



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

数字逻辑电路

王 楚 沈伯弘 编



高 等 教 育 出 版 社
HIGHER EDUCATION PRESS

内 容 简 介

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材,同时也是教育部信息与电子科学学科“九五”规划国家级重点教材。它是北京大学教授依据多年的教学和科研经验,并参考国内、外优秀教材编写而成。本书分为两部分,前六章介绍组合逻辑电路设计、反馈电路设计和同步时序逻辑电路设计;后三章扼要地介绍 CPU 的组成、接口电路和含 CPU 的器件。本书特点一是把数字逻辑电路、微机原理和接口技术等内容相结合、建立了新的结构体系;二是在选材和对命题的论述方面,有其独到之处;三是在行文叙事方面,善于启发读者思维,而且配有大量独具匠心的思考题和习题,有利于培养学生的创新能力。

本书可作为高等学校信息与电子科学专业的教科书,也可供其它专业选用和社会读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

数字逻辑电路/王楚,沈伯弘编. —北京:高等教育出版社,2000

ISBN 7-04-007469-9

I. 数… II. ①王… ②沈… III. ①数字电路 - 高等学校 - 教材 ②逻辑电路 - 高等学校 - 教材 IV. TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 30390 号

数字逻辑电路

王楚 沈伯弘 编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16

版 次 1999 年 9 月第 1 版

印 张 27

印 次 2000 年 10 月第 2 次印刷

字 数 500 000

定 价 28.10 元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究



面向 21 世纪课程教材



普通高等教育“九五”
国家级重点教材

序 言

自本世纪 60 年代以来,由于集成电路技术的发展,逻辑电路的设计已有较大的进展,高等学校的教学要求也应作相应的调整。本书是电子与信息科学类专业的一本教学用书。本书的编写属于电子与信息科学类专业主干课程建设课题中的一个子课题。本书力图体现电子与信息科学类专业的基本教学要求,也包含一部分阅读资料。在写本书时,作者认为读者已修“基础物理”、“高等数学”、“电子线路”等先导课程,因而本书侧重于逻辑电路的基本概念与逻辑电路设计。

本书分两部分:前六章包括组合逻辑电路设计、反馈电路设计和同步时序逻辑电路设计,大致对应于多数学校“数字电路”课程的基本教学要求。后三章扼要地介绍 CPU 之组成、接口电路和含 CPU 的器件。另设“微机原理”、“接口技术”的学校可不讲授后三章。第九章只是阅读资料,宜有选择地讲授。

本书是作者依据在北京大学电子学系多年的教学与科学研究经验,参考国内、外优秀教材编写而成的。自 80 年代以来,作者日益感到逻辑电路已发展到软件与硬件相结合组成系统的阶段,CPU 与存储器已成为逻辑电路的常用器件。就电路的组成方式而言,ROM 只是标准形式的门阵列,CPU 是典型的控制器与运算器。自 1985 年以来,我们已不以 CPU 作为核心内容设置课程,而把较多时间用于含 CPU 的系统实验。这种做法与国外的一些学校相似。

本书旨在简明扼要地介绍设计逻辑电路的基本方法,以帮助读者建立规范有序的思维习惯。作者认为大学生应针对一门课程阅读几本不同风格的书。因此本书不追求面面俱到,只是供大学生和工程师阅读的一本书。本书的选材和对命题的论述,有一些与常用的教材有差异,其目的在于说明有关命题还有值得研讨的内容。

本书在每一章后面,有一定数量的思考题和习题,其中有些题难度较大,有些题不一定能得到全面的答案。作者的意图在于引起读者的思考。大学生不要力求能做完全部习题和思考题,但若能看一遍题并有初步的想法,无疑是有益的。

在本书的评审过程中复旦大学凌燮亭教授、清华大学陆大铨教授、北京邮电大学谢源清教授和理科信息与电子科学类专业教学指导委员会委员们都提出了许多宝贵意见,作者在此致以衷心的感谢。

由于作者的水平有限,本书难免有错误和不当之处,我们由衷地欢迎大家提出批评或建议。

王楚 沈伯弘
于北京大学电子学系
1998年7月

责任编辑 刘素馨

封面设计 张楠

责任绘图 李维平

责任校对 康晓燕

责任印制 杨明



目 录

第一章 绪论	1
1.1 数 码	1
1.1.1 自然数的表示方法	1
1.1.2 二进制数和十六进制数	2
1.1.3 数码的意义	3
1.2 逻辑变量和逻辑函数	4
1.2.1 逻辑数和逻辑变量	4
1.2.2 逻辑函数	5
1.3 逻辑电路与逻辑信号	7
1.3.1 组成逻辑电路的基本单元	7
1.3.2 逻辑电平与逻辑极性	9
1.3.3 逻辑电路的用途	10
1.4 常用的二进制码	12
1.4.1 二-十进制码(Binary Coded Decimal)	12
1.4.2 循环码	14
1.4.3 检错码和纠错码	15
1.4.4 字符编码(Alphanumeric Code)	18
思考题	20
习 题	22
第二章 逻辑运算和逻辑门	25
2.1 简单的逻辑等式	25
2.1.1 恒等和非运算	25
2.1.2 恒等门和非门	26
2.2 与运算和或运算	28
2.2.1 与和或的运算规则	28
2.2.2 与函数和或函数	28
2.2.3 真值图	30
2.2.4 与门和或门	31
2.3 门电路之组成和主要参数	34
2.3.1 集成门之组成	34
2.3.2 MOSFET门	37

2.3.3 逻辑电平与噪声容限	39
2.3.4 传输延迟时间	41
2.4 同和异或	43
2.4.1 同和异或的定义	43
2.4.2 简单的算术运算电路	45
2.5 逻辑代数的运算规则	47
2.5.1 逻辑函数的变换规则	48
2.5.2 代数运算的一般规则	49
2.5.3 0-1律	51
2.5.4 与、或的重叠律和互补律	53
*2.5.5 同和异或的特殊运算规则	55
附录 高速逻辑电路	57
思考题	61
习 题	64
第三章 组合逻辑电路设计	68
3.1 组成逻辑电路的基本方法	68
3.1.1 逻辑函数的表述方式	68
3.1.2 最小项和最大项	69
3.1.3 逻辑函数的基本形式	74
3.2 组合逻辑电路的标准形式及电路的化简	76
3.2.1 逻辑电路的标准形式	76
3.2.2 逻辑函数表述方式的选择	78
3.2.3 逻辑函数的化简	80
*3.2.4 多因变量电路的化简	83
3.3 有禁止态的逻辑函数	85
3.3.1 8-4-2-1 码译码器	85
3.3.2 BCD-七段译码器	87
3.3.3 五位左移码译码电路	91
3.4 组合逻辑电路中的冒险	93
3.4.1 冒险与竞争	93
3.4.2 动态冒险	95
3.4.3 逻辑信号的判读	97
*3.4.4 利用延迟时间的辅助电路	98
3.5 三态门与传输门	99
3.5.1 三态门与总线	99
3.5.2 MOSFET 传输门	101

* 3.5.3 三态门组成逻辑电路	102
附录一 混合逻辑图	104
附录二 逻辑单元的符号	107
思考题	109
习 题	111
第四章 可编程逻辑电路	114
4.1 通用的组合逻辑电路	114
4.1.1 通用的逻辑函数式	114
4.1.2 通用的组合逻辑电路	115
* 4.1.3 用通用器件组成专用电路	116
4.1.4 传输开关	118
4.2 可编程逻辑器件	121
4.2.1 可编程逻辑器件之组成	121
4.2.2 可编程逻辑阵列(PAL)	123
4.2.3 通用逻辑阵列(GAL)	126
* 4.2.4 PLD的开发过程	128
4.3 只读存储器(ROM)	129
4.3.1 ROM的逻辑结构	129
4.3.2 乘法器	131
4.3.3 ROM的时序	134
4.4 受指令控制的逻辑电路	134
4.4.1 组成受控电路的基本方法	134
4.4.2 链式 ALU 之组成	136
* 4.4.3 一种集成的 ALU 基本单元	137
* 4.4.4 并行运算的 ALU	140
附录 二进制数的机器运算	142
思考题	146
习 题	147
第五章 反馈与锁存器	151
5.1 反馈电路的分析方法	151
5.1.1 反馈与逻辑稳定态	151
5.1.2 反馈电路的分析方法	152
5.1.3 状态转移过程	154
5.1.4 状态转移图	155
5.2 锁存器	157

5.2.1 锁存器的逻辑功能	157
5.2.2 “写入”控制	159
* 5.2.3 准动态 MOSFET 锁存器	160
5.3 含锁存器的基本电路	162
5.3.1 锁存器用于读取逻辑信号	162
5.3.2 主从触发器	164
* 5.3.3 单稳态与无稳态电路	167
5.4 反馈电路的设计	170
5.4.1 反馈电路的设计过程	170
5.4.2 维持-阻塞电路的设计	170
5.4.3 单脉冲发生器的逻辑设计	172
5.4.4 状态代码的设计	175
5.5 随机存取存储器	177
5.5.1 锁存器阵列	177
* 5.5.2 静态 RAM 中的存储单元	179
5.5.3 动态 RAM	180
附 录 触发器常见符号和国家标准符号对照表	182
思考题	183
习 题	187
 第六章 同步时序逻辑电路	 192
6.1 触发器的逻辑功能	192
6.1.1 触发器的描述	192
6.1.2 移位寄存器	194
6.1.3 保持与变反	197
* 6.1.4 集成的 T 触发器与 JK 触发器	199
6.2 同步计数器的基本电路	200
6.2.1 二进制加法计数器	200
6.2.2 二进制减法计数器	202
6.2.3 8-4-2-1 BCD 码计数器	203
6.2.4 左移 BCD 码计数器	205
6.3 计数器的控制电路	207
6.3.1 启动与进位控制电路	207
6.3.2 置数电路	210
6.3.3 可预置计数器	211
6.4 同步时序逻辑电路之组成	214
6.4.1 同步信号发生器	214

6.4.2 数字式频率计	215
6.4.3 同步时序逻辑电路的基本模型	218
6.5 小规模同步时序逻辑电路的设计	220
6.5.1 小规模同步时序逻辑电路	220
6.5.2 同步时序逻辑电路的设计过程	221
*6.5.3 触发器直接输出的电路	224
*6.6 同步时序逻辑电路的分析	227
6.6.1 基本分析方法	227
6.6.2 m 序列码发生器	228
附 录 异步计数器	229
思考题	231
习 题	234
第七章 CPU 型微处理器	239
7.1 微处理器中的控制器	239
7.1.1 微处理器	239
7.1.2 控制单元的基本结构	240
7.1.3 CCU 之组成	241
7.2 CPU 型微处理器	244
7.2.1 CPU 的基本结构	244
7.2.2 CPU 的运算器	245
7.2.3 读/写控制电路	247
7.2.4 读和写的操作过程	249
7.2.5 联络应答控制	251
7.3 机器语言指令	253
7.3.1 机器语言	253
7.3.2 汇编语言的指令格式	254
*7.3.3 寻址方式	256
7.3.4 基本的转移指令	259
7.3.5 状态控制指令	260
7.4 程序的流程	260
7.4.1 简单的程序段	260
7.4.2 分支程序与循环程序	261
7.4.3 有条件的循环程序	264
*7.4.4 数据块的传送指令与搜索指令	266
*7.5 关于运算指令的说明	268
7.5.1 关于算术运算指令的说明	268

7.5.2 逻辑运算与位操作指令	268
7.5.3 移位指令	269
7.6 子程序调用	272
7.6.1 地址空间的分配	272
7.6.2 子程序调用与堆栈	273
7.6.3 中断	275
* 7.6.4 中断服务子程序的组成	277
* 7.6.5 中断的屏蔽	278
附 录 Z-80 指令表	278
思考题	286
习 题	288
 第八章 接口电路	 293
8.1 并行传送的基本方法	293
8.1.1 并行传送的工作方式	293
8.1.2 查询传送	295
8.1.3 中断传送	297
8.2 常用的并行接口器件	300
8.2.1 通用的并行接口	300
* 8.2.2 中断控制单元	302
8.2.3 数模转换器	306
8.2.4 模数转换器	309
* 8.2.5 采样保持电路	311
8.3 可编程接口器件	313
8.3.1 可编程 I/O 接口之组成	313
8.3.2 Z80-PPIO	315
8.3.3 可编程计数器	318
8.3.4 8253 型计数器/定时器	321
8.4 串行通信	324
8.4.1 异步串行通信	324
8.4.2 异步时钟的校正	326
* 8.4.3 同步串行通信	328
* 8.4.4 可编程串行接口	329
* 8.5 存储器与外设直接传送数据	333
8.5.1 存储器直接存取传送方式(DMA)	333
8.5.2 DMAC 的结构	334
思考题	335

习 题	326
* 第九章 微处理器的发展	340
9.1 二进制数的乘、除运算	341
9.1.1 数字信号处理中的乘运算	341
9.1.2 整数的乘法运算	342
9.1.3 定点数与浮点数	343
9.1.4 除法运算	344
9.2 8086 型 CPU	345
9.2.1 8086 的引脚	345
9.2.2 8086 的结构	348
9.2.3 8086 的中断系统	350
9.2.4 8086 的工作方式	351
9.3 微型计算机系统的组成	355
9.3.1 80286 微处理器	356
9.3.2 IBM PC/AT 概述	359
9.3.3 IBM PC/AT 主板结构及地址分配	360
9.3.4 AT 机总线与时序	363
9.3.5 AT 机 I/O 扩展总线——ISA 总线	365
9.3.6 主板上的接口部件和外部接口设备	367
9.4 单片微型计算机	379
9.4.1 单片机的组成	379
9.4.2 存储器和 I/O 扩展	383
9.4.3 中断与定时器/计数器	386
9.4.4 串行口与定时器/计数器 2	389
9.4.5 复位、电源控制与加密	392
9.5 数字信号处理器(DSP 芯片)	394
9.5.1 概述	394
9.5.2 定点运算 DSP 芯片	395
9.5.3 浮点运算 DSP 芯片	397
附录一 32 位与 64 位微处理器	398
附录二 MCS-51 指令	402
习 题	408
主要参考资料	411
附录 教学说明	412

第一章 绪 论

1.1 数 码

1.1.1 自然数的表示方法

逻辑电路又称为数字电路,就其名称而言与数字有密切的关系,常用的计算机就是由逻辑电路组成的设备。但是,这里所说的“数字”不仅是指表述数量大小的“数”,还包括以后介绍的逻辑数。为了便于理解电路中的“数字”,先对通常用于算术运算的数——自然数的表示方法作简要的说明。

常用的数的书写符号是由幂级数导出的。若有正整数 R , 则正数 N 可表示为

$$N = a_n R^n + a_{n-1} R^{n-1} + \cdots + a_0 R^0 + a_{-1} R^{-1} + \cdots + a_{-m} R^{-m}$$

即

$$N = \sum_{i=-m}^n a_i R^i \quad (1.1)$$

式中 a_i 是由 R 个符号表示 $0 \sim (R-1)$ 的 R 个正整数,称为基本数符。式 (1.1) 表示的数 N 可以简写为

$$N = (a_n a_{n-1} \cdots a_0 a_{-1} \cdots a_{-m})_R \quad (1.2)$$

或

$$N = a_n a_{n-1} \cdots a_0 a_{-1} \cdots a_{-m} \pmod{R} \quad (1.3)$$

这种计数方法称为“ R 进制”计数法, R 称为计数法的模。

十进制数是以“10”为模表示的数,它以“0”、“1”、“2”、“3”、“4”、“5”、“6”、“7”、“8”、“9”10个符号为基本数符。当然,也可以规定其它符号表示基本数符,但必须给符号以数量定义。例如“0”定义为“零”,其它9个符号依次加1。

式(1.2)是用一个有定义的符号串表示数,例如符号串“(502.12)₁₀”是大家都看懂的。但很多人通常没有意识到,这种符号串是式(1.1)的缩写符号。在这种符号中以小数点作为划分指数 i 的标志。小数点左边第一位对应的指数为 $i=0$,符号的位置每左移一位,对应的指数加 1,每右移一位对应的指数减 1。在式(1.2)中,符号 a_i 书写在小数点左边第 $(i+1)$ 个位置上,它表示的数为 $a_i R^i$ 。字符串的定义是各符号表示的数之和。例如

$$502.12 = 5 \times 10^2 + 0 \times 10^1 + 2 \times 10^0 + 1 \times 10^{-1} + 2 \times 10^{-2}$$

在用基本数符表示的数(字符串)中,每一符号表示的数是基本数与另一数之积。例如在式(1.2)中 a_i 表示的数实际为 $a_i Q_i$, 其中

$$Q_i = R^i \quad (1.4)$$

Q_i 叫做这一位符号的“权”。在定义了权之后,式(1.1)又可表示为

$$N = a_n Q_n + a_{n-1} Q_{n-1} + \cdots \quad (1.5)$$

式(1.5)可以理解为一种用字符串表示数的一种定义式, R 进制计数制只是规定 $Q_i = R^i$ 而已。当然,也可以用其它方法规定每一位符号的权。

在用字符串表示 R 进制数时,应标明进位制的模。通常都是用十进制,在计算机中则常用二进制数或十六进制数。为了方便起见,在不会混淆时也可以不标“模”。

1.1.2 二进制数和十六进制数

二进制数是 $R=2$ 的计数制。它只有 0 和 1 两个符号,这两个符号的意义与对应的十进制数符号相同。表示二进制数的字符串也是由式(1.1)定义的。例如

$$\begin{aligned} (1101)_2 &= (1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0)_{10} \\ &= (13)_{10} \end{aligned}$$

二进制数在形式上是用 0 和 1 排列成的字符串表示。4 位二进制数可以有 $(2^4)_{10} = (16)_{10}$ 种不同的符号,表示 $(16)_{10}$ 个不同的数;8 位二进制数可以有 $(2^8)_{10} = (256)_{10}$ 种不同的符号,表示 $(256)_{10}$ 个不同的数。以正整数为例,4 位二进制数可表示 $(0 \sim 15)_{10}$ 共 16 个数。

二进制数是机器运算所用的数,为便于书写和人机对话,常用十六进制数。十六进制数有 16 个基数符号,除了 10 个与十进制数相同的符号外,还用“A”、“B”、“C”、“D”、“E”、“F”6 个符号,依次表示 $(10 \sim 15)_{10}$ 6 个数(表 1-1)。

表 1-1 十六进制基数符号

$(N)_{10}$	二进制数	十六进制符号
0	0000	0
1	0001	1
2	0010	2
3	0011	3
4	0100	4
5	0101	5
6	0110	6
7	0111	7
8	1000	8
9	1001	9
10	1010	A
11	1011	B
12	1100	C
13	1101	D
14	1110	E
15	1111	F

十六进制数实际上是将小数点两边的每 4 位二进制数视为一个基数。若给定一个二进制数,只要按 4 位一组分组,每组用十六进制基数符号表示,并保持符号的顺序不变,就转换成为十六进制数。

[例 1.1] 将 $(101110.101)_2$ 表示为十六进制数。

解:将 $(101110.101)_2$ 以小数点为基准,在小数点两边以 4 位为一组。分组时可补上高位的和小数点后低位的 0,得到以下的三组

$$|0010|1110| \cdot |1010|$$

三组的十六进制符号依次是 2、E 和 A 即

$$(101110.101)_2 = (2E.A)_{16}$$

[例 1.2] 将 $(D7.B)_{16}$ 表示为二进制数。

解:将每一个十六进制基数用 4 位二进制数代替就得到二进制数。即

$$(D7.B)_{16} = (11010111.1011)_2$$

1.1.3 数码的意义

前面已经说明,“数”是由按一定的规则定义的符号来表示的,这种符号称为数码。但是数码并不一定用于表示“数”,它可以是一种表示事物及其状态的符号。人们可以利用一定的符号传递信息,但这些符号的含义是通过人们的“约定”而赋予的。当人们规定用数码表示“数”时,就可以把数码理解为数,并用来

表示算术运算。

实际上数码并不只是用来表示数。读者知道,许多事物都是用数码表示的,例如地址的邮政编码、“119”次列车、“25”中学等,在发电报的过程中,也用数码表示文字、标点符号及其它符号。总之,数码的内涵因人们约定的意义不同而异。

一个包含有限种事物及其状态的集合总是可以和一个由有限位基数符组成的数码集合建立确定的对应关系。可以令每一事物的状态以一个特定的数码表示。在这里,数码不一定具有数值的意义。如果说数码还具有某种“数”的意义的话,可以认为是这种事物的状态在集合中的排序号,这种排序可以只是一种“约定”。

到目前为止,电子线路只适合于有效地识别和处理两种不同的信号。这两种信号可以用符号 **0** 和 **1** 表示。因此,机器中的数码总是用 **0** 和 **1** 组成符号串表示,通常称为二进制码。机器中的二进制码是一种表示信息的符号,并不局限于表示二进制数。

二进制码是由 **0**、**1** 排列成的符号串,一串符号中的符号的数目称为二进制码的“码长”或“位数”。 n 位二进制码由 n 个 **0**、**1** 符号组成,可以有 2^n 种不同的组合,最多只能表示 2^n 个不同的事物状态。在处理实际问题时,应依据需要描述的事物状态的总数,选定恰当的码长,并规定每一串数码的含义。

1.2 逻辑变量和逻辑函数

1.2.1 逻辑数和逻辑变量

用有限位数码表示“数”或事物的状态,只能是离散的,不连续的。对于二进制码,每一个符号(又叫做码元)只能是 **0** 或 **1**,俗称“非 **0** 即 **1**,非 **1** 即 **0**”。用二进制码表示事物的状态时,每一码元只能以 **0** 或 **1** 表示两种互不相容的状态。例如图 1-1 所示的电路。开关(S)只有“通”和“断”两种状态,假定灯(H)的状态只需要表述为“亮”或“暗”,则开关 S 和灯 H 都只有两种互不相容的状态。

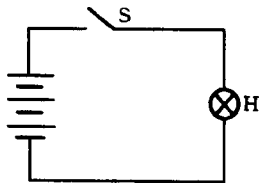


图 1-1 单开关电路

如果要描述开关和灯,则可以用描述它们的符号 S 和 H 。可以规定 $S = 1$ 表示开关处于“通”状态, $S = 0$ 表示开关处于“断”状态;还可以规定 $H = 1$ 表示灯处于“亮”状态, $H = 0$ 表示灯处于“暗”状态。当然也可以作相反的规定,例如以 $S = 1$ 表示开关处于“断”状态,以 $S = 0$ 表示开关处于“通”状态。这种按照约定的规则表示事物的状态的 **0**、**1** 符号叫做逻辑数。通常的二进制数,是按算