

数字电路

下 册

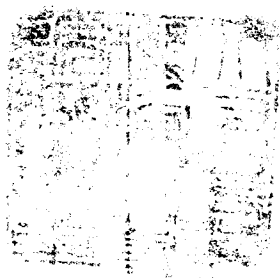
张汝杰 陶增乐 钱菊娣 叶俊生 编著

上海科学技术出版社

数 字 电 路

下 册

张汝杰 陶增乐 编著
钱菊娣 叶俊生



上海科学技术出版社

北京卡片商店1001

数 字 电 路

下 册

张汝杰 陶增乐 编著
钱菊娣 叶俊生

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 江苏扬州印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 8.25 字数 216,000

1984 年 4 月第 1 版 1984 年 4 月第 1 次印刷

印数 1-20,100

书号: 15119·2308 定价: (科五) 1.15 元

目 录

第六章 电流型开关电路	1
第一节 开关电路的发展	1
第二节 电流型“非”门电路	3
6-2-1 电路的工作原理	3
6-2-2 参考电压的获得	6
6-2-3 各种电平的设置	8
第三节 电流型“或非”门电路	11
第四节 电流型斯密脱电路	12
6-4-1 电路的构成及工作原理	12
6-4-2 电路设计原则	15
6-4-3 电路内部的耦合	17
6-4-4 电路传输系数	18
第五节 电流型双稳电路	20
6-5-1 电路的构成	20
6-5-2 电路的分析	21
第六节 电流型开关电路应用举例	23
6-6-1 $\div 2$ 电路	23
6-6-2 电感微分电路	27
第七节 思考题	32
第七章 逻辑集成电路	34
第一节 集成电路原理介绍	35
7-1-1 概述	35
7-1-2 TTL“与非”门电路基本工作原理	39
7-1-3 TTL“与非”门电路基本参数	46
第二节 集成电路触发器	51
7-2-1 集成电路触发器的特点	51

7-2-2	触发器的基本形式	52
7-2-3	触发导引电路	56
7-2-4	集成电路触发器的逻辑功能	66
7-2-5	触发器的转换	81
7-2-6	触发器的分类和比较	90
第三节	常用 TTL 逻辑电路	91
7-3-1	单稳触发器	91
7-3-2	斯密脱电路	101
7-3-3	计数电路	107
7-3-4	寄存器	132
7-3-5	多路器	146
第四节	思考题	148
第八章	脉冲信号的放大——宽带放大器	153
第一节	脉冲信号的频谱	153
8-1-1	周期性脉冲信号的频谱	153
8-1-2	非周期性脉冲信号的频谱	165
第二节	放大脉冲信号对电路的要求	173
第三节	宽带放大器	174
8-3-1	影响放大器频率特性的主要因素	175
8-3-2	宽带放大器的设计	179
8-3-3	宽带放大器的工艺	186
第九章	逻辑电路综合实例	189
第一节	数字频率计的设计要求	189
第二节	数字频率计逻辑综合方法	191
9-2-1	数字频率计基本工作原理	191
9-2-2	频率计的高速度、高精度的问题	203
9-2-3	频率计的控制电路	216
9-2-4	PS-43 总体逻辑	222
第十章	PS-43 单板电路划分及功能介绍	225
第一节	A 放大及 $\div 2$ 电路单元	225
第二节	高速计数单元	230
第三节	$\div 20$ 译码单元	231

第四节	中速计数单元	239
第五节	低速计数单元	239
第六节	时标分频单元	246
第七节	<i>B</i> 放大和时标选择单元	246
第八节	倍、分频单元	247
第九节	控制单元	251
第十节	标频单元	253
第十一节	电源单元	255
第十二节	晶振单元	255

第六章 电流型开关电路

高精度时间和高频率的测量, 需要计数速度极高的数字频率计; 为了更准确地控制和操纵洲际导弹和宇宙飞船的飞行, 就需要运算速度高达千万次以上的电子计算机。这样便推动了作为计算机及频率计最基本电路——逻辑开关电路向更高速度方向发展。电流型开关电路就是为了适应这种要求而发展起来的高速逻辑开关电路, 开关时间仅为纳秒数量级; 而前面所介绍的电压型开关电路, 开关时间通常是微秒数量级, 最高也只能做到数十纳秒。

第一节 开关电路的发展

电流型开关电路是在电压型的基础上, 为适应高速要求而发展起来的。本节我们将先分析限制开关速度的因素, 然后针对问题讨论改进措施。

一、限制开关速度的因素

1. 饱和状态的存贮时间问题 电压型开关电路, 晶体管工作在饱和或截止状态, 而且为了提高开启速度, 晶体管常采用基极电流过驱动来实现。这固然对于提高负载能力、输出电平稳定性具有一定好处, 但是, 电路在翻转过程中, 基区多余存贮电荷的消失需要一定的存贮时间, 从而使饱和式开关电路速度不能很高。

2. 开关电平建立的时间问题 晶体管电路总有一定的容性负载(如晶体管发射极-集电极电容, 负载电容, 寄生电容等)。由于这些电容的存在, 使得电路输入、输出电压的跳变需要一定的充放电时间。我们知道, $Q = CV$, $\Delta Q = I\Delta t = C \cdot \Delta V$, 故 $\Delta t = \frac{C \cdot \Delta V}{I}$ 。

对于饱和式开关电路来讲, 由于晶体管工作在饱和、截止状态, 因

此电路开关电平的跳变 ΔV 有数伏的变化。这样大的电平跳变, 就需要较长的建立时间, 从而也就影响了开关速度的提高。例如, 若容性负载 $C=40\text{ pF}$ 、充电电流 $I=10\text{ mA}$ 、输出电平跳变幅度 $\Delta V=5\text{ V}$, 所需建立时间

$$\Delta t = \frac{C \cdot \Delta V}{I} = \frac{40 \cdot 10^{-12} \cdot 5}{10 \cdot 10^{-3}} = 20\text{ ns}.$$

可见, 电压型开关电路, 仅是开关电平的建立时间就已超出了高速开关时间的数量级, 因而它不适应高速要求。

3. 没有充分利用晶体管的频率响应 晶体管电路有三种连接方式, 即共发射极电路、共基极电路、共集电极电路。其中, 共基极电路、共集电极电路的频率响应最高, 即 $f_a \gg f_\beta$ 。但是各种电压型开关电路, 绝大部分都是采用共发射极电路的连接方法, 这样就使得晶体管内在频率响应没有得到充分发挥。这也是电压型开关电路速度提不高的一个原因。

二、电流型开关电路的改进措施

1. 使晶体管工作在放大区 针对电压型开关电路因晶体管工作时须进入饱和区、其存贮时间影响开关速度的矛盾, 电流型开关电路却使晶体管工作在放大区, 不进入饱和区, 从而克服了存贮时间的影响, 提高了开关速度。

2. 减小开关电平的跳变幅度和电路的容性负载 事实上, 要使晶体管处于导通、截止状态, 并非一定需要几伏的电压跳变。对于硅管来讲, 只要使其发射结电压有 $-0.7 \sim +0.7$ 伏的变化, 就足以保证硅管处于两种不同的状态了。这样, 随着开关电平跳变幅度的减小, 所需的建立时间也就相应减小了。例如, 对于同样的 $C=40\text{ pF}$ 、 $I=10\text{ mA}$ 的开关电路, 如果输出电平跳变幅度减小为 $\Delta V=1.4\text{ V}$, 则建立时间

$$\Delta t = \frac{C \cdot \Delta V}{I} = \frac{40 \cdot 10^{-12} \cdot 1.4}{10 \cdot 10^{-3}} = 5.6\text{ ns}.$$

显然, 随着开关电路速度的提高, 开关幅度要求越来越小。当然开关幅度的减小也有一定限度, 否则就满足不了晶体管发射结导通

和截止条件，而且过小的开关幅度将使电路的抗干扰能力减弱。

晶体管结电容与结上所加电压有关：结正偏时，结电容大；反偏时，结电容小。对发射结来讲，由于要保证晶体管导通，发射结必须正偏，发射结电容无法减小，然而集电结就没有必要一定要正偏。因此，使晶体管导通时，工作在放大区而不进入饱和区，这不仅有利于克服存贮时间的影响，而且也有利于集电结电容的减小，从而有利于开关速度的提高。

3. 采用共基极电路 为了充分利用晶体管的频响特性，电流型开关电路采用共基极电路。共基极电路的放大系数 α 的离散性较小，不象共发射极电路的电流放大系数 β 的离散性大，因而电路参数确定后，管子调换的一致性较好。

以上分析的限制开关速度的因素，并不是孤立的，而是互相联系的，因而解决矛盾的方法也是相互联系的。归纳起来，电流型开关电路与电压型比较，有以下几个特点：晶体管工作在放大区和截止区；开关幅度小，仅1伏左右；采用共基极电路连接方式。

第二节 电流型“非”门电路

6-2-1 电路的工作原理

开关电路的最基本形式是“非”门电路，因此，在介绍电流型开关电路单元时，仍从“非”门电路着手。按照由特殊到一般的认识规律，通过一个具体例子来说明电流型“非”门电路的工作原理。

图6-2-1所示的是一基本电流型“非”门电路，它由两个晶体管 T_1 、 T_2 组成。输入信号加在 T_1 的基极，而 T_2 基极接有参考电源 E_0 ，输出信号由 T_1 或 T_2 的集电极取得。很显然，这与电压型“非”门电路在形式上具有很大的不同。

一、电路工作情况

1. 输入为低电平“0”状态时 当输入为低电平“0”状态时，即 $V_{b1}=0.5\text{V}$ ，由于 $V_{b2}=E_0=1\text{V}>V_{b1}$ （这是一种预先设置的参考电压），因而 T_2 抢先导通，这样使发射极 e 点电压 $V_e=V_{b2}-V_{be2}$

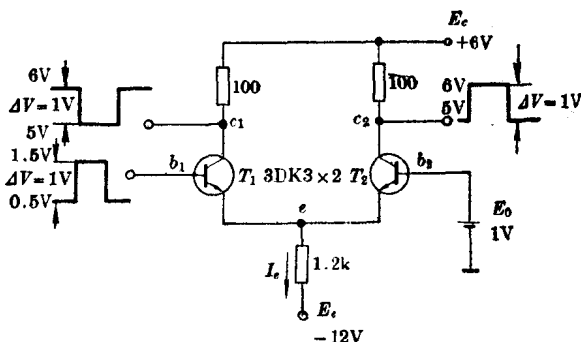


图 6-2-1 基本电流型“非”门电路

$=1-0.7=0.3\text{ V}$ 。因此,

$$I_e = \frac{12\text{ V} + 0.3\text{ V}}{1.2\text{ k}\Omega} \approx 10\text{ mA}. \quad (6-2-1)$$

由于 $V_e=0.3\text{ V}$ 、 $V_{b1}=0.5\text{ V}$, 对 T_1 来说, 虽然它的基极电压比发射极仅高 0.2 V , 但由于是硅管, 仍可保证截止。因此, 上面计算而得的电流 I_e 将全部由 T_2 提供, 即

$$I_{c2} = \alpha I_e \approx 10\text{ mA}. \quad (6-2-2)$$

这样, c_2 点电位

$$V_{c2N}^* = E_c - I_{c2}R_{c2} = 5\text{ V}. \quad (6-2-3)$$

由于 T_1 截止, 所以 $I_{c1}=0$, c_1 点电位则为:

$$V_{c1f}^{**} = E_c = 6\text{ V}. \quad (6-2-4)$$

由此可知, 当输入为“0”状态, 即 $V_{b1}=0.5\text{ V}$ 时, T_1 截止, 送出高电平“1”; 而 T_2 导通, 送出低电平“0”, 且由于 $V_{b2}=1\text{ V}$ 而 $V_{c2N}=5\text{ V}$, 显然 T_2 虽导通但没饱和。这是电流型电路要求之一。

2. 输入为高电平“1”状态时 当 $V_{b1}=1.5\text{ V}$, 则 $V_{b1} > V_{b2}$, 因此 T_1 抢先导通。这样,

$$V_e = 1.5\text{ V} - 0.7\text{ V} = 0.8\text{ V}, \quad (6-2-5)$$

$$I_e = \frac{12\text{ V} + 0.8\text{ V}}{1.2\text{ k}\Omega} = 10.6\text{ mA}. \quad (6-2-6)$$

* V_{c2N} 表示在 T_2 导通时的集电极电位, N 是导通意思。

** V_{c1f} 表示在 T_1 截止时的集电极电位, f 是截止意思。

由于 $V_e = 0.8 \text{ V}$, 而 $V_{b2} = 1 \text{ V}$, 虽然 T_2 的基极电压比发射极高 0.2 V , 对硅管来说足以保证 T_2 截止, 使得 I_e 全部由 T_1 提供, 因此,

$$I_{e1} = \alpha I_e \approx 10.6 \text{ mA}, \quad (6-2-7)$$

而

$$V_{c1N} = E_c - I_{e1} R_{c1} \approx 5 \text{ V}. \quad (6-2-8)$$

显然, T_1 导通, 但未进入饱和区。

从上面分析可以看出, 该电路具有二个输出端。当输入电压由低变到高 ($0.5 \sim 1.5 \text{ V}$), 即从“0”→“1”, T_1 集电极输出的 V_{c1} 则由高变到低 ($6 \sim 5 \text{ V}$), 因此, c_1 点的输出正好满足“非”门电路性能; c_2 点则是同相输出端。

同时还可以看到, 无论那一个管子导通, 所形成的发射极电流 I_e 几乎是一个常数 (在这里, 其值约 10.3 毫安)。这个电流受输入信号的控制, 一会接入 T_1 , 一会接入 T_2 , 好象有一开关在控制, 这就是电流型开关名称的由来。显然, 只要电压 E_c 的绝对值比发射极电压的变动值 $|\Delta V_e|$ (这里, V_e 由 0.8 V 变到 0.3 V , $\Delta V_e = 0.5 \text{ V}$) 大得越多, 这种恒流性能就越好。

二、电路工作的特点 从以上分析可以看到, 图 6-2-1 所示的电路实质上相当于一个工作在非线性状态的差分放大器, 但它满足“非”门电路的功能, 而且具有电流型开关电路的特点。

(i) 晶体管 T_1 和 T_2 都只工作在截止和放大区, 但电压 V_e 总是大于电压 V_b 。这就避免了晶体管因饱和而产生存贮电荷问题, 从而满足了电流型开关的第一个要求。

(ii) 开关信号电压跳变幅度 $\Delta V_i = 1 \text{ V}$ ($0.5 \sim 1.5 \text{ V}$), 输出电平跳变幅度 $\Delta V_o = 1 \text{ V}$ ($6 \sim 5 \text{ V}$)。这个上下电平的差值已经小到只能区分管子的导通和截止两种状态。集电极输出电平跳变幅度小, 不仅有利于开关电平的建立, 而且可以挑选很小的集电极负载电阻 R_o 。因此, 一般电流型开关电路的负载电阻总在几百欧姆的数量级, 这样又使输出回路的时间常数可以比一般饱和型电路大大减少。这些都与电流型开关的要求相吻合。

(iii) 虽然从电路的表面形式来看, 是一共发射极电路, 但是对于 T_2 来说, 由于基极接固定参考电源 E_0 , 对交流电来说是完全接地的, 并且输入信号通过 b_1 输入 T_2 发射极, 因此是一共基极电路; 对于 T_1 管来说, 由于基极输入信号的变化幅度很小(仅 1 伏), 在电路的整个工作过程(即与 T_2 抢夺电流的过程中), 可看作是由 T_2 的电流变化引起 e 点电压变化传递到 T_1 发射极的输入信号, 因此, T_1 也接近于共基极电路的运用。这就充分发挥了晶体管内在的频响特性。正是由于电流型开关的这一个要求, 才决定了它的电路形式必须具有两个管子。

采用集成技术制成的国产电流型“非”门电路, 如图 6-2-2 所示。这电路由于集成电路的特点, 只用到一种负电源 $E_0 = -5\text{V}$, 而 $E_c = 0\text{V}$ 。

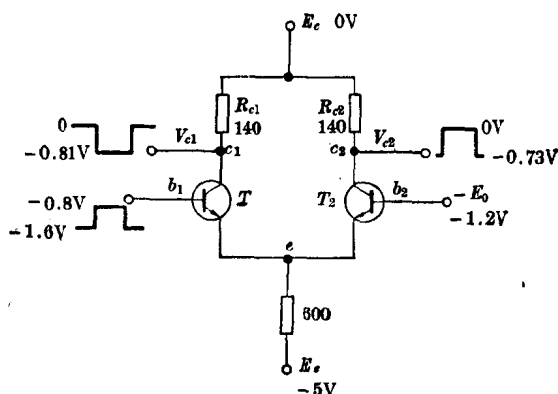


图 6-2-2 典型电流型“非”门电路

6-2-2 参考电压的获得

电流型“非”门电路的 T_2 基极须接恒定的参考电源 E_0 , 并且在整个工作过程中, 这电压的稳定性是很重要的。此电源电压当然可用专门的稳压电源来获得, 但在电流型开关电路中, 根据各级电流型开关电路配合的需要, 类似这种参考电压的种类将是很多的。如果每一种电源都配有稳压电源, 既不经济也不可能。事实

上,由于大多数参考电源的负载电流不大,因此可用简单的稳压方法来实现。下面介绍一些常用的参考电压的获得方法。

一、用稳压管获得参考电压
用稳压管获得参考电压的电路如图 6-2-3 所示。这是一般的稳压管稳压电路,挑选适当型号的稳压管,使得 $V_z = E_0$, 就可作为电流型开关电路中的参考电压 E_0 。

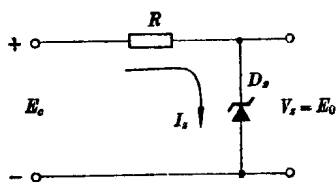
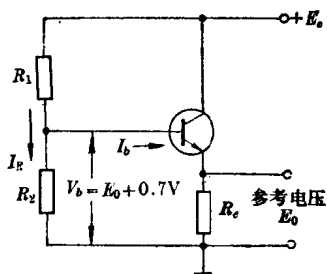


图 6-2-3 稳压管稳压电源

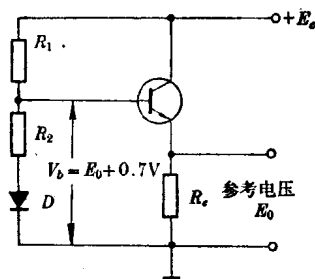
二、采用射极输出器获得参考电压 射极输出器通常被用作阻抗变换电路,这是由于它具有电流放大作用。另外,射极输出器还具有电平漂移作用,它的输出电平总比输入电平降低一个恒定电压(硅管为 0.7 伏)。因而只要提供一恒定电压源作射极输出器的输入,由于电流放大作用,就能得到电压恒定的电流源。这一恒定电压就可作为参考电压。

射极输出器输入电压一般可通过以下几种电路形式获得。

1. 电阻分压器电路 用电阻分压器获得射极输出器输入电压 V_b 的电路如图 6-2-4(a)所示。通过电阻 R_1 、 R_2 的分压,使射极输出器基极输入电压 $V_b = E_0 + 0.7\text{V}$, 通过射极输出器的电平漂移作用,在射极输出端获得参考电压 E_0 。在设计时,为了保证 V_b 的稳定,通常使流过电阻 R_1 、 R_2 的电流远大于基极电流,即 $I_R = (5 \sim 10)I_b$ 。



(a)



(b)

图 6-2-4 电阻分压器稳压电路

这电路虽然简单,但由于晶体管结电压 V_{be} 的负温度系数,使 E_0 的温度稳定性较差。为了减小温度对 E_0 的影响,可在基极回路里串一温度漂移特性与晶体管发射结相似的温度补偿二极管 D , 如图 6-2-4(b) 所示。利用 D 正向压降的温度系数来补偿晶体管发射结电压 V_{be} 的温度系数,使得参考电压 E_0 具有良好的温度稳定性。

2. 稳压管电路 用稳压管获得射极输出器输入电压 V_0 的电路如图 6-2-5 所示。适当地挑选稳压管型号,就能获得射极输出器的输入电压 $V_0 = V_z = E_0 + 0.7 \text{ V}$, 从而得到参考电压 E_0 。

这电路的优点是能送出较大的负载电流,缺点是必须挑选合适的稳压管,才能保证 $V_z = E_0 + 0.7 \text{ V}$ 。

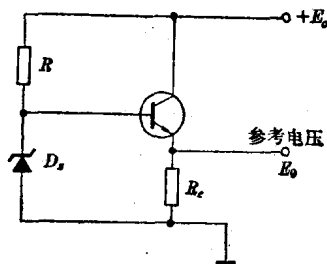


图 6-2-5 稳压管稳压电路

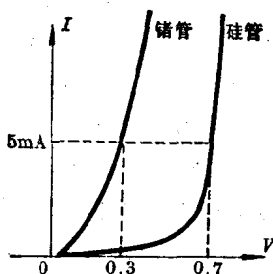


图 6-2-6 二极管伏安特性

三、用二极管正向压降作参考电压 由二极管正向伏安特性可知,只要二极管通有一定的正向电流(5毫安以上),其正向压降几乎与正向电流大小无关,如图 6-2-6 所示。应用这一关系,就可获得极低的参考电压(硅管约 0.7 伏,锗管约 0.3 伏)。

6-2-3 各种电平的设置

如前所述,电流型开关电路要设置各种电平(如输入信号电平 V_H 、 V_L , 参考电压 E_0 等),具体情况如图 6-2-7 所示。图中,没有括号的参数值是图 6-2-1 所示电路的参数值;括号内是图 6-2-2 所示电路参数值。

一、输入信号电平的设置 输入信号的跳变幅度 ($\Delta V = V_H - V_L$) 一般选择在 $0.5 \sim 1$ 伏之间。选取此值的原则是要足以区别晶体管的截止和导通两个状态。也就是, 输入为低电平 ($V_i = V_L$) 时, 保证晶体管 T_1 能截止; 输入为高电平 ($V_i = V_H$) 时, 能保证晶体管 T_1 导通。电流型开关电路要求开关幅度不宜太大, 因此, ΔV 的取值一般为 1V 左右。对硅管来说, ΔV 起码要大于 0.5 伏, 再小就不能区分晶体管截止和导通两个状态。例如: 图 6-2-1 所示的基本电流型“非”门电路, 取 $\Delta V = 1.5\text{V} - 0.5\text{V} = 1\text{V}$; 图 6-2-2 所示的典型电流型“非”门电路, 取 $\Delta V = -0.8\text{V} - (-1.6\text{V}) = 0.8\text{V}$ 。输入信号的高、低电平 V_H 、 V_L 主要由以下两个方面因素决定:

(i) 输入信号高电平 V_H 必须要小于集电极电源 E_c , 这样, 才能保证晶体管 T_1 导通时不处于饱和状态。

(ii) V_H 、 V_L 的数值须考虑到级间的耦合问题, 以便能以最简便的电路来实现级间联接。有关这个问题, 下面再讨论。

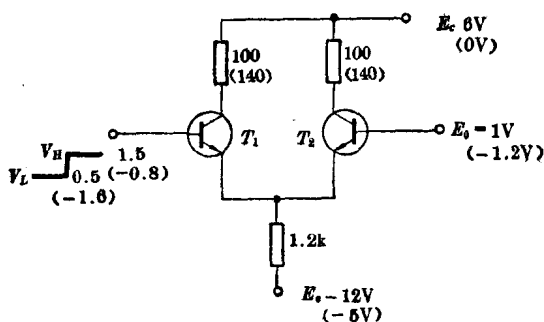


图 6-2-7 标有各种电平值的电流型“非”门电路

二、参考电压 E_o 值的设置 E_o 的大小要保证电路在翻转过程中, T_1 和 T_2 能轮流地抢夺电流。当 $V_i = V_L$ 时, 必须保证 T_2 抢夺电流而使 T_1 管截止, 这就要求 $E_o > V_L$; 而当 $V_i = V_H$ 时, 必须保证 T_1 从 T_2 中抢夺电流, 使 T_1 导通 T_2 截止, 这必须要求 $E_o < V_H$ 。从这两个方面要求可得:

$$V_L < E_0 < V_H. \quad (6-2-9)$$

通常取 E_0 为 V_H 和 V_L 的中间值, 即 $E_0 = V_H - \frac{\Delta V}{2} = V_L + \frac{\Delta V}{2}$,

其中 $\Delta V = |V_H - V_L|$.

三、输出电平的设置 电子设备中, 电流型“非”门电路并不是单独工作的, 经常是一个“非”门输出要带动一个或几个“非”门, 或者其他开关电路, 而电流型开关电路往往采用电平直接耦合, 也就是说, 这一级的输出电平必须是下一级的输入电平。因此, 在设计电路时, 首先应选择适当电路参数, 使输入电压的跳变幅度 ΔV 与输出电平的跳变幅度 ΔV_0 尽可能接近, 然后比较输入、输出逻辑电平 (V_{iH} 、 V_{oH} 或 V_{iL} 、 V_{oL}), 根据其差值选择适当的电平漂移器件, 使输入与输出电平相一致。获得电平漂移的方法通常有如下几种:

1. 射极输出器电平漂移 考虑输入、输出电平相一致的要求, 改进后的典型“非”门电路如图 6-2-8 所示。它根据射极输出器能产生约 0.8 伏电平漂移的特性, 使电路输入、输出的逻辑电平几乎一致。

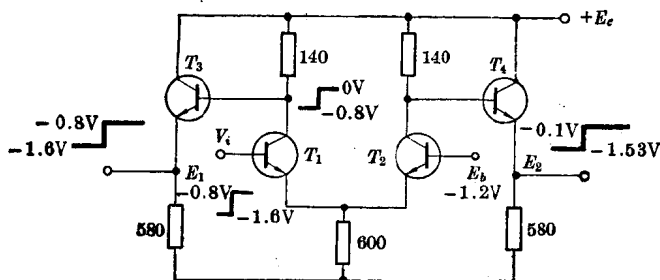


图 6-2-8 射极输出器电平漂移电流型“非”门电路

2. 稳压管电平漂移 若需要漂移的电平幅度较大, 射极输出器显然是不能胜任的。这时, 往往采用稳压管作为大幅度电平漂移的电路, 如图 6-2-9 所示。在图(a)中, A 点电平跳变为 $6 \rightarrow 5$ 伏 ($V_H = 6$ V, $V_L = 5$ V)。若下级开关电平为 $1 \rightarrow 0$ 伏, 选择 2CW12 ($V_z = 5$ V) 作耦合元件, 获得 5 伏电平漂移, 从而使 A 点与

下级开关电平相一致。但稳压管的输入阻抗较低,流经稳压管的电流势必会对 A 点的逻辑电平有影响,因此,在设计电路时必须事先把这种负载电流考虑在内,否则就必须提高耦合电路的输入阻抗。图(b)就是利用射极输出器实现阻抗变换的一个例子,这里整个电平漂移应包括稳压管及射极输出器的基压降(约 0.7 伏)。

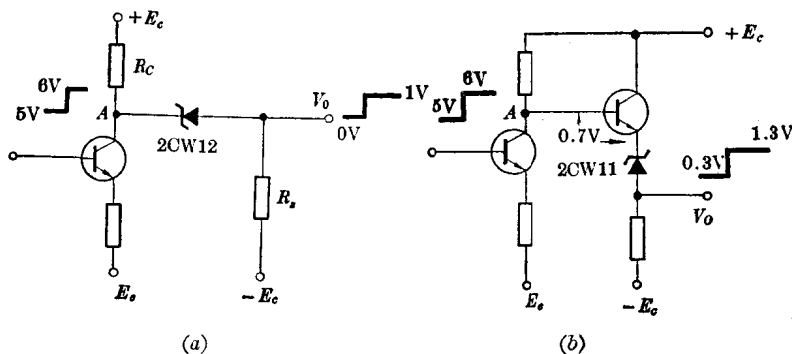


图 6-2-9 稳压管电平漂移

3. 二极管顺向压降电平漂移 如同用二极管顺向压降 V_D 作参考电压一样,硅管可得 0.7 伏(锗管 0.3 伏)电平漂移。如果所需电平漂移大于单只二极管顺向压降 V_D ,可将几只二极管串联使用。例如,两只硅二极管串联,可得 1.4 伏的电平漂移。

第三节 电流型“或非”门电路

“与非”、“或非”门电路是数字电路中极为重要的逻辑单元。在电压型开关电路中,通常以“与非”门电路作为最基本单元;而在电流型电路中,由电流型电路形式决定采用“或非”门电路单元。最基本“或非”门电路形式如图 6-3-1 所示,它与图 6-2-1 所示电流型“非”门电路的差别仅在 T_1 的集电极、发射极间并接了一只同类型的晶体管 T_3 。由于 T_1 与 T_3 的集电极与发射极都处在同样地位,因此 T_3 的基极 A 端与 T_1 的基极 B 端,同样具有与 T_2 抢夺电流的能力。也就是说,只要 A 、 B 输入端中任何一端处于高电平