"十二五"普通高等教育本科国家级规划教材
国家精品资源共享课程"数字逻辑电路"主教材

高等学校电子信息类精品教材

数字逻辑电路与系统设计

（第3版）

蒋立平 主编
姜 萍 谭雪琴 花汉兵 编著

中国工信出版集团
電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
http://www.phei.com.cn

教育本科国家级规划教材
程“数字逻辑电路”主教材
业科技与教育专著出版资金资助出版
高等学校电子信息类精品教材

数字逻辑电路与系统设计

（第3版）

蒋立平　主编

姜　萍　谭雪琴　花汉兵　编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内容简介

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

本教材系统地介绍了数字逻辑电路的基本概念、基本理论、基本方法，以及常用数字逻辑部件的功能和应用。主要内容包括：数字逻辑基础、逻辑门电路、组合逻辑电路、常用组合逻辑功能器件、时序逻辑电路、常用时序逻辑功能器件、半导体存储器和可编程逻辑器件、脉冲信号的产生与整形、数模和模数转换。本教材将硬件描述语言的介绍渗透于各个章节。

本教材理论联系实际、循序渐进、便于教学。全书叙述简明，概念清楚；知识结构合理，重点突出；深入浅出，通俗易懂，图文并茂；例题、习题丰富，各章还配有复习思考题。

本教材可供高等学校电气信息类专业的本科生和研究生使用，也可供有关专业技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

数字逻辑电路与系统设计 / 蒋立平主编. —3 版. —北京：电子工业出版社，2019.1
ISBN 978-7-121-35221-8

Ⅰ. ①数… Ⅱ. ①蒋… Ⅲ. ①数字电路－逻辑电路－电路设计－高等学校－教材 Ⅳ. ①TN790.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 238875 号

责任编辑：韩同平　　特约编辑：李佩乾
印　　刷：三河市华成印务有限公司
装　　订：三河市华成印务有限公司
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：20　字数：640 千字
版　　次：2008 年 12 月第 1 版
　　　　　2019 年 1 月第 3 版
印　　次：2019 年 1 月第 1 次印刷
定　　价：55.90 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）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@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）88254525，hantp@phei.com.cn。

前　言

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

本书是根据教育部电子电气基础课程教学指导分委员会制定的“数字电子技术基础课程基本教学要求”而编写的。

本书作者长期从事电子技术类课程的教学和科研工作，本书是在总结多年教学积累的基础上编写的：2004 年，涵盖数字逻辑电路的南京理工大学电子学课程群被评为江苏省高等学校优秀课程群；2006 年，数字逻辑电路课程被评为江苏省高等学校一类精品课程；2008 年南京理工大学数字逻辑电路课程被评为国家精品课程；2016 年被评为国家精品资源共享课程；本教材也是江苏省高等学校精品教材立项研究项目。

本书第 1 版、第 2 版分别于 2008 年、2013 年出版，先后被多所院校选作教材，2010 年获全国电子信息类优秀教材一等奖，2011 年被评为江苏省高等学校精品教材。2013 年被遴选为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

当前，随着数字技术的高速发展，开发数字系统的方法和用来实现这些方法的工具已经发生了很大变化，但作为理论基础的基本原理没有改变，因此，对于学生来说理解这些原理以便进行应用，其要求并未降低。就数字系统的硬件实现而言，标准中小规模数字集成电路已不再广泛使用，然而，这些器件经常还会以不同形式出现，这些电路对于研究数字系统基本构成模块的工作原理还具有重要意义。中小规模标准元件的接线及实验，在许多入门性的教学及基础实验课程中仍占有重要位置。为此，本书较为完整地保留了传统数字逻辑电路教材的基础内容。

学习数字逻辑电路课程，常使学生感觉到的一个难点是：除利用以逻辑代数为基础的规范方法（对组合逻辑电路按真值表→表达式→电路图步骤进行设计，对时序逻辑电路按状态定义→状态表→输出和驱动方程→电路图步骤进行设计）来进行电路设计外，如何能利用现有的中规模器件来实现一些较为复杂的数字电路与系统。为增强学生的系统设计能力，本书的一个特点是：除一些常规的例题外，增加了一些实用性强、应用广泛、有一定难度的实例。例如，简易键盘编码电路、多位数字译码显示、计算机输入/输出接口译码电路、数码管动态显示电路、BCD 码加法器、求两数之差绝对值电路、BCD-二进制代码转换电路、键盘扫描电路、串行加法器、串行累加器等。通过对这些实例的学习，除增强系统设计能力外，也有利于培养学生的逻辑思维能力。

将硬件描述语言渗透到各种应用中去，是本书的另一特点。硬件描述语言应用于基本器件的描述，使学生在对器件的认识之初就接触到硬件描述语言，这样循序渐进，使学生尽可能熟悉硬件描述语言与器件、系统的关系。因为可编程器件和硬件描述语言代表了数字电子技术应用的发展方向。

精选习题，让习题起到既利于学生对课程知识的巩固，又利于学生创新和开拓精神的培养的作用。通过习题的训练，使学生的知识学活，不因循守旧，敢于创新，使学生能触类旁通，举一反三，活跃思维。为便于学生学习，本书给出了大部分习题的题解或者参考答案，考虑到本书的篇幅，有小部分难度较大或占篇幅较大的习题题解，以及所有 VHDL 编程设计题的题解，读者可以通过扫描书中给出的相应二维码在线阅读。

本书大部分图形符号采用标准 ANSI/IEEE Std.91—1984，考虑到传统逻辑符号当前仍在广泛使用，特别是考虑到用 ANSI/IEEE 标准逻辑符号绘制中规模集成模块电路的复杂性，本书在提

出 ANSI/IEEE 标准逻辑符号的同时，一般也列出了传统逻辑符号图形，使读者在阅读时不至于为某些传统逻辑符号而感到困惑。事实上，传统逻辑符号已列入补充标准 ANSI/IEEE Std.91a—1991。

本书可以作为高等学校电气信息类专业数字逻辑电路的入门教材；对于那些不熟悉基本电子学概念，或者对数字器件的电气特性不感兴趣的学生，可以跳过第 2 章，本书中其他部分的内容已尽可能地独立于这部分内容。

本书第 1、2、3 章由姜萍编写，第 4、6 章由蒋立平编写，第 5、7 章由谭雪琴编写，第 8、9 章由花汉兵编写。蒋立平负责全书内容的规划和统稿。

本书在编写过程中引用了诸多学者和专家的著作和论文中的研究成果，在这里向他们表示衷心感谢。同时，也向一直热情支持和关心本书出版的电子工业出版社韩同平编辑表示感谢。

由于作者水平有限，错误和不当之处在所难免，敬请各位读者不吝赐教。

作者电子邮件地址：jianglp@126.com

作　者

目　　录

绪　论

目前，人类社会已经进入数字时代，在过去的30年里，数字技术的发展速度是十分惊人的。在人们的日常生活中，生活用品已逐渐从模拟形式变化为数字形式，如数字摄像机、数码相机、数字化的移动电话、数字化的X光片、磁共振成像仪（MRI），以及医院使用的超声系统等，数字技术的应用随处可见，它已渗透到国民经济及人民生活的所有领域，并起着越来越重要的作用。可以这样说：数字化程度的高低，已成为衡量一个国家科学技术水平高低的一个重要标志。

随着集成电路的发展，特别是大规模和超大规模集成电路的发展，数字技术将在通信、商贸、交通控制、导航、医疗、天气监测、因特网等领域，在商业、工业和科研部门取得更大的成就。有理由相信，数字技术未来的发展速度会更快，对人类产生的影响将越来越深刻。

自然界中大部分的物理量都是模拟量，例如温度、时间、压力、距离和声音等。图1表示的是某一天中一个城市的温度变化情况，可以看出这是一条平滑的曲线，也就是说，在给定的时间内，温度值的变化是连续的。如果用整点时刻的值代表每个小时时间内的温度（这个过程称为“抽样”），便会得到如图2所示的用抽样值表示的温度与时间的关系图。如果再对整点时刻的温度值进行四舍五入（这个过程称为“量化”），并将其表示为二进制数值（这个过程称为“编码”），便会得到如图3所示温度变化的数字量图。可以看出一个模拟的物理量在经过抽样、量化、编码后，便会得到一个与之对应的数字量。

信号是传载信息的函数，信号常分为模拟信号、连续时间信号、离散时间信号和数字信号。电子电路中的信号一般分为两类：模拟信号，指该信号是时间的连续函数，在一定动态范围内幅值可取任意值；处理模拟信号的电路，称为模拟电路。数字信号，指该信号无论从时间上还是从大小上看其变化都是离散的，即不连续，信号的幅值只可以取有限个值；处理数字信号的电路，称为数字电路。

和模拟电路相比，数字电路具有以下一些特点：

（1）在数字电路中，工作信号是二进制的数字信号，即只有0和1两种可能的取值；反映到电路上，就是电压的高、低或脉冲的有、无两种状态。因此，凡是具有两个稳定状态的元件，其状态都可以用来表示二进制的两个数码，故其基本单元电路简单，这对实现电路的集成化十分有利。

（2）数字电路中处理的是二进制的数字信号，在稳态时，数字电路中的半导体器件一般都工作在截止和导通状态，即相当于开关工作时的开和关状态。而研究数字电路时关心的仅是输出和输入之间的逻辑关系。

（3）数字电路不仅能进行数值运算，而且能进行逻辑判断和逻辑运算，这在计算机技术及很多方面是不可缺少的，因此，也常把数字电路称为“数字逻辑电路”。

（4）数字电路工作可靠，精度高，并且具有较强的抗干扰能力。数字信号便于长期储存，可使大量的信息资源得以妥善保存，保密性好，使用方便，通用性强。

由于数字电路具有上述特点，其发展十分迅速。但是，数字电路也有一定的局限性。与此同时，模拟电路也有其优于数字电路的一些特点。因此，实际的电子系统往往是数字电路和模拟电路的结合。

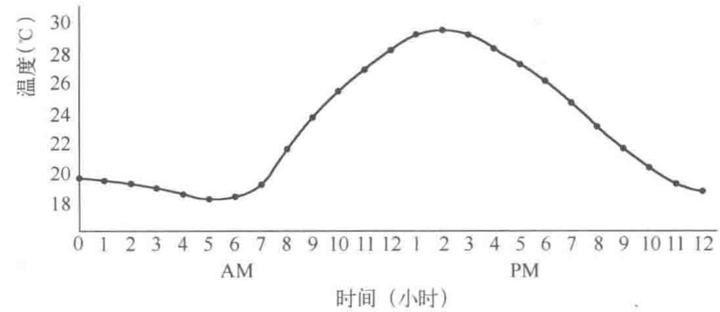


图 1　温度和时间的关系图（用模拟量表示）

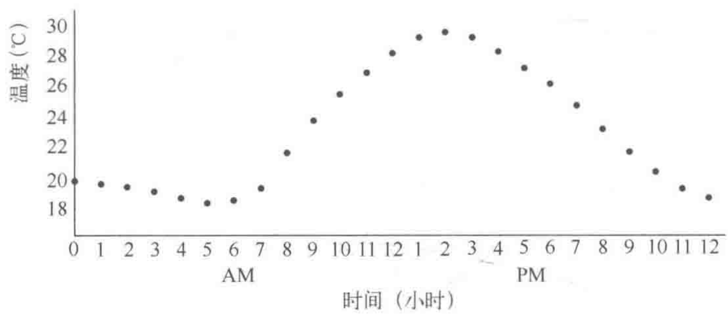


图 2　温度和时间的关系图（用抽样值表示）

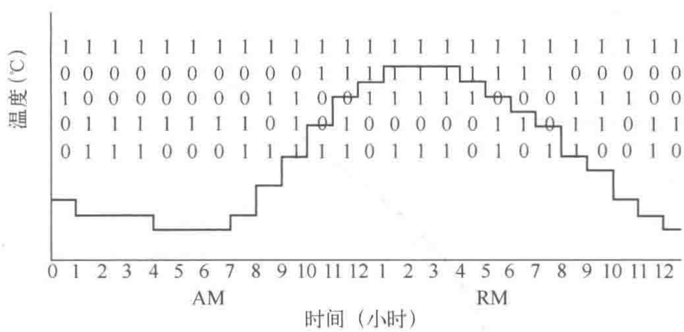


图 3　温度和时间的关系图（用数字量表示）

第 1 章　数字逻辑基础

数字系统所处理的信息通常是用二进制数的形式表示的，可采用的符号只有 0 和 1。本章首先介绍数制和编码，并讨论了二进制的数值运算。为了对数字电路进行分析和设计，本章还介绍了逻辑代数的基础知识，包括逻辑代数的基本公式、常用公式和重要定理，并讲述了逻辑函数的表示方法，介绍如何应用逻辑代数的公式和定理来化简逻辑函数；最后讨论了利用卡诺图化简逻辑函数的方法，并介绍了不完全确定逻辑函数的概念。

1.1　数制与数制转换

所谓“数制”是指进位计数制，即用进位的方式来计数。同一个数可以采用不同的进位计数制来计量。在日常生活中，人们习惯于使用十进制，而在数字电路中常采用二进制，这意味着，将十进制数输入到数字系统之前，必须要把它转换为二进制数；同样，在一个数字系统的输出部分，二进制数也必须要转换为十进制数，以方便人们的读取。除了二进制和十进制外，在数字系统中还广泛采用八进制和十六进制，由于八进制和十六进制可以方便地与二进制进行相互转换，因此这两种进制一般可以用来表示数值较大的二进制数。

1.1.1　十进制

十进制是人们最常用的一种数制。它有以下特点。

（1）采用 10 个计数符号（也称数码）：0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9。就是说，十进制数中的任 1 位，只可能出现这 10 个符号中的某 1 个。

（2）十进制数的进位规则是“逢十进一”。即每位计满十就向高位进 1，进位基数为 10。所谓“基数”，它表示该数制所采用的计数符号的个数及其进位的规则。因此，同一个符号在一个十进制数中的不同位置时，它所代表的数值是不同的。例如，十进制数 1976.5 可写为：

$$1976.5 = 1\times 10^3 + 9\times 10^2 + 7\times 10^1 + 6\times 10^0 + 5\times 10^{-1}$$

我们把一种数制中各位计数符号为 1 时所代表的数值称为该数位的“权”。十进制数中各位的权是基数 10 的整数次幂。

根据上述特点，任何一个十进制数可以表示为：

$$(N)_{10} = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \times 10^i \tag{1.1}$$

式中，a_i 为基数 10 的 i 次幂的系数，它可以是 0~9 中的任一个计数符号；n 为$(N)_{10}$的整数位个数；m 为$(N)_{10}$的小数位个数；下标 10 为十进制的进位基数；10^i 为 a_i 所在位的权。

通常把式（1.1）的表示形式称为按权展开式或多项式表示法。

从计数电路的角度来看，采用十进制是不方便的。因为要构成计数电路，必须把电路的状态跟计数符号对应起来，十进制有 10 个符号，电路就必须有 10 个能严格区别的状态与之对应，这样将在技术上带来许多困难，而且也不经济，因此在计数电路中一般不直接采用十进制。

1.1.2 二进制

和十进制类似，二进制具有以下特点。

（1）采用两个符号 0 和 1。

（2）二进制的进位规则为“逢二进一”，即 1+1=10（读为“壹零”）。必须注意，这里的“10”和十进制中的“10”是完全不同的，它实际上等值于十进制数“2”。

根据上述特点，任何具有 n 位整数 m 位小数的二进制数的按权展开式可表示为：

$$(N)_2 = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \times 2^i \tag{1.2}$$

式中，系数 a_i 可以是 0 或 1；下标 2 表示为二进制。

例如：$$(101.11)_2 = 1\times 2^2 + 0\times 2^1 + 1\times 2^0 + 1\times 2^{-1} + 1\times 2^{-2}$$

根据二进制的特点，目前数字电路普遍采用二进制，其原因如下。

（1）二进制的数字装置简单可靠，所用元器件少。二进制只有两个计数符号 0 和 1，因此它的每一位都可以用任何具有两个不同稳定状态的元件来实现。例如，继电器的闭合和断开，晶体管的饱和与截止等。只要规定一种状态代表“1”，另一种状态代表“0”，就可以表示二进制数。这样使数码的存储和传送变得简单而可靠。

（2）二进制的基本运算规则简单。例如：

加法运算	$0+0=0$	$1+0=0+1=1$	$1+1=10$
乘法运算	$0\times 0=0$	$0\times 1=1\times 0=0$	$1\times 1=1$

因此二进制数的运算操作简便。

1.1.3 十六进制和八进制

用二进制表示一个数，所用的数位要比十进制多很多，例如表示十进制数$(255)_{10}$，只需 3 位，而用二进制表示该数，却需 8 位，即$(11111111)_2$，不便于书写和记忆。为此常采用十六进制和八进制来表示二进制。上述十进制和二进制的表示法可推广到十六进制和八进制。

十六进制中，采用 16 个计数符号：0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F。符号 A~F 分别对应于十进制数的 10~15。进位规则是“逢十六进一”，进位基数是 16，十六进制数中各位的权是 16 的整数次幂。任何一个十六进制数，按权展开式为：

$$(N)_{16} = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \times 16^i \tag{1.3}$$

例如：$$\begin{aligned}(6D.4B)_{16} &= 6\times 16^1 + D\times 16^0 + 4\times 16^{-1} + B\times 16^{-2}\\ &= 6\times 16^1 + 13\times 16^0 + 4\times 16^{-1} + 11\times 16^{-2}\end{aligned}$$

八进制中，采用八个计数符号：0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7，进位规则是“逢八进一”，进位基数是 8。八进制数中各位的权是 8 的整数次幂，任何一个八进制数的按权展开式为：

$$(N)_8 = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \times 8^i \tag{1.4}$$

例如：$$(374.6)_8 = 3\times 8^2 + 7\times 8^1 + 4\times 8^0 + 6\times 8^{-1}$$

1.1.4 二进制数与十进制数之间的转换

1. 二进制数转换为十进制数

将二进制数转换为等值的十进制数，常用按权展开法和基数连乘、连除法。

（1）按权展开法

这种方法是将二进制数按式（1.2）展开，然后按十进制的运算规则求和，即得等值的十进制数。

【例 1.1】 将二进制数$(1101.101)_2$转换为等值的十进制数。

解：
$$\begin{aligned}(1101.101)_2 &= 1\times2^3+1\times2^2+0\times2^1+1\times2^0+1\times2^{-1}+0\times2^{-2}+1\times2^{-3}\\ &=8+4+0+1+0.5+0+0.125\\ &=(13.625)_{10}\end{aligned}$$

简化此法，只要将二进制数中数码为 1 的那些位的权值相加即可，而数码为 0 的那些位可以不去管它。

【例 1.2】 将二进制数$(101101.01)_2$ 转换为等值的十进制数。

解：
$$\begin{array}{l}(1\ \ 01\ \ \ 1\ 01.01)_2\\ \ \downarrow\ \ \ \downarrow\ \ \ \ \downarrow\ \ \ \downarrow\ \ \ \downarrow\\ \ 2^5+2^3+2^2+2^0+2^{-2}\\ =32+8+4+1+0.25\\ =(45.25)_{10}\end{array}$$

表 1.1　2 的幂所对应的数

n	2^n	n	2^n	n	2^n	n	2^n
0	1	6	64	12	4 096	18	262 144
1	2	7	128	13	8 192	19	524 288
2	4	8	256	14	16 384	20	1 048 576
3	8	9	512	15	32 768	21	2 097 152
4	16	10	1 024	16	65 536	22	4 194 304
5	32	11	2 048	17	131 072	23	8 388 608

这种方法要求对 2 的各次幂值比较熟悉，才能较快地实现转换。表 1.1 中列出了 2 的 n 次幂所表示的 24 个数。在计算机工作中，2^{10}用 K（kilo）表示，2^{20}用 M（mega）表示，2^{30}用 G（giga）表示，2^{40}用 T（tera）表示。因此，$4K=2^{12}=4096$，$16M=2^{24}=16\ 777\ 216$。计算机的存储容量通常用字节（B）来表示。一个字节等于 8 位二进制信息，可以表示键盘上的一个字符。计算机上一个 4G 的硬盘就能够容纳 $4G=2^{32}$ 字节的数据（大约 40 亿个字节）。

（2）基数连乘、连除法

二进制数（为了简化分析，假设有 4 位整数，4 位小数）的表示形式可以改写成如下连乘、连除的形式：

$$\begin{aligned}N_2 &= (a_3a_2a_1a_0a_{-1}a_{-2}a_{-3}a_{-4})_2\\ &= a_3\times2^3+a_2\times2^2+a_1\times2^1+a_0\times2^0+a_{-1}\times2^{-1}+a_{-2}\times2^{-2}+a_{-3}\times2^{-3}+a_{-4}\times2^{-4} \qquad (1.5)\\ &= [(a_3\times2+a_2)\times2+a_1]\times2+a_0+\{a_{-1}+[a_{-2}+(a_{-3}+a_{-4}\times2^{-1})\times2^{-1}]\times2^{-1}\}\times2^{-1}\end{aligned}$$

式（1.5）中，为了说明运算次序，在式子下面画上了算法线条。可见，用连乘、连除法把二进制数转换为十进制数时，其整数和小数部分的转换方法不完全相同。

（1）整数部分的转换是从整数部分最高位开始的：① 将最高位数乘以 2，将所得乘积与下 1 位数相加；② 将①所得之和乘以 2，其乘积再与更下 1 位数相加；③ 这样重复做下去，直到加上整数部分的最低位为止，即得转换后的十进制整数部分。

（2）小数部分的转换是从小数部分最低位开始的：① 将最低位数除以 2(即$\times2^{-1}$),将所得结果与高 1 位数相加；② 把①所得结果除以 2，其结果再与更高 1 位数相加；这样重复做下去，直到加上小数部分的最高位后，再除以 2，即得转换后的十进制小数部分。

（3）最后把整数部分和小数部分相加，即得所求十进制数。

【例 1.3】 用基数连乘、连除法将二进制数$(11001.101)_2$转换为等值的十进制数。

解： 分别转换二进制数的整数部分和小数部分，然后把两部分加起来。

整数部分
从最高位开始

1 1 0 0 1

$1\times2+1=3$
$3\times2+0=6$
$6\times2+0=12$
$12\times2+1=25$

整数部分$(11001)_2=(25)_{10}$。

小数部分 0.101，从最低位开始：

$$1\div2+0=0.5\quad 0.5\div2+1=1.25\quad 1.25\div2=0.625$$

即小数部分$(0.101)_2=(0.625)_{10}$。

故$(11001.101)_2=(25.625)_{10}$。

2. 十进制数转换为二进制数

将二进制数转换为十进制数的两种方法的运算过程反过来，就可以实现十进制数到二进制数的转换。相应的两种方法为：提取 2 的幂及基数连除、连乘法。

（1）提取 2 的幂

这种方法是前述用按权展开法将二进制数转换为十进制数运算过程的逆过程，即将十进制数分解为 2 的幂之和，然后从该和式求得对应的二进制数。

【例 1.4】 将十进制数（45）$_{10}$转换为等值的二进制数。

解：$(45)_{10}=32+8+4+1=2^5+2^3+2^2+2^0$

$=1\times2^5+0\times2^4+1\times2^3+1\times2^2+0\times2^1+1\times2^0$

$=(101101)_2$

这种方法的关键是要熟悉 2 的各次幂的值。

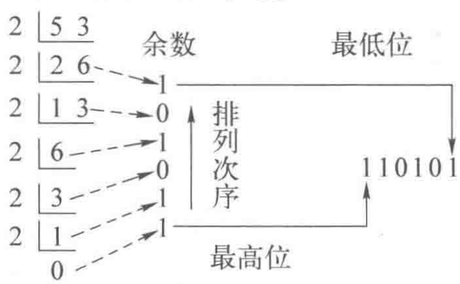
（2）基数连除、连乘法

这种方法也是把十进制数的整数部分和小数部分分别进行转换，然后将结果相加。

整数部分采用“除 2 取余”法转换，即把十进制整数连续除以 2，直到商等于零为止，然后把每次所得余数（1 或者 0）按相反的次序排列，即得转换后的二进制数整数。

【例 1.5】 将十进制数$(53)_{10}$转换为等值的二进制数。

解：



故$(53)_{10}=(110101)_2$。

小数部分采用“乘 2 取整”法转换，即把十进制小数连续乘以 2，直到小数部分为零或者达到规定的位数为止，然后将每次所取整数按序排列，即得转换后的二进制小数。

【例 1.6】 将十进制数$(0.6875)_{10}$转换为等值的二进制数。

解：