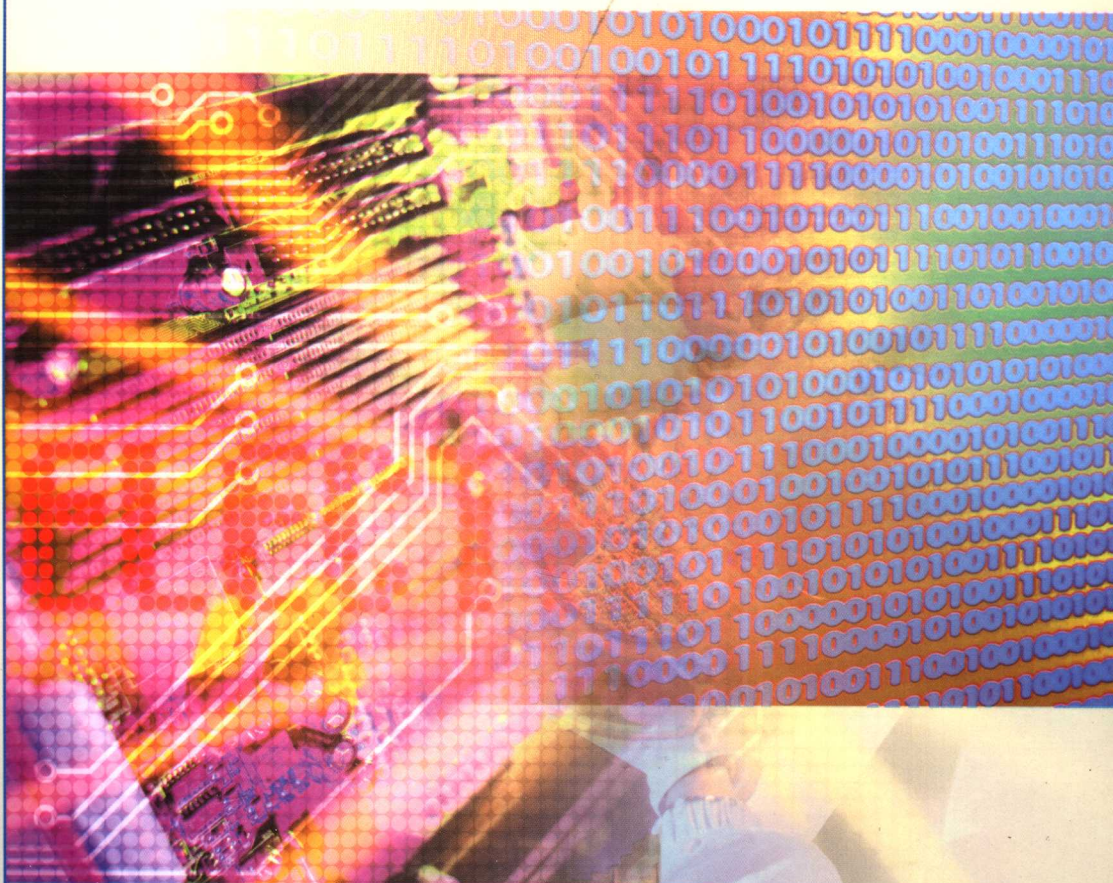


教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材

数字电子电路

路而红 主编



中央广播电视大学出版社

教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材

数字电子电路

路而红 主编

中央广播电视大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

数字电子电路 / 路而红主编. —北京: 中央广播电视大学出版社,
2004.12

教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材

ISBN 7 - 304 - 02913 - 7

I. 数… II. 路… 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 (2004) 第 127643 号

版权所有, 翻印必究。

教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材

数字电子电路

路而红 主编

出版·发行: 中央广播电视大学出版社

电话: 发行部: 010 - 68519502 总编室: 010 - 68182524

网址: <http://www.crtvup.com.cn>

地址: 北京市海淀区西四环中路 45 号

邮编: 100039

经销: 新华书店北京发行所

策划编辑: 何勇军

责任编辑: 安 红

印刷: 北京集惠印刷有限公司

印数: 0001~8000

版本: 2004 年 10 月第 1 版

2005 年 1 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 20.75 字数: 474 千字

书号: ISBN 7 - 304 - 02913 - 7/TP·233

定价: 27.00 元

(如有缺页或倒装, 本社负责退换)

内 容 简 介

为了适应电子技术发展的需要,2004年,中央电大重新修订了“数字电子电路课程教学大纲”。本书根据新教学大纲,同时满足高等工程专科电气、电子类专业对电子技术基础课程(数字电子电路)的要求,精选了教材内容,增加了新器件和新技术方面的内容,包括可编程逻辑器件的开发、VHDL对数字电路的描述等。为了方便读者学习,每章都给出了主要内容、学习目标及小结。另外对于特别重要的内容采取符号方式提醒读者,突出了重点内容和基本概念。

本书以逻辑代数为基础,以数字电路的分析与设计为目的,全面介绍了数字电路的基本理论、工作原理、分析与设计方法以及实际应用。全书共分11章,主要包括:逻辑代数基础、逻辑门电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路的分析与设计、常用时序逻辑电路、半导体存储器、可编程逻辑器件、脉冲电路、数模和模数转换器以及数字系统分析与设计。在附录部分,介绍了VHDL语言。

本书可作为高等工程专科电子信息类、电气信息类各专业的教科书,也可供其他相近学科工程技术人员参考。

前 言

本书根据中央电大 2004 年重新修订的“数字电子电路课程教学大纲”以及电子技术的发展编写，是高等工程专科电气、电子类专业电子技术基础课程（数字电子电路）的教材。

数字技术是目前发展最为迅速的技术之一，从计算机到通信、广播、电视、医疗仪器和航空航天，几乎所有领域都在应用数字技术。

随着数字技术的发展，数字集成电路经历了从分立元件、小规模、中规模、大规模到超大规模的发展，随着集成电路的密度不断提高，功能日益复杂，新型器件的相继诞生，相应的数字设计方法也在不断地演变和发展，传统的设计方法和手段已不能完全适应器件的发展。在编写的过程中，参考了阎石教授主编、中央广播电视大学出版社出版的《数字电子电路》以及国内外的优秀教材。

在教材体系上，将时序逻辑电路分为两章：时序逻辑电路的分析与设计、常用时序逻辑电路，既强调时序逻辑电路的分析与设计的一般规律，又不忽视时序逻辑电路集成芯片的应用；书中增加了可编程逻辑器件，主要讨论可编程逻辑器件的基本原理与开发应用，体现电子技术的发展，拓展设计电路的方法与手段；特别是在附录部分增加了 VHDL 语言，方便读者对硬件描述语言的学习与应用。

在教材内容上，适当减小了 TTL 器件和小规模集成电路设计的内容，增加了中大规模集成电路应用的比例，增加了 VHDL 的内容，并在相应的章节中，融入了典型电路的 VHDL 描述。

为了方便读者的学习，书中每章都给出了主要内容、学习目标、小结及习题。另外对于特别重要的内容以两种符号提醒读者，突出基本概念、重点和难点内容。书中采用的符号及其含义如表所示。

符号形式	符号含义
	小 结
	习 题
	易混淆的概念
	重要概念

本书由路而红任主编。书中的绪论、第1~3章由沈雅芬编写,第4~7章由冼立勤编写,第8~11章及附录由路而红编写。

清华大学刘宝琴教授、北京信息工程学院朱茂镒教授、北京工业大学张贺文副教授在百忙之中审阅了全书,并对本书的编写提出了宝贵的意见。在全书的编写过程中,我们还得到了清华大学华成英教授、中央电大任为民教授、谷良老师、宁晨老师和北京电大姚行洲老师的悉心指导,作者对他们的支持与合作表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,殷切希望读者批评指正。

作 者

2004年9月

目 录

绪 论	(1)
0.1 数字量与模拟量	(1)
0.2 数字电路及其特点	(1)
0.3 数字电路的分类	(2)
第 1 章 逻辑代数基础	(3)
1.1 数制与码制	(3)
1.2 基本逻辑运算	(8)
1.3 逻辑代数的基本定律与规则	(11)
1.4 逻辑代数的常用公式	(13)
1.5 逻辑函数的表示方法及其相互转换	(14)
1.6 逻辑函数的公式化简法	(17)
1.7 逻辑函数的卡诺图化简法	(19)
本章小结	(26)
习 题	(27)
第 2 章 逻辑门电路	(30)
2.1 数字集成电路的特点及分类	(30)
2.2 半导体器件的开关特性	(31)
2.3 TTL 门电路	(35)
2.4 其他类型的 TTL 门电路	(45)
2.5 CMOS 门电路	(46)
2.6 CMOS 与 TTL 门电路的比较	(51)
本章小结	(53)
习 题	(54)
第 3 章 组合逻辑电路	(58)
3.1 组合逻辑电路概述	(58)

2 数字电子电路	
3.2 常用组合逻辑电路	(62)
3.3 用中规模集成器件 (MSI) 构成组合电路的设计和分析	(85)
3.4 组合电路中的竞争冒险现象	(91)
本章小结	(94)
习 题	(95)
第4章 触 发 器	(99)
4.1 时序逻辑电路的特点	(99)
4.2 基本 RS 触发器	(100)
4.3 同步 RS 触发器	(107)
4.4 主从触发器	(110)
4.5 边沿触发器	(115)
4.6 动态特性	(119)
4.7 触发器的逻辑功能	(122)
本章小结	(128)
习 题	(128)
第5章 时序逻辑电路分析与设计	(132)
5.1 时序逻辑电路的分类	(132)
5.2 同步时序逻辑电路分析	(132)
5.3 同步时序逻辑电路设计	(139)
本章小结	(144)
习 题	(145)
第6章 常用时序逻辑电路	(147)
6.1 寄 存 器	(147)
6.2 计 数 器	(155)
6.3 序列信号发生器	(171)
本章小结	(176)
习 题	(176)
第7章 半导体存储器	(179)
7.1 只读存储器 (ROM)	(179)
7.2 随机存取存储器 (RAM)	(189)
本章小结	(196)

习 题	(197)
第 8 章 可编程逻辑器件	(198)
8.1 PLD 概 述	(199)
8.2 可编程阵列逻辑 PAL	(203)
8.3 通用阵列逻辑 GAL	(206)
8.4 复杂可编程逻辑器件 CPLD	(210)
8.5 现场可编程门阵列 FPGA	(214)
8.6 PLD 的应用开发	(215)
本章小结	(229)
习 题	(229)
第 9 章 脉冲电路	(232)
9.1 脉冲信号与脉冲电路	(232)
9.2 555 定时器	(233)
9.3 施密特触发器	(236)
9.4 单稳态触发器	(240)
9.5 多谐振荡器	(245)
本章小结	(249)
习 题	(249)
第 10 章 数模和模数转换器	(254)
10.1 数模转换器 (DAC)	(255)
10.2 模数转换器 (ADC)	(261)
10.3 集成 DAC, ADC 及其应用	(270)
本章小结	(274)
习 题	(275)
第 11 章 数字系统分析与设计	(276)
11.1 数字系统概述	(276)
11.2 数字系统的分析	(277)
11.3 数字系统的设计	(282)
本章小结	(290)
习 题	(290)

附 录 硬件描述语言 VHDL	(291)
1 VHDL 程序结构	(291)
2 VHDL 语法规则	(296)
3 VHDL 并行语句	(301)
4 VHDL 顺序语句	(308)
5 常用组合逻辑电路设计	(312)
6 常用时序逻辑电路设计	(317)
参考文献	(320)

绪 论

0.1 数字量与模拟量

在自然界形形色色的物理量中，尽管各种物理量的性质不同，但就其变化规律的特点，可以将其归结为两大类：数字量和模拟量。

数字电路中常见的信号变化在时间和数量上不连接，即它们的变化在时间上总是发生在一系列离散的瞬间，数值的大小或每次增减的变化都是某个最小数量单位的整数倍。我们将这类物理量称为数字量。表示数字量的信号叫做数字信号，处理数字信号的电路叫做数字电路。

与之对应的另一类物理量叫做模拟量，模拟量的变化在时间和数量上是连续的，例如正弦函数、指数函数等，人们熟悉的自然界中的许多物理量都具有模拟性质，例如速度、温度、流量等。表示模拟量的信号叫做模拟信号，处理模拟信号的电路叫做模拟电路。

0.2 数字电路及其特点

数字电路处理的信号在时间和数值上是不连续的离散信号，即数字信号。数字电路中常用二值数字逻辑，采用数字 0 和 1 表示数字信号，这里的 0 和 1 不是十进制中的数字，而是逻辑 0 和逻辑 1，相当于客观世界中彼此相关又互相联系的是与非、真与假、开与关等逻辑关系。

在数字电路中，可以用电子器件的开关特性形成不同的数字电压，用这些数字电压的高电平或低电平表示逻辑 1 或逻辑 0。数字电路有以下特点：

(1) 研究对象

数字电路研究输入高低电平与输出高低电平之间的因果关系，即逻辑关系。

(2) 研究工具

研究数字电路的工具是逻辑代数。在数字电路中的 0 和 1 表示两种对应的状态，而不是数值本身的大小。

(3) 半导体器件的工作状态

由于数字电路输入输出只有两种状态，因此组成电路的半导体器件大多工作在开关状

2 绪 论

态。半导体器件饱和导通时，相当于开关闭合；截止时，相当于开关断开。

(4) 数字电路的抗干扰

由于数字电路输入输出是非高则低两种状态，因此，当由于电路内部或外部原因使输出信号波动时，只要波动的幅度在一定范围不致改变信号原来的 1 或 0 状态，电路仍能正常工作。因此，数字电路具有较强的抗干扰能力。

0.3 数字电路的分类

数字电路的发展经历了从电子管、半导体分立器件到集成电路的过程，从 20 世纪 60 年代开始，小规模数字集成电路开始出现，到 70 年代末，微处理机的出现，数字集成电路的发展产生了质的飞跃。近年来，可编程逻辑器件特别是现场可编程门阵列的进步，为数字电子技术开创了新局面，不仅集成电路规模大，而且将硬件设计与软件设计相结合，使器件的功能更加完善，使用更加灵活。

数字集成电路根据所用晶体管结构和工艺的不同，可以分为双极型集成电路和金属氧化物半导体（MOS）集成电路两大类。前者使用的主要器件是双极型晶体管；后者使用的主要器件是 MOS 场效应管。

数字集成电路还可以根据每个集成芯片集成规模的不同，分为小规模、中规模、大规模、超大规模和甚大规模集成电路。小规模集成电路以集成门电路为集成对象；中规模集成电路则以计数器、译码器、加法器等集成电路为主；而大规模集成电路则以小型存储器等功能部件为集成对象；超大规模集成电路有微处理器、大型存储器；甚大规模集成电路则有可编程逻辑器件、多功能集成电路等。有关这些器件的详细内容将在本书后续章节中继续讨论。

第 1 章 逻辑代数基础

逻辑代数是分析和设计数字电路的数学工具，是学习数字电路的基础。本章首先介绍数字电路中几种常见的数制和码制，然后介绍逻辑代数的基本概念，基本运算、公式和定理。在此基础上，重点介绍逻辑函数的五种表示方法和两种化简方法。

学习目标

- 掌握二进制数的计数规律，二进制、十六进制数与十进制数之间的转换方法。
- 掌握逻辑代数的三种基本运算、基本公式和常用公式。
- 掌握运用公式法和卡诺图法化简逻辑函数。
- 掌握逻辑函数中的五种表示方法（真值表、逻辑式、逻辑图、卡诺图和波形图）及相互转换方法。
- 掌握几种常用的复合函数（与非、或非、与或非、异或、同或）的定义及其表示方法。
- 理解逻辑函数中约束的概念、约束条件的表示方法、具有约束的逻辑函数的化简方法。
- 了解几种常用的二进制代码及其特点。
- 了解逻辑代数的基本运算规则：代入规则、反演规则和对偶规则。
- 了解 VHDL 对基本逻辑运算的描述。

1.1 数制与码制

1.1.1 数制

数制即计数体制，它是按照一定规则表示数值大小的计数方法。在日常生活中，最常用的计数体制是十进制，数字电路中常用到的计数体制是二进制。

1. 十进制数

十进制数是用十个数字符号 0, 1, 2, …, 8, 9 按一定规则排列表示数的大小。例如：

$$8\,228 = 8 \times 10^3 + 2 \times 10^2 + 2 \times 10^1 + 8 \times 10^0$$

可以看出,十进制数有以下特点:

- (1) 有十个数字符号: 0, 1, 2, ..., 8, 9, 其计数基数为 10。
- (2) 相同的数字符号在不同的数位所表示的值是不同的,称为位权。各位数的位权是 10 的幂 ($10^0, 10^1, 10^2, \dots$)。

- (3) 低位与相邻高位的进位关系是逢十进一。

n 位十进制正整数 $(M)_{10}$ 的值可以由式 (1-1) 所示的多项式求得:

$$\begin{aligned}(M)_{10} &= k_{n-1} \times 10^{n-1} + k_{n-2} \times 10^{n-2} + \dots + k_1 \times 10^1 + k_0 \times 10^0 \\ &= \sum_{i=0}^{n-1} k_i \times 10^i\end{aligned}\quad (1-1)$$

式中 k_i 称系数,它可以是 0~9 十个数字符号中的任意一个, 10^i 是第 i 位的权。

2. 二进制数

数字电路中的信号通常只有两种工作状态,因此,二进制数是数字电路中应用最广泛的计数体制。与十进制数对应,二进制数有以下特点:

- (1) 有两个数字符号: 0 和 1, 其计数基数为 2。
- (2) 各位数的位权是 2 的幂 ($2^0, 2^1, 2^2, \dots$)。
- (3) 低位与相邻高位的进位关系是逢二进一。

n 位二进制整数 $(M)_2$ 的值可以由式 (1-2) 所示的多项式求得:

$$\begin{aligned}(M)_2 &= k_{n-1} \times 2^{n-1} + k_{n-2} \times 2^{n-2} + \dots + k_1 \times 2^1 + k_0 \times 2^0 \\ &= \sum_{i=0}^{n-1} k_i \times 2^i\end{aligned}\quad (1-2)$$

3. 十六进制数

二进制数只有两个数字符号,虽然运算简便,但是用二进制数表示数值较大的数,会因位数太多不便记忆和书写,因此,常采用十六进制。十六进制数有以下特点:

- (1) 有十六个数字符号: 0~9, A, B, C, D, E, F, 其计数基数为 16。
- (2) 各位数的位权是 16 的幂 ($16^0, 16^1, 16^2, \dots$)。
- (3) 低位与相邻高位的进位关系是逢十六进一。

n 位十六进制整数 $(M)_{16}$ 的值可以由式 (1-3) 所示的多项式求得:

$$\begin{aligned}(M)_{16} &= k_{n-1} \times 16^{n-1} + k_{n-2} \times 16^{n-2} + \dots + k_1 \times 16^1 + k_0 \times 16^0 \\ &= \sum_{i=0}^{n-1} k_i \times 16^i\end{aligned}\quad (1-3)$$

4. 不同进制整数之间的转换

(1) 二、十六进制数转换成十进制数

二、十六进制数转换成十进制数,只要将二、十六进制数分别按式 (1-2) 或式 (1-3) 展开,然后将各位结果相加即可。

例 1-1 将二进制数 $(10111001)_2$ 转换成相应的十进制数。

$$\begin{aligned}\text{解: } (10111001)_2 &= 1 \times 2^7 + 0 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 \\ &= 2^7 + 2^5 + 2^4 + 2^3 + 2^0 = (185)_{10}\end{aligned}$$

$$\text{故: } (10111001)_2 = (185)_{10}$$

例 1-2 将十六进制数 $(4AE)_{16}$ 转换成相应的十进制数。

$$\begin{aligned}\text{解: } (4AE)_{16} &= 4 \times 16^2 + 10 \times 16^1 + 14 \times 16^0 \\ &= 1\,024 + 160 + 14 = (1\,198)_{10}\end{aligned}$$

$$\text{故: } (4AE)_{16} = (1\,198)_{10}$$

(2) 十进制数转换成二进制数

十进制数转换成二进制数采用除基取余法,即用十进制数不断除以 2,直至商为 0 止。每次得到的余数从后往前排即为转换后的二进制数。

例 1-3 将十进制数 $(48)_{10}$ 转换成相应的二进制数。

解:

2	48	-----	余 0	(b ₀)	最低位
2	24	-----	余 0	(b ₁)	
2	12	-----	余 0	(b ₂)	
2	6	-----	余 0	(b ₃)	
2	3	-----	余 1	(b ₄)	
2	1	-----	余 1	(b ₅)	最高位
	0				

$$\text{故: } (48)_{10} = (110000)_2$$

(3) 二进制数与十六进制数之间的转换

因为 16 是 2 的整次幂 ($16 = 2^4$), 因此, 十六进制数转换成二进制数, 只要将每位十六进制数分别用二进制数表示, 即可完成十六进制数至二进制数的转换; 同理, 二进制数转换成十六进制数, 从 (整数) 最低位开始, 每 4 位二进制数为一组, 依次用十六进制数表示, 即可完成二进制数至十六进制数的转换。

例 1-4 将二进制数 $(10011000011)_2$ 转换成相应的十六进制数。

解:

$$\begin{array}{ccc} (100) & (1100) & (0011) \\ \swarrow & \downarrow & \searrow \\ 4 & C & 3 \end{array}$$

$$\text{故: } (10011000011)_2 = (4C3)_{16}$$

例 1-5 将十六进制数 $(F7A2)_{16}$ 转换成相应的二进制数。

解:

$$\begin{array}{cccc} (F) & (7) & (A) & (2) \\ \swarrow & \downarrow & \downarrow & \searrow \\ 1111 & 0111 & 1010 & 0010 \end{array}$$

$$\text{故: } (F7A2)_{16} = (1111011110100010)_2$$

1.1.2 码 制

在数字电路中，常常用一定位数的二进制数码表示不同的事物或信息，这些数码称为代码。编制代码时要遵循一定的规则，这些规则称为码制。常用的码制有二进制码和循环码。

1. 二一十进制码

二一十进制码简称 BCD (Binary Coded Decimal) 码，它是用 4 位二进制代码表示 0~9 十个十进制数。最常用的 8421BCD 码，其编码规则如表 1-1 所示，它每位的权从左至右依次是 8, 4, 2, 1，属于有权码。四位二进制代码有 16 种不同的代码，在 8421BCD 码中，有 6 种代码不用，它们是：1010, 1011, 1100, 1101, 1110, 1111，这 6 种代码被称为伪码。

除了 8421BCD 码以外，还有其他一些 BCD 码也较为常用，如表 1-1 所示，它们的编码原则各有不同。

表 1-1 所示的余 3 码编码规则与 8421 码不同，如果把每一个余 3 码看作是 4 位二进制数，则它的数值要比它所表示的十进制数多 3，因此，将它称为余 3 码。余 3 码是无权码，也就是说，它的每一位的权不是固定的。表 1-1 所示的 2421, 5211 都是有权码。

表 1-1 几种常见的 BCD 码

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

2. 循环码

循环码又称格雷码。表 1-2 列出了最常用的 4 位循环码的编码表，同时给出了循环码与 4 位二进制代码的对照。循环码的构成原则是：相邻两个代码之间仅有一位取值不同。循环码的特点是：在代码传输的过程中引起的误差小。循环码是一种误差最小化代码，因此获得了广泛的应用。

表 1-2 4 位循环码编码表

二进制数	循环码	十进制数	循环码
0 0 0 0	0 0 0 0	1 0 0 0	1 1 0 0
0 0 0 1	0 0 0 1	1 0 0 1	1 1 0 1
0 0 1 0	0 0 1 1	1 0 1 0	1 1 1 1
0 0 1 1	0 0 1 0	1 0 1 1	1 1 1 0
0 1 0 0	0 1 1 0	1 1 0 0	1 0 1 0
0 1 0 1	0 1 1 1	1 1 0 1	1 0 1 1
0 1 1 0	0 1 0 1	1 1 1 0	1 0 0 1
0 1 1 1	0 1 0 0	1 1 1 1	1 0 0 0
$B_3 B_2 B_1 B_0$	$G_3 G_2 G_1 G_0$	$B_3 B_2 B_1 B_0$	$G_3 G_2 G_1 G_0$

1.1.3 算术运算和逻辑运算

在数字电路中, 1 位二进制数码 0 和 1 不仅可以表示数值的大小, 也可以表示两种不同的逻辑状态。当两个二进制数表示数值大小时, 它们可以进行数值运算, 称之为算术运算, 其运算规则与十进制数的运算规则基本相同。另外, 在数字电路和电子计算机中, 两数相减的运算是用它们的补码相加来完成。下面, 简单介绍二进制数的补码及相应的运算方法。

在数字电路和电子计算机中, 二进制数的正、负号是用 0 和 1 来表示的。将最高位作为符号位, 0 表示正、1 表示负, 这种方法表示的数码称为原码。

二进制数中的补码是这样定义的: (1) 最高位作为符号位, 0 表示正、1 表示负; (2) 正数的补码与原码相同; (3) 负数的补码是将原码的数值位逐位求反, 在最低位加 1 得到。表 1-3 列出了三种不同的三位二进制正负数表示法。

表 1-3 三种不同三位二进制正负数表示法

十进制数	二进制数			十进制数	二进制数		
	原码	反码	补码		原码	反码	补码
-8			1000	+0	0000	0000	0000
-7	1111	1000	1001	+1	0001	0001	0001
-6	1110	1001	1010	+2	0010	0010	0010
-5	1101	1010	1011	+3	0011	0011	0011
-4	1100	1011	1100	+4	0100	0100	0100
-3	1011	1100	1101	+5	0101	0101	0101
-2	1010	1101	1110	+6	0110	0110	0110
-1	1001	1110	1111	+7	0111	0111	0111
-0	1000	1111	0000				