

高等学校教材

数字电子技术基础

(第三版)

清华大学电子学教研组 编

阎石主编

高等教育出版社

本书是根据国家教委制定的“电子技术基础课程基本要求”，在第二版的基础上修订而成的。

在内容上，进一步削减了分立元件电路和讲述集成电路内部结构及其详细工作过程的内容，增强了CMOS电路和中、大规模集成电路应用的比重。

在体系上，部分调整了一些章节内容的先后次序及归属，使全书结构更加切合教学实际，易于学生接受。

全书内容按要求分为两大部分，正文部分基本上按“基本要求”编写，附录部分供学时较多、要求较高的院校作为选讲或自学内容。为了便于读者自行检查学习效果，每章除思考题与习题外还增加了自我检验题。书中绝大部分的习题是重新编排的。

本书与童诗白主编的《模拟电子技术基础》(第二版)配套使用，可作为高等学校电气、电子类专业“电子技术基础”课程教材，也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

本书责任编辑 章浩平

**注意：未经国家教委同意，任何单位
不得出版本教材的习题解答**

(京) 112号

高等学校教材

数字电子技术基础

(第三版)

清华大学电子学教研组编

阎石 主编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京顺义县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 20.875 字数 500 000

1981年9月第1版 1989年3月第3版 1992年4月第6次印刷

印数 88 678—108 691

ISBN7-04-002066-1/TN·108

定价 6.40 元

第三版序

自《数学电子技术基础》(第一版)出版至今,已经过去七年了。由于电子技术及其应用又有了很大的发展,同时教委主持制定了电子技术基础课程的教学基本要求,因而对原书进行全面的修订就势在必行了。

修订工作主要是针对以下几个方面进行的:

从内容上,进一步削减了分立元件电路和讲述集成电路内部结构及其详细工作过程的内容,增强了CMOS电路和中、大规模集成电路应用的比重。同时,还适当介绍了一些近年来迅速发展起来的新型器件和电路,如高速CMOS电路、半定制集成电路等。

鉴于原书中各章的习题与内容配合得不够紧密,而且新版教材的内容又改动很大,所以这次更换了绝大部分的习题。另外,为便于读者自行检查学习效果,每章除思考题与习题之外还增加了自我检验题,并在全书的最后给出了这些题目的答案。自我检验题所涉及的内容都是各章的基本概念、基本原理和基本的分析、设计方法。

从体系上,在基本沿用原书体系的基础上,作了一些局部调整。首先调换了第一、二章的先后次序。因为门电路一章的份量比较重,概念和难点比较集中,而逻辑代数基础的内容很容易为学生所接受,所以将两章的次序对掉符合由浅入深的原则。其次,把原来的第四章分成了触发器和时序逻辑电路两章,这样既解决了原来第四章篇幅过大的问题,同时又不影响教材体系的系统性和完整性。再次,考虑到大规模集成电路往往是既包含组合逻辑电路又包含时序逻辑电路的数字系统,所以把大规模集成电路的内容也

目 录

第一章 逻辑代数基础	1
1.1 概述	1
1.1.1 数字量和模拟量	1
1.1.2 数制和码制	2
1.1.3 算术运算和逻辑运算	5
1.2 逻辑代数中的三种基本运算	6
1.3 逻辑代数的基本公式和常用公式	11
1.3.1 基本公式	11
1.3.2 若干常用公式	12
1.4 逻辑代数的基本定理	14
1.4.1 代入定理	14
1.4.2 反演定理	15
1.4.3 对偶定理	16
1.5 逻辑函数及其表示方法	17
1.5.1 逻辑函数	17
1.5.2 逻辑函数的表示方法	18
1.5.3 逻辑函数的两种标准形式	22
1.6 逻辑函数的公式化简法	26
1.6.1 逻辑函数的最简形式	26
1.6.2 常用的化简方法	28
1.7 逻辑函数的卡诺图化简法	31
1.7.1 逻辑函数的卡诺图表示法	31
1.7.2 用卡诺图化简逻辑函数	34
1.8 具有无关项的逻辑函数及其化简	39
1.8.1 约束项、任意项和逻辑函数式中的无关项	39
1.8.2 无关项在化简逻辑函数中的应用	40

本章小结	42
参考文献	43
自我检验题	44
思考题和习题	46
第二章 门电路	51
2.1 概述	51
2.2 半导体二极管和三极管的开关特性	52
2.2.1 半导体二极管的开关特性	52
2.2.2 半导体三极管的开关特性	55
2.3 分立元件门电路	59
2.3.1 二极管门电路	59
2.3.2 三极管门电路	60
2.4 TTL门电路	62
2.4.1 TTL与非门的工作原理	62
2.4.2 TTL与非门的静态输入特性与输出特性	66
2.4.3 TTL与非门的动态特性	72
2.4.4 其他类型的TTL门电路	76
2.4.5 TTL电路的改进系列	86
2.5 CMOS门电路	91
2.5.1 CMOS反相器的工作原理	91
2.5.2 CMOS反相器的静态输入特性与输出特性	96
2.5.3 CMOS反相器的动态特性	99
2.5.4 其他类型的CMOS门电路	104
2.5.5 改进的CMOS电路	114
本章小结	117
参考文献	119
自我检验题	119
思考题和习题	121
第三章 组合逻辑电路	129
3.1 概述	129

3.2 常用的组合逻辑电路	130
3.2.1 编码器	131
3.2.2 译码器	138
3.2.3 数据选择器	144
3.2.4 加法器	148
3.2.5 数值比较器	153
3.3 组合逻辑电路的设计方法	157
3.3.1 设计组合逻辑电路的原则和一般步骤	157
3.3.2 用SSI设计组合逻辑电路的实例	159
3.3.3 用MSI设计组合逻辑电路的实例	167
3.4 组合逻辑电路中的竞争-冒险现象	174
3.4.1 竞争-冒险现象及其成因	174
3.4.2 检查竞争-冒险现象的方法	176
3.4.3 消除竞争-冒险现象的方法	178
本章小结	181
参考文献	182
自我检验题	183
思考题和习题	184
第四章 触发器	190
4.1 概述	190
4.2 触发器的电路结构与动作特点	191
4.2.1 基本RS触发器的电路结构与动作特点	191
4.2.2 同步RS触发器的电路结构与动作特点	195
4.2.3 主从触发器的电路结构与动作特点	198
4.2.4 边沿触发器的电路结构与动作特点	205
4.3 触发器的逻辑功能及其描述方法	213
4.3.1 触发器按逻辑功能的分类	213
4.3.2 触发器的电路结构与逻辑功能的关系	217
4.4 触发器逻辑功能的转换	219
4.4.1 D触发器转换为其他逻辑功能触发器的方法	219
4.4.2 JK触发器转换为其他逻辑功能触发器的方法	221

本章小结	223
参考文献	224
自我检验题	225
思考题和习题	227
第五章 时序逻辑电路	236
5.1 概述	236
5.2 同步时序逻辑电路的分析方法	239
5.2.1 分析同步时序逻辑电路的一般步骤	239
5.2.2 时序逻辑电路的状态转换表、状态转换图和时序图	241
5.3 若干常用的时序逻辑电路	244
5.3.1 寄存器和移位寄存器	244
5.3.2 计数器	253
5.3.3 顺序脉冲发生器	291
5.4 时序逻辑电路的设计方法	295
5.4.1 设计时序逻辑电路的原则和一般步骤	295
5.4.2 时序逻辑电路的设计举例	297
本章小结	310
参考文献	311
自我检验题	312
思考题和习题	313
第六章 脉冲波形的产生和整形	319
6.1 概述	319
6.2 施密特触发器	320
6.2.1 集成施密特触发器	321
6.2.2 用门电路组成的施密特触发器	326
6.2.3 施密特触发器应用举例	330
6.3 单稳态触发器	333
6.3.1 用门电路组成的单稳态触发器	333
6.3.2 用施密特触发器组成的单稳态触发器	341
6.3.3 集成单稳态触发器	342

6.4	多谐振荡器	347
6.4.1	用门电路组成的多谐振荡器	348
6.4.2	用施密特触发器组成的多谐振荡器	361
6.4.3	石英晶体多谐振荡器	363
6.5	555定时器及其应用	365
6.5.1	555 定时器的电路结构	365
6.5.2	用 555 定时器接成的施密特触发器	366
6.5.3	用 555 定时器接成的单稳态触发器	368
6.5.4	用 555 定时器接成的多谐振荡器	370
	本章小结	374
	参考文献	375
	自我检验题	376
	思考题和习题	377
第七章	大规模集成电路	383
7.1	概述	383
7.2	只读存储器(ROM)	385
7.2.1	固定 ROM	385
7.2.2	PROM 和 EPROM	388
7.2.3	用 ROM 实现组合逻辑函数	395
7.3	可编逻辑阵列(PLA)	401
7.4	随机存取存储器(RAM)	403
7.4.1	RAM 的结构及工作原理	403
7.4.2	RAM 的扩展	415
7.5	顺序存取存储器(SAM)	418
7.5.1	SAM 的结构及工作原理	418
7.5.2	SAM 中的 MOS 动态移位寄存单元	422
7.6	半定制集成电路	429
7.6.1	门阵列	430
7.6.2	标准单元	433
7.6.3	半定制电路的研制步骤	433

本章小结	435
参考文献	436
自我检验题	437
思考题和习题	437
第八章 数-模和模-数转换	439
8.1 概述	439
8.2 D/A 转换器	441
8.2.1 权电阻网络 D/A 转换器	441
8.2.2 T 形电阻网络 D/A 转换器	443
8.2.3 权电流型 D/A 转换器	447
8.2.4 具有双极性输出的 D/A 转换器	449
8.2.5 D/A 转换器的转换精度与转换速度	451
8.3 A/D 转换器	458
8.3.1 A/D 转换的一般步骤及采样定理	458
8.3.2 采样-保持电路	461
8.3.3 直接 A/D 转换器	464
8.3.4 间接 A/D 转换器	472
8.3.5 A/D 转换器的转换精度与转换速度	480
本章小结	482
参考文献	484
自我检验题	484
思考题和习题	485
第九章 数字系统读图练习	491
9.1 概述	491
9.2 $3\frac{1}{2}$ 位双积分型数字电压表	492
9.3 ASCII 码键盘编码电路	498
参考文献	504
自我检验题答案	505
半导体集成电路型号命名方法	517

第一章附录	522
附录 1A 不同数制间的转换.....	522
附录 1B 原码、补码和反码.....	525
附录 1C 若干常用的编码.....	527
附录 1D 用 Q-M 法化简逻辑函数.....	533
附录 1E 混合逻辑中逻辑符号的等效替换.....	536
第二章附录	538
附录 2A 双极型数字集成电路的其他类别.....	538
附录 2B CMOS 电路的锁定效应.....	549
附录 2C CMOS 电路的正确使用方法.....	551
附录 2D MOS 数字集成电路的其他类别.....	553
附录 2E TTL 与 CMOS 电路的接口.....	555
附录 2F TTL 与非门的主要性能参数.....	560
附录 2G CMOS 或非门 CC4001 的主要性能参数.....	562
附录 2H 各类数字集成电路主要性能参数比较表.....	564
第三章附录	565
附录 3A 算术逻辑单元和奇偶校验器.....	565
附录 3B 附加功能齐全的七段字形译码器.....	570
附录 3C 数码显示器件.....	573
第四章附录	584
附录 4A 触发器的动态特性.....	584
附录 4B 集成触发器的主要性能参数.....	589
第五章附录	594
附录 5A 异步时序逻辑电路的分析方法.....	594
附录 5B 异步时序逻辑电路的设计方法.....	597
附录 5C 时序逻辑电路的自启动设计.....	602
附录 5D 时序逻辑电路中的竞争-冒险现象.....	605
附录 5E 最大长度移位寄存器式计数器.....	609
第六章附录	613

附录 6A	多谐振荡器振荡频率的调节方法	613
附录 6B	可重复触发的集成单稳态触发器	615
附录 6C	式(6-11)和式(6-16)的推导	618
附录 6D	555 定时器的主要性能参数	620
第七章附录		623
附录 7A	EPROM 实例——2716	623
附录 7B	电荷耦合器件	627
附录 7C	磁泡存储器	633
第八章附录		638
附录 8A	集成 D/A 转换器的主要性能参数与实例	638
附录 8B	集成 A/D 转换器的主要性能参数与实例	641

第一章 逻辑代数基础

内 容 提 要

本章介绍分析数字电路逻辑关系的基本方法。

首先扼要地讲述了逻辑代数的基本公式、常用公式和重要定理,然后介绍逻辑函数及其表示方法,最后着重阐述了应用这些公式和定理化简逻辑函数的方法。

为便于读者理解和掌握这些基本概念、公式、定理和方法,各部分均配置了较多的例题。

1.1 概述

1.1.1 数字量和模拟量

当我们观察自然界中形形色色的物理量时可以发现,尽管它们的性质各异,但就其变化规律的特点而言,不外乎两大类。

其中一类物理量的变化在时间上和数量上都是离散的。也就是说,它们的变化在时间上是不连续的,总是发生在一系列离散的瞬间。同时,它们的数值大小和每次的增减变化都是某一个最小数量单位的整数倍,而小于这个最小数量单位的数值没有任何物理意义。我们把这一类物理量叫做数字量,把表示数字量的信号叫做数字信号,并且把工作数字信号下的电子电路叫做数字电路。

例如,当我们用一个电子电路记录从自动生产线上输出的零件数目时,每送出一个零件就给电子电路一个信号,使之记1,而平

时没有零件送出时加给电子电路的信号是 0，所以不记数。可见，零件数目这个信号的变化在时间上和数量上都不连续，所以它是一个数字信号。最小的数量单位就是 1 个。

与此同时，我们将除数字量以外的所有物理量统称为模拟量，把表示模拟量的信号叫做模拟信号^①，并把工作于模拟信号下的电子电路称为模拟电路。

例如，从热电偶得到的电压信号就属模拟信号，因为在任何情况下被测温度都不可能发生突跳，所以测得的电压信号无论在时间上还是在数量上都是连续的。而且，这个电压信号在连续变化的过程中任何一个取值都有具体的物理意义，即代表一个相应的温度。

1.1.2 数制和码制

一、数制

用数字量表示物理量的大小时，仅用一位数码往往不够用，因而必须用进位计数的方法组成多位数码使用。我们把多位数码中每一位的构成方法以及从低位到高位进位的规则称为数制。常用的数制有以下几种：

1. 十进制

十进制是我们日常生活和工作中最常使用的进位计数制。在这种进位计数制中，每一位有 0~9 十个数码，所以计数的基数是 10。超过 9 的数必须用多位数表示，其中低位数和相邻高位数之间的关系是“逢十进一”，故称为十进制。例如：

$$143.75 = 1 \times 10^2 + 4 \times 10^1 + 3 \times 10^0 + 7 \times 10^{-1} + 5 \times 10^{-2}$$

所以任意一个正的十进制数 D 均可展开为

^① 严格地讲，应当包含模拟信号和数字信号以外的其他离散信号。

$$D = \sum k_i \times 10^i \quad (1-1)$$

其中 k_i 是第 i 位的系数, 它可能是 $0 \sim 9$ 十个数码中的任何一个。若整数部分的位数是 n , 小数部分的位数是 m , 则 i 包含从 $n-1$ 到 0 的所有正整数和从 -1 到 $-m$ 的所有负整数。

若以 N 取代式(1-1)中的 10 , 即可得到任意进制(N 进制)数展开式的普遍形式

$$D = \sum k_i N^i \quad (1-2)$$

式中 i 的取值范围与式(1-1)中的规定相同; N 称为计数的基数; k_i 为第 i 位的系数; N^i 称为第 i 位的权。

2. 二进制

在数字电路中应用最广的是二进制。在二进制数中, 每一位仅有 0 和 1 两个可能的数码, 所以计数基数为 2 。低位和相邻高位之间的进位关系是“逢二进一”, 故得名二进制。

根据式(1-2), 任何一个二进制数均可展开为

$$D = \sum k_i \times 2^i \quad (1-3)$$

例如:

$$101.11 = 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2}$$

3. 八进制

在八进制数中, 每一位用 $0 \sim 7$ 这八个数码表示, 所以计数基数为 8 。低位与相邻高位之间的进位关系是“逢八进一”。

任何一个八进制数都可以按式(1-2)展开为

$$D = \sum k_i \times 8^i \quad (1-4)$$

例如:

$$37.41 = 3 \times 8^1 + 7 \times 8^0 + 4 \times 8^{-1} + 1 \times 8^{-2}$$

由于同一个数用八进制写出来的结果要比用二进制写出来的结果简单得多, 而且二进制与八进制之间的互相转换又极为方便, 所以有时在书写计算机程序时使用八进制。

4. 十六进制

十六进制数的每一位有十六种可能出现的状态，分别用0~9、A(10)、B(11)、C(12)、D(13)、E(14)和F(15)表示。因此，任意一个十六进制数均可展开为

$$D = \sum k_i \times 16^i \quad (1-5)$$

例如：

$$\begin{aligned} 2A.7F &= 2 \times 16^1 + A \times 16^0 + 7 \times 16^{-1} + F \times 16^{-2} \\ &= 2 \times 16^1 + 10 \times 16^0 + 7 \times 16^{-1} + 15 \times 16^{-2} \end{aligned}$$

由于目前在微型计算机中普遍采用八位和十六位二进制并行运算，而八位和十六位二进制数可以用两位和四位十六进制数表示，因而用十六进制符号书写程序十分方便。同时，十六进制数和二进制数之间的转换又非常简单，这就使得十六进制数的应用比八进制数更加广泛。

有关各种数制间互相转换的方法在计算机原理课程中将会详细介绍，读者若有兴趣，也可自行阅读本书末尾的附录1A或有关书籍。

二、码制

不同的数码不仅可以表示数量的不同大小，而且还能用来表示不同的事物。在后一种情况下，这些数码将不再表示数量大小的差别，而只是不同事物的代号而已。我们将这些数码称为代码。

例如，在举行长跑比赛时，为便于识别运动员，给每个运动员编一个数码并写在号码布上。显然，这些不同的号码仅代表不同的运动员，而失去了数量大小的含意。

为便于记忆和查找，在编制代码时总要遵循一定的规则，这些规则就叫做码制。

例如，在用四位二进制数码表示一位十进制数的0~9这十个

状态时，经常采用表 1-1 所示的编码规则。不难看出，如果把每一个代码都看作一个四位二进制数，各位的权依次为 8、4、2 和 1，那么每个代码的数值恰好等于它所表示的十进制数的大小。因此，又将这种代码的码制叫做 8421 编码。

表 1-1 8421 代码的编码表

十进制数	代 码			
	D	C	B	A
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
权	8	4	2	1

1.1.3 算术运算和逻辑运算

在数字电路中，一位二进制数码的 0 和 1 不仅可以表示数量的大小，而且还可以表示两种不同的逻辑状态。例如，可以用 1 和 0 分别表示某一事物的是和非、真和伪、有和无、好和坏，或表示电路的通和断、电灯的亮和暗等等。这种只有两种对立逻辑状态的逻辑关系称为二值逻辑。

当两个二进制数码表示两个数量大小时，它们之间可以进行数值运算，我们称这种运算为算术运算。二进制数的算术运算法则和十进制数的运算法则基本相同，唯一的区别在于相邻两位之间的关系是逢二进一而不是逢十进一。例如：

加法运算

$$\begin{array}{r} 1001 \\ + 0101 \\ \hline 1110 \end{array}$$

乘法运算

$$\begin{array}{r} 1001 \\ \times 0101 \\ \hline 1001 \\ 0000 \\ 1001 \\ 0000 \\ \hline 0101101 \end{array}$$

减法运算

$$\begin{array}{r} 1001 \\ - 0101 \\ \hline 0100 \end{array}$$

除法运算

$$\begin{array}{r} 1.11\dots\dots \\ 0101 \overline{) 1001} \\ \underline{0101} \\ 1000 \\ \underline{0101} \\ 0110 \\ \underline{0101} \\ 0010 \end{array}$$

当两个二进制数码表示不同的逻辑状态时，它们之间则可以按照指定的某种因果关系进行所谓逻辑运算。下面将会看到，这种逻辑运算与算术运算有着本质上的不同。因为二进制算术运算非常简单，所以下面将重点介绍逻辑运算的各种规律。

1.2 逻辑代数中的三种基本运算

1849年英国数学家乔治·布尔(George Boole)首先提出了描述客观事物逻辑关系的数学方法——布尔代数。后来，由于布尔代数被广泛地应用于解决开关电路和数字逻辑电路的分析与设计上，所以也把布尔代数叫做开关代数或逻辑代数。本章所讲的逻辑代数就是布尔代数在二值逻辑电路中的应用。

逻辑代数中也用字母表示变量，这种变量称为逻辑变量。在二值逻辑中，每个逻辑变量的取值只有0和1两种可能，而且这里的0和1已不再表示数量的大小，只代表两种不同的逻辑状态。

逻辑代数的基本运算有与、或、非三种。为了便于理解它们的含意，让我们先来看一个简单的例子。

图1-1中给出了三个指示灯的控制电路。显而易见，在图(a)