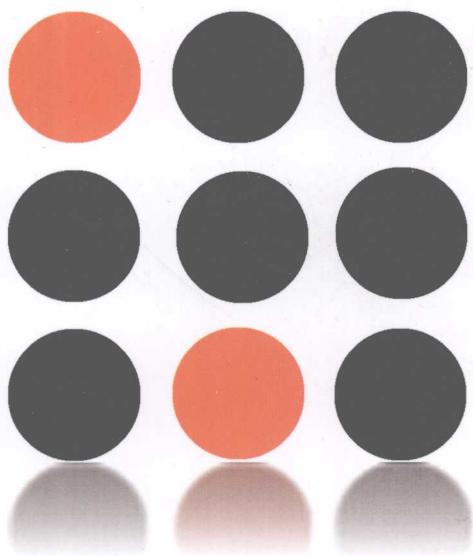


 高等院校计算机专业课程综合实验系列规划教材



丛书主编 何钦铭 陈根才

施青松 董亚波 等 著
邹逢兴 主 审

逻辑与计算机设计 基础实验与 课程设计



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

TP302.2-33/2D

2008

浙江大学魏绍相计算机教材建设基金资助
高等院校计算机专业课程综合实验系列规划教材

逻辑与计算机设计 基础实验与课程设计

施青松 董亚波 等著
邹逢兴 主审

浙江大学出版社

内容简介

本书是《数字电子技术基础》和《逻辑与计算机设计基础》课程的实验教程。作为基础实验教程,主要是为后续课程培养硬件基础的实验技能。全书分6章共安排了12个基本实验,2个课程设计范例解析,8个综合课程设计练习及若干参考选题。每个实验都给出若干个任务,任务之间由浅入深。本教程软件设计平台选用Xilinx ISE,硬件描述语言选择Verilog HDL。书后附光盘,其内容包含核心代码、课件PPT及实验相关资料。

本书可供高等院校的计算机科学、计算机工程、软件工程、电子信息工程、通信工程、自动化专业及相关本科专业使用,尤其适用于已经采用EDA技术的课程实验、综合实验及课程设计实验的教材,同时也可作为其他工程类专业或从事数字EDA技术设计的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

逻辑与计算机设计基础实验与课程设计 / 施青松等著.
杭州:浙江大学出版社, 2008.5
(高等院校计算机专业课程综合实验系列规划教材)
ISBN 978-7-308-05683-0

I. 逻... II. 施... III. 电子计算机—逻辑设计—高等学校—教材 IV. TP302.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第196795号

逻辑与计算机设计基础实验与课程设计

施青松 董亚波 等著
邹逢兴 主审

丛书主编 何钦铭 陈根才
策 划 黄娟琴 希 言
责任编辑 邹小宁
封面设计 氧化光阴
出版发行 浙江大学出版社
(杭州天目山路148号 邮政编码310028)
(E-mail: jsjy@zju.edu.cn)
(网址: <http://www.zjuxsj.com>)
<http://www.press.zju.edu.cn>)
电话: 0571—88925592, 88273066(传真)

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心
印 刷 富阳市育才印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 14.5
字 数 380千
版 次 2008年5月第1版 2008年5月第1次印刷
印 数 0001—3000
书 号 ISBN 978-7-308-05683-0
定 价 26.00元(含光盘)

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换
浙江大学出版社发行部邮购电话(0571)88072522

专家指导委员会

主 任

齐治昌 国防科技大学教授,教育部软件工程专业教学指导分委员会副主任

副主任

陈道蓄 南京大学计算机系教授,教育部计算机科学与技术专业教学指导分委员会副主任

蒋宗礼 北京工业大学计算机学院副院长,教授,教育部计算机科学与技术专业教学指导分委员会秘书长

委 员(按姓氏笔画排列)

王志英 国防科技大学计算机学院副院长,教授,教育部高等学校计算机科学与技术专业教学指导分委员会副主任

左保河 华南理工大学软件学院副教授,教育部高等学校软件工程专业教学指导分委员会委员

刘 强 清华大学副教授,教育部高等学校软件工程专业教学指导分委员会秘书长

孙吉贵 吉林大学计算机学院副院长,教授,教育部高等学校计算机科学与技术专业教学指导分委员会委员

庄越挺 浙江大学计算机学院副院长,教授,教育部计算机科学与技术专业教学指导分委员会委员

吴 跃 电子科技大学计算机学院教授,教育部计算机科学与技术专业教学指导分委员会委员

李 彤 云南大学软件学院副院长,教授,教育部计算机科学与技术专业教学指导分委员会委员

邹逢兴 国防科学技术大学教授,国家级教学名师

陈志刚 中南大学信息学院副院长,教授,教育部高等学校计算机科学与技术专业教学指导分委员会委员

岳丽华 中国科学技术大学教授,教育部高等学校计算机科学与技术专业教学指导分委员会委员

徐宝文 东南大学教授,教育部高等学校软件工程专业教学指导分委员会委员

廖明宏 哈尔滨工业大学计算机学院副院长,教授,教育部高等学校计算机科学与技术专业教学指导分委员会委员

管会生 兰州大学信息科学与工程学院副院长,教授,教育部高等学校理工类计算机基础课程教学指导分委员会秘书长

序 言

近 10 多年来,以计算机和通信技术为代表的信息技术迅猛发展,并已深入渗透到国民经济与社会发展的各个领域。信息技术成为国家产业结构调整 and 推动国民经济与社会快速发展的最重要的支撑技术。与此同时,深入掌握计算机专业知识、具有良好系统设计与分析能力的计算机高级专业人才在社会上深受欢迎。

计算机科学与技术是一门实践性很强的学科。良好的系统设计和分析能力的培养需要通过长期、系统的训练(包括理论和实践两方面)才能获得。高等学校的实践教学一般包括课程实验、综合性设计(课程设计)、课外科技活动、社会实践、毕业设计等,基本上可以分为三个层次:第一,是紧扣课堂教学内容,以掌握和巩固课程教学内容为主的课程实验和综合性设计;第二,是以社会体验和科学研究体验为主的社会实践和课外科技活动;第三,是以综合应用专业知识和全面检验专业知识应用能力的毕业设计。课程实践(含课程实验和课程设计)是大学教育中最重要也最基础的实践环节,直接影响后继课程的学习以及后继实践的质量。由于课程设计是以培养学生的系统设计与分析能力为目标,通过团队式合作、研究式分析、工程化设计完成较大型系统或软件的设计题目的,因此课程设计不仅有利于学生巩固、提高和融合所学的专业课程知识,更重要的是能够培养学生多方面的能力,如综合设计能力、动手能力、文献检索能力、团队合作能力、工程化能力、研究性学习能力、创新能力等。

浙江大学计算机学院在专业课程中实施课程设计(project)已有 10 多年的历史,积累了丰富的经验和资料。为全面总结专业课程设计建设的经验,推广建设成果,我们特别组织相关课程的骨干任课教师编写了这套综合实验系列教材。本系列教材的作者们不仅具有丰富的教学和科研经验,而且是浙江大学计算机学院和软件学院的教学核心力量。这支队伍目前已经获得了两门国家精品课程以及四门省部级精品课程,出版了几十部教材。

本套教材由《C 程序设计基础课程设计》、《软件工程课程设计》、《数据结构课程设计》、《数值分析课程设计》、《编译原理课程设计》、《逻辑与计算机设计基础实验与课程设计》、《操作系统课程设计》、《数据库课程设计》、《Java 程序设计课程设计》、《面向对象程序设计课程设计》、《计算机组成课程设计》、《计算机体系结构课程设计》和《计算机图形学课程设计》等十三门课程的综合实验教材所组成。该系列教材构思新颖、案例丰富,许多案例直接取材于作者多年教学、科研以及企业工程经验的积累,适用于作为计算机以及相关专业课程设计的实验教材;也适用于对计算机有浓厚兴趣的专业人士进一步提升计算机的系统设计与分析

能力。从实践的角度出发,大部分教材配备了随书光盘,以方便读者练习。

可以说,本套教材涵盖了计算机专业绝大部分必修课程和部分选修课程,是一套比较完整的专业课程设计系列教材,也是国内第一套由研究型大学计算机学院独立组织编写的专业课程设计系列教材。鉴于书中难免存在的谬误之处,敬请读者指正,以便不断完善。

主编 何钦铭、陈根才

2007年6月于求是园

前言

20 世纪 80 年代以来,计算机体系结构的发展对科学技术和社会生活所产生的影响是任何一个学科都难以比拟的,它推动了生产力的发展,改变了科学技术、生产工艺以及人类的生活方式。在硬件知识体系范畴上,虽然其基本理论没有发生改变,但这些理论的应用及涉及对象的实现技术、方法等都发生了巨大的改变。计算机辅助设计技术融入硬件设计中,使原来复杂的数字逻辑系统的设计难度降低,让技术人员可以更多地考虑系统的复杂性、完备性、性能优化等要素,同时也使计算机科学、计算机工程、软件专业知识背景的人才直接介入复杂数字电路系统的设计成为可能。

一方面,随着计算机辅助设计技术和微电子 FPGA 技术的出现,要在 FPGA 上实现一个简单的或略微复杂的 CPU 逻辑核(IP 核)已不是很困难的事情,在理论上即使实现功能完善的 CPU 核也是可行的。这样的技术条件和实现背景为计算机硬件课程提供了坚实的底层支持,使我们可以在教学和科研上开展计算机体系结构和组成的逻辑电路实现。

另一方面,随着对计算机系统性能需求的提高及嵌入式应用的发展,社会需要具有计算机系统知识的人才参加数字系统的软硬件协同设计,以便从计算机体系结构、操作系统、编译技术、数据结构的角度及算法语言的优化设计层面去研究如何做更好的硬件体系结构,做更好的软硬件之间的映射与协同。

基于这样的技术和需求背景,本课程及相应的实验紧密围绕理论知识点,突出硬件知识运用的基本技能,体现两个特点:一是利用计算机辅助设计技术,选择 Verilog HDL 和 FPGA 作为数字系统课程的实现技术,强化硬件知识的基本运用能力;二是为计算机后续课程作准备,学习和掌握计算机系统设计所需的基本单元功能电路。

课程实验是课堂教学的延伸,目的是加深对基本概念的感性认识;课程设计是课堂教学的深化,目的是强化理论知识的综合运用。课程实验和课程设计只有紧密围绕理论课程的知识点和教学目标,才能达到预期目的,成为理论联系实际的桥梁。因此,在课程学习阶段的实验、综合设计与课程设计都是为课程教学服务的。

对于计算机科学和软件学科,《逻辑与计算机设计基础》是一门专业基础课。根据学科特点和学生的特长,本实验教程兼顾结构思维和行为思维方式,分三个层次设计实验,即基本原理知识点实验、专业课程知识点实验及课程设计(综合)实验,力求各实验单独构成模块,相互之间循序渐进、由浅入深、点面结合。

本书选择 Verilog HDL 作为计算机辅助设计的硬件描述语言,主要有两方面原因:一是计算机专业的学生具有 C 语言特长;二是用 C 语言设计的模拟器较容易移植为 Verilog HDL 代码,但本实验不是学习硬件描述语言的实验,因此,在知识点实验设计中,力求通过结构描述和门级描述来加强对电路结构的感性认识。这种设计方法没有充分利用系统综合工具,在实现时序要求较高的组合电路和时序电路时会遇到很多困难,但对这些困难的解决

可以让学生加深对电路的结构和时延等电气参数的感性认识。在课程设计部分,我们要求采用可综合行为描述方法,让学生掌握实际应用中的硬件描述方法。

关于本书实验教学的两点建议。

1. 实验安排

实验教学课时分配可以根据教学对象灵活调整。实验课程共安排了 12~14 个必修实验,每个实验有若干个任务,可以根据专业进行不同选择。每个实验的基本任务(一般是前 1~3 个任务)为必修,其余任务略有难度,可视学生程度增减,对电子类专业建议全做。

实验课时安排为每周一个实验,每个实验平均 2~3 学时。前期实验根据情况,课时可以多一些。为加强平台运用并为后续实验打好基础,计算机辅助实验平台应用实验(实验二)分配 4~6 学时。必修实验时数合计为 32 学时,不含考核时间。

实验课时安排非常紧凑,前后循序渐进,其中 8 个实验完全是用硬件描述语言来实现的。因此,在加强“实验二”指导的同时要认真做好实验预习。从组合实验(实验五)开始,在进实验室前必须将实验 HDL 代码调试至无语法错误,综合和模拟基本正确,以提高实验课效率。要求带着调试代码与问题进实验室。

综合实验和课程设计作为选择性实验,不计算课时数,可结合理论课教学布置。电子类专业可选做课程设计的高级要求部分,其余专业可选做课程设计(综合)基本要求部分。有困难的也可以不选,由实验老师酌情掌握。综合实验和课程设计与基础实验不一样,只需选做一个。

2. 加强实验教学指导与考核

每次实验课均要求做实验要点讲授、实验电路原理分析。在实验进行的同时,就实验中出现的问题可以组织适量的实验交流讨论。在做实验时,进行预习检查。每次实验后完成实验报告的同时,还要完成每周 2~4 小时的实验作业,包含预习。

实验课程考核根据学校课程考核要求严格执行,成绩评定按照实验预习、实验提问、实验过程、实验报告等综合评定。建议评分如下:

以每个实验 10 分计:预习 3 分,实验过程 4 分,实验结果 1 分,实验报告 2 分。期末实验考核(包括实验提问、综合实验或课程设计、考核)占 15%。

全书共分 6 章,其中第 1 章由王琦、章鸣、施青松编写;第 2 章由章鸣、蒋方炎、江树木编写;第 3 章~4 章、第 6 章由董亚波、施青松编写;第 5 章由施青松编写。

在本书编写过程中得到了许多教师和同学的帮助。特别感谢石教英教授、施敏华高工及洪燕、郑钦卿、潘峰同学。

由于时间和条件的限制,虽然努力改进,但由于技术涉及面广及编者的局限性,难免存在一些不妥和错误,欢迎读者提出修改意见。作者邮箱:zjsqs@zju.edu.cn。

作者

2007 年 11 月

目 录

第 1 章 硬件实验基本常识	1
1.1 实验的重要性	1
1.2 硬件实验的基本常识	1
1.2.1 常用电子器件及装配工具	1
1.2.2 数字集成电路使用要点	8
1.2.3 数字系统输入信号的获取	11
1.2.4 数字系统输出形式	13
1.2.5 数字系统电路的测试与调试	15
1.2.6 数字系统设计开发的一般过程	18
1.3 可编程逻辑器件	18
1.3.1 复杂可编程器件 CPLD	18
1.3.2 现场可编程门阵列 FPGA	19
1.4 Xilinx Spartan III 实验平台简介	23
1.4.1 实验平台功能布局结构	23
1.4.2 Spartan III 资源参数	25
1.5 Xilinx ISE8.1i FPGA 开发平台	28
1.5.1 Xilinx ISE 简介	28
1.5.2 ISE8.1i 的界面简介	29
1.5.3 使用 ISE 的开发流程	32
第 2 章 数字逻辑电路基础实验	34
实验一 基本开关电路	34
实验二 Verilog HDL 运用与 Xilinx 软硬件实验平台的运用	40
实验三 集成逻辑门电路的功能及参数测试	59
实验四 三态门和集电极开路(OC)门	67
实验五 RS,D 触发器设计实验	76
第 3 章 组合逻辑电路实验	88
实验六 变量译码器应用	88
实验七 数据选择器设计及应用	99
实验八 全加器的设计分析	112

第 4 章 时序逻辑电路实验.....	124
实验九 同步时序电路典型设计.....	124
实验十 计数器/定时器设计与应用	130
实验十一 移位寄存器设计与应用.....	140
实验十二 寄存器及寄存器堆设计.....	145
第 5 章 课程设计范例解析.....	152
范例一 数字钟——实用计时时钟系统.....	153
范例二 简单 VGA 显示接口	168
第 6 章 综合课程设计练习.....	187
练习一 数字密码锁.....	187
练习二 算术逻辑单元 ALU	189
练习三 程序计数器.....	193
练习四 多周期指令译码器.....	197
练习五 二进制并行乘法器.....	206
练习六 霓虹灯控制器.....	209
练习七 串口终端.....	213
练习八 课程设计参考选题.....	218
参考文献.....	221

第1章

硬件实验基本常识

1.1 实验的重要性

在世界科技的发展历程中,重大的发现和创造发明无不与参与者精心设计的实验和认真的实验过程有关。实验既可以验证理论正确与否又可以有新的发现,是科学技术前进中不可缺少的环节。要达到实验理想的目标不仅要设计好的实验方案,而且要认真地做好实验中的每一步,正确记录实验的数据并做科学的统计。

实验分为科学实验和教学实验,科学实验是人们对自己的想法以及对自然界现象的观察、猜想、怀疑、推断等进行验证、求证和实现所进行的活动。教学实验主要是知识学习的重要手段和方法,通过演示、验证、综合、设计来加深对理论知识的认识。在大学课程教学中,实验教学处于非常重要的地位,其作用是任何课堂讲解所无法取代的。

教学实验符合教学过程中的认知特征,感性认识对学生具有很强的吸引力,能使学生参与意识明显提高;通过实验过程,可以培养实事求是、严谨治学、一丝不苟的学习态度和工作作风。硬件实验可以加深学生对电路理论知识的理解,对电路中的一些具体器件,如数字集成块,有感性认识,增强电路设计及动手操作的能力,提高综合素质,达到理论联系实际的目的。

1.2 硬件实验的基本常识

在教学实验中经常用到一些元件、器件和工具,有必要先认识它们,以便更好地完成实验,提高实验课效率。下面简介数字电路实验中经常用到的器件。

1.2.1 常用电子器件及装配工具

1. 常用电路器件

(1)电阻器:是电路中的最基本元件,常用于电路分压、分流,简称电阻,单位欧姆(Ω)。导体对电流的阻碍作用叫做导体的电阻。电阻器根据结构可分为固定电阻器、可变电阻(也称电位器)、排电阻和半固定电阻器。图 1-1 为固定电阻和色标。

根据工艺和制造材料,电阻器可分为三类:薄膜电阻器、线绕电阻器和敏感电阻器。其中,薄膜电阻器又分为碳膜电阻器、合成碳膜电阻器、金属膜电阻器、金属氧化膜电阻器、化

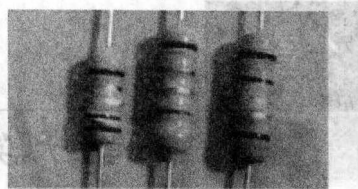
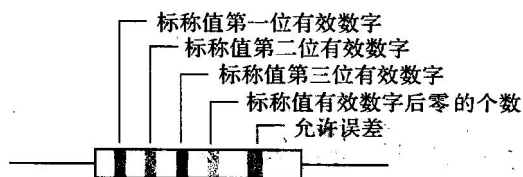


图 1-1 固定电阻与色标

学沉积膜电阻器、玻璃釉膜电阻器和金属氮化膜电阻器；线绕电阻器分为：通用线绕电阻器、精密线绕电阻器、大功率线绕电阻器和高频线绕电阻器；敏感电阻器分为：压敏电阻器、热敏电阻器、光敏电阻器、力敏电阻器、气敏电阻器和湿敏电阻器。

电阻器阻值标示方法一般有四种。

直标法：用数字和单位符号在电阻器表面标出阻值，其允许误差直接用百分数表示，若电阻上未注偏差，则为 $\pm 20\%$ 。一般允许偏差 $\pm 0.5\%$, $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ 。

色标法：用不同颜色的环或点在电阻器表面标出标称阻值和允许偏差。国外电阻大部分采用色标法。色标的数值含义如表 1-1 所示。

表 1-1 色码对应的数字

黑	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	金	银	无色
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 20\%$

文字符号法：用阿拉伯数字和文字符号两者以约定排列组合来表示标称阻值，其允许偏差用符号表示。符号前面的数字表示整数阻值，后面的数字依次表示第一位小数阻值和第二位小数阻值。表示允许误差的符号有 D, F, G, J, K, M 分别对应 $\pm 0.5\%$, $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ 。

数码法：在电阻器上用三位数码表示标称值的标志方法。数码从左到右，第一、二位为有效值，第三位为指数，即零的个数，单位为欧姆。偏差通常用符号表示。

电阻的主要参数是阻值和功率，后者根据流过电阻的电流用欧姆定律来确定，超出额定功率，电阻要烧毁。一般大功率电路上用水泥电阻和珐琅电阻，如步进电机控制中的限流电阻。图 1-2 所示是常见的电阻和电位器，其中①、②是功率不同的金属膜电阻；③是色标碳膜电阻；④是电位器；⑤是大功率珐琅电阻。

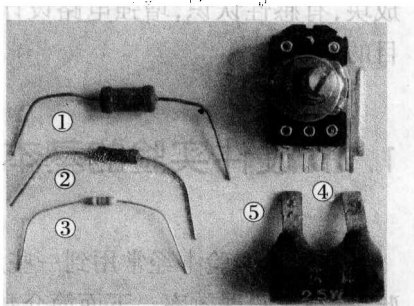


图 1-2 常用的电阻和电位器

(2) 电容器：也是电路中常用的基本元件，常用于储能、隔直流、耦合、旁路、滤波、延时、调谐回路等，简称电容。两块相互靠近又彼此绝缘的平行板导体就构成了电容器。电容器所带的电量与两极板间电势差的比值叫电容。国际单位为法拉(F)，常用的有 μF (微法拉)、 nF (纳法拉)和 pF (皮法拉或微微法拉)。

根据结构电容器可分为固定电容器、可变电容器和微调电容器。按平行板间的电解质不同可分为：有机介质电容器、无机介质电容器、电解电容器和空气介质电容器等。电解质电容器是有正负极性的，一般用于电源滤波。由于电容结构上存在分布参数，不同场合所用

的电容的材料和工艺不同。高频电路一般用陶瓷电容器、云母电容器、玻璃膜电容器、涤纶电容器和玻璃釉电容器;低频电路一般用纸介电容器、陶瓷电容器、铝电解电容器和涤纶电容器,如图 1-3 所示,其中,①是涤纶电容,②是聚苯乙烯电容,③是铝电解电容,④是陶瓷电容,⑤是云母电容。

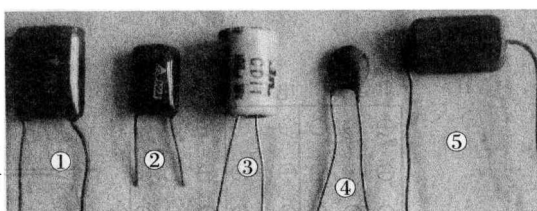


图 1-3 常见的电容器

电容器容量标示方法一般有三种。

直标法:用数字和单位符号直接标出。如 $01\mu\text{F}$ 表示 0.01 微法拉,有些电容用“R”表示小数点,如 R56 表示 0.56 微法拉。

文字符号法:用数字和文字符号两者以约定排列组合来表示容量。如 p10 表示 0.1pF, 1p0 表示 1pF, 6p8 表示 6.8pF, $2\mu 2$ 表示 $2.2\mu\text{F}$ 。

色标法:用色环或色点表示电容器的主要参数。电容器的色标法与电阻相同。

电容的主要参数是容量和耐压,根据电路加在电容两端的工作电压选择电容耐压,超出额定耐压,电容将被击穿损坏。

工厂生产电阻、电容时按照国家制定的标准进行,这个标准称为标称值,如表 1-2 所示。所有生产的电阻、电容额定值都应是标称值的 10^n 倍数,其中 n 为 $\pm$ 整数。

表 1-2 电阻、电容标称值系列

标称值系列	精度	电阻器(Ω)、电位器(Ω)、电容器标称值(pF)							
E24	$\pm 5\%$	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0
		2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9	4.3
		4.7	5.1	5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1
E12	$\pm 10\%$	1.0	1.2	1.5	1.8	2.2	2.7		
		3.3	3.9	4.7	5.6	6.8	8.2	—	—
E6	$\pm 20\%$	1.0	1.5	2.2	3.3	4.7	6.8	8.2	—

2. 基本半导体元件

(1)二极管:是基本的半导体元件,其主要特性是单向导电性。半导体导电结构有两类:一类是 P 型半导体,主要导电粒子是空穴;另一类是 N 型半导体,主要导电粒子是电子。在 P 型半导体和 N 型半导体结合处由于正负电荷(载流子)浓度的不同而产生扩散和漂移两种不同的运动,这两种运动在无外力(电场)作用时会达到平衡而形成内电场,这个电场称为 PN 结,它对流过 PN 结的电流有阻碍作用,如图 1-4(a)所示。这个 PN 结电场在温度、光线等作用下会发生变化。

如果在 PN 结上加上外部电场,就可以控制这个内电场的大小,从而控制流过 PN 结的电流,如图 1-4(b)所示是 PN 结加上外部电场(电压,也称为偏压)后的伏安特性曲线。将 PN 结封装后两端引出就是一个二极管,其本质就是一个 PN 结,图 1-4(c)是它的电路符号。

晶体二极管的伏安特性曲线可以分为三个区域,根据用于不同的电路要求,可以生产不同特性的二极管。

正向特性:当在二极管两端加正向电压,即 P 为正、N 为负时,这个电压所产生的电场

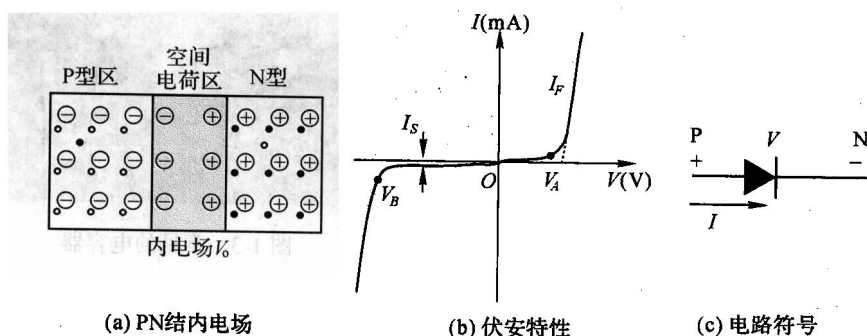


图 1-4 晶体二极管输入输出伏安特性及电路符号

与内电场方向相反,当所加电压很小时,不能克服内电场的作用,二极管不导通,处于“截止”状态;当所加正向电压超过一定数值后,克服了内电场的作用,二极管才开始导通,见图 1-4(b)中的 V_A ,这个电压称为导通电压,不同材料的二极管,导通电压不同,硅管为 $0.5 \sim 0.7\text{V}$ 左右,锗管为 $0.1 \sim 0.3\text{V}$ 左右;超过 V_A 后,电压再稍微增大,电流急剧增加,见图 1-4(b)中的 I_F 段。

反向特性:当在二极管两端加反向电压时,这个电压所产生的电场与内电场方向相同,加强了内电场,此时反向电流很小。当反向电压逐渐增加时,反向电流基本保持不变,二极管此时也处于截止状态,这时的电流称为反向饱和电流,如图 1-4(b)中的 I_S 段。不同材料的二极管,反向电流大小不同,硅管约为 1 微安到几十微安,锗管则可高达数百微安,另外,反向电流受温度变化的影响很大,锗管的稳定性比硅管差。

击穿特性:当反向电压继续增加到某一数值时,反向电流急剧增大,这种现象称为反向击穿,见图 1-4(b)中 V_B 段, V_B 称作反向击穿电压。不同的结构、工艺和材料制成的管子,其反向击穿电压值差异很大,可为 1 伏到几百伏,甚至高达数千伏。反向击穿有雪崩击穿、齐纳击穿(少数载流子数目剧增,有稳压作用)和热击穿(超出功耗,永久性损坏)。

常见的二极管有整流二极管、稳压二极管、开关二极管等,如图 1-5 所示的是常见的二极管。其中,①是稳压二极管;②是整流二极管;③,④,⑤是发光二极管。

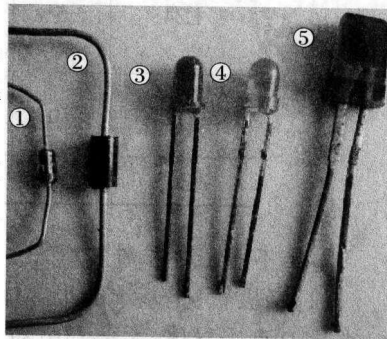


图 1-5 常见二极管外形

(2)三极管:也是基本的半导体元件,有两个 PN 结,分别称为集电结和发射结;有三个极,分别称为发射极、基极、集电极。常见的三极管有两种结构,一种是双极型三极管,简称三极管,是控制电流的受控源,其内部结构和电路符号如图 1-6 所示。另一种是场效应管,是电压(场)控制电流的受控源,输入阻抗非常大。在数字电路中使用的场效应管大多数是用金属氧化膜半导体工艺制作的,简称 MOS 管,其内部结构和电路符号如图 1-7 所示,场效应管的三个极,分别称为源极、栅极、漏极。

图 1-8 是常见三极管外形,其中,①是金属封装的大功率三极管,②是金属封装的小功率三极管,③是塑封的小功率三极管,④是塑封的大功率三极管,⑤是塑封的 MOS 功率管。

三极管是利用两个 PN 结的不同工艺结构来构成的一种受控源,可以实现电压电流的

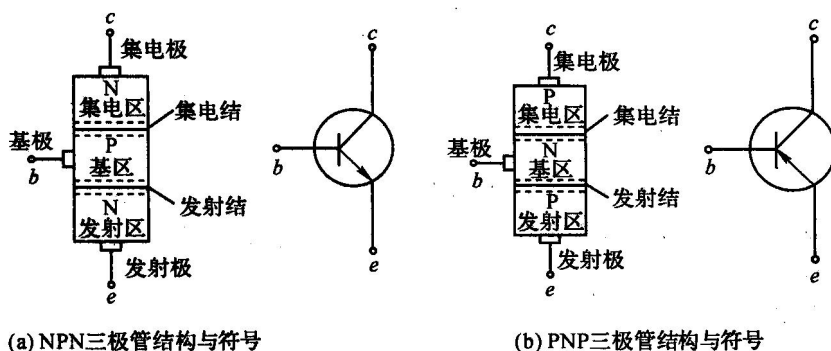


图 1-6 双极型三极管结构与电路符号

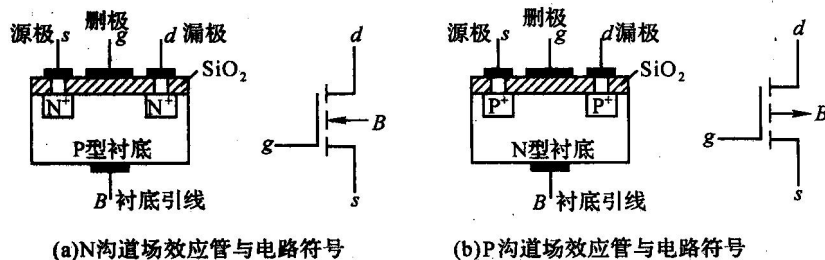


图 1-7 MOS 场效应管结构与电路符号

控制,如放大或开关运算。图 1-9 是 NPN 双极型三极管的输入回路和输出回路的伏安特性曲线。其中输入回路特性与二极管相同,输出回路特性曲线可以分为三个工作区:放大区、饱和区与截止区。

根据三极管工艺结构,当外加电压使发射结 $V_{BE} > 0$ (实际应大于导通电压),集电结 $V_{BC} < 0$ 时,三极管进入放大区,工艺上保证满足 $i_C = \beta \cdot i_B$;当发射结 $V_{BE} < 0$ 时,三极管进入截止区, $i_B \approx 0$;当发射结 $V_{BE} > 0$,集电结 $V_{BC} > 0$ 时,三极管进入饱和区, $V_{CE} \approx 0$ 。利用三极管的饱和与截止可以制成开关三极管,实现逻辑电路功能。

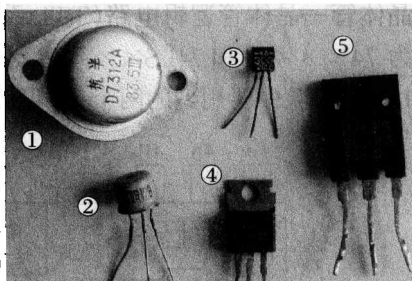


图 1-8 常见三极管外形

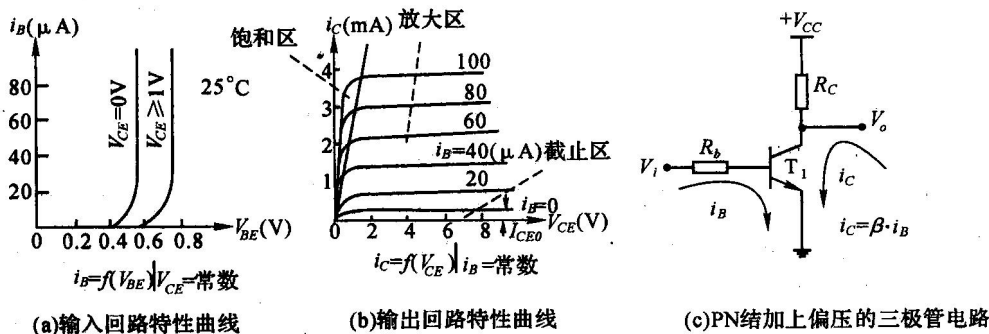


图 1-9 NPN 三极管的输入回路和输出回路 V - I 特性曲线

由图 1-9(c) 的三极管电路可得输入、输出回路方程: $V_i = I_B R_b + V_{BE}$; $V_o = V_{CC} - I_C R_c = V_{CC} - \beta I_B R_c$ 。分析方程可以发现 V_i 与 V_o 相位相反, 当 $V_i = 0$ 时, $V_o = V_{CC}$; 当 $V_i = V_{CC}$ 时, 调节 R_b 可以使 $\beta I_B R_c = V_{CC}$, $V_o = 0$ 。此时三极管输入输出反向, 实现逻辑“非”运算。

由三极管的工艺结构可以看出, 三极管的发射区和集电区的几何位置是等价的, 它们的区别在于制造时发射区的多数载流子(电荷)浓度比集电区要高很多。因此, 将发射极和集电极互换也有电流控制电流的作用, 只是性能很差, 我们把这种连接状态称为“倒置”。TTL 逻辑门的输入级将会出现这种状态。

3. 常用数字集成电路

给三极管电路加上不同的偏置电压可以等效为电阻、电容和电感。采用特殊的半导体工艺将实际电路等效集成在半导体材料上就构成了集成电路。因此, 集成电路是用半导体工艺制成的三极管(PN 结)集合。由于等效的电容和电感都非常小, 如果当电路中需有较大的电容、电感时, 还需外接电容、电感元件。

集成电路主要有两大类。一类是模拟集成电路, 主要是集成运算放大器和实现各种模拟信号处理的专用集成电路。另一类是数字集成电路, 主要是逻辑门电路、触发器、寄存器、计数器、存储器、可编程集成芯片和专用数字系统(如 CPU 之类)等众多数字集成电路产品。

常用的半导体材料是硅晶体, 所以集成电路也称为晶片或硅片; 实际使用的还有一些是用金属氧化物材料的半导体, 如 MOS 集成电路。目前中小规模数字集成电路最常用的是晶体管—晶体管逻辑电路(TTL 系列)和互补金属氧化物半导体(CMOS 系列)。TTL 又分为 74×× 系列和 74LS×× 系列等; MOS 逻辑门电路分为 CMOS 系列和 HCMOS 系列等。图 1-10 是实验中要用到的两个集成逻辑门电路 74LS00 和 CD4001 引脚排列和内部逻辑功能图。

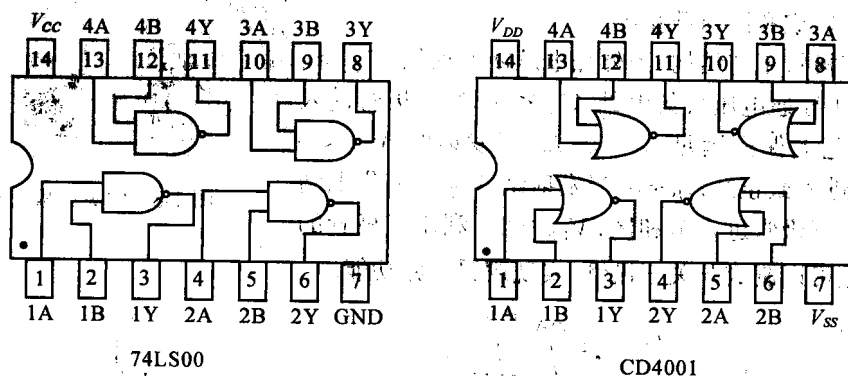


图 1-10 74LS00 和 CD4001 集成逻辑门电路引脚与逻辑功能

数字集成电路规模一般是由集成内部门的数量来划分的, 小规模集成电路(small-scale integrated, SSI)小于 10 个门, 中规模集成电路(medium-scale integrated, MSI)10 到 100 个门, 大规模集成电路(large-scale integrated, LSI)100 到几千个门, 超大规模集成电路(very large-scale integrated, VLSI)几千到几千万个门。

74LS00 芯片一共封装了四个与非门, 其中一个与非门组件构成一个独立的 TTL 与非门, 其内部电路结构如图 1-11 所示, 它由输入级、分相级和输出级三级电路组成。

输入级 T_1 : 实现“与”功能。 T_1 的多个输入端是并联接入的, 只要有一个输入为低电平

“0”时, T_1 深饱和, T_1 集电极为低电平“0”; 当 T_1 输入均为“1”时发射结截止, 基极电流经过集电结流向 T_2 、 T_5 , 使其导通, T_1 倒置工作, 其集电极为高电平“1”(约 1.4V)。

分相级 T_2 : 实现分相功能。前面分析过集电极与基极相位相反, T_2 集电极反相输出前级送来的信号, 构成“与非”输出, 驱动 T_3 、 T_4 基极; 发射极与基极的电平只相差一个 PN 结的电压 (V_{BE}), T_2 发射极同相输出前级送来的信号, 构成“与”输出, 驱动 T_5 基极。

输出级 T_3 、 T_4 、 T_5 : 构成输出驱动级。 T_3 、 T_4 将前级信号从发射极同相输出(这种输出称射极跟随器), 称“1”输出驱动器; T_5 将前级信号从集电极反相输出, 称“0”反相输出驱动器。在输出 F 端合成“与非”输出功能, 这种互补输出称为图腾结构。正常工作时或静态时只有一个输出级是导通的, 如果两个输出级同时导通将会使 T_4 、 T_5 损坏。

4. 常用电路装配工具

图 1-12 所示给出了电路装配时常用的工具, 各工具的主要作用是:

裁纸刀, 见图 1-12 所示①。一般用于裁剪修正胶布、绝缘材料、塑料件等较软性的实验材料。

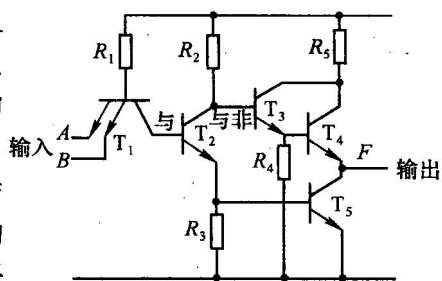


图 1-11 TTL 与非门电路

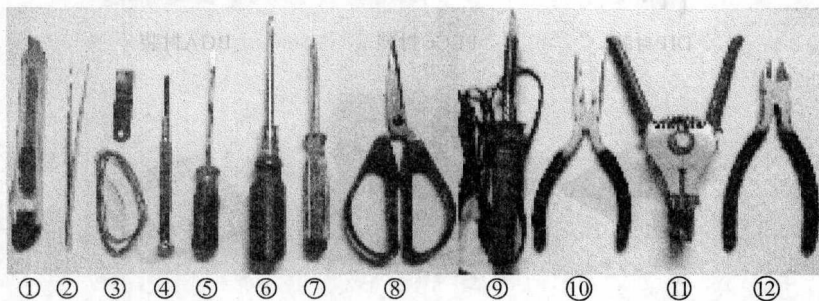


图 1-12 常用电路装配工具

镊子钳, 见图 1-12 所示②。一般用于夹拿小元件; 弯曲、弯折元件引脚或细导线; 焊接时夹住定位小器件等。

钢锯片, 见图 1-12 所示③上部。用于清除焊接处的杂质和氧化层。

起子, 又称螺丝刀, 如图 1-12 所示④~⑥分别是钟表起子、一字小起子、十字起子。一般用于装配螺丝固定件、起拆插件等。

验电笔, 简称电笔, 见图 1-12 所示⑦。用于检验交流电, 漏电等。

剪刀, 见图 1-12 所示⑧。用于修剪各种软、薄材料。

电烙铁, 焊锡, 见图 1-12 所示⑨, ③下部。小功率电烙铁用于焊接集成电路、电阻电容及印刷电路板等。

尖嘴钳, 见图 1-12 所示⑩。用于修正、弯曲较硬的导线; 焊接时夹住定位器件。

剥线钳, 见图 1-12 所示⑪。用于各类单根导线的线头剥线。

斜口钳, 见图 1-12 所示⑫。修剪较硬的材料和导线。