浙江省重点教材建设项目

全国普通高等院校电子信息规划教材

数字电子技术

李光辉 周素茵 章云 胡海根 编著

清华大学出版社

浙江省重点教材建设项目

全国普通高等院校电子信息规划教材

数字电子技术

李光辉 周素茵 章云 胡海根 编著

清华大学出版社
北京

内容简介

本书系统地介绍了数字电子技术基础知识。全书共分为8章，内容包括数字逻辑基础、组合逻辑电路、时序逻辑基础与触发器、时序逻辑电路分析与设计、可编程逻辑器件、数/模和模/数转换电路、数字系统设计、电子设计自动化技术基础。为便于教学，每章都配备了大量实例和习题。

本书可作为高等院校计算机、电子、自动化等专业的教材也可供从事数字电子技术工作的技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

数字电子技术/李光辉等编著. —北京：清华大学出版社，2012.7
（全国普通高等院校电子信息规划教材）
ISBN 978-7-302-28238-9

Ⅰ. ①数…　Ⅱ. ①李…　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(2012)第038916号

责任编辑：焦　虹　顾　冰
封面设计：常雪影
责任校对：李建庄
责任印制：王静怡

出版发行：清华大学出版社
网　址：http://www.tup.com.cn，http://www.wqbook.com
地　址：北京清华大学学研大厦A座　邮　编：100084
社 总 机：010-62770175　邮　购：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质量反馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
课件下载：http://www.tup.com.cn，010-62795954
印 刷 者：北京季蜂印刷有限公司
装 订 者：三河市新茂装订有限公司
经　销：全国新华书店
开　本：185mm×260mm　印　张：16.75　字　数：415千字
版　次：2012年7月第1版　印　次：2012年7月第1次印刷
印　数：1～3000
定　价：27.00元

产品编号：045623-01

前言 Foreword

本书是根据高等学校电气信息类专业数字电子技术基础课程教学的基本要求，结合应用型人才的培养目标，以培养学生的实际动手能力为出发点，并考虑数字技术和微电子技术的快速发展，结合编者多年的教学实践经验而编写的。

本书既注重基础知识，又重视对学生应用能力的培养。重点介绍数字电子技术的基本理论与方法及其具体应用。考虑到数字集成电路是复杂数字系统设计的基础，本书还介绍了电子设计自动化的基本方法、工具和流程。为了让读者了解数字电子技术的最新发展前沿，介绍了有关的数字电子系统设计的验证与测试领域的基础知识。书中每章都配了大量的实例和习题，以加深对基础理论的理解，巩固所学知识。

全书共分 8 章。第 1 章介绍数字逻辑的基础知识，包括数制、逻辑门电路与逻辑代数。第 2 章讨论组合逻辑电路的逻辑门、常用的组合逻辑模块、组合逻辑电路的分析和设计方法以及组合逻辑电路的竞争与冒险。第 3 章为时序逻辑电路基础，包括时序逻辑电路的特点与分类和各种触发器。第 4 章为时序逻辑电路的分析与设计，着重介绍了同步时序电路的分析与设计以及计数器、寄存器和存储器等功能部件。第 5 章介绍了不同类型的可编程逻辑器件及其编程与测试方法。第 6 章讲述了数字与模拟信号的相互转换的基本概念、原理、电路和应用。第 7 章介绍了数字电子系统设计的过程、方法与工具。第 8 章介绍了 EDA 工具、方法、逻辑模拟与逻辑综合，以及数字系统的可测试性设计方法。

本书由李光辉任主编，周素茵、章云、胡海根等参与编写。其中，李光辉负责本书的编写提纲和修改定稿，以及第 8 章的编写。周素茵编写了第 1、2、5 章，章云编写了第 3、4、6 章，第 7 章由胡海根编写。

在本书的编写过程中，参考和借鉴了国内外大量同行专家的著作和研究成果。在此，向他们表示衷心的感谢。由于作者水平有限，书中难免有疏漏或不足之处，恳请读者指正。

编　者

2012 年 4 月

目录 Contents

第1章 chapter 1

数字逻辑基础

本章介绍数字逻辑的基本概念和数学工具，主要内容包括计算机等数字设备中常用的数制与编码、逻辑代数基础、逻辑函数的描述方法以及逻辑函数的卡诺图化简法。这些内容是分析和设计数字电路的基础，贯穿全书的始终。

1.1 数字电路的基本概念

1.1.1 什么是数字电路

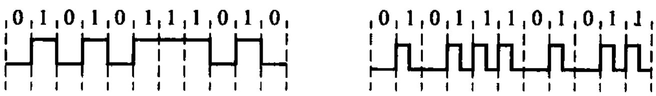
1. 模拟量和数字量

在自然界中，存在着各种各样的物理量，这些物理量就共性特征而言，可以归纳为两类，一类称为模拟量，一类称为数字量。模拟量的典型特征是其变化是连续的，在变化过程中的任何一点都具有实际的物理意义，如温度、压力、交流电压等就是典型的模拟量。数字量的变化是不连续的(即离散的)，如学生人数、货架上商品的个数等就是典型的数字量。

1) 模拟信号与数字信号

在电子设备中，常常将表示模拟量的电信号叫做模拟信号(Analog Signal)，将表示数字量的电信号叫做数字信号(Digital Signal)。正弦波信号和方波信号分别是典型的模拟信号和数字信号。

数字信号有两种传输波形，一种称为电平型，另一种称为脉冲型。电平型数字信号是以一个时间节拍内信号是高电平还是低电平来表示 1 或 0，而脉冲型数字信号是以一个时间节拍内有无脉冲来表示 1 或 0，如图 1.1 所示。从图 1.1 中可见，二者在波形上的显著差别是，电平型信号波形在一个节拍内不会归零，而脉冲型信号波形在一个节拍内会归零。



(a) 电平型信号　　(b) 脉冲型信号

图 1.1 数字信号

2）模拟电路与数字电路

根据电路所采用的信号形式，把传送、变换、处理模拟信号的电子电路称为模拟电路(analog circuit)，把传送、变换、处理数字信号的电子电路称为数字电路(digital circuit)。各种放大电路就是典型的模拟电路，而数字表、数字钟的定时电路就是典型的数字电路。

与模拟电路相比，数字电路具有抗干扰能力强、可靠性高、精确性和稳定性好、通用性广、便于集成、便于故障诊断和系统维护等突出优点。

1.1.2 数字电路的应用

数字电路在日常生活中的应用有很多，尤其是数字电路和计算机技术的发展，使数字电路的应用越来越普遍，它已经被广泛应用于工业、农业、通信、医疗、家用电子等各个领域，如工农业生产中用到的数控机床、温度控制、气体检测、家用冰箱、空调的温度控制、通信用的数字手机以及正在发展中的网络通信、数字化电视等。随着数字电路的发展，其应用将会越来越广泛，它将会深入到生活的每一个角落。

1.2 数制与编码

1.2.1 数制

数制即进位计数制。日常生活中最常用的是十进制，而在数字系统中多采用二进制，为了便于书写和记忆，数字计算机当中常采用八进制或十六进制，这 4 种进制之间可进行相互转换。

1. 十进制(Decimal)

数制包含两个基本要素：基数与位权。基数是指一种数制中所包含的基本数字的个数，基数为 R 的数制(简称 R 进制)的进位规则是“逢 R 进一”。在十进制数中，每一位有 0～9 十个数字，因此十进制数的计数基数是 10，进位规则为“逢十进一”。位权是指基数的幂，与数字在数中的位置有关。例如：

$$(168.45)_{10} = 1\times10^2 + 6\times10^1 + 8\times10^0 + 4\times10^{-1} + 5\times10^{-2}$$

上式中的下标 10 表示括号里的数是十进制数，因此，任意一个十进制数 N 可展开为如下的形式

$$N = \sum k_i \times 10^j \tag{1.1}$$

式中：k_i 是十进制数 N 中第 i 位的系数；10^j 是第 i 位的权；对于 N 中的整数部分，$j=i-1$；对于 N 中的小数部分，$j=i$，$i\in[-1,-\infty]$。

2. 二进制(Binary)

由于二进制数中只有 0 和 1 两个数字，因此二进制数的计数基数是 2，进位规则为

“逢二进一”。因此,任意一个二进制数均可展开为如下的形式

$$N = \sum k_i \times 2^j \tag{1.2}$$

例如:

$$\begin{aligned}(1011.011)_2 &= 1\times 2^3 + 0\times 2^2 + 1\times 2^1 + 1\times 2^0 + 0\times 2^{-1} + 1\times 2^{-2} + 1\times 2^{-3} \\ &= (11.375)_{10}\end{aligned}$$

式(1.2)表明,任何一个二进制数按权展开后的各项相加得到的数值是一个十进制数,即二进制数可转换为十进制数。

3. 八进制(Octal)

八进制数中有 0~7 共八个数字,因此其基数是 8,进位规则是“逢八进一”。任意一个八进制数可展开为如下的形式

$$N = \sum k_i \times 8^j \tag{1.3}$$

例如:

$$(127.14)_8 = 1\times 8^2 + 2\times 8^1 + 7\times 8^0 + 1\times 8^{-1} + 4\times 8^{-2} = (87.1875)_{10}$$

式(1.3)表明,任意一个八进制数按权展开后相加得到的和也是一个十进制数,即八进制数也可转换为十进制数。

4. 十六进制(Hexadecimal)

十六进制数有 0~9 和 A~F 共 16 个数字,其中 A~F 代表的数值是 10~15。同样,任意一个十六进制数也可按权展开后相加得到一个十进制数,其展开式为

$$N = \sum k_i \times 16^j \tag{1.4}$$

例如:

$$(3B.8)_{16} = 3\times 16^1 + B\times 16^0 + 8\times 16^{-1} = (59.5)_{10}$$

以上 4 种进制数的表示也可采用加字母下标的方式,如$(1011.01)_B$、$(123.45)_D$、$(27.1)_O$和$(2C.8)_H$ 分别表示二进制数、十进制数、八进制数和十六进制数,其中字母 B、D、O 和 H 分别是 4 种进制英文单词的首字母。

1.2.2 数制转换

1. 二、八、十六进制数转换为十进制数

根据式(1.2)~式(1.4),将二进制数、八进制数和十六进制数按权展开求和即为对应的十进制数,1.2.1 节中已有举例,此处不再赘述。

2. 十进制数转换为二、八、十六进制数

十进制数转换成二、八、十六进制数时,整数和小数部分需分别转换。

1) 整数部分

除新基数(2、8、16)倒序取余法。具体步骤如下:

(1) 用新基数除十进制数，第一次得到的余数为新基数制的最低位数字。

(2) 用新基数除步骤(1)中得到的商，第二次得到的余数为新基数制的次低位数字。

(3) 重复步骤(2)，直到商等于零。商为零时的余数为新基数制的最高位数字。

2) 小数部分

乘新基数顺序取整法。具体步骤如下：

(1) 用新基数乘十进制小数，第一次得到的乘积的整数部分的数字是新基数小数的最高位数字。

(2) 用新基数乘前一次乘积的小数部分，第二次得到的乘积的整数部分是新基数小数的次高位数字。

(3) 重复步骤(2)，直到乘积的小数部分为零，或者“四舍五入”后，达到其误差要求的小数转换精度为止。

例 1.1 将$(25.125)_{10}$转换成二进制数。

解：按照整数与小数分别转换的总体原则，可分成两步。

(1) 整数部分的转换：

	余数	
2 | 25 ………	1 ………	(最低位)
2 | 12 ………	0 ………	↑
2 | 6 ………	0 ………	(读数方向)
2 | 3 ………	1 ………	↑
2 | 1 ………	1 ………	(最高位)
0		

故$(25)_{10}=(11001)_2$

(2) 小数部分的转换：

	整数	
$0.125\times 2=0.25$ ………	0 ………	(最高位)
$0.25\times 2=0.5$ ………	0	↓(读数方向)
$0.5\times 2=1.0$ ………	1 ………	(最低位)

故$(0.125)_{10}=(0.001)_2$

由(1)和(2)可得最终的转换结果：

$$(25.125)_{10}=(11001)_2+(0.001)_2=(11001.001)_2$$

例 1.2 将$(543.65625)_{10}$转换成十六进制数。

解：按照整数与小数分别转换的总体原则，将转换分成整数部分转换和小数部分的转换。

(1) 整数部分的转换：

	余数	
16 | 543 ………	F ………	(最低位)
16 | 33 ………	1 ………	↑(读数方向)
16 | 2 ………	2 ………	(最高位)
0		

故$(543)_{10}=(21F)_{16}$

(2) 小数部分的转换：

	整数		
$0.65625\times16=10.5$ ········	A	········	(最高位)
			↓(读数方向)
$0.5\times16=8.0$ ········	8	········	(最低位)

故$(0.65625)_{10}=(0.A8)_{16}$

经过上述转换，可得最终的转换结果：

$$(543.65625)_{10}=(21F)_{16}+(0.A8)_{16}=(21F.A8)_{16}$$

3. 二进制数转换成八进制数、十六进制数

由于3位二进制数恰好有8个状态，因此二进制数转换成八进制数可采用“三位聚一位”的方法，即从二进制数的小数点开始，整数部分自右往左每三位一组，最高位不够三位数的左边补零；小数部分自左往右每三位一组，最低位不够三位数的右边补零，然后顺序写出对应的八进制数即可。

同样的道理，二进制转换成十六进制数可采用“四位聚一位”法，分组规则与八进制数相同。

例1.3 将$(10110101.01110101)_2$转换为八进制数。

解：按照“三位聚一位”法，有

二进制数	010,	110,	101	.	011,	101,	010
	↓	↓	↓		↓	↓	↓
八进制数	2	6	5	.	3	5	2

故$(10110101.01110101)_2=(265.352)_8$

例1.4 将$(1011111.1001011)_2$转换为十六进制数。

解：按照“四位聚一位”法，有

二进制数	0101,	1111	.	1001,	0110
	↓	↓		↓	↓
十六进制数	5	F	.	9	6

故$(1011111.1001011)_2=(5F.96)_{16}$

4. 八进制数、十六进制数转换成二进制数

八进制数转换成二进制数时，采用“**一位拆三位**”法。即将每位八进制数字用相应的三位二进制数来表示，去掉整数部分最高位和小数部分最低位的零。

十六进制数转换成二进制数时，采用“**一位拆四位**”法。即将每位十六进制数字用相应的四位二进制数来表示，去掉整数部分最高位和小数部分最低位的零。

例1.5 将$(3AD.5C)_{16}$转换为二进制数。

解：按照“一位拆四位”法，有

十六进制数	3	A	D	.	5	C
	↓	↓	↓		↓	↓
二进制数	0011	1010	1101	.	0101	1100

故$(3AD.5C)_{16}=(1110101101.010111)_2$

1.2.3 编码

在数字系统中，常用0和1的有规律的各种组合来表示不同的数字、符号、动作或事物，这一过程称为编码，这些组合称为代码(Code)。代码可以分为数字型的和字符型的，有权的和无权的。数字型代码用来表示数字的大小，字符型代码用来表示不同的符号、动作或事物。有权代码的每一位数字都定义了相应的位权，无权代码中的数字没有定义相应的位权。下面介绍几种最常用的二进制编码。

1. 常用的BCD码

十进制数共有0～9十个数码，而四位二进制数有16种不同的组合，用4位二进制数中的任意10种组合来表示10个十进制数码，这种编码方式称为二-十进制编码，简称BCD(Binary Coded Decimal)码。几种常用的BCD码如表1.1所示。

表1.1　常用的BCD码

编码种类 / 十进制数	8421码	余3码	5211码	5421码	2421码	余3循环码
0	0000	0011	0000	0000	0000	0010
1	0001	0100	0001	0001	0001	0110
2	0010	0101	0100	0010	0010	0111
3	0011	0110	0101	0011	0011	0101
4	0100	0111	0111	0100	0100	0100
5	0101	1000	1000	1000	0101	1100
6	0110	1001	1001	1001	0110	1101
7	0111	1010	1100	1010	0111	1111
8	1000	1011	1101	1011	1110	1110
9	1001	1100	1111	1100	1111	1010
权	8421		5211	5421	2421	

8421码是BCD代码中最常用的一种，它是利用4位二进制数0000～1001来分别表示10个十进制数码0～9，由于将代码中的每一位从左到右按权8、4、2、1展开后相加，所得的结果就是其所表示的十进制数，所以称为8421码。8421码是有权代码，且该代码中每一位的权又是恒定不变的，故属于恒权代码。

除8421码以外，2421码、5211码和5421码也是恒权代码，这些代码中的每一位从左到右的权分别是2、4、2、1，5、2、1、1和5、4、2、1，将这些代码分别按相应的权展开后相加，得到的结果就是它所表示的十进制数。

余3码也是一种被广泛采用的二-十进制编码。对应于同样的十进制数，余3码比相

应的 8421BCD 码多出 0011，所以称为余 3 码。它是一种无权码。

余 3 码有两大特点：一是该码当中的 0 和 9、1 和 8、2 和 7、3 和 6、4 和 5 互为反码。二是利用第一个特点，当两个用余 3 码表示的数相减时，可以将原码的减法改为反码的加法，这样有利于简化 BCD 码的减法运算。

余 3 循环码也是一种无权码，由于它是将 4 位二进制循环码去除首尾各 3 组代码而得到的，且保留了循环码的特性，因而称为余 3 循环码。它的主要特点是相邻两个代码之间有且仅有一位不同。

2. 格雷(Gray)码

多位二进制代码在形成和传输的过程中，由于各位的变化速度不同而可能产生错误。为了减小这种错误发生的可能性，出现了一种常用的可靠性编码的方法，即格雷码(属循环码)。格雷码也是一种无权码。在格雷码当中，任意两个相邻代码中的数码只有一位不同，其余各位均相同。而且首尾(0 和 15)两个代码也仅有一位不同，构成“循环”。根据这个特点，在数码变化时采用格雷码可大大减少错码的可能性。

表 1.2 中列出了十进制数 0～15 的 4 位格雷码。由表 1.2 可以看出，用格雷码也可以表示十进制数的 0～9，因此该表中的 0000～1101 共 10 组二进制代码也属于 BCD 码。它是一种无权码。

表 1.2 4 位格雷码

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

格雷码也是一种易于校正的编码，它与二进制数之间的转换关系如下：

(1) 已知二进制数，求对应的格雷码。

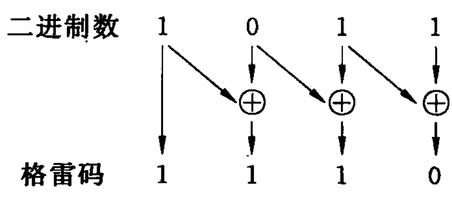
设二进制数为 $B=B_nB_{n-1}\cdots B_1B_0$，其对应的格雷码为 $G=G_nG_{n-1}\cdots G_1G_0$，则有

$$\begin{cases} G_n = B_n \\ G_i = B_{i+1} \oplus B_i, \quad i = 0,1,2,\cdots,n-1 \end{cases}$$

式中，$\oplus$是异或逻辑运算。参与异或运算的两个逻辑变量取值相同时，结果为 0；不同时结果为 1，简记为“同为 0，异为 1”。

例 1.6 将二进制数 1011 转换为格雷码。

解：根据二进制数到格雷码的转换公式，有



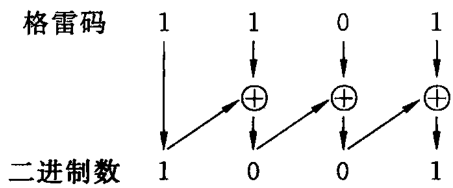
(2) 已知格雷码,求对应的二进制数。

由格雷码到二进制数的求解公式为

$$\begin{cases} B_n = G_n \\ B_i = B_{i+1} \oplus G_i, \quad i = 0,1,2,\cdots,n-1 \end{cases}$$

例 1.7 将格雷码 1101 转换为二进制数。

解:根据格雷码到二进制数的转换公式有



3. ASCII 码

通常人们通过键盘上的字母、符号和数码向计算机或其他数字系统传送数据和指令,所以这些字母和符号也需要用特定的二进制代码来表示。美国信息交换标准代码(American Standard for Information Interchange, ASCII 码)就可以满足这种需要。ASCII 码是国际上广泛采用的一种字符码,它用七位二进制代码来表示 128 个不同的字符和符号。这些字符和符号包括十进制数、英文字母(大小写)和专用符号,如表 1.3 所示。

表 1.3 ASCII 码

$b_7b_6b_5$ / $b_4b_3b_2b_1$	**000**	**001**	**010**	**011**	**100**	**101**	**110**	**111**
0000	NUL	DLE	SP	0	@	P	、	p
0001	SOH	DC1	!	1	A	Q	a	q
0010	STX	DC2	”	2	B	R	b	r
0011	ETX	DC3	#	3	C	S	c	s
0100	EOT	DC4	$	4	D	T	d	t
0101	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u
0110	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v
0111	BEL	ETB	'	7	G	W	g	w
1000	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
1001	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
1010	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z
1011	VT	ESC	+	;	K	[	k	{
1100	FF	FS	,	<	L	\	l	|
1101	CR	GS	—	=	M	]	m	}
1110	SO	RS	.	>	N	^	n	~
1111	SI	US	/	?	O	—	o	DEL