



21 世纪高职高专信息技术教材

数字逻辑电路

北京希望电子出版社 总策划
连晋平 主 编
王东红 刘庆林 副主编

 科学出版社
www.sciencep.com



世纪高职高专信息技术教材

数字逻辑电路

北京希望电子出版社 总策划
连晋平 主 编
王东红 刘庆林 副主编

 科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

《数字逻辑电路》是高等学校计算机专业的一门重要技术基础课。全书共分为 11 章和 1 个附录,包括:绪论、数制与编码、逻辑函数及其简化、集成逻辑门、组合逻辑电路、集成触发器、时序逻辑电路、半导体存储器和可编程逻辑器件、脉冲单元电路、模数转换器和数模转换器、VHDL 语言与数字逻辑电路设计。附录中对 EWB (electronics workbench) 做了简单介绍。利用 EDA (electronic design automation) 技术进行电子电路设计,设计者可通过计算机仿真、分析、验证电路的功能和特性,并且能很容易地修正原设计方案,特别适合计算机专业的学生学习电子技术知识。

本书内容丰富,语言通俗易懂,实用性非常强,可作为高等学校计算机专业教材,也可供工程技术人员参考学习。

需要本书或需要得到技术支持的读者,请与北京中关村 083 信箱(邮编 100080)发行部联系,电话:010-82702660 010-82702658, 010-62978181 转 103 或 238, 传真:010-82702698, E-mail: tbd@bhp.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

数字逻辑电路 / 连晋平主编. —北京: 科学出版社, 2005.4

ISBN 7-03-014768-5

I. 数... II. 连... III. 数字电路: 逻辑电路 IV. TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 134130 号

责任编辑: 李东震 / 责任校对: 若 白

责任印刷: 双 青 / 封面设计: 梁运丽

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2005 年 4 月第一次印刷 印张: 18 5/8

印数: 1—5 000 字数: 427 000

定价: 28.00 元

21世纪高职高专信息技术教材编委会名单

(排名不分先后)

主 任 高 林

副主任 谢玉声 袁启昌

胡伏湘 陆卫民

委 员

阮东波 龙 超 杨丽群

王东红 罗映峰 侯晓华

连晋平 冯矢勇 杨章静

唐伟奇 徐 萍 尹 静

慕东周 李 淼 田 更

朱作付 李超燕 吴 军

杨旭东 景鹏森 杨金龙

米 昶 陈孟建 崔俊杰

孙 杰 宗小翀 陈翠娥

唐燕青 韦 伟 陈 春

刘 毅 袁海宁 徐建华

邱建国 曹冬梅 郑明红

蒋建强 陈彦许 韩素华

王趾成 崔会军 张光瑞

总 序

高等职业教育目前已成为我国高等教育的重要组成部分,对于推动我国社会主义现代化建设起着不可忽视的作用。计算机教育在整个高职教育中有着举足轻重的地位,因为计算机的普及已经涉及到各个行业。对于传统的学习计算机知识的方法即理论为主、应用为辅的教学模式,相对高职教育来说有些不太适合,针对这种情况,就需要一些符合高职教育特点的教材来满足这种需求。

为解决教材供需不平衡的矛盾,北京希望电子出版社与全国高等学校计算机基础教育研究会高职高专专业委员会联合组织国内十几所高职院校,聘请“双师”型教师共同编写针对高职特点的教材30多种,以及实训类教材10多种,并请专家论证了本套教材的体系、风格、结构、内容等方面的可行性与可操作性。该系列教材体现“重在能力素质培养”的目标,结合教育部的教学大纲要求,在实用性、新颖性、可读性几个方面都有所突破。

高职教材建设是教学改革重要的环节,高等职业技术教育专业设置要与劳动力市场需求相结合,教学内容与国家职业标准相衔接。采取“订单教学”的校企合作培养模式,实行学业文凭和职业资格两种证书制度,使一线技术人才培养实现教学与市场“零距离”、毕业生上岗“零适应期”。这种以市场为导向实行的订单教学,能够直接为用人单位培养实用型人才,是一条富有特色的职教之路,可以保证同学们将来在就业和升学两条渠道上有最大的发展空间。所以,高校就要突出应用技能培养的办学特色,按照人才市场供求信号进行学科、专业和教学内容的调整,以适应社会需要。在培养学生的知识、能力、技能方面都要与其他综合性本科院校有所区别。

本系列教材就是遵循这种订单式教学的需要,一方面是设定系统理论知识的教材,这种教材的内容按照“必需、够用”的原则,构筑坚实的具有高职特色的理论体系基础;另一方面是训练职业动手能力的实训教材,按照“切实、实用”的原则,培养动手能力强的人才。以上两种教材相互配合,既可以单独使用,也可以配套使用。

高职教材建设还在探索中,如何能满足企业对人才的需求,跟上时代发展的步伐,这些都是亟需解决的问题。本丛书旨在抛砖引玉,希望更多的优秀教师参与到教材建设中来,真诚希望广大教师、学生与读者朋友在使用本丛书过程中提出宝贵意见和建议,为下一次的修订与改版做准备,使本丛书日臻完美。

若有投稿或建议,请发至本丛书出版者电子邮件: textbook@bhp.com.cn。

21世纪高职高专信息技术教材编委会

前 言

《数字逻辑电路》是高等学校计算机专业的一门重要技术基础课。它是培养学生获取现代数字逻辑电路理论和实践知识的入门性课程。《数字逻辑电路》既具有较强的理论性，也具有较强的实践性。

本教材内容共有 11 章和 1 个附录，包括：数制与编码、逻辑函数及其简化、集成逻辑门、组合逻辑电路、集成触发器、时序逻辑电路、半导体存储器和可编程逻辑器件、脉冲单元电路、模数转换器和数模转换器、VHDL 语言与数字逻辑电路设计。附录中对 EWB (electronics workbench) 做了简单介绍。

现代电子技术飞速发展，新技术、新器件不断出现，特别是一些已经很成熟的新技术和新器件，例如，可编程逻辑器件、一些通用性很强的专用集成电路和 VHDL 语言等，它们已经得到了广泛的应用。本书编写过程中在讲清数字逻辑电路的基本概念、知识和方法的基础上，对这些成熟的新技术和新器件选择一些加以简单介绍，以便起到抛砖引玉的作用。附录中对 EWB (electronics workbench) 做了简单介绍，EWB 是一种功能较强的电子设计、仿真软件，是比较流行的 EDA (electronic design automation) 软件之一，利用 EDA 技术进行电子电路设计，设计者可通过计算机仿真、分析、验证电路的功能和特性，并且能很容易地修正原设计方案，特别适合计算机专业的学生学习电子技术知识。在提倡终身学习的信息时代，有兴趣的同学可利用互联网这个现代化的学习工具进一步探究、学习。

本书是作者在从事计算机硬件类课程教学和实验的基础上，参考大量兄弟院校的教材编写而成，在编写过程中得到了肇庆学院计算机系主任令锋博士的关心和帮助，在此一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中必然存在许多不足之处，欢迎读者对本书提出批评和建议。

编 者

目 录

绪论.....	1	2.3 本章小结	44
0.1 数字逻辑电路的发展	1	2.4 习题	45
0.2 模拟量和数字量	2	第 3 章 集成逻辑门.....	48
0.3 数字逻辑电路	3	3.1 晶体管的开关特性	49
0.4 数字逻辑电路的特点和研究方法	3	3.1.1 晶体二极管的开关特性	49
第 1 章 数制与编码.....	5	3.1.2 晶体三极管的开关特性	52
1.1 数 制	5	3.2 TTL 集成逻辑门	55
1.1.1 进位记数制	5	3.2.1 晶体管-晶体管逻辑门	
1.1.2 十进制数	6	电路 (TTL)	55
1.1.3 二进制数	6	3.2.2 TTL 与非门的主要外部特性	57
1.1.4 八进制数和十六进制数	7	3.2.3 TTL 或非门、集电极开路门	
1.1.5 任意进制数	7	(OC)、三态输出门等	62
1.2 数制转换	9	3.2.4 其他系列 TTL 门电路	64
1.2.1 多项式替代法	9	3.2.5 其他双极型门电路简介	65
1.2.2 基数乘除法	9	3.3 CMOS 电路	66
1.2.3 数码直接代替法	11	3.3.1 MOS 管的开关特性	66
1.2.4 转换精度	12	3.3.2 CMOS 反相器工作原理	70
1.3 二进制编码	13	3.3.3 CMOS 反相器的主要特性	70
1.3.1 二—十进制编码	13	3.3.4 CMOS 传输门	72
1.3.2 格雷码	16	3.3.5 CMOS 逻辑门电路	73
1.3.3 ASCII 码	17	3.3.6 CMOS 电路的正确使用	74
1.3.4 奇偶校验码	19	3.4 本章小结	75
1.4 本章小结	19	3.5 习题	76
1.5 习题	20	第 4 章 组合逻辑电路.....	79
第 2 章 逻辑函数及其简化.....	22	4.1 组合逻辑电路分析	80
2.1 逻辑代数	22	4.1.1 分析步骤	80
2.1.1 基本逻辑	22	4.1.2 分析实例	81
2.1.2 基本逻辑运算	24	4.2 组合逻辑电路设计	92
2.1.3 真值表与逻辑函数	28	4.2.1 组合逻辑电路设计概述	92
2.1.4 逻辑函数相等	29	4.2.2 输入无反变量组合逻辑电路	
2.1.5 3 个规则和常用公式	30	的设计	93
2.1.6 逻辑函数的标准形式	33	4.2.3 多输出组合逻辑电路的设计	95
2.2 逻辑函数的简化	37	4.2.4 采用中规模集成器件实现	
2.2.1 公式化简法	37	组合逻辑函数	97
2.2.2 卡诺图法	38	4.3 组合逻辑电路的冒险现象	101

4.3.1 竞争与险象的基本概念.....	101	6.2.4 常见的时序逻辑电路.....	137
4.3.2 险象的产生和分类.....	102	6.3 同步时序逻辑电路设计.....	145
4.3.3 险象的判别.....	104	6.3.1 同步时序逻辑电路设计步骤...145	
4.3.4 险象的消除.....	105	6.3.2 同步时序逻辑电路设计举例...150	
4.4 本章小结.....	106	6.3.3 采用中规模集成器件实现 任意模值计数(分频)器.....	151
4.5 习题.....	106	6.4 序列信号发生器.....	156
第5章 集成触发器.....	109	6.4.1 设计给定序列信号的 产生电路.....	156
5.1 基本触发器.....	109	6.4.2 根据序列循环长度M的要求 设计发生器电路.....	158
5.1.1 基本触发器的电路组成和 工作原理.....	109	6.5 本章小结.....	162
5.1.2 基本触发器功能的描述.....	111	6.6 习题.....	162
5.2 钟控触发器.....	114	第7章 半导体存储器和可编程逻辑器件.....	165
5.2.1 钟控R-S触发器.....	114	7.1 概述.....	165
5.2.2 钟控D触发器.....	115	7.1.1 程序逻辑电路的结构及特点...165	
5.2.3 钟控J-K触发器.....	116	7.1.2 数字逻辑电路设计方式.....	166
5.2.4 钟控T触发器.....	117	7.2 半导体存储器.....	166
5.2.5 电位触发方式的工作特性.....	118	7.2.1 半导体存储器的特点与应用...166	
5.3 主从触发器.....	118	7.2.2 半导体存储器的分类.....	166
5.3.1 主从触发器基本原理.....	118	7.2.3 随机存储器.....	167
5.3.2 主从J-K触发器主触发器的 一次翻转现象.....	120	7.2.4 只读存储器.....	170
5.3.3 主从JK触发器集成单元.....	120	7.2.5 用ROM实现组合逻辑电路....173	
5.3.4 集成主从J-K触发器的脉冲 工作特性.....	121	7.3 可编程逻辑器件.....	174
5.4 边沿触发器.....	122	7.3.1 可编程逻辑器件的分类.....	174
5.4.1 维持—阻塞触发器.....	122	7.3.2 阵列型可编程逻辑器件.....	175
5.4.2 下降沿触发的边沿触发器.....	124	7.3.3 现场可编程门阵列FPGA.....	181
5.4.3 CMOS传输门构成的 边沿触发器.....	125	7.4 编程逻辑器件的设计.....	184
5.5 本章小结.....	126	7.4.1 概述.....	184
5.6 习题.....	127	7.4.2 可编程逻辑器件的设计流程...186	
第6章 时序逻辑电路.....	129	7.4.3 在系统可编程技术.....	189
6.1 时序逻辑电路概述.....	129	7.4.4 边界扫描技术.....	191
6.1.1 时序逻辑电路的分类.....	129	7.5 本章小结.....	192
6.1.2 时序逻辑电路的描述.....	130	7.6 习题.....	193
6.2 时序逻辑电路分析.....	130	第8章 脉冲单元电路.....	194
6.2.1 时序逻辑电路的分析步骤.....	130	8.1 脉冲信号与脉冲电路.....	194
6.2.2 同步时序逻辑电路的分析.....	131	8.1.1 脉冲信号.....	194
6.2.3 异步时序逻辑电路的分析.....	135	8.1.2 脉冲电路.....	194
		8.2 集成门构成的脉冲单元电路.....	195

8.2.1	施密特触发器.....	195
8.2.2	单稳态触发器.....	198
8.2.3	多谐触发器.....	201
8.3	555 定时器及其应用.....	203
8.3.1	集成 555 定时器.....	203
8.3.2	用集成 555 定时构成施密特 触发器.....	204
8.3.3	用集成 555 定时构成单稳态 触发器.....	204
8.3.4	用集成 555 定时构成多谐 触发器.....	205
8.4	本章小结.....	206
8.5	习题.....	206
第 9 章	模数转换器和数模转换器.....	208
9.1	转换系统.....	208
9.1.1	数字控制系统.....	208
9.1.2	数据传输系统.....	209
9.1.3	自动测试与测量设备.....	209
9.1.4	多媒体计算机系统.....	209
9.2	数模转换器 (DAC).....	209
9.2.1	数模转换器 (DAC) 的构成 及工作原理.....	210
9.2.2	数模转换器 (DAC) 的转换 精度和转换速度.....	213
9.2.3	集成数模 (DAC) 转换器.....	214
9.3	模数转换器 (ADC).....	217
9.3.1	模数转换器 (ADC) 的构成 及工作原理.....	217
9.3.2	模数转换器 (ADC) 的转换 精度和转换速度.....	224
9.3.3	集成模数 (ADC) 转换器.....	225
9.4	本章小结.....	228

9.5	习题.....	228
第 10 章	VHDL 语言与数字逻辑电路设计.....	230
10.1	VHDL 语言程序结构.....	231
10.1.1	VHDL 语言基本单元 及构成.....	231
10.1.2	子结构体.....	233
10.1.3	库、包和配置.....	234
10.2	VHDL 语言的数据类型和操作符.....	236
10.2.1	标识符命名.....	236
10.2.2	客体类型.....	236
10.2.3	数据类型.....	237
10.2.4	词法单元.....	241
10.2.5	运算操作符.....	242
10.3	VHDL 语言的描述方式及主要 描述语句.....	244
10.3.1	并发语句.....	244
10.3.2	顺序语句.....	251
10.3.3	其他语句.....	254
10.4	数字逻辑基本电路的设计.....	257
10.4.1	门电路.....	257
10.4.2	译码器和选择器.....	260
10.4.3	加法器.....	261
10.4.4	触发器.....	263
10.4.5	寄存器.....	264
10.4.6	计数器.....	267
10.5	本章小结.....	268
10.6	习题.....	268
附录	Electronics Workbench (电子工作台)	
	使用简介.....	270
	参考文献.....	288

本章重点内容:

- 数字逻辑电路的发展
- 模拟量和数字量
- 数字逻辑电路
- 数字逻辑电路的特点和研究方法

0.1 数字逻辑电路的发展

数字逻辑电路技术的发展大致可分为 5 个阶段。

第一阶段是从 19 世纪末获得工程应用的电报通信开始,它在本质上是一个简单的二值数字系统。二十世纪 30 年代,电话逐渐普及,众多电话机用人工转接的方法来选取所需要的对象已经无法满足需要,这样便促使了拨号式自动电话交换系统的诞生。在该系统的研究中,英国数学家乔治·布尔(George Boole)早在 1847 年就创立了布尔代数理论获得工程应用,并在随后的实践中丰富和发展了布尔代数,逐渐形成了近代开关理论:继电—触点网络理论(Relay—Contact Network Theory),在这个理论基础上建立了一套对于数字逻辑电路的分析方法和设计方法,为以后数字技术的发展奠定了理论基础。进入 20 世纪 40 年代,美国的许多军事科学的研究迫切需要进行快速的大量计算,例如,火箭的飞行轨迹和自动控制等,这就要求计算工作自动化,从而促使美国在 1946 年研制出世界上第一台采用电子管为基本元件的电子计算机(ENIAC)。但是由于电子管在性能指标上存在许多缺陷,因此,在晶体管出现以前,采用电子管为基本器件的一些数字设备只是在自动电话交换系统、数字通信和专用计算机等少数学科领域获得应用,这是数字技术发展的初期阶段。

第二阶段是从 20 世纪 60 年代开始,数字技术中广泛采用晶体管代替电子管作为基本器件。由于晶体管具有体积小、功耗低、工作速度高和工作寿命长等优点,使数字设备缩小了体积、降低了功耗、提高了工作速度和可靠性。

第三阶段从 20 世纪 60 年代末至 70 年代中期,在数字技术中广泛采用集成电路作为基本器件。集成电路可以把成千上万的晶体管、电阻、电容等元件以及它们的连线都制作在一个面积很小的芯片上,它的应用使数字设备的体积缩小、功耗降低、可靠性大幅度提高,特别是集成电路的价格随着生产工艺技术的进步而愈来愈低廉。

第四阶段从 20 世纪 70 年代中期至 80 年代中期,由于微电子学和集成电路生产工艺的发展,集成电路在集成度和工作速度等性能指标上取得突破性进展。大规模和超大规模集成电路的生产技术已经非常成熟。一块芯片上可以集成几百万、甚至上千万个元件。因而出现了将一台计算机主要部件都集成在一块芯片上的中央处理器(CPU)和单片计算机。它们的出现标志着数字技术发展进入了一个新时代。

第五阶段从 20 世纪 80 年代中期开始,超大规模的专用集成电路 ASIC(Application Specific Integrated Circuit)的制作技术已趋成熟。芯片生产厂商可以代客户将他们设计的十分庞大的数字系统制作在一块芯片上,客户所需要的系统级芯片便得到了。与此同时,各

种用户可编程逻辑器件如可编程阵列逻辑 PAL (Programmable Array Logic)、可编程通用阵列逻辑 GAL (Generic Array Logic)、现场可编程门阵列 FPGA (Field Programmable Gate Array) 等, 它们在集成规模上有配套的系列产品, 用户可将自己设计的数字系统通过编制一定的程序 (通常称为软件), 将程序输入这些可编程逻辑器件便得到自己所需的 (数字逻辑系统) 芯片。这些专用的和通用的系统级芯片的应用不但进一步提高了设备的性能, 而且将数字系统的设计、安装和调试融为一体, 并且都是在计算机上来完成, 这就彻底更新了数字设备传统的研制方法, 大大缩短了设备的研制周期、降低了设备的生产成本, 使之成为当今数字技术发展的主要方向。利用 EDA (Electronic Design Automation) 技术进行电子电路设计, 设计者可通过计算机仿真、分析、验证电路的功能和特性, 并且能很容易地修正原设计方案。进入二十世纪 90 年代, 计算机技术、通信技术以及建立在计算机和网络技术基础上的计算机网络技术得到了迅猛的发展。特别是 1993 年美国宣布建立国家信息基础设施 (NII) 后, 全世界许多国家纷纷制定和建立本国的 NII, 从而极大地推动了计算机网络技术的发展, 使计算机网络进入了一个崭新的阶段。目前, 全球以美国为核心的高速计算机互联网络即 Internet 已经形成, Internet 已经成为人类最重要的、最大的知识宝库。而美国政府又分别于 1996 年和 1997 年开始研究发展更加快速可靠的互联网 2 (Internet 2) 和下一代互联网 (Next Generation Internet)。另一方面, 多媒体技术将更加完美地与网络通信技术结合在一起。

数字逻辑电路和模拟电路都有它们各自的适用范围, 不能完全用一种技术取代另一种技术, 但数字信号和模拟信号可以互相转换, 随着各种新型电路芯片的不断推出, 数字逻辑电路系统正在从多方面取代模拟电路系统, 如数字通讯、数码照相机、数字音乐、数字电视等, 多媒体、高速计算机网络、无线网络、各种便携式计算机的普及应用将使人类的多种活动变得更加方便。数字逻辑电路技术是未来空间技术、基因技术、纳米技术等众多高新技术的基础, 它的不断发展、完善将进一步促进未来多种高新技术的发展。

0.2 模拟量和数字量

在自然界中存在着许多物理量, 其中有一些物理量, 如温度、湿度、压力、速度等, 它们在时间上和数值上都具有连续变化的特点, 在一定范围内可以取任意实数值, 通常称这种连续变化的物理量为模拟量。表示模拟量的电信号称为模拟信号。周期性模拟信号分为两类: 一是正弦信号 (各种不同频率正弦信号是模拟电子电路的处理对象) 二是脉冲信号。广义的来说, 凡不具有连续变化形状的信号, 都可以通称为脉冲信号。如方波、矩形波、尖脉冲、锯齿波、钟形脉冲、三角波以及梯形波等等。完成脉冲信号产生、传输、变换和处理的电路称为脉冲电路 (见第 8 章)。

还有一类物理量在时间和数值上是离散的, 它们的大小以及每次的增减变化都是某个最小单位的整数倍。这一类物理量称为数字量。表示数字量的信号称为数字信号, 完成数字信号产生、传输和处理的电路就称为数字逻辑电路, 或称为数字系统。

在数字电路中最常采用的只有 0、1 两种数值所组成的数字信号, 又称为二进制信号。这类信号中的数值 1 或 0 可以用电平的高或低来表示; 也可以用脉冲的有或无来表示。

0.3 数字逻辑电路

对数字信号进行传递、变换、运算、存储以及显示等处理的电路称为数字电路。由于数字电路不仅能对数字信号进行数值运算，而且具有逻辑运算和逻辑判断的功能，所以又称为数字逻辑电路，或逻辑电路。

数字逻辑电路有许多种不同的分类方法，常用的方法有两种。一种是根据电路的功能特点分类，另一种是根据电路的集成规模分类。根据数字逻辑电路有无记忆功能，可分为组合逻辑电路（见第4章）和时序逻辑电路（见第5、6章）两类。而传统数字逻辑电路的主要内容就是讨论这两类逻辑电路的分析与设计方法与常用电路的特点与应用。

另一种是根据构成电路芯片的集成规模分类。分类情况见表0-1。

表0-1 数字逻辑电路分类

类别	集成度	应用电路
小规模集成电路 SSI	<10 门/片 <100 元器件/片	用于逻辑单元电路如逻辑门电路、集成触发器
中规模集成电路 MSI	10~99 门/片 100~999 元器件/片	用于逻辑功能电路如译码器、编码器、计数器
大规模集成电路 LSI	100~9999 门/片 1000~99999 元器件/片	用于小的数字系统或子系统如 CPU、存储器
超大规模集成电路 VLSI	>10 000 门/片 >1000 000 元器件/片	用于构成完整的数字系统如单片机

0.4 数字逻辑电路的特点和研究方法

数字逻辑电路中处理和传递信息的逻辑值是用“0”和“1”来表示的，而此逻辑值“0”和“1”分别对应电子器件内或电子器件间的电平的“低”和“高”，脉冲的“无”和“有”，电流的“断”和“通”两种状态，所以称数字逻辑电路具有“二值性”。

数字逻辑电路中，处理数字信息的方式称为操作或运算，它和模拟电路（比如放大、调制、变频）中的处理是不同的。最基本的操作有下列几种：把“1”变成“0”或者反过来，称为取“非”变“反”或“翻转”；存放在某些器件中，称为“寄存”；从一些器件转移到另一些器件中，称为移位；把一组0~1序列变换成特定的“1”或“0”，称为译码；把特定的“1”或“0”变换成一组0~1序列，称为编码；对“1”序列进行累加或对脉冲个数进行记忆，称为“计数”等等。

数字电路具有如下特点：

数字电路中的器件工作在开关（饱和、截止）状态，因而电路的稳定性好，可靠性高。

电路只需识别信号的有无，这样就便于扩充数字的位数以获得较高的精度。

数字信号便于处理和存储。

数字电路便于集成，可大大降低成本，减小体积。

便于采用数字计算机或微处理机来处理信息和参与控制。

上述特点使数字电路迅速发展,成为电子电路发展的主流,一些原来由模拟电路完成的工作,在一些新技术的支持下,用数字电路也可以实现。但模拟电路和数字电路二者不是对立的关系,而是互相依存的关系,二者各有各的适用范围。

数字电路中主要研究输入信号(单个变量或多个变量“0”和“1”的不同组合)和输出信号(单个变量或多个变量的不同组合)之间的逻辑关系,而研究这种逻辑关系往往分为两个方面——分析和综合(设计)。

逻辑分析是对现成的数字逻辑电路研究其逻辑功能,而逻辑综合(设计)恰恰相反,是要根据给定的逻辑功能寻求一个最佳的数字逻辑电路。当然这里的最佳是指高可靠性(不出现逻辑错误)、低成本(器件最少且合理)而言的。逻辑分析和逻辑设计采用的重要依据是逻辑代数(布尔代数、开关代数),对于具体的逻辑器件内部电路不是要研究的主要对象,主要掌握的是各类逻辑器件的外特性(对外呈现的逻辑功能)。一个完善的数字系统不是逻辑器件的简单连接,而是靠完整的逻辑设计理论和完善的逻辑设计方法来完成的。这正是“数字逻辑”这门课程所要达到的目的。

本课程的学习方法与建议:

根据本课程的内容和特点,建议读者在学习过程中注意以下几点:

1. 抓住重点,掌握基本知识和基本分析方法

本书各章前面有内容提要和学习目标,后面都有本章小结,已把学习的重点、要求和主要概念、结论和公式介绍清楚了。读者要在学习中学好这些提示,帮助自己理清思路。涉及的基本概念,一定要弄清物理含义;一些重要公式和分析方法,不宜死记硬背,要通过认真做习题来巩固和掌握;各种电路、器件不要把注意力放在内部结构及其工作过程的分析上,重点掌握外部特性和使用方法。

2. 注重实验和平时作业练习

本课程实践性较强,必须通过实际电路的实验和测试,才能深入了解其性能和使用方法;通过观察和分析实验现象才能深刻领会所学知识和结论;通过动手操作,才能培养、训练一些基本的专业技能。因此,本课程规定了一些重要实验,应尽量认真去做。

平时作业也是本课程的重要环节。本书每章有思考题及习题,要认真完成这些内容,主要以掌握方法、理清思路为主。

3. 注意培养自学的能力

有限的学习时间内不可能、也没有必要学完所有的电路知识,关键是掌握学习方法,提高自学的能力。学习本课更应注意培养获取新知识的能力,树立终身学习的信念。

第 1 章

数制与编码

本章重点内容:

- 数制
- 数制转换
- 二进制编码

本章是数字电路与系统的重要基础知识。数字系统是处理数字信息的,首要解决的问题是数值的表示方法,为此,本章介绍易于用硬件存储和计算的二进制数制与二进制编码。主要是介绍数制及其转换、十进制数的二进制编码等。这些编码不但在数字系统中使用,在计算机系统中也广泛地使用。

在数字逻辑电路系统中数值是以器件的物理状态来表示的。具有两种不同稳定状态而且能相互转换的器件或信号,例如,三极管的饱和与截止、发光二极管的明暗、磁盘磁化区域的方向、电子线路的接通断开、光盘区域的凹凸、脉冲电平的高低等,就可以用来表示一位二进制数。因此,用二进制来表示数显得最简单、可靠。另一方面,二进制数的运算规则也是最简单的。所以在数字逻辑电路系统中广泛使用了二进制。但是我们实际需要处理信息的不仅仅是这种二进制数据,还有整数、实数、声音、文字,图像等,必须先将它们用二进制进行编码、转换后,才能用数字逻辑电路系统进行处理。人们习惯使用十进制数,数字系统中还经常使用八进制数和十六进制数来标记二进制数,而不同的数制之间可以进行等值转换。人们交给数字系统的所有信息都必须首先对其进行二进制编码,然后才能由数字系统来处理。因此这里先讨论数制及其等值转换,再讨论常见信息的二进制编码。

1.1 数 制

数制就是人们记数的规则、体制。计数体制可分为“进位记数制”和“非进位记数制”。

1.1.1 进位记数制

在非进位记数制中,数码所表示的值只决定于数码本身,而与该数码所处的位置无关。用罗马数字来记数时就是一种“非进位记数制”。钟表上常见的罗马数字 I、II、III、IV、V、VI、VII、VIII、IX、X、XI、XII 分别表示的数量值为 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12,这里 11 不是用 I 1,当然十二也不是用 I II,而 50 是用“L”,而不是 V X,由此可见,用罗马数字来记数时数值和数码的位置无关。这种记数制当数值大了以后很不方便,所以除了在一些特殊场合使用外,已基本不用。

我们现在所用的计数体制是“进位记数制”。在进位记数制中,同样形式但不同进制的数是不相等的,例如,十进制的 100 和二进制的 100 是不同的,为了区别不同进制的数,通常用括号加下标的方式或加英文前(后)缀的方式以示区别,可以把该例中的两数分别记作 $(100)_{10}$ 和 $(100)_2$ 或 100D 和 100B。在同一进制中,处在不同位置的数码符号所代表的数也是不同的,为了说明这个问题,要引入“位权”的概念。十进制是我们最习惯的记数规则,下面就以十进制数 $(6208.2)_{10}$ 为例,说明这个问题,该数整数部分的 6、2、0、

8 数码不同, 本身表示的数值不同。不仅如此, 整数部分的 2 和小数部分的 2 数码是相同的, 但表示的数值也是不同的。在 $(6208.2)_{10}$ 这个数中, 每位数码表示的数值依次为 6×10^3 、 2×10^2 、 0×10^1 、 8×10^0 、 2×10^{-1} 。这里 6、2、0、8 称为系数, “10” 叫做基数, 而基数的整数次幂 10^3 、 10^2 、 10^1 、 10^0 、 10^{-1} 称为各位的“位权”。可见在进位记数制 (R 进制) 中, 选定 R 个数码和逢“R”进位的规则后, (R 称为基数), 表示某物理量数值时, 不仅和数码本身有关, 而且和数码所处的位置有关, 我们把这个与位置有关的大小称之为“位权”。

所谓“位权”, 在进位记数制中是基数的整数次幂。“基数”等于相邻两位中高位的权与低位的权之比, 所以进位记数制又可称为有“权”记数制。

1.1.2 十进制数

基数为 10 的计数制称为十进制, 十进制数在位置计数法中使用 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 十个数码和小数点来表示数据。加减计数法则为逢十进一, 借一当十。对于任意一个有 n 位整数、m 位小数的十进制数 N, 可以按位置系统依次排列, 记为:

$$(N)_{10} = (K_{n-1}K_{n-2} \cdots K_1 K_0 . K_{-1}K_{-2} \cdots K_{-m})_{10} \quad (\text{其中 } K_i \text{ 是 } 0 \text{ 至 } 9 \text{ 的整数})$$

也可将这个数用多项式展开为

$$(N)_{10} = (K_{n-1} \times 10^{n-1} + K_{n-2} \times 10^{n-2} + \cdots + K_1 \times 10^1 + K_0 \times 10^0 + K_{-1} \times 10^{-1} + K_{-2} \times 10^{-2} \cdots K_{-m} \times 10^{-m})_{10}$$

称为“多项式表示法”

例如, 数字 $(538.48)_{10}$ 可展开写为: $(5 \times 10^2 + 3 \times 10^1 + 8 \times 10^0 + 4 \times 10^{-1} + 8 \times 10^{-2})_{10}$

1.1.3 二进制数

基数为 2 的计数制称为二进制, 二进制数在位置计数法中使用 0、1 两个数码和小数点来表示数据。加减计数法则为逢二进一, 借一当二。同样, 对于任意一个有 n 位整数、m 位小数的二进制数 N, 可以按位置系统依次排列, 记为:

$$(N)_2 = (K_{n-1} \cdots K_1 K_0 . K_{-1} \cdots K_{-m})_2 \quad (\text{其中 } K_i \text{ 是 } 0 \text{ 或 } 1)$$

展开为多项式表示法, 有

$$(N)_2 = (K_{n-1} \times 10^{n-1} + \cdots + K_1 \times 10^1 + K_0 \times 10^0 + K_{-1} \times 10^{-1} + \cdots + K_{-m} \times 10^{-m})_2$$

例如, 数字 $(11011.101)_2$ 可展开写为:

$$(1 \times 10^{100} + 1 \times 10^{11} + 0 \times 10^{10} + 1 \times 10^1 + 1 \times 10^0 + 1 \times 10^{-1} + 0 \times 10^{-10} + 1 \times 10^{-11})_2$$

二进制数除了数码少外, 其运算规则也非常简单, 例如:

加法规则: $0+0=0$

$$0+1=1+0=1$$

$$1+1=10$$

减法规则: $0-0=0$

$$1-0=1$$

$$1-1=0$$

$$0-1=1 \text{ (借位)}$$

乘法规则: $0 \times 0 = 0$

$$0 \times 1 = 1 \times 0 = 0$$

$$1 \times 1 = 1$$

除法规则: $0 \div 1 = 0$

$$1 \div 1 = 1 \quad (0 \text{ 不能作除数})$$

例 1-1: 求 $(11011011)_2 + (10010001)_2 = ?$

解:

$$\begin{array}{r} 11011011 \\ + 10010001 \\ \hline 101101100 \end{array}$$

$$(11011011)_2 + (10010001)_2 = (101101100)_2$$

1.1.4 八进制数和十六进制数

基数为 8 的计数制称为八进制, 八进制数在位置计数法中使用 0、1、3、4、5、6、7 八个数码和小数点来表示数据。加减计数法则为逢八进一, 借一当八。同样, 对于任意一个有 n 位整数、 m 位小数的八进制数 N , 可以按位置系统依次排列, 记为:

$$(N)_8 = (K_{n-1}K_{n-2}\cdots K_1K_0.K_1K_2\cdots K_m)_8 \quad (\text{其中 } K_i \text{ 是 } 0 \text{ 至 } 7 \text{ 的整数})$$

也可将这个数用多项式展开为

$$(N)_8 = (K_{n-1} \times 10^{n-1} + K_{n-2} \times 10^{n-2} + \cdots + K_1 \times 10^1 + K_0 \times 10^0 + K_{-1} \times 10^{-1} + K_{-2} \times 10^{-2} \cdots K_{-m} \times 10^{-m})_8$$

而十六进制的基数为 16, 有 0、1、3、4、5、6、7、8、9、A、B、C、D、E、F 共十六个数码符号, 其中 A、B、C、D、E、F 依次与十进制中的 10、11、12、13、14、15 相等。加减计数法则为逢十六进一, 借一当十六。同样, 对于任意一个有 n 位整数、 m 位小数的十六进制数 N , 可以按位置系统依次排列, 记为:

$$(N)_{16} = (K_{n-1}K_{n-2}\cdots K_1K_0.K_1K_2\cdots K_m)_{16} \quad (\text{其中 } K_i \text{ 是 } 0 \text{ 至 } F \text{ 的整数})$$

也可将这个数用多项式展开为

$$(N)_{16} = (K_{n-1} \times 10^{n-1} + K_{n-2} \times 10^{n-2} + \cdots + K_1 \times 10^1 + K_0 \times 10^0 + K_{-1} \times 10^{-1} + K_{-2} \times 10^{-2} \cdots K_{-m} \times 10^{-m})_{16}$$

在数字系统和计算机中除普遍采用二进制数外, 为了书写和阅读方便, 也常用八进制和十六进制来记数。

1.1.5 任意进制数

基数为 R 的任意进制数是由 0, 1, 2, 3, ..., $R-1$ 共 R 个数码和小数点构成的, R 数码本身是不出现的, 加减计数法则为逢 R 进一, 且借一当 R 。对于任意一个有 n 位整数、 m 位小数的 R 进制数 N , R 进制数 N 位置记数形式为:

$$(N)_R = (K_{n-1}K_{n-2}\cdots K_1K_0.K_1K_2\cdots K_m)_R \quad (\text{其中 } K_i \text{ 是 } 0 \text{ 至 } R-1 \text{ 的整数})$$

也可将这个数用多项式展开为

$$(N)_R = (K_{n-1} \times 10^{n-1} + K_{n-2} \times 10^{n-2} + \cdots + K_1 \times 10^1 + K_0 \times 10^0 + K_{-1} \times 10^{-1} + K_{-2} \times 10^{-2} \cdots K_{-m} \times 10^{-m})_R$$

这里 K_{n-1} 、 K_{n-2} 、 $\cdots$ 、 K_1 、 K_0 、 K_{-1} 、 K_{-2} 、 $\cdots$ 、 K_{-m} 是 R 个数码中的任意一个。 R 为基数, 也只有在文字标记多项式展开时基数这个数码才出现, 而在数字展开多项式时基数一律记为“10”。任意进制基数 R 规定是以 10 进制数做下标的。当 R 进制的基数 $R < (10)_{10}$ 时借用十进制的数码来作为 R 进制的数码, 而当 R 进制的基数 $R \geq (10)_{10}$ 时, 其小于 $(10)_{10}$ 的部分仍借用十进制数的十个数码 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 大于或等于 $(10)_{10}$ 的部分往往借用文字来表示。

这里就不给出任意进制的运算规则了, 因为任意进制无穷尽, 在进行任意进制运算时往往是以十进制为媒介的, 只要时时注意是在哪个进位体制中运算即可。

表 1-1 中列出了二十以内的数, 在二至十及十六进制记数制中的表示形式, 以及为了表示这些数所需的物理状态数和在这些物理状态数下所能表示的最大数。物理状态数等于位数与基数的乘积。假设表示一个状态的材料消耗为 C , 则 n 位 R 进制数的总耗材为 nRC , 与物理状态数 nR 成正比。假设 n 位 R 进制数最多表示 M 个数, 求出表示 M 所需要的设备量与 R 之间的关系, 进一步可求出使得该设备量最小时的 R 。

表 1-1 不同进制表示相同数值的对照表

数值	R=10	R=2	R=3	R=4	R=5	R=6	R=7	R=8	R=9	R=16
零	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
一	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
二	2	10	2	2	2	2	2	2	2	2
三	3	11	10	3	3	3	3	3	3	3
四	4	100	11	10	4	4	4	4	4	4
五	5	101	12	11	10	5	5	5	5	5
六	6	110	20	12	11	10	6	6	6	6
七	7	111	21	13	12	11	10	7	7	7
八	8	1000	22	20	13	12	11	10	8	8
九	9	1001	100	21	14	13	12	11	10	9
十	10	1010	101	22	20	14	13	12	11	A
十一	11	1011	102	23	21	15	14	13	12	B
十二	12	1100	110	30	22	20	15	14	13	C
十三	13	1101	111	31	23	21	16	15	14	D
十四	14	1110	112	32	24	22	20	16	15	E
十五	15	1111	120	33	30	23	21	17	16	F
十六	16	10000	121	100	31	24	22	20	17	10
十七	17	10001	122	101	32	25	23	21	18	11
十八	18	10010	200	102	33	30	24	22	20	12
十九	19	10011	201	103	34	31	25	23	21	13
二十	20	10100	202	110	40	32	26	24	22	14
需要的状态数目 = 位数×基数	2×10 =20	5×2 =10	3×3 =9	3×4 =12	2×5 =10	2×6 =12	2×7 =14	2×8 =16	2×9 =18	2×16 =32
能表示的最大数 相当于十进制数	99 99	11111 31	222 26	333 63	44 24	55 35	66 48	77 63	88 80	FF 255

因为 $M=R^n$, 两边取对数得 $\ln M=\ln (R^n)=n \ln R$, 移项得 $n=(\ln M) /(\ln R)$ 。

求得总耗材为: $nRC=CR(\ln M) /(\ln R)$

求导并令 $d(nRC) / d R=0$ 得 $C(\ln M) /(\ln R)-C(\ln M) /(\ln R)^2=0$

即 $C(\ln M) /(\ln R)(1-1 / \ln R)=0$

所以有 $(1-1 / \ln R)=0$

解得 $R=e=2.71828$ 即 $(nRC)_{\min}$ 时的 $R=e$

说明在表示数 M 时, 采用三进制或二进制计数制, 使用的器材最少。因三进制的器件不易制做, 故数字逻辑系统中广泛采用二进制。