高等学校教学用书

数字电子技术基本教程

SHUZIDIANZI JISHU JIAOCHENG

浙江大学电子学教研室编

浙江大学出版社

内 容 简 介

本书是依据全国电工教材编审委员会电子技术课程指导小组拟定的"数字电子技术课程的基本教学要求"编写的。

内容包括数字电路的分析基础、集成逻辑门电路、组合逻辑电路、集成触发器、时序逻辑电路、数模和模数转换器、脉冲的产生和整形电路、半导体存储器、及其应用等。

本书可作为工科院校电类、自动化类及计算机类等专业50～60学时的教材，也可供有关的工程技术人员作参考。

本书可以与浙江大学电子学教研室编的模拟电子技术基本教程(高等教育出版社出版)配套使用。

数字电子技术基本教程

浙江大学电子学教研室　编

责任编辑　　龚建勋

*　　*　　*

浙江大学出版社出版

上虞汤浦印刷厂排版

萧山东湘印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

*　　*　　*

开本 850×1168　1/32　12.625 印张　316 千字

1989 年 11 月第一版　　1989 年 11 月第一次印刷

印数：1—2000

ISBN 7—308—00168—7

TN·018　　　定价：3.20 元

前　言

本书是根据国家教委批准的《高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求》和总结了组内多年来的教学经验、在几经试用、修改的基础上编写的。本书系统地介绍数字集成电路的分析设计基础、逻辑单元、典型电路和综合应用。本书在保证基本教学内容的前提下，增写了部分加宽加深的内容，均注有*号，对标有*的内容，可作教师选讲和读者自学参考。

当前，各种类型中、大规模集成电路，不仅应用在数字电子计算机中，而且在通讯、控制、测量仪表、医疗设备和家用电器等各个技术领域中的应用也日益广泛。为了适应科学技术和生产发展的需要，为了给读者学习数字电子计算机及其它各种数字系统打好基础，本书在小规模集成逻辑门电路和触发器的基础上，着重介绍中、大规模集成电路的工作原理、功能和应用。

本书一、二、三、四章由宋梓林编写，六、七章由陈道铎编写，五、八、九章由王小海编写。

本书承浙江大学计算机系张德馨教授仔细地审阅了全部书稿，并提出了许多宝贵的意见。浙江大学电子学教研室方伟、张圣训、许中元、郑元耀、刘宝墉、吴燮华、邢建等同志参加了大纲的讨论、本教材的试用，并提出了具体的修改意见。本书编写过程中得到了国家教委电子技术课程指导小组成员邓汉馨教校的关心和指导。对此，一并表示衷心的感谢。

由于我们的水平有限，书中难免存在缺点和错误，恳请读者给予批评指正。

编者　1989年8月

目　录

第一章　数字电路的分析基础………………………………… 1

1.1　数制和编码………………………………………………… 1

1.1.1　数制…………………………………………………… 1

1.1.2　各种进位制数的互相转换…………………………… 4

1.1.3　带符号数的代码表示………………………………… 9

1.1.4　常用编码……………………………………………… 12

1.2　逻辑代数及其运算………………………………………… 19

1.2.1　三种基本逻辑关系…………………………………… 19

1.2.2　逻辑代数的基本定律和规则………………………… 24

1.2.3　几种复合逻辑关系…………………………………… 28

1.3　逻辑函数的化简…………………………………………… 31

1.3.1　代数化简法…………………………………………… 32

1.3.2　逻辑函数的图解化简法……………………………… 34

*1.3.3　逻辑函数的 Q-M 化简法 …………………………… 44

1.4　正逻辑和负逻辑…………………………………………… 49

1.5　逻辑函数应用示例………………………………………… 50

习题 ……………………………………………………………… 54

第二章　集成逻辑门电路…………………………………… 59

2.1　半导体器件的开关特性…………………………………… 59

2.1.1　二极管的开关特性…………………………………… 59

2.1.2　三极管的开关特性…………………………………… 61

2.1.3　MOS 管的开关特性 ………………………………… 65

2.2　晶体管-晶体管逻辑(TTL)门…………………………… 65

2.2.1　TTL“与非”门………………………………………… 66

2.2.2　抗饱和 TTL“与非”门 (Schottky TTL) ………… 68

2.2.3 TTL“与非”门的主要特性和参数………………… 69
2.2.4 TTL 集电极开路“与非”门和 TTL 三态输出“与非”门………………………………………… 75
*2.3 射极耦合逻辑门和集成注入逻辑门 ……………………… 83
2.3.1 射极耦合逻辑门电路……………………………… 82
2.3.2 集成注入逻辑门电路……………………………… 85
2.4 MOS 逻辑门电路 …………………………………… 87
2.4.1 NMOS 反相器和门电器 ………………………… 87
2.4.2 CMOS 门电路和 CMOS 传输门……………………… 92
2.5 不同类型逻辑门电路的连接……………………………… 103
习题 ………………………………………………………… 106

第三章 组合逻辑电路 ……………………………………… 111

3.1 运算器………………………………………………… 112
3.1.1 加法器………………………………………………… 112
*3.1.2 算术逻辑运算单元（ALU）…………………………… 118
3.1.3 数值比较器…………………………………………… 124
3.2 编码器和译码器……………………………………… 128
3.2.1 编码器………………………………………………… 128
3.2.2 译码器………………………………………………… 133
3.3 数据选择器和数据分配器……………………………… 145
3.3.1 数据选择器…………………………………………… 145
3.3.2 数据分配器…………………………………………… 151
3.4 组合逻辑电路的冒险现象……………………………… 153
3..4.1 竞争和冒险 ………………………………………… 153
3.4.2 发现和消除冒险的方法……………………………… 155
习题 ………………………………………………………… 157

第四章 集成触发器 ……………………………………… 161

4.1 基本 RS 触发器………………………………………… 161
4.2 时钟控制电平触发的触发器…………………………… 166
4.2.1 钟控 RS 触发器……………………………………… 166
4.3.2 触发器的空翻………………………………………… 171

4.3 边沿触发的触发器 …… 172
4.3.1 集成正边沿触发D触发器 …… 173
4.3.2 集成负边沿触发 JK 触发器 …… 176
4.4 主从触发器 …… 180
4.4.1 主从 CMOSD 触发器 …… 181
*4.4.2 主从-JK 触发器 …… 182
*4.5 集成触发器的参数示例 …… 186
4.6 各类触发器逻辑功能和触发方式比较 …… 186
习题 …… 192
第五章 时序逻辑电路 …… 197
5.1 寄存器 …… 198
5.1.1 数码寄存器 …… 198
5.1.2 移位寄存器 …… 200
5.1.3 中规模集成移位寄存器及其应用 …… 203
5.1.4 动态 MOS 移位寄存单元 …… 210
5.2 计数器 …… 214
5.2.1 二进制计数器 …… 214
5.2.2 N 进制计数器 …… 225
5.2.3 移位寄存器型计数器 …… 238
5.2.4 中规模集成计数器 …… 243
*5.3 顺序脉冲发生器和序列脉冲检测器 …… 257
5.3.1 顺序脉冲发生器 …… 257
5.3.2 序列脉冲检测器 …… 257
习题 …… 264
第六章 数模和模数转换器 …… 272
6.0 概述 …… 272
6.1 D/A 转换器 …… 272
6.1.1 D/A 转换器的基本原理 …… 272
6.1.2 T 形电阻 D/A 转换器 …… 274
6.1.3 倒 T 形电阻 D/A 转换器 …… 277
*6.1.4 权电流 D/A 转换器 …… 280

*6.1.5 双极性输出的 D/A 转换器 …………………… 282
*6.1.6 集成 D/A 转换器实例 …………………… 285
6.2 A/D 转换器 …………………… 289
6.2.1 概述 …………………… 289
6.2.2 并行比较型 A/D 转换器 …………………… 294
6.2.3 逐次逼近型 A/D 转换器 …………………… 296
6.2.4 双积分型 A/D 转换器 …………………… 300
*6.2.5 集成 A/D 转换器实例 …………………… 304
习题 …………………… 306
第七章 脉冲信号的产生和整形 …………………… 310
7.1 多谐振荡器 …………………… 310
7.1.1 CMOS 多谐振荡器 …………………… 310
7.1.2 石英晶体多谐振荡器 …………………… 315
7.2 集成定时电路 …………………… 318
7.2.1 CC 7555 集成定时电路 …………………… 318
7.2.2 集成定时电路的典型应用 …………………… 321
7.3 集成单稳态触发器 …………………… 334
7.3.1 TTL 型 T 1121 集成单稳态触发器 …………………… 335
*7.3.2 可重触发 CMOS 单稳态触发器 …………………… 339
7.3.3 集成单稳态触发器的应用举例 …………………… 343
习题 …………………… 345
第八章 半导体存储器 …………………… 351
8.1 只读存储器ROM …………………… 351
8.1.1 只读存储器的结构及工作原理 …………………… 351
8.1.2 只读存储器的类型 …………………… 353
8.1.3 可编逻辑阵列 PLA …………………… 357
*8.1.4 应用举例 …………………… 359
8.2 随机存取存储器 RAM …………………… 362
8.2.1 RAM 的基本结构及工作原理 …………………… 362
8.2.2 RAM 中的存储单元 …………………… 365
8.2.3 存储器存储容量的扩充 …………………… 369

习题 ………………………………………… 372

第九章 数字集成电路应用举例 ………………………… 3,4

主要参考文献 ……………………………………………… 391

第一章　数字电路的分析基础

本章主要讨论数制和编码，逻辑代数及其运算，逻辑函数的简化方法，以及简单逻辑函数的电路实现等。

1.1　数制和编码

在数字电路中广泛使用二进制 (Binary) 数，但它有读起来困难，写起来很长的缺点。为了弥补这一缺点，常采用八进制 (Octal) 数和十六进制 (Hexadecimal) 数。本节从大家习惯的十进制 (Decimal) 数开始，进而讨论这些数制和数制之间的相互转换方法。在此基础上再介绍带符号数的代码表示法及几种数字电路的常用编码。

1.1.1 数　　制

数制是计数进位的简称。例如，常用的十进制数，它由 0，1，…，9 等十个数码和一个小数点符号组成。在记数时，采用位值法则，就是对每一个数位赋以一定的位值——或称"权"(Weight)，相邻两位，高位比低位的位值大十倍。应用这种位值法则就能够排列适当的数码来表示任意大小的数目，例如十进制数 794.5，写成

$$794.5 = \underset{(百)}{7 \times 10^2} + \underset{(拾)}{9 \times 10^1} + \underset{(个)}{4 \times 10^0} + \underset{(十分之一)}{5 \times 10^{-1}}$$

式中 10^2、10^1、10^0、10^{-1} 分别表示相应数位的"权"。十进制数的基数为 10，计数规律是"逢十进一"。

因此，一个具有 n 位整数及 m 位小数的十进制数

$$(N)_{10}=(K_{n-1}K_{n-2}\cdots K_1K_0\cdot K_{-1}K_{-2}\cdots K_{-m})_{10}$$

可按权展开：

$$(N)_{10}=K_{n-1}\times 10^{n-1}+\cdots+K_1\times 10^1+K_0\times 10^0+K_{-1}\times 10^{-1}+\cdots+K_{-m}\times 10^{-m}$$

$$=\sum_{i=-m}^{n-1}K_i\times 10^i \qquad (1.1.1)$$

式中系数 K_i 可取 0～9 十个数中的任何一个。等式左边的下标10（有时写 D）代表十进制数。

同理，对于任意的 r 进制数来说，它的基数为 r，由 r 个数码组成，计数规律是"缝 r 进 一"。则一个 n 位整数及 m 位小数的 r 进制数

$$(N)_r=(K_{n-1}K_{n-2}\cdots K_1K_0\cdot K_{-1}K_{-2}\cdots K_{-m})_r$$

可按权展开：

$$(N)_r=K_{n-1}\times r^{n-1}+\cdots+K_1\times r^1+K_0\times r^0+K_{-1}\times r^{-1}+\cdots+K_{-m}\times r^{-m}$$

$$=\sum_{i=-m}^{n-1}K_i\times r^i \qquad (1.1.2)$$

式中系数 K_i 可取 $0\sim(r-1)$ 之间的任意一个整数。

基数 $r=2$、为二进制数。数码只有 0 和 1 两个，计数规律是"逢二进一"；$r=8$。为八进制数，有 0～7 八个数码，计数规律是"逢八进一"；$r=16$，为十六进制数，用 0～9 和 A～F 来表示。其中 $A=10$，$B=11$，$C=12$，$D=13$，$E=14$，$F=15$，计数规律是"逢十六进一"。

表 1.1.1 中列出了几种数制（r 为 10、2、8 和 16）开头的二十个自然数，以资对照。

表 1.1.1　几种数制的对照表

$r=10$	$r=2$	$r=8$	$r=16$
0	00000	0	0
1	00001	1	1
2	00010	2	2
3	00011	3	3
4	00100	4	4
5	00101	5	5
6	00110	6	6
7	00111	7	7
8	01000	10	8
9	01001	11	9
10	01010	12	A
11	01011	13	B
12	01100	14	C
13	01101	15	D

续表

$r=10$	$r=2$	$r=8$	$r=16$
14	01110	16	E
15	01111	17	F
16	10000	20	10
17	10001	21	11
18	10010	22	12
19	10011	23	13

1.1.2 各种进位制数的互相转换

一、非十进制数转换成十进制数

应用式(1.1.2)，可以把 r 进制数转换成等值的十进制数，现举例说明。

例 1.1.1 二进制数$(110.011)_2$，表示的等值十进制数是

$$(\underbrace{110}_{\text{整数}}.\underbrace{011}_{\text{小数}})_2=(\underbrace{1\times2^2+1\times2^1+0\times2^0}_{\text{整数}}\underbrace{+0\times2^{-1}+1\times2^{-2}+1\times2^{-3}}_{\text{小数}})_{10}$$

$$=(6.375)_{10}$$

式中的下标 2(有时写 B)代表二进制数。

例 1.1.2 写出八进制数$(17.3)_8$，按权展开后的等值十进制

数是

$$(17.3)_8=(\underbrace{1\times8^1+7\times8^0}_{整数}+\underbrace{3\times8^{-1}}_{小数})_{10}=(15.375)_{10}$$

式中的下标 8(有时写 O)代表八进制数。

例 1.1.3 写出十六进制数 $(CD.E)_{16}$，按权展开后的等值进制数是

$$\begin{aligned}(CD.E)_{16}&=C\times16^1+D\times16^0+E\times16^{-1}\\&=12\times16^1+13\times16^0+14\times16^{-1}\\&=192+13+0.875\\&=(205.875)_{10}\end{aligned}$$

式中的下标 16(有时写 H)代表十六进制数。

由上可见，非十进制数转换成等值十进制数的基本方法是按权展开再相加的方法。

二、十进制数转换成非十进制数

1. 十进制数转换成二进制数

十进制数转换成二进制数时，需将待转换数的整数部分和小数部分,分别加以转换。

(1) 整数部分

若要将十进制整数 $(N)_{10}$,转换成等值二进制数$(K_{n-1}K_{n-2}\cdots\cdots K_1K_0)_2$，则可写成下列等式

$$\begin{aligned}(N)_{10}&=K_{n-1}\times2^{n-1}+K_{n-2}\times2^{n-2}+\cdots+K_1\times2^1+K_0\times2^0\\&=2\times(K_{n-1}\times2^{n-2}+K_{n-2}\times2^{n-3}+\cdots+K_2\times2^1+K_1)\\&\quad+K_0\end{aligned}$$

将上式两边均除以 2,可得商为 $(K_{n-1}\times2^{n-2}+K_{n-2}\times2^{n-3}+\cdots+K_2\times2^1+K_1)$，余数为 K_0。将商再除以 2,得新余数 K_1,用这样方法进行下去,直到最后的商为零,就可以分别求出 K_0,K_1，K_2，$\cdots$，K_{n-1}。

由上分析可知,其转换方法,就是将十进制整数逐次除以 2,并

依次记下余数，直到其商得0为止。第一次余数表示最低位(LSB)，最后的余数表示最高位(MSB)。把全部余数按最高位到最低位次序排列，就得到等值的二进制数。

例 1.1.4 将十进制数 $(19)_{10}$ 转换为二进制数。

解

$$
\begin{array}{r|l}
2 & \underline{19} \qquad \text{余数} \\
2 & \underline{9} \cdots\cdots 1 \ (\text{LSB}) \\
2 & \underline{4} \cdots\cdots 1 \\
2 & \underline{2} \cdots\cdots 0 \\
2 & \underline{1} \cdots\cdots 0 \\
 & 0 \cdots\cdots 1 \ (\text{MSB})
\end{array}
$$

结果 $(19)_{10}=(10011)_2$

上述将十进制整数转换成二进制整数的方法，称为"除2取余"法。

(2) 小数部分

若要将十进制小数 $(N)_{10}$，转换成等值二进制数 $(0.K_{-1}K_{-2}\cdots K_{-m})_2$，则可写成下列等式

$$(N)_{10}=K_{-1}\times 2^{-1}+K_{-2}\times 2^{-2}+\cdots+K_{-m}\times 2^{-m}$$

将上式两边均乘以2，则得

$$2(N)_{10}=K_{-1}+(K_{-2}\times 2^{-1}+K_{-3}\times 2^{-2}+\cdots+K_{-m}\times 2^{-m+1})$$

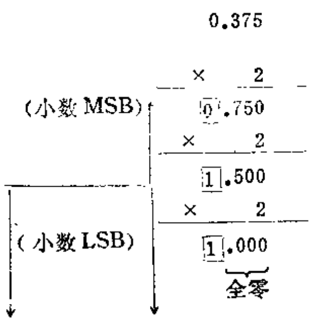
上式整数部分为 K_{-1}，小数部分为 $(K_{-2}\times 2^{-1}+K_{-3}\times 2^{-2}+\cdots+K_{-m}\times 2^{-m+1})$，将小数部分再乘以 2，得新整数 K_{-2}，如此继续下去，可以分别求出 $K_{-3},K_{-4},\cdots,K_{-m}$。

由此可见，其转换方法，就是将十进制小数逐次乘以 2（每次只将小数部分乘以 2），并每次记下整数，直到积的小数部分出现

全0为止。第一次得到的"积的整数"为最高位，而最后一次得到的"积的整数"为最低位。把全部整数按次序排列，就得等值的二进制数。

例 1.1.5 将十进制小数 $(0.375)_{10}$ 转换成二进制小数：

解



结果 $(0.375)_{10}=(0.011)_2$

上述将十进制小数转换成二进制小数的方法，称为" 乘 2 取整"法。

有时乘 2 取整积的小数部分永远不等于零，就产生转换误差，此时可根据所需精度取二进制小数的位数。

由上可见，若把 $(19.375)_{10}$ 转换成二进制数，其结果是

$$(19.375)_{10}=(10011.011)_2$$

2. 十进制数转换成八进制数

转换方法是将十进制数的整数部分"除 8 取余"，小数部分"乘 8 取整"。

例 1.1.6 把十进制数 $(379.375)_{10}$ 转换成八进制数。

解：

整数部分

$$
\begin{array}{r|ll}
8 & 379 & \text{余数} \\ \hline
8 & 47 & \cdots\cdots 3 \\ \hline
8 & 5 & \cdots\cdots 7 \\ \hline
 & 0 & \cdots\cdots 5
\end{array}
\quad \uparrow \text{读数方向}
$$

小数部分

$$
\begin{array}{r}
0.375 \\
\times \quad 8 \\ \hline
\boxed{3}.000
\end{array}
$$

结果 $(379.375)_{10}=(573.3)_8$

至于十进制数转换成十六进制数，可用“除 16 取余”及“乘 16 取整”法。例如，

$$(7141.25)_{10}=(1BE5.4)_{16}$$

三、八进制数、十六进制数和二进制数的相互转换

由于 $2^3=8$。因此，每位八进制数可用三位二进制数表示。例如：$(0)_8=(000)_2,\cdots\cdots,(7)_8=(111)_2$。同样，由于 $2^4=16$。故可用四位二进制数来表示一位十六进制数。例如：$(0)_{16}=(0000)_2,\cdots\cdots,(F)_{16}=(1111)_2$。而二进制、八进制和十六进制之间可直接进行转换。例如

八进制　3　5　7　.　1　2　4　6

二进制　0 1 1 1 0 1 1 1 1 . 0 0 1 0 1 0 1 0 0 1 1 0

十六进制　E　F　.　2　A　6

即 $(357.1246)_8=(11101111.00101010011)_2=(EF.2A6)_{16}$。

由上可见，二进制转换成八进制(或十六进制)时，二进制数的整数部分从低位开始。每三位(或四位)分为一组。若最左边的一组不足三位(或四位)，可在左边添 0 补足。二进制小数部分从小数点向右每三位(或四位)分为一组，最后不足三位(成四位)，可在右边添 0 补足。然后，将每组二进制数转换为八进制(或十六进制)数。采用上述的逆过程，可将八进制(或十六进制)转换成二进制。

八进制和十六进制之间转换，可用二进制作桥梁。

1.1.3 带符号数的代码表示

通常，在数值(绝对值)左面加上符号“+”或“-”，以表示数的正或负。例如负数9，表示为“-9”。但机器只能识别二进制数，因此也只能用二进制数来表示“+”或“-”。习惯上以“0”表示正数符号，以“1”表示负数符号。将符号位放在数值的左边，就成为一个带符号数。例如

$$N_1 = +1001(\text{或}1001) \qquad N_2 = -1001$$

在机器中分别表示为：

$$\underset{\substack{\uparrow\\ \text{符号}}}{0}\ \underbrace{1\ 0\ 0\ 1}_{\text{数值部分}} \qquad\qquad \underset{\substack{\uparrow\\ \text{符号}}}{1}\ \underbrace{1\ 0\ 0\ 1}_{\text{数值部分}}$$

这种将数值部分及符号部分统一用代码表示的带符号数称为机器数，如 N_1、N_2 的机器数表示形式就是 01001，11001。而把原来的数值形式称为机器数的真值，如 N_1、N_2 的真值表示形式就是 +1001，-1001。

在数字电路中，机器数表示方法最常用的有原码、反码和补码三种。

一、原码 (True form)

原码表示方法是将带符号数中的符号位用数码 0 表示正号，用 1 表示负号，而对数值位不作任何改变，仍然采用原来的二进制数表示。例如两个带符号的二进制数 $N_1 = +1101$ 及 $N_2 = -1010$ 的原码表示形式为：

$$[N_1]_{原} = 01101 \qquad [N_2]_{原} = 11010$$

原码表示法简单易懂，且真值转换也较方便。但是原码的加、减运算较复杂，例如，两数相加时，如果同号，则数值相加，符号不变；如果异号，就要进行减法，而在相减时，需先比较两数绝对值的大