

数字电子技术

李济芳 王 尧 主编



东南大学出版社

数字电子技术

李济芳 主 编
王 尧

东南大学出版社

(苏)新登字第 012 号

内 容 提 要

本书是根据 1993 年国家教委组织制定的“高等工业学校电子技术课程教学基本要求”，按照“加强基础、面向更新、拓宽应用、提高能力”的原则，由六所高等工业院校在总结多年教学实践的基础上编写而成。内容包括：逻辑代数基础、逻辑门电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与整形、数模与模数转换器、大规模集成电路、综合练习、数字电路的接口电路、电子干扰和抑制等十章。每章都有小结，并附有一定数量的例题、复习思考题和习题。本书和王尧、张国华主编的《模拟电子技术》组成配套教材。两书的内容是按照总参考学时 170~195 来安排的。

本书可作为高等工科院校电气、自控、电力、电子等类专业的“电子技术基础”教材，也可供相近专业的师生和工程技术人员学习和参考。

数字电子技术

李济芳 王尧 主编

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210008)

江苏省新华书店经销 江宁县印刷厂印刷

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 11½ 字数 310 千

1994 年 8 月第 1 版 1994 年 8 月第 1 次印刷

印数：1—7000 册

ISBN 7-81023-875-2/TP·52

定价：10.00 元

(凡因印装质量问题，可直接向承印厂调换)

前 言

本书是全国高校电气技术专业指导委员会组织编写的统编教材之一。其目的是为了在电子技术迅速发展的形势下,结合有关院校的教学实际,在规定的学时内,更好地保证教学基本要求,便于实施教学和因材施教。

编写本书的具体考虑是:

1. 教材的基本内容紧扣教委制定的“电子技术基础课程基本要求”,对基本概念、基本原理和基本分析方法,进行由浅入深、准确透彻的阐述。

2. 加强集成电路及其应用内容,并适当介绍一些最新的集成电路。

3. 注意联系实际、启发思维,易于自学和阅读。

4. 便于不同专业,按不同学时,由教师灵活选择。

参加本书编写工作的有武汉水利电力大学李海(第一章)、江苏工学院张维亚(第二章)、江苏工学院李鸿洲(第三章)、广东工学院黄金章(第四、五章)、北京航空航天大学李济芳(第六、十章)、南京航空航天大学陈晰(第七章)、东南大学王尧(第八、九章)。

本书由李济芳、王尧担任主编,清华大学夏莹教授担任主审。

在编写本书过程中,东南大学电气系和北京航空航天大学自动控制系的有关领导和同志们曾给予热情的帮助和支持,在此一并表示衷心的感谢。

限于编者水平,加之时间仓促,书中错误和不妥之处,在所难免,诚恳希望使用本教材的老师和读者予以批评指正。

编 者

1993年12月于北京航空航天大学

出版说明

电气技术专业是电工学科领域内强弱电相结合的一个学科型宽口径专业。自1979年创办以来,已在教育部、航空航天部、机械工业部、轻工业部、水利电力部、冶金工业部、地质矿产部、城乡建设环境保护部以及地方的几十所高等和中等院校相继成立了电气技术专业。1984年教育部批准将该专业由试办改为正式专业。1986年12月中国电工技术学会教育工作委员会组织同行专家评审通过全国电气技术教学研究会经调查研究而提出的《电气技术专业人才培养基本业务规格》,确定了该专业的主要课程。1987年成立全国电气技术专业教学指导委员会,挂靠在机械工业部。该委员会于1988年讨论通过了各课程研究组制定的主要课程和教学环节的基本要求,并据此组织编审有关教材,陆续出版,作为该专业的第一轮试用教材。

电气技术专业具有四个特性:其一是学科性,即它是面向整个电工学科而不是以某一特定的电气产品或工程对象来设置专业;其二是基础性,突出强调技术基础在人才培养过程中的重要性和技术基础课程自身学科体系的相对完整性;其三是综合性,强调学科相互交叉和相互渗透的重要性。因此提出四个结合,即强弱电相结合,元件系统相结合,软硬件相结合和电与机相结合;其四是实践性,即在切实加强基础理论和基本技能的同时,特别强调培养综合运用这些基础和技能来分析和解决实际工程问题的能力,为此必须加强实践性的教学环节,并重视自学能力的培养。因此,本专业的课程设置、课程改革和教材编写都力求体现这四个特性。

虽然这批教材的书稿都是由具有多年教学经验的教师,经院校推荐,专业指导委员会组织,根据专业改进的基本要求重新编写并组织专家进行评审,各有关出版社为保证教材的质量也作出了很多努力。但是,限于水平和经验,并且这毕竟也还是初次改革的尝试,不足之处希望使用单位、广大师生提出批评和建议,为不断提高电气技术专业教材的质量而努力。

全国电气技术专业指导委员会

目 录

1 逻辑代数基础	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 数制与编码	(2)
1.2.1 数制	(2)
1.2.2 数制转换	(4)
1.2.3 二进制编码	(8)
1.3 逻辑代数的基本概念	(11)
1.3.1 逻辑变量	(11)
1.3.2 逻辑运算	(12)
1.3.3 真值表	(14)
1.3.4 逻辑函数的相等	(15)
1.3.5 正逻辑和负逻辑	(15)
1.4 逻辑代数的基本公式、定理及规则	(16)
1.4.1 逻辑代数的公理和基本定理	(16)
1.4.2 逻辑代数的基本规则	(17)
1.5 逻辑函数的表达形式	(19)
1.5.1 函数表达式法	(19)
1.5.2 卡诺图表示法	(24)
1.6 逻辑函数化简	(27)
1.6.1 逻辑函数的代数化简法	(28)
1.6.2 逻辑函数的卡诺图化简法	(29)
1.6.3 逻辑函数化简中的几个实际问题的处理	(31)
小 结	(35)
思考题和习题	(36)
2 逻辑门电路	(39)

2.1	半导体二极管、三极管及场效应管的开关特性	(39)
2.1.1	半导体二极管的开关特性	(39)
2.1.2	半导体三极管的开关特性	(41)
2.1.3	增强型 MOS 场效应管的开关特性	(44)
2.2	分立元件门电路	(46)
2.2.1	三种基本门电路	(46)
2.2.2	复合逻辑门电路	(49)
2.3	三极管—三极管逻辑(TTL)与非门电路	(52)
2.3.1	TTL 与非门的工作原理	(52)
2.3.2	TTL 门电路的主要特性及参数	(55)
2.3.3	TTL 与非门的改进	(59)
2.4	TTL 门电路的其它类型	(61)
2.5	MOS 门电路	(66)
2.5.1	单沟道 MOS 门电路	(66)
2.5.2	互补 MOS 门电路(CMOS 门电路)	(71)
2.6	几种集成门电路性能比较	(77)
	小 结	(78)
	思考题和习题	(79)
3	组合逻辑电路	(87)
3.1	概述	(87)
3.2	组合逻辑电路分析的一般方法	(88)
3.3	常见组合逻辑电路的分析	(90)
3.3.1	编码器	(90)
3.3.2	数据选择器	(93)
3.4	组合逻辑电路的设计	(95)
3.4.1	组合逻辑电路的基本设计方法	(95)
3.4.2	加法器的设计	(98)
3.4.3	数值比较器的设计	(100)
3.4.4	译码器的设计	(101)

3.5	组合逻辑电路中的竞争与冒险	(111)
3.6	组合逻辑电路芯片及其应用	(113)
	小 结	(120)
	思考题和习题	(121)
4	触发器	(127)
4.1	概 述	(127)
4.2	基本 RS 触发器	(128)
4.2.1	电路的组成及逻辑符号	(128)
4.2.2	工作原理	(128)
4.2.3	逻辑功能及其表示法	(129)
4.2.4	由与非门组成的基本 RS 触发器	(131)
4.2.5	基本特点	(132)
4.3	同步 RS 触发器	(133)
4.3.1	电路的组成及逻辑符号	(133)
4.3.2	工作原理	(133)
4.3.3	特性表和特性方程	(134)
4.3.4	基本特点	(135)
4.3.5	同步 RS 触发器的空翻问题	(136)
4.4	主从型触发器	(136)
4.4.1	主从 RS 触发器	(136)
4.4.2	主从 JK 触发器	(139)
4.5	边沿触发器	(142)
4.5.1	维持阻塞型 D 触发器	(142)
4.5.2	CMOS 边沿主从 D 触发器	(145)
4.5.3	边沿 JK 触发器	(147)
4.6	触发器逻辑功能的分类	(149)
4.6.1	RS 触发器	(149)
4.6.2	D 触发器	(149)
4.6.3	JK 触发器	(150)

4.6.4	T 和 T' 触发器	(150)
4.7	集成触发器及其应用举例	(151)
	小 结	(154)
	思考题和习题	(155)
5	时序逻辑电路	(161)
5.1	概述	(161)
5.2	几种常用时序逻辑电路的分析	(162)
5.2.1	寄存器	(162)
5.2.2	计数器	(168)
5.2.3	顺序脉冲发生器	(187)
5.3	时序逻辑电路的设计	(189)
5.3.1	时序逻辑电路设计的几种方法	(189)
5.3.2	时序逻辑电路设计的一般步骤	(189)
5.3.3	用 SSI(小规模集成电路)设计同步时序电路的举例 ..	(190)
5.3.4	用 MSI(中规模集成电路)实现时序逻辑电路	(198)
5.4	应用举例	(205)
	小 结	(213)
	思考题和习题	(214)
6	脉冲波形的产生和整形	(223)
6.1	概述	(223)
6.2	脉冲的产生和整形电路	(224)
6.2.1	单稳态触发器	(224)
6.2.2	多谐振荡器	(231)
6.2.3	施密特触发器	(234)
6.3	集成定时器	(239)
6.3.1	555 电路的分析	(240)
6.3.2	555 电路的典型应用	(242)
	小 结	(248)
	思考题和习题	(249)

7	数-模与模-数转换器	(254)
7.1	概述	(254)
7.2	D/A 转换器	(255)
7.2.1	D/A 转换器原理	(255)
7.2.2	权电阻网络 D/A 转换器	(256)
7.2.3	T 型解码网络 D/A 转换器	(257)
7.2.4	DAC 中的模拟开关	(259)
7.2.5	D/A 转换器的主要指标	(260)
7.2.6	集成 DAC 举例	(261)
7.3	A/D 转换器	(264)
7.3.1	采样保持电路	(265)
7.3.2	量化与编码	(267)
7.3.3	多路模拟开关	(269)
7.3.4	A/D 转换器	(270)
7.3.5	ADC 的主要指标	(279)
7.3.6	集成 ADC 电路介绍	(280)
	小 结	(281)
	思考题和习题	(282)
8	大规模集成电路	(284)
8.1	概述	(284)
8.2	只读存储器 ROM	(285)
8.2.1	只读存储器的结构和工作原理	(285)
8.2.2	可编程 ROM(PROM)和可改写 ROM(EPROM)	(287)
8.2.3	用 ROM 实现组合逻辑函数	(288)
8.3	随机存取存储器(RAM)	(290)
8.3.1	RAM 的结构和工作原理	(290)
8.3.2	RAM 的扩展	(292)
8.3.3	RAM 芯片举例	(293)
8.4	可编程逻辑阵列 PLA	(294)

8.4.1	可编程逻辑阵列 PLA 的结构	(294)
8.4.2	PLA 的逻辑设计	(295)
小 结		(299)
思考题和习题		(299)
9	综合练习	(300)
9.1	概述	(300)
9.2	积分型数字直流电压表	(300)
10	数字电路的接口电路、电子干扰和抑制	(306)
10.1	接口电路	(306)
10.1.1	接口电路的功能	(306)
10.1.2	一些常用的接口电路	(307)
10.2	电子干扰及其抑制方法	(313)
10.2.1	噪声与干扰	(313)
10.2.2	噪声的来源	(314)
10.2.3	噪声的耦合方式	(316)
10.2.4	抑制电子噪声的方法	(317)
10.3	设计、安装和调试中的几个问题	(329)
10.3.1	设计、安装中某些实际问题的处理	(329)
10.3.2	电路的调试	(331)
小 结		(333)
思考题和习题		(333)
附录		(337)
A	混合逻辑中逻辑符号的等效替换	(337)
B	集成数码比较器及其应用	(338)
C	集成触发器简介	(340)
D	集成脉冲电路简介	(352)

1 逻辑代数基础

本章先介绍数的结构和特征。主要讨论计数表示、计数规律、各种数制的转换和十进制数的二进制编码。随后介绍描述数字电路的数学工具——逻辑代数。而主要从实用的角度介绍逻辑代数的基本概念、基本定理和规则、逻辑函数的表示形式及函数化简。目的在于使读者能运用这一数学工具去解决逻辑电路分析和设计中的具体问题。

1.1 概 述

逻辑代数是哲学领域中的逻辑学中抽象出来的。逻辑学是研究逻辑思维和推理的一门学科,为了摆脱逻辑学研究中繁琐的文字描述,在 1854 年,英国数学家乔治·布尔(George Boole)提出了一种新的推论事物的方法。他使用了一套有效的符号来建立逻辑思维的数学模型。进而将复杂的逻辑问题抽象为一种简单的符号演算。符号逻辑在许多方面与普通代数相似,但又不同于普通代数的规律,它表达的是二值性的函数关系。因此,常称它为布尔代数。至 20 世纪初,布尔代数已发展成为一门纯数学的分支学科。

随着通信事业的迅速发展,如电话的大量普及,伴随而至的问题是,如何从众多的电话机中选取所需要的对象。1938 年克劳德·向农(C. E. Shannon)将布尔代数应用于电话继电器触点组成的开关电路,使得原为解决逻辑问题而提出的布尔代数找到了一个极其广泛的应用天地,它不仅为数字技术提供了重要的数学工具,而且加速了计算机时代的到来。

随着数字技术的发展,数字系统的研究核心是优化设计问题,以寻求逻辑门数目最少为主要目标,为此提出了最简化逻辑结构

问题。1952年后,维奇(Veitch)和卡诺(Karnaugh)先后提出了对工程上十分有用的逻辑工具——卡诺图。从而使布尔代数得到了进一步的丰富和发展。

自布尔代数曾被称为开关代数用于开关数字电路之后,随着电子技术的发展,开关代数这个术语已很少使用。为了与“数字系统逻辑设计”这一术语相适应,人们更习惯于把开关代数叫做逻辑代数。而逻辑代数是布尔代数向电子工程领域延伸的结果。目前,逻辑代数已成为研究和设计数字系统时不可缺少的重要数学工具。

1.2 数制与编码

1.2.1 数制

所谓数制是进位计数制度的简称。日常生活中有许多不同的数制。然而人们最熟悉的是“十进制”。但作为计数电路十进制并不是最方便的,因此在计数电路中,一般不直接采用十进制。为了易于理解和接受有关数制的一些概念,下面先介绍十进制数。

一、十进制数

十进制数是用十个不同的数码 $0, 1, 2, \dots, 9$ 来表示数的。任何一个数都可以用上述数码按一定规律排列起来表示。其计数规律是“逢十进一”。一个数制中所允许使用的数码的个数称为该数制的基数,用字母 R 表示。显然十进制的基数为10。换句话说,基数为10的计数制叫十进制。一般来讲,基数为 M 的计数体制叫 M 进制。

用有限的数码来表示任何一个数,常用方法是位置记数法。所谓位置记数法,就是将数码并列放在不同的位置组成数串,而且同一数码在不同的位置所表示的数值也不同。如333,相同数码因在不同位置的权重不同,而表示的数值则不相同。 n 位十进制数从右至左,第 i 位的权为 $10^{(i-1)}$ 。一般来讲,对 n 位任意进制数第 i 位的权可写成 $W_i = R^{(i-1)}$,其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。

一个数除用位置记数法表示外,还可以按权展开成多项式表示,如

$$357=3\times 10^2+5\times 10^1+7\times 10^0$$

等号右边称为按权展开的多项式。

二、二进制

基数 $R=2$ 的计数体制称为二进制。二进制具有运算简单,易于物理实现等优点,因此它在计算技术中被广泛采用。

二进制的两个数码为“0”和“1”,其计数规律是“逢二进一”,即 $1+1=10$ (读为“壹零”)。必须注意,这里的 10 与十进制的“10”是完全不同的,它并不代表“拾”,它与十进制的 2 的数值是相等的,即

$$10=1\times 2^1+0\times 2^0$$

所以,一个二进制数同样既可以用位置记数法表示(如 1101),也可以按权展开成多项式表示,如

$$(1101)_{\text{二}}=1\times 2^3+1\times 2^2+0\times 2^1+1\times 2^0$$

等号左边为位置记数法表示的二进制数,其右边为按权展开的多项式。如果把系数为“1”的权相加得到的数正好是二进制数对应的十进制的数。换句话说,二进制数可按权展开的方法转换为相应的十进制数。实际上,任意进制的数都可以用按权展开的办法转换成十进制数。

二进制虽具有运算简单,易于用电路实现等优点,但用二进制表示一个数时,与等值的十进制数相比位数多得多,例如,十进制数 54 用二进制数表示则为 110110,使用时不便书写和记忆,也不习惯,这是它的缺点。

为了读写方便起见,常把二进制改写成八进制或者十六进制。下面分别加以介绍。

① 下标 B(Binary)表示二进制

三、十六进制和八进制数

十六进制的基数 $R=16$ 。它的十六个数码除借用十进制的十个数码外,还借用字母作补充,即十六个数码为:0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A(对应于十进制数中10)、B(11)、C(12)、D(13)、E(14)、F(15)。其计数规律为“逢十六进一”。如数 $(4E6)_{16}$ 就是十六进制位置记数法表示的数,同样也可按权展开成多项式表达,即

$$(4E6)_{16} = 4 \times 16^2 + 14 \times 16^1 + 6 \times 16^0$$

八进制的基数 $R=8$ 。它的八个数码为 0、1、2、3、4、5、6、7。计数规律为“逢八进一”。如数 $(24)_8$ 。为用位置记数法表示的八进制数。若按权展开成多项式则为

$$(24)_8 = 2 \times 8^1 + 4 \times 8^0$$

1.2.2 数制转换

将一个数从一种进制转换成另一种进制表示称为数制转换。由于不同的情况要求用不同的数制。例如,我们日常习惯于十进制,而数字电路却是二进制工作的。这就需要将十进制数转换成数字系统能接受的二进制数。数字电路的输出又需要转换成十进制才能适应人们的日常习惯。在不同的场合,其它进制之间的转换往往也是需要的。下面着重以二进制与十进制数之间转换为例介绍数制转换的方法,然后将其转换方法推广到任意进制的转换。

一、二进制数转换为十进制数

由二进制数转换为十进制数,只要将二进制数按权展开后,按权相加即可。例如,将 $(11011)_2$ 转换成十进制数。即

$$\begin{aligned}(11011)_2 &= 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 \\ &= 16 + 8 + 2 + 1 = 27\end{aligned}$$

所以 $(11011)_2 = (27)_{10}$ 。

① 下标 H(Hexadecimal)表示十六进制, $(4E6)_H$ 又可写成 $4E6_H$ 。

② 下标 O(Octal)表示八进制。

③ 下标 D(Decimal)表示十进制。

上述方法可以推广到任意进制向十进制的转换。

二、十进制数转换成二进制数

十进制数转换成二进制数,常用的方法是基数乘除法。基数乘法包含两个内容,即基数除法和基数乘法。前者用于整数转换,后者用于小数转换。如果一个数包含整数和小数两部分,则须先将它们分别转换,然后再合并起来。

既然同一数可以用二进制和十进制两种不同形式来表示,那么两者之间就必然有一定的转换关系。对于整数可写成:

$$(N)_D = b_n \times 2^n + b_{n-1} \times 2^{n-1} + \cdots + b_1 \times 2^1 + b_0 \times 2^0 \quad (1.2.1)$$

式中 $b_n, b_{n-1}, \cdots, b_1, b_0$ 是二进制数各位的数字,将等式两边分别除以 2,得

$$\frac{1}{2}(N)_D = b_n \times 2^{n-1} + b_{n-1} \times 2^{n-2} + \cdots + b_1 \times 2^0 + \frac{b_0}{2} \quad (1.2.2a)$$

由此可知,将式(1.2.1)右边除以 2,其余数为 b_0 。将式(1.2.2a)的商再除以 2,得

$$\frac{1}{2^2}(N)_D = b_n \times 2^{n-2} + b_{n-1} \times 2^{n-3} + \cdots + b_2 \times 2^0 + \frac{b_1}{2} \quad (1.2.2b)$$

其余数为 b_1 ,不难推知,将十进制整数每除以一次 2,就可以根据余数得到二进制数的一位数字。因此,只要连续除以 2,直到商为 0,就可由所有的余数求出二进制数。根据上述方法可将 $(35)_D$ 按如下步骤转换成二进制数。

2	35	余数	低位
2	17	1	b_0
2	8	1	b_1
2	4	0	b_2
2	2	0	b_3
2	1	0	b_4
	0	1	b_5
			高位

所以 $(35)_D = (b_5b_4b_3b_2b_1b_0)_B = (100011)_B$ 。

对于小数可写成

$$(N)_D = b_{-1} \times 2^{-1} + b_{-2} \times 2^{-2} + \dots + b_{-(n-1)} \times 2^{-(n-1)} + b_{-n} \times 2^{-n} \quad (1.2.3)$$

将上式两边分别乘以 2, 得

$$2 \times (N)_D = b_{-1} \times 2^0 + b_{-2} \times 2^{-1} + \dots + b_{-(n-1)} \times 2^{-(n-2)} + b_{-n} \times 2^{-(n-1)} \quad (1.2.4)$$

由此可见, 将十进制小数乘以 2, 取其个位数为 b_{-1} 。不难推知, 将十进制小数每次去掉上次所得积中之个位数, 连续乘以 2, 直到满足误差要求进行“四舍五入”为止, 就可以完成由十进制小数转换成二进制小数。例如可按以下步骤将 $(0.625)_D$ 转换成二进制小数。

$$0.625 \times 2 = \dots 1 \dots b_{-1} \quad \text{高位}$$

$$0.25 \times 2 = \dots 0 \dots b_{-2} \quad \text{所以 } (0.625)_D = (0.101)_B$$

$$0.5 \times 2 = \dots 1 \dots b_{-3} \quad \text{低位}$$

三、 2^n 进制间的转换

这里仅介绍常用的二、八、十六进制数之间的转换。

1. 二进制数与八进制数之间的转换

八进制数与二进制数之间的转换比较方便。这是因为这两种进制的基数之间有着内在的联系, 即 $8^1 = 2^3$ 。也就是说, 每一位八进制的数相当于三位二进制数, 或反之。例如: $(5)_D = (101)_B$ 。

二进制数转换成八进制数的规则是: 以小数点为界向左、右两边每三位分成一组, 不满三位者补 0。每组以其等价的八进制数码代替, 并顺序排列, 即为变换后的等值八进制数。例如将二进制数 $(11011110.1)_B$ 转换成八进制数:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{二进制数:} & 0 & 11 & 0 & 11 & 1 & 10 & . & 1 & 00 \\ & & \downarrow & & \downarrow & \downarrow & \downarrow & & & \\ \text{八进制数:} & & 3 & & 3 & 6 & . & 4 & & \end{array}$$