数字电子技术

SHUZI DIANZI JISHU

孟贵胥 王 兢/主 编

大连理工大学出版社

高等学校教材

数字电子技术

孟贵胥　王　兢　主编

高仁璟　王明龙　　编

大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术/孟贵胥,王兢主编.一大连:大连理工大学出版社,2002.9
ISBN 7-5611-1823-6

Ⅰ.数…　Ⅱ.①孟…　②王…　Ⅲ.数字电路　Ⅳ.TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 028782 号

大连理工大学出版社出版发行
大连市凌水河　邮政编码:116024
电话:0411-4708842　传真:0411-4701466
E-mail:dutp@mail.dlptt.ln.cn
URL:http://www.dutp.com.cn
大连理工印刷有限公司印刷

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 字数:442 千字 印张:19.25
印数:1—3000 册
2002 年 9 月第 1 版　　2002 年 9 月第 1 次印刷

责任编辑:梁艾玲　　责任校对:吴孝东
封面设计:王福刚

定价:22.00 元

前　言

“数字电子技术”是电子、自动化、电磁、机电一体化、计算机等多个专业本科生的专业基础课程。近年来，随着电子科学技术的高速发展，尤其是大规模、超大规模乃至可编程器件的出现，使得近年来数字电路课程的内容有了很大变化，即由讲授单元电路、器件功能过渡到数字系统。数字系统的分析与设计，也由传统方法过渡到计算机辅助分析与设计。面对电子科技发展的现状和现代数字技术的高新要求，我们编写的“数字电子技术”应运而生，我们希望本教材能成为先进的换代教材，受到读者的喜爱。

本书内容上保持了原“数字电路与系统”内容的完整性和理论方面的系统性，但进行了精简，增加了先进的实用的例题解析和习题，更有利于学生理解和掌握。增加和完善了超高速、超大规模集成电路及其硬件描述语言 VHDL 及其应用，并尽可能深入浅出地将完整和实用的设计例题进行加工后奉献给读者，使可编程器件、用于数字系统的设计得以容易理解和实际应用。本书既适用于教，又适合于学，内容上具有一定的前沿性，又避开了高深的理论知识，简明扼要地介绍了学生最需要的基础知识和前沿科学技术。尤其在课堂讲授的基础上，还配备了实验教学和数字电路课程设计，以便学生把理论知识用于实践，更好地发挥其主观能动性，有效地提高数字电路课程的教学质量。

本书由大连理工大学电子系孟贵胥、王兢主编。第二、七、八、九章由孟贵胥编写；第一、三、四、六章由王兢编写；第十章由高仁璟编写；第五章由王明龙编写。全书由孟贵胥统稿、定稿。真心希望本书成为教师的助手，学生的良师益友。

由于编者水平有限，书中难免有缺点和错误，恳请读者批评指正。

编　者

2002 年 9 月

目　　录

第 1 章　数制与编码

1.1　数　制

数制就是计数规则，即进位的制度。常用的数制有十进制、二进制、八进制和十六进制。

1. 十进制(Decimal)

十进制有 10 个数字符号：0、1、2、3、4、5、6、7、8、9，基数为十，逢十进一。一个数的大小由它的数码大小和数码所在的位置决定。每个数码所处的位置称为"权"。权由基数的乘方来表示，十进制的权由 $10^0,10^1,10^2,\cdots$ 及 $10^{-1},10^{-2},10^{-3},\cdots$ 来表示。例如 8596.4 按权展开为：

$$(8596.4)_{10}=8\times10^3+5\times10^2+9\times10^1+6\times10^0+4\times10^{-1}$$

任何一个十进制数 N_{10} 都可以表示为

$$N_{10}=k_{n-1}10^{n-1}+k_{n-2}10^{n-2}+\cdots+k_1 10^1+k_0 10^0+k_{-1}10^{-1}+k_{-2}10^{-2}+\cdots k_{-m}10^{-m}$$

式中 n、m 为正整数；k_i 为系数，是 0～9 中的一个；10^i 为各位的权。注意整数部分第 n 位的权为 10^{n-1}，系数为 k_{n-1}。

2. 二进制(Binary)

二进制的基数为二，只有两个数码 0 和 1，逢二进一。二进制各位的权为 2 的乘方(见表 1-1)。

二进制数 N_2 一般表示为

$$N_2=j_{n-1}2^{n-1}+j_{n-2}2^{n-2}+\cdots+j_1 2^1+j_0 2^0+j_{-1}2^{-1}+j_{-2}2^{-2}+\cdots+j_{-m}2^{-m}$$

式中 n、m 为正整数；j_i 是系数，为 0 或 1；2^i 为各位置的权。例如

$$(101101.101)_2=1\times2^5+1\times2^3+1\times2^2+1\times2^0+1\times2^{-1}+1\times2^{-3}$$

表 1-1　　　　　　　　　　　　　　　　　二进制数的权

二进制位数	权	（十进制表示）	二进制位数	权	（十进制表示）	二进制位数	权	（十进制表示）
12	2^{11}	2048	6	2^5	32	−1	2^{-1}	0.5
11	2^{10}	1024	5	2^4	16	−2	2^{-2}	0.25
10	2^9	512	4	2^3	8	−3	2^{-3}	0.125
9	2^8	256	3	2^2	4	−4	2^{-4}	0.0625
8	2^7	128	2	2^1	2	−5	2^{-5}	0.03125
7	2^6	64	1	2^0	1	−6	2^{-6}	0.015625

3. 八进制（Octal）

八进制的基数为八，有 8 个数码：0、1、2、3、4、5、6、7，逢八进一。八进制数各位的权是 8 的乘方。例如八进制数$(374.25)_8$按权展开为

$$(374.25)_8=3\times8^2+7\times8^1+4\times8^0+2\times8^{-1}+5\times8^{-2}$$

4. 十六进制（Hexadecimal）

十六进制的基数为十六，十六个数码为 0、1、2、…8、9、A、B、C、D、E、F。其中 A～F 分别表示 10～15，逢十六进一。各位的权为 16 的乘方。例如十六进制数$(D5E8.A3)_{16}$按权展开为

$$(D5E8.A3)_{16}=13\times16^3+5\times16^2+14\times16^1+8\times16^0+10\times16^{-1}+3\times16^{-2}$$

5. 任意进制

γ 进制的基数为 γ，γ 个数码为 0、1、…$(\gamma-1)$，逢 γ 进一，各位权为 γ 的乘方。例如 7 进制数$(345.61)_7$按权展开为

$$(345.61)_7=3\times7^2+4\times7^1+5\times7^0+6\times7^{-1}+1\times7^{-2}$$

1.2　数制间的转换

1.2.1　γ 进制转换成十进制

从上一节可以看出，各种进制数按权展开就已经完成了各种进制向十进制的转换。例如二进制数$(101011.011)_2$按权展开：

$$\begin{aligned}(101011.011)_2&=(1\times2^5+1\times2^3+1\times2^1+1\times2^0+1\times2^{-2}+1\times2^{-3})_{10}\\&=(43.375)_{10}\end{aligned}$$

1.2.2　十进制转换成 γ 进制

转换原则：整数部分，除以 γ 取余数，逆序排列；小数部分，乘以 γ 取整数，顺序排列。

【例 1.1】 将十进制数 45.28 转换成二进制数。

解

$$\begin{array}{rl}
 & \qquad\qquad 余 \\
2\,\underline{|45} & \cdots\cdots\ 1 \quad \uparrow 低位 \\
2\,\underline{|22} & \cdots\cdots\ 0 \\
2\,\underline{|11} & \cdots\cdots\ 1 \\
2\,\underline{|5} & \cdots\cdots\ 1 \\
2\,\underline{|2} & \cdots\cdots\ 0 \\
2\,\underline{|1} & \cdots\cdots\ 1 \\
0 & \qquad\qquad\quad 高位
\end{array}
\qquad\qquad
\begin{array}{lrr}
 & & 0.28 \\
高位 & & \underline{\times\quad 2} \\
\downarrow & 0 \leftarrow & (0).56 \\
 & & \underline{\times\quad 2} \\
 & 1 \leftarrow & (1).12 \\
 & & \underline{\times\quad 2} \\
 & 0 \leftarrow & (0).24 \\
 & & \underline{\times\quad 2} \\
低位 & 0 \leftarrow & (0).48 \\
 & & \vdots
\end{array}$$

所以有$(45.28)_{10}=(101101.0100)_2$。

【例 1.2】 将十进制数 348.27 转换成八进制数。

解

$$\begin{array}{rl}
8\,\underline{|348} & \cdots\cdots\ 4 \quad \uparrow 低位 \\
8\,\underline{|43} & \cdots\cdots\ 3 \\
8\,\underline{|5} & \cdots\cdots\ 5 \quad 高位 \\
0 &
\end{array}
\qquad\qquad
\begin{array}{lrr}
 & & 0.27 \\
 & & \underline{\times\quad 8} \\
高位 & 2 \longleftarrow & (2).16 \\
\downarrow & & \underline{\times\quad 8} \\
低位 & 1 \longleftarrow & (1).28 \\
 & & \vdots
\end{array}$$

所以有$(348.27)_{10}=(534.21)_8$(取 2 位小数)

【例 1.3】 将十进制数 4021.78 转换成十六进制数。

解

$$\begin{array}{rl}
16\,\underline{|4021} & \cdots\cdots\ 5 \quad \uparrow 低位 \\
16\,\underline{|251} & \cdots\cdots\ 11 \\
16\,\underline{|15} & \cdots\cdots\ 15 \quad 高位 \\
0 &
\end{array}
\qquad\qquad
\begin{array}{lrr}
 & & 0.78 \\
 & & \underline{\times\quad 16} \\
 & & 468 \\
 & & \underline{78\ \ } \\
高位 & 12 \longleftarrow & (12).48 \\
\downarrow & & \underline{\times\quad 16} \\
 & & 288 \\
 & & \underline{48\ \ } \\
低位 & 7 \longleftarrow & (7).68 \\
 & & \vdots
\end{array}$$

所以有$(4021.78)_{10}=(FB5.C7)_{16}$。(取 2 位小数)

1.2.3 二进制与八进制间的转换

八进制的基数是 2 的幂,$8=2^3$。用三位二进制数表示一位八进制数。将二进制数转换成八进制数时,以小数点为界向左、右两侧每三位分成一组(不够添零),每组为一位八进制数。

【例 1.4】 将二进制数转换成八进制数:

$$(\underline{10}\ \underline{111}\ \underline{101}.\underline{110}\ \underline{1})_2=(275.64)_8$$

【例 1.5】 将八进制数转换成二进制数:

$$(3641.256)_8=(11110100001.01010111)_2$$

1.2.4 二进制与十六进制间的转换

用四位二进制数表示一位十六进制数。将二进制数以小数点为界向左、右两侧每四位分成一组(不够添零),每组为一位十六进制数。

【例 1.6】 将二进制数转换成十六进制数:

$$(\underline{101}\ \underline{1101}\ \underline{1010}\ \underline{0100}.\underline{1111}\ \underline{011})_2=(5DA4.F6)_{16}$$

【例 1.7】 将十六进制数转换成二进制数:

$$(B2E.57)_{16}=(101100101110.01010111)_2$$

1.3 代　码

代表信息的码称为代码。把一组信息用一组数码表示叫做编码。本节介绍几种常用的二进制代码。

1.3.1 二-十进制代码(BCD)

若被编码的信息量为 M,用于编码的二进制数为 n 位,则应有 $n\geqslant\log_2 M$,即 $2^n\geqslant M$。用二进制对 0～9 这十个十进制数进行编码,二进制的位数 n,应有 $n\geqslant\log_2 10$,应取 $n=4$。

用四位二进制数对一位十进制数的编码,称做二—十进制代码,称 BCD(Binary Coded Decimal)码。这种编码的方法有多种,常用的几种 BCD 码列于表 1-2。最常用的是 8421BCD 码,它使用了 0000～1001 十个四位二进制数,分别顺序作为十进制十个数的代码,而 1010～1111 为禁用码。8421BCD 码保持了二进制数位权的特点,为有权码。此外,2421BCD 码,4221BCD 码,5421BCD 码等也是有权码,而余 3 码是一种偏移码,每个码值比 8421BCD 码的值多 3。

表 1-2　几种 BCD 码

十进制	二进制	8421BCD	2421BCD	4221BCD	5421BCD	余 3 码
0	0000	0000	0000	0000	0000	0011
1	0001	0001	0001	0001	0001	0100
2	0010	0010	0010	0010	0010	0101
3	0011	0011	0011	0011	0011	0110
4	0100	0100	0100	0110	0100	0111
5	0101	0101	0101	0111	1000	1000
6	0110	0110	0110	1100	1001	1001
7	0111	0111	0111	1101	1010	1010
8	1000	1000	1110	1110	1011	1011
9	1001	1001	1111	1111	1100	1100

8421BCD 码与十进制之间的转换是直接完成的。例如:

$$(0101\ 1000\ 0111.1001\ 0000\ 0100)_{8421BCD}=(587.904)_{10}$$

$$(3462.58)_{10}=(0011\ 0100\ 0110\ 0010.0101\ 1000)_{8421BCD}$$

8421BCD码不能直接转换成二进制数，要先将其转换成十进制数，再由十进制数转换成二进制数。

余3码也是一种常用的BCD码，是由8421BCD码加3后得到。

从表1-2中可以看出，余3码的主要特点是：0与9；1与8；2与7；3与6；4与5各组数中两数之和均为1111，即各组数中两数互为反码。

表1-3 格雷码与二进制数

十进制	二进制	格雷码
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

1.3.2 格雷码

格雷码(Gray Code)有许多种，表1-3给出典型格雷码的编码顺序。各种格雷码的共同特点是任意两个相邻码之间只有一位不同。在典型的n位格雷码中，0和最大数(2^n-1)之间也只有一位不同，所以它是一种循环码。格雷码的这个特点使它在传输过程中引起的误差较小。例如，7的二进制码为0111，8的二进制码为1000。在7和8的边界上，二进制的四位数都发生变化，都处于模糊状态。而格雷码中7为0100，8为1100，在二者边界上仅有一位发生变化，带来的误差不会大于1(即7和8之差)。

1.3.3 字符代码

在数字系统中，0和1不仅可以代表数，还可以用0和1的组合表示字母和符号的代码。ASCII码就是一种常见的字符代码。ASCII码是美国信息交换标准码(American Standard Code for Information Interchange)。ASCII码一般有七位信息码，不同的字符组合代表不同的含义。如0001101为信息CR(Carriage Return回车)；1111111为信息DEL(Delete 删除)；1000001为信息A；0100101为信息%，等等。

1.4 二进制正负数表示法

二进制正负数的表示方法有多种，本节介绍原码表示法，反码表示法和补码表示法。

1.4.1 原码、反码、补码

一个二进制数的原码就是其本身。

把一个二进制的原码逐位求反，即1变0，0变1，就得到该二进制数的反码。如11001的反码为00110。显然，n位二进制数的反码等于n位最大数(n个1)与其原码之差。

将一个二进制数反码的最低有效位加1，就得到该二进制数的补码。如11001的反码

为 00110，其补码为 00111。一个 n 位二进制数 N，其补码 $(N)_{补}$ 的定义为：

$$(N)_{补}=2^n-N$$

二进制数的补码可以直接从其原码求得，方法是：二进制数低位的第一个“1”右边保持不动（包含此 1），左边依次求反。

反码的反码为原码；补码再求补为原码。

1.4.2 二进制数为正负数表示法

二进制数的正、负符号分别用 0 和 1 表示。

对正数，原码表示法、反码表示法和补码表示法相同，为符号位 0 加二进制数本身（即原码）。例如 $(+37)_{10}=0,100101$。最左边为符号位。

对负数，三种表示方法不同：

原码表示法：符号位 1 加原码；

反码表示法：符号位 1 加反码；

补码表示法：符号位 1 加补码。

例如：37 的二进制数为 100101，（−37）的三种二进制表示法分别为

原码表示法：1,100101

反码表示法：1,011010

补码表示法：1,011011

习　　题

1-1 把下列二进制数转换成十进制数：

(1)11000101　　(2)1010010　　(3)010001

(4)0.01001　　(5)0.011010　　(6)1010.001

1-2 把下列十进制数转换成二进制数：

(1)$(12.0625)_{10}$　　(2)$(101)_{10}$

(3)$(673.23)_{10}$　　(4)$(2002)_{10}$

1-3 把二进制数 $(110101111.110)_2$ 转换成十进制、八进制和十六进制数。

1-4 把八进制数 $(623.77)_8$ 转换成十进制、十六进制和二进制数。

1-5 把十六进制数 $(2AC5.D)_{16}$ 转换成十进制、八进制和二进制数。

1-6 把十进制数 $(432.13)_{10}$ 转换成五进制数。

1-7 用 8421BCD 码表示下列各数：

(1)$(42.78)_{10}$　　(2)$(103.65)_{10}$　　(3)$(9.04)_{10}$

1-8 把下列 8421BCD 码表示成十进制数：

(1)$(0101\ 1000)_{8421BCD}$　　(2)$(1001\ 0011\ 0101)_{8421BCD}$

(3)$(0011\ 0100.0111\ 0001)_{8421BCD}$　　(4)$(0111\ 0101.0110)_{8421BCD}$

1-9 填空：

(1) $(58.23)_{10}=(\quad)_2=(\quad)_8=(\quad)_{8421BCD}$

(2) $(0001\ 1000\ 1001.0011\ 0101)_{8421BCD}=(\quad)_{10}=(\quad)_2$

1-10 下列各式是否正确，为什么？

(1) $(01011001.1000)_2=(59.8)_{10}$

(2) $(B3.F)_{16}=(1011\ 0011.1111)_{8421BCD}$

1-11 填写下表中空格

原　码	反　码	补　码
10010		
	01010.01	
		111001.10
10000		

1-12 求下列二进制数的补码和反码：

(1)1,1010101　(2)0,0111000　(3)1,0000001　(4)1,10000

1-13 求下列各数的二进制数原码、补码和反码表示：

(1) $(+418)_{10}$　(2) $(-52)_{10}$　(3) $(-39.28)_{10}$

1-14 求下列各数的二进制数原码、反码和补码表示：

(1) $(+312)_8$　(2) $(-75)_8$　(3) $(+B73)_{16}$　(4) $(-C82)_{16}$

1-15 用二进制补码运算求：

(1) $(+51)_{10}+(+32)_{10}$　(2) $(-51)_{10}+(-32)_{10}$

(3) $(+51)_{10}+(-32)_{10}$　(4) $(-51)_{10}+(+32)_{10}$

第2章　逻辑门电路

逻辑门是构成数字电路的最基本的器件，基本逻辑门电路有与门、或门和非门。实际上，常用的门电路还有与非门、或非门、与或门、与或非门、异门、同门、OC 门、三态门、传输门等。本章着重讨论集成 TTL 门电路，MOS 门电路的符号、工作原理、逻辑功能等。

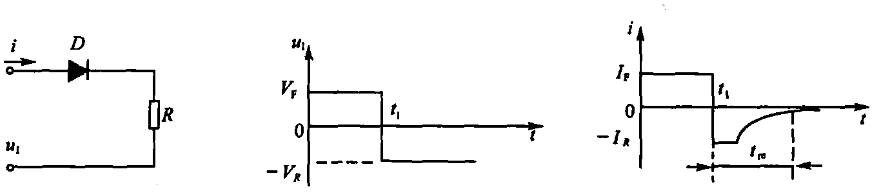
2.1　分立元件门电路

2.1.1　半导体二极管和三极管的开关特性

1. 半导体二极管的开关特性

在数字电路中，二极管经常工作在开关状态，以硅二极管为例，当外加正向电压大于其导通电压 0.7 V 时，则导通，而且一旦导通后，可近似认为其压降保持在 0.7 V 不变，如同一个具有 0.7 V 的闭合开关；当外加电压小于其死区电压 0.5 V 时，则截止，而且一旦截止后，可近似认为其电流为 0，如同断开了的开关。

但是二极管开关状态的转换并不可能瞬时完成，二极管从导通到截止需要一个恢复时间。在图 2-1(a)所示的硅二极管电路中，如输入信号 u_I 为如图 2-1(b)所示的阶跃电压，在 0～t_1 时间内，二极管正向导通，负载电流为 I_F。在 t_1 时刻，虽然 u_I 从 $+V_F$ 变 $-V_R$，但二极管并不会立即截止，而是先产生一个较大的反向电流 $-I_R$，并经过一段时间 t_{re} 以后，二极管才进入截止状态，二极管的电流波形如图 2-1(c)。通常把 t_{re} 称为反向恢复时间，t_{re} 一般是纳秒(ns)数量级，它的存在限制了二极管的工作速度。



(a) 电路图　(b) 输入电压波形图　(c) 二极管电流波形图

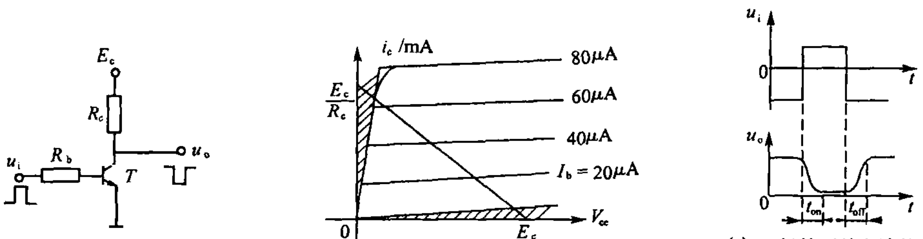
图 2-1　二极管开关特性

产生上述现象的原因是由于二极管在导通时，P 区和 N 区的多数载流子不断向对方注入。因此，在 PN 结边界附近存储着一定数量的少数载流子，称为存储电荷。当外加电压突然转为反向时，这些存储电荷不会立即消失，因而形成较大的反向电流 $-I_R$。正向时的电流越大，存储电荷就越多，反向恢复时间就越长。

二极管从截止转为导通，在 P 区和 N 区内电荷的积累同样也需要时间，但它和 t_{re} 相比却小得多，故可忽略不计。

2. 三极管的开关特性

三极管开关电路，三极管输出特性曲线，三极管输入、输出电压波形图分别示于图2-2 (a)、(b)、(c)。在三极管开关电路的输入端加上(c)图的矩形脉冲电压，当 u_i 由低变高时，三极管的工作点会沿(b)图的直流负载线由下向上移动，由截止区途经放大区进入饱和区。开关三极管也完成了由断开到闭合的开关过程，反之，三极管完成由闭合到断开的过程。输出波形和输入波形反相，故也叫非门。

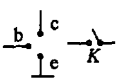
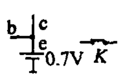
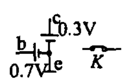


(a) 电路图　　(b) 三极管输出特性曲线　　(c) 三极管开关电路的输入输出电压波形图

图 2-2　三极管开关电路

表 2-1 列出了三极管在各种工作状态下的电压电流数值及开关情况。

表 2-1　　三极管工作状态表

工作状态 / 工作情况	截　止	放　大	临界饱和	饱　和
偏置电压	$V_{be}<0$ $V_{bc}<0$	$V_{be}=0.7\ V>0$ $V_{bc}<0$	$V_{be}=0.7\ V>0$ $V_{bc}=0$	$V_{be}=0.7\ V>0$ $V_{bc}=0.4\ V>0$
电流 i_b，i_c	$i_b=0$，$i_c=0$	$i_c=\beta i_b$ $0<i_b<I_{bs}$	$I_{cs}=\frac{E_c}{R_c}$，$I_{bs}=\frac{I_{cs}}{\beta}$ $i_b=I_{bs}$	$i_b>I_{bs}$
管压降 V_{ce}	$V_{ce}\approx E_c$	$V_{ce}=E_c-i_cR_c$	$V_{ce}=0.7$v	$V_{ce}=0.3\ V$
内阻 r_{ce}	r_{ce}数百 kΩ， 相当开关断开	可变	r_{ce}几百 Ω，很小，近似开关闭合	r_{ce}很小 相当开关闭合
三极管 等效电路		放大状态下的三极管微变等效电路		

3. 判别三极管在电路中的工作状态举例

【例 2.1】　判断图 2-3(a)、(b)、(c)、(d)中三极管 T 在电路中的工作状态。

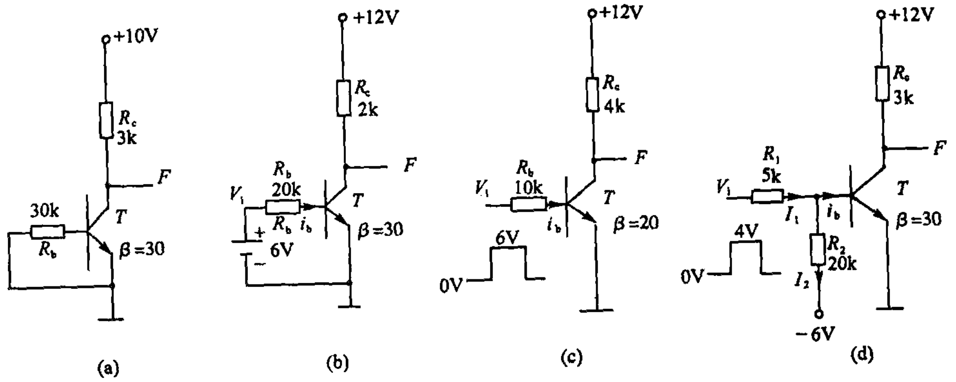


图 2-3

解 (a) $\because V_{be}=0$ $\therefore T$ 截止

(b) $\because I_{bs}=\dfrac{E_c}{\beta R_c}=\dfrac{12\ \text{V}}{30\times 2\ \text{k}\Omega}=0.2\ \text{mA}$

$i_b=\dfrac{V_i-V_{be}}{R_b}=\dfrac{6\ \text{V}-0.7\ \text{V}}{20\ \text{k}\Omega}=0.265\ \text{mA}$

$\because i_b>I_{bs}$ $\therefore T$ 饱和

(c) V_i 加入 0～6 V 的矩形脉冲

$V_i=0$ 时，$V_{be}=0$ $\therefore T$ 截止，相当开关断开

$V_i=6$ V 时 $\because I_{bs}=\dfrac{E_c}{\beta R_c}=\dfrac{12\ \text{V}}{20\times 4\ \text{k}\Omega}=0.15\ \text{mA}$

$i_b=\dfrac{V_i-V_{be}}{R_b}=\dfrac{6\ \text{V}-0.7\ \text{V}}{10\ \text{k}\Omega}=0.53\ \text{mA}$

$i_b>I_{bs}$ $\therefore T$ 饱和 相当开关闭合

$\therefore V_i$ 加入 0～6 V 矩形脉冲电压，T 可作开关。

(d)输入 V_i 加入 0～4 V 的矩形脉冲

$V_i=0$ 时，$\because V_{be}=0$ $\therefore T$ 截止 相当开关断开

$V_i=4$ V 时，$\because I_{bs}=\dfrac{E_c}{\beta R_c}=\dfrac{12\ \text{V}}{30\times 3\ \text{k}\Omega}=0.13\ \text{mA}$

$i_b=I_1-I_2=\dfrac{4\ \text{V}-0.7\ \text{V}}{5\ \text{k}\Omega}-\dfrac{6\ \text{V}+0.7\ \text{V}}{20\ \text{k}\Omega}=0.66\ \text{mA}-0.335\ \text{mA}=0.33\ \text{mA}$

$\because i_b>I_{bs}$ $\therefore T$ 饱和，相当开关闭合

$\therefore V_i$ 加入 0～4 V 矩形脉冲电压，T 可作开关

2.1.2 基本逻辑门电路

1. 非门(反相器)

非门即三极管开关电路，如图 2-4(a)所示，输入图 2-4 (b)所示的矩形脉冲。$A<0$ 时，T 截止，$F=E_c(1)$；$A>0$ 时，$I_{bs}=\dfrac{E_c}{\beta R_c}$，$i_b=\dfrac{A-V_{be}}{R_b}$，合理设计 E_c、β、R_c、R_b 等参数，以保证 $i_b>I_{bs}$ 使 T 饱和，$F=0.3$ V(0)。因输出与输入波形反相，故三极管开关电路也称为反相器。