



# 第1章 NI Multisim 10系统

---



---

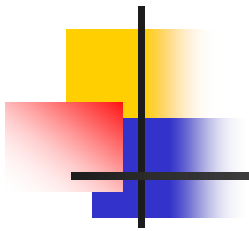
- *内容提要*

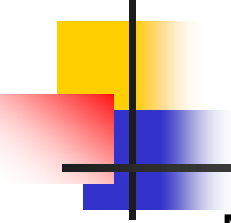
- NI Multisim 10仿真软件是电子电路计算机仿真设计与分析的基础。本章介绍了multisim的基本界面与操作方法，multisim的电路创建的基础，multisim的仪器仪表的使用，multisim的电路分析方法。
- 知识要点：multisim的菜单，工具，元器件库，仪器仪表库，分析功能，操作方法。

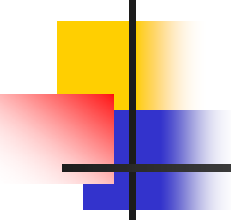


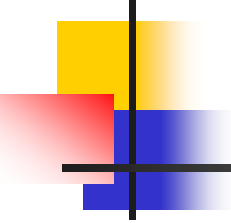
# 1.1 NI Multisim 10系统简介

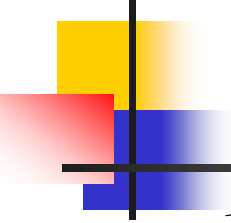
- NI Multisim 10是美国国家仪器公司（NI，National Instruments）最新推出的Multisim最新版本。
- 目前美国NI公司的EWB的包含有电路仿真设计的模块Multisim、PCB设计软件Ultiboard、布线引擎Ultiroute及通信电路分析与设计模块Commsim 4个部分，能完成从电路的仿真设计到电路版图生成的全过程。Multisim、Ultiboard、Ultiroute及Commsim 4个部分相互独立，可以分别使用。Multisim、Ultiboard、Ultiroute及Commsim 4个部分有增强专业版（Power Professional）、专业版（Professional）、个人版（Personal）、教育版（Education）、学生版（Student）和演示版（Demo）等多个版本，各版本的功能和价格有着明显的差异。

- 
- NI Multisim 10用软件的方法虚拟电子与电工元器件，虚拟电子与电工仪器和仪表，实现了“软件即元器件”、“软件即仪器”。NI Multisim 10是一个原理电路设计、电路功能测试的虚拟仿真软件。
  - NI Multisim 10的元器件库提供数千种电路元器件供实验选用，同时也可以新建或扩充已有的元器件库，而且建库所需的元器件参数可以从生产厂商的产品使用手册中查到，因此也很方便的在工程设计中使用。

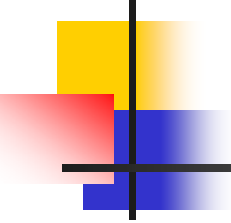
- 
- NI Multisim 10的虚拟测试仪器仪表种类齐全，有一般实验用的通用仪器，如万用表、函数信号发生器、双踪示波器、直流电源；而且还有一般实验室少有或没有的仪器，如波特图仪、字信号发生器、逻辑分析仪、逻辑转换器、失真仪、频谱分析仪和网络分析仪等。
  - NI Multisim 10具有较为详细的电路分析功能，可以完成电路的瞬态分析和稳态分析、时域和频域分析、器件的线性和非线性分析、电路的噪声分析和失真分析、离散傅里叶分析、电路零极点分析、交直流灵敏度分析等电路分析方法，以帮助设计人员分析电路的性能。

- 
- NI Multisim 10可以设计、测试和演示各种电子电路，包括电工学、模拟电路、数字、电路、射频电路及微控制器和接口电路等。可以对被仿真的电路中的元器件设置各种故障，如开路、短路和不同程度的漏电等，从而观察不同故障情况下的电路工作状况。在进行仿真的同时，软件还可以存储测试点的所有数据，列出被仿真电路的所有元器件清单，以及存储测试仪器的的工作状态、显示波形和具体数据等。

- 
- NI Multisim 10有丰富的Help功能，其Help系统不仅包括软件本身的操作指南，更重要的是包含有元器件的功能解说，Help中这种元器件功能解说有利于使用EWB进行CAI教学。另外，NI Multisim10还提供了与国内外流行的印刷电路板设计自动化软件Protel及电路仿真软件PSpice之间的文件接口，也能通过Windows的剪贴板把电路图送往文字处理系统中进行编辑排版。支持VHDL和Verilog HDL语言的电路仿真与设计。

- 
- 利用NI Multisim 10可以实现计算机仿真设计与虚拟实验，与传统的电子电路设计与实验方法相比，具有如下特点：设计与实验可以同步进行，可以边设计边实验，修改调试方便；设计和实验用的元器件及测试仪器仪表齐全，可以完成各种类型的电路设计与实验；可方便地对电路参数进行测试和分析；可直接打印输出实验数据、测试参数、曲线和电路原理图；实验中不消耗实际的元器件，实验所需元器件的种类和数量不受限制，实验成本低，实验速度快，效率高；设计和实验成功的电路可以直接在产品中使用。



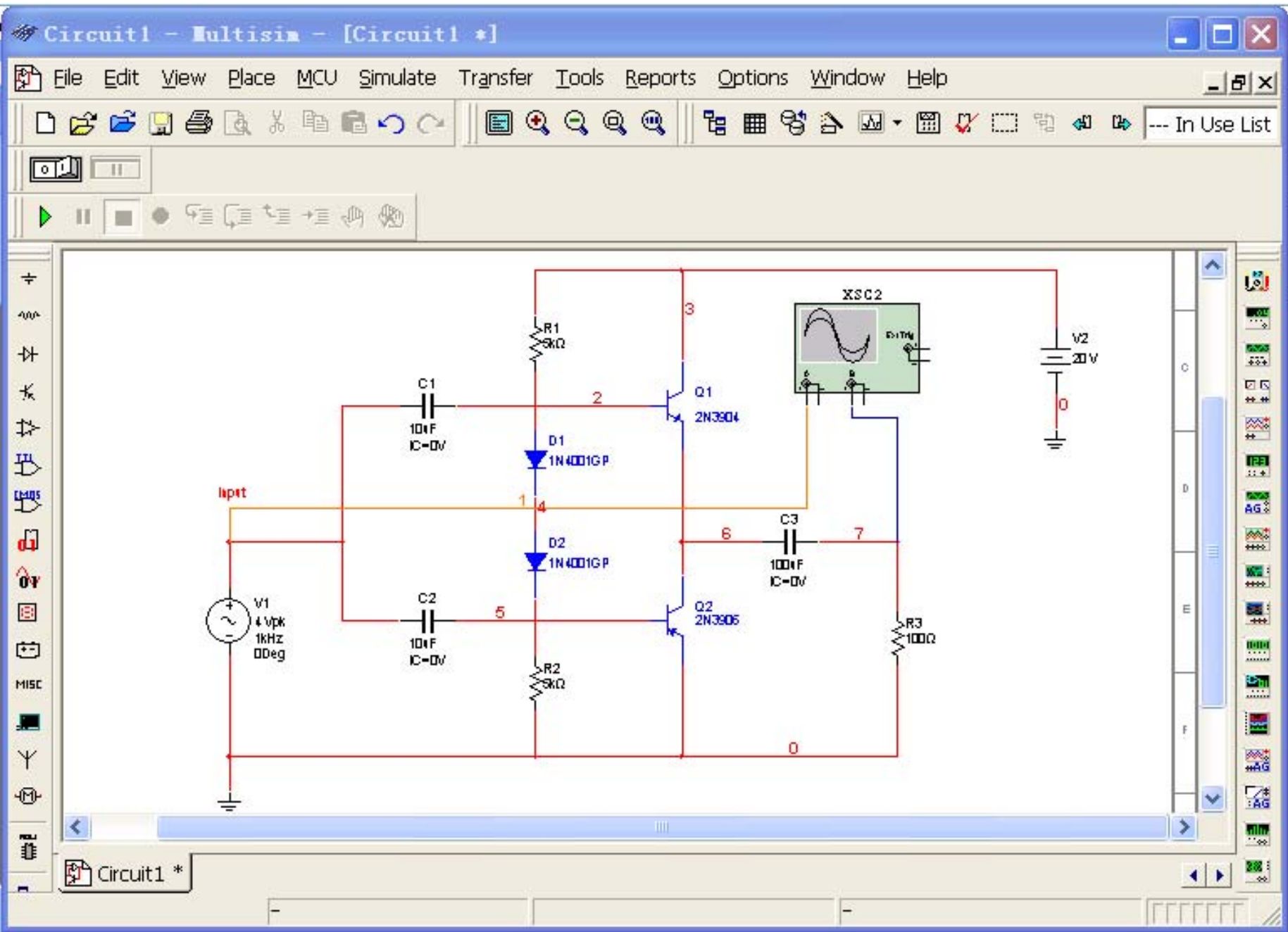
- 
- 
- NI Multisim 10易学易用，便于电子信息、通信工程、自动化、电气控制类专业学生自学、便于开展综合性的设计和实验，有利于培养综合分析能力、开发和创新能力。
  - 本章仅对NI Multisim 10教育版进行介绍。

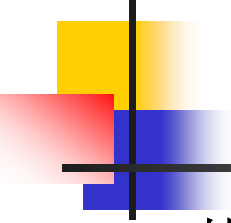


## 1.2 multisim的基本界面

---

- 1.2.1 multisim的主窗口
- 点击“开始”→“程序”→“National Instruments”  
→“Circuit Design Suite 10.0”→“multisim”，启动  
multisim10，可以看到图1.2.1所示的multisim的主窗口。





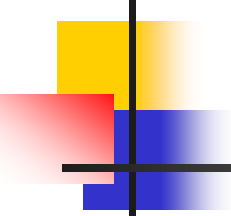
■ 从图1.2.1可以看出，multisim的主窗口如同一个实际的电子实验台。屏幕中央区域最大的窗口就是电路工作区，在电路工作区上可将各种电子元件和测试仪器仪表连接成实验电路。电路工作窗口上方是菜单栏、工具栏。从菜单栏可以选择电路连接、实验所需的各种命令。工具栏包含了常用的操作命令按钮。通过鼠标操作即可方便地使用各种命令和实验设备。电路工作窗口两边是元件栏和仪器仪表栏。元件栏存放着各种电子元件，仪器仪表栏存放着各种测试仪器仪表，用鼠标的操作可以很方便地从元件和仪器库中，提取实验所需的各种元件及仪器、仪表到电路工作窗口并连接成实验电路。按下电路工作窗口的上方的“启动 / 停止”开关或“暂停 / 恢复”按钮可以方便地控制实验的进程。



## 1.2.2 multsim菜单栏

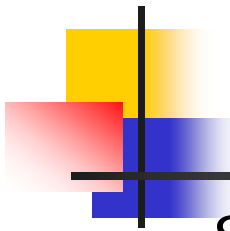
- multsim10有12个主菜单，如图1.2.2所示，菜单中提供了本软件几乎所有的功能命令。

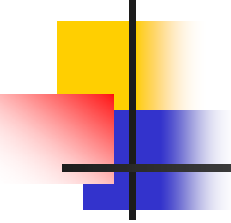
File Edit View Place MCU Simulate Transfer Tools Reports Options Window Help



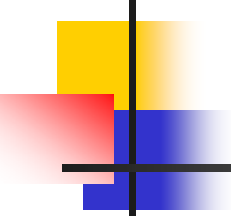
## ■ 1. File（文件）菜单

- File（文件）菜单提供19个文件操作命令，如打开、保存和打印等，File菜单中的命令及功能如下：
- New：建立一个新文件。
- Open：打开一个已存在的\*.msm10、\*.msm9、\*.msm8、\*.msm7、\*.ewb或\*.utsch等格式的文件。
- Close：关闭当前电路工作区内的文件。
- Close All：关闭电路工作区内的所有文件。
- Save：将电路工作区内的文件以\*.msm10的格式存盘。
- Save as：将电路工作区内的文件另存为一个文件，仍为\*.msm10格式。

- 
- **Save All:** 将电路工作区内所有的文件以 \*.msm10的格式存盘。
  - **New Project:** 建立新的项目（仅在专业版中出现，教育版中无此功能）。
  - **Open Project:** 打开原有的项目（仅在专业版中出现，教育版中无此功能）。
  - **Save Project:** 保存当前的项目（仅在专业版中出现，教育版中无此功能）。
  - **Close Project:** 关闭当前的项目（仅在专业版中出现，教育版中无此功能）。
  - **Version Control:** 版本控制（仅在专业版中出现，教育版中无此功能）。

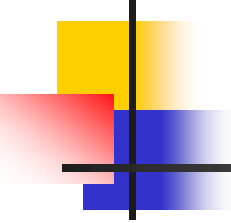
- 
- 
- **Print:** 打印电路工作区内的电原理图。
  - **Print Preview:** 打印预览。
  - **Print Options:** 包括**Print Setup**（打印设置）和**Print Instruments**（打印电路工作区内的仪表）命令。
  - **Recent Files:** 选择打开最近打开过的文件。
  - **Recent Projects:** 选择打开最近打开过的项目。
  - **Exit:** 退出。

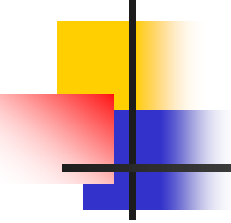




## ■ 2. Edit（编辑）菜单

- Edit（编辑）菜单在电路绘制过程中，提供对电路和元件进行剪切、粘贴、旋转等操作命令，共21个命令，Edit菜单中的命令及功能如下：
- Undo：取消前一次操作。
- Redo：恢复前一次操作。
- Cut：剪切所选择的元器件，放在剪贴板中。
- Copy：将所选择的元器件复制到剪贴板中。
- Paste：将剪贴板中的元器件粘贴到指定的位置。

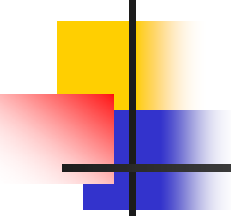
- 
- 
- Delete: 删除所选择的元器件。
  - Select All: 选择电路中所有的元器件、导线和仪器仪表。
  - Delete Multi-Page: 删除多页面。
  - Paste as Subcircuit: 将剪贴板中的子电路粘贴到指定的位置。
  - Find: 查找电原理图中的元件
  - Graphic Annotation: 图形注释。
  - Order: 顺序选择。
  - Assign to Layer: 图层赋值。
  - Layer Settings: 图层设置。

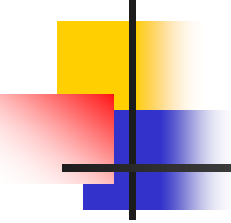
- 
- Orientation: 旋转方向选择。包括：Flip Horizontal（将所选择的元器件左右旋转），Flip Vertical（将所选择的元器件上下旋转），90 Clockwise（将所选择的元器件顺时针旋转90度），90 CounterCW（将所选择的元器件逆时针旋转90度）。
  - Title Block Position: 工程图明细表位置。
  - Edit Symbol/Title Block: 编辑符号/工程明细表。
  - Font: 字体设置。
  - Comment: 注释。
  - Forms/Questions: 格式/问题。
  - Properties: 属性编辑。



### ■ **3. View（窗口显示）菜单**

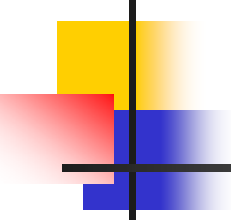
- View（窗口显示）菜单提供19个用于控制仿真界面上显示的内容的操作命令，View菜单中的命令及功能如下：
  - Full Screen：全屏。
  - Parent Sheet：层次。
  - Zoom In：放大电原理图。
  - Zoom Out：缩小电原理图。
  - Zoom Area：放大面积。
  - Zoom Fit to Page：放大到适合的页面。
  - Zoom to magnification：按比例放大到适合的页面。

- 
- 
- Zoom Selection: 放大选择。
  - Show Grid: 显示或者关闭栅格。
  - Show Border: 显示或者关闭边界。
  - Show Page Border: 显示或者关闭页边界。
  - Ruler Bars: 显示或者关闭标尺栏。
  - Statusbar: 显示或者关闭状态栏。
  - Design Toolbox: 显示或者关闭设计工具箱。
  - Spreadsheet View: 显示或者关闭电子数据表。扩展显示窗口。
  - Circuit Description Box: 显示或者关闭电路描述工具箱。
  - Toolbar: 显示或者关闭工具箱。
  - Show Comment/Probe: 显示或者关闭注释/标注。
  - Grapher: 显示或者关闭图形编辑器。



## ■ 4. Place（放置）菜单

- Place（放置）菜单提供在电路工作窗口内放置元件、连接点、总线和文字等17个命令，Place菜单中的命令及功能如下：
- Component：放置元件。
- Junction：放置节点。
- Wire：放置导线。
- Bus：放置总线。
- Connectors：放置输入 / 输出端口连接器。
- New Hierarchical Block：放置层次模块。
- Replace Hierarchical Block：替换层次模块。

- 
- 
- Hierarchical Block form File: 来自文件的层次模块。
  - New Subcircuit: 创建子电路。
  - Replace by Subcircuit: 子电路替换。
  - Multi-Page: 设置多页。
  - Merge Bus: 合并总线。
  - Bus Vector Connect: 总线矢量连接。
  - Comment: 注释。
  - Text: 放置文字。
  - Grapher: 放置图形。
  - Title Block: 放置工程标题栏。



## 5. MCU（微控制器）菜单

---

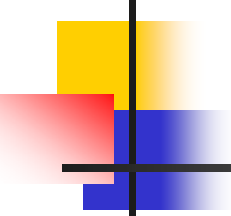
- MCU（微控制器）菜单提供在电路工作窗口内MCU的调试操作命令， MCU菜单中的命令及功能如下：
- No MCU Component Found:没有创建MCU器件。
- Debug View Format: 调试格式。
- Show Line Numbers: 显示线路数目。
- Pause: 暂停。
- Step into: 进入。
- Step over: 跨过。
- Step out: 离开。
- Run to cursor: 运行到指针。
- Toggle breakpoint: 设置断点。
- Remove all breakpoint: 移出所有的断点。

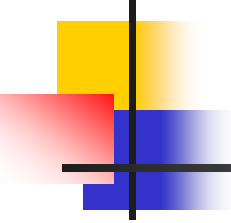




## ■ 6. Simulate（仿真）菜单

- Simulate（仿真）菜单提供18个电路仿真设置与操作命令， Simulate菜单中的命令及功能如下：
- Run：开始仿真。
- Pause：暂停仿真。
- Stop：停止仿真。
- Instruments：选择仪器仪表。
- Interactive Simulation Settings...：交互式仿真设置。
- Digital Simulation Settings...：数字仿真设置。
- Analyses：选择仿真分析法。
- Postprocess：启动后处理器。

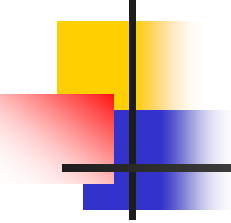
- 
- 
- Simulation Error Log/Audit Trail: 仿真误差记录/查询索引。
  - XSpice Command Line Interface: XSpice命令界面。
  - Load Simulation Setting: 导入仿真设置。
  - Save Simulation Setting: 保存仿真设置。
  - Auto Fault Option: 自动故障选择。
  - VHDL Simulation: VHDL仿真。
  - Dynamic Probe Properties: 动态探针属性。
  - Reverse Probe Direction: 反向探针方向。
  - Clear Instrument Data: 清除仪器数据。
  - Use Tolerances: 使用公差。

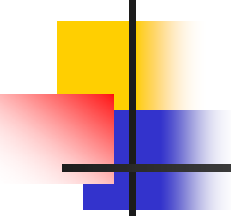


---

## ■ **7. Transfer**（文件输出）菜单

- Transfer（文件输出）菜单提供8个传输命令，Transfer菜单中的命令及功能如下：
- Transfer to Ultiboard 10：将电路图传送给 Ultiboard 10。
- Transfer to Ultiboard 9 or earlier：将电路图传送给 Ultiboard 9或者其它早期版本。
- Export to PCB Layout：输出 PCB设计图。

- 
- 
- Forward Annotate to Ultiboard 10: 创建Ultiboard 10 注释文件。
  - Forward Annotate to Ultiboard 9 or earlier: 创建 Ultiboard 9 或者其它早期版本注释文件。
  - Backannotate from Ultiboard: 修改Ultiboard注释文件。
  - Highlight Selection in Ultiboard: 加亮所选择的 Ultiboard
  - Export Netlist: 输出网表。



## ■ **8. Tools**（工具）菜单

- Tools（工具）菜单提供17个元件和电路编辑或管理命令，Tools菜单中的命令及功能如下：
  - Component Wizard：元件编辑器。
  - Database：数据库。
  - Variant Manager：变量管理器。
  - Set Active Variant：设置动态变量。
  - Circuit Wizards：电路编辑器。
  - Rename/Renumber Components：元件重新命名/编号。

- 
- 
- Replace Components...: 元件替换。
  - Update Circuit Components...: 更新电路元件。
  - Update HB/SC Symbols: 更新HB/SC符号。
  - Electrical Rules Check: 电气规则检验。
  - Clear ERC Markers: 清除ERC标志。
  - Toggle NC Marker: 设置NC标志。
  - Symbol Editor...: 符号编辑器。
  - Title Block Editor...: 工程图明细表比较器。
  - Description Box Editor...: 描述箱比较器。
  - Edit Labels...: 编辑标签。
  - Capture Screen Area: 抓图范围。



---

## ■ **9. Reports**（报告）菜单

- Reports（报告）菜单提供材料清单等6个报告命令，Reports菜单中的命令及功能如下：
- Bill of Report:材料清单。
- Component Detail Report:元件详细报告。
- Netlist Report:网络表报告。
- Cross Reference Report:参照表报告。
- Schematic Statistics:统计报告。
- Spare Gates Report:剩余门电路报告。



---

- **10. Option**（选项）菜单

- Option（选项）菜单提供5个电路界面和电路某些功能的设定命令，Options菜单中的命令及功能如下：
  - Global Preferences...：全部参数设置。
  - Sheet Properties:工作台界面设置。
  - Customize User Interface...:用户界面设置。





---

## ■ 10. Windows（窗口）菜单

- Windows（窗口）菜单提供9个窗口操作命令，Windows菜单中的命令及功能如下：
- New Window：建立新窗口。
- Close：关闭窗口。
- Close All：关闭所有窗口。
- Cascade：窗口层叠。
- Tile Horizontal：窗口水平平铺。
- Tile Vertical：窗口垂直平铺。
- Windows...：窗口选择。

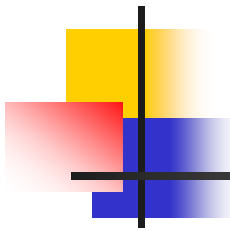


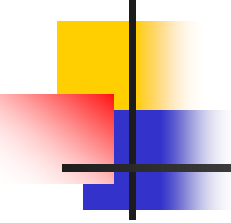
---

## ■ **11. Help**（帮助）菜单

- Help（帮助）菜单为用户提供在线技术帮助和使用指导， Help菜单中的命令及功能如下：
- Multisim Help： 主题目录。
- Components Reference： 元件索引。
- Release Notes： 版本注释。
- Check For Updates...： 更新校验。
- File Information...： 文件信息。
- Patents...： 专利权。
- About Multisim： 有关 Multisim的说明。



- 
- 
- 新建：清除电路工作区，准备生成新电路。
  - 打开：打开电路文件。
  - 存盘：保存电路文件。
  - 打印：打印电路文件。
  - 剪切：剪切至剪贴板。
  - 复制：复制至剪贴板。
  - 粘贴：从剪贴板粘贴。
  - 旋转：旋转元器件。
  - 全屏：电路工作区全屏。
  - 放大：将电路图放大一定比例。

- 
- 缩小：将电路图缩小一定比例。
  - 放大面积：放大电路工作区面积。
  - 适当放大：放大到适合的页面。
  - 文件列表：显示电路文件列表。
  - 电子表：显示电子数据表。
  - 数据库管理：元器件数据库管理。
  - 元件编辑器：
  - 图形编辑/分析：图形编辑器和电路分析方法选择。
  - 后处理器：对仿真结果进一步操作。
  - 电气规则校验：校验电气规则。
  - 区域选择：选择电路工作区区域。





---

- **1. 电源/信号源库**

- 电源/信号源库包含有接地端、直流电压源（电池）、正弦交流电压源、方波（时钟）电压源、压控方波电压源等多种电源与信号源。电源/信号源库如图1.2.5所示。

# Select a Component

Database:  
Master Database

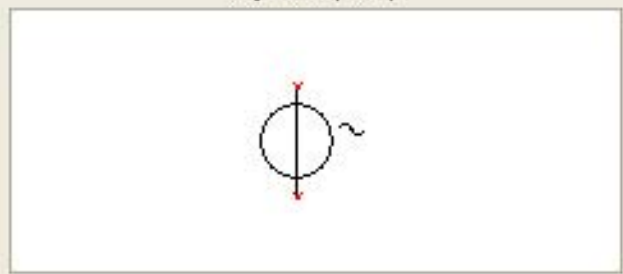
Group:  
Sources

- Family:
- All Select all families
  - POWER\_SOURCES
  - SIGNAL\_VOLTAGE\_SO...
  - SIGNAL\_CURRENT\_S...
  - CONTROLLED\_VOLTA...
  - CONTROLLED\_CURRE...
  - CONTROL\_FUNCTION...

Component:  
AC\_POWER

- AC\_POWER
- DC\_POWER
- DGND
- GROUND
- THREE\_PHASE\_DELTA
- THREE\_PHASE\_WYE
- VCC
- VDD
- VEE
- VSS

Symbol (DIN)



Function:  
AC Power Source

Model manuf./ID:  
Generic/ACP

Footprint manuf./Type:

Hyperlink:

- OK
- Close
- Search...
- Detail Report
- Model...
- Help

Components: 10

Searching:

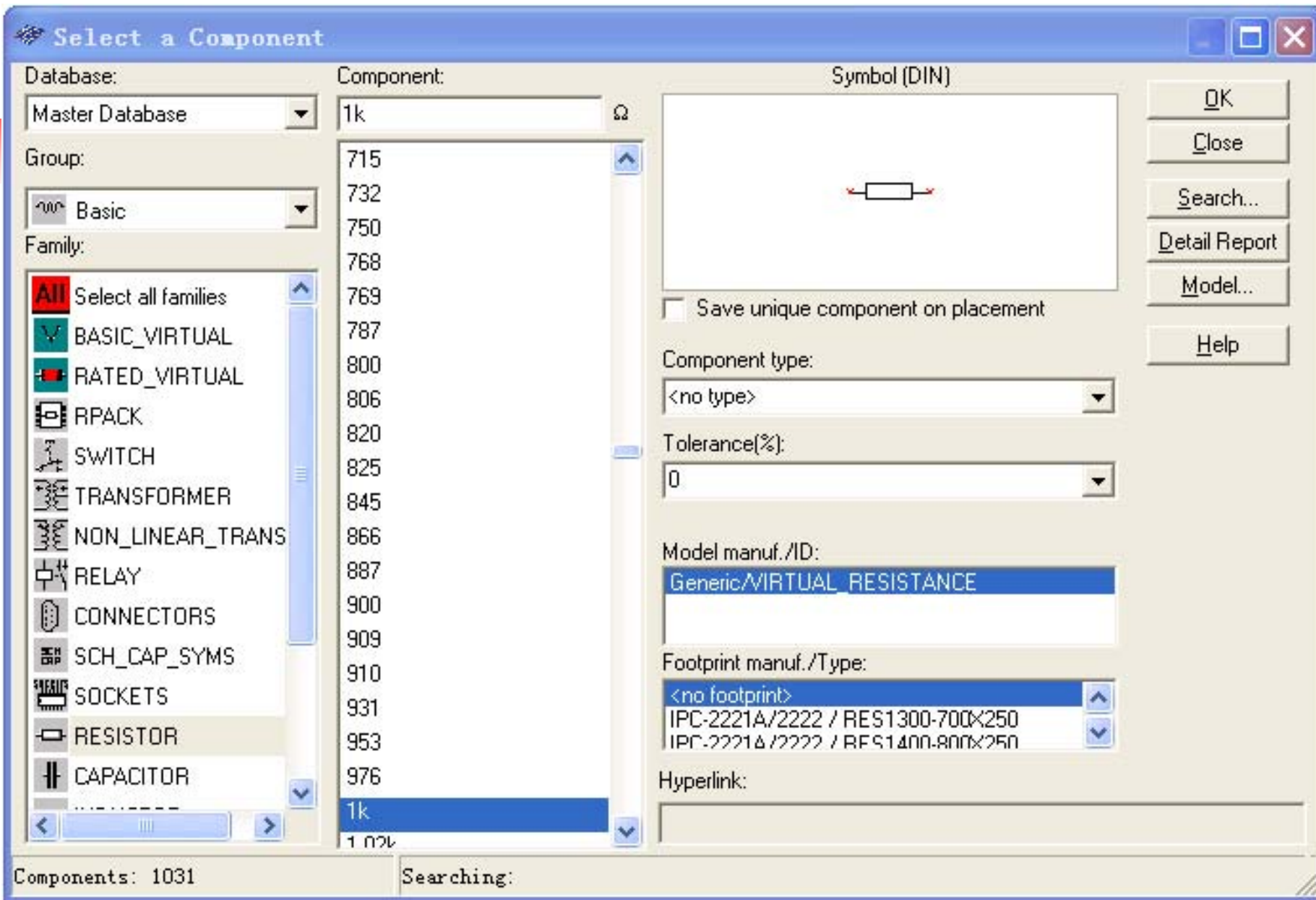




---

## ■ 2. 基本器件库

- 基本器件库包含有电阻、电容等多种元件。基本器件库中的虚拟元器件的参数是可以任意设置的，非虚拟元器件的参数是固定的，但是可以选择的。基本器件库如图1.2.6所示。

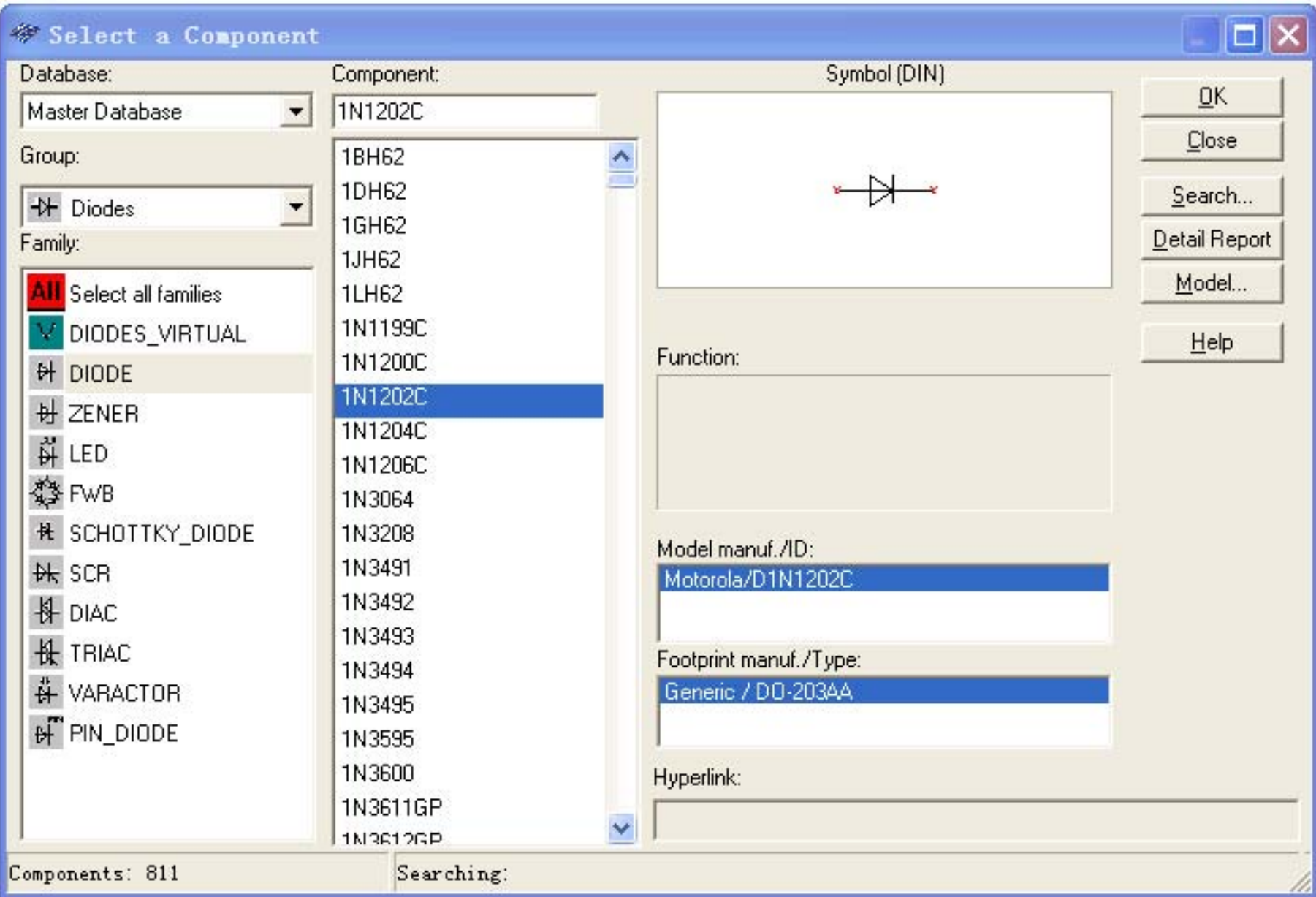




---

### ■ 3. 二极管库

- 二极管库包含有二极管、可控硅等多种器件。二极管库中的虚拟器件的参数是可以任意设置的，非虚拟元器件的参数是固定的，但是是可以选择的。二极管库如图1.2.7所示。





---

## ■ 4. 晶体管库

- 晶体管库包含有晶体管、FET等多种器件。晶体管库中的虚拟器件的参数是可以任意设置的，非虚拟元器件的参数是固定的，但是是可以选择的。晶体管库如图1.2.8所示。

### Select a Component

Database: Master Database

Component: 2N2219

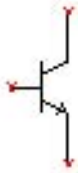
Group: Transistors

Family:

- All Select all families
- TRANSISTORS\_VIRTUAL
- BJT\_NPN
- BJT\_PNP
- DARLINGTON\_NPN
- DARLINGTON\_PNP
- DARLINGTON\_ARRAY
- BJT\_NRES
- BJT\_PRES
- BJT\_ARRAY
- IGBT
- MOS\_3TDN
- MOS\_3TEN

2N1711
2N2102
2N2218
2N2218A
<b>2N2219</b>
2N2219A
2N2221
2N2221A
2N2222
2N2222A
2N2369
2N2369A
2N2712
2N2714
2N2923
2N2924
2N2925
2N3019
2N3020
2N3055A
2N3390

Symbol (DIN)



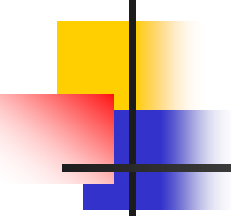
Function:

Model manuf./ID: Motorola/2N2219

Footprint manuf./Type: Generic / TO-39

Hyperlink:

Components: 633      Searching:



---

## ■ 5. 模拟集成电路库

- 模拟集成电路库包含有多种运算放大器。模拟集成电路库中的虚拟器件的参数是可以任意设置的，非虚拟元器件的参数是固定的，但是是可以选择的。模拟集成电路库如图1.2.9所示。

# Select a Component

Database:

Master Database

Group:

Analog

Family:

- All Select all families
- ANALOG\_VIRTUAL
- OPAMP
- OPAMP\_NORTON
- COMPARATOR
- WIDEBAND\_AMPS
- SPECIAL\_FUNCTION

Component:

3280A

3280A

3288RT

3554AM

3554BM

3554SM

741

741-DIV

AD22050N

AD22050R

AD22057N

AD22057R

AD380JH

AD380KH

AD380LH

AD380SH

AD507JH

AD507KH

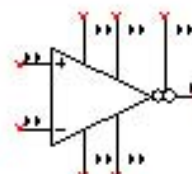
AD507SH

AD509JH

AD509KH

AD509SH

Symbol (DIN)



A

B

Function:

Operational Transconductance Amplifier

Model manuf./ID:

Harris/3280A

Footprint manuf./Type:

IPC-2221A/2222 / PDIP-16

Hyperlink:

OK

Close

Search...

Detail Report

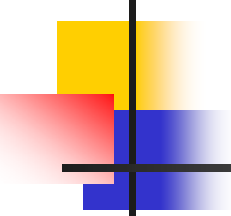
Model...

Help

Components: 5144

Searching:





---

- **6. TTL数字集成电路库**

- TTL数字集成电路库包含有74××系列和74LS××系列等74系列数字电路器件。TTL数字集成电路库如图1.2.10所示。

# Select a Component

Database:

Master Database

Component:

74LS00D

Group:

TTL

Family:

All Select all families

74 74STD\_IC

74 74STD

74B 74S\_IC

74B 74S

74LS 74LS\_IC

74LS 74LS

74F 74F

74ALS 74ALS

74ALS 74AS

74LS00D

74LS00N

74LS02D

74LS02N

74LS03D

74LS03N

74LS04D

74LS04N

74LS05D

74LS05N

74LS08D

74LS08J

74LS08N

74LS09D

74LS09N

74LS107D

74LS107N

74LS109D

74LS109N

74LS10D

74LS10N

Symbol (DIN)



Function:

QUAD 2-INPUT NAND

Model manuf./ID:

Generic/74LSIC00

Footprint manuf./Type:

IPC-7351 / D014

Hyperlink:

OK

Close

Search...

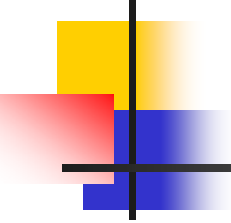
Detail Report

Model...

Help

Components: 203

Searching:



---

- **7. CMOS数字集成电路库**

- CMOS数字集成电路库包含有40××系列和74HC××系列多种CMOS数字集成电路系列器件。CMOS数字集成电路库如图1.2.11所示。

# Select a Component

Database:

Master Database

Group:

CMOS

Family:

All Select all families

CMOS\_5V\_IC

CMOS\_5V

CMOS\_10V\_IC

CMOS\_10V

CMOS\_15V

74HC\_2V

74HC\_4V\_IC

74HC\_4V

74HC\_6V

TinyLogic\_2V

TinyLogic\_3V

TinyLogic\_4V

Component:

4000BD\_5V

4000BD\_5V

4000BP\_5V

4000BT\_5V

4001BD\_5V

4001BP\_5V

4001BT\_5V

4002BD\_5V

4002BP\_5V

4002BT\_5V

4008BD\_5V

4008BP\_5V

4008BT\_5V

4009BCL\_5V

4009BCP\_5V

4009BD\_5V

40106BD\_5V

40106BP\_5V

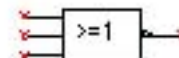
40106BT\_5V

4010BC1\_5V

4010BEY\_5V

4010BF\_5V

Symbol (DIN)



A B C

Function:

DUAL 3-INPUT NOR GATE AND INVERTER

Model manuf./ID:

Signetics/4000B ab 5

Footprint manuf./Type:

IPC-2221A/2222 / SOT-73

Hyperlink:

OK

Close

Search...

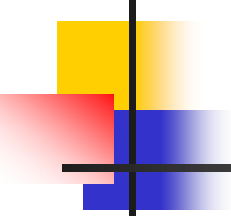
Detail Report

Model...

Help

Components: 265

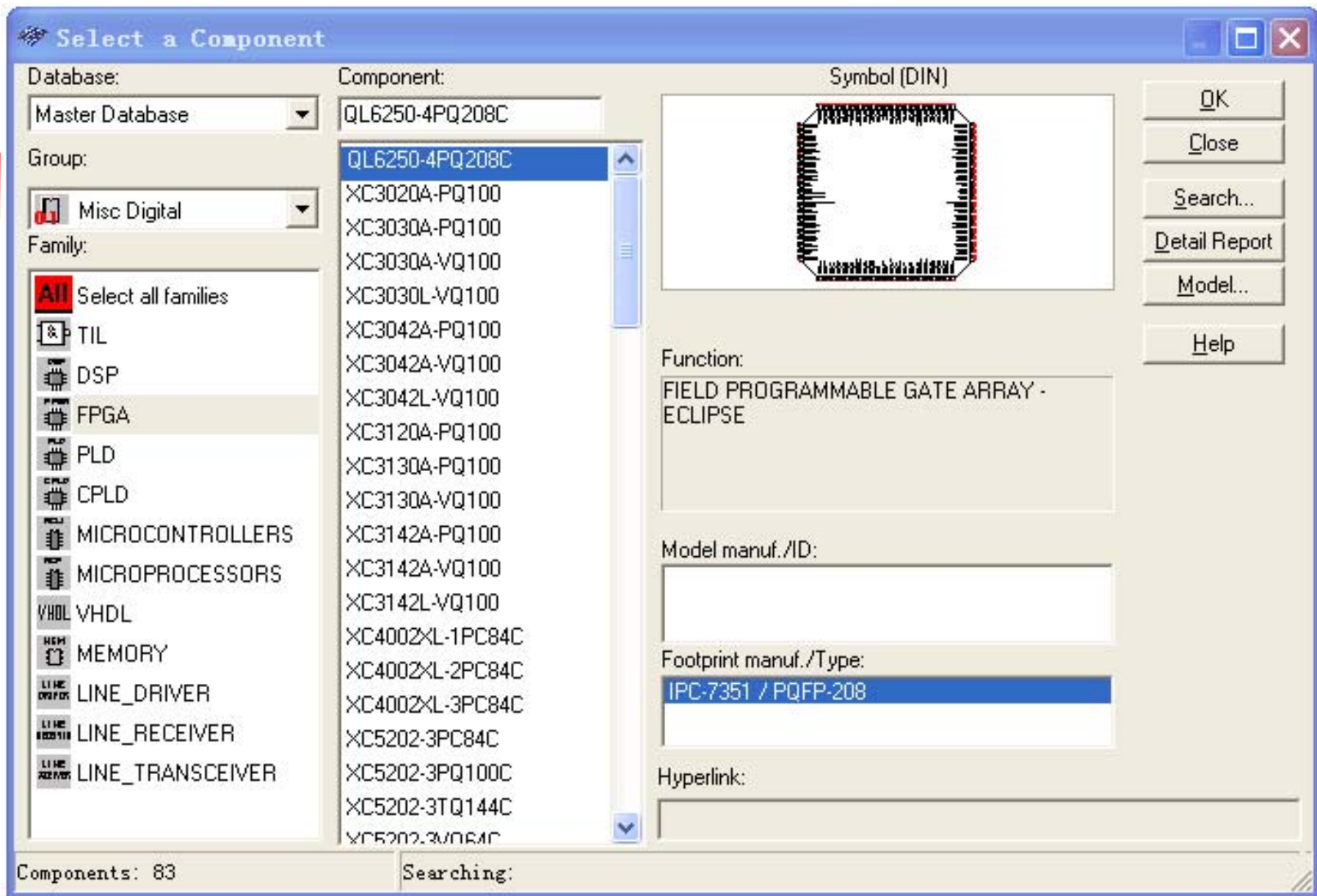
Searching:



---

- **8. 数字器件库**

- 数字器件库包含有DSP、FPGA、CPLD、VHDL等多种器件。数字器件库如图1.2.12所示。





---

## ■ 9. 数模混合集成电路库

- 数模混合集成电路库包含有ADC/DAC、555定时器等多种数模混合集成电路器件。数模混合集成电路库如图1.2.13所示。

# Select a Component

Database: Master Database

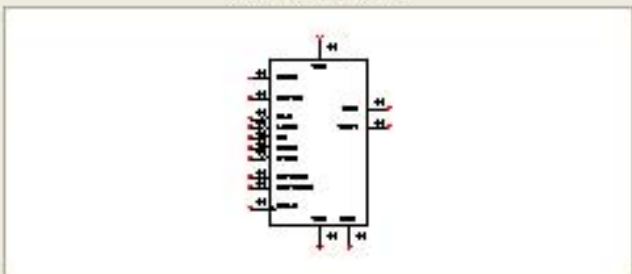
Group: Mixed

- Family:
- All Select all families
  - MIXED\_VIRTUAL
  - TIMER
  - ADC\_DAC
  - ANALOG\_SWITCH\_IC
  - ANALOG\_SWITCH
  - MULTIVIBRATORS

Component: AD5530\_SO16

- AD5530\_SO16
- AD5531\_SO16
- AD9218\_FP48
- ADC
- ADC16
- ADS8320EB
- ADS8322YB
- ADS8364Y
- DAC7642\_FP32
- DAC7643\_FP32
- DAC8541
- IDAC
- IDAC16
- MAX1180\_FP48
- MAX1181\_FP48
- MAX1182\_FP48
- MAX1183\_FP48
- MAX1184\_FP48
- MAX1185\_FP48
- MAX1195\_FP48
- MAX1197\_FP48

## Symbol (DIN)



Function:

Model manuf./ID:

Footprint manuf./Type:  
IPC-7351 / SO16 0M65 4M50x5M10

Hyperlink:

- OK
- Close
- Search...
- Detail Report
- Model...
- Help





---

- **10. 指示器件库**

- 指示器件库包含有电压表、电流表、七段数码管等多种器件。指示器件库如图1.2.14所示。

# Select a Component

Database:

Master Database

Group:

Indicators

Family:

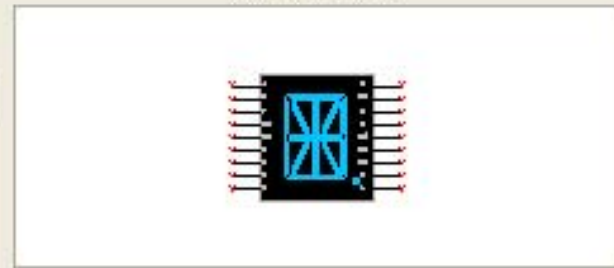
- All Select all families
- VOLTMETER
- AMMETER
- PROBE
- BUZZER
- LAMP
- VIRTUAL\_LAMP
- HEX\_DISPLAY
- BARGRAPH

Component:

\\_NUMERIC\_COM\_A\_BLUE

- ALPHA\_NUMERIC\_COM\_A
- ALPHA\_NUMERIC\_COM\_A
- ALPHA\_NUMERIC\_COM\_A
- ALPHA\_NUMERIC\_COM\_A
- ALPHA\_NUMERIC\_COM\_K
- ALPHA\_NUMERIC\_COM\_K
- ALPHA\_NUMERIC\_COM\_K
- ALPHA\_NUMERIC\_COM\_K
- ALPHA\_NUMERIC\_COM\_K
- DCD\_HEX
- DCD\_HEX\_BLUE
- DCD\_HEX\_DIG\_BLUE
- DCD\_HEX\_DIG\_GREEN
- DCD\_HEX\_DIG\_ORANGE
- DCD\_HEX\_DIG\_RED
- DCD\_HEX\_DIG\_YELLOW
- DCD\_HEX\_GREEN
- DCD\_HEX\_ORANGE
- DCD\_HEX\_YELLOW

Symbol (DIN)



Function:

15 Segment - LED Alpha Numeric Display (Based on A-398G)

Model manuf./ID:

Generic/ALPHA\_NUMERIC\_COM\_A

Footprint manuf./Type:

Hyperlink:

OK

Close

Search...

Detail Report

Model...

Help

Components: 55

Searching:



---

- **11. 电源器件库**

- 电源器件库包含有三端稳压器、PWM控制器等多种电源器件。电源器件库如图1.2.15所示。

# Select a Component

Database:

Master Database

Group:

Power

Family:

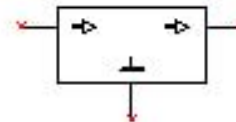
- All Select all families
- SMPS\_Transient\_Virtual
- SMPS\_Average\_Virtual
- FUSE
- VOLTAGE\_REGULATOR
- VOLTAGE\_REFERENCE
- VOLTAGE\_SUPPRESS...
- POWER\_SUPPLY\_CO...
- MISCPower
- PWM\_CONTROLLER

Component:

LM109H

- LM109H
- LM109H/883
- LM109K
- LM109K/883
- LM117H
- LM117HVH
- LM117HVKSTL/883
- LM117K
- LM120H-12
- LM120H-15
- LM120H-5
- LM120K-12/883
- LM120K-15/883
- LM120K-5/883
- LM123K
- LM133K
- LM137H
- LM137H/883
- LM137HVH/883
- LM137K/883
- LM139K

Symbol (DIN)



Function:

Model manuf./ID:

National/LM109H

Footprint manuf./Type:

Generic / TO-39(H03A)

Hyperlink:

OK

Close

Search...

Detail Report

Model...

Help

Components: 201

Searching:



---

- **12. 其他器件库**

- 其他器件库包含有晶体、滤波器等多种器件。其他器件库如图1.2.16所示。

# Select a Component

Database:

Master Database

Group:

MISC Misc

Family:

Select all families

MISC\_VIRTUAL

OPTOCOUPLER

CRYSTAL

VACUUM\_TUBE

BUCK\_CONVERTER

BOOST\_CONVERTER

BUCK\_BOOST\_CONVE

LOSSY\_TRANSMISSIC

LOSSLESS\_LINE\_TYF

LOSSLESS\_LINE\_TYF

FILTERS

MOSFET\_DRIVER

...

Component:

12AT7

12AT7

12AU7A

12AX7

12AX7A

12BH7A

2A3

4503BCL\_5V

4N25

4N25A

4N26

4N27

4N28

4N33

4N35

4N36

4N37

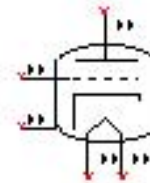
4N38

4N38A

4N48

4N49

Symbol (DIN)



A

B

Function:

Model manuf./ID:

Generic/TRIODE\_12AT7

Footprint manuf./Type:

Generic / 9A

Hyperlink:

OK

Close

Search...

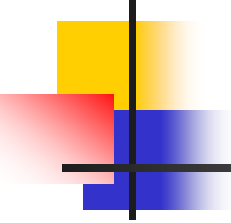
Detail Report

Model...

Help

Components: 223

Searching:



---

- **13. 键盘显示器库**

- 键盘显示器库包含有键盘、LCD等多种器件。键盘显示器库如图1.2.17所示。

Select a Component

Database: Master Database

Component: DTMF\_KEYPAD

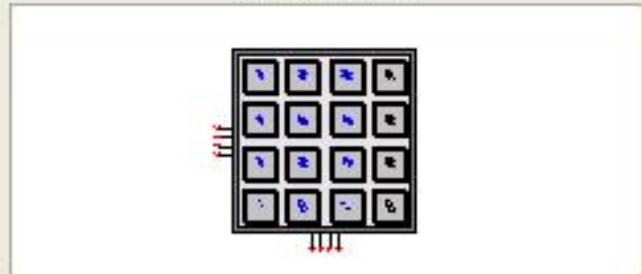
Group: Advanced\_Peripherals

Family:

- All Select all families
- KEYPADS
- LCDS
- TERMINALS

- DTMF\_KEYPAD**
- GRAPH\_LCD\_L
- GRAPH\_LCD\_M
- GRAPH\_LCD\_S
- LCD\_DISPLAY\_08x1
- LCD\_DISPLAY\_08x2
- LCD\_DISPLAY\_10x2
- LCD\_DISPLAY\_16x1
- LCD\_DISPLAY\_16x2
- LCD\_DISPLAY\_16x4
- LCD\_DISPLAY\_20x2
- LCD\_DISPLAY\_20x4
- LCD\_DISPLAY\_24x2
- LCD\_DISPLAY\_30x2
- LCD\_DISPLAY\_32x2
- LCD\_DISPLAY\_40x2
- LCD\_DISPLAY\_4DIGIT
- NUMERIC\_KEYPAD\_4X4
- NUMERIC\_KEYPAD\_4X5
- VTERM

Symbol (DIN)



Function: DTMF Keypad

Model manuf./ID: Generic/DTMF\_KEY\_PAD

Footprint manuf./Type:

Hyperlink:

- OK
- Close
- Search...
- Detail Report
- Model...
- Help





---

- **14. 机电类器件库**

- 机电类器件库包含有开关、继电器等多种机电类器件。机电类器件库如图1.2.18所示。

# Select a Component

Database:

Master Database

Component:

3PDT\_DB

Group:

Electro\_Mechanical

Family:

Select all families

SENSING\_SWITCHES

MOMENTARY\_SWITC...

SUPPLEMENTARY\_CO...

TIMED\_CONTACTS

COILS\_RELAYS

LINE\_TRANSFORMER

PROTECTION\_DEVICES

OUTPUT\_DEVICES

3PDT\_DB

3PDT\_SB

3PH\_MOTOR

3PST\_DB

3PST\_SB

4POS\_ROTARY

5POS\_ROTARY

6POS\_ROTARY

7POS\_ROTARY

8POS\_ROTARY

AIR\_CORE\_INDUCTOR

AIR\_CORE\_XFORMER

AIR\_NC

AIR\_NO

ANTI\_PLUG

AUTO\_XFORMER

CONTROL\_1A

CONTROL\_1C

CONTROL\_2A

CONTROL\_2C

Symbol (DIN)



OK

Close

Search...

Detail Report

Model...

Help

Function:

3PDT DOUBLE BREAK

Model manuf./ID:

Generic/ILLUMINATED\_PB

Footprint manuf./Type:

Hyperlink:

Components: 122

Searching:



---

- **15. 微控制器库**

- 微控制器件库包含有8051、PIC等多种微控制器。微控制器件库如图1.2.19所示。

# Select a Component

Database:

Master Database

Component:

27C128-12L

Group:

MCU Module

Family:

All Select all families

805x 805x

PIC PIC

RAM RAM

ROM ROM

27C128-12L

27C128-12P

27C128-15L

27C128-15P

27C128-17L

27C128-17P

27C128-20L

27C128-20P

27C128-25L

27C128-25P

27C256-12L

27C256-12P

27C256-15L

27C256-15P

27C256-20L

27C256-20P

27C64-12L

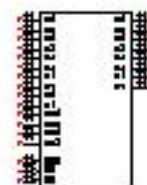
27C64-12P

27C64-15L

27C64-15P

27C64-17L

Symbol (DIN)



Function:

16K x 8 CMOS EPROM - 120ns Access Time

Model manuf./ID:

Microchip/27C128-12

Footprint manuf./Type:

IPC-SM-782 / PLCCR-32

Hyperlink:

Components: 42

Searching:

OK

Close

Search...

Detail Report

Model...

Help



---

- **16. 射频元器件库**

- 射频元器件库包含有射频晶体管、射频FET、微带线等多种射频元器件。射频元器件库如图1.2.20所示。

# Select a Component

Database: Master Database

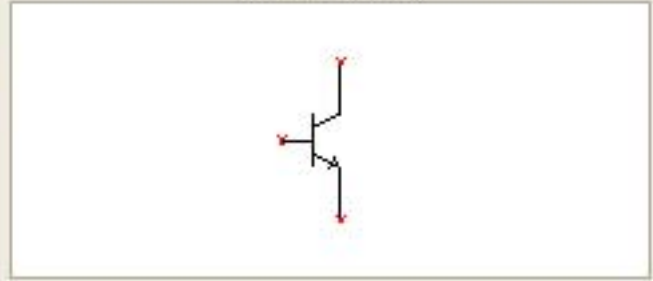
Group: RF

- Family:
- All Select all families
  - RF\_CAPACITOR
  - RF\_INDUCTOR
  - RF\_BJT\_NPN
  - RF\_BJT\_PNP
  - RF\_MOS\_3TDN
  - TUNNEL\_DIODE
  - STRIP\_LINE
  - FERRITE\_BEADS

Component: BF517

- BF517
- BFG135A
- BFG193
- BFG196
- BFG19S
- BFG235
- BFP136W
- BFP180
- BFP180W
- BFP181
- BFP181W
- BFP182
- BFP182W
- BFP183
- BFP183W
- BFP193
- BFP193W
- BFP196
- BFP196W
- BFP280
- BFP280W

Symbol (DIN)



OK  
Close  
Search...  
Detail Report  
Model...  
Help

Function:

Model manuf./ID:

Siemens/BF517C

Footprint manuf./Type:

IPC-7351 / SOT-23

Hyperlink:

Components: 84

Searching:





## 1.3 Multisim的基本操作

---

- 1.3.1 文件 (**File**) 基本操作
- 与Windows一样，用户可以用鼠标或快捷键打开multisim的File菜单。使用鼠标可按以下步骤打开File菜单：（1）将鼠标器指针指向主菜单File项；（2）单击鼠标左键，此时，屏幕上出现File子菜单。multisim的大部分功能菜单也可以采用相应的快捷键进行快速操作。





---

- **1. 新建 (File→New) —— Ctrl+N**

- 用鼠标单击File→New选项或用Ctrl+N快捷键操作，打开一个无标题的电路窗口，可用它来创建一个新的电路。
- 当启动multisim时，将自动打开一个新的无标题的电路窗口。在关闭当前电路窗口前将提示是否保存它。
- 用鼠标单击工具栏中的“新建”图标，等价于此项菜单操作。



## ■ 2. 打开 (**File**→**Open**) —— **Ctrl+O**

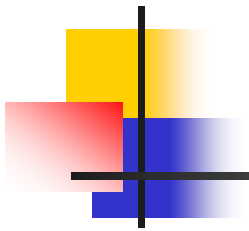
- 用鼠标单击Open选项或用Ctrl+O操作，打开一个标准的文件对话框，选择所需要的存放文件的驱动器 / 文件目录或磁盘 / 文件夹，从中选择电路文件名用鼠标单击，则该电路便显示在电路工作窗口中。
  - 用鼠标单击工具栏中的“打开”图标，等价于此项菜单操作。
- ## ■ 3. 关闭 (**File**→**Close**)
- 用鼠标单击File→Close选项，关闭电路工作区内的文件。



---

## ■ 4. 保存（ **File→Save**）—— **Ctrl+S**

- 用鼠标单击**File→Save**选项或用**Ctrl+S**操作，以电路文件形式保存当前电路工作窗口中的电路。对新电路文件保存操作，会显示一个标准的保存文件对话框，选择保存当前电路文件的目录 / 驱动器或文件夹 / 磁盘，键入文件名，按下保存按钮即可将该电路文件保存。
- 用鼠标单击工具栏中的“保存”图标，等价于此项菜单操作。



---

- **5. 文件换名保存 (File→Save As)**

- 用鼠标单击File→Save As选项，可将当前电路文件换名保存，新文件名及保存目录 / 驱动器均可选择。原存放的电路文件仍保持不变。

- **6. 打印 (File→Print) —— Ctrl+P**

- 用鼠标单击File→Print选项或用Ctrl+P操作，将当前电路工作窗口中的电路及测试仪器进行打印操作。必要时，在进行打印操作之前应完成打印设置工作。



- **7. 打印设置 (File→Print Options→Print Circuit Setup)**

- 用鼠标单击File→Print Circuit Setup选项，显示一个标准的打印设置对话框，从中选择各打印的参数进行设置。打印设置内容主要有打印机选择、纸张选择、打印效果选择等。

- **8. 退出 (File→Exit)**

- 用鼠标单击File→Exit选项，关闭当前的电路退出multisim。如果你在上次保存之后作过电路修改，在关闭窗口之前，将会提示你是否再保存电路。



## 1.3.2 编辑（Edit）的基本操作

- 编辑（Edit）菜单是multisim用来控制电路及元器件的菜单。菜单中：
  - **1. 顺时针旋转（Edit→Orientation→90 Clockwise）——Ctrl+R**
    - 用鼠标单击Edit→90 Clockwise选项或进行Ctrl+R操作，将所选择的元器件顺时针旋转  $90^\circ$ ，与元器件相关的文本，例如标号、数值和模型信息可能重置，但不会旋转。
  - **2. 逆时针旋转（Edit→Orientation→90 CounterCW）——Shift+Ctrl+R**
    - 用鼠标单击Edit→90 CounterCW选项或进行Shift+Ctrl+R操作，将所选择的元器件逆时针旋转  $90^\circ$ ，与元器件相关的文本，例如标号、数值和模型信息可能重置，但不会旋转。



---

- **3. 水平反转 (Edit→Orientation→ Flip Horizontal)**

- 用鼠标单击Edit→Flip Horizontal选项，将所选元器件以纵轴为轴翻转 $180^\circ$ ，与元器件相关的文本，例如标号、数值和模型信息可能重置，翻转。
- **4. 垂直反转 (Edit→Orientation →Flip Vertical)**
- 用鼠标单击Edit→Flip Vertical选项，将所选元器件以横轴为轴翻转 $180^\circ$ ，与元器件相关的文本，例如标号、数值和模型信息可能重置，翻转。



---

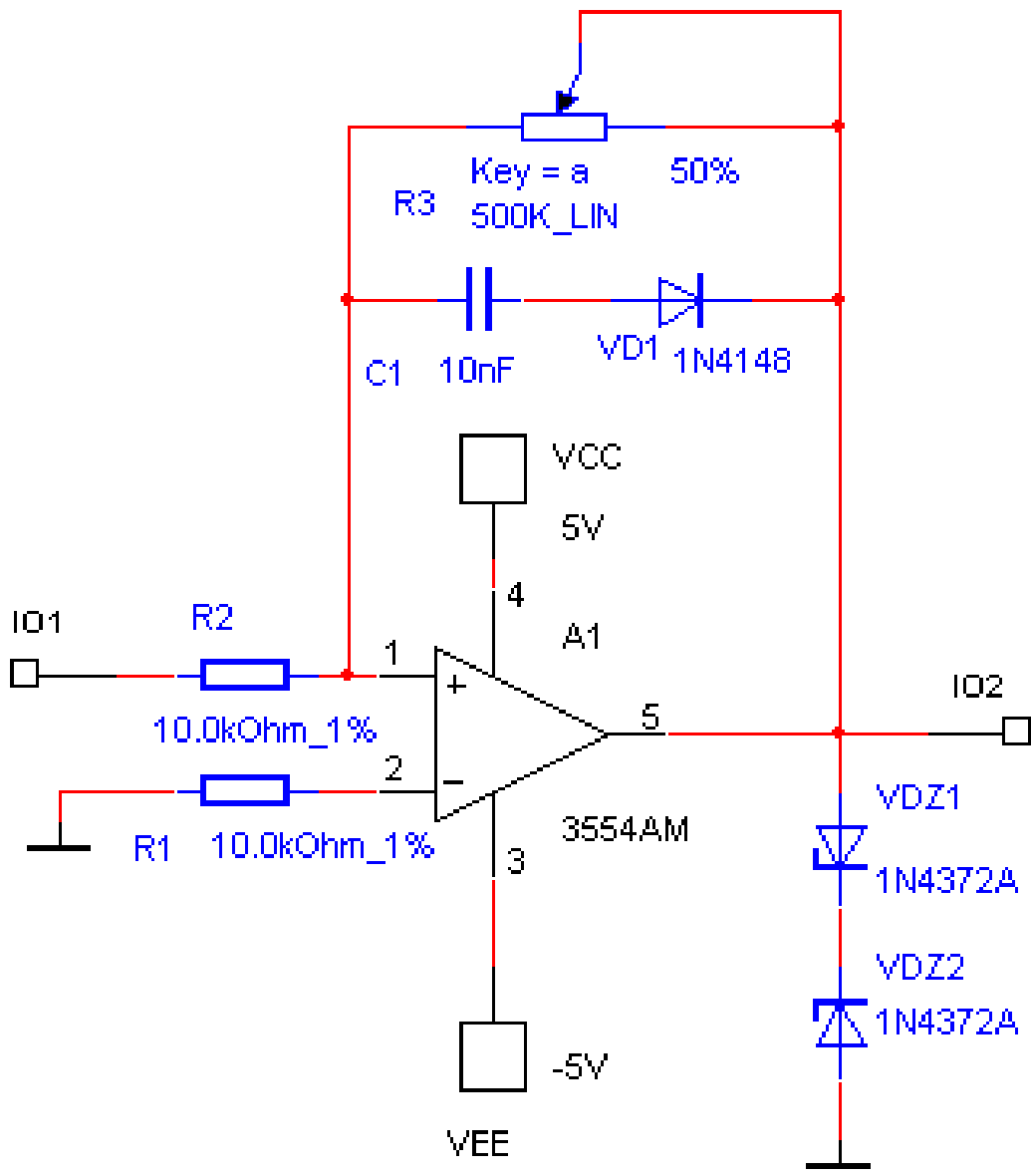
## ■ 5. 元件属性（**Edit→Properties**）——**Ctrl+M**

- 选中元器件，用鼠标单击Edit→Properties选项或进行Ctrl+M操作，弹出该元器件的特性对话框。用鼠标器双击所选元器件也可以。其对话框中的选项与所选的元器件类型有关。使用该对话框，可对元器件的标签、编号。数值、模型参数等进行设置与修改。



# 1.3.3 创建子电路 (Place → New Subcircuit)

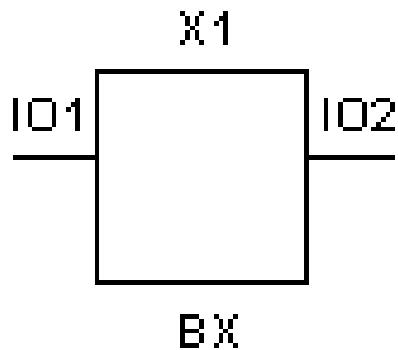
- 子电路是由用户自己定义的一个电路（相当于一个电路模块），可存放在自定元器件库中供电路设计时反复调用。利用子电路可使大型的、复杂系统的设计模块化、层次化，从而提高设计效率与设计文档的简洁性、可读性，实现设计的重用，缩短产品的开发周期。
- Place操作中的子电路（New Subcircuit）菜单选项，可以用来生成一个子电路。子电路的创建步骤如下：
- 首先在电路工作区连接好一个电路，如图1.3.1所示的一个波形变换电路。



- 然后用拖框操作（按住鼠标左键，拖动）将电路选中，这时框内元器件全部选中。用鼠标器单击Place → New Subcircuit菜单选项，即出现子电路对话框，如图1.3.3所示。

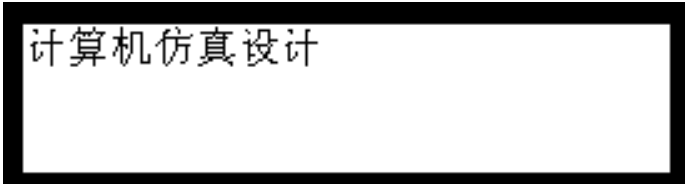


- 输入电路名称如BX（最多为8个字符，包括字母与数字）后，用鼠标单击“OK”选项，生成一个子电路图标如图1.3.3所示。
- 用鼠标单击File→Save选项或用Ctrl+S操作，可以保存生成的子电路。用鼠标单击File→Save As选项，可将当前子电路文件换名保存。



# 1.3.4 在电路工作区内输入文字 (Place→Text)

- 为加强对电路图的理解，在电路图中的某些部分添加适当的文字注释有时是必要的。在Multisim的电路工作区内可以输入中英文文字，其基本步骤为：
  - 1. 启动Text命令 (Place→Text)
- 启动Place菜单中的Text命令 (Place→Text)，然后用鼠标点击需要放置文字的位置，可以在该处放置一个文字块，如图1.3.4所示（注意：如果电路窗口背景为白色，则文字输入框的黑边框是不可见的）。



计算机仿真设计



## ■ 2. 输入文字

- 在文字输入框中输入所需要的文字，文字输入框会随文字的多少会自动缩放。文字输入完毕后，用鼠标点击文字输入框以外的地方，文字输入框会自动消失。

## ■ 3. 改变文字的颜色

- 如果需要改变文字的颜色，可以用鼠标指向该文字块，点击鼠标右键弹出快捷菜单。选取Pen Color命令，在“颜色”对话框中选择文字颜色。注意：选择Font可改动文字的字体和大小。



---

## ■ 4. 移动文字

- 如果需要移动文字，用鼠标指针指向文字，按住鼠标左键，移动到目的地后放开左键即可完成文字移动。

## ■ 5. 删除文字

- 如果需要删除文字，则先选取该文字块，点击右键打开快捷菜单，选取Delete命令即可删除文字。



## 1.3.5 输入注释 (Place→Comment)

---

- 利用注释描述框输入文本可以对电路的功能、使用说明等进行详尽的描述，并且在需要查看时可打开，不需要时关闭，不占用电路窗口空间。注释描述框的操作很简单，写入时，启动Place菜单中的Comment命令 (Place→Comment)，打开如图1.3.5所示的对话框，在其中输入需要说明的文字，可以保存和打印所输入的文本。



# Comment Properties

Display | **Font**

## Color

Background 

System (Tooltip)

Custom

Select Color

## Text



System (Tooltip)

Custom

Select Color

## Size

Auto-Resize

Width

78

Pixels

Height

30

Pixels

## Visibility

Drawing Layer:

ERC Error Mark

Static Probe

**Comment**

Text/Graphics

Show popup window

hzw (2007-10-06):

波形变换电路

OK

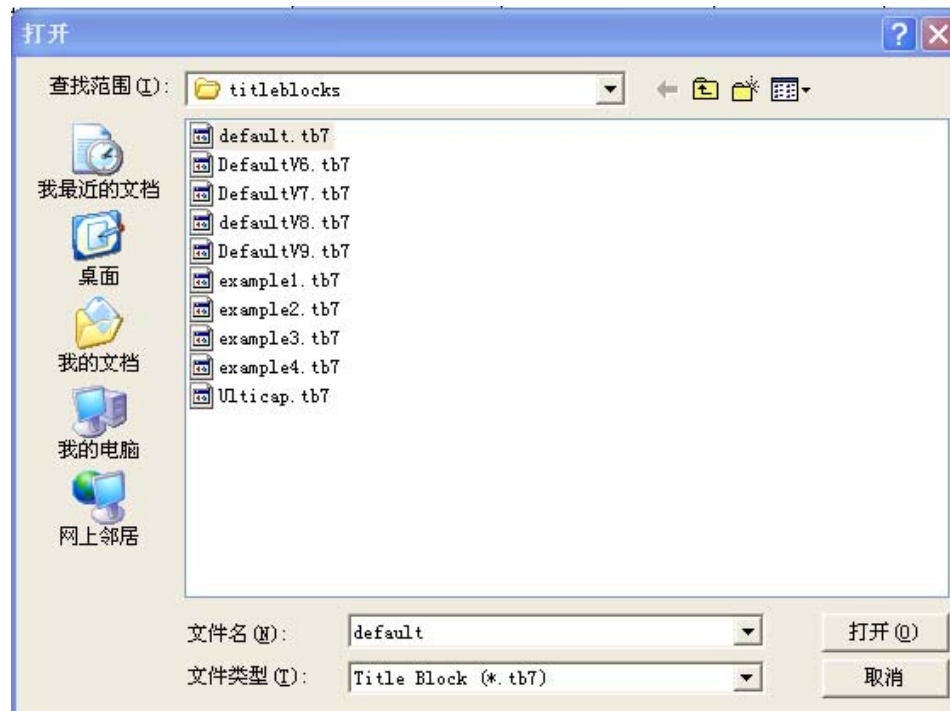
Cancel

Apply

Help

## 1.3.6 编辑图纸标题栏 (Place→Title Block)

- 用鼠标点击Place菜单中的Title Block (Place→Title Block) 则打开一个标题栏文件选择对话框如图1.3.6所示，在标题栏文件中包括10个可选择的标题栏文件。



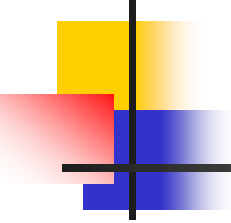


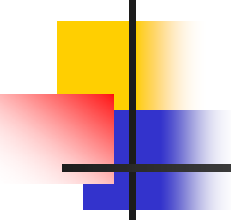
**Electronics Workbench**  
801-111 Peter Street  
Toronto, ON M5V 2H1  
(416) 977-5550



Title: Circuit3	Desc.: Circuit3	
Designed by:	Document No: 0001	Revision: 1.0
Checked by:	Date: 2007-10-06	Size: A
Approved by:	Sheet 1 of 1	

图1.3.7 选择default.tb7所提供的标题栏

- 
- 图1.3.7中：
  - Title: 当前电路图的图名，程序会自动将文件名称设定为图名
  - Desc...: 当前电路图的功能描述，可以用来说明该电路图。
  - Designed: 当前电路图的设计者姓名。
  - Checked : 当前电路图的检查者姓名。
  - Approved by: 当前电路图的核准者姓名。
  - Document: 当前电路图的图号。

- 
- 
- Date: 当前电路图的绘制日期。
  - Sheet : 标明当前电路图为图集中的第几张图。
  - Of: 当前电路图所属的图集，总共有多少张图。
  - Revision: 当前电路图的版本号码。
  - Size: 图纸尺寸。
  - 双击鼠标可以打开标题栏设置对话框，可以编辑修改标题栏内容，编辑完毕点击“OK”即可。



## 1.4 电路创建的基础

---



## 1.4.1 元器件的操作

---

- 1. 元器件的选用
- 选用元器件时，首先在元器件库栏中用鼠标点击包含该元器件的图标，打开该元器件库。然后从选中的元器件库对话框中（如图1.4.1所示电容库对话框），用鼠标点击将该元器件，然后点击“OK”即可，用鼠标拖曳该元器件到电路工作区的适当地方即可。

**Select a Component**

Database: Master Database

Component: 1u F


Group: Basic

Family:

- BASIC\_VIRTUAL
- RATED\_VIRTUAL
- RPACK
- SWITCH
- TRANSFORMER
- NON\_LINEAR\_TRANS
- RELAY
- CONNECTORS
- SCH\_CAP\_SYMS
- SOCKETS
- RESISTOR
- CAPACITOR
- INDUCTOR

160n  
180n  
200n  
220n  
240n  
270n  
300n  
330n  
360n  
390n  
430n  
470n  
510n  
560n  
620n  
680n  
750n  
820n  
910n  
1μ

Symbol (DIN)



Save unique component on placement

Component type: <no type>

Tolerance(%): 0

Model manuf./ID:  
Generic/VIRTUAL CAPACITANCE

Footprint manuf./Type:  
IPC-2221A/2222 / CAPPA1600-1000X450  
IPC-2221A/2222 / CAPPA1600-1000X600  
IPC-2221A/2222 / CAPPA1700-1100X800

Hyperlink:

Components: 342      Searching:





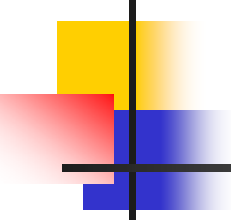
## ■ 2. 选中元器件

- 在连接电路时，要对元器件进行移动、旋转、删除、设置参数等操作。这就需要先选中该元器件。要选中某个元器件可使用鼠标的左键单击该元器件。被选中的元器件的四周出现4个黑色小方块（电路工作区为白底），便于识别。对选中的元器件可以进行移动、旋转、删除、设置参数等操作。用鼠标拖曳形成一个矩形区域，可以同时选中在该矩形区域内包围的一组元器件。
- 要取消某一个元器件的选中状态，只需单击电路工作区的空白部分即可。



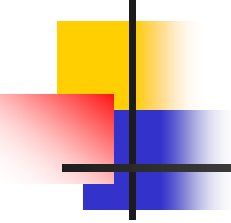
### ■ 3. 元器件的移动

- 用鼠标的左键点击该元器件（左键不松手），拖曳该元器件即可移动该元器件。
- 要移动一组元器件，必须先用前述的矩形区域方法选中这些元器件，然后用鼠标左键拖曳其中的任意一个元器件，则所有选中的部分就会一起移动。元器件被移动后，与其相连接的导线就会自动重新排列。
- 选中元器件后，也可使用箭头键使之作微小的移动。



## ■ 4. 元器件的旋转与反转


- 对元器件进行旋转或反转操作，需要先选中该元器件，然后单击鼠标右键或者选择菜单Edit，选择菜单中的Flip Horizontal（将所选择的元器件左右旋转）、Flip Vertical（将所选择的元器件上下旋转）、90 Clockwise（将所选择的元器件顺时针旋转90度）、90 CounterCW：（将所选择的元器件逆时针旋转90度）等菜单栏中的命令。也可使用Ctrl键实现旋转操作。Ctrl键的定义标在菜单命令的旁边。



---

- **5. 元器件的复制、删除**

- 对选中的元器件，进行元器件的复制、移动、删除等操作，可以单击鼠标右键或者使用 菜单Edit→Cut（剪切）、Edit→Copy（复制）和 Edit→Paste（粘贴）、Edit→Delete（删除）等菜单命令实现元器件的复制、移动、删除等操作。



## ■ 6. 元器件标签、编号、数值、模型参数的设置

- 在选中元器件后，双击该元器件，或者选择菜单命令 **Edit→Properties**（元器件特性）会弹出相关的对话框，可供输入数据。
- 器件特性对话框具有多种选项可供设置，包括 **Label**（标识）、**Display**（显示）、**Value**（数值）、**Fault**（故障设置）、**Pins**（引脚端）、**Variant**（变量）等内容。电容器件特性对话框如图1.4.2所示。

# Capacitor



Label | Display | Value | Fault | Pins | Variant | User Fields

Capacitance (C): 1u F

Tolerance: 0 %

Component Type:

Hyperlink:

Additional SPICE Simulation Parameters

Initial Conditions: 0 V

Layout Settings

Footprint: CAPPA1600-1000X450

Edit Footprint...

Manufacturer: IPC-2221A/2222

Replace

OK

Cancel

Info

Help



- (1) Label (标识)

- Label (标识) 选项的对话框用于设置元器件的 Label (标识) 和 RefDes (编号)。
- RefDes (编号) 由系统自动分配, 必要时可以修改, 但必须保证编号的唯一性。注意连接点、接地等元器件没有编号。在电路图上是否显示标识和编号可由Options菜单中的Global Preferences (设置操作环境) 的对话框设置。

- (2) Display (显示)

- Display (显示) 选项用于设置Label、RefDes的显示方式。该对话框的设置与Options菜单中的Global Preferences (设置操作环境) 的对话框的设置有关。如果遵循电路图选项的设置, 则Label、RefDes的显示方式由电路图选项的设置决定。



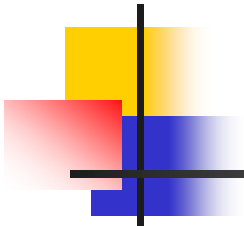
- (3) Value (数值)

- 点击Value (数值) 选项, 出现Value (数值) 选项对话框。

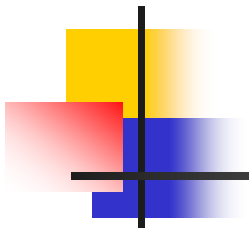
- (4) Fault (故障)








- Fault (故障) 选项可供人为设置元器件的隐含故障。例如在三极管的故障设置对话框中, E、B、C为与故障设置有关的引脚号, 对话框提供Leakage (漏电)、Short (短路)、Open (开路)、None (无故障) 等设置。如果选择了Open (开路) 设置。图中设置引脚E和引脚B为Open (开路) 状态, 尽管该三极管仍连接在电路中, 但实际上隐含了开路的故障。这可以为电路的故障分析提供方便。





- (5) 改变元器件的颜色
- 在复杂的电路中，可以将元器件设置为不同的颜色。要改变元器件的颜色，用鼠标指向该元器件，点击右键可以出现菜单，选择Change Color选项，出现颜色选择框，然后选择合适的颜色即可。点击右键出现的菜单如图1.4.3所示。



 Cut	Ctrl+X
 Copy	Ctrl+C
 Paste	Ctrl+V
 Delete	Delete
<hr/>	
Flip <u>H</u> orizontal	Alt+X
Flip <u>V</u> ertical	Alt+Y
 90 Clockw <u>u</u> ise	Ctrl+R
 90 C <u>o</u> unterCW	Ctrl+Shift+R
<hr/>	
Bus <u>V</u> ector Connect...	
<hr/>	
Replace by <u>H</u> ierarchical Block	Ctrl+Shift+H
Replace by <u>S</u> ubcircuit	Ctrl+Shift+B
<hr/>	
<u>R</u> eplace Components...	
<hr/>	
<u>S</u> ave Component to DB...	
<hr/>	
Edit Symbol/Title Block	
<hr/>	
Lock name position	
<hr/>	
Reverse Probe <u>D</u> irection	
<hr/>	
Change Color...	
Font...	
<hr/>	
 Properties	Ctrl+M



## 1.4.2 电路图选项的设置

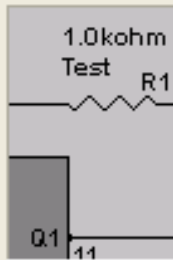
- 选择Options菜单中的Sheet Properties（工作台界面设置）（Options→Sheet Properties）用于设置与电路图显示方式有关的一些选项。
- **1. Circuit对话框**
- 选择Options→Sheet Properties对话框的Circuit选项可弹出如图1.4.4所示的Circuit对话框，在Circuit对话框中：
- Show 图框中可选择电路各种参数，如labels选择是否显示元器件的标志，RefDes选择是否显示元器件编号，Values选择是否显示元器件数值，Initial Condition选择初始化条件，Tolerance选择公差。
- Color图框中的5个按钮用来选择电路工作区的背景、元器件、导线等的颜色。

# Sheet Properties



- Circuit
- Workspace
- Wiring
- Font
- PCB
- Visibility

## Show



## Component

- Labels
- RefDes
- Values
- Initial Conditions
- Tolerance
- Variant Data
- Attributes
- Symbol Pin Names
- Footprint Pin Names

## Net Names

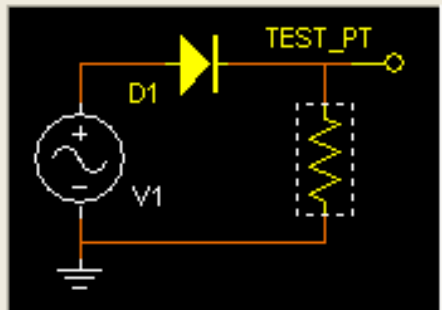
- Show All
- Use Net-specific Setting
- Hide All

## Bus Entry

- Show labels

## Color

Custom



Background



Selection



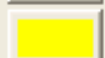
Wire



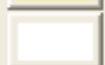
Component with model



Component without model



Virtual component



Save as default

- OK
- Cancel
- Apply
- Help



## ■ 2. workspace对话框

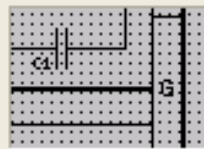
- 选择Options→Sheet Properties对话框的workspace选项可弹出如图1.4.5所示的workspace对话框，在workspace对话框中：
- Show Grid: 选择电路工作区里是否显示格点。
- Show Page Bounds: 选择电路工作区里是否显示页面分隔线（边界）。
- Show border: 选择电路工作区里是否显示边界。
- Sheet size区域的功能是设定图纸大小（A—E、A0—A4以及Custom选项），并可选择尺寸单位为英寸（Inches）或厘米（Centimeters），以及设定图纸方向是Portrait（纵向）或Landscape（横向）。

# Sheet Properties



- Circuit
- Workspace
- Wiring
- Font
- PCB
- Visibility

## Show



- Show grid
- Show page bounds
- Show border

## Sheet size

A (Letter)

### Orientation



- Portrait
- Landscape

### Custom size

Width 11

Height 8.5

- Inches
- Centimeters

Save as default

OK

Cancel

Apply

Help



---

### ■ **3. Wiring**对话框

- 选择Options→Sheet Properties对话框的Wiring选项可弹出Wiring对话框，在Wiring对话框中：
- Wire Width：选择线宽。
- Bus Width：选择总线线宽。
- Bus Wiring Mode：选择总线模式。

# Sheet Properties



- Circuit
- Workspace
- Wiring
- Font
- PCB
- Visibility

Font:

- Arial
- Arial**
- Arial Black
- Arial Narrow
- Basemic
- Basemic Symbol

Font Style:

- Bold
- Bold**
- Bold Italic
- Italic
- Regular

Size:

- 10
- 10**
- 11
- 12
- 14
- 16

Sample

**AaBbYyZz**

Change All

- Component RefDes
- Component Values and Labels
- Component Attributes
- Footprint Pin Names
- Symbol Pin Names
- Net Names
- Schematic Texts
- Comments and Probes
- Busline Name

Apply to

- Selection
- Entire Circuit

Save as default

OK

Cancel

Apply

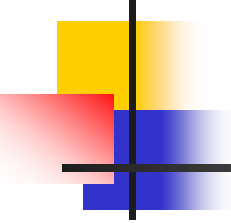
Help

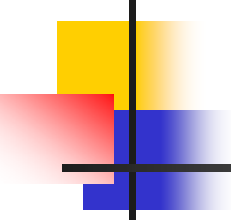




## ■ 4. Font对话框

- 选择Options→Sheet Properties对话框的Font选项可弹出Font对话框，Font对话框如图1.4.6所示。在Font对话框中：
  - (1) 选择字型
  - Font区域可以字型，可以直接在栏位里选取所要采用的字型。
  - Font Style区域选择字型，字型可以为粗体字（**Bold**）、粗斜体字（**Bold Italic**）、斜体字（*Italic*）、正常字（**Regular**）。
  - Size区域选择字型大小，可以直接在栏位里选取。
  - Sample区域显示的是所设定的字型。

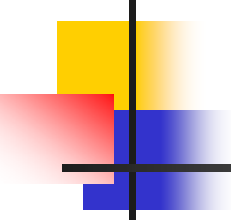
- 
- 
- (2) 选择字型的应用项目
  - Change All区域选择本对话框所设定的字型应用项目。
  - Component Values and Labels: 选择元器件标注文字和数值采用所设定的字型。
  - Component RefDes: 选择元器件编号采用所设定的字型。
  - Component Attributes: 选择元器件属性文字采用所设定的字型。
  - Footprint Pin names: 选择引脚名称采用所设定的字型。

- 
- Symbol Pin names: 选择符号引脚采用所设定的字型。
  - Net names: 选择网络表名称采用所设定的字型。
  - Schematic text: 选择电路图里的文字采用所设定的字型。
  - (3) 选择字型的应用范围
  - Apply to区域选择本对话框所设定的字型的应用范围。
  - Entire Circuit: 将应用于整个电路图。
  - Selection: 应用在选取的项目。



## ■ 5. Part对话框

- 选择Options→Global Preferences...对话框的Part选项可弹出如图1.4.7所示的Part对话框，在Part对话框中：
- (1) 选择元器件操作模式
- 在Place component mode区域选择元器件操作模式。
- Place single component: 选定时，从元器件库里取出元器件，只能放置一次。
- Continuous placement for multi-section part only (ESC to quit) : 选定时，如果从元器件库里取出的元器件是74xx之类的单封装内含多组件的元器件，则可以连续放置元器件；停止放置元器件，可按 [ESC] 键退出。
- Continuous placement (ESC to quit) : 选定时，从元器件库里取出的零件，可以连续放置；停止放置元器件，可按 [ESC] 键退出。

- 
- (2) 选择元器件符号标准
  - 在Symbol standard区域选择元器件符号标准。
  - ANSL: 设定采用美国标准元器件符号。
  - DIN: 设定采用欧洲标准元器件符号。
  - (3) 选择相移方向
  - 在Positive Phase shift Direction区域选择相移方向，左移（Shift left）或者右移（Shift right）。
  - (4) 数字仿真设置
  - 在Digital Simulation Setting区域选择数字仿真设置，Idea（faster simulation）状态为理想状态仿真，可以获得较高速度的仿真；Real（more accurate simulation-requires power and digital ground）为真实状态仿真。

# Preferences



Paths | Save | Parts | General

## Place component mode

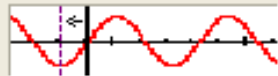
- Return to Component Browser after placement
- Place single component
- Continuous placement for multi-section part only (ESC to quit)
- Continuous placement (ESC to quit)

## Symbol standard

- ANSI
- DIN

## Positive Phase Shift Direction

- Shift right
- Shift left



Note: This setting only affects the "Phase" parameter in AC sources.

## Digital Simulation Settings

- Ideal (faster simulation)
- Real (more accurate simulation - requires power and digital ground)

OK

Cancel

Apply

Help



---

- **6. Default对话框**

- 在Options→Sheet Properties和Options→Global Preferences...的各对话框的左下角有一个用于用户默认的设置，点击选择 **Save as default**则将当前设置存为用户的默认设置，默认设置的影响范围是新建图纸；除去**Save as default**选择则将当前设置恢复为用户的默认设置。若仅点击**OK**按钮则不影响用户的默认设置，仅影响当前图纸的设置。



## 1.4.3 导线的操作

---

- **1. 导线的连接**
- 在两个元器件之间，首先将鼠标指向一个元器件的端点使其出现一个小圆点，按下鼠标左键并拖曳出一根导线，拉住导线并指向另一个元器件的端点使其出现小圆点，释放鼠标左键，则导线连接完成。
- 连接完成后，导线将自动选择合适的走向，不会与其他元器件或仪器发生交叉。
- **2. 连线的删除与改动**
- 将鼠标指向元器件与导线的连接点使出现一个圆点，按下左键拖曳该圆点使导线离开元器件端点，释放左键，导线自动消失，完成连线的删除。也可以将拖曳移开的导线连至另一个接点，实现连线的改动。





### ■ 3. 改变导线的颜色

- 在复杂的电路中，可以将导线设置为不同的颜色。要改变导线的颜色，用鼠标指向该导线，点击右键可以出现菜单，选择Change Color选项，出现颜色选择框，然后选择合适的颜色即可。

### ■ 4. 在导线中插入元器件

- 将元器件直接拖曳放置在导线上，然后释放即可插入元器件在电路中。

### ■ 5. 从电路删除元器件

- 选中该元器件，按下Edit→Delete即可,或者点击右键可以出现菜单，选择Delete即可。



## ■ 6. “连接点”的使用

- “连接点”是一个小圆点，点击Place Junction可以放置节点。一个“连接点”最多可以连接来自四个方向的导线。可以直接将“连接点”插入连线中。

## ■ 7. 节点编号

- 在连接电路时，multisim自动为每个节点分配一个编号。是否显示节点编号可由Options→Sheet Properties对话框的Circuit选项设置。选择RefDes选项，可以选择是否显示连接线的节点编号。

## 1.4.4 输入/输出端

- 用鼠标点击Place菜单中的Connectors选项（Place → Connectors）即可取出所需要的一个输入/输出端。输入/输出端菜单如图1.4.8所示。
- 在电路控制区中，输入/输出端可以看作是只有一个引脚的元器件，所有操作方法与元器件相同。不同的是输入/输出端只有一个连接点。

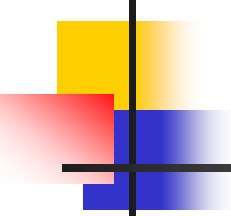




# 1.5 仪器仪表的使用

---

- 1.5.1 仪器仪表的基本操作
- multisim的仪器库存放有数字多用表、函数信号发生器、示波器、波特图仪、字信号发生器、逻辑分析仪、逻辑转换仪、瓦特表、失真度分析仪、网络分析仪、频谱分析仪11种仪器仪表可供使用，仪器仪表以图标方式存在，每种类型有多台，仪器仪表库的图标及功能如图1.2.5所示。



---

- **1. 仪器的选用与连接**

- (1) 仪器选用

- 从仪器库中将所选用的仪器图标，用鼠标将它“拖放”到电路工作区即可，类似元器件的拖放。

- (2) 仪器连接

- 将仪器图标上的连接端（接线柱）与相应电路的连接点相连，连线过程类似元器件的连线。



---

## ■ 2. 仪器参数的设置

### ■ (1) 设置仪器仪表参数

- 双击仪器图标即可打开仪器面板。可以用鼠标操作仪器面板上相应按钮及参数设置对话框的设置数据。

### ■ (2) 改变仪器仪表参数

- 在测量或观察过程中，可以根据测量或观察结果来改变仪器仪表参数的设置，如示波器、逻辑分析仪等。



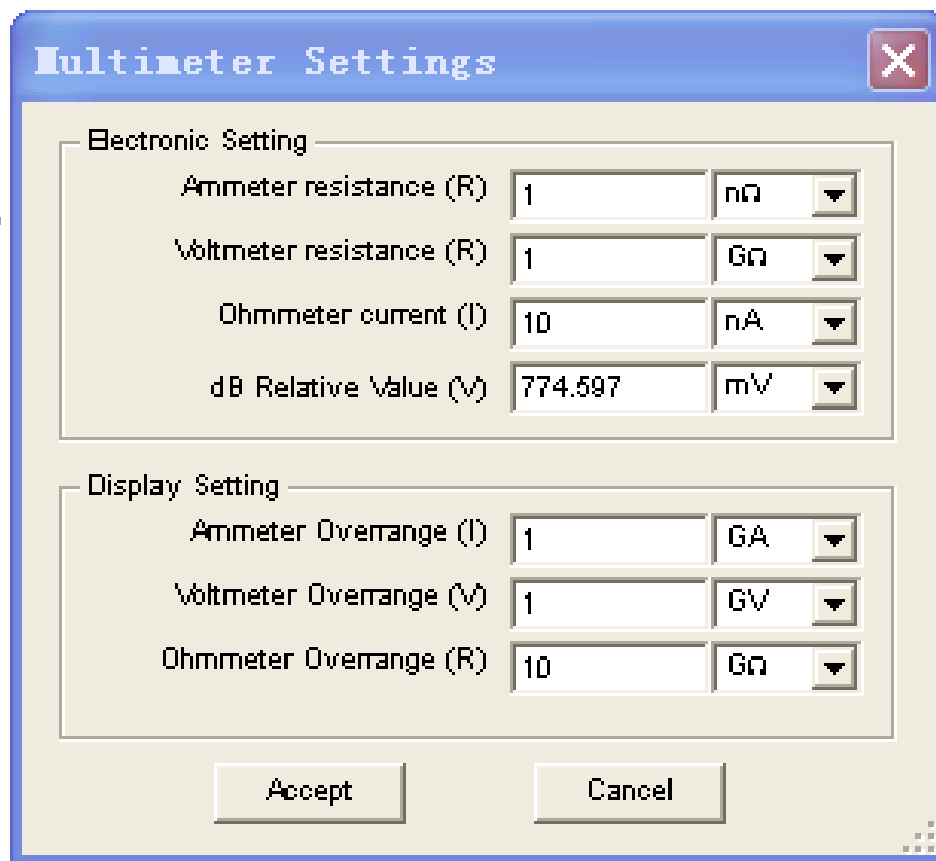
## 1.5.2 数字多用表 (Multimeter)

---

- 数字多用表是一种可以用来测量交直流电压、交直流电流、电阻及电路中两点之间的分贝损耗，自动调整量程的数字显示的多用表。
- 用鼠标双击数字多用表图标，可以放大的数字多用表面板，如图1.5.1所示。用鼠标单击数字多用表面板上的设置 (Settings) 按钮，则弹出参数设置对话框窗口，可以设置数字多用表的电流表内阻、电压表内阻、欧姆表电流及测量范围等参数。参数设置对话框如图1.5.2所示。



图1.5.1 数字多用表面板图



1.5.2数字多用表参数设置对话框



## 1.5.3 函数信号发生器 (Function Generator)

- 函数信号发生器是可提供正弦波、三角波、方波三种不同波形的信号的电压信号源。用鼠标双击函数信号发生器图标，可以放大的函数信号发生器的面板。函数信号发生器的面板如图1.5.3所示。
- 函数信号发生器其输出波形、工作频率、占空比、幅度和直流偏置，可用鼠标来选择波形选择按钮和在各窗口设置相应的参数来实现。频率设置范围为1Hz~999THz；占空比调整值可从1%~99%；幅度设置范围为1  $\mu$  V~999kV；偏移设置范围为一999kV~999kV。

**Function Gene...** [X]

Waveforms

Signal Options

Frequency	1	Hz
Duty Cycle	50	%
Amplitude	10	Vp
Offset	0	V

Set Rise/Fall Time

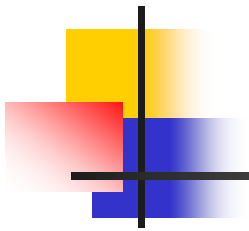
+      Common      -



---

## ■ 1.5.4 瓦特表 (Wattmeter)

- 瓦特表用来测量电路的功率，交流或者直流均可测量。用鼠标双击瓦特表的图标可以放大的瓦特表的面板。电压输入端与测量电路并联连接，电流输入端与测量电路串联连接。瓦特表的面板如图1.5.4所示。



**Wattmeter...** [Close]

[Empty display area]

Power Factor: [Empty display area]

Voltage                      Current

+                      -                      +                      -

[Terminal 1]   [Terminal 2]   [Terminal 3]   [Terminal 4]

[Grid icon]

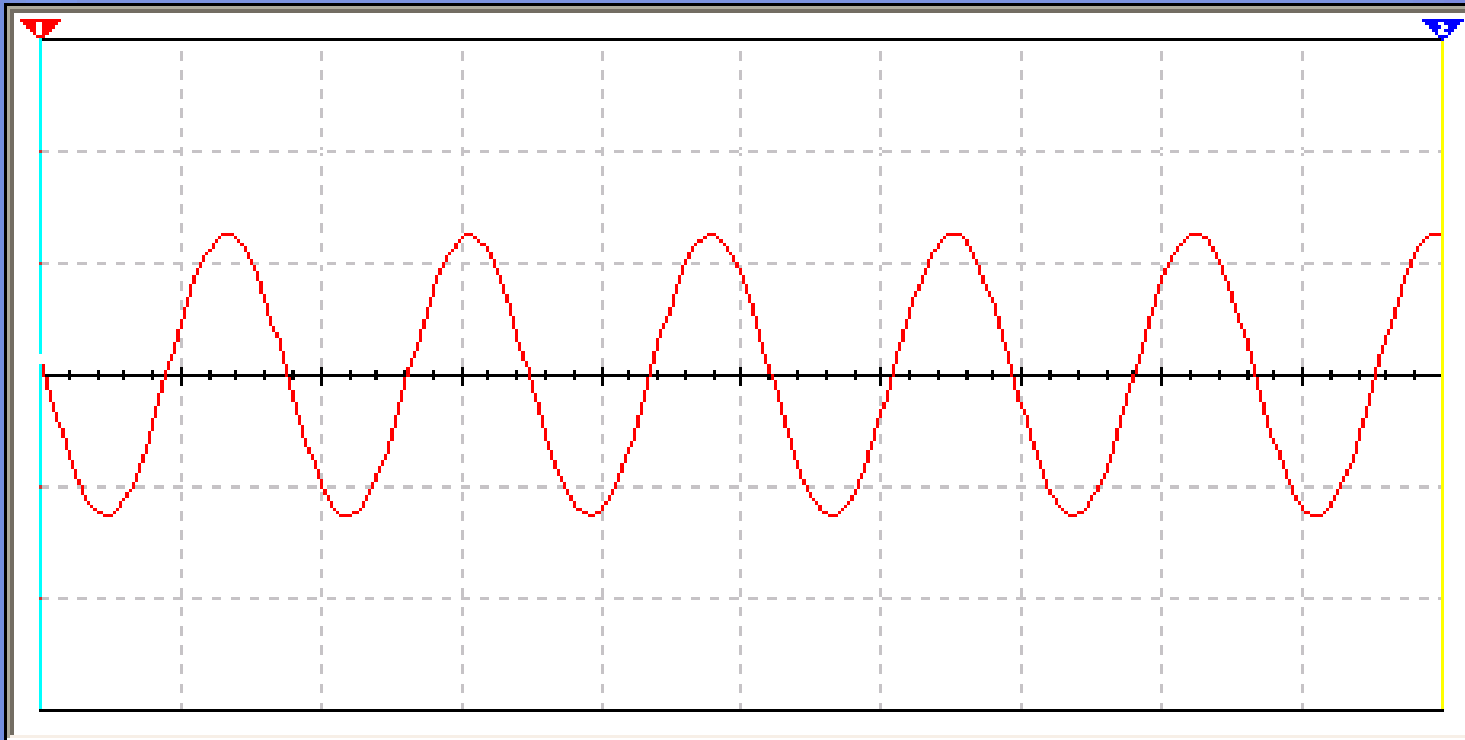


## 1.5.5示波器（Oscilloscope）

---

- 示波器用来显示电信号波形的形状、大小、频率等参数的仪器。用鼠标双击示波器图标，放大的示波器的面板图如图1.5.5所示。
- 示波器面板各按键的作用、调整及参数的设置与实际的示波器类似。

# Oscilloscope-XSC2



	Time	Channel_A	Channel_B	
T1	← →	5.406 ms	184.963 mV	Reverse
T2	← →	5.426 ms	1.248 V	Save Ext. Trigger
T2-T1		20.000 us	1.083 V	

Timebase: Scale  Channel A: Scale  Channel B: Scale  Trigger: Edge  F   $\nabla$   A  B  Ext

X position  Y position  Y position  Level  V

Y/T Add B/A A/B AC 0 DC  AC 0 DC  Type Sing. Nor. Auto None



---

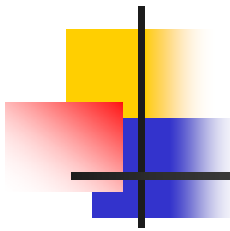
- **1. 时基 (Time base) 控制部分的调整**

- (1) 时间基准

- X轴刻度显示示波器的时间基准，其基准为 $0.1\text{fs} / \text{Div} \sim 1000\text{Ts} / \text{Div}$ 可供选择。

- (2) X轴位置控制

- X轴位置控制X轴的起始点。当X的位置调到0时，信号从显示器的左边缘开始，正值使起始点右移，负值使起始点左移。X位置的调节范围从 $-5.00 \sim +5.00$ 。



- (3) 显示方式选择

- 显示方式选择示波器的显示，可以从“幅度 / 时间 (Y / T)”切换到“A通道 / B通道中 (A / B)”、“B通道 / A通道 (B / A)”或“Add”方式。
- ① Y / T方式：X轴显示时间，Y轴显示电压值。
- ② A / B、 B / A方式： X轴与Y轴都显示电压值。
- ③ Add方式：X轴显示时间，Y轴显示A通道、B通道的输入电压之和。





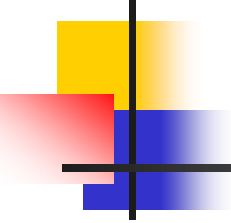
## ■ 2. 示波器输入通道（Channel A/B）的设置

### ■ （1）Y轴刻度

- Y轴电压刻度范围从 $1\text{fV} / \text{Div} \sim 1000\text{TV} / \text{Div}$ ，可以根据输入信号大小来选择Y轴刻度值的大小，使信号波形在示波器显示屏上显示出合适的幅度。

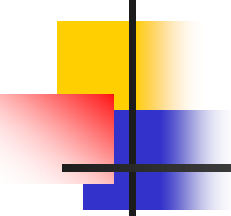
### ■ （2）Y轴位置(Y position)

- Y轴位置控制Y轴的起始点。当Y的位置调到0时，Y轴的起始点与X轴重合，如果将Y轴位置增加到1.00，Y轴原点位置从X轴向上移一大格，若将Y轴位置减小到-1.00，Y轴原点位置从X轴向下移一大格。Y轴位置的调节范围从-3.00~+3.00。改变A、B通道的Y轴位置有助于比较或分辨两通道的波形。



### ■ (3) Y轴输入方式

- Y轴输入方式即信号输入的耦合方式。当用AC耦合时，示波器显示信号的交流分量。当用DC耦合时，显示的是信号的AC和DC分量之和。
- 当用0耦合时，在Y轴设置的原点位置显示一条水平直线。



### ■ 3. 触发方式 (Trigger) 调整

#### ■ (1) 触发信号选择

- 触发信号选择一般选择自动触发 (Auto) .选择“A”或“B”，则用相应通道的信号作为触发信号。选择“EXT”，则由外触发输入信号触发。选择“Sing”为单脉冲触发。选择“Nor”为一般脉冲触发。

#### ■ (2) 触发沿 (Edge) 选择

- 触发沿 (Edge) 可选择上升沿或下降沿触发。

#### ■ (3) 触发电平 (Level) 选择

- 触发电平 (Level) 选择触发电平范围。



## ■ 4. 示波器显示波形读数

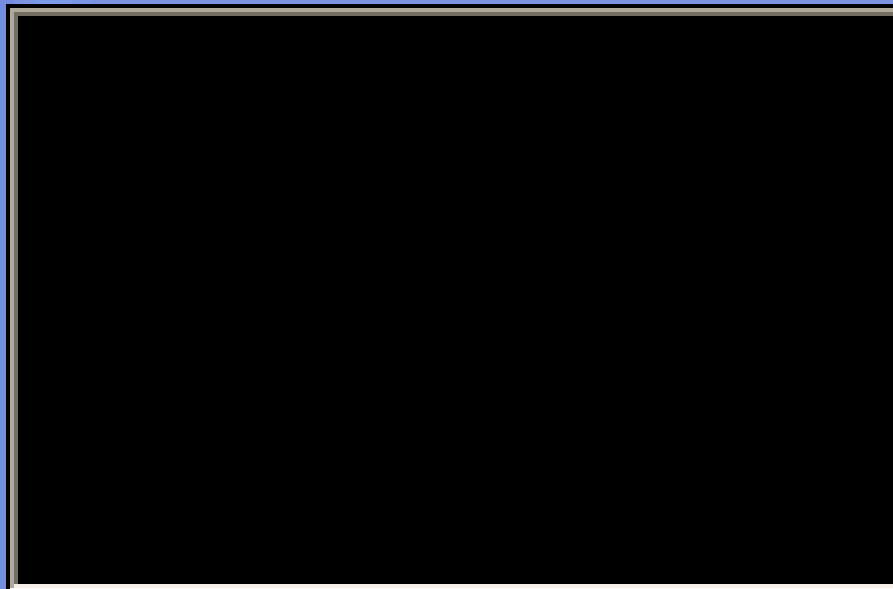
- 要显示波形读数的精确值时，可用鼠标将垂直光标拖到需要读取数据的位置。显示屏幕下方的方框内，显示光标与波形垂直相交点处的时间和电压值，以及两光标位置之间的时间、电压的差值。
- 用鼠标单击“Reverse”按钮可改变示波器屏幕的背景颜色。用鼠标单击“Save”按钮可按ASCII码格式存储波形读数。



## ■ 1.5.6 波特图仪（Bode Plotter）

- 波特图仪可以用来测量和显示电路的幅频特性与相频特性，类似于扫频仪。用鼠标双击波特图仪图标，放大的波特图仪的面板图如图1.5.6所示。可选择幅频特性（Magnitude）或者相频特性（Phase）
- 波特图仪有In和Out两对端口，其中In端口的+和-分别接电路输入端的正端和负端；Out端口的+和-分别接电路输出端的正端和负端。使用波特图仪时，必须在电路的输入端接入AC（交流）信号源。

# Bode Plotter-XBP1



Mode

Magnitude  Phase

Horizontal

Log  Lin

Vertical

Log  Lin

F 1 GHz

I 1 mHz

F 0 dB

I -200 dB

Controls

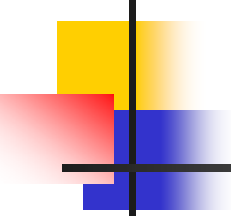
←  →

+  In  -    +  Out  -



## ■ 1. 坐标设置

- 在垂直（Vertical）坐标或水平（Horizontal）坐标控制面板图框内，按下“Log”按钮，则坐标以对数（底数为10）的形式显示；按下“Lin”按钮，则坐标以线性的结果显示。
- 水平（Horizontal）坐标标度（1mHz~ 1000THz）：水平坐标轴戏 / 轴总是显示频率值。它的标度由水平轴的初始值（I Initial）或终值（F Final）决定。
- 在信号频率范围很宽的电路中，分析电路频率响应时，通常选用对数坐标（以对数为坐标所绘出的频率特性曲线称为波特图）。
- 垂直（Vertical）坐标当测量电压增益时，垂直轴显示输出电压与输入电压之比，若使用对数基准，则单位是分贝；如果使用线性基准，显示的是比值。当测量相位时，垂直轴总是以度为单位显示相位角。



## ■ 2. 坐标数值的读出

- 要得到特性曲线上任意点的频率、增益或相位差，可用鼠标拖动读数指针（位于波特图仪中的垂直光标），或者用读数指针移动按钮来移动读数指针（垂直光标）到需要测量的点，读数指针（垂直光标）与曲线的交点处的频率和增益或相位角的数值显示在读数框中。

## ■ 3. 分辨率设置

- Set用来设置扫描的分辨率，用鼠标点击Set，出现分辨率设置对话框，数值越大分辨率越高。



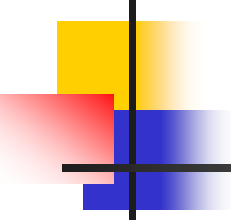


---

## ■ 1.5.7字信号发生器（Word Generator）

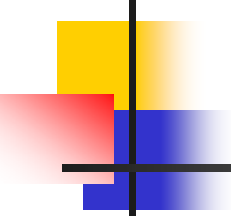
- 字信号发生器是能产生16路（位）同步逻辑信号的一个多路逻辑信号源，用于对数字逻辑电路进行测试。
- 用鼠标双击字信号发生器图标，放大的字信号发生器图标如图1.5.7所示。





## ■ 1. 字信号的输入

- 在字信号编辑区，32bit的字信号以8位16进制数编辑和存放，可以存放1024条字信号，地址编号为0000~03FF。
- 字信号输入操作：将光标指针移至字信号编辑区的某一位，用鼠标器单击后，由键盘输入如二进制数码的字信号，光标自左至右，自上至下移位，可连续地输入字信号。
- 在字信号显示（Display）编辑区可以编辑或显示字信号格式有关的信息。字信号发生器被激活后，字信号按照一定的规律逐行从底部的输出端送出，同时在面板的底部对应于各输出端的小圆圈内，实时显示输出字信号各个位（bit）的值。



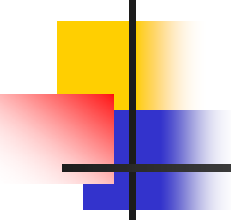
## ■ 2. 字信号的输出方式

- 字信号的输出方式分为Step（单步）、Burst（单帧）、Cycle（循环）三种方式。用鼠标单击一次Step按钮，字信号输出一条。这种方式可用于对电路进行单步调试。
- 用鼠标单击Burst按钮，则从首地址开始至本地址连续逐条地输出字信号。
- 用鼠标单击Cycle按钮，则循环不断地进行Burst方式的输出。
- Burst和Cycle情况下的输出节奏由输出频率的设置决定。
- Burst 输出方式时，当运行至该地址时输出暂停。再用鼠标单击Pause则恢复输出。



### ■ 3. 字信号的触发方式

- 字信号的触发分为**Internal**（内部）和**External**（外部）两种触发方式。当选择**Internal**（内部）触发方式时，字信号的输出直接由输出方式按钮（**SteP**、**Burst**、**Cycle**）启动。当选择**External**（外部）触发方式时，则需接入外触发脉冲，并定义“上升沿触发”或“下降沿触发”。然后单击输出方式按钮，待触发脉冲到来时才启动输出。此外在数据准备好输出端还可以得到与输出字信号同步的时钟脉冲输出。

- 
- **4. 字信号的存盘、重用、清除等操作**
  - 用鼠标单击Set按钮，弹出Pre-setting patterns对话框，在对话框中Clear buffer（清字信号编辑区）、Open（打开字信号文件）、Save（保存字信号文件）三个选项用于对编辑区的字信号进行相应的操作。字信号存盘文件的后缀为“. DP”。对话框中UP Counter（按递增编码）、Down Counter（按递减编码）、Shift right（按右移编码）、Shift left（按左移编码）四个选项用于生成一定规律排列的字信号。例如选项UP Counter（按递增编码），则按0000~03FF排列；如果选择Shift right（按右移编码），则按8000，4000，2000等逐步右移一位的规律排列；其余类推。

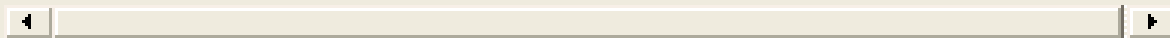
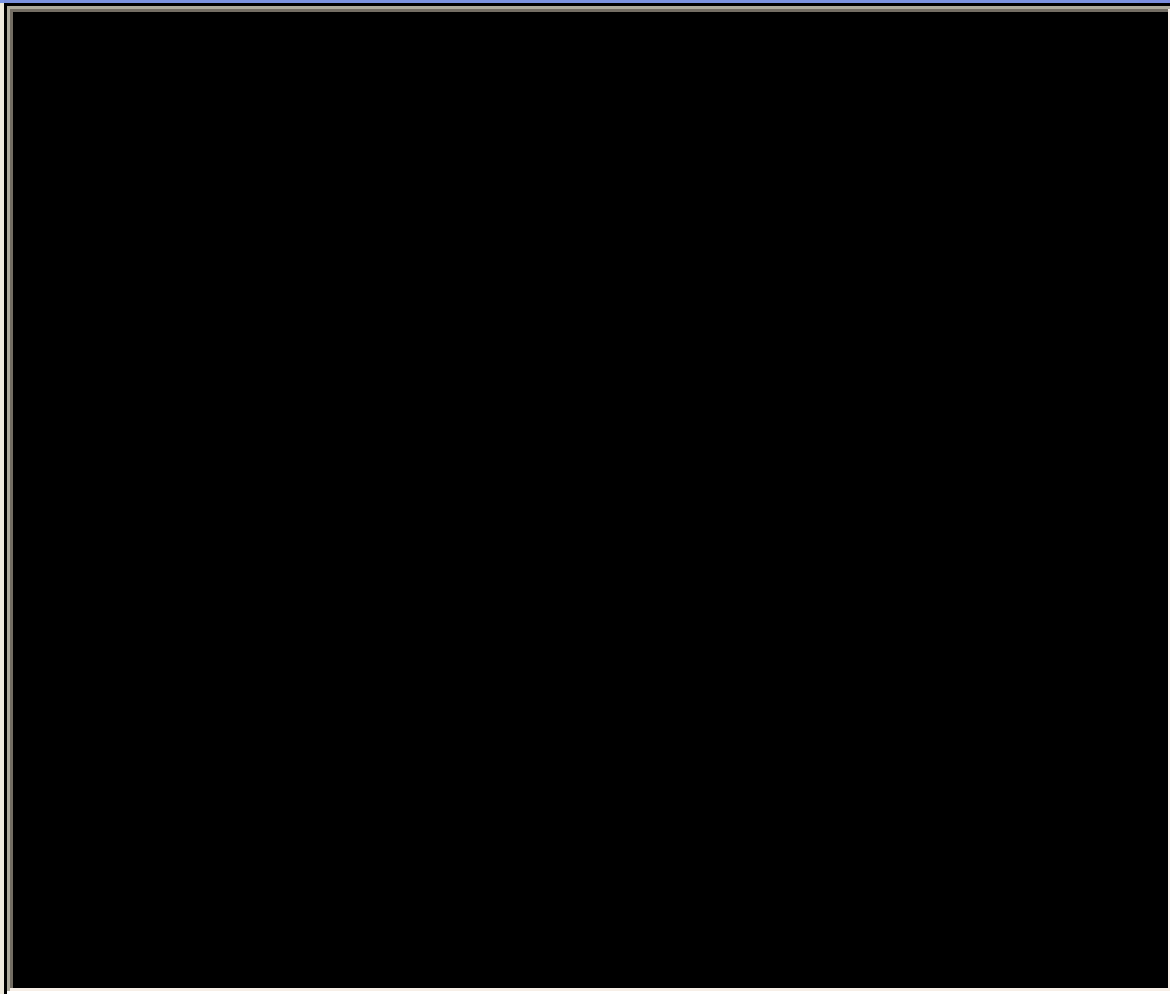


---

- 1.5.8逻辑分析仪（Logic Analyzer）

- 逻辑分析仪用于对数字逻辑信号的高速采集和时序分析，可以同步记录和显示16路数字信号。逻辑分析仪的面板图如图1.5.8所示。

Logic Analyzer-XLA1

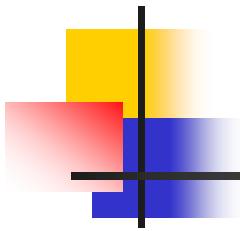


Stop  
Reset  
Reverse

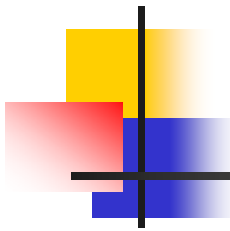
T1  
T2  
T2-T1

Clock  
Clocks/Div 1  
Set... External Qualifier

Trigger  
Set...  
Qualifier







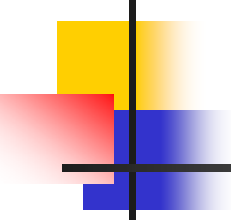
## ■ 1. 数字逻辑信号与波形的显示、读数

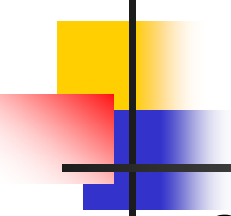
- 面板左边的16个小圆圈对应16个输入端，各路输入逻辑信号的当前值在小圆圈内显示，接从上到下排列依次为最低位至最高位。16路输入的逻辑信号的波形以方波形式显示在逻辑信号波形显示区。通过设置输入导线的颜色可修改相应波形的显示颜色。波形显示的时间轴刻度可通过面板下边的**Clocks per division**设置。读取波形的数据可以通过拖放读数指针完成。在面板下部的两个方框内显示指针所处位置的时间读数和逻辑读数（4位16进制数）。



## ■ 2. 触发方式设置

- 单击Trigger区的Set按钮，可以弹出触发方式对话框。触发方式有多种选择。对话框中可以输入A、B、C三个触发字。逻辑分析仪在读到一个指定字或几个字的组合后触发。触发字的输入可单击标为A、B或C的编辑框，然后输入二进制的字（0或1）或者x，x代表该位为“任意”（0、1均可）。用鼠标单击对话框中Trigger combinations方框右边的按钮，弹出由A、B、C组合的八组触发字，选择八种组合之一，并单击Accept（确认）后，在Trigger combinations方框中就被设置为该种组合触发字。

- 
- 三个触发字的默认设置均为XXXXXXXXXXXXXXXXXX，表示只要第一个输入逻辑信号到达，无论是什么逻辑值，逻辑分析仪均被触发开始波形的采集，否则必须满足触发字条件才被触发。此外，Trigger qualifier（触发限定字）对触发有控制作用。若该位设为x，触发控制不起作用，触发完全由触发字决定；若该位设置为“1”（或“0”），则仅当触发控制输入信号为“1”（或“0”）时，触发字才起作用；否则即使触发字组合条件满足也不能引起触发。



### ■ 3. 采样时钟设置

- 用鼠标单击对话框面板下部Clock区的Set按钮弹出时钟控制对话框。在对话框中，波形采集的控制时钟可以选择内时钟或者外时钟；上升沿有效或者下降沿有效。如果选择内时钟，内时钟频率可以设置。此外对Clock qualifier（时钟限定）的设置决定时钟控制输入对时钟的控制方式。若该位设置为“1”，表示时钟控制输入为“1”时开放时钟，逻辑分析仪可以进行波形采集；若该位设置为“0”，表示时钟控制输入为“0”时开放时钟；若该位设置为“x”，表示时钟总是开放，不受时钟控制输入的限制。

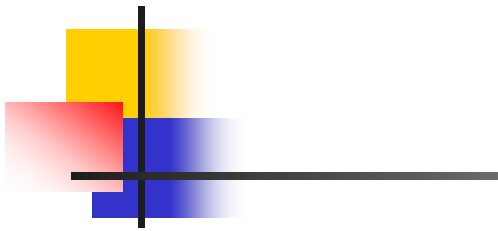


---

## ■ 1.5.9逻辑转换仪（Logic Converter）

- 逻辑转换仪是multisim特有的仪器，能够完成真值表、逻辑表达式和逻辑电路三者之间的相互转换，实际中不存在与此对应的设备。逻辑转换仪面板及转换方式选择图如图1.5.9和图1.5.10所示。





### Conversions

$\Rightarrow$	$\rightarrow$	$\overline{10 1}$
$\overline{10 1}$	$\rightarrow$	$A B$
$\overline{10 1}$	$\xrightarrow{\text{SIMP}}$	$A B$
$A B$	$\rightarrow$	$\overline{10 1}$
$A B$	$\rightarrow$	$\Rightarrow$
$A B$	$\rightarrow$	NAND

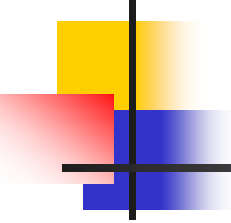


---

- **1. 逻辑电路→真值表**

- 逻辑转换仪可以导出多路（最多八路）输入一路输出的逻辑电路的真值表。首先画出逻辑电路，并将其输入端接至逻辑转换仪的输入端，输出端连至逻辑转换仪的输出端。按下“电路—真值表”按钮，在逻辑转换仪的显示窗口，即真值表区出现该电路的真值表。





## ■ 2. 真值表→逻辑表达式

- 真值表的建立：一种方法是根据输入端数，用鼠标单击逻辑转换仪面板顶部代表输入端
- 的小圆圈，选定输入信号（由A至H）。此时其值表区自动出现输入信号的所有组合，而输出列的初始值全部为零。可根据所需要的逻辑关系修改真值表的输出值而建立真值表；另一种方法是由电路图通过逻辑转换仪转换过来的真值表。
- 对已在真值表区建立的真值表，用鼠标单击“真值表→逻辑表达式”按钮，在面板的底部逻辑表达式栏出现相应的逻辑表达式。如果要简化该表达式或直接由真值表得到简化的逻辑表达式，单击“真值表→简化表达式”按钮后，在逻辑表达式栏中出现相应的该真值表的简化逻辑表达式。在逻辑表达式中的“ $\bar{\quad}$ ”表示逻辑变量的“非”。



### ■ 3. 表达式→真值表、逻辑电路或逻辑与非门电路

- 可以直接在逻辑表达式栏中输入逻辑表达式，“与一或”式及“或一与”式均可，然后按下“表达式→真值表”按钮得到相应的真值表；按下“表达式→电路”按钮得相应的逻辑电路；按下“表达式→与非门电路”按钮得到由与非门构成的逻辑电路。



## ■ 1.5.10 失真分析仪（Distortion Analyzer）

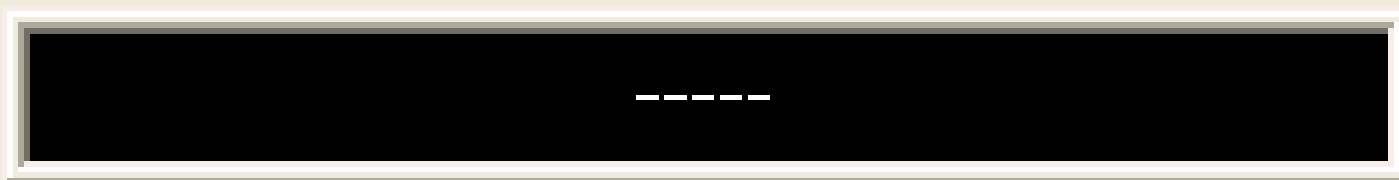
- 失真分析仪是一种用来测量电路信号失真的仪器，multisim提供的失真分析仪频率范围为20Hz~20kHz，失真分析仪面板如图1.5.11所示。
- 在Control Mode（控制模式）区域中，THD设置分析总谐波失真，SINAD设置分析信噪比。Settings设置分析参数。



# Distortion Analyzer-KDA1



## Total Harmonic Distortion(THD)



Start

Stop

Fundamental Freq.

1

k Hz

Resolution Freq.

100 Hz

Controls

THD

SINAD

Set...

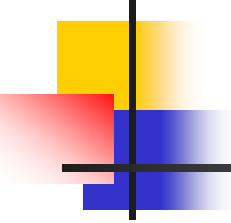
Display

%

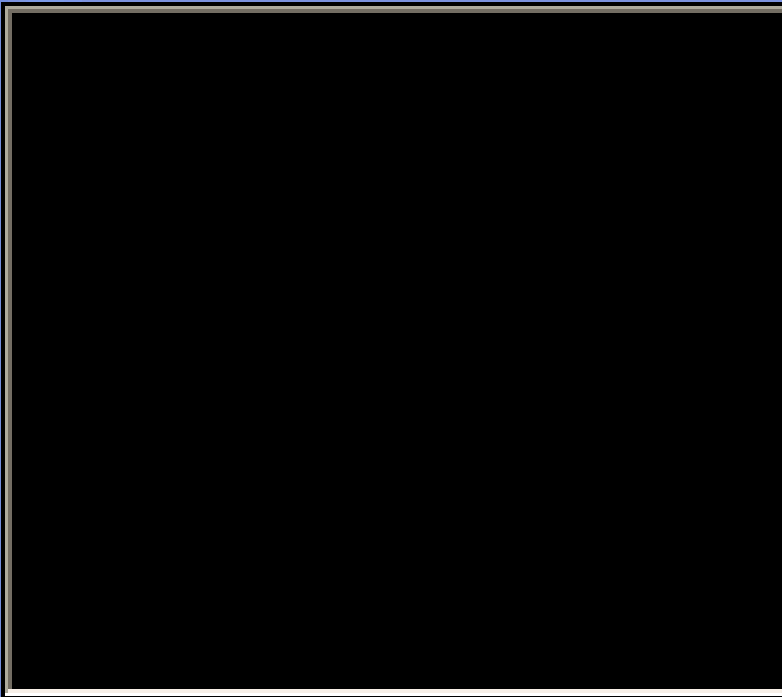
dB

In



- 
- 1.5.11 频谱分析仪（Spectrum Analyzer）
  - 频谱分析仪用来分析信号的频域特性，multisim提供的频谱分析仪频率范围上限为4GHz，频谱分析仪面板如图1.5.12所示。

# Spectrum Analyzer-XSA1



## Span Control

## Frequency

Span  kHz

Start  kHz

Center  kHz

End  kHz

## Amplitude

Range  WDiv

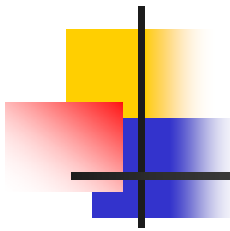
Ref.  dB

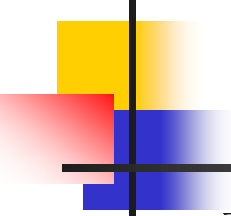
## Resolution Freq.

kHz

Input  Trigger



- 
- 在图1.5.12所示频谱分析仪面板中，分5个区。
  - 在Span Control区中：当选择Set Span时，频率范围由Frequency区域设定。当选择Zero Span时，频率范围仅由Frequency区域的Center栏位设定的中心频率确定。
  - 当选择Full Span时，频率范围设定为0~4GHz。
  - 在Frequency区中：Span设定频率范围。start设定起始频率。Center设定中心频率。End设定终止频率。
  - 在Amplitude区中：当选择dB时，纵坐标刻度单位为dB。当选择dBm时，纵坐标刻度单位为dBm。当选择Lin时，纵坐标刻度单位为线性。

- 
- 在Resolution Frequency区中可以设定频率分辨率，即能够分辨的最小谱线间隔。
  - 在Controls区中：当选择Start时，启动分析。当选择Stop时，停止分析。当选择trigger Set时，选择触发源是Internal（内部触发）还是External（外部触发），选择触发模式是Continue（连续触发）还是Single（单次触发）。
  - 频谱图显示在频谱分析仪面板左侧的窗口中，利用游标可以读取其每点的数据并显示在面板右侧下部的数字显示区域中。





---

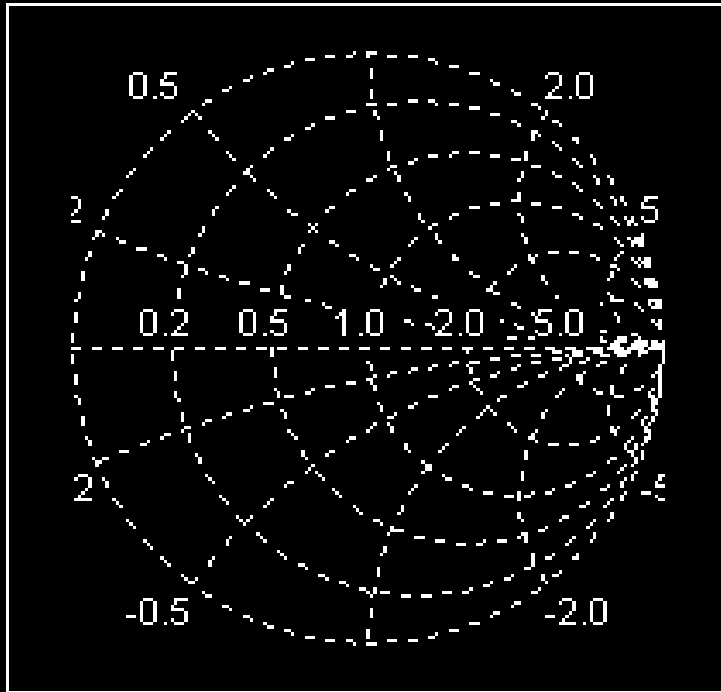
## ■ 1.5.12 网络分析仪（Network Analyzer）

- 网络分析仪是一种用来分析双端口网络的仪器，它可以测量衰减器、放大器、混频器、功率分配器等电子电路及元件的特性。Multisim提供的网络分析仪可以测量电路的S参数并计算出H、Y、Z参数。网络分析仪面板如图1.5.13所示。

# Network Analyzer-XNA1



Source: No valid data



## Mode

- Measurement
- RF Characterizer
- Match Net. Designer

## Graph

- Param. Z-Parameters
- Smith
  - Mag/Ph
  - Polar
  - Re/Im

## Trace

- Z11
- Z12
- Z21
- Z22

## Functions

- Marker Re/Im
- Scale
  - Auto Scale
  - Set up

## Settings

- Load
- Save
- Exp
- Print
- Simulation Set...



P1 P2



## ■ 1. 显示窗口数据显示模式设置

- 显示窗口数据显示模式在Marker区中设置。当选择Re/Im时，显示数据为直角坐标模式。当选择Mag / Ph (Degs)时，显示数据为极坐标模式。当选择dB Mag / Ph (Deg)时，显示数据为分贝极坐标模式。滚动条控制显示窗口游标所指的位置。

## ■ 2. 选择需要显示的参数

- 在Trace区域中选择需要显示的参数，只要按下需要显示的参数按钮（Z11、Z12、Z21、Z22）即可。

## ■ 3. 参数格式

- 参数格式在Graph区中设置。
- Param.选项中可以选所分析的参数，其中包括S—Parameters（S参数）、H—Parameters（H参数）、Y—Parameters（Y参数）、Z—Parameters（Z参数），Stability factor（稳定因素）四种。



## ■ 4. 显示模式

- 显示模式可以通过选择Smith（史密斯格式）、Mag / Ph（增益 / 相位的频率响应图即波特图）、Polar（极化图）、Re/Im（实部 / 虚部）完成。以上四种显示模式的刻度参数可以通过Scale设置；程序自动调整刻度参数由Auto Scale设置；显示窗口的显示参数，如线宽、颜色等由Set up设置。

## ■ 5. 数据管理

- Settings区域提供数据管理功能。点击LOAD读取专用格式数据文件；点击SAVE储存专用格式数据文件；点击Exp输出数据至文本文件；点击PRINT打印数据。



## ■ 6. 分析模式设置

- 分析模式在Mode区中设置。当选择Measurement时为测量模式；当选择Match Net. Designer时为电路设计模式，可以显示电路的稳定度、阻抗匹配、增益等数据；当选择RF Characterizer时为射频特性分析模式。Set up设定上面三种分析模式的参数，在不同的分析模式下，将会有不同的参数设定，如图1.5.14~1.5.15所示。

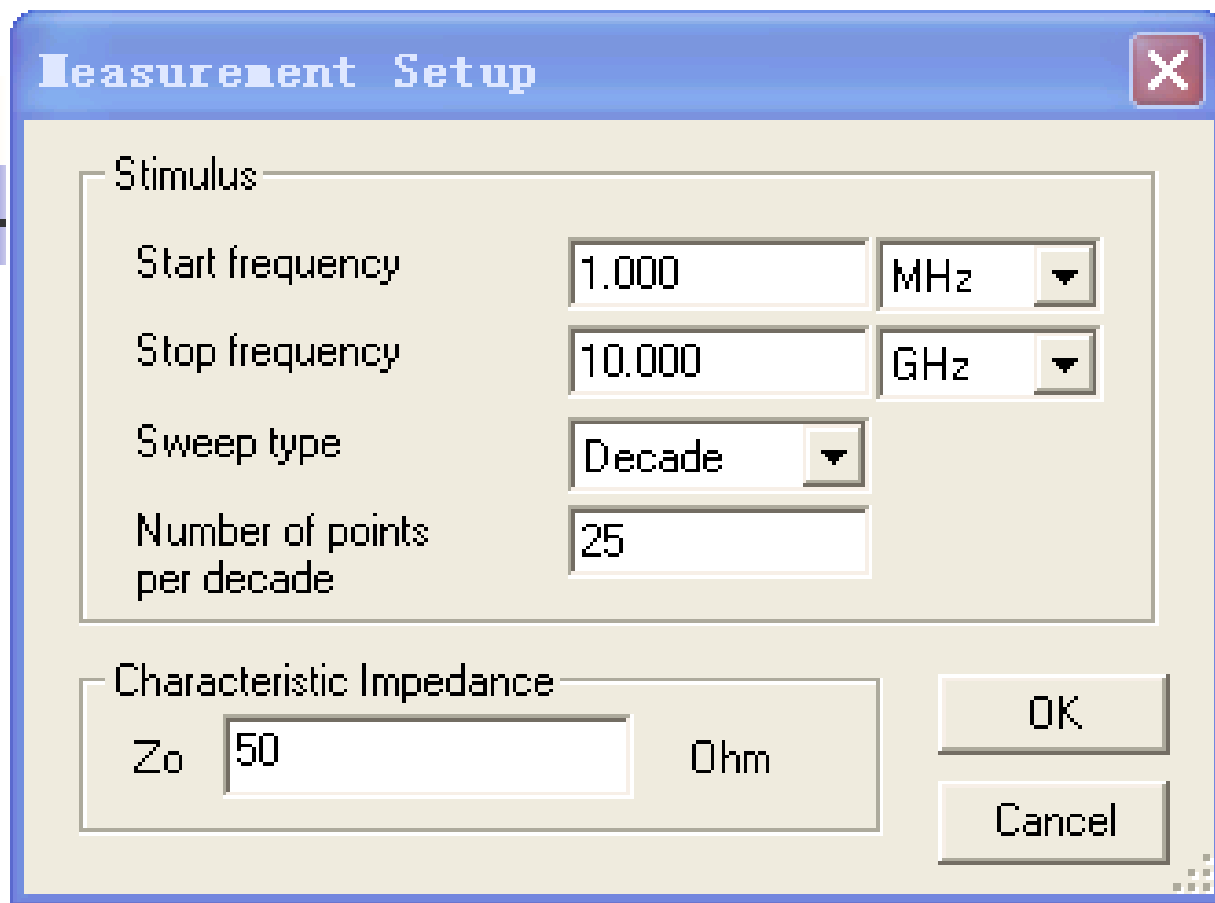


图1.5.14 Measurement参数设置

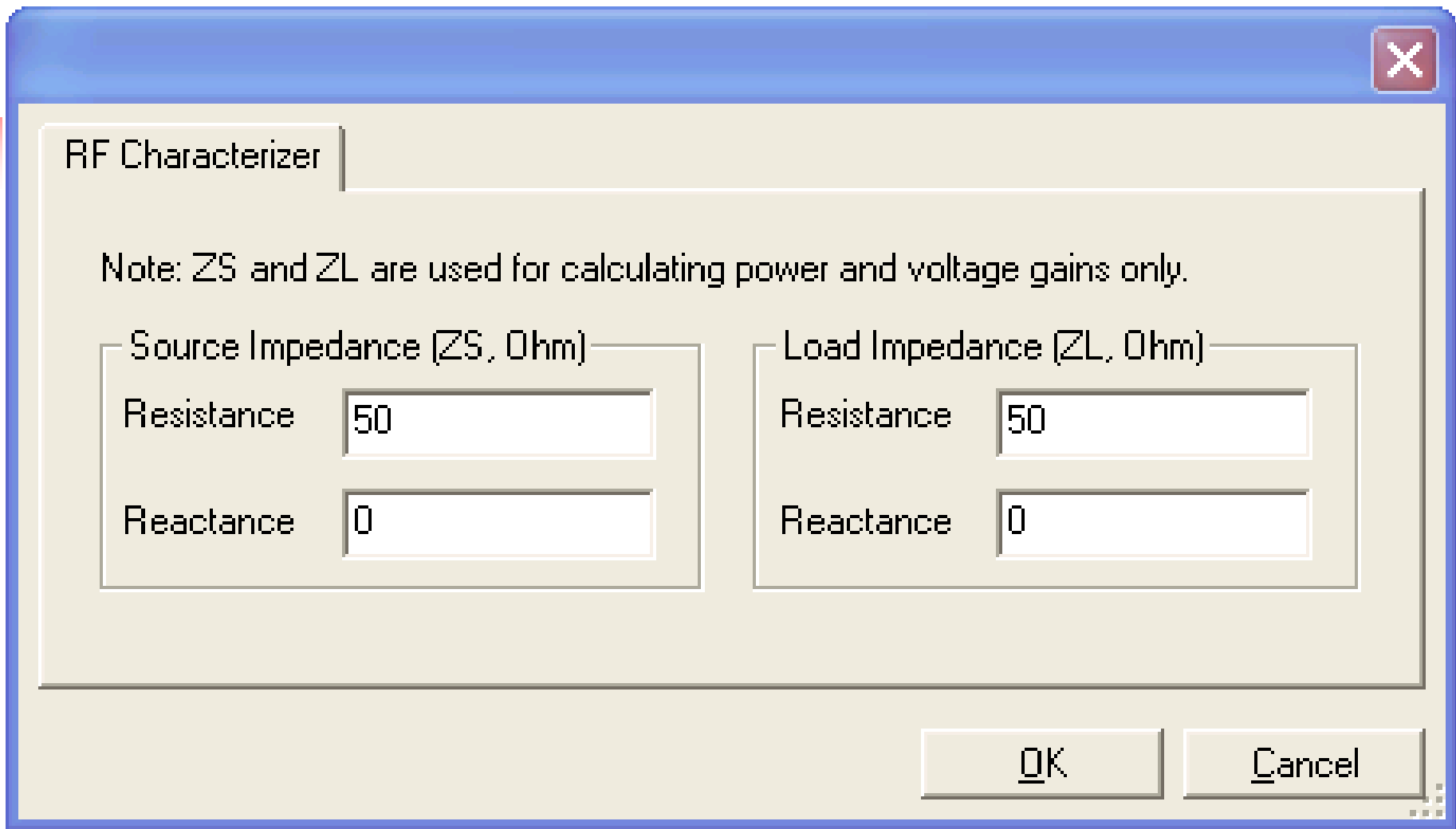


图1.5.15 RF Characterizer参数设置



---

- 1.5.13 IV（电流/电压）分析仪

- IV（电流/电压）分析仪用来分析二极管、PNP和NPN晶体管、PMOS和CMOS FET的IV特性。注意：IV分析仪只能够测量未连接到电路中的元器件。IV（电流/电压）分析仪的面板如图1.5.16所示。



# IV Analyzer-XIV1



Components:

Diode

Current Range(A)

Log

Lin

F

2

kA

I

-100

A

Voltage Range(V)

Log

Lin

F

50

V

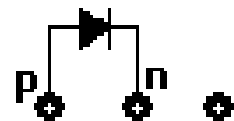
I

-50

V

Reverse

Sim\_Param





---

## ■ 1.5.14 测量探针和电流探针

- Multisim提供测量探针和电流探针。在电路仿真时，将测量探针和电流探针连接到电路中的测量点，测量探针即可测量出该点的电压和频率值。电流探针即可测量出该点的电流值。



## ■ 1.5.15 电压表

- 电压表存放在指示元器件库中，在使用中数量没有限制，如图1.5.17所示。点击旋转按钮可以改变其引出线的方向。电压表用来测量电路中两点间的电压。测量时，将电压表与被测电路的两点并联。电压表交、直流工作模式及其他参数设置，可双击电压表图标，弹出电压表参数对话框。电压表预置的内阻很高，在 $1\text{M}\Omega$ 以上。然而，在低电阻电路中使用极高内阻电压表，仿真时可能会产生错误。电压表特性对话框具有多种选项可供设置，包括Label（标识）、Models（模型）、Value（数值）、Fault（故障设置）、Display（显示）内容的设置，设置方法与元器件中标签、编号、数值、模型参数的设置方法相同。



## ■ 1.5.16 电流表

- 电流表存放在指示元器件库中，在使用中数量没有限制，如图1.5.18所示。点击旋转按钮可以改变其引出线的方向。电流表用来测量电路回路中的电流。测量时将它串联在被测电路回路中。双击电流表图标，弹出电流表参数对话框。电流表特性对话框具有多种选项可供设置，包括Label（标识）、Models（模型）、Value（数值）、Fault（故障设置）、Display（显示）内容的设置，设置方法与元器件中标签、编号、数值、模型参数的设置方法相同。



## 1.6 电路分析方法

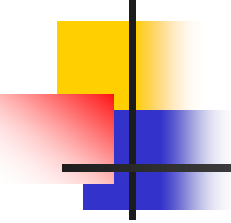
---



## 1.6.1 multsim的分析菜单

---

- multsim具有较强的分析功能，用鼠标点击Simulate（仿真）菜单中的Analysis（分析）菜单（Simulate→Analysis），可以弹出电路分析菜单。点击设计工具栏的也可以弹出该电路分析菜单。

- 
- 1.6.2直流工作点分析（DC Operating Point...）
  - 在进行直流工作点分析时，电路中的交流源将被置零，电容开路，电感短路。用鼠标点击Simulate→Analysis→DC Operating Point...，将弹出DC Operating Point Analysis对话框，进入直流工作点分析状态。如图1.6.1所示，DC Operating Point Analysis对话框有Output、Analysis Options和Summary 3个选项，分别介绍如下：

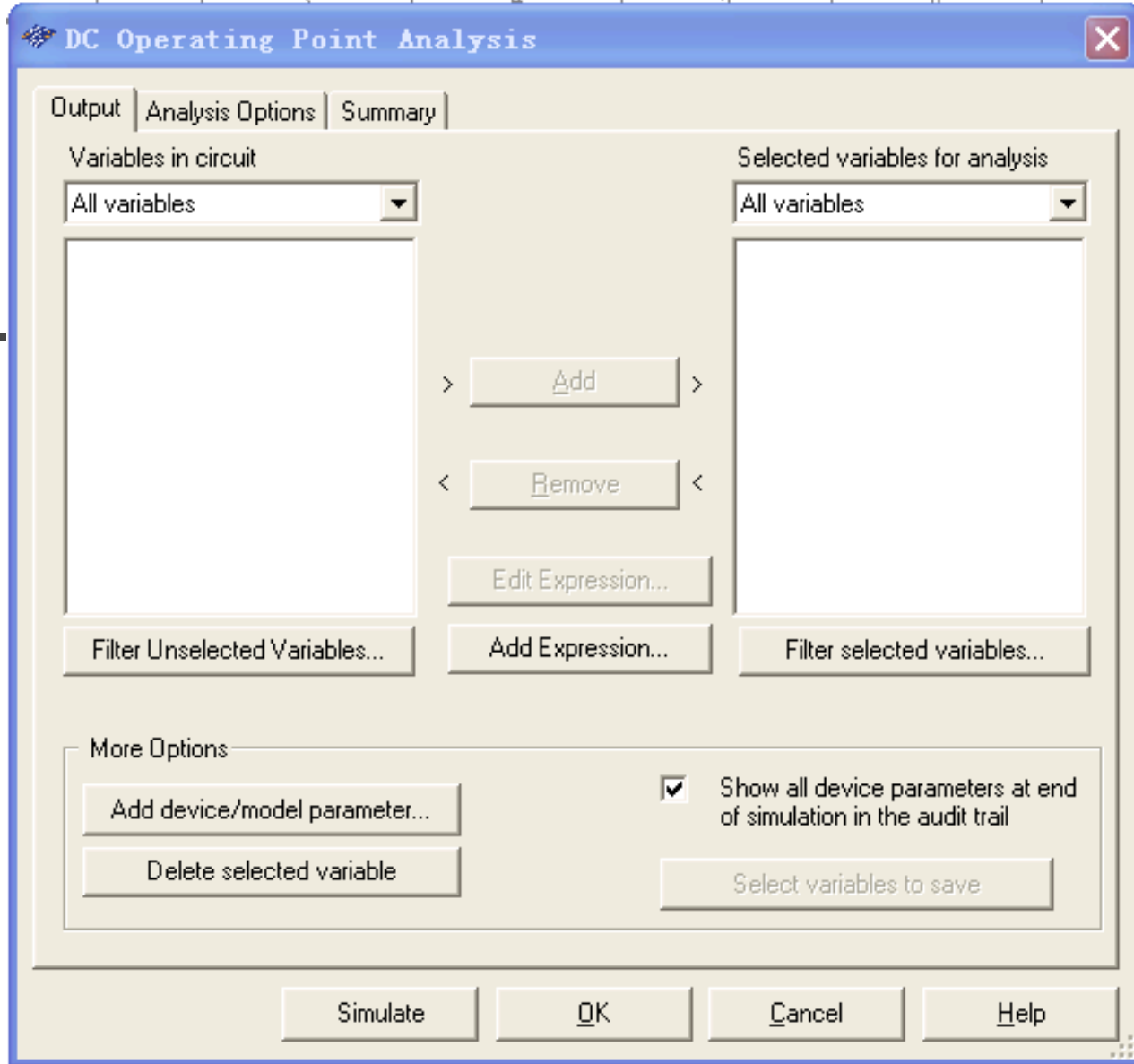


图1.6.1 DC Operating Point Analysis对话框





## ■ 1. Output对话框

- Output对话框用来选择需要分析的节点和变量。
- (1) Variables in Circuit栏
- 在Variables in Circuit栏中列出的是电路中可用于分析的节点和变量。点击 Variables in circuit窗口中的下箭头按钮，可以给出变量类型选择表。在变量类型选择表中：
  - 点击Voltage and current选择电压和电流变量。
  - 点击Voltage选择电压变量。
  - 点击 Current选择电流变量。
  - 点击Device / Model Parameters 选择元件 / 模型参数变量。
  - 点击All variables选择电路中的全部变量。

- 点击该栏下的 Filter Unselected Variables按钮，可以增加一些变量。点击此按钮，弹出Filter nodes对话框，如图1.6.2所示，该对话框有 3个选项，选择Display internal nodes选项 显示内部节点，选择Display submodules选项显示子模型的节点，选择Display open pins选项显示开路的引脚。

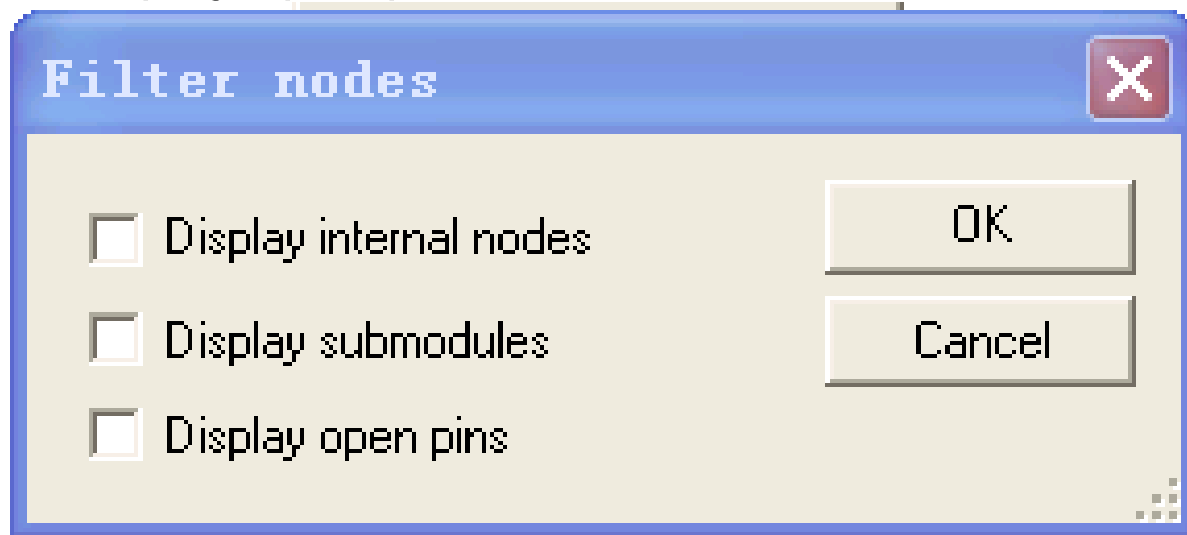


图1.6.2 Filter nodes对话框



## ■ (2) More Options区

- 在Output对话框中包含有More Options区，在More Options区中：
- 点击Add device / model parameter可以在Variables in circuit栏内增加某个元件 / 模型的参数，弹出Add device / model parameter对话框。
- 在Add device / model parameter对话框，可以在Parameter Type栏内指定所要新增参数的形式；然后分别在Device Type栏内指定元件模块的种类、在Name栏内指定元件名称（序号）、在Parameter栏内指定所要使用的参数。
- Delete selected variables按钮可以删除已通过Add device / model parameter按钮选择到 Variables in circuit栏中的变量。首先选中需要删除变量，然后点击该按钮即可删除该变量。



- (3) Selected variables for analysis栏

- 在Selected variables for analysis栏中列出的是确定需要分析的节点。默认状态下为空，用户需要从Variables in circuit栏中选取，方法是：首先选中左边的Variables in circuit栏中需要分析的一个或多个变量，再点击Plot during simulation按钮，则这些变量出现在Selected variables for analysis栏中。如果不想分析其中已选中的某一个变量，可先选中该变量，点击Remove按钮即将其移回Variables in circuit栏内。
- Filter Selected Variables筛选Filter Unselected Variables已经选中并且放在Selected variables for analysis栏的变量。



## ■ 2. Analysis Options对话框

- Analysis Options对话框如图1.6. 3所示。在Analysis Options对话框中包含有SPICE Options区和Other Options区。Analysis Options对话框用来设定分析参数，建议使用默认值。
- 如果选择Use Custom Settings，可以用来选择用户所设定的分析选项。可供选取设定的项目已出现在下面的栏中，其中大部分项目应该采用默认值，如果想要改变其中某一个分析选项参数，则在选取该项后，再选中下面的Customize选项。选中Customize选项将出现另一个窗口，可以在该窗口中输入新的参数。点击左下角的Restore to Recommended Settings按钮，即可恢复默认值。

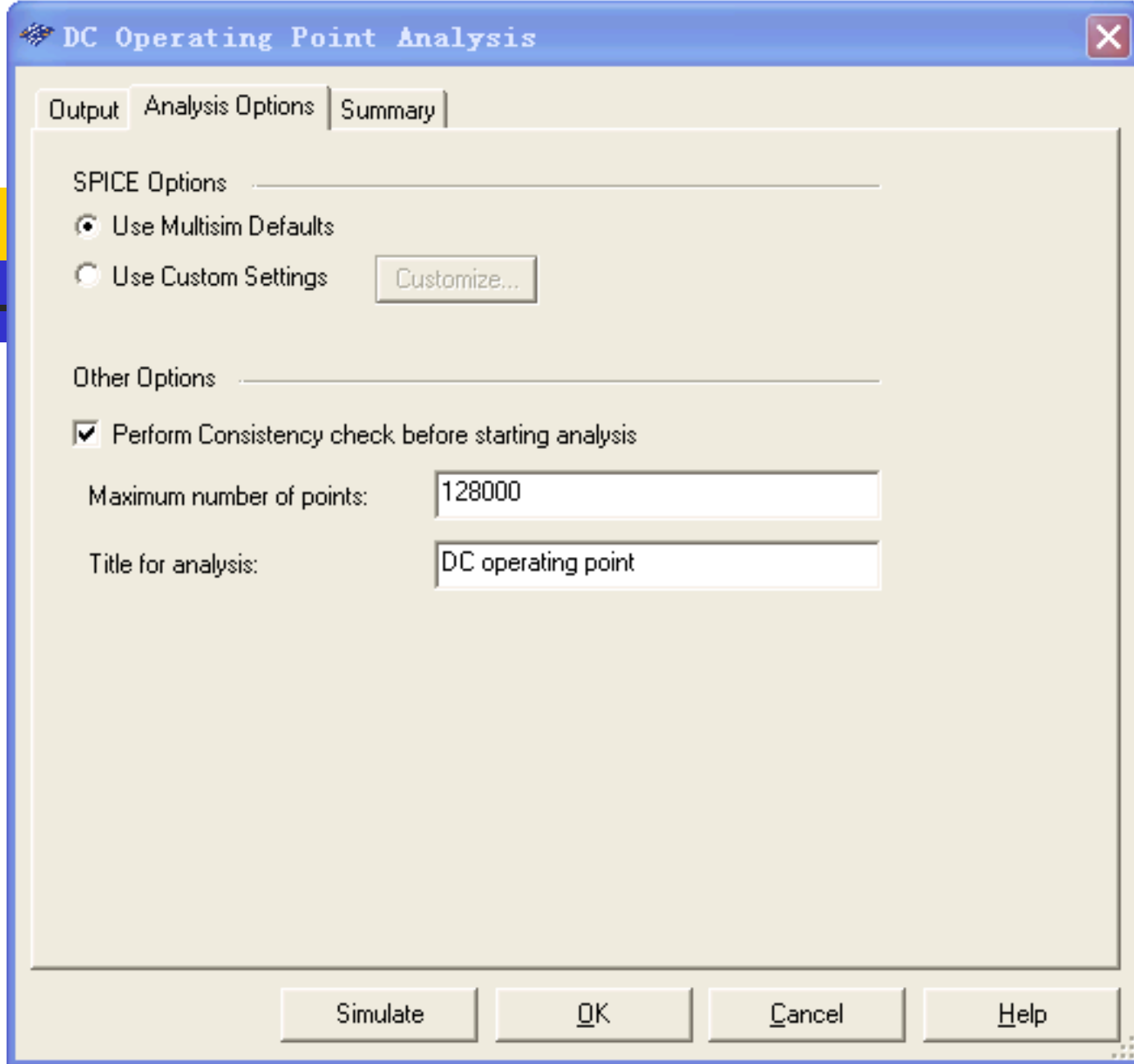


图1.6.3 Analysis Options对话框



---

- **3. Summary对话框**

- 在Summary对话框中，给出了所有设定的参数和选项，用户可以检查确认所要进行的分析设置是否正确。

- **4. 保存设置**

- 点击OK按钮可以保存所有的设置。

- **5. 放弃设置**

- 点击Cancel按钮即可放弃设置。

- **6. 进行仿真分析**

- 点击Simulate按钮即可进行仿真分析，得到仿真分析结果。



## 1.6.3 交流分析 (AC Analysis...)

- 交流分析用于分析电路的频率特性。需先选定被分析的电路节点，在分析时，电路中的直流源将自动置零，交流信号源、电容、电感等均处在交流模式，输入信号也设定为正弦波形式。若把函数信号发生器的其它信号作为输入激励信号，在进行交流频率分析时，会自动把它作为正弦信号输入。因此输出响应也是该电路交流频率的函数。
- 用鼠标点击Simulate→Analysis→AC Analysis...，将弹出AC Analysis对话框，进入交流分析状态，AC Analysis对话框如图1.6.4所示。AC Analysis对话框有Frequency Parameters、Output、Analysis Options和Summary 4个选项，其中Output、Analysis Options和Summary 3个选项与直流工作点分析的设置一样，下面仅介绍Frequency Parameters选项。



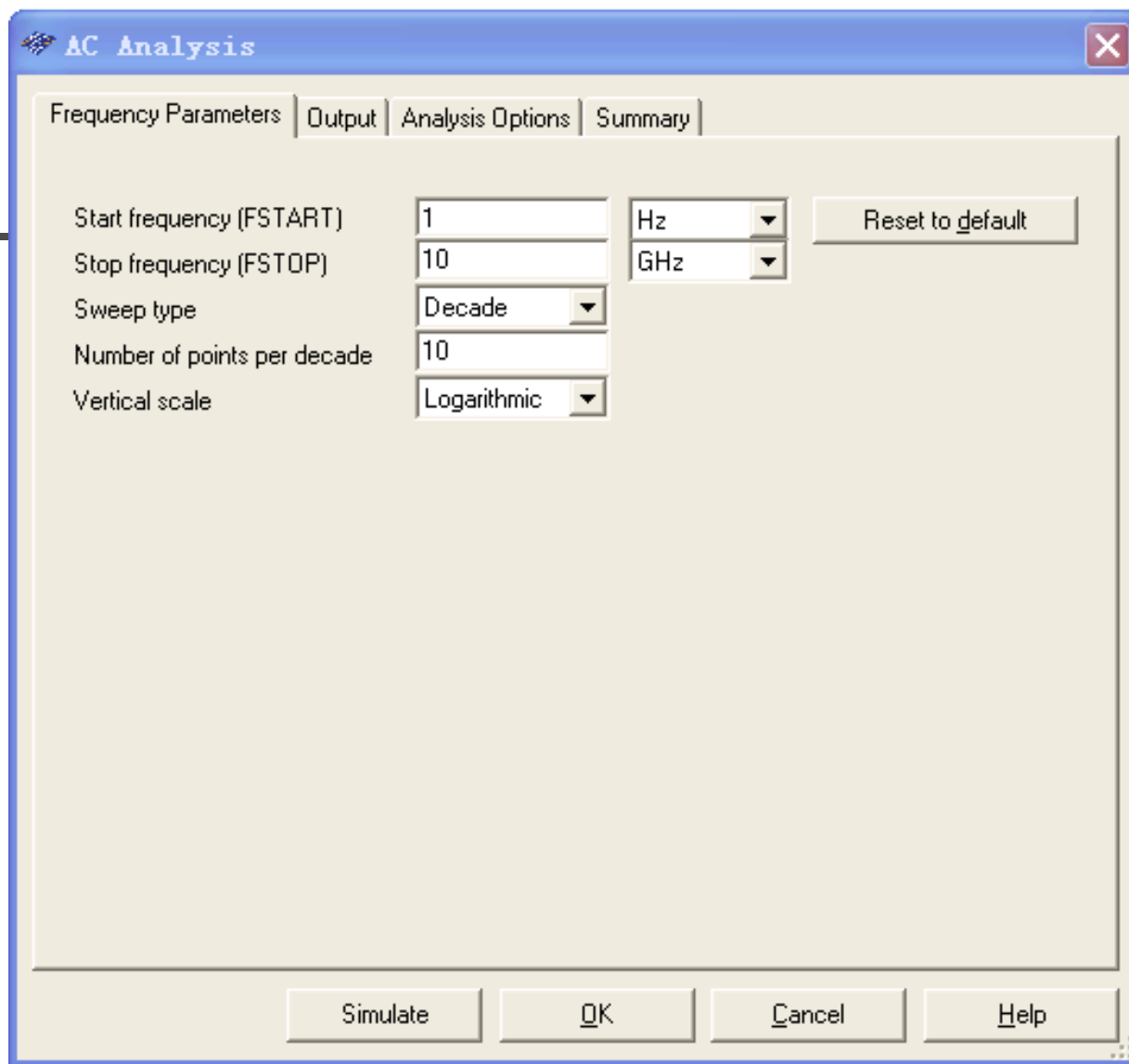


图1.6.4 AC Analysis对话框



在Frequency Parameters对话框中：

---

## ■ 1. 参数设置

- 在Frequency Parameters参数设置对话框中，可以确定分析的起始频率、终点频率、扫描形式、分析采样点数和纵向坐标（Vertical scale）等参数。其中：
- 在Start frequency窗口中，设置分析的起始频率，默认设置为1Hz。
- 在Stop frequency（FSTOP）窗口中，设置扫描终点频率，默认设置为10GHz。
- 在Sweep type窗口中，设置分析的扫描方式，包括 Decade（十倍程扫描）和 Octave（八倍程扫描）及Linear（线性扫描）。默认设置为十倍程扫描（Decade选项），以对数方式展现。
- 在Number of points per decade窗口中，设置每十倍频率的分析采样数，默认为10。
- 在Vertical Scale窗口中，选择纵坐标刻度形式：坐标刻度形式有 Decibel（分贝）、Octave（八倍）、Linear（线性）及 Logarithmic（对数）形式。默认设置为对数形式。



## ■ 2.默认值恢复

- 点击Reset to default按钮，即可恢复默认值。

## ■ 3. 仿真分析

- 按下“Simulate”（仿真）按钮，即可在显示图上获得被分析节点的频率特性波形。交流分析的结果，可以显示幅频特性和相频特性两个图。如果用波特图仪连至电路的输入端和被测节点，同样也可以获得交流频率特性。
- 在对模拟小信号电路进行交流频率分析的时候，数字器件将被视为高阻接地。



## 1.6.4 瞬态分析 (Transient Analysis...)

- 瞬态分析是指对所选定的电路节点的时域响应。即观察该节点在整个显示周期中每一时刻的电压波形。在进行瞬态分析时，直流电源保持常数，交流信号源随着时间而改变，电容和电感都是能量储存模式元件。
- 用鼠标点击Simulate→Analysis→Transient Analysis...，将弹出Transient Analysis对话框，进入瞬态分析状态，Transient Analysis对话框如图1.6.5所示。Transient Analysis对话框有Analysis Parameters、Output、Analysis Options和Summary 4个选项，其中Output、Analysis Options和Summary 3个选项与直流工作点分析的设置一样，下面仅介绍Analysis Parameters选项。

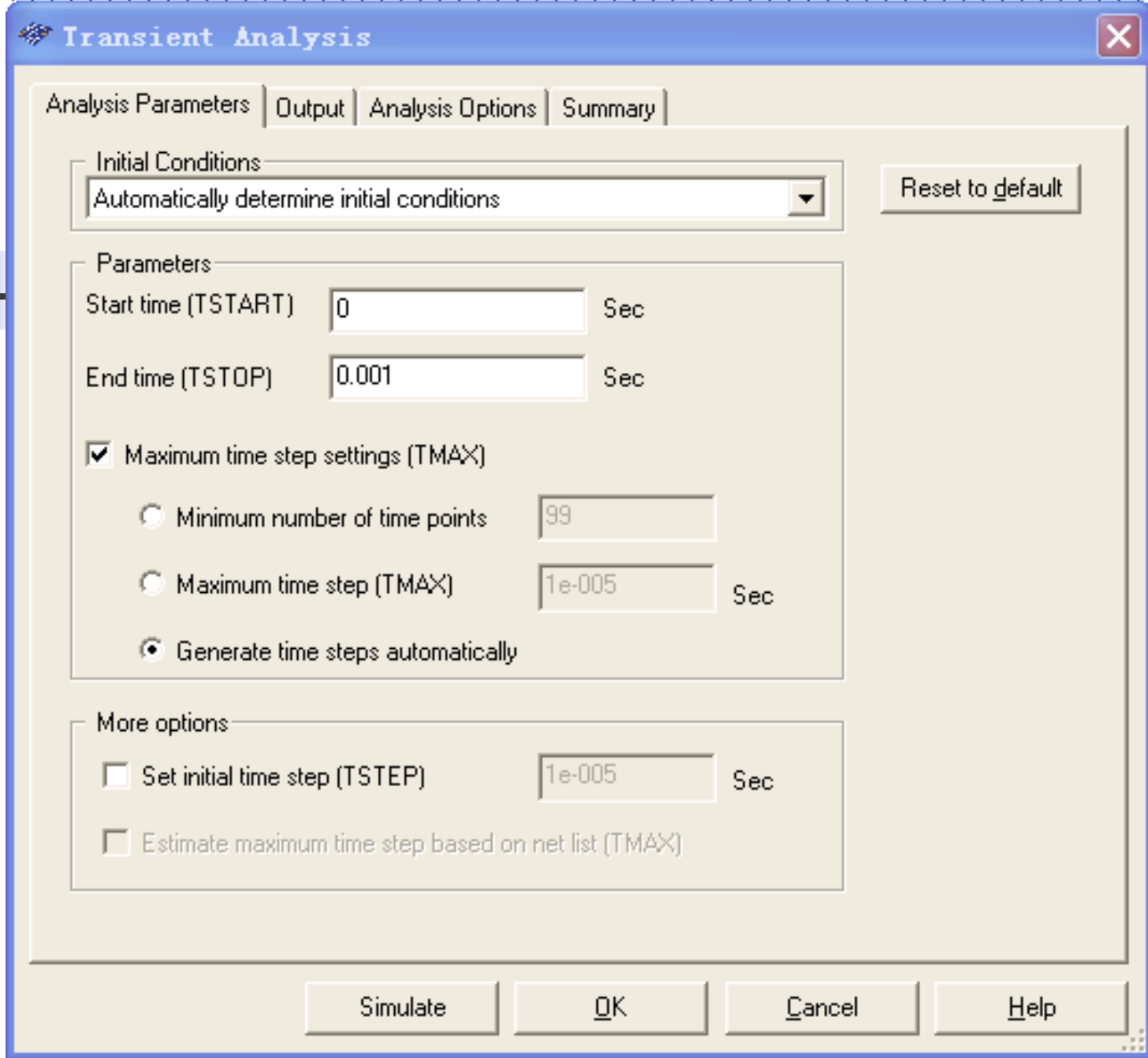
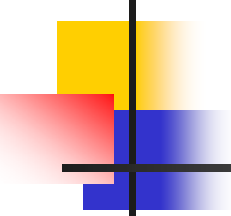


图1.6.5 Transient Analysis对话框

- 
- 
- 在 Analysis Parameters对话框中：
  - **1. Initial conditions区**
  - 在Initial conditions区中可以选择初始条件。
  - 点击Automatically determine Initial conditions，由程序自动设置初始值。
  - 点击Set to zero，初始值设置为0。
  - 点击User defined，由用户定义初始值。
  - 点击Calculate DC operating point，通过计算直流工作点得到的初始值。



## ■ 2. Parameters区

- 在Parameters区可以对时间间隔和步长等参数进行设置。
- Start time窗口：设置开始分析的时间。
- End time窗口：设置结束分析的时间。
- 点击Maximum time step settings，可以设置分析的最大时间步长。其中：
  - (1) 设置单位时间内的采样点数
- 点击Minimum number of time points，可以设置单位时间内的采样点数。
- (2) 设置最大的采样时间间距
- 点击Maximum time step (TMAX)，可以设置最大的采样时间间距。
- (3) 设置分析的时间步长
- 点击Generate time steps automatically，由程序自动决定分析的时间步长。



### ■ **3. More Options区**

■ 在More Options区中：

■ 选择Set initial time step选项，可以由用户自行确定起始时间步，步长大小输入在其右边栏内。如不选择，则由程序自动约定。

■ 选择Estimate maximum time step based on net list，根据网表来估算最大时间步长。

### ■ **4. Reset to default按钮**

■ 点击Reset to default按钮，即可恢复默认值。

### ■ **5. Simulate按钮**

■ 按下“Simulate”（仿真）按钮，即可在显示图上获得被分析节点的瞬态特性波形。





## 1.6.5 傅里叶分析 (Fourier Analysis...)

- 傅里叶分析方法用于分析一个时域信号的直流分量、基频分量和谐波分量。即把被测节点处的时域变化信号作离散傅里叶变换，求出它的频域变化规律。在进行傅里叶分析时，必须首先选择被分析的节点，一般将电路中的交流激励源的频率设定为基频，若在电路中有几个交流源时，可以将基频设定在这些频率的最小公因数上。譬如有一个10.5kHz和一个7kHz的交流激励源信号，则基频可取0.5kHz。
- 用鼠标点击Simulate→Analysis→Fourier Analysis...，将弹出Fourier Analysis对话框，进入傅里叶分析状态，Fourier Analysis对话框如图1.6.6所示。Fourier Analysis对话框有Analysis Parameters、Output、Analysis Options和Summary 4个选项，其中Output、Analysis Options和Summary 3个选项与直流工作点分析的设置一样，下面仅介绍Analysis Parameters选项。

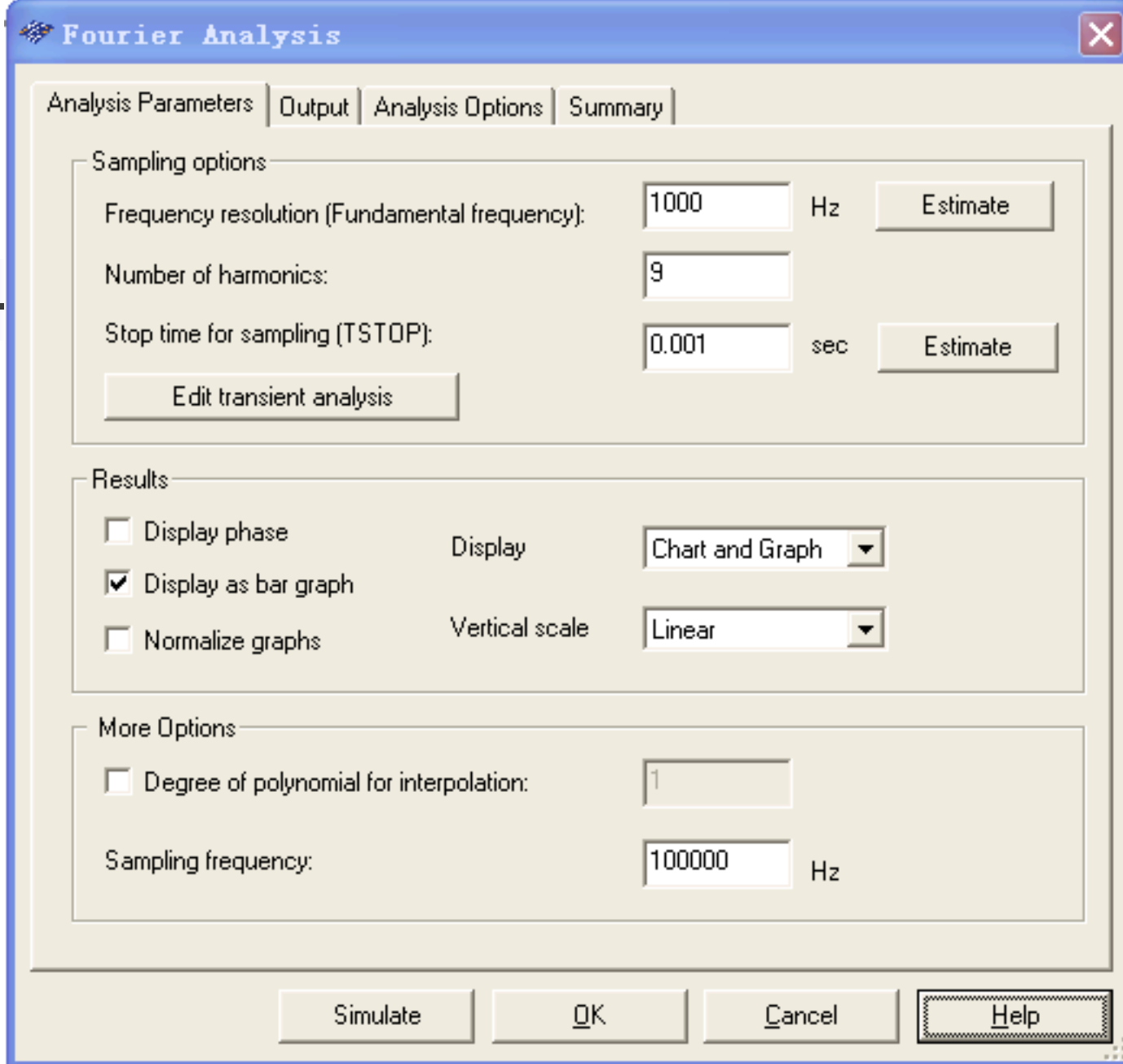
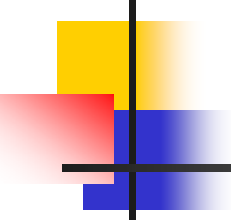


图1.6.6 Fourier Analysis对话框

- 
- 在Analysis Parameters对话框中：
  - **1. Sampling options区**
  - 在Sampling options区可以对傅里叶分析的基本参数进行设置。其中：
  - 在Frequency resolution (Fundamental frequency) 窗口中可以设置基频。如果电路之中有多个交流信号源，则取各信号源频率的最小公倍数。如果不知道如何设置时，可以点击Estimate按钮，由程序自动设置。
  - 在Number of窗口可以设置希望分析的谐波的次数。
  - Stopping time for sampling: 设置停止取样的时间。如果不知道如何设置时，也可以点击Estimate按钮，由程序自动设置。
  - 点击Edit transient Analysis按钮，弹出的对话框与瞬态分析类似，设置方法与瞬态分析相同。



## ■ 2. Results区

- 在Results区可以选择仿真结果的显示方式。其中：
- 选择Display phase可以显示幅频及相频特性。
- 选择Display as bar graph可以以线条显示出频谱图。
- 选择Normalize graphs: 可以显示归一化的（Normalize）频谱图
- 在Display窗口可以选择所要显示的项目，有 3个选项：Chart（图表）、Graph曲线）及 Chart and Graph（图表和曲线）。
- 在Vertical窗口可以选择频谱的纵坐标刻度，其中包括Decibel（分贝刻度）、Octave（八倍刻度）、Linear（线性刻度）及Logarithmic（对数刻度）。



### ■ 3. More Options区

- 点击More>>, 将增加一个More Options区（点击Less<<按钮可以消除More Options区）。在More Options区中:
- 选择Degree of polynomial for interpolation可以设置多项式的维数, 选中该选项后, 可在其右边栏中输入维数值。多项式的维数越高, 仿真运算的精度也越高。
- Sampling frequency窗口可以设置取样频率, 默认为100000Hz。如果不知道如何设置时, 可点击Stopping time for sampling区中的 Estimate按钮, 由程序设置。



---

## ■ 4. Simulate 按钮

- 按“Simulate”（仿真）按钮，即可在显示图上获得被分析节点的离散傅里叶变换的波形。傅里叶分析可以显示被分析节点的电压幅频特性也可以选择显示相频特性，显示的幅度可以是离散条形，也可以是连续曲线型。



## 1.6.6 噪声分析 (Noise Analysis...)

- 噪声分析用于检测电子线路输出信号的噪声功率幅度，用于计算、分析电阻或晶体管的噪声对电路的影响。在分析时，假定电路中各噪声源是互不相关的，因此它们的数值可以分开各自计算。总的噪声是各噪声在该节点的和（用有效值表示）。
- 用鼠标点击Simulate→Analysis→Noise Analysis...，将弹出Noise Analysis对话框，进入噪声分析状态，Noise Analysis对话框如图1.6.7所示。Noise Analysis对话框有Analysis Parameters、Frequency Parameters、Output、Analysis Options和Summary 5个选项，其中Output、Analysis Options和Summary 3个选项与直流工作点分析的设置一样，Frequency Parameters与交流分析类似，下面仅介绍Analysis Parameters选项。

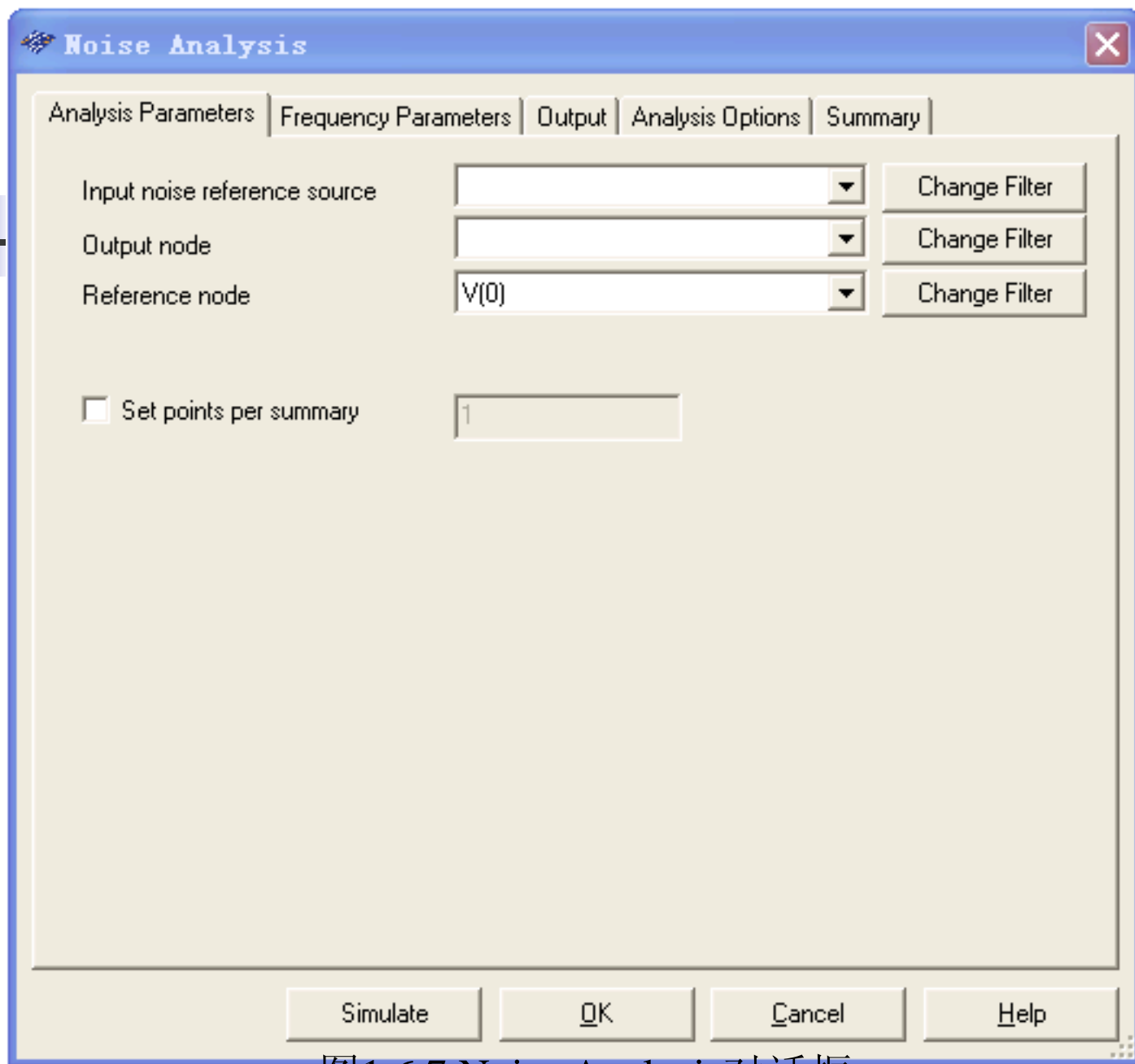
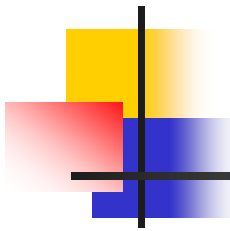


图1.6.7 Noise Analysis对话框



- 
- 在Analysis Parameters对话框中：
  - 在Input noise reference source窗口，选择作为噪声输入的交流电压源。默认设置为电路中的编号为第1的交流电压源。
  - 在Output node窗口，选择作测量输出噪声分析的节点。默认设置为电路中编号为第1的节点。
  - 在Reference node窗口，选择参考节点。默认设置为接地点。
  - 当选择Set point per summary选项时，输出显示为噪声分布为曲线形式。未选择时，输出显示为数据形式。
  - 在Analysis Parameters对话框中的右边的有3个Change Filter，分别对应于其左边的栏，其功能与Output对话框中的 Filter Unselected Variables按钮相同，详见直流工作点分析中的 Output对话框。
  - 按“Simulate”（仿真）键，即可在显示图上获得被分析节点的噪声分布曲线图。

## 1.6.7 噪声系数分析（Noise Figure Analysis...）

- 噪声系数分析主要用于研究元件模型中的噪声参数对电路的影响。在Multisim中噪声系数定义中： $N_o$ 是输出噪声功率， $N_s$ 是信号源电阻的热噪声， $G$ 是电路的AC增益（即二端口网络的输出信号与输入信号的比）。噪声系数的单位是dB，即 $10\log_{10}(F)$ 。
- 用鼠标点击Simulate→Analysis→Noise Figure Analysis...，将弹出Noise Figure Analysis对话框，进入噪声系数分析状态，Noise Figure Analysis对话框如图1.6.8所示。Noise Figure Analysis对话框有Analysis Parameters、Analysis Options和Summary 3个选项，其中Analysis Options和Summary 2个选项与直流工作点分析的设置一样，Analysis Parameters与噪声分析类似。只是多了Frequency（频率）和Temperature（温度）两项，默认值如图1.6.8所示。

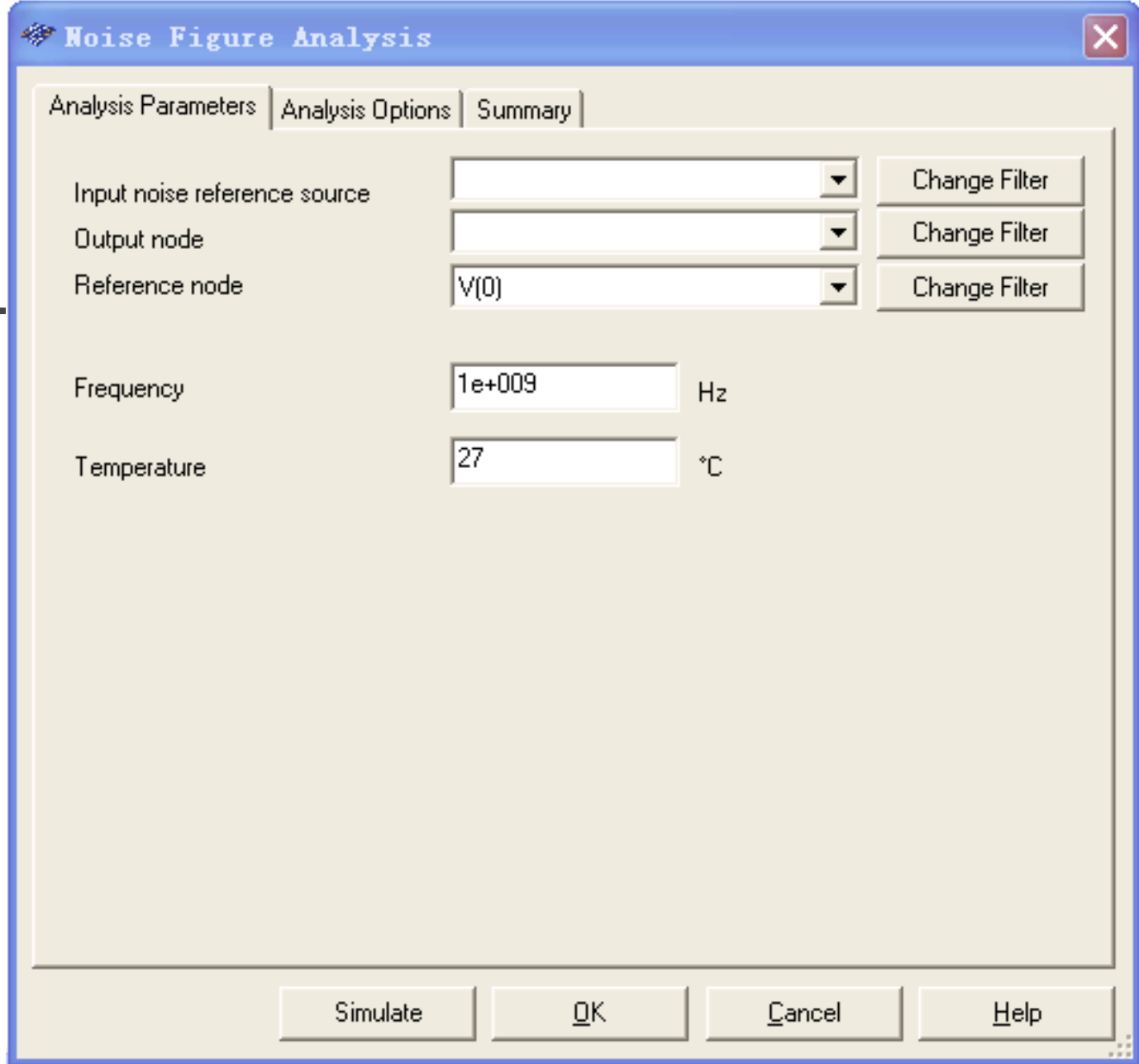
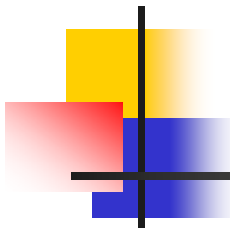


图1.6.8 Noise Figure Analysis对话框



## 1.6.8失真分析（Distortion Analysis...）

- 失真分析用于分析电子电路中的谐波失真和内部调制失真（互调失真），通常非线性失真会导致谐波失真，而相位偏移会导致互调失真。若电路中有一个交流信号源，该分析能确定电路中每一个节点的二次谐波和三次谐波的复值，若电路有两个交流信号源，该分析能确定电路变量在三个不同频率处的复值：两个频率之和的值、两个频率之差的值以及二倍频与另一个频率的差值。该分析方法是对电路进行小信号的失真分析，采用多维的“Volterra”分析法和多维“泰勒”（Taylor）级数来描述工作点处的非线性，级数要用到三次方项。这种分析方法尤其适合观察在瞬态分析中无法看到的、比较小的失真。

- 
- 用鼠标点击Simulate→Analysis→Distortion Analysis...，将弹出Distortion Analysis对话框，进入失真分析状态，Distortion Analysis对话框如图1.6.9所示。Distortion Analysis对话框有Analysis Parameters、Output、Analysis Options和Summary 4个选项，其中Output、Analysis Options和Summary 3个选项与直流工作点分析的设置一样，下面仅介绍Analysis Parameters选项。

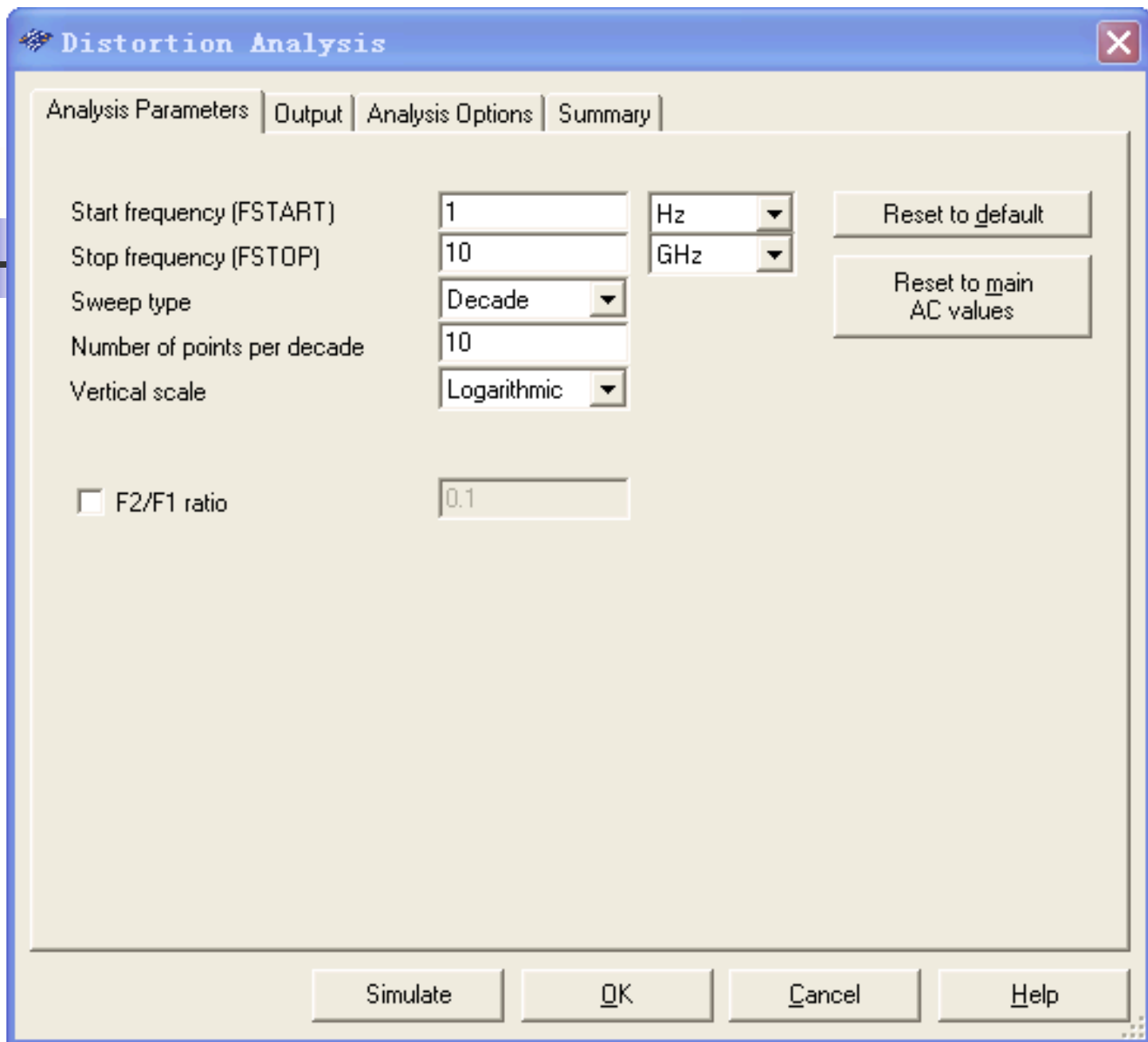
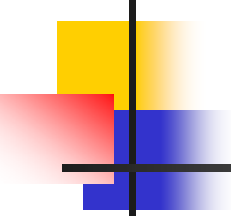
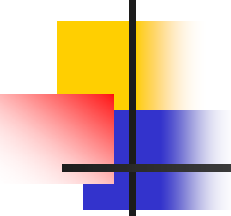


图1.6.9 Distortion Analysis对话框

- 
- 在Analysis Parameters对话框中：
  - 在Start frequency (FSTART) 窗口中，设置分析的起始频率，默认设置为1Hz。
  - 在Stop frequency (FSTOP) 窗口中，设置扫描终点频率，默认设置为10GHz。
  - 在Sweep type窗口中，设置分析的扫描方式，包括 Decade（十倍程扫描）和 Octave（八倍程扫描）及Linear（线性扫描）。默认设置为十倍程扫描（Decade选项），以对数方式展现。
  - 在Number of points per decade窗口中，设置每十倍频率的分析采样数，默认为10。
  - 在Vertical Scale窗口中，选择纵坐标刻度形式。坐标刻度形式有 Decibel（分贝）、Octave（八倍）、Linear（线性）及 Logarithmic（对数）形式。默认设置为对数形式。

- 
- 选择F2 / F1 ratio时，分析两个不同频率（F1和F2）的交流信号源，分析结果为（F1+F2），（F1-F2）及（2F1-F2）相对于频率F1的互调失真。在右边的窗口内输入F2 / F1的比值，该值必须在0到1之间。
  - 不选择F2 / F1 ratio时，分析结果为F1作用时产生的二次谐波、三次谐波失真。
  - Reset to main AC values按钮将所有设置恢复为与交流分析相同的设置值。
  - Reset to default按钮将本对话框的所有设置恢复为默认值。
  - 按“Simulate”（仿真）按钮，即可在显示图上获得被分析节点的失真曲线图。该分析方法主要被用于小信号模拟电路的失真分析，元器件噪声模型采用SPICE模型。





## 1.6.9 直流扫描分析（DC Sweep...）

---

- 直流扫描分析（DC Sweep...）是利用一个或两个直流电源分析电路中某一节点上的直流工作点的数值变化的情况。注意：如果电路中有数字器件，可将其当作一个大的接地电阻处理。
- 用鼠标点击Simulate→Analysis→DC Sweep...，将弹出DC Sweep Analysis对话框，进入直流扫描分析状态，DC Sweep Analysis对话框如图1.6.10所示。DC Sweep Analysis对话框有Analysis Parameters、Output、Analysis Options和Summary 4个选项，其中Output、Analysis Options和Summary 3个选项与直流工作点分析的设置一样，下面仅介绍Analysis Parameters选项。

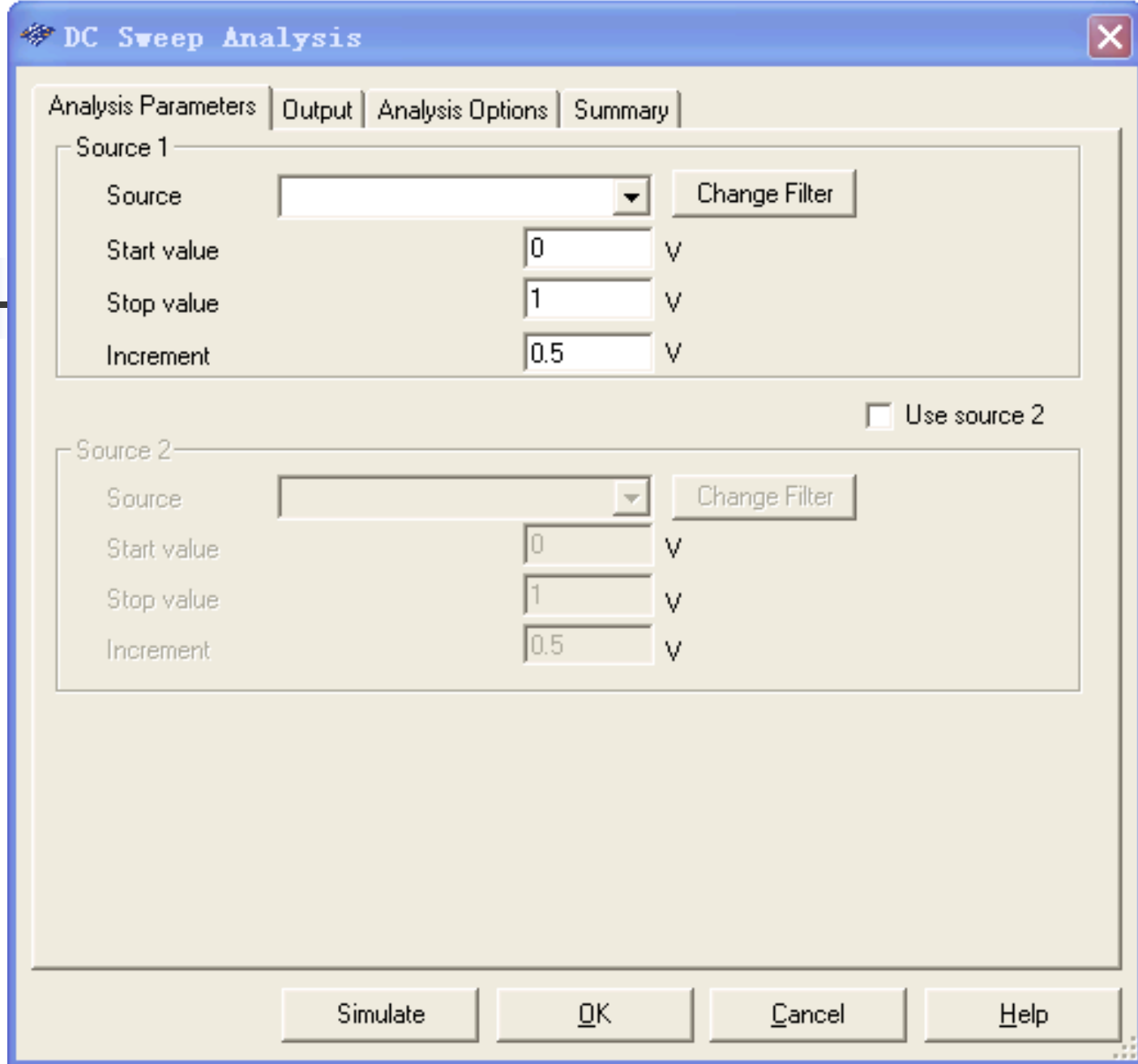
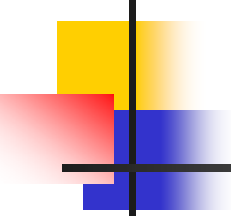


图1.6.10 DC Sweep Analysis对话框

- 
- 在Analysis Parameters对话框中有Source1与 Source 2两个区，区中的各选项相同。如果需要指定第 2个电源，则需要选择Use source 2选项。
  - 在Source窗口，可以选择所要扫描的直流电源。
  - 在Start value窗口设置开始扫描的数值。
  - 在Stop value窗口设置结束扫描的数值。
  - 在Increase窗口设置扫描的增量值。
  - 在Analysis Parameters对话框中的右边的有1个Change Filter，其功能与Output对话框中的 Filter Unselected Variables按钮相同，详见直流工作点分析中的 Output对话框。
  - 按下“Simulate”（仿真）按钮，可以得到直流扫描分析仿真结果。



## 1.6.10 灵敏度分析 (Sensitivity...)

- 灵敏度分析 (Sensitivity...) 是分析电路特性对电路中元器件参数的敏感程度。灵敏度分析包括直流灵敏度分析和交流灵敏度分析功能。直流灵敏度分析的仿真结果以数值的形式显示，交流灵敏度分析仿真的结果以曲线的形式显示。
- 用鼠标点击 Simulate → Analysis → Sensitivity...，将弹出 Sensitivity Analyses 对话框，进入灵敏度扫描分析状态，Sensitivity Analyses 对话框如图 1.6.11 所示。Sensitivity Analyses 对话框有 Analysis Parameters、Output、Analysis Options 和 Summary 4 个选项，其中 Output、Analysis Options 和 Summary 3 个选项与直流工作点分析的设置一样，下面仅介绍 Analysis Parameters 选项。

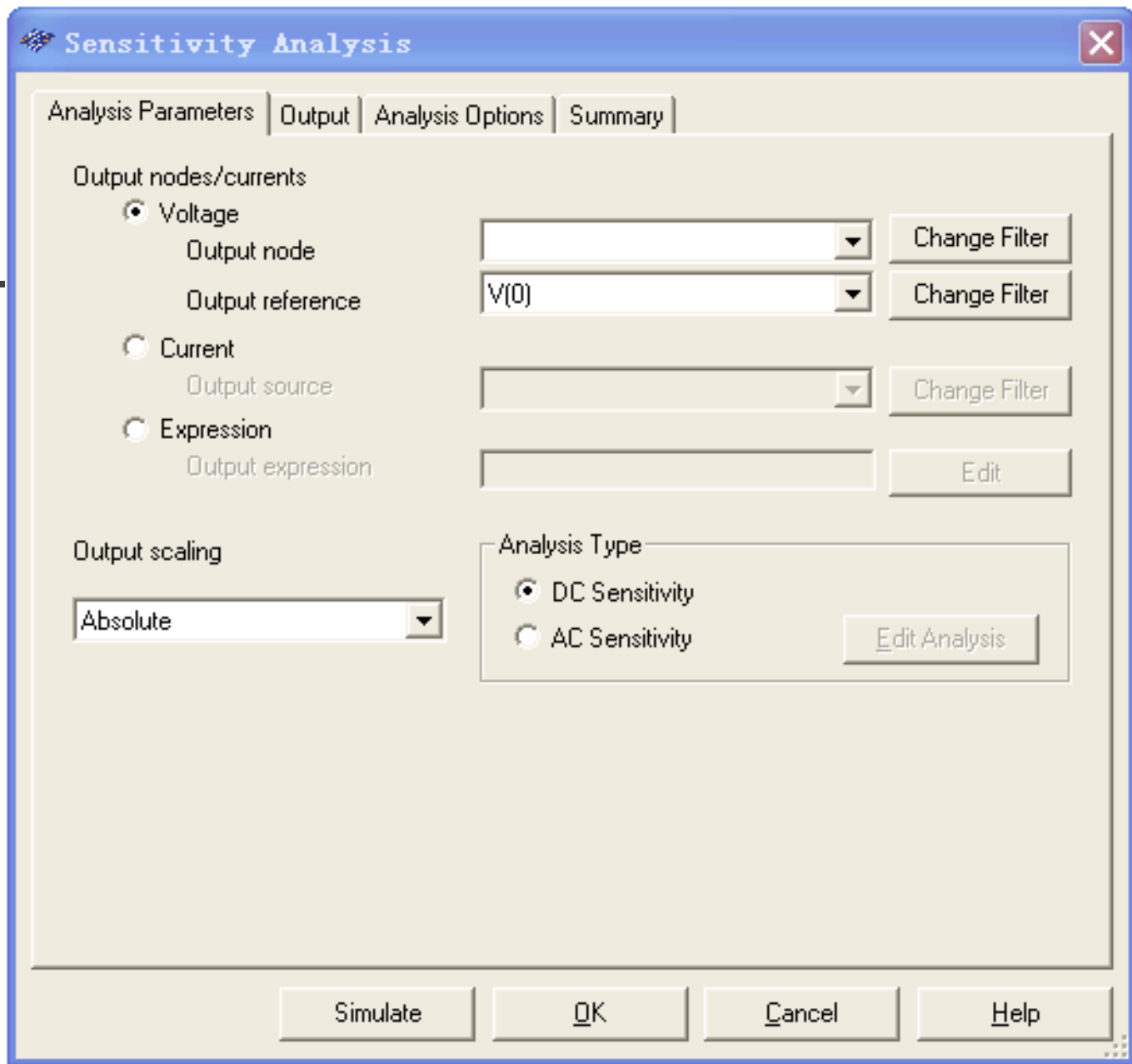
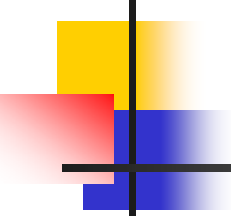


图1.6.11 Sensitivity Analyses对话框

- 
- 在Analysis Parameters对话框中有两区。
  - **1. Output nodes/currents区**
  - 在Output nodes/currents中：
    - ①选择Voltage可以进行电压灵敏度分析。选择该项后即可在其下部的output node窗口内选定要分析的输出节点；在 output reference窗口内选择输出端的参考节点。
    - ②选择Current可以选择进行电流灵敏度分析。电流灵敏度分析只能对信号源的电流进行分析，在选择该项后即可在其下部的 Output source窗口内选择要分析的信号源。
  - 在Output scaling窗口可以选择灵敏度输出格式，有Absolute（绝对灵敏度）和 Relative（相对灵敏度）两个选项。
  - 在Analysis Parameters对话框中的右边的有3个Change Filter，分别对应左边的三个栏，其功能与Output对话框中的 Filter Unselected Variables按钮相同，详见直流工作点分析中的 Output对话框。



---

## ■ **2. Analysis Type**区

- 在Analysis Type中：
- 选择DC Sensitivity进行直流灵敏度分析，分析结果将产生一个表格。
- 选择AC Sensitivity进行交流灵敏度分析，分析结果将产生一个分析图。选择交流灵敏度分析后，点击Edit Analysis，进入灵敏度交流分析对话框，参数设置与交流分析相同。

## ■ **3. Simulate**按钮

- 按下“Simulate”（仿真）按钮，可以得到灵敏度分析仿真结果。



## 1.6.11 参数扫描分析（Parameter Sweep...）

---

- 采用参数扫描方法分析电路，可以较快地获得某个元件的参数，在一定范围内变化时对电路的影响。相当于该元件每次取不同的值，进行多次仿真。对于数字器件，在进行参数扫描分析时将被视为高阻接地。
- 用鼠标点击Simulate→Analysis→Parameter Sweep ...，将弹出Parameter Sweep Analyses对话框，进入参数扫描分析状态，Parameter Sweep Analyses对话框如图1.6.12所示。Parameter Sweep Analyses对话框有Analysis Parameters、Output、Analysis Options和Summary 4个选项，其中Output、Analysis Options和Summary 3个选项与直流工作点分析的设置一样，下面仅介绍Analysis Parameters选项。



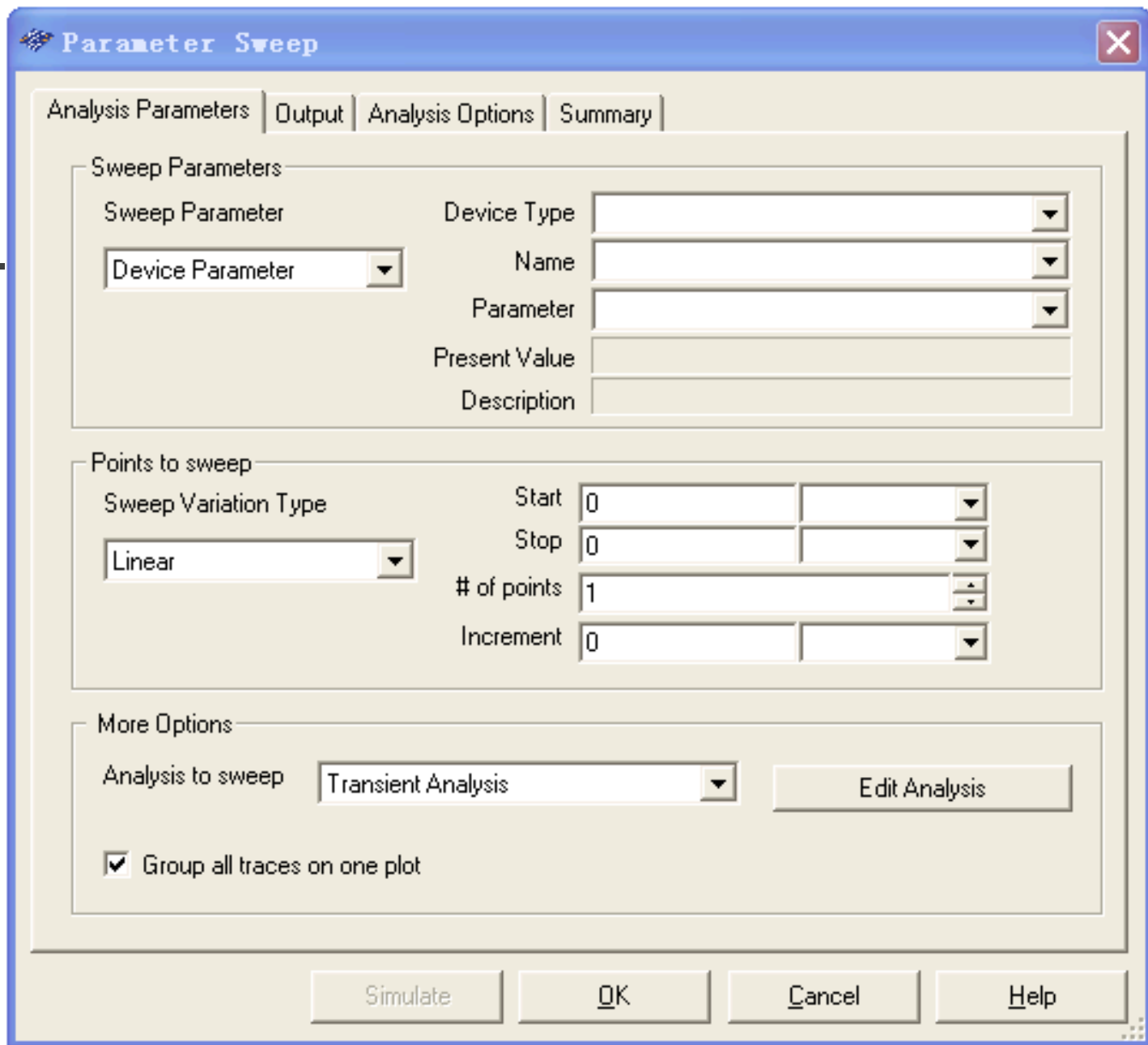
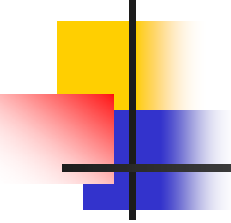


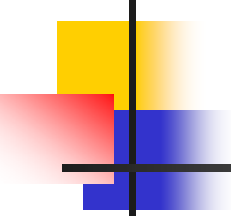
图1.6.12 Parameter Sweep Analyses对话框

- 
- 在Analysis Parameters对话框中有Sweep Parameter区、Point to sweep区和More Options区。
  - **1. Sweep Parameter区**
  - 在Sweep Parameter区可以选择扫描的元件及参数。在Sweep Parameter窗口可选择的扫描参数类型有：元件参数（Device Parameter）或模型参数（Model Parameter）。选择不同的扫描参数类型之后，还将有不同的项目供进一步选择。



## ■ (1) 选择元件参数类型

- Device Parameter窗口可以选择元件参数类型。选择Device Parameter后，该区的右边 5个栏出现与器件参数有关的一些信息，还需进一步选择。
- 在Device窗口选择所要扫描的元件种类，这里包括了电路图中所用到的元件种类，如：Capacitor（电容器类）、Diode（二极管类）、Resistor（电阻类）和Vsource（电压源类）等。
- 在Name窗口可以选择要扫描的元件序号，例如若 Device Type 栏内选择 Capacitor，则此处可选择电容。
- 在Parameter窗口可以选择要扫描元件的参数。当然，不同元件有不同的参数，其含义在 Description栏内说明。而 Present Value栏则为目的该参数的设置值。

- 
- 
- (2) 选择元件模型参数类型
  - Model Parameter可以选择元件模型参数类型。选择Model Parameter后，该区右边同样出现需要进一步选择的5个栏。这5个栏中提供的选项，不仅与电路有关，而且与选择Device Parameter对应的选项有关，需要注意区别。



## ■ 2. Point to sweep区

- 在Point to sweep区可以选择扫描方式。
- 在Sweep Variation Type窗口中可以选择扫描变量类型：有Decade（十倍刻度扫描）、Octave（八倍刻度扫描）、Linear（线性刻度扫描）及List（取列表值扫描）。
- 如果选择Decade、Octave或Linear选项，则该区的左边将出现Decade、Octave或Linear选项的参数栏4个窗口。其中：在Start可以输入开始扫描的值。在Stop可以输入结束扫描的值。在# of可以输入扫描的点数。在Increment可以输入扫描的增量。在这4个数值之间有：
$$\text{Increment} = \frac{(\text{Stop}) - (\text{Start})}{[\text{\# of}] - 1}$$
，故# of与Increment只须指定其中之一，另一个由程序自动设定。
- 如果选择List选项，则其右边将出现Value栏，此时可在Value栏中输入所取的值。如果要输入多个不同的值，则在数字之间以空格、逗点或分号隔开。



### ■ **3. More Options区**

- 在More Options区可以选择分析类型。
- 在Analysis to sweep窗口可以选择分析类型，有3种分析类型DC Operating Point（直流工作点分析）、AC Analysis（交流分析）和Transient Analysis（瞬态分析）可供选择。在选定分析类型后，可点击Edit Analysis按钮对该项分析进行进一步编辑设置，设置方法与1.6.4相同。
- 选择Group all traces on one plot选项，可以将所有分析的曲线放在同一个分析图中显示。
- **4. Simulate按钮**
- 点击Simulate按钮，可以得到参数扫描仿真结果。

## 1.6.12 温度扫描分析 (Temperature Sweep ...)

- 采用温度扫描分析，可以同时观察到在不同温度条件下的电路特性，相当于该元件每次取不同的温度值进行多次仿真。可以通过“温度扫描分析”对话框，选择被分析元件温度的起始值、终值和增量值。在进行其它分析的时候，电路的仿真温度默认值设定在27℃。
- 用鼠标点击Simulate→Analysis→Temperature Sweep ...，将弹出Temperature Sweep Analyses对话框，进入温度扫描分析状态，Temperature Sweep Analyses对话框如图1.6.13所示。Temperature Sweep Analyses对话框有Analysis Parameters、Output、Analysis Options和Summary 4个选项，其中Output、Analysis Options和Summary 3个选项与直流工作点分析的设置一样，下面仅介绍Analysis Parameters选项。

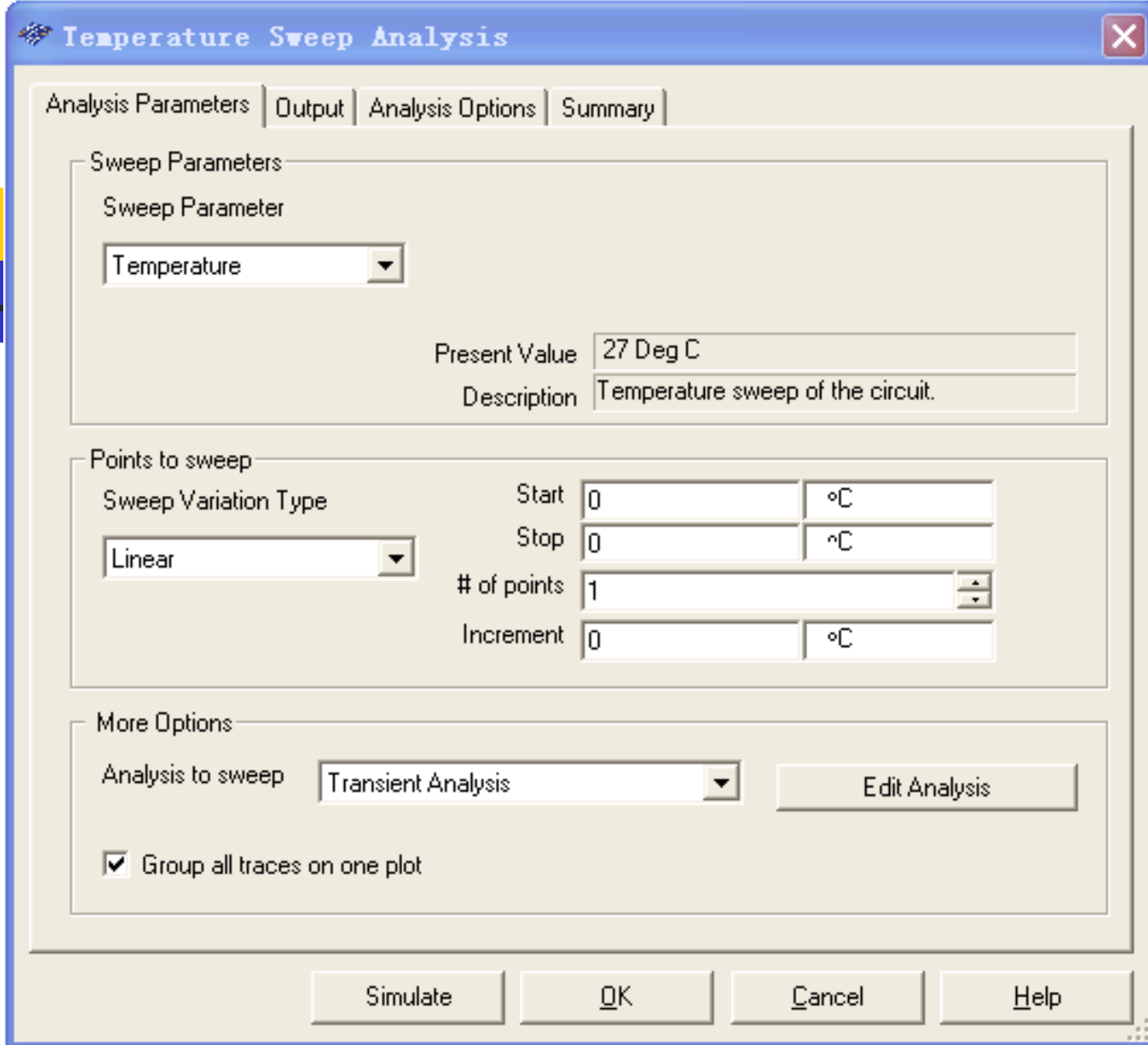
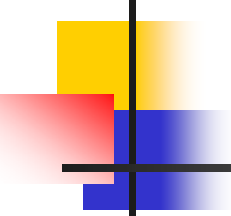


图1.6.13 Temperature Sweep Analyses对话框



- 
- 在Analysis Parameters对话框中：
  - **1. Sweep Parameter区**
  - 在Sweep Parameter区可以选择扫描的温度Temperature。Temperature默认值为27℃
  - **2. Point to sweep区**
  - 在Point to sweep区可以选择扫描方式。设置方法与1.6.11参数扫描分析中的Point to sweep区完全相同。
  - **3. More Options区**
  - 在More Options区可以选择分析类型。设置方法与1.6.11参数扫描分析中的More Options区完全相同。
  - 选择Group all traces on one plot选项，可以将所有分析的曲线放在同一个分析图中显示。
  - **4. Simulate按钮**
  - 点击Simulate按钮，即可得到扫描仿真分析结果。



## 1.6.13 零一极点分析 (Pole Zero)

- 零一极点分析方法是一种对电路的稳定性分析相当有用的工具。该分析方法可以用于交流小信号电路传递函数中零点和极点的分析。通常先进行直流工作点分析，对非线性器件求得线性化的小信号模型。在此基础上再分析传输函数的零、极点。零极点分析主要用于模拟小信号电路的分析，对数字器件将被视为高阻接地。
- 用鼠标点击Simulate→Analysis→Pole Zero，将弹出Pole—Zero Analyses对话框，进入零一极点分析状态，Pole—Zero Analyses对话框如图1.6.14所示。Pole—Zero Analyses对话框有Analysis Parameters、Analysis Options和Summary 3个选项，其中Analysis Options和Summary与直流工作点分析的设置一样，下面仅介绍Analysis Parameters选项。

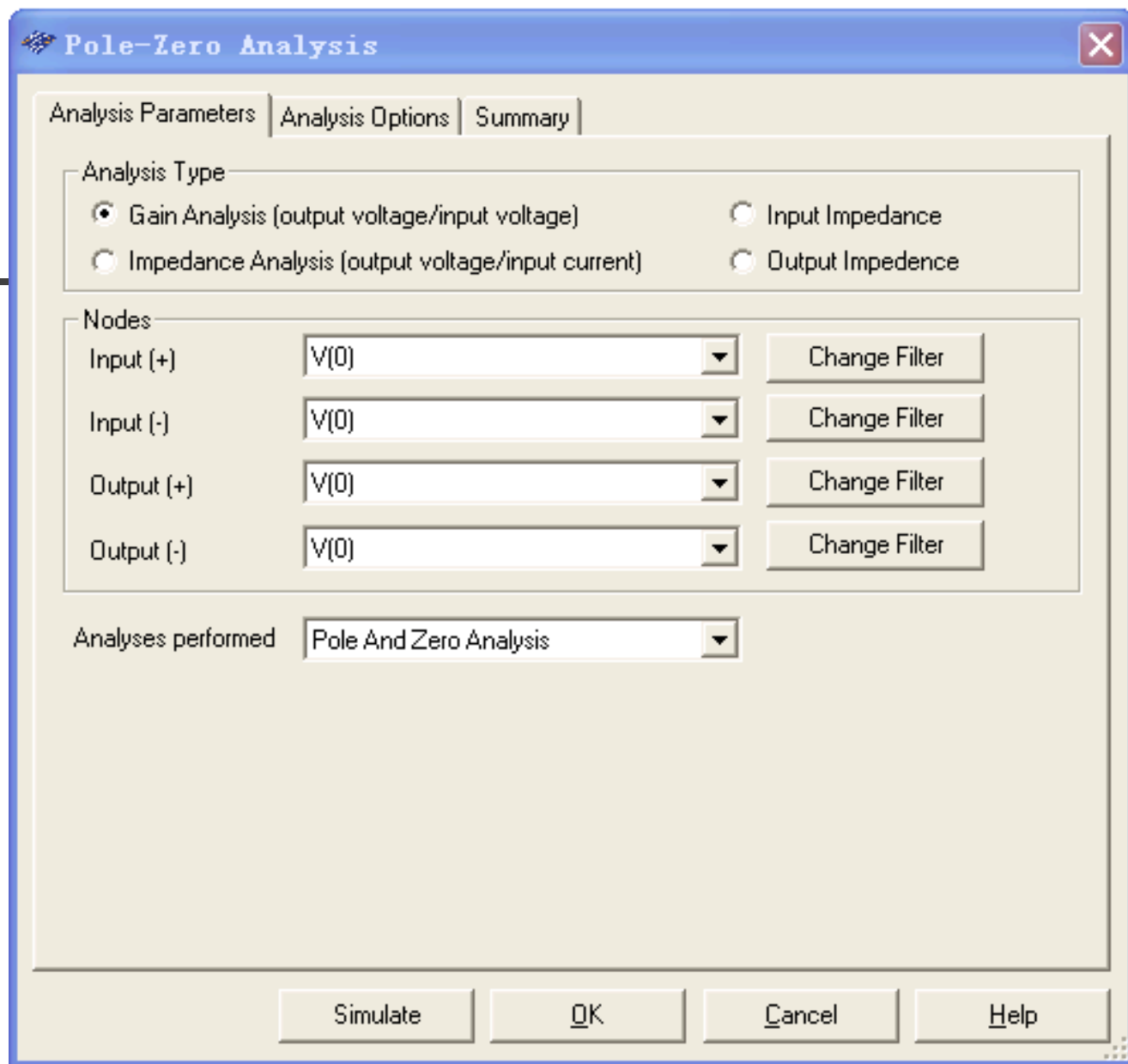


图1.6.14 Pole—Zero Analyses对话框



---

■ 在Pole—Zero Analysis Parameters对话框中：

■ **1. Analysis type区**

■ 在Analysis type区可以选择4种分析类型

■ (1) 电路增益分析

■ 选择Gain Analysis (output voltage / input voltage) 进行电路增益分析，也就是输出电压 / 输入电压。

■ (2) 电路互阻抗分析

■ 选择Impedance Analysis (output voltage / input current) 进行电路互阻抗分析，也就是输出电压 / 输入电流。

■ (3) 电路输入阻抗分析

■ 选择Input Impedance进行电路输入阻抗分析。

■ (4) 电路输出阻抗分析

■ 选择Output Impedance进行电路输出阻抗分析。



## ■ 2. Nodes区

- 在Nodes区可以选择 输入、输出的正负端（节）点。
- （1）选择正的输入端（节）点
- 在Input（+）窗口可以选择正的输入端（节）点。
- （2）选择负的输入端（节）点
- 在Input（-）窗口可以选择负的输入端（节）点（通常是接地端，即节点0）。
- （3）选择正的输出端（节）点
- 在Output（+）窗口可以选择正的输出端（节）点。
- （4）选择负的输出端（节）点
- 在Output（-）窗口可以选择负的输出端（节）点（通常是接地端，即节点0）。
- 在Nodes对话框中的右边的有4个Change Filter，分别对应左边的四个栏，其功能与Output对话框中的 Filter Unselected Variables按钮相同，详见直流工作点分析中的 Output对话框。



---

- **3. Analyses performed区**

- Analyses performed区可以选择所要分析的项目，有 Pole and Zero Analysis（同时求出极点与零点）、 Pole Analysis（仅求出极点）和Zero Analysis（仅求出零点）3个选项。

- **4. Simulate按钮**

- 点击Simulate按钮，即可得到极点与零点仿真分析结果。

## 1.6.14 传递函数分析 (Transfer Function...)

- 传递函数分析可以分析一个源与两个节点的输出电压或一个源与一个电流输出变量之间的直流小信号传递函数。也可以用于计算输入和输出阻抗。需先对模拟电路或非线性器件进行直流工作点分析，求得线性化的模型，然后再进行小信号分析。输出变量可以是电路中的节点电压，输入必须是独立源。
- 用鼠标点击Simulate→Analysis→Transfer Function...，将弹出Transfer Function Analyses对话框，进入传递函数分析状态，Transfer Function Analyses对话框如图1.6.15所示。Transfer Function Analyses对话框有Analysis Parameters、Analysis Options和Summary 3个选项，其中Analysis Options和Summary与直流工作点分析的设置一样，下面仅介绍Analysis Parameters选项。

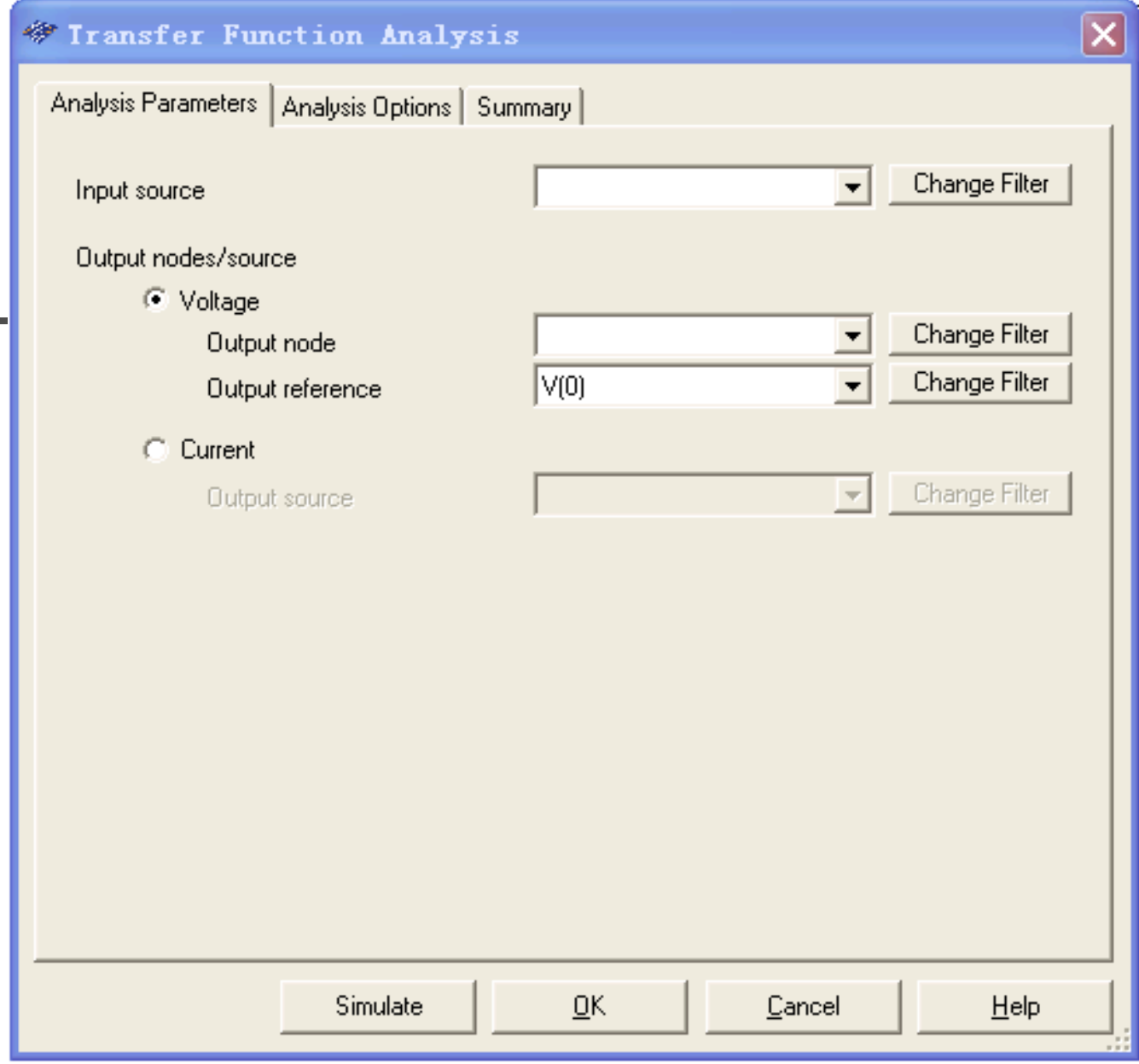
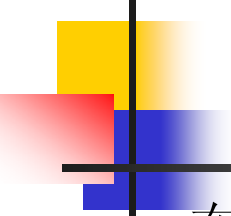


图1.6.15 Transfer Function Analyses对话框



- 
- 在Analysis Parameters对话框中：
  - 在Input source窗口可以选择所要分析的输入电源。
  - 在Output node/source区中可以选择Voltage或者Current作为输出电压的变量。
  - 选择Voltage，在Output node窗口中指定将作为输出的节点，而在 output reference窗口中指定参考节点，通常是接地端（即 0）。
  - 选择Current，在Output source栏中指定所要输出的电流。
  - 在Analysis Parameters对话框中的右边的有3个Change Filter，分别对应左边的三个栏，其功能与Output对话框中的 Filter Unselected Variables按钮相同，详见直流工作点分析中的 Output 对话框。
  - 点击Simulate按钮，即可得到传递函数分析结果。



## 1.6.15 最坏情况分析（Worst Case...）

- 最坏情况分析是一种统计分析方法。它可以使你观察到在元件参数变化时，电路特性变化的最坏可能性。适合于对模拟电路值流和小信号电路的分析。所谓最坏情况是指电路中的元件参数在其容差域边界点上取某种组合时所引起的电路性能的最大偏差，而最坏情况分析是在给定电路元件参数容差的情况下，估算出电路性能相对于标称值时的最大偏差。
- 用鼠标点击Simulate→Analysis→Worst Case...，将弹出Worst Case Analyses对话框，进入最坏情况分析状态，Worst Case Analyses对话框如图1.6.16所示。Worst Case Analyses对话框有Model tolerance List、Analysis Parameters、Analysis Options和Summary 4个选项，其中Analysis Options和Summary与直流工作点分析的设置一样，下面仅介绍Model tolerance List和Analysis Parameters选项。

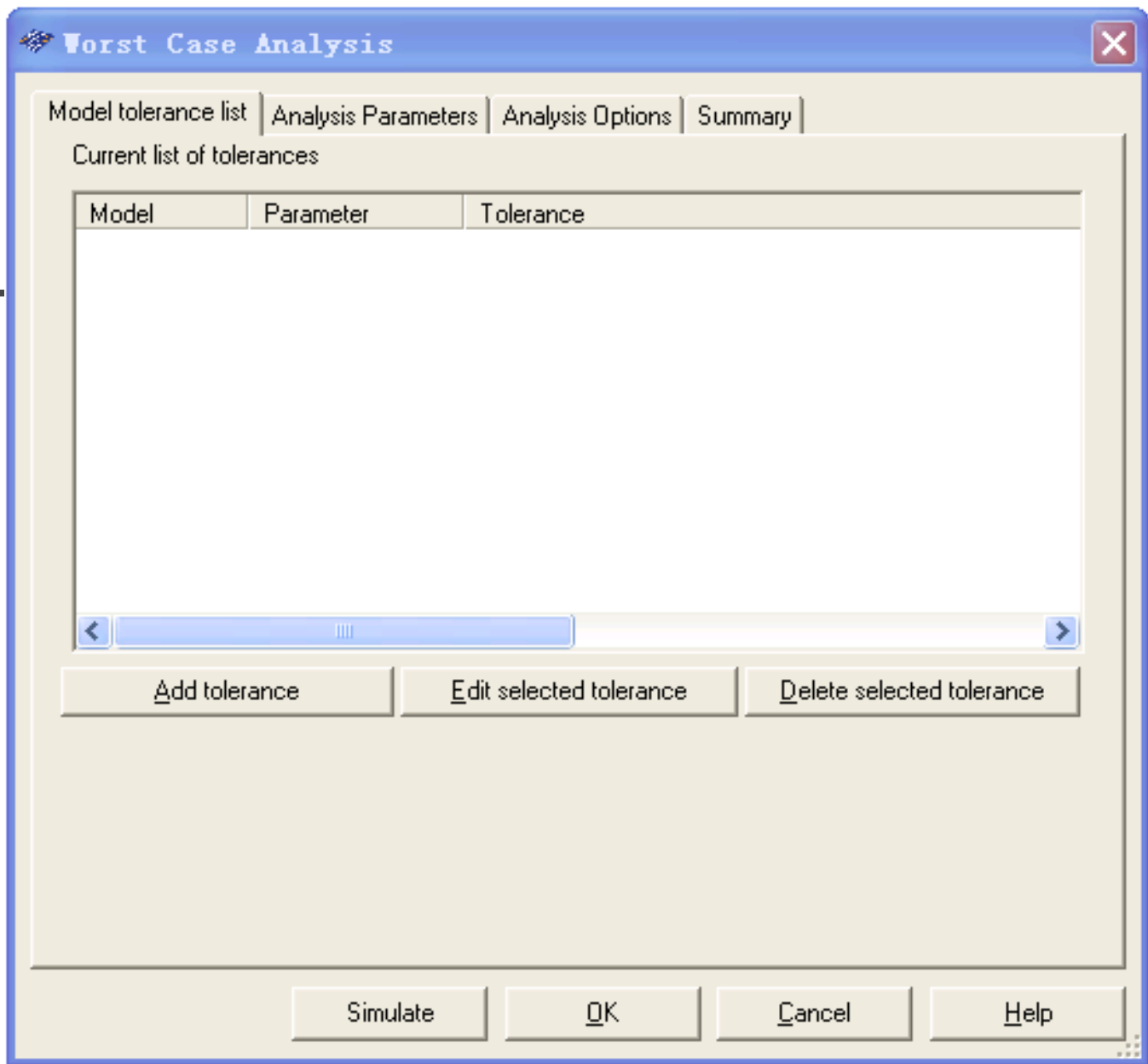


图1.6.16 Worst Case Analyses对话框



## ■ 1. Model tolerance list对话框

- 在Current list of tolerances区中列出目前的元件模型误差，可以点击下方的Add a new tolerance按钮，添加误差设置。
- （1）Parameter Type窗口
- 在Parameter Type窗口可以选择所要设定的元件模型参数（Model Parameter选项）或器件参数（Device Parameter选项），其下的Parameter区将随之改变，说明如下：



## ■ (2) Parameter区

- ①在Parameter区中的Device Type窗口可以选择需要设定参数的器件种类，其中包括电路图中所使用到的元件种类，例如 BJT（双极性晶体管类）、Capacitor（电容器类）、Diode（二极管类）、Resistor（电阻器类）及Vsource（电压源类）等。
- ② 在Name窗口可以选择所要设定参数的元件序号。
- ③ 在Parameter可以选择所要设定的参数，当然，不同元件有不同的参数。
- ④ Present Value显示当前该参数的设定值（不可更改）。
- ⑤ Description为Parameter所选参数的说明（不可更改）。



### ■ (3) Tolerance区

- 在Tolerance区可以确定容差的设置方式，其中包括4个窗口：
- ① 在Distribution窗口可以选择元件参数容差的分布类型，其中包括元件参数的误差分布状态呈现一种高斯曲线的形式的Guassian（高斯分布）和元件参数值在其误差范围内以相等概率出现的Uniform（均匀分布）两个选项。
- ② 在Lot number窗口可以选择容差随机数出现方式，其中选择Lot表示对各种元件参数都有相同的随机产生的容差率，较适用于集成电路；而选择Unique则表示每一个元件参数随机产生的容差率各不相同，较适用于离散元件电路。
- ③ 在Tolerance Type窗口可以选择容差的形式，其中包括Absolute（绝对值）和Percent（百分比）两个选项。
- ④ 在Tolerance value窗口可以根据所选的容差形式设置容差值。
- 当完成新增设定后，点击Accept按钮即可将新增项目添加到前一个对话框中。
- 点击Edit selected tolerance按钮，可以对所选取的某个误差项目进行重新编辑。
- 点击Delete tolerance entry按钮，可以删除所选取的误差项目。



## ■ 2. Analysis Parameters对话框

- Worst Case Analyses的Analysis Parameters对话框如图1.6.17所示。在Analysis Parameters对话框中：
- 在Analysis窗口中，可以选择所要进行的分析，有 AC analysis（交流分析）及 DC Operating point（直流工作点分析）两个选项。
- 在Output variable窗口中，可以选择所要分析的输出节点。
- 在Collating Function窗口中，可以选择分析方式。其中：MAX最大值分析，仅在 DC operating point选项时选用。MIN 最小值分析，仅在 DC operating point选项时选用。RISE EDGE上升沿分析，其右边的Threshold窗口用来输入其门限值。FALL EDGE下降沿分析，其右边的Threshold窗口用来输入其门限值。
- 在Direction窗口中，可以选择容差变化方向，有Default、Low及High等3个选项。
- 在Output Control窗口中，选择Group all traces on one plot项将所有仿真分析结果和记录在一个图形中显示。若不选此项，则将标称值仿真、最坏情况仿真和 Run Log Descriptions分别输出显示。

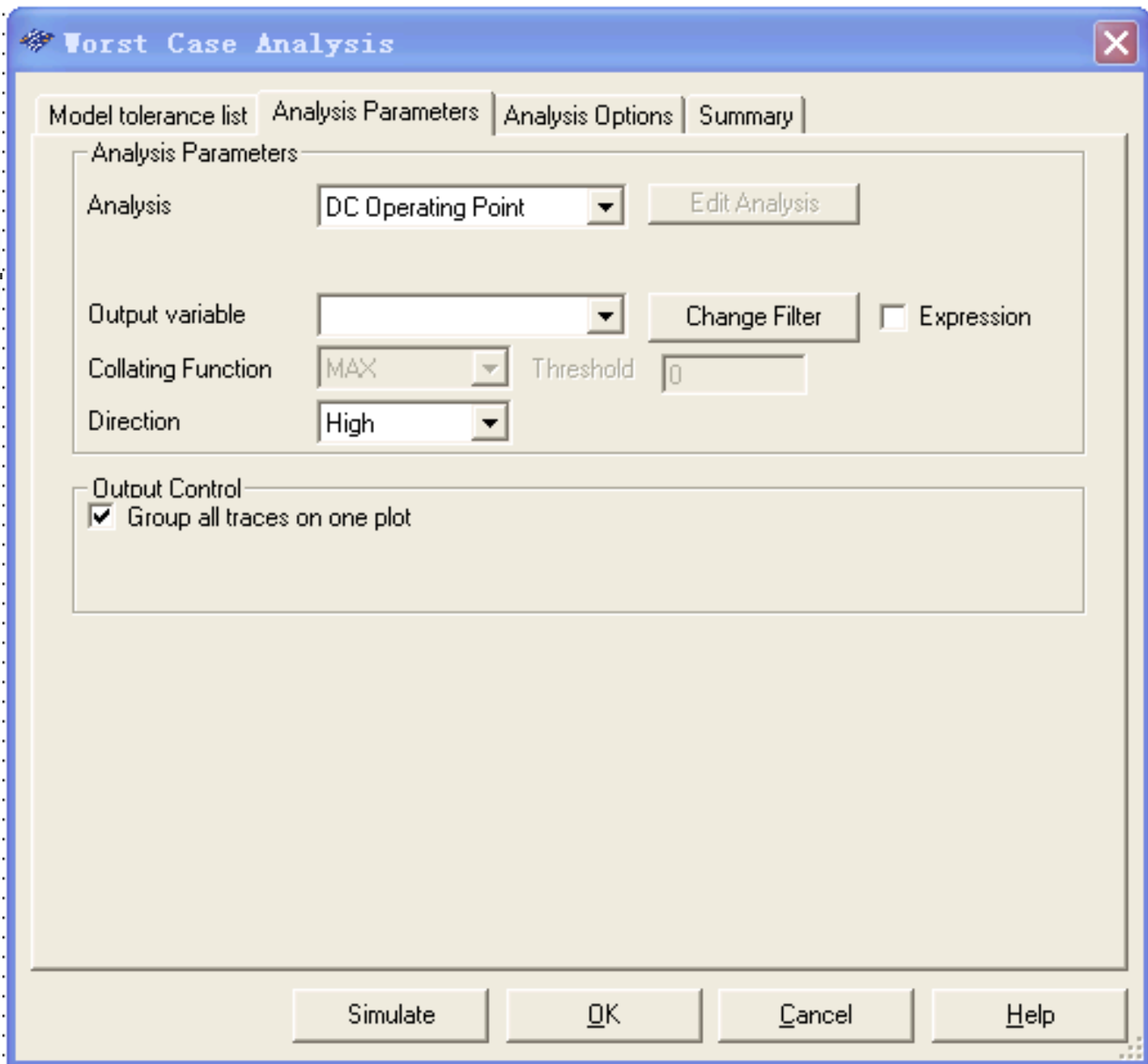


图1.6.17 Worst Case Analyses的Analysis Parameters对话框





## 1.6.16 蒙特卡罗分析 (Monte Carlo...)

- 蒙特卡罗是采用统计分析方法来观察给定电路中的元件参数，按选定的误差分布类型在一定的范围内变化时，对电路特性的影响。用这些分析的结果，可以预测电路在批量生产时的成品率和生产成本。
- 用鼠标点击Simulate→Analysis→Monte Carlo...，将弹出Monte Carlo Analyses对话框，进入蒙特卡罗分析状态，Monte Carlo Analyses对话框如图1.6.18所示。Monte Carlo Analyses对话框有Model tolerance List、Analysis Parameters、Analysis Options和Summary 4个选项，其中Summary和Analysis Options与直流工作点分析的设置一样，Monte Carlo的Model tolerance List对话框与1.6.15最坏情况分析中的Model tolerance List对话框完全相同。下面仅介绍Analysis Parameters选项。

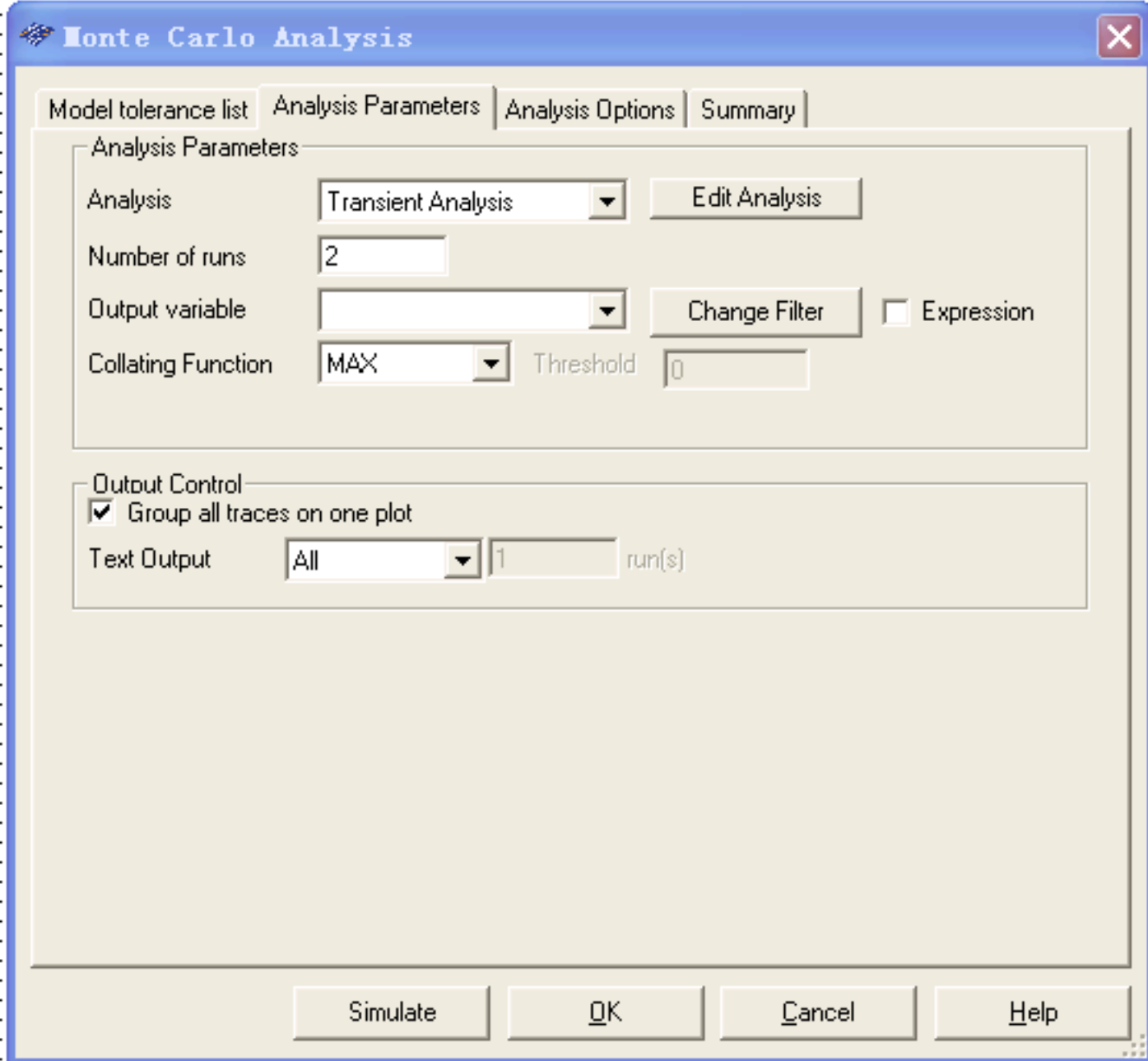
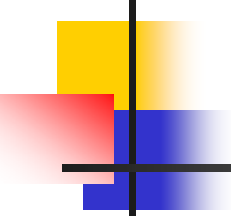


图1.6.18 Monte Carlo Analyses的Analysis Parameters对话框

- 
- 在Monte CarloAnalyses的Analysis Parameters对话框中：
  - 在Analysis窗口中，可以选择所要进行的分析，有Transient analysis（瞬态分析）、AC analysis（交流分析）及DC Operating point（直流工作点分析）3个选项。
  - 在Number of runs窗口中设定执行次数，必须 $\geq 2$ 。
  - 在Output variable窗口中，可以选择所要分析的输出节点。
  - 在Collating Function窗口中，可以选择分析方式。其中：MAX最大值分析，仅在DC operating point选项时选用。MIN 最小值分析，仅在DC operating point选项时选用。RISE EDGE上升沿分析，其右边的Threshold窗口用来输入其门限值。FALL EDGE下降沿分析，其右边的Threshold窗口用来输入其门限值。
  - 在Output Control窗口中，选择Group all traces on one plot项将所有仿真分析结果和记录在一个图形中显示。若不选此项，则将标称值仿真、最坏情况仿真和Run Log Descriptions分别输出显示。
  - 在Text Output窗口可以选择文字输出的方式。



## 1.6.17 导线宽度分析 (Trace Width...)

- 导线宽度分析主要用于计算电路中电流流过时所需要的最小导线宽度。
- 用鼠标点击Simulate→Analysis→Trace Width...，将弹出Trace Width Analyses对话框，进入导线宽度分析状态，Trace Width Analysis对话框如图1.6.19所示。Trace Width Analysis对话框有Trace Width Analysis、Analysis Parameters、Analysis Options和Summary 4个选项，其中Analysis Parameters、Analysis Options和Summary与直流工作点分析的设置一样。下面仅介绍Trace Width Analysis选项。
- 在Trace Width Analysis选项中，Maximum temperature above ambient用来设置环境温度，Weight of plating用来设置镀层，默认值如图1.6.20所示。
- Set node trace widths using the results from this analysis用来设置是否将分析结果用于建立导线宽度。

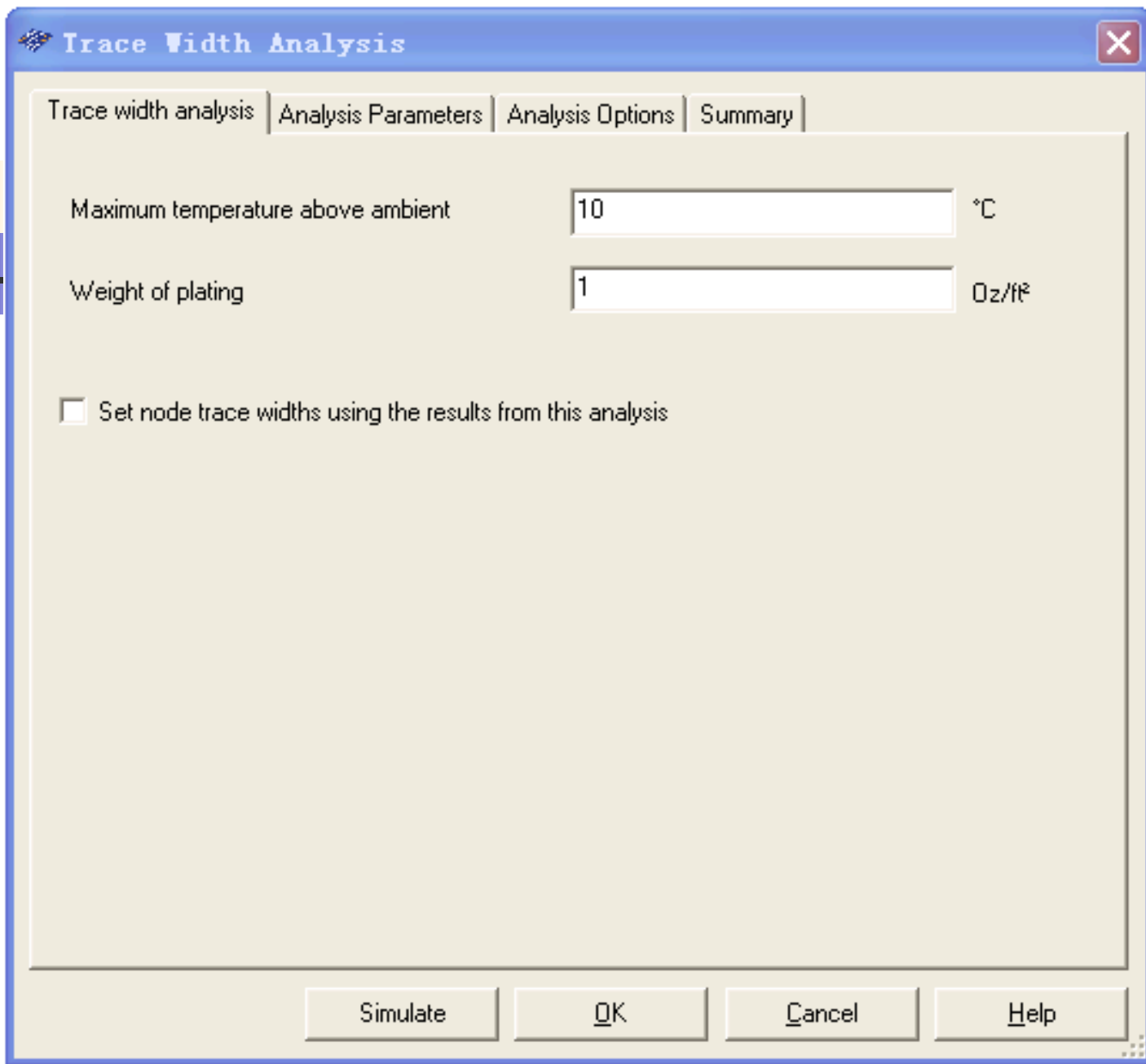


图1.6.19 Trace Width Analysis对话框



## 1.6.18 批处理分析（Batched...）

- 在实际电路分析中，通常需要对同一个电路进行多种分析，例如对一个放大电路，为了确定静态工作点，需要进行直流工作点分析；为了了解其频率特性，需要进行交流分析；为了观察输出波形，需要进行瞬态分析。批处理分析可以将不同的分析功能放在一起依序执行。
- 用鼠标点击Simulate→Analysis→Batched...，将弹出Batched Analyses对话框，进入批处理分析状态，Batched Analyses对话框如图1.6.20所示。

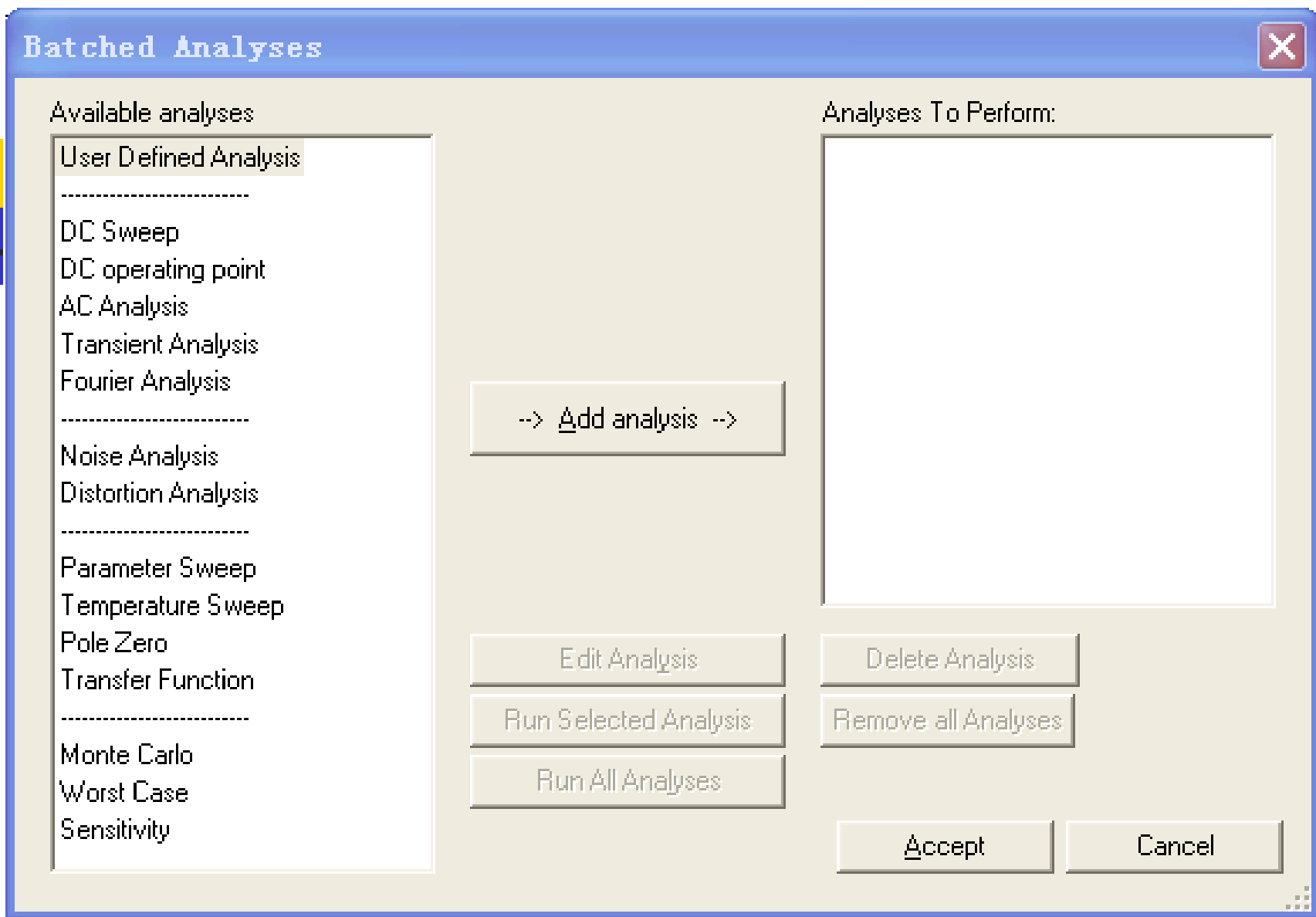
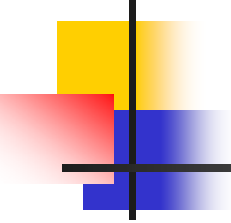
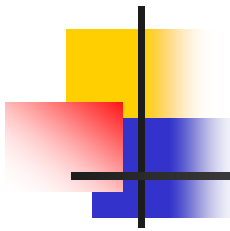


图1.6.20 Batched Analyses对话框

- 
- 在Batched Analysis对话框的左边 Available区中可以选择所要执行的分析，点击 Add analysis按钮，则所选择的分析的参数对话框出现。例如选择Monte Carlo，点击 Add analysis按钮，则弹出Monte Carlo Analysis对话框。该对话框与蒙特卡罗分析的参数设置对话框基本相同，其操作也一样，所不同的是 Simulate按钮变成了 Add to list按钮。在设置对话框中各种参数之后，点击 Add to list按钮，即回到 Batch Analyses对话框，这时在此右边的Analyses To区中出现将要分析的选项Monte Carlo，点击Monte Carlo分析左侧的十号，则显示出该分析的总结信息。



- 
- 如果需要继续添加所希望的分析，可以按照上述办法进行，全部选择完成后，在 **Batch Analyses**对话框的右边 **Analyses To**区中将出现全部选择分析项，点击**Run All Analyses**按钮即执行所选定在 **Analyses To**区中的全部分析仿真。仿真的结果将依次出现在 **Analyses Graphs**中。
  - 选择右边 **Analyses To**区中的某个分析，点击**Edit Analysis**，可以对其参数进行编辑处理。
  - 选择右边 **Analyses To**区中的某个分析，点击**Run Selected Analysis**，可以对其运行仿真分析。
  - 选择右边 **Analyses To**区中的某个分析，点击**Delete Analysis**，可以将其删除。
  - 点击**Remove all Analysis**，可以将已选中在**Analysis To**区内的分析全部删除。
  - 点击**Accept**可以，保留**Batched Analysis**对话框中的所有选择设置。



## 1.6.19 用户自定义分析 (User Defined...)

---

- 用户自定义分析可以使用户扩充仿真分析功能。
- 用鼠标点击Simulate→Analysis→User Defined...，将弹出User Defined Analyses对话框，进入用户自定义分析状态，User Defined Analyses对话框如图1.6.21所示。用户可在输入框中输入可执行的Spice命令，点击Simulate按钮即可执行此项分析。对话框中Analysis Options和Summary与直流工作点分析的设置一样。

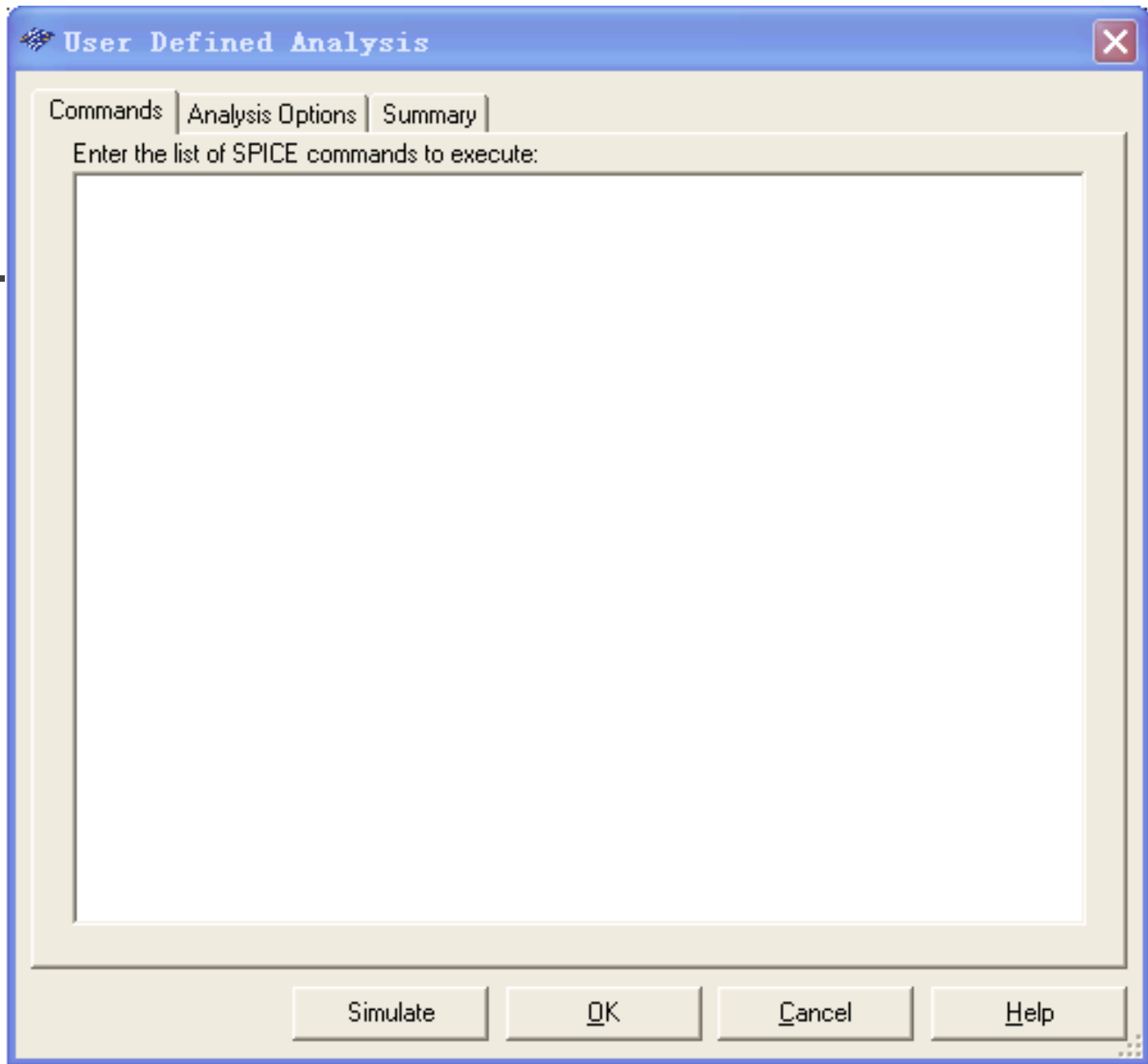


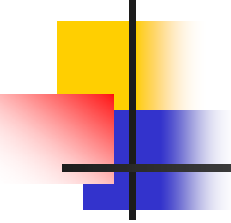
图1.6.21 User Defined Analyses对话框



# 本章小结

---

- NI Multisim 10是电子电路计算机仿真设计与分析的基础。本章介绍的主要内容有：
- （1）multisim的基本操作： multisim的主窗口、multisim菜单栏、multisim工具栏、multisim的元器件库、multisim仪器仪表库的基本界面操作。
- （2）multisim的文件操作：编辑（Edit）的基本操作，创建子电路，在电路工作区内输入文字，输入文本，编辑图纸标题栏。
- （3）multisim的电路创建的基础：元器件的操作，电路图选项的设置，导线的操作，输入/输出端点设置。

- 
- (4) multisim的仪器仪表的使用：仪器仪表的基本操作，包括数字多用表、函数信号发生器、瓦特表、示波器、波特图仪、字信号发生器、逻辑分析仪、逻辑转换仪、失真分析仪、频谱分析仪、网络分析仪的使用。
  - (5) multisim的电路分析方法：直流工作点分析，交流分析，瞬态分析，傅里叶分析，噪声分析，失真分析，直流扫描分析，灵敏度分析，参数扫描分析，温度扫描分析，零一极点分析，传递函数分析，最坏情况分析，蒙特卡罗分析，批处理分析，用户自定义分析，噪声系数分析。
  - 掌握NI Multisim 10的使用方法是本章的重点，是进行以后各章学习的基础。软件学习最重要的是实践，不断的实践，需要在实际的电路设计与仿真分析中，通过在学习以后各章的内容的过程中，熟练的掌握和使用Multisim仿真软件。





---

## 第2章 晶体管放大器电路

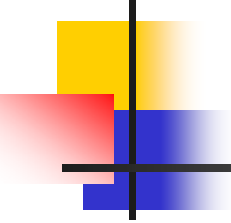


---

## 内容提要

晶体管放大器电路是模拟电子技术课程的基础部分。本章介绍了单管放大器、多级放大器电路、负反馈放大器电路、射极跟随器、差动放大器、OTL低频功率放大器、单调谐放大器、双调谐回路谐振放大器的工作原理、主要性能指标、特性以及计算机仿真设计方法。





---

本章的重点是掌握晶体管放大器电路的仿真设计与分析方法。单管晶体管放大器是基础，注意区分不同类型放大器之间的不同点。



---

## 2.1 单管放大器



## 2.1.1 单管放大器电路基本原理

图2.1.1为电阻分压式工作点稳定的单管放大器电路图。它的偏置电路采用 $R_{B11}$  (RB11) 和 $R_{B12}$  (RB12) 组成的分压电路，并在发射极中接有电阻 $R_E$  (RE1)，以稳定放大器的静态工作点。当在放大器的输入端加入输入信号 $u_i$ 后，在放大器的输出端便可得到一个与 $u_i$ 相位相反，幅值被放大的输出信号 $u_o$ ，从而实现了电压放大。

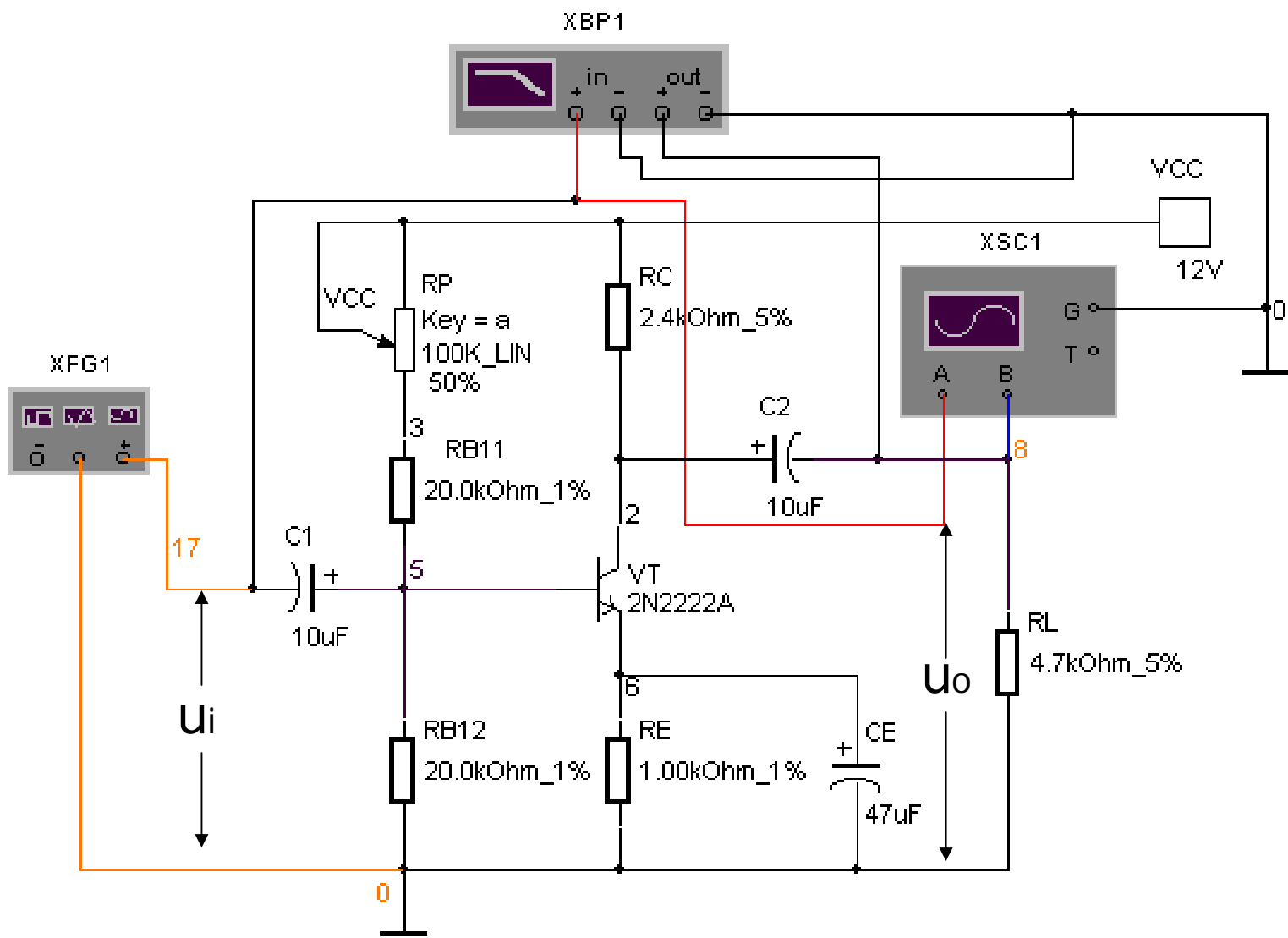
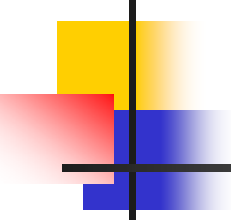


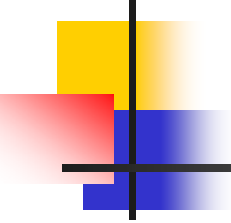
图2.1.1电阻分压式工作点稳定放大电路



---

在图2.1.1电路中，当流过偏置电阻 $R_{B11}$ 和 $R_{B12}$ 的电流远大于晶体管的基极电流 $I_B$ 时（一般 $5 \sim 10$ 倍），则它的静态工作点可用下式估算

$$U_B \approx \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} \quad I_E \approx \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} \approx I_C$$



---

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

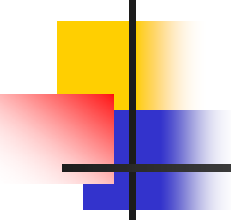
电压放大倍数:

$$A_u = -\beta \frac{R_C // R_L}{r_{be}}$$

输入电阻:  $R_i = R_{B11} // R_{B12} // r_{be}$

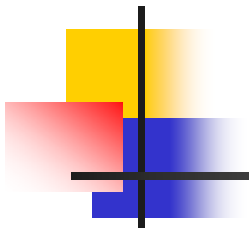
式中  $r_{be}$  为三极管基极与发射极之间的电阻

输出电阻  $R_o \approx R_C$



---

由于电子器件性能的分散性比较大，因此在设计和制作晶体管放大电路时，离不开测量和调试技术。在设计前应测量所用元器件的参数，为电路设计提供必要的依据，在完成设计和装配以后，还必须测量和调试放大器的静态工作点和各



---

项性能指标。一个优质放大器，必定是理论设计与实验调整相结合的产物。因此，除了掌握放大器的理论知识和设计方法外，还必须掌握必要的测量和调试技术。





## 2.1.2 单管放大器静态工作点的分析

---

### 1. 函数信号发生器参数设置

双击函数信号发生器图标，出现如图 2.1.2 面板图，改动面板上的相关设置，可改变输出电压信号的波形类型、大小、占空比或偏置电压等。

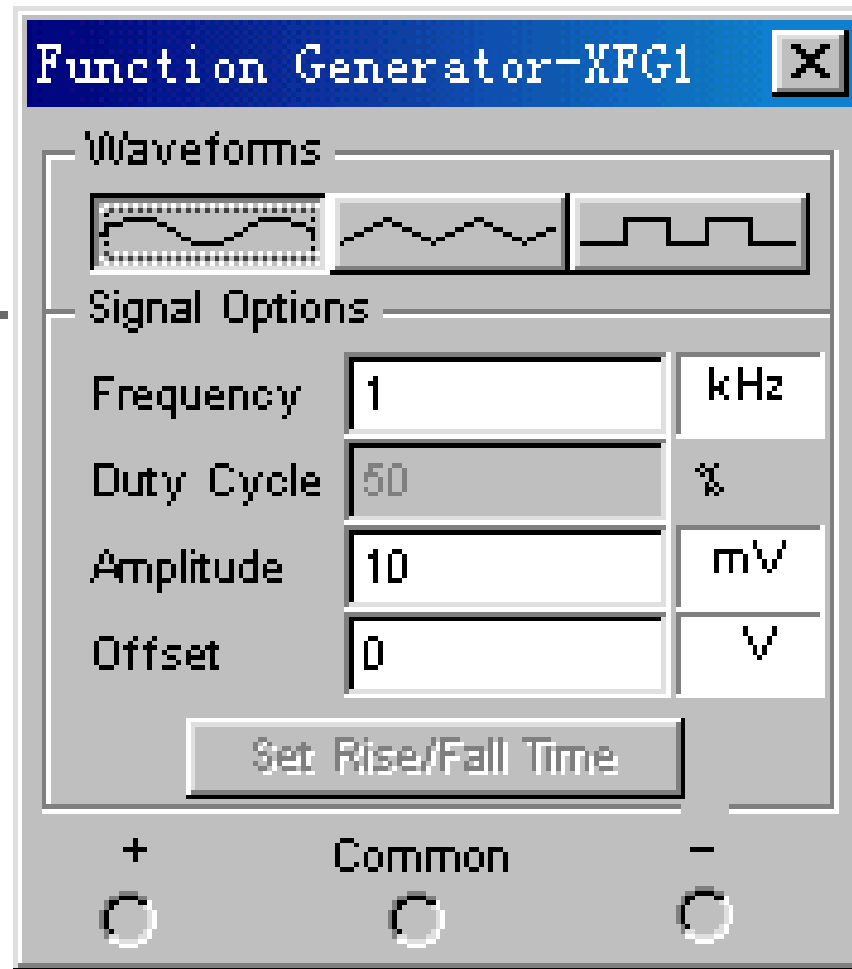
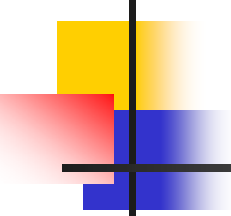


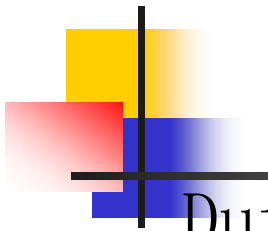
图2.1.2 函数信号发生器面板图



Waveforms区：选择输出信号的波形类型，有正弦波、三角波和方波等3种周期信号供选择。本例选择正弦波。

Signal Options区：对Waveforms区中选取的信号进行相关参数设置。

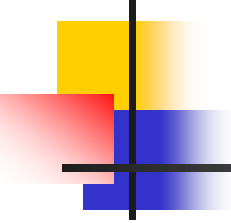
Frequency：设置所要产生信号的频率，范围在1Hz-999MHz。本例选择1KHz



Duty Cycle: 设置所要产生信号的占空比。设定范围为1%-99%。

Amplitude: 设置所要产生信号的最大值(电压), 其可选范围从1  $\mu$  V级到999KV。本例选择10mV

Offset: 设置偏置电压值, 即把正弦波、三角波、方波叠加在设置的偏置电压上输出, 及可选范围从1  $\mu$  V级到999KV。



---

Set Rise / Fall Time按钮：设置所要产生信号的上升时间与下降时间，而该按钮只有在产生方波时有效。点击该按钮后，出现如图2.1.3所示的对话框。

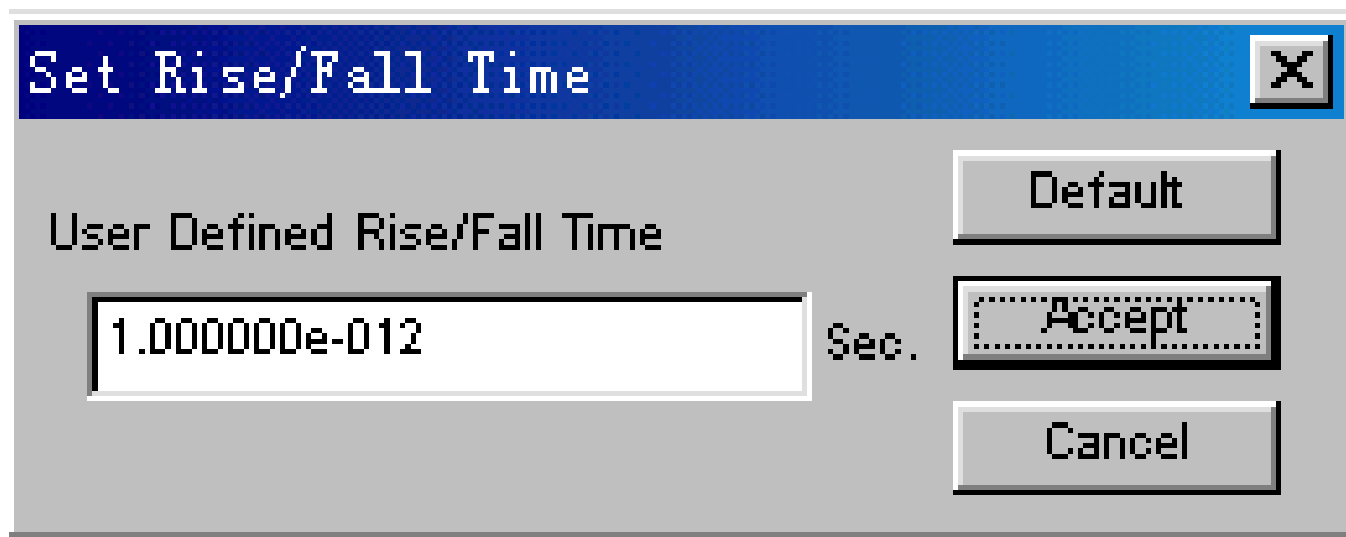
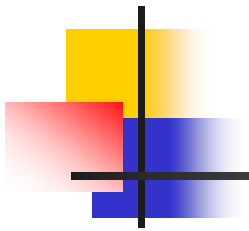


图2.1.3 Set Rise / Fall Time对话框



---

此时，请在栏中以指数格式设定上升时间(下降时间)，再点击Accept按钮即可。如点击Default，则恢复为默认值 $1.000000e-12$ 。

注意：当所有面板参数设置完成后，可关闭其面板对话框，仪器图标将保持输出的波形。



---

## 2. 电位器RP参数设置

双击电位器RP，出现如图2.1.4所示对话框，点击Value选项。

Key区：调整电位器大小所按键盘。

Increment区：设置电位器按百分比增加或减少。



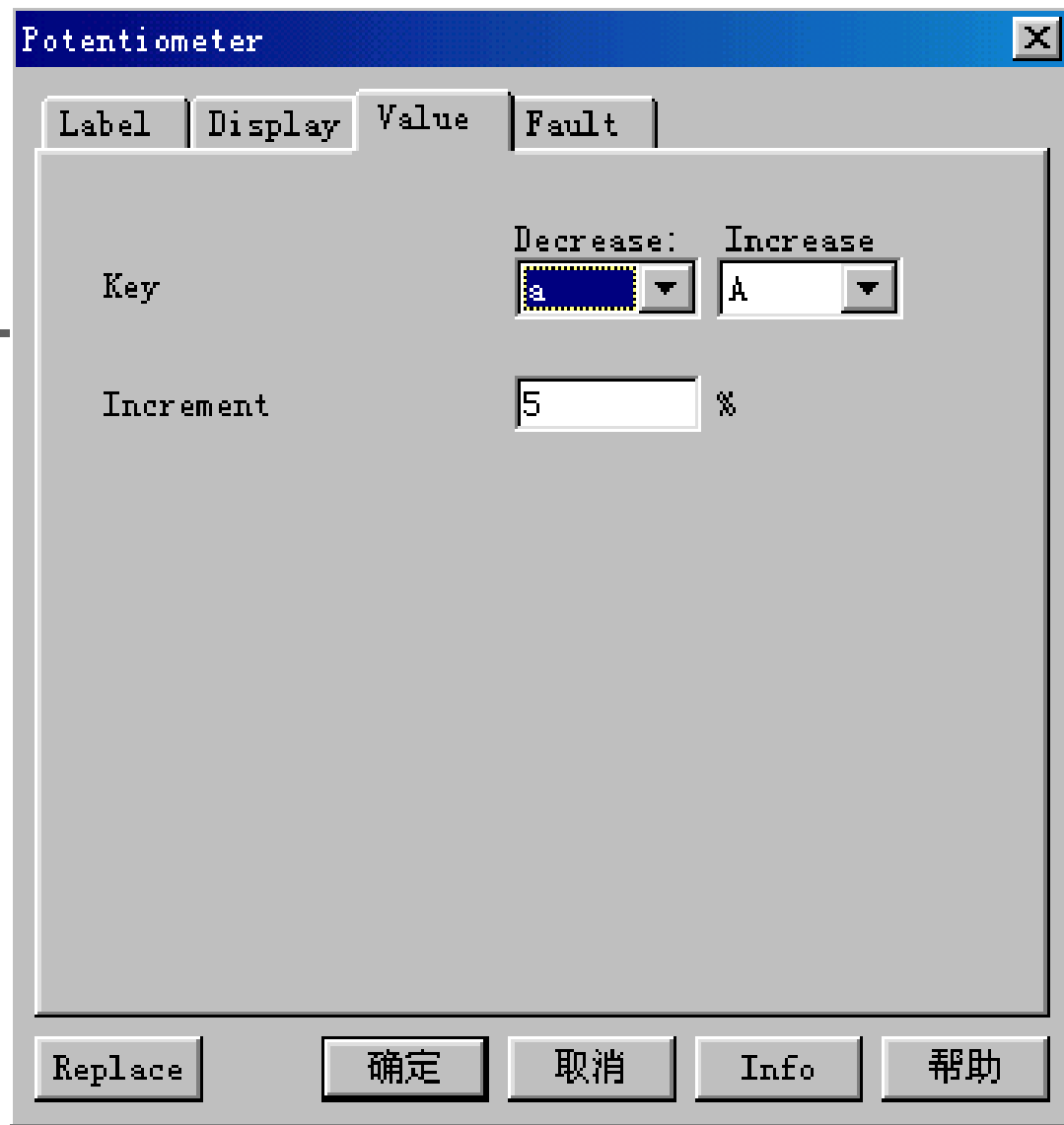
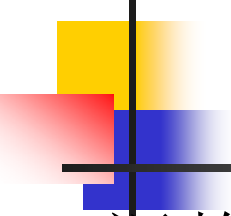


图2.1.4 Potentiometer对话框



调整图2.1.1中的电位器RP确定静态工作点。电位器RP旁标注的文字“Key=a”表明按动键盘上a键，电位器的阻值按5%的速度减少；若要增加，按动Shift+a键，阻值将以5%的速度增加。电位器变动的数值大小直接以百分比的形式显示在一旁。启动仿真电源开关，反复按键盘上的a键。双击示波器图标，观察示波器输出波形如图2.1.5（节点8的波形）所示。

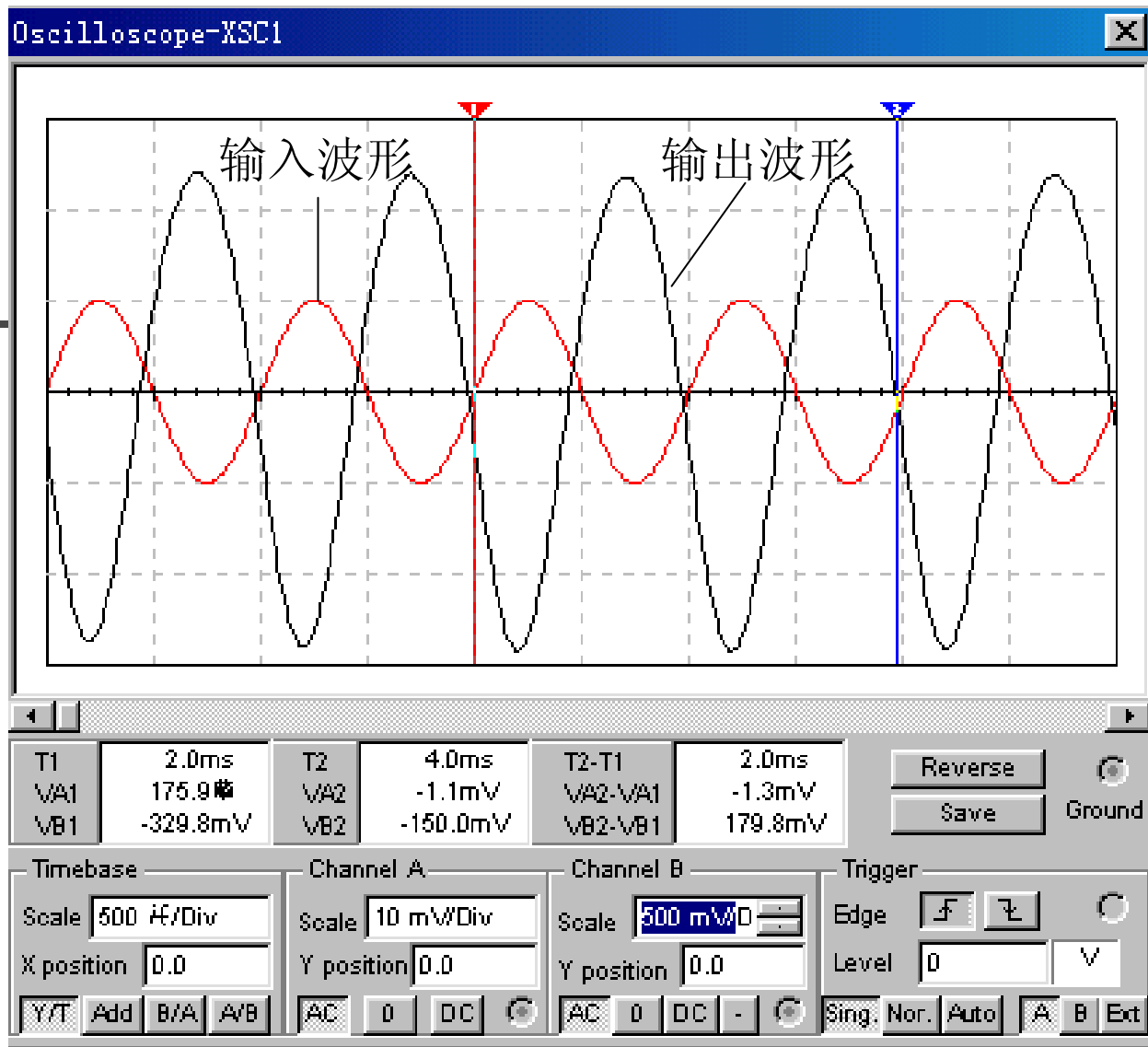
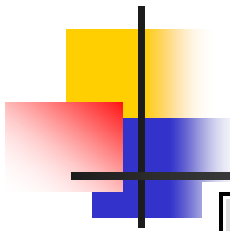


图2.1.5 示波器显示节点8的波形



### 3. 直流工作点分析

在输出波形不失真情况下，点击  
Options→Preferences→Show node names使  
图2.1.1显示节点编号，然后点击  
Analysis→DC operating Point→Output  
variables选择需要用来仿真的变量，然后点  
击Simulate按钮，系统自动显示出运行结果，  
如图2.1.6所示。



DC Operating Point		
6	1.88811	
1	7.48943	
3	5.23662	
17	0.00000	
5	2.53127	
8	0.00000	
vccvcc#branch	-2.01467m	

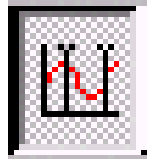
图2.1.6 系统运行结果显示

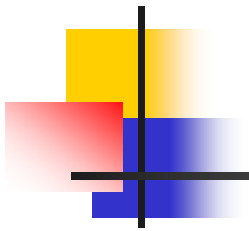


## 4. 电路直流扫描

直流扫描分析 (DC Sweep Analysis) 是利用一个或两个直流电源分析电路中某一节点上的直流工作点的数值变化的情况。直流扫描操作分析方法请看第1章中的1.7.8小节。本例分析了图2.1.1电路中节点“2”随电源电压变化的曲线如图2.1.7所示，

在图2.1.7中点击





---

图标可显示/隐蔽指针，该指针与示波器显示屏上的读数指针相同，即拖动指针可测出集电极的电位随电源电压变化的情况。

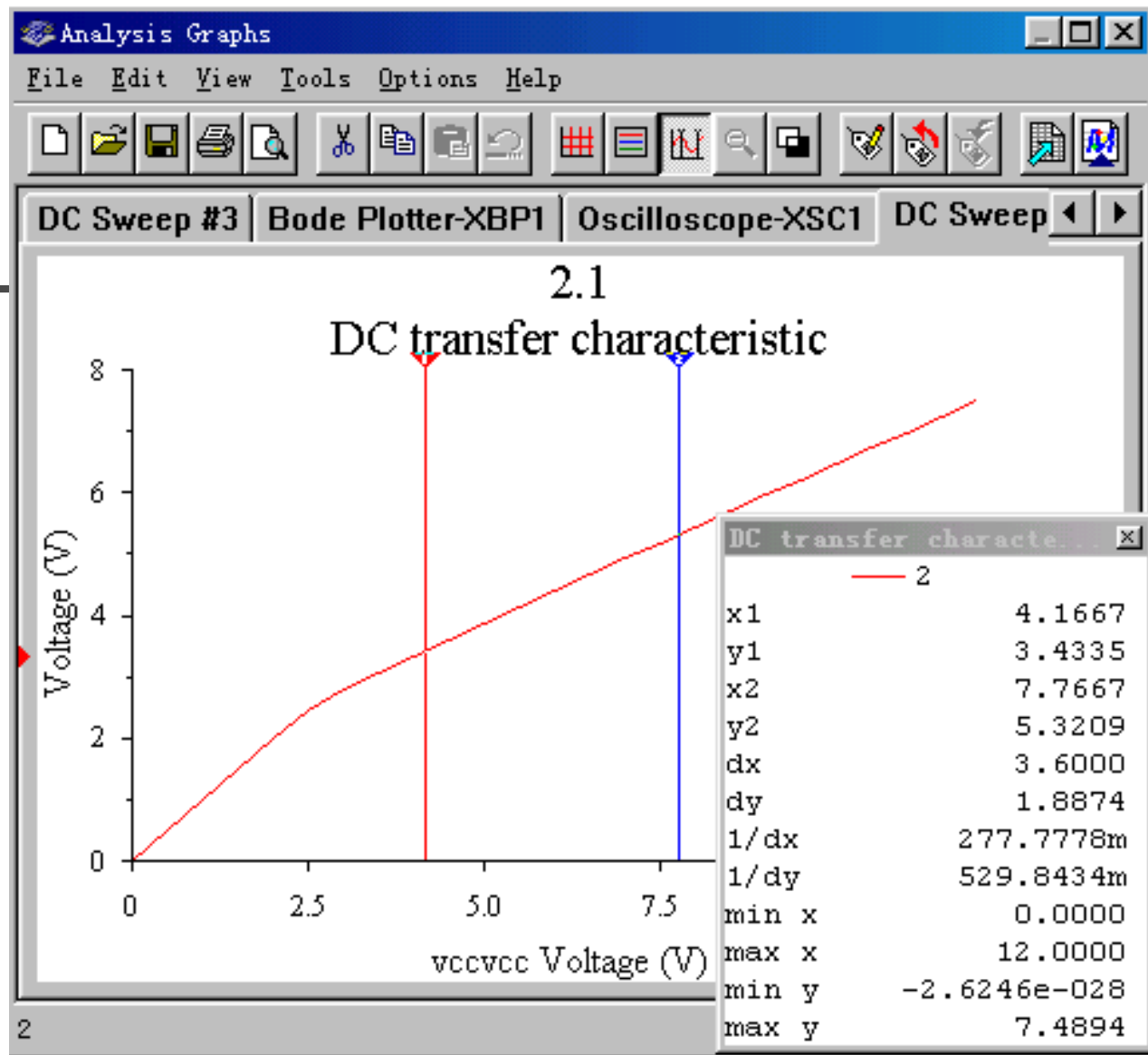


图2.1.7 图2.1.1电路中节点“2”直流扫描分析结果





## 2.1.3 单管放大器动态分析

---

用鼠标点击Simulate→Analysis→AC

Analysis，将弹出AC Analysis对话框，进入交流分析状态。AC Analysis对话框有Frequency Parameters、Output variables、

Miscellaneous Options和Summary 4个选项，本例中首先用鼠标点击其中Output variables选定节点8进行仿真，然后点击 Frequency

Parameters选项，弹出Frequency Parameters对话框如图2.1.8所示。

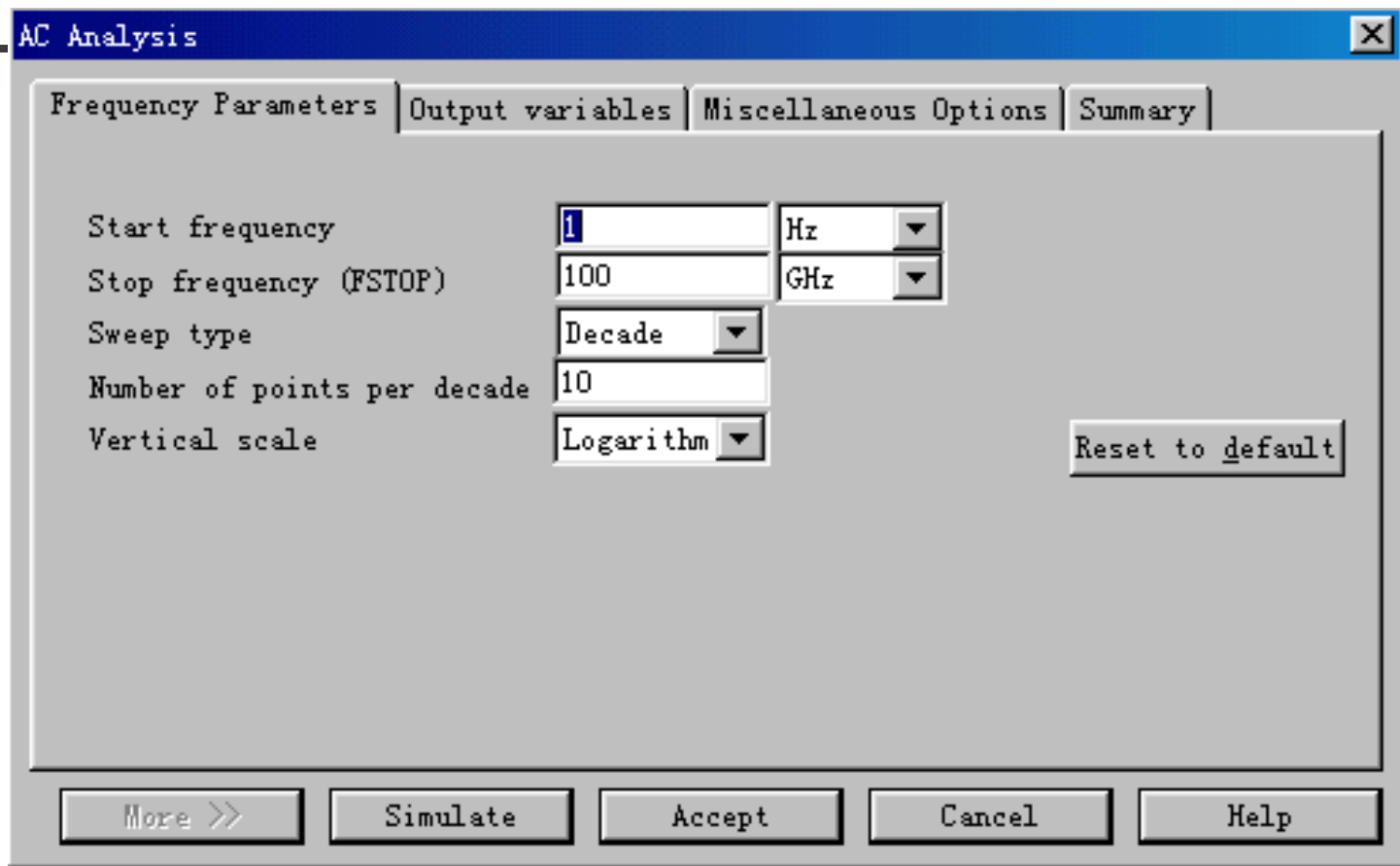


图2.1.8 AC Analysis对话框



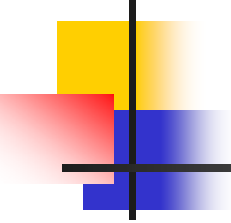
---

## 1. Frequency Parameters 参数设置

在Frequency Parameters参数设置对话框中，可以确定分析的起始频率、终点频率、扫描形式、分析采样点数和纵向坐标（Vertical scale）等参数。本例中：

在Start frequency窗口中，设置分析的起始频率，设置为1Hz。

在Stop frequency（FSTOP）窗口中，设置扫描终点频率，设置为100GHz。



---

在Sweep type窗口中，设置分析的扫描方式为，Decade（十倍程扫描）

在Number of points per decade窗口中，设置每十倍频率的分析采样数，默认为10。

在Vertical Scale窗口中，选择纵坐标刻度形式为：Logarithmic（对数）形式。默认设置为对数形式。

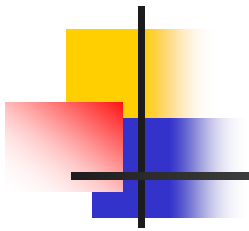


## 2. 恢复默认值

点击Reset to default按钮，即可恢复默认值。

## 3. 分析节点的频率特性波形

按下“Simulate”（仿真）按钮，即可在显示图上获得被分析节点的频率特性波形。交流分析的结果，可以显示幅频特性和相频特性两个图，仿真分析结果如图2.1.9所示。



---

如果用波特图仪连至电路的输入端和被测节点，双击波特图仪（波特图仪各参数设置方法参照 1.5节中的1.5.6），同样也可以获得交流频率特性，显示结果如图2.1.10所示。

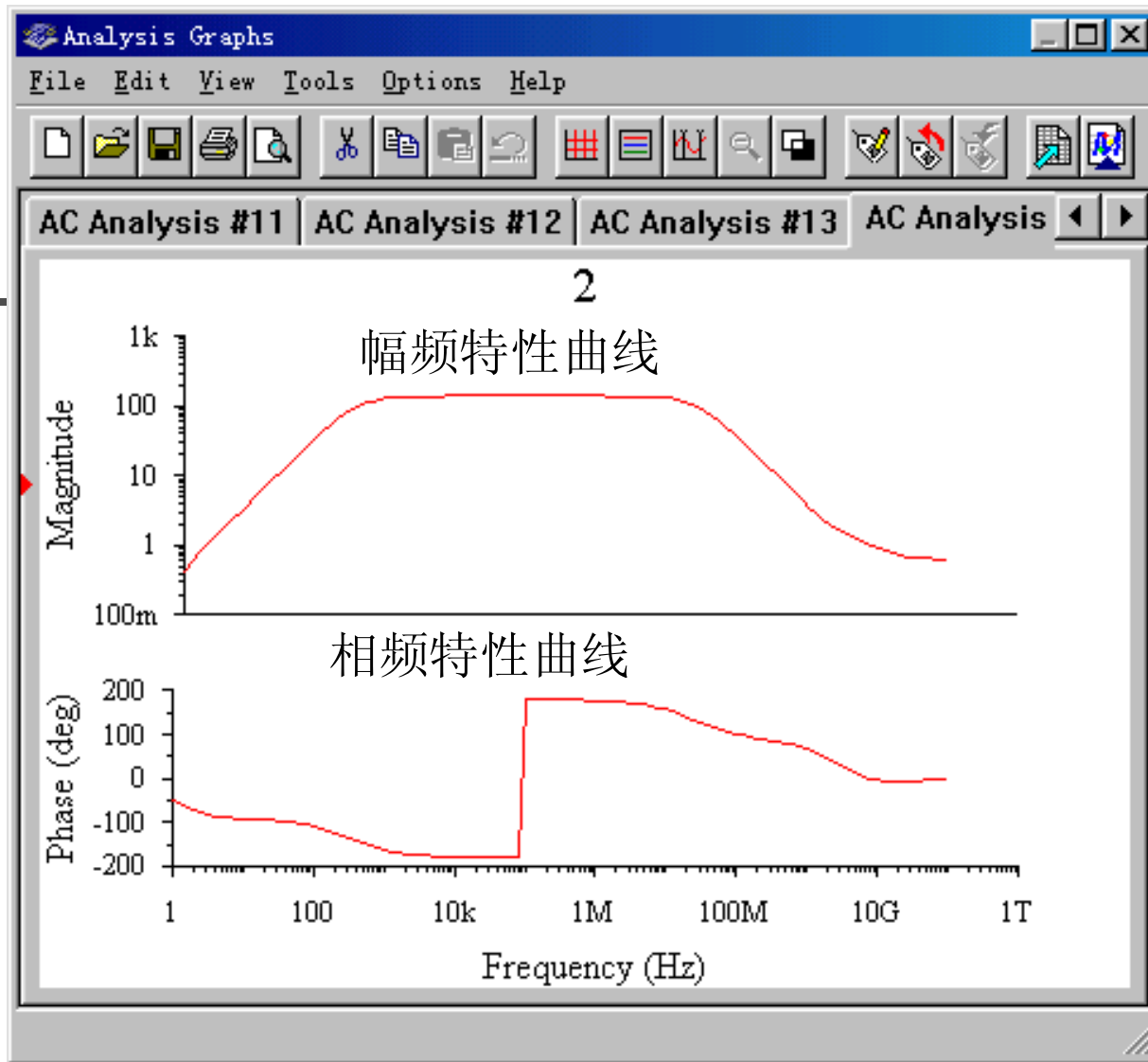


图 2.1.9 单管放大器AC Analysis仿真分析结果

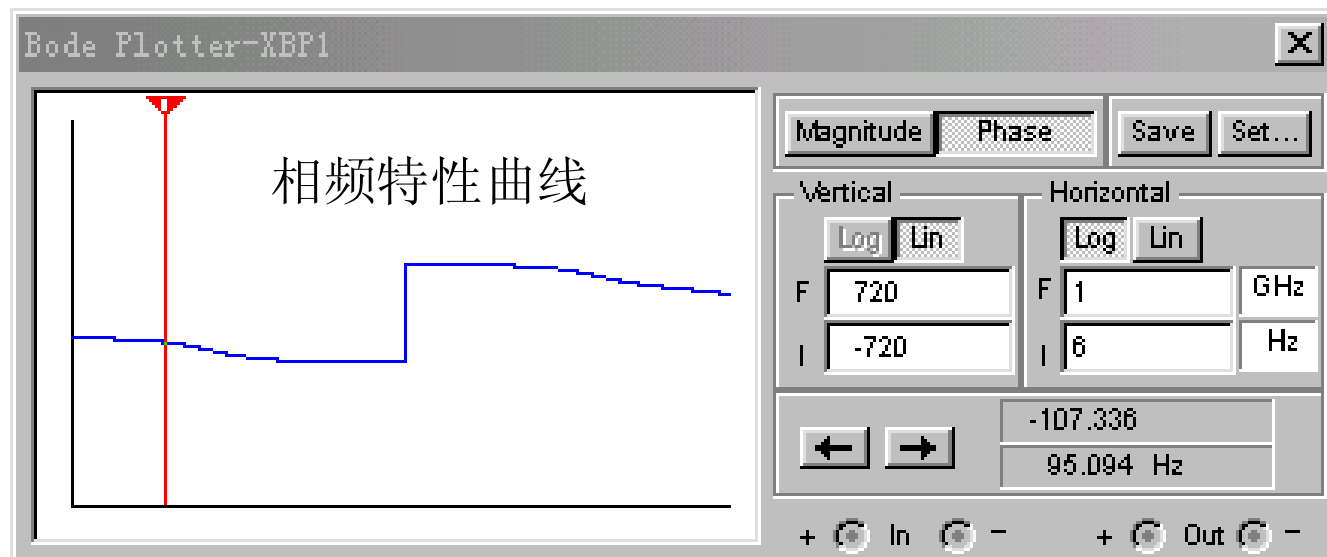
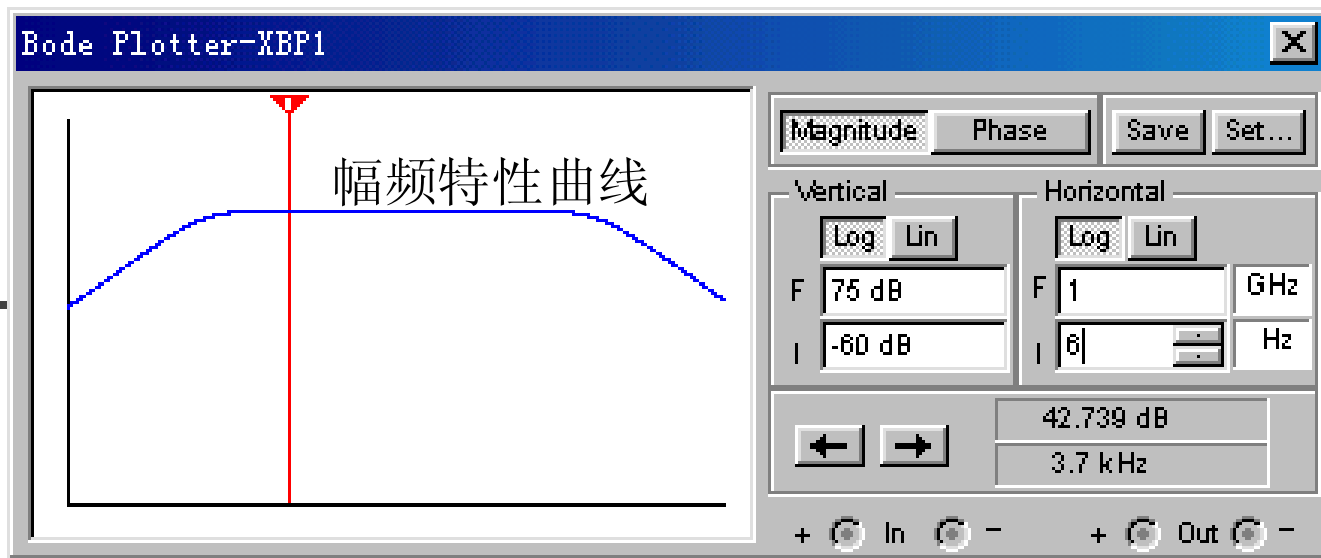


图2.1.10 波特图仪测试频率特性显示





---

## 4. 放大器幅值及频率测试

双击示波器图标，通过拖拽示波器面板（图2.1.5）中的指针可分别测出输出电压的峰-峰值及周期。示波器参数设置方法参照1.5节中的1.5.5小节。



---

## 5. 电路噪声分析 (Noise Analysis)

噪声分析用于检测电子线路输出信号的噪声功率幅度，用于计算、分析电阻或晶体管的噪声对电路的影响。在分析时，假定电路中各噪声源是互不相关的，因此它们的数值可以分开各自计算。总的噪声是各噪声在该节点的和（用有效值表示）。噪声分析操作方法请看第1章中的1.7.6小节。图2.1.11是图2.1.1节点“2”噪声分析仿真结果。

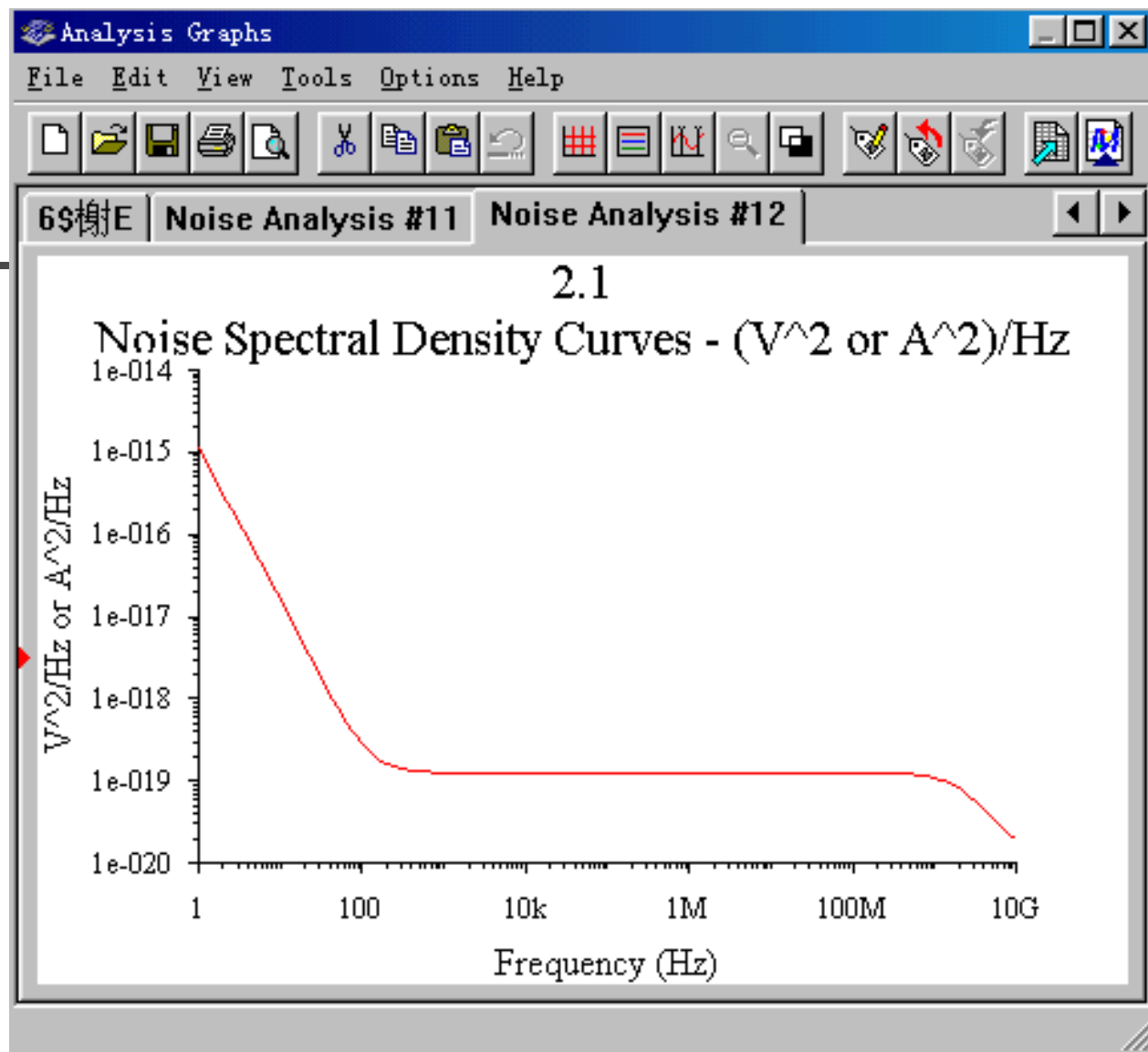


图2.1.11 噪声分析图2.1.1节点2的仿真分析结果



## 6. 电路失真分析

失真分析用于分析电子电路中的谐波失真和内部调制失真（互调失真），通常非线性失真会导致谐波失真，而相位偏移会导致互调失真。若电路中有一个交流信号源，该分析能确定电路中每一个节点的二次谐波和三次谐波的复值。失真分析操作方法请看第1章中的1.7.7小节。本例分析了图2.1.1电路中的节点“2”，分析结果如图2.1.12所示。

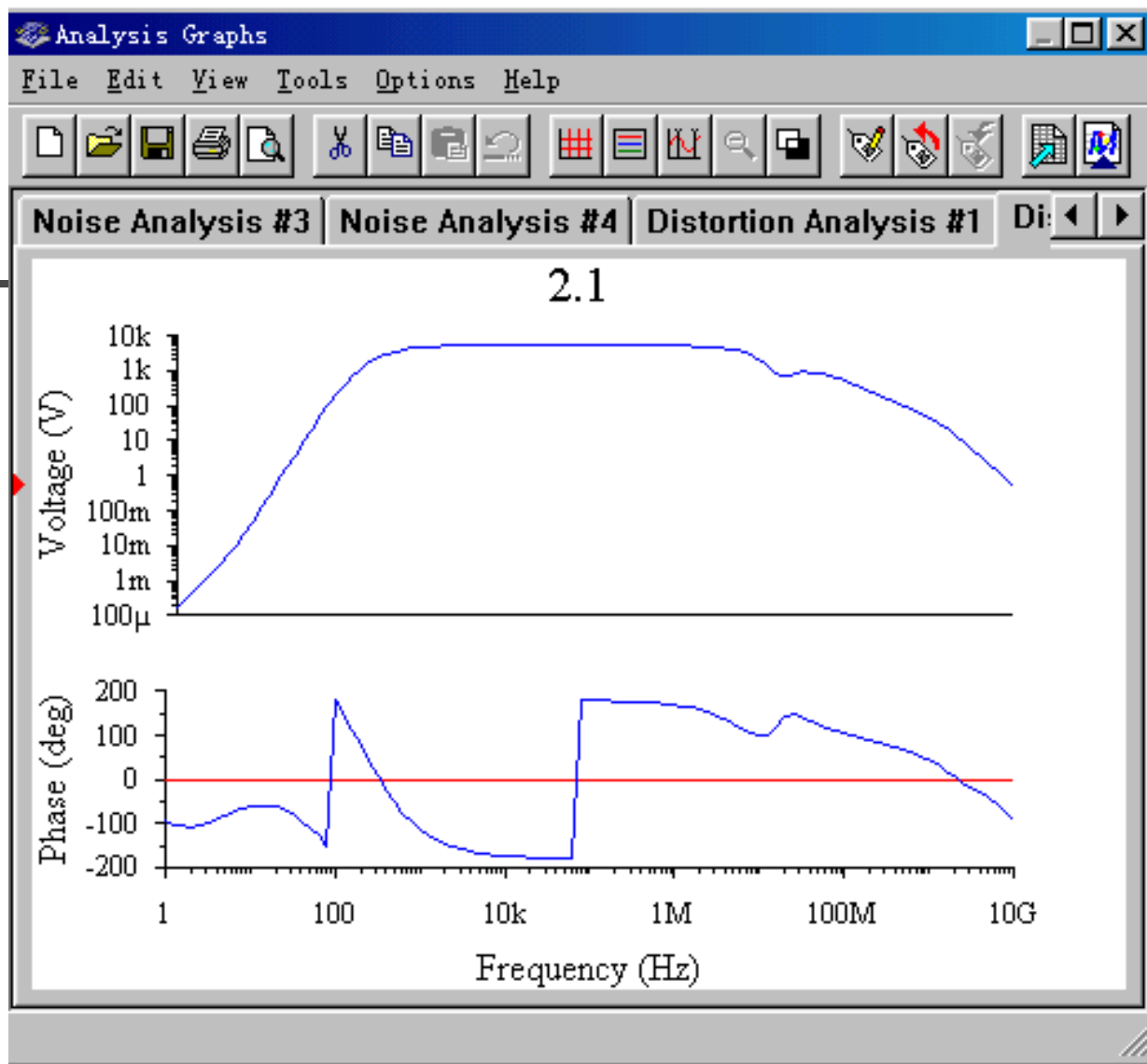


图2.1.12 图2.1.1电路节点“2”失真分析结果



---

## 2.2 多级放大电路



## 2.2.1 多级放大电路的频率响应

多级放大电路分为直接耦合式电路、阻容耦合式电路、变压器耦合式电路。

为了简明起见，假设由两级完全相同的单级共发射级放大电路构成——两级放大电路，其结构如图2.2.1所示，级间采用RC耦合的方式，由于耦合环节具有隔离直流、传送交流的作用，两级的静态工作情况互不影响，而信号则可顺利通过。

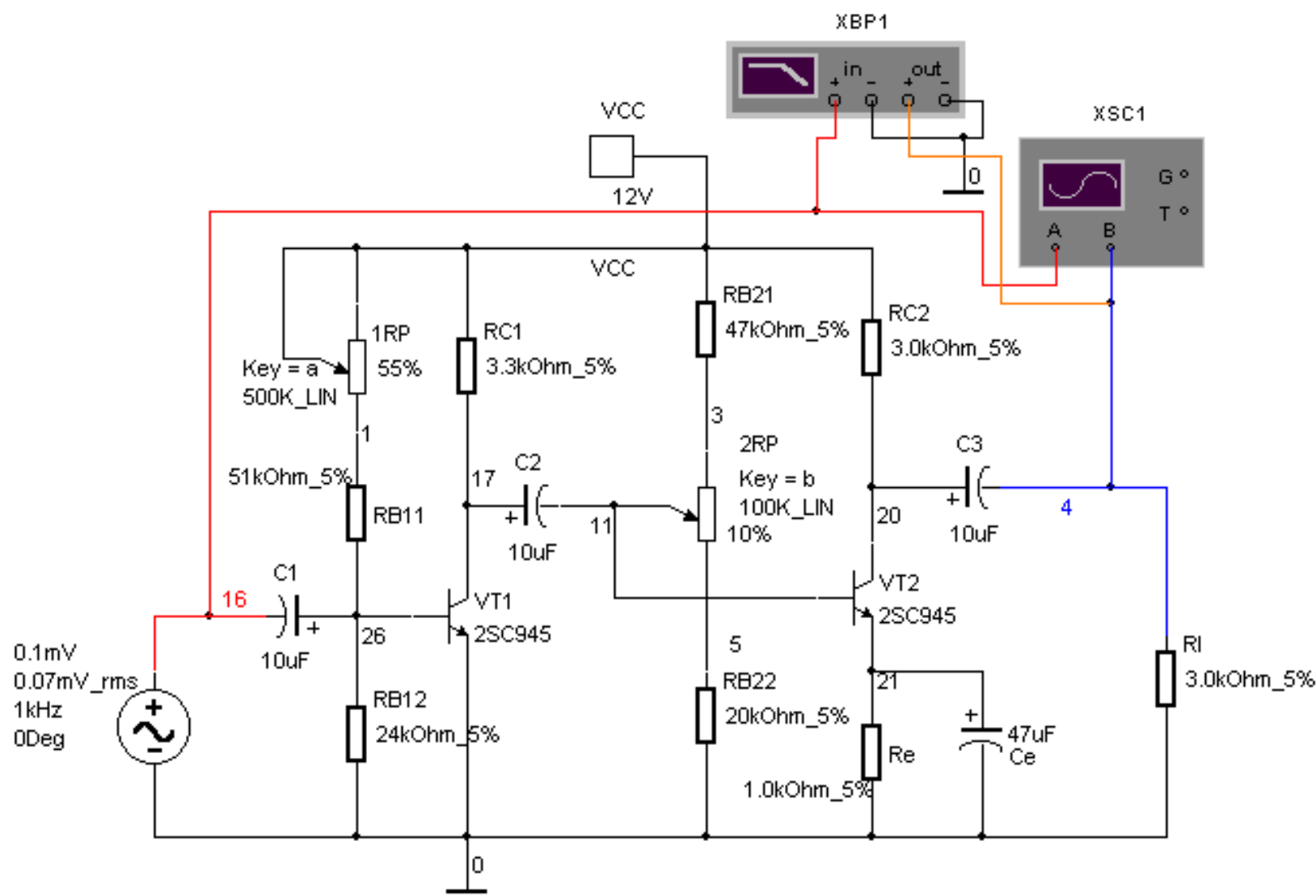
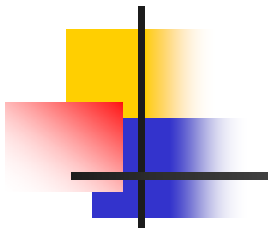
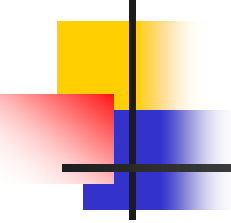


图2.2.1 两级放大电路原理图





现在分析图2.2.1所示两级放大电路的频率响应与单级放大电路频率响应的关系，设每级的中频电压增益为 $A_{uM1}$ ，则每级的上限频率 $f_{H1}$ 和下限频率 $f_{L1}$ 对应的电压增益为 $0.707 A_{uM1}$ ，两级电压放大电路的中频区电压增益为 $A_{uM1}^2$ ，这时，两级放大电路的上、下限频率不能再取 $f_{L1}$ 和 $f_{H1}$ 了，因为这两个频率的电压增益将是



$(0.707 A_{uM1})^2 = 0.5 A_{uM1}^2$ 了， 电路如图2.2.2  
 $f_{H1}$  和  $f_{L1}$  两点所示。根据放大电路频带的定  
义， 两级放大电路的下限频率为  $f_L$ ， 上限频率  
为  $f_H$ ， 它们都是对应于电压增益为  $A_u = 0.707$   
 $A_{uM1}^2$  的频率， 如图2.2.2所示。

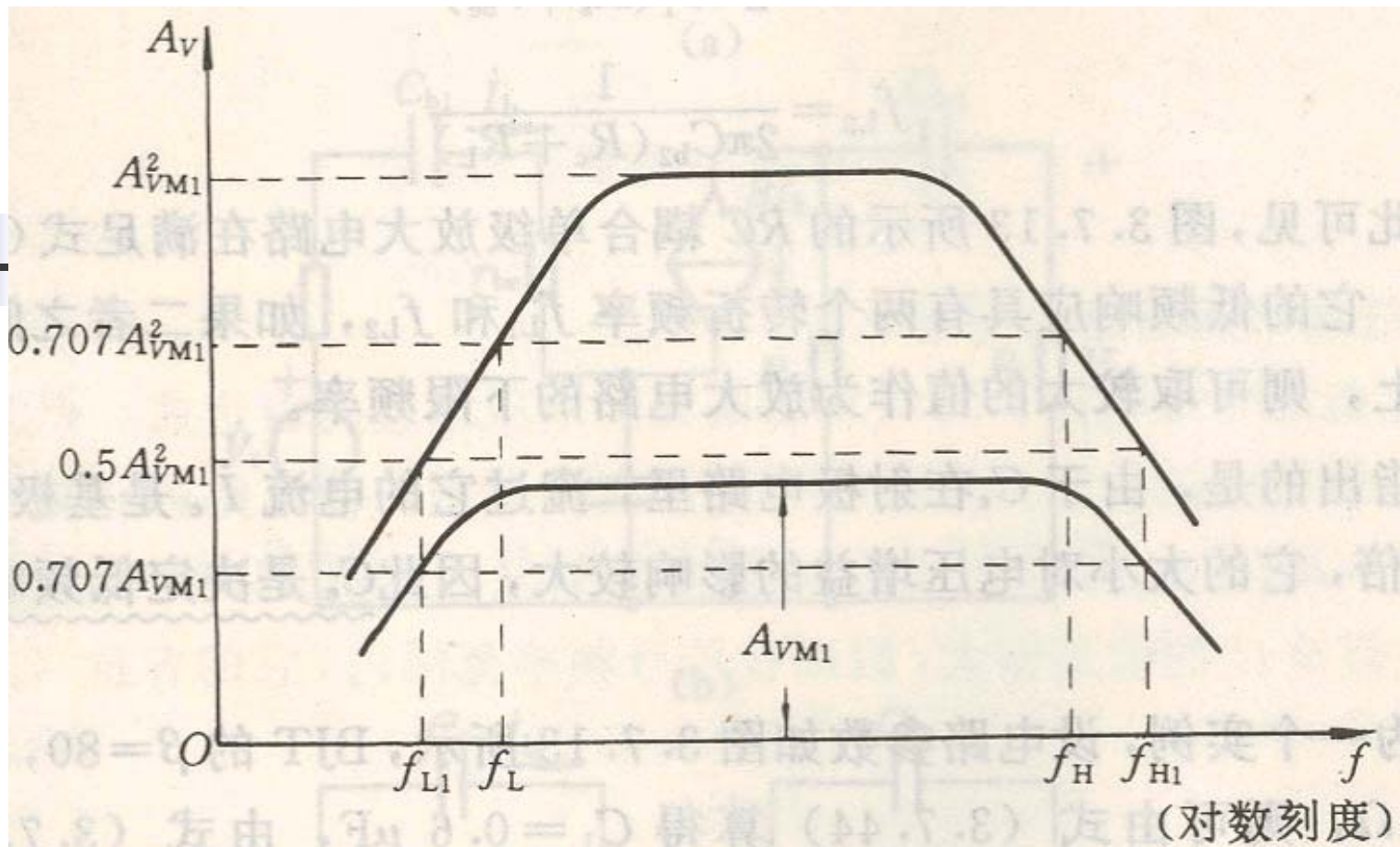
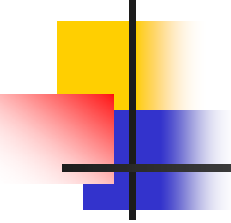
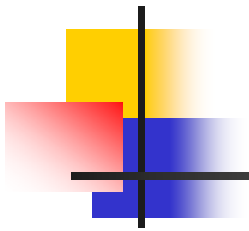


图2.2.2 单级和两级放大电路的频率响应



显然， $f_L > f_{L1}$ ， $f_H < f_{H1}$ ，，即两级电路的通频带变窄了。依此推广到n级放大电路，其总电压增益为各单级电路电压增益的乘积，即

$$\dot{A}_u(j\omega) = \frac{\dot{U}_{o1}(j\omega)}{\dot{U}_{i1}(j\omega)} \cdot \frac{\dot{U}_{o2}(j\omega)}{\dot{U}_{o1}(j\omega)} \cdots \frac{\dot{U}_{on}(j\omega)}{\dot{U}_{o(n-1)}(j\omega)}$$



---

或 
$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \cdots \dot{A}_{un}$$

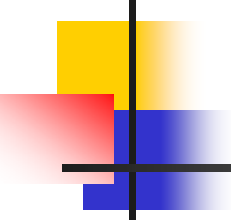
应当注意的是，在计算各级的电压增益时，前级的开路电压是下级的信号源电压；前级的输出阻抗是下级的信号源阻抗，而下级的输入阻抗是前级的负载。



## 2.2.2 多级放大器电路 的频率响应仿真分析

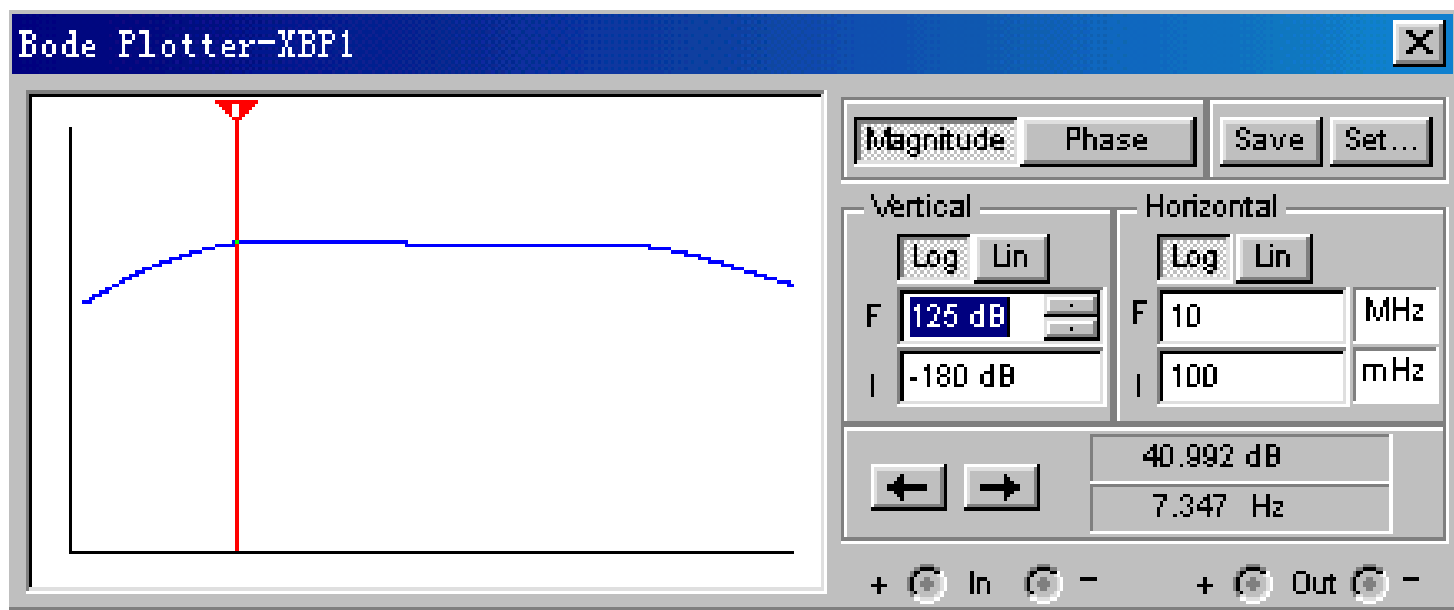
---

在Multisim仿真平台上，将波特图仪参数设置完全一样的情况下分别测出了第一级放大器的幅频特性如图2.2.3(a)所示、第二级放大器的幅频特性如图2.2.3 (b) 所示。从图2.2.3中测出单级放大电路的 $f_L = 7.37\text{Hz}$ ， $f_H = 266\text{kHz}$ 。



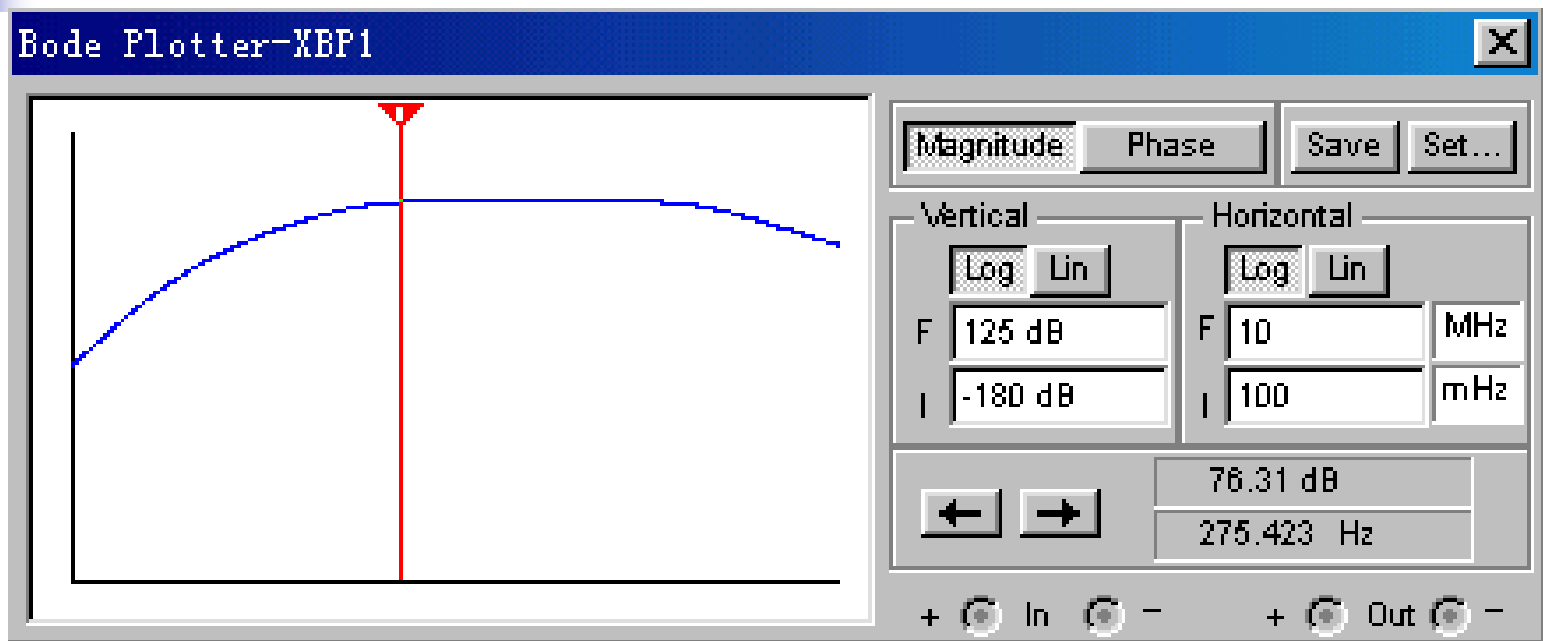
---

而两级放大电路  $f_L = 301\text{Hz}$ ,  $f_H = 147\text{kHz}$ 。从图 2.2.3 所示的两级放大电路的通频带可以推知, 多级放大电路的通频带一定比它的任何一级都窄, 级数愈多, 通频带越窄。这就是说, 将几级放大电路串联起来后, 总电压增益虽然提高了, 但通频带变窄了。



(a) 第一级放大器的幅频特性





(b) 两级放大器的幅频特性

图2.2.3 两级放大器频率特性



## 2.2.3 极点—零点分析

---

极点—零点分析操作请看第1章的1.7.12小节。本例在Nodes区选择输入、输出的正负端（节）点是：

在Input（+）窗口选择正的输入端（节）点16。

在Input（-）窗口选择负的输入端（节）点（通常是接地端，即节点0）。

在Output（+）窗口选择正的输出端（节）点4。

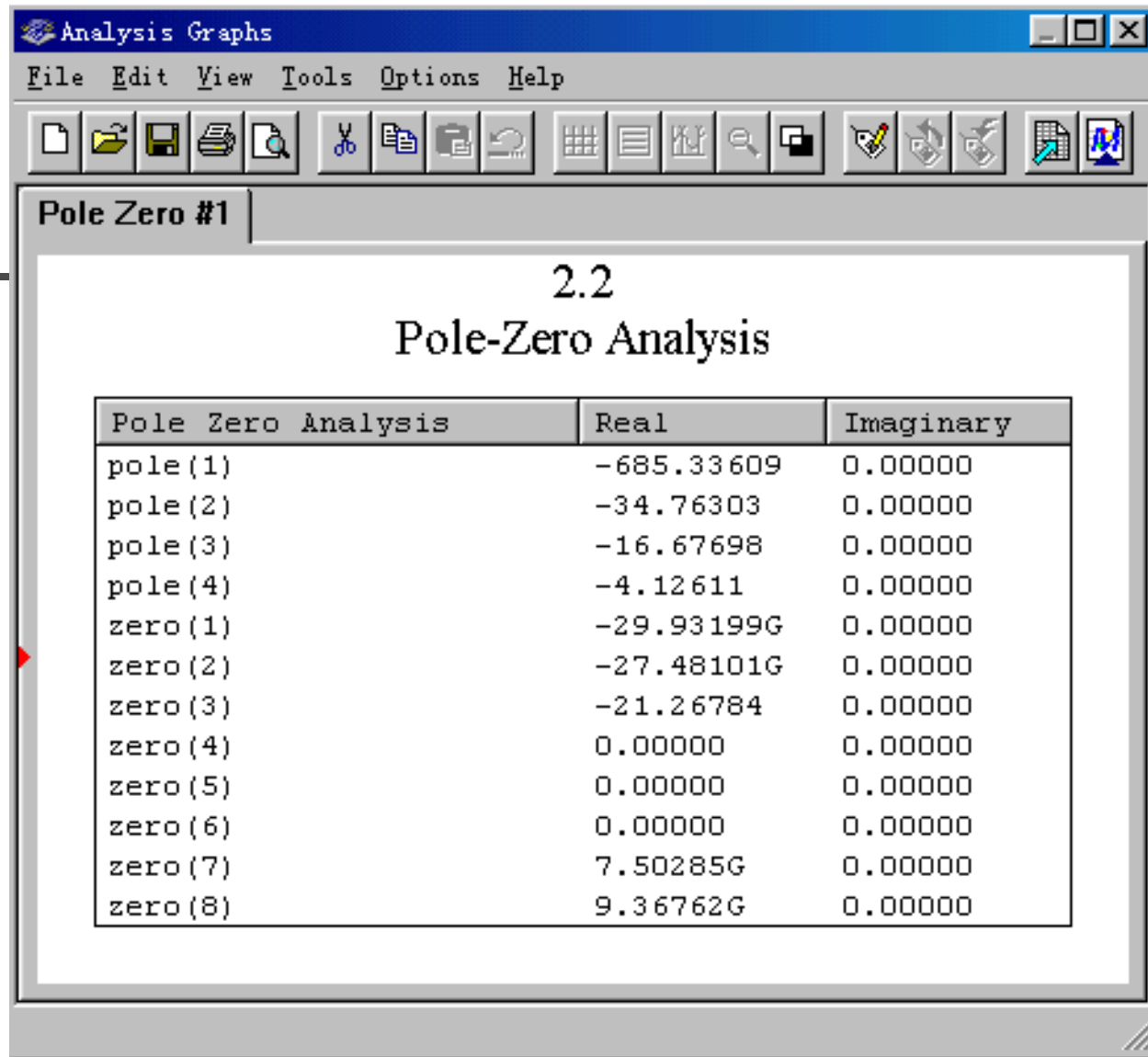
在Output（-）窗口选择负的输出端（节）点（通常是接地端，即节点0）。



---

## 1. 电路增益分析

选择 Gain Analysis (output voltage / input voltage) 进行电路增益分析，也就是输出电压 / 输入电压，分析结果如图2.2.4所示。



### 2.2.4 输出电压 / 输入电压分析



---

## 2. 电路互阻抗分析

选择 Impedance Analysis (output voltage / input current) 进行电路互阻抗分析，也就是输出电压 / 输入电流。分析结果如图2.2.5所示。

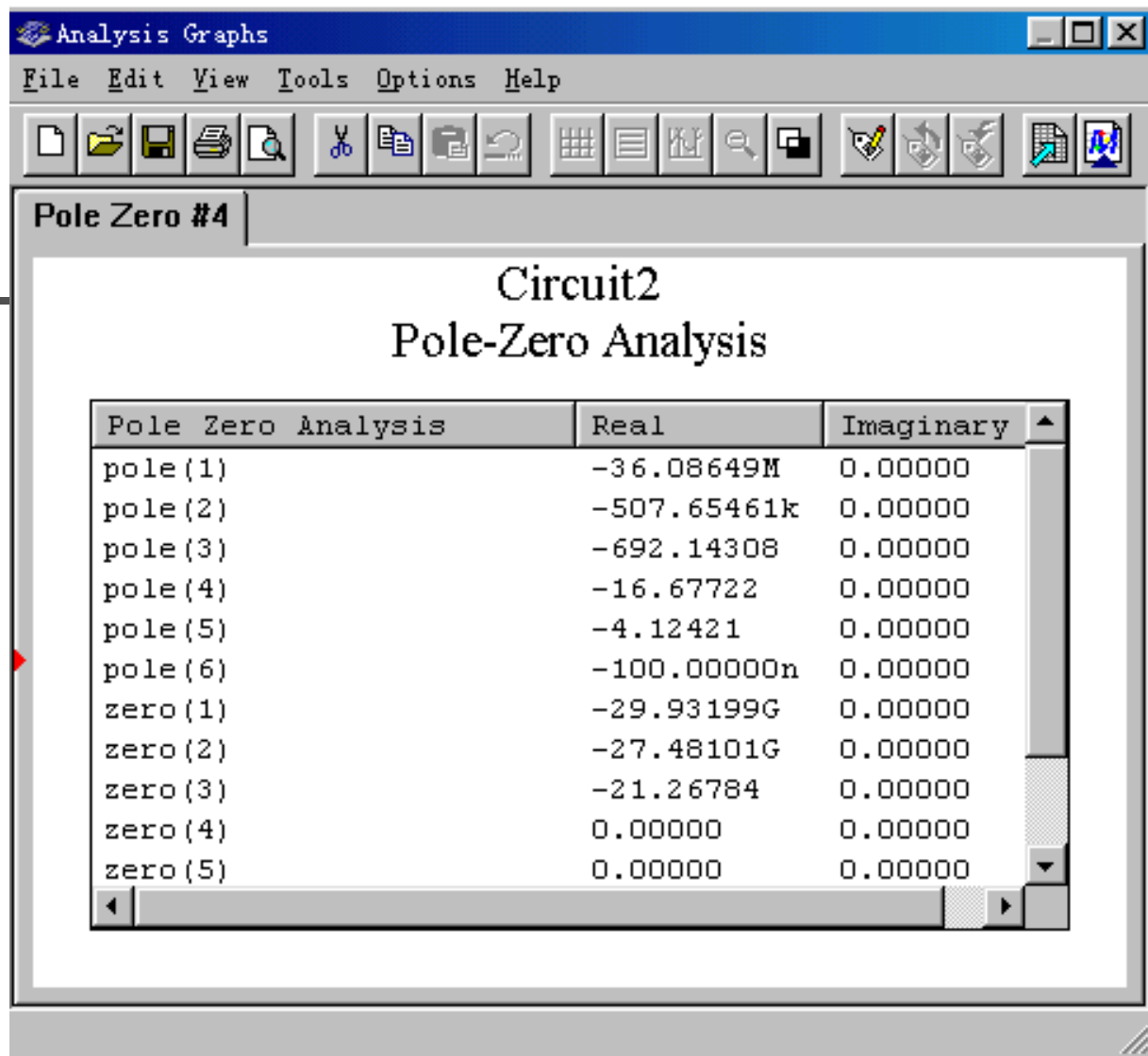


图2.2.5 电路互阻抗分析



---

### 3. 电路输入阻抗分析

选择Input Impedance进行电路输入阻抗分析。分析结果如图2.2.6所示。

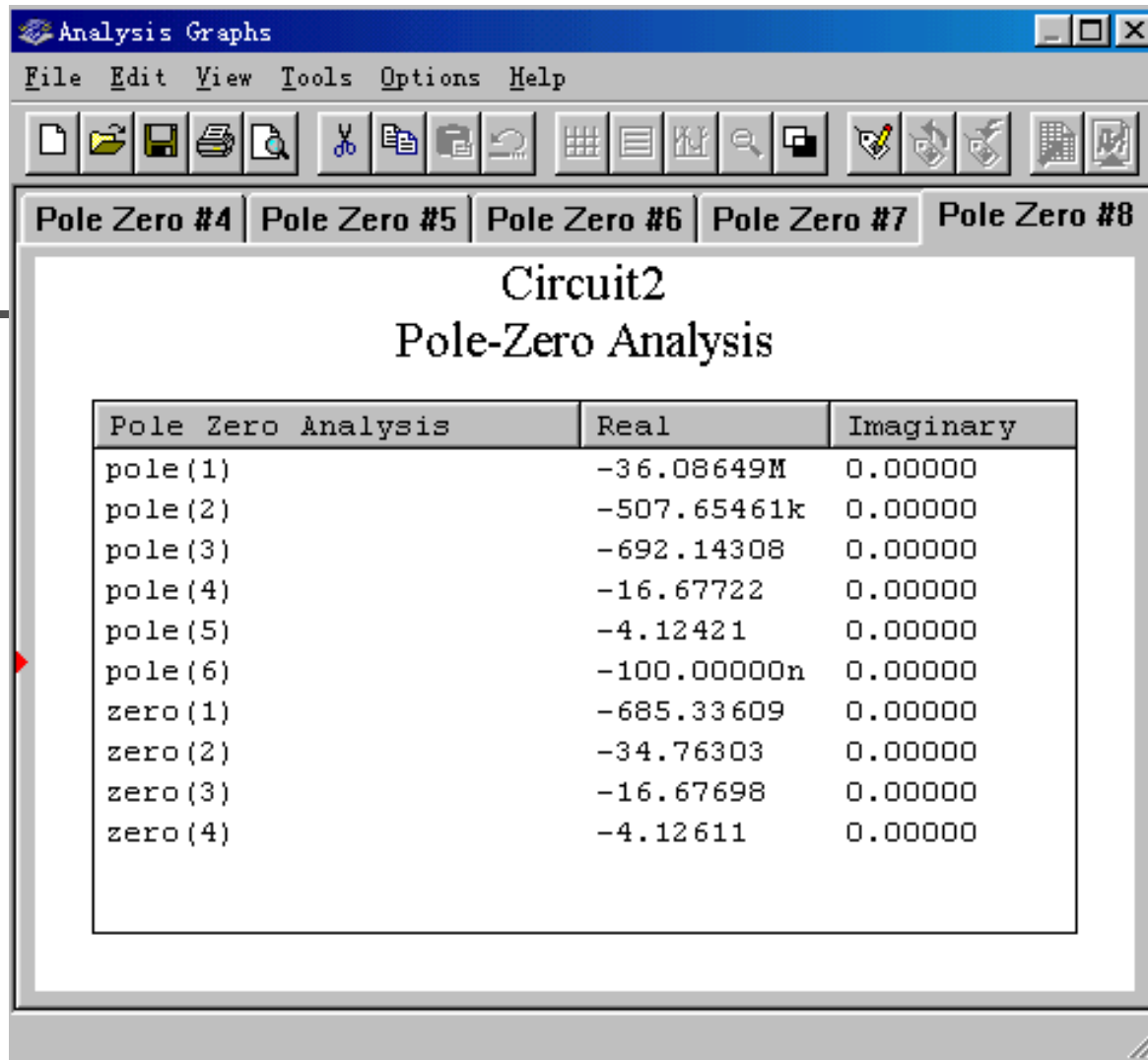


图2.2.6 电路输入阻抗分析





---

## 4. 电路输出阻抗分析

选择Output Impedance进行电路输出阻抗分析。分析结果如图2.2.7所示。

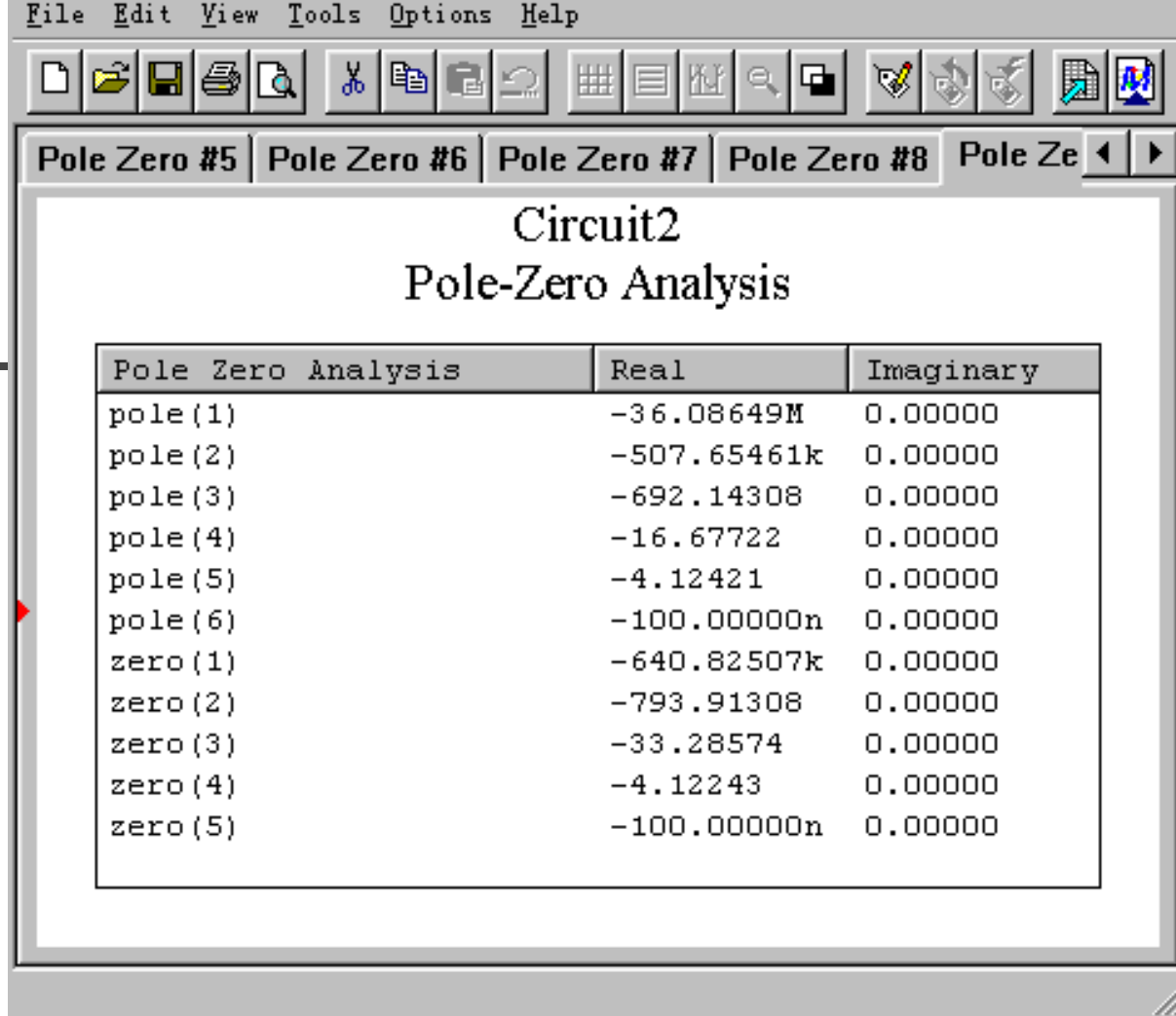


图2.2.7电路输出阻抗分析

注意：此处用到极点—零点的单位为rad/s。



## 2.2.4 电路传递函数分析

### (Transfer Function Analysis)

---

传递函数分析可以分析一个源与两个节点的输出电压或一个源与一个电流输出变量之间的直流小信号传递函数。也可以用于计算输入和输出阻抗。传递函数操作分析请看第1章1.7.13小节。本例输入电压只能取 $u_1$ ，节点4为输出节点，节点0为参考节点。仿真结果如图2.2.8所示。

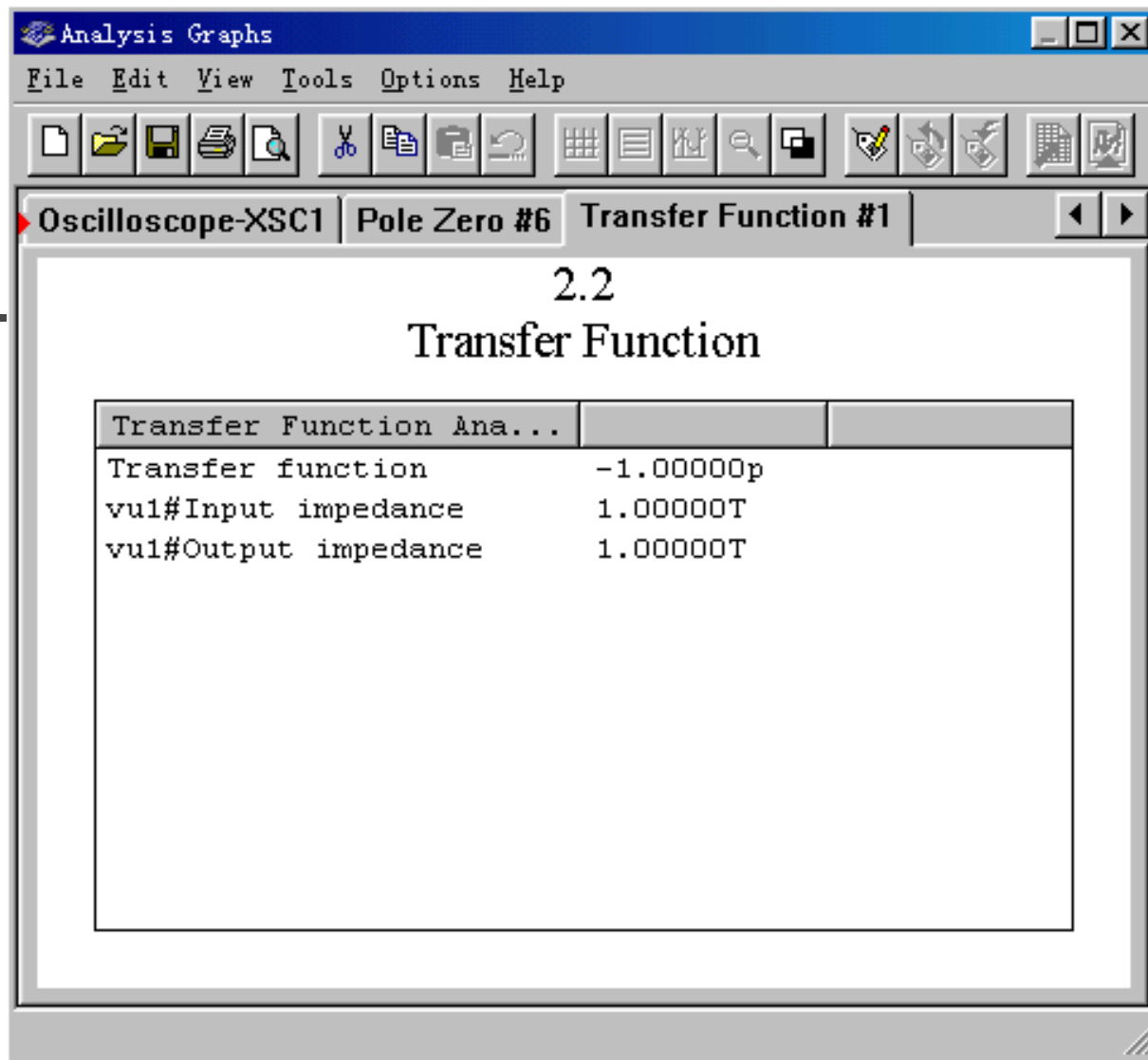


图2.2.8 传递函数仿真结果



---

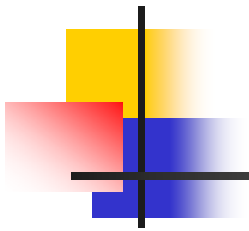
## 2.3 负反馈放大器电路



## 2.3.1 负反馈放大器电路工作原理

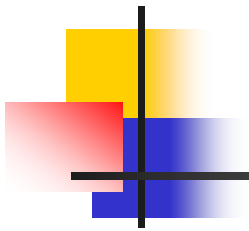
---

负反馈在电子电路中有着非常广泛的应用，虽然它使放大器的放大倍数降低，但能在多方面改善放大器的动态指标，如稳定放大倍数，改变输入、输出电阻，减小非线性失真和展宽通频带等。因此，几乎所有的实用放大器都带有负反馈。



---

负反馈放大器有四种组态，即电压串联，电压并联，电流串联，电流并联。本例以电压串联负反馈为例，分析负反馈对放大器各项性能指标的影响。



---

图2.3.1为带有负反馈的两级阻容耦合放大电路，在电路中通过 $R_F$  (RF)把输出电压 $u_o$ 引回到输入端，加在晶体管 $VT_1$  (VT1)的发射极上，在发射极电阻 $R_{F1}$  (RF1)上形成反馈电压 $u_f$ 。根据反馈的判断法可知，它属于电压串联负反馈。



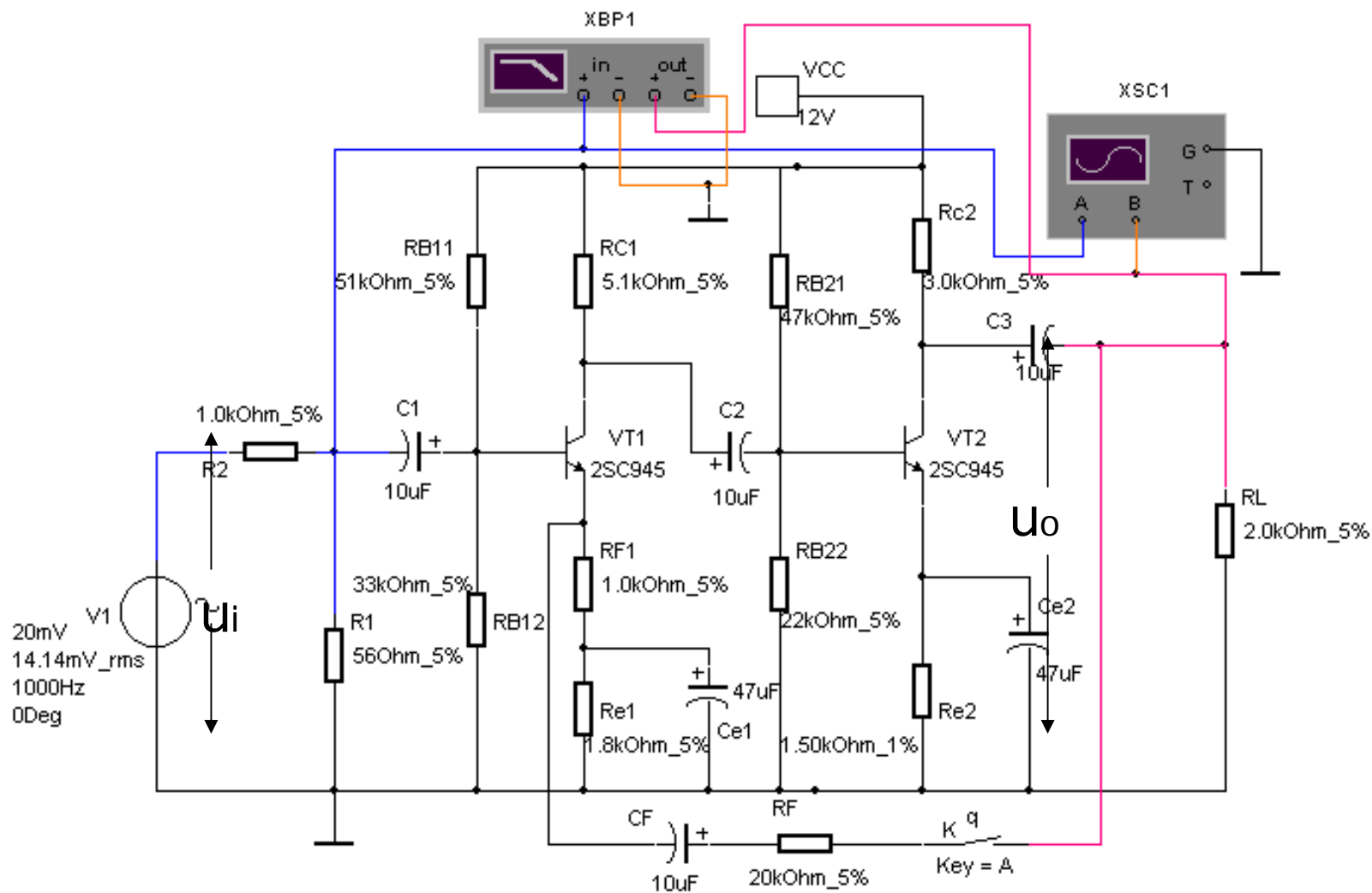
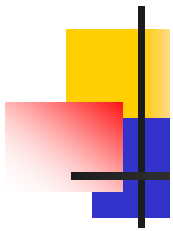


图2.3.1 带有电压串联负反馈的两级阻容耦合放大器



---

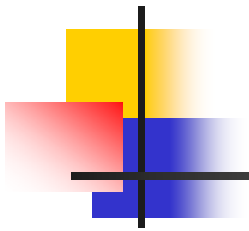
主要性能指标如下

## 1. 闭环电压放大倍数

$$A_{uf} = \frac{A_u}{1 + A_u F_u}$$

其中：

$$A_u = \frac{U_o}{U_i}$$



---

$A_u$ 为基本放大器（无反馈）的电压放大倍数，即开环电压放大倍数。

$1 + A_u F_u$  —— 反馈深度，它的大小决定了负反馈对放大器性能改善的程度。



---

## 2. 反馈系数

$$F_u = \frac{R_{F1}}{R_F + R_{F1}}$$

## 3. 输入电阻

$$R_{if} = (1 + A_u F_u) R_i$$



## 4. 输出电阻

$$R_{of} = \frac{R_0}{1 + A_{u0}F_u}$$

式中： $R_0$  为基本放大器的输出电阻。 $A_{u0}$  为基本放大器 $R_L = \infty$ 时的电压放大倍数。



## 2.3.2 负反馈对失真的改善作用

---

将图2.3.1电路中开关“Key=A”断开，双击电路窗口中信号源符号，打开AC Voltage对话框如图2.3.2所示。

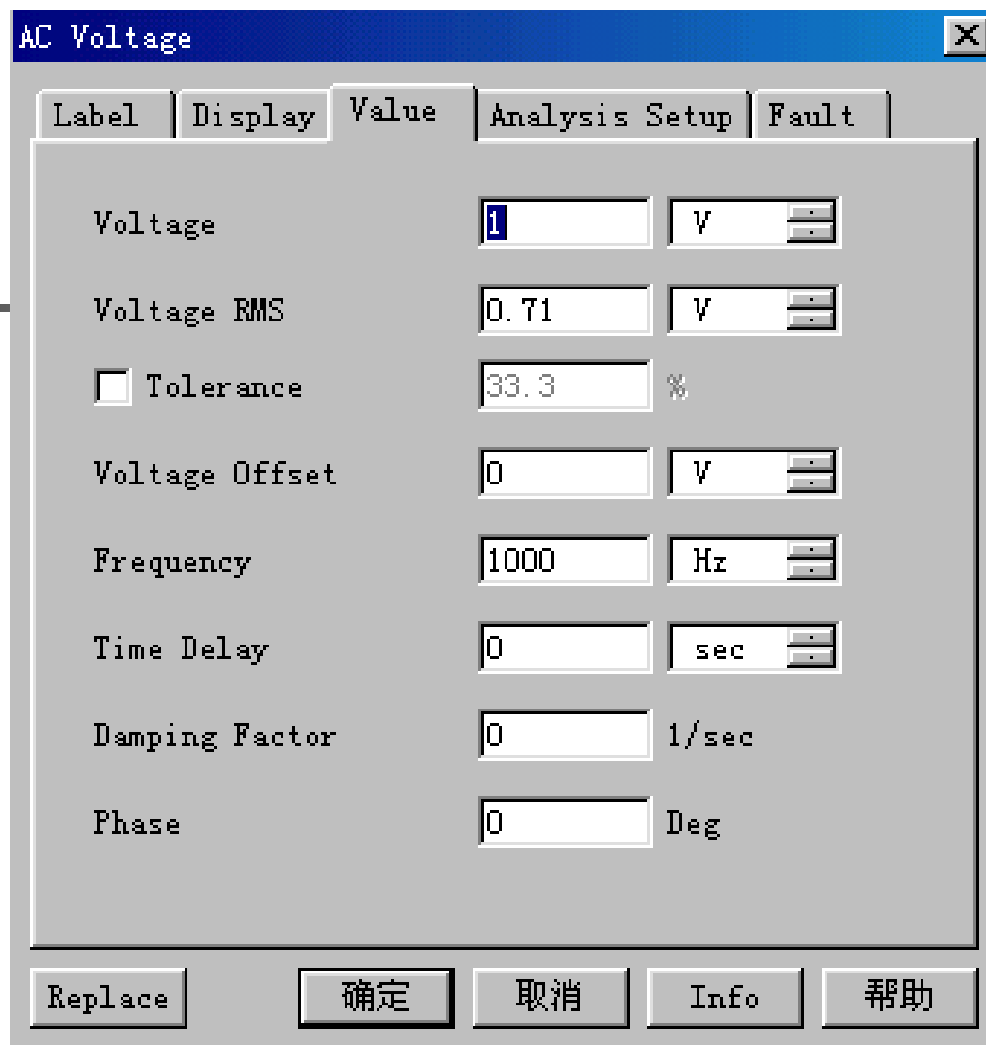


图2.3.2 AC Voltage对话框



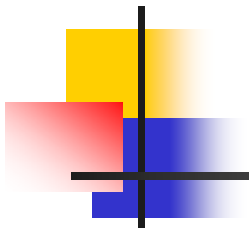
---

Voltage区：设置输入电压的幅值为1V。

Voltage RMS区：自动显示输入电压的有效值0.71V。

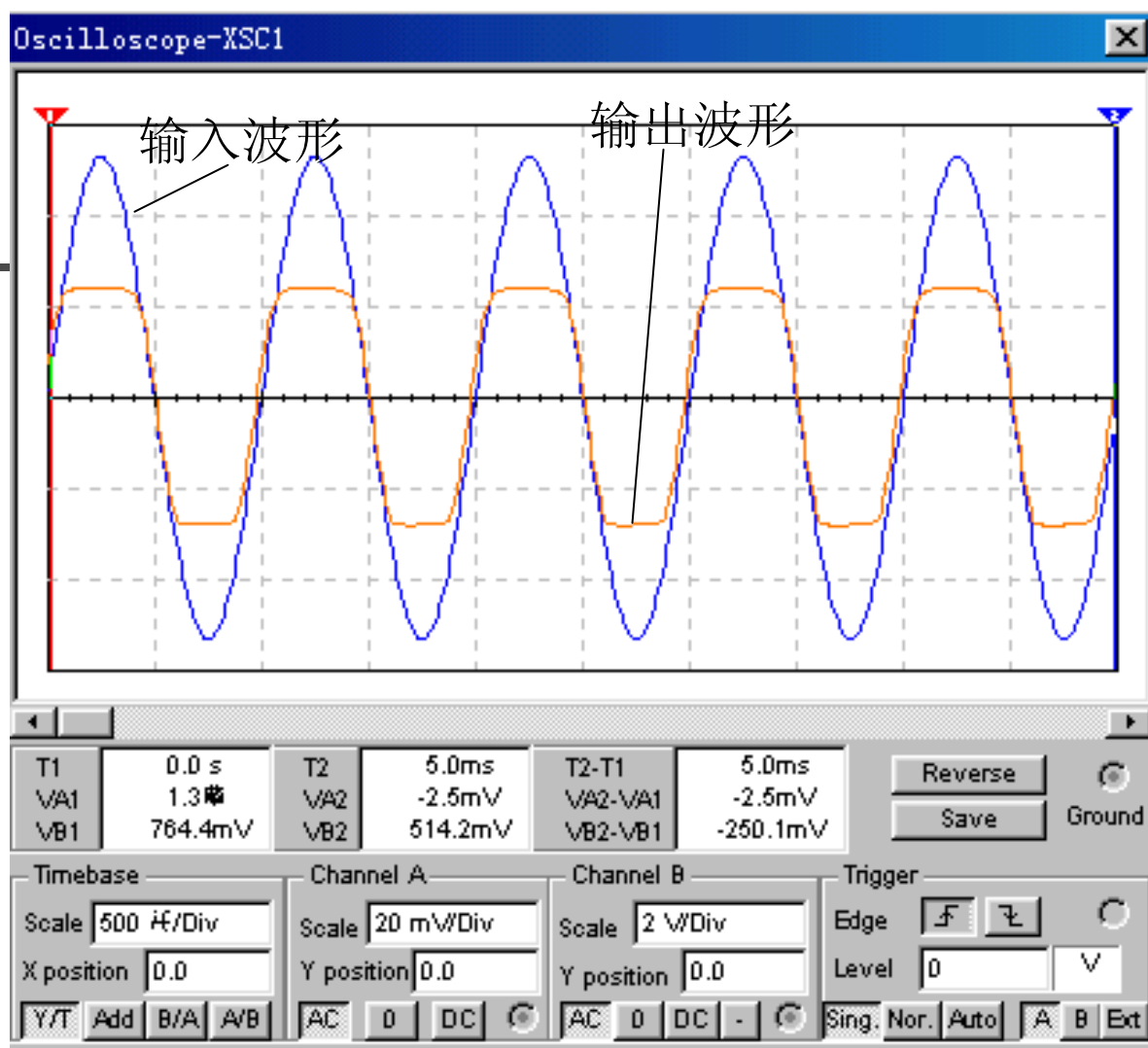
Frequency区：设置输入电压频率为1000Hz。



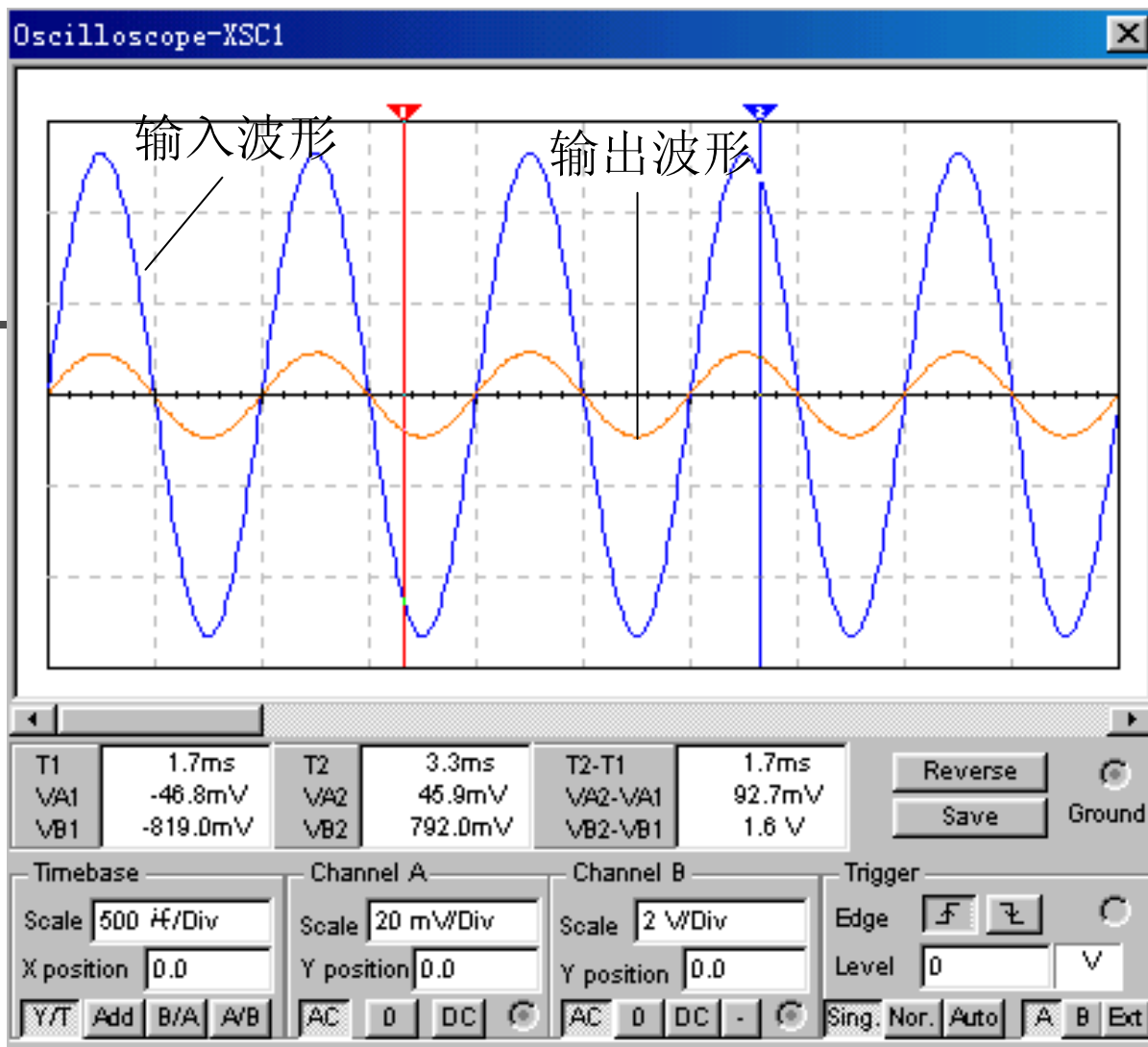


---

也可逐步加大 $u_i$ 的幅度，用示波器观察，使输出信号出现失真如图2.3.3(a)所示（注意不要过分失真），然后将开关“Key=A”闭合，从2.3.3(b)上观察到输出波形的失真得到明显的改善。



(a) 无负反馈



(b) 有负反馈

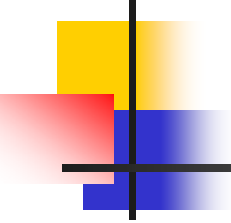
### 2.3.3 负反馈对放大器失真的改善



### 2.3.3 负反馈对频带的展宽

---

引入负反馈后，放大电路的中频放大倍数减少了，等于无负反馈时的 $1/(1+A_uF_u)$ ，而上限频率 $f_H$ 提高了，等于无负反馈时的 $(1+A_uF_u)$ ，而下限频率降低到原来的 $1/(1+A_uF_u)$ ，所以总的通频带得到了展宽。



---

图2.3.4是未加负反馈时放大电路的幅频特性，标尺指示的位置参数为 $38.686\text{dB}/162.183\text{Hz}$ 。图2.3.5是加入负反馈后放大电路的幅频特性，标尺指示的位置参数为 $21.406\text{dB}/1.622\text{MHz}$ 。

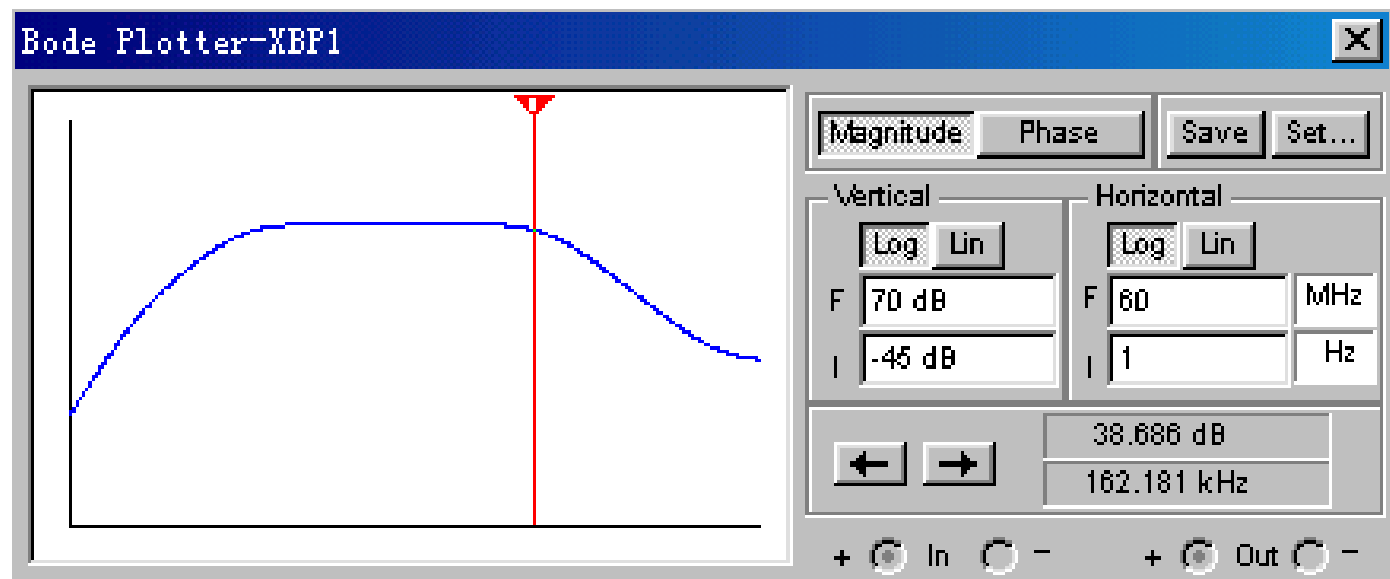


图2.3.4 未加负反馈时放大电路的幅频特性

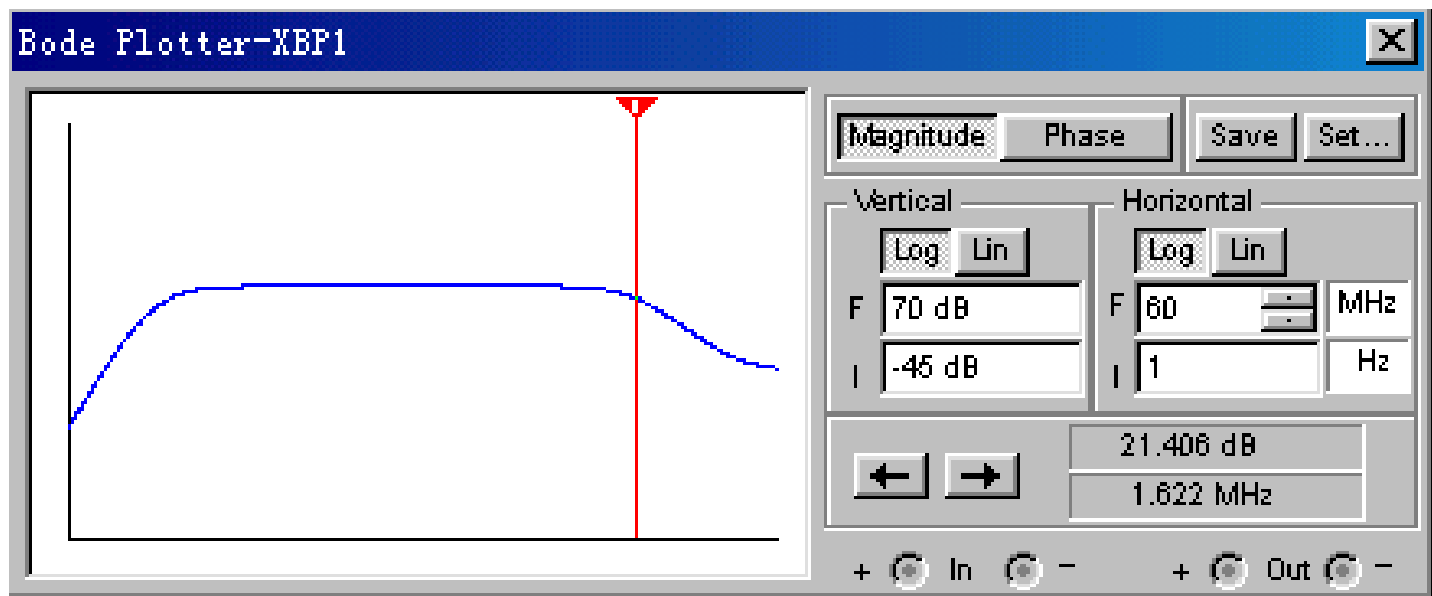
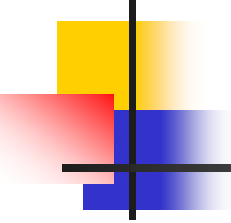


图2.3.5 加入负反馈后放大电路的幅频特性



---

从图2.3.4、2.3.5可看出波特图仪的参数设置是一样的，但加入负反馈后通频带得到了展宽。





---

## 2.4 射极跟随器



## 2.4.1 射极跟随器工作原理

---

射极跟随器的原理图如图2.4.1所示。它是一个电压串联负反馈放大电路，具有输入电阻高，输出电阻低，电压放大倍数接近于1，输出电压能够在较大范围内跟随输入电压作线性变化以及输入、输出信号同相等特点。

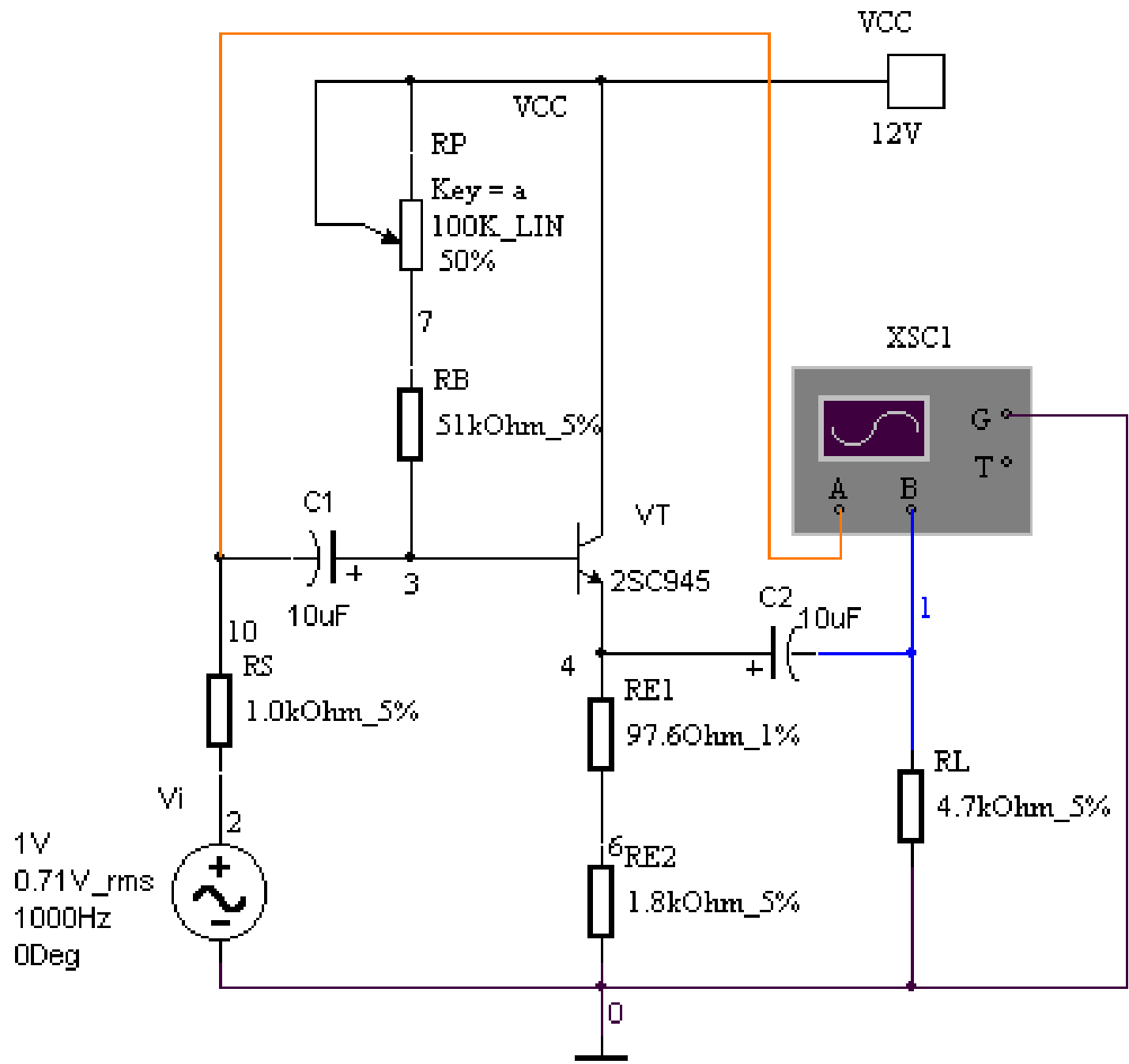


图2.4.1  
射极跟随器



## 1, 输入电阻 $R_i$

$$R_i = r_{be} + (1 + \beta) (R_{E1} + R_{E2})$$

如考虑偏置电阻 $R_B$  ( $R_B$ ) 和负载 $R_L$  ( $R_L$ ) 的影响, 则

$$R_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta) (R_E // R_L)]$$

由上式可知射极跟随器的输入电阻 $R_i$ 比共发射极单管放大器的输入电阻 $R_i = R_B // r_{be}$ 要高得多, 但由于偏置电阻 $R_B$ 的分流作用, 输入电阻难以进一步提高。

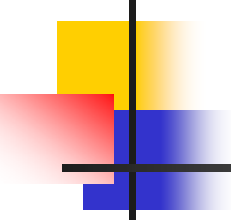


## 2. 输出电阻 $R_0$

$$R_0 = \frac{r_{be}}{\beta} // R_E \approx \frac{r_{be}}{\beta}$$

如考虑信号源内阻 $R_S$  ( $R_S$ ), 则 $R_0$

$$R_0 = \frac{r_{be} + (R_S // R_B)}{\beta} // R_E \approx \frac{r_{be} + (R_S // R_B)}{\beta}$$



---

式中 $R_E = R_{E1} + R_{E2}$

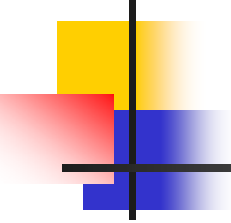
由上式可知射极跟随器的输出电阻 $R_0$ 比共发射极单管放大器的输出电阻 $R_0 \approx R_C$ 低得多。  
三极管的 $\beta$ 愈高，输出电阻愈小。



### 3. 电压放大倍数

图2.4.1电路

$$A_u = \frac{(1 + \beta)(R_E // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)} \leq 1$$



---

上式说明射极跟随器的电压放大倍数小于近于1，且为正值。其仿真结果如图2.4.2所示，这是深度电压负反馈的结果。但它的发射极电流仍比基极电流大 $(1 + \beta)$ 倍，所以它具有有一定的电流和功率放大作用。



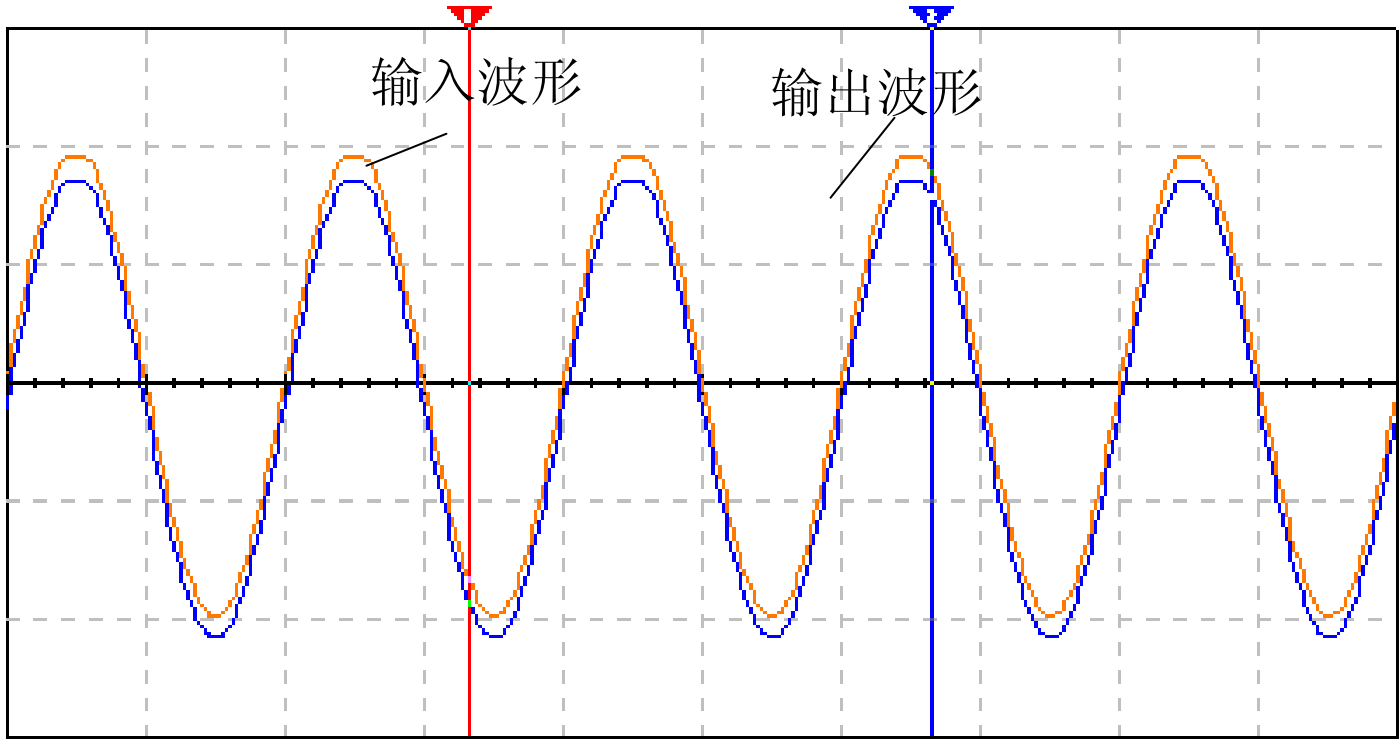


图2.4.2  
射极跟随器  
输入输出波形

T1	1.7ms	T2	3.3ms	T2-T1	1.7ms	Reverse	<input type="radio"/>
VA1	-3.5 V	VA2	3.4 V	VA2-VA1	6.9 V	Save	Ground
VB1	-3.5 V	VB2	3.4 V	VB2-VB1	6.8 V		

Timebase: Scale 500  $\mu$ s/Div, X position 0.0

Channel A: Scale 2 V/Div, Y position 0.0, AC 0 DC

Channel B: Scale 2 V/Div, Y position -0.2, AC 0 DC -

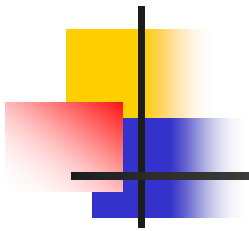
Trigger: Edge    Level 0 V, Sing. Nor. Auto  A B Ext



---

## 4. 电压跟随范围

电压跟随范围是指射极跟随器输出电压  $u_o$  跟随输入电压  $u_i$  作线性变化的区域。当  $u_i$  超过一定范围时， $u_o$  便不能跟随  $u_i$  作线性变化，即  $u_o$  波形产生了失真。



---

为了使输出电压 $u_o$ 正、负半周对称，静态工作点应选在交流负载线中点，测量时可直接用示波器读取 $u_o$ 的峰-峰值，即电压跟随范围；或用交流毫伏表读取 $U_o$ 的有效值，则电压跟随范围

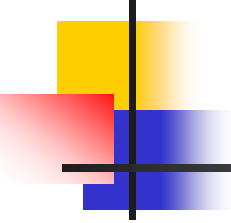
$$U_{oP-P} = 2\sqrt{2} U_o$$



## 2.4.2 射极跟随器的瞬态特性分析 (Transient Analysis)

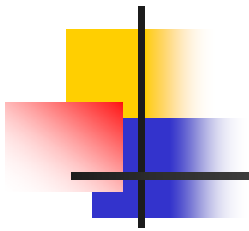
---

瞬态分析是指对所选定的电路节点的时域响应。即观察该节点在整个显示周期中每一时刻的电压波形。在进行瞬态分析时，直流电源保持常数，交流信号源随着时间而改变，电容和电感都是能量储存模式元件。



---

用鼠标点击 Simulate→Analysis→Transient Analysis，将弹出Transient Analysis对话框，进入瞬态分析状态。Transient Analysis对话框有Analysis Parameters、Output variables、Miscellaneous Options和Summary 4个选项，其中Output variables、Miscellaneous Options。



---

和Summary 3个选项与直流工作点分析的设置一样，Analysis Parameters对话框如图2.4.2所示。参数设置方法请看1.7节中的1.7.4小节。本例参数设置如图2.4.3所示。

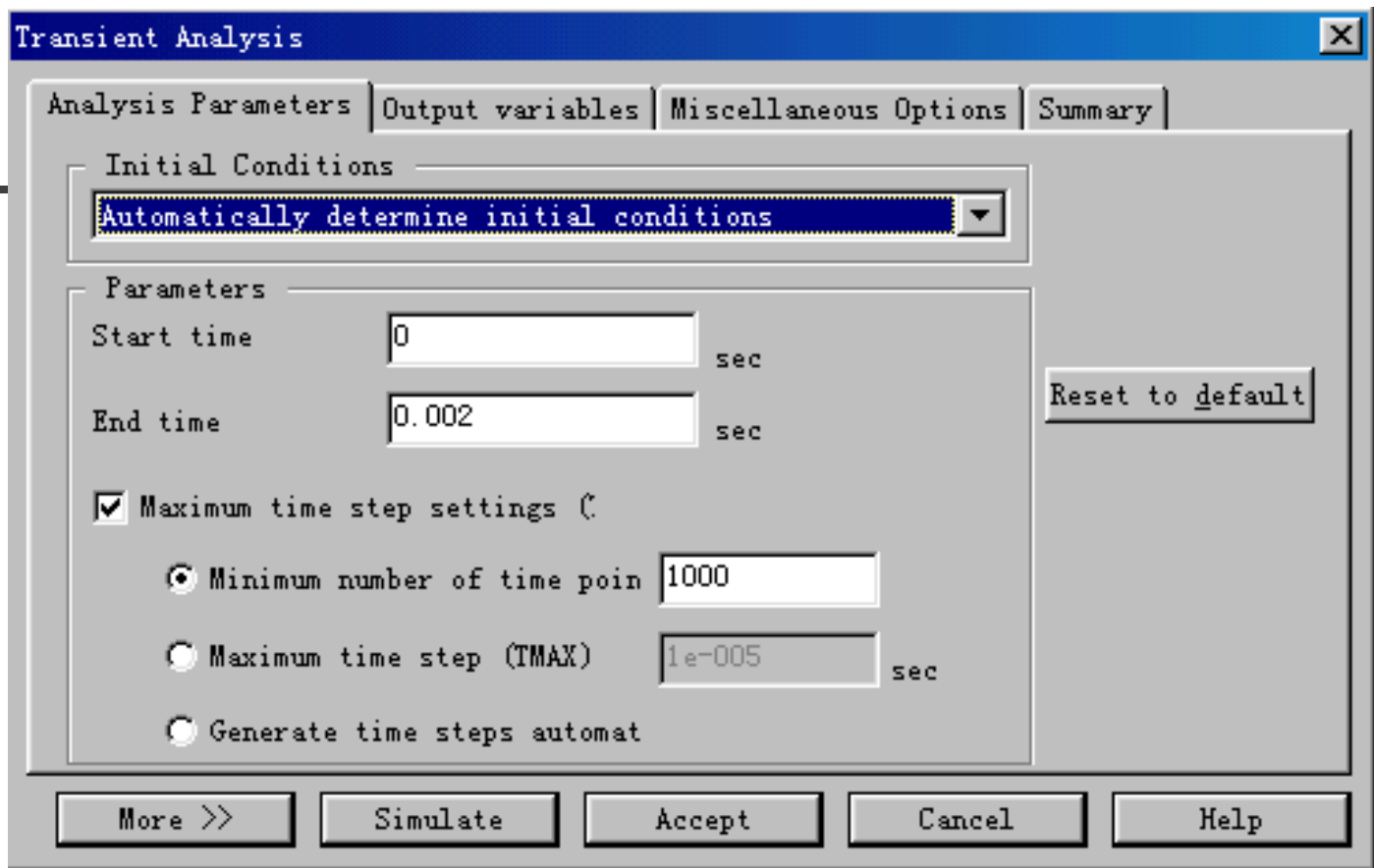
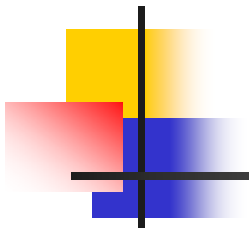


图2.4.3 Analysis Parameters对话框



点击Simulate按钮，仿真运行如图2.4.4所示，可得输出电压的峰值  $U_{om}=1V$ ，其结果满足

$$A_u = \frac{(1 + \beta)(R_E // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)} \leq 1 \quad \text{关系式。}$$



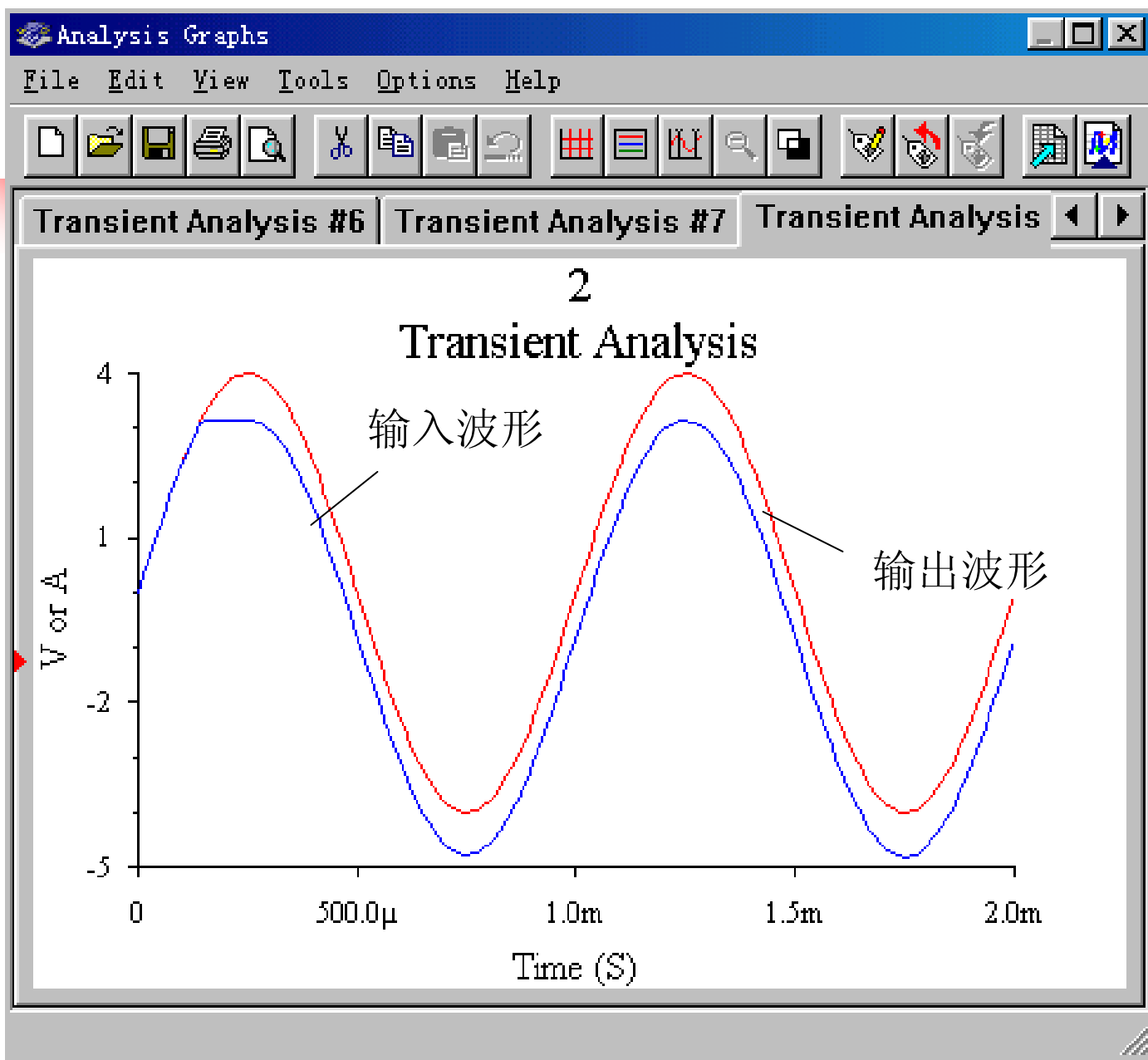
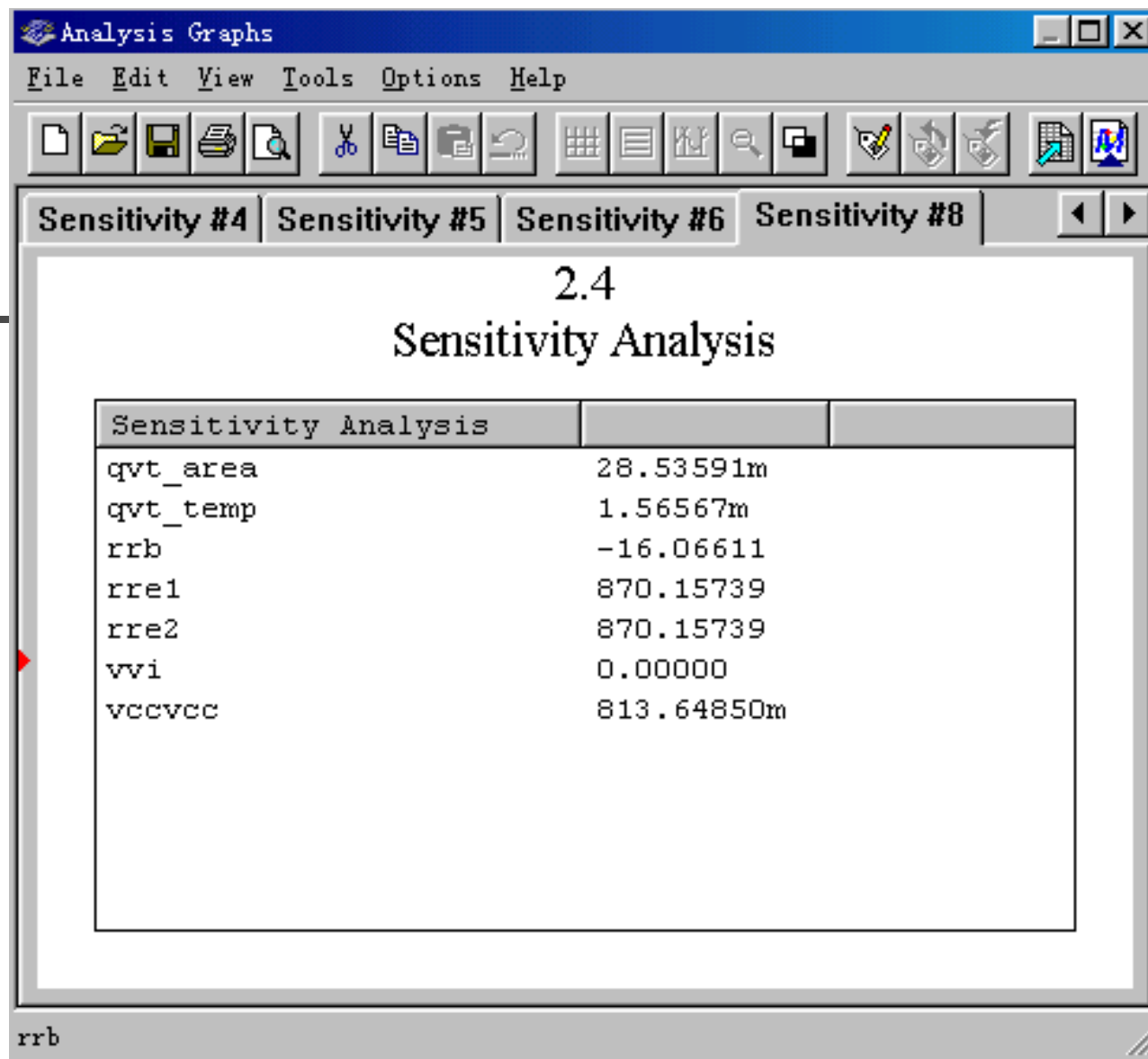


图2.4.4  
分析节点1的  
瞬态特性波形图

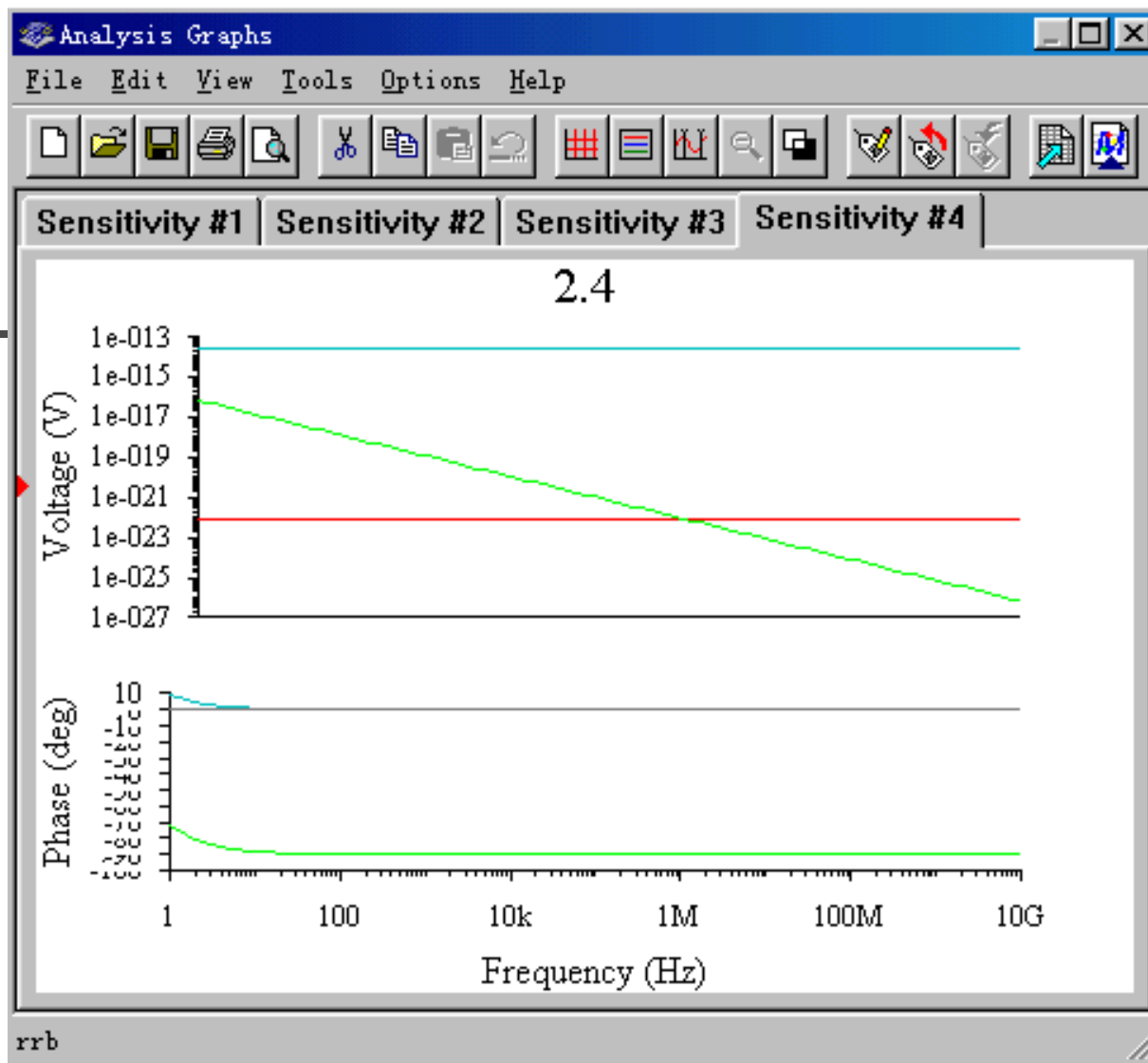
## 2.4.3 电路灵敏度分析

### (Sensitivity Analyses)

灵敏度分析 (Sensitivity Analyses) 是分析电路特性对电路中元器件参数的敏感程度。灵敏度分析包括直流灵敏度分析和交流灵敏度分析功能。直流灵敏度分析的仿真结果以数值的形式显示，交流灵敏度分析仿真的结果以曲线的形式显示。灵敏度分析操作请看第1章1.7.9小节。本例选择了节点4分别进行了直流和交流电压灵敏度仿真，其仿真结果如图2.4.5(a)及2.4.5(b)所示。



(a) 直流电压灵敏度仿真



(b) 交流电压灵敏度仿真

2.4.5 电路灵敏度仿真



## 2.4.4 电路参数扫描分析 (Parameter Sweep Analysis)

---

采用参数扫描方法分析电路，可以较快地获得某个元件的参数，在一定范围内变化时对电路的影响。相当于该元件每次取不同的值，进行多次仿真。参数扫描分析操作请看第1章1.7.10小节。对于本例Analysis Parameters页中的各选项选择如下：



---

Sweep Parameters: Device Parameters

Device : Capacitor

Name: cc2

Parameters: Capacitor



---

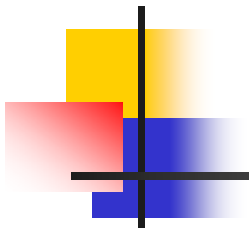
Sweep Variation Type: Linear

Star: 1e-005

Stop: 0.0001

# Of: 2

Analysis to Sweep: Transient Analysis



---

点击Edit Analysis按钮，将Edit time修改为0.01。

选择Group all traces on plot选项。

同时在Output variables页中选择节点4为分析变量。

最后点击Simulate按钮，则仿真结果如图2.4.6所示。



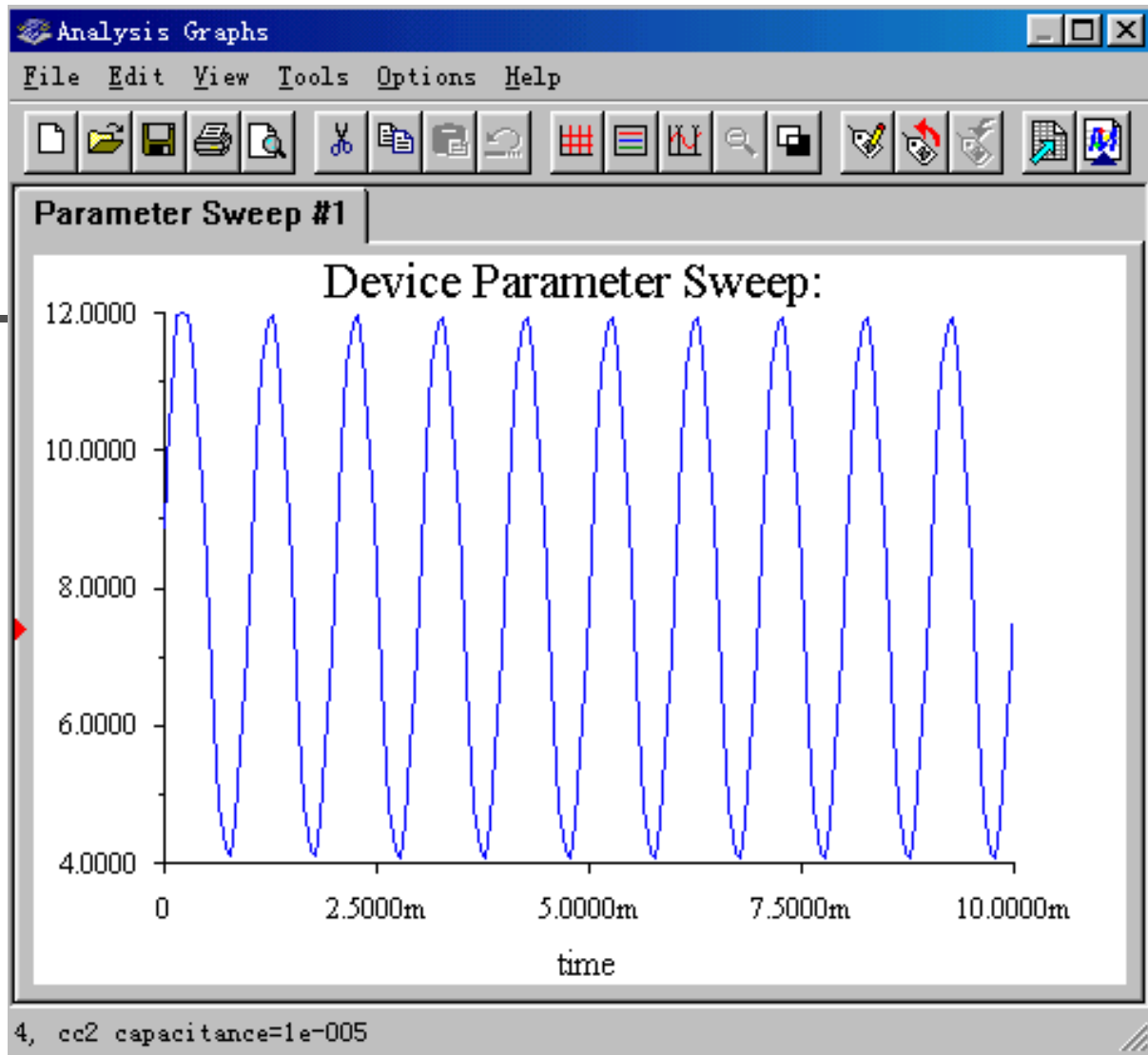


图2.4.6 节点4参数扫描仿真结果



---

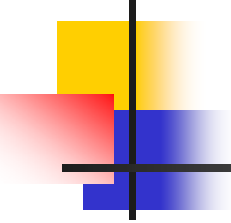
## 2.5 差动放大器



## 2.5.1 差动放大器电路结构

---

图2.5.1是差动放大器的基本结构。它由两个元件参数相同的基本共发射放大电路组成。当开关K拨向左边时，构成典型的差动放大器。调零电位器RP用来调节 $VT_1$  ( $VT1$ )、



---

$VT_2$  ( $VT_2$ ) 管的静态工作点，使得输入信号  $U_i=0$  时，双端输出电压  $U_0=0$ 。 $R_E$  ( $RE$ ) 为两管共用的发射极电阻，它对差模信号无负反馈作用，因而不影响差模电压放大倍数，但对共模信号有较强的负反馈作用，故可以有效地抑制零漂，稳定静态工作点。

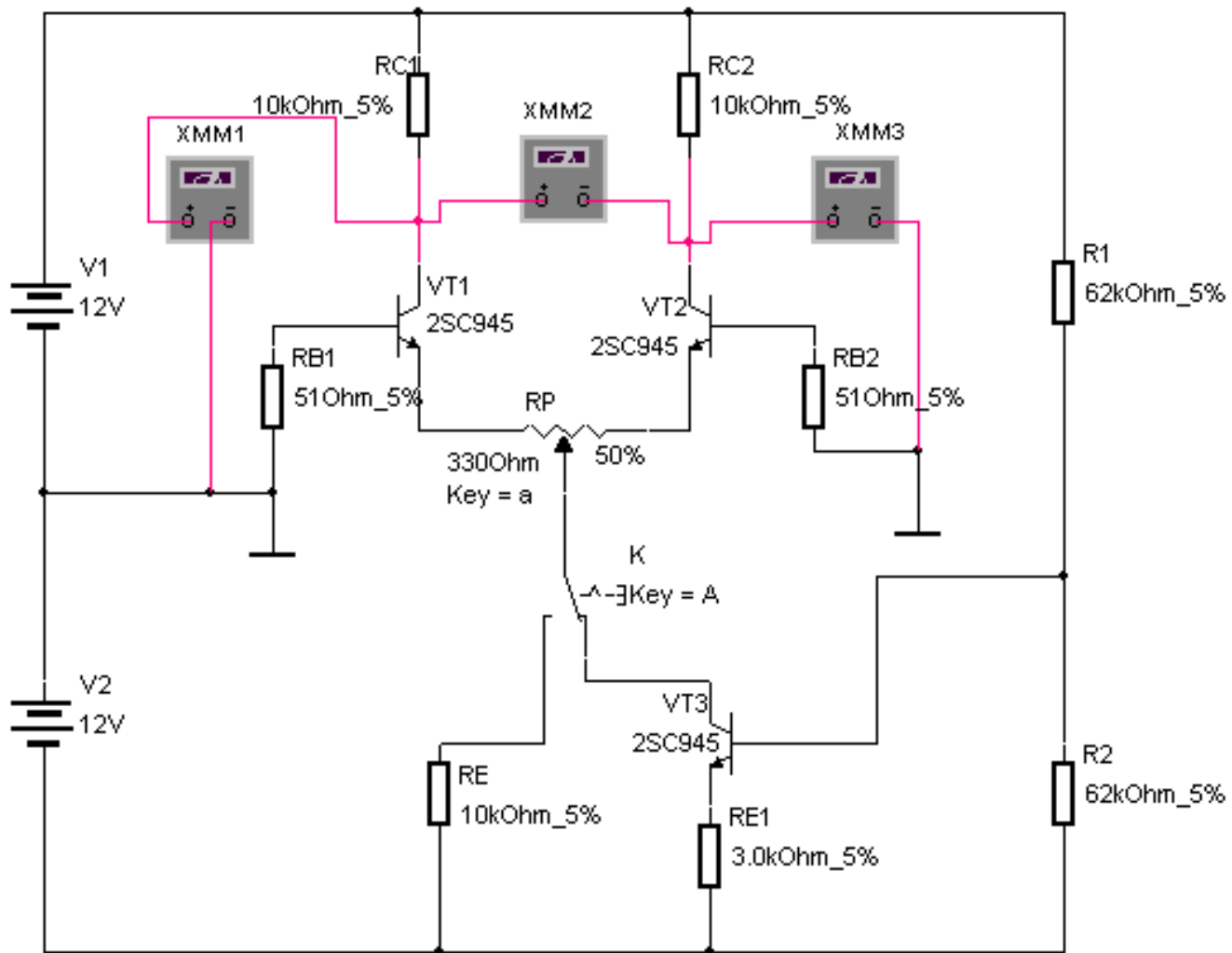
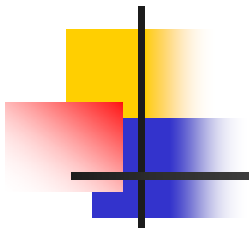


图2.5.1 差动放大器原理电路



在设计时，选择 $VT_1$ 、 $VT_2$ 特性完全相同，相应的电阻也完全一致，调节电位器RP的位置置50%处，则当输入电压等于零时， $U_{CQ1} = U_{CQ2}$ ，即 $U_o = 0$ 。双击图中万用表XMM1、XMM2、XMM3分别显示出 $U_{CQ1}$ 、 $U_{CQ2}$ 、 $U_o$ 电压，其显示结果如图2.5.2所示。



(a)  $U_{CQ1}$ 显示结果



(b)  $U_o$ 显示结果



(c)  $U_{CQ2}$ 显示结果

图2.5.2  $U_{CQ1}$ 、 $U_{CQ2}$ 、 $U_o$ 显示结果



## 2.5.2 差动放大器的静态工作点分析

### 1. 典型差动放大器电路静态工作点

$$I_E \approx \frac{|U_{EE}| - U_{BE}}{R_E} \quad (\text{认为 } U_{B1} = U_{B2} \approx 0)$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{1}{2} I_E$$





## 2. 恒流源差动放大器电路静态工作点

$$I_{C3} \approx I_{E3} \approx \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} (U_{CC} + |U_{EE}|) - U_{BE}}{R_{E1}}$$

$$I_{C1} = I_{C1} = \frac{1}{2} I_{C3}$$



## 2.5.3 差模电压放大倍数和共模电压放大倍数

### 1. 差模电压放大倍数

当差动放大器的发射极电阻 $R_E$ 足够大，或采用恒流源电路时，差模电压放大倍数 $A_d$ 由输出端方式决定，而与输入方式无关。



---

## (1) 双端输出方式

$R_E = \infty$ ，RP在中心位置时，

$$A_d = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_i} = - \frac{\beta R_c}{R_B + r_{be} + \frac{1}{2}(1 + \beta) RP}$$

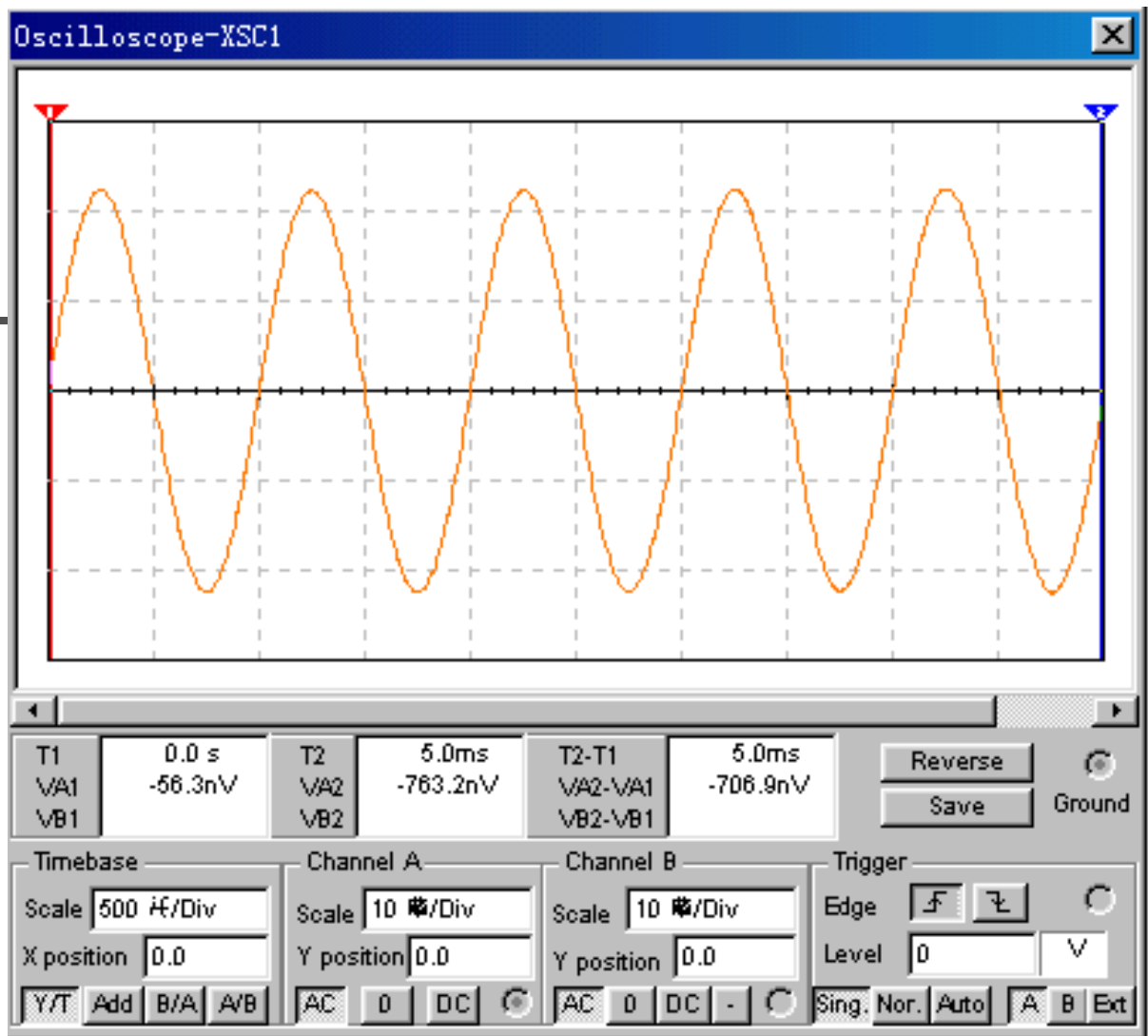


图2.5.3 双端输出波形



---

## (2) 单端输出方式

$$A_{d1} = \frac{\Delta U_{c1}}{\Delta U_i} = \frac{1}{2} A_d$$

$$A_{d2} = \frac{\Delta U_{c2}}{\Delta U_i} = -\frac{1}{2} A_d$$

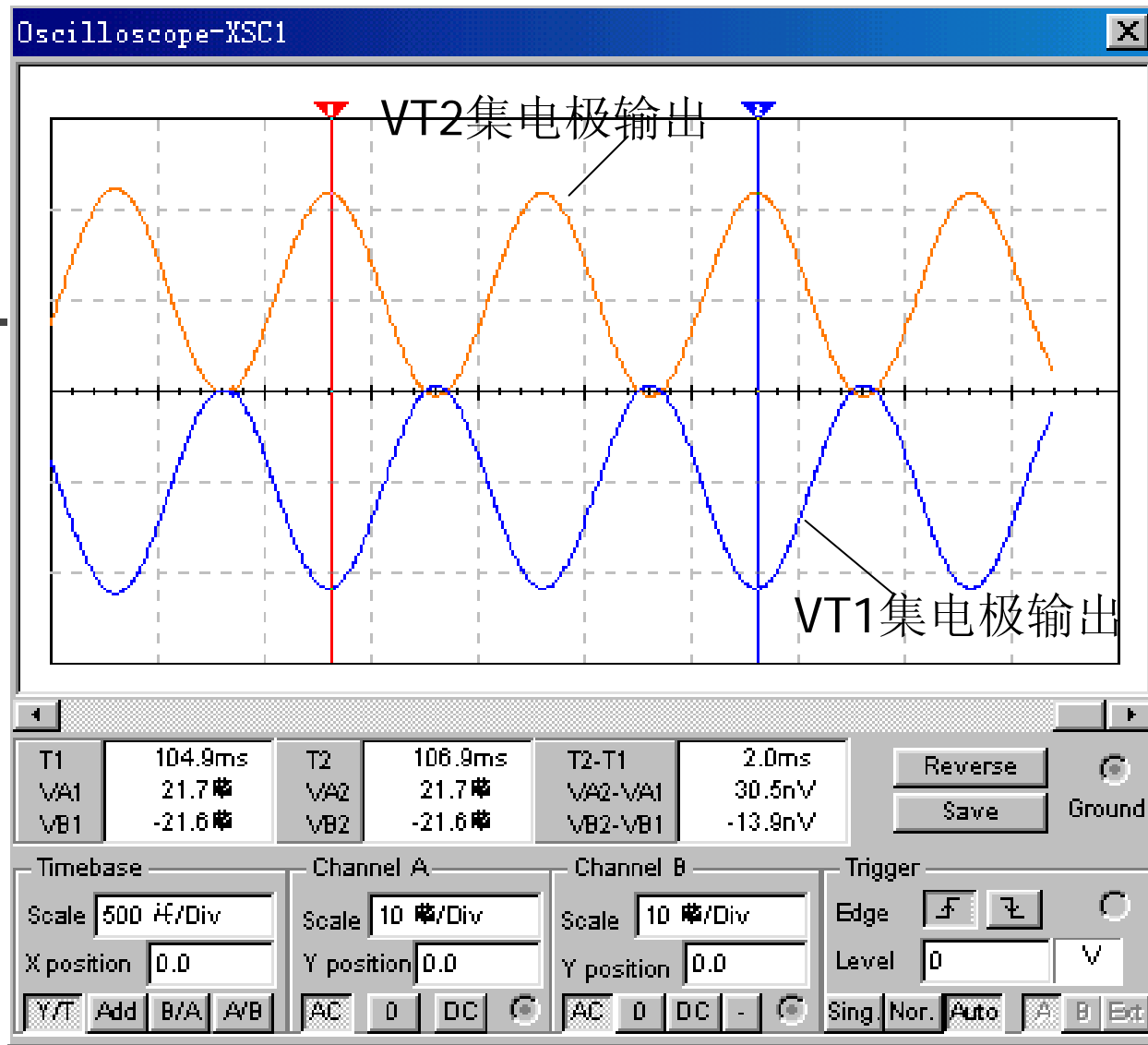
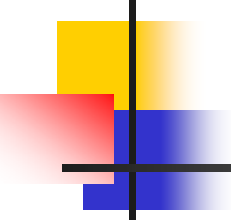


图2.5.4 单端输出波形



## 2. 共模电压放大倍数

### (1) 单端输出方式

当输入共模信号时，若为单端输出，则有

$$A_{C1} = A_{C2} = \frac{\Delta U_{C1}}{\Delta U_i} = \frac{-\beta R_C}{R_B + r_{be} + (1 + \beta) \left( \frac{1}{2} R_P + 2R_E \right)} \approx -\frac{R_C}{2R_E}$$

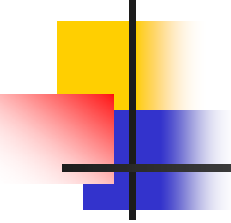


---

## (2) 双端输出方式

若为双端输出，在理想情况下





---

$$A_C = \frac{\Delta U_0}{\Delta U_i} = 0$$

实际上由于元件不可能完全对称，因此  $A_C$  也不会绝对等于零。



## 2.5.4 共模抑制比CMRR

---

为了表征差动放大器对有用信号（差模信号）的放大作用和对共模信号的抑制能力，通常用一个综合指标来衡量，即共模抑制比

$$\text{CMRR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad \text{或} \quad \text{CMRR} = 20\text{Log} \left| \frac{A_d}{A_c} \right| (\text{dB})$$

注意：差动放大器的输入信号可采用直流信号也可采用交流信号。



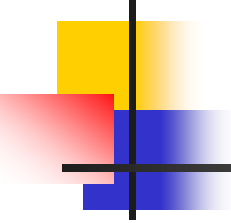
---

## 2.6 低频功率放大器



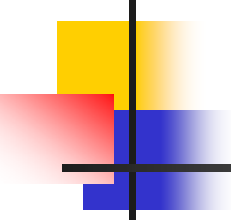
## 2.6.1 低频功率放大器工作原理

图2.6.1所示为OTL 低频功率放大器。其中由晶体三极管 $VT_1$  ( $VT1$ )组成推动级（也称前置放大级）， $VT_2$  ( $VT2$ )、 $VT_3$  ( $VT3$ )是一对参数对称的NPN和PNP型晶体三极管，它们组成互补推挽OTL功率放大电路。由于每一个管子都接成射极输出器形式，因此具有输出电阻低，负载能力强等优点，适合于作



---

功率输出级。VT<sub>1</sub>管工作于甲类状态，它的集电极电流I<sub>C1</sub>由电位器RP<sub>1</sub> (RP1) 进行调节。I<sub>C1</sub>的一部分流经电位器RP<sub>2</sub> (RP2) 及二极管VD，给VT<sub>2</sub>、VT<sub>3</sub>提供偏压。调节RP<sub>2</sub>，可以使VT<sub>2</sub>、VT<sub>3</sub>得到合适的静态电流而工作于甲、乙类状态，以克服交越失真。



---

静态时要求输出端中点A的电位，可以通过调节 $RP_1$ 来实现，又由于 $RP_1$ 的一端接在A点，因此在电路中引入 $\frac{1}{2}$ 交、直流电压并联负反馈，一方面能够稳定放大器的静态工作点，同时也改善了非线性失真。 $C_4$  ( $C_4$ )和R 构成自举电路，用于提高输出电压正半周的幅度，以得到大的动态范围。

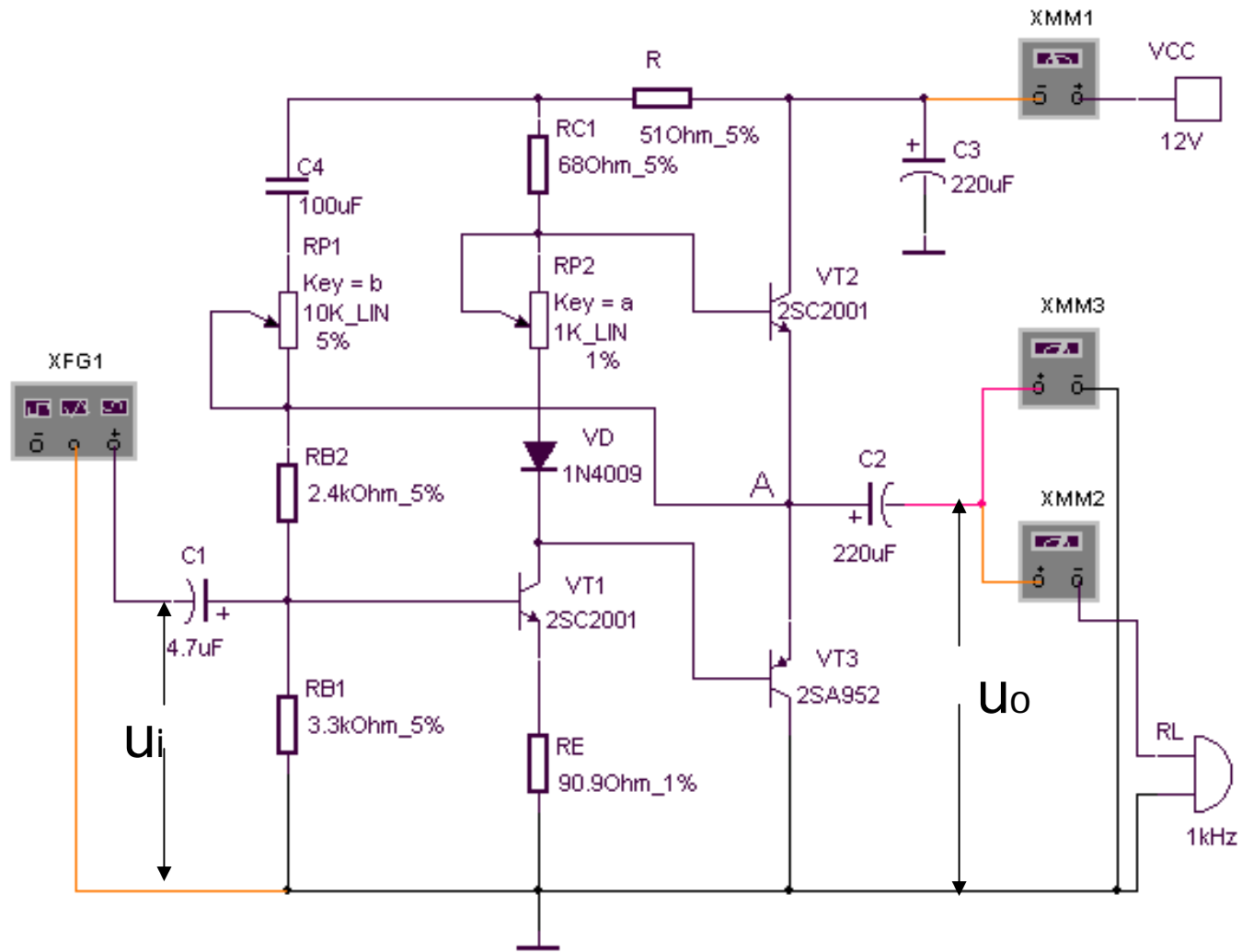
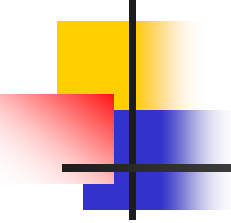


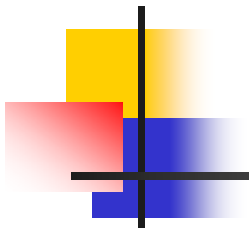
图2.6.1 低频功率放大器工作原理图



---

当输入正弦交流信号  $u_i$  时，经  $VT_1$  放大、倒相后同时作用于  $VT_2$ 、 $VT_3$  的基极， $u_i$  的负半周使  $VT_2$  管导通（ $VT_3$  管截止），有电流通过负载  $R_L$ ，同时向电容  $C_2$  (C2) 充电，在  $u_i$  的正半周， $VT_3$  导通（ $VT_2$  截止），则已充好电的电容器  $C_2$





---

起着电源的作用，通过负载 $R_L$ 放电，这样在 $R_L$ 上就得到完整的正弦波，其波形如图2.6.2所示。在仿真中若输出端接喇叭，在仿真时只要输入不同的频率信号，就能在喇叭中能听到不同的声音。

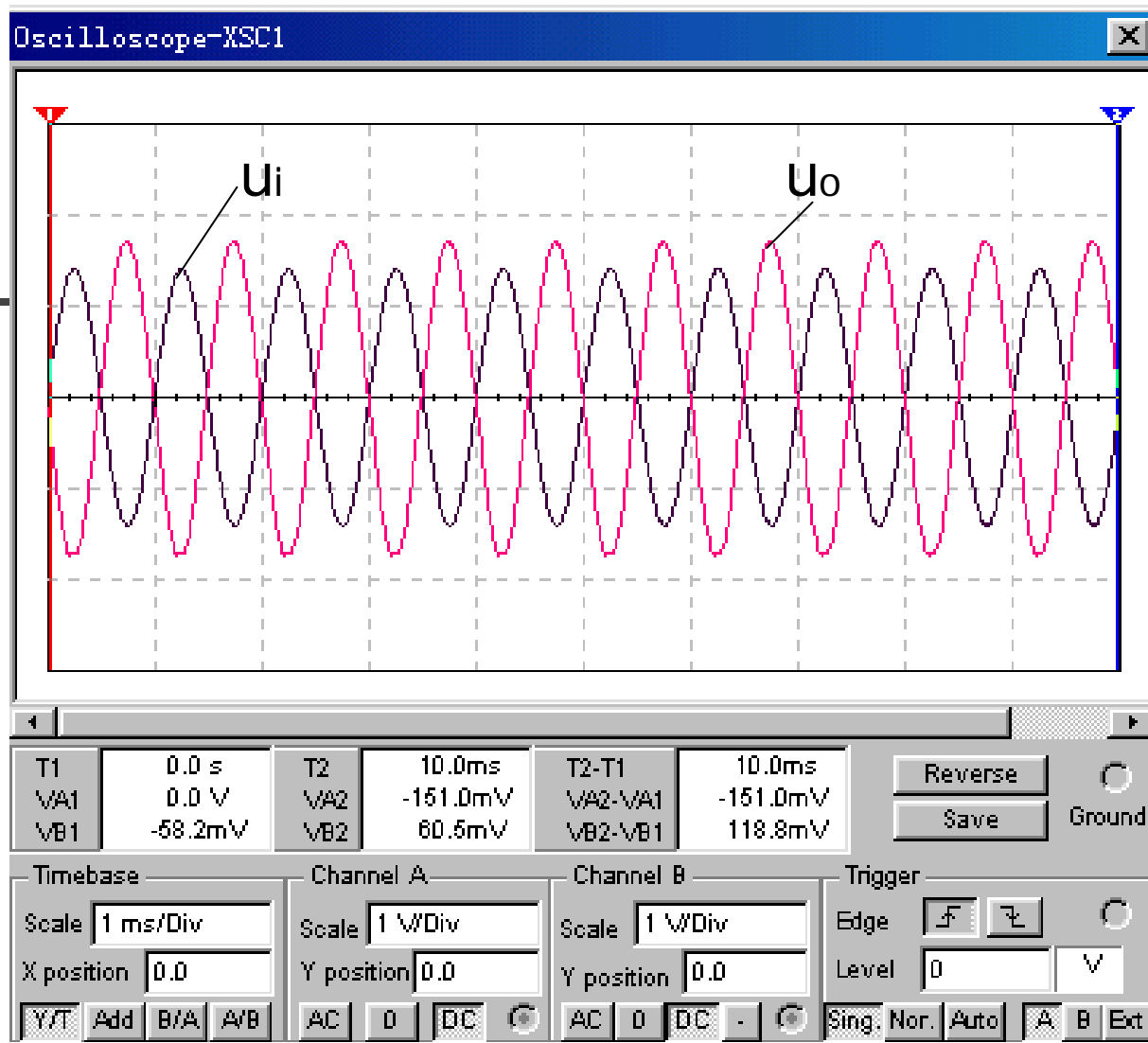
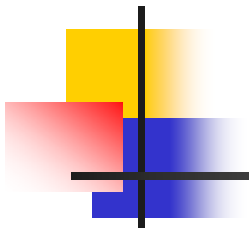


图2.6.2 输入输出波形



---

该电路也可用瞬态分析方法分析电路的动态特性，其分析方法请看第1章中的1.7.4小节瞬态分析（Transient Analysis）。本电路分析结果如图2.6.3所示。

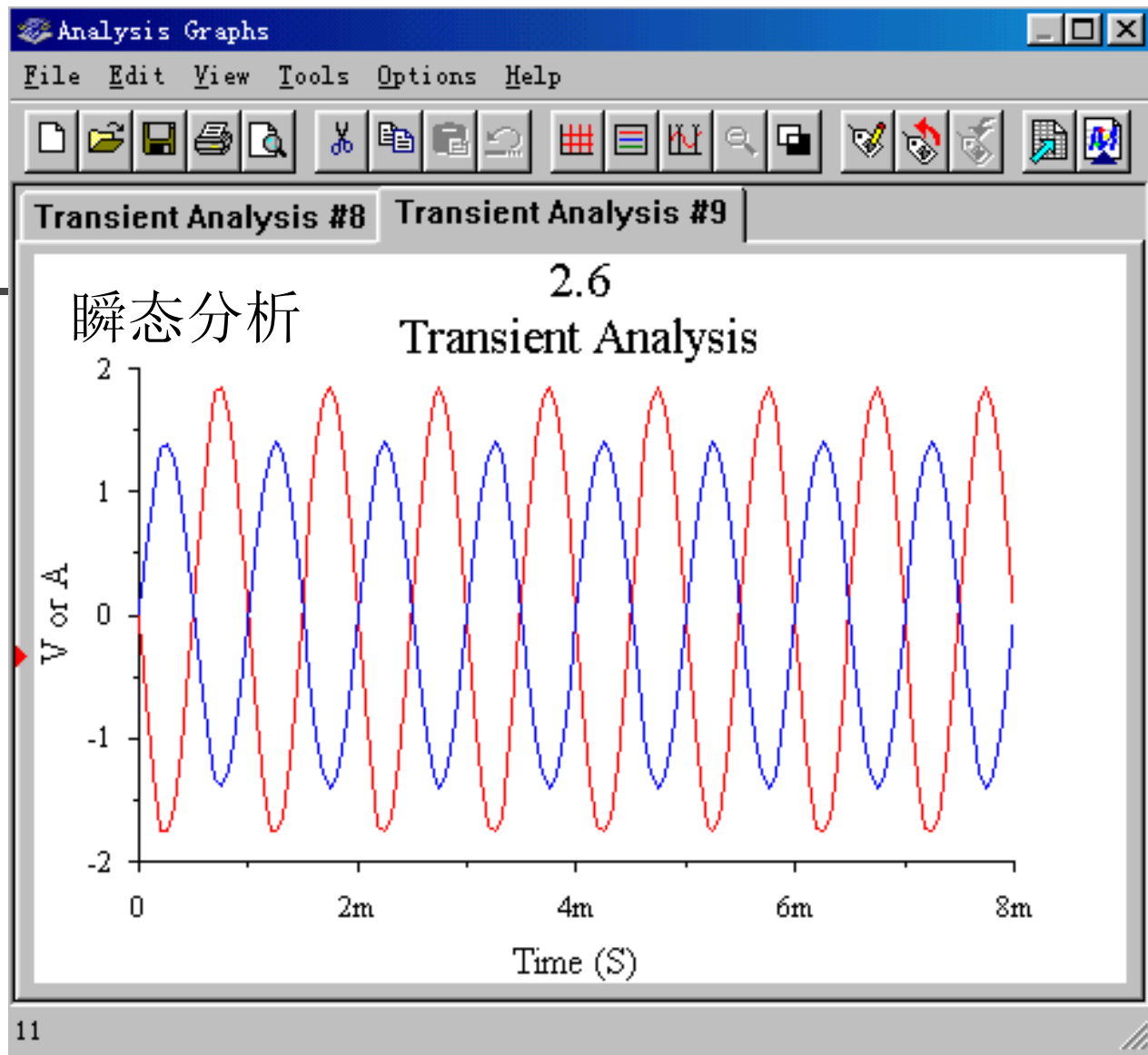
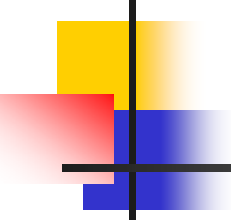


图2.6.3瞬态分析



---

喇叭的设置：应根据输入信号的频率及输出信号的幅值（用示波器测出）来设置喇叭的参数。双击喇叭弹出Buzzer对话框，在对话框窗口中点击Value出现如图2.6.4所示对话框，本例对话框中参数设置见图2.6.4所示。



图2.6.4 Value窗口对话框



## 2.6.2 OTL 电路的主要性能指标

### 1. 最大不失真输出功率 $P_{om}$

理想情况下, 
$$P_{om} = \frac{1}{8} \frac{U_{CC}^2}{R_L}$$

在电路中可通过测量  $R_L$  两端的电压有效值  $U_0$  如图 2.6.5 (a) 所示或测量流过  $R_L$  的电流如图 2.6.5 (b) 所示, 来求得实际的

$$P_{om} = \frac{U_0^2}{R_L} = U_o I_o$$



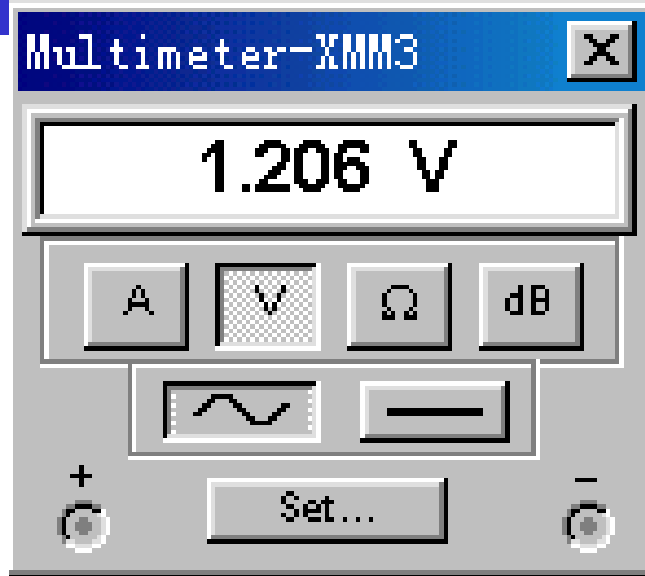
## 2. 效率 $\eta$

$$\eta = \frac{P_{\text{om}}}{P_{\text{v}}} 100\%$$

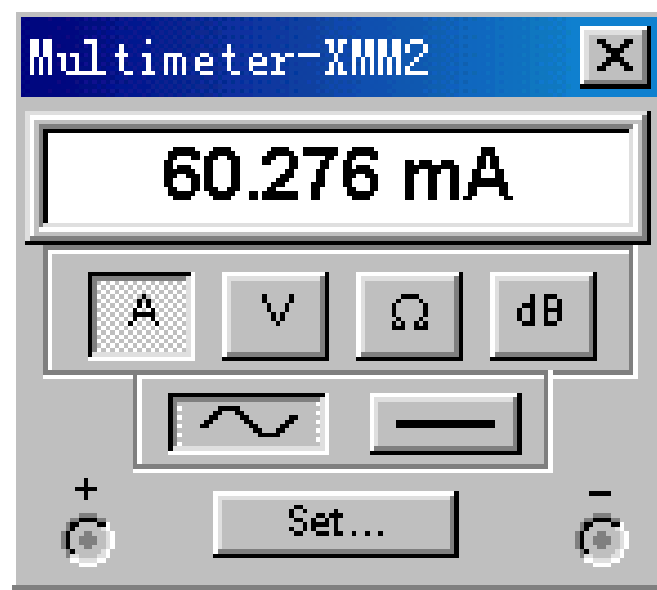
$P_{\text{v}}$  — 一直流电源供给的平均功率

理想情况下， $\eta_{\text{max}} = 78.5\%$ 。可测量电源供给的平均电流  $I_{\text{dC}}$  如图2.6.6所示，从而求得  $P_{\text{v}} = U_{\text{CC}} \cdot I_{\text{dC}}$ ，负载上的交流功率已用上述方法求出，因而也就可以计算实际效率了。在仿真平台上也可用功率表分别测出最大不失真功率和电源供给的平均功率。





图(a)  $R_L$  两端的电压有效值



图(b) 流过 $R_L$ 的电流

图 2.6.5  $P_{0m}$ 的测量

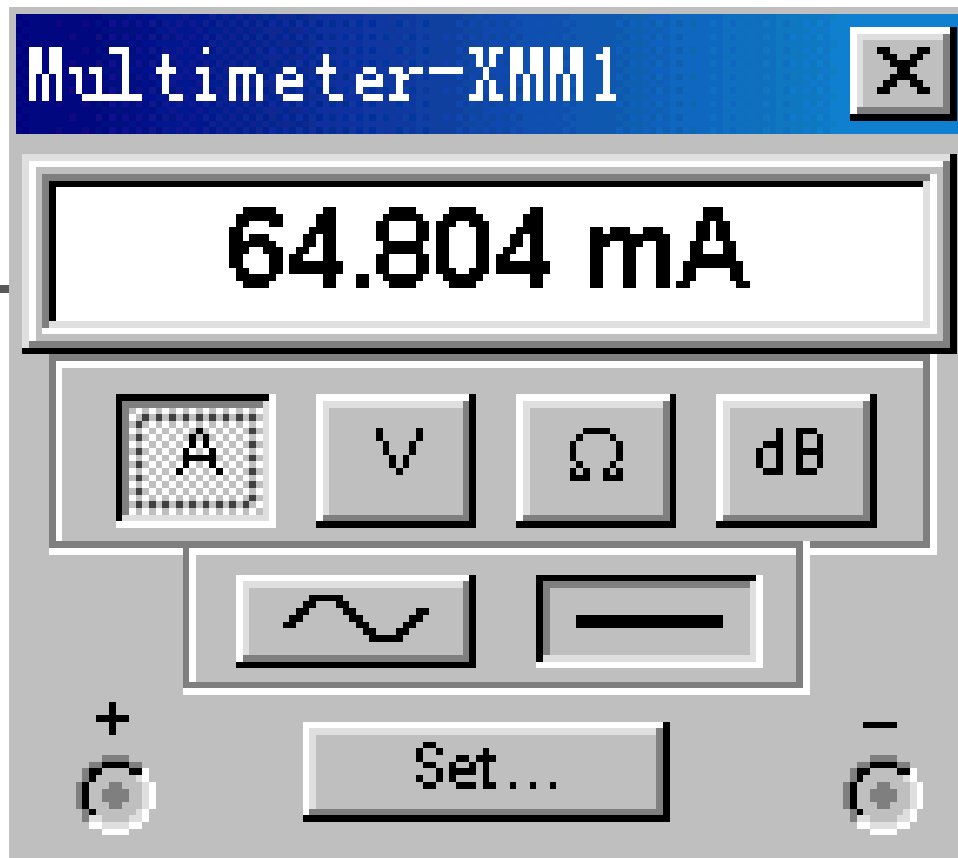
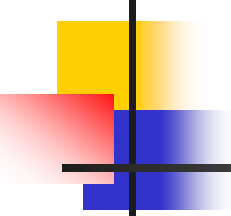
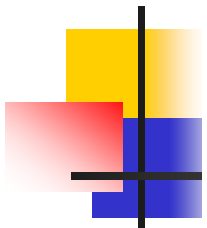


图2.6.6 电源供给的平均电流 $I_{dc}$

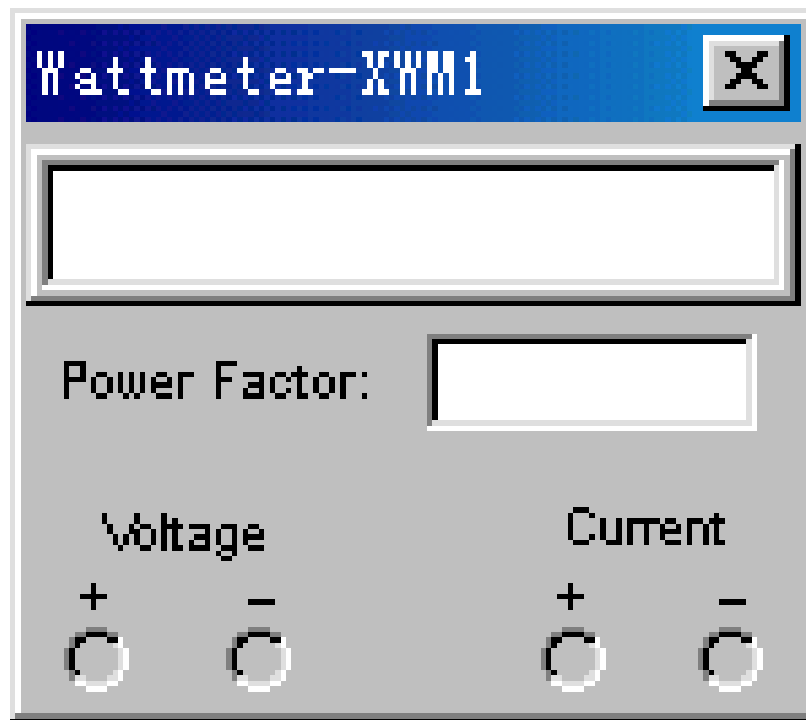


---

在本例中也可用两块瓦特表分别测量电源供给的平均功率 $P_v$ 及最大不失真输出功率 $P_{0m}$ ，其图标和面板如图2.6.7所示。该图标中有两组端子，左边两个端子为电压输入端子，与所要测试电路并联，右边两个端子为电流输入端子，与所要测试电路串联。



(a) 图标



(b) 面板

图2.6.7 瓦特表图标和面板



---

## 2.7 单级单调谐放大器



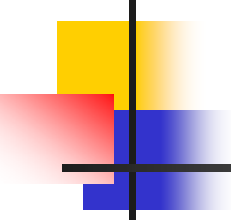
## 2.7.1 并联谐振回路的特性

LC组成的并联谐振回路具有如下特性：

### 1. 谐振回路阻抗的频率特性

阻抗的模和阻抗角分别为：

$$|Z| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{CR}{L}\right)^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \quad \varphi = -\arctan \frac{\omega C - \frac{1}{\omega L}}{\frac{CR}{L}}$$



---

当回路谐振时， $\omega = \omega_0$ ， $\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$ 。

并联谐振回路的阻抗为一纯电阻，数值可达到最大值， $|Z| = R_p = \frac{L}{CR}$ ， $R_p$ 称为谐振电阻，阻抗相角为0。从图2.7.2可以看出，并联谐振回路在谐振点频率 $\omega_0$ 时，相当于一个纯电阻电路。

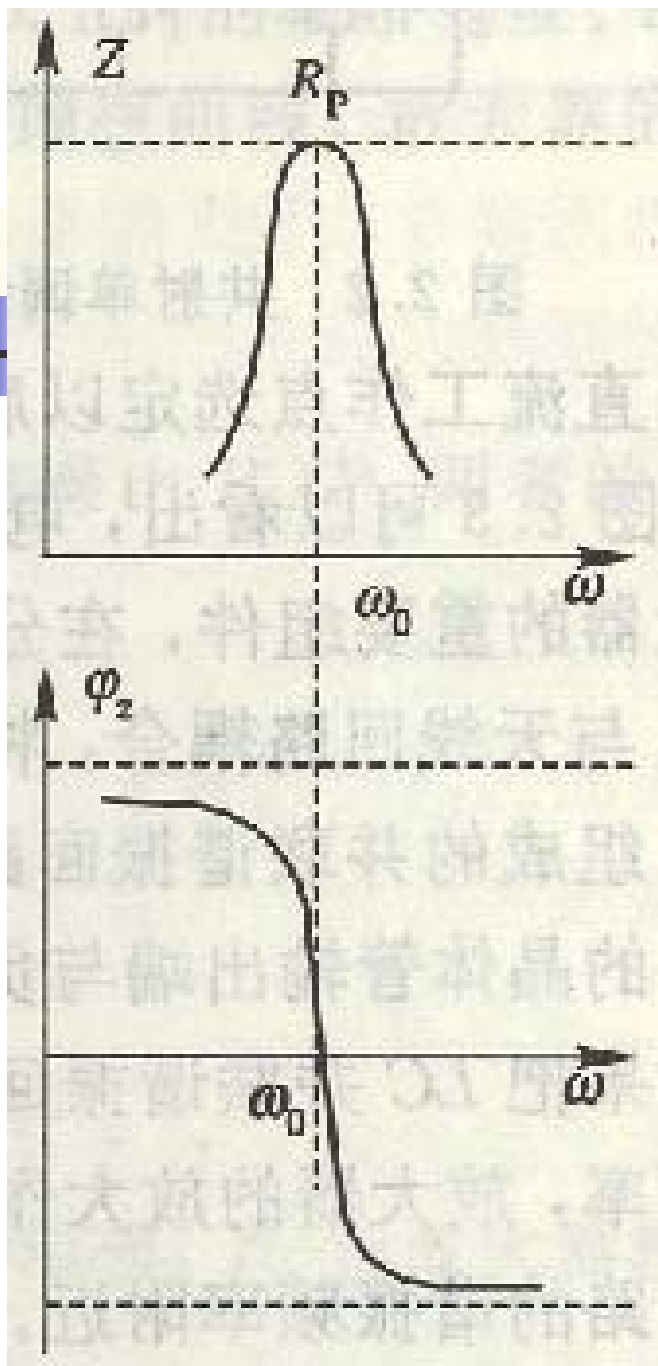
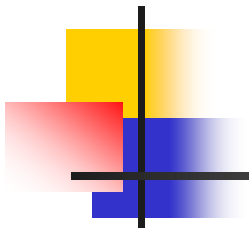


图2.7.1

并联谐振回路特征曲线



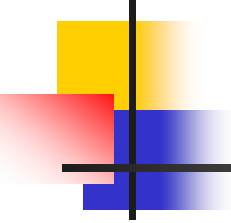


当回路的角频率  $\omega < \omega_0$  时，并联回路总阻抗呈电感性。当回路的角频率  $\omega > \omega_0$  时，并联回路总阻抗呈电容性。

## 2. 并联谐振回路端电压频率特性

谐振回路两端的电压

$$U_{AB} = U = I_S |Z| = \frac{I_S}{\sqrt{\left(\frac{CR}{L}\right)^2 = \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}$$



---

$$\varphi_u = -\arctan \frac{\omega C - \frac{I}{\omega L}}{\frac{CR}{L}}$$

当谐振回路谐振时

$$U_{AB} = U_0 = I_S \frac{L}{RC} = I_S R_P$$

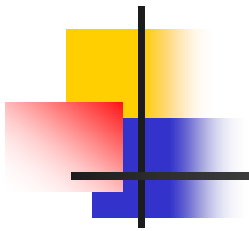


### 3. 并联谐振回路的谐振频率

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

### 4. 品质因素

并联回路谐振时的感抗或容抗与线圈中串联的损耗电阻R之比，定义为回路的品质因素，用 $Q_0$ 表示。

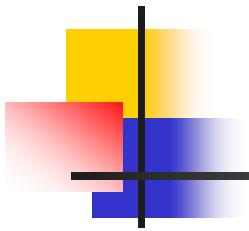


---

$$Q_0 = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} = \frac{1}{R} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\rho}{R}$$

式中， $\rho = \sqrt{L/C}$ ，称为特性阻抗； $Q_0$  为 LC 并联谐振回路的空载 Q 值。

$$R_p = \frac{L}{CR} = Q_0 \omega_0 L = \frac{Q_0}{\omega_0 C}$$



---

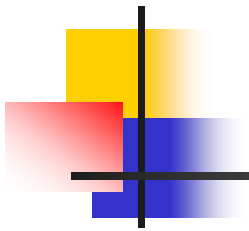
上式说明并联谐振回路在谐振时，谐振电阻等于感抗或容抗的 $Q_0$ 倍。



## 2.7.2 单级单调谐放大器电路

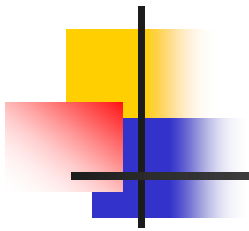
---

单调谐放大器是由单调谐回路作为交流负载的放大器。图2.7.2 所示为一个共发射极的单调谐放大器。它是接收机中一种典型的高频放大器电路。



---

图中 $R_{B11}$ (RB11)、 $R_{B12}$ (RB12)是放大器的偏置电阻， $R_e$ (Re)是直流负反馈电阻， $C_e$ (Ce)是旁路电容，它们起到稳定放大器静态工作点的作用。 $L_2$ (L2)、 $L_3$ (L3)、 $C_2$ (C2)组成并联谐振回路，它与晶体管共同起着选频放大作用。



---

为了防止三极管的输出与输入导纳直接并入LC ( $L_2$ 、 $L_3$ 、 $C_2$ ) 谐振回路，影响回路参数，以及为防止电路的分布参数影响谐振频率，同时也为了放大器的前后级匹配，本电路采用部分接入方式。 $R_3$ (R3)的作用是降低放大器输出端调谐回路的品质因数Q值，以加宽放大器的通频带。



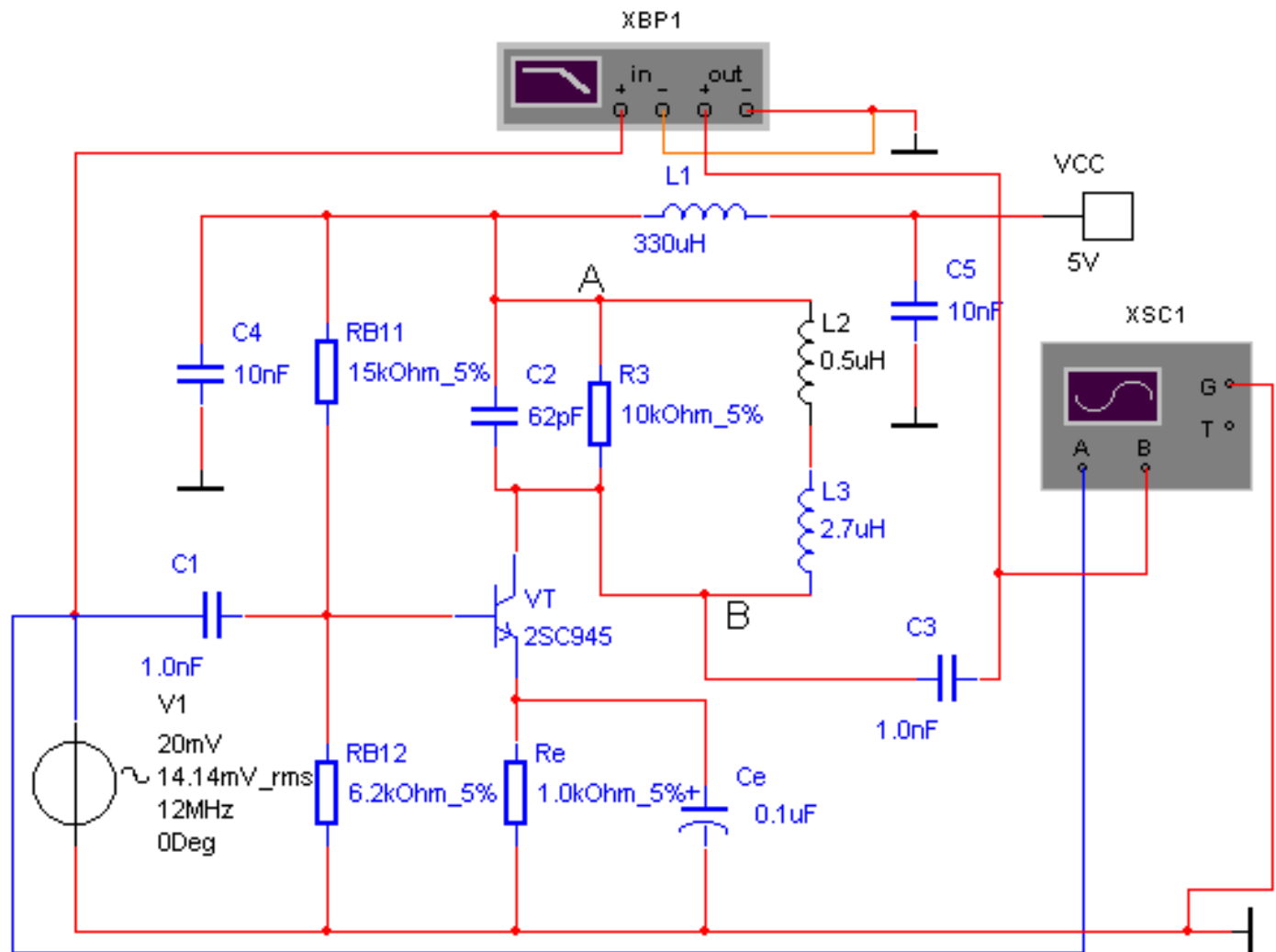
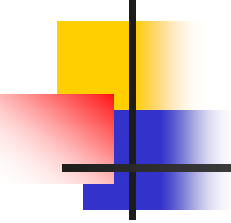
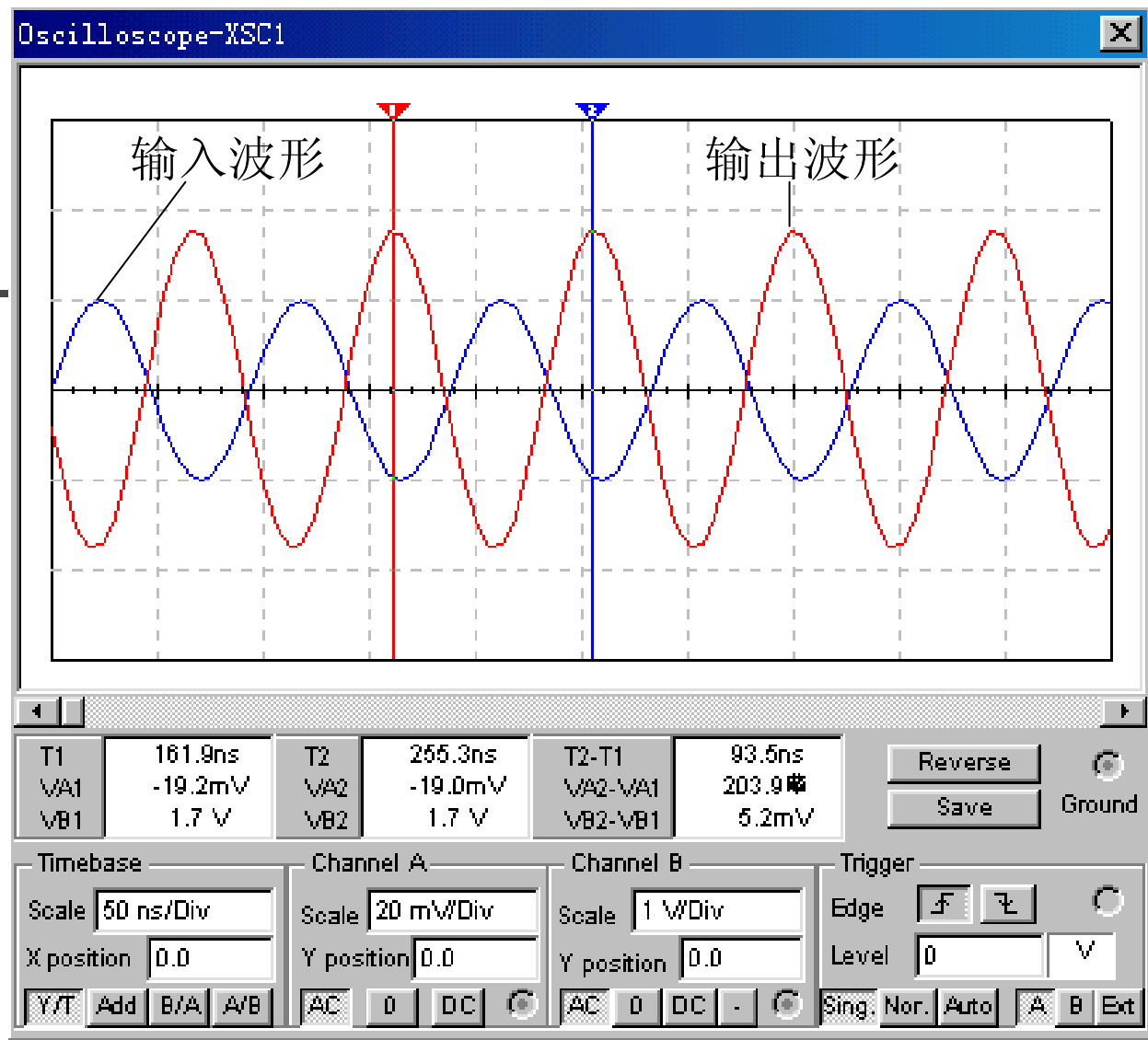


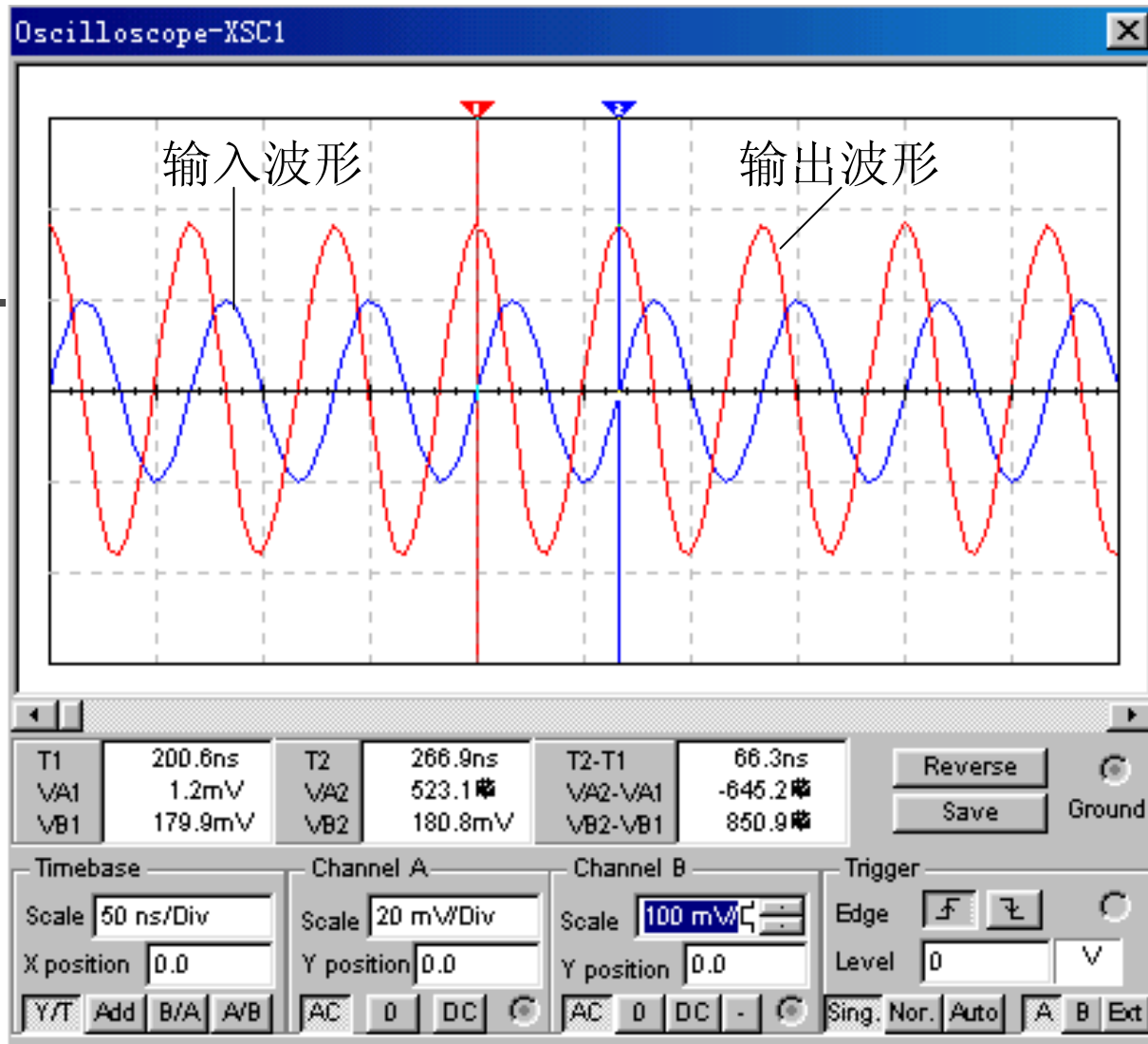
图2.7.2 共发射极单调谐放大器



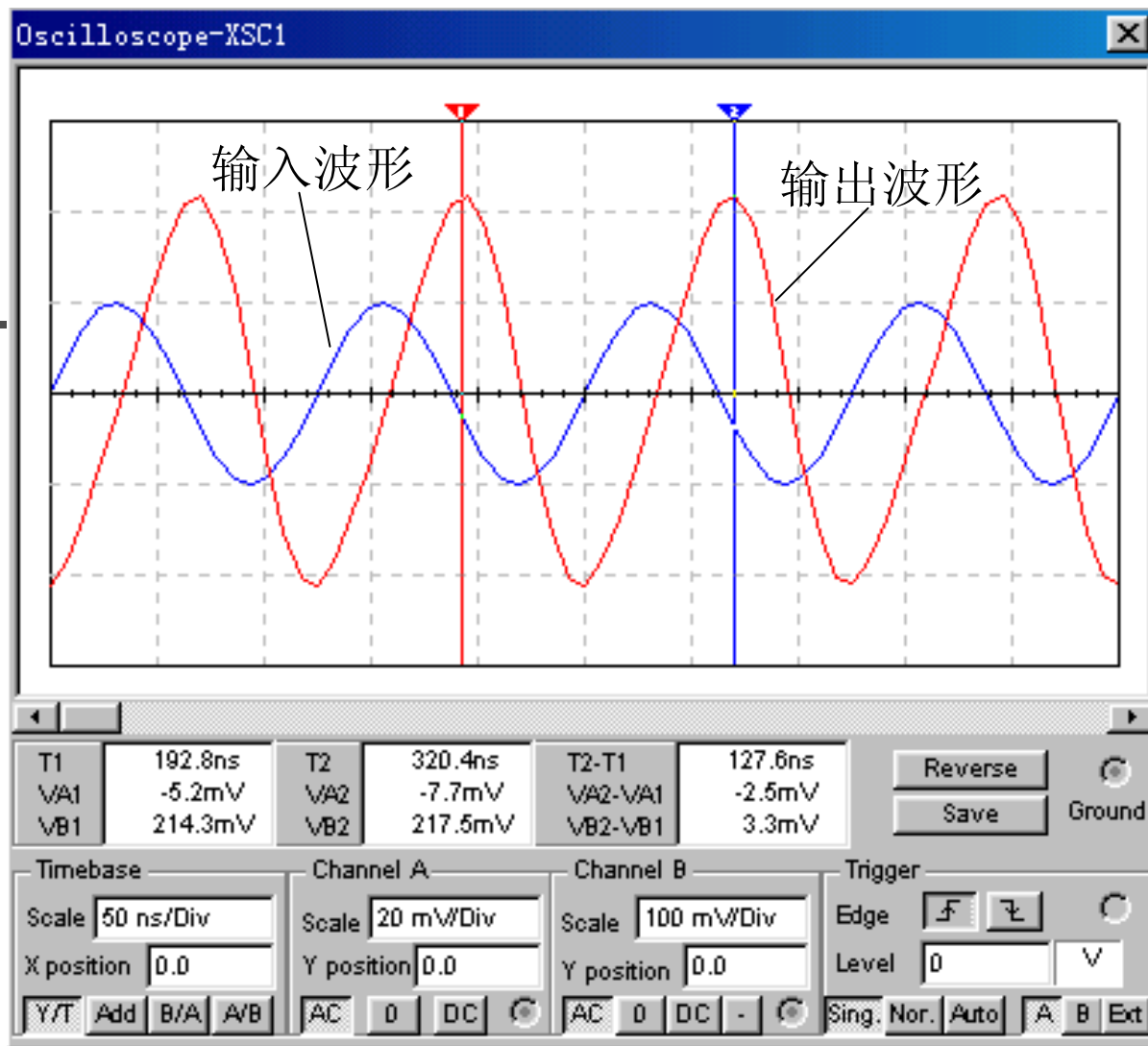
如果把LC ( $L_2$ 、 $L_3$ 、 $C_2$ ) 并联谐振回路调谐在放大器的工作频率上, 则放大器的增益就很高; 偏离这个频率, 放大器的放大作用就下降。图2.7.3 (a) 测出的是  $f_\omega = f_{\omega_0}$  时的波形, 图2.7.3(b)测出的是  $f_\omega > f_{\omega_0}$  的波形, 图2.7.3(c)测出的是  $f_\omega < f_{\omega_0}$  的波形。



(a)  $f_{\omega} = f_{\omega\omega}$

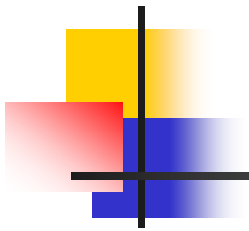


(b)  $f_{\omega} > f_{\omega\omega}$



$$(c) \quad f_{\omega} < f_{\omega_0}$$

图2.7.3  $f_{\omega} = f_{\omega_0}$  ,  $f_{\omega} > f_{\omega_0}$  ,  $f_{\omega} < f_{\omega_0}$  时输入与输出波形



---

这样，放大器能放大的频带宽度，就局限于LC（ $L_2$ 、 $L_3$ 、 $C_2$ ）并联谐振回路的谐振频率附近。可见调谐放大器频带响应，在很大程度上取决于LC（ $L_2$ 、 $L_3$ 、 $C_2$ ）谐振回路的特性。

双击波特图仪，弹出面板如图2.7.4所示，测出图2.7.1谐振频率为10.904MHz。

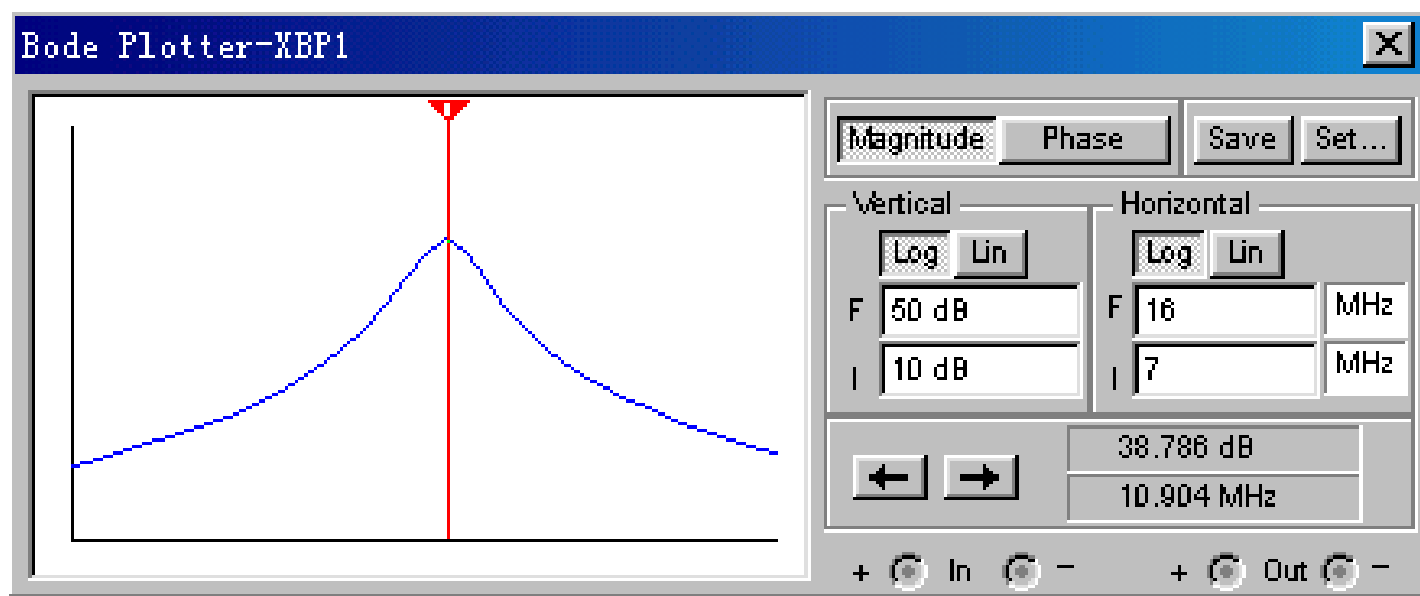


图2.7.4 单调谐放大器幅频特性曲线



## 2.7.3 单调谐放大器的RF特性分析

---

单调谐放大器RF特性分析电路如图2.7.5所示，使用网络分析仪进行RF分析，分析结果可以从网络分析仪的面板中一一读出。



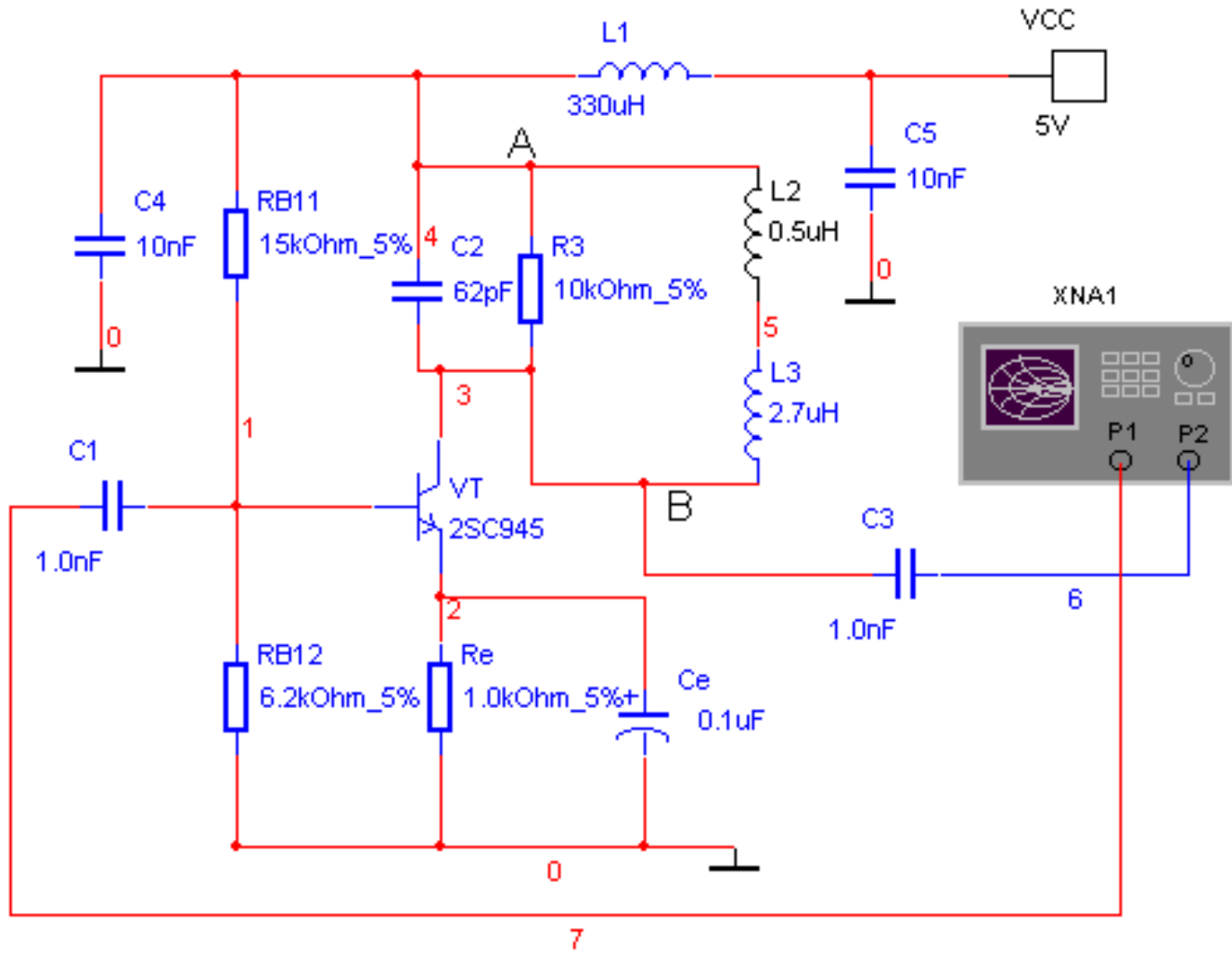
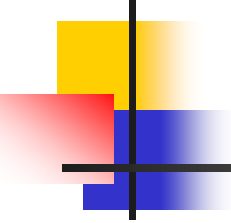


图2.7.5 单调谐放大器RF特性分析电路



---

点击“启动”开关，启动RF分析。点击网络分析仪，打开网络分析仪面板如图2.7.6所示。

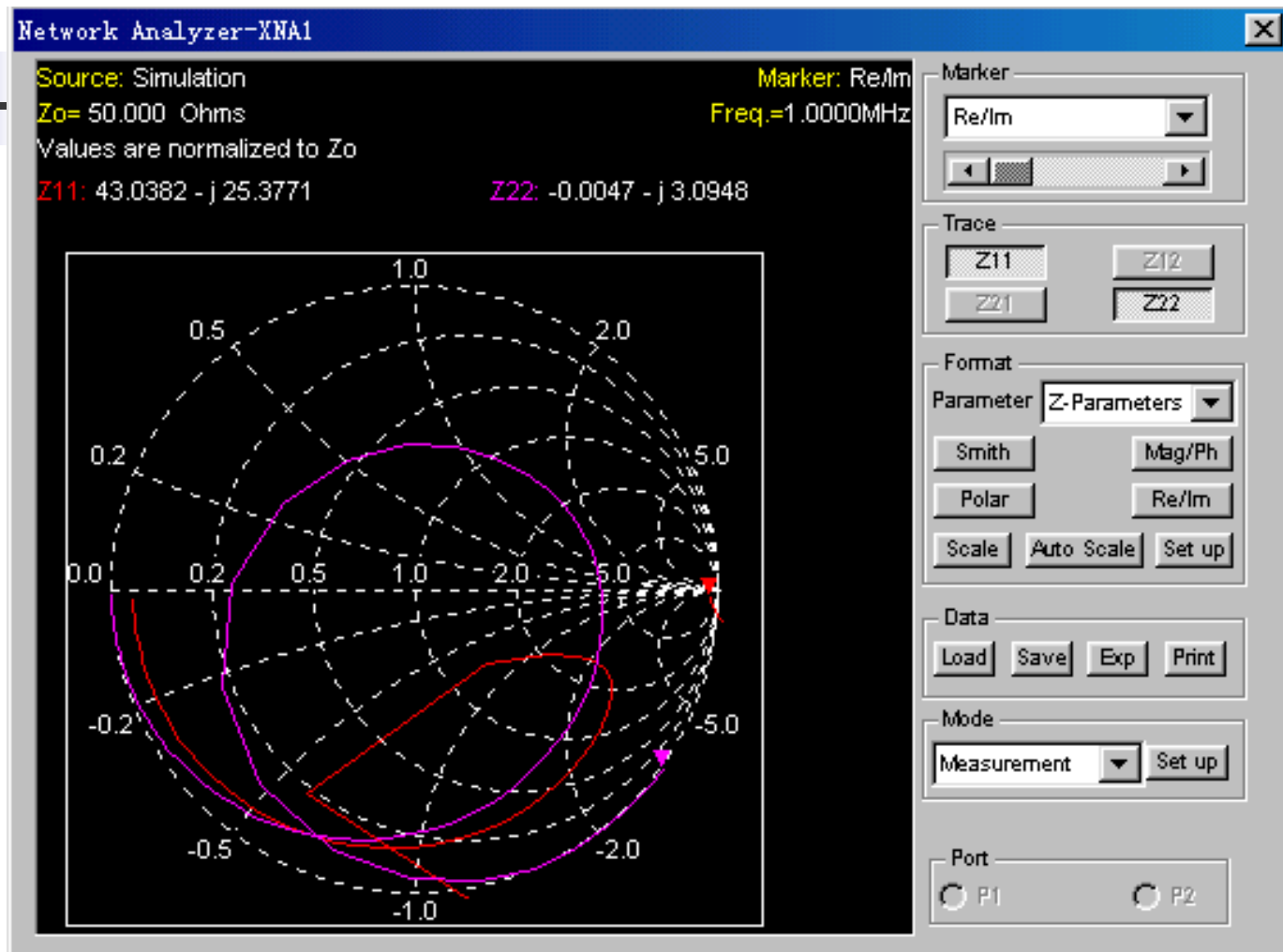


图2.7.6 网络分析仪面板

## 1. Marker区

在 Marker 区有 3 个选项：Re/Im，Mag/Ph(Degs) 和 dB Mag/PH(Degs)，如图 2.7.7 所示。

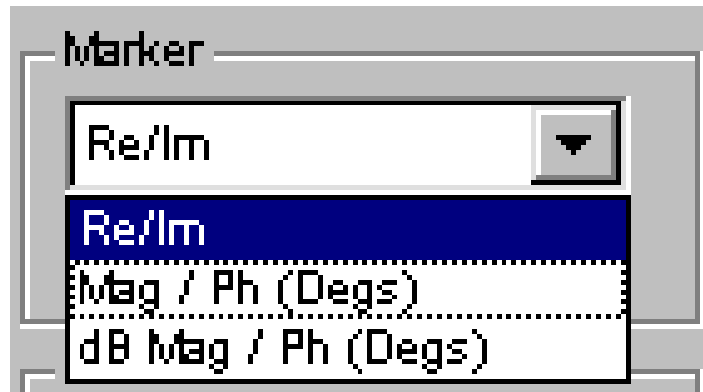
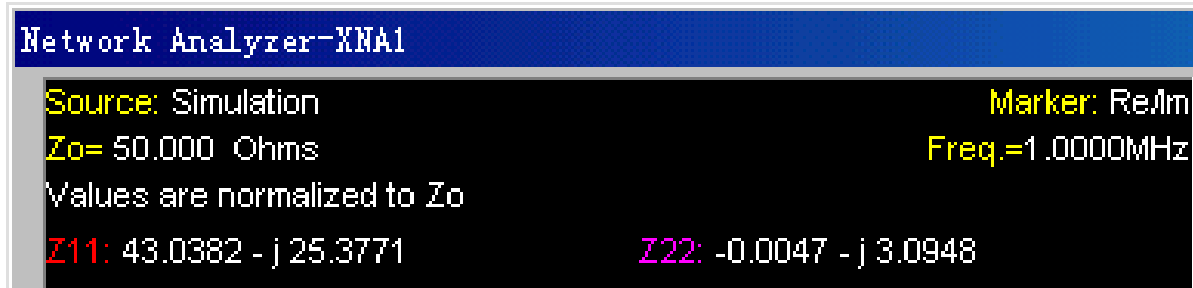


图2.7.7 Marker区的3个选项

## (1) Re/Im (实部/虚部)

选择Re/Im (实部/虚部)，网络分析仪在面板上方以直角坐标模式显示参数Z11和Z22，如图2.7.8所示。

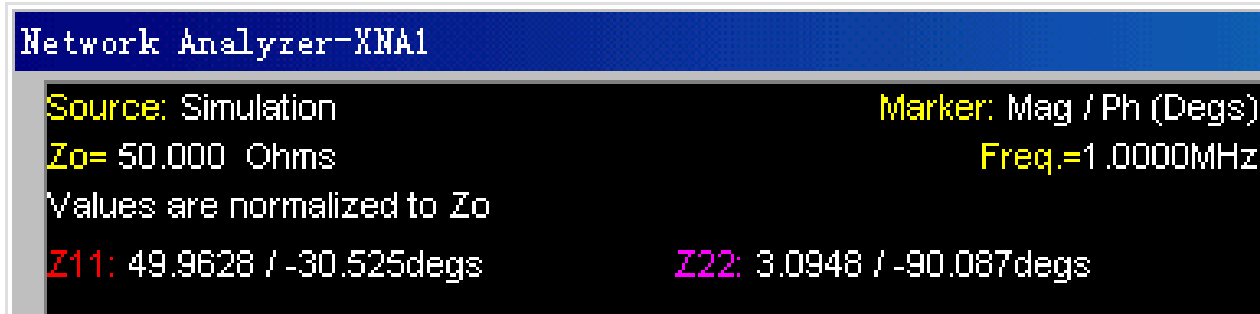


```
Network Analyzer-XNA1
Source: Simulation                               Marker: Re/Im
Zo= 50.000 Ohms                                 Freq.=1.0000MHz
Values are normalized to Zo
Z11: 43.0382 -j 25.3771                          Z22: -0.0047 -j 3.0948
```

图2.7.8网络分析仪在面板上方以直角坐标模式显示参数

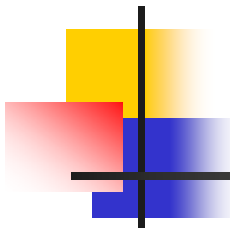
## (2) Mag/Ph(Degs) (幅度/相位)

选择Mag/Ph(Degs) (幅度/相位)，网络分析仪在面板上方以极坐标模式显示参数Z11和Z22，如图2.7.9所示。

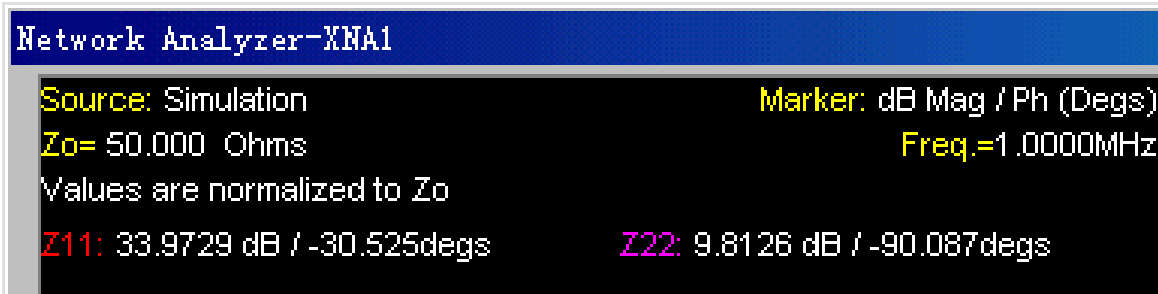


```
Network Analyzer-XNA1
Source: Simulation           Marker: Mag / Ph (Degs)
Zo= 50.000 Ohms            Freq.=1.0000MHz
Values are normalized to Zo
Z11: 49.9628 / -30.525degs   Z22: 3.0948 / -90.087degs
```

图2.7.9 网络分析仪在面板上方以极坐标模式显示参数

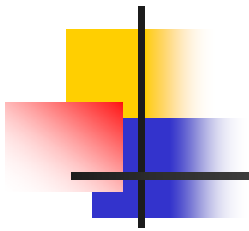


(3) dB Mag/PH(Degs) (dB幅度/相位) 选择 dB Mag/PH(Degs) (dB幅度/相位)，网络分析仪在面板上方以分贝的极坐标模式显示参数 Z11和Z22，如图2.7.10所示。



```
Network Analyzer-XNA1
Source: Simulation                               Marker: dB Mag / Ph (Degs)
Zo= 50.000 Ohms                                 Freq.=1.0000MHz
Values are normalized to Zo
Z11: 33.9729 dB / -30.525degs                    Z22: 9.8126 dB / -90.087degs
```

图2.7.10 网络分析仪在面板上方以分贝的极坐标模式显示参数



在选择Marker区的3个选项时，用鼠标拖动在Marker区中的滑块，可以改变频率。对应不同的频率，显示不同的Z11和Z22参数。

## **2. Trace区**

在Trace区，可以选择显示的参数，点击Trace区的Z11或者Z22按钮，网络分析仪面板显示的参数和图形不同。点击Z11按钮的显示面板如图2.7.12所示。



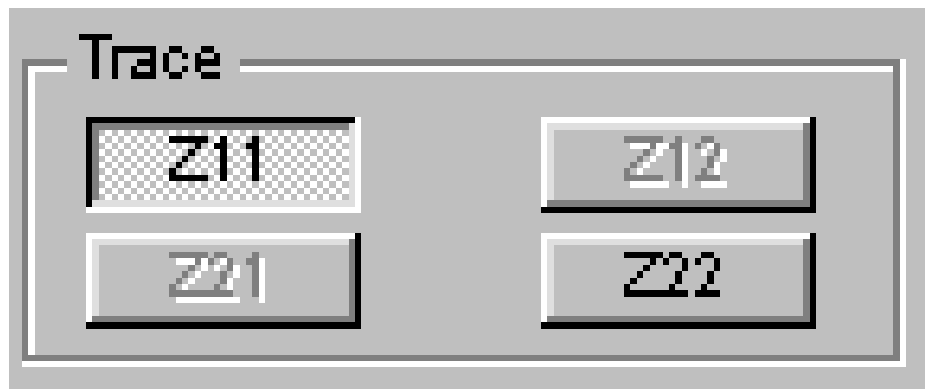


图2.7.11 网络分析仪的Trace区

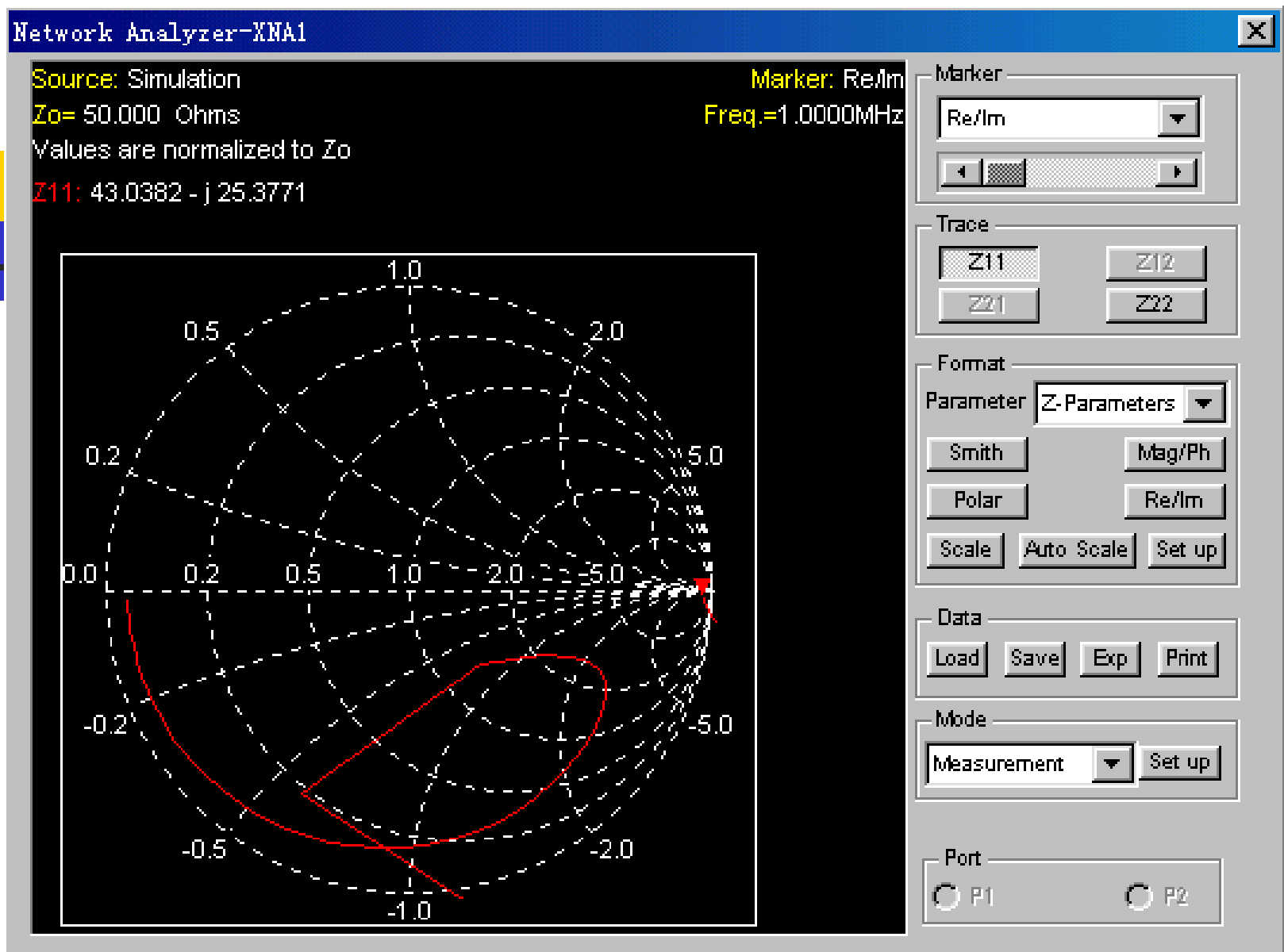


图2.7.12 点击Z11按钮的显示面板



---

### 3. Format区

(1) 在Format区，可以选择所要分析的参数种类，可选择的参数种类有：Y参数、S参数、H参数、Z参数和稳定系数，如图2.7.13所示。

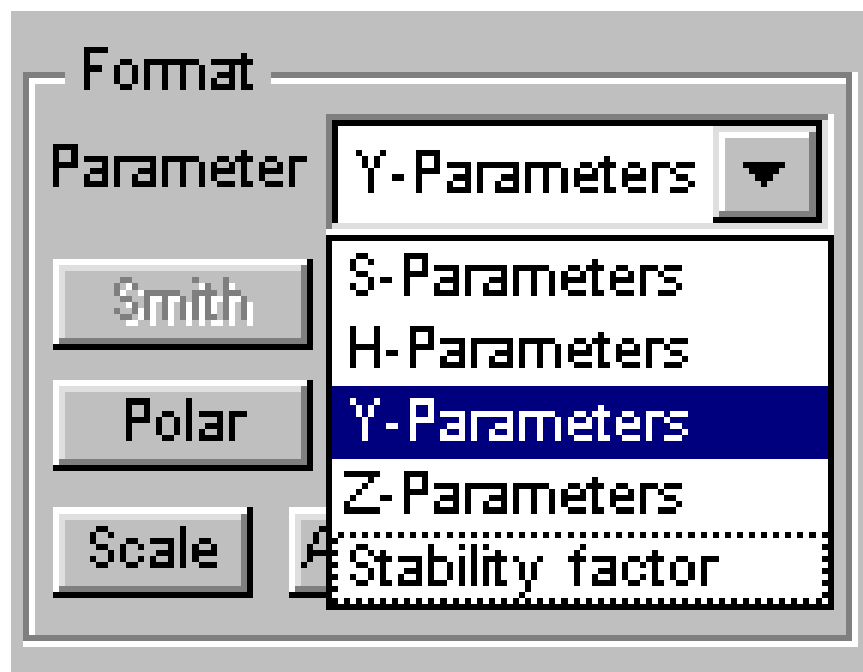


图2.7.13 在Format区可以选择的参数种类



---

(2) 在Format区中，可以选择参数显示格式，如图2.7.14所示。S参数和Y参数有4种参数显示格式：Smith（史密斯图）、Mag/Ph（幅度/相位图）、Polar（极化图）和Re/Im（实数/虚数图）。H参数和Y参数有3种参数显示格式：Mag/Ph（幅度/相位图）、Polar（极化图）和Re/Im（实数/虚数图）。

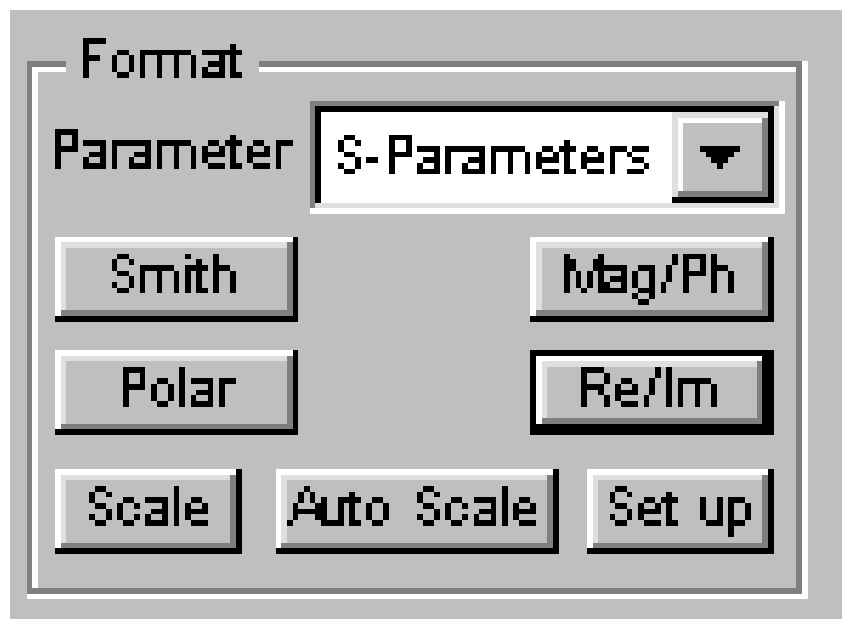


图2.7.14 在Format区可以选择参数显示格式

显示S参数的Smith图如图2.7.15所示。

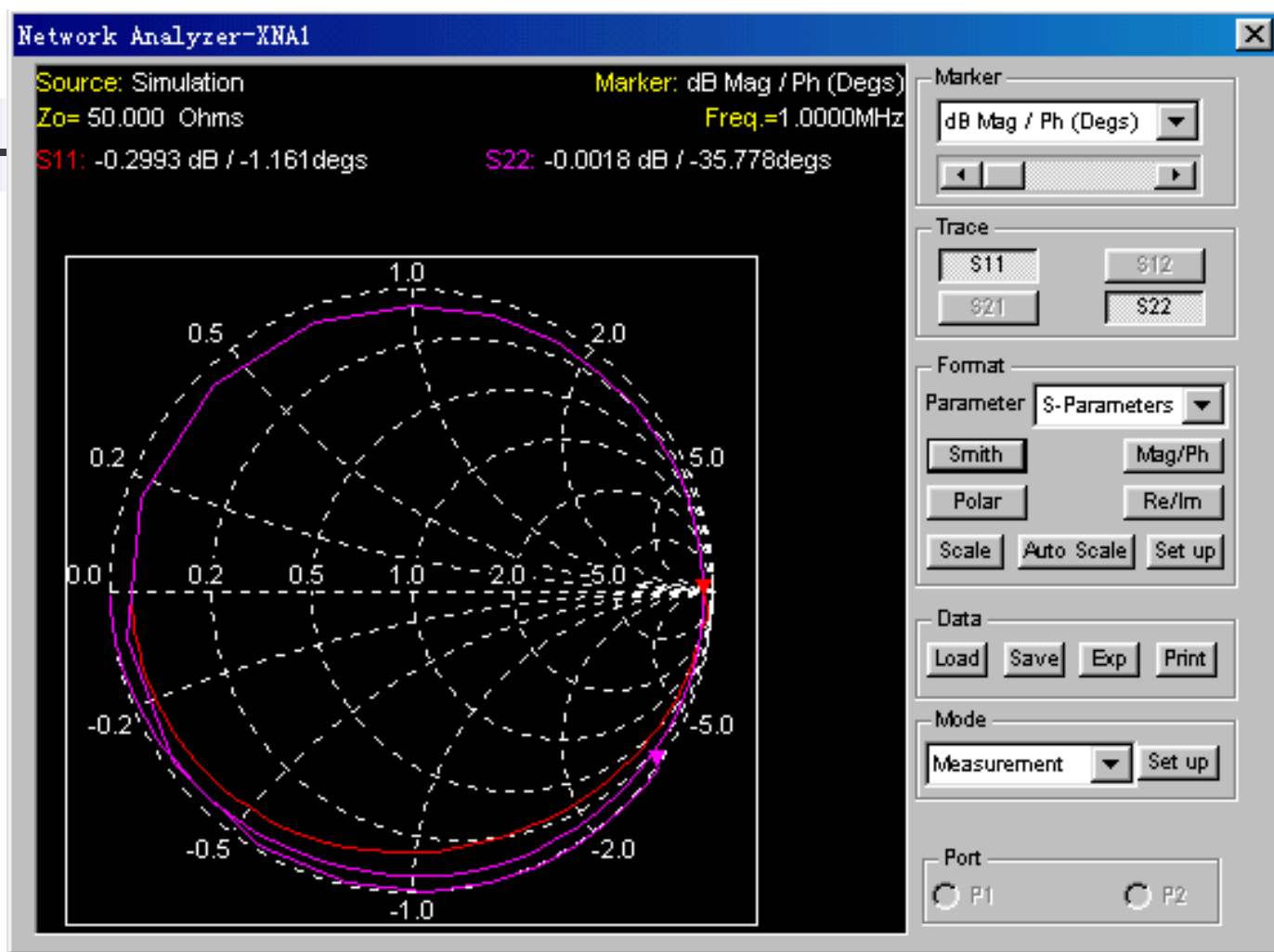


图2.7.15 显示S参数的Smith图

显示S参数的Mag/Ph图如图2.7.16所示。

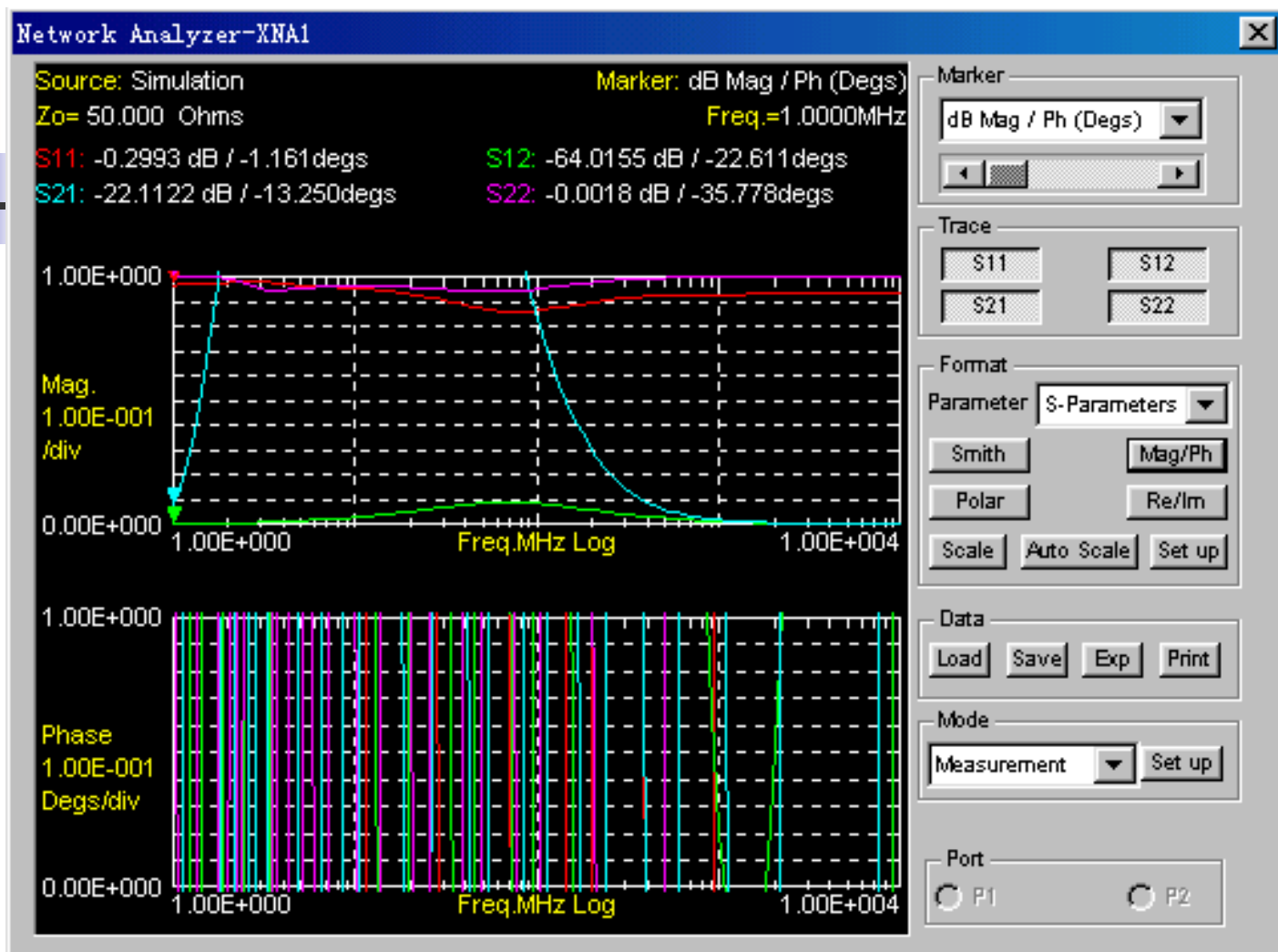


图2.7.16 显示S参数的Mag/Ph图



显示S参数的Polar图如图2.7.17所示。

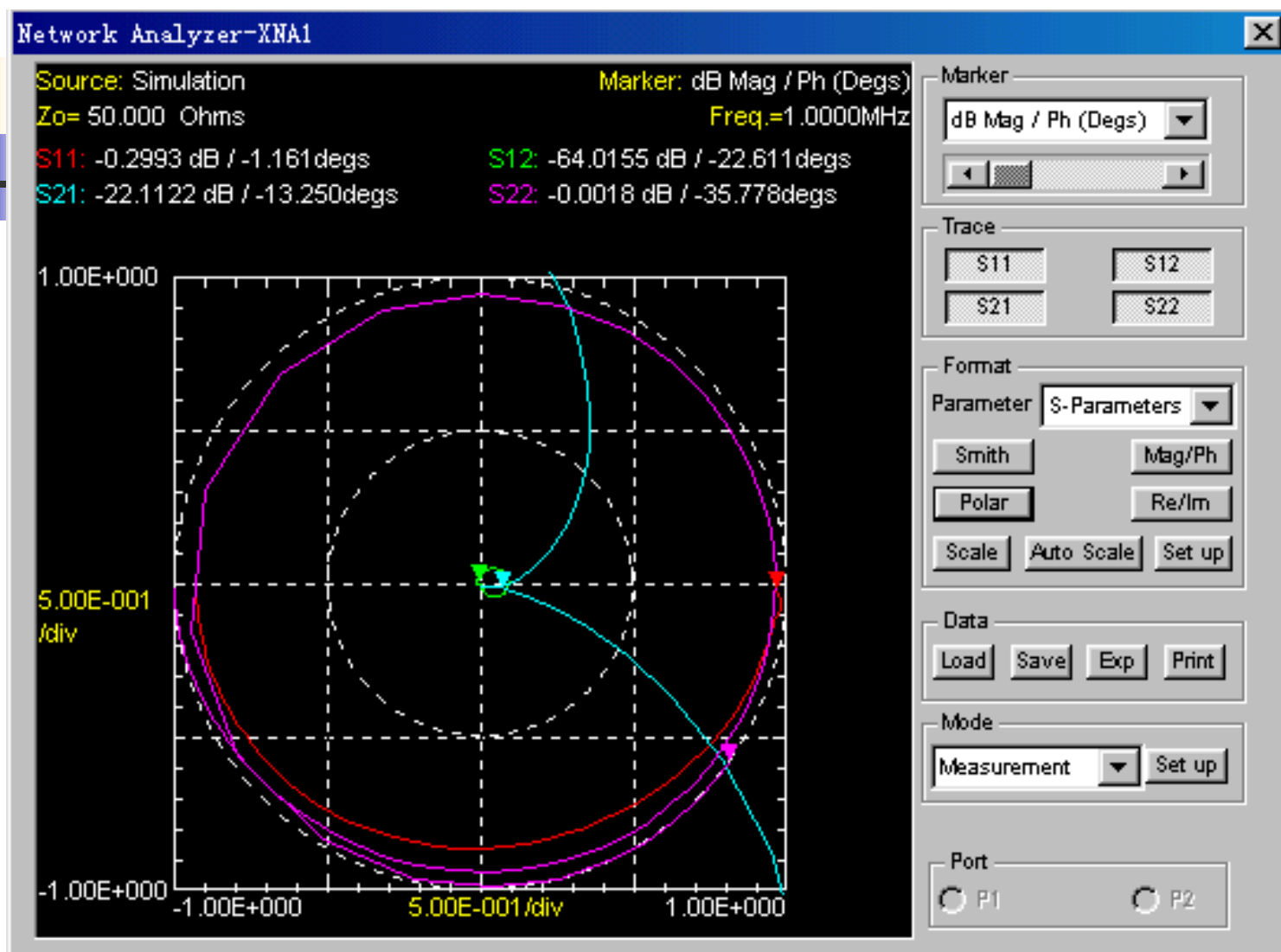


图2.7.17 显示S参数的Polar图

显示S参数的Re/Im图如图2.7.18所示。

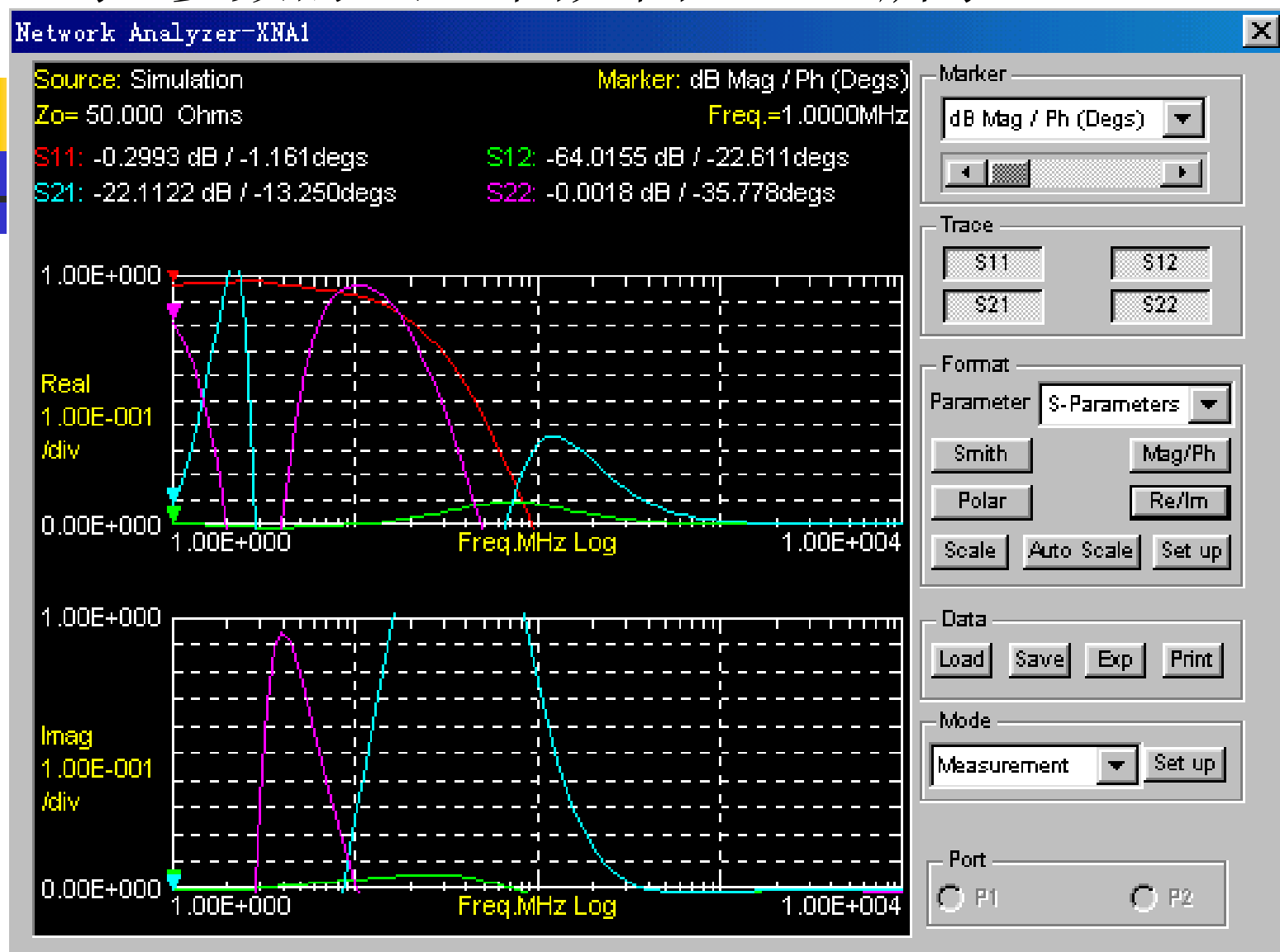
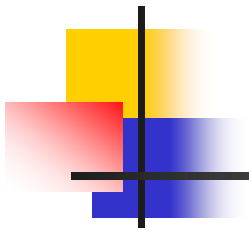


图2.7.18 显示S参数的Re/Im图



---

(3) 在Format区中，可以选择Scale（坐标刻度）。点击Scale，弹出的对话框如图2.7.19所示，可以改变有关刻度参数。

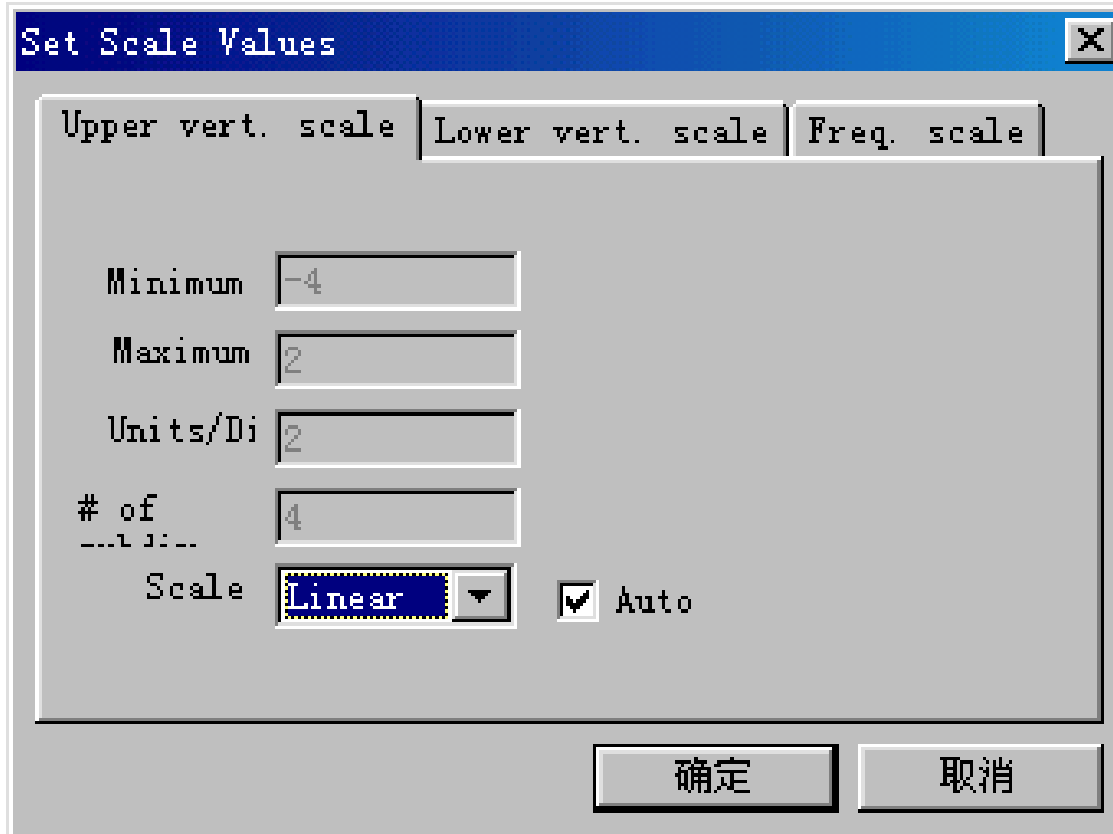
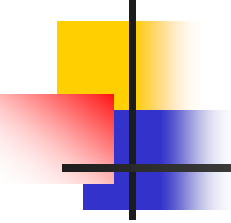


图2.7.19 Scale的对话框



---

(4) 在 Format 区中，可以选择 Auto Scale，由程序自动定义坐标刻度。

(5) 在 Format 区中，可以选择 Set up，弹出的对话框如图 2.7.20 所示。

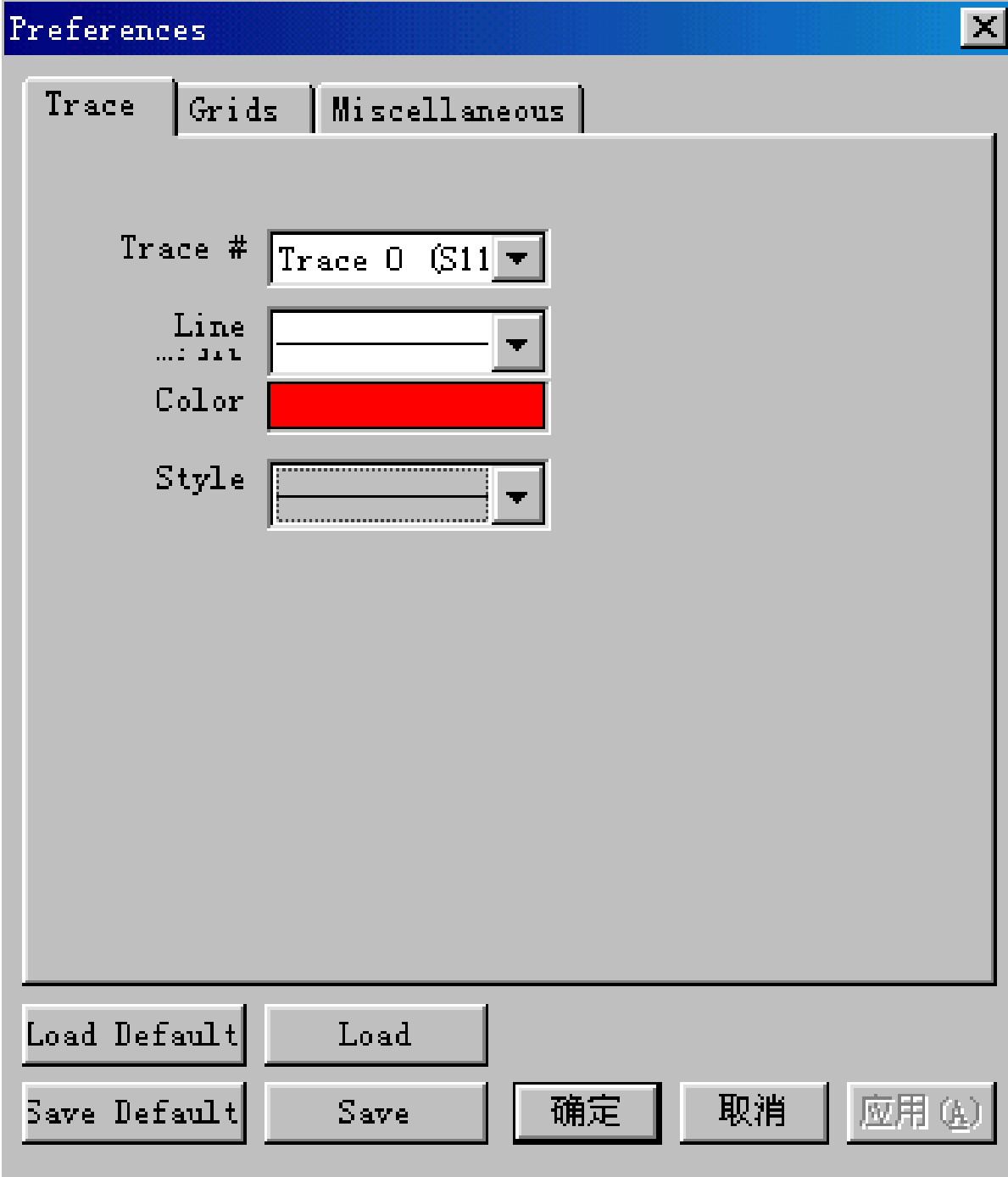
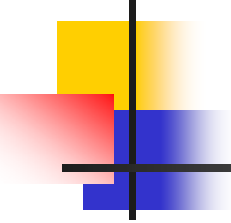
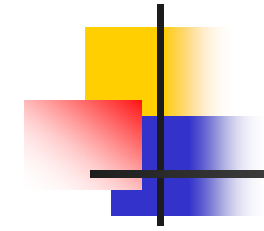


图2.7.20  
Set up的对话框



---

在Set up对话框中：Trace项可以用来设置曲线的特性，如线宽（Line width）、颜色（Color）、形式（Style）。Gride项可以用来设置网格线的特性，如线宽（Line width）、颜色（Color）、形式（Style），以及刻度文字的颜色。



Miscellaneous项可以用来设置绘图区的特性，如图框的线宽（Frame width）和颜色（Frame Color）、图框背景颜色（Background Color）、绘图区的颜色（Graph area Color）、标注文字的颜色（Label Color）和数字的颜色（Data Color）。





---

## 4. Data区

在Data区，可以对显示区内的数据进行加载（Load）、保存（Save）、输出（Exp）和打印（Print）处理。



---

## 5. Mode区

在Mode区，如图2.7.21所示，有3个选项：  
Measurement（测量模式）、Match Net.  
Designer（匹配网络设计）和 RF  
Characterizer（射频特性分析）。Set up按钮用来设置不同选项的参数。



图2.7.21 Mode区的选项



---

## (1) Measurement (测量模式)

选择Measurement，点击Set up按钮，出现的对话框如图2.7.22所示。在对话框中可以设置：激励信号的起始频率（Start frequency）、激励信号的终止频率（Stop frequency）、扫描方式（Sweep type）和点数（Number of point）等参数。

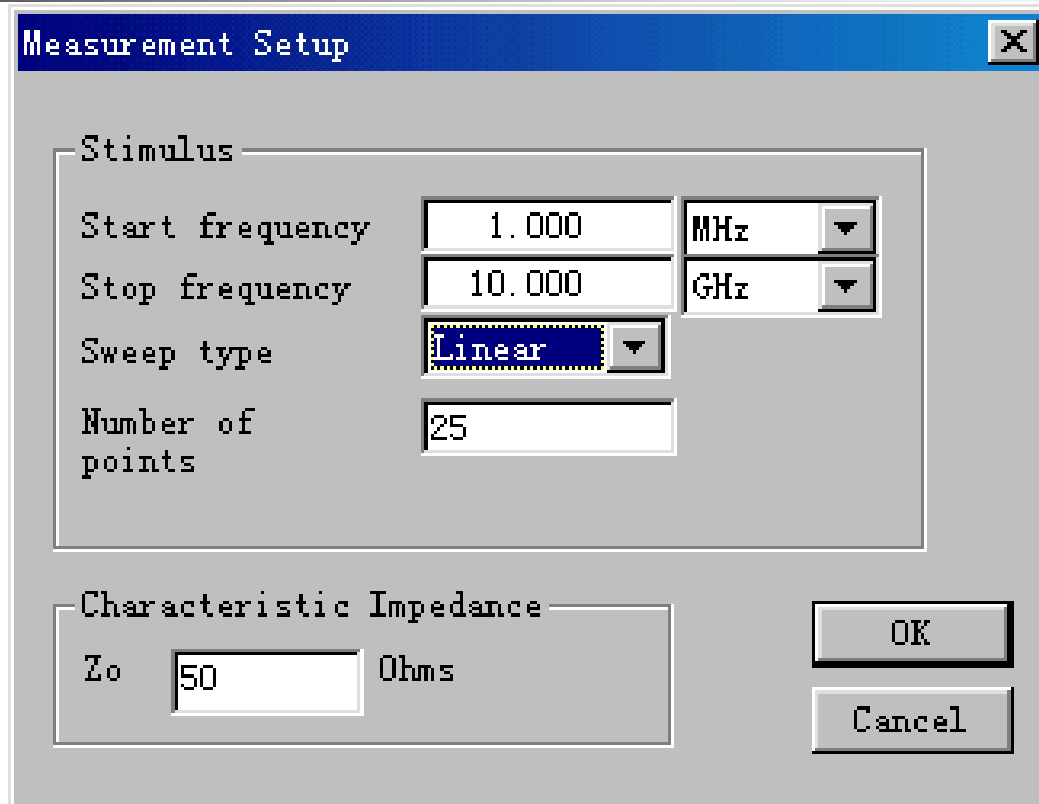
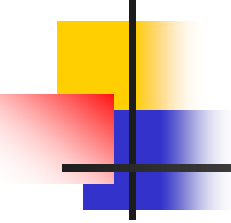


图2.7.22 Measurement Set up 对话框



---

(2) Match Net. Designer (匹配网络设计)

选择Match Net. Designer, 点击Set up按钮, 出现的对话框如图2.7.23所示。在对话框中可以选择: **Stability Circles** (稳定圈) 、 **Impedance Matching** (阻抗匹配) 、 **Unilateral Gain Circles** (单向的增益圈) 、 **Freq** (频率) 以及LC网络的结构形式等参数。

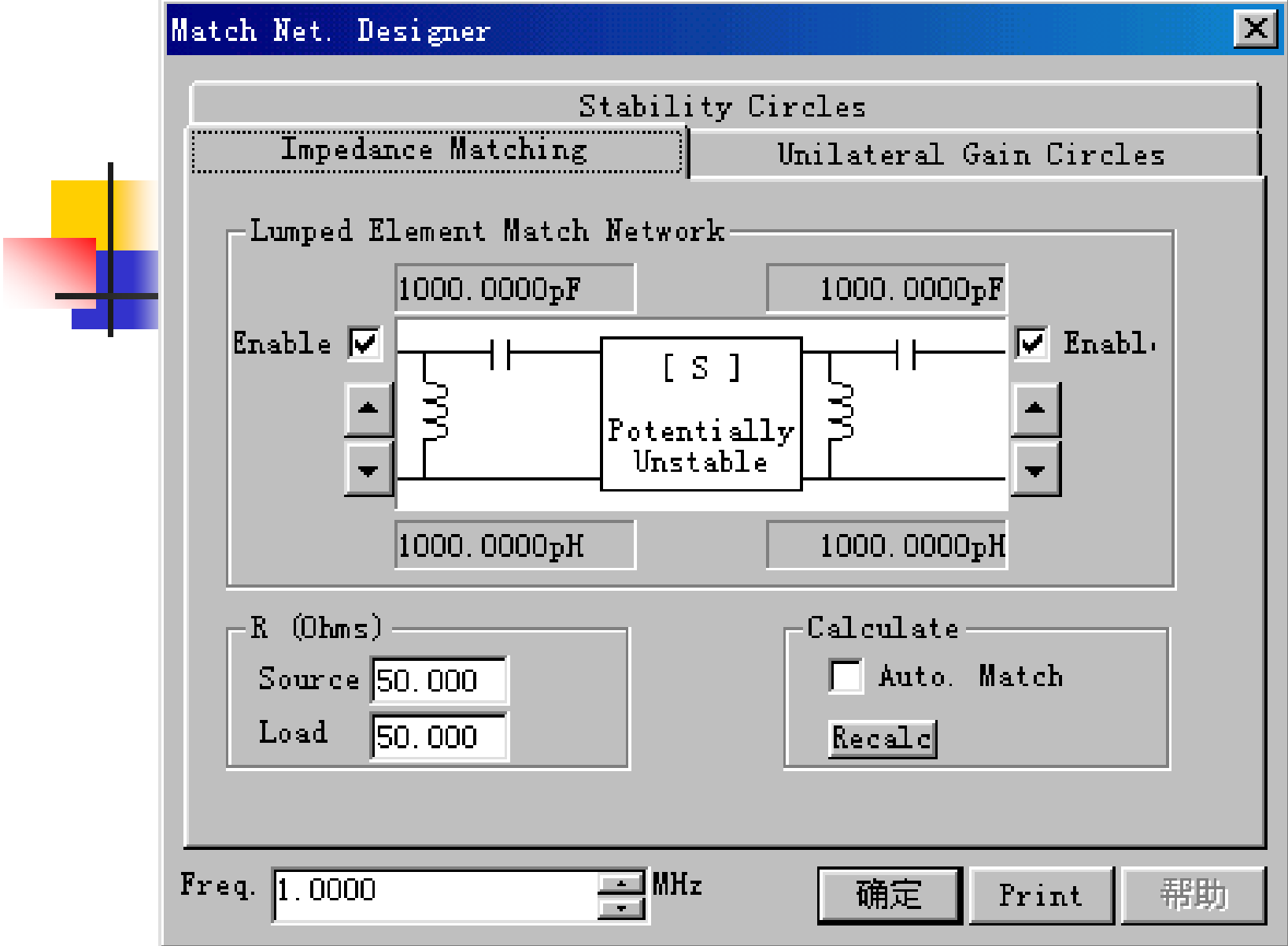
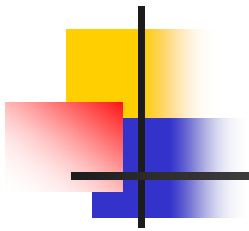


图2.7.23 Match Net. Designer Set up 对话框



---

(3) RF Characterizer (射频特性分析) 选择RF Characterizer, 点击Set up按钮, 出现的对话框如图2.7.24所示。在对话框中可以设置: Source Impedance(源阻抗) 、 Load Impedance (负载阻抗) 等参数。



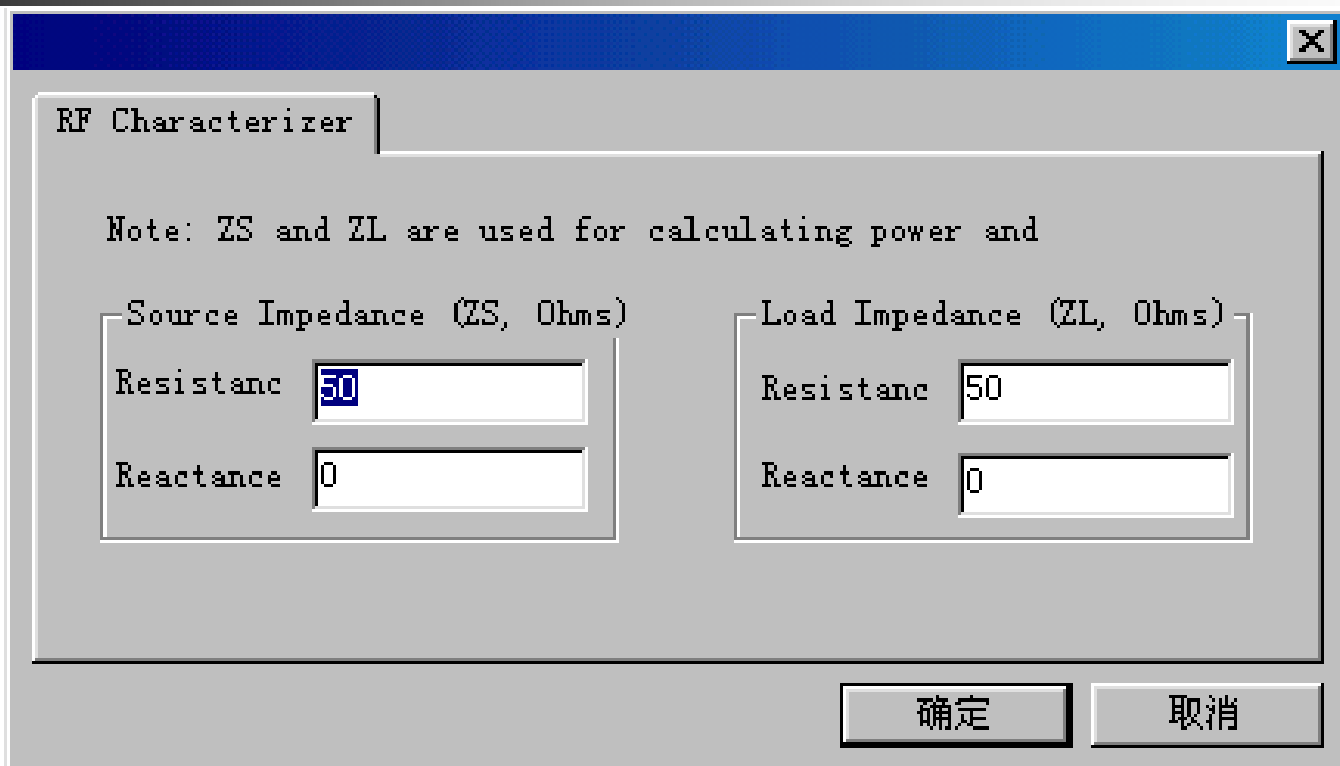


图2.7.24 RF Characterizer Set up对话框



---

## 2.8 双调谐回路谐振放大器



## 2.8.1 双调谐回路谐振放大器电路

双调谐回路放大器具有较好的选择性、较宽的通频带，并能较好地解决增益与通频带之间的矛盾，因而它被广泛地用于高增益、宽频带、选择性要求高的场合。但双调谐回路放大器的调整较为困难。双调谐回路放大器如图2.8.1所示，图中由 $C_3$  (C3)、 $C_4$  (C4)、 $C_5$  (C5)、 $C_9$  (C9)、 $C_{10}$  (C10)、 $L_1$  (L1)、 $L_2$  (L2)组成的双调谐回路。

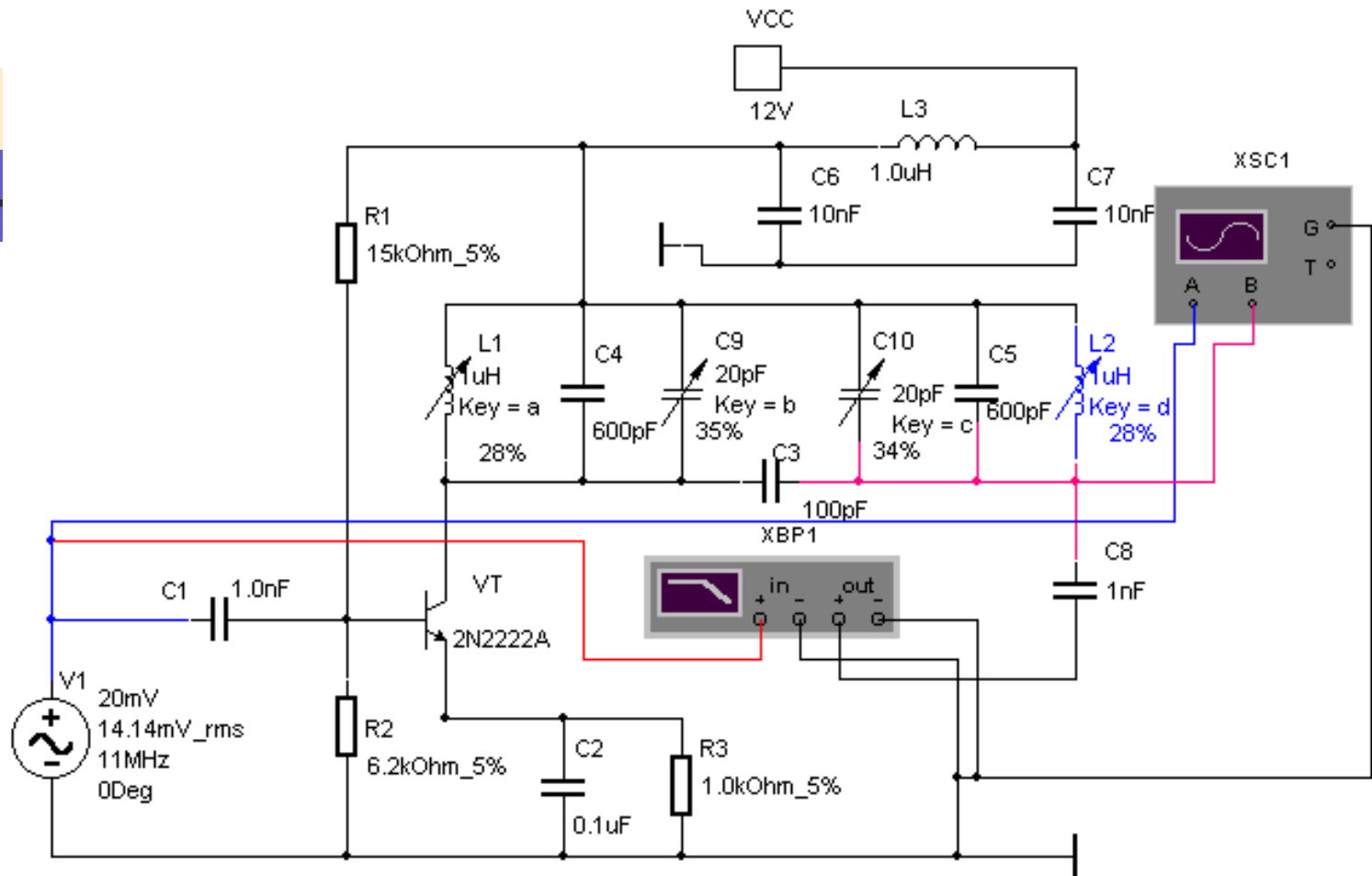


图2.8.1 双调谐回路谐振放大器

## 2.8.2 双调谐回路谐振放大器特性分析

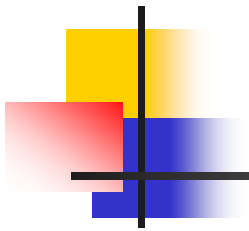
### 1. 电压增益

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{n_1 n_2 Y_{fe}}{G_X} \frac{\eta}{\sqrt{(1 - \xi^2 + \eta^2)^2 + 4\xi^2}}$$

式中：  $\xi = Q_L \frac{2\Delta f}{f_0}$

$n_1$ 、 $n_2$  分别代表  $C_4$ 、 $L_1$ 、 $C_9$  与  $C_5$ 、 $C_{10}$ 、 $L_2$  组成的谐振回路接入系数。但  $\xi = 0$  时，则

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{n_1 n_2 Y_{fe}}{G_X}$$

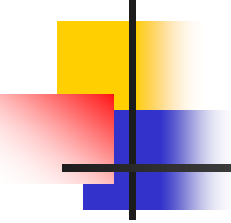


广义失调量  $\eta = KQ_L$ ：式中  $K$  为耦合因子， $Q_L$  为有载品质因素。对耦合回路来讲，可分为临界耦合、强耦合及弱耦合。

(1) 临界耦合的条件  $\eta = 1$

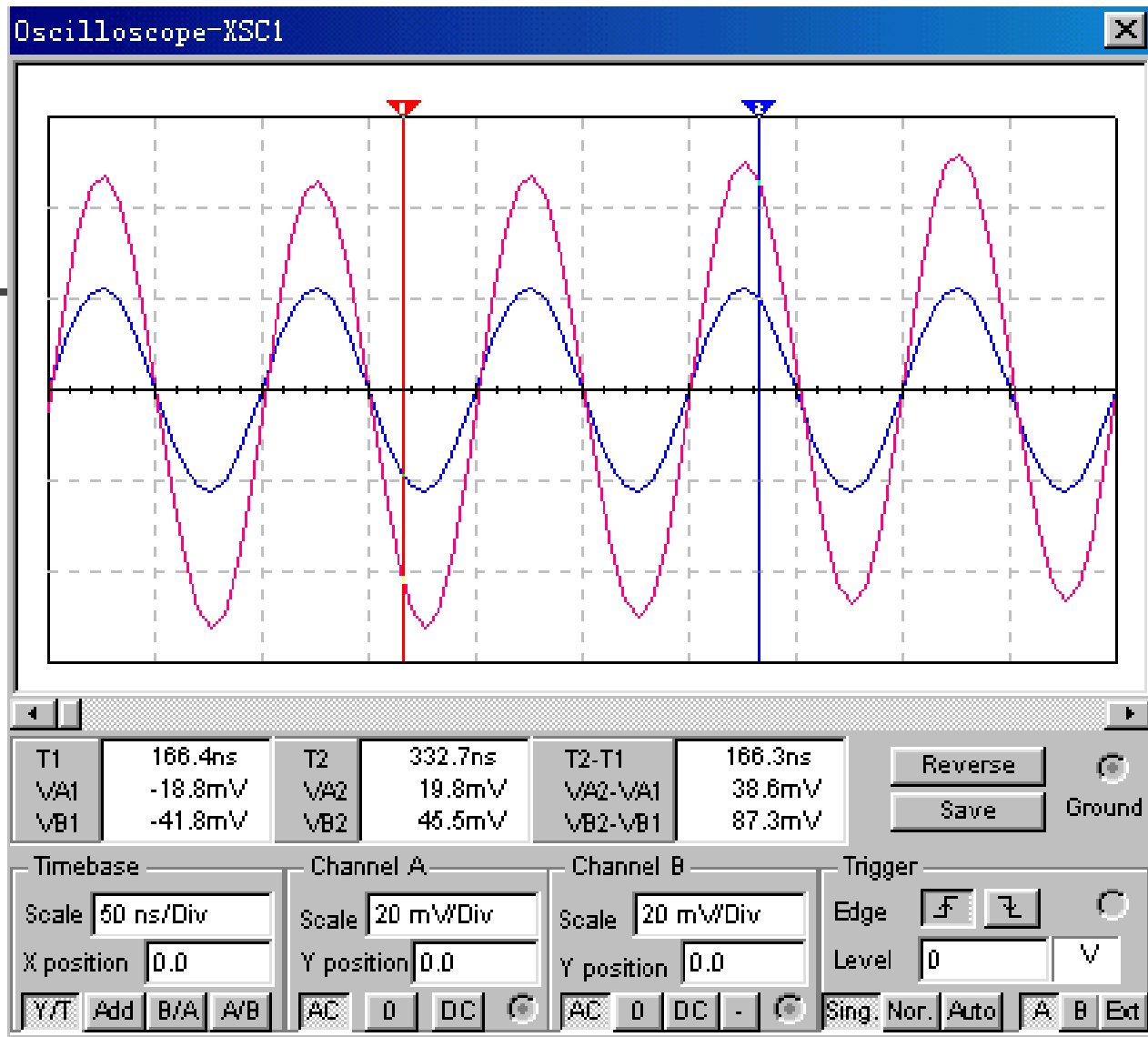
(2) 强耦合条件  $\eta > 1$

(3) 弱耦合条件  $\eta < 1$



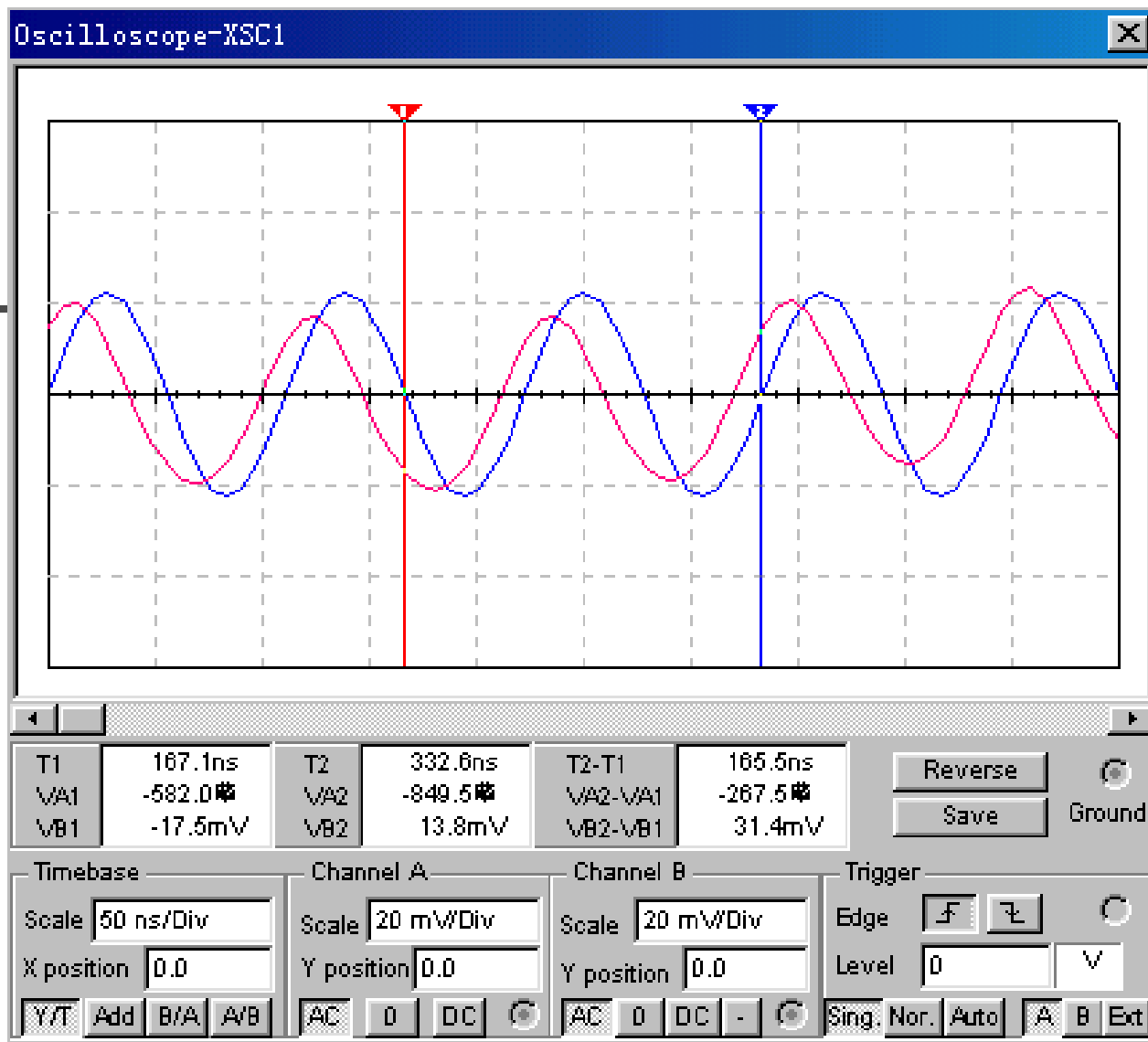
---

并联谐振回路调谐在放大器的工作频率上，则放大器的增益就很高；偏离这个频率放大器的放大作用就下降。图2.8.2 (a) 测出的是  $f_{\omega} = f_{\omega_0}$  时的波形，图2.7.3(b)测出的是  $f_{\omega} < f_{\omega_0}$  的波形，图2.7.3(c)测出的是  $f_{\omega} > f_{\omega_0}$  的波形。

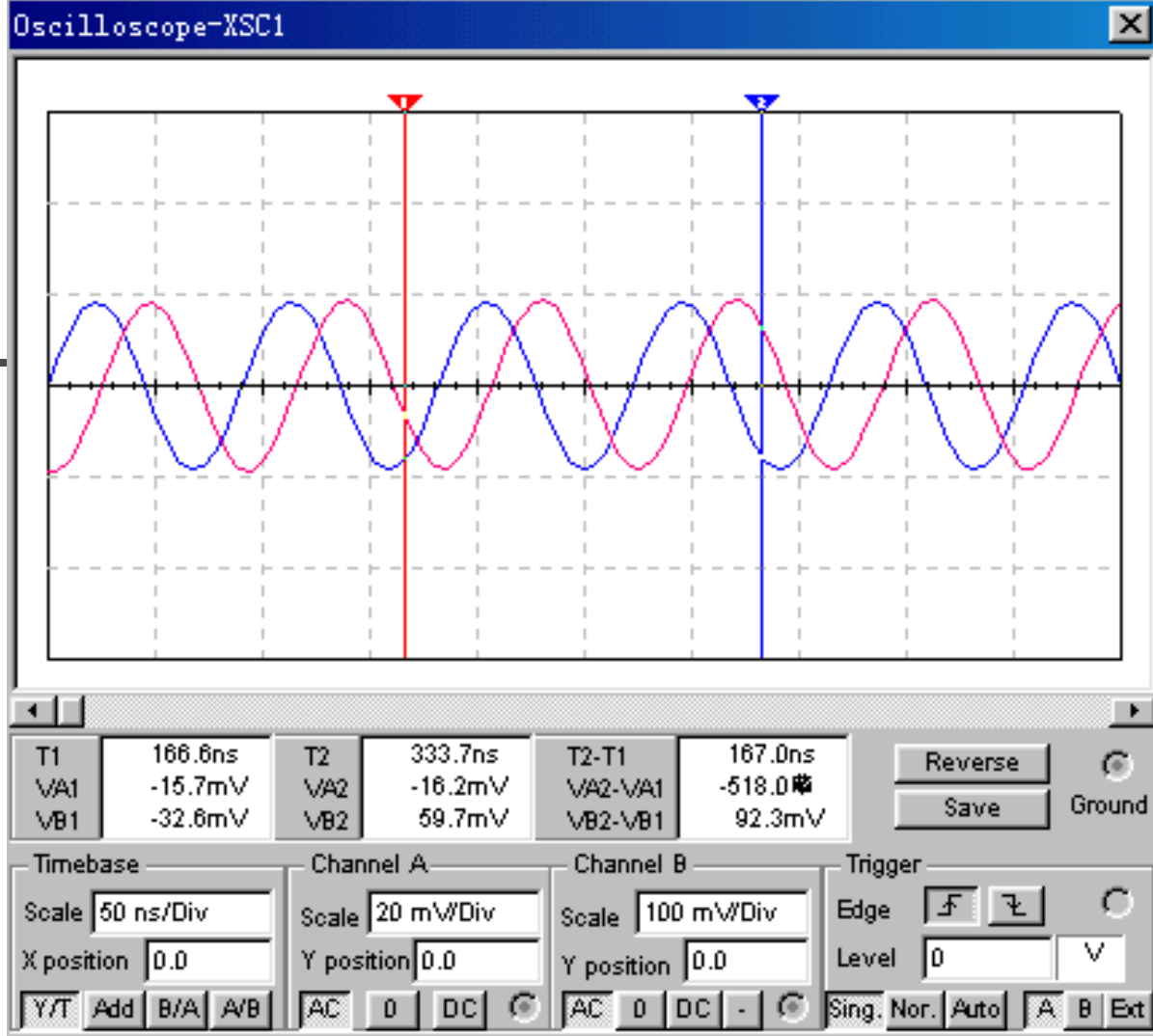


(a)  $f_{\omega} = f_{\omega\omega}$





(b)  $f_{\omega} < f_{\omega\omega}$



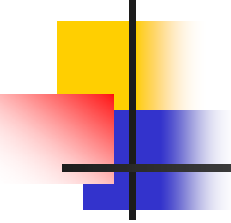
$$(c) \quad f_{\omega} > f_{\omega\omega}$$

图2..8.2  $f_{\omega} = f_{\omega\omega}$  ,  $f_{\omega} > f_{\omega\omega}$  ,  $f_{\omega} < f_{\omega\omega}$  时输入与输出波形



## 2.通频带

双调谐放大器在临界耦合状态时，选择性比单调谐放大器选择性好。双调谐放大器在弱耦合时，其放大器的谐振曲线和单调谐放大器相似，通频带窄，选择性差；在强耦合时，通频带显著加宽，矩形系数变好，但不足之处是谐振曲线的顶部出现凹陷，这就使回路通频带、增益的兼顾较难。



---

解决的方法通常是在电路上采用双—单—双的方式，即用双调谐回路展宽频带，又用单调谐回路补偿中频段曲线的凹陷，使其增益在通频带内基本一致。但在大多数情况下，双调谐放大器是工作在临界耦合状态的。从图2.8.2调试结果中可看出，双调谐回路放大器比单调谐回路放大器通频带宽。

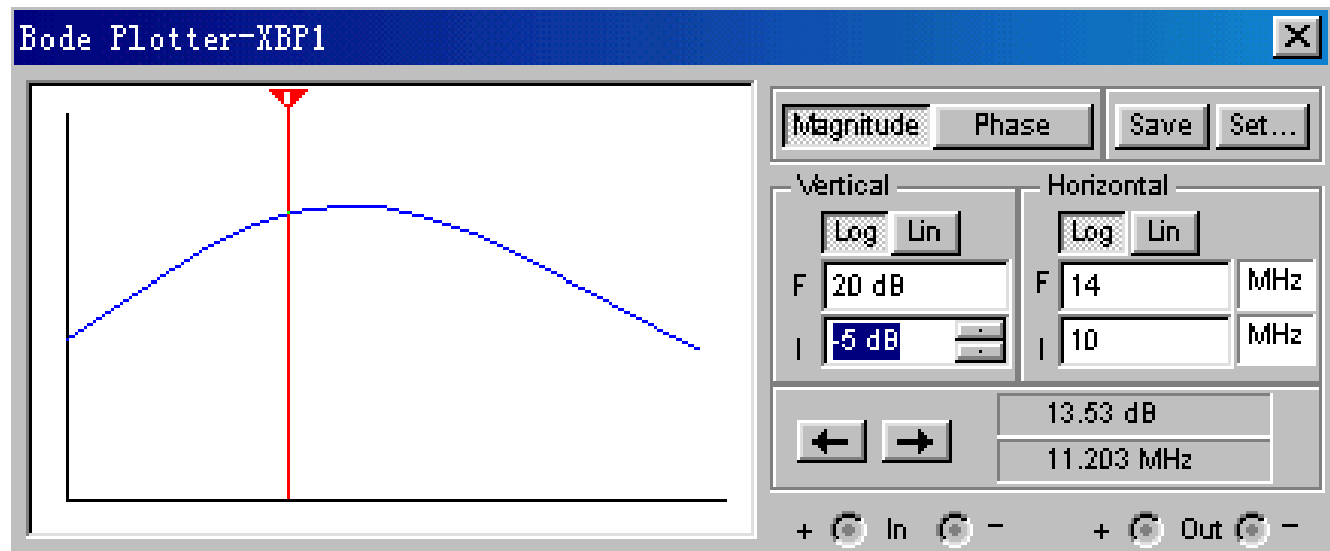


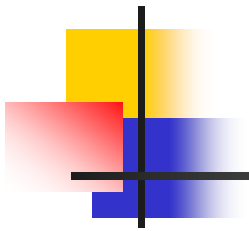
图2.8.2 双调谐回路放大器幅频特性曲线



## 2.9 $0\sim 360^\circ$ 移相电路

---

利用两级移相放大器可以组成 $0\sim 360^\circ$ 可调移相电路。 $0\sim 360^\circ$ 可调移相电路如图2.9.1所示。图中Q1和Q2是 $0\sim 180^\circ$ 相移放大器，两级移相放大器可以完成 $0\sim 360^\circ$ 。Q3是缓冲放大器。调节电位器RP1和RP2，可以使输入信号产生移相。



---

利用两级移相放大器可以组成 $0\sim 360^\circ$  可调移相电路。 $0\sim 360^\circ$  可调移相电路如图2.9.1所示。图中Q1和Q2是 $0\sim 180^\circ$  相移放大器，两级移相放大器可以完成 $0\sim 360^\circ$  。Q3是缓冲放大器。调节电位器RP1和RP2，可以使输入信号产生移相。

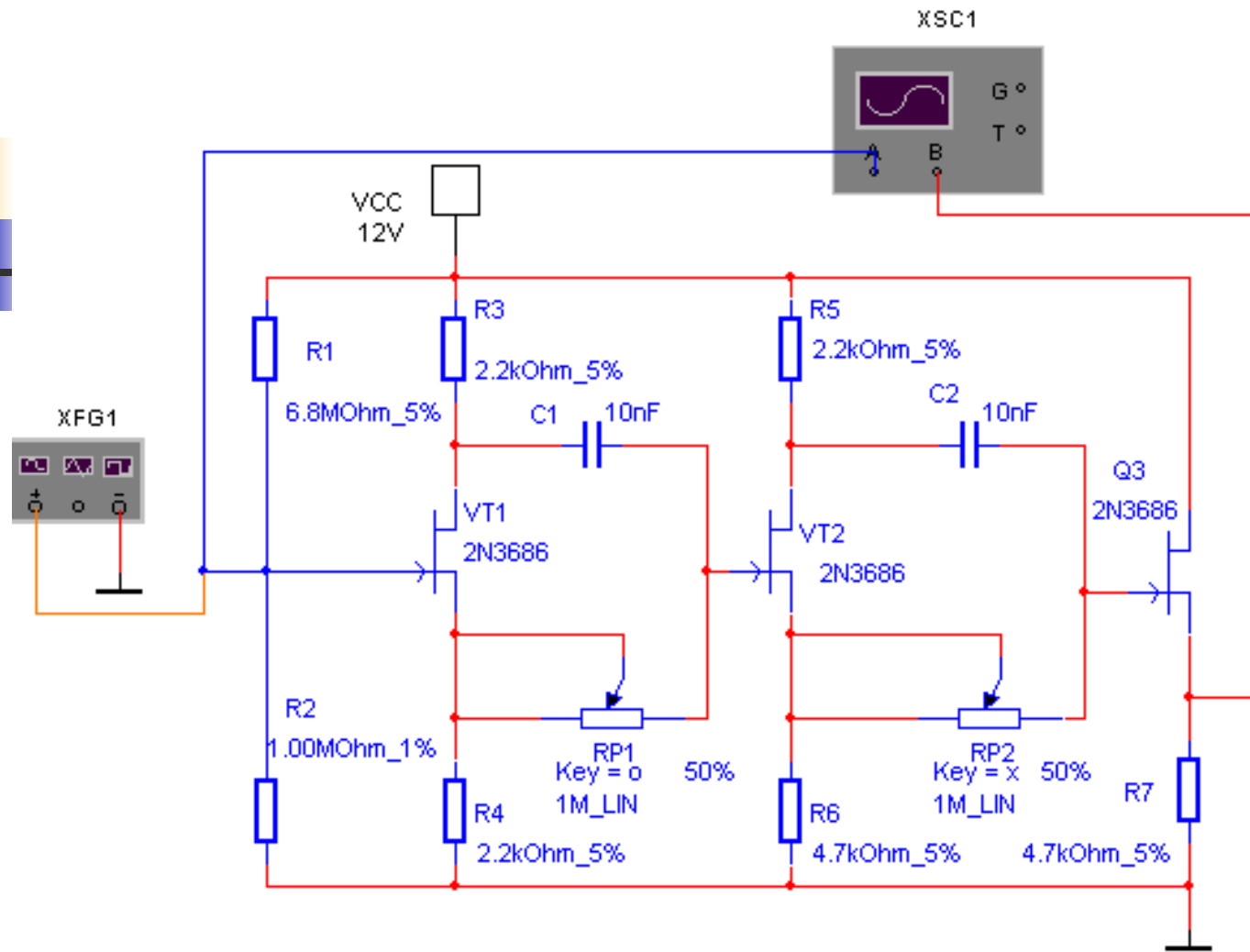
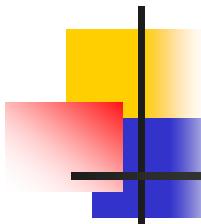


图2.9.1 0~360° 可调移相电路



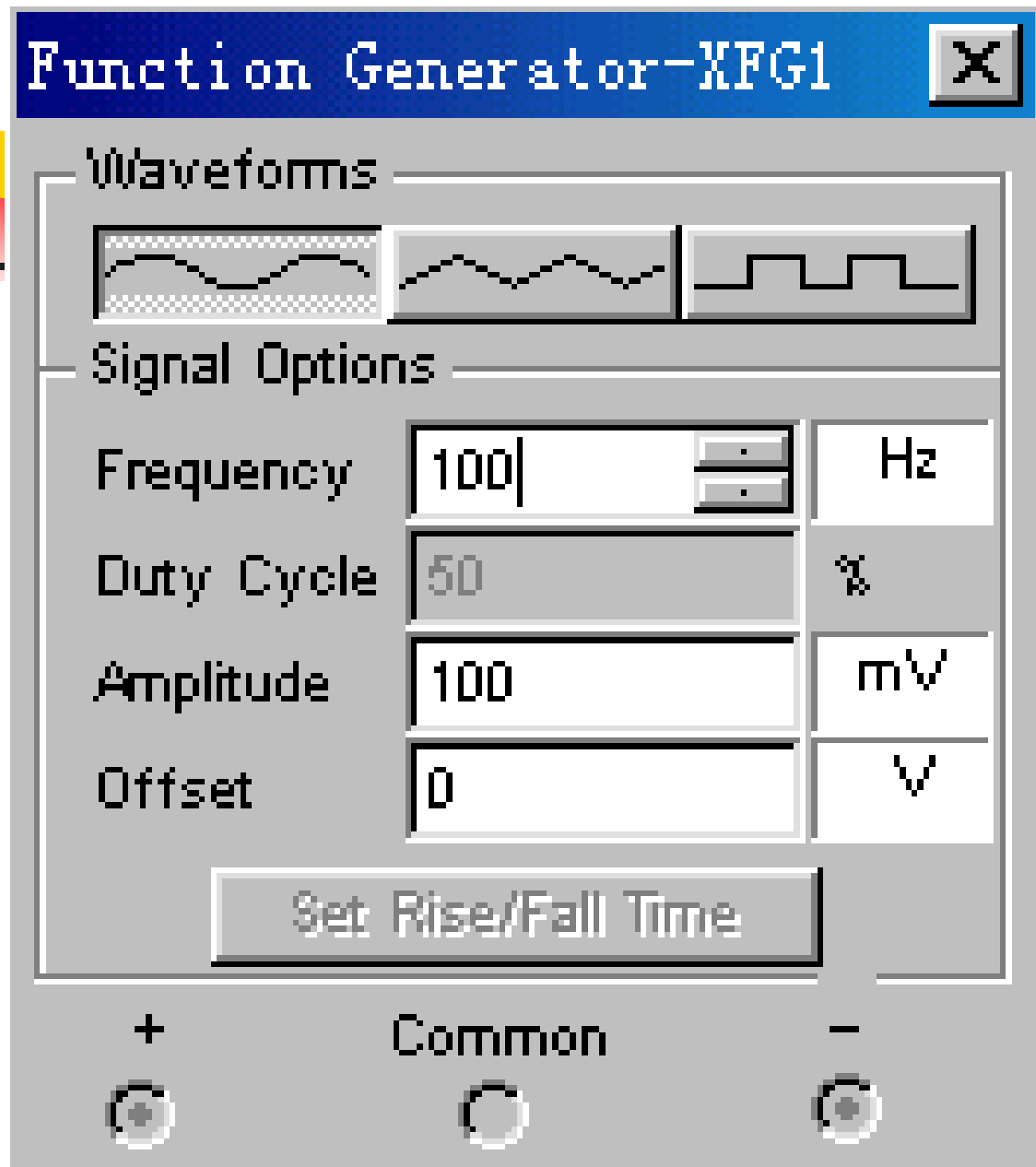
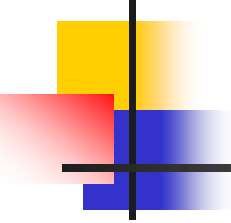
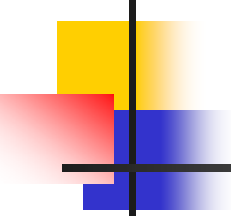


图2.9.2  
信号源参数



可调电位器RP1和RP2的参数设置对话框如图2.9.3所示，数值1M-LIN表示两个固定端之间的电阻值。电位器滑动点的改变可以通过改变key = ? 字母来进行，字母范围a~z或者A~Z，小写字母表示减少百分比，大写字母表示增加百分比，



---

字母的设定可以在电位器的对话框中进行。对话框中 **Increment** 表示每次设置的字母键，滑动点下方电阻减少或者增加量占总值的百分比。输入/输出信号波形如图2.9.4所示。

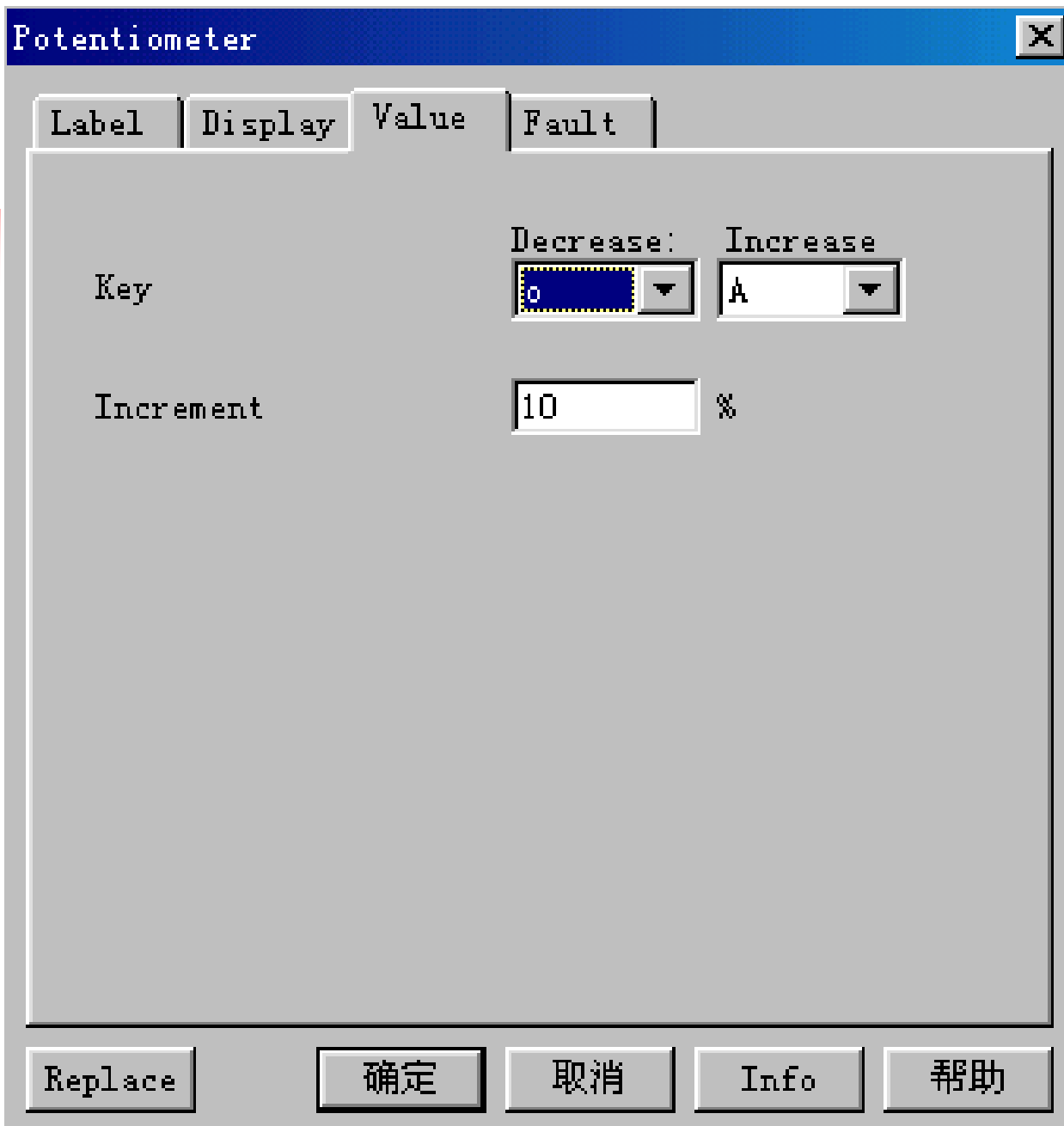


图2.9.3  
可调电位器的  
参数设置对话框

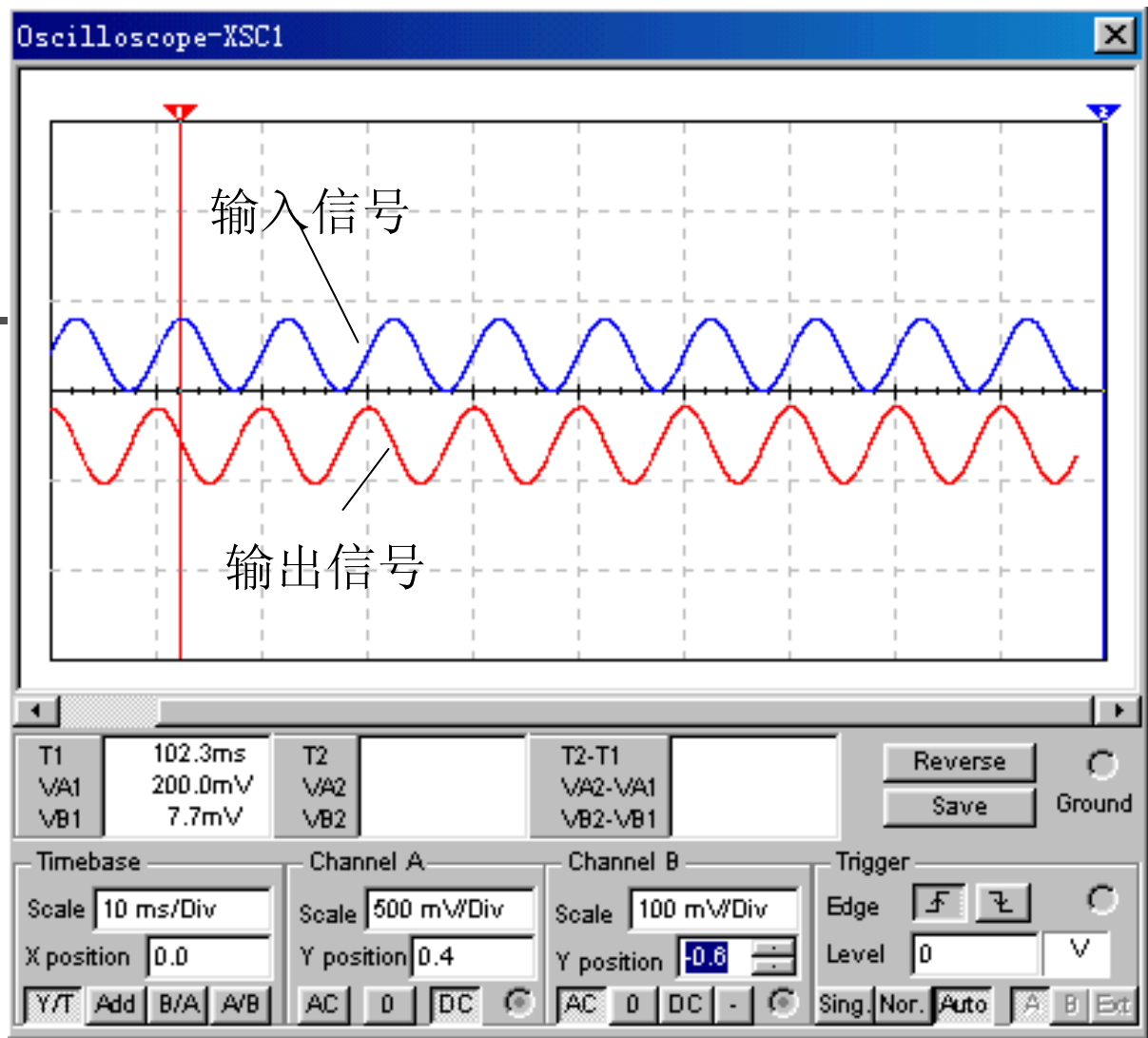
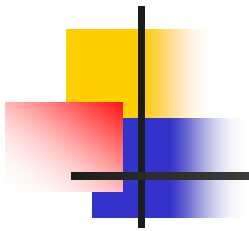
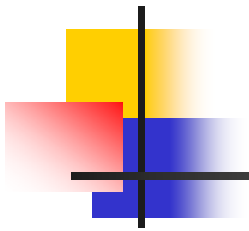


图2.9.4 输入/输出信号波形



## 本章小结

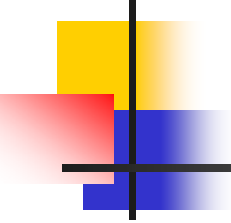


---

本章介绍了晶体管放大器的工作原理、主要性能指标、特性以及仿真分析。本章的主要内容包括：

(1) 单管放大器电路基本原理，静态工作点的分析，动态特性分析。

(2) 以两级共射级放大电路构成的放大电路为例，进行了多级放大电路的频率响应和仿真分析。多级放大电路能够提高总的电压增益，但通频带会变窄。

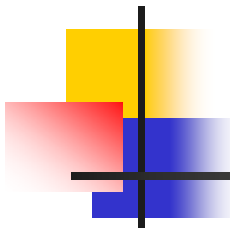


---

(3) 负反馈使放大器的放大倍数降低，但能在多方面改善放大器的动态指标，如稳定放大倍数，改变输入、输出电阻，减小非线性失真和展宽通频带等。

(4) 介绍了射极跟随器工作原理和瞬态特性分析。

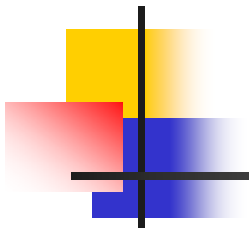




---

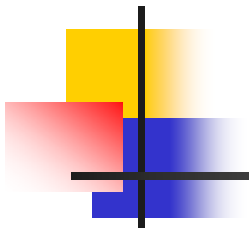
(5) 介绍了差动放大器电路结构和工作点分析。差动放大器对差模信号无负反馈作用，因而不影响差模电压放大倍数，但对共模信号有较强的负反馈作用，故可以有效地抑制零漂，稳定静态工作点。

(6) 介绍了OTL 电路的主要性能指标，OTL低频功率放大器电路。



(7) 单调谐放大器是由单调谐回路作为交流负载的放大器。介绍了LC并联谐振回路的特性，进行了单级单调谐放大器电路分析。

(8) 双调谐回路放大器是由LC组成的双调谐回路作为交流负载的放大器，具有较好的选择性、较宽的通频带，并能较好地解决增益与通频带之间的矛盾。介绍了双调谐回路谐振放大器电路，进行了双调谐回路谐振放大器特性分析。



---

(9) 移相电路：介绍了一个 $0\sim 360^\circ$  的移相电路。

掌握晶体管放大器电路的仿真设计与分析方法是本章的重点，注意不同类型放大器之间的差别。



## 思考题与习题

---

2.1 在Multisim仿真平台中建立如图2.1所示晶体管放大电路，设 $V_{CC}=12V$ ， $R_C=3K\Omega$ ， $R_b=240K\Omega$ ，三极管选择2N222A。（1）用万用表测出各极静态工作点。（2）用示波器观察输入及输出波形。

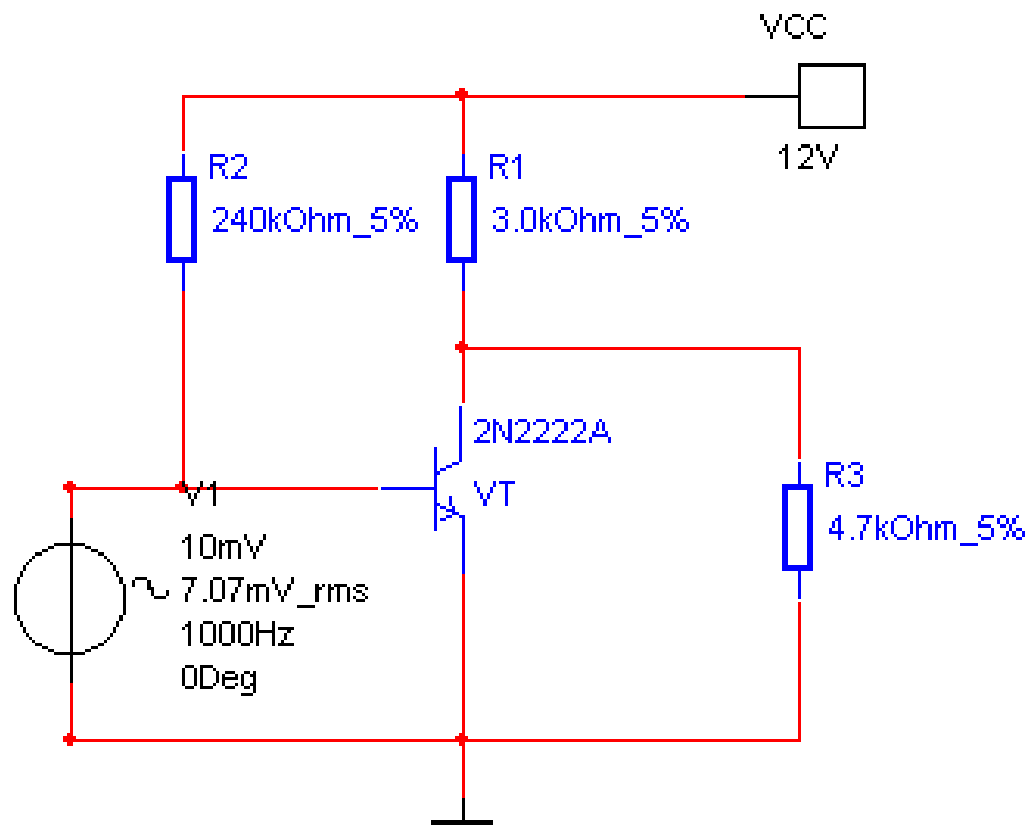
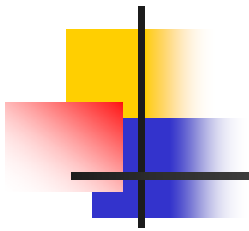
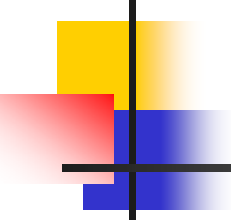


图2.1 习题2.1图



---

2.2 在上图中如改变 $R_b$ ，使  $R_b=100\text{K}\Omega$  其他不变，用万用表测出各极静态工作点，并观察其输入、输出波形的变化。



---

2.3 在仿真软件中建立如图2.2所示分压式偏置电路，调节合适静态工作点，用示波器观察使输出波形最大不失真。（1）测出各级静态工作点：（2）测出输入、输出电阻。（3）改变 $R_P$ 的大小观察静态工作点的变化，并用示波器观察输出波形是否失真。

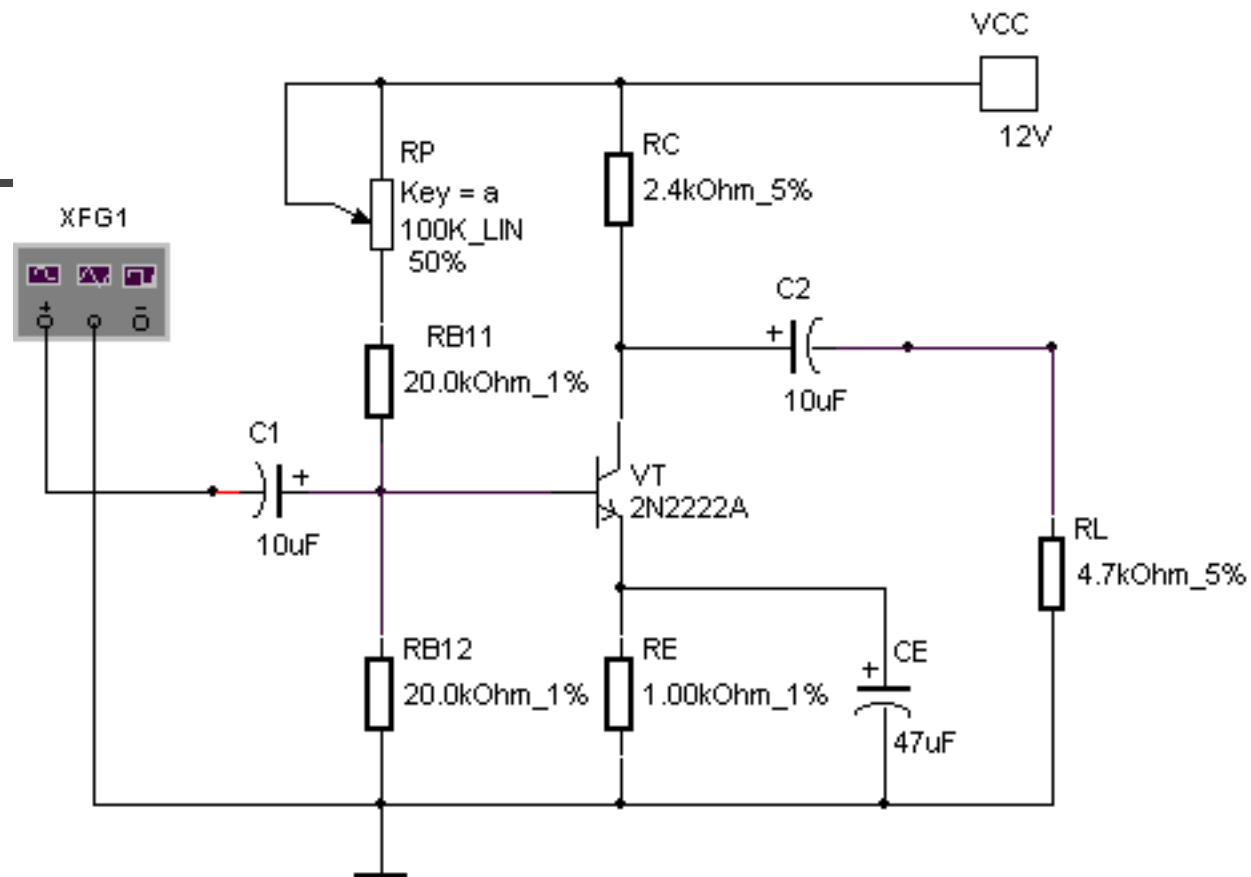
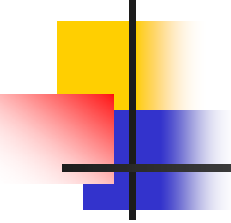


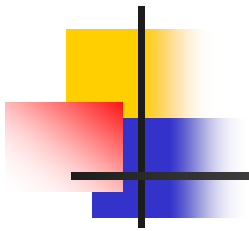
图2.2 习题2.3图





---

2.4 (1) 在上图中用示波器观察接上负载和负载开路时对输出波形的影响。(2) 学会使用波特图仪在放大电路中的连接：(3) 观察放大电路的幅频特性和相频特性。



---

2.5 两级放大电路如图2.3所示，在输出波形不失真的情况下；（1）测出各级静态工作点；（2）用示波器测出各级输出电压的大小。

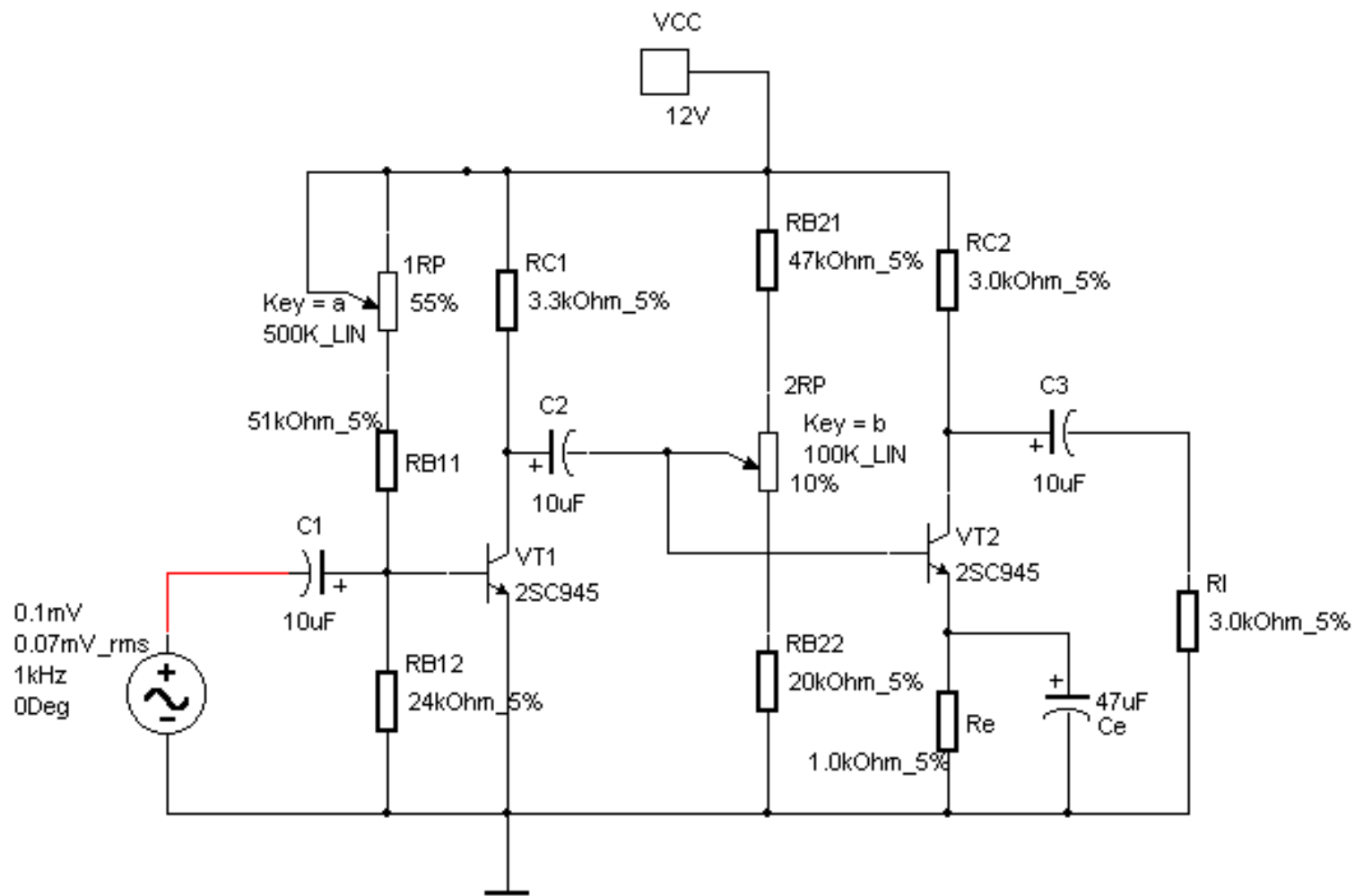
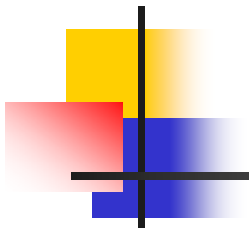


图2.3 习题2.5图



---

2.6 两级负反馈电路如图2.4所示。(1) 断开反馈支路开关“K”加大输入信号使输出波形失真，然后合上反馈支路开关“K”，观察负反馈对放大电路失真的改善：

(2) 接上波特图观察有、无负反馈时放大电路的幅频特性和相频特性。

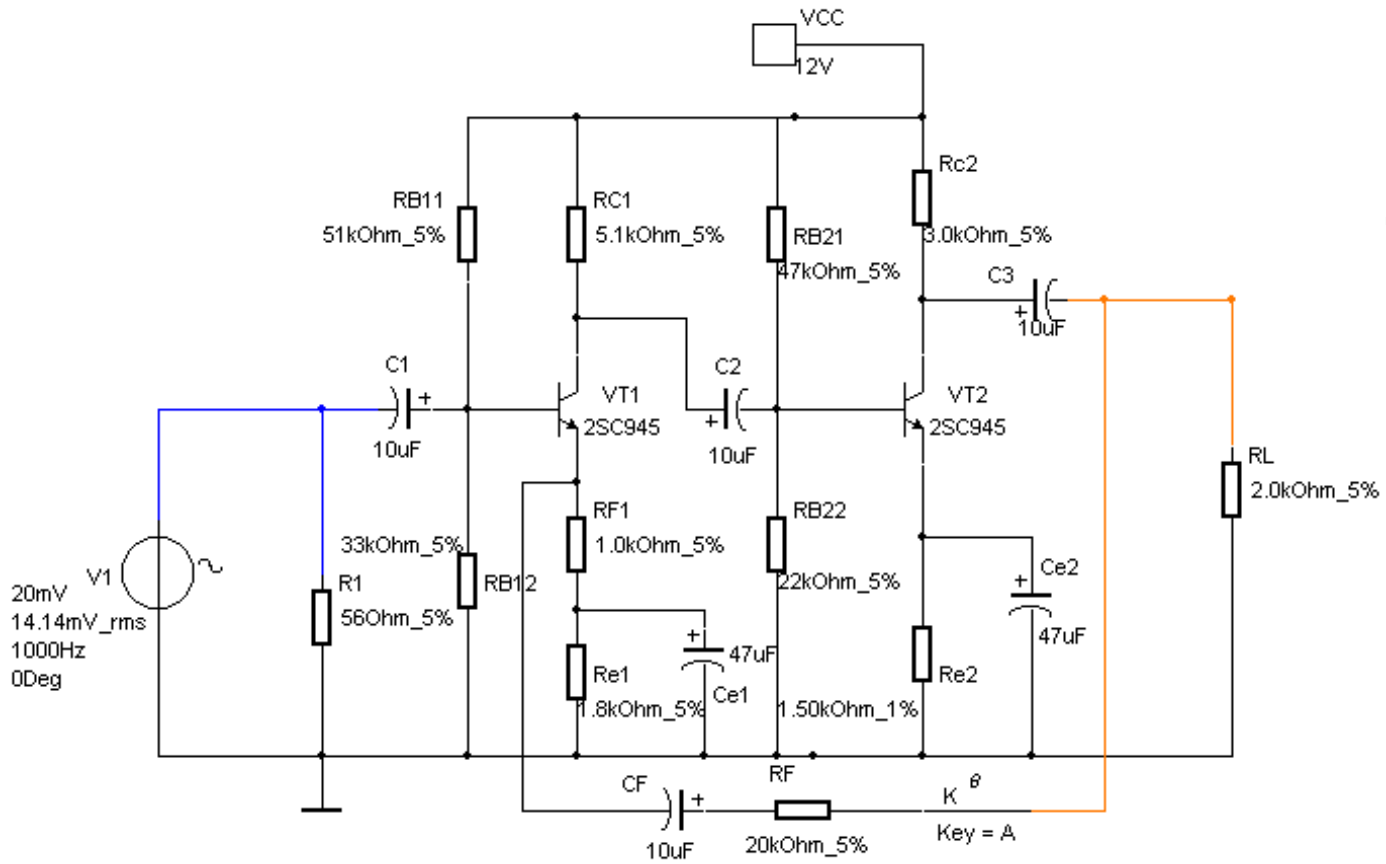
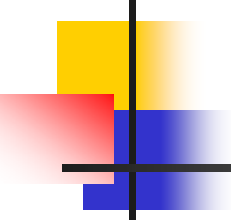


图2.4 习题2.6图



---

2.7 电路如图2.5所示。(1) 调试合适的静态工作点；(2) 用示波器测出输入、输出电压的大小。

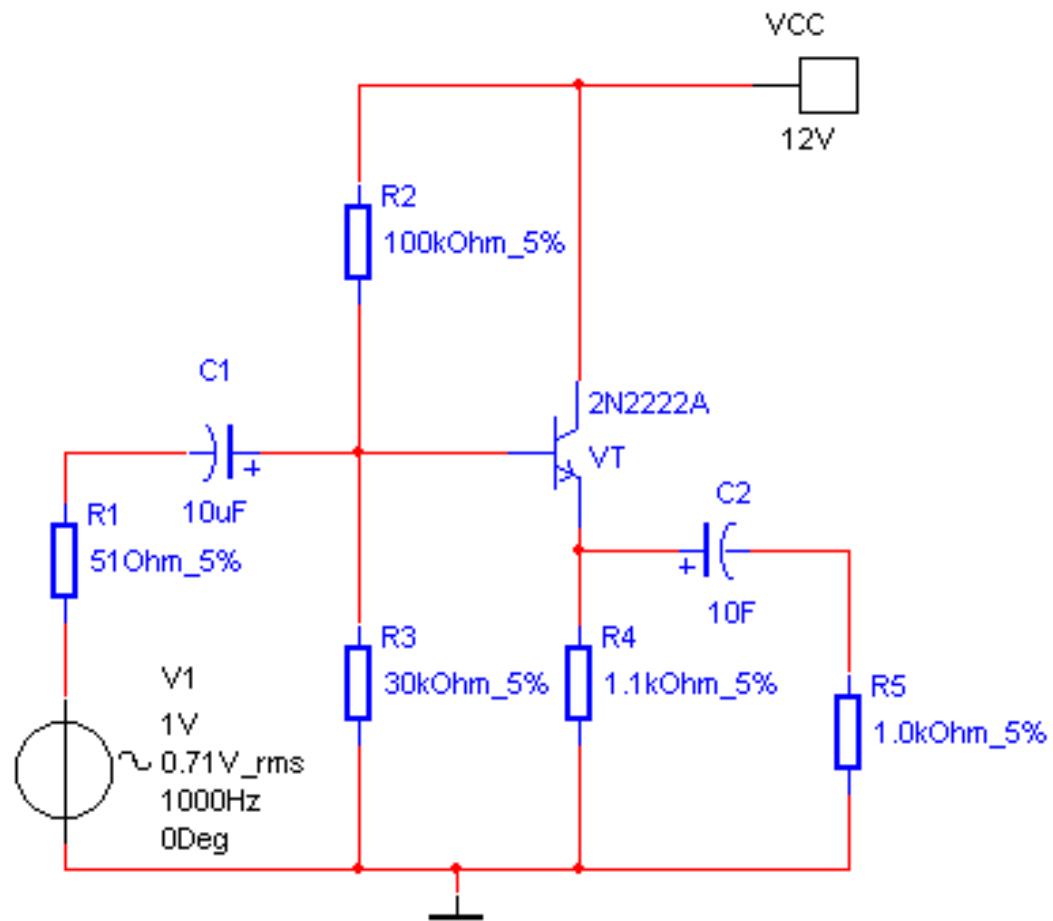
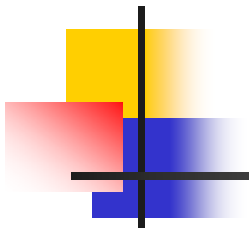


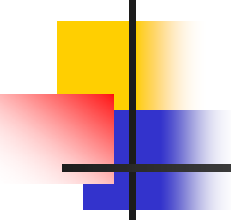
图2.5 习题2.7图



---

2.8 在仿真平台上建立一个双端输入、双端输出的差动放大电路。（1）输入共模分量，分别测出单端输出电压及双端输出电压；（2）输入差模分量，分别测出单端输出电压及双端输出电压



- 
- 
- 2.9 电路如图2.6所示。(1) 学会设置喇叭参数：  
(2) 调节 RP1 电位器使 A 点的电压等于：  
(3) 测出各级静态工作点  $\frac{1}{2}V_{CC}$  (4) 改变信号发生器的频率倾听喇叭声音的变化。

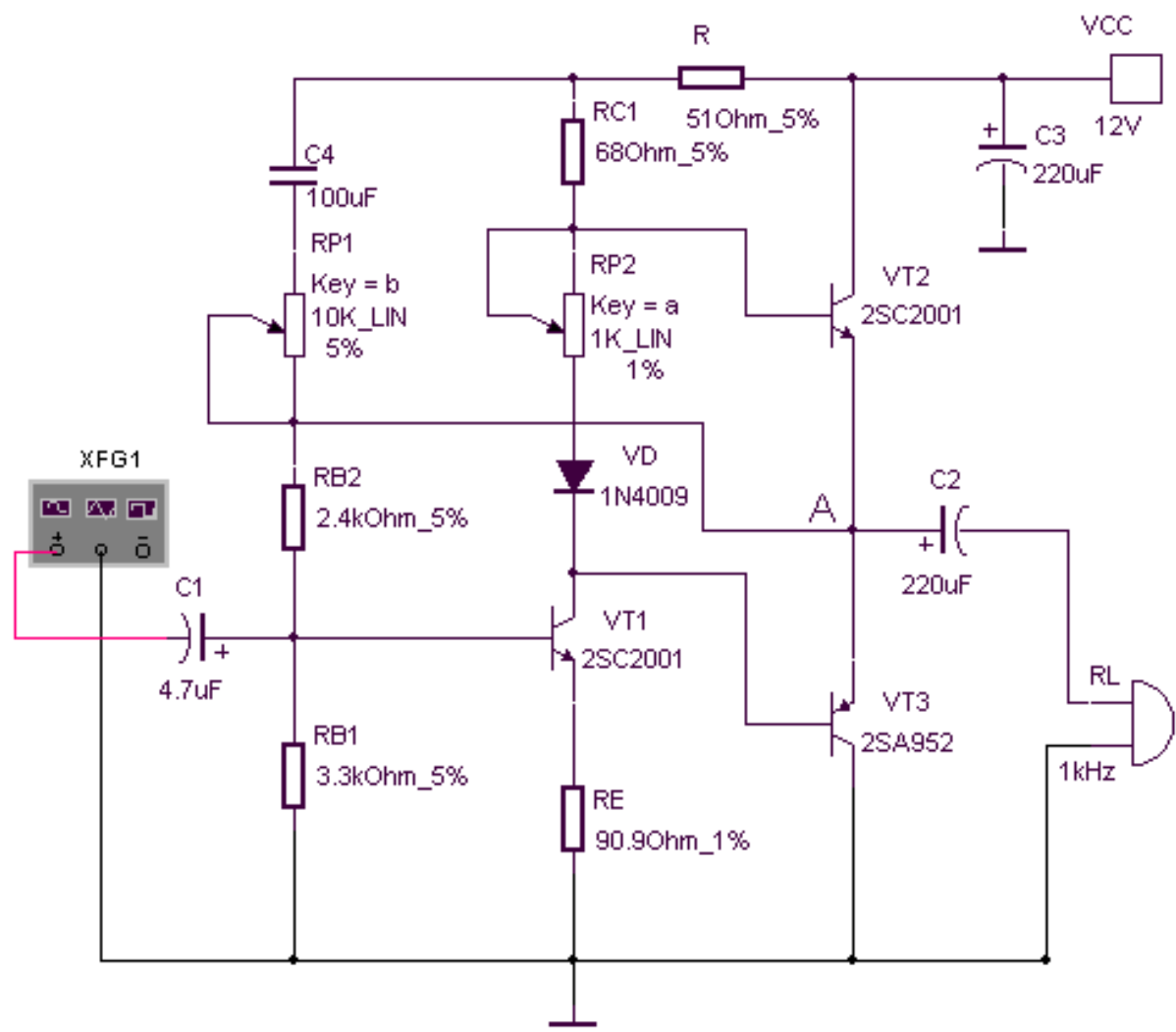
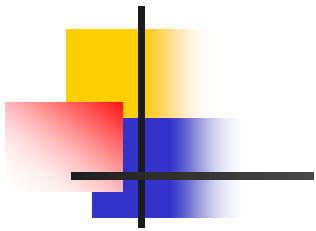
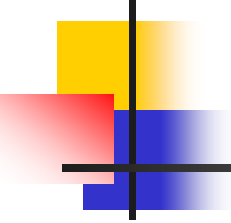


图2.6 习题2.9图



---

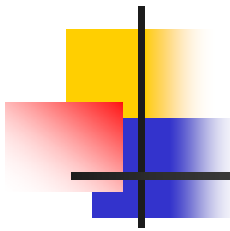
2.10 在仿真平台上设计一个单级单调谐放大电路，要求谐振频率为 $10.904\text{MHz}$ ，用波特图仪测出调谐放大电路的频率。

2.11 在仿真平台上设计一个单级双调谐放大电路，用波特图仪观察双调谐回路放大器的通频带。



---

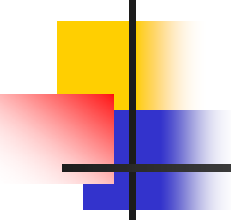
# 第3章 集成运算放大器

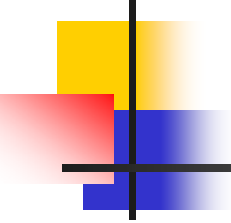


---

- **内容提要**

- 集成运算放大器当外部接入不同的线性或非线性元器件组成输入和负反馈电路时，可以灵活地实现各种特定的函数关系。在线性应用方面，可组成比例、加法、减法、积分、微分、对数等模拟运算电路。

- 
- 
- 本章介绍了比例求和运算电路，积分与微分电路，一阶有源滤波器，二阶有源低通滤波器，二阶有源高通滤波器，二阶有源带通滤波器，双T带阻滤波器电路，电压比较器、对数器、指数器的电路结构与计算机仿真设计方法。

- 
- 
- 本章的重点是掌握运算放大器电路的仿真设计与分析方法。注意输入回路和负反馈回路上元器件的变化对电路功能的影响。



---

## 3.1 比例求和运算电路

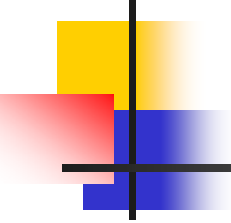




## 3.1.1 理想运算放大器的基本特性

---

- **1. 理想运算放大器特性**
- 在大多数情况下，将运放视为理想运放，就是将运放的各项技术指标理想化，满足下列条件的运算放大器称为理想运放。

- 
- 
- (1) 开环电压增益 $A_{ud} = \infty$
  - (2) 输入阻抗 $r_i = \infty$
  - (3) 输出阻抗 $r_o = 0$
  - (4) 带宽 $f_{BW} = \infty$
  - (5) 失调与漂移均为零等。

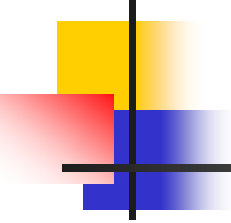


## ■ 2. 理想运放在线性应用时的两个重要特性:

- (1) 输出电压 $U_O$ 与输入电压之间满足关系式

- $U_O = A_{ud} (U_+ - U_-)$

- 由于 $A_{ud} = \infty$ ，而 $U_O$ 为有限值，因此， $U_+ - U_- \approx 0$ 。即 $U_+ \approx U_-$ ，称为“虚短”。

- 
- 
- (2) 由于 $r_i = \infty$ ，故流进运放两个输入端的电流可视为零，即 $I_{IB} = 0$ ，称为“虚断”。这说明运放对其前级吸取电流极小。
  - 上述两个特性是分析理想运放应用电路的基本原则，可简化运放电路的计算。

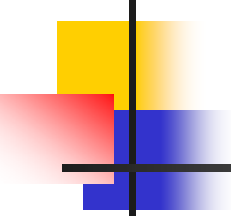


## 3.1.2 反相比例运算电路

---

- 电路如图3.1.1所示。对于理想运放，该电路的输出电压与输入电压之间的关系为：

$$U_0 = -\frac{R_F}{R_1} U_i$$

- 
- 
- 为了减小输入级偏置电流引起的运算误差，在同相输入端应接入平衡电阻 $R_2 = R_1 // R_F$ 。  
( $R_F$ 为图中RF， $R_1$ 为图中R1)

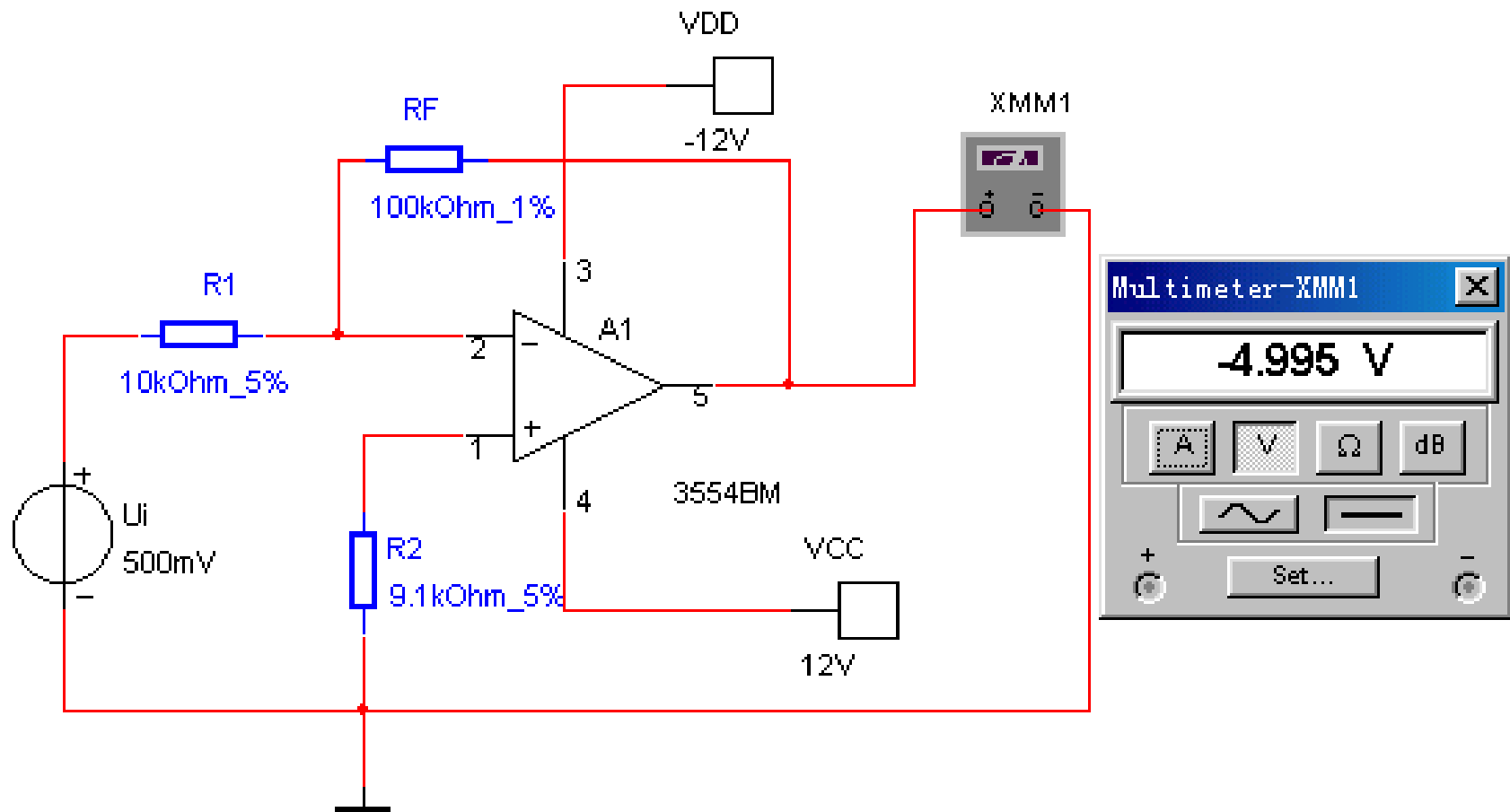


图3.1.1 反相比例运算电路

### 3.1.3 反相加法电路

- 电路如图3.1.2所示，输出电压与输入电压之间的关系为：

$$U_0 = -\left(\frac{R_F}{R_1} U_{i1} + \frac{R_F}{R_2} U_{i2}\right)$$

- $R_3 = R_1 // R_2 // R_F$  ( $R_F$ 为图中 $R_F$ ,  $R_1$ 为图中 $R_1$ ,  $R_2$ 为图中 $R_2$ ,  $R_3$ 为图中 $R_3$ )



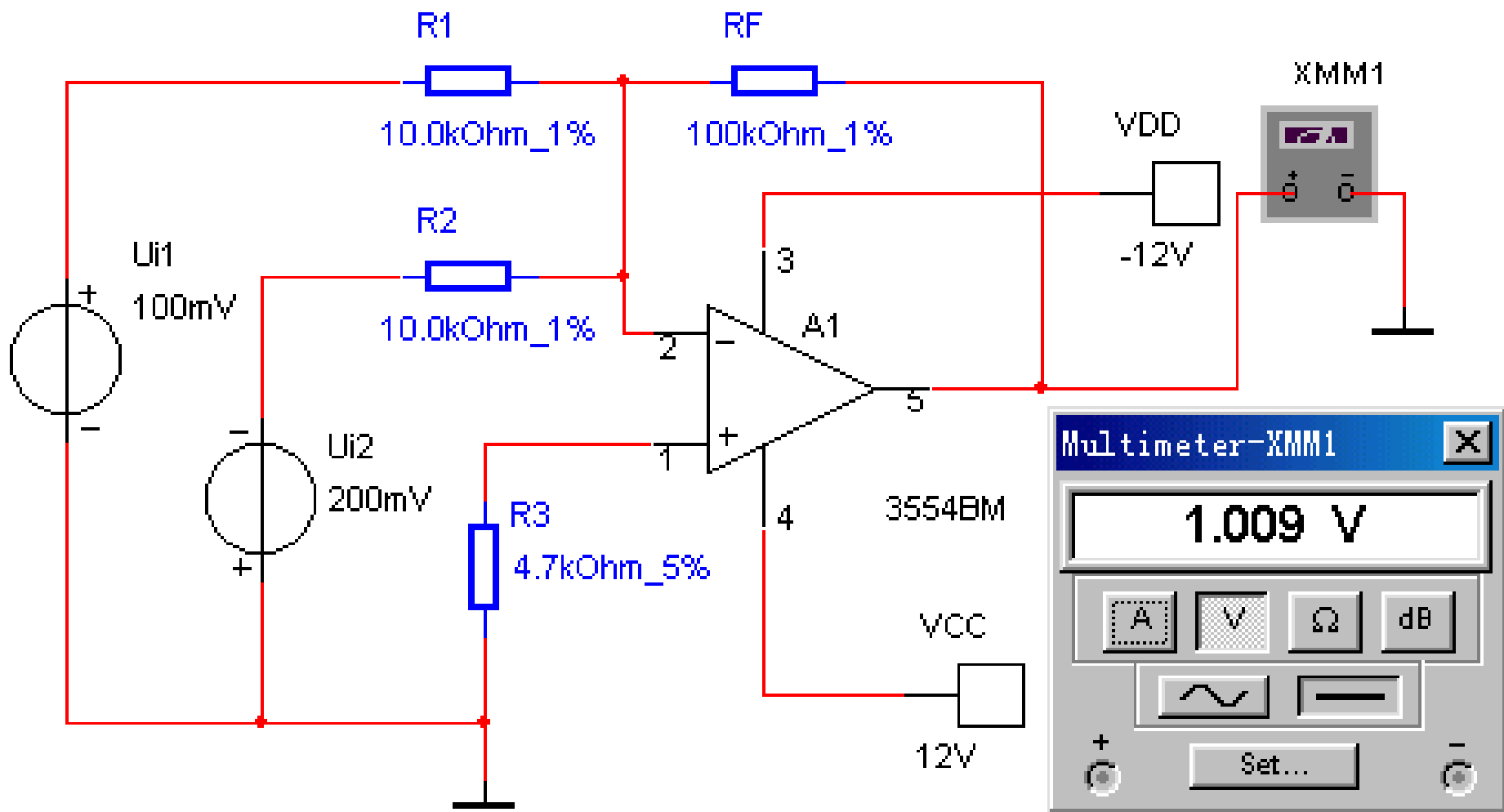


图3.1.2 反相加法运算电路

## 3.1.4 同相比例运算电路

■ 图3.1.3是同相比例运算电路，它的输出电压与输入电压之间的关系为：

■

$$U_0 = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) U_i \quad R_2 = R_1 // R_F$$

■

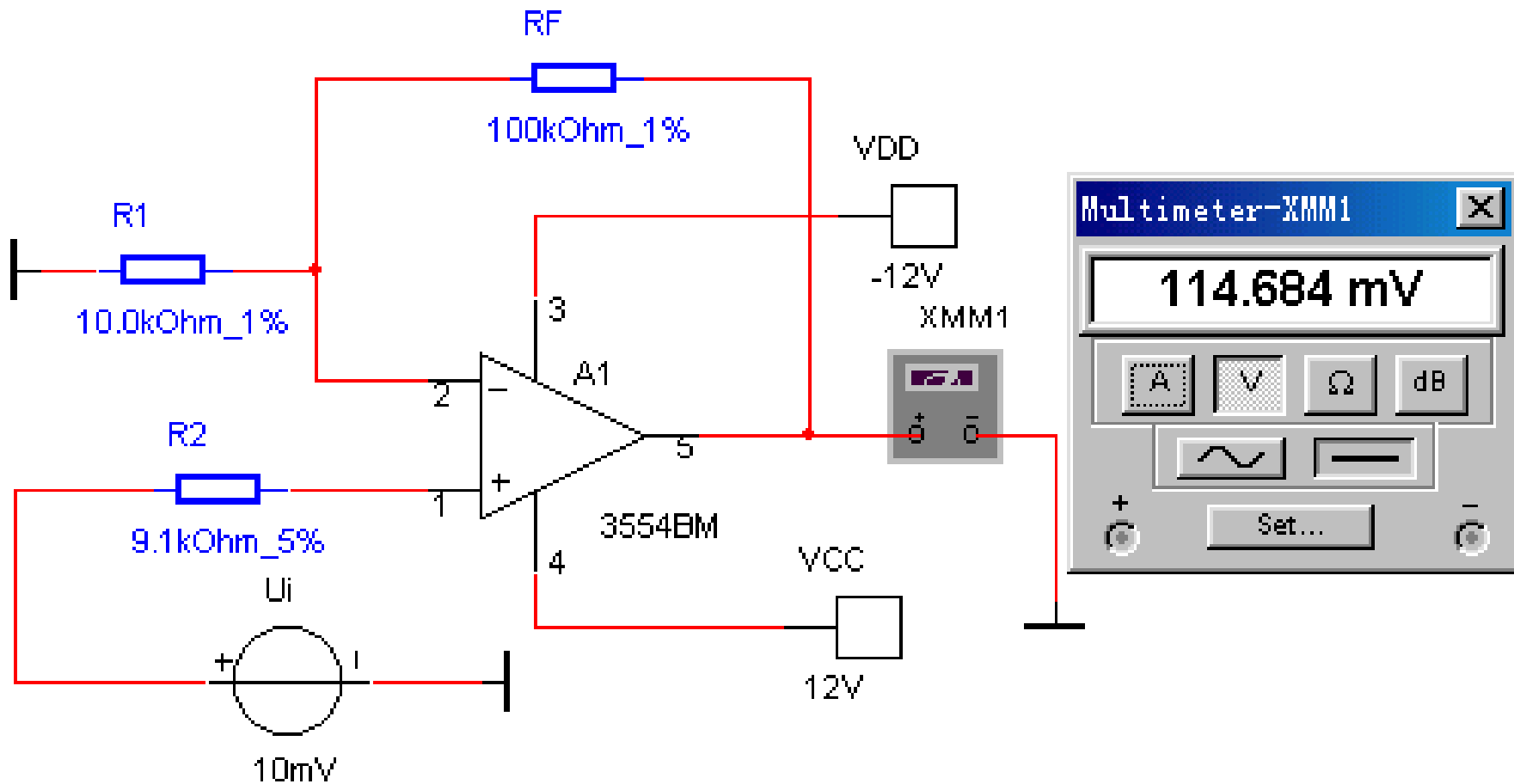
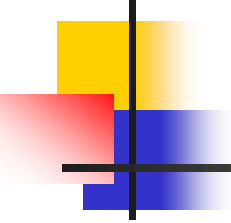


图3.1.3 同相比例运算电路

- 
- 
- 当 $R_1 \rightarrow \infty$ 时， $U_O = U_i$ ，即得到如图3.1.4所示的电压跟随器。图中 $R_2 = R_F$ ，用以减小漂移和起保护作用。一般 $R_F$ 取 $10K \Omega$ ， $R_F$ 太小起不到保护作用，太大则影响跟随性。

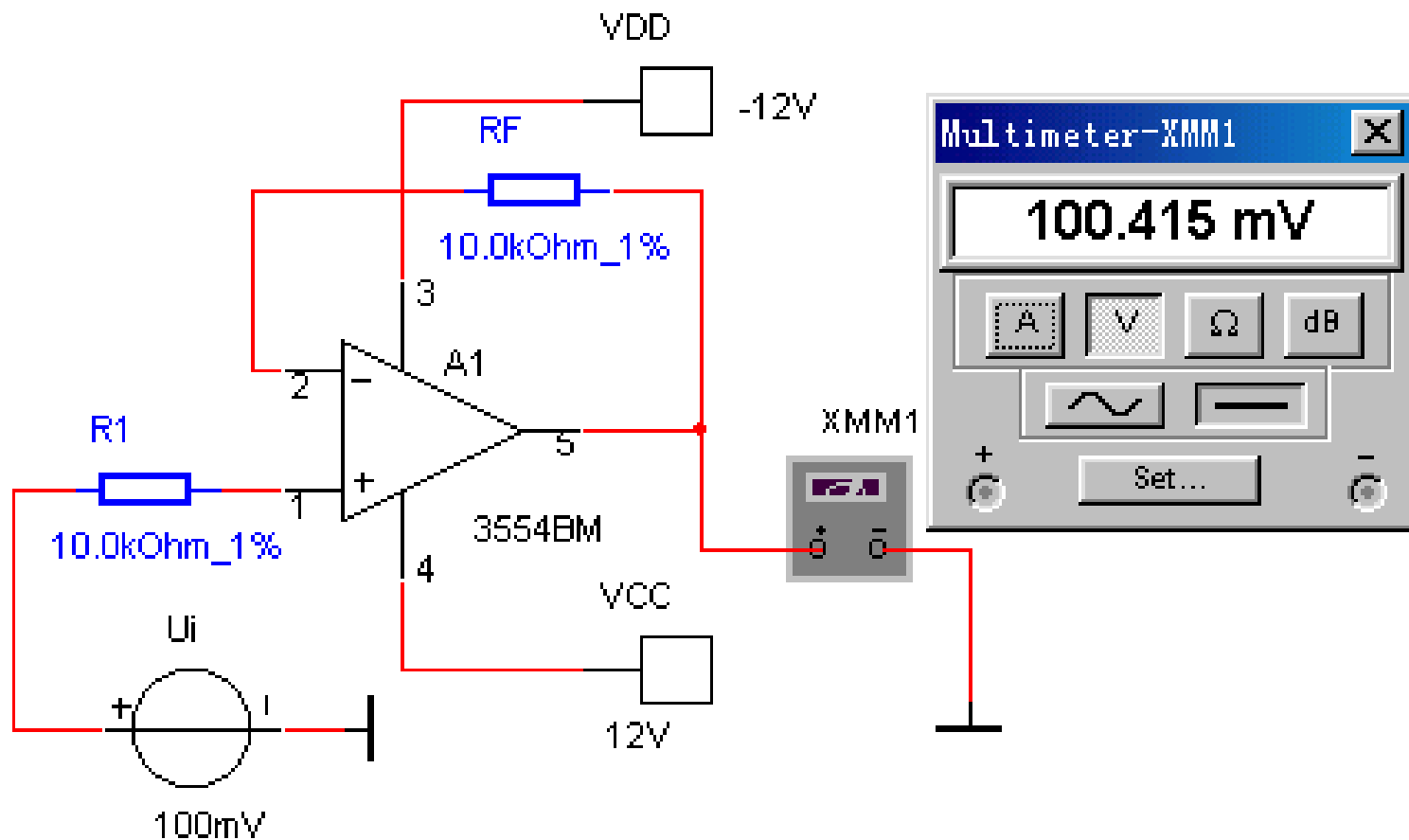


图 3.1.4 电压跟随器电路



## 3.1.5 减法运算电路

---

- 对于图3.1.5所示的减法运算电路，当 $R_1 = R_2$ ， $R_3 = R_F$ 时，有如下关系式：

$$U_0 = \frac{R_F}{R_1} (U_{i2} - U_{i1})$$

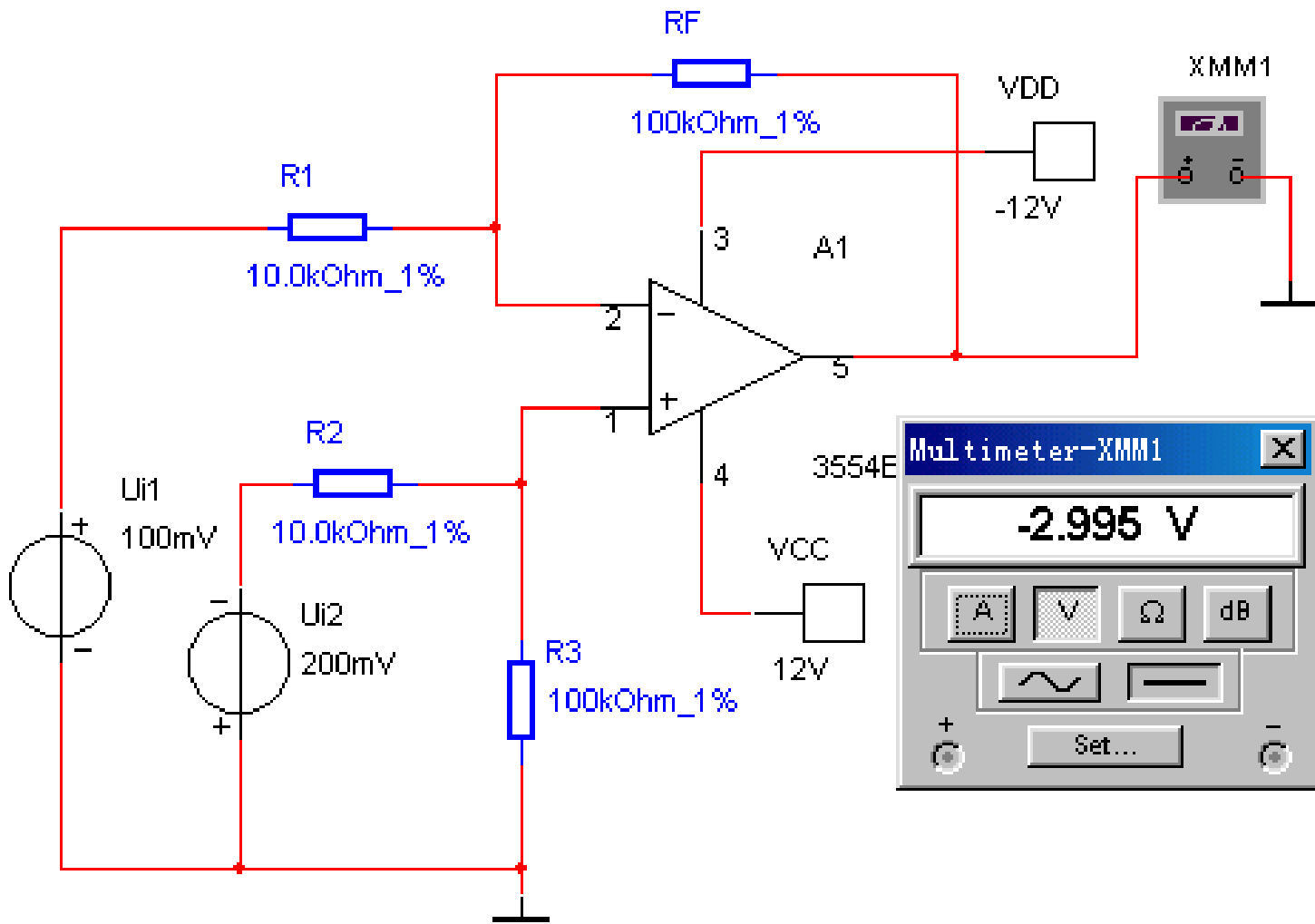


图3.1.5 減法运算电路图



---

## 3.2 积分与微分电路





## 3.2.1 积分运算电路

---



## 1. 电路组成

---

- 反相积分电路如图3.2.1所示。在理想化条件下，输出电压 $u_0(t)$ 等于

- $$u_0(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t u_i dt + u_c(0)$$

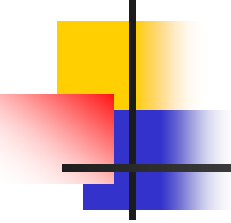
- 式中  $u_c(0)$ 是 $t=0$ 时刻电容C两端的电压值，即初始值。

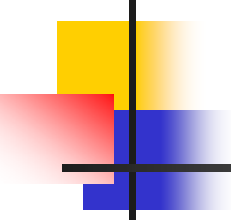
- 如果 $u_i(t)$ 是幅值为E的阶跃电压，并设 $u_c(0)=0$ ，则

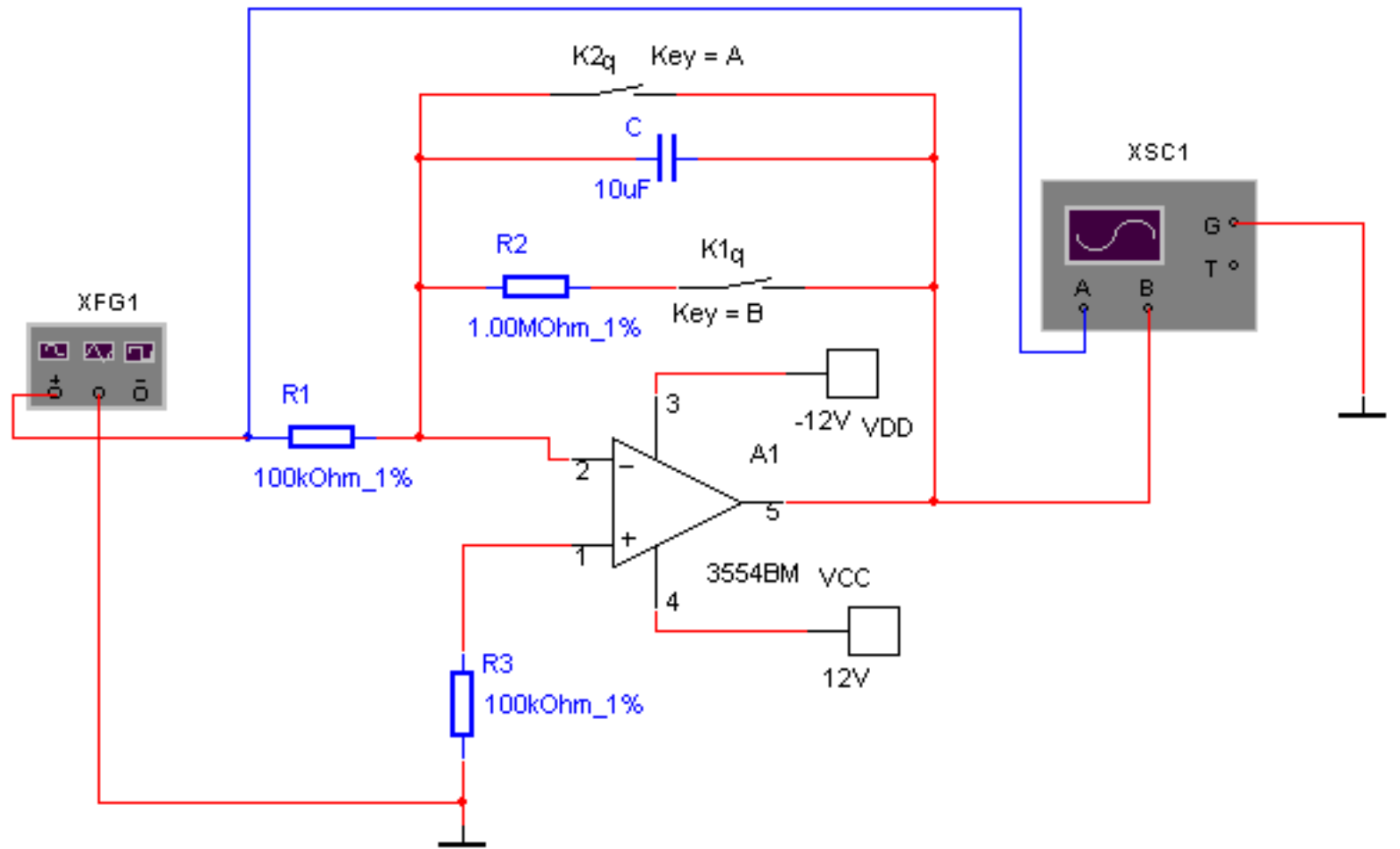
- 
- 
- 式中  $U_C(0)$  是  $t=0$  时刻电容  $C$  两端的电压值，即初始值。

- 如果  $u_i(t)$  是幅值为  $E$  的阶跃电压，并设  $U_C(0) = 0$ ，则

$$u_0(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t E dt = -\frac{E}{R_1 C} t$$

- 
- 即输出电压  $u_o(t)$  随时间增长而线性下降。显然RC的数值越大，达到给定的  $u_o$  值所需的时间就越长。积分输出电压所能达到的最大值受集成运放最大输出范围的限值。
  - 在进行积分运算之前，首先应对运放调零。为了便于调节，将图中K1闭合，即通过电阻R2(R2)的负反馈作用帮助实现调零。但在完成调零后，应将K1打开，

- 
- 以免因R2的接入造成积分误差。K2的设置一方面为积分电容放电提供通路，同时可实现积分电容初始电压 $U_C(0)=0$ ，另一方面，可控制积分起始点，即在加入信号 $u_i$ 后，只要K2一打开，电容就将被恒流充电，电路也就开始进行积分运算。其输入、输出波形如图3.2.2所示。



3.2.1 反相积分运算电路

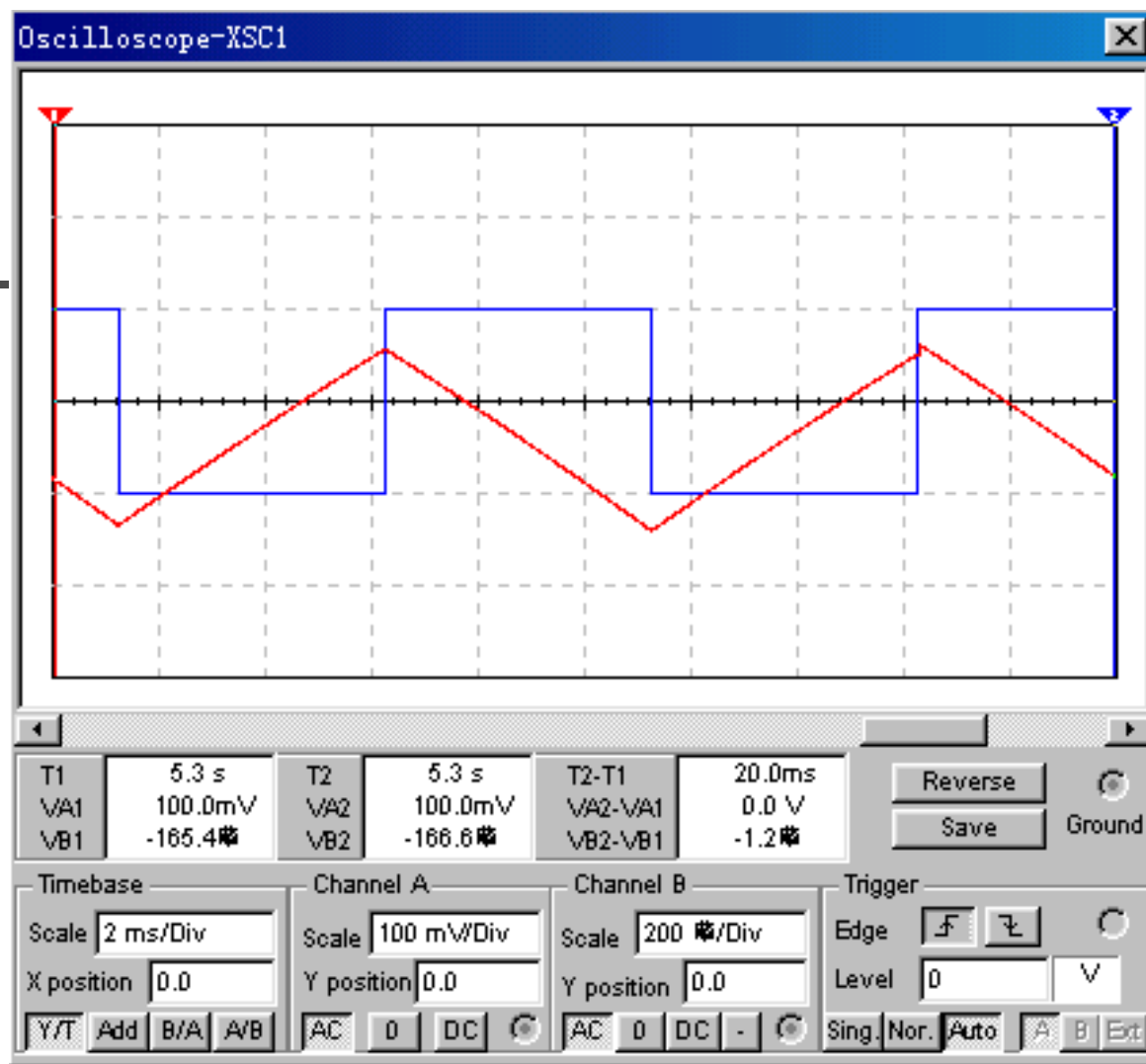


图3.2.2 积分运算输入、输出波形



## 3.2.2 微分电路

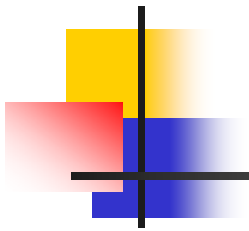
---

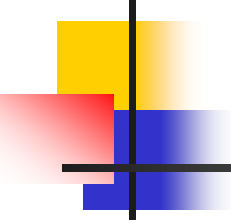
- 微分是积分的逆运算。将积分电路中R和c的位置互换，可组成基本微分电路。在理想化条件下，输出电压 $u_0$ 等于。

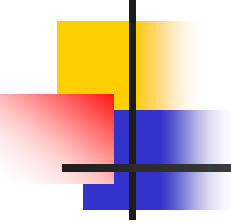
$$u_0 = -RC \frac{du_i}{dt}$$

- 可见输出电压正比于输入电压对时间的微分。



- 
- 微分电路可以实现波形变换，例如将矩形波变换为尖脉冲，此外，微分电路也可以移相作用。
  - 基本微分电路的主要缺点是，当输入信号频率升高时，电容的容抗减小，则放大倍数增大，造成电路对输入信号中的高频噪声非常敏感，因而输出信号中的噪声成分严重增加，信噪比大大下降。另一个缺点是微分电路中的RC元件

- 
- 
- 形成一个滞后的移相环节，它和集成运放中原有的滞后环节共同作用，很容易产生自激振荡，使电路的稳定性变差。最后，输入电压发生突变时有可能超过集成运放允许的共模电压，以致使运放“堵塞”，使电路不能正常工作。

- 
- 为了克服以上缺点，常常采用图3.2.3所示的实用微分电路。主要措施是在输入回路中接入一个电阻 $R$ 与微分电容 $C_1$  ( $C_1$ )串联，在反馈回路中接入一个电容 $C$ 与微分电阻 $R_1$  ( $R_1$ )并联，并使 $RC_1=R_1C$ 在正常的工作频率范围内，使，而，此时  $R_1$  、  $C_1$

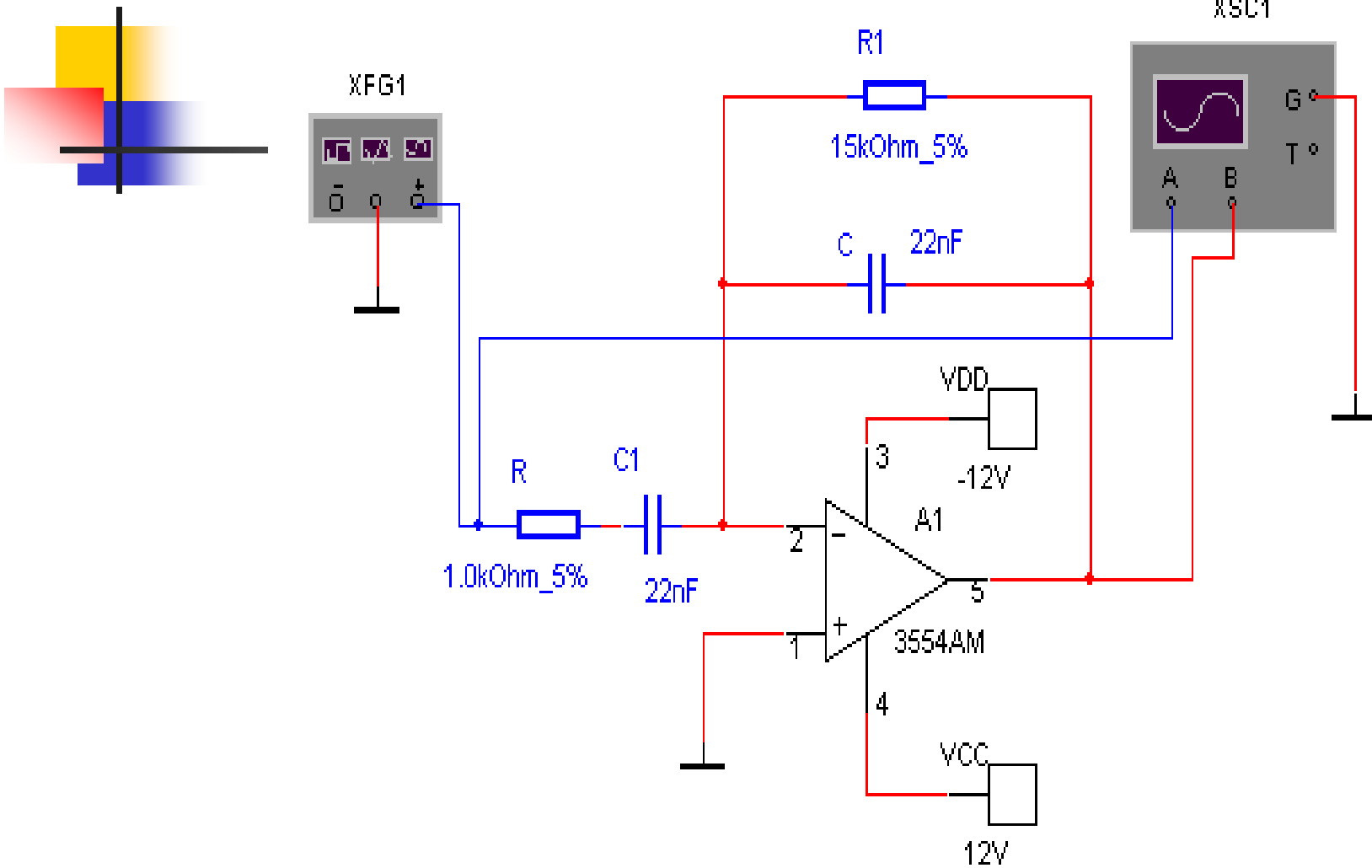
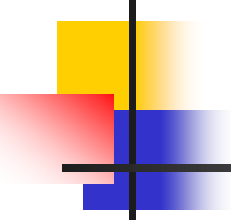


图3.2.3 实用的微分电路

- 
- 对微分电路的影响很小。但当频率高到一定程度时， $R_1$ 、 $C_1$ 的作用使闭环放大倍数降低，从而抑制了高频噪声。同时置 $R$ 、 $C_1$ 形成一个超前环节，对相位进行补偿，提高了电路的稳定性。
  - 实用微分电路输入输出波形如图3.2.4所示，

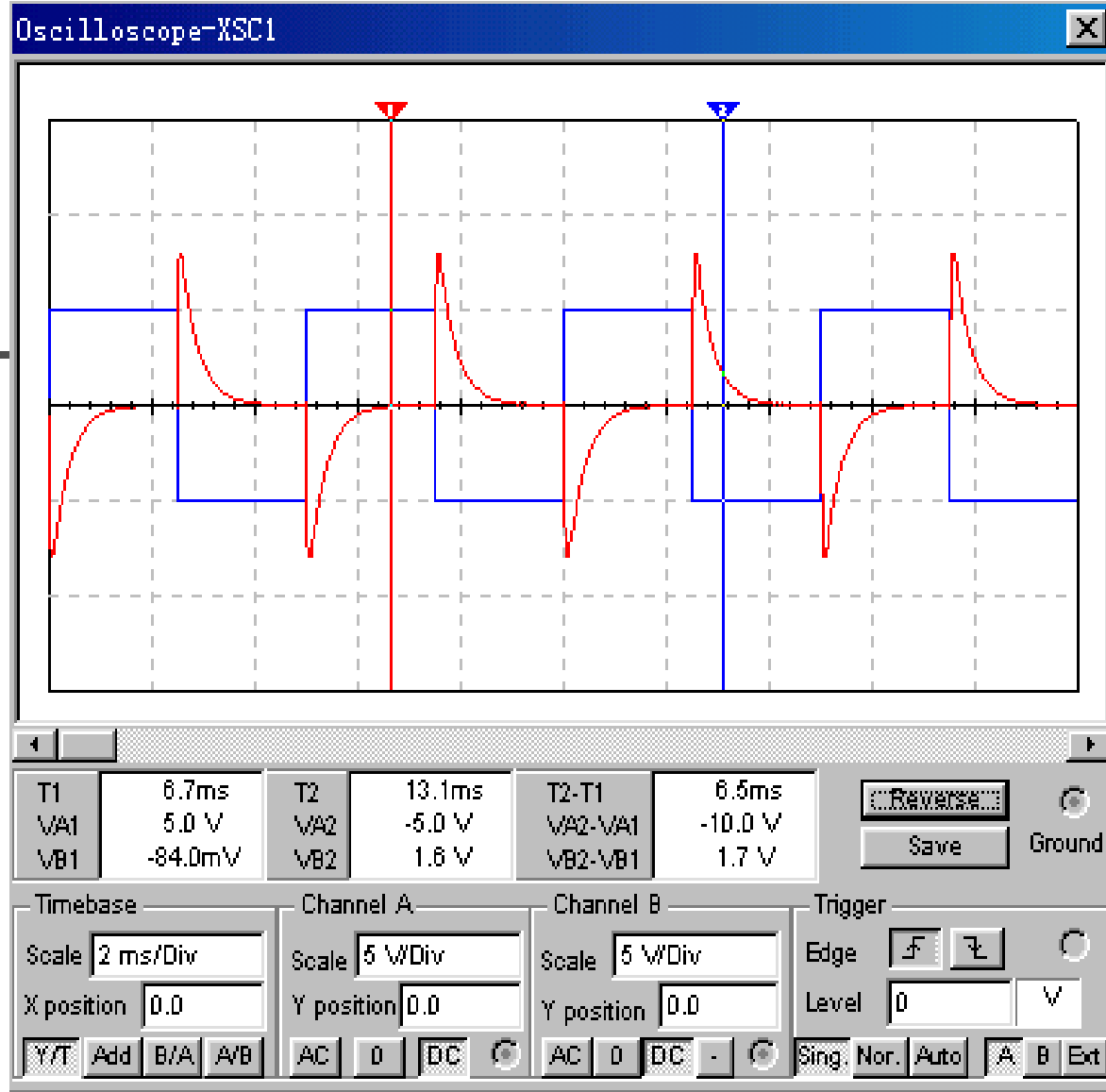


图3.2.4 实用微分电路输入输出波形



---

## 3.3 一阶有源滤波器

### ■ 3.3.1 一阶有源低通滤波器工作原理

■ 一个一阶有源低通滤波器如图3.3.1所示，由一级RC低通滤波器电路再加上一个电压跟随器组成。由于电压跟随器的输入阻抗很高，输出阻抗很低，因此，可得出如下关系式


$$U_0(S) = \frac{\overline{SC}}{R + \frac{1}{SC}} U_i(S) = \frac{1}{1 + SRC} U_i(S) \quad (3.3.1)$$



- 
- 电路的传递函数可表示为:

- 
- $$A(S) = \frac{U_o(s)}{U_i(S)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{S}{\omega_n}\right)} \quad (3.3.2)$$
-

- 式中  $\omega_n = 1 / RC$ ，称为特征角频率， $U_i$ 为图中V1。  
值得指出的是，这里  $\omega_n$ 就是3dB截止角频率  $\omega_c$ 。

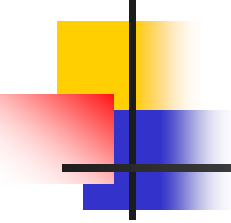


■ 上述有源滤波器电路传递函数（3.3.2）式分母为S的一次幂，故称为一阶有源低通滤波器。

■ 对于实际的频率来说，式（3.3.1）中的s可用  $s=j\omega$  代入，由此可得：

■

$$A(j\omega) = \frac{U_o(j\omega)}{U_i(j\omega)} = \frac{1}{1 + j\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)} \quad (3.3.3)$$

- 
- 
- 启动仿真，点击波特图仪，可以看见一阶有源低通滤波器的幅频特性如图3.3.2所示。

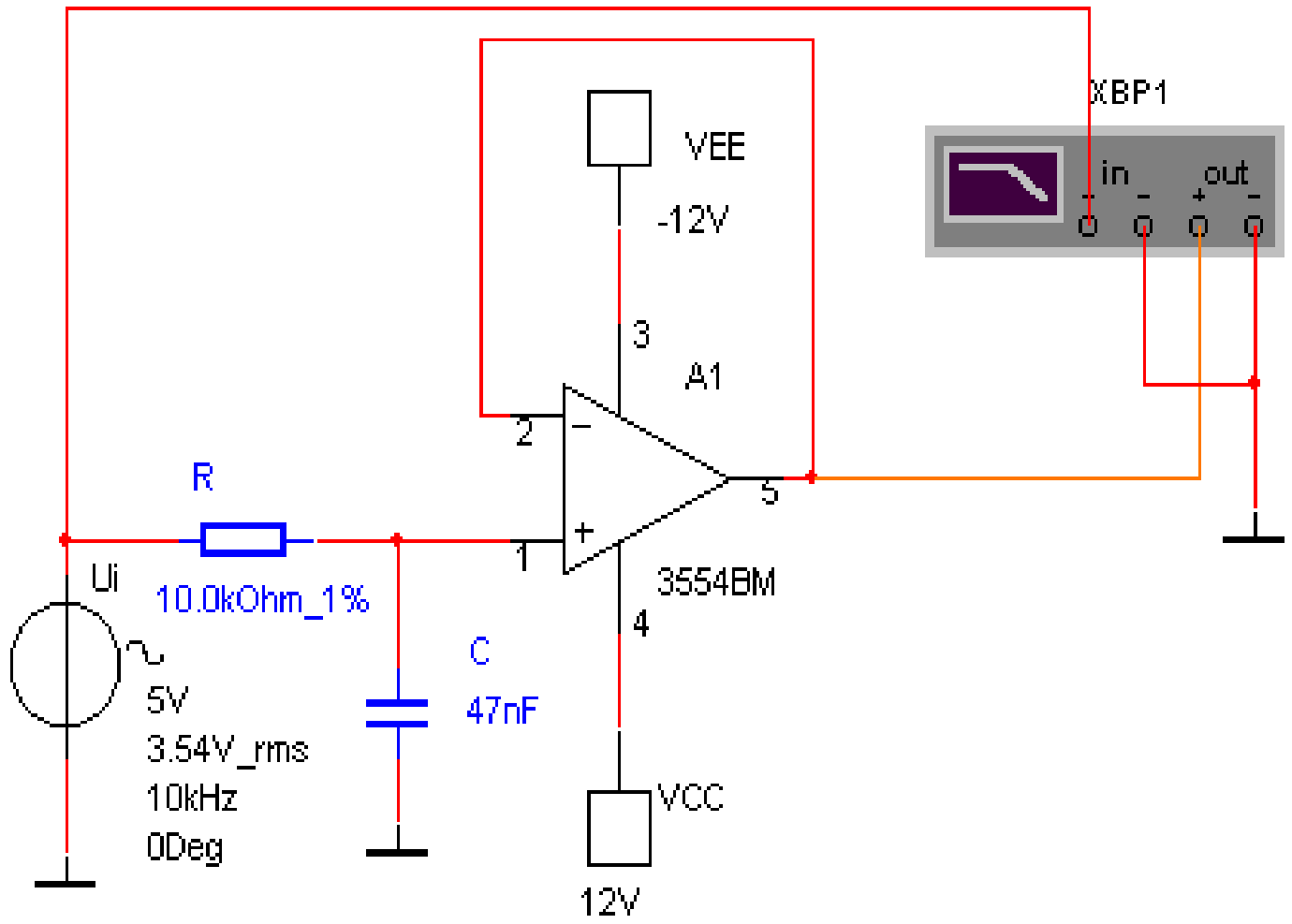


图3.3.1 一阶有源低通滤波器

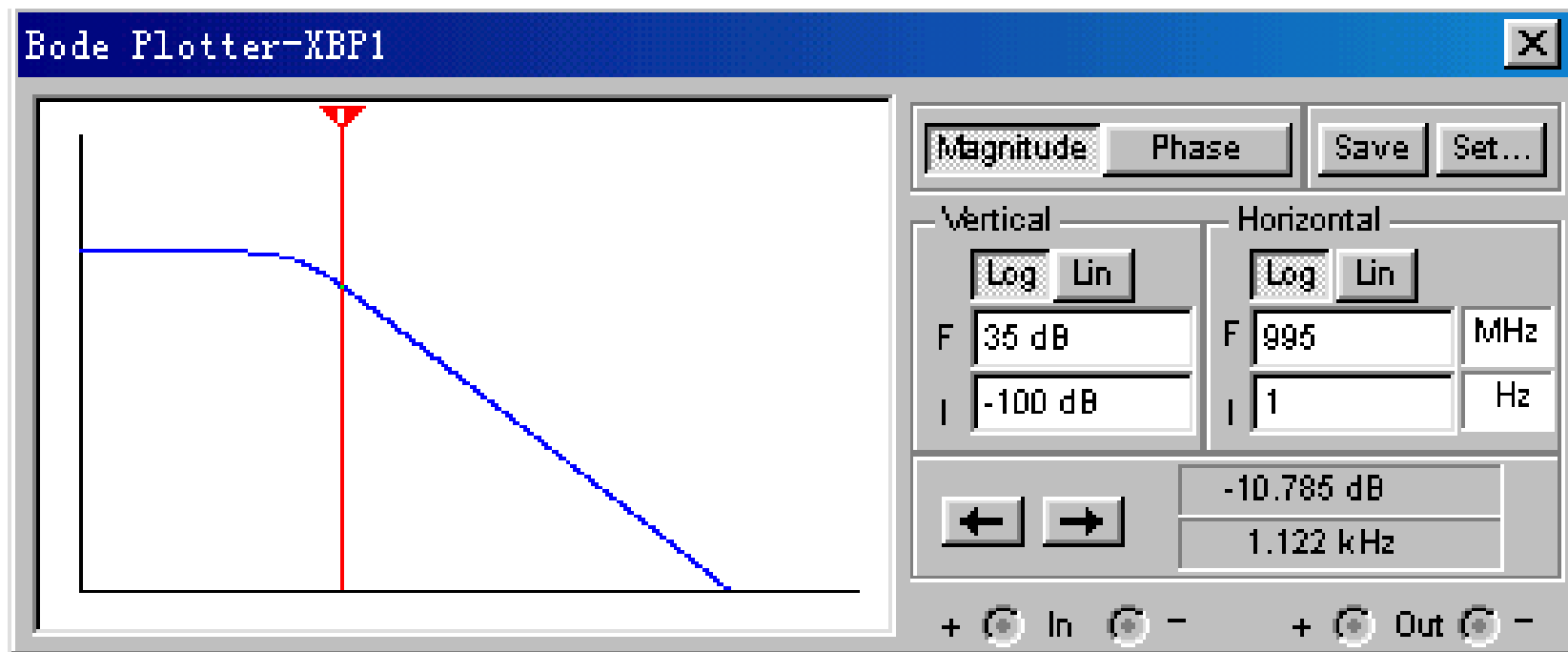


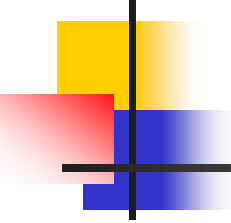
图3.3.2 一阶有源低通滤波器的幅频特性

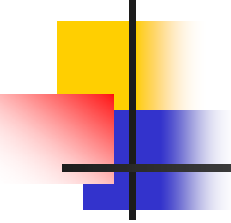


## 3.3.2 一阶有源低通滤波器的AC Analysis (交流分析)

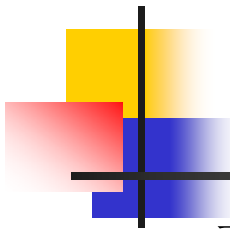
---

- 利用AC Analysis（交流分析）可以分析一阶有源低通滤波器电路的频率特性。分析步骤如下：
- ① 点击Options→Preferences→Show node names使图3.3.1电路显示节点编号，在本电路中输出节点编号为2。
- ② 点击Simulate→Analysis→AC Analysis，将弹出AC Analysis对话框，进入交流分析状态。

- 
- 在图3.3.3所示Frequency Parameters参数设置对话框中，可以确定分析的起始频率、终点频率、扫描形式、分析采样点数和纵向坐标（Vertical scale）等参数。其中：
  - 在Start frequency窗口中，设置分析的起始频率，默认设置为1Hz，在本例中设置为1Hz。

- 
- 在Stop frequency (FSTOP) 窗口中，设置扫描终点频率，默认设置为10GHz，在本例中设置为1MHz。
  - 在Sweep type窗口中，设置分析的扫描方式，包括Decade（十倍程扫描）和 Octave（八倍程扫描）及 Linear（线性扫描）。默认设置为十倍程扫描（Decade选项），以对数方式展现，在本例中选择默认设置。



- 
- 在Number of points per decade窗口中，设置每十倍频率的分析采样数，默认为10，在本例中选择默认设置。
  - 在Vertical Scale窗口中，选择纵坐标刻度形式：坐标刻度形式有Decibel（分贝）、Octave（八倍）、Linear（线性）及Logarithmic（对数）形式。默认设置为对数形式，在本例中选择默认设置。

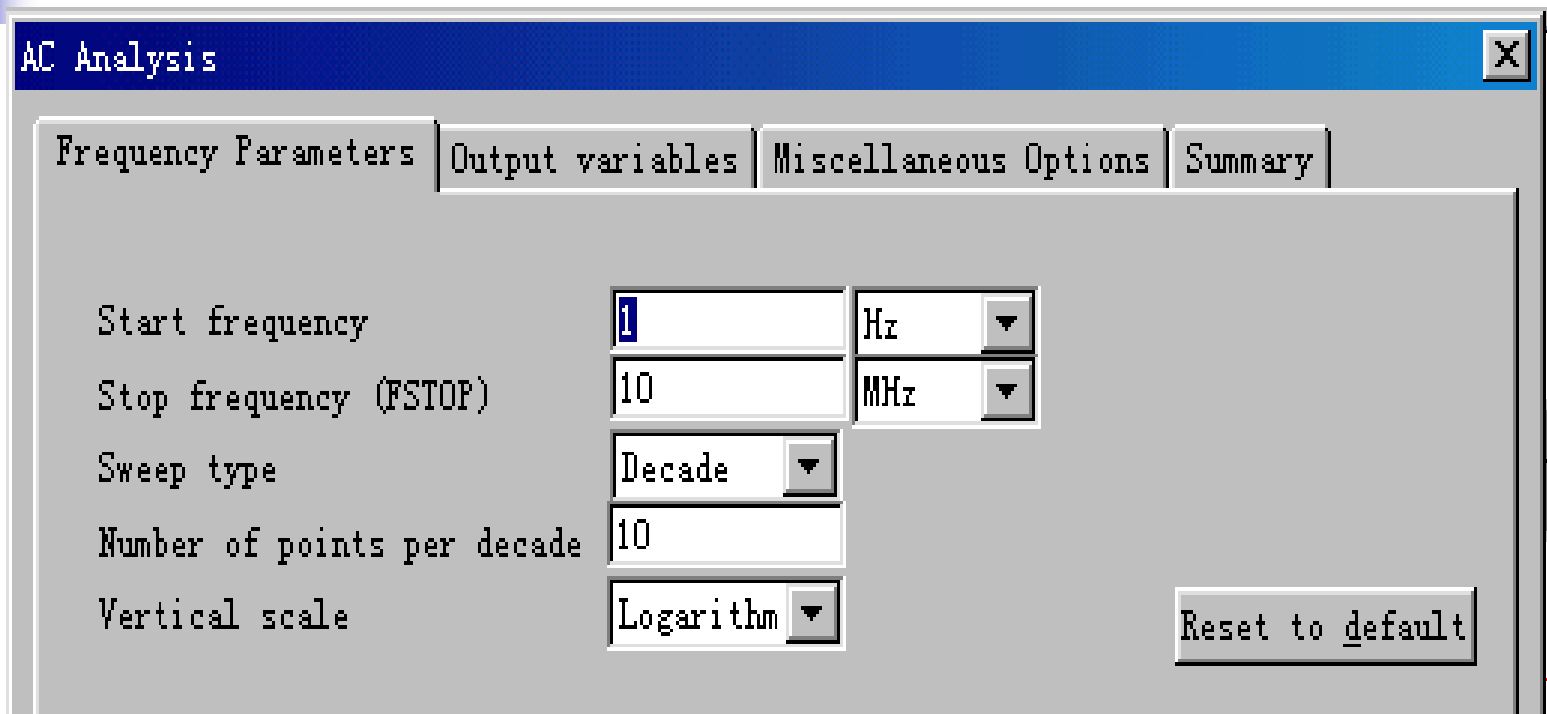
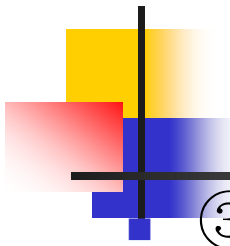
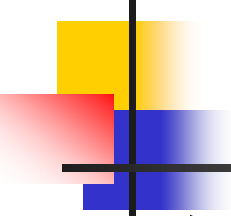


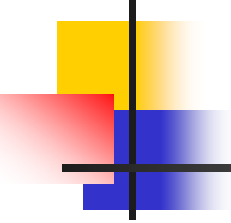
图3.3.3 Frequency Parameters参数设置对话框



③在图3.3.4所示Output variables对话框中，可以用来选择需要分析的节点和变量。

- 在Variables in Circuit栏中列出的是电路中可用于分析的节点和变量。点击 Variables in circuit窗口中的下箭头按钮，可以给出变量类型选择表。在变量类型选择表中：
- 点击Voltage and current选择电压和电流变量。

- 
- 
- 点击Voltage选择电压变量。
  - 点击 Current选择电流变量。
  - 点击Device / Model Parameters 选择元件 / 模型参数变量。
  - 点击All variables选择电路中的全部变量。

- 
- 在本例中选择**All variables**。首先从 **Variables in circuit** 栏中选取输出节点2，再点击 **Plot during simulation** 按钮，则输出节点2出现在 **Selected variables for analysis** 栏中。
  - ④ 点击 **Simulate** 按钮即可进行仿真分析，仿真分析结果例如图3.3.5所示。

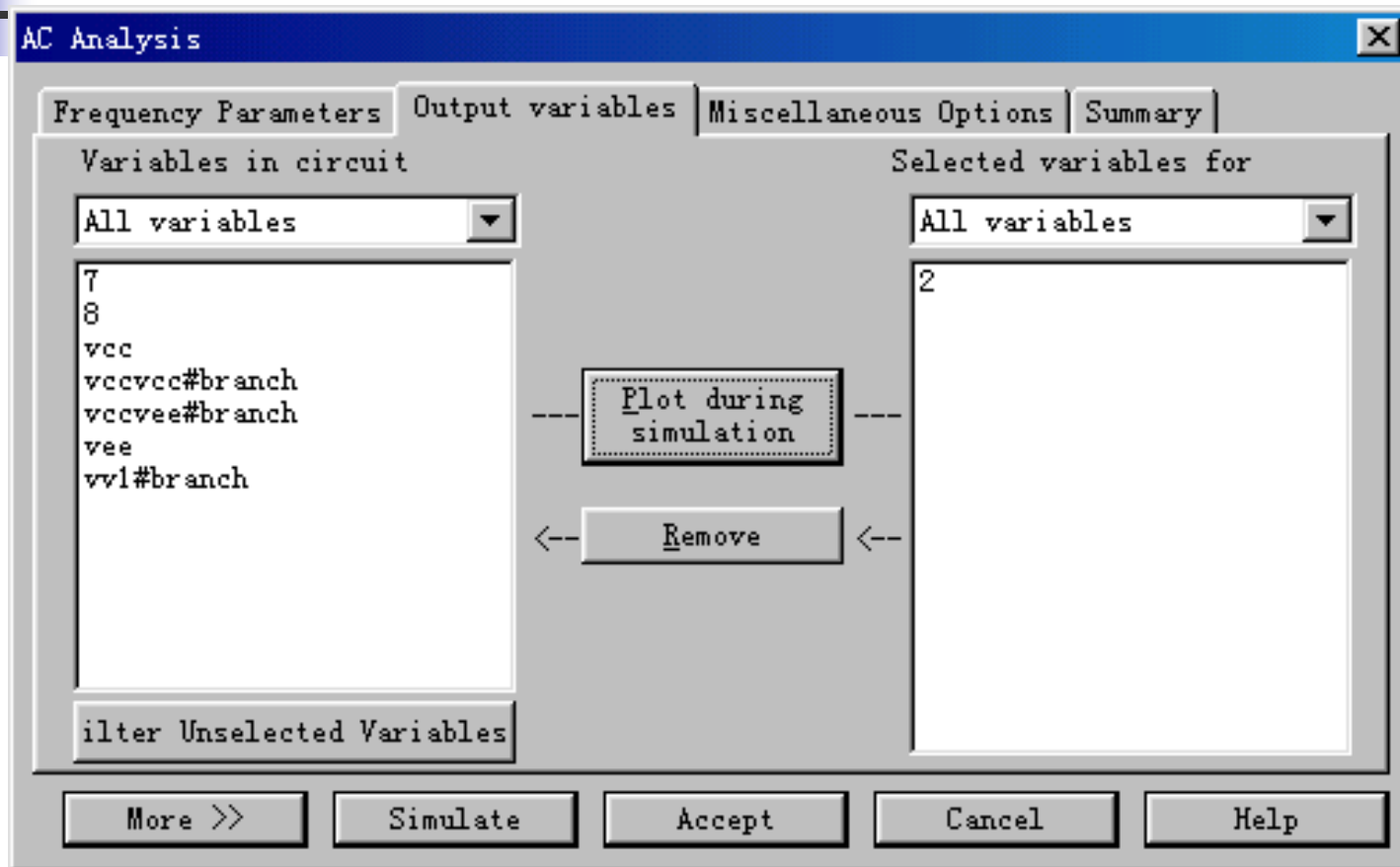


图3.3.4 Output variables对话框

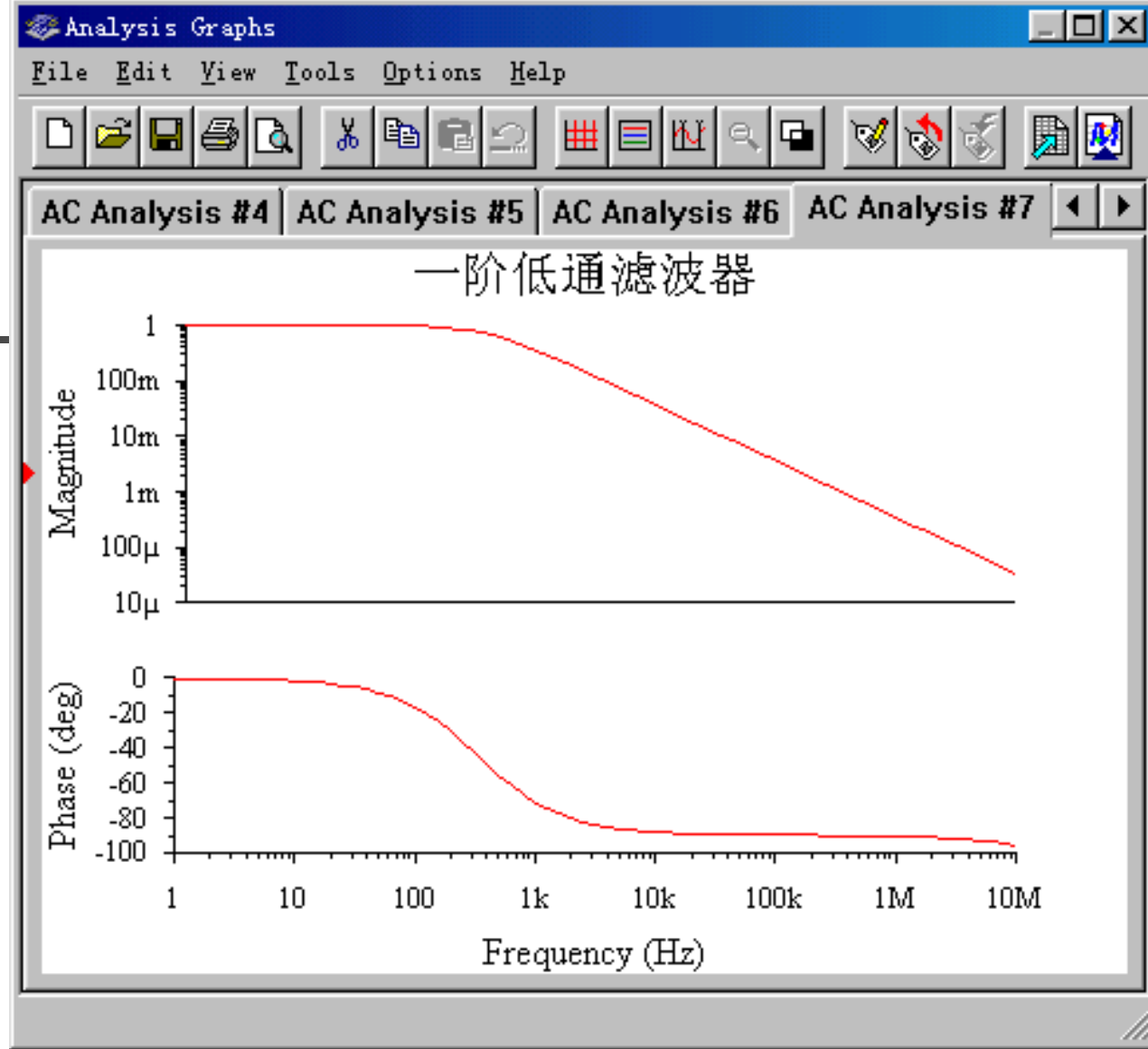


图3.3.5 一阶有源低通滤波器AC Analysis仿真分析结果



---

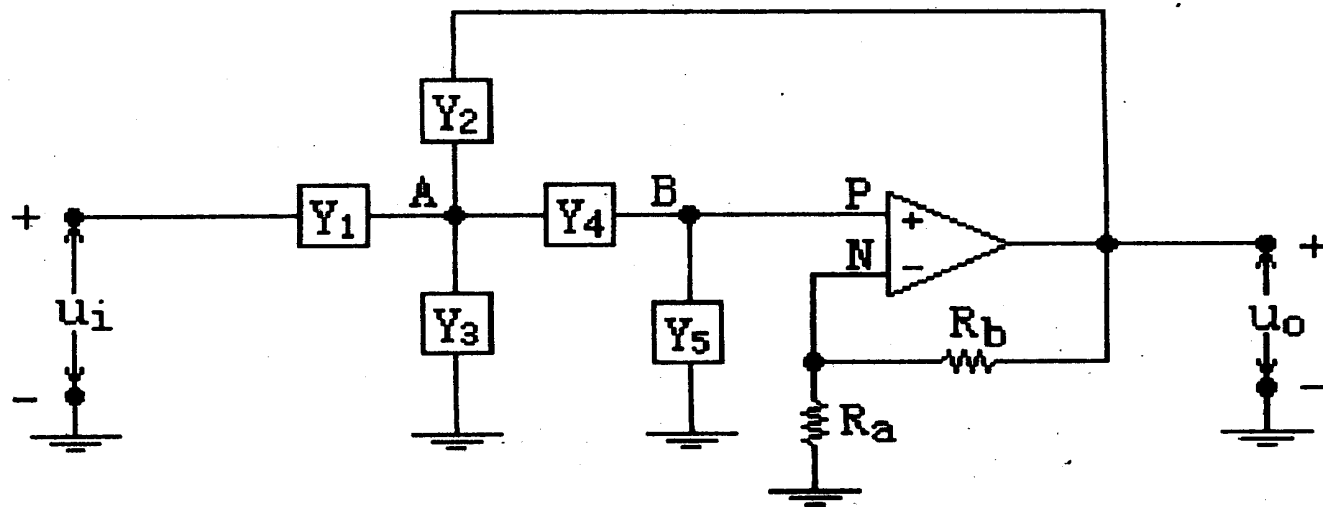
## 3.4 二阶有源低通滤波器



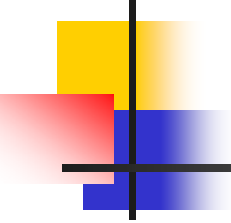
### ■ 3.4.1 二阶有源滤波器的典型结构

二阶有源滤波器的典型结构如图3.4.1所示。

图中， $Y_1 \sim Y_5$ 为导纳，考虑到 $U_P = U_N$ ，可列出相应的节点方程式为



■ 图3.4.1 二阶有源滤波器典型结构



---

- 在节点A 有:

- $(U_A - U_i)Y_1 + (U_A - U_o)Y_2 + U_A Y_3 + (U_A - U_P)Y_4 = 0 \quad (3.4.1)$

- 在节点B有:

- $(U_P - U_A)Y_4 + U_P Y_5 = 0 \quad (3.4.2)$

- 由 (3.4.2) 有:

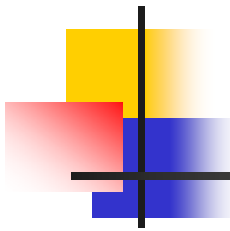
- $$U_A = \frac{U_P (Y_4 + Y_5)}{Y_4} \quad (3.4.3)$$

- 
- 将式 (3.4.3) 代入式 (3.4.1) 得

$$U_P \left[ \left( \frac{Y_4 + Y_5}{Y_4} \right) (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) - Y_4 \right] - U_i Y_1 - U_o Y_2 = 0$$

(3.4.4)

考虑到  $U_P \approx U_N = U_o \left( \frac{R_a}{R_a + R_b} \right)$

- 
- 则由式 (3.4.4) 可得

$$A(S) = \frac{U_o(S)}{U_i(s)} = \frac{A_{UF} Y_1 Y_4}{Y_5 (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) + [Y_1 + Y_2 (1 - A_{UF}) + Y_3] Y_4} \quad (3.4.5)$$

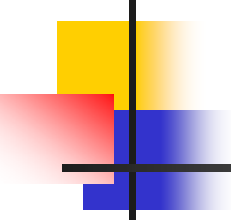
式 (3.4.5) 是二阶压控电压源滤波器传递函数的一般表达式。只要适当选择  $Y_i$  ( $i=1 \sim 5$ )，就可以构成低通、高通、带通等有源滤波器。



## 3.4.2 二阶有源低通滤波器仿真分析

---

- 设  $Y_1=1/R_1$ ,  $Y_2=sC_1$ ,  $Y_3=0$ ,  $Y_4=1/R_2$ ,  $Y_5=sC_2$ , 将它们代入式 (3.4.5), 可得到二阶压控电压源低通滤波器的传递函数如下:



$$\begin{aligned}
 A(S) = \frac{U_o(S)}{U_i(S)} &= \frac{A_{UF} \cdot \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{S^2 + \frac{S[R_2 C_2 + R_1 C_2 + R_1 C_1(1 - A_{UF})]}{R_1 R_2 C_1 C_2} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \\
 &= \frac{A_{UF}}{R_1 R_2 C_1 C_2 S^2 + [R_2 C_2 + R_1 C_2 + R_1 C_1(1 - A_{UF})S] + 1}
 \end{aligned}$$

(3.3.6)



令

$$A_o = A_{UF} = 1 + \frac{R_b}{R_a}$$

$$\omega_n^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_2 (R_1 + R_2) + R_1 C_1 (1 - A_{UF})}$$



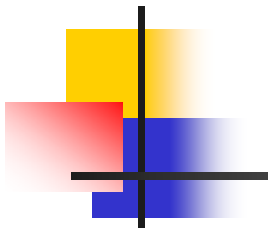
■ 则有

$$A(S) = \frac{U_o(S)}{U_i(S)} = \frac{A_o}{\left(\frac{S}{\omega_n}\right)^2 + \frac{1}{Q} \cdot \frac{S}{\omega_n} + 1} = \frac{A_o \omega_n^2}{S^2 + \frac{\omega_n}{Q} S + \omega_n^2}$$

(3.4.7)

式 (3.4.7) 为二阶低通滤波器传递函数的典型表达式。其中  $\omega_n$  为特征角频率，而  $Q$  则称为等效品质因数。



- 
- 一个二阶有源低通滤波器电路如图3.4.2所示。启动仿真，点击波特图仪，可以看见二阶有源低通滤波器的幅频特性如图3.4.3所示。
  - 利用AC Analysis（交流分析）可以分析二阶有源低通滤波器电路的频率特性如图3.4.4所示。分析方法参考3.3.2 一阶有源低通滤波器的AC Analysis（交流分析）分析步骤。

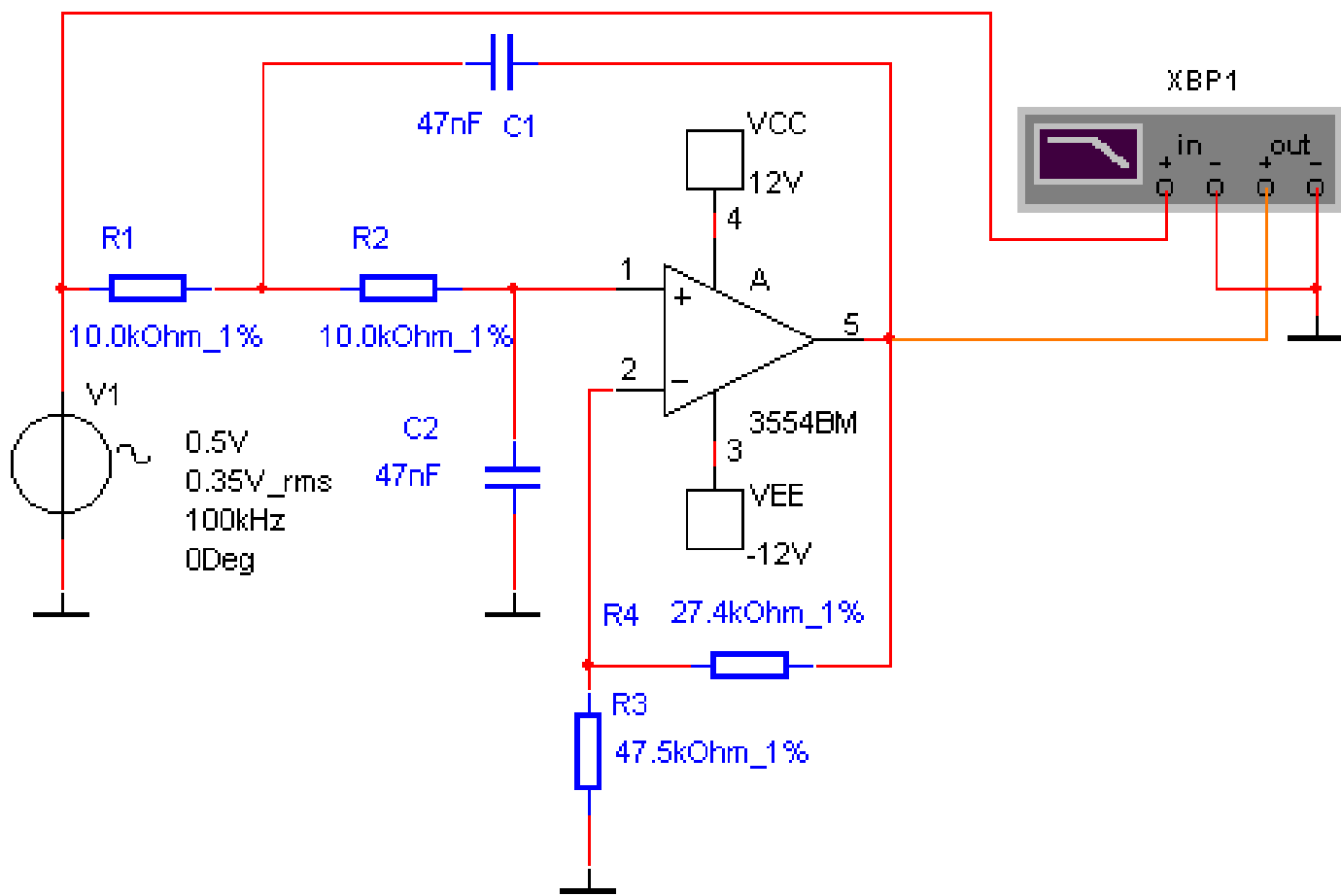


图3.4.2 二阶有源低通滤波器电路

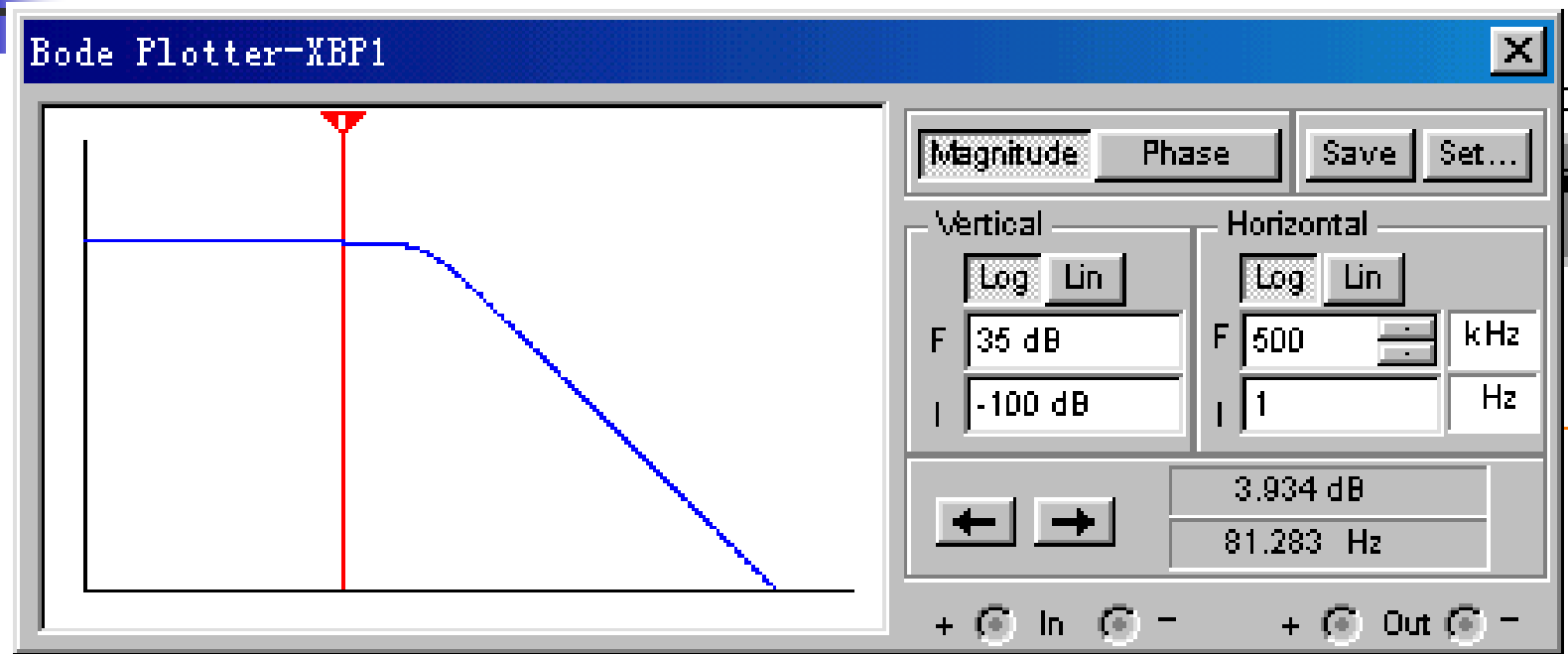


图3.4.3 二阶有源低通滤波器的幅频特性

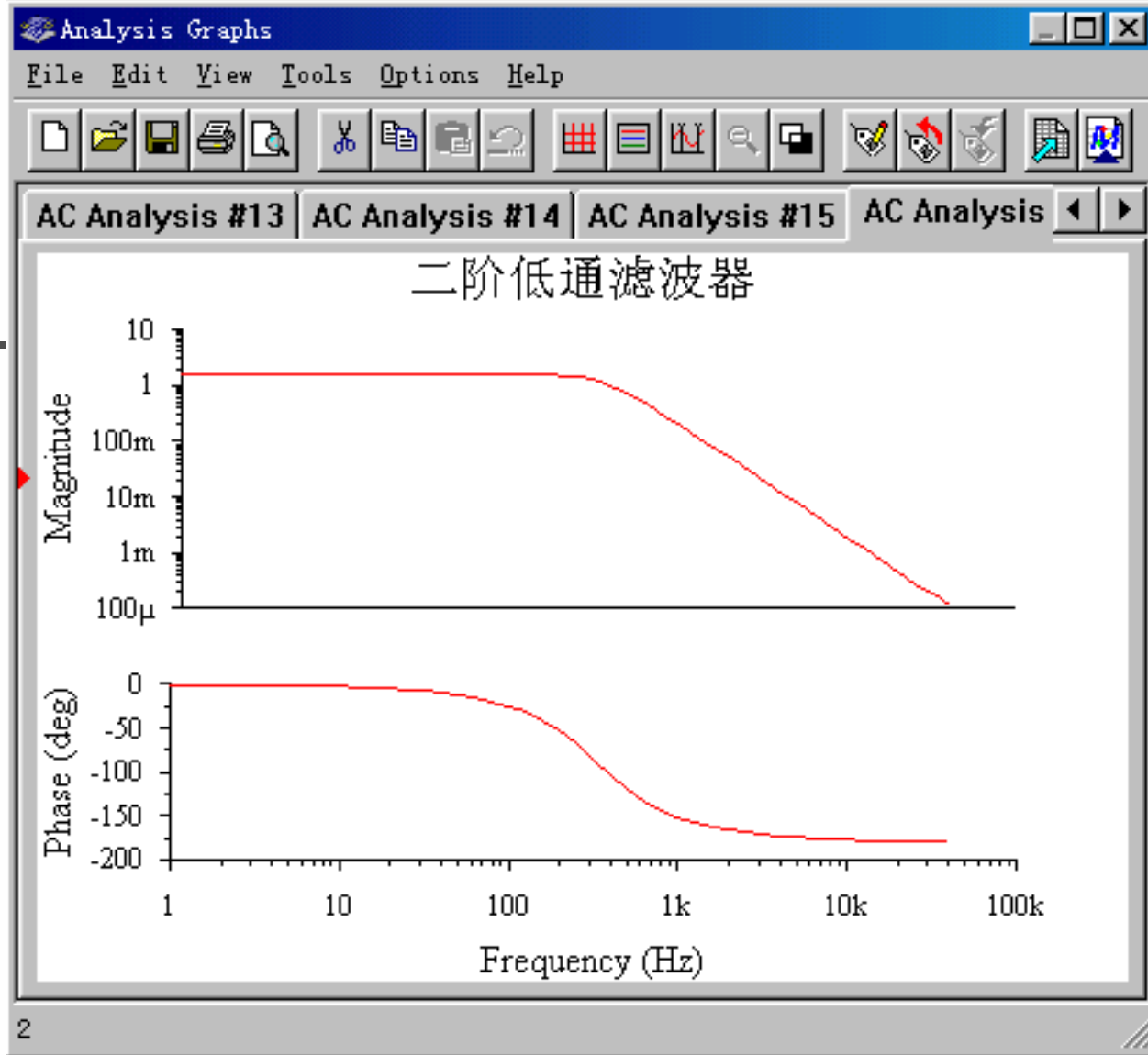


图3.4.4 二阶有源低通滤波器AC Analysis仿真分析结果



---

## 3.5 二阶有源高通滤波器

## 3.5.1 二阶有源高通滤波器特性

- 设图3.4.1中， $Y1=SC1$ ， $Y2=R1$ ， $Y3=0$ ， $Y4=SC2$ ， $Y5=R2$ ，将它们代入式（3.4.5），可得到二阶压控电压源高通滤波器的传递函数如下：

$$A(S) = \frac{U_o(S)}{U_i(S)} = \frac{A_{UF} s^2}{s^2 + \frac{S[R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2 (1 - A_{UF})]}{R_1 R_2 C_1 C_2} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$(3.5.1)$$



■ 令

$$A_O = A_{UF} = 1 + \frac{R_b}{R_a}$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_1 R_1 + C_2 R_1 + R_2 C_2 (1 - A_{UF})}$$



■ 则有

$$A(S) = \frac{U_o(S)}{U_i(s)} = \frac{A_o S^2}{S^2 + \frac{\omega_n}{Q} S + \omega_n^2} \quad (3.5.2)$$

式（3.5.2）为二阶高通滤波器传递函数的典型表达式。其中  $\omega_n$  为特征角频率，而  $Q$  则称为等效品质因数。





## 3.5.2 二阶有源高通滤波器特性分析

一个二阶压控电压源高通滤波器电路如图3.5.1所示。启动仿真，点击波特图仪，可以看见二阶压控电压源高通滤波器的幅频特性如图3.5.2所示。

- 利用AC Analysis（交流分析）可以分析二阶压控电压源高通滤波器电路的频率特性如图3.5.3所示。分析方法参考3.3.2 一阶有源低通滤波器的AC Analysis（交流分析）分析步骤。

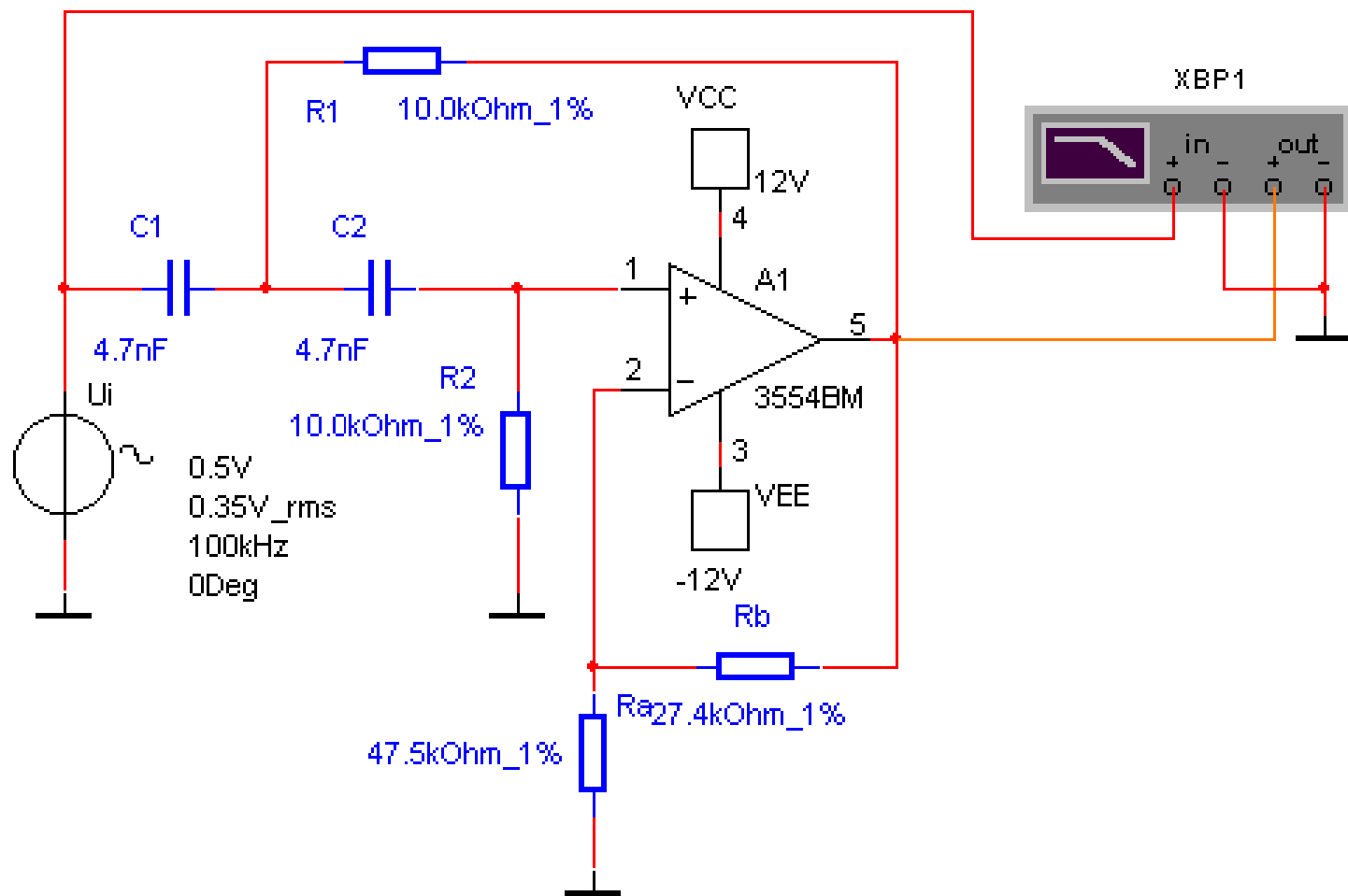


图3.5.1 二阶压控电压源高通滤波器电路

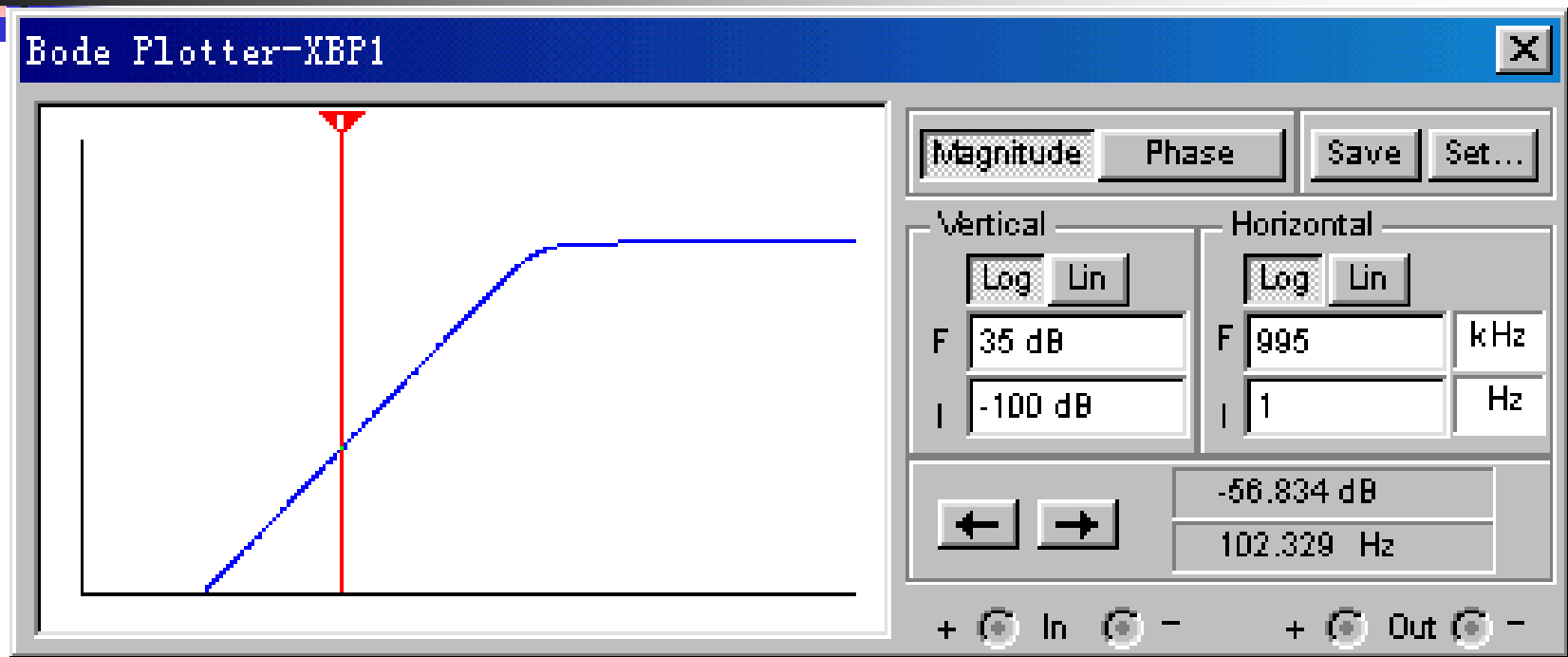


图3.5.2 二阶压控电压源高通滤波器的幅频特性

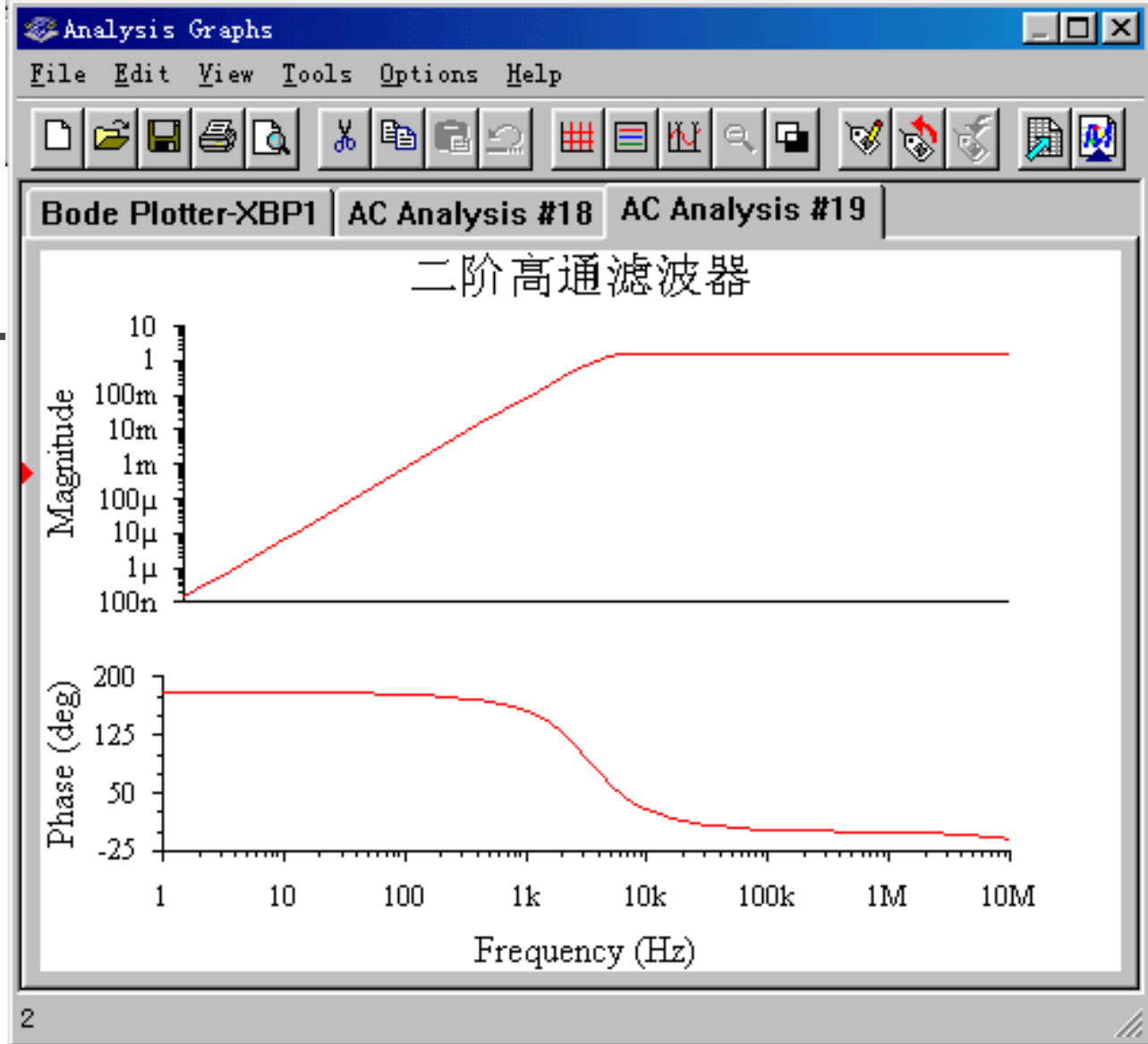


图3.5.3 二阶压控电压源高通滤波器AC Analysis仿真分析结果



---

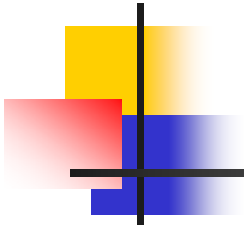
## 3.6 二阶有源带通滤波器

### 3.6.1 二阶有源带通滤波器特性

- 设图3.4.1中,  $Y1=R1$ ,  $Y2=R2$ ,  $Y3=SC1$ ,  $Y4=SC2$ ,  $Y5=R3$ , 将它们代入式 (3.4.5), 可得到二阶有源带通滤波器的传递函数如下

$$A(S) = \frac{A_{UF} \cdot S \frac{1}{R_1 C_2}}{S^2 + S \left[ \frac{1}{R_3 C_1} + \frac{1}{R_3 C_2} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2} (1 - A_{UF}) \right] + \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}}$$

(3.6.1)



■ 令

$$A_o = \frac{A_{UF}}{R_1 C_2 \left[ \frac{1}{R_3 C_1} + \frac{1}{R_3 C_2} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2} (1 - A_{UF}) \right]}$$

$$\omega_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 + R_2} \sqrt{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}}{R_1 R_2 (C_1 + C_2) + C_1 R_3 [R_2 + R_1 (1 - A_{UF})]}$$



■ 则有

$$A(S) = \frac{A_o \frac{1}{Q} S \omega_o}{S^2 + \frac{\omega_o}{Q} \cdot S + \omega_o^2} = \frac{A_o \frac{1}{Q} \frac{S}{\omega_o}}{\left(\frac{S}{\omega_o}\right)^2 + \frac{1}{Q} \frac{S}{\omega_o} + 1} \quad (3.6.2)$$

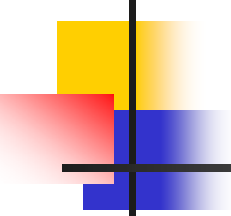
式 (3.6.2) 为二阶带通滤波器传递函数的典型表达式。其中  $\omega_o$  为中心角频率。





## 3.6.2 二阶有源带通滤波器特性分析

- 一个二阶有源带通滤波器电路如图3.6.1所示。启动仿真，点击波特图仪，可以看见二阶有源带通滤波器的幅频特性如图3.6.2所示。
- 利用AC Analysis（交流分析）可以分析二阶有源带通滤波器电路的频率特性如图3.6.3所示。分析方法参考3.3.2 一阶有源低通滤波器的AC Analysis（交流分析）分析步骤。

- 
- 
- 改变信号源的信号频率，利用示波器也可以观察到不同频率的输入信号通过带通滤波器的情况。

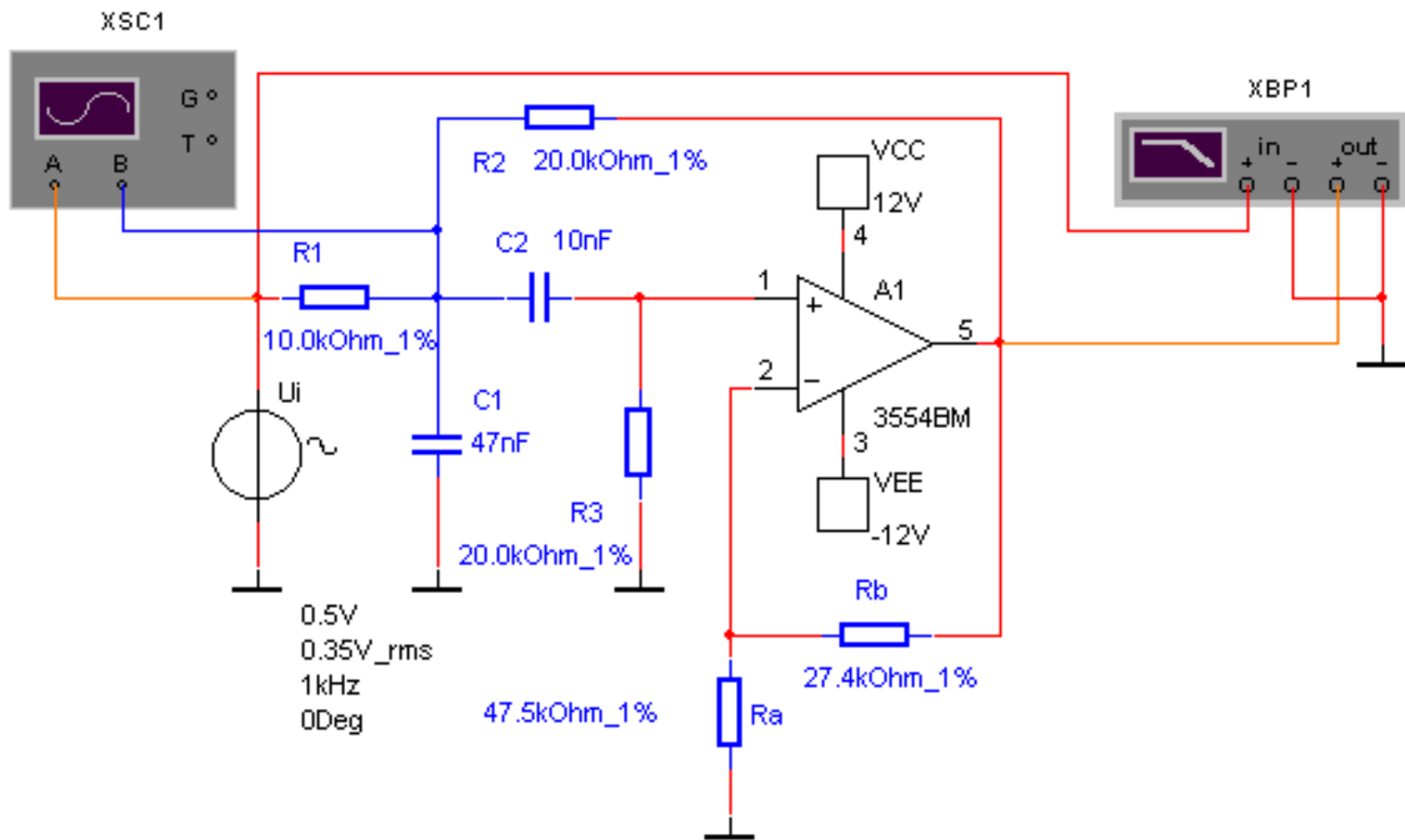


图3.6.1 二阶有源带通滤波器电路

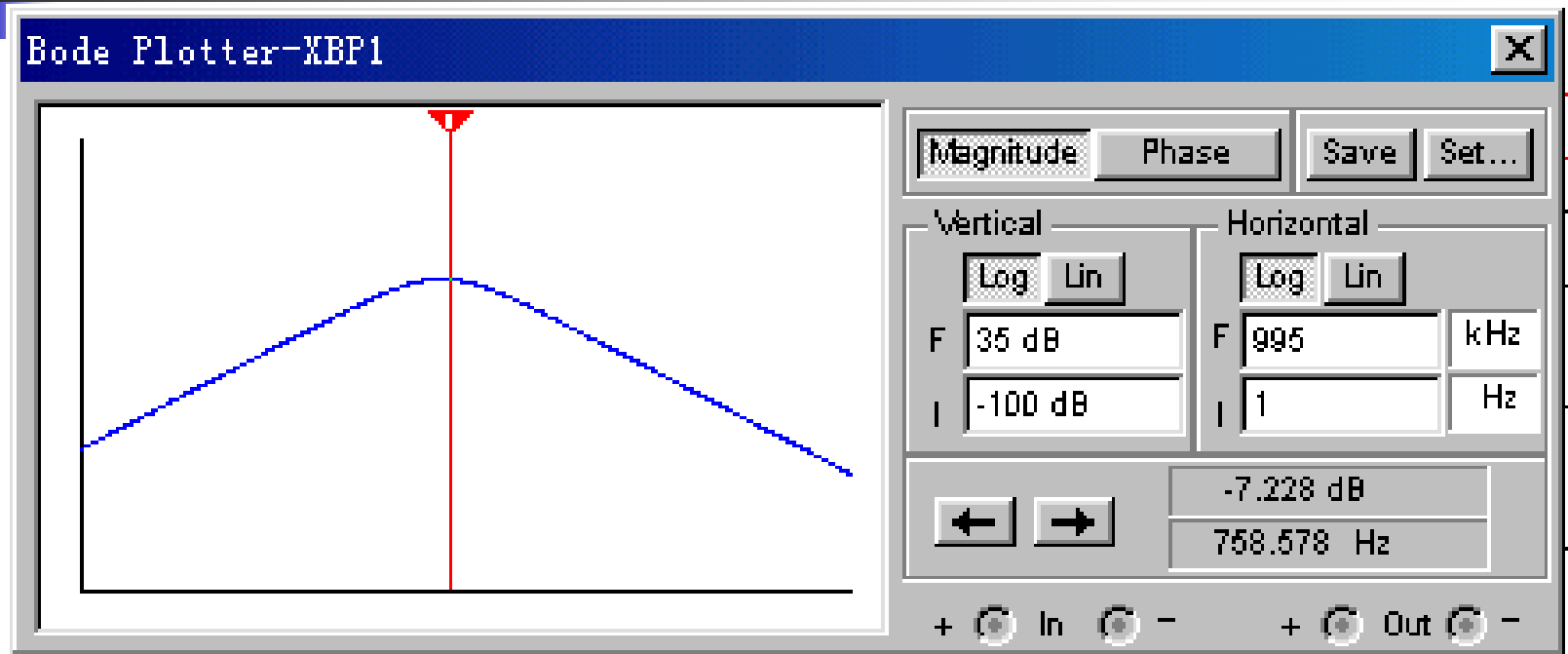


图3.6.2 二阶有源带通滤波器的幅频特性

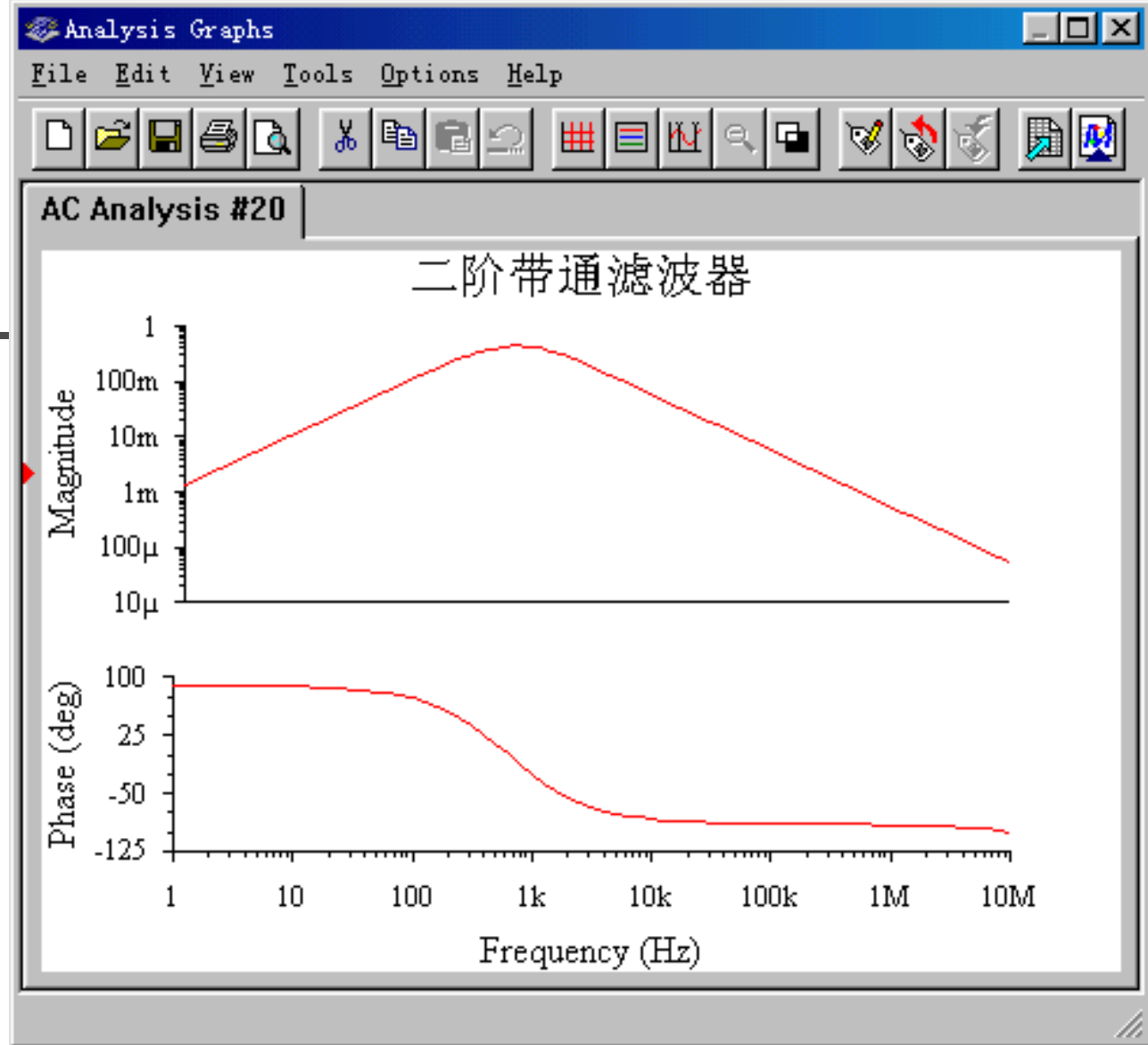


图3.6.3 二阶有源带通滤波器AC Analysis仿真分析结果



---

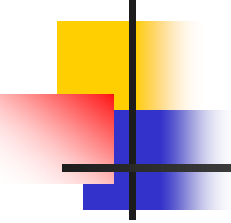
## 3.7 双T带阻滤波器电路



## 3.7.1 双T带阻滤波器电路特性

---

- 双T带阻滤波器电路原理图如图3.7.1所示，由节点导纳方程可导出电路的传递函数为：



---

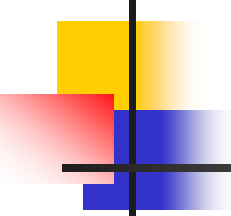
$$A(S) = \frac{U_o(S)}{U_i(s)} = \frac{A_{UF} \left[ 1 + \left( \frac{S}{\omega_n} \right)^2 \right]}{1 + 2(2 - A_{UF}) \frac{S}{\omega_n} + \left( \frac{S}{\omega_n} \right)^2}$$

或者

$$A(j\omega) = \frac{U_o(j\omega)}{U_i(s)} = \frac{A_{UF} \left[ 1 + \left( \frac{j\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]}{1 + 2(2 - A_{UF}) \frac{j\omega}{\omega_n} + \left( \frac{j\omega}{\omega_n} \right)^2} = \frac{A \left[ 1 + \left( \frac{j\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]}{1 + \frac{1}{Q} \cdot \frac{j\omega}{\omega_n} + \left( \frac{j\omega}{\omega_n} \right)^2}$$

(3.7.1)





---

■ 式中  $\omega_n = \frac{1}{RC}$        $Q = \frac{1}{2(2 - A_{UF})}$        $A_{UF} = 1 + \frac{R_b}{R_a}$

如果  $A_{UF}=1$ ，则  $Q=0.5$ ，增加  $A_{UF}$ ， $Q$  将随之升高。当  $A_{UF}$  趋 2 时， $Q$  趋向无穷大。因此， $A_{UF}$  愈接近 2， $|A|$  愈大，可使带阻滤波器的选频特性愈好。

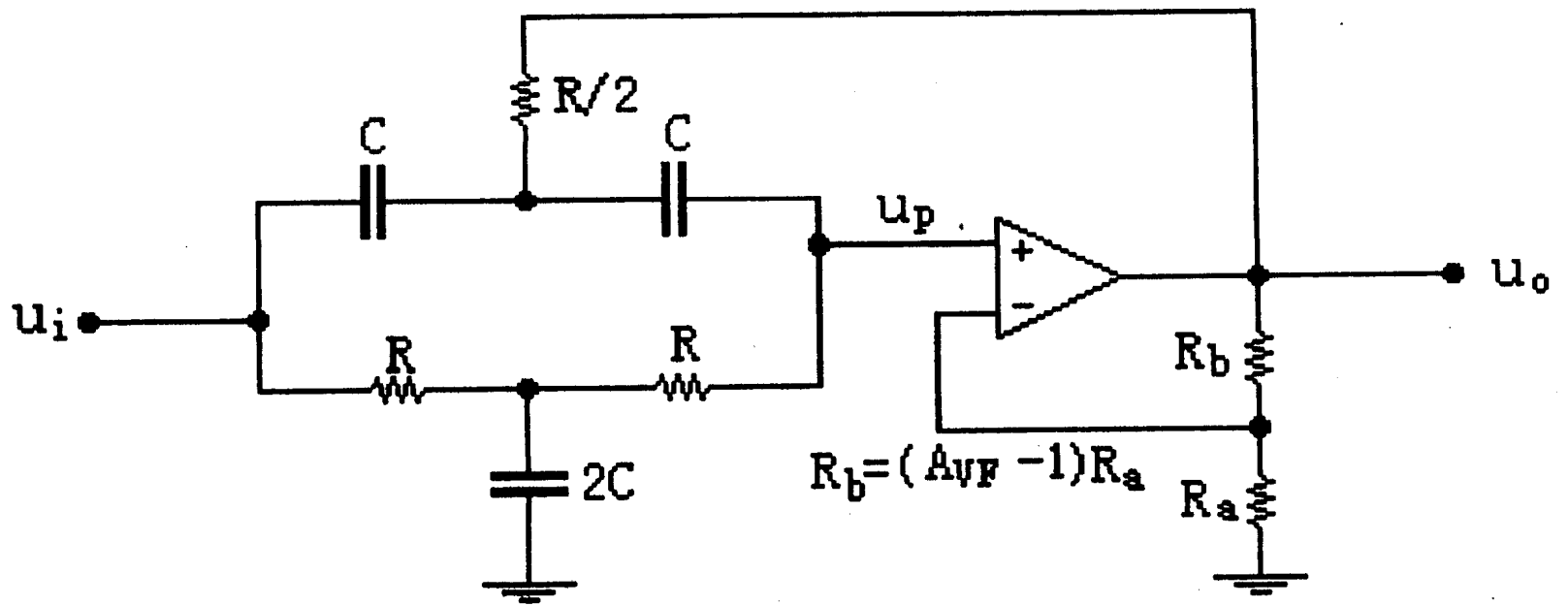
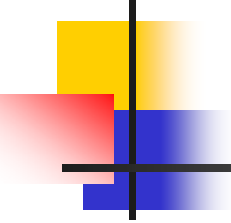


图3.7.1双T带阻滤波器电路原理图

- 
- 
- 式 (3.7.1) 为双T带阻滤波器传递函数的典型表达式。其中  $\omega_n$  为中心角频率，而  $Q$  则称为等效品质因数。



## 3.7.2 双T带阻滤波器电路特性分析

---

- 一个双T带阻滤波器电路如图3.7.2所示。启动仿真，点击波特图仪，可以看见双T带阻滤波器的幅频特性如图3.7.3所示。
- 利用AC Analysis（交流分析）可以分析双T带阻滤波器电路的频率特性如图3.7.4所示。分析方法参考3.3.2 一阶有源低通滤波器的AC Analysis（交流分析）分析步骤。

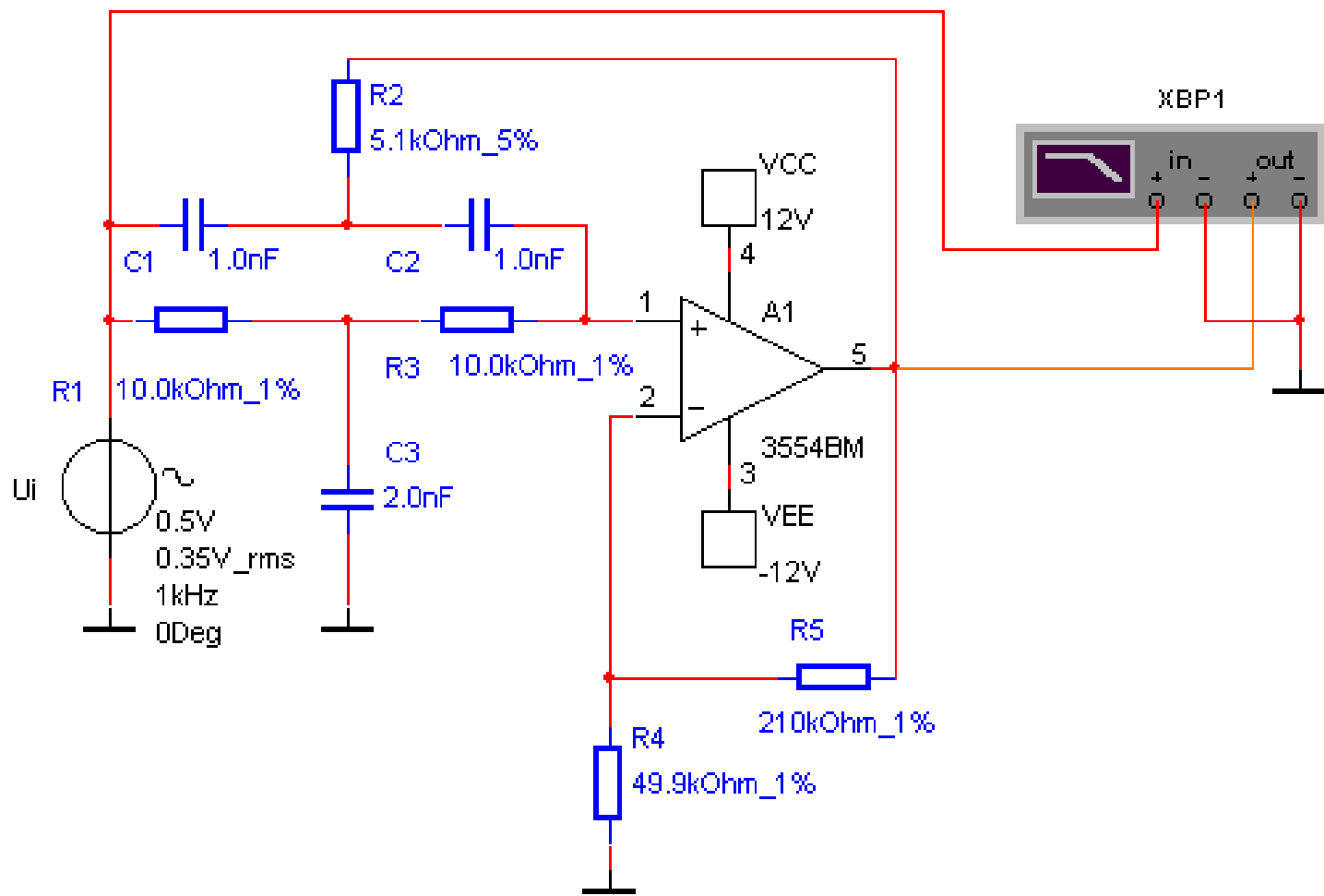


图3.7.2 双T带阻滤波器电路

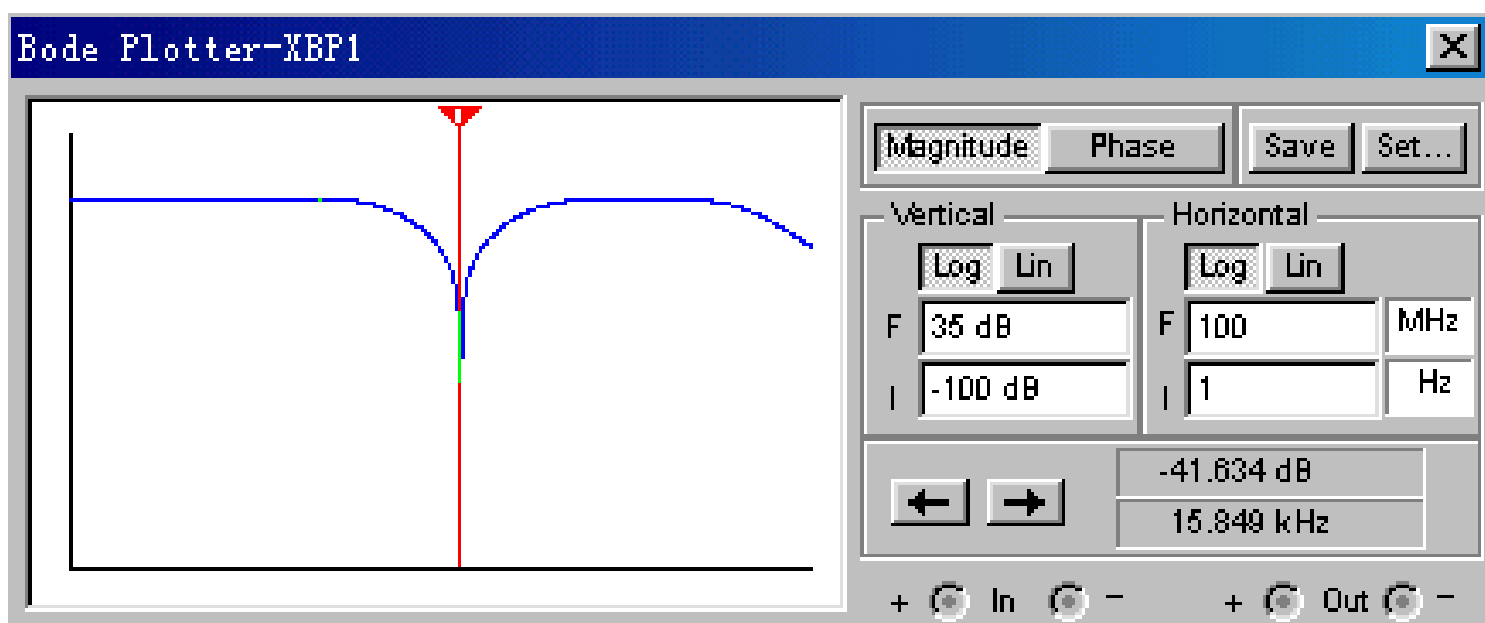


图3.7.3 双T带阻滤波器的幅频特性

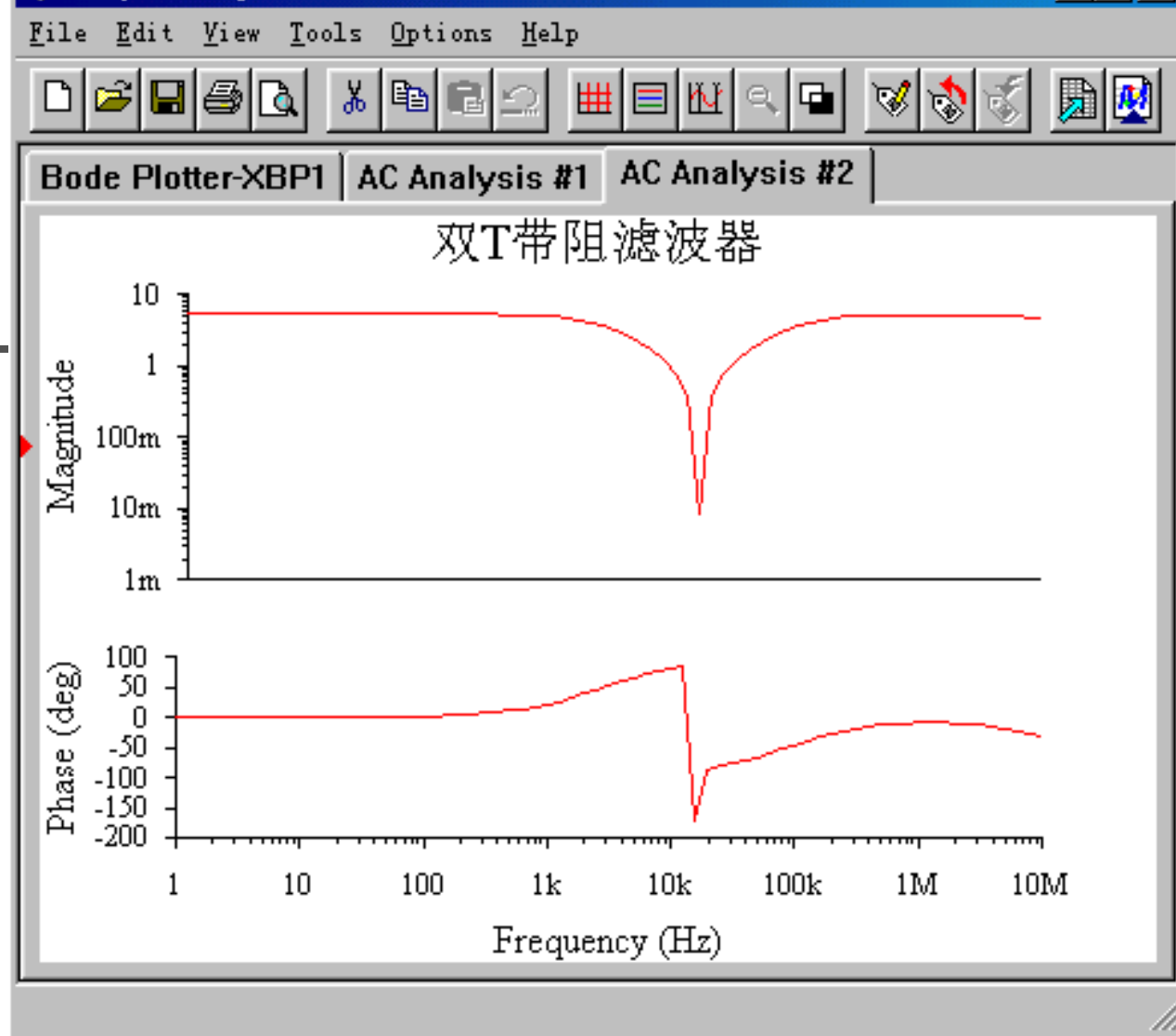


图3.7.4 双T带阻滤波器AC Analysis仿真分析结果



---

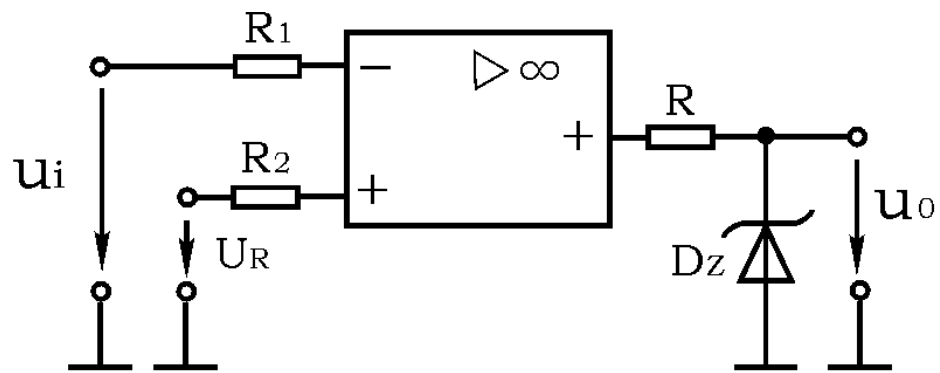
## 3.8 电压比较器



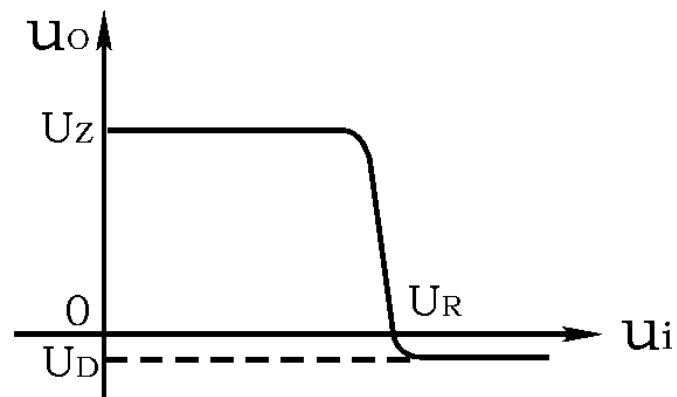


## 3.8.1 电压比较器工作原理

- 电压比较器是集成运放非线性应用电路，它将一个模拟量电压信号和一个参考电压相比较，在二者幅度相等的附近，输出电压将产生跃变，相应输出高电平或低电平。比较器可以组成非正弦波形变换电路及应用用于模拟与数字信号转换等领域。
- 图3.8.1所示为一最简单的电压比较器， $U_R$ 为参考电压，加在运放的同相输入端，输入电压 $u_i$ 加在反相输入端。

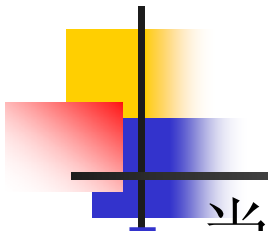


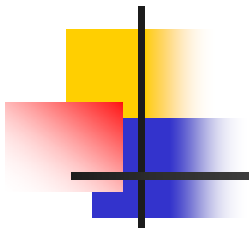
(a) 电路图



(b) 传输特性

图3.8.1 电压比较器

- 
- 当 $U_i < U_R$ 时，运放输出高电平，稳压管 $VD_Z$ 反向稳压工作。输出端电位被其箝位在稳压管的稳定电压 $U_Z$ ，即 $U_O = U_Z$
  - 当 $U_i > U_R$ 时，运放输出低电平， $VD_Z$ 正向导通，输出电压等于稳压管的正向压降 $U_D$ ，即 $U_O = -U_D$
  - 因此，以 $U_R$ 为界，当输入电压 $U_i$ 变化时，输出端反映出两种状态。高电位和低电位。

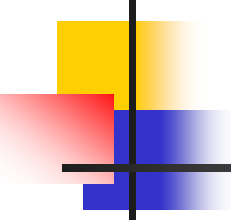
- 
- 表示输出电压与输入电压之间关系的特性曲线，称为传输特性。图3.8.1(b)为图3.8.1(a)比较器的传输特性。
  - 常用的电压比较器有过零比较器、具有滞回特性的过零比较器、双限比较器（又称窗口比较器）等。

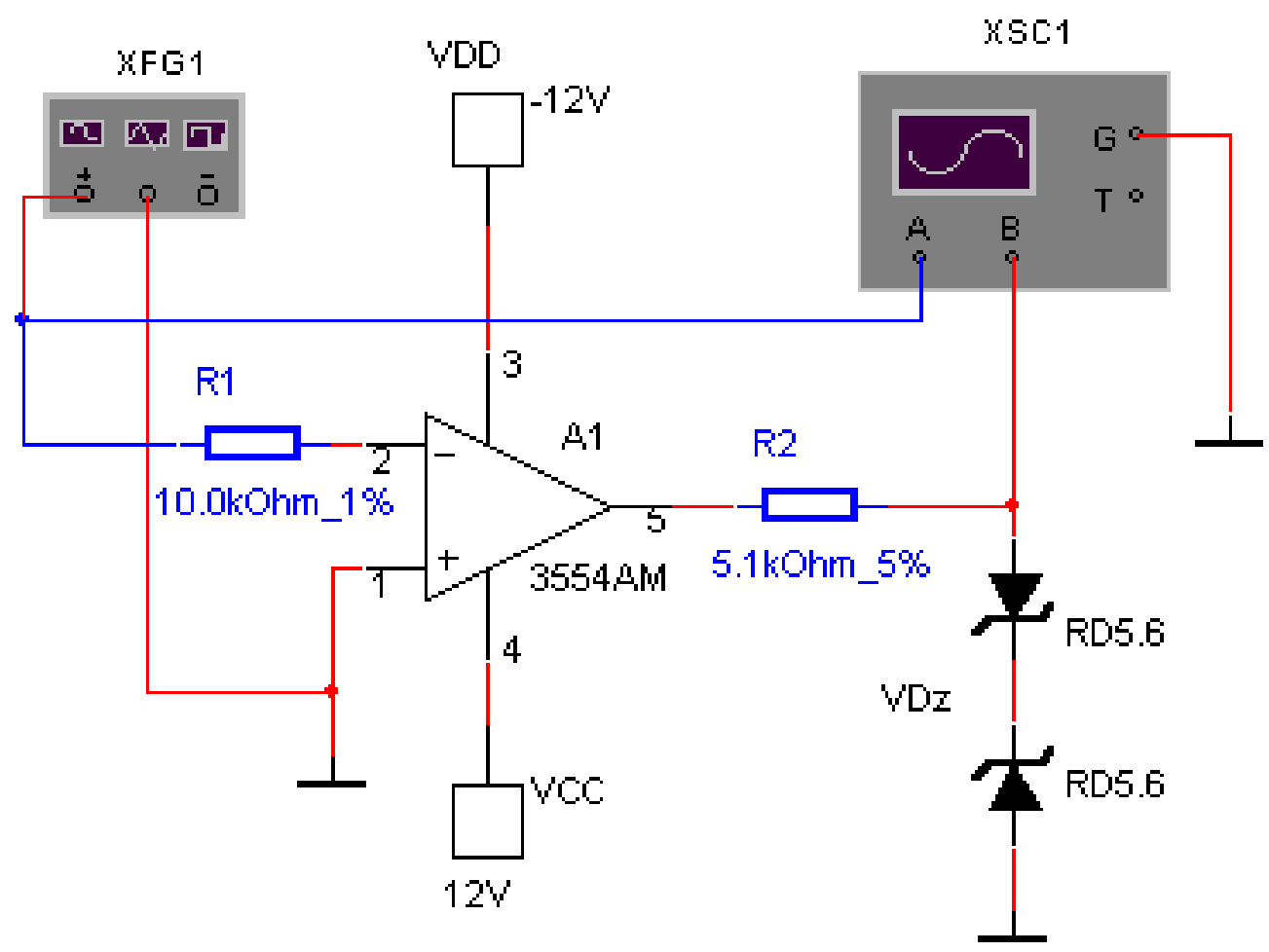
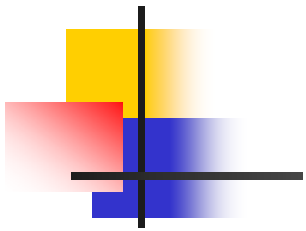


## 3.8.2 过零比较器

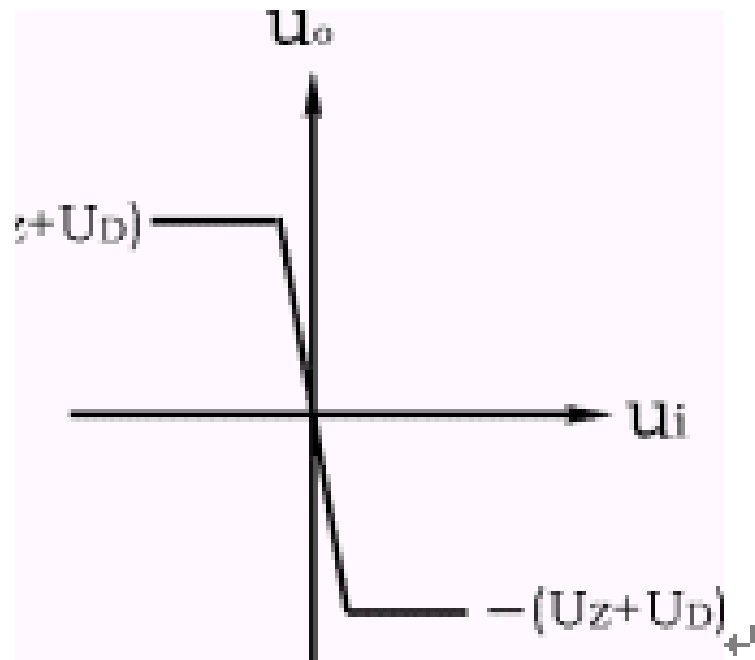
---

- 电路如图3.8.2(a)所示为加限幅电路的过零比较器， $VD_Z$ 为限幅稳压管。信号从运放的反相输入端输入，参考电压为零，从同相端输入。当 $U_i > 0$ 时，输出 $U_o = -(U_Z + U_D)$ ，当 $U_i < 0$ 时，

- 
- $U_O = +(U_Z + U_D)$ ,  $U_Z$  表示稳压管反相稳压值,  $U_D$  表示稳压管正相压降, 其电压传输特性如图 3.8.2 (b) 所示。过零比较器结构简单, 灵敏度高, 但抗干扰能力差。过零比较器输入输出波形如图 3.8.3 所示。



(a) 过零比较器



(b) 电压传输特性

图3.8.2 过零比较器



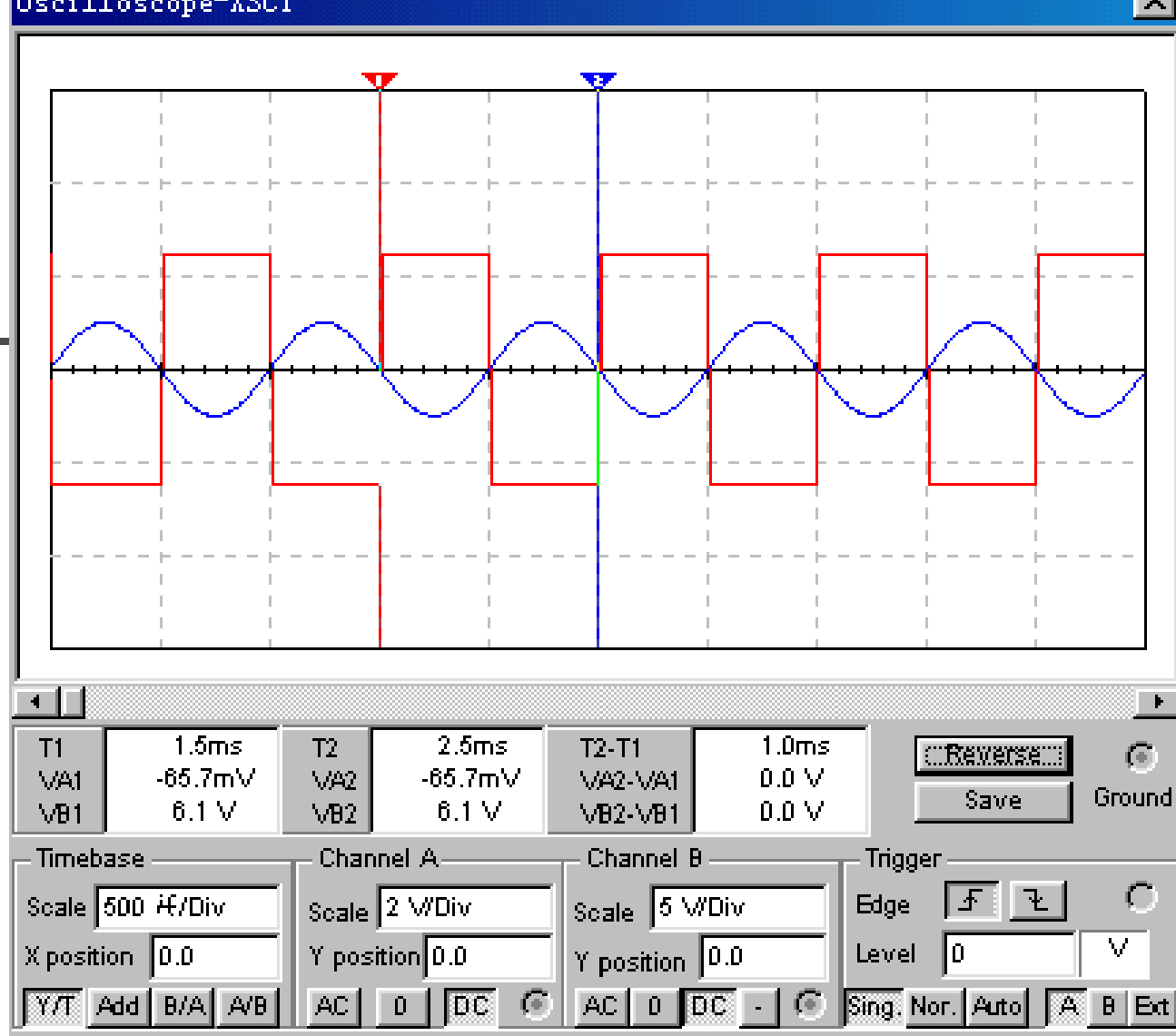
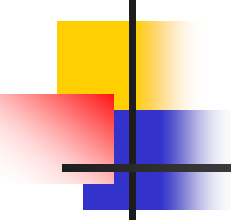


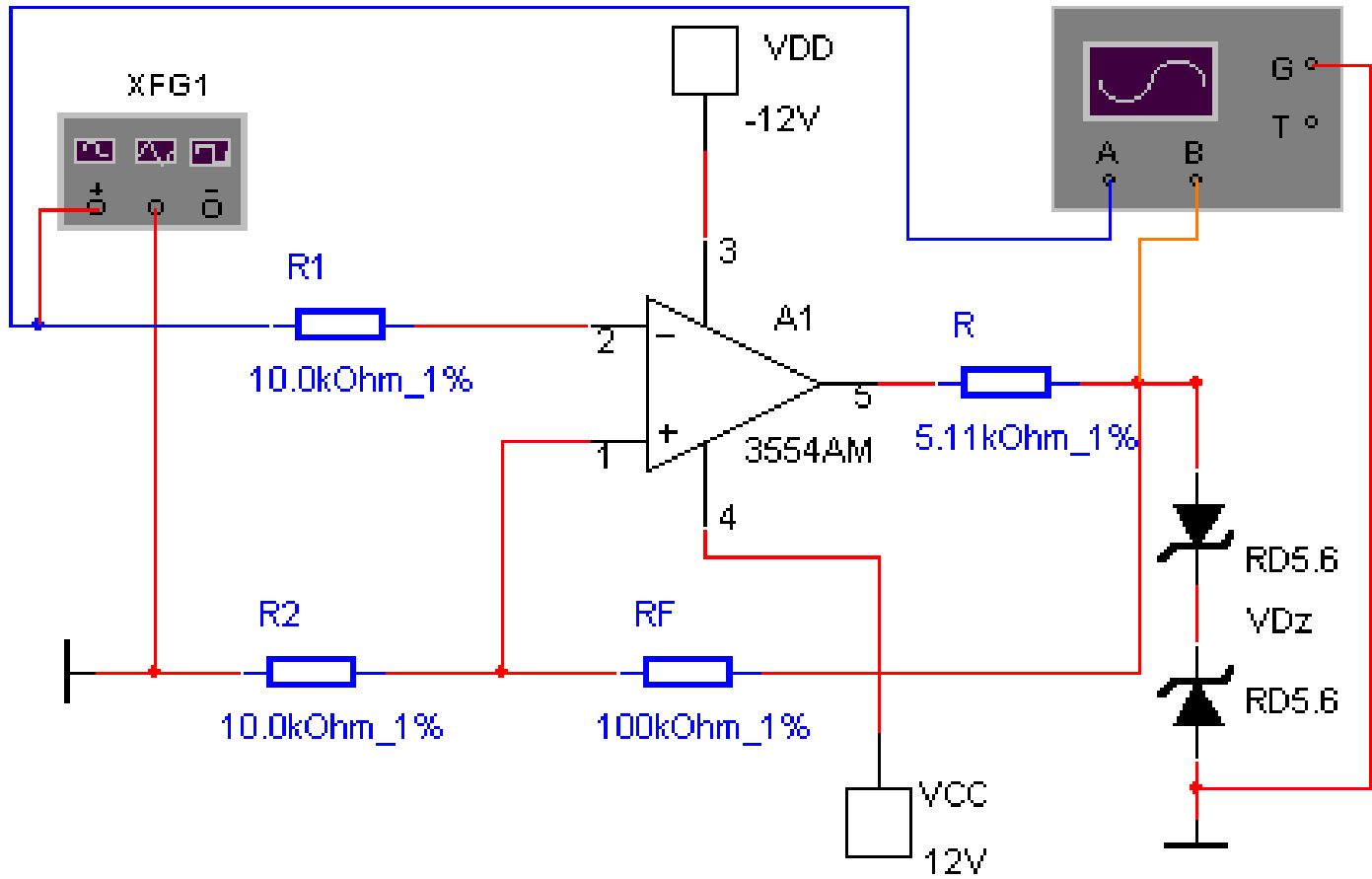
图3.8.3 过零比较器测试结果

### 3.8.3 滞回比较器

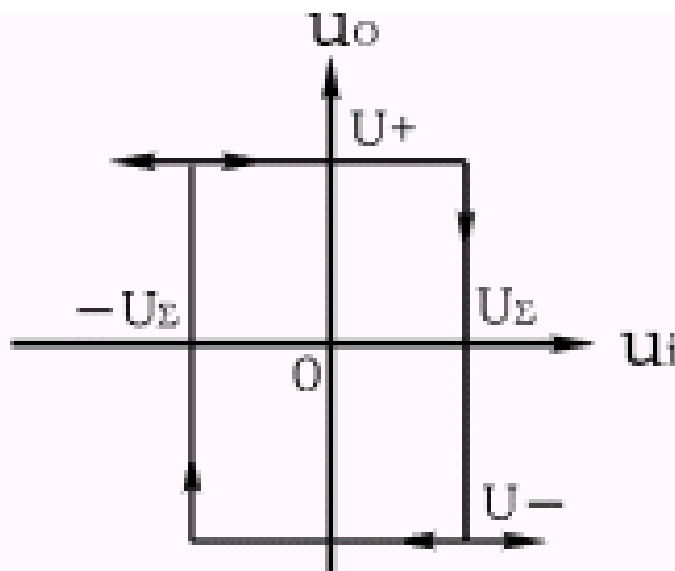
图3.8.4为具有滞回特性的过零比较器，过零比较器在实际工作时，如果 $u_i$ 恰好在过零值附近，则由于零点漂移的存在， $U_O$ 将不断由一个极限值转换到另一个极限值，这在控制系统中，对执行机构将是很不利的。为此，就需要输出特性具有滞回现象。如图3.8.4（a）所示，从输出端引一个电阻分压正反馈支路到同相输入端，

- 
- 
- 若 $U_o$ 改变状态， $\Sigma$ 点也随着改变电位，使过零点离开原来位置。当 $U_o$ 为正（记作 $U_+$ ）

$$U_{\Sigma} = \frac{R_2}{R_f + R_2} U_+$$

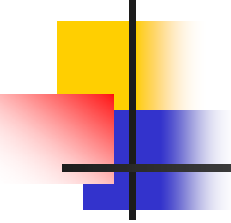


(a) 电路图



(b) 传输特性

图3.8.4 滞回比较器

- 
- 则当 $U_i > U_{\Sigma}$ 后， $U_O$ 即由正变负（记作 $U_-$ ），此时 $U_{\Sigma}$ 变为 $-U_{\Sigma}$ 。故只有当 $U_i$ 下降到 $-U_{\Sigma}$ 以下，才能使 $U_O$ 再度回升到 $U_+$ ，于是出现图3.8.3(b)中所示的滞回特性。 $-U_{\Sigma}$ 与 $U_{\Sigma}$ 的差别称为回差。改变 $R_2$ 的数值可以改变回差的大小。本例中通过仿真，用示波器测出回差电压 $\Delta U_T = 1.1V$ 。见图3.8.5所示。

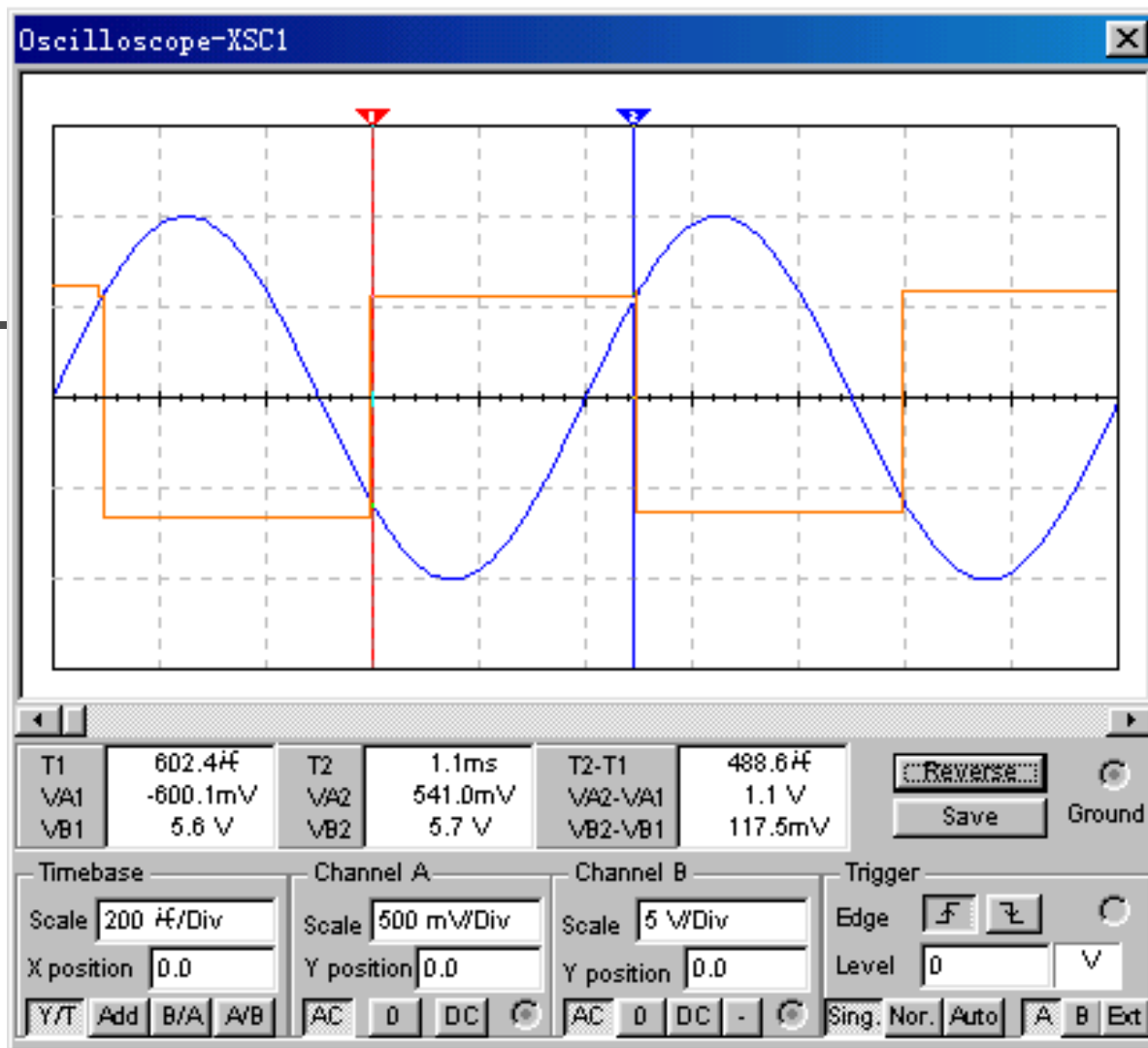


图3.8.5 回差电压 $\Delta U_T$ 仿真显示



---

## 3.9对数器



- 
- 
- 对数器是实现输出电压与输入电压成对数关系的非线性模拟器件。



## 3.9.1 PN结的伏安特性

- 半导体PN结的伏安特性为

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{q}{kT} U_D} - 1 \right) \quad (3.9.1)$$

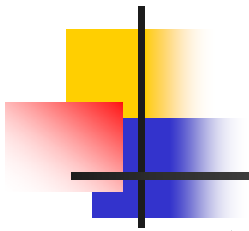
式中， $I_D$ ——PN结的正向导通电流；

$I_S$ ——PN结的反向饱和电流，它随温度变化；

$q$ ——电子电荷量，；

$k$ ——玻耳兹曼常数，；

$T$ ——热力学温度。

- 
- 
- 在常温下， $t=25^{\circ}\text{C}$ 时， $\frac{kT}{q} \approx 26\text{mV}$ 。

- 若结电压 $U_D > 100\text{mV}$ ，则上式近似为



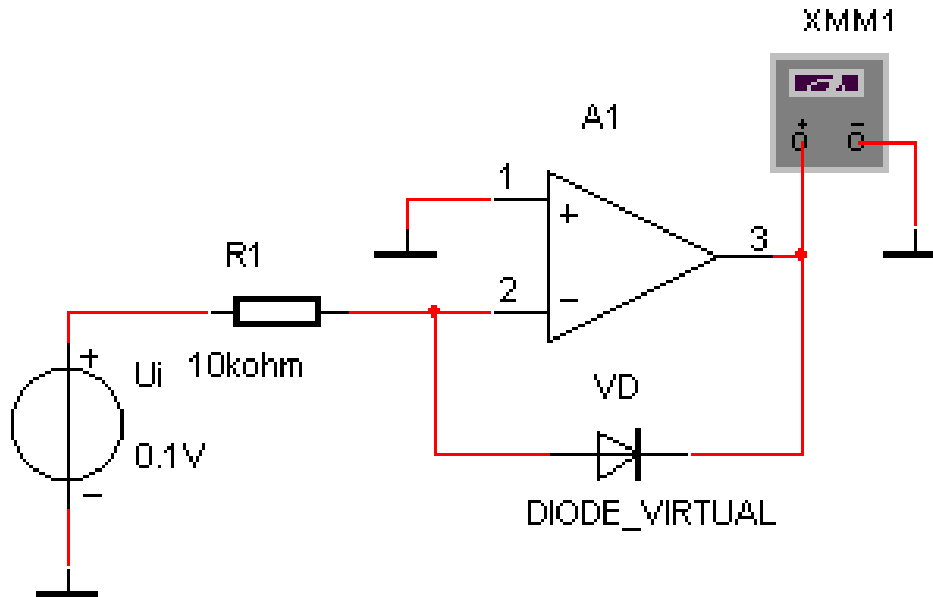
$$I_D \approx I_S e^{\frac{q}{kT} U_D}$$

(3.9.2)

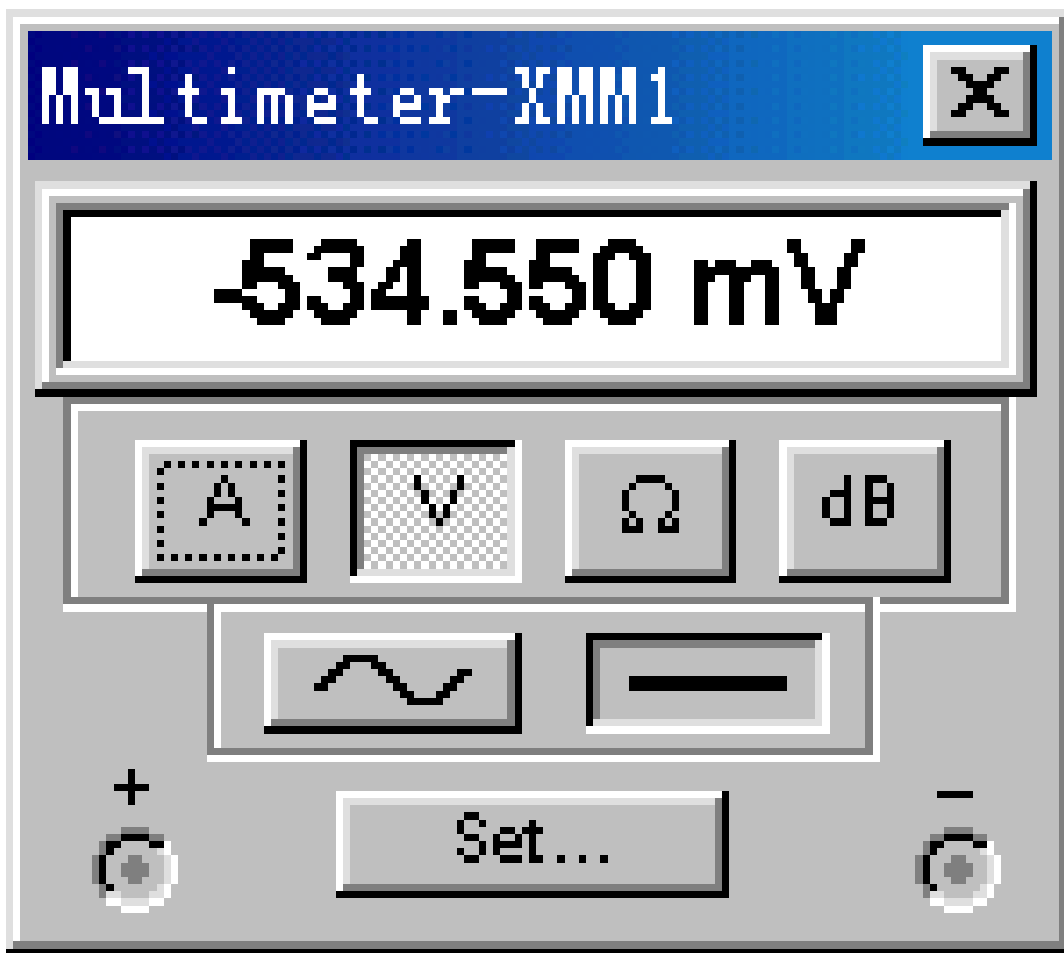
- 式 (3.9.2) 是具有指数关系的PN结的伏安特性。

## 3.9.2 二极管对数放大器

- 由二极管和运算放大器组成的对数放大器电路如图3.9.1所示。

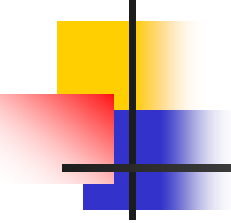


(a) 对数放大器电路



(b) 输出电压

图3.9.1 由二极管和运算放大器组成的对数放大器电路

- 
- 
- 在理想运放的情况下， $U_O = -U_D$ ，由

$$I_D = I_S e^{\frac{q}{kT} U_D}$$

- ，得此对数器的输出电压为

$$U_O = -U_D = -\frac{2.3kT}{q} \lg\left(\frac{U_i}{RI_S}\right) = -U_T \lg\left(\frac{U_i}{U_k}\right)$$

(3.9.3)

- 
- 
- 式中,  $U_T = 2.3 \frac{kT}{q}$

$$U_T \approx 59\text{mV}, U_k = RI_S。$$

- 当 $t=25^\circ\text{C}$ 时,
- 由式 (3.9.3) 可得对数器的传输特性, 如图3.9.2所示。

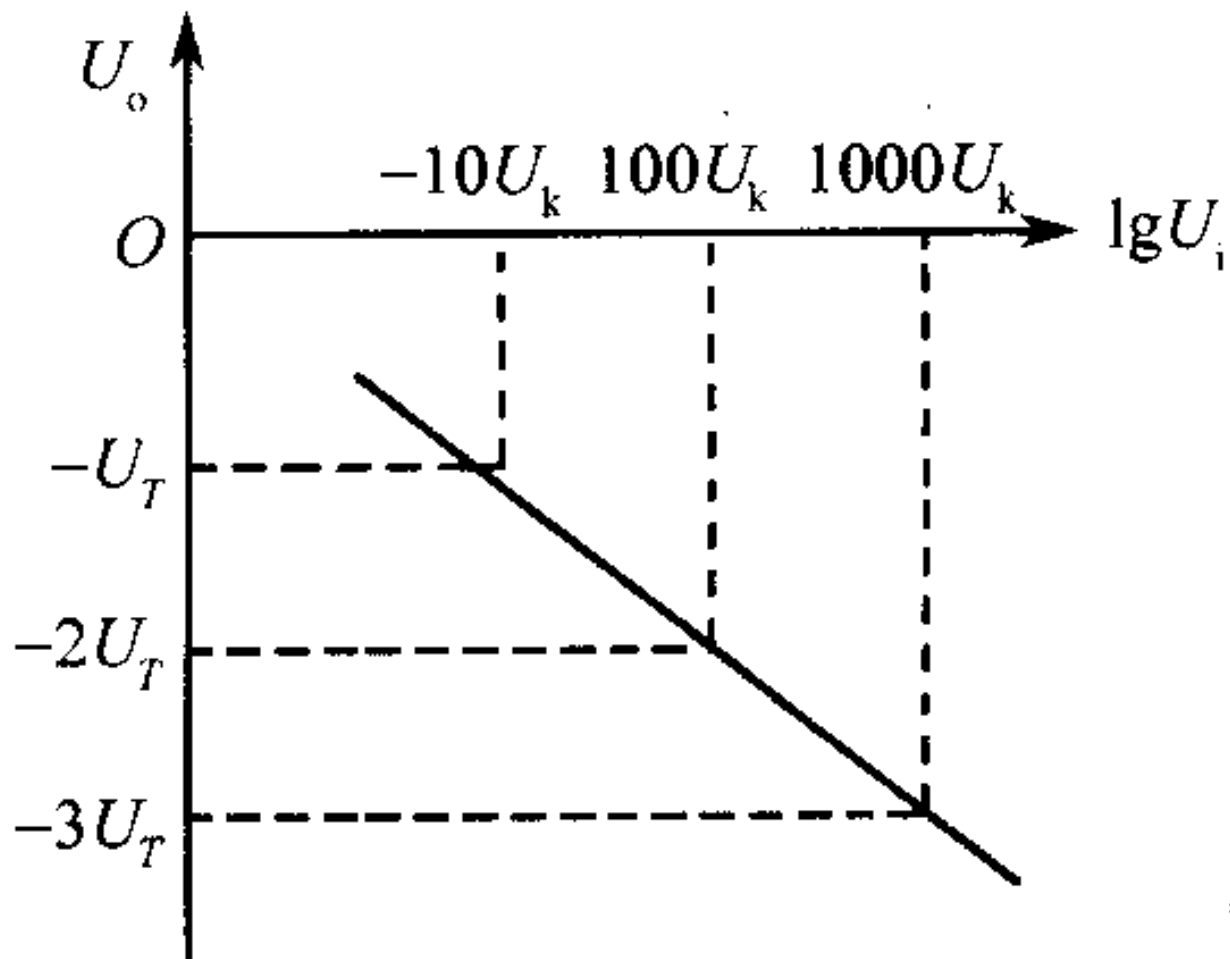
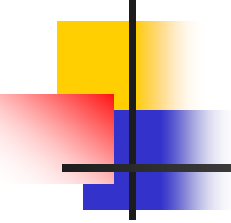


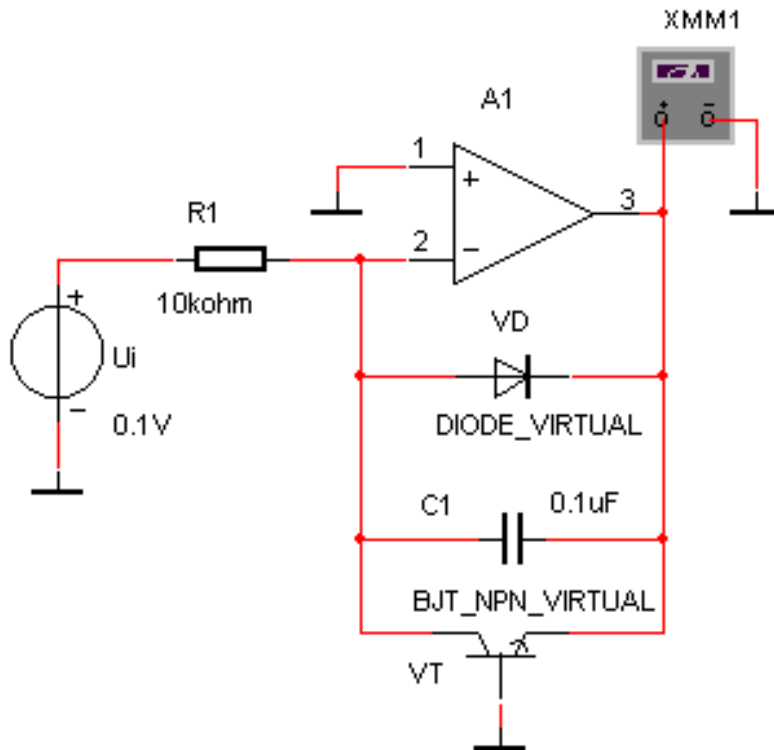
图3.9.2二极管对数器的传输特性



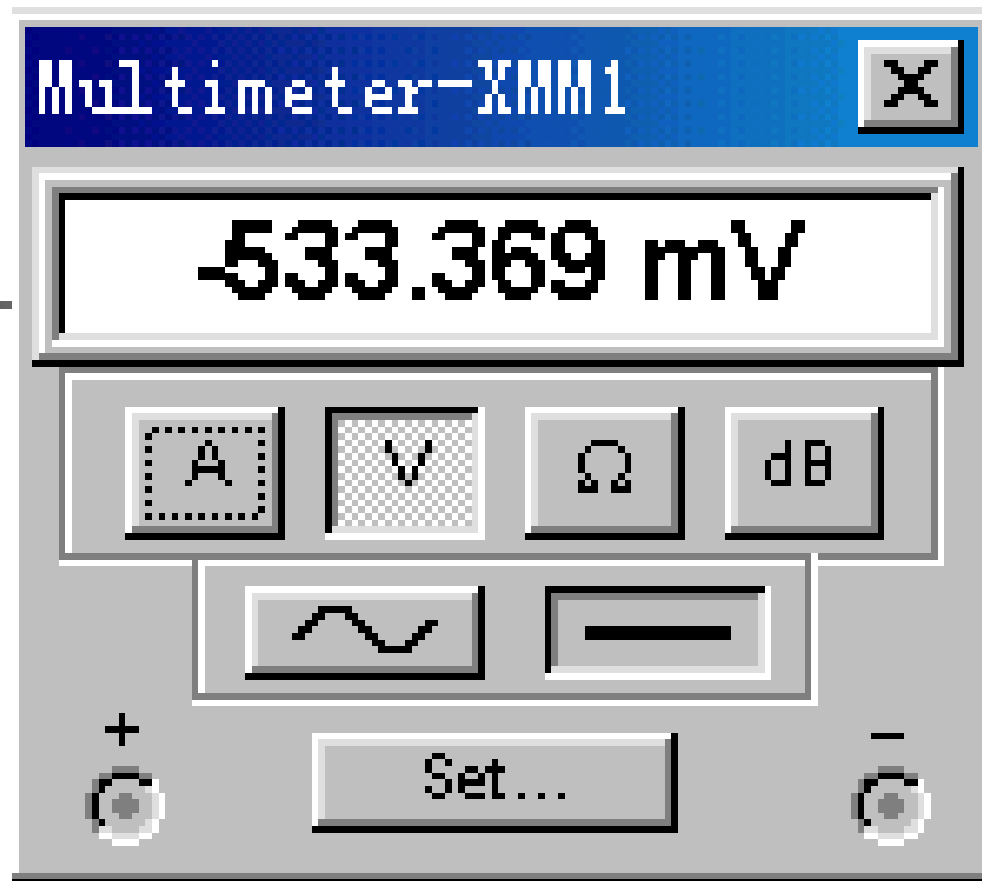
- 
- 
- 为了利用PN结正向导通特性的指数伏安特性，要求输入电压必须为正，若PN结反接，则输入电压必须为负。在分析上述关系式时，忽略了PN结的体电阻的影响。实际上，由于体电阻上的压降而破坏了对数运算，所以要选用体电阻小的管子作为变换元件。

## 3.9.3 三极管对数放大器

- 三极管对数放大器电路如图3.9.3所示。



(a) 对数放大器电路



(b) 输出电压

图3.9.3 三极管对数放大器电路

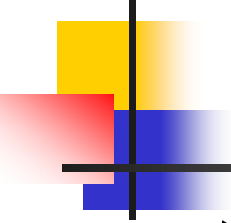
- 
- 在理想运放的条件 下，

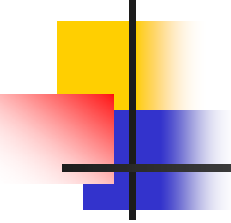
- $$I_C \approx \alpha I_E = \alpha I_S e^{\frac{q}{kT} U_{BE}} \quad (3.9.4)$$

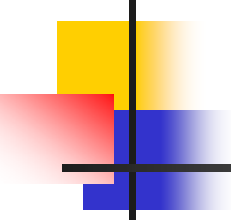
- 式中， $I_S$  是三极管 b-e 结的反向饱和电流， $\alpha$  是共基极电流放大系数。

- 由图 3.9.3 可得此对数器的输出电压为：

$$U_o = -U_{BE} = -\frac{2.3kT}{q} = -U_T \lg\left(\frac{U_i}{\alpha R I_S}\right)$$

- 
- 在图3.9.3(a)中，VD是保护二极管，其作用是防止VT反偏时因输出电压 $U_O$ 过大而造成击穿。当输入电压  $U_i(U_i) > 0$ 时，使用 NPN三极管；当输入电压  $U_i < 0$ 时，使用 PNP三极管,如图3.9.4所示。在图3.9.4中，VD<sub>2</sub>是保护二极管，其作用是防止VT<sub>2</sub>反偏时因输出电压 $U_O$ 过大而造成击穿。

- 
- 
- 采用三极管作为变换元件，可实现5~6个数量级的动态范围，而采用二极管可实现3~4个数量级的动态范围。三极管对数器和二极管对数器一样，在分析时忽略了体电阻的影响，所以在实际应用时，应选用体电阻小的管子作为变换元件。

- 
- 
- 二极管对数器和三极管对数器明显的缺点是温度稳定性差，因为 $U_T$ 、 $I_S$ 均是与温度有关的量。为了使对数器具有实用性，可采用具有温度补偿的对数器。

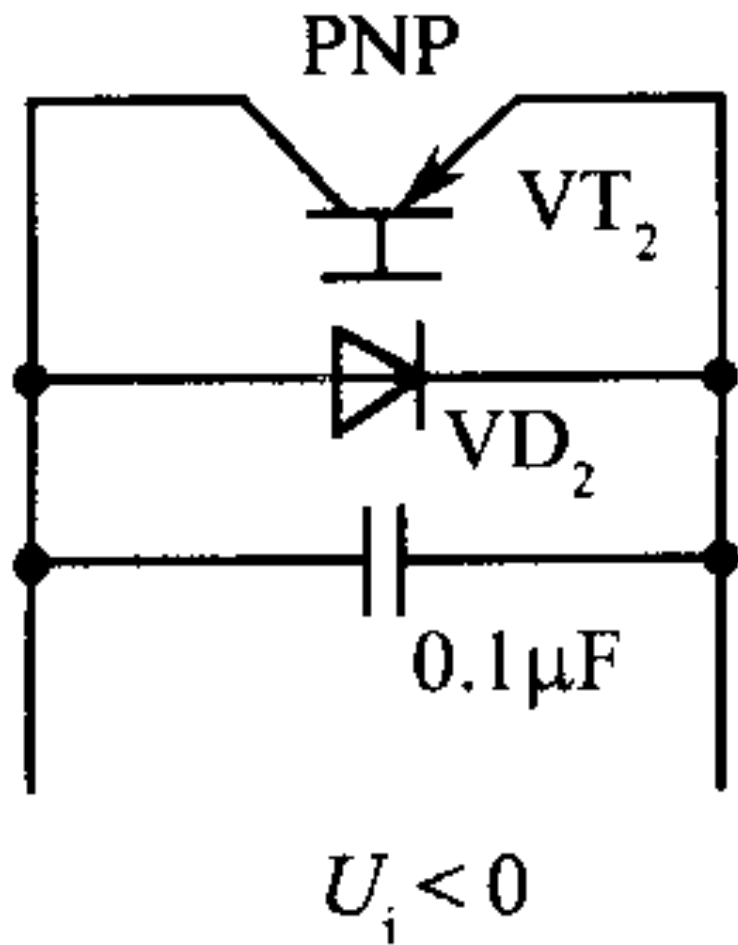


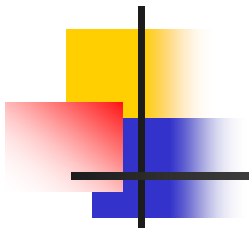
图3.9.4使用 PNP三极管的电路





---

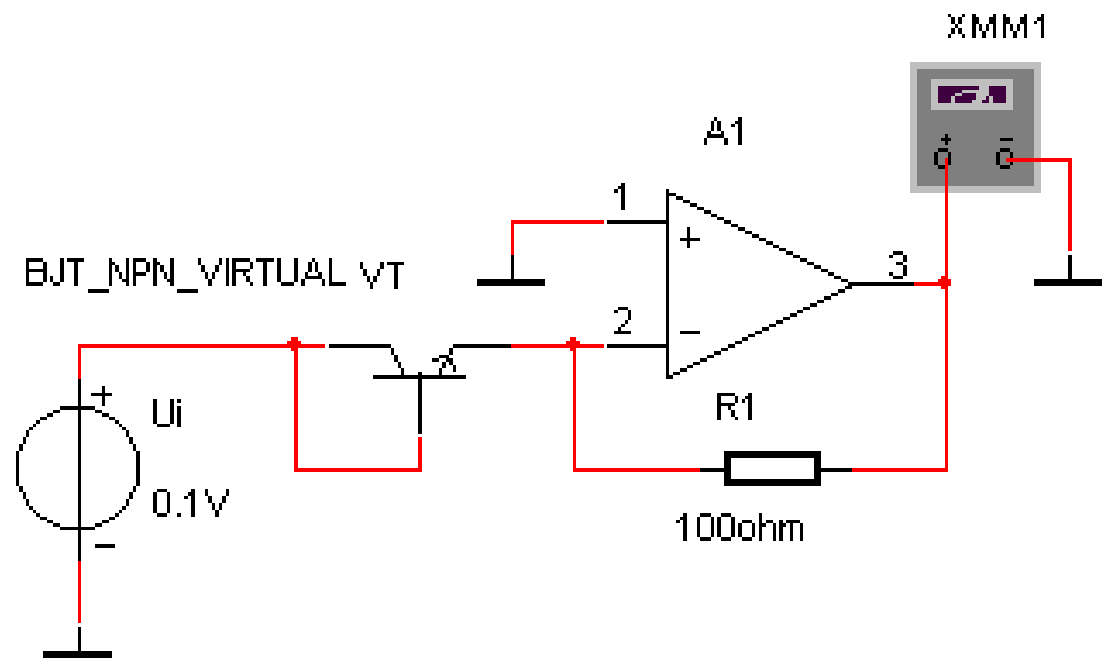
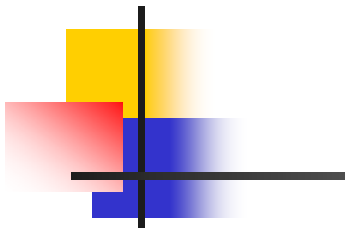
## 3.10 指数器



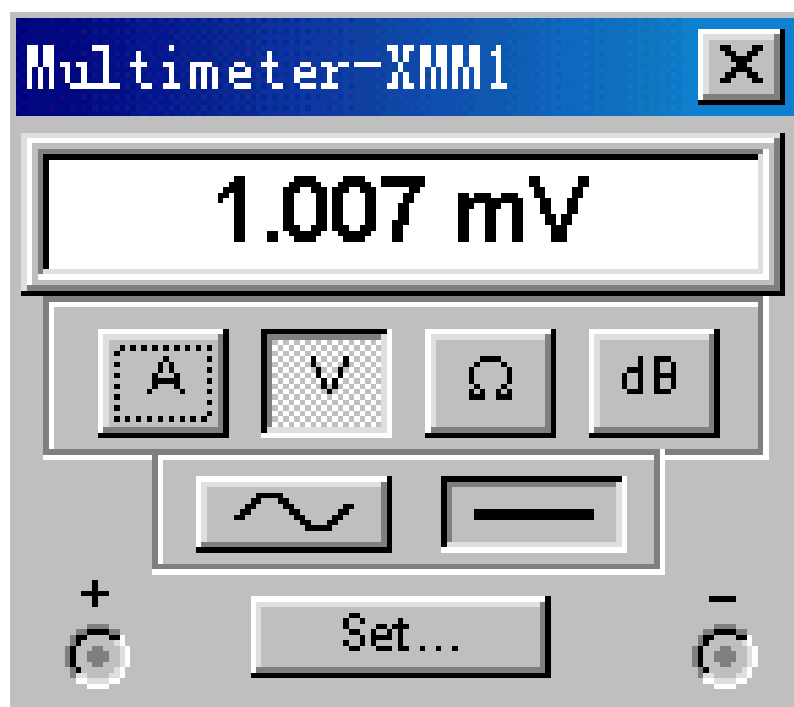
---

指数器是实现输出电压与输入电压成指数关系的非线性模拟器件，由于输入电压也是输出电压的对数，因此也称为逆对数器。

指数器电路如图3.10.1所示。



(a) 指数器电路



(b) 输出电压

图3.10.1 由三极管组成的指数器电路



---

在理想运放的情况下，

$$U_o = -I_E R \quad (3.10.1)$$

由 
$$I_E = I_{Se} e^{\frac{q}{kT} U_{BE}}$$

得此指数器的输出电压为

$$U_o = -RI_E = -RI_{Se} e^{\frac{q}{kT} U_{BE}} = -RI_{Se} e^{\frac{q}{kT} U_i} \quad (3.10.2)$$

由式 (3.10.2) 可得  
指数器的传输特性如  
图3.10.2所示。

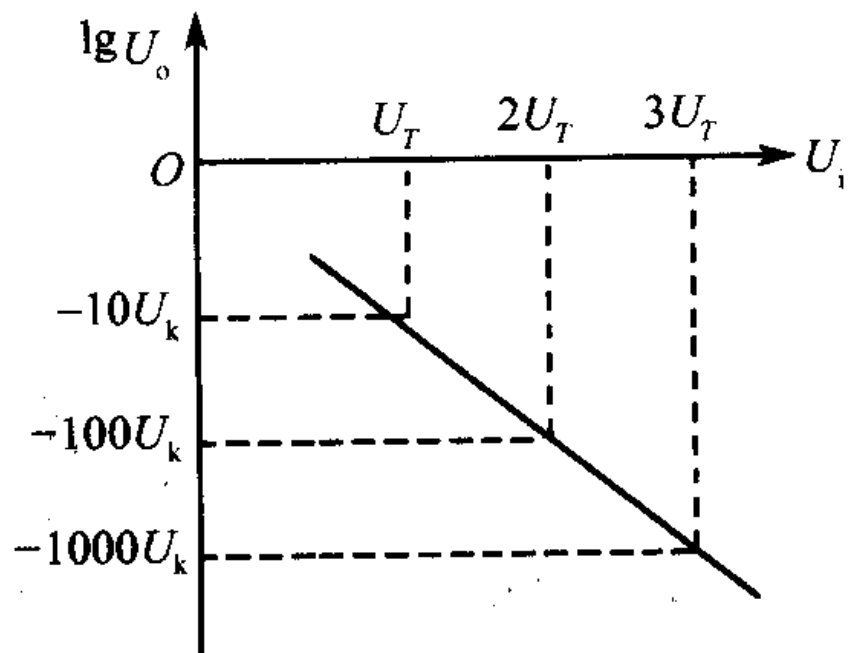
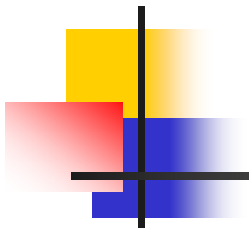


图3.10.2 指数器的传输特性



---


## 3.11 音调控制电路的设计



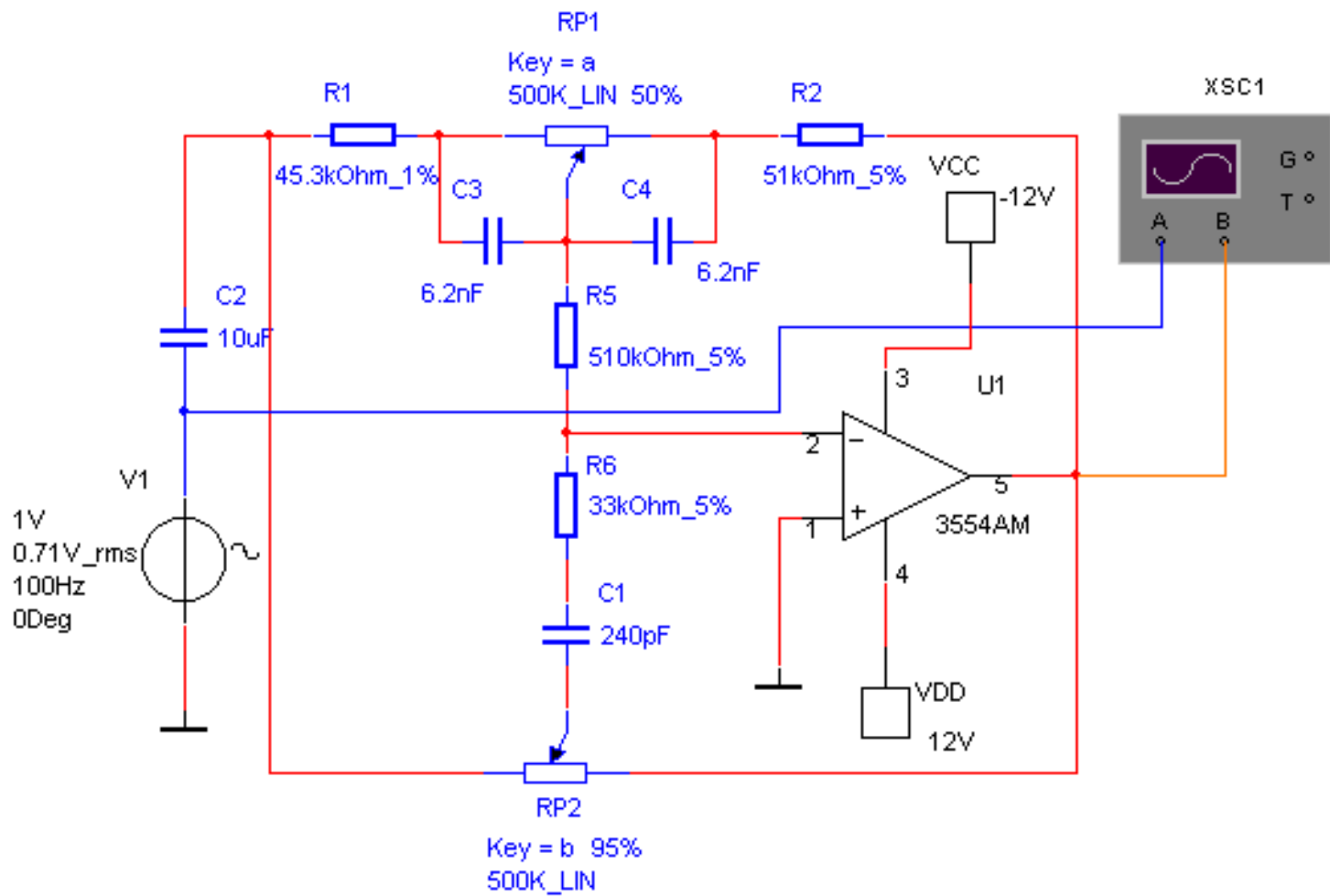
---

- 音调控制是指人为地调节输入信号的低频、中频、高频成分的比例，改变音响系统的频率响应特性，以补偿音响系统各环节的频率失真，或用来满足聆听者对音色的不同爱好。反馈式音调控制电路只改变电路频率响应特性曲线的转折频率，而不改变其斜率。反馈式音

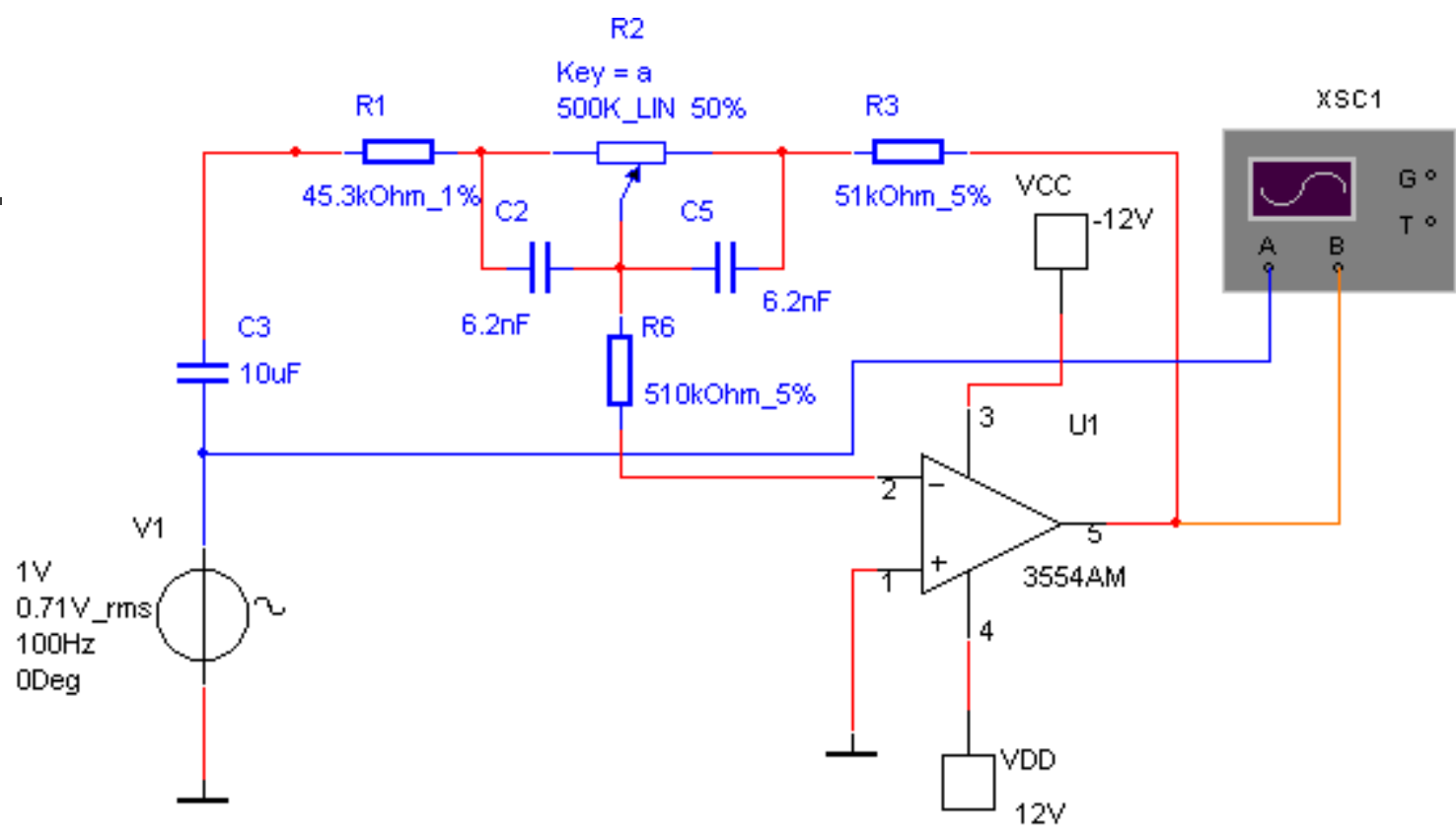
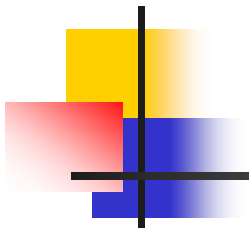




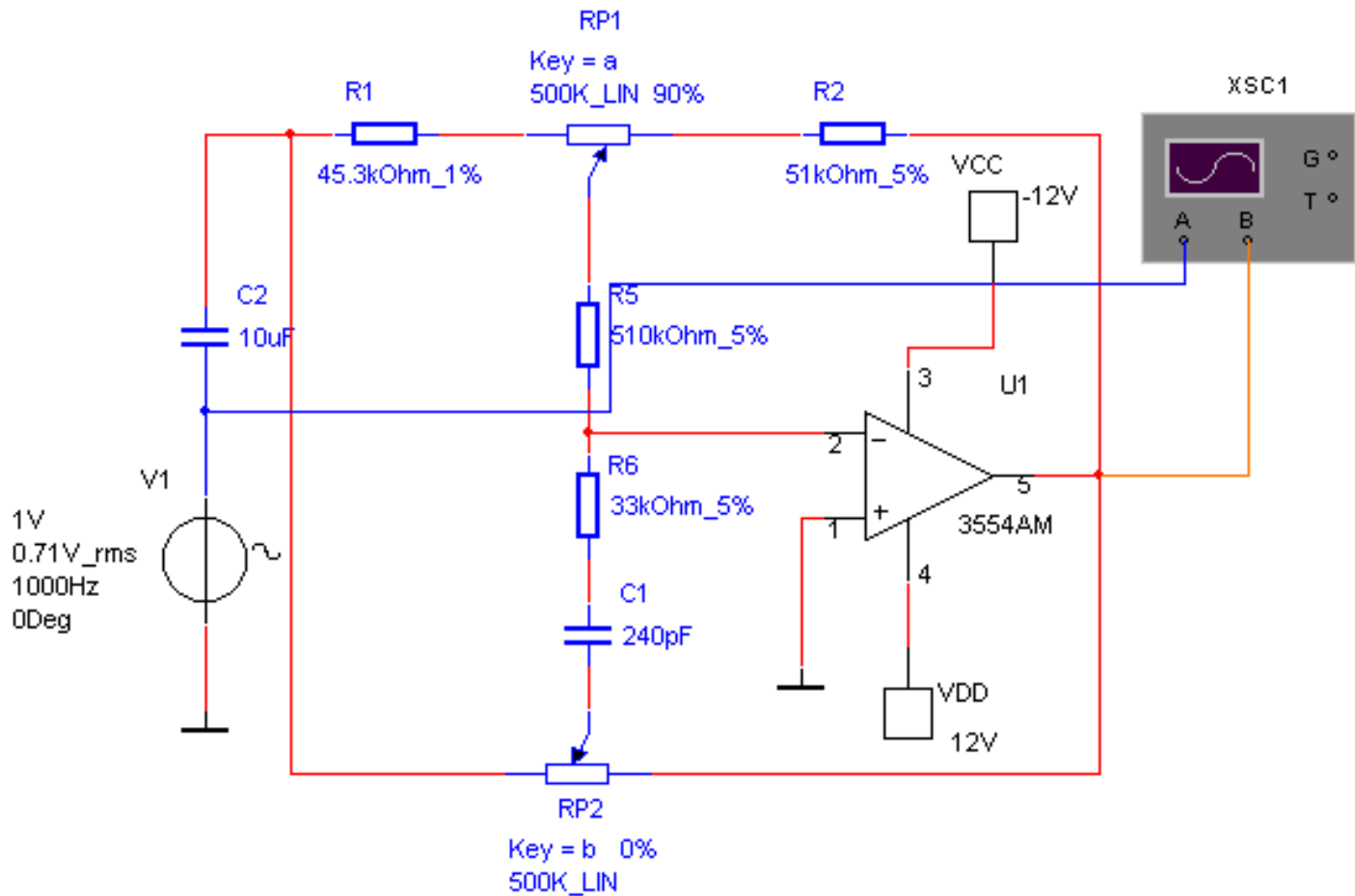
■ 调控制电路可以很好地补偿音响系统的频率失真，而且适应于人耳的听觉特性。电路设计如图3.11.1所示。电路中R1、R2、C3、C4和RP1组成低音反馈网络R6、C1、RP2组成高音反馈网络，对于输入中的低频成分，C1可视为开路，其等效电路如图3.11.2所示。对于输入中的高频成分C3、C4可视为短路，其等效电路如图3.11.3所示。



3.11.1 反馈式音调控制等效电路

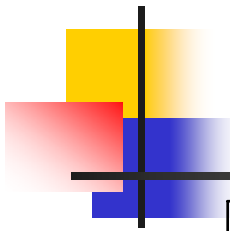


3.11.2 低音控制等效电路



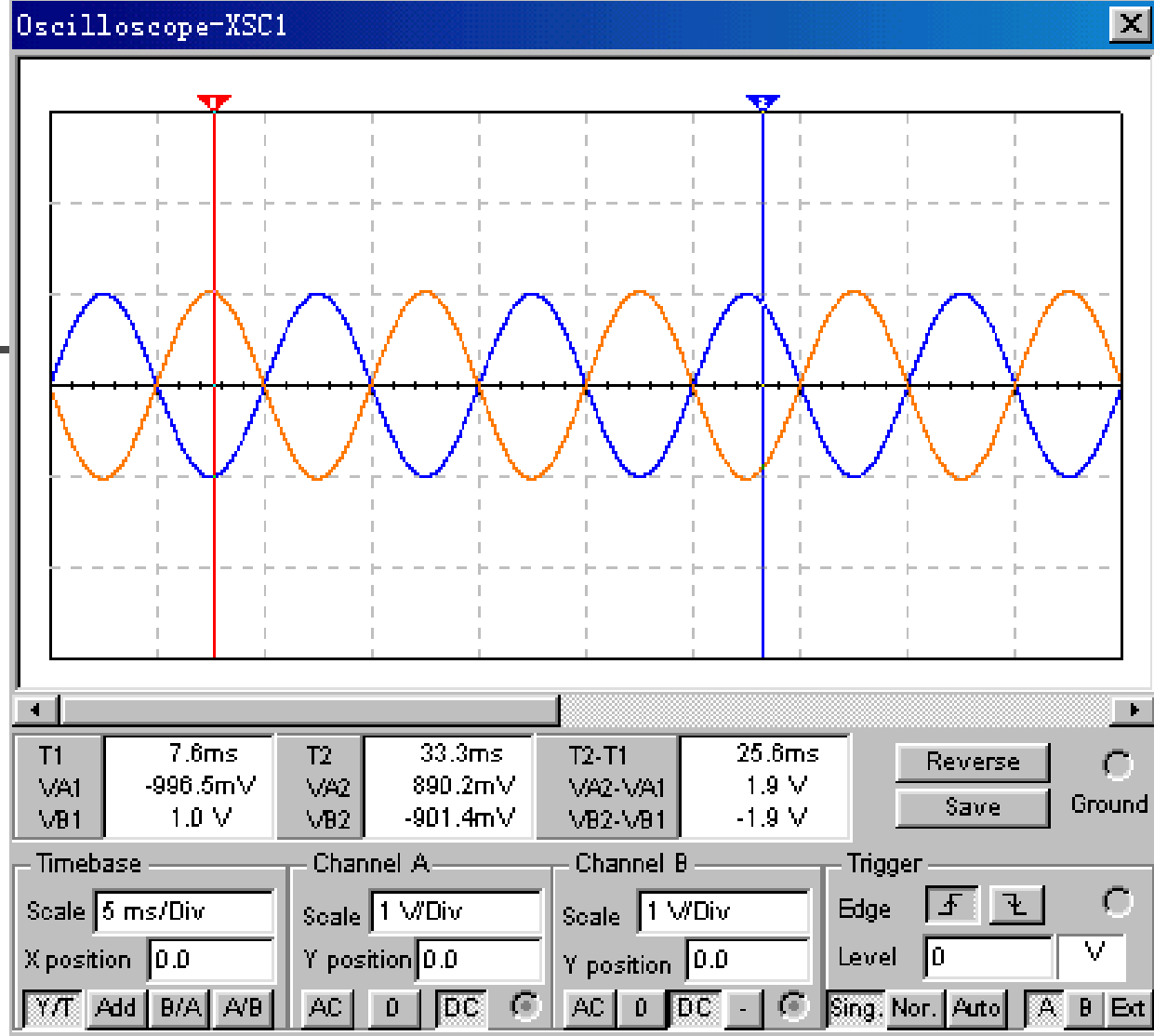
### 3.11.3 高音控制等效电路

将图3.11.1电路进行仿真得到表3.11.1仿真数据。

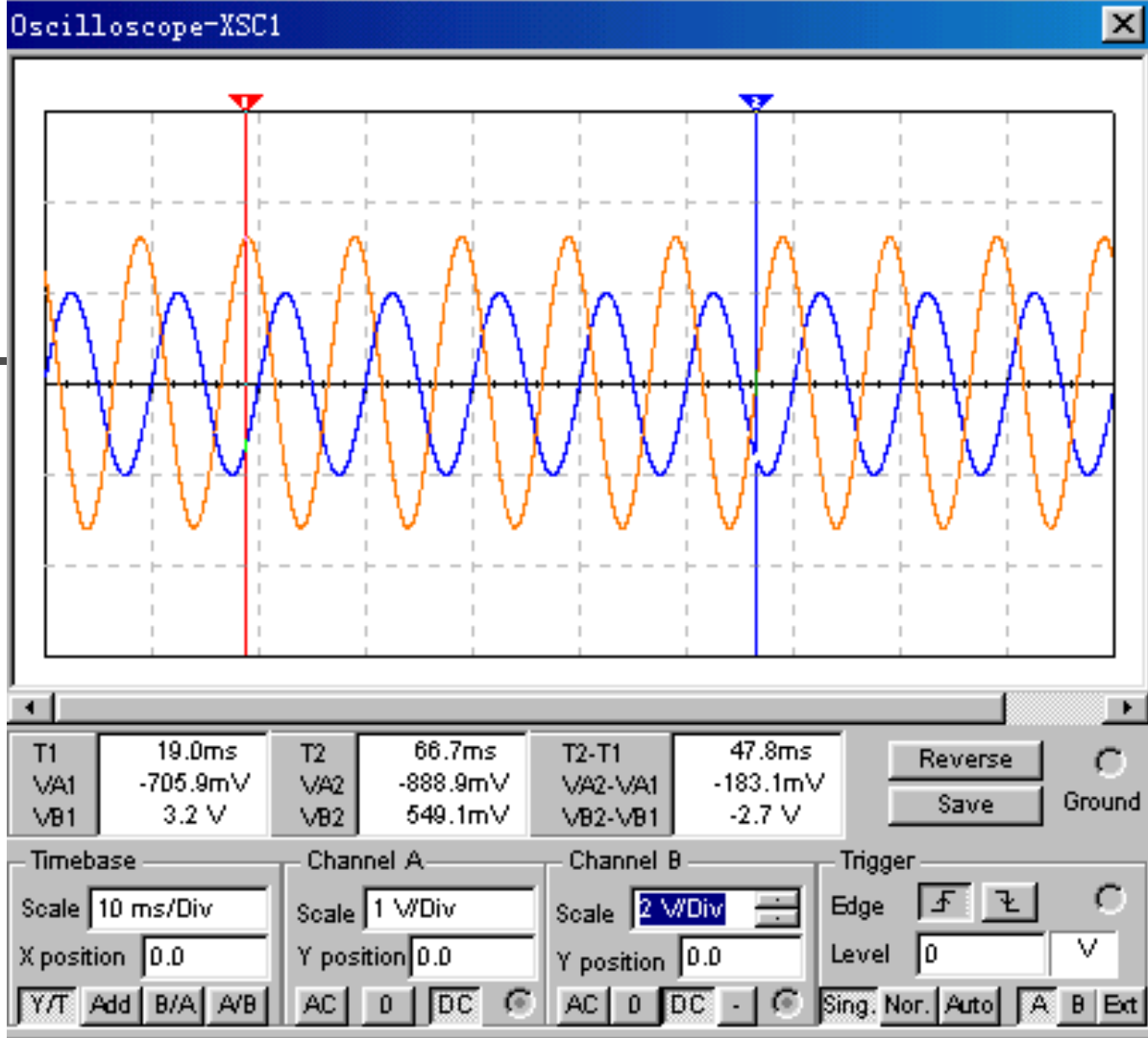


频率点	RP1 50% PR2 50%	RP1 0% PR2 50%	RP1 100% PR2 50%	RP1 50% PR2 0%	RP1 50% PR2 100%
100H <sub>Z</sub>	1.0V	105.7 mV	3.2V	1.0 V	1.0 V
5K H <sub>Z</sub>	1.0 V	656 mV	970 mV	6.6 V	128mV

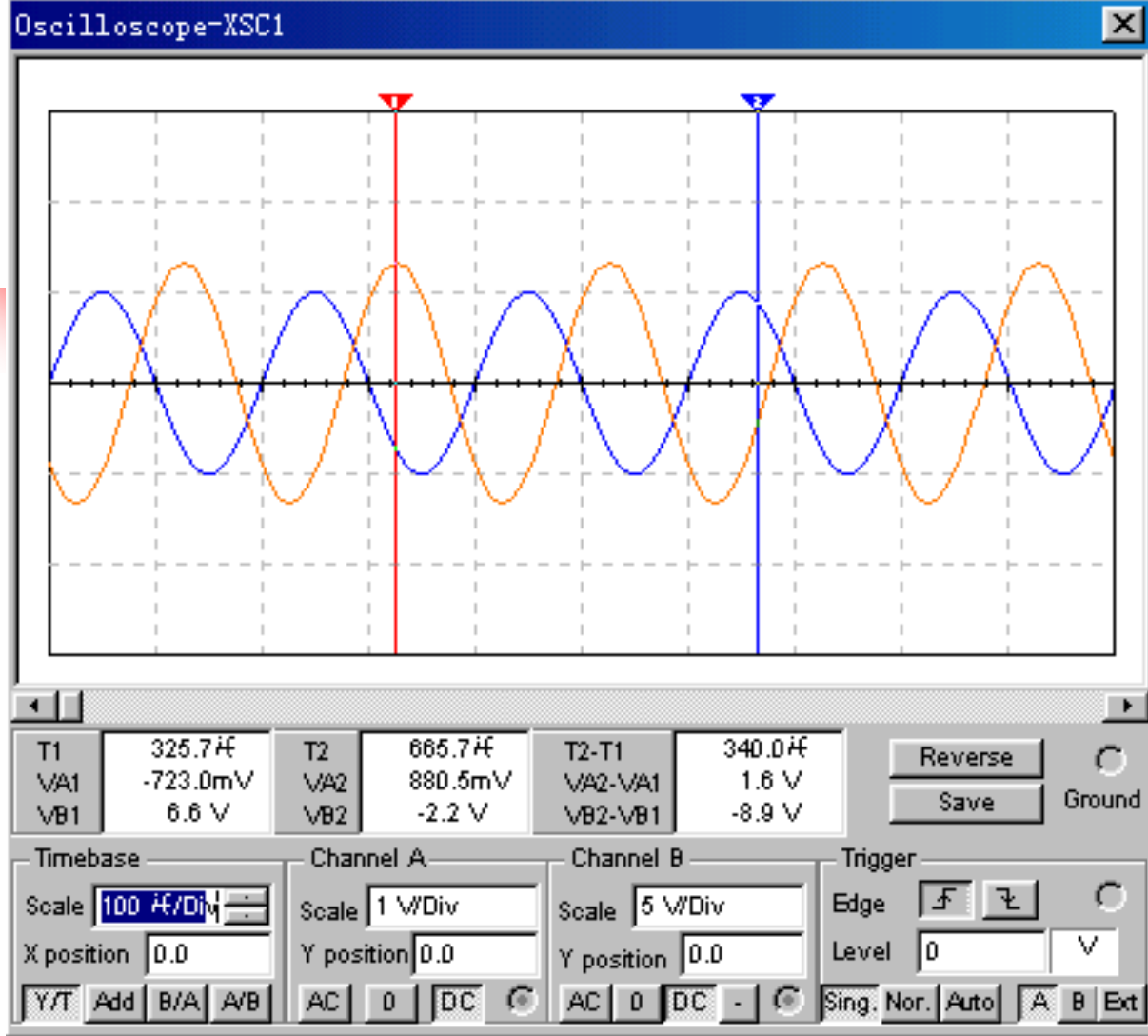
图3.11.4 (a)、(b)、(c) 分别用示波器仿真了电位器调节在不同的位置时的输出波形。



(a)  $RP_1$ 、 $RP_2$  电位器分别调到50%处时的仿真波形



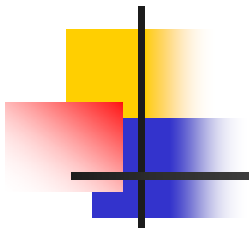
(b) 电位器 $RP_1$ 调到100% $RP_2$ 调50%，  
输入为100HZ时的仿真波形



(c) 电位器 $RP_1$   
调到50% $RP_2$ 调到  
0%,  
输入为5000Hz时  
的仿真波形

图3.11.4 电位器 $RP_1$ 、 $RP_2$ 处在  
不同位置时的仿真波形





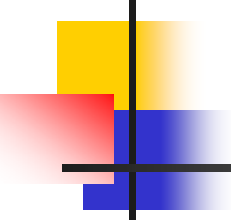
---

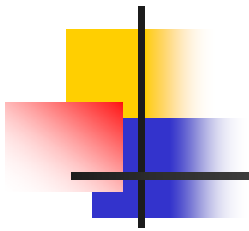
- 从以上仿真结果可以看出当可变电阻RP1调节在100%时，低音提升量最大，约为3.2V。当RP1调节在0%时，低音衰减量最大约为105.7 mV。当RP2调节在0%时，高音提升量最大约为6.6V，当RP2调节在100%时，高音衰减量最大约为128mV。

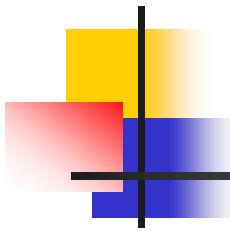


---

## 本章小结

- 
- 理想运算放大器开环电压增益 $A_{ud}=\infty$ ，输入阻抗 $r_i=\infty$ ，输出阻抗 $r_o=0$ ，带宽 $f_{BW}=\infty$ ，失调与漂移均为零。理想运算放大器在线性应用时具有两个重要的特性：“虚短”和“虚断”。当外部接入不同的线性或非线性元器件组成输入和负反馈电路时，可以灵活地实现各种特定的函数关系。

- 
- 
- 本章的主要内容有：
  - (一).运算放大器组成的反相比例运算电路、反相加法电路、同相比例运算电路、减法运算电路、积分运算电路、微分电路的结构、工作原理与计算机仿真分析。
  - (二).运算放大器组成的一阶有源滤波器、二阶压控电压源有源滤波器、二阶有源高通滤

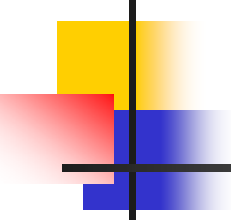


---

- 波器、二阶有源带通滤波器、双T带阻滤波器的结构、工作原理与计算机仿真分析。

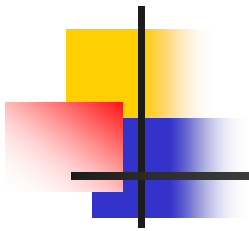
- (三).电压比较器组成的过零比较器和滞回比较器的结构、工作原理与计算机仿真分析。

- (四).运算放大器组成的对数器是实现输出电压与输入电压成对数关系的非线性模拟器件，介绍了结构、工作原理与计算机仿真分析。



---

- (五).运算放大器组成的指数器是实现输出电压与输入电压成指数关系的非线性模拟器件，由于输入电压也是输出电压的对数，因此也称为逆对数器，介绍了结构、工作原理与计算机仿真分析。

- 
- 
- 掌握运算放大器电路的仿真设计与分析方法是本章的重点。改变运算放大器输入回路和负反馈回路上的元器件，即可改变电路的功能。



## 思考题与习题

---

- **3.1** 在图3.1反相比例运算电路中， $R_1=10\text{K}\Omega$   
 $R_F=500\text{K}\Omega$ ，问 $R_2$ 的阻值应为多大。若输入信号为 $10\text{mV}$ ，用万用表测出输出信号的大小。



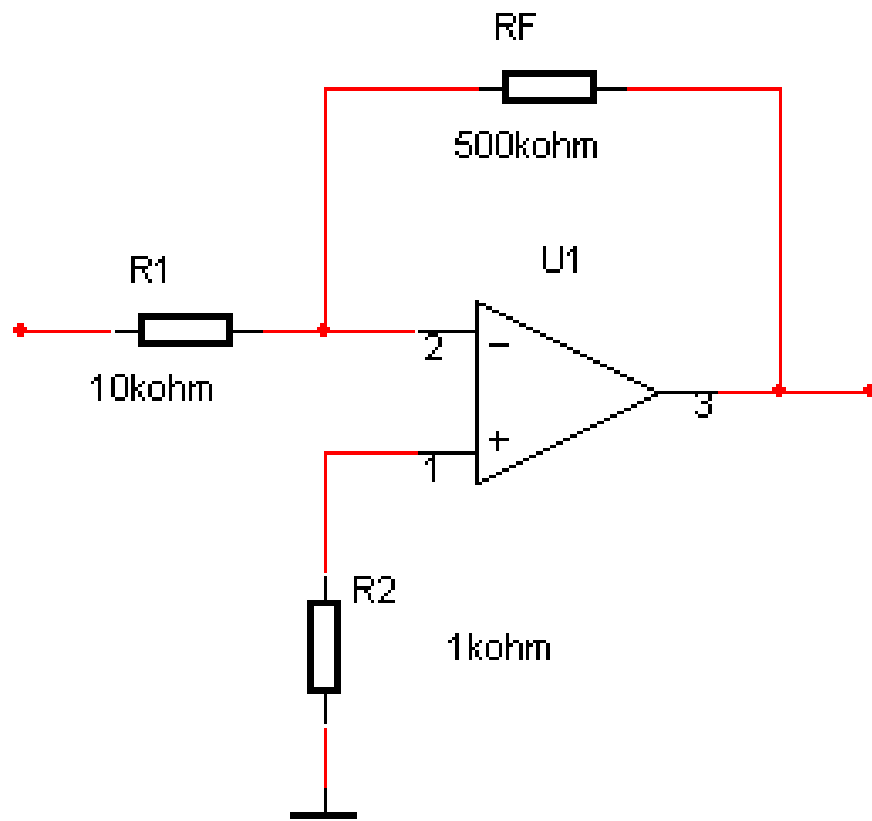
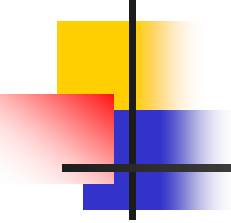


图3.1 习题3.1图

- 
- **3.2** 在 Multisim 仿真平台上设计一个同相比例运算电路，若输入信号为  $10\text{mV}$ ，用示波器观察输入、输出信号波形的相位，并测出输出电压。
  - **3.3** 电路如图3.2所示，已知  $u_{i1}=1\text{V}$ ，  
 $u_{i2}=2\text{V}$ ， $u_{i3}=3\text{V}$ ， $u_{i4}=14\text{V}$ ， $R_1=R_2=2\text{K}\Omega$ ，  
 $R_3=R_4=R_F=1\text{K}\Omega$ ，试测出  $u_o$ 。

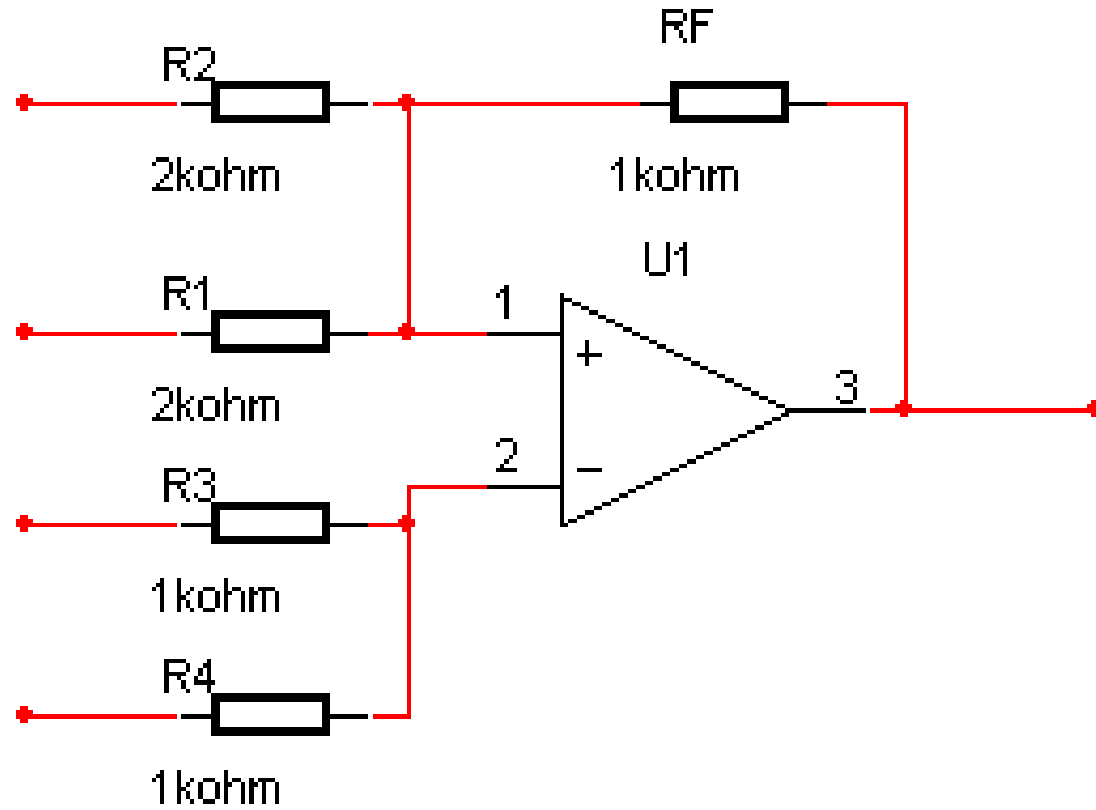
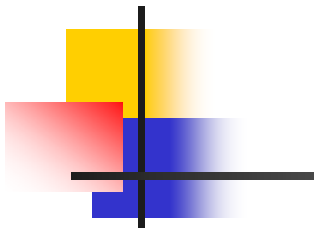
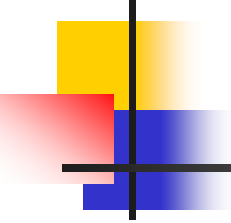


图3.2 习题3.3图

- 
- 
- 3.4 在 Multisim 仿真平台上建立如图 3.3 所示电路，用示波器测出输入、输出信号波形。改变电容的大小，观察输入、输出波形的变化。

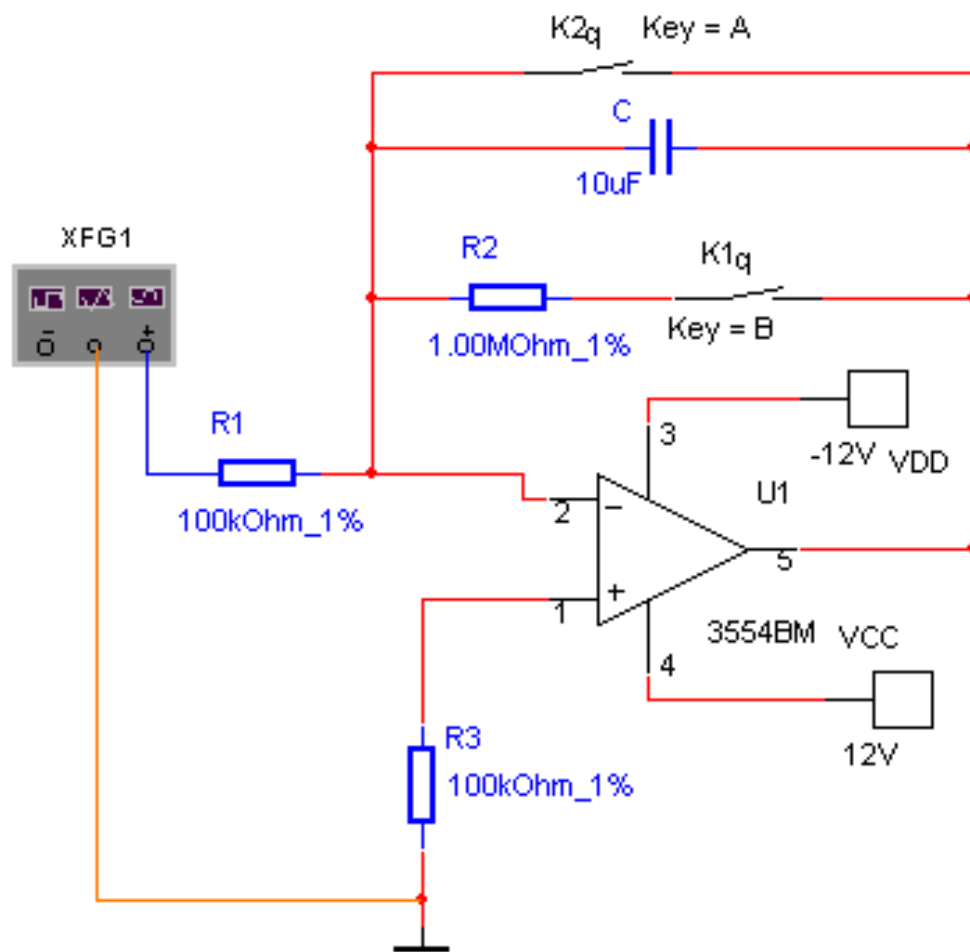
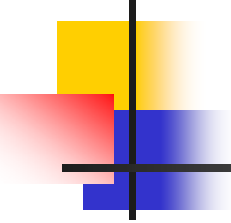


图3.3 习题3.4图

- 
- 
- 3.5 在 Multisim仿真平台上建立一个微分运算电路如图3.4所示，用示波器测出输入、输出信号波形。改变电容的大小，观察输入、输出波形的变化。

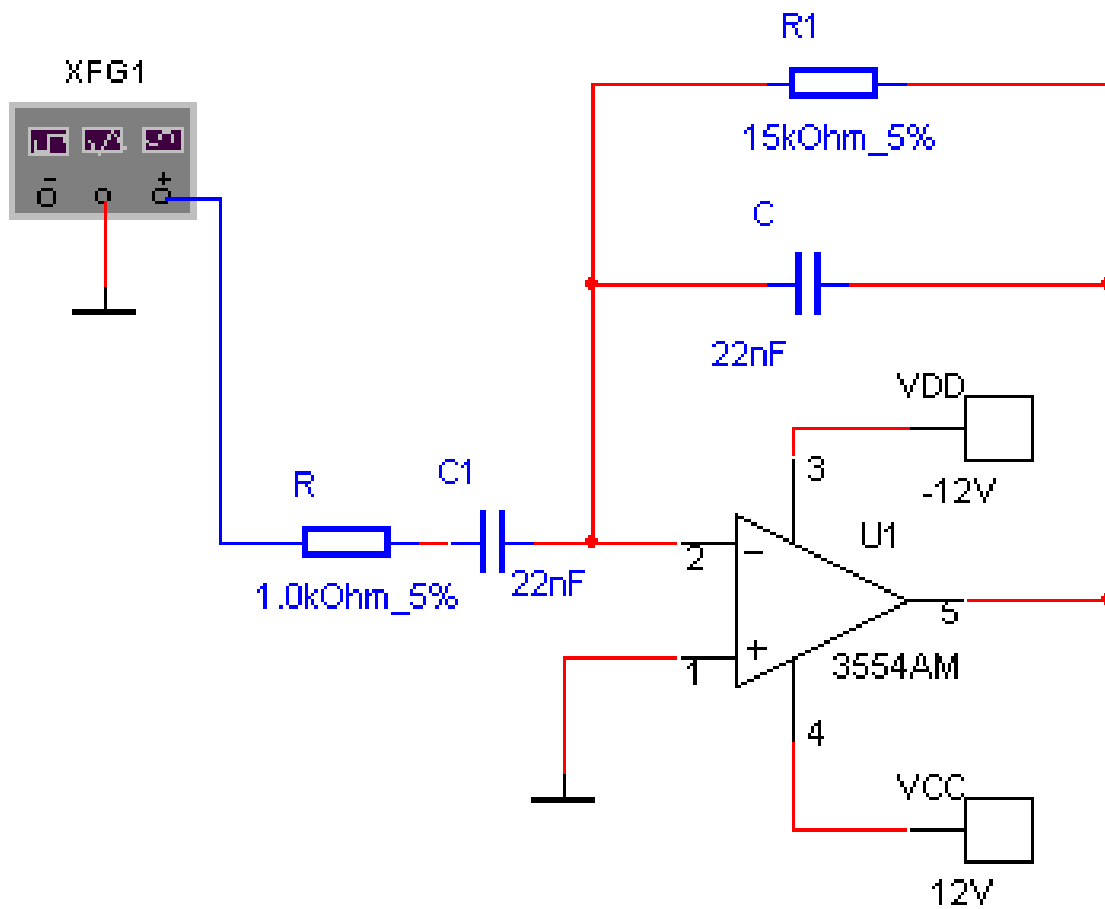
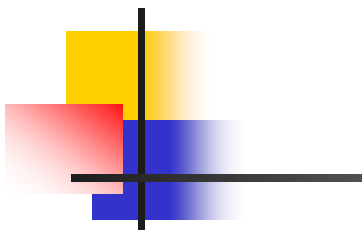
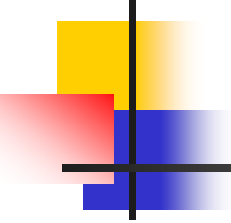
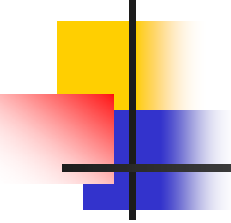


图3.4 习题3.5图

- 
- 
- **3.6** 在 Multisim 仿真平台上设计一个有源低通滤波器，要求 1KHZ 以下的频率能通过，试用波特图仪测出电路的幅频特性。
  - **3.7** 在 Multisim 仿真平台上设计一个有源高通滤波器，要求 1KHZ 以上的频率能通过，试用波特图仪测出电路的幅频特性。



- 
- 
- **3.8** 在 Multisim 仿真平台上设计一个二阶有源低通滤波器电路，要求 1KHZ 以下的频率能通过，试用波特图仪测出电路的幅频特性。
  - **3.9** 在 Multisim 仿真平台上建立一个带通滤波器如图 3.5 所示，试用波特图仪测出电路所通过的频率范围。

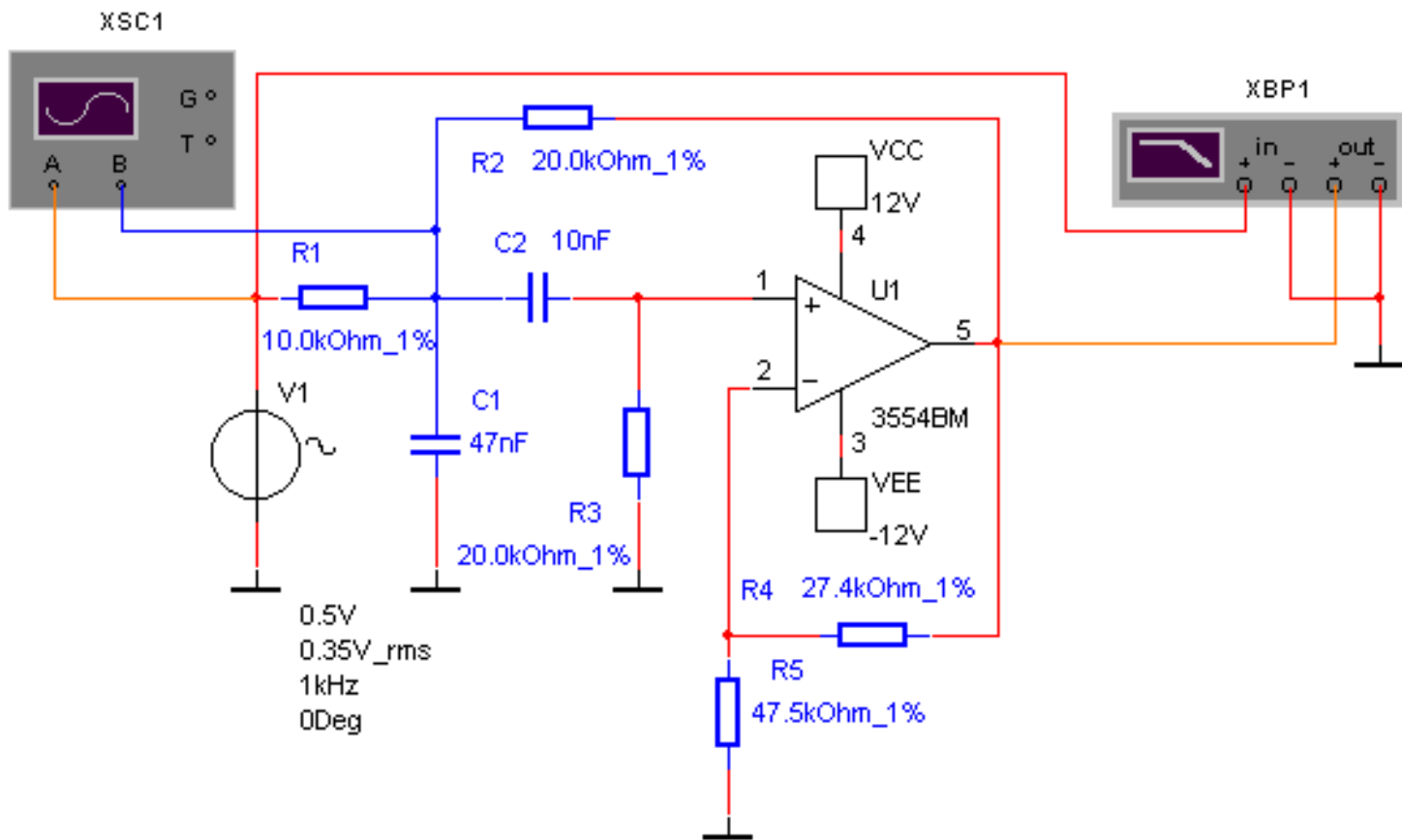
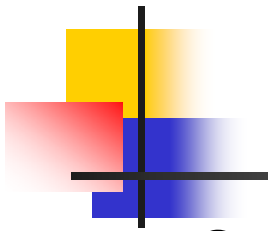


图3.5 习题3.9图

- 
- **3.9** 在 Multisim 仿真平台上建立一个双T带阻滤波器电路，试用波特图仪测出电路所通过的频率范围。
  - **3.10** 设计一个过零比较器，输入信号最大值为5V的正弦交流电，选择稳压值为3V的双向稳压管。用示波器观察输入、输出波形，并将观察到的波形画在同一坐标纸上。
  - **3.11** 在 Multisim 仿真平台上建立一个反相滞回比较器如图3.6所示。试用示波器测出门限电平 $U_{T+}$ 、 $U_{T-}$ 及回差电压 $\Delta U_T$ 。

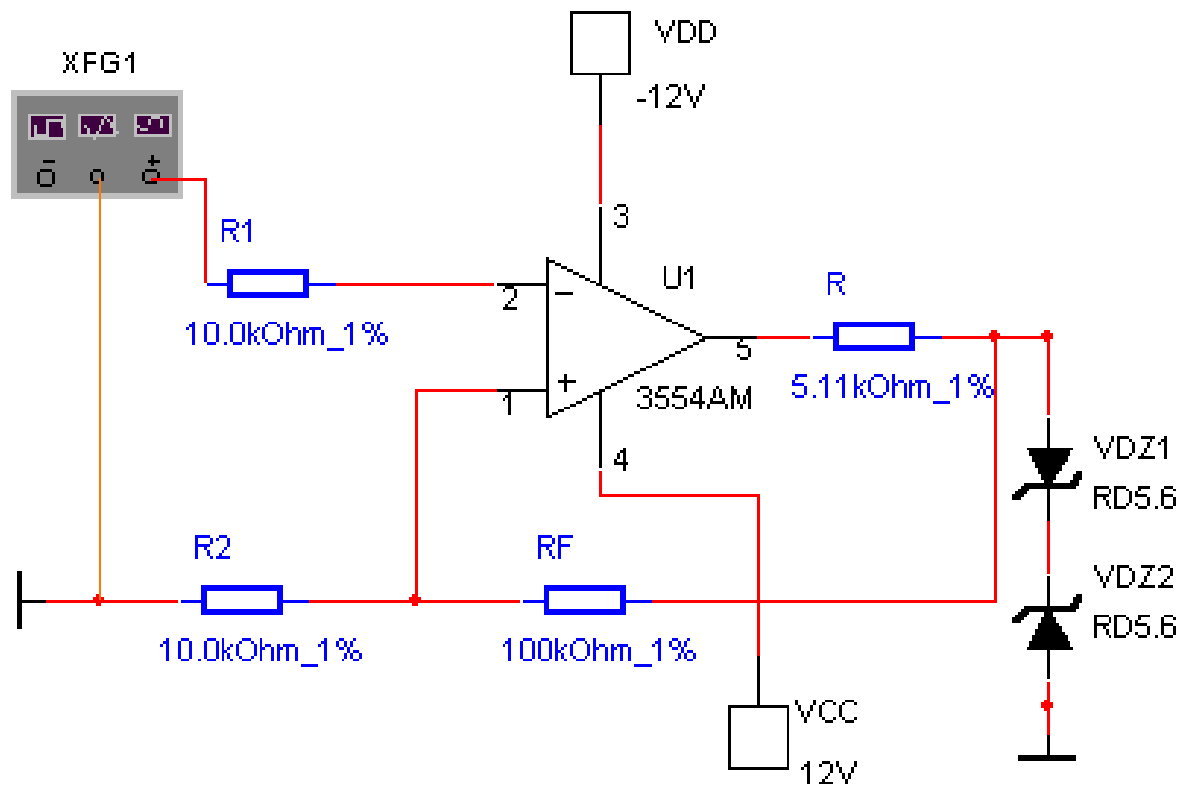
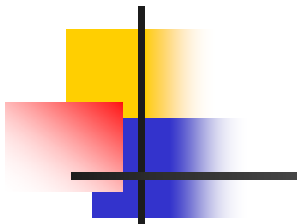
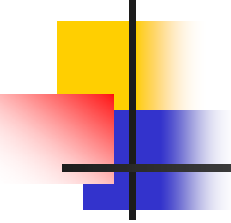


图3.6 习题3.11图

- 
- 
- **3.12** 在 Multisim 仿真平台上设计一个同相滞回比较器。试用示波器测出门限电平  $U_{T+}$ 、 $U_{T-}$  及回差电压  $\Delta U_T$ 。
  - **3.13** 在 Multisim 仿真平台上建立一个温度补偿对数器的电路，如图 3.7 所示。

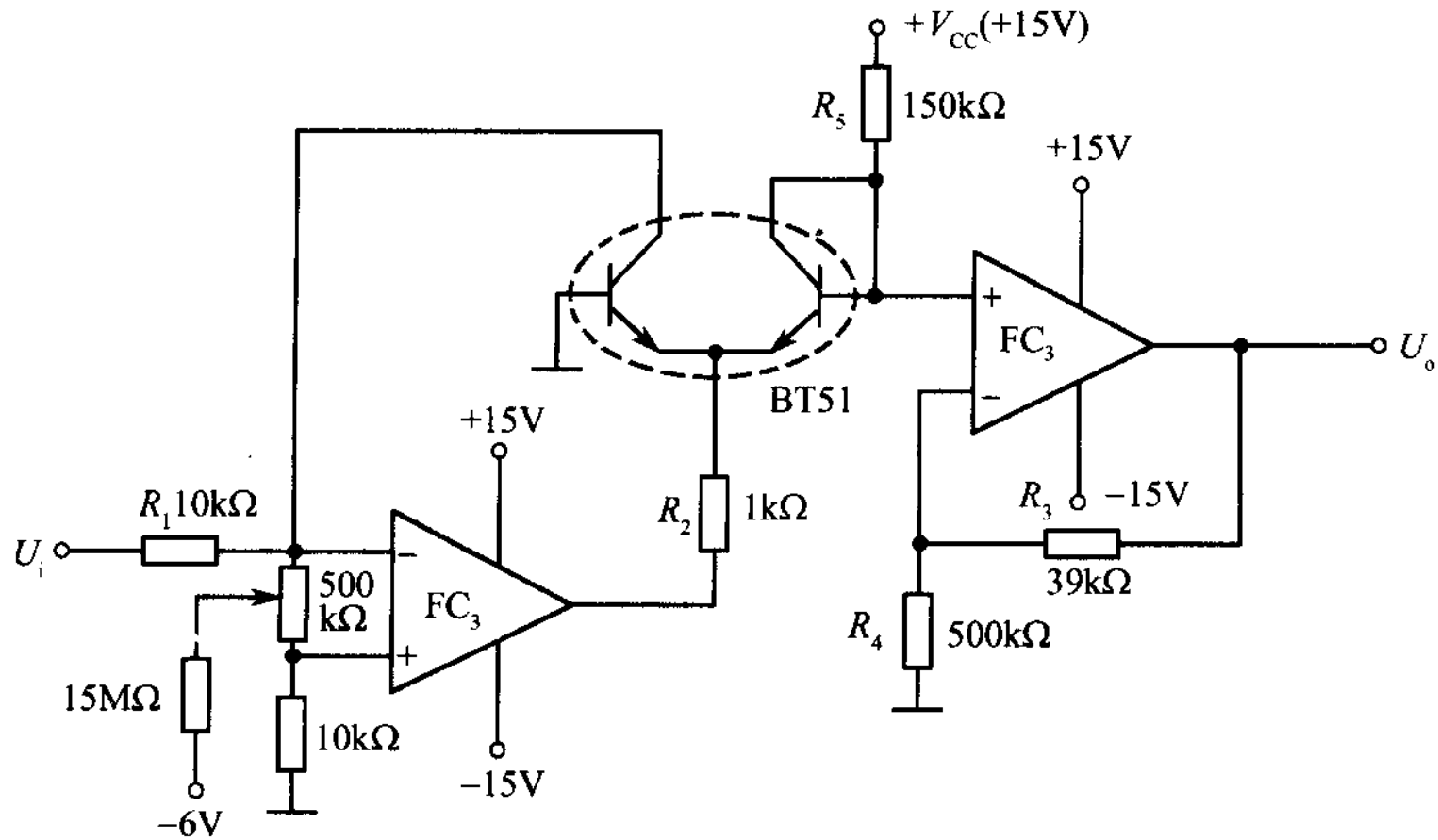
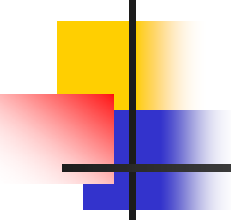


图3.7 习题3.13图

- 
- 
- 3.14 在 Multisim仿真平台上建立一个温度补偿指数器的电路，如图3.8所示。

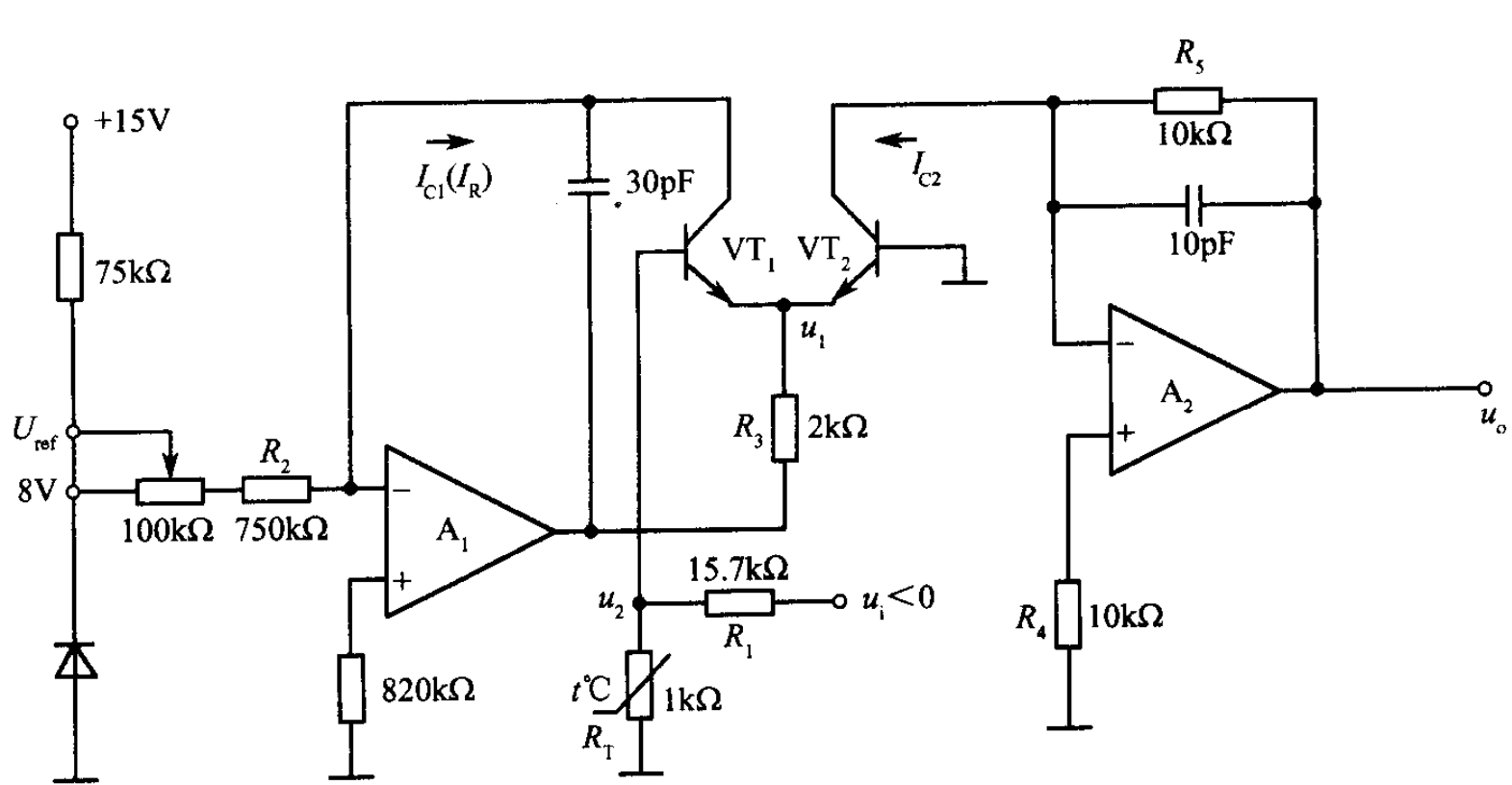


图3.8 习题3.14图





---

## 第四章 波形发生器电路



## 内容提要

---

- 信号发生器可以分为正弦波发生器和非正弦波发生器。本章介绍了RC正弦波振荡器电路，LC振荡器电路，方波和三角波发生电路，锯齿波产生电路的电路结构与计算机仿真设计方法。
- 本章的重点是掌握信号发生器电路的仿真设计与分析方法。注意正弦波发生器和非正弦波发生器电路结构与工作原理的不同，注意振荡频率的计算方法，注意计算值与仿真结果的差别。



---

## 4.1 RC正弦波振荡器



## 4.1.1 RC正弦波振荡器工作原理

---

- 从结构上看，正弦波振荡器是没有输入信号的带选频网络的正反馈放大器。若用R、C元件组成选频网络，就称为RC振荡器，一般用来产生1Hz~1MHz的低频信号。
- **1. RC移相振荡器**
- 电路型式如图4.1.1所示,选择 $R \gg R_i$ 。

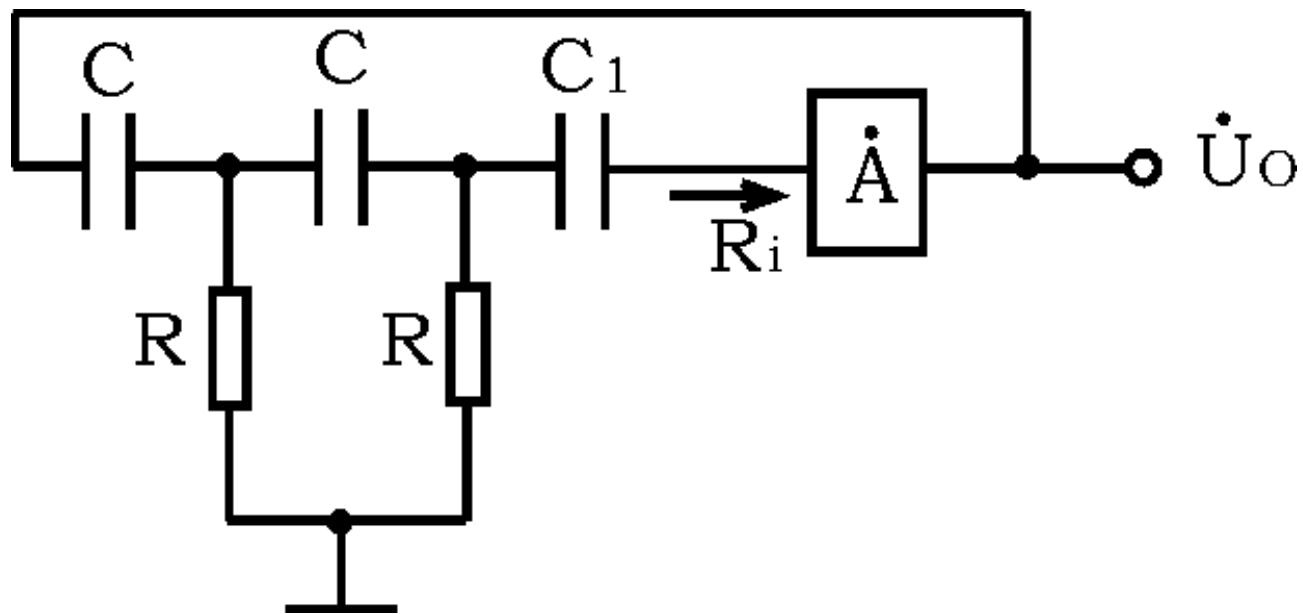


图4.1.1 RC移相振荡器原理图



振荡频率:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{6RC}}$$

- 起振条件:放大器A的电压放大倍数  $|A| > 29$
- 电路特点:简便, 但选频作用差, 振幅不稳, 频率调节不便, 一般用于频率固定且稳定性要求不高的场合。
- 频率范围:几赫~数十千赫。



---

- **2. RC串并联网络（文氏桥）振荡器**

- 电路型式如图4.1.2所示。

- 振荡频率： 起振条件： $|A| > 3$

- 电路特点：可方便地连续改变振荡频率，便于加负反馈稳幅，容易得到良好的振荡波形。

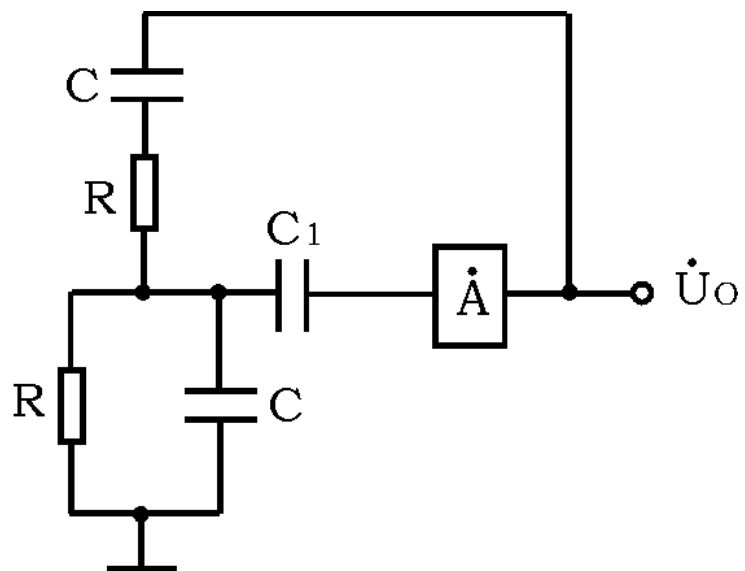


图4.1.2 RC串并联网络振荡器原理图



- 3. 双T选频网络振荡器
- 电路型式如图4.1.3所示。

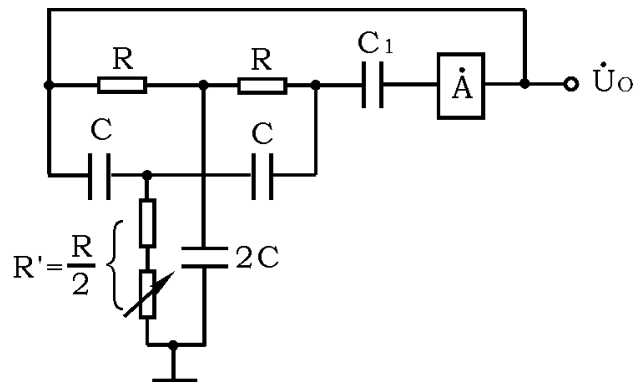
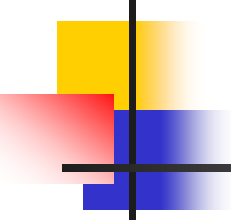


图4.1.3 双T选频网络原理图

- 
- 
- 振荡频率:

$$f_0 = \frac{1}{5RC}$$

- 起振条件:  $R' < \frac{R}{2}$   $|AF| > 1$

- 电路特点: 选频特性好, 调频困难, 适于产生单一频率的振荡。



## 4.1.2 双T选频网络正弦波振荡器

---

- 采用两级共射极分立元件放大器组成双T选频网络正弦波振荡器如图4.1.4所示。

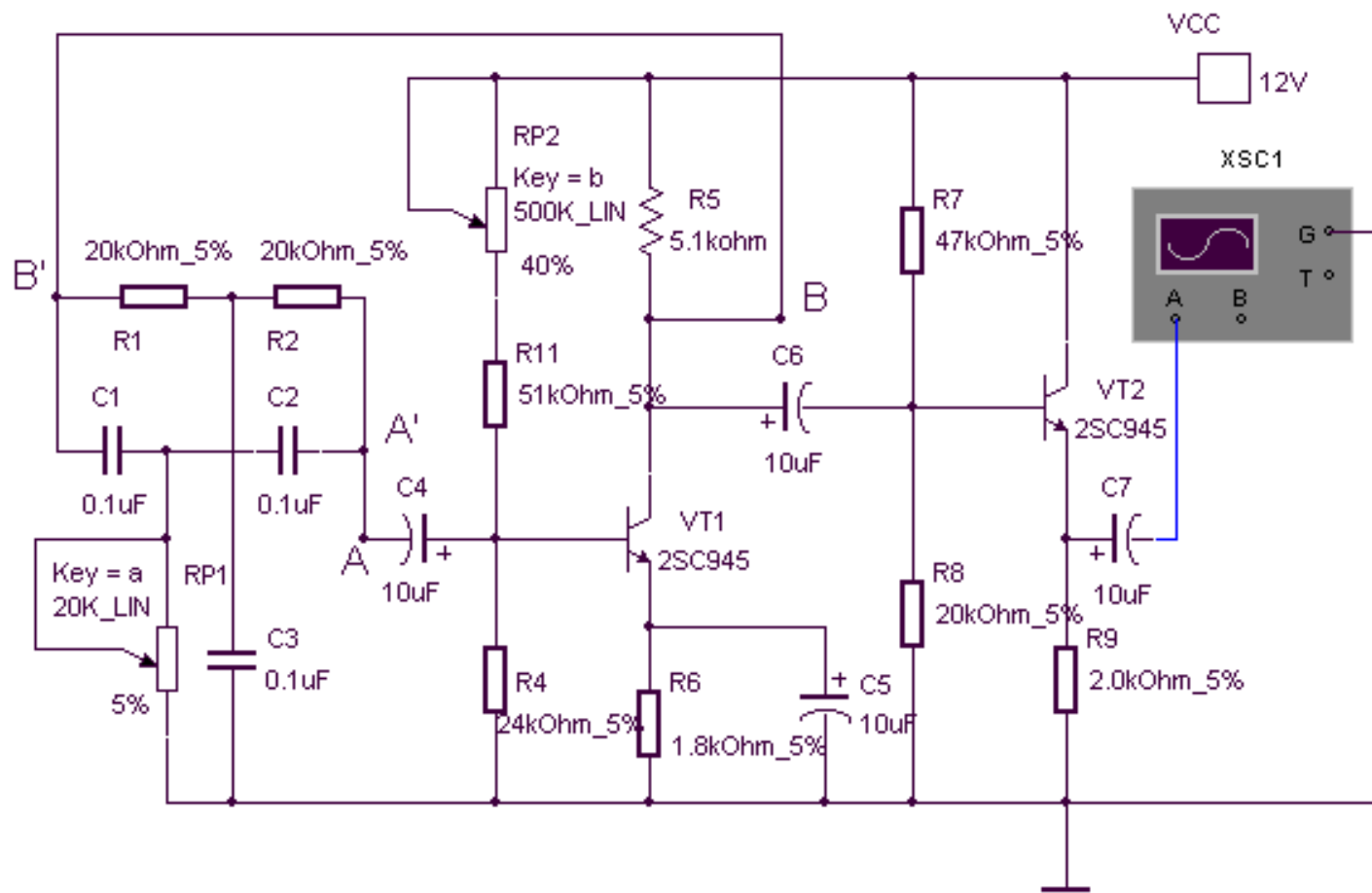
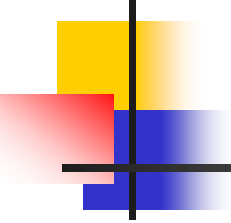


图4.1.4 双T选频网络正弦波振荡器原理图

- 
- 
- 在调试电路时应适当调节 $RP_1$ ( $RP_1$ )和 $RP_2$ ( $RP_2$ ),否则振荡器不起振。仿真结果如图4.1.5所示。

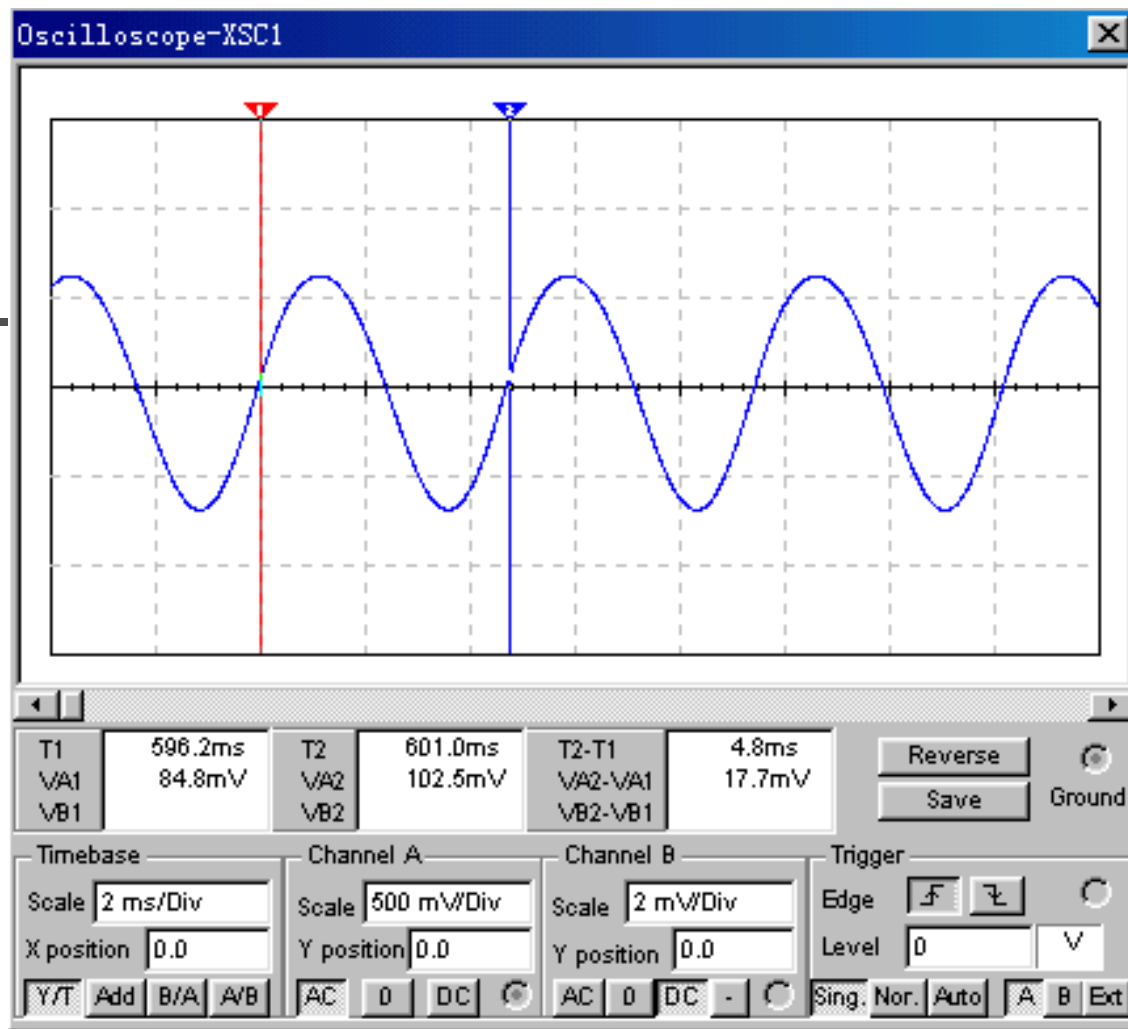


图4.1.5 双T选频网络正弦波振荡器振荡波形



---

## 4.2 运算放大器组成的RC正弦波振荡器

## 4.2.1 RC串并联网络（文氏桥）振荡器原理

- 电路型式如图4.2.1所示。

- 振荡频率：
$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

- 起振条件： $|A| > 3$

- 电路特点：可方便地连续改变振荡频率，便于加负反馈稳幅，容易得到良好的振荡波形。

- 电路特点：可方便地连续改变振荡频率，便于加负反馈稳幅，容易得到良好的振荡波形。



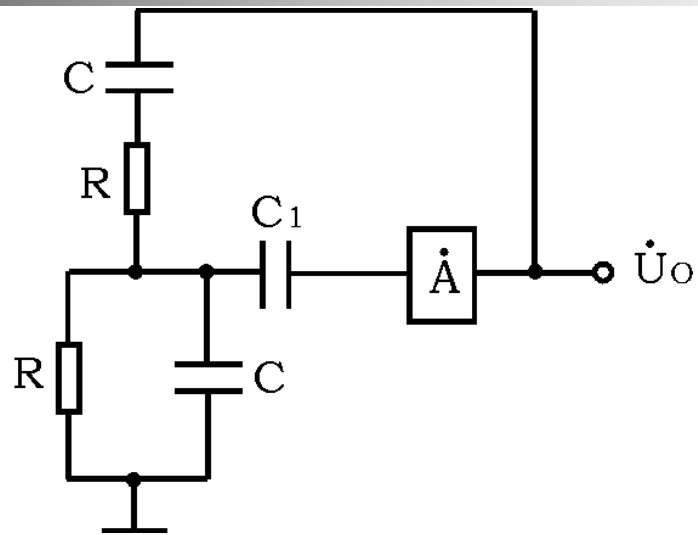
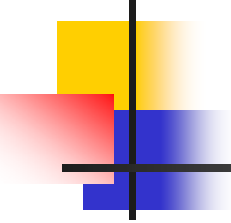


图4.2.1 RC串并联网络振荡器原理图

## 4.2.2 运算放大器组成的RC桥式 正弦波振荡器

- 图4.2.2为R--C桥式正弦波振荡器。其中RC串、并联电路构成正反馈支路，同时兼作选频网络， $R_1(R_1)$ 、 $R_2(R_2)$ 、 $R_P$ 及二极管等元件构成负反馈和稳幅环节。调节电位器 $R_P$ ，可以改变负反馈深度，以满足振荡的振幅条件和改善波形。利用两个反向并联二极管 $VD_1(VD_1)$ 、

- 
- 
- VD2(VD2)正向电阻的非线性特性来实现稳幅。  
VD1、VD2采用硅管（温度稳定性好），且要求特性匹配，才能保证输出波形正、负半周对称。  
R3的接入是为了削弱二极管非线性的影响，以
  - 改善波形失真。

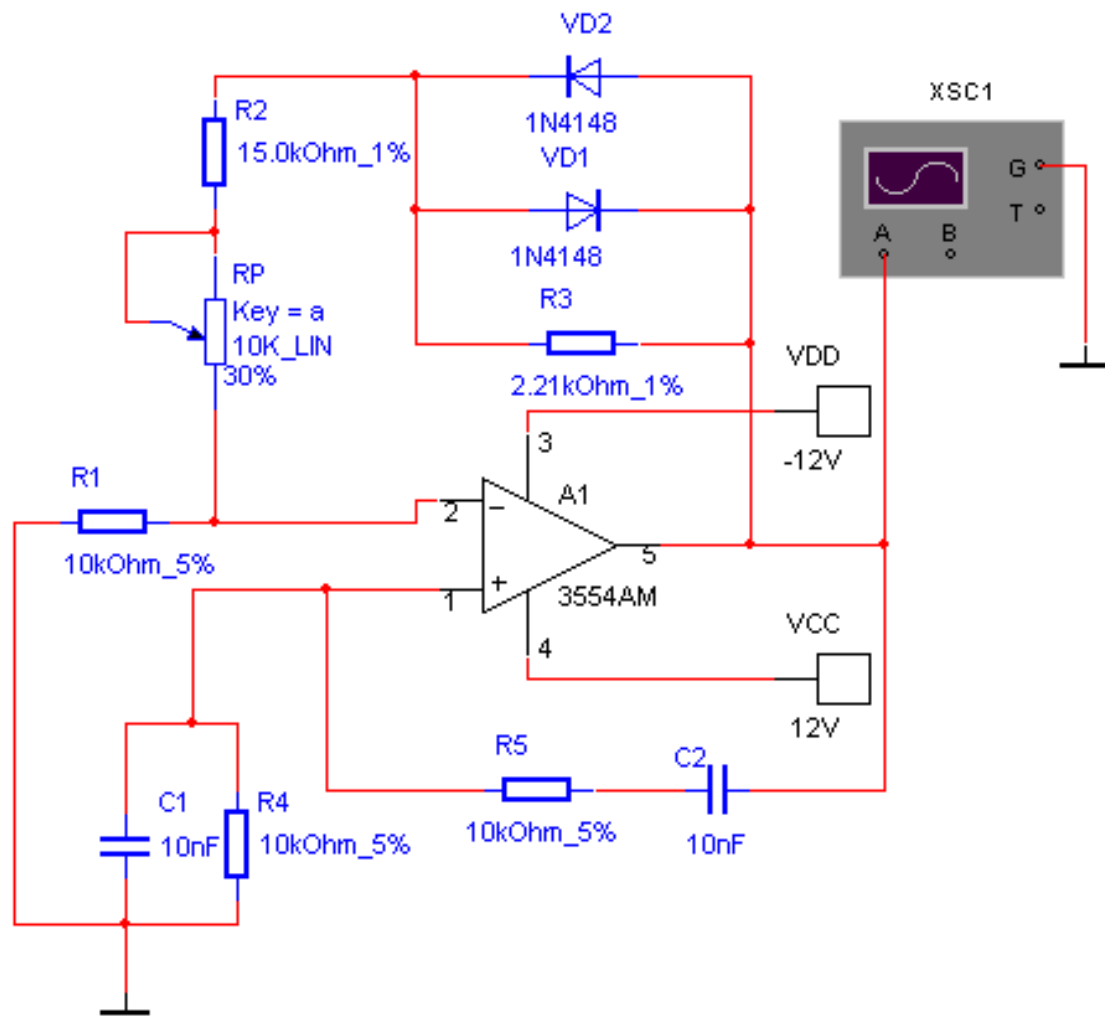


图4.2.2 运算放大器组成的RC桥式正弦波振荡器

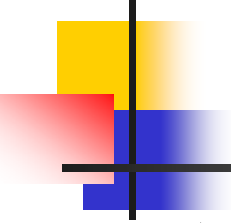
- 
- 电路的振荡频率:

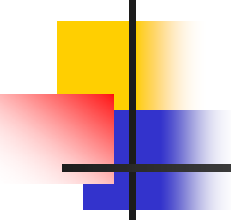
$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

- 式中  $R=R_4=R_5$   $C=C_1=C_2$
- 起振的幅值条件:

$$\frac{R_f}{R_1} \geq 2$$

- 式中  $R_f = R_P + R_2 + (R_3 // r_D)$  ,  $r_D$  — 二极管正向导通电阻。

- 
- 调整反馈电阻 $R_f$ （调RP），使电路起振，且波形失真最小。如不能起振，则说明负反馈太强，应适当加大 $R_f$ 。如波形失真严重，则应适当减小 $R_f$ 。
  - 改变选频网络的参数C或 R，即可调节振荡频率。一般采用改变电容C作频率量程切换，而调节R作量程内的频率细调。

- 
- 点击示波器，可以看见RC桥式正弦波振荡器的输出波形如图4.2.2所示，从开始仿真到起振可以通过示波器观察到起振全过程。即首先把示波器面板中的V/Div钮调到较小位置，然后随着输出电压的增大逐渐将V/Div钮调到合适位置。

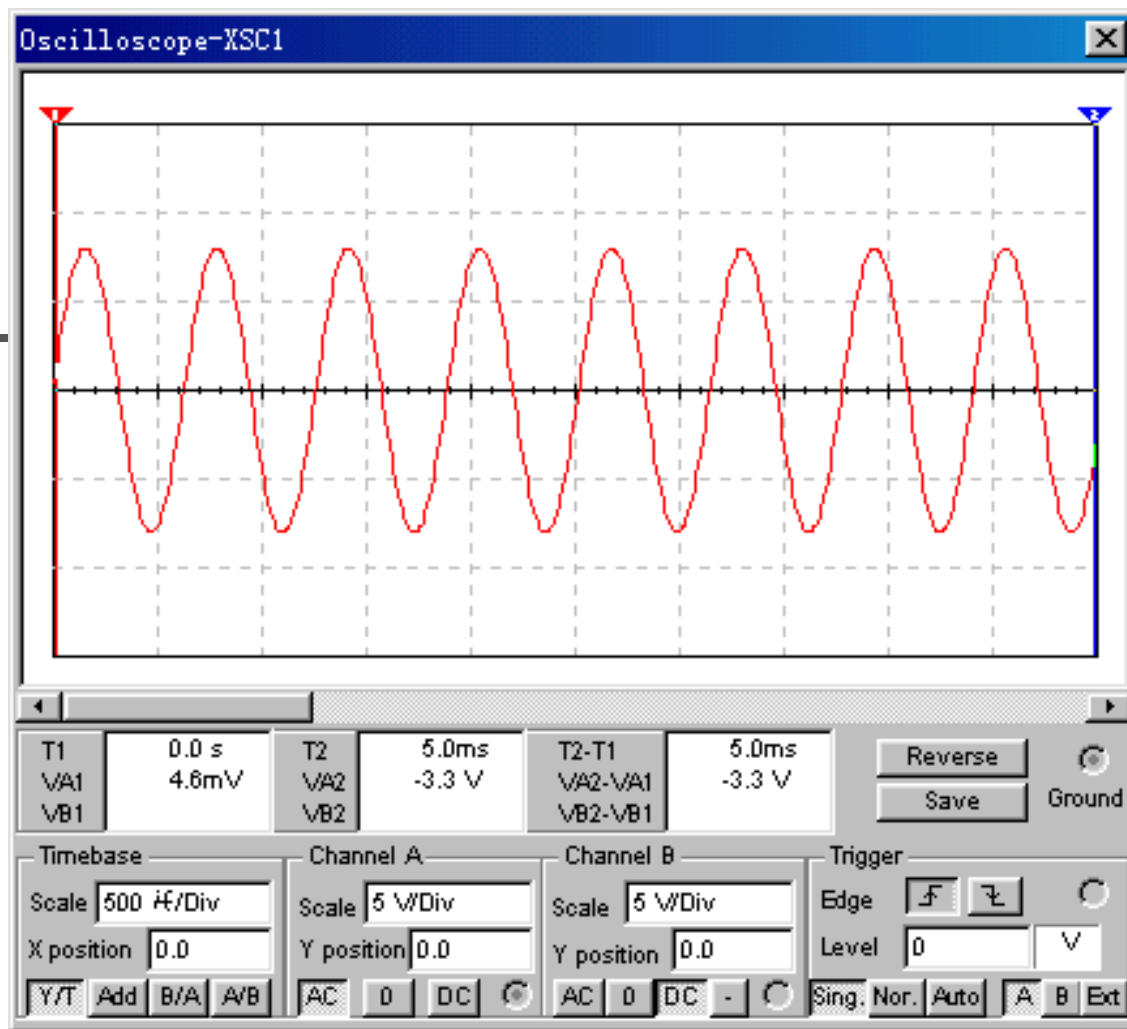


图4.2.2 RC桥式正弦波振荡器的输出波形





---

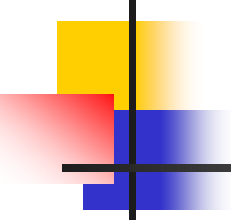
## 4.3 LC振荡电路

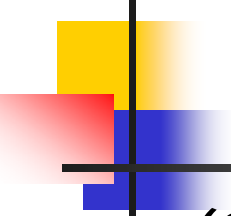


## 4.3.1 LC振荡电路原理

---

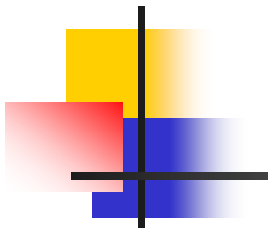
- 振荡器是一种将直流电源的能量变换为一定波形的交变振荡能量的电路。LC振荡器振荡应满足两个条件：
  - (1) 相位平衡条件：反馈信号与输入信号同相，保证电路正反馈。在电路中表现为，集电极—发射极之间和基极—发射极之间回路元件的电抗性质是相同的，

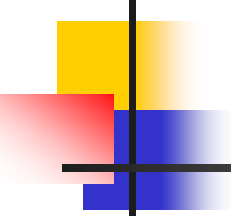
- 
- 
- 集电极—基极之间回路元件的电抗性质是相反的。在本电路中，集电极—基极间的电抗应呈现电感性。而集电极—发射极之间和基极—发射极之间的电抗应呈现电容性。

- 
- (2) 振幅平衡条件：反馈信号的振幅应该大于或等于输入信号的振幅，即

$$\left| \dot{A} \dot{F} \right| \geq 1$$

- 式中为放大倍数，为反馈系数。
- 振荡器接通电源后，由于电路中存在某种扰动，这些微小的扰动信号，通过电路放大及

- 
- 正反馈使振荡幅度不断增大。当增大到一定程度时，导致晶体管进入非线性区域，产生自给偏压，引起晶体管的放大倍数减小；最后达到平衡，即 $AF=1$ 。振荡幅度就不再增大了。
  - 振荡器有一个LC并联谐振回路，由于其选频作用，所以使振荡器只有在某一频率时才

- 
- 
- 能满足振荡条件，于是得到单一频率的振荡信号，这个振荡器就是正弦波振荡器。

## 4.3.2 电容反馈三点式振荡器

- 图4.3.1 所示电路为电容反馈三点式振荡器。

电路在设计时要注意电路中的参数设置，特别是电位器RP1(RP1)和RP2(RP2)要调节合适，否则电路将不起振。其振荡波形如图4.3.2所示。

振荡频率为：

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{C_4 C_5}{C_4 + C_5}}}$$

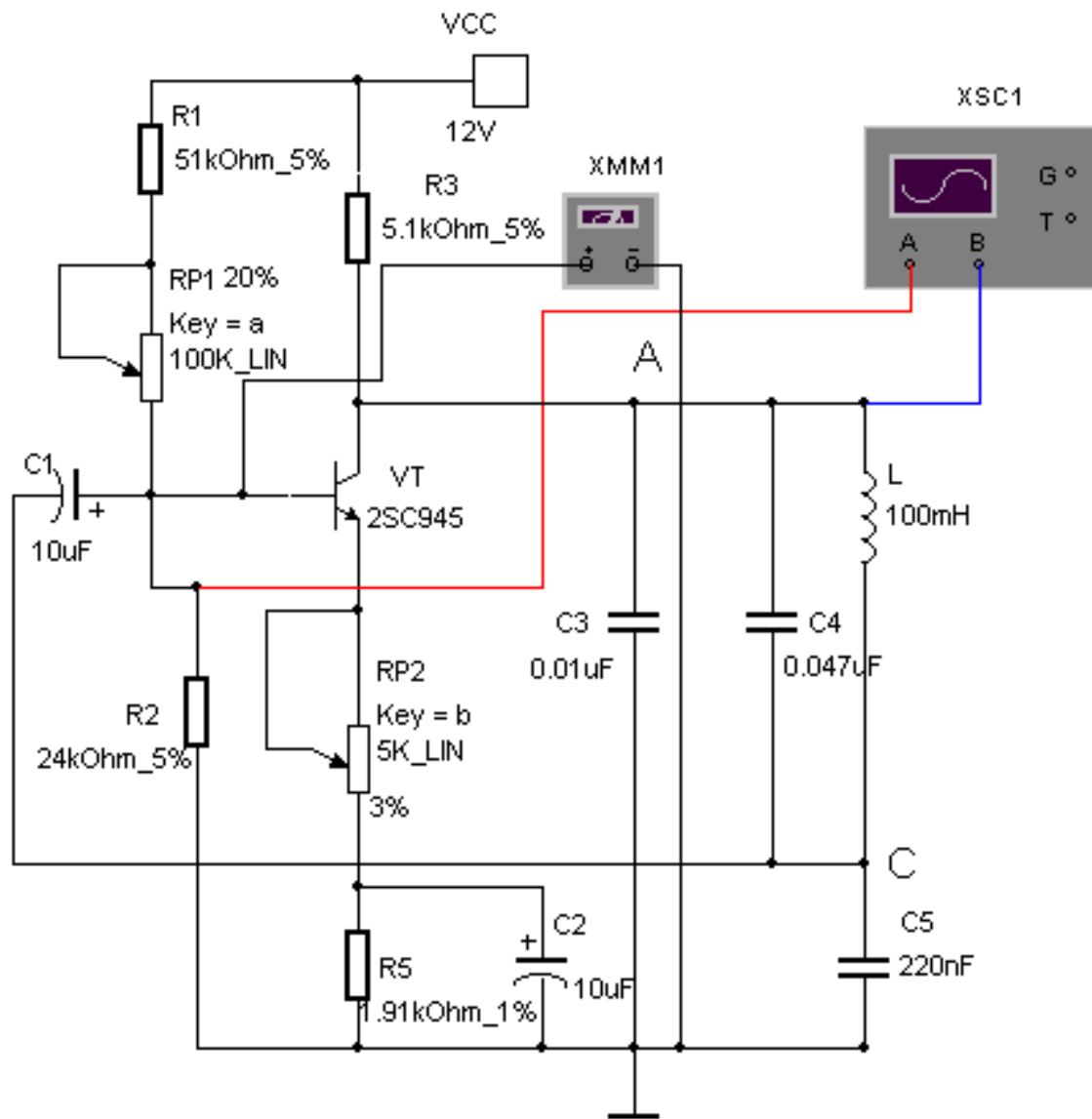


图4.3.1 电容反馈三点式振荡器。



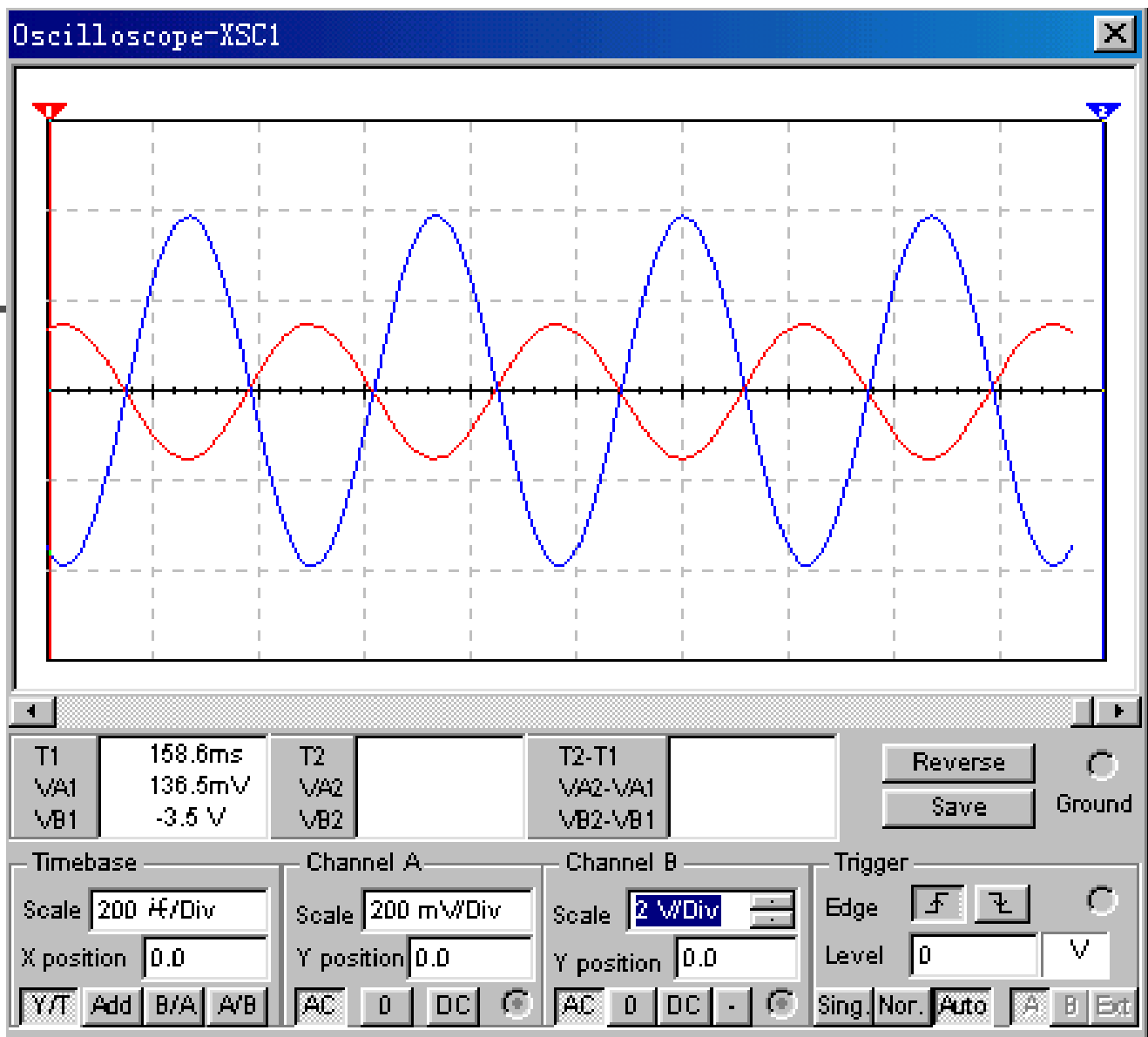


图4.3.2 电容三点式局部放大波形

### 4.3.3 电感反馈三点式振荡器

- 图4.3.3为电感反馈三点式振荡电路。从图4.3.4仿真结果可测出其振荡频率为1MHZ，输出电压的幅值为14.2V。其振荡频率为：

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2 + 2M)C_2}}$$

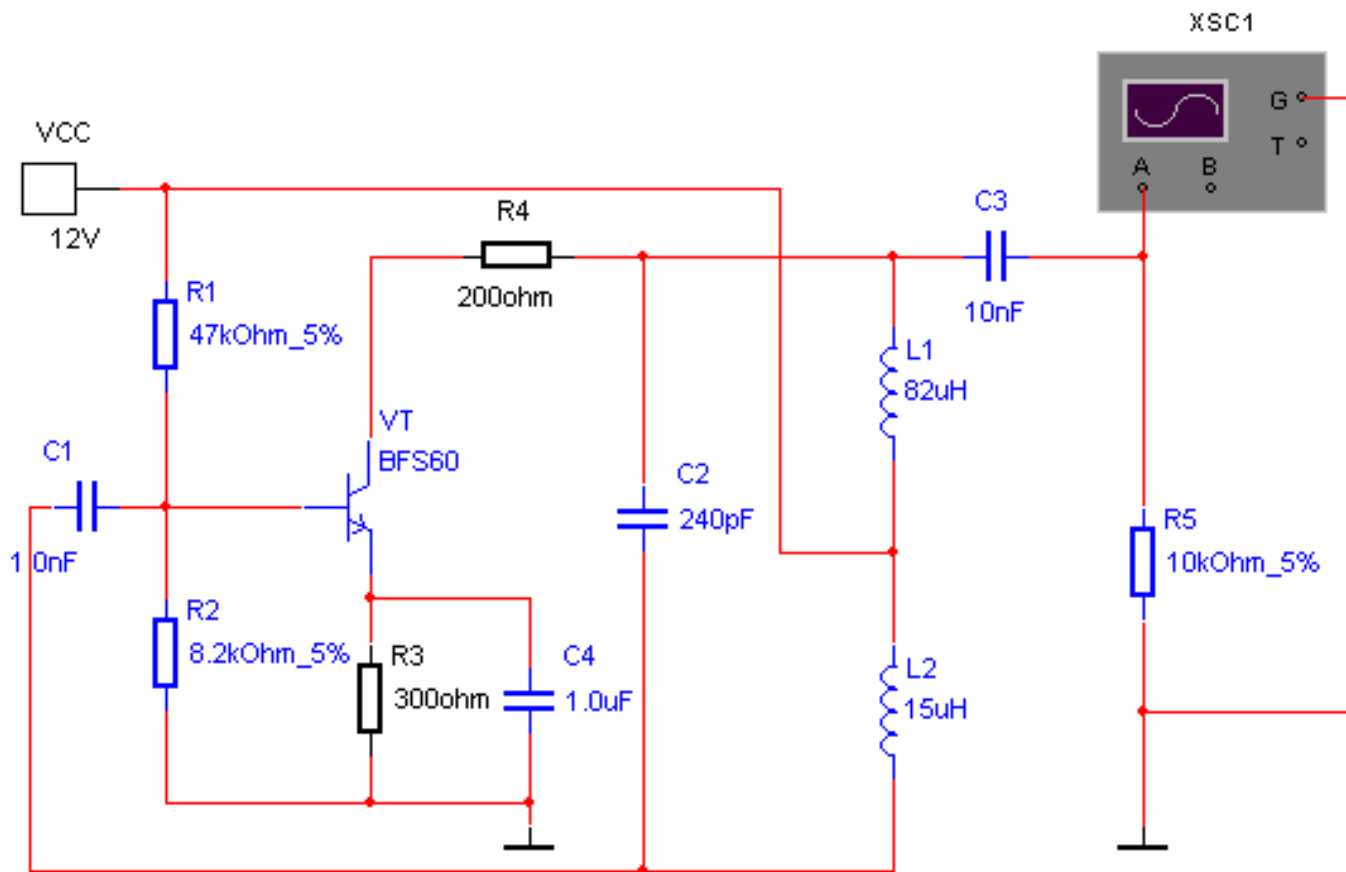
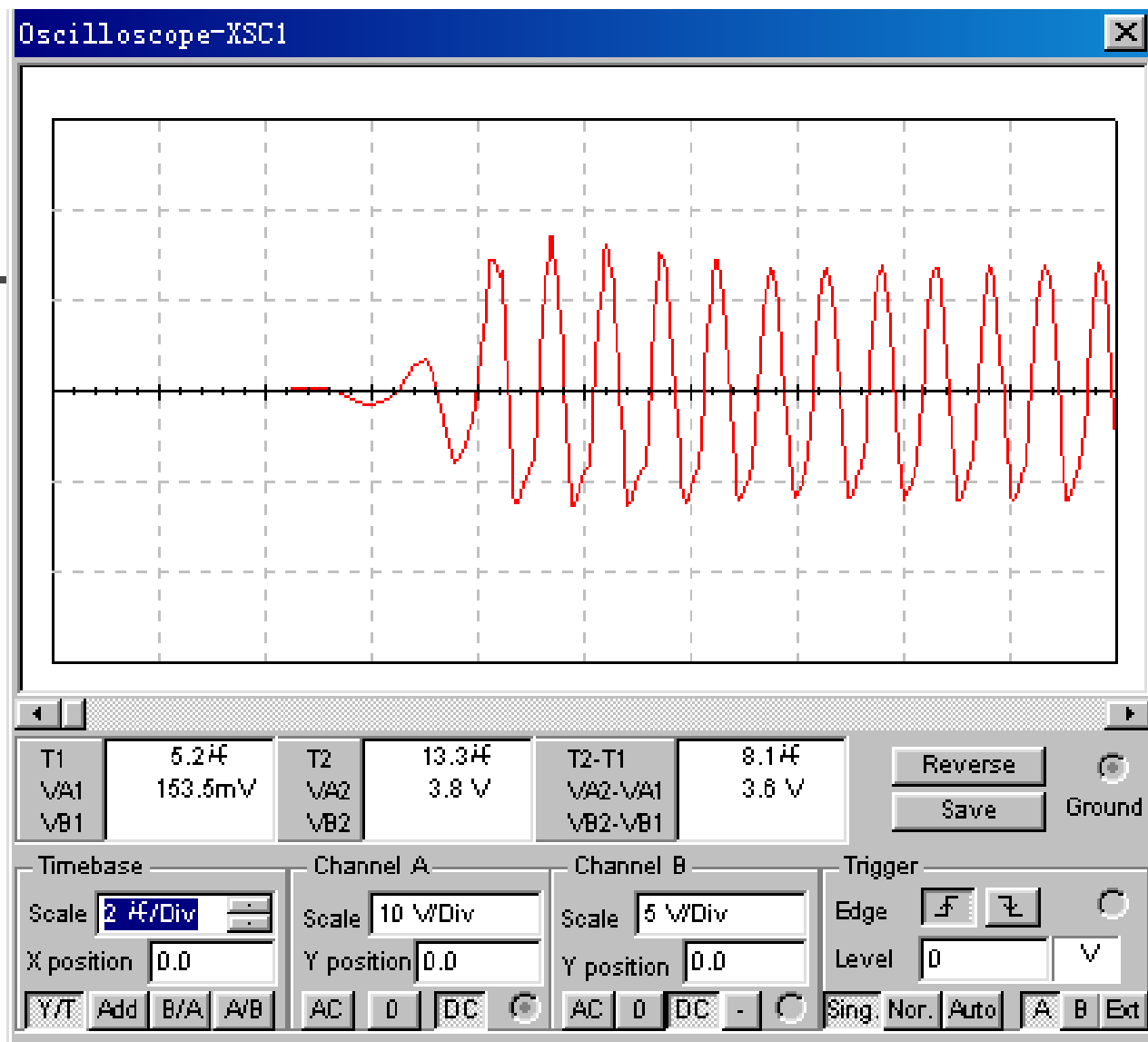
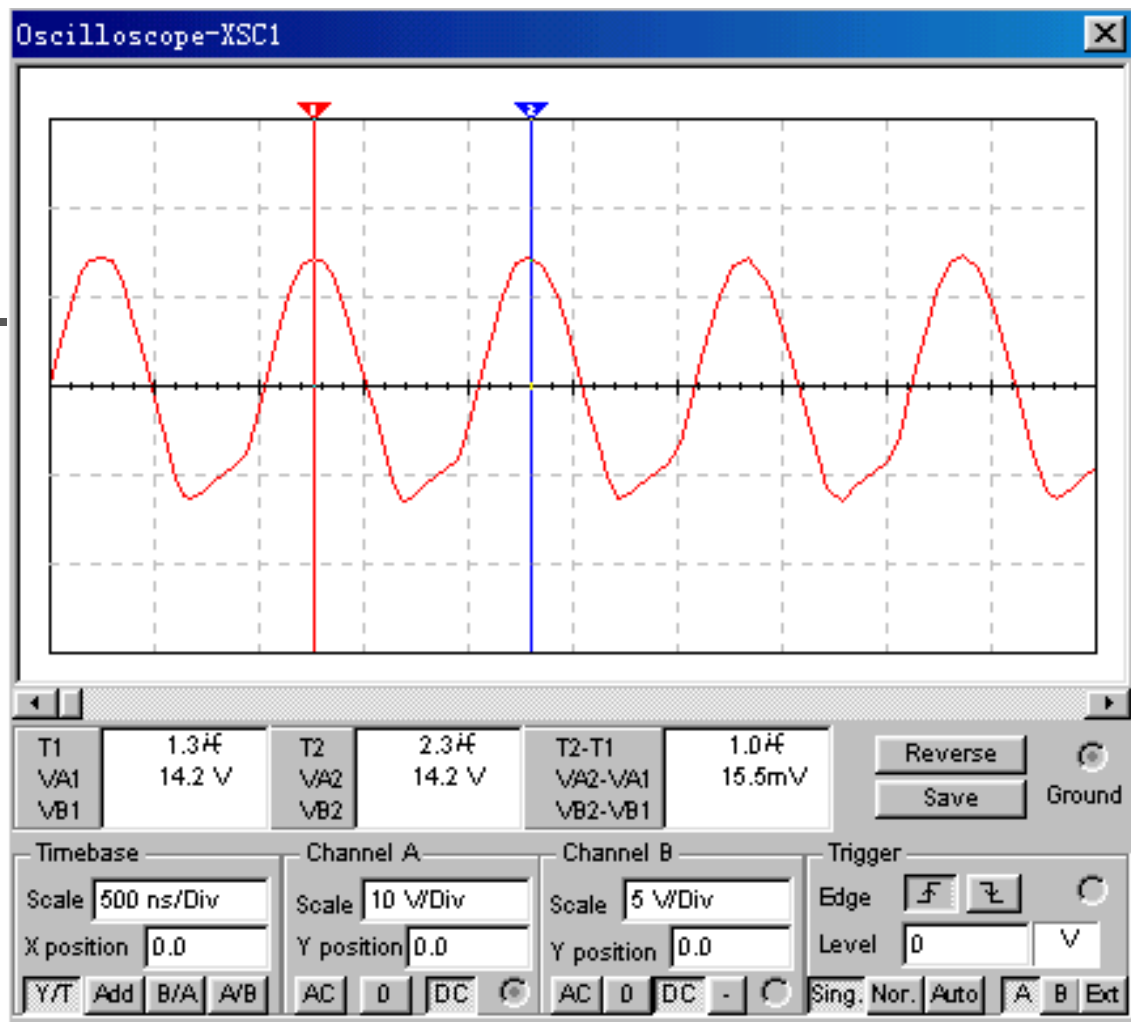


图4.3.3 电感反馈三点式振荡电路



(a) 起振过程



(b) 局部放大波形

图4.3.4 电感三点式振荡电路仿真结果

## 4.3.4 克拉波振荡电路

■ 图4.3.5为克拉波振荡电路。从图4.3.6(a)能观察到起振过程，注意在观察起振过程时首先点击示波器sing，然后再点击仿真开关。在图4.3.6(b)中测出其振荡周期为62nS，输出电压的幅值为3.3V。其振荡频率的计算公式为：

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_3}} \quad C1 \gg C3 \quad C2 \gg C3$$

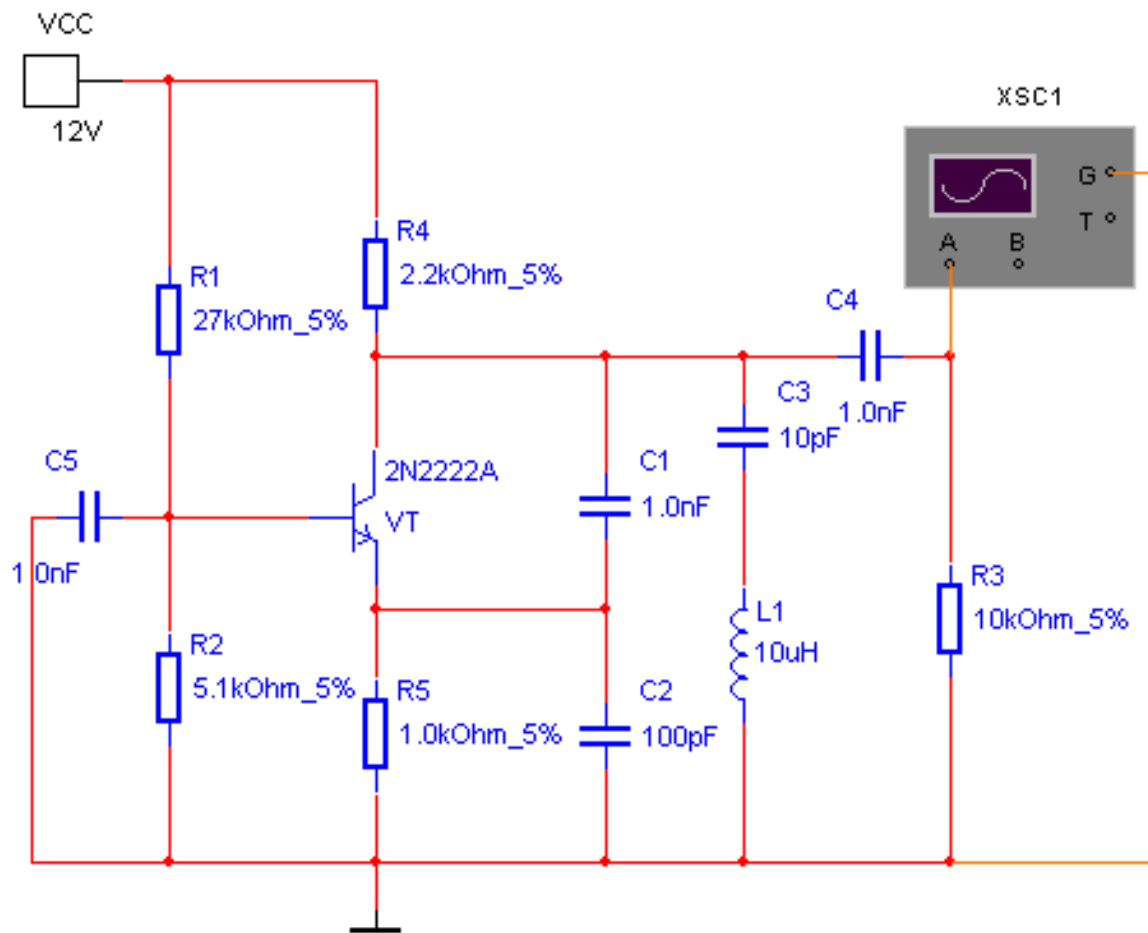
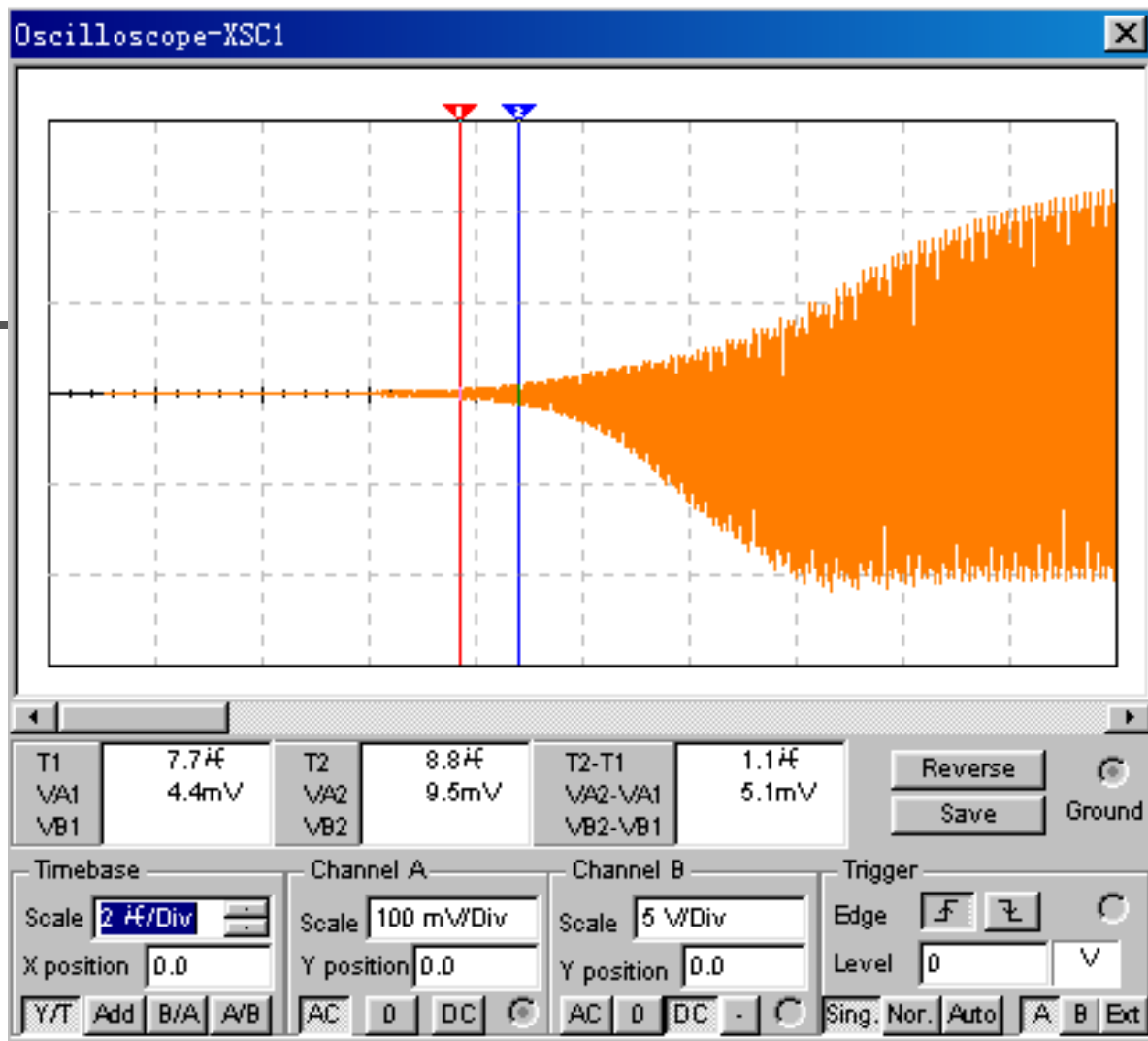
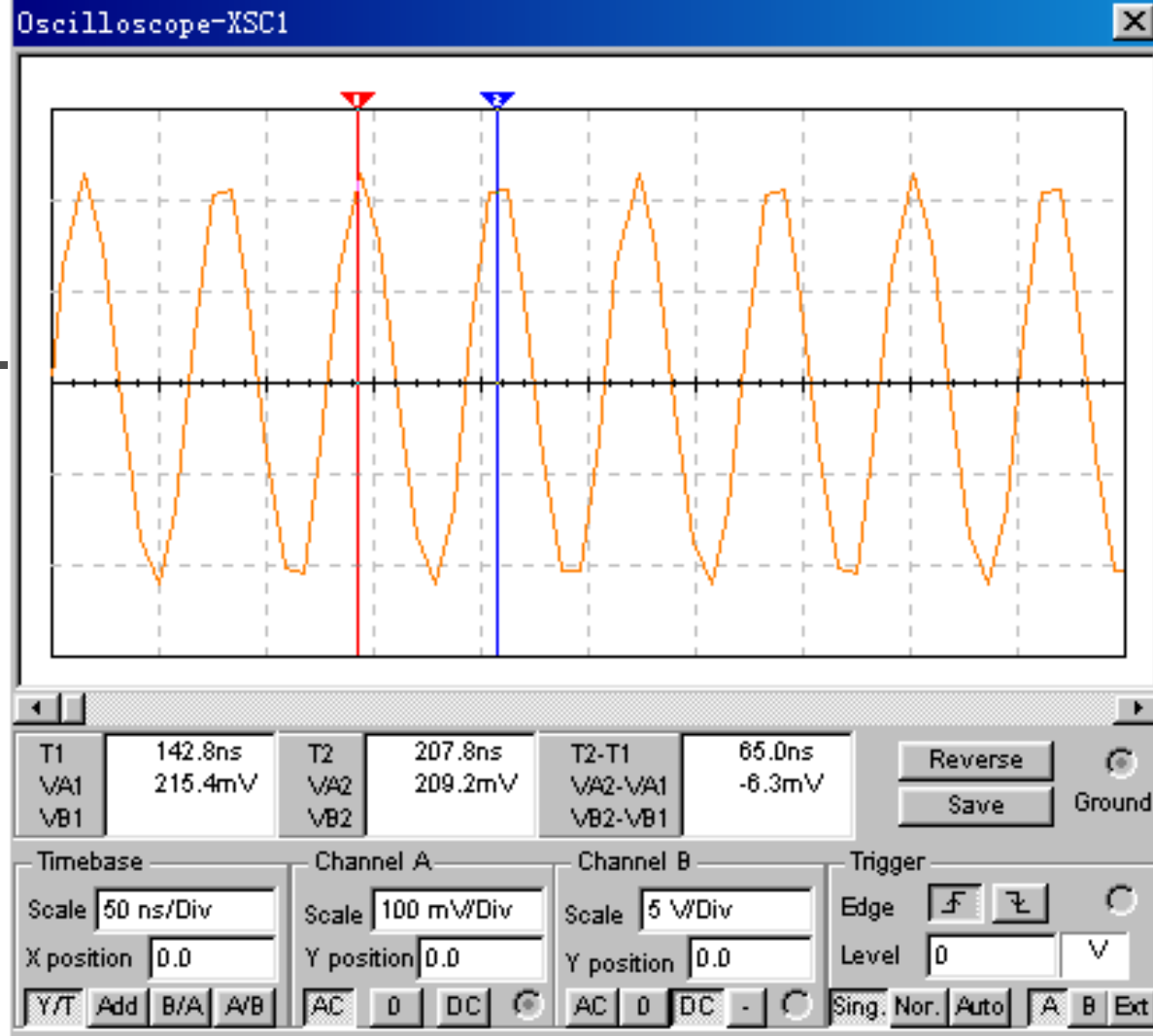


图4.3.5克拉波振荡电路



图(a) 起振过程





图(b) 局部放大波形

图4.3.6克拉波振荡电路仿真结果

## 4.3.5 西勒振荡电路

- 图4.3.7为西勒振荡电路。从图4.3.8(a)能观察到起振过程，注意在观察起振过程时首先点击示波器sing，然后再点击仿真开关。在图4.3.8(b)中测出其振荡周期为62nS，输出电压的幅值为3.3V。其振荡频率的计算公式为：

- $$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_2 + C_6)}} \quad C5 \gg C2 \quad C1 \gg C2$$

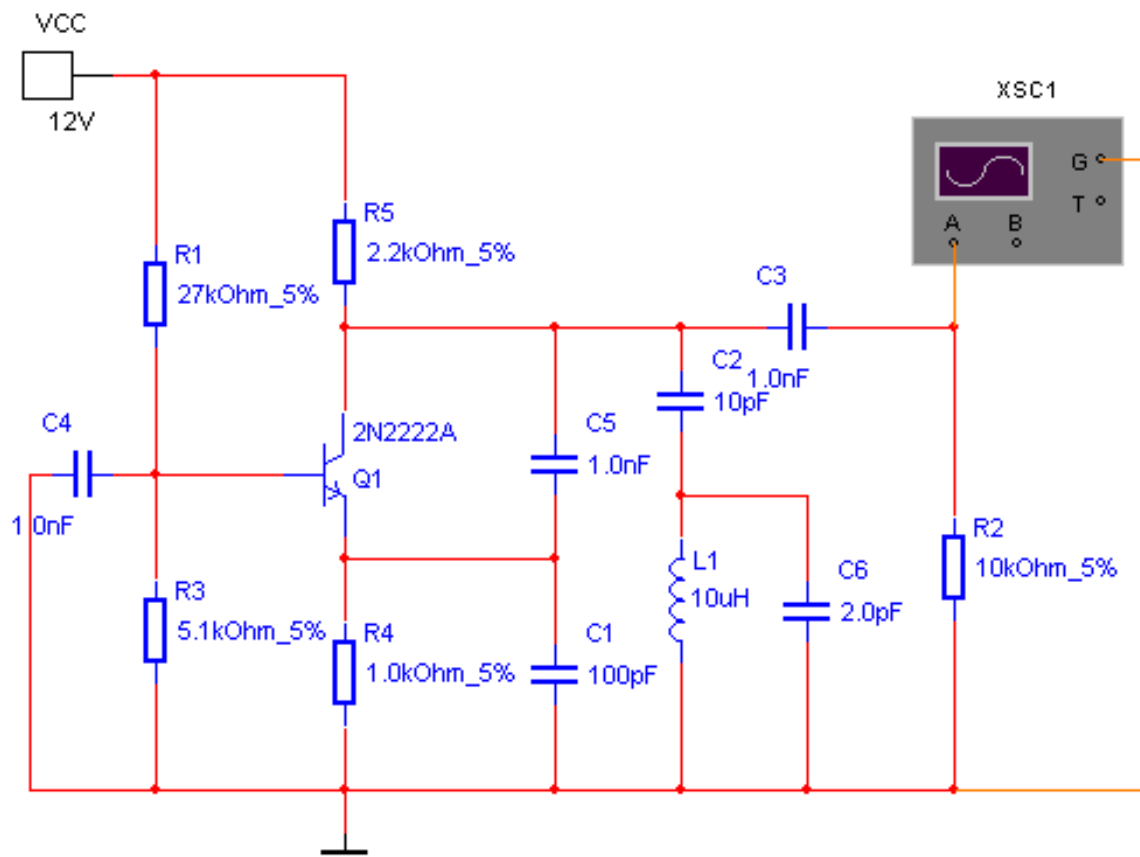
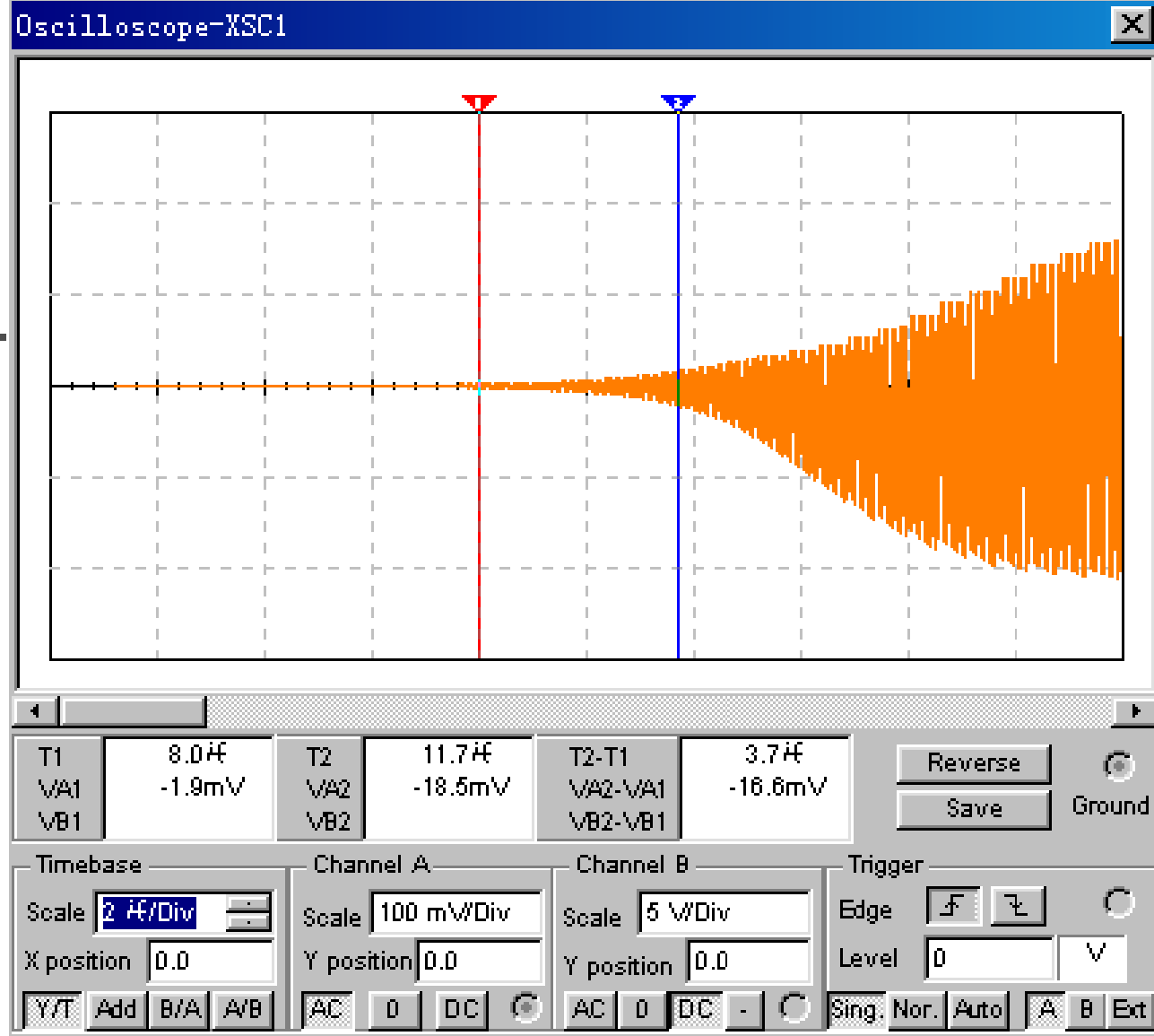
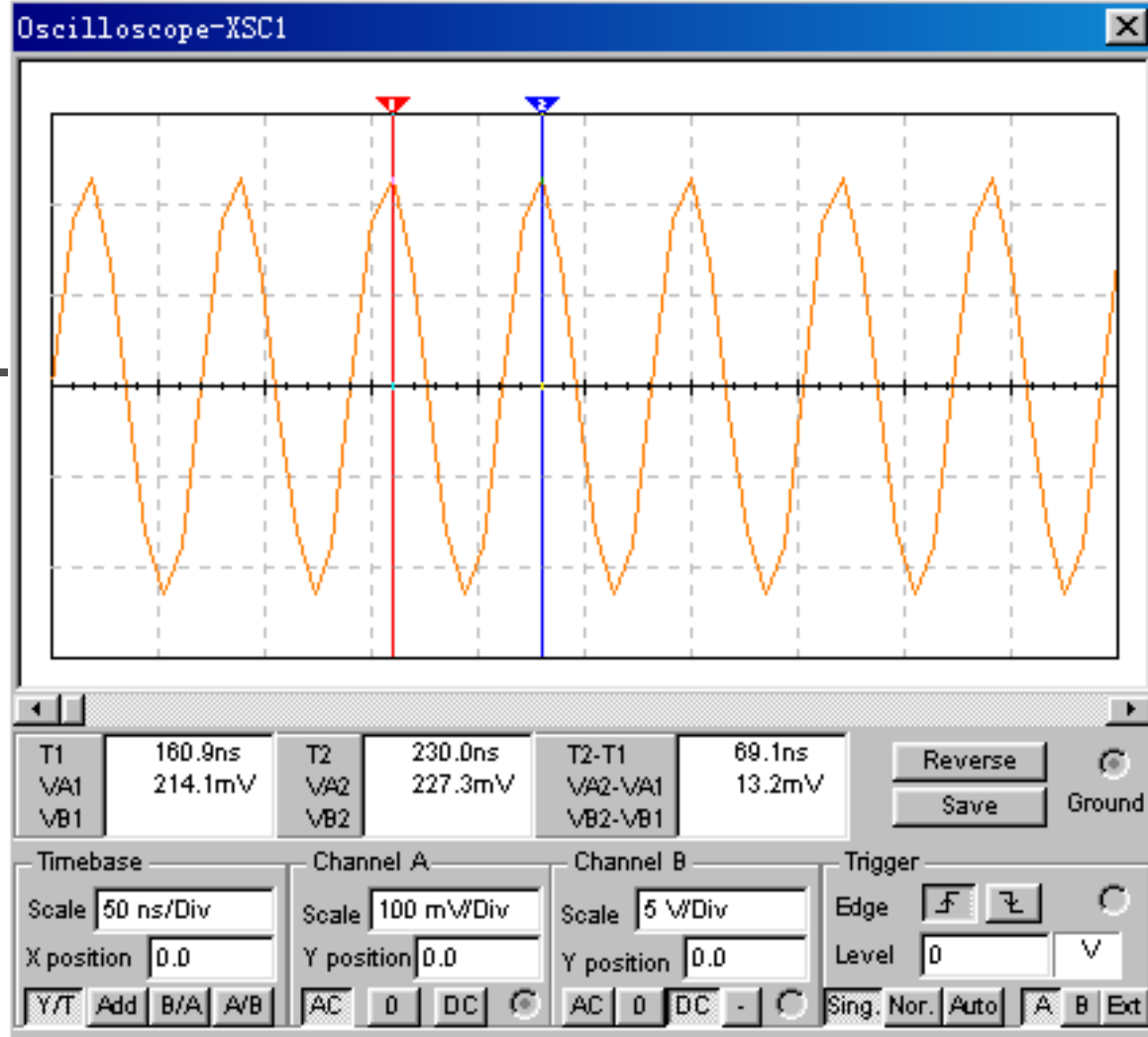


图4.3.7西勒振荡电路



(a) 起振过程



图(b) 局部放大波形

图4.3.8西勒振荡电路仿真结果



---

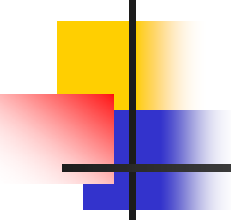
## 4.4方波和三角波发生电路



## 4.4.1 方波和三角波发生电路结构

---

- 由集成运放构成的方波发生器和三角波发生器，一般均包括滞回比较器和RC积分器两大部分。构成的方波和三角波发生器有多种形式，本设计选用最常用的，线路比较简单的电路加以分析。

- 
- 如把滞回比较器和积分器首尾相接形成正反馈闭环系统，如图4.4.1所示，则比较器U1输出的方波经积分器U2积分可得到三角波，三角波又触发比较器自动翻转形成方波，这样即可构成三角波和方波发生器。



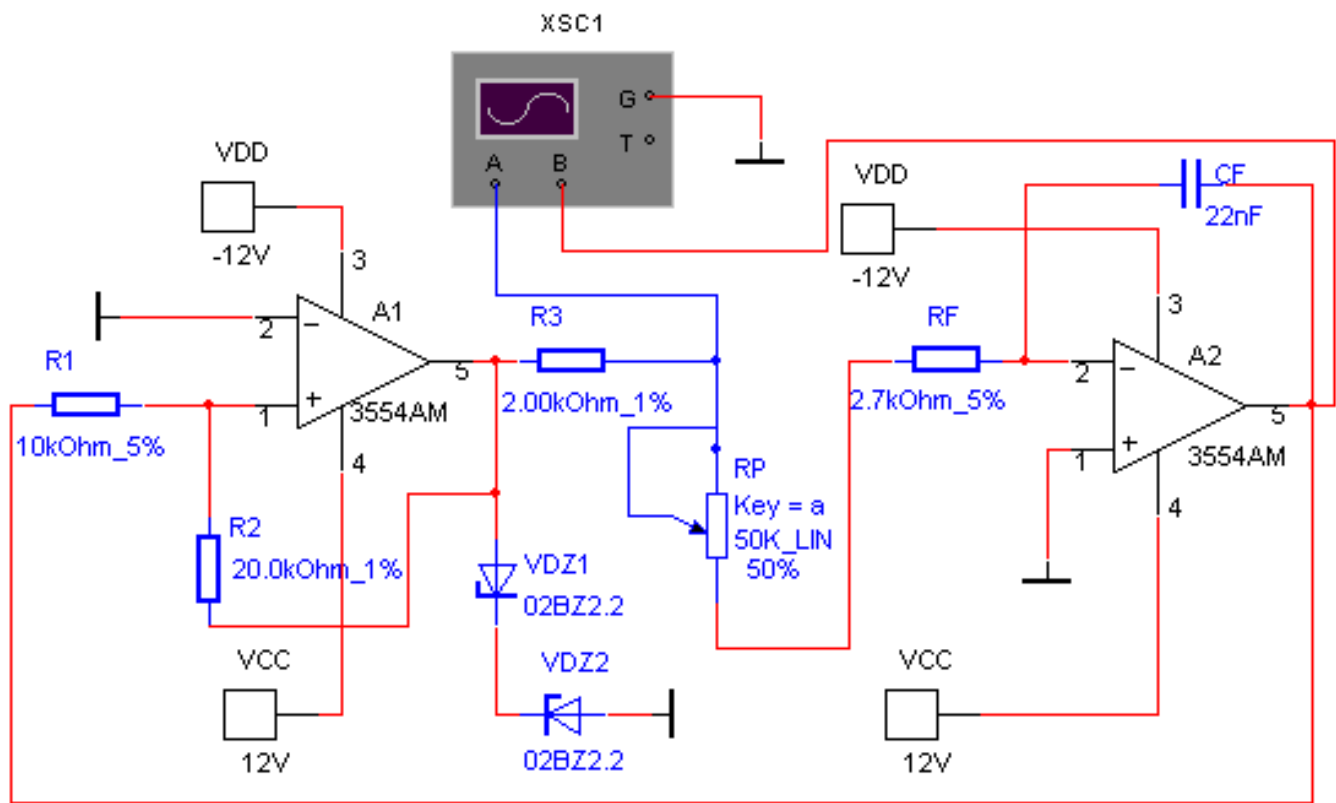


图4.4.1 三角波和方波发生器电路



## 4.4.2 方波和三角波发生器输出波形

---

- 图4.4.2 为方波和三角波发生器输出波形图。  
由于采用运放组成的积分电路，因此可实现恒流充电，使三角波线性大大改善。
- 电路振荡频率：

$$f_0 = \frac{R_2}{4R_1(R_f + R_P)C_f}$$

- 
- 
- 方波幅值

- $$U'_{om} = \pm U_Z$$

- 三角波幅值

$$U_{om} = \frac{R_1}{R_2} U_Z$$

- 调节RP可以改变振荡频率，改变比值可调节三角波的幅值。

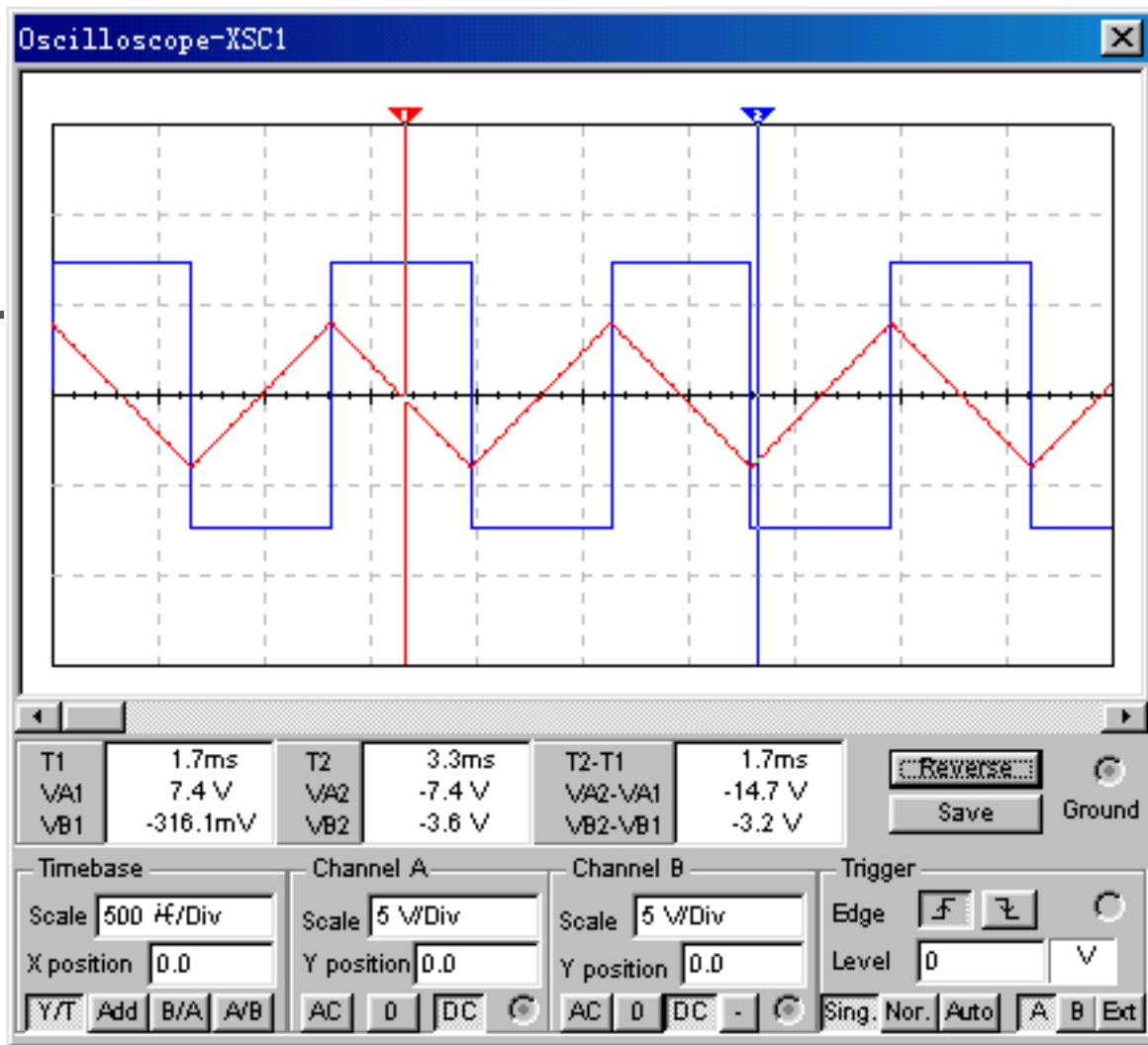


图4.4.2 方波和三角波发生器输出波形图



---

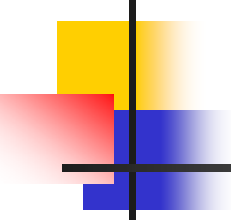
## 4.5 锯齿波产生电路

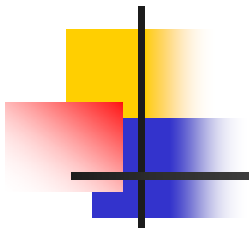


## 4.5.1 锯齿波电压产生电路结构

---

锯齿波和正弦波、方波、三角波是常用的基本测试信号。此外，如在示波器等仪器中，为了使电子按照一定规律运动，以利用荧光屏显示图像，常用到锯齿波产生器作为时基电路。例如，要在示波器荧光屏上不失真地观察到被测

- 
- 
- 信号波形间作线性变化的电压——锯齿波电压，使电子束沿水平方向匀速扫过荧光屏。而电视机中显像管荧光屏上的光点，是靠磁场变化进行偏转的，所以需要锯齿波电流来控制。

- 
- 本例以图4.5.1 所示的锯齿波电压产生电路为例，讨论其组成及工作原理。由图4.5.1可见，它包括同相输入滞回比较器(A1)和充放电时间常数不等的积分器(A2)两部分，共同组成锯齿波电压产生器电路。



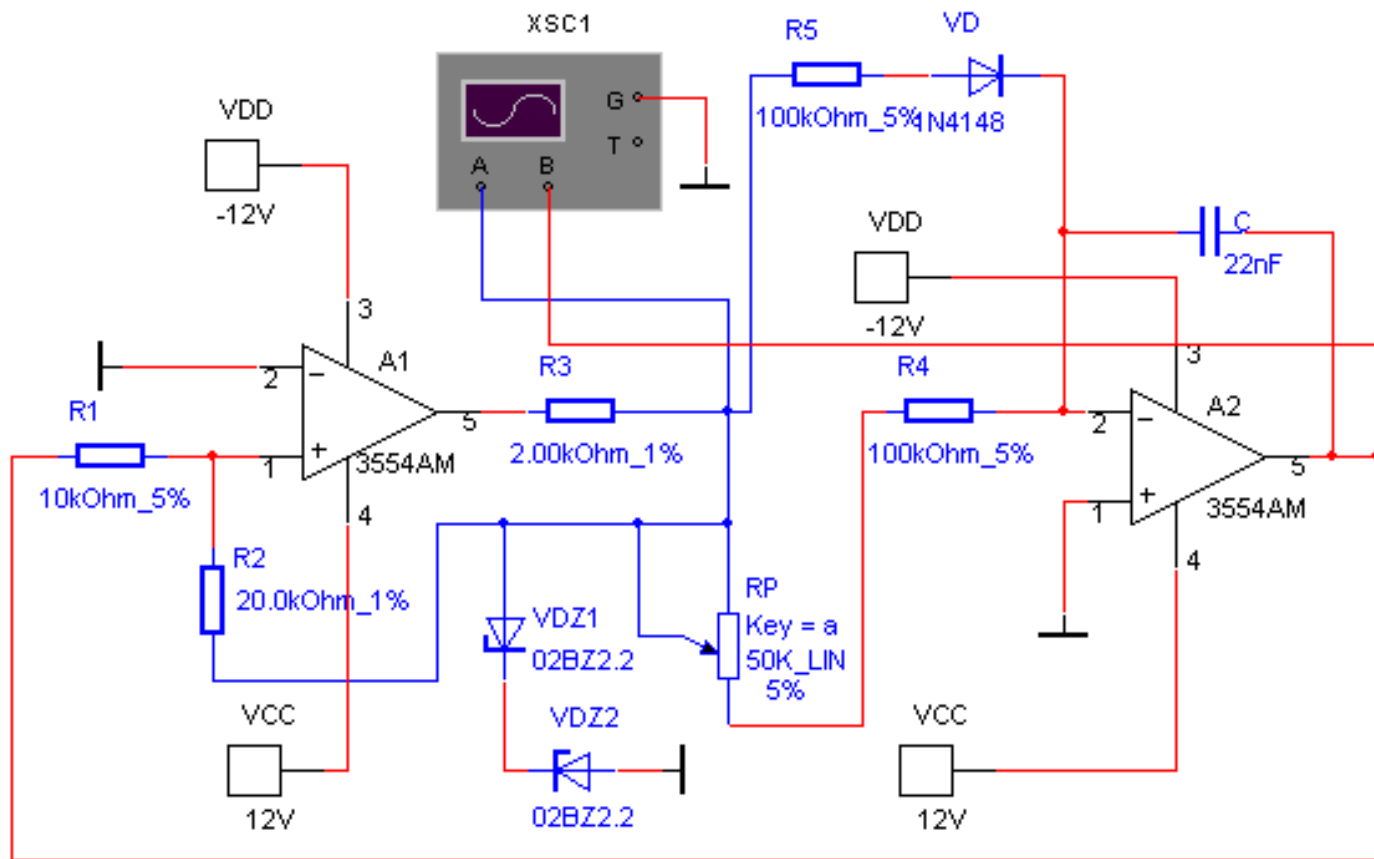
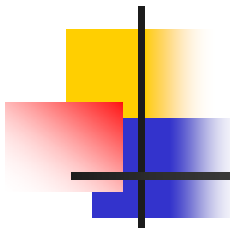


图4.5.1锯齿波产生电路



## 4.5.2 锯齿波电压产生电路输出波形

- 设 $t=0$ 时接通电源，有 $u_{o1} = -U_z$ ，则 $-U_z$ 经 $R_P$ 、 $R_4$ 向 $C$ 充电，使输出电压按线性规律增长。当 $u_o$ 上升到门限电压 $U_T+$ 使 $u_{p1} = u_{N1}$ 时，比较器输出 $u_{o1}$ 由 $-U_z$ 上跳到 $+U_z$ ，同时门限电压下跳到 $U_T-$ 值。以后 $u_{o1} = +U_z$ 经 $R_P$ 、 $R_4$ 和 $VD$ 、 $R_5$ 两支路向 $C$ 反向充电，由于时间常数减小，

- 
- $u_O$  迅速下降到负值。当  $u_O$  下降到下门限电压  $U_{T-}$  使  $u_{P1} \approx u_{N1}$  时，比较器输出  $u_{O1}$  又由  $+U_z$  下跳到  $-U_z$ 。如此周而复始，产生振荡，如图 4.5.2 所示。由于电容  $C$  的正向与反向充电时间常数不相等，输出波形  $u_O$  为锯齿波电压， $u_{O1}$  为矩形波电压。锯齿波电压产生电路输出波形如图 4.5.2 所示。



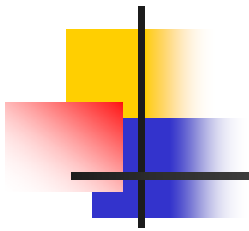
## ■ 1. 门限电压的估算

- $u_{p1} = u_I - \frac{u_I - u_{o1}}{R_1 + R_2} R_1$

- 考虑到电路翻转时，有  $u_{N1} = u_{P1} = 0$ ，即得

- $u_I = -\frac{R_1}{R_2} u_{o1}$

- 由于  $u_{o1} = \pm U_Z$ ，由上式可分别求出上、下门限电压和门限宽度为

- 
- 
- 由于  $u_{O1} = \pm U_Z$ ，由上式可分别求出上、下门限电压和门限宽度为

- $$U_{T+} = \frac{R_1}{R_2} U_Z \quad U_{T-} = -\frac{R_1}{R_2} U_Z$$

- $$\Delta U_T = U_{T+} - U_{T-}$$



---

- **2. 振荡周期**

- 可以证明，设忽略二极管的正向电阻，其振荡周期为

$$T = T_1 + T_2 = \frac{2R_1R_4C}{R_2} + \frac{2R_1(R_4 \parallel R_5)C}{R_2} = \frac{2R_1R_4C(R_4 + 2R_5)}{R_2(R_5 + R_4)}$$

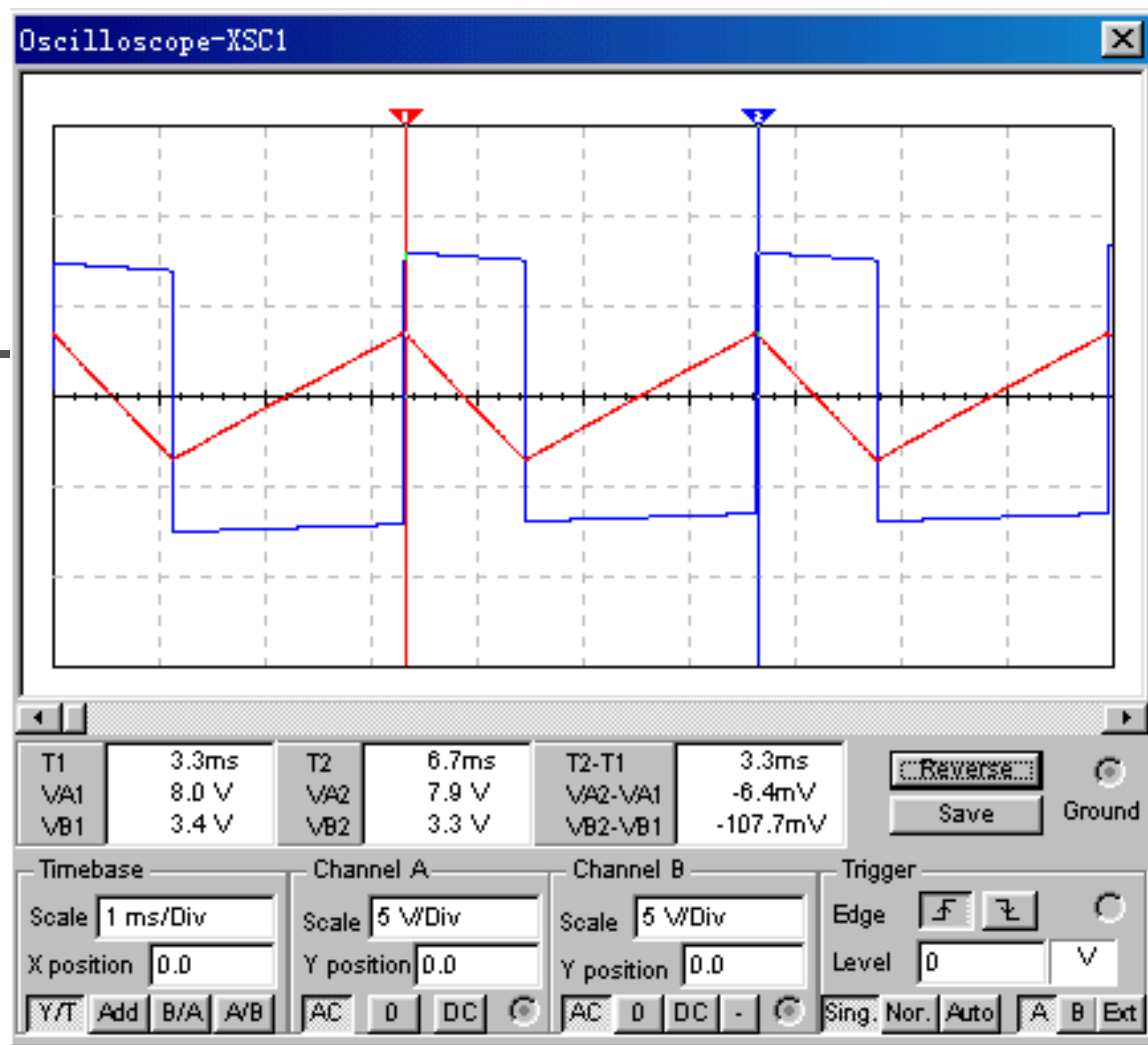
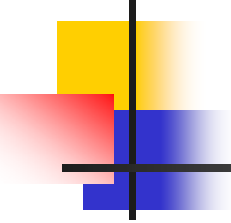


图4.5.2  $u_o$ 、 $u_{o1}$ 输出波形

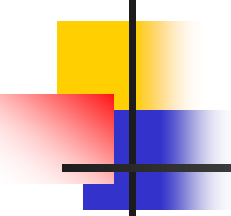
- 
- 显然，图4.5.1所示电路，当 $R_5$ 、VD支路开路，电容C的正、反向充电时间常数相等时，此时，锯齿波就变成三角波，图4.5.1所示电路就变成方波、三角波产生电路，因此在设计此电路时充放电回路参数设置很重要。

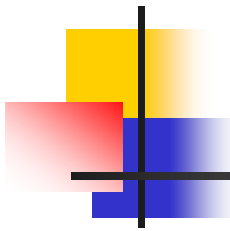


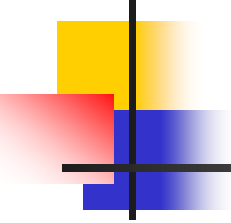


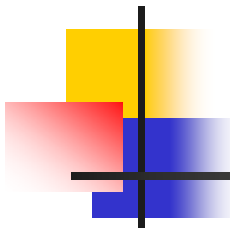
---

## 本章小结

- 
- 信号发生器可以分为正弦波发生器和非正弦波发生器。本章主要内容有：
    - （1）双T选频网络正弦波振荡器是带选频网络的正反馈放大器。若用R、C元件组成选频网络，就称为RC 振荡器，一般用来产生1Hz~1MHz的低频信号。

- 
- (2) 运算放大器组成的RC正弦波振荡器，其中RC串、并联电路构成正反馈支路，同时兼作选频网络。
  - (3) LC振荡器振荡应满足相位平衡条件和振幅平衡条件。电容反馈三点式振荡器有一个LC并联谐振回路，由于其选频作用，所以使振荡器只有在某一频率时才能满足振荡条件，

- 
- 可以得到单一频率的正弦波振荡信号。
  - （4）由集成运算放大器构成的方波发生器和三角波发生器，构成形式有多种，把滞回比较器和积分器首尾相接形成正反馈闭环系统，则比较器输出的方波经积分器积分可得到三角波，三角波又触发比较器自动翻转形成方波。



---

■ (5) 锯齿波产生电路由同相输入滞回比较器(A1)和充放电时间常数不等的积分器(A2)两部分组成，产生锯齿波电压。

- 掌握信号发生器电路的仿真设计与分析方法是本章的重点。振荡频率和波形是信号发生器的基本参数，注意计算值与仿真结果的差别。



## 思考题与习题

---

- **4.1** 在 Multisim 仿真平台上设计一个如图4.1所示的RC串并联选频网络振荡器，调节 $R_f$ 使电路起振，测出起振时电阻 $R_f$ 的大小，并用示波器测出其振荡频率。改变正反馈支路RC的大小，再测其振荡频率。

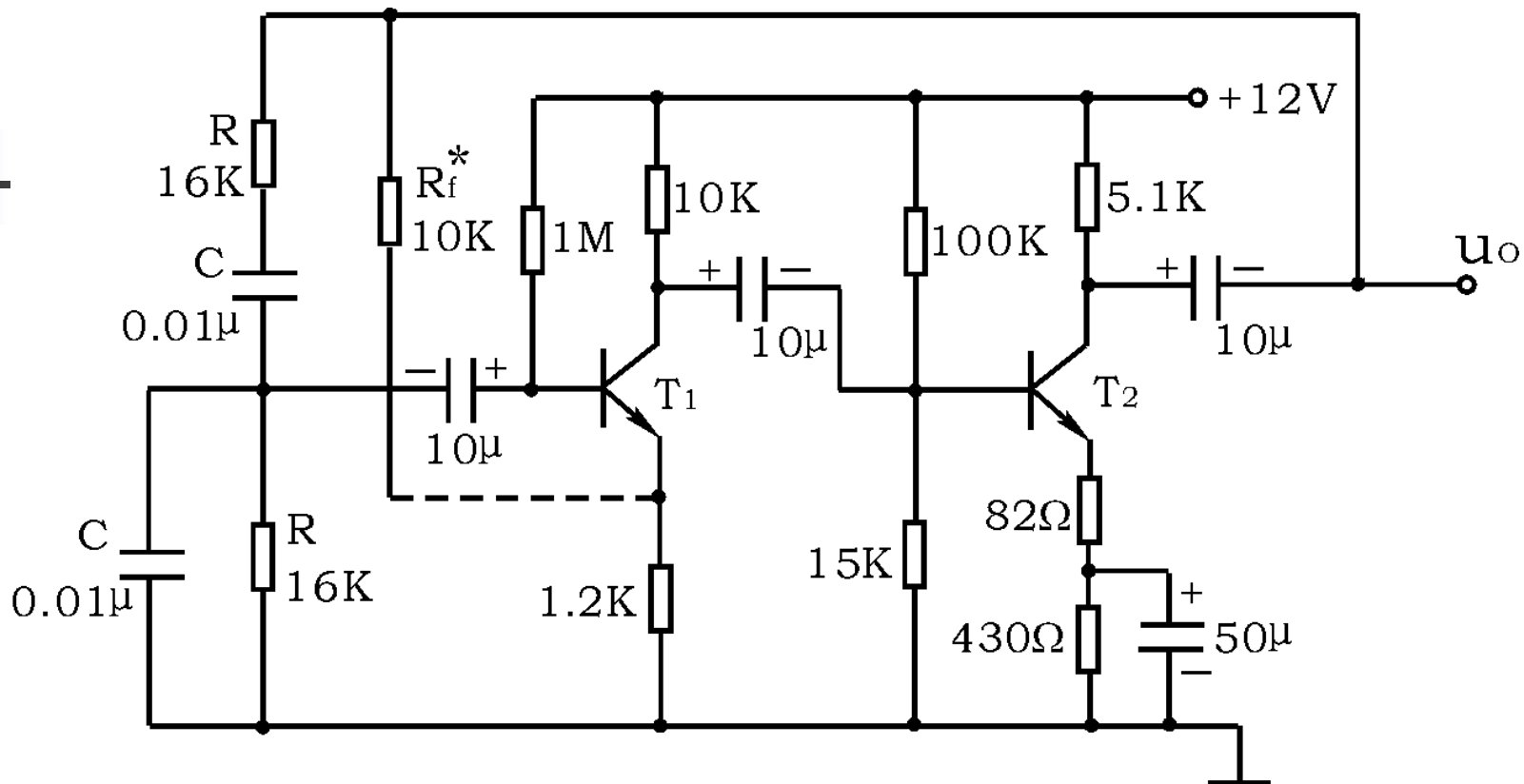
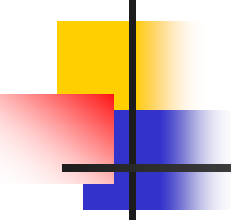


图4.1 习题4.1图

- 
- 
- **4.2** 在 Multisim 仿真平台上建立一个如图 4.2 所示的双 T 网络 RC 正弦波振荡器，调节合适的静态工作点，用示波器测出其振荡频率。改变反馈支路 RP1 的大小，再测其振荡频率。



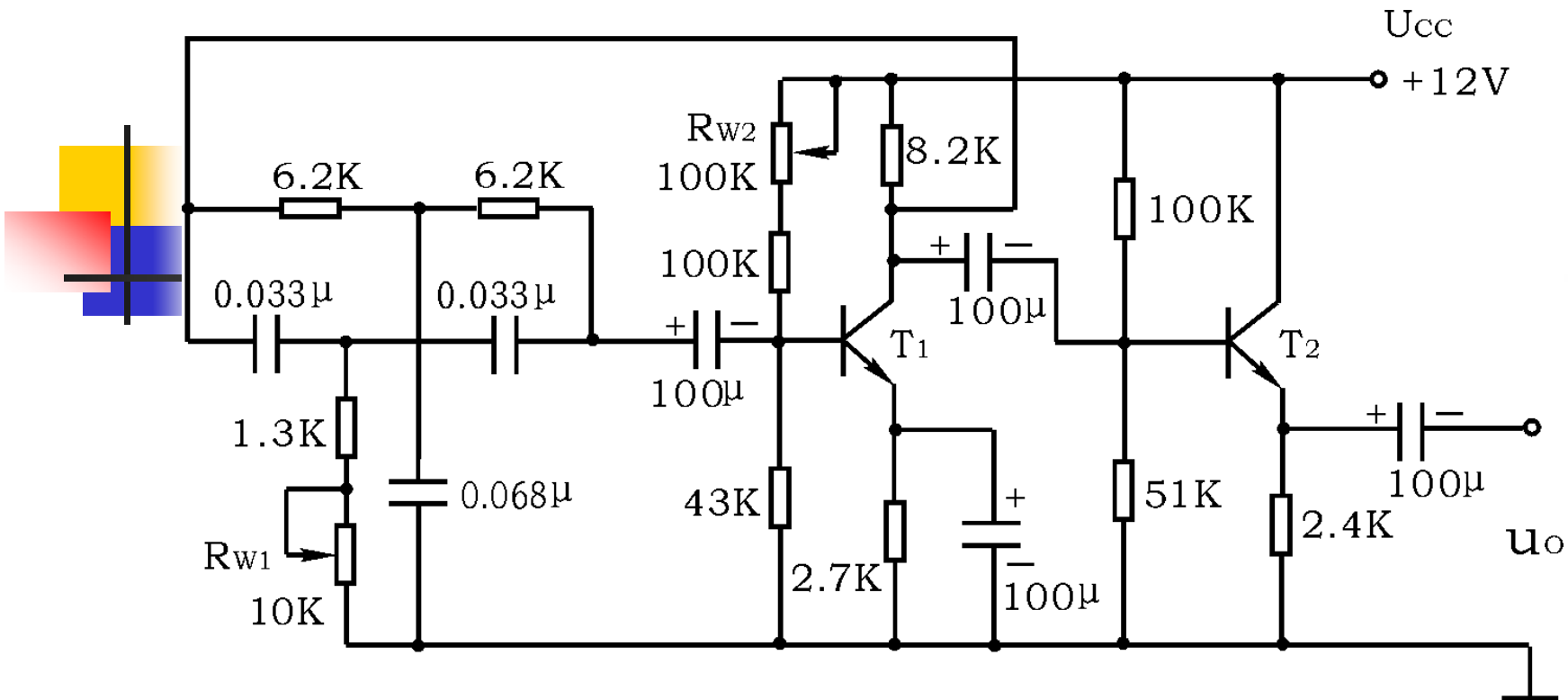
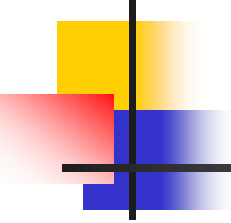


图4.2 习题4.2

- 
- **4.3** 在Multisim仿真平台上建立一个如图4.3所示的音频信号发生器的简化电路。（1）R5大致调到多大才能起振？（2）RP为双联电位器，可以从0调到10K  $\Omega$  ,试测出振荡频率的调节范围。

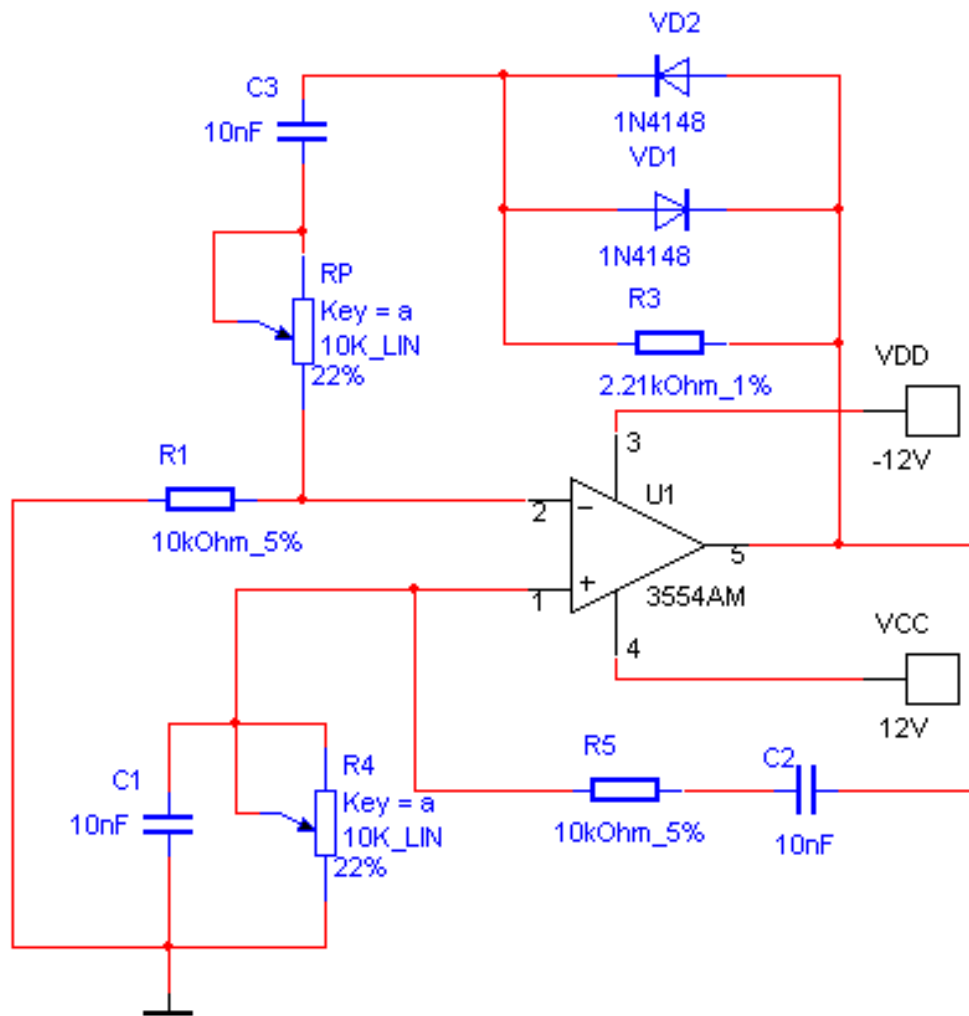
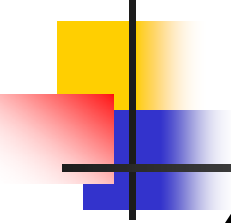
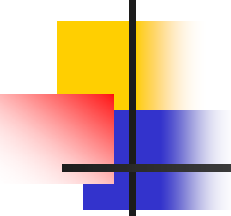


图4.3 习题4.3图

- 
- **4.4** 实验室自制一台由运算放大器组成的文氏电桥振荡器电路，要求输出频率共四档，频率范围分别为 $20\sim 200\text{HZ}$ ,  $200\text{HZ}\sim 2\text{KHZ}$ ,  $2\sim 20\text{KHZ}$ ,  $20\sim 200\text{KHZ}$ ,各档之间的频率略有覆盖。可采用图4.3所示的方案，改变不同的电容作为粗调，调节电位器作为细调。已知有四个电容分别为 $0.1\ \mu\text{F}$ ,  $0.01\ \mu\text{F}$ ,  $0.001\ \mu\text{F}$ ,  $0.0001\ \mu\text{F}$ ,试选择电位器电阻 $R_P$ 的值。

- 
- 
- **4.5** 在 Multisim仿真平台上建立一个如图4.3所示的电容反馈三点式振荡器电路。（1）测出起振时RP1的值。（2）测出振荡频率。

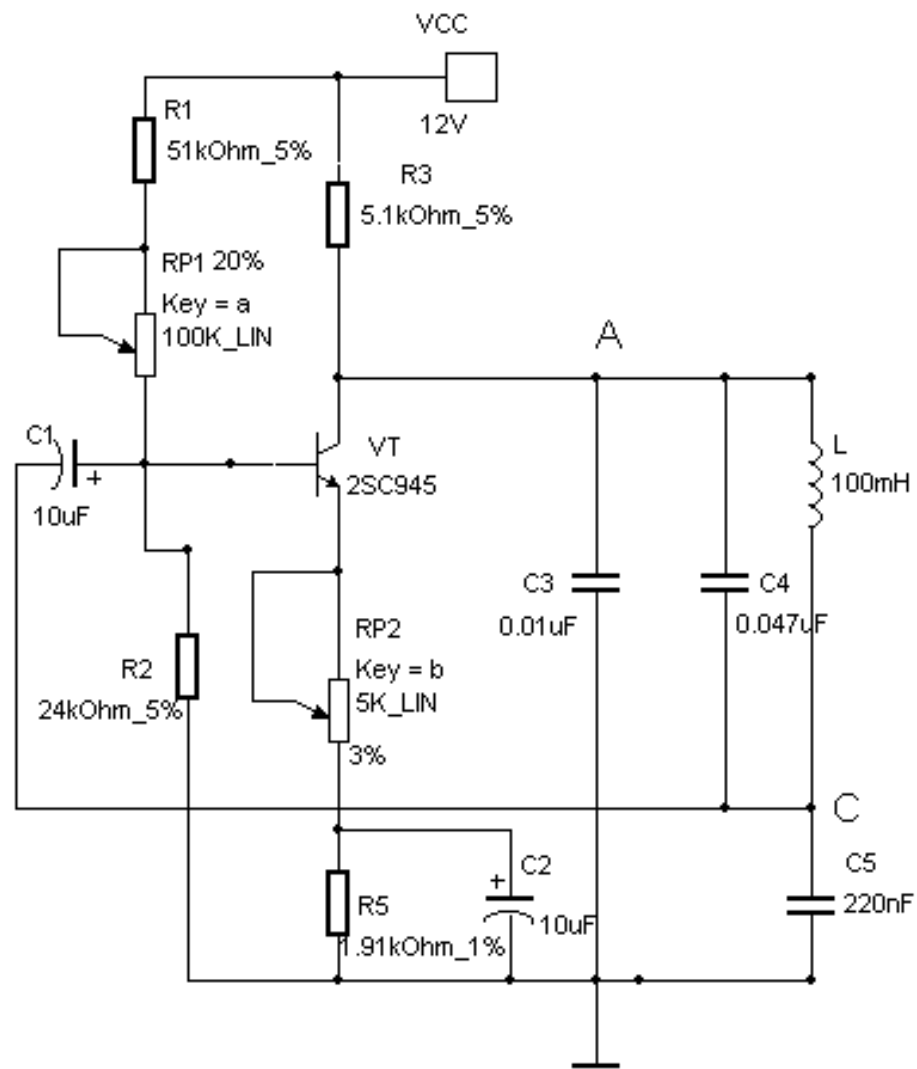
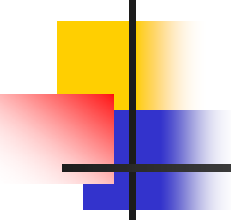


图4.4 习题4.5图

- 
- 
- **4.6** 在图4.5所示电路中设稳压管的稳压值为 $V$ 。电阻 $R_1, R_2, R_3$ 已知。(1)若要求三角波的输出幅值为 $3V$ 振荡周期为 $1\text{ms}$ ，试选择电容 $C_F$ 和电阻 $R_F$ 的值。(2)用示波器测出振荡周期及幅值。

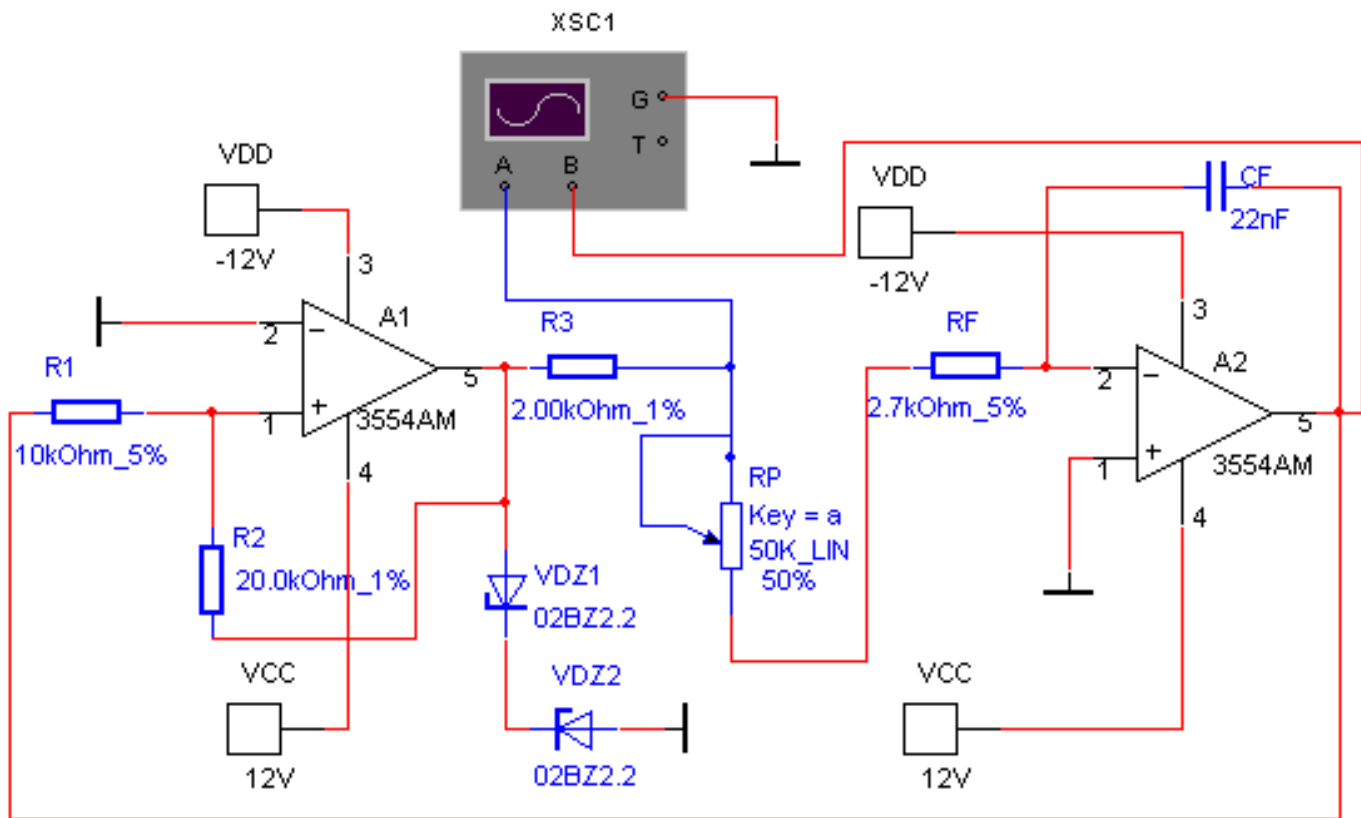
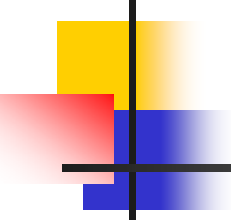


图4.5 习题4.6图



- 
- 
- **4.7** 在图4.5电路中调节RP电位器阻值，一边调节RP一边用示波器观察输出波，使其从三角波变为锯齿波，并用示波器测出振荡周期及幅值。



---

# 第5章 变换电路



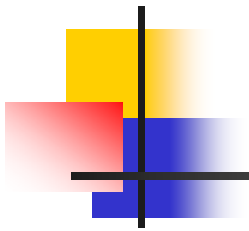
## 内容提要

变换电路属于非线性电路，其传输函数随输入信号的幅度、频率或者相位变化，输出信号的波形不同于输入信号的波形。本章介绍了不同类型的变换电路，有检波电路、绝对值电路、限幅电路、死区电路、电压 / 电流 ( $V/I$ ) 变换电路、电流/电压 ( $I/V$ ) 转换电路、VFC (电压—频率变换) 电路、

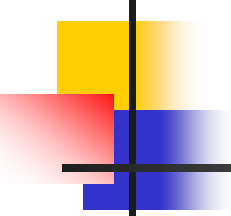


---

## 5.1 检波电路

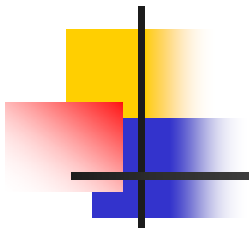


一个由运算放大器组成的线性检波电路如图5.1.1所示。电路中，把检波二极管VD<sub>1</sub>（VD<sub>1</sub>）接在反馈支路中，检波二极管VD<sub>2</sub>（VD<sub>2</sub>）接在运算放大器A1输出端与电路输出端之间。该电路能克服普通小信号二极管检波电路失真大，传输效率低及输入的检波信号需



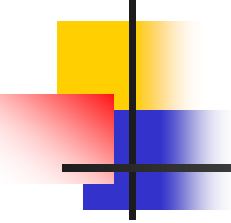
---

大于起始电压（约为 $0.3V$ ）的固有缺点，即使输入信号远小于 $0.3V$ ，也能进行线性检波，因而检波效率能大大地提高。



线性检波电路工作原理：当  $u_i > 0$ ，则  $u_{o1} < 0$ ， $VD_1$  导通、 $VD_2$  截止， $u_o = 0$ ；当  $u_i < 0$ ，则  $u_{o1} > 0$ ， $VD_1$  截止、 $VD_2$  导通，输出电压  $u_o$  为：

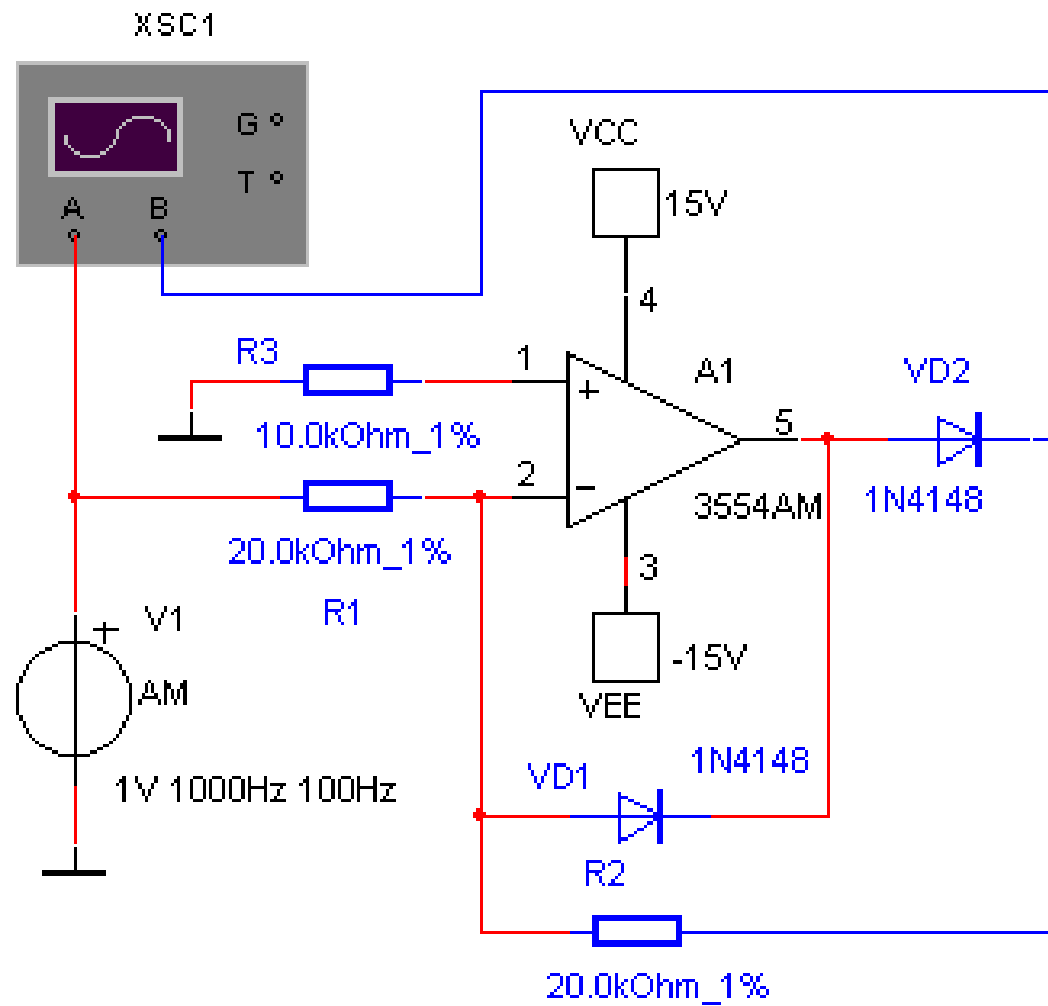
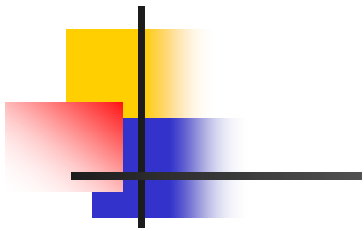
$$u_o = -\frac{R_2}{R_1} u_i \quad u_i < 0$$



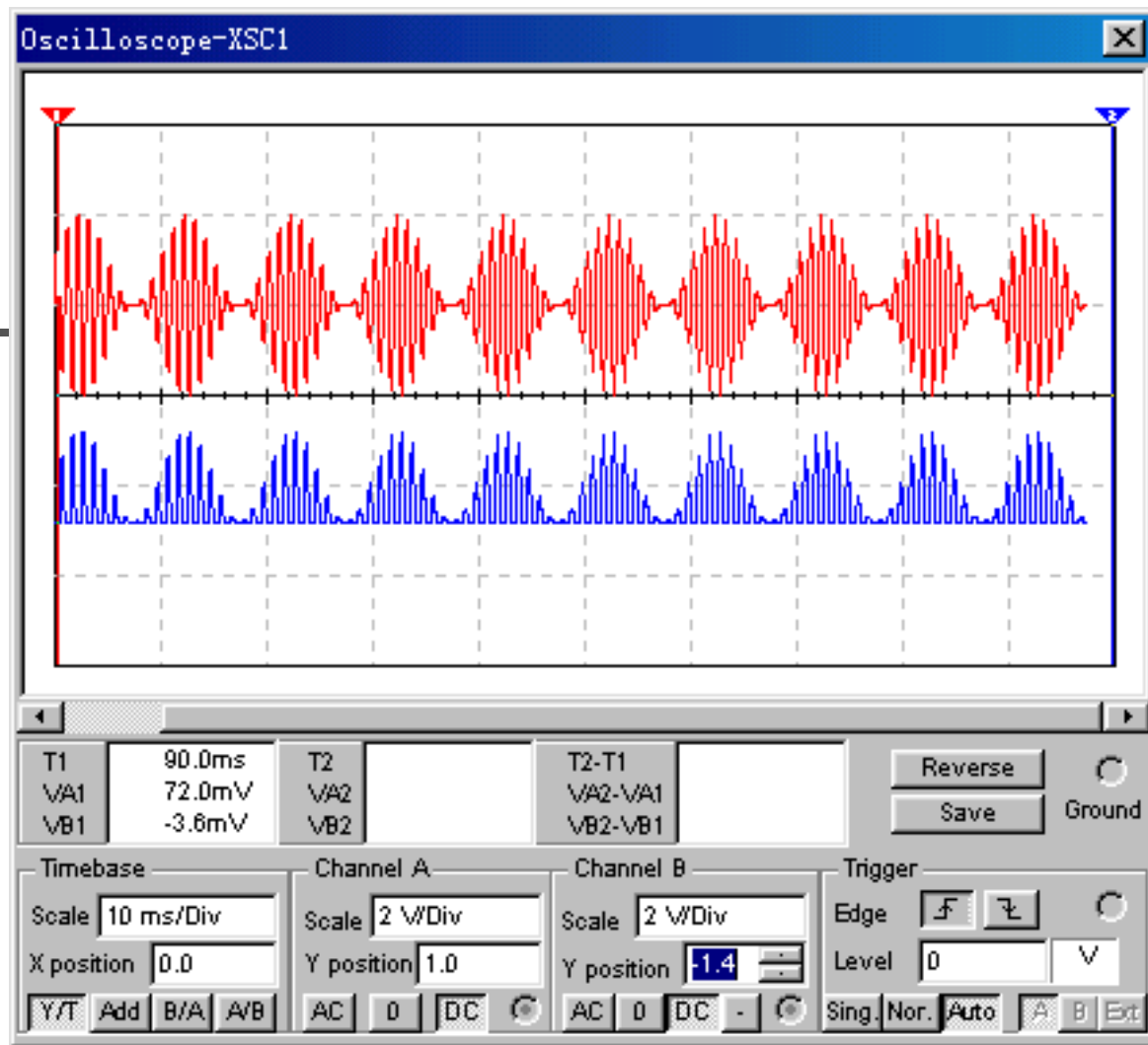
---

图5.1.1 (b) 所示为输入和输出波形，输入信号  $u_i$  为AM信号，输出信号  $u_o$  为检波后未滤波的信号，加上滤波器即可得到100Hz的低频调制信号。





(a)线性检波电路



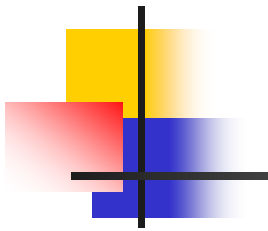
(b)输入和输出波形

图5.1.1 线性检波电路和输入输出波形

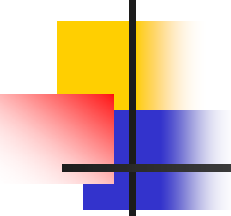


---

## 5.2 绝对值电路



在线性检波器的基础上，加一级加法器，让输入信号  $u_i$  的另一极性电压不经检波，而直接送到加法器，与来自检波器的输出电压相加，便构成绝对值电路。绝对值电路又称为整流电路，其输出电压等于输入信号电压的绝对值，而与输入信号电压的极性无关。采用绝对值电路能把双极性输入信号变成单极性信号。其原理电路如图5.2.1所示。



由图可知：当  $u_i > 0$  时，则运算放大器  $U_1$  输出  $< 0$ ， $VD_1$  ( $VD1$ ) 导通、 $VD_2$  ( $VD2$ ) 截止，检波器的输出电压为  $u_{o1} = 0$ 。

加法器  $U_2$  输出电压为：

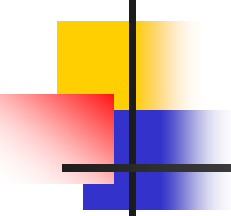
$$u_0 = -\frac{R_5}{R_3} u_i \quad u_i > 0$$



---

当  $u_i < 0$  时，检波器的输出电压  $u_{o1}$  为：

$$u_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} u_i$$



---

加法器输出电压  $u_o$  为:

$$u_o = -\frac{R_5}{R_4}u_{o1} - \frac{R_5}{R_3}u_i = \left(\frac{R_2R_5}{R_1R_4} - \frac{R_5}{R_3}\right)u_i \quad u_i < 0$$



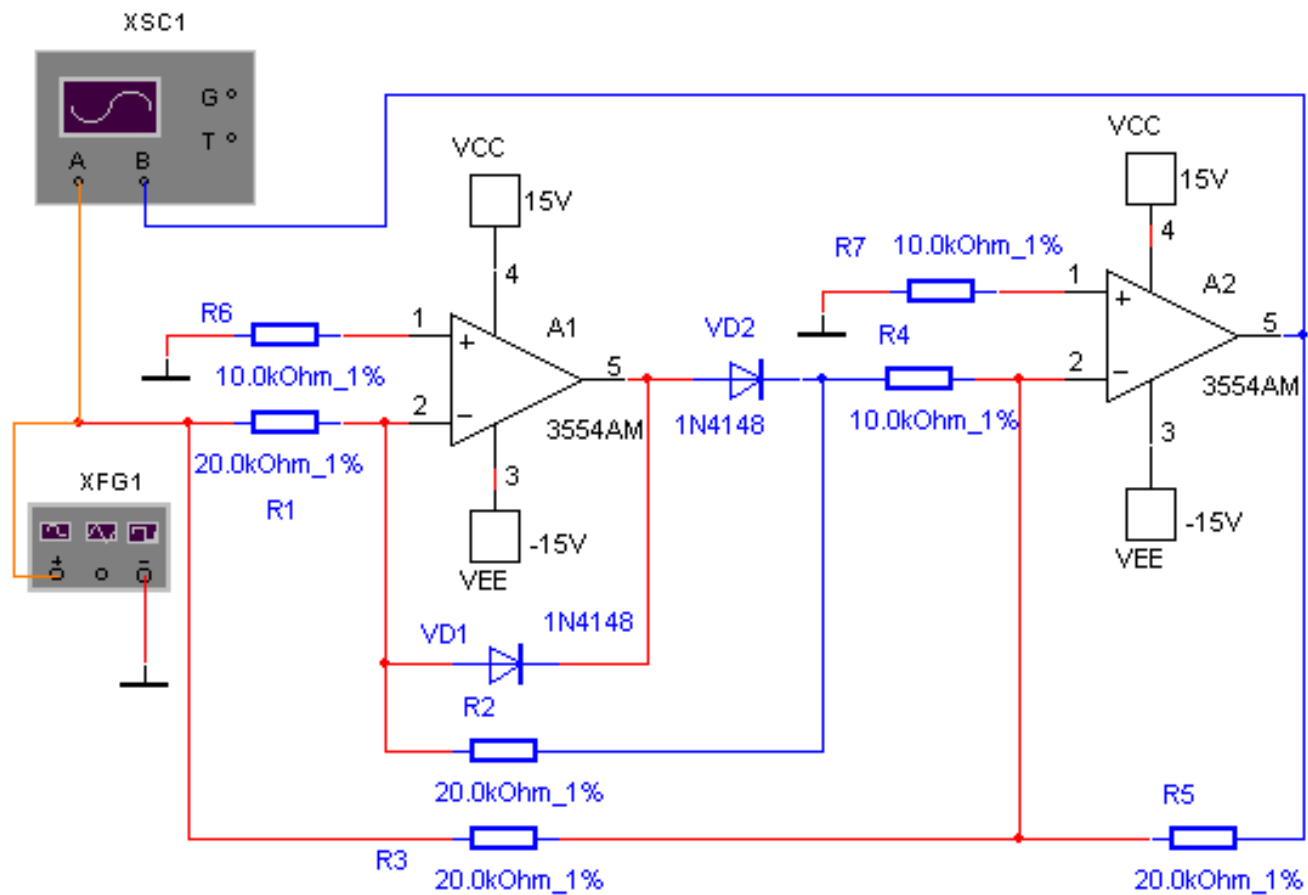
若取  $R_1 = R_2 = R_3 = R_5 = 2R_4$ ，则绝对值电路输出电压  $u_o$  为：

$$u_o = -|u_i|$$

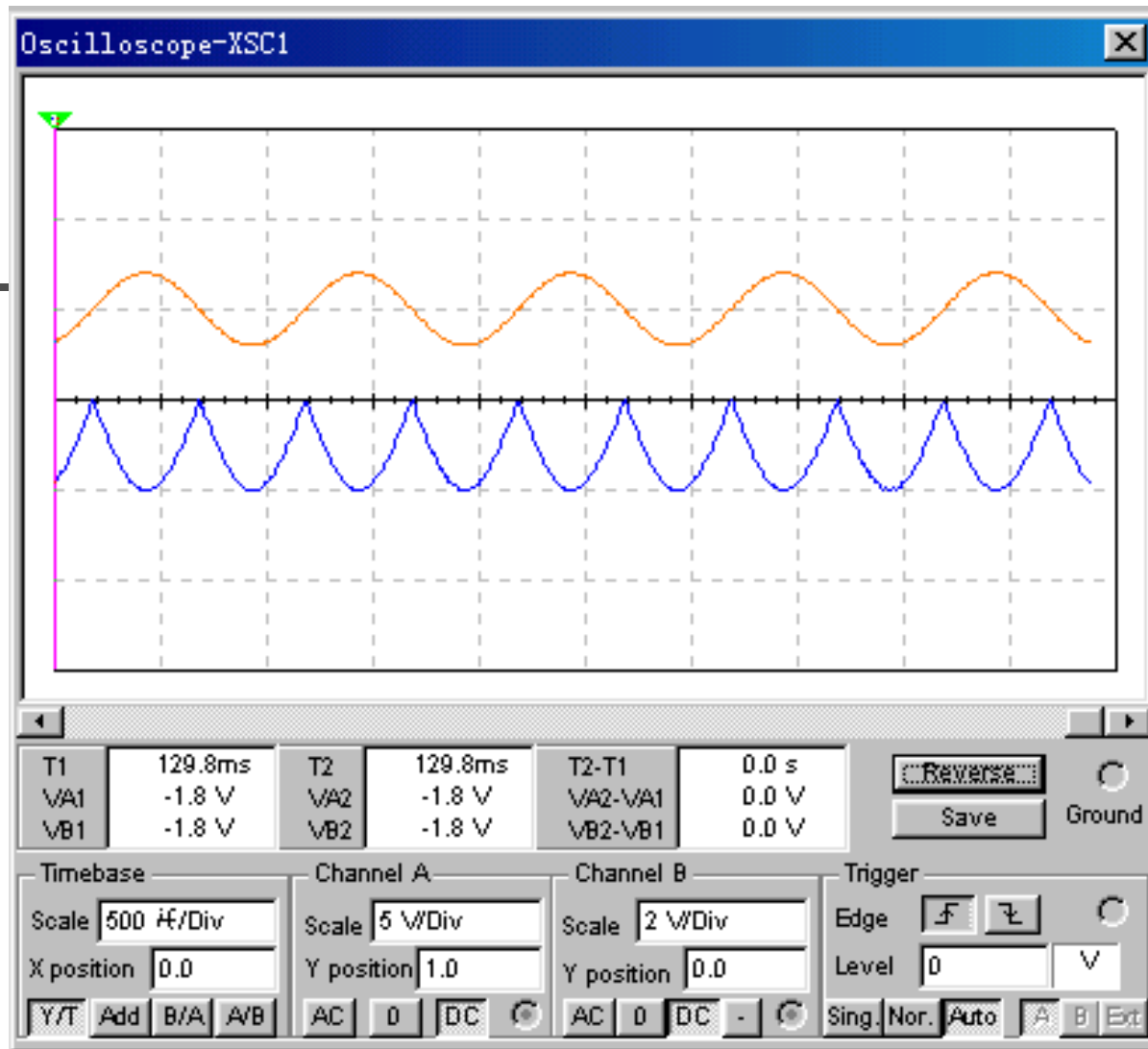
即输出电压值等于输入电压的绝对值，而且输出总是负电压。

若要输出正的绝对值电压，只需把图5.2.1所示电路中的二极管VD1、VD2的正负极性对调即可。





(a) 绝对值电路



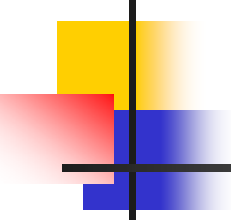
(b) 输入和输出波形

图5.2.1绝对值电路和输入输出波形



---

## 5.3 限幅电路



---

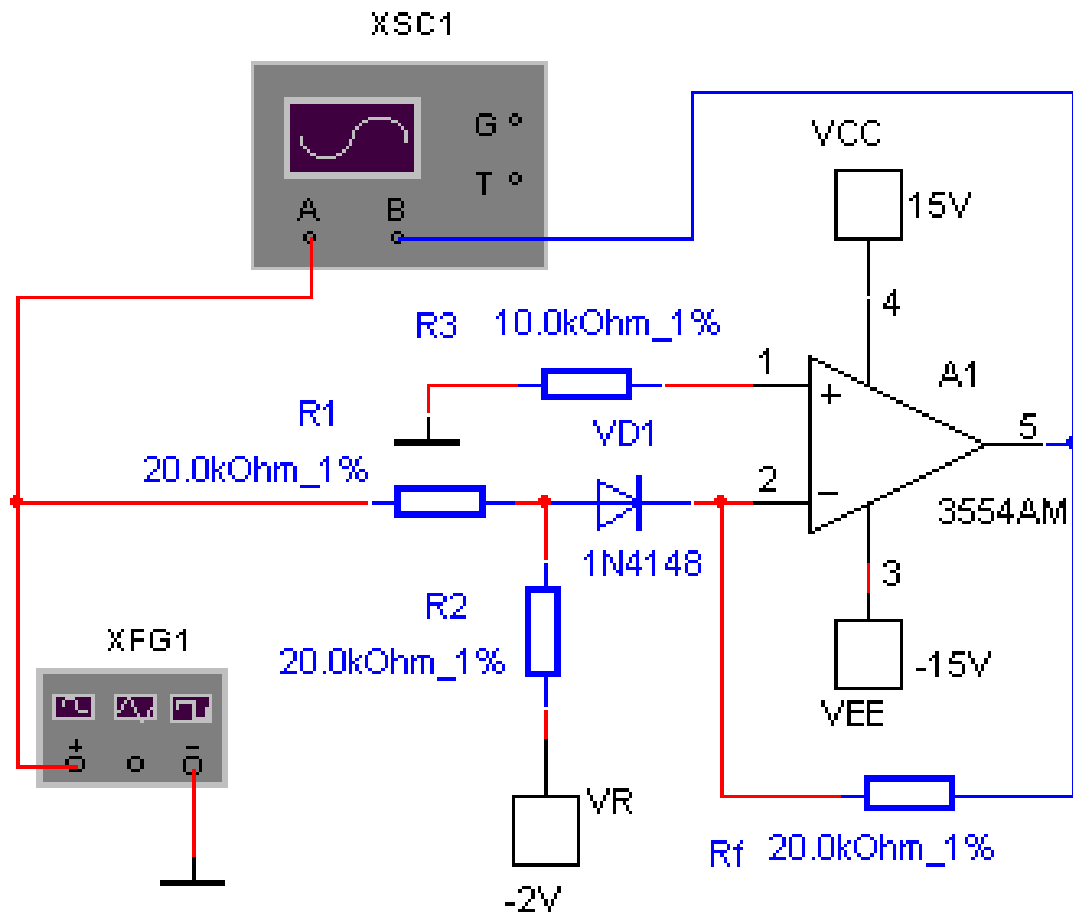
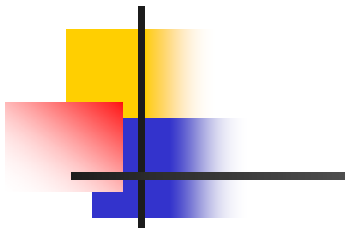
限幅电路的功能是：当输入信号电压进入某一范围（限幅区）后，其输出信号电压不再跟随输入信号电压变化，或是改变了传输特性。



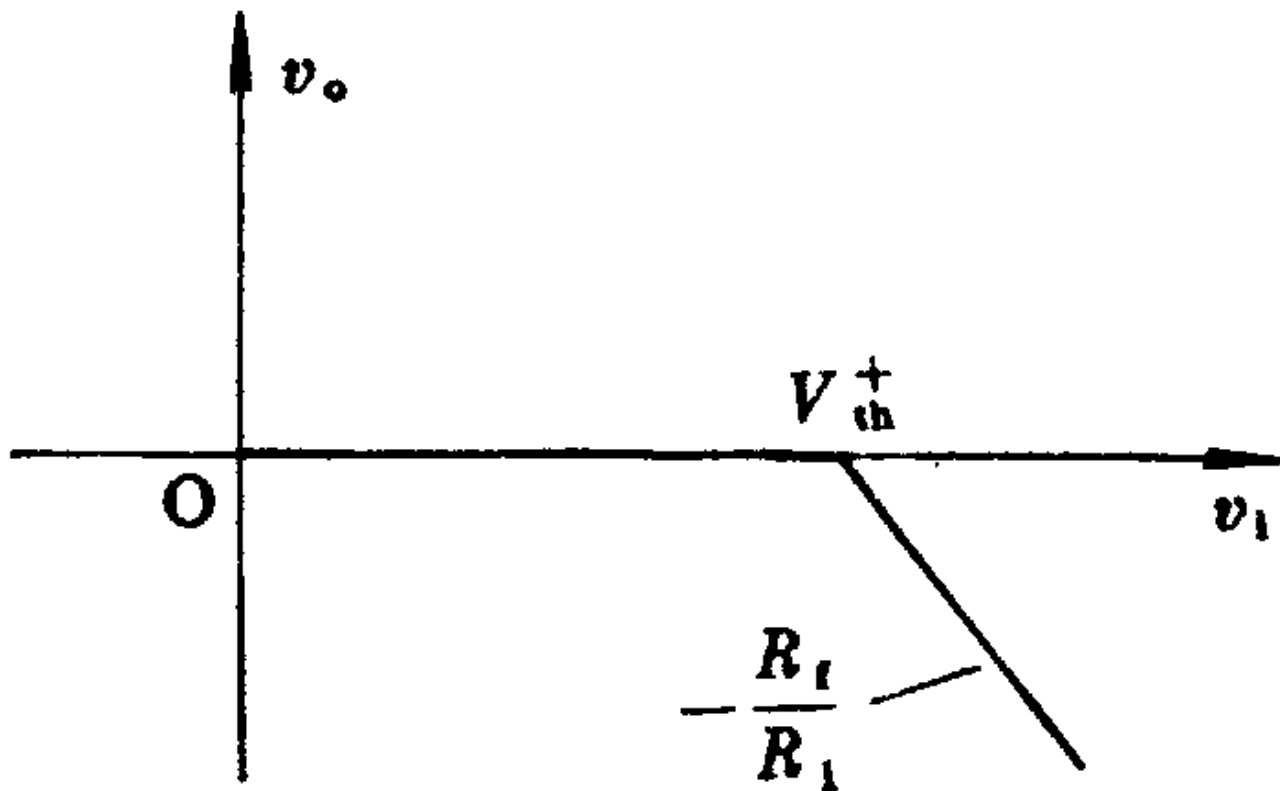
## 5.3.1 串联限幅电路

---

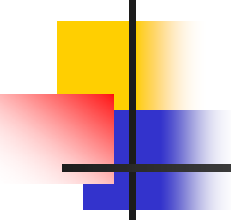
串联限幅电路如图5.3.1 (a) 所示，其传输特性如图5.3.1 (b) 所示。起限幅控制作用的二极管 $VD_1$ 与运放U1输入端串联，参考电压 $(-UR)$ 作 $VD_1$ 的反偏电压，以控制限幅器的限幅门限电压 $U_{th}$ 。



(a) 串联限幅电路



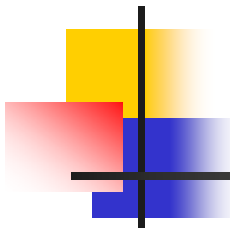
(b) 传输特性  
图5.3.1 串联限幅电路



---

由电路可知， $u_i < 0$  或  $u_i$  为数值较小的正电压时，VD截止，运放U1输出  $u_o = 0$ ；仅当  $u_i > 0$  且数值大于或等于某一个正电压值（称为正门限电压）时，VD才正偏导通，电路有输出，且  $u_o$  跟随输入信号  $u_i$  变化。其传输特性如图5.3.1（b）所示。





---

由于输入信号  $u_i = U_D$  时，电路开始有输出，此时A点电压  $u_A$  应等于二极管VD的正向导通电压  $U_D$ ，故使  $u_A = U_D$  时的输入电压值即为门限电压，即

$$u_A = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{th}^+ - \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_R = U_D$$



---

可求得  $U_{th}^+$  为:

$$U_{th}^+ = \frac{R_1}{R_2} U_R + \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) U_D$$

可见, 当  $u_i <$  时,  $u_o = 0$ , 因此  $u_i <$  的区域称为限幅区;  $u_i >$  时,  $u_o$  随  $u_i$  而变化,  $u_i >$  区域称为传输区, 传输系数为:

$$A_{uf} = -\frac{R_f}{R_1}$$

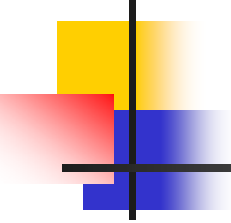


---

如果把电路中的二极管**D**的正负极性对调，参考电压改为正电压+**UR**，则门限电压值为：

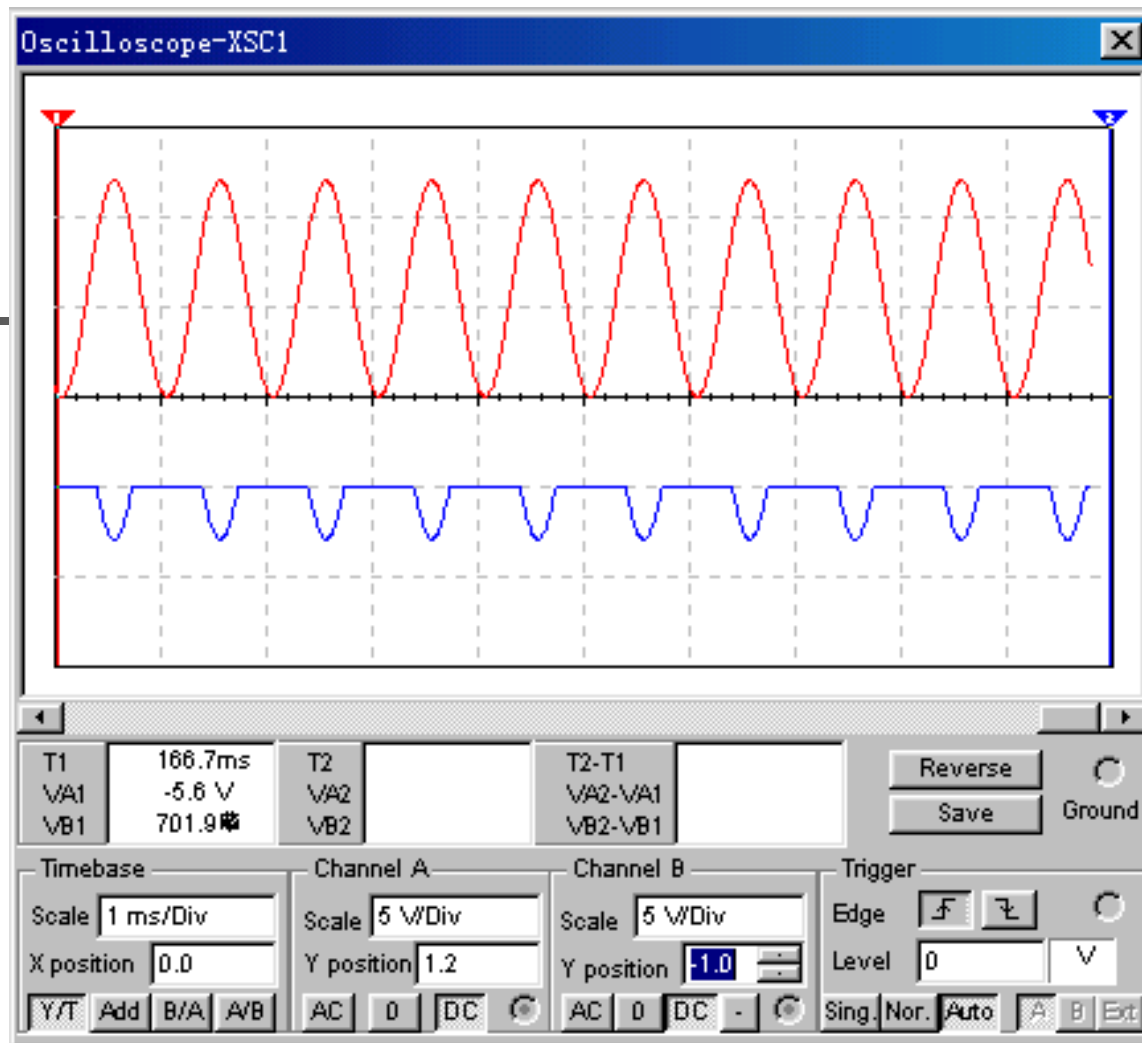
$$U_{th}^- = - \left[ \frac{R_1}{R_2} U_R + \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) U_D \right]$$

从上式中可知，改变的数值和改变**R<sub>1</sub>**与**R<sub>2</sub>**的比值，均可以改变门限电压。

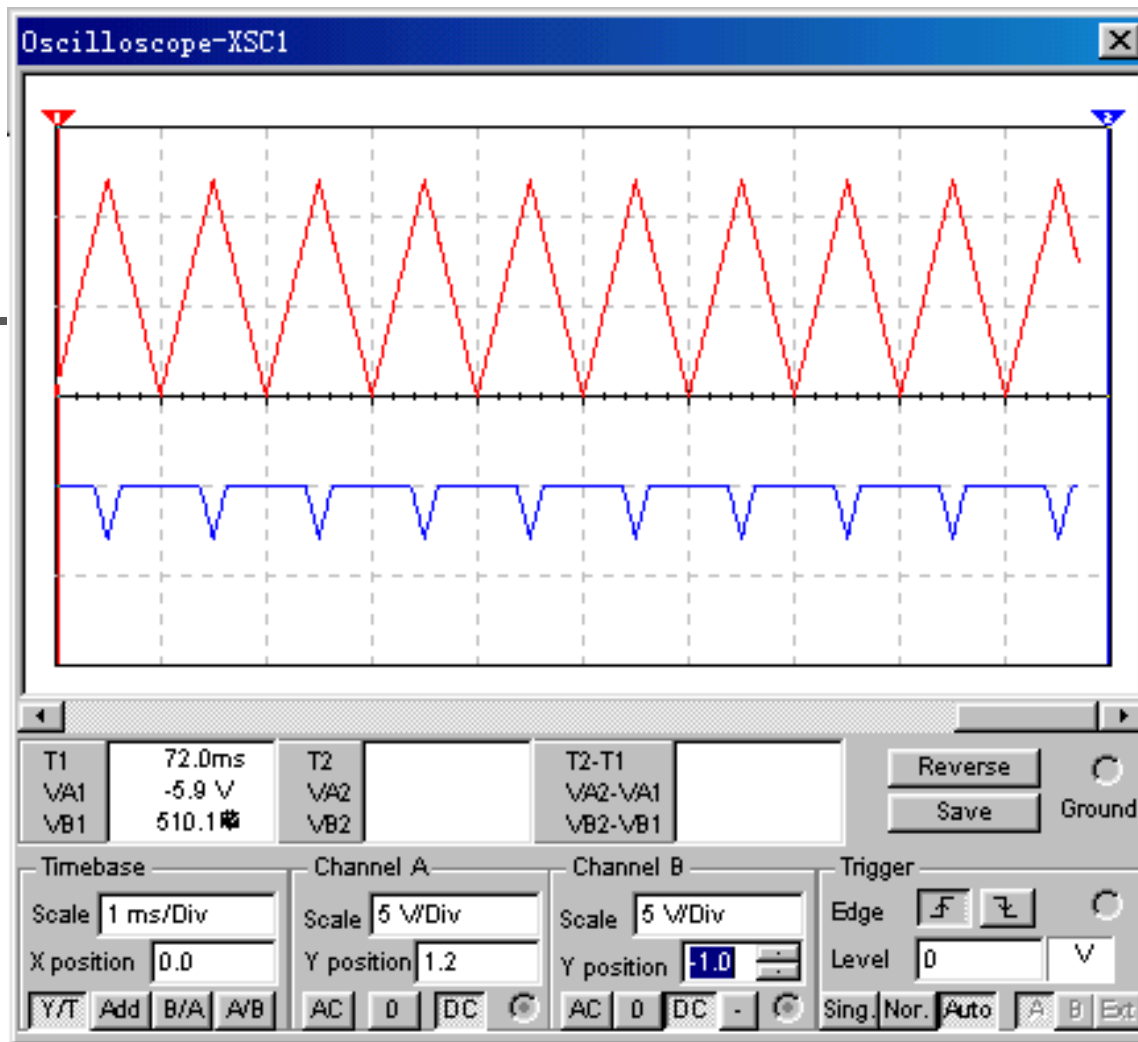


---

串联限幅电路输入正弦波和三角波时的限幅情况如图5.3.2 (a) 和 (b) 所示, 改变门限电压, 可以改变限幅情况。



(a) 输入正弦波的限幅



(b) 输入三角波的限幅

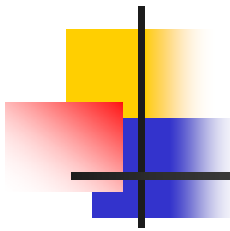
图5.3.2 串联限幅电路输入和输出波形



## 5.3.2 稳压管双向限幅电路

稳压管构成的双向限幅电路如图5.3.3 (a) 所示。稳压管 $VD_{z1}$  ( $VDZ1$ ) 和 $VD_{z2}$  ( $VDZ2$ ) 与负反馈电阻 $R_f$ 并联。当 $u_i$ 较小时,  $u_o$ 亦较小,  $VD_{z1}$ 和 $VD_{z2}$ 没有击穿, 输出电压 $u_o$ 随输入电压 $u_i$ 变化, 传输系数为:

$$A_{uf} = -\frac{R_f}{R_1}$$

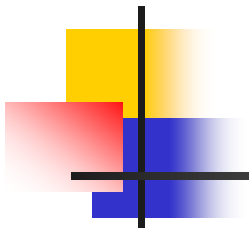


当 $u_i$ 幅值增大，使 $u_o$ 幅值增大至使 $VD_{z1}$ 和 $VD_{z2}$ 击穿时，输出 $u_o$ 的幅度保持值不变，电路进入限幅工作状态。限幅正门限电压和负门限电压 $U_{th}^-$ 的数值为：

$$U_{th}^+ = |U_{th}^-| = \frac{R_1}{R_f} (U_Z + U_D)$$

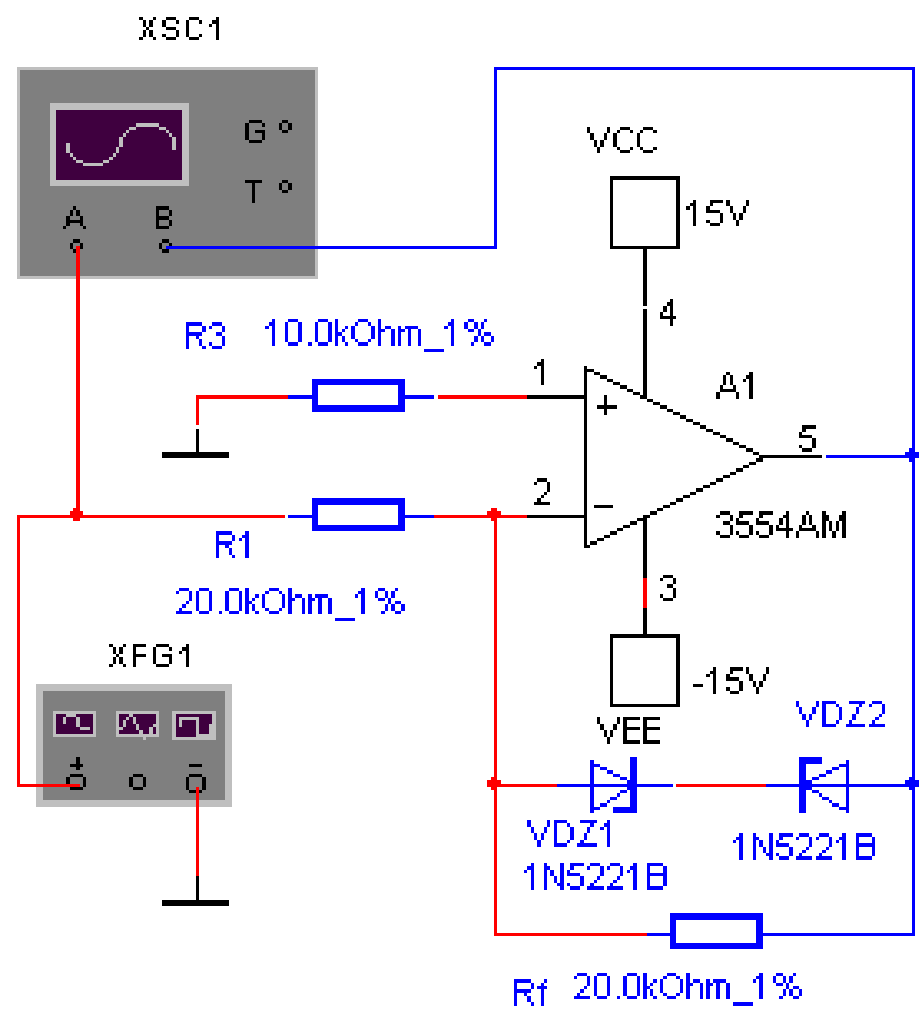
电路传输特性如图 5.3.3 (b) 所示。



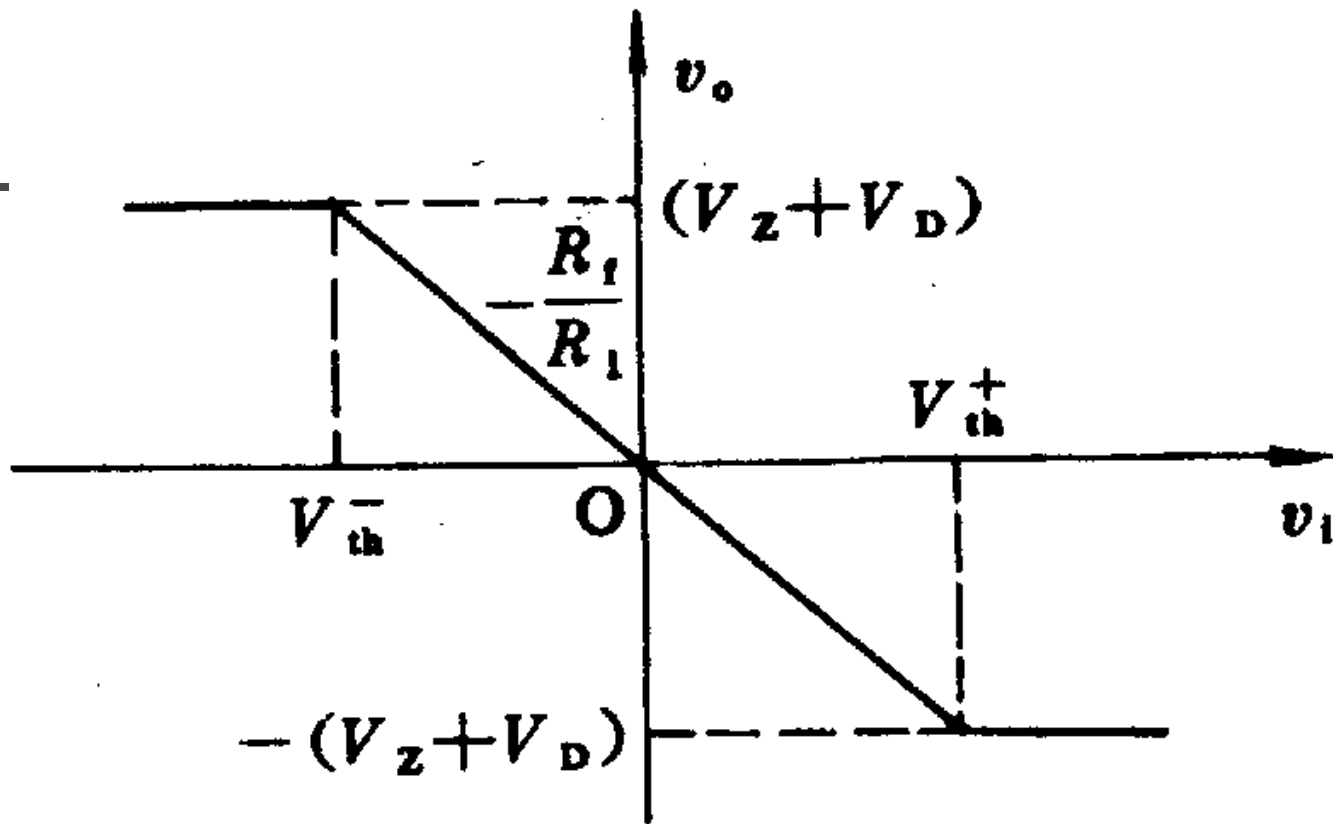


---

稳压管双向限幅器电路简单，无需调整；但限幅特性受稳压管参数影响大，而且输出限幅电压完全取决于稳压管的稳压值。因而，这种稳压器只适用于限幅电压固定，且限幅精度要求不高的电路。

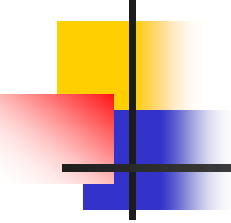


(a)稳压管双向限幅电路



(b) 传输特性

图5.3.3 稳压管构成的双向限幅电路



---

稳压管构成的双向限幅电路输入三角波时的限幅情况如图**5.3.4**所示，改变门限电压限幅正门限电压和负门限电压的数值，可以改变限幅情况。

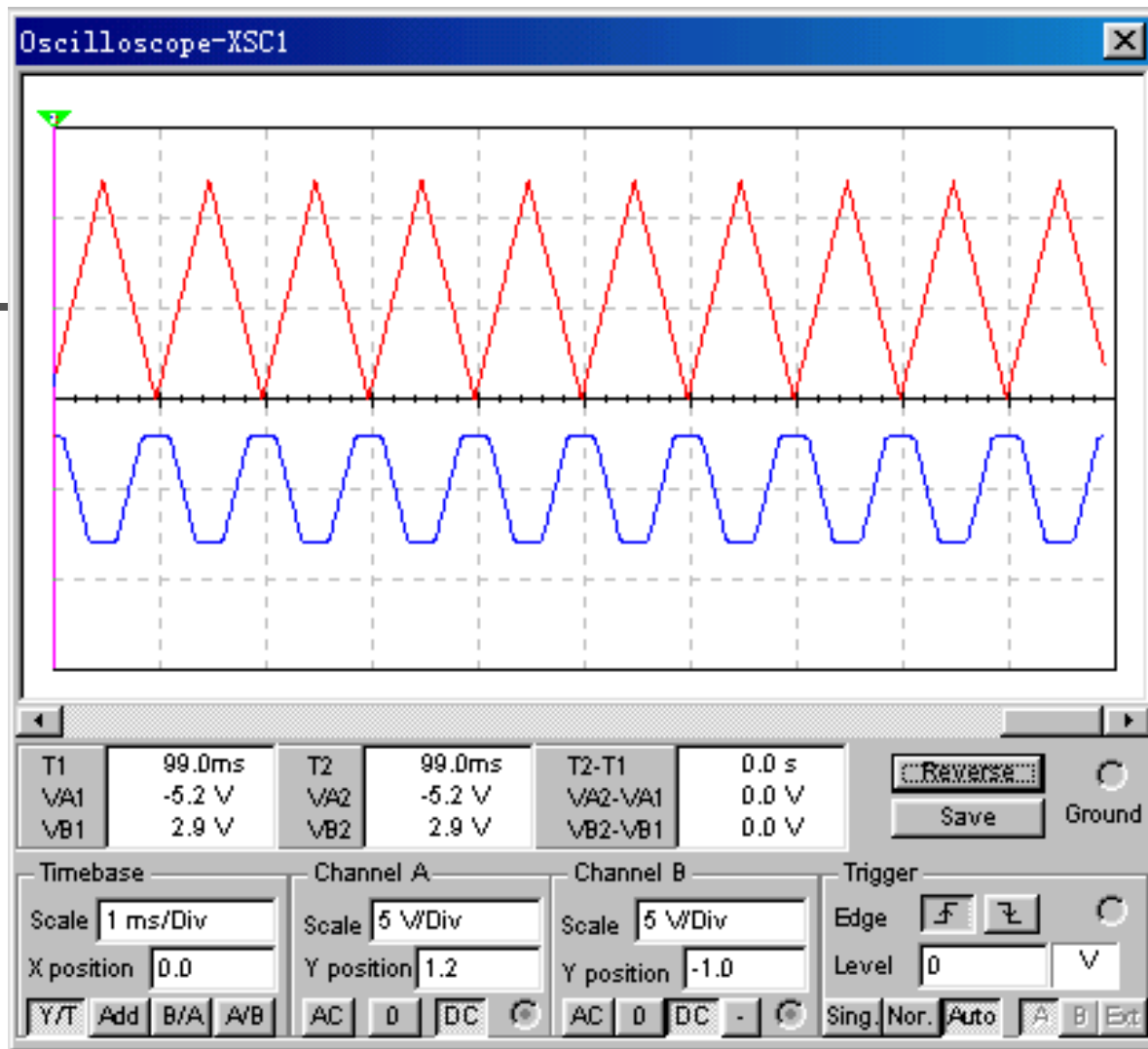
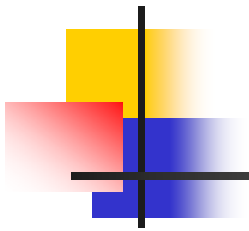


图5.3.4 双向限幅电路输入三角波的限幅



---

## 5.4 死区电路



---

死区电路又称失灵区电路。当输入信号 $u_i$ 进入某个范围（死区）时，电路输出电压为零；当 $u_i$ 脱离此范围时，电路输出电压随输入信号变化。死区电路在计算机及产品自动检测设备中应用广泛。



## 5.4.1 二极管死区电路

---

图5.4.1所示为二极管桥式死区电路。二极管桥路接在负反馈网络中，其导通情况与参考电压上 ( $U_{R1} = -U_R$ 和  $U_{R2} = +U_R$ )、 $R$ 及输入电压 $u_i$ 有关。二极管的导通与截止，将改变负反馈量而导致传输系数的改变，达到死区输出电压 $u_o = 0$ 的目的。



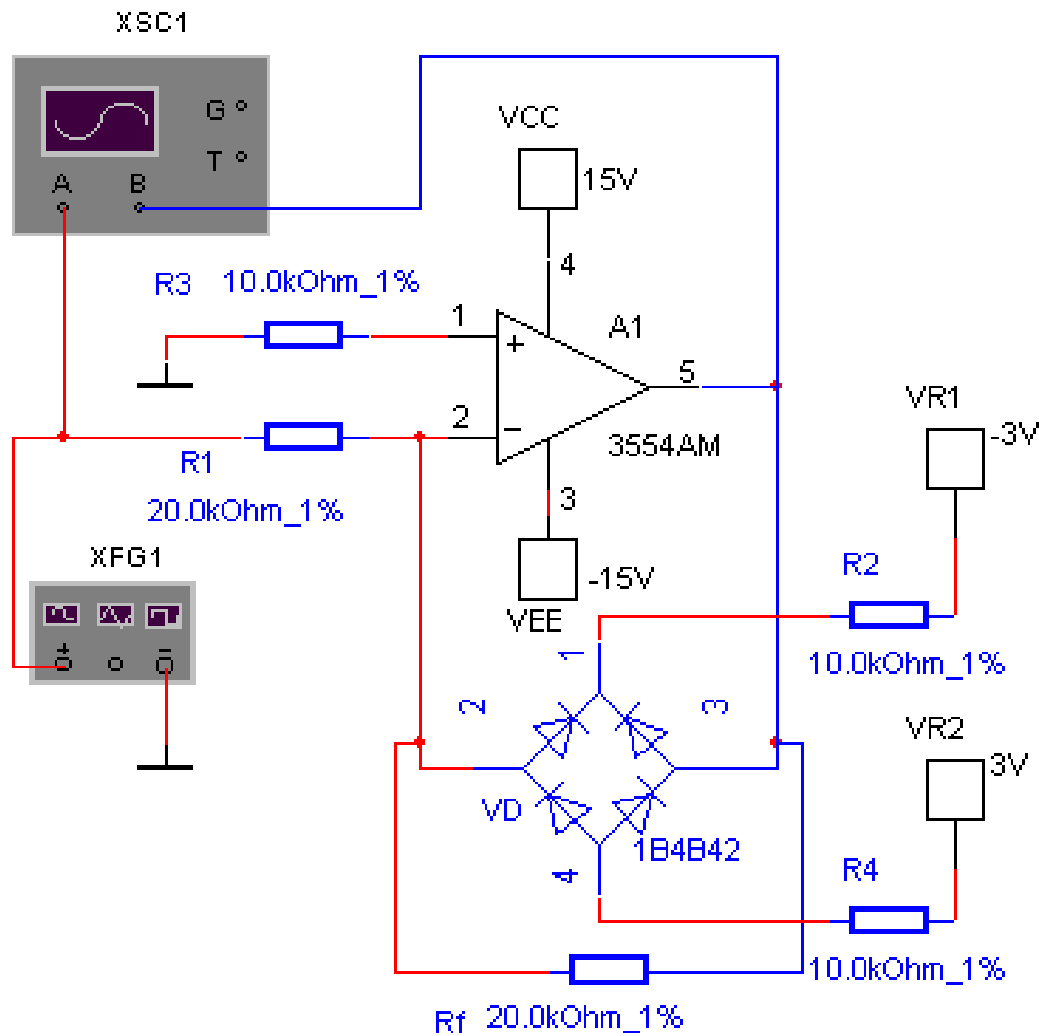
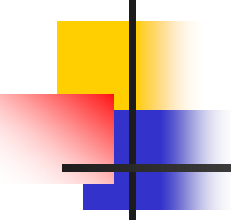


图5.4.1 二极管桥式死区电路



U1为运算放大器，设四个二极管性能对称，正偏导通时，压降均为 $U_D$ ，内阻 $r_d \approx 0$ 。当 $u_i = 0$ 、 $i_i = 0$ 时，四个二极管均导通，参考电压提供的电流 $I_1$ 和 $I_2$ 分别为：

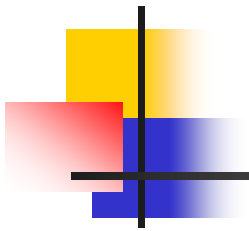
$$I_1 = \frac{U_R - U_D}{R}$$

$$I_2 = \frac{-U_D - (-U_R)}{R} = \frac{U_R - U_D}{R}$$



由于 $I_1 = I_2$ ，电桥将 $R_f$ 短路，故输出 $u_o = 0$ 。

当  $u_i \neq 0$ ，但  $|u_i|$  较小时，输入电流  $i$  较小，全被桥路吸收，负反馈电阻  $R_f$  上电流  $i_f = 0$ ，输出电压  $u_o$  保持零，出现死区。仅当  $|u_i|$  增大到限幅门限电压  $|U_{th}|$  时， $i$  较大，桥路无法全部吸收，负反馈电阻  $R_f$  上电流  $i_f \neq 0$ ，电路进入线性放大区，产生输出电压。



例如， $u_i > 0$ ，随着输入信号幅度的增大， $i_i$  ( $> 0$ ) 增大，二极管截止，反馈网络中由二极管桥构成的两条起短路作用的支路被切断，仅剩  $R_f$ ，电路开始对输入信号反相放大。

根据  $u_i = U_{th}^+$  时， $i_i = I_2$ ，由上式可得：

$$i_i = \frac{U_{th}^+}{R_1} = \frac{U_R - U_D}{R}$$



从上式可求得正向限幅门限电压 $U_{th}^+$  为:

$$U_{th}^+ = \frac{R_1}{R} (U_R - U_D)$$

当 $u_i < 0$ ，且负方向增大时， $i_i < 0$ 负方向增大，二极管截止，反馈网络中由二极管桥构成的两条起短路作用的支路被切断，仅剩 $R_f$ ，电路开始对输入信号反相放大。因为

$$|i_i| = -\frac{U_{th}^-}{R_1} = \frac{U_R - U_D}{R}$$



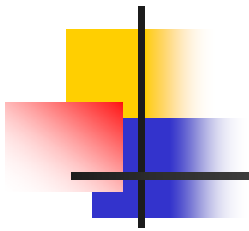
---

所以负向限幅门限电压 $U_{th}^-$ 为:

$$U_{th}^+ = \frac{R_1}{R} (U_R - U_D)$$

从上面分析可知, 当 $U_{th}^- < u_i < U_{th}^+$ 时, 有 $I_1 < i_i < I_2$

输入电流全部被二极管吸收, 四个二极管维持导通状态, 桥路把 $R_f$ 短路, 输出电压 $u_o=0$ , 电路处于死区状态。



---

当 $u_i \leq U_{th}^-$ 或 $u_i \geq U_{th}^+$ 时，有 $i_i \leq -I_1$ 或 $i_i \geq I_2$ ，输入电流未能全部被二极管吸收，桥路中必有对应两个臂上的二极管截止而被切断，电路进入线性放大区，其传输系数为：

$$A_{UF} = -\frac{R_f}{R_1}$$



---

输出电压 $u_o$ 表示为:

$$u_o = \begin{cases} A_{UF} (u_i - U_{th}^+) & (u_i \geq U_{th}^+) \\ A_{UF} (u_i - U_{th}^-) & (u_i \leq U_{th}^-) \end{cases}$$

电路传输特性如图5.4.2所示。



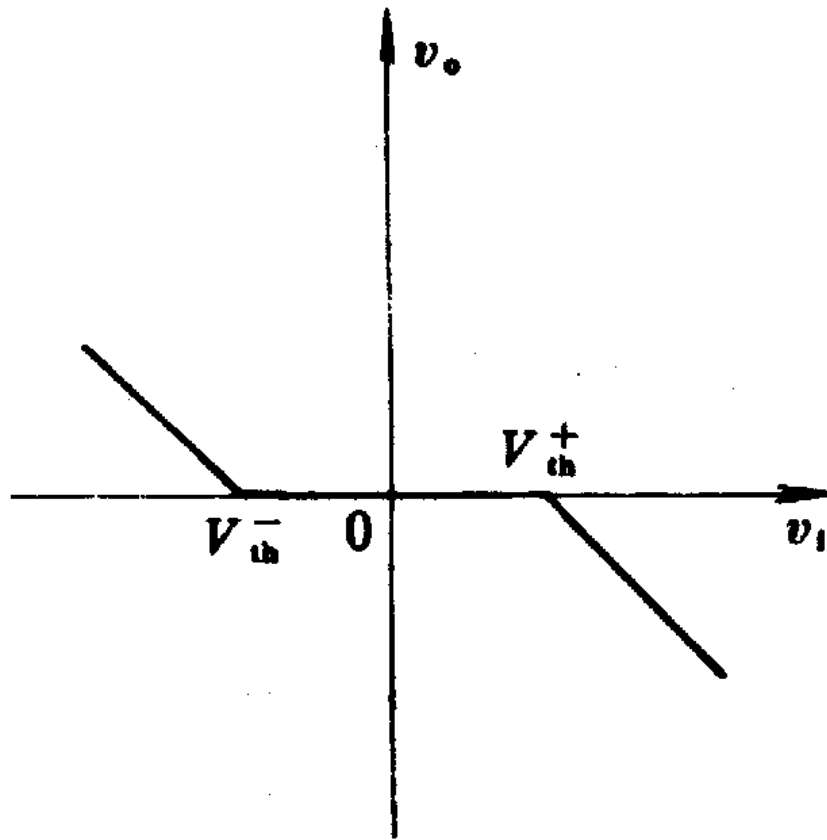
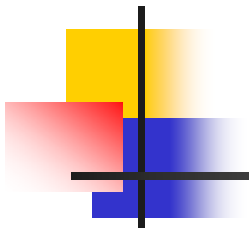


图5.4.2 电路传输特性



---

在输入端加上一个三角波，通过死区电路的输出波形如图5.4.3所示，只有当 $u_i \leq U_{th}^-$ 或 $u_i \geq U_{th}^+$ 才有输出电压随输入信号反相变化。

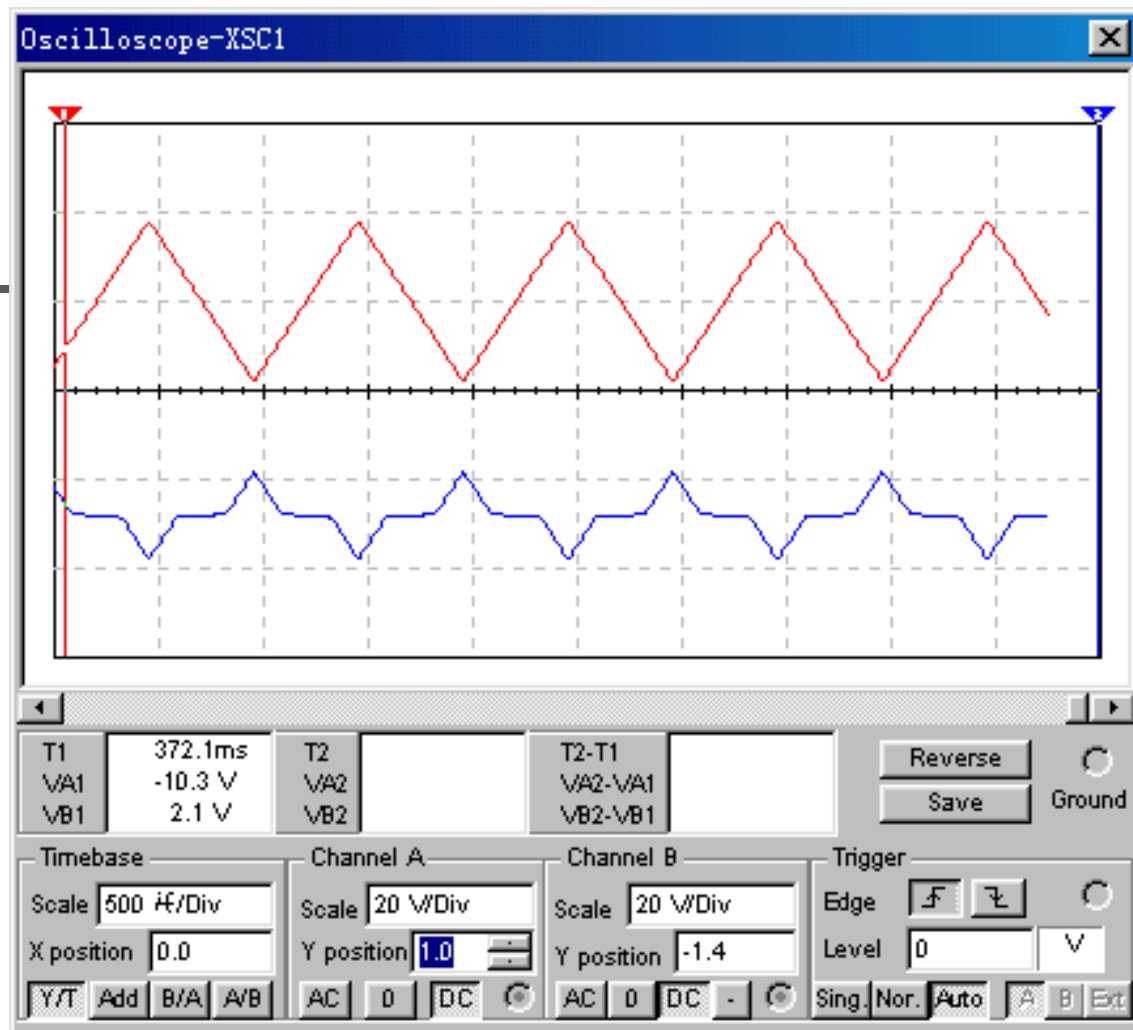



图5.4.3 死区电路的输入输出波形

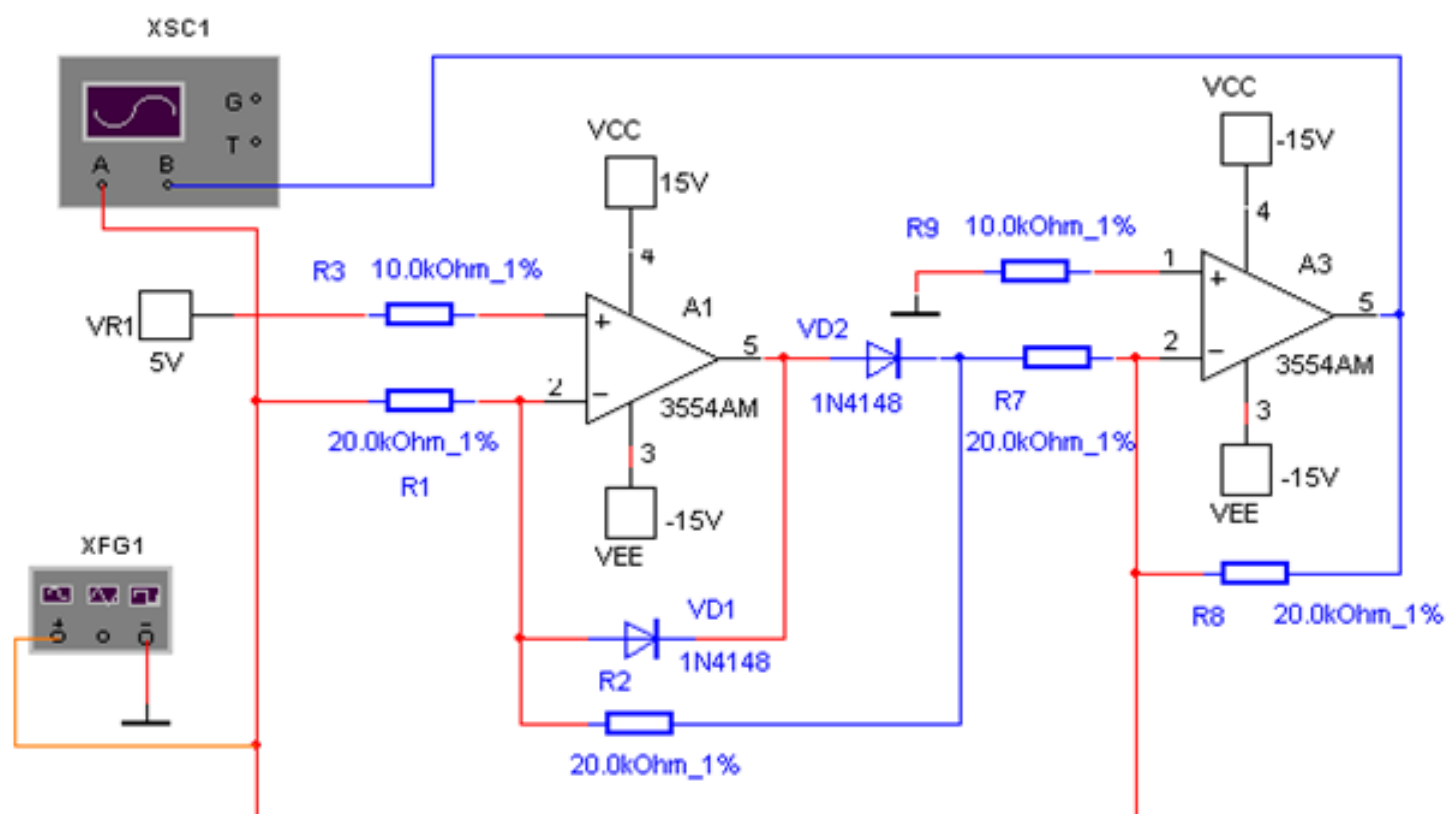
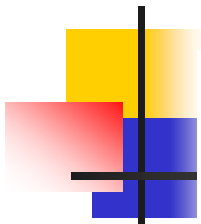


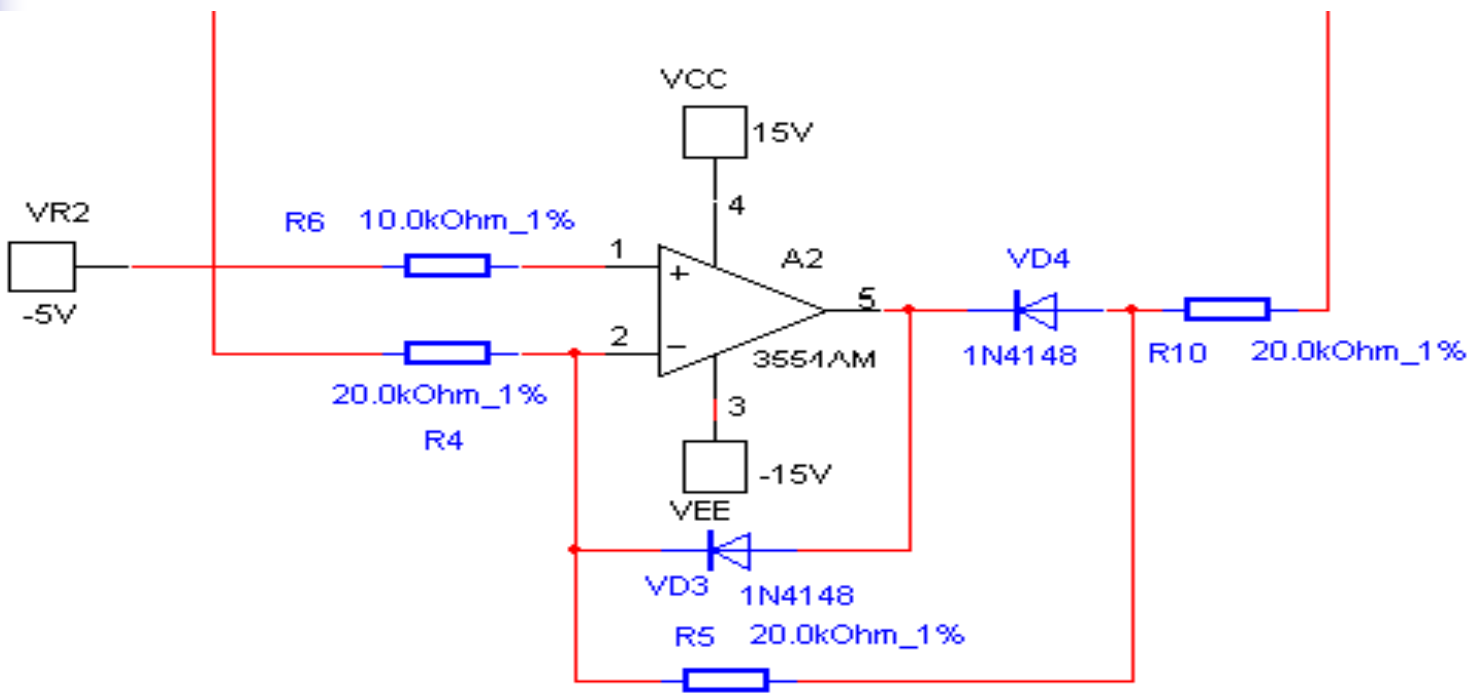
## 5.4.2 精密死区电路

精密死区电路及其传输特性如图5.4.4所示。电路中，把带偏置电压（ $V_{R1}=+5V$ ， $V_{R2}=-5V$ ）的两个半波检波（整流）电路A1、 $VD_1$ （ $VD_1$ ）、 $VD_2$ （ $VD_2$ ）及A2、 $VD_3$ （ $VD_3$ ）、 $VD_4$ （ $VD_4$ ）组合起来。输入信号 $u_i$ 的正、负极性电压分别由正半波检波电路A1和负半波检波电路A2限幅检波后，送入反相相加器A3相加，获输出电压 $u_o$ 。

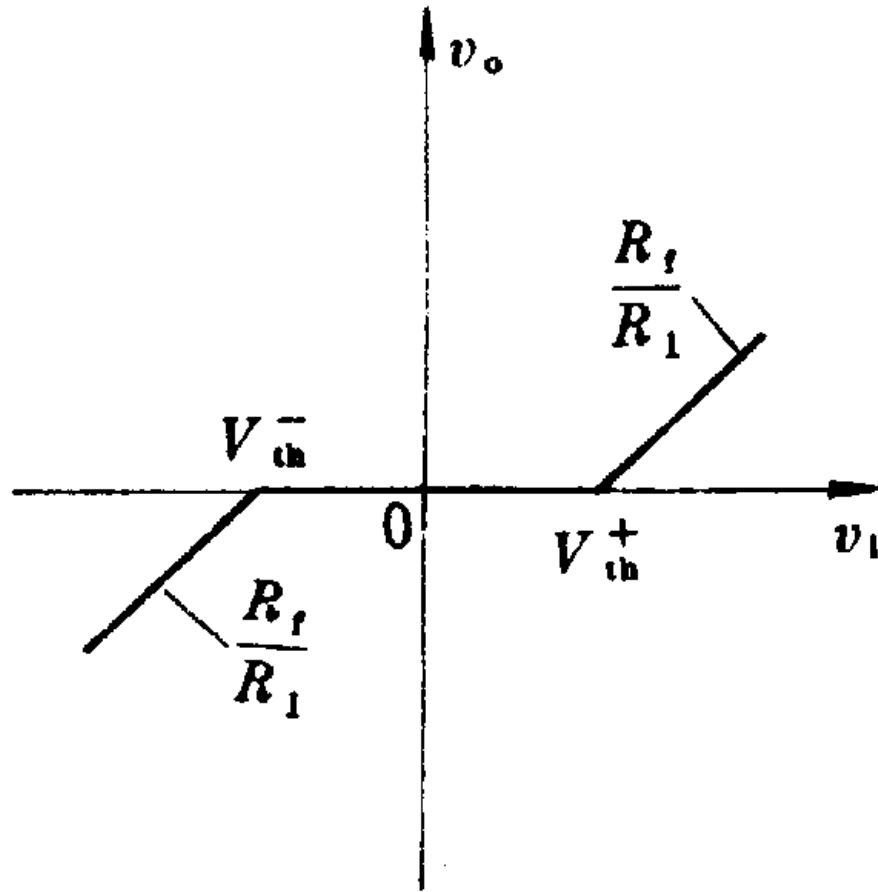


由于二极管VD<sub>1</sub>和VD<sub>3</sub>均加上正偏电压，因而A1和A2检波输出不是以 $u_i=0$ 作起点。当 $U_{th}^- < u_i < U_{th}^+$ 时，两检波电路均无输出电压， $u_o=0$ ，电路处于死区状态； $u_i \leq U_{th}^-$ 或 $u_i \geq U_{th}^+$ 时，A1或从A2有检波输出电压，电路处于同相线性放大状态，整个电路的传输系数为 $A_{UF} = \frac{R_8}{R_7}$ 。经过反相相加器A3反相输出。





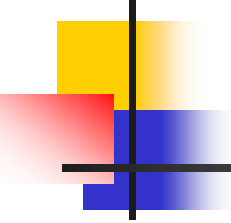
(a)精密死区电路



(b) 电路的传输特性

图5.4.4 精密死区电路及其传输特性





---

在输入端加上一个正弦波，通过死区电路的输出波形如图**5.4.5**所示，只有或时，才有输出电压随输入信号反相变化。

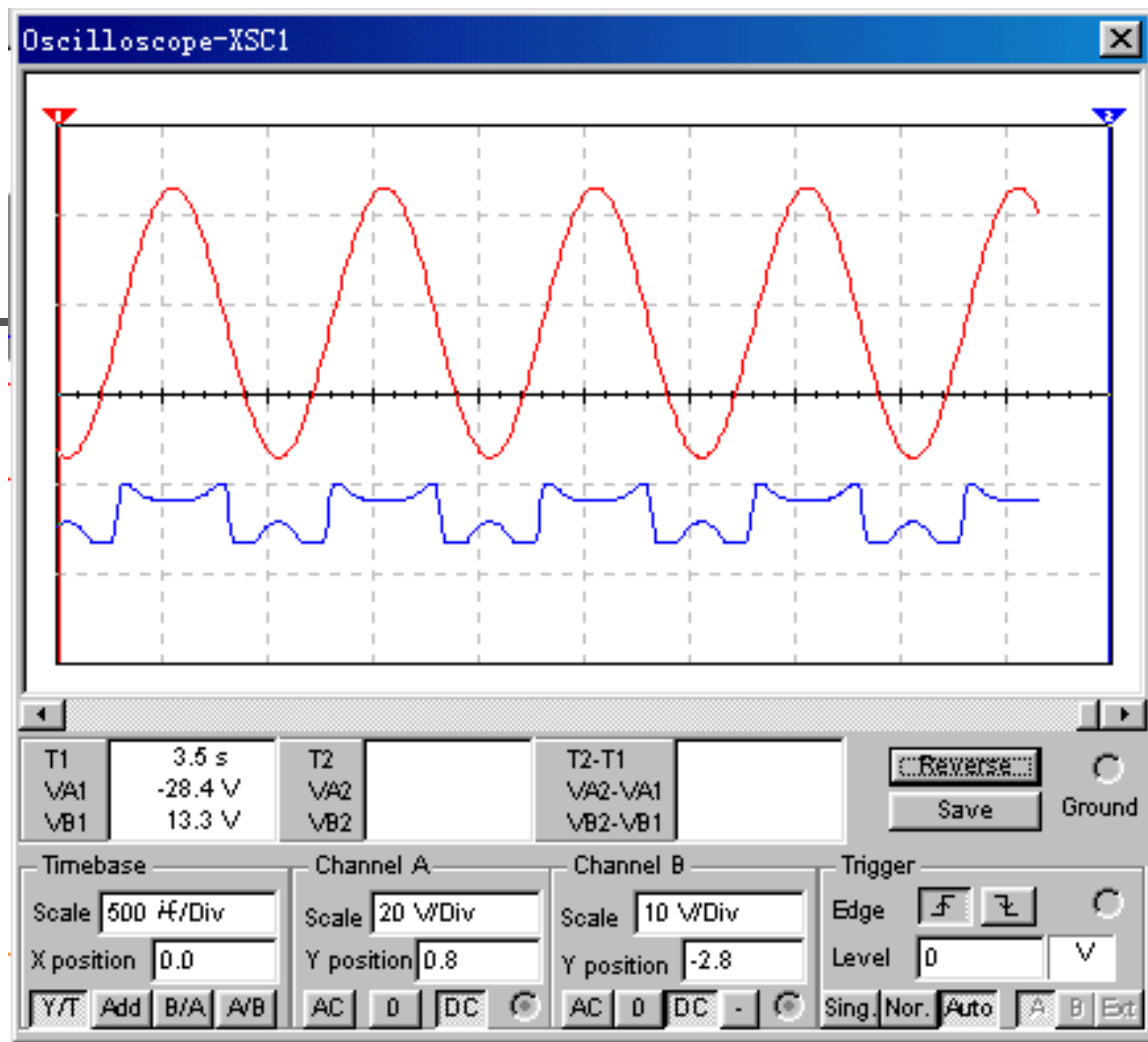


图5.4.5 精密死区电路的输入输出波形



---

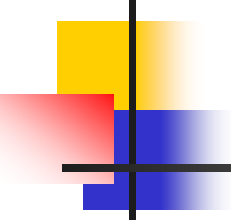
## 5.5 电压 / 电流 ( $U/I$ ) 变换电路

## 5.5.1 负载不接地U/I变换电路

负载不接地电压 / 电流变换原理电路如图

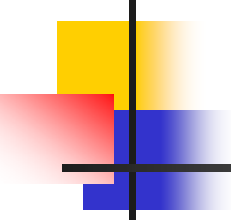
5.5.1 所示，电路中电流表XMM1和XMM2为测量用。负载 $R_L$ 接在反馈支路，兼作反馈电阻。A1为运算放大器，则有：

$$i_L \approx i_R \approx \frac{u_i}{R}$$



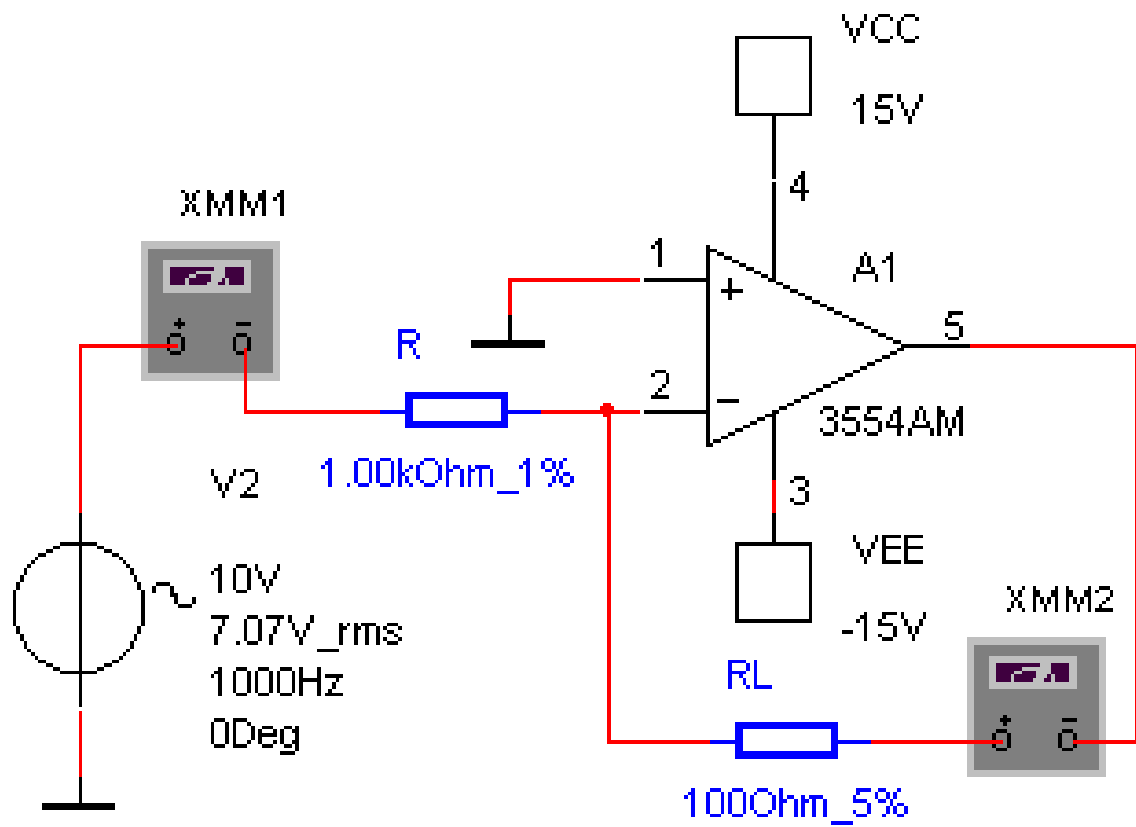
---

可见，负载 $R_L$ 的电流大小与输入电压 $u_i$ （电路图中的V1）成正比例，而与负载大小无关，实现U / I变换。如果 $u_i$ 不变，即采用直流电源，则负载电流 $i_L$ 保持不变，可以构成一个恒流源电路。

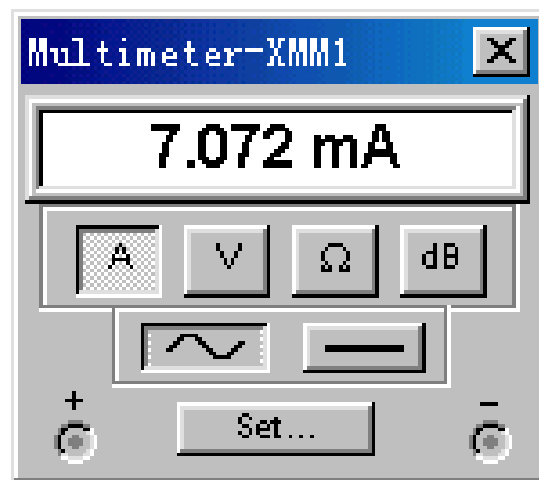


---

图5.5.1所示电路，最大负载电流受运放最大输出电流的限制；最小负载电流又受运放输入电流 $I_B$ 的限制而取值不能太小，而且  $u_o = -i_L \cdot R_L$  值不能超过运放输出电压范围。



(a) 负载不接地电压 / 电流变换电路



(b) 电流 $i_R$ 数值





(c) 电流 $i_L$ 数值

图5.5.1 负载不接地U / I变换电路



## 5.5.2 负载接地的U/I变换电路

负载接地U / I变换电路如图5.5.2所示电路中电流表XMM1为测量用。由图可知：

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i + \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) i_L R_L$$

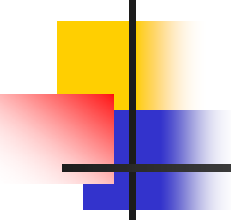
$$i_L R_L = \frac{R_2 \parallel R_L}{R_3 + R_2 \parallel R_L} u_o$$



---

联解上述两式可得:

$$i_L = \frac{u_i \frac{R_f}{R_1}}{\frac{R_3}{R_2} R_L - \frac{R_f}{R_1} R_L + R_3}$$



---

如取  $\frac{R_f}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$ ，则  $i_L = -\frac{u_i}{R_2}$

可见，负载 $RL$ 的电流大小 $i_L$ 与输入电压 $u_i$ （电路图中的V1）成正比例，而与负载大小无关，实现U / I变换。如果 $u_i$ 不变，即采用直流电源，则负载电流 $i_L$ 保持不变，可以构成一个恒流源电路。

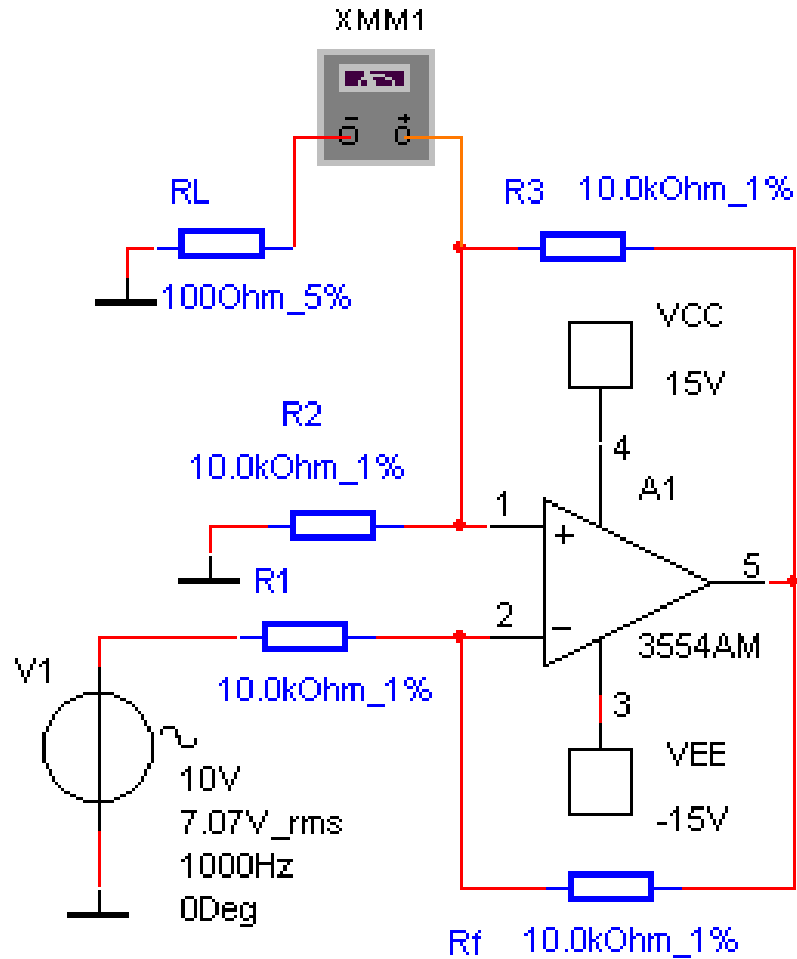
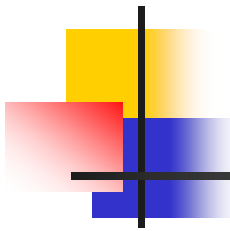


图5.5.2 负载接地U / I变换电路



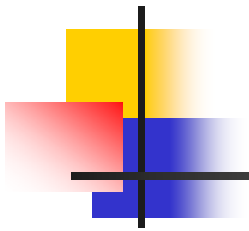
---

## 5.6 电流电压转换电路



---

因为电流环路能很好地抑制噪声，电流可以通过电缆传送到较远距离。而在接收端需要逆变电流信号为电压信号，电流电压转换电路如图5.6.1所示。电流流过电阻 $R_1$ 就能产生电压 $U_i$ ， $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 、 $R_5$ 、与A1组成差分放大器抑制共模干扰，将 $U_i$ 放大为输出电压 $U_o$ 。

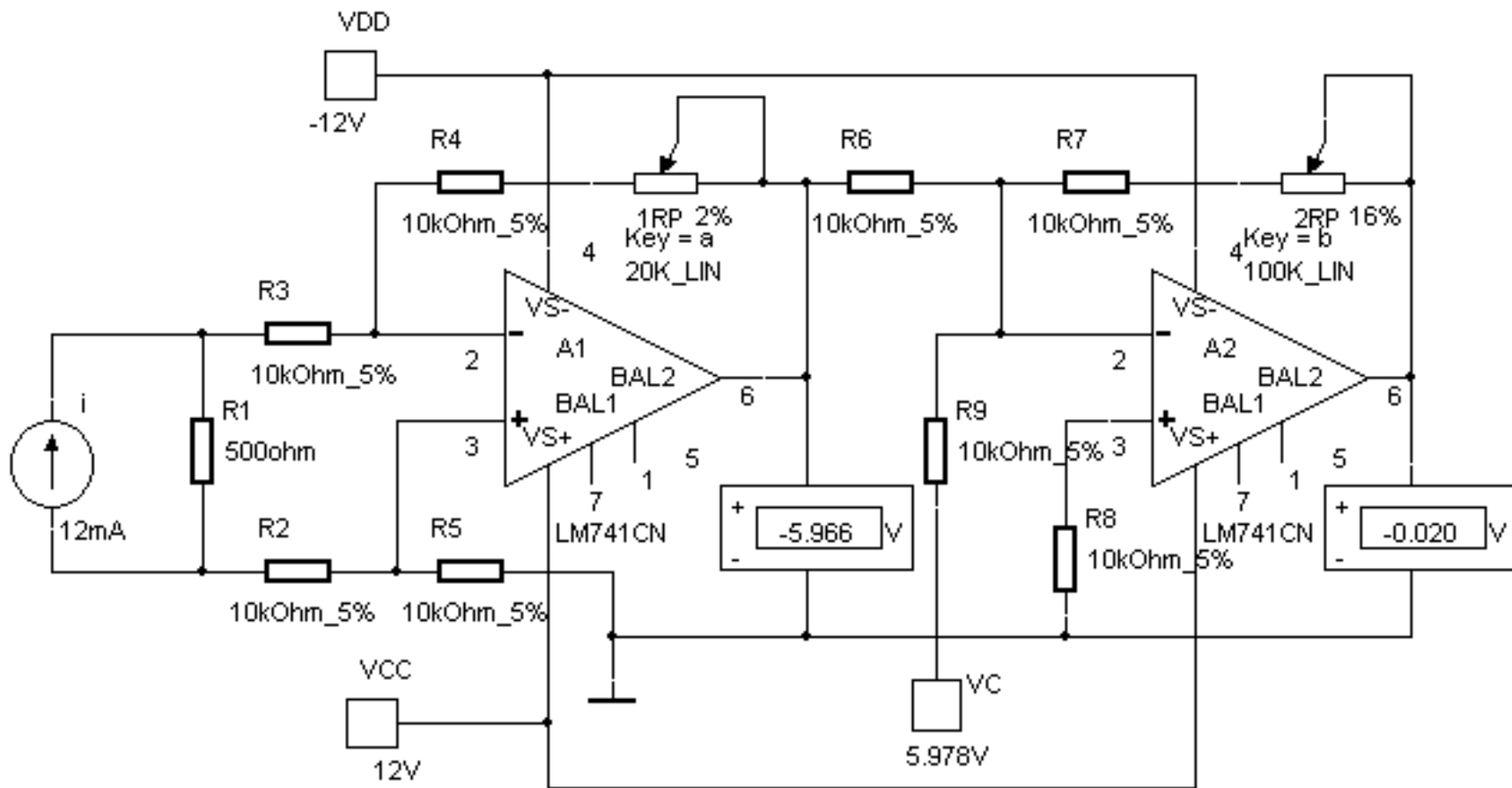


---

在工业控制中需要将4mA~20mA的电流信号转换成±10V的电压信号，以便送到计算机进行处理。这种转换电路以4mA为满量程的0%对应-10V；12mA为50%对应0V；20mA为100%对应+10V。

在电路调试时要仔细调节RP1、RP2，否则电压表的量程得不到正确结果。



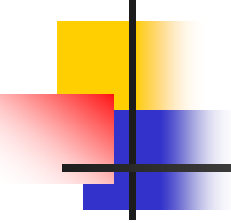


5.6.1 电流电压转换电路



---

## 5.7 峰值检出电路



峰值检出电路是一种由输入信号自行控制采样或保持的特殊采样—保持电路。当复位控制信号 $u_c$ 末到时，输出信号自动跟踪输入信号的峰值，并自动保持相邻两复位控制信号期间的输入信号的最大峰值，一旦下一个复位控制信号到来，保持电容CH上的信号立即回零，并接着进行下一次峰值检出。理想峰值检出电路的输入电压 $u_s$ 和输出电压 $u_o$ 波形如图5.7.1所示。

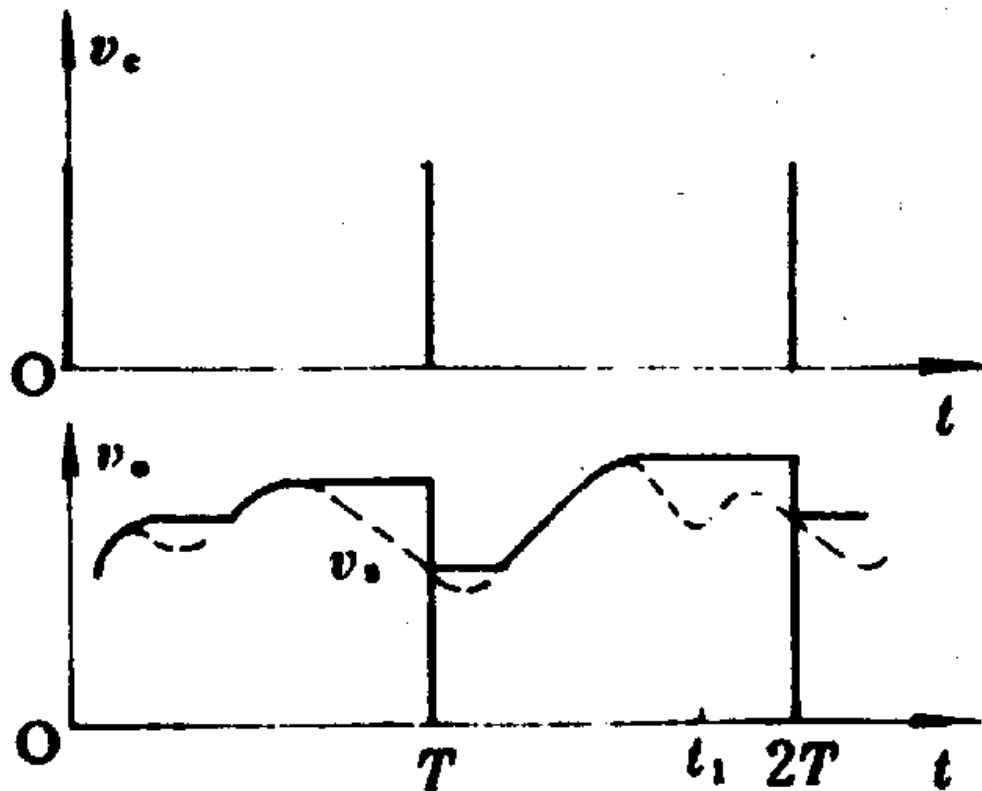
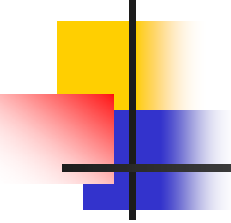
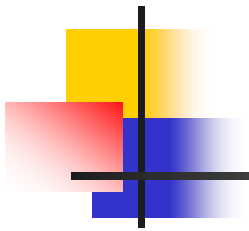


图5.7.1理想峰值检出电路  
的输入电压  $u_s$  和输出电压  $u_o$  波形

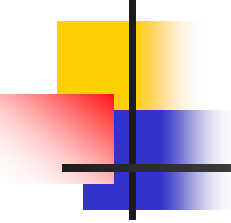


---

一个同相峰值检出电路如图5.7.2所示。它由A1和VD1、VD2构成的半波整流电路、保持电容CH、起缓冲作用的电压跟随器A2及复位开关管VT1组成。

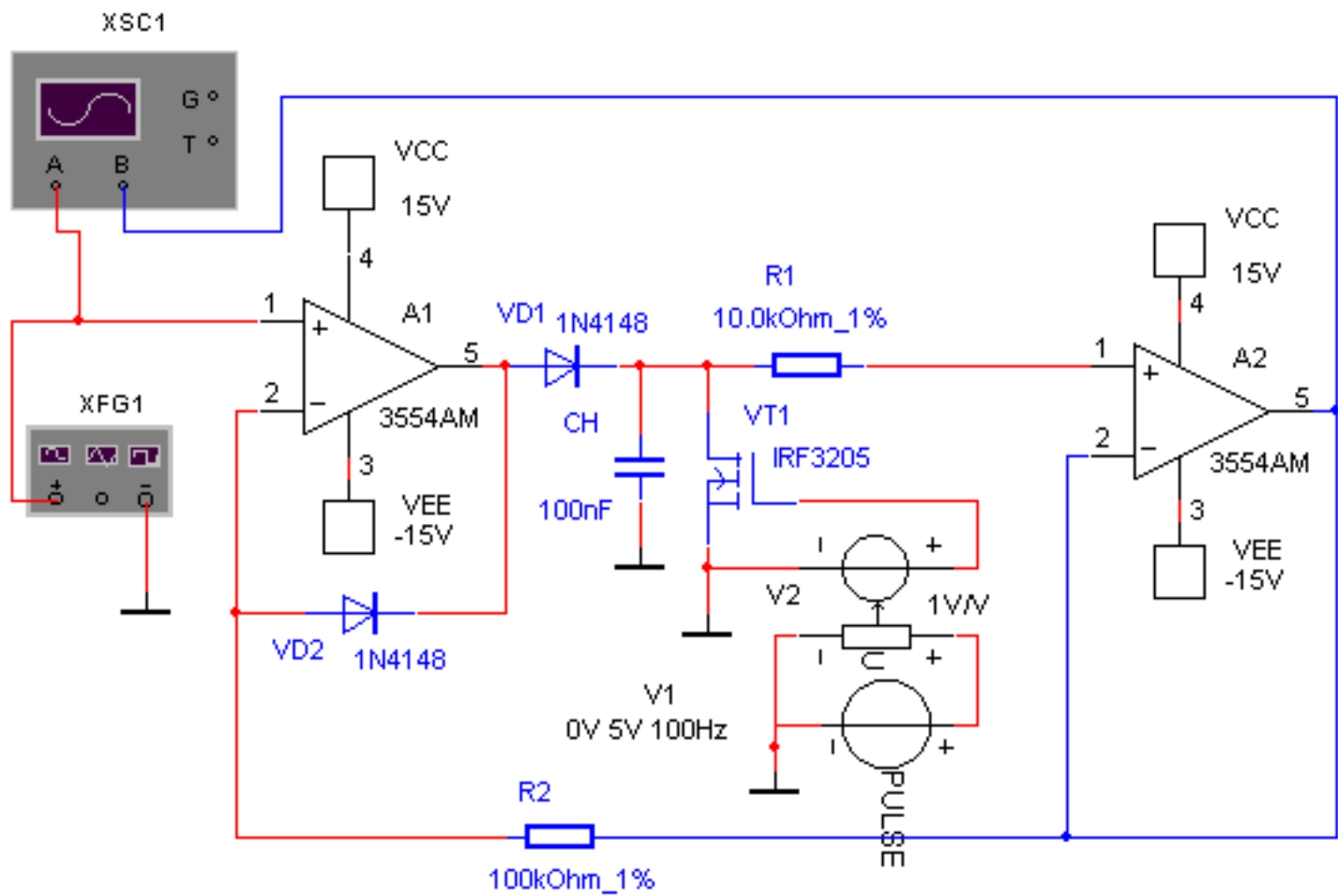


由图可知，A1和A2构成负反馈系统。当复位控制信号  $U_c < 0$  时，场效应管VT2截止，电路处于采样—保持状态， $U_o = U_{CH}$ ，如  $U_s > U_o$ ，则  $U_{o1} > U_{CH}$ ，VD2截止、VD1导通，误差电压经A1放大后，通过VD1对CH充电，使  $U_{CH}$ 、 $U_o$  跟踪  $U_s$ ；如  $U_s < U_o$ ，则VD2导通、VD1截止， $U_o = U_{CH}$  不再跟踪  $U_s$ ，保持已检



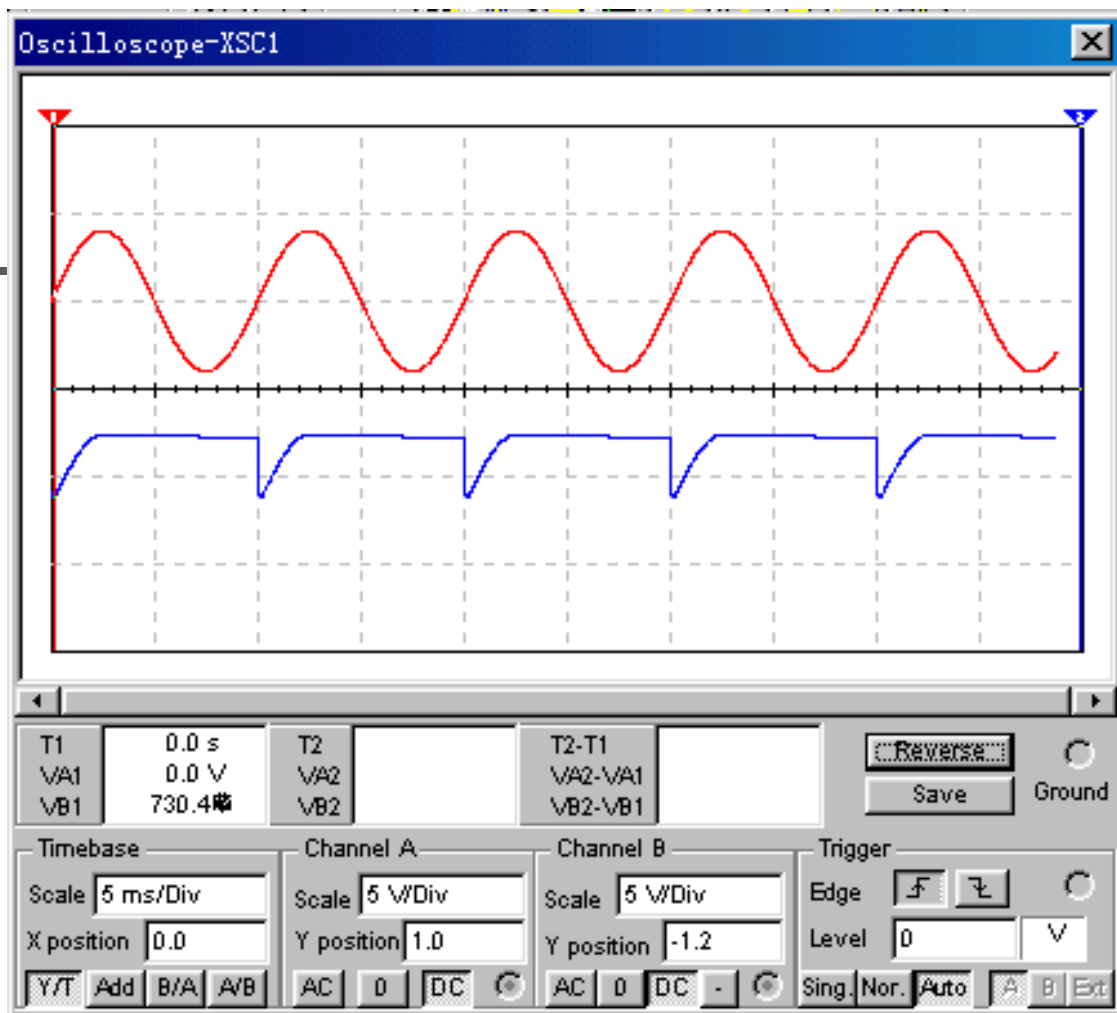
---

出的 $u_s$ 的最大峰值。VD2导通提供A1负反馈通路，防止A1进入饱和状态。当 $u_c > 0$ 时，即复位控制信号有效时，VT1导通，CH通过VT1快速放电， $u_{CH} = 0$ ，当 $u_c < 0$ 时，电路又开始进入峰值检出过程。

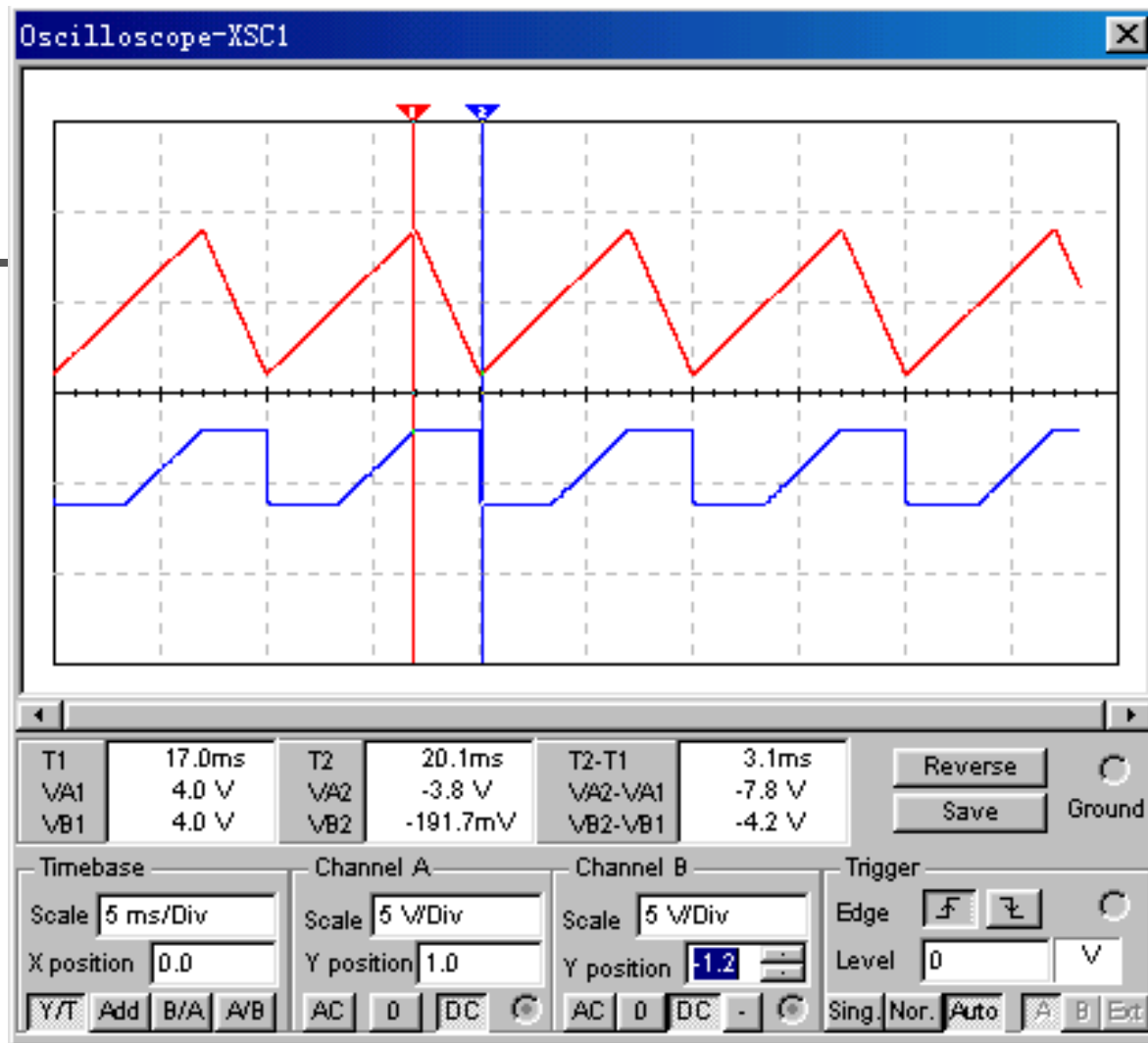


(a) 同相峰值检出电路





(b) 输入正弦波的峰值检出

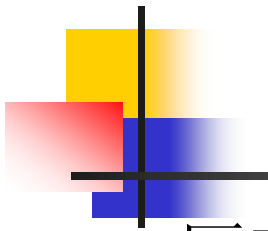


(c) 输入锯齿波的峰值检出  
图5.7.2 同相峰值检出电路

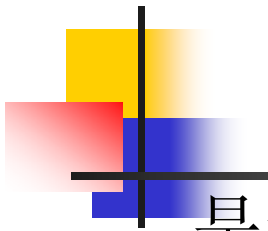


---

## 5.8 VFC（电压—频率变换）电路



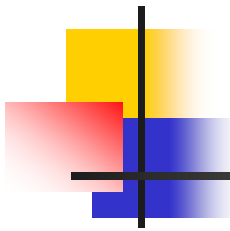
VFC（电压—频率变换）电路能把输入信号电压变换成相应的频率信号，即它的输出信号频率与输入信号电压值成比例，故又称之为电压控制振荡器（VCO）。VFC电路通常主要由积分器、电压比较器、自动复位开关电路等三部分组成。各种类型VFC电路的主要区别在于复位方法及复位时间不同而已。由通用模拟集成电路组成的VFC电路，尤其



是专用模拟集成V / F转换器，其性能稳定、灵敏度高、非线性误差小。

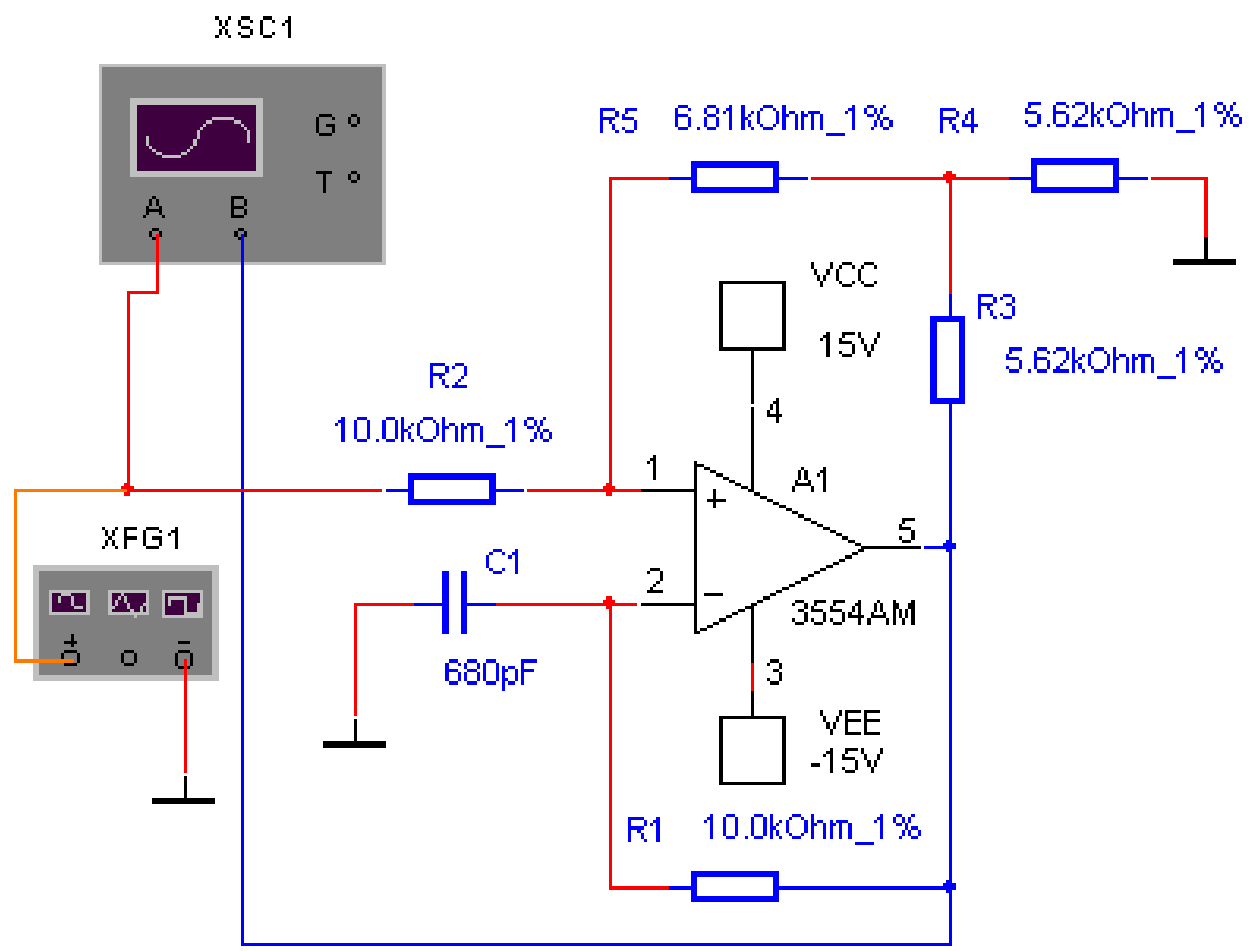
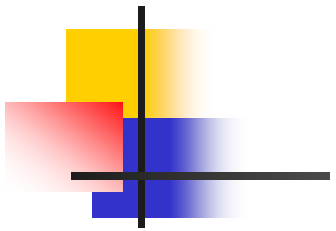
图5.8.1所示为简单的运算放大器组成的VFC电路。从图可知，当外输入信号 $u_i=0$ 时，电路为方波发生器。振荡频率 $f_0$ 为：

$$f_0 = \frac{1}{2R_1C_1 \ln\left(1 + \frac{2R_4}{R_3}\right)}$$

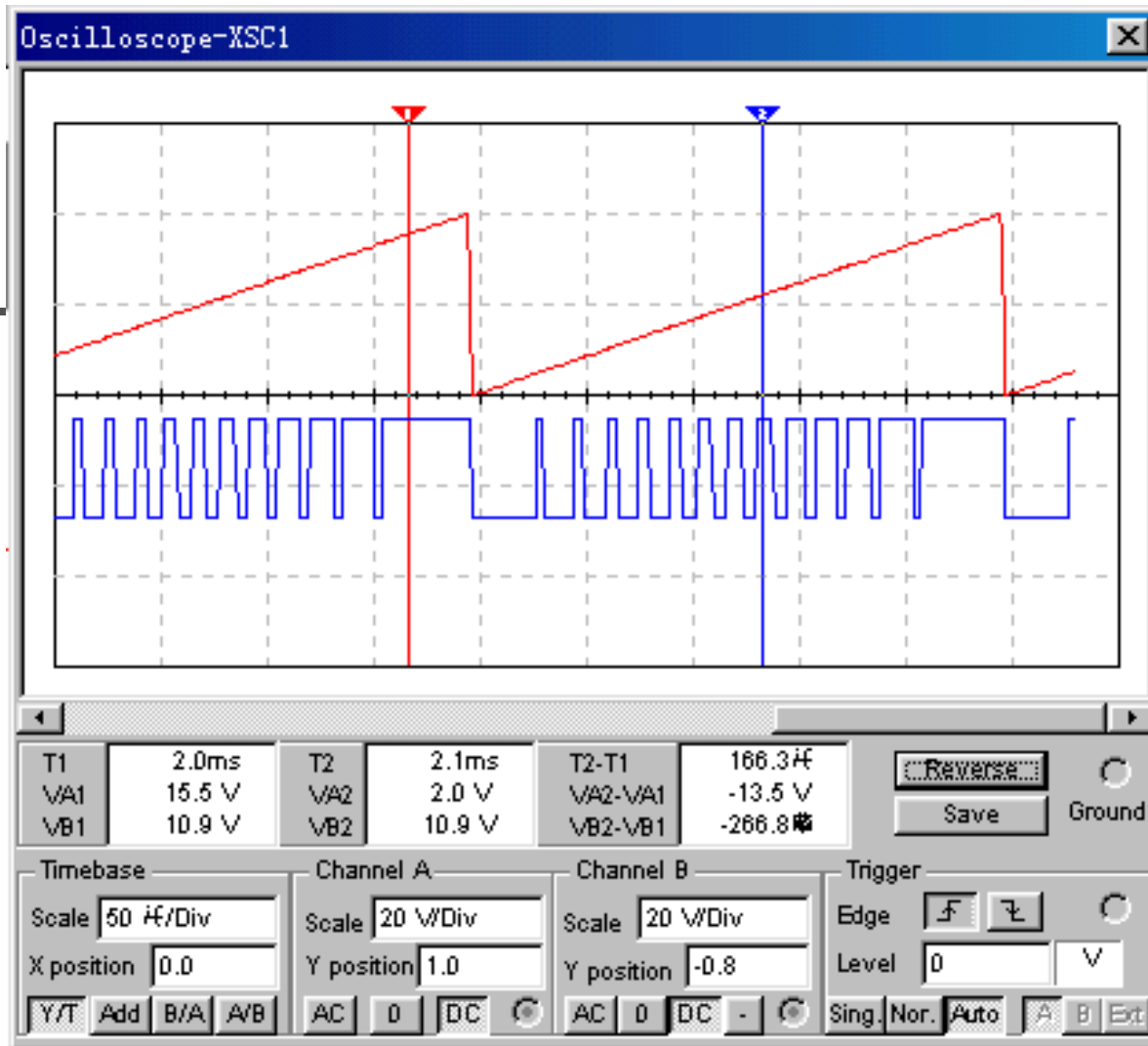


---

当 $u_i \neq 0$ 时，运放同相输入端的基准电压由 $v_i$ 和反馈电压 $F_u u_o$ 决定。如 $u_i > 0$ 则输出脉冲的频率低， $f < f_o$ ；如 $u_i < 0$ 则输出脉冲的频率升高， $f > f_o$ 。可见，输出信号频率随输入信号电压 $u_i$ 变化，实现V / F变换。

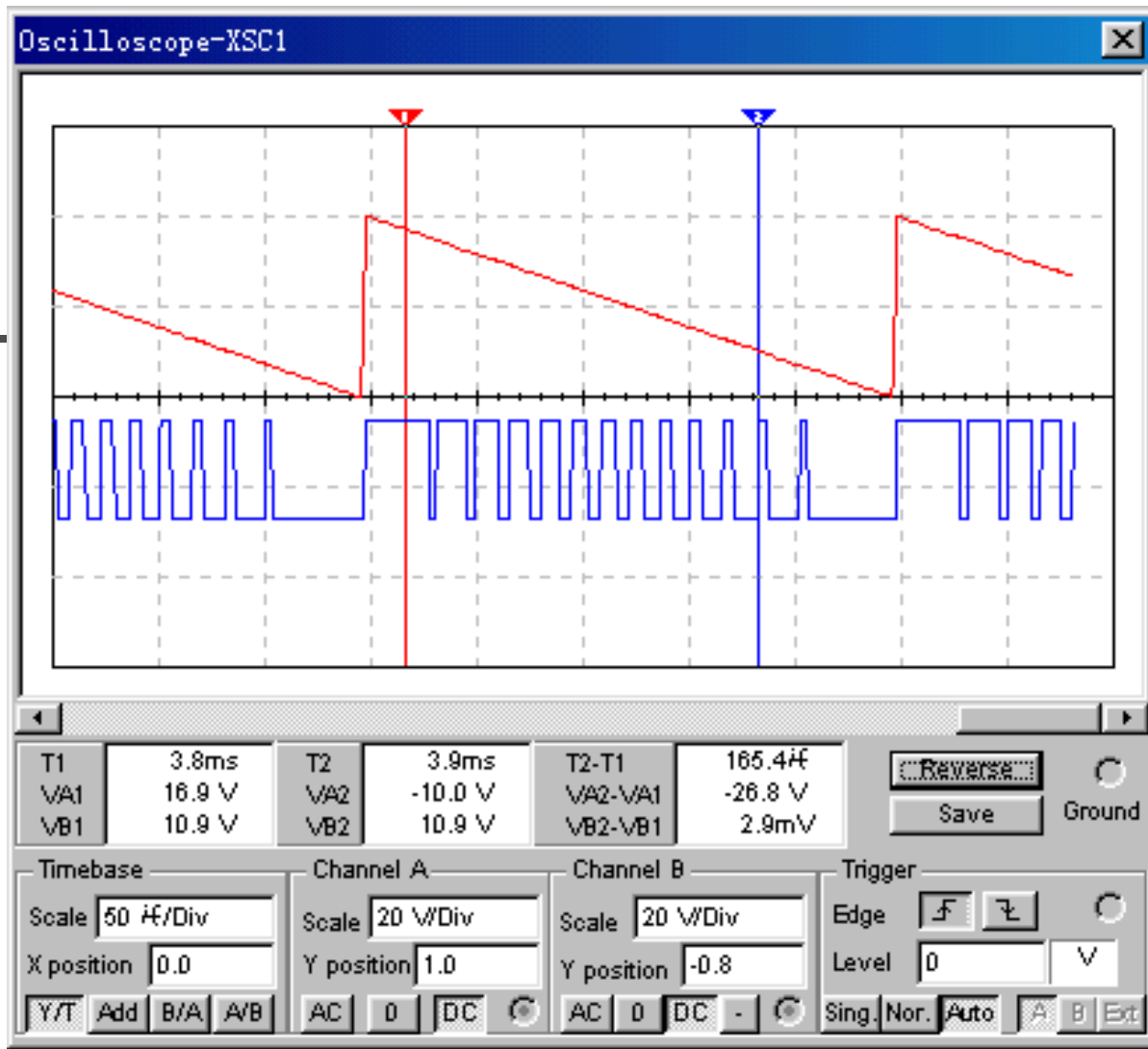


(a) 运算放大器组成的VFC电路



(b)  $u_i$ 上升, 输出脉冲的频率降低





(c)  $u_i$ 下降，输出脉冲的频率升高  
图5.8.1 运算放大器组成的VFC电路



---

## 5.9 负阻抗变换器



---

图5.9.1所示是一个同相放大器，其输入阻抗很高，输出电压为：

$$\dot{U}_o = \dot{U}_i \left( 1 + \frac{R_2}{Z} \right) \quad (5.9.1)$$

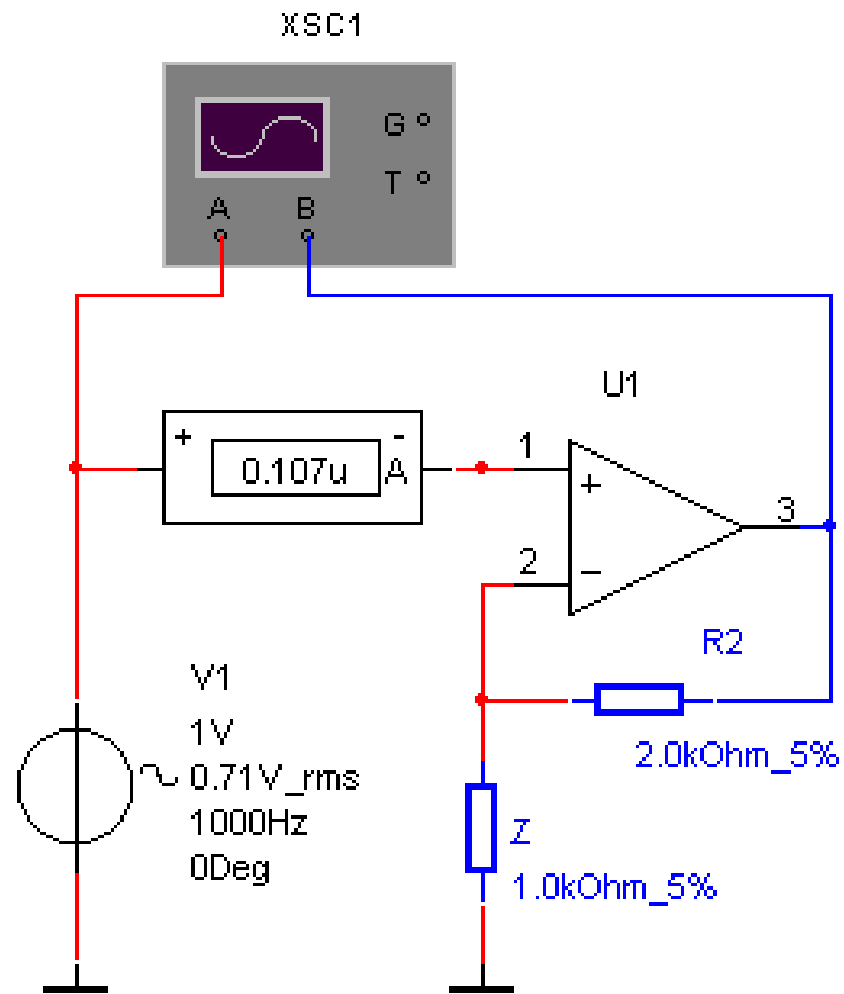
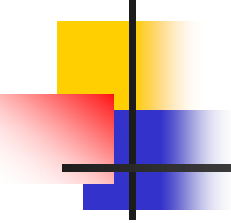


图5.9.1 同相放大器电路



---

在图5.9.1所示的同相放大器上接入电阻 $R_1$ 构成负阻抗变换器电路，如图5.9.2所示。

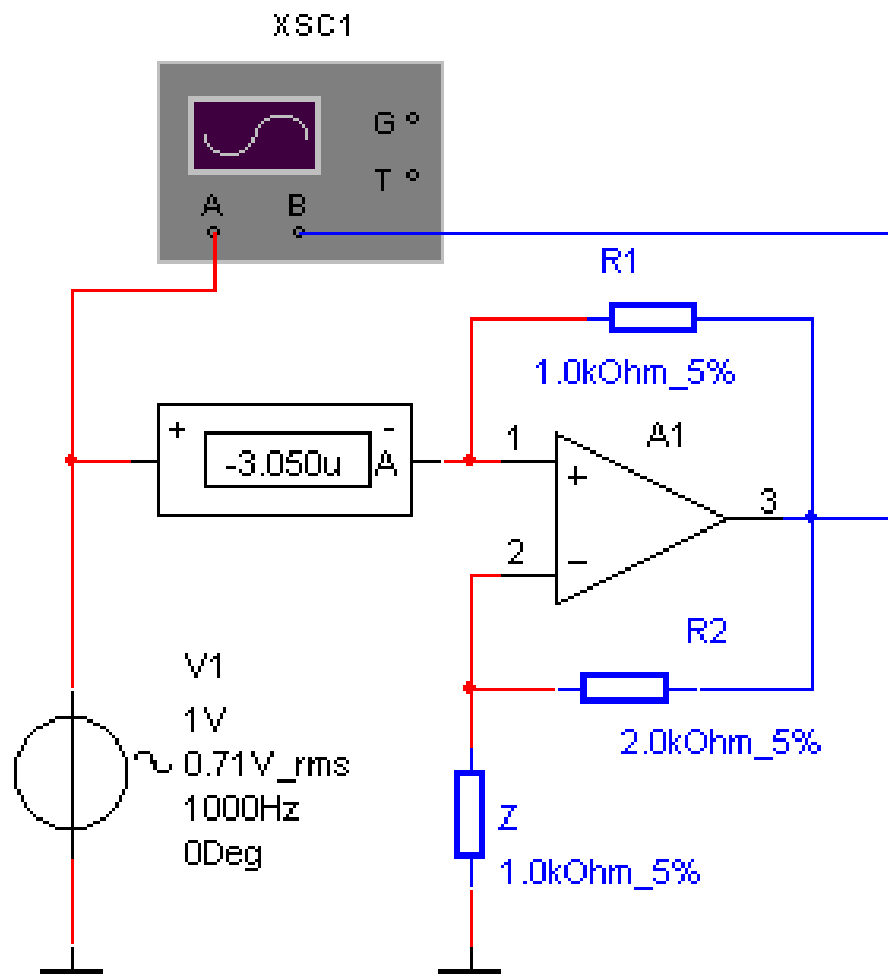
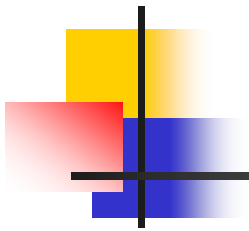
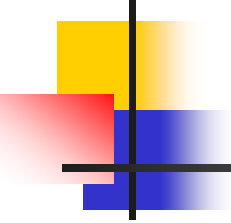


图5.9.2 负阻抗变换器电路



电阻 $R_1$ 接入后，其等效输入阻抗将发生很大变化。这时由输入电压 $U_i$ （图中的V1）引起的输入电流为：

$$\dot{I}_i = \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_o}{R_1} \quad (5.9.2)$$

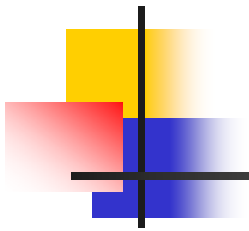


---

将式 (5.9.1) 代入式 (5.9.2) , 可得等效输入阻抗为:

$$Z_{ie} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = -\frac{ZR_1}{R_2} \quad (5.9.3)$$





由式 (5.9.3) 可知, 从阻抗 $Z$ 变换到等效输入阻抗 $Z_{ie}$ , 它不仅按比值 $R_1 / R_2$ 变化, 而且其特性也由正变为负, 因此称之为负阻抗变换器。

图5.9.2所示的负阻抗变换器只适用于信号源内阻抗

$|z_s| < |z|$  的情况, 否则易自激。若将 $Z$ 取为电阻 $R$ , 则等效输入阻抗为负电阻。

$$Z_{ie} = -\frac{RR_1}{R_2} \quad (5.9.4)$$

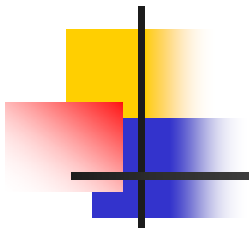


---

称之为负电阻变换器。

若将 $Z$ 取为电容 $C$ ，则等效输入阻抗为电感

$$Z_{ie} = j\omega \frac{R_1}{R_2 \omega^2 C} = j\omega L_e \quad (5.9.5)$$



---

(5.9.5) 式中，为等效模拟电感，所以称之为模拟电感变换器。此等效模拟电感是随频率变化的。



---

## 5.10 阻抗模拟变换器



## 5.10.1 阻抗模拟变换器电路结构与原理

---

图5.10.1所示是阻抗模拟变换器电路。在图5.10.1中，运放A1是同相放大器，起隔离作用和放大作用，运放A2是阻抗变换电路。

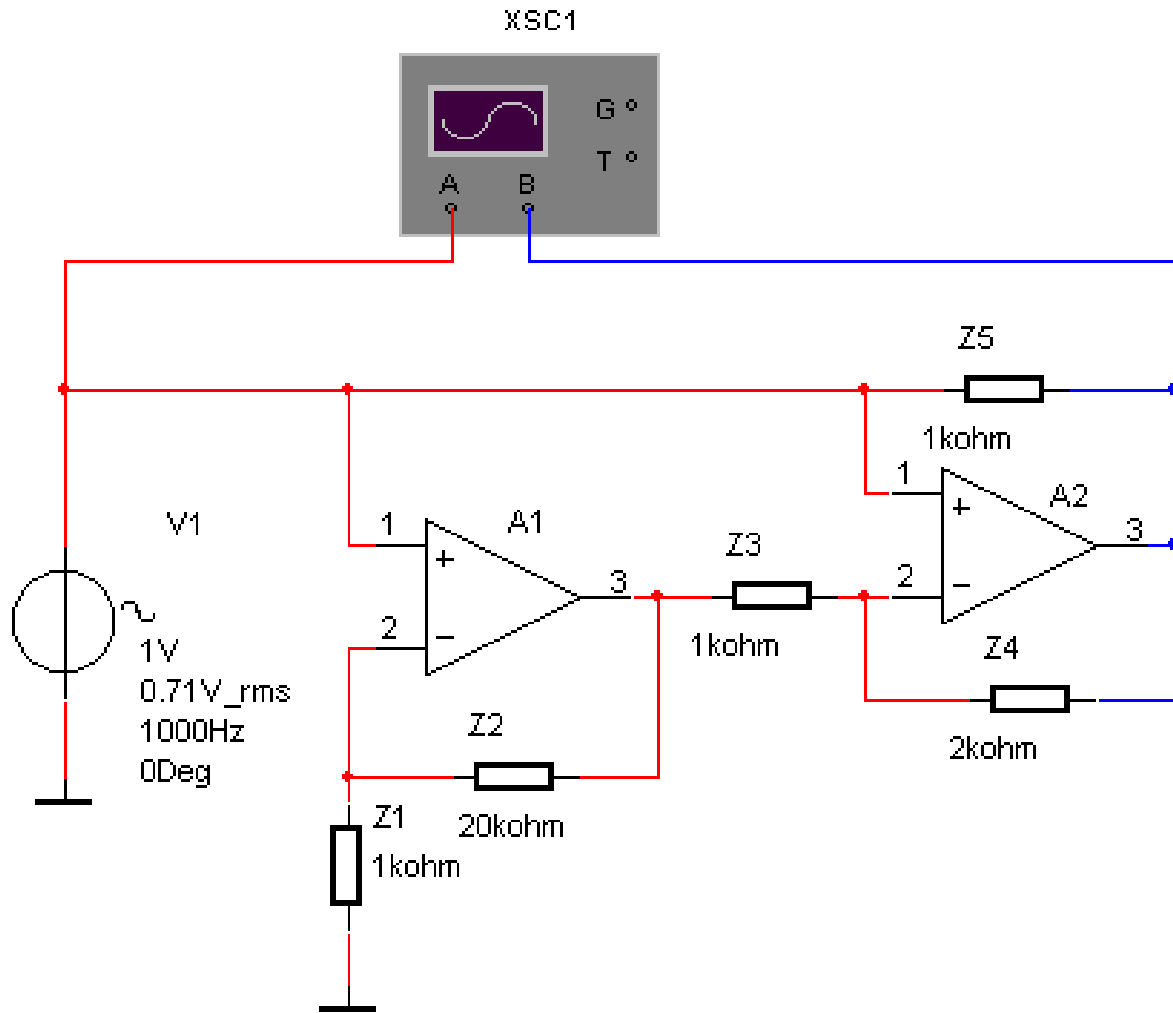


图5.10.1 阻抗模拟变换器电路



---

下面分析此阻抗变换器的工作原理。

运放A1的输出电压为:

$$\dot{U}_{o1} = \dot{U}_i \left( 1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \quad (5.10.1)$$

运放A2的输出电压为:

$$\dot{U}_{o2} = \dot{U}_i \left( 1 + \frac{Z_4}{Z_3} \right) - \dot{U}_{o1} \frac{Z_4}{Z_3} \quad (5.10.2)$$



由式 (5.10.1) 和式 (5.10.2) 可得:

$$\dot{U}_{\omega 2} = \dot{U}_i \left( 1 - \frac{Z_2 Z_4}{Z_1 Z_3} \right) \quad (5.10.3)$$

由图5.10.1可知, 输入电流为:

$$\dot{I}_i = \dot{I}_5 = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{\omega 2}}{Z_5} \quad (5.10.4)$$





将式 (5.10.3) 代入式 (5.10.4) , 可得等效输入阻抗为:

$$Z_{ie} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = \frac{Z_1 Z_3 Z_5}{Z_2 Z_4} \quad (5.10.5)$$

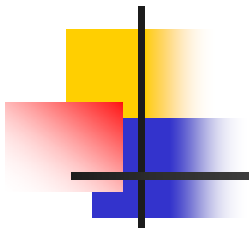
根据式 (5.10.5) , 当选择不同性质的元件时, 则可构成不同性质的阻抗模拟电路。如可构成模拟对地电感电路、模拟对地电容电路、模拟对地负阻抗电路等。



## 5.10.2 模拟对地电感电路

若取 $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_5$ 分别为电阻 $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_5$ 的阻抗, 而 $Z_4$ 为电阻 $R_4$ 和电容 $C_4$ 的并联阻抗, 则构成等效模拟电感电路, 如图5.10.2所示。其等效阻抗为:

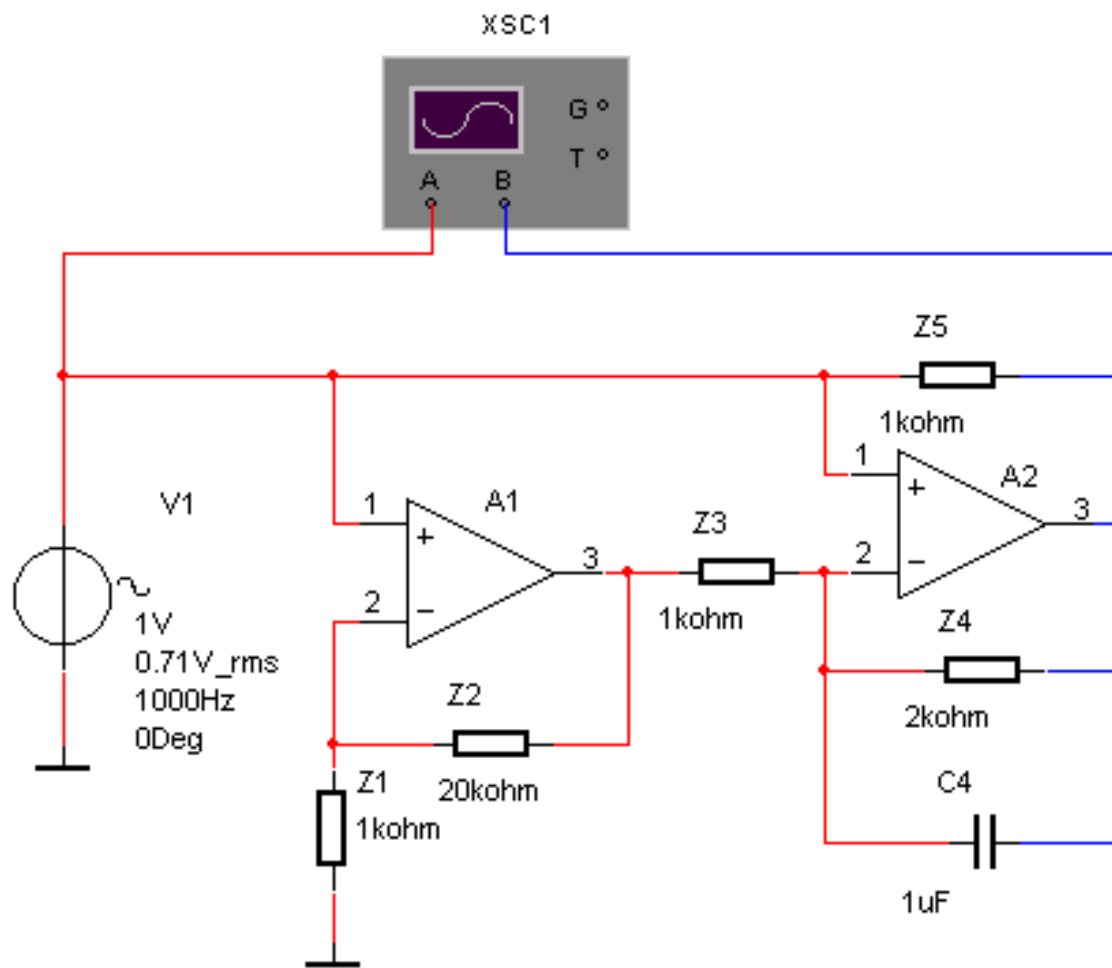
$$Z_{ie} = \frac{R_1 R_3 R_5}{R_2 R_4} + j\omega \frac{C_4 R_1 R_3 R_5}{R_2} \quad (5.10.6)$$



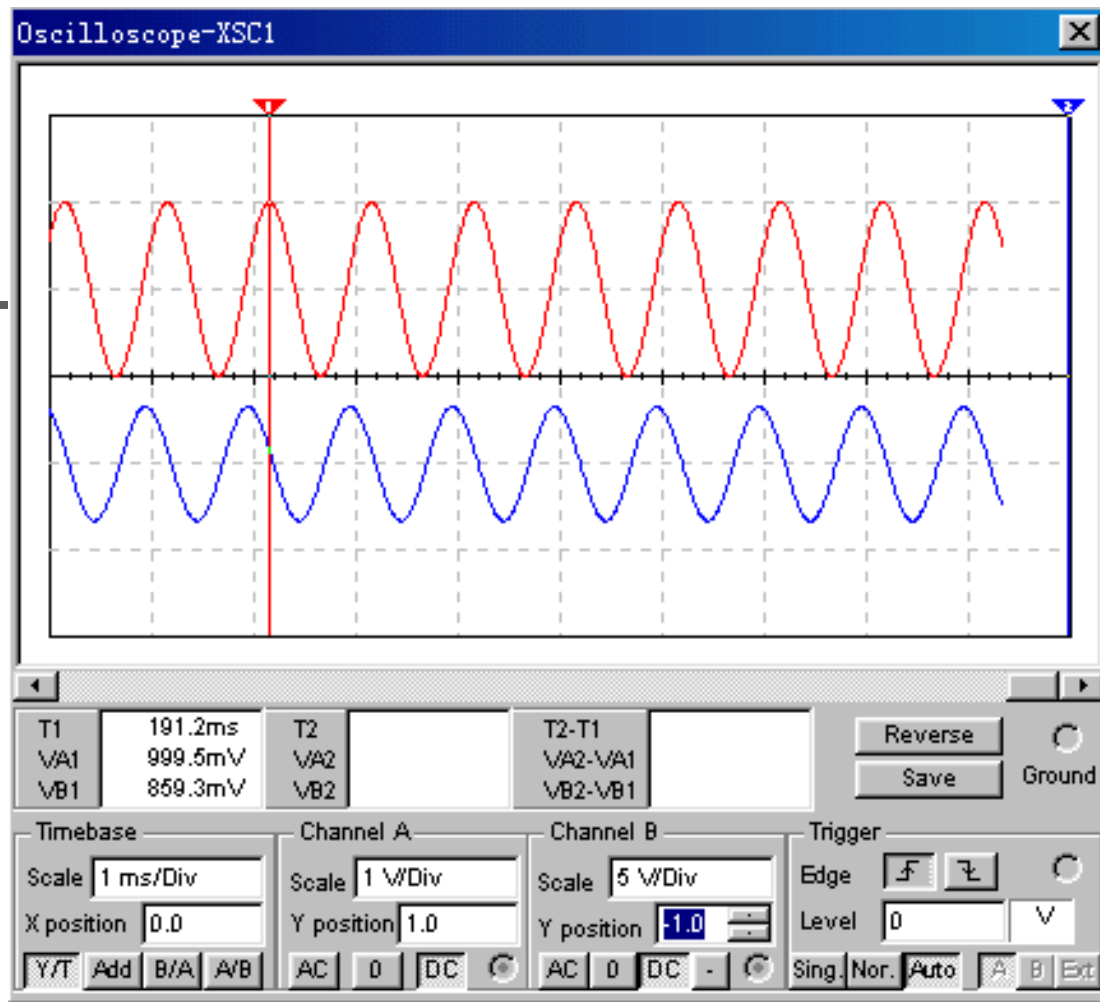
其等效电感和等效内阻分别为:

$$L_e = \frac{C_4 R_1 R_3 R_5}{R_2}, R_e = \frac{R_1 R_3 R_5}{R_2 R_4} \quad (5.10.7)$$

由式 (5.10.7) 可知, 调节  $R_1$ ,  $R_3$ ,  $R_5$  中任一个电阻, 即可线性调节等效电感的大小。若增大电阻  $R_4$ , 可获得低内阻的等效模拟电感。



(a) 等效模拟电感电路



(b) 等效模拟电感电路输入输出波形  
 图5.10.2 等效模拟电感电路和输入输出波形



### 5.10.3 模拟对地电容电路

---

若取 $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_4$ ,  $Z_5$ 分别为电阻 $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_4$ ,  $R_5$ 的阻抗, 而 $Z_3$ 为电容 $C_3$ , 则构成等效模拟电容电路, 如图5.10.3所示。其等效阻抗为:

$$Z_{ie} = \left( j\omega \frac{C_3 R_2 R_4}{R_1 R_5} \right)^{-1} \quad (5.10.8)$$

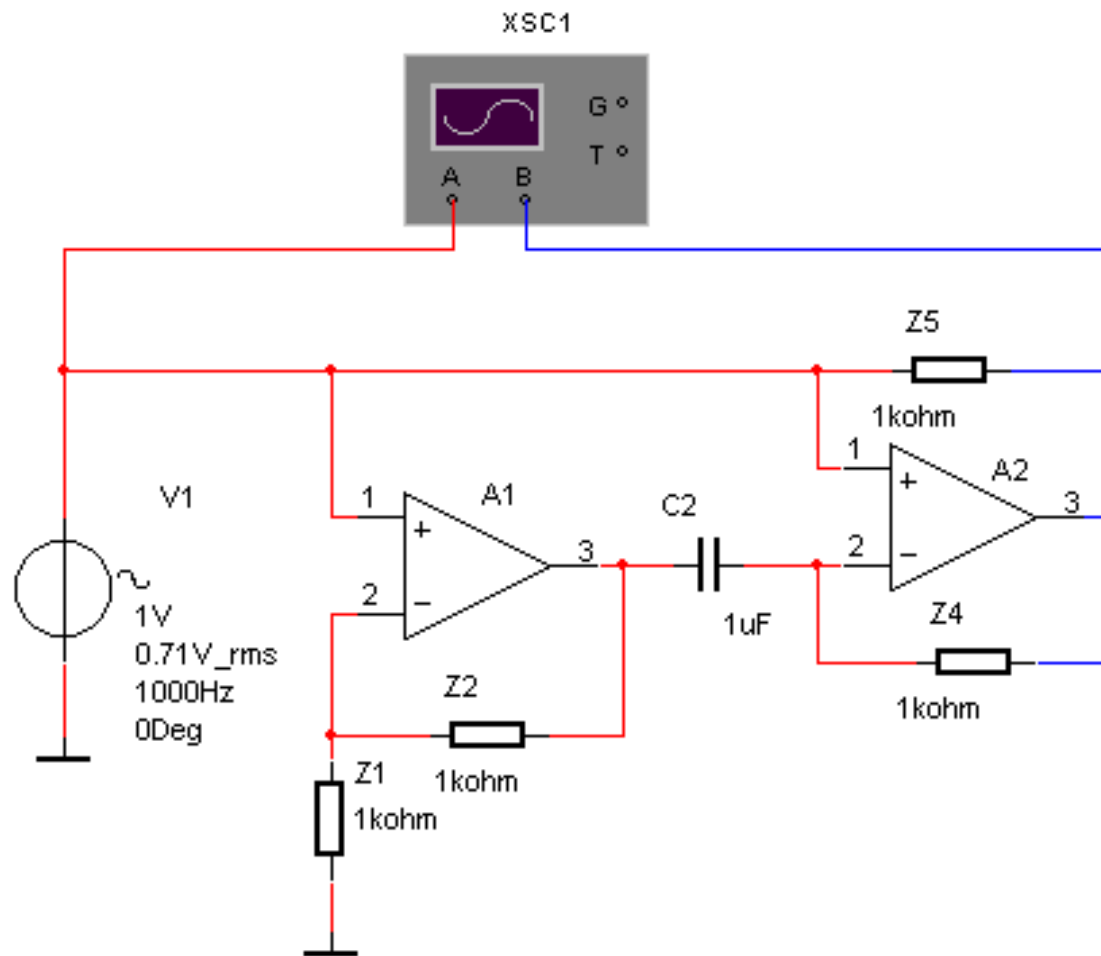


---

其等效电容为:

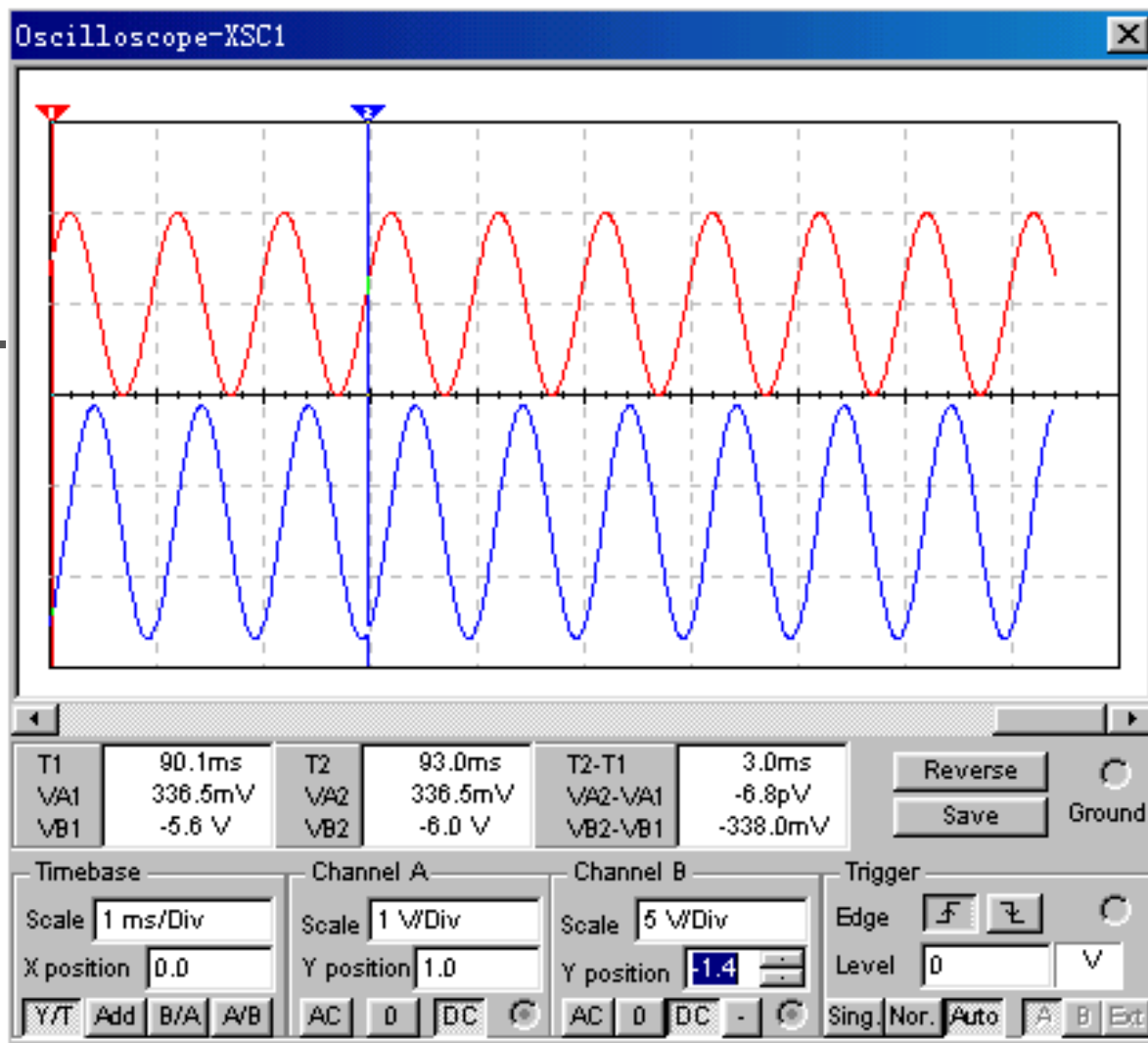
$$C_e = \frac{C_3 R_2 R_4}{R_1 R_5} \quad (5.10.9)$$

调节R2, R4中任一个电阻, 即可线性调节电容量的大小。



(a) 等效模拟电容电路





(b) 等效模拟电容电路输入输出波形

图5.10.3等效模拟电容电路和输入输出波形



## 5.10.4 模拟对地负阻抗电路

若取  $Z_1$  和  $Z_3$  分别为电容  $C_1$ ,  $C_3$ , 而  $Z_2$ ,  $Z_4$  分别取为电阻  $R_2$ ,  $R_4$ ,  $Z_5$  中的任一阻抗, 则等效对地阻抗为:

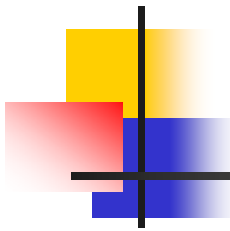
$$Z_{ie} = - \frac{Z_5}{\omega^2 C_1 C_3 R_2 R_4} \quad (5.10.10)$$

由式 (5.10.10) 可知, 这是一个  $Z_5$  的负阻抗变换器, 其阻抗随频率变化。



---

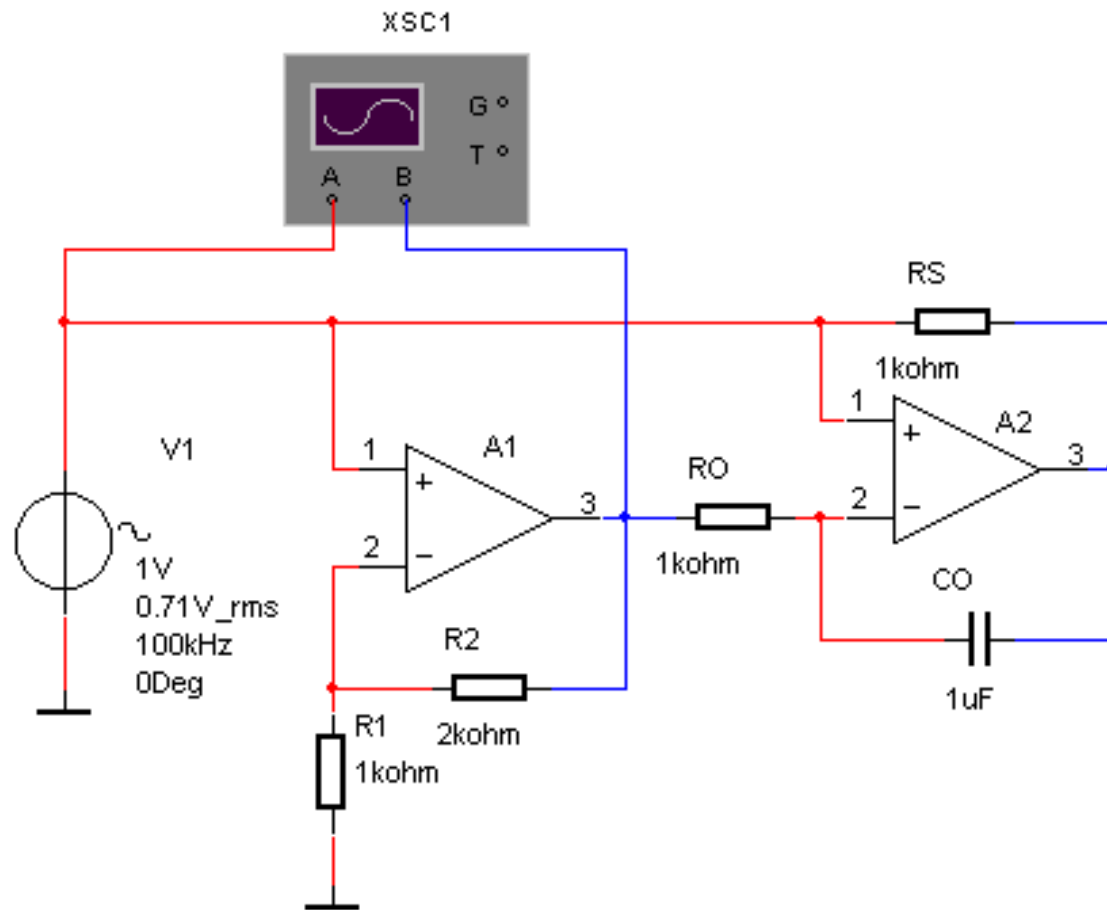
## 5.11 模拟电感器



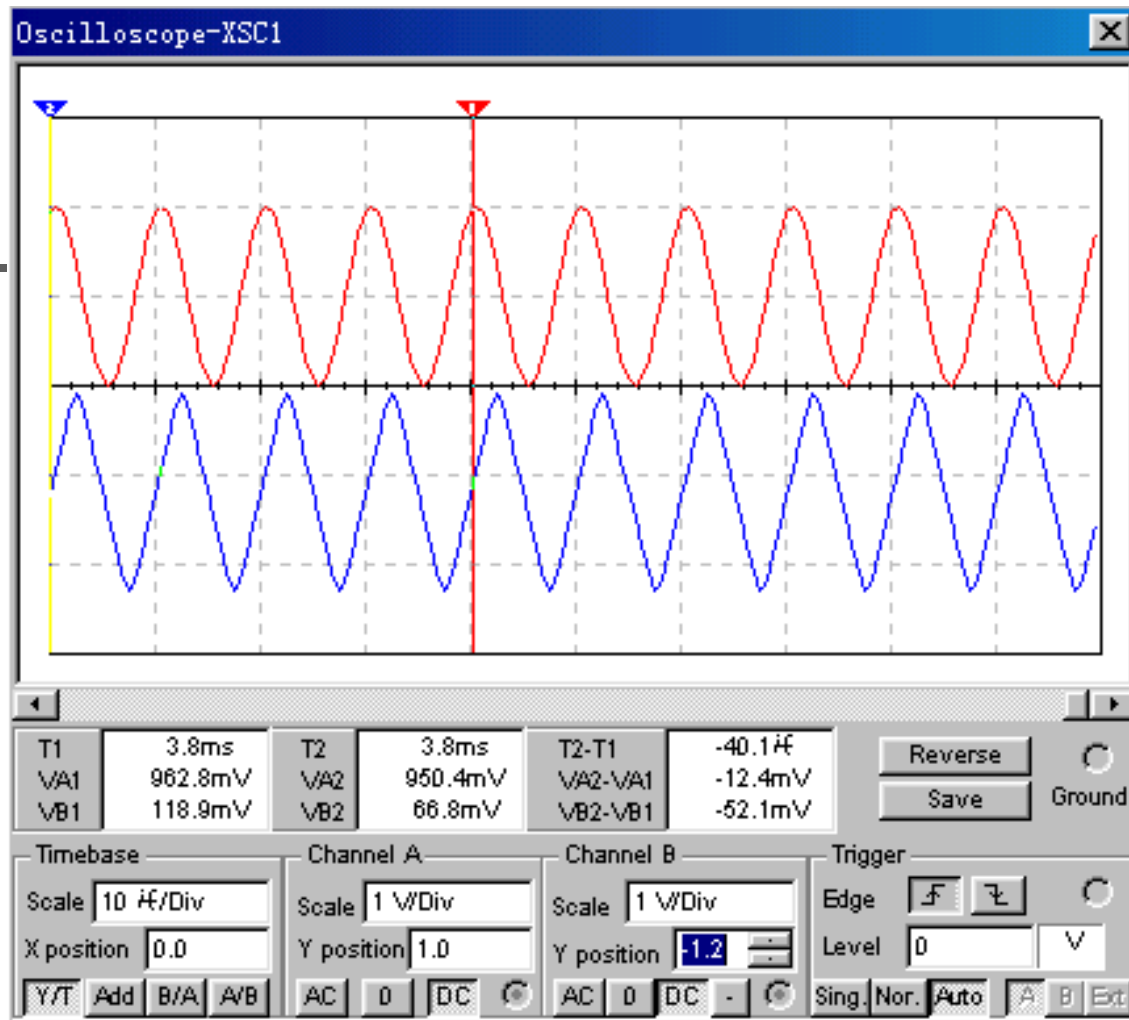
---

在集成电路中，电感元件不能直接集成，需要电感时都是采用模拟的方法得到。模拟电感元件有多种，图5.11.1介绍采用电容和集成运放组成的模拟电感器。

图5.11.1所示的是一个密勒积分式模拟电感器电路。在图5.11.1中，A1构成同相放大器，A2构成积分器。

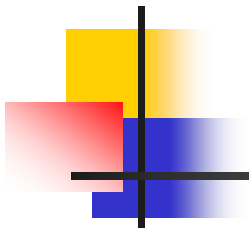


(a) 密勒积分式模拟电感器电路



(b) 密勒积分式模拟电感器电路输入输出波形

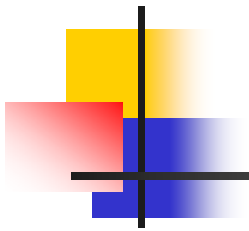
图5.11.1模拟电感器电路和输入输出波形



下面分析此电路的工作原理。假定集成运放满足理想化条件，由图5.11.1可知，

$$\dot{I}_i = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_o}{R_S} \quad (5.11.1)$$

$$\dot{U}_o = -\frac{1}{j\omega R_o C_o} \dot{U}_{o1} + \left(1 + \frac{1}{j\omega R_o C_o}\right) \dot{U}_1 \quad (5.11.2)$$



---

$$\dot{U}_{o1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \dot{U}_i = A_F \dot{U}_i \quad (5.11.3)$$

由式 (5.11.1)、式 (5.11.2)、式 (5.11.3) 可得

$$\dot{I}_i = \frac{A_F - 1}{j\omega R_o C_o R_S} \dot{U}_i \quad (5.11.4)$$





---

所以，等效输入阻抗为：

$$Z_{ie} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = j\omega \frac{R_o C_o R_S}{A_F - 1} \quad (5.11.5)$$

当 $AF \gg 1$ 时，输入阻抗可近似为：

$$Z_{ie} \approx j\omega \frac{C_o R_o R_S}{A_F} \quad (5.11.6)$$



## 5.12 电容倍增器

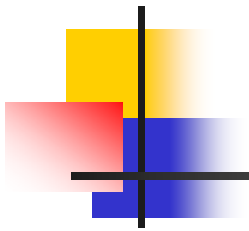
---

在有些低电平、低阻抗的电路中，往往需要容量非常大的电容，例如，对在某些低电压应用场合，当需要很大的电容如  $1000\ \mu\text{f}$  的无极性电容，用无源元件实现这种要求是很困难的，这时可采用电容倍增器来实现大电容量的要求。



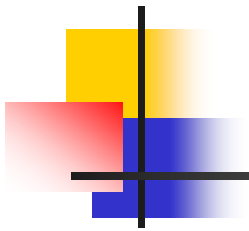
---

## 5.12 电容倍增器



---

在有些低电平、低阻抗的电路中，往往需要容量非常大的电容，例如，对在某些低电压应用场合，当需要很大的电容如  $1000\ \mu\text{f}$  的无极性电容，用无源元件实现这种要求是很困难的，这时可采用电容倍增器来实现大电容量的要求。



由反相放大器构成的电容倍增器电路如图  
5.12.1所示。

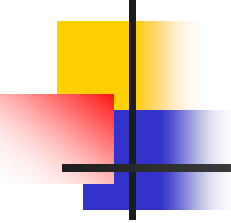
$$\dot{I}_i = \frac{j\omega C_o + \frac{1}{R_1 + R_2}}{1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2}} \cdot \dot{U}_i = \frac{1 + j\omega C_o(R_1 + R_2)}{R_1} \cdot \dot{U}_i \quad (5.12.1)$$



由图5.12.1可知，输入电流为等效输入阻抗为：

$$Z_{ie} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = \frac{R_1}{1 + j\omega C_o(R_1 + R_2)} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + j\omega C_o\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + j\omega C_1}$$

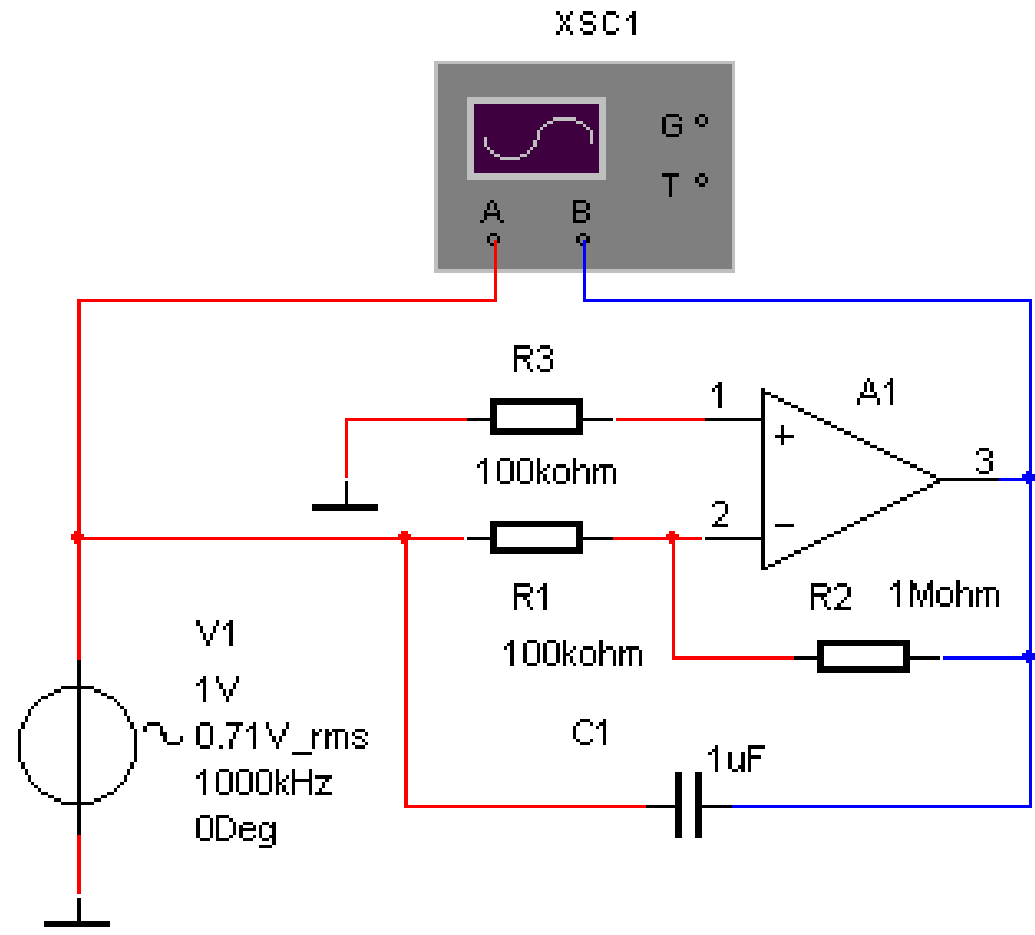
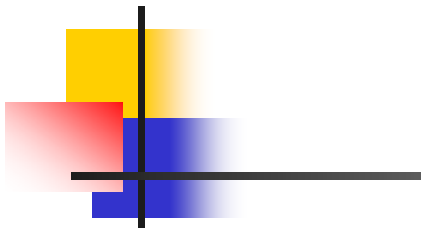
(5.12.2)



---

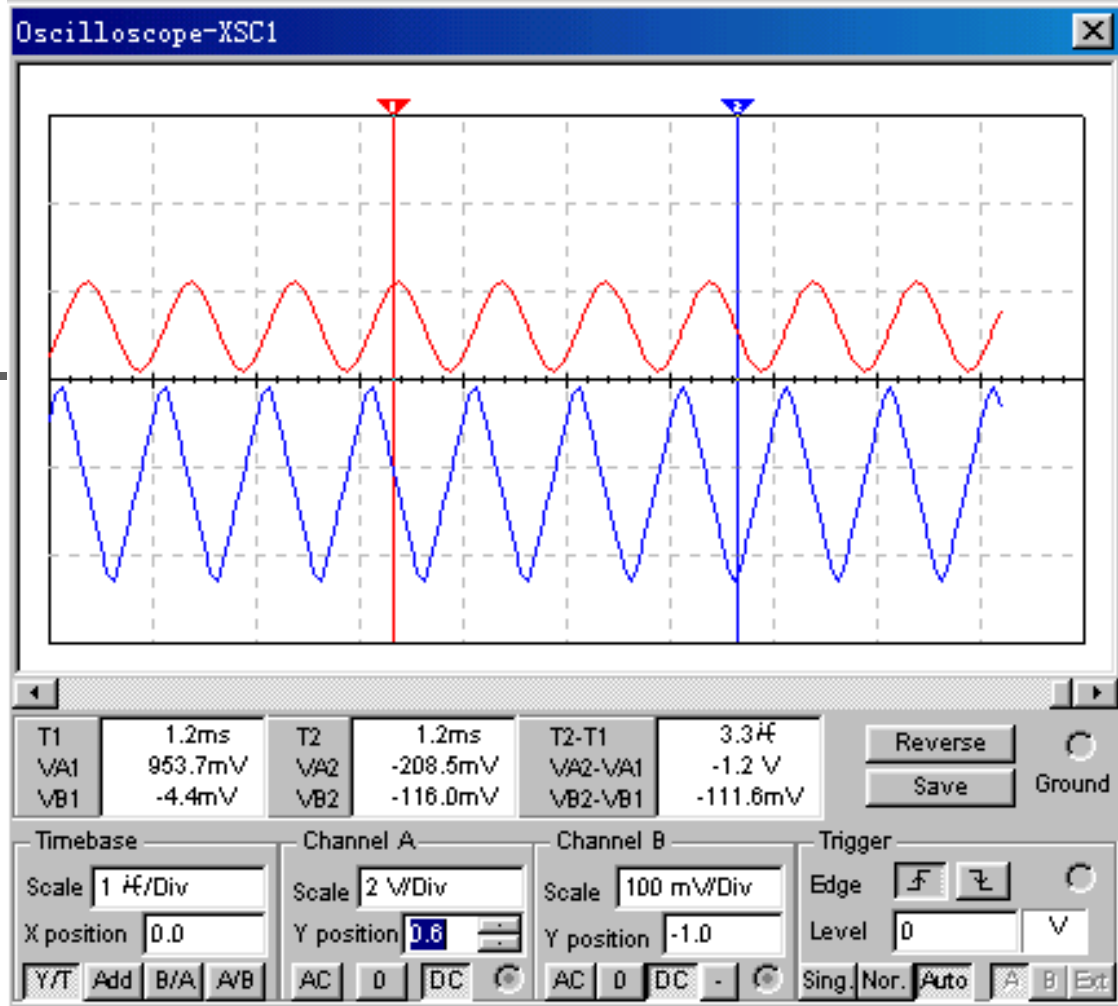
由式 (5.12.2) 可知, 此电路的输入阻抗是电阻**R1**和等效电容**Cie**的并联, 其中等效电容为:

$$C_{ie} = C_o \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (5.12.3)$$



(a) 反相放大器构成的电容倍增器电路





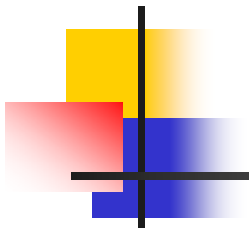
(b) 反相放大器构成的电容倍增器电路输入输出波形

图5.12.1 反相放大器构成的电容倍增器电路和输入输出波形



---

## 本章小结



---

变换电路属于非线性电路，其传输函数随输入信号的幅度、频率或者相位变化，输出信号的波形不同于输入信号的波形。本章介绍了不同类型的变换电路与计算机仿真设计方法，主要内容有：

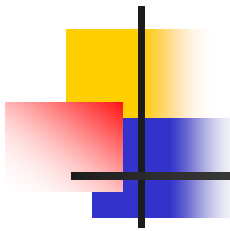


---

(1) 由运算放大器组成的线性检波电路。

(2) 在线性检波器的基础上，加一级加法器，便构成绝对值电路。绝对值电路又称为整流电路。

(3) 限幅电路介绍了串联限幅电路和稳压管双向限幅电路。

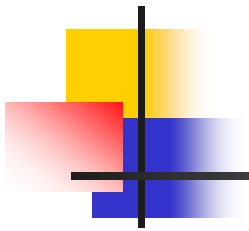


(4) 死区电路介绍了二极管死区电路和精密死区电路。

(5) 介绍了负载不接地U/I变换电路和负载接地的U/I变换电路。

(6) 将输入的电压信号转换为电流输出的电流/电压转换电路。

(7) **VFC** (电压—频率变换) 电路能把输入信号电压变换成相应的频率信号。



---

(8) 峰值检出电路是一种由输入信号自行控制采样或保持的特殊采样—保持电路。

(9) 负阻抗变换器电路输入阻抗 $Z$ 变换到等效输入阻抗 $Z_{ie}$ ，其特性由正变为负。

(10) 阻抗模拟变换器电路选择不同性质的元件时，则可构成不同性质的阻抗模拟电路。



(11) 模拟电感器采用电容和集成运放组成。

(12) 电容倍增器由反相放大器构成。

掌握变换电路的仿真设计与分析方法是本章的重点。运算放大器是构成各种变换电路的基础，改变运算放大器输入回路和负反馈回路上元器件，可以获得不同类型的变换电路。



## 思考题与习题

---

5.1 简述线性检波电路的工作原理。

5.2 试分析题图5.2工作原理与输出波形。



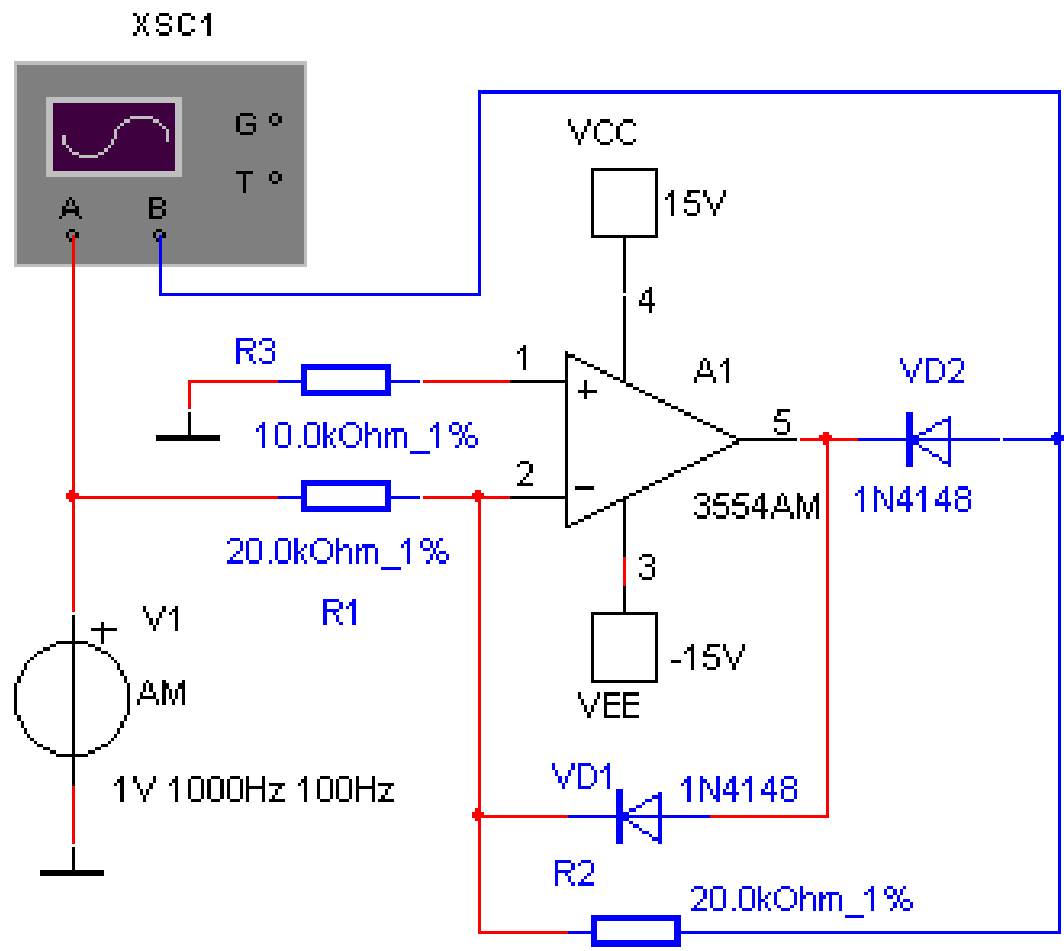
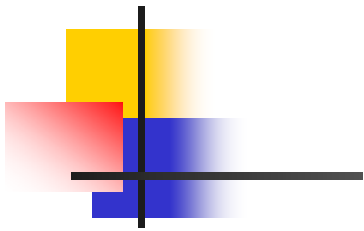
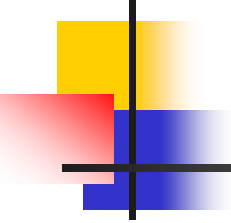


图5.1 习题5.2图



---

5.3 试分析题图5.3工作原理与输出波形。

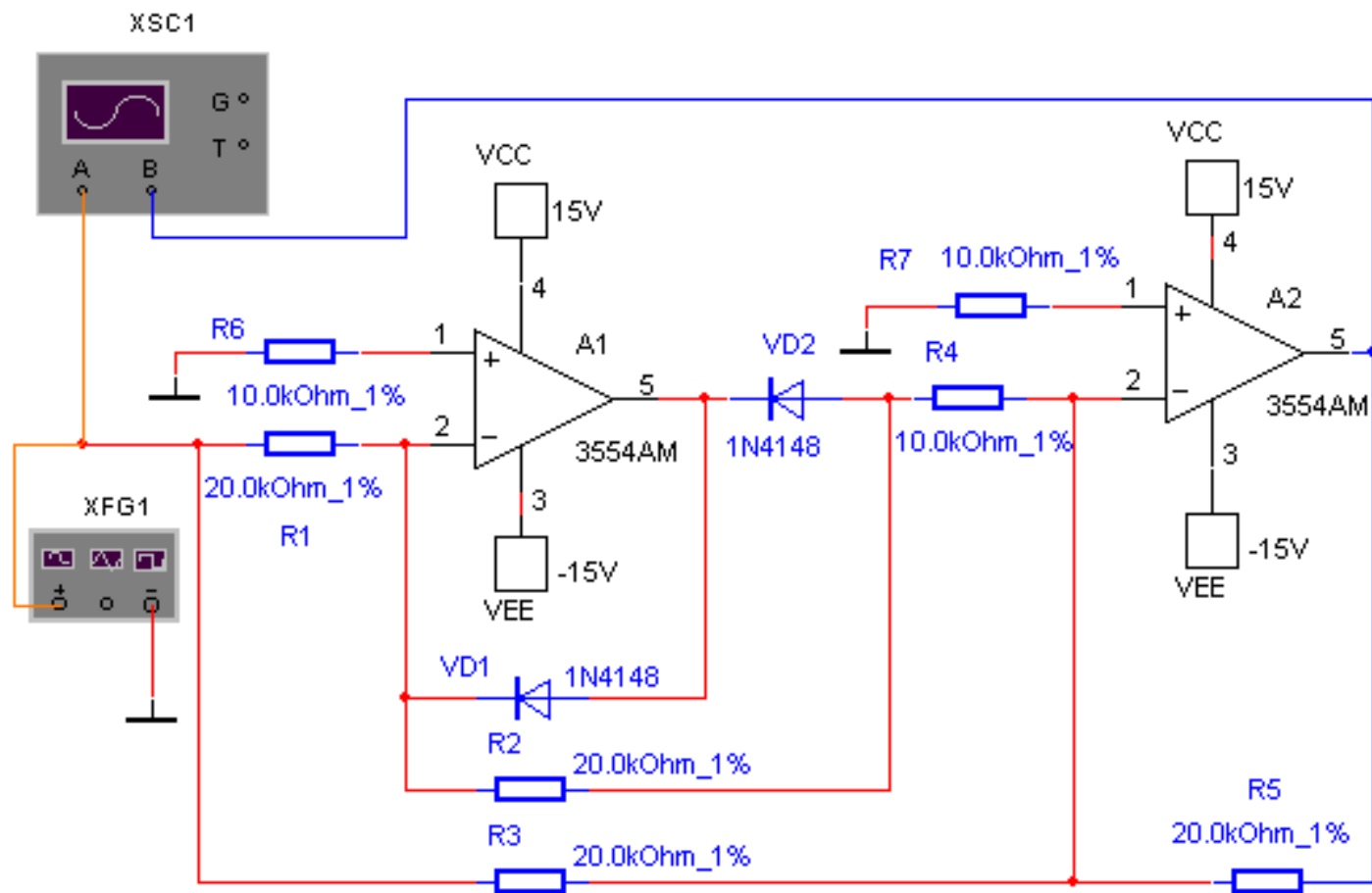
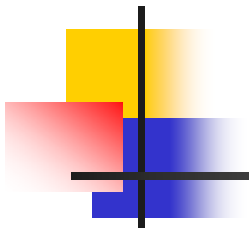


图5.2 习题5.3图



---

5.4 改变题图5.4中稳压二极管D1和D2的连接方式，观察输出波形的变化。如果稳压二极管D1和D2改为二极管，情况会怎样？

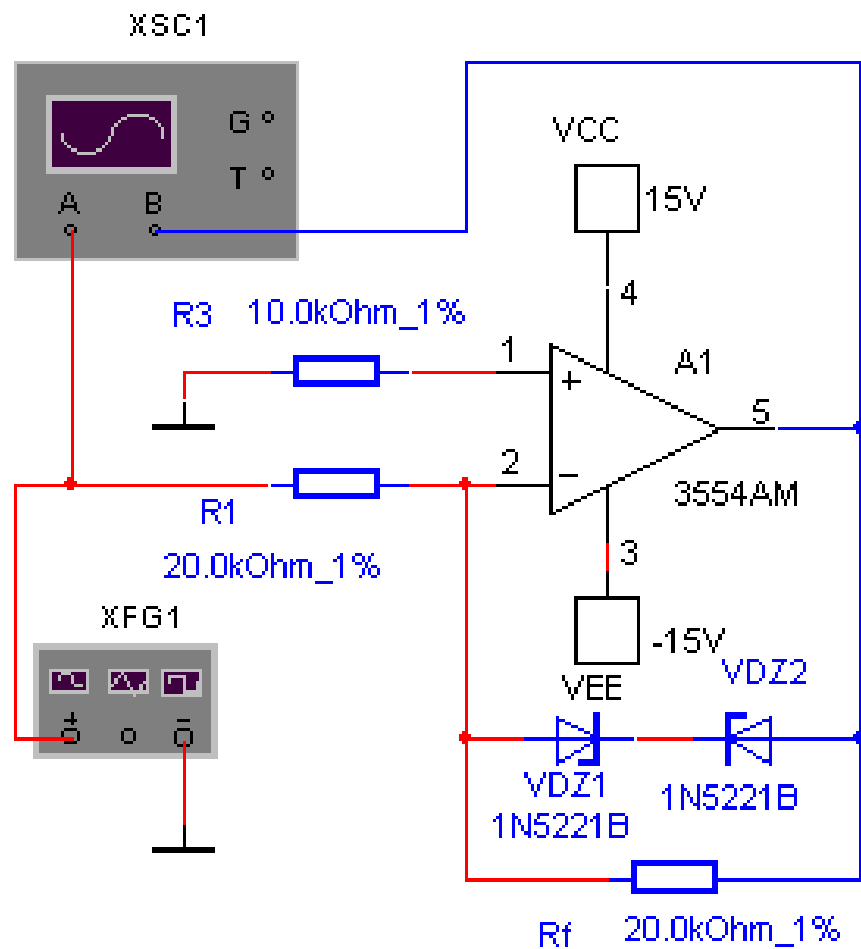


图5.3 习题5.4图



---

5.5 试分析二极管桥式死区电路的传输特性。

5.6 改变图5.4.4 精密死区电路中二极管D1~D4的连接方向，其传输特性有何变化？

5.7题图5.7负载不接地电压 / 电流变换电路，如果采用单电源电压的运算放大器情况会怎样？

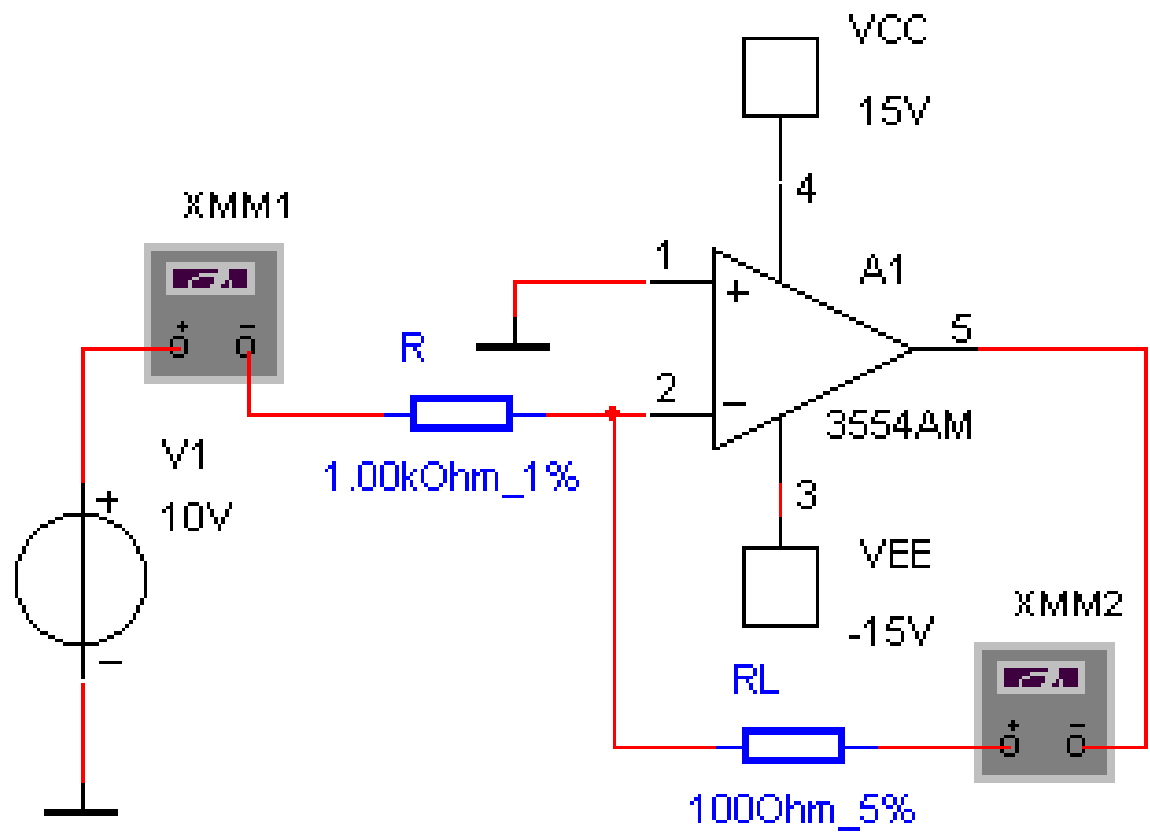
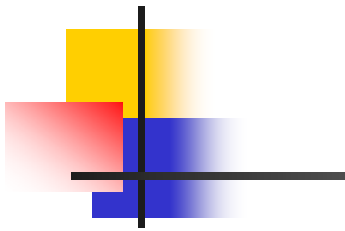
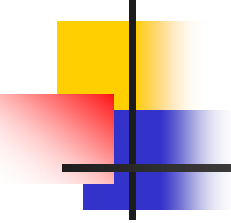


图5.4 习题5.7图



---

5.8 试设计一个VFC（电压—频率变换）电路，要求：输入电压 $0\sim 1\text{V}$ ，转换频率范围 $0\sim 1000\text{Hz}$ 。

5.9 简述峰值检出电路的工作原理。

5.10 试设计一个反相峰值检出电路。

5.11 仿真图5.5所示可变电容倍增器电路，分析工作原理与各参数关系。



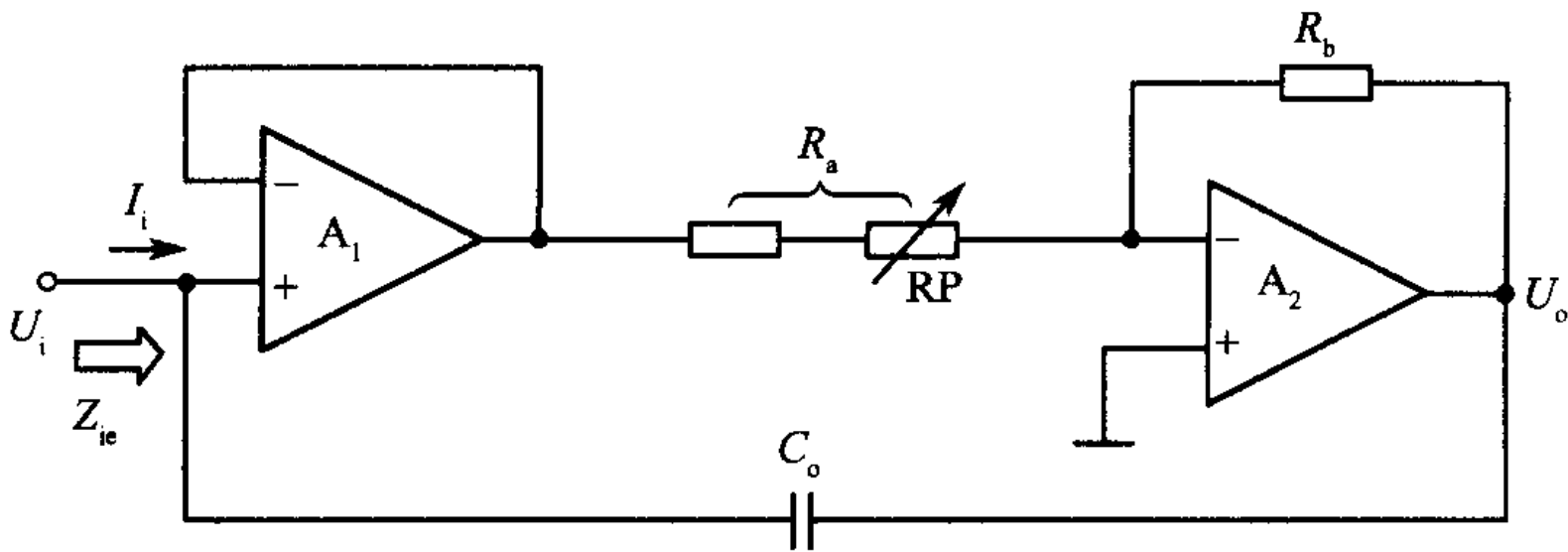


图5.5习题5.11图



---

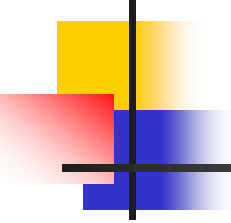
## 第6章 模拟乘法器电路

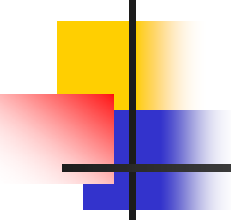


---

- *内容提要*

- 模拟乘法器能实现两个互不相关的模拟信号间的相乘功能，是一种普遍应用的非线性模拟集成电路。本章介绍了模拟乘法器的基本概念与特性，multisim2001模拟乘法器，以及模拟乘法器组成的乘法与平方运算电路、除法与

- 
- 
- 开平方运算电路、函数发生电路、调幅电路、振幅键控（ASK）调制电路、混频器电路、倍频器电路、抑制载波双边带调幅（DSB/SC AM）解调电路和功率测量电路与计算机仿真设计方法。



---

- 本章的重点是掌握模拟乘法器应用电路的仿真设计与分析方法。模拟乘法器是构成应用电路的基础，注意模拟乘法器与运算放大器的结合，以及将模拟乘法器连接在运算放大器的输入回路和负反馈回路上对电路功能的影响。



---

## 6.1 模拟乘法器的基本概念与特性



## 6.1.1 通用模拟乘法器

---

■ 模拟乘法器是一种普遍应用的非线性模拟集成电路。模拟乘法器能实现两个互不相关的模拟信号间的相乘功能。它不仅应用于模拟运算方面，而且广泛地应用于无线电广播、电视、通信、测量仪表、医疗仪器以及控制系统，进行模拟信号的变换及处理。

- 模拟乘法器具有两个输入端口X和Y，及一个输出端口Z ( $K \cdot XY$ )，是一个三端口非线性网络，其符号如图6.1.1所示

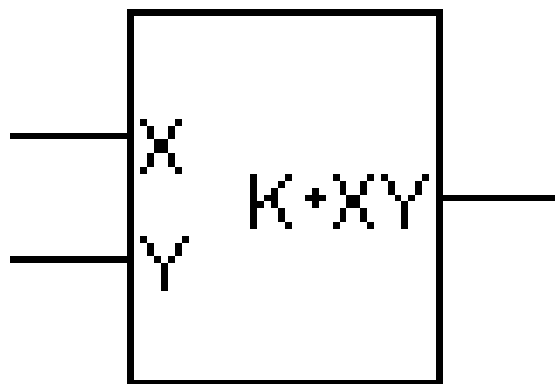
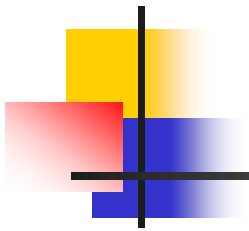


图6.1.1 模拟乘法器符号

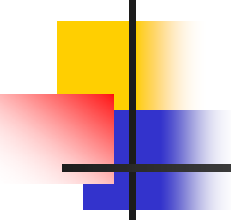




一个理想的模拟乘法器，其输出端Z的瞬时电压 $U_o$ 仅与两个输入端（X和Y）的瞬时电压 $U_x$ 和 $U_y$ 的(波形、幅值、频率均是任意的)的相乘积成正比，不含有任何其它分量。模拟乘法器输出特性可表示为：

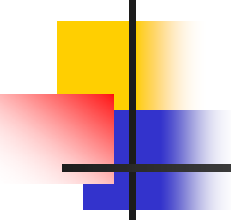
$$U_o = KU_x U_y \quad (6.1.1)$$

式(6.1.1)中， $K$ 为相乘增益。



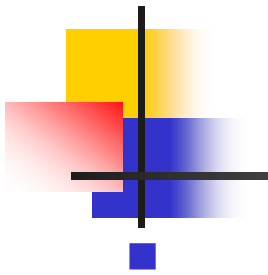
---

根据模拟乘法器两输入电压  $U_x$  和  $U_y$  的极性，乘法器有四个工作象限（又称区域）。如果两输入电压都只能取同一极性（同为正或同为负）时，乘法器才能工作，则称之为“单象限乘法器”；如果其中一个输入电压极性可正、可负，而另一个输



---

入电压极性只能取单一极性（即只能是正或只能是负），则称之为“二象限乘法器”；如果两输入电压极性均可正、可负，则称之为“四象限乘法器”。两个单象限乘法器可构成一个二象限乘法器；两个二象限乘法器则可构成一个四象限乘法器。

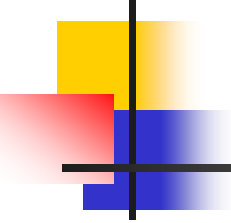


■ 模拟乘法器有两个独立的输入量  $U_X$  和  $U_Y$ ，输出量  $U_O$  与  $U_X$  和  $U_Y$  之间的传输特性既可以用式  $V_O = KU_X U_Y$  表示，也可以用四象限输出特性和平方律输出特性来描述。

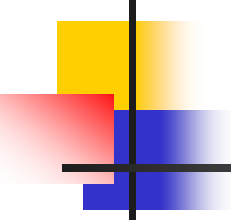
- 当模拟乘法器两个输入信号中，有一个为恒定的直流电压  $E$ ，根据式 (6.1.1) 得到

$$U_O = (KE) U_Y \quad (6.1.2)$$

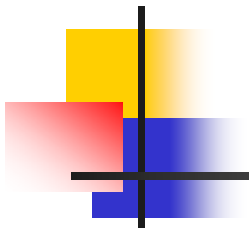
- 或  $U_O = (KE) U_X \quad (6.1.3)$



■ 上述关系称为理想模拟乘法器四象限输出特性。由上式可知，模拟乘法器输入、输出电压的极性关系满足数学符号运算规则；有一个输入电压为零时，模拟乘法器输出电压亦为零；有一个输入电压为非零的直流电压E时；模拟乘法器相当于一个增益为 $A_u=KE$ 的放大器。

- 
- 
- 当模拟乘法器两个输入电压相同，则其输出电压为：

- $$U_O = KU_X^2 = KU_Y^2 \quad (6.1.4)$$

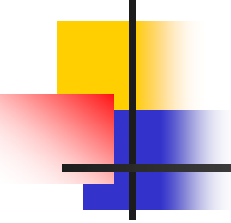


■ 当模拟乘法器两个输入电压幅度相等而极性相反，则其输出电压为

$$U_O = -KU_X^2 = -KU_Y^2 \quad (6.1.5)$$

上述关系称为理想模拟乘法器的平方律输出特性。

模拟乘法器是一种非线性器件，一般情况下，它体现出非线性特性。例如，两输入信号为  $U_X = U_Y = U_m \cos \omega t$  时，则输出电压为



模拟乘法器是一种非线性器件，一般情况下，它体现出非线性特性。例如，两输入信号为  $U_X = U_Y = U_m \cos \omega t$  时，则输出电压为

- $U_O = KU_X U_Y = KU_m^2 \cos^2 \omega t = KU_m^2 \cos^2 \omega t =$
- $KU_m^2 \cos^2 \omega t + KU_m^2 \cos^2 2\omega t$  (6.1.6)

- 可见，输出电压中含有新产生的频率分量。
- 注意：一般情况下，线性迭加原理不适用于模拟乘法器。





## 6.1.2 multisim2001模拟乘法器

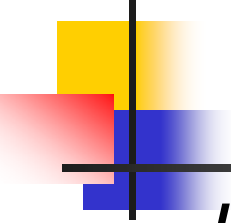
在multisim2001模拟乘法器模型中，输出电压：

$$U_{out} = K \left[ X_K + (U_x + X_{off}) \cdot Y_K (U_Y + Y_{off}) \right] + O_{ff} \quad (6.1.7)$$

式中： $U_{out}$ ：在Z（K\*XY）端的输出电压。

$U_x$ ：在X端的输入电压。

$U_y$ ：在Y端的输入电压。

- 
- 
- $K$  : 输出增益, 默认值 $1V/V$ 。
  - $O_{\text{ff}}$  : 输出补偿, 默认值 $0V$ 。
  - $Y_{\text{off}}$  : Y补偿, 默认值 $0V$ 。
  - $X_{\text{off}}$  : X补偿, 默认值 $0V$ 。
  - $Y_K$  : Y增益, 默认值 $1V/V$ 。
  - $X_K$  : X增益, 默认值 $1V/V$ 。



■ 点击控制类元器件库  的乘法器图标 

即可取出一个乘法器放置在电路工作区中，双击乘法器图标，即可弹出乘法器属性对话框如图6.1.2所示，可以在对应的窗口中对乘法器的参数数值、标识符等进行修改。

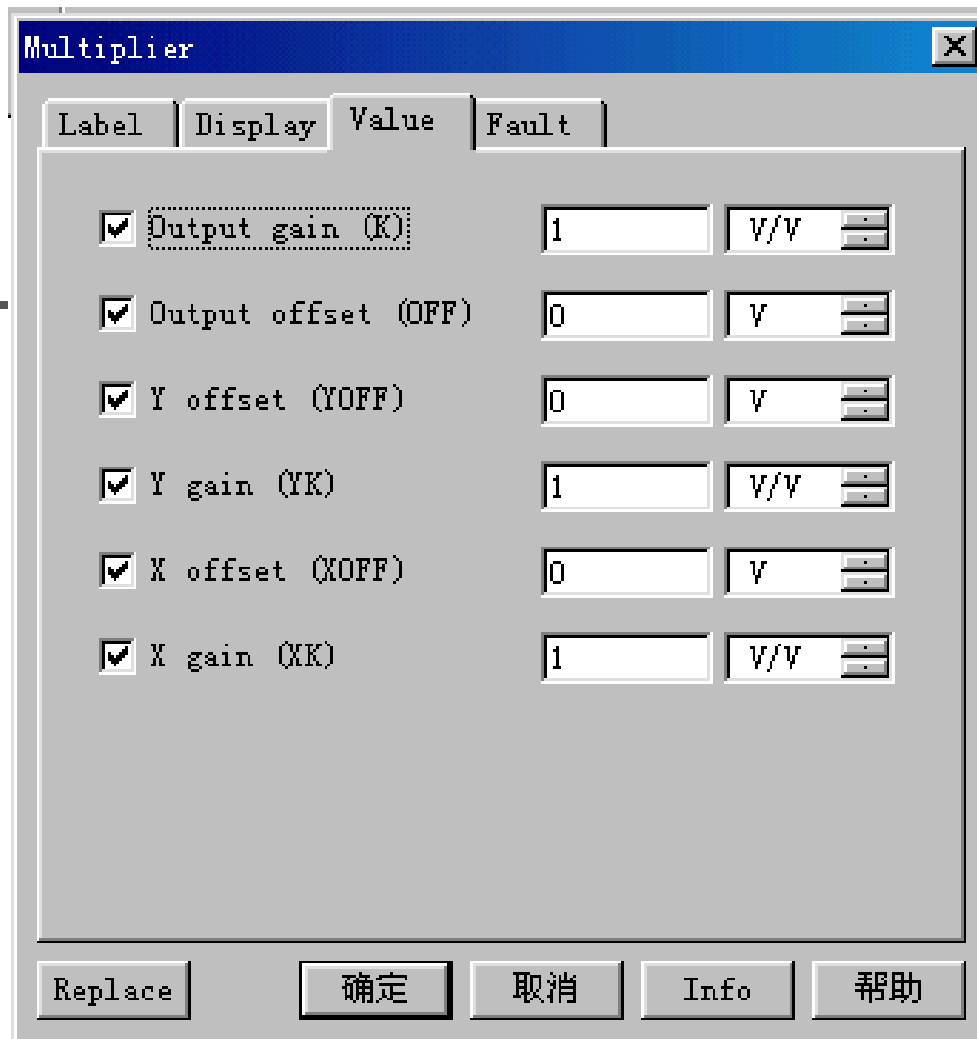
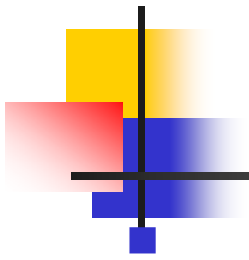


图6.1.2 乘法器设置对话框



---

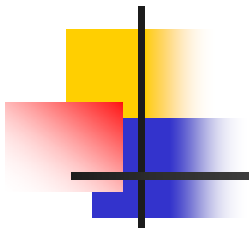
## 6.2 乘法与平方运算电路



当两个输入电压  $U_X$  (图中的V1) 和  $U_Y$  (图中的V2) 加到乘法器X和Y端时, 乘法器输出端的输出电压  $U_O$  可表示为

$$U_O = KU_X U_Y \quad (6.2.1)$$

从图6.2.1仿真分析结果可见,  $K=1$ , (V1) = 2V,  $V_Y$  (V2) = 4.3V, 输出电压  $U_O = 8.6V$ , 满足  $U_O = KU_X U_Y$  关系。



---

从图6.2.2仿真分析结果可见，当 $K=1$ ， $U_x$  (V1) =  $U_y$  (V2) = 2V时，输出电压 $U_o=4V$ ，满足 $U_o=KU_x^2=KU_y^2$ 关系，即平方运算关系。

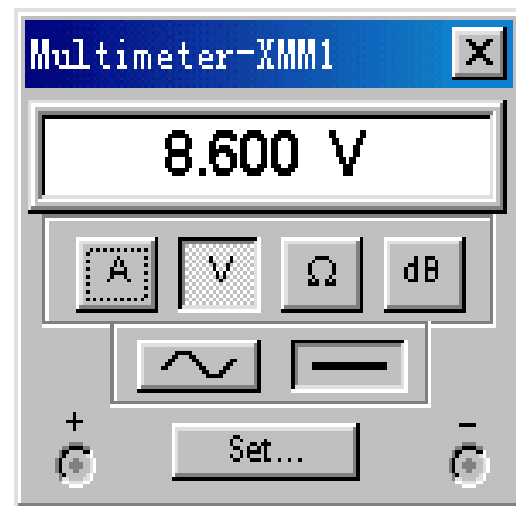
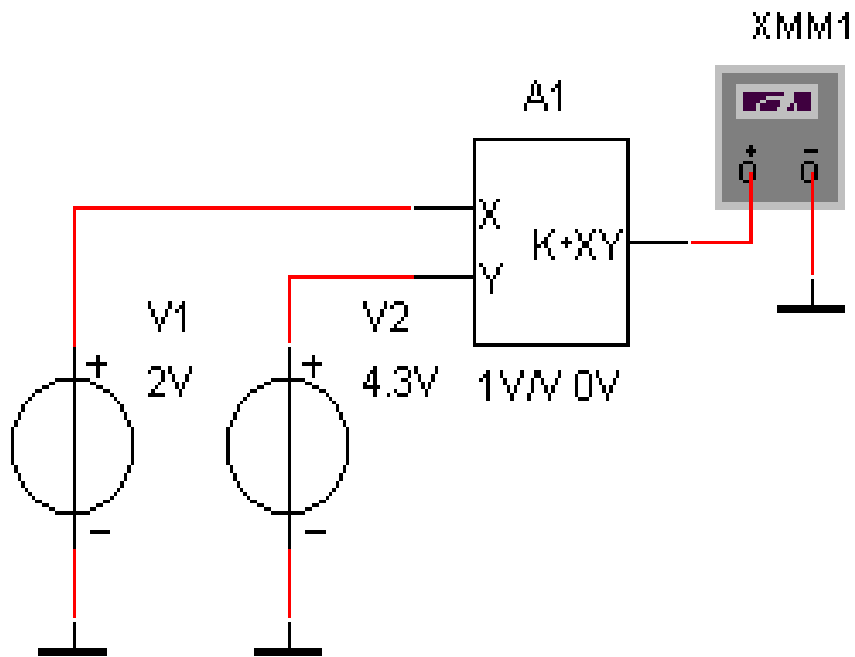


图6.2.1 乘法电路



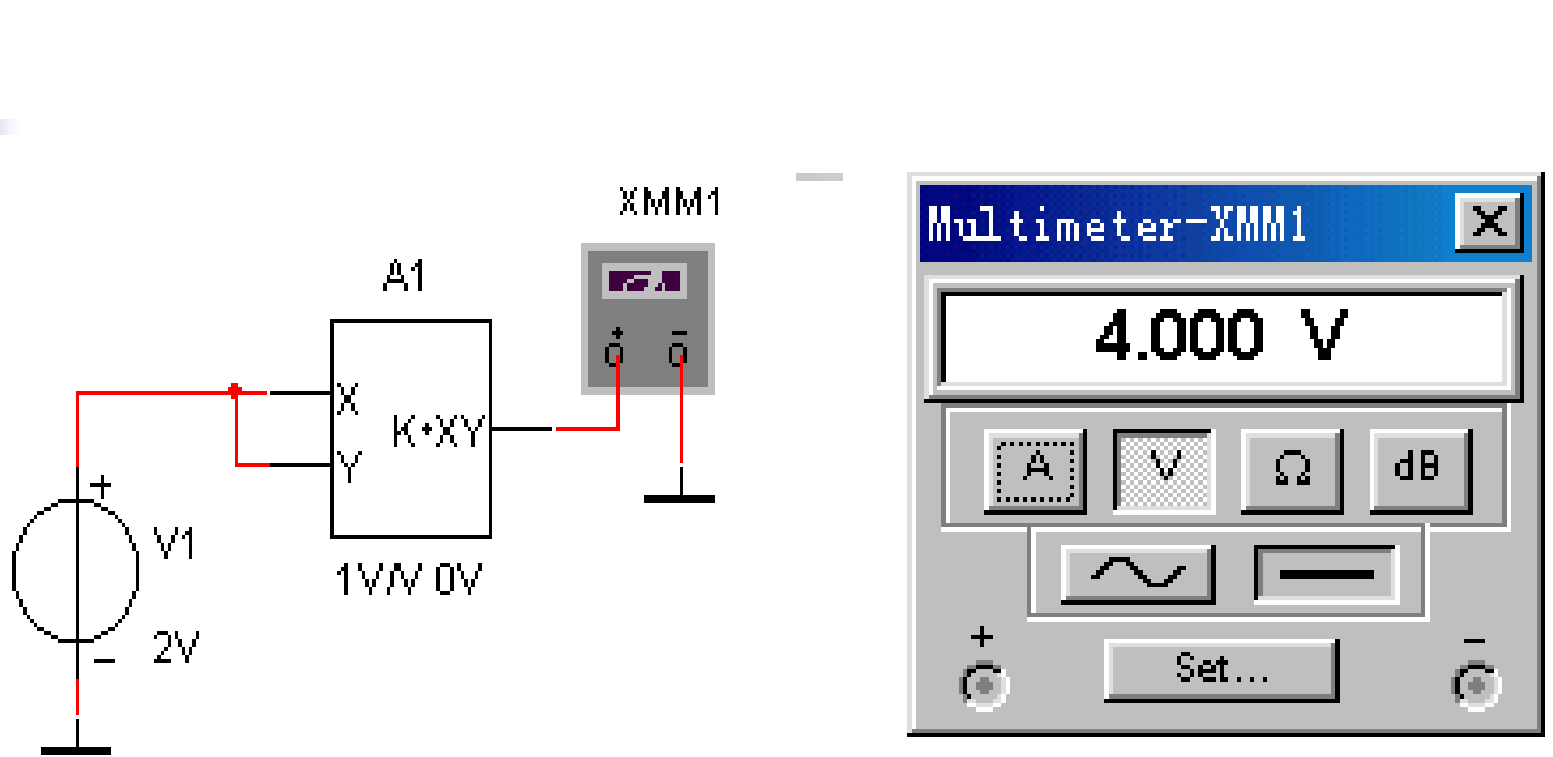


图6.2.2 平方运算电路



---

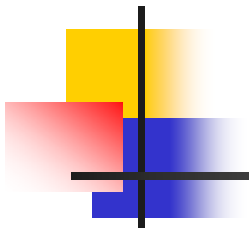
## 6.3 除法与开平方运算电路



## 6.3.1 反相输入除法运算电路

---

- 一个二象限反相输入除法运算电路如图6.3.1所示，它由运放3554AM和接于负反馈支路的乘法器A1构成。根据运放线性应用时的特点及乘法器的特性，不



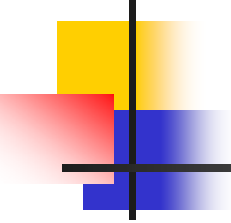
---

难推理出输出电压  $U_o$  与输入信号  $U_i$  (V2)、 $U_r$  (V1) 的关系为：

$$U_o = -\frac{1}{K} \frac{R_2}{R_1} \frac{U_i}{U_r} \quad (6.3.1)$$

当取  $R_1$  (R1) =  $R_2$  (R2) 时,  $U_o$  为

$$U_o = -\frac{1}{K} \frac{U_i}{U_r} = -K_d \frac{U_i}{U_r} \quad (6.3.2)$$



---

式中相除增益 $K_d$ 为乘法器相乘增益 $K$ 的倒数。仿真运行图6.3.1电路（ $K=1$ ），可得输出电压 $U_o = -5.999V$ ，满足式（6.3.2）关系。

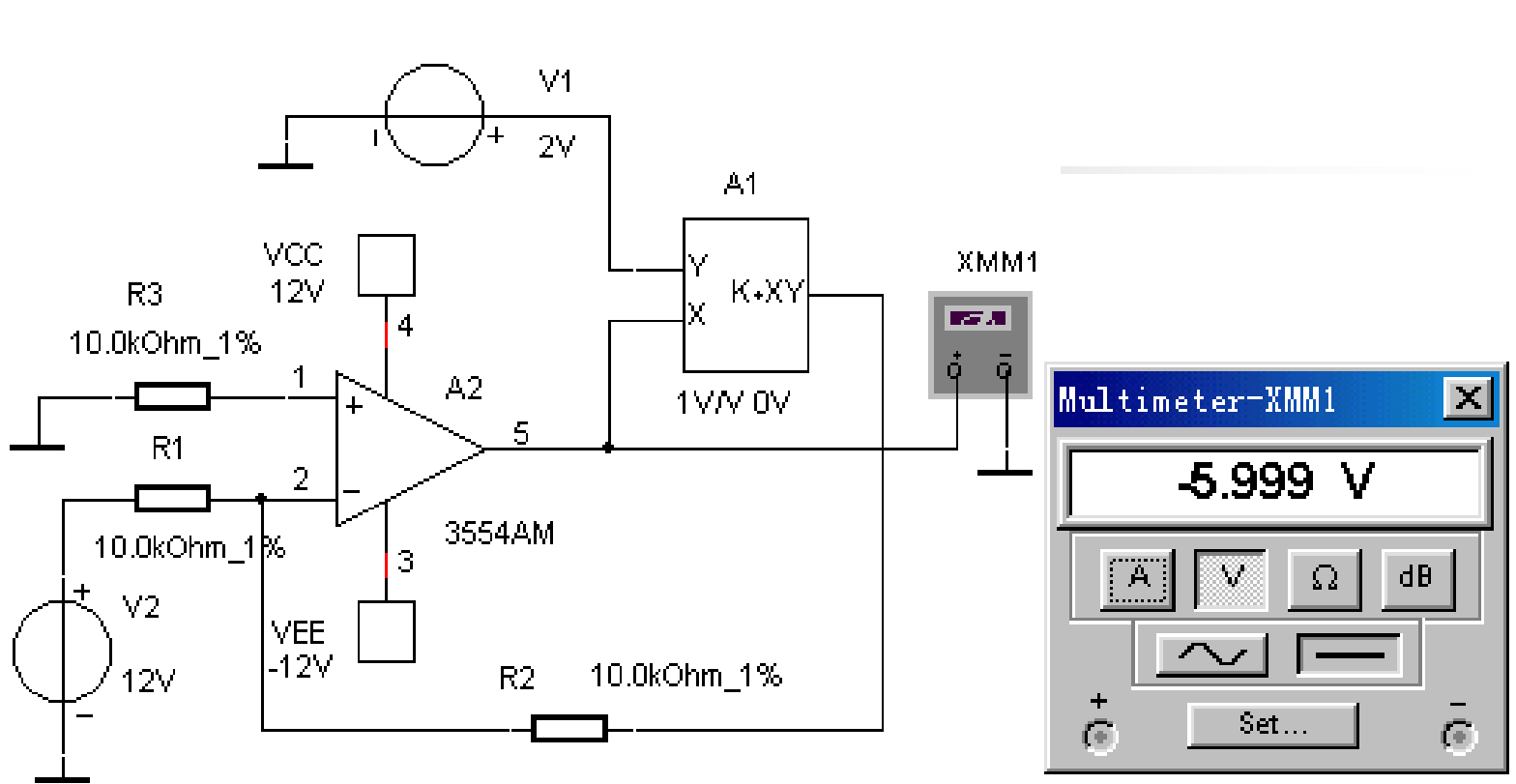
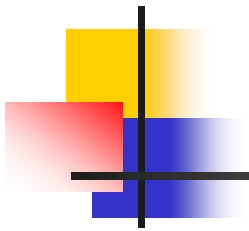


图6.3.1 反相输入除法运算电路



---

- 电路中， $U_r$ （即电路图上的V1）为正极性电压，否则，运算放大器**3554AM**将工作于非线性饱和状态。因而，电路只能实现二象限相除功能。

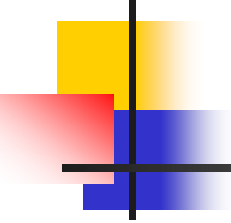


## 6.3.2 同相输入除法运算电路

图6.1.5所示电路中， $U_i$  (V2) 从运放的反相输入端加入，除法器的输入阻抗较低。如要求提高除法器的输入阻抗，可采用图6.3.2所示的同相端输入除法电路。同样地，要求 $U_r$  (V1) 为正极性电压。由图可推导出电路输出电压为

$$U_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{U_i}{KU_r} \quad (6.3.3)$$





---

式中 $K$ 为乘法器相乘增益。仿真运行图6.3.2电路，可得输出电压 $U_o=7.905V$ （ $K=1$ ），满足式（6.3.3）关系。

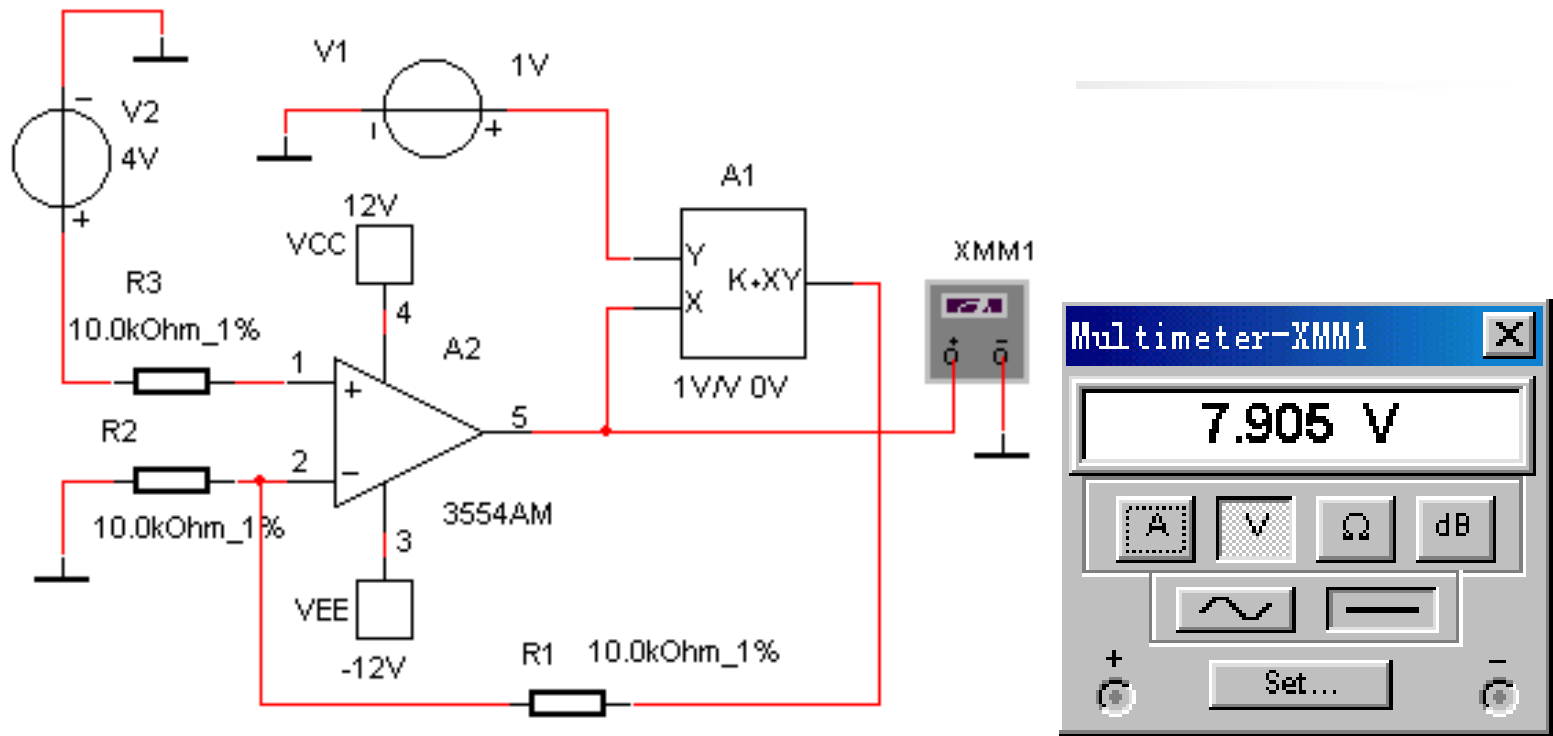


图6.3.2 同相输入除法运算电路



### 6.3.3 开平方运算电路

■ 开平方运算电路如图6.3.3所示，电路适用于 $U_i (V_2) < 0$ 情况，把乘法器组成的平方运算电路接在运放的负反馈支路便构成了开平方运算电路。由图可推理出电路输出电压 $U_o$ 为：

$$U_o = \sqrt{\frac{R_2}{KR_1} |U_i|} \quad (6.3.4)$$

当取 $R_1=R_2$ 时， $U_o$ 为：

$$U_o = \sqrt{\frac{1}{K} |U_i|} \quad (6.3.5)$$

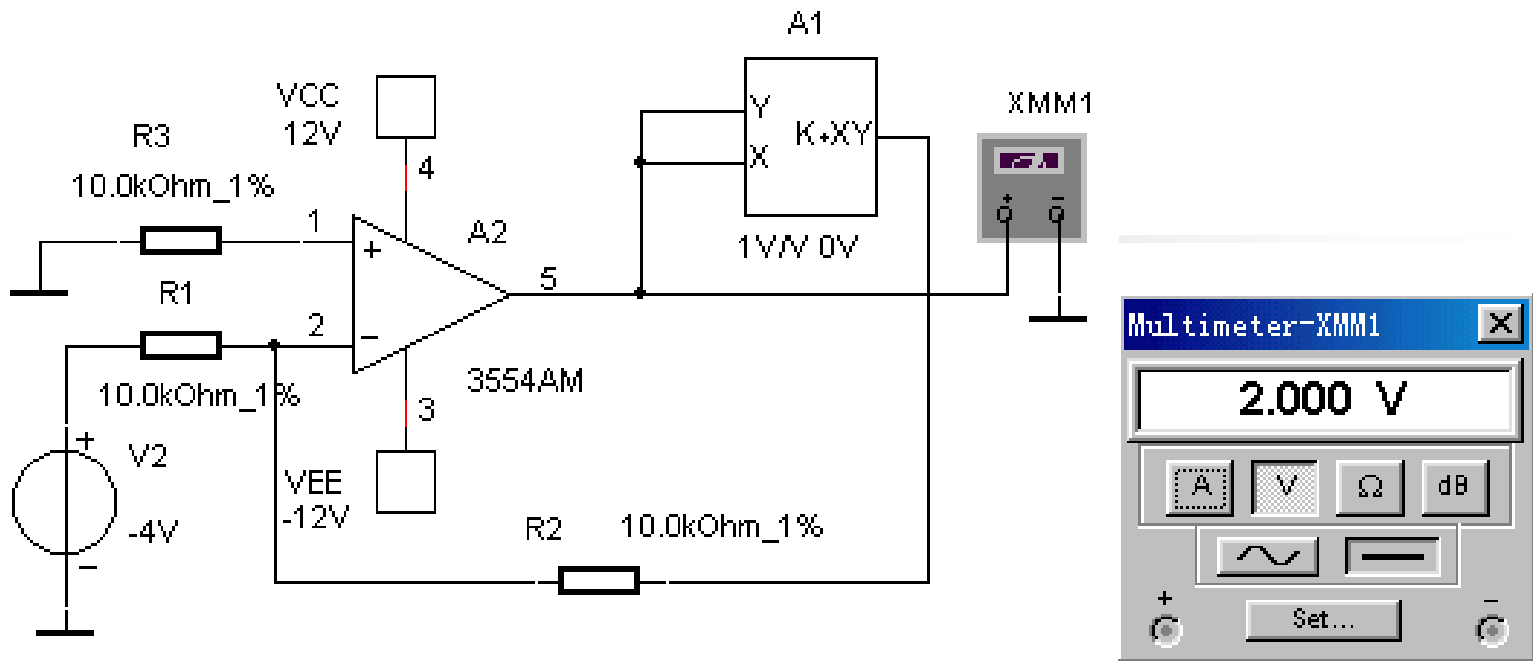


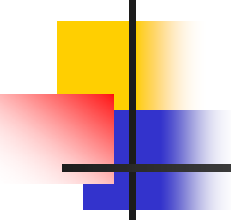
图6.3.3开平方运算电路

仿真运行图6.1.7电路，可得输出电压  $U_o = 4V$  ( $K=1$ )，满足式 (6.3.5) 关系。



---

## 6.4 函数发生电路

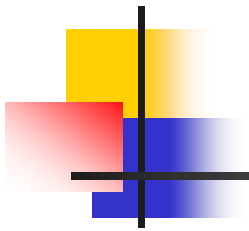


---

- 利用模拟集成乘法器与集成运算放大器配合，可以构成各种各样能以幕级数形式表示的函数发生电路。

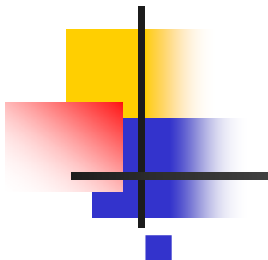
例：函数  $f(x) = 2.6x - 1.69x^2$

由函数表达式  $f(x) = 2.6x - 1.69x^2$  可知，该函数可



---

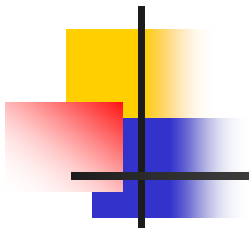
由乘法器构成的平方电路和由运放构成的比例相减电路的组合电路来实现，其电路如图6.4.1所示，图中 $R_1=R_2=R$ ， $R_3=1.69R$ ， $R_4=1.86R$ ， $R_5=2.6R$ ，输入电压 $U_i$ （V）。



图中乘法器A1接成单位增益平方电路，运放3554AM接成双端输入比例相减电路。由图可得：

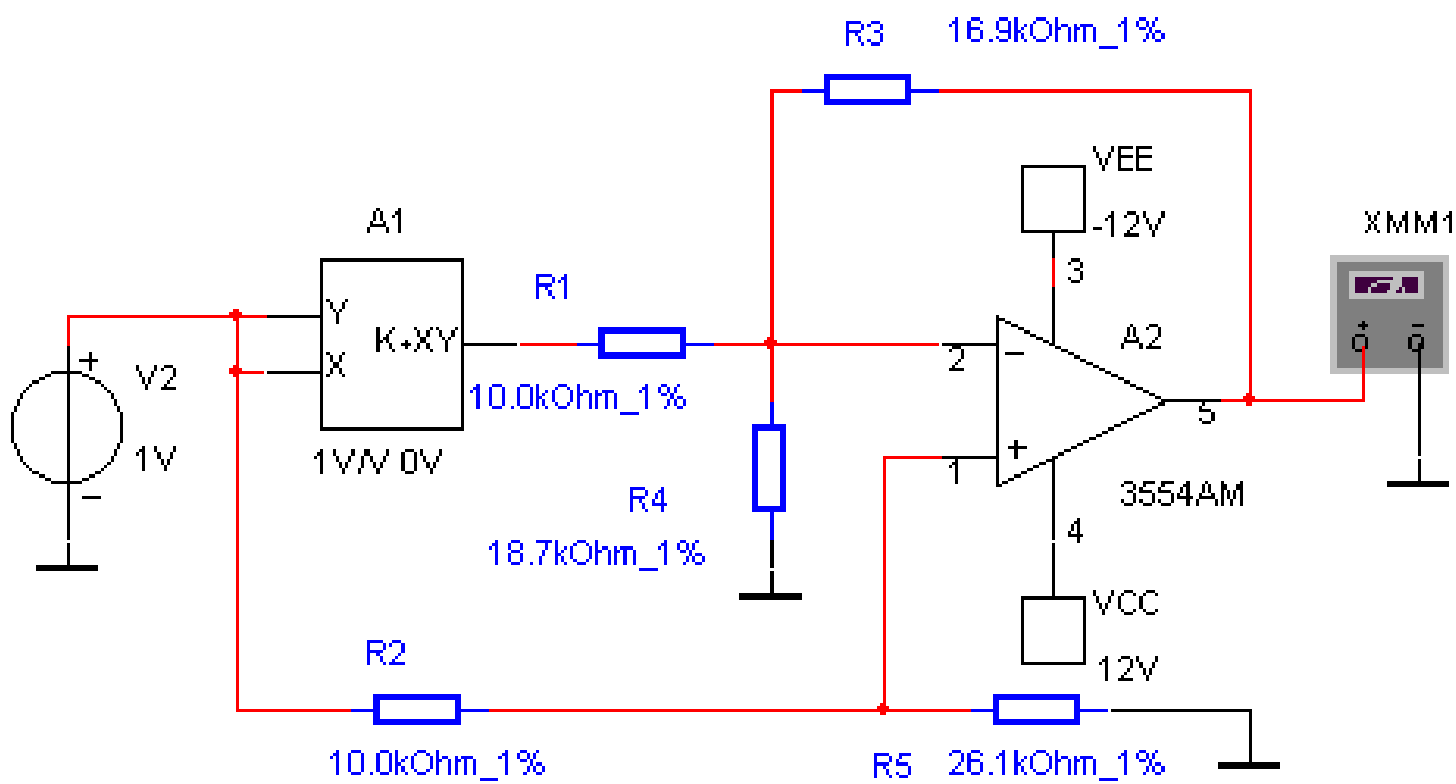
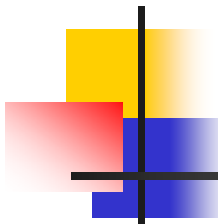
$$\begin{aligned} U_o &= \left(1 + \frac{1.69R}{R \parallel 1.86R}\right) \frac{2.6R}{R+2.6R} U_i - \frac{1.69R}{R} U_i^2 \\ &= \left(1 + \frac{1.69}{1 \parallel 1.86}\right) \frac{2.6}{1+2.6} U_i - 1.69U_i^2 = 2.6U_i - 1.69U_i^2 \end{aligned} \quad (6.4.1)$$





■ 可见，电路的输出特性方程与函数  $f(x)$  的表达式完全相同，只要乘法器、运放及外接电阻的精度足够高，便能产生逼真的函数关系。

仿真运行图6.4.1电路，可得输出电压  $U_o = 910.492\text{mV}$  ( $K=1$ )，满足式(6.4.1)关系。



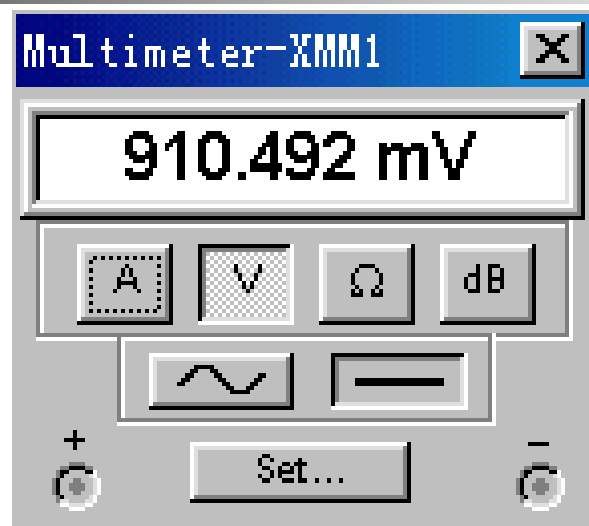
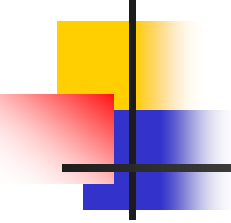


图6.4.1函数 $f(x)=2.6x-1.69x^2$ 电路



---

## 6.5 调幅电路



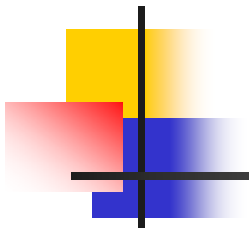
调幅（振幅调制）是用低频调制信号去控制高频载波的振幅，使其振幅按调制信号的规律而变化，调制是一个非线性过程。从频谱结构来看，调幅又是一个对调制信号进行频谱搬移的过程，即把较低的频谱搬到较高频谱。



## 6.5.1 普通调幅 (AM) 电路

---

- 普通调幅电路可分为高电平调制电路和低电平调制电路两大类。前者属于发射机的最后一级，直接产生发射机输出功率要求的已调波；后者属于发射机前级产生小功率的已调波，

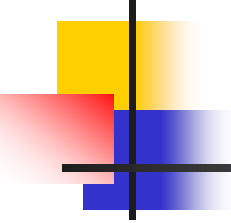


再经过线性功率放大达到所需的发射机功率电平。  
现在设

载波电压为：
$$u_c(t) = U_{cm} \cos \omega_c t \quad (6.5.1)$$

调制电压为：
$$u_\Omega = E_c + U_{\Omega m} \cos \Omega t \quad (6.5.2)$$

上两式相乘为普通振幅调制信号。

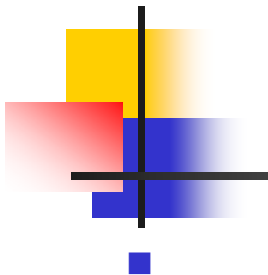


---

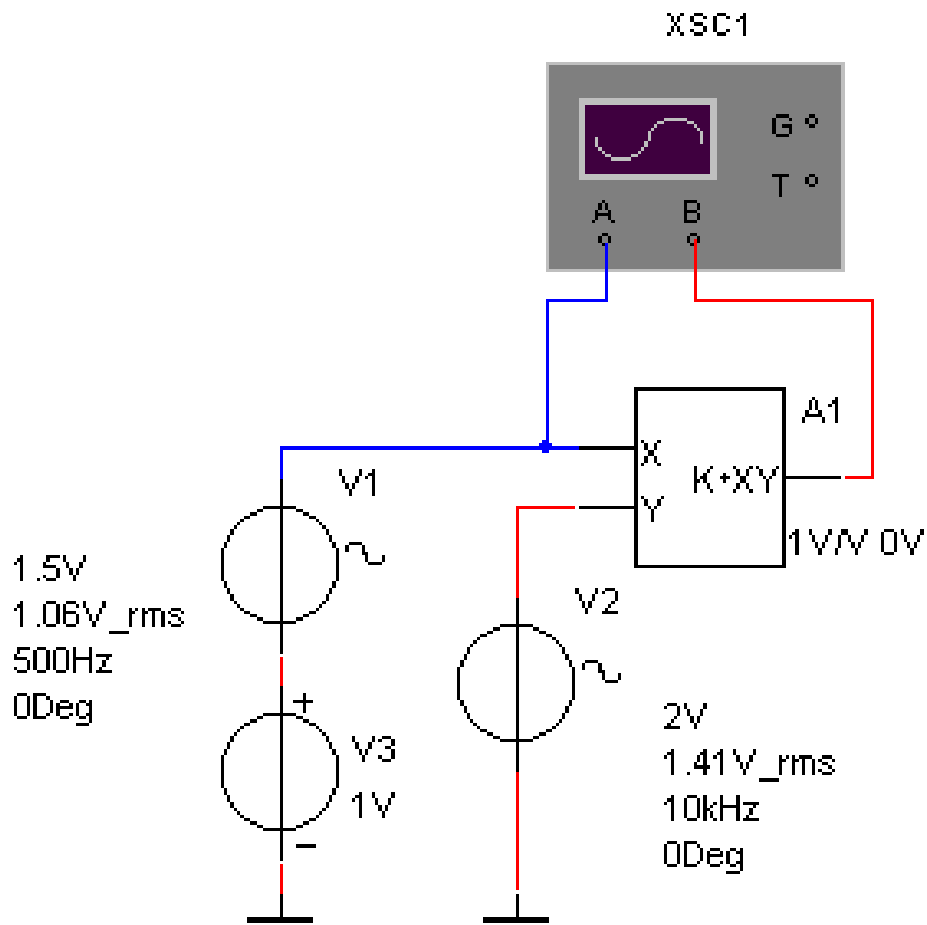
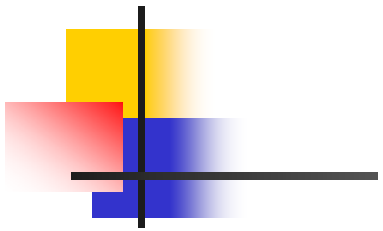
$$\begin{aligned}u_s(t) &= K[E_c + U_{\Omega m} \cos \Omega t]U_{cm} \cos \omega_c t \\&= KU_{cm}[E_c + U_{\Omega m} \cos \Omega t] \cos \omega_c t \\&= U_s[1 + m_a \cos \Omega t] \cos \omega_c t\end{aligned}\tag{6.5.3}$$

式中称为调幅系数（或调制指数），它表示调幅波的幅度的最大变化量与载波振幅之比，即幅度变化量的最大值。显然 否则已调波会产生失真。

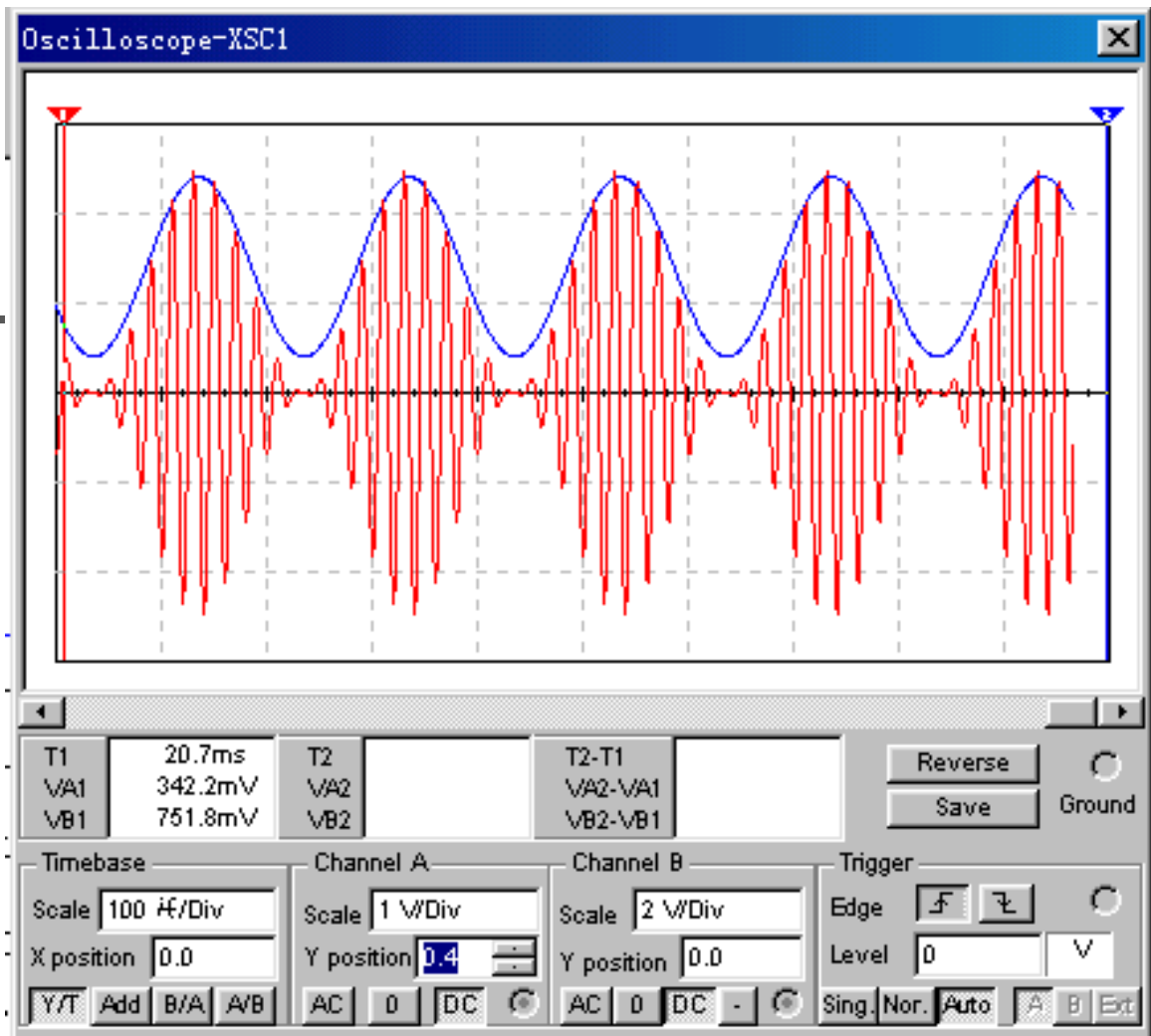




根据6.6.3式，由乘法器 ( $K=1$ ) 组成的普通调幅 (AM) 电路图6.5.1所示，可获得通信系统中常用的普通调幅 (AM)。高频载波信号电压  $u_c(t)$  (图中的  $V2$ ) 加到Y输入端口；直流电压  $U_3$  (图中的  $V3$ ) 和低频调制信号  $u_\Omega(t)$  (图中的  $V1$ ) 加到X输入端口，仿真运行图6.5.1电路，可得输出电压波形如图6.5.1(b)，满足式 (6.5.1) 关系。



(a) 乘法器组成的普通调幅 (AM) 电路



(b) 普通调幅 (AM) 仿真输出波形

图6.5.1 乘法器组成的普通调幅 (AM) 电路



## 6.5.2 抑制载波双边带调幅 (DSB/SC AM) 调制电路

---

在抑制载波调幅波的产生电路中，设

载波电压为：
$$u_c(t) = U_{cm} \cos \omega_c t \quad (6.5.4)$$

调制电压为：
$$u_\Omega(t) = U_{\Omega m} \cos \Omega t \quad (6.5.5)$$

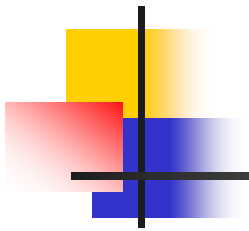


经过模拟乘法器电路后输出电压为抑制载波

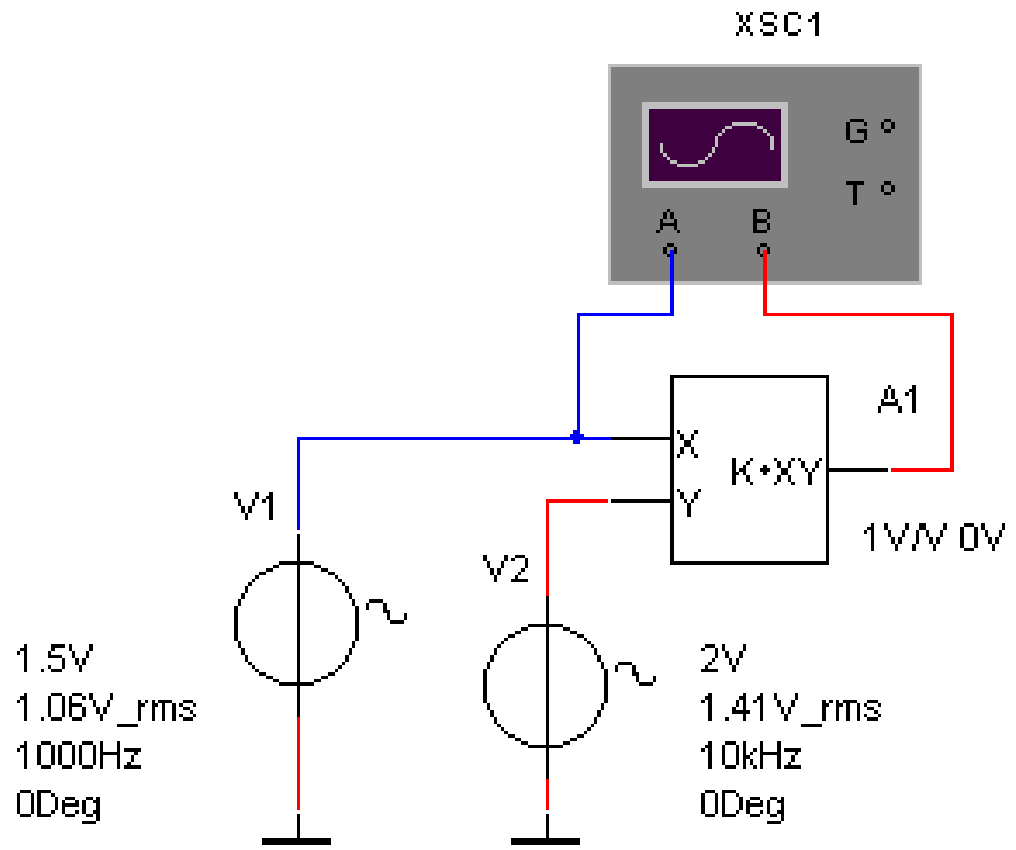
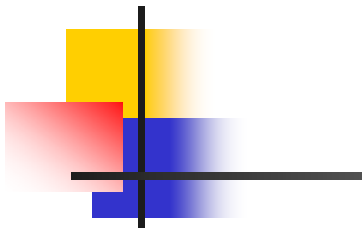
双边带振幅调制信号为：

$$\begin{aligned} u_0(t) &= Ku_c(t)u_\Omega(t) = KU_{cm}U_{\Omega m} \cos(\Omega t) \cdot \cos(\omega_C t) \\ &= \frac{1}{2}KU_{cm}U_{\Omega m} [\cos(\omega_C + \Omega)t + \cos(\omega_C - \Omega)t] \end{aligned}$$

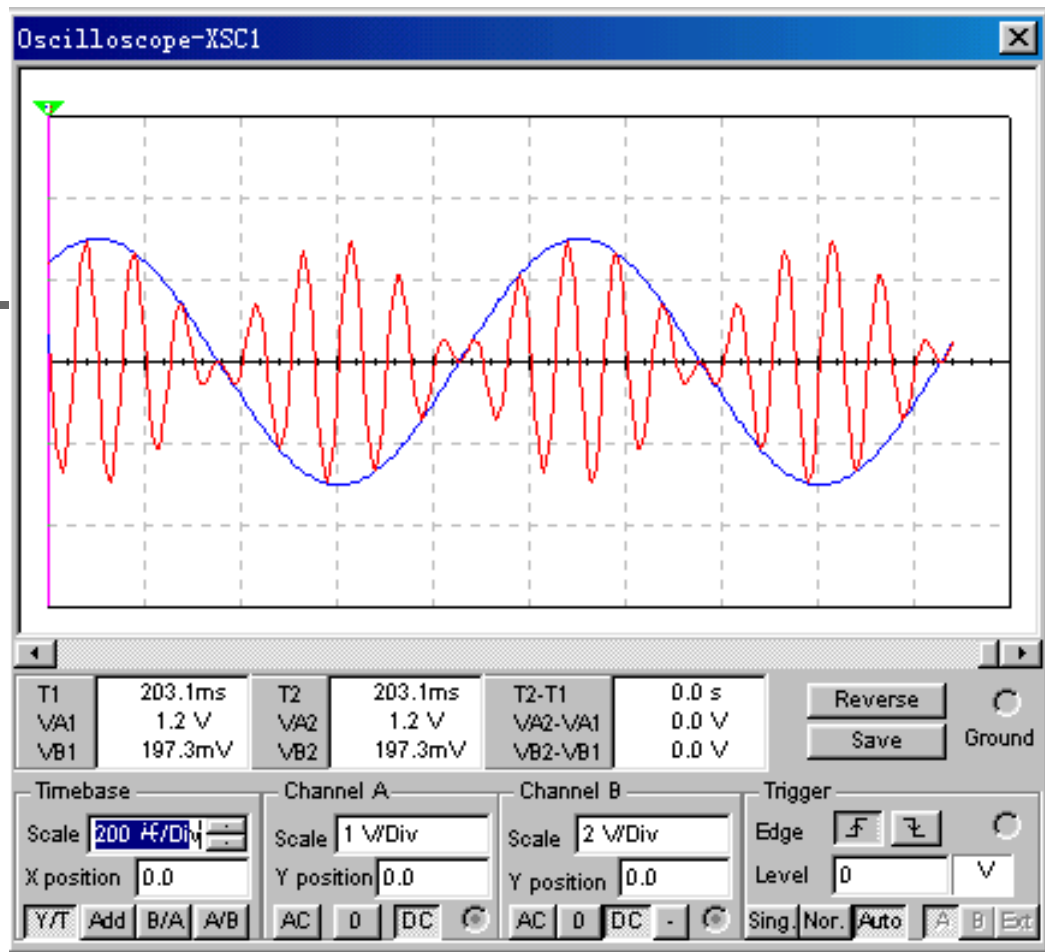
(6.5.6)



利用乘法器 ( $K=1$ ) 组成的抑制载波双边带调幅 (DSB/SC AM) 电路如图6.5.2所示, 可获得通信系统中常用的抑制载波双边带信号 (DSB/SC AM)。高频载波信号电压  $V_2 (u_c (t))$  加到Y输入端口。低频调制信号  $V_1 (u_\Omega (t))$  加到X输入端口, 仿真运行图6.5.2电路, 可得输出电压波形如图6.5.2 (b) ( $K=1$ ), 满足式 (6.5.2) 关系。



(a) 乘法器组成的抑制载波双边带调幅电路



(b) 抑制载波双边带调幅仿真输出波形

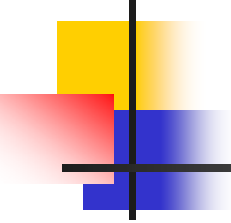
图6.5.2 乘法器组成的抑制载波双边带调幅电路





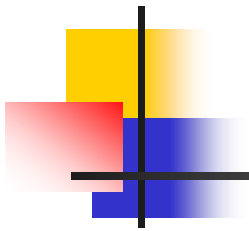
---

## 6.6 振幅键控 (ASK) 调制电路

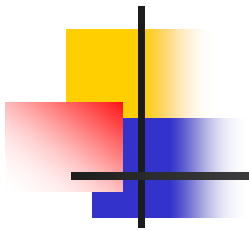


---

数字信号对载波的调制与模拟信号对载波的调制类似，它同样可以去控制正弦振荡的振幅、频率或相位的变化。但由于数字信号的特点——时间和取值的离散性，使受控参数离散化而出现“开关控制”，称为“键控法”。



数字信号对载波振幅调制称为振幅键控即ASK (Amplitude-Shift Keying), ASK有两种实现方法: 乘法器实现法和键控法。乘法器实现法的调制器方框图如图6.6.1所示, 它的输入是随机信息序列, 以 $\{A_k\}$ 所示。经过基带信号形成器, 产生波形序列, 设形成器的基本波形为 $g(t)$ , 则波形序列为



---

$$u(t) = \sum_k A_k g(t - kT_B) \quad (6.6.1)$$

式中， $T_B$ 为码元宽度； $A_k$ 是第 $k$ 个输入随机信息。乘法器用来进行频谱搬移，乘法器后的带通滤波器用来滤除高频谐波和低频干扰。带通滤波器的输出就是振幅键控信号，用 $u_{ASK}(t)$ 表示。

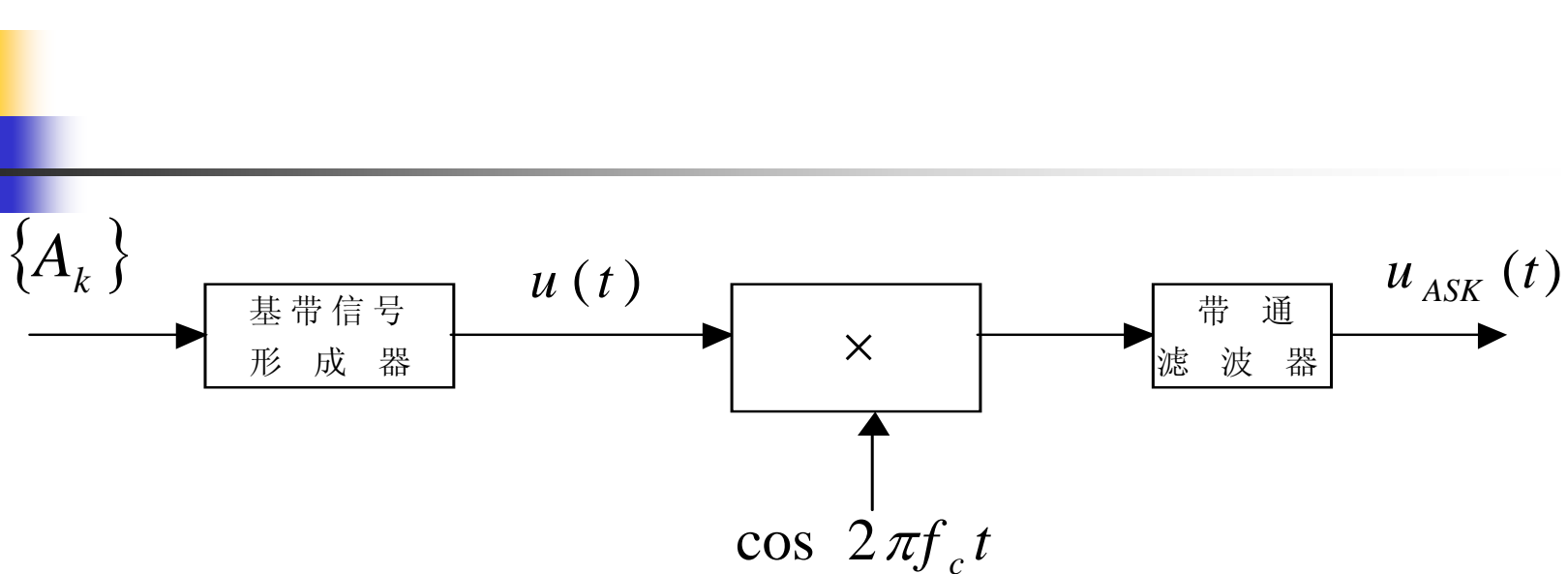
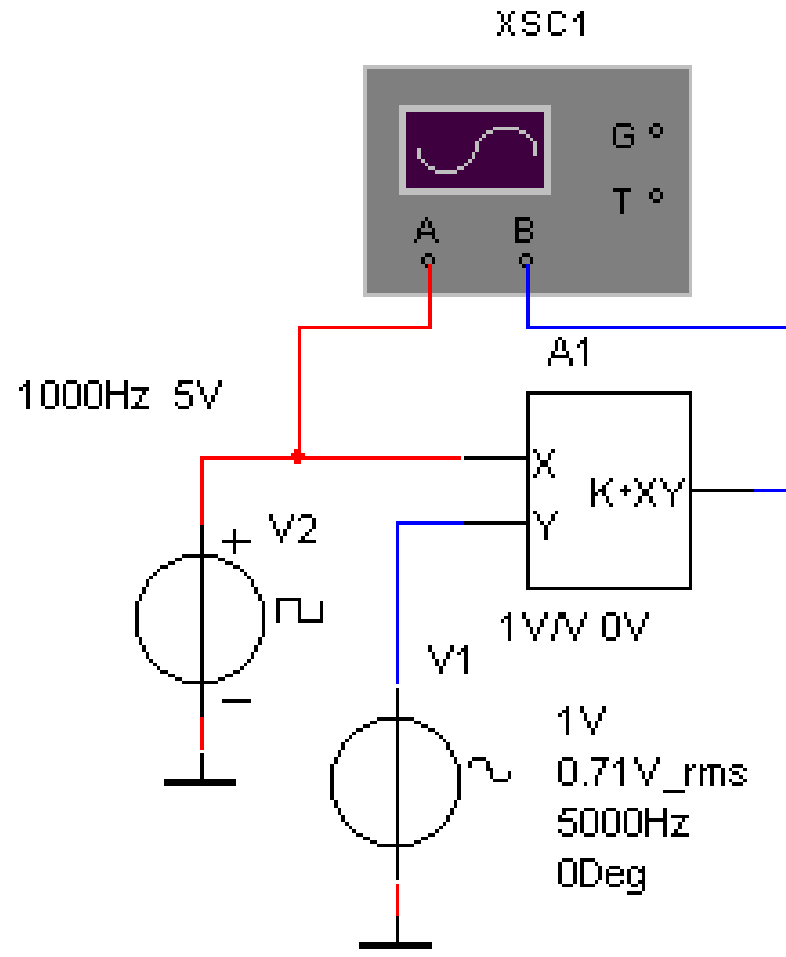
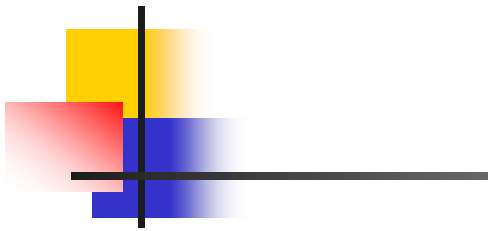
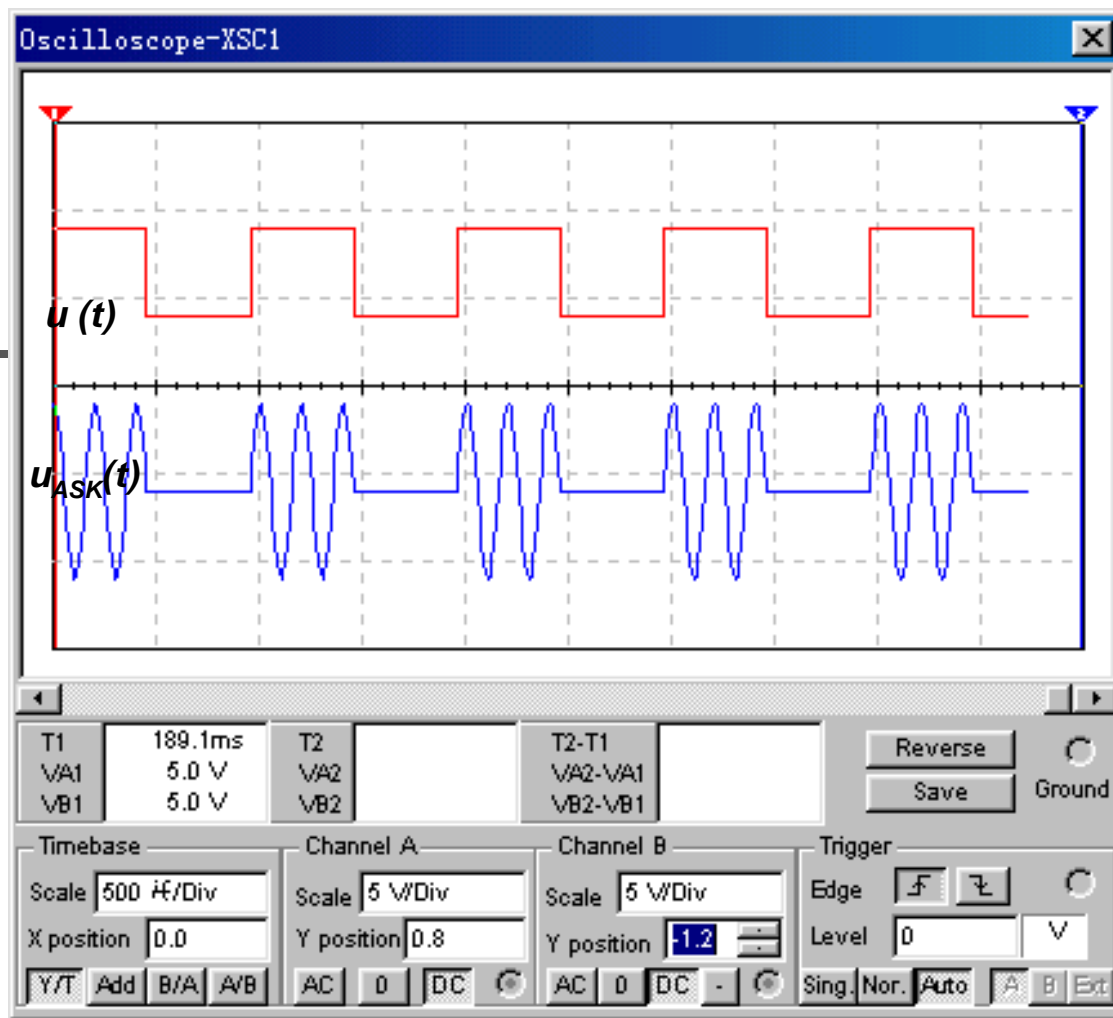


图6.6.1 乘法器实现法的调制器方框图

在图6.6.2 (a) 所示仿真电路中， $u(t)$ 用方波信号源V2代替，载波信号为V1，产生的振幅键控信号  $u_{ASK}(t)$ 如图6.6.2 (b) 所示。



(a) 乘法器实现的ASK调制电路



(b) 产生的振幅键控信号  $u_{ASK}(t)$

图6.6.2乘法器实现的ASK调制电路



---

## 6.7 混频器电路





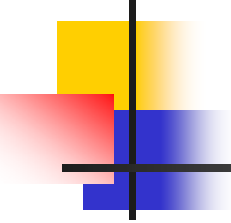
## 6.7.1 混频器特性与仿真

---

■ 在保持调制类型和调制参数不变的情况下，将输入已调波的载频 变为中频的过程称为混频。即：

$$\omega_I = \omega_L - \omega_S \quad (6.7.1)$$

实际上从频谱而言，混频的作用是不失真地将输入已调信号的频谱从  $\omega_S$  搬移到 位置上。因此，混频电路也是一种频谱搬移电路。



以普通调幅波 (AM) 为例说明上述的混频过程。输入信号为：

$$u_s(t) = U_m [1 + m_a u_\Omega(t)] \cos \omega_s t \quad (6.7.2)$$

本地振荡信号

$$U_L = U_{Lm} \cos \omega_L t \quad (6.7.3)$$

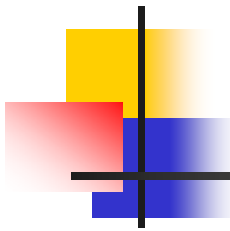


---

当  $\omega_L > \omega_S$  时，乘法器的输出为：

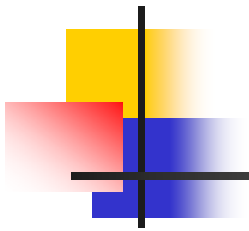
$$\begin{aligned} u_p &= U_{sm} [1 + m_\alpha u_\Omega(t)] \cdot \text{COS} \omega_S t \cdot U_{mL} \text{COOS} \omega_L t \\ &= \frac{U_{Sm} U_{Lm}}{2} [1 + m_\alpha u_\Omega(t)] [\text{COS}(\omega_L - \omega_S)t + \text{COS}(\omega_L + \omega_S)t] \end{aligned}$$

(6.7.4)



---

式中 $\omega_L - \omega_S = \omega_I$  为所需的中频分量 $\omega_S$ ；  
则是无用分量。可以从中心频率为 $\omega_I$  的  
带通滤波器滤除无用分量取出有用分  
量，即实现了混频作用。其电路模型  
和频谱如图6.7.1所示。



---

实际的混频器有晶体二极管平衡和环路混频电路，晶体三极管混频电路和模拟乘法器混频电路。由于模拟乘法器构成的混频器其输出电压中不包含信号频率分量，从而降低了对带通滤波器的要求。用带通滤波器取出差频

$(\omega_L - \omega_S)$  即可得混频输出。

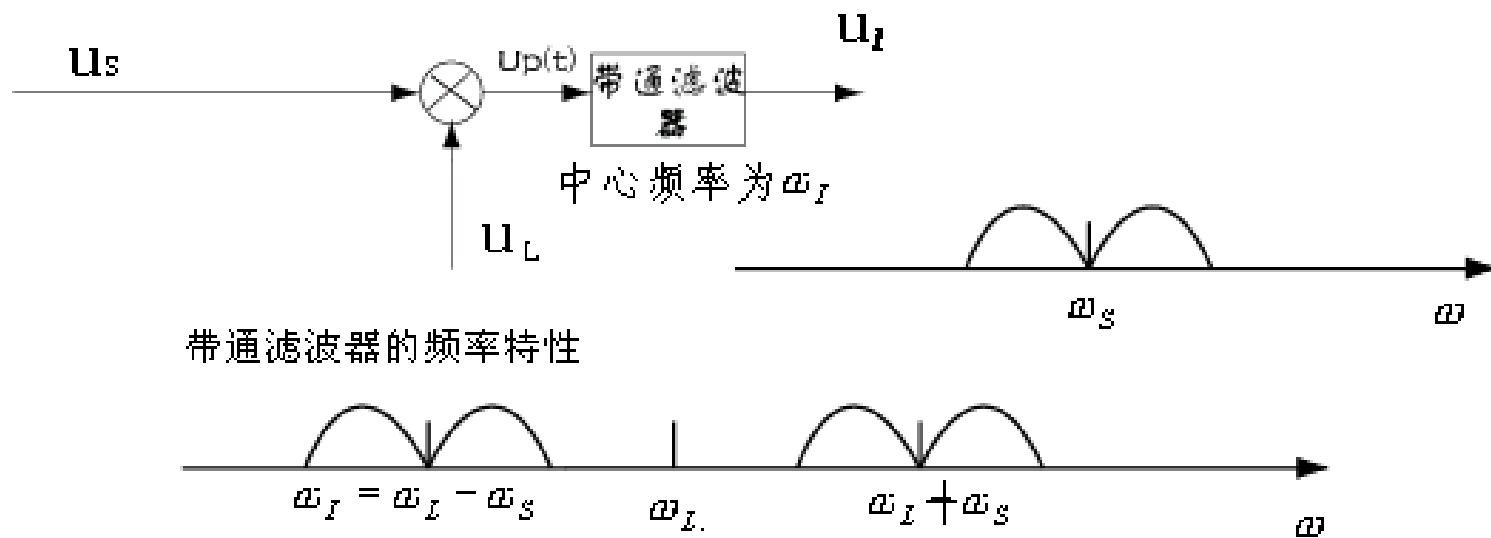
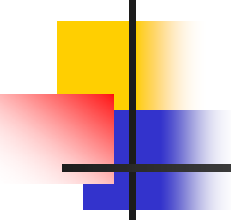
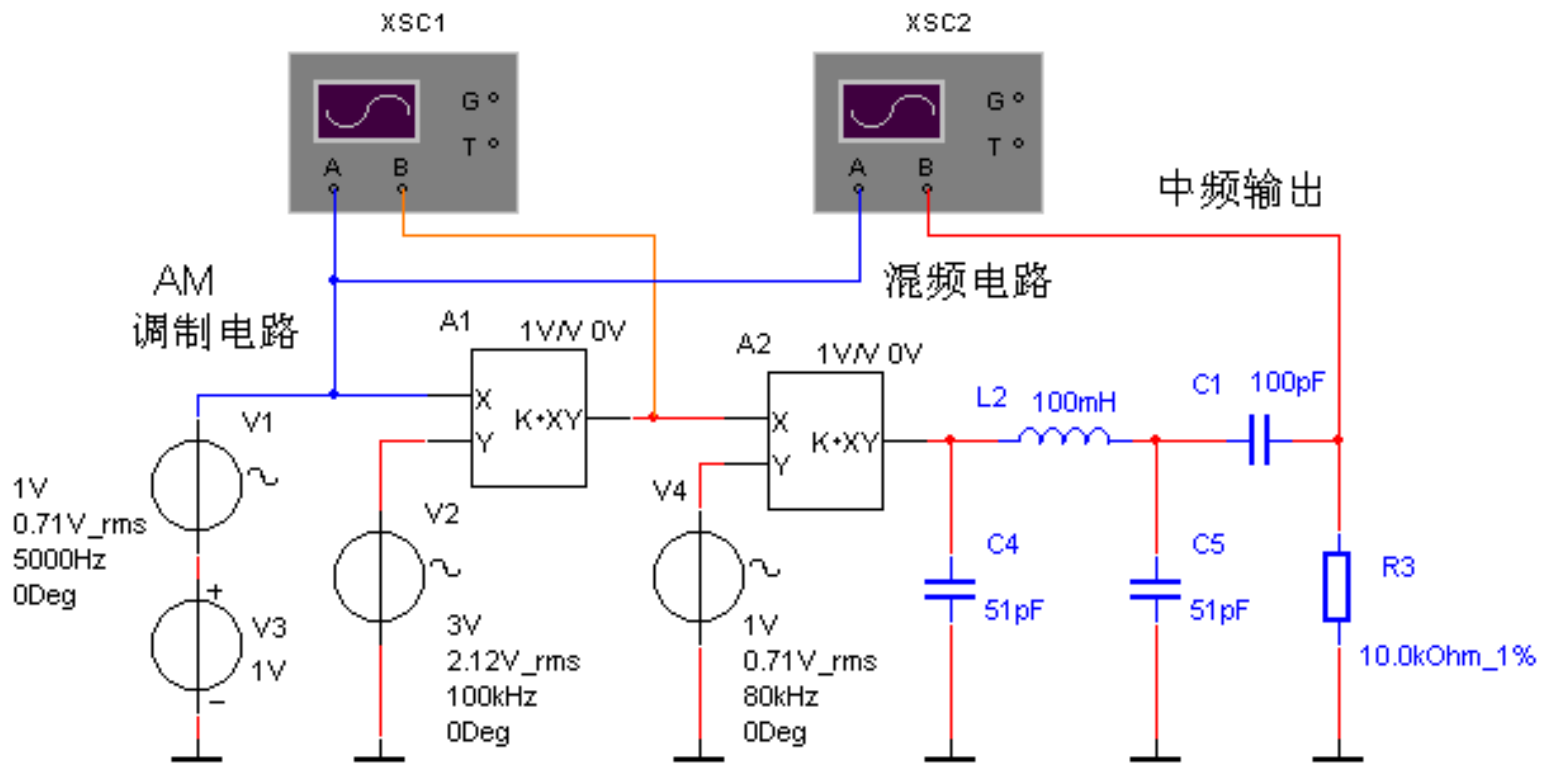


图6.7.1 混频电路的电路模型和频谱

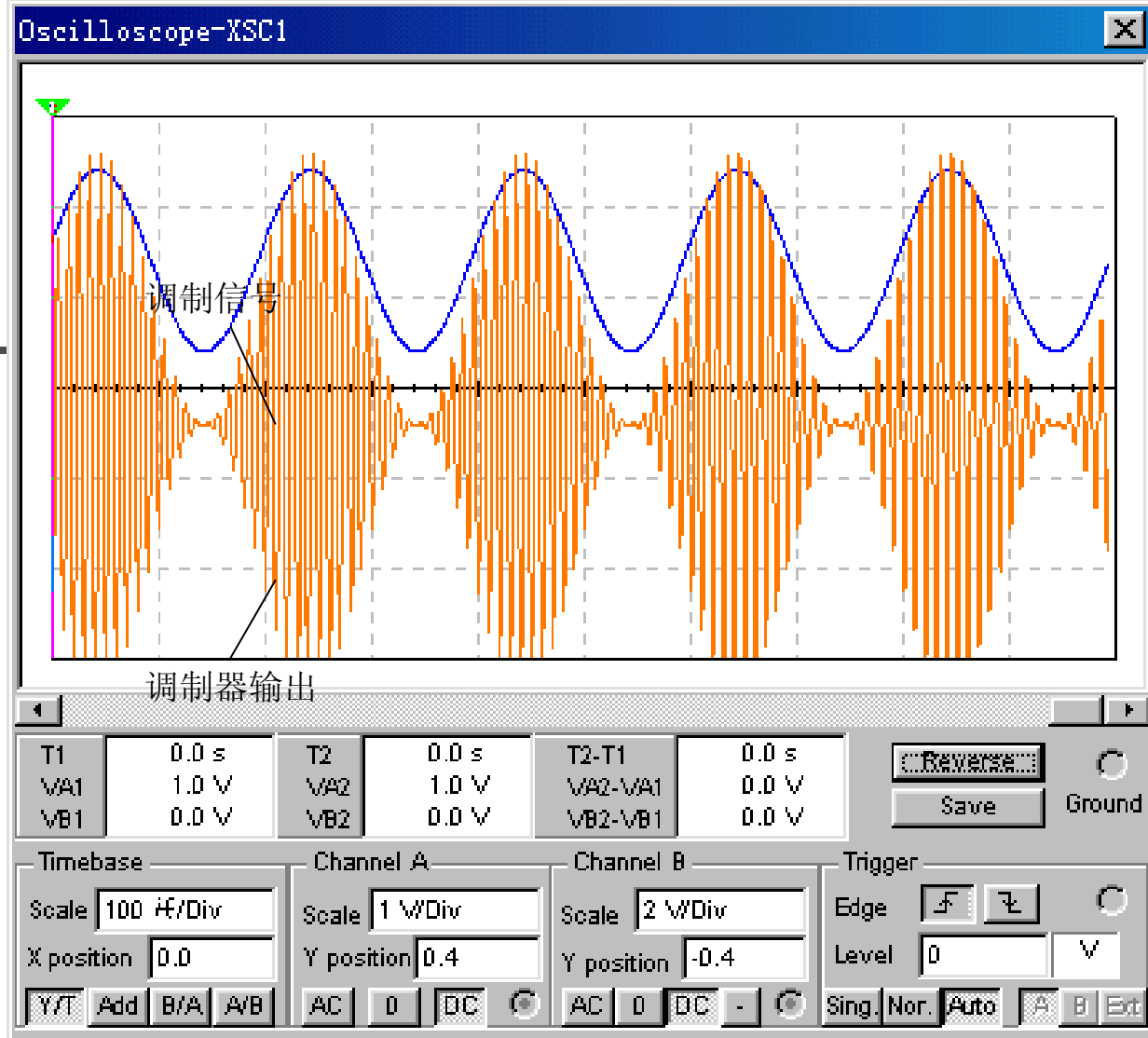


用乘法器组成的普通调幅波 (AM) 调制与混频电路如图6.7.2 (a) 所示。调制器输出信号  $u_s$  经过乘法器和带通滤波器组成的混频电路，输出波形如图6.7.2 (c) 所示，比较图6.7.2 (b) 和图6.7.2 (c)，可以看到载波频率已经降低。

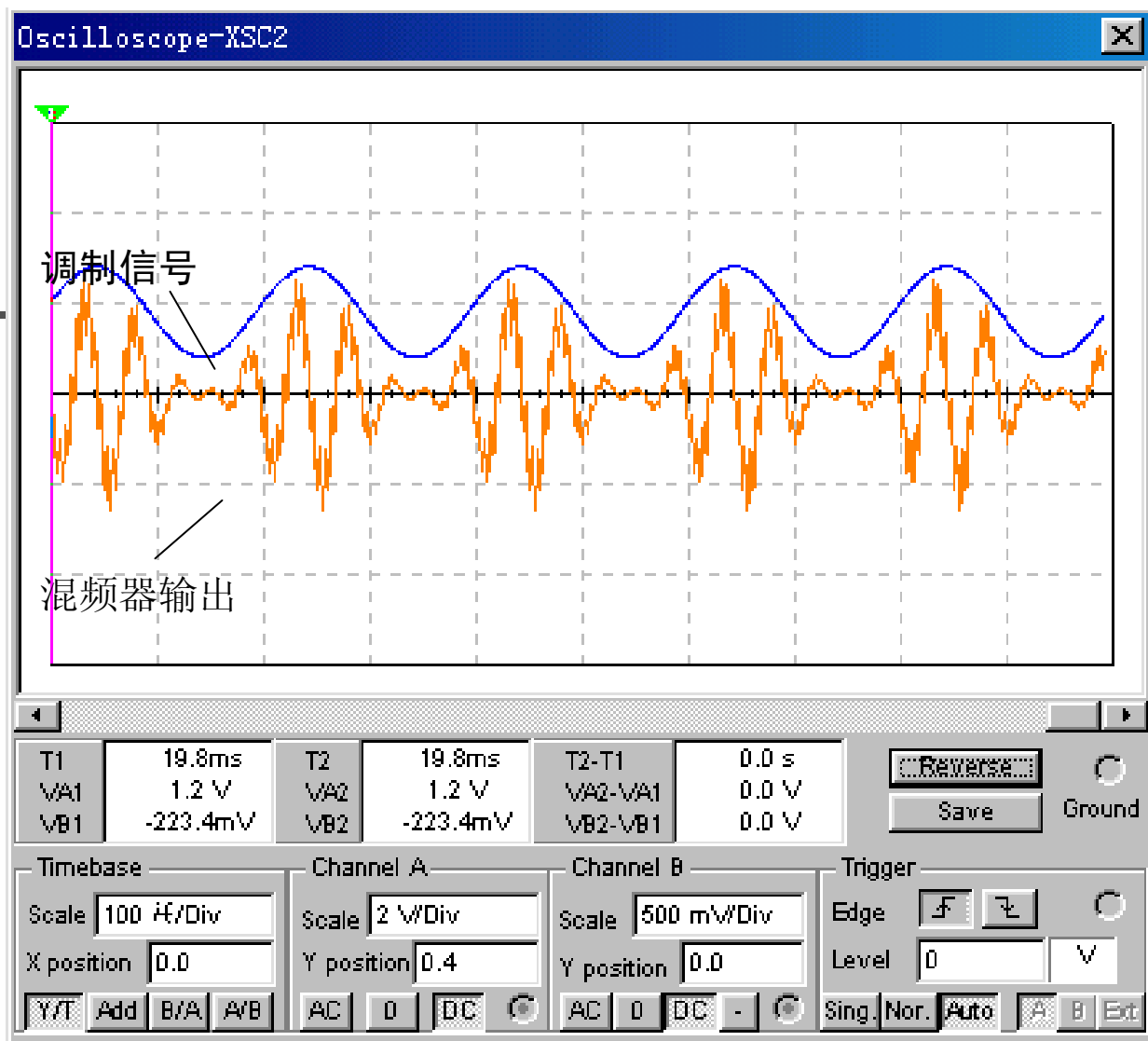


(a) 普通调幅波 (AM) 调制与混频电路





(b) 普通调幅波(AM)调制输出波形



(c) 普通调幅波(AM)混频电路输出波形

图6.7.2普通调幅波(AM)调制/混频电路和输出波形

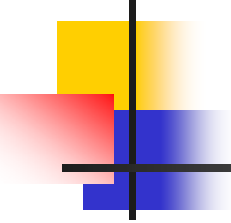


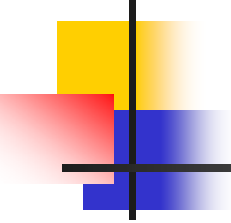
## 6.7.2 混频器频谱分析

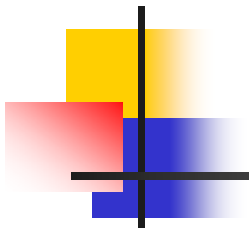
---

- 用乘法器组成的混频电路如图6.7.3所示，设射频输入频率  $f_R$  为2.45GHz，本机振荡器频率  $f_L$  为2.21GHz，混频后输出中频  $f_I$  为240MHz。按图6.7.3连接好仿真电路，点击频谱分析仪，进行参数设置：

- 
- 
- (1) 在Span Control区中：选择Set Span，频率范围由Frequency区域设定。频率范围可设定为0~4GHz。

- 
- 
- (2) 在Frequency区中：在Span栏设定频率范围，3GHz。在start栏设定起始频率，1Hz。在Center栏设定中心频率，1.5GHz。在End栏设定终止频率，3GHz。。

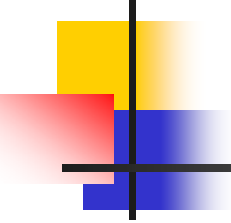
- 
- (3) 在Amplitude区中：当选择dB时，纵坐标刻度单位为dB。当选择dBm时，纵坐标刻度单位为dBm。当选择Lin时，纵坐标刻度单位为线性V/Div。
  - (4) 在Resolution Frequency区中可以设定频率分辨率，即能够分辨的最小谱线间隔。



---

- (5) 在Controls区中：当选择Start时，启动分析。当选择Stop时，停止分析。

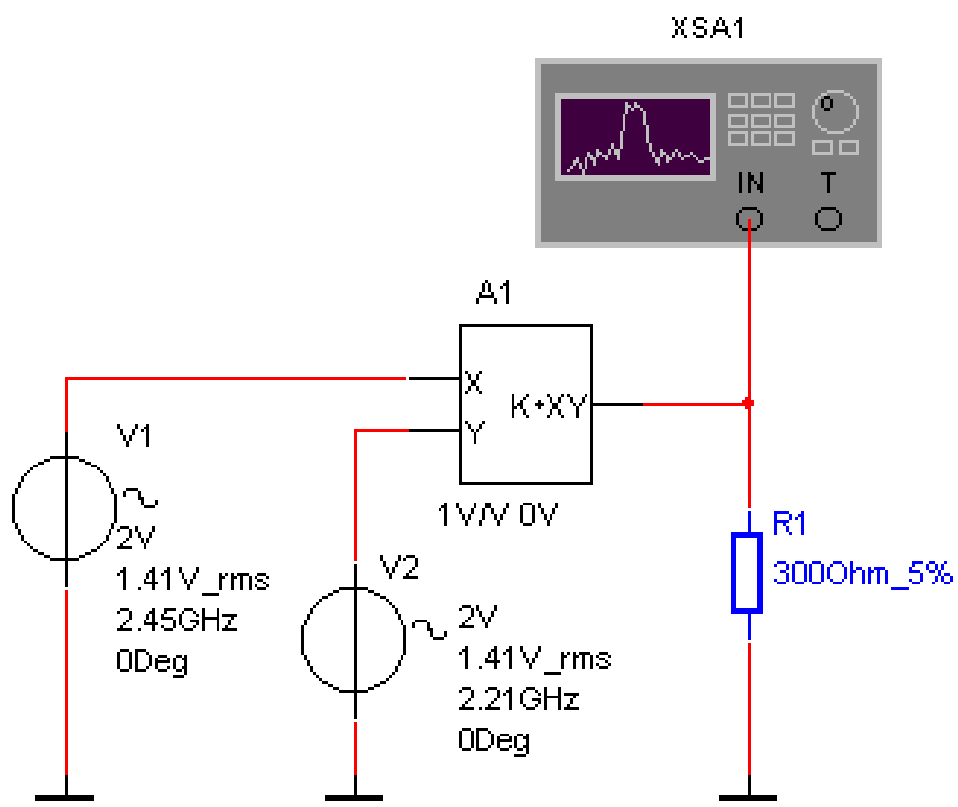
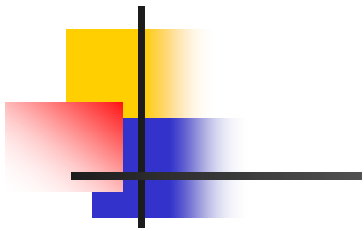
- (6) 当选择trigger Set时，选择触发源是Internal（内部触发）还是External（外部触发），选择触发模式是Continue（连续触发）还是Single（单次触发）。



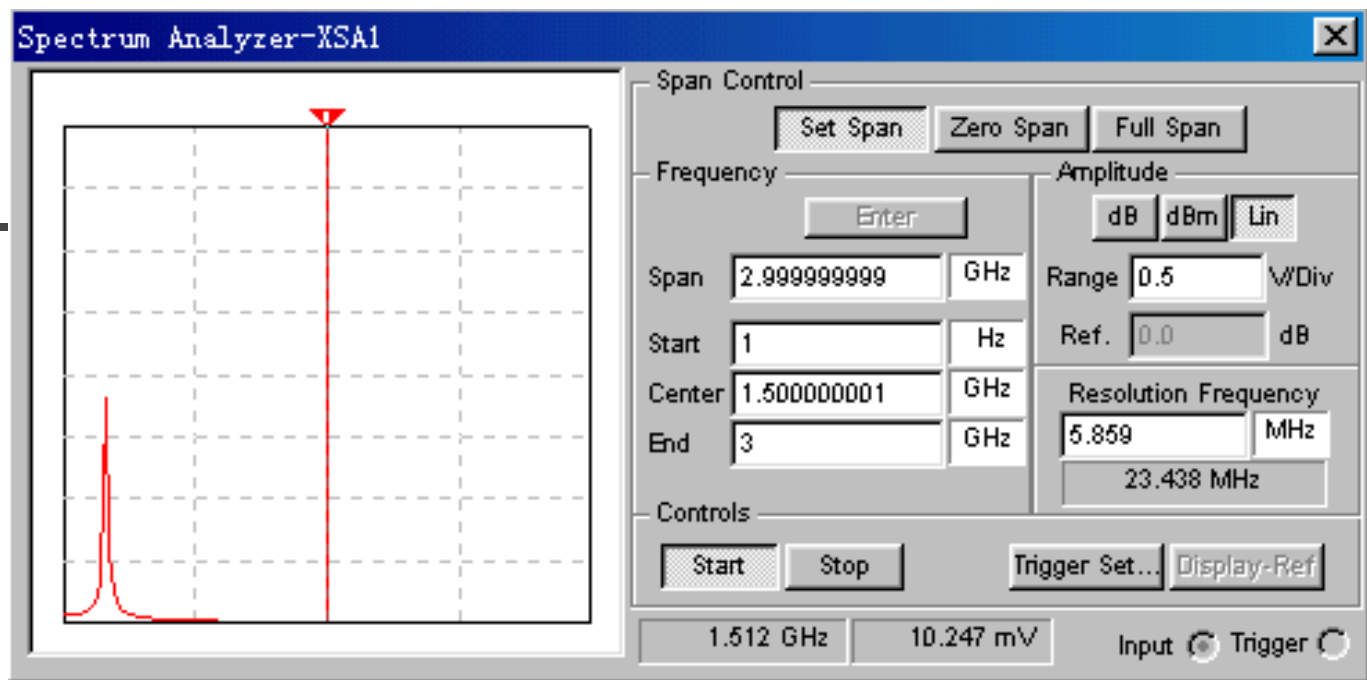
---

- 点击启动按钮，频谱图显示在频谱分析仪面板左侧的窗口中，移动游标可以读取所显示的频谱参数，每点的数据显示在面板右侧下部的数字显示区域中。

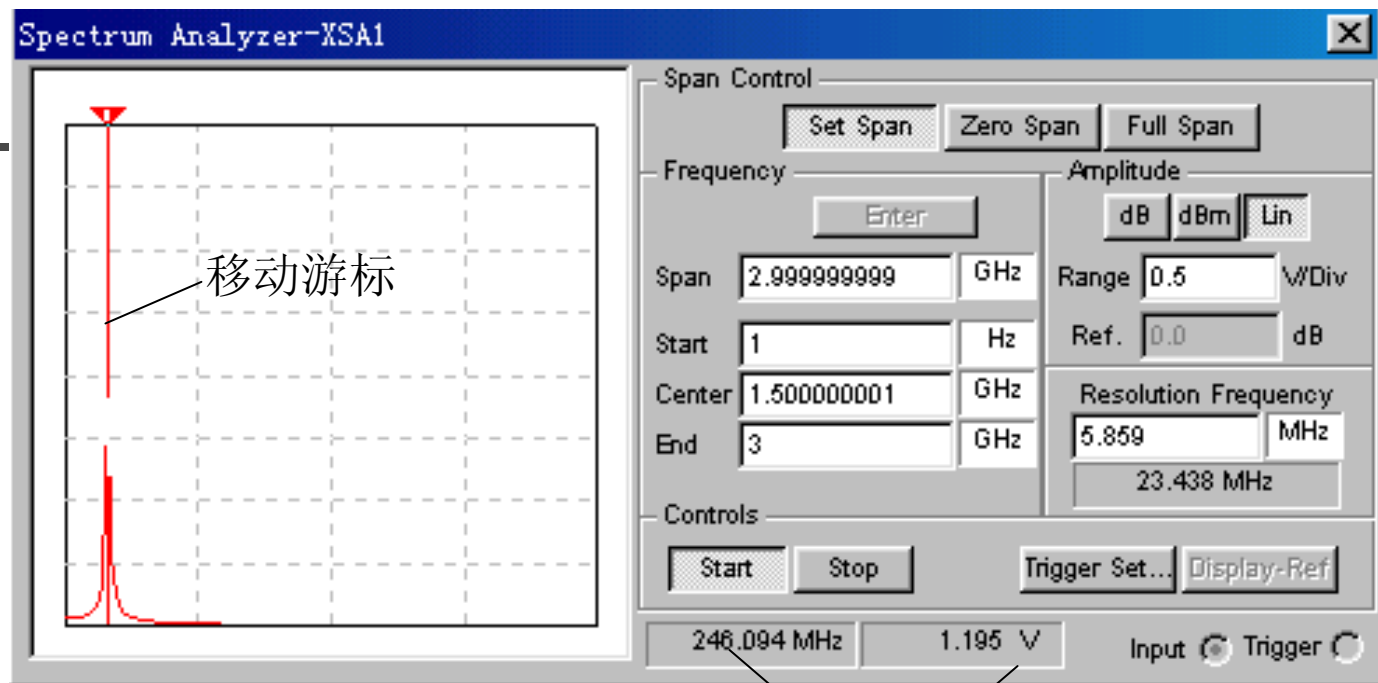




(a) 用乘法器组成的混频电路



(b) 频谱分析仪参数设置与分析



读取数据

(c) 频谱分析仪读取数据

图6.7.3混频器的频谱分析



---

## 6.8 倍频器电路



## 6.8.1 倍频器特性与仿真

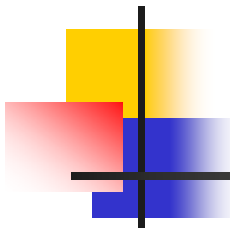
---

如果输出频率为输入频率整数值，即

$$f_0 = nf_n (n = 1, 2, 3, \dots)$$

则这种频率变换电路称为倍频器。当 $n=2$ 时，即

$$f_0 = 2f_s$$



称为二倍频器。用模拟乘法器可以组成一个倍频电路。用模拟乘法器实现二倍频器的原理方框图如图6.8.1所示。

若 
$$u_S(t) = U_{Sm} \cos \omega_S t$$

则模拟乘法器的输出为：

$$\begin{aligned} u_S(t) &= U_{Sm} \cos \omega_S t \\ &= \frac{K}{2} U_{Sm}^2 (1 + \cos 2\omega_S t) \end{aligned}$$

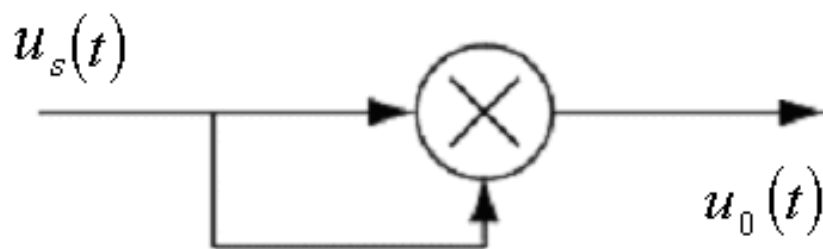
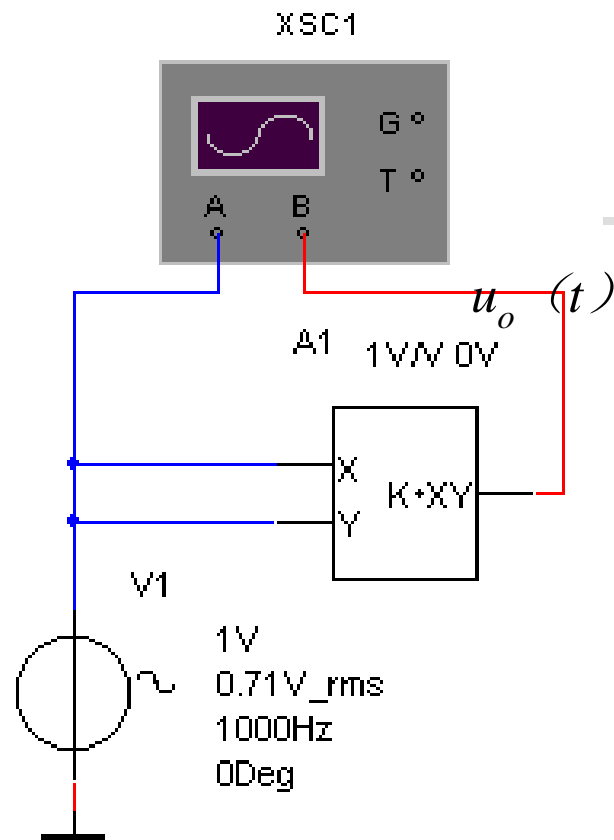


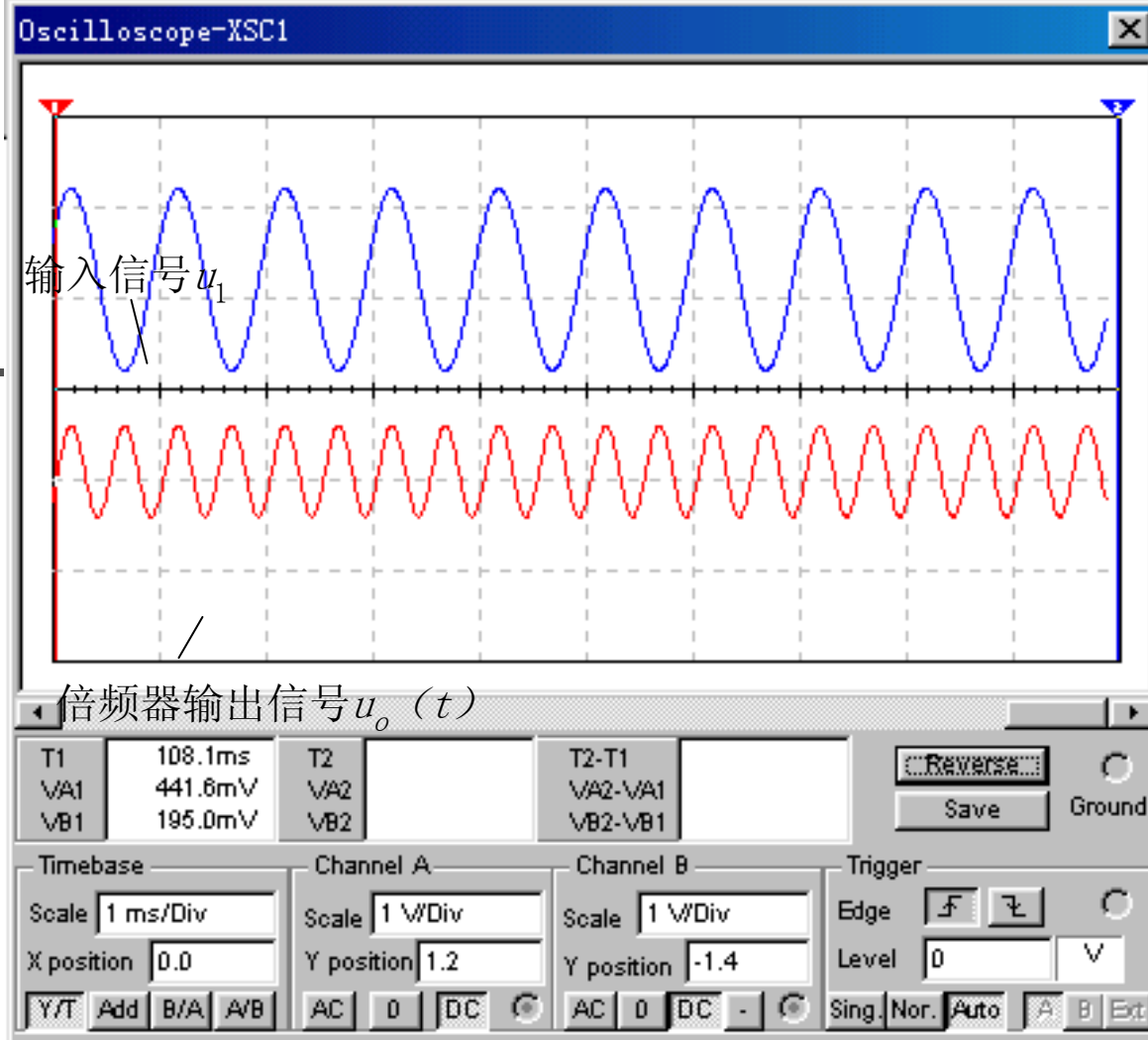
图6.8.1 二倍频器原理方框图

- 从上式可见，输出电压中包含直流分量和二倍频分量，通过隔直流电容滤除直流分量，可在负载上得到二倍频电压。
- 用乘法器组成的二倍频器电路如图6.8.2 (a) 所示。倍频器输出信号  $u_o(t)$  波形如图6.8.2 (b) 所示，



(a) 用乘法器组成的二倍频器电路





(b) 二倍频器电路输出波形

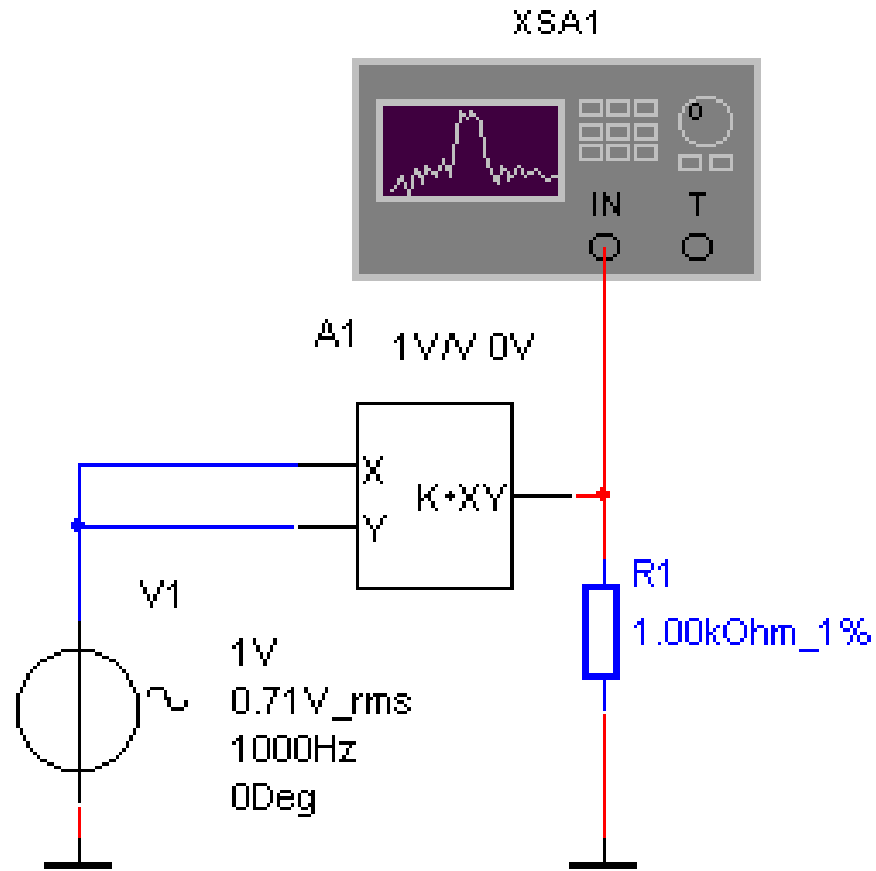
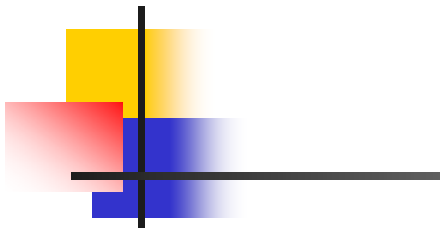
图6.8.2用乘法器组成的二倍频器电路和输出波形



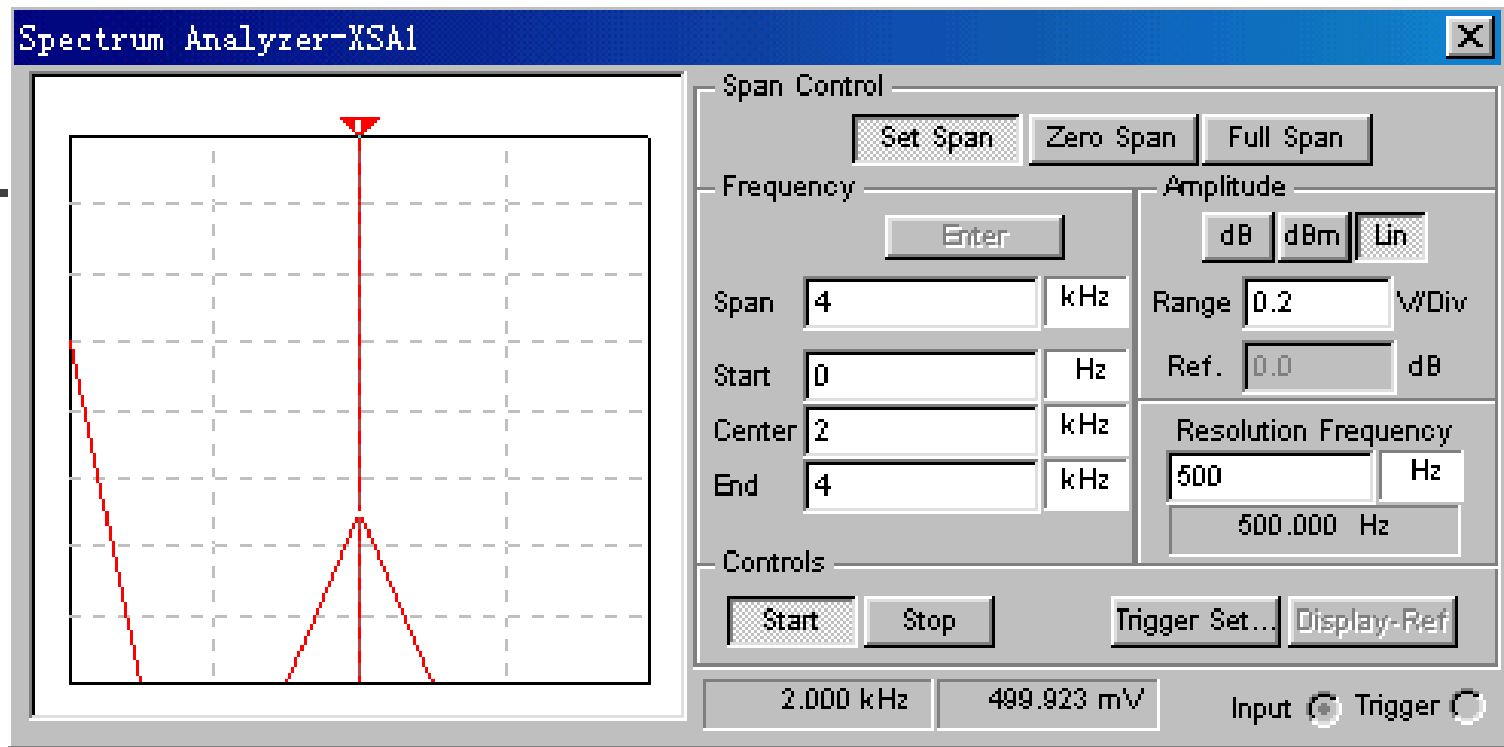
## 6.8.2 用乘法器组成的二倍频器电路频谱分析

---

- 用乘法器组成的二倍频器电路频谱分析电路如图6.8.3 (a) 所示, 按6.7.3所介绍的方法设置频谱分析仪参数, 分析结果如图6.8.3 (b) 所示。



(a) 二倍频器电路频谱分析电路



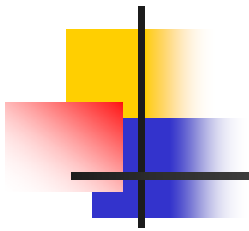
(b) 频谱分析仪参数设置与分析

图2.8.3倍频器的频谱分析



---

## 6.9 抑制载波双边带调幅 (DSB/SC AM) 解调电路



要从抑制载波的双边带调幅波检出调制信号  $u_{\Omega}(t)$  来。从频谱上看就是将幅度调制波的边带信号不失真的搬到零频附近。因此AM波的解调电路（包括抑制载波的双边带调幅波的解调在内）也属于频谱搬移电路。需要用乘法器来实现这种频谱搬移作用，其电路如图6.9.1所示。



---

DSB/SC AM波的  $u(t)$  电压可表示为：

若 
$$u(t) = U_{DSB}(t) = Ku_{\Omega}(t)COS\omega_c t$$

$$u(t) = U_{DSB}(t) = Ku_{\Omega}(t)COS(\omega_c t) \quad (6.9.1)$$



---

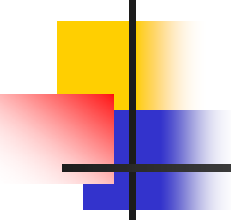
本机载波频率:

$$u_c(t) = U_{\Omega_m} \text{COS}(\omega_c t)$$

两者相乘:

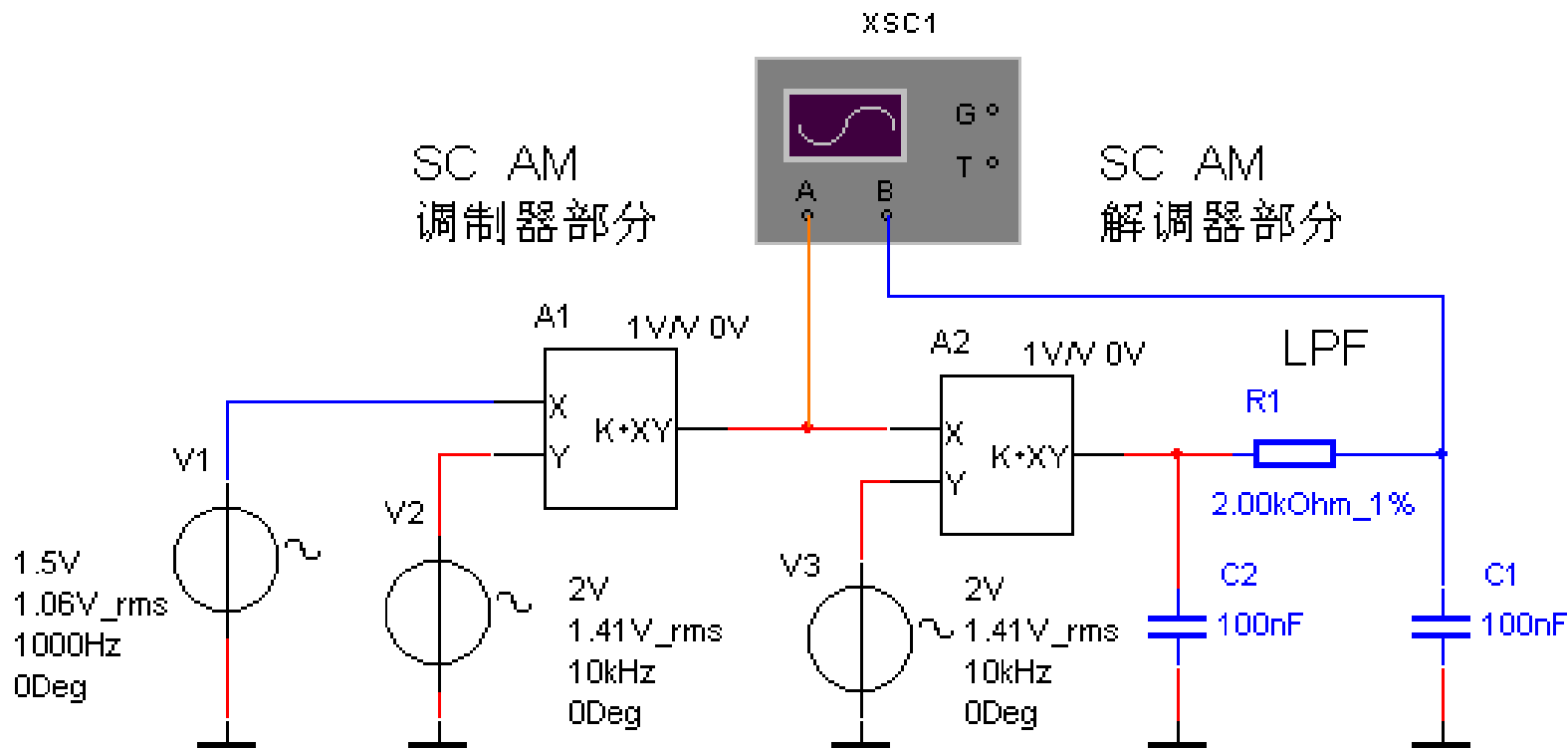
$$\begin{aligned} u_p(t) &= U_{DSB}(t) \cdot u_c(t) = Ku_{\Omega}(t) \text{COS} \omega_c t \cdot U_{cm} \text{COS} \omega_c t \\ &= \frac{KU_{cm}u_{\Omega}(t)}{2} [1 + \text{COS} 2\omega_c t] \end{aligned}$$



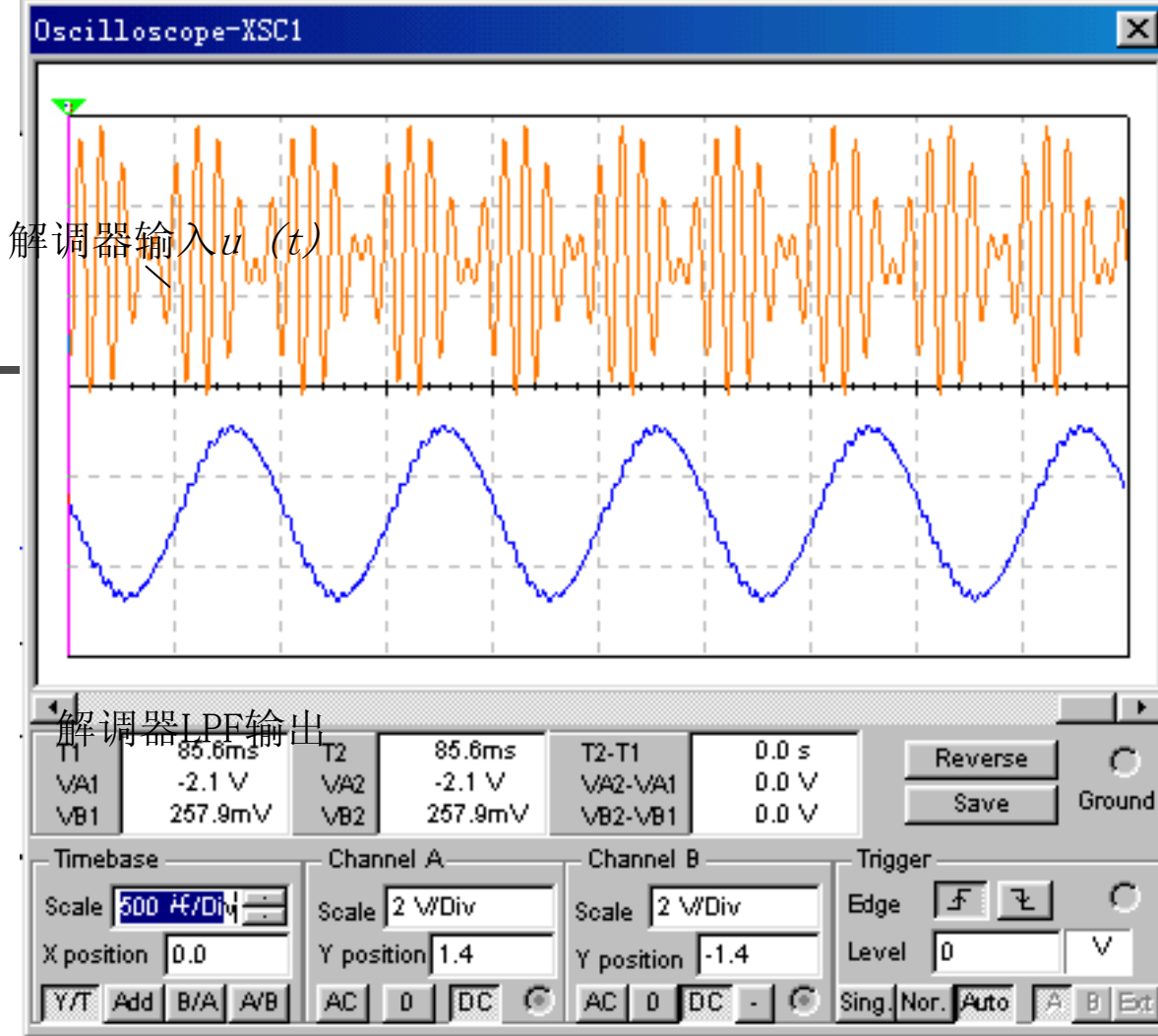


---

其中第一项包含了所需的调制信号，第二项则是载频为  $\omega_c$  的双边带调制信号，用低通滤波器（**LPF**）将它滤除，即可得到所需调制信号。



(a) 用乘法器组成的抑制载波  
双边带调幅调制与解调电路



(b) 解调器输入和输出波形

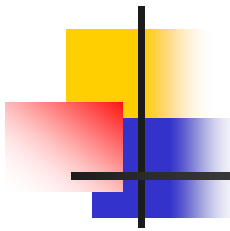
图6.9.1用乘法器组成的抑制载波

双边带调幅调制与解调电路

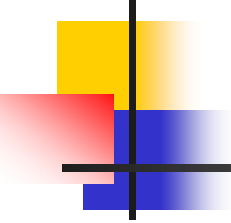


## 6.10 功率测量电路

---



用乘法器组成的功率测量电路如图6. 10. 1所示，图中输入电压V1（加在负载电阻RL上电源电压），通过分压电阻加到乘法器的X输入端。U1、R1、R2和R4组成电流/电压转换电路，将流过负载电阻RL上的电流直接转换成1:1的电压，加到乘法器的Y输入端。乘法器的比例系数K=2，乘法器的输出电压  $U_0 = KU_X U_Y$ ，数字万用表XMM1测量乘法器的输出电压，显示的数字直接表示在负载电阻RL上的消耗功率。



---

XMM2用来测量流过RL上的电流，XMM3用来测量I/V转换电路的输出电压，仅在调试中使用。实际应用时A、B为输入端。

该电路也可以用于交流功率测量，应注意的是XMM1应设置为直流电压档，XMM1显示的电压值直接表示RL上消耗的功率。

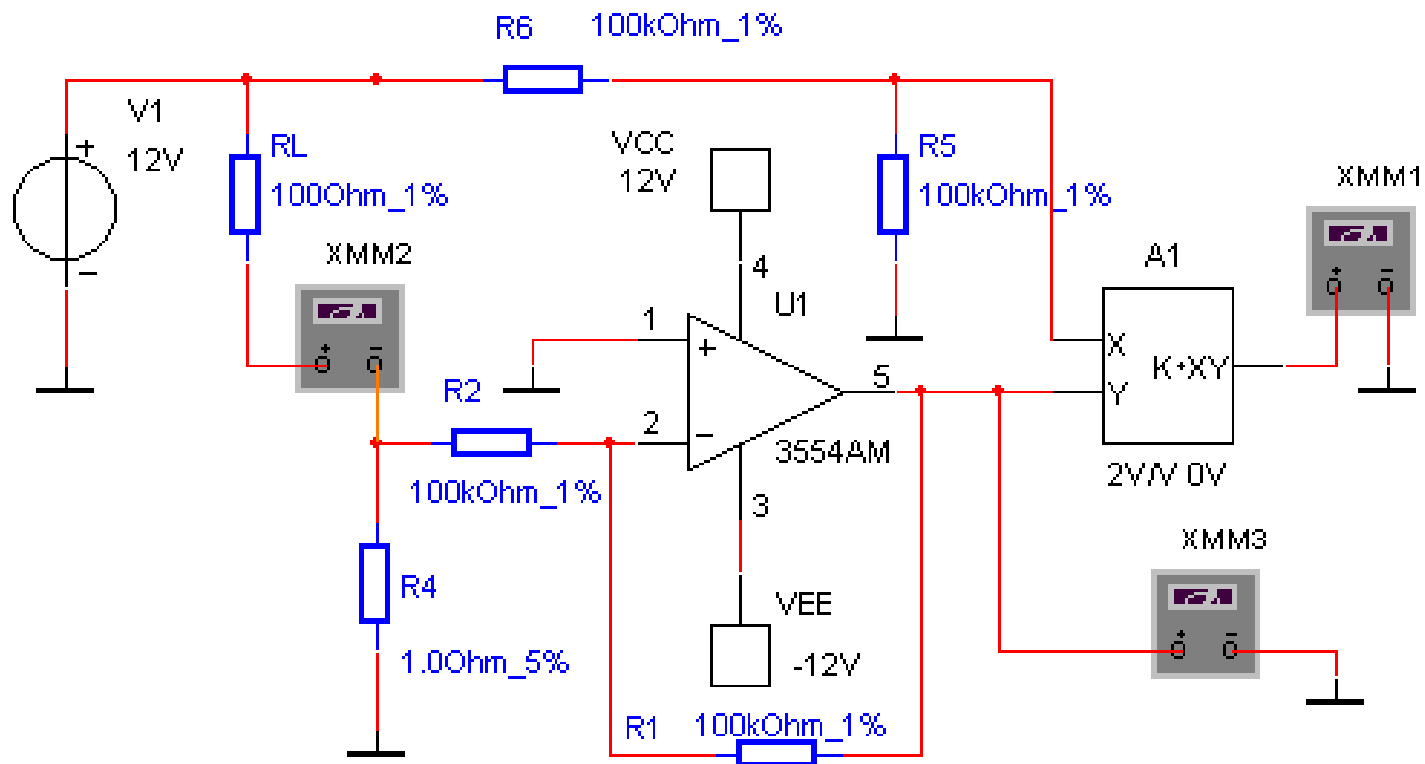


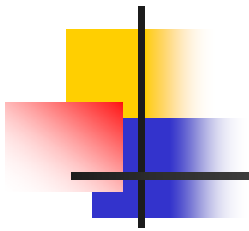
图6.10.1 用乘法器组成的功率测量电路



---

## 本章小结





模拟乘法器能实现两个互不相关的模拟信号间的相乘功能，是一种普遍应用的非线性模拟集成电路。本章主要内容有：

(1) 模拟乘法器是一个三端口非线性网络，输出特性可表示为  $U_o = KU_x U_y$ ， $K$  为相乘增益。

(2) 在multisim2001拟乘法器模型中，输出电压模：

$$U_{out} = K \left[ X_K + (U_x + X_{off}) \cdot Y_K (U_Y + Y_{off}) \right] + O_{ff}$$

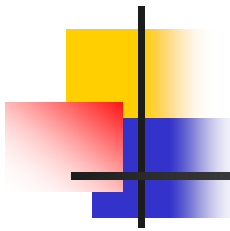


(3) 由模拟乘法器组成的乘法与平方运算电路。

(4) 由运算放大器和乘法器组成的除法与开平方运算电路。

(5) 由模拟集成乘法器与运算放大器构成的以幕级数形式表示的函数发生电路其特点是：利用模拟集成乘法器产生函数所需要的变量。

(6) 由模拟乘法器组成的普通调幅 (AM) 电路和抑制载波双边带调幅 (DSB/SC AM) 调制电路。

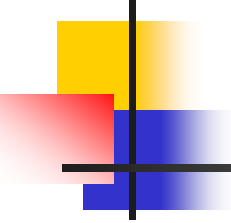


---

(7) 由模拟乘法器组成的振幅键控 (ASK) 调制电路, 完成数字信号对载波振幅调制。

(8) 由模拟乘法器组成的混频器电路, 将输入已调波的载频 变为中频。

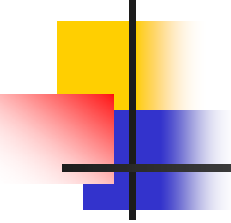
(9) 由模拟乘法器组成的倍频器电路, 输出频率为输入频率整数倍。



---

(10) 抑制载波双边带调幅 (DSB/SC AM) 解调电路, 利用乘法器来实现这种频谱搬移作用。

(11) 用乘法器组成的功率测量电路可以完成功率的测量。



---

掌握模拟乘法器应用电路的仿真设计与分析方法是本章的重点。构成应用电路的基础是模拟乘法器，将模拟乘法器连接在运算放大器的输入回路和负反馈回路上，可以构成各种不同的应用电路。



## 思考题与习题

---

- 6.1 简述模拟乘法器的基本概念与特性。
- 6.2 分析multisim2001模拟乘法器模型的特性，进行参数设置。
- 6.3 题图6.3电路，改变乘法器系数，使乘法器输出为4.3V。

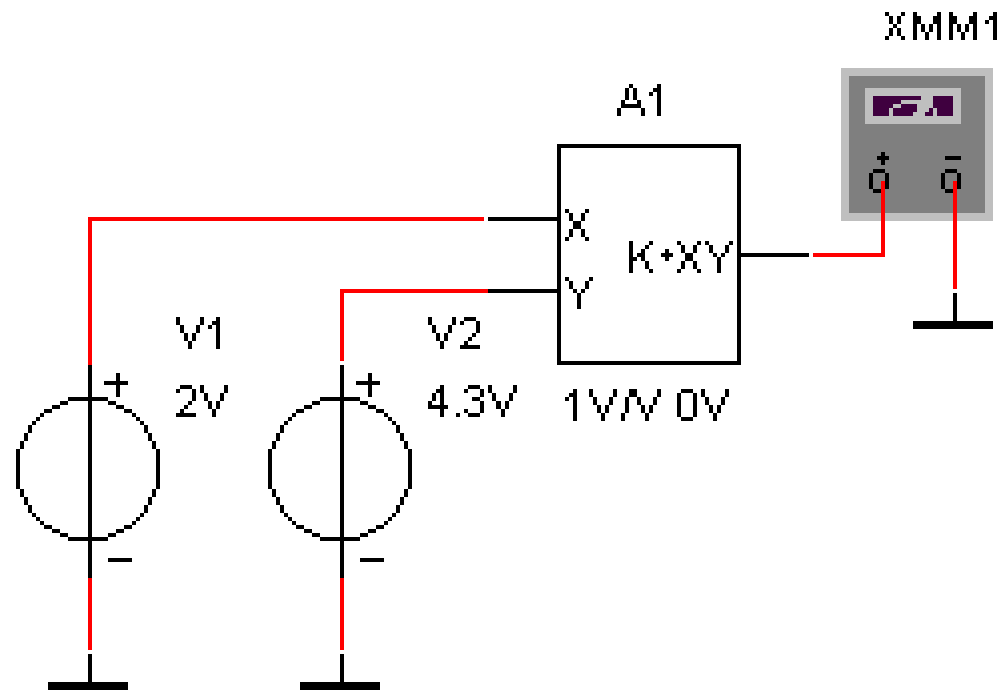
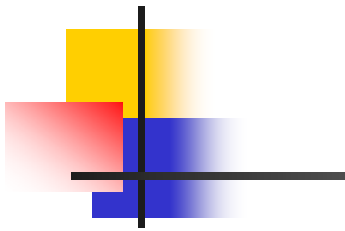
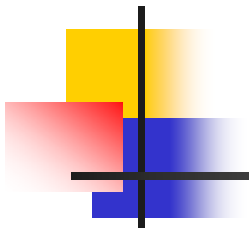


图6.1 题图6.3

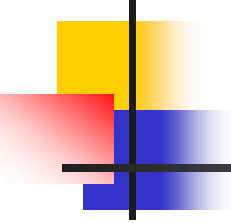


6.4 试用乘法器和运算放大器设计一个开立方运算电路。

6.5 试用乘法器和运算放大器设计一个函数发生器，函数  $f(x) = \sin x$ 。（提示：将  $\sin x$  展开）。

6.6 试用乘法器和运算放大器设计一个函数发生器，函数  $f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$ 。



- 
- 
- 6.7 试用乘法器和运算放大器设计一个调频电路。
  - 6.8 试用乘法器和运算放大器设计一个鉴相电路。
  - 6.9 试用乘法器和运算放大器设计一个压控三角波与方波发生器电路。



---

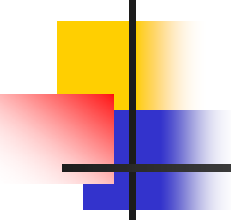
## 第7章 集成定时电路

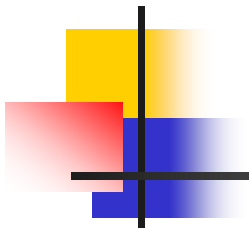


---

## ■ 内容提要

集成定时器555电路是一种数字、模拟混合型的中规模集成电路，是一种能够产生时间延迟和多种脉冲信号的电路，应用十分广泛。本章介绍了第7章 集成定时电路555定时电路的基本结

- 
- 
- 构与工作原理，以及555构成多谐振荡器、模拟声响电路、大范围可变占空比方波发生器电路、数字逻辑笔测试电路、接近开关电路和简单的汽车防盗报警电路与计算机仿真设计方法。



---

- 本章的重点是掌握555电路应用电路的仿真设计与分析方法。555电路是构成应用电路的基础，基本电路是555电路构成的振荡器电路，应用电路多是振荡器电路的变型。



---

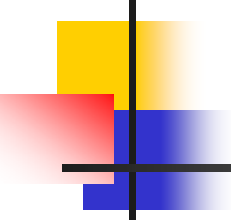
## 7.1 555定时电路



## 7.1.1 555定时电路原理

---

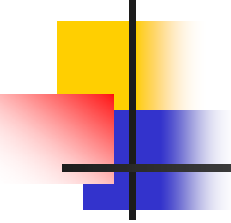
集成时基电路又称为集成定时器或555电路，是一种数字、模拟混合型的中规模集成电路，应用十分广泛。它是一种产生时间延迟和多种脉冲信号的电路，由于内部电压标准使用了三个5K电阻，故取名555电路。



---

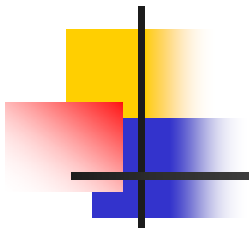
其电路类型有双极型和CMOS型两大类，二者的结构与工作原理类似。几乎所有的双极型产品型号最后的三位数码都是555或556；所有的CMOS产品型号最后四位数码都是7555或7556，二者的逻辑功能和引脚排列完全相同，易于互换。

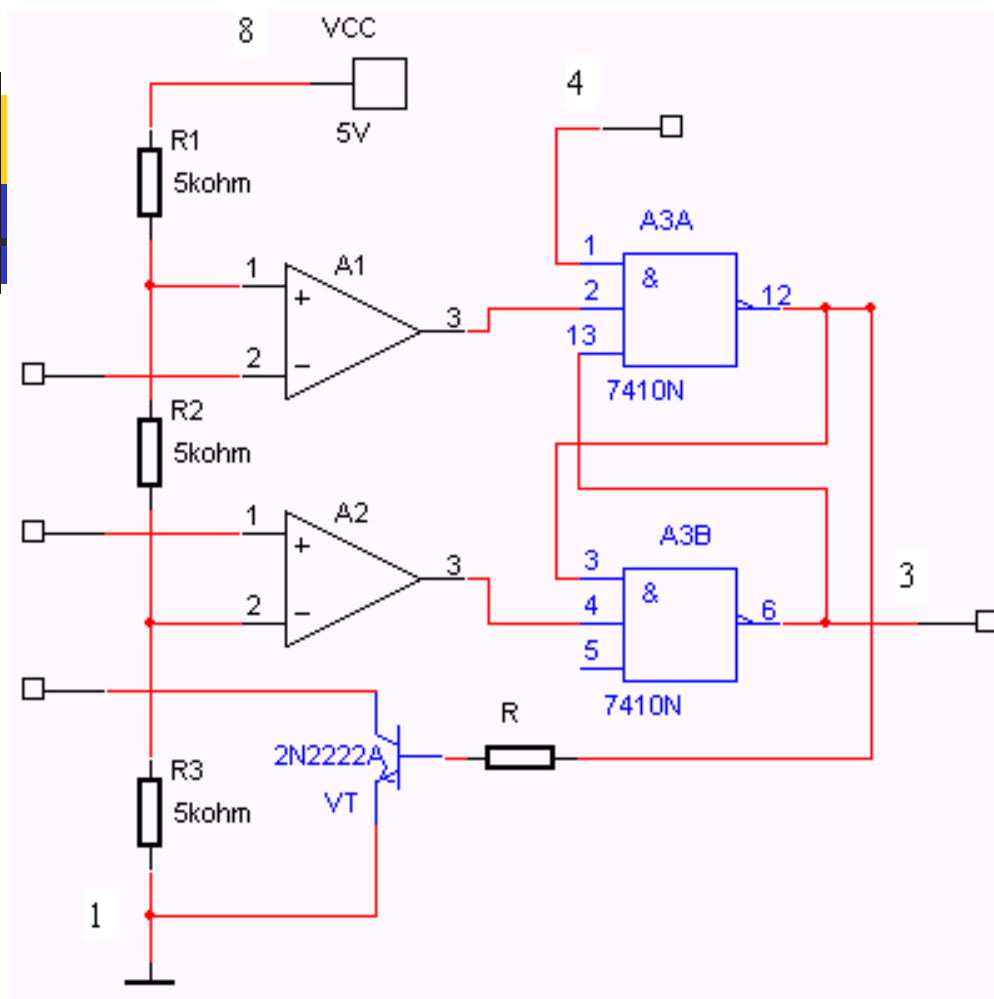




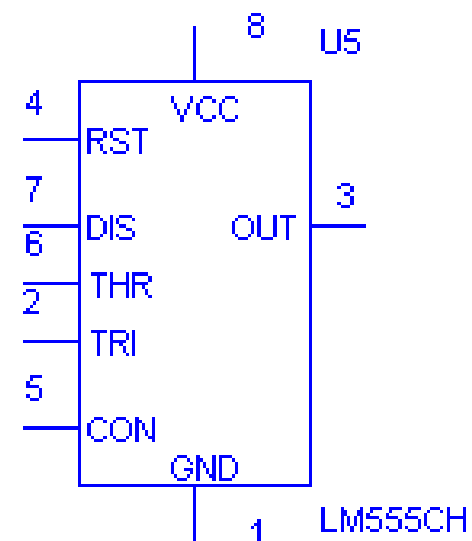
---

- 555和7555是单定时器。556和7556是双定时器。双极型的电源电压 $V_{CC} = +5V \sim +15V$ ，输出的最大电流可达200mA，CMOS型的电源电压为 $+3 \sim +18V$ 。

- 
- 555电路的内部电路结构图如图7.1.1所示。它含有两个电压比较器，一个基本RS触发器，一个放电开关管VT，比较器的参考电压由三只 $5K\ \Omega$  的电阻器构成的分压器提供。

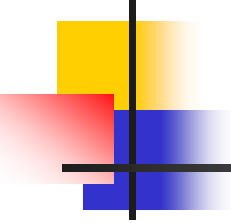


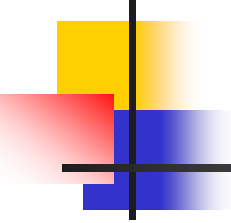
图a 内部结构图

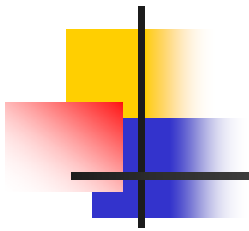


图b 引脚排列

图7.1.1 555电路的内部电路结构图

- 
- 它们分别使高电平比较器A1的同相输入端和低电平比较器A2的反相输入端的参考电平为  $\frac{2}{3}V_{CC}$  和  $\frac{1}{3}V_{CC}$  A1与A2的输出端控制RS触发器状态和放电管开关状态。

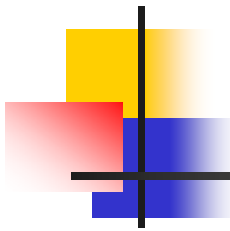
- 
- 当输入信号自6脚输入，即高电平触发输入并超过参考电平 $\frac{2}{3}V_{CC}$ 时，触发器复位，555的输出端3脚输出低电平，同时放电开关管导通；当输入信号自2脚输入并低于 $\frac{1}{3}V_{CC}$ 时，触发器置位，555的3脚输出高电平，同时放电开关管截止。



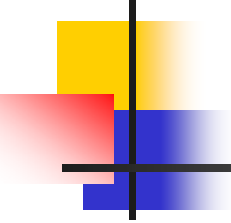
---

RST是复位端（4脚），当RST=0，555输出低电平。平时RST端开路或接VCC。

CON是控制电压端（5脚），平时输出  $\frac{2}{3}V_{CC}$  作为比较器A1的参考电平，当5脚外接一个输入电压，即改变了比较器的参考电平，从而实现对其输出的另一种控制，在不接外加电压时，通常接一个  $0.01\mu f$  的电容器到地，起滤波作用，

- 
- 以消除外来的干扰，以确保参考电平的稳定。  
VT为放电管，当VT导通时，将给接于脚7的电容器提供低阻放电通路。

- 555定时器主要是与电阻、电容构成充放电电路，并由两个比较器来检测电容器上的电压，以确定输出电平的高低和放电开关管的通断。这就很方便地构成从微秒到数十分钟的延

- 
- 
- 时电路，可方便地构成单稳态触发器，多谐振荡器，施密特触发器等脉冲产生或波形变换电路。

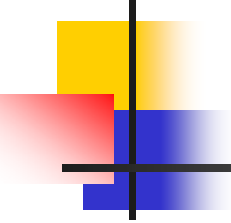


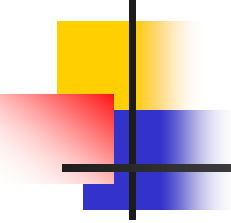


## 7.1.2 555构成多谐振荡器

---

- 如图7.1.2，由555定时器和外接元件R1 (R1)、R2 (R2)、C构成多谐振荡器，脚2与脚6直接相连。电路没有稳态，仅存在两个暂稳态，电路亦不需要外加触发信号，利用电源通过R1、R2向C充电，以及C通过R1放电，使电路产生振荡。

- 
- 
- 电容C在  $\frac{1}{3}V_{CC}$  和  $\frac{2}{3}V_{CC}$  之间充电和放电，其波形如图7.1.3 所示。输出信号的时间参数是：

- 
- 
- $T_1 = 0.7(R_1 + R_2)C,$
  - $T_2 = 0.7R_2C$
  - $T = T_1 + T_2$

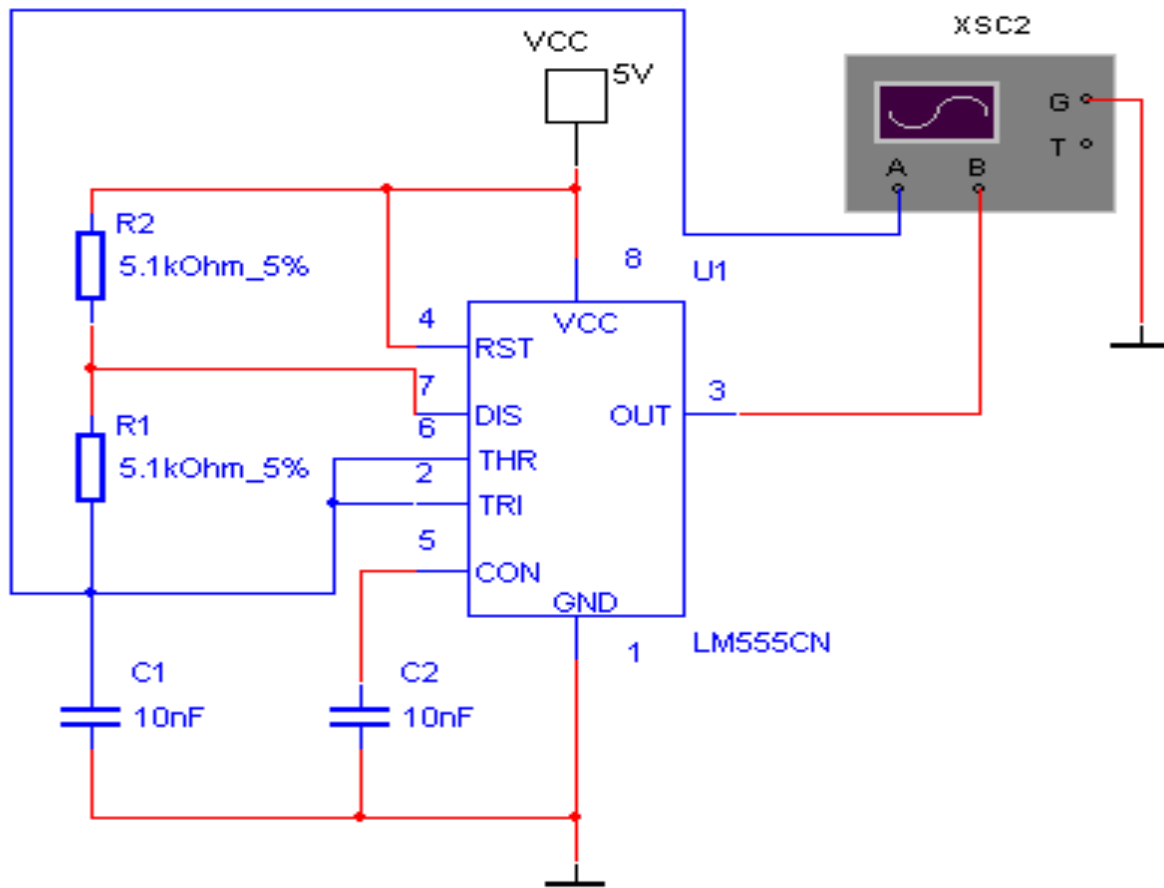


图7.1.2 多谐振荡器电路

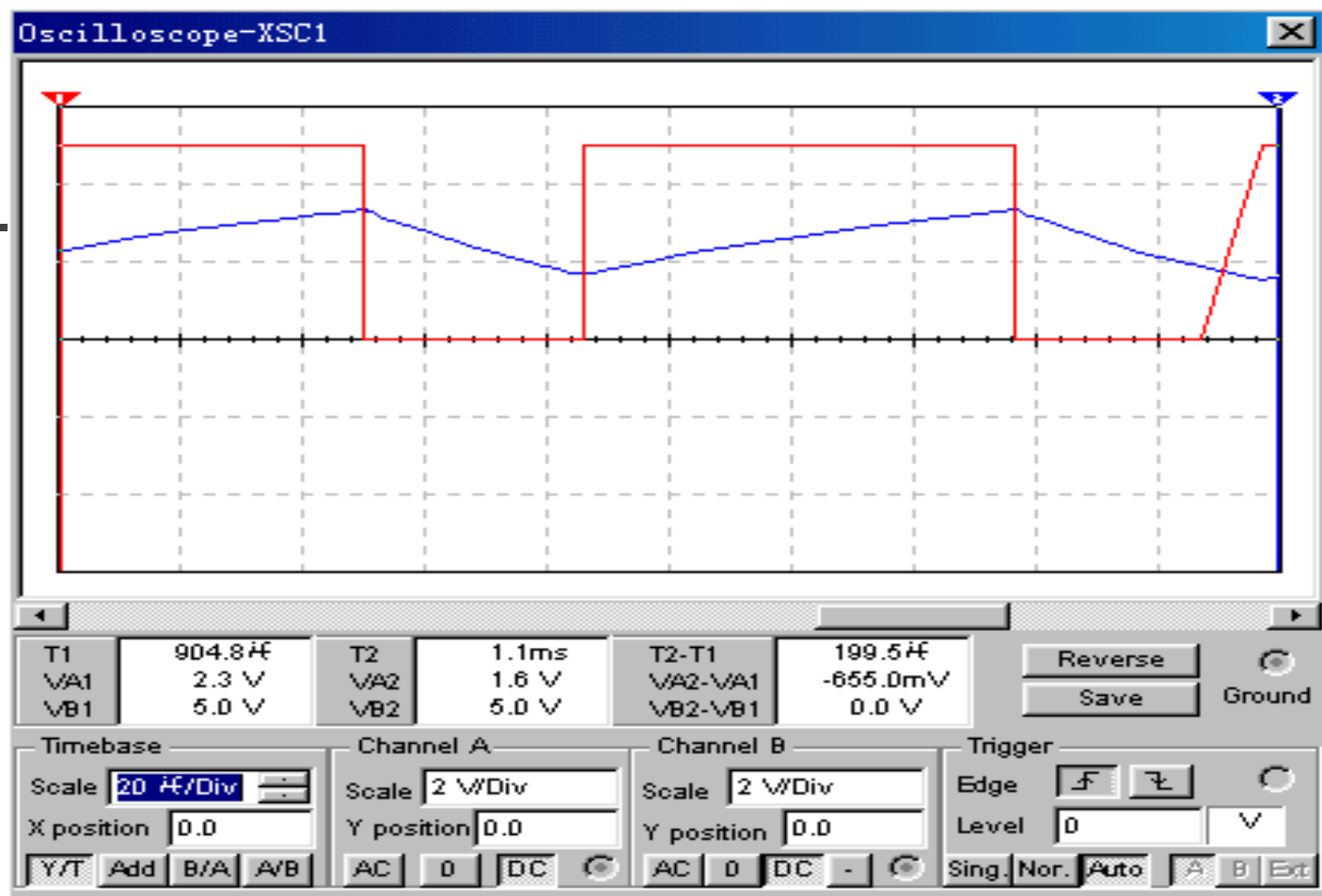
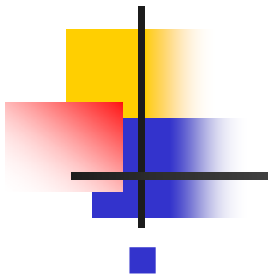


图7.1.3  $u_c$ 、 $u_o$ 端仿真波形

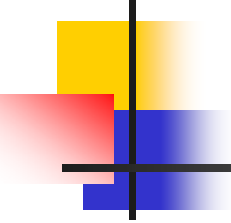


555电路要求 $R_1$  与 $R_2$  均应大于或等于 $1\text{K}\Omega$ ，但 $R_1 + R_2$ 应小于或等于 $3.3\text{M}\Omega$ 。外部元件的稳定性决定了多谐振荡器的稳定性，555定时器配以少量的元件即可获得较高精度的振荡频率和具有较强的功率输出能力。因此这种形式的多谐振荡器应用很广。



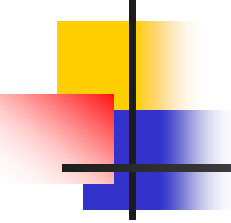
---

## 7.2 模拟声响电路



■ 图7.2.1是由两个多谐振荡器构成的模拟声响发生器。调节定时元件R1, R2、C2使第1个振荡器的振荡频率为714Hz, 调节R3, R4, C4使第2个振荡器的振荡频率为10kHz。由于低频振荡器的输出端3接到高频振荡器的复位端4,





---

因此当振荡器U1的输出电压 $u_{o1}$ 为高电平时，振荡器U2就振荡； $u_{o1}$ 为低电平时，振荡器U2停止振荡。接通电源，试听音响效果。调换外接阻容元件，再试听音响效果。从而扬声器便发出“鸣……鸣……”的间隙声响。 $u_{o1}$ 和 $u_o$ 的波形如图中7.2.2所示。

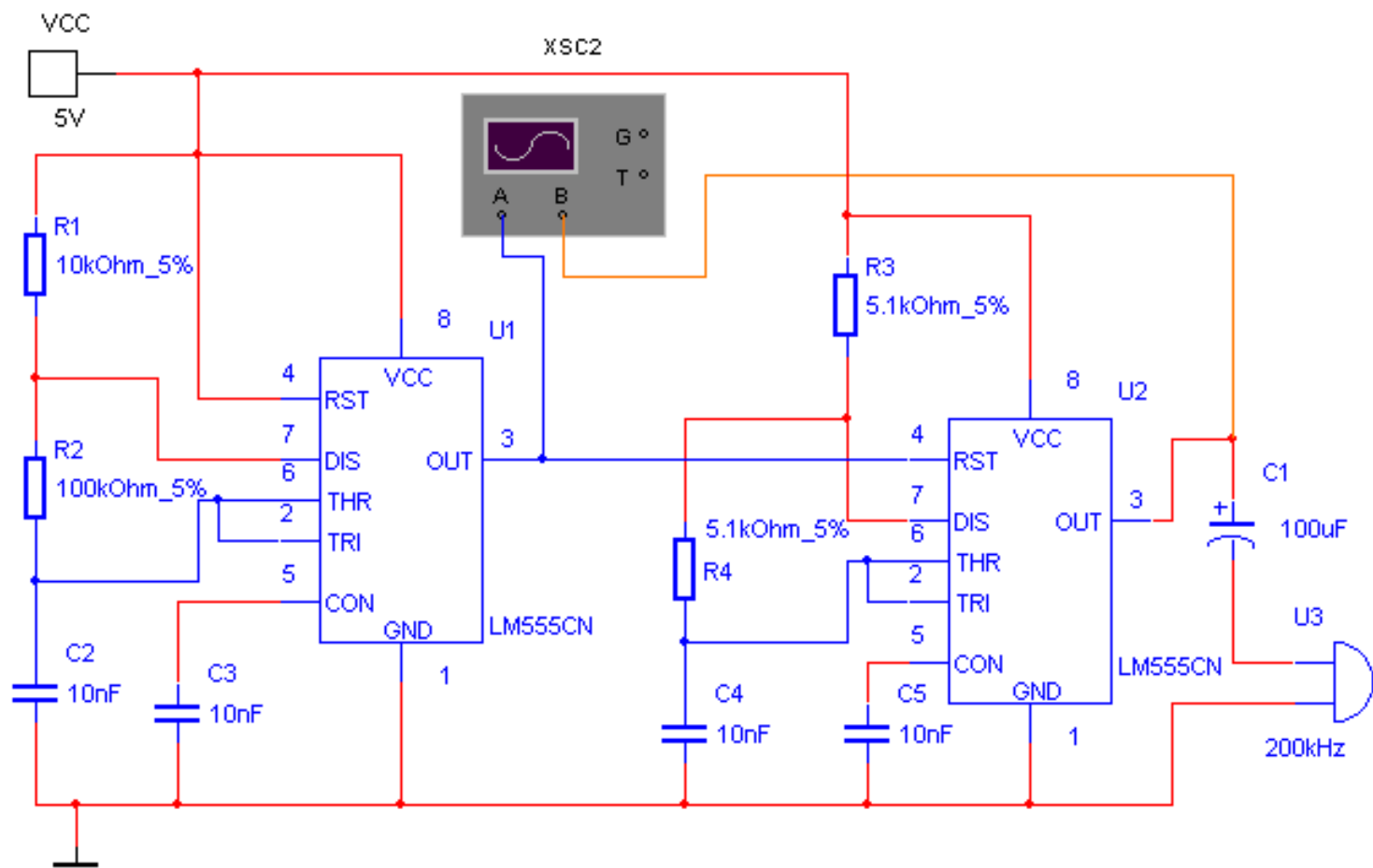


图7.2.1 模拟声响电路

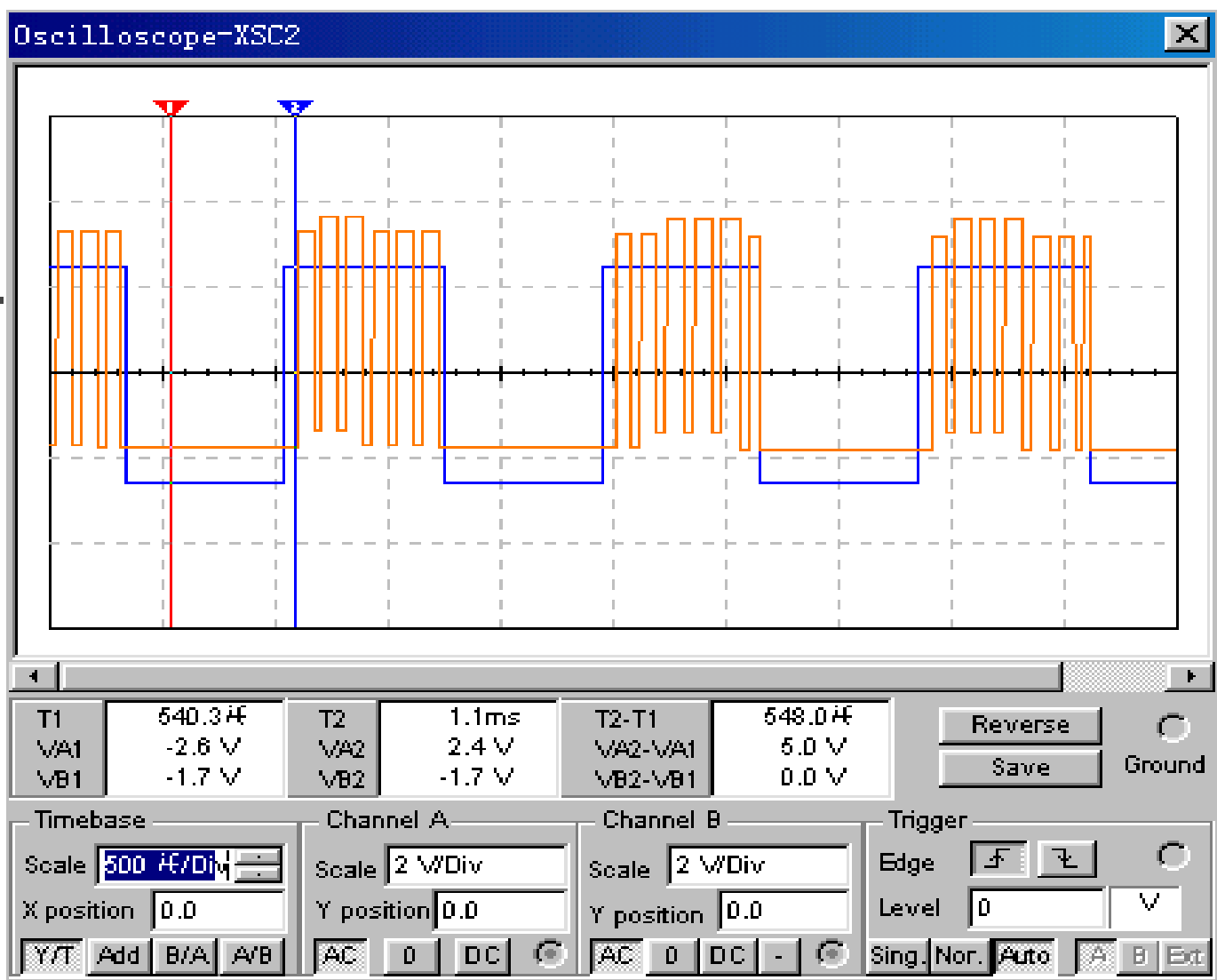
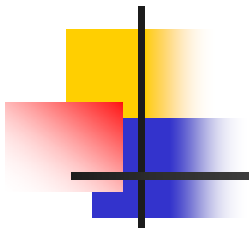


图7.2.2  $u_{o1}$ 和 $u_o$ 的波形



---

## 7.3 大范围可变占空比方波发生器电路



---

电路如图7.3.1所示，555与R1 (R1)、R2 (R2)、RP、VD1 (VD1)、VD2 (VD2)、C1 (C1) 组成无稳态多谐振荡器。VD1、VD2分别为充电和放电回路的导引管。

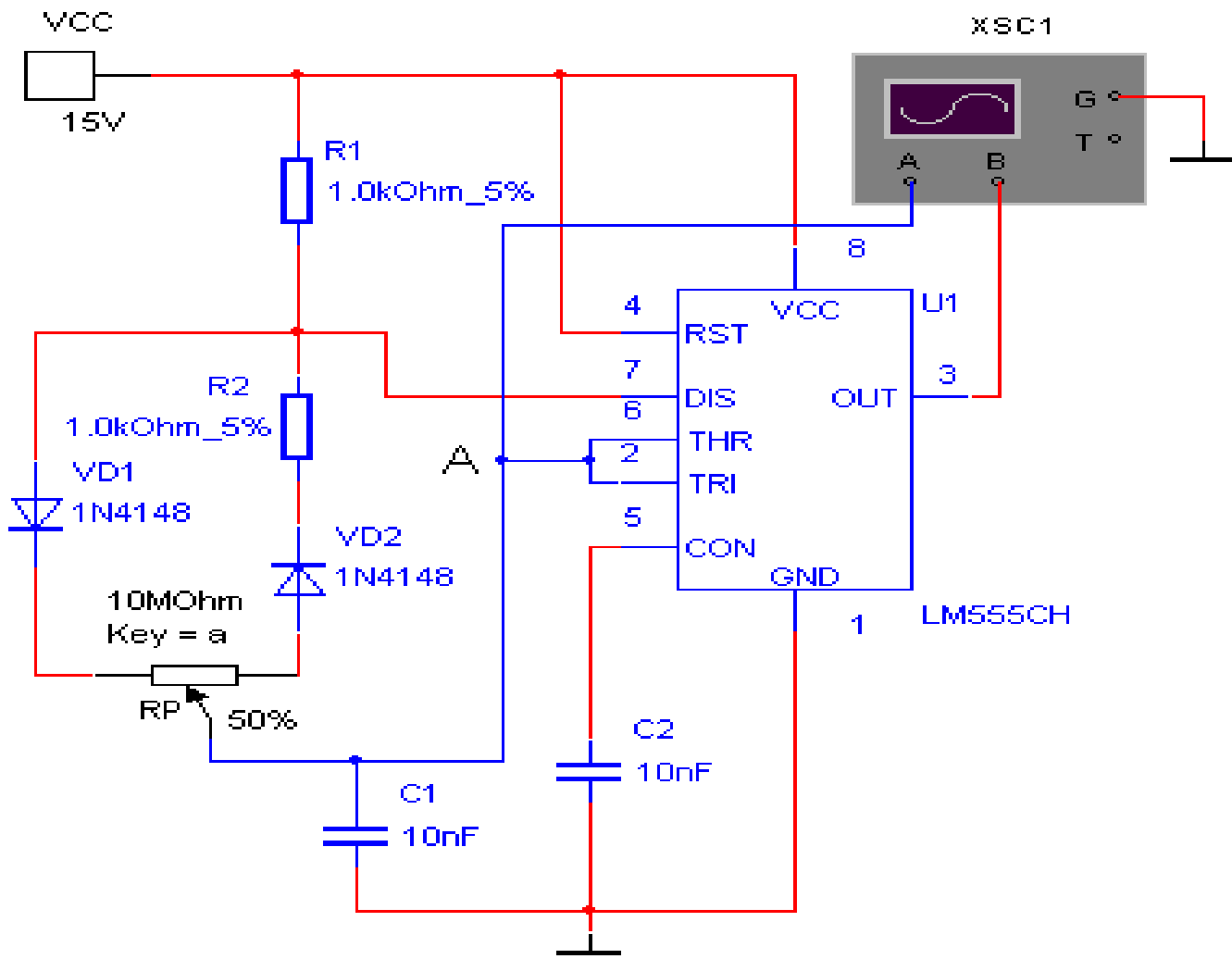


图7.3 .1 大范围可变占空比方波产生器



---

其充、放时间分别为：

$$t_{\text{充}} = 0.693(R_1 + R_{P\text{左}})C_1$$

$$t_{\text{放}} = 0.693(R_2 + R_{P\text{右}})C_1$$

$$T = t_{\text{充}} + t_{\text{放}} = 0.693(R_1 + R_2 + R_P)C_1$$



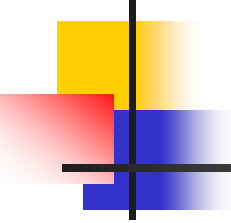
---

占空比D则为：

$$D_{\min} = \frac{t_{\text{充}}}{T} = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + RP} \approx 0.01\%$$

$$D_{\max} = \frac{t_{\text{充}}}{T} = \frac{R_1 + RP}{R_1 + R_2 + RP} \approx 99.9\%$$





---

从以上公式可见，不管RP如何调节，不影响振荡周期T的值。图示参数的振荡频率约为20Hz左右，图7.3 .2、7.3 .3用示波器分别测出了RP调节在5%和95%位置时A点的波形和输出波形。

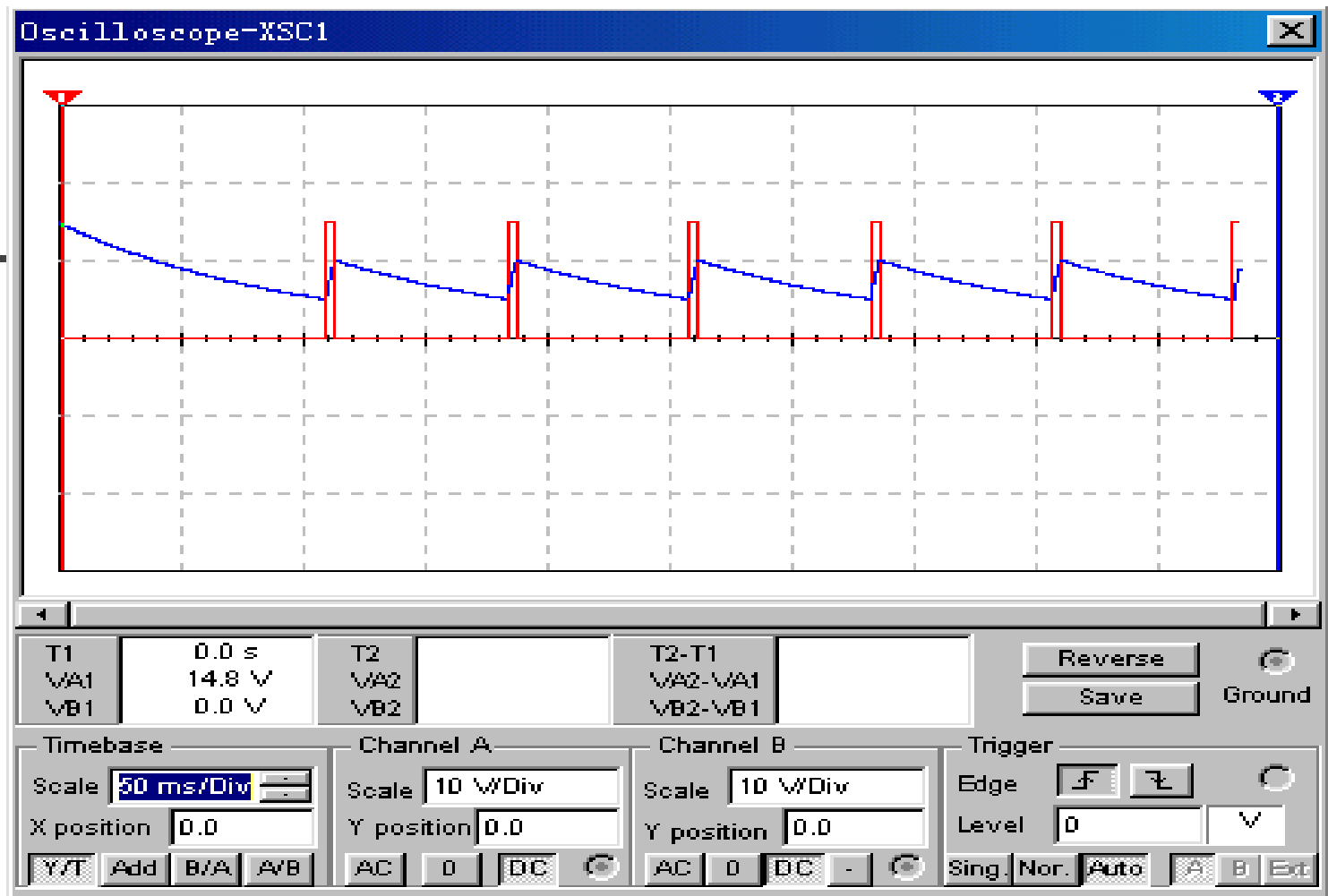


图7.3 .2 RP电位器调节在5%位置时的波形

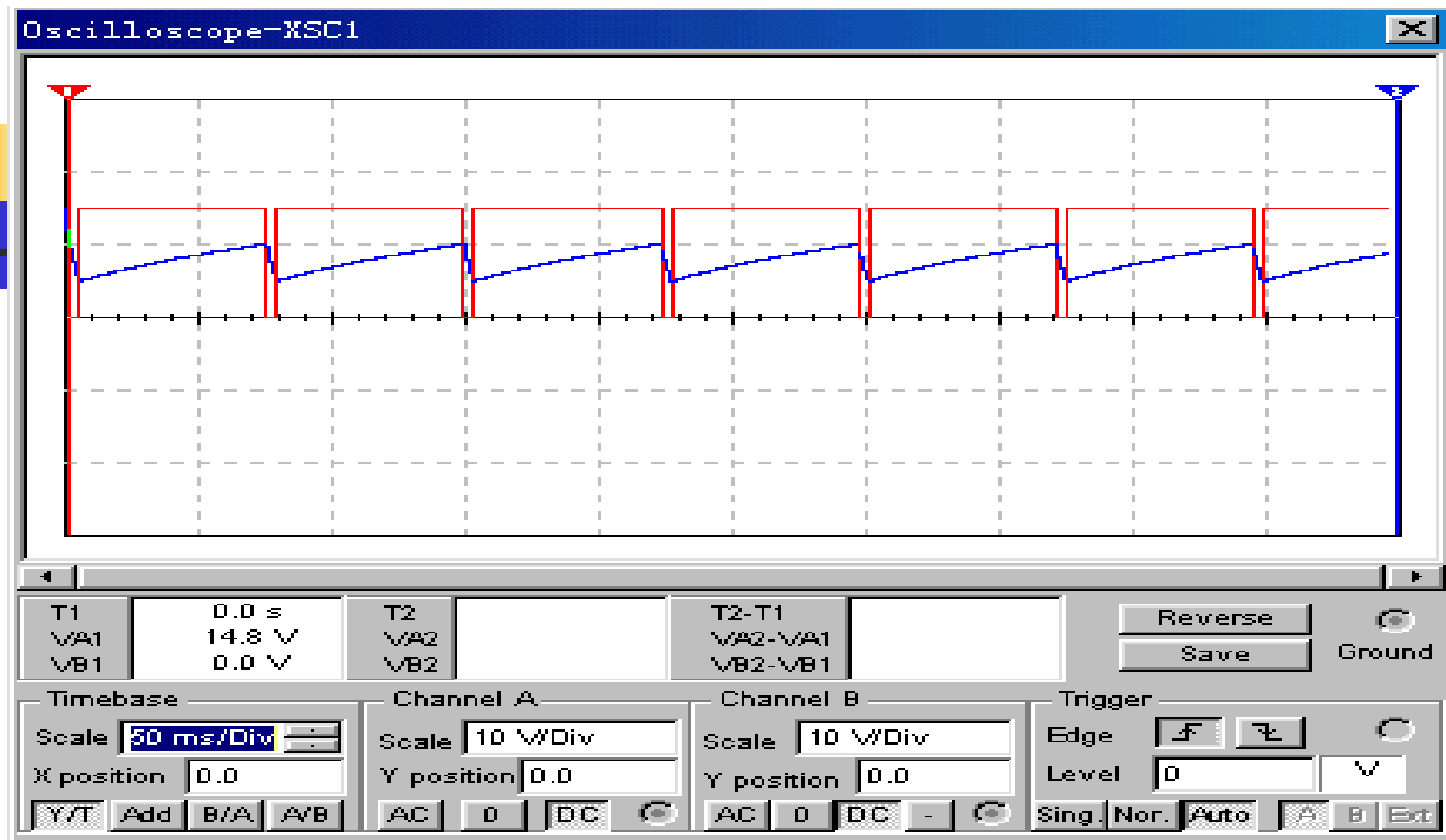
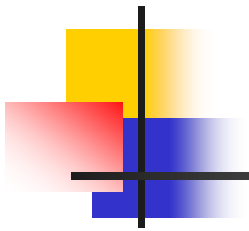


图7.3 .3 RP电位器调节在95%位置时的波形



---

## 7.4 数字逻辑笔测试电路



---

利用555电路的触发端(2脚)和阈值端的置位和复位特性,可组成对数字逻辑的状态是否正常进行检测的测试笔,电路如图7.4.1所示。

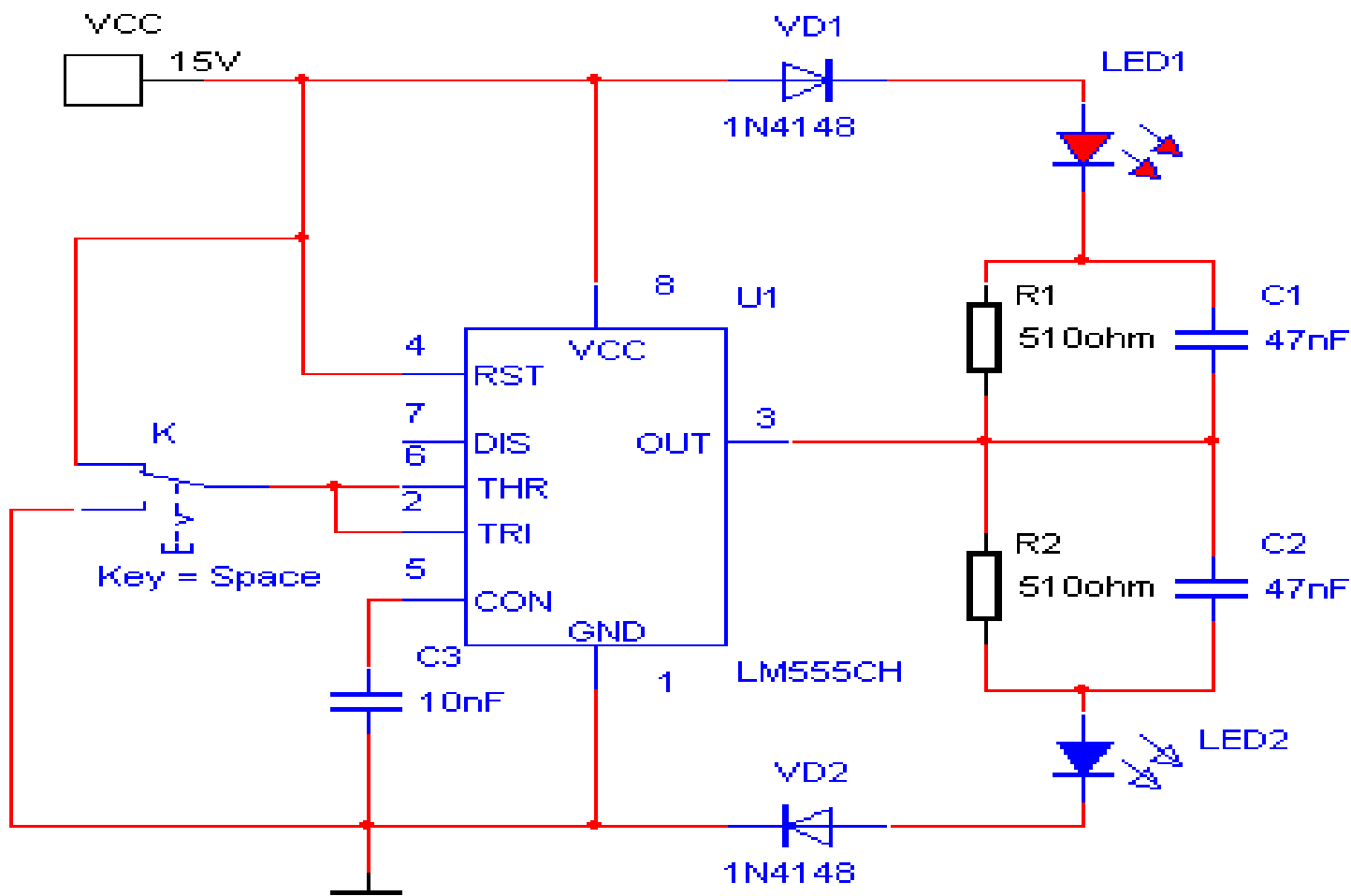
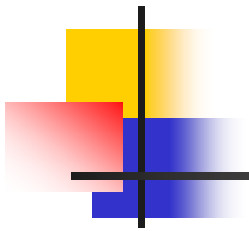


图7.4.1 数字逻辑笔测试电路



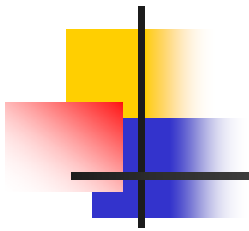
本例中的探头是用开关K来代替，通过空格键控制（2、6脚）高、低电平的输入。当探头输入为低电平“0”时，LED2(绿)亮，当输入高电平“1”时，LED1(红)亮。由R1C1、R2C2组成的网络为加速网络。该逻辑笔适用于TTL、CMOS等数字电路的测试，VCC在5~15V内任选。在电路中R1、R2、C1分别表示为R1、R2、C1。



---

## 7.5 接近开关电路





接近开关电路如图7.5.1所示，接近开关以555为核心组成单稳触发电路。555的触发端2脚通过大电阻R1 (R1)接VCC，处于等待触发状态。当人体接近或触摸金属板电极时，由于感应信号，555被触发，输出一单稳脉冲。C1 (C1)用于抗干扰滤波。该电路可用于电器、玩具或报警电路中。本例中触摸金属板电极用开关K代替。

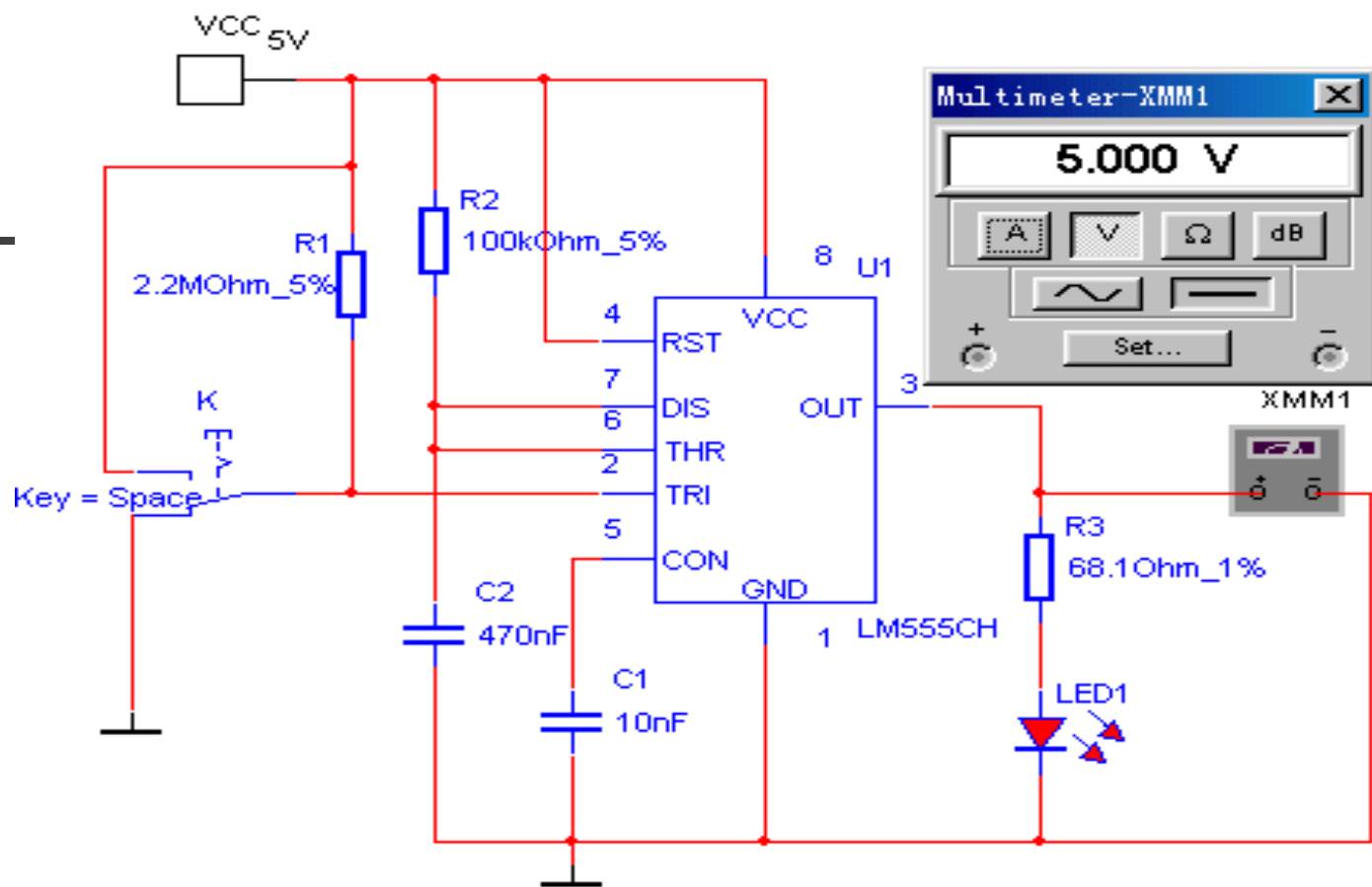
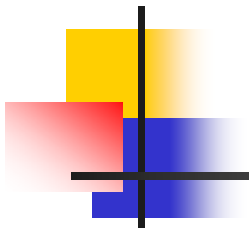


图7.5.1 接近开关电路



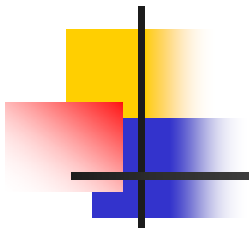
---

## 7.6 简单的汽车防盗报警电路



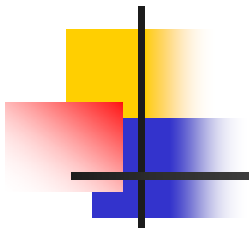
---

简单的汽车防盗报警电路如图7.6.1所示，报警电路由一只双时基电路556和少量R、C元件、继电器、门开关组成。556中每个时基电路组成一个单稳延时电路，延时时间为 $t=1.1RC$ ，图示参数的延时时间约为10秒左右，换句话说，允许汽车主人短时下出入。



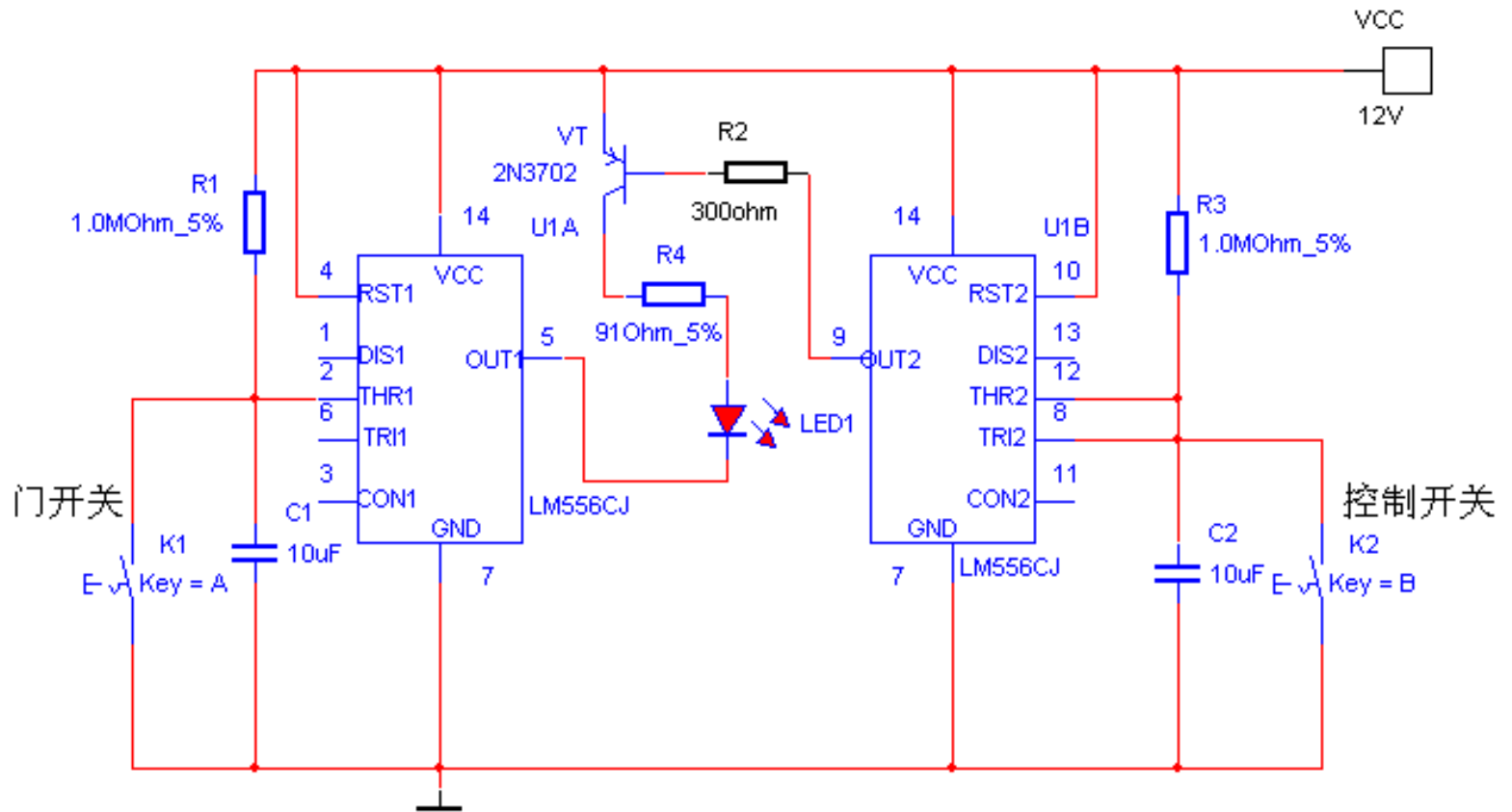
---

当主人关门外出后，门开关和控制开关闭合，两个时基电路的输出端（5、9脚）皆成高电平，继电器J不动作。当盗车者破门而入时，开关起开，则C1（C1）、C2（C2）各自通过R1（R1）及R3（R3）充电，



---

当复位端2、12脚的电压超过 $\frac{2}{3}V_{CC} = 8V$ 时，电路置位，输出端5脚、9脚皆成低电平，则VT导通，继电器吸合，其接点接通，将报警电路的电源接通。在本例中继电器用发光二极管替代。



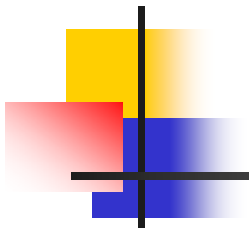
## 7.6.1 简单的汽车防盗报警



---

## 本章小结



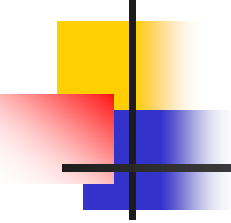


---

■ 集成定时器555电路是一种数字、模拟混合型的中规模集成电路，是一种能够产生时间延迟和多种脉冲信号的电路，应用十分广泛。

本章主要内容有：

- (1) 集成定时器555电路工作原理。
- (2) 集成定时器555电路构成多谐振荡器。

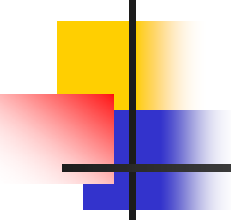


---

- (3) 模拟声响电路由集成定时器555电路构成的两个多谐振荡器组成。

- (4) 集成定时器555电路构成的大范围可变占空比方波发生器电路。

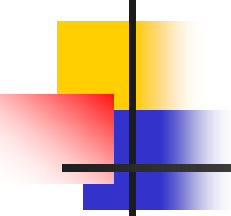
- (5) 集成定时器555电路构成的数字逻辑笔测试电路。

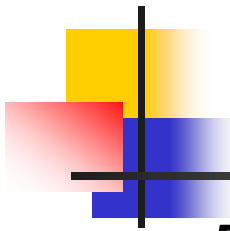
- 
- (6) 集成定时器555电路构成的接近开关电路。
  - (7) 集成定时器构成的简单的汽车防盗报警电路。
  - 掌握555电路应用电路的仿真设计与分析方法是本章的重点。555电路构成的振荡器电路是基本的电路形式，应用电路多是振荡器电路的变型。

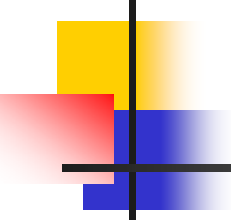


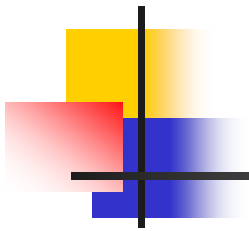
---

## 思考题与习题

- 
- 
- 7.1 在什么元件库中选择喇叭？为了与电路输出端匹配应如何设置喇叭的参数？
  - 7.2 在Multisim仿真平台上建立一个由运放、RS触发器、三极管及若干个电阻组成的555原理电路。

- 
- 7.3 在Multisim仿真平台上用555定时器设计一个单稳态触发器，给定输入触发信号的重复频率为500HZ，要求输出脉冲宽度为0.5ms，请选择定时元件R、C，并用示波器观察定时元件C端及输出端的波形。
  - 7.4 在Multisim仿真平台上用555定时器设计一个多谐振荡器电路，要求振荡输出频率为10MHZ。用示波器测出振荡频率。

- 
- 
- **7.5** 在Multisim仿真平台上用555定时器设计一个大范围可变占空比方波发生器电路，并用示波器测出其占空比的时间变化范围。



■ **7.6** 在Multisim仿真平台上用555定时器建立如图7.1所示模拟声响电路。（1）用示波器观察第一级、第二级的波形并测出其频率。（2）分别改变电阻R1、R2、R3、R4的值用示波器观察第一级、第二级的波形并测出其频率。（3）分别改变电阻C2、C4、的值用示波器观察第一级、第二级的波形并测出其频率。



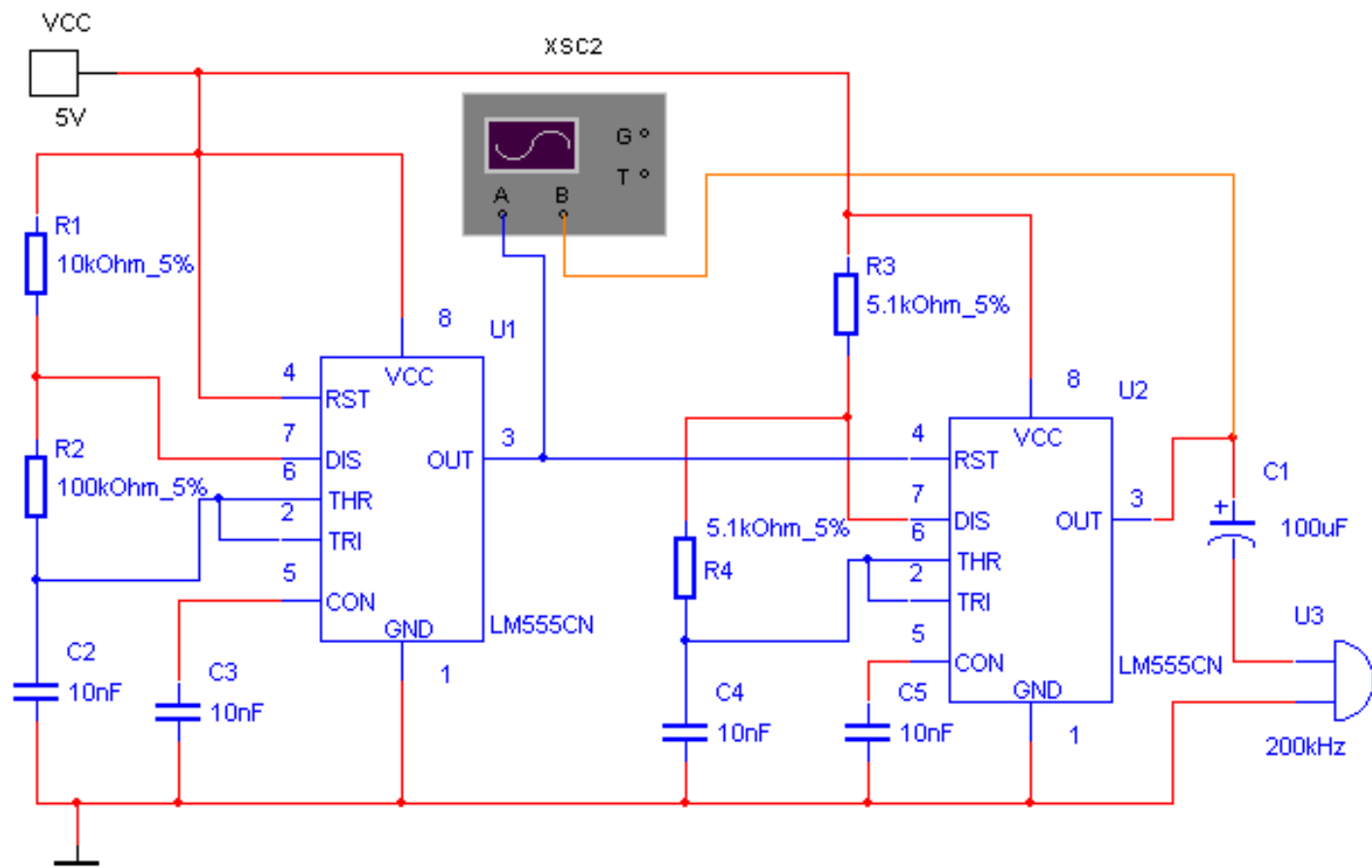
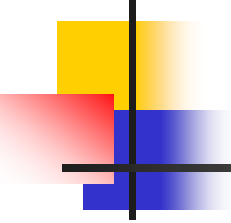


图7.1 习题7.6图

- 
- 
- 7.7 在Multisim仿真平台上用555定时器建立如图7.2所示的双音电子门电路。（1）用示波器观察A、B点的波形：（2）倾听喇叭发出的双音频率。

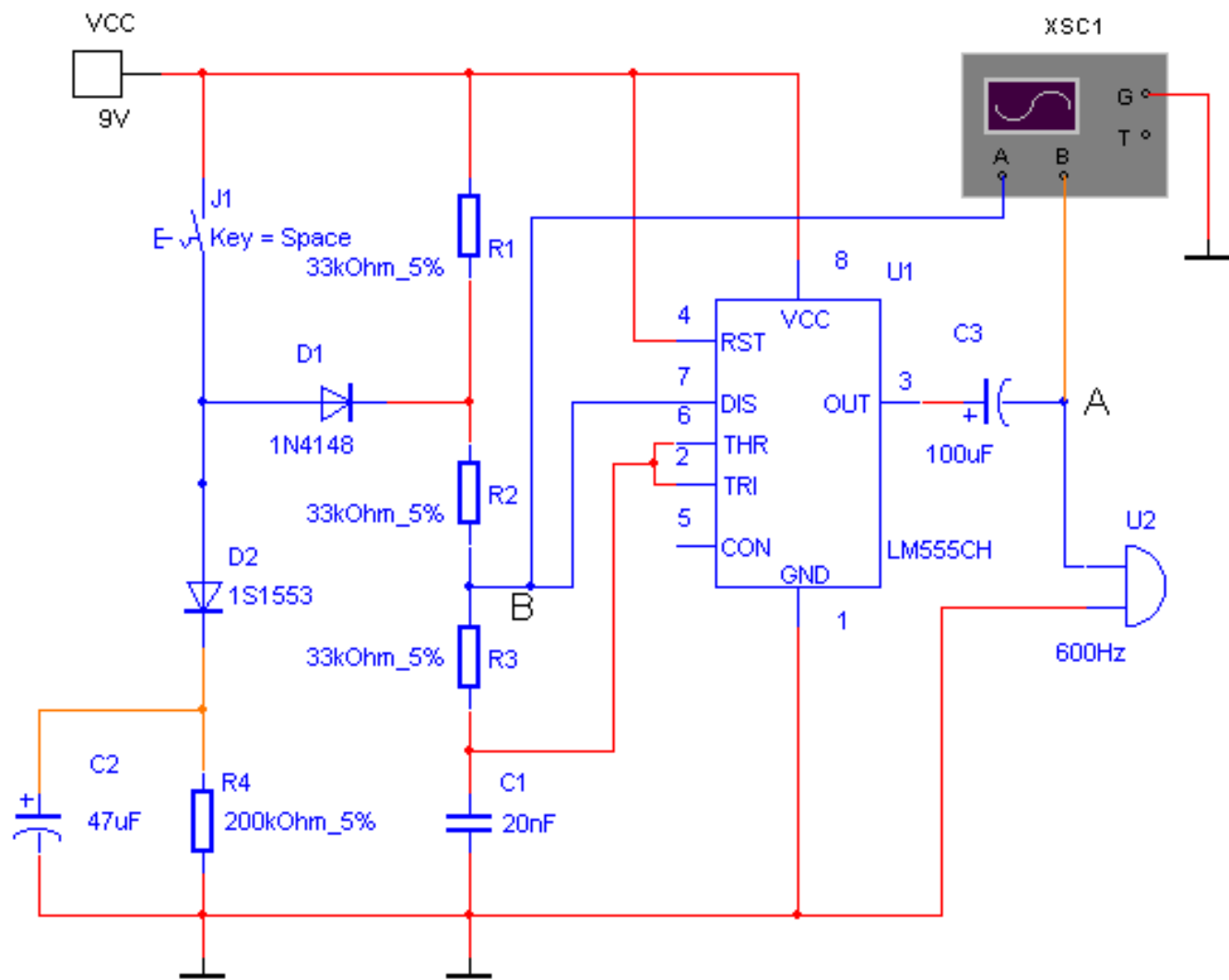


图7.2 习题7.7图



---

# 第8章门电路



## 内容提要

用来实现基本逻辑运算和复合逻辑运算的单元电路统称为门电路。本章介绍了门电路的基本性质，编码器电路，译码器电路，数据选择器电路，加法器电路，数值比较器电路、用门电路实现的ASK幅度键控调制电路、用门电路实现的FSK频率键控调制电路、用门电路实现的PSK相位选择法调制电路特性以及计算机仿真设计方法。



---

## 8.1 门电路的应用



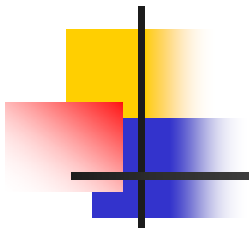
## 8.1.1 门电路的性质

---

### 1. TTL电路输入输出电路性质

当输入端为高电平时，其方向是从外部流入输入端。

当输入端处于低电平时，电流由电源  $V_{CC}$  经内部电路流出输入端，电流较大，当与上一级电路连接时，将决定上级电路应具有负载能力。



---

高电平输出电压在负载不大时为3.5V左右。

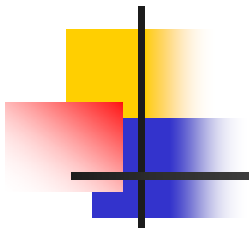
低电平输出时，允许后级电路灌入电流，随着灌入电流的增加，输出低电平将升高，一般LS系列TTL电路允许灌入8mA电流，即可吸收后级20个LS系列标准门的灌入电流。最大允许低电平输出电压为0.4V。





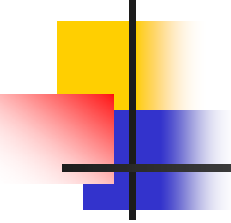
---

## 2. CMOS电路输入输出电路性质



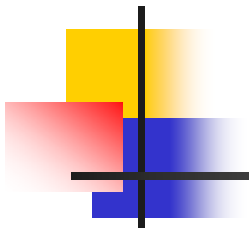
---

一般CC系列的CMOS电路输入阻抗可高达 $10^{10} \Omega$ ，输入电容在5pf以下，输入高电平通常要求在3.5V以上，输入低电平通常为1.5V以下。CMOS电路的输出结构具有对称性，故对高低电平具有相同的输出能力，负载能力较小，仅可驱动少量的CMOS电路。



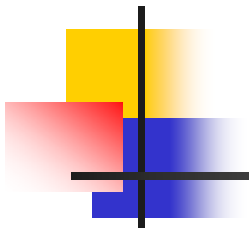
---

当输出端负载很轻时，输出高电平将十分接近电源电压；输出低电平时将十分接近地电位。



---

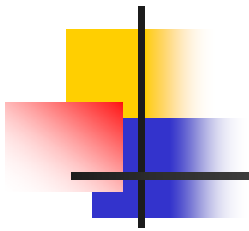
在高速CMOS电路54/74HC系列中的一个子系列54/74HCT，其输入电平与TTL电路完全相同，因此在相互取代时，不需考虑电平的匹配问题。



---

### 3. 集成逻辑电路的连接

在实际的数字电路系统中总是将一定数量的集成逻辑电路按需要前后连接起来。这时，前级电路的输出将与后级电路的输入相连并驱动后级电路工作。这就存在着电平的配合和负载能力这两个需要妥善解决的问题。



可用下列几个表达式来说明连接时所要满足的条件:

$$U_{OH} \text{ (前级)} \geq U_{iH} \text{ (后级)}$$

$$U_{OL} \text{ (前级)} \leq U_{iL} \text{ (后级)}$$

$$I_{OH} \text{ (前级)} \geq n \times I_{iH} \text{ (后级)}$$

$$I_{OL} \text{ (前级)} \geq n \times I_{iL} \text{ (后级)}$$

$n$ 为后级门的数目



---

## (1) TTL与TTL的连接

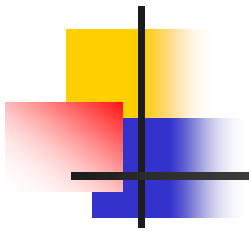
TTL集成逻辑电路的所有系列，由于电路结构形式相同，电平配合比较方便，不需要外接元件可直接连接，不足之处是受低电平时负载能力的限制。



## (2) TTL驱动CMOS电路

TTL电路驱动CMOS电路时，由于CMOS电路的输入阻抗高，故此驱动电流一般不会受到限制，但在电平配合问题上，低电平是可以的，高电平时有困难，因为TTL电路在满载时，输出高电平通常低于CMOS电路对输入高电平的要求，因此为保证TTL输出高电平时，  
后级





---

的CMOS电路能可靠工作，通常要外接一个上拉电阻R，如图8.1.1所示，使输出高电平达到3.5V以上，R的取值为2~6.2K较合适。

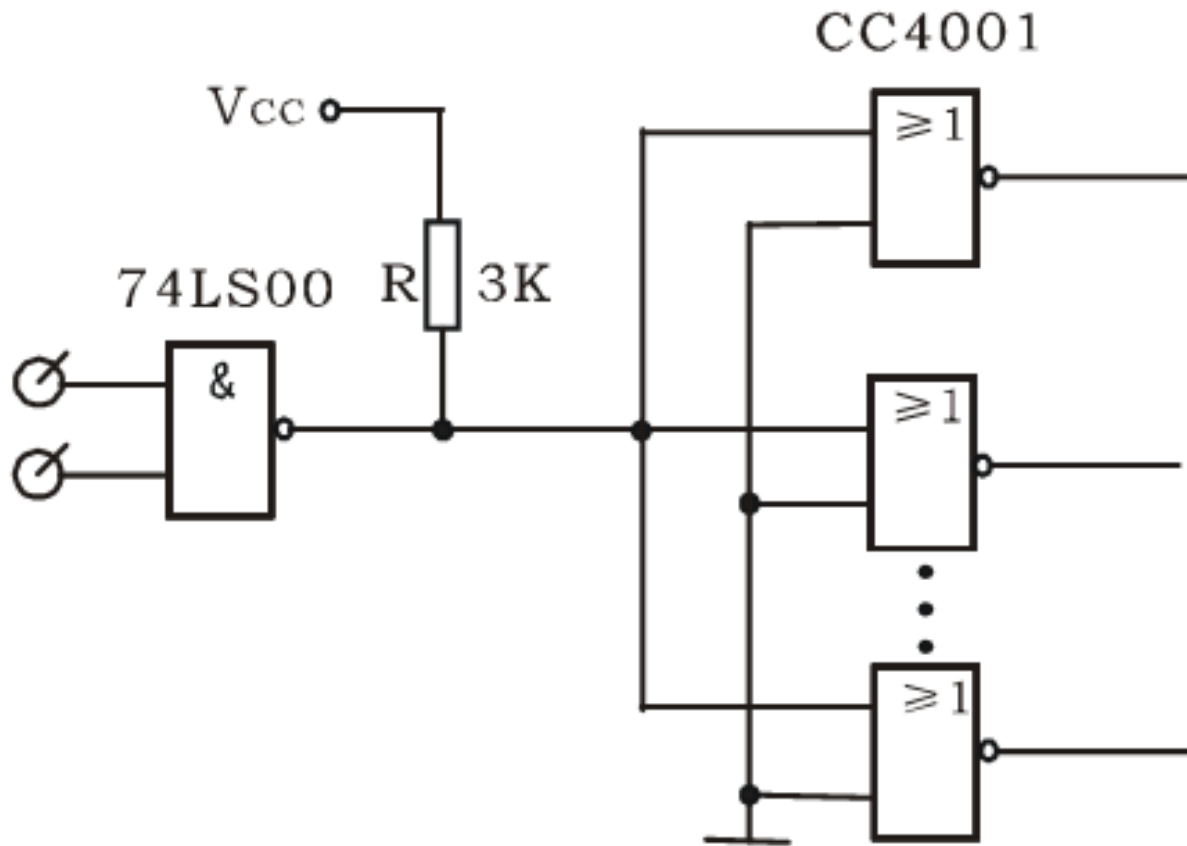


图8.1.1 TTL电路驱动CMOS电路

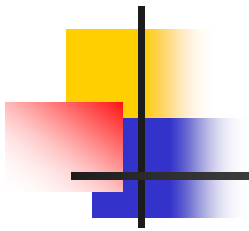


---

### (3) CMOS驱动TTL电路

CMOS的输出电平能满足TTL对输入电平的要求，而驱动电流将受限制，主要是低电平时的负载能力。除了74HC系列外的其它CMOS电路驱动TTL的能力都较低。

既要使用此系列又要提高其驱动能力时，可采用以下两种方法：



---

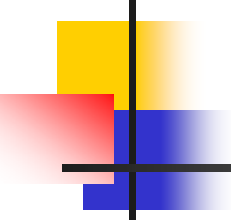
① 采用CMOS驱动器，如CC4049、CC4050的CMOS电路。

② 几个同功能的CMOS电路并联使用，即将其输入端并联，输出端并联（TTL电路是不允许并联的）。



## (4) CMOS与CMOS的连接

CMOS电路之间的连接十分方便，不需另加外接元件。对直流参数来讲，一个CMOS电路可带动的CMOS电路数量是不受限制，但在实际使用时，应当考虑后级门输入电容对前级门的传输速度的影响，电容太大时，传输速度要下降，因此在高速



---

使用时要从负载电容来考虑，例如CC4000T系列。  
CMOS电路在10MHz以上速度运用时应限制在20  
个门以下。



## 8.1.2 故障报警器

该电路主要用于自控设备中的自动报警，也可用作防盗报警器。本例中，使用一片四2输入端或非门集成电路CC4001,晶体三极管VT和扬声器等构成故障报警器。其中门U1A、门U1C为或非门连接，门U1B、门U1D为反相器连接，电路如图8.1.2所示电路。电路中CC4001的门U1A和门U1B组成一个低频振荡器，门U1C和门U1D组成一个音频振荡器。在



---

## 8.2 编码器电路



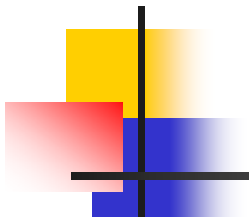


## 8.2.1 编码器工作原理

---

为了区分不同的事物，将其中的每个事物用一个二值代码表示，即编码。在二值逻辑电路中，信号都是以高、低电平的形式给出的。因此，编码器的逻辑功能就是把输入的每一个高、低电平信号编成一个对应的二进制代码，

目前经常使用的编码器有普通编码器和优先编码器两类。在普通编码器中，任何时刻只允许



输入一个编码信号，否则输出将发生混乱。在优先编码器电路中，允许同时输入两个以上编码信号。不过在设计优先编码器时已经将所有的输入信号按优先顺序排了队，当几个输入信号同时出现时，只对其中优先权最高的一个进行编码。

本例采用了74LS148优先编码器74LS148  
优先编码器逻辑功能如表8.2.1所示。

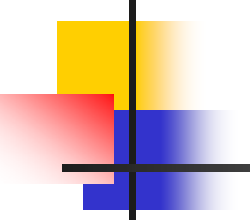


---

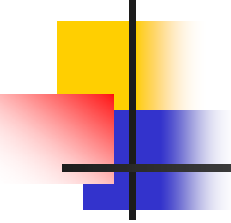
括号中的符号为实际芯片中的符号。

## 表8.2.1 74LS148功能表

输 入 <sup>↕</sup>		输 入 <sup>↕</sup>					输 出 <sup>↕</sup>						
V18( $\bar{S}_1$ ) <sup>↕</sup>	$\bar{Y}_0$	$\bar{Y}_1$	$\bar{Y}_2$	$\bar{Y}_3$	$\bar{Y}_4$	$Y_5$	$\bar{Y}_6$	$\bar{Y}_7$ <sup>↕</sup>	$\bar{A}_2$	$\bar{A}_1$	$\bar{A}_0$ <sup>↕</sup>	EO( $\bar{S}_0$ )	GS( $G_2$ ) <sup>↕</sup>
1 <sup>↕</sup>	x	x	x	x	x	x	x	x <sup>↕</sup>	1	1	1 <sup>↕</sup>	1	1 <sup>↕</sup>
0 <sup>↕</sup>	1	1	1	1	1	1	1	1 <sup>↕</sup>	1	1	1 <sup>↕</sup>	0	1 <sup>↕</sup>
0 <sup>↕</sup>	x	x	x	x	x	x	x	0 <sup>↕</sup>	0	0	0 <sup>↕</sup>	1	0 <sup>↕</sup>
0 <sup>↕</sup>	x	x	x	x	x	0	0	1 <sup>↕</sup>	0	0	1 <sup>↕</sup>	1	0 <sup>↕</sup>
0 <sup>↕</sup>	x	x	x	x	x	0	1	1 <sup>↕</sup>	0	1	0 <sup>↕</sup>	1	0 <sup>↕</sup>
0 <sup>↕</sup>	x	x	x	x	0	1	1	1 <sup>↕</sup>	0	1	1 <sup>↕</sup>	1	0 <sup>↕</sup>
0 <sup>↕</sup>	x	x	x	0	1	1	1	1 <sup>↕</sup>	1	0	0 <sup>↕</sup>	1	0 <sup>↕</sup>
0 <sup>↕</sup>	x	x	0	1	1	1	1	1 <sup>↕</sup>	1	0	1 <sup>↕</sup>	1	0 <sup>↕</sup>
0 <sup>↕</sup>	x	0	1	1	1	1	1	1 <sup>↕</sup>	1	1	0 <sup>↕</sup>	1	0 <sup>↕</sup>
0 <sup>↕</sup>	1	1	1	1	1	1	1	1 <sup>↕</sup>	1	1	1 <sup>↕</sup>	1	0 <sup>↕</sup>

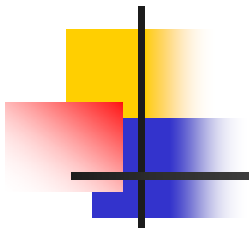


表中不难看出，在  $\bar{S}_1 = 0$  电路正常工作状态下，允许  $\bar{Y}_0 \sim \bar{Y}_7$  当中同时有几个输入端为低电平，即有编码输入信号， $\bar{Y}_7$  的优先权最高  $\bar{Y}_0$  的优先权最低。当  $\bar{Y}_7 = 0$  时，无论其他输入端有无输入信号(表中以  $\times$  表示)，输出端只给出  $\bar{Y}_7$  的编码，



---

即  $\bar{A}_0 \bar{A}_1 \bar{A}_2 = 000$ 。当  $\bar{Y}_7 = 1$ 、 $\bar{Y}_6 = 0$  时，无论其余输入端有无输入信号，只对  $\bar{Y}_6$  编码，输出为  $\bar{A}_0 \bar{A}_1 \bar{A}_2 = 001$ ，其余的输入状态请读者自行分析。



---

表中出现的3种=111情况可以用  $\bar{s}_0$ 、GS 的不同状态加以区分。

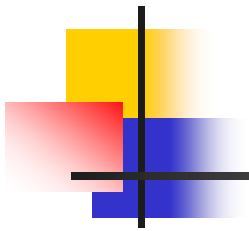


## 8.2.2 74LS148接成16线—4线优先编码器

下面通过一个具体例子说明—利用 $\bar{S}_0$ 、GS信号实现电路功能扩展的方法。

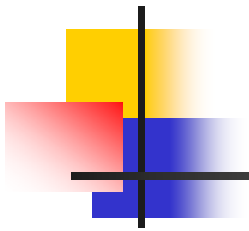
用两片74LS148接成16线—4线优先编码器，将 $\bar{Y}_0 \sim \bar{Y}_{15}$  16个低电平输入信号编为0000~1111 16个4位二进制代码。其中 $\bar{Y}_0$ 的优先权最高， $\bar{Y}_{15}$ 的优先权最低。





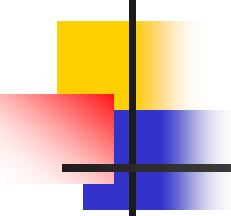
由于每片74LS148只有8个编码输入，所以需将16个输入信号分别接到两片上。现将 $\bar{Y}_8 \sim \bar{Y}_{15}$  8个优先权高的输入信号接到第1(U)片的(0~7)输入端，而将 $\bar{Y}_0 \sim \bar{Y}_7$  8个优先权低的输入信号接到第2(U1)片的(0~7)输入端。





---

按照优先顺序的要求，只有 $\bar{Y}_{15} \sim \bar{Y}_8$ 均无输入信号时，才允许对 $\bar{Y}_7 \sim \bar{Y}_0$ 的输入信号编码。因此，只要把第1片的“无编码信号 输入”信号EO作为第2片的选通输入信号就行了。



---

此外，当第1片有编码信号输入时它的  $GS=0$ ，无编码信号输入时  $GS=1$ ，正好可以用它作为输出编码的第四位，以区分8个高优先权输入信号和8个低优先权输入信号的编码。

依照上面的分析，便得到了图8.2.1的逻辑电路。

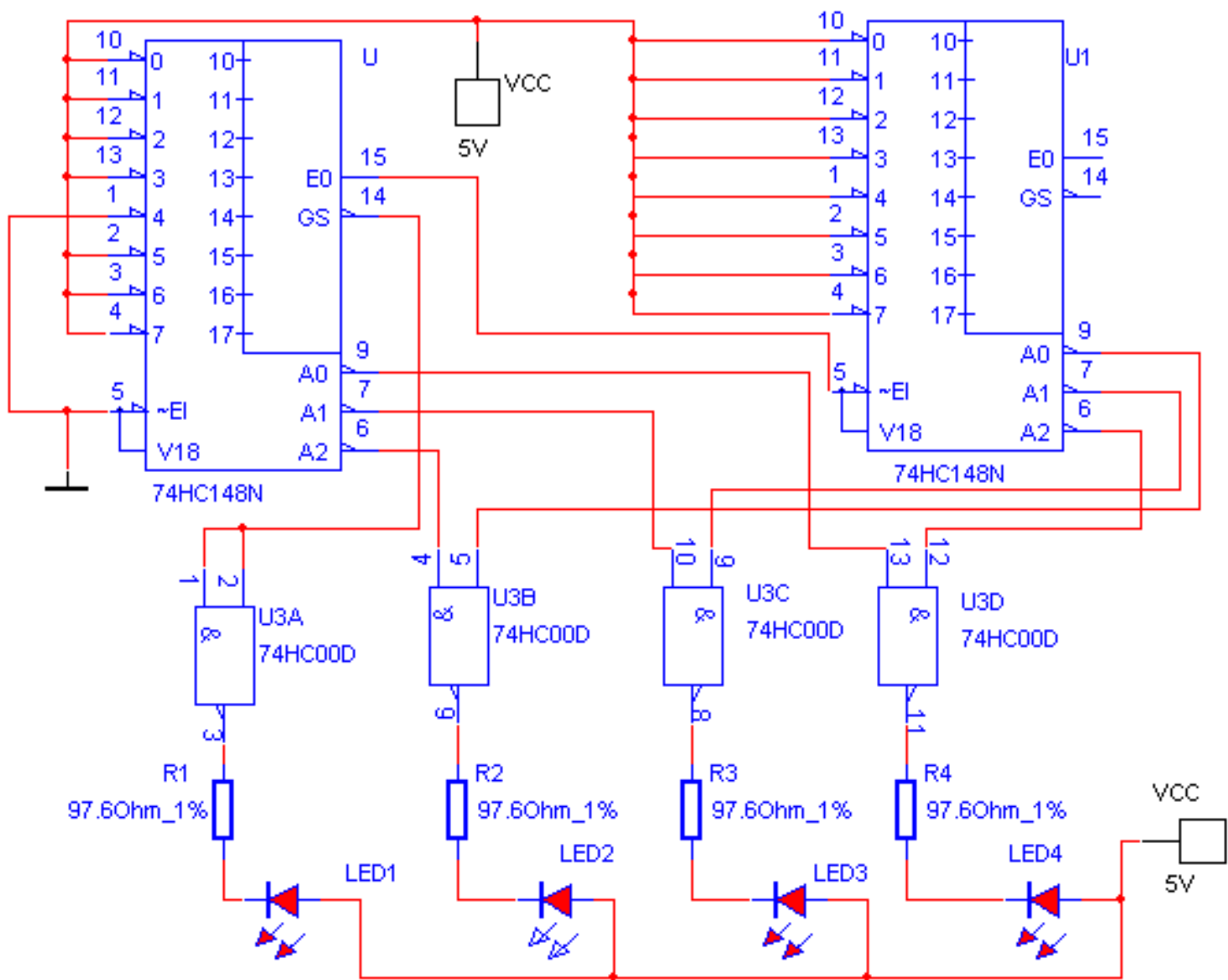
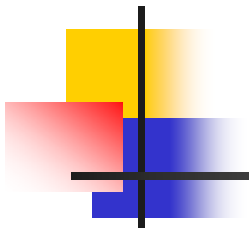
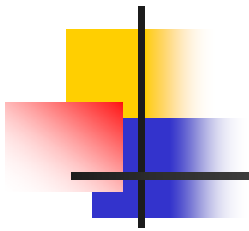


图8.2.1 用两片74LS148接成16线—4线优先编码器



由图8.2.1可见，当 $\bar{Y}_{15} \sim \bar{Y}_8$ 中任一输入端为低电平时，例如 $\bar{Y}_1 = 0$ ，则片(U)Gs=0， $Z_3 \bar{A}_0 \bar{A}_1 \bar{A}_2 = 011$ 。同时片(U)的EO=1，将片(U1)封锁，使它的输出 $\bar{A}_0 \bar{A}_1 \bar{A}_2 = 111$ 。 $\bar{Y}_{15} \sim \bar{Y}_8$ 于是在最后的输出端得到 $Z_3 Z_2 Z_1 Z_0 = 1011$ 。如果 $\bar{Y}_{15} \sim \bar{Y}_8$ 中同时有几个输入端为低电平，则只对其优先权最高的一个信号编码。其他编码结果读者可通过仿真观察。



---

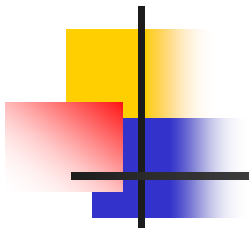
在进行仿真时要注意调节二极管的参数，本例调节二极管的端电压为**3V**时，发光二极管亮。



---

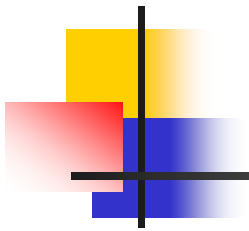
## 8.3 译码器电路





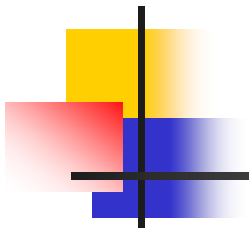
---

译码是编码的逆过程，把二进制码还原成给定的信息符号(数符、字符或运算符等)。能完成译码功能的电路叫译码器。译码器输入二进制数码的位数 $n$ 与输出端数 $m$ 之间的关系为 $m \leq 2^n$ 。若 $m = 2^n$ 称为全译码。 $m < 2^n$ 称为非全译码。



---

译码器是一个多输入、多输出的组合逻辑电路。它的作用是把给定的代码进行“翻译”，变成相应的状态，使输出通道中相应的一路有信号输出。译码器在数字系统中有广泛的用途，不仅用于代码的转换、终端的数字显示，还用于数据分配，存储器寻址和组合控制信号等。不同的功能可选用不同种类的译码器。



译码器可分为通用译码器和显示译码器两大类。前者又分为变量译码器和代码变换译码器。变量译码器（又称二进制译码器），用以表示输入变量的状态，如2线—4线、3线—8线和4线—16线译码器。

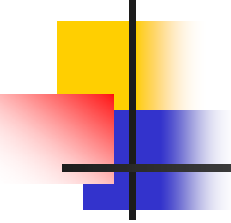
若有 $n$ 个输入变量，则有  $2^n$  个不同的组合状态，就有  $2^n$  个输出端供其使用。而每一个输出所代表的函数对应于 $n$ 个输入变量的最小项。



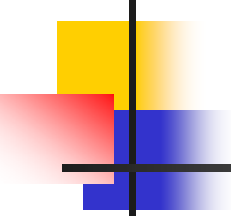
### 8.3.1 变量译码器

---

变量译码器的特点：对应于输入的每一位二进制码，译码器只有确定的一条输出线有信号输出。这类译码芯片有2线—4线译码器74LS139，3线—8线译码器74LS138、74LS137、74LS237、74LS238、74LS538，4线-16线译码器MC74154、MC74159、4514、4515等。



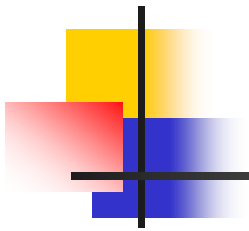
以3线—8线译码器74LS138为例进行分析，其逻辑功能如表8.3.1所示，表中  $A_2$ 、 $A_1$ 、 $A_0$  为地址输入端， $\bar{Y}_7 \sim \bar{Y}_0$  为译码输出端， $G1 (S_1)$ 、 $G2A (\bar{S}_2)$ 、 $G2B (\bar{S}_3)$  为使能端。当  $G1 (S_1) = 1$ ， $G2A (\bar{S}_2) + G2B (\bar{S}_3) = 0$  时，器件使能，地址码所指定的输出端有信号（为0）输出，其它所有输出端均无信号（全为1）输出。当  $G1 (S_1) = 0$ ， $G2A ( ) + G2B ( ) =$



---

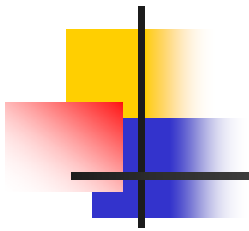
X时，或  $G1(S1) = X$ ， $G2A(\bar{S}_2) + G2B(\bar{S}_3) = 1$  时，译码器被禁止，所有输出同时为1。括号中的符号为实际芯片中的符号。





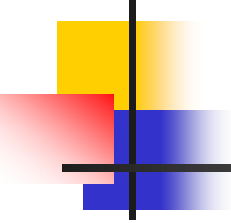
二进制译码器实际上也是负脉冲输出的脉冲分配器。若利用使能端中的一个输入端输入数据信息，器件就成为一个数据分配器(又称多路分配器)，如图8.3.1所示。若在 $G1(S_1)$ 输入端输入数据信息， $\overline{G2A}(\quad)=\overline{G2B}(\quad)=0$ ，地址码所对应的输出是 $G1(S_1)$ 数据信息的反码；若从 $G2A(\quad)$ 端输入数据信息，令 $G1(S_1)=1$ 、 $\overline{G2B}(\quad)=0$ ，地址码所对应的





---

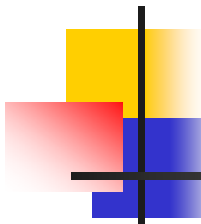
输出就是G2A( $\bar{S}_2$ )端数据信息的原码。若数据信息是时钟脉冲，则数据分配器便成为时钟脉冲分配器。括号中的符号是实际芯片中的符号。



根据输入地址的不同组合译出唯一地址，故可用作地址译码器。接成多路分配器，可将一个信号源的数据信息传输到不同的地点。

二进制译码器还能方便地实现逻辑函数，如图8.3.2所示，实现的逻辑函数是：

$$Z = \overline{A}\overline{B}\overline{C} + \overline{A}B\overline{C} + A\overline{B}\overline{C} + ABC$$



分配器输出

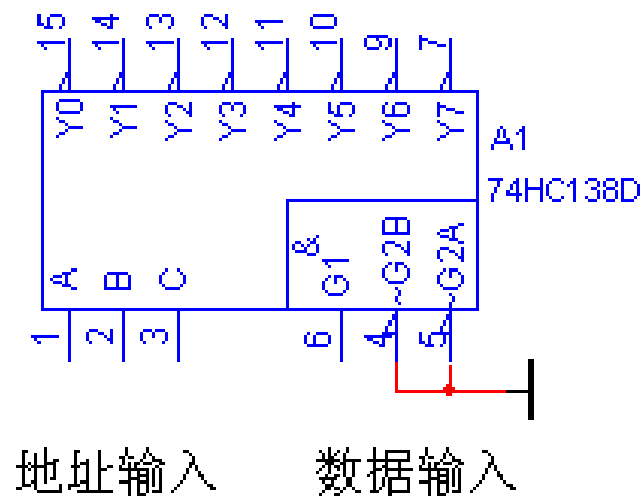


图8.3.1 作数据分配器

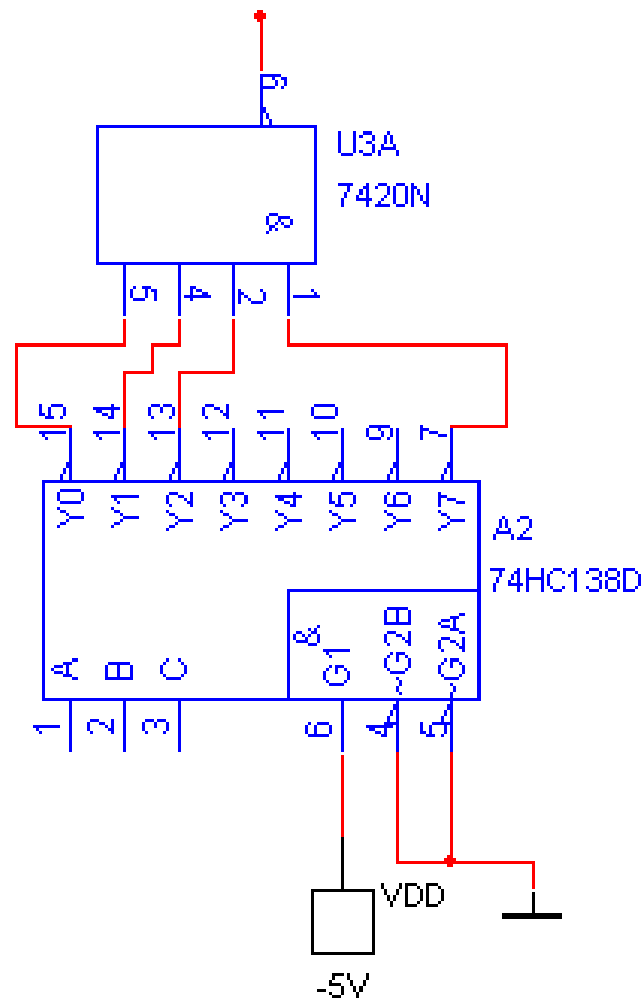
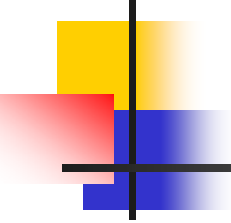


图8.3.2 实现逻辑函数



---

利用使能端能方便地将两个  $3/8$ 译码器组合成一个 $4/16$ 译码器，如图8.3.3所示。

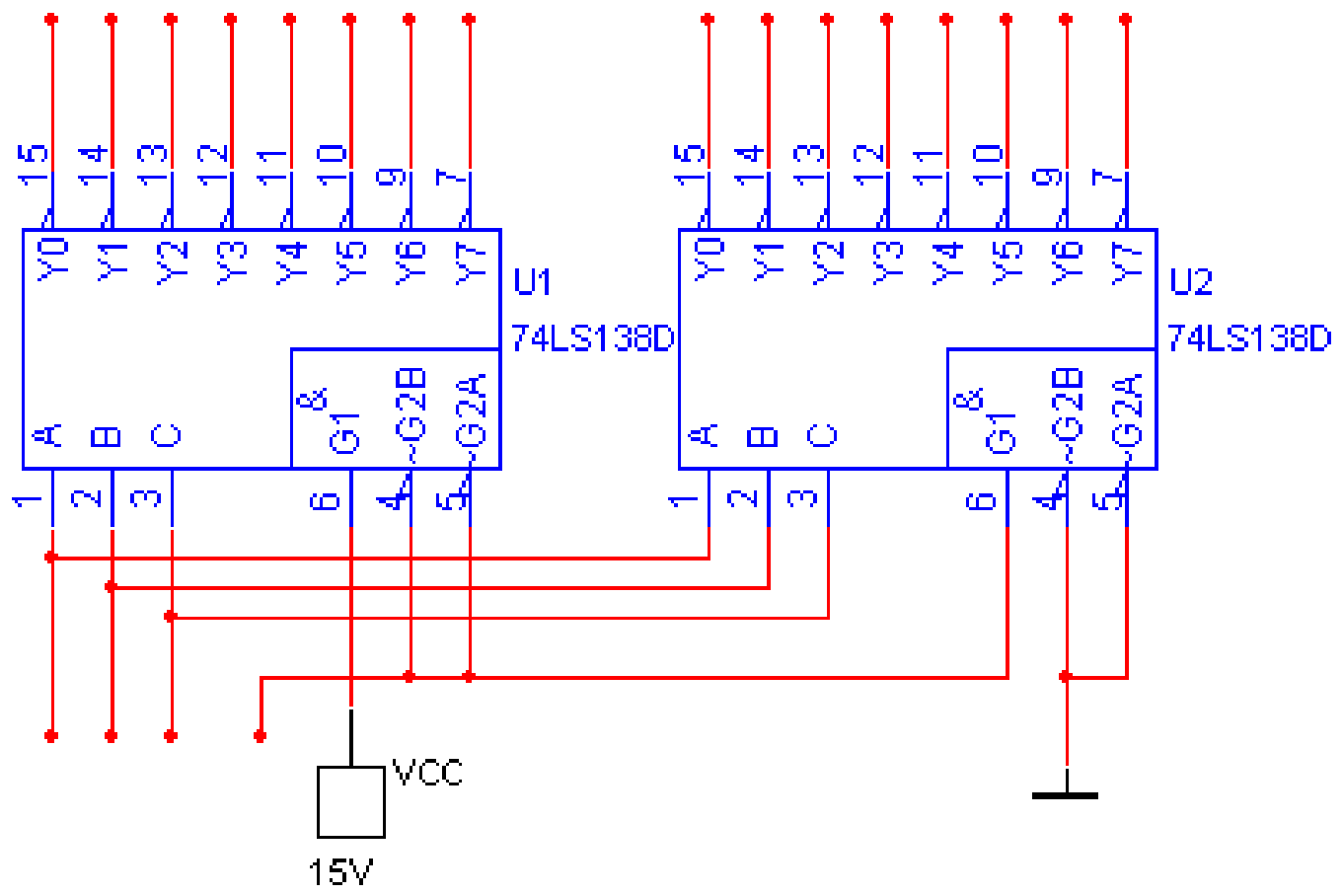
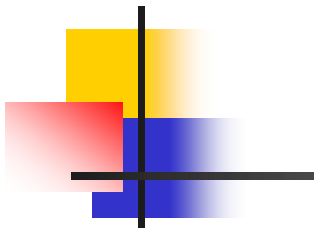


图8.3.3 用两个 3/8译码器组合成一个4/16译码器电路



## 8.3.2 码制变换译码器

---

码制变换译码器可以把一种码制变换成另一个码制。常用的集成芯片有4线-10线译码器74LS42、7443、74441、C1M028、74141、74145等。74LS45的逻辑电路及符号如图8.3.4所示。其4条输入线为8421BCD码，输出的10根线为对应的十进制状态。其输出为低电平有效。

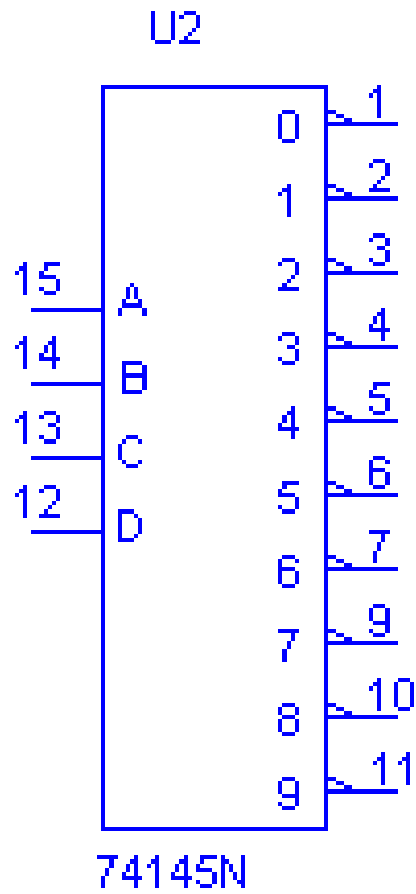
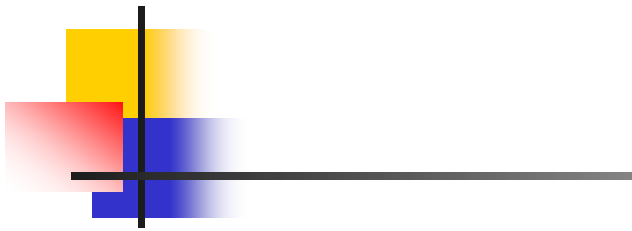


图8.3.4 74LS45的逻辑符号



### 8.3.3 显示译码器

---

用来驱动荧光数码管、发光二极管等显示器件的译码器称为显示译码器。它可将数符或字符的各种编码转换成字型码显示出来。这类集成芯片有：BCD-七段译码器7445、7446、7447、7448、7449、74246、74247、74LS247、74LS248、74LS249、4558，十进制数—七段译码器4026，BCD码—十进制译码器 / 驱动器74LS145等。





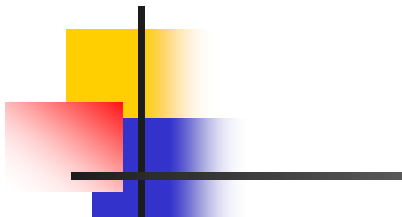
### 8.3.4 译码器驱动指示灯电路

---

74145是BCD码到十进制数译码器，其逻辑功能见表8.3.2，其中×为随意态。74145为集电极开路输出型的电路。其吸收大电流的能力较强且输出管具有高的击穿电压。用74145选择驱动指示灯和继电器的电路如图8.3.5所示。

### 表8.3.2 74145逻辑功能

N <sub>0</sub>	输 入 <sub>0</sub>				输 出 <sub>0</sub>									
	D <sub>0</sub>	C <sub>0</sub>	B <sub>0</sub>	A <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	2 <sub>0</sub>	3 <sub>0</sub>	4 <sub>0</sub>	5 <sub>0</sub>	6 <sub>0</sub>	7 <sub>0</sub>	9 <sub>0</sub>	10 <sub>0</sub>	11 <sub>0</sub>
0 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>
1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>
2 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>
3 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>
4 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>
5 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>
6 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>
7 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>
8 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>
9 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>
× <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>
× <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>
× <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>
× <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	0 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>
× <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>	1 <sub>0</sub>
↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔



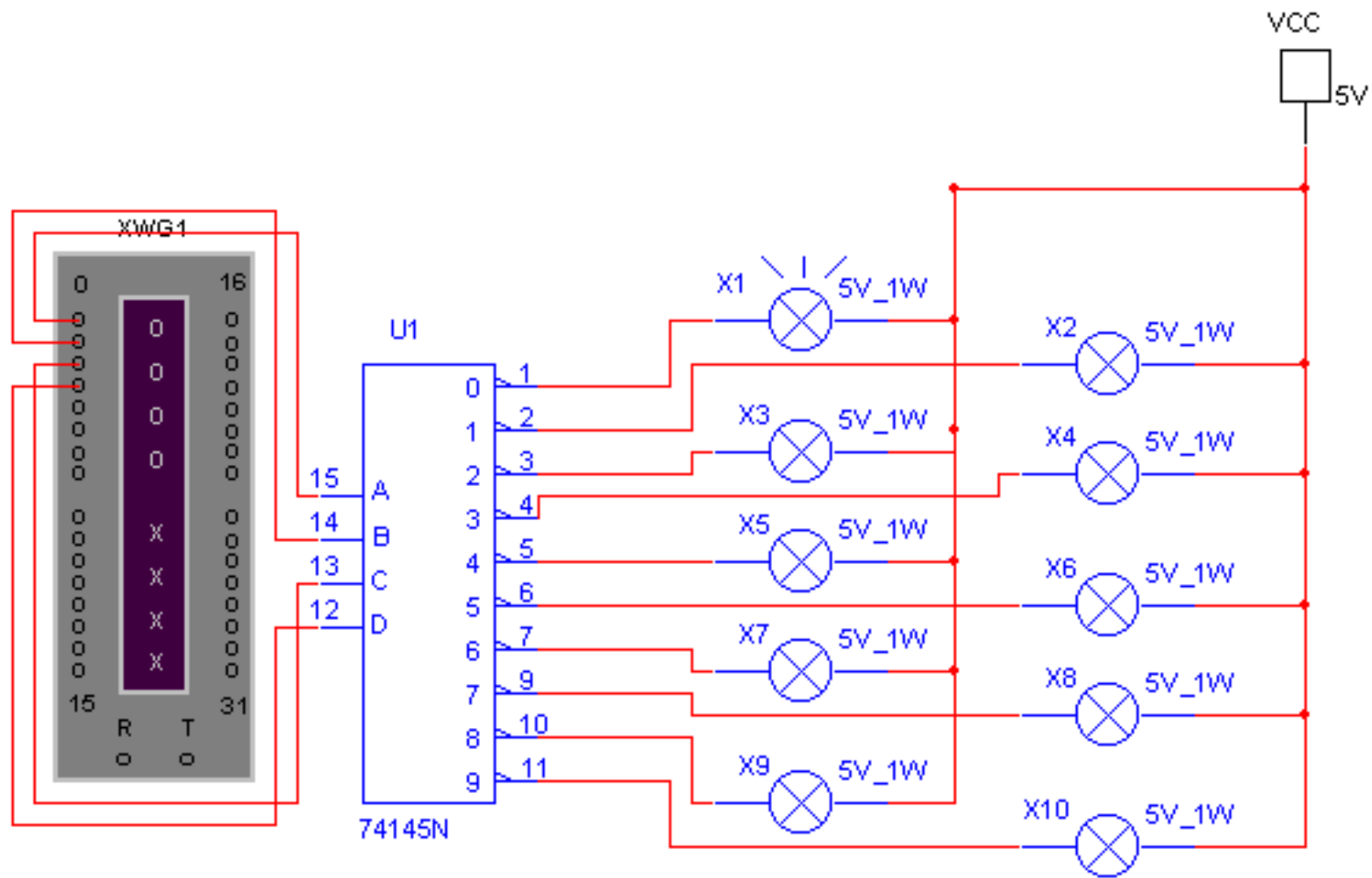
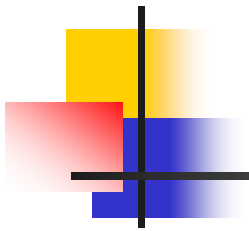


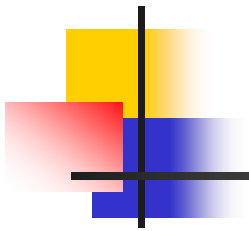
图8.3.5 译码器驱动指示灯电路



电路中字信号输入操作：双击字信号图标，出现如图8.3.6对话框。字信号参数设置方法请参照1,5节中的1.5.7（字信号发生器）小节。

**Edit:** 栏为正在编辑的那条字信号的地址

**Current:** 栏为正在输出的那条字信号的地址。



Initar 和Final栏分别表示输出字信号的起始地址和终止地址，设置后，字信号从起始地址开始逐条输出。

本例设置起始地址是0000，终止地址是0009。字信号的输出方式分为Step（单步）

用鼠标单击一次Step按钮，字信号输出一条。这种方式可用于对电路进行单步调试，便于观察电路变化状态。



---

## 8.4 数据选择器及其应用



## 8.4.1 数据选择器工作原理

---

数据选择器又叫“多路开关”。数据选择器在地址码（或叫选择控制）电位的控制下，从几个数据输入中选择一个并将其送到一个公共的输出端。数据选择器的功能类似一个多掷开关，如图8.4.1所示，图中有四路数据 $D_0 \sim D_3$ ，通过选择控制信号  $A_1$ 、 $A_0$ （地址码）从四路数据中选中某一路数据送至输出端 $Q$ 。

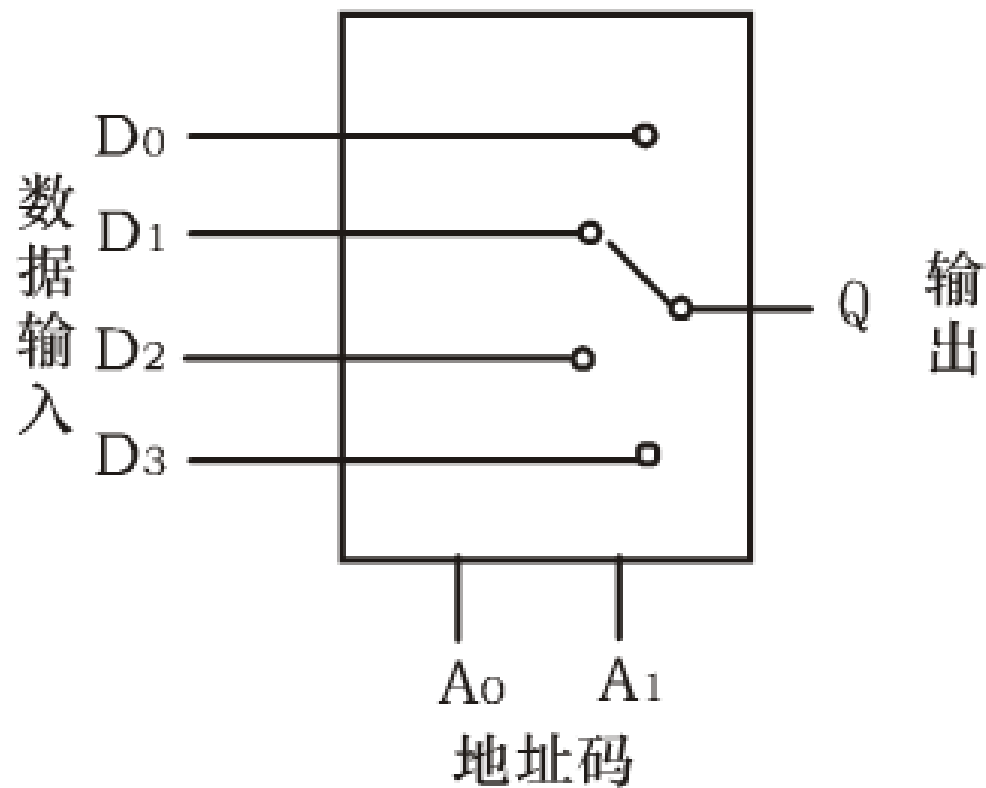
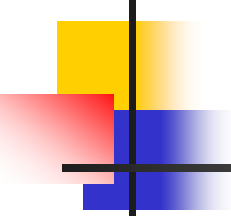


图8.4.1 4选1数据选择器示意图





---

数据选择器有2选1、4选1、8选1、16选1等类型。

数据选择器的电路结构一般由与或门阵列组成，也有用传输门开关和门电路混合而成的。



## 8.4.2 双四选一数据选择器 74LS153

---

双4选1数据选择器在一块芯片上集成了两个4选1数据选择器,功能如表8.4.1。引脚排列如图8.4.2。

表8.4.1 74LS153功能表

输 入			输 出
$\bar{S}$	$A_1$	$A_0$	$Q$
1	×	×	0
0	0	0	$D_0$
0	0	1	$D_1$
0	1	0	$D_2$
0	1	1	$D_3$

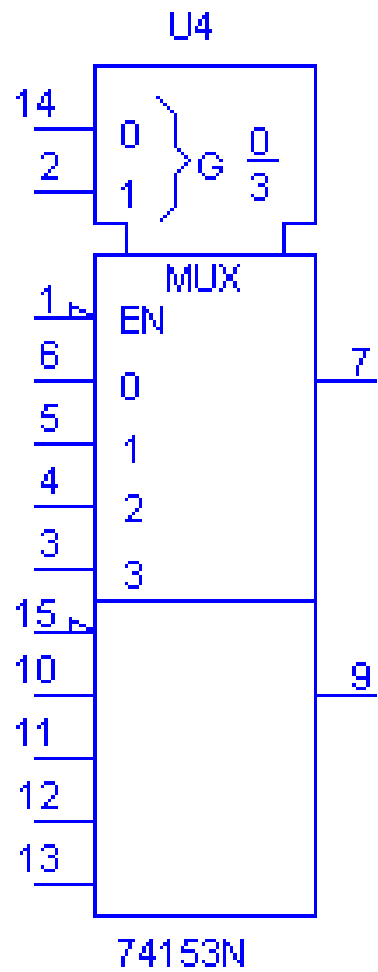
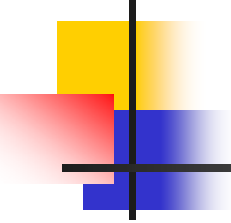


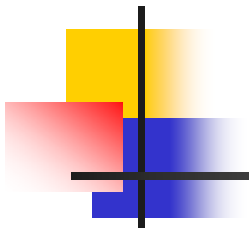
图8.4.2 74LS153引脚功能图





$\overline{1S}$  (1脚EN) )、 $\overline{2S}$  (15脚) 为两个独立的使能端； $A_1$  (2脚)、 $A_0$  (14脚) 为公用的地址输入端； $1D_0$  (6脚) ~  $1D_3$  (3脚) 和  $2D_0$  (10脚) ~  $2D_3$  (13脚) 分别为两个4选1数据选择器的数据输入端； $Q_1$  (7脚)、 $Q_2$  (8脚) 为两个输出端。


(1) 当使能端  $\overline{2S}$  ( ) = 1 时，多路开关被禁止，无输出， $Q=0$ 。



(2) 当使能端  $\overline{1S}(\overline{2S}) = 0$  时，多路开关正常工作，根据地址码  $A_1$ 、 $A_0$  的状态，将相应的数据  $D_0 \sim D_3$  送到输出端  $Q$ 。

如：  $A_1A_0 = 00$  则选择  $D_0$  数据到输出端，即  $Q = D_0$ 。

$A_1A_0 = 01$  则选择  $D_1$  数据到输出端，即  $Q = D_1$ ，其余类推。



数据选择器的用途很多，例如多通道传输，数码比较，并行码变串行码，以及实现逻辑函数等。

在Multisim平台上用74153建立全加器仿真电路如图8.4.3所示，全加器函数功能表如8.4.2所示，74153的7脚是全加器的进位端输出，9脚是全加器的和输出，在电路中开关“A”“B”“C”分别表示全加器的“A<sub>i</sub>”“B<sub>i</sub>”“C<sub>i-1</sub>”。



表8.4.2全加器函数功能表

$A_i$	0	0	0	0	1	1	1	1
$B_i$	0	0	1	1	0	0	1	1
$C_{i-1}$	0	1	0	1	0	1	0	1
$S_i$	0	1	1	0	1	0	0	1
和输出接线方法	$2C_0=C_{i-1}$		$2C_1=\bar{C}_{i-1}$		$2C_2=\bar{C}_{i-1}$		$2C_3=C_{i-1}$	
$C_i$	0	0	0	1	0	1	1	1
进位输出接线方法	$1C_0=0$		$1C_1=C_{i-1}$		$1C_2=C_{i-1}$		$1C_3=1$	

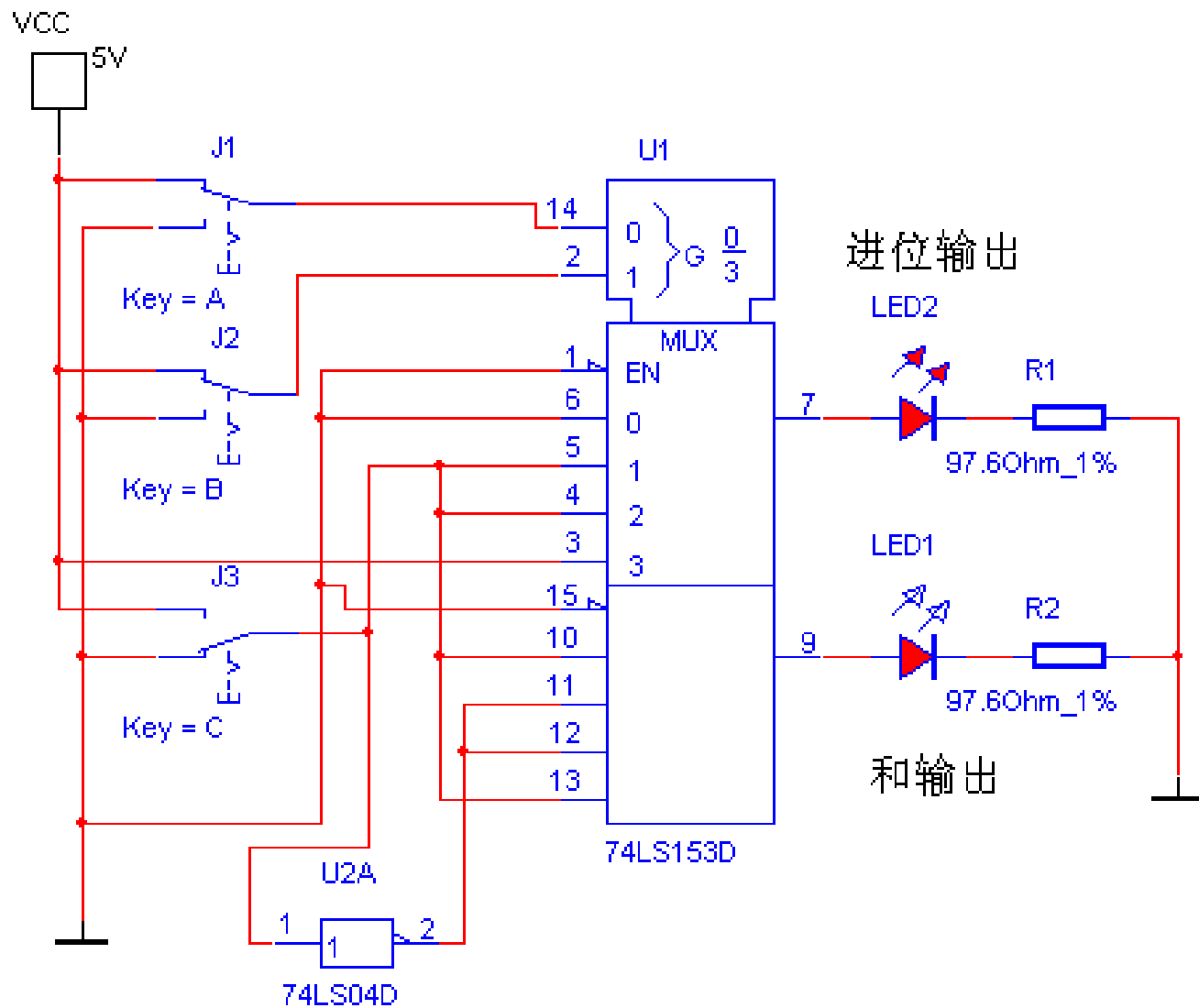


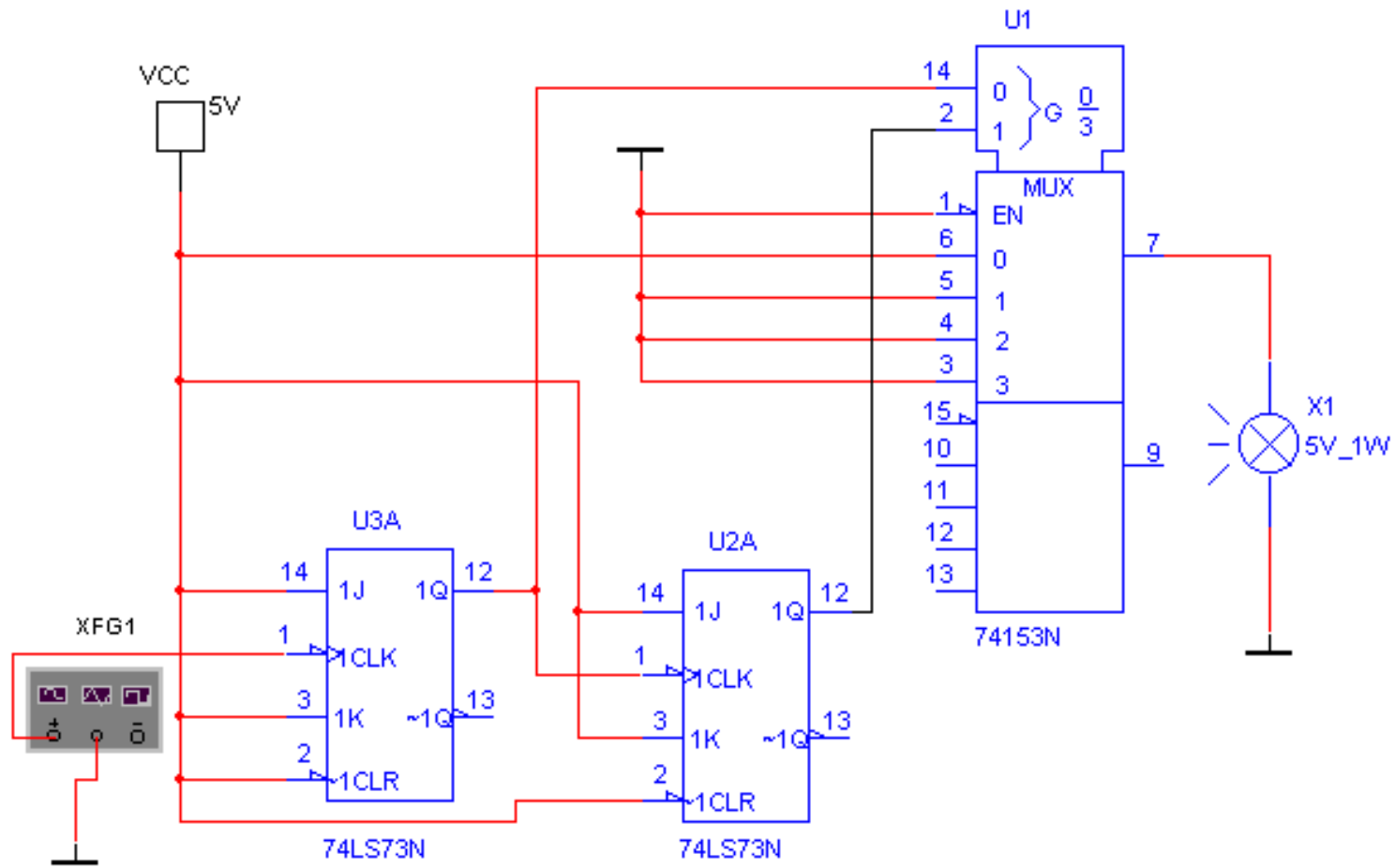
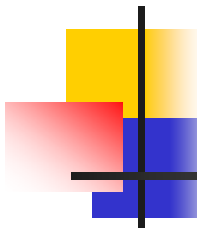
图8.4.3 用74LS153实现的全加器仿真电路



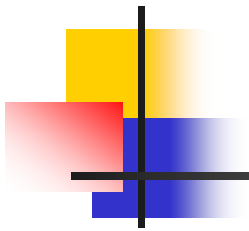
### 8.4.3 通道顺序选择电路

---



用数据选择器**74153**（双4选1）和**J-K**触发器**7470**组成的4通道顺序选择器电路如图**8.4.4**所示，触发器组成的计数器对时钟脉冲**CP**计数，周而复使地进行**00**到**11**的计数，其输出使**74153**顺序将**1D0~1D3**选中，输出端**7**脚依次按位得到数据输出**1D0~1D3**，**1CLR**端可对计数器清零。



8.4.4 4通道顺序选择电路



电路中信号发生器是用来提供时钟脉冲的，因此  
在设置参数时应注意,信号发生器的输出信号为  
方波，幅值不能太小，一般情况应大于或等于3V，  
频率选择为1HZ,这样便于观察灯泡的亮、灭。

电路中的灯泡选择：点击指示部件库中的  
灯泡图标显示如图8.4.5所示对话框

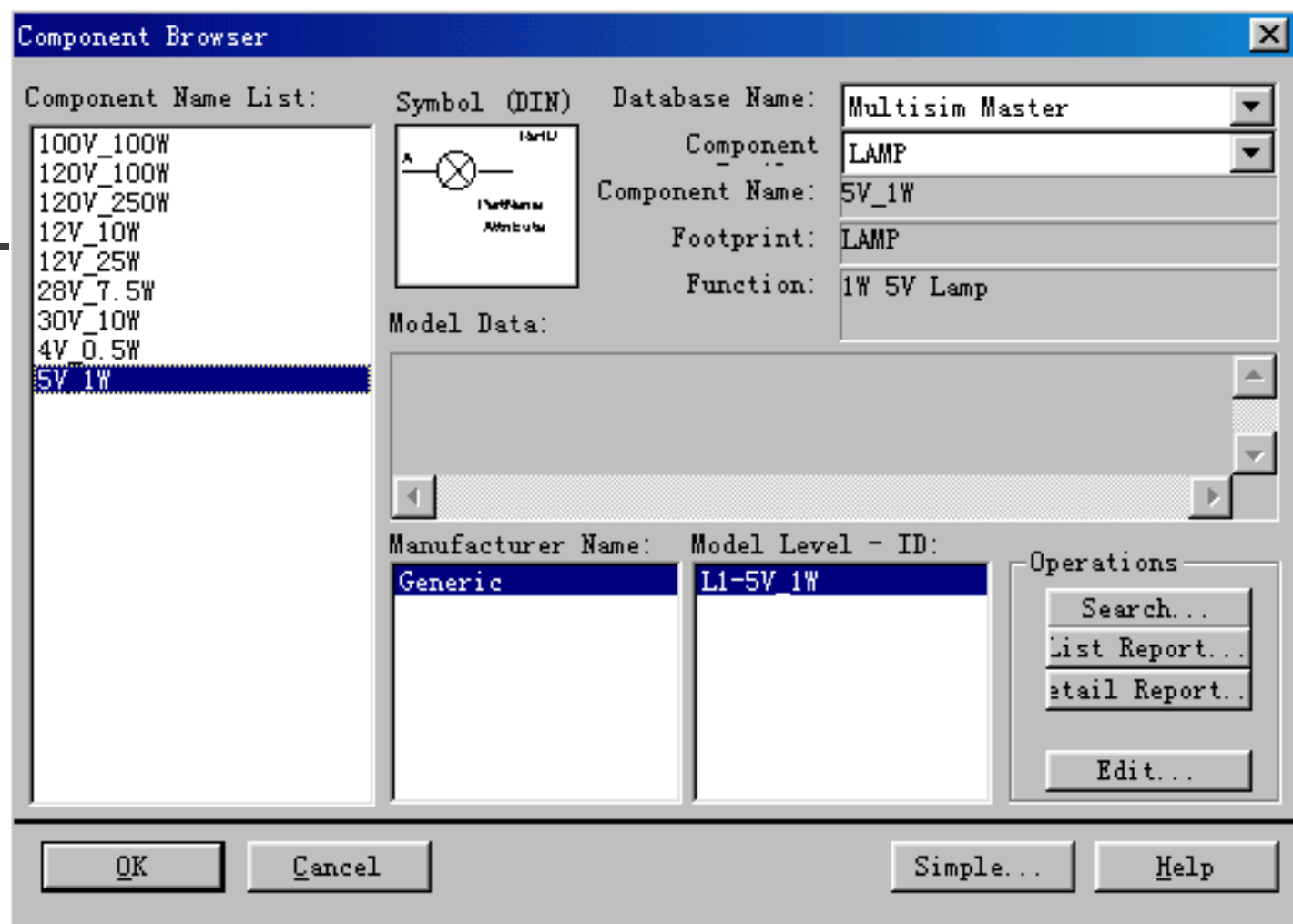
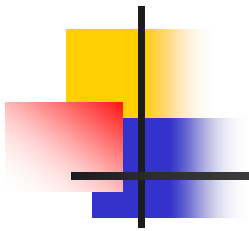
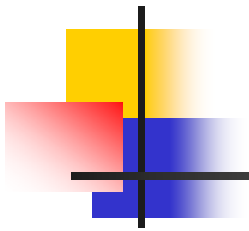


图8.4.5 灯泡选择对话框



在对话框中选择5V,1W的灯泡放入电路中。其工作电压及功率不可设置，额定电压(即显示在灯泡旁的电压参数)对交流而言是指其最大值。当加在灯泡上的电压大于(不能等于)额定电压的50%至额定电压时，灯泡一边亮；而大于额定电压至150%额定电压值时，灯泡两边亮；，而当外加电压超过电



---

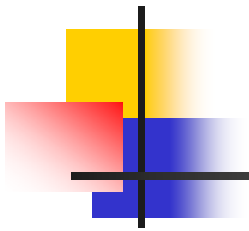
压150%额定电压值时，灯泡被烧毁。灯泡烧毁后不能恢复，只有选取新的灯泡。对直流而言，灯泡发出稳定的灯光，对交流而言，灯泡将一闪一闪地发光。





---

## 8.5. 加法器



---

两个二进制数之间的算术运算无论是加、减、乘、除，目前在数字计算机中都是化做若干步加法运算进行的。因此，加法器是构成算术运算器的基本单元。



## 8.5.1 半加器

---

如果不考虑有来自低位的进位将两个1位二进制数相加，称为半加。实现半加运算的电路叫做半加器。

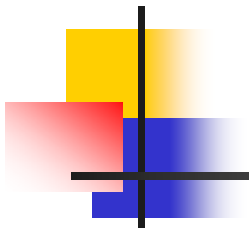
按照二进制加法运算规则可以列出如表8.5.1所示的半加器真值表。其中A、B是两个加数，s是相加的和，CO是向高位的进位。将S、CO和A、B的关系写成逻辑表达式则得到。



---

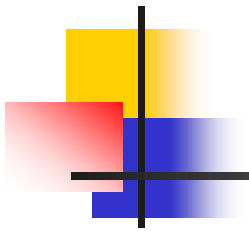
$$S = \bar{A}B + A\bar{B} = A \oplus B$$

$$C = AB$$



### 8.5.1 半加器真值表

输 入 <sup>↗</sup>		输 出 <sup>↖</sup>	
A	B	S	C <sup>↖</sup>
0	<u>0</u> <sup>↗</sup>	0	<u>0</u> <sup>↖</sup>
0	1 <sup>↗</sup>	1	0 <sup>↖</sup>
1	0 <sup>↗</sup>	1	0 <sup>↖</sup>
1	<u>1</u> <sup>↗</sup>	0	1 <sup>↖</sup>



---

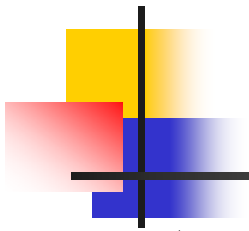
因此半加器是由一个异或门和一个与门组成的，如图8.5.1所示。



## 8.5.2 全加器

---

全加器是一种广义名称。就其电路结构而言，它是一种二进制运算的单元电路。从器件角度看，它又是一种最基本的二进制算术运算器件。实际的加法运算，必须同时考虑由低位来的进位，这种由被加数、加数和一个来自低位的进位数三者相加的运算称为全加运算。执行这种运算的器件称为全加器。



1. 全加器运算如下式。

A	—————	被加数
B	—————	加数
+) $C_0$	—————	低位进位
C	—————	向高位进位
<hr/>		
S	—————	和



## 2. 全加器真值表如表8.5.1所示

表8.5.1全加器真值表

输 入 <sub>0</sub>			输 出 <sub>0</sub>	
$C_0$	B	A	S	$C_0$
0	<u>0</u>	<u>0</u> <sub>0</sub>	0	<u>0</u> <sub>0</sub>
0	<u>0</u>	1 <sub>0</sub>	1	0 <sub>0</sub>
0	1	0 <sub>0</sub>	1	0 <sub>0</sub>
0	1	<u>1</u> <sub>0</sub>	0	1 <sub>0</sub>
1	0	<u>0</u> <sub>0</sub>	1	0 <sub>0</sub>
1	0	1 <sub>0</sub>	0	1 <sub>0</sub>
1	<u>1</u>	0 <sub>0</sub>	0	1 <sub>0</sub>
1	<u>1</u>	<u>1</u> <sub>0</sub>	1	<u>1</u> <sub>0</sub>

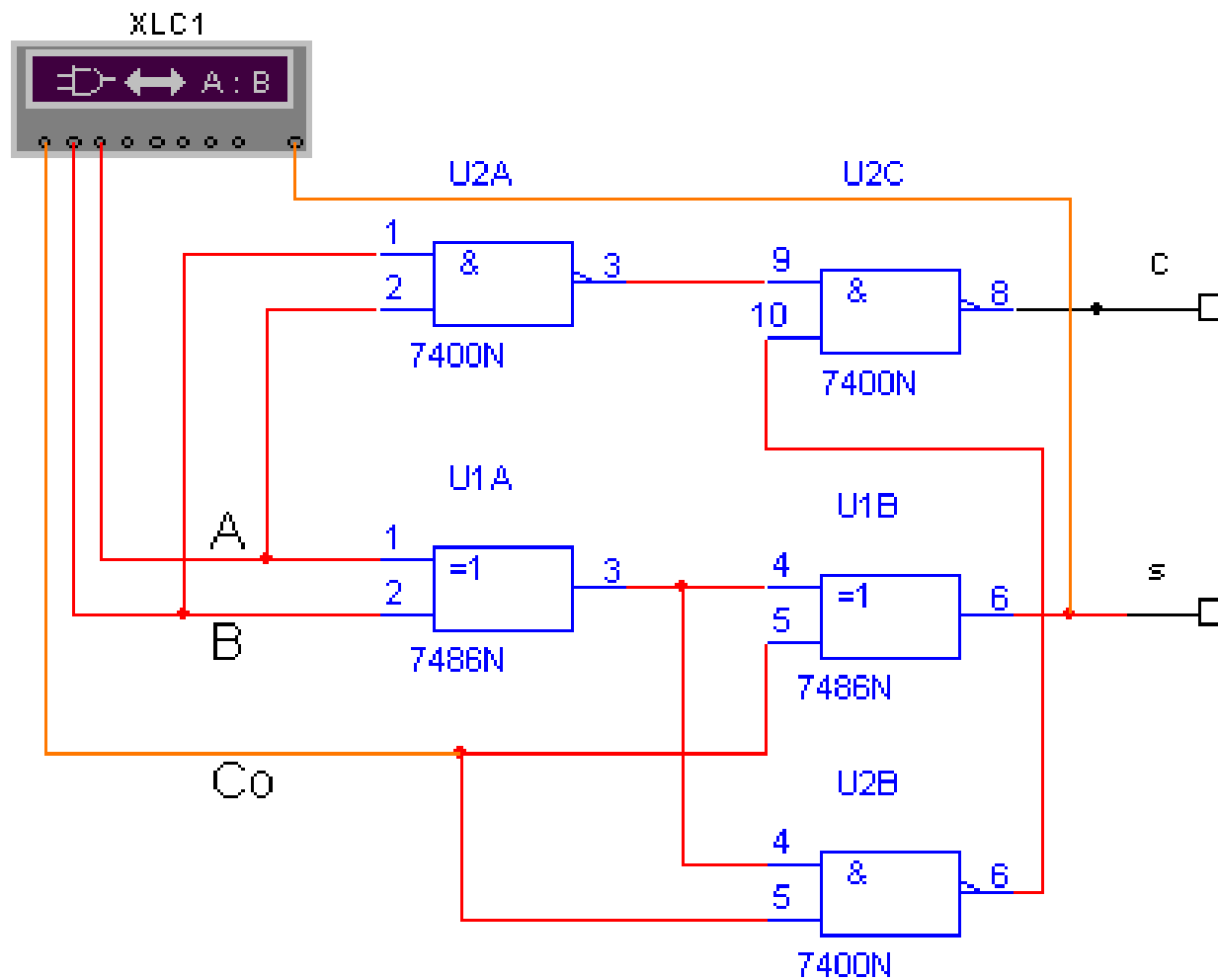


### 3. 全加器逻辑表达式:

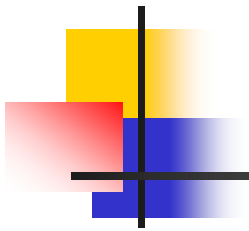
$$S = C_o \oplus (A \oplus B)$$

$$C = C_o(A \oplus B) + AB$$

### 4. 全加器逻辑电路



8.5.2 全加器电路



---

电路仿真，双击逻辑转换仪图标，如图8.5.3逻辑转换仪面板。逻辑转换仪的使用方法请看1.5节中的1.5.9小节（逻辑转换仪）。图中测出的是和S的结果，若要测出向高位进位的结果，则把测试线改接到进位C端，便得到向高位进位的结果。

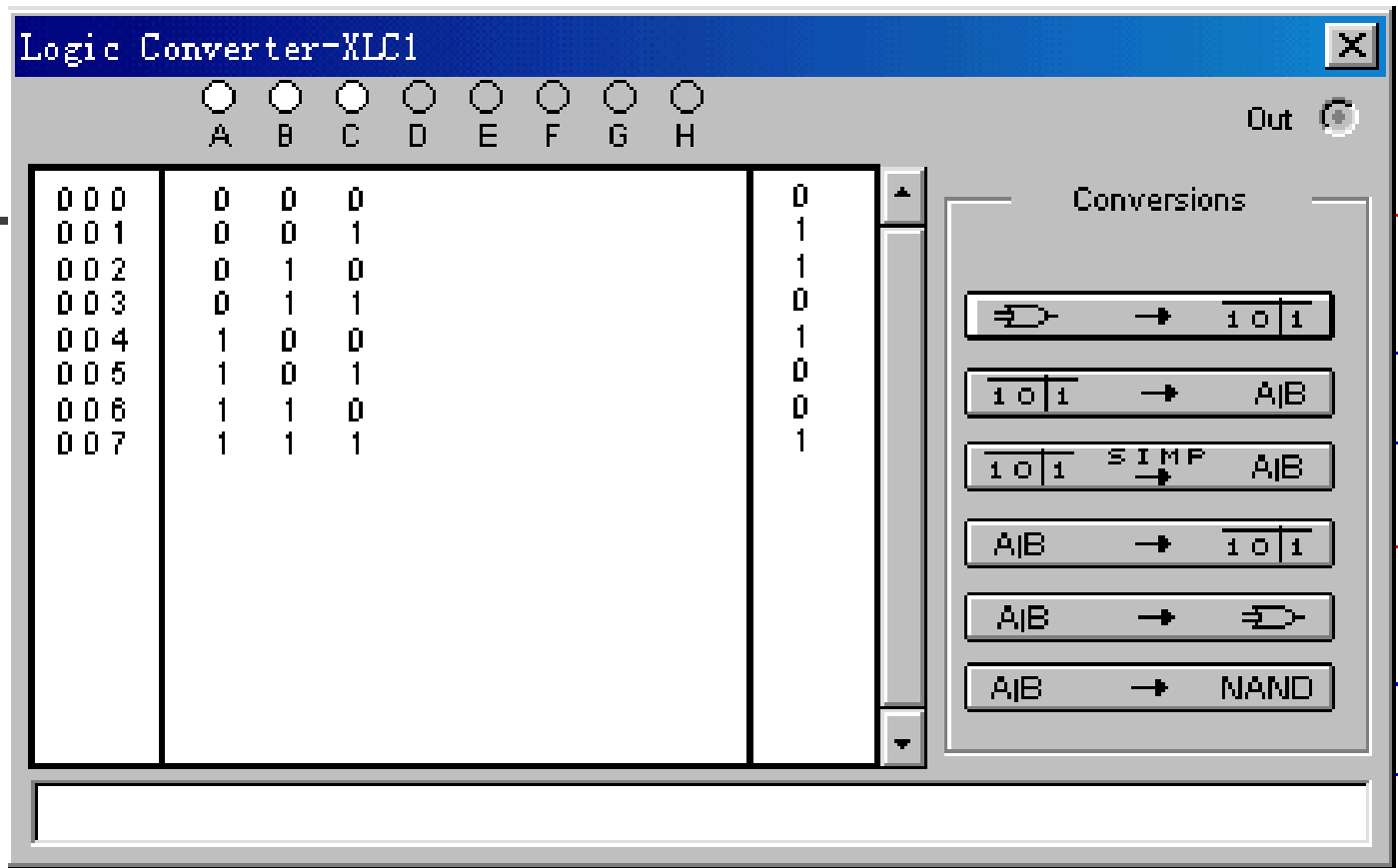
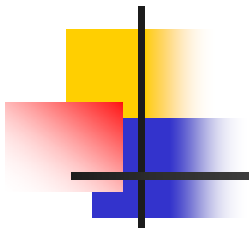


图8.5.3 逻辑转换仪面板



---

## 8.6 数值比较器



---

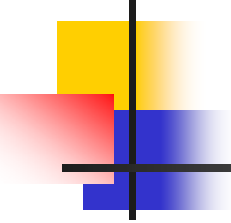
在一些数字系统(例如数字计算机)当中经常要求比较两个数字的大小。为完成这一功能所设计的各种逻辑电路统称为数值比较器。



## 8.6.1 1位数值比较器

首先讨论两个1位二进制数A和B相比较的情况。这时有三种可能：①A>B(即A=1、B=0)，则  $A\bar{B}=1$ ，故可以用  $A\bar{B}$  作为A>B的输出信号 $Y_{(A>B)}$ 。②A<B(即A=0、B=1)，则  $\bar{A}B=1$ ，故可以用  $\bar{A}B$  作为A<B的输出信号 $Y_{(A<B)}$ 。③A=B，则  $A\odot B=1$ ，故可以用 $A\odot B$ 作为A=B的输出信号 $Y_{(A=B)}$ 。





---

将以上的逻辑关系画成逻辑图，即得图  
8..6.1所示的1位数值比较器电路。

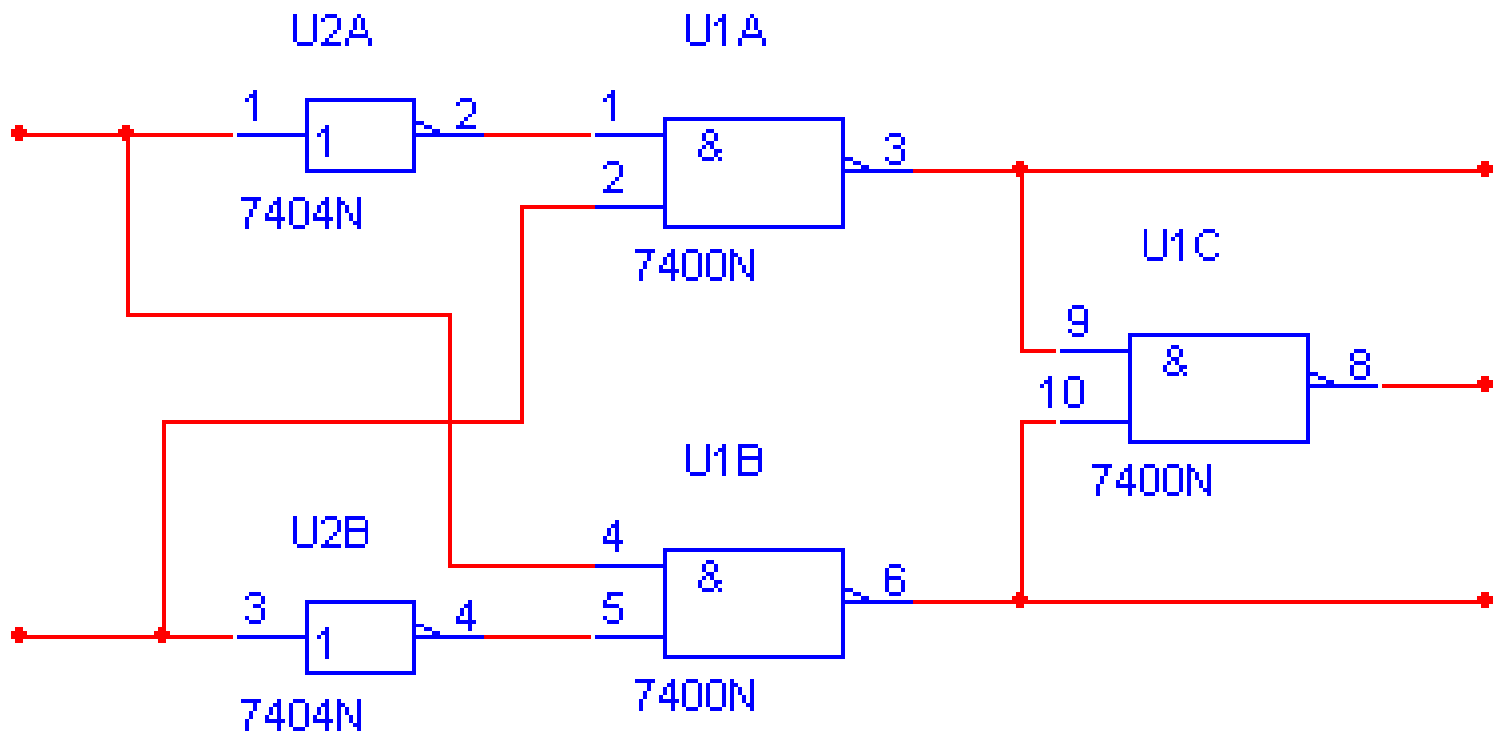


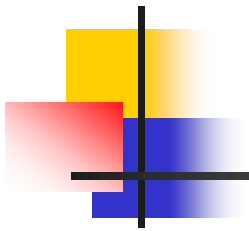
图8.6.1 1位数值比较器



## 8.6.2 多位数值比较器

---

在比较两个多位数的大小时，必须自高而低地逐位比较，而且只有在高位相等时，才需要比较低位。



---

例如A、B是两个4位二进制数 $A_3A_2A_1A_0$ 和 $B_3B_2B_1B_0$ ，进行比较时应首先比较 $A_3$ 和 $B_3$ 。如果 $A_3 > B_3$ 那么不管其他几位数码各为何值，肯定是 $A > B$ 。反之， $A_3 < B_3$ 则不管其他几位数码为何值，肯定是 $A < B$ 。如果 $A_3 = B_3$ 这就必须通过比较下一位 $A_2$ 和 $B_2$ 来判断A和B的大小。依次类推，定能比出结果。

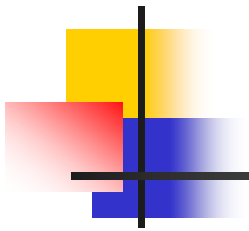


CC14585的逻辑表达式为：

$$Y_{(A<B)} = \bar{A}_3 B_3 + (A_3 \odot B_3) \bar{A}_2 B_2 + (A_3 \odot B_3) (A_2 \odot B_2) \bar{A}_1 B_1 \\ + (A_3 \odot B_3) (A_2 \odot B_2) (A_1 \odot B_1) \bar{A}_0 B_0 \\ + (A_3 \odot B_3) (A_2 \odot B_2) (A_1 \odot B_1) (A_0 \odot B_0) I_{(A<B)}$$

$$Y_{(A=B)} = (A_3 \odot B_3) (A_2 \odot B_2) (A_1 \odot B_1) (A_0 \odot B_0) I_{(A=B)}$$

$$Y_{(A>B)} = \overline{Y_{(A<B)} + Y_{(A=B)}}$$



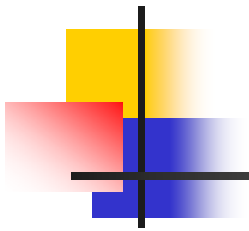
式中 $Y_{(A<B)}$ 、 $Y_{(A=B)}$ 、 $Y_{(A>B)}$ 是总的比较结果， $A_3A_2A_1A_0$ 和 $B_3B_2B_1B_0$ 是两个相比较的4位数的输入端。 $I_{(A<B)}$ 、 $I_{(A=B)}$ 、 $I_{(A>B)}$ 是扩展端，供片间连接时用。只比较两个4位数时，将扩展端 $I_{(A<B)}$ 接低电平， $I_{(A=B)}$ 、 $I_{(A>B)}$ 接高电平，即 $I_{(A<B)}=0$ 、 $I_{(A=B)}=I_{(A>B)}=1$ 。这时上式中 $Y_{(A<B)}$ 中的最后一项为0，其余4项分别表示了 $A<B$ 的4种可能情况，即 $A_3<B_3$ ； $A_3=B_3$ ， $A_2<B_2$ ； $A_2=B_2$ ， $A_1<B_1$ ； $A_1=B_1$ ， $A_0<B_0$ 。



---

上式 $Y_{(A=B)}$ 中表明，只有A和B的每一位都相等时，A和B才相等。

式 $Y_{(A>B)}$ 则说明，若A和B比较的结果既不是 $A<B$ 又不是 $A=B$ ，则必为 $A>B$ 。



---

在比较两个4位以上的二进制数时，需要用两片以上的CC14585组合成位数更多的数值比较电路。下面通过一个简单的例子说明一下扩展接法。用两片CC14585接成8位数值比较器电路如图8.6.2所示。



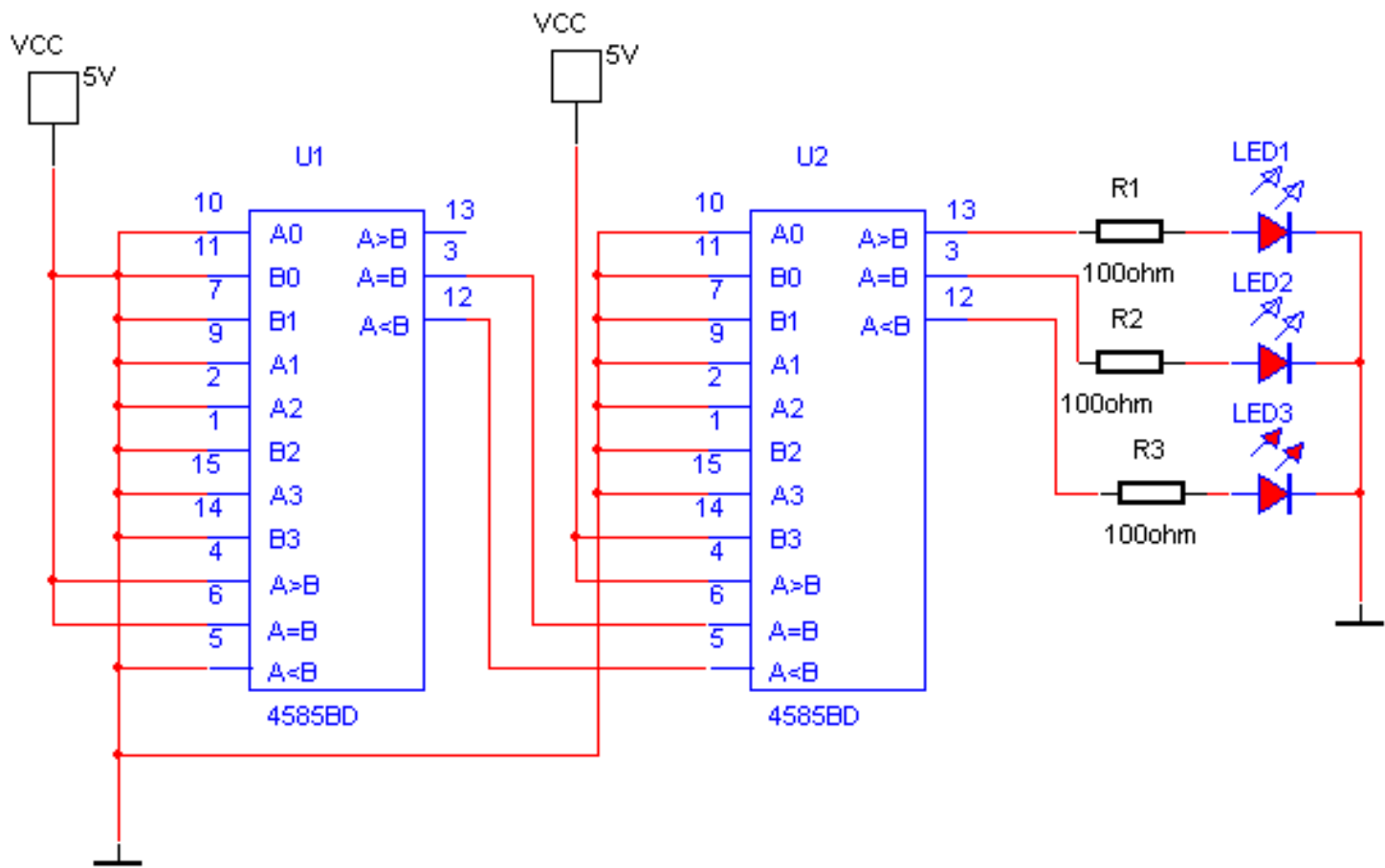
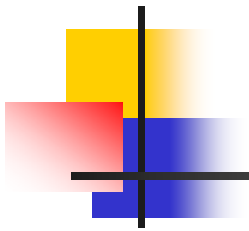
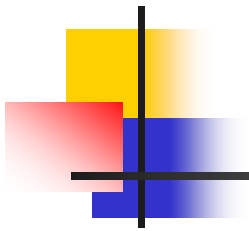


图8.6.2 两片CC14585接成8位数值比较器电路

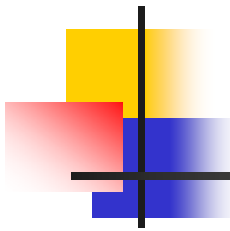


根据多位数比较的规则，在高位相等时取决于低位的比较结果。由上式 $Y_{(A<B)}$ 和式 $Y_{(A=B)}$ 又知，在CC14585中只有两个输入的4位数相等时，输出才由 $I_{(A<B)}$ 和 $I_{(A=B)}$ 的输入信号决定。因此，在将两个数的高4位接到CC1458的U2片上，而将低4位接到CC1458的U1片上时，只需把第(1)片的 $Y_{(A<B)}$ 和 $Y_{(A=B)}$ 到第(2)片 $I_{(A<B)}$ 和 $I_{(A=B)}$ 就行了。



---

由式 $Y(A>B)$ 中可见，在CC14585中 $Y(A>B)$ 信号是用 $Y(A<B)$ 和 $Y(A=B)$ 产生的，因此在扩展连接时，只需输入低位比较结果 $I(A<B)$ 和 $I(A=B)$ 就够了。 $Y(A>B)$ 并未用于产生 $Y(A>B)$ 的输出信号，它仅仅是一个控制信号。当 $I(A>B)$ 为高电平时，允许有 $Y(A>B)$ 信号输出，而当 $I(A>B)$ 为低电平时



$Y(A>B)$ 输出端被封锁在低电平。因此，在正常工作时应使 $I(A>B)$ 端处于高电平。这样就得到了图8.6.2的电路。

目前生产的数值比较器产品中，也有采用其他电路结构形式的。因为电路结构不同，扩展输入端的用法也不完全一样，使用时应注意加以区别。



---

## 8.7 ASK幅度键控调制电路



## 8.7.1 键控法产生ASK信号的方法

---

ASK有两种实现方法：乘法器实现法和键控法。乘法器实现法已经在第6.6节中介绍了。键控法是产生ASK信号的另一种方法。二元制ASK又称为通断控制（OOK）。最典型的实现方法是用一个电键来控制载波振荡器的输出而获得。

图8.7.1所示为该方法的原理框图。

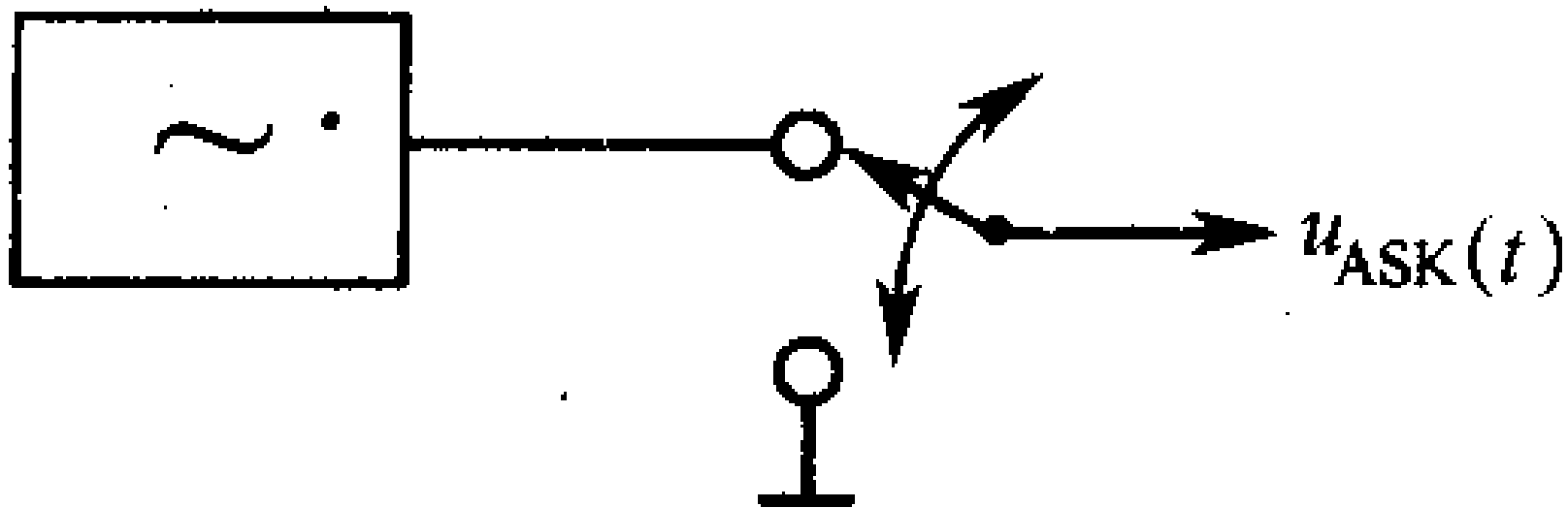
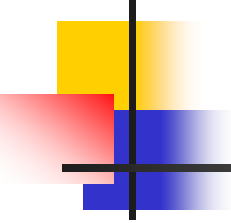


图8.7.1键控法产生ASK信号原理框图



---

为适应自动发送高速数据的要求，键控法中的电键可以利用各种形式的受基带信号控制的电子开关来实现，代替电键，产生ASK信号。用数字电路实现键控，产生ASK信号的电路示意图如图8.7.2所示。该电路是用基带信号控制与非门的开闭，实现ASK调制。



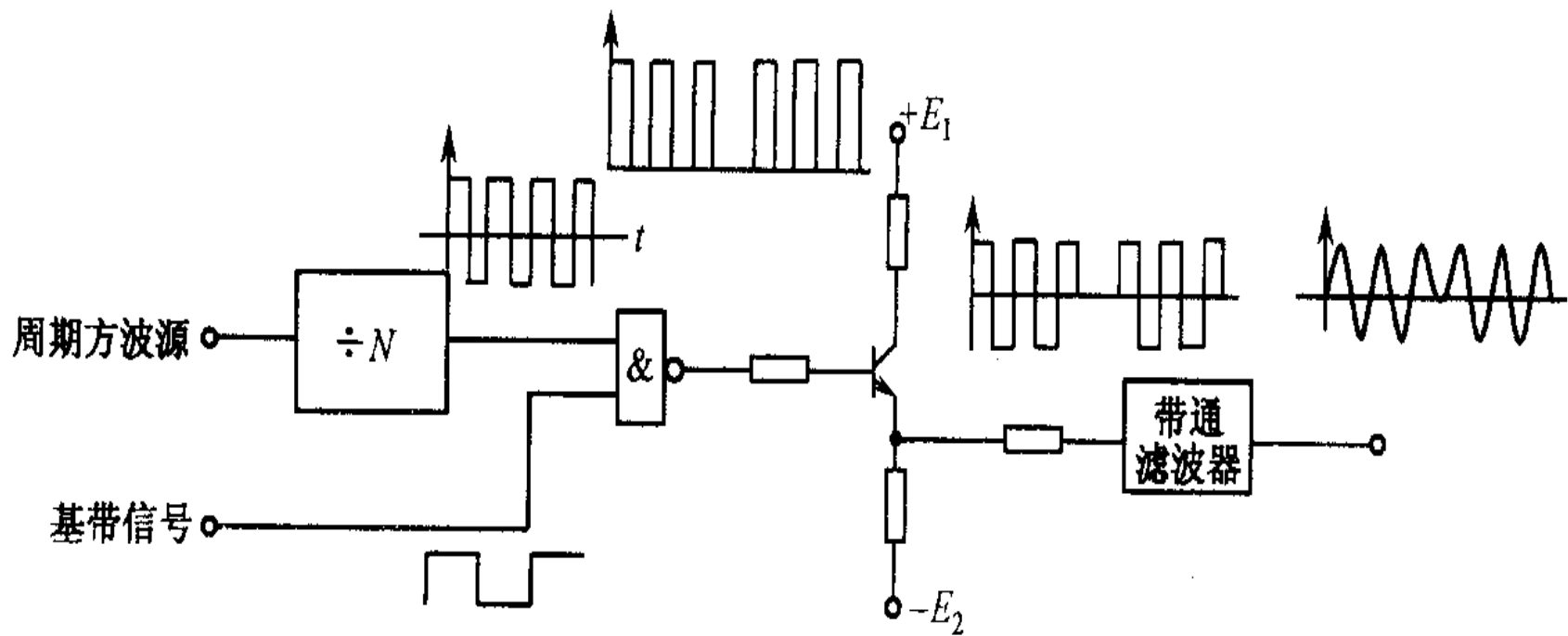
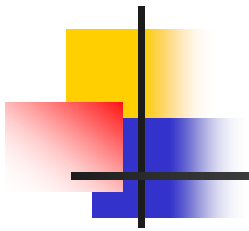


图8.7.2 数字电路实现ASK调制的方法



---

## 8.8 FSK频率键控调制电路



---

频移键控（FSK）是用不同频率的载波来传送数字信号，用数字基带信号控制载波信号的频率。二进制频移键控是用两个不同频率的载波来代表数字信号的两种电平。接收端收到不同的载波信号再进行逆变换成为数字信号，完成信息传输过程。



## 8.8.1 FSK 信号的产生

---

FSK 信号的产生有两种方法，直接调频法和频率键控法。直接调频法是用数字基带信号直接控制载频振荡器的振荡频率。频率键控法也称频率选择法，图8.8.1是实现频率键控法的原理框图。电路中有两个独立的振荡器，数字基带信号控制转换开关，选择不同频率的高频振荡信号实现FSK调制。

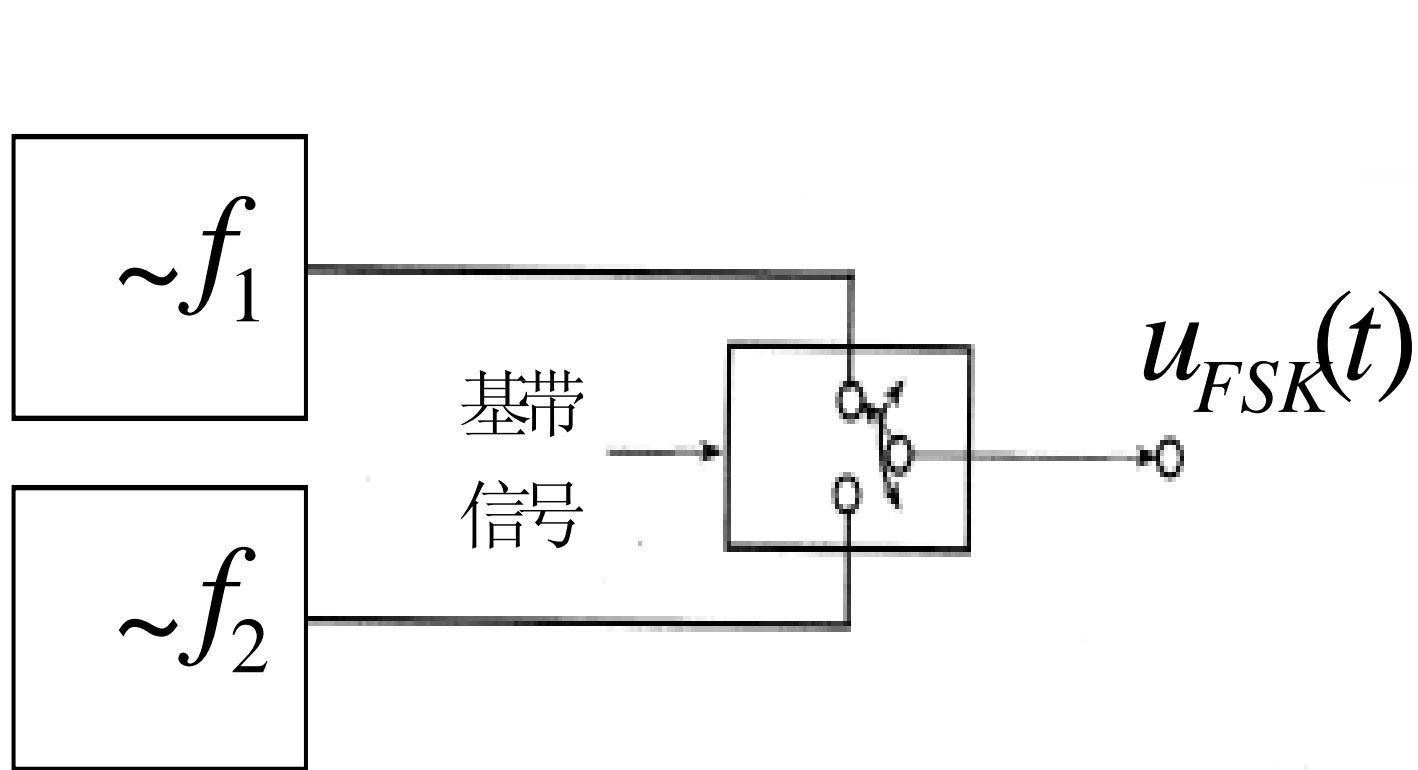
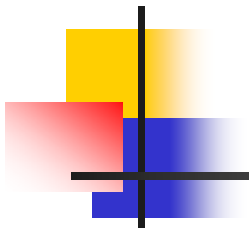
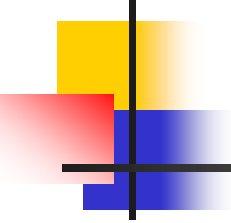


图8.8.1 频率键控法的原理框图



键控法产生的 FSK 信号频率稳定度可以做得很高并且没有过渡频率，它的转换速度快，波形好。频率键控法在转换开关发生转换的瞬间，两个高频振荡的输出电压通常不可能相等，于是  $u_{FSK}(t)$  信号在基带信息变换时电压会发生跳变，这种现象也称为相位不连续，这是频率键控特有的情况。



---

图8.8.2 是利用两个独立分频器，以频率键控法来实现 FSK调制的原理电路图。在图8.8.2中，与非门3和4起到了转换开关的作用。当数字基带信号为“1”时，与非门4打开，输出，当数字基带信号为“0”时，与非门3打开，输出，从而实现了FSK调制。

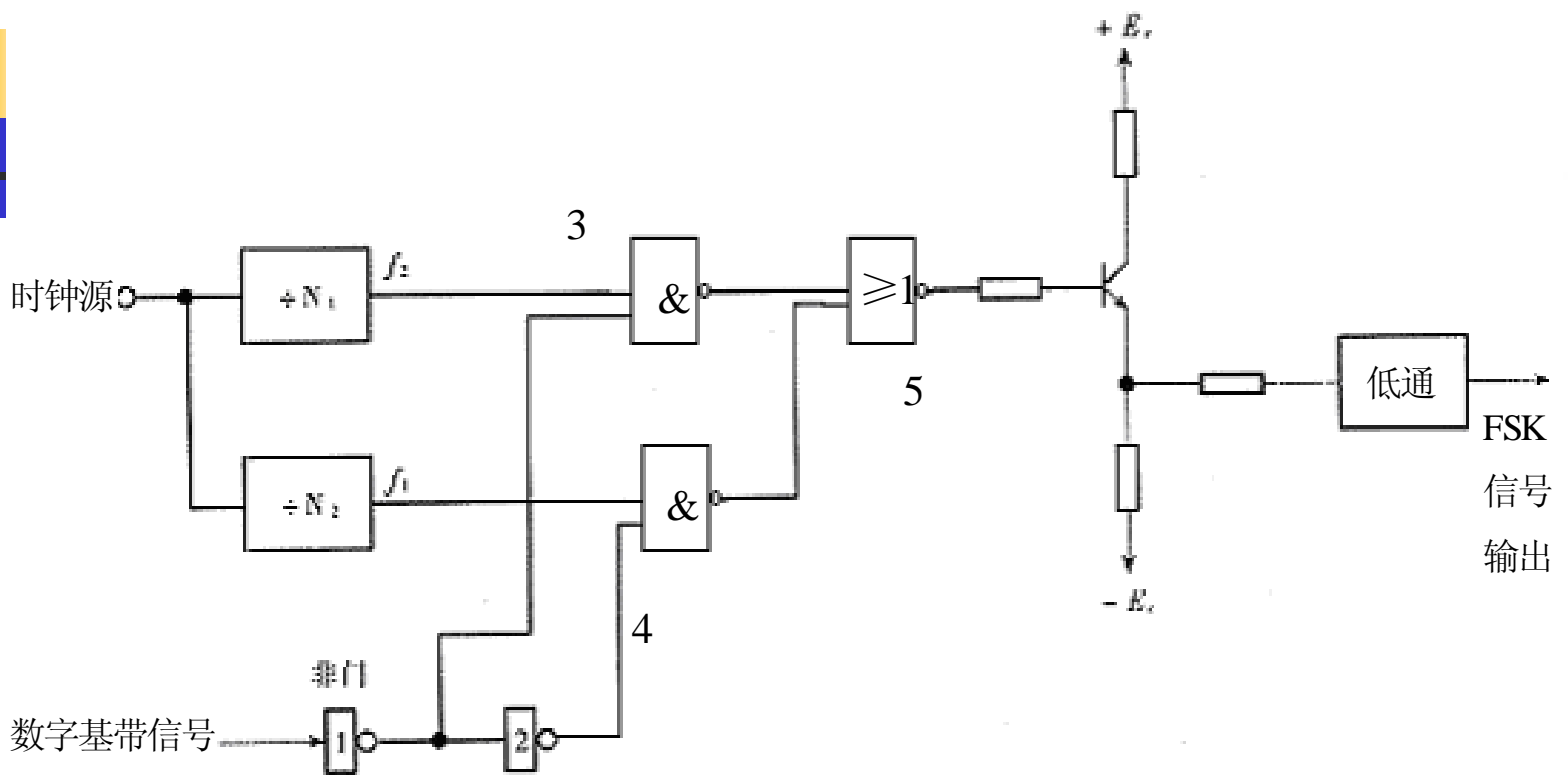
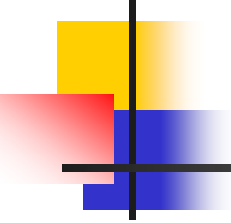
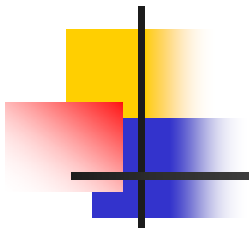


图 8.8.2 独立分频器的键控法FSK调制





键控法也常常利用数字基带信号去控制可变分频器的分频比来改变输出载波频率，从而实现 FSK调制。图8.8.3是一个11 / 13可控分频器原理图。当数字基带信号为“1”时，第四级双稳态电路输出的反馈脉冲被加到第一级和第二级双稳态电路上，此时分频比为13；当基带信号为“0”时，第四级双稳态电路输出的反馈脉冲被加到第一级和第三级双稳态电路上，分频比变为11。



---

由于分频比改变，使输出信号频率变化，从而实现 FSK调制。采用可变分频器产生的FSK信号相位通常是连续的，因此在基带信息变化时，FSK信号会出现过渡频率。为减小过渡时间，可变分频器应工作于较高的频率，而在可变分频器后再插入固定分频器，使输出频率满足FSK信号要求的频率。

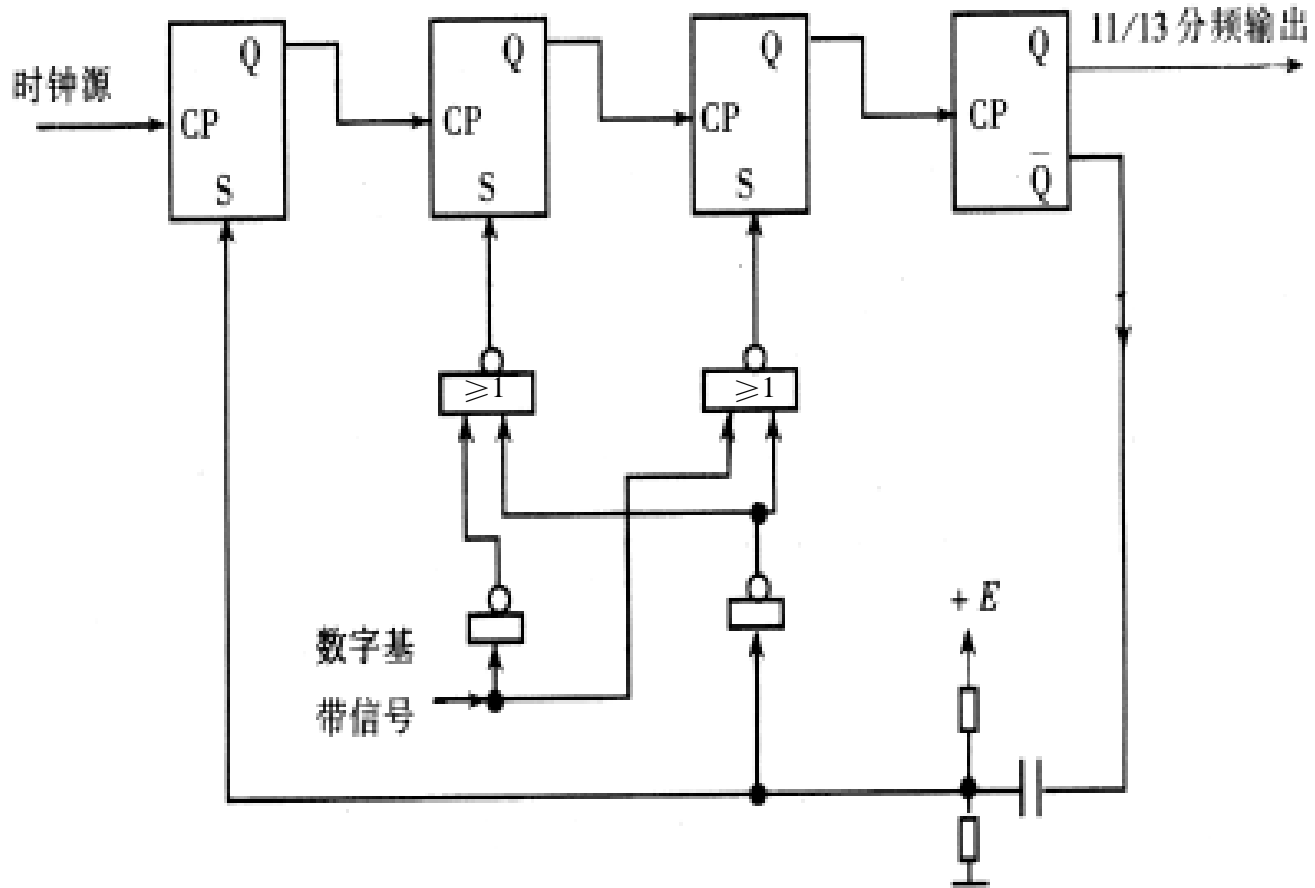
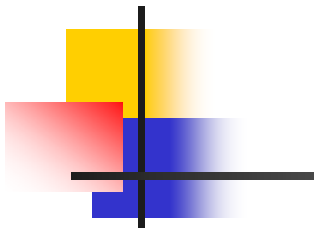
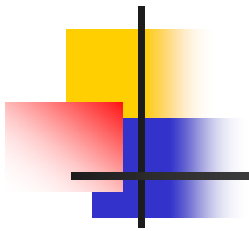


图8.8.3 利用可变分频器实现FSK调制



---

FSK信号有相位不连续和相位连续两种情况，相位不连续的 FSK信号可以视为两个频率分别为和的 ASK信号的叠加，如图8.8.4所示。

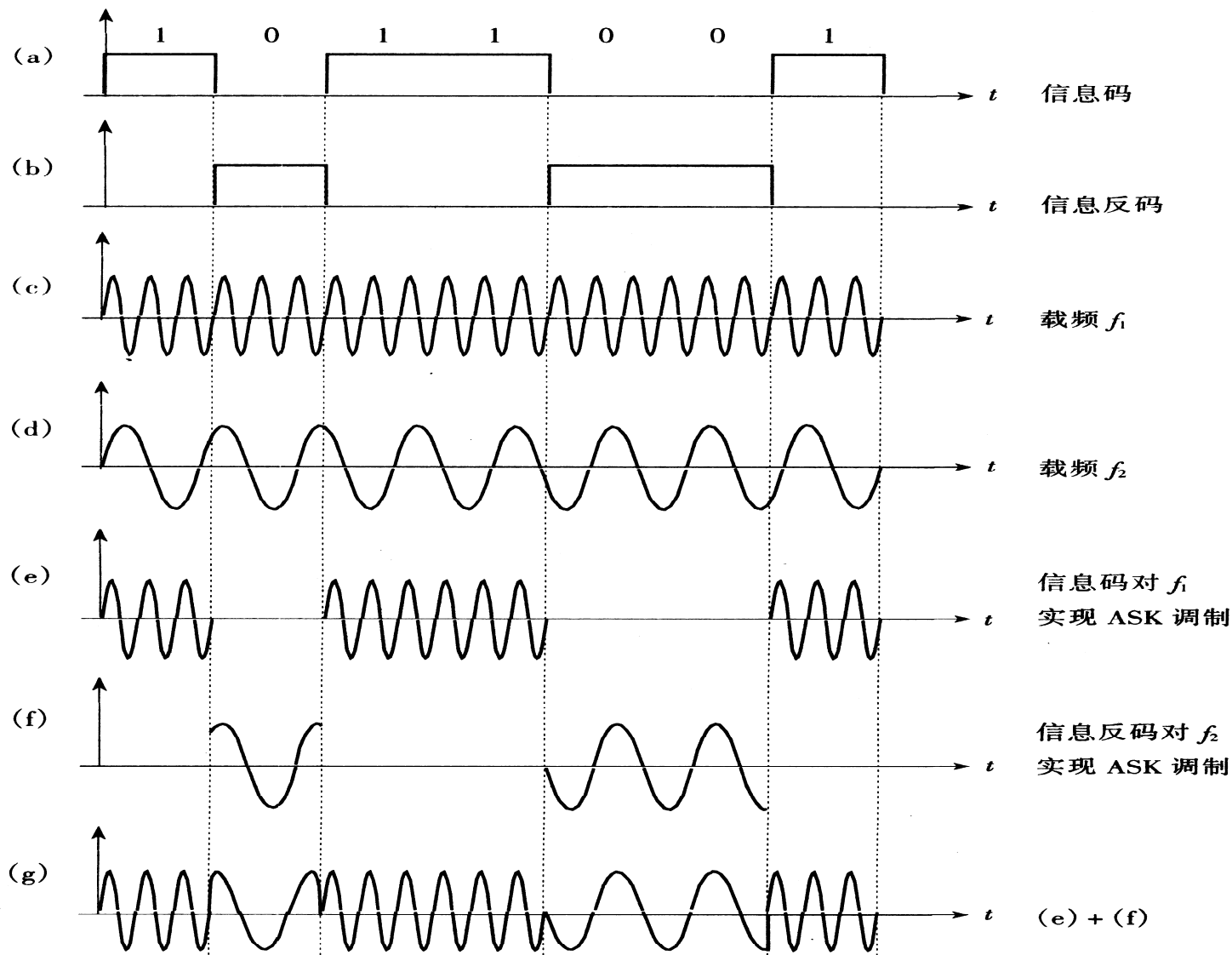


图8.8.4 FSK信号为两个不同频率的ASK信号叠加



## 8.8.2 用门电路实现的FSK频率键控调制电路

---

用门电路实现的FSK键控调制电路如图8.8.5所示。用XFG3信号发生器作为基带信号。XFG1作为时钟源1，产生频率为 $f_1$ 的信号。XFG2作为时钟源2，产生频率为 $f_2$ 的信号。与门74LS08D的U1A和U1B作为键控开关。输入波形与输出波形如图8.8.6所示。

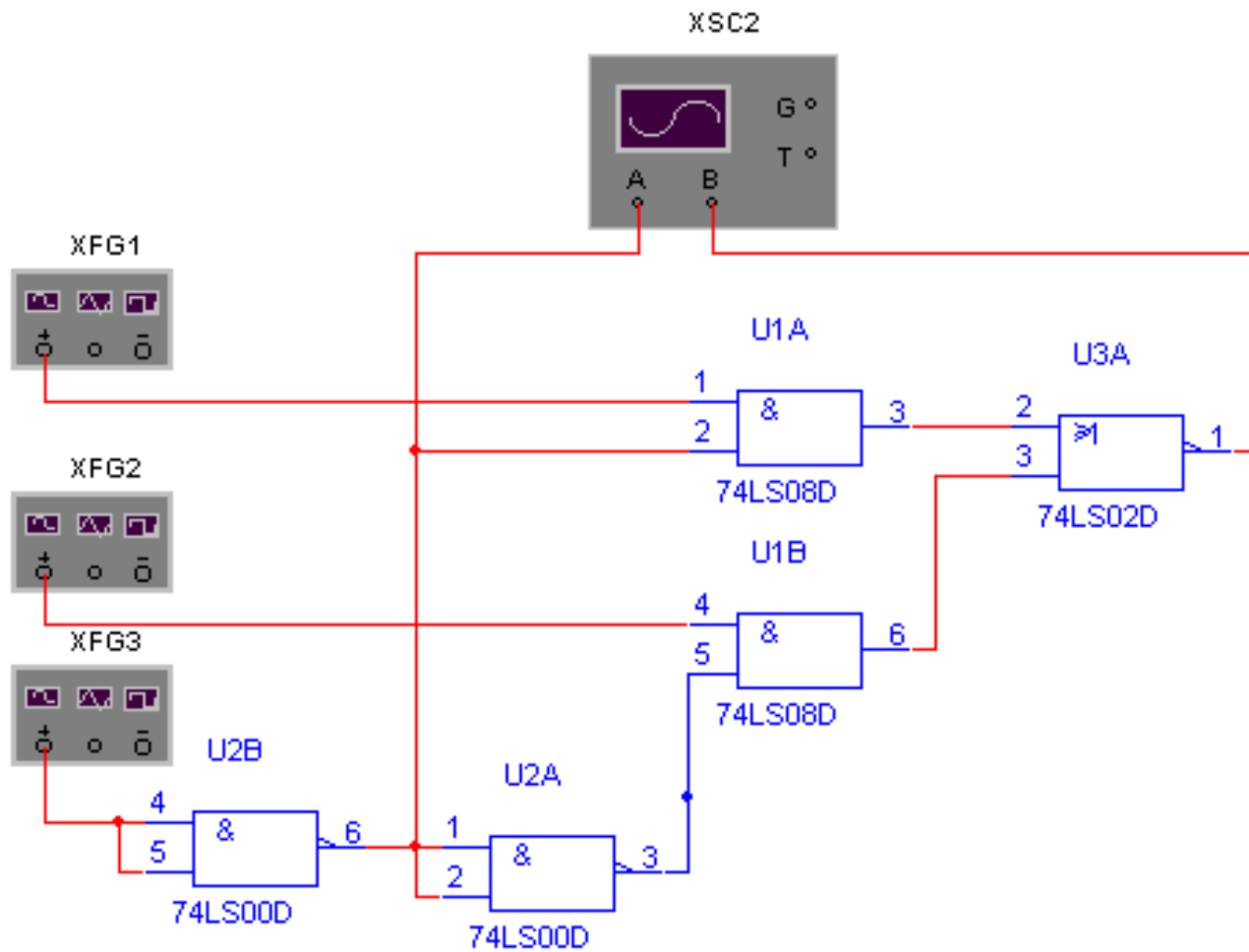


图8.8.5 用门电路实现的FSK键控调制电路

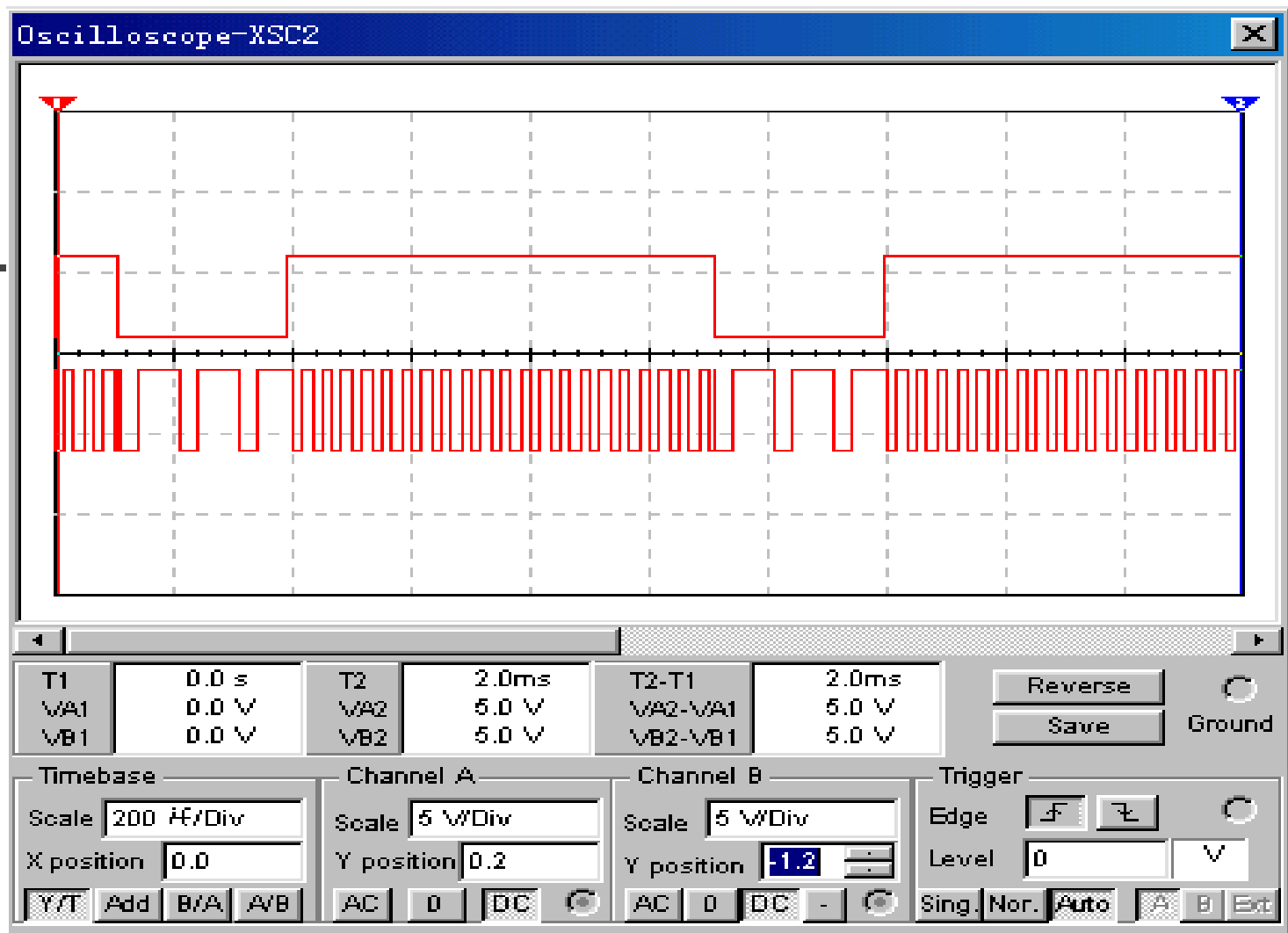


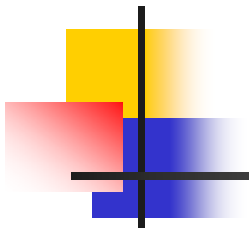
图8.8.6 FSK键控调制电路的输入波形与输出波形





---

## 8.9 PSK相位选择法调制电路



---

数字相位调制（相位键控）是用数字基带信号控制载波的相位，使载波的相位发生跳变的一种调制方式。二进制相位键控用同一个载波的二种相位来代表数字信号。由于PSK系统抗噪声性能优于ASK和FSK，而且频带利用率较高，所以，在中、高速数字通信中被广泛采用。



## 8.9.1 绝对调相和相对调相

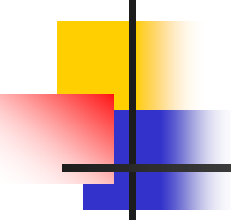
---

数字调相（相位键控）常分为：（1）绝对调相，记为 CPSK；（2）相对调相，记为 DPSK。对于二进制的绝对调相记为 2CPSK，相对调相记为 2DPSK。



## 1. 绝对调相 ( CPSK )

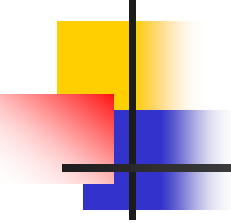
所谓绝对调相即CPSK，是利用载波的不同相位去直接传送数字信息的一种方式。对二进制CPSK，若用相位  $\pi$  代表“0”码，相位0代表“1”码，即规定数字基带信号为“0”码时，已调信号相对于载波的相位为  $\pi$ ；数字基带信号为“1”码时，已调信号相对于载波相位为同相。按此规定，2CPS K信号的数学表示式为



---

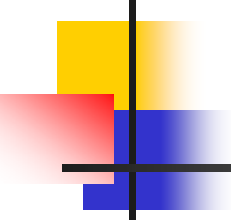
$$u_{2cpsk} = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t + \theta_0) & \text{为“1”码} \\ A \cos(2\pi f_c t + \theta_0 + \pi) & \text{为“0”码} \end{cases}$$

(8.9.1)



---

式中  $\theta_0$  为载波的初相位。受控载波在  $0$ 、 $\pi$  两个相位上变化例如图 8.9.1 所示。其中，(a) 为数字基带信号  $S(t)$ （也称绝对码），(b) 为载波，(c) 为 2CPSK 绝对调相波形，(d) 为双极性数字基带信号。

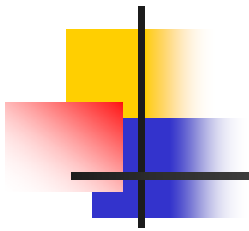


---

从图8.9.1可见， 2CPSK信号可以看成是双极性基带信号乘以载波而产生的，即：

$$u_{2cpsk}(t) = u(t)A \cos(2\pi f_c t + \theta_0) \quad (8.9.2)$$

式中为双极性基带信号，其波形如图8.9.1 (d)所示。



关于CPSK波形的特点，必须强调的是：  
CPSK波形相位是相对于载波相位而言的。因此  
画 CPSK波形时，必须先把载波画好，然后根据  
相位的规定，才能画出它的波形。



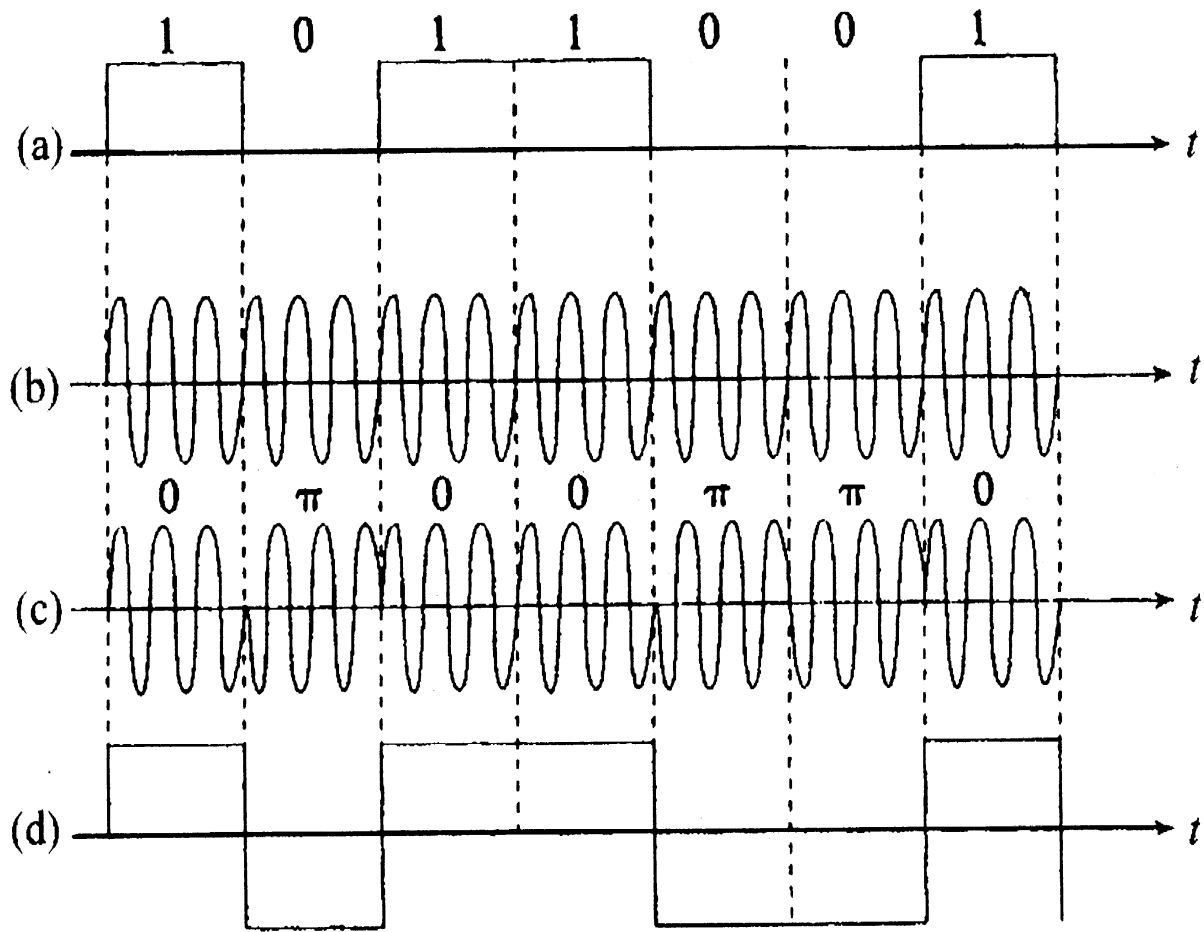
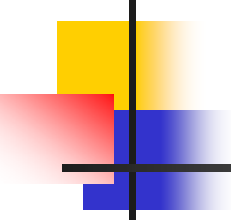


图8.9.1 2CPSK信号波形图



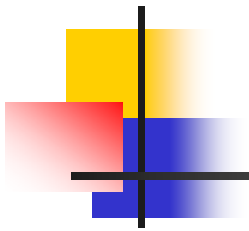
## 2. 相对调相 (DPSK)

相对调相（相对移相），即DPSK，也称为差分调相，这种方式用载波相位的相对变化来传送数字信号，即利用前后码之间载波相位的变化表示数字基带信号的。所谓相位变化又有向量差和相位差两种定义方法。向量差是指前一码

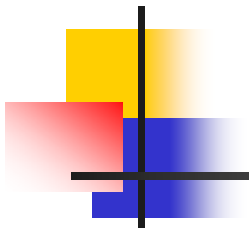


---

元的终相位与本码元初相位比较，是否发生相位变化。而相位差是指前后两码元的初相位是否发生了变化，图7.4.2给出了两种定义的DPSK的波形。

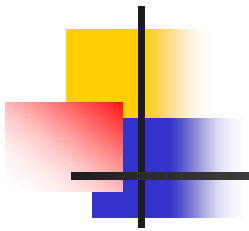


从图8.9.2可以看出，对同一个基带信号，按向量差和相位差画出的DPSK波形是不同的。例如在相位差法中，在绝对码出现“1”码时，DPSK的载波初相位即前后两码元的初相位相对改变 $\pi$ 。出现“0”码时，DPSK的载波相位即前后两码元的初相位相对不变。在向量差法中，

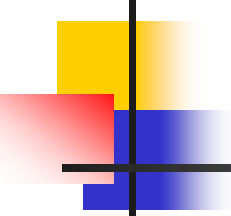


---

在绝对码出现“1”码时，DPSK的载波初相位相对前一码元的终相位改变 $\pi$ 。出现“0”码时，DPSK的载波初相位相对前一码元的终相位连续不变。如图8.9.2中所示。在画DPSK波形时，第一个码元波形的相位可任意假设。



由以上分析可以看出，绝对移相波形规律比较简单，而相对移相波形规律比较复杂。绝对移相是用已调载波的不同相位来代表基带信号的，在解调时，必须要先恢复载波，然后把载波与CPSK信号进行比较，才能恢复基带信号。由于接收端恢复载波常常要采用二分频电路，它存在相位模糊，即用二分频电路恢复的载波



---

有时与发送载波同相，有时反相，而且还会出现随机跳变，这样就给绝对移相信号的解调带来困难。而相对移相，基带信号是由相邻两码元相位的变化来表示，它与载波相位无直接关系，即使采用同步解调，也不存在相位模糊问题，因此在实际设备中，相对移相得到了广泛运用。

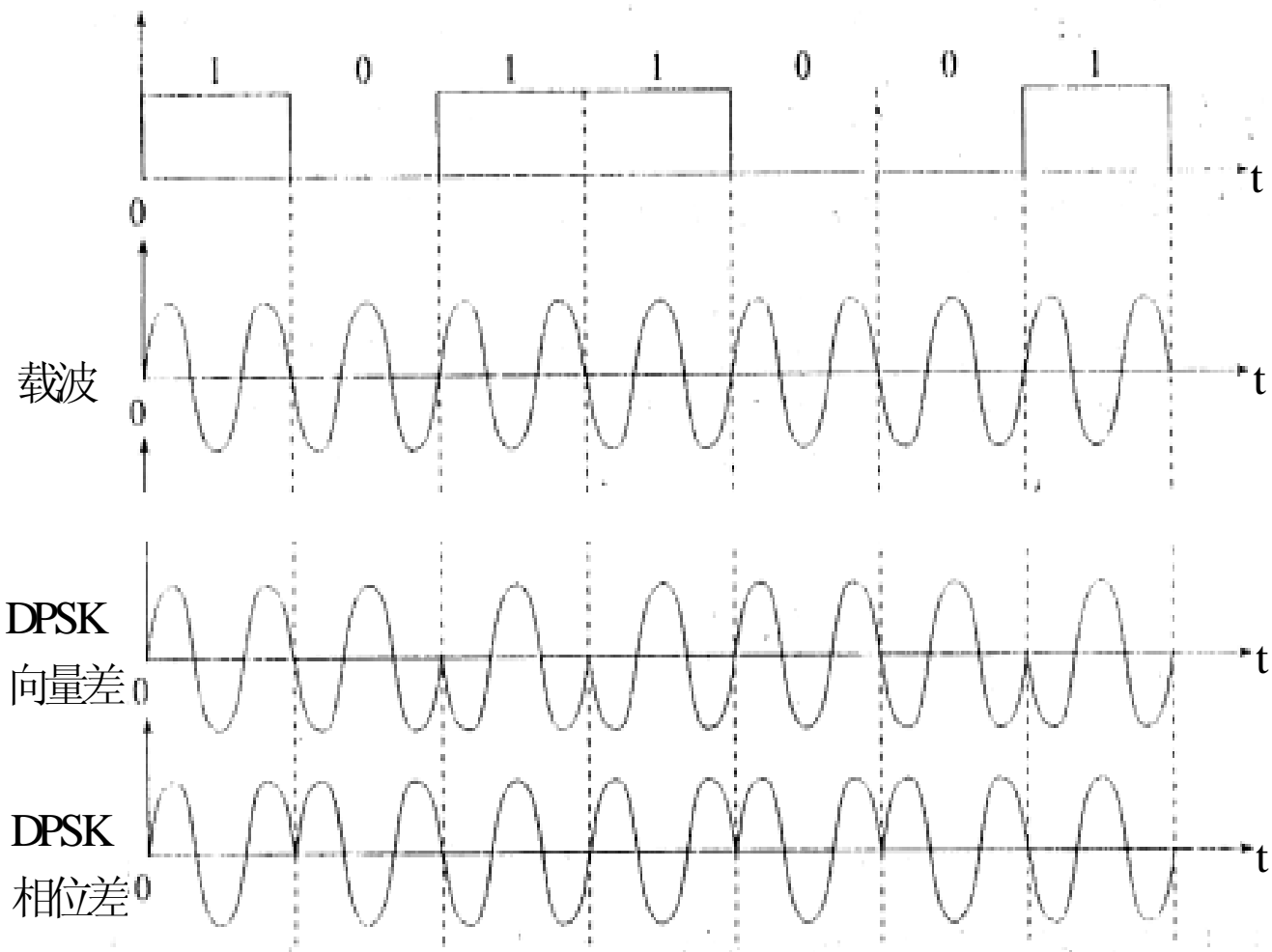
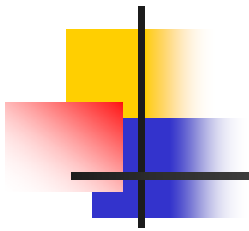


图8.9.2 两种定义的DPSK波形



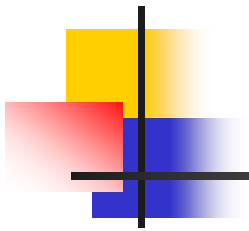


### 3. CPSK和 DPSK信号的产生

DPSK信号应用较多，但由于它的调制规律比较复杂，难以直接产生，目前DPSK信号的产生较多地采用码变换加 CPSK调制而获得。

CPSK调制有直接调相法和相位选择法两种方法。

直接调相法的典型电路是采用一个环形调制器。



相位选择法电路如图8.9.3所示，设振荡器产生的载波信号为 $c(t)$ ，它加到与门1，同时该振荡信号经倒相器变为 $\bar{c}(t)$ ，加到与门2，基带信号和它的倒相信号分别作为与门1及与门2的选通信号。基带信号为1码时，与门1选通，输出为 $c(t)$ ；基带信号为“0”码时，与门2选通，输出为 $\bar{c}(t)$ ，即可得到CPSK信号。

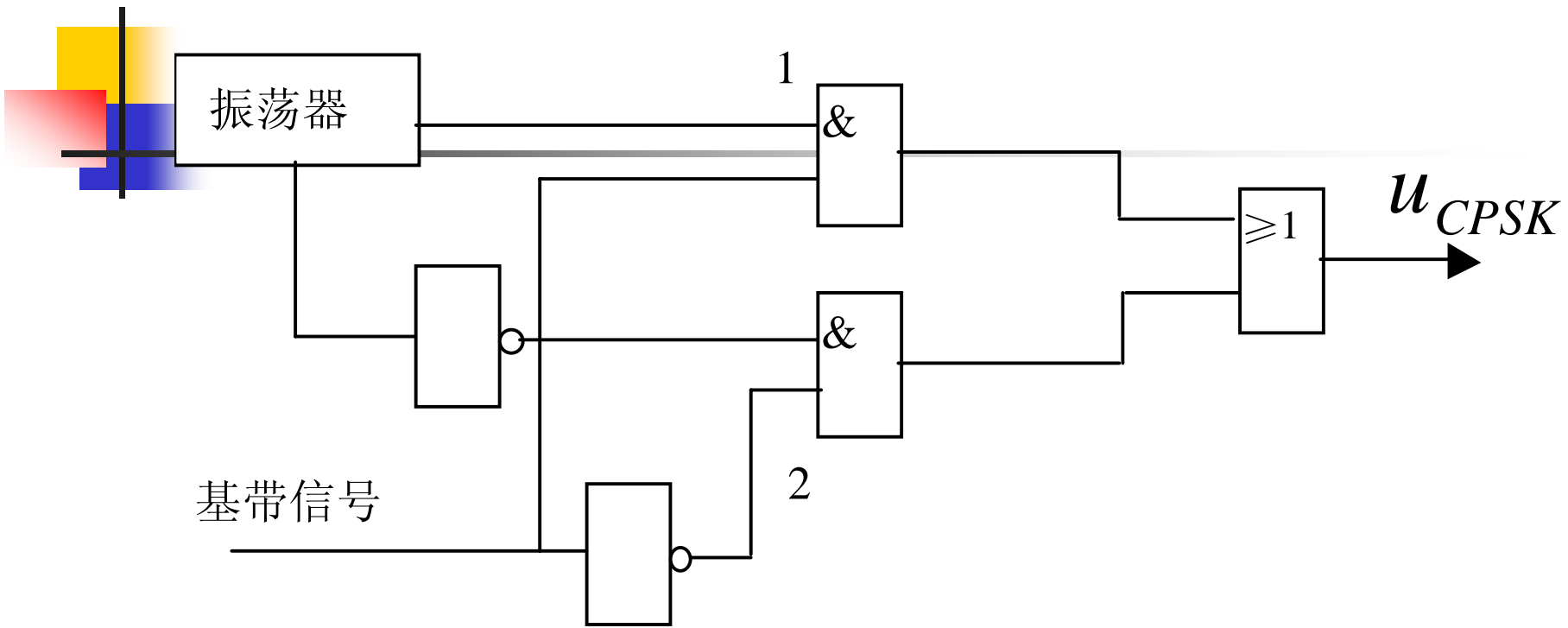
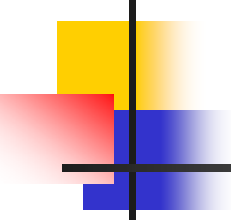


图8.9.3 相位选择法电路



### (3) 相对移相信号 (DPSK) 的产生

相对移相信号 (DPSK) 是通过码变换加 CPS K调制产生, 其产生原理如图8.9.4所示。这种方法是把原基带信号经过绝对码—相对码变换后, 用相对码进行 CPS K调制, 其输出便是 DP S K信号。

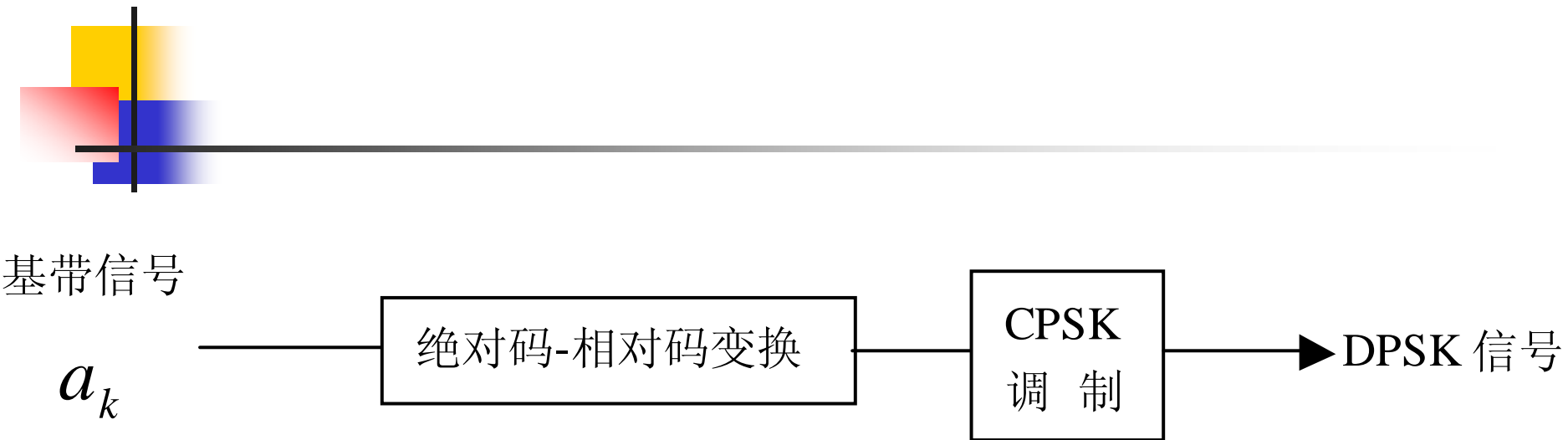
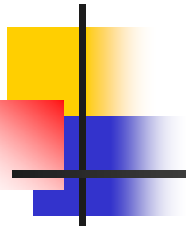


图8.9.4 相对移相信号产生方框图



若假设绝对调相按“1”码同相，“0”码 $\pi$ 相的规律调制；而相对调相按“1”码相位变化（移相 $\pi$ ），“0”码相位不变规律调制。按此规定，绝对码记为aK，相对码记为bK，绝对码—相对码变换电路如图8.9.5所示，

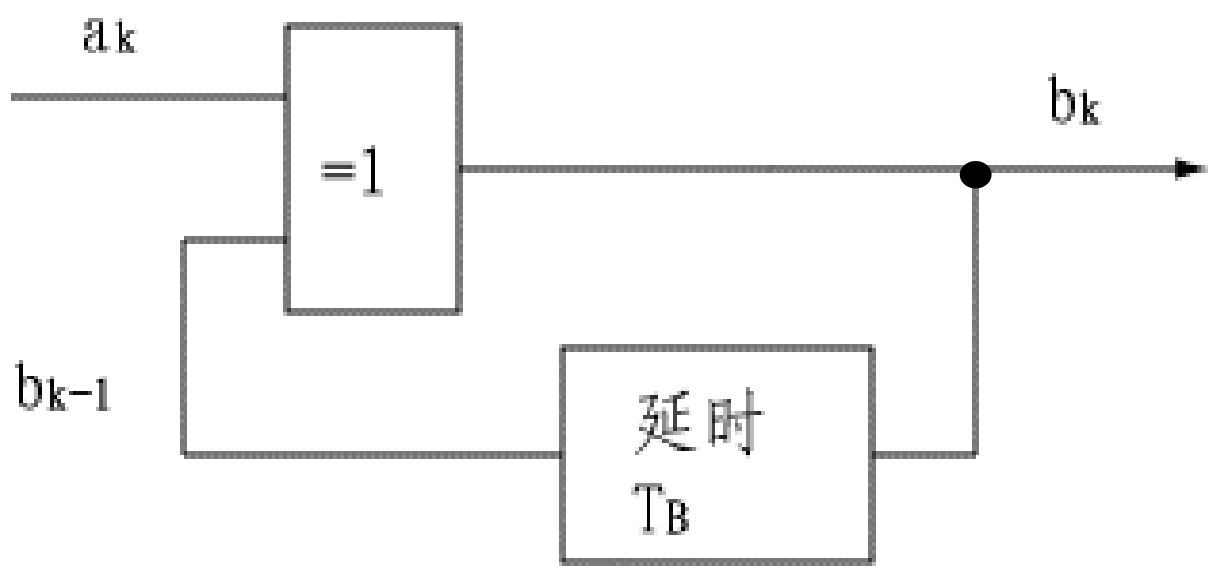
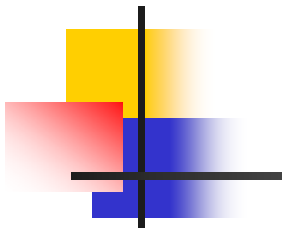


图8.9.5 绝对码一相对码变换电路

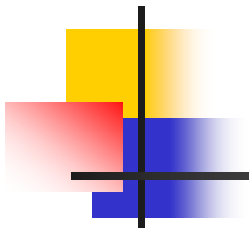


绝对码—相对码之间的关系为

$$b_k = a_k \oplus b_{k-1}$$

(8.9.3) 按图8.9.5所示的电路画出相对码，然后再按绝对调相的规定画出调相波，并把此调相波与按相对调相定义直接画出的调相波比较，如图8.9.6所示。





---

为作图方便，这里设  $T_B = T_C$ ， $T_B$ 是码元宽度， $T_C$ 是载波周期。由图可见，按相对码进行CPSK调制与按原基带信号（即绝对码）进行DPSK调制，两者波形完全相同，因此相对调相可以用绝对码一相对码变换加上绝对调相来实现。

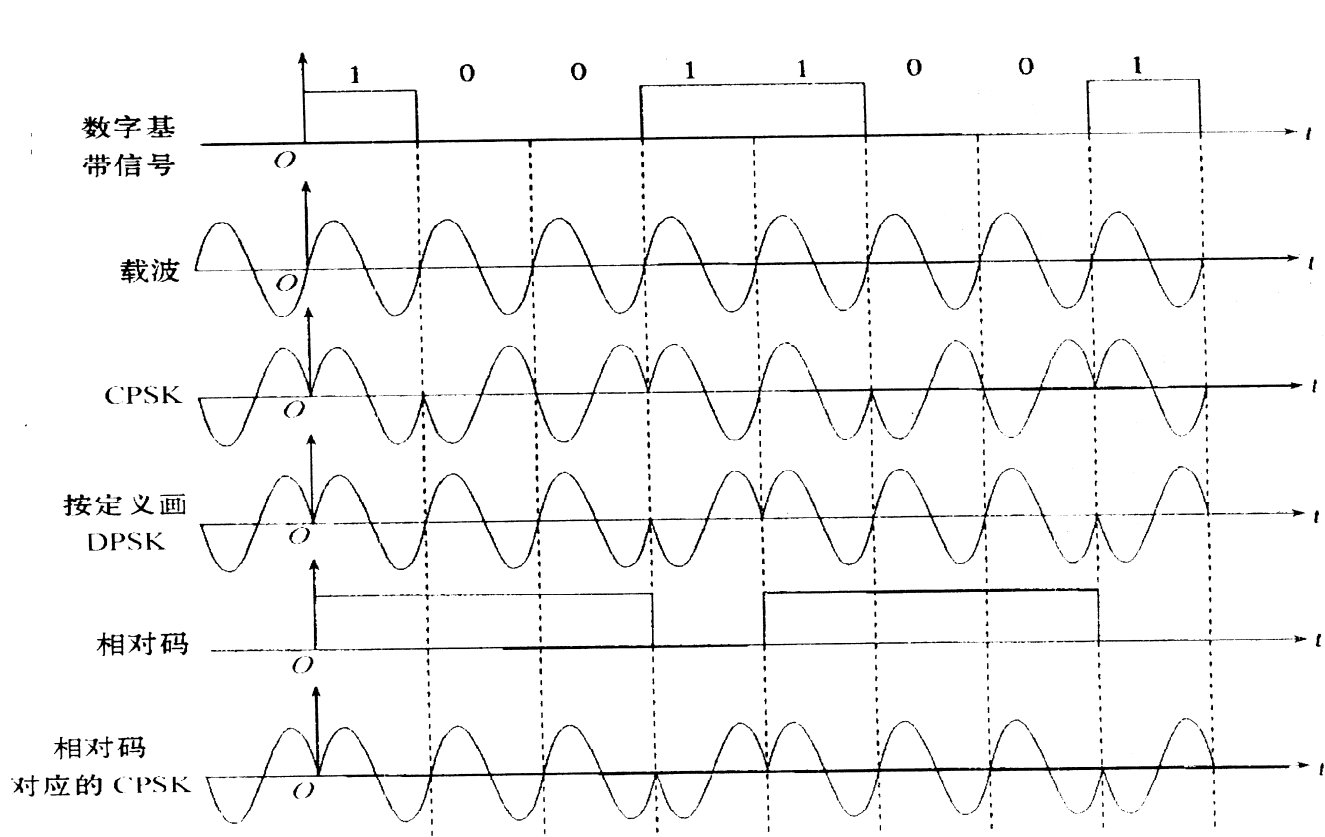


图8.9.6 按相对码进行CPSK调制与按绝对码进行DPSK调制的波形



## 8.9.2 用门电路实现的PSK 相位选择法调制电路

用门电路实现的PSK相位选择法调制电路如图8.9.7所示。用XFG2信号发生器作为基带信号。XFG1作为振荡器信号源，产生频率为 $f_1$ 的信号。与门74LS08D的U1A和U1B作为键控开关。输入波形与输出波形如图8.9.8所示。

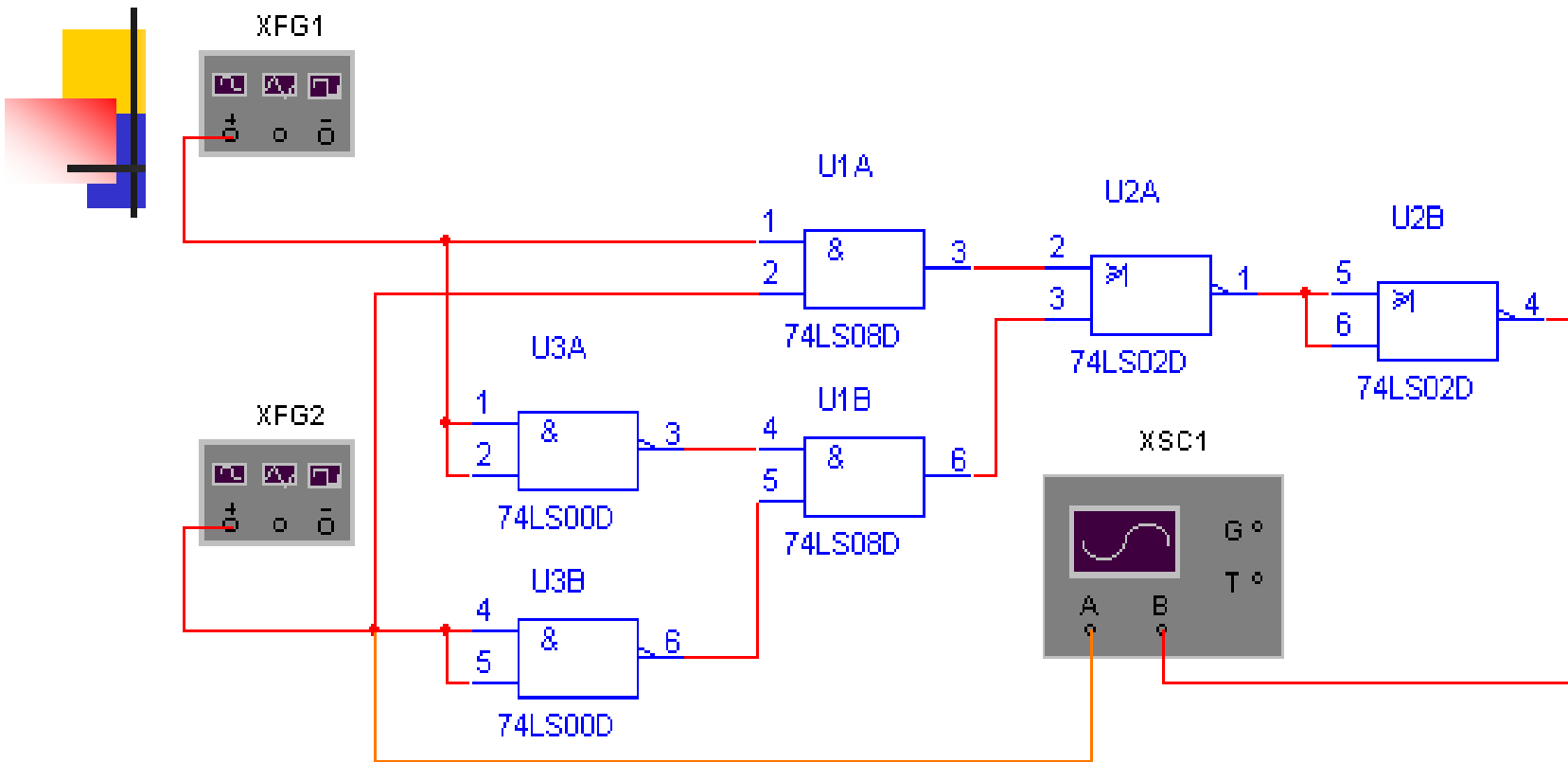


图8..9.7 用门电路实现的PSK相位选择法调制电路

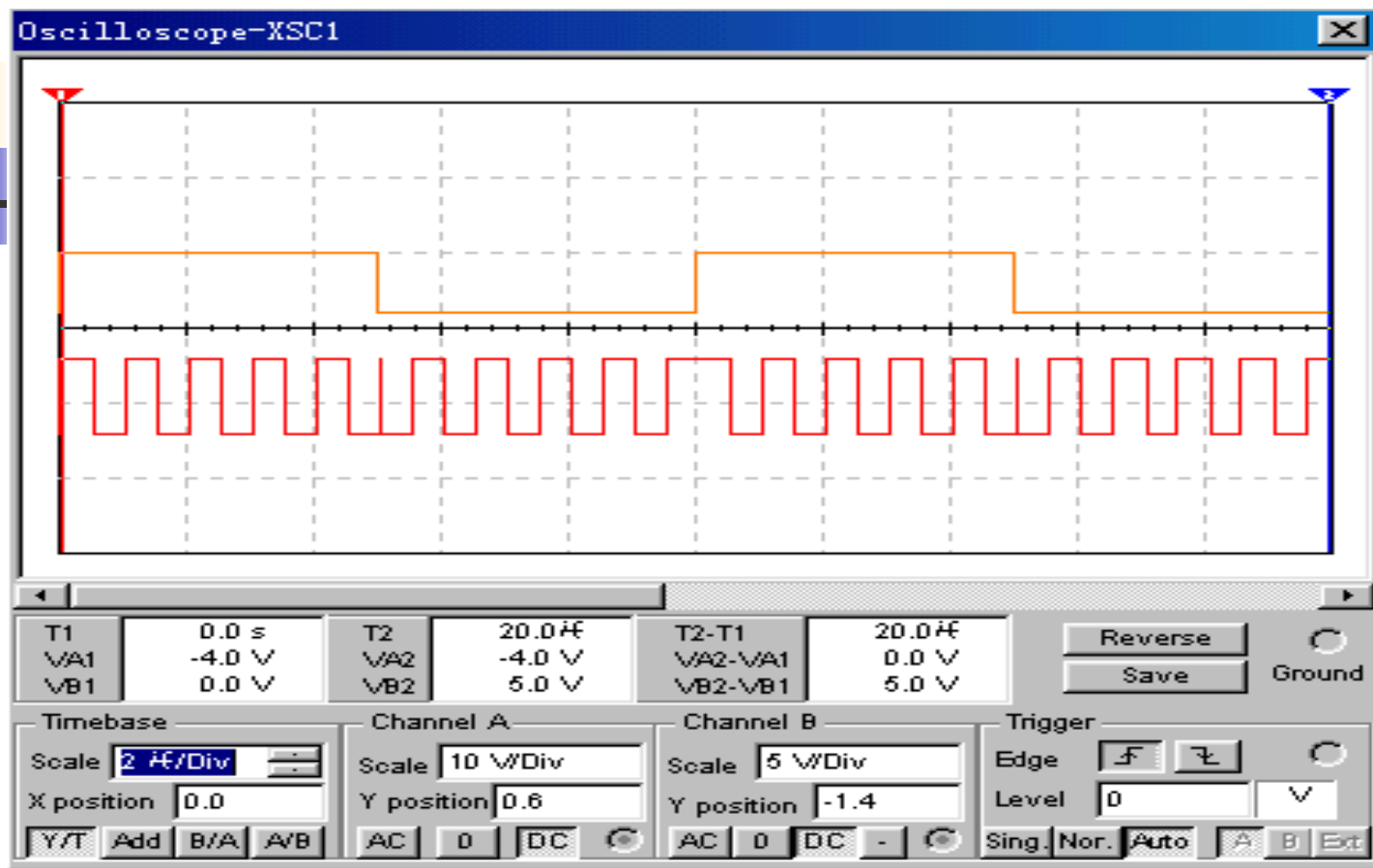


图8.9.8 PSK相位选择法调制电路输入波形与输出波形



---

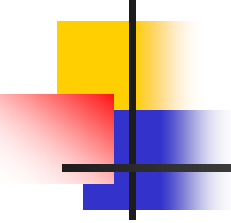
## 8. 10竞争冒险现象分析与消除



## 8.10.1 竞争冒险现象

---

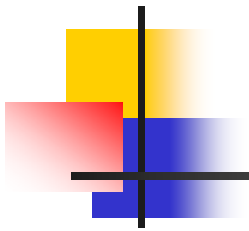
在由门电路组成的组合逻辑电路中，输入信号的变化传输到电路各级门电路时，由于门电路存在传输延时时间和信号状态变化的速度不一致等原因，使信号的变化出现快慢的差异，这种先后所形成的时差称为竞争。竞争的结果是使输出端可能出现错误信号，这种现象叫做冒险。有竞争不一定有冒险，但有冒险一定存在竞争。



---

利用卡诺图可以判断组合逻辑电路是否可能存在竞争冒险现象，具体做法如下：根据逻辑函数的表达式，作出其卡诺图，若卡诺图中填1的格所形成的卡诺图有两个相邻的圈相切，则该电路就存在竞争冒险的可能性。





---

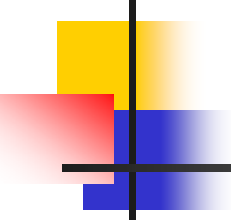
组合逻辑电路存在竞争就有可能产生冒险，造成输出的错误动作。因此，在设计组合逻辑电路时必须分析竞争冒险现象的产生的原因，解决电路设计中的问题，杜绝竞争冒险现象的产生。常用的消除竞争冒险的方法有：加取样脉冲，消除竞争冒险；修改逻辑设计，增加冗余项；在输出端接滤波电容；加封锁脉冲等。



## 8.10.2 竞争冒险现象的仿真

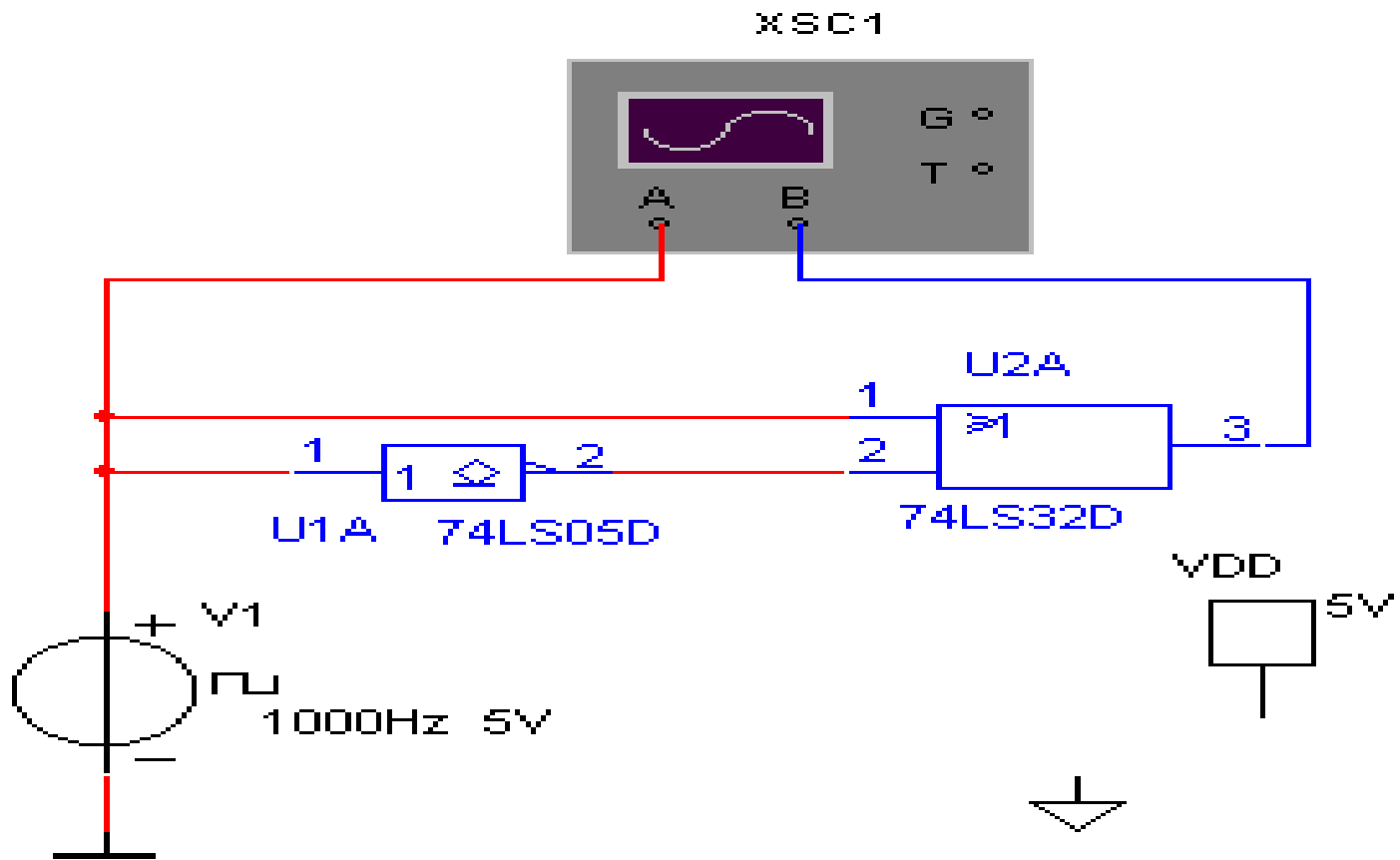
---

(1) 竞争冒险现象的仿真电路例1如图8.10.1(a)所示，该电路的逻辑功能为，从逻辑表达式来看，无论输入信号如何变化，输出应保存不变，恒为1（高电平）。

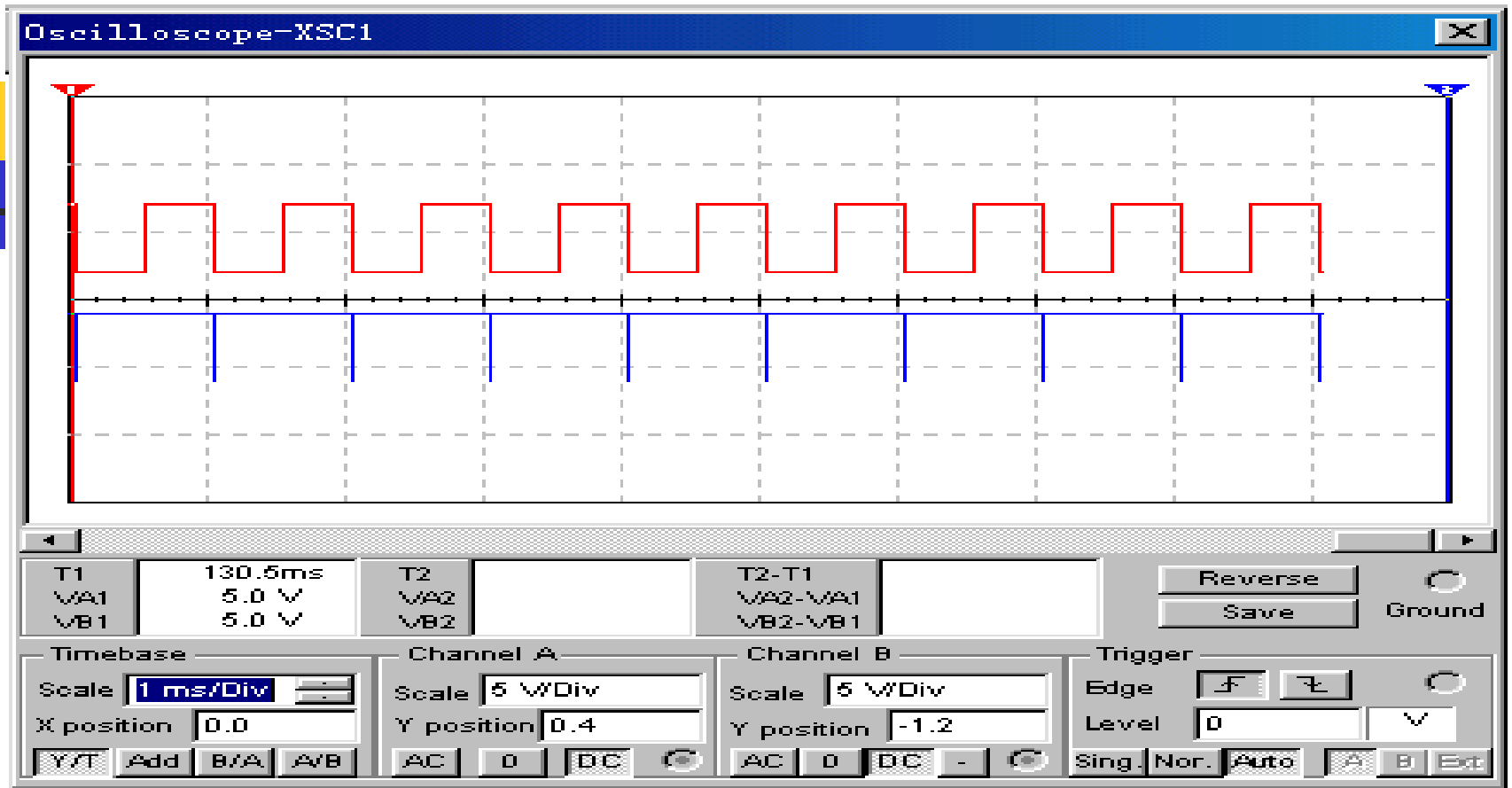


---

但实际情况并非如此，从仿真的结果可以看到，由于74LS05D非门电路的延时，在输入信号的下降沿，电路输出端有一个负的窄脉冲输出，这种现象称为0（低电平）型冒险。



(a) 竞争冒险现象的仿真电路例1



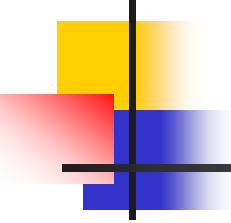
(b) 0（低电平）型冒险输出

图8.10.1 竞争冒险现象的仿真电路与输出波形



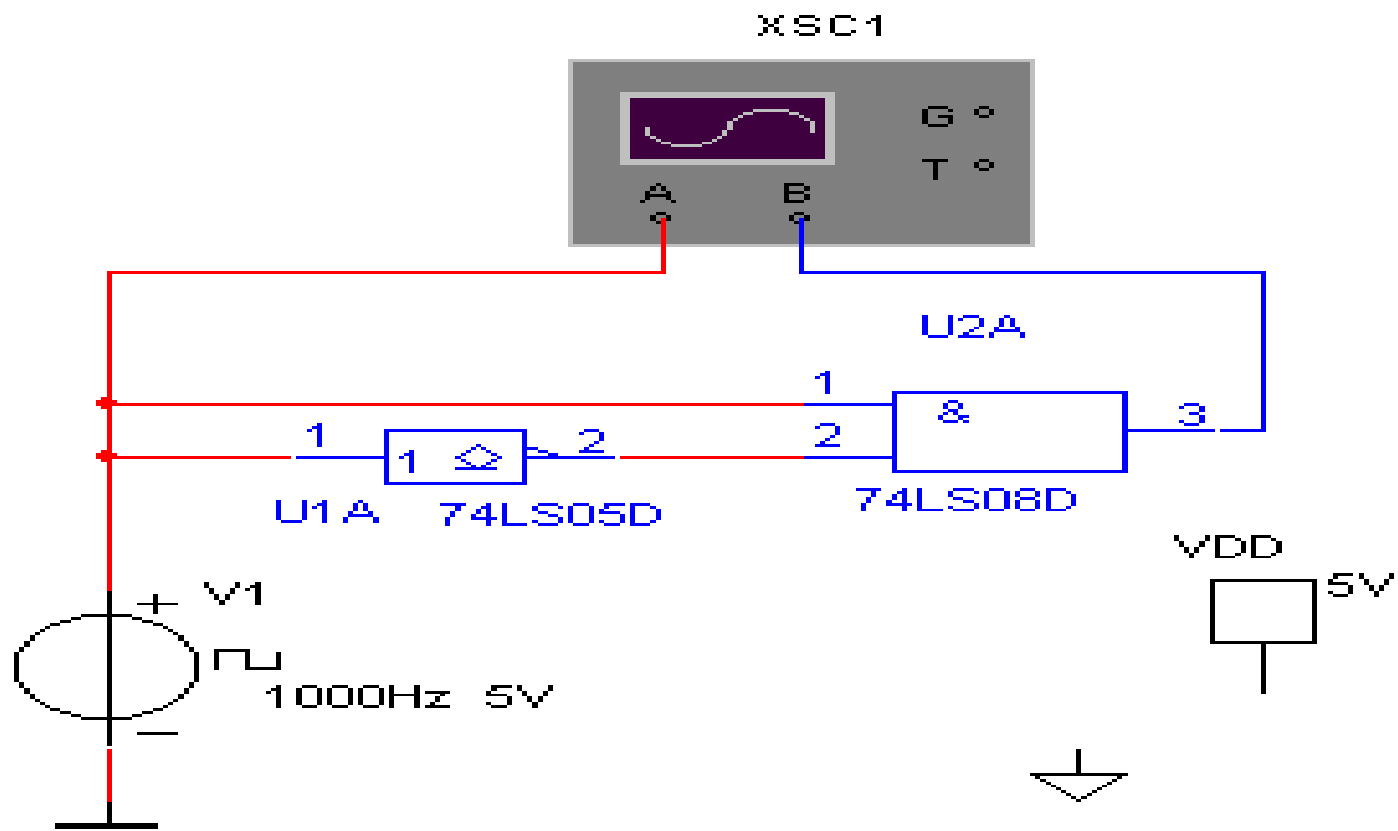
## 2. 竞争冒险现象的仿真电路例

竞争冒险现象的仿真电路例2如图8.10.2 (a)所示, 该电路的逻辑功能为, 从逻辑表达式来看, 无论输入信号如何变化, 输出应保存不变, 恒为0 (低电平)。但实际情况并非如此, 从仿真的结果可以看到, 由于74LS05D



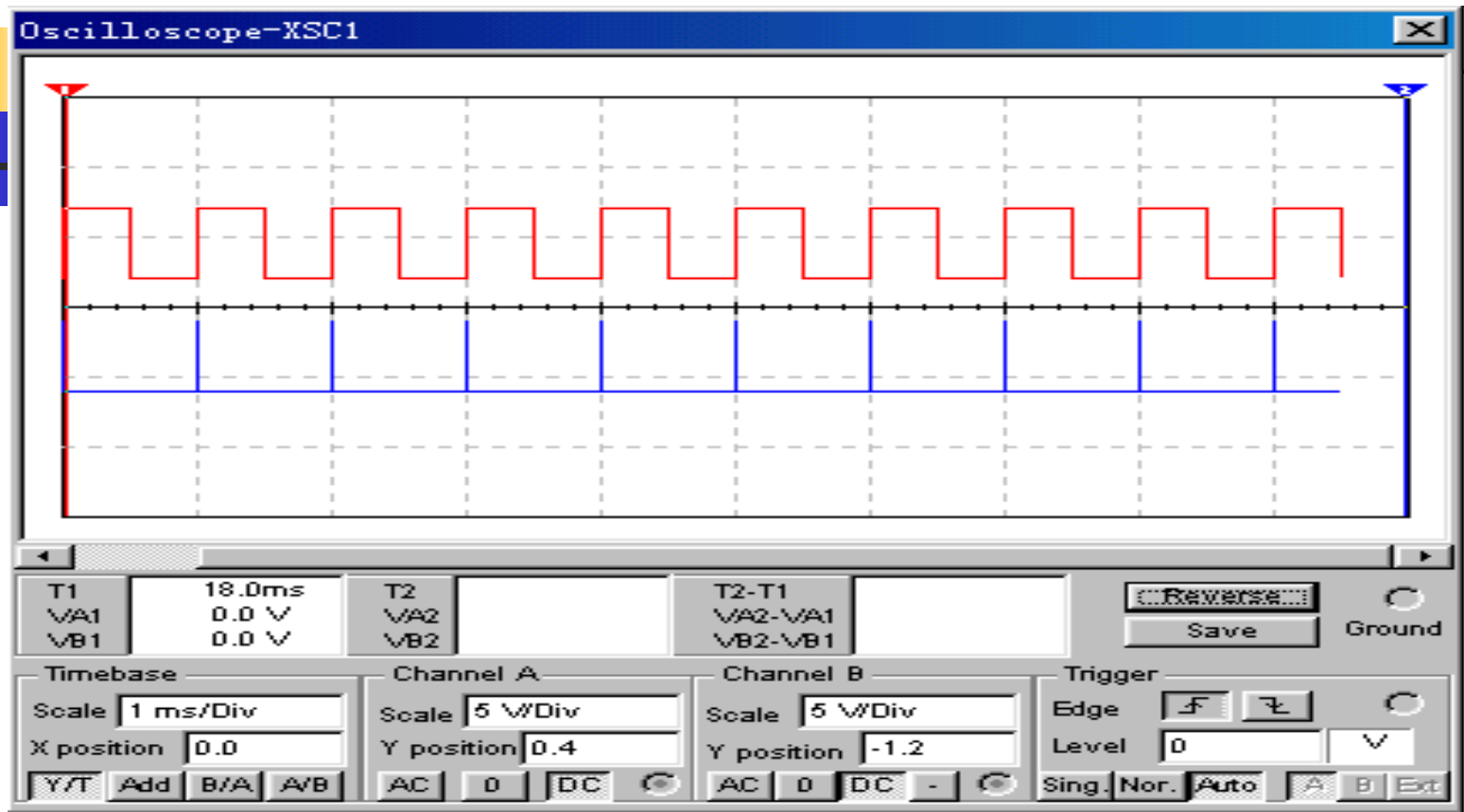
---

非门电路的延时，在输入信号的上升沿，电路输出端有一个正的窄脉冲输出，这种现象称为1（高电平）型冒险。



(a) 竞争冒险现象的仿真电路例2





(b) 1 (高电平)型冒险输出

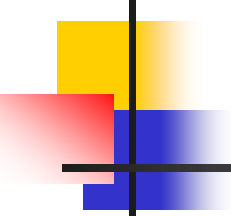
图8.10.2 竞争冒险现象的仿真电路与输出波形



### 3. 竞争冒险现象的仿真电路例3

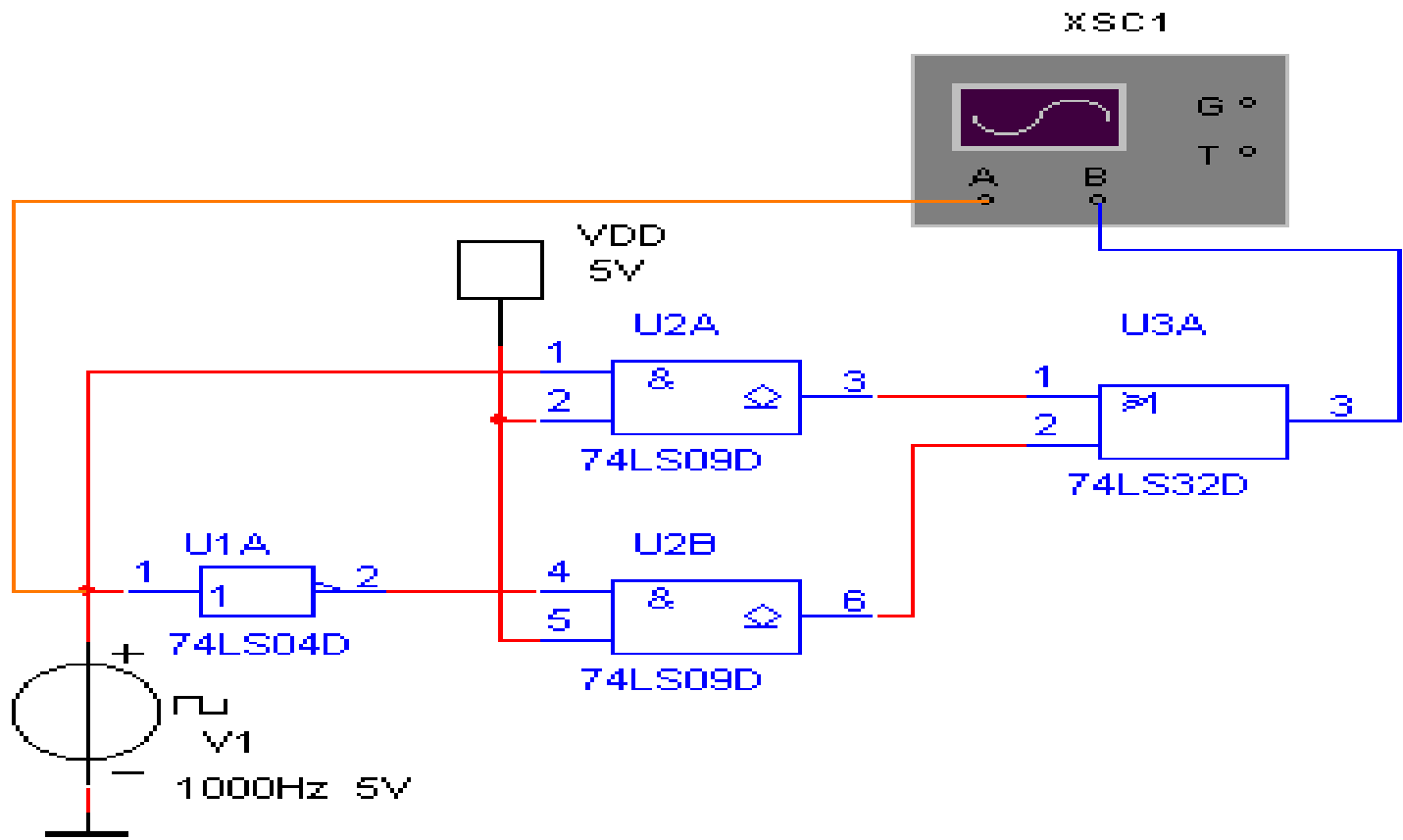
竞争冒险现象的仿真电路例3如图8.10.3

(a) 所示，该电路的逻辑功能为，已知 $B=C=1$ ，所以。从逻辑表达式来看，无论输入信号如何变化，输出应保存不变，恒为1（高电平）。但实际情况并非如此，从仿真的结果可以看到，

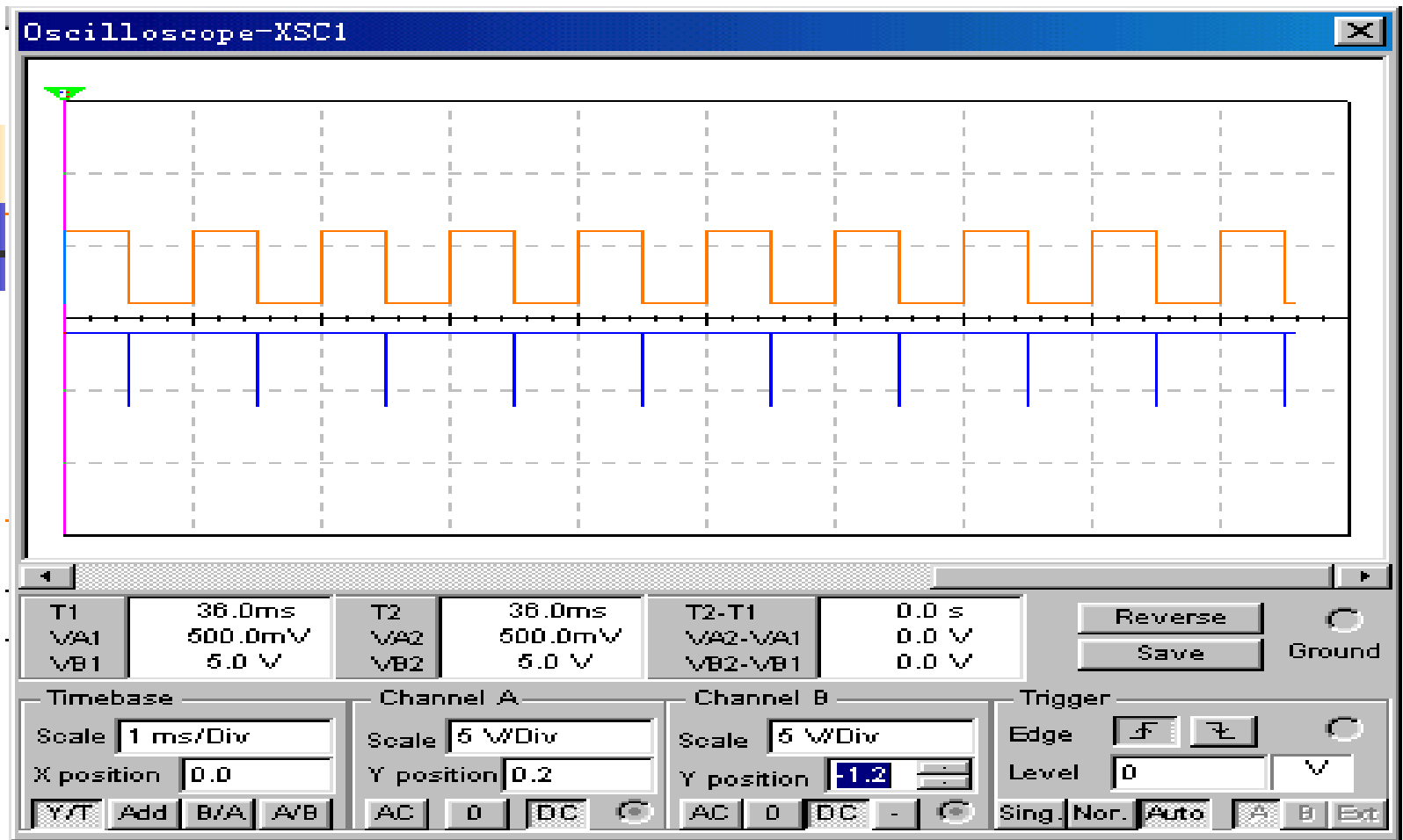


---

由于74LS09D与门电路的延时，在输入信号的下降沿，电路输出端有一个负的窄脉冲输出，这种现象称为0（低电平）型冒险。



(a) 竞争冒险现象的仿真电路例3



(b) 0 (低电平) 型冒险输出

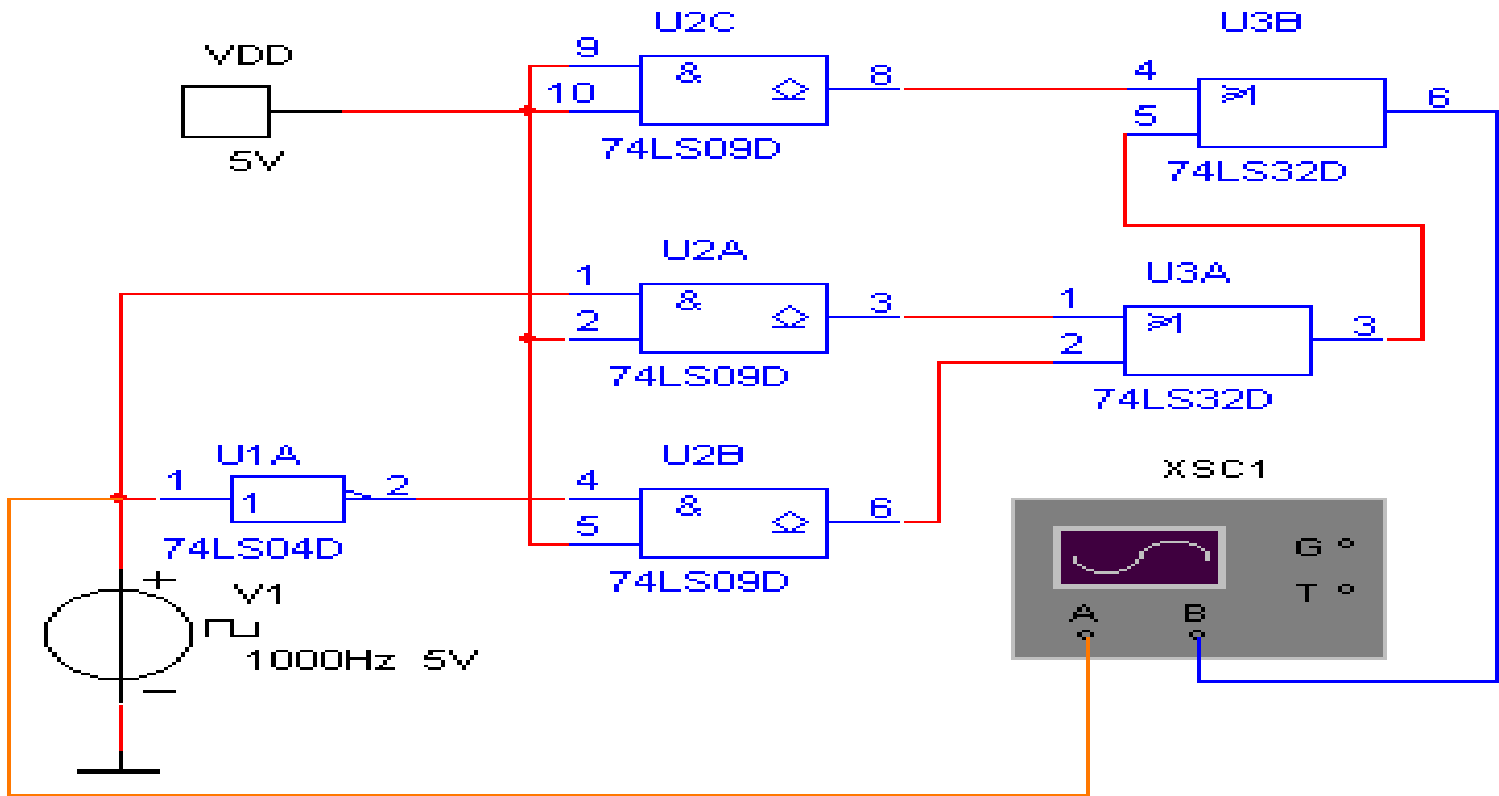
图8.10.2 竞争冒险现象的仿真电路与输出波形



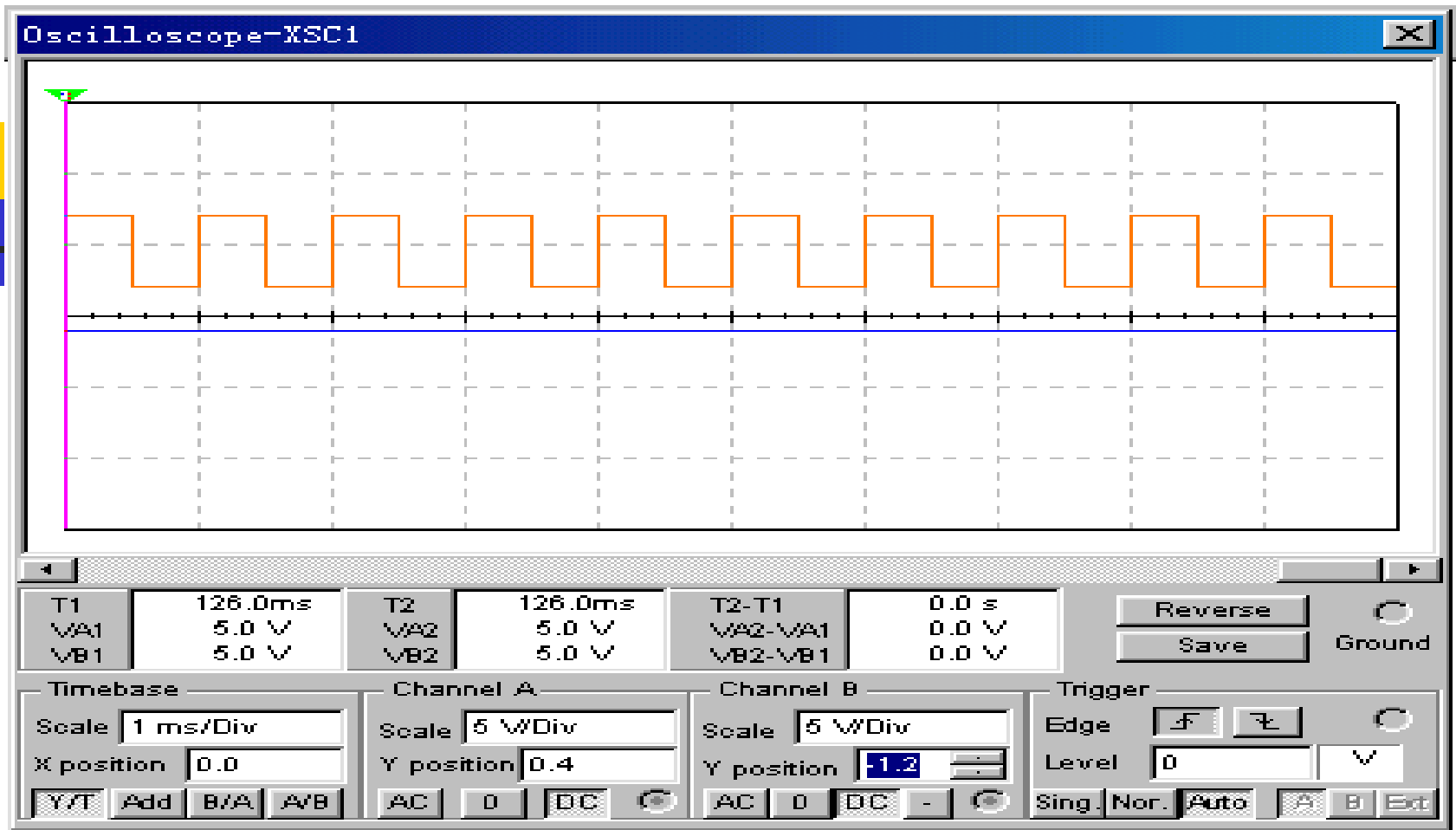
### 8.10.3 竞争冒险现象的消除

---

为了消除图8.10.3 (a) 所示电路的竞争冒险现象，修改逻辑设计，增加冗余项BC，该电路的逻辑功能为 $A + BC$ ，修改后的电路和仿真结果如图8.10.4所示，输出保持不变，恒为1（高电平），电路的竞争冒险现象被消除。



(a) 增加冗余项BC



(b) 输出保持不变（高电平）

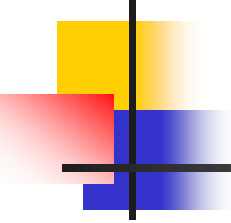
图8.10.4 消除竞争冒险现象的电路与输出波形





---

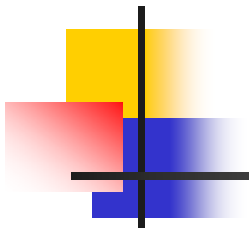
## 本章小结



---

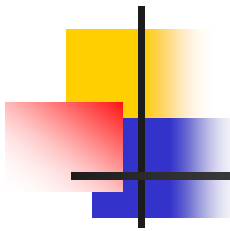
门电路是实现基本逻辑运算和复合逻辑运算的基本单元电路。本章主要内容有：

(1) 门电路的基本性质：门电路有TTL和CMOS结构。



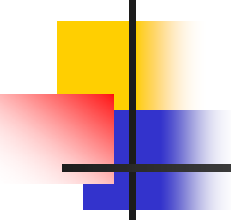
---

(2) 目前经常使用的编码器有普通编码器和优先编码器两类。在普通编码器中，任何时刻只允许输入一个编码信号。在优先编码器中，当几个输入信号同时出现时，只对其中优先权最高的一个进行编码。



(3) 译码是编码的逆过程。译码器可分为通用译码器和显示译码器两大类。前者又分为变量译码器和代码变换译码器。

(4) 数据选择器又叫“多路开关”。数据选择器在地址码（或叫选择控制）电位的控制下，从几个数据输入中选择一个并将其送到一个公共的输出端。



---

(5) 加法器是构成算术运算器的基本单元。全加器实现由被加数、加数和一个来自低位的进位数三者相加的运算。

(6) 数值比较器电路完成两个数字信号大小的比较。

(7) 介绍了ASK幅度键控调制电路工作原理与用门电路实现的ASK键控调制电路。

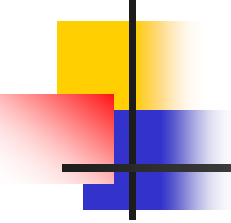


---

(8) 介绍了FSK频率键控调制电路工作原理与用门电路实现的FSK键控调制电路。

(9) 介绍了PSK相位选择法调制电路与用门电路实现的PSK相位选择法调制电路。

(10) 对竞争冒险现象进行了分析，介绍了竞争冒险的消除方法。



---

掌握门电路组成的应用电路的仿真设计与分析方法本章的重点。与门、或门、非门是基本的门电路，注意应用要求、逻辑函数与门电路之间的有机关系，解决同一个问题，可以有不同形式的逻辑关系表达式，当然组成的电路形式也可以不同。竞争冒险是电路设计应注意的一个问题。



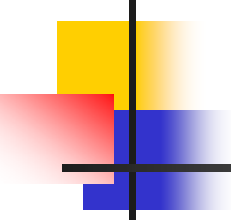
## 思考题与习题

---

8.1 在Multisim仿真平台上用逻辑分析仪直接测试字信号发生器的输出信号，要求逻辑分析仪所测出的波形颜色不同。

8.2 若已知逻辑表达式，在Multisim仿真平台上要将其直接转换成逻辑电路应选择那种仪器？选择好仪器后应点击那个键？





---

8.3 在Multisim仿真平台上选择一块7400芯片构成一个基本的RS触发器

8.4 在Multisim仿真平台上建立如图8.1所示倍频电路，输入电压频率自定，用示波器观察输入输出波形并测出其周期。

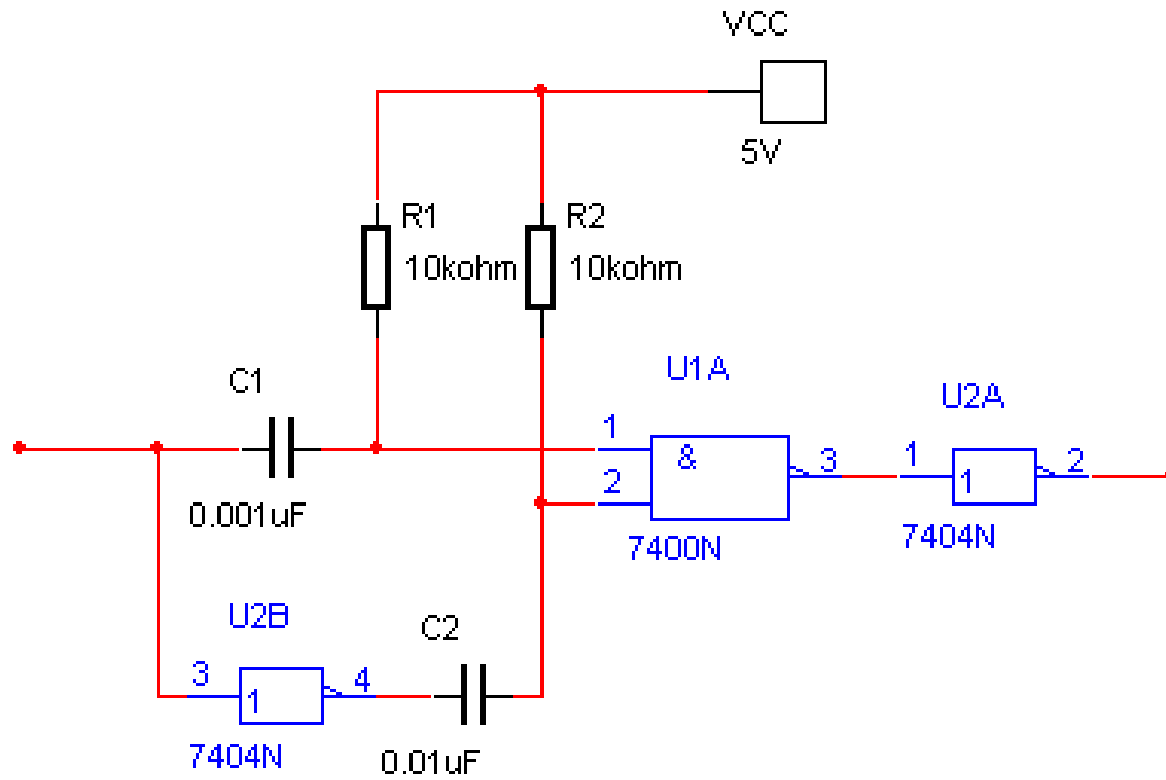
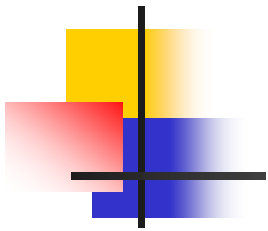
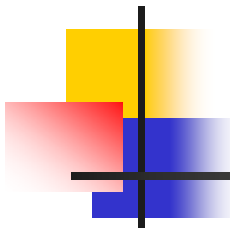


图8.1 习题8.4图




---

8.5 在Multisim仿真平台上设计一个全加器电路，用发光二极管显示其结果。（1）用与非门和异或门组成，（2）用与或非门、与非门和异或门组成，（3）自己另设计一种方案。

8.6 在Multisim仿真平台上用与非门设计一个多谐振荡器电路，要求振荡频率为10KHZ。

8.7 在Multisim仿真平台上用与非门设计一个单稳态振荡器电路，要求振荡频率为10KHZ。

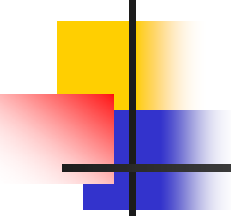


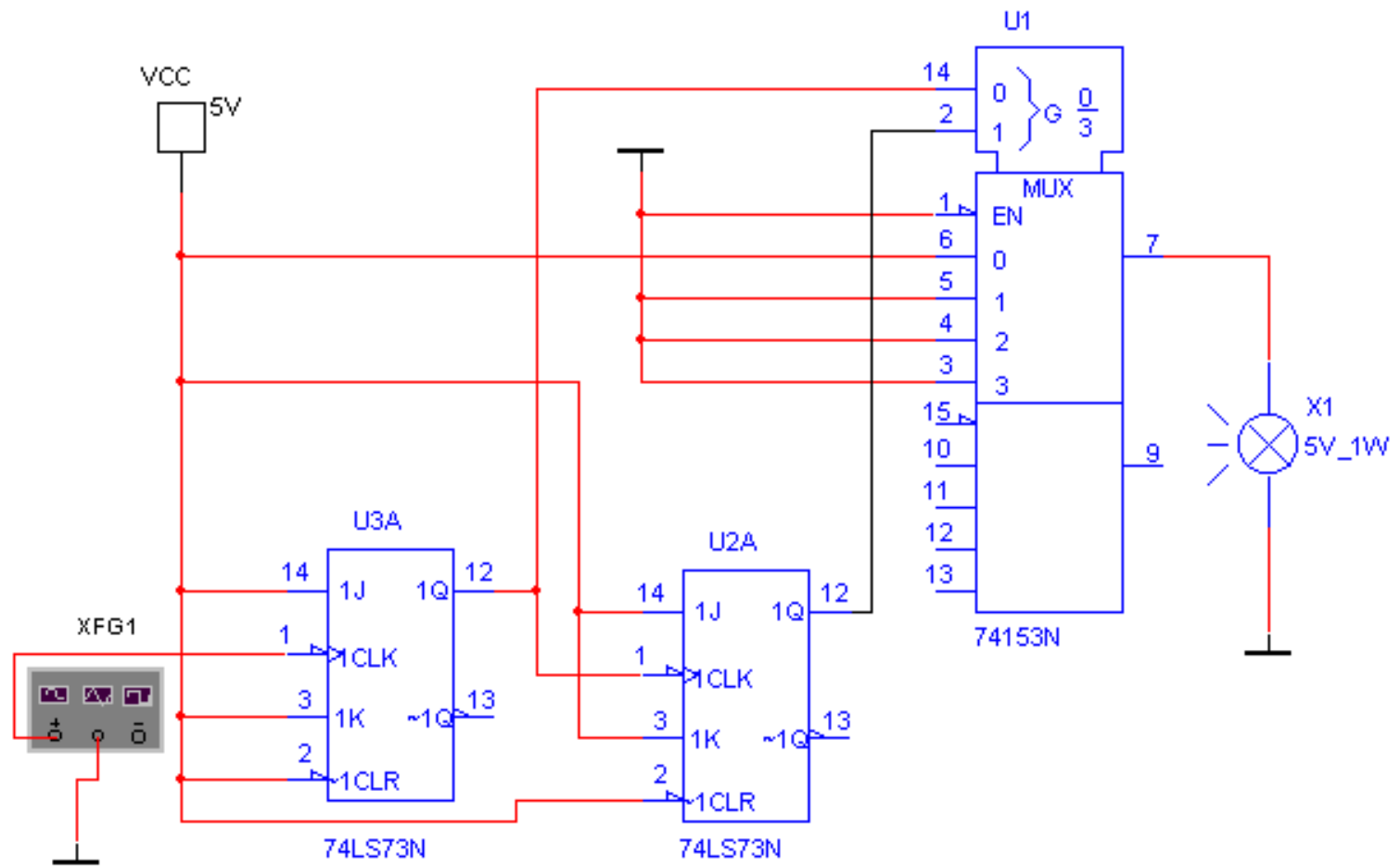
---

8.8 在Multisim仿真平台上用两块CC4052一块CC4069设计一个两路数据传输开关。

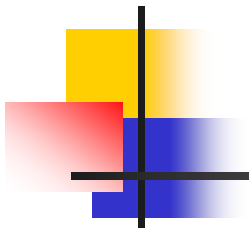
8.9 在Multisim仿真平台上用两片74LS148设计一个16线—4线优先编码器，用二极管显示编码结果。

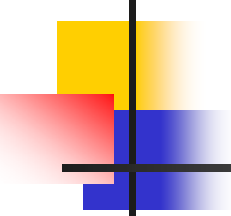
8.10 在Multisim仿真平台上选择一块能实现8421编码的芯片进行仿真，用数码管显示编码结果。

- 
- 
- 8.11 在Multisim仿真平台上选择一块74LS138芯片进行仿真，记下仿真结果。
  - 8.12 在Multisim仿真平台上选择两块74LS138芯片设计一个4线—16线译码器，用数码管显示译码结果。
  - 8.13 在Multisim仿真平台上测出74LS153的逻辑功能，并列表记录。



ultisim图8.2 习题8.13图

- 
- 
- 8.14 在Multisim仿真平台上建立如图8.2所示的四通道数据选择器电路进行仿真。自拟表格记录仿真结果。
- 8.15 在M仿真平台上测出CC4585BT的逻辑功能，并列表记录。
- 8.16 在Multisim仿真平台上用两块CC4585BT设计一个8位数值比较器，用二极管显示比较结果。



---

8.17 设计仿真图8.8.3利用可变分频器实现FSK  
调制电路

8.18设计仿真一个绝对码一相对码变换电路。

8.19 设计仿真一个2DPSK调制电路。





---

# 第9章 时序逻辑电路



## 内容提要

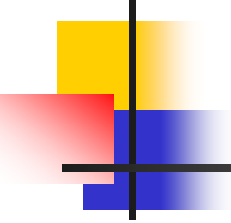
---

触发器是一个具有记忆功能的二进制信息存贮器件，是构成各种时序电路的最基本的逻辑单元。本章介绍了基本RS触发器，JK触发器，D触发器，移位寄存器，计数器，多谐振荡器的原理应用电路与计算机仿真设计方法。本章的重点是掌握触发器组成的应用电路的仿真设计与分析方法。注意不同结构形式的触发器之间的差别，注意采用不同触发器构成的寄存器，计数器，多谐振荡器的特点。



---

## 9.1 触发器及其应用



触发器具有两个稳定状态，用以表示逻辑状态“1”和“0”，在一定的外界信号作用下，可以从一个稳定状态翻转到另一个稳定状态，它是一个具有记忆功能的二进制信息存贮器件，是构成各种时序电路的最基本的逻辑单元。

## 9.1.1 基本RS触发器

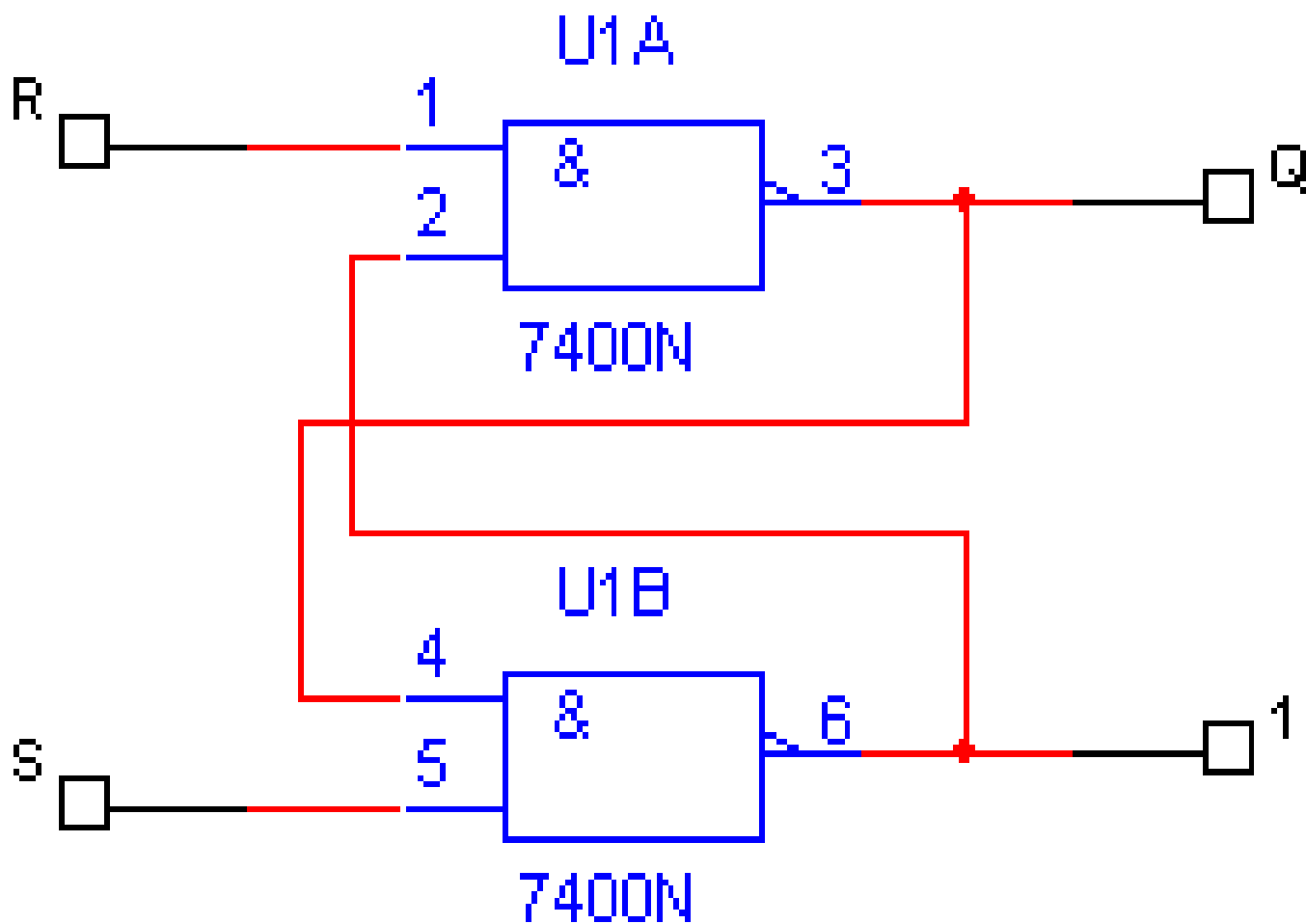


图9.1.1  
基本RS触  
发器

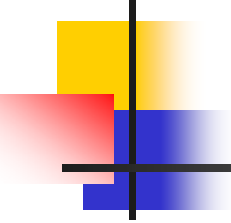
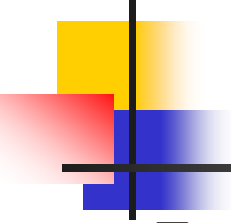


图9.1.1为由两个与非门交叉耦合构成的基本RS触发器，它是无时钟控制低电平直接触发的触发器。基本RS触发器具有置“0”、置“1”和“保持”三种功能。通常 $\bar{S}$ 称为置“1”端，因为 $\bar{S}=0$ （ $\bar{R}=1$ ）时触发器被置“1”； $\bar{R}$ 为置“0”端，因为 $\bar{R}=0$ （ $\bar{S}=1$ ）时触发器被置“0”，当 $\bar{S}=\bar{R}=1$ 时状态保持；



---

$\bar{S}=\bar{R}=0$ 时，触发器状态不定，应避免此种情况发生，9.1.1为基本RS触发器的功能表。基本RS触发器。也可以用两个“或非门”组成，此时为高电平触发。



输 入		输 出	
$\bar{S}$	$\bar{R}$	$Q^{n+1}$	$Q^{n+1}$
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	$Q^n$	$\bar{Q}^n$
1	1	$\phi$	$\phi$

表9.1.1  
基本RS触  
发器的功  
能表





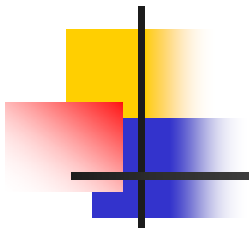
## 9.1.2 JK触发器

---

在输入信号为双端的情况下，JK触发器是功能完善、使用灵活和通用性较强的一种触发器。本例采用4027B双JK触发器，在Multisim环境下的引脚功能如图9.1.2所示。

JK触发器的状态方程为：

$$Q^{n+1} = J\bar{Q}^n + \bar{K}Q^n$$



---

J和K是数据输入端，是触发器状态更新的依据，若J、K有两个或两个以上输入端时，组成“与”的关系。Q与  $\bar{Q}$  为两个互补输出端。通常把  $Q=0$ 、 $\bar{Q}=1$  的状态定为触发器“0”状态；而把  $Q=1$ 、 $\bar{Q}=0$  定为“1”状态。

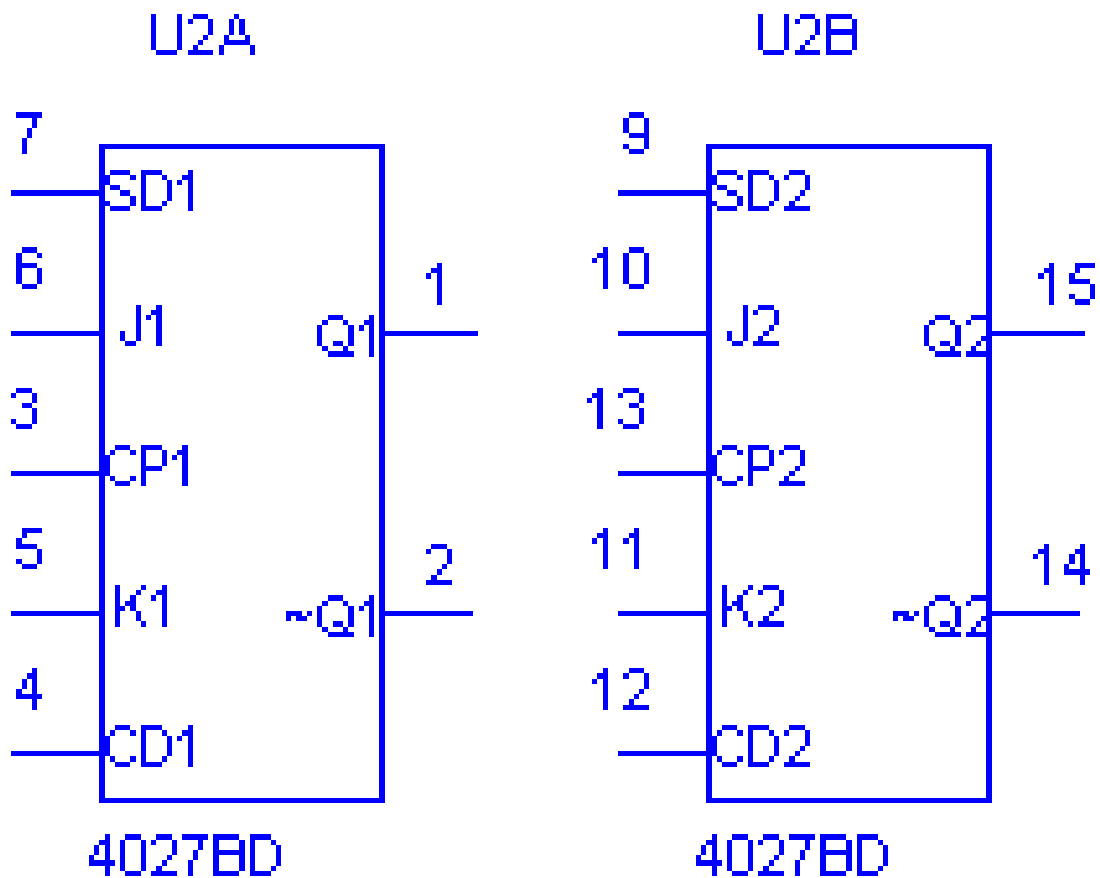
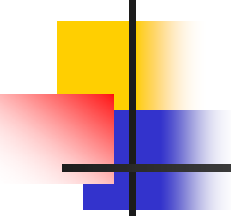


图9.1.2  
双JK触  
发器引  
脚排列

上升沿触发JK触发器的功能如表9.1.2

输 入			输 入		输 出	
$S_D$	$R_D$	CP	J	k	$Q^{n+1}$	$Q^{n+1}$
0	1	×	×	×	1	0
1	0	×	×	×	0	1
0	0	×	×	×	$\phi$	$\phi$
1	1	↑	0	0	$Q^n$	$Q^n$
1	1	↑	1	0	1	$\bar{0}$
1	1	↑	0	1	0	1



1	1	↑	1	1	$\bar{Q}^n$	$Q^n$
1	1	↑	×	×	$Q^n$	$\bar{Q}^n$

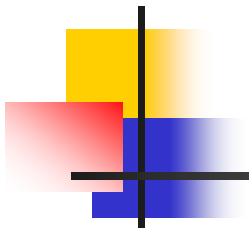
注：×—任意态，↓—高到低电平跳变，↑—低到高电平跳变， $\bar{Q}^n$ （ $Q^n$ ）—现态， $Q^{n+1}$ （ $\bar{Q}^{n+1}$ ）—次态， $\phi$ —不定态JK触发器常被用作缓冲存储器，移位寄存器和计数器。



### 9.1.3 D触发器

---

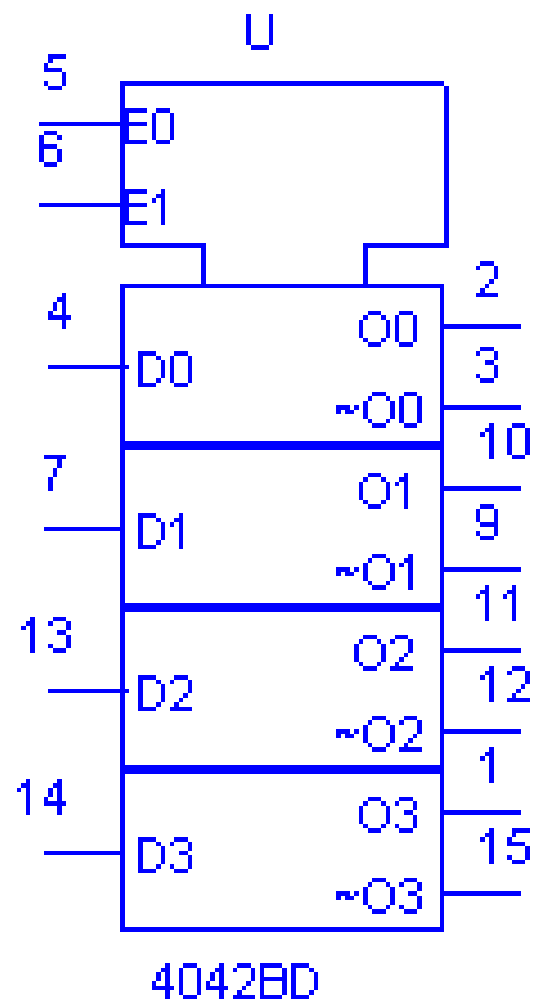
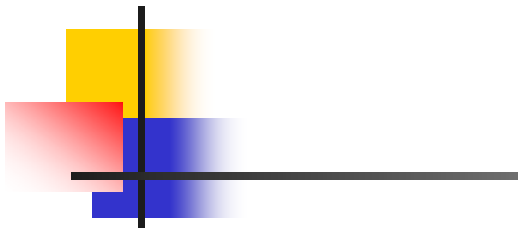
在输入信号为单端的情况下，D触发器用起来最为方便，其状态方程为 $Q^{n+1}=D^n$ ，其输出状态的更新发生在CP脉冲的上升沿，故又称为上升沿触发的边沿触发器，触发器的状态只取决于时钟到来前D端的状态，D触发器的应用很广，可用作数字信号的寄存，移位寄存，分频和波形发生等。有很多种型



---

号可供各种用途的需要而选用。如双D74LS74、四D 74LS175、六D 74LS174、CD4042等。

图9.1.3 为6D CD4042的引脚排列。功能如表9.1.3。



9. 1. 3  
CD4042  
引脚排  
列图



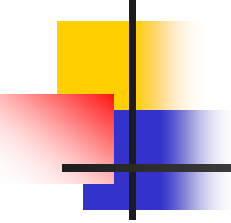
表9.1.3 D触发器功能表

输 入				输 出	
$\bar{S}_D$	$\bar{R}_D$	CP	D	$Q^{n+1}$	$\bar{Q}^{n+1}$
0	1	×	×	1	0
1	0	×	×	0	1
0	0	×	×	$\phi$	$\phi$
1	1	↑	1	1	0
1	1	↑	0	0	1
1	1	↑	×	$Q^n$	$\bar{Q}^n$



## 9.1.4 双J-K触发器组成的时钟变换电路

该电路主要用于单一双时钟脉冲的转换，可作为双时钟可逆计数器的脉冲源。图9.1.4所示电路是由双J-K触发器CC4027和四2输入端与非门CC4011构成的时钟变换电路。将CC4027的J端(⑥脚)接至端(②脚)，K端(⑤脚)接至Q端(①脚)，CP



---

端(③脚)接与非门U2A和门U2C的输入端。假设Q端初始状态为低电平“0”状态，当CP脉冲上升沿到达后，Q端变为高电平“1”状态，端为低电平“0”状态。CP脉冲和Q端输出经门U2A与非后送入反相器门U2B，输出一个与CP脉冲同步的脉冲。

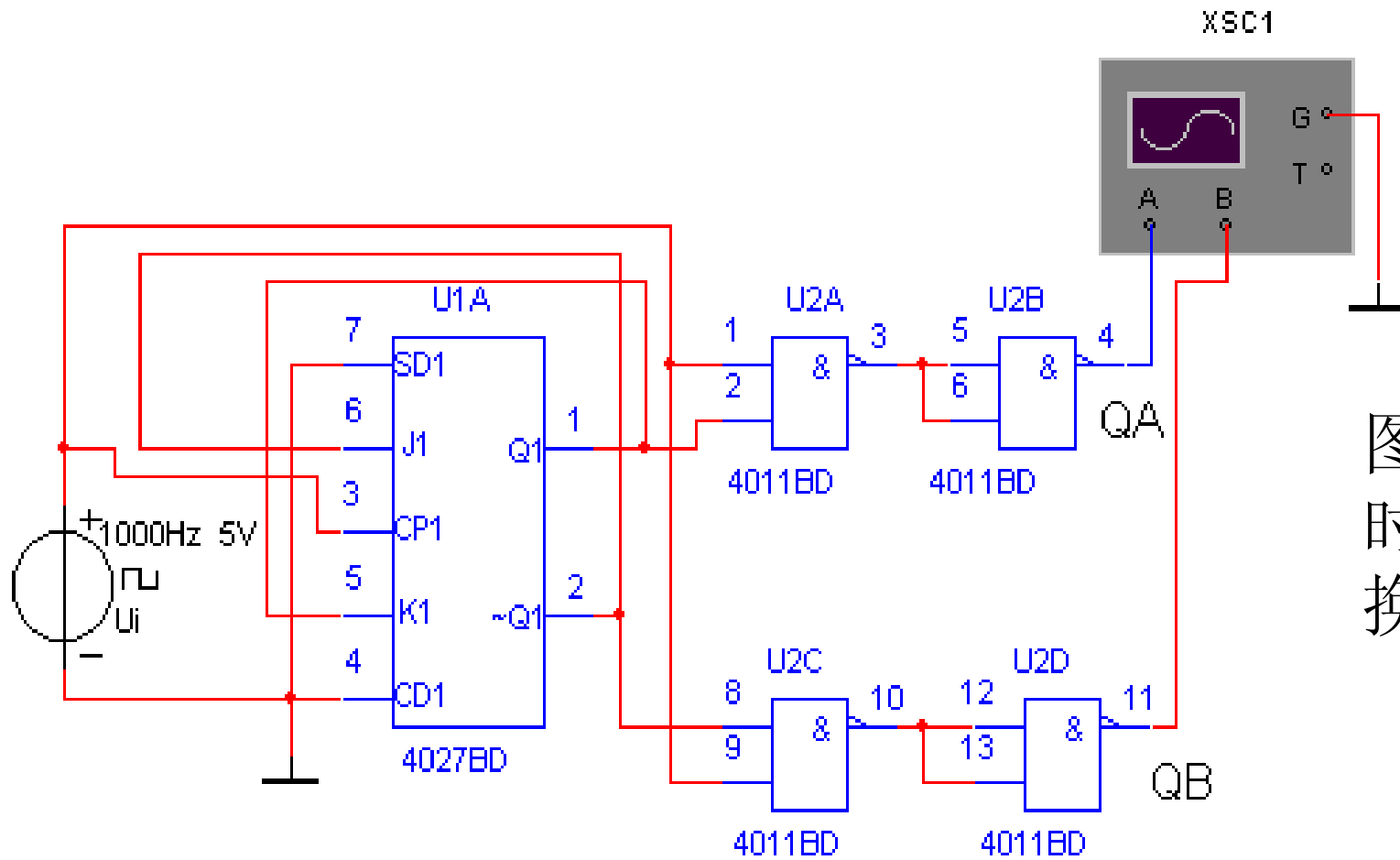
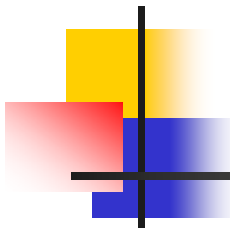


图9.1.4  
时钟变  
换电路



当第二个CP上升沿到达后，Q变为低电平“0”状态，变为高电平“1”状态。CP脉冲和端输出经门U2C与非后送入反相器门U2D，输出一个与CP脉冲同步的脉冲。

应当指出：经转换的双时钟脉冲，其频率为CP的二分之一， $Q_A$ （QA）与 $Q_B$ （QA）相差180°。

波形如图9.1.5所示。

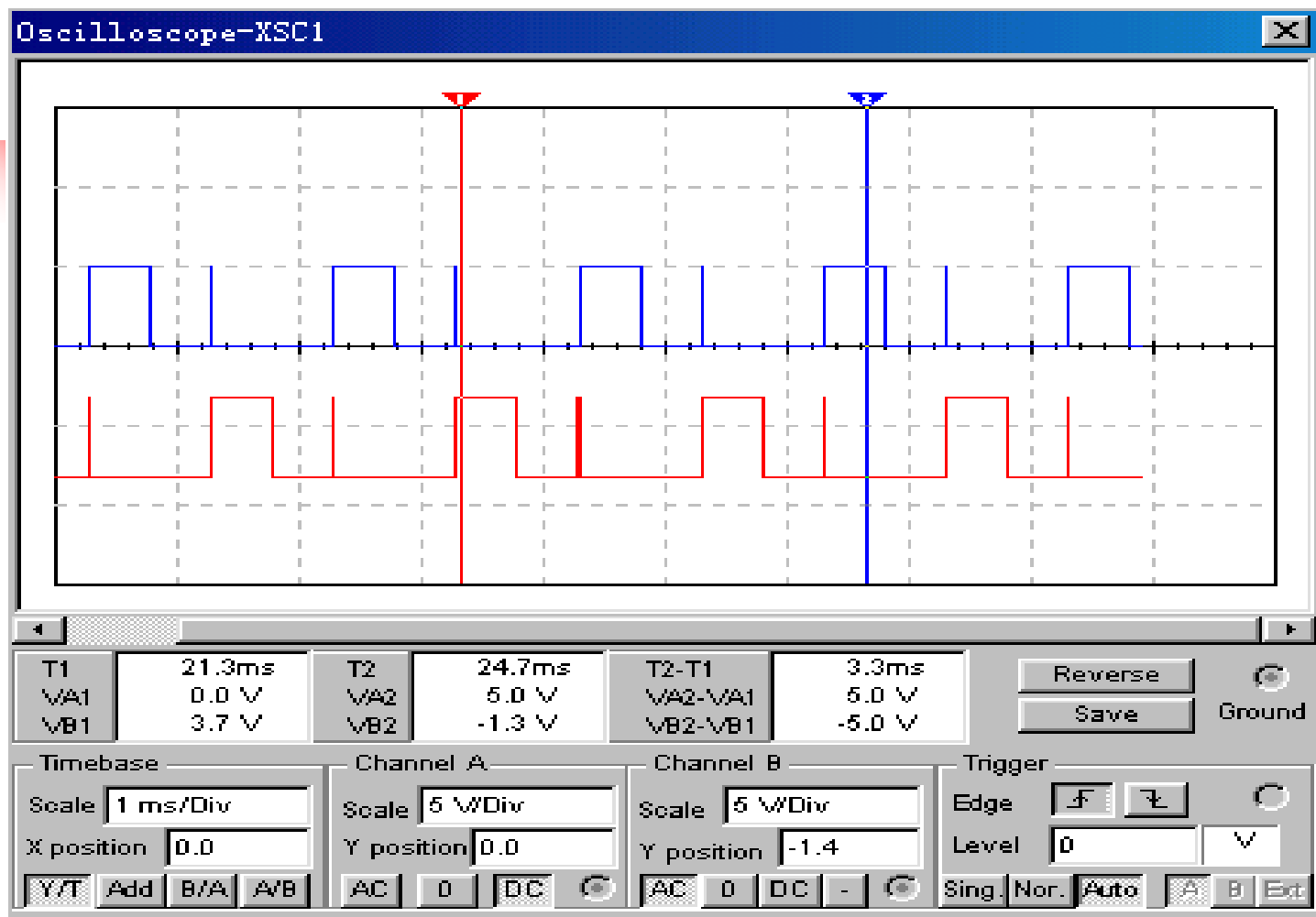


图9.1.5  
 $Q_A$ 、 $Q_B$   
 输出波  
 形图



## 9.1.5 四锁存D型触发器组成的智力竞赛抢答器

智力竞赛抢答电路如图9.1.6所示。该电路能鉴别出4个数据中的第1个到来者，而对随之而后到来的其它数据信号不再传输和作出响应。至于哪一位数据最先到来，则可从LED指示看出。该电路主要用于智力竞赛抢答器中。

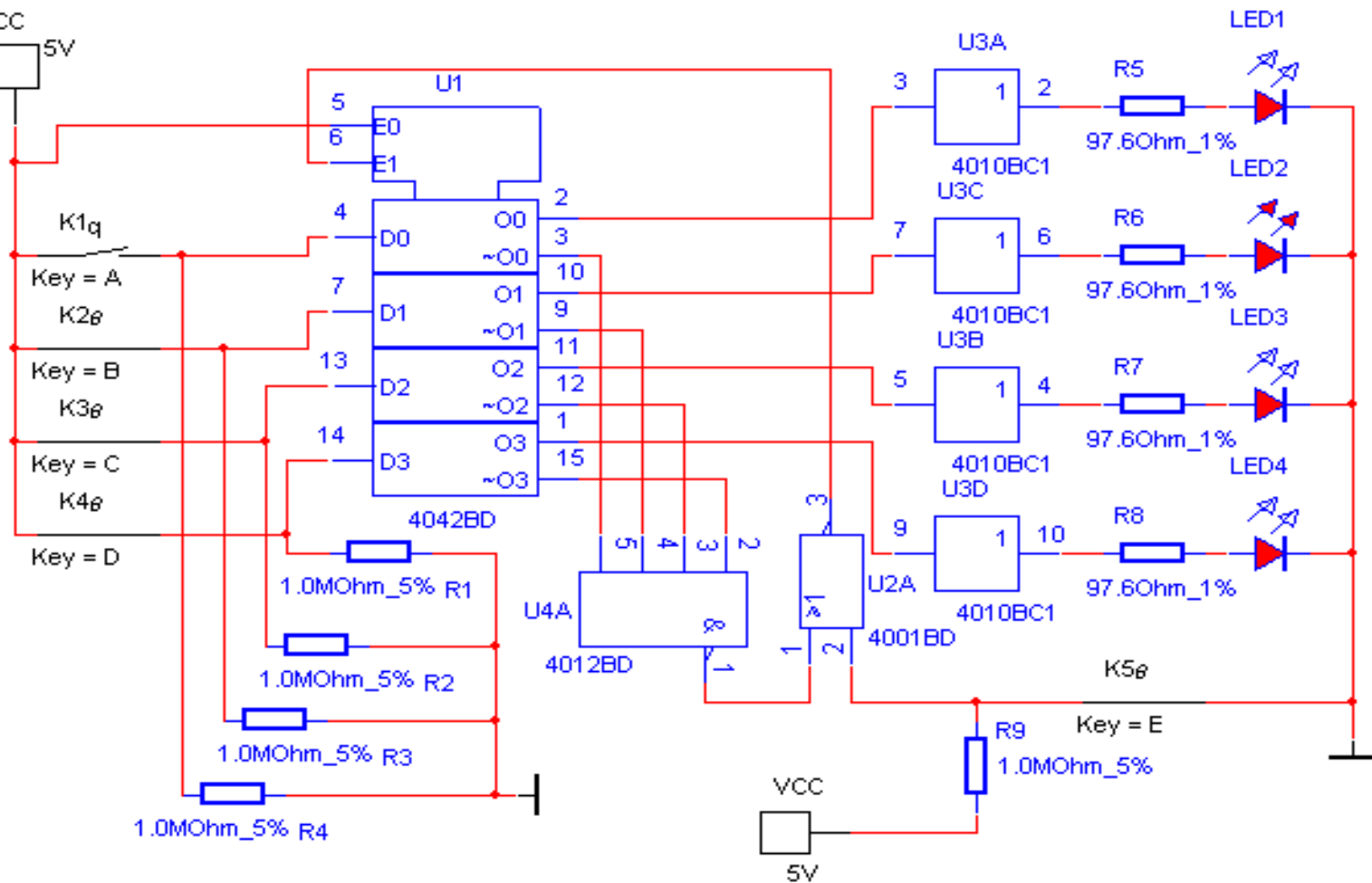
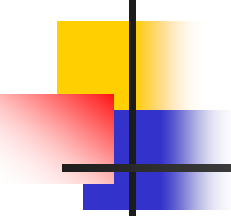


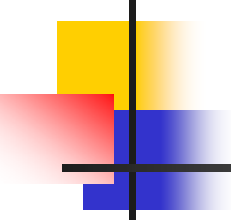
图9.1.6  
智力竞赛抢答  
电路





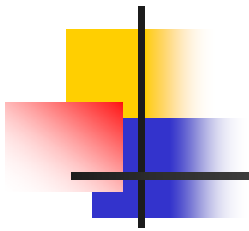
---

图9.1.6所示电路是由四锁存D型触发器CC4042，双4输入端与非门CC4012、四2输入端或非门CC4001和六同相缓冲/变换器CC4010构成的智力竞赛抢答器。电路工作时，CC4042的极性端E0(POL)处于高电平“1”，E1(CP)端电平由 $\sim$ 和复位开关产生的信号决定。复位开关K<sub>5</sub>断开时，

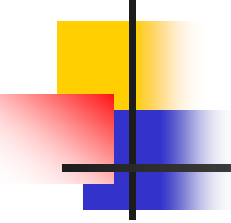


---

CC4001的②脚经上拉电阻接VCC, 由于 $K_1 \sim K_4$ 均为关断状态,  $D_0$  (D0)  $\sim$   $D_3$  (D3) 均为低电平“0”状态, 所以 $\sim$ 为高电平“1”状态, CP端为低电平“0”状态, 锁存了前一次工作阶段的

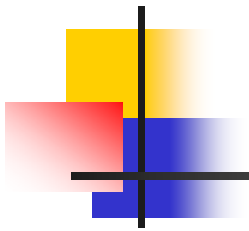


数据。新的工作阶段开始，复位开关 $K_5$ 闭合，CC4001的②脚接地，CC4012的输出端①脚也为低电平“0”状态，所以E1端为高电平“1”状态。以后，E1的状态完全由CC4042的输出端电平决定。一旦数据开关( $K_1 \sim K_4$ )有一个闭合，则 $Q_0$  ( $Q_0$ )  $\sim$   $Q_3$  ( $Q_3$ ) 中必有一端最先处于高电平“1”状态，



---

相应的LED被点亮，指示出第一信号的位数。同时CC4012的①脚为高电平“1”状态，迫使E1为低电平“0”状态，在CP脉冲下降沿的作用下，第一信号被锁存。电路对以后的信号便不再响应。



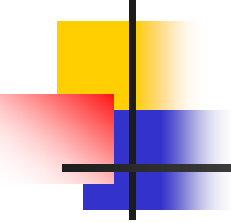
---

该电路还可用于数字系统中，可检测群脉冲的时序。图中的  $K_1 \sim K_3$  开关如果是机械触点，则需对输入信号进行整形，以是高系统抗干扰能力。CC4010为电平接口电路，将CMOS集成电路高电平电压转换成适合LED工作的电压。



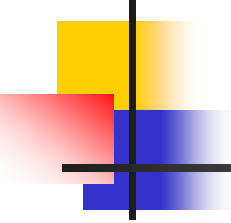
---

## 9.2 移位寄存器及其应用



---

移位寄存器是一个具有移位功能的寄存器，是指寄存器中所存的代码能够在移位脉冲的作用下依次左移或右移。既能左移又能右移的称为双向移位寄存器，只需要改变左、右移的控制信号便可实现双向移位要求。



---

根据移位寄存器存取信息的方式不同分为：串入串出、串入并出、并入串出、并入并出四种形式。本例选用的4位串入一并出移位寄存器集成电路CC4015, 该电路主要用于数字电路系统或计算机中对输入数据进行排队，使数据按先后次序传送。



其电路如图9.2.1所示

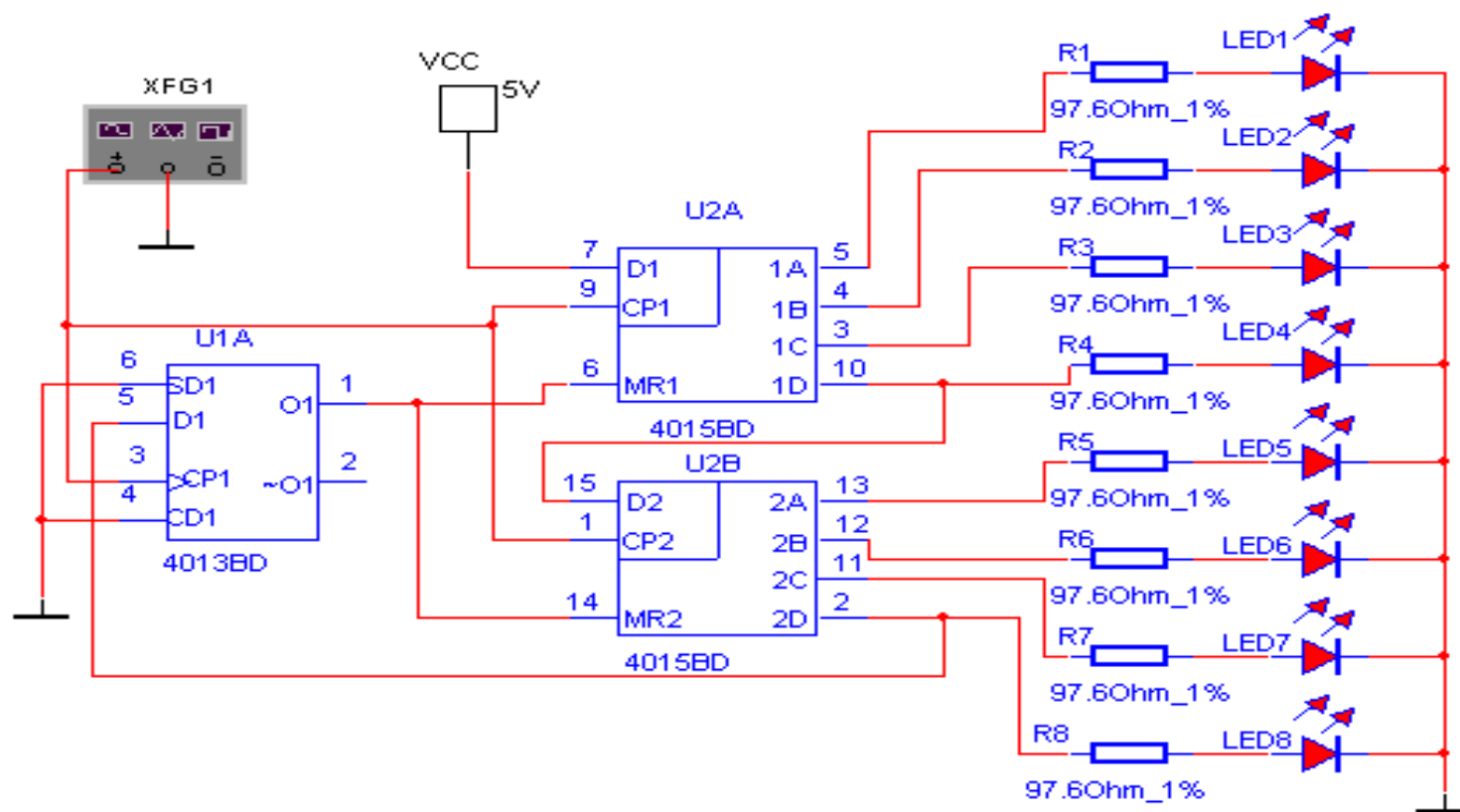
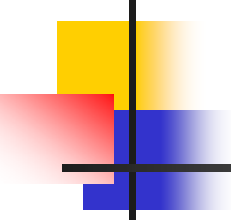
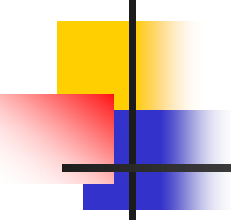


图9.2.1  
4位串  
入—并  
出移位  
寄存器  
电路



---

电路中，CC4015的两个移位寄存器为串行级联，构成8级串行输入并行输出形式。前级（U2A）的数据输入端 $D_1$ （D1）接高电平“1”或 $V_{CC}$ ，在末级输出端2D后串入CC4013，并将其输出Q与CC4015的复位端MR1、MR2相连接。



---

这样，在时钟脉冲CP的作用下，高电平“1”信息将逐次移位通过每级寄存器，当高电平‘1’到达CC4013的Q端时，移位寄存器全部复位。因此，在两个时钟脉冲后，复位消失，同时高电平“1”再一次移入寄存器内。点击仿真开关，得到表9.1.1所示的仿真结果。

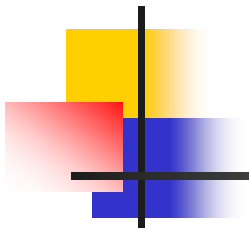
输入	输出							
CP	1A	1B	1C	1D	2A	2B	2C	2D
0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	0	0	0	0
4	1	1	1	1	1	0	0	0
5	1	1	1	1	1	1	0	0
6	1	1	1	1	1	1	1	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1

表  
9.1.1  
4位串  
入一并  
出移位  
寄存器  
仿真结  
果



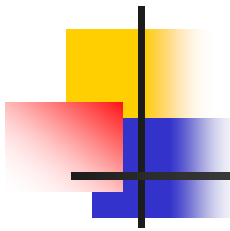
---

## 9.3 计数器及其应用



---

计数器是一个用以实现计数功能的时序部件，它不仅可用来计脉冲数，还常用作数字系统的定时、分频和执行数字运算以及其它特定的逻辑功能。



---

计数器种类很多。按构成计数器中的各触发器是否使用一个时钟脉冲源来分，有同步计数器和异步计数器。根据计数制的不同，分为二进制计数器，十进制计数器和任意进制计数器。根据计数的增减趋势，又分为加法、减法和可逆计数器。还有可预置数和可编程功能计数器等等。目前，无论是TTL还是CMOS集成电路，都有品种较齐全的。



## 9.3.1 中规模十进制计数器

---

中规模集成计数器。使用者只要借助于器件手册提供的功能表和工作波形图以及引出端的排列，就能正确地运用这些器件。

CC40192是同步十进制可逆计数器，具有双时钟输入，并具有清除和置数等功能，其引脚排列如图9.3.1所示。仿真芯片与实际芯片各引脚对照如表9.3.1所示。



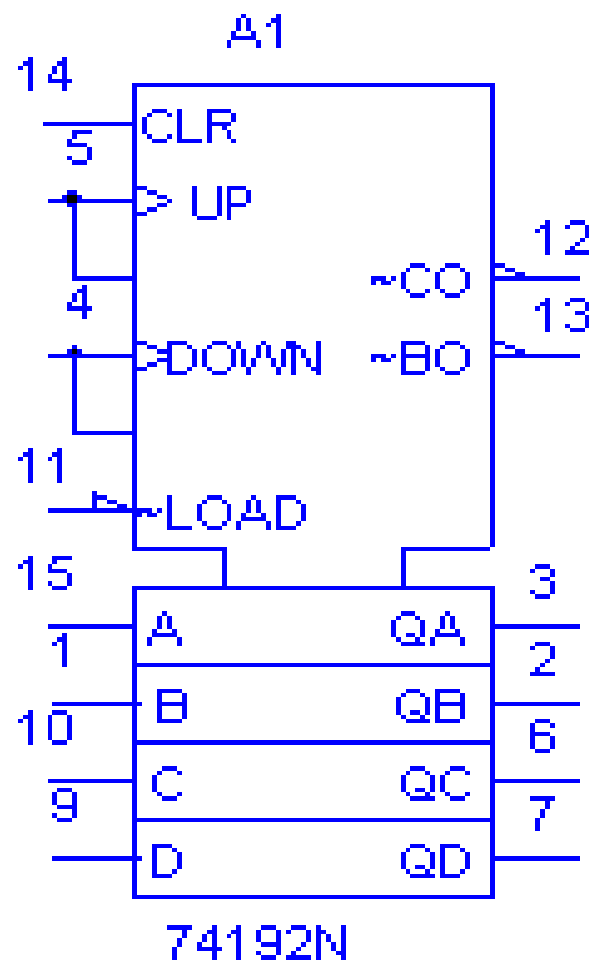
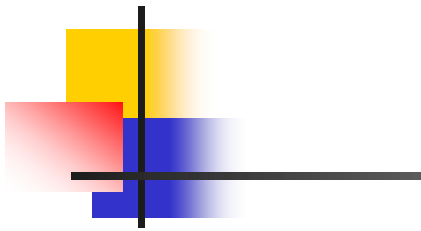
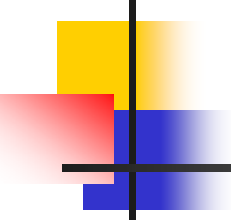


图9.3.1  
CC40192  
仿真芯  
片引脚  
排列

### 9.3.1 仿真芯片与 实际芯片各 引脚对照表

引脚	实际芯片	仿真芯片	引脚	实际芯片	仿真芯片
1	$D_1$	B	9	$D_3$	D
2	$Q_1$	$Q_B$	10	$D_2$	C
3	$Q_0$	$Q_A$	11	$\bar{LD}$	LOAD
4	$CP_D$	DOWN	12	$\bar{\bar{CD}}$	CO
5	$CP_U$	UP	13	$\bar{\bar{BO}}$	BO
6	$Q_2$	$Q_C$	14	CR	CLR
7	$Q_3$	$Q_D$	15	$D_0$	A
8	GND	GND	16	$V_{CC}$	$V_{CC}$



图中 LOAD—置数端      UP—加计数端      DOWN—  
减计数端

CO—非同步进位输出端      BO—非同步借位输出端

A、B、C、D—计数器输入端

$Q_A$  (QA)、 $Q_B$  (QB)、 $Q_C$  (QC)、 $Q_D$  (QD) —数据输出  
端CLR—清除端

CC40192（同74LS192，二者可互换使用）的功能如表9.3.2，说明如下：

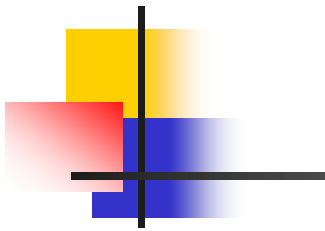
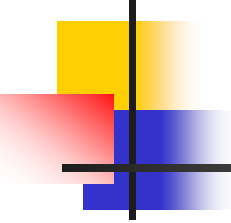


表9.3.2  
74LS192  
与  
CC40192  
二者可  
互换使  
用表

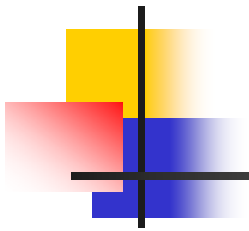
输 入								输 出			
CLR	LOAD	UP	DOWN	D	C	B	A	Q <sub>D</sub>	Q <sub>C</sub>	Q <sub>B</sub>	Q <sub>A</sub>
1	×	×	×	×	×	×	×	0	0	0	0
0	0	×	×	d	c	b	a	d	c	b	a
0	1	↑	1	×	×	×	×	加 计 数			
0	1	1	↑	×	×	×	×	减 计 数			



---

当清除端CLR为高电平“1”时，计数器直接清零；CLR置低电平则执行其它功能。当CLR为低电平，置数端LOAD也为低电平时，数据直接从置数端A、B、C、D置入计数器。

当CLR为低电平，LOAD为高电平时，执行计数功能。执行加计数时，减计数端DOWN接高电平，计数脉冲由UP 输入；

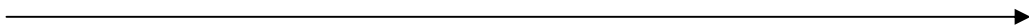


---

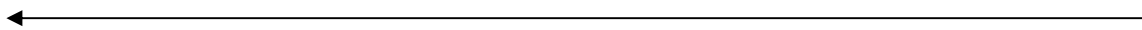
在计数脉冲上升沿进行 8421 码十进制加法计数。执行减计数时，加计数端UP接高电平，计数脉冲由减计数端DOWN输入，表9.3.3为8421码十进制加、减计数器的状态转换表。

表9.3.3 8421码十进制加、减计数器的状态转换表

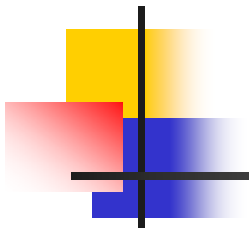
# 加法计数



输入脉冲数		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
输出	Q <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Q <sub>2</sub>	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
	Q <sub>1</sub>	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
	Q <sub>0</sub>	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1



# 减计数



---

一个十进制计数器只能表示0~9十个数，为了扩大计数器范围，常用多个十进制计数器级联使用。

同步计数器往往设有进位（或借位）输出端，故可选用其进位（或借位）输出信号驱动下一级计数器

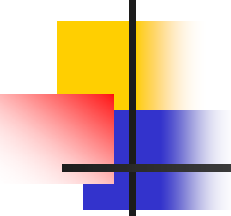




## 9.3.2用复位法获得任意进制计数器

---

假定已有N进制计数器，而需要得到一个M进制计数器时，只要 $M < N$ ，用复位法使计数器计数到M时置“0”，即获得M进制计数器。如图9.3.2所示 是一个特殊12进制的计数器电路方案。在数字钟里，对时位的计数序列是1、2、...11，12、1、...是12进制的，且无0数。



---

如图所示，当计数到13时，通过与非门产生一个复位信号，使CC40192(2)〔时十位〕直接置成0000，而CC40192(1)，即时的个位直接置成0001，从而实现了1~12计数。

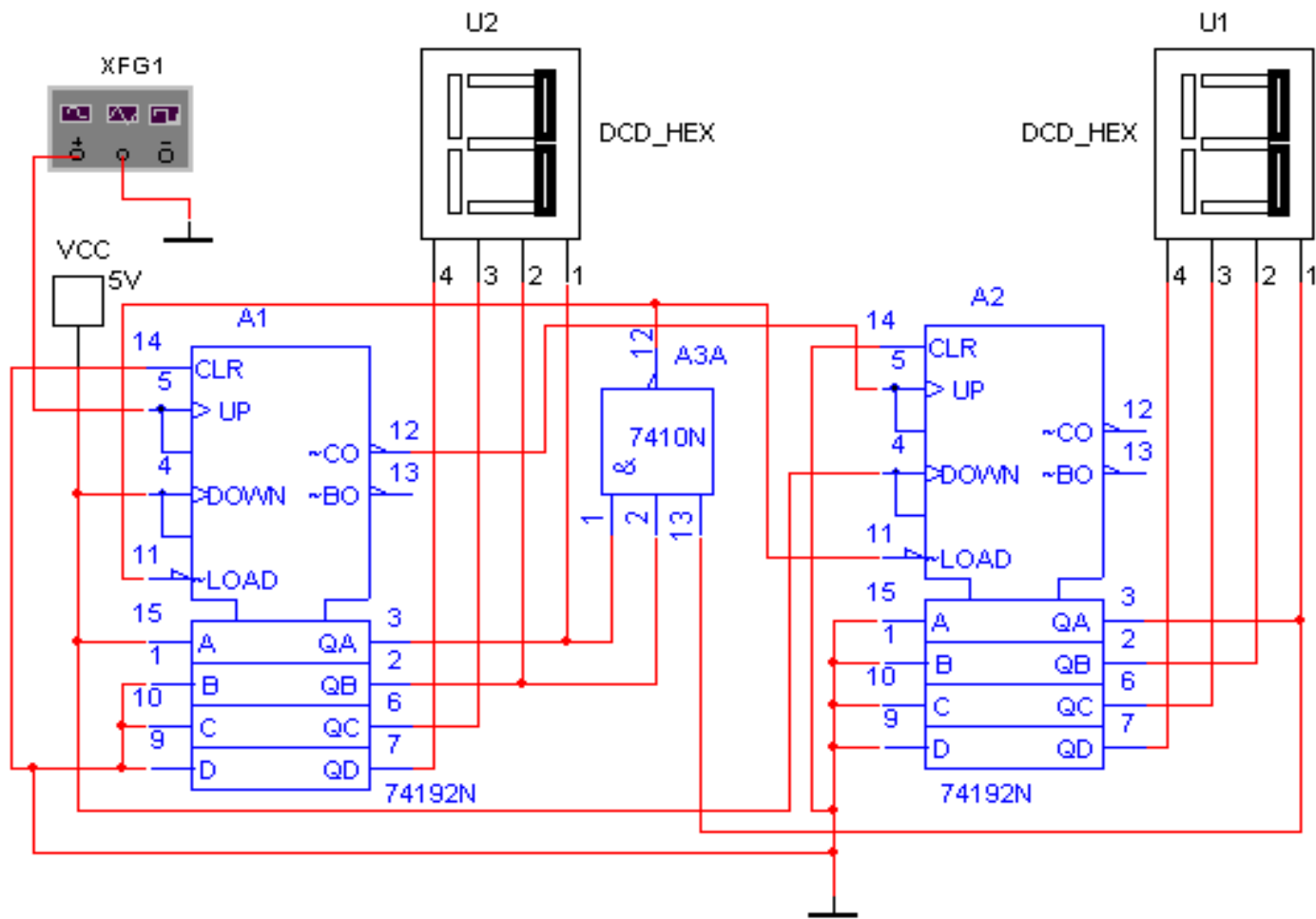
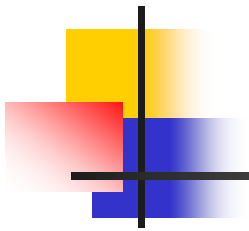



图9.3.2  
特殊12  
进制的  
计数器  
电路方  
案



电路中十六进制显示器调用：点击其他部件库的图标，显示如图9.3.3所示对话框，

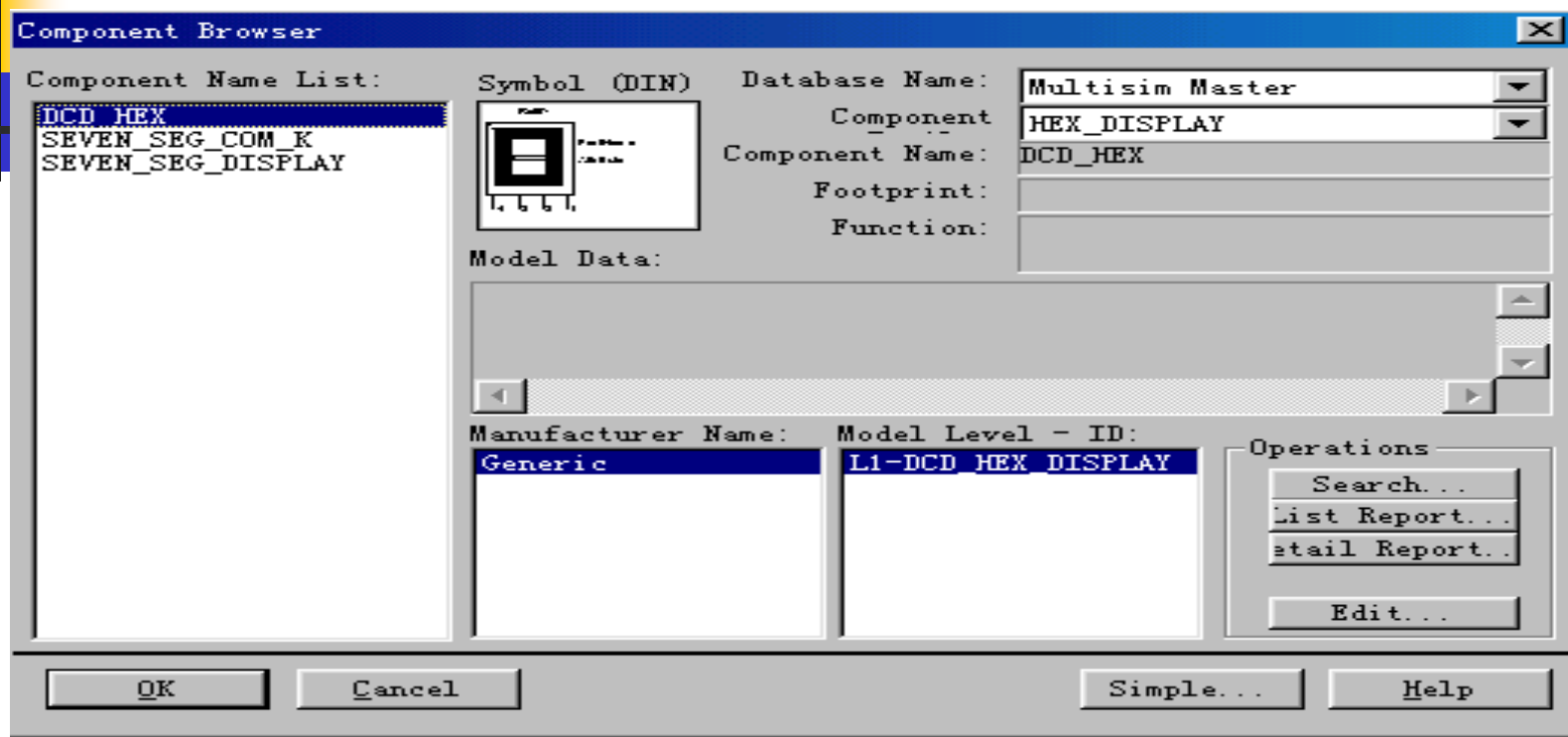
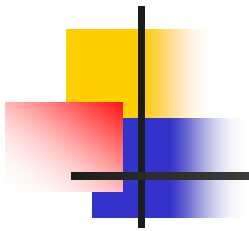
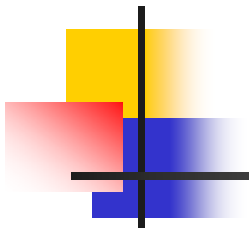


图9.3.3 带译码的七段数码显示器对话框



在对话框中选择带译码的七段数码显示器 (DCD HEX)：有4条引脚线，从左到右，分别对应4位二进制数的最高位到最低位，可显示0—F之间的16个数。七段数码显示器 (SEVEN SEG DISPLAY)：



---

显示器的每一段和引脚之间有惟一的对应关系。在某一引脚上加上高电平，其对应的数码段就发光显示。如要用七段数码显示器显示十进制数，需要有一个译码电路。

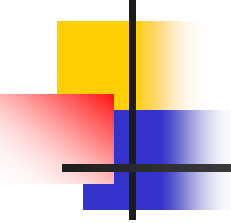


### 9.3.3 数字钟晶振时基电路

---

图9.3.4所示电路是由12位二进制串行计数器/分频器CC4040和六反相器CC4069等构成的数字钟晶振时基电路。电路中，CC4069的门U1A和门U1B构成振荡频率为32798Hz的晶体振荡器。其输出经CC4069的门U1C整形后送至CC4040的端。





---

CC4040的输出端由二极管 $VD_1$  ( $VD1$ )  $\sim$   $VD_3$  ( $VD3$ ) 置成分频系数为 $2^1+2^5+2^9=546$ , 经分频后在输出端Q9上便可输出一个 $60H_z$ 的时钟信号供给数字钟集成电路。

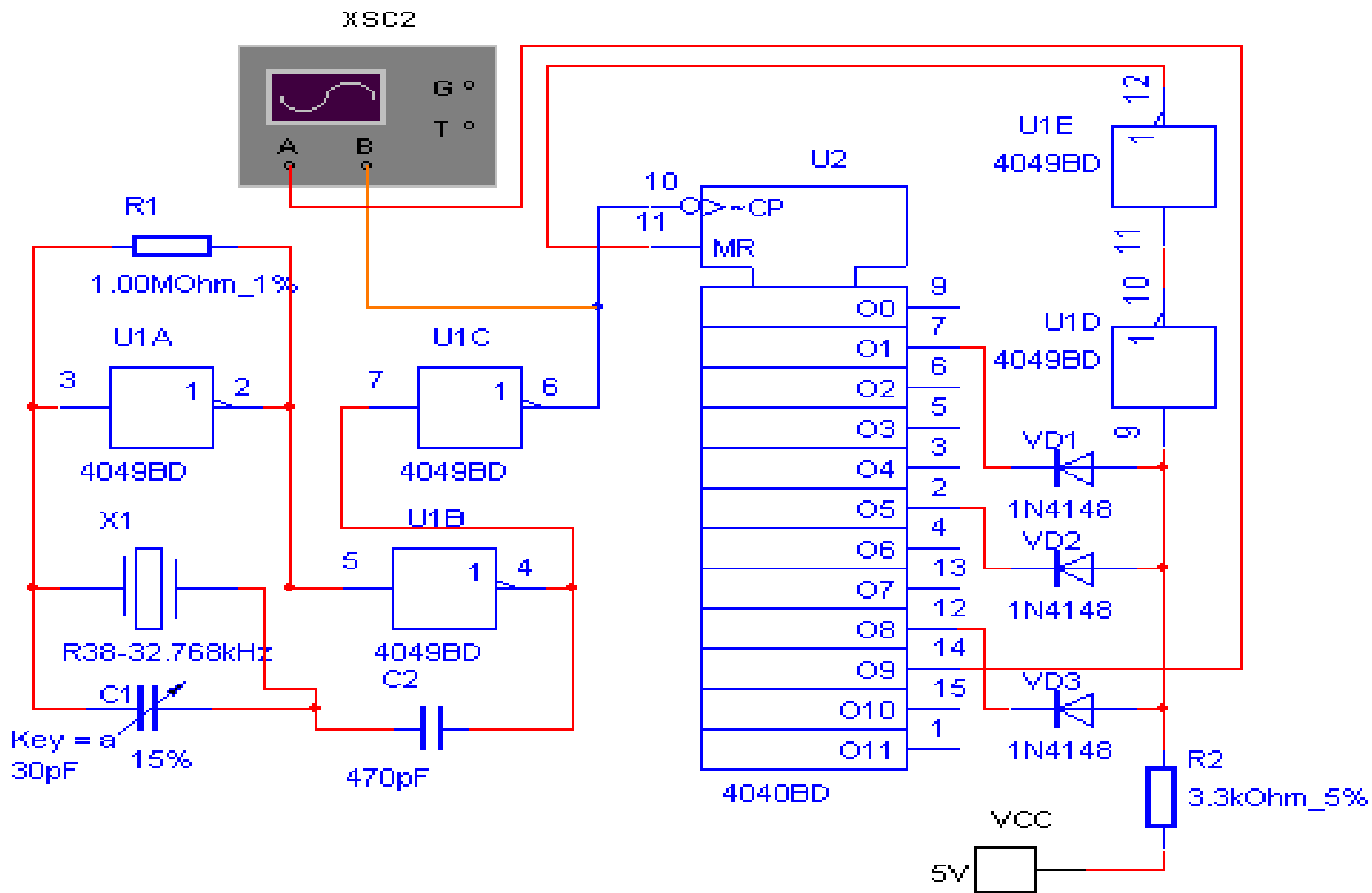
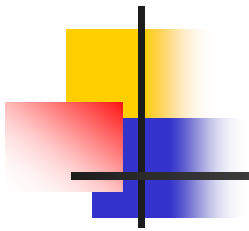


图9.3.4 数字钟晶振时基电路



---

## 9.4 多谐振荡器



---

与非门作为一个开关倒相器件，可用以构成各种脉冲波形的产生电路。电路的基本工作原理是利用电容器的充放电，当输入电压达到与非门的阈值电压 $U_{th}$ 时，门的输出状态即发生变化。因此，电路输出的脉冲波形参数直接取决于电路中阻容元件的数值。



## 9.4.1 非对称型多谐振荡器

---

如图9.4.1所示，非门U1C用于输出波形整形。非对称型多谐振荡器的输出波形是不对称的，当用TTL与非门组成时，输出脉冲宽度

$$t_{01}=RC \quad t_{02}=1.2RC \quad t=2.2RC$$

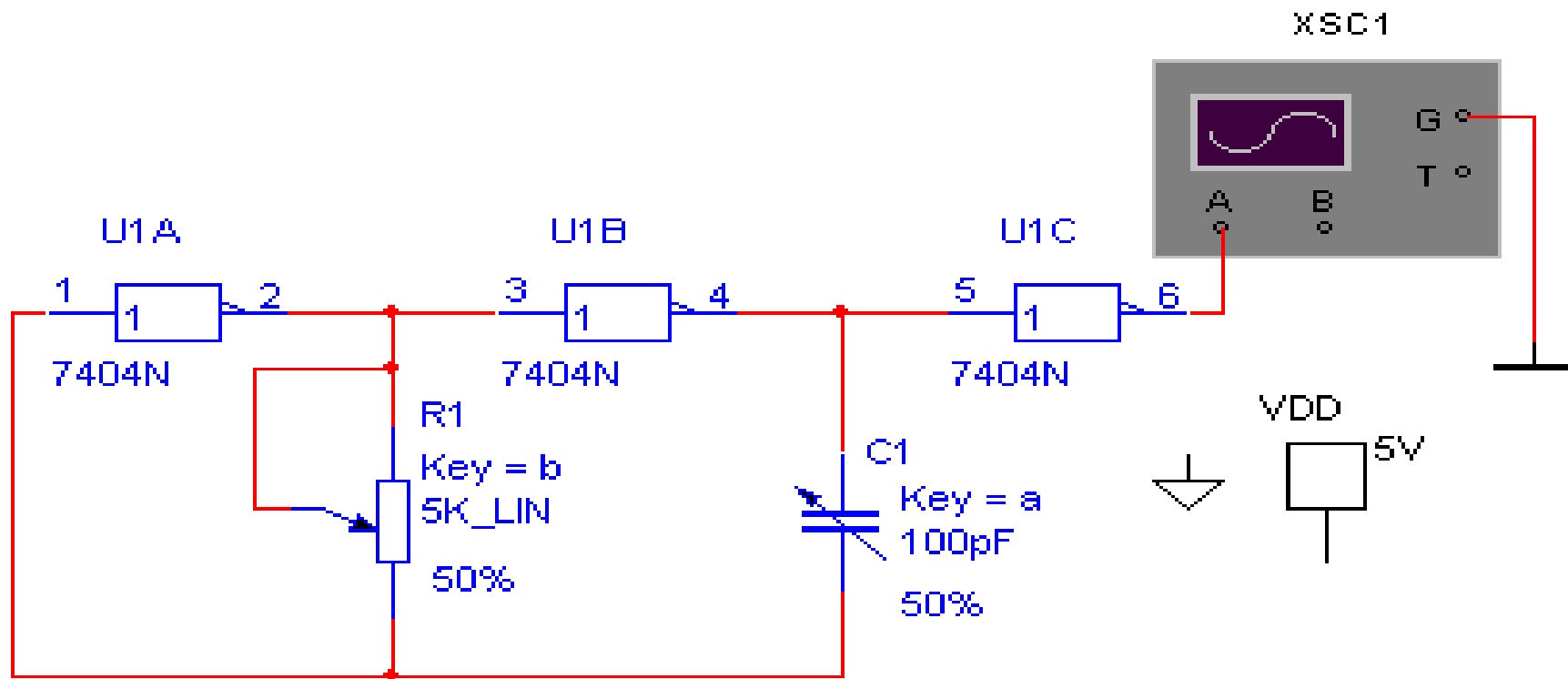
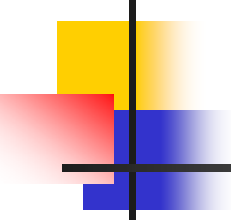
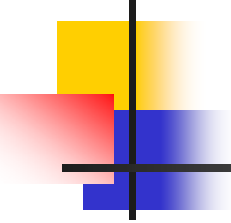


图9.4.1 非对称型多谐振荡器



---

调节  $R$ 和 $C$ 值，可改变输出信号的振荡频率，通常用改变 $C$ 实现输出频率的粗调，改变电位器 $R$ 实现输出频率的细调。

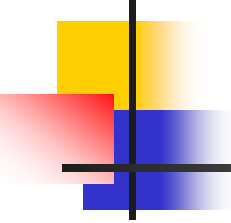


---

## 数字接地端 $\nabla$ (Digital Ground)

在实际数字电路中，许多数字元件需要接上直流电源才能正常工作，而在原理图中并不直接表示出来。为更接近于现实，Multisim在进行数字电路的“Real”仿真时，电路中的数字元件要接上示意性的电源，





---

数字接地端是该电源的参考点。数字接地端只用于含有数字元件的电路，通常不能与任何器件相接，仅示意性地放置于电路中。要接到0V电位，还是需要用一般接地端。



## 9.4.2 对称型多谐振荡器

如图9.4.2所示，由于电路完全对称，电容器的充放电时间常数相同，故输出为对称的方波。改变R和C的值，可以改变输出振荡频率。非门3用于输出波形整形。

一般取 $R \leq 1\text{K}\Omega$ ，当 $R = 1\text{K}\Omega$ ， $C_1 = 100\text{pf} \sim 100\mu\text{f}$ 时， $f = \text{nHz} \sim \text{nMHz}$ ，脉冲宽度  $t_{01} = t_{02} = 0.7RC$ ， $t = 1.4RC$

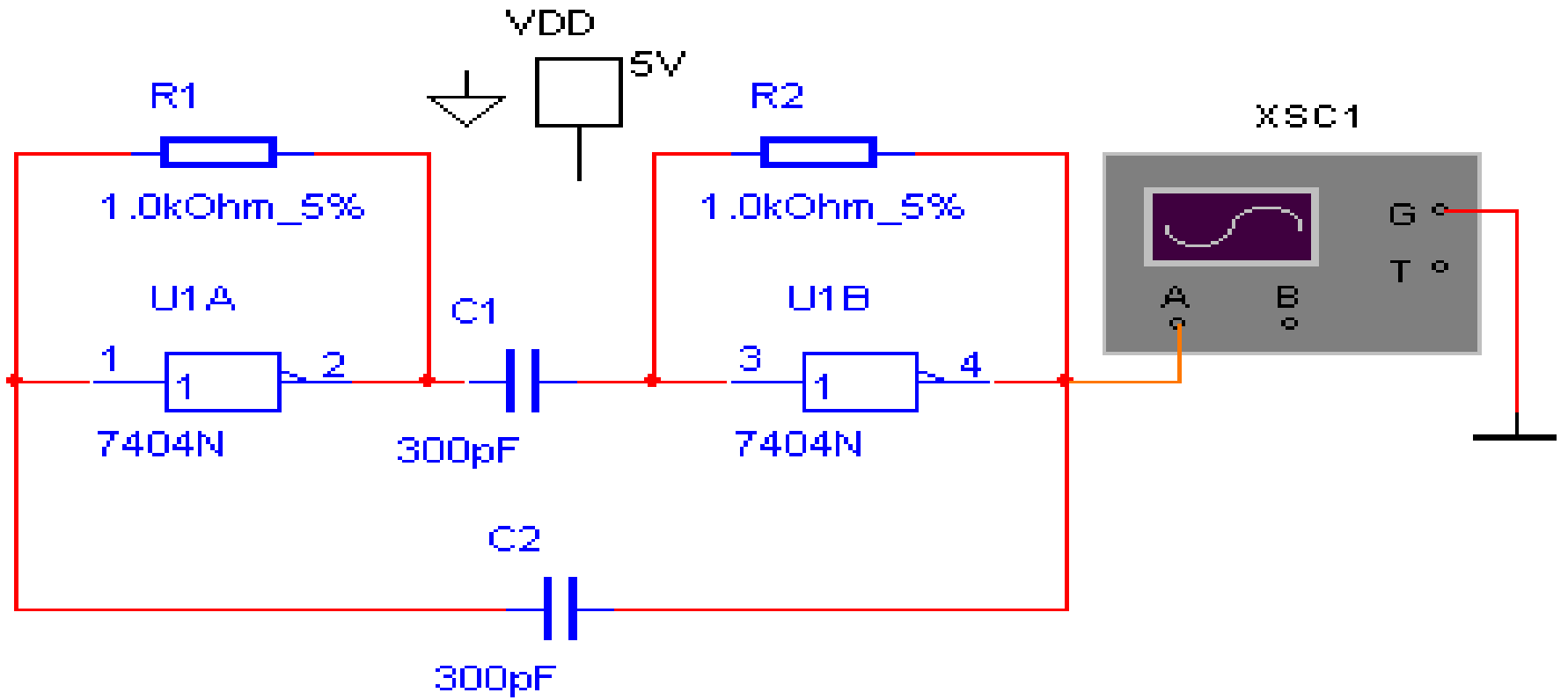


图9.4.2 对称型多谐振荡器



### 9.4.3 带RC电路的环形振荡器

电路如图9.4.3所示，非门U1D用于输出波形整形，R为限流电阻，一般取 $100\ \Omega$ ，电位器RP 要求 $\leq 1\text{K}\ \Omega$ ，电路利用电容C的充放电过程，控制D点电压 $U_D$ ，从而控制与非门的自动启闭，形成多谐振荡，电容C的充电时间 $t_{01}$ 、放电时间 $t_{02}$ 和总的振荡周期 $t$ 分别为：

$$t_{01} \approx 0.94RC, \quad t_{02} \approx 1.26RC, \quad t \approx 2.2RC$$

调节R和C的大小可改变电路输出的振荡频率。

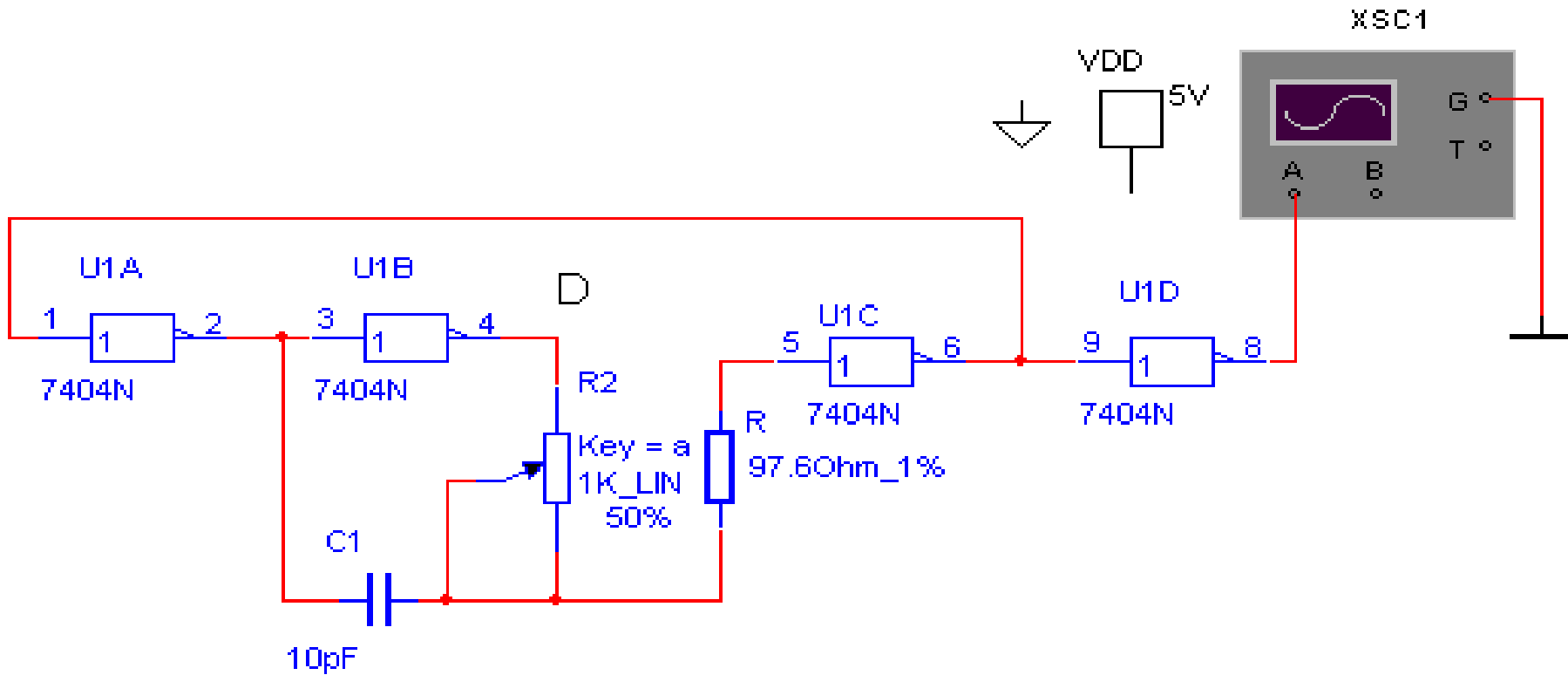
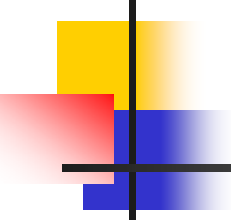


图9.4.3 带有RC电路的环形振荡器



---

以上这些电路的状态转换都发生在与非门输入电平达到门的阈值电平 $U_{th}$ 的时刻。在 $U_{th}$ 附近电容器的充放电速度已经缓慢，而且 $U_{th}$ 本身也不够稳定，易受温度、电源电压变化等因素以及干扰的影响。因此，电路输出频率的稳定性较差。



## 9.4.4 石英晶体稳频的多谐振荡器

---

当要求多谐振荡器的工作频率稳定性很高时，上述几种多谐振荡器的精度已不能满足要求。为此常用石英晶体作为信号频率的基准。用石英晶体与门电路构成的多谐振荡器常用来为微型计算机等提供时钟信号。

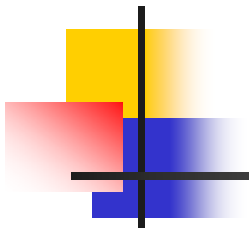


图9.4.4所示为常用的晶体稳频多谐振荡器，其中晶体的 $f_0=32768\text{Hz}$ 。门1用于振荡，门2用于缓冲整形。 $R_F$  (RF) 是反馈电阻，通常在几十兆欧之间选取，一般选 $22\text{M}\Omega$ 。 $R$ 起稳定振荡作用，通常取十至几百千欧。 $C_1$  (C1) 是频率微调电容器， $C_2$  (C2) 用于温度特性校正。



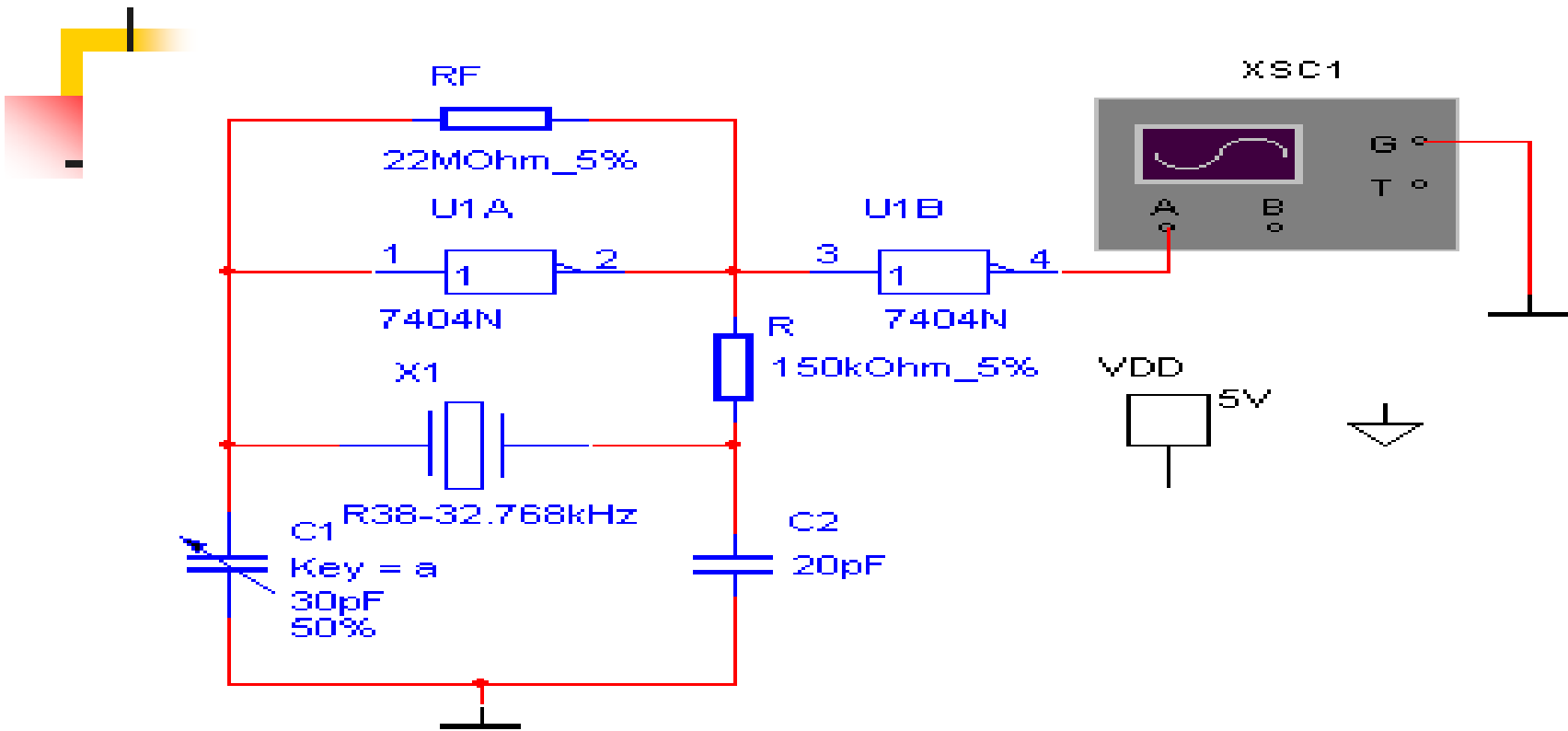
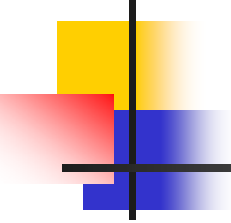


图9.4.4 晶体稳频多谐振荡器



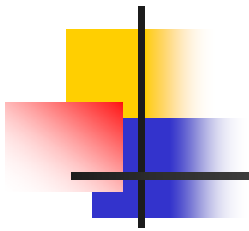
---

## 本章小结



---

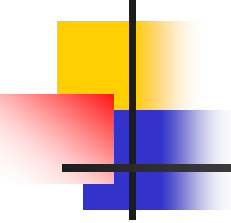
触发器具有两个稳定状态，用以表示逻辑状态“1”和“0”，在一定的外界信号作用下，可以从一个稳定状态翻转到另一个稳定状态，它是一个具有记忆功能的二进制信息存贮器件，是构成各种时序电路的最基本的逻辑单元。本章主要内容有：



---

(1) 触发器：基本RS触发器、JK触发器、D触发器、双J-K触发器组成的时钟变换电路、四锁存D型触发器组成的智力竞赛抢答器原理与应用电路。

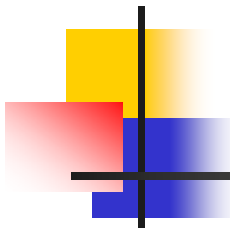
(2) 移位寄存器及其应用。



---

(3) 计数器： 中规模十进制计数器、用复位法获得任意进制计数器、数字钟晶振时基电路原理与应用电路。

(4) 多谐振荡器： 非对称型多谐振荡器、对称型多谐振荡器、带RC电路的环形振荡器、石英晶体稳频的多谐振荡器原理与应用电路。



---

掌握触发器组成的应用电路的仿真设计与分析方法是本章的重点。不同结构形式的触发器其特性不同，构成的寄存器，计数器，多谐振荡器等电路形式有差别。解决同一个问题，可以采用不同形式的组成电路。

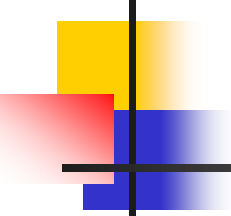


## 思考题与习题

---

9.1 在Multisim仿真平台上的元件库中选择RS、JK、D触发器，分别测出他们的逻辑功能记录于自拟表格中。

9.2 在Multisim仿真平台上画出由D触发器转换为T触发器的电路，并将仿真结果记录于自拟表格中。

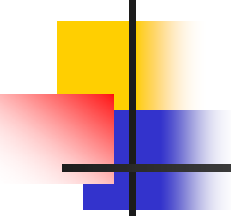


---

9.3 在Multisim仿真平台上用74LS112JK触发器设计一个同步二进制计数器，要求显示仿真结果。

9.4 在Multisim仿真平台上用两片74LS192、一片74LS10的芯片设计一个特殊的13进制计数器，要求显示仿真结果。

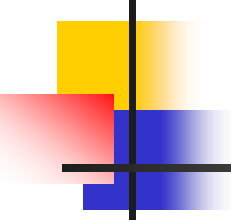




---

9.5 在Multisim仿真平台上利用同步十进制计数器74LS160：（1）用置零法设计一个六进制计数器；（2）用置数法设计一个六进制计数器。要求显示仿真结果。

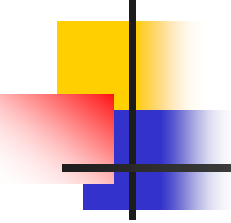
9.6 在Multisim仿真平台上用三块CC40192设计一个421进制计数器，要求显示仿真结果。



---

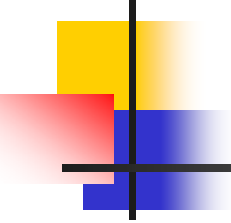
9.7 在Multisim仿真平台上用74LS74设计一个能自动实现环行计数器电路，要求显示仿真结果。

9.8在Multisim仿真平台上用74LS74设计一个能自动实现扭环计数器电路，要求显示仿真结果。



---

9.9 在Multisim仿真平台上设计一个串行数据检测器。对他的要求是：连续输入3个或3个以上的1时输出为1，其他输入情况下输出为零。要求显示仿真结果。



---

9.10 在Multisim仿真平台上设计一个能自启动实现3位环行计数器，有效循环状态为100—010—001—100。要求显示仿真结果。

9.11在Multisim仿真平台上设计一个可控进制计数器，当输入控制变量M=0时工作在五进制，M=1时工作在十五进制。要求显示仿真结果。



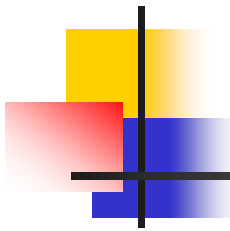
---

# 第十章 A/D 与 D/A转换电路



## 内容提要

把模拟量转换为数字量称为模 / 数转换电路（A / D转换器，简称ADC），将数字量转换为模拟量称为数 / 模转换电路（D / A转换器，简称DAC）。本章介绍了 Multism的A/D和D/A转换器电路、数控放大器、可编程任意波形发生器、数控电压源、数控电压 / 电流变换器、数控恒流源电路的基本结构与计算机仿真设计方法。



---

本章的重点是掌握A/D和D/A转换器电路的仿真设计与分析方法。A/D和D/A转换器是构成应用电路的基础。注意A/D和D/A转换器与一些运算放大器应用电路的特点，采用不同的结合方式，可以构成各种可编程的数控电路。注意输入信号的变化对电路功能的影响。



---

## 10.1 A / D转换电路

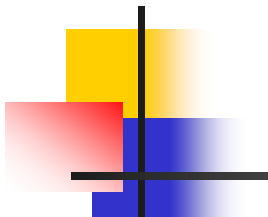




## 10.1.1 A/D转换器的基本概念

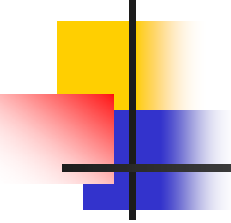
---

在自动控制与信息处理技术中往往需要把模拟量转换为数字量，这个过程称为模 / 数转换，完成模 / 数转换的电路称为A / D转换器，简称ADC。实现 A / D转换，一般需要通过采样、保持、量化、编码四个步骤。



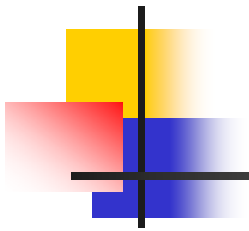
## 1. 采样保持与采样保持电路

所谓采样，就是把一个在时间上连续变化的模拟信号按一定的时间间隔和顺序进行采集，形成在时间上离散的模拟信号。即把随时间连续变化的模拟量变换为一串脉冲信号，这种脉冲信号是等距离的，幅值决定于当时模拟量的大小。由于采样有一定的时间间隔，在采样时间间隔内，



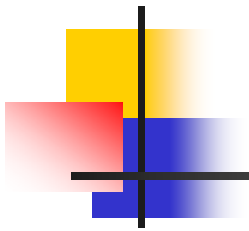
---

采取的“样值”应该是保持不变的，真实的表现该时刻模拟量的大小。因此，在采样时间间隔内，对采样的“样值”应该加以保持，直至下一次采样时刻的到来。

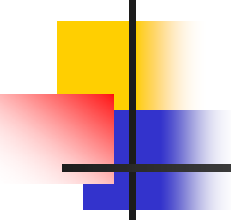


---

S是采样开关，C是保持电容。S受采样信号 $V_S$ 的控制， $V_S$ 为高电平，S闭和； $V_S$ 为低电平，S断开。S闭合时间为采样时间 $T_{W1}$ ，S断开时间为保持时间 $T_{W2}$ ，则采样周期 $T_S = T_{W1} + T_{W2}$ 。在S闭合时间内， $u_i$ 给电容C充电，设输入阻抗足够大，

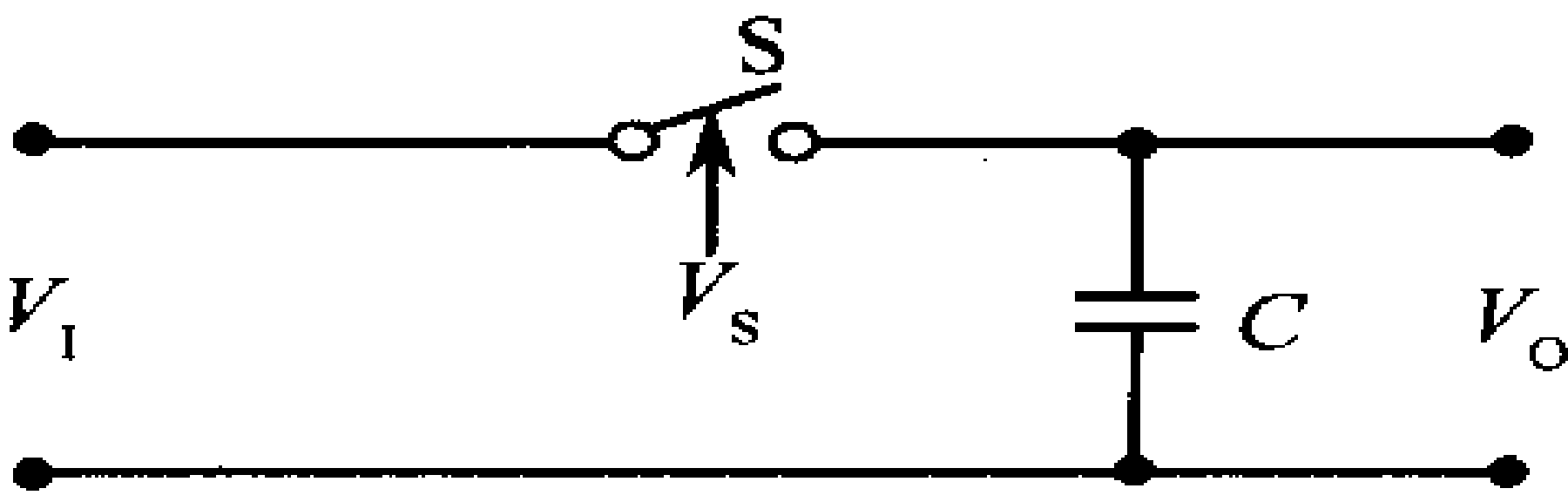
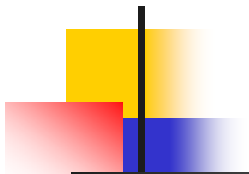


图中采样保持的原理如图10.1.1 (a) 所示。采样电压  $V_C = u_i$ 。在S断开时间内，输入阻抗足够大，电容无放电回路，电容C上电压保持不变， $V_C$  保持在上一次采样结束时刻的瞬时值上，直至下一采样时间的到来。采样电路的输出波形  $u_o$  如图10.1.1 (b) 所示，是一个阶梯波，阶梯波的包络线等效输入信号  $u_i$  的

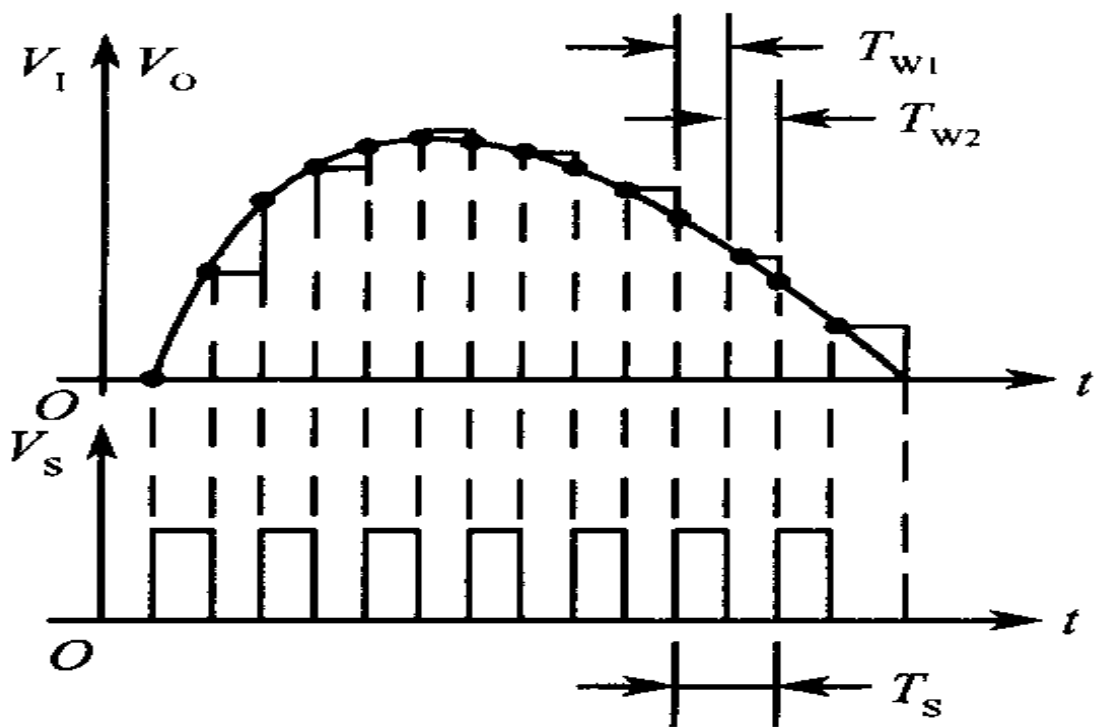


---

波形描述采样保持电路性能的指标主要有两个：一个是采集时间，即采集指令发出后，采样保持电路的输出由原来的保持值变化到输入值所需要的时间，要求采集时间越小越好；另一个是保持电压下降速率，即在保持阶段采样保持电路的输出电压在单位时间内所下降的幅值，要求下降的幅值越小越好。



(a) 采样保持电路



(b) 输入输出波形

图10.1.1 采样保持电路和输入输出波形



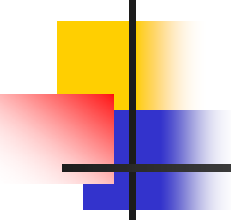


## 2. 采样定理

---

采样将连续变化的模拟信号变换成在时间上离散的一串脉冲模拟量。采样的有限脉冲能否不失真地反映原来模拟信号的波形，取决于采样的频率。研究表明，只要当采样频率大于模拟信号中最高频率成分频率的两倍时，采样值才能不失真的反映原来模拟信号的波，即：

$$f_S \geq 2f_{\max}, \quad T_S \leq T_{\max}/2$$



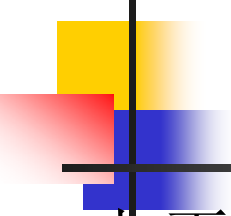
式中， $f_S$ 是采样信号 $V_S$ 的频率， $f_{max}$ 是输入模拟信号中最高频率成分的频率， $T_S$ 是采样信号 $V_S$ 的采样周期， $T_{max}$ 是输入模拟信号中最高频率成分的周期。在工程应用中，一般选择采样频率为：

$$f_S > (3 \sim 5) f_{max}。$$



### 3. 量化与编码

采样保持电路在保持阶段输出的离散模拟量是一个电平信号。要把这个电平数值转换为二进制的数字量，首先确定最小量化单位，以最小量化单位的整数倍确定量化区段，用二进制数表示每个量化区段的上限值和下限值，并且根据满量程数值的大小确定二进制数的位数。根据采样保持电路输出的




---

电平信号落在的量化区段，取该量化区段的上限值或者下限值的二进制数，来表示采样保持电路输出的电平信号的近似值，这个过程叫量化。所取的最小数字单位称为量化单位，用  $\Delta$  表示。把量化的结果用代码（二进制或者其他进制）表示出来，这一过程称之为编码。

#### 4. 模数转换器的种类

模数转换器的种类很多，基本工作原理是通过比较的



方法来实现模数转换。按比较方法来区分，可以分为直接比较型和间接比较型。直接比较型是将输入模拟信号直接与参考电压比较，进而转换为输出的数字量。属于这种类型的有并行比较型ADC和反馈比较型ADC。间接比较型是将输入信号与参考电压比较，转换为某个中间物理量再进行比较转换，其中间变量有时间、频率，属于这种类型的有V/T型ADC和V/F型ADC。

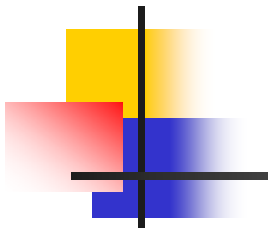


## 10.1.2 Multisim 2001中的A/D转换电路

---

在Multisim 2001仿真软件中只有一种A/D转换电路，是将输入的模拟信号转换成8位的数字信号输出，其中：


VIN——模拟电压输入端子。



VREF+——参考电压“+”端子，要接直流参考源的正端，其大小视用户对量化精度的要求而定。由于输出是8位，若VREF为5V，则输入信号对应的量化离散电平为：

$$V_{in} \times 256 / V_{fs}$$

为满刻度电压， $V_{in}$ 模拟输入电压。 $V_{fs} = (V_{REF+}) - (V_{REF-})$ 。

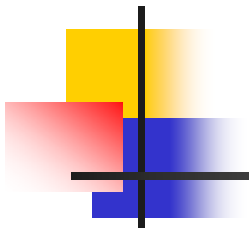


---

VREF——参考电压“-”端子，一般与地连接。

SOC——为启动转换信号端子，只有端子电平从低电平变成高电平时，转换才开始，转换时间 $1\mu\text{s}$ ，期间EOC为低电平。EOC——转换结束标志位端子，高电平表示转换结束。OE——输出允许端子，可与EOC接在一起。





---

A / D转换器仿真电路如图10.1.2所示，改变电位器RP的大小，即改变输入模拟量，在仿真电路中可观察到输出端数字信号的变化。

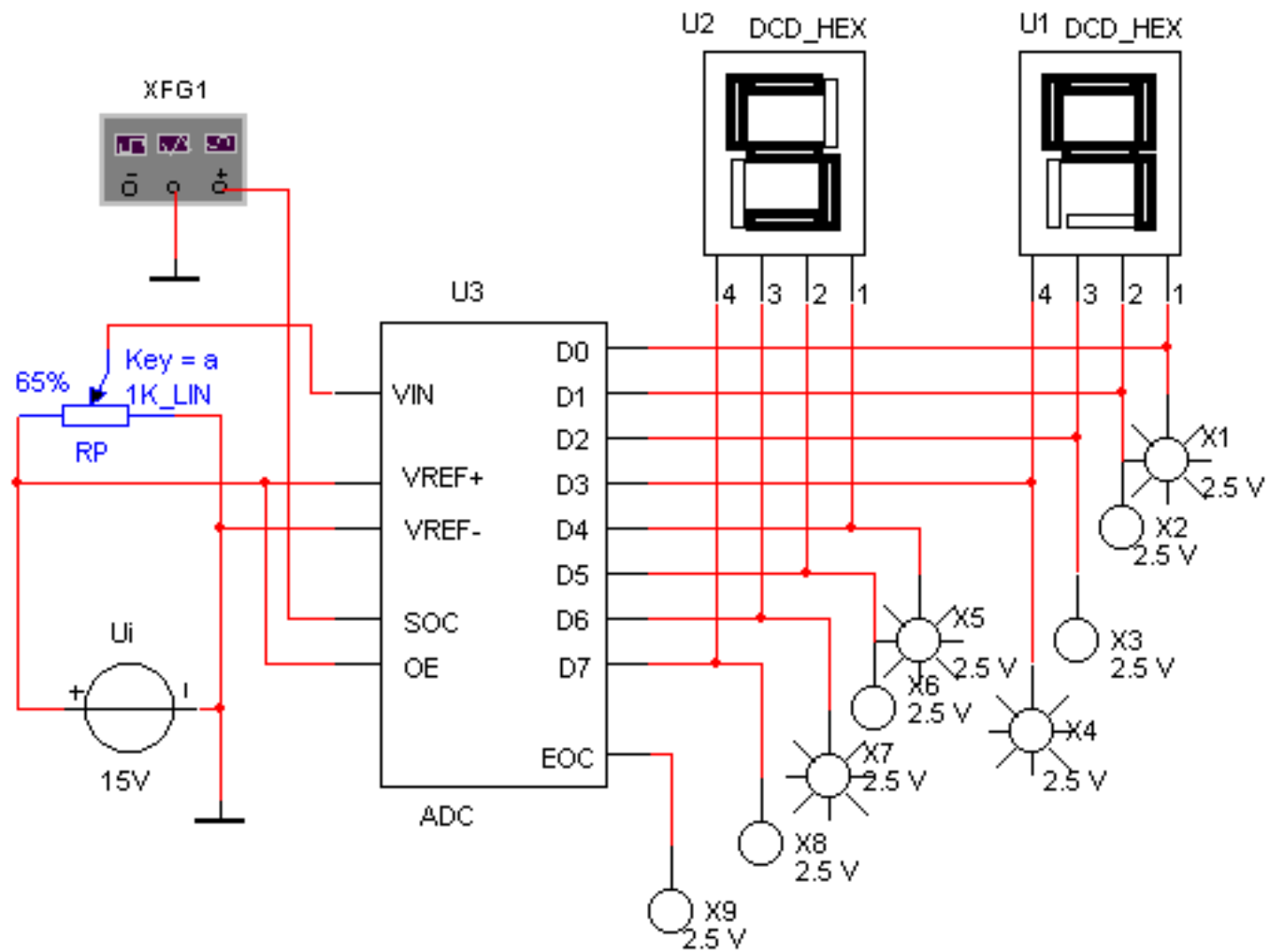
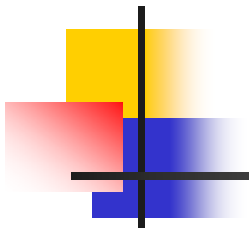


图10.1.2 A / D转换器仿真路



---

## 10.2.1 D/A转换器的基本原理



---

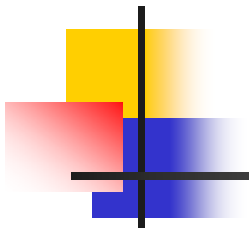
利用电阻网络将数字量的每位数码的权值转换成相对应的模拟信号，然后用运算放大器求和电路将这些模拟量相加完成数模转换的电路称为电阻网络DAC（数/模转换器）。根据不同的电阻网络结构，DAC有权电阻网络DAC、T型电阻网络DAC和倒T型电阻网络DAC等不同形式。



---

## 1. 权电阻网络DAC

4位二进制权电阻网络DAC的原理图如图10.2.1所示。电路由基准电压源 $V_{REF}$ ，权电阻网络，模拟开关S和运算放大器求和电路四部分组成。



---

权电阻网络中各位电阻的阻值与数字量的权值相对应，电子开关受输入的各位数字信号控制。当数字量为1时，开关S接通 $V_{REF}$ ；当数字量为0时，开关S接通地电位。求和放大器A把各支路电流相加，通过反馈电阻 $R_F$ 转换为输出模拟电压 $V_0$ ，显然 $V_0$ 与输入数字量成正比。

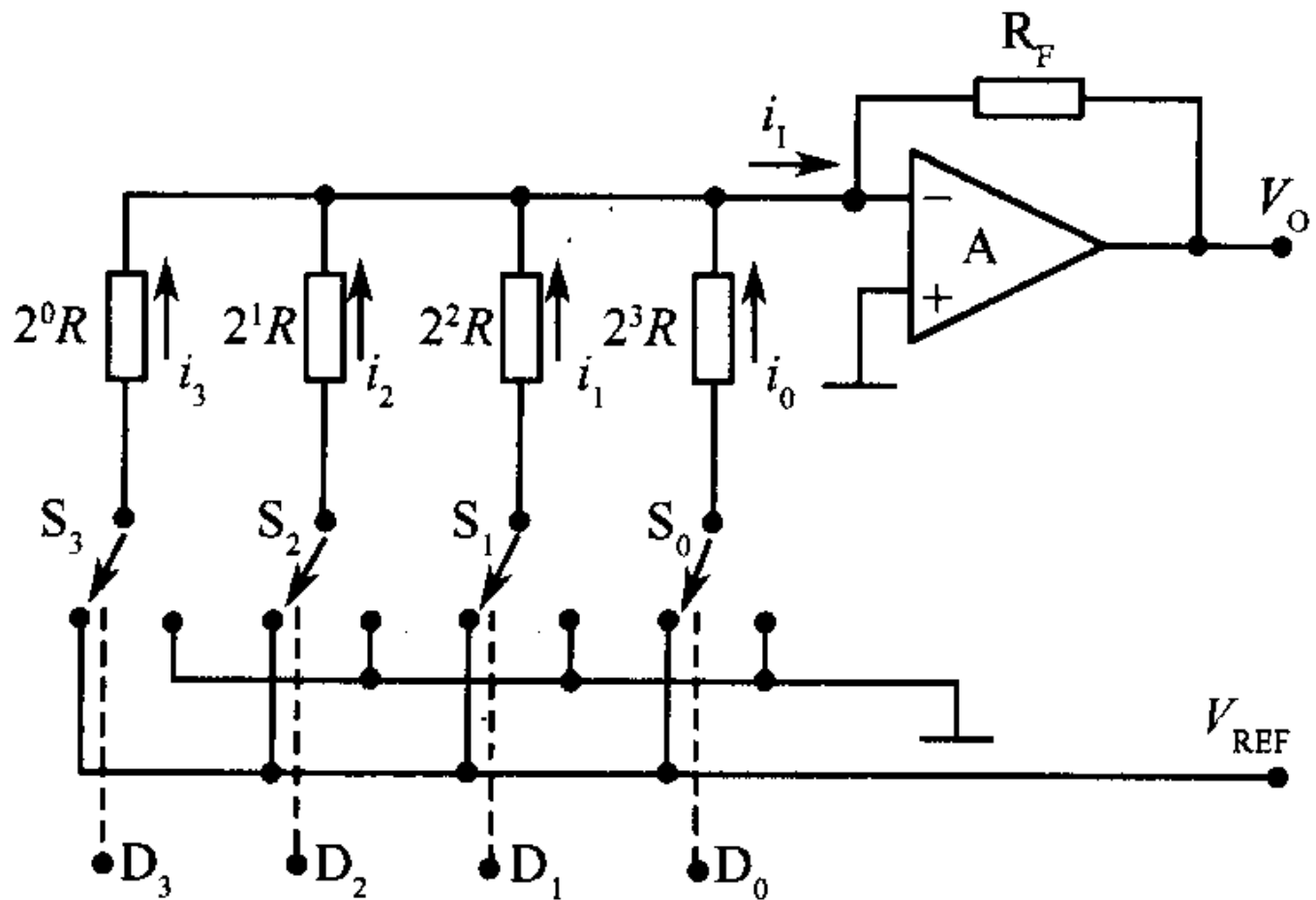
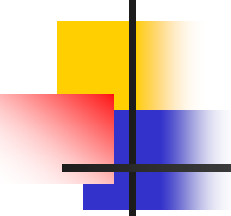


图 10.2.1 4位二进制权电阻网络DAC电路

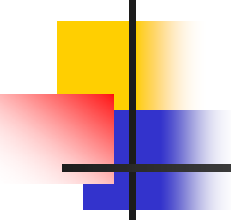


从图10.2.1可得：

$$\begin{aligned}i_I &= i_0 + i_1 + i_2 + i_3 = D_3 \frac{V_{\text{REF}}}{2^0 R} + D_2 \frac{V_{\text{REF}}}{2^1 R} + D_1 \frac{V_{\text{REF}}}{2^2 R} + D_0 \frac{V_{\text{REF}}}{2^3 R} \\&= \frac{V_{\text{REF}}}{2^3 R} (D_3 \times 2^3 + D_2 \times 2^2 + D_1 \times 2^1 + D_0 \times 2^0) \\&= \frac{V_{\text{REF}}}{2^3 R} \sum_{i=0}^3 D_i \times 2^i .\end{aligned}$$

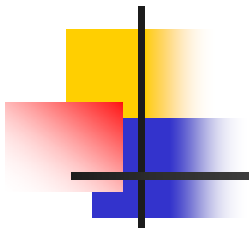
$$V_o = -i_I R_F = -\frac{V_{\text{REF}} R_F}{2^3 R} \sum_{i=0}^3 D_i \times 2^i$$





将图10.2.1中得4位二进制权电阻网络DAC电路进行扩展，当数字量超过四位时，每增加一位，可以增加一个模拟开关和全电阻，这样可以构成n位二进制权电阻DAC电路，其权电阻分别为R、2R、4R、...、 $2^{n-1}R$ 。即有：

$$V_o = -\frac{V_{REF}R_F}{2^{n-1}R} \sum_{i=0}^{n-1} D_i \times 2^i$$



---

权电阻网络DAC电路十分简单，但是，当位数增多时，权电阻阻值范围越来越大。这样，一方面权电阻阻值种类太多，集成电路制造比较困难；另一方面各位权电阻值与二进制数位成反比，高位权电阻的误差对输出电流的影响比低位大得多，因此对高位权电阻的精度和稳定性要求很高。这样给制造生产带来很大的困难。



---

## 2. T型电阻网络DAC

4位T型电阻网络DAC如图10.2.2所示。电路由R-2R电阻解码网络、模拟电子开关和求和放大电路构成，因为R和2R组成T型，故称为T型电阻网络DAC。图中电阻网络中只有R和2R两种电阻值，克服了权电阻网络DAC存在的缺点。

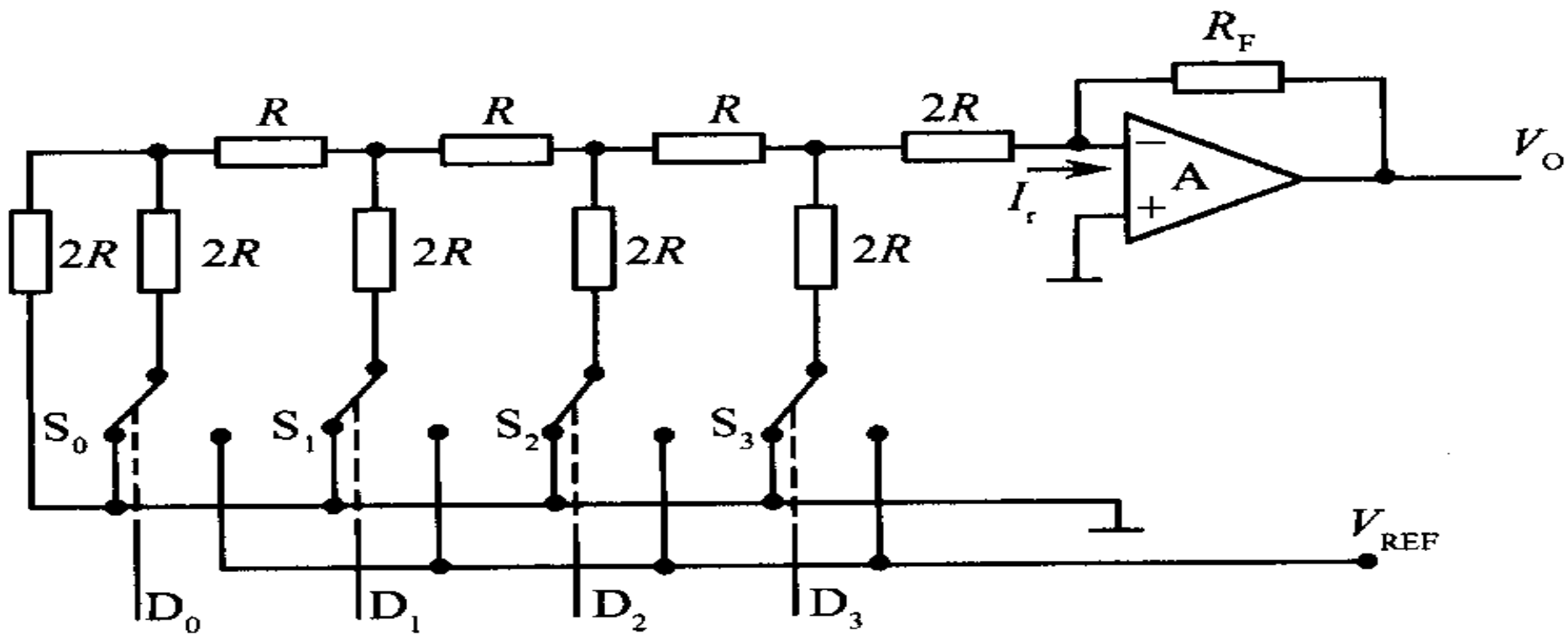


图10.2.2 4位T型电阻网络DAC电路

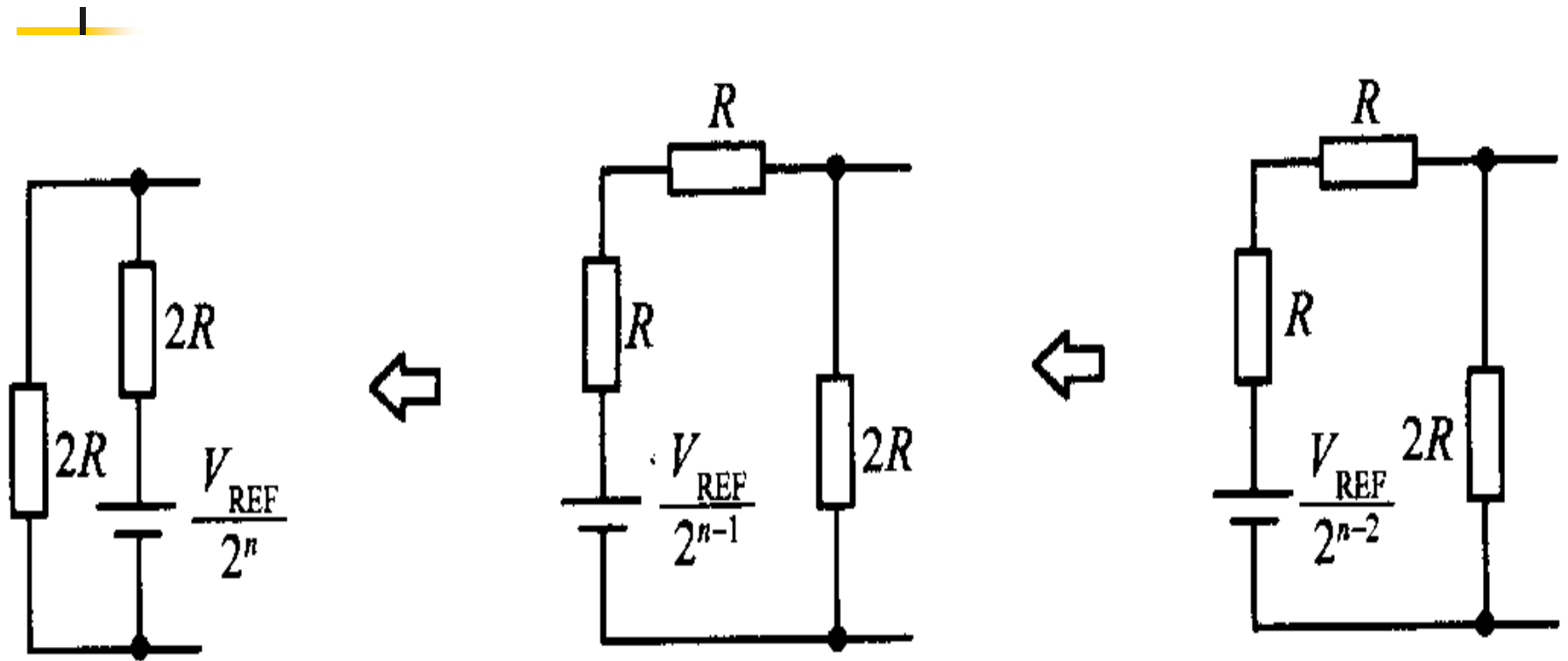
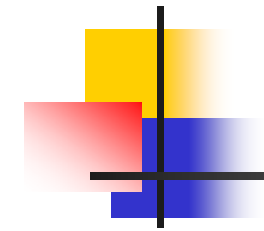
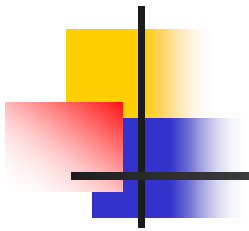


图10.2.3 T型电阻网络中的信号传递过程



由图10.2.2可知，根据等效电源定理，每经过一个电阻并联支路，等效电源电压减少一半，而等效电阻不变，均为 $R$ 。电路中的信号传递过程如图10.2.3所示。当传递至最左边时，运放的输入端等效内阻仍为 $R$ ，而等效电压经过 $n$ 级则减为 $V_{REF}/2^n$ 。当传递到运放的输入端时，其运放的等效内阻也是 $R$ ，而等效电压则为 $V_{REF}/2^{n-i}$ 。



---

根据叠加原理，运放总的等效电压是各支路等效电压之和，即：

$$V_e = V_{\text{REF}}(D_3 \times 2^3 + D_2 \times 2^2 + D_1 \times 2^1 + D_0 \times 2^0) / 2$$



若取 $R_F = 3R$ ，运放的输入端电流为：

$$I_r = \frac{V_{REF}}{3R \times 2^4} (D_3 \times 2^3 + D_2 \times 2^2 + D_1 \times 2^1 + D_0 \times 2^0)$$

运放的输出电压 $V_O$ 为

$$V_O = I_r R_F = \frac{V_{REF}}{2^4} (D_3 \times 2^3 + D_2 \times 2^2 + D_1 \times 2^1 + D_0 \times 2^0)$$

可见，输出模拟量 $V_O$ 与输入数字量成正比。  
同理，T型电阻网络的输入数字量也可以扩展到n位二进制数。





### 3. 倒T型电阻网络DAC

倒T型电阻网络DAC电路如图10.2.4所示，电路由倒T型电阻译码网络，电子开关和运算放大电路三部分构成。图中运算放大器的反相输入端“虚地”，电位为0。因此，无论电子开关S倒向哪一边，都相当接在地电位上，因而流过每个支路的总电流始终不变。

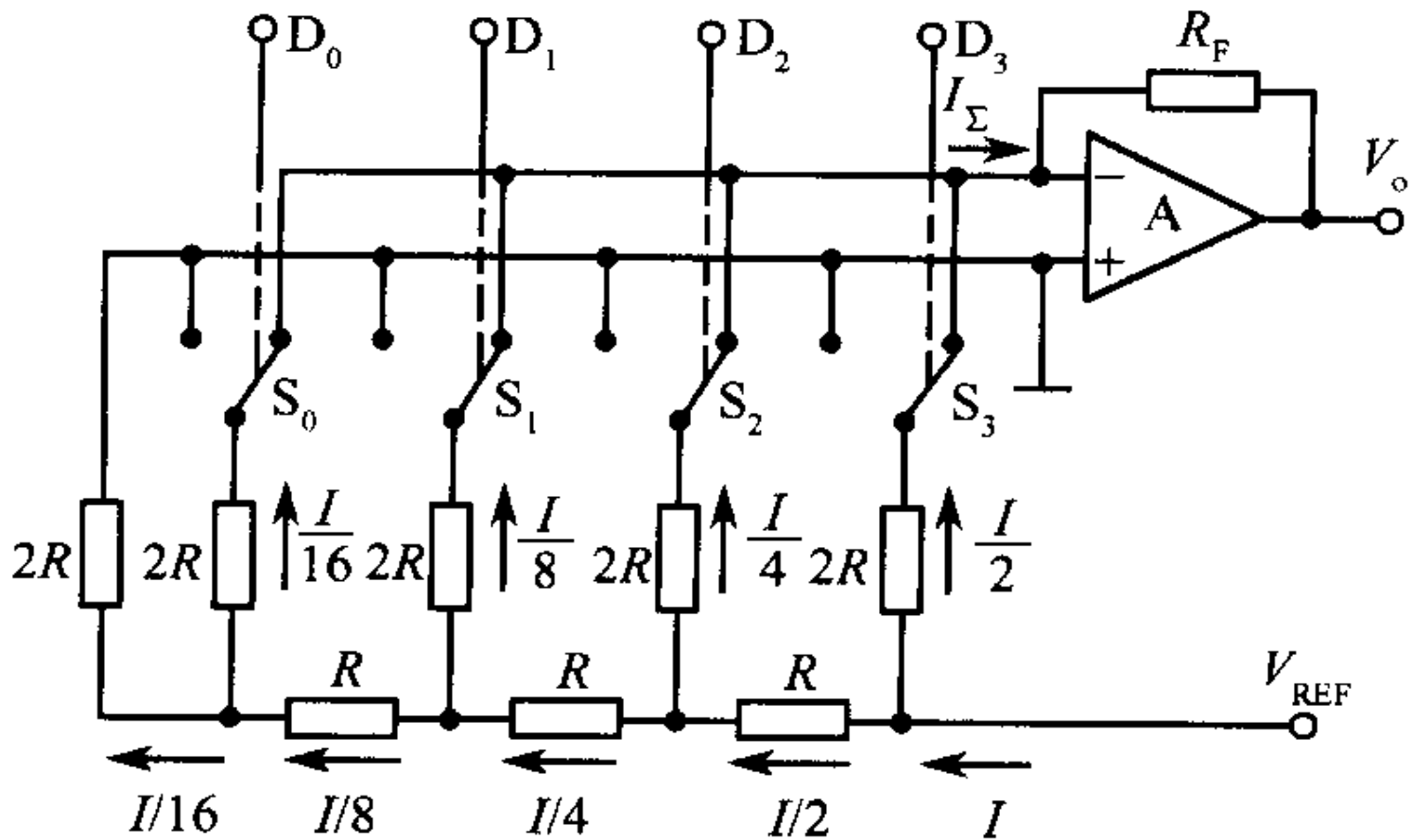


图10.2.4 倒T型电阻网络DAC电路

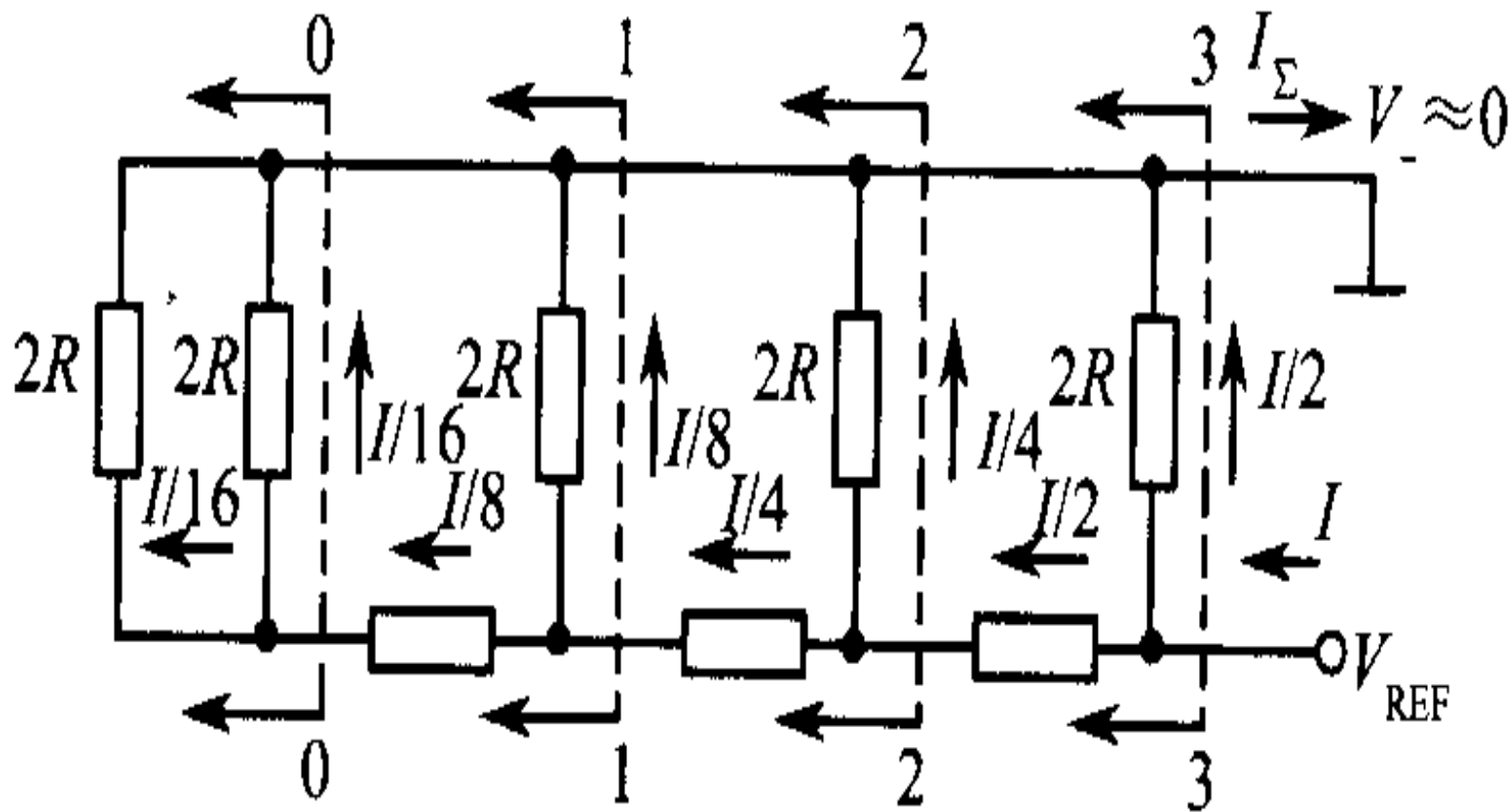
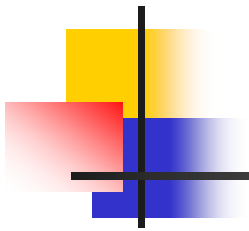


图10.2.5 倒T型电阻网络等效电路



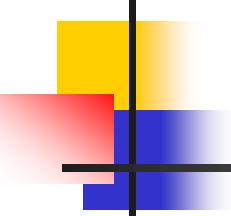
倒T型电阻网络的等效电路如图10.2.5所示。图中无论从00, 11, 22, 33哪个端口向左看, 其等效电阻都是R, 因此流过每个支路的电流

从 
$$I_3 = I/2 = 1/2(V_{\text{REF}}/R) = \frac{V_{\text{REF}}}{16R} \times 2^3$$

$$I_2 = I/4 = 1/4(V_{\text{REF}}/R) = \frac{V_{\text{REF}}}{16R} \times 2^2$$

$$I_1 = I/8 = 1/8(V_{\text{REF}}/R) = \frac{V_{\text{REF}}}{16R} \times 2^1$$

$$I_0 = I/16 = 1/16(V_{\text{REF}}/R) = \frac{V_{\text{REF}}}{16R} \times 2^0$$



可见各支路电流按二进制权值大小依次减小。  
当电子开关S都连接到运算放大器的反相输入端  
时，流过运放的电流为：

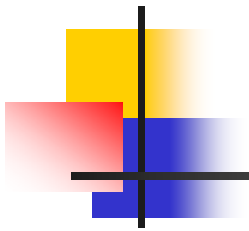
$$\begin{aligned} i_F = i_\Sigma &= \frac{V_{\text{REF}}}{16R} \times 2^3 + \frac{V_{\text{REF}}}{16R} \times 2^2 + \frac{V_{\text{REF}}}{16R} \times 2^1 + \frac{V_{\text{REF}}}{16R} \times 2^0 \\ &= \frac{V_{\text{REF}}}{16R} (D_3 \times 2^3 + D_2 \times 2^2 + D_1 \times 2^1 + D_0 \times 2^0) = \frac{V_{\text{REF}}}{2^4 R} \sum_{i=0}^3 D_i \times 2^i \end{aligned}$$



---

输出模拟电压 $V_o$ 为：

$$V_o = -i_F \times R_F = \frac{V_{REF} R_F}{2^4 R} \sum_{i=0}^3 D_i \times 2^i$$



---

同理，倒T型电阻网络的输入数字量也可以扩展到n位二进制数，有：

$$i_{\text{E}} = \frac{V_{\text{REF}}}{2^n R} \sum_{i=0}^{n-1} D_i \times 2^i$$

$$V_{\text{o}} = \frac{V_{\text{REF}} R_{\text{F}}}{2^n R} \sum_{i=0}^{n-1} D_i \times 2^i$$

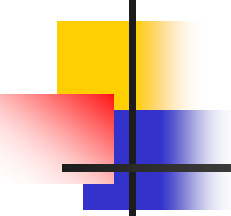


---

由此可知，输出模拟电压与输入数字量成正比。

T型和倒T型电阻解码网络DAC的优点是只有两种电阻值 $R$ 和 $2R$ ，有利于生产制造。由于支路电流不变，不需要电流建立时间，有利于提高工作速度。T型和





---

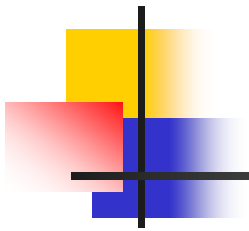
倒T型电阻网络DAC是目前使用最多的一种。除上述介绍的电阻网络DAC外，还有权电流DAC、开关树型DAC、权电容网络DAC、串行DAC等。但在DAC集成芯片中，应用最多的是T型和倒T型电阻网络DAC。



## 10.2.2 Multisim的D/A转换器

---

在Multisim 2001仿真软件中有两种D/A转换电路，一个是电流型DAC，即IDAC，另一个是电压型DAC，即VDAC。



利用VDAC的D/A转换器仿真电路如图10.2.6所示。VDAC芯片中的 $D_0$  (D0)  $\sim$   $D_7$  (D7) 是8位数字量输入，用两个数码管显示其输入的数字量，V1为D/A转换器的基准电压。只要改变输入的数字信号，即可将数字量转换为模拟量。在图10.2.6中，按键开关中的key=A (B、C、D、E、F、G、H) 表示在仿真时按键盘上的字母键即可改变开关的触点位置。

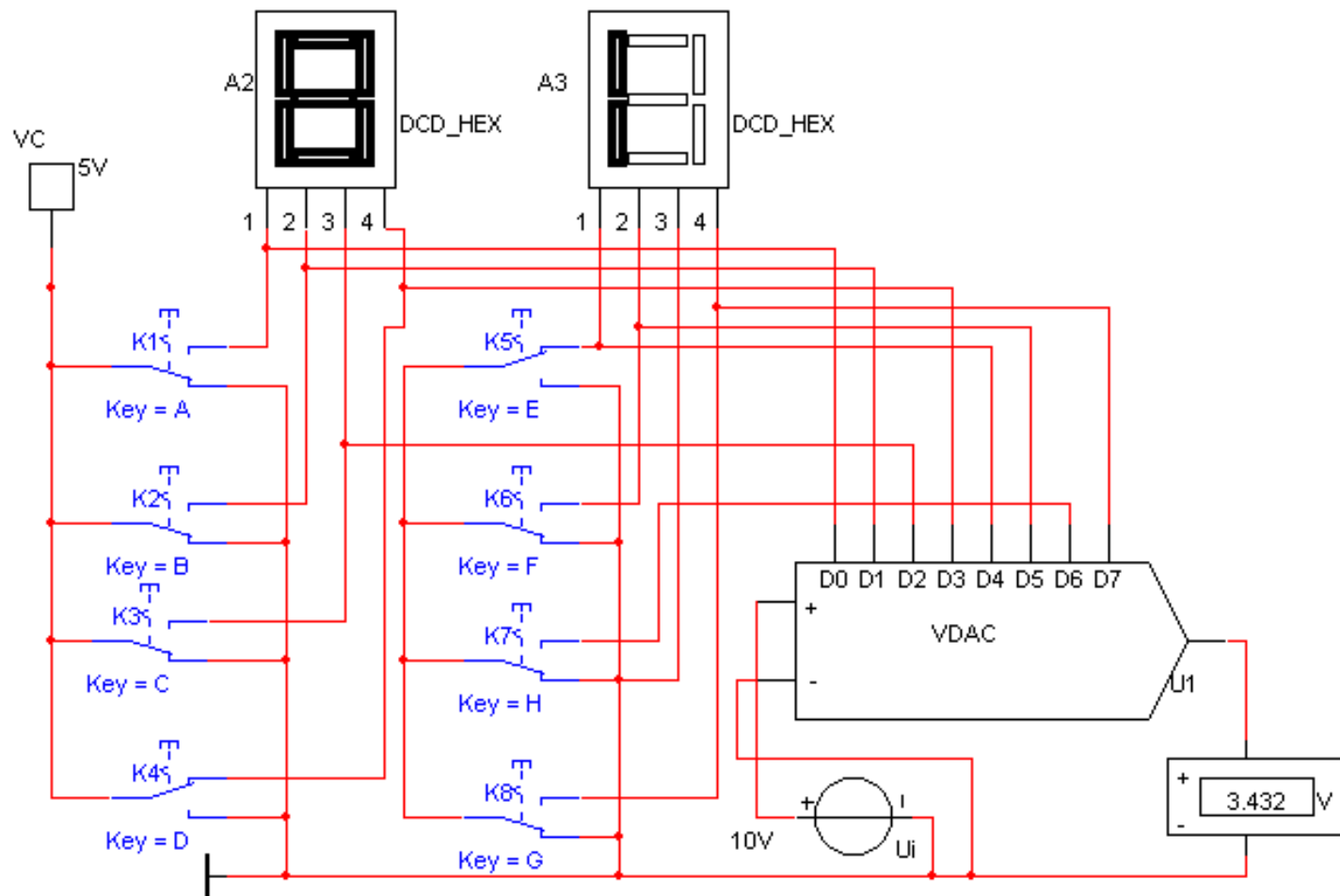
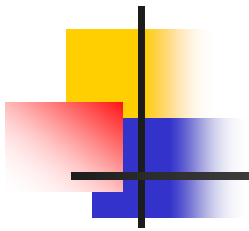


图10.2.6 在Multism环境下的  
D/A转换器仿真电路



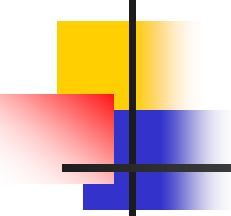
---

## 10.3 数控放大器



利用D/A转换器可以构成增益受数字信号工作的可变增益放大器。图10.3.1是一个由VDAC构成的数控放大器。放大器的输入信号加在VDAC的基准电压输入端上，从10.2.1节中的介绍可知，对于电阻网络的DAC，如倒T型电阻网络DAC，有：

$$V_o = \frac{V_{REF} R_F}{2^n R} \sum_{i=0}^{n-1} D_i \times 2^i$$



---

图10.3.1电路中输入电压 $V_1$  等于 $V_{REF}$ ，改变数字控制信号 $D_0 \sim D_7$ 的权值，可以改变输出电压 $V_0$ 。

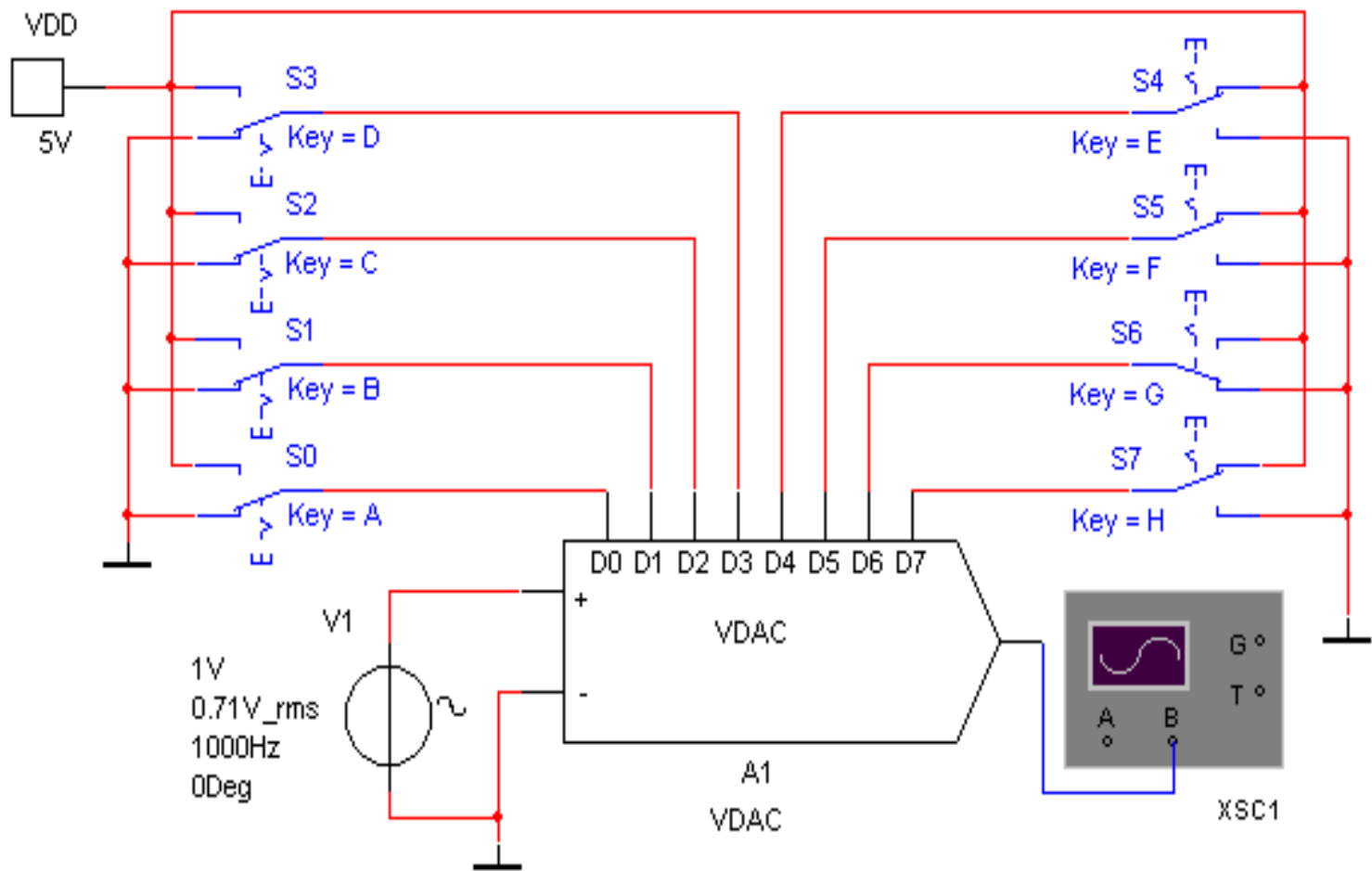
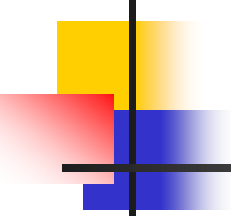


图10.3.1 数控可变增益放大器电路





---

将D/A转换器与微控制器等电路相连，可以构成可编程的数控可变增益放大器电路，示意图如图10.3.2所示。

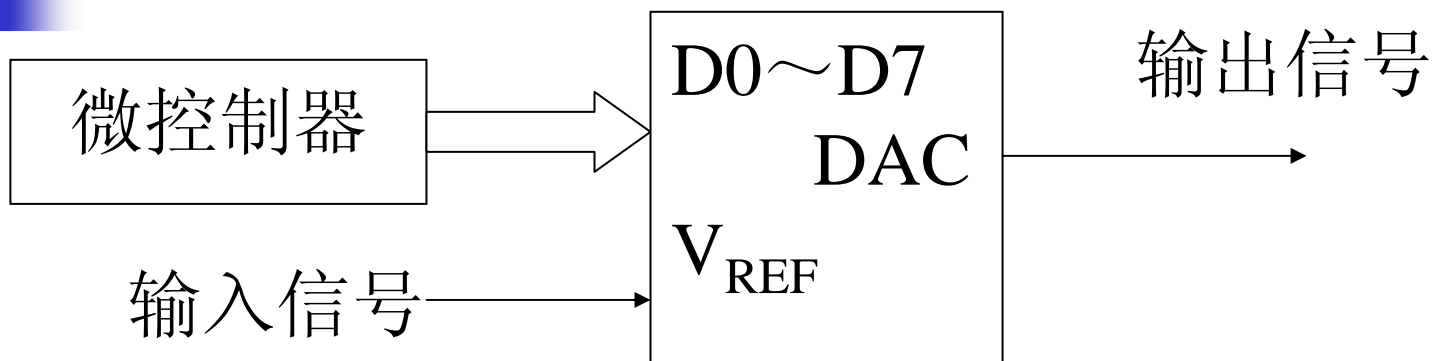


图10.3.2 可编程的数控可变增益放大器电路



---

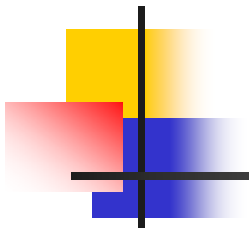
## 10.4 可编程任意波形发生器



从10.2.1节中的介绍可知，对于电阻网络的DAC，如倒T型电阻网络DAC，有：

$$V_o = \frac{V_{REF} R_F}{2^n R} \sum_{i=0}^{n-1} D_i \times 2^i$$

改变数字控制信号D0~D7的权值，可以改变输出电压 $V_o$ 。如果利用微控制器等器件，通过编程使数字控制信号



---

D0~D7按照一定的规律变化，则DAC的输出电压是与按一定的规律变化数字控制信号D0~D7相对应的波形。DAC构成的可编程任意波形发生器如图10.4.1所示，图10.4.1中利用字信号发生器代替微控制器，字信号发生器大的一个编码例如图10.4.2所示，DAC输出波形如图10.4.3所示。改变字信号发生器的编码，即可改变DAC的输出波形。

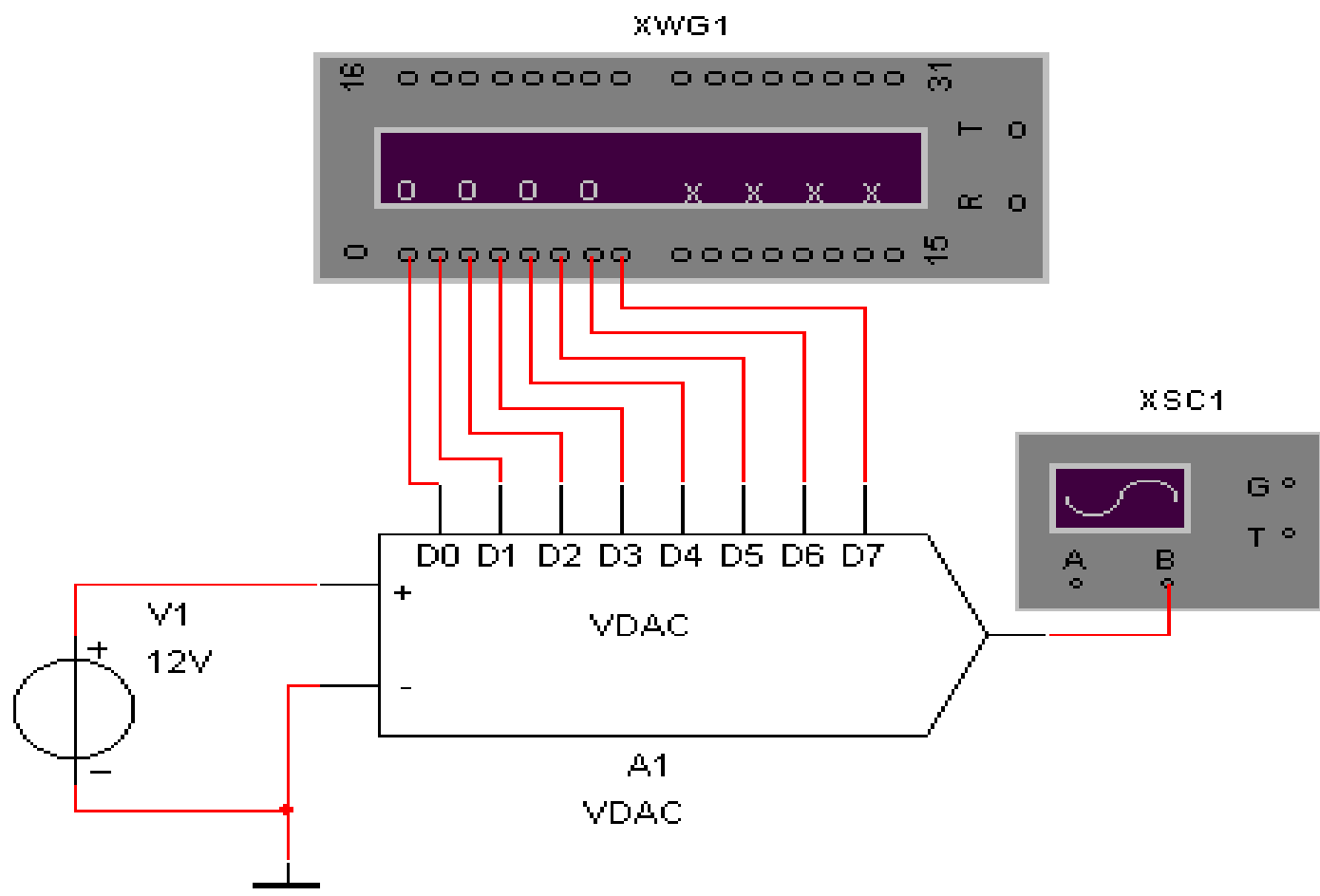
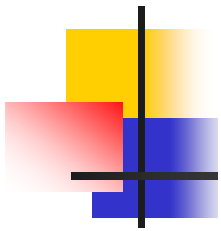


图10.4.1 DAC构成的可编程任意波形发生器

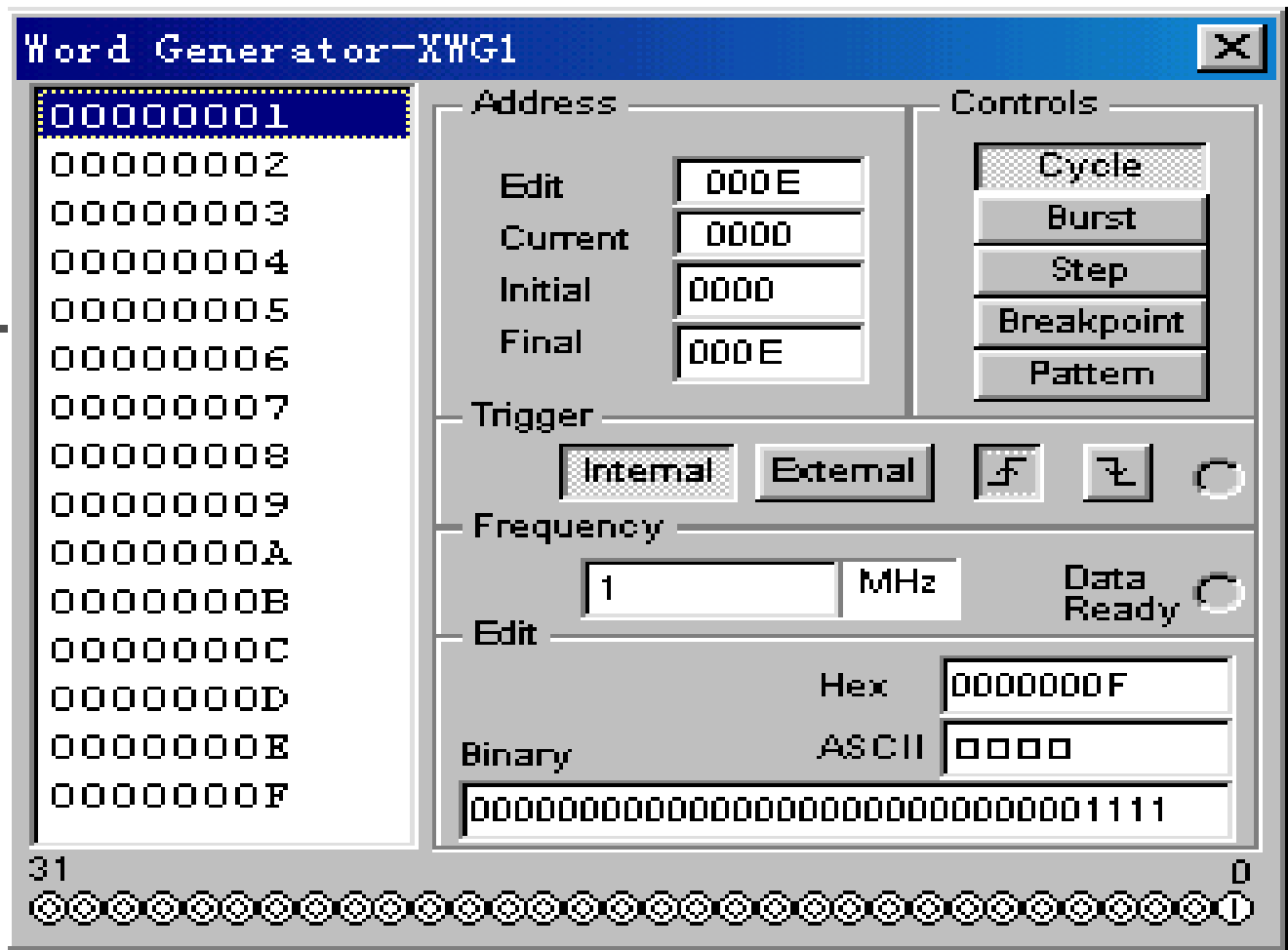


图10.4.2 字信号发生器编程状态

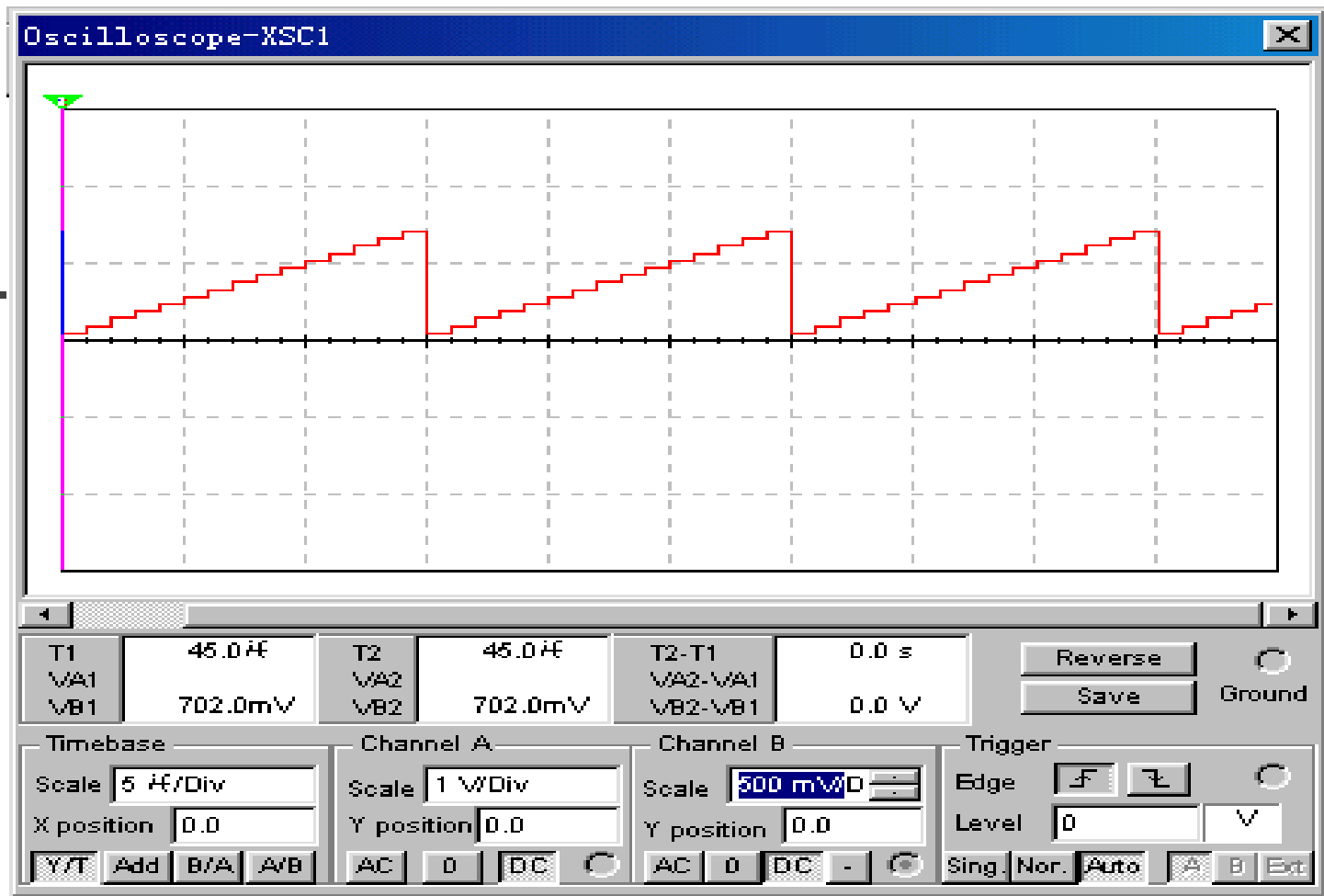


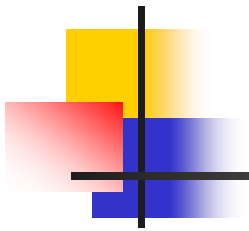
图10.4.3 DAC构成的可编程任意波形发生器输出波形例



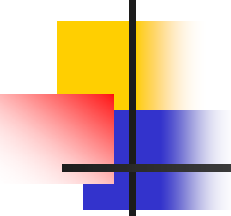


---

## 10.5 数控电压源



从10.2.1节中的介绍可知，对于电阻网络的DAC，如倒T型电阻网络DAC，有  $V_o = \frac{V_{REF} R_F}{2^n R} \sum_{i=0}^{n-1} D_i \times 2^i$  改变数字控制信号D0~D7的权值，可以改变输出电压 $V_o$ 。DAC构成的数控电压源电路如图10.5.1所示，基准电压 $V_{REF}$ 由电压源V2和输出电压 $V_o$ 通过电阻R3



---

和R4分压获得，调整电位器R4可以调节基准电压 $V_{REF}$ 和输出电压 $V_0$ （按小写字母a减少电位器的百分比，按大写字母A增加电位器的百分比）。Q1为电压调整管。改变开关A~H的触点位置，也可以改变输出电压 $V_0$ 。

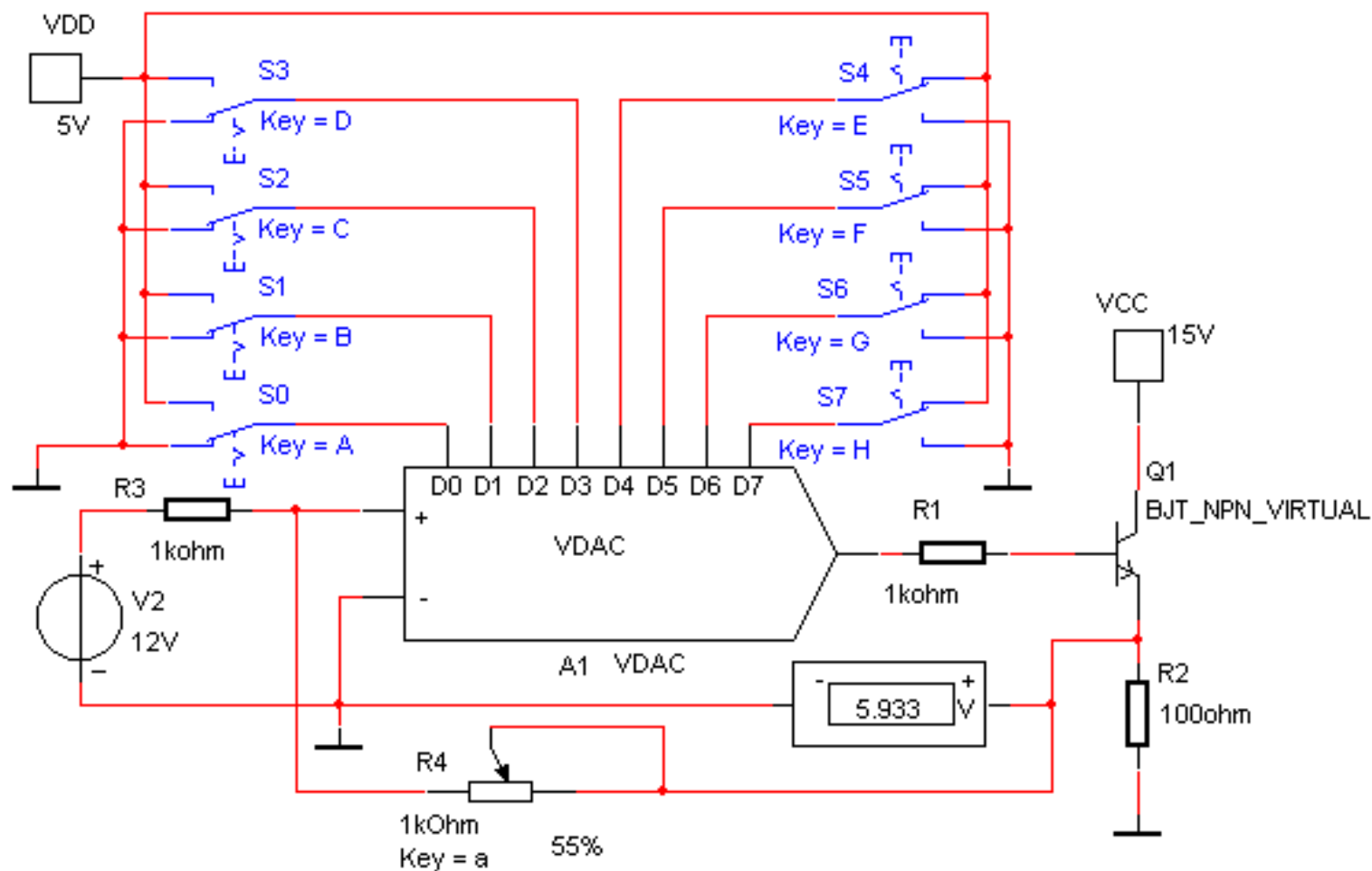
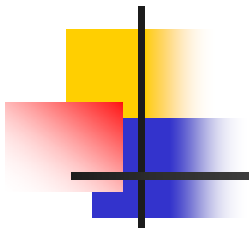


图10.5.1 DAC构成的数控电压源电路



---

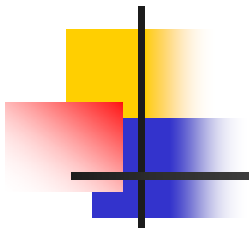
## 10.6 数控电压/电流变换器



---

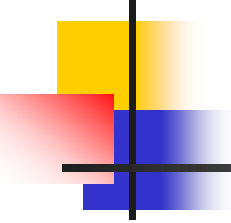
负载不接地电压 / 电流变换原理电路如图 10.6.1 所示，负载 $R_L$ 接在反馈支路，兼作反馈电阻。A1为运算放大器，则有：

$$i_L \approx i_R \approx \frac{u_i}{R}$$



---

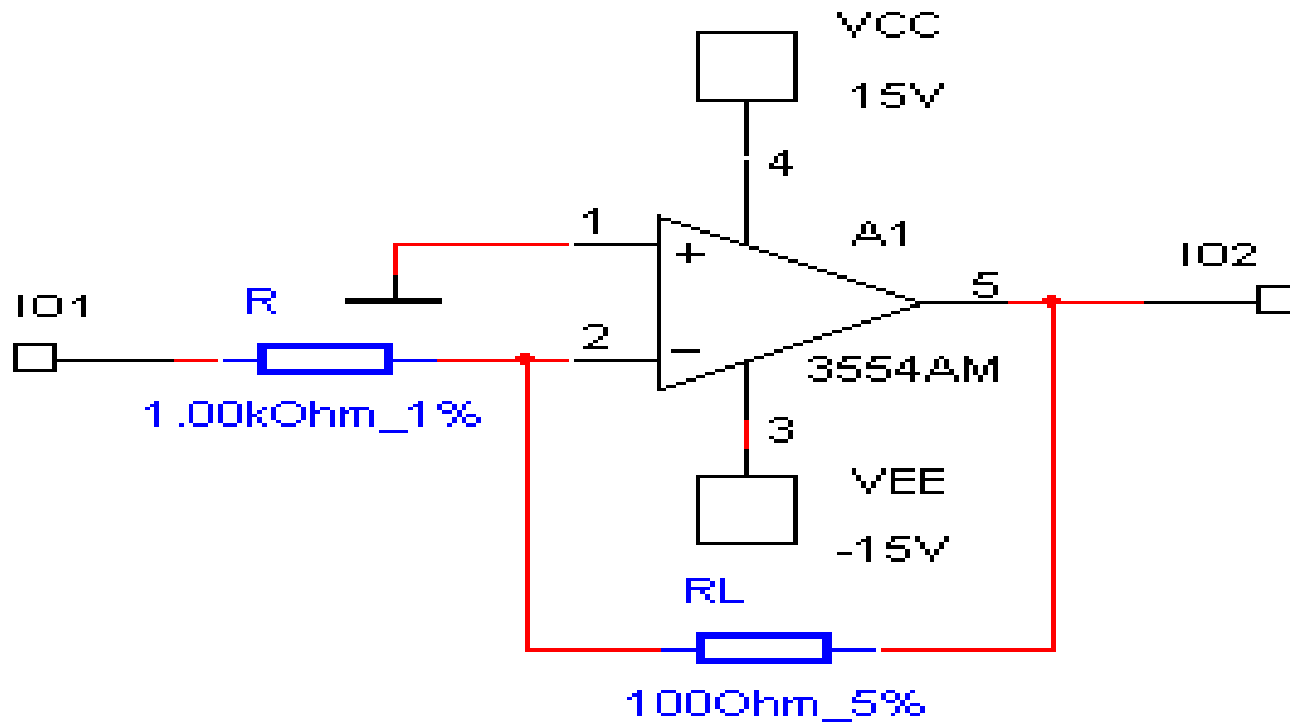
可见，负载 $R_L$ 的电流大小与输入电压 $u_i$ 成正比，而与负载大小无关，实现电压 / 电流变换。如果 $u_i$ 不变，即采用直流电源，则负载电流 $i_L$ 保持不变，可以构成一个恒流源电路。



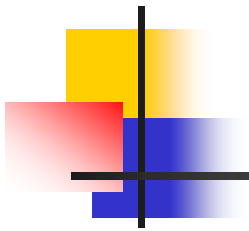
---

图10.6.1所示电路，最大负载电流受运放最大输出电流的限制；最小负载电流又受运放输入电流  $I_B$  的限制而取值不能太小，而且  $u_o = -i_L \cdot R_L$  值不能超过运放输出电压范围。

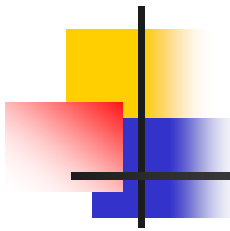




(a) 负载不接地电压 / 电流变换电路  
 图10.6.1 负载不接地U / I变换电路



由DAC和运算放大器组成的数控电压/电流变换器如图10.6.2所示。输入电压 $u_i$ （图中V1）从VDAC的基准电压端 $V_{REF}$ 输入，VDAC构成一个数控电压源，改变VDAC的D0~D7端连接开关的触点位置可以调节VDAC的输出电压（按键开关中的key=A（B、C、D、E、F、G、H），在仿真时按键盘上的对应的字母键即可改变开关的触点位置）。



---

运算放大器A2构成负载不接地电压 / 电流变换电路，在负载电阻 $R_L$ 上流过的电流（ $i_L$ ）大小与输入电压 $u_i$ 成正比例。图中XXM1和XXM2为仿真测试用。

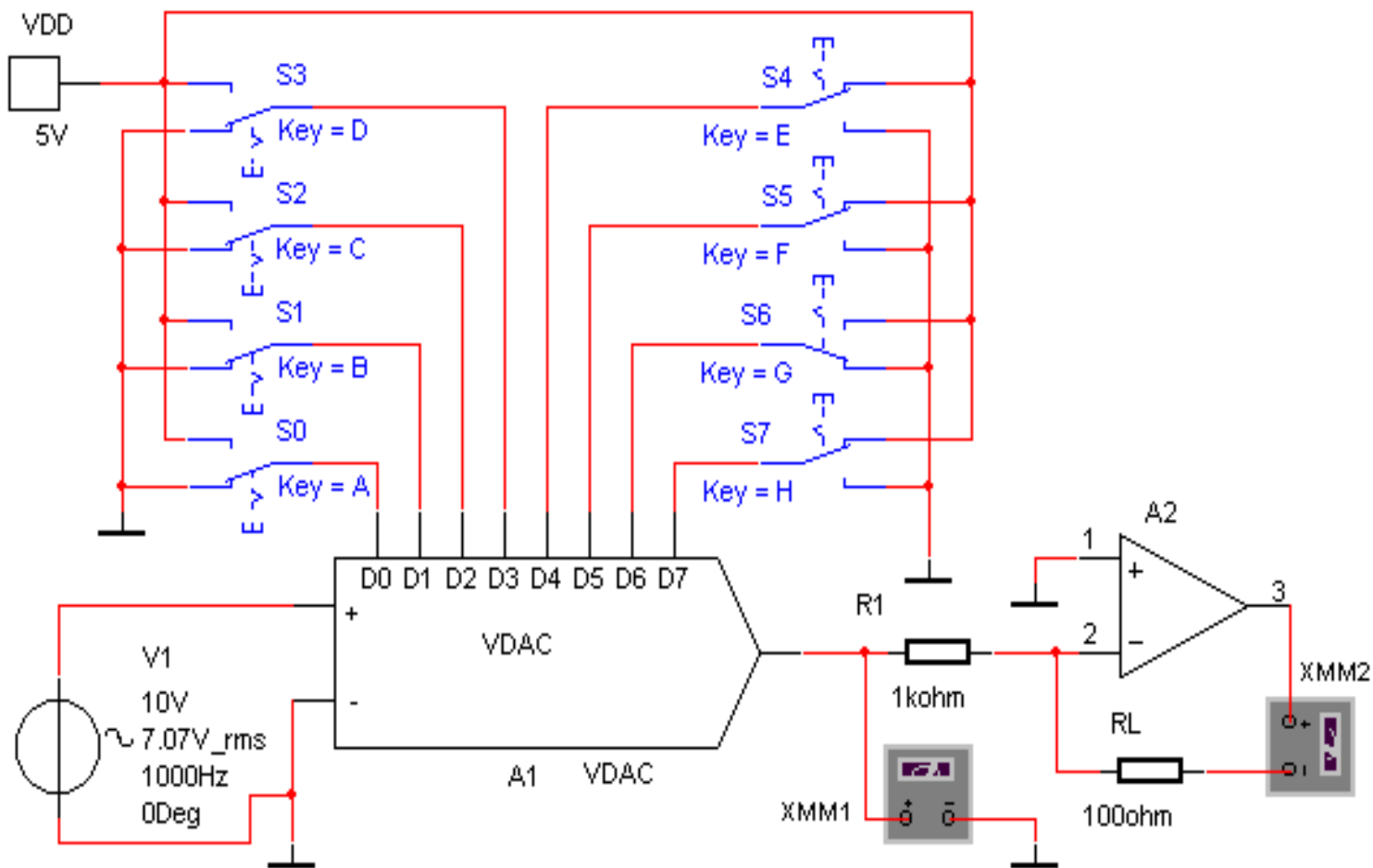


图10.6.2 数控电压/电流变换器



## 10.7 数控恒流源电路

由运算放大器组成的恒流源电路如图10.7.1 (a) 所示,

忽略  $I_B$  ( $I_B \ll I_R$ ), 其负载电流  $I_L$  为  $I_L = I_R = \frac{E}{R}$

为提高恒流源电路的输出电流, 改进的电路如图10.7.1

(b) 所示, 负载电流为  $I_L = \alpha I_E = \alpha \frac{E}{R_1}$

运放A输出电流  $I_o$  为  $I_o = \frac{I_L}{\beta} = \frac{E}{(1 + \beta)R_1}$

可见图10.7.1 (b) 所示电路, 输出电流扩大  $\beta$  倍。

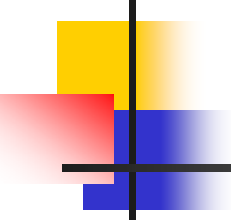


---

由运算放大器组成的恒流源电路如图

10.7.1 (a) 所示, 忽略 $I_B$  ( $I_B \ll I_R$ ), 其负载电流 $I_L$ 为:

$$I_L = \alpha I_E = \alpha \frac{E}{R_1}$$

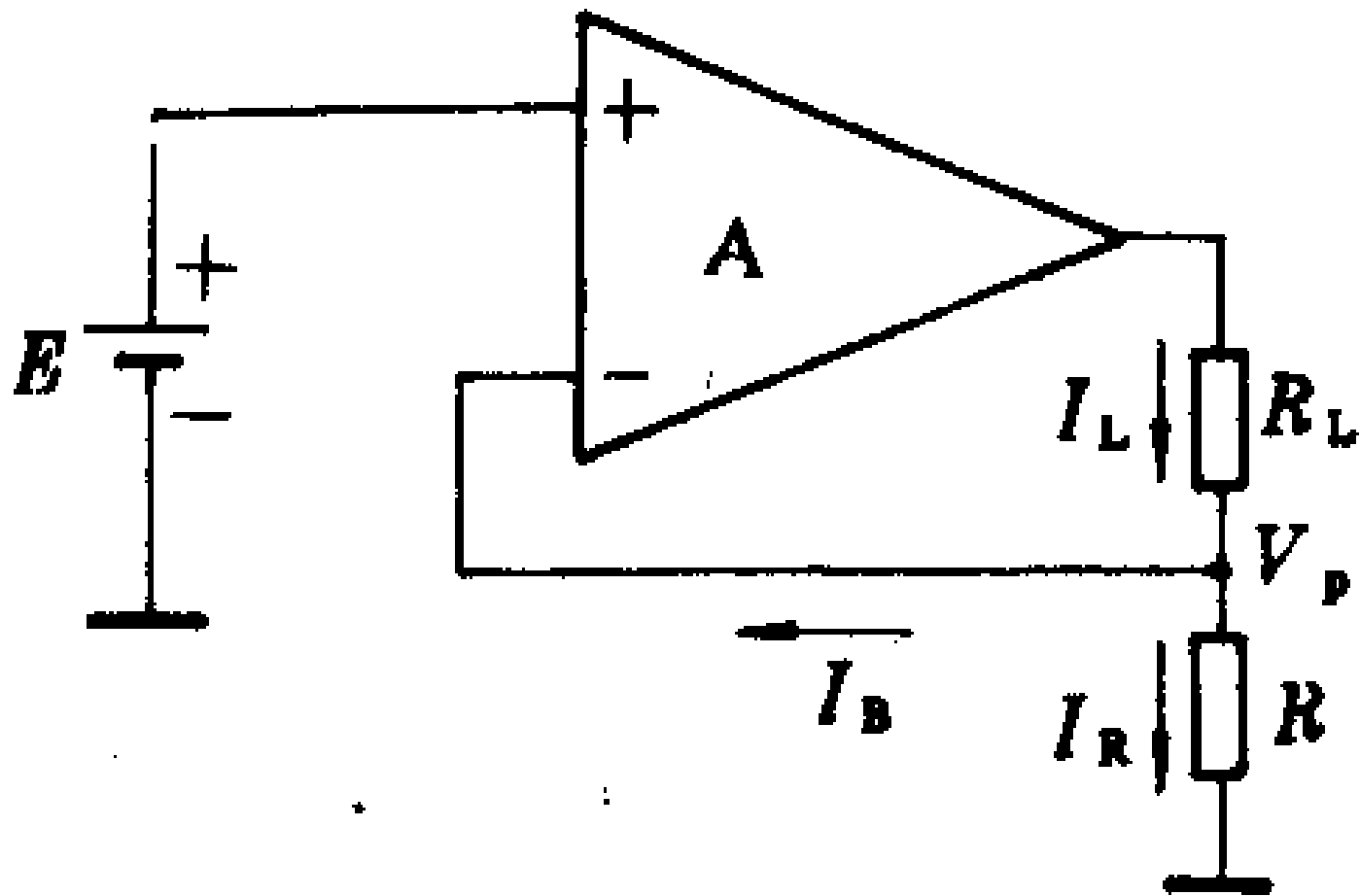


---

运放A输出电流 $I_o$ 为：

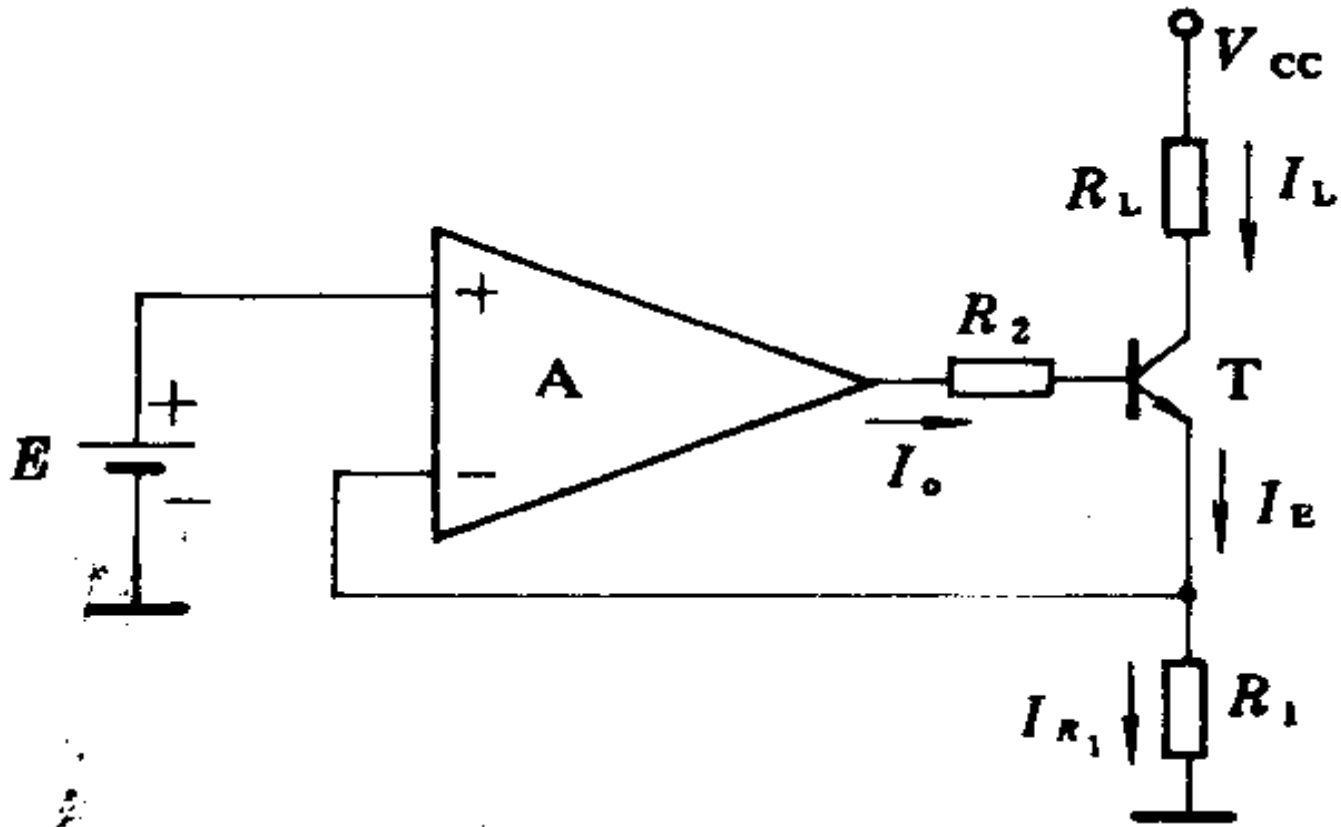
$$I_o = \frac{I_L}{\beta} = \frac{E}{(1 + \beta)R_1}$$

可见图10.7.1 (b) 所示电路，输出电流扩大  $\beta$  倍。



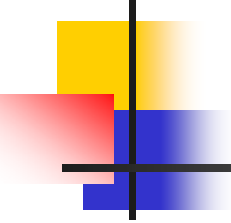
(a) 运算放大器构成的恒流源电路





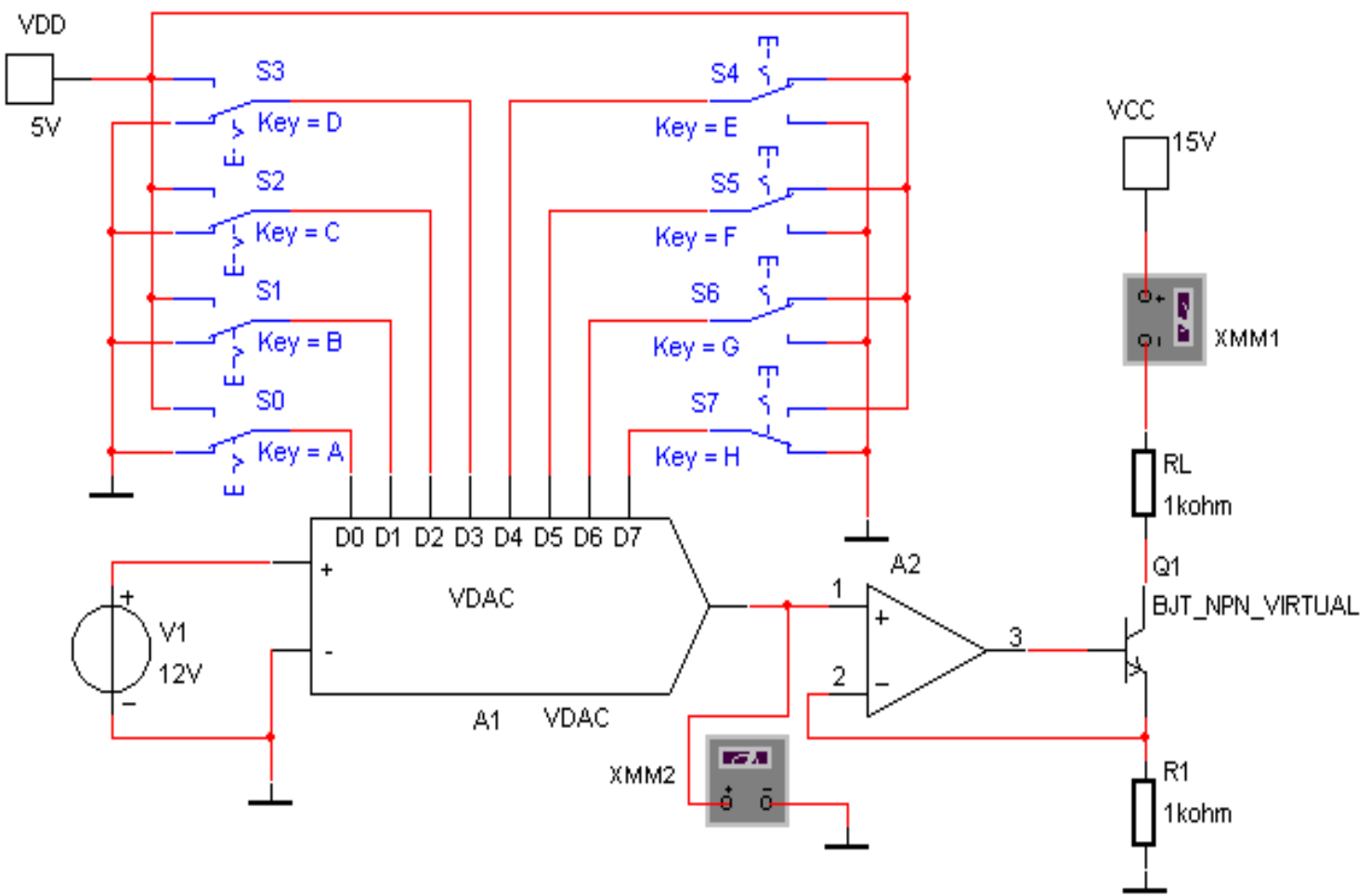
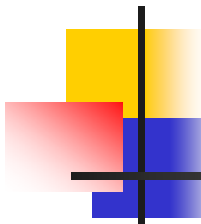
(b) 改进的恒流源电路

图10.7.1 恒流源电路

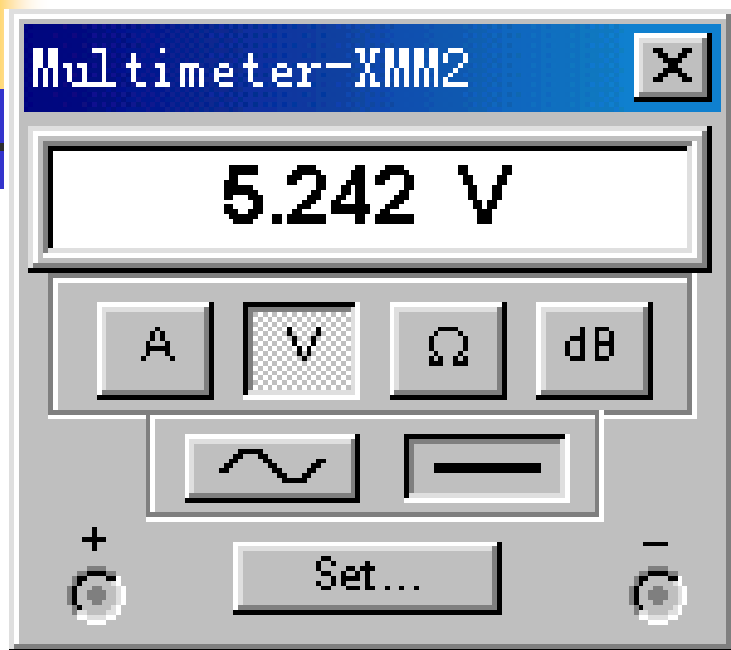


---

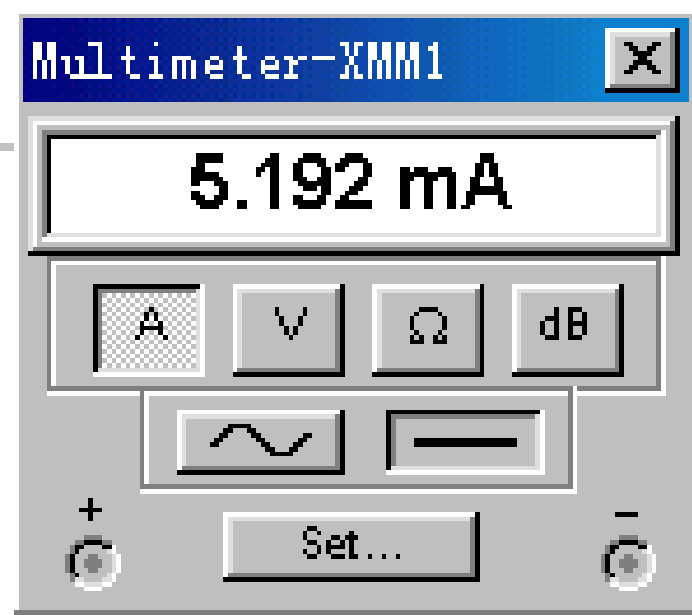
由VDAC和运算放大器组成的数控恒流源电路如图10.7.2所示。图中VDAC构成数控直流电压源，运算放大器构成恒流源电路，改变开关触点位置，可以调节恒流源电路输出电流。



(a) 数控恒流源电路

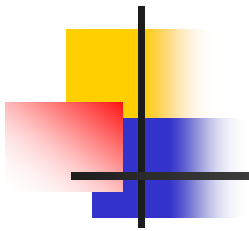


(b) DAC输出电压



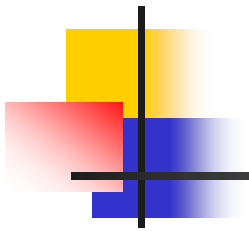
(c) 负载电流

图10.7.2 DAC和运算放大器组成的数控恒流源电路



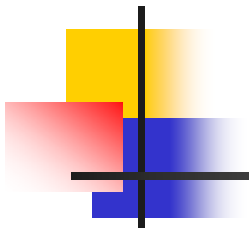
---

## 本章小结



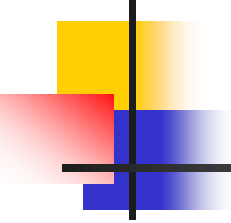
---

在自动控制与信息处理技术中往往需要把模拟量转换为数字量，或者将数字量转换为模拟量，前者称为模 / 数转换电路（A / D）转换器，简称ADC），后者称为数 / 模转换电路（D / A）转换器，简称DAC）。本章主要内容有：



---

(1) Multism的A/D和D/A转换器电路。A/D转换电路将输入的模拟信号转换成8位的数字信号输出。Multism的D/A转换器电路有IDAC和VDAC两种，将输入的8位数字信号转换成模拟信号输出。



---

(2) 可改变电路输出增益的数控可变增益放大器电路。

(3) 可改变输出波形的可编程任意波形发生器

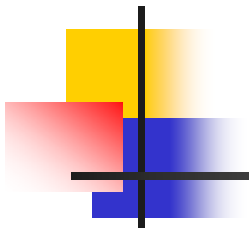
(4) 可改变电路输出电压的数控电压源电路

(5) 由DAC和运算放大器组成的数控电压/电流变换器

(6) 由DAC和运算放大器组成的数控恒流源电路

。





---

本章的重点是掌握A/D和D/A转换器电路组成的应用电路的仿真设计与分析方法。DAC与一些运算放大器应用电路结合，通过按键开关或者微控制器编程改变D/A转换器的D0~D7的状态，可以构成各种各样的可编程数控电路。



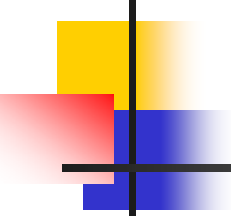
## 思考题与习题

---

10.1 根据第3.2节积分与微分电路原理，试设计一个数控可编程的积分与微分电路。

10.2 根据第3.3节一阶有源低通滤波器电路原理，试设计一个数控可编程的一阶有源低通滤波器。

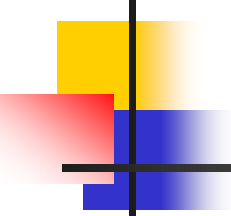
。



---

10.3 根据第3.4节二阶有源低通滤波器电路原理，试设计一个数控可编程的二阶有源低通滤波器。

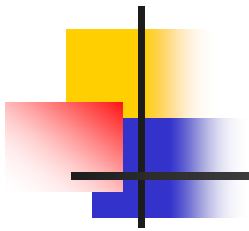
10.4 根据第3.5节二阶有源高通滤波器电路原理，试设计一个数控可编程的二阶有源高通滤波器。



---

10.5 根据第3.6节二阶有源带通滤波器电路原理，试设计一个数控可编程的二阶有源带通滤波器。

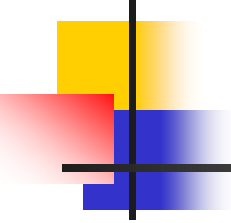
10.6 根据第3.9节对数器电路原理，试设计一个数控可编程的对数器电路。



---

10.7 根据第3.10节指数器电路原理，试设计一个数控可编程的指数器电路。

10.8 根据第4.2节R-C正弦波振荡器电路原理，试设计一个数控可编程的R-C正弦波振荡器电路。



---

10.9 根据第4.4~4.5节正弦波、方波、三角波和锯齿波发生器电路原理，试设计一个数控可编程的正弦波、方波、三角波和锯齿波发生器电路。

10.10 根据第5.8节VFC（电压—频率变换）电路原理，试设计一个试设计一个数控可编程的VFC（电压—频率变换）电路。



---

# 第11章 电源电路

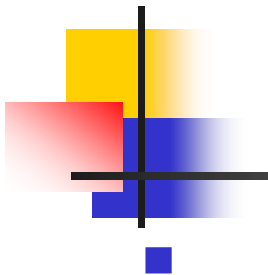


## 内容提要

---

电源电路是各种电子设备必不可少的组成部分。本章介绍了单相半波可控整流电路，单相半控桥整流电路，三相桥式整流电路，直流降压斩波变换电路，直流升压斩波变换电路，直流降压—升压斩波变换电路，DC—AC全桥逆变电路，正弦脉宽调制（SPWM）逆变电路工作原理、电路结构与计算机仿真设计方法。





本章的重点是掌握电源电路的仿真设计与分析方法。整流电路、直流降压/升压斩波变换电路、逆变电路是常用的电源电路。注意整流电路中二极管与晶闸管的不同，晶闸管的控制方法。注意直流降压/升压斩波变换电路的拓扑结构，注意电感 $L$ 、电容 $C$ 、续流二极管 $D$ 和开关 $S$ 位置的变化带来的电路功能变化。注意逆变电路的控制信号的产生与相互之间的关系。



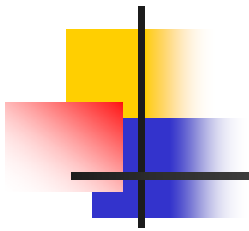
---

## 11.1 单相半波可控整流电路



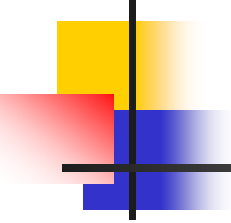
## 11.1.1 单相半波可控整流电路工作原理

- 单相半波可控整流电路如图11.1.1所示，电路中的相控开关器件为晶闸管（SCR），负载为电阻负载。在电源正半周（ $0 \sim \pi$ ），晶闸管承受正向电压（晶闸管的阳极电位高于阴极），处于正向阻断状态。若假定在  $\omega t = \alpha$  时刻才发出触发脉冲，则在（ $0 \sim \alpha$ ）期间晶闸管不导通，电源电压全部加在晶闸管上，负载上的电压为零，流过负载的电流也为零。

- 
- 在  $\alpha$  时刻触发晶闸管并使其导通，晶闸管从正向阻断状态进入通态，于是在  $\alpha \sim \pi$  期间，电源电压全部加在负载上，有负载电流  $i_0$  流过，其值为

$$i_0 = \frac{U_m}{R} \sin \omega t \quad [\alpha, \pi]$$

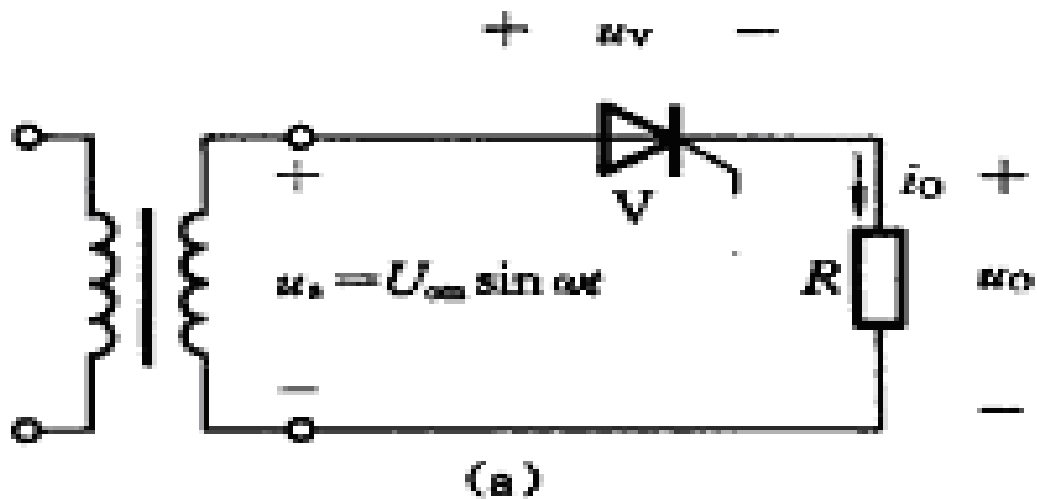
(11.1.1)

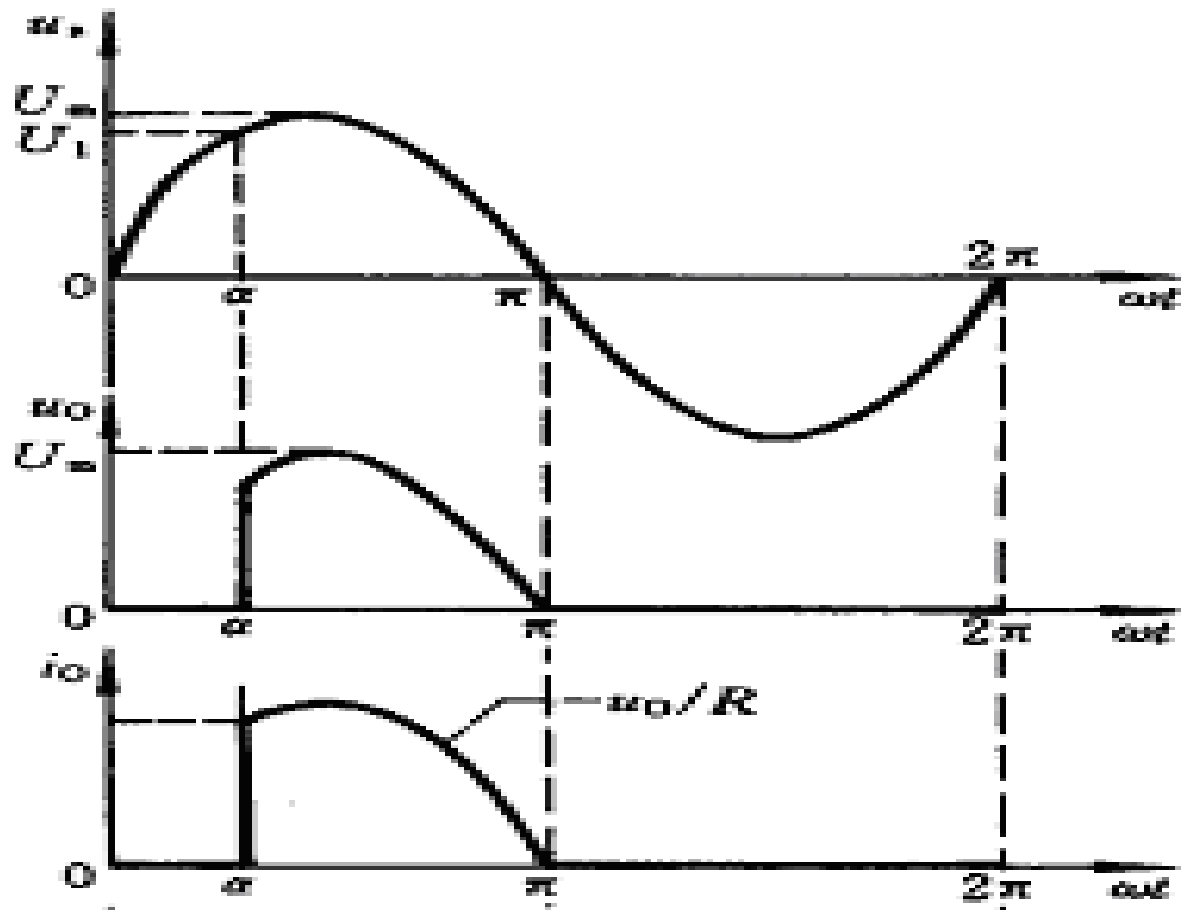
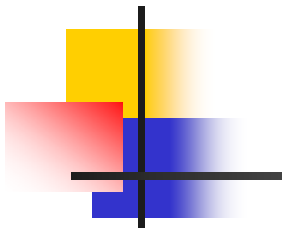


---

- 由于交流电源的特点，在正半周快结束时，电路中的电流自然地下降到SCR的维持电流以下，晶闸管就自动地从通态转入阻断状态，负载电流变为零。紧接着电源负半周开始，在电源负半周（ $\pi \sim 2\pi$ ）期间，晶闸管转入反向阻断状态，电源电压又反向全部加在晶闸管上，负载上的电压为零。

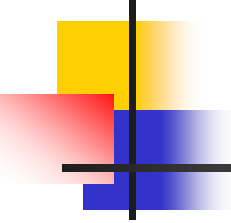
- 至此，电路完成了一个工作周期，尔后电路始终周期地重复上述过程，其波形示于图11.1.1 (b)。



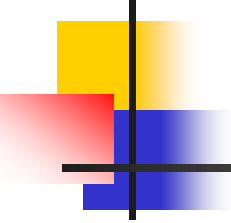


(b) 整流电路输入/输出波形

图11.1.1 单相半波可控整流电路

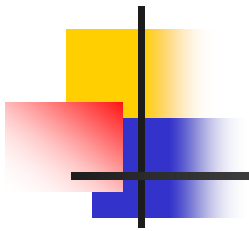
- 
- 
- 综上所述可知，图11.1.1所示电路在电源一周工作期间，负载上得到的只是脉动的直流电压  $u_o$ ，脉动频率与电源频率一样。



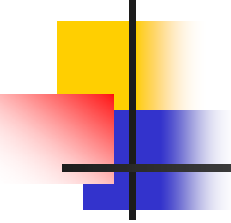


---

- 一般定义：从晶闸管开始承受正向电压算起，到被触发导通为止，这段时间的角度称为控制角或触发角，用字母  $\alpha$  表示。改变施加触发脉冲的时间相位，即改变控制角  $\alpha$  的大小，称为移相，故  $\alpha$  又称移相角。改变  $\alpha$ ，也就改变了输出电压  $u_O$  波形的形状，而电源电压  $u_S$  的波形并未改变，仍然是正弦交流。

- 
- 根据图11.1.1 (b) 所示波形, 针对某一触发角  $\alpha$ , 可求出整流输出电压平均值

$$\begin{aligned}U_O &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{U_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha)\end{aligned}\quad (11.1.2)$$

- 
- 式 (11.1.2) 表明,  $UO \sim \alpha$  关系是非线性的, 如图11.1.2所示。触发角  $\alpha$  从0变到了  $\pi$  时, 输出电压平均值从最大值 ( $Um / \pi$ ) 变到零。这意味着, 只要改变触发角, 就能改变整流输出电压的平均值, 达到可控整流的目的, 这就是相控整流的基本原理。

- 整流的结果是将正弦交流电压变换为脉动直流电压，功率由交流侧流向直流侧，完成了AC向DC的转换。

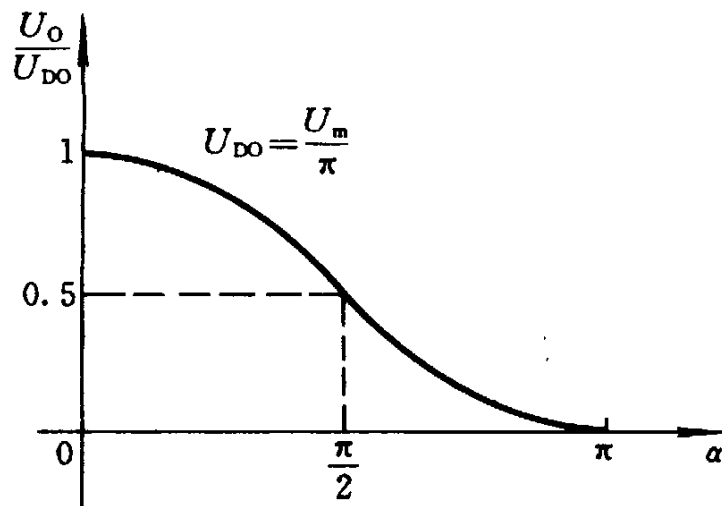
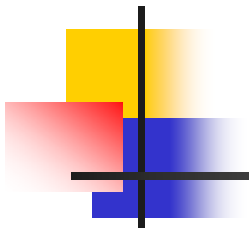
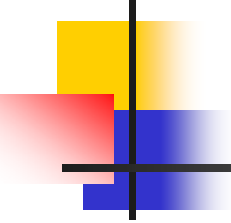


图 9.2 整流输出电压平均值与控制角的关系



---

- 从上面分析看出，要使整流电路稳定地输出某数值的电压  $U_0$ ，就必须使整流输出电压  $U_0$  每周期的波形相同。这就要求每个周期内的触发时间相位相同，即  $\alpha$  角相同。所以，触发信号和电源电压在频率和相位上均须适当配合。为了调节  $U_0$  的大小，还要求二者的相位差是可调的。

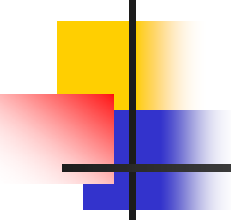
- 
- 
- 这种相互配合关系称为同步。保证电源电压与触发角的同步运行是相控整流与相控逆变电路的基本条件。



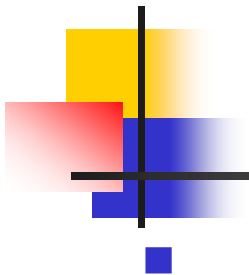
## 11.1.2 单相半波可控整流电路

---

- 一个单相半波可控整流电路如图11.1.3所示。图中，V1为220V交流电源。电压控制电压源V2和脉冲电压源V3组成可控硅驱动电路。VD1（2N3898）为可控硅，栅极受电压控制电压源V2控制，电压控制电压源V2受脉冲电压源V3控制。

- 
- 用鼠标双击V3，可以打开V3的对话框，如图11.1.4所示，在对话框中可以修改脉冲宽度、上升时间、下降时间和脉冲电压等参数。应注意的是，触发脉冲周期是20ms（对应是360度，即 $2\pi$ ），控制角或触发角 $\alpha$ 是与Delay Time参数相对应，修改Delay Time参数即可修改触发角 $\alpha$ 。





当设置Delay Time参数（即触发角 $\alpha$ ）为2ms时，启动仿真，点击示波器，可以看见单相半波可控整流电路的输出电压变化曲线如图11.1.5所示。在图11.1.3电路中增加一个滤波电容C1，可以看见单相半波可控整流电路的输出电压变化曲线如图11.1.7所示，输出电压脉动变化被减小。

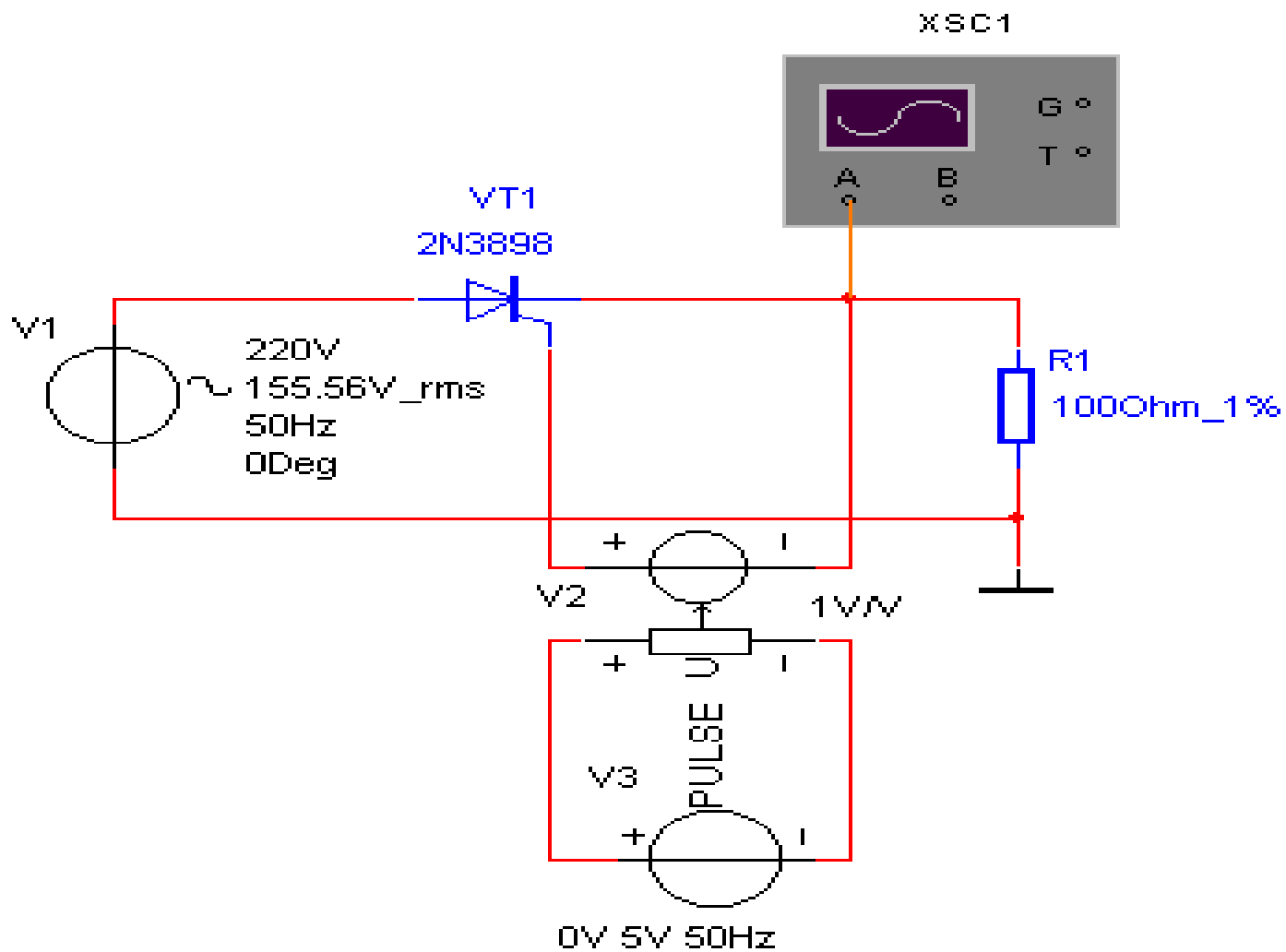


图11.1.3 单相半波可控整流电路

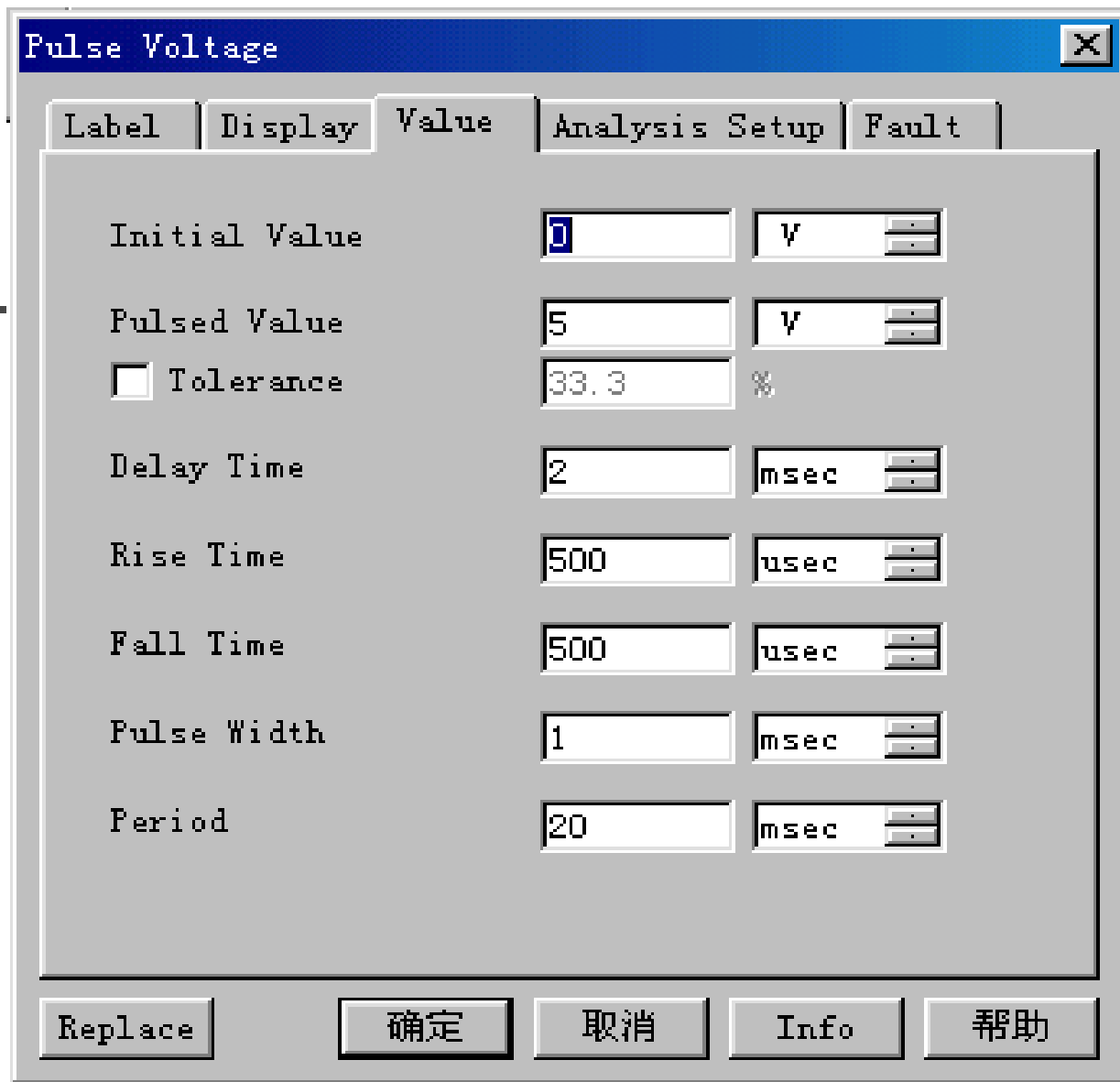


图11.1.4 脉冲电压源对话框

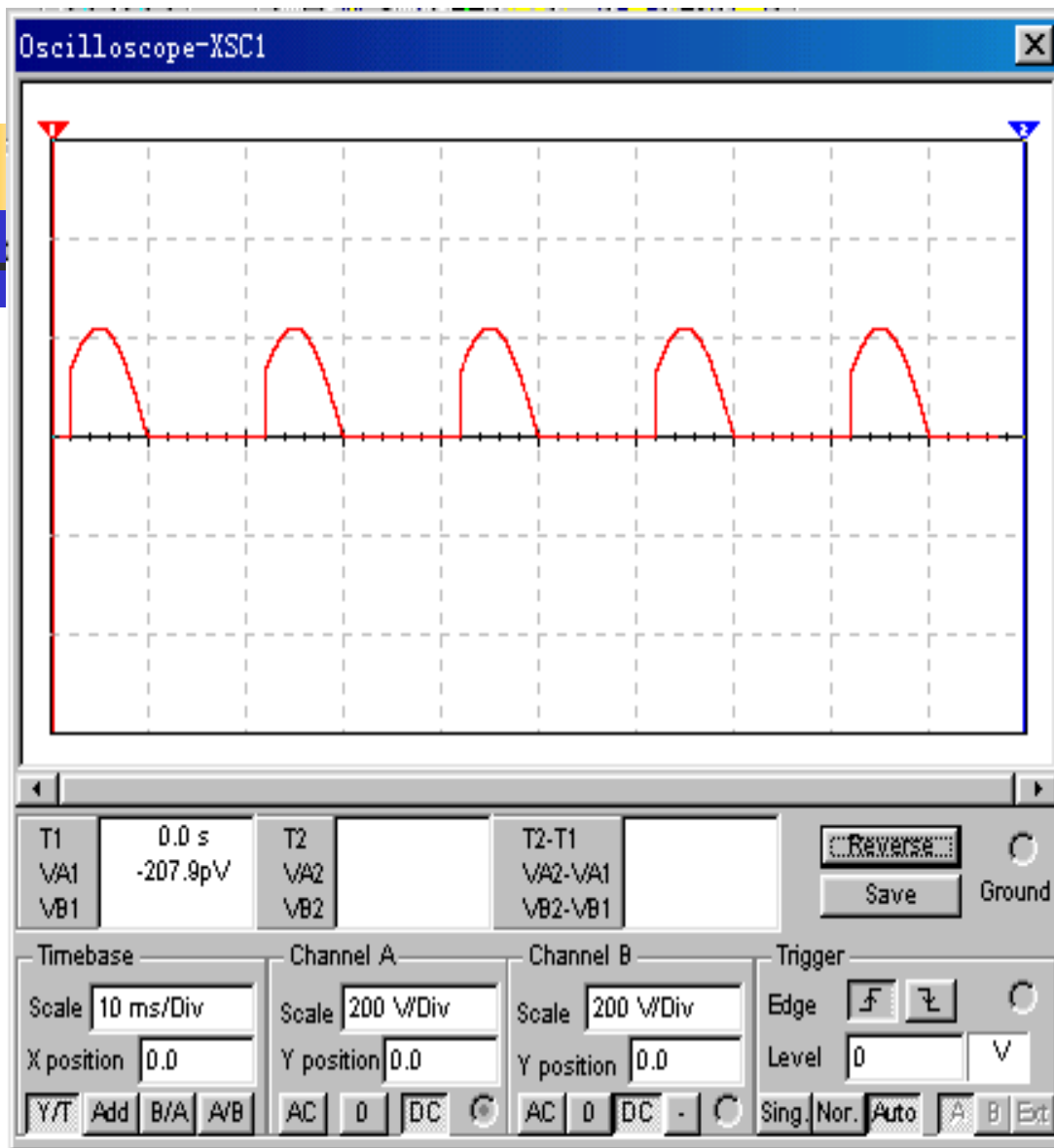


图11.1.5单相半波可控整流电路的输出电压曲线

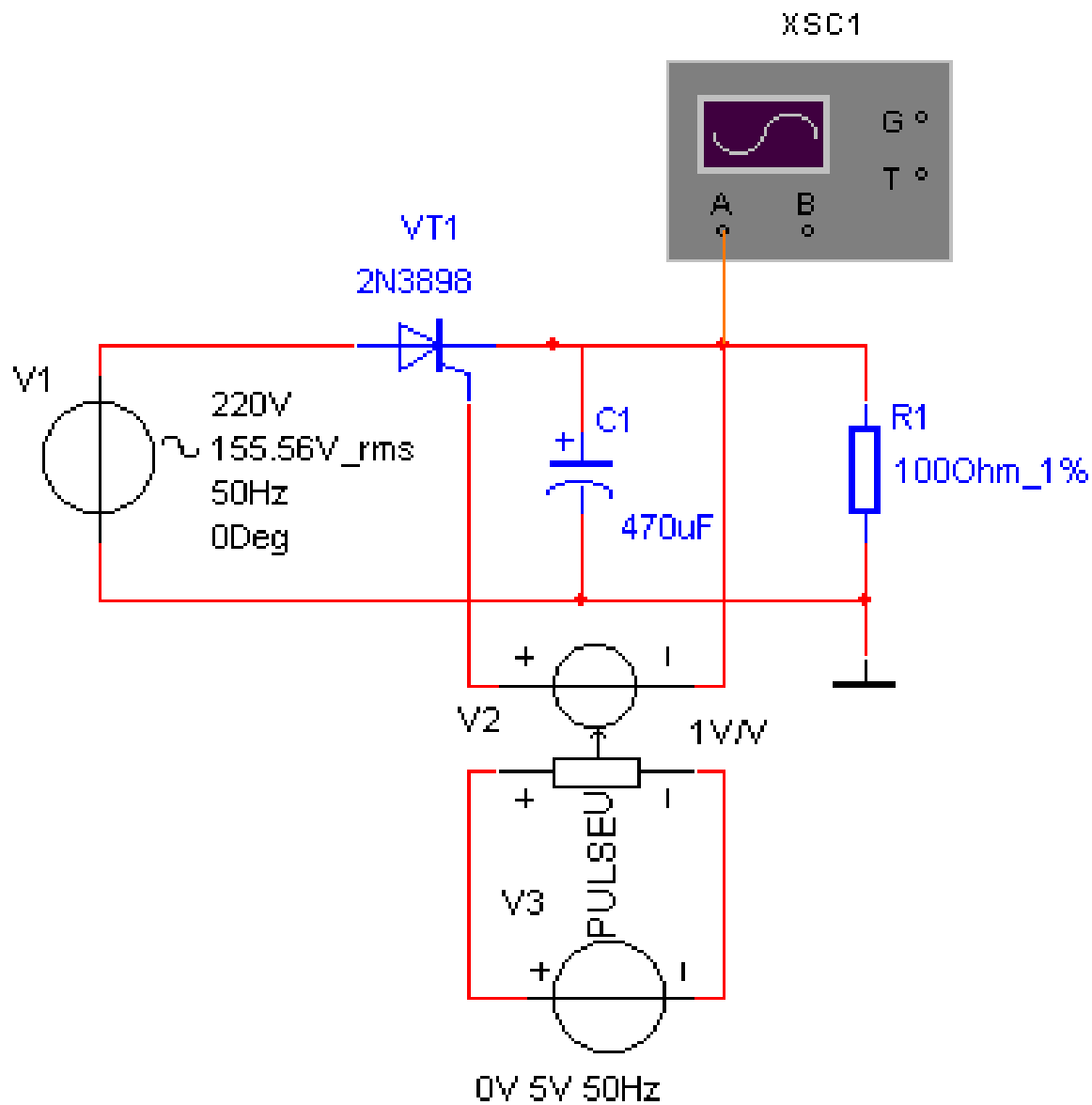


图11.1.6 带滤波电容的单相半波可控整流电路

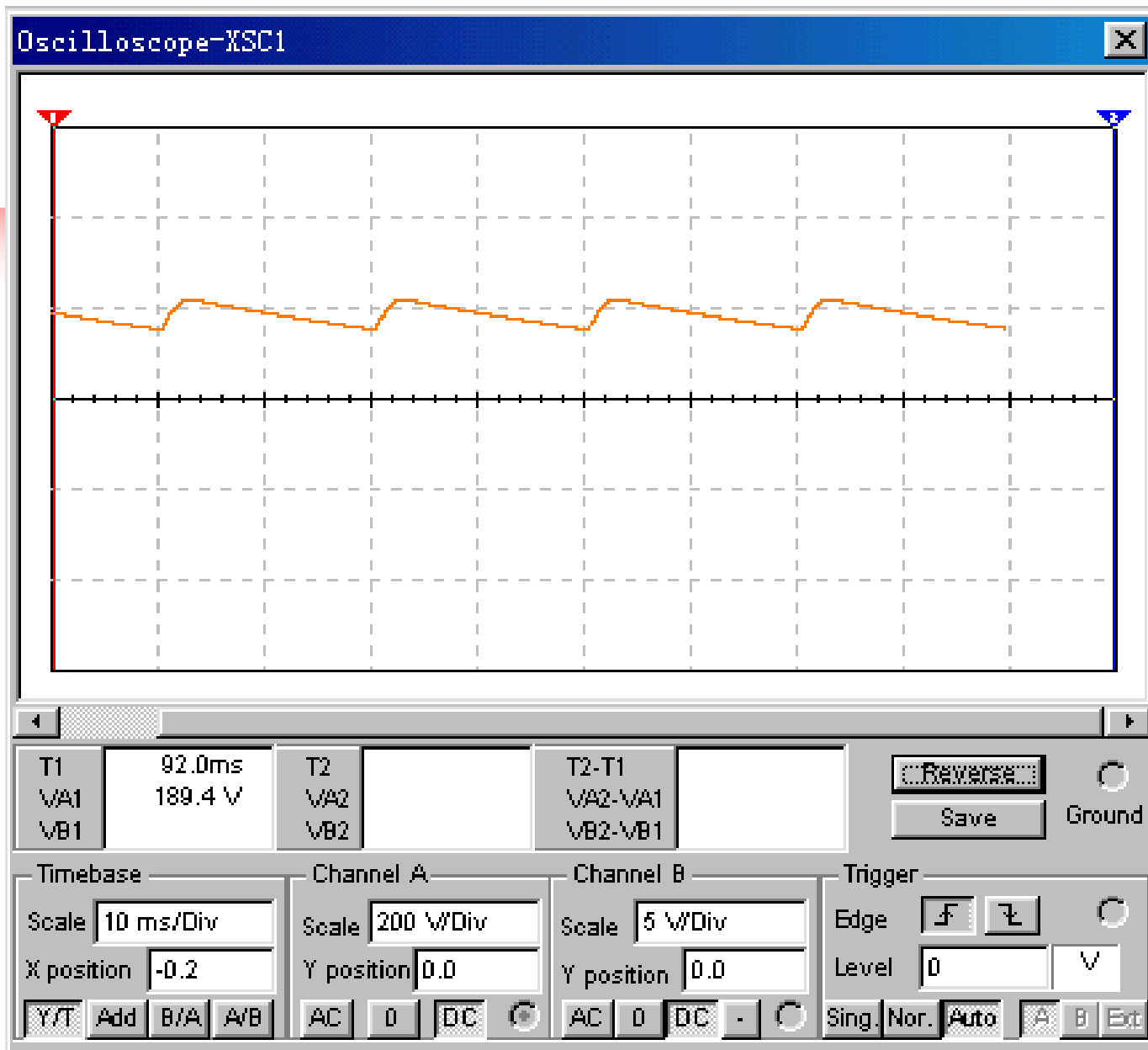


图11.1.7  
带滤波电容的  
单相半波可控  
整流电路的输  
出电压曲线



---

## 11.2单相半控桥整流电路

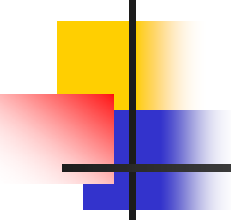


## 11.2.1 单相半控桥整流电路工作原理

---

- 单相半控桥整流电路及其工作波形如图 11.2.1 所示。图中 VT1 和 VT2 为触发脉冲互差  $180^\circ$  的晶闸管，VD1 和 VD2 为整流二极管。由这四个管子组成桥式整流电路。因为只有共阴极的 VT1 和 VT2 可控，而共阳极的 VD1 和 VD2 不可控，所以称为半控桥整流电路。





---

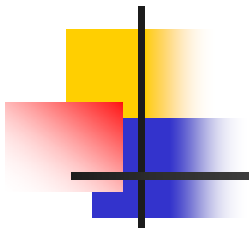
- 电阻R和电感L为负载，二极管VD为续流二极管。若假定电感L足够大，即  $\omega L \gg R$ ，由于电感中电流不能突变，则可认为负载电流在整个稳态工作过程中保持恒值。



---

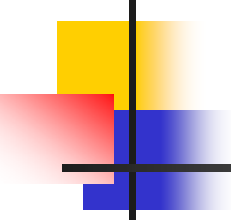
- 在上述条件下，半控桥整流电路的工作过程如下所述：

- ①  $[0, \alpha]$ 期间，VT1和VT2都未导通，负载电流（ $i_o$ ）通过续流二极管续流， $i_{T1} = i_{T2} = 0$ ， $i_D = i_o$ ；

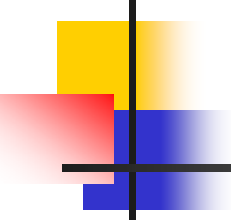


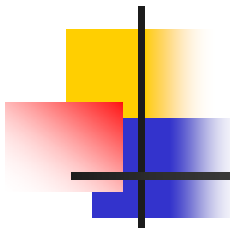
---

- ②  $[\alpha, \pi]$ 期间，在电源正半周  $\omega t = \alpha$  时刻触发VT1导通，而续流管被加上反偏压而截止，负载电流从VD转移到VT1和VD2， $i_{T1} = i_{D2} = I_O$ ， $i_D = 0$ ；



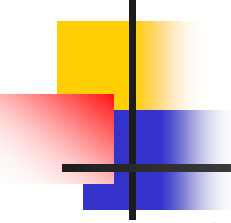
■ ③  $[\pi, \pi + \alpha]$ 期间，由于电源电压变负，续流管正偏置而导通， $VT_1$ 管被加上反向电压而关断，负载电流从 $VT_1$ 和 $VD_2$ 转移到 $VD$ ， $i_{T1} = i_{D2} = 0$ ， $i_D = I_O$ ；，电路又恢复到两个晶闸管都不导通状态，与在 $[0, \alpha]$ 期间的工作状态相同；


- 
- ④  $[\pi + \alpha, 2\pi]$  期间, VT2管却承受正向电压, 因此, 在  $\omega t = \pi + \alpha$  时刻可以触发 VT2管而导通, 此时, 续流管被加反偏压而截止, 负载电流又从VD转移到VT<sub>2</sub>和VD<sub>1</sub>,  $i_{T2} = i_{D1} = I_O$ ,  $i_D = 0$ 。



---

- 至此，电路完成了一个工作周期。只要周期地发出触发脉冲，电路就周而复始地重复上述四个过程。由于桥式整流电路结构的特点，只要晶闸管导通，负载端总是加上正向电压，而负载电流始终是单方向流动，因此半控桥式整流电路只能工作在第一象限，电路的工作波形示于图11.2.1（b）。

- 
- 
- 因为  $\omega L \gg R$ ，所以不论控制角  $\alpha$  为何值，负载电流  $i_o$  波形的变化很小，可近似看成与横轴平行的一条直线。流过晶闸管、二极管和电源电流都是矩形波。
  - 根据上述分析，可求出输出电压平均值为：


$$\begin{aligned}U_{\text{O}} &= \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{\text{m}} \sin \omega t \, d(\omega t) \\ &= \frac{U_{\text{m}}}{\pi} (1 + \cos \alpha)\end{aligned}\quad (11.2.1)$$

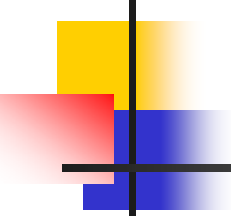
$$U_{\text{R}} = \left[ \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{\text{m}}^2 \sin^2 \omega t \, d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}}$$

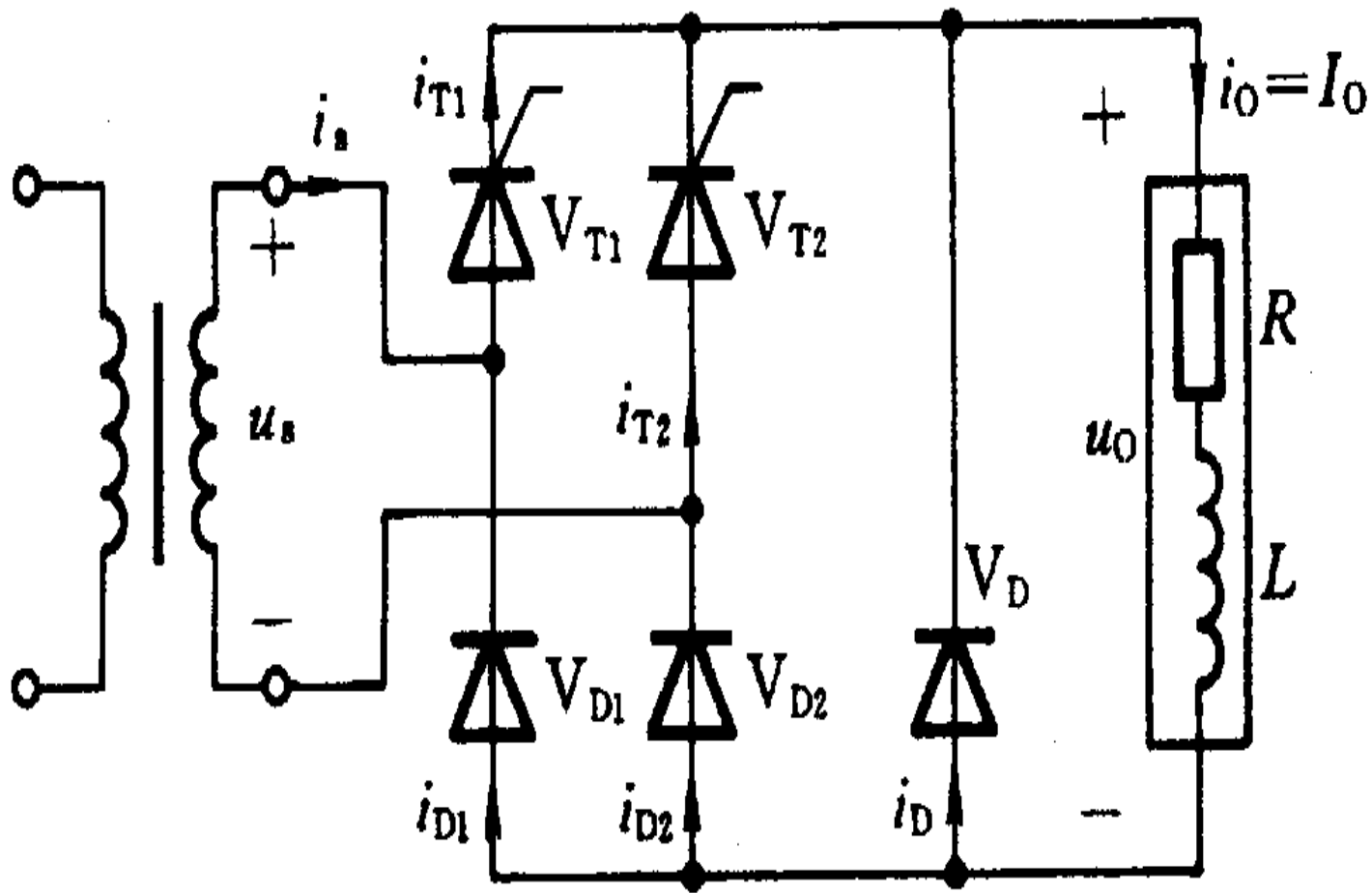
其整流输出电压有效值为

$$= \frac{U_{\text{m}}}{\sqrt{2}} \left[ \frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

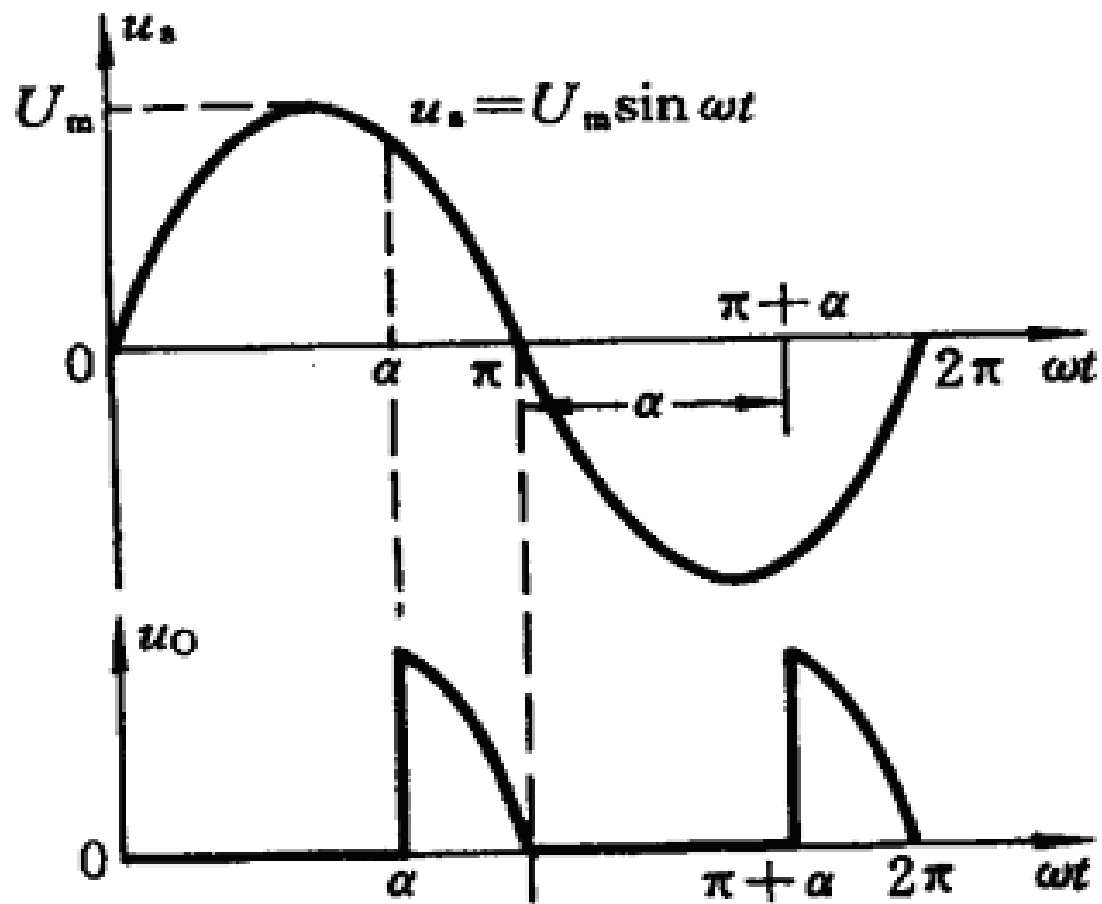
(11.2.2)



- 
- 
- 式 (11.2.1) 表明, 单相全波整流电路输出电压平均值比相同条件下半波整流电路的大一倍。另外从  $i_S$  波形可判知, 变压器绕阻中没有直流成分的电路, 因而不存在铁心直流磁化问题。

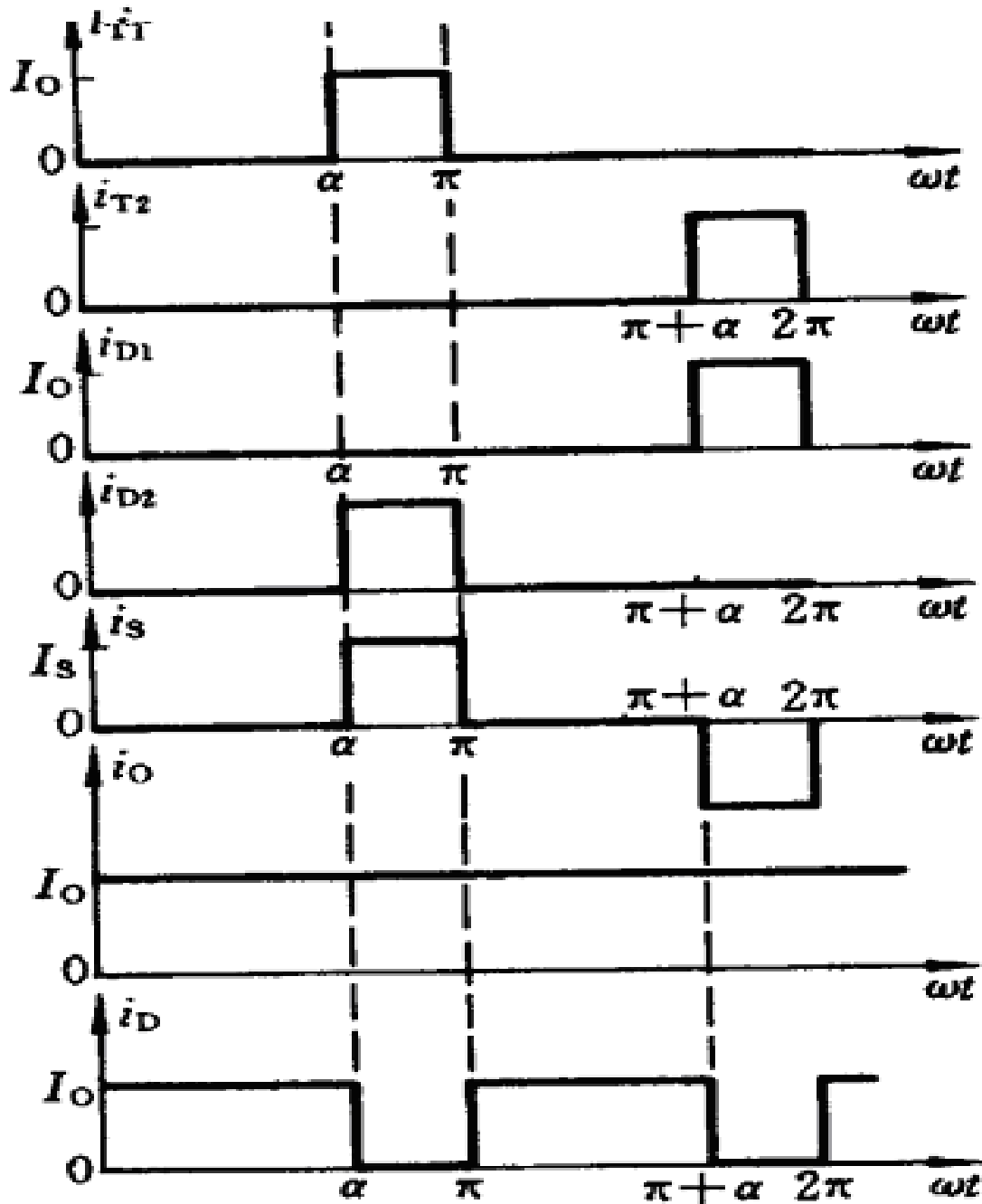


(a) 单相半控桥整流电路



(b) 电压电流波形

图11.2.1 单相半控桥整流电路及其电压电流波形



(b)  
电压电  
流波形

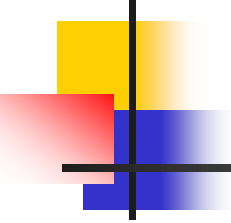
图11.2.1  
单相半控  
桥整流电  
路及其电  
压电流波  
形

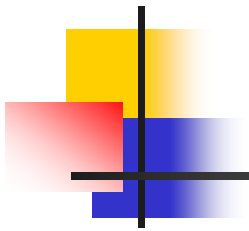


## 11.2.2 单相半控桥整流电路

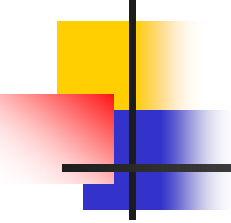
---

- 一个单相半控桥整流电路如图11.2.2所示。图中，V1为220V交流电源。电压控制电压源V2和脉冲电压源V4组成可控硅VT1驱动电路，电压控制电压源V3和脉冲电压源V5组成可控硅VT2驱动电路。

- 
- VT1（2N3898）为可控硅，栅极受电压控制电压源V2控制，电压控制电压源V2受脉冲电压源V4控制。
  - VT2（2N3898）为可控硅，栅极受电压控制电压源V3控制，电压控制电压源V3受脉冲电压源V5控制。VD3为续流二极管，R1和L1为负载。

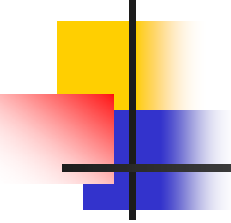


■ 用鼠标双击V3或者V5，可以打开V3或者V5的对话框，如图11.2.3和图11.2.4所示，在对话框中可以修改脉冲宽度、上升时间、下降时间和脉冲电压等参数。应注意的是，在本例中，触发脉冲周期是20ms（对应是 $360^\circ$ ，即 $2\pi$ ），控制角或触发角 $\alpha$ 是与Delay Time参数相对应，修改Delay Time参数即可修改触发角 $\alpha$ 。



■ 当设置V3 的Delay Time参数（即触发角  $\alpha$ ）为5ms时，应设置V5 的Delay Time参数（即触发角  $\alpha$ ）为15ms（10ms对应为  $\pi$ ），使两者之间相差 $180^\circ$ （ $\pi$ ）。启动仿真，点击示波器，可以看见单相半控桥整流电路的输出电压变化曲线如图11.2.5所示。





---

- 在图11.2.2电路中负载R1和L1的两端增加一个滤波电容C1（470  $\mu$ F），可以看见单相半控桥整流电路的输出电压变化曲线如图11.2.6所示，输出电压脉动变化被减小。

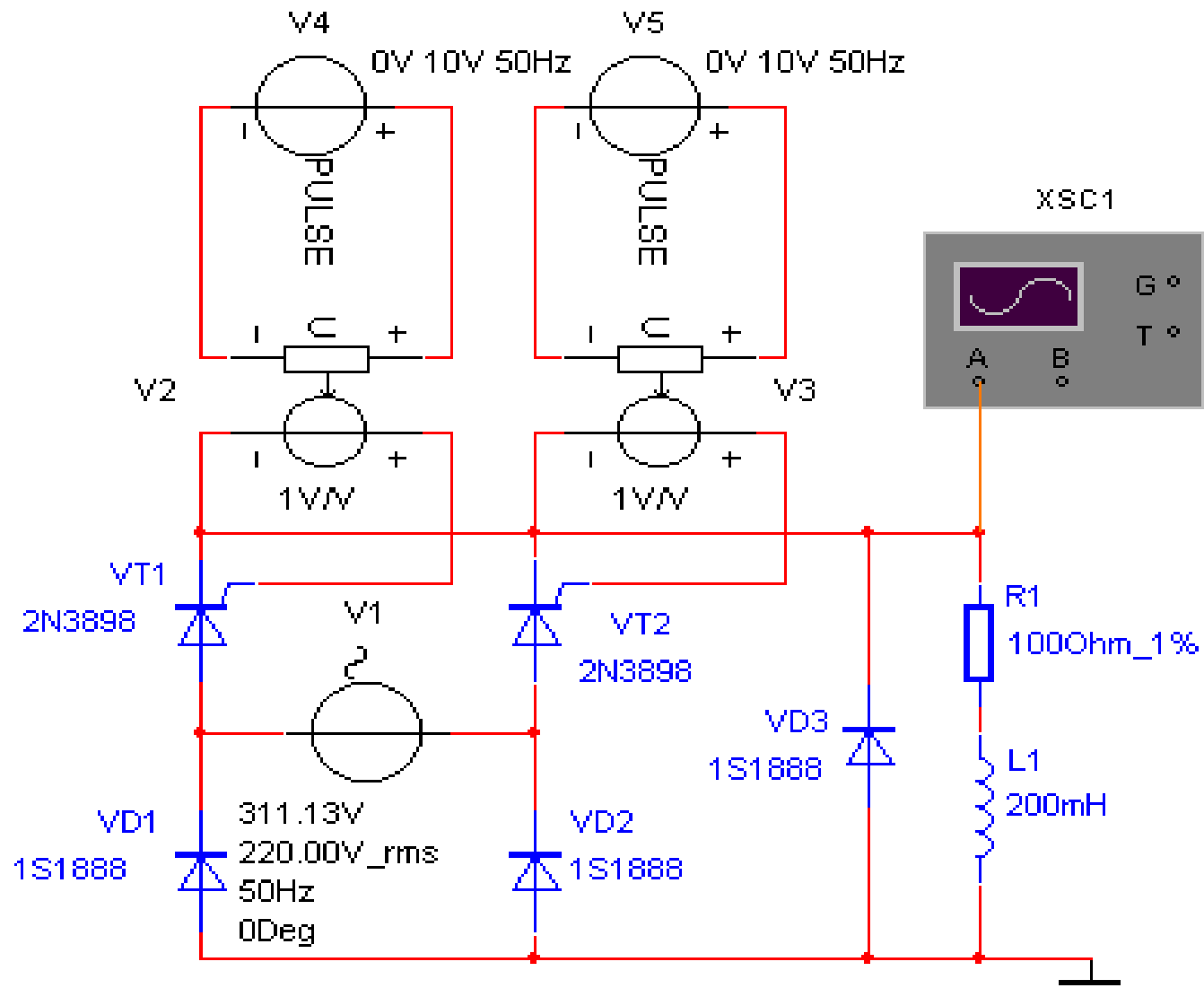
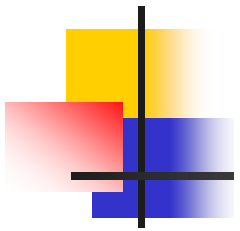


图11.2.2 单相半控桥整流电路

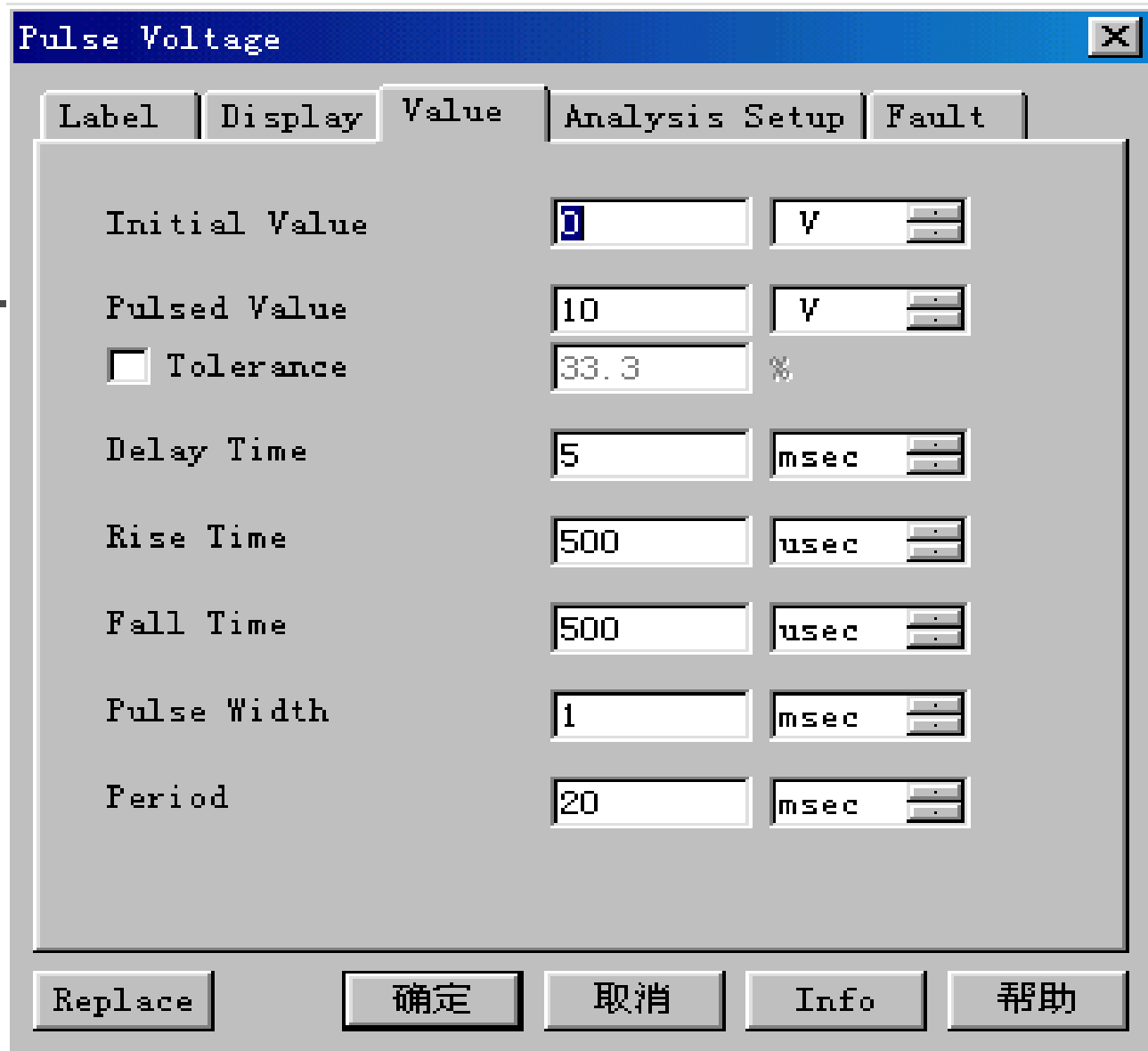


图11.2.3 脉冲电压源V3的对话框

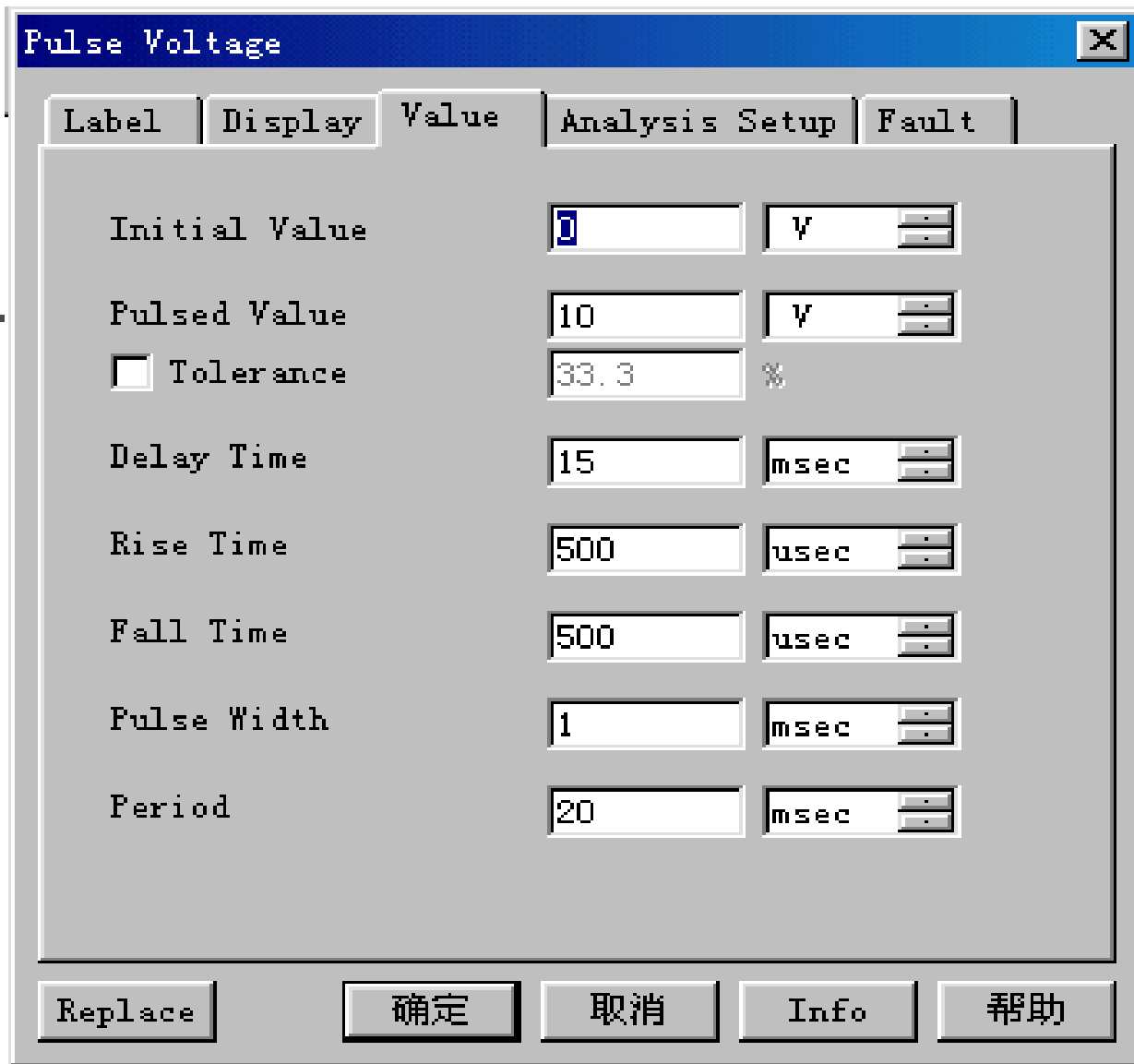


图11.2.4 脉冲电压源V5的对话框

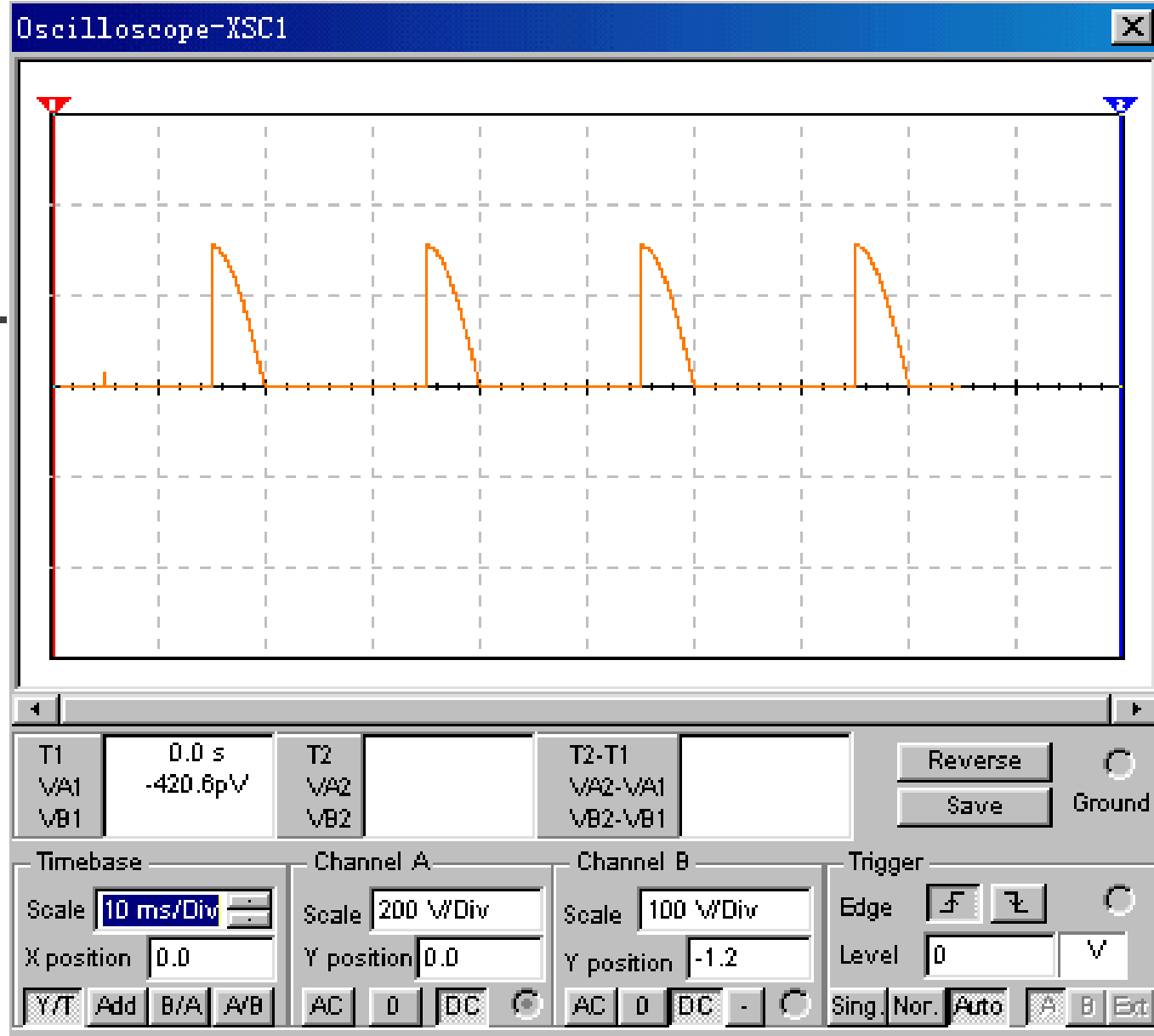


图11.2.5 单相半控桥整流电路输出电压波形

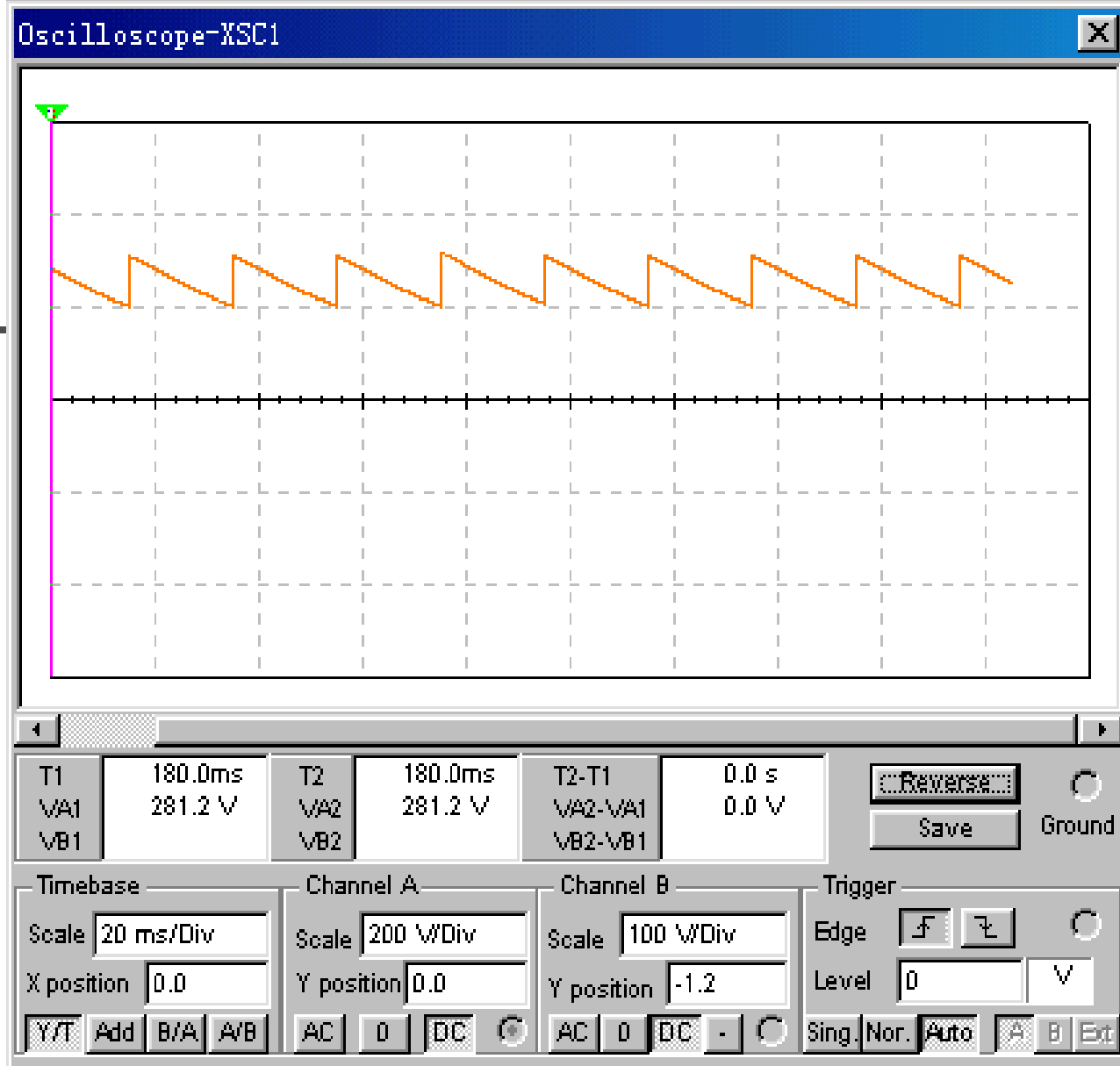


图11.2.6 加滤波电容的单相半控桥整流电路输出电压波形



---

## 11.3 三相桥式整流电路



## 11.3.1 三相桥式整流电路工作原理

---

- 三相桥式整流电路是一组共阴极电路和一组共阳极电路串联组成的，电路如图11.3.1所示。图中VD1、VD3、VD5三个晶闸管按共阴极连结，VD4、VD6、VD2则按共阳极连结。此外，晶闸管VD1和VD4接a相，VD3和VD6接b相，VD5和VD2接C相。



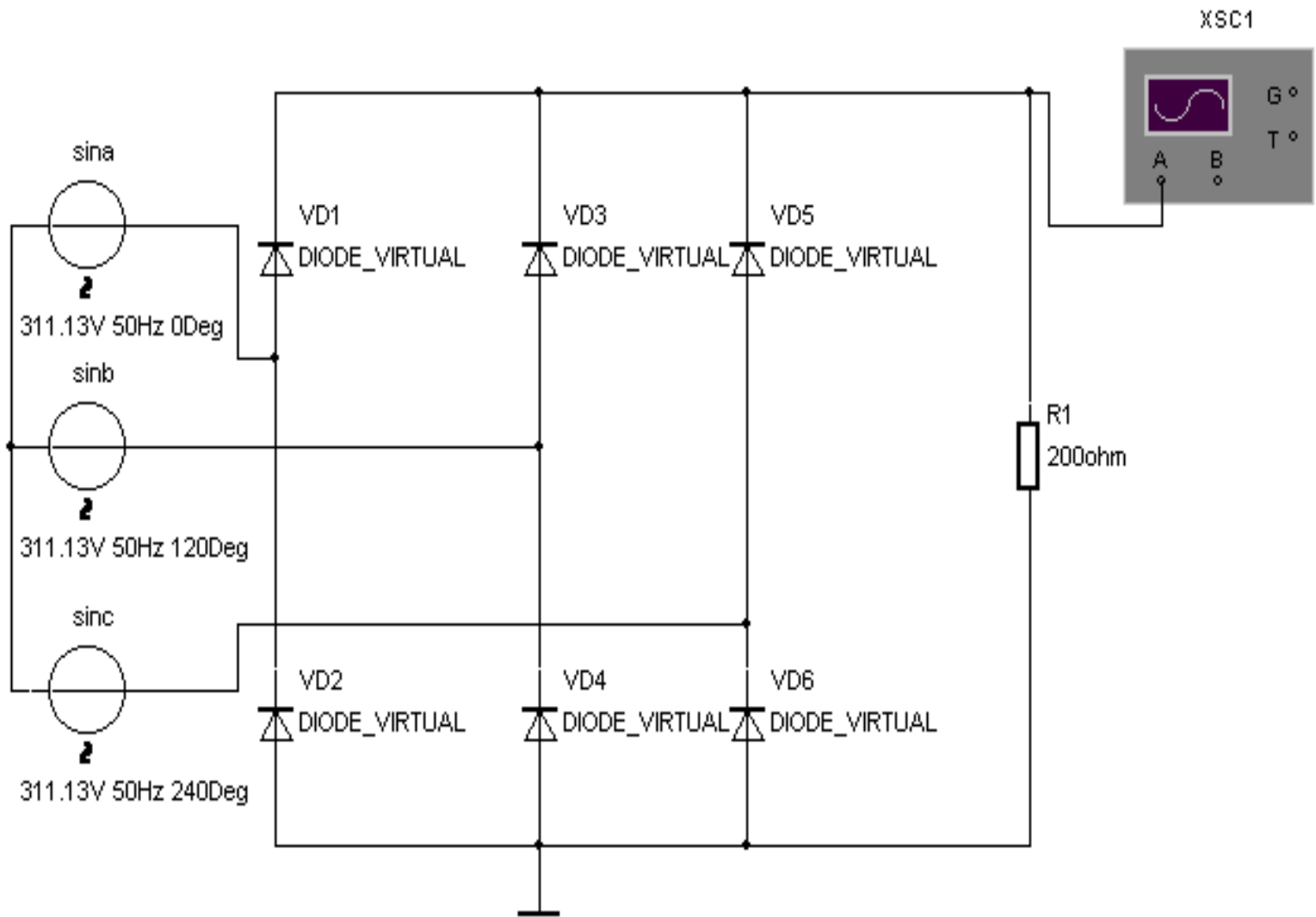
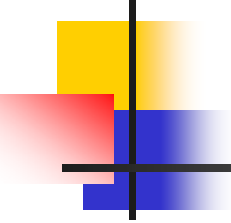
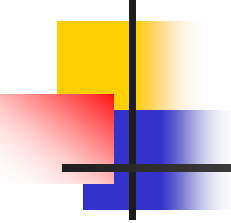


图11.3.1 三相桥式整流电路



---

- 在自然换相点换相时，各整流管的导通规律，分析输出波形的变化规则，如图11.3.2所示。为了分析方便起见，把一个周期等分6段。在第（1）段期间，a相电位最高，因而共阴极组的整流管VD1导通，b相电位最低，所以共阳极组的整流管VD6导通。

- 
- 这时电流由a相经VD1流向负载，再经VD6流入b相。变压器a、b两相工作，共阴极组的a相电流为正，共阳极组的b相电流为负。加在负载上的整流电压为：

$$u_0 = u_a - u_b = u_{ab} \quad (11.3.1)$$

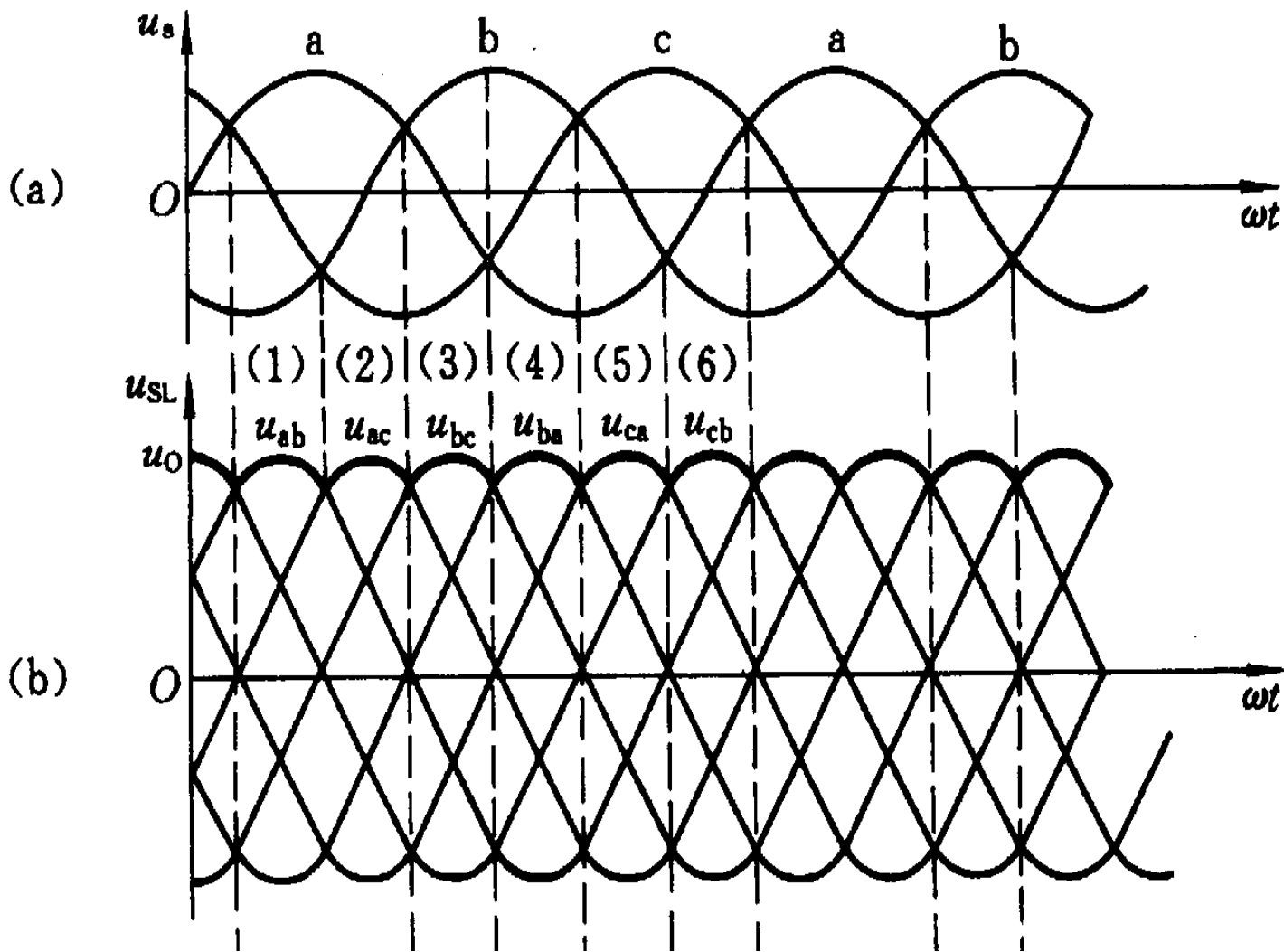
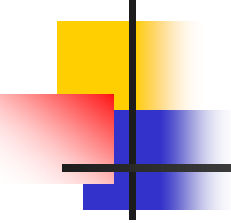
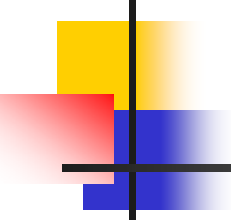
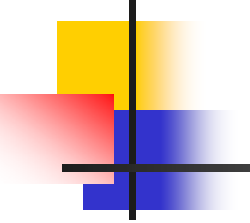


图11.3.2 三相桥式整流电路输入输出电压波形

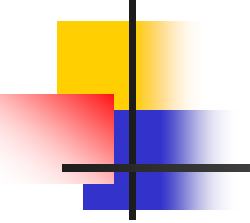
- 
- 经过 $60^\circ$ 后进入第（2）段时期。这时a相电位仍然最高，整流管VD1继续导通，但是c相电位却变成最低。当经过自然换相点时整流管VD2导通，电流即从b相换到C相，VD6承受反向电压而关断。这时电流由a相流出经VD1、负载、VD2流回电源c相。

- 
- 
- 变压器a、c两相工作。这时a相电流为正，c相电流为负。在负载上的电压为：

$$u_0 = u_a - u_c = u_{ac} \quad (11.3.2)$$

- 
- 再经过 $60^\circ$ ，进入第（3）段时期。这时b相电位最高，共阴极组在经过自然换相点时，导通整流管VD3，电流即从a相换到b相，c相整流管VD2因电位仍然最低而继续导通。此时变压器b、c两相工作，在负载上的电压为：

- $$u_0 = u_b - u_c = u_{bc} \quad (11.3.3)$$



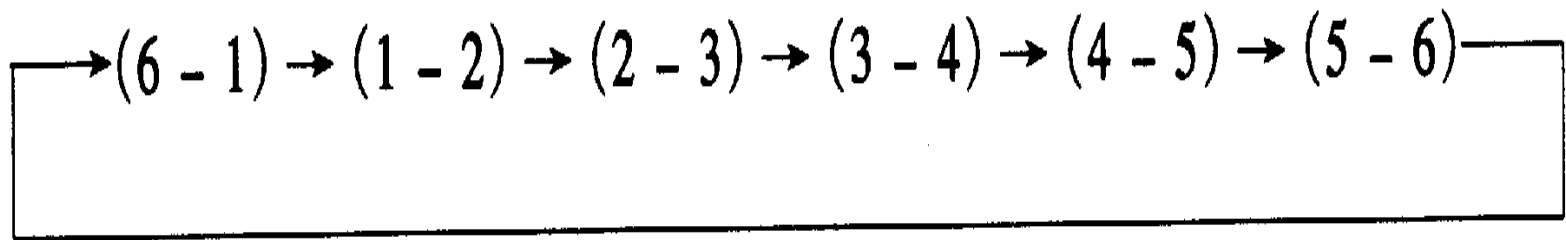
---

- 余依次类推。在第（4）段时期内，整流管VD3、VD4导通，电源b、a两相工作。在第（5）段时期内，整流管VD4、VD5导通，电源c、a两相工作。在第（6）段时期内，整流管VD5、VD6导通，电源c、b两相工作，再下去又重复上述过程。

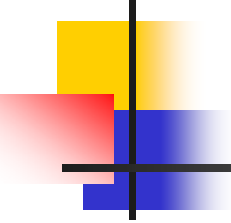


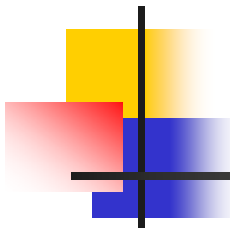


■ 总之，三相桥式整流电路中，整流管导通的顺序是：



■ 由上述三相桥式整流电路的工作过程可以看出：

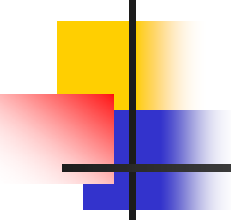
- 
- 
- ① 三相桥式整流电路在任何时刻都必须有两个整流管导通，而且这两个整流管一个是共阴极组的，另一个是共阳极组的，只有它们能同时导通，才能形成导电回路。



---

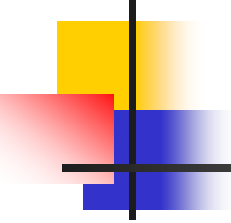
- ② 三相桥式整流电路是两组三相半波整流电路的串联，因此它的整流电压为三相半波时的两倍。

- ③ 三相桥式整流电路每隔 $60^\circ$  有一个整流管要换流，由上一号整流管换流到下一号整流管。例如由VD1、VD2换流到VD2、VD3。



---

- ④ 整流输出的电压，也就是负载上的电压，它属于变压器次级的线电压。图11.3.2 (a) 中的电压波形都是相对于电源零点而言的相电压波形。整流输出的电压应该是两相电压相减后的波形，实际上都属于线电压，波头  $u_{ab}$ 、 $u_{ac}$ 、 $u_{bc}$ 、 $u_{ba}$ 、 $u_{ca}$ 、 $u_{cb}$  均为线电压的一部分，是上述线电压的包络线。

- 
- 相电压的交点与线电压的交点在同一角度位置上，故线电压的交点同样是自然换相点，同时亦可看出，三相桥式整流电路的整流电压在一个周期内脉动六次，脉动频率为  $6 \times 50\text{Hz} = 300\text{Hz}$ ，比三相半波时大一倍。



## 11.3.2 三相桥式整流电路仿真输出

---

- 启动仿真，点击示波器，可以看见三相桥式整流电路的输出电压变化曲线如图11.3.3所示。在图11.3.1电路中负载R1的两端增加一个滤波电容C1（470  $\mu$ F），可以看见输出电压脉动变化被减小。

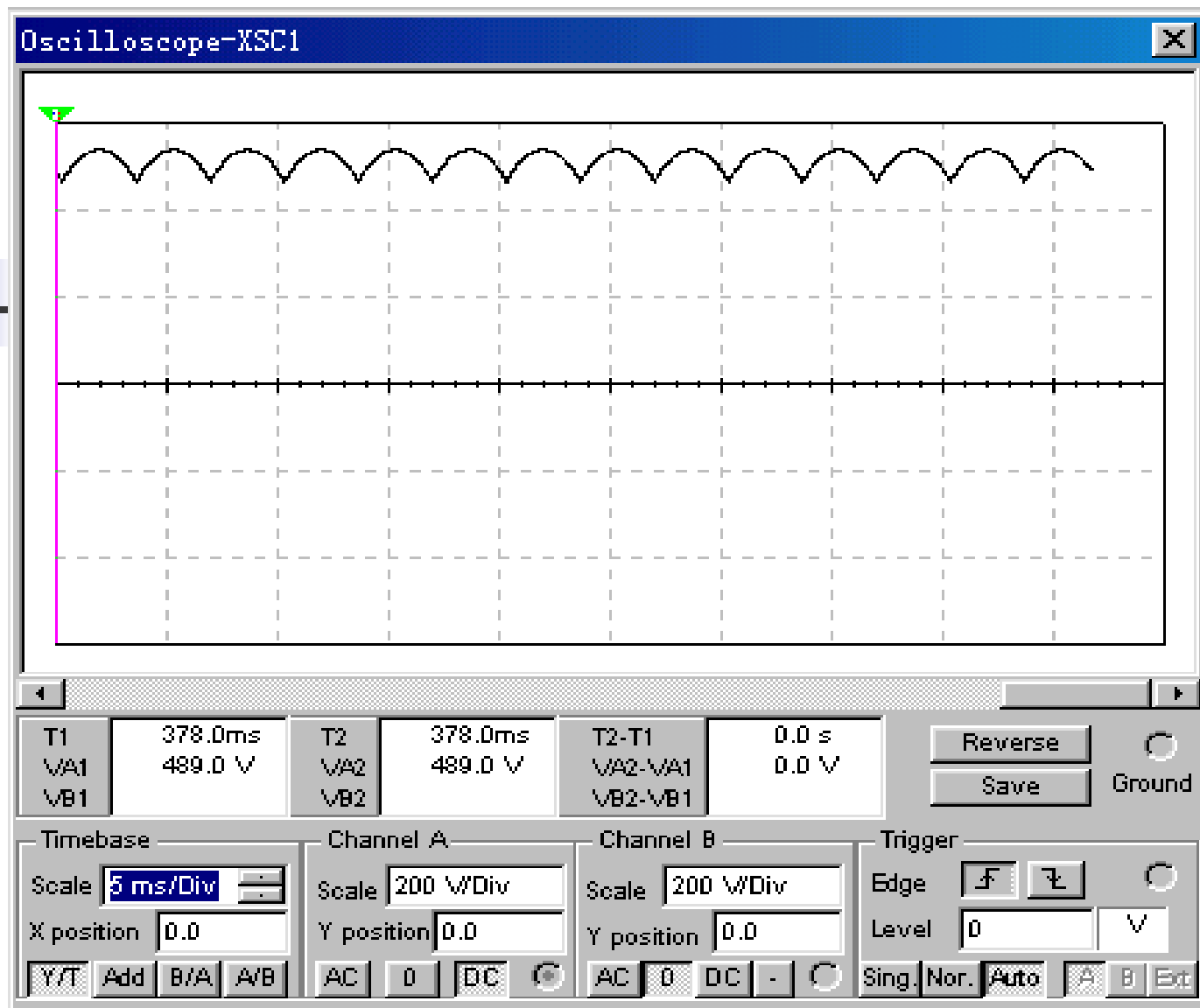


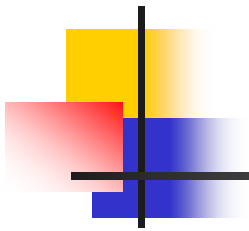
图11.3.3 三相桥式整流电路输出电压波形

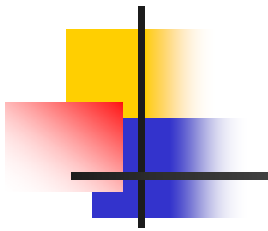


---

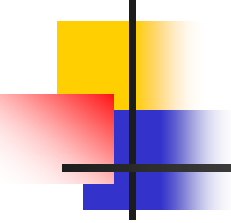
## 12.4 病房呼叫系统的设计



- 
- 本例设计了某医院有7个病房房间，每间病房门口设有呼叫显示灯，室内设有紧急呼叫开关，同时在护士值班室设有一个数码显示管，可对应显示病室的呼叫号码。

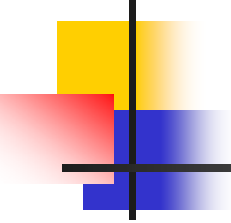


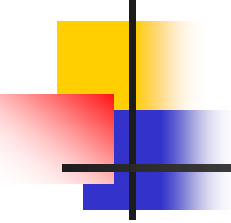
■ 现要求当一号病房的按钮按下时，无论其他病室的按钮是否按下，护士值班室的数码显示“1”，即“1”号病室的优先级别最高，其他病室的级别依次递减，7号病室最低，当7个病房中有若干个请求呼叫开关合上时，护士值班室的数码管所显示的号码即为当前相对优先级别最高的病室呼叫的号码，



---

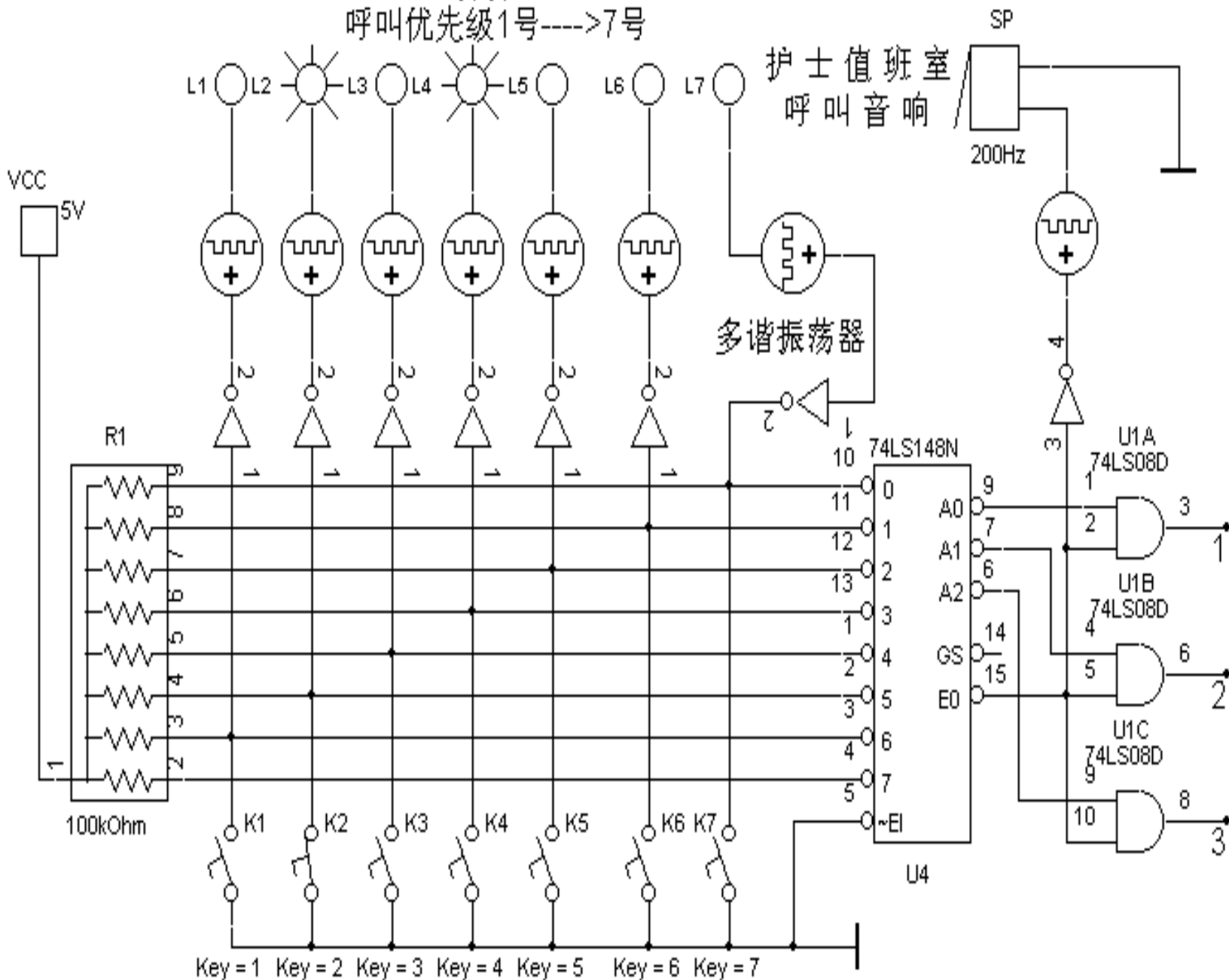
- 同时在有呼叫的病房门口的指示灯闪烁。待护士按优先级处理完后，将该病房地呼叫开关打开，再去处理下一个相对最高优先级的病房的事务。全部处理完毕后，即没有病室呼叫，此时值班室的数码管显示“0”。

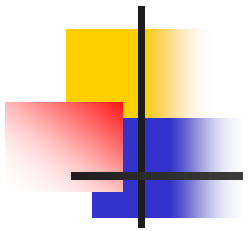
- 
- 本例在设计中采用了8—3优先编码器74LS148，74LS148有8个数据端(0~7)，3个数据输出端(A0~A1)，1个使能输入端(EI：低电平有效)，两个输出端(GS、E0)，其功能请看8.2节中的表8.2.1 74LS148的功能表。数据输出端A~C根据输入端的选通变化，

- 
- 分别输出000~111这0~7二进制码，经逻辑组合电路与74LS47BCD—七段译码器/驱动器的数据输入端（A~C）相连，最终实现设计要求的电路功能，电路如图12.4.1所示。电路中与门74LS08D的输出端（3、6、8）与74LS47D BCD—七段译码器/驱动器的数据输入端的数据端（A、B、C）连接。

病房房间号  
呼叫优先级1号---->7号

护士值班室  
呼叫音响





# 护士值班室 呼叫病房号显示

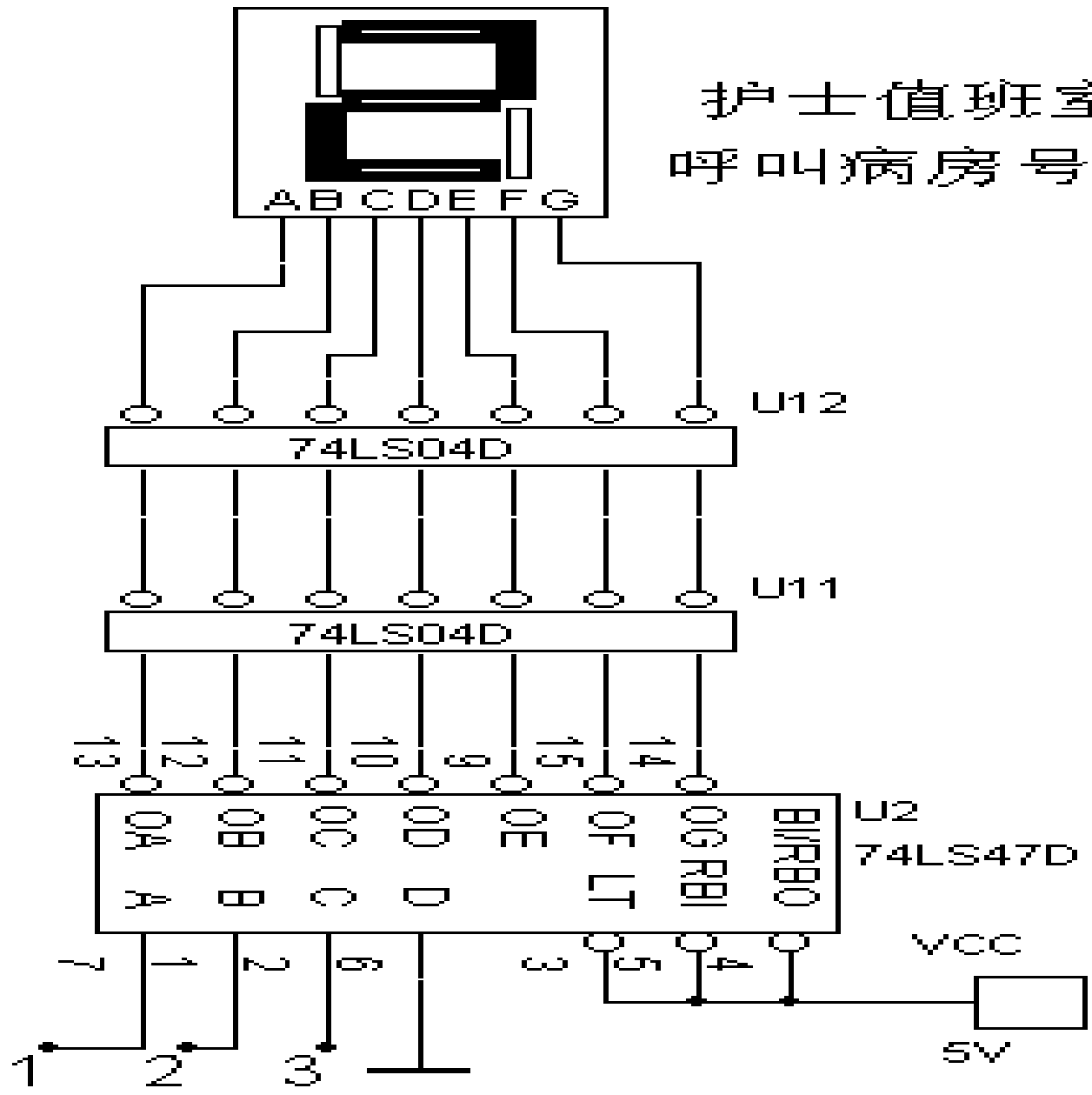
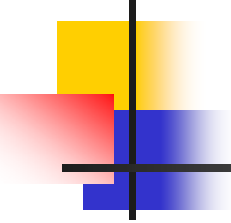


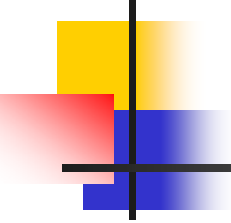
图12.4.1 病房呼叫系统电路



---

- 此例仿真可在Multisim的主界面下，启动仿真开关即可进行电路的仿真。在图12.4.1中K1~K7为病房呼叫开关，在其下方的Key=1~Key=7分别表示按下键盘上1~7数字键即可控制相应开关的通道。

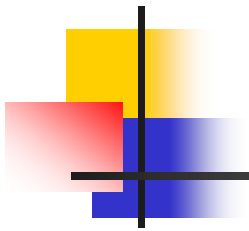


- 
- 
- L1~L7为模拟病房门口的呼叫指示灯，当呼叫开关K1~K7任何开关被按下时，相应开关上的指示灯即闪烁发光，同时护士值班室的数码管即显示相对最高优先级别的病房号，而且峰鸣器SP会令计算机上的扬声器发声。



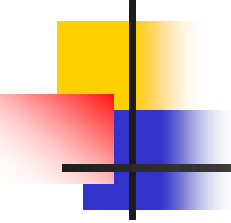
---

## 12.5 8 路数显报警器

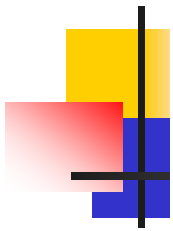


■ 图12.5.1所示电路是由8位优先编码器CC4532、BCD—锁存 / 7段译码 / 驱动器CC4511、六反相器CC4069及时基电路NE555等构成的8路数显优先报警器。

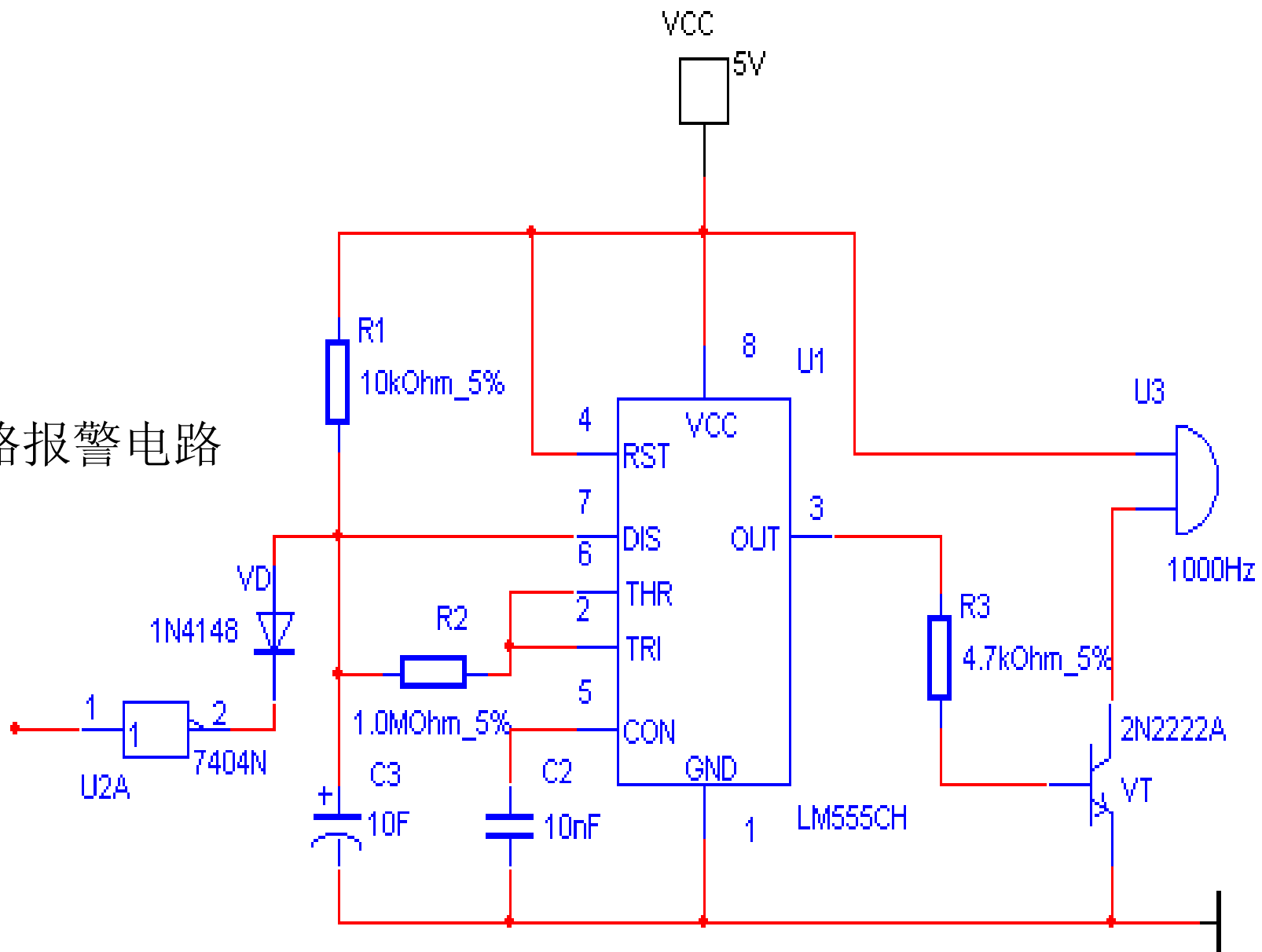
■ 电路中CC4532的8路输入控制端分别接有K0~K7 8个开关，对应输入端D0~D7。

- 
- 
- 平时K0~K7均为接通状态，D0~D7均为低电平“0”状态，当某一个开关断开时，则对应输入端变为高电平“1”状态，CC4532将其编为2进制码输出送至译码 / 驱动器CC4511译码后由数码管显示出报警的路数。



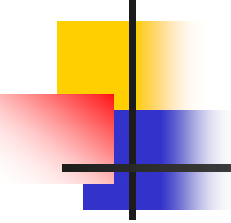


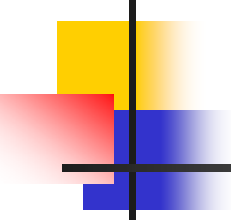
## b 8路报警电路



7404的1脚与12.5.1a图4532BT的14脚相接

## 12.5.1 8路数显报警电路

- 
- 电路为预备报警状态时，CC4532将输出为“000”码，同时允许输出端E0为高电平“1”，为了减少耗电或者误显，将E0反相后加至CC4511的消隐端使其处于熄灭状态。
  - 假设K3被断开，相应的CC4532的D端变为高电平“1”，输出端为011与此同时E0端变为低电子“0”，

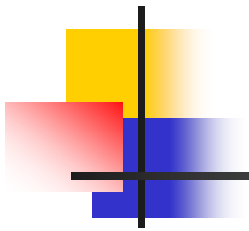
- 
- 译码器为显示状态，LED5011显示“3”表示第3路出现报警信号。当K4断开时，CC4532的组选端14脚由原来的低电平变为高电平，使由NE555构成的报警电路发出报警声。本软件没有音响电路，在实际的电路中可在NE555的输出端接一音响电路，使喇叭发出动听得音乐。





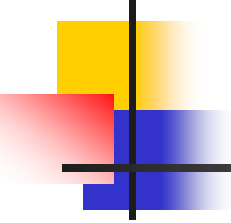
---

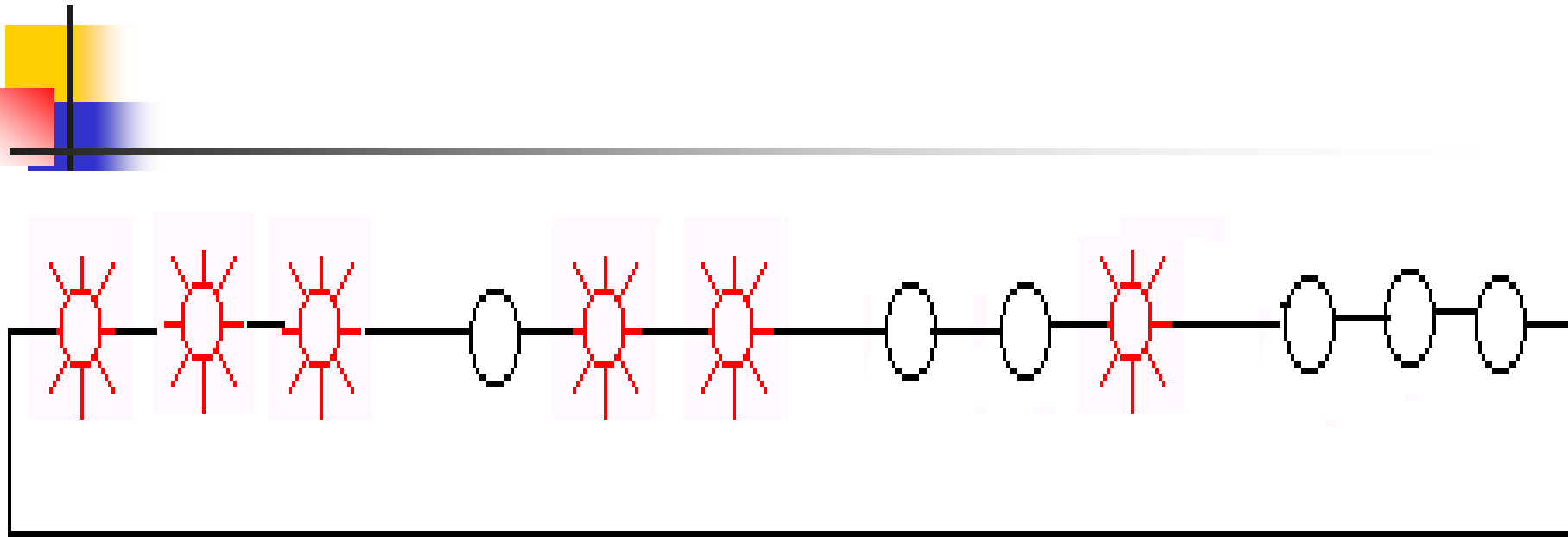
## 12.6 汽车尾灯控制电路



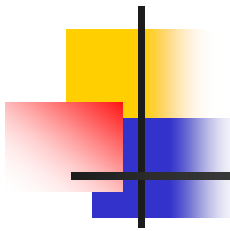
---

- 用6个发光二极管模拟汽车尾灯，即左尾灯（L1~L3）3个发光二极管，右尾灯（R1~R3）3个发光二极管。用两个开关分别控制左尾灯显示和右尾灯显示。当左转弯开关KL打开时，左转弯尾灯显示的3个发光二极管按图12.6.1所示的规律亮灭显示。

- 
- 
- 当右转弯开关KR打开时, 同样, 如同左转弯尾灯显示的3个发光二级管也按图12.6.1所示的规律亮灭显示。



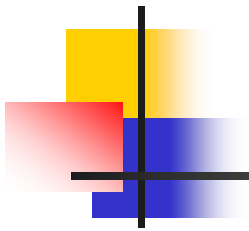
12.6.1 左转弯显示规律图



---

- 本电路主要由3—8线译码器74LS138、BCD同步加减计数器74LS190及四位双向移位寄存器74LS194组成，电路如图12.6.2。

- 例如当左尾灯控制开关断开时74LS138芯片的输入端ABC为100，



---

通过译码后将100信号加到74S194的相应的端子从而实现左边的灯光移位闪烁，同时通过74LS190组成3进制计数器来控制3个灯闪烁。右尾灯控制过程与左尾灯相同。若要控制多个灯的闪烁可将计数器电路重新设计就能实现。

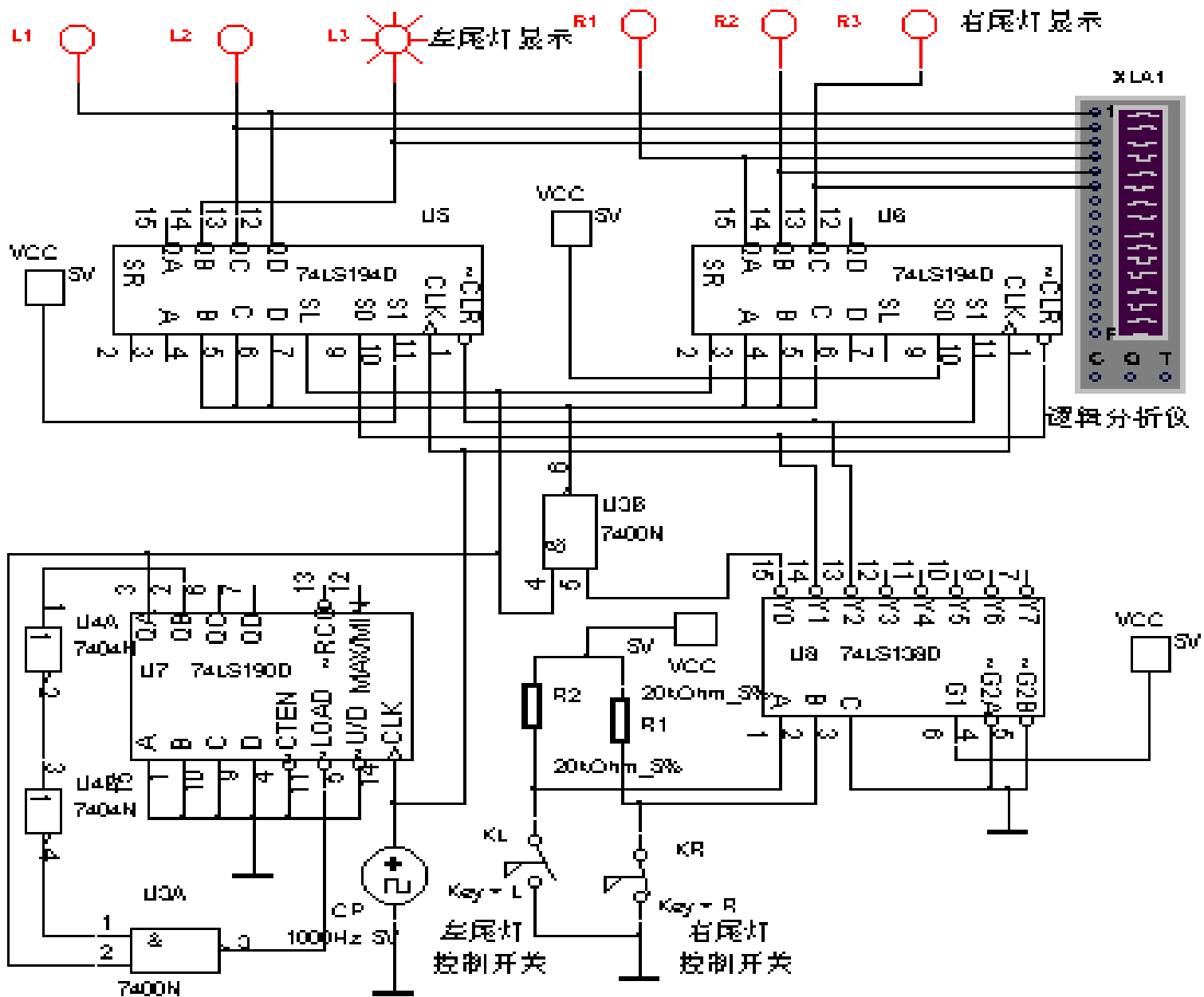


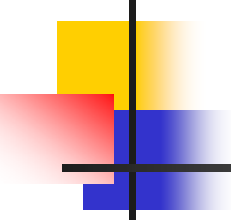
图12.6.2 汽车尾灯控制电路



---

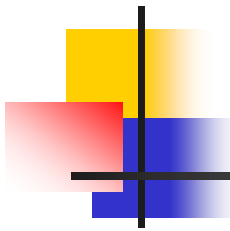
## 12.7 计数器、译码器、 数码管驱动显示电路





---

- 该电路由计数器、译码器及数码管驱动显示电路组成，原理电路如图12.7.1所示。计数器选用74LS191四位二进制同步可逆计数器，有四个J、K触发器和若干门电路组成，有一个时钟输入（CLK）正边沿触发，四个触发器同时翻转的高速同步计数器。

- 
- 
- 由输出端QB和QD经逻辑组合电路接至计数器（LOAD）端，构建计数进位阻塞电路。在设计时可根据需要，由相应的输出端构建组合逻辑电路，从而实现不同进制的计数器。

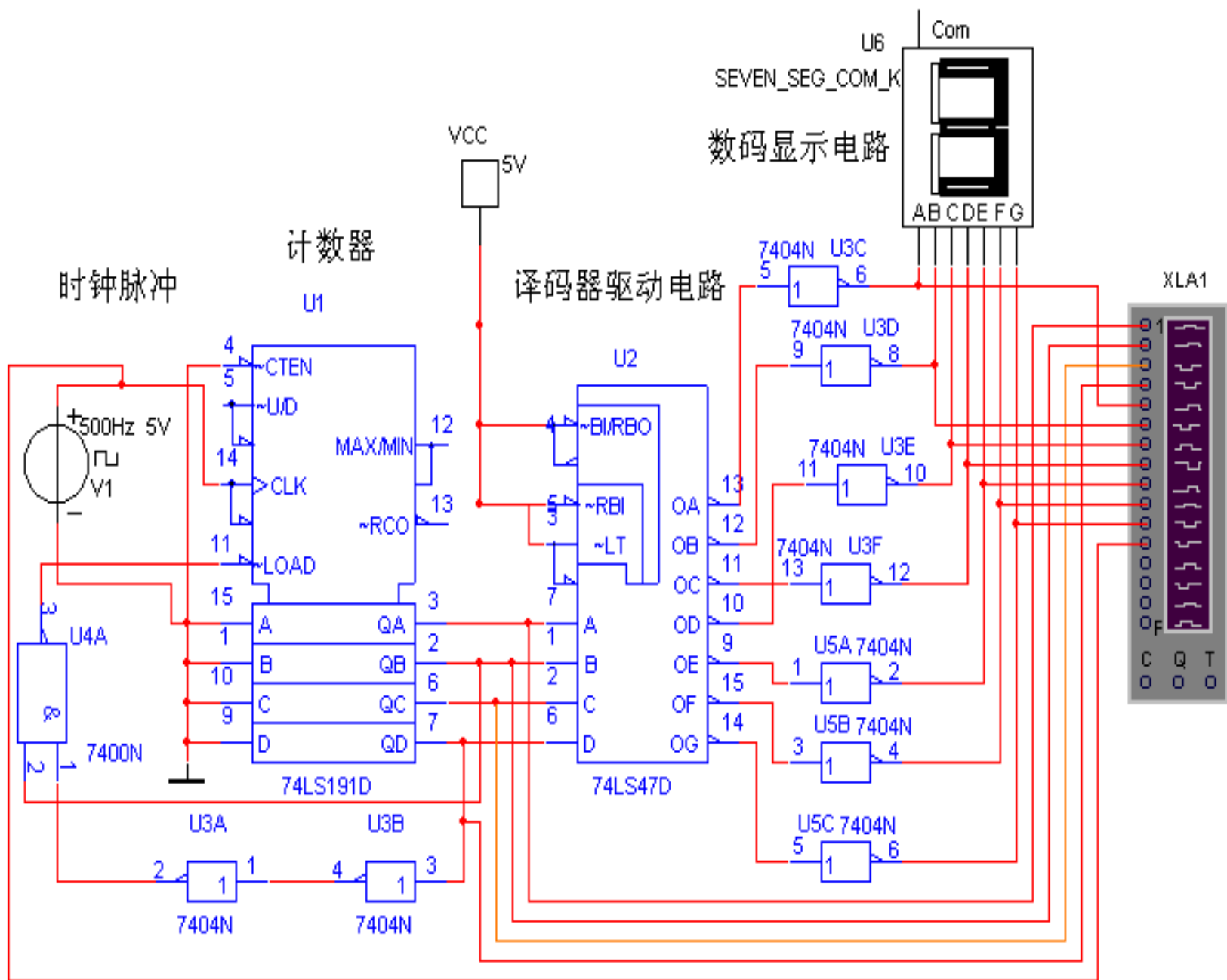
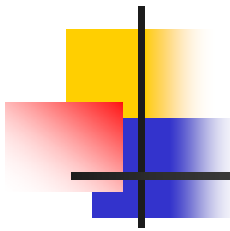


图12.7.1 计数器、译码器、数码管驱动显示电路

- 
- 从虚拟仪器中取逻辑分析仪XLA1，其上有1~F共16个输入端，1~4端分别于计数器的四个数据输出端QA~QD相连，第5~11端 分别与数码管的七段A~G相连，第12端接CLK脉冲输入端。用鼠标双击逻辑分析仪，将出现逻辑分析仪面板窗口如图12.7.2所示。

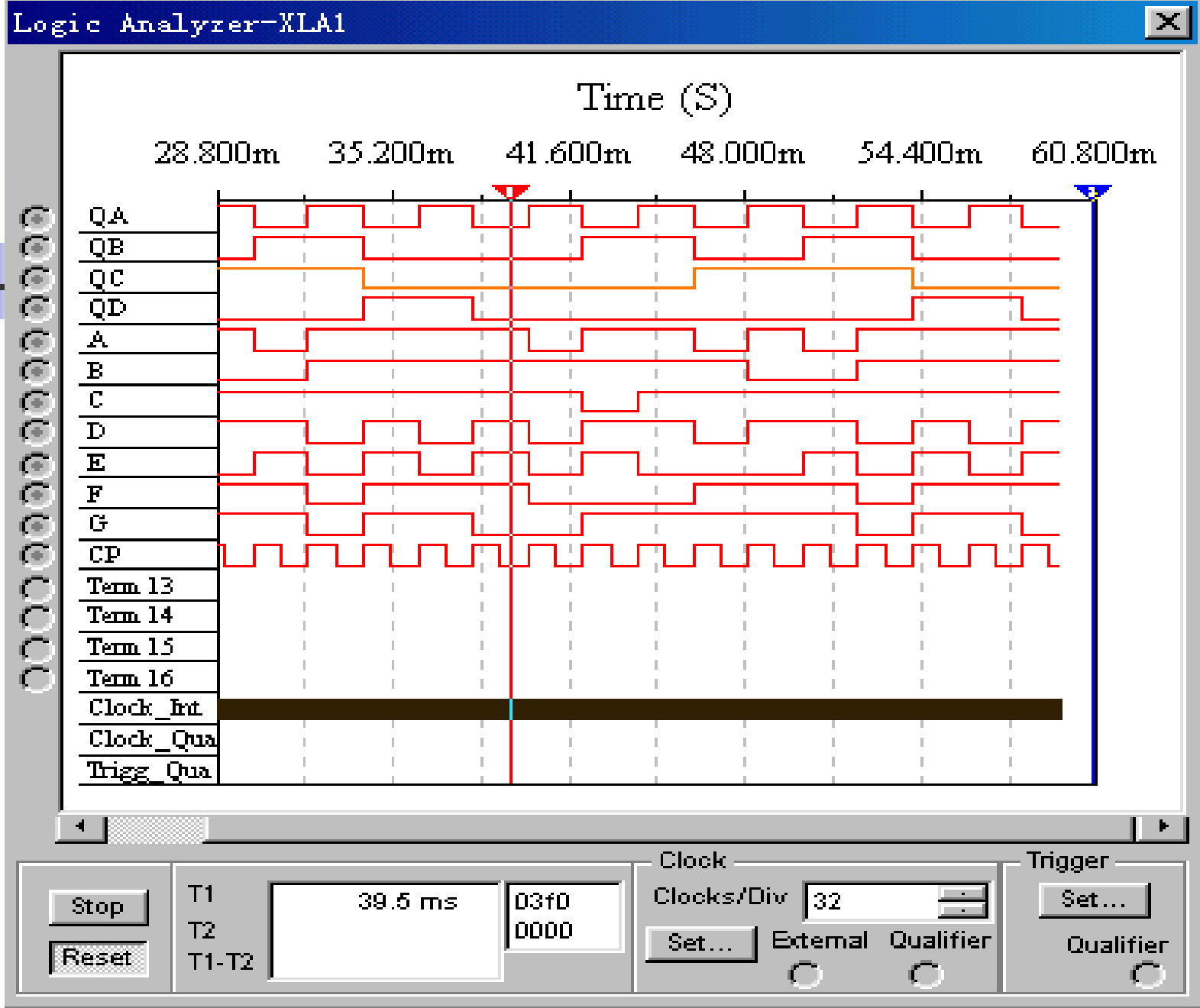
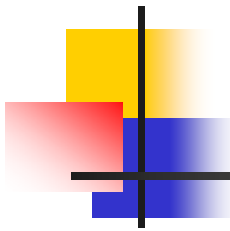
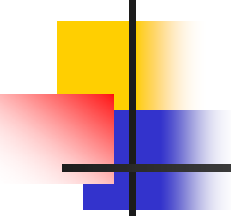


图12.7.2 时钟脉冲、输入、输出波形时序关系图



- 改变逻辑分析仪Clock区(Clock/Div)的个数，从“1”调到“32”。在图12.7.2的左侧显示的号码为原理图的节点号码，其并不能表示出计数器输出端和数码管的段位字母，显示不用鼠标左键双击与逻辑分析仪“1”号输入端连接的图线，出现如图12.7.3所示对话框。直观，所以要对原理图进行编辑。

- 
- 将对话框中Node name改成与数码管相对应的符号A。其他与逻辑分析仪的输入端的连线都以此法行之，点击仿真开关或按F5键进行仿真，计数器的输出和数码管的波形时序关系则立即直观的被显示在“Logic Analyzer—XLA1”的面板窗口中。见图12.7.2。

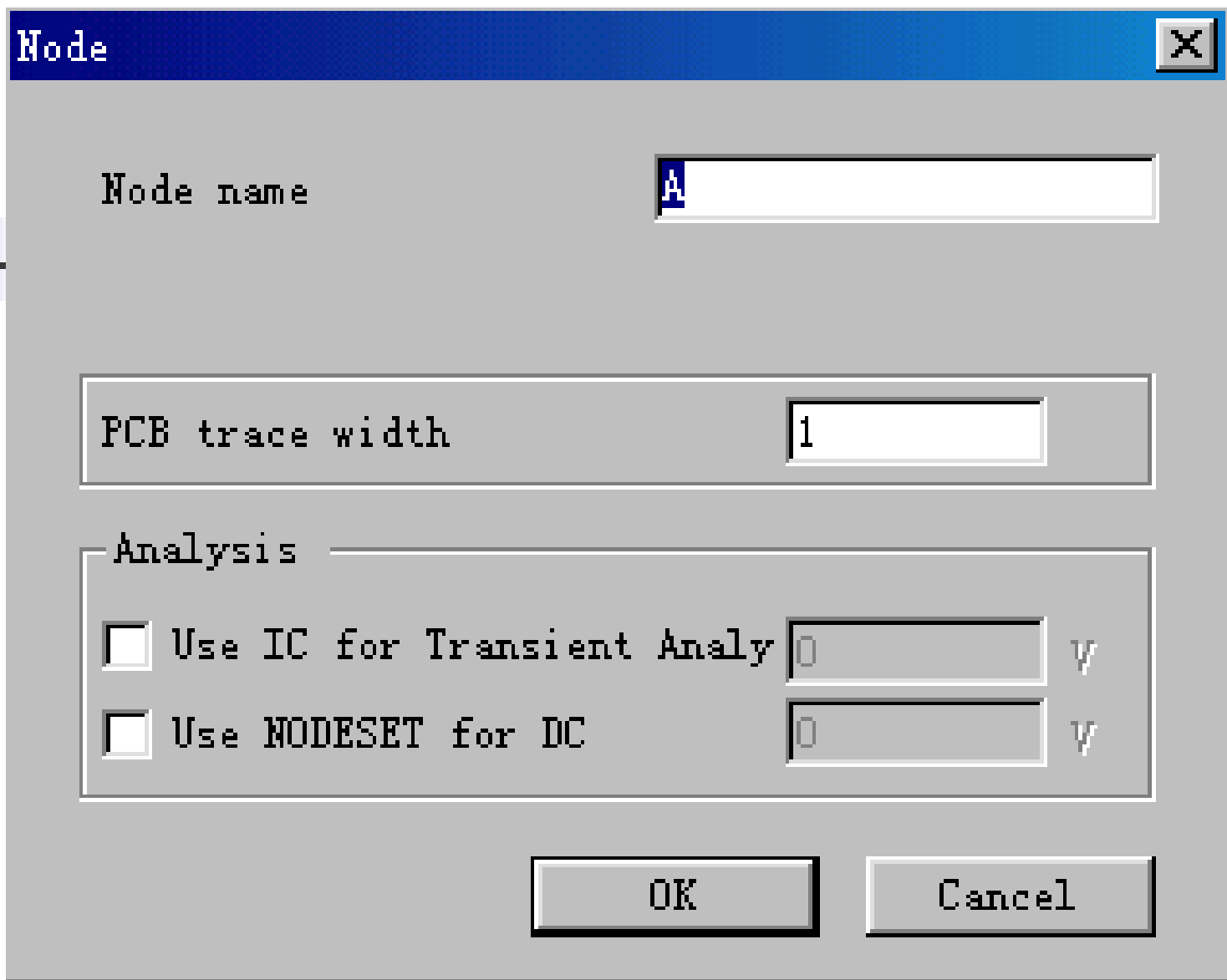


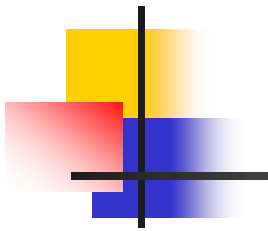
图12.7.3 Node对话框





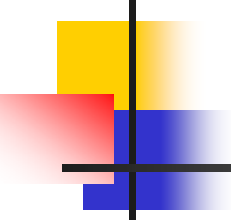
---

## 12.8 程控电压衰减器



---

- 该程控电压衰减器，在数字信号控制下，可以获得不同的衰减量，这在自动量程控制、自动增益纠正等场合非常有用。



---

■ 图12.8.1所示电路是由四双向模拟开关CC4066和四运算放大器3554AM等构成的程控电压衰减器。CC4066双向模拟开关的13、8、6、脚为控制端（分别用A2、A1、A0表示），分别控制由1、2，3、4，8、9，脚构成的开关。

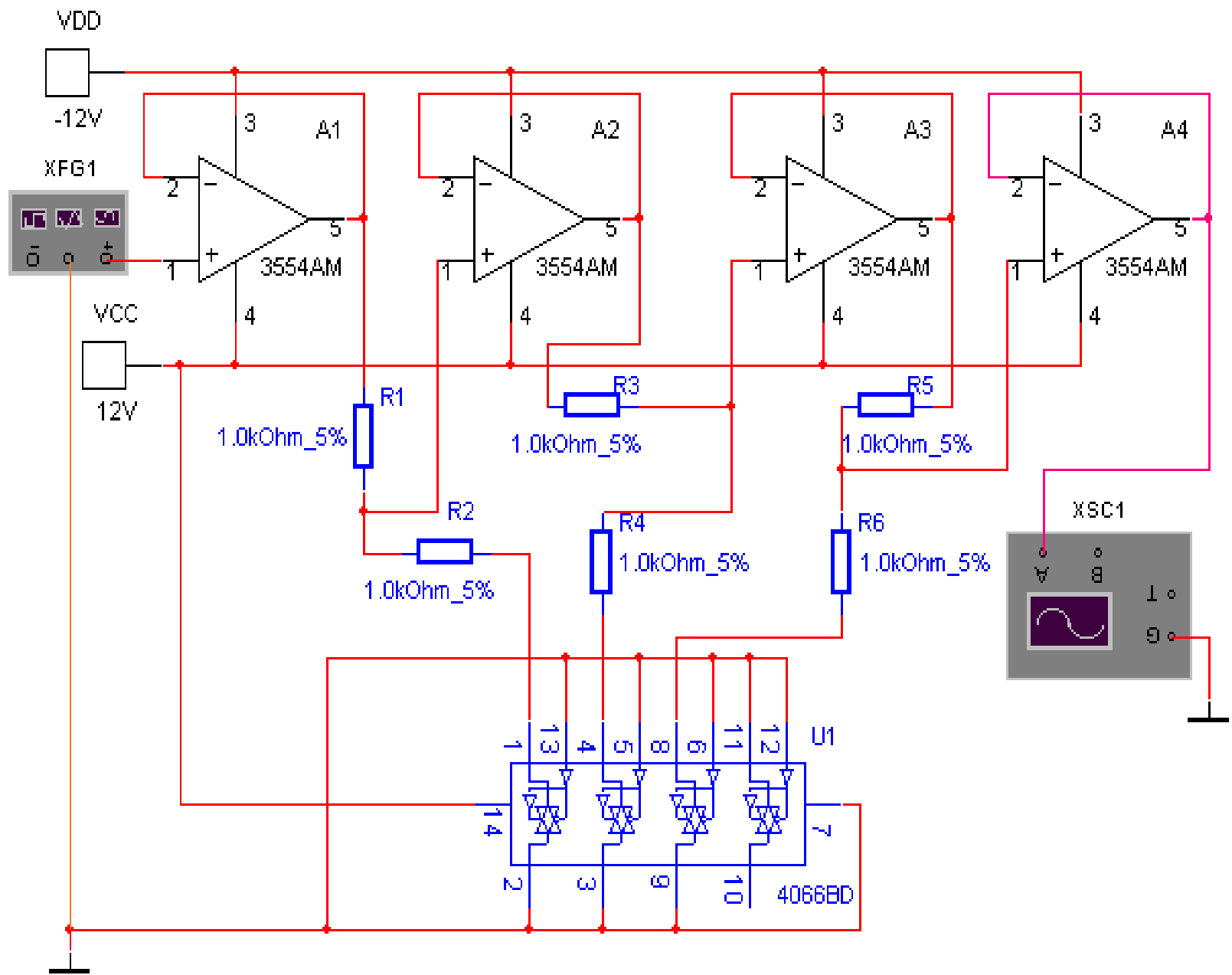
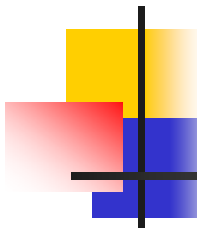
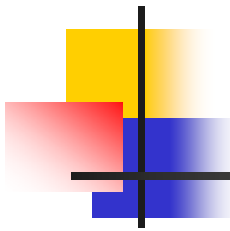
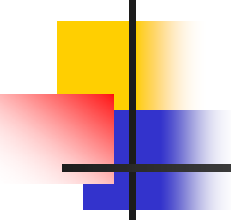


图12.8.1 程控电压衰减器

- 
- 电路中，将分压电阻接在3354AM的同相输入端，便构成了电压衰减器。3个电阻分压器经CC4066的开关1、2，3、4，8、9分别接通时的衰减量K1，K2，K3可分别表示为：

$$K1 = 20 \lg \frac{R_2}{R_1 + R_2} (dB)$$



---

$$K2 = 20 \lg \frac{R_4}{R_3 + R_4} (dB)$$

$$K3 = 20 \lg \frac{R_6}{R_5 + R_6} (dB)$$

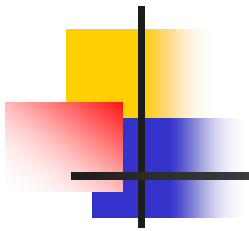
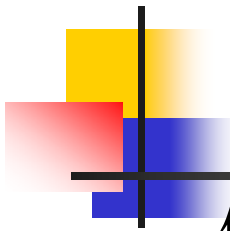
- 
- 
- 在3位二进制数字A0、A1、A2的控制下，可获得8种不同的衰减量，其衰减量与控制量的关系见表12.8.1。

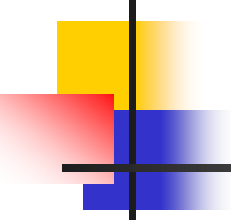
表12.8.1 衰减量与控制量的关系表

A2	A1	A0	顺序	衰减值
0	0	0	0	0dB
0	0	1	1	K3
0	1	0	2	K2
0	1	1	3	K2+K3
1	0	0	4	K1
1	0	1	5	K1+K3
1	1	0	6	K1+K2
1	1	1	7	K1+K2+K3





■ 假设 $K_1 = -40\text{dB}$ ； $K_2 = -20\text{dB}$ ， $K_3 = -10\text{dB}$ ，则每级衰减量为 $-10\text{dB}$ 。该电路可实现从0、10、20，……70步长为10的衰减。当选取不同电阻值时，还可以改变步长。当控制端输入000时衰减为 $0\text{dB}$ ，图12.8.2衰减值为 $0\text{dB}$ 时的输出波形。图12.8.3衰减值为 $K_1$ 时的输出波形。



---

- 本例中，四双向模拟开关集成电路CC4066的4个开关只用了3个，剩余一个若无他用可将控制端接地。14脚接正电源，7脚接地。

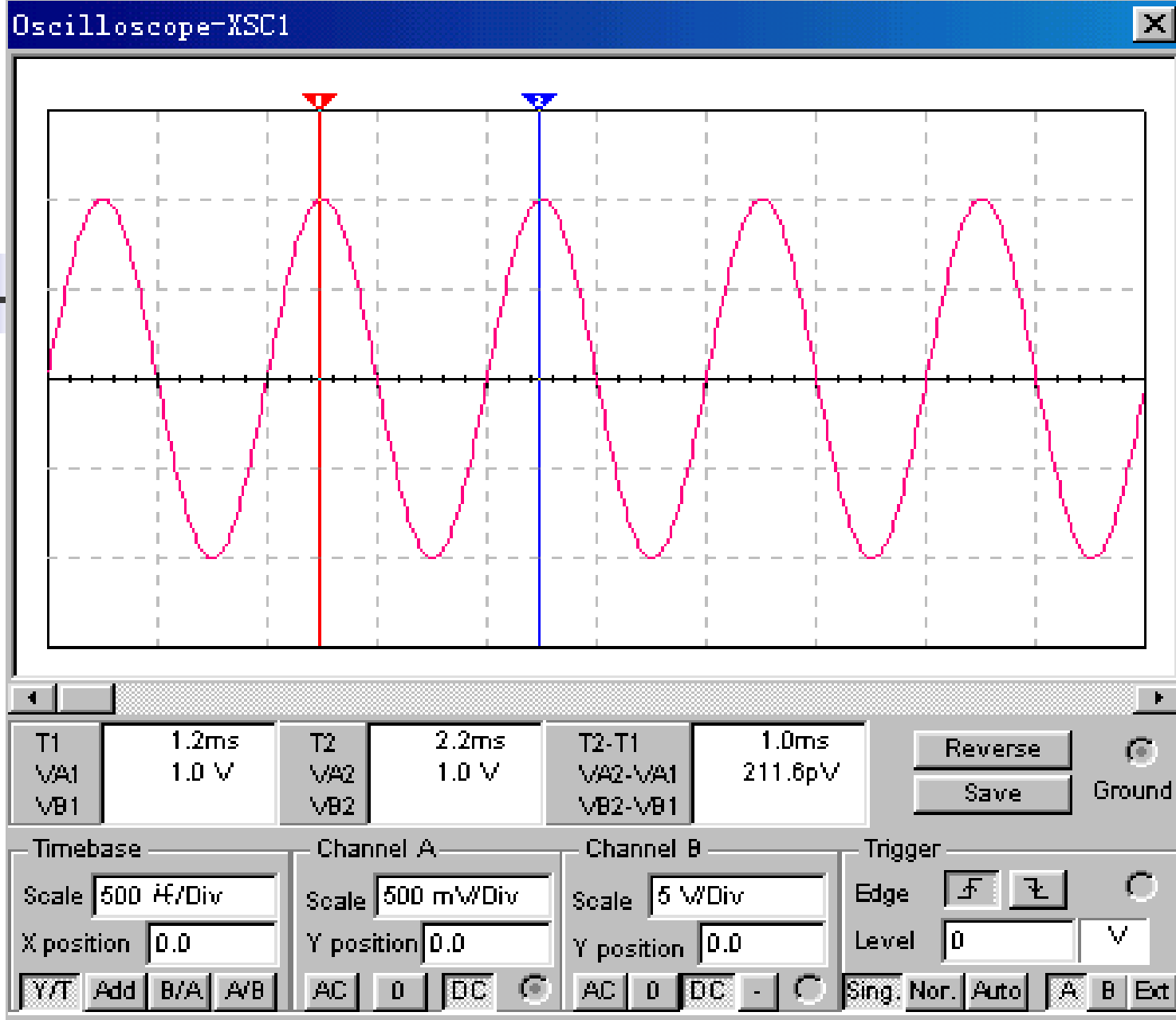


图12.8.2 衰减值0dB时的输出波形

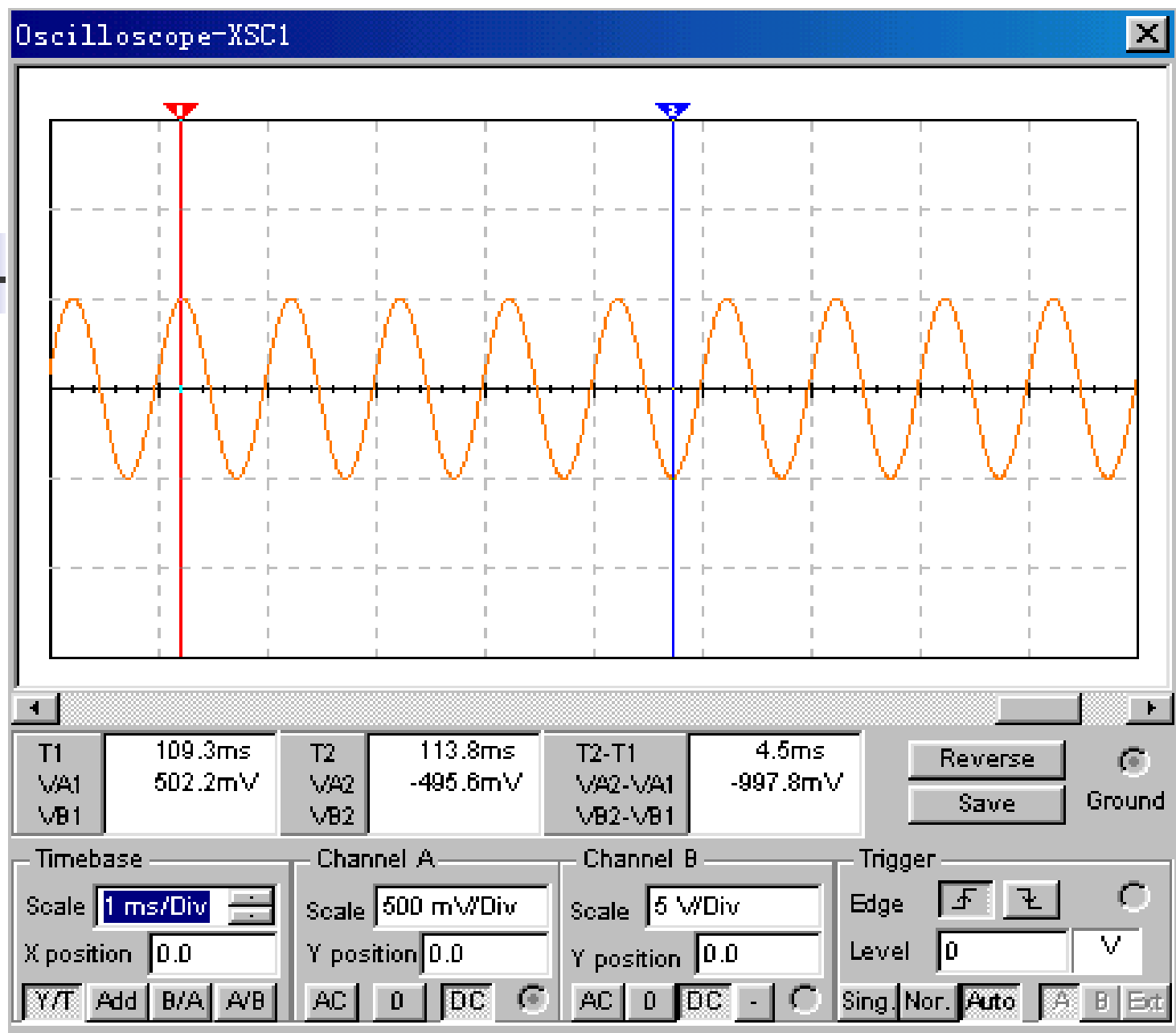


图12.8.3 衰减值K1时的输出波形



---

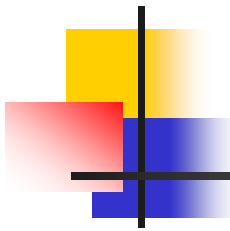
## 12.9 数字时钟的设计



## 12.9.1 数字时钟的电路结构

---

- 数字时钟是用数字集成电路构成的，用数码显示的一种现代化计数器，由振荡器、分频器、校时电路、计数器、译码器和显示器六部分组成。振荡器和分频器组成标准秒信号发生器，不同进制的计数器、译码器和显示器组成计时系统，

- 
- 
- 通过校时电路实现对时、分的校准。由于采用纯数字硬件设计制作，与传统机械表相比，它具有走时准确，显示直观，无机械传动装置等特点。其基本原理的逻辑框图如下图12.9.1所示：

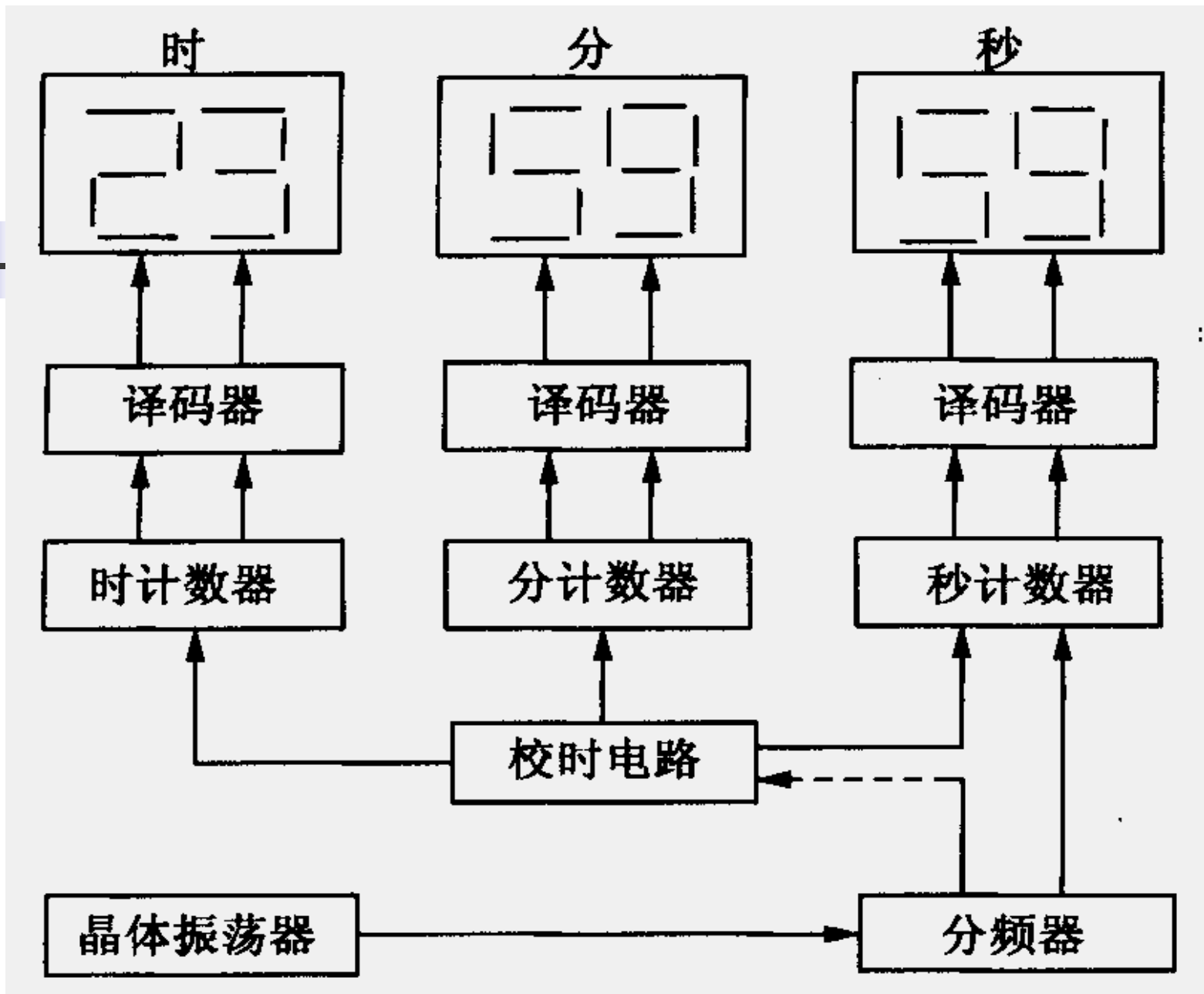
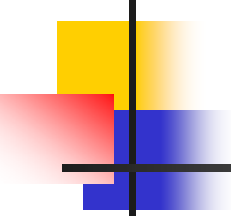
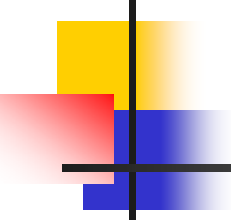


图12.9.1 数字电子钟的逻辑框图



- 
- 由图中可看出，石英晶体振荡器产生的信号经过分频器作为秒脉冲，秒脉冲送入计数器计数，计数结果通过“时”、“分”、“秒”译码器显示时间。其中晶体振荡器和分频器组成标准秒信号发生器，由不同进制的计数器、译码器和显示器组成计时系统。

- 
- 秒信号送入计数器进行计数，把累计的结果以‘时’、‘分’、‘秒’的数字显示出来。

‘时’显示由二十四进制计数器、译码器、显示器构成，‘分’、‘秒’显示分别由六十进制计数器、译码器、显示器构成。在本例中只介绍计数、译码及显示电路，振荡器、分频器读者可参照有关教材自行设计。



## 12.9.2 计数器电路的设计

---

- 根据图12.9.1数字电子钟的逻辑方框图可清楚知道，显示‘时’、‘分’、‘秒’需要六片中规模计数器。其中，‘秒’‘分’计时各为60进制计数器，‘时’位计时为24进制计数器，60进制计数器和24进制计数器都选用74LS90集成块来实现。实现的方法采用反馈清零法。



---

## 1. 60进制计数

- “秒”计数器电路与“分”计数器电路都是60进制，它由一级10进制计数器和一级6进制计数器连接构成，如图12.9.2所示，采用两片中规模集成电路74LS90串接起来构成的“秒”、“分”计数器。

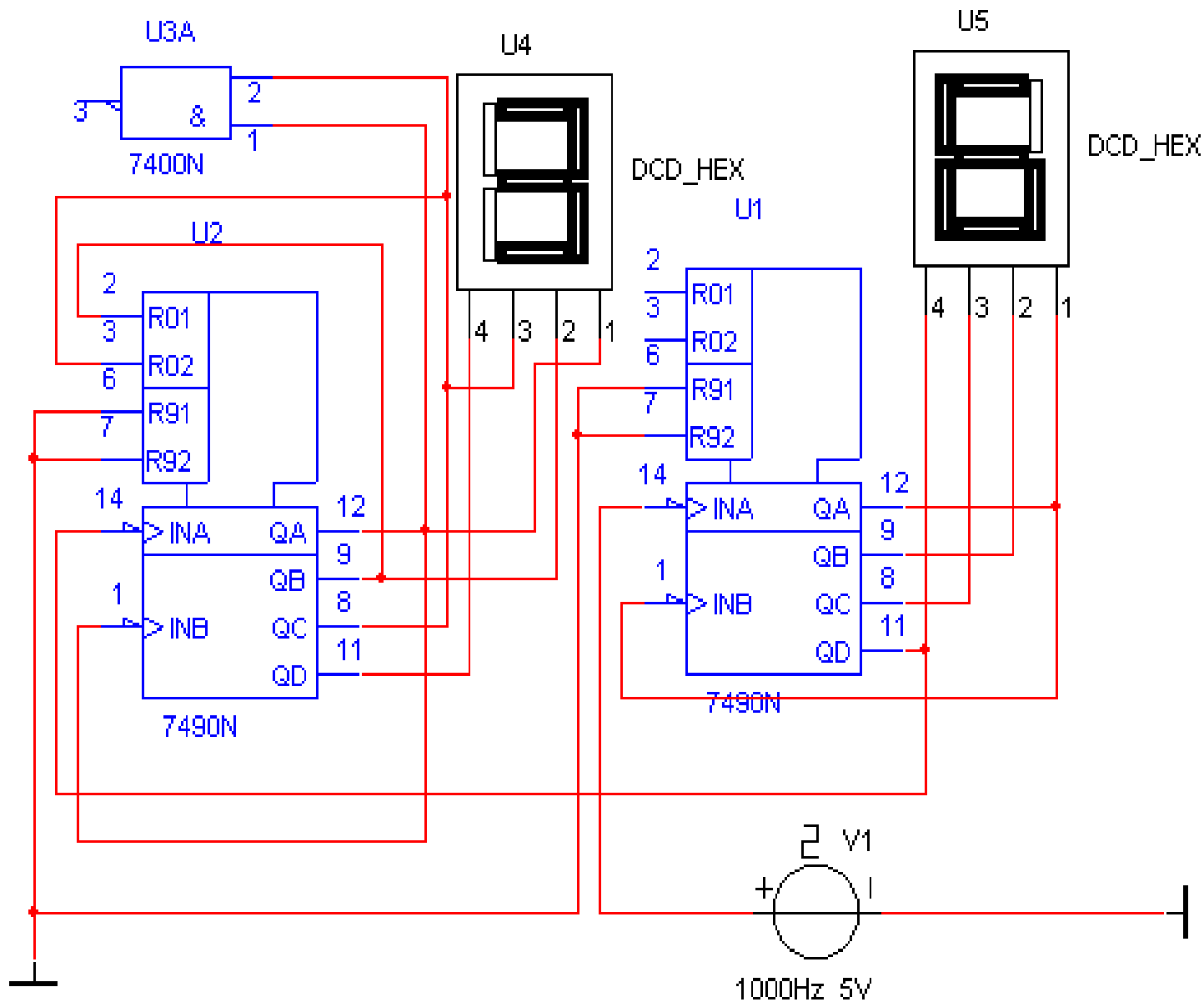
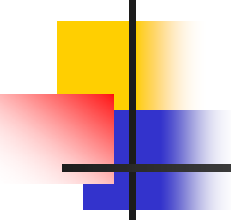
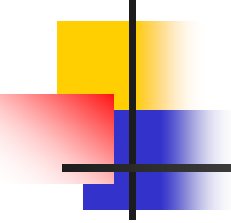
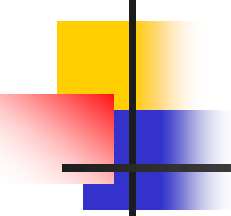


图12.9.2 60进制同步递增计数器

- 
- 由上图可知，U1是十进制计数器，U1的QD作为十进制的进位信号，74LS90计数器是十进制异步计数器，用反馈归零方法实现十进制计数，U2和与非门组成六进制计数。74LS90是在CP信号的下降沿翻转计数，U2的QA和 QC相与0101的下降沿，

- 
- 作为“分”（“时”）计数器的输入信号。U2的输出0110高电平1分别送到计数器的R01、R02端清零，74LS90内部的R01和R02与非后清零而使计数器归零，完成六进制计数。由此可见U1和U2串联实现了六十进制计数。

- 
- 
- 六十进制计数器子电路的创建。其具体的操是：
  - （1）在Multisim平台上按住鼠标左键，拉出一个长方形，把用来组成子电路的那一部分全部选定。



- (2) 启动Place菜单中的Replace by Subcircuit, 打开如图12.9.3所示的对话框

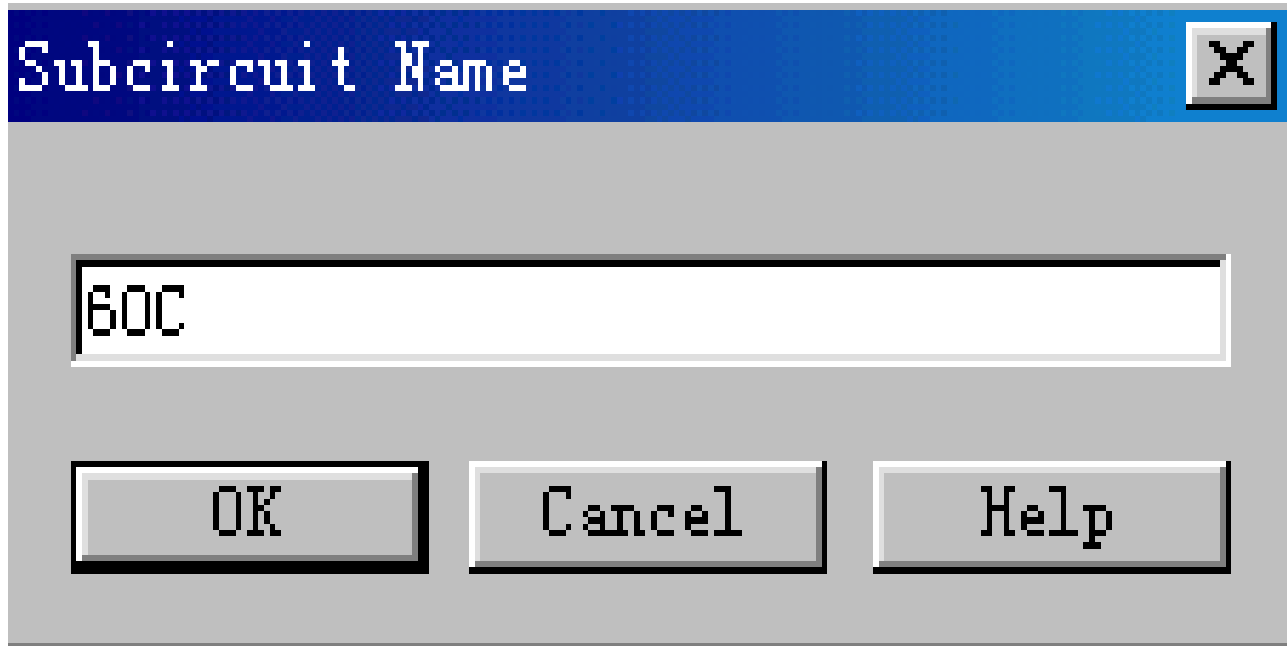
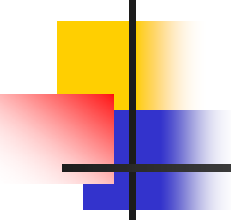
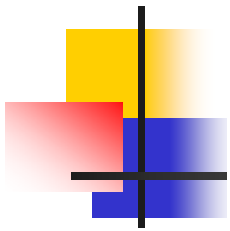


图12.9.3 Subcircuit Name对话框

- 
- 
- 在其编辑栏内输入子电路名称，如60C，点击OK即得到如图12.9.4所示的子电路。



连接点参看图  
12.9.7

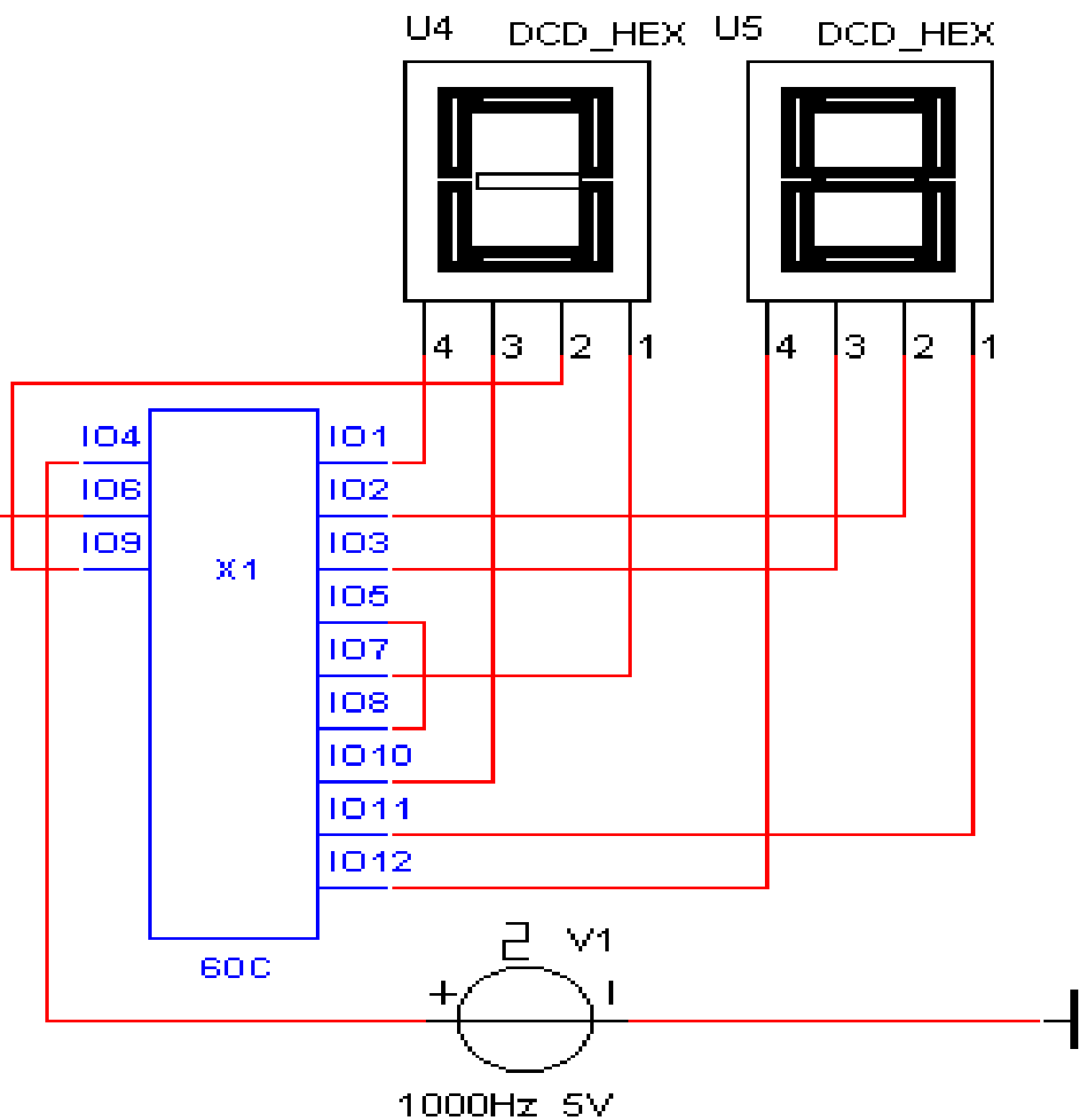
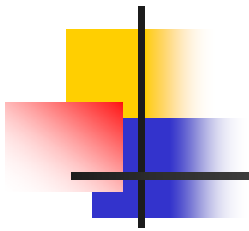


图12.9.4 60进制同步递增计数器子电路



---

### 3. 24进制计数器

- 时计数电路是由U1和U2组成的24进制计数电路，如图12.9.5 所示：

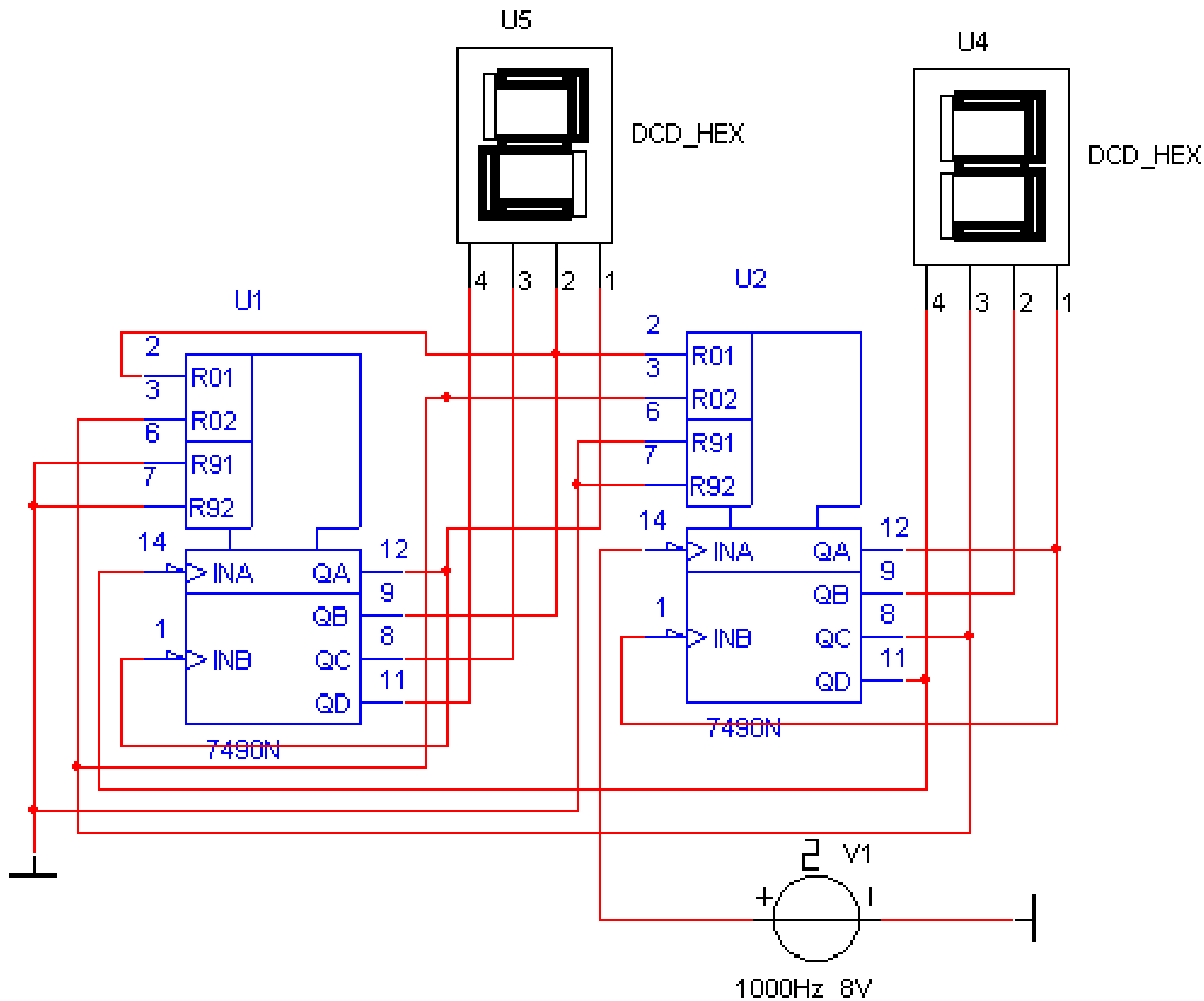
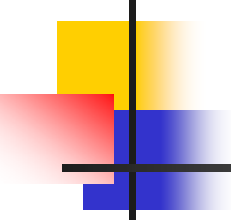
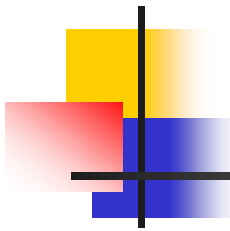
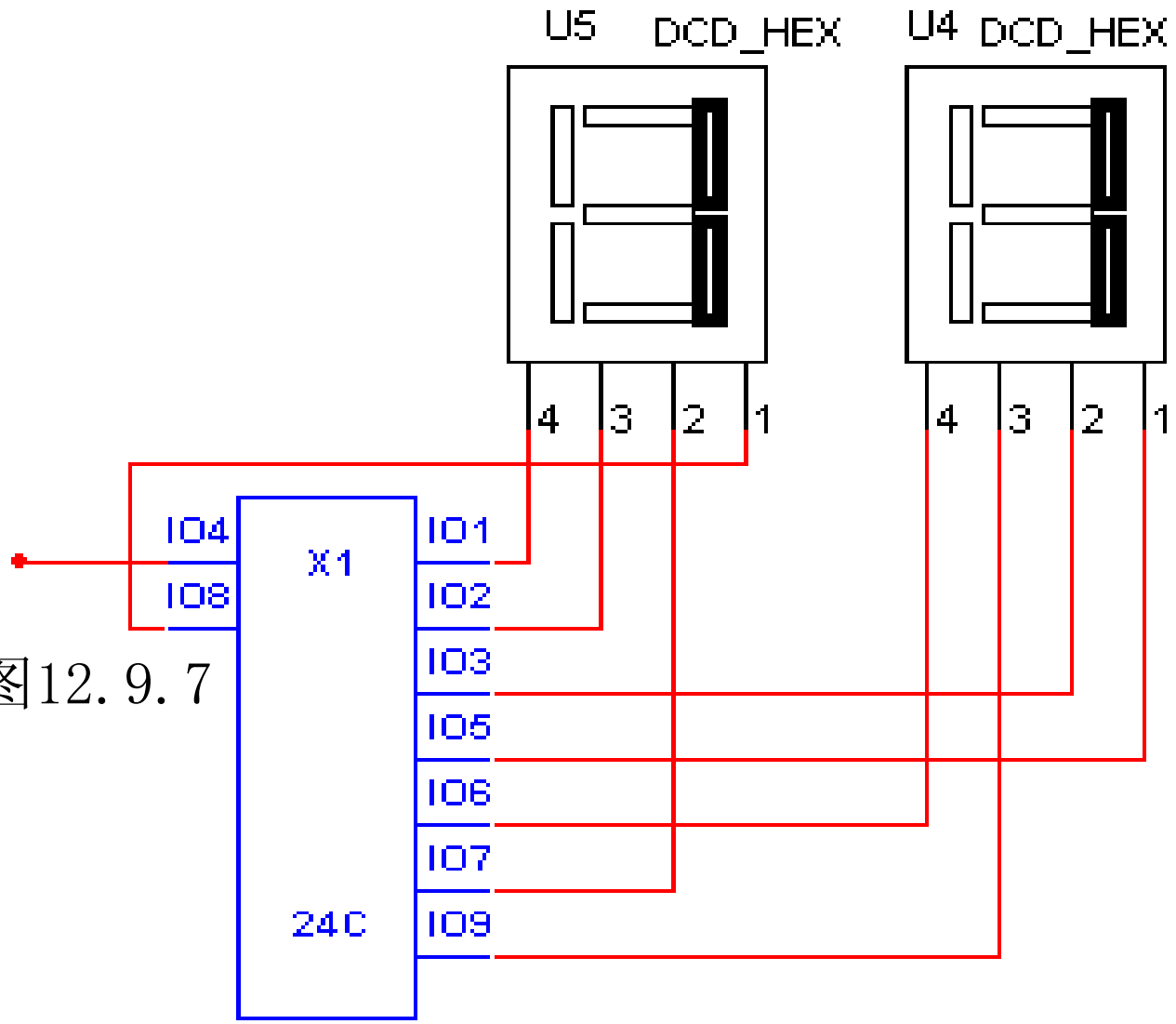
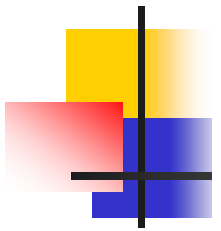


图12.9.5 24进制同步递增计数器



■ 由图可看出，当“时”个位U2计数输入端U2来到第10个触发信号时，U2计数器复零，进位端QD向U1“时”十位计数器输出进位信号，当第24个“时”（来自“分”计数器输出的进位信号）脉冲到达时U2计数器的状态为“0100”，U1计数器的状态为“0010”，

- 
- 此时“时”个位计数器的QC，和“时”十位计数器的QB输出为“1”。把它们分别送到U1和U2计数器的清零端R0（1）和R0（2），通过7490内部的R0（1）和R0（2）与非后清零，计数器复零，完成24进制计数。子电路的创建方法与60进制计数器子电路的创建方法相同，其电路如图12.9.6所示。



连接点参看图12.9.7

图12.9.5 24进制同步递增计数器子电路





## 12.9.3 显示器

---

- 用七段发光二极管来显示译码器输出的数字，显示器有两种：共阳极或共阴极显示器。  
74LS48译码器对应的显示器是共阴（接地）显示器。在本设计中采用的是解码七段排列显示器。



## 12.9.4 数字钟系统的组成

---

- 利用60进制和24进制递增计数器子电路构成的数字钟系统如图12.9.7 所示：

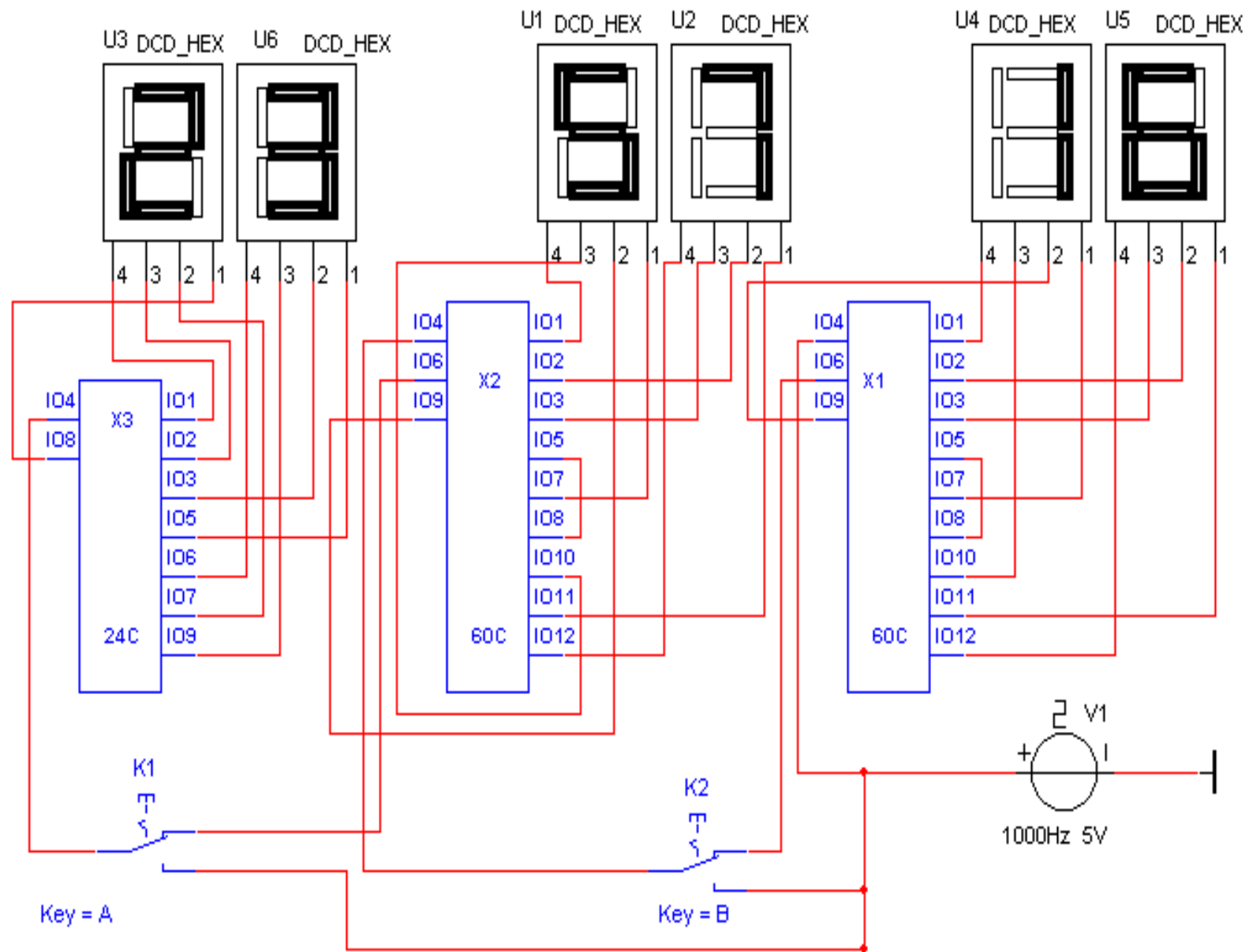
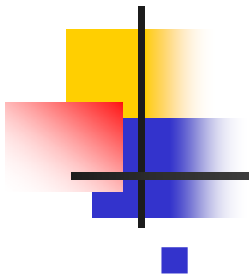
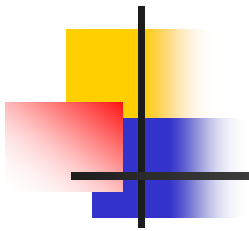


图 12.9.7 数字钟电路

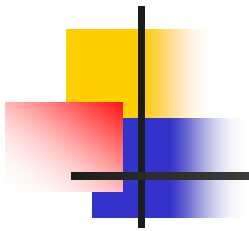


■ 从上图可知，在数字钟电路中，由两个60进制同步递增计数器完成秒、分计数，由24进制同步递增计数器实现小时计数。秒、分、时计数器之间采用同步级连方式。开关K1控制小时的24进制方式选择，开K2控制分的60进制方式选择。敲击A和B键，可控制开关K1和K2将秒脉冲直接引入时、分计数器，实现校时。

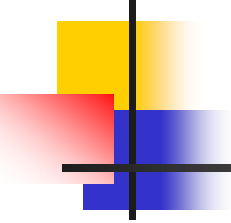


---

## 本章小结



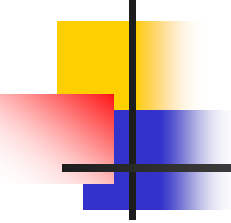
- 本章介绍了一些应用电路例。主要内容有：
- (1) 介绍了由运算放大器组成的，能够产生方波和三角波的函数发生器。



---

- (2) 阶梯波发生器电路能够产生5个台阶的阶梯波，电路由电压跟随器、压控振荡器、五进制计数器、缓冲器、反相求和电路及反相器组成。

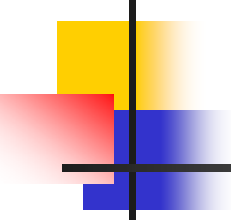
- (3) 介绍了以D触发器为核心实现的铁路和公路交叉路口交通控制器的设计。

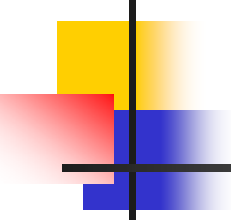


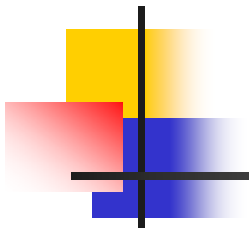
---

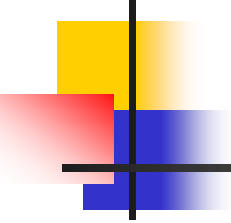
- (4) 病房呼叫系统有7个病房房间，每间病房门口设有呼叫显示灯，室内设有紧急呼叫开关，同时在护士值班室设有一个数码显示管，可对应显示病室的呼叫号码。

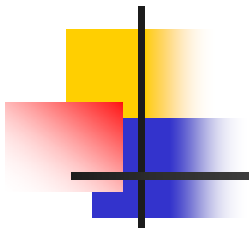


- 
- 
- (5) 8 路数显报警器是由8位优先编码器CC4532、BCD—锁存 / 7段译码 / 驱动器CC4511、六反相器CC4069及时基电路NE555等构成的8路数显优先报警器。

- 
- 
- (6) 汽车尾灯控制电路用6个发光二极管模拟汽车尾灯，即左尾灯（L1~L3）3个发光二极管，右尾灯（R1~R3）3个发光二极管。用两个开关分别控制左尾灯显示和右尾灯显示。

- 
- 
- (7) 计数器、译码器、数码管驱动显示电路在设计时可根据需要，由相应的输出端构建组合电路，从而实现不同进制的计数器。

- 
- 
- (8) 程控电压衰减器电路由四双向模拟开关CC4066和四运算放大器3554AM等构成。该程控电压衰减器在数字信号控制下，可以获得不同的衰减量。



---

- 掌握综合应用电路的仿真设计与分析方法是本章的重点。注意应用要求与逻辑函数之间的转换、子电路设计、电路功能的模块化等设计技巧。解决一个实际问题，可以采用不同形式的电路形式。

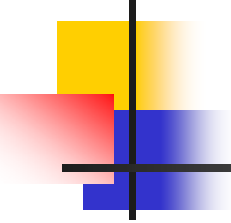


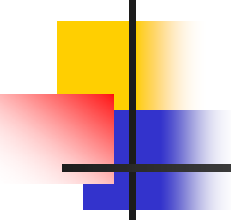
## 思考题与习题

---

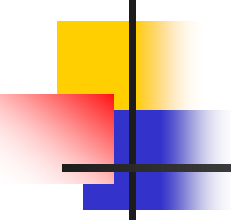
- 12.1 在Multisim仿真平台上设计一个前置放大器，其电路的设计条件为：
  - 输入信号： $U_I \leq 10\text{mV}$
  - 输入阻抗： $R_I \geq 100\text{K}\Omega$
  - 共模抑制比： $K_{CMR} \geq 60\text{dB}$

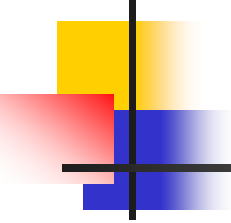
要求用交流分析法分析输入、输出信号。将所设计的电路进行仿真，经过调试达到设计要求。

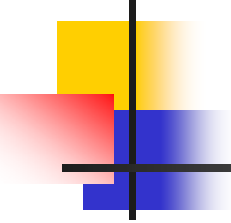
- 
- 
- 12.2 在Multisim仿真平台上由集成运算放大器设计一个三级交流电压放大电路，电路设计条件：
    - 输入信号： $U_I = 50\text{mV}$
    - 输出信号： $U_O = -10\text{V}$
    - 输入阻抗： $R_I \geq 100\text{M}\Omega$

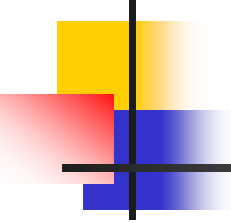
- 
- 
- 要求第一级采用电压跟随器，后面两级采用同相比例或反相比例两种方案。将所设计的电路进行仿真，经过调试达到设计要求。



- 
- 
- 12.3 在Multisim仿真平台上设计一个门限比较器，要求门限电压 $U_{T+}=7.5V$ ,  $U_{T-}=1.5V$ ,  $\Delta U=6V$ . 将所设计的电路进行仿真，经过调试达到设计要求。

- 
- 
- 12.4 在Multisim仿真平台上设计一个波形发生器与变换电路，第一级由运算放大器设计一个正弦波振荡器，第二级设计一个由正弦波变成矩形波的电路。电路设计条件：
    - 振荡频率： $f_0=1500\text{HZ}$

- 
- 
- 输出电压稳定且 $U_{O1}=9V$  (峰—峰值)
  - 输出电压稳定且 $U_{O2}=9V$  (峰—峰值)
  - 频率稳定度%
  - 将所设计的电路进行仿真，经过调试达到设计要求。

- 
- 12.5 在Multisim仿真平台上设计一个OTL音频功率放大电路，放大电路的框图如图12.1所示。电路设计条件为：
    - 电压放大倍数： $A_{uf}=101$
    - 最大输出功率 $P_0=0.6W$
    - 最大输出电压： $U_0=4.5V$

- 将所设计的电路进行仿真，经过调试达到设计要求。

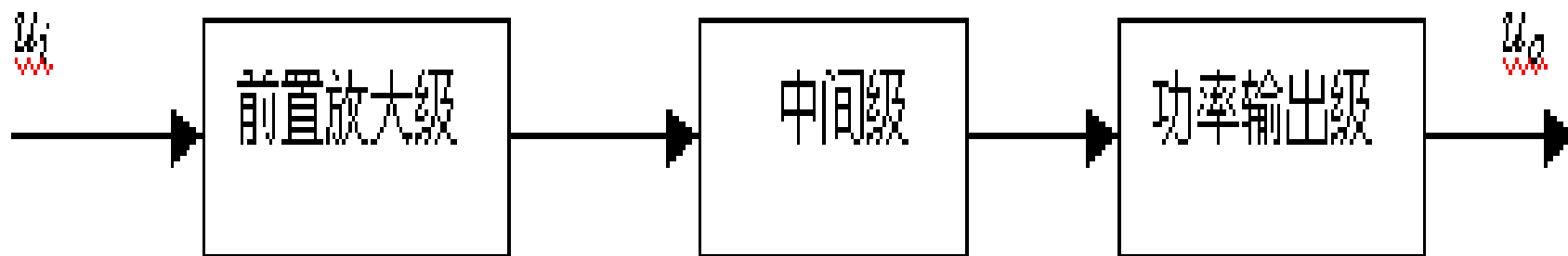
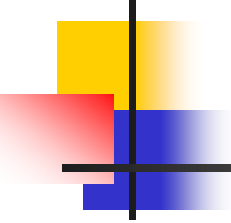
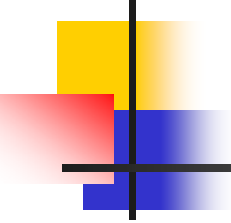
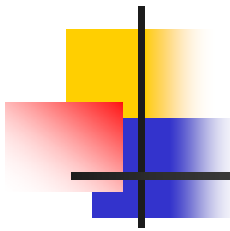


图12.1 习题12.3图

- 
- 12.6 在Multisim仿真平台上设计一个二阶压控电压源带通滤波器，电路设计条件：
  - 电路中心频率： $f_0=1000\text{HZ}$
  - Q值等于0.5
  - 带通宽度 $B=200\text{HZ}$
  - 将所设计的电路进行仿真，经过调试达到设计要求。

- 
- 
- 12.7 在Multisim仿真平台上设计一个2倍频电路，要求用74LS00实现。将所设计的电路进行仿真，经过调试达到设计要求。

- 
- 
- 12.8 在Multisim仿真平台上建立一个如图12.2所示电路，要求（1）将逻辑电路转换为真值表；（2）由真值表导出逻辑表达式；（3）根据导出的逻辑表达式导出逻辑电路。



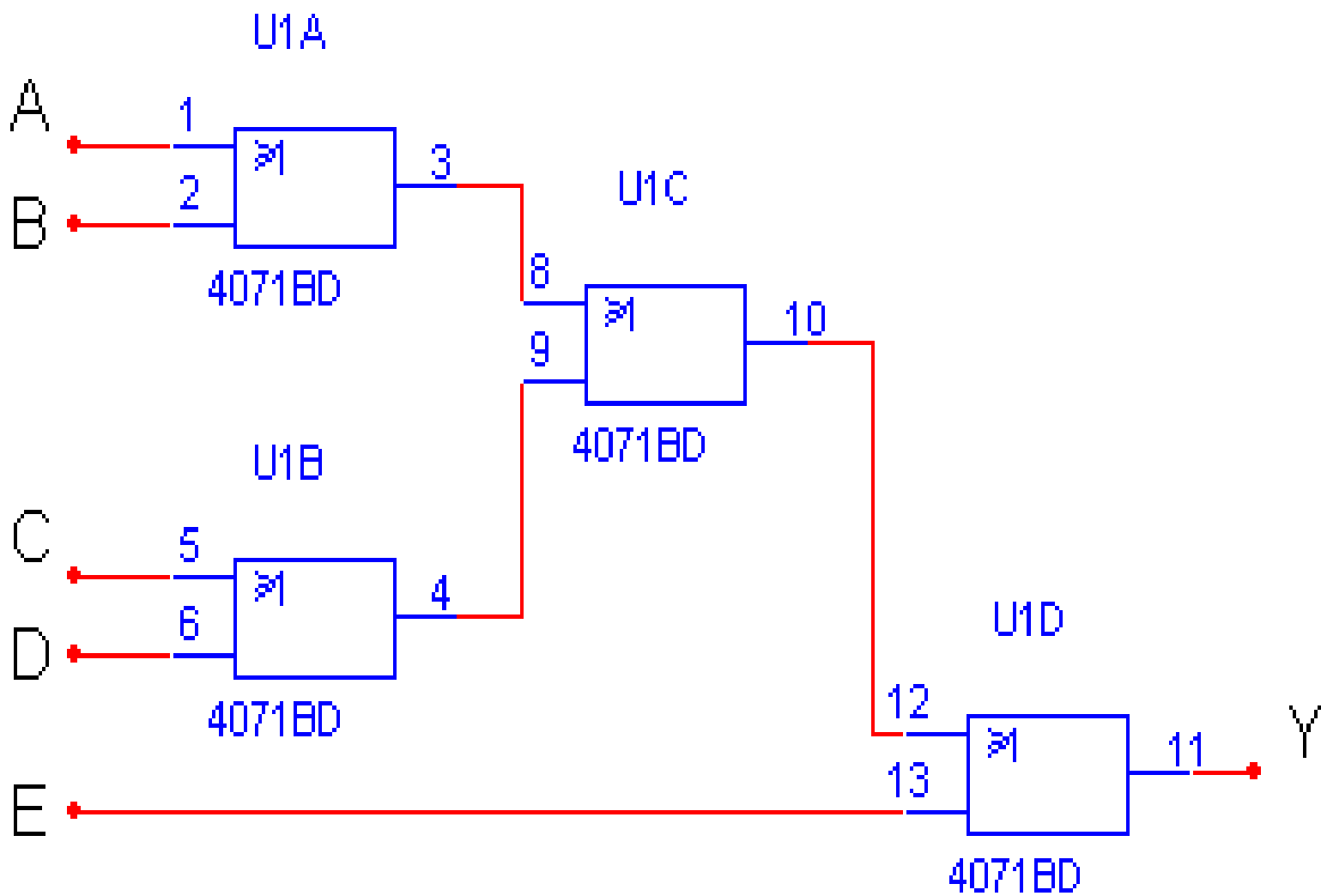
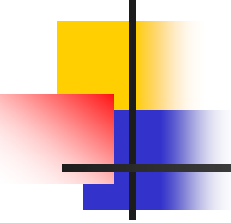
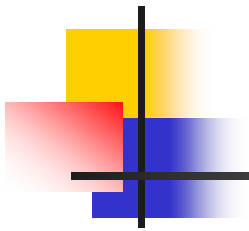
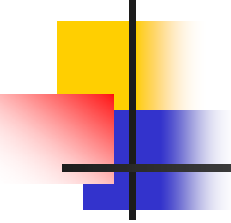
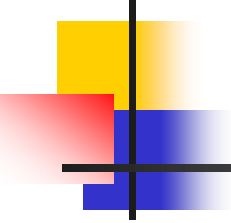


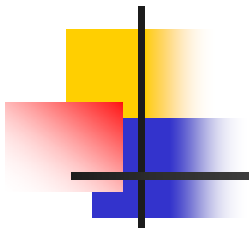
图12.2 习题12.8图

- 
- 
- 12.9 在Multisim仿真平台上设计一个全加器电路。(1)用与非门74LS00和异或门74LS86组成：(2)用与非门74LS00和与或非门74LS154组成：(3)用非门74LS04和74LS153数据选择器实现。将所设计的电路进行仿真，显示仿真结果。

- 
- 
- 12.10 在Multisim仿真平台上用74LS153芯片实现三输入多数表决电路，将所设计的电路进行仿真，显示仿真结果。

- 
- 
- 12.11 在Multisim仿真平台上用两块74LS138芯片实现4线—16线译码器仿真电路，将所设计的电路进行仿真，显示仿真结果。

- 
- 12.12 在Multisim仿真平台上设计一个智能竞赛抢答器，电路设计要求：（1）抢答器为4路输入抢答器；（2）当四组参赛之一抢先按下按钮时，抢答器能准确判断出抢答者，并以闪烁灯显示；（3）抢答器应具有互锁功能，即某路抢答后能自动封锁其他各路的人。

- 
- 12.13 在Multisim仿真平台上设计一个电子秒表，要求能显示0~100秒。将所设计的电路进行仿真，显示仿真结果。（提示：可用三块7490十进制计数器，一块555定时器，一块74LS00四一二输入与非门及辅助元件电阻、电容）



---

## 11.4 直流降压斩波变换电路

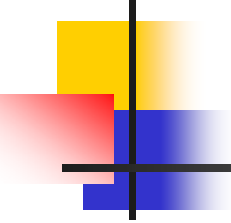


## 11.4.1 直流降压斩波变换电路工作原理

---

- 直流降压变换电路产生一个低于直流输入电压  $U_D$  的平均输出电压  $U_O$ 。一个具有纯电阻负载的降压变换的基本电路拓扑结构如图 11.4.1 (a) 所示。假定开关是理想的，则瞬时输出电压决定于开关的通断状态。由图 11.4.1 (b)，根据开关占空比可计算平均输出电压为：

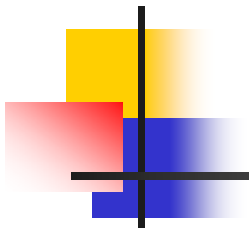




---

$$U_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_0(t) dt = \frac{1}{T_s} \left( \int_0^{t_{\text{on}}} U_D dt + \int_{t_{\text{on}}}^{T_s} 0 dt \right) = \frac{t_{\text{on}}}{T_s} U_D = D U_D$$

从(11.4.1)可见,通过改变开关的占空比  $t_{\text{on}} / T_s$  可以控制输出电压  $U_0$ 。但在实际应用中上述电路存在两个问题:



---

- ①负载不可能是纯电阻性的，即使是电阻负载，也会存在一定的寄生电感。这意味着开关总要吸收（或耗散）电感储能，这很可能使开关损坏；②输出电压 $U_0$ 会在零与 $UD$ 之间波动，在很多应用中，这是不允许的。

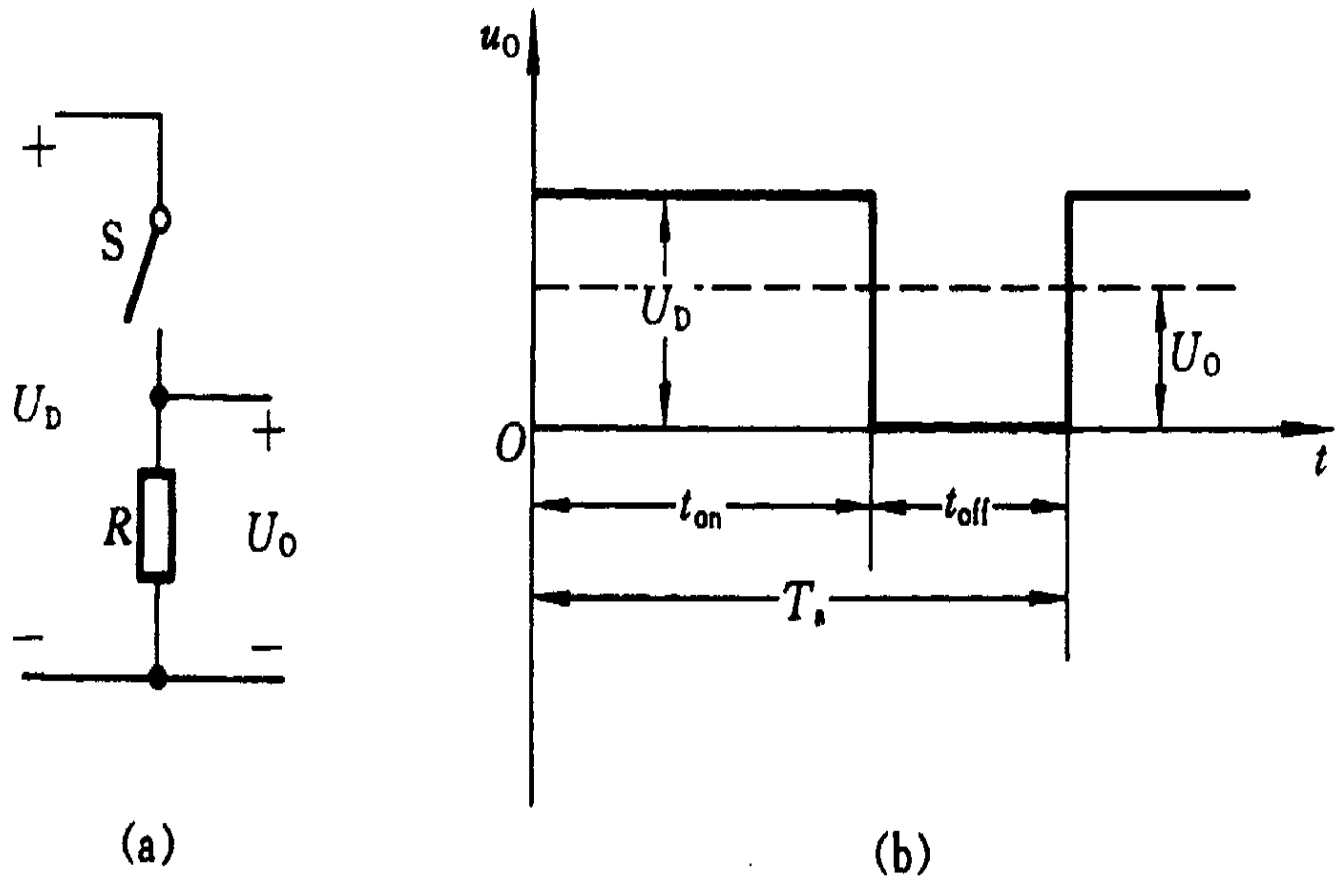
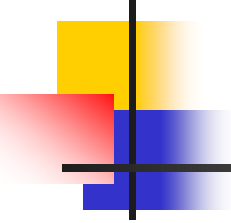
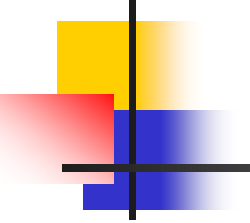


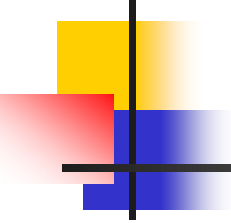
图11.4.1 直流降压变换的基本电路拓扑结构

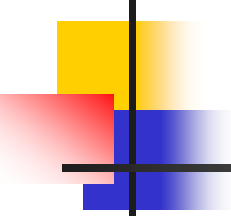


---

- 一个直流降压斩波变换电路模型如图 11.4.2 (a) 所示，图中采用一个续流二极管来消除电感储能对开关造成的不利影响，并采用由电感 $L$ 与电容 $C$ 组成的低通滤波器以尽可能降低输出电压的波动。

- 
- 图11.4.2给出了输入到低通滤波器的电压 $u_{o1}$ 的电压波形，在 $u_{o1}$ 电压波形中包含有一个直流分量 $U_0$ 与具有开关频率 $f_s$ 及其倍数如 $2f_s$ 、 $4f_s$ ……的谐波电压  $U_{f_s}$ 、  $U_{2f_s}$ 、  $U_{4f_s}$ ……。设计时使低通滤波器的截止频率 $f_c$ 远低于开关

- 
- 
- 频率 $f_s$ ，基本上可以消除输出电压中的开关频率 $f_s$ 的纹波。在图11.4.2 (a) 的电路中，当开关闭合时，二极管被反偏，输入端电源向负载及电感 $L$ 提供能量，当开关断开时，电感电流流经二极管。电感中的一部分储能转移到负载上。

- 
- 由图11.4.2 (a) 的电路还可以看出，在降压变流器中，流经电感的平均电流  $I_L$  就等于平均输出电流  $I_o$ ，因为在稳态时流经电容的平均电流为零。由于滤波电容很大，可以满足许多应用场合希望有一个近似恒定输出电压  $u_o(t) \approx U_o$  的要求。

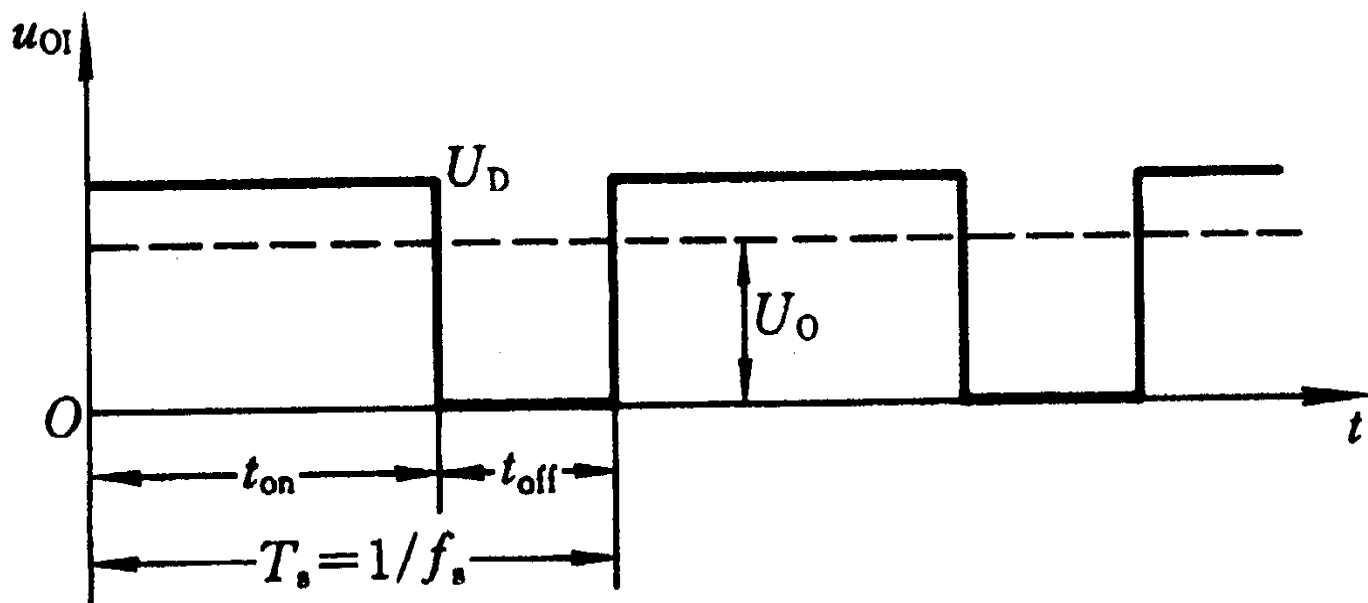
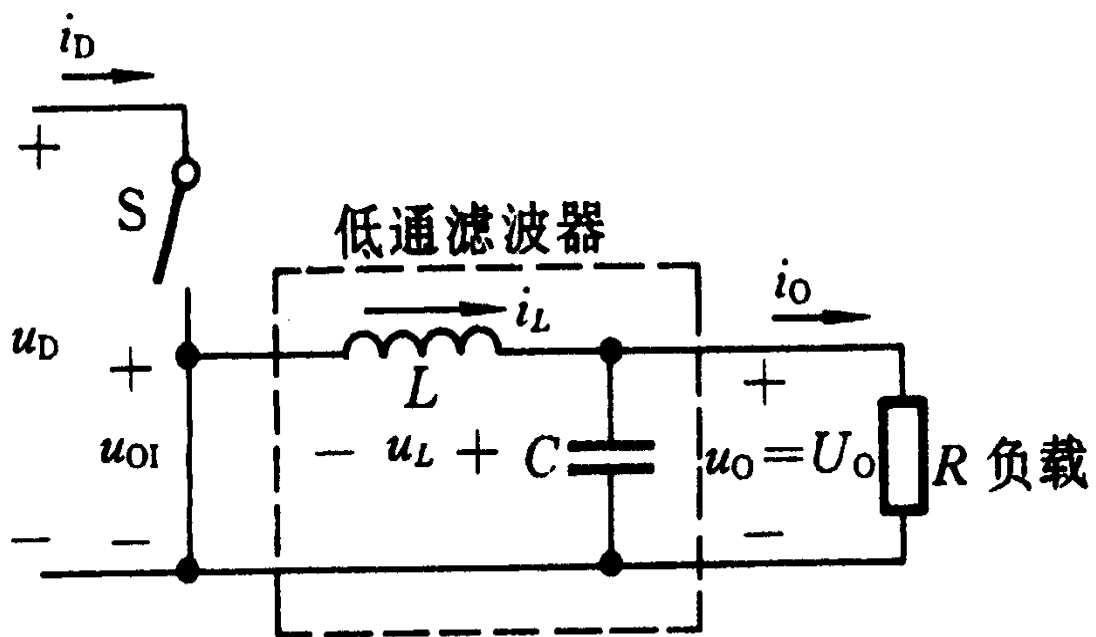
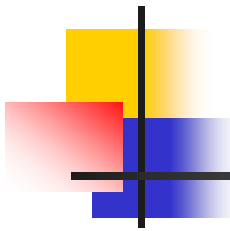


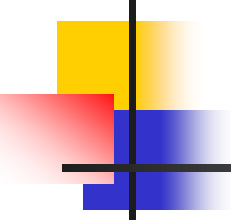
图11.4.2 降压斩波变换电路模型和电压  $u_{O1}$

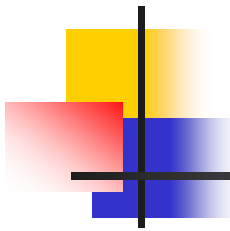




---

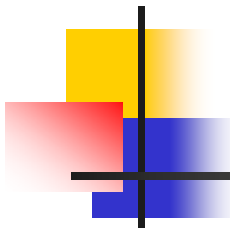
- 在连续导电模式模式中，直流降压斩波变换电路的电流、电压波形与电路图如图11.4.3所示。图中，电感中的电流  $i_L$  连续流动，且  $i_L(t) > 0$ 。在  $t_{on}$  时间内开关持续闭合，开关上流过电感电流  $i_L$ ，而二极管受到反偏，

- 
- 结果是图11.4.3 (b) 的电感上受到一个正电压  $u_L = U_D - U_0$  的作用，这一电压使电感电流  $i_L$  作线性增长。当开关断开时，电感内的储能使  $i_L$  继续流通。不过，此时  $i_L$  流经二极管，并且线性下降。由图11.4.3 (c) 可见，这时  $u_L = -U_0$ 。

- 
- 在稳态运行时，第一个周期的波形是重复的，所以在一个周期内电感电压 $u_L$ 的积分必定为零。这里， $T_s = t_{on} + t_{off}$ ，即：

$$\int_0^{T_s} u_L dt = \int_0^{t_{on}} u_L dt + \int_{t_{on}}^{T_s} u_L dt = 0$$

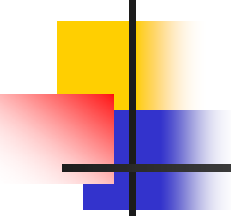
(11.4.2)

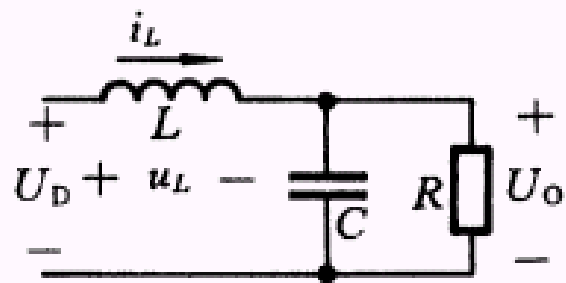
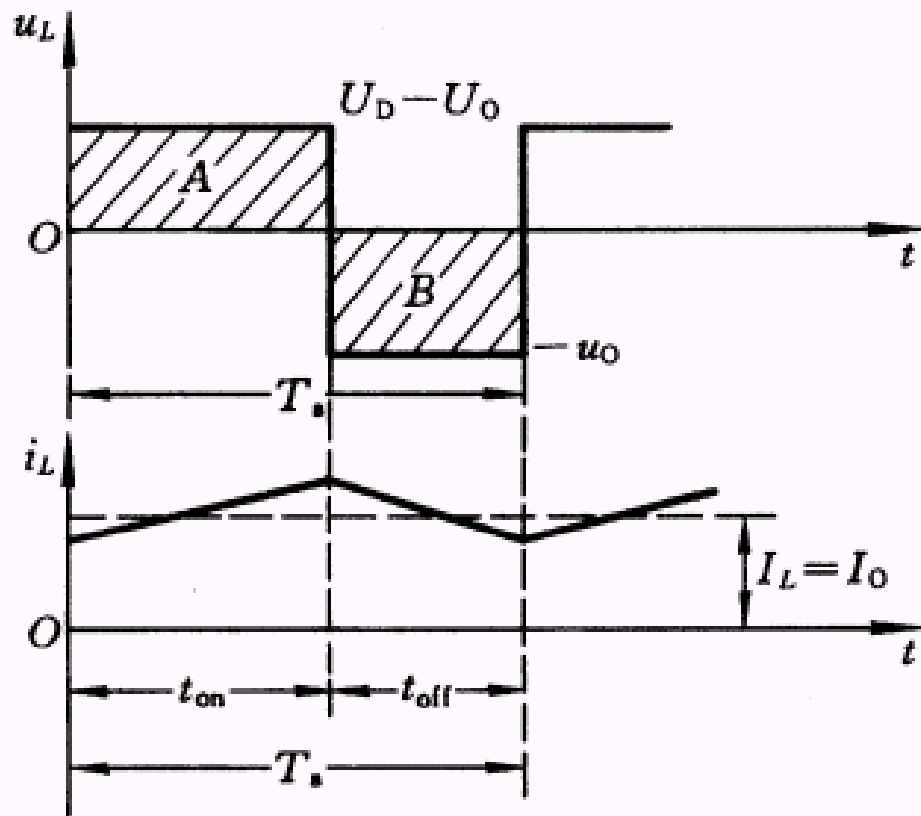
- 
- 上式表明，图11.4.3 (a) 中的阴影面积A必须等于B，即：

$$(U_D - U_0) t_{\text{on}} = U_0 (T_s - t_{\text{on}})$$

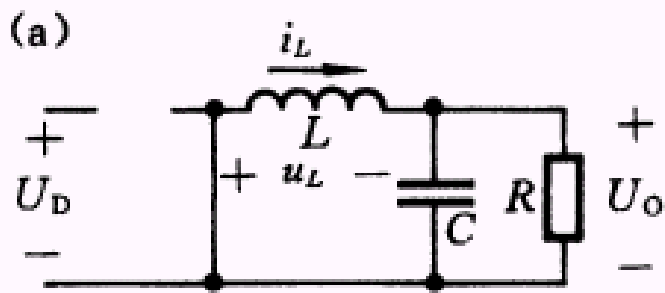
或化简为

$$\frac{U_0}{U_D} = \frac{t_{\text{on}}}{T_s} = D \quad (11.4.4)$$

- 
- 
- 所以在电流连续导电的工作模式中，当输入电压一定时，输出电压与开关的占空比成线性关系，而与任何其他电路参数无关。



(b)



(c)

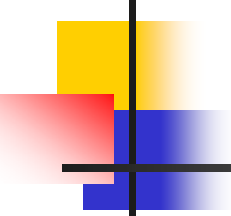
图11.4.3  
直流降压斩  
波变换电路  
的工作状态



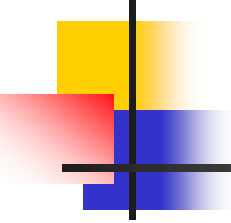
## 11.4.2 直流降压斩波变换电路

---

- 一个直流降压斩波变换电路如图11.4.4所示。图中，V1为输入电源，电压为12V。电压控制电压源V2和脉冲电压源V4组成开关管驱动电路。Q1（2SK4070S）为开关管，栅极受电压控制电压源V2控制，电压控制电压源V2受脉冲电压源控制。

- 
- 用鼠标双击V4，可以打开V4的对话框，如图11.4.5所示，在对话框中可以修改脉冲宽度、上升时间、下降时间和脉冲电压等参数。当设置占空系数 $D=0.5$ 时，启动仿真，可以看见电路输出电压为5.641V，基本满足式（11.4.4）关系。



- 
- 
- （注意：在实际的电路中开关不是理想状态的，存在一定的压降）。点击示波器，可以看见降压斩波变换电路的输出电压变化曲线如图11.4.6所示。

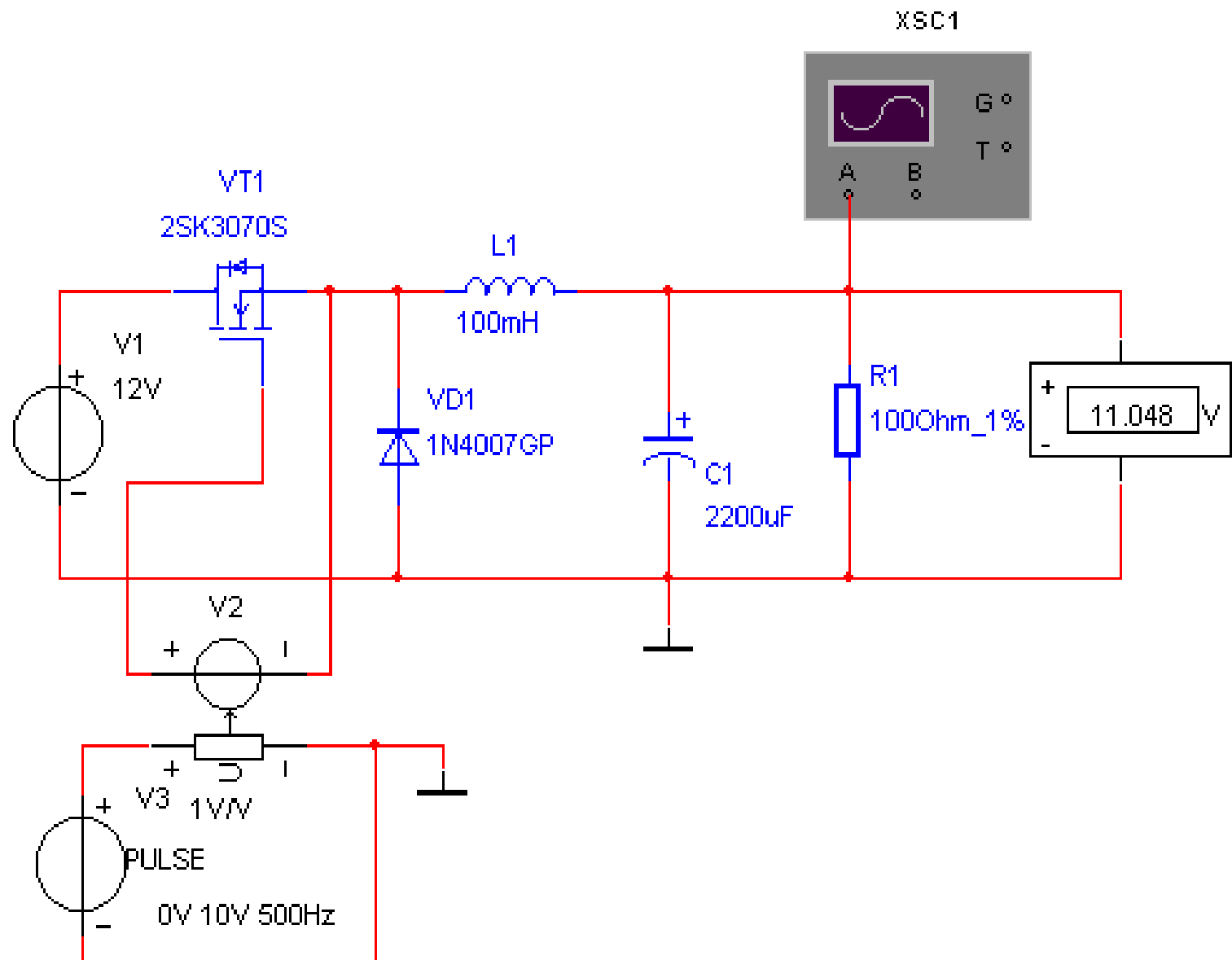


图11.4.4 直流降压斩波变换电路

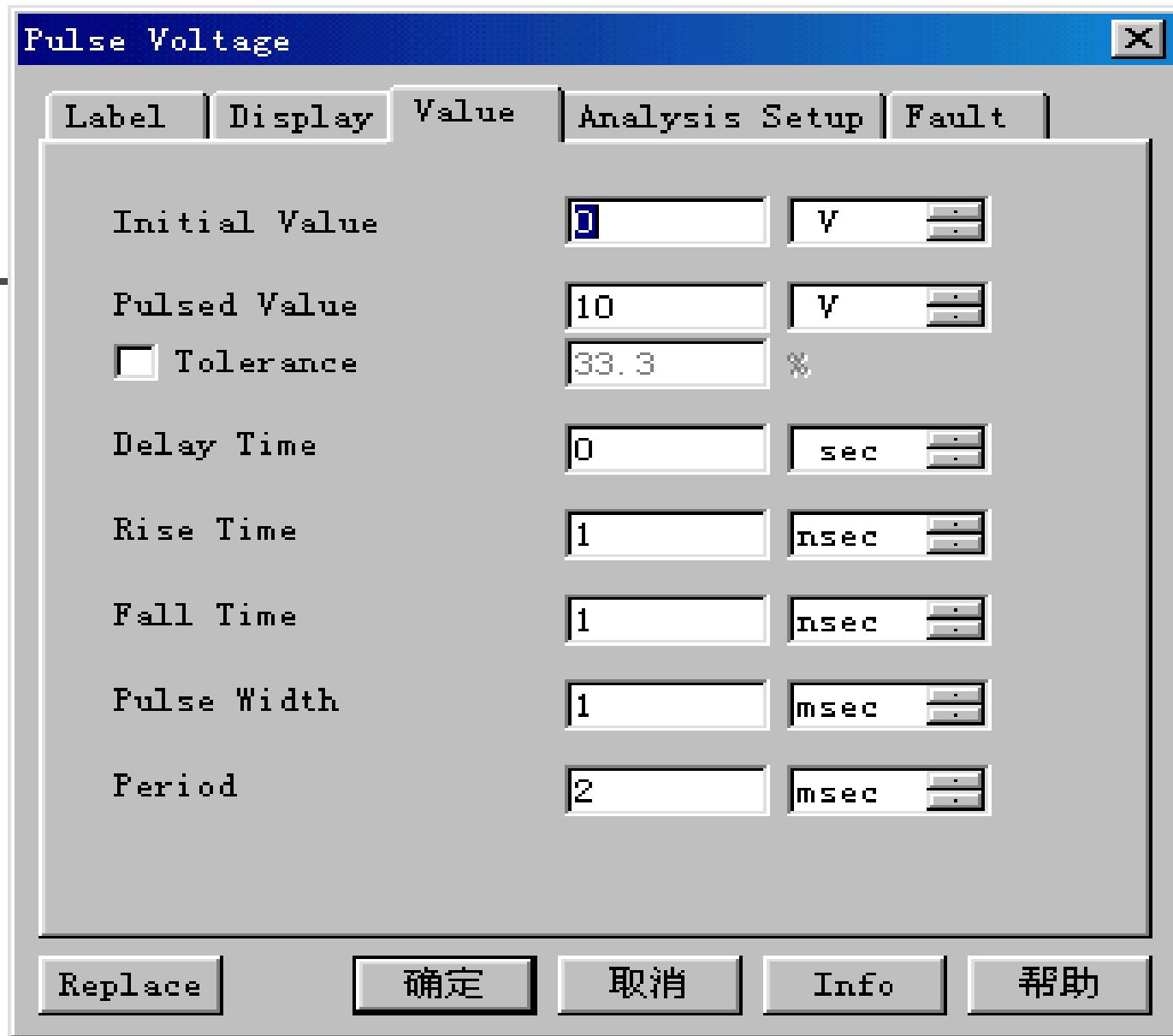


图11.4.5 脉冲电压源对话框

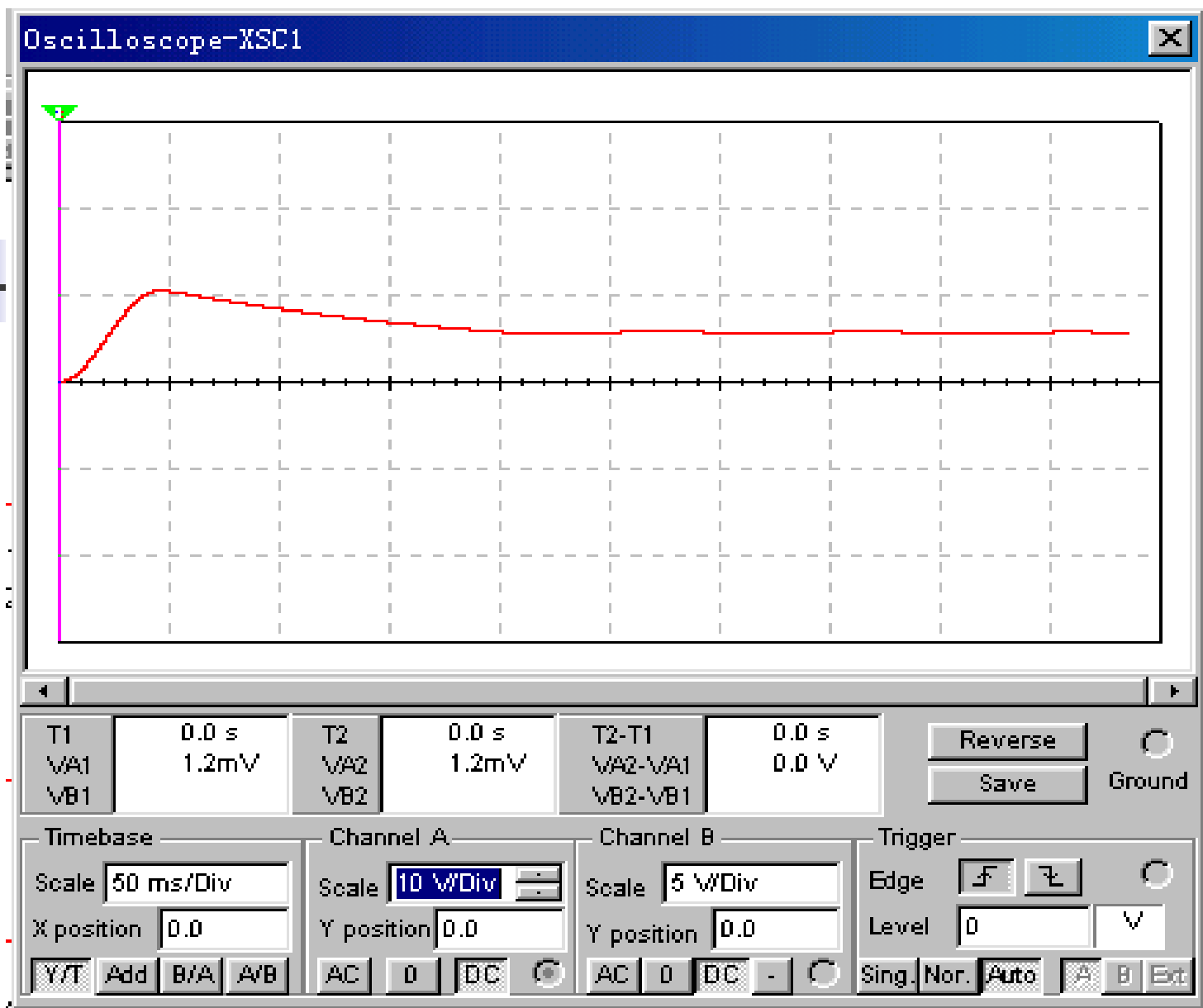


图11.4.6 直流降压斩波变换电路的输出电压曲线



---

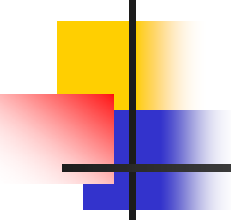
## 11.5 直流升压斩波变换电路



## 11.5.1 直流升压斩波变换电路工作原理

---

- 一个直流升压斩波变换电路模型如图 11.5.1 所示，其输出电压  $U_O$  总是大于输入电源电压  $U_D$ 。当开关 S 闭合时，二极管受电容器 C 上的电压影响反偏断开，于是将输出级隔离，由输入端电源向电感供应能量。



---

当开关S断开时，二极管正偏导通，输出级吸收来自电感与输入端电源的能量。在进行稳态分析时，假定输出滤波器足够大以确保一个恒定的输出电压  $u_0(t) = U_0$ 。

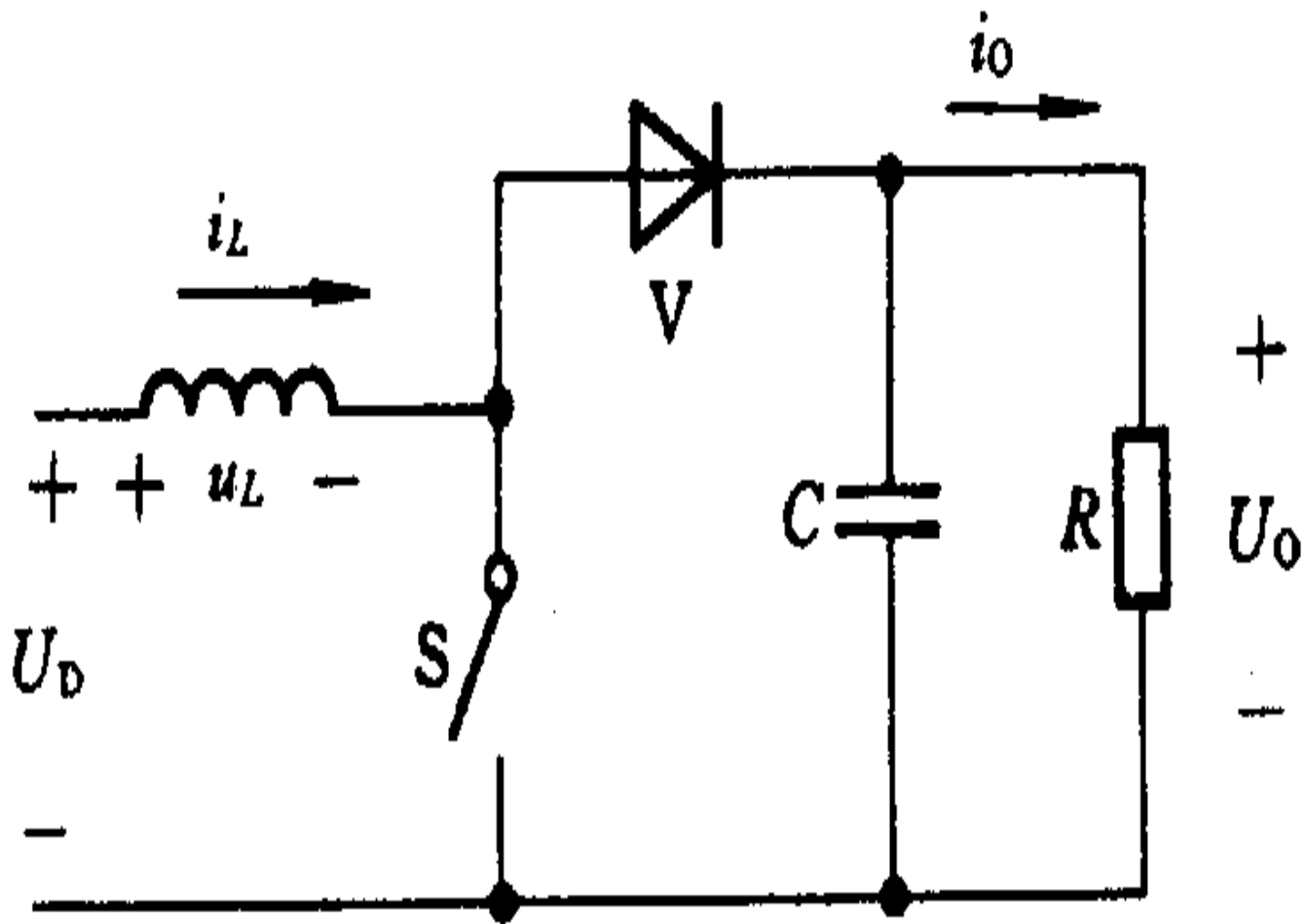


图11.5.1 升压斩波变换电路模型



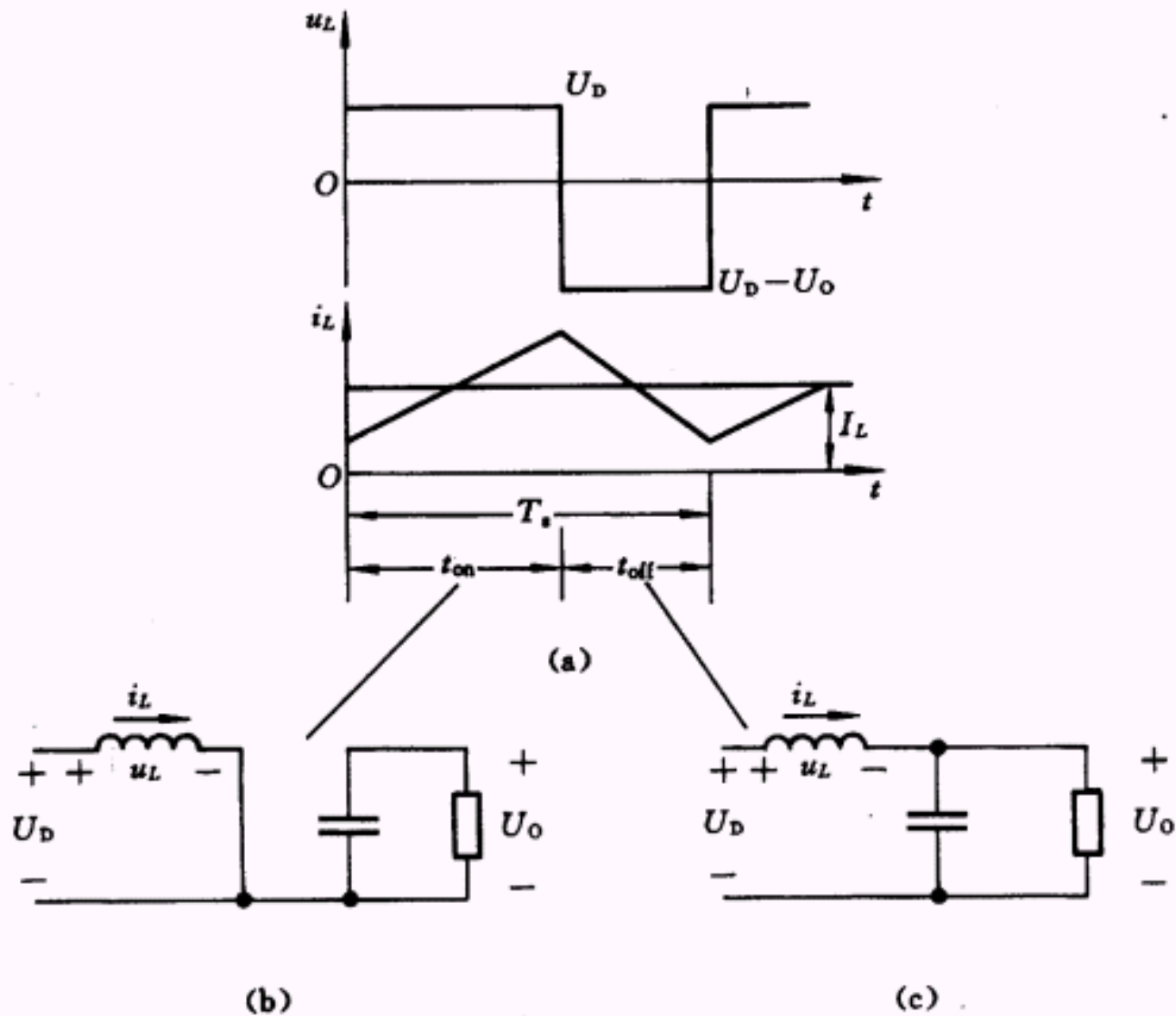
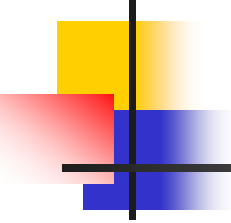
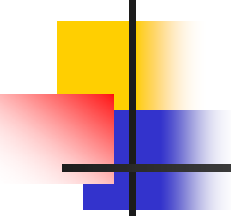


图11.5.2

连续导电模式  
等效电路和电感上的电压电  
流波形

(a) 稳态波形 (b) 开关闭合( $t_{on}$ ) (c) 开关断开( $t_{off}$ )

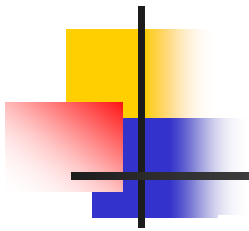
- 
- 在连续导电模式时电感上的电压和电流波形如图11.5.2 (a) 所示，电感上的电流连续流动（ $i_L(t) > 0$ ）。在  $t_{on}$  和  $t_{off}$  期间的等效电路分别如图11.5.2 (b) 和图11.5.2 (c) 所示。

- 
- 
- 根据电感的基本特性，在稳态时电感电压在一个周期内对时间的积分必须为零，即

$$U_D t_{\text{on}} + (U_D - U_O) t_{\text{off}} = 0$$

(11.5.1)

- 两边除以  $T_s$ ，整理后可得



---

$$\frac{U_O}{U_D} = \frac{T_s}{t_{\text{off}}} = \frac{1}{1 - D}$$

(11.5.2)

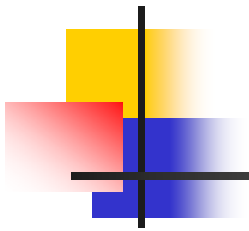
在式 (11.5.2) 中,  $D$  为占空系数。当输入电压  $U_D$  保持不变时, 改变  $D$  即可改变输出电压  $U_O$ 。



## 11.5.2 直流升压斩波变换电路

---

- 一个直流升压斩波变换电路如图11.5.3所示。图中，V1为输入电源，电压为12V。VT1（2SK3070S）为开关管，栅极受脉冲发生器V2控制，用鼠标双击V2，可以打开V2的对话框，如图11.5.4所示，在对话框中可以修改频率、占空系数、输出电压。



---

- 当设置占空系数 $D=0.5$ 时，启动仿真，可以看见电路输出电压为23.127V，基本满足式（11.5.2）关系（注意：在实际的电路中开关不是理想状态的，存在一定的压降）。点击示波器，可以看见升压斩波变换电路真的输出电压变化曲线如图11.5.5所示。

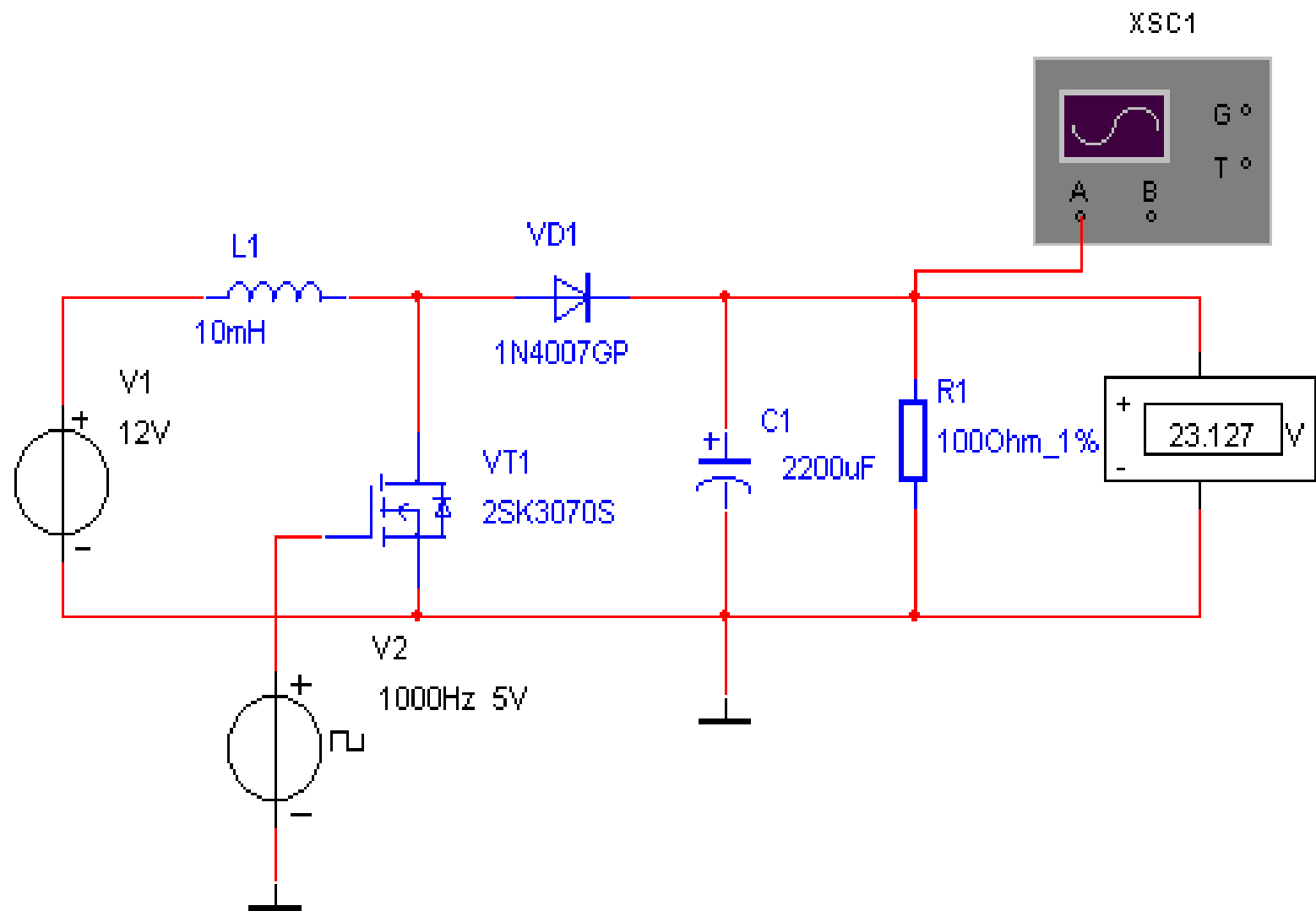


图11.5.3 直流升压斩波变换电路

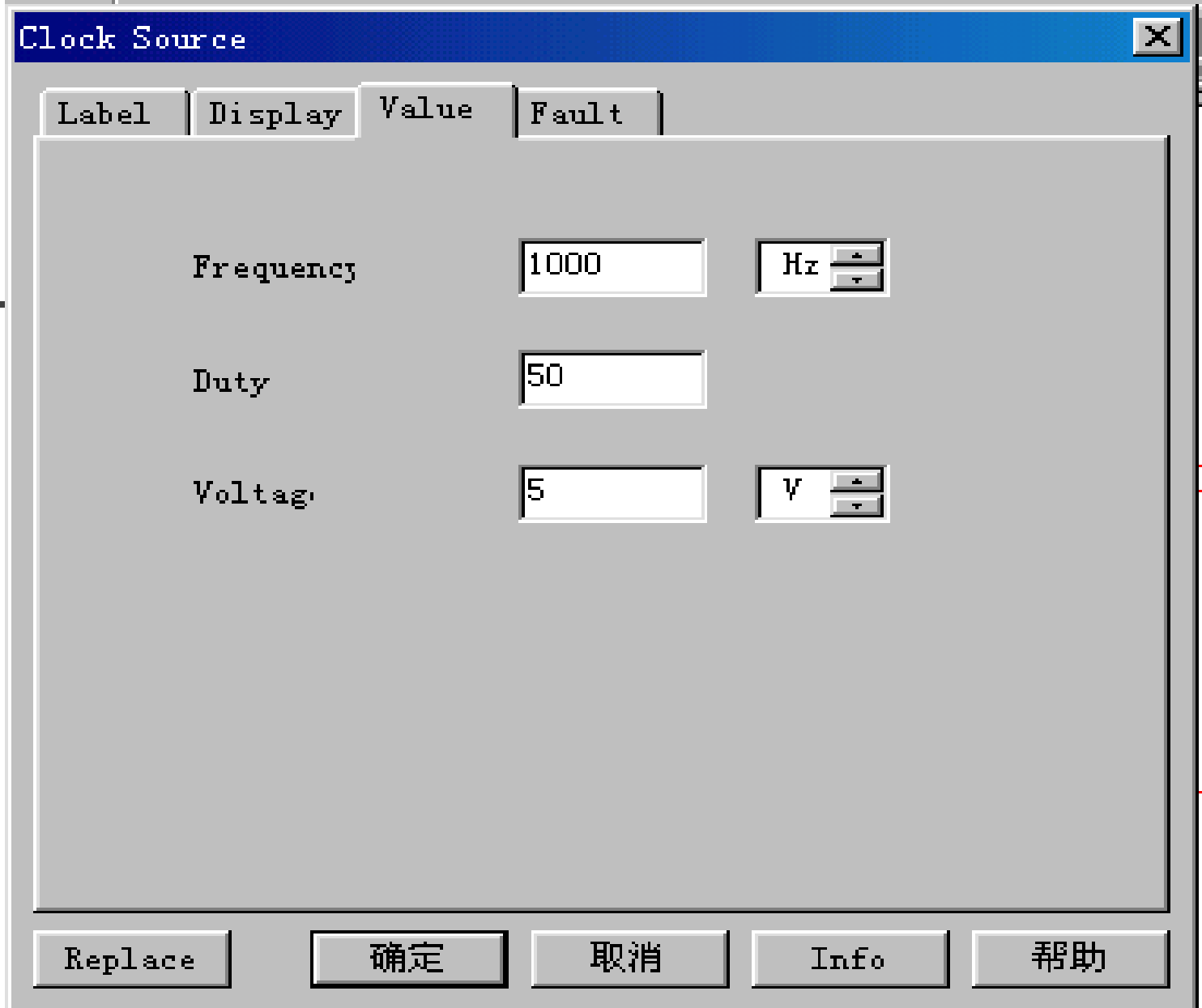


图11.5.4 脉冲发生器参数设置对话框



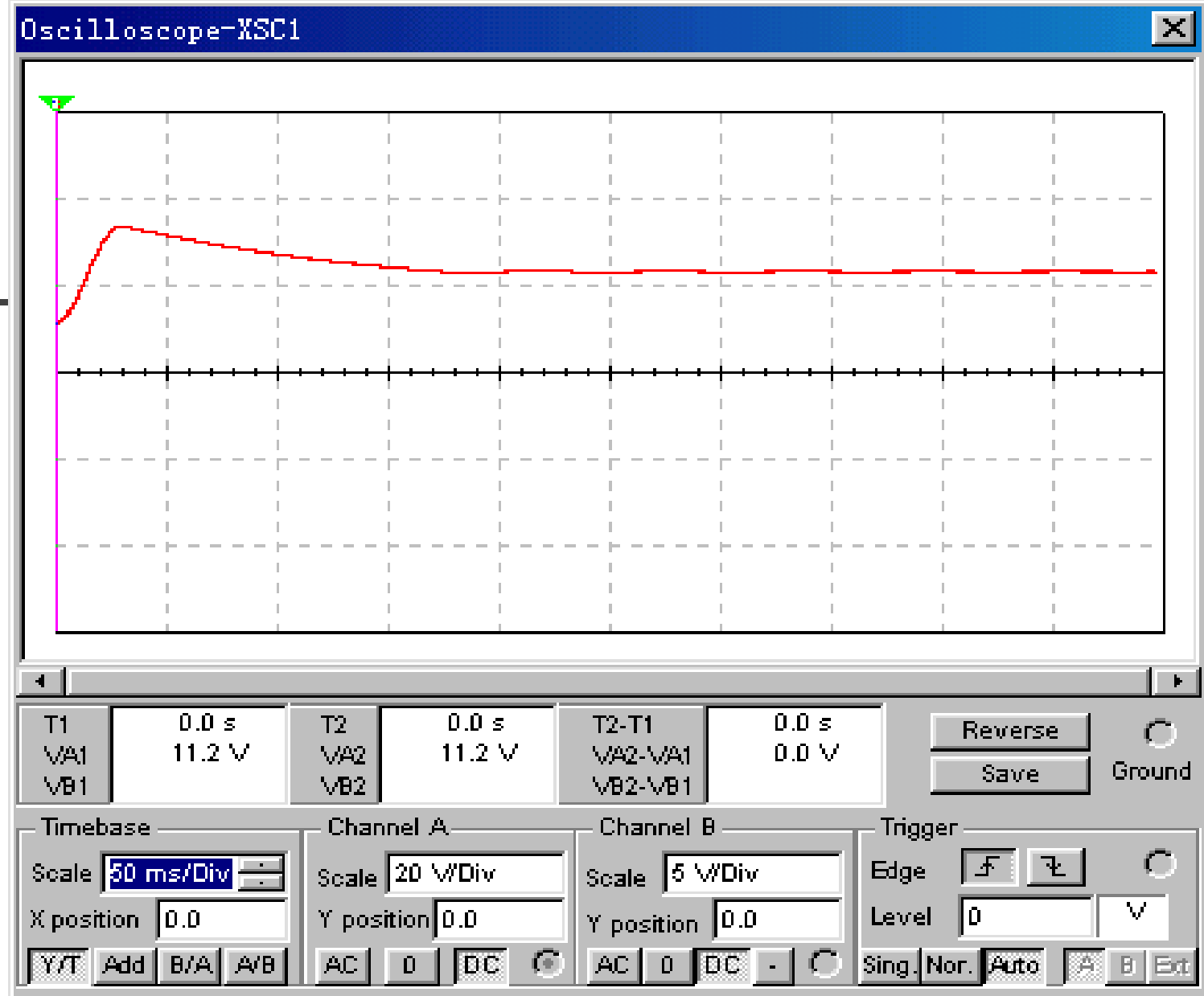


图11.5.5 直流升压斩波变换电路输出电压曲线



---

## 11.6 直流降压—升压斩波变换电路

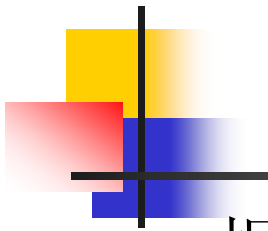


## 11.6.1 直流降压—升压斩波变换电路工作原理

---

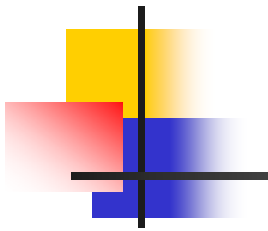
- 直流降压—升压变换电路的输出电压可以高于或者低于输入电压，具有一个相对于输入电压公共端为负极性的输出电压。

- 直流降压—升压变换电路是由直流降压与直流升压变换电路串接而成的。在稳态时，输出一输入电压的变换比是两个串级变换电路变换比的乘积。假定两个变换电路中的开关具有相同的占空比，

- 
- 
- 根据式 (11.4.4) 与式 (11.5.2) 可得降压一升压变换电路电压变换比为

$$\frac{U_O}{U_D} = D \cdot \frac{1}{1 - D}$$

- 不同的占空比 $D$ , 可使输出电压 $U_O$ 高于或低<sup>(11.6.1)</sup>于输入电压 $U_D$ 。



■ 直流降压一升压变换器电路模型如图 11.6.1 所示。当开关闭合时，输入端向电感提供能量，同时二极管反偏。当开关断开时，储存在电感中的能量被转移到输出端，在此期间内，输入端不向电路提供能量。在稳态分析时，假定输出电容器很大，以形成一个恒定输出电压，即：

$$u_0(t) \approx U_0 \quad (11.6.2)$$

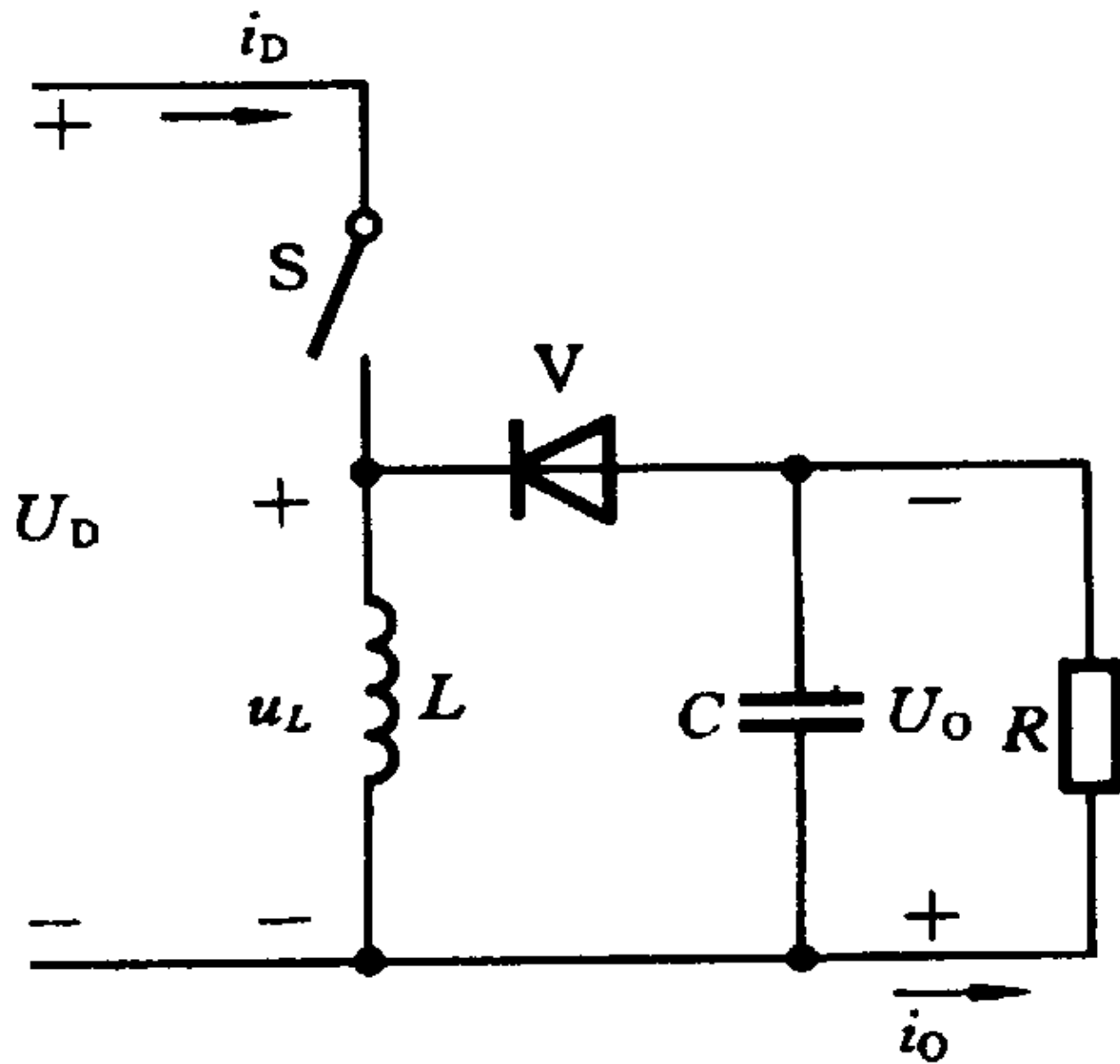
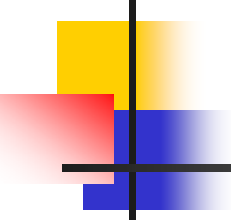


图11.6.1降压一升压变换器电路模型



■ 直流降压一升压变换器电路在连续导电模式时的电感电压和电流波形如图11.6.2所示。图中，电感中的电流连续流通。由于电感电压在一周内的积分等于零，于是有：

$$U_D D T_s + (-U_0)(1-D)T_s = 0 \quad (11.6.3)$$

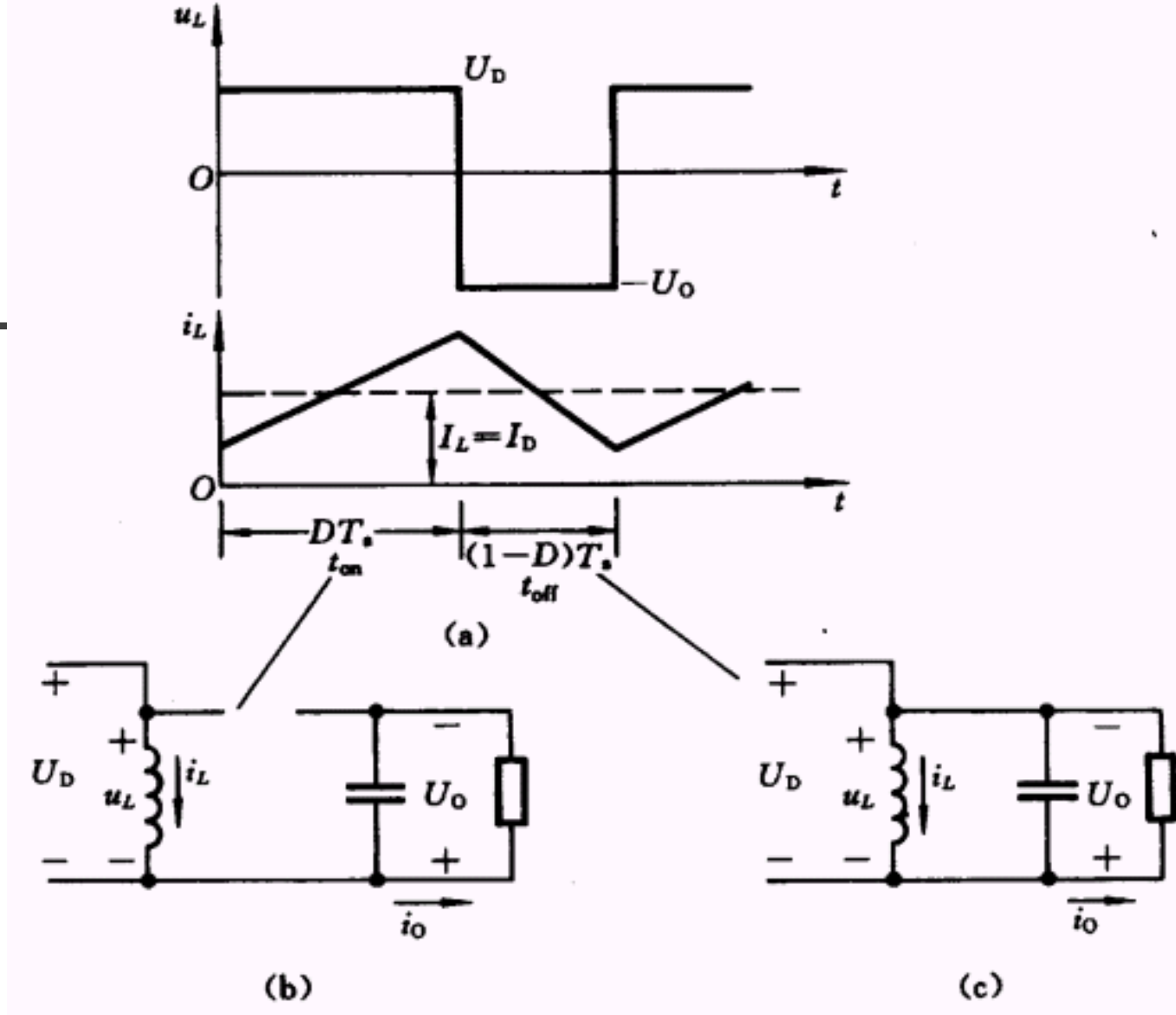


---

$$\frac{U_O}{U_D} = \frac{D}{1 - D} \quad (11.6.4)$$

式（11.6.4）表明输出电压  $U_O$  可以高于或低于输入电压  $U_D$ ，这取决于占空比  $D$  的数值。





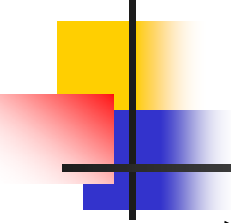
(a)  $u_L$  和  $i_L$  波形 (b) 开关闭合等效电路 (c) 开关断开等效电路  
 图11.6.2 降压-升压变换电路 ( $i_L$ ) 电感电压和电流的波形

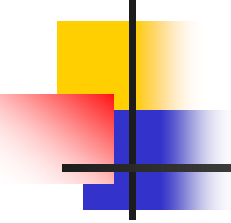


## 11.6.2 直流降压一升压斩波变换电路

---

- 一个直流降压一升压斩波变换电路如图11.6.3所示。图中，V1为输入电源，电压为12V。电压控制电压源V2和脉冲电压源V3组成开关管驱动电路。VT1（2SK3070S）为开关管，栅极受电压控制电压源V2控制，电压控制电压源V2受脉冲电压源控制。用鼠标双击V3，可以打开V3的对话框，

- 
- 如图11.4.4所示，在对话框中可以修改脉冲宽度、上升时间、下降时间和脉冲电压等参数。当设置占空系数 $D=0.6$ 时，启动仿真，可以看见电路输出电压为17.902V，基本满足式（11.6.4）关系（注意：在实际的电路中开关不是理想状态的，存在一定的压降）。



---

点击示波器，可以看见降压—升压斩波变换电路的输出电压变化曲线如图11.6.4所示。改变占空系数 $D$ 可以改变输出电压。

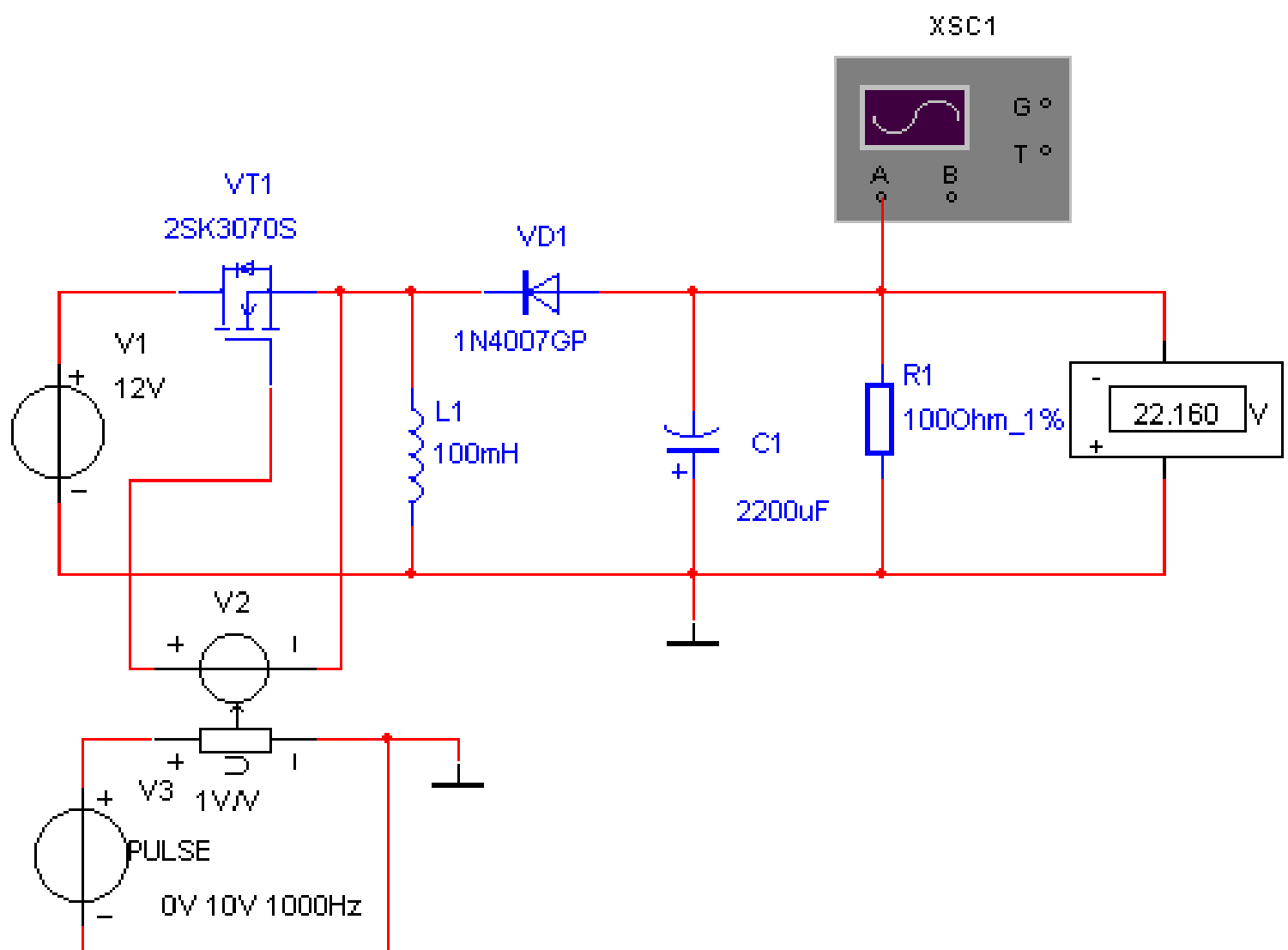
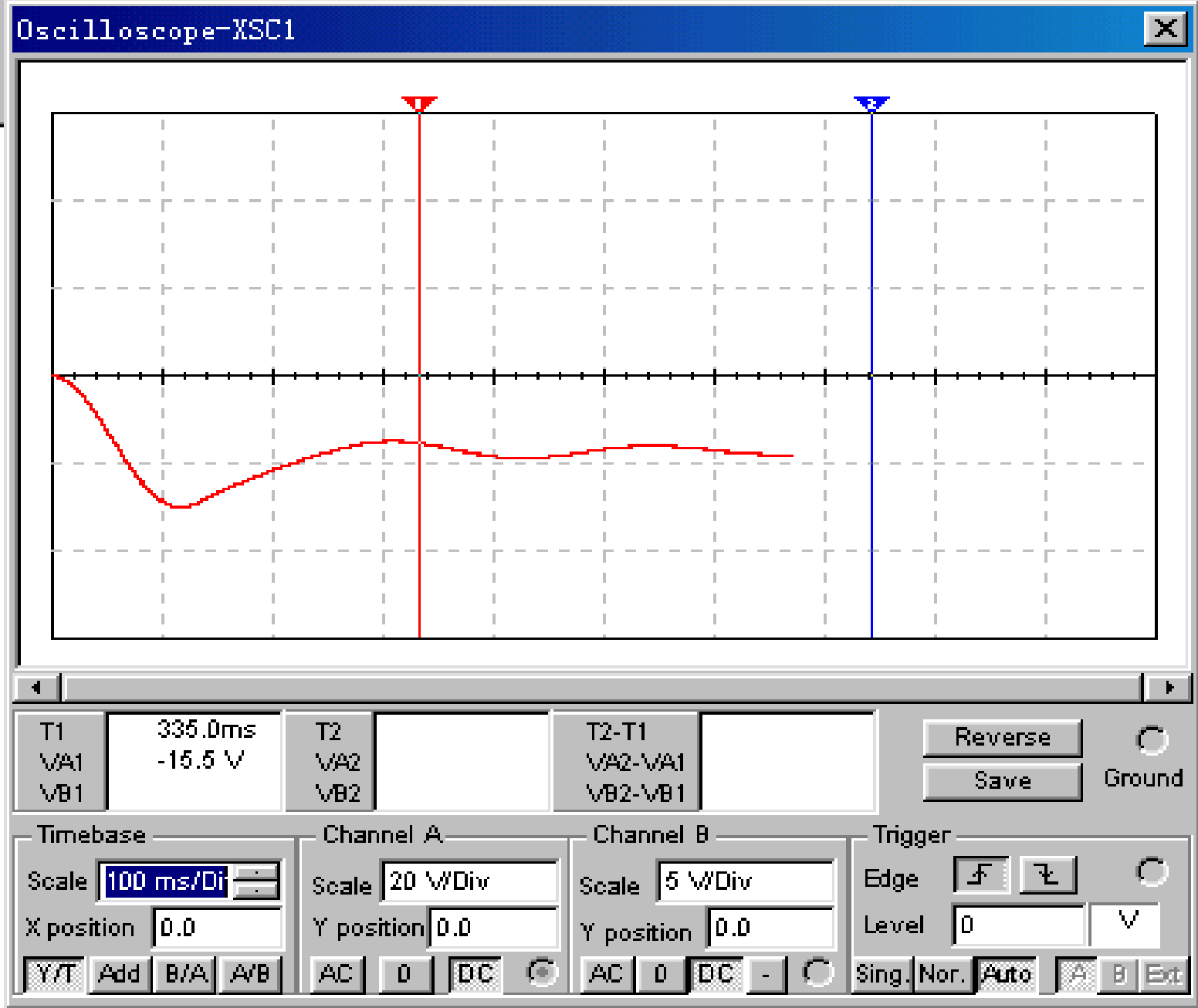
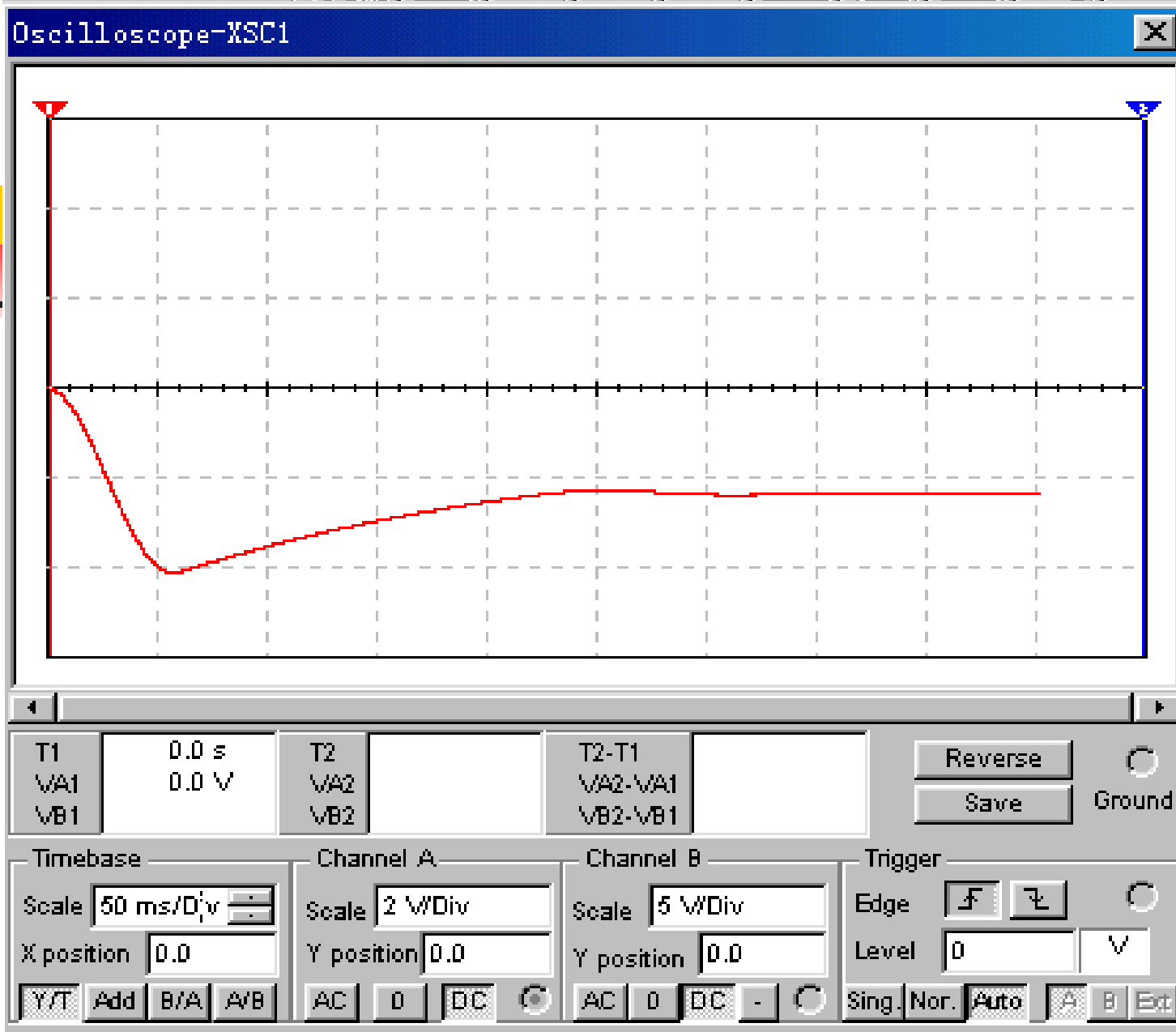


图11.6.3 直流降压—升压斩波变换电路



(a)  $D=0.6$



(b)

$D=0.2$

图11.6.4 直流降压-升压斩波变换电路的输出电压曲线



---

## 11.7 DC—AC全桥逆变电路





## 11.7.1 DC-AC全桥逆变电路工作原理

---

- 一个DC-AC全桥逆变电路原理图如图11.7.1 (a) 所示，图11.7.1 (b) 和 (c) 给出全桥逆变电路的各点电压及电流波形图。由图可见，控制信号  $u_{G1}$  和  $u_{G3}$ ， $u_{G4}$  和  $u_{G2}$  同相； $u_{G1}$  和  $u_{G3}$ ， $u_{G4}$  和  $u_{G2}$  的相位互差  $180^\circ$ 。

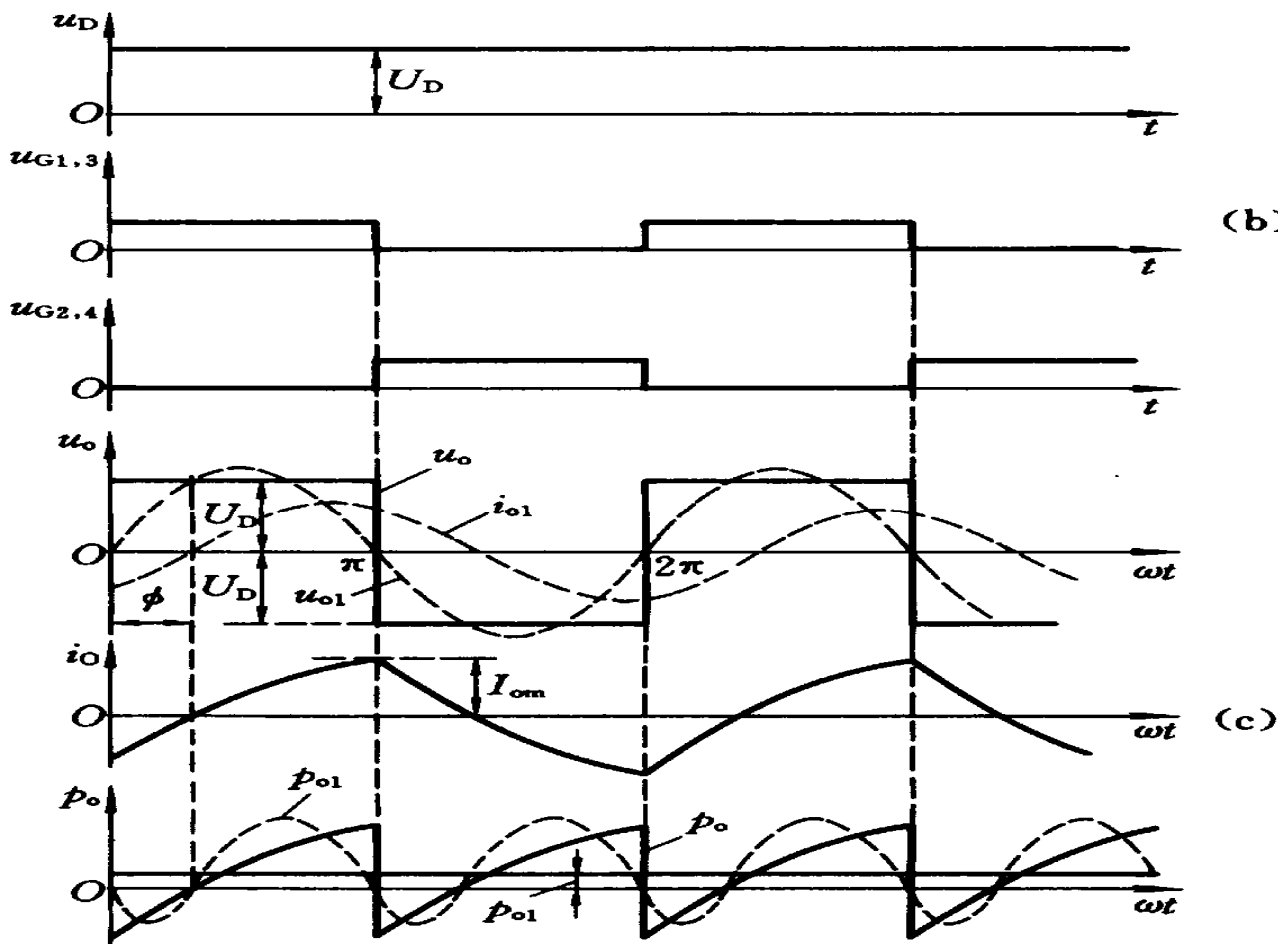
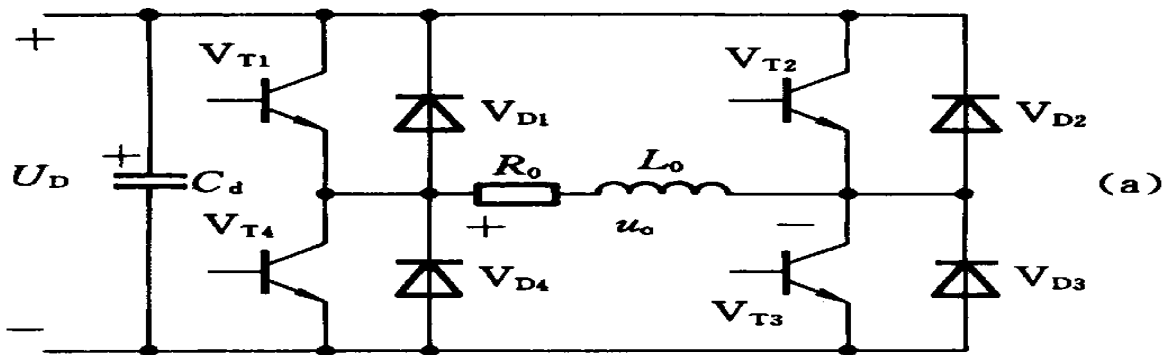
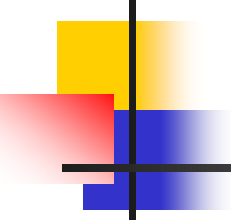


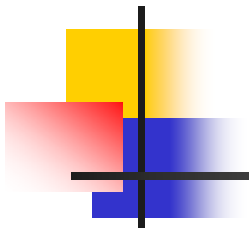
图11.7.1

(b) DC-AC全桥逆变电路和电压电流波形



---

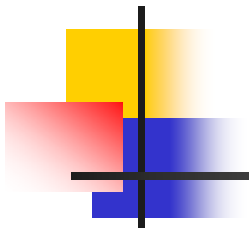
- 全桥电路的桥中各臂在控制信号作用下轮流导通，当VT1和VT3同时处于通态时，VT2和VT4处于断态。电源电压为恒值，输出电压 $U_o$ 为交变方波电压，其幅值为 $U_D$ 。输出电压的频率由控制信号决定。将输出电压 $u_o$ 用傅立叶级数展开



---

$$\begin{aligned} u_o &= \frac{4U_D}{\pi} \left( \sin\omega t + \frac{1}{3}\sin 3\omega t + \frac{1}{5}\sin 5\omega t + \cdots + \frac{1}{n}\sin n\omega t \right) \\ &= U_{o1m}\sin\omega t + U_{o3m}\sin 3\omega t + U_{o5m}\sin 5\omega t + \cdots + U_{onm}\sin n\omega t \end{aligned}$$

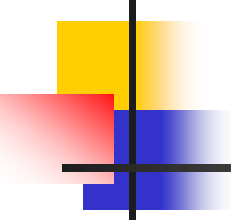
(11.7.1)

- 
- 其中基波分量  $u_{o1} = U_{o1m} \sin \omega t$ , 基波的幅值和有效值为:

$$U_{o1m} = \frac{4U_D}{\pi} = 1.27U_D$$

$$U_{o1} = \frac{U_{o1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{2}U_D}{\pi} = 0.9U_D$$

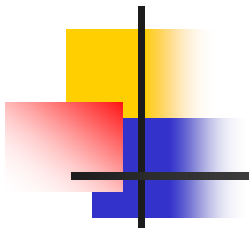
(11.7.2)



---

- 当VT1和VT3或VT2和VT4导通时，负载由电源获得能量；当VD1、VD3和VD2、VD4导通时，负载中电能反馈到 $C_d$ 中，反并二极管和电容 $C_d$ 为无功电流提供了通路。

- 当负载参数变化时，不会影响输出电压 $u_o$ 的波形， $u_o$ 波形均为交变方波；但负载电流 $i_o$ 的波形则与负载性质和参数有关。

- 
- 
- 在感性负载下，基波分量  $i_{O1}$  将滞后于基波电压  $u_{O1}$  某一电角度  $\varphi$ 。：

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L_0}{R_0}$$

(11.7.3)

- 
- 
- 逆变电路输出功率的瞬时值 $P_o$ 为:

$$p_o = u_o i_o \quad (11.7.4)$$

负载端的基波瞬时功率为:

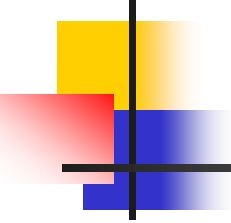
$$P_{o1} = u_{o1} i_{o1} \quad (11.7.5)$$

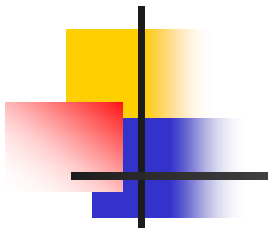




## 11.7.2 MOSFET DC—AC全桥逆变电路

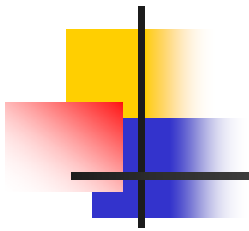
■ 一个MOSFET DC—AC全桥逆变电路如图11.7.2所示。图中， $U_D$ 为输入电源，电压为100V。电压控制电压源VCVS1~VCVS4和脉冲电压源V1~V4组成MOSFET功率开关管驱动电路。VT1~VT4为MOSFET功率开关管，栅极受电压控制电压源VCVS1~VCVS4 ( $u_{G1}$ 和 $u_{G3}$ ,  $u_{G4}$ 和 $u_{G2}$ ) 控制，电压控制电压源VCVS1~VCVS4受脉冲电压源V1~V4控制。

- 
- 
- 用鼠标双击V1~V4，可以打开V1~V4的对话框，如图11.7.3所示，在对话框中可以修改脉冲宽度、上升时间、下降时间和脉冲电压等参数。VCVS1和VCVS3与VCVS2和VCVS4的相位互差 $180^\circ$ 。



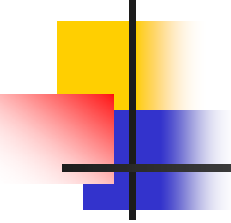
---

- 应注意的是，触发脉冲周期是20ms（对应是360度，即 $2\pi$ ）。修改Pulse Width（脉冲宽度）参数，可以改变MOSFET功率开关管的导通时间。控制导通角或触发角 $\alpha$ 是与Delay Time参数相对应，修改Delay Time参数即可修改触发角 $\alpha$ 。



---

- 例如当设置V1和V3 的Delay Time参数（即触发角  $\alpha$ ）为3ms时，应设置V2和V4 的Delay Time参数（即触发角  $\alpha$ ）为13ms（10ms对应  $\pi$ ），使两者之间相差180度（ $\pi$ ）。启动仿真，点击示波器，可以看见DC—AC全桥逆变电路的输出电压波形如图11.7.4所示。

- 
- 
- 在图11.7.2电路中增加滤波电感 $L1$  ( $1.0\text{H}$ ) 和电容 $C1$  ( $10\mu\text{F}$ )，可以看见全桥逆变电路的输出的基波电压波形如图11.7.5所示，输出电压是一个正弦波。

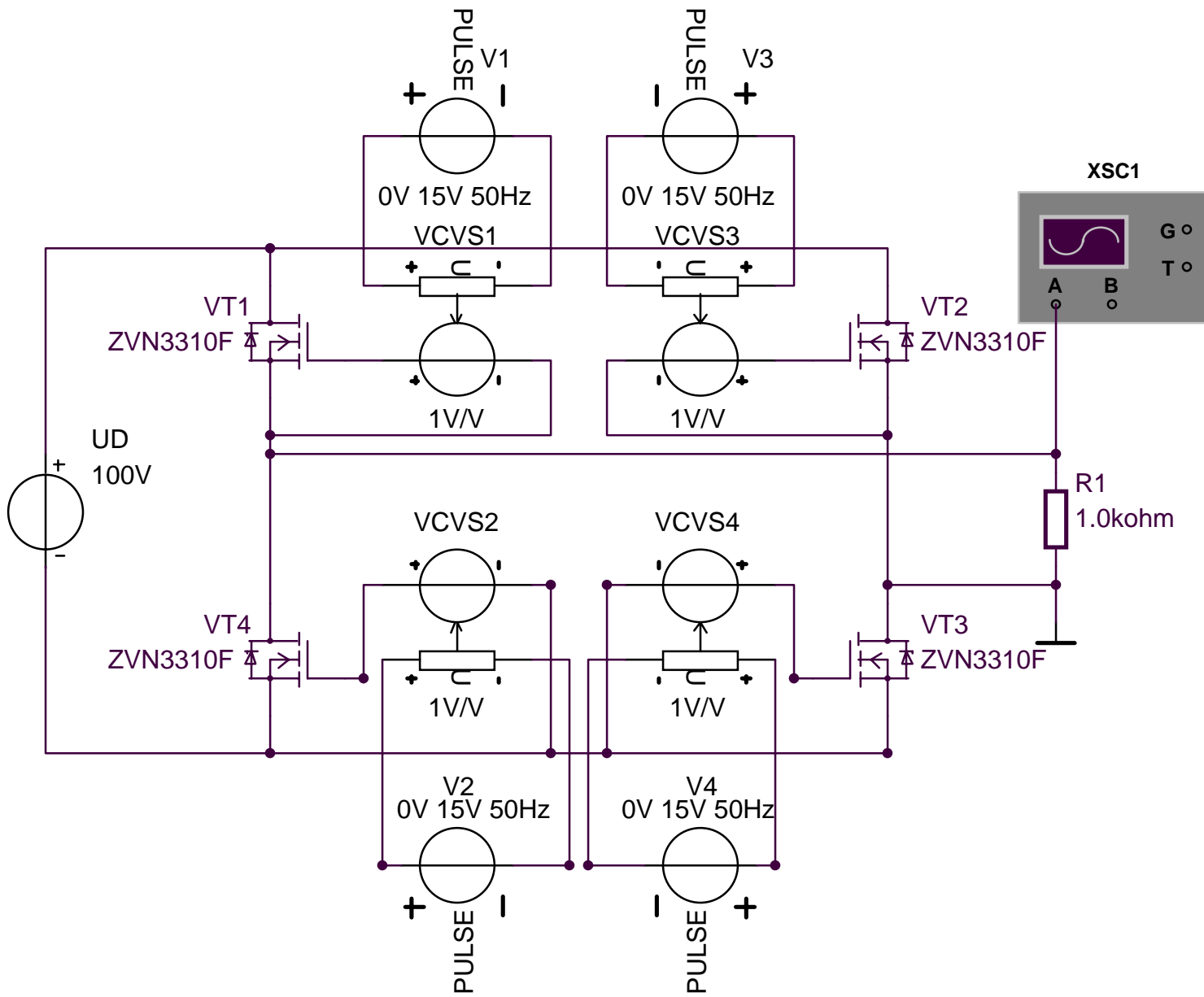
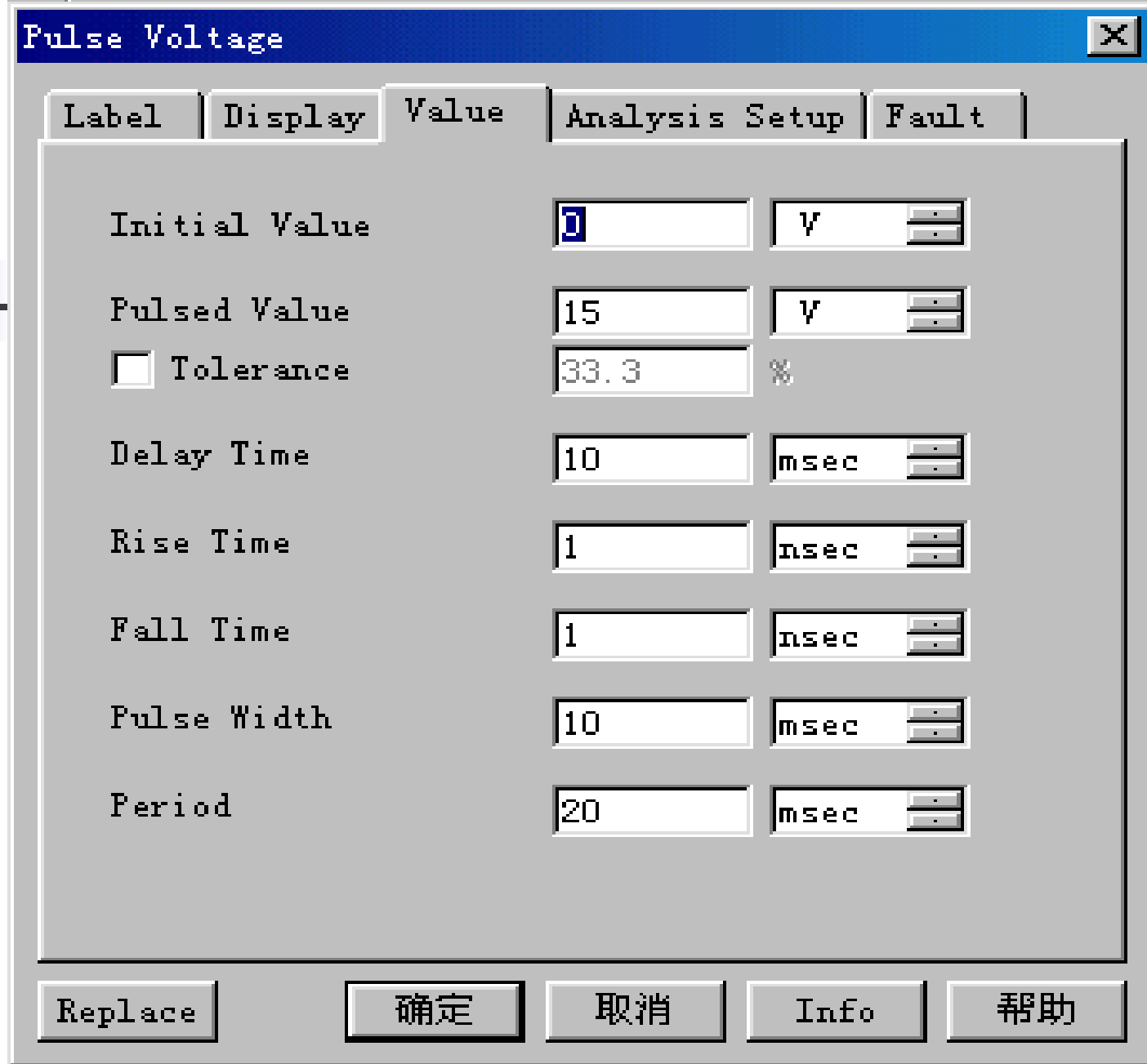
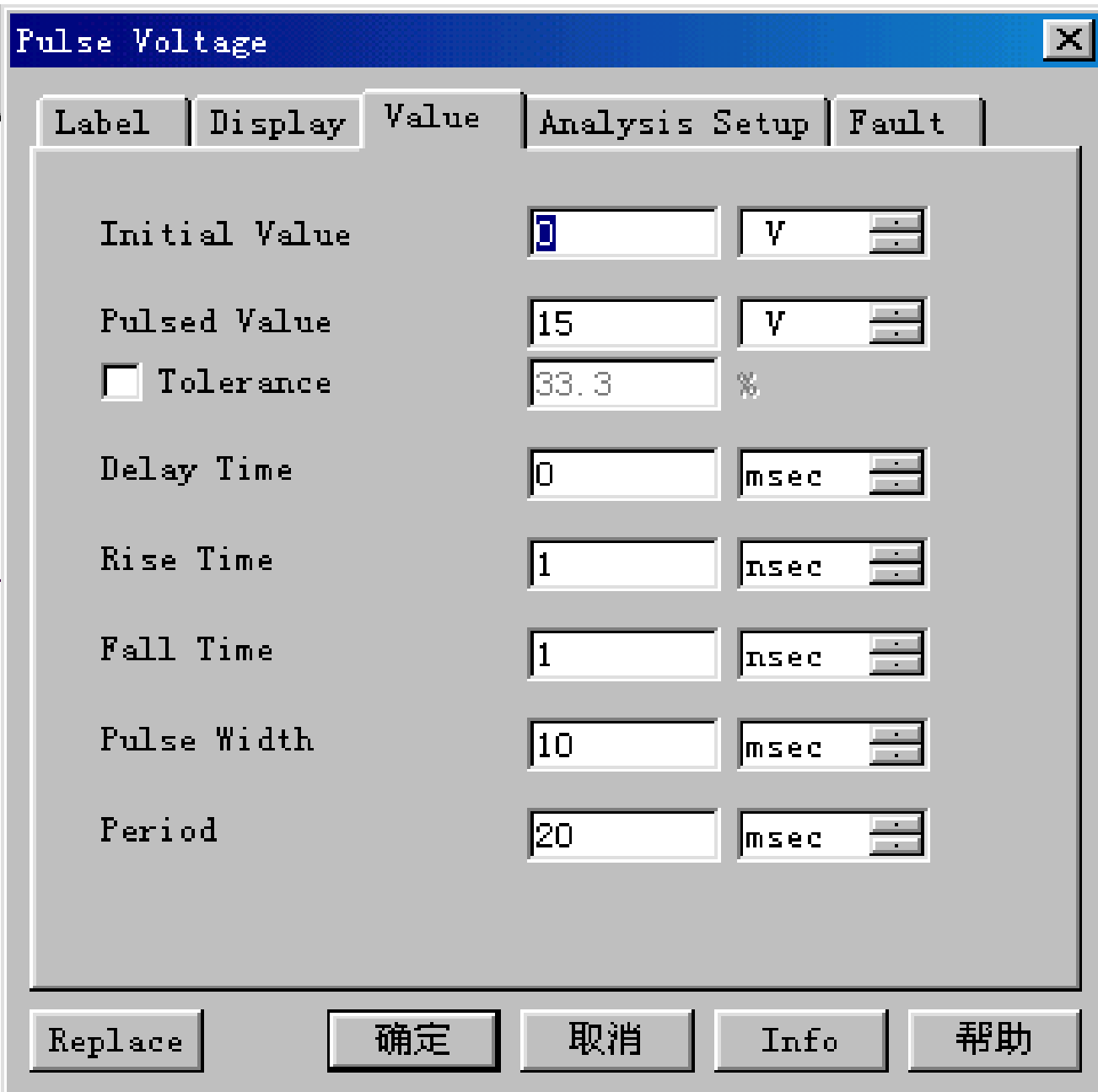


图11.7.2 MOSFET DC-AC全桥逆变电路



(a) V2和V4对话框



(b)

V1和V3对话框图

11.7.3

V1~V4的对话框



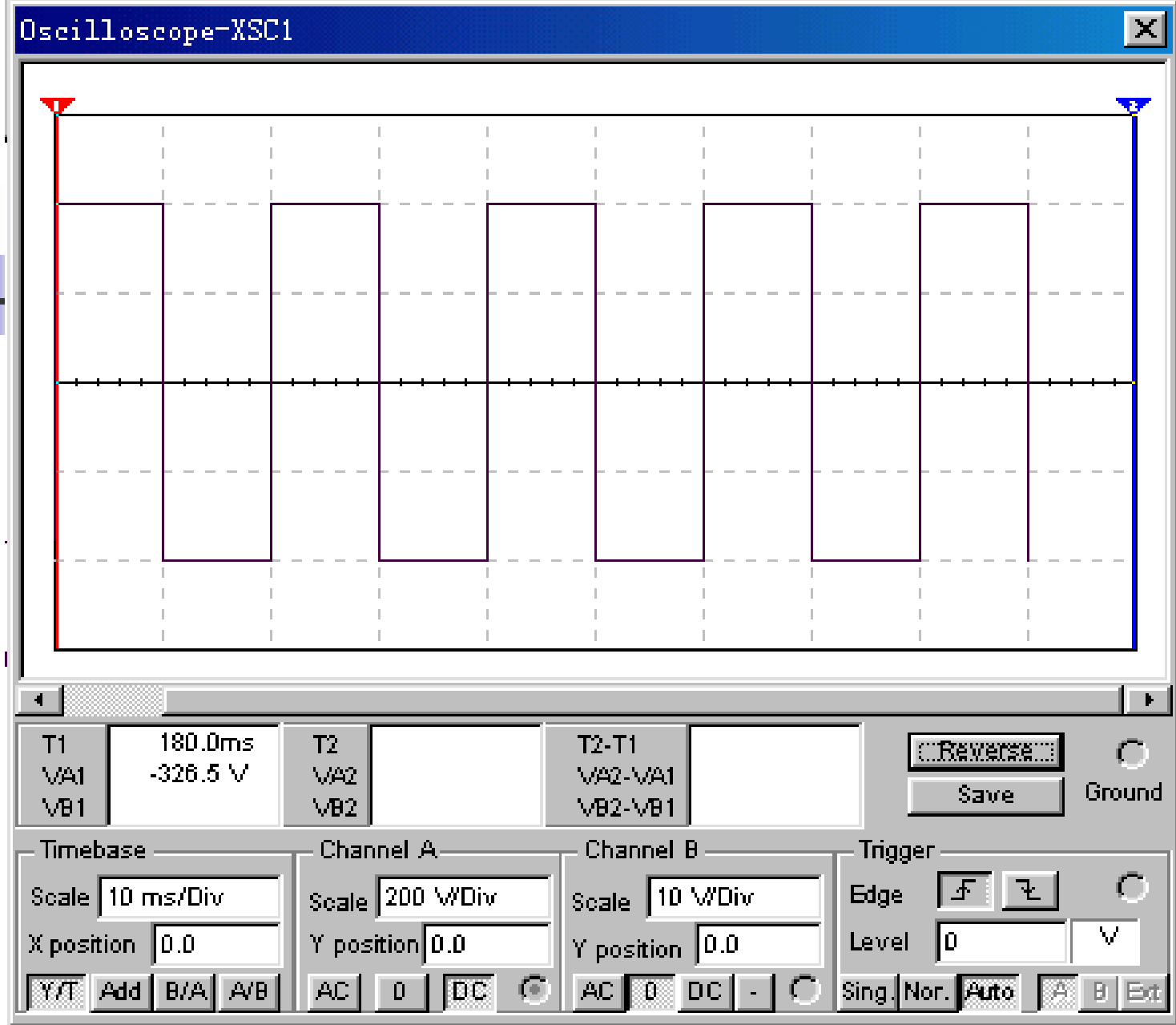
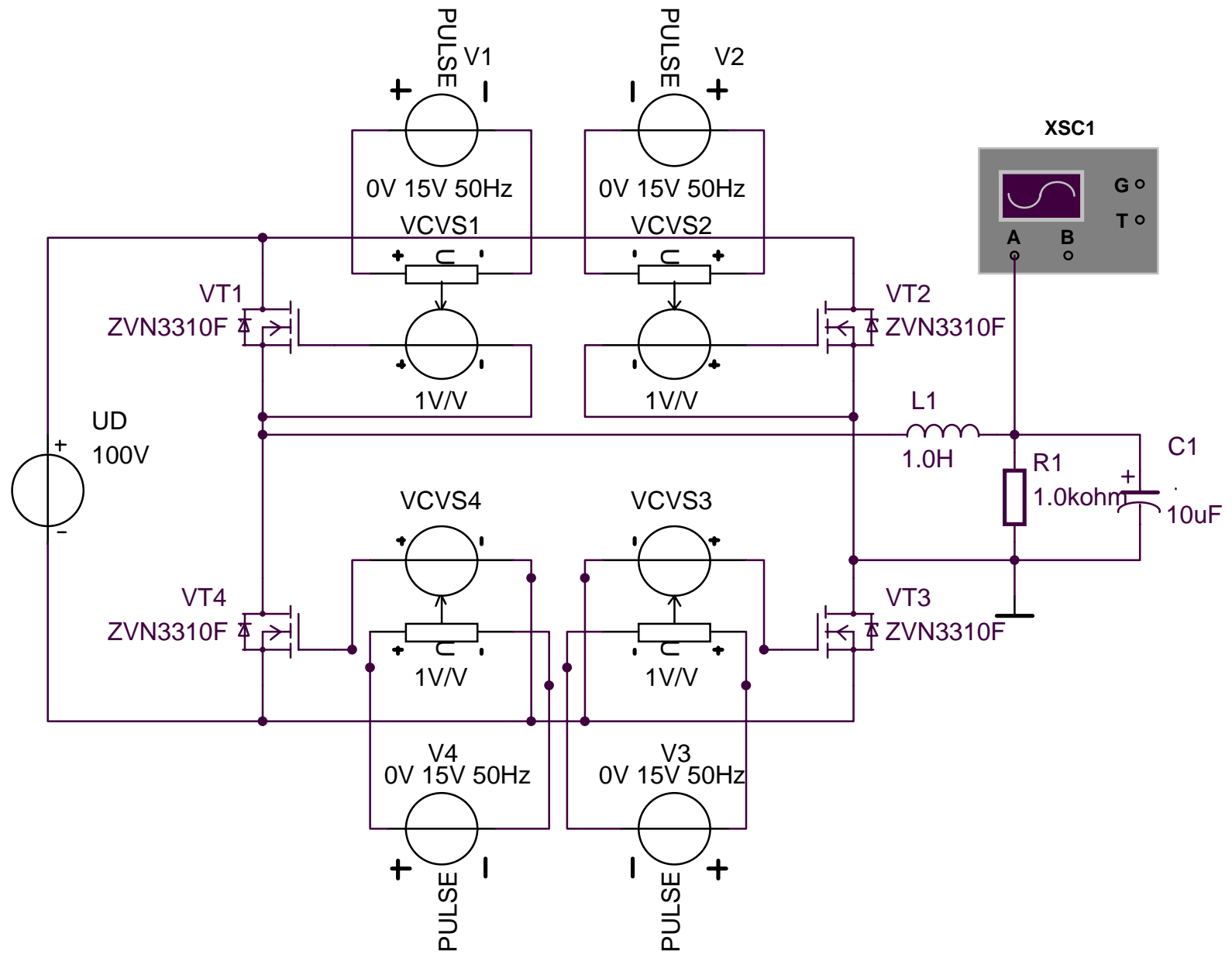
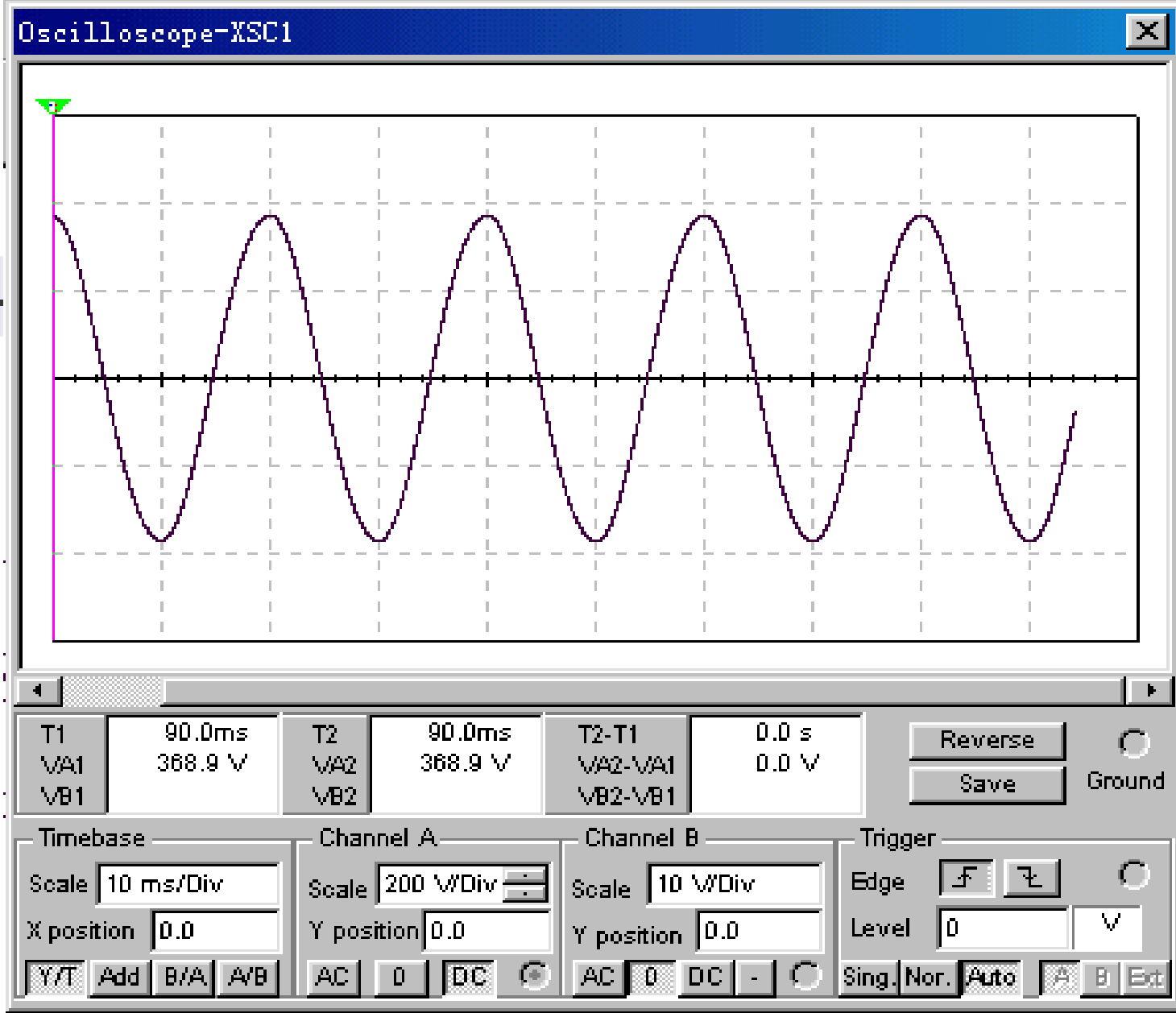


图11.7.4 DC—AC全桥逆变电路的输出电压波形



(a) 带滤波器的DC—AC全桥逆变电路



(b) 滤波器的输出电压波形图11.7.4 带滤波器的DC—AC全桥逆变电路和输出电压波形



---

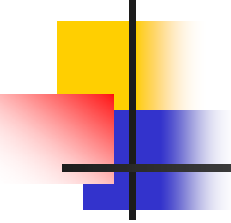
## 11.8 正弦脉宽调制 ( SPWM ) 逆变电路

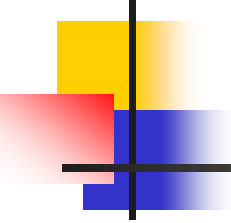


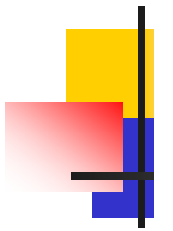
## 11.8.1 正弦脉宽调制（SPWM）逆变电路工作原理

---

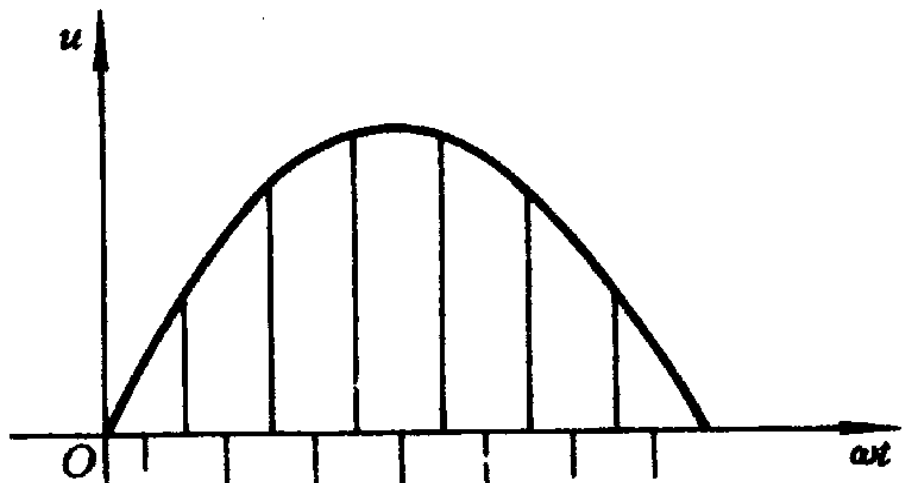
- 1. SPWM控制的基本原理
- 图11.8.1（a）示出正弦波的正半周波形，并将其划分为N等份，这样就可把正弦半波看成由N个彼此相连的脉冲所组成的波形。这些脉冲的宽度相等，都等于  $\pi / N$ ，但幅值不等，且脉冲顶部是曲线，各脉冲的幅值按正弦规律变化。

- 
- 
- 如果将每一等份的正弦曲线与横轴所包围的面积用一个与此面积相等的等高矩形脉冲代替，就得到图11.8.1 (b) 所示的脉冲序列。这样，由N个等幅而不等宽的矩形脉冲所组成的波形与正弦波的正半周等效，正弦波的负半周也可用相同的方法来等效。

- 
- 
- SPWM (Sine Pulse Width Modulation 正弦波脉宽调制) 的控制思想，就是利用逆变器的开关元件，由控制线路按一定的规律控制开关元件的通断，从而在逆变器的输出端获得一组等幅、等距而不等宽的脉冲序列。其脉宽基本上按正弦分布，以此脉冲列来等效正弦电压波。



(a)



(b)

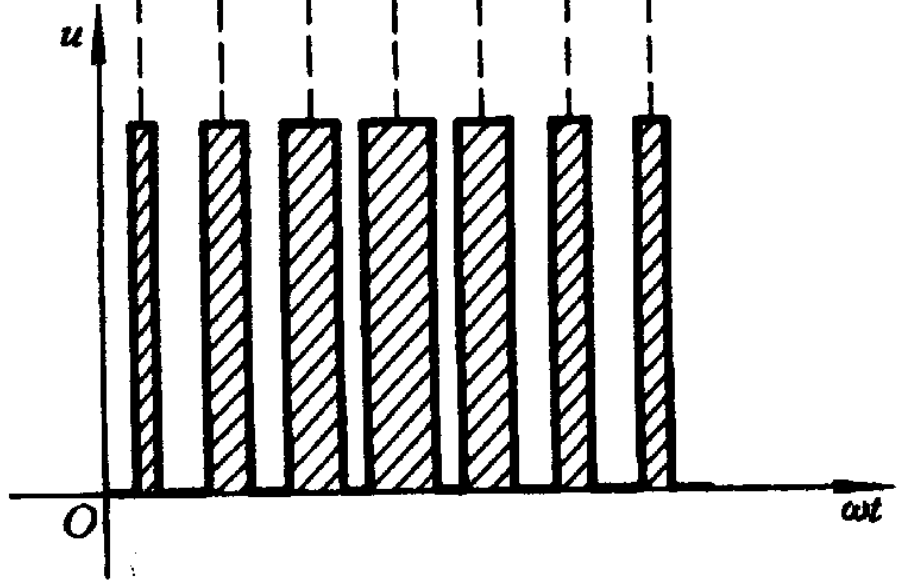
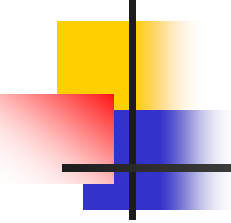


图11.8.1  
SPWM控制的基本原理

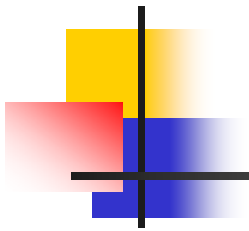




---

- SPWM正弦波脉宽调制的特点是输出脉冲列是不等宽的，宽度按正弦规律变化，故输出电压的波形接近正弦波。

SPWM是采用一个正弦波与三角波相交的方案确定各分段矩形脉冲的宽度。通常采用等腰三角波作为载波，因为等腰三角波上下宽度与高度成线性关系且左右对称。



---

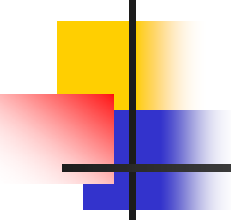
- 当它与正弦波的调制信号波相交时，所得到的就是SPWM波形。如在交点时刻控制电路中开关器件的通断，就可以得到宽度正比于信号波幅值的脉冲。这正好符合SPWM控制的要求。

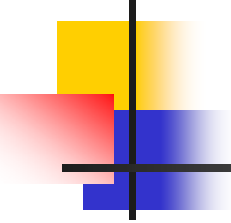


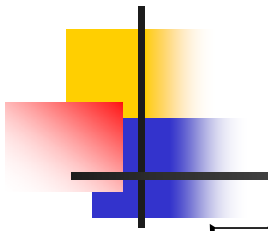
---

- 2. 单极性PWM控制方式

- 一个电压型单相桥式逆变电路如图11.8.2所示，采用电力晶体管作为开关器件。设负载为电感性，对各晶体管的控制按下面的规律进行：在正半周期，让晶体管VT1一直保持导通，而让晶体管VT4交替通断。

- 
- 
- 当VT1和VT4导通时，负载上所加的电压为直流电源电压 $U_D$ 。当VT1导通而使VT4关断后，由于电感性负载中电流不能突变，负载电流将通过二极管VD3续流，负载上所加电压为零。

- 
- 如负载电流较大，那么直到使VT4再一次导通之前，VD3一直持续导通。如负载电流较快地衰减到零，在VT4再一次导通之前，负载电压也一直为零。这样，负载上的输出电压 $u_o$ 就可得到零和UD交替的两种电平。

- 
- 同样，在负半周期，让晶体管VT2保持导通。当VT3导通时，负载被加上负电压 $-U_D$ ；当VT3关断时，VD4续流，负载电压为零，负载电压 $u_o$ 可得到 $-U_D$ 和零两种电平。这样，在一个周期内，逆变器输出的PWM波形就由 $\pm U_D$ 和0三种电平组成。

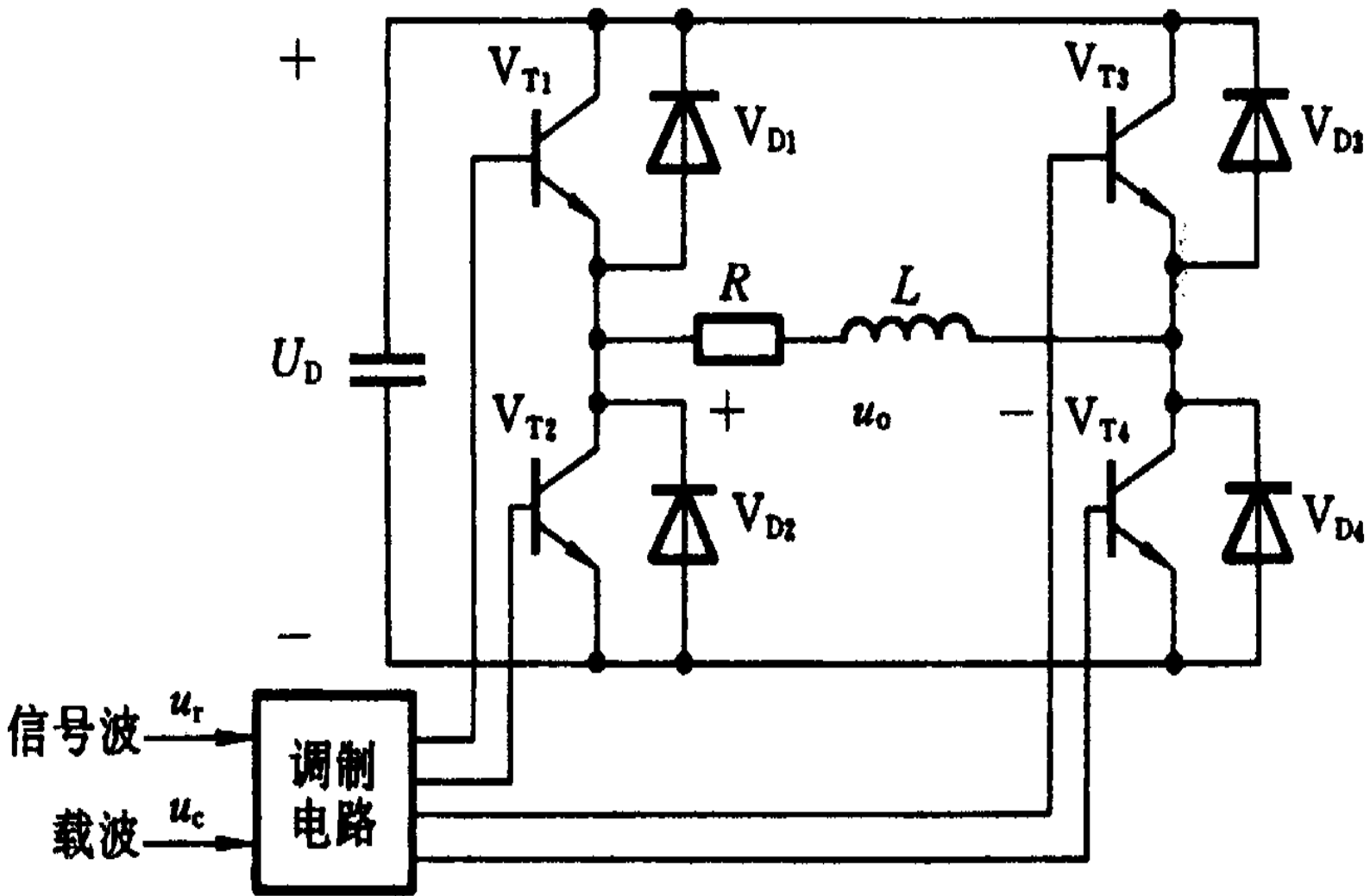


图11.8.2 电压型单相桥式逆变电路

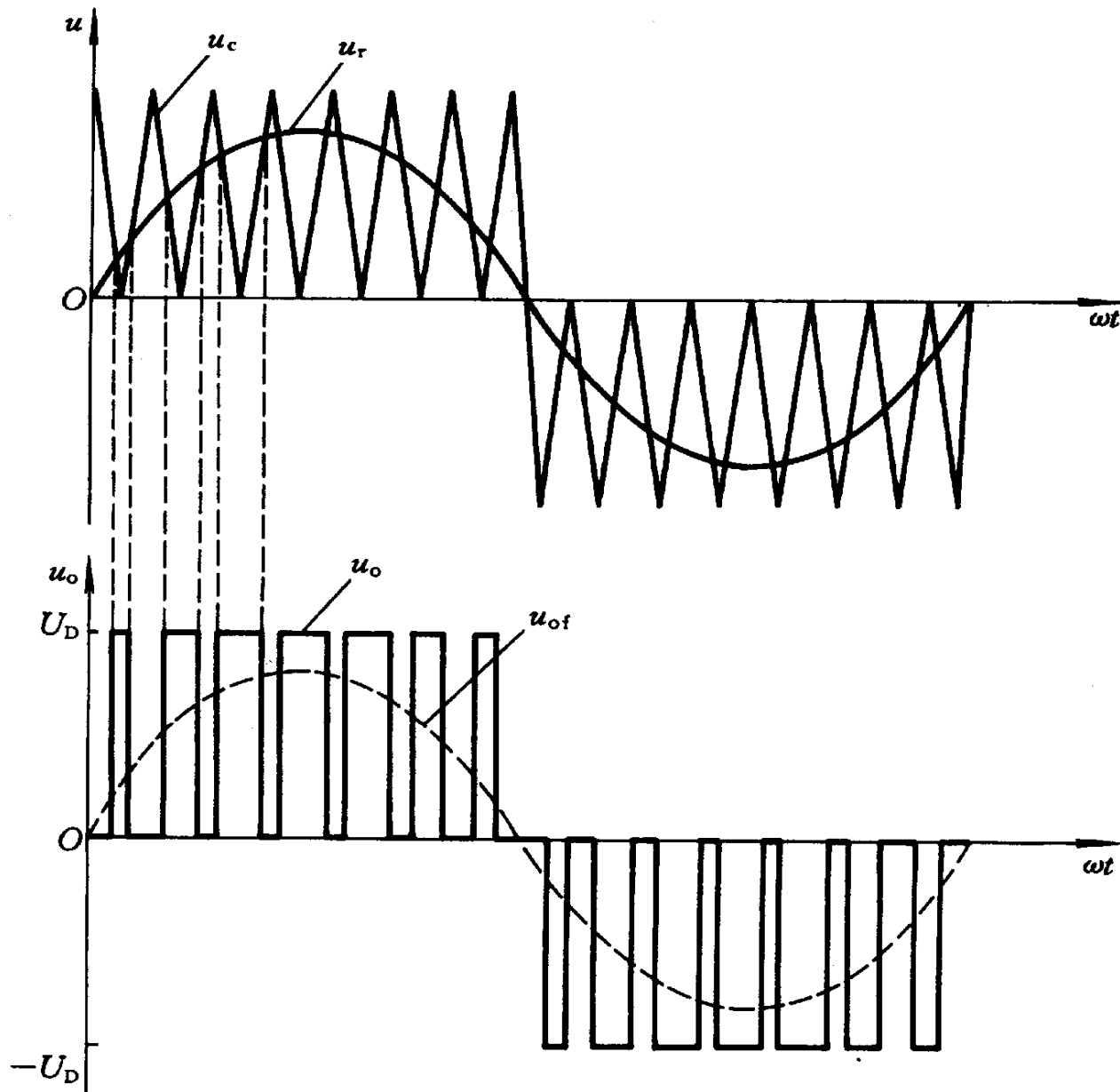
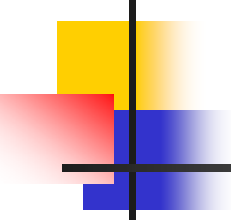
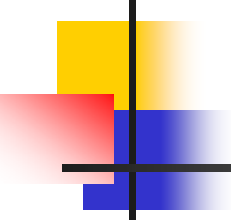
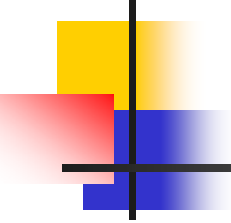


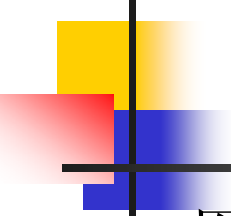
图11.8.3单极性PWM控制方式

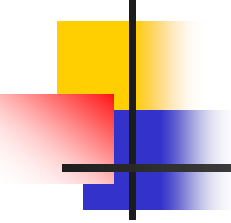


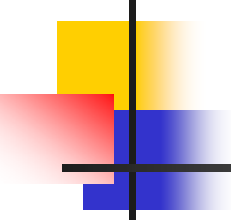
- 
- 控制VT4或VT3通断的方法如图11.8.3所示。载波 $u_c$ 在调制信号波 $u_r$ 的正半周为正极性的三角波，在负半周为负极性的三角波。调制信号 $u_r$ 为正弦波。在 $u_r$ 和 $u_c$ 的交点时刻控制晶体管VT4或VT3的通断。在 $u_r$ 的正半周，VT1保持导通，当 $u_r > u_c$ 时使VT4导通，负载电压 $u_o = U_D$ ，

- 
- 当  $u_r < u_c$  时使VT4关断,  $u_o = 0$ ; 在  $u_r$  的负半周, VT1关断, VT2保持导通, 当  $u_r < u_c$  时使VT3导通,  $u_o = -U_D$ , 当  $u_r > u_c$  时使VT3关断,  $u_o = 0$ 。这样, 就得到了PWM波形  $u_o$ 。图中虚线  $u_{of}$  表示  $u_o$  中的基波分量。

- 
- 像这种在  $u_r$  的半个周期内三角波载波只在一个方向变化，所得到的输出电压的PWM波形也只有一个方向变化的控制方式称为单极性PWM控制方式。
  - 3. 双极性PWM控制方式

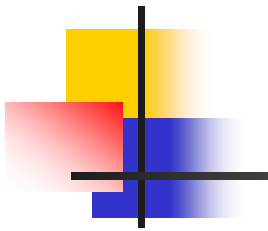
- 
- 图11.8.2的单相桥式逆变电路采用双极性PWM控制方式的波形如图11.8.4所示。在双极性方式中 $u_r$ 的半个周期内，三角波载波是在正、负两个方向变化的，所得到的PWM波形也是在两个方向变化的。在 $u_r$ 的一周期内，输出的PWM波形只有 $\pm U_D$ 两种电平，仍然在调制信号 $u_r$ 和载波信号 $u_c$ 的交点时刻控制各开关器件的通断。


- 
- 在  $u_r$  的正负半周，对各开关器件的控制规律相同。当  $u_r > u_c$  时，给晶体管 VT1 和 VT4 以导通信号，给 VT2、VT3 以关断信号，输出电压  $u_o = U_D$ 。当  $u_r < u_c$  时，给 VT2、VT3 以导通信号，给 VT1 和 VT4 以关断信号，输出电压  $U_o = -U_D$ 。可以看出，同一半桥上下两个桥臂晶体管的驱动信号极性相反，处于互补工作方式。



---

- 在电感性负载的情况下，若VT1和VT4处于导通状态时，给VT1或VT4以关断信号，而给VT2和VT3以开通信号后，则VT1或VT4立即关断，因感性负载电流不能突变，VT2和VT3并不能立即导通，二极管VD2和VD3导通续流。

- 
- 当感性负载电流较大时，直到下一次VT1和VT4重新导通前，负载电流方向始终未变，VD2和VD3持续导通，而VT2和VT3始终未开通。当负载电流较小时，在负载电流下降到零之前，VD2和VD3续流，之后VT2和VT3开通，负载电流反向。

- 
- 
- 不论VD2和VD3导通，还是VT2和VT3开通，负载电压都是一UD。从VT2和VT3开通向VT1和VT4开通切换时，VD1和VD4的续流情况和上述情况类似。



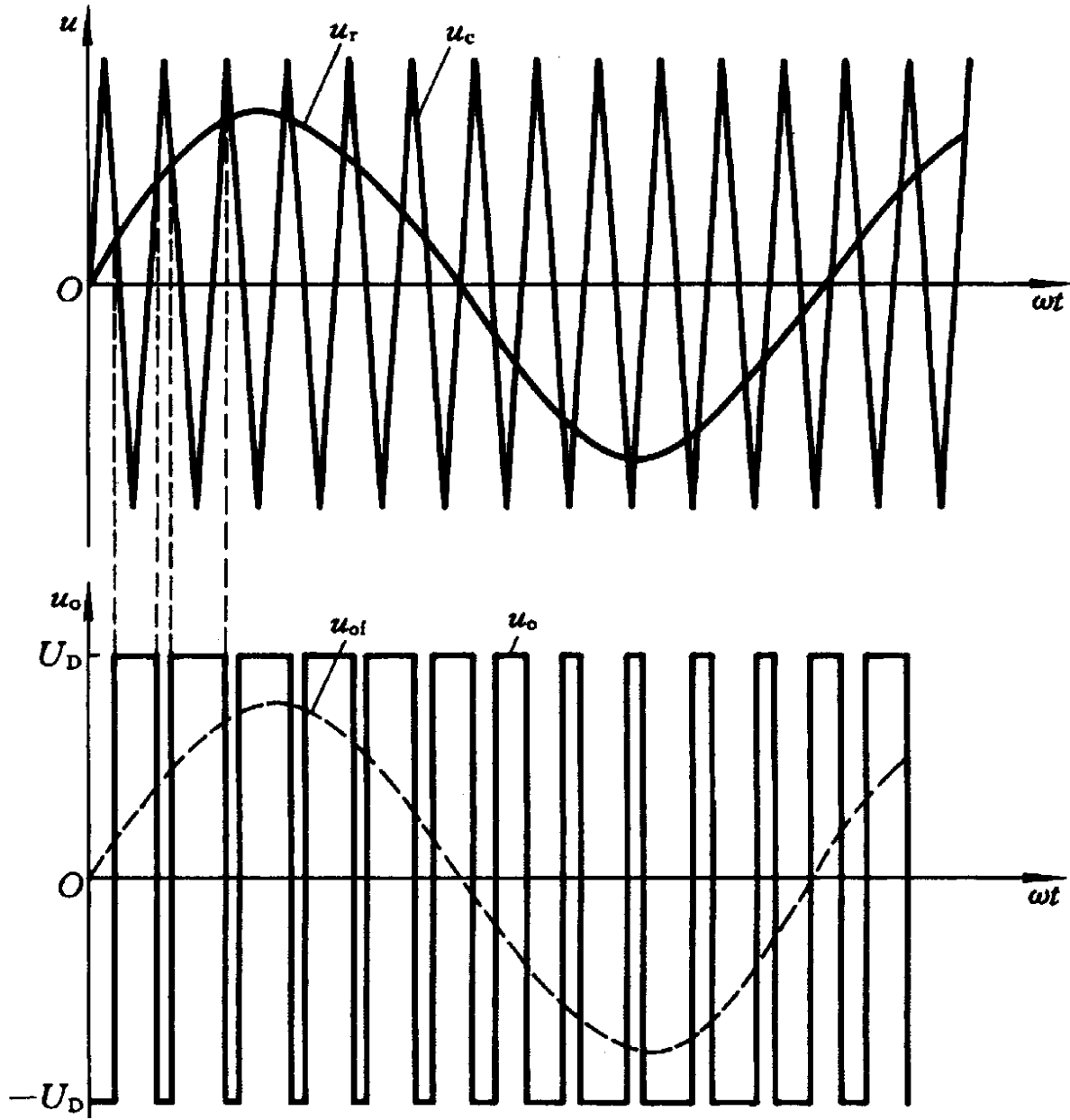


图11.8.4 双极性PWM控制方式的波形



## 11.8.2 SPWM产生电路

---

■ SPWM产生电路如图11.8.5所示，图中采用LM339AJ比较器作为SPWM调制电路，函数发生器XFG1产生1kHz的三角波信号作为载波信号 $u_c$ ，函数发生器XFG2产生50Hz的正弦波信号作为调制信号 $u_r$ 。XFG1和XFG2对话框设置如图11.8.6所示，产生的波形如图11.8.7所示。通过比较器产生的波形如图1.8.8所示。

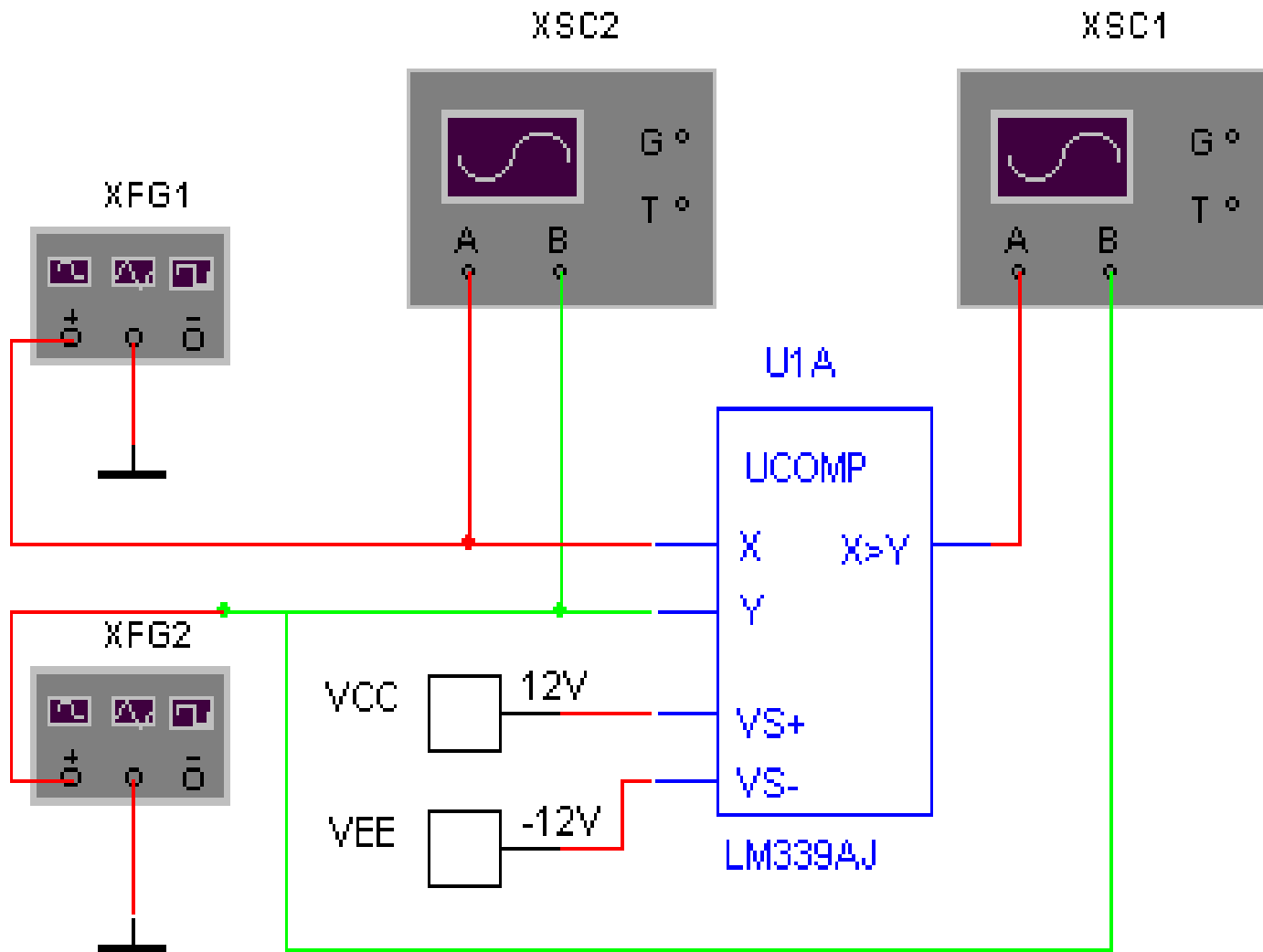
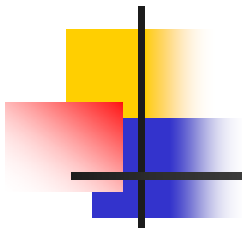
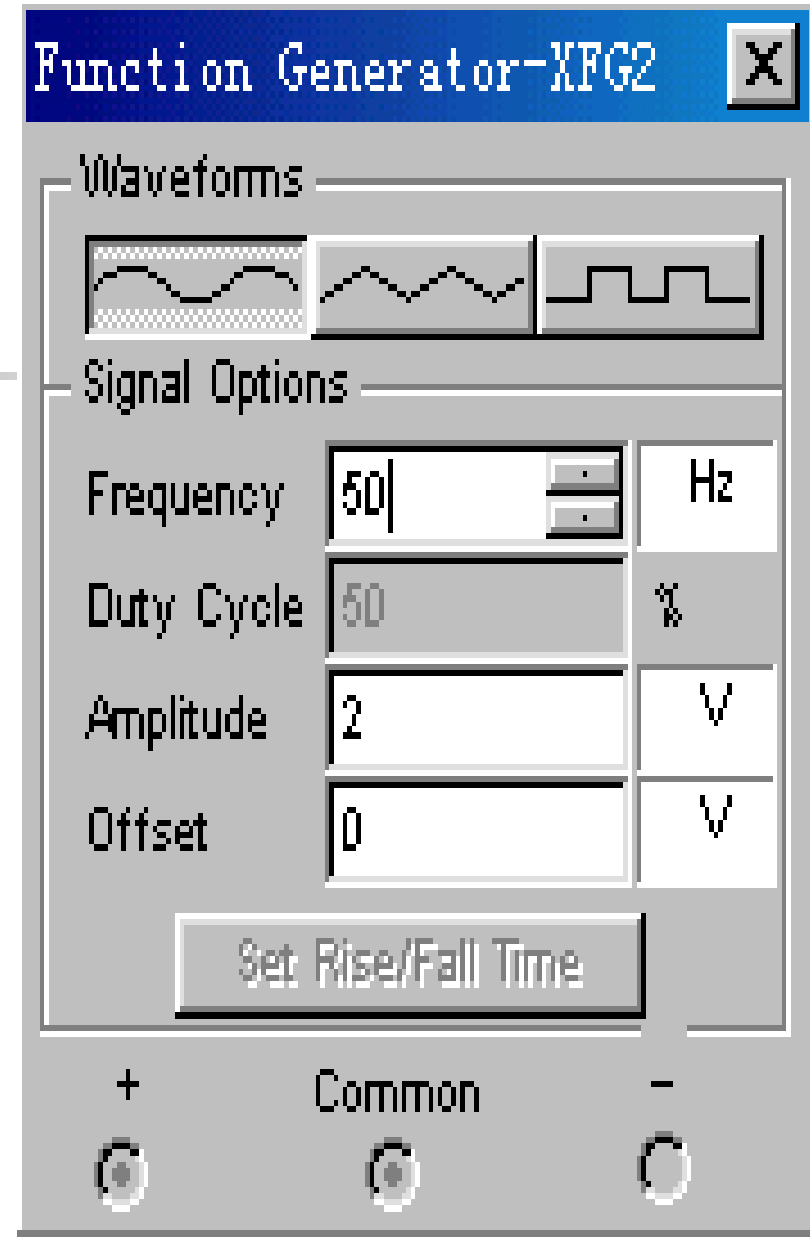
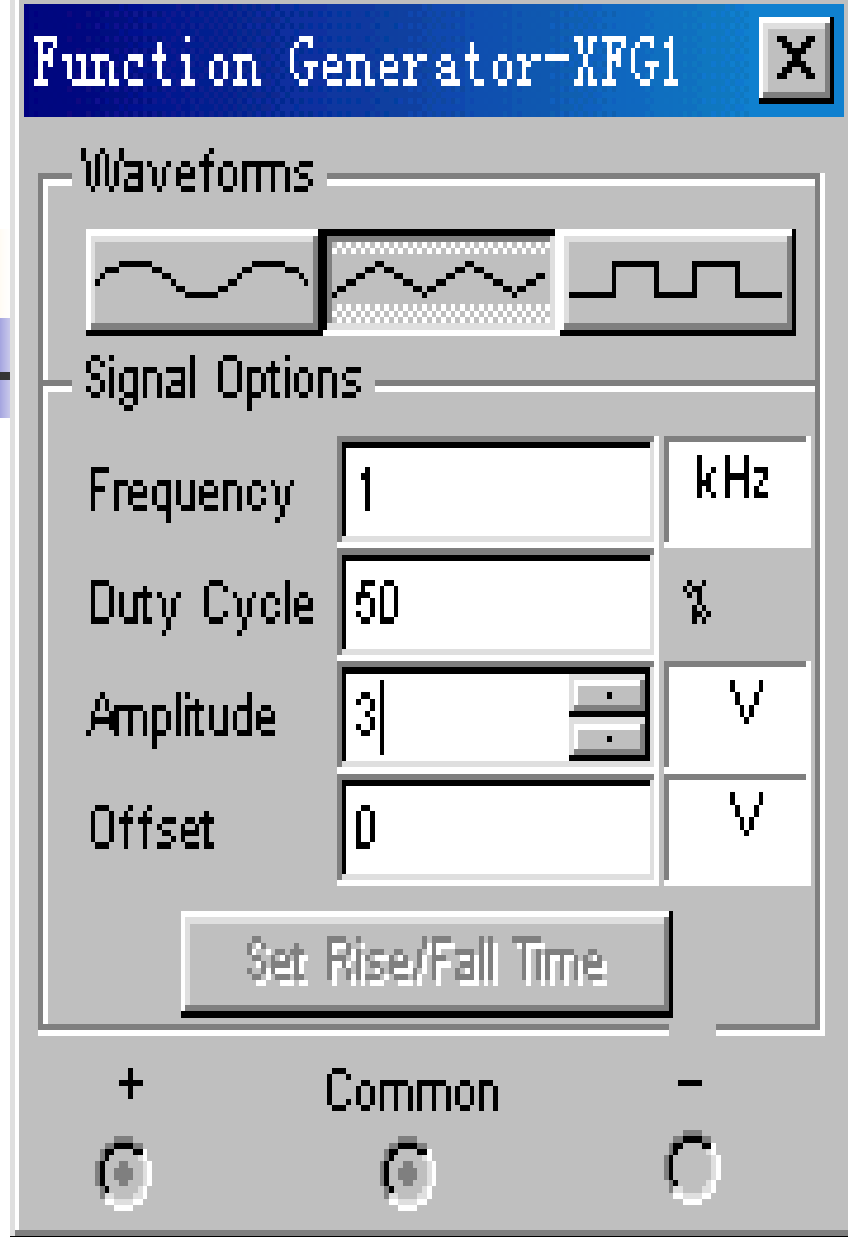
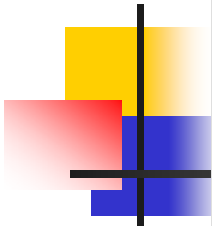


图11.8.5 SPWM产生电路



(a)

(b)

图11.8.6 XFG1和XFG2对话框设置

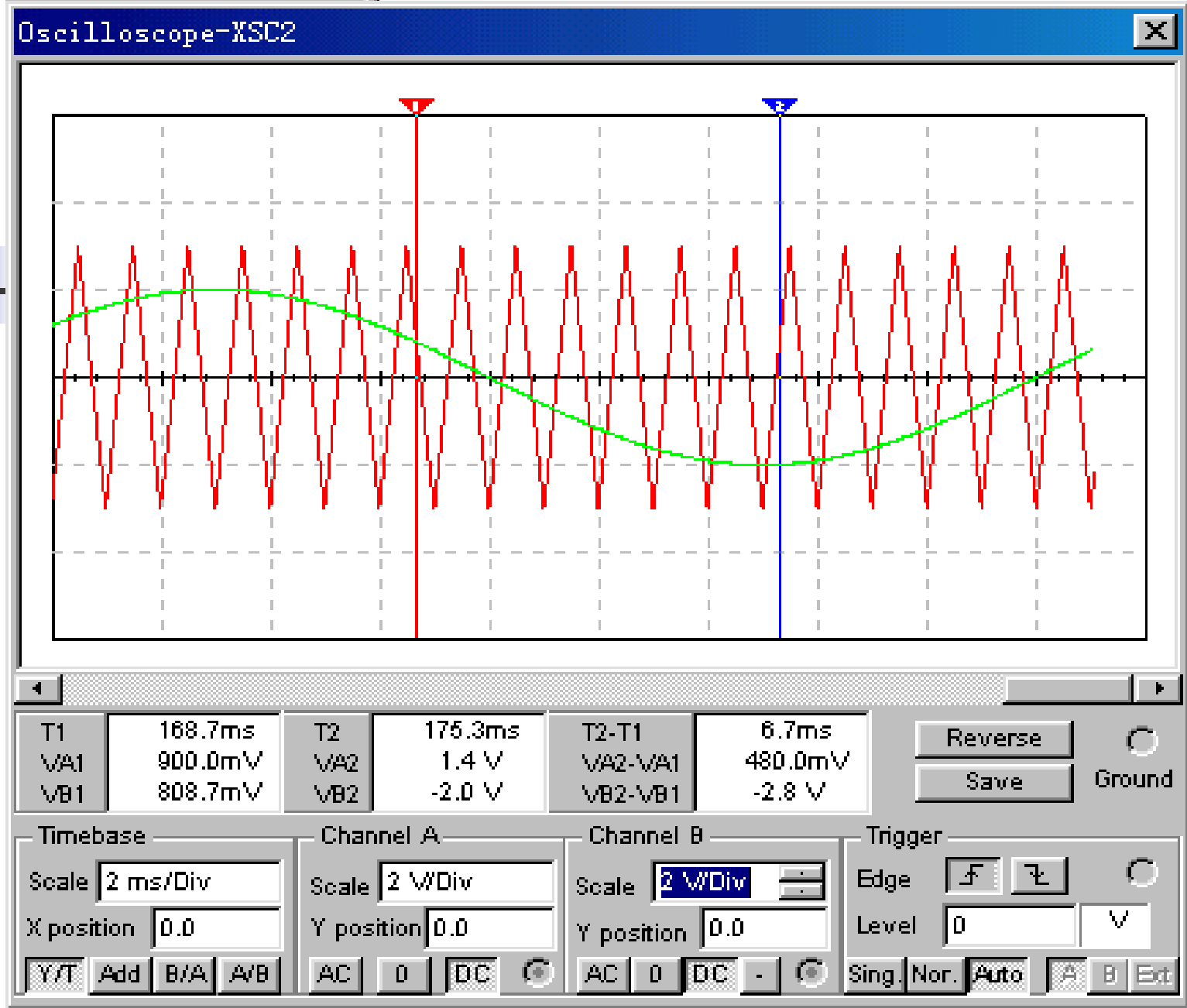


图11.8.7 XFG1和XFG2 产生的波形

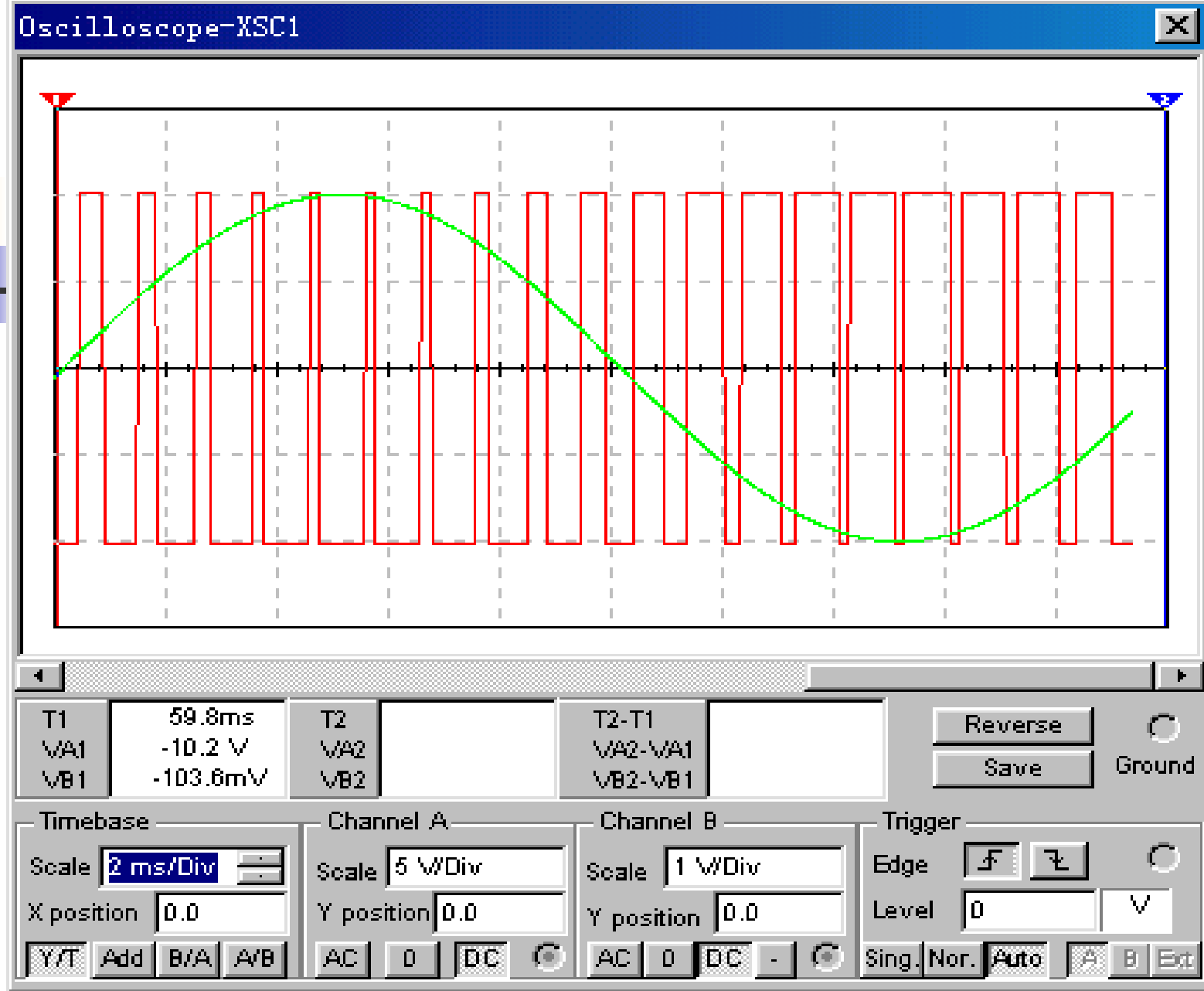


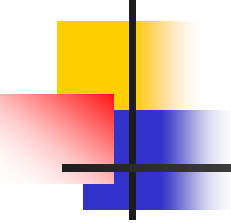
图11.8.8 通过比较器产生的波形



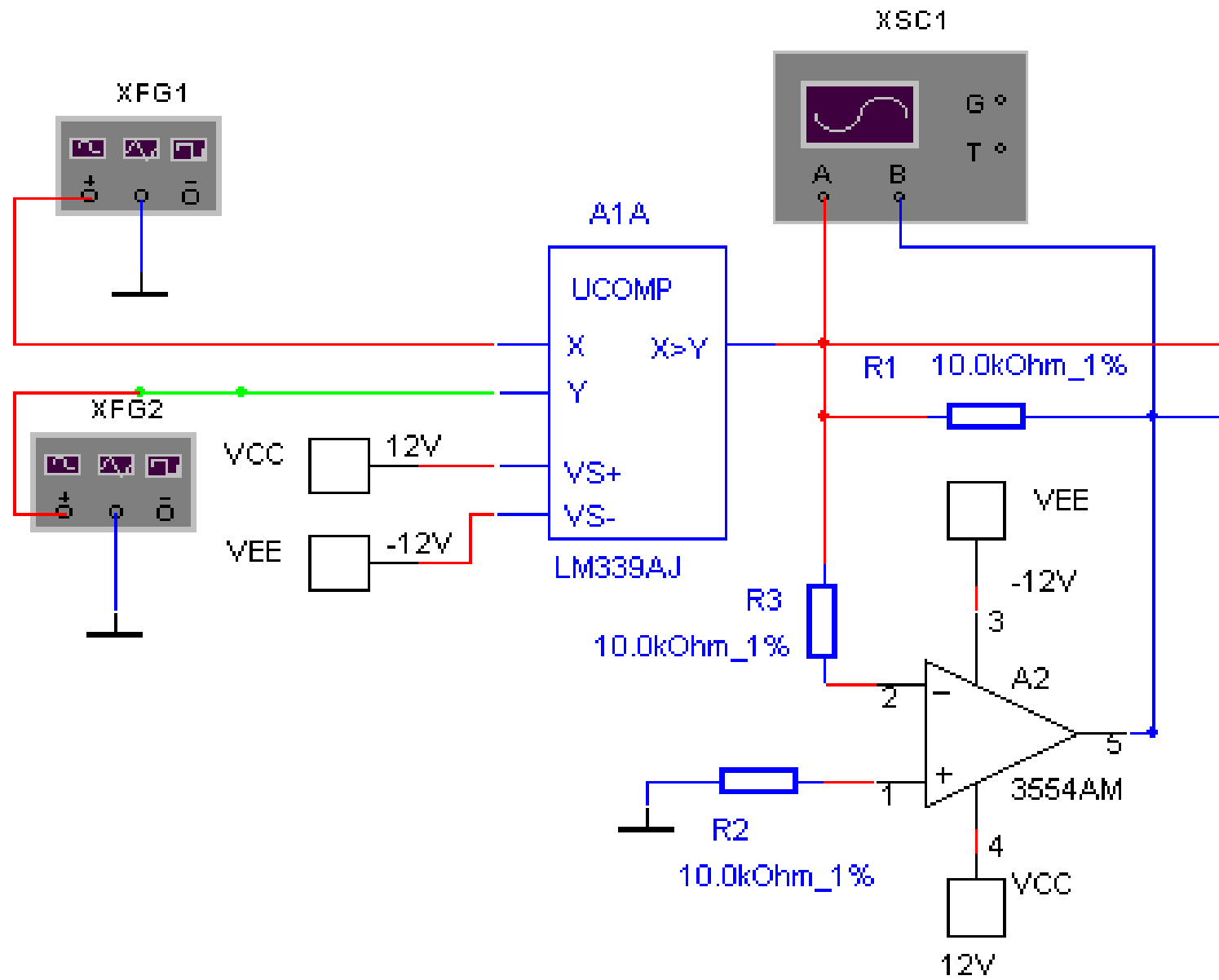
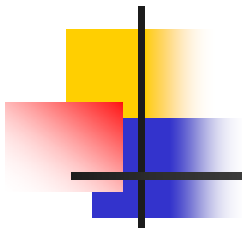
### 11.8.3 SPWM逆变电路

---

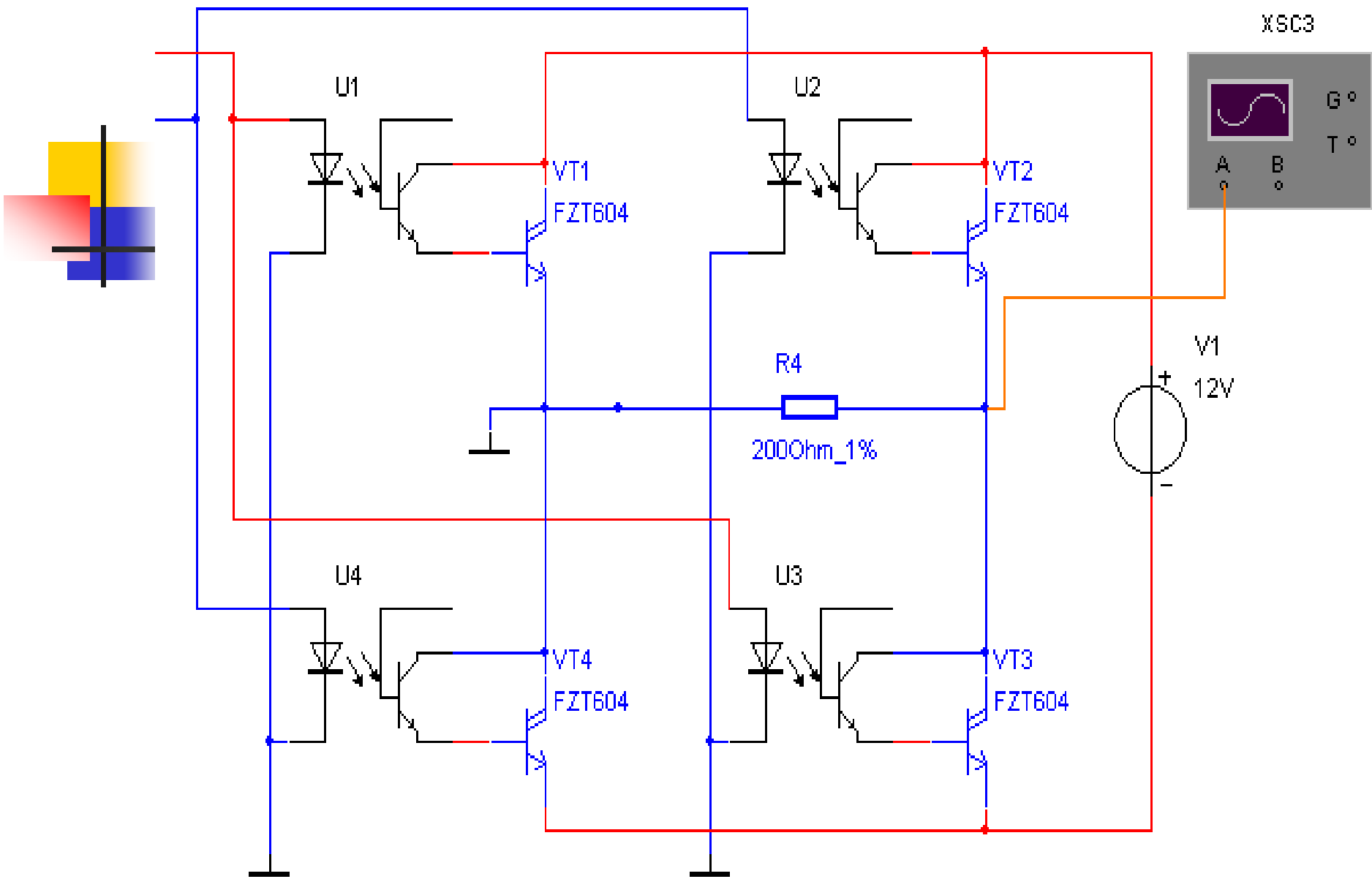
- SPWM逆变电路如图11.8.9 (a) (b) 所示。图中函数发生器XFG1产生1kHz的三角波信号作为载波信号  $u_c$ ，函数发生器XFG2产生50Hz的正弦波信号作为调制信号  $u_r$ ，XFG1和XFG2对话框设置如图11.8.6所示。

- 
- 
- 图中采用LM339AJ比较器作为SPWM调制电路，A2 3545AM作为反相放大器，产生的波形如图11.8.9（c）所示。在负载电阻R4上的输出波形如图11.8.9（d）所示。



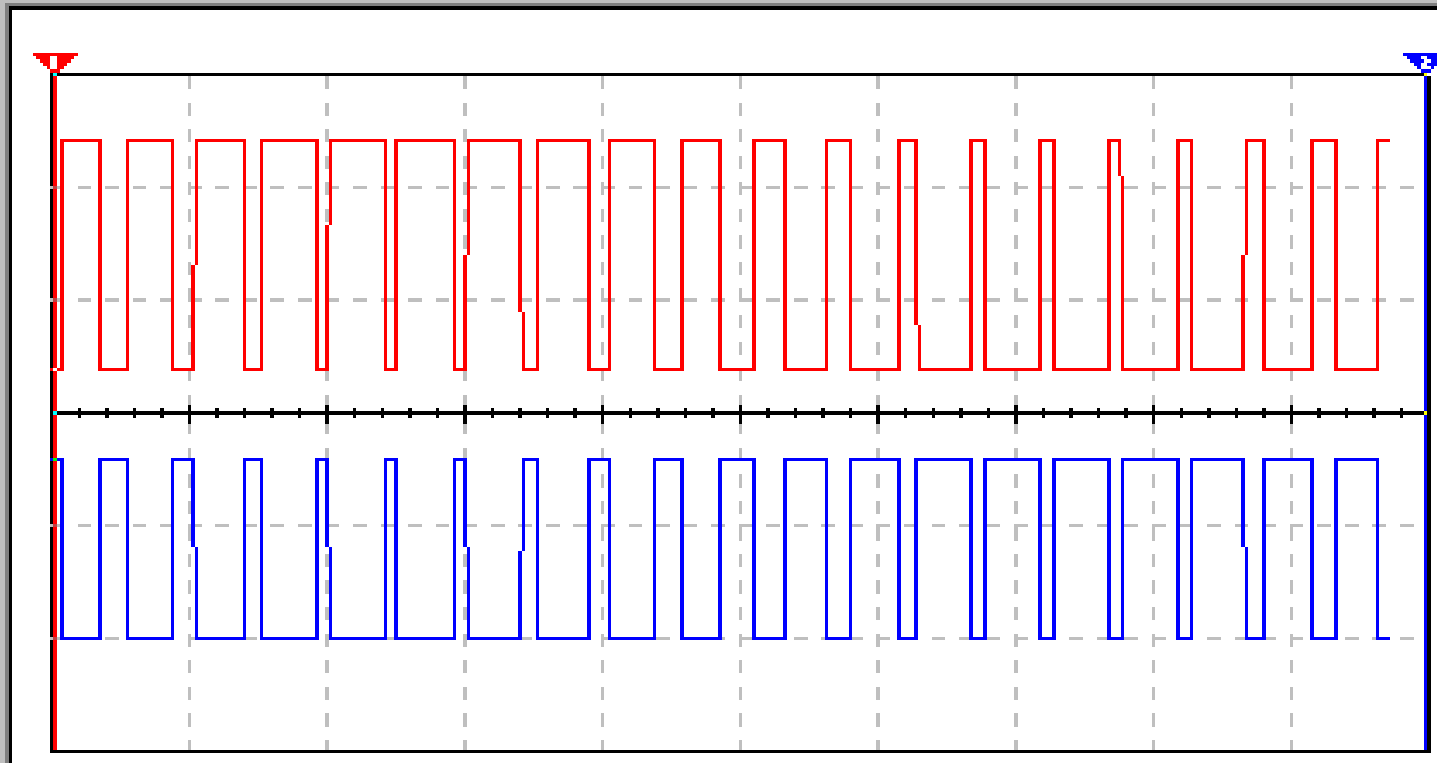


(a) SPWM驱动信号产生电路



(b) SPWM逆变电路

Oscilloscope-XSC1

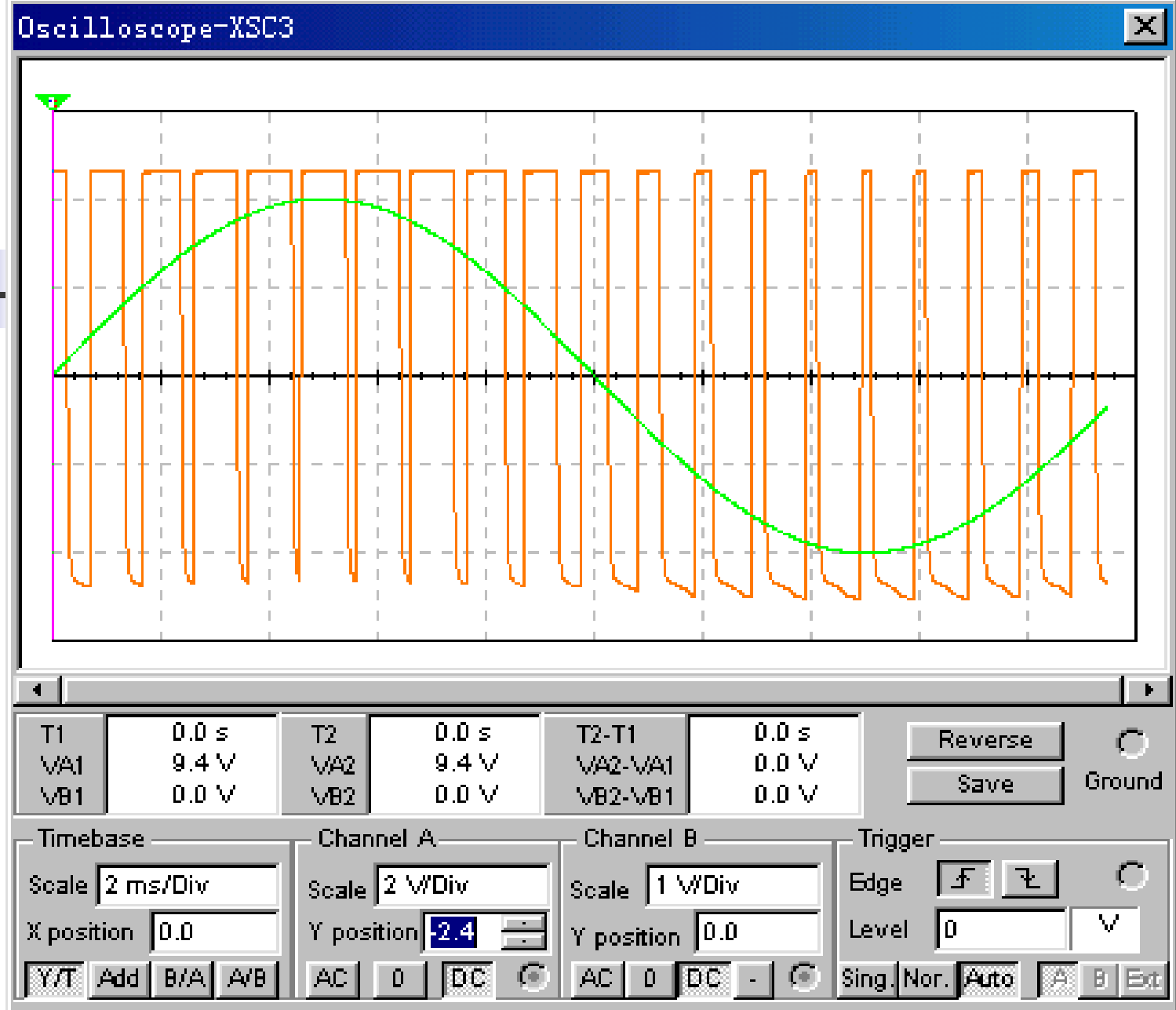


T1	270.1ms	T2		T2-T1		Reverse	<input type="radio"/>
VA1	-10.2 V	VA2		VA2-VA1		Save	Ground
VB1	7.9 V	VB2		VB2-VB1			

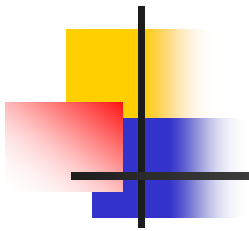
  

Timebase	Channel A	Channel B	Trigger
Scale 2 ms/Div	Scale 10 V/Div	Scale 10 V/Div	Edge <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>
X position 0.0	Y position 1.4	Y position -1.2	Level 0 V
<input type="button" value="Y/T"/> <input type="button" value="Add"/> <input type="button" value="B/A"/> <input type="button" value="A/B"/>	<input type="button" value="AC"/> <input type="button" value="0"/> <input type="button" value="DC"/> <input checked="" type="radio"/>	<input type="button" value="AC"/> <input type="button" value="0"/> <input type="button" value="DC"/> <input type="radio"/>	Sing. Nor. <input type="button" value="Auto"/> <input type="button" value="A"/> <input type="button" value="B"/> <input type="button" value="Ext"/>

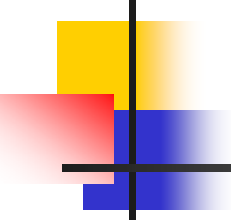
(c) SPWM逆变电路驱动信号



(d) SPWM逆变电路输出波形      图11.8.9 SPWM逆变电路



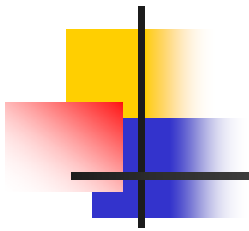
## 本章小结



---

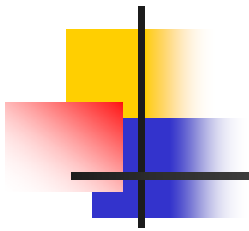
- 电源电路是各种电子设备必不可少的组成部分。本章主要内容有：

- (1) 介绍了单相半波可控整流电路，单相半波可控整流电路中的相控开关器件为晶闸管（SCR），负载为电阻负载。



---

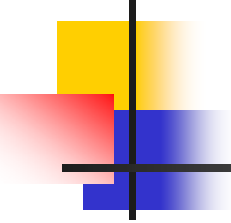
- (2) 单相半控桥整流电路是由四个管子组成的桥式整流电路，其中两只为触发脉冲互差 $180^\circ$  的晶闸管，两只为整流二极管。

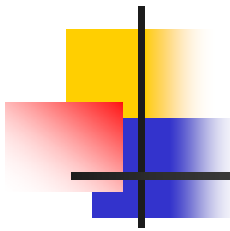


---

■ (3) 三相桥式整流电路是由一组共阴极电路和一组共阳极电路串联组成，在任何时刻都必须有两个整流管导通，三相桥式整流电路的整流电压为三相半波时的两倍，三相桥式整流电路每隔 $60^\circ$ 有一个整流管要换流，整流输出的电压属于变压器次级的线电压。

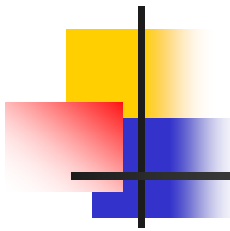


- 
- 
- (4) 直流降压斩波变换电路产生一个低于直流输入电压  $U_D$  的平均输出电压  $U_O$ 。
  - (5) 直流升压斩波变换电路其输出电压  $U_O$  总是大于输入电源电压  $U_D$ 。



---

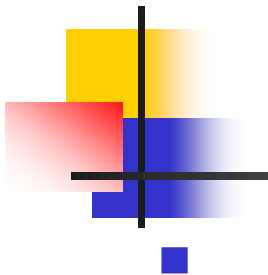
- (6) 直流降压一升压变换电路的输出电压可以高于或者低于输入电压，具有一个相对于输入电压公共端为负极性的输出电压。直流降压一升压变换电路是由直流降压与直流升压变换电路串接而成的。



---

- (7) DC—AC全桥逆变电路完成直流到交流的变换，电源电压为恒值，输出电压 $U_0$ 为交变方波电压。

- (8) SPWM逆变器的输出是一组等幅、等距而不等宽的脉冲序列，其脉宽基本上按正弦分布，以此脉冲序列来等效正弦电压波。

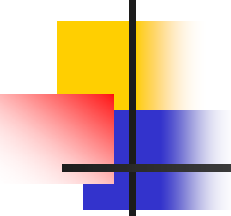


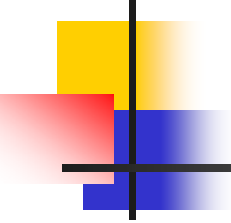
■ 掌握电源电路的仿真设计与分析方法是本章的重点。控制整流电路中晶闸管的导通角可以控制整流输出电压。改变电感 $L$ 、电容 $C$ 、续流二极管 $D$ 和开关 $S$ 位置可以获得不同形式的直流降压/升压斩波变换电路。逆变电路的输出脉冲序列波形与控制信号的形式有关。

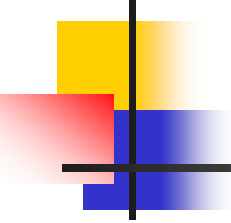


---

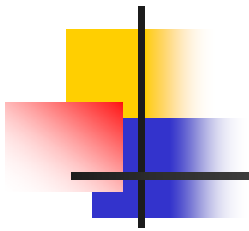
# 思考题与习题

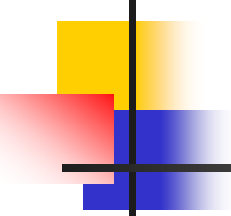
- 
- 
- 11.1 单相全控桥式整流电路和单相半控桥式整流电路接大电感负载，负载两端并接续流二极管的作用是什么？两者的作用是否相同？

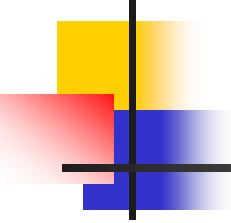
- 
- 11.2 一个单相全控桥式整流电路的  $\alpha = 60^\circ$  ,  $U_S = 220 \text{ V}$  , 求当电阻负载  $R = 100 \Omega$  和电阻电感负载  $R = 100 \Omega$  、  $L = \infty$  情况下的整流电压  $U_o$ 、负载电流  $I_o$  与电源输入电流  $I_s$  , 并作出  $u_o$ 、  $i_o$  与  $i_s$  的波形。

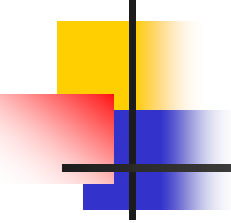
- 
- 
- 11.3在三相半波整流电路中，如果a相的触发脉冲消失，试仿真在电阻性负载和电感性负载下的整流电压波形。

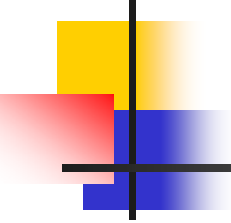


- 
- 
- 11.4在三相全控桥式整流电路中有电阻性负载。如果一个晶闸管不能导通，此时整流波形如何？如果有一个晶闸管被击穿（短路），其他晶闸管受什么影响？

- 
- 
- 11.5变流器产生逆变状态应具备哪些条件？哪些类型的变流电路不能实现逆变工作？试仿真一个变流器电路。

- 
- 11.6 考虑一个降压变流器所有元件是理想的。在 $u_o=6V$ 时，通过控制开关的占空比 $D$ 使 $u_o \approx U_o$ 保持为常数。若 $U_D=10V$ 到 $40V$ ， $P_o > 10W$ 以及 $f_s=100kHz$ ，试计算在各种条件下为保持变流器工作在连续导电模式所需的最小电感 $L_{min}$ 。

- 
- 
- 11.7 考虑一个升压变流器所有元件是理想的。已知  $U_D = 10\text{V}$  到  $20\text{V}$ ,  $U_o = 24\text{V}$ ,  $f_s = 20\text{kHz}$  以及  $C = 470 \mu\text{F}$ 。若  $P_o \geq 10\text{W}$ , 试计算为使变流器工作在连续导电模式所需的  $L_{\min}$ 。

- 
- 
- 11.8 考虑一个降压-升压变流器所有元件是理想的。已知  $U_D = 10\text{V}$  到  $40\text{V}$ ， $U_o = 15\text{V}$ ， $f_s = 20\text{kHz}$  以及  $C = 470\ \mu\text{F}$ 。若  $P_o \geq 5\text{W}$ ，试计算为使变流器工作在连续导电模式所需的  $L_{\min}$ 。

- 
- 
- 11.9 试设计一个采用晶体管的DC-AC全桥逆变电路。
  - 11.10 试设计一个采用MOSFET的SPWM逆变电路。



---

## 第12章 综合应用电路

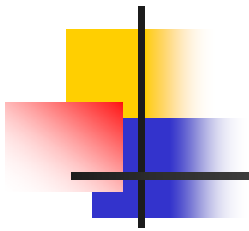


---

## ■ 内容提要

■ 本章介绍了一些应用电路例，主要有函数波形发生器电路，阶梯波发生器电路，铁路和公路交叉路口交通控制器的设计，病房呼叫系统的设计，8 路数显报警器，汽车尾灯控制电路，计数器、译码器、数码管驱动显示电路，程控电压衰减器电路与计算机仿真设计方法。





---

- 本章的重点是掌握综合应用电路的仿真设计与分析方法。注意掌握综合应用电路设计的一些技巧，如子电路设计、电路功能的模块化等。注意应用要求与逻辑函数之间的转换，解决一个实际问题，可以采用不同形式的电路形式。



## 12.1 函数波形发生器电路

---

- 函数发生器一般是指能自动产生正弦波、三角波（锯齿波）、方波（矩形波）、阶梯波等电压波形的电路和仪器。电路形式可以采用由运放及分离元件构成；也可采用单片集成函数发生器，根据用途不同，有产生多种波形的函数信号发生器，本例介绍产生方波和三角波的函数发生器。电路如图12.1.1所示。

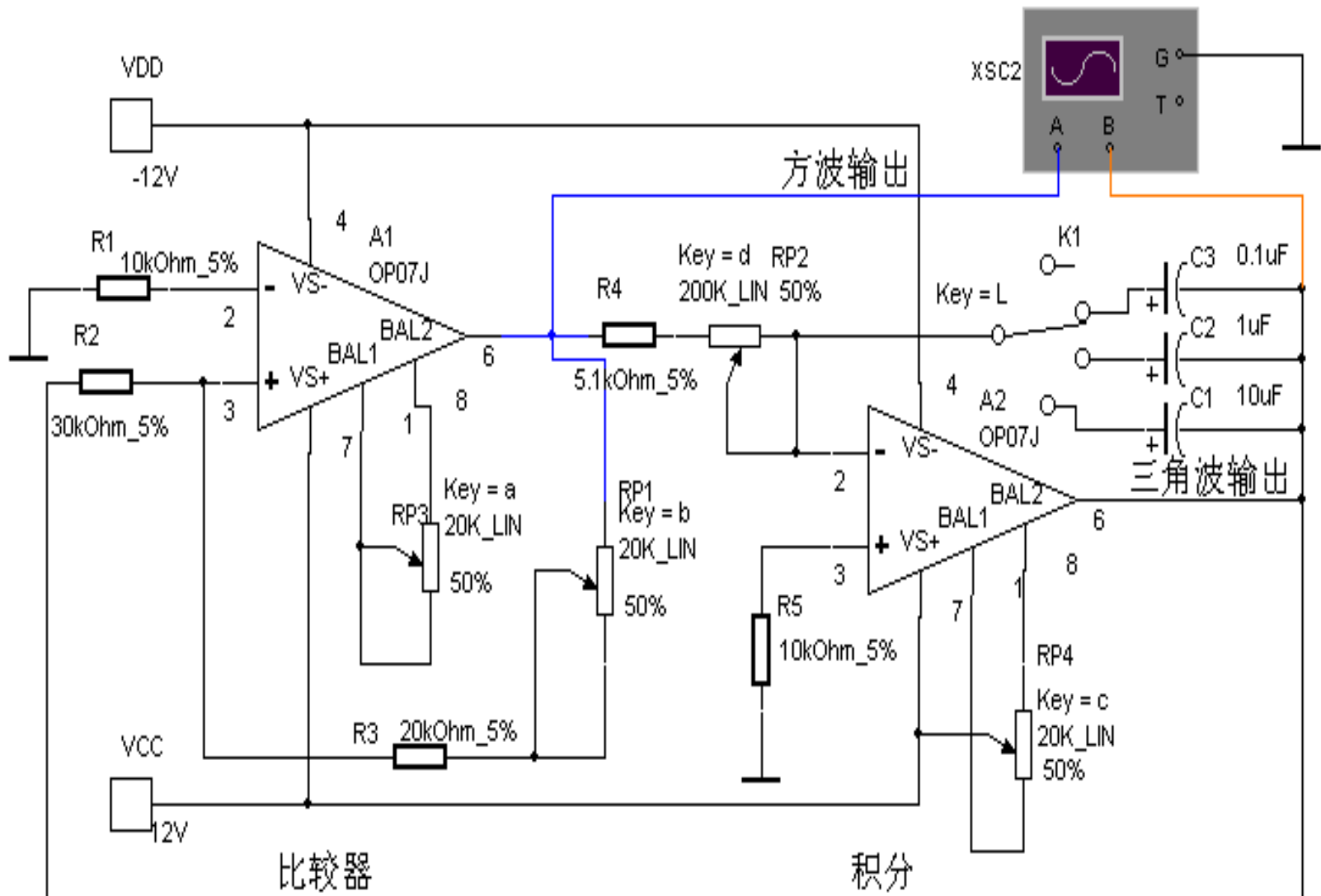
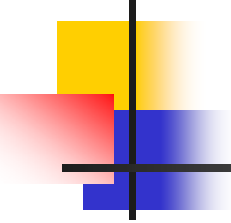


图12.1.1 函数波形发生器电路

- 
- 
- 此电路的频率范围：1HZ~10HZ ， 10HZ~100HZ ， 100HZ~1KHZ
  - 元件参数的选定
  - 方波—三角波的频率：

$$f = \frac{R_3 + RP_1}{4R_2(R_4 + RP_2)C}$$

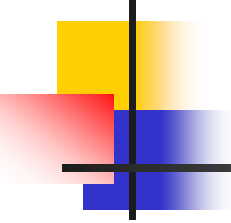


---

- 而

$$\frac{R_2}{R_3 + RP_1} = \frac{1}{3}$$

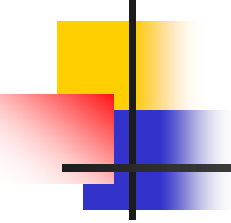
- 取 $R_2=10\text{K}\Omega$ ，则 $R_2+ RP_1=30\text{K}\Omega$ ： 取 $R_3=20\text{K}\Omega$ ， $RP_1=20\text{K}\Omega$

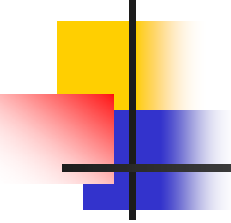


---

■ 由  $f = \frac{R_3 + RP_1}{4R_2(R_4 + RP_2)C}$  得到

$$R_2 + RP_1 = \frac{3}{4fC}$$

- 
- 
- 当  $1H_z \ll f \ll 10H_z$  时, 取  $C=10\mu F$ ,  $R_4+R_{P2}=75\sim 7.5K\Omega$ ,  $R_4=5.1K\Omega$ ,  $R_{P2}=100K\Omega$
  - 当  $10H_z \ll f \ll 100H_z$  时, 取  $C=1\mu F$
  - 当  $100H_z \ll f \ll 1000H_z$  时, 取  $C=0.1\mu$

- 
- 
- 改变开关K与电容C1、 C2、 C3的连接位置可改变三角波、方波的输出频率，图12.1.2 是开关K与电容C2相连时的输出波形。(注：在仿真电路中各元器件的脚标无法用下脚标表示，如C1只能表示成C1)。



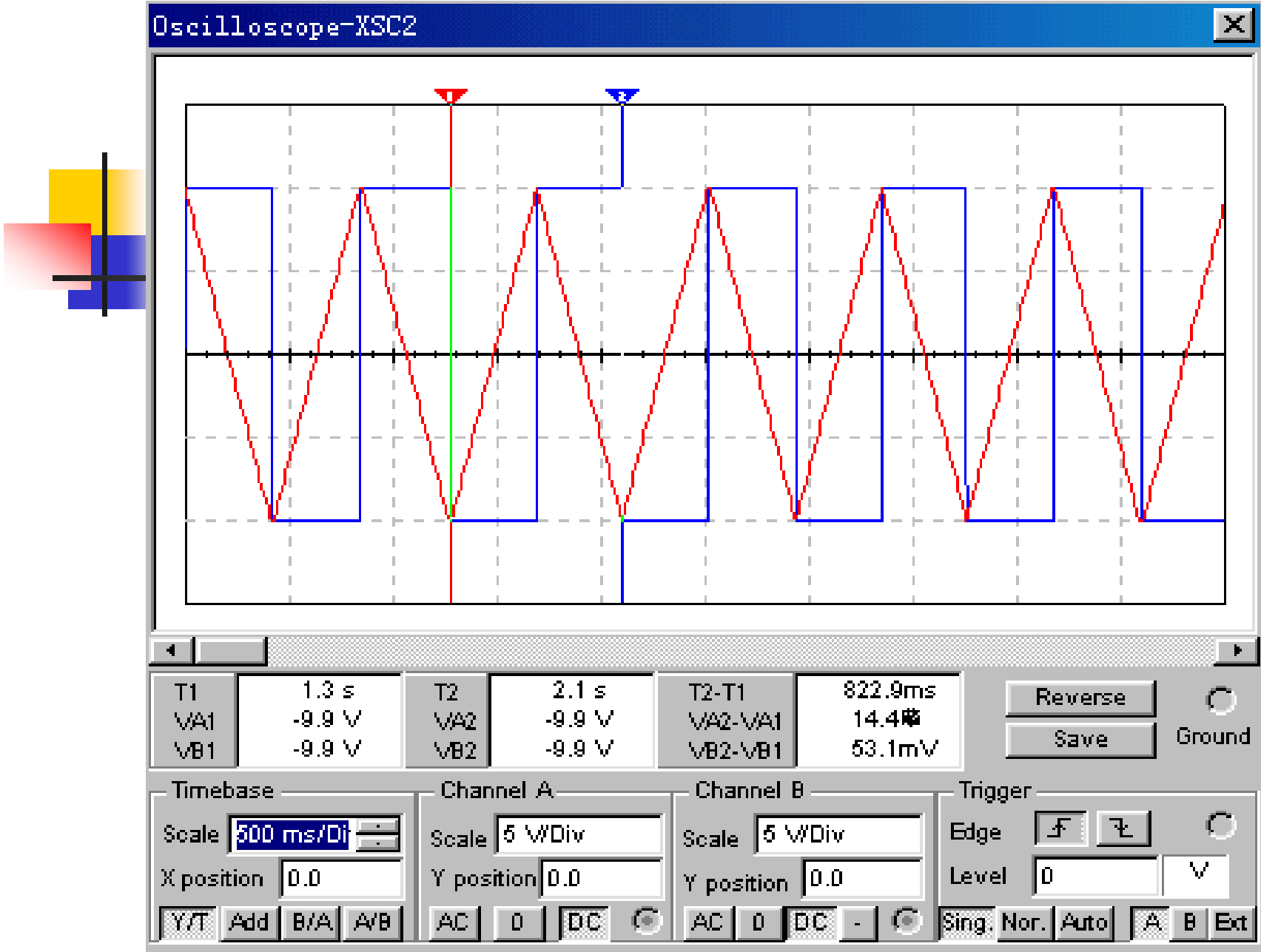
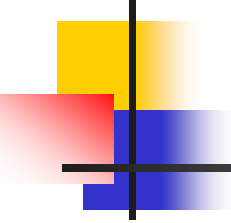


图12.1.2 开关K与电容C2相连时的输出波形



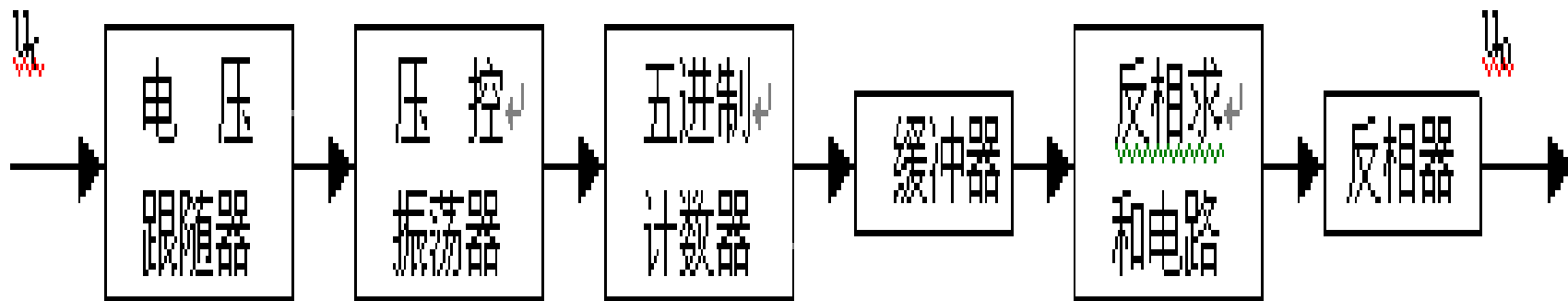
---

## 12.2 阶梯波发生器电路



---

- 该电路产生5个台阶的阶梯波电路，电路由电压跟随器、压控振荡器、五进制计数器、缓冲器、反相求和电路及反相器组成，其框图如图12.2.1所示。



12. 2. 1 阶梯波发生器电路框图

阶梯波发生器原理电路如图12. 2. 2所示。

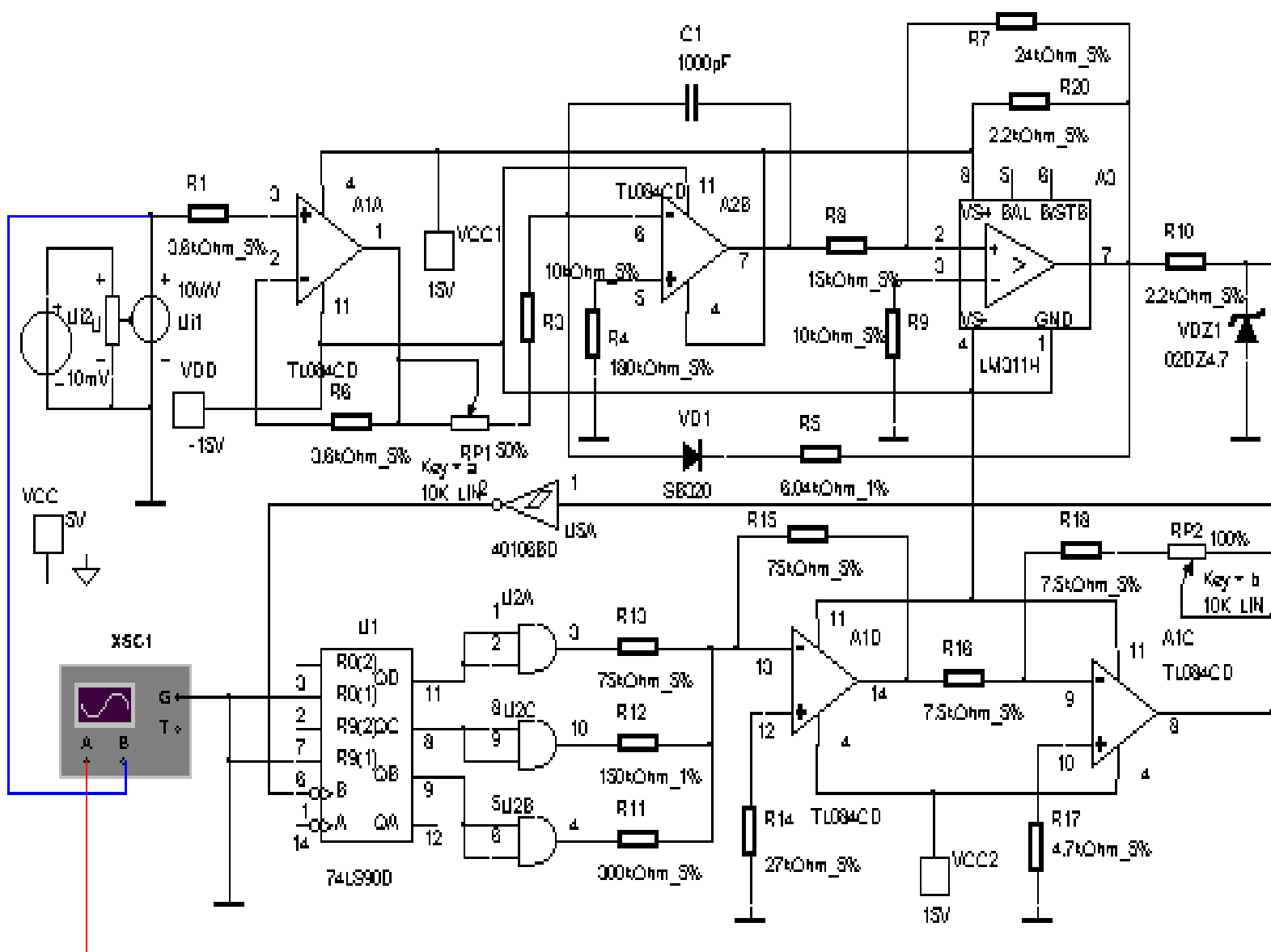


图12.2.2 阶梯波发生器原理电路

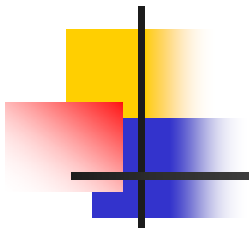


- 压控振荡器的频率

$$f = \frac{1}{2(R_3 + RP_1)} \cdot \frac{R_7}{R_8} \cdot \frac{U_C}{U_{0m}}$$

式中 $U_{0m}$ 为LM311最大输出电压，约为13V。

由上式可知，若要改变阶梯波的频率，可通过调节压控振荡器的频率来实现。

- 
- 
- 对阶梯波幅值的要求可通过调节RP2来实现。
  - 对阶梯波台阶的要求可通过改变74LS90的计数状态来实现。
  - 本例运放A1D、A1C输出电压随计数器74LS90状态转换如表12.2.1 所示。

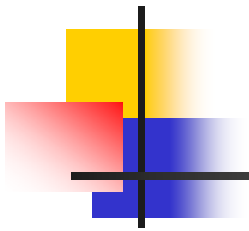


表12.2.1 运放U4D、U4C输出电压

随计数器74LS90状态转化表

74LS90			A1D输出	A1C输出
QD	QC	QB	A1D (V)	A1C (V)
0	0	0	0	0
0	0	1	-1.25	2
0	1	0	-2.5	4
0	1	1	-3.75	6
1	0	0	-5.0	8



电路仿真结果如图12.2.3所示。

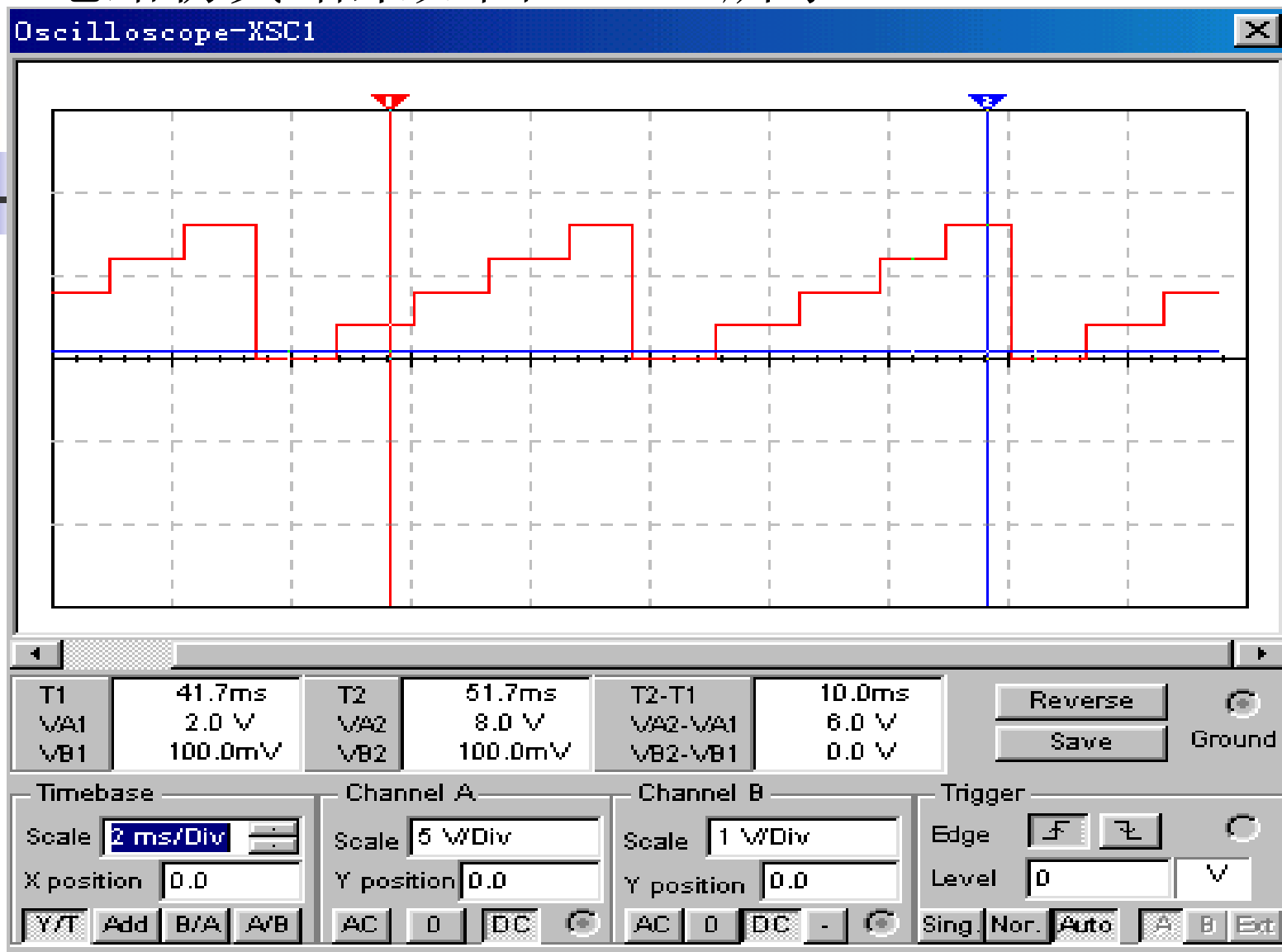


图12.2.3 5个台阶的阶梯波仿真图



---

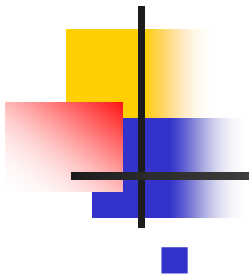
## 12.3 交叉路口交通控制器的设计



## 12.3.1 交通控制器的设计原则

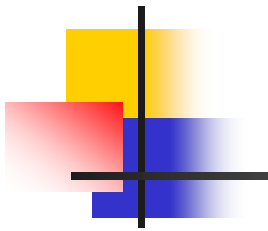
---

- 设计一个铁路和公路交叉路口的交通控制器。图12.3.1(a)是该铁路和交叉路口的平面位置示意图。在P1和P2点设置了两个压敏元件(在仿真电路中用开关替代)。这两点相距较远,因此一列火车不会同时压在两个压敏元件上。A和B是两个栅门。

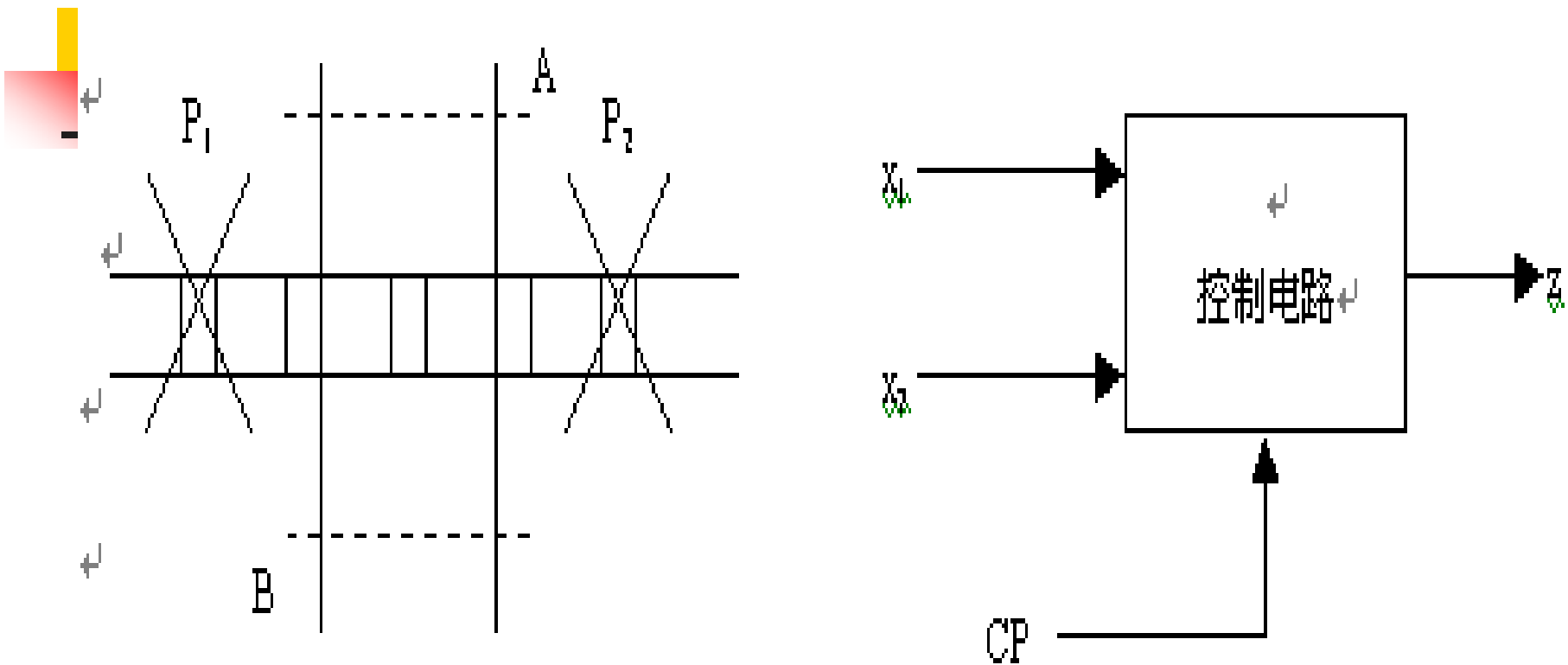


---

■ 当火车由东向西或由西向东通过P1P2段，且当火车的任何部分位于P1P2之间时，栅门A和B应同时关闭，否则栅门同时打开。压敏元件的功能是，当它感受到火车的压力时，产生逻辑电平1，否则产生逻辑电平0

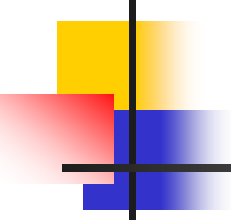


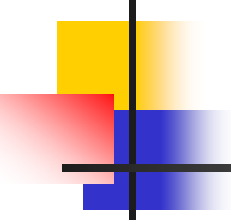
■ 设位于P1和P2两点的压敏元件所输出的信号分别为 $x_1$ 和 $x_2$ 。栅门A和B的开闭如图12.3.1(b)所示的电路控制。控制电路的输入是压敏元件所发出的信号 $x_1$ 和 $x_2$ ，输出信号 $z$ 用来控制栅门A和B，当 $Z=1$ 时，栅门关闭；当 $Z=0$ 时栅门打开。



(a) 铁路和交叉路口的平面位置示意图 (b) 电路控制框图

图12.3.1 交通控制器示意图

- 
- 
- 本例的状态设置分别为：
  - S1：火车在P1和P2区间之外（对应输入 $x_1$   
 $x_2 = 00$ ）。
  - S2：火车自西向东行驶，并压在P1上。
  - S3：火车继续自西向东行驶，且位于P1和P2之间。

- 
- 
- S4: 火车仍自西向东行驶，压在P2上。
  - S5: 火车自东向西行驶，并压在P2上。
  - S6: 火车继续自东向西行驶，且位于P1和P2之间。
  - S7: 火车仍自东向西行驶，并压在P1上。



- 交通控制状态如表12.3.1所示。

交通控制状态如表12.3.1所示。

$x_1$ S	$x_2$	00	01	11	10
$S_1$		$S_1/0$	$S_5/1$	$\times/\times$	$S_2/1$
$S_2$		$S_3/1$	$\times/\times$	$\times/\times$	$S_2/1$
$S_3$		$S_3/1$	$S_4/1$	$\times/\times$	$\times/\times$
$S_4$		$S_1/0$	$S_4/1$	$\times/\times$	$\times/\times$
$S_5$		$S_6/1$	$S_5/1$	$\times/\times$	$\times/\times$
$S_6$		$S_6/1$	$\times/\times$	$\times/\times$	$S_7/1$
$S_7$		$S_1/0$	$\times/\times$	$\times/\times$	$S_{17}/1$

对表12.3.1进行状态化简，从而可得到简化的状态表。如表12.3.2所示。

表12.3.2 化简后的交通控制状态表

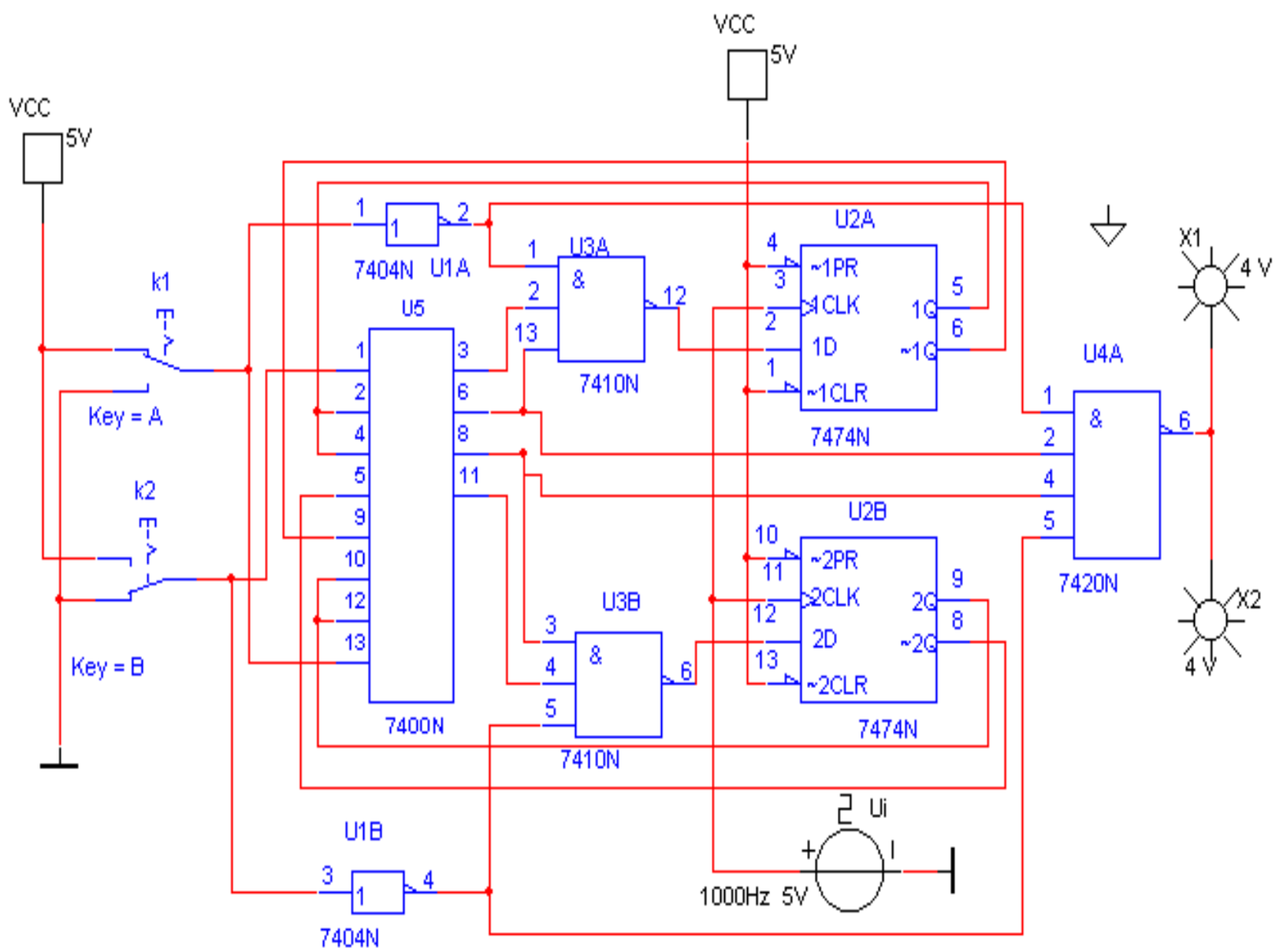
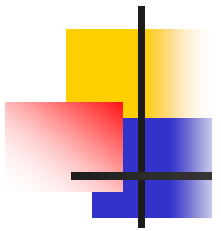
$x_1 \quad x_2$ S	00	01	11	10
$S_1$	$S_1/0$	$S_5/1$	$\times/\times$	$S_2/1$
$S_2$	$S_2/1$	$S_4/1$	$\times/\times$	$S_2/1$
$S_4$	$S_1/0$	$S_4/1$	$\times/\times$	$S_4/1$
$S_5$	$S_5/1$	$S_5/1$	$\times/\times$	$S_4/1$



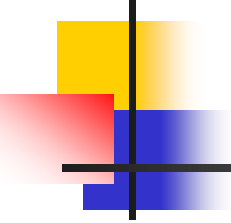
## 12.3.2 交通控制器电路

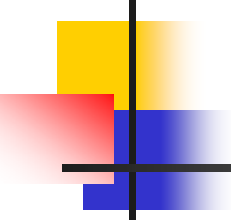
---

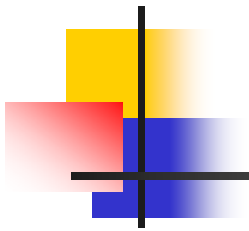
- 电路如图12.3.2所示，在编辑该电路图时，需要进行如下设置：

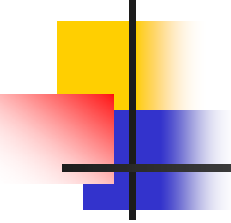


12.3.2 以D触发器为核心实现交通控制器逻辑电路

- 
- 
- (1) D触发器和其他数字元件均取自TTL元件库74元件箱。触发器的时钟信号选用Clock Source, 参数为1000Hz、5V。
  - (2) P1和P2点上的压敏元件是从Basic元件库中取出的两个单刀双掷开关(SPDT)来代替。

- 
- 
- 当开关向上打，模仿火车已压在压敏元件上，输入信号为1；而如开关打到下端，则模仿火车没有压着压敏元件，相应的输入信号为0。两开关的上下搬动，分别设置为按键盘上的A、B键来进行。

- 
- (3) 输出信号Z控制的两个栅门A和B分别用两个数字指示器(Probe)来模拟。当输出 $z=1$ 时, Probe不发光, 表示两个栅门关闭; 而输出 $z=0$ 时, Probe发光, 则表示栅门打开。由于当电路的数字元件设置为Real时, TTL的输出高电平约4.5V, 为了可靠发光, Probe的发光门限设置为4V。

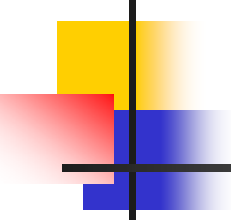


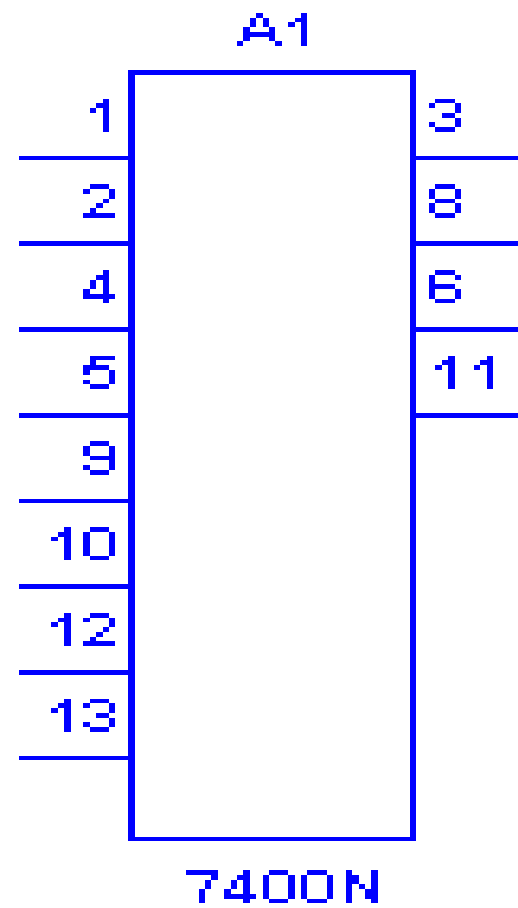
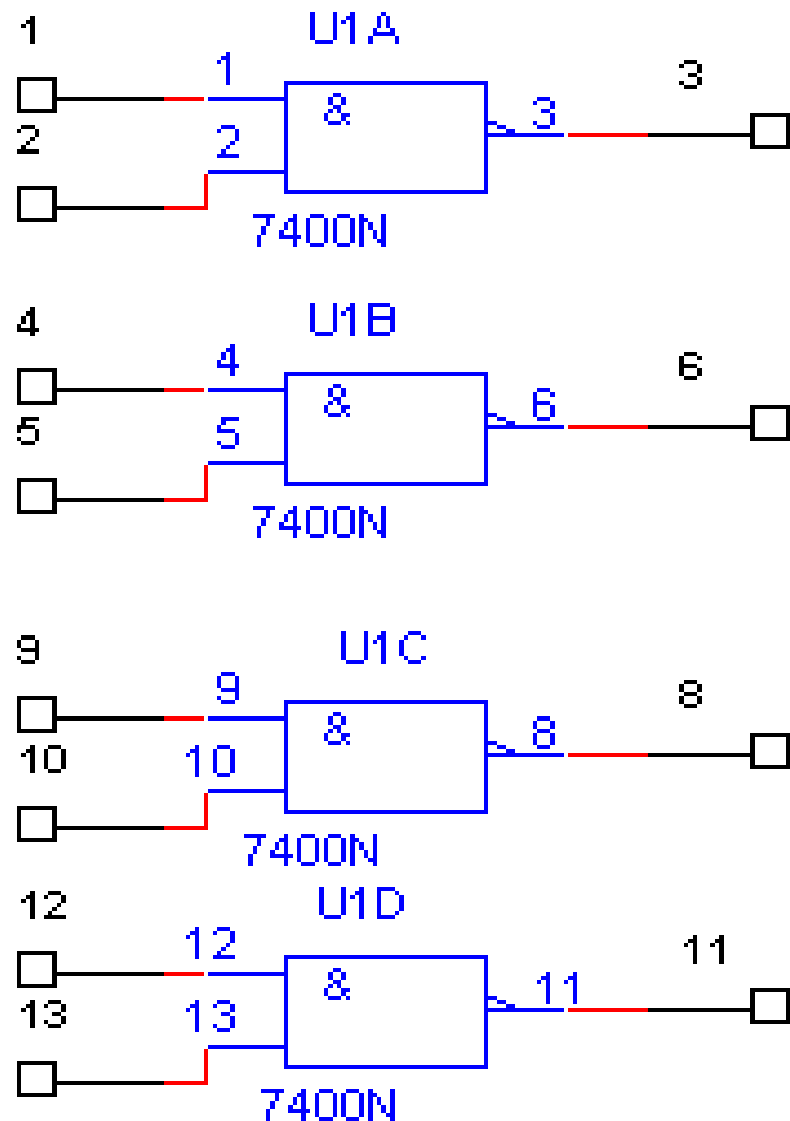
---

- (4) 为了进行Real仿真，在电路中已经有了5V数字电源的基础上，还要示意属性地设置一个数字接地端，否则得不到正确的结果。

- (5) 为了使电路简洁，本例中将四个与非门设计成一个子电路。



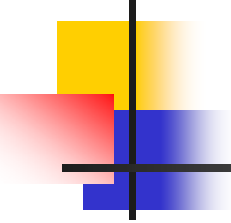
- 
- 
- 在TTL元件库中取出四个与非门，启动菜单中Place Input/Output命令，取出四个输入/输出端与逻辑电路连接，并对端子进行重新设置命名，如图12.3.3(a)所示。

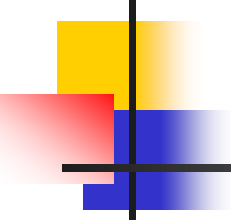


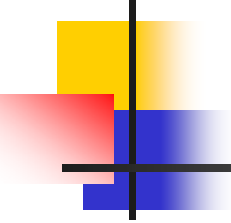
(b) 子电路

(a) 输入/输出端与电路的连接

图12.3.3 子电路的设置

- 
- 按住鼠标左键拖出一个方框（或按Ctrl+A键），把上图全部圈入方框内（即全部选中），再启动Place菜单中的Replace by Subcircuit命令，在出现的Subcircuit Name对话框中输入相应的符号，即可得到如图12.3.3(b)所示子电路。

- 
- 
- 编辑好电路后，启动Simulate菜单中的Digital Simulation Settings…命令，在打开的Digital Simulation Settings对话框中选择Raal项，然后再启动电路的仿真开关，就可进行仿真观察。



---

- 如火车从西向东开过，通过点击A、A、B、B顺序来进行模拟。而火车从东向西开过，则通过点击B、B、A、A顺序来进行。如果用其他顺序来操作，将产生错误的结果，但这不影响电路的正确性，因为其他顺序操作在实际情况下是不可能出现的。



# 第13章 单片机应用电路

---



---

## ■ 内容提要

- 本章介绍了单片机仿真平台和一些单片机应用电路例，主要有Multisim 10单片机仿真平台，简易计算器电路设计和程序编译、LCD显示器控制电路设计和程序编译、交通灯管理控制器电路设计和程序编译、传送带控制器电路设计和程序编译的与计算机仿真设计方法。
- 知识要点：电路创建、电路功能的模块化、程序编写、程序调试。



## 13.1 Multisim 10单片机仿真平台

---

- 1. 单片机仿真界面的进入
- 单击图标，出现图13.1.1选择MICROCONTROLLER，出现单片机选择窗口，拉动滑条，选择需要的单片机，例如PIC16C65A，单击OK即可。



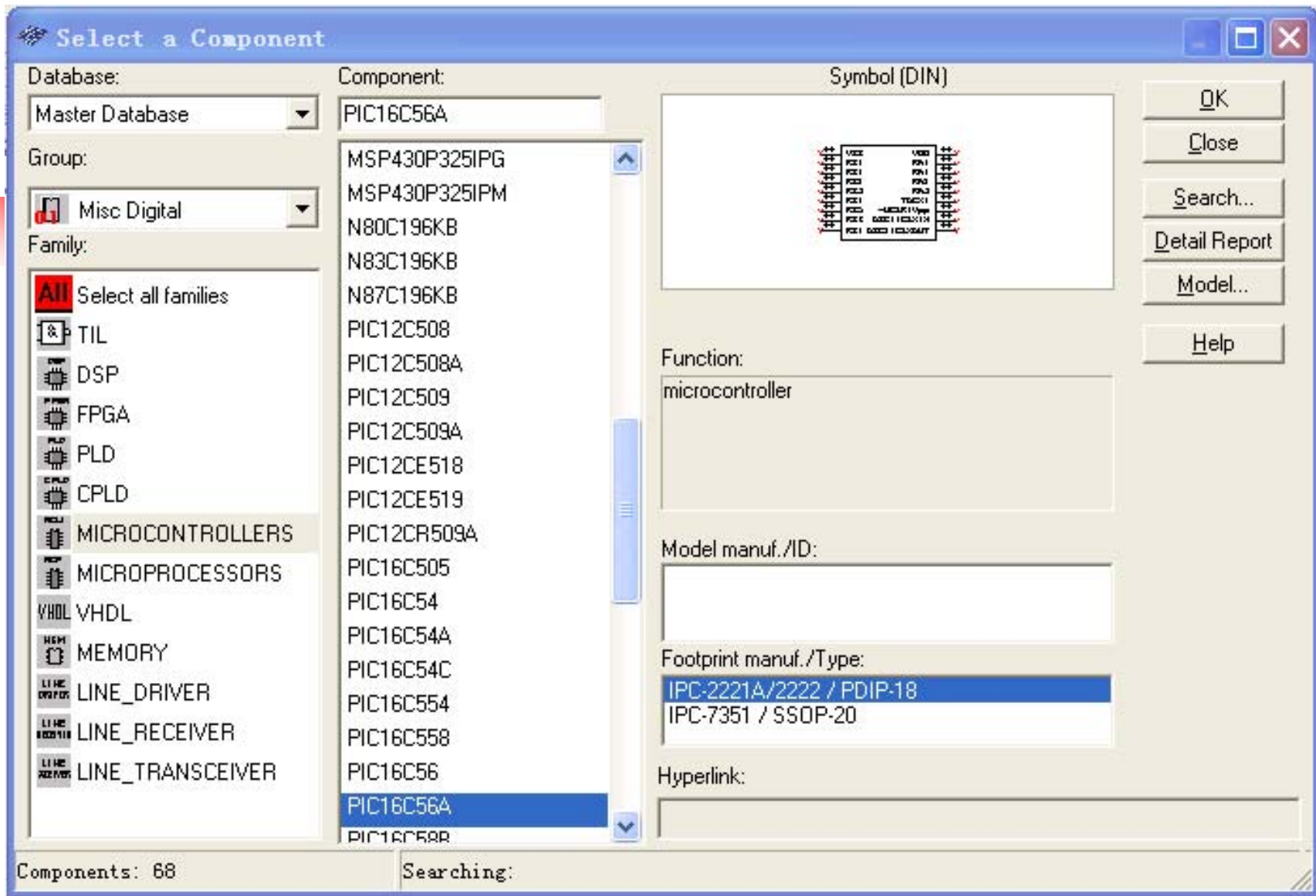
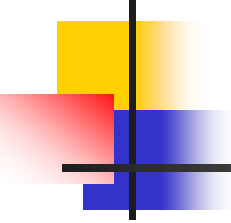


图13.1.1 MICROCONTROLLER选择窗口

- 
- 
- 也可以单击Misc Digital窗口，选择MCU Module，出现图13.1.2所示 MCU Module（微控制器模块）选择窗口，可选择需要的805x和PIC单片机、或者RAM和ROM。例如选择8051，单击OK即可选择8051单片机。

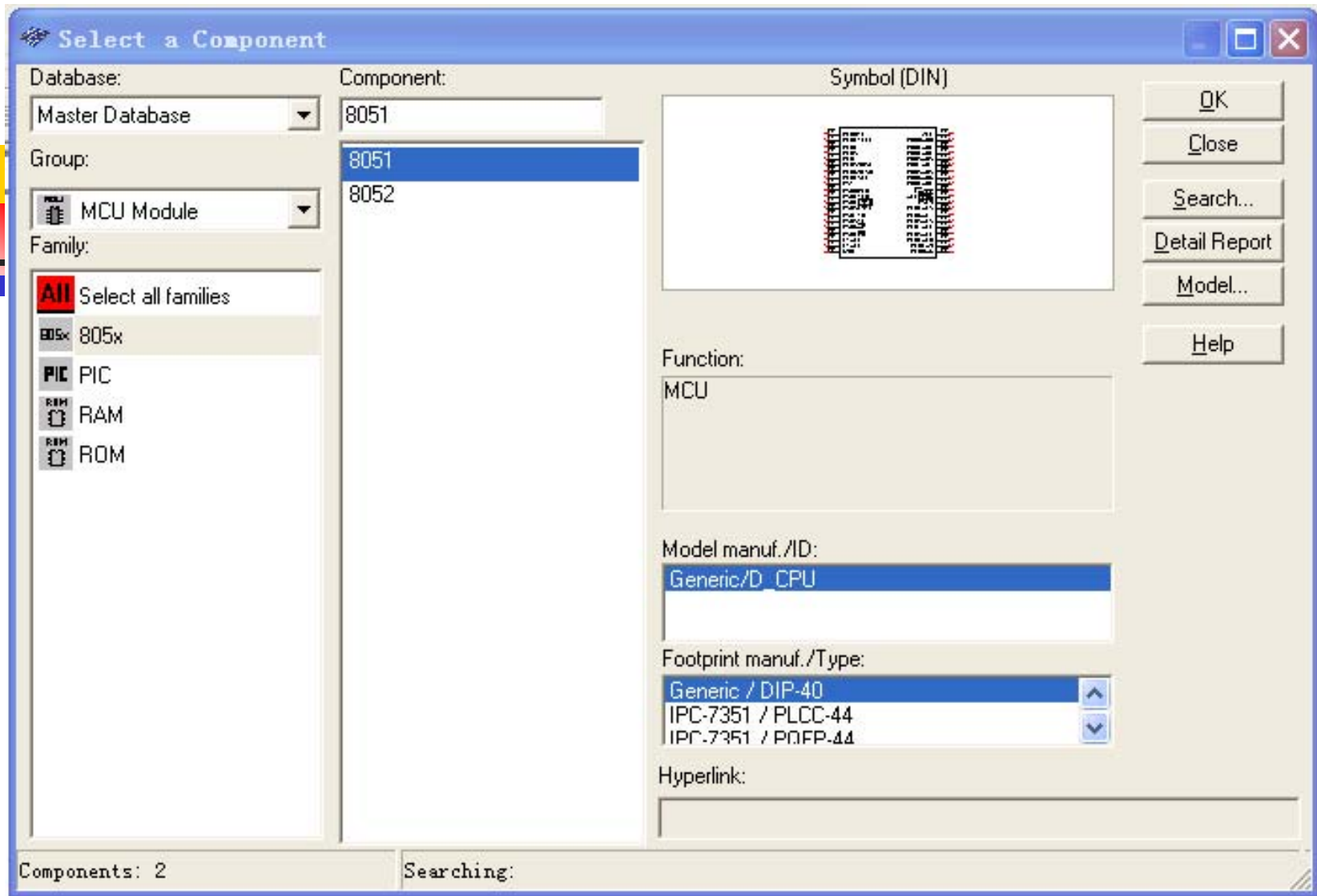
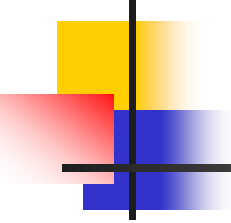


图13.1.2 MCU Module（微控制器模块）选择窗口

- 
- 双击PIC16C65A图标，出现图13.1.3所示微控制器对话框，其操作请参考第1章“1.4.1 元器件的操作”。在电路工作区建立一个单片机应用电路，其操作请参考第1章“1.4电路创建的基础”。



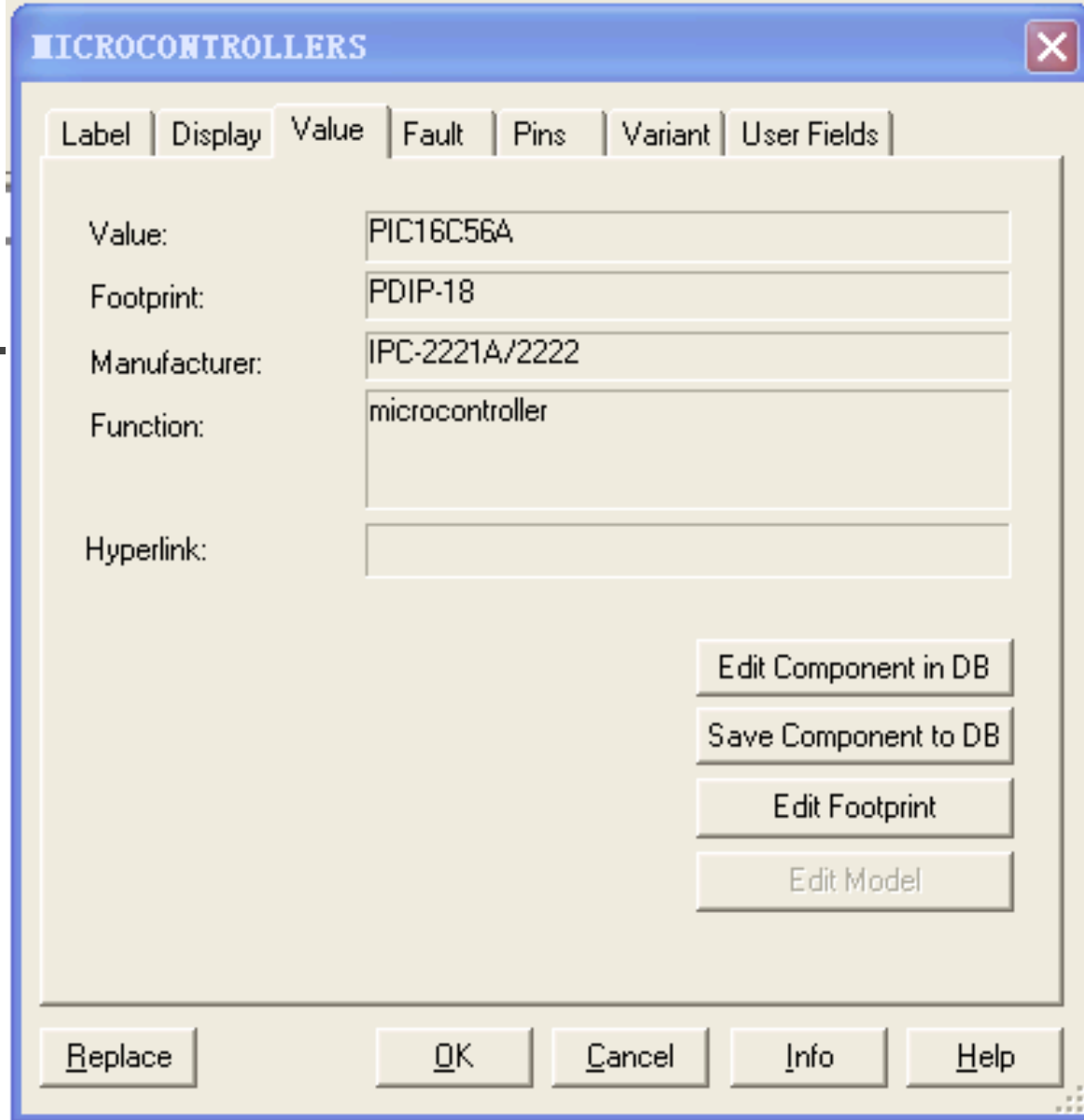


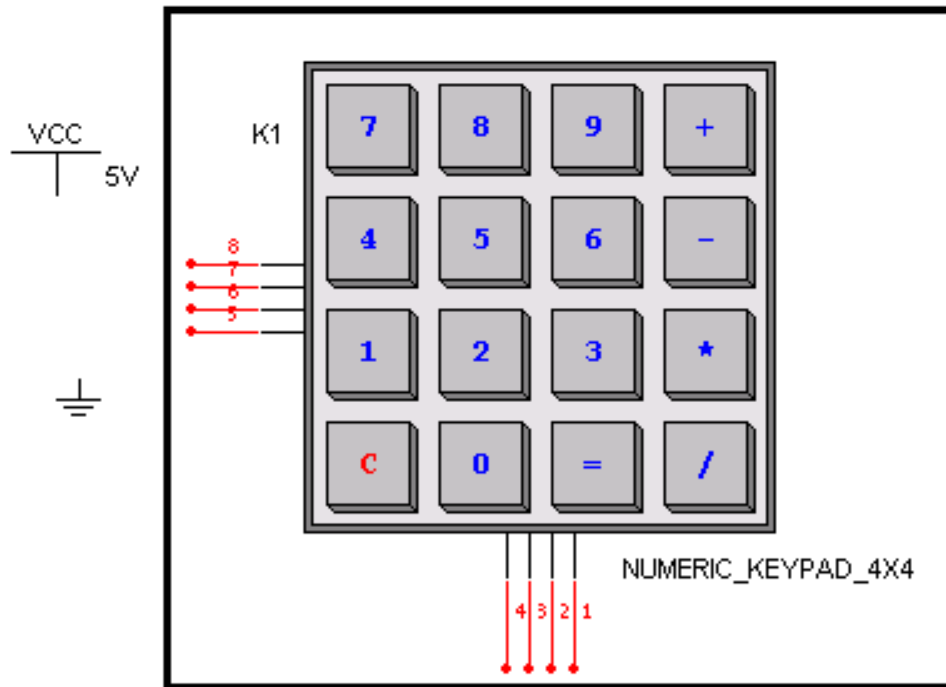
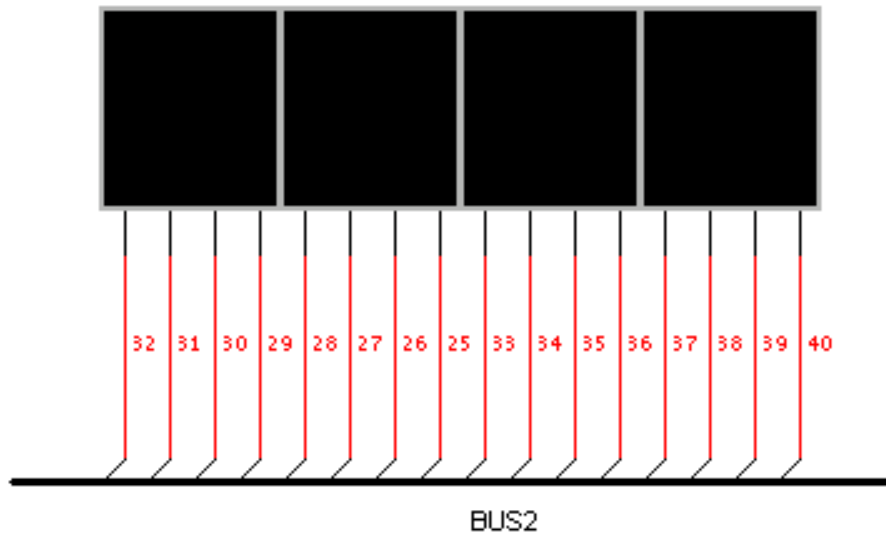
图13.1.3 微控制器对话框



## 13.2 单片机应用电路实例

---

- **13.2.1 简易计算器 (Calculator)**
- 1. 简易计算器电路创建
- 采用“第1章1.4电路创建的基础”中所介绍的方法，在电路工作区建立一个简易计算器电路如图13.2.1所示。





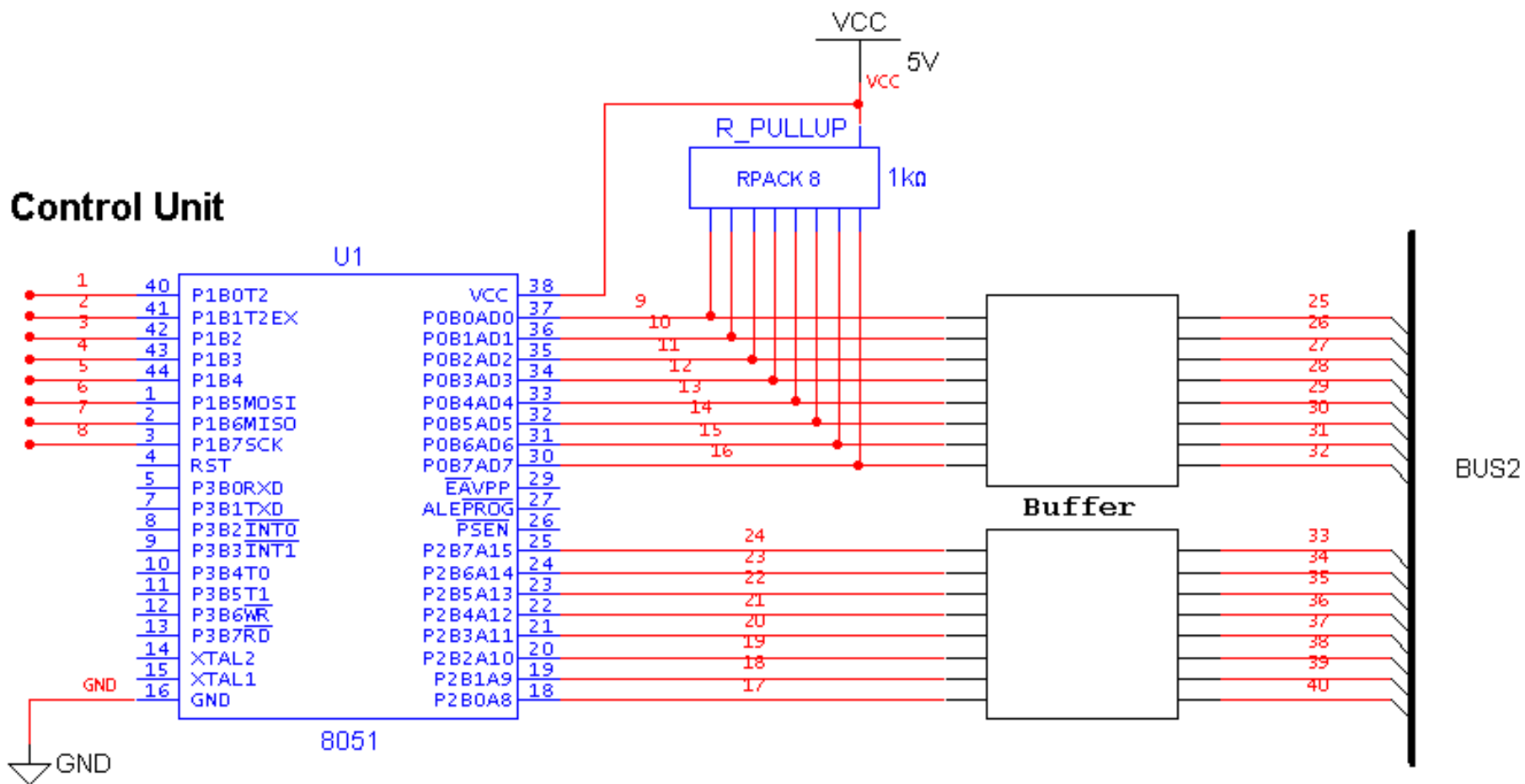
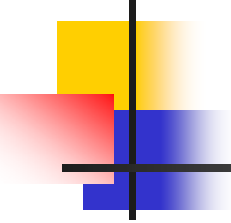


图13. 2. 1简易计算器电路

- 
- 2.程序编写与汇编
  - 单击MCU菜单可选择“MCU Code Manager（微控制器代码管理器）”“Debug View（调试观察窗口）”“Memory View（存储器观察窗口）”“Build（构造）”功能。
  - 单击MCU → MCU 8051U1 → MCU Code Manager，进入图13.2.2所示微控制器代码管理器对话框，可以进行程序的编辑。

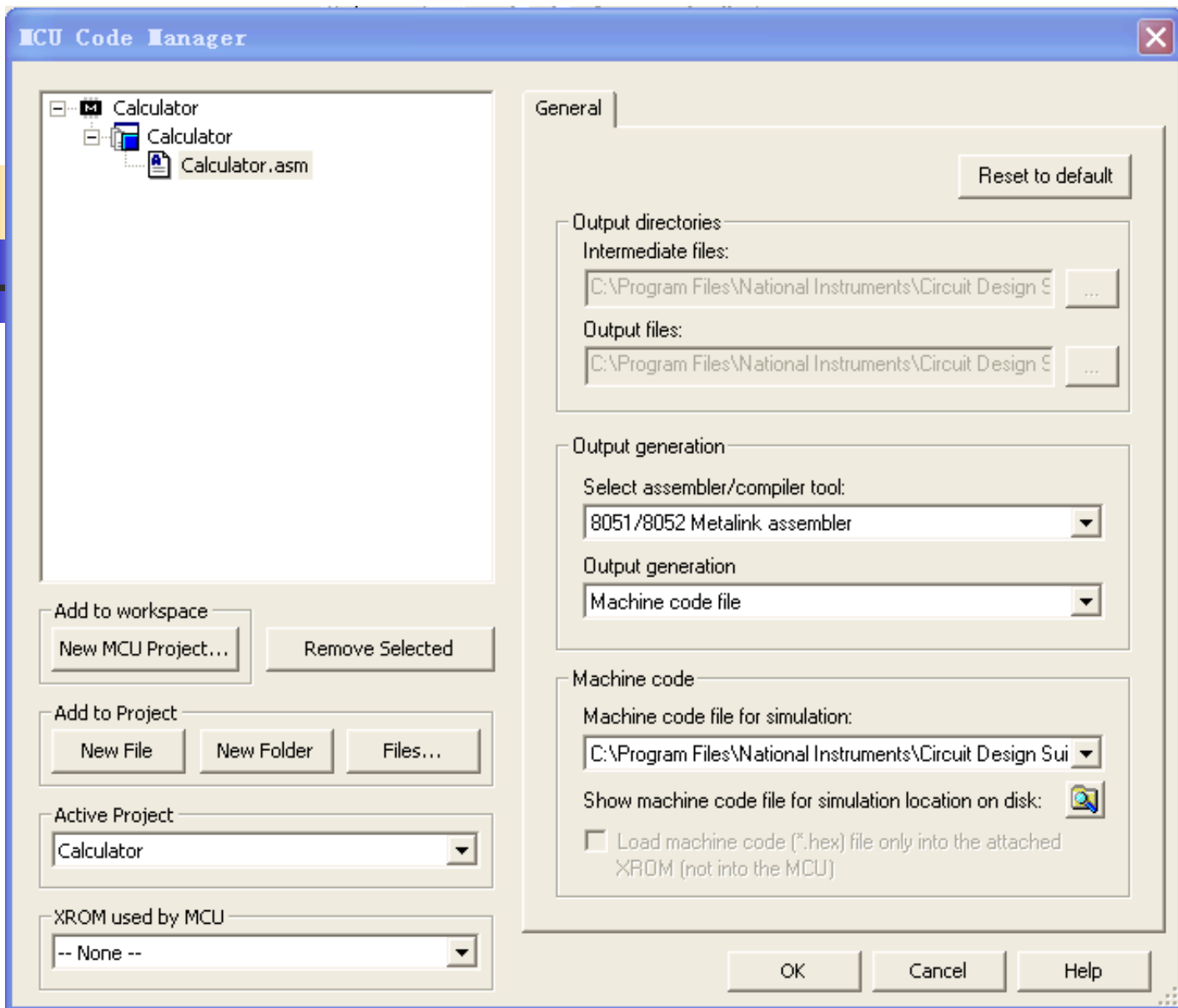
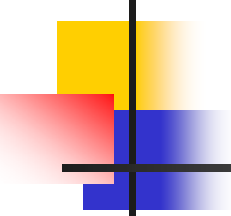


图13.2.2 微控制器代码管理器对话框

- 
- 单击MCU →MCU 8051U1→ Debug View ， 进入图13.2.3所示调试对话框，窗口的上方显示简易计算器（Calculator）的程序，在窗口下方的编译信息栏显示相关编译信息，程序汇编是否正确将给出提示信息。如果程序有错误，点击出错提示信息，光标会自动跳到程序出错处，检查错误并修改，直到编译通过。源程序编译通过后，单击启动仿真按钮或者单击 Simulate→Run，则可进行加载仿真。注：详细的源程序请参考NI Multisim 10评估版中Samples→MCU Sample Circuit文件夹中的Calculator.asm（C:\Program Files\National Instruments\Circuit Design Suite 10.0\samples\MCU Sample Circuits\805x Samples\Calculator）。

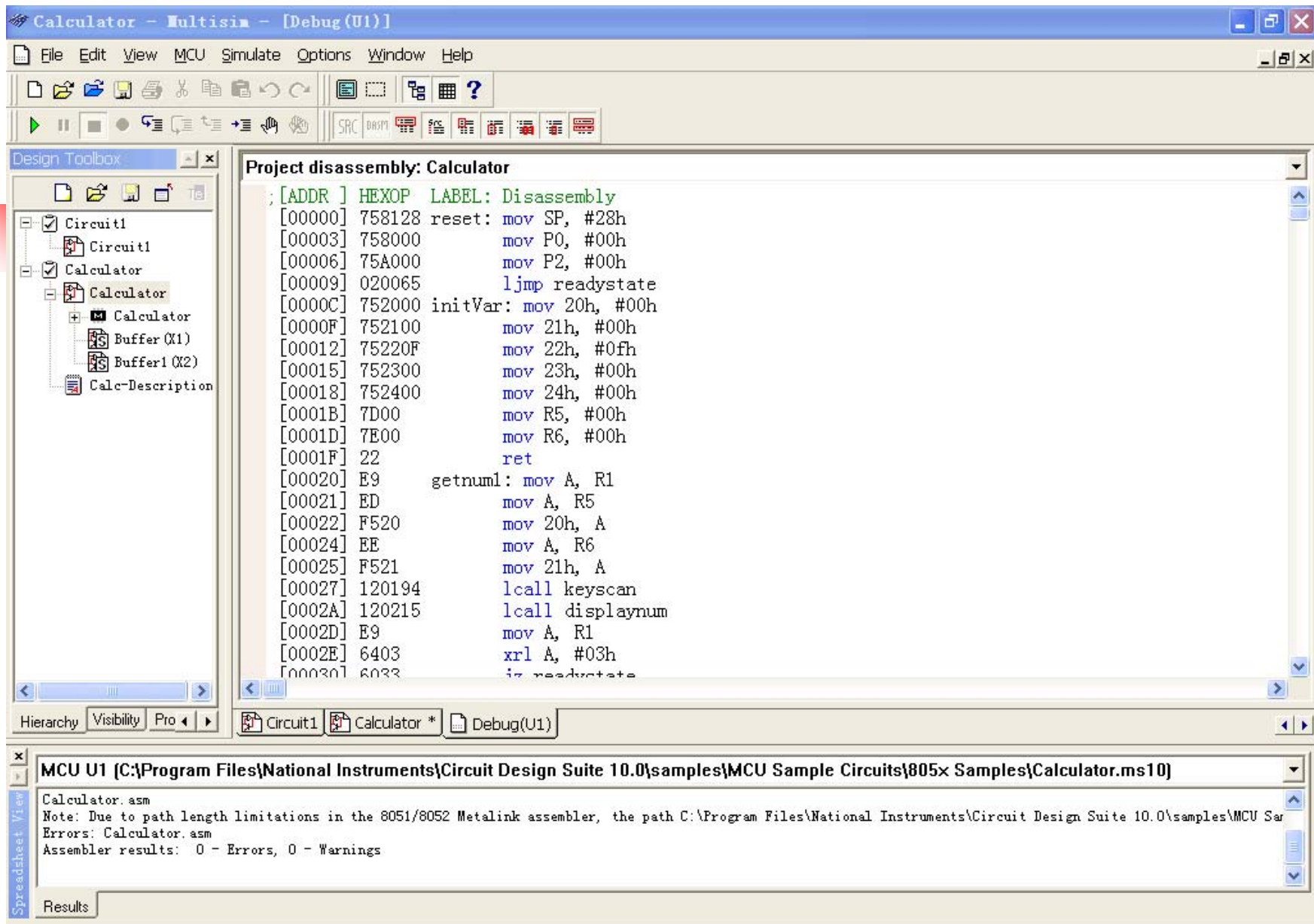


图13.2.3 Calculator调试对话框

- 调试时，单击MCU→ Debug View Format，进入图13.2.4所示调试格式选择菜单，可选择调试相关格式。

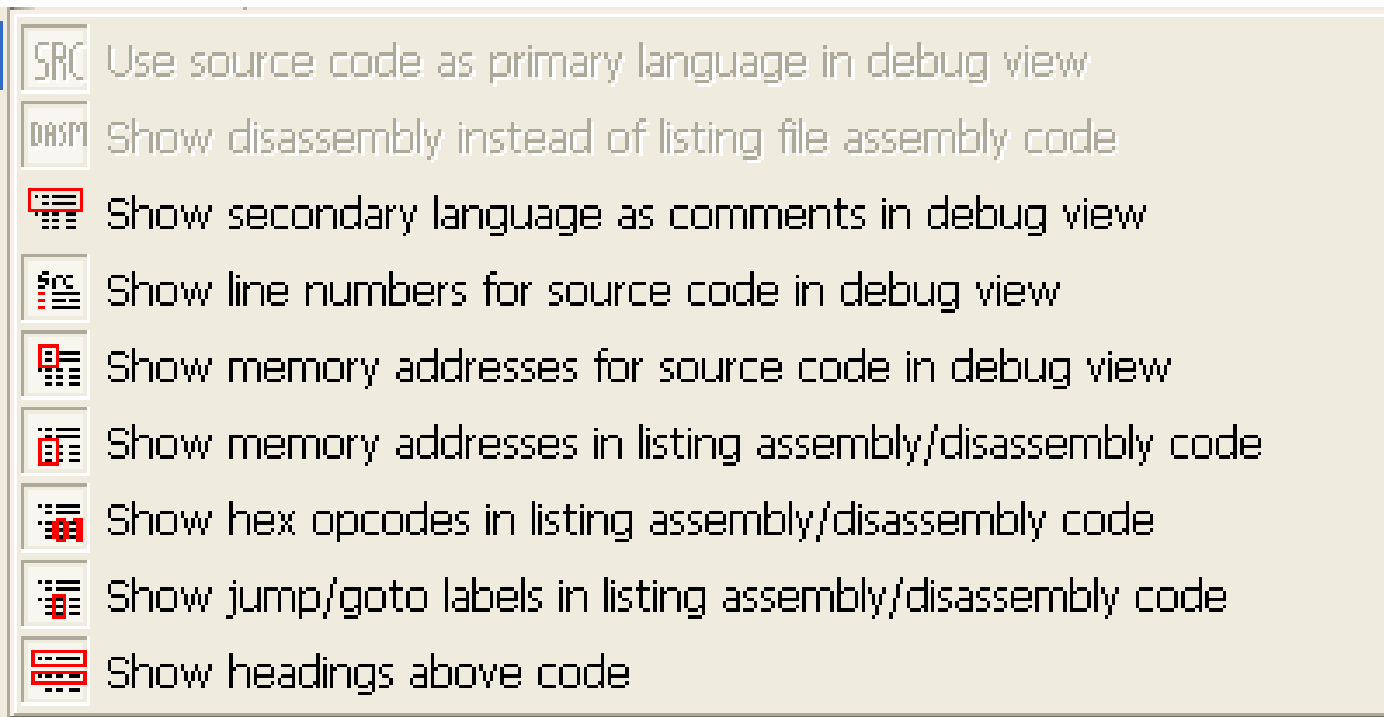
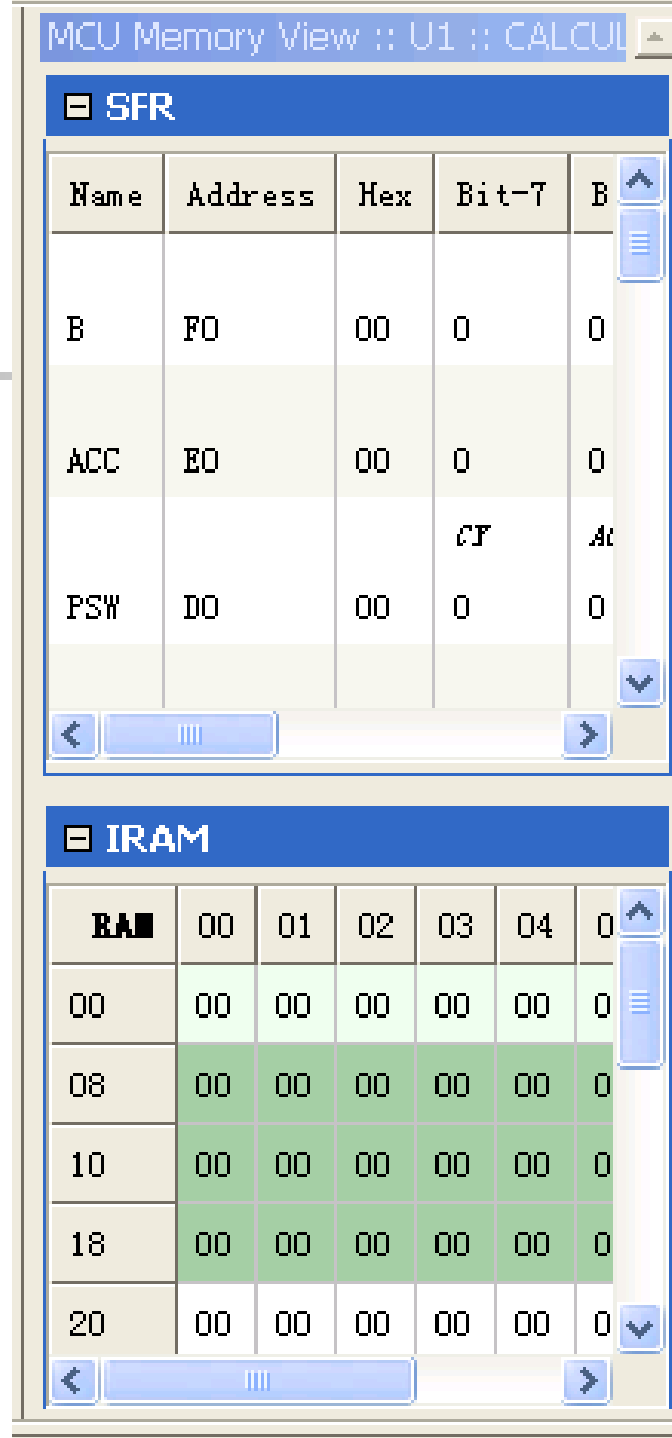


图13.2.4 调试格式选择菜单

- 单击MCU → MCU 8051U1 → Memory View, 可以观察到存储器内部数据, 如图 13.2.5所示。





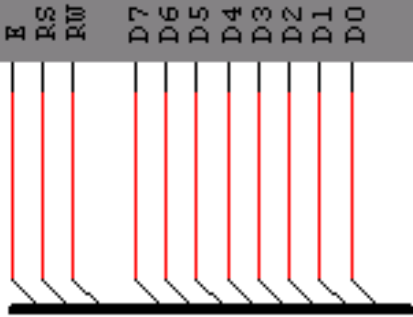
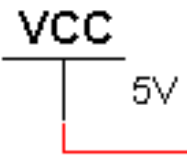
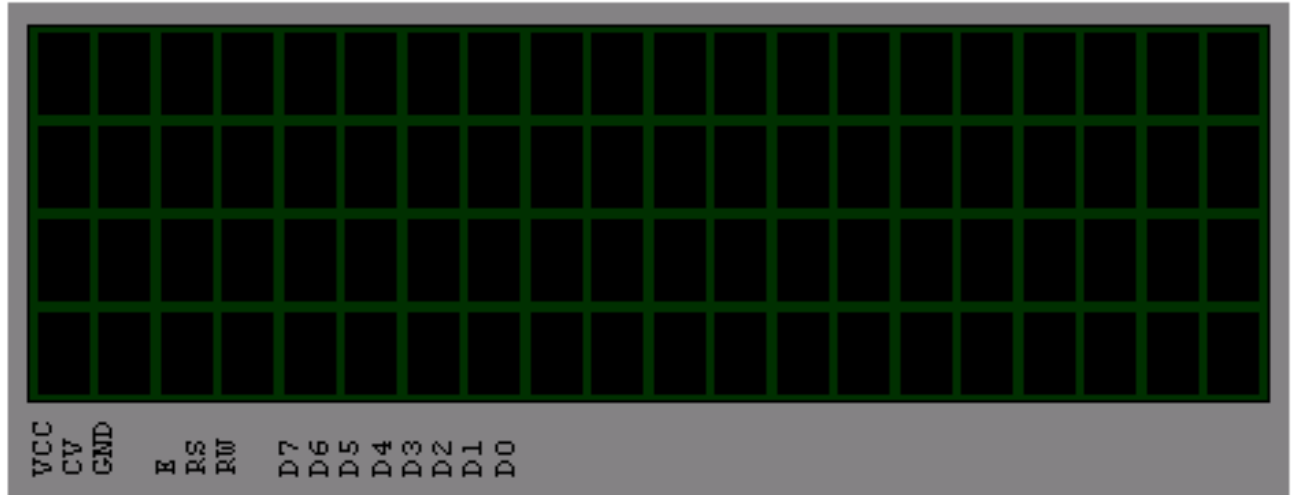
## 13.2.2 LCD显示器控制电路

---

- 1. 创建LCD显示器控制电路
- 在电路工作区建立一个LCD显示器控制电路如图13.2.6所示。



U2



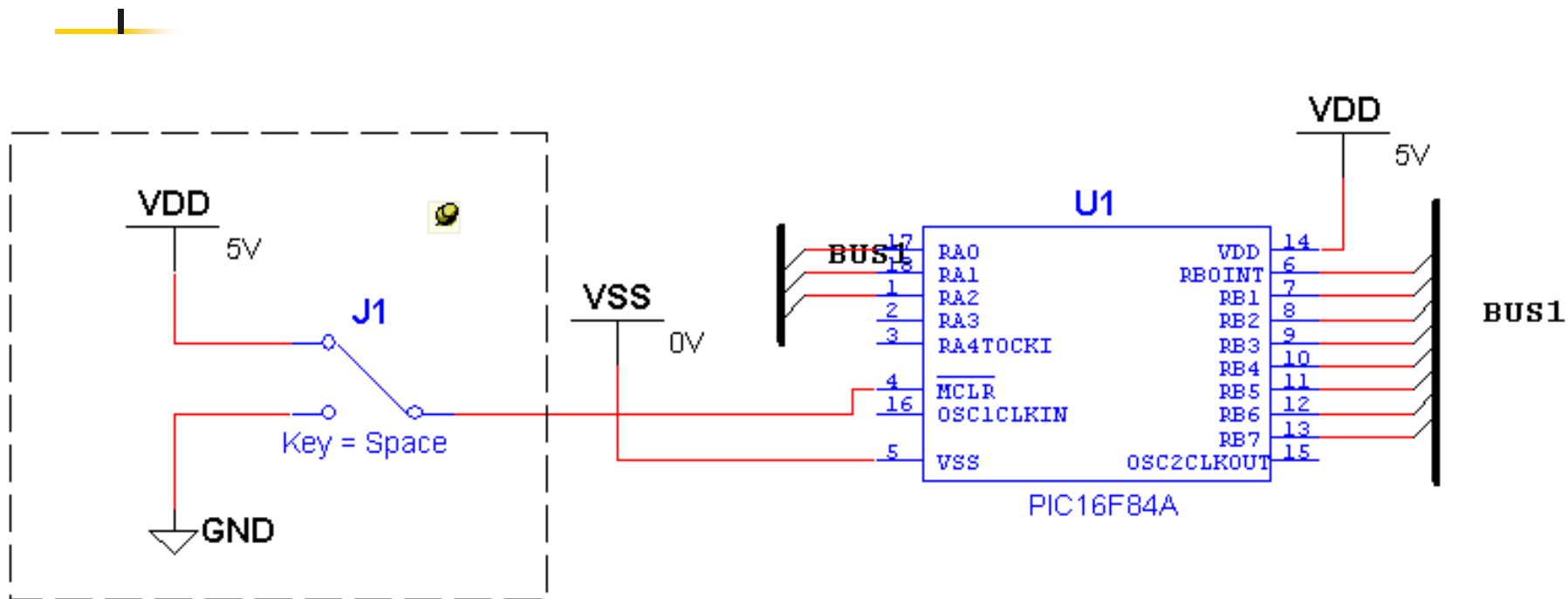
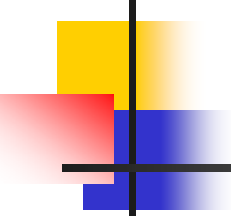
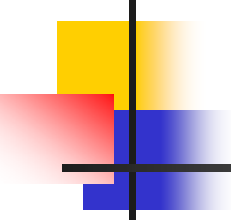


图13.2.6 LCD显示器控制电路



## ■ 2.程序编写与汇编

- 单击MCU →MCU PIC16F84A U1→ MCU Code Manager，进入微控制器代码管理器对话框，可以进行程序的编辑，与图13.2.2类似。
- 单击MCU →MCU PIC16F84A U1→ Debug View ，进入图13.2.7所示调试对话框，窗口的上方显示LCD显示器控制电路（LCD\_Display）的程序，在窗口下方的编译信息栏显示相关编译信息，程序汇编是否正确将给出提示信息。如果程序有错误，点击出错提示信息，光标会自动跳到程序出错处，检查错误并修改，直到编译通过。源程序编译通过后，单击启动仿真按钮或者单击Simulate→Run，则可进行加载仿真。注：详细的源程序请参考NI Multisim 10评估版中Samples →MCU Sample Circuit文件夹中的LCD\_Display.asm（C:\Program Files\National Instruments\Circuit Design Suite 10.0\samples\MCU Sample Circuits\PIC Samples\LCD\_Display）。

- 
- 
- 调试时，单击MCU→ Debug View Format，进入图13.2.4所示调试格式选择菜单，可选择调试相关格式。
  - 单击MCU →MCU PIC16F84A U1→ Memory View，可以观察到存储器内部数据，如图13.2.8所示。

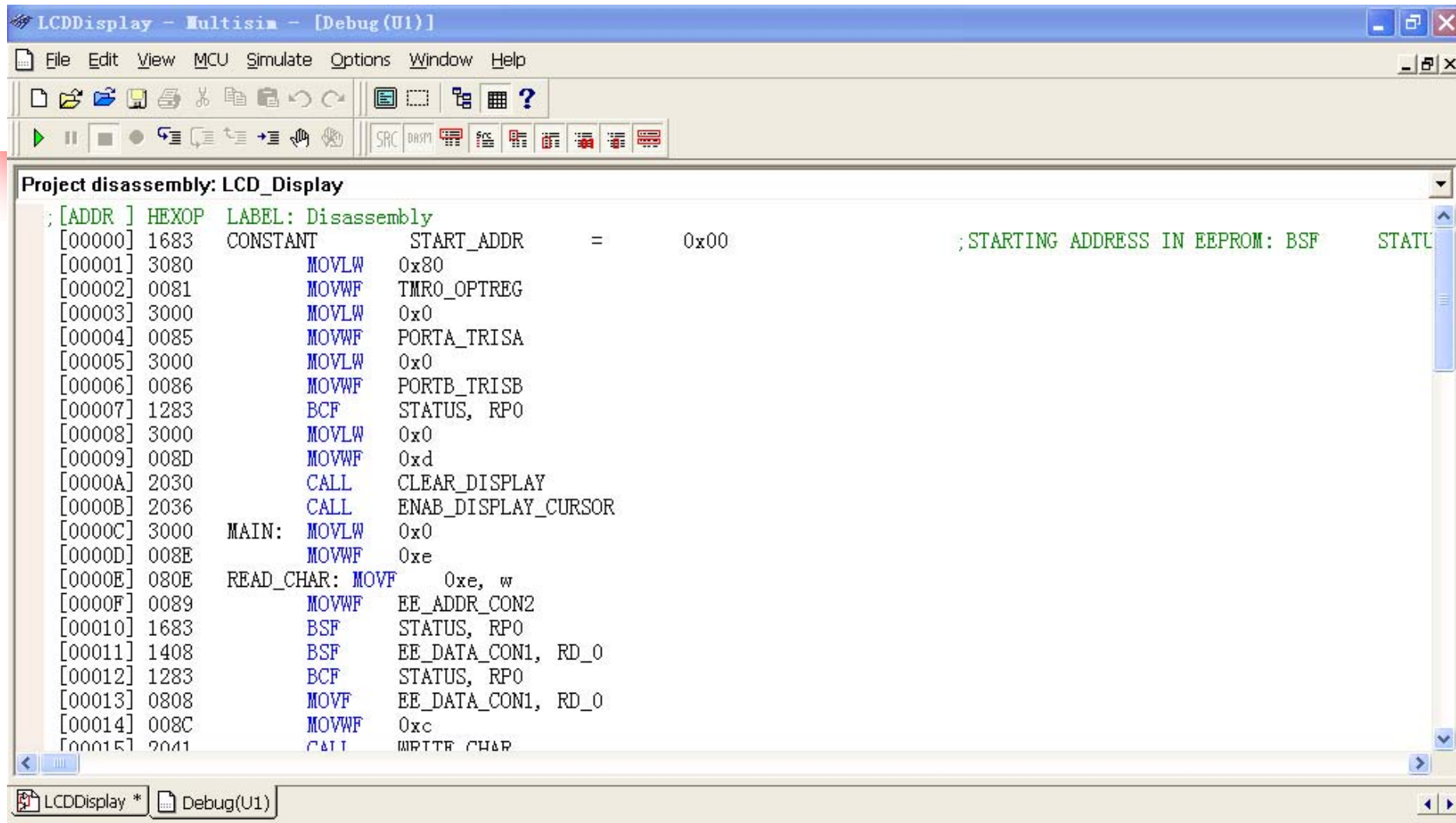


图13.2.7 LCD\_Display调试对话框

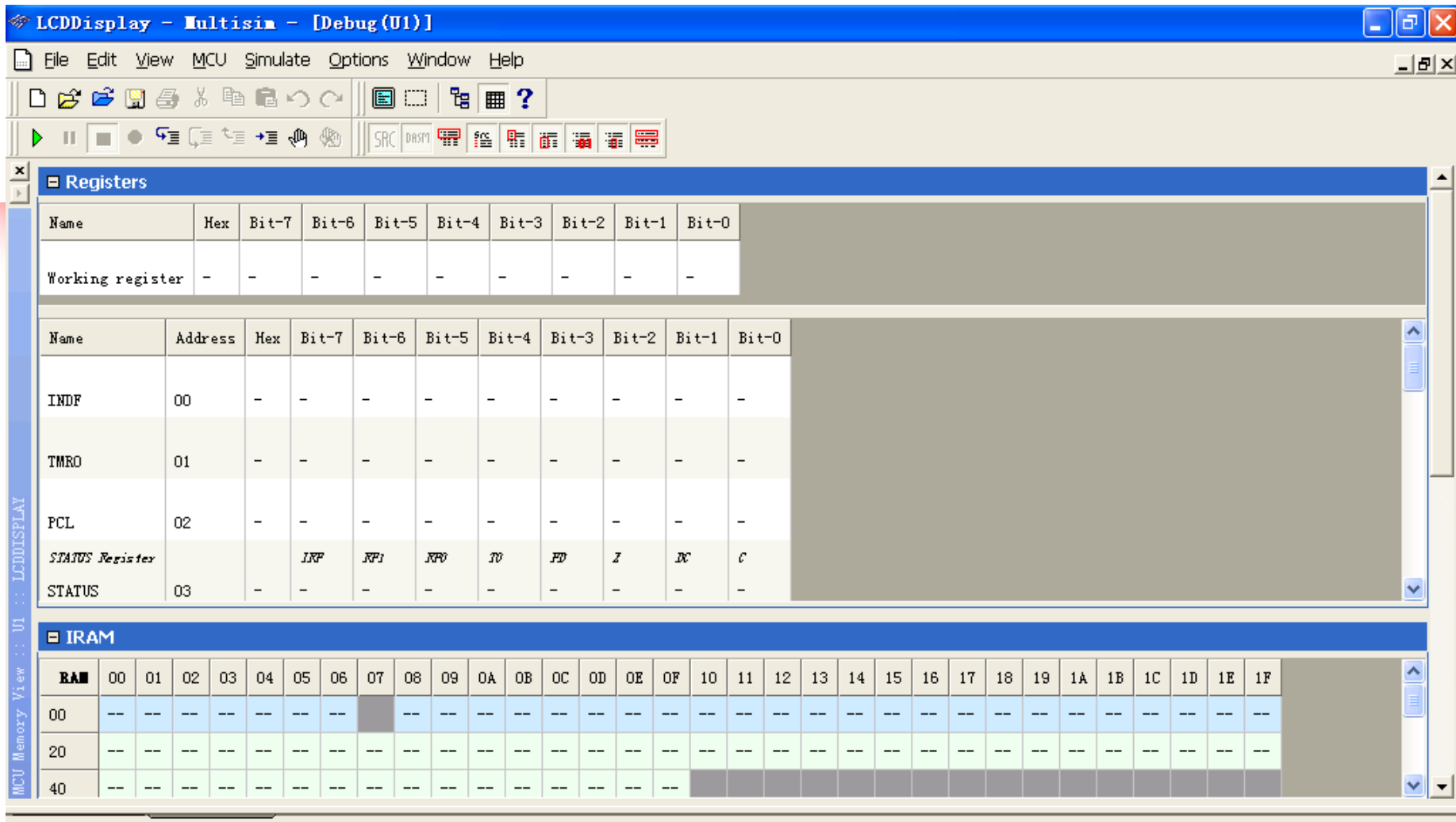


图13.2.8存储器内部数据



## 13.2.3 交通灯管理控制器

---

- 1. 创建交通灯管理控制器
- 在电路工作区建立一个交通灯管理控制器电路如图13.2.9所示。

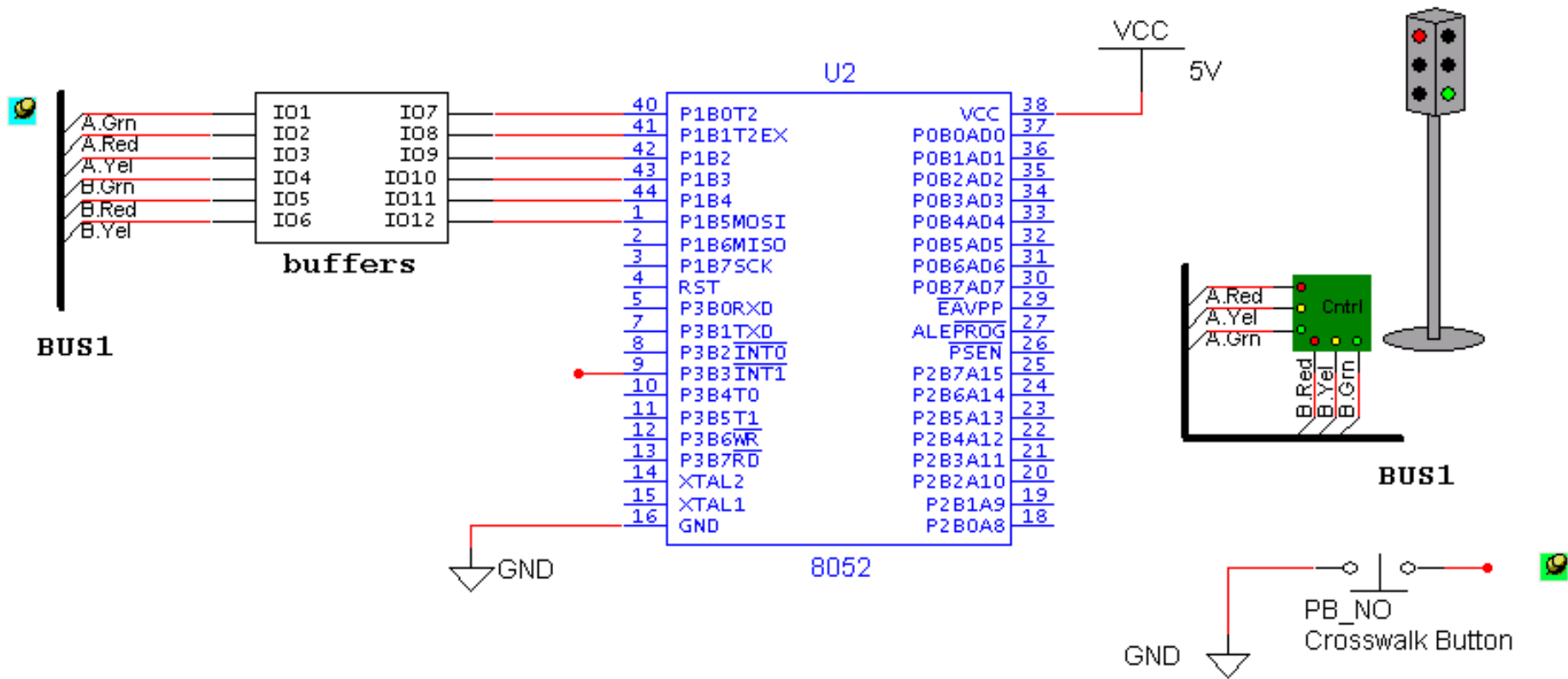


图13.2.9 交通灯管理控制器电路





---

## ■ 2.程序编写与汇编

- 单击MCU菜单可选择“MCU Code Manager（微控制器代码管理器）”“Debug View（调试观察窗口）”“Memory View（存储器观察窗口）”“Build（构造）”功能。
- 单击MCU → MCU 8052 U2 → MCU Code Manager，进入微控制器代码管理器对话框，可以进行程序的编辑，与图13.2.2类似。

- 
- 单击MCU → MCU 8052 U2 → Debug View，进入图13.2.10所示调试对话框，窗口的上方显示交通灯管理控制器电路（TrafficLights）的程序，在窗口下方的编译信息栏显示相关编译信息，程序汇编是否正确将给出提示信息。如果程序有错误，点击出错提示信息，光标会自动跳到程序出错处，检查错误并修改，直到编译通过。源程序编译通过后，单击启动仿真按钮或者单击Simulate → Run，则可进行加载仿真。注：详细的源程序请参考NI Multisim 10评估版中Samples → MCU Sample Circuit文件夹中的TrafficLights.asm（C:\Program Files\National Instruments\Circuit Design Suite 10.0\samples\MCU Sample Circuits\805x Samples\TrafficLights）。
  - 调试时，单击MCU → Debug View Format，进入图13.2.4所示调试格式选择菜单，可选择调试相关格式。
  - 单击MCU → 8052 U2 → Memory View，可以观察到存储器内部数据。

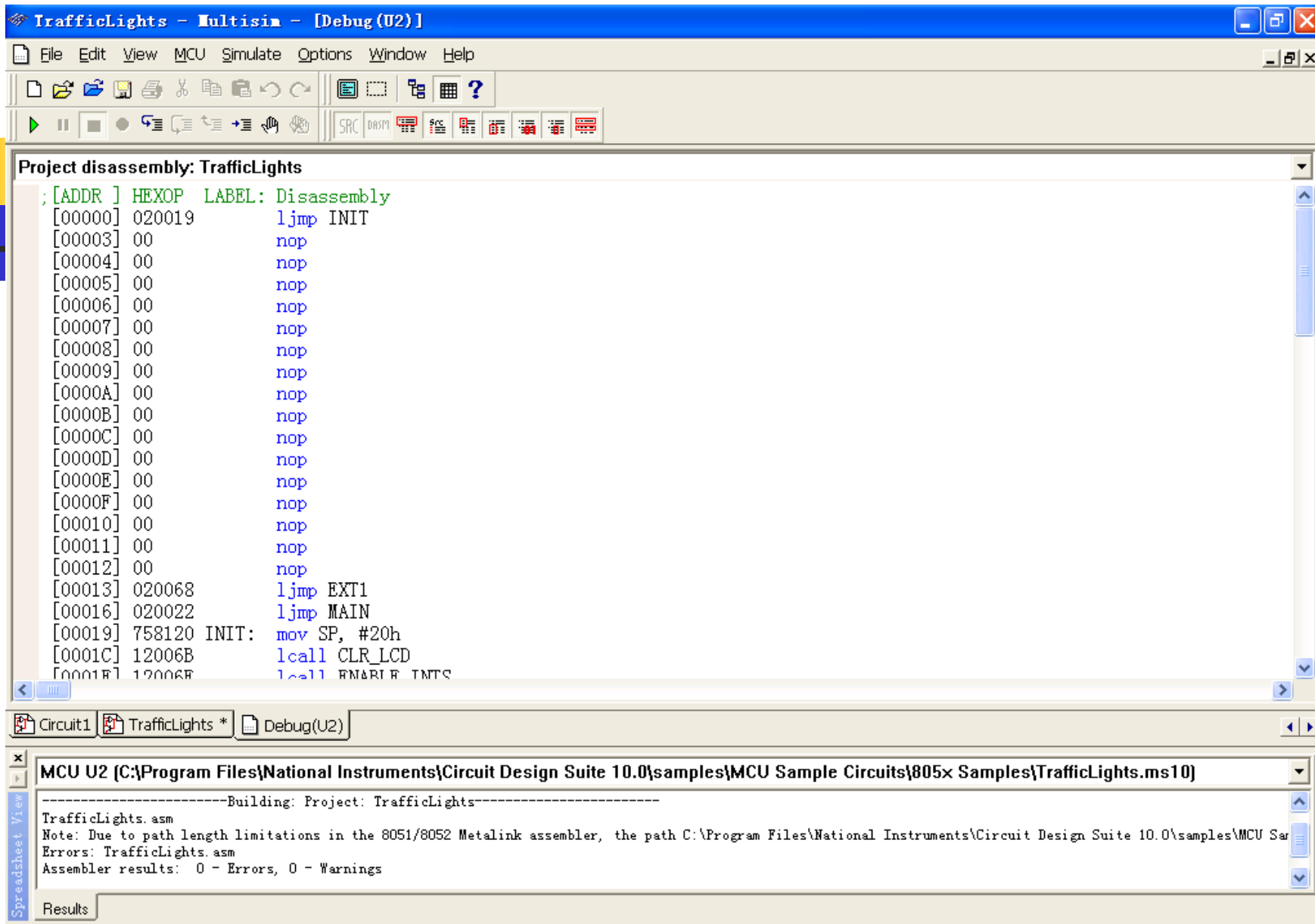


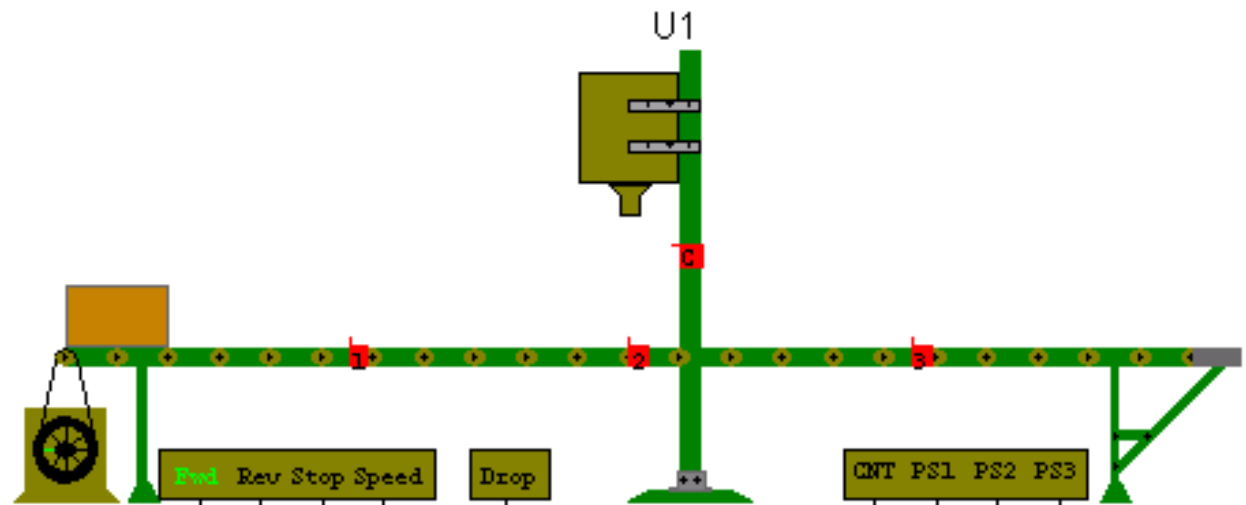
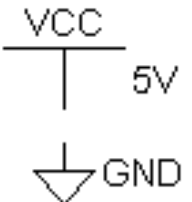
图13.2.10 TrafficLights调试对话框



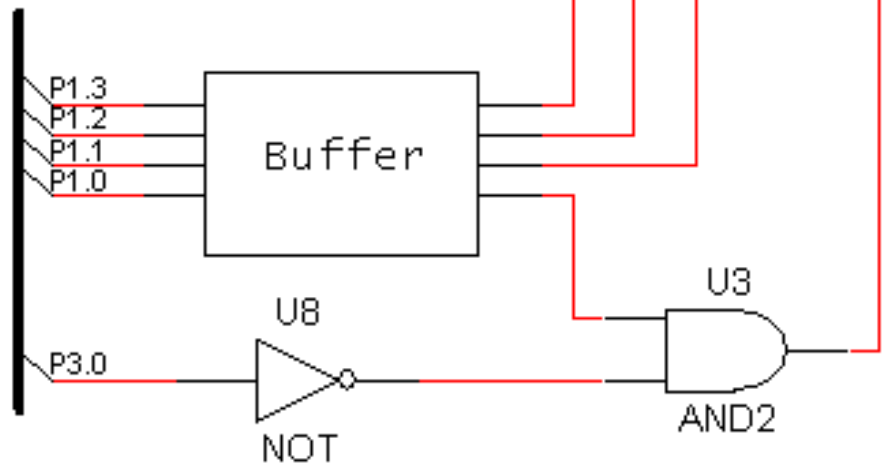
## 13.2.4 传送带控制器

---

- 1. 创建传送带控制器
- 在电路工作区建立一个传送带控制器电路如图13.2.11所示。



**BUS1**



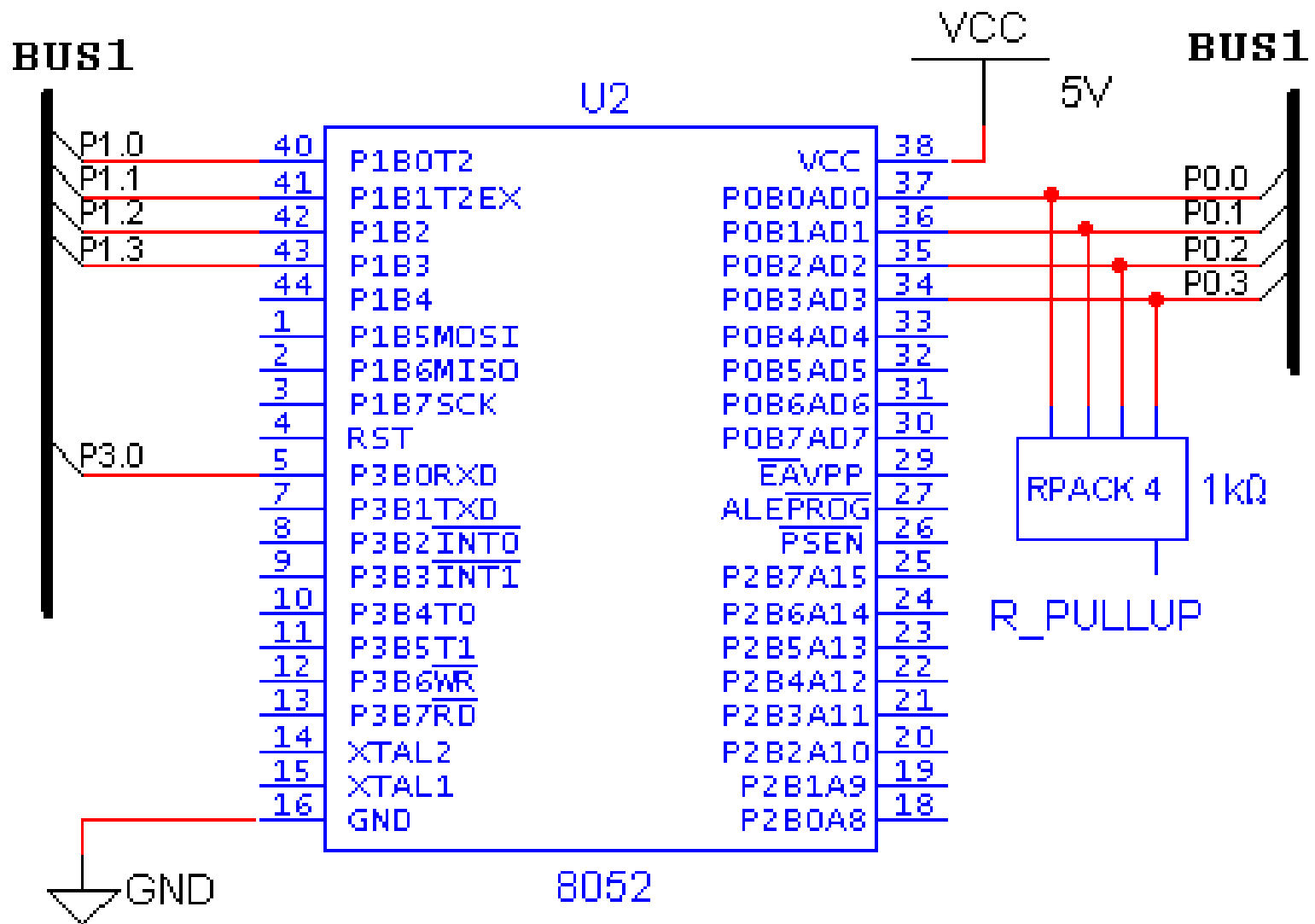
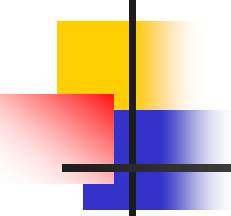


图13.2.11 传送带控制器电路



## ■ 2.程序编写与汇编

- 单击MCU → MCU 8052 U2 → MCU Code Manager，进入微控制器代码管理器对话框，可以进行程序的编辑，与图13.2.2类似。
- 单击MCU → MCU 8052 U2 → Debug View，进入图13.2.12所示调试对话框，窗口的上方显示传送带控制器电路（ConveyorBelt）的程序，在窗口下方的编译信息栏显示相关编译信息，程序汇编是否正确将给出提示信息。如果程序有错误，点击出错提示信息，光标会自动跳到程序出错处，检查错误并修改，直到编译通过。源程序编译通过后，单击启动仿真按钮或者单击Simulate → Run，则可进行加载仿真。注：详细的源程序请参考NI Multisim 10评估版中Samples → MCU Sample Circuit文件夹中的ConveyorBelt.asm（C:\Program Files\National Instruments\Circuit Design Suite 10.0\samples\MCU Sample Circuits\805x Samples\ConveyorBelt）。
- 调试时，单击MCU → Debug View Format，进入图13.2.4所示调试格式选择菜单，可选择调试相关格式。
- 单击MCU → 8052 U2 → Memory View，可以观察到存储器内部数据。

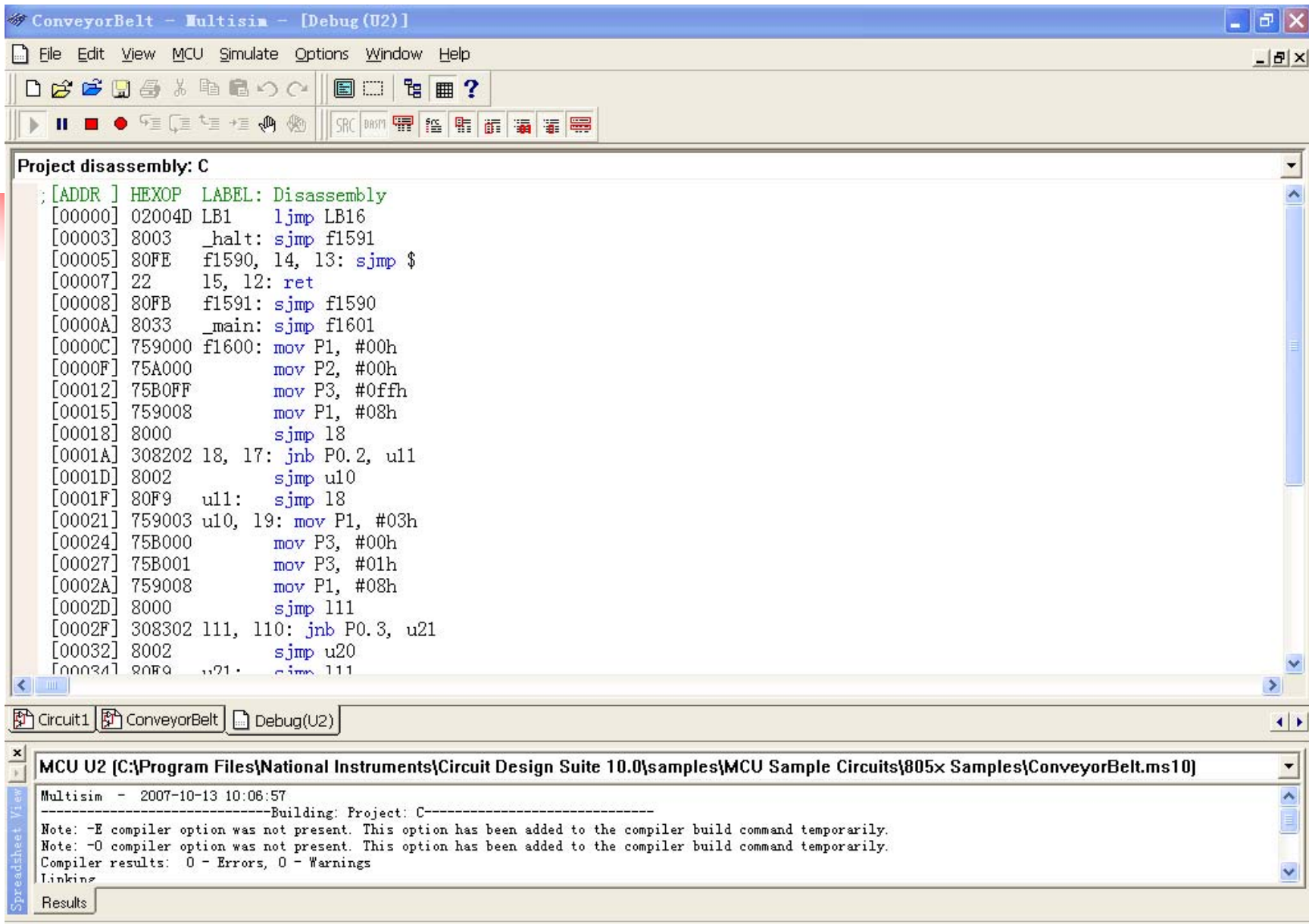


图13.2.12 ConveyorBelt调试对话框





# 本章小结

---

- 本章介绍了单片机仿真平台和一些单片机应用电路例。主要内容有：
  - (1) Multisim 10单片机仿真平台的使用。
  - (2) 简易计算器 (Calculator) 电路设计和程序编译，微控制器采用8051。
  - (3) LCD显示器控制电路设计和程序编译，微控制器采用PIC16F84A。
  - (4) 交通灯管理控制器电路设计和程序编译，微控制器采用8052。
  - (5) 传送带控制器电路设计和程序编译，微控制器采用8052。
- 掌握单片机仿真平台的使用和单片机应用电路的仿真设计与分析方法，是本章的重点。注意单片机应用系统要求，单片机型号的选择，电路设计、电路功能的模块化、程序编写和编译等设计技巧。解决一个实际问题，可以采用不同的单片机应用电路形式。