高职高专通用教材

数字电子技术基础

何其贵 主编

北京航空航天大学出版社

数字电子技术基础

何其贵 主编

北京航空航天大学出版社

内容提要

《数字电子技术基础》系统地介绍了数字逻辑电路的基本概念、数字逻辑电路分析及设计的基本理论和方法。全书共6章。第1章介绍了数字电路的基本理论；第2、第3及第4章系统地介绍了数字逻辑电路的分析与设计，这一部分是本书的重点、难点，也是学习其他数字设计方法的基础；最后2章则分别介绍了D/A、A/D转换器及采用大规模集成电路进行数字设计的特点和一般方法。本书每章后面都有本章小结、思考与练习题及技能训练，便于读者巩固所学理论知识，提高实践操作能力。

本书可作为高职高专院校电子、电气、自动化、计算机等有关专业的教材或参考书，也可作为自学者、科技人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术基础/何其贵主编. —北京：北京航空航天大学出版社，2005.02

ISBN 7-81077-555-3

Ⅰ.数… Ⅱ.何… Ⅲ.数字电路—电子技术 Ⅳ. TN79

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第042934号

数字电子技术基础

何其贵 主编

责任编辑：金友泉

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(100083) 发行部电话：010-82317024 传真：010-82328026

http://www.buaapress.com.cn E-mail:bhpress@263.net

北京宏伟双华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本：787×960 1/16 印张：9.75 字数：218千字

2005年2月第1版 2005年2月第1次印刷 印数：5 000册

ISBN 7-81077-555-3 定价：14.00元

前　言

本教材是根据1999年教育部组织制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》及《高职高专教育专业人才培养目标及规格》要求，结合作者多年的教学改革和实践经验，以培养高素质、具备综合工作能力的人才为出发点编写而成的。

本书从工程应用的实际出发，突出实用性及基本能力的培养，重点讲述数字电路的基本理论和电路分析及设计的基本方法。

作为教材或教学参考书，既要符合科学技术发展的需要，又应能培养学生分析问题和解决问题的能力。为满足上述要求，本书主要有如下创新：

1. 内容组织　重点讲述“方法”，而不是各种各样的逻辑线路，更没有烦琐的数学推导，力求为学生提供独立分析和设计逻辑线路的“工具”。

2. 讲述方法　对问题的解答，重在思路的分析，使学生明白其来龙去脉，培养学生独立解决问题的能力。

3. 文字叙述　力求做到言简意赅，便于读者自学。

当然，上述这些考虑是否能够真正实现，还有待于教学实践的检验。

本教材建议学时80～100学时，其中理论教学为50～60学时，实践教学为30～40学时。

本教材由江西信息应用职业技术学院何其贵老师担任主编，余春平老师、钟先芳老师、余秋萍老师和贾洪波老师参与了编写。其中第1、3、5章由何其贵、贾洪波老师编写；第2、4章由余春平老师编写；第6章及附录部分由钟先芳老师和余秋萍老师编写。

在本书编写与整理过程中，得到了兄弟院校许多教授、专家及同事的大力支持和帮助，并提出了一些宝贵意见，在此，向他们表示衷心的感谢。

由于笔者水平所限，书中难免会有错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编　者

2004年8月于江西

目　录

第 2 章 组合逻辑电路

第 3 章 触发器

第 5 章 数/模(D/A)及模/数(A/D)转换

第 6 章 大规模专用集成电路

附 录

参考文献

第 1 章　数字电路基础

1.1　概　述

1.1.1　数、模信号

在实际应用中，人们所接触的信号可分为模拟信号和数字信号两大类。模拟信号是指在时间和数值上都是连续变化的信号，如用传统调频、调幅方式传送的广播电视信号等；数字信号是指信号的变化在时间上是不连续的，即它在时间和幅度上是离散的。数字信号常用二值量信息表示，即既可以用两个有一定数值范围的高、低电平来表示，也可以用两个状态的逻辑符号 0 和 1 来表示。例如，可以用 1 表示灯的亮，0 表示灯的灭等。

1.1.2　数、模电路

能够对模拟信号进行传送、加工及处理的电子电路称为模拟电路，如在电子线路中介绍的交、直流放大器等；类似地，能够对数字信号进行传递、加工及处理的电子电路称为数字电路，如本教材中即将介绍的门电路、触发器和计数器等。

将二极管、三极管、电阻等元器件组成的具有一定逻辑功能的电路（即分立元件电路），集中制作在一块很小的半导体材料基片上，这种电路就叫做“集成电路”。

按照集成度的高低，集成电路可分为：小规模集成电路(SSI)（每个芯片含有 10～100 个元件）、中规模集成电路(MSI)（每个芯片含 100～1 000 个元件）、大规模集成电路(LSI)（每个芯片含 1 000～10 000 个元件）、超大规模集成电路(VLSI)（每个芯片含 10 000～1 000 000 个元件）和超超大规模集成电路(VVLSI)（每个芯片可含 1 000 000 个以上元件）。

1.1.3　数字电路的优点

与模拟电路相比，数字电路主要有如下优点：

(1) 工作可靠性高、抗干扰能力强　数字电路其信号是用高(1)、低(0)电平来描述的，大大提高了电路工作的可靠性及抗噪声干扰能力。

(2) 集成度高　数字电路采用二进制，并作为基本单元电路，其结构简单，对电路元件的精度要求不高，有利于高度集成。

(3) 数字集成电路功耗低、通用性强、成本低。

(4) 保密性好　对数字信息进行编码加密处理，该处理简单，且难于被破解。

1.1.4　数字电路的研究方法

数字电路的传统研究方法是经典法，即先对设计任务进行逻辑分析，求出函数与变量之间的逻辑关系（一般称它为逻辑函数），然后利用布尔代数法或卡诺图等方法对逻辑函数进行简化，最后用集成器件实现逻辑函数。这样设计出来的逻辑电路具有使用器件和连线最少等优点，这种经典法特别适宜于用中、小规模集成数字电路的设计。

1.2　晶体管的开关特性

由模拟电路知识可知，在理想状态下，晶体二极管正偏导通时其正向压降为 0，相当于短路状态；而反偏截止时其反向电流为 0，相当于开路状态。晶体三极管工作在饱和区时其 B－E、C－E 结之间呈现的电阻很小，相当于短路状态；而工作于截止区时其 B－E、C－E 结之间均呈现很高的电阻，相当于开路状态。它们的这种特性与理想开关的特性十分相似。所谓理想开关就是指开关接通时其接触电阻为 0，相当于短路状态；开关断开时其绝缘电阻为无穷大，电流等于 0，处于开路状态，且开关状态的转换能在瞬间完成。因此，在数字电路中，晶体二极管、晶体三极管常被作为开关器件来使用。

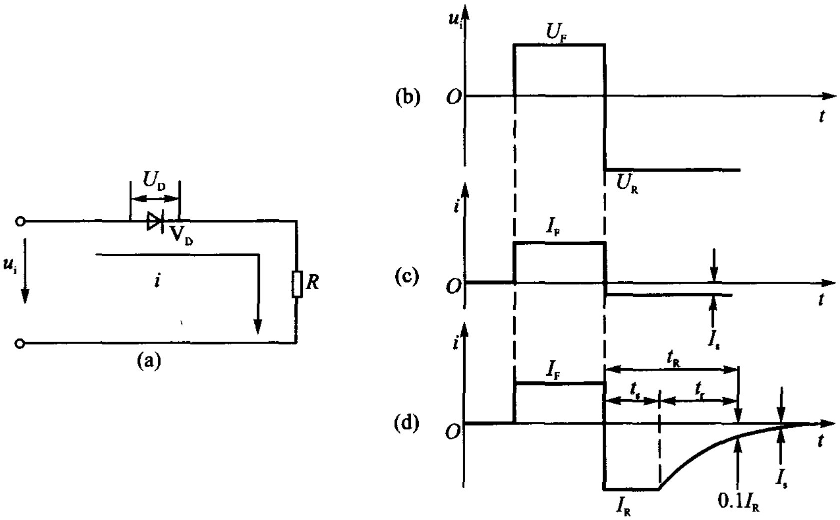
1.2.1　晶体二极管的开关特性

由于实际中使用的晶体二极管不可能是理想的，因此，晶体二极管从截止到饱和或是从饱和到截止都需要一定的时间。在低速开关电路中，二极管导通与截止两种状态之间的转换过程可以看做是无惰性的，转换时间可以不考虑；但在高速开关电路中就必须加以考虑了；又由于二极管从截止转换到导通所需要的时间很短，因此它对开关速度的影响可忽略不计。在这里只分析二极管由导通到截止的过程，即反向恢复过程。

图 1.1(a)是一简单的二极管开关电路，其输入电压波形如图 1.1(b)所示。

当输入电压由正向 U_F 突然变到反向 U_R 时，理想情况下，二极管应立即由导通变为截止，流过二极管的电流为反向漏电流 I_s，如图 1.1(c)所示。但由于二极管并非是理想的，实际电流如图 1.1(d)所示。反向电流 $I_R \approx U_R/R$ 持续一段时间 t_s 后，按指数规律减小，经过一段时间 t_r，电流下降到 $0.1I_R$，然后电流逐渐减小到反向电流 I_s，二极管才截止。其中，反向恢复时间 $t_R = t_s + t_r$。

二极管产生反向恢复过程的根本原因是由于正向工作时，PN 结两边存储了多余的少数载流子，消散该存储电荷是需要时间的。除了少数载流子的存储效应会引起开关的惰性外，二极管的结电容也有影响；当正向工作时 P 区的空穴和 N 区的电子进入空间电荷区，使阻挡层变窄，空间电荷量减少；而当 PN 结由正偏变为反偏时，阻挡层变宽，空间电荷量增加。PN 结



(a) 电路　(b) 输入电压波形　(c) 理想电流波形　(d) 实际电流波形

图 1.1　二极管的开关特性

的这个作用如同一个电容器一样，故称为结电容。因此，产生反向恢复过程的原因可归结为存储电荷效应和结电容效应。

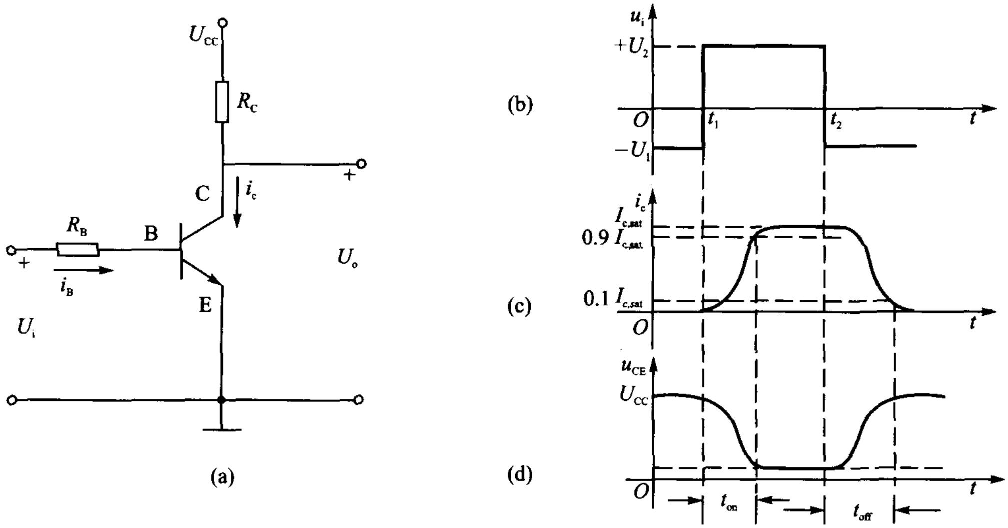
反向恢复时间 t_R 的大小除了与管子本身的性能有关外，与正向导通电流和反向电流的大小也有关。正向电流越小，则存储的少数载流子电荷少；t_R 就短，反向电流越大，则对存储电荷的驱散速度越快，即 t_R 短。因此，为了减小反向恢复时间，应该尽量减小正向电流与反向电流的比值。

1.2.2　晶体三极管的开关特性

由于晶体三极管的发射结、集电结同晶体二极管的 PN 结一样，都存在存储电荷效应和结电容效应。因此，晶体三极管在截止状态与饱和状态之间转换时也具有过渡特性，即状态的转换不可能在瞬间完成，一定有时间的延时。

在图 1.2(a)所示电路中，若三极管基极输入电压为一理想的矩形波，理想条件下其集电极电流 i_c 和集电极电压 u_{CE} 的波形也应是理想的矩形波，但实际的波形却是如图 1.2(d)所示，它们的上升沿和下降沿都变化缓慢，而且上升部分和下降部分与输入波形相比都有时延。产生这种情况的原因同样是因为存储电荷效应和结电容效应。

在图 1.2(a)中，规定 u_i 正跳变开始到 i_c 上升至 $0.9I_{c,sat}$ 所需要的时间称为开通时间，用 t_{on} 表示；而从 u_i 负跳变开始到 i_c 下降至 $0.1I_{c,sat}$ 所需要的时间称为关断时间，用 t_{off} 表示。开通时间 t_{on} 与关断时间 t_{off} 总称为三极管的开关时间，它随管子不同而有很大差别，其大小影响三极管的开关速度。



(a) 电路 (b) 输入电压波形 (c) 实际电流波形 (d) 实际电压波形

图 1.2 三极管的开关特性

1.3 数制和码

所谓数制是进位计数制度的简称。在日常生活中有许多不同的数制。例如，十进制是"逢十进一"；钟表计时采用 60 进制，即 60 s 为 1 min，60 min 为 1h；而 12 in 为 1ft，则采用的是十二进制等。

1.3.1 数制表示

1. 十进制的表示

十进制是使用最早的一种主要的计数制度。例如一个十进制数 286.75，可以立刻读出这个数，其中数码"2"代表 200，数码"8"代表 80 等，显然这是由某个数码在数字中处在不同的位置(数位)所决定的。此数也可用一个多项式来表示，即

$$286.75 = 2\times 10^2 + 8\times 10^1 + 6\times 10^0 + 7\times 10^{-1} + 5\times 10^{-2}$$

一般来说，对于一个任意 n 位整数，m 位小数的十进制数$(N)_{10}$可以表示为

$$(N)_{10} = a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_0 a_{-1}\cdots a_{-m} \tag{1-3-1}$$

或

$$(N)_{10} = a_{n-1}\times 10^{n-1} + a_{n-2}\times 10^{n-2} + \cdots + a_0\times 10^0 + a_{-1}\times 10^{-1}\cdots a_{-m}\times 10^{-m} = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i\times 10^i \tag{1-3-2}$$

a_i 表示相应数位的数码，可以是 0，1，…，9 十个数码中的任意一个，记作 $0 \leqslant a_i \leqslant 9$，因此，可以把“10”称为十进制的基数。所谓“基数”是指在一个数制中可能用到的数码个数。例如，二进制的基数是“2”，R 进制的基数是 R。n、m 为正整数，分别代表整数位数和小数位数；$(N)_{10}$的下标 10(也可用 D)表示十进制数。

式(1－3－1)称为十进制数的位置计数法或称并列表示法；式(1－3－2)称为十进制数的多项式表示法，或称按权展开式。

10^i 称为数码 a_i 具有的“权”。例如：数码 a_3 的权为 $10^3 = 1\ 000$，数码 a_0 的权为 $10^0 = 1$。显而易见，处在不同数位上的数码具有不同的“权”。

2. 二进制数的表示

(1) 二进制数的表示方法

与十进制数一样，二进制数的表示也有两种方法：位置计数法和多项式表示法。如

$$1011.01 = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2}$$

等式左边是位置计数法，等式右边是多项式表示法。

一般来说，对于一个任意 n 位整数和 m 位小数的二进制数$(N)_2$ 可以表示为

$$(N)_2 = b_{n-1}b_{n-2}\cdots b_0 b_{-1}\cdots b_{-m} \tag{1-3-3}$$

$$(N)_2 = b_{n-1} \times 2^{n-1} + b_{n-1} \times 2^{n-2} + \cdots + b_0 \times 2^0 + b_{-1} \times 2^{-1} \cdots b_{-m} \times 2^{-m} = \sum_{i=-m}^{n-1} b_i \times 2^i \tag{1-3-4}$$

$(N)_2$ 的下标 2 表示二进制。式中 b_i 表示相应数位的数码，n、m 为正整数，n 代表整数位数，m 代表小数位数。2^i 称为数码 b_i 的权。

(2)二进制数的运算

二进制数的运算规则与十进制数相类似，其运算规则如下：

① 加法运算规则

$0+0=0$　　$0+1=1$　　$1+0=1$　　$1+1=0$ (同时向邻近高位进一)

② 减法运算规则

$0-0=0$　　$0-1=1$ (同时向邻近高位借一)　　$1-0=1$　　$1-1=0$

③ 乘法规则

$0\times0=0$　　$0\times1=0$　　$1\times0=0$　　$1\times1=1$

④ 除法规则

$0\div1=0$　　$1\div1=1$

例 1.1　求 1001 与 1010 之和。

解　将末位对齐逐位相加，则：

$$\begin{array}{rccccc} & & 1 & 0 & 0 & 1 \\ +) & & 1 & 0 & 1 & 0 \\ \hline & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{array}$$

即得：1001＋1010＝10011。

二进制数加法运算将末位对齐逐位相加，但采用“逢二进一”的法则。

例 1.2 求 1101 与 1011 之差。

解 将末位对齐逐位相减，则：

$$\begin{array}{rcccc} & 1 & 1 & 0 & 1 \\ -) & 1 & 0 & 1 & 1 \\ \hline & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array}$$

即得：1101－1011＝0010。

二进制数减法运算亦是将末位对齐逐位相减，当某数位减数大于被减数时，需向高位借位，并且是借一当二。

例 1.3 求 1001 与 1011 的积。

解

$$\begin{array}{rccccccc} & & & & 1 & 0 & 0 & 1 \\ & & & \times) & 1 & 0 & 1 & 1 \\ \hline & & & & 1 & 0 & 0 & 1 \\ & & & 1 & 0 & 0 & 1 & \\ & & 0 & 0 & 0 & 0 & & \\ & 1 & 0 & 0 & 1 & & & \\ \hline & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{array}$$

即得：1001×1011＝1100011。

例 1.4 求 10010001 与 1011 之商。

解

$$\begin{array}{r} 1101\cdots\text{商} \\ 1011\overline{)\,10010001} \\ \underline{1011} \\ 1110 \\ \underline{1011} \\ 1101 \\ \underline{1011} \\ 10\cdots\text{余数} \end{array}$$

二进制数的乘法和除法运算与十进制数的运算类似，但必须采用二进制数的运算规则。

3. 任意进制数的表示

对于一个 n 位整数和 m 位小数的任意进制数 $(N)_R$ 可以表示为

$$(N)_R = c_{n-1}c_{n-2}\cdots c_0 c_{-1}\cdots c_{-m} \tag{1-3-5}$$

或

$$(N)_R = c_{n-1}\times R^{n-1} + c_{n-2}\times R^{n-2} + \cdots + c_0\times R^0 + c_{-1}\times R^{-1}\cdots c_{-m}\times R^{-m} = \sum_{i=-m}^{n-1} c_i \times R^i \tag{1-3-6}$$

式中：$(N)_R$ 的下标 R 表示 R 进制；c_i 可以是 0,1,…,$(R-1)$ 中任意一个数码；n、m 为正整数；R^i 称为 c_i 具有的权。

4. 八进制和十六进制数的表示

八进制数用 0、1、2、3、4、5、6、7 的 8 个数码表示，基数为 8。计数规则是"逢八进一"，即 $7+1=10$（表示八进制数的 8），各数位的权为 8^{n-1}、…、8^2、8^1、8^0、8^{-1}、…、8^{-m}。按权展开可写成

$$(N)_8 = p_{n-1}\times 8^{n-1} + p_{n-2}\times 8^{n-2} + \cdots + p_0\times 8^0 + p_{-1}\times 8^{-1}\cdots p_{-m}\times 8^{-m} = \sum_{i=-m}^{n-1} p_i \times 8^i \tag{1-3-7}$$

如 $(368.25)_8 = 3\times 8^2 + 6\times 8^1 + 8\times 8^0 + 2\times 8^{-1} + 5\times 8^{-2}$。

同理十六进制数是用 0、1、2、3、…、9、A、B、C、D、E、F 来表示 0～15 共 16 个数码，基数为 16。其中 A、B、C、D、E、F 分别表示 10、11、12、13、14、15 这 6 个数码。其计数规则是"逢十六进一"，即 $F+1=10$（表示十六进制数的 16）。按权展开可写成

$$(N)_{16} = q_{n-1}\times 16^{n-1} + q_{n-2}\times 16^{n-2} + \cdots + q_0\times 16^0 + q_{-1}\times 16^{-1}\cdots q_{-m}\times 16^{-m} = \sum_{i=-m}^{n-1} q_i \times 16^i \tag{1-3-8}$$

如 $(257.36)_{16} = 2\times 16^2 + 5\times 16^1 + 7\times 16^0 + 3\times 16^{-1} + 6\times 16^{-2}$。

1.3.2 数制转换

人们习惯于采用十进制数，但在计算机和数字电路中却是按二进制工作的。因此，在数字系统中，首先必须把十进制数转换成计算机和数字电路能加工、处理的二进制数，而作为数字系统的输出又要转换成人们熟悉的十进制数等。这就要求我们必须掌握各种不同数制之间的相互转换。

1. 二进制数转换为十进制数

由二进制数转换为十进制数只要采用式(1-3-4)，将被转换的二进制数按权相加即可得到与该二进制数相对应的十进制数。

例 1.5　将 $(11001.101)_2$ 转换成十进制数。

解　根据式(1－3－4)，有

$$
\begin{aligned}
(11001.101)_2 &= 1\times2^4+1\times2^3+0\times2^2+0\times2^1+1\times2^0+1\times2^{-1}+0\times2^{-2}+1\times2^{-3}=\\
&16+8+0+0+1+0.5+0.125=\\
&(25.625)_{10}
\end{aligned}
$$

即得：$(11001.101)_2=(25.625)_{10}$。

2. 十进制数转换为二进制数

十进制数转换为二进制数的方法很多，下面仅介绍基数乘除法。基数乘除法包含两个内容，即基数除法和基数乘法。前者用于整数转换，后者用于小数转换。如果某数包含整数和小数两部分，则须将它们分别转换，然后合并起来。

(1) 整数转换

整数转换采用基数除法，即"除 2 取余"的方法。也就是把十进制整数除以 2，取出余数 1 或 0 作为相应二进制数的最低位，把得到的商再除以 2，再取余数 1 或 0 作为二进制数的次低位，依次类推，直至商为 0，所得余数为最高位。

例 1.6　将十进制数$(76)_{10}$转换为二进制数。

解

		余数	
2	76		
2	38	0	最低位
2	19	0	
2	9	1	
2	4	1	
2	2	0	
2	1	0	
	0	1——最高位	

即得：$(76)_{10}=(1001100)_2$。

(2) 小数转换

小数转换采用基数乘法，即"乘 2 取整"的方法。先将十进制小数乘以 2，取其整数 1 或 0 作为二进制小数的最高位，然后将乘积的小数部分再乘以 2，再取整数作为次高位。依次类推，直至小数部分为 0 或达到所要求的精度。

例 1.7　试将$(0.75)_{10}$转换为二进制数。

解

$$
\begin{array}{rl}
0.75 & \\
\times)\quad 2 & \\
\hline
\boxed{1}.50 & b_{-1}=1\text{——小数最高位}\\
\times)\quad 2 & \\
\hline
\boxed{1}.00 & b_{-2}=1\text{——小数最低位}
\end{array}
$$

例 1.8　试将$(26.45)_{10}$转换为二进制数，取小数 5 位。

解　这是一个既有整数又有小数的十进制数，可将其两部分分别转换，然后相加。即

整数部分

		余数	
2	26		
2	13	0	最低位
2	6	1	
2	3	0	
2	1	1	
	0	1	最高位

小数部分

0.45		
×) 2		
$\boxed{0}$.90	$b_{-1}=0$	最高位
×) 2		
$\boxed{1}$.80	$b_{-2}=1$	
×) 2		
$\boxed{1}$.60	$b_{-3}=1$	
×) 2		
$\boxed{1}$.20	$b_{-4}=1$	
×) 2		
$\boxed{0}$.40	$b_{-5}=0$	最低位

即得：$(26.45)_{10}=(11010.01110)_2$。

3. 八进制数、十六进制数与二进制数的转换

将二进制数转换成八进制数或十六进制数的方法是：从小数点开始，分别向左、向右按 3 位（转换成八进制数）或 4 位（转换成十六进制数）分组，最后不满 3 位或 4 位时，则填 0 补充。再将每组以对应的八进制数或十六进制数代替，即可得相应的八进制数或十六进制数。

例 1.9　将二进制数$(10011101)_2$分别转换为八进制数和十六进制数。

解

二进制数	10	011	101	每 3 位一组
	010	011	101	最高位补 0
八进制数	2	3	5	结果

即得：$(10011101)_2=(235)_8$。

二进制数	1001	1101	每 4 位一组
十六进制数	9	D	

即得：$(10011101)_2=(9D)_{16}$。

将八进制数或十六进制数转换成二进制数的方法是：将八进制数或十六进制数的每一位，用对应的 3 位或 4 位二进制数来表示即可。

例 1.10　将八进制数$(327)_8$和十六进制数$(7A)_{16}$分别转换成二进制数。

解

八进制数	(3	2	7 $)_8$
二进制数	011	010	111

即得：$(327)_8=(011010111)_2$。

十六进制数	(7	A $)_{16}$
二进制数	0111	1010