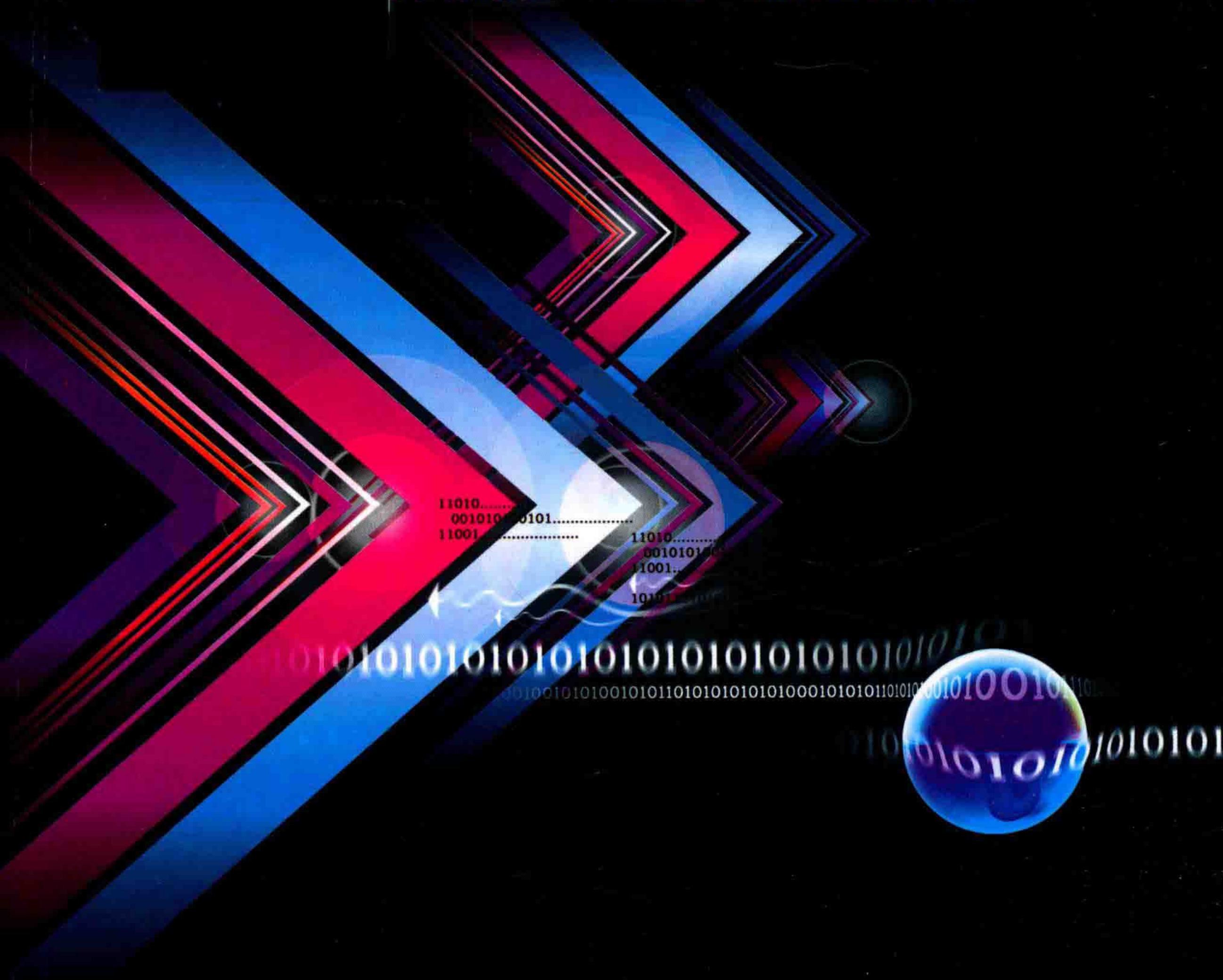
中国电子教育学会高教分会推荐

电子信息类“十三五”课改规划教材



数字电子技术基础

张俊涛　编著

西安电子科技大学出版社
http://www.xduph.com

中国电子教育学会高教分会推荐
普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

数字电子技术基础

张俊涛　编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书共分为 9 章，主要讲述数字电路的基本概念和数字系统分析与设计的工具——逻辑代数，以及数字系统设计中常用集成电路的原理、功能和应用。本书以原理为主线，以器件为基础，以应用为目标，讲述了基本门电路、组合逻辑电路、时序逻辑电路、存储器、脉冲电路以及 A/D 和 D/A 转换器，并通过思考与练习环节强化和拓展教学内容，通过设计项目及时地学以致用。

本书既可以作为大学本科电类或计算机类相关专业的教材，也可以作为相关课程的教学参考书，或供相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术基础/张俊涛编著. 一西安：西安电子科技大学出版社，2017.8
(普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材)
ISBN 978 - 7 - 5606 - 4562 - 9

Ⅰ. ① 数… Ⅱ. ① 张… Ⅲ. ① 数字电路—电子技术—教材
Ⅳ. ① TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 160988 号

策　　划　刘玉芳
责任编辑　杨　璠
出版发行　西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)
电　　话　(029)88242885　88201467　　邮　　编　710071
网　　址　www.xduph.com　　电子邮箱　xdupfxb001@163.com
经　　销　新华书店
印刷单位　陕西华沐印刷科技有限责任公司
版　　次　2017 年 8 月第 1 版　2017 年 8 月第 1 次印刷
开　　本　787 毫米×1092 毫米　1/16　印张　20
字　　数　475 千字
印　　数　1～3000 册
定　　价　40.00 元
ISBN 978 - 7 - 5606 - 4562 - 9/TN

XDUP　4854001 - 1

＊＊＊如有印装问题可调换＊＊＊

前　言

“数字电子技术”是电类和计算机类相关专业一门重要的专业基础课，理论性和实践性都很强。在多年的电子技术教学实践中，编者深切地体会到高等教育必须要适应社会发展的需求，培养既懂理论，又能学以致用的专业技术人才。因此，本书以学以致用为培养目标确定教材内容，使学生能够从应用的角度学习数字电路，提高电子系统设计能力。

作者具有二十多年的电子技术教学经验，同时又组织和指导了十余届大学生电子设计竞赛、EDA/SOPC电子设计专题竞赛、模拟及模数混合应用电路竞赛等。为了能够达到学以致用的培养目标，作者在教材的架构、教学内容的侧重点、设计项目的构思以及习题的选取等方面进行了深入思考，精心编排。考虑到数字电子技术课程的专业基础性，同时又考虑到没有时序逻辑器件难以有效构成数字系统的应用特点，本书在编写上还是采用较为传统的思路，即理论、器件、应用和设计相结合的编排方式，在讲清数字电路基本理论的同时，注重器件的设计原理、功能、特性及应用。为了突出教材的针对性和实用性，大多章节中配有利于课堂启发式教学、翻转讨论的思考与练习环节，并在章末附有典型的设计项目和习题，由浅入深，举一反三，注重系统观点的培养和应用能力的提高。

本书分为9章，第1章为数字电路基础，主要讲述数字电路的基本概念和数制与编码。第2章讲述数字电路分析与设计的工具——逻辑代数。第3～9章介绍数字系统设计中常用的集成电路，以原理为主线，以器件为基础，以应用为目标，讲述了基本门电路，组合逻辑电路，时序逻辑电路，存储器，脉冲电路以及A/D、D/A转换器，并通过章末典型的设计项目使学生能够及时地学以致用。

本书的编写力求突出三个特点：

(1) 精简。以应用为导向，注重原理设计，简化器件内部电路分析，突出器件的功能和应用。

(2) 完整。在精简教学内容的同时，注重教材的完整性。基本门电路、组合电路、时序电路、存储器、脉冲电路以及A/D和D/A转换器在数字系统设计中都可能要用到，因此均有讲述。

(3) 实用。通过许多典型的设计项目和设计性习题突出应用，由浅入深，循序渐进，培养系统设计能力。

考虑到硬件描述语言已广泛应用到集成电路设计、通信系统开发、数字信号处理以及嵌入式系统设计等许多领域，作为选修内容，本书简要地讲述了 Verilog HDL 及其应用，以进一步拓宽学生视野。

特别需要注意的是，为了后续学生项目设计时使用软件平台、查阅资料和国际交流方便起见，本书采用国际通用的门电路符号，敬请读者注意。

全书由张俊涛编写，陈晓莉绘制了书中的插图，并审稿和校对，在此表示感谢。

在多年的教学实践中，作者阅读了大量国内外电子技术课程教材和相关资料，无法一一尽述，在此向相关作者表示感谢。鉴于作者的水平，书中难免有疏漏、不妥甚至是错误之处，恳请读者提出批评意见和改进建议。

编　者

2017 年 3 月

目录

第1章　绪　论

在电子技术飞速发展的几十年间，数字技术的应用改变了世界。我们每天都要获取大量的信息，而这些信息的传输、处理和存储越来越趋于数字化。

在日常生活中，以数字系统为核心的产品很多。典型的产品有：

(1) 计算机。计算机是数字系统的典型代表。

自 20 世纪 40 年代第一台数字计算机诞生以来，伴随着半导体工艺技术的提高，计算机的功能随之增强，性能大幅度提高，在数据处理、数字音视频技术和数字通信等领域都得到了广泛的应用。近 30 年来，“数字革命”已经深入到了生活的方方面面。计算机不仅成为了学习和工作的平台，同时又是文化传播和娱乐的平台，可以听音乐、看电影、欣赏图片、浏览网页等。

(2) 数码相机。数码相机的发展和应用主要依赖于数字存储和数字图像处理技术。

40 多年前，大多数照相机用银卤化物胶片记录图像。胶片需要经过曝光、冲洗、显影等过程才能再现摄入的图像信息。今天，半导体制造工艺的提高使得半导体存储器的容量大幅度提高，而成本大幅度降低，成为数字存储的主要载体。数码相机摄入图像后经压缩记录为数字信息存储在 SD 卡、U 盘等半导体存储器中，便于携带、拷贝、加工和处理。每幅图像记录为 720p、1080p 或者更大的像素矩阵，其中每个像素又可以用 8 位或者更多比特位表示红、绿、蓝三个基色的强度值。

(3) 智能手机。手机从初期的以语音通信为主要功能的普通手机发展到现在的集通信、数字音视频、电子商务、定位和导航等多种功能于一体的智能手机，其内部电路为以微处理器为核心的数字系统。智能手机内置的摄像头使得人人都可以随时随地拍照，高分辨率的显示屏方便播放视频和显示图片，语音接口方便录音和播放音乐，高清数字地图配合 GPS 可以提供定位和导航服务。

除上述典型的数字产品外，数字技术还广泛应用于医学信息处理、仪器仪表、工业控制以及音视频信息处理等领域。

数字技术之所以能够广泛应用，主要是因为数字电路与模拟电路相比，有如下优点：

(1) 抗干扰能力强。数字电路能够在相同的输入条件下精确地产生相同的结果，而模拟电路受到温度、电源电压、噪声、辐射以及元器件老化等因素的影响，在相同的输入条件下输出的结果并不完全相同。

(2) 数字信号便于传输和处理。数字系统很容易对信息进行变换和编码，以提高通信效率和可靠性，而且容易实现信息的加密，从而有效地保护了知识产权。例如，目前许多住宅小区的有线电视网络将视音频信息编码成数字信号传输，再通过机顶盒解码出信息。除了提供上网和回看等附加功能之外，便于收费也是其主要功能之一。

(3) 成本低。数字电路可以被集成在单个芯片里，如 CPU、单片机和 FPGA 等，并能

以很低的成本进行量产。例如，经典 MCS-51 系列单片机的目前售价只有几元，等效门电路达到百万门的 FPGA，内部集成了功能强大的微处理器、DSP、乘法器和锁相环等，其售价也只有几十元到几百元之间。

为了能够理解数字电路的工作原理，掌握数字系统的分析与设计方法，需要系统地学习数字电子技术。

本章首先介绍数字信号与数字电路的基本概念，然后讲述数字系统中常用的数制和编码。

1.1 数字信号与数字电路

人类社会通过各种各样的方式传递信息。烽火连三月，家书抵万金。古人用烽火传递战争预警信息，用击鼓鸣金传送战场上的命令信息。边关的战事信息需要通过快马加鞭的方式接力传递，费时费力，效率低下。

随着电磁波的发现和半导体器件的产生及应用，信息的传递方式也发生了巨大的变化。从起初的电报、有线电话发展到移动通信、网络通信和卫星通信，大大地提高了信息传递的效率，丰富了我们的生活，拉近了人与人之间的距离。相应地，人类社会也从农业社会、工业社会步入了信息化社会。

在电子信息领域，承载信息的载体称为信号(Signal)。信号一般表现为随时间、空间等因素变化的某种物理量。例如，语音信号随时间变化，气压信号随高度和温度变化，而图像信号随空间变化。通常习惯于将信号理解为随时间变化的一维信号，因此记为 $f(t)$。

根据自变量 t 是否连续取值，将信号分为连续时间信号和离散时间信号两大类。又根据信号的幅值是否连续，将信号分为幅值连续的信号和幅值离散的信号。这样，就可以组合出以下四类信号：第一类信号为时间连续、幅值连续的信号；第二类信号为时间离散、幅值连续的信号；第三类信号为时间连续、幅值离散的信号；第四类信号为时间离散、幅值离散的信号。分别如图 1-1(a)～(d)所示。

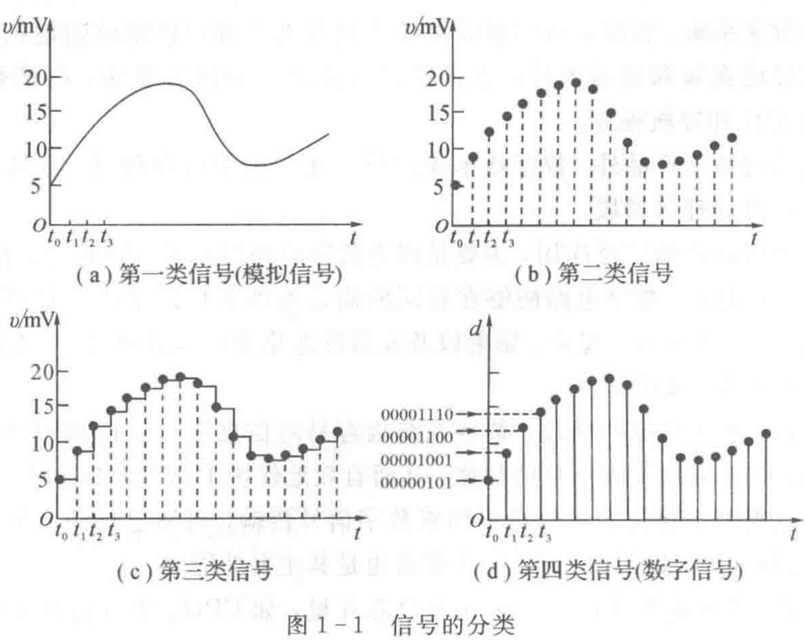


图 1-1　信号的分类

我们将第一类信号——时间连续、幅值连续的信号称为模拟信号(Analog Signal)，将第四类信号——时间离散、幅值离散的信号称为数字信号(Digital Signal)。相应地，产生和处理模拟信号的电子电路称为模拟电路，产生和处理数字信号的电子电路称为数字电路。第二类和第三类信号为模拟信号转换为数字信号和将数字信号还原为模拟信号时产生的过渡信号，在模拟电路和数字电路课程中均有涉及。例如，对模拟信号进行采样产生第二类信号(因此也称为采样信号)，再对幅值进行量化后才转换为数字信号，如图 1-2 所示。相应地，将数字信号经过数模(D/A)转换为第三类信号，再经过低通滤波后还原为模拟信号。

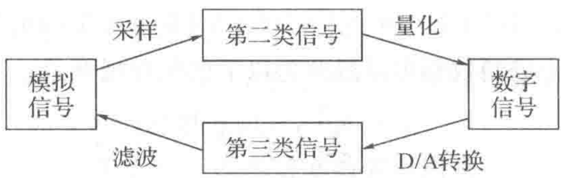


图 1-2 模拟信号与数字信号的转换

虽然数字系统在信息处理、存储、加密和传输等方面有着独特的优势，但我们仍然生活在模拟世界中，因为自然界多数物理量本质上还是模拟的。如果需要用数字系统处理模拟信号，首先要将模拟信号转换为数字信号，经过数字系统处理后，需要时再还原成模拟信号。音频信号数字化处理流程如图 1-3 所示，前端先将模拟音源信号经过调理后转换为数字信号，再经过信源编码、调制、记录到存储介质上，或者通过信道编码经过传输介质进行传输，后端则通过光盘传递或网络下载后，再经过解调或者信道解码、信源解码后还原出音源信息。

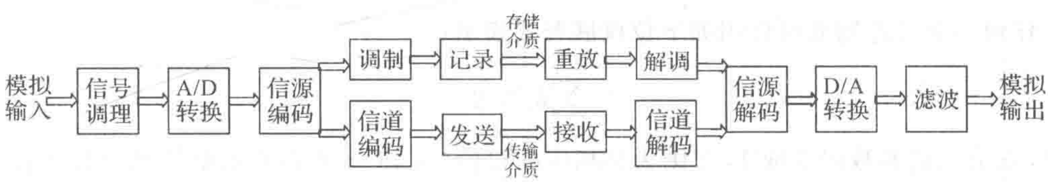


图 1-3 音频信号数字化处理流程

数字电子技术课程与模拟电子技术课程相比，特点是入门简单，但内容繁多，既包含逻辑分析与设计，又包含电路分析与设计。而实际器件的性能并不理想，因此在设计数字系统时，通常需要在逻辑功能与电路性能之间进行综合考虑。

1.2 数 制

数制(Number Systems)即计数所采用的体制，具体是指多位数码中每位数码的构成方式，以及从低位到高位的进位规则和从高位到低位的借位规则。从古至今，人们习惯于使用十进制进行计数(这与人自身的特点有关)，而数字电路采用开关电路来实现，开关的通、断只能代表两种数码，自然与二进制数相对应。因此，二进制是数字电路的基础。

本节介绍常用的数制及其转换方法。

1.2.1 十进制

十进制(Decimal)使用“0、1、2、3、4、5、6、7、8、9”十个数码和小数点符号“.”，采用多位计数体制进行计数，其进位规则为逢十进一，借位规则为借一当十。处于不同数位的数码具有不同的权值(Weight)，以小数点为界，十进制计数法向左每位的权值依次为 10^0、10^1、10^2、…，向右每位的权值依次为 10^{-1}、10^{-2}、…。例如，对于十进制数“555.55”，虽然每个数码均为 5，但处于不同位置的 5 的权值不同。因此，十进制数“555.55”实际表示的数值大小为

$$5\times10^2+5\times10^1+5\times10^0+5\times10^{-1}+5\times10^{-2}$$

一般地，任意一个十进制数都可以展开为以下的位权展开式：

$$\sum_{i=-m}^{n-1} d_i \times 10^i$$

其中，d_i是第 i 位数码，10^i则为第 i 位的权值，n 和 m 分别表示整数部分和小数部分的位数。

1.2.2 二进制

数字电路基于开关电路实现，而开关具有闭合和断开两个稳定状态。假设用其中一个状态代表 0，另一个代表 1，当开关交替闭合、断开时，自然就形成了 0 和 1 表示的二值序列。多个开关同时工作时则形成了多位 0 和 1 的组合，因此，数字电路自然与二进制数(Binary)相对应。

二进制只使用 0 和 1 两个数码，采用多位计数体制进行计数，其进位规则是逢二进一，借位规则是借一当二。

任何一个二进制数可以用如下位权展开式表示：

$$\sum_{i=-m}^{n-1} b_i \times 2^i$$

其中，b_i为二进制数码 0 或 1，2^i则为其相应的权值，n 和 m 分别表示整数部分和小数部分的位数。例如，$(1011.101)_2$表示的数的大小为

$$1\times2^3+0\times2^2+1\times2^1+1\times2^0+1\times2^{-1}+0\times2^{-2}+1\times2^{-3}$$

一般地，N 进制数共有 N 个数码，其权位展开式可以表示为

$$\sum_{i=-m}^{n-1} k_i \times N^i$$

其中，k_i是第 i 位数码的大小，N^i为第 i 位数码的权值，n 和 m 分别表示整数部分和小数部分的位数。

1.2.3 十六进制

二进制的优点是简单，而且便于运算，缺点是当位数很多时不但书写麻烦而且不易识别。二进制数书写时需要占用较大的篇幅，按权展开式的计算也比较麻烦。例如，32 位二进制数“1_1111_0001_1110_1010_1010.0111_0110_111”的大小就不容易识别了。

为了解决这个问题，人们想到一种方法：将二进制数以小数点为界，向左和向右每四

位合并为一个十六进制数码(常用)，或者每三位合并为一个八进制数码(周易是建立在八进制基础上的，但八进制目前已不常用了)，以方便表示和识别。

十六进制(Hexadecimal)采用“0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A、B、C、D、E、F”十六个数码，其进位规则是逢十六进一，借位规则是借一当十六。以小数点为界，十六进制整数向左每位的权值依次为 16^0、16^1、16^2、…，向右小数部分每位的权值依次为 16^{-1}、16^{-2}、…。例如：

$$
\begin{aligned}
(9AB.1C)_{16} &= (9\times16^2+10\times16^1+11\times16^0+1\times16^{-1}+12\times16^{-2})_{10}\\
&= (2475.109375)_{10}
\end{aligned}
$$

即十六进制数 9AB.1C 和十进制数 2475.109375 等值。

十六进制数既方便书写又方便识别，是数字系统中常用的数制之一。四位二进制数和十进制数、十六进制数之间关系的对照表如表 1-1 所示。

表 1-1 不同进制数的对照表

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
00	0000	0	08	1000	8
01	0001	1	09	1001	9
02	0010	2	10	1010	A
03	0011	3	11	1011	B
04	0100	4	12	1100	C
05	0101	5	13	1101	D
06	0110	6	14	1110	E
07	0111	7	15	1111	F

1.2.4 不同进制的转换

日常生活中我们习惯使用十进制计数，而数字系统是由产生和处理二进制数码 0 和 1 的开关电路构建的，所以用数字系统进行数值计算时，就需要将十进制数转换成二进制数送入数字系统，计算完成后再将二进制数还原成十进制数以方便识别。

1. 十进制数转换成二进制数

十进制数转换为二进制数时，整数部分和小数部分的转换方法不同。将整数部分和小数部分分别转换完成后，再合并为一个数。

十进制整数转换成二进制数时采用“除 2 取余”的方法。具体做法是：用 2 去除十进制整数，得到一个商数和一个余数；再用 2 去除新得到的商数，又会得到一个商数和一个余数，反复进行直到商数为 0 时为止，把最后得到的余数作为二进制数的最高位，把最先得到的余数作为二进制数的最低位，依次排列即得到转换结果。

【例 1-1】 将十进制整数 173 化为二进制数。

解 十进制整数的转换采用“除 2 取余，逆序排列”的方法。

$$
\begin{array}{r|l l}
2 & 173 & \\
\hline
2 & 86 & \text{余数}=1=k_0 \\
\hline
2 & 43 & \text{余数}=0=k_1 \\
\hline
2 & 21 & \text{余数}=1=k_2 \\
\hline
2 & 10 & \text{余数}=1=k_3 \\
\hline
2 & 5 & \text{余数}=0=k_4 \\
\hline
2 & 2 & \text{余数}=1=k_5 \\
\hline
2 & 1 & \text{余数}=0=k_6 \\
\hline
 & 0 & \text{余数}=1=k_7
\end{array}
$$

因此，$(173)_{10}=(10101101)_2$。

十进制小数转换为二进制数时采用“乘 2 取整”的方法。具体做法是：用 2 乘以十进制小数，将得到的乘积整数部分取出；再用 2 乘以余下的小数，再将乘积的整数部分取出，反复进行直到乘积的小数部分为 0 或者满足精度要求为止。把最先得到的整数作为二进制小数的最高位，把最后得到的整数作为二进制数的最低位，依次排列即可得到等值的二进制小数。

【例 1-2】 将十进制小数 0.8125 化为二进制数。

解 十进制小数的转换采用“乘 2 取整，顺序排列”的方法。

$$
\begin{array}{r l}
0.8125 & \\
\times\qquad 2 & \\
\hline
1.6250 & \text{整数部分}=1=k_{-1} \\
0.6250 & \\
\times\qquad 2 & \\
\hline
1.2500 & \text{整数部分}=1=k_{-1} \\
0.2500 & \\
\times\qquad 2 & \\
\hline
1.5000 & \text{整数部分}=1=k_{-1} \\
0.5000 & \\
\times\qquad 2 & \\
\hline
1.0000 & \text{整数部分}=1=k_{-1}
\end{array}
$$

因此，$(0.8125)_{10}=(0.1101)_2$。

若需要将十进制数 173.8125 转换为二进制数，则为 10101101.1101。

上述转换方法可以类推到将十进制数转换为十六进制数，即十进制整数部分“除 16 取余”，小数部分采用“乘 16 取整”的方法。

2. 二进制数转换成十进制数

二进制数转换成十进制数的基本方法是按照其位权展开式进行展开，然后将各部分相加即可得到等值的十进制数。例如：

$$(1011.101)_2=(1\times2^3+0\times2^2+1\times2^1+1\times2^0+1\times2^{-1}+0\times2^{-2}+1\times2^{-3})_{10}=(11.625)_{10}$$

十六进制数转换成十进制数的方法相同。例如：

$$(F5.6E)_{16}=(15\times16^1+5\times16^0+6\times16^{-1}+14\times16^{-2})_{10}=(245.4296875)_{10}$$

3. 二进制数和十六进制数的相互转换

二进制数和十六进制数的相互转换比较容易。将二进制数转换为十六进制数时，只需要从小数点开始，向左、向右每四位合并为一位十六进制数码对应排列就可以了。相反地，将十六进制数转换为二进制数时，只需要把每位十六进制数码重新展开为四位二进制数对应排列即可。例如：

$$(1010\ 0110\ 0010.1011\ 1111\ 0011)_2=(A62.BF3)_{16}$$

$$(7E3.5B4)_{16}=(0111\ 1110\ 0011.0101\ 1011\ 0100)_2$$

综上所述，常用进制数之间的转换方法如图 1-4 所示。

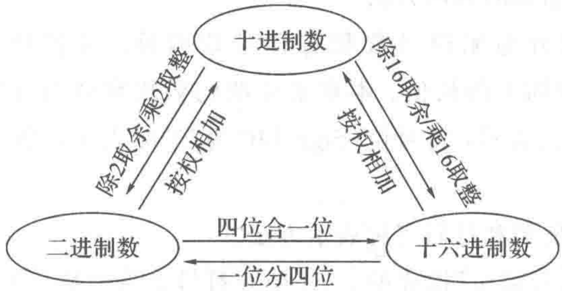


图 1-4　常用进制数之间的转换

1.3　补　码

用十进制进行运算时，做加法容易，做减法则比较麻烦。做减法时，首先需要比较两个数的大小，然后用大数减去小数，运算结果取大数的符号。这种运算方法若用数字系统实现，则电路很复杂。能否将减法运算转化为加法运算，以方便数字系统实现呢？下面以日常生活中常用的手表为例进行分析。

假设早上 7 点起床，发现手表在昨天晚上 11 点停了，这时就需要将手表从 11 点调到 7 点。调表的方法有两种：第一种方法是将表针逆时针回拨 4 格，做减法，即 11－4＝7，如图 1-5 所示；第二种方法是将表针顺时针向前拨 8 格，做加法，即 11＋8＝(12)＋7，同样可以达到目的。

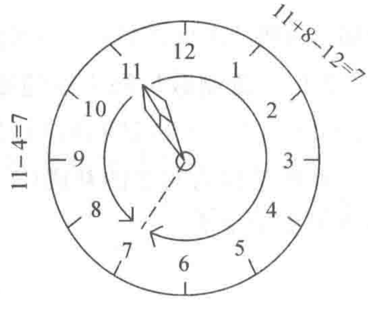


图 1-5　调表

这个例子说明，对于手表来说，在忽略进位的情况下，做加法和做减法的效果是一样的，也就是说，可以用加法运算来代替减法运算。关键问题是，怎么知道减 4 可以转化为加 8 呢？答案是 4＋8＝12，恰好为表盘的模(也称为进制、容量)。也就是说，对于模 12 来说，8 为 4 的补码。

这种思维方式可以类推到其他进制。例如，对于模 10 运算，9－4 可以用 9＋6 代替，在忽略进位的情况下，运算结果是一样的，即 6 为 4 的补码。对于模 100 运算，86－45 可以用 86＋55 代替，即 55 是 45 的补码。

对于二进制系统也是同样的道理。以四位二进制(模16)系统为例，如图1-6所示，若要做减法运算1011－0111(对应十进制11－7)时，首先应找到0111的补码。因为7＋9＝16，所以1011－0111可以用加法运算1011＋1001(十进制11＋9)代替，即对于模16运算，1001为0111的补码。

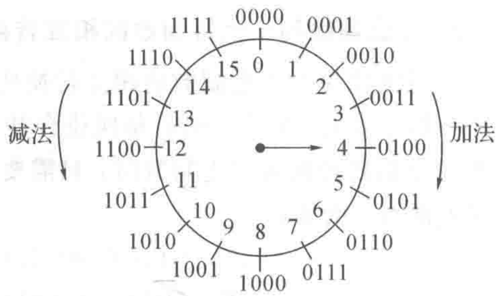


图1-6　四位二进制系统

一般地，对于n位二进制数(模2^n)，如何求数的补码呢？下面先介绍数的表示方法。

在数字系统中，数分为无符号数和有符号数两种。无符号数每位都是“数值位”(Magnitude Bits)，都有固定的权值。本章节介绍的数均默认为无符号数。有符号数采用“符号位＋数值位”的形式表示，符号位(Sign Bit)为“0”时表示正数，为“1”时表示负数，而数值位表示数值的大小。

有符号数有原码、反码和补码三种表示方法。

对于“符号位＋n位数值位”构成的$n+1$位有符号二进制数，其原码的格式为

$$S,\ b_{n-1},\ \cdots,\ b_0$$

其中，S为符号位，b_{n-1}，…，b_0为n位二进制数，数值大小用N表示。

原码能够表示的数的范围为$-(2^n-1)\sim+(2^n-1)$。对于8位有符号二进制数，能够表示的数的范围为$-127\sim+127$，其中数“0”的表示方式有两种：0,0000000(＋0)和1,0000000(－0)。

反码又称为对1的补码(1′s complement)。用反码表示有符号数时，符号位保持不变，数值大小定义为

$$(N)_{\text{反码}}=\begin{cases}N & (\text{正数时})\\(2^n-1)-N & (\text{负数时})\end{cases}$$

例如，原码1,0101011(－43)的反码为1,1010100(－43)。

8位二进制数反码表示的数的范围为$-127\sim+127$，其中数“0”的表示方式仍然有两种：00000000(＋0)和11111111(－0)。

补码又称为对2的补码(2′s complement)。用补码表示有符号数时，符号位保持不变，数值大小定义为

$$(N)_{\text{补码}}=\begin{cases}N & (\text{正数时})\\2^n-N & (\text{负数时})\end{cases}$$

例如，原码1,0101011(－43)的补码为1,1010101(－43)。

8位二进制数补码表示数的范围为$-128\sim+127$，其中数“0”只有一种表示方法：0,0000000。

表1-2为8位二进制数码表示的无符号数以及有符号数的原码、反码和补码表示数值大小的对照表。

表 1-2　8 位二进制无符号数和有符号数三种表示方法对照表

8 位二进制数	无符号数	有符号数		
		原码	反码	补码
0000_0000	0	+0	+0	+0
0000_0001	1	+1	+1	+1
…	…	…	…	
0111_1101	125	+125	+125	+125
0111_1110	126	+126	+126	+126
0111_1111	127	+127	+127	+127
1000_0000	128	−0	−127	−128
1000_0001	129	−1	−126	−127
1000_0010	130	−2	−125	
…	…	…		
1111_1110	254	−126	−1	−2
1111_1111	255	−127	−0	−1

注：表中“_”为分隔符，使数值表示更清晰一些，可以省略。

从上述定义可以看出，正数的原码、反码和补码形式相同。在求负数的补码时，为了避免做减法运算，一般方法是：先求出负数的反码，然后在数值位上加 1 即可得到补码。即

$$(N)_{补码}=(N)_{反码}+1 \quad （负数时）$$

有符号数用补码表示以后，使得加法电路既能做加法，也能做减法，因而大大简化了处理器的硬件结构。

【例 1-3】 用二进制补码计算 13+10、13−10、−13+10 和−13−10。

解　由于 13+10=23，故数值大小需要用 5 位二进制数表示。用补码运算时，需要再加上 1 位符号位，所以需要用 6 位有符号二进制数运算。

$$\begin{array}{rr} +13 & 0\ 01101 \\ \underline{+10} & \underline{0\ 01010} \\ +23 & 0\ 10111 \end{array} \qquad \begin{array}{rr} +13 & 0\ 01101 \\ \underline{-10} & \underline{0\ 01010} \\ +3 & (1)0\ 10111 \end{array}$$

$$\begin{array}{rr} -13 & 1\ 10011 \\ \underline{+10} & \underline{0\ 01010} \\ -3 & 1\ 11101 \end{array} \qquad \begin{array}{rr} -13 & 1\ 10011 \\ \underline{-10} & \underline{1\ 10110} \\ -23 & (1)1\ 01001 \end{array}$$

在数字系统中，二进制加法是基本运算，应用补码可以将减法转化成加法，而乘法运算可以用移位相加实现，除法运算可以用移位相减实现，因此计算机 CPU 中的累加器既能进行加法运算，也可以实现减法、乘法和除法运算，而指数、三角函数等都可以分解为加、减、乘、除运算的组合，因此累加器可以实现任意的数值运算。

1.4　编　　码

数码不但可以表示数的大小，还可以用来表示不同的事物。用数码表示不同的事物称为编码(Code)。编码的应用特别广泛，例如居民身份证号是国家对每个公民的编码，学号是学校对每位学生的编码。类似地，还有运动员的编码、货品的条形码和车牌号，等等。另外，编码