



教育部高职高专规划教材

第二版

数字电子技术

张惠敏 主编
肖耀南 主审



化学工业出版社

教育部高职高专规划教材

数 字 电 子 技 术

第二版

	张惠敏	主 编
王翠兰	朱祥贤	副主编
	肖耀南	主 审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是根据高职高专院校电子类专业《数字电子技术》课程的基本要求编写的。全书共分八章,内容有数字电路基础知识;组合逻辑电路;时序逻辑电路;脉冲产生与变换;A/D和D/A转换;大规模集成电路;数字电路综合应用和电子电路仿真软件-Electronics Workbench的应用。

本书紧密结合高职高专教学特点,内容编排力求简洁明快、深入浅出。全书采用模块化编写方式,每章包含理论讲授、硬件实验、软件仿真和检测题,突出了理论与实践的结合,即适合教学又便于自学。与本书配套的教学课件与教学资源请登录:<http://jpk2.zzrvtc.edu.cn/ec2006/c18/zcr-1.htm>

本书可作为高职高专院校电子信息类专业或其他工科类专业《数字电子技术》课程的教学用书,也可作为中等职业学校以及成人大、中专教育和各级工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术/张惠敏主编. —2版. —北京:化学工业出版社, 2009.5
教育部高职高专规划教材
ISBN 978-7-122-05082-3

I. 数… II. 张… III. 数字电路-电子技术-高等学校: 技术学院-教材 IV. TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 039266 号

责任编辑: 张建茹

装帧设计: 郑小红

责任校对: 蒋 宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 15¼ 字数 390 千字 2009 年 6 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 27.50 元

版权所有 违者必究

出版说明

高职高专教材建设工作是整个高职高专教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、有关学校和出版社的共同努力下,各地先后出版了一些高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育专门课程基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。这500种教材中,专门课(专业基础课、专业理论与专业能力课)教材将占很高的比例。专门课教材建设在很大程度上影响着高职高专教学质量。专门课教材是按照《培养规格》的要求,在对有关专业的人才培养模式和教学内容体系改革进行充分调查研究和论证的基础上,充分吸取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的。这套教材充分体现了高等职业教育的应用特色和能力本位,调整了新世纪人才必须具备的文化基础和技术基础,突出了人才的创新素质和创新能力的培养。在有关课程开发委员会组织下,专门课教材建设得到了举办高职高专教育的广大院校的积极支持。我们计划先用2~3年的时间,在继承原有高职高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验,解决新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专规划教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

本套教材适用于各级各类举办高职高专教育的院校使用。希望各用书学校积极选用这批经过系统论证、严格审查、正式出版的规划教材,并组织本校教师以对事业的责任感对教材教学开展研究工作,不断推动规划教材建设工作的发展与提高。

教育部高等教育司

第二版前言

电子类专业系列教材于 2002 年开始陆续出版,在七年的教学运用中,结合教育部高职高专教育教学改革的需求,不断进行优化,对各章内容进行了系列修订,参与院校有:

郑州铁路职业技术学院	成都航空职业技术学院
贵州电子信息职业技术学院	淮安信息职业技术学院
湖南铁道职业技术学院	黄河水利职业技术学院
常州纺织职业技术学院	河南工业职业技术学院
包头职业技术学院	四川工商职业技术学院
济源职业技术学院	天津铁道职业技术学院
武汉铁路职业技术学院	漯河职业技术学院

《数字电子技术》教材是根据高职高专院校电子类专业《数字电子技术》课程的基本要求编写的。全书共分八章:第一章 数字电路基础知识;第二章 组合逻辑电路;第三章 时序逻辑电路;第四章 脉冲产生与变换电路;第五章 A/D 和 D/A 转换;第六章 大规模集成电路;第七章 数字电路综合应用;第八章 电子电路的仿真软件—Electronics Workbench 的应用。

本教材紧密结合高职高专教育特点,内容编排力求简洁明快、深入浅出;全书采用模块化编写格式,每章包含理论讲授、硬件实验、软件仿真和检测题,突出了理论与实践的结合,体现了“应用性、实用性、综合性和先进性”原则,着重于实际应用能力的培养。

本教材建议教学学时数为 100 学时,其中技能训练内容(含讨论课、软、硬件实验等)约 30 学时,各校可根据具体情况自行增减;利用电子电路仿真软件 EWB 进行的仿真实验既可以作为实训课内容也可以作为课堂演示教学内容,以增强课堂教学的直观性,帮助学生理解、消化理论知识,提高学习兴趣;数字电子技术的综合技能训练可通过大型作业或实习演练完成。书中带“*”号内容可作为选修内容。

与本教材配套的教学课件与教学资源请登录以下网站:

<http://jpk2.zzrvtc.edu.cn/ec2006/C18/zcr-1.htm>

参加本教材编写任务的人员及参编内容:

第一章的第一节至第六节由卢德俊编写;第二章由朱祥贤编写;第三章由张惠敏编写;第四章由曹建军编写;第五章由王翠兰编写;第六章和第一章的第七、第八节由王素姣编写;第七章由庄宜松编写;第八章以及各章的 EWB 仿真实验由路文娟、王琳编写。

全书由张惠敏负责统稿,担任主编;王翠兰、朱祥贤任副主编;肖耀南任主审。

本教材在编写过程中得到了教育部有关领导和化学工业出版社领导的热情支持及帮助,各参编院校的领导和同行们给予了极大的关怀和鼓励,在此表示衷心感谢。

随着科学技术的发展,集成电路工艺水平、集成度以及器件功能不断完善和提高,数字电子技术的应用也愈加广泛,教材内容的更新势在必行,教材编写组全体成员诚恳希望社会各界多提改进意见,以共同促进高职高专教育的发展;同时限于编者水平,书中难免有不妥之处,敬请使用者提出宝贵意见。

编者

2009 年 5 月

第一版前言

为贯彻《教育部关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》(教高[2000]2号)有关精神,积极支持教育部面向21世纪高职高专教材建设,在教育部领导直接关怀下,全国高等职业院校协作会专门课开发指导委员会确定了编写电子类专业的10门主干课程(《电路分析》、《模拟电子技术》、《数字电子技术》、《电子技术实训》、《高频电子线路》、《电子测量与仪器》、《电视接收技术》、《电子设计自动化(EDA)技术》、《单片机应用技术》和《C语言》)教材,供电子技术应用、应用电子技术、电子工程、通信、电子设备制造与维修等相关专业使用。

本套教材紧密结合高职高专教育特点,主动适应社会实际需要,突出应用性、针对性,加强实践能力的培养。内容叙述力求深入浅出,将知识点与能力点有机结合,注重培养学生的工程应用能力和解决现场实际问题的能力;内容编排力求简洁明快、形式新颖、目标明确,利于促进学生的求知欲和学习主动性。

《数字电子技术》教材是根据高职高专院校电子类专业《数字电子技术》课程的基本要求编写的。

本教材紧密结合高职高专教育特点,内容编排力求简洁明快、深入浅出;全书采用模块化编写格式,每章包含理论讲授、硬件实验、软件仿真和检测题,突出了理论与实践的结合,体现了“应用性、实用性、综合性和先进性”原则,着重于实际应用能力的培养。

本教材建议教学时数为100学时,其中技能训练内容(含讨论课,软、硬件实验等)约30学时,各校可根据具体情况自行增减;利用电子电路仿真软件EWB进行的仿真实验既可以作为实训课内容也可以作为课堂演示教学内容,以增强课堂教学的直观性,帮助学生理解、消化理论知识,提高学习兴趣;数字电子技术的综合技能训练可通过大型作业或实习演练完成。书中带“*”号内容可作为选修内容。

参加本教材编写任务的人员及参编内容:

第一章由马国瀚编写;第二章由朱祥贤编写;第三章、第六章、第八章以及各章的EWB仿真训练由张惠敏编写;第四章由曹建军编写;第五章由刘明黎编写;第七章由庄宜松编写。

张惠敏负责全书统稿,担任主编;朱祥贤任副主编;肖耀南任主审;刘海燕老师为全书各章思考题与习题提供了参考答案。

本教材在编写过程中得到了教育部有关领导和化学工业出版社领导的热情支持及帮助,各参编院校的领导和同行们给予了极大的关怀和鼓励,在此表示衷心感谢。

随着科学技术的发展,集成电路工艺水平、集成度以及器件功能不断完善和提高,数字电子技术的应用也愈加广泛,教材内容的更新势在必行,教材编写组全体成员诚恳希望社会各界多提改进意见,以共同促进高职高专教育的发展;同时限于编者水平,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者提出宝贵意见。

编者

2002. 5

目 录

绪论	1	第二节 施密特触发器	130
第一章 数字电路基础知识	3	第三节 单稳态触发器	135
第一节 数字电路预备知识	3	第四节 多谐振荡器	138
第二节 数制与码制	6	第五节 技能训练	141
第三节 基本逻辑门	11	本章小结	149
第四节 逻辑函数化简	15	思考题与习题	150
第五节 集成 TTL 逻辑门	23	第五章 数/模和模/数转换	153
第六节 CMOS 逻辑门	32	概述	153
第七节 集成逻辑门的使用及注意事项	36	第一节 数字-模拟转换器 (DAC)	154
第八节 技能训练	42	第二节 模拟-数字转换器 (ADC)	159
本章小结	45	第三节 技能训练	167
思考题与习题	46	本章小结	178
第二章 组合逻辑电路	50	思考题与习题	179
第一节 组合逻辑电路的分析与设计	50	第六章 大规模集成电路	182
第二节 编码器	54	概述	182
第三节 译码器	59	第一节 只读存储器	182
第四节 数据选择器及数据分配器	67	第二节 随机存取存储器	185
第五节 数值比较器	71	第三节 可编程逻辑器件	190
* 第六节 组合逻辑电路中的竞争冒险	73	* 第四节 在系统可编程逻辑器件	195
第七节 技能训练	75	本章小结	199
本章小结	81	思考题与习题	199
思考题与习题	81	第七章 数字电路综合应用	202
第三章 时序逻辑电路	85	第一节 数字电路的调试方法	202
概述	85	第二节 数字电路故障的诊断与排除	206
第一节 RS 触发器	85	第三节 数字电路应用实例	209
第二节 JK 触发器	89	本章小结	217
第三节 D、T 触发器及触发器的使用	92	思考题与习题	217
注意事项	92	第八章 EWB 电子电路仿真软件	219
第四节 计数器	95	概述	219
第五节 集成计数器及其功能扩展	101	第一节 EWB 的基本功能	219
第六节 寄存器和移位寄存器	107	第二节 EWB 的基本操作	229
第七节 技能训练	110	第三节 子电路的生成与使用	231
本章小结	121	第四节 虚拟仪器的使用	231
思考题与习题	122	部分思考题与习题参考答案	238
第四章 脉冲产生与变换电路	128	参考文献	244
概述	128		
第一节 集成 555 定时器	128		

绪 论

21 世纪将是全面的信息化世纪。信息技术的迅猛发展和向社会各领域、各层次渗透的程度,即使是最具想象力的人也感到始料不及。而实现这一切的基石之一正是数字电子技术。

一、数字电子技术的发展历史

数字化最早是人们为制造机械式加法器开始的。1847 年英国数学家乔治·布尔 (George Boole) 在代数学方面做出了划时代的贡献,提出了揭示客观事物逻辑关系的数学方法——布尔代数,用于研究人的思维规律。而 1897 年马可尼 (Marconi) 第一次使用实用数字通信系统——电报,即:用“0”和“1”数字编码来表述和传输信息。到 20 世纪 30 年代, Bell 实验室的一位数学家乔治·史蒂比兹 (Geoge Stibitz), 首先萌发了使用继电器 (开关) 来制作二进制加法器的念头,并先后开发出 4 个专用计算机和 6 个通用计算机。被人们公认为信息论和开关理论之父的克劳德·香农 (Claude Shanno), 在信息论方面的研究为今天通信理论奠定了基础,他的开关理论则在布尔代数与计算机设计之间架起了一座桥梁。

电子器件的发展带来了电子产品和技术的更新换代,其发展过程大致经历了五个阶段,即真空电子管电路、晶体管电路、中小规模集成电路、大规模集成电路和超大规模集成电路。随着 1958 年第一块集成电路在美国研制成功,电子技术发生了一次巨大的突破和变革,使电子电路的小型化、低成本成为现实;到 20 世纪 60 年代末,第四代电子器件——大规模集成电路诞生,使得电子电路的集成度大大提高,尤其是 1972 年诞生的第四代计算机,标志着电子设备小型化的进程进一步加快;20 世纪 70 年代,美国和日本相继研制成功超大规模集成电路,由此产生了真正意义上的微型计算机,其成本大幅下降,并逐渐实现个人化。

二、数字电路的特点

数字集成技术的发展,导致计算机不断的升级换代;同时,也迅速向当今社会扩展开来,被广泛地应用于雷达定位、通信、电视、自动控制、电子测量仪表、地球物理、航空航天等领域。例如,在通信系统中,应用数字电子技术的数字通信系统,拥有模拟通信系统不可比拟的优点:① 抗干扰能力强;② 易于加/解密;③ 信码间具有逻辑关系便于纠错;④ 能与电子计算机相结合进行信息处理和控制;⑤ 能够进行数字压缩实现多媒体传输等。再如,在地球物理中,全球定位系统 (GPS) 与高精度数字化地图相结合使地球变成了“数字化村落”,其测定精度之高、所含信息之丰富以及其实时性是任何其他系统都不能相提并论的。

数字电子技术随着集成技术的发展,特别是大规模和超大规模集成器件的发展,使得各种数字系统的体积越来越小、可靠性越来越高、成本越来越低廉,而功能特别是自动化和智能化程度越来越高。

三、本课程研究的对象及内容

数字电路是产生、传输和处理数字信号的电路的通称。所谓数字信号是指在时间上和幅值上都是离散的信号。数字电子技术的主要研究对象是电路的输入和输出之间的逻辑关系，其基本分析工具是逻辑代数。

在数字电路中，半导体器件大多工作在开关状态，电路只有两个状态，分别用“0”和“1”表示，因此构成数字电路的基本单元十分简单，并且对器件要求不高、易于集成。

本课程主要学习内容有数字电路的基础知识、基本逻辑门电路、常用集成触发器、常用的组合逻辑部件和时序逻辑部件、数字信号的产生与变换电路、数/模和模/数转换器、大规模集成电路以及数字电路的故障检测与排除等。

数字逻辑器件可分为三大类：一是硬件由基本逻辑门和触发器构成的中、小规模集成逻辑器件；二是大规模和超大规模集成逻辑器件；三是专用集成电路 ASIC，又可分为标准单元、门阵列和可编程逻辑器件 PLD，它是兼有硬、软件逻辑设计功能的可编程逻辑器件，是近年来迅速发展的新型逻辑器件。

《数字电子技术》课程是应用性非常强的技术基础课，学习过程中必须特别注重实践能力的培养，因此本教材根据内容特点，在每章有选择地编排了讨论课、硬件实验或软件仿真实验，突出理论与实践的结合，同时便于教师灵活安排技能训练或利用多媒体教室演示教学。EWB 是电子电路仿真软件的一种，它可以模拟实际电子实验室的环境，提供众多的元器件和仪器仪表以及分析工具，可以虚拟所有的电子实验，堪称虚拟电子实验室，了解强大的 EDA（电子设计自动化）工具在电子课教学和实验中的作用，以扩展学生的知识面和综合应用能力。

第一章 数字电路基础知识



目的与要求 了解数字信号的特点；掌握数字电路特点及常用分析方法；掌握数制与码制的概念及其相互转换；熟练掌握基本逻辑关系、基本数字逻辑器件的功能和逻辑符号，并能根据需要合理选用集成逻辑门器件。

第一节 数字电路预备知识

一、数字信号

信号的形式是多种多样的，例如：时间、温度、压力、路程等都是时间连续幅度也连续的信号。这种连续变化的信号称为模拟信号。

还有一类信号，它们只在一些离散的瞬间才有定义，并且每次取值都是某一个最小单位的整数倍。例如，每次打靶命中的环数、流水线生产的机件数。这些在时间和幅值上都是离散的信号称为数字信号。用于产生和处理数字信号的电路称为数字电路。数字电路的主要研究对象是电路的输入和输出之间的逻辑关系。数字电路只有两种状态，例如电位的高与低、电流的有与无、开关的通与断等等，分别用“1”和“0”表示，这里的“0”和“1”不是十进制数中数字，而是逻辑0和逻辑1，称为二值数字逻辑。而“0”和“1”与“无脉冲”和“有脉冲”对应就是脉冲数字信号。一个0或一个1通常称作1比特。图1-1中，(a)所示为数字信号111010111111；(b)所示为用1代表高电平、用0代表低电平的数字信号波形。



图 1-1 数字信号

二、数字电路的分类

数字集成电路 (Digital Integrated Circuit) 是将电路所有的器件和连接线制作在一块半导体基片 (芯片) 上而成。通常以“门”为最小单位，按“集成度”将数字集成电路分成：

- (1) 小规模集成电路 SSI (Small Scale Integrating) 一块芯片上含 1~100 个门；
- (2) 中规模集成电路 MSI (Medium Scale Integrating) 一块芯片上含 100~1000 个门；
- (3) 大规模集成电路 LSI (Large Scale Integrating) 一块芯片上含 1000~10000 个门；
- (4) 超大规模集成电路 VLSI (Very Large Scale Integrating) 一块芯片上含 $10^4 \sim 10^6$ 个门。

如果集成逻辑门是以双极型晶体管 (电子和空穴两种载流子均参与导电) 为基础制成的，则称为双极型集成逻辑门电路。它主要有下列几种类型：

晶体管-晶体管逻辑门 TTL (Transistor-Transistor Logic); 高阈值逻辑门 HTL (High Threshold Logic); 射极耦合逻辑门 ECL (Emitter Coupled Logic); 集成注入逻辑门 I²L (Integrated Injection Logic)。

如果集成逻辑门是以单极型晶体管(只有一种极性的载流子参与导电:电子或空穴)为基础制成的,则称为单极型集成逻辑门电路。目前应用最为广泛的是金属-氧化物-半导体场效应管逻辑电路,简称 MOS (Metal Oxide Semiconductor) 集成电路,可分为:

PMOS (P 沟道 MOS)、NMOS (N 沟道 MOS) 和 CMOS (PMOS-NMOS 互补) 集成电路等。

三、二极管的开关特性

1. 二极管的静态特性

二极管是由一个密合的 PN 结构成的,具有单向导电性。即二极管两端加正向电压且大于其阈值电压 U_r 时,正向导通;否则,反向截止。

二极管的伏安特性曲线如图 1-2 所示。由图可见,二极管的正、反向特性具有如下特点。

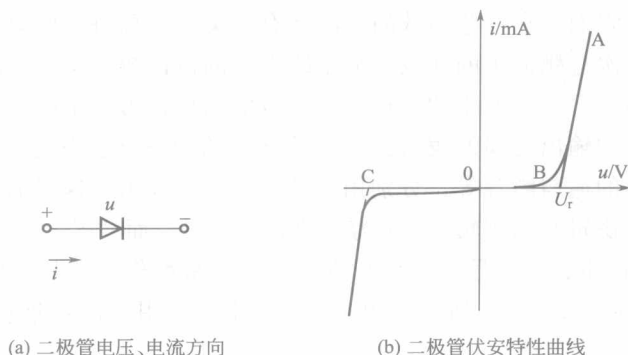


图 1-2 二极管的电压、电流

① 二极管两端加正向电压时,当二极管两端的正向电压小于阈值电压 U_r 时,几乎无电流通过,此时正向电流 i 基本上为零;当二极管两端的正向电压大于阈值电压 U_r 时,二极管上才有较大的正向电流通过,二极管正向导通。硅二极管的阈值电压 U_r 约为 0.5V ,锗二极管的阈值电压 U_r 约为 0.2V 。

② 二极管两端加反向电压时,仅有一个极小的反向电流,为微安数量级,此时二极管反向截止。

③ 当二极管两端的反向电压达到某一数值时,反向电流会急剧增长,此时二极管被反向击穿,单向导电性被破坏。一般二极管作开关管使用时不允许这种状态出现。

2. 二极管的动态特性

在数字电路中,二极管常作为开关管使用。由二极管伏安特性曲线可以看出,二极管加正向电压且超过开启电压 U_r 时,二极管导通且钳位(二极管的 PN 结导通时有固定的正向压降),称为二极管的“开”态;当正向电压小于 U_r 或加反向电压时,二极管截止,此称为二极管的“关”态。在数字信号的作用下,二极管可在“开”态和“关”态间转换。

在高速开关电路中,晶体二极管不能作为理想开关,必须考虑二极管的状态转换时间。

二极管由正向导通转为反向截止所需的时间称为反向恢复时间, 存在反向恢复时间的实质是二极管存在电荷的存储效应。通常用 t_r 表示反向恢复时间, 一般为纳秒数量级。正向导通时电流越大、存储电荷越多, 反向恢复时间就越长。



图 1-3 二极管的简化等效电路

二极管从反向截止转为正向导通所需的时间称为开通时间, 与反向恢复时间相比要小得多, 它是在正向偏压下使空间电荷区变窄直至消失所需的时间。因此影响二极管动态特性的主要参数是反向恢复时间 t_r , 开通时间通常可忽略。

图 1-3 所示为二极管的近似等效电路。

四、晶体管的开关特性

晶体管是双极性 (有两种载流子: 空穴和自由电子) 二结 (发射结、集电结) 三极 (发射极 E、基极 B、集电极 C) 半导体器件, 具有 NPN 型和 PNP 型两种管型, 有截止、放大、饱和三种工作状态。

现以图 1-4(a) 所示的 NPN 硅晶体管共发射极电路为例, 分析并归纳晶体管三种工作状态及特点。

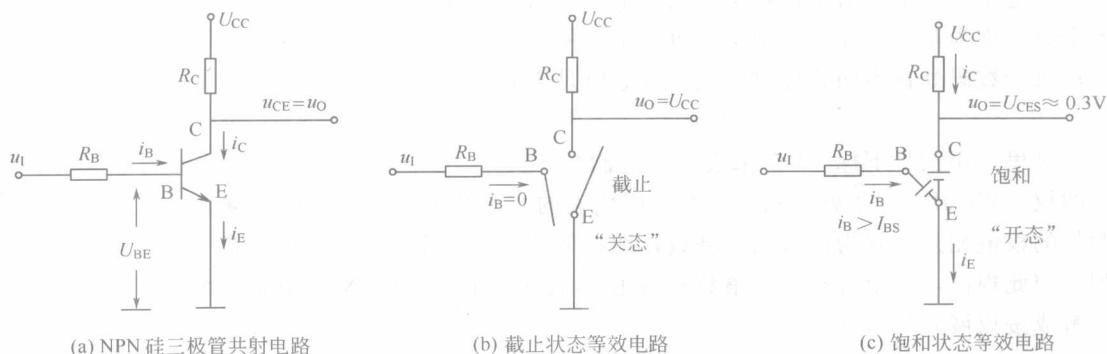


图 1-4 晶体管开关等效电路

1. 截止状态

当输入信号电压 $u_I < 0.5\text{V}$ 时, 发射结处于反偏状态, 发射区高掺杂浓度的载流子 (电子) 不能顺利扩散到基区, 发射极电流 i_E 几乎为 0; 同时, 集电结电压 $U_{BC} < 0$, 也处于反偏状态, 基极电流 i_B 和集电极电流 i_C 也基本上为 0。因此, 集电极电阻 R_C 上无电流也无压降, $u_{CE} \approx U_{CC}$, B、E、C 三极间均如同断路一样, 此状态称为晶体管的截止状态, 也称晶体管的“关”态。其等效电路如图 1-4(b) 所示。

2. 放大状态

当发射结处于正向偏置而集电结反向偏置时, 晶体管处于放大工作状态。此时, 集电极变化电流 Δi_C 与基极变化电流 Δi_B 存在如下关系: $\Delta i_C = \beta \Delta i_B$, 式中系数 β 为电流放大系数。

3. 饱和状态

当晶体管导通进入放大状态后, 随着输入电压 u_I 增大, i_B 、 i_C 、 i_E 均增大, 而 $u_{CE} = U_{CC} - i_C R_C$ 不断地下降, 当 u_{CE} 降到 0.7V 以下时, 晶体管的集电结由反偏转向正偏, 这使集电结对基区扩散至集电结边界的载流子 (电子) 的收集能力下降, i_C 电流趋于饱和, 即

使基极电流 i_B 再增加, 而能到达集电区的载流子数目恒定, i_C 不再增大。

在饱和状态下, 发射结和集电结均处于正偏, 集电极电流不再服从 $\Delta i_C = \beta \Delta i_B$ 这一规律, 而为 $i_C \approx U_{CC}/R_C$, i_C 基本不变。

在饱和状态下集电极与发射极之间呈低阻状态 (两结均导通), 集电极与发射极之间的压降很小, 一般硅管为 0.3V (锗管为 0.1V) 左右, 称为晶体管的饱和压降, 用 U_{CES} 来表示。此时, 集电极与发射极之间如同短路一样, 这种状态称为晶体管的“开”态, 其等效电路如图 1-4(c) 所示。

在脉冲数字电路中, 在大幅度的脉冲信号作用下, 晶体管交替工作于截止区和饱和区, 并通过放大区快速转换, 作为开关元件使用。

第二节 数制与码制

一、数制

数字量的计数进位制简称数制。

1. 十进制 (Decimal)

十进制是日常生活中最熟悉、应用最广泛的计数方法。每一种进制中所用到的不同数码的个数, 称为基数。在十进制中, 每一个数用 0、1、2、…、9 共十个数码来表示, 基数为十; 每个数码处在不同数位时所代表的数值是不同的, 例如十进制数 737 可表示为:

$$(737)_D = 7 \times 10^2 + 3 \times 10^1 + 7 \times 10^0$$

这里, 用括号下标 “D” 来表示十进制数, 其中 10^2 、 10^1 、 10^0 分别为百位、十位、个位的权 (Weight), 也就是相应位的 1 所代表的实际数值。显然, 位数越高权值越重; 相邻两位的权值相差正好为该数制的基数, 即相邻位间按“逢十进一”或“借一当十”的规律排列。照此规律, 一个含有 n 位整数和 m 位小数的正十进制数 $(N)_D$ 应是各个位值的和, 都能分解成按权展开的形式:

$$\begin{aligned} (N)_D &= K_{n-1} \times 10^{n-1} + \cdots + K_1 \times 10^1 + K_0 \times 10^0 + K_{-1} \times 10^{-1} + \cdots + K_{-m} \times 10^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} K_i \times 10^i \end{aligned}$$

式中, K_i 为十进制基数 10 的 i 次幂的系数, 它可取 0~9 中任一个数码。

2. 二进制 (Binary)

在数字电路中应用最广泛的是二进制。

二进制数的基数 K_i 只取两个数码“0”和“1”, 与十进制的区别在于基数和权值不同。二进制的“进”、“退”位规律是“逢二进一”或“借一当二”。任意一个二进制数 $(N)_B$ 都能分解成按权展开的形式:

$$\begin{aligned} (N)_B &= K_{n-1} \times 2^{n-1} + \cdots + K_1 \times 2^1 + K_0 \times 2^0 + K_{-1} \times 2^{-1} + \cdots + K_{-m} \times 2^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} K_i \times 2^i \end{aligned}$$

二进制最突出的优点是简单, 只用 0 和 1 两个数码, 在电路中, 用“开”和“关”两种状态表示。同时, 二进制基本运算规则简单, 实现运算操作方便。

二进制明显的缺点是: 用二进制表示一个数时, 位数多、直观可读性差。

3. 十六进制 (Hexadecimal)

二进制虽简单且电路实现方便,但与等值十进制数相比,它所需要的位数多,不便于书写和记忆,因此在计算机系统中经常用十六进制数来表示。

十六进制采用 0~9、A (对应十进制数 10)、B (11)、C (12)、D (13)、E (14)、F (15) 十六个数码,其基数 K_i 为 16,相邻位间计数规律是“逢十六进一”或“借一当十六”。

同上,十六进制数可按权展开为

$$(N)_H = \sum_{i=-m}^{n-1} K_i \times 16^i$$

4. 八进制 (Octal)

同理可表述,八进制数的基数 K_i 为 0、1、2、3、4、5、6、7 共八个数码,计数规律是“逢八进一”或“借一当八”。

八进制数可按权展开为

$$(N)_O = \sum_{i=-m}^{n-1} K_i \times 8^i$$

二进制、八进制、十进制及十六进制四种不同数制的对照关系如表 1-1 所示。

表 1-1 二、八、十、十六进制数的转换关系

十进制数	二进制数	八进制数	十六进制数	十进制数	二进制数	八进制数	十六进制数
0	0000	0	0	8	1000	10	8
1	0001	1	1	9	1001	11	9
2	0010	2	2	10	1010	12	A
3	0011	3	3	11	1011	13	B
4	0100	4	4	12	1100	14	C
5	0101	5	5	13	1101	15	D
6	0110	6	6	14	1110	16	E
7	0111	7	7	15	1111	17	F

二、不同数制间的相互转换

同一个数可以用不同的进位制表示,不同的进位制之间可以相互转换,称为数制转换。

1. N 进制数转换成十进制数

将 N 进制数转换成十进制数,只需将该数按其所在数制的权位展开、再相加取和,就能得到相应的十进制数。

【例 1-1】 将二进制数 $(11101)_B$ 转换成十进制数。

$$(11101)_B = 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = (29)_D$$

【例 1-2】 将八进制数 $(64.72)_O$ 转换成十进制数。

$$(64.72)_O = 6 \times 8^1 + 4 \times 8^0 + 7 \times 8^{-1} + 2 \times 8^{-2} = 48 + 4 + 0.875 + 0.125 = (53)_D$$

【例 1-3】 将十六进制数 $(1F6.B2)_H$ 转换成十进制数。

$$\begin{aligned} (1F6.B2)_H &= 1 \times 16^2 + 15 \times 16^1 + 6 \times 16^0 + 11 \times 16^{-1} + 2 \times 16^{-2} \\ &= 256 + 240 + 6 + 0.6875 + 0.0078125 = (502.6953125)_D \end{aligned}$$

2. 十进制数转换成 N 进制数

将一个十进制数转换成 N 进制数,要将十进制数的整数部分和小数部分分开进行转换,

可采用“基数乘法，存余取整”，再将整数、小数合并起来。

(1) 整数转换 将十进制数的整数部分除以 N 进制的基数，保存余数作为 N 进制数的最低位，并把前一步的商再除以 N 进制的基数，还保存余数作为次低位，重复上述过程，直至最后商为 0，这时最后所得的余数为 N 进制的最高位。

【例 1-4】 将十进制数 $(92)_{\text{D}}$ 转换成二进制数。

2		92	0	 最低位
2		46	0	 次低位
2		23	1	
2		11	1	
2		5	1	
2		2	0	
2		1	1	 最高位
		0	最后的商必须为 0	

所以， $(92)_{\text{D}} = (1011100)_{\text{B}}$

由此可知：将十进制整数转换成二进制数采用“除 2 取余逆排法”；将十进制整数转换成八进制数采用“除 8 取余逆排法”；将十进制整数转换成十六进制数采用“除 16 取余逆排法”。

(2) 小数转换 十进制纯小数转换成 N 进制数，采用“连乘基数取整法”，逐次乘基数，逐次取出整数，直至最后乘积为 0 或达到某个精度为止。当乘至第 n 位时，若乘积不等于 0，但看成近似为 0，这就存在了转换误差。转换误差的估算：取到小数点后第 n 位，转换误差就为 $(\text{权})^{-n}$ 。

【例 1-5】 将十进制小数 $(0.3721)_{\text{D}}$ 转换成二进制数（取到小数点后八位）。

0.3721	
$\times 2$	
[0].7442	$B_{-1} = 0$
$\times 2$	
[1].4884	$B_{-2} = 1$
$\times 2$	
[0].9768	$B_{-3} = 0$
$\times 2$	
[1].9536	$B_{-4} = 1$
$\times 2$	
[1].9072	$B_{-5} = 1$
$\times 2$	
[1].8144	$B_{-6} = 1$
$\times 2$	
[1].6288	$B_{-7} = 1$
$\times 2$	
[1].2576	$B_{-8} = 1$

所以 $(0.3721)_D = (0.01011111)_B$ 转换误差为 $2^{-8} = \frac{1}{256} = 0.0039$

由此可知：将十进制小数转换成二进制数采用“乘 2 取整顺排法”。推广之，将十进制小数转换成八进制数可采用“乘 8 取整顺排法”；将十进制小数转换成十六进制数可采用“乘 16 取整顺排法”。

3. 八进制数、十六进制数与二进制数的互相转换

因为八进制数、十六进制数严格说来都可归于二进制数，所以，它们之间的相互转换就显得十分方便，并且也不存在转换误差。

如八进制数每位的基数为 $8=2^3$ ，相当于三位二进制数。因此，就有“每一位八进制相当于三位的二进制；每三位二进制相当于八进制的一位”。

【例 1-6】 将八进制数 $(115.734)_O$ 转换成二进制数。

$$(115.734)_O = (001001101.111011100)_B$$

【例 1-7】 将二进制数 $(111001.011101)_B$ 转换成八进制数。

$$(111001.011101)_B = (71.35)_O$$

再如，十六进制数每位的基数为 $16=2^4$ ，相当于四位二进制数。因此，就又有“十六进制的每一位相当于四位二进制；每四位二进制相当于十六进制的一位”。

【例 1-8】 将十六进制数 $(A6D.8F)_H$ 转换成二进制数。

$$(A6D.8F)_H = (101001101101.10001111)_B$$

【例 1-9】 将二进制数 $(1001.101101010011)_B$ 转换成十六进制数。

$$(1001.101101010011)_B = (9.B53)_H$$

当八进制和十六进制相互转换时，可借助二进制来完成。

三、码制

在数字系统中，二进制数的每一位数只有 0 或 1 两个数码，只能用来表达两个不同的信号。若需要表示更多的信息，往往是将若干位二进制数码按特定的规律进行编排，其每一种组合对应一个特定意义的信息（如数字、字母或符号等），这种组合，称之为“代码”。这种将多位二进制组合的每个代码都被赋予固定含义的过程，叫做“编码”。“编码”的规律体制就是码制。

（一）BCD 码

十进制数除了可以转换成等量的二进制数以外，还可以采用二进制“编码”的形式表示。这种代码既具有二进制数的形式，又具有十进制的特点。

用四位二进制代码来表示一位十进制数，称为二十进制代码，简称 BCD (Binary Coded Decimal) 代码。

当采用不同的编码方案时，可以得到不同形式的 BCD 码。下面介绍几种常用的 BCD 码。

1. 8421BCD 码

8421BCD 码是最基本、最常用的有权 BCD 码，即其 4 位二进制代码中，每位二进制数都对应有确定的位权值，即 $B_4=8$ ， $B_3=4$ ， $B_2=2$ ， $B_1=1$ 。

例如，8421BCD 码中的 1001 代表： $8 \times 1 + 4 \times 0 + 2 \times 0 + 1 \times 1 = (9)_D$

应当指明的是，在 8421BCD 码中不允许出现 1010~1111 这 6 个代码，它们是没有

意义的。

2. 2421 码、5421 码和 631-1 码

只要满足最低权位值为 1、四位权值之和大于等于 9、且能区分开 0~9 十个数码的均可构成有权的 BCD 码。

2421BCD、5421BCD 和 631-1 码也是有权码，其中，2421BCD 和 631-1 码的 0 和 9、1 和 8、2 和 7、3 和 6、4 和 5 恰好互为反码，这种特性称为具有自补性，在数字系统的信号传输中是很有用的。

3. 余 3 码

余 3 码，是在每个 8421BCD 代码上加上(0011)_B 而得到的。余 3 码各位无固定的位权，也称为无权码，用余 3 码进行加减运算比 8421BCD 码方便、快捷。

(二) 格雷 (Gray) 码、奇偶校验码的特点及应用

代码在形成、传输的过程中，由于偶然因素会产生误码，为了减少这种误码，就要对代码的形式进行筛选，挑选出在实际传输过程中不容易出错的代码，这就是可靠性编码。

可靠性编码有许多，其中最突出的就是格雷 (Gray) 码和奇偶校验码。

1. 格雷码

格雷码，又称循环码。它利用了所有的十六种组合，因此也是一种无权码。它的编码特点是任两相邻代码间只有一位数码不同，所以在传输过程中易被机器识别而不容易出错，它是一种错误最小化代码，因此获得广泛应用。Gray 码不唯一，如表 1-2 列出的就是一种格雷码 (表中仅列出了 10 个代码，另 6 个未列出)。

表 1-2 常用编码对照表

十进制数	编 码	有权码				无权码	
		8421BCD	2421BCD 码	5421BCD 码	631-1 码	余 3 码	格雷码 奇偶校验 码 (奇校验)
0		0000	0000	0000	0011	0011	0000
1		0001	0001	0001	0010	0100	0001
2		0010	0010	0010	0101	0101	0011
3		0011	0011	0011	0111	0110	0010
4		0100	0100	0100	0110	0111	0110
5		0101	1011	1000	1101	1000	0111
6		0110	1100	1001	1000	1001	0101
7		0111	1101	1010	1010	1010	0100
8		1000	1110	1011	1101	1011	1100
9		1001	1111	1100	1100	1100	1101
10							1111
11							1110
12							1010
13							1011
14							1001
15							1000

2. 奇、偶校验码 (Parity Code)

可靠性编码中还有一种常用的代码，就是奇、偶校验码 (Parity Code)。它除了表示传输信息的代码外，又增加了一位奇、偶校验位，用来标记传输信息的代码中“1”的奇、偶数。

它的编码有两种方式：使得一个代码组中信息位和校验位中“1”的总个数为奇数的叫奇校验；“1”的总个数为偶数的叫偶校验。奇校验和偶校验在计算机中获得广泛的应用。通