ELECTRICAL ENGINEERING

■ 主审　吴先良

电工学

下册

数字电子技术基础

主　编　华君玮
副主编　李基殿

中国科学技术大学出版社

电　工　学

下　册

数字电子技术基础

主　审　吴先良

主　编　华君玮

副主编　李基殿

中国科学技术大学出版社

2008・合肥

内容简介

本书全面依据教育部《高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划》编写，是现代化教学工程的研究成果.

全书分上、中、下三册出版，上册是电工技术基础，中册是模拟电子技术基础，下册是数字电子技术基础.

本书适于作为电气信息类、军事工程类专业的教科书，也可供其他理工科专业选用和相关人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

电工学. 下册. 数字电子技术基础/华君玮主编. —合肥：中国科学技术大学出版社，2008. 8
ISBN 978-7-312-02324-8

Ⅰ. 电… Ⅱ. 华… Ⅲ. ①电工学 ②数字电路 Ⅳ. TM1 TN79

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第111967号

出版发行 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路96号，230026
http://press.ustc.edu.cn

印　　刷 合肥学苑印务有限公司印刷
经　　销 全国新华书店
开　　本 787×1092　1/16
印　　张 20
字　　数 510千
版　　次 2008年8月第1版
印　　次 2008年8月第1次印刷
定　　价 38.00元

序

人类社会的发展经历了农业社会、工业社会，目前正处在信息社会．同样，战争也从冷兵器时代、热兵器时代，走进了电子战、信息战和数字化战场的时代．可见，电工电子技术的产生是人类发展的里程碑，它是信息社会的基石．电工电子技术在推动社会文明和国防建设中起着发动机式的作用．科学技术突飞猛进，国际竞争日趋激烈，电工电子技术教育的发展也因此面临着前所未有的机遇与挑战．

为适应电子科学技术的高度发展和21世纪高等教育培养高素质人才的需要，编著者总结了多年来课程改革的经验，精心安排和科学组织了教材内容．考虑到素质教育的特点，就要求既保持多年形成的成熟体系，又面向新世纪的发展；既符合本门课程的基本要求，又适当地引进新器件、新技术和新方法等前沿知识；既要使学生掌握基础知识，又要培养他们的定性定量分析能力、综合应用能力和创新意识；既要有利于教师对教材的灵活取舍，又要有利于学生对教材内容的主动学习和思考．我们制订了“保证基础、体现先进、联系实际、引导创新、明确层次、方便教学”的指导原则，确保教材具有系统性、科学性、启发性、先进性、实用性和适用性．

因此，编著者在教材建设中坚持：

1．打牢基础，确保后劲．

电子科学技术的发展，要求我们必须具备终生学习的能力，为此在内容上，我们安排宽泛全面的基础知识充分体现本学科教学的要求．

2．突出特色，强化应用．

以培养既懂技术又能统筹全盘的工程应用和复合型人才为目标，强化应用教学．力争做到知识新、结构新、方法新，强化应用层面、注重能力培养．

本书中有些富有创意的内容来源于编著者勇于探索的精神，希望本书的出版

可以给电工电子学的教学改革增添生气，对提高科技人才水平起到积极的作用.书中难免有不妥和错误，敬请广大电子学同行、教师和读者不吝赐教，相信编著者一定会欢迎并且衷心感谢的！

合肥师范学院院长
安徽大学教授、博士生导师
安徽省科学家与企业家学会副会长
2008年7月11日

前　　言

近30年来，作者为各届各专业开设“三电”(电路分析基础、模拟电子技术、数字电子技术)课程，同时编写了这方面的学习参考资料．现整理、扩充编成本套系列教材．

学习本课程，读者需有一定的高等数学基础和工科物理学基础．通过本课程的学习，希望能激发同学们对电工、电子科学的学习兴趣和热情，使他们有信心也有能力适应这一领域突飞猛进、日新月异的发展．

本册为数字电子技术，包括10章：1至4章以组合逻辑电路为核心内容展开讨论；5、6两章重点研究时序逻辑电路；7、8两章学习存储电路和可编程逻辑器件；9、10两章阐述脉冲产生、D/A与A/D．适用于电子、机电类专业，非电类专业和军事工程及军事指挥专业的电子课程教学．

本册篇幅较大，涉及的问题比较广泛，各专业均用全部内容是不适当的，可以根据专业的不同按以下方式选择所需章节，组成深度、广度和学时有别的课程：

(1) 电子类专业：1—2—3—4—5—6—7—8—9—10章；

(2) 机电类专业：1—2—3—4—5—6—7—8章；

(3) 非电类专业：1—2—3—4—5—6章．

因为我们的能力和水平有限，所提编写原则和书中具体内容难免疏漏、欠妥和错误之处，恳请读者多加指正(电邮：lequn02@163.com)，以便今后不断改进．

编　者

2008年于合肥

目　　录

第1章　绪

内容提要　本章介绍数字电路及数字量的概念，学习数制与码制，最后阐述算术运算和逻辑运算.

1.1　数字电路与模拟电路

数字电路是用于处理数字信号的电路.在数字电子系统中，信息用二元数 0、1 来表示.一个 0 或一个 1 通常称为 **1 比特**，有的也将一个 0 或一个 1 的持续时间称为一拍.对于数字信息的 0 和 1，可以用开关的闭合和断开来表示，可以用电位的低和高来表示，也可以用脉冲信号的有和无来表示.

数字信号不同于模拟信号.一方面，它们的变化在时间上是不连续的，总是发生在一个瞬间；另一方面，它们表示数值的大小和增减变化，也都是采用数字形式，例如，可以用 1101 表示数值 13，1100 表示数值 12 等.

数字电路的输出和输入都是数字信号.数字电路的输出和输入之间的关系称为**逻辑关系**.通常把完成一些基本逻辑关系的数字电路用逻辑符号表示，由一系列逻辑符号及它们之间的联系所构成的电路图就叫做**逻辑图或称为逻辑电路**.逻辑电路只反映数字电路或设备的逻辑功能，而不反映电路或设备在电气上的参数、性能等.所以，对数字电路物分析和设计需要考虑两方面的问题，一方面是电气性能，另一方面是这类电路的逻辑功能.

数字信号简单，只需要用两个不同状态来分别表示 0 和 1 即可，在电子线路中常用晶体三极管的饱和和截止两个截然不同的状态来表示.

因此数字电路的基本单元比较简单，而且对元件的要求也不严格，只要能区分 0 和 1 就够了.这样就能在一块硅片上把众多的基本单元制作在一起，产生数字集成电路.因而，对数字电路电气性能方面的分析，重点在讨论基本数字集成电路(如集成逻辑门、集成触发器)的电气性能.对于较复杂的数字电路，侧重于逻辑功能的分析和设计.所以本书中，有时直接把数字电路叫做逻辑电路.

逻辑电路的分析和设计，采用了一套完全不同于模拟电路的分析和设计方法.由于逻辑电路的输入和输出信号只有两种取值：0 和 1，故可以用"逻辑代数"这一数学工具来加以描述.常用真值表、卡诺图、特征方程和状态转移图等方法来分析和设计逻辑电路.

目前，数字电路的应用已极为广泛.在数字通信系统中，在图像及电视信号处理中，都可以用若干个 0 和 1 编制成各种代码，分别代表不同的信息含义；在自动控制中，可以利用数字电路的逻辑功能，设计出各种各样的数字控制装置；在测量仪表中，可以利用数字电路对测量信号进行处理，并将测试结果用十进制数码显示出来；尤其是在数字电子计算机中，可以利用数字电路实现各种功能的数字信息处理，数字电子计算机已日益渗透到国民经济和人民生活的

一切领域之中,并已带来了许多方面根本性的变革.

必须指出,数字电路只能对数字信号进行处理,它的输入和输出均为数字信号,而大量的物理量几乎都是模拟信号,因此必须将模拟信号转换成数字信号,才可送给数字电路进行处理,而且还要把数字结果再转换成模拟信号.将模拟信号转换成相应数字信号的电路称为模数转换电路;将数字信号转换成相应模拟信号的电路称为数模转换电路.

随着中、大规模集成电路的飞速发展,成本不断降低,通用中、大规模功能块已大量使用.与此同时,逻辑设计方法也在不断地发展.数字电路的概念也在发生变化,例如,在单片计算机中已将元器件制造技术、电路设计技术、系统构成技术等融为一体,元器件、电路、系统的概念已经趋于模糊了.数字电路和设备随着新技术的发展也在不断变化,类型层出不穷.所以数字技术是一门发展很快的学科,本书仅仅介绍了数字电路的基础.

数字电路是一门实践性很强的技术基础课,除要掌握基本原理、基本方法以外,更重要的是灵活运用,因此在学习中要完成一定数量的习题、进行一定的实验.只有这样,才能掌握本课程基本内容,掌握分析问题的基本方法,培养灵活地解决实际问题的能力.

1.2 数制与码制

1.2.1 数制

数制是指进位计数制,一般有二进制、八进制、十进制和十六进制等.人们最常用的是十进制数,而在数字系统中多采用二进制数,有时也采用八进制数和十六进制数.

1. 十进制数

十进制数是用0、1、2、3、4、5、6、7、8、9十个不同的数码来表示的,任何一个数都可以用这十个数码按一定规律排列起来表示.十进制的特点是“逢十进一”.例如,十进制数2996展开可表示为

$$2996 = 2 \times 10^3 + 9 \times 10^2 + 9 \times 10^1 + 6 \times 10^0$$

其中十进制计数制的10称为基数;10^0, 10^1, 10^2, …, 10^n 称为十进制数的“权”,即个位数的权是10^0,十位数的权是10^1,百位数的权是10^2……

一个 n 位的十进制数N_D可表示为:

$$N_D = a_{n-1} \times 10^{n-1} + a_{n-2} \times 10^{n-2} + \cdots + a_1 \times 10^1 + a_0 \times 10^0$$

式中,a_{n-1}, a_{n-2}, …, a_1, a_0 是各数位相应的系数;下标D表示是十进制数,通常可以省略.

上述十进制数表示法也可以扩展到小数,不过这时小数点以右的各位数码要乘以基数的负幂次.例如,数3.142可表示为:

$$3.142 = 3 \times 10^0 + 1 \times 10^{-1} + 4 \times 10^{-2} + 2 \times 10^{-3}$$

一般来说,任意十进制数 N_D 可表示为:

$$N_D = \sum_{i=-\infty}^{\infty} a_i \times 10^i$$

式中，a_i 为基数 10 第 i 次幂对应的系数.

2. 二进制数

二进制数有 0 和 1 两个数码.它的每一位数都可以用任何具有两个不同稳定状态的元件来表示，如三极管的饱和与截止，继电器触点的闭合与断开，灯泡的亮与不亮等.只要规定其中一种状态表示"1"，另一种状态表示"0"，就可以表示二进制数.二进制计数特点是"逢二进一"，即 $1+1=10$（读为壹零），本位为零，并向高位进一.二进制数的基数是 2，每位数的"权"分别为 2^0，2^1，2^2，…，2^n.

一个 n 位的二进制数 N_B 可表示为：

$$N_B = b_{n-1}\times 2^{n-1} + b_{n-2}\times 2^{n-2} + \cdots + b_1\times 2^1 + b_0\times 2^0$$

3. 八进制数与十六进制数

八进制有八个数码，它们分别是 0、1、2、3、4、5、6、7.其计数特点是"逢八进一".八进制数的基数为 8，它的"权"相应为 8^0，8^1，8^2，….

十六进制数有十六个数码，它们分别是 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A(10)、B(11)、C(12)、D(13)、E(14)、F(15).其计数特点是"逢十六进一".十六进制数的基数为 16，它的"权"相应为 16^0，16^1，16^2，….

例如，十六进制数 4AB6 可表示为：

$$N_H = 4AB6 = 4\times 16^3 + A\times 16^2 + B\times 16^1 + 6\times 16^0$$

式中，A、B 对应于十进制数中的 10、11；下标 H 表示是十六进制数（若下标为 O 则表示是八进制数）.

4. 数制之间的转换

(1) 十进制数转换成二进制数

要把某个十进制数转换成二进制数，通常采用"除 2 取余"的方法，即将 N_D 除 2 取余数得 b_0，其商再除 2，余数为 b_1……如此下去直至商为零.每次求得的余数依次为 b_0，b_1，b_2，…，b_{n-2}，b_{n-1}，它们组成的数 $b_{n-1}b_{n-2}\cdots b_1 b_0$ 就是对应于十进制数 N_D 的二进制数.

以十进制数 56 为例，将十进制数转换成二进制数的过程如下：

$$\begin{array}{r|l l}
2 & 56 & \text{余 } 0\cdots\cdots b_0 \\ \hline
2 & 28 & \text{余 } 0\cdots\cdots b_1 \\ \hline
2 & 14 & \text{余 } 0\cdots\cdots b_2 \\ \hline
2 & 7 & \text{余 } 1\cdots\cdots b_3 \\ \hline
2 & 3 & \text{余 } 1\cdots\cdots b_4 \\ \hline
2 & 1 & \text{余 } 1\cdots\cdots b_5 \\ \hline
 & 0 &
\end{array}$$

得

$$b_5 b_4 b_3 b_2 b_1 b_0 = 111000$$

即

$$56 = (111000)_B$$

对于十进制小数 N_D，可写成：

$$N_D = b_{-1} \times 2^{-1} + b_{-2} \times 2^{-2} + \cdots + b_{-(n-1)} \times 2^{-(n-1)} + b_{-n} \times 2^{-n}$$

将上式两边分别乘以 2，得

$$2 \times N_D = b_{-1} \times 2^{0} + b_{-2} \times 2^{-1} + \cdots + b_{-(n-1)} \times 2^{-(n-2)} + b_{-n} \times 2^{-(n-1)}$$

由此可见，将十进制小数乘以 2，取其个位数即为 b_{-1}. 不难推知，去除上次所得积中之个位后再连续乘以 2，直到满足误差要求进行“四舍五入”为止，取其去除的个位数就可依次得到 b_{-2}，b_{-3}，b_{-4}，…，即可得到十进制小数对应的二进制小数 $b_{-1}b_{-2}b_{-3}\cdots$. 例如，可按如下步骤将$(0.706)_D$ 转换成误差 ε 不大于 2^{-10} 的二进制小数：

$$0.706 \times 2 = 1.412 \cdots\cdots 1 \cdots\cdots b_{-1}$$

$$0.412 \times 2 = 0.824 \cdots\cdots 0 \cdots\cdots b_{-2}$$

$$0.824 \times 2 = 1.648 \cdots\cdots 1 \cdots\cdots b_{-3}$$

$$0.648 \times 2 = 1.296 \cdots\cdots 1 \cdots\cdots b_{-4}$$

$$0.296 \times 2 = 0.592 \cdots\cdots 0 \cdots\cdots b_{-5}$$

$$0.592 \times 2 = 1.184 \cdots\cdots 1 \cdots\cdots b_{-6}$$

$$0.184 \times 2 = 0.368 \cdots\cdots 0 \cdots\cdots b_{-7}$$

$$0.368 \times 2 = 0.736 \cdots\cdots 0 \cdots\cdots b_{-8}$$

$$0.736 \times 2 = 1.472 \cdots\cdots 1 \cdots\cdots b_{-9}$$

由于最后得到的小数 0.472 小于 0.5，根据“四舍五入”的原则，b_{-10} 取为 0. 所以，$(0.706)_D = (0.101101001)_B$，其误差 $\varepsilon < 2^{-10}$.

(2) 二进制数转换成十进制数

要把一个二进制数转换为十进制数，可按转换数制的“权”与系数的乘积之和求得，即将该二进制数按权位展开，相加而得. 如将$(11011)_B$ 转换成十进制，有：

$$(11011)_B = 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0$$
$$= 16 + 8 + 2 + 1 = 27$$

(3) 十进制数与八、十六进制数的转换

十进制数要转换成八进制数或十六进制数，其方法与十进制数转换为二进制数相类似，即

采用“求商取余”法，十进制数连续除以 8 或 16，直到商为零，得到的一组余数就是要转换的结果.

例 1.1 把十进制数 125 转换为八进制数.

解

$$\begin{array}{r|l l}
8 & \underline{125} & \text{余 } 5 \\
8 & \underline{15} & \text{余 } 7 \\
8 & \underline{1} & \text{余 } 1 \\
 & 0 &
\end{array}$$

得

$$125 = (175)_O$$

例 1.2 把十进制数 578 转换为十六进制数.

解

$$\begin{array}{r|l l}
16 & \underline{578} & \text{余 } 2 \\
16 & \underline{36} & \text{余 } 4 \\
16 & \underline{2} & \text{余 } 2 \\
 & 0 &
\end{array}$$

得

$$578 = (242)_H$$

八进制数或十六进制数转换为十进制数，其方法同样可采用按权展开相加，只是要注意十六进制数中 A、B、C、D、E、F 相当于十进制数的 10、11、12、13、14、15 即可.

例 1.3 把十六进制数 6C5 转换为十进制数.

解 $(6C5)_H = 6\times16^2 + 12\times16^1 + 5\times16^0 = 6\times256 + 12\times16 + 5 = 1373$

(4) 二、八、十六进制数之间的转换

二、八、十六进制数之间的转换是很方便的.其转换方法如下：

① 二进制数转换为八进制数.

将二进制数从右向左，每三位分为一组(不足三位补 0)，由每组对应的八进制数码所构成的数，便是二进制数所对应的八进制数.如：

二进制数：	100	100	111	011
八进制数：	4	4	7	3

即

$$(100100111011)_B = (4473)_O$$

二进制数与八进制数之间的对应关系如表 1.1.1 所示.

表 1.1.1 二进制数与八进制数之间的对应关系

二进制数	八进制数	二进制数	八进制数
000	0	100	4
001	1	101	5
010	2	110	6
011	3	111	7

② 二进制数转换为十六进制数.

将二进制数从右向左,每四位分为一组(不足四位补 0),由每组对应的十六进制数码所构成的数,便是二进制数所对应的十六进制数.如:

二进制数: 1001 0011 1011

十六进制数: 9 3 B

即

$$(100100111011)_B = (93B)_H$$

二进制数与十六进制数之间的对应关系如表 1.1.2 所示.

表 1.1.2 二进制数与十六进制数对应关系

二进制数	十六进制数	二进制数	十六进制数
0000	0	1000	8
0001	1	1001	9
0010	2	1010	A
0011	3	1011	B
0100	4	1100	C
0101	5	1101	D
0110	6	1110	E
0111	7	1111	F

③ 八进制数或十六进制数转换为二进制数.

八进制数或十六进制数转换为二进制数,只要依次把每位数用三位二进制数或四位二进制数表示即可.

例 1.4 把八进制数$(527)_O$转换为二进制数.

解 5 用 101 表示,2 用 010 表示,7 用 111 表示,故

$$(527)_O = (101010111)_B$$

例 1.5 把十六进制数$(8BC)_H$转换为二进制数.

解 因 8→1000，B→1011，C→1100,故

$$(8BC)_H = (100010111100)_B$$

1.2.2 码制

在数字系统中,信息可分为两类,一类是数值,另一类是文字符号.文字符号信息往往也采用一定位数的二进制数码来表示,这个特定的二进制码称为代码.建立的这种代码与十进制数值、字母、符号的一一对应关系称为编码.

1. 有权码

在编码中,用四位二进制数 $b_3b_2b_1b_0$ 来表示十进制数中的 0—9 十个数码,如果把二进制数码的值赋以一定的位权,这样的数码称为有权码.

最常用的有权码是 8421BCD 码,即十个数码(0—9)与自然二进制数一一对应. b_0 位的权为 $2^0=1$，b_1 位的权为 $2^1=2$，b_2 位的权为 $2^2=4$，b_3 位的权为 $2^3=8$. 8421BCD 码取四位二进制数的 0000(0)到 1111(15)十六种组合中的前十种,即取 0000(0)—1001(9),其余六种组合是无效的.

如果把 b_3 位的权定为 2 或 5,b_2 位的权定为 4,b_1 位的权定为 2,b_0 位的权定为 1,则产生 2421BCD 码和 5421BCD 码.

有权码与十进制数对应关系见表 1.1.3.

各种有权码,只要把每位二进制码与它的权相乘并求和,就是该有权码所代表的十进制数值.

表 1.1.3 几种有权 BCD 码

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

2. 无权码

无权码与有权码不同，无权码中各数位并不具有固定的“权”. 常用的无权码有余 3 码和格雷码.

余 3 码是由 8421BCD 码加 3(0011)而得来的，即用 0011—1100 十个数码来表示十进制数 0—9.

格雷码在码盘装置中常被采用. 这种码的特点是：相邻的两个码组之间仅有一位不同.

1.3　算术运算和逻辑运算

二进制数码可以表示数量大小，它们之间可以进行数值运算，这种运算称为算术运算. 二进制算术运算和十进制算术运算的规则基本相同，唯一的区别在于二进制数是逢二进一而不是十进制数的逢十进一.

例如，两个二进制数 1001 和 0101 的算术运算有：

$$\begin{array}{r} \text{加法运算} \\ 1\,0\,0\,1 \\ +\,0\,1\,0\,1 \\ \hline 1\,1\,1\,0 \end{array} \qquad\qquad \begin{array}{r} \text{减法运算} \\ 1\,0\,0\,1 \\ -\,0\,1\,0\,1 \\ \hline 0\,1\,0\,0 \end{array}$$

在数字系统中，二进制数的正、负号也用 0 和 1 描述. 在定点运算的情况下，以最高位作为符号位，正数为 0，负数为 1. 除去最高位，以下各位是数值位. 用这种方式规定的二进制数码称为原码. 例如，

$$(\underset{\text{符号位}}{\dot{0}}\ 10110010)_2=(+89)_{10}$$

$$(\underset{\text{符号位}}{\dot{1}}\ 1011001)_2=(-89)_{10}$$

为了简化运算电路，数字系统中两数相减的运算是用它们的补码相加来完成的. 二进制数的补码是这样定义的：

① 最高位为符号位，正数为 0，负数为 1.

② 正数的补码和它的原码相同.

③ 负数的补码可通过将原码的数值位逐位求反，然后在最低位上加 1 得到.

例 1.3.1　使用补码计算$(1001)_2-(0101)_2$.

解　根据二进制数的运算规则可知：

$$\begin{array}{r} 1\,0\,0\,1 \\ -\,0\,1\,0\,0 \\ \hline 0\,1\,0\,1 \end{array}$$

在采取补码运算时，首先求出$(+1001)_2$和$(-0101)_2$的补码：

$$[+1001]_{补}=\underset{\text{符号位}}{\dot{0}}1001$$