



普通高等教育“十三五”规划教材
电工电子基础课程规划教材

数字电路与逻辑设计 (第2版)

■ 李晓辉 主编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划教材
电工电子基础课程规划教材

数字电路与逻辑设计

(第2版)

李晓辉 主编

杨 萍 李民权 副主编

徐小红 程 鸿 罗 洵 参编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍数字电路与逻辑设计的基本知识、基本理论、基本器件和基本方法,详细介绍各种逻辑电路的分析、设计与实现的全过程。全书共10章,内容包括:数制与码制、逻辑函数及其化简、集成逻辑门电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、半导体存储器、可编程逻辑器件、脉冲波形的产生和整形、数模和模数转换器等。提供配套电子课件和习题参考答案等。

本书可作为高等学校电子信息、电气、计算机、仪器仪表类各专业和部分非电类专业本科生的教材,也可作为相关学科工程技术人员的参考用书。

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

数字电路与逻辑设计/李晓辉主编. —2版. —北京:电子工业出版社,2017.9

ISBN 978-7-121-32782-7

I. ①数… II. ①李… III. ①数字电路-逻辑设计-高等学校-教材 IV. ①TN79

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第238287号

策划编辑:王羽佳

责任编辑:裴杰

印刷:涿州市京南印刷厂

装订:涿州市京南印刷厂

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:16.75 字数:494千字

版次:2012年1月第1版

2017年9月第2版

印次:2017年9月第1次印刷

定价:39.90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,(010)88258888。

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

本书咨询联系方式:(010)88254535,wyj@phei.com.cn。

前 言

21 世纪是信息数字化的时代,信息时代以数字化为基本特征。目前,数字电子技术已广泛应用于电子、通信、计算机、自动控制等领域。

“数字电路与逻辑设计”课程是电子、电气、计算机、仪器仪表类专业的主要专业基础课,其作用与任务是使学生掌握数字电路的基本分析方法和逻辑设计方法。

本书的基本内容符合教育部电工电子基础课程教学指导分委员会制订的《数字电路与逻辑设计课程教学基本要求》,同时注重内容更新和基础内容相对稳定的关系、先进性和适用性的关系、完整性和重要性的关系。

为了适应电子技术的迅猛发展,本书在介绍基础知识的同时,精选了代表当前数字电子技术发展水平的新技术和新方法作为教学内容,力求做到基本概念清晰,内容全面,有较强的可读性。

本书在介绍经典方法时,以小规模集成电路为主,重点介绍数字逻辑电路的基础理论、基本电路和基本分析、设计方法。而在讨论器件功能和应用时,以中、大规模集成电路为主,并且采用突出阐明各类器件的外特性为主、介绍电路内部结构为辅的方法,以便使读者能够熟练地运用各类器件进行逻辑设计。

组合逻辑电路和时序逻辑电路的分析方法和设计方法仍然是数字电路与逻辑设计课程的核心内容。为了学习逻辑电路的分析方法和设计方法,还必须掌握逻辑代数的基础知识和所用半导体器件的电气特性。因此,本书将门电路、触发器、半导体存储器和可编程逻辑器件的工作原理和特性,以及数制与码制、逻辑函数及其化简、组合逻辑电路和时序逻辑电路的分析方法和设计方法列为最基本的教学内容。

作为数字电路技术的入门课程,本书仍以中、小规模集成电路为主的数字逻辑电路的基础理论、基本电路和基本分析、设计方法为重点。适当减少小规模集成电路的内容,增加中规模集成电路分析和设计的内容。

随着大规模和超大规模集成电路的发展,CMOS 集成电路已在电子技术应用中占有主导地位。因此,本书重点讲述 CMOS 集成逻辑门电路。

在可编程逻辑器件章节中,结合可编程逻辑器件的编程,对硬件描述语言进行了简要的介绍。

从保持教材的系统性和完整性出发,书中保留了“脉冲波形的产生和整形”和“数模和模数转换器”章节。在“脉冲波形的产生和整形”章节,主要介绍施密特触发器、单稳态触发器以及多谐振荡器的性能和特点。

为了便于教学,也为了便于读者今后阅读外文教材和使用外文版的 EDA 软件,书中采用了目前国际通用的图形逻辑符号。

本书提供配套电子课件、习题参考答案等,请登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)免费注册下载。

本书的第 1 章、第 5 章和第 9 章由李晓辉执笔编写,第 3 章和第 4 章由杨萍执笔编写,第 6 章由李民权执笔编写,第 2 章由徐小红执笔编写,第 8 章由罗洵执笔编写,第 7 章和第 10 章由程鸿执笔编写,全书由李晓辉定稿。

在本书的编写过程中,电子工业出版社的编辑及相关院校的老师 and 同学们给予了大力支持,在此谨向他们表示衷心的感谢,并恳请读者给予批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 数制与码制	1	3.3.1 CMOS 反相器的结构及工作 原理	36
1.1 数字信号与数字电路	1	3.3.2 CMOS 反相器的电气特性和 参数	36
1.2 数制	1	3.4 CMOS 逻辑门电路	40
1.3 数制转换	3	3.4.1 CMOS 与非门和或非门	41
1.4 编码	5	3.4.2 CMOS 传输门	42
1.4.1 二-十进制代码	5	3.4.3 三态输出和漏极开路输出 的 CMOS 门电路	43
1.4.2 格雷码	6	3.5 双极型晶体管的开关特性及 应用	45
1.4.3 美国信息交换标准代码	6	3.5.1 双极型二极管的开关特性和 二极管门电路	46
1.4.4 二进制原码、反码和补码	8	3.5.2 双极型三极管的开关特性和 反相器电路	48
本章小结	9	3.6 TTL 逻辑门电路	50
习题	10	3.6.1 肖特基晶体管	50
第 2 章 逻辑函数及其化简	11	3.6.2 TTL 与非门和 TTL 或非门	51
2.1 概述	11	3.6.3 TTL 集电极开路门和三态 输出门	54
2.2 基本逻辑运算	11	*3.6.4 BiCMOS 门电路	55
2.2.1 三种基本逻辑运算	11	*3.7 ECL 逻辑门电路	56
2.2.2 复合逻辑运算	13	本章小结	57
2.3 逻辑函数	16	习题	57
2.3.1 逻辑问题的描述	16	第 4 章 组合逻辑电路	60
2.3.2 逻辑函数相等	17	4.1 概述	60
2.3.3 逻辑代数的常见公式	18	4.2 组合逻辑电路的分析和设计 方法	60
2.3.4 逻辑代数的基本规则	19	4.2.1 组合逻辑电路的分析	60
2.4 逻辑函数的标准表达式	20	4.2.2 组合逻辑电路的设计	62
2.4.1 标准与或式	20	4.3 常用中规模组合模块的功能与 应用	65
2.4.2 标准或与式	21	4.3.1 加法器	65
2.5 逻辑函数的化简方法	22	4.3.2 编码器	69
2.5.1 逻辑函数的公式化简法	23	4.3.3 译码器	72
2.5.2 卡诺图化简法	25		
本章小结	31		
习题	31		
第 3 章 集成逻辑门电路	33		
3.1 概述	33		
3.2 MOS 晶体管	33		
3.2.1 MOS 管的分类	33		
3.2.2 MOS 管的开关特性	35		
3.3 CMOS 反相器	36		

4.3.4 数据选择器	79	6.3 常用时序逻辑电路	128
4.3.5 数值比较器	84	6.3.1 计数器	128
4.4 组合逻辑电路的竞争冒险	87	6.3.2 寄存器和移位寄存器	145
4.4.1 竞争冒险现象及分类	87	6.3.3 序列信号发生器	157
4.4.2 竞争冒险的判断	88	本章小结	164
4.4.3 竞争冒险的消除	89	习题	165
本章小结	90	第7章 半导体存储器	171
习题	91	7.1 概述	171
第5章 触发器	93	7.2 半导体存储器基础	171
5.1 概述	93	7.2.1 半导体存储器的分类	171
5.2 基本 RS 触发器	93	7.2.2 半导体存储器的主要技术	
5.2.1 基本 RS 触发器的电路组成		指标	171
和工作原理	93	7.3 只读存储器(ROM)	172
5.2.2 基本 RS 触发器的功能描述	94	7.3.1 固定 ROM	172
5.3 同步触发器	96	7.3.2 可编程 ROM	174
5.3.1 同步 RS 触发器	96	7.3.3 ROM 的应用	177
5.3.2 同步 JK 触发器	98	7.4 随机存取存储器(RAM)	180
5.3.3 同步 D 触发器	99	7.4.1 RAM 的结构	180
5.3.4 同步 T 触发器	100	7.4.2 RAM 的存储单元	182
5.3.5 电平触发方式的工作特性	100	7.4.3 RAM 集成芯片 Intel 2114	183
5.4 主从触发器	101	7.5 存储容量的扩展	184
5.4.1 主从 RS 触发器	101	7.5.1 位扩展	184
5.4.2 主从 JK 触发器	102	7.5.2 字扩展	184
5.5 边沿触发器	104	7.5.3 字和位扩展	185
5.5.1 维持-阻塞触发器	104	本章小结	185
5.5.2 下降沿触发的边沿触发器	106	习题	185
5.5.3 CMOS 传输门构成的边沿		第8章 可编程逻辑器件	187
触发器	107	8.1 可编程逻辑器件(PLD)概述	187
5.6 触发器的电路结构和逻辑功能		8.1.1 可编程 ASIC 简介	187
的转换	108	8.1.2 PLD 的发展和分类	188
本章小结	109	8.2 PLD 的基本结构	189
习题	109	8.2.1 可编程阵列	190
第6章 时序逻辑电路	114	8.2.2 宏单元	192
6.1 概述	114	8.2.3 简单可编程逻辑器	
6.1.1 时序逻辑电路特点及组成	114	件(SPLD)	192
6.1.2 时序逻辑电路分类	114	8.2.4 复杂可编程逻辑器	
6.1.3 时序逻辑电路的表示方法	115	件(CPLD)	196
6.2 时序逻辑电路的分析和设计		8.3 现场可编程门阵列(FPGA)	197
方法	115	8.3.1 FPGA 的基本结构	197
6.2.1 时序逻辑电路分析	115	8.3.2 编程数据的装载	201
6.2.2 时序逻辑电路设计	119	8.3.3 FPGA 和 CPLD 的比较	202

8.4 在系统可编程(ISP)	202	本章小结	239
8.4.1 ispLSI1032 的结构	203	习题	240
8.4.2 编程原理	209	第 10 章 数模和模数转换器	242
8.5 PLD 的开发	211	10.1 概述	242
8.5.1 开发软件和具体设计步骤	211	10.2 A/D 转换器	242
8.5.2 VHDL 文本方式设计	213	10.2.1 A/D 转换器的工作原理	242
本章小结	225	10.2.2 A/D 转换器的主要类型和 电路特点	244
习题	225	10.2.3 A/D 转换器的主要技术 指标	250
第 9 章 脉冲波形的产生和整形	226	10.3 D/A 转换器	251
9.1 概述	226	10.3.1 D/A 转换器的工作原理	251
9.1.1 脉冲信号	226	10.3.2 D/A 转换器的主要类型和 电路特点	251
9.1.2 脉冲电路	226	10.3.3 D/A 转换器的主要技术 指标	255
9.2 脉冲波形产生和整形电路	226	10.4 A/D 转换器和 D/A 转换器的 主要应用	257
9.2.1 施密特触发器	226	10.4.1 数字处理系统	257
9.2.2 单稳态触发器	229	10.4.2 数据传输系统	257
9.2.3 多谐振荡器	232	本章小结	258
9.3 555 定时器及其应用	235	习题	258
9.3.1 555 定时器的电路结构	235	参考文献	259
9.3.2 用 555 定时器构成施密特 触发器	236		
9.3.3 用 555 定时器构成单稳态 触发器	237		
9.3.4 用 555 定时器构成多谐振 荡器	238		

第1章 数制与码制

1.1 数字信号与数字电路

在自然界中,存在着各种各样的物理量,尽管它们的性质各异,但就其变化规律的特点而言,可以分为两大类。

一类是物理量的变化在时间上和数量上都是离散的,其数值的变化都是某一个最小数量单位的整数倍,这一类物理量称为数字量。将表示数字量的信号称为数字信号,并将工作在数字信号下的电子电路称为数字电路。

另一类是物理量的变化在时间上和数值上是连续的,这一类物理量称为模拟量。将表示模拟量的信号称为模拟信号,并将工作在模拟信号下的电子电路称为模拟电路。

与模拟电路相比,数字电路具有以下主要优点:

(1) 稳定性好,抗干扰能力强。在数字系统中,数字电路只需判别输入、输出信号是高电平还是低电平,而无须知道信号的精确值。只要噪声信号不超过高低电平的阈值,就不会影响逻辑状态,因而具有较好的稳定性和抗干扰能力。

(2) 容易设计,便于构成大规模集成电路。与模拟电路的设计相比,数字电路的设计所需要的基础知识和电路设计技能要少得多。数字电路中晶体管工作在开关状态。大多数数字电路都可以采用集成电路来系列化生产,且成本低廉,使用方便。

(3) 信息处理能力强。数字系统可以方便地与计算机连接,利用计算机对信息进行处理。

(4) 精度高且容易保持。通过增加二进制的位数,可以使数字电路处理数字信号的结果达到所要求的精度。因此,由数字电路组成的数字系统工作准确,精度高。信号一旦数字化后,在传输和处理过程中信息的精度是不会降低的,即结果再现性好。

(5) 便于存储。利用数字存储器可以方便地对数字信号进行保存、传输和再现。

(6) 功耗小。由于数字电路中的元件均处于开关状态,大大降低了静态功耗。

鉴于数字电路存在以上优点,因此应用日趋广泛,在电子系统中所占的比重也越来越大。随着新技术的出现和集成电路技术的不断发展,数字系统正在向低功耗、低电压、高速度和高集成度方向迅猛发展。因此,在电子信息、通信、自动化以及计算机工程领域,数字电路与逻辑设计是一门发展迅速、应用广泛的理论和技术。

1.2 数 制

数字信号通常以数码形式给出,不同的数码可以用来表示数量的大小。在用数码表示数量大小时,有时仅仅用一位数是不够的,经常需要采用多位数。多位数码中每一位的构成和低位向高位的进位规则称为数制或进位计数制。在日常生活中,最常用的进位计数制是十进制。而在数字电路中通常采用二进制数,有时也采用八进制数和十六进制数。

1. 十进制数

在十进制数中,共有0、1、2、…、9十个不同的数码。进位规则是“逢十进一”。各个数码处于十进

制数的不同位置时,所代表的数值是不同的。例如十进制数 1961 可写成展开式为

$$(1961)_{10} = 1 \times 10^3 + 9 \times 10^2 + 6 \times 10^1 + 1 \times 10^0$$

其中,10 称为基数, 10^0 、 10^1 、 10^2 、 10^3 称为各位数的“权”。十进制数个位的权为 1,十位的权为 10,百位的权为 100。任意一个十进制数可表示为

$$\begin{aligned} (N)_{10} &= d_{n-1} \times 10^{n-1} + d_{n-2} \times 10^{n-2} + \cdots + d_1 \times 10^1 + d_0 \times 10^0 + d_{-1} \times 10^{-1} \\ &\quad + \cdots + d_{-m} \times 10^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} d_i \times 10^i \end{aligned}$$

式中; m 、 n 为正整数; n 表示整数部分数位; m 表示小数部分数位; d_i 为各位数的数码; 10^i 为各位数的权;所对应的数值为 $d_i \times 10^i$ 。

2. 二进制数

在二进制数中,共有 0、1 两个不同的数码。进位规则是“逢二进一”。任意一个二进制数的展开式为

$$\begin{aligned} (N)_2 &= b_{n-1} \times 2^{n-1} + b_{n-2} \times 2^{n-2} + \cdots + b_1 \times 2^1 + b_0 \times 2^0 + b_{-1} \times 2^{-1} \\ &\quad + \cdots + b_{-m} \times 2^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} b_i \times 2^i \end{aligned}$$

式中;2 称为基数; m 、 n 为正整数; n 表示整数部分数位; m 表示小数部分数位; b_i 为各位数的数码; 2^i 为各位数的权;所对应的数值为 $b_i \times 2^i$ 。

例如二进制数 1011.01 可展开为

$$(1011.01)_2 = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2}$$

3. 十六进制

在十六进制数中,有 0~9, A~F 共 16 个不同的数码。进位规则是“逢十六进一”。任意一个十六进制数的展开式为

$$\begin{aligned} (N)_{16} &= h_{n-1} \times 16^{n-1} + h_{n-2} \times 16^{n-2} + \cdots + h_1 \times 16^1 + h_0 \times 16^0 + h_{-1} \times 16^{-1} \\ &\quad + \cdots + h_{-m} \times 16^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} h_i \times 16^i \end{aligned}$$

式中;16 称为基数; m 、 n 为正整数; n 表示整数部分数位; m 表示小数部分数位; h_i 为各位数的数码; 16^i 为各位数的权;所对应的数值为 $h_i \times 16^i$ 。

例如十六进制数 C3.8F 可展开为

$$(C3.8F)_{16} = 12 \times 16^1 + 3 \times 16^0 + 8 \times 16^{-1} + 15 \times 16^{-2}$$

上述表示方法可以推广到任意进制的计数制。在 R 进制中共有 R 个数码,基数为 R ,其各位数码的权是 R 的幂。因而一个 R 进制数可表示为

$$\begin{aligned} (N)_R &= a_{n-1} \times R^{n-1} + a_{n-2} \times R^{n-2} + \cdots + a_1 \times R^1 + a_0 \times R^0 + a_{-1} \times R^{-1} + \cdots + a_{-m} \times R^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \times R^i \end{aligned}$$

表 1-1 所列为不同的选定数在二进制、十进制以及十六进制中的对照关系。

表 1-1 不同进位计数制对照表

十进制	二进制	十六进制
0	0000	0
1	0001	1
2	0010	2
3	0011	3
4	0100	4
5	0101	5
6	0110	6
7	0111	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

1.3 数制转换

1. 二、十六进制数转换成十进制数

若将二进制数或十六进制数转换成等值的十进制数,只要将二进制数或十六进制数的每位数码乘以权,再按十进制运算规则求和,即可得到相应的十进制数。例如:

$$\begin{aligned}(1011.101)_2 &= 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} \\ &= (11.625)_{10}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(AC3.8)_{16} &= 10 \times 16^2 + 12 \times 16^1 + 3 \times 16^0 + 8 \times 16^{-1} \\ &= (2755.5)_{10}\end{aligned}$$

2. 二进制与十六进制数之间的转换

由于4位二进制数正好能表示1位十六进制数,因而可将4位二进制数看作一个整体。当二进制数转换为十六进制数时,以小数点为界,整数部分自右向左每4位一组,不足则前面补0,小数部分从左向右每4位一组,不足则后面补0,并代之以等值的十六进制数,即可得到相应的十六进制数。例如:

$$(1111110.11)_2 = \underbrace{0111}_{7} \underbrace{1110}_{E} \underbrace{.1100}_{C} = (7E.C)_{16}$$

当十六进制数转换为二进制数时,只需将十六进制数的每一位用等值的二进制数代替就可以了。例如:

$$(3A.2)_{16} = \underbrace{0011}_{3} \underbrace{11010}_{A} \underbrace{.0010}_{2} = (00111010.0010)_2$$

3. 十进制数转换成二进制数和十六进制数

将十进制数转换成二进制数和十六进制数,需将十进制数的整数部分和小数部分分别进行转换,然后将它们合并起来。

1) 整数的转换

整数转换采用“除基取余”法。先将十进制数不断除以将要转换进制的基数,再对每次得到的商除以要转换进制的基数,直至商为0。然后将各次余数按倒序列出,即第一次的余数为要转换进制整数的最低有效位,最后一次的余数为要转换进制整数的最高有效位,所得的数值即为等值要转换进制整数。

例 1-1 将十进制数 26 转换成二进制数。

解 由于二进制数基数为 2,所以逐次除以 2 取其余数。转换过程如下:

$$\begin{array}{r|l}
 2 & 26 \\
 \hline
 & 13 \quad \text{余}0 \\
 2 & 13 \\
 \hline
 & 6 \quad \text{余}1 \\
 2 & 6 \\
 \hline
 & 3 \quad \text{余}0 \\
 2 & 3 \\
 \hline
 & 1 \quad \text{余}1 \\
 2 & 1 \\
 \hline
 & 0 \quad \text{余}1
 \end{array}
 \quad \begin{array}{l}
 \uparrow \\
 \text{低位} \\
 \\ \\ \\ \\ \\
 \uparrow \\
 \text{高位}
 \end{array}$$

所以 $(26)_{10} = (11010)_2$

例 1-2 将十进制数 208 转换成十六进制数。

解 由于十六进制数基数为 16,所以逐次除以 16 取其余数。转换过程如下:

$$\begin{array}{r|l}
 16 & 208 \\
 \hline
 & 13 \quad \text{余}0 \\
 16 & 13 \\
 \hline
 & 0 \quad \text{余}13
 \end{array}$$

所以 $(208)_{10} = (D0)_{16}$

2) 小数部分的转换

小数部分的转换采用“乘基取整”法。先将十进制小数不断乘以将要转换进制的基数,积的整数作为相应的要转换进制小数,再对积的小数部分乘以要转换进制的基数,直至小数部分为 0,或达到一定精度为止。第一次积的整数为要转换进制小数的最高有效位,最后一次积的整数为要转换进制小数的最低有效位,所得的数值即为等值要转换进制小数。

例 1-3 将十进制数 0.625 转换成二进制数。

解 由于二进制数基数为 2,所以逐次用 2 乘以小数部分。转换过程如下:

$$\begin{aligned}
 0.625 \times 2 &= 1.250 & b_{-1} &= 1 \\
 0.250 \times 2 &= 0.500 & b_{-2} &= 0 \\
 0.500 \times 2 &= 1.000 & b_{-3} &= 1
 \end{aligned}$$

所以 $(0.625)_{10} = (0.101)_2$

例 1-4 将十进制数 0.39 转换成二进制数,要求精度达到 0.1%。

解 由于要求精度达到 0.1%,所以需要精确到二进制小数 10 位,即 $1/2^{10} = 1/1024$ 。转换过程如下:

$$\begin{aligned}
 0.39 \times 2 &= 0.78 & b_{-1} &= 0 & 0.24 \times 2 &= 0.48 & b_{-5} &= 0 & 0.84 \times 2 &= 1.68 & b_{-9} &= 1 \\
 0.78 \times 2 &= 1.56 & b_{-2} &= 1 & 0.48 \times 2 &= 0.96 & b_{-6} &= 0 & 0.68 \times 2 &= 1.36 & b_{-10} &= 1 \\
 0.56 \times 2 &= 1.12 & b_{-3} &= 1 & 0.96 \times 2 &= 1.92 & b_{-7} &= 1 & & & & \\
 0.12 \times 2 &= 0.24 & b_{-4} &= 0 & 0.92 \times 2 &= 1.84 & b_{-8} &= 1 & & & &
 \end{aligned}$$

所以 $(0.39)_{10} = (0.0110001111)_2$

例 1-5 将十进制数 26.625 转换成二进制数。

解 按例 1-1 和例 1-3 分别转换,并将结果合并,得

$$(26.625)_{10} = (11010.101)_2$$

例 1-6 将十进制小数 0.625 转换成十六进制数。

解 由于十六进制数基数为 16,所以逐次用 16 乘以小数部分。转换过程如下:

$$0.625 \times 16 = 10.0 \quad a_{-1} = A$$

所以 $(0.625)_{10} = (0.A)_{16}$

1.4 编 码

在数字系统中,常用数码表示不同的事物或状态,这一过程称为编码。此时数码已没有表示数量大小的含义,只是表示不同事物的代号,这些数码称为代码。编码所遵循的规则称为码制。

1.4.1 二-十进制代码

二-十进制代码(Binary Coded Decimal,BCD)是用 4 位二进制数表示 1 位十进制数码。由于 1 位十进制数共有 0~9 十个数码,因此至少需要 4 位二进制数码才能表示 1 位十进制数。4 位二进制数码共有 16 种组合(0000~1111),究竟取哪 10 个以及如何与十进制数的 0~9 对应则有多种方案。表 1-2 所列为常见的 BCD 代码,它们的编码规则各不相同。

8421BCD 码是 BCD 代码中最常用的一种。在这种编码方式中,代码从左到右每一位的 1 分别表示 8、4、2、1,所以将这种代码称为 8421 码。8421 码中每一位的权是固定不变的,分别为 8、4、2、1,它属于恒权代码。由于 8421 码的各位数的权是按基数 2 的幂增加的,这和二进制数的权一致,所以有时也称 8421BCD 码为自然权码。

余 3 码的编码规则是在 8421 码加 3 后得到的,是一种无权码。由表 1-2 可以看出,0 和 9、1 和 8、2 和 7、3 和 6、4 和 5 的余 3 码互为反码。

2421 码是一种恒权代码,其中 0 和 9、1 和 8、2 和 7、3 和 6、4 和 5 也互为反码。

表 1-2 常见的 BCD 代码

十进制数码	8421	2421	余 3 码	5211
0	0000	0000	0011	0000
1	0001	0001	0100	0001
2	0010	0010	0101	0100
3	0011	0011	0110	0101
4	0100	0100	0111	0111
5	0101	1011	1000	1000
6	0110	1100	1001	1001
7	0111	1101	1010	1100
8	1000	1110	1011	1101
9	1001	1111	1100	1111

续表

没有用到的码			
1010	0101	0000	0010
1011	0110	0001	0011
1100	0111	0010	0110
1101	1000	1101	1010
1110	1001	1110	1011
1111	1010	1111	1110

5211 码是另一种恒权代码,代码从左到右每一位的 1 分别表示 5、2、1、1,所以将这种代码称为 5211 码。

1.4.2 格雷码

格雷码又称为循环码,其构成方法为每一位的状态变化都按一定的顺序循环,如表 1-3 所列。4 位格雷码如果从 0000 开始,最右边一位的状态按 0110 顺序循环变化,右边第二位的状态按 00111100 顺序循环变化,右边第三位按 000011111110000 顺序循环变化。由此可见,自右向左每一位状态循环中连续的 0 和 1 的数目增加一倍。

表 1-3 4 位格雷码与二进制代码的比较

十进制	二进制代码	格雷码
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

与普通的二进制代码相比,格雷码的最大优点是当它按照表 1-3 的编码顺序依次变化时,相邻两个代码之间只有一位发生了变化,这一点非常有用。例如与十进制数 7 和 8 等值的自然二进制码分别为 0111 和 1000。在数字系统中,当由 0111 变为 1000 时,4 个码位都有变化。实际应用中每个码位的变化有先有后,假设是由高位到低位依次变化,则会出现 0111→1111→1011→1001→1000 的变化过程。这种瞬变过程有时会影响系统的正常工作。而对应的格雷码由 0100→1100 时,只有一位发生了变化,不会出现上述瞬变过程,从而提高了系统的抗干扰性能和可靠性,也有助于提高系统的工作速度。

1.4.3 美国信息交换标准代码

美国信息交换标准代码(American Standard Code for Information Interchange, ASCII)是由美国国家标准协会制定的一种代码,目前已被国际标准化组织(International Organization for Standards,

ISO)选定作为一种国际通用的代码,广泛地用于通信和计算机中。

ASCII码是7位二进制代码,一共有128个。分别用于表示数字0~9,大、小写英文字母,若干常用的符号和控制命令代码,如表1-4所列。各种控制命令码的含义如表1-5所列。

此外,还可以根据不同的要求编制出具有不同特点的代码。

表1-4 美国信息交换标准代码(ASCII码)

$b_4b_3b_2b_1$	$b_7b_6b_5$							
	000	001	010	011	100	101	110	111
0000	NUL	DLE	SP	0	@	P	,	P
0001	SOH	DC1	!	1	A	Q	a	q
0010	STX	DC2	"	2	B	R	b	r
0011	ETX	DC3	#	3	C	S	c	s
0100	EOT	DC4	\$	4	D	T	d	t
0101	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u
0110	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v
0111	BEL	ETB	'	7	G	W	g	w
1000	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
1001	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
1010	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z
1011	VT	ESC	+	;	K	[	k	|
1100	FF	FS	,	<	L	\	l	|
1101	CR	GS	-	=	M	]	m	|
1110	SO	RS	.	>	N	^	n	~
1111	SI	US	/	?	O	-	o	DEL

表1-5 ASCII码中控制码的含义

代码	含 义	
NUL	Null	空白,无效
SOH	Start of heading	标题开始
STX	Strart of text	正文开始
ETX	End of text	文本结束
EOT	End of transmission	传输结束
ENQ	Enquiry	询问
ACK	Acknowledge	承认
BEL	Bell	报警
BS	Backspace	退格
HT	Horizontal tab	横向制表
LF	Line feed	换行
VT	Vertical tab	垂直制表

续表

代码	含 义	
FF	Form feed	换页
CR	Carriage return	回车
SO	Shift out	移出
SI	Shift in	移入
DLE	Data link escape	数据通信换码
DC1	Device control 1	设备控制 1
DC2	Device control 2	设备控制 2
DC3	Device control 3	设备控制 3
DC4	Device control 4	设备控制 4
NAK	Negative acknowledge	否定
SYN	Synchronous idle	空转同步
ETB	End of transmission block	信息块传输结束
CAN	Cancel	作废
EM	End of medium	媒体用毕
SUB	Substitute	代替, 置换
ESC	Escape	扩展
FS	File separator	文件分隔
GS	Group separator	组分隔
RS	Record separator	记录分隔
US	Unit separator	单元分隔
SP	Space	空格
DEL	Delete	删除

1.4.4 二进制原码、反码和补码

在通常的算术运算中,用“+”号表示正数,用“-”号表示负数。但在数字系统中,正、负数的表示方法为:将一个数的最高位作为符号位,用“0”表示“+”;用“1”表示“-”;常用的二进制数表示方法有原码、反码和补码。

1. 原码表示法

用附加的符号位表示数的正负,符号位加在绝对值最高位之前(最左侧)。通常用“0”表示正数,用“1”表示负数。该表示方法称为二进制的原码表示法。

例如十进制数 +25 和 -25 的原码分别表示为

十进制数	+25	-25
二进制原码	011001	111001
	↑	↑
	符号位	符号位

十进制小数 +53.625 和 -53.625 的原码分别表示为

十进制数	+53.625	-53.625
二进制原码	0110101.101	1110101.101
	↑	↑
	符号位	符号位

原码表示法虽然简单易懂,但在数字系统中运算并不方便。如果以原码方式进行两个不同符号数的减法运算,则必须先判别两个数的大小,然后从大数中减去小数。最后,还要判别结果的符号位,因此增加了运算时间。实际上,在数字系统中更为适合的方法是采用补码表示法,而补码可以由反码获得。

2. 反码表示法

反码的符号位表示法与原码相同,即用“0”表示正数,用“1”表示负数。与原码表示法不同的是数值部分,即正数的反码数值与原码数值相同,负数的反码数值是原码数值按位求反。

例 1-7 用4位二进制数表示十进制数+6和-6的反码。

解 先求十进制数所对应的原码,然后再将原码转换成反码。

十进制数	+6	-6
二进制原码	0110	1110
二进制反码	0110	1001
	↑	↑
	符号位	符号位

即 $[+6]_{\text{反}} = 0110$, $[-6]_{\text{反}} = 1001$ 。

3. 补码表示法

在补码表示法中,正数的补码和原码以及反码的表示相同。但对于负数,由原码转换到补码的规则为:符号位保持不变,数值部分则是按位求反,然后加1,即“求反加1”。

例 1-8 用4位二进制数表示十进制数+6和-6的补码。

解 先求十进制数所对应的原码,然后再将原码转换成反码,最后将反码加1转换为补码。

十进制数	+6	-6
二进制原码	0110	1110
二进制反码	0110	1001
二进制补码	0110	$1001 + 1 = 1010$
	↑	↑
	符号位	符号位

即 $[+6]_{\text{补}} = 0110$, $[-6]_{\text{补}} = 1010$ 。

本章小结

本章介绍了数制和码制的基本概念、常用的计数进位制及其相互转换、几种常见的标准代码。其中8421BCD码是需要重点掌握的。在数字系统中,常用的二进制数表示方法有原码、反码和补码。

习 题

1-1 将下列二进制数转换成十进制数。

- (1) 101101 (2) 11011101 (3) 0.11 (4) 1010101.0011

1-2 将下列十进制数转换成二进制数(小数部分取4位有效数字)。

- (1) 37 (2) 0.75 (3) 12.34 (4) 19.65

1-3 将下列二进制数转换成十六进制数。

- (1) 0011 (2) 10101111 (3) 1001.0101 (4) 101010.001101

1-4 将下列十六进制数转换成二进制数。

- (1) 2A (2) 123 (3) 7F.FF (4) 432.B7

1-5 将下列十进制数转换成十六进制数(小数部分取一位有效数字)。

- (1) 43 (2) 36.8 (3) 6.73 (4) 174.5

1-6 将下列十六进制数转换成十进制数。

- (1) 56 (2) 4F.12 (3) 2B.C1 (4) AB.CD

1-7 完成下列各数的转换。

(1) $(24.36)_{10} = (\quad)_{8421 \text{ BCD}}$

(2) $(64.27)_{10} = (\quad)_{\text{余}3 \text{ BCD}}$

(3) $(11011010)_{8421 \text{ BCD}} = (\quad)_{10}$

(4) $(10110011.1011)_{2421 \text{ BCD}} = (\quad)_{10}$

1-8 写出下列带符号位二进制数所表示的十进制数。

- (1) 0101 (2) 1011 (3) 10101 (4) 11100

1-9 试写出下列十进制数的二进制原码、反码和补码(码长为8)。

- (1) +37 (2) -102 (3) +10.5 (4) -38