高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

数字电路与逻辑设计

主编 白 静
主审 王 荣

西安电子科技大学出版社
http://www.xduph.com

高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

数字电路与逻辑设计

主编　白　静
主审　王　荣

西安电子科技大学出版社

2009

内 容 简 介

本书详细介绍了数字电路与逻辑设计的基本理论及设计方法。对课程内容进行了优化，力求在知识体系、理论教学与实践教学等方面充分体现本课程的基础性、先进性和实用性。

本书在注重知识连贯性的基础上，精简了传统分立元件、小规模集成电路等内容，增加了可编程逻辑器件PLD、硬件描述语言VHDL以及课程设计等内容，能较好地适应现代数字技术的发展要求和本课程教学的实际需要。

全书共十章，主要内容包括数字逻辑基础、集成逻辑门电路、组合逻辑电路、集成触发器、时序逻辑电路、脉冲产生电路、半导体存储器、可编程逻辑器件、硬件描述语言VHDL，以及典型的数字电路课程设计。

本书概念清楚、选材典型、深入浅出、语言流畅、通俗易懂，并配有大量例题帮助学习和理解。可作为高等学校电子信息、通信工程、电气工程、自动化等专业的教材，也可供相关工程技术人员阅读和参考。

☆ **本书配有电子教案，需要者可与出版社联系，免费提供。**

图书在版编目(CIP)数据

数字电路与逻辑设计/白静主编. —西安：西安电子科技大学出版社，2009.8
高等学校电子与通信类专业"十一五"规划教材
ISBN 978-7-5606-2256-9

Ⅰ. 数…　Ⅱ. 白…　Ⅲ. 数字电路—逻辑设计—高等学校—教材　Ⅳ. TN79

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第070988号

策　　划　寇向宏
责任编辑　寇向宏
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　陕西天意印务有限责任公司
版　　次　2009年8月第1版　2009年8月第1次印刷
开　　本　787毫米×1092毫米　1/16　印张　21.25
字　　数　497千字
印　　数　1～4000册
定　　价　30.00元
ISBN 978-7-5606-2256-9/TN·0511
XDUP　2548001—1

西安电子科技大学出版社
高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材
编审专家委员会名单

前　言

“数字电路与逻辑设计”是通信、电子信息类专业的主要基础课程，也是当前发展最快的学科之一。本书是针对体现“面向21世纪，注重应用能力培养”的教学特点，结合作者多年的教学和实践经验进行编写的，力求在内容、体系、理论与实践教学方面充分体现新世纪对本课程的教学要求。

本书具有以下特点：

（1）内容上具有完整的理论体系。本书的理论体系符合数字技术的发展趋势，能够引导学生掌握扎实的理论基础。

（2）注重基本理论、基本分析和设计方法，重点突出。在内容编排上，遵从先易后难、由浅入深、循序渐进的原则，对重点、难点进行深入分析和讨论，通过大量典型例题的学习，加深对重要的知识点和考点的理解。

（3）注重当前数字电子技术的发展要求，增加了可编程逻辑器件PLD和硬件设计语言VHDL等内容。详细介绍了PLA、PAL、GAL、FPGA、CPLD等器件的基本工作原理及应用，并通过实例介绍了用VHDL设计实现组合逻辑电路和时序逻辑电路。

（4）理论教学与实践教学相结合。针对本课程具有实践性强的特点，为培养学生学以致用的能力，本书在理论分析的基础上，给出了典型的数字电路与逻辑设计课程设计实例，以培养学生分析问题和解决问题的能力。

（5）选材典型，结构清晰，文字简练，通俗易懂。本书适合作为高等学校电子信息、通信工程、电气工程、计算机科学与技术、自动化等专业的本科教材，也可作为报考电子、信息、通信专业的硕士研究生考生的复习参考用书。

全书共十章，由白静任主编，张雪英任副主编。第一章到第七章、第十章及附录由白静编写，第八章和九章由张雪英编写。解放军理工大学的王荣老师担任本书的主审。在此书完成之际，谨向对本书提供过帮助的人们以及给与我们支持的家人表示诚挚的谢意！

限于编者水平，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

编　者

2009年1月

目　　录

第一章　数字逻辑基础

1.1 数制及码制

1.1.1 模拟量与数字量

在自然界中，存在着形形色色的物理量，尽管它们的性质各异，但就其变化规律的特点而言，可分为两大类：模拟量和数字量。

模拟量：在时间和数值上都具有连续变化特点的物理量叫做模拟量。自然界广泛存在着的许多物理量都是模拟量，如温度、压力、距离、时间等。

模拟信号：表示模拟量的电信号叫做模拟信号。在工程应用中，为了测量、传递和处理这些物理量，常把它们通过传感器转换成与之成比例的电压值(或电流值)，这些时间连续、幅值也连续的电信号表示和模拟了实际的物理量。例如：正弦波信号、话音信号等就是典型的模拟信号。

模拟电路：工作在模拟信号下的电子电路称为模拟电路。

数字量：在时间和数量上的取值是不连续的、离散的，只能按有限个或可数的量化单位取值，这类物理量叫做数字量。例如：某一实际距离的值为 3869.82526…km，若取量化单位为 1 km，则代表此距离的数字量为 3870 km，若量化单位为 1 m，则数字量为 3 869 825 m。量化单位的选择取决于所要求的精度。

数字信号：表示数字量的信号称为数字信号。数字信号是一种脉冲信号(Pulse Signal)，脉冲信号具有边沿陡峭、持续时间短的特点。广义讲，凡是非正弦波形状的信号都可称为脉冲信号。例如：矩形波、方波、锯齿波等信号就是典型的数字信号。

数字电路：处理数字信号的电路称为数字电路。

同一物理量可以用连续的模拟信号表示，也可用离散的数字信号表示。同模拟信号相比，数字信号具有传输可靠、易于存储、抗干扰能力强、稳定性好等优点。因此，数字电路的应用愈来愈广泛。

在数字电路中，只采用 0、1 两种数字表示数字信号，一个 0 或一个 1 通常称为 1 bit，有时也将一个 0 或一个 1 的持续时间称为一拍。“0”在数字电路中可代表低电平、开关的闭合，也可代表无脉冲信号等；“1”可代表高电平、开关的断开，也可代表有脉冲信号等。

数字电路中把只由高、低两种逻辑电平组成的信号称为数字信号，或数字逻辑信号，这种信号只能由数字电路进行处理。注意，数字逻辑信号不同于数字信号处理中所说的数字信号。对

于数字信号处理系统来说，数字信号是一组离散数据，可通过运算对其进行任何处理。

1.1.2 数制及其转换

1. 数制

多位数码中每一位的构成方法以及从低位到高位的进位规则称为计数进位制，简称数制(Number System)。日常生活中最常用的是十进制，数字电路及计算机等设备中还经常使用二进制、八进制和十六进制。对于任何一个数，可以用不同的进制来表示。

1）十进制(Decimal)

在十进制中，采用0～9十个数码，任何一个十进制数都可以用这十个数码按一定规律并列在一起来表示，计数规则为“逢十进一，借一当十”。例如，十进制数749.25可表示成

$$749.25 = 7\times10^2+4\times10^1+9\times10^0+2\times10^{-1}+5\times10^{-2}$$

上式中的10^2、10^1、10^0…称为十进制数数位的位权值。十进制数各个数位的位权值是10的幂。“10”称为十进制数的基数。

对于任意一个十进制数N，均可按位权展开为

$$\begin{aligned}(N)_{10} &= (a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_1a_0\cdot a_{-1}a_{-2}\cdots a_{-m})_{10}\\ &= a_{n-1}\times10^{n-1}+a_{n-2}\times10^{n-2}+\cdots+a_1\times10^1+a_0\times10^0\\ &\quad +a_{-1}\times10^{-1}+a_{-2}\times10^{-2}+\cdots+a_{-m}\times10^{-m}\\ &= \sum_{i=-m}^{n-1}a_i\times10^i \end{aligned}\qquad(1-1)$$

这种表示方法称为多项式表示法或按位权展开式。上式中，a_i为十进制数第i位的数码，它可以是0～9这十个数码中的任意一个；n表示整数部分的位数，m表示小数部分的位数，因此i包含从$n-1$～0的所有正整数和从-1～$-m$的所有负整数。一般可用下角标10或D表示十进制数，如$(12)_{10}$、$(20)_D$等。

若以R取代式(1-1)中的10，可得到任意R进制数的位权展开式为

$$\begin{aligned}(N)_R &= (a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_1a_0\cdot a_{-1}a_{-2}\cdots a_{-m})_R\\ &= a_{n-1}\times R^{n-1}+a_{n-2}\times R^{n-2}+\cdots+a_1\times R^1+a_0\times R^0+a_{-1}\times R^{-1}+a_{-2}\times R^{-2}\\ &\quad +\cdots+a_{-m}\times R^{-m} = \sum_{i=-m}^{n-1}a_i\times R^i \end{aligned}\qquad(1-2)$$

式中，a_i为R进制数第i位的数码；R^i为R进制数第i位的位权值。R称为计数制的基数或称为计数的模(mod)，一般用下角标R表示数N是R进制。

2）二进制(Binary)

在二进制中，只采用0和1两个数码，计数规则为“逢二进一，借一当二”。二进制的基数为2，每个数位的位权值为2的幂。任意一个二进制数的位权展开式为

$$(N)_2 = \sum_{i=-m}^{n-1}a_i\times2^i \qquad(1-3)$$

式中，a_i为第i位的0或1数码；2^i为第i位的位权值。例如，二进制数11101.101按位权展开式为

$(11101.101)_2 = 1\times2^4+1\times2^3+1\times2^2+0\times2^1+1\times2^0+1\times2^{-1}+0\times2^{-2}+1\times2^{-3}$

二进制数 N 一般用下角标 2 或 B 表示，如 $(101)_2$、$(110.1)_B$ 等。

3）八进制（Octal）

在八进制中，采用 0～7 八个数码，计数规则为"逢八进一，借一当八"。八进制的基数为 8，其位权展开式为

$$(N)_8 = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \times 8^i \tag{1-4}$$

八进制数 N 一般用下角标 8 或 O 表示，如 $(76)_8$，$(35.1)_O$ 等。

4）十六进制（Hexadecimal）

在十六进制中，采用 0～9、A(10)、B(11)、C(12)、D(13)、E(14)、F(15)共十六个数码，计数规则为"逢十六进一，借一当十六"。十六进制的基数为 16，其位权展开式为

$$(N)_{16} = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \times 16^i \tag{1-5}$$

十六进制数 N 一般用下角标 16 或 H 表示，如 $(E12)_{16}$，$(2B)_H$ 等。

2. 不同数制的转换

1）R 进制—十进制转换

将 R 进制（R 为二、八、十六）数转换为等值的十进制数，其步骤为

（1）将 R 进制数按位权展开，见式（1－2）；

（2）将展开式按十进制运算规则相加，即可得到等值的十进制数。

【例 1－1】 将二进制数 $(11011.101)_2$ 转换成等值的十进制数。

解： 二进制数　1　1　0　1　1.　1　0　1

位权　2^4　2^3　2^2　2^1　2^0　2^{-1}　2^{-2}　2^{-3}

$$\begin{aligned}(11011.101)_2 &= 1\times2^4+1\times2^3+0\times2^2+1\times2^1+1\times2^0+1\times2^{-1}+0\times2^{-2}+1\times2^{-3}\\ &= 16+8+0+2+1+0.5+0+0.125=(27.625)_{10}\end{aligned}$$

【例 1－2】 将八进制数 $(157.304)_8$ 转换成等值的十进制数。

解：
$$\begin{aligned}(157.304)_8 &= 1\times8^2+5\times8^1+7\times8^0+3\times8^{-1}+0\times8^{-2}+4\times8^{-3}\\ &= 64+40+7+0.375+0.007\,812\,5=(111.382\,812\,5)_{10}\end{aligned}$$

【例 1－3】 将十六进制数 $(F4.C)_{16}$ 转换成等值的十进制数。

解： $(F4.C)_{16} = 15\times16^1+4\times16^0+12\times16^{-1} = 240+4+0.75 = (244.75)_{10}$

2）十进制—R 进制转换

将十进制数转换为等值的 R（R 为二、八、十六）进制数，需将十进制数的整数部分和小数部分分别进行转换，然后再将它们合并起来。

整数部分转换时，采用除基取余法，具体步骤如下：

（1）将十进制整数除以 R 进制的基 R，并对每次得到的商再依次除以 R，直到商等于 0 为止。

（2）将每次得到的余数按倒序写出来，即第一次的余数作为 R 进制整数的最低有效位（Least Significant Bit，LSB），最后一次的余数作为 R 进制整数的最高有效位（Most Significant Bit，MSB），所得数值即为等值 R 进制整数。

【例 1－4】 将十进制数$(83)_{10}$转换成等值的二进制数。

解：将十进制数 83 依次除以二进制数的基数 2，并取其余数，转换过程如下：

2	83	商	余数	
2	41	…………	1	LSB
2	20	…………	1	
2	10	…………	0	
2	5	…………	0	
2	2	…………	1	
2	1	…………	0	
	0	…………	1	MSB

因此
$$(83)_{10}=(1010011)_2$$

【例 1－5】 将十进制数$(93)_{10}$转换成等值的十六进制数。

解：将十进制数 93 依次除以十六进制数的基数 16，并取其余数，转换过程如下：

16	93	商	余数	
16	5	…………	D	
	0	…………	5	

因此
$$(93)_{10}=(5D)_{16}$$

十进制小数部分转换时，采用乘基取整法，即将十进制小数依次乘以 R，取每次得到的乘积的整数部分构成十进制小数的各位数，直到小数部分为 0 或达到一定的精度为止。第一次乘积的整数作为二进制小数的最高有效位，最后一次乘积的整数作为二进制小数的最低有效位。

【例 1－6】 将十进制数$(0.375)_{10}$转换成二进制数。

解：

$0.375\times2=0.75$	取整：$b_{-1}=0$	MSB
$0.75\times2=1.5$	$b_{-2}=1$	
$0.5\times2=1.0$	$b_{-3}=1$	LSB

b_{-i}表示小数点后第 i 次乘积的整数部分。因此

$$(0.375)_{10}=(0.011)_2$$

有整数和小数的十进制数转换成 R 进制数时，将整数和小数部分分别进行转换，然后将结果合并起来。

例如，十进制数$(83.375)_{10}$转换为二进制数时，综合例 1－4 和例 1－6 的转换结果，可得

$$(83.375)_{10}=(1010011.011)_2$$

十进制小数部分的转换有一个精度问题，不可能准确地完全转换，只要满足所要求的精度即可。

【例 1－7】 将十进制数$(0.46)_{10}$转换成二进制数。

(1) 要求转换误差不大于 2^{-8}；

(2) 要求精度达到 0.1%。

解：(1) 要求误差不大于 2^{-8}，只需保留至小数点后第八位，计算过程如下：

$0.46\times2=0.92 \quad b_{-1}=0 \qquad 0.92\times2=1.84 \quad b_{-2}=1$

$0.84\times2=1.68 \quad b_{-3}=1 \qquad 0.68\times2=1.36 \quad b_{-4}=1$

$$0.36\times 2 = 0.72 \quad b_{-5} = 0 \qquad 0.72\times 2 = 1.44 \quad b_{-6} = 1$$
$$0.44\times 2 = 0.88 \quad b_{-7} = 0 \qquad 0.88\times 2 = 1.76 \quad b_{-8} = 1$$

因此

$$(0.46)_{10} \approx (0.01110101)_2$$

(2) 由于二进制数的小数点后第九位为 $2^{-9} = 1/512 \approx 0.2\%$，第十位为 $2^{-10} = 1/1024 < 0.1\%$，所以要达到 0.1%的精度，需保留至小数点后第十位。

接(1)的计算过程，有

$$0.76\times 2 = 1.52 \quad b_{-9} = 1$$
$$0.52\times 2 = 1.04 \quad b_{-10} = 1$$

因此

$$(0.46)_{10} \approx (0.0111010111)_2$$

3) 二进制—八进制、八进制—二进制转换

二进制数转换为八进制数时，由于三位二进制数恰好有八个状态，所以将三位二进制数直接用一位八进制数代替。划分原则为：以小数点为中心，整数部分从低到高每三位一组，最高位不足三位其前添零补齐；小数部分从高到低每三位一组，最低位不足三位其后添零补齐。

八进制数转换为二进制数时，将每位八进制数直接展开成三位二进制数即可。

4) 二进制—十六进制、十六进制—二进制转换

二进制数转换为十六进制数时，由于四位二进制数恰好有十六个状态，所以将四位二进制数直接用一位十六进制数代替。划分原则为：以小数点为中心，整数部分从低到高每四位一组，最高位不足四位其前添零补齐；小数部分从高到低每四位一组，最低位不足四位其后添零补齐。

十六进制数转换为二进制数时，将每位十六进制数直接展开成四位二进制数即可。

5) 八进制—十六进制、十六进制—八进制转换

八进制数转换为十六进制数时，以二进制为桥梁，先将八进制数转换为二进制数，再将二进制数转换为十六进制数。

同理，十六进制数转换为八进制数时，先将十六进制数转换为二进制数，再将二进制数转换为八进制数。

【例 1-8】 将二进制数$(10011101100.001110111)_2$分别转换成八进制数和十六进制数。

解：转换过程如下：

二进制数	010	011	101	100.	001	110	111
八进制数	2	3	5	4 .	1	6	7

因此

$$(10011101100.001110111)_2 = (2354.167)_8$$

二进制数	0100	1110	1100.	0011	1011	1000
十六进制数	4	E	C .	3	B	8

因此

$$(10011101100.001110111)_2 = (4EC.3B8)_{16}$$

【例 1 - 9】 将十六进制数$(BE.29D)_{16}$转换成八进制数。

解：转换过程如下：

$$(BE.29D)_{16} = (\underline{1011}\ \ \underline{1110}.\ \ \underline{0010}\ \ \underline{1001}\ \ \underline{1101})_2$$

十六进制数	B	E .	2	9	D		
二进制数	010	111	110.	001	010	011	101
八进制数	2	7	6 .	1	2	3	5

因此 $(BE.29D)_{16} = (276.1235)_8$

1.1.3 码制

数码不仅可以表示数量上的大小，而且还可用来表示特定的事物。例如“865”路公交车，学号 060016 等，这些数码已没有表示数量大小的含意，只是一种人们事先约定而赋予特定事物的代号。这种类型的数码称为代码。

在编制代码时所遵循的规则称为码制。

1. 二—十进制代码(BCD 代码)

在数字系统中，常用 0、1 两种数码的组合作为代码，称为二进制码。二进制码可以是多位数的，若用 4 位二进制码表示 1 位十进制数的代码，称为二－十进制代码，简称 BCD (Binary Coded Decimal) 代码。BCD 代码是用 4 位二进制码的 10 种组合表示十进制数 0～9 十个数码。

4 位二进制码有 $2^4=16$ 种组合，当用这些组合表示十进制数 0～9 时，需在 16 种组合中选用 10 种组合，表 1.1 列出了几种常用的 BCD 代码。

表 1.1 常用 BCD 代码

十进制数	8421 码	余 3 码	2421 码	5421 码	631 - 1 码	余 3 循环码	移存码
0	0000	0011	0000	0000	0011	0010	0001
1	0001	0100	0001	0001	0010	0110	0010
2	0010	0101	0010	0010	0101	0111	0100
3	0011	0110	0011	0011	0111	0101	1001
4	0100	0111	0100	0100	0110	0100	0011
5	0101	1000	1011	1000	1001	1100	0111
6	0110	1001	1100	1001	1000	1101	1111
7	0111	1010	1101	1010	1010	1111	1110
8	1000	1011	1110	1011	1101	1110	1100
9	1001	1100	1111	1100	1100	1010	1000

BCD 代码分为有权码和无权码两类。

1) 有权 BCD 码

有权 BCD 码是指 4 位二进制数码都有确定的位权值。如表 1.1 中的 8421 码、2421 码、5421 码、631 - 1 码等。对于有权 BCD 码，可根据位权展开求得所代表的十进制数。

例如：$[1001]_{8421码} = 1\times8+0\times4+0\times2+1\times1 = (9)_{10}$

$[1110]_{2421码} = 1\times2+1\times4+1\times2+0\times1 = (8)_{10}$

$[0111]_{631-1码} = 0\times6+1\times3+1\times1+1\times(-1) = (3)_{10}$

最常用的有权 BCD 码是 8421 码，其位权值与自然二进制数的位权值 8、4、2、1 一致，所以也称为自然权码。

2421 码各位的权依次为 2、4、2、1，其组成特点是，2421 码的前 5 个码与 8421 码一致，后 5 个码是 8421 码加上$(6)_{10}=(0110)_2$得到。另一显著特点是，将任意一个十进制数 D 的 2421 码的各位取反，正好是与 9 互补的那个十进制数(9－D)的代码。例如，将 4 的 2421 代码 0100 取反，得到的代码 1011，与 9－4 ＝ 5 的 2421 码 1011 一致，即 4 和 5、0 和 9、1 和 8、2 和 7、3 和 6 互为反码。这种特性称为自补特性。余 3 码、631－1 码等也具有自补特性，这在数字系统中非常有用。

5421 码各位的权依次为 5、4、2、1，其组成特点是，5421 码的前 5 个码与 8421 码一致，后 5 个码是 8421 码加上$(3)_{10}=(0011)_2$得到。另一特点是最高位连续 5 个 0 后连续 5 个 1。当计数器采用这种代码时，最高位可产生对称方波输出。

2）无权 BCD 码

无权 BCD 码没有确定的位权值，不能按位权展开来求所代表的十进制数。如表 1.1 中的余 3 码、余 3 循环码、移存码等。但这些代码各有其特点，可应用于不同场合。

余 3 码是每个 8421 码加上$(3)_{10}=(0011)_2$得到的。用余 3 码进行加减运算比 8421 码方便。余 3 循环码的两个相邻代码仅有一个数码不同，利用这种特性设计的计数器不会发生冒险现象。

3）用 BCD 码表示十进制数

在 BCD 代码中，4 位二进制代码仅表示一位十进制数，对一个多位十进制数编制代码，需要用与十进制位数相同的几组 BCD 代码来表示。

【例 1－10】 用 8421 码、2421 码、余 3 码分别表示十进制数 869。

解：

$$[869]_{10}=[1000\ 0110\ 1001]_{8421码}=[1011\ 1001\ 1100]_{余3码}$$
$$=[1110\ 1100\ 1111]_{2421码}$$

如果用 8421 码表示 R 进制数，应先将 R 进制数转换成十进制数，再用相应的几组 BCD 码表示出来。例如：$(1101.1)_2=(13.5)_{10}=(0001\ 0011.0101)_{8421码}$。

2. 格雷码

格雷码(Gray Code)是另一种无权码，表 1.2 列出了一种典型的四位格雷码与相应的十进制码以及二进制码的对应关系。

表 1.2　四位格雷码与十进制码及二进制码的对应关系

十进制码	二进制码	格雷码	十进制码	二进制码	格雷码
0	0000	0000	8	1000	1100
1	0001	0001	9	1001	1101
2	0010	0011	10	1010	1111
3	0011	0010	11	1011	1110
4	0100	0110	12	1100	1010
5	0101	0111	13	1101	1011
6	0110	0101	14	1110	1001
7	0111	0100	15	1111	1000