

高等工程专科学校教材



电子技术基础

数字部分

杨志忠 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

CD40100

高等工程专科学校教材

电子技术基础

数字部分



主编 杨志忠

参编 (以姓氏笔划为序)

卫桦林 师中伟 郭顺华 耿芬燕

中国电力出版社

内 容 提 要

EA13/20

本套书是根据教育部(原国家教育委员会)高教司组织制订的《高等学校工程专科电子技术基础和脉冲与数字电路课程教学基本要求》(1996年修订版)编写的。与之配套使用的教材有胡宴如主编的《电子技术基础模拟部分》和章忠全主编的《电力技术基础实验及课程设计》。

本书深入浅出地阐述了数字集成电路的基本工作原理和逻辑功能,突出了中规模数字集成电路的应用。

全书共分九章,内容包括:数字电路的基本知识、逻辑代数基础及逻辑函数化简、集成逻辑门、组合逻辑电路、集成触发器、时序逻辑电路、数/模和模/数转换器、脉冲波形的产生与变换、半导体存储器等。每章都有教学基本要求、本章小结、思考题与习题。

本书可作为高等工程专科、高等职业和高等函授电气、电子、通信、计算机和自动控制等专业的教材,也可作为自学考试自学参考用书,并可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟部分 数字部分 实验及课程设计/胡宴如 杨志忠
章忠全主编. -北京:中国电力出版社,1999

(电子技术基础)

ISBN 7-5083-0068-8

I. 模… II. 胡… III. ① 模拟电路-电子技术-实验-高等学校 ② 模拟电路-课程设计-高等学校 ③ 数字电路-电子技术-实验-高等学校 ④ 数字电路-课程设计-高等学校 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 24450 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 http://www.cepp.com.cn)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1999年7月第一版 1999年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 14印张 312千字

印数 0001—5000册 全三册定价 49.00元 (本册 14.00元)

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

本书是根据教育部高教司组织制订的《高等学校工程专科电子技术基础和脉冲与数字电路课程教学基本要求》(1996年修订版)编写的。与胡宴如主编的《电子技术基础模拟部分》及章忠全主编的《电子技术基础实验与课程设计》配套使用。由电子技术及电子线路课程组推荐出版,可作为高等工程专科、高等职业和高等函授电气、电子、通信、计算机和自动控制等专业的电子技术及数字电路教材使用,也可作为自学考试的自学参考用书,并可供有关技术人员参考。

电子技术基础是一门重要的专业技术基础课,随着集成电路制造技术的飞速发展,中、大规模数字集成电路在各个领域已被广泛使用。考虑到数字部分自身的特点,本教材编写的指导思想是:

(1) 教材内容紧靠本课程的教学基本要求,贯彻少而精原则、突出基本概念、讲清基本原理及基本分析方法和设计方法。

(2) 本书以小规模集成电路作引路,删除了电路内部的详细分析和繁琐的数学推导;以逻辑代数为工具,讨论了组合逻辑电路和时序逻辑电路的分析方法和设计方法。在此基础上,着重介绍了中、大规模数字集成电路的基本原理、逻辑功能及其应用。由于数字集成电路是一门实践性很强的课程,因此,必须加强实践性教学环节,以培养学生运用所学知识分析和设计小型数字系统的能力以及诊断和排除故障的能力。

(3) 数字集成电路的种类繁多,不可能面面俱到,一一列举。本书通过对典型数字集成器件及其应用的介绍,培养学生根据手册正确选择和使用数字集成器件的能力。

(4) 全书采用国家标准的图形符号,它和过去教材及有关技术资料中所用数字电路的逻辑符号有很大差别。由于新标准的规定很多,也比较复杂,因此,在本书后面的附录中,给出了教材部分章节中举例所用新逻辑符号对应的以往习惯画法,供读者参考。

(5) 在编写过程中,力求做到重点突出、概念清楚、通俗易懂、文字简炼、理论和实际结合,便于自学。

参加本书编写的有卫桦林(第二章、第七章)、耿苏燕(第四章)、郭顺华(第五章)、师中伟(第九章)和杨志忠(第一章、第三章、第六章、第八章和附录)。全书由杨志忠担任主编,并负责该书的组织、统稿和定稿。

本书由胡宴如副教授担任主审,对全书提出了许多宝贵的修改意见。在编写过程中,章忠全副教授也对初稿提出了很多修改意见。在此对他们表示衷心地感谢。

由于编者学识水平有限,书中的缺点和错误在所难免,恳请读者,特别是使用本教材的教师和同学提出批评和修改意见。

编 者

1998.10

前言	
第一章 数字电路的基本知识	1
教学基本要求	1
第一节 概述	1
第二节 数制和码制	4
第三节 半导体二极管和三极管的开关特性	8
第四节 逻辑的基本概念和基本逻辑门电路	12
本章小结	15
思考题与习题	16
第二章 逻辑代数基础及逻辑函数化简	18
教学基本要求	18
第一节 逻辑代数的基本定律及逻辑函数	18
第二节 逻辑函数的公式化简法	25
第三节 逻辑函数的卡诺图化简法	27
本章小结	36
思考题与习题	36
第三章 集成逻辑门电路	39
教学基本要求	39
第一节 TTL 集成逻辑门电路	39
第二节 CMOS 集成逻辑门电路	54
第三节 集成逻辑门电路的使用	59
本章小结	64
思考题与习题	65
第四章 组合逻辑电路	69
教学基本要求	69
第一节 组合逻辑电路的分析和设计	69
第二节 常用中规模集成组合逻辑电路	76
第三节 用 MSI 设计组合逻辑电路	94
本章小结	99
思考题与习题	100
第五章 集成触发器	102
教学基本要求	102
第一节 触发器的基本形式	102
第二节 边沿触发器	107
第三节 主从触发器	114
第四节 触发器的应用举例	117
本章小结	120

思考题与习题	120
第六章 时序逻辑电路	126
教学基本要求	126
第一节 计数器	126
第二节 移位寄存器	142
第三节 同步时序逻辑电路的分析和设计	146
本章小结	154
思考题与习题	155
第七章 数/模和模/数转换器	158
教学基本要求	158
第一节 D/A 转换器	158
第二节 A/D 转换器	163
本章小结	173
思考题与习题	173
第八章 脉冲波形的产生与变换	175
教学基本要求	175
第一节 多谐振荡器	175
第二节 单稳态触发器	181
第三节 施密特触发器	187
第四节 555 定时器及其应用	190
本章小结	195
思考题与习题	195
第九章 半导体存储器	198
教学基本要求	198
第一节 只读存储器	198
第二节 随机存取存储器	203
本章小结	209
思考题与习题	209
附 录 部分应用举例逻辑图的习惯画法	211
参考文献	215

第一章 数字电路的基本知识

教学基本要求

1. 了解模拟信号和数字信号的特点及脉冲波形的主要参数。
2. 了解数字电路的特点及数字集成电路的分类。
3. 熟悉常用进制数的表示及其相互转换和常用二—十制码。
4. 熟悉二极管、三极管开关时间产生的原因及其减小的办法。掌握三极管的饱和条件和截止条件。
5. 掌握正逻辑和负逻辑的概念及基本逻辑门的逻辑功能。

引言 自1961年生产出第一块小规模集成电路以来,电子技术有了极大的发展。随着集成电路生产工艺的日臻完善和设计手段的日益现代化,在本世纪70年代就已生产出能将数万个、甚至数百万个晶体管和元件集成在一块很小的硅片上的大规模集成电路和超大规模集成电路,使计算机和数字设备以前所未有的规模和速度迅速发展。今天,电子技术几乎已渗透到社会生产和生活的各个领域,它在工业、农业、国防、科研、经济管理、办公自动化、现代通信及日常生活等各个领域中都拥有着广泛的应用。可以说,没有先进的电子技术就没有现代社会生产、就没有国防、工业与生活的现代化。因此,电子技术是一门十分重要的技术基础课。

第一节 概 述

一、数字信号的特点和脉冲波形的参数

(一) 数字信号的特点

在电子技术中,被传送、加工和处理的信号有两类:一类是模拟信号,其特点是它的电压或电流的幅度随时间连续变化,如图1-1(a)所示。用于传送、加工和处理模拟信号

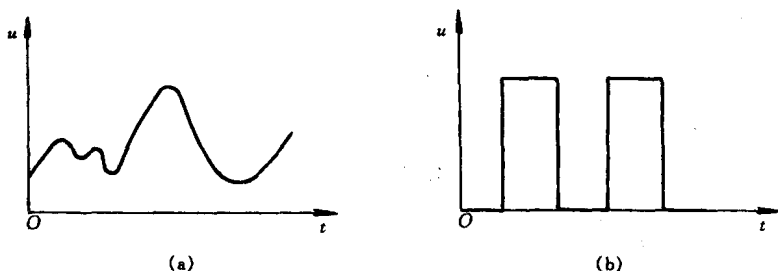


图 1-1 模拟信号和数字信号

(a) 模拟信号; (b) 数字信号

的电路称为模拟电路。另一类是数字信号，其特点是它的电压或电流在幅度上和时间上都是离散的、突变的信号，即常称的离散信号，如图 1-1 (b) 所示。用于传送、加工和处理数字信号的电路称为数字电路。数字信号体现了电压或电流的有和无，它与半导体器件的截止与导通相对应。因此，数字信号可用 1 和 0 来表示，它代表了两种完全不同的状态。

(二) 脉冲波形的参数

矩形脉冲在数字电路中应用很广泛，它的特性主要用下述一些参数来描述，如图 1-2 所示。

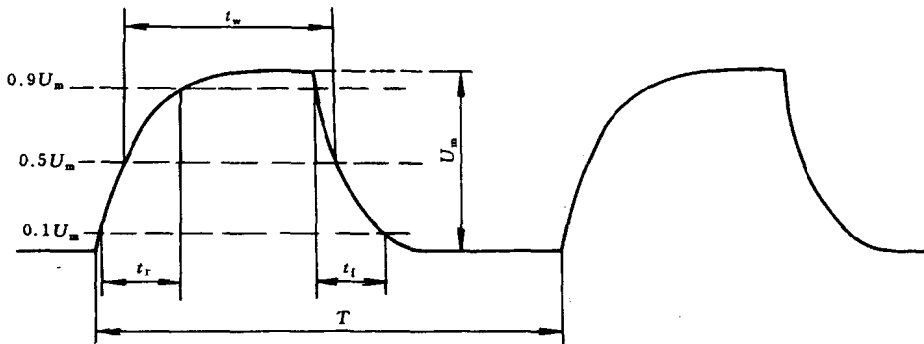


图 1-2 脉冲波形的参数

- (1) 脉冲幅度 U_m ：脉冲电压变化的最大值。
- (2) 脉冲上升时间 t_r ：脉冲前沿从 $0.1U_m$ 上升到 $0.9U_m$ 所需的时间。
- (3) 脉冲下降时间 t_f ：脉冲后沿从 $0.9U_m$ 下降到 $0.1U_m$ 所需的时间。
- (4) 脉冲宽度 t_w ：从脉冲前沿 $0.5U_m$ 到脉冲后沿 $0.5U_m$ 所需的时间，又称脉冲持续时间。
- (5) 脉冲周期 T ：周期性相邻脉冲信号重复出现的时间间隔。
- (6) 脉冲频率 f ：单位时间内脉冲重复的次数， $f=1/T$ 。
- (7) 占空比 q ：脉冲宽度与周期的比值，即 $q=t_w/T$ 。

应当指出，一个理想的矩形脉冲，其 $t_r=t_f=0$ ，且 t_w 、 T 、 U_m 稳定不变。在实际上，矩形脉冲总有一定的上升时间和下降时间，即 $t_r \neq 0$ 、 $t_f \neq 0$ ，而 t_w 、 T 、 U_m 因受多种因素的影响也是不稳定的，但采取一定的措施后，可做到相对稳定。

二、数字电路的特点

近 20 年来，随着数字电子技术的发展，数字集成电路特别是中、大规模和超大规模数字集成电路的飞速发展，传统的模拟系统已被或逐渐被性能优越的数字系统所代替，它已对各种电子系统的设计、生产等都产生了深远的影响。和模拟电路相比，数字电路主要有以下特点：

(1) 数字电路采用二进制。凡具有两个状态的电路都可用来表示二进制的 0 和 1 两个数码。因此，数字电路的基本单元电路结构简单，对元器件精度的要求不高，允许电路参数有较大的离散性，这对数字电路的集成化是十分有利的。

(2) 数字集成电路产品系列多、品种规格全、成本低、体积小。

(3) 通用性强。数字系统的设计通常采用各种标准数字集成组件，因此，系统工作可靠

性高、稳定性好、精度高，便于维护。

(4) 抗干扰能力强。由于数字信号是用 0 或 1 两个状态来表示的，它不易受到外界信号的干扰，因此，它的抗干扰能力很强。

(5) 保密性好。数字信号比较容易进行加密处理，这使信息资源不易被窃取。

(6) 数字电路不仅能完成数值运算，而且还能进行逻辑判断和运算。因此，数字电路又被称为数字逻辑电路。

三、数字集成电路的分类

数字电路可分为分立元件电路和数字集成电路两大类。目前，分立元件电路基本上已被数字集成电路所取代。按照集成度的不同，数字集成电路可分为以下几类。

(1) 小规模集成电路 (SSI)。其集成度为 1~10 门/片，或 10~100 个元器件/片，主要是逻辑单元电路，如各种逻辑门电路、集成触发器等。

(2) 中规模集成电路 (MSI)。其集成度为 10~100 门/片，或 100~1000 个元器件/片，主要是逻辑功能部件，如译码器、编码器、数据选择器、比较器、寄存器、计数器、A/D 和 D/A 转换器等。

(3) 大规模集成电路 (LSI)。其集成度为 100~10000 门/片，或 1000~100000 个元器件/片，主要是数字逻辑系统，如微型计算机中的中央处理器、存储器等。

(4) 超大规模集成电路 (VLSI)。其集成度为 10000 门/片以上，或 100000 个元器件/片以上，主要是高集成度的数字逻辑系统，如单片计算机等。

四、本课程的学习内容

本课程以数字集成电路为中心，以小规模集成电路作引路，逻辑代数为工具，介绍数字电路的分析方法和设计方法，以及数字集成电路的逻辑功能及其使用方法。本课程的主要内容有：数字电路的基础知识、逻辑代数基础及逻辑函数化简、集成逻辑门电路、组合逻辑电路、集成触发器、时序逻辑电路、数/模和模/数转换器、脉冲波形的产生与变换、半导体存储器等。

五、本课程的学习要求

数字电路和模拟电路的差别是很大的，我们学习数字电路时，在学习方法上也应作相应的改变，这样，才能取得良好的学习效果。

(1) 抓住数字电路的特点。首先，在数字电路中，所有的变量都归结为 0 和 1 两个对立的状态。因此，在讨论数字电路的工作原理时，只需关心电平的高与低，无需关心电平的具体数值。其次，在学习数字集成电路时，应把重点放在理解数字集成电路的外部特性、逻辑功能及其使用上，而不需要把过多的注意力放在数字集成电路内部电路结构和工作过程的分析与计算上。

(2) 掌握数字电路的分析方法和设计方法。这是贯穿本教材的主线。逻辑代数是数字电路的分析、设计的基础和工具。数字电路分析和设计的主要方法有：逻辑表达式、逻辑图、真值表、功能表、状态表、状态图和时序图（波形图）等。

(3) 学会阅读数字集成电路产品手册，并根据手册正确选择和使用数字集成器件。

(4) 重视实践，提高动手能力。数字集成电路是一门发展十分迅速而且实践性和应用性很强的技术基础课程，只有通过实践，才能提高使用仪表测试电路和分析排除故障的能力。

第二节 数制和码制

一、常用进制数的表示

(一) 十进制数的表示

十进制是我们熟悉的数制，它用0、1、2、3、4、5、6、7、8、9十个数字符号的不同组合来表示一个数的大小，它的进位规律是逢十进一，即 $9+1=10=1\times 10^1+0\times 10^0$ 。因此，十进制数是以10为基数的计数体制。在不同数位上的数码其值是不同的，如十进制数3856可表示为

$$3856 = 3 \times 10^3 + 8 \times 10^2 + 5 \times 10^1 + 6 \times 10^0$$

式中 10^3 、 10^2 、 10^1 、 10^0 分别为千位、百位、十位和个位的权，可见，十进制数中各位的权都是十的幂。显然，在一个十进制数中，数码所处的权位越高，它的权值越大，该数码所代表的数值也越大。某位数码（如8）与该位权（ 10^2 ）的乘积，称为加权系数（如 8×10^2 ），所以，十进制数的数值实际上就是各位加权系数的和。

(二) 二进制数的表示

1. 二进制数的表示

在二进制数中，只有0和1两个数字符号，它的进位规律是逢二进一，即 $0+0=0$ 、 $0+1=1$ 、 $1+1=10$ （读壹零）、 $10+1=11$ 、 $11+1=100$ ……。由上可看出，每当本位为1，再加1时，应使本位为0，同时向高位进位，使高位加1。

和十进制数一样，二进制数是以2为基数的计数体制。各位的权为2的幂在二进制数中，每个数所处的位置不同时，其值也不同。

【例 1-1】 试求出二进制数 $(1101)_2$ 对应的十进制数。

解：将二进制数按权展开后，再求各加权系数的和

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

式中， 2^3 、 2^2 、 2^1 、 2^0 分别为二进制数各位的权，它们为2的幂。

2. 二进制数的特点

在数字系统中，常用二进制数来表示十进制数的大小或进行运算，主要是由于它有如下优点：

(1) 二进制数只有0和1两个数码。因此，任何一个具有两个稳定状态的元件都可用来表示一位二进制数。这样的电子线路是很容易找到的。

(2) 二进制运算规则简单，相应的运算电路简单，工作稳定可靠。

(三) 八进制数的表示

在八进制数中，有0、1、2、3、4、5、6、7八个数字符号，其运算规则为逢八进一，即 $7+1=10$ ，各位的权为8（ 2^3 ）的幂。

【例 1-2】 试求出八进制数 $(427)_8$ 对应的十进制数。

解：将八进制数按权展开后，再求各加权系数的和

$$(427)_8 = 4 \times 8^2 + 2 \times 8^1 + 7 \times 8^0 = (279)_{10}$$

(四) 十六进制数的表示

在十六进制数中，有0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A(10)、B(11)、C(12)、D(13)、E(14)、F(15)

十六个不同的数字符号,其运算规则为逢十六进一,各位的权为 $16(2^4)$ 的幂。

【例 1-3】 试求出十六进制数 $(4BE)_{16}$ 对应的十进制数

$$\begin{aligned} \text{解:} \quad (4BE)_{16} &= 4 \times 16^2 + 11 \times 16^1 + 14 \times 16^0 \\ &= (1214)_{10} \end{aligned}$$

根据以上分析,可写出十进制数、二进制数、八进制数和十六进制数的对照表,见表 1-1。

表 1-1 十进制数、二进制数、八进制数和十六进制数的对照表

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

二、不同进制数间的转换

在计算机和数字系统中,已普遍使用二进制数,但人们对二进制数并不习惯,而对十进制数却很熟悉,所以,在进行信息处理时,需将十进制数转换成计算机能接收的二进制数输入,再将二进制数运算的结果转换成十进制数。因此,需要进行不同数制间的相互转换。

(一) 二进制数和十进制数的相互转换

1. 二进制数转换成十进制数

二进制数转换成十进制数通常采用“加权法”。首先将二进制数写成它的按权展开式,然后,将各位加权系数相加,便得到该二进制数对应的十进制数。

【例 1-4】 试将二进制数 $(1101101)_2$ 转换成十进制数。

$$\begin{aligned} \text{解:} \quad (1101101)_2 &= 1 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^0 \\ &= (109)_{10} \end{aligned}$$

2. 十进制数转换成二进制数

十进制数转换成二进制数通常采用“除 2 取余法”。首先用二进制数的基数 2 除给定的十进制数,所得余数(0 或 1)即为所求二进制数的最低位(K_0);再用 2 除前面得的商,得余数(0 或 1)为所求二进制数的次低位(K_1);如此重复用 2 除前一步得的商,直到商数得 0 为止。最后一次得的余数为所求二进制数的最高位。

【例 1-5】 将十进制数 $(124)_{10}$ 转换成二进制数。

解:

2	124	余数 0	K_0	↑ 读 数 顺 序
2	62	.....	0	.....	K_1
2	31	.....	1	.....	K_2
2	15	.....	1	.....	K_3
2	7	.....	1	.....	K_4
2	3	.....	1	.....	K_5
2	1	.....	1	.....	K_6
	0					

所以

$$(124)_{10} = K_6K_5K_4K_3K_2K_1K_0 = (1111100)_2$$

(二) 二进制数与八进制数、十六进制数的相互转换

1. 二进制数和八进制数的相互转换

(1) 二进制数转换成八进制数。由于八进制数的基数 $8 = 2^3$ ，故用三位二进制数构成一位八进制数，因此，将二进制数转换成八进制数时，只要从低位开始，每三位二进制数为一组，对于最后不满三位二进制数的，则在高位加 0 补足三位为止，然后每组二进制数用其对应的八进制数来代替，并按原来的顺序排列便得到了相应的八进制数。

【例 1-6】 试将二进制数 $(11110011010)_2$ 转换成八进制数。

解：

$$\begin{array}{cccc} 011, & 110, & 011, & 010 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 3 & 6 & 3 & 2 \end{array}$$

所以

$$(11110011010)_2 = (3632)_8$$

(2) 八进制数转换成二进制数。只要将每位八进制数写成相应的三位二进制数，再按原来的顺序排列起来便得到了相应的二进制数。

【例 1-7】 试将八进制数 $(7405)_8$ 转换成二进制数。

解：

$$\begin{array}{cccc} 7 & 4 & 0 & 5 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 111 & 100 & 000 & 101 \end{array}$$

所以

$$(7405)_8 = (11110000101)_2$$

2. 二进制数和十六进制数的相互转换

(1) 二进制数转换成十六进制数。由于十六进制数的基数 $16 = 2^4$ ，故用四位二进制数构成一位十六进制数。根据上述转换方法，只要从低位到高位每四位二进制数为一组，对于最后不满四位二进制数的，则在高位加 0 补足四位为止，然后再写出相应的十六进制数。

【例 1-8】 试将二进制数 $(11111010011101)_2$ 转换成十六进制数。

解：

$$\begin{array}{cccc} 0011, & 1110, & 1001, & 1101 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 3 & E & 9 & D \end{array}$$

所以

$$(11111010011101)_2 = (3E9D)_{16}$$

(2) 十六进制数转换成二进制数。只要将每位十六进制数写成相应的四位二进制数，再按原来的顺序排列起来便得到了相应的二进制数。

【例 1-9】 试将十六进制数 $(5BF7)_{16}$ 转换成二进制数。

解：

$$\begin{array}{cccc} 5 & B & F & 7 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 0101 & 1011 & 1111 & 0111 \end{array}$$

所以 $(5BF7)_{16} = (101101111110111)_2$

三、常用二—十进制代码

十进制数的二进制编码称为二—十进制码，又称 BCD 码。BCD 码分为有权码和无权码两大类。

二—十进制码是用四位二进制数的代码来表示一位十进制数。由于四位二进制代码共有 16 种不同的组合，而一位十进制数只取其中的 10 种组合，因此，需去掉其余的 6 种，这有多种方案，常用二—十进制码如表 1-2 所示。

表 1-2 常用二—十进制码

十进制数	有 权 码				无 权 码		
	8421 码	5421 码	2421 (A) 码	2421 (B) 码	余 3 码	余 3 循环码	格雷码
0	0000	0000	0000	0000	0011	0010	0000
1	0001	0001	0001	0001	0100	0110	0001
2	0010	0010	0010	0010	0101	0111	0011
3	0011	0011	0011	0011	0110	0101	0010
4	0100	0100	0100	0100	0111	0100	0110
5	0101	1000	0101	1011	1000	1100	0111
6	0110	1001	0110	1100	1001	1101	0101
7	0111	1010	0111	1101	1010	1111	0100
8	1000	1011	1110	1110	1011	1110	1100
9	1001	1100	1111	1111	1100	1010	1101

1. 8421BCD 码

这是一种使用最多的 BCD 码，为恒权码，它只取了四位二进制数的前 10 种码组 0000(0)~1001(9)。去掉的后 6 种码组 1010~1111 称为冗余码组。这四位二进制数从高位到低位的权值分别为 8、4、2、1，故称 8421 码。二进制数各位代码加权系数的和等于它所代表的十进制数。

2. 2421BCD 码和 5421BCD 码

它们也是恒权码，从高位到低位各位的权值分别为 2、4、2、1 和 5、4、2、1。每位代码加权系数的和等于它们所代表的十进制数。2421 码又分 (A) 和 (B) 两种代码，它们的编码状态不完全相同。2421 (B) 码具有互补性，由表 1-2 可看出：0 和 9、1 和 8、2 和 7、3 和 6、4 和 5 互为反码。

3. 余 3BCD 码

代码中的每一位 1 没有固定的权，是一种无权码。它是由 8421 码加 0011 得来的，也即用 0011~1100 来表示 0~9 十个数。它比用 8421 码的 0000~1001 来表示 0~9 多余 3，所以称余 3 码。这种代码也具有互补性。

4. 格雷码

和余3码一样，它也是无权码。这种代码的两组相邻数码之间只有一位代码取值不同，其余各位都相同。计数电路按这种码计数时，每次状态更新只有一位代码变化，利用这个特性，可减少计数过程中出现差错的可能性。格雷码常用于高分辨率的设备中。

第三节 半导体二极管和三极管的开关特性

一、二极管的开关特性

(一) 静态开关特性

图 1-3 (a) 所示为简单二极管开关电路，下面讨论它的静态开关工作情况。

当输入高电平 $u_I = U_{IH} > U_{TH}$ (二极管的门限电压，硅二极管的 $U_{TH} \approx 0.5V$) 时，二极管受正向电压导通。其等效电阻比 R 小得多，可忽略不计。随着 u_I 的增加，二极管的导通电流 i 增加较快，而 u_D 上升很小。当 $u_D \approx 0.7V$ 时，此后， i_D 随 u_I 增加而迅速增大，而 $u_D \approx 0.7V$ 不变。因此，二极管正向导通时的等效电路可视为一个串接固定电压 $u_D = 0.7V$ 的闭合开关，如图 1-3 (b) 所示。

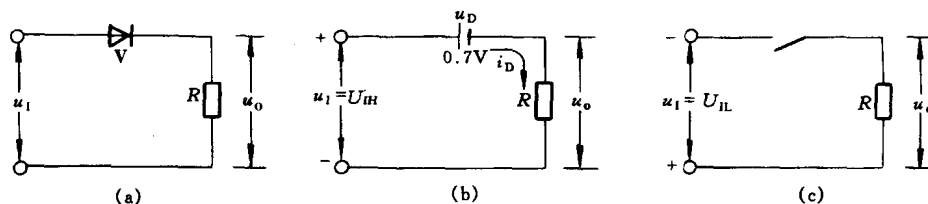


图 1-3 二极管静态开关电路及其等效电路

(a) 开关电路；(b) 输入高电平时的等效电路；(c) 输入低电平时的等效电路

当输入低电平 $u_I = U_{IL} < 0$ 时，二极管受反向电压截止，其反向电流 I_o 很小，可视为 0，这时，二极管的等效电阻极大，可视为一个断开的开关，如图 1-3 (c) 所示。

(二) 动态开关特性

前面讨论二极管静态开关特性时，是在外加稳定电压的情况下进行的。在二极管开关电路中输入 u_I 为快速变化的脉冲电压时，二极管 V 开关状态的转换不可能在瞬间完成，其从正向导通转到反向截止需要有一个反向恢复过程。如在图 1-4 (a) 所示电路中输入图 1-4 (b) 所示的快速脉冲时，二极管的动态工作过程如下。

当时间 $t < t_1$ 时， $u_I = U_F > U_{TH}$ ，二极管 V 导通， $i = I_F \approx U_F/R$ 。

当在时间 $t = t_1$ 时刻，输入电压 u_I 突然由 U_F 跃到 $-U_R$ 时，如二极管是理想器件，应立刻转为截止。然而在实际上，它并不能立即截止，相反，却出现了相当大的反向电流 $i = -I_R \approx -U_R/R$ ，经过一段时间后，二极管才转向截止，如图 1-4(c) 所示。我们把从输入电压 u_I 负跃变开始到反向电流衰减到 $-0.1I_R$ 所需的时间称为二极管的反向恢复时间，用 t_{re} 表示。 t_{re} 很小，一般为纳秒 (ns, $1ns = 10^{-9}s$) 数量级。如输入信号的频率很高而使负脉冲的宽度小于 t_{re} 时，二极管将失去反向截止的特性。因此， t_{re} 的存在限制了它的开关速度。为保证二极管开关电路能正常工作，应选用 t_{re} 比输入负脉冲宽度小得多的二极管。

下面讨论二极管产生反向恢复时间的原因。

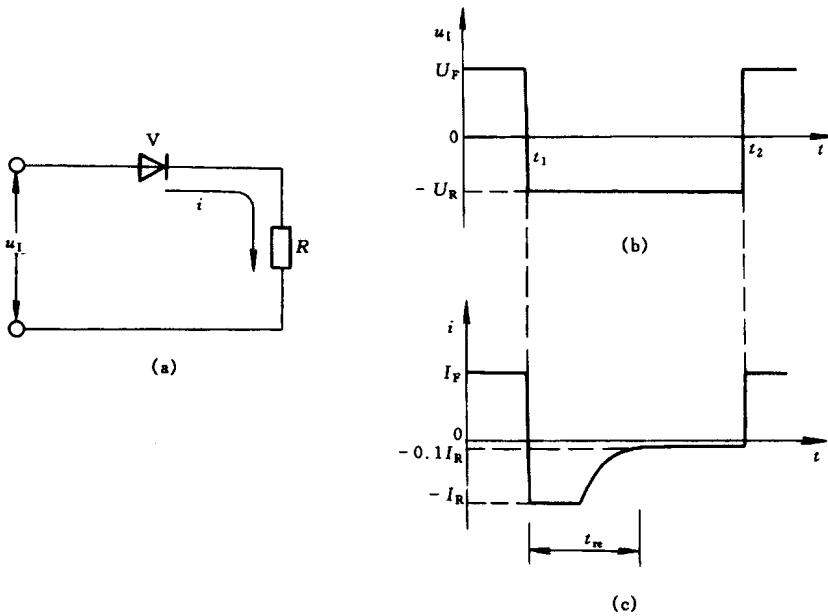


图 1-4 二极管的动态开关特征

(a) 电路图; (b) 输入脉冲电压波形; (c) 实际电流波形

当二极管正向导通时, P 区多数载流子空穴和 N 区多数载流子电子源源不断地向对方扩散, 在 P 区和 N 区内分别存储了相当数量的电子和空穴, 统称为存储电荷, 近 PN 结处浓度大, 离 PN 结越远, 浓度越小。一旦当外加电压由正向转为反向时, 这些存储电荷不会立即消失, 在反向电压作用下, 将迫使 N 区中存储的空穴向 P 区漂移, P 区中存储的电子向 N 区漂移, 从而形成了较大的反向电流 $i = -I_R \approx -U_R/R$ 。经一段时间后, 存储电荷消失, 反向电流趋于 0, 二极管转为截止。应当指出, 正向电流越大, 存储电荷越多, 反向恢复时间 t_{re} 越长。

当二极管由截止转向导通时, 在 P 区和 N 区中积累电荷所需的时间远比 t_{re} 小得多, 实际上, 这个时间可以不考虑。

二、三极管的开关特性

(一) 静态开关特性

三极管在数字电路中作开关使用时, 主要工作在饱和区和截止区, 不允许工作在较大区, 它只是三极管饱和与截止相互转换时的一个过渡区, 由图 1-5 (a) 所示的输出特性上可看到这一点。下面以图 1-5 (b) 所示的共发射极电路为例分析三极管的静态开关特性。

1. 三极管的截止条件及其等效电路

当输入 $u_I = U_{IL} \leq 0$ 时, $u_{BE} \leq 0$, 三极管可靠截止, $i_C = I_{CBO} \approx 0$, R_C 上不产生压降, 输出 $u_O = U_{OH} \approx V_{CC}$, 工作在输出特性的 A 点。如输入 $u_I > 0$, 但小于三极管的门限电压 $U_{TH} \approx 0.5V$ 时, 其仍能截止。因此, 三极管的可靠截止条件为

$$u_I \leq 0 \quad (1-1)$$

三极管截止时, E、B、C 三个电极可视为互相开路, 所以, 图 1-5 (b) 所示电路可用图

1-6 (a)来表示。

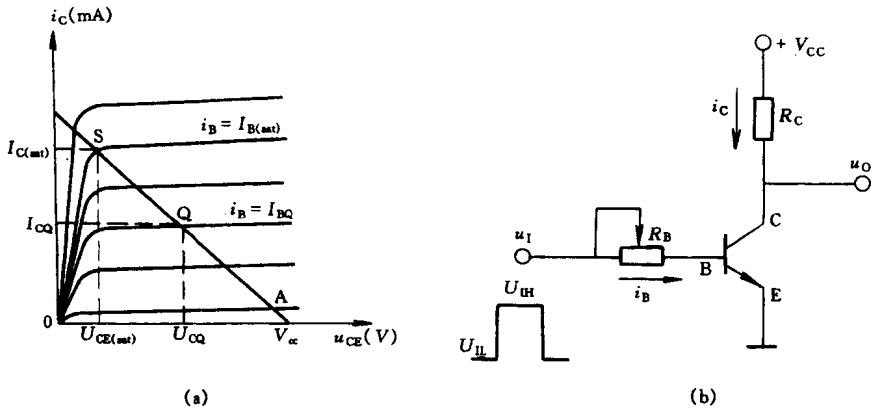


图 1-5 三极管的开关特性
(a) 三种工作状态; (b) 共发射极电路

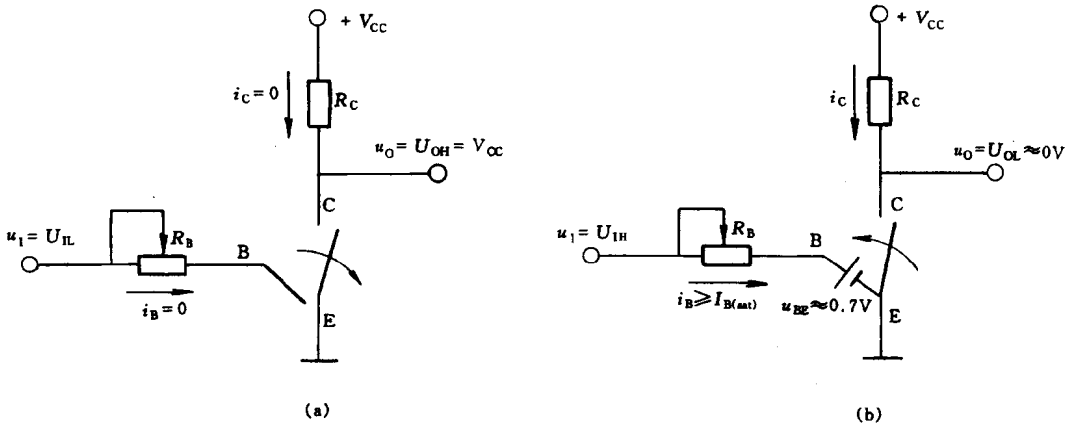


图 1-6 三极管的开关等效电路
(a) 截止状态的等效电路; (b) 饱和状态的等效电路

2. 三极管的饱和条件及其等效电路

当输入 $u_I = U_{IH}$ 时, 调节 R_B , 使 $i_B \approx V_{CC} / \beta R_C$, 三极管工作在图 1-5 (a) 所示输出特性的 S 点上, 即工作在临界饱和状态, 输出电压 $u_O = U_{OL} \approx 0.3V$, 放大区的电流分配关系仍然适用。由图 1-5 (b) 可得

$$i_C = I_{C(sat)} = \beta I_{B(sat)} = \frac{V_{CC} - U_{CE(sat)}}{R_C} \quad (1-2)$$

式中 $I_{C(sat)}$ ——三极管临界饱和时的集电极电流;

$I_{B(sat)}$ ——三极管临界饱和时的基极电流;

$U_{CE(sat)}$ ——三极管临界饱和时的集电极—发射极间的电压, 其值约为 $0.1 \sim 0.3V$;

β ——三极管临界饱和时的共射直流放大倍数。

由于 $V_{CC} \gg U_{CE(sat)}$, 所以式 (1-2) 可用下式表示

$$I_{C(sat)} \approx \frac{V_{CC}}{R_C} \quad (1-3)$$

所以

$$I_{B(\text{sat})} = \frac{I_{C(\text{sat})}}{\beta} \approx \frac{V_{CC}}{\beta R_C} \quad (1-4)$$

只要实际注入基极的电流 i_B 大于临界饱和基极电流 $I_{B(\text{sat})}$ ，则三极管的饱和导通（简称饱和）条件为

$$i_B > I_{B(\text{sat})} \approx \frac{V_{CC}}{\beta R_C} \quad (1-5)$$

三极管工作在饱和状态时， $U_{BE(\text{sat})} \approx 0.7\text{V}$ ， $U_{CE(\text{sat})} \leq 0.3\text{V}$ 。因此，三极管的集电极与发射极之间相当于开关闭合，由此可画出图 1-6 (b) 所示的等电路。

(二) 动态开关特性

当在图 1-7 (a) 所示开关电路中加入图 1-7 (b) 所示的理想脉冲波形时，则三极管的截止状态与饱和状态间的相互转换也需要一定的时间。设输入 $u_I = -U_R$ 时，三极管截止；输入 $u_I = U_F$ 时，三极管饱和导通。

当时间 $t = t_1$ 时，输入 u_I 由 $-U_R$ 跃到 U_F ，三极管不能立即进入饱和状态，其基区存储电荷的积累需要一定的时间，故集电极电流 i_C 和输出电压 u_O 的变化滞后于输入电压 u_I 。通常把从 u_I 正跃变开始到 i_C 上升到 $0.9I_{C(\text{sat})}$ 所需的时间称为开通时间，用 t_{on} 表示，见图 1-7 (c) 和 (d)。

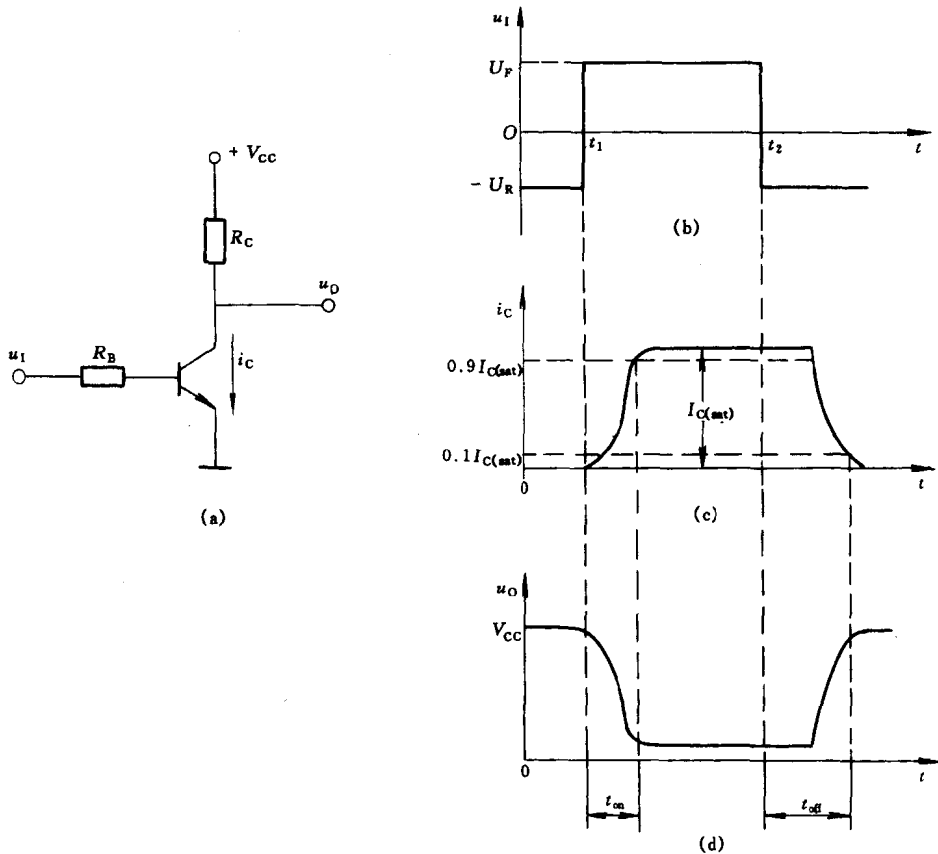


图 1-7 三极管动态的开关特性

(a) 电路图；(b) 输入脉冲波形；(c) 集电极电流波形；(d) 输出电压波形