

● 高等学校教材

数字逻辑与 数字系统基础



沈建国 雷剑虹 主编



高等教育出版社

高等学校教材

内容提要

本书共分9章，前3章介绍数字逻辑的基本概念、逻辑代数、逻辑函数的化简与实现，后6章介绍数字系统的基础知识，包括组合逻辑、时序逻辑、总线系统、可编程逻辑器件、数字信号处理和数字通信等。

数字逻辑与数字系统基础

本书可作为高等院校计算机专业及相关专业的基础课程教材，也可供从事计算机工作的工程技术人员参考。

沈建国 雷剑虹 主编

图书在版编目(CIP)数据

数字逻辑与数字系统基础 / 沈建国, 雷剑虹主编. — 北京: 高等教育出版社, 2008. 7
ISBN 7-04-019303-3

Ⅰ. 数... Ⅱ. 沈... 雷... Ⅲ. 数字逻辑—高等学校—教材 Ⅳ. TP303.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第110001号

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德胜门内大街2号
邮政编码 100011
总发行部 010-82028899

编辑 陈颖
排版 陈颖
印刷 北京奥德印刷有限公司

开本 787×960
印张 26.75
字数 200 000

高等教育出版社

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

010-82028899
010-82028899
www.hep.edu.cn
www.hep.com.cn

内容提要

全书共分9章,前三章论述数字逻辑的基本原理,讨论了组合逻辑电路和时序逻辑电路的工作原理及其设计思想;第四章简述了模数和数模转换的工作原理;第五章介绍了基本脉冲电路工作原理;第六至第九章讨论目前应用广泛的 PAL、GAL、FPGA 和 isp 的组成结构、基本的 ABEL_HDL 硬件描述语言的使用及编程技术;第八、九章介绍数字系统设计的基础及 Verilog-HDL 语言的设计方法。非电类、师范类物理专业以及电类专业可根据不同要求选择相关章节进行教学。本书也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字逻辑与数字系统基础/沈建国,雷剑虹主编.
北京:高等教育出版社,2004.1

ISBN 7-04-013048-3

I. 数... II. ①沈...②雷... III. ①数字逻辑-高等学校-教材②数字系统-高等学校-教材 IV. TP302.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 101993 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-82028899		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所		
排 版	高等教育出版社照排中心		
印 刷	北京奥隆印刷厂		
开 本	787×960 1/16	版 次	2004年1月第1版
印 张	26.75	印 次	2004年1月第1次印刷
字 数	500 000	定 价	33.20 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

策划编辑 金春英

责任编辑 刘素馨

封面设计 于文燕

责任绘图 朱静

版式设计 马静如

责任校对 杨雪莲

责任印制 陈伟光

发行部电话：(010) 28281807 \ 28281808 \ 28281879 \ 28281877

传真：(010) 82086090

E-mail: db@hpc.com.cn & chunong@hpc.com.cn

邮购地址：北京市西城区德胜大街

高教社出版发行部

邮编：100011

邮购部电话：(010) 64014080 \ (010) 64024601 \ (010) 64024288

前 言

数字电路课程是电子工程、自动化技术、计算机等电类专业和机电一体化等非电类专业的主要技术基础课,同时也是理科、师范类物理专业学生的必修课。

现代科学技术的发展日新月异,电子技术的新理论、新技术、新器件更是层出不穷。大规模和超大规模集成电路(LSI/VLSI)、通用逻辑电路(GAL)、现场可编程逻辑电路(FPGA)及在系统可编程器件(isp)的出现,使逻辑电路的设计逐步从选择通用的标准74系列逻辑器件向通用逻辑电路GAL或现场可编程逻辑电路FPGA转移。数字电路器件的更新换代,一方面使数字系统的设计发生极大的变化,另一方面也给传统的“数字电路”课程教学体系、教学内容、教学方法和任课老师提出了新的挑战。编写本书的目的是为学生提供数字电路设计、分析的基础知识。

数字逻辑与数字系统基础是一门专业基础课,本书的主要读者是大学二年级的学生,它既要分析经典的组合逻辑与时序逻辑的原理,又要兼顾数字器件的新发展及其相关的软件工具。新的内容,既不是作为陪衬,也不是资料的搬迁,而是以完整的体系和较完备的分析设计实例献给读者,并尽可能的深入浅出,使读者容易接受。编写本教材中,我们力求在论述基本原理时突出重点,精简内容,给新技术和新知识点较多空间。使学生在掌握基础知识的同时,对新技术有较全面的认识和了解。有利于培养学生在较短时间内掌握和使用新技术的能力。

本书共分九章,前三章论述数字逻辑的基本原理,讨论了组合逻辑电路和时序逻辑电路的工作原理及其设计思想;第四章简述了模数和数模转换的工作原理;第五章介绍了基本脉冲电路的工作原理;第六到第九章讨论目前应用广泛的PAL、GAL和isp的组成结构、工作原理、基本的ABEL-HDL硬件描述语言的使用及编程技术。第八、第九章介绍Verilog-HDL语言的设计方法及数字系统设计的基础。

本教材的使用,根据不同学校的特点及条件可分二种情况:

1. 非电类、师范类物理系以数字逻辑电路为主,可编程逻辑作一般性介绍,第一章用14~18学时,第二章用10~14学时,第三章用20~24学时,第四和第五章各用6~8学时,总学时为56~72学时,第六到第九章可按各学校具体情况处理;

2. 对于电类学生,第一章 14 学时,第二章 8~10 学时,第三章 18 学时,第四章 6 学时,第五章 4 学时,第六章和第七章各 6 学时,第八章 4 学时,第九章 4 学时,总学时为 72 学时。

以上安排不包括实验课时。

参加本书编写的有沈建国教授、雷剑虹讲师、徐力平副教授、金之诚讲师。其中第一、二、三、四、五章主要由沈建国教授执笔,第六、七、八、九章主要由雷剑虹讲师执笔,全部书稿由沈建国教授统稿。

浙江大学电气工程学院王小海教授、祁才君教授审阅全部书稿,提出了不少宝贵意见及建议。

华东师范大学电子系数字系统教研组的老师对本书提出不少建议,孟杰、王祖杰、奚慧婷等作了不少工作,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中会有不少不恰当之处,恳请使用本书的读者提出宝贵意见。

作者

2003 年 8 月

目 录

第一章 逻辑代数和逻辑门电路	1
1.1 数制与编码	1
1.1.1 数制	1
1.1.2 编码	6
1.2 基本逻辑运算	10
1.2.1 与、或、非运算	11
1.2.2 与非、或非运算	13
1.2.3 异或、同或逻辑运算	14
1.2.4 正逻辑和负逻辑	16
1.3 逻辑代数的基本规律	17
1.3.1 逻辑代数的基本定律	17
1.3.2 逻辑代数的三个规则	19
1.4 逻辑函数的化简	20
1.4.1 逻辑函数的代数法化简	20
1.4.2 逻辑函数的卡诺图法化简	22
1.5 逻辑门电路	34
1.5.1 基本逻辑门	34
1.5.2 CMOS 和 TTL 器件的外部特性	38
1.5.3 集电极开路的与非门	44
1.5.4 三态输出门	45
*1.5.5 发射极耦合逻辑门和集成注入逻辑门	46
1.6 逻辑门电路的非逻辑应用	48
1.6.1 用逻辑门产生脉冲信号	48
1.6.2 用逻辑门组成单稳态电路	50
1.6.3 逻辑门电路的其他应用	51
习题一	53
第二章 组合逻辑电路	59
2.1 组合逻辑电路的分析与设计	59
2.2 组合电路的竞争与冒险	66
2.3 编码器与译码器	70
2.3.1 编码器	70

2.3.2	译码和译码器	76
2.4	比较器和加法器	83
2.4.1	比较器	84
2.4.2	加法器	87
2.5	数据选择器和奇偶校验器	91
2.5.1	数据选择器	91
2.5.2	奇偶校验器	96
2.6	利用组合逻辑器件设计逻辑电路	100
习题二	102
第三章	时序逻辑电路	107
3.1	概述	107
3.2	存储器件——触发器	108
3.2.1	基本 RS 触发器	108
3.2.2	时钟脉冲 RS 触发器	112
3.2.3	主从式 JK 触发器	115
3.2.4	集成主从式 JK 触发器	119
3.2.5	维持阻塞式 D 触发器	121
3.2.6	TTL 集成触发器的主要参数	123
3.2.7	CMOS 触发器	124
3.3	同步时序电路分析	127
3.4	同步时序电路设计	131
3.4.1	同步时序电路的设计步骤	131
3.4.2	设计举例	131
3.5	异步时序逻辑电路分析	140
3.5.1	脉冲型异步时序电路的分析	140
3.5.2	电平型异步时序逻辑电路的分析	143
3.6	寄存器和移位寄存器	145
3.6.1	寄存器和锁存器	146
3.6.2	移位寄存器	149
3.6.3	应用举例	152
3.7	计数器	155
3.8	应用中规模逻辑器件设计数字系统	170
习题三	175
第四章	数模和模数转换	182
4.1	数模转换电路	182
4.1.1	数模转换的基本工作原理	182
4.1.2	二进制权电阻 D/A 转换器	183

4.1.3	$R-2R$ 型 D/A 转换器	184
4.1.4	权电流 D/A 转换器	186
4.1.5	D/A 转换器的主要性能参数	187
4.2	集成 D/A 转换器	189
4.3	模数转换电路	195
4.3.1	采样与保持	195
4.3.2	量化与编码	197
4.3.3	几种典型的 A/D 转换器	198
4.4	集成 A/D 转换器	203
	习题四	209
第五章	脉冲电路基础	212
5.1	脉冲的基本知识	212
5.1.1	脉冲波形与参数	212
5.1.2	RC 电路的暂态过程	214
5.2	简单脉冲波形变换电路	215
5.2.1	耦合电路	215
5.2.2	微分电路	216
5.2.3	积分电路	216
5.2.4	RC 分压电路	217
5.2.5	限幅电路	217
5.2.6	钳位电路	219
5.3	集成脉冲电路	220
5.3.1	集成单稳态触发器	220
5.3.2	集成时基电路 555	223
	习题五	228
第六章	可编程逻辑器件基础	230
6.1	PLD 器件基础	230
6.1.1	PLD 器件概述	230
6.1.2	PLD 器件的分类	232
6.2	可编程逻辑器件的基本结构	235
6.2.1	PAL 的基本电路结构	235
6.2.2	GAL 的基本电路结构	238
6.2.3	FPGA 的基本电路结构	246
*6.3	可编程逻辑器件产品简介	252
6.4	MACH 系列器件介绍	256
6.4.1	MACH 系列器件概述	257
6.4.2	ispMACH™4A 系列器件结构和配置	259

习题六	269
第七章 ispLSI 应用软件	271
7.1 ABEL_HDL 语言	271
7.1.1 ABEL_HDL 语言的基本要素	271
7.1.2 ABEL_HDL 语言的基本语法	283
7.1.3 ABEL_HDL 语言的指示字	293
7.2 ABEL_HDL 设计应用实例	299
7.3 可编程器件工具软件介绍	308
7.3.1 ispLEVER 的原理图输入	309
7.3.2 设计的编译与仿真	314
7.3.3 建立元件符号(Symbol)	321
7.3.4 ABEL 语言和原理图混合输入	322
7.3.5 把设计适配到 Lattice 器件中	327
7.3.6 在系统编程的操作方法	328
7.3.7 器件读出与加密实验	331
7.4 可编程器件工具软件应用实例	332
习题七	352
第八章 Verilog HDL 设计方法	356
8.1 概述	356
8.2 Verilog 硬件描述语言	357
8.2.1 Verilog HDL 语言的基本结构	357
8.2.2 Verilog HDL 语言的基本要素	360
8.2.3 Verilog HDL 语言的基本语法	367
8.2.4 Verilog HDL 语言的任务和函数结构	375
8.3 用 Verilog HDL 设计数字电路举例	377
8.3.1 简单的组合逻辑电路模块设计	377
8.3.2 简单的时序逻辑电路模块的设计	379
8.3.3 利用有限状态机进行较复杂时序逻辑电路的设计	382
习题八	386
第九章 数字系统设计基础	388
9.1 数字系统设计概述	388
9.1.1 数字系统的基本组成	388
9.1.2 数字系统的设计方法	389
9.1.3 现代数字系统的设计流程	390
9.2 ASM 图和 MDS 图描述方法	392
9.2.1 ASM 图	392
9.2.2 MDS 图	398

9.2.3 ASM 图转换 MDS 图	402
9.3 状态机设计与举例	405
9.3.1 状态机的基本结构和功能	405
9.3.2 状态机设计举例	406
习题九	413
参考文献	414

第一章 逻辑代数和逻辑门电路

内容提要

本章主要论述数字逻辑关系的基本原理和实现数字逻辑关系的基本门电路及其外特性。

首先简单介绍数字系统中数的表示方法,不同计数制及其相互转换。然后讨论逻辑代数的基本公式及定理,重点讲述应用逻辑代数化简逻辑函数的方法——代数法和几何(卡诺图)法。最后介绍实现数字逻辑关系的具体电路——逻辑门电路及其外特性。

1.1 数制与编码

在日常生活中,常用十进制数表示一个数值的大小,但在计算机及数字系统中通常采用二进制数表示一个值的大小,有时也采用八进制数和十六进制数表示一个数的值,数制是计数进位制的简称。

1.1.1 数制

一、十进制数

在十进制数中有0、1、2、3、4、5、6、7、8、9等十个数字符号,表示0~9的数值,当一个数大于9时,向相邻高位进1,以10表示。即 $9+1=10$,称作为逢十进一。在十进制数中虽然只有0~9十个数字符号,但经适当组合可以表现任何有限的数值。例如,某数三百贰拾五点二可以写成325.2,也可用多项式表示:

$$325.2 = 3 \times 10^{(3-1)} + 2 \times 10^{(2-1)} + 5 \times 10^{(1-1)} + 2 \times 10^{-1} \\ = 300 + 20 + 5 + 0.2 \quad (1.1.1)$$

在小数点左边第一位乘 10^0 ,第二位乘 10^1 ,第三位乘 10^2 ,而小数点右面第一位乘 10^{-1} 。可见,数符在数中所处的位置不同,数符再乘上10的*i*次方,就表示该数符在其数值中的大小。例如,在式(1.1.1)中小数点后的2其值为0.2,小数点左面第二位的2其值是20。*i*是数符在某数的第*n*位减一的值,10的*i*

次方称为“权”，对于一个十进制数 n 的一般表示如下所示：

$$(N)_{10} = d_{n-1} \times 10^{n-1} + d_{n-2} \times 10^{n-2} + \cdots + d_1 \times 10 + d_0 \times 10^0 + d_{-1} \times 10^{-1} + \cdots + d_{-m} \times 10^{-m} \\ = \sum_{i=-m}^{n-1} d_i \times 10^i \quad (1.1.2)$$

式中 n 表示整数部分的位数； m 表示小数部分的位数； 10^i 表示第 i 位的权； d_i 表示 i 位的数码。通常我们把 (1.1.2) 式称为按权展开式或多项式之和。对于一个数，理论上讲可以采用任何一种进位制表示。但是，对于电子电路而言，若选用十进制数，则很难找到一个有十种状态的简单电路与十个数码相对应，所以在数字电路中不用十进制数表示一个数值。

二、二进制数

二进制数只有 0 和 1 两个数字符号，分别代表 0 和 1 两个数值。当数值大于 1 时，则向高位进 1，即 $1+1=10$ ，称作“逢二进一”。二进制数也可以用多项式的和来表示，例如 $(10\ 111.01)_2$ 可表示为：

$$(10\ 111.01)_2 = 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2}$$

其整数部分最高位权是 2^4 ，小数部分最低位权是 2^{-2} 。可见，二进制数同样可以表示任意一个数值。一般表达式如下所示：

$$(N)_B = \sum_{i=-m}^{n-1} b_i \times 2^i = b_{n-1} b_{n-2} \cdots b_1 b_0 \cdot b_{-1} b_{-2} \cdots b_{-m} \\ = b_{n-1} \times 2^{n-1} + b_{n-2} \times 2^{n-2} + \cdots + b_1 \times 2^1 + b_0 \times 2^0 + b_{-1} \times 2^{-1} \\ + b_{-2} \times 2^{-2} + \cdots + b_{-m} \times 2^{-m} \quad (1.1.3)$$

(1.1.3) 式中 $-m$ 是小数点后的位数， n 是小数点前的位数。 $(N)_B$ 的下标 B (Binary) 表示二进制。

由于二进制数只有二个字符，因此它的每 1 位数都可以用具有二个不同稳定状态的电路来实现，例如晶体管电路中的饱和及截止，开关电路的开和关，继电器的接通与断开等，因而二进制数在计算机技术中有广泛的应用。

但是，用二进制数表示一个数值时，位数较长，例如 $(10\ 111.01)_2$ 要用 7 位二进制数，若用十进制数表示该数 $(23.25)_{10}$ 只需 4 位十进制数。可见，使用二进制数时不够方便也不习惯。因而，在计算机技术中常采用十六进制数和八进制数。

十六进制采用十六个数码：0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A (相当于十进制的 10)、B(11)、C(12)、D(13)、E(14)、F(15)，是“逢十六进一”。例如十六进制的 AE4 可用多项式表示如下：

$$(AE4)_H = A \times 16^2 + E \times 16^1 + 4 \times 16^0 = A \times 16^2 + E \times 16 + 4 \quad (1.1.4)$$

(1.1.4) 式中下标 H (Hexadecimal) 表示十六进制。同理，八进制数有 0、1、2、3、4、5、6、7 等八个数码，是“逢八进一”，用下标

O (Octal) 表示, 例如:

$(73)_O$ 表示八进制。

$$(73)_O = 7 \times 8^1 + 3 \times 8^0 = 7 \times 8 + 3$$

三、不同进制之间的转换

由于人们日常习惯使用十进制数, 但在计算机和数字系统内部大多使用二进制数或用二进制为基础的其他进位制数。因此, 就需要在机器的输入或输出端对不同进制的数之间进行转换。

1. 二进制数转换为十进制数

二进制数转换为十进制数可按下述方法进行: 首先计算出(1.1.3)式中各项的积, 然后求和, 就可得到该二进制数对应的十进制数, 我们称作为按权展开求和法。例如:

例 1.1.1 求 $(10\ 111.01)_2$ 对应的十进制数值。

$$\begin{aligned} \text{解: } (10\ 111.01)_2 &= 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} \\ &= 16 + 4 + 2 + 1 + 0.25 \\ &= (23.25)_{10} \end{aligned}$$

2. 十进制数转换成二进制数

十进制数转换成二进制数, 分整数部分和小数部分, 采取不同的方法加以转换。

整数部分的转换采用“除二取余法”, 即把十进制数除以 2, 取出余数 1 或 0 作为相应的二进制数的最低位, 把商再除以 2, 取余数 1 或 0, 作相应的二进制数的第 2 位, 依次类推, 直到最后商为零为止。这时所得余数为最高位。

例 1.1.2 把 $(71)_{10}$ 转换为二进制数。

解:	$2 \overline{) 71}$	余数
	$2 \overline{) 35}$	1
	$2 \overline{) 17}$	1
	$2 \overline{) 8}$	1
	$2 \overline{) 4}$	0
	$2 \overline{) 2}$	0
	$2 \overline{) 1}$	0
	0	1

所以: $(71)_{10} = (1000111)_2$

小数部分的转换采用“乘 2 取整”法, 即把小数部分乘以 2, 取其积的整数 1 或 0, 作小数部分的最高位, 然后取积的小数部分再乘以 2 取其积的整数 1 或 0, 作整数部分的第 2 位, 依次类推, 直到积等于零或所需精度为止。

例 1.1.3 把 $(0.375)_{10}$ 转换为二进制。

乘数	$\times \quad 2$	0.192	-----	0	-----	b_{-6}
	$\times \quad 2$	0.384	-----	0	-----	b_{-7}
	$\times \quad 2$	0.768	-----	0	-----	b_{-8}

对 0.628 连八次乘 2 以后,其小数部分是 0.768,根据“四舍五入”的原则,第 8 位不是 0 而取 1。所以 $(0.628)_{10} = (0.10100001)_2$,其误差 $e < 2^{-9}$ 。

若一个十进制数既有整数部分又有小数部分,转换时整数部分采用“除 2 取余”法,小数部分采用“乘 2 取整”法,然后把转换的结果合并起来即可。

例 1.1.6 将 $(71.375)_{10}$ 转换为二进制数。

解: $(71.375)_{10} = (71)_{10} + (0.375)_{10} = (1000111)_2 + (0.011)_2 = (1000111.011)_2$

3. 二进制数转换成十六进制数

二进制数转换成十六进制数可按下述方法进行,以小数点为基准分别向左向右按 4 位分组,最后不满 4 位则需加 0,每组以十六进制数符代替即可。

例 1.1.7 将 $(100111.11)_2$ 转换为十六进制数

解: $(100111.11)_2 = 10,0111.1100 = (27.B)_{16}$

二进制数转换成八进制数的方法与二进制数转换为十六进制数的方法相似,它是 以 3 位分组,每组以八进制数符代替。

4. 十六进制数转换成二进制数

例 1.1.8 把 $(AE3.3)_{16}$ 转换成二进制数

解: $(AE3.3)_{16} = (101011100011.0011)_2$

例 1.1.9 把十六进制数 $(38A.B)_{16}$ 转换成二进制数

解: $(38A.B)_{16} = (001110001010.1100)_2 = (1110001010.11)_2$

需要注意的是,在对十六进制数每一位用二进制数表示时,整数部分 1 前面的 0 和小数部分后面的 0 可以省略。

现将十进制、二进制、八进制、十六进制的对照表列于表 1.1.1。

表 1.1.1 几种常见的数制对照表

十进制数	二进制数	八进制数	十六进制数
0	0000	0	0
1	0001	1	1
2	0010	2	2
3	0011	3	3
4	0100	4	4
5	0101	5	5

十进制数	二进制数	八进制数	十六进制数
6	0110	6	6
7	0111	7	7
8	1000	10	8
9	1001	11	9
10	1010	12	A
11	1011	13	B
12	1100	14	C
13	1101	15	D
14	1110	16	E
15	1111	17	F
16	10000	20	10

1.1.2 编码

前面讨论的数都没有考虑符号,一般认为是正数,对于带负号的数在机器中怎样表示,是本节所讨论的内容。

一个带符号的数由二部分组成,一部分表示该数的符号,另一部分表示该数的值。符号有正和负两种,它可以用1位二进制数表示。通常用0表示正数,用1表示负数,放在数值位的最高位前面。对于一个 n 位二进制数,若第一位是符号位,则余下的 $n-1$ 位是该数值的绝对值。一般直接用正号“+”和负号“-”表示符号的二进制数,如+1101和-1101,称作符号数的真值,不能直接用于计算机和数字系统中。符号数值化以后,称作机器数,可以在计算机和数字系统中使用。

例如,二进制正数1111在机器中表示如图1.1.1(a)所示,二进制负数-1101在机器中表示如图1.1.1(b)所示。

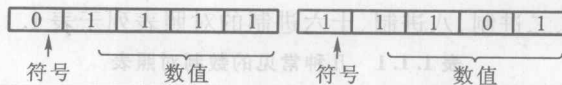


图 1.1.1 二进制数在机器中的表示

在数字系统中,表示机器数的方法很多,通常用的有原码,补码,反码三种。

一、原码

用原码表示正数和负数时,第一位是符号位,0表示正数,1表示负数,其余