



第3章

逻辑门电路

第1章中初步介绍了与、或、非三种基本逻辑运算和与非、或非、异或等常用逻辑运算,在那里,这些运算关系都是用逻辑符号来表示的。在工程中,每一个逻辑符号都对应着一种电路,并通过集成工艺作成一种集成器件,称为集成逻辑门电路,逻辑符号仅是这些集成逻辑门电路的“黑匣子”。本章将进入这些“黑匣子”内部,去看看每一个逻辑符号的背后隐藏着一个怎样的电路。逻辑门电路有好几种类型,本章只介绍两种主要类型(TTL 和 MOS)门电路的内部结构、工作原理、逻辑功能、电气特性及主要参数等。

3.1 二极管的开关特性及二极管门电路

3.1.1 二极管的开关特性

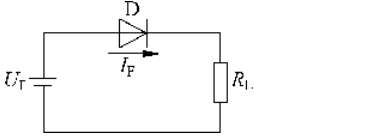
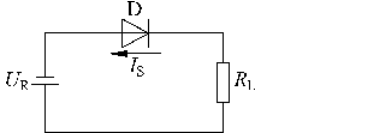
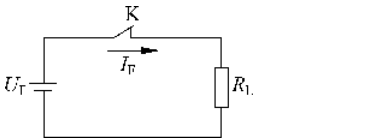
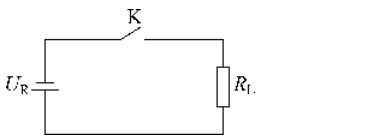
1. 理想二极管开关

二极管有导通与截止两种工作状态,正好对应于开关的闭合与断开。加正向电压时,二极管导通,导通电阻很小,相当于开关闭合;加反向电压时,二极管截止,截止电阻很大,相当于开关断开。所以,可把二极管看做一个受外加电压控制的理想开关。表 3.1.1 中列出了理想二极管开关的工作条件、特点及等效电路。

2. 二极管开关的动态特性

当给二极管两端加一脉冲信号时,二极管将随着脉冲电压的变化在“开”与“关”两种状态之间转换。这个转换过程就是二极管开关的动态特性。

表 3.1.1 二极管的开关特性

工作状态	导 通	截 止
条件	外加正向电压,且电压值大于死区电压	外加反向电压,或加正向电压但电压值小于死区电压
电路形式		
等效电路		
特点	等效电阻很小,如忽略正向压降,相当于开关闭合	等效电阻很大,如忽略反向电流 I_S,相当于开关断开

在图 3.1.1(a)所示的二极管电路中,加入一个如图 3.1.1(b)所示的脉冲信号。在 $0 \sim t_1$ 时间内,输入为正向电压 U_F ,电路中的电流为正向电流 I_F ,则有

$$I_F = \frac{U_F - U_D}{R_L} \approx \frac{U_F}{R_L}$$

在 t_1 时刻,输入电压突然从 $+U_F$ 变为 $-U_R$ 时,按照理想情况,二极管应立刻转为截止,电路中只有很小的反向电流 I_S ,波形如图 3.1.1(c)所示。但实际的电流波形却如图 3.1.1(d)所示,即二极管并不立刻截止,而是先由正向的 I_F 变到一个很大的反向电流 $-I_R$,这个电流维持一段时间 t_s 后才开始下降,再经过 t_t 后,下降到约 $0.1 I_R$,这时二极管才进入截止状态。通常把二极管从正向导通转为反向截止所经过的转换过程称为反向恢复过程,其中称 t_s 为存储时间, t_t 称为渡越时间, $t_{re} = t_s + t_t$ 称为反向恢复时间。

3. 产生反向恢复过程的原因

当二极管加正向电压 U_F 时,多数载流子不断地向对方区域扩散,并在对方区域中作为非平衡少数载流子被存储,并建立起一定的浓度分布,如图 3.1.2 所示,即 P 区中的空穴扩散到 N 区以后,并非立即全部与 N 区电子复合而消失,而是在一定的路程 L_p (L_p 通常称为扩散长度)内一方面与电子复合,另一方面又不断继续扩散,这样会在 N 区的 L_p 范围内存储一定数量的空穴。正向电流越大,存储的载流子的数目越多,浓度分布的梯度也越大。电子从 N 区扩散到 P 区以后的情况,与空穴从 P 区扩散到 N 区的情况相似。这种正向导通时少数载流子积累的现象叫做电荷存储效应。

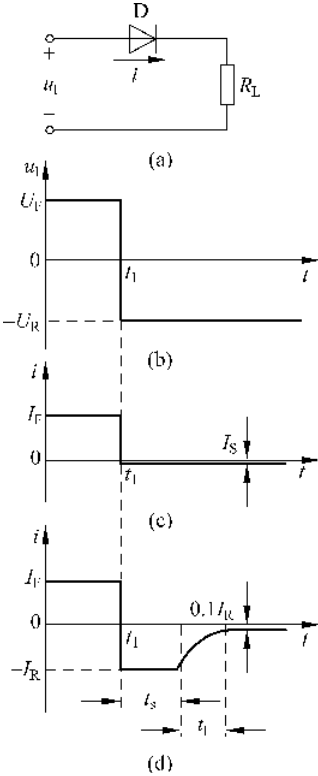


图 3.1.1 二极管开关的动态特性

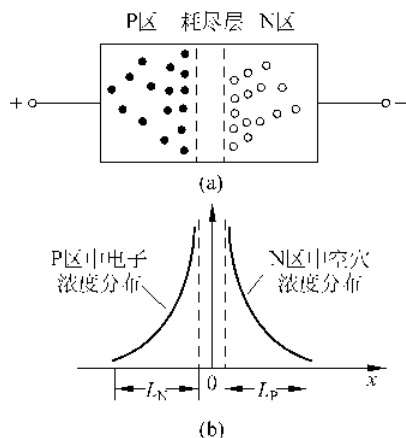


图 3.1.2 加正向电压时二极管存储电荷的分布

当外加电压突然从 $+U_F$ 变为 $-U_R$ 时,这些存储的电荷像电容器中的电荷一样,不会突然消失。它们将通过两个途径逐渐减少:一是载流子的复合,二是在反向电场作用下形成漂移电流 $I_R \approx \frac{U_R}{R_L}$,这就是对应于 t_s 时间内的情况。以后随着存储电荷的逐渐消散,浓度梯度逐渐减小,反向电流下降,这一过程就是渡越时间 t_t 。经过 t_s 和 t_t 这两段时间后,存储电荷消散掉,PN 结的空间电荷区开始由窄变宽,二极管内阻加大,转入截止状态。所以二极管的反向恢复时间 t_{re} 就是存储电荷消散所需要的时间。

以上讨论的是二极管由导通转为截止的过程。同理,二极管从截止转为导通也需要时间,这段时间称为开通时间。开通时间比反向恢复时间要小得多,一般可忽略。

3.1.2 二极管门电路

1. 二极管与门电路

图 3.1.3(a)所示是由二极管组成的二输入端与门电路,其中 A 、 B 为输入端, L 为输出端。输入电压为 $+5V$ 或 $0V$,忽略二极管的正向压降。此电路按输入信号的不同有以下四种工作情况:

(1) $u_A = u_B = 0V$ 。此时二极管 D_1 和 D_2 都导通,由于二极管正向导通时的钳位作用, $u_L \approx 0V$ 。

(2) $u_A = 0V, u_B = 5V$ 。此时 D_1 导通,由于钳位作用 $u_L \approx 0V$, D_2 受反向电压而截止。

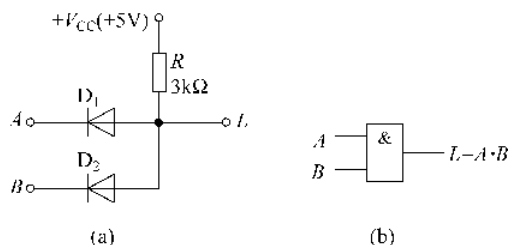


图 3.1.3 二极管与门

(a) 电路; (b) 逻辑符号

(3) $u_A=5V, u_B=0V$ 。此时 D_2 导通, $u_L \approx 0V$, D_1 受反向电压而截止。

(4) $u_A=u_B=5V$ 。此时 D_1 和 D_2 都截止, $u_L=V_{CC}=5V$ 。

把上述分析结果列入表 3.1.2 中,可见这个电路的输入和输出电压都只有两个值 5V 和 0V。如果采用正逻辑体制,规定高电平 5V 为逻辑 1,低电平 0V 为逻辑 0,则表 3.1.2 可表示为表 3.1.3 的形式。很容易看出表 3.1.3 正是二变量与逻辑的真值表,所以称图 3.1.3(a)中电路为与门电路,它实现与逻辑运算 $L=A \cdot B$ 。

表 3.1.2 与门输入输出电压的关系

输 入		输出 u_L/V
u_A/V	u_B/V	
0	0	0
0	5	0
5	0	0
5	5	5

表 3.1.3 与逻辑真值表

输 入		输出 L
A	B	
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

图 3.1.3(b)为它的逻辑符号。如果在图 3.1.3(a)中增加一个输入端和一个二极管,就可变成三输入端与门。

2. 二极管或门电路

电路如图 3.1.4(a)所示。分析方法同上,其输出电压与输入电压之间的关系列入表 3.1.4 中。

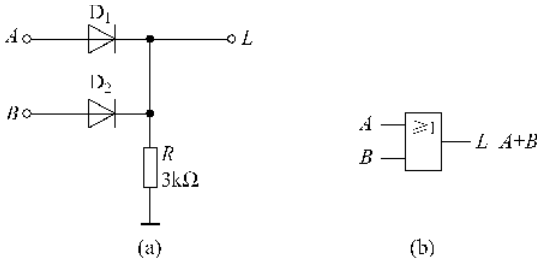


图 3.1.4 二极管或门

(a) 电路; (b) 逻辑符号

采用正逻辑体制,则转换为表 3.1.5 的形式。该表为二变量或逻辑的真值表,所以称图 3.1.4(a)的电路为或门电路,它实现或逻辑运算 $L=A+B$ 。

表 3.1.4 或门输入输出电压的关系

输 入		输出 u_L/V
u_A/V	u_B/V	
0	0	0
0	5	5
5	0	5
5	5	5

表 3.1.5 或逻辑真值表

输 入		输出 L
A	B	
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

图 3.1.4(b)为它的逻辑符号。同样,可用增加输入端和二极管的方法,构成更多输入端的或门。

3.2 三极管的开关特性及三极管门电路

3.2.1 三极管的开关特性

三极管有三种工作状态,但在数字电路中,三极管只工作在两种状态下,即饱和导通状态和截止状态,这两个对立的状态也相当于开关的闭合和断开。因此,在数字电路中三极管也常被当做开关用。

1. 三极管的三种工作状态

三极管电路如图 3.2.1(a)所示,输出特性曲线及负载线如图 3.2.1(b)所示。当输入电压 u_i 小于三极管发射结死区电压(硅管为 0.5V)时, $i_B = I_{\text{CBO}} \approx 0$, $i_C = I_{\text{CEO}} \approx 0$, $u_{\text{CE}} \approx V_{\text{CC}}$, 三极管工作在截止区,对应图 3.2.1(b)中的 A 点。三极管工作在截止区的特点是电流很小,集电极回路中的 C、E 之间近似开路,相当于开关断开。

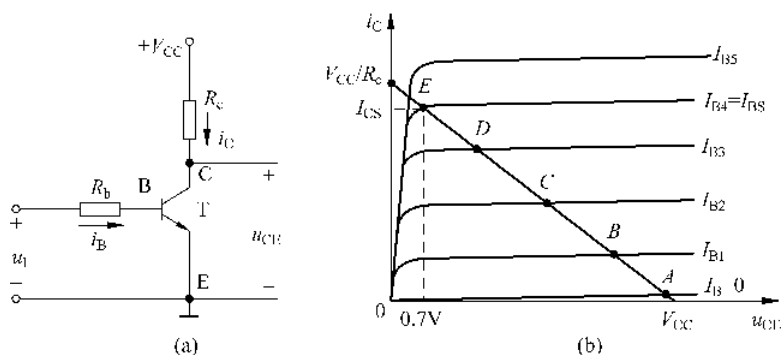


图 3.2.1 三极管的三种工作状态

(a) 电路; (b) 三种工作状态图解

当输入电压 u_i 为正值且大于死区电压时,三极管导通,有

$$i_B = \frac{u_i - U_{\text{BE}}}{R_b} \approx \frac{u_i}{R_b} \quad (3.2.1)$$

此时,若继续增加 u_i ,则 i_B 增大, i_C 增大, u_{CE} 减小,工作点沿着负载线由 A 点 $\rightarrow$ B 点 $\rightarrow$ C 点 $\rightarrow$ D 点向上移动。在此期间,三极管工作在放大区,其特点为 $i_C = \beta i_B$, β 为电流放大系数,即 i_C 随 i_B 的增加而成比例地增加。三极管在模拟电路中作放大用时就工作在这种状态。

继续增加 u_i ,当 u_{CE} 减小至 0.7V 时,集电结由反偏变为零偏,称为临界饱和状态,对应图 3.2.1(b)中的 E 点。此时的集电极电流称为集电极饱和电流,用 I_{CS} 表示,基极电流称为基极临界饱和电流,用 I_{BS} 表示,有

$$I_{\text{CS}} = \frac{V_{\text{CC}} - 0.7\text{V}}{R_c} \approx \frac{V_{\text{CC}}}{R_c} \quad (3.2.2)$$

$$I_{\text{BS}} = \frac{I_{\text{CS}}}{\beta} = \frac{V_{\text{CC}}}{\beta R_c} \quad (3.2.3)$$

若再增加 u_1 , i_B 会继续增加, 但 i_C 已接近于最大值 V_{CC}/R_c , 受 V_{CC} 和 R_c 的限制, 不会再随 i_B 的增加按 β 关系增加, 三极管进入饱和状态, 所以三极管工作在饱和状态的条件为

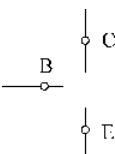
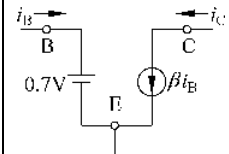
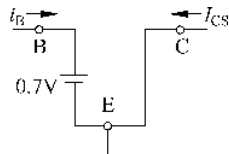
$$i_B > I_{BS} \quad (3.2.4)$$

进入饱和状态后, i_B 增加时 i_C 会略有增加, $u_{CE} < 0.7V$, 集电结变为正向偏置。所以也常把集电结和发射结均正偏作为三极管工作在饱和状态的条件。饱和时的 u_{CE} 电压称为饱和压降 U_{CES} , 其典型值为 $0.3V$ 。

三极管工作在饱和区的特点是 u_{CE} 很小, 集电极回路中的 C、E 之间近似短路, 相当于开关闭合。

为便于比较, 将 NPN 型三极管截止、放大、饱和三种工作状态的特点列于表 3.2.1。

表 3.2.1 NPN 型三极管三种工作状态的特点

工作状态		截 止	放 大	饱 和
条件		$i_B \approx 0$	$0 < i_B < I_{BS}$	$i_B > I_{BS}$
工 作 特 点	偏置情况	发射结电压 $< 0.5V$, 集电结反偏	发射结正偏且 $u_{BE} > 0.5V$, 集电结反偏	发射结正偏且 $u_{BE} > 0.5V$, 集电结正偏
	集电极电流	$i_C \approx 0$	$i_C = \beta i_B$	$i_C = I_{CS} \approx V_{CC}/R_c$
	管压降	$u_{CE} \approx V_{CC}$	$u_{CE} = V_{CC} - i_C R_c$	$u_{CE} = U_{CES} \approx 0.3V$
	近似的等效电路			
	C、E 间等效内阻	很大, 约为数百 $k\Omega$, 相当于开关断开	可变	很小, 约为数百 Ω , 相当于开关闭合

例 3.2.1 电路及参数如图 3.2.2 所示, 设输入电压 $u_1 = 3V$, 三极管的 $U_{BE} = 0.7V$ 。

(1) 若 $\beta = 60$, 试判断三极管是否饱和, 并求出 i_C 和 u_O 的值。

(2) 若 $R_c = 6.8k\Omega$, 重复以上计算;

(3) 若 $R_c = 6.8k\Omega$, $R_b = 60k\Omega$, 重复以上计算;

(4) 若 $R_c = 6.8k\Omega$, $\beta = 100$, 重复以上计算。

解 根据饱和条件 $i_B > I_{BS}$ 解题。

$$(1) i_B = \frac{u_1 - U_{BE}}{R_b} = \frac{3 - 0.7}{100} \approx 0.023(mA)$$

$$I_{BS} = \frac{V_{CC}}{\beta R_c} = \frac{12}{60 \times 10} \approx 0.020(mA)$$

因为 $i_B > I_{BS}$, 所以三极管饱和。

$$i_C = I_{CS} = \frac{V_{CC}}{R_c} = \frac{12}{10} \approx 1.2(mA)$$

$$u_O = U_{CES} \approx 0.3(V)$$

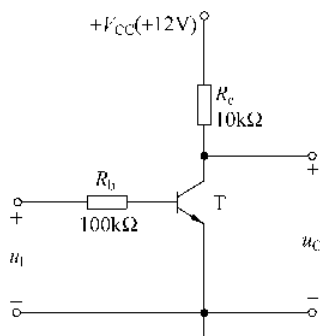


图 3.2.2 例 3.2.1 电路

(2) i_B 不变, 仍为 0.023mA 。

$$I_{BS} = \frac{V_{CC}}{\beta R_c} = \frac{12}{60 \times 6.8} \approx 0.029(\text{mA})$$

因为 $i_B < I_{BS}$, 所以三极管处在放大状态。

$$i_C = \beta \times i_B = 60 \times 0.023 \approx 1.4(\text{mA})$$

$$u_O = u_{CE} = V_{CC} - i_C \times R_c = 12 - 1.4 \times 6.8 \approx 2.48(\text{V})$$

$$(3) i_B = \frac{3-0.7}{60} \approx 0.038(\text{mA}) \quad I_{BS} \approx 0.029(\text{mA})$$

因为 $i_B > I_{BS}$, 所以三极管饱和。

$$i_C = I_{CS} = \frac{V_{CC}}{R_c} = \frac{12}{6.8} \approx 1.76(\text{mA})$$

$$u_O = U_{CES} \approx 0.3(\text{V})$$

$$(4) I_{BS} = \frac{V_{CC}}{\beta R_c} = \frac{12}{100 \times 6.8} \approx 0.0176(\text{mA}) \quad i_B \approx 0.023(\text{mA})$$

因为 $i_B > I_{BS}$, 所以三极管饱和。

$$i_C = I_{CS} = \frac{V_{CC}}{R_c} = \frac{12}{6.8} \approx 1.76(\text{mA})$$

$$u_O = U_{CES} \approx 0.3(\text{V})$$

由上例可见, R_b 、 R_c 、 β 等参数都能决定三极管是否饱和。将式(3.2.1)及式(3.2.3)代入式(3.2.4), 则饱和条件变为

$$\frac{u_1}{R_b} > \frac{V_{CC}}{\beta R_c}$$

即在 u_1 一定(要保证发射结正偏)和 V_{CC} 一定的条件下, R_b 越小, β 越大, R_c 越大, 三极管越容易饱和。在数字电路中总是合理地选择这几个参数, 使三极管在导通时为饱和导通。

2. 三极管开关的动态特性

同二极管一样, 给三极管加上脉冲信号, 三极管可能截止, 也可能饱和导通, 在两种状态之间相互转换时, 其内部电荷有消散和建立的过程, 即动态特性。

在图 3.2.1(a)所示电路的输入端加入一个如图 3.2.3(a)所示的输入电压, 按照前面的分析, 应得理想的集电极电流波形如图 3.2.3(b)所示, 实际的波形却如图 3.2.3(c)所示, 上升沿和下降沿均有延迟且变得缓慢。为描述其动态过程, 引入如下 4 个开关参数:

延迟时间 t_d ——从输入信号 u_1 正跳变的瞬间开始, 到集电极电流 i_C 上升到 $0.1I_{CS}$ 所需的时间。

上升时间 t_r ——集电极电流从 $0.1I_{CS}$ 上升到 $0.9I_{CS}$ 所需的时间。

存储时间 t_s ——从输入信号 u_1 下跳变的瞬间开始, 到集电极电流 i_C 下降到 $0.9I_{CS}$ 所需的时间。

下降时间 t_f ——集电极电流从 $0.9I_{CS}$ 下降到 $0.1I_{CS}$ 所需的时间。

其中 t_d 和 t_r 之和称为开通时间 t_{on} , 即 $t_{on} = t_d + t_r$; t_s 和 t_f 之和称为关闭时间 t_{off} , 即 $t_{off} = t_s + t_f$ 。

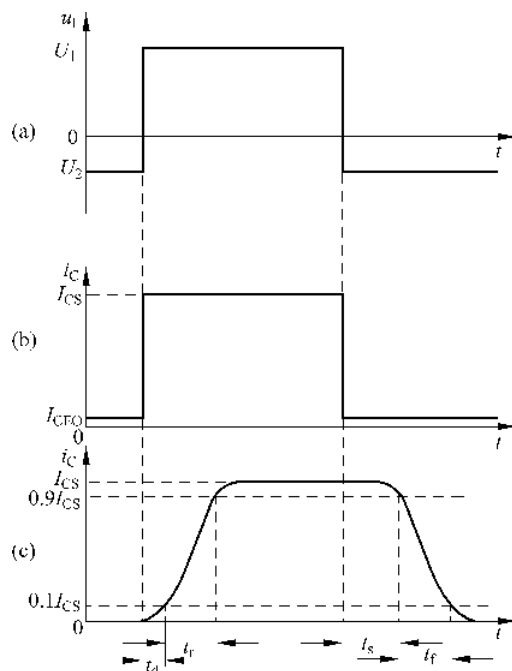


图 3.2.3 三极管开关的动态特性

三极管的开启时间和关闭时间总称为三极管的开关时间,一般为几纳秒到几十纳秒。三极管的开关时间对电路的开关速度影响很大,开关时间越小,电路的开关速度越快。如果三极管的开关时间可与输入脉冲周期相比拟,则电路的输出波形明显变坏,甚至使输出的高低电平达不到规定值,而使开关电路不能正常工作。

3.2.2 三极管非门电路

图 3.2.4(a)所示是由三极管组成的非门电路,非门又称反相器。仍设输入信号为+5V或0V。此电路只有以下两种工作情况:

(1) $u_A = 0V$ 。此时三极管的发射结电压小于死区电压,满足截止条件,所以三极管截止, $u_L = V_{CC} = 5V$ 。

(2) $u_A = 5V$ 。此时三极管的发射结正偏,管子导通,只要合理选择电路参数,使其满足饱和条件 $i_B > I_{BS}$,则三极管工作于饱和状态,有 $u_L = U_{CES} \approx 0V(0.3V)$ 。

把上述分析结果列入表 3.2.2 中,此电路满足非运算的逻辑关系,其逻辑真值表如表 3.2.3 所示,图 3.2.4(b)所示为它的逻辑符号。

表 3.2.2 非门输入输出电压的关系

u_A/V	u_L/V
0	5
5	0

表 3.2.3 非逻辑真值表

A	L
0	1
1	0

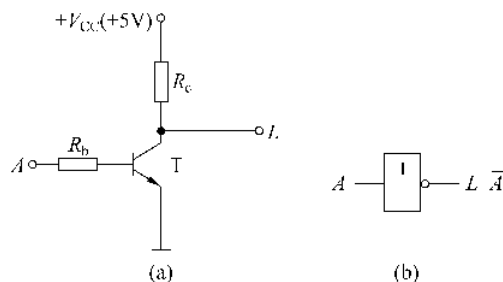


图 3.2.4 三极管非门

(a) 电路; (b) 逻辑符号

3.2.3 二极管和三极管组成的与非门电路

二极管与门和或门电路虽然结构简单,却不实用。因为当信号通过门电路时,二极管的正向压降将引起信号电平的偏离,特别是在多级门电路串接使用时。例如在图 3.2.5 所给出的两级二极管与门电路中,当第一级输入信号为 0V 时,由于二极管的正向压降(硅管为 0.7V),经过一个与门后输出变成 0.7V ,经过两个与门变成了 1.4V 。这样,串接的级数越多,低电平偏离标准数值就越远,而导致逻辑上的错误。同时,二极管门的带负载能力也很差。为此,常将二极管与门和或门与三极管非门组合起来组成与非门和或非门电路,以消除在串接时产生的电平偏离,并提高带负载能力。

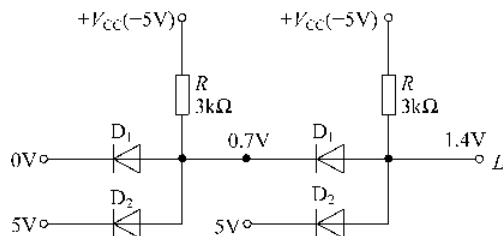


图 3.2.5 两级二极管与门串接使用的情况

图 3.2.6 所示是由三输入端的二极管与门和三极管非门组合而成的与非门电路。其中作两处必要的修正:一是将原来三极管非门电路中的电阻 R_b 换成两个二极管 D_4 和 D_5 ,作用是提高输入低电平的抗干扰能力,即当输入低电平有波动时,保证三极管可靠截止,以输出高电平;二是增加 R_1 ,目的是当三极管从饱和向截止转换时,给基区存储电荷提供一个泄放回路。

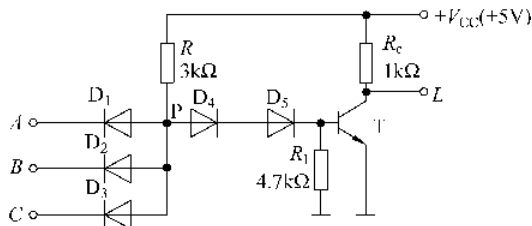


图 3.2.6 DTL 与非门电路

该电路的逻辑关系为:

(1) 当三输入端 A 、 B 、 C 都接高电平时(即 $u_A = u_B = u_C = 5V$), 二极管 $D_1 \sim D_3$ 都截止, 而 D_4 、 D_5 和 T 导通, 则 $u_P \approx 0.7 \times 3 \approx 2.1V$ 。合理选择 R_1 及 R_C , 使三极管饱和, 则 $u_L = U_{CES} \approx 0.3V$, 即输出低电平。

(2) 三输入端中只要有一个接低电平 $0.3V$ 时, 则阴极接低电平的二极管导通, 由于二极管正向导通时的钳位作用, $u_P \approx 1V$, 从而使 D_4 、 D_5 和 T 都截止, $u_L = V_{CC} = 5V$, 即输出高电平。可见该电路满足与非逻辑关系, 即

$$L = \overline{A \cdot B \cdot C}$$

把一个电路中的所有元件, 包括二极管、三极管、电阻及导线等都制作在一片半导体芯片上, 封装在一个管壳内, 就是集成电路。图 3.2.6 就是早期的简单集成与非门电路, 称为二极管-三极管逻辑门电路, 简称 DTL 电路。

3.3 TTL 逻辑门电路

TTL 电路是由 DTL 电路改进而来的, 其输入级和输出级都采用了三极管, 所以称为三极管-三极管逻辑电路, 简称 TTL 电路。

3.3.1 TTL 与非门的基本结构及工作原理

1. TTL 与非门的基本结构

TTL 与非门的电路结构如图 3.3.1 所示, 与图 3.2.6 所示的 DTL 与非门电路相比较, 作了以下几个方面的改进。

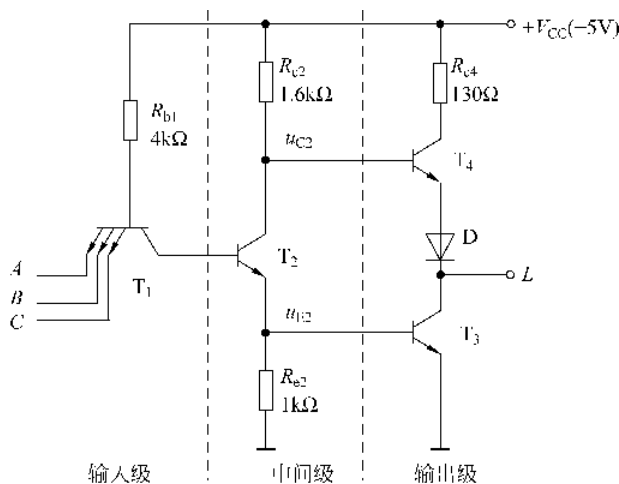


图 3.3.1 TTL 与非门电路图

首先,注意到 DTL 电路中的 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 的 P 区是相连的,如图 3.3.2(a)所示,可用集成工艺做成一个多发射极三极管,如图 3.3.2(b)所示。这样它既是四个 PN 结,不改变原来的逻辑关系,又具有三极管的特性,一旦满足放大的外部条件,就具有放大作用,为 T_2 截止提供足够大的反向基极电流,从而大大加快 T_2 的关闭速度。

第二,将二极管 D_5 改换成三极管 T_2 。这样 T_2 的发射结代替了 D_2 ,逻辑关系不变,同时在电路的开通过程中利用 T_2 的放大作用,为输出管 T_3 提供较大的基极电流,加速了输出管的导通。另外, T_2 和电阻 R_{c2} 、 R_{e2} 组成的电路可将 T_2 的单端输入信号转换为互补的双端输出信号 u_{C2} 和 u_{E2} ,分别驱动 T_4 管和 T_3 管。这一级称为中间级。

第三,为了提高输出级的负载能力,将图 3.2.6 中三极管的集电极负载电阻 R_C 换成由三极管 T_4 、二极管 D 和 R_{c4} 组成的有源负载。在正常工作时, T_3 和 T_4 总是轮流导通。当输出低电平时, T_3 饱和导通, T_4 截止。这时,电路的输出电阻为 T_3 的饱和电阻,因为该电阻较小,所以带负载能力较强。而且由于 T_4 截止, T_3 的集电极电流可以全部用来驱动负载;当输出高电平时, T_3 截止, T_4 导通。由于 T_4 组成射极输出器,输出阻抗很小,所以带负载能力也较强。 T_3 、 T_4 的这种结构称为推挽式输出级。

2. TTL 与非门的逻辑关系

图 3.3.1 所示电路的输出高低电平分别为 3.6V 和 0.3V,所以在下面的分析中假设输入高低电平也分别为 3.6V 和 0.3V。

(1) 输入全为高电平

当三输入端 A、B、C 全接高电平 3.6V 时, T_1 的三个发射结都不可能导通。如若导通,则有 $u_{B1} = 3.6 + 0.7 = 4.3(\text{V})$,4.3V 的电压足以使 T_1 的集电结和 T_2 、 T_3 的发射结这三个串联的 PN 结导通。而这三个 PN 结一导通,由于钳位作用, $u_{B1} = 0.7 \times 3 = 2.1(\text{V})$,从而使 T_1 的发射结因反偏而截止。所以,此时 T_2 、 T_3 导通,且饱和导通。

由于 T_3 饱和导通,输出电压为: $u_L = U_{CES3} \approx 0.3\text{V}$ 。

这时 $u_{E2} = u_{B3} = 0.7\text{V}$,而 $U_{CE2} = 0.3\text{V}$,故有 $u_{C2} = u_{E2} + U_{CE2} = 1\text{V}$ 。1V 的电压作用于 T_4 的基极,使 T_4 和二极管 D 都截止。

将上述分析的电路中各个三极管的工作情况及各点电位标示于图 3.3.3 中,可见它实现了与非门的逻辑功能之一:当输入全为高电平时,输出为低电平。

(2) 输入中有低电平

当某个输入端接低电平 0.3V 时,该发射结导通, T_1 的基极电位被钳位到 $u_{B1} = 1\text{V}$ 。而此时,要使 T_1 的集电结和 T_2 的发射结这两个串联的 PN 结导通,需要 $u_{B1} = 0.7 \times 2 = 1.4\text{V}$,

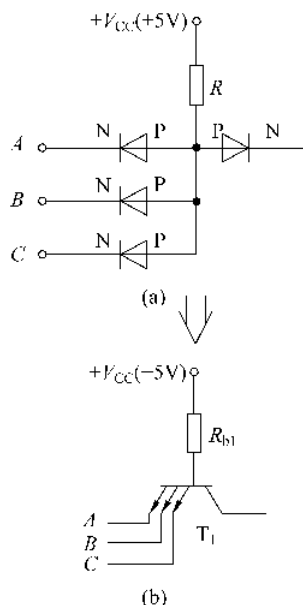


图 3.3.2 TTL 与非门输入级的由来

(a) 二极管与门; (b) 多发射极三极管