



普通高等教育“十三五”应用型人才培养规划教材

数字电子技术及应用

SHUZI DIANZI JISHU JI YINGYONG

主 编 ● 代红英 李翠锦
副主编 ● 胡晶晶 曾建梅



西南交通大学出版社



普通高等教育“十三五”应用型人才培养规划教材

数字电子技术及应用

SHUZI DIANZI JISHU JI YINGYONG

主 编 ○ 代红英 李翠锦
副主编 ○ 胡晶晶 曾建梅

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

数字电子技术及应用 / 代红英, 李翠锦主编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2016.12
普通高等教育“十三五”应用型人才培养规划教材
ISBN 978-7-5643-5165-6

I. ①数… II. ①代… ②李… III. ①数字电路 - 电子技术 - 高等学校 - 教材 IV. ①TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 298543 号

普通高等教育“十三五”应用型人才培养规划教材
数字电子技术及应用

主编 代红英 李翠锦

责任编辑 穆 丰
封面设计 何东琳设计工作室

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)

发行部电话 028-87600564 028-87600533
邮政编码 610031
网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印 刷 成都中铁二局永经堂印务有限责任公司
成 品 尺 寸 185 mm × 260 mm
印 张 15.75
字 数 336 千
版 次 2016 年 12 月第 1 版
印 次 2016 年 12 月第 1 次
书 号 ISBN 978-7-5643-5165-6
定 价 35.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前言

PREFACE

在传统理工科教学模式中,学生在学习专业基础课的时候,需要在课堂接受理论讲授,然后在其他时间、在不同的实验室参加验证性实验,这是一个从脑到手的学习过程,它要求学生有比较强的基础学习能力,比较好的听课、记笔记和验证性思考的习惯。我们注意到这种教学模式对培养应用型人才和工程能力人才的高校并不适合。由于学生的理论基础相对薄弱,或许很难听懂严谨的推导论证,他们对某些专业基础理论的认识,对某些设计方案的选择,更需要一定的实际操作过程去领悟、验证。为了适应应用型高校及工程教育改革的需要,我们编写了这本教材,并作为 CDIO 工程教育改革系列教材之一。

本教材依托重庆工程院校内重点项目“基于 CDIO 工程教育模式下的电子信息工程专业课程体系研究”(项目编号:JY2015204),按照 CDIO (Conceive, Design, Implement, Operate) 工程教育创新模式,结合教育部“卓越工程师教育培养计划”的实施原则,突出基本理论与实际应用的结合。以数字逻辑电路和系统设计为主线贯穿整个教材的典型应用综合实例,帮助学生学习基本理论的同时,了解各章节单元电路在完整数字系统设计中的作用。通过合理安排教材内容,在保证基本理论知识的前提下,兼顾解决好传统设计方法与硬件软件化设计方法、单元电路与系统设计的关系。本教材的特点如下:

(1) 整体结构方面。本书采用以基本原理、基本理论结合典型工程应用实例的结构方式,重点培养学生数字电子技术和工程应用的能力。本书介绍的仿真软件 Multisim 12, 提供了一个功能完善、操作界面好、容易使用、成本低廉且方便重复使用的工作平台,学生可利用 Multisim 12 完成数字电路的仿真技能训练,为电子电路设计自动化打下坚实的基础。

(2) 整体内容方面。教材压缩了分立元器件构成的数字电路的内容,重点讲述了中小规模集成电路外部特性及其应用,引入了软件仿真内容,同时也加入了数字系统的设计,将理论和实践更有机融合在一起。通过常用集成芯片构成的典型电路的实例分析,强化学生的理论知识,培养学生举一反三

的能力。再结合具有实用性和趣味性的思考题和实践练习题，激发学生学习兴趣和潜能，培养学生的创新能力。

(3) 章节内容方面。每章节首先让学生明确该章节的学习目标，然后逐步掌握理论知识的同时，培养学生电路设计能力，通过仿真验证设计的电路。最后为了锻炼学生们的动手操作能力，特设计了第 10 章的内容。锻炼学生们的电路安装、调试、故障检修，帮助学生理解所学理论知识，学会用所掌握的理论知识，分析实际问题、解决实际问题，完成对学生能力的培养。

本书的整体编排设计思路清晰，易于学生和教师使用，将能力培养贯穿于教学的全过程中。

全书由重庆工程学院代红英、李翠锦任主编，胡晶晶、曾建梅老师任副主编。全书由代红英统稿和审校。具体编写分工如下：代红英编写了第 1、2、10 章；李翠锦编写了第 5、6、8 章；胡晶晶编写了第 3、4 章；曾建梅编写了第 7、9 章和附录。重庆邮电大学何丰教授审阅了全书，并提出了许多宝贵的意见和建议，在此深表感谢！

限于编者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编者
2016 年 6 月

目录 / CONTENTS

第 1 章 概 述	1
1.1 电子技术的发展历程	1
1.2 数字电路概述	2
1.3 认识 Multisim 12 软件	5
1.4 EDA 技术	13
1.5 技能实训 数字电路的仿真分析	14
1.6 本章小结	15
第 2 章 数字逻辑基础	18
2.1 数制和码制	18
2.2 逻辑代数基础	24
2.3 逻辑函数的化简	34
2.4 技能实训 逻辑函数化简的仿真分析	40
2.5 本章小结	41
第 3 章 逻辑门电路	43
3.1 基本逻辑门电路	43
3.2 门电路中开关器件的开关特性	44
3.3 TTL 集成逻辑非门电路	50
3.4 CMOS 集成逻辑非门电路	53
3.5 数字集成电路的命名方法及使用常识	55
3.6 技能实训 数字集成电路的识别	59
3.7 本章小结	60

第 4 章	组合逻辑电路	63
4.1	组合逻辑电路概述	63
4.2	组合逻辑电路的分析与设计	64
4.3	常用中规模集成组合逻辑器件及应用	73
4.4	组合逻辑电路中的竞争与冒险	100
4.5	技能实训 中规模组合逻辑电路逻辑功能的仿真分析	104
4.6	本章小结	107
第 5 章	触发器	109
5.1	触发器的特点与分类	109
5.2	RS 触发器	110
5.3	JK 触发器	117
5.4	D 触发器	121
5.5	触发器的逻辑功能表示方法	125
5.6	技能实训 触发器逻辑功能的仿真分析	126
5.7	本章小结	131
第 6 章	时序逻辑电路	135
6.1	时序逻辑电路的特点和表示形式	135
6.2	时序逻辑电路的分析	137
6.3	时序逻辑电路的设计	140
6.4	计数器	143
6.5	寄存器	157
6.6	技能实训 计数器逻辑功能的仿真分析	163
6.7	本章小结	166
第 7 章	脉冲波形的产生与变换	169
7.1	脉冲信号与脉冲电路	169
7.2	555 定时器的电路结构与工作原理	170
7.3	555 定时器构成的施密特触发器	173
7.4	555 定时器构成的单稳态触发器	175
7.5	555 定时器构成的多谐振荡器	178
7.6	技能实训 555 电路逻辑功能的仿真分析	182
7.7	本章小结	185

第 8 章	半导体存储器	187
8.1	半导体存储器概述	187
8.2	只读存储器 (ROM)	189
8.3	随机存取存储器 (RAM)	194
8.4	存储器的扩展	197
8.5	本章小结	199
第 9 章	D/A 和 A/D 转换器	201
9.1	D/A 转换器	202
9.2	A/D 转换器	207
9.3	本章小结	216
第 10 章	数字电路的制作	218
10.1	三人表决器电路的制作	218
10.2	四人抢答器电路的制作	226
10.3	数码显示电路的制作	230
10.4	秒脉冲电路的制作	233
10.5	数字电子钟电路的制作	235
10.6	本章小结	238
附 录		240
参考文献		244

第1章 概 述

在集成技术迅速发展和广泛应用的今天，由半导体元件组成的分立元件电路已经很少有人使用，电子电路一般都由集成电路组成。数字电路主要是指对数字信号进行处理的电子电路，它以数字集成电路为基本器件。

本章主要介绍了数字集成电路的基本知识和贯穿本课程的重要辅助学习仿真软件 Multisim 12 的使用，要求学生能识别数字集成电路的型号，学会查找数字集成电路芯片参数的方法，同时让学生体会数字电子电路的应用以提高学习该课程的兴趣，为后续章节的学习打下良好基础。

学习目标

本章学习目标如表 1-1 所示。

表 1-1 本章学习目标

序号	类别	学习目标
1	知识目标	熟悉数字信号和数字电路的特点； 了解数字电路的分类、特点及学习方法； 熟悉仿真软件 Multisim 12 的使用
2	技能目标	能查阅有关数字电路的技术资料和数字电路参数并能正确选用； 能使用仿真软件 Multisim12 进行电路的仿真分析； 能按照数字电路原理图制作实际简单的数字电路，并能通过仿真分析测试得出正确结论
3	素养目标	学生的自主学习能力、沟通能力及团队协作精神； 良好的职业道德； 质量、成本、安全、环保意识

1.1 电子技术的发展历程

电子技术是 19 世纪末、20 世纪初开始发展起来的新兴技术，是近代科学技术发展的一个重要标志。第 1 代电子产品是以电子管为核心的。到了 20 世纪 40 年代末，世界上诞生了第 1 只半导体三极管，它小巧、轻便、省电及寿命长等特点，很快地被各国应用起来，在很大范围内取代了电子管。20 世纪 50 年代末，世界上出现了第 1 块集成电路，它把许多晶体管等电子元器件集成在一块硅芯片上，使电子产品向更小型化发展。随着集成电路从小规模集成电路迅速发展到大规模

集成电路和超大规模集成电路，电子产品也向着高效能、低功耗、高精度、高稳定和智能化的方向迅速发展。

1.2 数字电路概述

人们常说，我们已经生活在信息化时代，信息技术已经渗透到人类社会生活的各个领域。互联网+、云计算、大数据、移动通信、数字高清电视等无时无刻不在改变着我们的生活，而实现这些信息技术的设备都是以数字电路为基础的。

1.2.1 数字信号与数字电路

电子电路中的信号可以分为两大类：一类是时间或幅度连续的信号，称为模拟信号，如温度、湿度、速度、压力、磁场及电场等物理量通过传感器转换成的电信号、模拟语音音频信号以及模拟图像的视频信号等。模拟信号的波形如图 1-1 (a) 所示。对模拟信号进行产生、传输、加工和处理的电子电路称为模拟电路，如放大器、滤波器、功率放大器及信号函数发生器等。另一类是时间和幅度都离散的信号，称为数字信号。数字信号的波形如图 1-1 (b) 所示。对数字信号进行产生、传输、加工和处理的电子电路称为数字电路，如裁判表决器、数字抢答器、数字电子钟、数字万用表和数字电子计算机等。



图 1-1 模拟信号和数字信号的波形

由于在数字电路和模拟电路中研究的问题和使用的分析方法、设计方法都不相同，所以电子技术基础的内容一般分为数字电子技术和模拟电子技术两部分。

目前在数字电路中普遍采用数字 0 和 1 来表示数字信号，这里的 0 和 1 不是十进制中的数字，而是逻辑 0 和逻辑 1，称为二值数字逻辑。如果数字电路中逻辑 1 表示高电平，逻辑 0 表示低电平，称之为正逻辑体制；如果逻辑 0 表示高电平、逻辑 1 表示低电平，称之为负逻辑体制。目前在数字逻辑电路中习惯采用正逻辑体制，以后如无特殊说明，本书一律采用正逻辑体制。

表 1-2 列出了在正逻辑体制下逻辑电平和数字电压值之间的对应关系。

表 1-2 逻辑电平和数字电压值之间的对应关系表

电压/V	二值数字逻辑	电平
5	1	H (高电平)
0	0	L (低电平)

在工程实践中,电路描述一般采用正逻辑体制,负逻辑体制用得较少。如果需要,可按以下方式进行两种逻辑体制的转换:

与 $\leftrightarrow$ 或

非 $\leftrightarrow$ 非

与非 $\leftrightarrow$ 或非

二值数字逻辑的产生,是基于客观世界的许多事物可以用彼此关系又互相对立的两种状态来表示的。比如:事件的真与假、开关的通与断、电压的高与低、电流的有与无等。在数字电路中可用电子元器件的开关特性来实现该逻辑,电路中的半导体器件,如二极管、三极管等,它们可以处于开关状态,有时导通,有时截止。

1.2.2 数字电路的分类和特点

1. 数字电路的分类

最基本的数字电路仅由二极管、三极管和电阻等分立元器件组成,在实际应用中已经很少见到。现在的数字电路一般由集成电路组成。数字电路的种类繁多,其分类方式也较多,大致可从以下四方面进行分类。

(1) 按照集成电路芯片的集成度可以分为小规模(SSI, 每片数十器件)、中规模(MSI, 每片数百器件)、大规模(LSI, 每片数千器件)、超大规模(VLSI, 每片数十万器件)和特大规模(ULSI, 每片器件数大于100万)数字电路。所谓集成度,是指每一块数字集成芯片所包含三极管的个数。

(2) 按照所用器件制作工艺的不同,可以将数字电路分为双极性(TTL型)和单极性(CMOS型)两类。双极性电路开关速度快,频率高,信号传输延迟时间短,但制造工艺较复杂。单极性电路输入阻抗高、功耗小、工艺简单、集成密度高,且易于大规模集成。

(3) 按照电路的结构和工作原理的不同,可以将数字电路分为组合逻辑电路和时序逻辑电路两类。组合逻辑电路没有记忆功能,其输出信号只与当时的输入信号有关,而与电路以前的状态无关,如加法器、编码器、译码器、数据选择器等都是典型的组合逻辑电路。时序逻辑电路具有记忆功能,其输出信号不仅与当时的输入信号有关,还与电路以前的状态有关,如触发器、计数器、存储器、顺序脉冲发生器等都是典型的时序逻辑电路。组合逻辑电路和时序逻辑电路常常结合起来使用,以控制、操作和运算各种数字系统和数字设备。

(4) 按照电路的应用不同,可以将数字电路分为专用型和通用型两类。专用型数字电路是指为各种特殊用途专门设计、制造的,具有特定功能且功能完整的产品,只适用于专用的数字电路。典型的专用型数字电路如计算机中存储器芯片(RAM、ROM),微处理器芯片(CPU)及语音芯片等。

通用型数字电路又分为两种类型。一种是逻辑功能被定型的标准化、系列化的产品;另一种是可编程逻辑器件(Programmable logic Device, PLD)。前一种类型

的电路中，每一种器件的内部结构和逻辑功能在制造时已经固化，不能改变。目前常见的中、小规模数字集成电路大多属于这一种。利用这些产品可以组成更为复杂的数字系统，但当系统复杂以后，电路的体积将很庞大，而且由于器件之间的连线很多，降低了电路的可靠性。所以希望能找到一种既具有像专用电路那样体积小、可靠性高，能满足各种专门用途，同时又可以作为电子产品生产的数字电路，于是PLD便应运而生。

PLD的内部包含了大量的基本逻辑单元电路，通过写入编程数据，可以将这些单元连接成所需要的逻辑电路。所以，它的产品是通用型的，而它所实现的逻辑功能则由用户根据自己的需要通过编程来设定。20世纪90年代PLD得到了迅速的发展和普及，目前在一片高密度PLD中可以集成数十万个基本逻辑单元，足够连接成一个相当复杂的数字电路，形成所谓的“片上系统”。

2. 数字电路的特点

由于数字电路的工作信号是离散的二值数字信号，反映在电路上只有电流的有无或电平的高低两种状态，所以数字电路在结构、工作状态、研究内容和分析方法等方面都与模拟电路不同。数字电路具有下面6个方面的特点。

(1) 结构简单，便于集成化、系列化生产，成本低廉，使用方便。

电子器件（如二极管、三极管）的导通和截止两种稳定状态的外部表现为电流的有无或电平的高低，所以数字电路在稳态时，电子器件处于开关状态，即工作在饱和区或截止区。这种有和无、高和低相对立的两种稳定状态，可以用二进制数的两个数码1和0来表示。这里的1和0没有任何数量的含义，只表示两种不同的状态，所以在数字电路的基本单元电路中，对器件的精度要求不高，允许有较大的误差，电路在工作时只要能可靠地区分开1和0两种状态就可以了。相应地，组成数字电路的单元结构也比较简单，具有便于集成化和系列化生产、工作准确可靠、精度高、成本低廉、使用方便等优点。

(2) 抗干扰能力强、可靠性高、精度高。

由于数字电路传输、加工和处理的都是二值数字信号，这样不易受到外界的干扰，所以电路的抗干扰能力较强，可靠性较高。数字电路还可以用增加二值信号的位数来提高电路的运算精度。

(3) 便于长期存储、使用方便。

二值数字信号具有便于长期存储的特点，使大量的信息资源得以妥善保存，并且容易调出，使用方便。

(4) 保密性好。

在数字电路中可以很容易地进行保密处理，使宝贵的信息资源不易被窃取。

(5) 通用性强。

在数字电路中，可以采用标准的数字逻辑器件和可编程逻辑器件（PLD）来设计各种各样的数字系统，应用起来相当灵活。

(6) 具有“逻辑思维”能力。

数字电路能对输入的数字信号进行各种算术运算和逻辑运算、逻辑判断,故又称为数字逻辑电路。

由于数字电路具有以上优点,以及集成电路工艺技术的迅速发展,使数字电路在计算机、通信系统、仪器仪表、数控技术、家电以及国民经济的各个领域都得到了广泛的应用。

1.2.3 数字电路的学习方法

(1) 逻辑代数是分析和设计数字电路的工具,熟练掌握和运用好这一工具才能使学习顺利进行。

(2) 应当重点掌握各种常用数字逻辑电路的逻辑功能、外部特性及典型应用。对其内部电路结构和工作原理的学习,主要是为了加强对数字逻辑电路外部特性和逻辑功能的正确理解,不必过于深究。

(3) 数字电路的种类虽然繁多,但只要掌握基本的分析方法,便能得心应手地分析各种逻辑电路。

(4) 数字电路技术是一门实践性很强的技术基础课。学习时必须重视习题、基础实训和综合实训等实践性环节。

(5) 数字电子技术发展十分迅速,数字电路的种类和型号越来越多,应逐渐提高查阅有关技术资料 and 数字电路产品手册的能力,以便从中获得更多更新的信息。

1.3 认识 Multisim 12 软件

从事电子产品设计和开发等工作的人员,经常需要对所涉及的电路进行实物模拟和调试。其目的在于,一方面可验证所涉及的电路是否能达到设计要求的技术指标,另一方面通过改变电路中元器件的参数,使整个电路性能达到最佳。而这种实物模拟和调试的方法不但费工费时,而且其结果的准确性会受实验条件、实验环境、实物制作水平等因素的影响,因而工作效率不高。从 20 世纪 80 年代开始,随着计算机技术的迅速发展,电子电路的分析和设计方法发生了重大变革,一大批各具特色的优秀仿真软件的出现,改变了以定量估算和电路实验为基础的电路设计方法。下面介绍在电子电路中广泛使用的仿真软件 Multisim 12。

Multisim 12 是 NI 公司推出 Multisim 2001 之后的 Multisim 最新版本。Multisim 12 提供了全面集成化的设计环境,完成原理图设计输入、电路仿真分析及电路功能测试等工作。当改变电路连接或改变器件参数,对电路进行仿真时,可以清楚地观察到各种变化对电路性能的影响。其启动界面如图 1-2 所示。

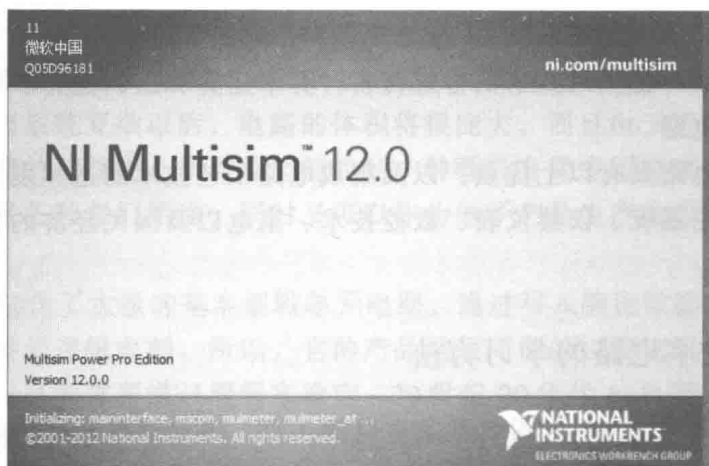


图 1-2 Multisim 12 的启动界面

1. 基本界面

在计算机“开始”中依次选择“程序”→“National Instruments”→“Circuit Design Suite 12.0”→“Multisim 12.0”，启动 Multisim 12，弹出如图 1-3 所示的 Multisim 12 用户界面。

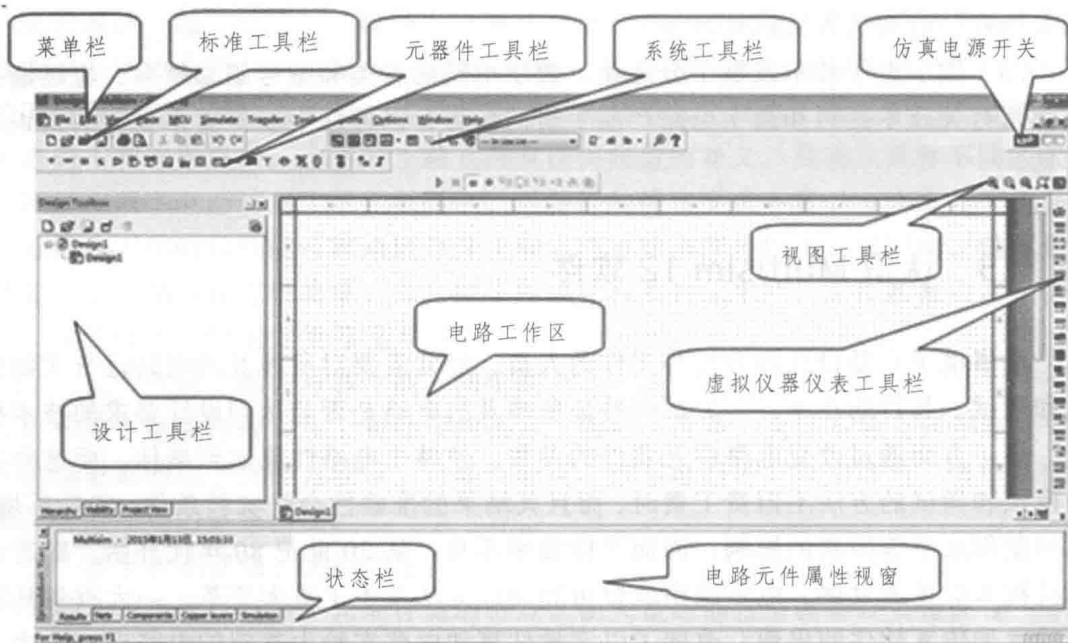


图 1-3 Multisim 12 用户界面

从图 1-3 可以看出，Multisim 12 用户界面主要由菜单栏、标准工具栏、元器件工具栏、系统工具栏、仿真电源开关、设计工具栏、视图工具栏、电路工作区、虚拟仪器仪表工具栏、状态栏以及电路元件属性视窗等组成。

1) 菜单栏

Multisim 12 的菜单栏提供了该软件的绝大部分功能命令,如图 1-4 所示。菜单栏从左到右依次是 File (文件)、Edit (编辑)、View (视图)、Place (放置)、MCU (单片机)、Simulate (仿真)、Transfer (转换)、Tools (工具)、Reports (报告)、Options (属性)、Window (窗口) 和 Help (帮助),共 12 项。



图 1-4 Multisim 12 的菜单栏

(1) File 菜单。

菜单用来对电路文件进行打开、新建、保存等管理操作,其具体功能如图 1-5 所示。

(2) Edit 菜单。

Edit 菜单用来对电路窗口中的电路图或元件进行编辑操作,其具体功能如图 1-6 所示。此菜单中,Undo、Redo、Cut、Copy、Paste、Delete、Find 和 Select All 选项的用法与 Windows 类似。下面介绍另外一些选项。

- ① Delete Multi-Page: 删除多页电路中某一页。
- ② Paste as Subcircuit: 将电路复制为子电路。
- ③ Find: 寻找元器件命令。
- ④ Comment: 编辑仿真电路的注释。
- ⑤ Graphic Annotation: 编辑图形注释,利用它可以改变导线的颜色等设置。
- ⑥ Order: 编辑图形在电路工作区中的顺序。
- ⑦ Assign to Layer: 用于层的分配。
- ⑧ Layer Setting: 用于层的设计。
- ⑨ Title Block Position: 设置标题栏在电路工作区中的位置。
- ⑩ Orientation: 调整电路元器件方向,包括水平调整、垂直调整、顺时针旋转 90°、逆时针旋转 90°。
- ⑪ Edit Symbol/Title Block: 编辑电路元器件的外形或标题栏的形式。
- ⑫ Font: 字体设置。可以对电路窗口中的元器件的标识号、参数值等进行设置。
- ⑬ Properties: 属性编辑窗口。

(3) View 菜单。

View 菜单用来显示或隐藏电路窗口中的某些内容,其具体功能如图 1-7 所示。

(4) Place 菜单。

Place 菜单提供在电路工作窗口内放置元器件、连接点、总线和文字等命令,其具体功能如图 1-8 所示。

(5) MCU 菜单。

MUC 菜单提供在电路工作窗口内 MCU 的调试操作命令,其具体功能如图 1-9 所示。

(6) Simulate 菜单。

Simulate 菜单用于对电路仿真的设置与操作,其具体功能如图 1-10 所示。

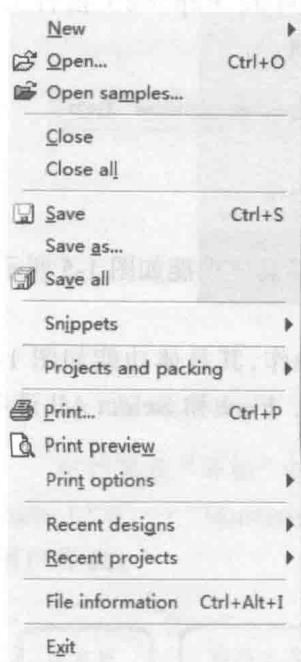


图 1-5 File 菜单

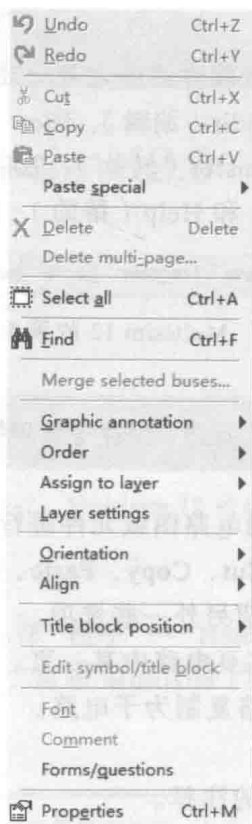


图 1-6 Edit 菜单

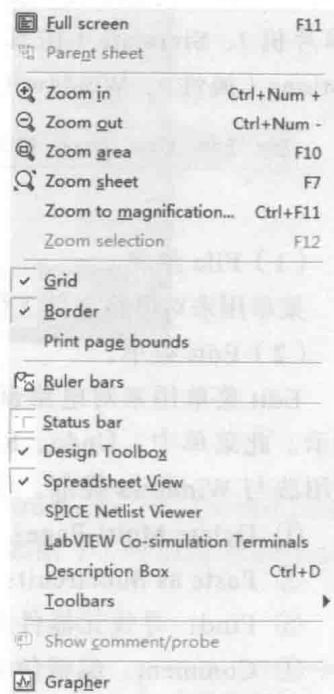


图 1-7 View 菜单



图 1-8 Place 菜单

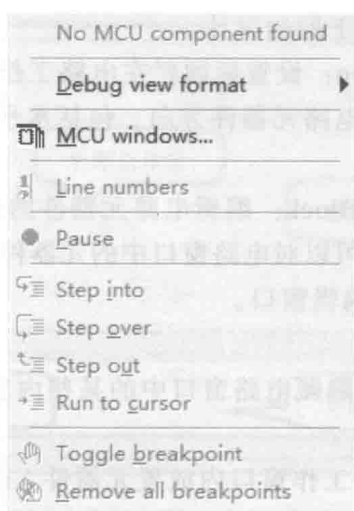


图 1-9 MCU 菜单

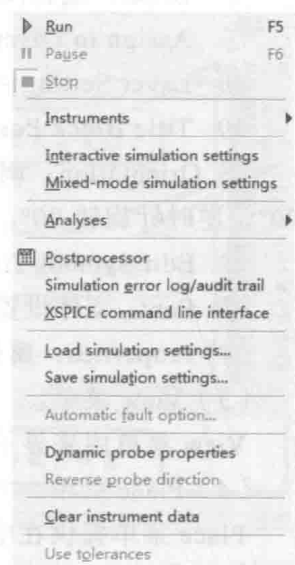


图 1-10 Simulate 菜单

(7) Transfer 菜单。

Transfer 菜单用于将 Multisim 12 的电路文件或仿真结构输出到其他应用文件，其具体功能如图 1-11 所示。

(8) Tools 菜单。

Tools 菜单用来编辑或管理元器件库或元器件命令,其具体功能如图 1-12 所示。

(9) Reports 菜单。

Reports 菜单用来产生当前电路的各种报告,其具体功能如图 1-13 所示。

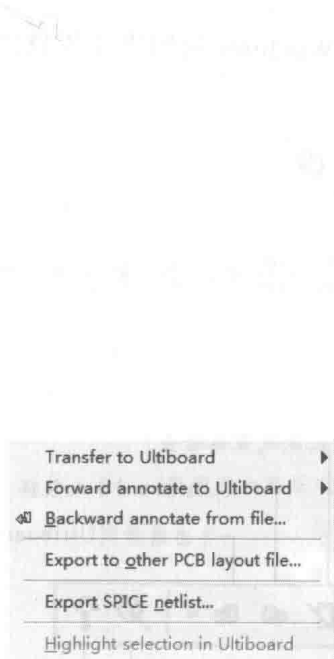


图 1-11 Transfer 菜单

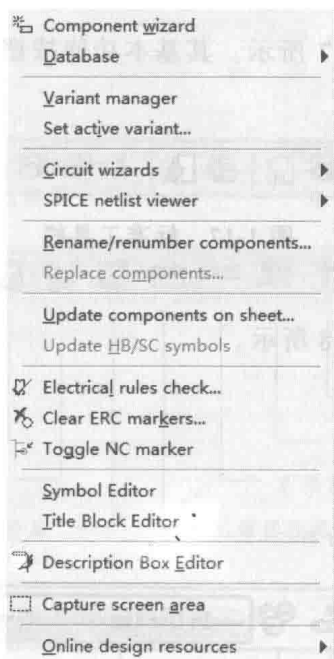


图 1-12 Tools 菜单

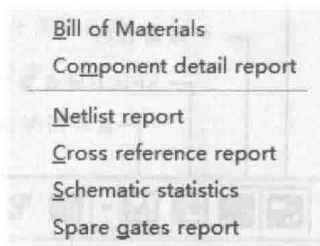


图 1-13 Reports 菜单

(10) Options 菜单。

Options 菜单用于定制软件界面和某些功能的设置,其具体功能如图 1-14 所示。

(11) Window 菜单。

Window 菜单用于控制 Multisim12 窗口的显示,其具体功能如图 1-15 所示。

(12) Help 菜单。

Help 菜单为用户提供在线技术帮助和指导,其具体功能如图 1-16 所示。

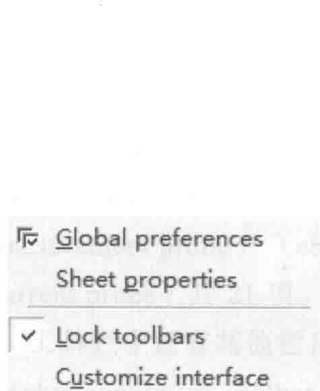


图 1-14 Options 菜单

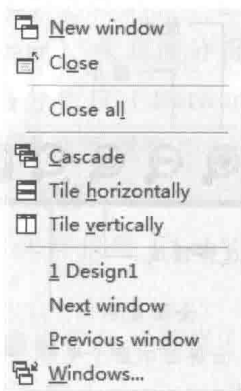


图 1-15 Window 菜单

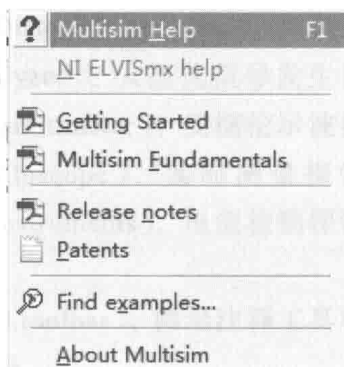


图 1-16 Help 菜单