

A decorative graphic on the left side of the slide, consisting of overlapping blue, red, and yellow squares with a black crosshair.

数字系统设计--TTL

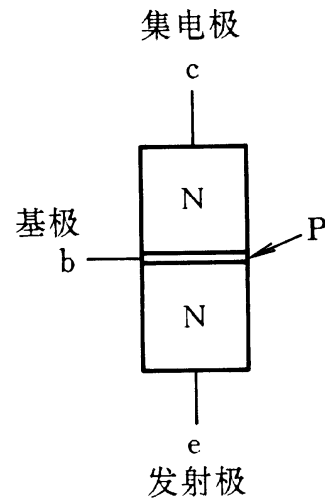
刘 鹏

浙江大学

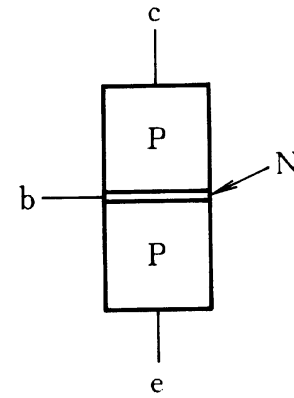
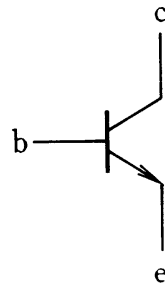
信息与电子工程学院

liupeng@zju.edu.cn

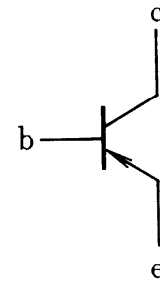
双极型三极管的开关特性



(a)

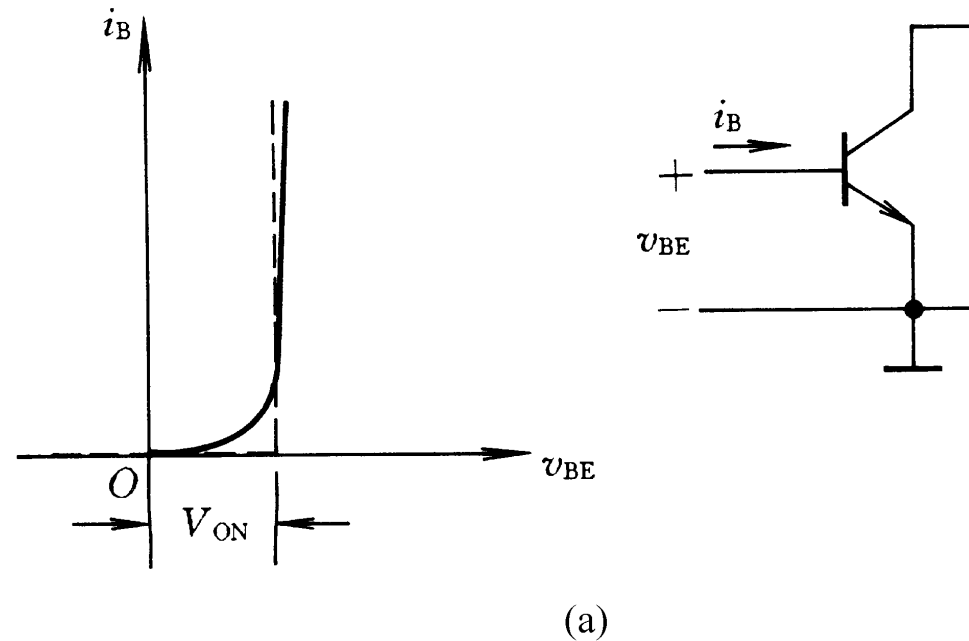


(b)



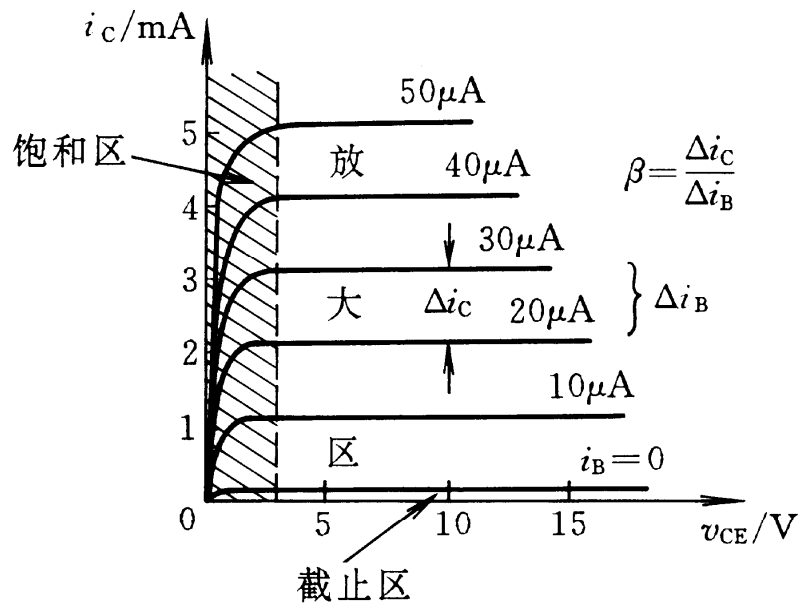
工作时有电子和空穴两种载流子参与导电过程

双极型三极管的输入特性曲线

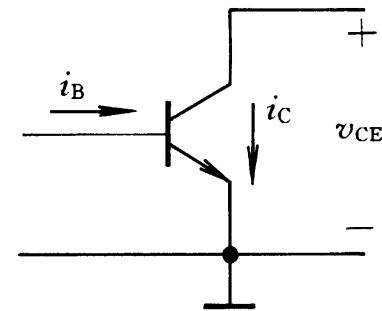


以基极 **B** 和发射极 **E** 之间的发射结作为输入回路，则可以测出表示输入电压 V_{BE} 和输入电流 i_B 之间关系的特性曲线

双极型三极管的输出特性曲线

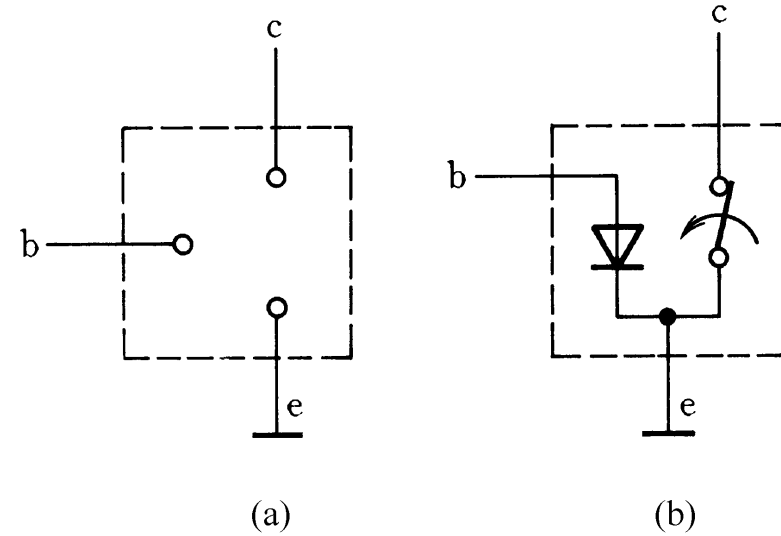
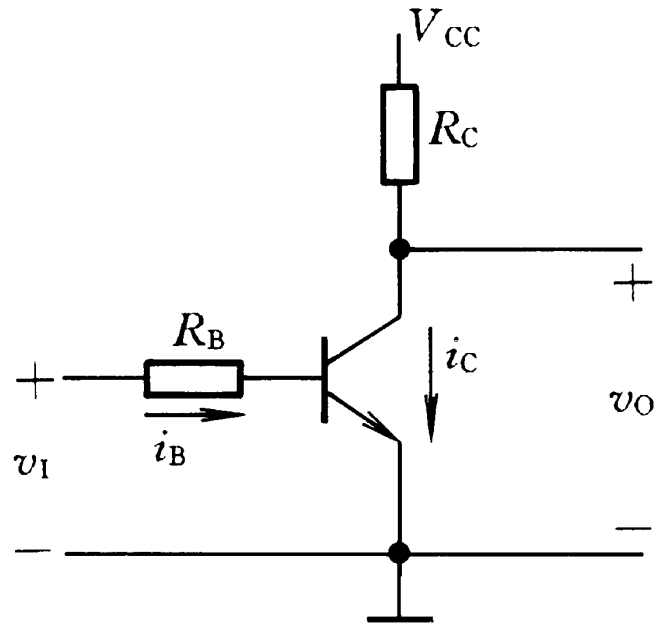


(b)



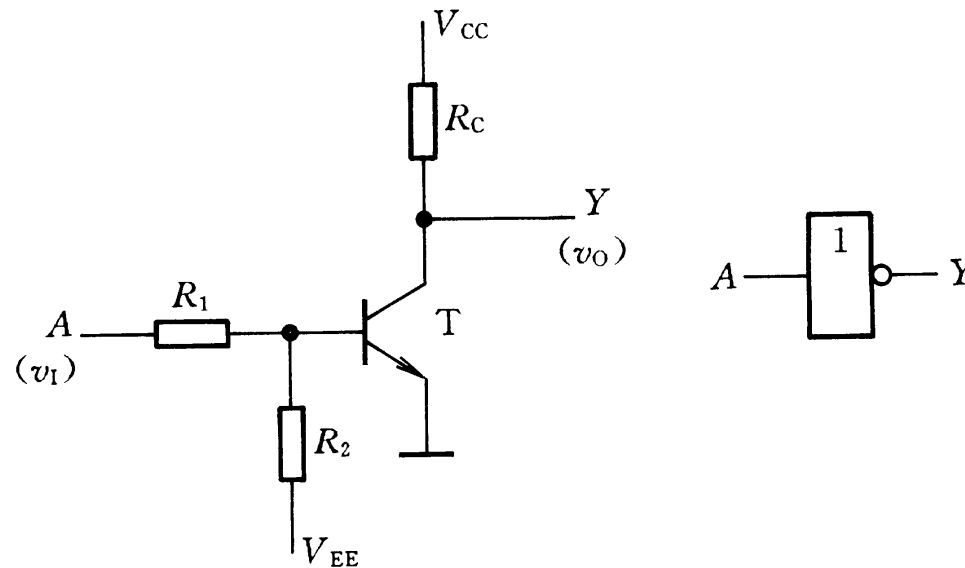
以集电极 **C** 和发射极 **E** 之间的回路作为输出回路，则可以测出在不同 i_B 值下表示集电极电流 i_C 和集电极电压 V_{CE} 之间的关系曲线

双极型三极管的基本开关电路



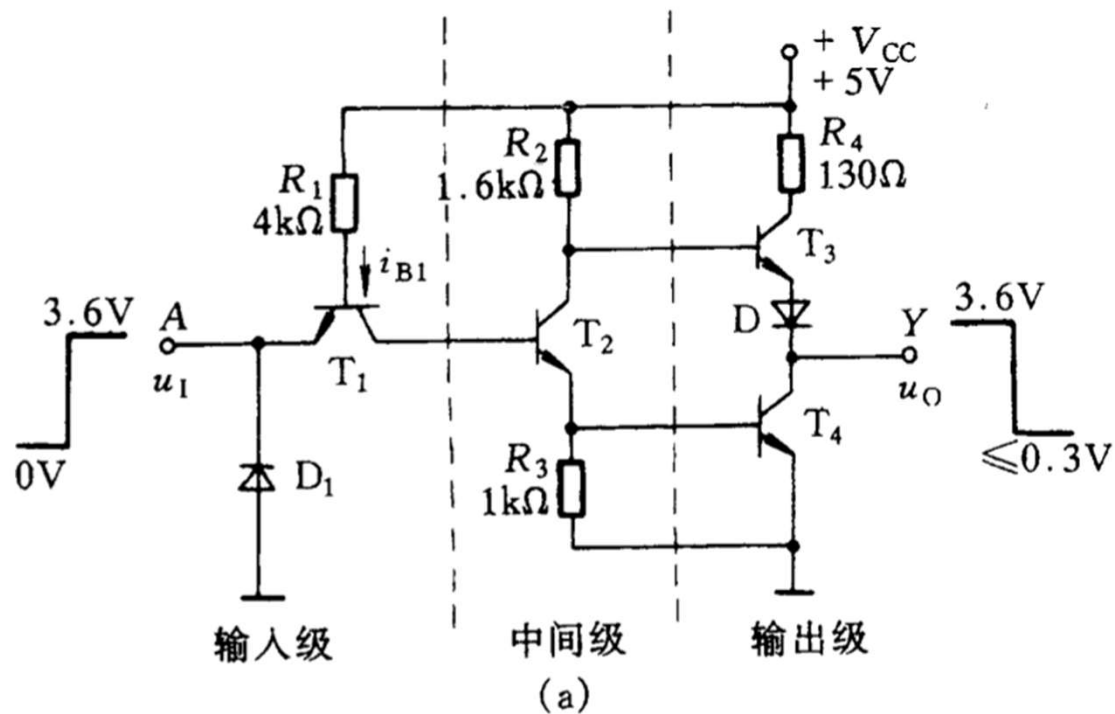
双极型三极管的开关等效电路
(a)截止状态 (b)饱和导通状态

三极管非门（反相器）



- 接入电阻 R_2 和负电源 V_{EE} , 使三极管可靠地截止
- 当输入信号为高电平时, 保证 $I_B > I_{BS}$, 工作在深饱和状态, 三极管输出电平接近于零

TTL反相器电路结构



输入级: 由 T_1 , R_1 , D_1 组成, D_1 是保护二极管, 防止输入端电压过低

倒相级: 由 T_2 , R_2 , R_3 组成, T_2 集电极输出驱动 T_3 , 发射极输出驱动 T_4

输出级: 由 T_3 , T_4 , R_4 , D 组成

工作条件:

三极管电流放大系数 β 为20, 电源电压 $V_{CC} = 5V$

输入信号的高低电平为 $V_{IH} = 3.6V$, $V_{IL} = 0.2V$

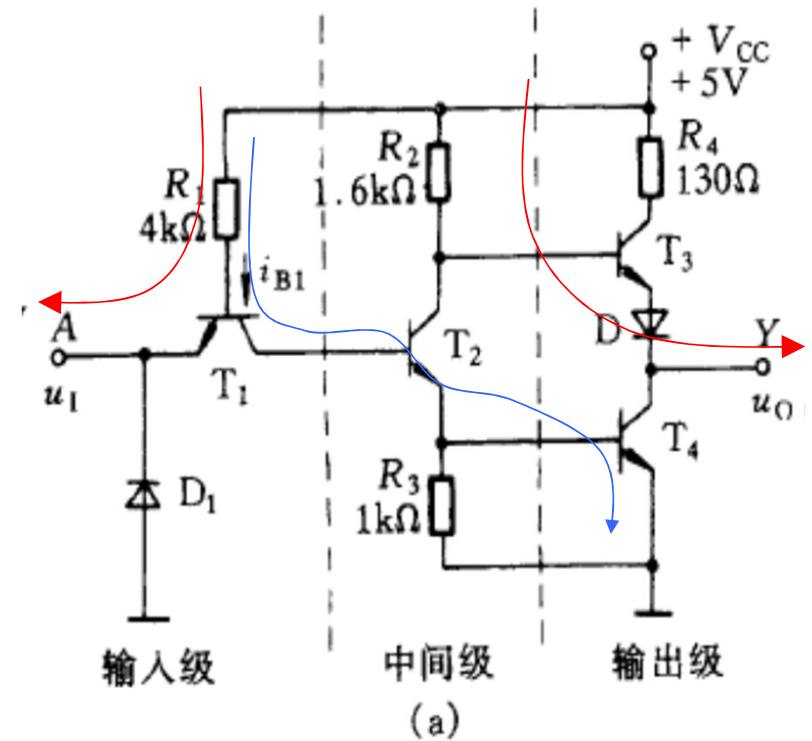
开启电压 $V_{ON} = 0.7V$

TTL反相器工作原理

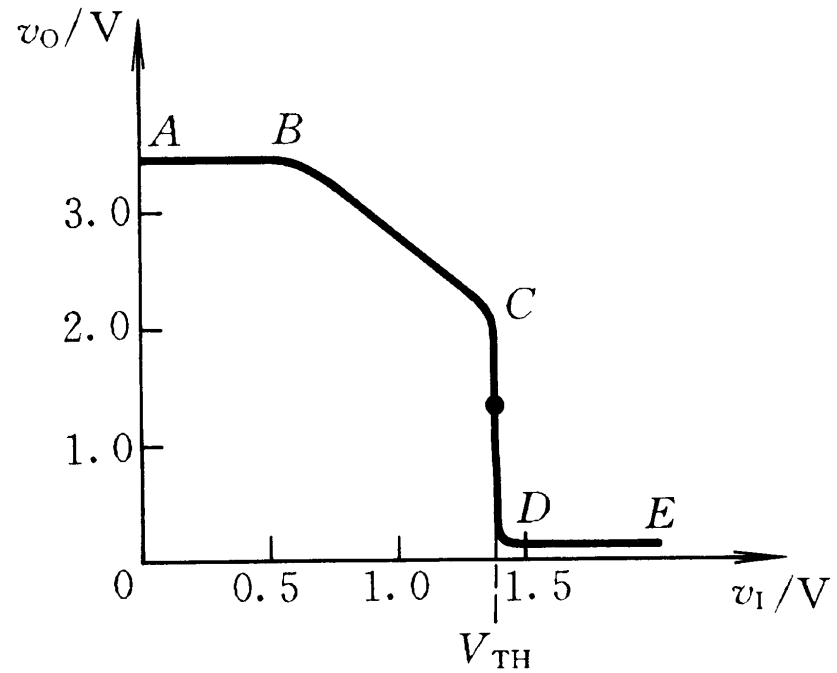
■ 定性分析

- $V_I = V_{IL} = 0.2V$, T_1 基极电流 i_{B1} 流入发射极, 即由反相器输入端流出, 因此 $i_{B2} \approx 0$, T_2 截止, T_4 也截止. T_3 和 D 将导通, 输出为高电平 V_{OH}
- $V_I = V_{OH} = 3.6V$, T_1 倒置, 即发射极和集电极颠倒; i_{B1} 流入 T_2 基极, 使 T_2 饱和导通, 从而 T_4 饱和导通, T_3 和 D 截止, 输出为低电压 V_{OL}

■ 定量分析



TTL反相器的电压传输特性



AB:截止区

BC:线性区

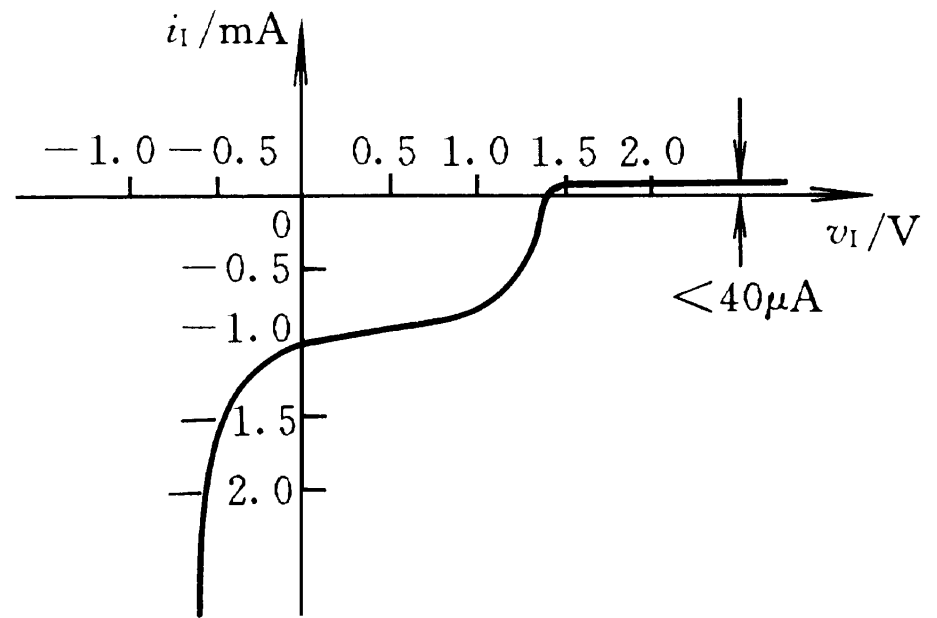
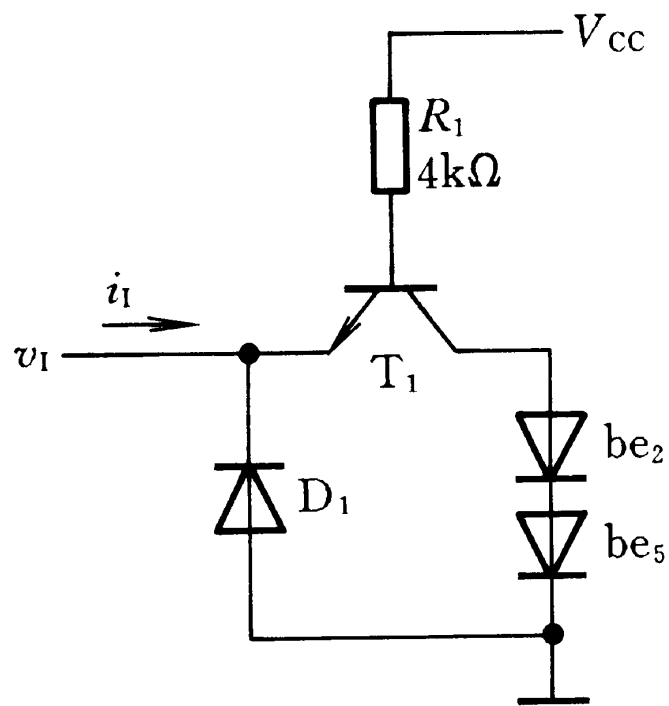
CD:转折区

DE:饱和区

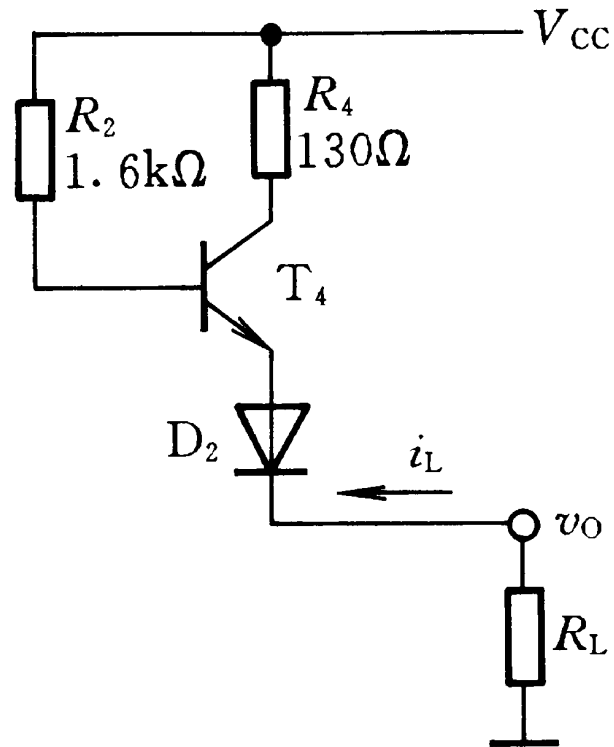
阈值电压/
门槛电压

TTL反相器的输入特性

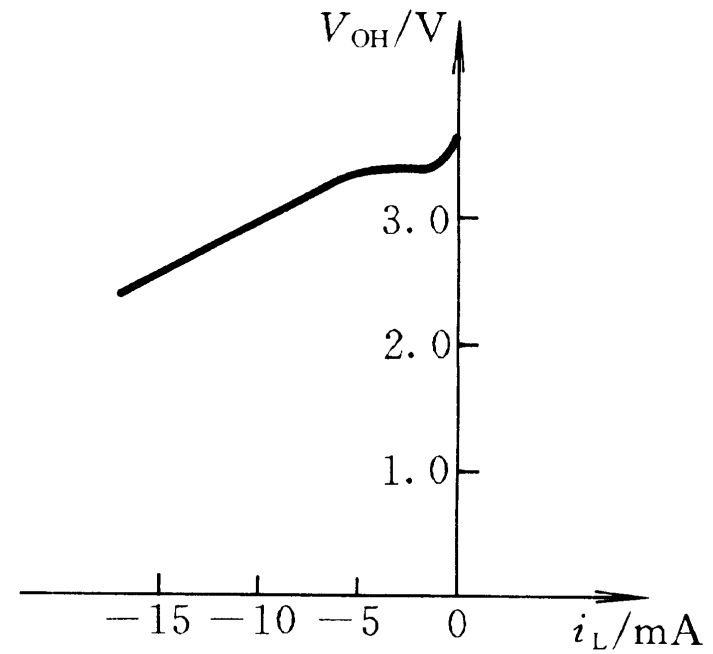
输入伏安特性曲线：反映输入电流 i_i 和电压 V_i 关系的曲线



TTL反相器输出特性

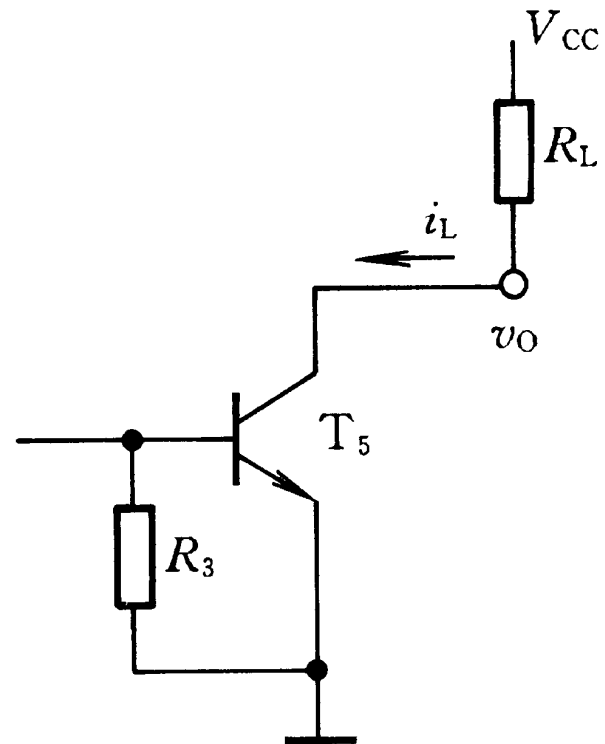


TTL反相器高电平输出等效电路

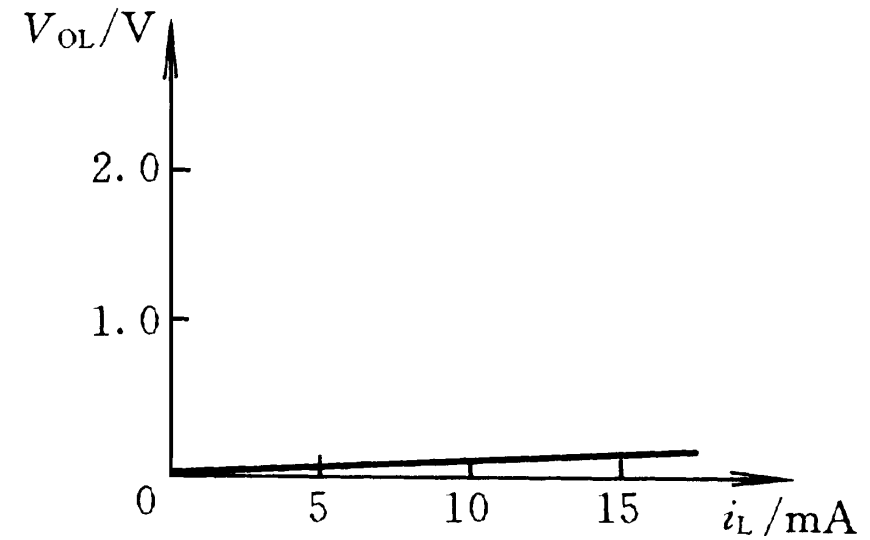


TTL反相器高电平输出特性

TTL反相器输出特性

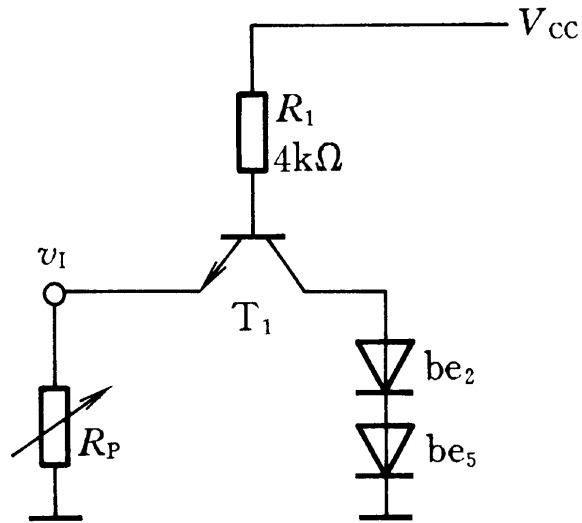


TTL反相器低电平输出等效电路



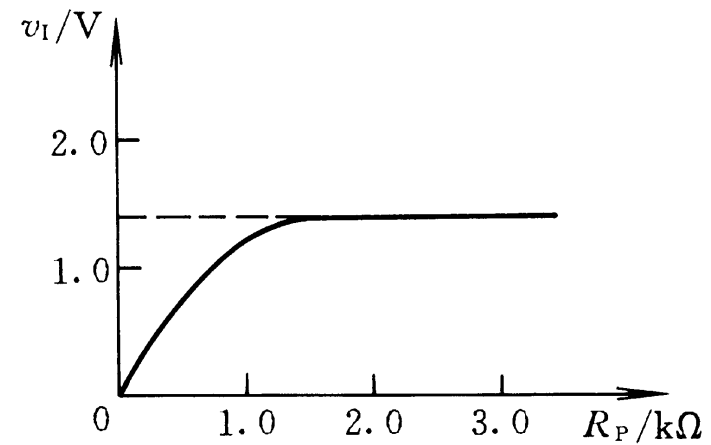
TTL反相器低电平输出特性

输入端负载特性



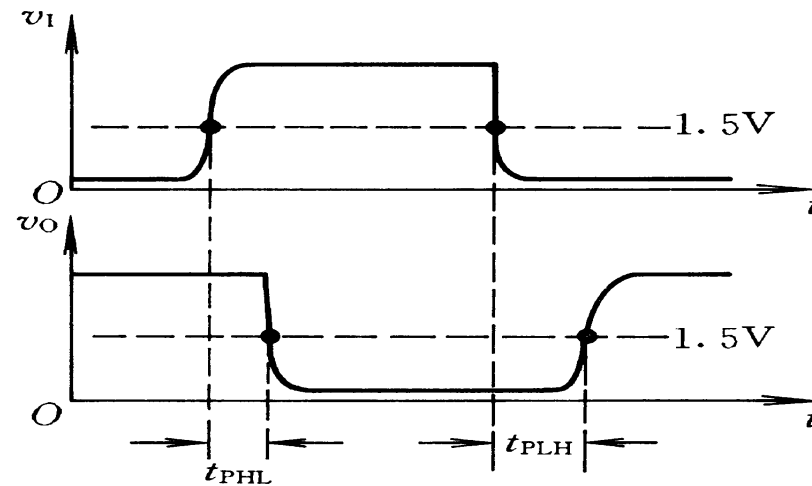
TTL反相器输入端经电阻接地时的等效电路

$$V_i = (V_{CC} - V_{BE1}) R_P / (R_1 + R_P)$$



TTL反相器输入端负载特性

传输延迟时间

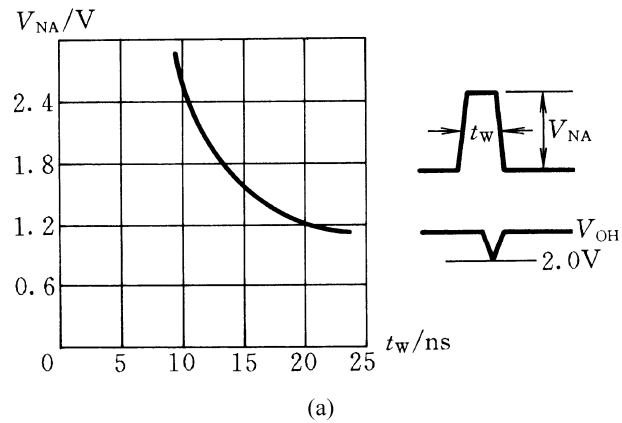


t_{PHL} : 输出电压由高电平变为低电平的传输延迟时间, 从 V_i 波形上升沿的中点到 V_o 波形下降沿的中点的延迟时间

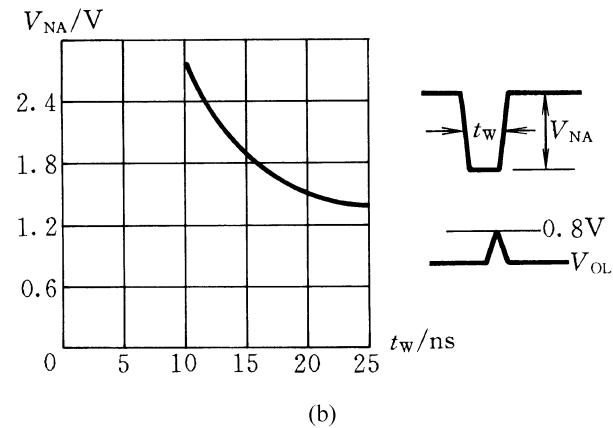
t_{PLH} : 输出电压由低电平变为高电平的传输延迟时间, 从 V_i 波形下降沿的中点到 V_o 波形上升沿的中点的延迟时间

t_{pd} 平均传输延迟时间 $t_{pd} = (t_{PHL} + t_{PLH})/2$

TTL反相器的交流噪声容限



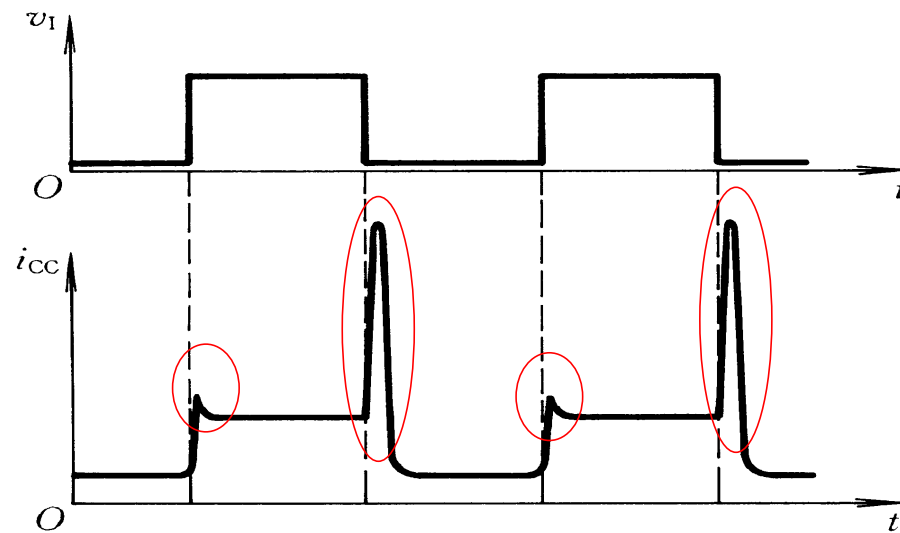
(a) 正脉冲噪声容限



(b) 负脉冲噪声容限



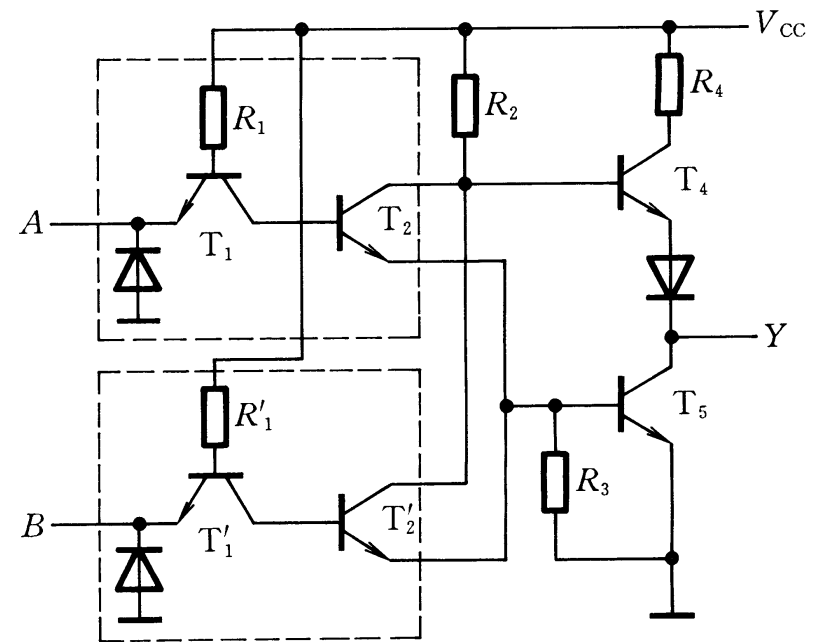
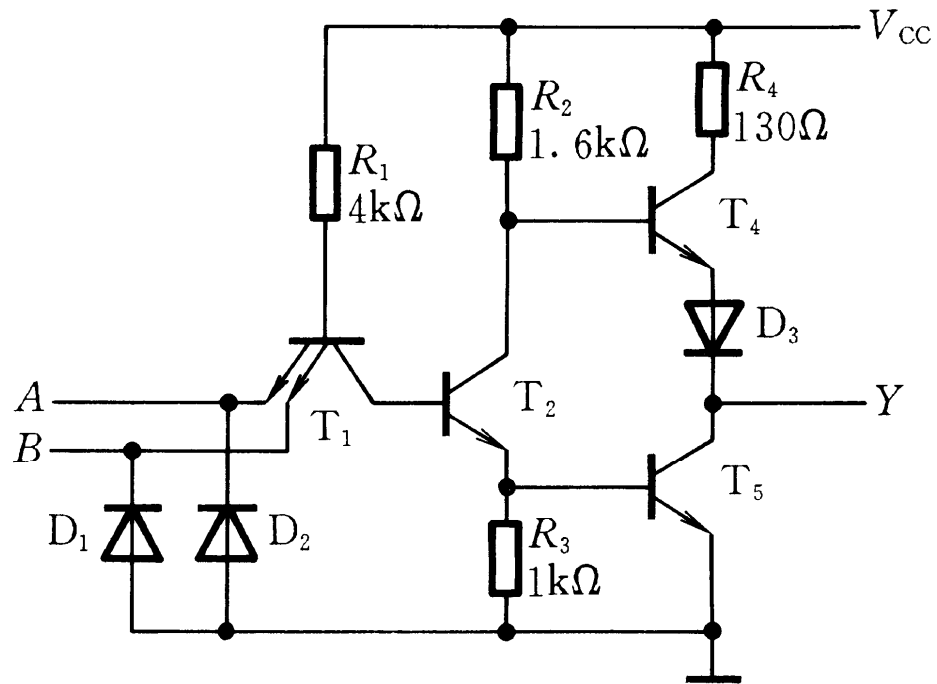
TTL反相器的电源动态尖峰电流



电源尖峰电流带来的影响:

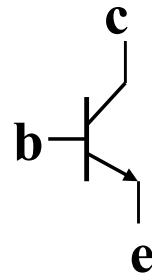
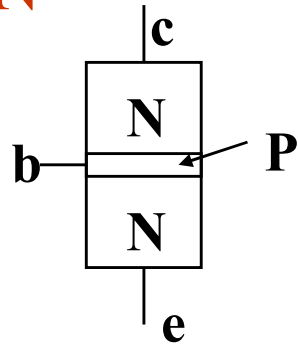
- 使电源的平均电流增加
- 尖峰电流将通过电源线、地线以及电源的内阻形成一个系统内部的噪声源

TTL与非门/或非门电路

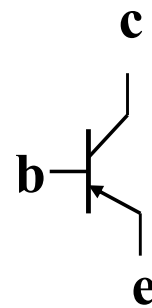
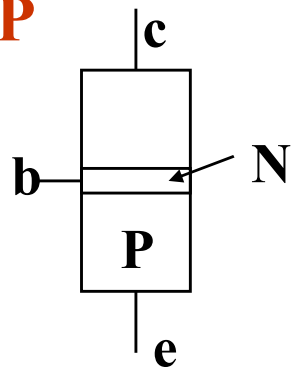


半导体三极管结构

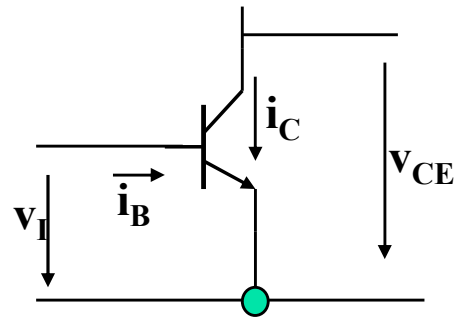
(a) NPN



(b) PNP



三极管输出特性



饱和区

特点:

- (a) $i_B > 0$; $i_C/i_B < \beta$
- (b) 发射结和 集电结都**正偏**
- (c) $V_{CE} < 0.7V$ 且 i_B 一定时,
 $i_C \downarrow$, $V_{CE} \downarrow$

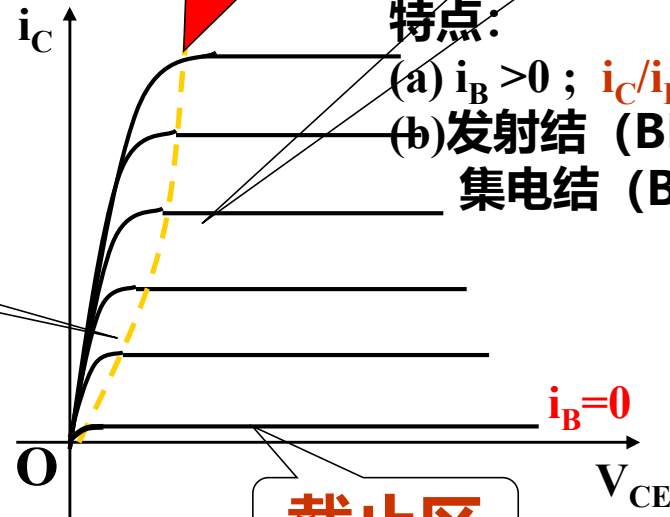
$i_C = 0$ 时, $V_{CE} \approx 0$

临界饱和线

放大区

特点:

- (a) $i_B > 0$; $i_C/i_B = \beta$
- (b) 发射结 (BE) 正偏
集电结 (BC) 反偏

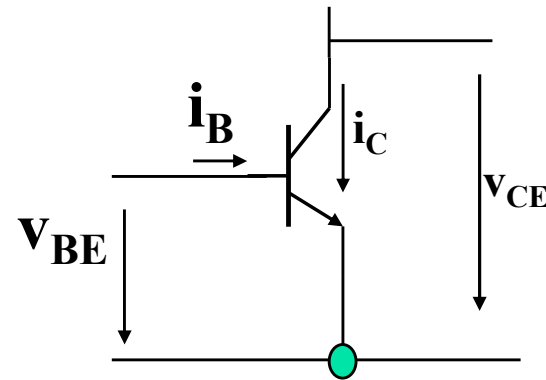
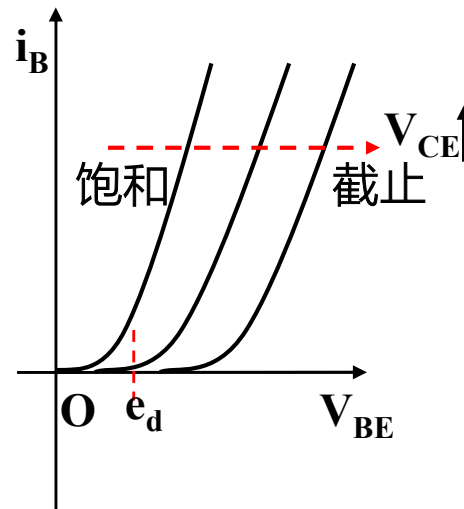


截止区

特点:

$$i_B = 0; i_C \approx 0$$

三极管输入特性

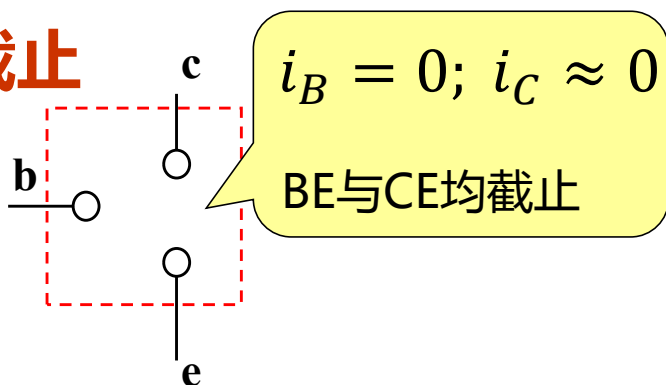


因为，BE为一个PN结，所以输入特性类似二极管特性，
但受 V_{CE} 影响：

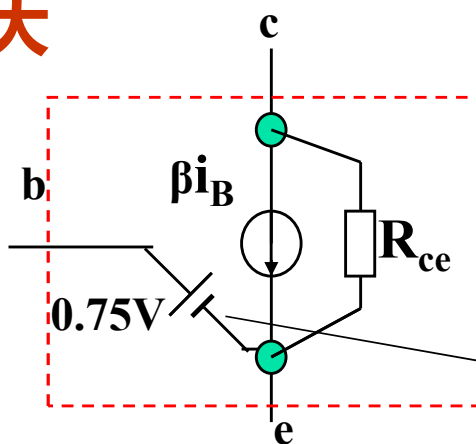
i_B 一定时， $V_{CE} \uparrow$ ， $V_{BE} \uparrow$

等效电路

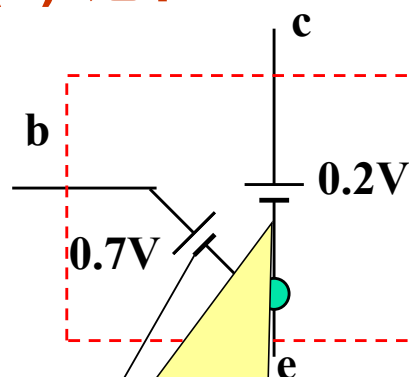
(1) 截止



(2) 放大



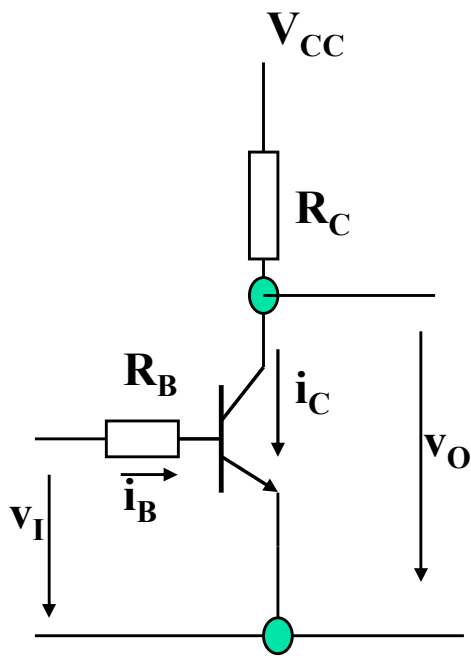
(3) 饱和



V_{CE} 与饱和深度有关, 平均值为 $0.2V$

与 V_{CE} 有关, V_{BE} 不同, 计算时都可用 $0.7V$ 近似

三极管的基本开关电路的计算



(1) $v_I < V_{on} (0.7V)$ 时, $i_B = 0$: 截止

(2) $v_I > V_{on} (0.7V)$ 时, $i_B > 0$: 导通

饱和? 放大?

方法1: 求临界饱和基极电流 I_{BS}

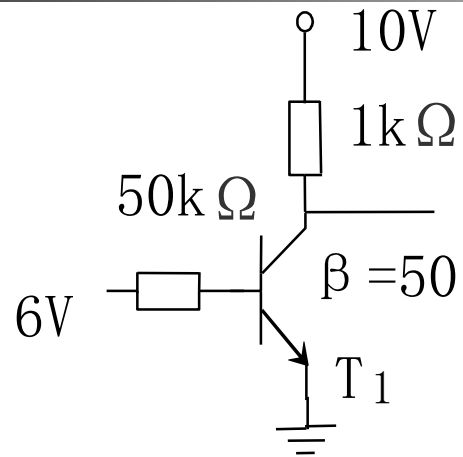
• $i_B > I_{BS}$: 饱和
• $i_B < I_{BS}$: 放大

$$I_{BS} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{\beta \bullet R_C} \approx \frac{V_{CC}}{\beta \bullet R_C}$$

方法2: 假设放大, 验证是否正确?

(计算 V_{CE} 值: $V_{CE} > 0.7V$, 放大, 否则饱和)

例1：判断三极管T的状态



V_i 大于 0.7V, 导通

$$i_B \approx \frac{6V - 0.7V}{50K\Omega} = 0.106mA$$

$$I_{BS} \approx \frac{10V}{50 \times 1K\Omega} = 0.2mA$$

$$\because i_b < I_{BS} \quad \therefore \text{放大状态}$$

例2：判断三极管T的状态

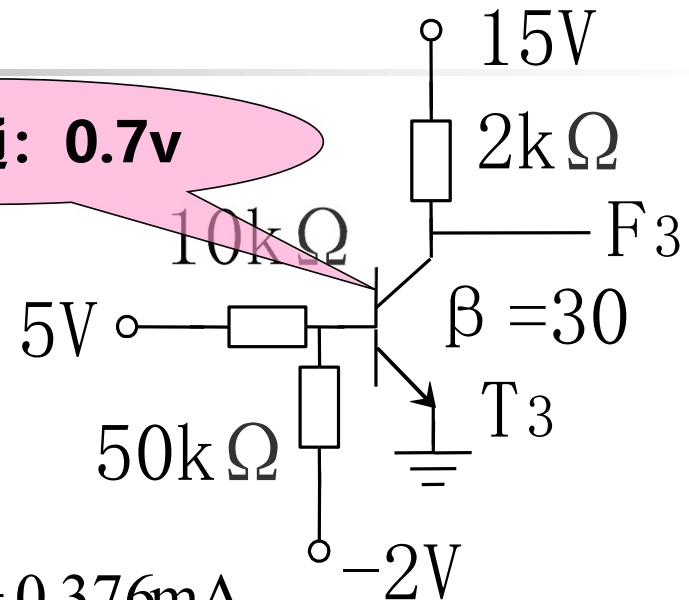
首先，判断导通？截止？

$$i_B \approx \frac{5V - 0.7V}{10K\Omega} - \frac{0.7V - (-2V)}{50K\Omega} = 0.376mA$$

$$I_{BS} \approx \frac{15V}{30 \times 2K\Omega} = 0.25mA$$

$\because i_b > I_{BS} \quad \therefore$ **饱和**状态

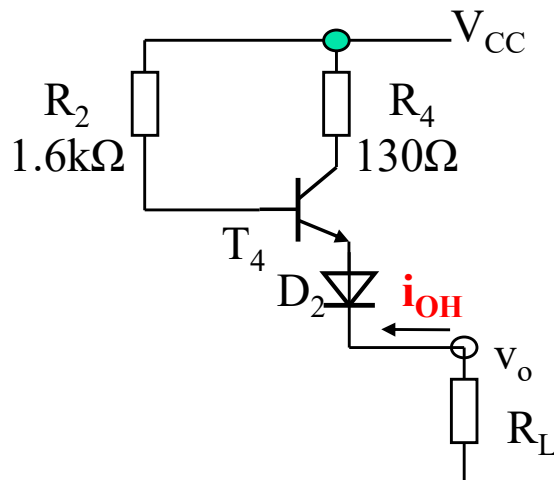
假设导通：0.7v



$i_B > 0$
假设成立

TTL反相器输出特性

1. 高电平输出特性



• 最大高电平输出电流
(最大拉电流)

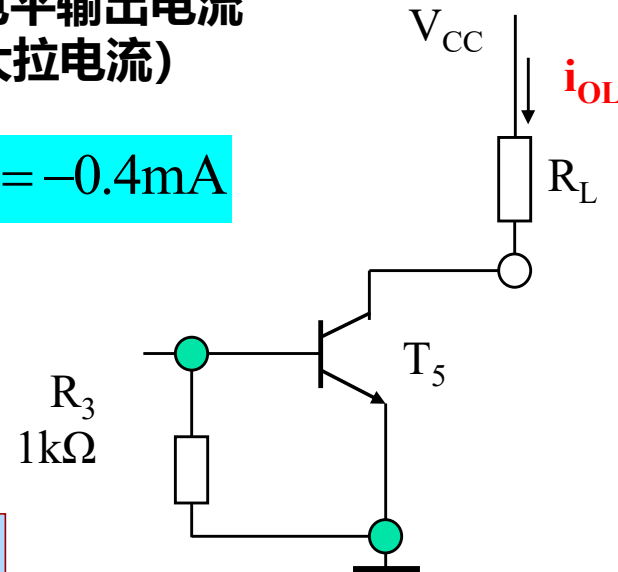
$$I_{OH} = -0.4\text{mA}$$

2. 低电平输出特性

• 最大低电平输出电流
(最大灌电流)

$$I_{OL} = 16\text{ mA}$$

假定输入电流 I_i 流入 T_1 发射极时方向为正, 反之为负



注意：高、低电平驱动电阻负载能力不同

定量估算

(1) $u_1 = U_{1L} = 0 \text{ V}$ 时

$$u_{B1} = u_{BE1} = 0.7 \text{ V}$$

$$i_{B1} = (V_{CC} - u_{B1}) / R_1 = \frac{5 - 0.7}{4} \text{ mA} \approx 1.1 \text{ mA}$$

T_2 基极不可能供给 T_1 集电极以电流，因为在正常情况下稳态时， i_{B2} 是不可能向外流的，即

$$i_{C1} = 0, I_{BS1} = 0, i_{B1} \gg I_{BS1}$$

因此 T_1 深度饱和，故

$$u_{CE1} = U_{CES1} \approx 0 \text{ V}$$

$$u_{B2} = u_1 + u_{CE1} = u_1 + U_{CES1} \approx 0 \text{ V}$$

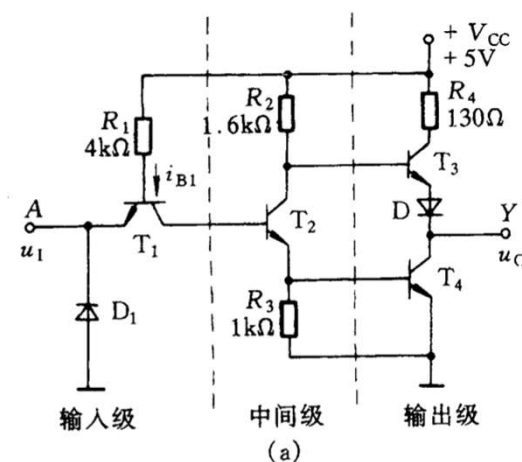
所以 T_2 、 T_4 截止， T_3 、 D 导通， T_3 工作在射极输出状态。由于 T_4 截止，只有很小的穿透电 I_{CEO}

流过，因此 i_{B3} 非常小，故

$$u_{B3} = V_{CC} - i_{B3} R_2 \approx V_{CC} = 5 \text{ V}$$

$$u_O = u_{B3} - u_{BE3} - u_D = (5 - 0.7 - 0.7) \text{ V} = 3.6 \text{ V}$$

输出为高电平。



定量估算

(2) $u_1 = U_{IH} = 3.6 \text{ V}$ 时

若假定 T_1 发射结仍正向导通, 则

$$u_{B1} = u_1 + u_{BE1} = (3.6 + 0.7) \text{ V} = 4.3 \text{ V}$$

看一看 T_1 集电结、 T_2 和 T_4 发射结这三个 PN 结的情况, 若 $u_{B1} = 4.3 \text{ V}$, 即从 T_1 基极到地有 4.3 V 压降, 那么三个 PN 结, 每一个上面将会有 1.3 V 多一点的正向压降, 所以它们必然都导通, 从而使

$$u_{B1} = u_{BC1} + u_{BE2} + u_{BE4} = (0.7 + 0.7 + 0.7) \text{ V} = 2.1 \text{ V}$$

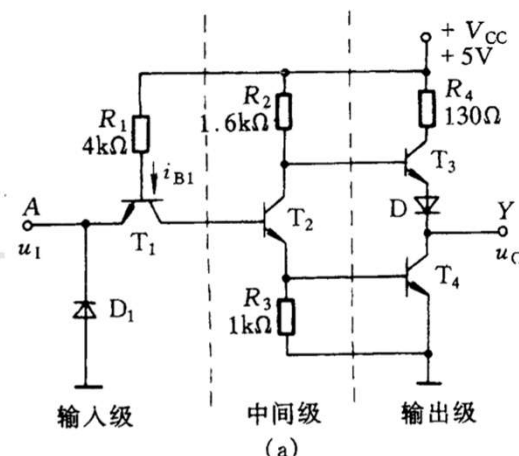
即 u_{B1} 被钳位在 2.1 V , T_1 发射结正向导通的假定不成立。此时, 由于

$$u_{E1} = 3.6 \text{ V}, u_{B1} = 2.1 \text{ V}, u_{C1} = u_{BE2} + u_{BE4} = (0.7 + 0.7) \text{ V} = 1.4 \text{ V}$$

使 T_1 发射结反向偏置、集电结正向偏置, 工作在倒置状态——集电极和发射极颠倒使用。 T_1 倒置时, 电流放大系数 β_i 很少, 在 0.02 左右。因此 T_1 、 T_2 基极电流

$$i_{B1} = (V_{CC} - u_{B1}) / R_1 = \frac{(5 - 2.1)}{4} \text{ mA} \approx 0.725 \text{ mA}$$

$$i_{B2} = i_{B1} + \beta_i i_{B1} = (0.725 + 0.02 \times 0.725) \text{ mA} \approx 0.74 \text{ mA}$$



定量估算

假设 T_2 饱和导通，则

$$u_{C2} = u_{CES2} + u_{BE4} = (0.3 + 0.7)V = 1V$$

$u_{B3} = u_{C2} = 1V$ ，即 T_3 基极对地的电压只有 $1V$ ，显然 T_3 、 D 将截止。故

$$I_{CS2} = (V_{CC} - u_{C2}) / R_2 = \frac{(5 - 1)}{1.6} \text{mA} = 2.5 \text{mA}$$

$$I_{BS2} = I_{CS2} / \beta_2 = \frac{2.5}{20} \text{mA} = 0.125 \text{mA}$$

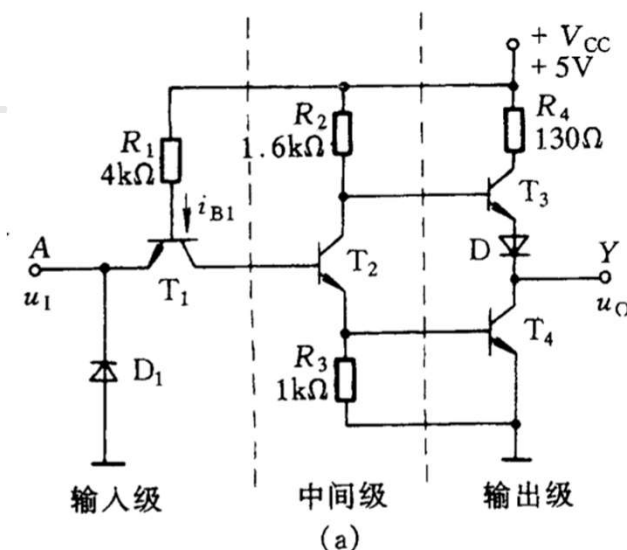
因为 $i_{B2} > I_{BS2}$ ，所以 T_2 饱和的假设成立， T_3 、 D 截止的推论也是正确的。
 T_4 的工作情况：

$$i_{B4} = i_{E2} - i_{R3}$$

$$i_{E2} = i_{B2} + I_{CS2} = (0.74 + 2.5) \text{mA} = 3.24 \text{mA}$$

$$i_{R3} = u_{E2} / R_3 = u_{BE4} / R_3 = \frac{0.7}{1} \text{mA} = 0.7 \text{mA}$$

$$i_{B4} = i_{E2} - i_{R3} = (3.24 - 0.7) \text{mA} = 2.54 \text{mA}$$



由于 T_3 、 D 是截止的，故

$$I_{CS4} = 0, I_{BS4} = 0$$

$$i_{B4} \gg I_{BS4}$$

所以 T_4 深度饱和， V_o 为低电平

$$u_o = U_{CES4} \leq 0.3V$$