



电子·教育

电子技术仿真 实验教程

朱力恒 主编 李乃夫 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电子技术仿真实验教程

朱力恒 主编
李乃夫 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是为各类职业学校电子技术专业电路仿真所编写的教材。本书共分为九章,第1章 PROTEL 99SE 仿真软件的使用,第2章 MULTISIM2001 仿真软件的使用,第3章 电工基础仿真实验,第4章 低频电子线路仿真实验,第5章 高频电子线路仿真实验,第6章 脉冲数字电路仿真实验,第7章 电视机仿真实验,第8章 音响技术仿真实验,第9章 电子测量仿真实验。本书通过选取电子技术几个主干课程的仿真实验辅助理论课程的教学,既可作为电子技术专业的实验与课程设计教材,也可以作为电子工程技术人员电路设计参考书籍。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术仿真实验教程/朱力恒主编. —北京:电子工业出版社,2003.7
ISBN 7-5053-8861-4

I. 电… II. 朱… III. 电子电路—计算机仿真 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 054016 号

责任编辑:陈晓明 特约编辑:高文勇

印 刷:北京彩艺印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1 092 1/16 印张:17 字数:435 千字

版 次:2003 年 7 月第 1 版 2003 年 7 月第 1 次印刷

印 数:8 000 册 定价:22.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010)68279077

前 言

本书是各级职业学校电类课程教学的配套用书,既能以计算机辅助教学的形式融会到各相关课程的教学上,又可作为一个专门的课程单独开设。它还是电子技术从业人员及自学者们的一本很有价值的参考书籍。

作为一本电路实验仿真教材,本书选用的软件是 EDA (电子技术自动化) 软件中最具代表性、最流行的 PROTEL 99 SE 和 MULTISIM 2001, 在项目选材上贯穿了电子技术由基础到专业的各门主干课程的相关实验,内容编排着眼于对基本理论的概括、验证,以及基本技能的训练,以强化应用为重点,最突出的优点是:完整、实用、直观、方便、安全。它把实验过程涉及到的所有电路、仪器仪表以及正确结论都展现在读者面前,学习过程就像在实验室中进行,对理论的验证简明而严谨,电路参数调整方便,还可直接显示和打印输出结果。最关键的是,在给读者提供结论的同时绝不束缚你的想象,读者的自我学习、扩展很容易实现。

本书由广州市无线电学校朱力恒、邢福堂、袁伯钊、吴雯、何永杏老师编写,其中朱力恒任主编并编写了第 1、2、3、7 章;邢福堂编写了第 6、8 章;吴雯编写第 4 章;何永杏编写第 5 章;袁伯钊编写第 9 章。广州市轻工业学校李乃夫高级讲师为本书主审,并且得到广州冶金研究所张同苏高级工程师的大力支持。

由于课程新颖,编者水平有限,书中难免有误,恳请行家指正。

编者

2003 年 4 月于广州

目 录

电路设计仿真概述	(1)
第 1 章 PROTEL 99SE 电路设计仿真	(3)
1.1 Sim 99SE 仿真库元器件	(3)
1.1.1 仿真库一览表	(3)
1.1.2 参数默认值及表示法	(4)
1.2 无源器件	(4)
1.2.1 电阻	(4)
1.2.2 电容	(4)
1.2.3 电感	(5)
1.2.4 保险丝	(6)
1.2.5 变压器	(6)
1.2.6 继电器	(6)
1.2.7 晶体振荡器	(6)
1.2.8 传输线	(7)
1.2.9 可控开关	(7)
1.3 有源器件	(8)
1.3.1 晶体二极管	(8)
1.3.2 晶体三极管 (双极型)	(8)
1.3.3 结型场效应管	(9)
1.3.4 MOS 场效应管	(9)
1.3.5 金属半导体场效应管	(9)
1.3.6 可控硅	(9)
1.4 数学模型器件	(10)
1.5 信号源器件	(10)
1.5.1 直流信号源	(10)
1.5.2 正弦交流信号源	(11)
1.5.3 脉冲信号源	(12)
1.5.4 分段信号源	(12)
1.5.5 调频信号源	(13)
1.6 各种受控源器件	(14)
1.6.1 线性受控源	(14)
1.6.2 非线性受控源	(15)
1.6.3 频压转换器	(16)
1.6.4 压频转换器 (压控振荡器)	(16)

1.7	设置仿真初始条件	(17)
1.8	仿真步骤	(17)
1.8.1	建立仿真新文件	(17)
1.8.2	绘制仿真电路图	(18)
1.8.3	设置仿真方式与参数	(19)
1.8.4	生成仿真网络表	(20)
1.8.5	运行仿真	(20)
1.8.6	观察与分析仿真结果	(20)
1.9	仿真方式及运用	(22)
1.9.1	静态工作点分析 (Operating Point Analyses)	(22)
1.9.2	瞬态特性分析 (Transient) 与傅里叶分析 (Fourier)	(24)
1.9.3	交流小信号分析 (AC Small Signal)	(25)
1.9.4	参数扫描分析 (Parameter Sweep)	(26)
1.9.5	温度扫描分析 (Temperature Sweep)	(28)
1.9.6	传输函数分析 (Transfer Function)	(29)
1.9.7	直流扫描分析 (DC Sweep)	(31)
1.9.8	阻抗特性分析 (Impedance Plot)	(33)
1.9.9	噪声分析 (Noise)	(35)
1.9.10	蒙特卡罗分析 (Monte Carlo)	(36)
1.10	高级选项设置 (Advanced...)	(39)
	思考题	(40)
第2章	MULTISIM2001 仿真软件的使用	(41)
2.1	MULTISIM2001 的工作界面	(41)
2.2	MULTISIM2001 仿真库元器件的提取	(44)
2.2.1	各种信号源库 	(44)
2.2.2	基本元件库 	(50)
2.2.3	晶体二极管库 	(50)
2.2.4	晶体三极管库 	(51)
2.2.5	运放库 	(51)
2.2.6	TTL 器件库 	(51)
2.2.7	CMOS 器件库 	(51)
2.2.8	单元逻辑器件库及可编程逻辑器件库 	(51)
2.2.9	数字模拟混合库 	(51)
2.2.10	指示元件库 	(52)
2.2.11	杂散元器件库 	(52)
2.2.12	数学控制模型库 	(53)
2.2.13	射频元器件库 	(54)
2.2.14	机电元件库 	(55)
2.3	MULTISIM2001 仿真仪器库的使用	(55)
2.3.1	数字万用表 	(55)

2.3.2	信号发生器 	(55)
2.3.3	功率表 	(55)
2.3.4	双踪示波器	(56)
2.3.5	波特图仪	(57)
2.3.6	字信号发生器 	(57)
2.3.7	逻辑分析仪 	(58)
2.3.8	逻辑转换仪 	(59)
2.3.9	失真度分析仪 	(60)
2.3.10	频谱分析仪 	(61)
2.3.11	网络分析仪 	(61)
2.4	仪表仿真步骤	(61)
2.4.1	编辑仿真电路图	(61)
2.4.2	运行仿真以及观察与分析仪表仿真结果	(64)
2.5	分析方法仿真步骤	(64)
2.5.1	设置仿真方式与参数	(64)
2.5.2	运行仿真及观察与分析波形仿真结果	(64)
2.6	MUTISIM2001 仿真方式及运用	(64)
2.6.1	静态工作点分析	(64)
2.6.2	交流分析	(67)
2.6.3	瞬态特性分析	(67)
2.6.4	傅里叶分析	(69)
2.6.5	噪声分析	(70)
2.6.6	失真分析	(70)
2.6.7	直流扫描分析	(71)
2.6.8	灵敏度分析	(72)
2.6.9	参数扫描分析	(72)
2.6.10	温度扫描分析	(73)
2.6.11	极点-零点分析	(74)
2.6.12	传输函数分析	(74)
2.6.13	最坏情况分析	(75)
2.6.14	蒙特卡罗分析	(77)
2.6.15	布线宽度分析	(77)
2.6.16	批处理分析	(77)
2.6.17	用户自定义分析	(78)
2.6.18	噪声指数分析	(78)
	思考题	(79)
第3章 电工基础仿真实验		(80)
3.1	各种指示器电路仿真实验	(80)
3.1.1	实验目的	(80)
3.1.2	实验原理	(80)

3.1.3	实验电路 (Multisim)	(80)
3.1.4	实验步骤	(81)
3.2	直流电路欧姆定律仿真实验	(82)
3.3	复杂直流电路仿真实验	(84)
3.4	正弦交流电路的功率仿真实验	(85)
3.5	平衡电桥电路仿真实验	(88)
3.6	楞次定律仿真实验	(89)
3.7	非正弦波傅里叶分析仿真实验	(90)
3.8	LC 阻尼振荡电路仿真实验	(92)
3.9	移相电路仿真实验	(93)
3.10	微分电路和积分电路仿真实验	(95)
3.11	三相交流电电路仿真实验	(97)
第 4 章	低频电子线路仿真实验	(104)
4.1	二极管参数测试仿真实验	(104)
4.2	单相整流和电容滤波电路的仿真实验	(106)
4.3	三极管交流小信号放大器仿真实验	(108)
4.4	射极跟随器电路仿真实验	(111)
4.5	负反馈放大器仿真实验	(114)
4.6	OTL、OCL、BTL 功率放大器仿真实验	(117)
4.7	分立元件直流放大器仿真实验	(121)
4.8	集成运算放大器应用仿真实验	(124)
第 5 章	高频电子线路仿真实验	(128)
5.1	三极管的高频特性分析仿真实验	(128)
5.2	谐振电路分析仿真实验	(133)
5.3	高频小信号调谐放大器仿真实验 (上)	(138)
5.4	高频小信号调谐放大器仿真实验 (下)	(140)
5.5	高频振荡器电路仿真实验 (一)	(143)
5.6	高频振荡器电路仿真实验 (二)	(147)
5.7	调幅与检波电路仿真实验	(156)
第 6 章	脉冲数字电路仿真实验	(160)
6.1	晶体二极管、三极管的开关特性仿真实验	(160)
6.2	分立元件门电路仿真实验	(162)
6.3	集成门电路仿真实验	(166)
6.4	组合逻辑电路设计与分析	(169)
6.5	编码器、译码器电路仿真实验	(172)
6.6	竞争冒险电路仿真实验	(175)
6.7	触发器电路仿真实验	(177)
6.8	计数器电路仿真实验	(180)
6.9	任意 N 进制计数器电路仿真实验	(183)
6.10	DAC 电路仿真实验	(186)

6.11	ADC 电路仿真实验	(189)
6.12	555 电路仿真实验	(190)
第 7 章	电视机仿真实验	(194)
7.1	基本高频调谐器电路仿真实验	(194)
7.2	参差调谐电路仿真实验	(197)
7.3	同步分离电路仿真实验	(200)
7.4	同步分离抗干扰电路仿真实验	(203)
7.5	场锯齿波发生器仿真实验	(205)
7.6	OTL 场输出电路仿真实验	(208)
7.7	行输出电路仿真实验	(213)
7.8	行扫描 AFC 锁相环电路仿真实验	(215)
7.9	开关电源基本电路仿真实验	(217)
7.10	电视机中各种信号仿真实验	(220)
第 8 章	音响技术仿真实验	(225)
8.1	音量控制电路仿真实验	(225)
8.2	音调控制网络仿真实验	(227)
8.3	图示均衡器电路仿真实验	(230)
8.4	扬声器分频网络仿真实验	(233)
8.5	导频制立体声复合信号仿真实验	(236)
8.6	扩音器延迟通断电路仿真实验	(238)
第 9 章	电子测量仿真实验	(241)
9.1	双踪示波器使用仿真实验	(241)
9.2	波特图仪使用仿真实验	(242)
9.3	失真度仪使用仿真实验	(246)
9.4	频谱分析仪使用仿真实验	(248)
9.5	电阻测量仿真实验	(251)
9.6	电容、电感的测量仿真实验	(253)
9.7	Q 值测量仿真实验	(257)
9.8	二极管伏安特性的测量仿真实验	(258)
9.9	三极管测量仿真实验	(259)
参考文献		(262)

电路设计仿真概述

电子线路设计仿真软件随着计算机技术水平不断提高而迅速发展,EDA(电子设计自动化)技术应运而生,功能日益强大,运行速度快。当今世界较为流行的电子CAD仿真软件有ORCAD、PSPICE、SYSTEMVIEW、PROTEL 99SE、MULTISIM2001等,其中PROTEL 99SE和MULTISIM2001特点突出,功能齐全,操作方便,普及性较高。但是它们在涉及电子技术领域各个范围中各有千秋,不能由一个完全取代,只能相辅相成。下面就以这两个软件为代表,介绍它们的功能和操作方法。在实验教学中,本书作者通过所做的大量的仿真实验,选取了电子类学科其中七门课程的部分代表实验作为教材内容,以辅助实体实验为本,扩大实验思维,为电子电路设计打下良好的基础。读者通过进行各种分析方法的使用和研究,会对电子技术和无线电技术的系统性加深认识和理解,特别是分析方法的复项设置使用,可以令所设计的电子产品的综合质量和可靠性得到较好的前端保证,对电子技术教学更是起到积极的作用。

1. PROTEL 99SE 的电路设计仿真技术功能

PROTEL 是众人熟悉的电子CAD软件,而PROTEL 99SE提供了模拟电子线路和数字电路的电路仿真功能,仿真的结果和数据精确。该软件仿真功能如下:

(1) 从PROTEL 99SE\Library\Sch\Sim.ddb 仿真库提供的元器件绘制电路后,即可进行仿真操作,但由Sch\下面的其他库的元器件所绘制的电路不具备仿真功能。

(2) 提供了多种仿真激励源(信号源),接近6000个仿真元器件和大量的数学模型元件,可以对电工基础电路、低频电子线路、高频电子线路、脉冲数字电路以及其他的电路在一定数值范围内进行仿真和分析。

(3) 提供了多种电路分析方法,如:静态工作点分析、瞬态特性和傅里叶分析(时域分析和频谱分析)、交流小信号分析(幅频和相频特性)、直流扫描分析(电压变化对电路的影响)、噪声分析(放大器产生的噪声)、传输函数分析(直流输入、输出阻抗)、温度扫描分析(温度变化对电路的影响)、参数扫描分析(某个元器件数值的变化对电路的影响)和蒙特卡罗分析(电路性能概率分析)。既可单项分析,亦可复项分析。

(4) 仿真结果以多种图形方式输出,可以单图精细分析,也可以多图综合比较分析,并可从不同的角度进行分析,以获得对电路设计的准确判断。

(5) 利用数学模型元件可以模拟电气仪表功能和图解某些电路数学公式,更好地理解信号的物理含义和观察波形。

(6) 仿真所绘制的电路,可直接进行PCB板的设计,无须再经过SCH电路绘制过程,这也是PROTEL 99SE的新功能。

(7) 特别是可以对电感线圈耦合做一定的处理,从而解决高频电路耦合的问题。

2. MULTISIM 2001 的电路设计仿真技术功能

MULTISIM 2001的前身EWB也是众人熟悉的电子电路仿真软件,该软件仿真功能如下:

(1) 仿真环境直观, 操作界面整洁明了, 操作方便, 容易掌握。

(2) 增强专业版的仿真库提供近 16000 个仿真元件, 分别有实际元件和虚拟元件, 其中虚拟元件方便参数的更改。

(3) 提供大量类型的激励源(信号源)和数学模型元件, 方便各种分析的需要。

(4) 提供了各种能发亮的指示元件和发声元件, 可用键盘控制电路中的开关、电位器调节、电感器调节和电容器调节, 使仿真过程更为形象。

(5) 提供了各种常用的仪器仪表, 增加仿真结果的直观度, 并允许多个仪表同时调用和重复调用。顺便一提, 一般人平时较难接触到如此众多的仪器仪表, 这无疑是对知识面大大的扩充。该软件所提供的仪器具有存储功能。

(6) 提供了射频元件, 可进行射频电路的仿真, 许多软件不具备此功能。

(7) 提供了机电元件, 可进行自动控制电路的仿真, 这也是许多软件不具备的。

(8) 除了仪表仿真方式以外, 该软件还具有波形仿真的方式, 方法与 PROTEL 99SE 类似, 仿真分析的种类更多, 可以单项选择, 也可以用户自定义分析复项选择。

第 1 章 PROTEL 99SE 电路设计仿真

1.1 Sim 99SE 仿真库元器件

在仿真库 Sim.ddb 中按元器件类型划分为 28 个元件库，每个库中提供了若干个元器件，它们的图形与 SCH 中的图形一样，但是它们还内含元件模型参数数据库，即描述文件，创建一个这样的元件比较复杂，这里不予讨论。

1.1.1 仿真库一览表

仿真库一览表如下：

7SEGDISP.lib	七段数码显示管
74XX.lib	74 系列 TTL 数字集成电路
BJT.lib	双极型晶体管
BUFFER.lib	缓冲器集成电路
CAMP.lib	高速运算放大器
CMOS.lib	CMOS 数字集成电路
COMPARATOR.lib	比较器集成电路
CRYSTAL.lib	晶体振荡器
DIODE.lib	二极管
IGBT.lib	绝缘栅双极型晶体管
JFET.lib	结型场效应晶体管
MATH.lib	数学模型库
MESFET.lib	MES 场效应晶体管
MISC.lib	杂散元件
MOSFET.lib	MOS 场效应晶体管
OPAMP.lib	通用运算放大器
OPTO.lib	光耦器件
REGULATOR.lib	电压变换器
RELAY.lib	继电器
SCR.lib	可控硅
Simulation Symbols.lib	DEVICE 库及激励源
SWITCH.lib	开关元件
TIMER.lib	555 定时器
TRANSFORMER.lib	变压器
TRANSLINE.lib	传输线
TRIAC.lib	双向可控硅
TUBE.lib	电子管
UJT.lib	单结晶体管

说明：另外，在 PROTEL99\Library\Sim\下面的 Simulation Models.ddb 文件内包含了每个元器件的仿真模型参数数据库，可以打开参阅，每个元器件的描述参数都以 Digital Sim Code 语言记载，对它们的含义未弄清楚之前不要随意修改，以免破坏系统的完整性。

1.1.2 参数默认值及表示法

在设置仿真元件参数和仿真运行参数时，系统的参数默认值及表示方法为：

(1) 基本物理量的默认值单位是电阻 Ω (欧姆)、电容 F (法拉)、电感 H (亨利)、频率 Hz (赫兹)、相位 $^{\circ}$ (度)、电压 V (伏特)、电流 A (安培) 等。

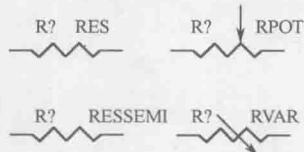
(2) 比例因子是 m (毫) $=10^{-3}$, 1E-3; μ (微) $=10^{-6}$, 1E-6, 填写参数时一般用 u 或者 U 来表示即可; n (纳) $=10^{-9}$, 1E-9; p (微微) $=10^{-12}$, 1E-12; k (千) $=10^3$, 1E+3; Meg (兆) $=10^6$, 1E+6; G (千兆) $=10^9$, 1E+9; T (兆兆) $=10^{12}$, 1E+12。

例如，电压值写成 5m (M) 表示 5 毫伏；频率值写成 1k (K) 表示 1kHz 等。

1.2 无源器件

1.2.1 电阻

在库 Simulation Symbols.lib 中提供的电阻器如下，见图 1.1 所示。



- RES 固定电阻。
- RESSEMI 半导体电阻。
- RPOT 电位器。
- RVAR 变阻器。

图 1.1 电阻元件

当在图纸中放置了元件，并用鼠标左键对该元件进行双击操作，屏幕弹出元件的属性对话框，见图 1.2。属性分为四个部分：

(1) 属性 Attributes。

- [Desighator] 元件编号 R1、R2 等。
- [Part Type] 电阻数值大小，例如，10k，即 $10k\Omega$ 。
- [Part] 某元件的第几部分，例如，某集成电路中有四个非门，[Part] 写成 1, 2... 对应集成电路也显示 U1A, U1B...

(2) 图形属性 Graphical Attrs。它用于描述元件的角度、位置、颜色等。

(3) 部分参数栏 Part Fields。它用于描述半导体电阻的设置参数。

- [L] 半导体电阻的长度，单位为米。
- [W] 半导体电阻的宽度，单位为米。
- [Temp] 半导体电阻的温度，单位为摄氏度，默认值为 27°C 。
- [Set] 可调电阻的调节系数，范围为 0~1。例如设置数值为 0.5，则阻值为原设定值乘以 0.5。

(4) 只读参数栏 Read-Only Fields (图 1.3)。该电阻建模的描述参数，一般不要去修改它。

1.2.2 电容

在库 Simulation Symbols.lib 中提供的电容器如下，见图 1.4 所示。

- CAP 无极性电容。

- CAP2 有极性电容。
- CAPSEMI 半导体电容。

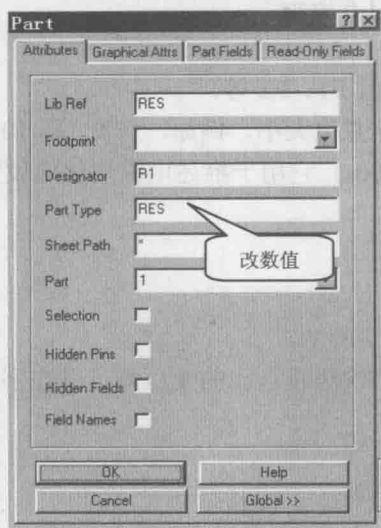


图 1.2 属性框

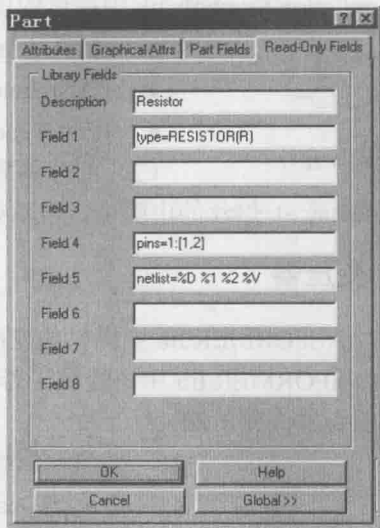


图 1.3 只读框

(1) 属性 Attributes。

- [Designator] 元件编号 C1、C2 等。
- [Part Type] 电容数值大小，例如，10u，即 $10\mu\text{F}$ 。

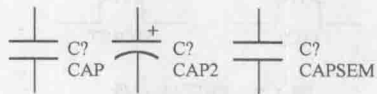


图 1.4 电容元件

(2) 部分参数栏 Part Fields。它用于描述电容的设置参数。

- [L] 半导体电容的长度，单位为米。
- [W] 半导体电容的宽度，单位为米。
- [IC] 电容的初始条件，即电容初态的电压值，此项在进行仿真执行“瞬态特性和傅里叶分析”时，[Use Initial Conditions]项被选中时才有效。

1.2.3 电感

在库 Simulation Symbols.lib 中提供的电感器，见图 1.5 所示。

(1) 属性 Attributes。

[Designator] 元件编号 L1、L2 等。

- [Part Type] 电感数值大小，例如，10u，即 $10\mu\text{H}$ 。



图 1.5 电感元件

(2) 部分参数栏 Part Fields。用于描述电感的设置参数[IC]电感的初始条件，即电感初态的电流值，此项在进行仿真执行“瞬态特性和傅里叶分析”时，[Use Initial Conditions]项被选中时才有效。

另外，当电感组成互感器时，可通过菜单[Place]/[Text Frame]键入电感耦合参数，加入仿真网络参数，这一项功能在高频电路中广泛应用。

.NSX

K1 L1 L2 0.5 (耦合描述 电感 1 电感 2 耦合度)

1.2.4 保险丝

在库 Simulation Symbols.lib 中提供的保险丝见图 1.6 所示。

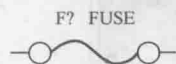


图 1.6 保险丝元件

(1) 属性 Attributes。

- [Designator] 元件编号 F1、F2 等。
- [Part Type] 熔断电流数值大小，例如，10A，即 10 安培。

(2) 部分参数栏 Part Fields。它用于描述电阻熔丝的设置参数。

- [Resistance] 熔丝的电阻值，以欧姆为单位。

1.2.5 变压器

在库 TRANSFORMER.lib 中提供的变压器见图 1.7 所示。

库 TRANSFORMER.lib 中还提供了若干固定初、次级匝数比的变压器，并在字母后面标有 CT 字样的为抽头变压器。

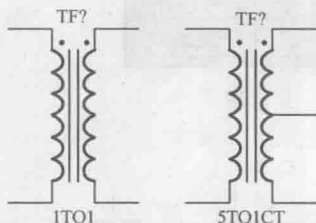


图 1.7 变压器元件

(1) 属性 Attributes。

- [Designator] 元件编号 TF1、TF12 等。

(2) 部分参数栏 Part Fields。

- [RATIO] 初、次级的匝数比。
- [RP] 初级线圈的直流电阻值，单位为欧姆。
- [RS] 次级线圈的直流电阻值，单位为欧姆。
- [LEAK] 变压器的漏感，单位为亨利。
- [MAG] 变压器的漏感，单位为亨利。

1.2.6 继电器

在库 Relay.lib 中提供的继电器见图 1.8 所示。

(1) 属性 Attributes

- [Designator] 元件编号 RLY1、RLY2 等。

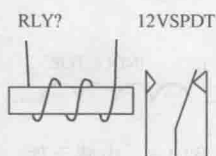


图 1.8 继电器元件

(2) 部分参数栏 Part Fields

- [Pullin] 继电器的吸合电压，单位为伏特。
- [Dropoff] 继电器的释放电压，单位为伏特。
- [Contact] 触点的电阻，单位为欧姆。
- [Resistance] 工作线圈的电阻，单位为欧姆。
- [Inductance] 工作线圈的电感，单位为亨利。

1.2.7 晶体振荡器

在库 Crystal.lib 中提供的振荡晶体见图 1.9 所示。

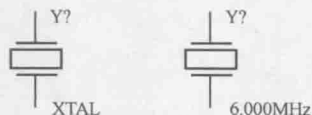


图 1.9 晶振元件

(1) 属性 Attributes。

- [Designator] 元件编号 Y1、Y2 等。

(2) 部分参数栏 Part Fields。

- [FREQ] 晶体振荡频率，单位为赫兹。
- [RS] 内部等效串联电阻，单位为欧姆。

- [C] 内部等效电容, 单位为法拉。
- [Q] 晶体的 Q 值, 例如 100。

1.2.8 传输线

在库 Transline.lib 中提供的传输线见图 1.10 所示。

- LLTRA 无损传输线。
- LTRA 有损传输线。
- URC 均匀分布 RC 有损传输线。

(1) 属性 Attributes。

- [Desighator] 元件编号 LTAR1、LTAR2 等。

(2) 部分参数栏 Part Fields。

- [Z0] 特征阻抗, 单位为欧姆。
- [TD] 传输线的延迟时间, 单位为秒。
- [F] 传输频率, 单位为赫兹。
- [NL] 晶体传输线长度除以传输信号波长, 有关系

式 $TD = NL/F$ 。

- [IC] 直流分析时的初始条件, 即初态电流。

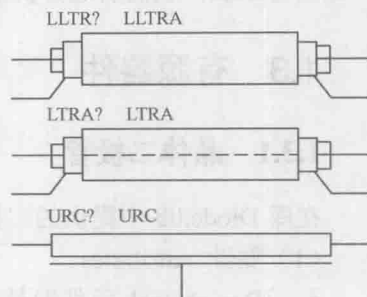


图 1.10 传输线元件

1.2.9 可控开关

在库 SWITCH.lib 中提供的可控开关见图 1.11 所示。

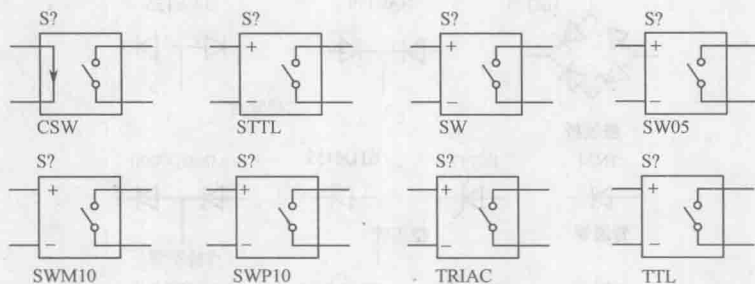


图 1.11 可控开关元件

- CSW 电流控制开关。
- SW 电压控制开关。
- SW05 电压控制开关, 阈值电压 $V_T = 500 \text{ mV}$ 。
- SWM10 电压控制开关, 阈值电压 $V_T = 10 \text{ mV}$ 。
- SWP10 电压控制开关, 阈值电压 $V_T = 10 \text{ mV}$ 。
- STTL 电压控制开关, 阈值电压 $V_T = 2.5 \text{ V}$, 滞后电压 $V_H = 0.1 \text{ V}$ 。
- TTL 电压控制开关, 阈值电压 $V_T = 2 \text{ V}$, 滞后电压 $V_H = 1.2 \text{ V}$, 关断电阻 $R_{OFF} = 100 \text{ M}\Omega$ (兆欧姆)。
- TRIAC 电压控制开关, 阈值电压 $V_T = 0.99 \text{ V}$, 导通电阻 $R_{ON} = 0.1 \Omega$, 关断电阻 $R_{OFF} = 10 \text{ M}\Omega$ 。

(1) 属性 Attributes。

- [Desighator] 元件编号 S1、S2 等。

(2) 部分参数栏 Part Fields。

- [ON/OFF] 开关初始条件。

注意：以上开关都是理想化的，关断时内阻很高，当电流或电压在出现 0, 1 过渡时容易产生信号断裂，从而引起分析错误，外部电路的阻抗不宜选择过高。

1.3 有源器件

1.3.1 晶体二极管

在库 Diode.lib 中提供的二极管见图 1.12 所示。

(1) 属性 Attributes。

- [Desighator] 元件编号 D1、D2 等。

(2) 部分参数栏 Part Fields。

- [AREA] 开面积因子，决定所指定模型的等效并联元件的数目。

• [OFF] 在直流工作点分析中，该项设 OFF，令二极管两端等效电压为 0，可以解决直流分析和瞬态分析的不收敛情况

- [IC] 二极管的初始条件，即二极管的初态电压值。

- [Temp] 二极管的工作温度，默认值为 27℃（摄氏度）。

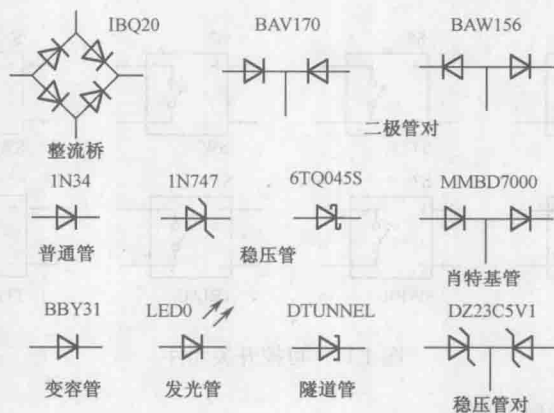


图 1.12 晶体二极管元件

1.3.2 晶体三极管（双极型）

在库 BJT.lib 中提供的三极管见图 1.13 所示。

(1) 属性 Attributes。

- [Desighator] 元件编号 Q1、Q2 等。

(2) 部分参数栏 Part Fields 参数的设定基本与二极管相

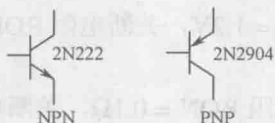


图 1.13 晶体三极管元件