

数字电子技术基础

主 编 夏路易

副主编 高文华 田建艳 刘振宇



科学出版社

数字电子技术基础

夏路易 主 编
高文华 田建艳 刘振宇 副主编



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书内容包括数制与编码、逻辑代数、逻辑门电路、组合电路、触发器、时序电路、存储器、可编程逻辑器件、Verilog 语言、脉冲整形与产生、数模与模数转换器、数字外围电路与 QUARTUS II 软件的使用,并给出数十个数字电路大型作业题。本书还介绍多种数字元器件的技术参数、数字电路逻辑设计与直接设计方法,给出大量丰富的例题与习题,目的是使读者具有分析、设计与实现数字电路的能力。

本书可作为电子信息类、电气信息类、仪器仪表类各专业的教材,也可供其他相关工科专业使用,还可作为电子工程师、电子技术爱好者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术基础 / 夏路易主编. —北京: 科学出版社, 2012. 8

ISBN 978-7-03-035275-0

I. ①数… II. ①夏… III. ①数字电路—电子技术—高等学校—教材
IV. ①TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 179203 号

责任编辑:刘鹏飞 张丽花 / 责任校对:林青梅
责任印制:闫 磊 / 封面设计:迷底书装

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>

化学工业出版社印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012 年 8 月第一次印刷 印张:24

字数:626 000

定价:46.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书内容丰富、通俗易懂、保证基础、立足应用的特点,根据教学情况对书中的内容适当取舍,使教材日臻完善,满足教学需要。

数字电子技术的教学目的有三个,其一是学习数字电路基本工作原理;其二是学会阅读数字元器件数据手册;其三是读懂数字电路图。本书围绕这三个方面编写,除像其他教材一样介绍数字电路基本原理外,还给出很多数字元器件技术参数及大量的数字电路实例,其目的是有意识地引导读者学习元器件技术参数,而给出大量数字电路实例的目的是使读者练习读懂数字电路图。

本书特点如下:

(1)在保留现有数字电路基本内容的基础上,突出介绍元器件功能与技术参数,使读者具有阅读元器件技术参数与数字电路图的能力。

(2)引入组合电路与时序电路的逻辑设计与直接设计概念,给出设计步骤。

(3)介绍基于 Verilog HDL 的硬件描述方法与 QUARTUS II 软件的使用方法,使读者能够掌握先进技术分析、设计组合、时序电路与数字系统。

(4)书中有很多单片机硬件相关的内容与例子,目的是为读者学习嵌入式系统做技术准备。

(5)附录给出数十个实际控制器设计的大型题目,不仅可以作为课后作业,而且可以作为课程设计题目。

本书适合作为电类各专业的数字电子技术课程教材,先修课程为电路基础,后续课程为微机原理、嵌入式系统(单片机)等课程。

在使用本书时,建议在讲第4章组合逻辑电路时,介绍 QUARTUS II 软件,以使學生可以随时通过软件仿真学习所讲授内容。若是有课程设计,也可以把第8章(可编程逻辑器件工作原理)与第9章(Verilog HDL)放在课程设计课中讲授。书中标有星号的内容可以根据课时数选用。

参加本书编写工作的有:太原理工大学田建艳(第4章)、石栋华(第2章)、曲兵妮(第5章)、郝晓丽(第9章);太原科技大学高文华(第6章)、董增寿(第12章)、任青莲(第1章)、曹俊琴(第11章);山西农业大学李利峰(第7章)、刘振宇(第8章)、郭海霞(第3章)、刘琪芳(第10章),其余章节与附录由夏路易编写。夏路易任主编,负责全书的组织、修改与定稿;高文华、田建艳与刘振宇任副主编,协助主编工作。

中北大学毕满清教授不辞辛劳,认真地审阅了书稿,并提出许多宝贵意见,在此表示感谢。

本书在成书过程中参考了许多专家的教材、著作与论文,在此一并表示感谢。

由于编者能力有限,本书虽经修改,但难免还有错漏之处,恳请同行与读者批评指正,在此表示感谢。

主编电子邮箱:yiluxia@yahoo.com.cn。

编 者

于太原理工大学

目 录

前 言

第 1 章 数制转换与编码	1
1.1 二进制数	1
1.1.1 为什么使用二进制数	1
1.1.2 二进制数的组成、转换与算术运算	2
1.2 常用的编码	6
小结	7
思考题	8
习题	8
第 2 章 逻辑门与逻辑代数基础	9
2.1 逻辑描述	9
2.2 基本逻辑门功能概述	9
2.3 逻辑代数基本定律与公式	15
2.3.1 基本定律	15
2.3.2 基本公式	16
2.3.3 基本定理	18
2.4 标准逻辑函数式	21
2.5 代数法化简函数式	22
2.6 卡诺图	24
2.6.1 画卡诺图	24
2.6.2 用卡诺图化简“与-或”函数式	26
2.6.3 具有无关项的逻辑函数化简	28
2.7 逻辑电路图、函数式与真值表之间的转换	29
2.8 与非门和或非门	32
小结	33
思考题	33
习题	33
第 3 章 门电路	36
3.1 数字逻辑信号	36
3.2 CMOS 门电路	36
3.2.1 MOS 晶体管	36
3.2.2 基本 CMOS 非门	37
3.2.3 CMOS 与非门和或非门	38
3.3 74HC 系列门电路的电特性	39
3.3.1 74HC 系列门电路的极限电参数	39
3.3.2 74HC 系列门电路的推荐工作条件	40

3.3.3	74HC 系列门电路的静态电特性	41
3.3.4	74HC 系列门电路的动态特性	46
3.4	其他类型的 CMOS 电路	48
3.5	常用的 CMOS 门电路系列	53
* 3.6	低电压 CMOS 器件	55
3.7	分立元件门电路	57
3.7.1	二极管与二极管逻辑门	57
3.7.2	双极性三极管	58
3.7.3	三极管非门	59
3.8	标准 TTL 门电路	60
3.9	74LS 系列门电路	63
3.9.1	74LS 系列门电路基本工作原理	63
3.9.2	74LS 系列门电路电特性	66
3.10	常用的 74TTL 系列门电路	70
3.11	在数字电路设计中使用不同系列的芯片	71
3.12	正确使用门电路	73
3.13	数字电路的封装	75
小结	.....	76
思考题	.....	76
习题	.....	77
第 4 章	组合逻辑电路	81
4.1	组合逻辑电路的一般问题	81
4.2	组合电路分析	81
4.2.1	组合电路的逻辑功能分析	81
4.2.2	组合电路的波形分析	82
4.2.3	组合电路的延迟时间分析	83
4.2.4	组合电路的电特性分析	85
4.3	组合电路部件	87
4.3.1	编码器	87
4.3.2	译码器	90
4.3.3	数据选择器	96
4.3.4	数值比较器	99
4.3.5	加法器	101
* 4.3.6	奇偶校验电路	104
4.4	组合电路设计	105
4.4.1	组合电路的逻辑设计法	105
4.4.2	组合电路的直接设计法	109
4.5	组合电路的竞争与冒险	113
4.5.1	竞争-冒险现象	113
4.5.2	竞争-冒险现象的消除	114
小结	.....	115

思考题	115
习题	115
第 5 章 锁存器与触发器	119
5.1 概述	119
5.2 锁存器	119
5.2.1 由三极管组成的 SR 双稳态电路	119
5.2.2 由或非门组成的 SR 锁存器	121
5.2.3 由与非门组成的 SR 锁存器	122
5.3 SR 触发器	123
5.4 D 触发器	125
5.4.1 电平触发 D 触发器	125
5.4.2 边沿触发的维阻结构 D 触发器	126
* 5.4.3 基于 CMOS 传输门的 D 触发器	128
5.4.4 D 触发器的特性方程与状态图	129
5.5 JK 触发器	129
5.5.1 脉冲触发 JK 触发器	129
5.5.2 边沿触发 JK 触发器	131
5.5.3 JK 触发器的特性方程与状态图	133
5.6 T 触发器	134
5.7 触发器的电特性	134
5.7.1 74LS74 的电特性	134
5.7.2 74HC74 的电特性	136
5.8 锁存器与触发器电路分析	139
5.9 锁存器与触发器的应用	142
小结	146
思考题	146
习题	147
第 6 章 时序电路分析与设计	152
6.1 概述	152
6.1.1 时序电路的组成	152
6.1.2 时序电路中的基本概念	153
6.1.3 描述时序电路的逻辑工具	153
6.2 同步时序电路的逻辑分析步骤与举例	154
6.3 寄存器	157
6.3.1 寄存器	157
6.3.2 移位寄存器	159
6.4 计数器	166
6.4.1 异步计数器	167
6.4.2 同步计数器	172
6.4.3 使用集成计数器构成任意进制计数器	177
6.4.4 移位寄存器型计数器	180

6.4.5	计数器应用	183
6.5	同步时序电路逻辑设计	187
6.5.1	设计步骤	187
6.5.2	设计举例	188
6.6	时序电路直接设计	196
* 6.7	数字系统设计	199
6.7.1	数字系统的概念	199
6.7.2	数字系统的组成	200
6.7.3	数字系统设计实例	200
小结	.....	211
思考题	.....	211
习题	.....	212
第7章	存储器	218
7.1	只读存储器	218
7.1.1	只读存储器概述	218
7.1.2	不可写入数据的 ROM	219
7.1.3	可写入数据的 ROM	221
7.1.4	并行接口 EPROM 存储器 27256	226
7.1.5	二极管 ROM 实现数字电路	227
7.2	随机存储器	230
7.2.1	静态随机存储器	231
* 7.2.2	动态随机存储器	234
7.3	存储器扩展	235
7.3.1	位扩展	235
7.3.2	字容量扩展	235
7.4	存储器使用举例	236
* 7.5	单片机中的存储器	238
7.5.1	51 单片机的程序存储器	238
7.5.2	51 单片机的数据存储器	238
小结	.....	239
思考题	.....	239
习题	.....	240
第8章	可编程逻辑器件工作原理	241
8.1	现场可编程门阵列	241
8.1.1	现场可编程门阵列的工作原理	241
8.1.2	实际应用的可编程门阵列器件	242
8.2	复杂可编程逻辑器件	249
8.2.1	复杂可编程逻辑器件的工作原理	249
8.2.2	实际的复杂可编程逻辑器件	250
* 8.3	其他可编程逻辑器件介绍	254
8.4	可编程逻辑器件的配置与编程	255

* 8.5 Cyclone 器件最小系统电路	258
* 8.6 MAX II 器件最小系统电路	259
小结	261
思考题	261
习题	261
第 9 章 Verilog HDL	262
9.1 Verilog HDL 基础	262
9.1.1 Verilog HDL 中的基本约定	262
9.1.2 数据类型	263
9.1.3 运算符	265
9.2 Verilog HDL 中的描述	267
9.3 Verilog HDL 中的分支语句	270
9.4 Verilog HDL 中的结构描述	271
9.5 Verilog HDL 描述组合逻辑电路	271
9.6 Verilog HDL 描述时序电路	272
9.7 Verilog HDL 描述状态机	274
9.8 一些 Verilog HDL 描述数字电路的例子	283
小结	288
思考题	288
习题	288
第 10 章 脉冲整形与产生电路	290
10.1 施密特触发器	290
10.1.1 由门电路组成的施密特触发器	290
10.1.2 施密特触发器的应用	292
10.2 单稳态触发器	293
10.2.1 由门电路组成的单稳态触发器	293
* 10.2.2 集成单稳态触发器 74121	297
10.3 多谐振荡器	298
10.3.1 门电路组成的多谐振荡器	298
10.3.2 施密特型多谐振荡器	300
10.3.3 石英晶体振荡器	301
10.4 定时器 555 及其应用	303
10.4.1 定时器 555 的基本工作原理	303
10.4.2 定时器 555 组成施密特触发器	304
10.4.3 定时器 555 组成单稳态触发器	305
10.4.4 定时器 555 组成多谐振荡器	305
10.5 应用电路举例	306
小结	310
思考题	310
习题	310

第 11 章 数模与模数转换器	312
11.1 数模转换器	312
11.1.1 权电阻 D/A 转换器	313
* 11.1.2 输出电压型 $R/2R$ 电阻网络 D/A 转换器	314
11.1.3 输出电流型 $R/2R$ 电阻网络 D/A 转换器	316
* 11.1.4 电阻串型 D/A 转换器	317
11.1.5 D/A 转换器的技术指标	318
11.2 模数转换器	321
11.2.1 并行 A/D 转换器	321
* 11.2.2 流水线型 A/D 转换器	322
11.2.3 双斜率 A/D 转换器	323
* 11.2.4 Δ - Σ 型 A/D 转换器	325
11.2.5 逐次比较式 A/D 转换器	327
11.2.6 A/D 转换器的技术指标	328
小结	329
思考题	330
习题	330
*第 12 章 数字外围电路	333
12.1 常用的开关量输入电路	333
12.1.1 按键电路	333
12.1.2 光耦隔离输入电路	336
12.2 LED 显示电路	339
12.3 数字驱动电路	341
12.3.1 采用三极管或场效应管驱动继电器	341
* 12.3.2 其他数字输出接口电路	344
12.4 常用的数字实验电路	347
小结	348
思考题	348
习题	349
*第 13 章 学习使用 QUARTUS II 软件	350
13.1 图形输入法设计数字电路	350
13.2 Verilog HDL 输入法	358
13.3 Verilog HDL 设计数字系统	360
附录 数字电路大型作业与数字电子产品开发	364
F.1 大作业题目	364
F.2 大作业论文的写作	369
参考文献	372

第 1 章 数制转换与编码

本章介绍二进制数的基本概念、不同数制之间的转换、二进制数运算与补码,以及常用的编码。

1.1 二进制数

1.1.1 为什么使用二进制数

日常使用的十进制数中任何一位数需要 10 个状态才能表示,因此用电的方法表示非常困难。例如,用电压表示十进制数,需要 10 个电压值,常用如图 1-1 所示的简单分压电路实现。所以,为获得表示任何数字的电压值,单刀开关须动作多次。

同样,实现 1 位二进制信号简单得多,若用两个分离的电压值(又称逻辑电平)表示二进制数,例如,实现 1 位二进制信号,可以用如图 1-2 所示的开关电路实现,开关闭合时,输出电压 0 V 表示二进制数字 0;开关断开时,输出电压 5 V 表示二进制数字 1,所以实现二进制数的开关动作简单得多,因此二进制数很容易用开关电路实现。

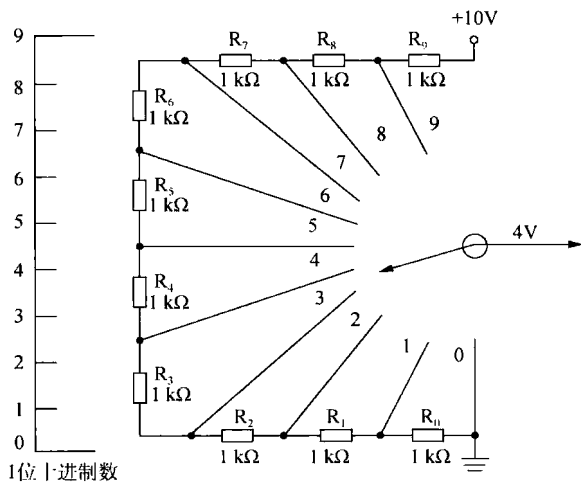


图 1-1 电阻分压电路实现 1 位十进制数

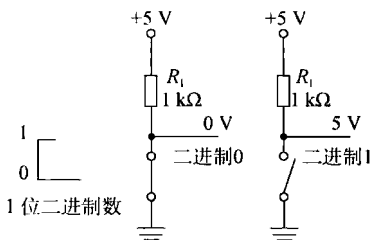


图 1-2 开关实现 1 位二进制数

在实际中具有开关功能的电子器件很多,如图 1-3 所示,继电器可以实现二进制数,二极管、晶体管等都可作为开关组成电路实现二进制数。如图 1-3(a)所示,继电器在线圈输入端无电压时,线圈 b 无电,触点 a 在弹簧 c 的作用下断开;当线圈输入端有电压时,继电器线圈 b 通电,在线圈 b 电磁吸力的作用下,触点 a 闭合。因此继电器是一个电压控制的开关。

图 1-3(b)是二极管作为开关的电路图,当二极管输入电压为 0 V 时,输出被钳位在 0.7 V;当二极管输入电压为 3 V 时,输出被钳位在 3.7 V,因此输入信号可以控制输出电平。

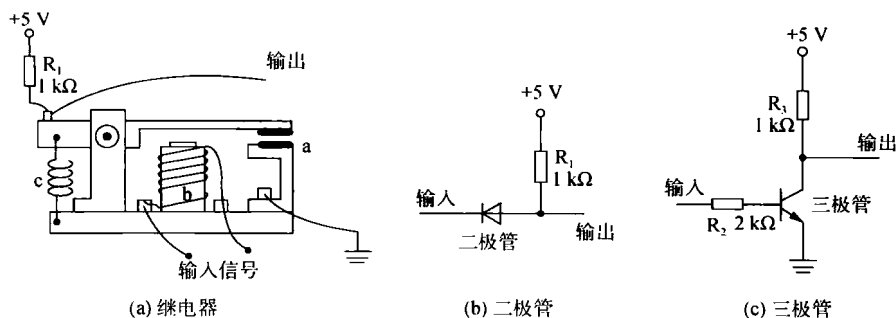


图 1-3 用于表示二进制数的开关元器件

图 1-3(c)是三极管开关电路图,当输入电压使三极管饱和时,输出电压近似为 0 V;当输入电压使三极管截止时,输出电压近似为 5 V。输入电压信号可以控制三极管开关的通断,控制输出电压的变化。

二进制数容易用电子元件实现,这是使用二进制数的主要原因。

1.1.2 二进制数的组成、转换与算术运算

1. 有权数

十进制数是有权数,数的位置不同,数具有的权不同,例如,对于十进制数 33,虽然两个数都是 3,但由于位置不同,所以右边的 3 代表 3,左边的 3 代表 30,所以 $33 = 3 \times 10^1 + 3$ 。对于有小数的十进制数,例如,123.4 可以表示为 $1 \times 10^2 + 2 \times 10^1 + 3 \times 10^0 + 4 \times 10^{-1}$ 。

十进制数的权结构可以表示为:

$$\dots 10^5 \ 10^4 \ 10^3 \ 10^2 \ 10^1 \ 10^0 \ 10^{-1} \ 10^{-2} \ 10^{-3} \dots$$

二进制数与十进制数一样也是有权数,其权结构可以表示为:

$$2^{n-1} \dots 2^5 \ 2^4 \ 2^3 \ 2^2 \ 2^1 \ 2^0 \ 2^{-1} \ 2^{-2} \ 2^{-3} \dots 2^{-n}$$

二进制权重如表 1-1 所示。

表 1-1 二进制权重

2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0	2^{-1}	2^{-2}	2^{-3}	2^{-4}	2^{-5}
256	128	64	32	16	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.0625	0.03125
									1/2	1/4	1/8	1/16	1/32

2. 二进制数转十进制数

将各位二进制数乘以相应的权后相加就可以转成十进制数。例如,将 1101101 转成十进制数的过程如下:

$$\begin{aligned}
 &1 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 0 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 \\
 &= 1 \times 64 + 1 \times 32 + 0 \times 16 + 1 \times 8 + 1 \times 4 + 0 \times 2 + 1 \times 1 \\
 &= 64 + 32 + 8 + 4 + 1 = 109
 \end{aligned}$$

3. 十进制整数转二进制数

常用的十进制整数转二进制数方法是重复除 2 法:将十进制数除以 2,余数则为二进制数低位,得到的商继续除以 2;得到的余数为次低位,得到的商再次除以 2;不断重复该过程,直到商为 0;最后得到的余数 1 为最高位。

例如, $45_{(10)} = 101101_{(2)}$, $173_{(10)} = 10101101_{(2)}$ 。其中, MSB 表示高位, LSB 表示低位。

余数				余数			
2	45	=1	LSB	2	173	=1	LSB
2	22	=0		2	86	=0	
2	11	=1		2	43	=1	
2	5	=1		2	21	=1	
2	2	=0		2	10	=0	
2	1	=1	MSB	2	5	=1	
	0			2	2	=0	
				2	1	=1	MSB
					0		

4. 十进制小数转二进制数

常用的十进制小数转二进制数方法是重复乘 2 法: 将小数部分乘以 2, 积的整数部分是最高位; 积的小数部分继续乘以 2, 积的整数部分是次高位; 积的小数部分继续乘以 2, 直到积的小数部分全为 0; 最后得到积的整数部分 1 是最低位。

例如, $0.3125_{(10)} = .0101_{(2)}$ 。

积的整数部分			
$0.3125 \times 2 = 0.625$	0	MSB	
$0.625 \times 2 = 1.25$	1		
$0.25 \times 2 = 0.50$	0		
$0.5 \times 2 = 1.00$	1	LSB	

5. 二进制数算术运算

二进制数可以表示数值, 也可以表示逻辑值。所以, 两个二进制数既可以实现算术运算, 也可以实现逻辑运算。二进制数的算术运算与十进制数运算规则相似, 只是逢 2 进 1, 借 1 相当于 2。

1) 加减法运算

例如, $1100_{(2)} + 1010_{(2)} = 10110_{(2)}$, $1100_{(2)} - 1010_{(2)} = 0010_{(2)}$ 。

0+0=0	1 1 0 0	0-0=0	1 1 0 0
0+1=1	+ 1 0 1 0	10-1=1	- 1 0 1 0
1+0=1	1 0 1 1 0	1-0=1	0 0 1 0
1+1=10		1-1=0	
加法		减法	

在实际应用中, 使用数字电路可以实现二进制数的加减法运算。

2) 乘法运算

二进制数乘法运算过程: 先将被乘数与乘数最低位形成部分积, 随后将被乘数与乘数次低位形成部分积, 直到所有乘数各位都与被乘数相乘形成部分积, 再将所有部分积相加。

例如, $1100_{(2)} \times 1001_{(2)} = 1101100_{(2)}$, 其运算式如下:

$$\begin{array}{r}
 1100 \\
 \times 1001 \\
 \hline
 1100 \\
 0000 \\
 0000 \\
 +1100 \\
 \hline
 1101100
 \end{array}$$

乘法运算实际上是被乘数按照乘数中 1 的位置左移形成部分积后相加实现, 乘数的最低位的位置为 0。在本例中, 由于乘数位置 0 为数 1, 则被乘数 1100 先左移 0 位, 形成第一个部分积

1100;然后由于乘数位置 3 为 1,则被乘数左移三位形成部分积 1100000,两个部分积相加,形成积为 1101100。

由上述规律可知,如果一个二进制数乘以一个 2 的整数幂,则可以由左移幂次实现,移出的空位补 0,例如, 110×2^1 之积可以直接将 110 左移 1 位实现,结果为 1100。

3) 除法运算

除法运算 是被除数或余数减去右移的除数。若余数大于等于 0,则商为 1,否则商为 0。

例如, $110_{(2)} \div 10_{(2)} = 11_{(2)}$ 。

首先是被除数 110 减去右移 0 位的除数,余数大于 0,所以商为 1;然后是余数减去右移 1 位的除数,余数等于 0,则商为 1。

由上述规律可知,如果一个二进制数除以一个 2 的整数幂,则可以由右移幂次实现,移出的空位补 0,例如, $110 \div 2^1$ 之商可以直接将 110 右移 1 位实现,结果为 11。

6. 反码与补码

1) 反码

反码是将一个二进制数中的 1 变为 0,0 变为 1。例如,二进制数 1010 的反码是 0101。

反码有时又称为 1 的补码,就是与该二进制数位数相等的全 1 二进制数($2^n - 1$, n 为二进制数的位数)的补码,或者一个二进制数与该二进制数 1 的补码相加,是与该二进制数相等位数的全 1 二进制数。

例如,1010 与 0101 相加等于 $1111(2^4 - 1)$,所以 0101 是 1010 的 1 的补码(反码)。

2) 2 的补码

反码加 1 称为 2 的补码,相当与二进制数位数相等的全 1 二进制数加 $1(2^n)$ 的补码,或者称为模为 2^n 的补码。

例如,1010 的反码是 0101, $0101 + 1 = 0110$ 是 2 的补码,因为 $1010 + 0110 = 10000(2^4)$ 。

一个二进制数的补码就是用模 2^n 减去这个二进制数。一个数与该数的补码之间是互补关系,而两个数互补,则说明是相同的数(只是表示方法不同),或者说是符号相反的另外一个数。因此在减法运算中,减一个数常用加一个数的补码代替。

7. 有符号数

有符号数可以表示为:符号+数值。一个二进制数的最高位在有符号数中是符号位,通常用 0 表示正数,1 表示负数,例如,+25 的 8 位有符号二进制数为 00011001,而 -25 的有符号的二进制数为 10011001。

有符号数也可以表示为:权重之和,即最高位等效为具有符号权重的十进制数。

若是将负数的符号位按照权重考虑为负数,其他权重为正数,则二进制数的权重之和是该数。取补运算可以改变该数的符号,例如,8 位有符号数中 00000100(+4)的补码为 11111100,由于最高位为 1,因此: $-128 + 64 + 32 + 16 + 8 + 4 = -4$;11101101(-19)的补码为 00010011,其权重之和为 $16 + 2 + 1 = 19$ 。

在有符号数系统中,正数的补码是该数本身,而负数的补码为该数取反码加 1。

1) 两个有符号数相加

两个有符号数相加分为 4 种情况,以下举例说明。

(1) 两数都是正数,如 $7 + 4 = 11$ 的情况:

$$\begin{array}{r} 00000111 \quad 7 \\ +00000100 \quad +4 \\ \hline 00001011 \quad 11 \end{array}$$

这时,和是正二进制数。

(2)正数大于负数,如 $15+(-6)=9$ 的情况:

$$\begin{array}{r} 00001111 \\ + 11111010 \\ \hline 1\ 00001001 \end{array} \quad \begin{array}{r} 15 \\ + -6 \\ \hline 9 \end{array}$$

在丢掉进位后,和是正二进制数。

(3)负数大于正数,如 $16+(-24)=-8$ 的情况:

$$\begin{array}{r} 00010000 \\ + 11101000 \\ \hline 11111000 \end{array} \quad \begin{array}{r} 16 \\ + -24 \\ \hline -8 \end{array}$$

和是负数,因此是 2 的补码。

(4)两数都是负数,如 $-5+(-9)=-14$ 的情况:

$$\begin{array}{r} 11111011 \\ + 11110111 \\ \hline 1\ 11110010 \end{array} \quad \begin{array}{r} -5 \\ + -9 \\ \hline -14 \end{array}$$

丢掉进位后,和是 2 的补码。

2)两个有符号数相减

两个有符号数减法运算步骤为:将减数取补码,然后被减数与减数相加,再丢掉进位,下面分 4 种情况举例说明。

(1) $8-3=8+(-3)=5$:

$$\begin{array}{r} 00001000 \\ + 11111101 \\ \hline 1\ 00000101 \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{被减数} 8 \\ -3 \text{的补码} \\ \hline \text{差为} 5 \end{array}$$

(2) $-25-(+19)=-25+(-19)=-44$:

$$\begin{array}{r} 11100111 \\ + 11101101 \\ \hline 1\ 11010100 \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{被减数 } (-25) \\ -19 \text{的补码} \\ \hline \text{差为} -44 \quad (-128+64+16+4=-44) \end{array}$$

(3) $-120-(-30)=-120+30=-90$:

$$\begin{array}{r} 10001000 \\ + 00011110 \\ \hline 10100110 \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{被减数 } (-120) \\ +30 \text{的补码} \\ \hline \text{差为} -90 \quad (-128+32+4+2=-90) \end{array}$$

(4) $12-(-9)=12+9=21$:

$$\begin{array}{r} 00001100 \\ + 00001001 \\ \hline 00010101 \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{被减数 } (+12) \\ +9 \text{的补码} \\ \hline \text{差为} +21 \quad (16+4+1=21) \end{array}$$

8. 十六进制数与二进制数之间的转换

1 位十六进制数与十进制数、二进制数之间的关系如表 1-2 所示。

将二进制数转换成十六进制数,只须将二进制数 4 位 1 组,按组转换成十六进制数。将十六进制数转换成二进制数,只须将每位十六进制数转换成对应的二进制数。例如, $10101110_{(2)} = \text{AE}_{(16)}$ 。

有时为区别十六进制数与十进制数,常在十六进制数前加 0x。例如, $10011100_{(2)} = 0\text{x}9\text{C}$ 。

表 1-2 十六进制数与十进制、二进制数之间的关系

十进制数	二进制数	十六进制数	十进制数	二进制数	十六进制数
0	0000	0	8	1000	8
1	0001	1	9	1001	9
2	0010	2	10	1010	A
3	0011	3	11	1011	B
4	0100	4	12	1100	C
5	0101	5	13	1101	D
6	0110	6	14	1110	E
7	0111	7	15	1111	F

1.2 常用的编码

1. 8421 码

8421 码又称为 BCD(Binary Coded Decimal)码,用 4 位二进制数表示 1 位十进制数,如表 1-3 所示。

表 1-3 BCD 码

十进制数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
BCD	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001

由于 4 位二进制数有 16 种组合,而 BCD 码只用其中的 10 种组合,因此还有 6 种组合没有使用。

2. 余三码

余三码也是一种用 4 位二进制数表示十进制的编码,是由 8421 码加 3 形成的一种编码,如表 1-4 所示。

表 1-4 余三码

十进制数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
余三码	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010	1011	1100

3. 格雷码

格雷码(Gray Code)又称为循环码,该编码如表 1-5 所示。

表 1-5 格雷码

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

从 0000 开始,该编码的特点是每一位都循环变化:

- (1)最右边一位的变化规律为 0110 0110 0110 0110;
- (2)右边第二位的变化规律为 0011 1100 0011 1100;

(3)右边第三位的变化规律为 0000 1111 1111 0000;

(4)最左边一位的变化规律为 0000 0000 1111 1111。

格雷码的主要优点是编码按照顺序变化时,相邻编码间只有一位发生变化,因此不会出现逻辑变量互补变化产生的噪声。

4. 美国信息交换标准代码(ASCII)

美国信息交换标准代码(American Standard Code)是由美国国家标准化协会(ANSI)指定的一种信息代码,广泛用于计算机与通信领域,ASCII 已经由国际标准化组织(ISO)认定为国际标准代码。

ASCII 码是用 7 位二进制数组成的编码,因此可以表示 128 个信息,其中包括十个数字 0~9、大小写英文字母、32 个符号和 34 个控制码。如表 1-6 所示是部分美国信息交换标准代码。

表 1-6 部分美国信息交换标准代码表

十六进制	ASCII 代码	十六进制	ASCII 代码	十六进制	ASCII 代码	十六进制	ASCII 代码
30	0	44	D	58	X	6C	l
31	1	45	E	59	Y	6D	m
32	2	46	F	5A	Z	6E	n
33	3	47	G	5B	[	6F	o
34	4	48	H	5C	"	70	p
35	5	49	I	5D	]	71	q
36	6	4A	J	5E	'	72	r
37	7	4B	K	5F	-	73	s
38	8	4C	L	60	`	74	t
39	9	4D	M	61	a	75	u
3A	:	4E	N	62	b	76	v
3B	;	4F	O	63	c	77	w
3C	<	50	P	64	d	78	x
3D	=	51	Q	65	e	79	y
3E	?	52	R	66	f	7A	z
3F	?	53	S	67	g	7B	DEL
40	@	54	T	68	h	7C	{
41	A	55	U	69	i	7D	|
42	B	56	V	6A	j	7E	}
43	C	57	W	6B	k	7F	~

小 结

本章内容主要为:

- (1)使用二进制数的原因。
- (2)二进制数的组成、基本运算,反码、补码与有符号数运算。
- (3)二进制数与十进制数、十六进制数之间的转换。
- (4)常用的 8421 码、余三码、格雷码与美国信息交换标准代码。