



21世纪高等学校计算机学科系列教材

# 电路与电子技术

## (下册·数字电子技术)

张纪成 主编

魏永继 张兴会 副主编

李大友 主审

全国高等学校计算机教育研究会  
课程与教材建设委员会推荐出版



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

21 世纪高等学校计算机学科系列教材

# 电路与电子技术

## (下册·数字电子技术)

张纪成	主 编
魏永继 张兴会	副主编
李大友	主 审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

100013

## 内 容 简 介

本书是在高等教育面向 21 世纪教学内容与课程体系改革研究的基础上编写的,是 21 世纪计算机科学的一门技术基础课教材。本书根据社会发展对计算机专业人员的知识结构要求,将电路原理和电子技术内容进行认真整理,突出概念、突出应用、突出集成电路、突出新技术和新产品。全书分为上、中、下三册。上册为电路原理部分,中册为模拟电子技术部分,下册为数字电子技术部分。下册包括逻辑代数、门电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与整形、半导体存储器 and 可编程逻辑、数/模和模/数转换器、数字系统等,共 9 章。本书内容简明、语言流畅、通俗易懂、保证基础、重点突出、立足应用。每章有丰富的例题和习题,各章前有概述,后有小结,书后有习题答案。

本书是为计算机专业本科生编写的教材,也适合作为电子、电气、自动化、通信和机电一体化等专业本科生、大专生及成人教育多学时教材或参考书,也可供工程技术人员自学使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究

### 图书在版编目(CIP)数据

电路与电子技术(下册·数字电子技术)/张纪成主编. —北京:电子工业出版社,2002.8

21 世纪高等学校计算机学科系列教材

ISBN 7-5053-7774-4

I. 电… II. 张… III. ①模拟电路—电子技术—高等学校—教材 ②数字电路—电子技术—高等学校—教材 IV. TN7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 046226 号

责任编辑:李 影 特约编辑:王宝祥

印 刷:北京市增富印刷有限责任公司

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:17.5 字数:448 千字

版 次:2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月第 1 次印刷

印 数:6 000 册 定价:22.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。  
联系电话:(010)68279077

## 序 言

这套教材是面向 21 世纪计算机学科系列教材。为什么要组织这套教材？根据什么编写这套教材？这些都是在这篇序言中要回答的问题。

计算机学科是一个飞速发展的学科，尤其是近十年来，计算机向高度集成化、网络化和多媒体化发展的速度一日千里。但是，从另一个方面来看，目前高等学校的计算机教育，特别是教材建设，远远落后于现实的需要。现在的教材主要是根据《教学计划 1993》的要求组织编写的。这个教学计划，在制定过程中主要参照了美国 IEEE 和 ACM 的《教学计划 1991》。

10 年来，计算机学科已有了长足发展，这就要求高等学校计算机教育必须跟上形势发展的需要，在课程建设和教材建设上做出相应调整，以适应面向 21 世纪计算机教育的要求。这是组织这套教材的初衷。

为了组织好这套教材，全国高等学校计算机教育研究会课程与教材建设委员会在天津召开了“全国高等学校计算机学科课程与教材建设研讨会”，在北京召开了“教材编写大纲研讨会”。在这两次会议上，代表们深入地研讨了全国高校计算机专业教学指导委员会和中国计算机学会教育委员会制定的《计算机学科教学计划 2000》以及美国 IEEE 和 ACM 的《计算机学科教学计划 2001》，这是这套教材参照的主要依据。

IEEE 和 ACM 的《计算机学科教学计划 2001》是在总结了从《计算机学科教学计划 1991》到现在，计算机学科十年来发展的主要成果的基础上诞生的。它认为面向 21 世纪计算机学科应包括 14 个主科目：算法与分析(AL)、体系结构(AR)、离散结构(DS)、计算科学(CN)、图形学、可视化、多媒体(GR)、网络计算(NC)、人机交互(HC)、信息管理(IM)、智能系统(IS)、操作系统(OS)、程序设计基础(PF)、程序设计语言(PL)、软件工程(SE)、社会、道德、法律和专业问题(SP)。其中除 CN 和 GR 为非核心主科目外，其他 12 项均为核心主科目。

将 2001 教学计划与 1991 教学计划比较可看出：

(1) 在 1991 年计划中，离散结构只作为数学基础提出，而在 2001 计划中，则作为核心主科目提出，显然，提高了它在计算机学科中的地位。

(2) 在 1991 计划中，未提及网络计算，而在 2001 计划中，则作为核心主科目提出，以适应网络技术飞速发展的需求。

(3) 图形学、可视化与多媒体也是为适应发展要求新增加的内容。

除此之外，2001 计划在下述 5 个方面做调整：

将程序设计语言引论调整为程序设计基础，将人-机通信调整为人机交互，将人工智能与机器人学调整为智能系统，将数据库与信息检索调整为信息管理，将数值与符号计算调整为计算科学。

显然，这些变化使 2001 计划更具有科学性，也更好地适应了学科发展的需要。

在组织这套教材的过程中，充分考虑了这些变化和调整，在软件和硬件的课程体系、界面划分方面均做了相应的调整，使整套教材更具有科学性和实用性。

另外，还要说明一点，教材建设既要满足必修课的要求，又要满足限选课和任选课的要求。因此，教材应按系列组织，反映整个计算机学科的要求，采用大拼盘结构，以适应各校不同的具

体教学计划,使学校可根据自己的需求进行选择。

这套教材包括:《微机应用基础》、《离散数学》、《电路与电子技术》、《电路与电子技术习题与实验指南》、《数字逻辑与数字系统》、《计算机组成原理》、《微型计算机接口技术》、《计算机体系结构》、《计算机网络》、《计算机网络实验教程》、《通信原理》、《计算机网络管理及系统开发》、《网络信息系统集成》、《多媒体技术》、《计算机图形学》、《计算机维护技术》、《数据结构》、《计算机算法设计与分析》、《计算机数值分析》、《汇编语言程序设计》、《Pascal 语言程序设计》、《VB 程序设计》、《C 语言程序设计》、《C++ 语言程序设计》、《Java 语言程序设计》、《操作系统原理》、《UNIX 操作系统原理与应用》、《Linux 操作系统》、《软件工程》、《数据库系统原理》、《编译原理》、《编译方法》、《人工智能》、《计算机信息安全》、《计算机图像处理》、《人机交互》、《计算机伦理学》。对于 IEEE 和 ACM 的《计算机学科教学计划 2001》中提出的 14 个主科目,这套系列教材均涵盖,能够满足不同层次院校、不同教学计划的要求。

这套系列教材由全国高等学校计算机教育研究会课程与教材建设委员会主任李大友教授精心策划和组织。编者均为具有丰富教学实践经验的专家和教授。所编教材体系结构严谨、层次清晰、概念准确、论理充分、理论联系实际、深入浅出、通俗易懂。

教材组织过程中,得到了哈尔滨工业大学蒋宗礼教授,西安交通大学董渭清副教授,武汉大学张焕国教授,吉林大学张长海教授,福州大学王晓东教授,太原理工大学余雪丽教授等的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢。

李大友  
2000 年 6 月

# 前 言

本书是根据 2000 年 3 月 ACM 和 IEEE/SC 联合专题组发表的《Computing Curricula 2000》报告,并结合我国高等院校计算机本科教学的实际情况编写的。它是 21 世纪计算机学科的一门技术基础课教材,也是高等学校规划教材。其内容是在《高等教育面向 21 世纪教学内容与课程体系改革研究》的基础上确定的。

本书除具有计算机专业所设《电路与电子技术》课程全部基本内容外,还充分考虑到培养 21 世纪人才所必须具备的基础扎实、知识面宽、能力强和素质高的特点。为此,我们注意了以下几点。

(1)重点突出基本理论、基本知识和基本技能的内容,了解电子技术发展概况,为学习计算机学科后续课程及从事有关工程技术、科学研究打好理论和实践基础。

(2)为了适应教学内容和课程体系改革研究,本教材分成上、中、下册。其中,上册为电路原理部分;中册为模拟电子技术部分;下册为数字电子技术部分。计算机及相关专业可根据教学计划选用。

(3)为了反映现代电子技术的新成果、新技术和新发展,本教材加强模拟集成电路、大规模集成电路、数字逻辑与数字系统的内容介绍,并且有由现场片 PROM,PLA,PAL,GAL 到门阵列片 FPGA 以及在线系统编程 ISP 的用户片。随着集成电路和教学内容的更新换代和发展,即使数字系统的设计发生重大变化,上述内容也会为有关课程的教学体系、教学内容和人才培养奠定必要的基础。

(4)突出电子技术应用知识,重点介绍常用集成电路芯片的功能和使用方法,为计算机后续有关课程打下应用基础,如谐振、有源滤波、数/模、模/数转换器等。

(5)为便于教与学,每章配有多种类型的例题和习题。例题是为巩固基本概念、基础知识、扩充基本内容所用,多数不用讲述,学生可以自学理解。各章习题有为加强理解基本内容的基本习题,也有为加深理解基本理论、基本概念,起到举一反三之功效的较难习题。除此之外,还有接近实际的应用习题,以便开拓视野,掌握实际应用知识。同时,部分习题配有答案。每章前面有概述,后面有小结,以便于学生加深理解、掌握本章主要内容及主要概念。

本书由天津师范大学张纪成担任主编,魏永继、张兴会担任副主编。张纪成编写第 7,8 章(部分)及全书统稿工作;张兴会编写第 8 章(部分);李燕荣编写第 1,2,3,4,5,6 章;魏永继编写第 9 章。

北京工业大学李大友教授担任主审并对编写大纲及编写内容给予指导和关心。在编写过程中,还得到了天津师范大学计算机系马希荣副教授、天津职业技术师范学院计算机系刘光然副教授、赵洁副教授的支持与帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平和知识的局限性,加上时间仓促,错误之处在所难免,希望广大读者提出宝贵意见,以便修改和提高。

编 者

2002 年 2 月

# 目 录

<b>第 1 章 逻辑代数</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.1.1 脉冲电路 .....	1
1.1.2 数字电路 .....	2
1.2 数制 .....	2
1.2.1 常用的计数制 .....	2
1.2.2 数制的转换 .....	4
1.3 码制 .....	5
1.3.1 二 - 十进制编码 .....	5
1.3.2 循环码 .....	6
1.4 逻辑函数及其描述方法 .....	8
1.4.1 逻辑变量 .....	8
1.4.2 基本逻辑运算 .....	8
1.4.3 逻辑函数表达式 .....	9
1.4.4 真值表 .....	10
1.4.5 逻辑门及逻辑电路图 .....	10
1.5 逻辑代数的基本定律和规则 .....	12
1.5.1 基本定律及常用公式 .....	12
1.5.2 三个规则 .....	13
1.6 逻辑函数表达式标准形式 .....	14
1.6.1 最小项表达式 .....	14
1.6.2 最大项表达式 .....	15
1.7 逻辑函数的化简 .....	15
1.7.1 代数法 .....	16
1.7.2 卡诺图法 .....	17
1.7.3 具有无关项的逻辑函数化简 .....	19
1.8 正逻辑与负逻辑 .....	20
本章小结 .....	21
习题 1 .....	21
<b>第 2 章 门电路</b> .....	24
2.1 三极管开关特性 .....	24
2.1.1 双极型三极管的开关特性 .....	24
2.1.2 增强型 MOS 场效应管的开关特性 .....	25
2.2 集成门电路 .....	26
2.2.1 TTL 与非门 .....	26
2.2.2 CMOS 反相器 .....	31
2.2.3 其他类型门电路 .....	34

本章小结 .....	39
习题 2 .....	40
<b>第 3 章 组合逻辑电路</b> .....	<b>45</b>
3.1 概述 .....	45
3.2 组合逻辑电路的分析方法 .....	45
3.3 常用的组合逻辑部件 .....	46
3.3.1 编码器 .....	46
3.3.2 译码器 .....	49
3.3.3 数据选择器与数据分配器 .....	54
3.3.4 加法器 .....	56
3.3.5 数值比较器 .....	58
3.4 组合逻辑电路的设计方法 .....	60
3.4.1 设计步骤 .....	60
3.4.2 设计举例 .....	60
3.5 组合逻辑电路的竞争冒险 .....	64
3.5.1 产生竞争冒险现象的原因 .....	64
3.5.2 竞争冒险现象的检查消除方法 .....	65
本章小结 .....	66
习题 3 .....	67
<b>第 4 章 触发器</b> .....	<b>69</b>
4.1 触发器的基本形式 .....	69
4.1.1 基本 RS 触发器 .....	69
4.1.2 同步触发器 .....	71
4.2 主从结构触发器 .....	74
4.2.1 主从 RS 触发器 .....	74
4.2.2 主从 JK 触发器 .....	75
4.3 边沿触发器 .....	77
4.3.1 维持阻塞 D 触发器 .....	77
4.3.2 边沿触发型 JK 触发器 .....	79
4.4 CMOS 触发器 .....	80
4.4.1 CMOS 主从 D 触发器 .....	80
4.4.2 CMOS 主从 JK 触发器 .....	81
本章小结 .....	81
习题 4 .....	82
<b>第 5 章 时序逻辑电路</b> .....	<b>86</b>
5.1 概述 .....	86
5.1.1 时序逻辑电路的基本特性 .....	86
5.1.2 时序逻辑电路的分类 .....	86
5.2 时序逻辑电路的分析方法 .....	87
5.2.1 同步时序逻辑电路分析 .....	87
5.2.2 异步时序逻辑电路分析 .....	89
5.3 常用时序逻辑部件 .....	91
5.3.1 寄存器 .....	91
5.3.2 计数器 .....	94



5.3.3	序列信号发生器	106
5.3.4	顺序脉冲发生器	107
5.4	同步时序逻辑电路的设计方法	107
5.4.1	原始状态表的形成	108
5.4.2	状态化简	109
5.4.3	状态分配	110
5.4.4	驱动方程和输出方程	110
5.4.5	设计举例	112
	本章小结	114
	习题 5	114
<b>第 6 章</b>	<b>脉冲波形的产生与整形</b>	<b>117</b>
6.1	施密特触发器	117
6.1.1	用门电路组成的施密特触发器	117
6.1.2	TTL 集成施密特触发器	118
6.1.3	CMOS 集成施密特触发器	119
6.1.4	施密特触发器的应用	121
6.2	单稳态触发器	121
6.2.1	用门电路组成的单稳态触发器	122
6.2.2	TTL 集成单稳态触发器	125
6.2.3	CMOS 集成单稳态触发器	126
6.2.4	用施密特触发器构成的单稳态触发器	128
6.2.5	单稳态触发器的应用	128
6.3	多谐振荡器	129
6.3.1	用门电路组成的多谐振荡器	129
6.3.2	用施密特触发器构成的多谐振荡器	131
6.3.3	用单稳态触发器构成的多谐振荡器	131
6.3.4	石英晶体多谐振荡器	132
6.4	555 集成定时器	133
6.4.1	集成定时器的工作原理	133
6.4.2	集成定时器的应用	134
	本章小结	136
	习题 6	137
<b>第 7 章</b>	<b>半导体存储器和可编程逻辑</b>	<b>140</b>
7.1	随机存储器(RAM)	140
7.1.1	静态随机存储器(SRAM)	140
7.1.2	动态随机存储器(DRAM)	144
7.2	只读存储器(ROM)	149
7.2.1	掩膜只读存储器(ROM)	150
7.2.2	可编程只读存储器(PROM)	151
7.2.3	可擦除的可编程只读存储器(EPROM)	152
7.2.4	电可擦除的可编程 ROM(E <sup>2</sup> PROM)	155
7.2.5	ROM 的应用	157
7.3	存储器容量的扩展	159
7.3.1	位扩展方式	159

7.3.2	字扩展方式	159
7.4	可编程逻辑器件	160
7.4.1	可编程逻辑阵列 PLA	161
7.4.2	可编程阵列逻辑器件 PAL	164
7.5	可编程通用阵列逻辑器件 GAL	166
7.5.1	GAL 器件的基本结构	167
7.5.2	GAL 结构控制字	169
7.5.3	GAL 的工作模式	170
7.6	现场可编程门阵列 FPGA	172
7.6.1	概述	172
7.6.2	现场可编程门阵列结构	173
7.7	在线系统编程技术	177
7.7.1	ISP 技术特点	178
7.7.2	ISP 逻辑器件分类	179
7.7.3	ispLSI 器件	181
7.7.4	在线系统编程原理及方式	186
	本章小结	187
	习题 7	188
<b>第 8 章</b>	<b>数/模和模/数转换器</b>	<b>190</b>
8.1	D/A 转换器	190
8.1.1	权电阻网络 D/A 转换器	190
8.1.2	T 型和倒 T 型电阻网络 D/A 转换器	192
8.1.3	权电流型 A/D 转换器	195
8.1.4	D/A 转换器的输出方式	197
8.1.5	D/A 转换器的主要技术指标	201
8.1.6	D/A 转换器的输入输出特性	202
8.2	典型 D/A 转换器集成芯片	203
8.2.1	概述	203
8.2.2	DAC0832 芯片	203
8.2.3	AD7520 与 AD7521 芯片	205
8.2.4	DAC1210 芯片	206
8.3	A/D 转换器	208
8.3.1	A/D 转换器转换的基本步骤	208
8.3.2	直接 A/D 转换器	211
8.3.3	间接 A/D 转换器	214
8.3.4	A/D 转换器的主要技术指标	218
8.4	典型的 A/D 转换器集成芯片	219
8.4.1	概述	219
8.4.2	ADC0809 芯片	219
8.4.3	AD574A	221
8.4.4	AD9048	224
8.5	多路转换器与采样保持器	226
8.5.1	概述	226
8.5.2	常用的多路模拟转换器芯片	226

8.5.3 多路模拟转换器的主要参数	228
8.5.4 常用的采样 - 保持器芯片	229
8.5.5 采样 - 保持电路的主要参数	230
8.5.6 一个 16 路数据采集系统电路	230
本章小结	232
习题 8	232
<b>第 9 章 数字系统</b>	<b>234</b>
9.1 数字系统的基本概念和特点	234
9.1.1 数字系统的基本概念	234
9.1.2 数字系统的特点	235
9.2 数字系统的基本逻辑子系统	236
9.2.1 算术/逻辑运算单元(ALU)	236
9.2.2 随机存储器(RAM)	240
9.2.3 数据总线	241
9.2.4 输入与输出	243
9.3 控制器的设计	244
9.3.1 控制器的基本概念	244
9.3.2 算法状态机和算法流程图	245
9.3.3 小型控制器设计举例	246
9.3.4 微程序控制器	250
本章小结	252
习题 9	253
<b>部分习题答案</b>	<b>254</b>
<b>附录 常用逻辑符号对照表</b>	<b>265</b>
<b>参考文献</b>	<b>266</b>

# 第1章 逻辑代数

数字电路研究的主要内容是各种数字逻辑电路的分析与综合。数字电路采用的计数制是二进制,逻辑代数是研究二进制数字运算的数学工具。在本章中,首先介绍二进制的表示方法和基本运算法则以及二进制和十进制的相互转换,进而讨论逻辑代数的基本运算法则、基本定律和规则、逻辑函数的建立及其化简方法,给逻辑电路的研究提供必要的数学基础。

## 1.1 概述

### 1.1.1 脉冲电路

#### 1. 基本概念

(1)模拟信号和模拟电路。在时间上和数值上连续变化的信号称为模拟信号,电路信号是模拟信号的电路称为模拟电路。例如,正弦信号在时间上和数值上都是连续变化的,它是模拟信号。

(2)脉冲信号和脉冲电路。脉冲这个词包含着脉动和短促的意思。所谓电压和电流脉冲,是指存在时间极短的电压和电流信号。就广义来说,通常把按非正弦规律变化的电压和电流信号统称为脉冲信号。常见的脉冲波形如图 1.1 所示。这些信号是连续变化的时间信号。

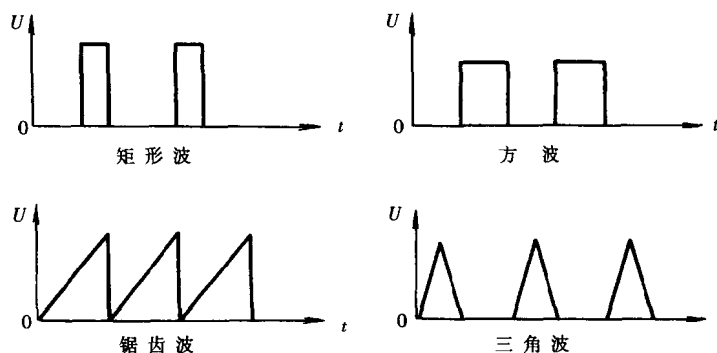


图 1.1 常见的几种脉冲波形

脉冲电路是完成脉冲波形的产生与变换的电路。通常由开关器件和包含有动态元件(电容  $C$  或电感  $L$ )的线性网络组成。

#### 2. 脉冲波形的基本参数

脉冲波形的种类很多,波形参数各不相同,下面以常见的矩形波为例来说明脉冲波形的基本参数,矩形波波形如图 1.2 所示。

- (1)脉冲幅度  $U_m$ :脉冲电压变化的最大值。
- (2)脉冲上升时间  $t_r$ :脉冲上升沿从  $0.1 U_m$  上升到  $0.9 U_m$  所需要的时间。
- (3)脉冲下降时间  $t_f$ :脉冲下降沿从  $0.9 U_m$  下降到  $0.1 U_m$  所需要的时间。
- (4)脉冲宽度  $t_w$ :脉冲前后沿在  $0.5 U_m$  两点间的时间间隔。
- (5)脉冲周期  $T$ :在周期性脉冲序列中,两个相邻脉冲间的时间间隔,有时也用频率  $f(f =$

$\frac{1}{T}$ )表示单位时间内脉冲重复的次数。

(6)占空比  $q$ :脉冲宽度与脉冲周期的比值,即  $q = \frac{t_w}{T}$ 。

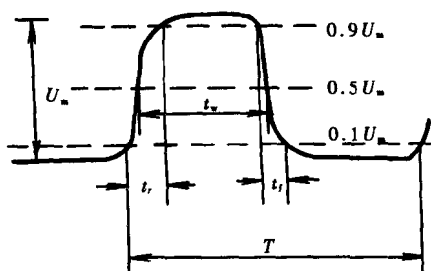


图 1.2 矩形波的基本参数

### 1.1.2 数字电路

在时间上和数值上都是不连续变化的信号称为数字信号,电路中的信号是数字信号的电路称为数字电路。数字电路中最常用的是 0、1 两种数值组成的数字信号,这种二值信号又称为二进制信号。

数字电路可分为组合逻辑电路和时序逻辑电路两大类。组合电路的输出状态仅与当前的输入状态有关,而时序电路的输出状态不仅取决于当前的输入状态,而且还与电路的过去状态有关。数字电路是由

集成逻辑门电路及触发器组成的,一般情况下,它们都是具有两个状态的电子器件,用它们来处理二值数字信号是非常方便的。

数字电路处理的是二值数字信号,因而必须搞清楚各种进位计数制及其相互间的转换关系。

## 1.2 数制

数制即计数制,有非进位计数制和进位计数制两种,在日常生活中使用的是按进位的方法进行计数的进位计数制。

### 1.2.1 常用的计数制

数制的种类繁多,最常用的是二进制、八进制、十进制和十六进制。为了便于了解计数制,首先给出几个概念:

(1)数位:是数码在一个数中的位置。

(2)基数:在某种计数制中,每个数位上所能使用的数码符号个数称为计数制的基数。

(3)位权:在每个数位上的数码符号所代表的数值等于该数位上的数码乘上一个固定的数值,这个固定的数值就是位权。

#### 1. 十进制

十进制的基本特点:

(1)每个数位可出现的数码是 10 个,0、1、2、3、4、5、6、7、8、9,即基数为 10。

(2)逢十进一,借一当十。

对于任意一个由  $n$  位整数和  $m$  位小数组成的十进制数  $D$ ,其按权展开式为

$$D = D_{n-1} \times 10^{n-1} + D_{n-2} \times 10^{n-2} + \dots + D_0 \times 10^0 + D_{-1} \times 10^{-1} + \dots + D_{-m} \times 10^{-m}$$

$$= \sum_{i=n-1}^{-m} D_i \times 10^i$$

其中, $i$  为数位的编码; $D_i$  表示第  $i$  位的数码,取值范围为  $0 \sim 9$ ;  $10^{n-1}$ 、 $10^{n-2}$ ... $10^0$ 、 $10^{-1}$ ... $10^{-m}$  是十进制的位权。例如

$$(314.16)_{10} = 3 \times 10^2 + 1 \times 10^1 + 4 \times 10^0 + 1 \times 10^{-1} + 6 \times 10^{-2}$$

## 2. 二进制

二进制的基本特点:

- (1) 每个数位可出现的数码为两个, 0 和 1, 即基数为 2。
- (2) 逢二进一, 借一当二。

对于任何一个有  $n$  位整数和  $m$  位小数的二进制数  $B$ , 其按权展开式为

$$B = B_{n-1} \times 2^{n-1} + B_{n-2} \times 2^{n-2} + \cdots + B_0 \times 2^0 + B_{-1} \times 2^{-1} + \cdots + B_{-m} \times 2^{-m} \\ = \sum_{i=n-1}^{-m} B_i \times 2^i$$

其中,  $B_i$  为 0 或 1。例如

$$(1101.01)_2 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2}$$

不难看出, 它与十进制数的差别仅仅在于进位基数变化了, 每个位权数为 2 的幂次数, 即相邻两位相同数码代表的值互为 2 倍关系。

二进制算术运算与十进制运算类似, 但更为简单。其运算规则为

加法规则	减法规则	乘法规则
$0+0=0$	$0-0=0$	$0 \times 0=0$
$0+1=1$	$0-1=1$ (借一当二)	$0 \times 1=0$
$1+0=1$	$1-0=1$	$1 \times 0=0$
$1+1=10$ (逢二进一)	$1-1=0$	$1 \times 1=1$

由于二进制每位只有两种取值 0 和 1, 在数字电路中, 可用电路的两种状态表示, 实现起来很方便。例如, 在数字电路, 可用高电平表示“1”, 低电平表示“0”, 或用三极管的导通表示“1”, 截止表示“0”。二进制运算规则简单, 求和与求积运算均只有 3 个规则, 电路实现起来简单易行, 而且数字传输和处理不容易出错, 使电路更加可靠。但是二进制表示一个数时, 数位过长不便于书写和记忆, 为此在实际应用中通常用八进制和十六进制数作为二进制数的缩写。

## 3. 八进制

八进制的基本特点:

- (1) 每个数位可出现的数码为 8 个, 0、1、2、3、4、5、6、7, 即基数为 8。
- (2) 逢八进一, 借一当八。

对于任一有  $n$  位整数和  $m$  位小数的八进制数  $S$ , 其按权展开式为

$$S = S_{n-1} \times 8^{n-1} + S_{n-2} \times 8^{n-2} + \cdots + S_0 \times 8^0 + S_{-1} \times 8^{-1} + \cdots + S_{-m} \times 8^{-m} \\ = \sum_{i=n-1}^{-m} S_i \times 8^i$$

其中,  $S_i$  为 0~7 中的任意一个。例如

$$(317)_8 = 3 \times 8^2 + 1 \times 8^1 + 7 \times 8^0$$

## 4. 十六进制

十六进制的基本特点:

- (1) 每个数位可出现的数码为 16 个, 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A、B、C、D、E、F, 即基数为 16。
- (2) 逢十六进一, 借一当十六。

对于任一有  $n$  位整数和  $m$  位小数的十六进制数  $H$  可表示为

$$H = H_{n-1} \times 16^{n-1} + H_{n-2} \times 16^{n-2} + \cdots + H_0 \times 16^0 + H_{-1} \times 16^{-1} + \cdots + H_{-m} \times 16^{-m} \\ = \sum_{i=n-1}^{-m} H_i \times 16^i$$

其中,  $H_i$  为 0~9 及 A、B、C、D、E、F 中的任意一个, 例如

$$(3C4)_{16} = 3 \times 16^2 + 12 \times 16^1 + 4 \times 16^0$$

由以上四种计数制, 可得到以下结论:

对于一个  $N$  进制数, 其每个数位上可出现的数码为 0、1、2、 $\dots$ 、 $N-1$ , 即基数为  $N$ , 并且符合逢  $N$  进一的原则。

对于一个  $N$  进制数  $M$  可表示为

$$\begin{aligned} M &= M_{n-1} \times N^{n-1} + M_{n-2} \times N^{n-2} + \dots + M_0 \times N^0 + M_{-1} \times N^{-1} + \dots + M_{-m} \times N^{-m} \\ &= \sum_{i=n-1}^{-m} M_i \times N^i \end{aligned}$$

其中,  $M_i$  为各位上的数码, 是 0~ $N-1$  中的任意一个;  $N$  为计数制基数;  $N^i$  为位权数。

### 1.2.2 数制的转换

#### 1. 二进制与十进制的转换

(1) 二进制转换为十进制。将二进制数按权展开后, 经过计算所得的结果即为转换后的十进制数。例如

$$\begin{aligned} (1011.01)_2 &= 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} \\ &= 8 + 0 + 2 + 1 + 0 + 0.25 = (11.25)_{10} \end{aligned}$$

(2) 十进制转换为二进制。十进制数的整数部分和小数部分利用不同的方法进行变换。

① 整数部分。采用的方法是“除 2 取余法”, 即将十进制数除以 2, 取其除数作为相应二进制数最低位  $K_0$ , 再除以 2 得余数  $K_1$ , 直到商为 0 时得到最高位  $K_{n-1}$ , 则  $K_{n-1} K_{n-2} \dots K_1 K_0$  为转换后得到的二进制数。

例如: 将  $(121)_{10}$  转换为二进制数。转换过程为

$$\begin{array}{rll} 2 & \overline{) 121} & \\ 2 & \overline{) 60} & \dots\dots\dots \text{余数} = 1 = K_0 \\ 2 & \overline{) 30} & \dots\dots\dots \text{余数} = 0 = K_1 \\ 2 & \overline{) 15} & \dots\dots\dots \text{余数} = 0 = K_2 \\ 2 & \overline{) 7} & \dots\dots\dots \text{余数} = 1 = K_3 \\ 2 & \overline{) 3} & \dots\dots\dots \text{余数} = 1 = K_4 \\ 2 & \overline{) 1} & \dots\dots\dots \text{余数} = 1 = K_5 \\ & 0 & \dots\dots\dots \text{余数} = 1 = K_6 \end{array}$$

$$(121)_{10} = (1111001)_2$$

② 小数部分。采用的方法是“乘 2 取整法”, 即将十进制数乘以 2, 取乘积整数部分作为相应十进制数小数点后最高位  $K_{-1}$ , 反复乘以 2, 逐次得到  $K_{-2}, K_{-3} \dots K_{-m}$ , 直到乘积的小数部分为 0 或小数点后的位数达到精度要求为止。

例如: 将  $(0.625)_{10}$  转换成二进制数, 转换过程为

$$\begin{array}{rll} 0.625 & & \\ \times 2 & & \\ \hline 1.250 & \text{整数部分} = 1 = K_{-1} & \\ 0.250 & & \\ \times 2 & & \\ \hline 0.500 & \text{整数部分} = 0 = K_{-2} & \end{array}$$

$$\frac{\times 2}{1.000} \quad \text{整数部分} = 1 = K_{-3}$$

$$(0.625)_{10} = (0.101)_2$$

对于既有整数又有小数部分的十进制数,可对其整数与小数部分分别转换成二进制数,再把两者连接起来即可。

例如:将 $(12.25)_{10}$ 转换成二进制数。

$$(12)_{10} = (1100)_2, (0.25)_{10} = (0.01)_2$$

$$(12.25)_{10} = (1100.01)_2$$

## 2. 二进制与十六进制的转换

二进制的基数为 2,十六位进制的基数为 16,且  $2^4 = 16, 16^1 = 16$ ,可见十六进制的一位对应于二进制的四位,所以十六进制与二进制互换是十分简便的。

(1)二进制转换为十六进制。采用的方法为“四位并一位”,即以小数点为基准,整数部分从右至左,每四位一组,最高位不足四位时,添 0 补足四位;小数部分从左至右,每四位一组,最低有效位不足四位时,添 0 补足四位。然后将各组的四位二进制数按  $2^3, 2^2, 2^1, 2^0$  的位权展开后相加,得到一位十六进制数。

例如:将 $(1011010101.011101)_2$ 转换为十六进制数得

$$= \left( \frac{0010}{2} \quad \frac{1101}{D} \quad \frac{0101}{5} \quad \frac{0111}{7} \quad \frac{0100}{4} \right)_{16}$$

$$(1011010101.011101)_2 = (2D5.74)_{16}$$

(2)十六进制转换为二进制。采用的方法为“一位拆四位”,即把一位十六进制数写成对应的四位二进制数,然后连接起来,即为转换的二进制数。

例如:将 $(5A0B.0C)_{16}$ 转换为二进制数得

$$\begin{array}{cccccc} (5 & A & 0 & B & 0 & C)_{16} \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ = (0101 & 1010 & 0000 & 1011 & 0000 & 1100)_2 \end{array}$$

$$(5A0B.0C)_{16} = (101101000001011.000011)_2$$

## 1.3 码制

数字系统只能处理二进制数据,而信息除了有前面介绍的数值型信息外,还有由字母、标点符号、控制字符组成的非数值型信息。为使数字系统能够处理非数值型信息,将其用不同的二进制代码来表示,这一过程即为编码过程,编码时所遵循的原则称为码制。

### 1.3.1 二-十进制编码

将十进制中的 0~9 十个数码,每个都用四位二进制数表示,就是二进制编码的十进制数,简称为 BCD 码或二-十进制编码。BCD 码分为有权码和无权码两类。

若 BCD 码的每位都有固定的权值,且 BCD 码按权展开后相加所得的数值与其所表示的十进制数相等,即 BCD 代码与其所表示的十进制数之间的关系满足

$$N = \sum_{i=0}^3 W_i a_i$$



其中,  $N$  代表十进制数字,  $w_i$  和  $a_i$  为第  $i$  位的权值和二进制代码。这种编码称为有权码。

若 BCD 码的每位没有固定的权值, 不能用按权展开式来求它所代表的十进制数, 这种编码称为无权码。

四位二进制码组合在一起有 16 种状态, 任选 10 种作为十进制编码, 所以 BCD 码有多种形式。表 1.1 中列出了常用的几种 BCD 码。

表 1.1 几种常用的 BCD 码

十进制数	8421 码	2421 码	余 3 码	4221 码	余 3 循环码
0	0000	0000	0011	0000	0010
1	0001	0001	0100	0001	0110
2	0010	0010	0101	0010	0111
3	0011	0011	0110	0011	0101
4	0100	0100	0111	0110	0100
5	0101	1011	1000	0111	1100
6	0110	1100	1001	1100	1101
7	0111	1101	1010	1101	1111
8	1000	1110	1011	1110	1110
9	1001	1111	1100	1111	1010

### 1. 8421 BCD 码

8421 BCD 码是使用最广泛的一种 BCD 码, 8421 是指这种编码每位的权值从左至右依次为 8、4、2、1, 所以它是一种有权码。根据每位权值, 可以很方便地得到 8421 BCD 码所代表的十进制数值。

**【例 1-1】** 计算 8421 BCD 码 0110 的十进制数值。

解:  $(0110)_{8421\text{BCD}} = 0 \times 8 + 1 \times 4 + 1 \times 2 + 0 \times 1 = (6)_{10}$

BCD 码总是四位二进制数为一组表示一位十进制数, 要将一个多位十进制数表示成 8421 BCD 码时, 就要将此十进制数的各位数字分别用相应的 8421 BCD 表示。

**【例 1-2】** 将十进制数 293 表示成 8421 BCD 码。

解:

十进制数	2	9	3
	↓	↓	↓
8421 BCD	0010	1001	0011

$(293)_{10} = (001010010011)_{8421\text{BCD}}$

### 2. 余 3 码

如果将每一个四位余 3 码看成是四位二进制数的话, 它的数值比它所表示的十进制数大 3, 所以这种代码称为余 3 码。它是一种无权码, 不能按权展开来求它所代表的十进制数。从表 1.1 中可以发现, 余 3 码的编码特点是 0 与 9、1 与 8、2 与 7……每一对 BCD 码的和都等于 1111, 又称为自补码, 这种性质的编码便于简化电路。

#### 1.3.2 循环码

循环码, 又称为格雷码, 有许多种形式。其共同的特点是:

(1) 任意两个相邻代码(包括首、尾两个代码)之间只有一位码元不同, 所以称为循环码。这一特点使它在代码传输时, 不容易出错。