高等教育
电气工程与自动化系列规划教材

数字电子技术

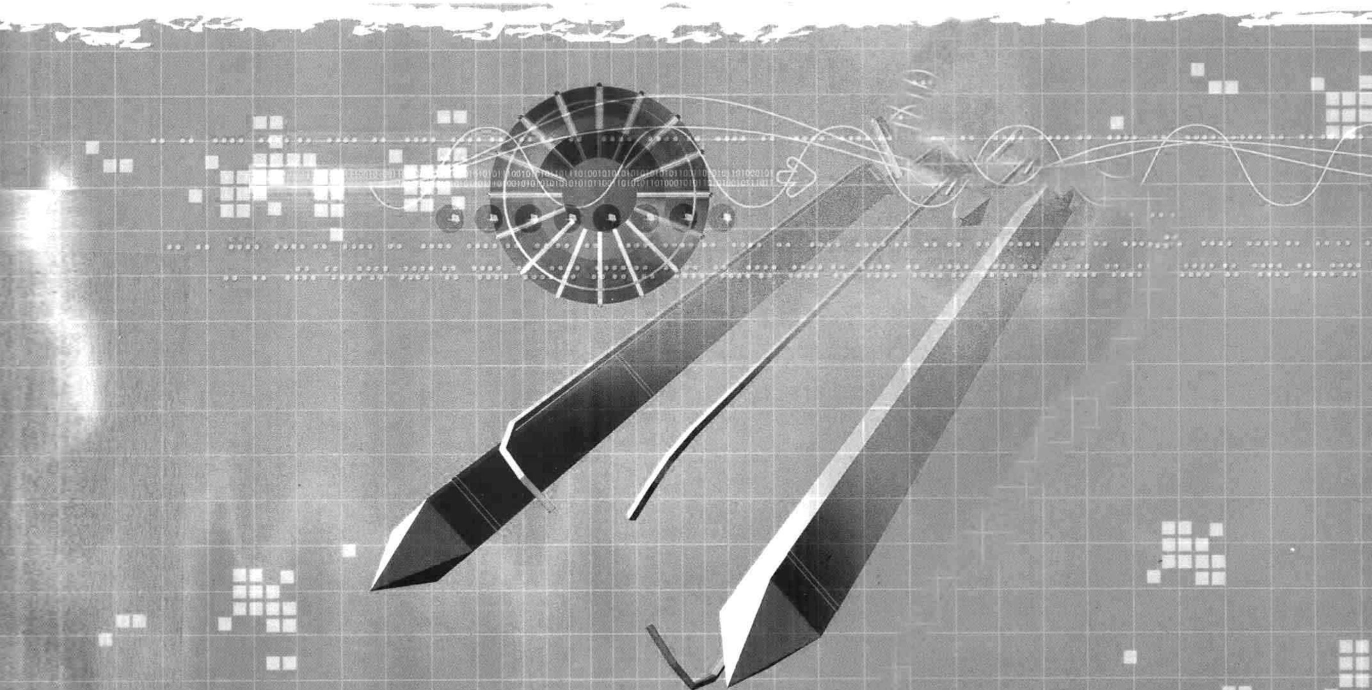
高等教育教材编审委员会 组编
主 编 王瑞兰 陈春玲 路永华
主 审 邵力耕

大连理工大学出版社

高等教育
电气工程与自动化系列规划教材

数字电子技术

高等教育教材编审委员会 组编
主 编 王瑞兰 陈春玲 路永华
主 审 邵力耕



大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术/王瑞兰，陈春玲，路永华主编. —大连:大连理工大学出版社,2011.11
高等教育电气工程与自动化系列规划教材
ISBN 978-7-5611-6607-9

Ⅰ.①数… Ⅱ.①王… ②陈… ③路… 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(2011)第 221704 号

大连理工大学出版社出版
地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023
发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466
E-mail:dutp@dutp.cn URL:http://www.dutp.cn
大连美跃彩色印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:185mm×260mm 印张:19.75 字数:456 千字
印数:1～3000
2011 年 11 月第 1 版 2011 年 11 月第 1 次印刷

责任编辑:孔泳滔 责任校对:王 喆
封面设计:张 莹

ISBN 978-7-5611-6607-9 定 价:39.00 元

前言

《数字电子技术》是应用型高等教育教材编审委员会组编的高等教育电气工程与自动化系列规划教材之一。

数字电子技术是电子技术、通信、电子信息、计算机、电气自动化等专业的一门专业基础课。它与工程实践联系紧密，实用性强，在测量、显示、信号处理、控制过程等专业领域有着极其广泛的应用，是实现各种系统自动化、智能化的基础。

本教材是根据作者多年的教学经验，结合当前电子技术的飞速发展和教学改革的要求，本着“厚基础、强能力、紧密联系工程实际、反映科技发展新技术”的指导思想而编写的。本教材的重点放在基本概念、基本方法和集成电路的外部特性及其应用知识等方面，突出电子技术的实践性，力求做到由浅入深、循序渐进。对重点、难点知识，精选例题，引导学生运用基本概念和方法来分析问题，培养学生解决实际问题的能力。

本教材的主要内容包括：逻辑代数基础，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，数/模和模/数转换，半导体存储器，EDA 技术及应用。在编写内容安排上，注重反映数字电子技术的新发展，重点介绍数字电路的新理论、新技术、新器件，对数字电路的常用集成电路进行了比较详细的介绍，尤其在各类芯片的应用外特性和主要参数上，加大了中、大规模集成电路器件应用方面的比例，并引入电子设计自动化(EDA)等内容，从而尽早使学生对当代电子电路的设计及制作有一定程度的了解，初步学习和掌握 EDA 技术的实用软件，并通过 EDA 软件的仿真技术提高学生理论与实践相结合的能力。

DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS
1985

本教材由潍坊学院王瑞兰、沈阳农业大学陈春玲、兰州商学院路永华任主编，西安科技大学程勇、沈阳农业大学科学技术学院郭鲁等参与了教材编写工作，具体编写分工如下：路永华编写第1、2、3章，王瑞兰编写第4、5章，陈春玲编写第7、8、9章，程勇编写第6章，郭鲁参加了部分章节的编写工作。由王瑞兰负责全书的统筹、修改和定稿。大连交通大学邵力耕审阅了全部书稿，并提出了许多宝贵意见和建议，在此深表谢意！

限于编者水平，本教材中难免有疏漏之处，恳请读者、同行、专家批评赐教。

所有意见和建议请发往：dutpbk@163.com

欢迎登录我们的网站：http://www.dutpbook.com

联系电话：0411-84706676　84707604

编　者

2011年11月

前　言

《数字电子技术》是应用型高等教育教材编审委员会组编的高等教育电气工程与自动化系列规划教材之一。

数字电子技术是电子技术、通信、电子信息、计算机、电气自动化等专业的一门专业基础课。它与工程实践联系紧密，实用性强，在测量、显示、信号处理、控制过程等专业领域有着极其广泛的应用，是实现各种系统自动化、智能化的基础。

本教材是根据作者多年的教学经验，结合当前电子技术的飞速发展和教学改革的要求，本着“厚基础、强能力、紧密联系工程实际、反映科技发展新技术”的指导思想而编写的。本教材的重点放在基本概念、基本方法和集成电路的外部特性及其应用知识等方面，突出电子技术的实践性，力求做到由浅入深、循序渐进。对重点、难点知识，精选例题，引导学生运用基本概念和方法来分析问题，培养学生解决实际问题的能力。

本教材的主要内容包括：逻辑代数基础，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，数/模和模/数转换，半导体存储器，EDA 技术及应用。在编写内容安排上，注重反映数字电子技术的新发展，重点介绍数字电路的新理论、新技术、新器件，对数字电路的常用集成电路进行了比较详细的介绍，尤其在各类芯片的应用外特性和主要参数上，加大了中、大规模集成电路器件应用方面的比例，并引入电子设计自动化(EDA)等内容，从而尽早使学生对当代电子电路的设计及制作有一定程度的了解，初步学习和掌握 EDA 技术的实用软件，并通过 EDA 软件的仿真技术提高学生理论与实践相结合的能力。

DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS
1985

本教材由潍坊学院王瑞兰、沈阳农业大学陈春玲、兰州商学院路永华任主编，西安科技大学程勇、沈阳农业大学科学技术学院郭鲁等参与了教材编写工作，具体编写分工如下：路永华编写第1、2、3章，王瑞兰编写第4、5章，陈春玲编写第7、8、9章，程勇编写第6章，郭鲁参加了部分章节的编写工作。由王瑞兰负责全书的统筹、修改和定稿。大连交通大学邵力耕审阅了全部书稿，并提出了许多宝贵意见和建议，在此深表谢意！

限于编者水平，本教材中难免有疏漏之处，恳请读者、同行、专家批评赐教。

所有意见和建议请发往：dutpbk@163.com

欢迎登录我们的网站：http://www.dutpbook.com

联系电话：0411-84706676　84707604

编　者

2011年11月

第1章

逻辑代数基础

【学习目标】 本章首先介绍数字信号和数字电路的特点以及数制和编码；然后介绍逻辑代数的基本运算(与、或、非)及基本定理；最后重点介绍逻辑函数的公式法化简和卡诺图法化简。

【能力目标】 了解数字信号和数字电路的概念与特点，掌握数制和编码；掌握逻辑代数的基本运算(与、或、非)及基本定理；重点掌握逻辑函数的化简方法。

1.1 数字逻辑电路概述

1.1.1 数字信号

电路中的工作信号可以分为两大类：模拟信号和数字信号。模拟信号是指时间上和幅值上均连续的信号。例如正弦函数、指数函数等。自然界中的许多物理量均属于模拟量，如汽车的速度、语音信号、大气温度与气压变化、图像各点的亮度变化等。在工程上常用传感器将模拟量转换为电流、电压或电阻等电学量，以便用电路进行分析和处理。传输、处理模拟信号的电路称为模拟电子线路，简称模拟电路。

数字信号是指时间上和幅值上都离散的信号。如计算机键盘输入电路中的信号、交通灯控制电路中的信号等都是数字信号。对数字信号进行传输、处理的电子线路称为数字电路。

对模拟信号进行取样，就得到了时间上离散的取样信号，再对该取样信号进行量化即可得到对应的数字信号。在现代电子工程中，随着数字电子技术的发展，越来越多的模拟信号均通过模拟/数字(A/D)转换后以数字信号的形式由计算机及数字电路来处理，处理后的数字信号可以通过数字/模拟(D/A)转换变为模拟信号。

1.1.2 数字电路的特点

1. 稳定性高，抗干扰能力强

数字电路对元件的精度要求不高，允许有较大的误差，只要工作时能够可靠地区分0和1这两种状态就可以了，故抗干扰能力强。

2. 易于设计

数字电路又称数字逻辑电路，它主要是对用0和1表示的数字信号进行逻辑运算和处

理，不需要复杂的数学知识，广泛使用的数学工具是逻辑代数。数字电路能够可靠区分 0 和 1 这两种状态就可以正常工作，因此，数字电路的分析与设计相对比较容易。

3. 大批量生产，成本低廉

数字电路结构简单，体积小，通用性强，容易制造，便于集成化生产，因而成本低廉。

4. 可编程性能好

现代数字系统的设计大多采用可编程逻辑器件，即厂家生产的一种半成品芯片。用户根据需要用硬件描述语言在计算机上完成电路设计和仿真，并写入芯片，产品的研制和开发更加灵活和方便。

5. 高速度，低功耗

随着集成电路工艺的发展，数字器件的工作速度越来越高，而功耗越来越低。集成电路中单管的开关速度可以低于 1×10^{-11} s。整体器件中，信号从输入到输出的传输时间短于 2×10^{-9} s。百万门以上超大规模集成芯片的功耗可以低达毫瓦级。

1.1.3 数字电路的分类与应用

1. 数字电路的分类

数字电路的发展经历了电子管、半导体分立器件到集成电路的过程。数字电路的主流形式是数字集成电路。从 20 世纪 60 年代开始，数字集成器件以双极性工艺制成了小规模逻辑器件，随后发展到中规模集成器件；至 20 世纪 70 年代末，微处理器的出现使数字集成电路的性能发生了质的飞跃；从 20 世纪 80 年代中期开始，专用集成电路制作技术已趋成熟，标志着数字集成电路发展到了新的阶段。

专用集成电路是将一个复杂的数字系统制作在一块半导体芯片上，构成体积小、质量轻、功耗低、速度快、成本低且具有保密性的系统级芯片。专用集成电路芯片的制作可以采用全定制或半定制两种办法，全定制方法适用于生产批量的成熟产品，由半导体生产厂家制造。对于生产批量小或处于研究试制阶段的产品，可以采用半定制方法，即用户通过软件编程，将自己设计的数字系统制作在厂家生产的可编程逻辑器件(PLD)半成品芯片上，便得到所需的系统级芯片。

数字电路根据电路结构特点及其对输入信号响应规则的不同，可分为组合逻辑电路和时序逻辑电路；按集成度(每一芯片包含的门电路个数)不同，数字集成电路可分为小规模集成电路(SSI)、中规模集成电路(MSI)、大规模集成电路(LSI)、超大规模集成电路(VLSI)和甚大规模集成电路(ULSI)。表 1-1 所示为数字集成电路的分类。

表 1-1　　数字集成电路的分类

类　别	门的个数	典型集成电路
小规模	<12	逻辑门、触发器
中规模	12～99	计数器、加法器
大规模	100～9 999	小型存储器、门阵列
超大规模	10 000～99 999	大型存储器、微处理器
甚大规模	100 000 以上	可编程逻辑器件、多功能专用集成电路

按所用元器件的不同,数字电路可分为双极性电路和单极性电路。其中双极性电路有TTL,DTL,ECL,IIL,HTL 等多种;单极性电路有 JEFT,NMOS,PMOS,CMOS 四种。

2. 数字电路的应用

数字电路由于稳定性好、抗干扰能力强、精确度高、电路简单、便于制造和集成、具有算术运算和逻辑运算能力等特点,所以其应用领域越来越广泛。

利用数字电路的逻辑推理和判断功能,可以设计出各式各样的数控装置,用来实现对生产和过程进行自动控制。其工作过程是:首先用传感器在现场采集受控对象的数据,接着用数字电路进行计算、判断;然后产生相应的控制信号,驱动伺服装置对受控对象进行控制或调整。这样不仅能通过连续监控提高生产的安全性和自动化水平,同时也提高了产品的质量,降低了成本,减轻了劳动强度。

以数字电路为基础发展起来的数字计算机,是当代科学技术最杰出的成就之一。现在,计算机不仅是自动控制系统不可缺少的组成部分,而且已经成为人们工作、生活、学习中不可或缺的重要组成部分,尤其是在数字电路应用于通信领域后,通信技术的发展突飞猛进,使人们获取信息、享受网络服务更为便捷。

1.2 数制与码制

数制即计数进位的规则,它是按照一定的规则表示数值大小的计数方法。日常生活中最常用的计数方法是十进制;数字电路中常用的是二进制,有时也用八进制和十六进制。对于任何一个数,可以用不同的进制来表示。

1.2.1 常用数制及其相互转换

1. 常用数制

(1)十进制

十进制有 0～9 共十个数码,它的运算规则是“逢十进一,借一当十”。设十进制数$(N)_{10}$有 n 位整数,m 位小数,则可表示为

$$(N)_{10}=(k_{n-1}k_{n-2}\cdots k_1k_0.k_{-1}k_{-2}\cdots k_{-m})_{10}$$

按权展开为

$$(N)_{10}=\sum_{i=-m}^{n-1}(k_i10^i)$$

式中:k_i 为第 i 位的系数,可取 0～9 十个数码;10^i 为第 i 位的权;10 为基数。基数和权是数制的两个要素,利用基数和权,可以将任何一个数按权展开为多项式的形式。例如十进制数 2569.58 可表示为

$$(2569.58)_{10}=2\times10^3+5\times10^2+6\times10^1+9\times10^0+5\times10^{-1}+8\times10^{-2}$$

通常,对十进制数的表示,可以在数字的右下角标注 10 或 D,也可以省略标注。

(2)二进制数

二进制计数进位的规则为“逢二进一,借一当二”。二进制中只有 0 和 1 两个数码,基数

为 2,各位的位权为 2^i。设二进制数 $(N)_2$ 有 n 位整数,m 位小数,则可表示为

$$(N)_2=(k_{n-1}k_{n-2}\cdots k_1k_0.k_{-1}k_{-2}\cdots k_{-m})_2$$

按权展开为

$$(N)_2=\sum_{i=-m}^{n-1}(k_i2^i)$$

式中:k_i 为第 i 位的系数,可取 0 和 1 两个数码;2^i 为第 i 位的权。通常,对二进制数的表示,可以在数字的右下角标注 2 或 B。

(3)八进制

八进制计数进位的规则为“逢八进一,借一当八”。八进制中有 0～7 八个数码,基数为 8,各位的位权为 8^i。设八进制数 $(N)_8$ 有 n 位整数,m 位小数,则可表示为

$$(N)_8=(k_{n-1}k_{n-2}\cdots k_1k_0.k_{-1}k_{-2}\cdots k_{-m})_8$$

按权展开为

$$(N)_8=\sum_{i=-m}^{n-1}(k_i8^i)$$

式中:k_i 为第 i 位的系数,可取 0～7 八个数码;8^i 为第 i 位的权。通常,对八进制数的表示,可以在数字的右下角标注 8 或 O。

(4)十六进制

十六进制计数进位的规则为“逢十六进一,借一当十六”。十六进制中有 0～9,A,B,C,D,E,F 十六个数码,基数为 16,各位的位权为 16^i。设十六进制数 $(N)_{16}$ 有 n 位整数,m 位小数,则可表示为

$$(N)_{16}=(k_{n-1}k_{n-2}\cdots k_1k_0.k_{-1}k_{-2}\cdots k_{-m})_{16}$$

按权展开为

$$(N)_{16}=\sum_{i=-m}^{n-1}(k_i16^i)$$

式中:k_i 为第 i 位的系数,可取 0～9,A,B,C,D,E,F 十六个数码;16^i 为第 i 位的权。通常,对十六进制数的表示,可以在数字的右下角标注 16 或 H。

2. 各种数制之间的转换

在实际应用中,常常需要进行各种进制数制之间的相互转换。数制之间的转换可归为两类:十进制和非十进制之间的转换;2^n 进制之间的转换。

(1)十进制和非十进制之间的转换

①非十进制数转换成十进制数　由二进制、八进制、十六进制数的表示式可知,只要将它们直接按权展开即得对应的十进制数。

【例 1-1】 将二进制数 $(1001011.101)_2$ 转换为十进制数。

解:将 $(1001011.101)_2$ 按权展开

$$(1001011.101)_2=1\times2^6+1\times2^3+1\times2^1+1\times2^0+1\times2^{-1}+1\times2^{-3}=75.625$$

所以 $(1001011.101)_2=(75.625)_{10}$

【例 1-2】 将八进制数 $(113.5)_8$ 转换为十进制数。

解:将 $(113.5)_8$ 按权展开

$$(113.5)_8=1\times8^2+1\times8^1+3\times8^0+5\times8^{-1}=75.625$$

所以$(113.5)_8=(75.625)_{10}$

②十进制数转换成非十进制数　十进制数转换成非十进制数时，要将其整数部分和小数部分分别转换，再把结果合并成目的数制。

• 整数部分的转换——除基取余法　整数部分的转换采用除基取余法。用目的数制的基数去除十进制数取其余数，并将余数倒序排列，即得所转换的目的数制。

【例 1-3】　将十进制数$(75)_{10}$转换为二进制数、八进制数和十六进制数。

解：按照除基取余法，转换为二进制数应逐次除以 2 取余数，转换过程如下

$$\begin{array}{r|l c l}
2 & 75 & \text{取余} & \\
2 & 37 & 1 & \uparrow \\
2 & 18 & 1 & \\
2 & 9 & 0 & \text{倒} \\
2 & 4 & 1 & \text{序} \\
2 & 2 & 0 & \text{排} \\
2 & 1 & 0 & \text{列} \\
2 & 0 & 1 &
\end{array}$$

同样的方法可将十进制数$(75)_{10}$转换为八进制数和十六进制数

$$\begin{array}{r|l c l}
8 & 75 & \text{取余} & \\
8 & 9 & 3 & \uparrow\ \text{倒} \\
8 & 1 & 1 & \text{序排} \\
 & 0 & 1 & \text{列}
\end{array}
\qquad
\begin{array}{r|l c l}
16 & 75 & \text{取余} & \\
16 & 4 & B & \uparrow\ \text{倒序} \\
 & 0 & 4 & \text{排列}
\end{array}$$

所以$(75)_{10}=(1001011)_2$　$(75)_{10}=(113)_8$　$(75)_{10}=(4B)_{16}$

• 小数部分的转换——乘基取整法　小数部分的转换采用乘基取整法。用目的数制的基数乘以十进制数取其整数部分，并将取得的整数顺序排列，即得所转换的目的数制。

【例 1-4】　将十进制数$(0.625)_{10}$转换为二进制数、八进制数和十六进制数。

解：按照乘基取整法，转换为二进制数应逐次乘以 2 取整数部分，转换过程如下

$$\begin{array}{r c l}
0.625 & \text{取整} & \\
\times\quad 2 & & \\
\hline
1.250 & 1 & \downarrow \\
0.25 & & \text{顺} \\
\times\quad 2 & & \text{序} \\
\hline
0.50 & 0 & \text{排} \\
\times\quad 2 & & \text{列} \\
\hline
1.00 & 1 &
\end{array}$$

同样的方法可将十进制数$(0.625)_{10}$转换为八进制数和十六进制数

$$\begin{array}{r c}
0.625 & \text{取整} \\
\times\quad 8 & \\
\hline
5.000 & 5
\end{array}
\qquad
\begin{array}{r c}
0.625 & \text{取整} \\
\times\quad 16 & \\
\hline
10.000 & A
\end{array}$$

所以$(0.625)_{10}=(0.101)_2$　$(0.625)_{10}=(0.5)_8$　$(0.625)_{10}=(0.A)_{16}$

(2)2^n 进制数之间的转换

①二进制与八进制之间的转换　由于八进制的基数$8=2^3$，所以 3 位二进制数构成 1 位八进制数。若要将二进制数转换成八进制数，只要将二进制数的整数部分自右向左每 3 位一组，最后一组不足 3 位时用 0 补足；小数部分自左向右每 3 位一组，最后一组不足 3 位时用 0 补齐；再将每组对应的八进制数写出即可。反之，若要将八进制数转换成二进制数，只要将每 1 位八进制数写成 3 位二进制数，按顺序排列起来即可。

【例 1-5】 将二进制数$(1100110.0101)_2$转换为八进制数。

解:按以上方法有

$$\begin{array}{cccccc} \underline{001} & \underline{100} & \underline{110} & . & \underline{010} & \underline{100} \\ 1 & 4 & 6 & . & 2 & 4 \end{array}$$

所以 $(1100110.0101)_2=(146.24)_8$

【例 1-6】 将八进制数$(45.36)_8$转换为二进制数。

解:按以上方法有

$$\begin{array}{cccccc} 4 & 5 & . & 3 & 6 \\ \downarrow & \downarrow & . & \downarrow & \downarrow \\ 100 & 101 & . & 011 & 110 \end{array}$$

所以 $(45.36)_8=(100101.01111)_2$

②二进制与十六进制之间的转换 由于十六进制的基数$16=2^4$,所以4位二进制数构成1位十六进制数。若要将二进制数转换成十六进制数,只要将二进制数的整数部分自右向左每4位一组,最后一组不足4位时用0补足;小数部分自左向右每4位一组,最后一组不足4位时用0补齐;再将每组对应的十六进制数写出即可。反之,若要将十六进制数转换成二进制数,只要将每1位十六进制数写成4位二进制数,按顺序排列起来即可。

【例 1-7】 将二进制数$(01001011.1010)_2$转换为十六进制数。

解:$(\underline{0100}\,\underline{1011}.\underline{1010})_2=(4B.A)_{16}$

②八进制数和十六进制数之间的转换

八进制数和十六进制数之间的转换通常采用间接转换法:先将八进制数或十六进制数转换为二进制数,再将二进制数转换为目的进制数。

【例 1-8】 将八进制数$(36.47)_8$转换为十六进制数。

解:$(36.47)_8=(011110.100111)_2=(1E.9C)_{16}$

1.2.2 二进制正、负数的表示法

十进制数中,可以在数字前面加上"+"或"−"来表示正数或负数,但数字电路不能识别符号"+"和"−"。因此,在数字电路中把一个数的最高位作为符号位,并用0表示"+",用1表示"−",像这样把符号用数字表示的二进制数称为机器数,而原来带有"+"或"−"的数称为真值。例如

十进制数	+65	−65
二进制数(真值)	+1000001	−1000001
计算机内(机器数)	01000001	11000001

1.原码

用首位表示数的符号,0表示正,1表示负,其他位表示数的真值的绝对值,这样表示的数就是数的原码。

【例 1-9】 求$(+115)_{10}$和$(-115)_{10}$的原码。

解:

$$[(+115)_{10}]_{原}=[(+1110011)_2]_{原}=(01110011)_2$$

$$[(-115)_{10}]_{原}=[(-1110011)_2]_{原}=(11110011)_2$$

0 的原码有两种，分别是

$$[+0]_{原}=(00000000)_2, [-0]_{原}=(10000000)_2$$

原码与真值转换起来很方便，在数学中，若两个异号的数相加或两个同号的数相减，都要做减法运算，先判断两个数中哪一个的绝对值大，用绝对值大的数减去绝对值小的数，运算结果的符号就是绝对值大的那个数的符号。但在计算机中，逻辑电路只能作加法运算，不能直接作减法运算，为了将加法和减法统一为加法运算，我们引入了反码和补码。

2. 反码

正数的反码与其原码相同，负数的反码为：先求出该负数的原码，然后将原码的符号位不变，其余各位按位取反，即 0 变 1，1 变 0，即得该负数的反码。

【例 1-10】 求$(+115)_{10}$和$(-115)_{10}$的反码。

解：$[(+115)_{10}]_{原}=(01110011)_2$，$[(-115)_{10}]_{原}=(11110011)_2$

则$[(+115)_{10}]_{反}=(01110011)_2$，$[(-115)_{10}]_{反}=(10001100)_2$

一个数反码的反码就是这个数本身。

3. 补码

正数的补码与其原码相同，负数的补码是它的反码加 1。

【例 1-11】 求$(+115)_{10}$和$(-115)_{10}$的补码。

解：$[(+115)_{10}]_{原}=(01110011)_2$，$[(+115)_{10}]_{反}=(01110011)_2$

$[(+115)_{10}]_{补}=(01110011)_2$

$[(-115)_{10}]_{原}=(11110011)_2$，$[(-115)_{10}]_{反}=(10001100)_2$

$[(-115)_{10}]_{补}=(10001101)_2$

一个数的补码的补码就是其原码。

引入补码后，两个数的加减运算就可以统一用加法运算来实现，此时两个数的符号位也当成数值直接参加运算。由于两数和的补码等于两数补码的和，故在数字系统中一般用补码表示带符号的数。

【例 1-12】 用机器数的表示方法，求$(13)_{10}-(17)_{10}$的差。

解：第一步：求补码。

$$[(+13)_{10}]_{原}=(00001101)_2, [(+13)_{10}]_{补}=(00001101)_2$$

$$[(-17)_{10}]_{原}=(10010001)_2, [(-17)_{10}]_{补}=(11101111)_2$$

第二步：求补码之和。

$$[(+13)_{10}]_{补}+[(-17)_{10}]_{补}=(11111100)_2$$

第三步：求和的补码。

$$[(11111100)_2]_{补}=(10000100)_2$$

$$即(13)_{10}-(17)_{10}=(-4)_{10}$$

1.2.3 常用的编码

在数字设备中，数据和信息都采用二进制码表示，n 位二进制数有 2^n 种不同的组合，可以代表 2^n 种不同的信息。用一定位数的二进制数码组合代表一组信息的过程称为编码。

本节介绍几种常用的编码。

1. 二-十进制编码

二-十进制编码是一种用 4 位二进制数表示 1 位十进制数的编码，简称 BCD 码。1 位十进制数有 0～9 共 10 个数码，而 4 位二进制数有 16 种组合，指定其中的任意 10 种组合来表示十进制的 10 个数，因此 BCD 码方案有很多，常用的有 8421 码、余 3 码、2421 码、5421 码等，见表 1-2。

表 1-2　　常用的 BCD 码

十进制数	8421 码	余 3 码	2421 码	5421 码
0	0000	0011	0000	0000
1	0001	0100	0001	0001
2	0010	0101	0010	0010
3	0011	0110	0011	0011
4	0100	0111	0100	0100
5	0101	1000	1011	1000
6	0110	1001	1100	1001
7	0111	1010	1101	1010
8	1000	1011	1110	1011
9	1001	1100	1111	1100

表 1-2 所列各种 BCD 码中，8421 码、2421 码和 5421 码都是有权码，余 3 码属于无权码。

(1)8421 码

8421 码和自然二进制码的组成相似，4 位的权值从高到低依次是 8，4，2，1。但不同的是它选了 4 位自然二进制码 16 个组合的前 10 个组合（0000～1001），分别用来表示 0～9 共 10 个十进制数，称为有效码；剩下的 6 个组合（1010～1111）没有采用，称为无效码。十进制数与 8421 码之间的转换只要直接按位转换即可。即

$$(906.35)_{10}=(100100000110.00110101)_{8421}$$

$$(010110011000.00010110)_{8421}=(598.16)_{10}$$

(2)余 3 码

余 3 码是一种无权码，如果将两个余 3 码相加，所得的和将比对应的十进制数之和所对应的二进制数多 6。因此，在用余 3 码进行十进制加法运算时，若两个十进制数之和为 10，则对应的余 3 码之和正好等于二进制数的 16，于是便从高位自动产生进位信号。从表 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。这对于求取对 10 的补码很方便。

(3)2421 码

2421 码是一种有权码，它的 0 和 9，1 和 8，2 和 7，3 和 6，4 和 5 也互为反码。

2. 可靠性编码

数码在产生和传输过程中，难免发生错误。为使代码不易出错，或在发生错误时能迅速地发现和纠正错误，在工程中普遍采用了可靠性编码。格雷码和奇偶校验码是其中最常见

的两种可靠性编码。

(1)格雷码

格雷码又称为循环码，格雷码有两个特点：相邻性和循环性。相邻性是指任意两个相邻的代码间只有一位不同；循环性是指首、尾的两个代码也具有相邻性。表 1-3 列出了十进制数与格雷码、二进制码之间的对应关系。

表 1-3　　十进制数与格雷码、二进制码之间的对应关系

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

由于格雷码具有相邻性和循环性，所以时序电路中采用格雷码编码能防止波形的“毛刺”，并提高工作速度。例如 8421 码表示的十进制数，从 7(0111)递增到 8(1000)时，4 位代码均发生了变化，而事实上数字电路(如计数器)的各位输出不可能完全同时变化，这样在变化过程中就可能出现其他代码，造成严重的错误。如第一位先变为 1，这时就会在瞬间出现 1111 代码，而格雷码由于其任何两个代码之间仅有 1 位不同，所以用格雷码表示的数在递增或递减过程中不易产生差错。

观察表 1-3 可以发现，最高位的 0 和 1 只改变了一次，若以该位 0 和 1 的交界处为轴，则其他位的代码是上下对称的，这一特性称为反射性，最高位称为反射位。利用反射特性可以很方便地构成位数不同的格雷码。1 位到 4 位格雷码编码过程如图 1-1 所示。

1 位	2 位	3 位	4 位
0	00	000	0000
1	01	001	0001
	11	011	0011
	10	010	0010
		110	0110
		111	0111
		101	0101
		100	0100
			1100
			1101
			1111
			1110
			1010
			1011
			1001
			1000

图 1-1　1 位到 4 位格雷码编码过程