

面向 **21** 世纪

高等学校信息工程类专业系列教材

数字电路与系统设计

Digital Circuits and System Design

邓元庆 贾 鹏 编著



西安电子科技大学出版社
[Http://www.xduph.com](http://www.xduph.com)

TN25
D298

TP271

面向 21 世纪高等学校信息工程专业系列教材

数字电路与系统设计

Digital Circuits and System Design

邓元庆 贾 鹏 编著

张晓蓓 主审

西安电子科技大学出版社

2003

内 容 简 介

本书既对数字电路的基本理论和经典内容进行了适当的介绍,也对数字电子技术的新成果和电路设计的新方法进行了介绍。叙述中减少了小规模数字集成电路的内容,突出了中、大规模数字集成电路的应用和数字系统设计等内容,并增加了对电子设计自动化等内容的介绍,使读者学习本书之后,能够理论联系实际地解决数字电路与系统设计方面的一些实际问题。

全书共分9章,分别是:数字逻辑基础,组合逻辑器件与电路,时序逻辑基础与常用器件,时序逻辑电路分析与设计,可编程逻辑器件,数模接口电路,数字系统设计,电子设计自动化,脉冲信号的产生与变换电路。各章配有大量例题、习题及自测题。书末附有习题和自测题的参考答案。

本书选材新颖,结构合理,时代感强,适应面广,既可作为电子工程、通信工程、信息工程、雷达工程、计算机科学和技术、电力系统及自动化等电类专业和机电一体化等非电类专业的专业基础课教材,也可作为相关专业工程技术人员的学习与参考用书。

本书建议学时为60~80学时。

★本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费索取。

图书在版编目(CIP)数据

数字电路与系统设计/邓元庆,贾鹏编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2003.5

(面向21世纪高等学校信息工程类专业系列教材)

ISBN 7-5606-1225-3

I. 数… II. ①邓… ②贾… III. 数字电路-高等学校-教材 IV. TN79

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第021805号

策 划 马乐惠

责任编辑 阎 彬

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)8242885 8201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com

E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2003年5月第1版 2003年5月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张24.125

字 数 572千字

印 数 1~4 000册

定 价 25.00元

ISBN 7-5606-1225-3/TN·0219

XDUP 1496001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

序

第三次全国教育工作会议以来,我国高等教育得到空前规模的发展。经过高校布局和结构的调整,各个学校的新专业均有所增加,招生规模也迅速扩大。为了适应社会对“大专业、宽口径”人才的需求,各学校对专业进行了调整和合并,拓宽专业面,相应地教学计划、大纲也都有了较大的变化。特别是进入21世纪以来,信息产业发展迅速,技术更新加快。面对这样的发展形势,原有的计算机、信息工程两个专业的传统教材已很难适应高等教育的需要,作为教学改革的重要组成部分,教材的更新和建设迫在眉睫。为此,西安电子科技大学出版社聘请南京邮电学院、西安邮电学院、重庆邮电学院、吉林大学、杭州电子工业学院、桂林电子工业学院、北京信息工程学院、深圳大学、解放军电子工程学院等10余所国内电子信息类专业知名院校长期在教学科研第一线工作的专家教授,组成了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材编审专家委员会,并且面向全国进行系列教材编写招标。该委员会依据教育部有关文件及规定对这两大类专业教学计划和课程大纲,对目前本科教育的发展变化和相应系列教材应具有的特色和定位以及如何适应各类院校的教学需求等进行了反复研究、充分讨论,并对投标教材进行了认真评审,筛选并确定了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材的作者及审稿人。这套教材预计在2004年春季全部出齐。

审定并组织出版这套教材的基本指导思想是力求精品、力求创新、好中选优、以质取胜。教材内容要反映21世纪信息科学技术的发展,体现专业课内容更新快的要求;编写上要具有一定的弹性和可调性,以适合多数学校使用;体系上要有所创新,突出工程技术型人才培养的特点,面向国民经济对工程技术人才的需求,强调培养学生较系统地掌握本学科专业必需的基础知识和基本理论,有较强的本专业的基本技能、方法和相关知识,培养学生具有从事实际工程的研发能力。在作者的遴选上,强调作者应在教学、科研第一线长期工作,有较高的学术水平和丰富的教材编写经验;教材在体系和篇幅上符合各学校的教学计划要求。

相信这套精心策划、精心编审、精心出版的系列教材会成为精品教材,得到各院校的认可,对于新世纪高等学校教学改革和教材建设起到积极的推动作用。

系列教材编委会
2002年8月

高等学校计算机、信息工程类专业

系列教材编审专家委员会

主任：杨震（南京邮电学院副院长、教授）
副主任：张德民（重庆邮电学院通信与信息工程学院院长、教授）
韩俊刚（西安邮电学院计算机系主任、教授）
李荣才（西安电子科技大学出版社总编辑、教授）

计算机组

组长：韩俊刚（兼）
成员：（按姓氏笔画排列）
王小民（深圳大学信息工程学院计算机系主任、副教授）
王小华（杭州电子工业学院计算机分院副院长、副教授）
孙力娟（南京邮电学院计算机系副主任、副教授）
李秉智（重庆邮电学院计算机学院院长、教授）
孟庆昌（北京信息工程学院教授）
周娅（桂林电子工业学院计算机系副主任、副教授）
张长海（吉林大学计算机科学与技术学院副院长、教授）

信息工程组

组长：张德民（兼）
成员：（按姓氏笔画排列）
方强（西安邮电学院电信系主任、教授）
王晖（深圳大学信息工程学院电子工程系主任、副教授）
胡建萍（杭州电子工业学院电子信息分院副院长、副教授）
徐祎（解放军电子工程学院电子技术教研室主任、副教授）
唐宁（桂林电子工业学院通信与信息工程系副主任、副教授）
章坚武（杭州电子工业学院通信工程分院副院长、教授）
康健（吉林大学通信工程学院副院长、教授）
蒋国平（南京邮电学院电子工程系副主任、副教授）

总策划：梁家新
策划：马乐惠 云立实 马武装 马晓娟
电子教案：马武装

前 言

“数字电路与系统设计”是电子、通信、雷达、信息、计算机、电力系统及自动化等电类专业和机电一体化等非电类专业的一门重要的专业基础课。随着微电子技术和信息处理技术的迅速发展及对新世纪人才培养目标的重新定位,对数字电路课程进行与时俱进的教学改革的呼声愈来愈强烈,不少专家学者已经在这方面取得了令人瞩目的教学改革成果。本书也是编者长期致力于数字电路课程教学改革实践、探索的产物。

本书主要介绍数字电路与系统的基础理论和分析、设计方法,其内容包括五个部分:

(1) 数字逻辑基础:这部分内容集中在第1章。该章除了介绍数字电路的理论基础——逻辑代数外,还介绍了计算机等数字设备中常用的数制与代码、逻辑函数的各种描述方法和化简方法等内容。这些内容是分析和设计数字电路的基础,贯穿了全书的始终。

(2) 常用逻辑器件及其应用:这部分内容集中在第2章、第3章和第5章。第2章介绍了集成逻辑门和常用的MSI组合逻辑模块及其应用,第3章介绍了集成触发器和各种常用的MSI/LSI时序逻辑模块及其应用,第5章介绍了各种可编程逻辑器件(PLD)及其应用。

(3) 数字电路的分析和设计方法:这部分内容集中在第2章、第4章和第5章。第2章介绍了数字电路的两大分支之一——组合逻辑电路的分析和设计方法,第4章介绍了数字电路的另一个分支——时序逻辑电路的分析和设计方法,第5章介绍了基于PLD器件的数字电路的设计方法。

(4) 数字系统设计与电子设计自动化:这部分内容集中在第7章和第8章。第7章介绍了数字系统的基本概念和实用设计方法,使读者在学习数字电路的基本内容后,能够了解数字系统的概念,掌握数字系统设计的基本方法,进而能够从系统的高度来分析和解决实际问题。第8章介绍了电子设计自动化(EDA)的基本概念、VHDL语言及其应用和典型EDA软件的使用方法,使读者与时俱进地进入到数字电路与系统设计的现代化王国,深入体会技术进步所带来的方便与喜悦。

(5) 数模接口与脉冲产生电路:这部分内容集中在第6章和第9章。第6章介绍了数字电路和模拟电路之间的接口电路——A/D、D/A电路,第9章介绍了各种脉冲产生与变换电路。学习这部分内容,可以帮助读者完整地了解和掌握数字电路与系统中的各种要素。由于这些内容的分析和设计方法更接近于模拟电路,所以近年来人们已经开始将其移入到“电子电路基础”课的教材中。本书保留这部分内容,主要出于保持教材完整性和尽量满足读者多种选择需要的考虑。

本书主要具有以下特色:

教材结构合理。全书由两条主线统揽:一条主线是器件—电路—系统,另一条主线是理论基础—分析方法—设计方法。在处理器件、电路、系统的关系时,先介绍器件,再介绍电路,后介绍系统,符合数字电路开始于器件、发展于电路、归结于系统的发展脉络,内容集中,系统性强;在处理理论基础、分析方法、设计方法的关系时,先介绍理论基础,再介绍分析方法,后介绍设计方法,符合认识事物的客观规律,衔接自然,逻辑性好,便于读者

学习、掌握。

内容与时俱进。数字电子技术和数字电路的设计手段发展迅速，本书在有限的篇幅里对介绍的内容做了认真的挑选，既对数字电路的基本理论和经典内容做了适当介绍，也对数字电子技术的新成果和电路设计的新方法进行了介绍，叙述中减少了小规模数字集成电路的内容，突出了中、大规模数字集成电路的应用和数字系统设计等内容，并增加了对电子设计自动化等内容的介绍。

注重实用性和创新意识的培养。本书涉及内容较多，像 VHDL 语言、数字系统设计和电子设计自动化等内容，每一部分都可以单独成书，而在本书中均从实用的角度出发进行介绍，每部分内容至多占用一章的篇幅。本书在注重使读者在数字电路的基本理论、基本方法、基本技能方面得到提高的同时，也注重对读者创新意识的培养。无论是讲授内容、讲授方式，还是例题、习题和自测题，都给读者提供足够的思维空间，使读者学习本书之后，能够理论联系实际地解决数字电路与系统设计方面的一些实际问题。

本书由解放军理工大学邓元庆教授主编，贾鹏参编，西北工业大学的张晓蓓老师审阅了全书。邓元庆编写第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 4 章和第 7 章，并负责本书大纲的制定和全书的统稿、定稿。第 5 章、第 6 章、第 8 章、第 9 章由贾鹏编写。西安电子科技大学出版社的马乐惠副编审和阎彬编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动，解放军理工大学理学院的各级领导及作者的家人，为本书的编写提供了大量的支持，特在此一并表示深深的谢意。

由于时间仓促和作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

作者的电子邮箱为：dyqnjty@yahoo.com.cn。

作 者

2002 年 12 月

目 录

第 1 章 数字逻辑基础

1.1 绪论	1	1.3.3 逻辑代数的基本公式和 运算规则	16
1.1.1 数字电路的基本概念	1	1.4 逻辑函数的描述方法	18
1.1.2 数字集成电路的发展趋势	3	1.4.1 真值表描述法	19
1.2 数制与代码	4	1.4.2 代数式描述法	19
1.2.1 数制	4	1.4.3 卡诺图描述法	22
1.2.2 带符号数的表示法	8	1.5 逻辑函数的化简	25
1.2.3 代码	10	1.5.1 逻辑函数最简的标准	25
1.3 逻辑代数基础	13	1.5.2 代数法化简逻辑函数	25
1.3.1 逻辑代数的基本运算	13	1.5.3 逻辑函数的卡诺图化简法	26
1.3.2 复合逻辑运算与常用逻辑门	15	1.5.4 含有任意项的逻辑函数的化简	30
本章小结	32		
习题 1	33		
自测题 1	36		

第 2 章 组合逻辑器件与电路

2.1 集成逻辑门	38	2.2.5 数据选择器	66
2.1.1 双极型逻辑门电路	38	2.3 组合逻辑电路分析	69
2.1.2 CMOS 逻辑门电路	42	2.3.1 门级电路分析	69
2.1.3 集成逻辑门的主要参数	45	2.3.2 模块级电路分析	71
2.1.4 各类逻辑门的性能比较	47	2.4 组合逻辑电路设计	73
2.1.5 正逻辑与负逻辑	48	2.4.1 门级电路设计	73
2.2 常用 MSI 组合逻辑模块	49	2.4.2 模块级电路设计	75
2.2.1 加法器	49	2.5 组合逻辑电路中的竞争与险象	79
2.2.2 比较器	53	2.5.1 逻辑竞争与险象	80
2.2.3 编码器	55	2.5.2 逻辑险象的识别	80
2.2.4 译码器	58	2.5.3 逻辑险象的消除方法	82
本章小结	83		
习题 2	83		
自测题 2	88		

第 3 章 时序逻辑基础与常用器件

3.1 时序逻辑基础	90	3.1.3 时序逻辑电路的一般分类	93
3.1.1 时序逻辑电路的一般模型	90	3.2 触发器及其应用	94
3.1.2 时序逻辑电路的描述方法	91	3.2.1 RS 触发器	94

3.2.2 集成触发器	97	3.3.4 计数器的应用	115
3.2.3 触发器的应用	101	3.4 MSI 移位寄存器及其应用	117
3.3 MSI 计数器及其应用	106	3.4.1 4 位双向移位寄存器 74194	118
3.3.1 二一五—十进制异步加法 计数器 7490	107	3.4.2 移位寄存器的应用	119
3.3.2 4 位二进制同步可预置加法 计数器 74163	110	3.5 半导体存储器	122
3.3.3 同步十进制可逆计数器 74192	113	3.5.1 半导体存储器的分类	122
本章小结		3.5.2 随机存取存储器 RAM	123
习题 3		3.5.3 存储器容量的扩展	126
自测题 3			

第 4 章 时序逻辑电路分析与设计

4.1 同步时序电路分析	136	4.2.5 设计举例	151
4.1.1 触发器级电路分析	136	4.3 模块级同步时序电路设计	154
4.1.2 模块级电路分析	139	4.3.1 基于计数器的电路设计	154
4.2 触发器级同步时序电路设计	141	4.3.2 基于移位寄存器的电路设计	156
4.2.1 设计步骤	141	4.4 异步计数器分析与设计	160
4.2.2 导出原始状态图或状态表	142	4.4.1 异步计数器分析	161
4.2.3 状态化简	146	4.4.2 异步计数器设计	161
4.2.4 状态分配	150		
本章小结			
习题 4			
自测题 4			

第 5 章 可编程逻辑器件

5.1 可编程逻辑器件概述	174	5.2.4 通用阵列逻辑 GAL	189
5.1.1 PLD 的发展简史	174	5.3 高密度可编程逻辑器件 HDPLD	193
5.1.2 PLD 的分类	175	5.3.1 复杂可编程逻辑器件 CPLD	194
5.1.3 PLD 电路的表示方法	176	5.3.2 现场可编程门阵列 FPGA	199
5.2 简单可编程逻辑器件 SPLD	177	5.4 PLD 的编程与测试	208
5.2.1 只读存储器 ROM	178	5.4.1 PLD 的开发过程	208
5.2.2 可编程逻辑阵列 PLA	184	5.4.2 PLD 的编程技术	209
5.2.3 可编程阵列逻辑 PAL	186	5.4.3 边界扫描测试技术	211
本章小结			
习题 5			
自测题 5			

第 6 章 数模接口电路

6.1 集成数模转换器	215	6.2.2 常用模数转换技术	231
6.1.1 数模转换的基本概念	215	6.2.3 集成 ADC 的主要技术指标	236
6.1.2 常用数模转换技术	216	6.2.4 集成 ADC 芯片的选择与使用 ...	237
6.1.3 集成 DAC 的主要技术指标	222	6.3 数模接口电路的应用	240
6.1.4 集成 DAC 芯片的选择与使用 ...	224	6.3.1 程控增益放大器	240
6.2 集成模数转换器	228	6.3.2 数据采集与控制系统	241
6.2.1 模数转换的一般过程	228	6.3.3 数字保密电话系统	242
本章小结	242		
习题 6	243		
自测题 6	244		

第 7 章 数字系统设计

7.1 数字系统设计概述	246	7.2.2 分组—按序算法语言	257
7.1.1 数字系统的基本概念	246	7.3 控制子系统的实现方法	261
7.1.2 数字系统设计的一般过程	247	7.3.1 硬件控制器的实现方法	261
7.1.3 数字系统的总体方案与 逻辑划分	248	7.3.2 微程序控制器的实现方法	264
7.1.4 数据子系统的构造方法	252	7.4 数字系统设计举例	266
7.2 控制子系统的设计工具	254	7.4.1 14 位二进制数密码锁系统	266
7.2.1 ASM 图	254	7.4.2 铁道路口交通控制系统	271
本章小结	274		
习题 7	275		
自测题 7	277		

第 8 章 电子设计自动化

8.1 EDA 概述	278	8.2.3 VHDL 的主要描述语句	295
8.1.1 EDA 的发展概况	278	8.3 VHDL 设计实例	301
8.1.2 EDA 设计语言	281	8.3.1 组合电路设计	301
8.1.3 EDA 开发工具	282	8.3.2 时序电路设计	302
8.1.4 EDA 设计方法	283	8.3.3 系统设计	303
8.2 硬件描述语言 VHDL 初步	285	8.4 MAX+plus II 开发系统	308
8.2.1 VHDL 源程序的基本结构	285	8.4.1 概述	308
8.2.2 VHDL 的基本语法	291	8.4.2 MAX+plus II 开发流程	310
本章小结	315		
习题 8	316		
自测题 8	317		

* 第9章 脉冲信号的产生与变换电路

9.1 多谐振荡器	320	9.3.2 集成施密特触发器	334
9.1.1 环形振荡器	320	9.3.3 施密特触发器的应用	335
9.1.2 石英晶体振荡器	323	9.4 555 定时器	336
9.1.3 多谐振荡器的应用	324	9.4.1 555 定时器的电路结构与功能 ...	336
9.2 单稳态触发器	325	9.4.2 555 定时器构成的多谐振荡器 ...	337
9.2.1 门电路构成的单稳态触发器	325	9.4.3 555 定时器构成的单稳态 触发器	338
9.2.2 集成单稳态触发器	329	9.4.4 555 定时器构成的施密特触发器 ..	339
9.2.3 单稳态触发器的应用	331	339
9.3 施密特触发器	332		
9.3.1 门电路构成的施密特触发器	333		
本章小结	340		
习题 9	341		
自测题 9	342		
附录 各章习题和自测题的参考答案	344		
参考文献	376		

第 1 章 数字逻辑基础

数字电路是存储、传送、变换和处理数字信息的一类电子电路的总称，是计算机等各类数字设备赖以存在的重要基石。计算机中的 CPU、存储器和 I/O 接口，数字通信中的编码器、译码器和缓存器，数字电视和数码相机中的信息存储和处理单元，都广泛采用了数字电路。即使像调制解调器这类过去通常用模拟电路实现的器件，今天也越来越多地采用了数字电路来实现。可以毫不夸张地说，数字化已成为当今电子技术的发展潮流，数字电路代表了电子电路的发展方向。人们完全有理由相信，随着微电子技术和信息处理技术的飞速发展，数字电子技术和数字电路将更多地渗透到人们的日常生活中。

1.1 绪 论

数字电路为何能够获得如此广泛的应用？它与模拟电路相比，到底有哪些优点？数字集成电路发展至今，已经形成了哪些发展趋势？本节作为全书的绪论，将简要回答这些问题。

1.1.1 数字电路的基本概念

1. 数字量与数字信号

在自然界中，存在着两类物理量：一类称为模拟量(Analog Quantity)，它具有时间上连续变化、值域内任意取值的特点，例如温度、压力、交流电压等就是典型的模拟量；另一类称为数字量(Digital Quantity)，它具有时间上离散变化(离散也就是不连续)、值域内只能取某些特定值的特点，例如训练场上运动员的人数、车间仓库里元器件的个数等就是典型的数字量。

在实际生活中，许多物理量的测量值既可以用模拟形式来表示，也可以用数字形式来表示。例如集市中购物的重量，用普通弹簧秤来测量时它是模拟形式的，而用数字式电子秤来测量时它就是数字形式的。利用现代电子技术，可以实现模拟量与数字量之间的相互转换。

在电子设备中，无论是数字量还是模拟量都是以电信号形式出现的。人们常常将表示模拟量的电信号叫作模拟信号(Analog Signal)，将表示数字量的电信号叫作数字信号(Digital Signal)。正弦波信号、话音信号就是典型的模拟信号，矩形波、方波信号就是典型的数字信号。

数字信号是一种脉冲信号(Pulse Signal)。脉冲信号具有边沿陡峭、持续时间短的持

点。广义地讲，凡是非正弦信号都称为脉冲信号。

数字信号有两种传输波形，一种称为电平型，另一种称为脉冲型。电平型数字信号是以一个时间节拍内信号是高电平还是低电平来表示“1”或“0”，而脉冲型数字信号是以一个时间节拍内有无脉冲来表示“1”或“0”，如图 1-1 所示。从图中可见，电平型信号的波形在一个节拍内不会归零，而脉冲型信号的波形在一个节拍内会归零。

与模拟信号相比，数字信号具有抗干扰能力强、存储和处理方便等优点。

2. 数字电路及其优点

在电子电路中，人们将产生、变换、传送、处理模拟信号电子电路叫作模拟电路 (Analog Circuit)，将产生、存储、变换、处理、传送数字信号电子电路叫作数字电路 (Digital Circuit)。“电子电路基础”课程中介绍的各种放大电路就是典型的模拟电路，而数字表、数字钟的定时电路就是典型的数字电路。

与模拟电路相比，数字电路主要具有以下优点：

- ① 电路结构简单，制造容易，便于集成和系列化生产，成本低，使用方便。
- ② 数字电路不仅能够完成算术运算，而且能够完成逻辑运算，具有逻辑推理和逻辑判断的能力，因此被称为数字逻辑电路或逻辑电路。计算机也因为这种逻辑思维能力而被称为电脑。

③ 由数字电路组成的数字系统，抗干扰能力强，可靠性高，精确性和稳定性好，便于使用、维护和进行故障诊断。

以抗干扰能力为例，数字电路不仅可以通过整形去除叠加于传输信号上的噪声与干扰，而且还可以进一步利用差错控制技术对传输信号进行检错和纠错。

图 1-2 是数字电路通过整形去除叠加于传输信号上的噪声与干扰的示意图。图 1-2 (a) 是发送信号波形，图 1-2 (b) 是接收信号波形。由于噪声与干扰的存在，接收信号波形相对于发送信号波形已有了很大的变化。如果是

模拟电路，这种噪声与干扰的影响很难消除，人们不得不忍受刺耳的噪声与干扰。但在数字电路中，可以通过对接收信号设置一个合适的门限来去除噪声和干扰。如图 1-2 (b) 所

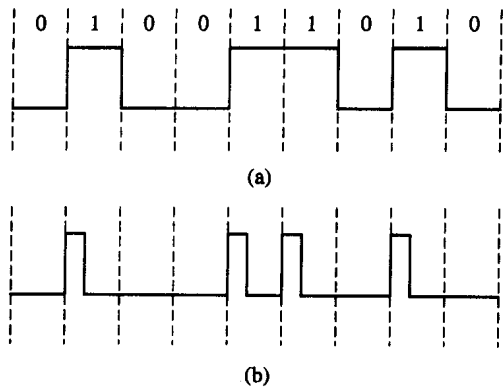


图 1-1 数字信号的传输波形
(a) 电平型信号；(b) 脉冲型信号

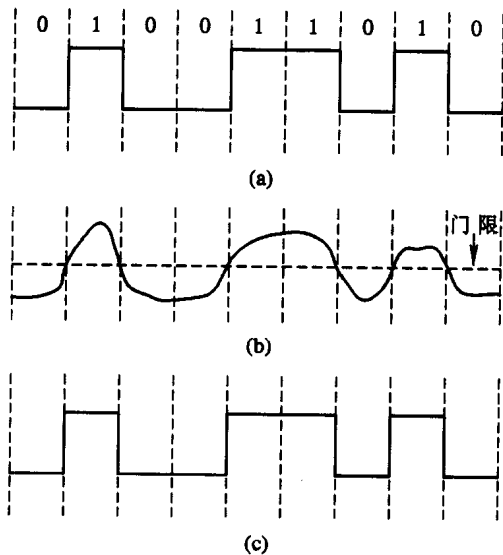


图 1-2 数字电路对接收信号整形
(a) 发送信号波形；(b) 接收信号波形；
(c) 整形信号波形

示,对接收信号设置一个如横虚线所示的门限电平。当接收信号电平低于门限电平时,整形电路输出低电平;而当接收信号电平高于门限电平时,整形电路输出高电平。这样,便可得到如图 1-2(c)所示的整形信号波形输出,其形状已与发送信号相同,说明原来存在于接收信号中的噪声与干扰已经被消除。

1.1.2 数字集成电路的发展趋势

当前,数字集成电路正向着大规模、低功耗、高速度、可编程、可测试和多值化方向发展。

1. 大规模

随着集成电路技术的发展,一块半导体硅片上能够集成的数字逻辑门已达数百万个。而蓬勃兴起的纳米技术(Nanotechnology),进一步扩大了集成电路的规模。据 2002 年 9 月 11 日《参考消息》报道,蓝色巨人 IBM 已经成功地利用纳米技术开发出一种邮票般大小的内存装置,它可以储存大约 2500 万页的教科书。集成规模的提高不仅缩小了系统的体积,降低了系统的功耗与成本,而且大大地提高了数字系统的可靠性。

2. 低功耗

功耗是制约许多电子设备研制、生产、推广、使用的一个重要因素,而系统功耗很大程度上又取决于所使用的芯片或模块。现在,即使是包含上百万个逻辑门的超大规模数字集成电路芯片,其功耗也可低至 mW 级。功耗的降低大大拓展了数字集成电路的应用领域。

3. 高速度

信息社会是知识大爆炸的时代,人们对信息处理速度的要求越来越高。以计算机为例,上个世纪末美国才研制成功了运算速度高达每秒十余万亿次的超级计算机,2002 年就传出消息,日本研制成功运算速度相当于美国最快的 20 台超级计算机一起运作的计算机超人。IBM 公司甚至已经开始研制一种运算速度高达每秒 1000 万亿次的超级计算机。虽然计算机的这种高速度在很大程度上依赖于并行处理技术,但集成电路芯片本身的速度在不断提高也不容置疑。

4. 可编程

传统的标准 MSI/LSI 数字集成电路是一种通用型集成电路。使用这种集成电路来设计复杂数字系统时,所需要的逻辑模块数量和种类往往比较多,这不仅增加了系统的体积和功耗,降低了系统的可靠性,而且也为器件的保存、电路和设备的调试、知识产权的保护等带来了难题。

如今,一种具有“可编程”特性的 LSI/VLSI 数字集成电路——可编程逻辑器件 PLD (Programmable Logic Device)可以很好地解决上述问题。用户可根据实际需要,在生产现场对这些 PLD 芯片进行“编程”来构造自己的专用集成电路 ASIC(Application Specific Integrated Circuit)。这种 PLD 器件大多数还具有“再编程”甚至“在系统编程 ISP(In-System Programmable)”和“硬件保密”的能力。这不仅为用户开发产品带来了极大的方便和灵活性,而且也大大地提高了产品的可靠性和保密性。

5. 可测试

数字集成电路的规模越来越大,功能也越来越复杂。为了便于数字系统的使用和维护,用户要求所使用的逻辑模块具有“可测试性(Testability)”,即可方便地对其进行功能测试和故障诊断。“可测试”已成为未来数字集成电路的一个重要的发展趋势。

6. 多值化

传统的数字集成电路是一种二值电路,在信号的产生、存储、传送、识别、处理等方面具有很多优点。为了进一步提高集成电路的信息处理能力,除了在速度上下功夫外,还可采用多值逻辑(Multivalued Logic)。

从20世纪70年代起,多值信号和多值逻辑电路的研究就一直受到世界各国的广泛关注。科学家们不仅提出了多值逻辑电路设计理论,而且在多值逻辑器件和多值计算机的研制方面也取得了世人瞩目的成就。美国、日本、加拿大等国不仅已成功研制出三值和四值数字集成电路,而且也研制出了别具一格的多值计算机样机。尽管在目前的技术条件下多值逻辑器件的成本太高,还难以像二值集成电路那样获得广泛应用,但它毕竟已向人们指明了提高集成电路信息处理能力的又一个发展方向。

1.2 数制与代码

1.2.1 数制

1. 数制

数制(Number System)是人类表示数值大小的各种方法的统称。迄今为止,人类都是按照进位方式来实现计数的,这种计数制度称为进位计数制,简称进位制。大家熟悉的十进制,就是一种典型的进位计数制。

一种数制中允许使用的数符个数称为这种数制的基数(Radix)或基(Base),R进制的基就等于R。设一个R进制数 N_R 包含n位整数和m位小数,其位置记数法的表示式为

$$N_R = (r_{n-1} r_{n-2} \cdots r_1 r_0 . r_{-1} r_{-2} \cdots r_{-m})_R \quad (1-1)$$

其中, r_i 为R进制数 N_R 第*i*位的有效数符, r_i 为“1”时所表示的数值大小称为该位的“权(power)”,用 R^i 表示。“权”的概念表明,处于不同位置上的相同数符所代表的数值大小是不同的。例如十进制数 $(215.12)_{10}$,其最高位和最低位均为2,但它们所代表的数值却分别为 $200(10^2 \times 2)$ 和 $0.02(10^{-2} \times 2)$;同样,次高位和次低位都为1,但它们所代表的数值却分别为 $10(10^1 \times 1)$ 和 $0.1(10^{-1} \times 1)$ 。

位置记数法实际上是多项式记数法省略各位权值和运算符号并增加小数点(小数点也称为基点)后的简记形式。多项式记数法的表示式为

$$\begin{aligned} N_R &= R^{n-1} \times r_{n-1} + R^{n-2} \times r_{n-2} + \cdots + R^1 \times r_1 + R^0 \times r_0 \\ &\quad + R^{-1} \times r_{-1} + R^{-2} \times r_{-2} + \cdots + R^{-m+1} \times r_{-m+1} + R^{-m} \times r_{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} R^i \times r_i \end{aligned} \quad (1-2)$$

例如,十进制数 $(215.12)_{10}$ 的多项式表示式(也称按权展开式)为

$$(215.12)_{10} = 10^2 \times 2 + 10^1 \times 1 + 10^0 \times 5 + 10^{-1} \times 1 + 10^{-2} \times 2$$

尽管生活中人们常用的是十进制数，但在计算机等数字设备中，用得最多的却是二进制数和十六进制数，这是因为当前数字设备中所用的数字电路通常只有低电平和高电平两个状态，正好可用二进制数的 0 和 1 来表示。由于采用二进制来表示一个数时数位太多，所以常用与二进制数有简单对应关系的十六进制数(或八进制数)来表示一个数。

十进制(Decimal System)、二进制(Binary System)和十六进制(Hexadecimal System)的数符、权、运算规则及其对应关系详见表 1-1。需要特别注意的是，在十六进制数中，用英文字母 A、B、C、D、E、F 分别表示十进制数的 10、11、12、13、14 和 15。

表 1-1 常用数制及其对应关系

项 目	十进制	二进制	十六进制
数符	0,1,2,3,4,5,6,7,8,9	0,1	0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,A,B,C,D,E,F
第 i 位的权	10^i	2^i	16^i
运算规则	逢 10 进 1, 借 1 为 10	逢 2 进 1, 借 1 为 2	逢 16 进 1, 借 1 为 16
对应关系	0	0	0
	1	1	1
	2	10	2
	3	11	3
	4	100	4
	5	101	5
	6	110	6
	7	111	7
	8	1000	8
	9	1001	9
	10	1010	A
	11	1011	B
	12	1100	C
	13	1101	D
	14	1110	E
	15	1111	F
16	10000	10	

2. 数制转换

1) 任意进制数转换为十进制数

首先写出待转换的 R 进制数的按权展开式，然后按十进制数的运算规则进行计算，即可得到转换后的等值十进制数。这称为按权展开法。

【例 1-1】 将二进制数 $(1011001.101)_2$ 和十六进制数 $(AD5.C)_{16}$ 转换为十进制数。

$$\begin{aligned} \text{解 } (1011001.101)_2 &= 2^6 \times 1 + 2^5 \times 0 + 2^4 \times 1 + 2^3 \times 1 + 2^2 \times 0 + 2^1 \times 0 + 2^0 \times 1 \\ &\quad + 2^{-1} \times 0 + 2^{-2} \times 0 + 2^{-3} \times 1 \\ &= 64 + 0 + 16 + 8 + 0 + 0 + 1 + 0 + 0 + 0.125 \\ &= (89.125)_{10} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (AD5.C)_{16} &= 16^2 \times A + 16^1 \times D + 16^0 \times 5 + 16^{-1} \times C \\ &= 256 \times 10 + 16 \times 13 + 1 \times 5 + 16^{-1} \times 12 \\ &= 2560 + 208 + 5 + 0.75 \\ &= (2773.75)_{10} \end{aligned}$$

2) 二进制数与十六进制数的相互转换

从表 1-1 可见, 1 位十六进制数正好可以用 4 位二进制数来表示, 反之亦然。因此, 以小数为基准, 向左或向右将二进制数按 4 位 1 组进行分组(整数部分高位不足 4 位时, 高位添 0 补足 4 位; 小数部分低位不足 4 位时, 低位添 0 补足 4 位), 然后用相应的十六进制数代替各组的二进制数, 即可得到等值的十六进制数; 反之, 将十六进制数的每个数符用相应的 4 位二进制数代替, 并去掉整数部分高位无效的 0 和小数部分末尾无效的 0, 即可得到等值的二进制数。

【例 1-2】 将二进制数 $(1011101.101)_2$ 转换为十六进制数, 将十六进制数 $(3AB.C8)_{16}$ 转换为二进制数。

解 $(1011101.101)_2 = (0101\ 1101.1010)_2 = (5D.A)_{16}$

$$(3AB.C8)_{16} = (0011\ 1010\ 1011.1100\ 1000)_2 = (1110101011.11001)_2$$

3) 十进制数转换为二进制数

十进制数转换为二进制数的过程相对复杂一些, 需要将整数部分和小数部分分别进行转换。

(1) 十进制整数转换为二进制数时, 其结果也必然是整数。利用转换前后数值相等的原理, 有

$$N_{10} = N_2 = 2^{n-1} \times b_{n-1} + \dots + 2^1 \times b_1 + 2^0 \times b_0$$

将上式左右两端同时除以 2, 所得的整数商应该相等, 余数也应该相等。而右端的二进制按权展开式除以 2 后的余数是 b_0 , 因此, 十进制数第 1 次除以 2 所得的余数就是等值的二进制数的最低位 b_0 (最低位常用符号 LSB 表示); 同理, 将左端每次所得的整数商依次除以 2, 所得的余数正好就是等值二进制数的 b_1 、 b_2 、 \dots 、 b_{n-1} 。 b_{n-1} 是商为 0 时的余数, 它是等值二进制数的最高位(最高位常用符号 MSB 表示)。这种转换方法称为除 2 取余法, 用它先得到的余数是等值二进制数的低位, 后得到的余数是等值二进制数的高位。

【例 1-3】 将十进制数 $(218)_{10}$ 转换为二进制数。

解 采用竖式除法:

2 218	余数
2 109	0 (LSB)
2 54	1
2 27	0
2 13	1
2 6	1
2 3	0
2 1	1
0	1 (MSB)

因此, $(218)_{10} = (11011010)_2$ 。

(2) 十进制小数转换为二进制数时, 其结果也必然是小数。利用转换前后数值相等的原理, 有

$$N_{10} = N_2 = 2^{-1} \times b_{-1} + 2^{-2} \times b_{-2} + \dots + 2^{-m} \times b_{-m}$$