



电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程

数字电路

贾立新 主编 何剑春 包晓敏 编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程

数字电路

贾立新 主编
何剑春 包晓敏 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书依据教育部教指委颁布的课程教学基本要求编写。全书共8章, 主要内容包括: 数字电路基础知识、数制和码制、逻辑代数基础、集成门电路、组合逻辑电路、VHDL 语言简介、触发器和时序逻辑电路、大规模数字集成电路、脉冲信号的产生与整形电路、数/模和模/数转换器、数字系统设计基础。本书概念清楚、实践性强, 附有大量应用实例和习题。

本书是浙江省省级精品课程配套教材, 配套教学网站、多媒体课件和课后习题解答。本书可作为高等学校电子信息、电气、通信、控制和计算机等专业的教材, 也可供电子信息领域的广大科技工作者学习、参考。

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

数字电路/贾立新主编;何剑春,包晓敏编. —北京:电子工业出版社,2007.9

(电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程)

ISBN 978-7-121-04895-1

I. 数… II. ①贾… ②何… ③包… 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(2007)第 128502 号

责任编辑:王羽佳

印 刷:北京市通州大中印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:20.25 字数:518.4 千字

印 次:2007 年 9 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:28.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

本教材是浙江省省级精品课程配套教材和浙江工业大学重点建设教材。书中的基本内容依据教育部教指委最新颁布的课程教学基本要求编写。全书分为8章。第1章介绍数字电路的基本概念、数制和码制、逻辑代数基础,第2章介绍集成门电路,第3章介绍组合逻辑电路、VHDL语言,第4章介绍触发器和时序逻辑电路,第5章介绍半导体存储器与可编程逻辑器件,第6章介绍脉冲信号的产生与整形,第7章介绍数/模和模/数转换器,第8章介绍数字系统设计基础。

编写过程中充分吸收了国内外最新教材中的新概念、新理论和新技术。力求处理好先进性和实用性的关系,处理好教材内容变化和基础内容相对稳定的关系。本书内容具有以下主要特点:

① 增加了反映数字电子技术发展的新技术和新方法。数字系统的设计已广泛采用可编程逻辑器件来代替传统的中小规模集成电路,硬件描述语言已成为数字逻辑电路设计的重要工具,在教材内容中增加了可编程逻辑器件、硬件描述语言VHDL、现代数字系统设计基础等方面的内容,并有机融入相关章节中。在模/数转换器的有关内容中增加了新型的 $\Sigma-\Delta$ 型A/D转换器的基本原理介绍。

② 精简了一些重复和过时的内容。例如,集成门电路一章有关三态门和OC(OD)门的内容中,只介绍TTL三态门和OC门的内容,将CMOS三态门和OD门的内容放入习题。时序电路内容中,严格区分锁存器和触发器的概念,删除了现已很少使用的TTL主从触发器的内容。

③ 理论与实际紧密结合。在介绍数字集成电路实例时,尽量采用当前的主流芯片。适当引入工程实际方面的实用知识,增加学生学习兴趣,满足解决实际问题需要。

④ 每一章后面安排了本章小结、自我检测题和习题。既便于学生课后复习,加深对课程内容的理解,又使学生在深入掌握课程内容的基础上扩展知识。

⑤ 配套网络课件、多媒体课件、习题答案,并均已上网,网址为210.32.200.206./szdl。

参加本教材编写工作的有贾立新、何剑春、包晓敏等。第1、3、5章由何剑春编写,第8章由包晓敏编写,其余各章由贾立新编写。贾立新任本书主编,负责全书的整体规划、统稿与定稿工作。金燕、王涌、李如春、周文委、王辛刚和章旌红老师也对教材编写给予了很多帮助。教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会成员李国丽教授不辞辛苦仔细审阅了全部书稿,提出了许多宝贵的意见。在此向他们表示衷心的感谢。

由于我们水平有限,书中难免有错误和不妥之处。如果您在阅读本书的过程中发现错误或是有改进本书的建议,请您通过jlx@zjut.edu.cn与作者联系。

作 者

2007年5月于浙江工业大学

目 录

第 1 章 数字逻辑基础	1
1.1 绪论	2
1.1.1 模拟信号和数字信号	2
1.1.2 模拟电路和数字电路	2
1.1.3 数字电路的发展及应用	4
1.2 数制和码制	5
1.2.1 数制	5
1.2.2 码制	9
1.3 逻辑代数基础	13
1.3.1 三种基本逻辑运算	13
1.3.2 复合逻辑运算	15
1.3.3 逻辑代数的基本公式和常用公式	16
1.3.4 逻辑代数的 3 个基本规则	18
1.4 逻辑函数及其表示方法	19
1.4.1 逻辑函数及其表示	19
1.4.2 逻辑函数的两种标准形式	22
1.5 逻辑函数的化简	25
1.5.1 逻辑函数化简的意义	25
1.5.2 逻辑函数的公式化简法	26
1.5.3 逻辑函数的卡诺图化简法	27
本章小结	33
自我检测题	34
习题	37
第 2 章 集成门电路	39
2.1 CMOS 门电路	40
2.1.1 MOS 管的开关特性	40
2.1.2 CMOS 反相器的电路结构和工作原理	42
2.1.3 CMOS 与非门和或非门	42
2.1.4 CMOS 门电路的电气特性	44
2.1.5 CMOS 传输门	53
2.1.6 改进型 CMOS 门电路	54
2.2 TTL 门电路	57
2.2.1 二极管和三极管的开关特性	57
2.2.2 分立元件门电路	58

2.2.3	LSTTL 与非门	60
2.2.4	LSTTL 门电路的电气特性	63
2.2.5	TTL 集电极开路门和三态门	68
2.3	集成门电路的接口	73
	本章小结	78
	自我检测题	78
	习题	80
第 3 章	组合逻辑电路	87
3.1	组合逻辑电路的分析和设计	88
3.1.1	组合逻辑电路的定义和特点	88
3.1.2	组合逻辑电路的分析方法	88
3.1.3	组合逻辑电路的设计方法	90
3.2	组合逻辑电路的竞争与冒险	93
3.2.1	竞争、冒险及其产生原因	93
3.2.2	冒险现象的识别	94
3.2.3	冒险现象的消除	95
3.3	VHDL 语言简介	97
3.3.1	VHDL 语言的要素	97
3.3.2	VHDL 语言的基本结构	100
3.3.3	VHDL 语言的句法	104
3.4	常用组合逻辑电路模块	107
3.4.1	编码器	107
3.4.2	译码器	112
3.4.3	数据选择器	121
3.4.4	数值比较器	126
3.4.5	加法器	129
	本章小结	133
	自我检测题	134
	习题	134
第 4 章	时序逻辑电路	141
4.1	锁存器	142
4.1.1	基本 SR 锁存器	142
4.1.2	钟控 SR 锁存器	145
4.1.3	钟控 D 锁存器	146
4.2	触发器	150
4.2.1	主从触发器	151
4.2.2	维持阻塞 D 触发器	153
4.2.3	利用传输延迟的 JK 触发器	154
4.2.4	触发器的动态参数	156

4.2.5 触发器的功能及转换	157
4.3 时序逻辑电路概述	160
4.4 同步时序逻辑电路的分析	162
4.5 同步时序逻辑电路的设计	166
4.6 异步时序逻辑电路的分析	172
4.7 常用时序逻辑电路模块	173
4.7.1 寄存器和移位寄存器	173
4.7.2 计数器	178
4.7.3 序列信号发生器	187
本章小结	189
自我测验题	189
习题	191
第5章 大规模数字集成电路	199
5.1 半导体存储器	200
5.1.1 只读存储器	201
5.1.2 静态随机存取存储器	207
5.1.3 动态随机存储器	210
5.1.4 存储器容量的扩展	212
5.2 可编程逻辑器件	214
5.2.1 可编程逻辑器件概述	214
5.2.2 可编程只读存储器 PROM	215
5.2.3 可编程逻辑阵列 PLA	216
5.2.4 可编程阵列逻辑 PAL	218
5.2.5 通用阵列逻辑 GAL	220
5.2.6 复杂可编程逻辑器件 CPLD	223
5.2.7 现场可编程门阵列 FPGA	226
本章小结	230
自我检测题	230
习题	231
第6章 脉冲波形的产生与整形	233
6.1 脉冲信号的基本参数	234
6.2 施密特触发器	235
6.2.1 施密特触发器的基本概念	235
6.2.2 由 CMOS 门构成的施密特触发器	236
6.2.3 施密特触发器的应用	237
6.3 单稳态触发器	239
6.3.1 单稳态触发器的基本概念	239
6.3.2 由 CMOS 门构成的微分型单稳态触发器	240
6.3.3 集成单稳态触发器	243
6.3.4 单稳态触发器的应用	244

6.4 多谐振荡器	245
6.4.1 由 CMOS 非门构成的多谐振荡器	245
6.4.2 CMOS 石英晶体振荡器	247
6.5 555 定时器及其应用	248
6.5.1 CMOS 集成定时器 7555 的电路结构和工作原理	248
6.5.2 555 定时器构成的施密特触发器	250
6.5.3 555 定时器构成的多谐振荡器	251
6.5.4 555 定时器构成的单稳态触发器	253
本章小结	255
自我检测题	255
习题	257
第 7 章 数/模与模/数转换器	261
7.1 概述	262
7.2 D/A 转换器	263
7.2.1 D/A 转换器的基本原理	263
7.2.2 权电阻型 D/A 转换器	264
7.2.3 R-2R 网络型 D/A 转换器	265
7.2.4 权电流型 D/A 转换器	267
7.2.5 D/A 转换器的主要技术指标	270
7.2.6 D/A 转换器的典型应用	272
7.3 A/D 转换器	274
7.3.1 A/D 转换器的基本原理	274
7.3.2 基于 DAC 的 A/D 转换器	277
7.3.3 并行比较型 A/D 转换器	282
7.3.4 双积分型 A/D 转换器	284
7.3.5 Σ - Δ 型 A/D 转换器	285
7.3.6 A/D 转换器的主要技术指标	288
7.3.7 集成 A/D 转换器的选择	288
本章小结	289
自我检测题	289
习题	290
第 8 章 数字系统设计基础	293
8.1 数字系统概述	294
8.2 传统数字系统设计方法	294
8.3 现代数字系统设计方法	299
本章小结	308
自我检测题	309
习题	309
附录 A 常用中规模集成电路国标符号	311
参考文献	315

第1章

数字逻辑基础

本章介绍数字系统中有关数码的各种表示方法,以及逻辑代数的基础知识。数制与码制概念是逻辑代数的基础,逻辑代数是逻辑分析和设计的基础。本章首先介绍各种不同进位计数制及其相互之间的转换方法,以及计算机中常用符号的代码表示,然后介绍逻辑代数各种基本运算及复合运算规律,逻辑问题的抽象及逻辑函数表示方法,以及利用公式法或卡诺图法对逻辑函数进行化简。通过学习本章,读者应熟悉各种数制和码制的规律;熟练掌握逻辑代数的基本运算规律,包括逻辑代数基本公式、常用公式、基本规则;熟练掌握应用卡诺图表示逻辑函数的方法,并能灵活应用于逻辑函数的变换和化简,为后续内容的学习奠定必要的数学基础。

1.1 绪论

1.1.1 模拟信号和数字信号

客观世界中存在的各种物理信号可分为模拟信号(Analog Signal)和数字信号(Digital Signal)两类。模拟信号是指幅度的取值是连续的,即幅值在一定范围内可以取任意实数值。大部分的模拟信号不但幅值是连续的,而且时间也是连续的,如图 1.1 所示。还有一些模拟信号幅值是连续的,但时间是离散的,如图 1.2 所示。

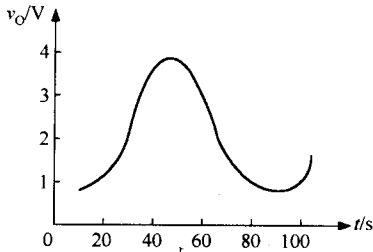


图 1.1 幅值和时间均连续的模拟信号

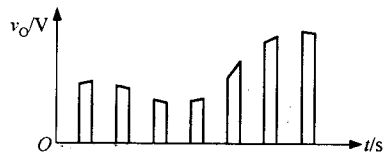


图 1.2 时间离散的模拟信号

自然界中大部分物理量表现为模拟信号。例如,电压信号、温度信号、声音信号、视频信号等就是典型的模拟信号。

数字信号是指信号幅度的取值是离散的,幅值表示被限制在有限个数值之内。在数字电路中,最常见的是由高、低逻辑电平描述的数字信号,如图 1.3 所示,它只有两种不同的电平,高电平表示逻辑 1,低电平表示逻辑 0。这种只有两个取值的数字信号又称二值信号。虽然只有两个取值,但可以表示各种各样的信息。

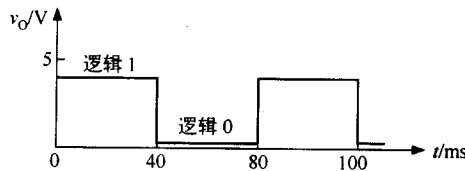


图 1.3 二值数字信号波形

从波形上看,数字信号具有“保持”和“突变”的特点,就是说数字信号在一段时间内保持低电平或高电平,低电平和高电平之间的转换是瞬时完成的。

1.1.2 模拟电路和数字电路

用以传递和处理模拟信号的电路称为模拟电路(Analog Circuit)。常见的模拟电路有放大电路、振荡电路、运算电路、有源滤波电路、整流稳压电路,以及混频、调制和解调等非线性电路。模拟电路中的元器件一般工作在放大状态,因而电路的灵敏度比较高,但也容易受到干扰信号的影响。模拟电路的设计十分灵活,在设计放大电路时,必须时时处处考虑各种概念。例如,应考虑静态工作点是否合适,AV 要多大,输入阻抗、输出阻抗应如何设计,影响如何,放大器的稳定性如何等。

如图 1.4(a)和 1.4(b)所示的电路都属于模拟电路。图 1.4(b)所示的电路虽然其输入和输出的信号都是像数字信号一样的矩形波,但因为输入和输出信号的幅值有比例关系,振幅被放大了,因此仍属于模拟电路。

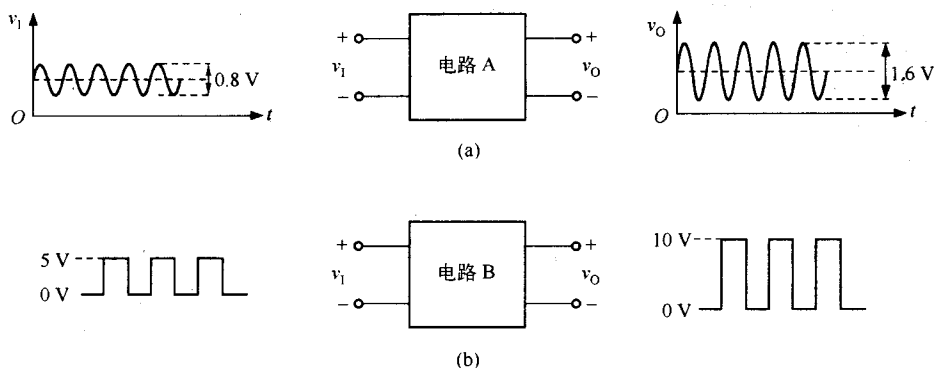


图 1.4 模拟电路的特性

用以传递和加工处理数字信号的电路称为数字电路(Digital Circuit)。数字电路包括各种逻辑电路,以及用于数字信号的存储、变换、测量等的各种电路。

数字电路具有如下特点:

① 数字电路中,晶体管多数工作在开关(饱和或截止)状态,因而电路的稳定性好,可靠性高;

② 研究对象是输入和输出的逻辑关系,因此主要的分析工具是逻辑代数,表达电路功能主要依靠真值表、逻辑表达式及逻辑图等。

如图 1.5 所示的电路属于数字电路,信号 A 和 B 经过电路运算后输出信号 C。从图中可以看到,信号 C 的幅值与输入信号 A、B 一致,但信号 C 与输入信号之间存在简单的逻辑关系,即输入信号 A、B 同时为高电平时,信号 C 为高电平,否则信号 C 为低电平。由此可见,该电路体现了数字电路的特点。

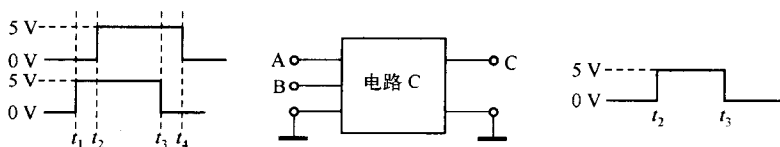


图 1.5 数字电路的特性

数字电路较之模拟电路有如下优点。

(1) 数字电路稳定性好,精度高

数字电路工作可靠,稳定性好。数字电路只要能够可靠区分 0 和 1 两种状态就可以正常工作,因此无论是对元器件参数的精度还是供电电源稳定度的要求,都比模拟电路要低。数字电路通过提高数字信号的位数就可以提高精度。例如,32 位的数字乘法器可以达到非常高的精度。而模拟乘法器受元器件参数的精度和供电电源的稳定度的限制,精度一般只能达到千分之一。

(2) 数字电路易于设计

数字电路的主要分析设计工具是逻辑代数,不需要复杂的数学知识,电路元器件的精度又不需要很高,因此,数字电路的分析和设计相对较容易。特别是采用计算机辅助设计 CAD 工具以后,数字电路的设计时间要远远小于模拟电路所需要的时间。

(3) 数字电路易于测试

随着集成度的提高,集成电路的测试在制造过程中所占的比重越来越大。许多数字集成电路内部都内置非常成熟的测试功能,从而大大降低了测试成本。

(4) 数字信号存储方便

半导体存储器的存储容量越来越大,采用大规模数字存储技术,能在相对较小的物理空间上存储几十亿位的数字信息。例如,把声音信号转化为数字信号以后,可以进行压缩存储,可长期保存,回放时声音质量高。

(5) 数字电路可以实现十分复杂的算法

微处理器是典型的数字器件,可以实现十分复杂的算法,对数字信号进行处理。

(6) 数字电路更易小型化、集成化

随着半导体工艺的发展,数字集成电路元器件的体积越来越小,集成度越来越高。今天,单个硅片上可以集成几万甚至几千万个元器件。随着 DSP、SoC 单片机等大规模数字器件的出现,使数字系统拥有体积小、重量轻、耗电省等特点。

1.1.3 数字电路的发展及应用

数字电路的发展与模拟电路一样,也经历了电子管、晶体管、集成电路等发展历程。

1906年,福雷斯特等发明了电子管。电子管体积大、重量重、耗电大、寿命短。世界上第一台计算机用了1.8万只电子管,占地170平方米,重30吨,耗电150 kW。

1948年,美国贝尔实验室发明了晶体管,其性能在体积、重量等方面明显优于电子管,但由分立元件组成的电路体积大、焊点多、电路的可靠性差。

1961年,美国德州仪器公司率先将数字电路的元、器件制作在同一硅片上,制成了数字集成电路(IC, Integrated Circuits)。集成电路的出现,大大促进了电子学的发展,尤其是促进了数字电路和微型计算机的飞速发展。

数字集成电路按集成度可分为小规模集成电路(SSI, Small Scale Integration)、中规模集成电路(MSI, Medium Scale Integration)、大规模集成电路(LSI, Large Scale Integration)、超大规模集成电路(VLSI, Very Large Scale Integration)和特大规模集成电路(ULSI, Ultra Large Scale Integration)。集成度按照单个芯片内含有的晶体管数量或等效门的数量来表示。表1.1列出的不同规模的数字集成电路所含等效门的数量。

表 1.1 不同规模的数字集成电路所含等效门的数量

分 类	等效门的个数	典型集成电路
小规模	≤ 12	基本门、触发器
中规模	12~99	译码器、计数器、加法器
大规模	100~9999	小容量存储器、门阵列
超大规模	10000~99999	单片微处理器
特大规模	≥ 100000	高密度可编程逻辑器件

图 1.6 所示为中小规模数字集成电路实物图,图 1.7 所示为大规模或超大规模数字集成电路实物图。

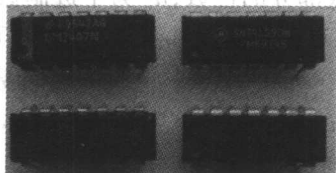


图 1.6 中小规模数字集成电路实物图

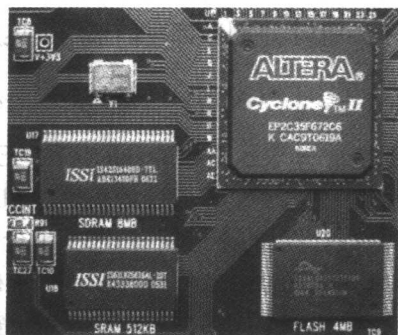


图 1.7 大规模和超大规模数字集成电路实物图

数字电路比模拟电路具有许多优点,这使得它在计算机、通信、自动控制、消费类电子产品等领域得到广泛应用。现代计算机就是最典型的数字系统。除了我们工作和生活中常见的通用计算机外,更多的是应用于各种特定对象智能化控制的嵌入式计算机,如 DSP、单片微控制器等。在消费类电子产品中,数字电路的应用日趋广泛。例如,移动电话、数码相机、音响产品、高清晰度数字彩电等,无不采用数字技术实现。在无线通信领域,采用 DSP 和 FPGA 等高速数字器件实现的软件无线电在军用和民用领域都得到了广泛应用。

随着数字电子技术的发展,将会有更多的数字电子产品问世。但是,我们生活在一个模拟的世界中,无论数字电路如何发展,也不能代替模拟电路。实际的电子系统更多是模拟电路和数字电路的结合。

1.2 数制和码制

计算机中处理的各种信息本质上归纳为数码和代码两类。数码和代码都是以二进制形式表示。一般认为对数值进行编码所得到的二进制数称为数码;对数码以外的事件、符号等进行编码得到的二进制数称为代码。本节首先介绍十进制、二进制、八进制、十六进制等数制及各种数制之间的转换;接着介绍针对二进制数、十进制数及字符的各种编码。

1.2.1 数制

日常生活中,人们常常采用具有 0~9 十个数码的十进制来进行计数。数字电路和计算机中处理信息时,通常采用只有 0 和 1 两种符号的二进制数,而不是人们熟悉的十进制数。为了便于计算机处理,一般需要将输入的十进制数转换成二进制数,处理后则需将二进制形式的结果转换为十进制,便于人们观察。因此,掌握数字电路知识首先应该理解各种不同的数制及其转换方法。

什么是进位计数制呢?进位计数制是按照进位方式实现计数的规则,是用统一的符号和规则表示数的方法。数字电路中涉及的进位计数制包括十进制、二进制、八进制、十六进制等。任何一个数都可用各种进位计数制来表示,但使用不同的进位计数制时,其运算方法和复杂度有所不同,对数字系统的性能有直接影响。下面介绍这些进位计数制的特点及它们之间的转换方法。

1. 十进制数(Decimal Number)

任何一个十进制数都可以采用下述加权和形式表示:

$$(N)_{10} = (a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_1a_0 \cdot a_{-1}a_{-2}\cdots a_{-m})_{10} = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i 10^i$$

式中,正整数 n 表示整数部分的位数;正整数 m 表示小数部分的位数; a_i 为十进制数 N 的数码,表示 $0\sim 9$ 这十个数码中的一个。和式中的数字 10 表示十进制的基数,基数决定了计数制的数码个数。例如,十进制有 $0\sim 9$ 十个数码,八进制有 $0\sim 7$ 八个数码。实际上,计数体制是以基数来命名的。和式中 10^i 表示处于确定位置的数码 a_i 具有的权重(Weight,也称位权、位值或权值)。例如,十进制数 123.35 可按照各数码具有的权重展开为:

$$(123.35)_{10} = 1 \times 10^2 + 2 \times 10^1 + 3 \times 10^0 + 3 \times 10^{-1} + 5 \times 10^{-2}$$

“权”的概念在计数制中非常重要,数中排列的数码由于具有不同的“权”而体现出不同的地位和层次。打个形象的比方:假设从银行取出 123.35 元钱,银行可能给你一张百元钞,两张十元钞,3 张一元钞,……,说明百位的数码 1 具有权 100,十位的数码 2 具有权 10 等。

从前面对十进制的分析中,可以归纳出如下规律:

- ① 十进制的基数为 10,即十进制有 $0\sim 9$ 十个数码;
- ② 十进制数由低位向高位的进位规律是“逢 10 进 1”,即计数满 10 就向高位进 1,如 $9+1=10, 19+1=20, 99+1=100$;
- ③ 十进制数中不同位置的数码具有不同的权,用 10^i 来表示。

十进制数有多种表示方法,如十进制数 123,可用 $(123)_{10}$ 、 $(123)_D$ 或 123D 等形式来表示它。

利用对十进制的分析抛砖引玉,我们很容易将进位计数制构成规律推广到二进制、八进制、十六进制及任意的 N 进制。

2. 二进制数(Binary Number)

与十进制类似,一个任意的二进制数可以表示为以下加权和的形式:

$$(N)_2 = (a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_1a_0 \cdot a_{-1}a_{-2}\cdots a_{-m})_2 = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i 2^i$$

式中,正整数 n 、 m 分别表示二进制数的整数部分和小数部分的位数; a_i 表示二进制数的数码,取值只能是 0 或 1;加权和式中,数字 2 是二进制的基数, 2^i 表示不同位置的数码的权。例如,二进制数 $(1101)_2$ 可以按照二进制数的各位数码和权展开为:

$$(1101)_2 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0$$

与十进制类似,二进制数也有如下规律:

- ① 基数为 2,只有两个数码 0 和 1;
- ② 遵循“逢 2 进 1”的计数规律,即 $1+1=10, 11+1=100$;
- ③ 不同位置的数码具有不同的权 2^i 。

二进制数也可以采用 $(1101)_2$ 、1101B 等形式来表示。数字系统中,尽管可以使用不同的进位制来表示数,考虑到运算方法、复杂度等因素,一般常用二进制来表示数,进行算术运算。这是因为二进制数在使用中体现出以下特点:

① 每个位置只有两个可能的取值1或0,因此很容易用具有两个稳定状态的电路元器件来模拟,如利用晶体管的导通和截止状态、指示灯的“亮”和“灭”分别表示1和0。

② 二进制的基本运算规则简单。1位二进制数的基本运算规则如下。

加法规则: $0+0=0,0+1=1,1+0=1,1+1=0$ (进位)

减法规则: $0-0=0,0-1=1$ (借位), $1-0=1,1-1=0$

乘法规则: $0\times 0=0,0\times 1=0,1\times 0=0,1\times 1=1$

除法规则: $0\div 1=0,1\div 1=1$

③ 二进制只有两个状态,数字的传输和处理不易出错,可靠性高。

④ 二进制还可以实现逻辑运算,可以利用布尔代数对实际数字系统进行分析与综合,便于逻辑电路的设计优化。

3. 八进制数(Octal Number)和十六进制数(Hexadecimal Number)

当二进制数的位数较多时,书写和阅读都不方便,容易出错,为此,通常采用八进制和十六进制。八进制数和十六进制数比二进制数简短,易读易记,而且数制之间的转换方便。因此,数字系统中普遍采用八进制或十六进制来表达。

一个任意的八进制数可以表示为:

$$(N)_8 = (a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_1a_0 \cdot a_{-1}a_{-2}\cdots a_{-m})_8 = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i 8^i$$

式中, a_i 可以取0~7等8个数码中的任意一个。八进制数遵循“逢8进1”的计数规律,不同位置上的数码具有权 8^i 。

一个任意的十六进制数可以表示为:

$$(N)_{16} = (a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_1a_0 \cdot a_{-1}a_{-2}\cdots a_{-m})_{16} = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i 16^i$$

式中, a_i 可取0~9及A、B、C、D、E、F等16个数码中的任意一个。十六进制数遵循“逢16进1”的计数规律,不同位置上的数码具有权 16^i 。

4. 数制转换

(1) 二进制与十进制的转换

由于数字电路中采用二进制数,而日常使用的是十进制数,因此,应该掌握二进制与十进制数之间的转换方法。

① 二进制数转换为十进制数

将二进制数转换为十进制数的方法比较简单——二进制数按位权展开,用十进制运算法则求和,即可得到相应的十进制数。例如,可以用下述方法将二进制数 $(1101)_2$ 转换为十进制数:

$$(1101)_2 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = (13)_{10}$$

② 十进制数转换为二进制数

将十进制数转换为二进制数则比较复杂。常用方法是先把十进制数的整数部分和小数部分分别进行转换,然后合成结果。十进制数整数部分的转换采用“除2取余,余数倒级联”的方法,即把十进制整数反复除以2直到商为0,并取出余数,将余数倒向级联(即最后出现的置于

最高位,最先出现的置于最低位),即可得到相应的二进制数。小数部分的转换采用“乘 2 取整法”,即将十进制小数乘以 2,从所得的积中取出整数部分(0 或 1)作为二进制数的最高位,去掉整数部分后留下的小数部分继续乘 2 取整,依次得到二进制数的第 2 位、第 3 位……直到积为 0 或满足精度要求为止。

【例 1.1】 采用“除 2 取余法”将十进制整数 $(77)_{10}$ 转换为二进制数。

解:

如图 1.8 所示,十进制数 77 除 2 取余,直至商为 0,并将余数自下而上倒级联,可得相应的二进制数,因此

$$(77)_{10} = (1001101)_2$$

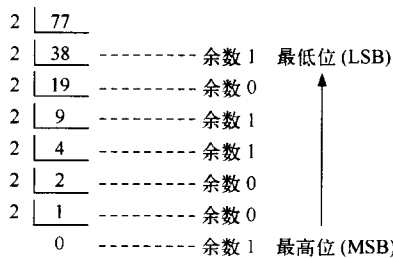


图 1.8 “除 2 取余法”实现十进制整数转换为二进制数

【例 1.2】 采用“乘 2 取整法”将十进制小数 $(0.828125)_{10}$ 转换为二进制数,取 6 位有效位数。

解:

如图 1.9 所示,通过乘 2 取整,直至积为 0,并将保留的整数自上而下级联,即得到二进制数。因此

$$(0.828125)_{10} = (0.110101)_2$$

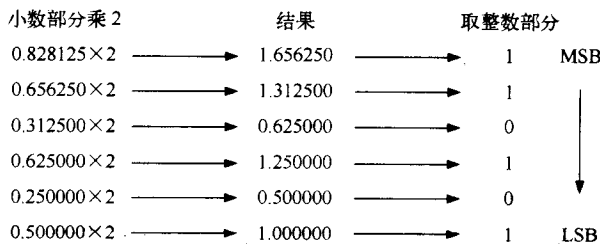


图 1.9 “乘 2 取整法”实现十进制小数转换为二进制数

(2) 二进制与十六进制的转换

由于十六进制的 16 个数码正好对应于 4 位二进制数的 16 种不同取值组合,所以十六进制数码和二进制数码之间有如下对应关系,如表 1.2 所示。

将二进制数转化为十六进制数的方法是,以小数点为基准,将二进制数的整数和小数部分每 4 位分为一组,不足 4 位的分别在整数的最高位前和小数的最低位后加 0 补足,然后每组用等值的十六进制数码替代,即得十六进制数。

十六进制数转换为二进制数的过程正好与上述过程相反,将每位十六进制数用 4 位二进制数代替即可。

表 1.2 十六进制数码与二进制数码之间对应关系

十六进制	0	1	2	3	4	5	6	7
二进制	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111
十六进制	8	9	A	B	C	D	E	F
二进制	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111

【例 1.3】 将二进制数 111011.10101 B 转换为十六进制数。

解：

$$\begin{array}{cccc} \underline{0011} & \underline{1011} & . & \underline{1010} & \underline{1000} & \text{B} \\ \uparrow & \uparrow & & \uparrow & \uparrow & \\ 3 & \text{B} & & \text{A} & 8 & \end{array}$$

因此, $111011.10101\text{B} = 3\text{B}.A8\text{H}$ 。

(3) 二进制与八进制的转换

由于八进制的 8 个数码正好对应于 3 位二进制数的 8 种不同取值组合,所以八进制和二进制之间有如下对应关系,如表 1.3 所示。

表 1.3 八进制与二进制之间对应关系

八进制	0	1	2	3	4	5	6	7
二进制	000	001	010	011	100	101	110	111

将二进制数转化为八进制数的方法是,以小数点为基准,将二进制数的整数和小数部分每 3 位分为一组,不足 3 位的分别在整数的最高位前和小数的最低位后加 0 补足,然后每组用等值的八进制数码替代。

八进制数转换为二进制数的过程正好与上述过程相反,将每位八进制数用 3 位二进制数代替即可。

例如, $(123.456)_8 = (001010011.100101110)_2 = (1010011.10010111)_2$ 。

1.2.2 码制

由于数字系统是以二值数字逻辑为基础的,因此其中的数值、文字、符号、控制命令等信息都采用二进制形式的代码来表示。所谓编码就是用一串二进制数表示某种信息的过程。例如,在道路交通灯控制系统中,绿灯表示“通行”,黄灯表示“注意”,红灯表示“停止”,对这 3 种状态可进行如表 1.4 所示的编码。

表 1.4 交通灯控制系统状态编码示例

状 态	编 码	说 明
红灯	1 0 0	停止
黄灯	0 1 0	注意
绿灯	0 0 1	通行

实际上,编码是为不同的信息人为地规定一种二进制形式的代号,因此,编码过程是比较灵活的,对同一信息,可采用多种编码方案。常见的二进制编码方式包括二-十进制码(即