



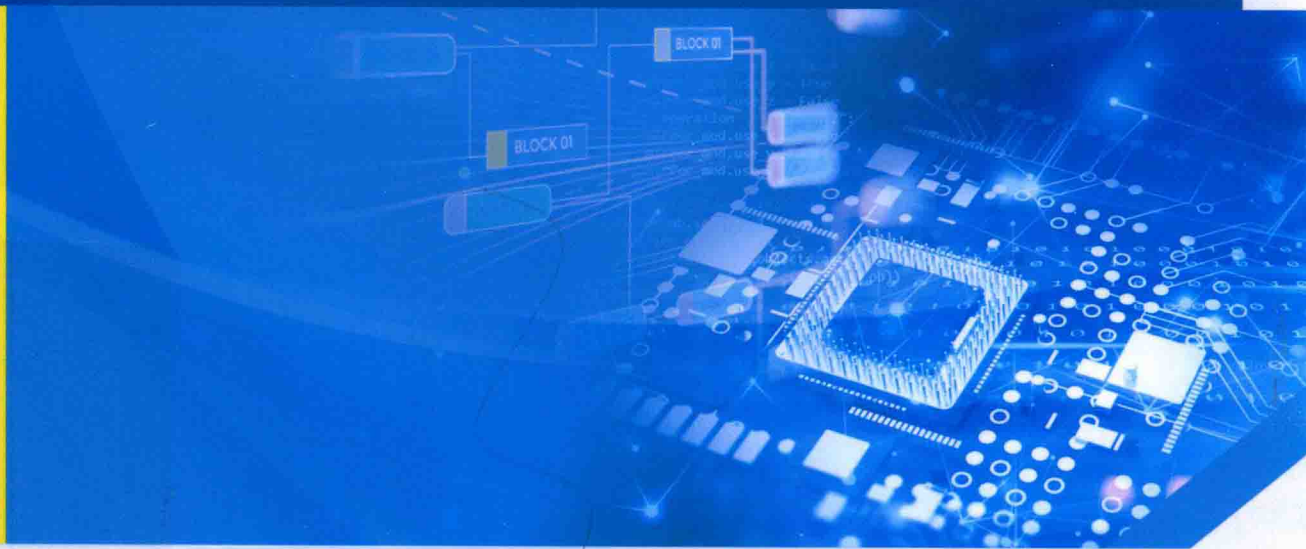
普通高等教育“十三五”电工电子基础课程规划教材

数字电子技术基础

第②版

沈任元 主编

Fundamentals of Digital Electronics



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”电工电子基础课程规划教材

数字电子技术基础

第2版

主编 沈任元

参编 王海群 刘桂英 陈平 成叶琴

机械工业出版社

本书是依据高等院校电气信息类专业数字电子技术基础课程教学的基本要求而编写的理论和实验合一的教材。课程以基础实验和项目任务实验为引领,将知识点融入其中,通过实践来学习基本理论,注重基本理论、基本分析方法的介绍和应用,始终贯彻“教、学、练、思”相结合的原则,鼓励学生积极思考,使学生熟悉器件在数字电子系统中的具体应用,从培养能力的角度出发,使学生能够学以致用,培养学生分析问题和解决问题的能力,创建一种生动的教学模式。

本书可作为高等院校理工科电类各专业本科或专科“数字电子技术”及相关课程的教材,也可供有关工程技术人员自学和参考。本书可满足先开设数字电路,后开设模拟电路的课程设置要求。为方便教学,本书配有理论和实验的全程视频课程、电子课件、部分习题答案、实验指导等资源,读者可登录 <http://www.sdju.edu.cn/网络服务/课程中心/数字电子技术基础>。

图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术基础/沈任元主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2019.2

普通高等教育“十三五”电工电子基础课程规划教材

ISBN 978-7-111-61929-1

I. ①数… II. ①沈… 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(2019)第021567号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:徐凡 责任编辑:徐凡 王玉鑫

责任校对:张晓蓉 封面设计:张静

责任印制:孙炜

北京中兴印刷有限公司印刷

2019年3月第2版第1次印刷

184mm×260mm·16.5印张·446千字

标准书号:ISBN 978-7-111-61929-1

定价:39.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

写给同学们的话

同学们！现代数字电子技术的发展是令人激动兴奋的，你无论走到哪里，都能看到数字电子设备和装置，数字电子技术使我们能够使用小巧灵便、功能强大的手机、MP5 等电子产品。数字电子技术改变着整个工业体系的技术，如 DSP 技术、SoC 设计、EDA 技术、嵌入式系统、面向用户的微电子技术等新技术的应用，也指引着未来电子技术的发展方向，电子产品的复杂度也越来越高。数字电子技术脱胎换骨式的变化，对这一领域的专业基础课程“数字电子技术基础”的教学内容提出了更高的要求。

从有利于培养高级技术人才出发，以培养学生的综合工作能力为线索，结合我们多年从事数字电子技术课程教学的改革和实践经验，依据高等学校电气信息类专业数字电子技术基础课程教学的基本要求，编写了这本理论和实验合一的试点教材。我们要与你们一起创建一种教与学相结合、学与用相结合、动手与动脑相结合的教学模式，为应用型本科课程实施方面做一尝试性探索。

本课程是采用更紧密的“教、学、做”合一的办法来学习技术理论的基础课。在课内外学习基本理论的基础上，充分利用实验来学习技术理论，我们开设的实验项目中不但有掌握基础理论知识的认识实验，还安排了一个以四相步进电动机控制的项目实验（通过一学期逐步完成）。每章实验的内容紧密配合理论课的教学，遵循循序渐进的实践原则，你们可以亲手来试一试。数字电子技术基础课程中“做”的作业不仅有理论分析计算，还包括实验作业，面对实验中提出的问题，正是挑战你们独立思考的机会，只有对问题喜欢刨根问底，以钻研为乐趣，喜欢琢磨的人才可能成为优秀的工程师。理论结合实践的认识过程常常遵循着“理论—实践—理论—实践”的路径，在寻求解决问题的过程中，会让每个同学都能体会到成功的喜悦，我们评价的重点是你们的学习态度和学习的投入程度，我们特别鼓励你们的创造性实践。实践是打开电子技术“大门”的钥匙，你们在实践中养成的应用知识能力，做事专注细心、踏实稳重，有科学的态度和创新意识，这些都会给以后的学习和工作带来更大的益处。尽管数字电子技术还有更多内容要进一步介绍，但由于教学计划的课时有限，本书只能帮助你们学习最重要的数字电子技术的基本原理，希望同学们在学习过程中能参阅更多的图书和资料，要努力去思考、理解、实践、积累，这样才能真正学会。

对书中存在的一些不妥和疏漏之处，欢迎广大学生多提宝贵意见，请把你们的意见和建议告诉我们（E-mail: ren yuan@ciyiz.net）。

诚邀同学们上座享用为你们制作的“数字大餐”，期待着与你们的携手合作！

编者

前 言

为了适应本科人才培养的要求和电子科学技术的发展,我们从“数字电子技术基础”课程的教学要求和总结教学实践的基础上来编写这本理论和实验合一的教材,采用更紧密的“教、学、做”教学理念,在传统的传递知识型学科教学的基础上,通过“教、学、做”使学生能够掌握良好的学习方法,把被动接受学习转向主动探究性的学习,使掌握的专业基础知识有一定广度和深度,对学生将来的学习和工作更具有意义和富有实际价值。

本书的主要特色:

(1) 本课程教学依据的是高等院校电气信息类专业数字电子技术基础课程教学的基本要求。尊重教学规律和学生认识规律,保证(不强调)知识的系统性、逻辑性和完整性,更关注学生的学习兴趣,如何更好地掌握数字电子技术的基本知识、基本理论以及分析和设计数字电路的一般方法。就目前来说,我们认为学习传统数字电子的理论技术对于深入理解现代数字电子技术是必需的。

(2) 理论教学与实践应用并重。课程教学通过基础实验和项目任务实验的引领,将理论知识融入实验中,书中安排了24个实验,其中验证性实验6个,设计性实验8个,课外实验10个。设法改变原来的课程实施过于强调接受学习、死记硬背的状况,鼓励学生主动参与和充分交流,乐于探究,勤于动手,培养学生具有更新知识的能力,以及在实践中培养学生发现问题、分析和解决问题的能力,使学生能够学以致用,形成积极主动的学习态度,以符合应用型本科人才培养的要求。

(3) 通过理论与实践应用并重的教学,学生能更好地完成从高中阶段向大学阶段在学习上和心理上的适应过程,并能更好地通过课程评价促进学生发展、教师提高和改进教学实践等。

(4) 本书从分析TTL门电路着手,理解逻辑器件的技术参数、逻辑集成器件的应用并以CMOS为主。书中配备了各章的应用电路介绍和各种类型的例题、习题,并在书后给出了部分习题的答案,有利于读者自我学习检查。为了理论教学、实验、课程设计等需要,还选编了各种用于模拟电路和数字电路的典型元器件的参数,并出版了《常用电子元器件简明手册》(ISBN: 978-7-111-30728-0)。

本书的理论教学参考学时数为32~48,实验教学参考学时数为14~30,有关章节内容可根据各校专业要求及学时情况酌情调整。本书可满足先开设数字电路,后开设模拟电路的课程设置要求。本书可作为高等院校理工科电类各专业本科或专科“数字电子技术”及相关课程的教材,也可供有关工程技术人员自学和参考。

本书各章实验汇总:

(1) 课内实验

实验1.1 数字电路的认识实验(验证性)

实验1.2 逻辑门电路的功能测试(验证性)

实验2.1 四相步进电动机转动(验证性)

实验2.2 门电路的逻辑变换(设计性)

- 实验 3.1 组合逻辑电路的设计 (设计性)
- 实验 3.2 步进电动机正反转控制 (设计性)
- 实验 3.5 步进电动机转动数字显示 (设计性)
- 实验 4.1 触发器逻辑功能的测试 (验证性)
- 实验 5.1 寄存器及其应用 (验证性)
- 实验 5.4 步进电动机驱动控制 (设计性)
- 实验 5.5 步进电动机置数控制 (设计性)
- 实验 6.1 555 定时器的应用 (验证性)
- 实验 6.3 步进电动机转速和定时控制 (设计性)
- 实验 9.1 步进电动机的点动、光照、声音等控制 (综合设计性)

(2) 课外实验

- 实验 1.3 集成逻辑门电路参数测试
- 实验 2.3 集成逻辑门电路的应用
- 实验 3.3 集成组合逻辑电路 (一)
- 实验 3.4 集成组合逻辑电路 (二)
- 实验 3.6 数字动态显示控制
- 实验 5.2 计数器功能
- 实验 5.3 计数器及其应用
- 实验 6.2 多谐振荡器的应用
- 实验 7.1 随机存取存储器及其应用
- 实验 8.1 D/A、A/D 转换器

合计 24 个: 验证性实验 6 个、设计性实验 8 个、课外实验 10 个。

参加本书编写的编者有王海群 (第 1 章)、成叶琴 (第 2、3 章)、刘桂英 (第 4~6 章)、陈平 (第 7、8 章)、沈任元 (第 9 章、附录、各章实验等)。全书由沈任元、王海群统稿, 华东师范大学劳五一教授担任主审, 他认真审阅了全书, 并提出了宝贵的修改意见。本书编写过程中得到了上海电机学院领导、教师、学生的关怀和支持, 在此一并表示深深的谢意。

对书中存在的一些不妥和疏漏之处, 敬请读者批评指正, 请把你们的意见和建议告诉我们 (E-mail: ren yuan@ciyiz.net)。

编 者

目 录

写给同学们的话

前 言

第 1 章 数字电路和逻辑门电路	1
1.1 概述	1
1.2 数字信号与模拟信号	1
1.3 数字电路的逻辑状态和正负逻辑	2
1.3.1 逻辑状态和正负逻辑的规定	2
1.3.2 标准高低电平的规定	2
1.4 基本逻辑关系及其逻辑运算	2
1.4.1 与逻辑和与运算	3
1.4.2 或逻辑和或运算	3
1.4.3 非逻辑和非运算	4
1.5 半导体器件的开关特性	4
1.5.1 半导体基本知识	4
1.5.2 半导体二极管及其开关特性	5
1.5.3 晶体管及其开关特性	6
1.6 TTL 集成门电路	9
1.6.1 TTL 门电路系列	9
1.6.2 TTL 与非门电路	9
1.6.3 TTL 门电路的外部特性	11
1.6.4 TTL 门电路的主要参数	15
1.6.5 TTL 其他类型的门电路	17
1.7 CMOS 门电路	21
1.7.1 MOS 管的开关特性	22
1.7.2 CMOS 门电路概述	23
1.7.3 CMOS 门电路系列	25
1.7.4 CMOS 器件使用时应注意的问题	26
1.8 集成门电路的接口电路	27
1.8.1 TTL 电路驱动 CMOS 电路	27
1.8.2 CMOS 电路驱动 TTL 电路	28
1.9 数字电路故障的检测和排除	29
1.9.1 产生故障的主要原因	29
1.9.2 常见的故障类型	29
1.9.3 查找故障的常用方法	30
1.10 应用电路介绍	31
本章小结	32
思考题与习题	33
本章实验	37
实验 1.1 数字电路的认识实验	37

实验 1.2 逻辑门电路的功能测试	37
实验 1.3 集成逻辑门电路参数测试	39

第 2 章 逻辑代数基础	43
2.1 数制与编码	43
2.1.1 几种常用的数制	43
2.1.2 不同进制数之间的相互转换	44
2.1.3 编码	46
2.2 逻辑代数基础	48
2.2.1 基本概念	49
2.2.2 基本逻辑运算	49
2.3 逻辑函数常用的描述方法及相互间的转换	49
2.3.1 逻辑函数及其表示方法	49
2.3.2 真值表、卡诺图和函数式的对应关系	51
2.3.3 用逻辑图描述逻辑函数	52
2.3.4 用波形图描述逻辑函数	52
2.3.5 逻辑函数相等的概念	52
2.4 逻辑函数的化简	53
2.4.1 逻辑代数中的基本公式和定律	53
2.4.2 逻辑函数的化简与变换	54
2.4.3 代数法化简	56
2.4.4 卡诺图法化简	57
2.5 具有无关项逻辑函数的化简	60
2.5.1 任意项、约束项和无关项	60
2.5.2 无关项的化简	61
2.6 应用电路介绍	62
本章小结	63
思考题与习题	64
本章实验	65
实验 2.1 四相步进电动机转动	65
实验 2.2 门电路的逻辑变换	66
实验 2.3 集成逻辑门电路的应用	68
第 3 章 组合逻辑电路	70
3.1 组合逻辑电路概述	70
3.2 组合逻辑电路的分析	70
3.2.1 基本分析方法	70
3.2.2 分析举例	71
3.3 组合逻辑电路的设计	72

3.3.1 基本设计方法	72	5.1.3 时序逻辑电路的逻辑功能的表示方法	122
3.3.2 设计举例	72	5.2 时序逻辑电路的分析	122
3.4 常用的组合电路	74	5.3 常用集成时序逻辑器件	125
3.4.1 编码器	75	5.3.1 寄存器	125
3.4.2 译码器	78	5.3.2 计数器	129
3.4.3 数据选择器	84	5.4 应用电路介绍	143
3.4.4 数据分配器	86	本章小结	145
3.4.5 数值比较器	87	思考题与习题	146
3.4.6 加法器	89	本章实验	151
3.5 组合逻辑电路中的竞争和冒险	92	实验 5.1 寄存器及其应用	151
3.5.1 竞争冒险现象产生及其产生的原因	92	实验 5.2 计数器功能	153
3.5.2 冒险现象的判断	93	实验 5.3 计数器及其应用	155
3.5.3 消除冒险现象的方法	93	实验 5.4 步进电动机驱动控制	156
3.6 应用电路介绍	94	实验 5.5 步进电动机置数控制	157
本章小结	96	第 6 章 脉冲波形的产生与整形	158
思考题与习题	96	6.1 预备知识	158
本章实验	99	6.1.1 脉冲概念	158
实验 3.1 组合逻辑电路的设计	99	6.1.2 微分电路和积分电路	158
实验 3.2 步进电动机正反转控制	100	6.1.3 阈值电压	160
实验 3.3 集成组合逻辑电路(一)	100	6.1.4 利用反相器对微积分脉冲进行整形处理	160
实验 3.4 集成组合逻辑电路(二)	102	6.2 555 定时器	161
实验 3.5 步进电动机转动数字显示	104	6.2.1 555 定时器的电路组成	161
实验 3.6 数字动态显示控制	105	6.2.2 555 定时器的功能及工作原理	162
第 4 章 触发器	106	6.3 555 定时器构成脉冲波形的产生与整形电路	163
4.1 触发器的基本电路	106	6.3.1 施密特触发器	163
4.1.1 基本 RS 触发器	106	6.3.2 单稳态触发器	164
4.1.2 钟控 RS 触发器	108	6.3.3 多谐振荡器	165
4.2 边沿触发器	110	6.4 门电路构成脉冲波形的产生与整形电路	167
4.2.1 边沿 D 触发器	110	6.4.1 用门电路组成的单稳态触发器	167
4.2.2 边沿 JK 触发器	111	6.4.2 用门电路组成的施密特触发器	170
4.3 触发器功能的转换	112	6.4.3 用门电路组成的多谐振荡器	171
4.3.1 D 触发器转换为 JK、T 和 T' 触发器	113	6.5 集成触发器构成脉冲波形的产生与整形电路	174
4.3.2 JK 触发器转换为 D、T 和 T' 触发器	113	6.5.1 集成单稳态触发器	174
4.4 应用电路介绍	114	6.5.2 集成施密特触发器	177
本章小结	116	6.6 应用电路介绍	178
思考题与习题	117	本章小结	180
本章实验	119	思考题与习题	181
实验 4.1 触发器逻辑功能的测试	119	本章实验	187
第 5 章 时序逻辑电路	121	实验 6.1 555 定时器的应用	187
5.1 时序逻辑电路的基本概念	121	实验 6.2 多谐振荡器的应用	187
5.1.1 时序逻辑电路的结构及特点	121		
5.1.2 时序逻辑电路的分类	121		

实验 6.3 步进电动机转速和定时控制	189	8.2 A/D 转换器	214
第 7 章 半导体存储器与可编程逻辑器件	190	8.2.1 A/D 转换的基本结构和工作原理	214
7.1 半导体存储器概述	190	8.2.2 A/D 转换器的组成和工作原理	217
7.1.1 半导体存储器的分类	190	8.2.3 A/D 转换器的主要参数	219
7.1.2 半导体存储器的技术指标	190	8.2.4 集成 A/D 转换器 ADC0809	219
7.2 只读存储器和随机存取存储器	191	8.3 应用电路介绍	221
7.2.1 只读存储器	191	本章小结	223
7.2.2 随机存取存储器	193	思考题与习题	224
7.2.3 存储器的扩展	195	本章实验	226
7.3 可编程逻辑器件	196	实验 8.1 D/A、A/D 转换器	226
7.3.1 PLD 概述	196	第 9 章 数字系统的综合分析	230
7.3.2 可编程逻辑阵列	198	9.1 数字系统的概念	230
7.3.3 通用阵列逻辑	200	9.2 数字系统的分析方法	230
7.3.4 复杂可编程逻辑器件	202	9.3 数字系统的实例分析	231
7.3.5 现场可编程逻辑阵列	202	本章小结	234
7.4 应用电路介绍	203	思考题与习题	234
本章小结	204	本章实验	238
思考题与习题	205	实验 9.1 步进电动机的点动、光照、声音等控制	238
本章实验	206	附录	239
实验 7.1 随机存取存储器及其应用	206	附录 A 电子电路实验箱简介	239
第 8 章 数/模和模/数转换	208	附录 B 步进电动机工作原理简介	242
8.1 D/A 转换器	208	附录 C 部分基本逻辑单元图形符号对照	243
8.1.1 D/A 转换器的基本原理	208	部分习题答案	245
8.1.2 D/A 转换器的主要参数	210	参考文献	256
8.1.3 集成 D/A 转换器	211		

第 1 章 数字电路和逻辑门电路

1.1 概述

数字电路中，逻辑门电路就是指实现基本逻辑关系的电路，最基本逻辑关系为与、或、非，最基本的逻辑门电路是与门、或门和非门。逻辑门电路分为分立元件门电路（discrete circuit）和集成门电路（integrated circuit）两大类。集成电路按照单片硅片集成门电路的数量，可分为小规模集成（Small Scale Integration, SSI）、中规模集成（Medium Scale Integration, MSI）、大规模集成（Large Scale Integration, LSI）、超大规模集成（Very Large Scale Integration, VLSI）电路等。

根据集成电路的制造工艺来分类，数字集成电路可以分为双极型集成电路和单极型集成电路。双极型集成电路中的基本开关器件为晶体三极管。在晶体三极管中，多子和少子两种载流子同时参与导电，所以也称为双极型器件。双极型集成电路可以分为 TTL（Transistor - Transistor Logic，晶体管—晶体管逻辑）、ECL（Emitter Coupled Logic，发射极耦合逻辑）、HTL（High Threshold Logic，高阈值逻辑）电路等类型。单极型集成电路中的基本开关器件为 MOS（Metal Oxide Semiconductor，金属氧化物半导体）场效应晶体管。在场效应晶体管中，只有一种载流子（自由电子或空穴）参与导电，所以也称为单极型器件。单极型集成电路又可以分为 PMOS、NMOS 和 CMOS 等类型。双极型集成电路的特点是速度快、负载能力强，但功耗较大、结构较复杂，因而集成度较低；单极型集成电路的特点是结构简单、集成度高、功耗低，但速度比一般双极型集成电路稍慢。随着 CMOS 制造工艺的不断发展，CMOS 集成电路的工作速度和驱动能力有了明显的提高，因此 CMOS 集成电路也越来越被广泛地应用。在本章中将着重介绍 TTL 集成电路和 CMOS 集成电路。

1.2 数字信号与模拟信号

在电子应用中，可测量的量分为两大类：一类是模拟量；另一类是数字量。所谓模拟量是指在时间和数值上都是连续变化的物理量。表示模拟量的信号称为模拟信号（Analog Signals），例如模拟语言的音频信号（可以通过送话器把声音信号转换成相应的电信号），模拟温度变化的（如从热电偶上得到的）电压信号等都属于模拟信号，图 1-1 中所示的信号就是一个模拟信号。我们把处理模拟信号电子电路称为模拟电路，如各类放大电路、稳压电路等。所谓数字量是指其变化在时间和数值上都是离散的或者说是断续的物理量。表示数字量的信号称为数字信号（Digital Signals），如图 1-2 所示。我们把处理数字信号电子电路称为数字电路，如在本书后面章节中介绍的门电路、编码器、译码器和计数器等。

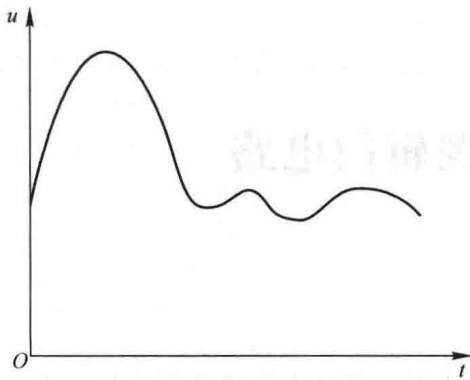


图 1-1 模拟信号

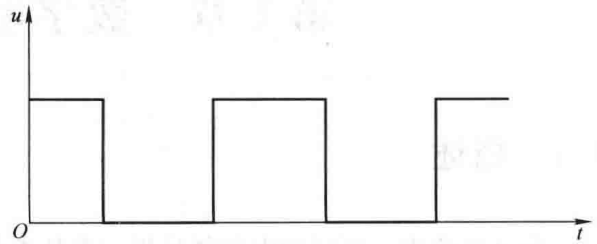


图 1-2 数字信号

1.3 数字电路的逻辑状态和正负逻辑

1.3.1 逻辑状态和正负逻辑的规定

在数字电路中，电位的高低或电路的“通”“断”是相互对立的逻辑状态，可用逻辑 1 和逻辑 0 分别表示。通常有两种不同的表示方法：

通常规定高电平表示逻辑 1，低电平表示逻辑 0，称为正逻辑（Positive Logic）。

如果规定低电平表示逻辑 1，高电平表示逻辑 0，称为负逻辑（Negative Logic）。

对于同一个逻辑电路，可以采用正逻辑也可以采用负逻辑，但应事先规定。因为即使同一种电路，由于选择的正、负逻辑不同，功能也会不相同。在本书的各个章节中，均采用正逻辑。

1.3.2 标准高低电平的规定

由于电路所处环境温度的变化、电源电压的波动、负载的大小以及电路中元器件参数的分散性和干扰等因素的影响，实际的高低电平都不是一个固定的值。通常高低电平都有一个允许变化的范围，只要能够明确区分开这两种对应的状态就可以了。因此，在数字电路中，对电源电压的稳定度和元器件参数精度的要求比在模拟电路中低。但在实际应用中，若高电平太低，或低电平太高，都会使逻辑 1 或逻辑 0 这两种逻辑状态区分不清，从而破坏了原来确定的逻辑关系。因此，规定了高电平的下限值，并称它为标准高电平，用 U_{SH} 表示，同样也规定了低电平的上限值，称为标准低电平，用 U_{SL} 表示。在实际的逻辑系统中，应满足高电平 $U_H \geq U_{SH}$ ，低电平 $U_L \leq U_{SL}$ 。图 1-3 为高低电平的允许范围示意图。

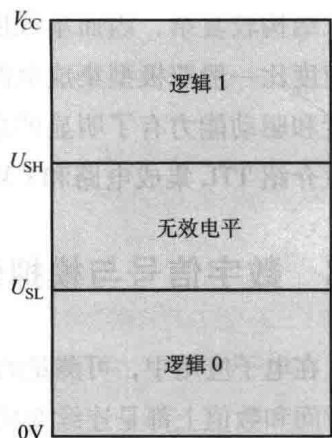


图 1-3 高低电平的允许范围

1.4 基本逻辑关系及其逻辑运算

在数字电路中，具有三种基本的逻辑关系：“与”“或”“非”。实现这三种逻辑关系的电路

分别叫作“与门 (AND gate)”“或门 (OR gate)”“非门 (NOT gate)”。相对应的还具有三种基本的逻辑运算，即“与”运算、“或”运算、“非”运算。其他逻辑运算就是通过这三种基本运算来实现的。

1.4.1 与逻辑和与运算

只有当决定某一种结果的所有条件都具备时，这个结果才能发生，我们把这种因果关系称为与逻辑关系，简称与逻辑。

在图1-4所示电路中，只有开关A与开关B都闭合时，灯Y才能亮，只要有一个开关断开，灯就灭。因此灯亮和开关A、B的接通是与逻辑关系。

通常，我们把结果发生或条件具备用逻辑1表示，结果不发生或条件不具备用逻辑0表示。在此电路中，灯亮用1表示，灯灭用0表示，开关接通用逻辑1表示，断开用逻辑0表示。可得表示Y与A、B逻辑关系的图表，这种用0、1表示输入逻辑变量的各种可能的取值和相应的函数值排列在一起而组成的图表称为真值表 (Truth Table)，如表1-1所示。

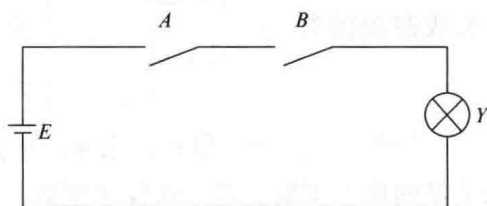


图1-4 与逻辑关系

表1-1 表示与逻辑运算的真值表

A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

该逻辑关系可以记作：

$$Y = A \cdot B \quad (1.1)$$

或 $Y = A B$ (其中“·”可以省略)

利用上述运算符号，得到下列与逻辑运算：

$$0 \cdot 0 = 0$$

$$0 \cdot 1 = 0$$

$$1 \cdot 0 = 0$$

$$1 \cdot 1 = 1$$

实现与逻辑关系的电路称为与门。图1-5所示为与逻辑符号，也是与门的逻辑符号。

图中，A、B叫作输入逻辑变量，Y叫作输出逻辑变量，“与”逻辑是当所有输入均为“1”状态时，输出才为“1”状态。

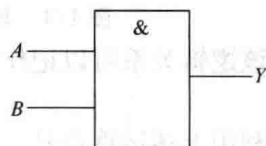


图1-5 与逻辑符号

1.4.2 或逻辑和或运算

当决定某一结果的多个条件中，只要有一个或一个以上的条件具备，结果就发生，这种逻辑关系就称为或逻辑关系，简称或逻辑。

图1-6所示电路中，开关A和B只要有一个接通，灯Y就亮。因此灯Y亮和开关A、B接通是或逻辑关系。

同样，开关接通、灯亮，我们用逻辑1表示，开关断开、灯灭，我们用逻辑0表示。可得表示Y与A、B逻辑关系真值表，如表1-2所示。

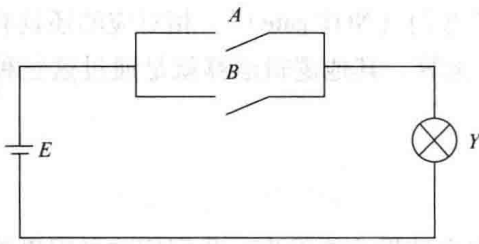


图 1-6 或逻辑关系

该逻辑关系可以记作：

$$Y = A + B \quad (1.2)$$

并可得到运算的运算规则：

$$0 + 0 = 0$$

$$0 + 1 = 1$$

$$1 + 0 = 1$$

$$1 + 1 = 1$$

实现或逻辑关系的电路称为或门。图 1-7 所示为或逻辑的符号，也是或门的逻辑符号。

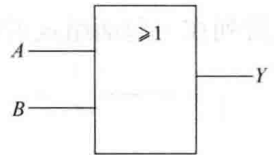


图 1-7 或逻辑符号

1.4.3 非逻辑和非运算

如果条件与结果的状态总是相反，则这样的逻辑关系叫作非逻辑关系，简称非逻辑，或者称逻辑非。

图 1-8 电路中，开关 A 接通时灯 Y 不亮，而开关 A 断开时反而灯 Y 亮。因此灯 Y 亮和开关接通是非逻辑关系。

同样，可得表示 Y 与 A 逻辑关系真值表，如表 1-3 所示。

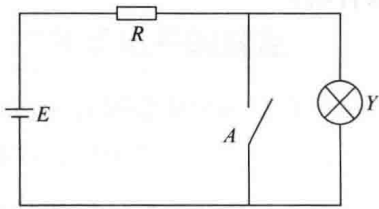


图 1-8 非逻辑关系

该逻辑关系可以记作：

$$Y = \bar{A} \quad (1.3)$$

利用上述运算符号，得到下列非逻辑运算：

$$\bar{0} = 1$$

$$\bar{1} = 0$$

实现非逻辑关系的电路称为非门（也称为反相器），其符号和非逻辑的逻辑符号相同，如图 1-9 所示。

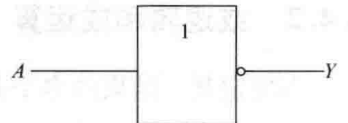


图 1-9 非逻辑符号

1.5 半导体器件的开关特性

1.5.1 半导体基本知识

自然界的物质若按导电能力划分，可分为导体、半导体和绝缘体三种。半导体的导电能力介

表 1-2 表示或逻辑运算的真值表

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

表 1-3 表示非逻辑运算的真值表

A	Y
0	1
1	0

于导体和绝缘体之间,电阻率通常为 $10^{-3} \sim 10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}$ 。常用的半导体有硅、锗、硒、砷化镓以及大多数金属氧化物和硫化物等。

半导体可以分为本征半导体和杂质半导体。纯净的单晶半导体称为本征半导体 (intrinsic semiconductor)。本征半导体中的载流子 (自由电子空穴对) 在常温下数量少、导电能力差。在本征半导体中掺入微量合适的元素后形成的半导体称为杂质半导体。根据掺入杂质的不同可分为: P 型半导体和 N 型半导体两种。在本征半导体中掺入五价杂质原子, 如掺入磷原子, 可形成 N 型半导体 (N-type semiconductor)。在本征半导体中掺入三价杂质原子, 如硼等形成了 P 型半导体 (P-type semiconductor)。

在同一块本征半导体晶片上, 采用特殊的掺杂工艺, 在两侧分别掺入三价元素和五价元素, 一侧形成 P 型半导体, 另一侧形成 N 型半导体, 则在这两种半导体交界面的两侧分别留下了不能移动的正负离子, 形成一个具有特殊导电性能的空间电荷区, 称为 PN 结。

当电源的正极接在 PN 结的 P 端, 电源的负极接在 PN 结的 N 端, 即在 PN 结上加正向电压时 (正偏), PN 结电阻很低, 正向电流 (forward current) 较大, PN 结处于导通状态 (turn-on state); 加反向电压时 (反偏), PN 结电阻很高, 反向电流很小, PN 结处于截止状态 (cut-off state)。PN 结的重要特性是具有单向导电性 (unilateral conductivity)。

1.5.2 半导体二极管及其开关特性

将 PN 结加上相应的电极引线和管壳, 就成为半导体二极管。根据半导体二极管材料的不同, 可分为硅二极管和锗二极管。图 1-10 是二极管的表示符号。

二极管的主要特性是单向导电性, 其伏安特性如图 1-11 所示。

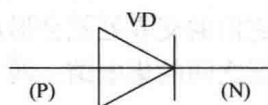


图 1-10 半导体二极管表示符号

当二极管的正向电压很小时, 几乎没有电流通过二极管。正向电压超过某数值后, 才有正向电流流过二极管, 这一电压值称为死区电压。硅管的死区电压一般为 0.5V , 锗管则约为 0.1V 。二极管的正向电压大于死区电压后, 有较大的正向电流通过二极管, 称为二极管导通。正向电流随着电压的增加而迅速增大, 当二极管充分导通后, 其管压降随电流的增加变化很小, 基本为一定值, 普通硅管导通电压约为 0.7V , 锗管约为 0.3V 。当二极管加反向电压时, 二极管截止, 反向电流 I_S 很小而且基本不变, 呈现很高的反向电阻。硅二极管的 I_S 在 $1\mu\text{A}$ 以下, 反向电阻在 $10\text{M}\Omega$ 以上, 锗二极管 I_S 在几十到上百微安, 反向电阻为几百千欧到几兆欧, 因此, 二极管截止时, 如同一个断开的开关。可见, 二极管在电路中可以作为受外加电压极性控制的开关。

图 1-12a 给出了一个二极管开关电路, 图 1-12b 为二极管导通状态下的等效电路, 图 1-12c 为二极管截止状态下的等效电路。

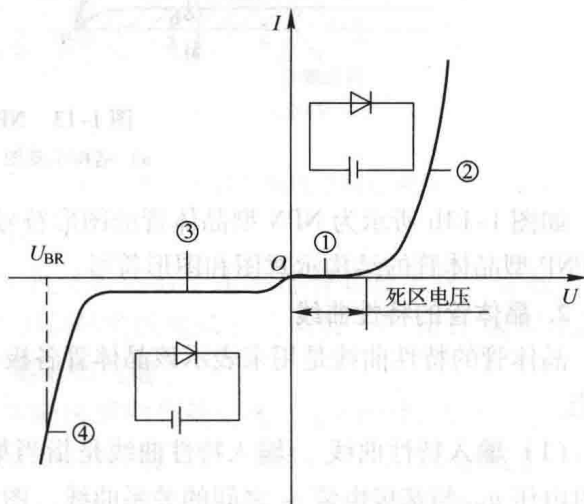


图 1-11 二极管的伏安特性

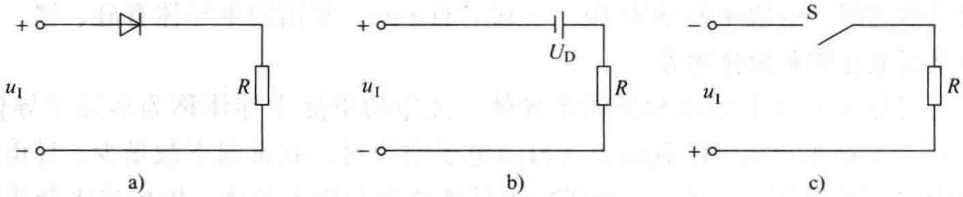


图 1-12 二极管开关电路

a) 二极管开关电路 b) 正向电压时的等效电路 c) 反向电压时的等效电路

1.5.3 晶体管及其开关特性

半导体三极管 (semiconductor triode) 也称晶体管或双极型晶体管, 它是数字电路和模拟放大电路的最基本元器件之一。

1. 晶体管的结构及符号

晶体管是三层半导体、三个电极和外壳组成的器件。由于各层半导体排列次序的不同, 晶体管有 NPN 型和 PNP 型两种结构形式。

如图 1-13a 所示是 NPN 型晶体管的结构示意图。中间层是很薄的 P 型半导体 (几至几十微米), 两边各为 N 型半导体, 从三层半导体上各自接出一根引线就成为晶体管的三个电极: 发射极 e (emitter)、基极 b (base) 和集电极 c (collector)。对应的每层半导体称为发射区 (emitter region)、基区 (base region) 和集电区 (collector region)。虽然发射区和集电区是 N 型半导体, 但是发射区比集电区掺入的杂质浓度高, 因此它们并不是对称的。两块不同类型的半导体结合在一起, 它们的交界处就会形成 PN 结。晶体管有两个 PN 结: 基区 - 发射区之间的发射结和基区 - 集电区之间的集电结。两个 PN 结由掺杂浓度很低且很薄的基区联系着。

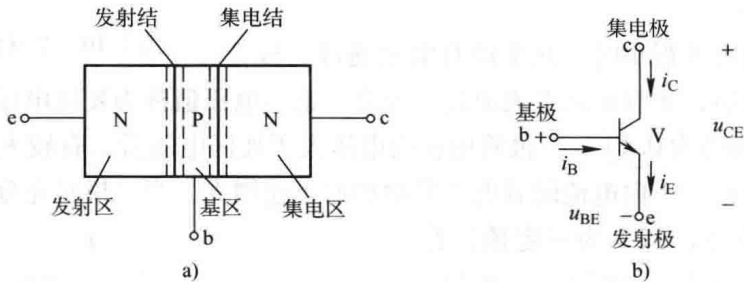


图 1-13 NPN 型晶体管

a) 结构示意图 b) 图形符号

如图 1-13b 所示为 NPN 型晶体管的图形符号和电流方向, 用 V 表示晶体管。如图 1-14 所示为 PNP 型晶体管的结构示意图和图形符号。

2. 晶体管的特性曲线

晶体管的特性曲线是用来表示该晶体管各极电压和电流之间相互关系的, 它反映了晶体管的性能。

(1) 输入特性曲线 输入特性曲线是指当集射电压 U_{CE} 为某一常数时, 输入回路中晶体管基射电压 u_{BE} 与基极电流 i_B 之间的关系曲线。图 1-15 所示为某晶体管输入特性曲线, 用函数式表示为

$$i_B = f(u_{BE}) \mid U_{CE} = \text{常数}$$

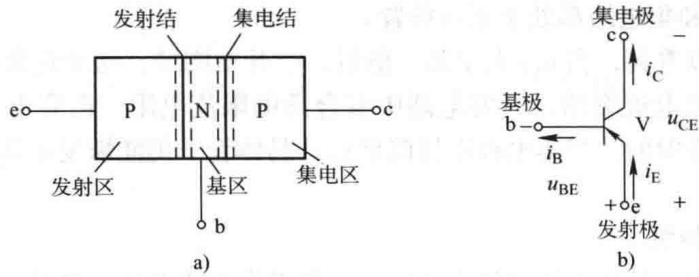


图 1-14 PNP 型晶体管

a) 结构示意图 b) 图形符号

我们称 U_{ON} 为开启电压，硅管的 U_{ON} 为 $0.5 \sim 0.7V$ ，锗管的 U_{ON} 为 $0.2 \sim 0.3V$ 。由图可见，当基极和发射极之间的电压 u_{BE} 小于开启电压 U_{ON} ，晶体管截止，基极电流约为 0；当基极和发射极之间的电压 u_{BE} 大于开启电压 U_{ON} ，晶体管发射结正偏导通，硅管的 $U_{BE} = 0.7V$ ，产生基极电流。

(2) 输出特性曲线 输出特性曲线是在基极电流 I_B 一定的情况下，晶体管输出回路中集射电压 u_{CE} 与集电极电流 i_C 之间的关系曲线，用函数式表示为

$$i_C = f(u_{CE}) | I_B = \text{常数}$$

图 1-16 所示为某晶体管的输出特性曲线。

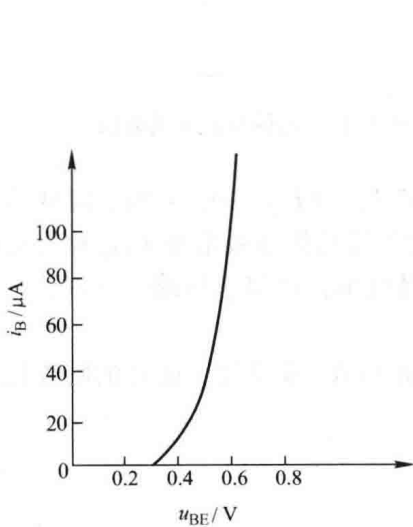


图 1-15 某晶体管输入特性曲线

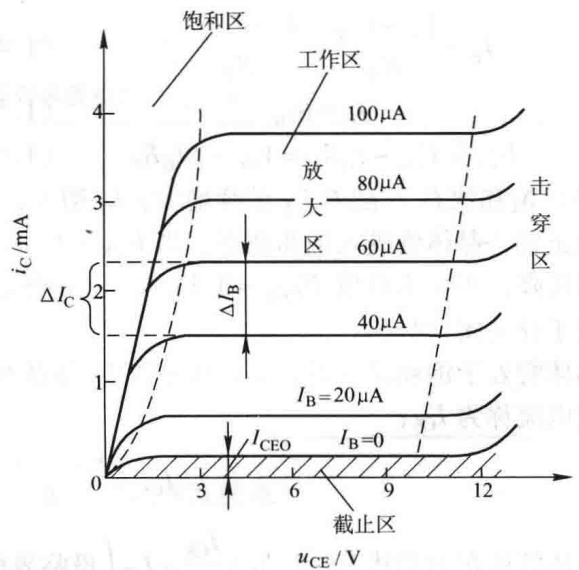


图 1-16 某晶体管输出特性曲线

通常把晶体管的输出特性曲线分为三个工作区：

1) 放大区 (amplification region): 输出特性曲线的近似于水平部分是放大区。在放大区， $I_C = \beta I_B$ ，其中 β 表征晶体管的电流放大能力，称为晶体管的电流放大系数。 I_C 和 I_B 成正比的关系。晶体管处于放大状态的条件是发射结正偏，集电结反偏。

2) 截止区 (cutoff region): $I_B = 0$ 的曲线以下的区域称为截止区。 $I_B = 0$ 时， $I_C = I_{CEO}$ (I_{CEO} 为反向穿透电流，硅管的通常小于 $1\mu A$)。对于 NPN 型硅管 $U_{BE} < 0.5V$ 时，已开始截止，但是为了截止可靠，常使 $U_{BE} \leq 0$ ，即发射结零偏或反偏，截止时集电结也处于反向偏置。

3) 饱和区 (saturation region): 饱和区是对应于 u_{CE} 较小 ($u_{CE} < u_{BE}$) 的区域，此时集电结处于正向偏置，以致使 I_C 不能随 I_B 的增大而成比例增大，即 I_C 处于“饱和”状态。在饱和区

$I_C \neq \beta I_B$, 此时发射结和集电结都处于正向偏置。

从曲线的右边可以看到, 当 u_{CE} 大于某一值后, i_C 开始剧增, 这个现象称为一次击穿。晶体管一次击穿后, 集电极电流突增, 只要电路中有合适的限流电阻, 击穿电流不过大, 时间又很短, 晶体管是不至于烧毁的。当集电极电压降低后, 晶体管仍能恢复正常工作, 所以一次击穿过程是可逆的。

3. 晶体管的开关特性

在模拟放大电路中, 晶体管作为放大器件, 主要工作在放大区。在数字电路中, 晶体管主要工作在截止状态或饱和状态, 晶体管的这种工作状态称为开关状态。

如图 1-17 所示 NPN 型硅晶体管电路, 下面我们来分析一下晶体管的三个工作状态。

(1) 截止状态 当输入电压 $U_I = 0$ 时, 晶体管 $U_{BE} = 0$, $I_B \approx 0$, $I_C \approx 0$, 晶体管工作在截止状态, 此时集电极和发射极之间相当于开关断开状态。此时, 电路输出的高电平 $U_{OH} \approx V_{CC}$ 。

(2) 放大状态 当增大输入电压 U_I , 使其大于晶体管的开启电压 U_{ON} (硅管约为 $0.5V$) 时, 晶体管发射结正偏导通, $U_{BE} = 0.7V$ 时, 晶体管进入放大工作状态, 可以求得:

$$I_B = \frac{U_I - U_{BE}}{R_B} = \frac{U_I - 0.7V}{R_B} \quad (1.4)$$

$$I_C \approx \beta I_B \quad (1.5)$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = V_{CC} - \beta I_B R_C \quad (1.6)$$

(3) 饱和状态 随着 U_I 继续增大, I_C 增大, U_{CE} 减小。若 $U_{CE} < U_{BE} \approx 0.7V$ 时, 晶体管集电结也正偏, 晶体管进入饱和状态。当 $U_{CE} = U_{CES} \approx 0.3V$ (饱和时的集电极电压 U_{CES} 称为集电极饱和压降, 小功率硅管 $U_{CES} \approx 0.3V$), c、e 极之间等效电阻很小, 近似于短路, 此时, c、e 极相当于开关闭合状态。

晶体管处于饱和状态时, 集电极电流 I_C 与 β 及 I_B 无关, 而与 R_C 成反比。此时的临界饱和集电极电流称为 I_{CS} :

$$I_{CS} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_C} \approx \frac{V_{CC}}{R_C} \quad (1.7)$$

晶体管处在饱和状态时, $I_B > \frac{I_{CS}}{\beta} = I_{BS}$ (设临界饱和基极电流 $I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta}$), I_C 不再等于 βI_B , 达到饱和值 I_{CS} 。因此, 晶体管的饱和条件是 $I_B > I_{BS}$, 即 $\beta I_B > I_{CS}$ 。硅晶体管饱和时, $U_{BE} = 0.7V$, $U_{CE} = U_{CES} \approx 0.3V$ 。

例 1-1 晶体管开关电路如图 1-17 所示, 已知 $\beta = 50$, $V_{CC} = 9V$, $R_C = 2k\Omega$, $R_B = 20k\Omega$, 设晶体管饱和时, $U_{BE} = 0.7V$, $U_{CES} = 0.3V$, 试求: (1) 当 $U_{IL} = 0.3V$ 时, 判断晶体管的工作状态; (2) 当 $U_{IH} = 5V$ 时, 判断晶体管的工作状态。并分别求出 U_O 。

解: (1) 当 $U_{IL} = 0.3V$ 时, 由于 $U_{BE} = 0.3V < U_{ON}$, 故晶体管工作在截止状态, $U_O = 9V$ 。

(2) 当 $U_{IH} = 5V$ 时:

$$I_{CS} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_C} = \frac{9 - 0.3}{2} \text{mA} = \frac{8.7}{2} \text{mA} = 4.35 \text{mA}$$

$$I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{4.35}{50} \text{mA} = 0.087 \text{mA} \approx 0.1 \text{mA}$$

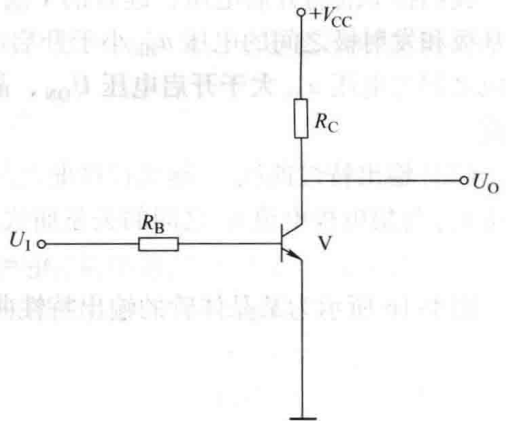


图 1-17 晶体管的开关电路