

基础电路实例仿真分析

钟洪声 杨忠孝 编著



科学出版社



基础电路头例仿具分析

钟洪声 杨忠孝 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在 Multisim 仿真工具的基础上,通过一些基础电路实例仿真分析,进一步理解电路的基本原理和性能。本书为电路分析基础和模拟电路基础课程的教学提供一个有益的参考教材,借助计算机工具,旨在提高基础课程的教学效率。

本书是一本教学辅导用书,适合于电子信息工程和电子科学与技术等专业学生使用,也适合于电子技术领域学习的初学者阅读参考。全书提供70多个电路实例分析介绍,包括理论分析和计算机仿真,还提供了25个视频文件,在正文的二维码处扫描可获得视频文件。

图书在版编目(CIP)数据

基础电路实例仿真分析/钟洪声,杨忠孝编著. —北京:科学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-03-054125-3

I. ①基… II. ①钟… ②杨… III. ①电子电路-计算机仿真
IV. ①TN702

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第191565号

责任编辑:潘斯斯/责任校对:郭端芝
责任印制:吴兆东/封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年9月第一版 开本:787×1092 1/16

2017年9月第一次印刷 印张:13 3/4

字数:336 000

定价:39.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着计算机技术的发展，计算量及速度问题得到基本解决。在工程领域，计算机仿真工具的能力越来越强大，部分替代实验功能，大幅度加快了产品开发的速度。在基础电路教学中，强调一定的手工计算分析还是必要的，有利于学生加强对电路原理的理解，但是过分强调手工计算，特别是难题的练习，已经没有什么价值。尽早让学生接触到先进的计算仿真工具，可以进一步提高学生的学习兴趣，提高教学效果。

本书主要基于计算机仿真软件 Multisim 介绍典型基础电路的分析练习。本书实例与理论教材知识点顺序基本保持一致，有利于辅助理论课程的学习。计算机仿真的方法与人工分析方法是一致的。计算机的优点：效率极大提高，计算机软件自动列写方程，快速计算，分析结果多种表达形式，Multisim 的显示与工程实验仪器紧密关联，直观清晰。人工分析计算的优点：采用公式推理，模型简化，逻辑关系清晰，物理概念清楚。人工计算的缺点：效率很低，对于大型电路的分析计算几乎无法完成。

计算机仿真工具的应用，对电路理论知识的教学带来革命性的影响，分析方法和手工计算的技能价值降低。学生掌握一种计算机分析仿真工具，对于学习电路理论知识日显重要。由于计算机工具的应用，对于电路课程的学习方式也有一定改变，在介绍基础理论之后，尽早提供计算工具，训练学生学会使用计算机工具解决电路分析问题。为了结合理论的学习，本书选择课本上的基础电路，借助计算机分析仿真，不仅给学生一种分析计算手段，还通过计算机的仿真显示，特别是虚拟仪表，促使学生更直观地理解电路原理。

本书主要是教学参考用书，可供电子信息工程专业大学生在基础学习阶段，掌握学习计算机仿真工具，也可供电路教学的教师参考，用于指导学生使用计算机仿真以及借助 Multisim 等软件设计简单电路。

本书共 12 章。第 1 章，软件工具简单介绍；第 2~11 章，一些简单电路的分析仿真介绍，包括基础的模拟电路、动态电路、模拟放大器、滤波器、功率分析、简单的数字电路等；第 12 章，在仿真分析的基础上，介绍简单电路的设计，实际上是利用软件工具辅助设计需要的特殊简单电路，引导学生学会自己设计一般的基本电路，并学会分析仿真电路。本书提供了 70 多个实例仿真分析，并提供了 25 个视频演示，在正文的二维码处扫描可获得视频文件。

实例由电子科技大学电路分析基础课程组 21 位老师提供，他们分别是董爱军、冯代伟、宫大为、韩尧、胡进峰、胡永忠、李颖、刘喆、王冰峰、王京梅、吴涛、吴韵秋、谢华、杨成林、杨德才、杨忠孝、张彪、张天良、郑颖熙、周秀云、钟洪声。吴涛完成

视频录制与制作工作。对于以上人员的辛勤工作，深表谢意。

全书由杨忠孝整理，由钟洪声策划、统稿与编辑，并完成视频演示。

由于作者对 Multisim 的熟悉程度还不够高，对于基础电路类型覆盖不一定全面，希望读者能够反馈意见，敬请批评指正，不胜感激。

钟洪声

2017年5月9日

目 录

前言

第 1 章 电路仿真软件介绍	1
1.1 仿真设计软件介绍.....	1
1.2 软件安装.....	2
1.3 界面介绍.....	3
1.4 元器件库.....	5
1.5 线路连接与虚拟测试.....	8
训练题.....	10
第 2 章 简单电路分析	11
2.1 电阻电路分析.....	11
2.1.1 分压电路.....	11
2.1.2 桥式电阻电路.....	12
2.1.3 万用表头扩量程电路分析.....	15
2.2 网络分析法.....	20
2.2.1 网孔分析.....	20
2.2.2 节点分析法.....	21
2.2.3 含非独立源网络分析.....	23
训练题.....	25
第 3 章 电路的基本定理	26
3.1 叠加定理.....	26
3.2 戴维宁定理.....	29
3.3 最大功率传输定理.....	32
3.4 替代定理.....	34
3.5 互易定理验证.....	37
训练题.....	40
第 4 章 简单非线性电路分析	41
4.1 整流电路.....	41
4.1.1 半波整流电路.....	41
4.1.2 全波整流电路.....	43
4.2 LED 电路分析.....	46
4.3 隧道二极管分析.....	49
4.4 含非线性元件单口网络特性.....	51
训练题.....	56

第 5 章 含运算放大器电路	57
5.1 反相放大器.....	59
5.2 同相放大器.....	61
5.3 跟随器.....	63
5.4 模拟加法器.....	65
5.5 差分信号放大电路.....	67
训练题.....	69
第 6 章 动态电路	70
6.1 一阶 RC 电路瞬态分析.....	70
6.2 一阶 RL 电路瞬态分析.....	74
6.3 二阶 RLC 串联电路.....	79
训练题.....	84
第 7 章 交流信号电路分析	85
7.1 单口网络电路.....	85
7.2 一般电路正弦信号分析.....	91
7.3 理想变压器及电路匹配.....	95
7.4 耦合电感电路.....	101
训练题.....	106
第 8 章 滤波器电路分析	107
8.1 无源 RC 滤波器.....	107
8.2 无源 RLC 带通滤波器.....	118
8.3 有源带通滤波器.....	123
8.4 双通带滤波器仿真分析.....	125
训练题.....	127
第 9 章 放大器电路分析	128
9.1 晶体管放大器.....	128
9.2 功率放大器.....	134
9.3 MOS 放大器.....	137
9.4 负反馈放大电路.....	143
训练题.....	152
第 10 章 电路的功率分析	153
10.1 电路功率分析.....	153
10.2 最大平均功率传输.....	161
10.3 三相电功率分析.....	165
10.4 电机功率分析.....	170
10.5 功率因数补偿问题.....	172
训练题.....	176

第 11 章 简单数字电路分析	177
11.1 简单逻辑电路	177
11.1.1 与非门	177
11.1.2 或非门	178
11.1.3 异或门	179
11.2 常用组合逻辑电路	180
11.2.1 四位编码器	180
11.2.2 八位译码器	181
11.2.3 一个循环计数器	183
11.3 D/A 转换器	184
11.3.1 四位 D/A 转换器	184
11.3.2 八位 D/A 转换器正弦信号输出仿真	185
11.3.3 运算放大器的带宽对 D/A 转换器速度影响分析	187
11.4 A/D 转换器	190
11.5 加法器	193
训练题	195
第 12 章 简单实用电路辅助设计	196
12.1 波形发生器	196
12.2 电源	200
12.3 放大器设计	205
训练题	208
参考文献	209

第 1 章 电路仿真软件介绍

设计是电子技术的一个重要任务，随着电路规模越来越大，传统的纯人工模式已经很难完成。电路分析是电路设计的基础，当电路拓扑和参数确定时，电路的解存在，但是随着电路规模的增加，计算量巨大，人工分析需要巨量的时间，而借助计算机可以高效完成计算任务。电路工程化设计内容更多，自动设计技术包括电路仿真、布线、生成 PCB 等过程。设计方法由全人工模式逐步过渡到和计算机共同完成电子系统设计，再发展成为目前的电子设计自动化技术。电路仿真成为电子系统设计的基础，而仿真技术的提高，可以大幅度减少实验验证环节，提高电子产品的更新速度和质量。

对于初学者，先学会分析电路，熟悉简单和典型电路，充实自己的电路基本“库”。对于已经掌握现代工具的学生，学会利用计算机工具分析或者辅助设计电路，是很有必要的。电路仿真的本质是在电路理论的基础上，提取数学模型，建立数学方程，并进行计算。在满足集总假设的条件下，元件模型准确，其计算结果与真实实验结果一致，或者误差可控制在很小范围。“仿真”一词也就是源于利用计算的结果模拟真实实验。由于现代计算机强大的计算能力，其仿真速度快，效率高，如果通过实验验证电路，则其工作量大，效率低。目前仿真的结果可以部分替代实验。如果仿真失败，则电路方案一定有问题；如果仿真成功，则电路成功的概率大幅度增加。

目前工业界已经出现很多仿真软件，均建立有大量元件库，其参数十分准确，其仿真结果十分接近实验参数。

1.1 仿真设计软件介绍

电路仿真软件有多种，如 Multisim、PSpice 等。各种软件均有自己的特色。在此，主要介绍 Multisim。Multisim 是用于电路仿真与设计的软件，其已发行了多个版本，对于初学者，教育版较为适合。

NI Circuit Design Suite 12.0 是用于电路设计与仿真的软件工具，其中的仿真设计模块 Multisim 是由 1988 年加拿大 IIT 公司最早推出的 Electronic Work Bench (EWB) 逐渐升级演变而来的。使用 Multisim 可以直观地搭建电路原理图，并对电路进行仿真与分析，结合虚拟仪器技术还可以对电路进行测试。该软件简便易学、使用灵活等特点，使其在电子学教育领域有很广泛的应用，也深受学生以及电子设计爱好者的喜爱。

NI Circuit Design Suite 12.0 软件包括 Multisim、Ultiboard、Ultiroute 及 Commsim 4 个相互独立的部分，可以分别使用。4 个部分有增强专业版、专业版、个人版、教育版、学生版和演示版等，各版本的功能和价格有着明显的差异。本书仅以 Multisim12.0 为例进行说明。

Multisim12.0 是美国国家仪器有限公司推出的以 Windows 为基础的仿真工具，软件

包含电路原理图的图形输入、电路硬件描述语言输入方式、电路分析、电路仿真、仿真仪器测试、射频分析、单片机分析、PCB 布局布线、基本机械 CAD 设计等应用，并结合了虚拟仪器的测试，也使得电路进行验证变得轻松与便捷。

Multisim 12.0 具有以下典型特色。

(1) 直观的图形界面，整个操作界面就像一个电子实验工作台，绘制电路所需的元器件和仿真所需的测试仪器均可直接拖放到屏幕上，单击可用导线将它们连接起来，软件仪器的控制面板和操作方式都与实物相似，测量数据、波形和特性曲线如同在真实仪器上看到的。

(2) 丰富的元器件，提供了超过 16000 多种元件，同时能方便地对元件各种参数进行编辑修改，能利用模型生成器以及代码模式创建模型等功能。

(3) 强大的仿真能力，以 SPICE3F5 和 Xspice 的内核作为仿真的引擎，通过 Electronic workbench 带有的增强设计功能将数字和混合模式的仿真性能进行优化。包括 SPICE 仿真、RF 仿真、MCU 仿真、VHDL 仿真、电路向导等功能。

(4) 丰富的测试仪器，提供了 22 种虚拟仪器进行电路动作的测量，这些仪器的设置和使用与真实的一样，除了 Multisim 提供的默认的仪器，还可以创建 LabVIEW 的自定义仪器，使得图形环境中可以灵活地升级测试、测量及控制应用程序的仪器。

(5) 完备的分析手段，分析范围较广，并将可以将一个分析作为另一个分析的一部分的自动执行。具有符合行业标准的交互式测量和分析功能。

(6) 独特的射频 (RF) 模块，提供基本射频电路的设计、分析和仿真。射频模块由 RF-specific (射频特殊元件，包括自定义的 RF SPICE 模型)、用于创建用户自定义的 RF 模型的模型生成器、两个 RF-specific 仪器 (频谱分析仪和网络分析仪)、一些 RF-specific 分析模块 (电路特性、匹配网络单元、噪声系数) 等组成。

(7) 强大的 MCU 模块，支持 4 种类型的单片机芯片，支持对外部 RAM、外部 ROM、键盘和 LCD 等外围设备的仿真，分别对 4 种类型的芯片提供汇编和编译支持；所建项目支持 C 代码、汇编代码以及 16 进制代码，并兼容第三方工具源代码；包含设置断点、单步运行、查看和编辑内部 RAM、特殊功能寄存器等高级调试功能。

(8) 完善的后处理，对分析结果进行的数学运算操作类型包括算术运算、三角运算、指数运行、对数运算、复合运算、向量运算和逻辑运算等。

(9) 详细的报告，能够呈现材料清单、元件详细报告、网络报表、原理图统计报告、多余门电路报告、模型数据报告、交叉报表等 7 种报告。

(10) 兼容性好的信息转换，提供了转换原理图和仿真数据到其他程序的方法，可以输出原理图到 PCB 布线 (如 Ultiboard、OrCAD、PADS Layout2005、P-CAD 和 Protel)；输出仿真结果到 MathCAD、Excel 或 LabVIEW；输出网络表文件；提供 Internet Design Sharing (互联网共享文件)。

1.2 软件安装



软件安装

以 Multisim12.0 教育版为例，在 Windows 7 操作系统下安装。安装步骤主要分为 3

个阶段：解压系统文件(也可以不解压，直接执行安装程序，系统自动解压)、安装系统程序、通过许可证激活。

进入“Install NI Circuit Design Suite 12.0”，填写用户资料，即用户名等，然后选择使用序列号(Serial Number)安装正式版本或选择“Install this product for evaluation(企业评估版)”。

选择合适的安装路径后再选择安装参数，可以选择“NI Circuit Design Suite 12.0 Education”；在“产品说明”对话框运行后进入“许可协议对话框”接受协议后进入安装窗口，此时只需单击“next”按钮继续安装。

安装完成后选择“Restart”，重启计算机即可结束程序安装阶段。

若前面选择安装评估版本，则只有30天的使用期限，若希望长时间使用，则可以通过许可证文件激活Multisim12.0。

使用时为了启动方便，可以将Multisim12.0的启动设置为桌面快捷方式置于桌面。直接在桌面上单击快捷键就进入应用软件页面。

1.3 界面介绍

Multisim12.0 窗口界面中主要包含菜单栏、工具栏、元件库、仪表工具栏、电路窗口、状态栏和项目栏。

(1)菜单栏如图1.1所示，包括12个菜单项。

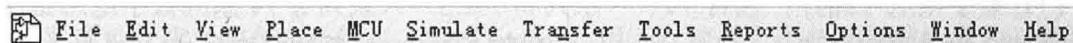


图 1.1 菜单栏

File: 主要用于管理所创建的电路文件，包括打开、新建、存储、打印和调用文件等基本文件操作命令。

Edit: 包括如剪切、复制、粘贴、位置变化、转向、回退等基本的编辑操作命令。

View: 包括添加去除工具条、元件库栏，在界面窗口中显示网格，放大缩小视图尺寸以及设置各种显示元素等调整窗口视图的命令。

Place: 可通过此菜单中的相应命令在窗口中放置节点、元件、总线等对象。

MCU: 提供在窗口内的MCU的调试操作命令。

Simulate: 用于仿真的设计与操作，如运行、暂停、仪表、分析等。

Transfer: 可将所搭电路及分析结果传输给其他程序。

Tools: 提供20个元件和电路编辑与管理命令，用于编辑和管理元件库或元件。

Reports: 产生当前电路的各种报告，如元件清单、电路图的统计报告、电路图中未使用的剩余门电路报告等。

Options: 提供7个有关电路界面和电路某些功能的设定命令，如全部参数设置、工作台面设置等。

Window: 提供窗口操作命令，包括新建窗口、窗口层叠、调整窗口尺寸等。



程序界面

Help: 为用户提供在线技术帮助和使用指导命令。

(2) 工具栏如图 1.2 所示, 通过工具栏, 用户可以方便地使用软件的各项功能, 如寻找相关设计实例、显示 3D 电路板、创建元件编辑器、电器规则校验等。

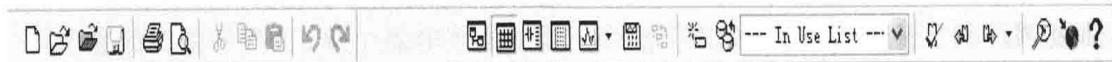


图 1.2 工具栏

(3) 元件库如图 1.3 所示。从左至右, 其元件库图标如下。



图 1.3 元件库

电源/信号源库: 包含接地端、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。

基本器件库: 包含电阻、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。

二极管库: 包含二极管、可控硅等多种器件。

晶体管库: 包含晶体管、FET 等多种器件。

模拟集成电路库: 包含多种运算放大器。

TTL 数字集成电路库: 包含 74××系列和 74LS××系列等 74 系列数字电路器件。

CMOS 数字集成电路库: 包含 40××系列和 74HC××系列等多种 CMOS 数字集成电路系列器件。

其他数字器件库: 包含 DSP、FPGA、CPLD、VHDL 等多种器件。

数模混合集成电路库: 包含 ADC/DAC、555 定时器等多种数模混合集成电路器件。

指示器件库: 包含电压表、电流表、七段数码管等多种器件。

功率组件库: 电源器件库包含三端稳压器、PWM 控制器等多种功率器件。

其他数字集成电路器件库: 包含晶体、滤波器等多种器件。

外围设备库: 包括液晶显示器、键盘等。

射频部件库: 包含射频晶体管、射频 FET、微带线等多种射频元器件。

机电类元件库: 包含开关、继电器等多种机电类器件。

NI 元件库: 包含 NI 的多种常用器件。

连接元件库: 包含各种电路中的连接元件。

微处理器库: 包含 8051、PIC 等多种微控制器。

放置分层模块。

放置总线。

放置梯形图示。

放置阶梯连接。



元件调用

(4) 仪表工具栏如图 1.4 所示。通常仪表工具栏位于电路窗口的右边, 每种类型可以

同时使用多台, 选用仪器以图标方式存在, 可以将选用的仪器拖放到电路窗口内, 然后通过双击仪器图标设置仪器参数。仪器仪表库中共提供了 22 种虚拟仪器。由上至下包括: 数字万用表、函数信号发生器、瓦特表、双踪示波器、4 通道示波器、波特图仪、频率计数器、字信号发生器、逻辑分析仪、逻辑转换仪、IV 特性分析仪、失真度分析仪、频谱分析仪、网络分析仪、安捷伦(现为德科技)函数信号发生器、安捷伦万用表、安捷伦示波器、泰克示波器、实时测量探针、LabVIEW 虚拟仪器、NI 教学实验室仪器以及电流探针。



图 1.4 仪表工具栏

电路编辑窗口, 位于中间区域, 其下方是状态栏和项目栏, 状态栏主要用于显示当前的操作以及鼠标所指的相关信息。电路窗口左侧是项目栏, 可以将相关电路分层管理。

1.4 元器件库

Multisim12.0 元器件库中有丰富的元器件, 当仿真缺少所需元件时, 也可以在现有元件模型上通过元件编辑工具进行修改或重建, 有些元器件库中的原件是不能被编辑而只能修改参数的。

选择某个元件库中的元件时, 可见如图 1.5 对话框左上角有三种元件数据库: Master Database, 用于存放 Multisim12.0 为用户提供的海量元件模型; Corporate Database, 用于多人开发项目时建立共有的元件库; User Database, 用于存放用户自行开发或修改的元件模型。

若需要创建一个仿真元件, 则可在主界面中单击如图 1.6 所示图标, 进入元件创建向导对话框, 分八个步骤, 包括元件名称、类型、外形、符号信息、定义引脚、元件模型等。如图 1.7、图 1.8 和图 1.9 所示过程, 创建了一个新的元件名为 74ALS00M, 有 14 个引脚和 2 个隐藏引脚, 存储在 User Database 数据库的 74ALSM123 中, 创建好的元件可在原理图中进行调用。

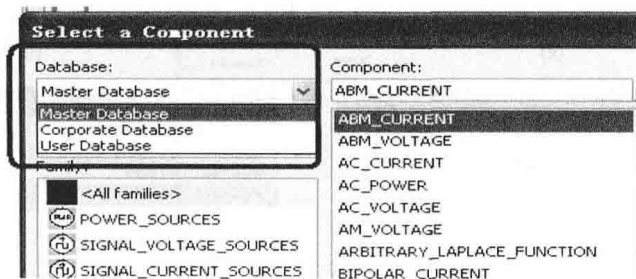


图 1.5 三种元件数据库

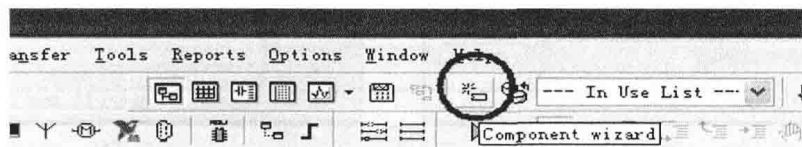


图 1.6 创建新元件按钮

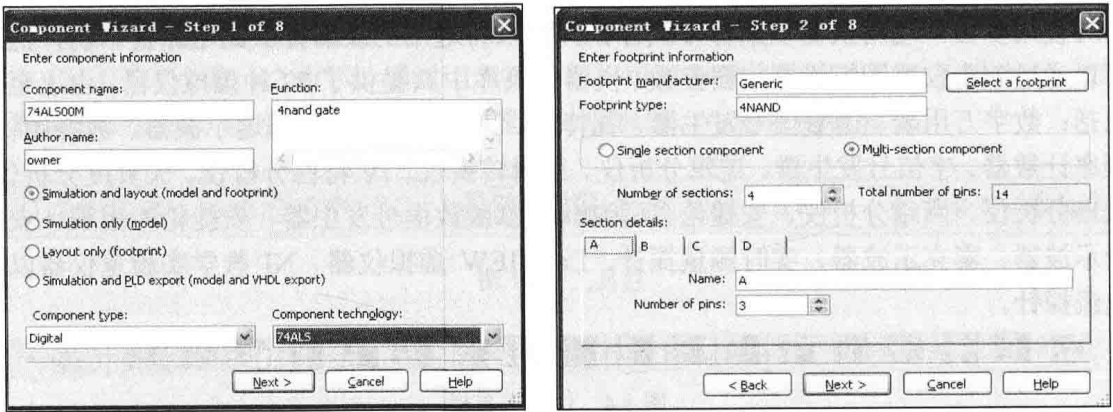
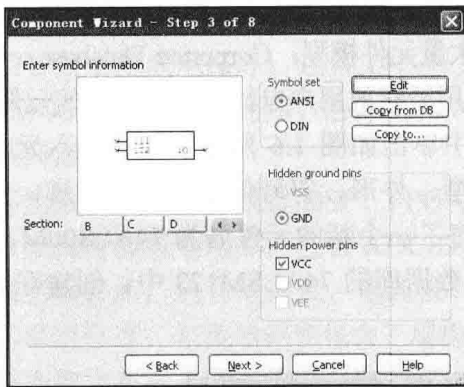
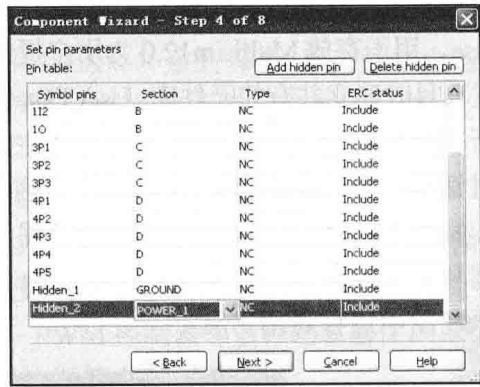


图 1.7 新创建元件名内容引脚定义

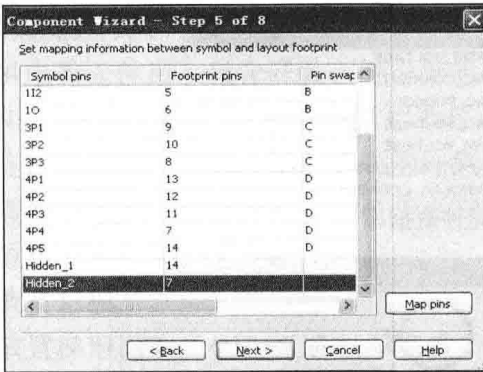
新创建元件 74ALS00M 包含 4 个与非门(A、B、C、D)，如图 1.7 所示。元件连接关系，设置如图 1.8(a)所示，隐含电源线和地线。功能引脚的设置如图 1.8(b)所示界面进行。可以按设计要求，加减隐含的引脚，这个例子主要是补充两个引脚(电源和地)。电路功能引脚与封装引脚对应设置，在图 1.8(c)所示界面进行。日期设置在图 1.8(d)所示界面给出。新建元件对应的 4 个逻辑单元原理图，在图 1.9(a)所示界面给出。可以直观地观察到设置的电路原理图，方便编辑和修改。新建元件设计完成后，先放入库文件中共享，库文件选择存储在 User Database 数据库的 74ALSM123 中，如图 1.9(b)所示。



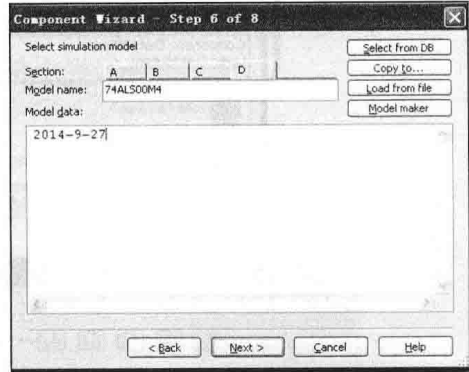
(a)



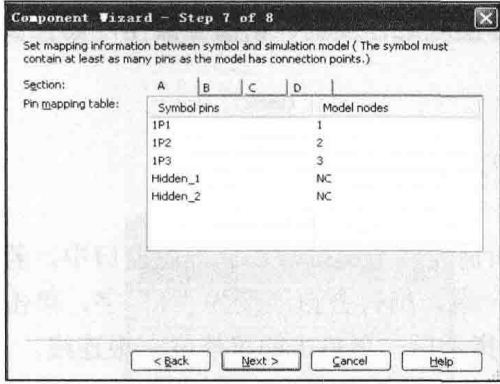
(b)



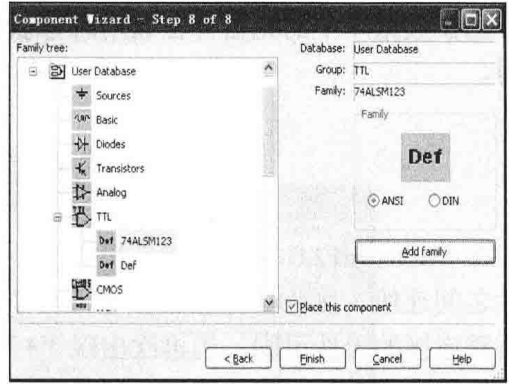
(c)



(d)

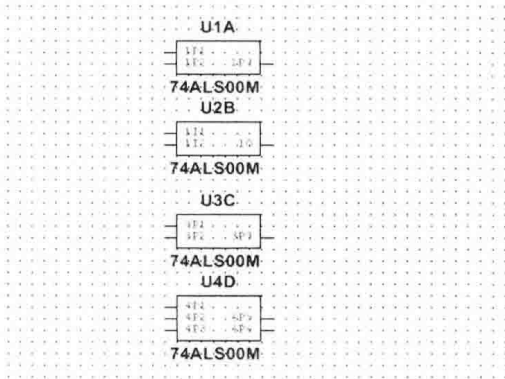


(e)

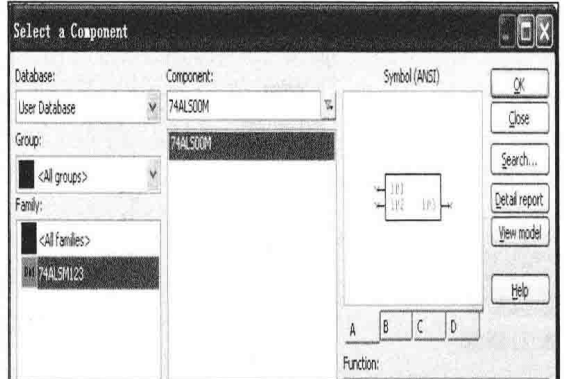


(f)

图 1.8 新建元件内容引脚连接编号



(a)



(b)

图 1.9 创建新元件逻辑图与存放库

可以在 Multisim12.0 中编辑已存在于元件库中的仿真元件。首先选择需要被编辑的元件到原理图，右击后选择 properties，如图 1.10 所示，即可编辑相关的一些参数。

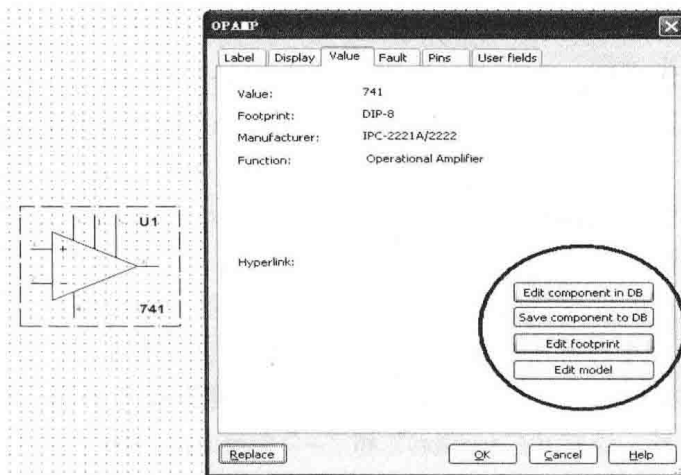


图 1.10 编辑已有元件

已在数据库中的元器件在调用时可以很方便地进行复制、粘贴等操作，而且被多次使用。

1.5 线路连接与虚拟测试

在 Multisim12.0 中连线操作很方便，将所需元件选出摆放在原理图窗口中，若需在元件之间连线，则将鼠标指针接近元件引脚一端，指针会自动变为“+”字，单击并拖动所需连接的元件引脚，当再次出现“+”字指示后，再单击即可连好一根连线。

如果将元件与已有线路的中间点连线，则如上所述从元件引脚拖动鼠标至所需连接位置后再单击，可自动连线并生成一个连接点。

在 Multisim12.0 中的两条交叉线并不相连，交叉连接节点用“·”标识，如图 1.11 所示。导线的轨迹、颜色、节点均可以进行修改。

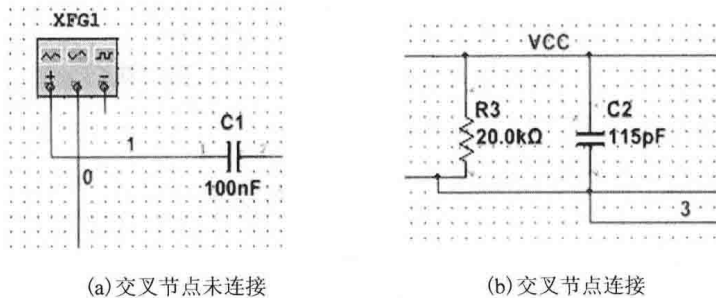



图 1.11 电路图连线交叉节点“·”表示连接

根据电路仿真分析需要，在选择仪器图标按钮上单击，仪器即可跟随鼠标移动，在电路窗口中选择好放置位置后再单击，即可将仪器放置在指定位置。

双击仪器图标，即可打开仪器的控制面板，进行必要的功能和参数设置。每种仪器的设置方法与使用方法都不同，大致分为参数设置与调整和电路与仪器连接两方面。

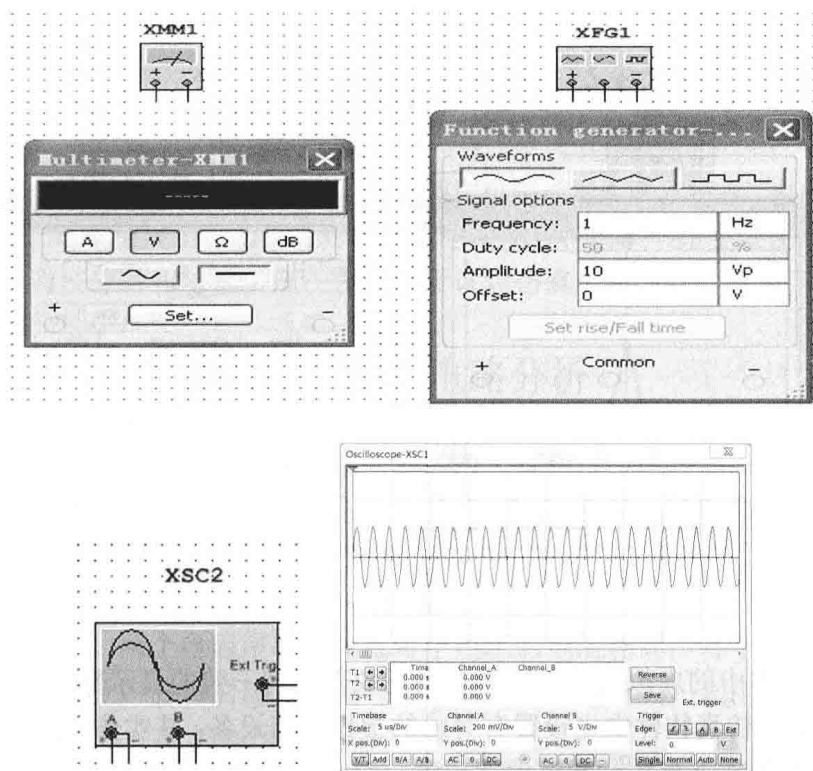
在菜单中单击  按钮，即可开始仿真，仿真结果在测量仪器中显示。

Multisim12.0 还允许打印仿真时仪器的面板，这样可以将仪器显示的仿真结果打印输出。此项操作通过执行菜单命令 File→Print Options→Print Instrument，选择所需打印的仪器面板。

若要保存仪器仿真数据，则执行菜单命令 Options→Global Preferences 中弹开 Save 页，选择保存仪器仿真数据。

电路分析中常用的仪器有数字万用表、函数发生器和示波器。3 种仪器的图标及面板如图 1.12 所示。使用时除了相应参数设置，还应注意仪器端口的连接方法。例如，函数发生器有“+”、“Common”、“-”三个输出端子，与外电路相连时，连接“+”和“Common”端子输出正极性信号，连接“Common”和“-”端子输出负极性信号，同时连接“+”、“Common”和“-”端子，且将“Common”与其地相接，则可输出两个幅值相等、极性相反的信号。又如，示波器中的“A”和“B”两个通道接被测点，接地端应接地，

但如果电路中已有接地符号，则示波器也可不接地。



虚拟仪表

图 1.12 万用表、函数发生器、示波器的图标与面板

数字电路中常用到的仪器有：数字信号发生器、逻辑分析仪和逻辑转换仪。数字信号发生器的图标与面板如图 1.13 所示，可以产生 32 路位同步的逻辑信号，也称为数字逻辑信号源。面板右侧为可写入可编辑的十六进制数，可以在 Set 选项中选择数字信号的编码方式。图 1.13 中选择了右移方式编码的数据。

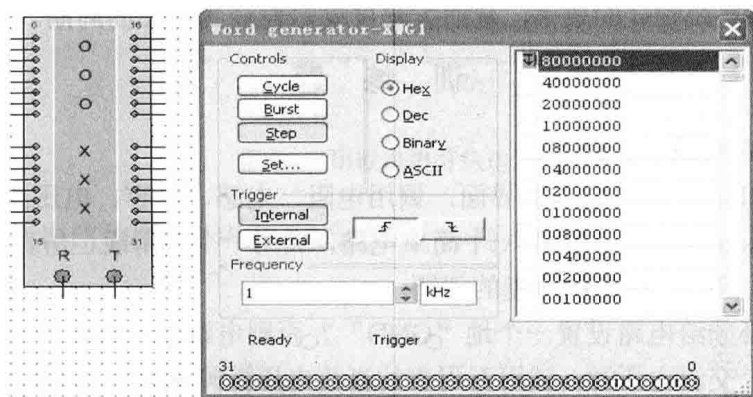


图 1.13 数字信号发生器的图标与面板

高频电路中常用的仪器有频谱分析仪、网络分析仪。频谱分析仪可以用于测量信号所包含的频率成分以及对应频率成分的幅度。图 1.14 为用频谱分析仪测试频率为 2kHz