

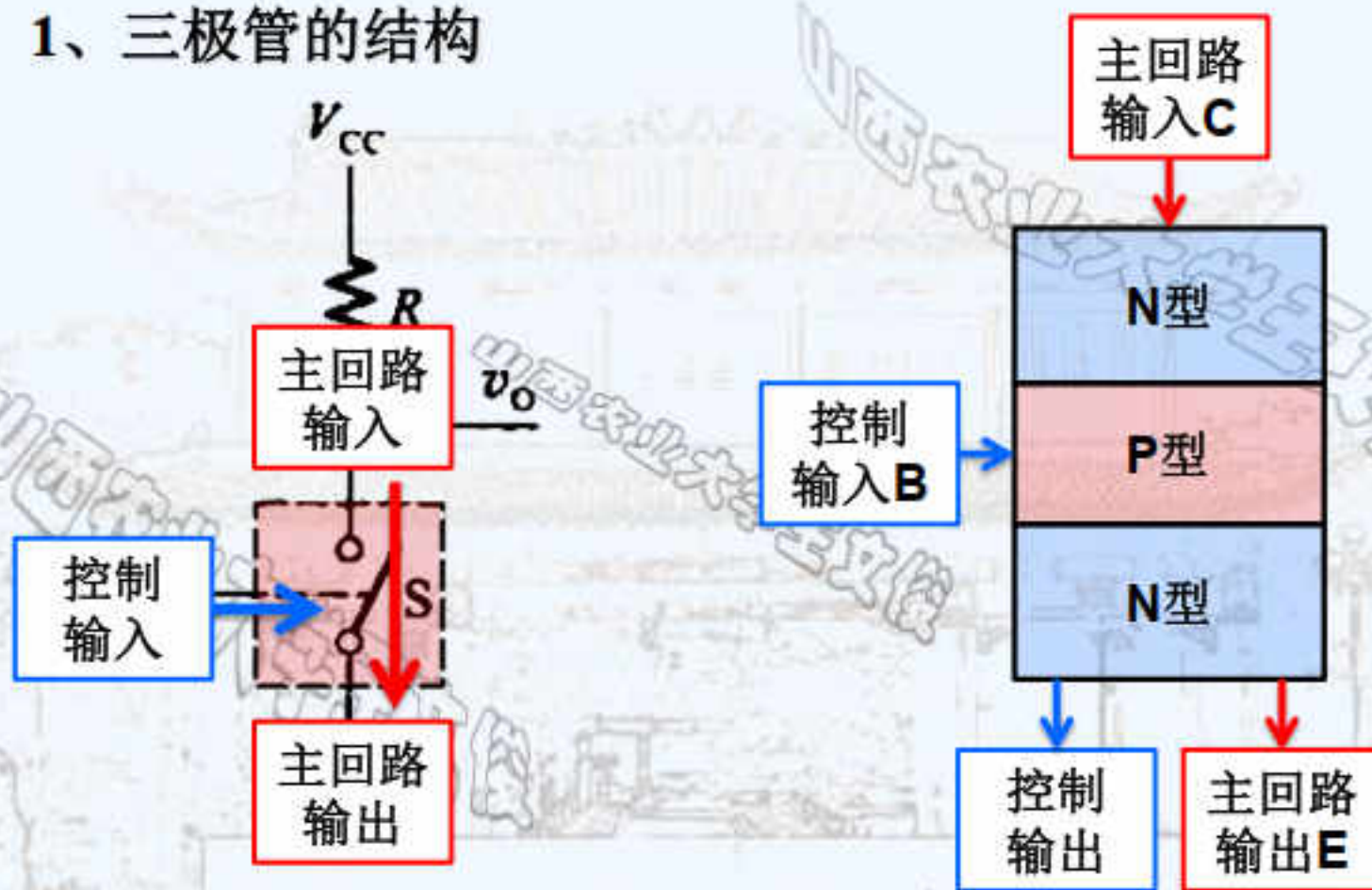
# 第三章 门电路（三）

——王文俊

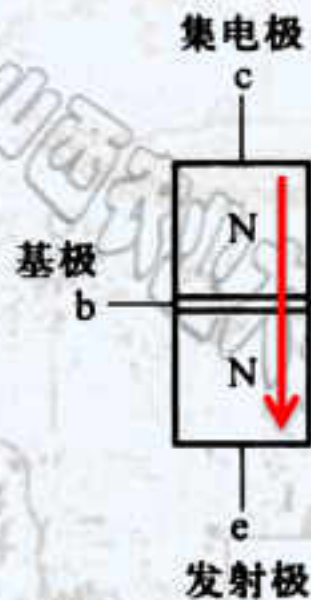
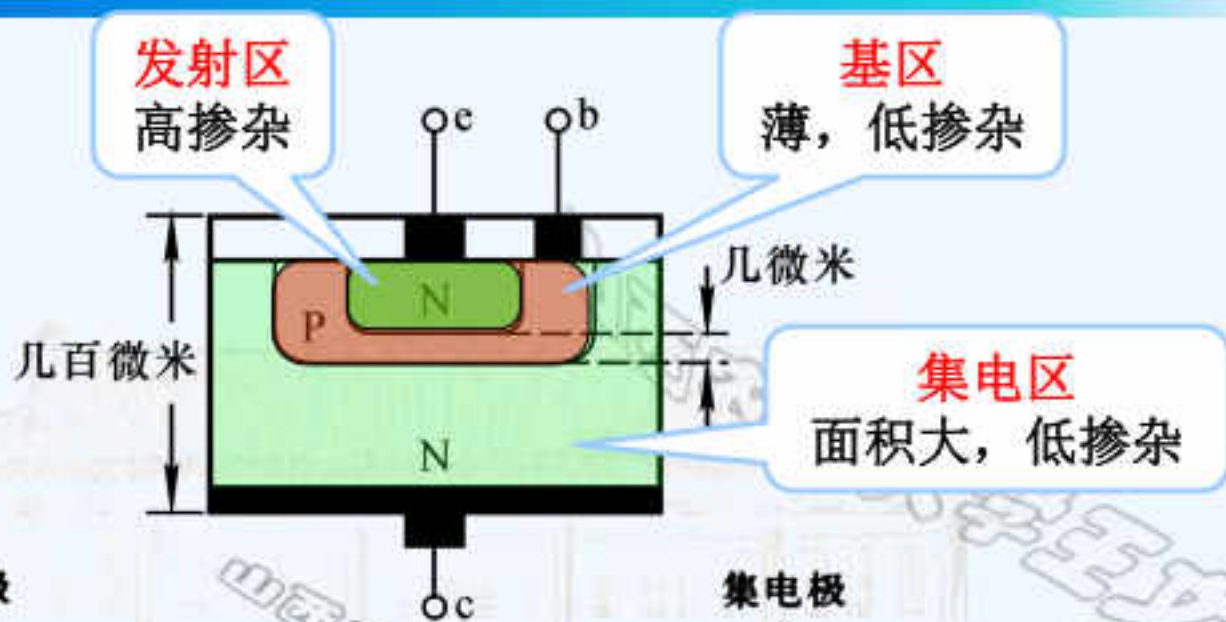
山西农业大学

# 十五、三极管

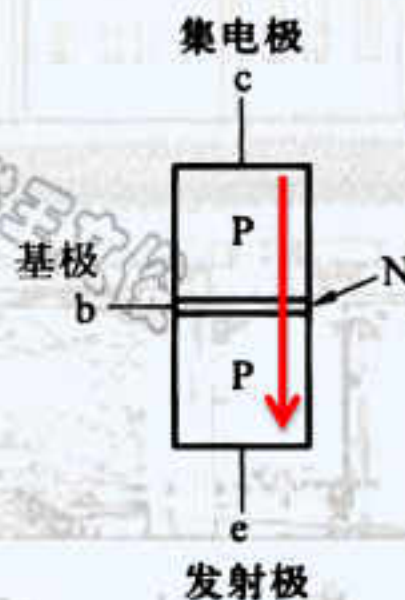
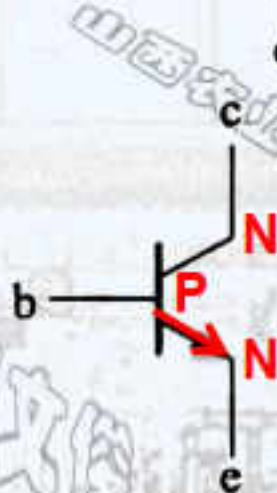
## • 1、三极管的结构



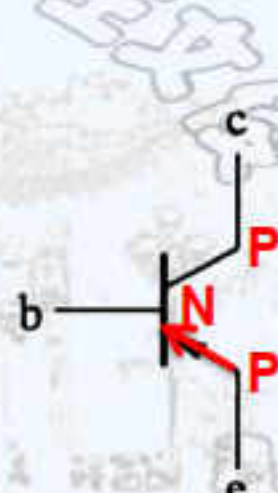
三个电极：基极（**Base**）、集电极（**Collector**）、发射极（**Emitter**）



NPN型三极管

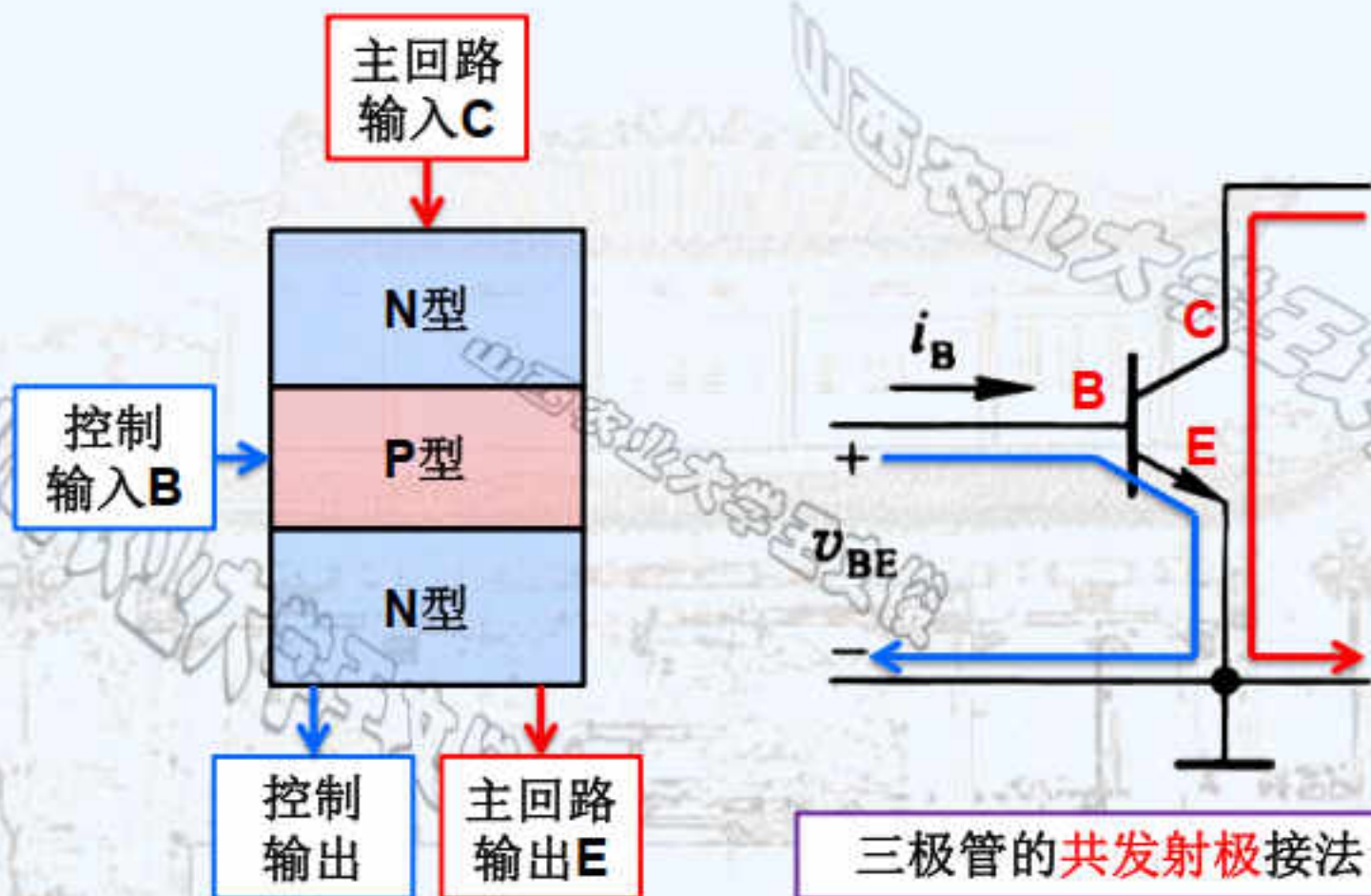


PNP型三极管

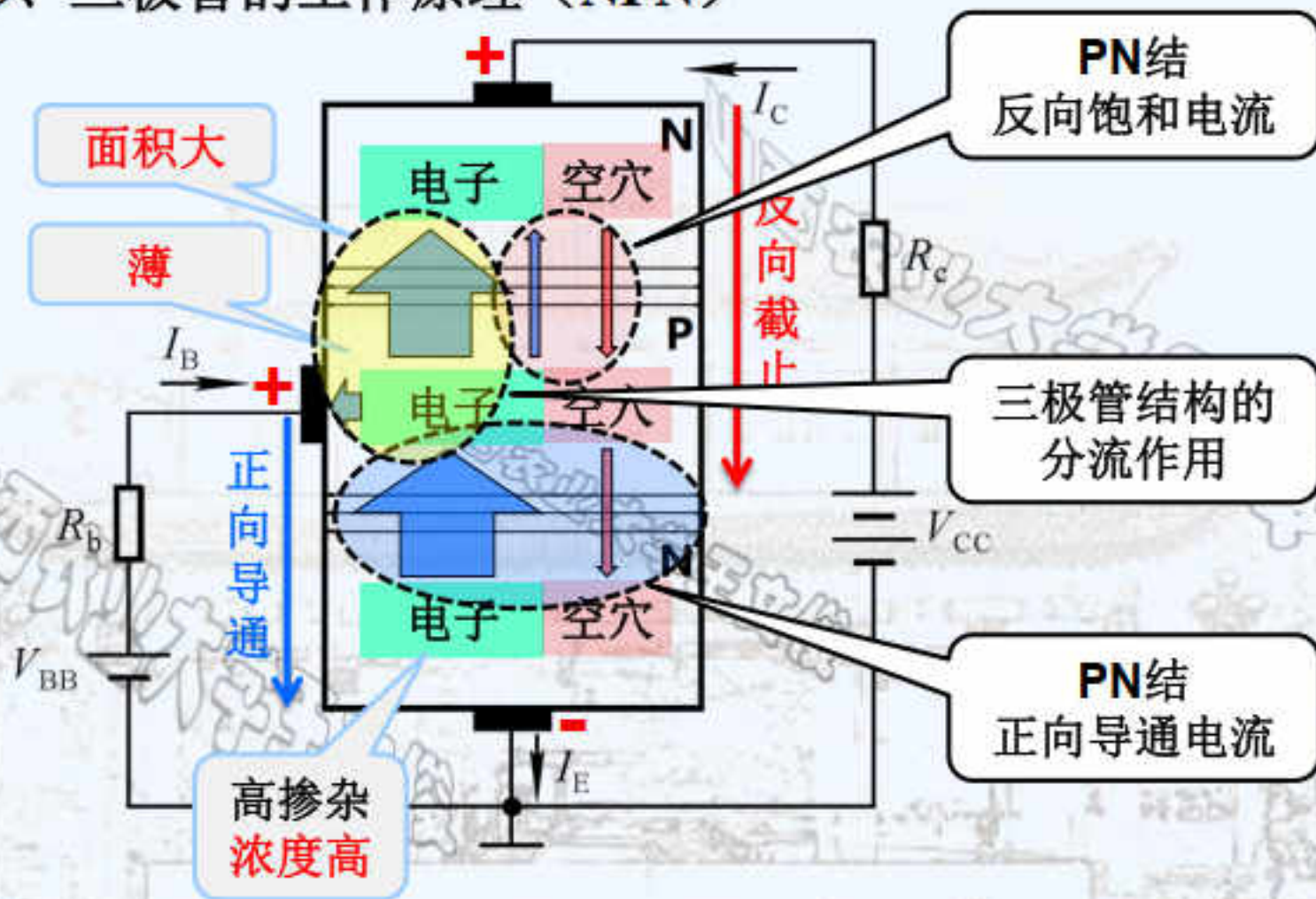




## • 2、三极管的共发射极接法 (NPN)

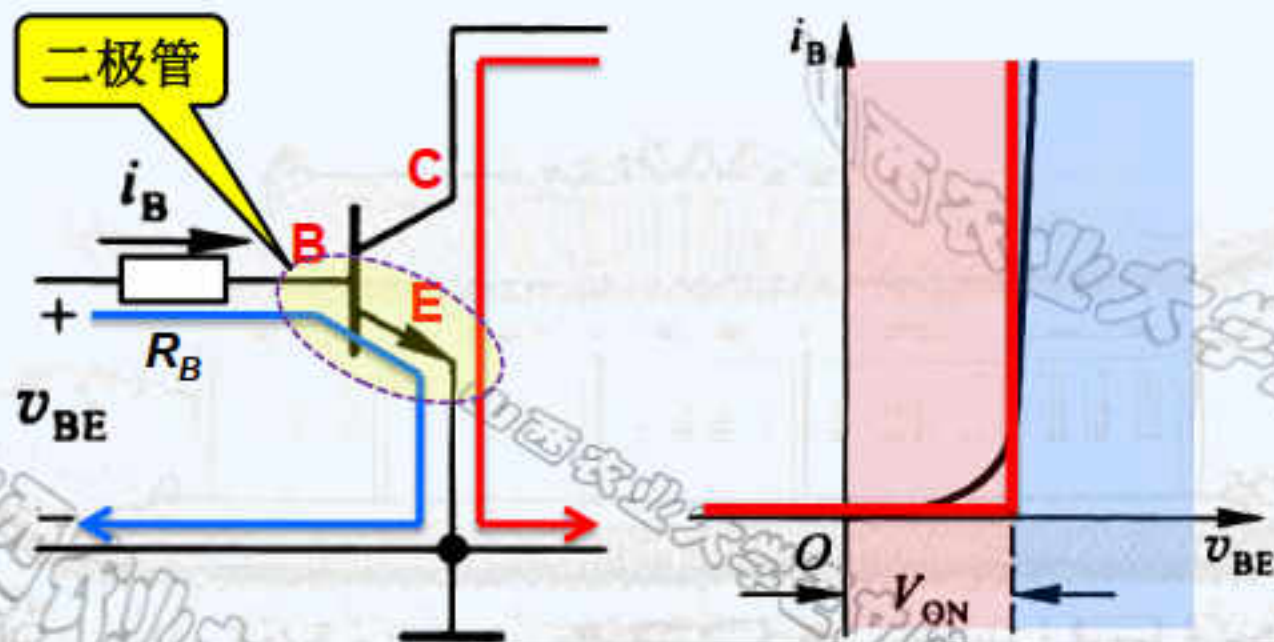


### 3、三极管的工作原理 (NPN)



电子和空穴两种载流子共同参与导电，因此称为**双极型**三极管。

#### • 4、三极管的输入特性 (NPN)



$$V_{BE} < V_{ON}$$

- $i_B = 0$

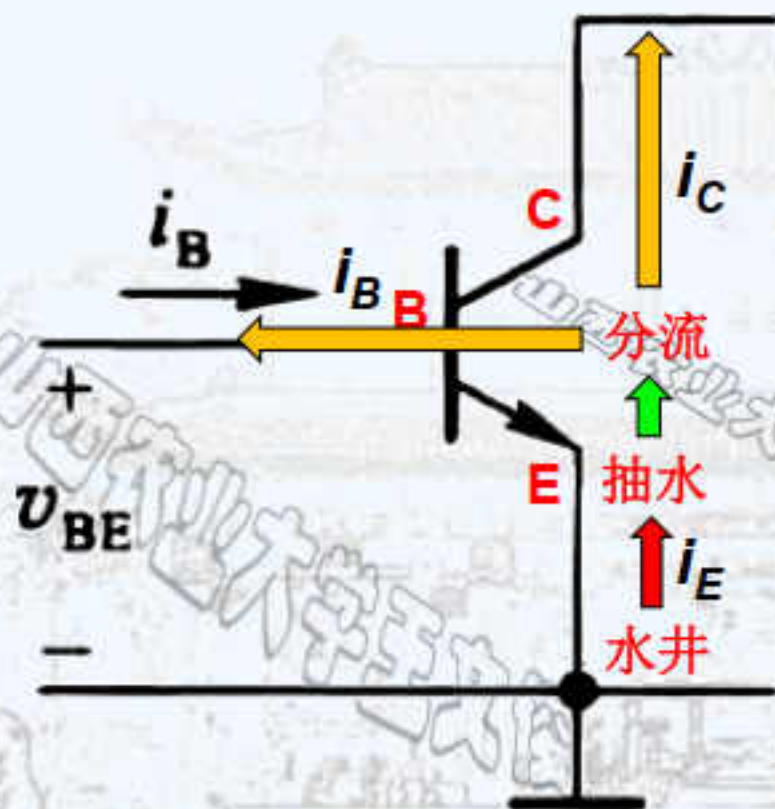
$$V_{BE} \geq V_{ON}$$

- $i_B$  由  $V_{BE}$  和  $R_B$  决定

$$i_B = \frac{V_{BE} - V_{ON}}{R_B}$$



## • 5、三极管的输出特性

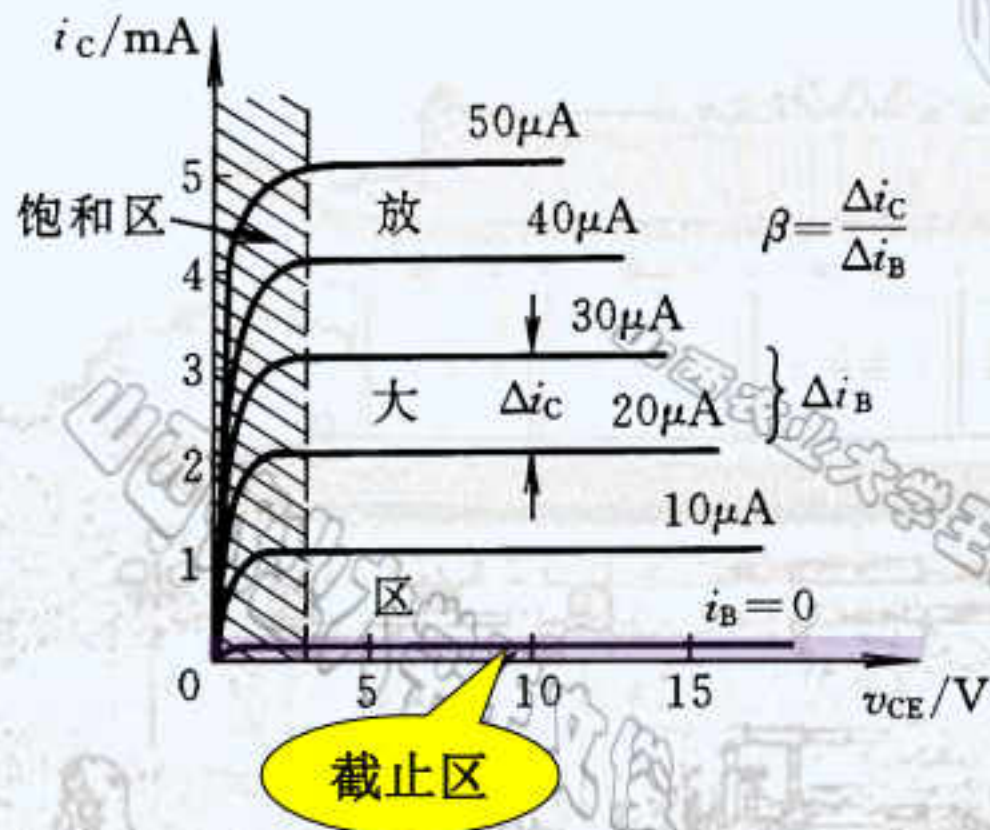


$V_{BE}$

- 决定抽出的总水量  $i_E$
- 根据分流比例  $\beta$  决定能够流向C的水量  $i_C$

$V_{CE}$

- 决定过C的最大水量  $i_{C(max)}$
- 影响实际的分流比例



$$V_{BE} < V_{ON}$$

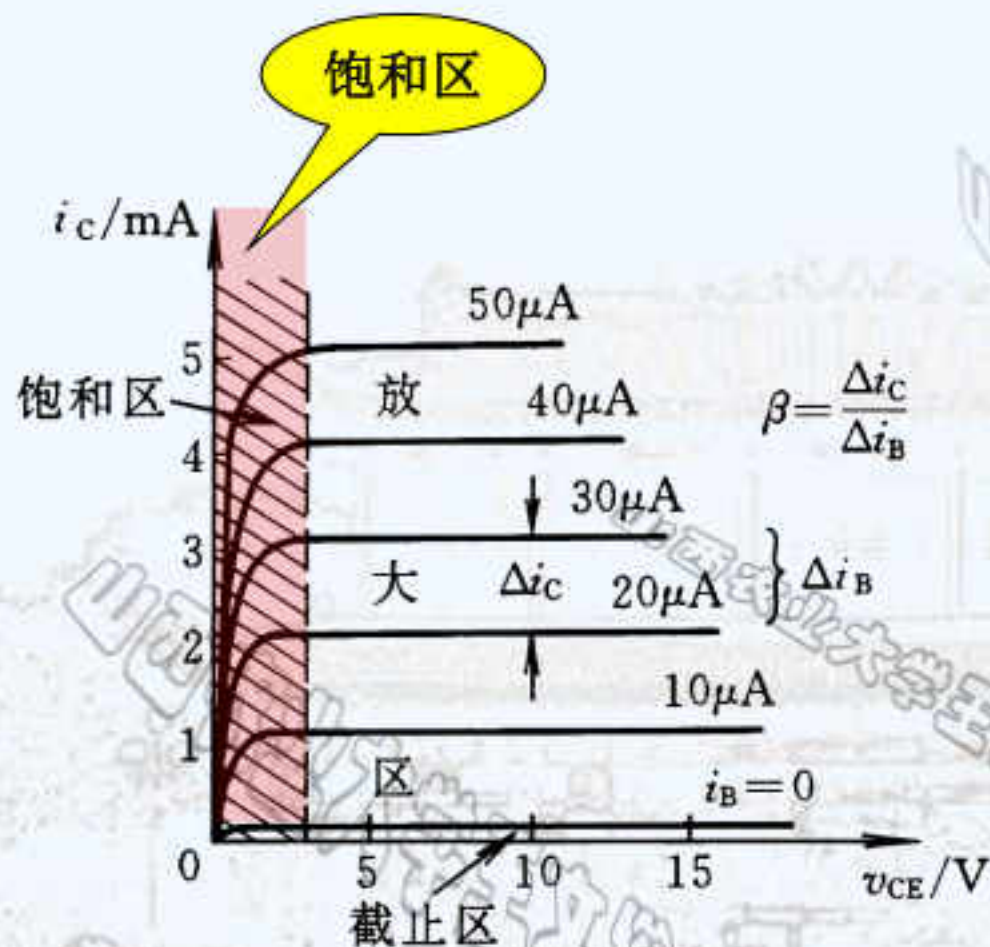
没有抽水

$$\text{总水量 } i_E = 0$$

$$i_B = 0, i_C = 0$$

截止区





饱和区:  $V_{CE} < 0.6 \sim 0.7 \text{ V}$

深度饱和区:  $V_{CE(sat)} < 0.2 \text{ V}$

$$V_{BE} > V_{ON}$$

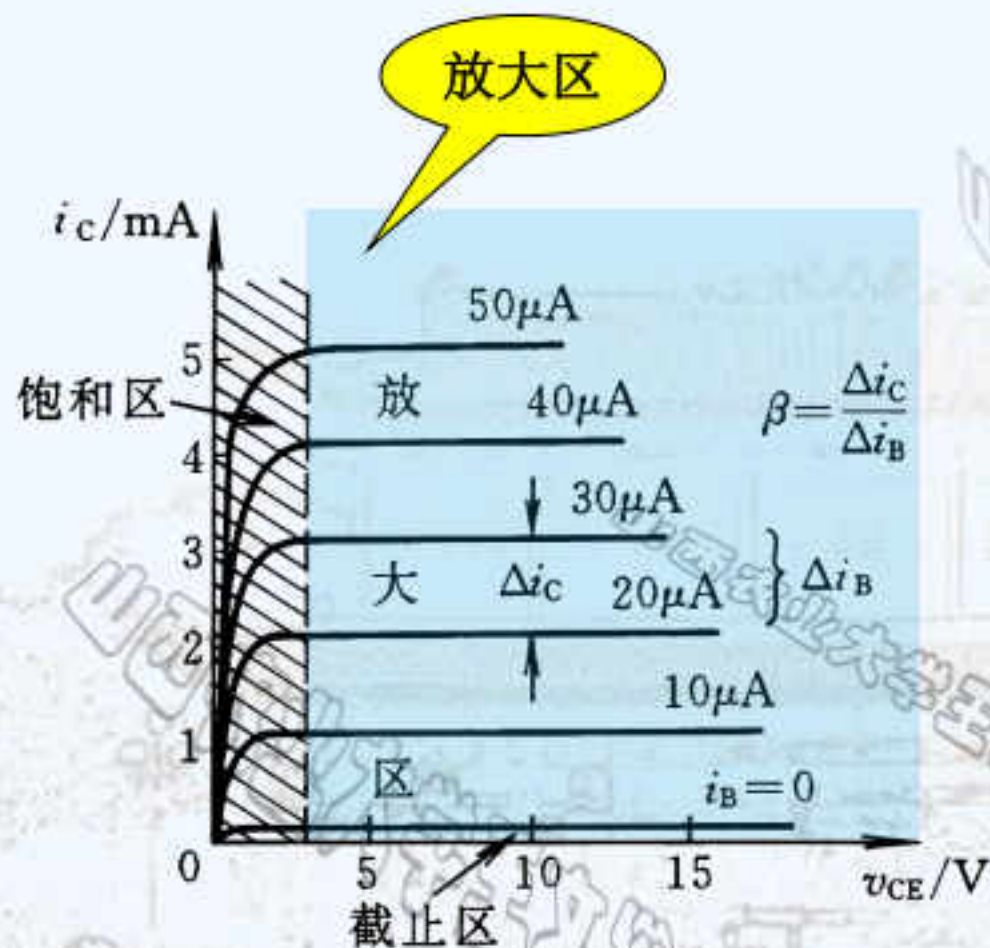
抽水, 总水量  $i_E > 0$

能够流向C的水量  $i_C$

$V_{CE}$  较小,  $i_C > i_{C(max)}$

$i_C = i_{C(max)}$ ,  $i_C$  达到饱和

饱和区



放大区:  $V_{CE} > 0.7\text{V}$

放大系数:  $\beta = \Delta i_c / \Delta i_B$

$$V_{BE} > V_{ON}$$

抽水, 总水量  $i_E > 0$

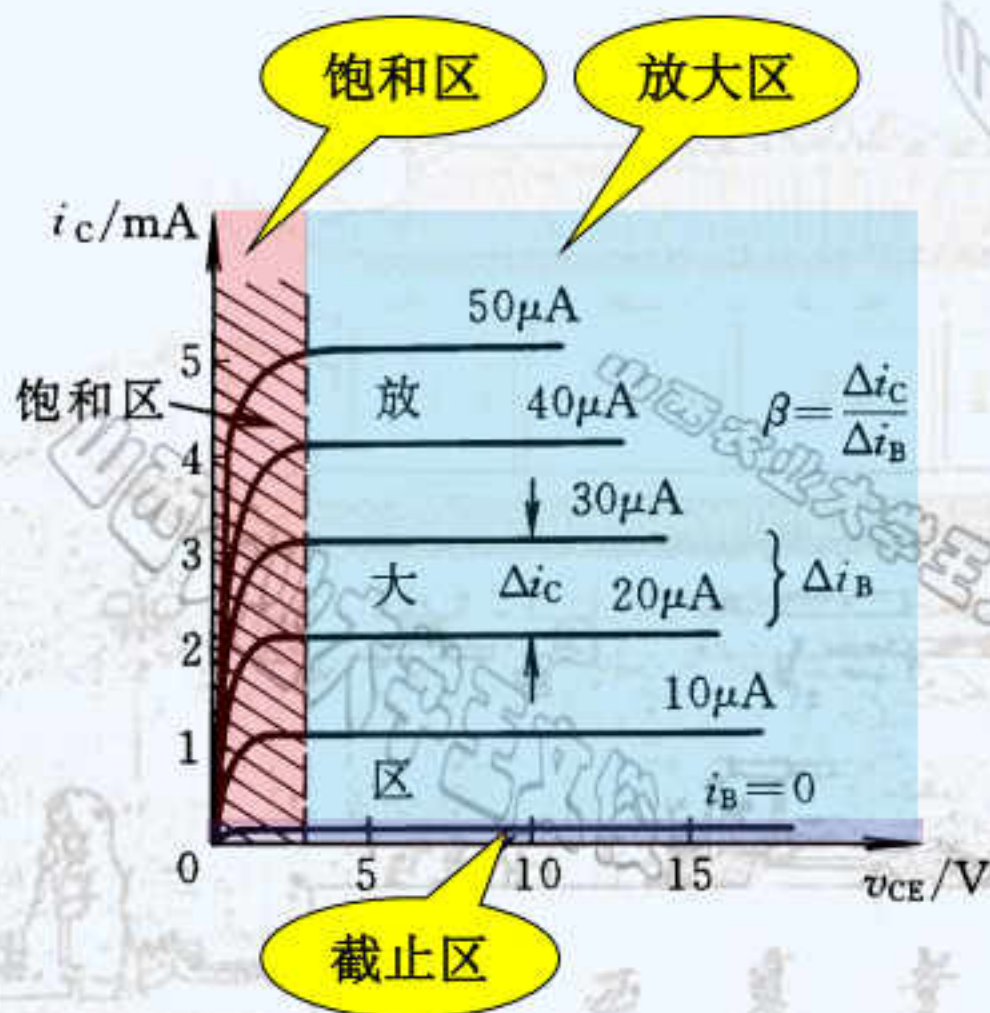
能够流向C的水量  $i_c$

$V_{CE}$  较大,  $i_c < i_{C(max)}$

$i_c$  由分流比例  $\beta$  决定

放大区

## • 6、三极管工作区的选择



截止区

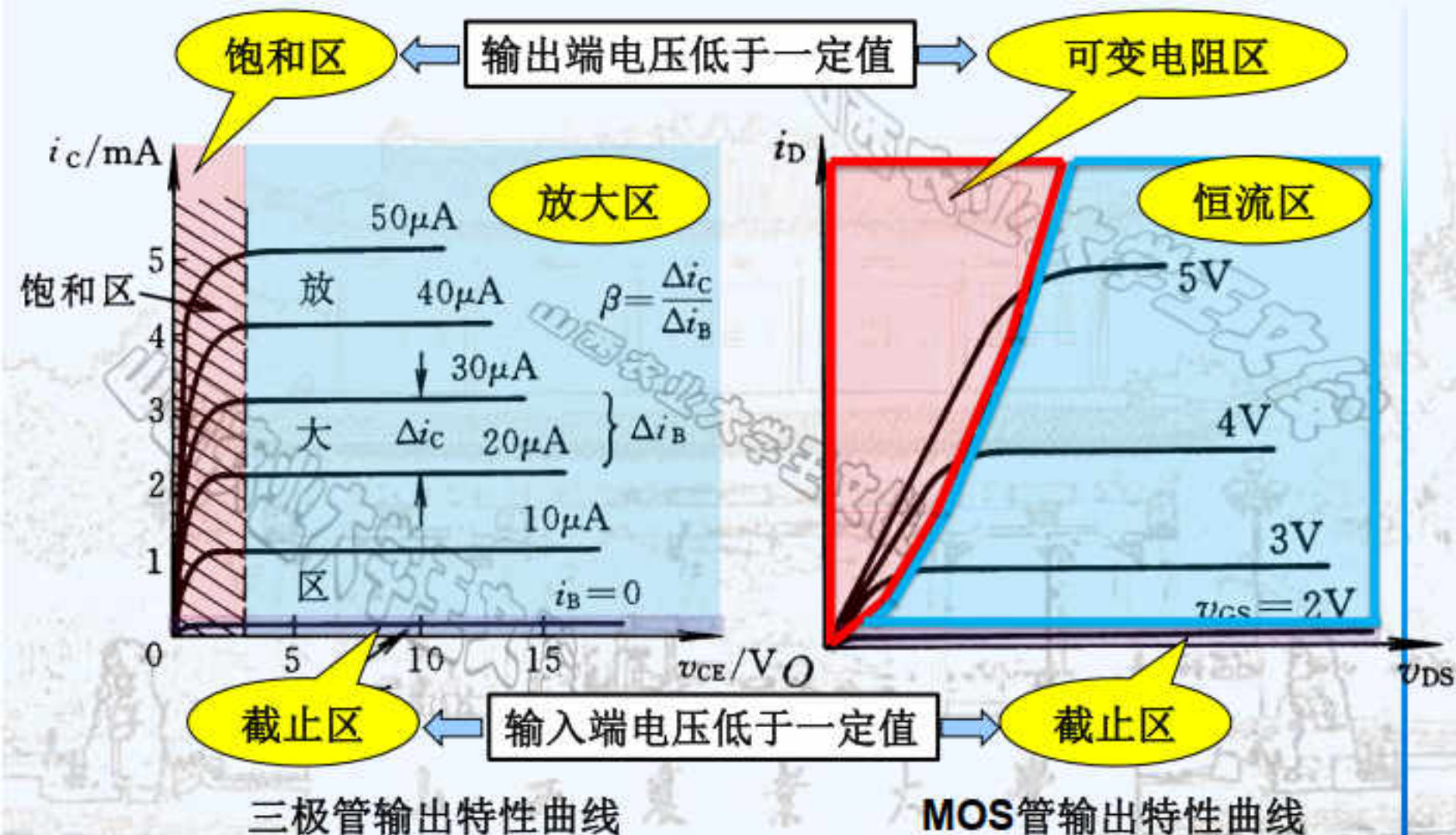
- 开关断开

饱和区

- 开关闭合
- 有电阻  $R_{CE(sat)}$
- 有压降  $V_{CE(sat)}$

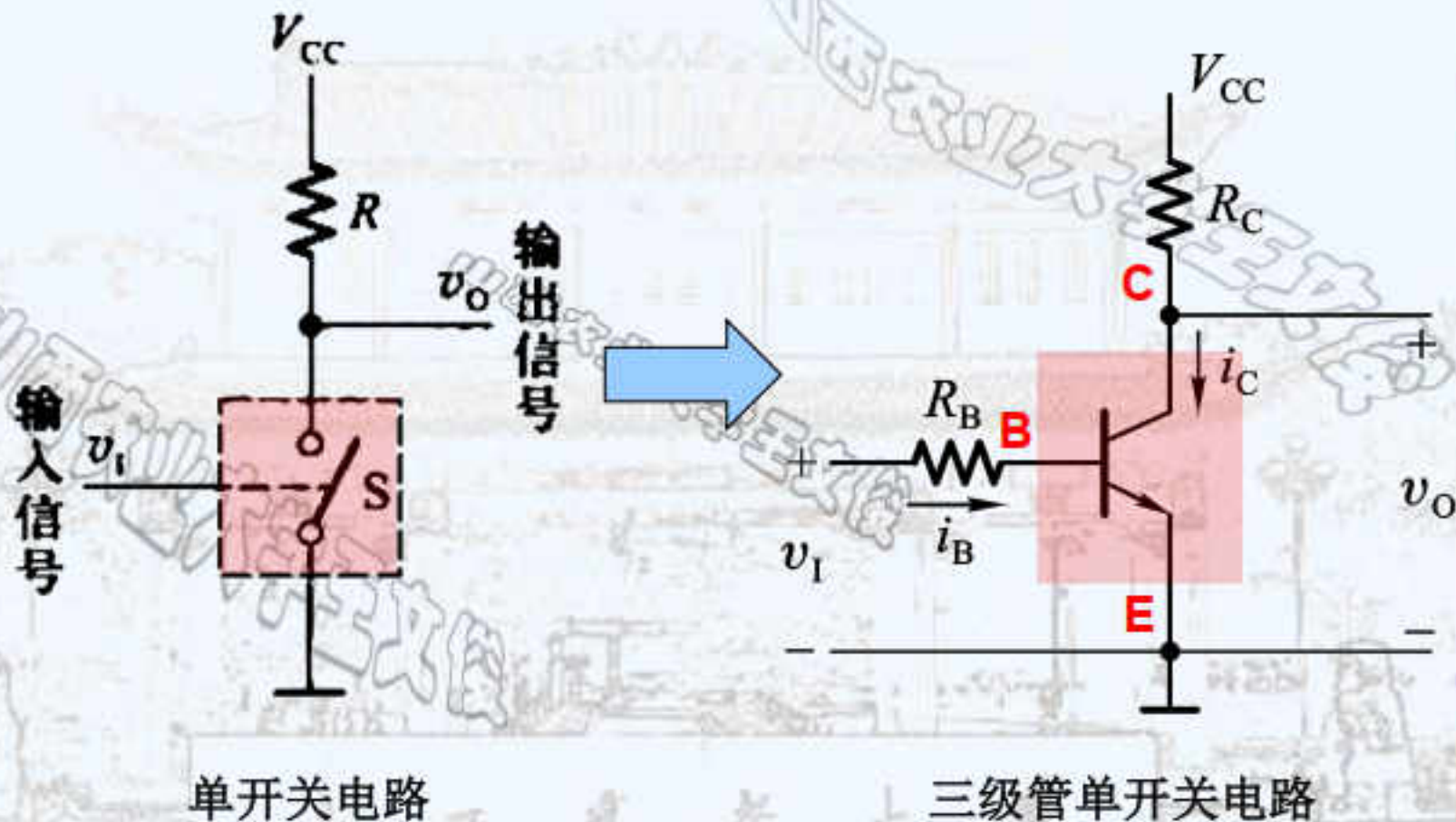


## 7、三极管与MOS管输出特性曲线比较



## 十六、三极管单开关电路（三极管反相器）

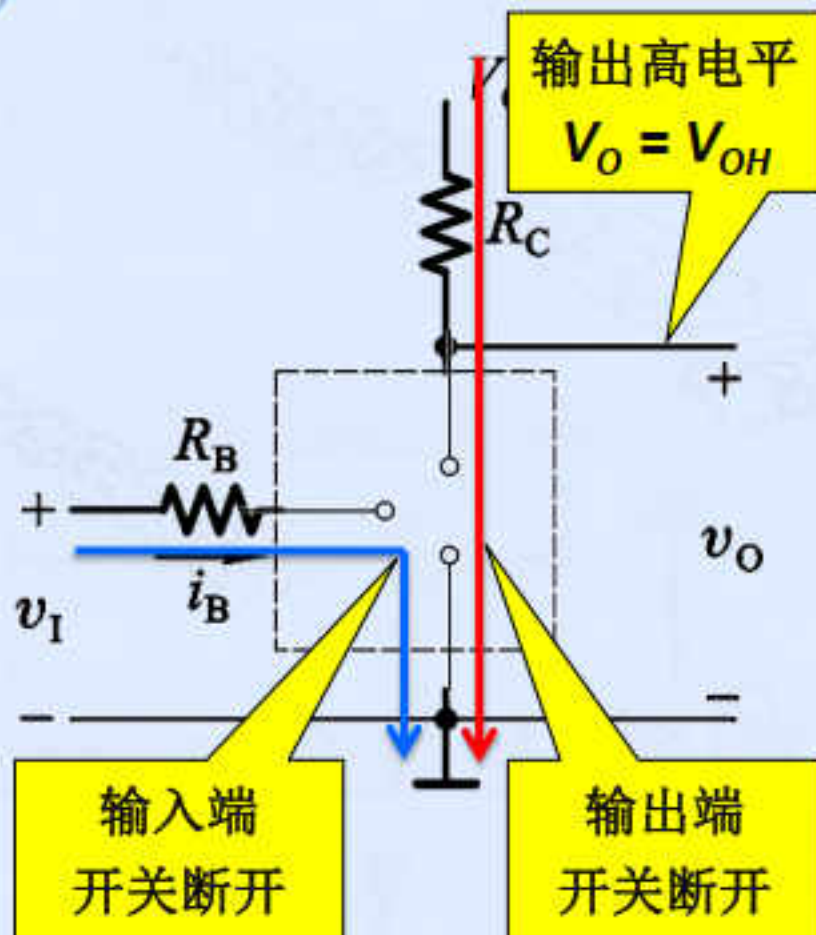
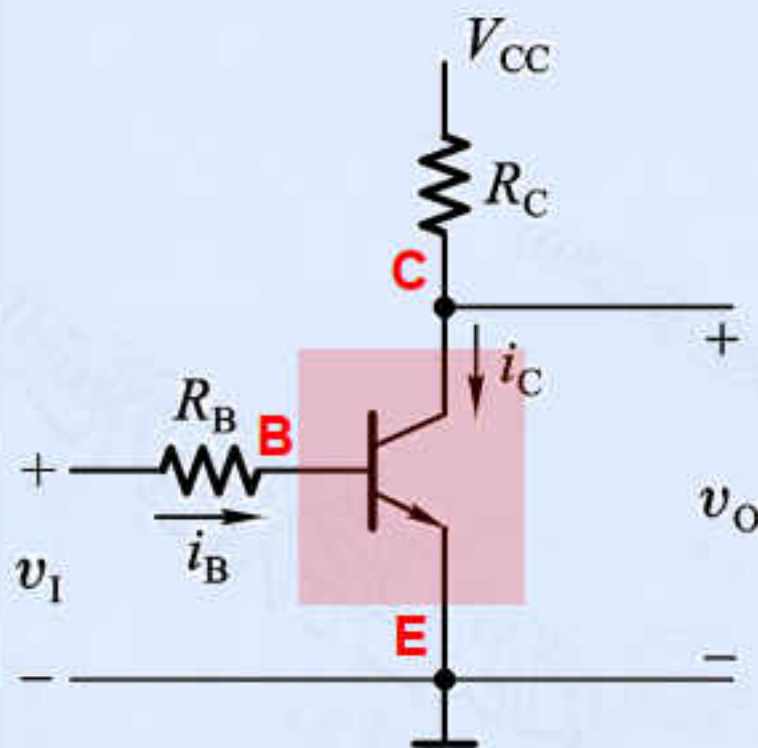
- 1、三极管单开关电路的结构





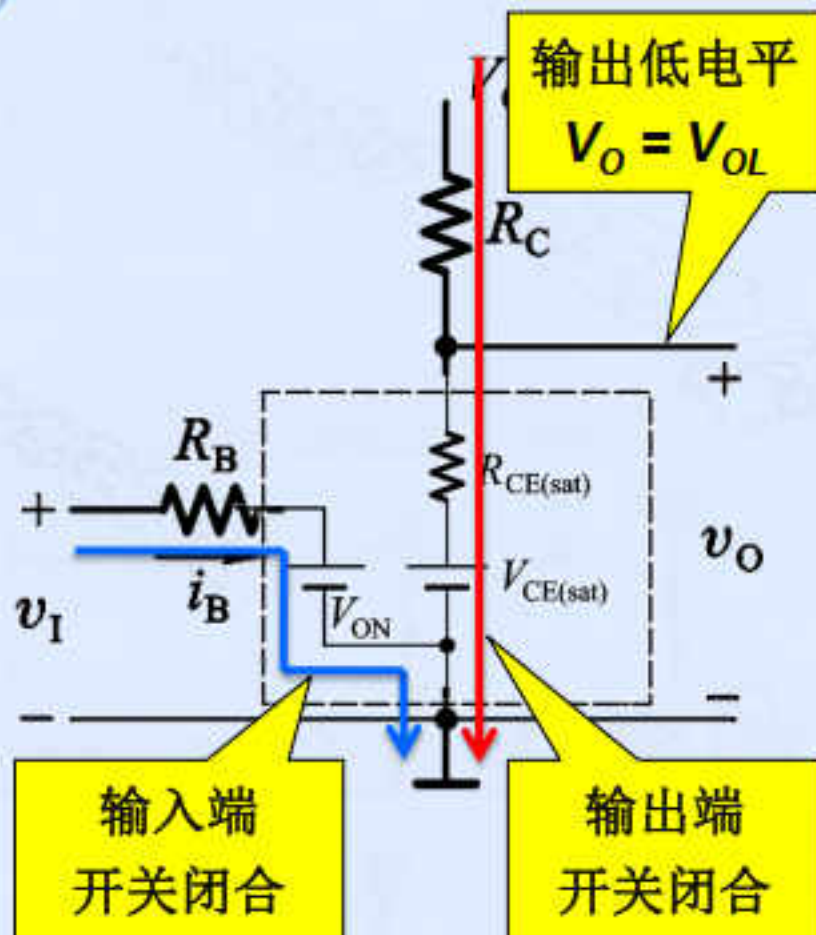
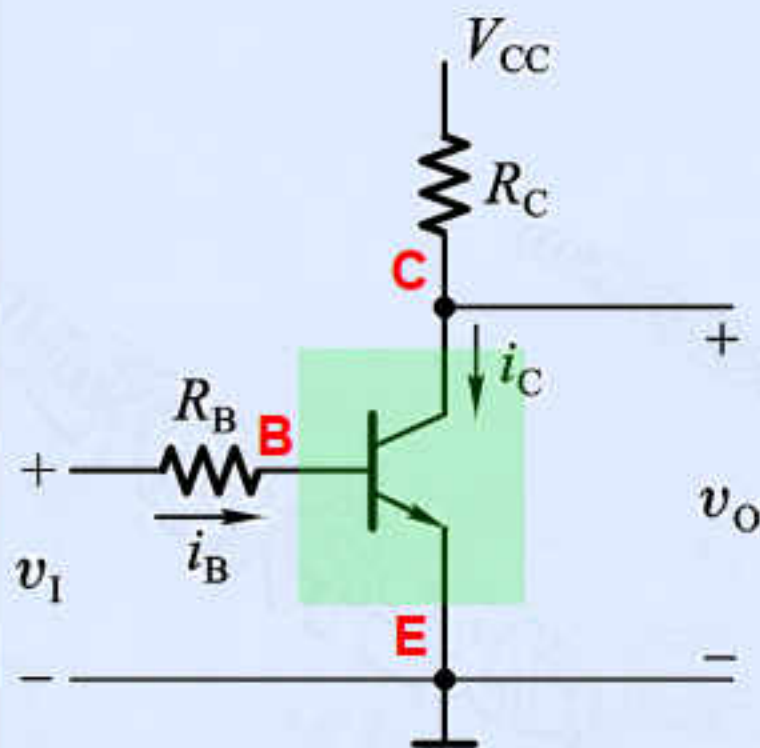
## • 2、三极管反相器实现高低电平输出

输入为低电平,  $V_I < V_{ON}$

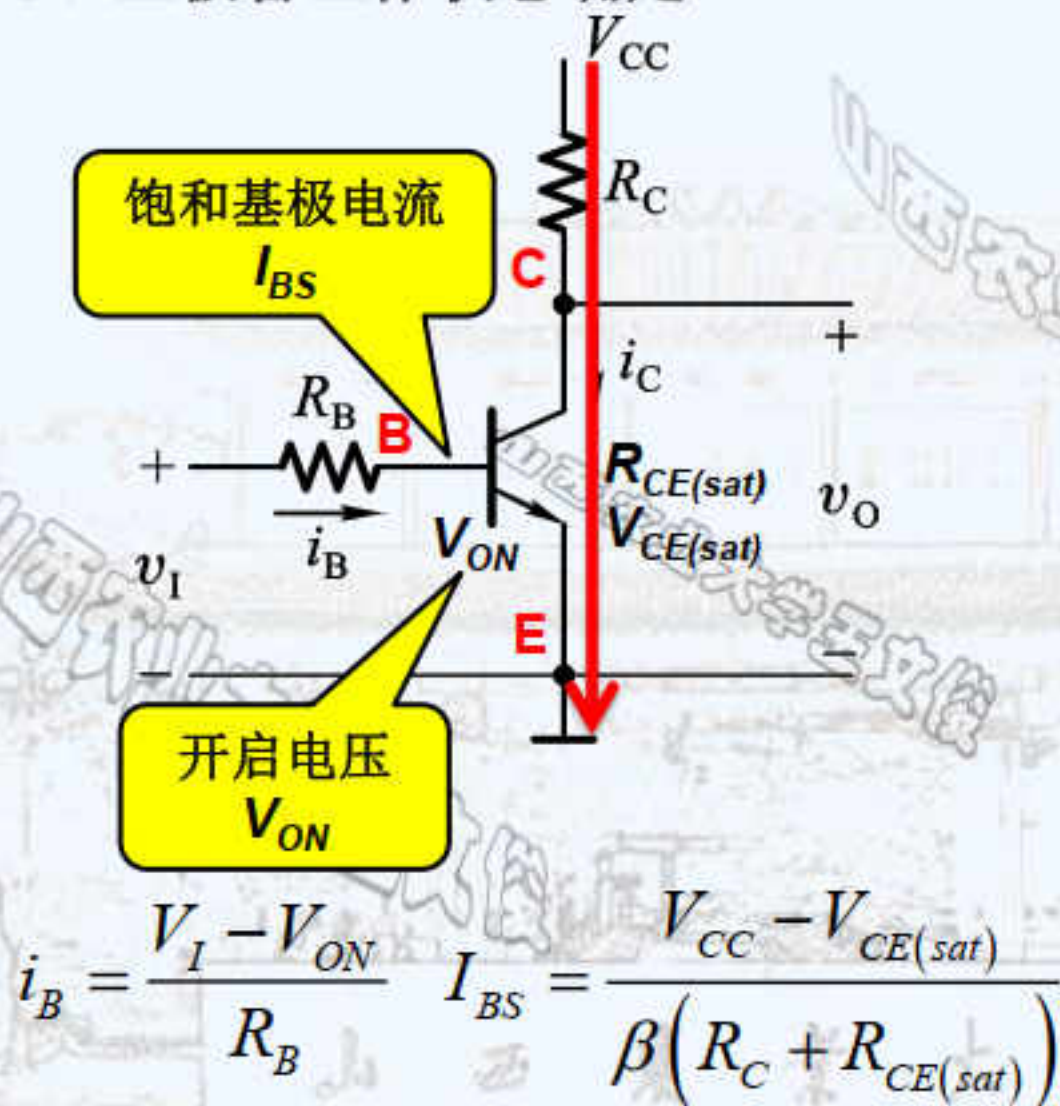




输入为高电平,  $V_I > V_{ON}$



### 3、三极管工作状态确定



$$V_I < V_{ON}$$

• 截止区

$$V_I \geq V_{ON}$$

•  $i_B \leq I_{BS}$

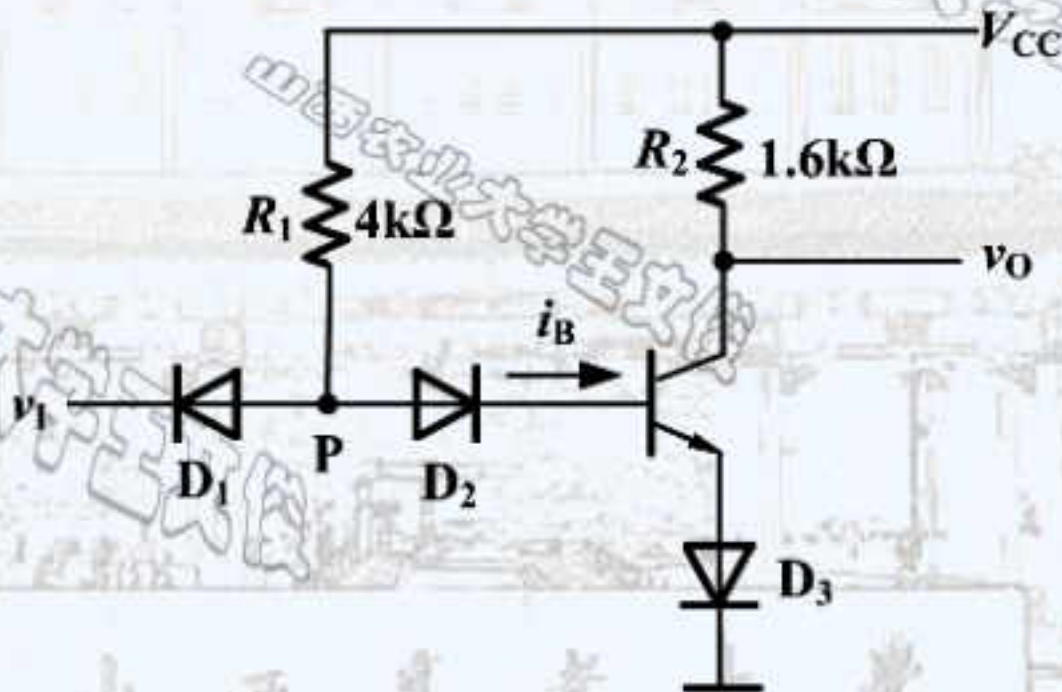
• 放大区

•  $i_B > I_{BS}$

• 饱和区

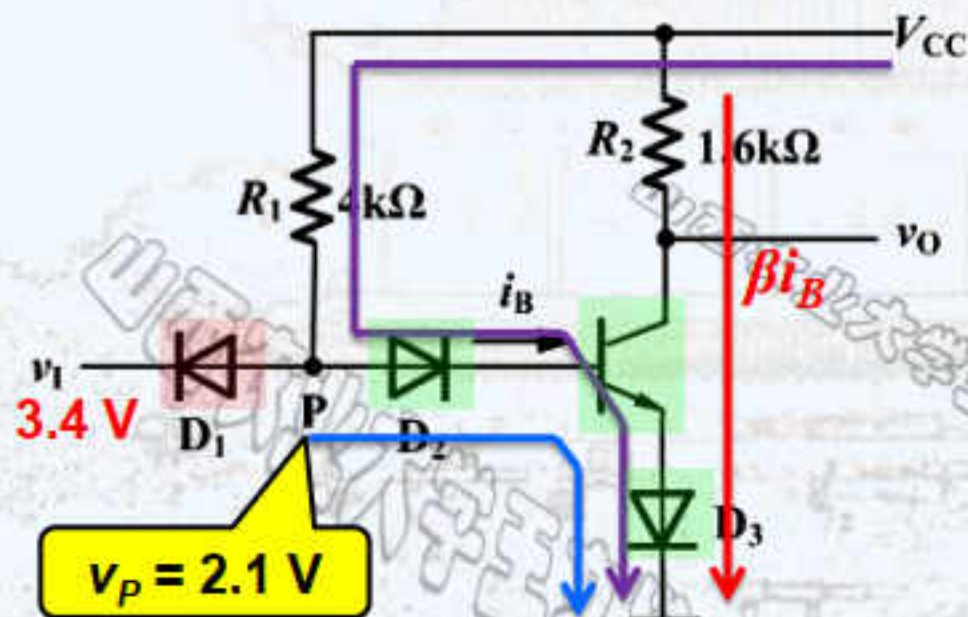
• 例4：在下图三极管反相器电路中，已知

- $V_{CC} = 5\text{ V}$ ,  $V_{IH} = 3.4\text{ V}$ ,  $V_{IL} = 0.2\text{ V}$
- $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 的正向导通压降为  $0.7\text{ V}$
- 三极管发射结（be结）的开启电压为  $0.7\text{ V}$
- 三极管饱和导通压降和导通内阻忽略不计。





- 1) 计算三极管  $\beta$  值取多少, 才能保证输入高电平信号时三极管饱和导通?



计算基极电流  $i_B$ :

$$i_B = \frac{V_{CC} - V_{D2} - V_{D3} - V_{ON}}{R_1}$$

计算饱和基极电流  $I_{BS}$ :

$$I_{BS} = \frac{V_{CC} - V_{D3}}{\beta R_2}$$

饱和导通要求:

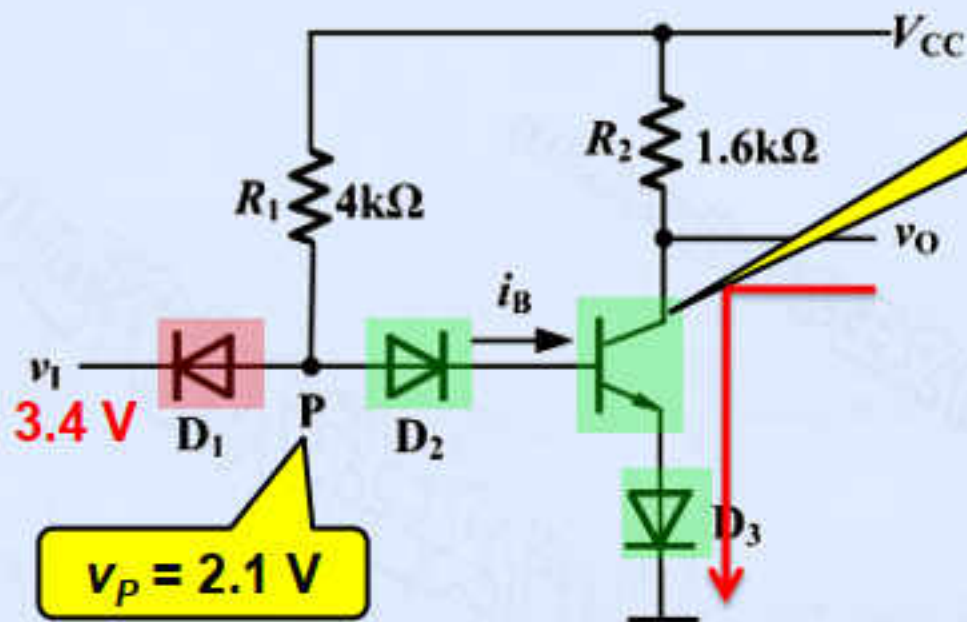
$$i_B > I_{BS}$$

解得:

$$\beta > 3.7$$

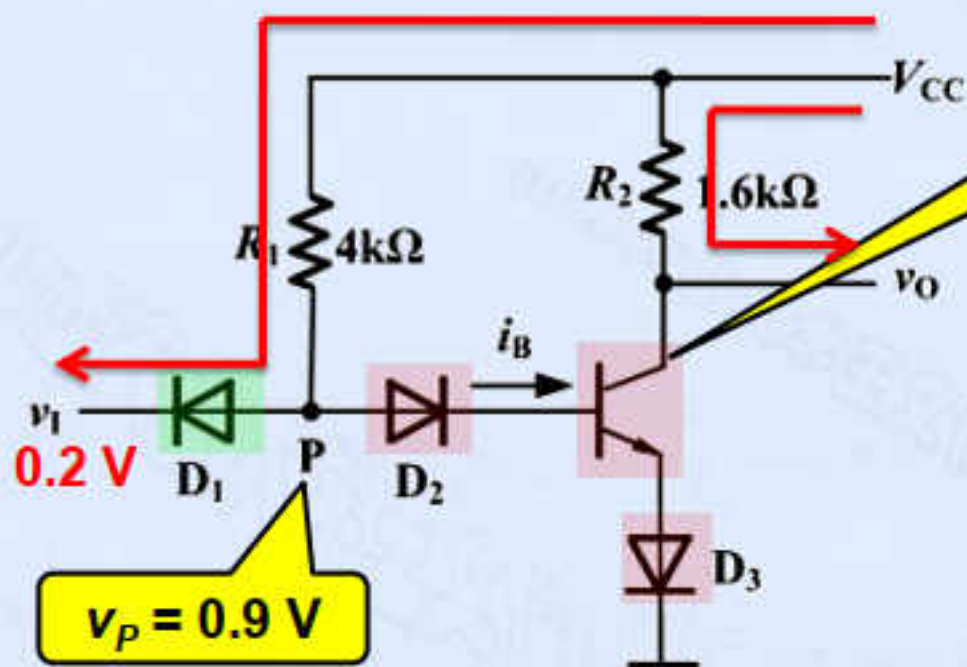
- 2) 当  $\beta \gg 3.7$  时, 求输出的高低电平值

输入为高电平,  $V_I = 3.4\text{ V}$



输出为低电平:  
 $V_{OL} = V_{D3} = 0.7\text{ V}$

输入为低电平,  $V_I = 0.2\text{ V}$

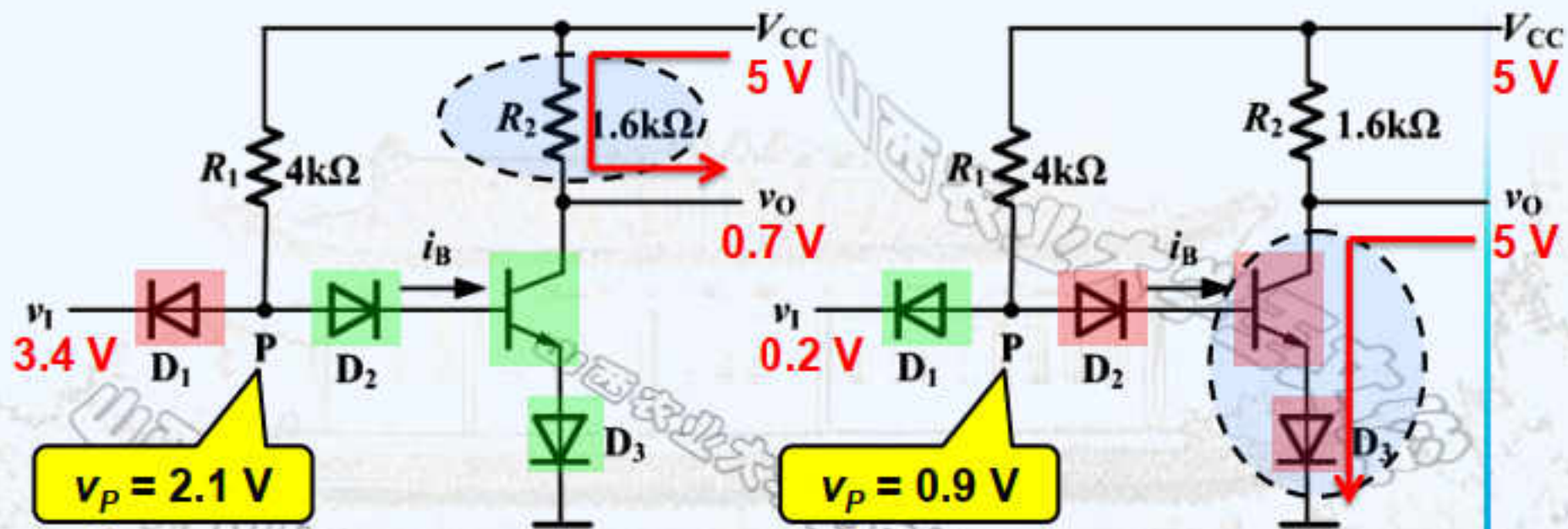


截止  
断开状态

输出为高电平:  
 $V_{OH} = V_{CC} = 5\text{ V}$



## • 5、三极管反相器的缺点



输出低电平

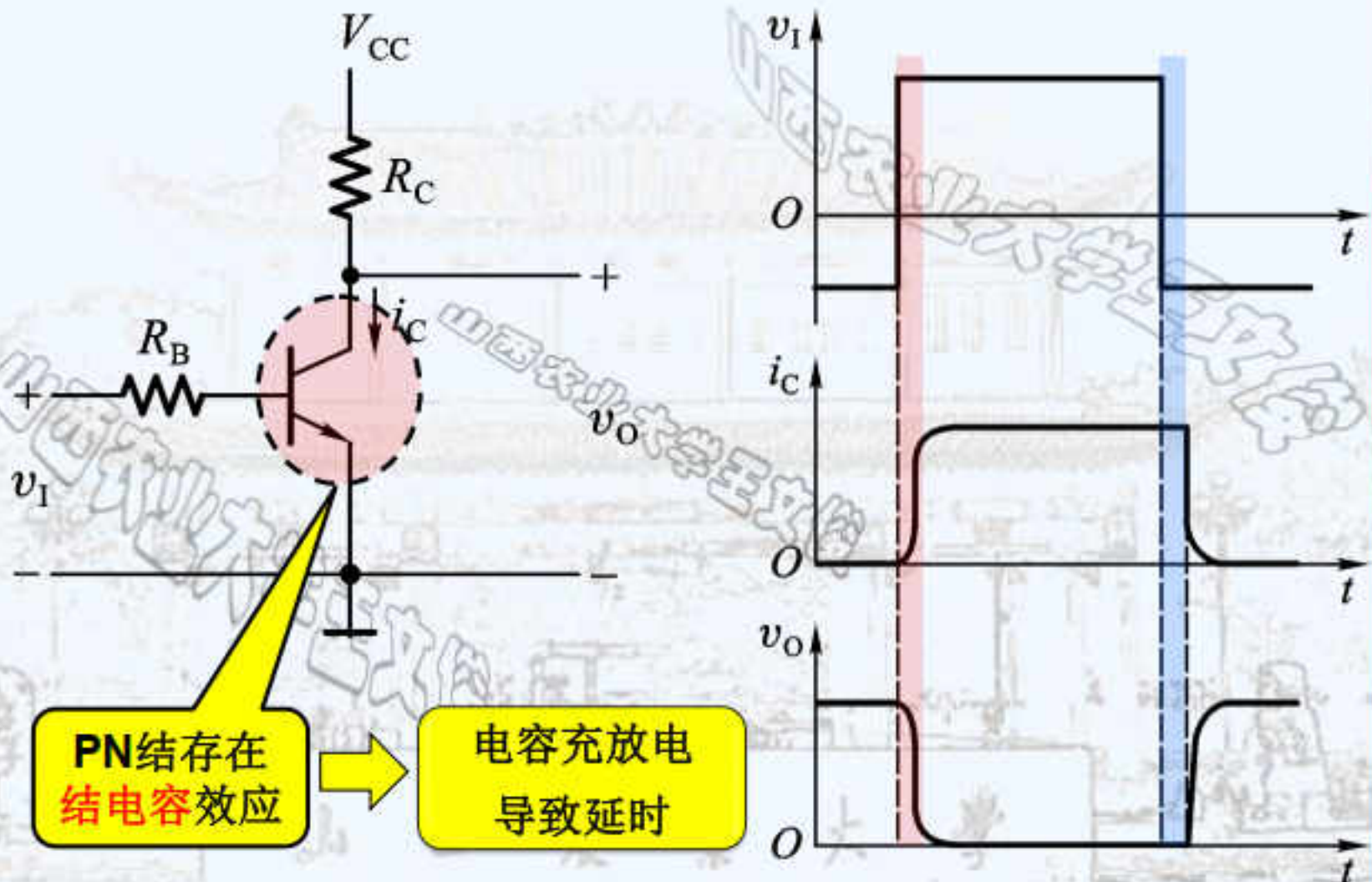
- 电路功耗很大

输出高电平

- 输出电阻很大

三极管反相器不适合作为集成电路的基本单元。

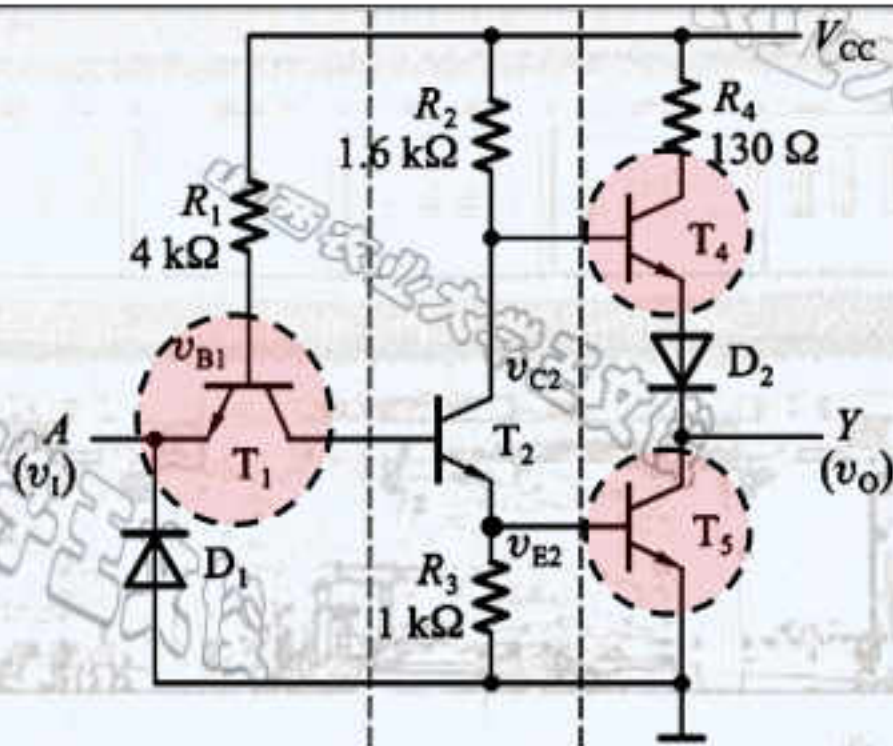
## • 6、三极管反相器的动态特性



# 十七、TTL反相器

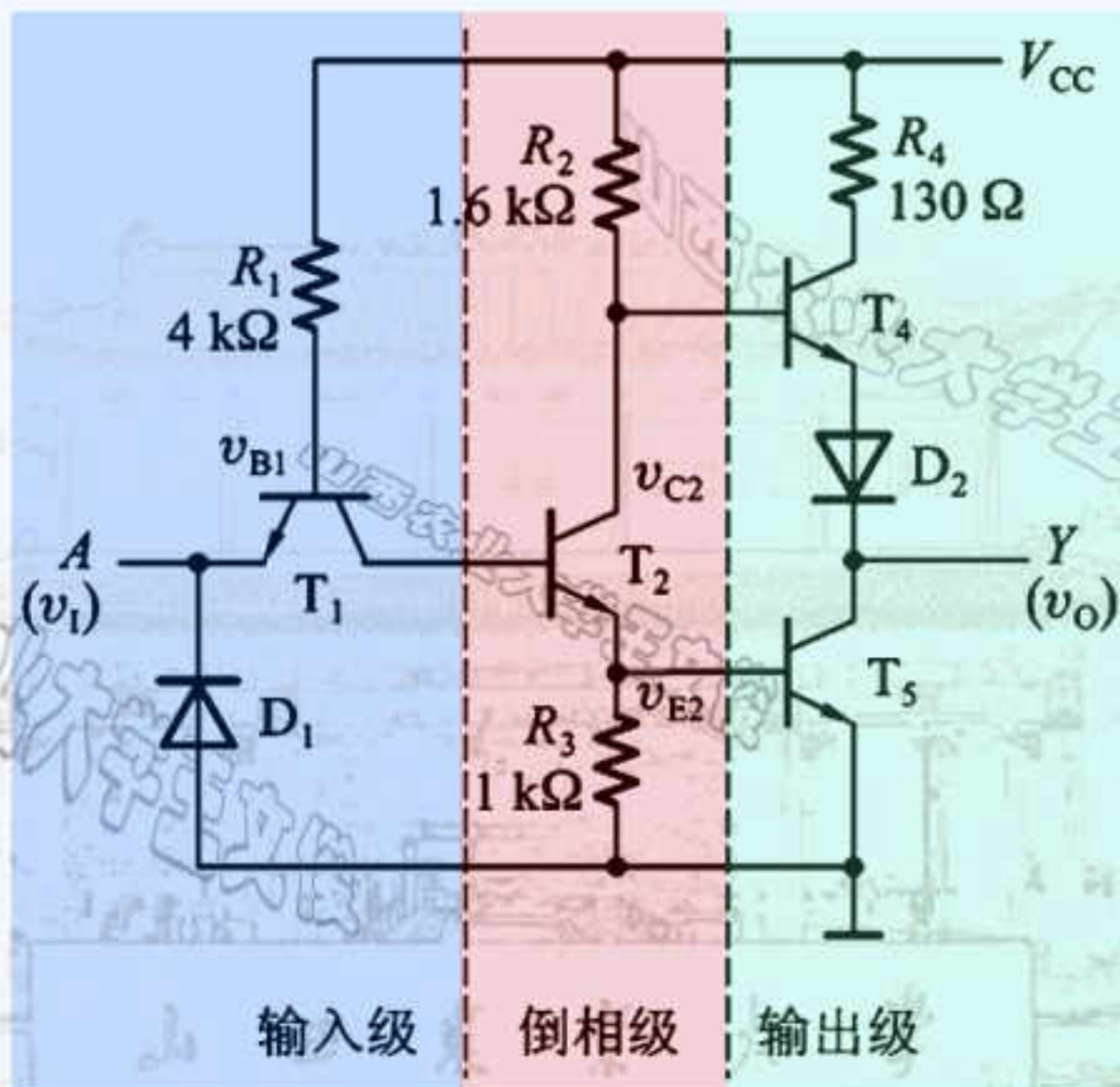
## • 1、TTL反相器的结构

反相器是TTL集成门电路中电路结构最简单的一种。



输入输出端均为三极管结构，称为**三极管-三极管逻辑(TTL)**电路。



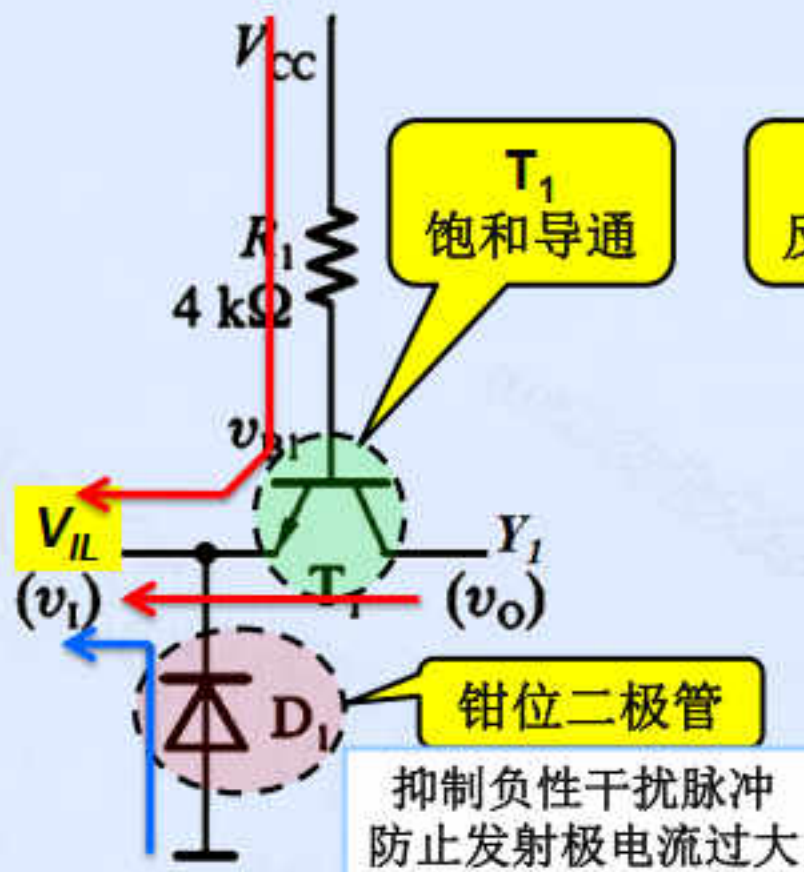


输入级

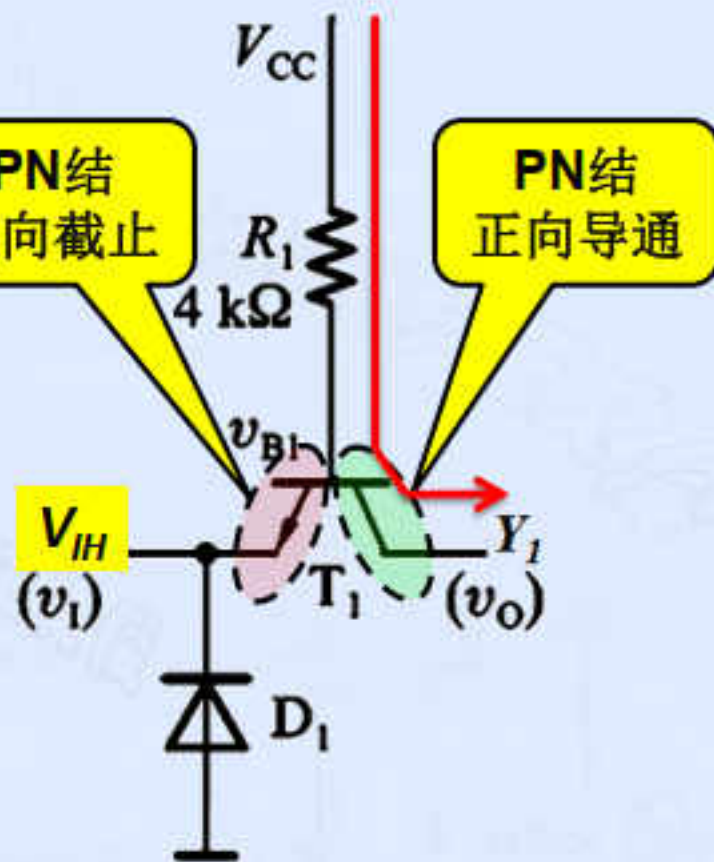
倒相级

输出级

## 输入级

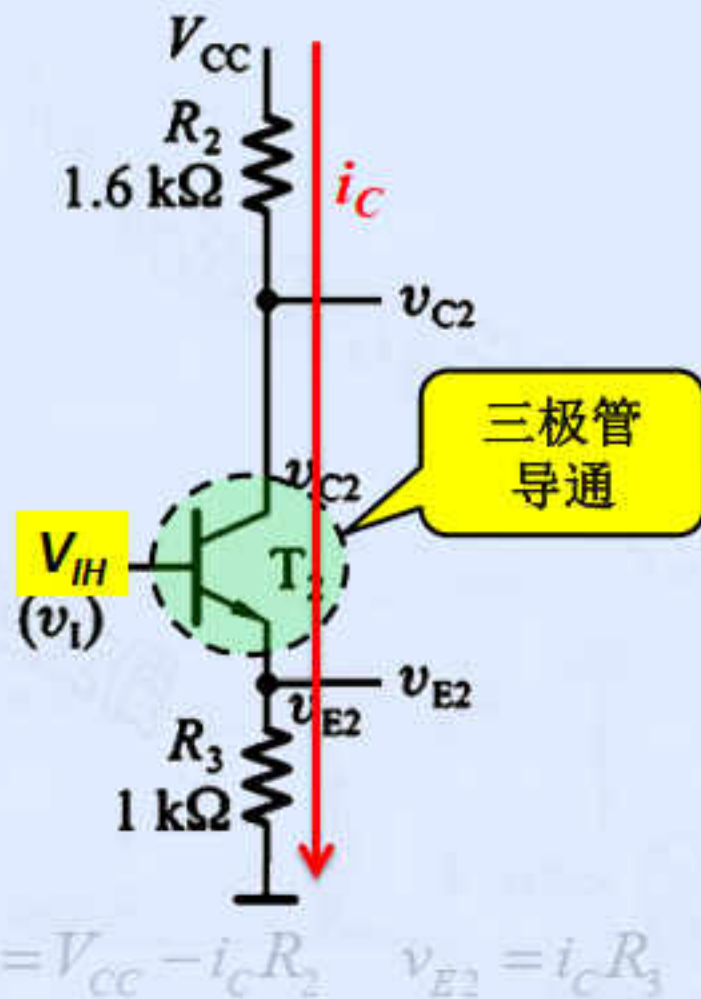
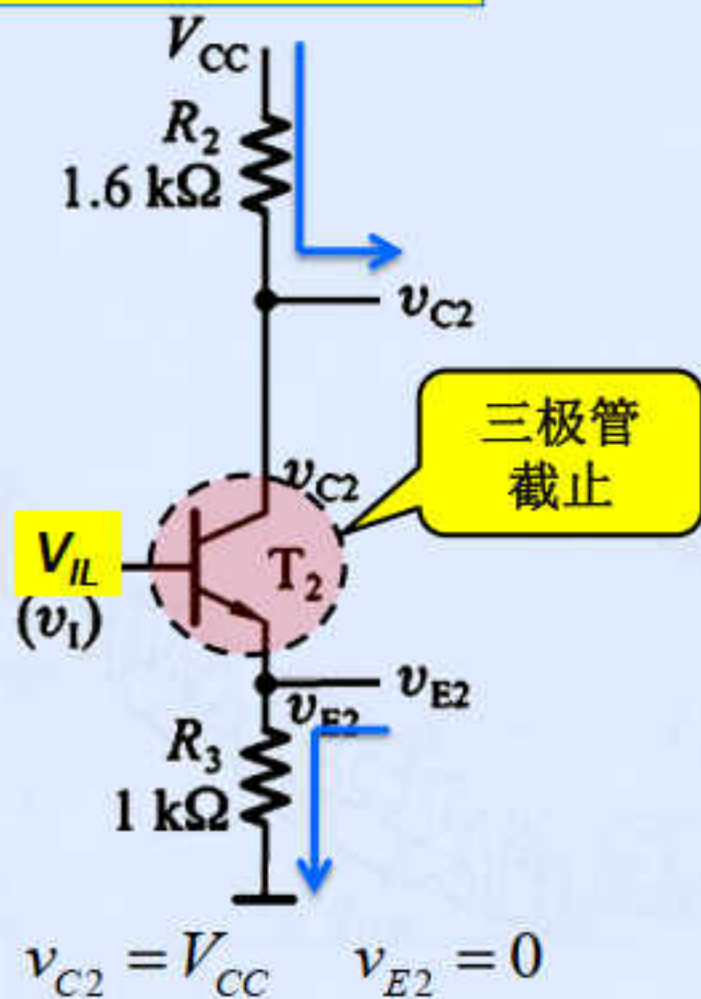


$$v_{B1} = V_{IL} + V_{ON} \quad Y_1 = V_{IL}$$



$$Y_1 = v_{B1} - V_{ON}$$

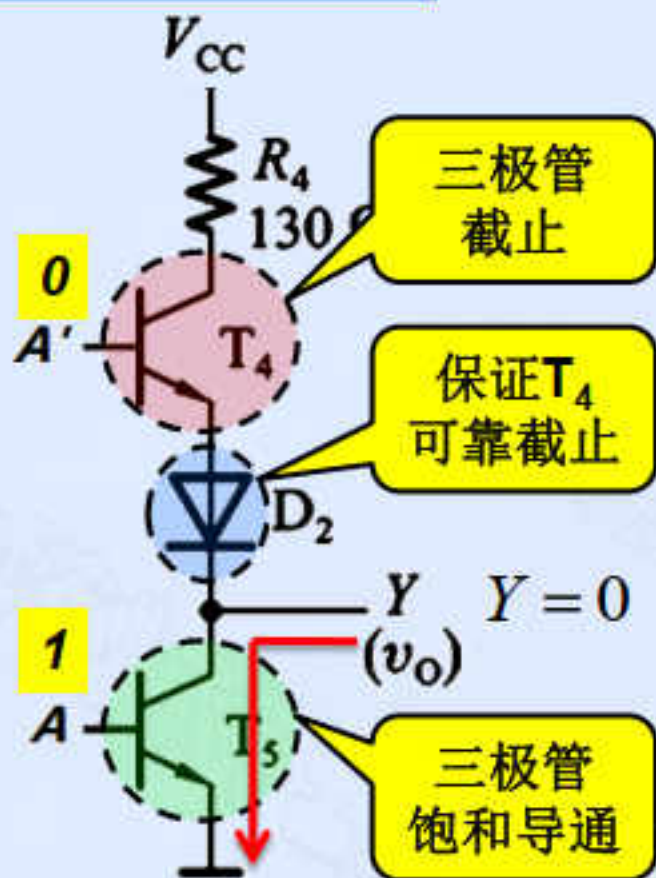
## 倒相级



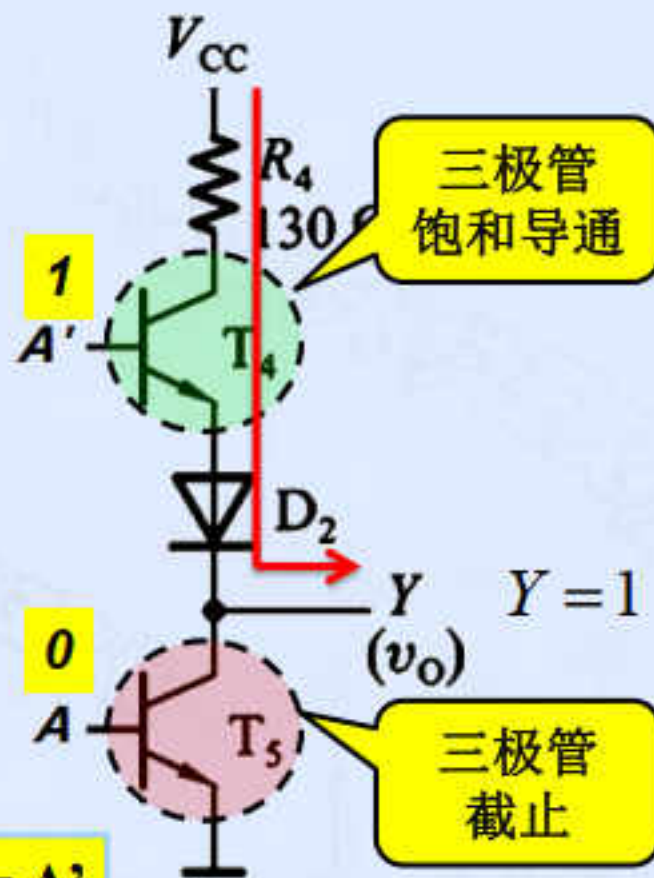
$v_{C2}$ 与 $v_{E2}$ 的电压信号变化方向相反，称为倒向级。



## 输出级

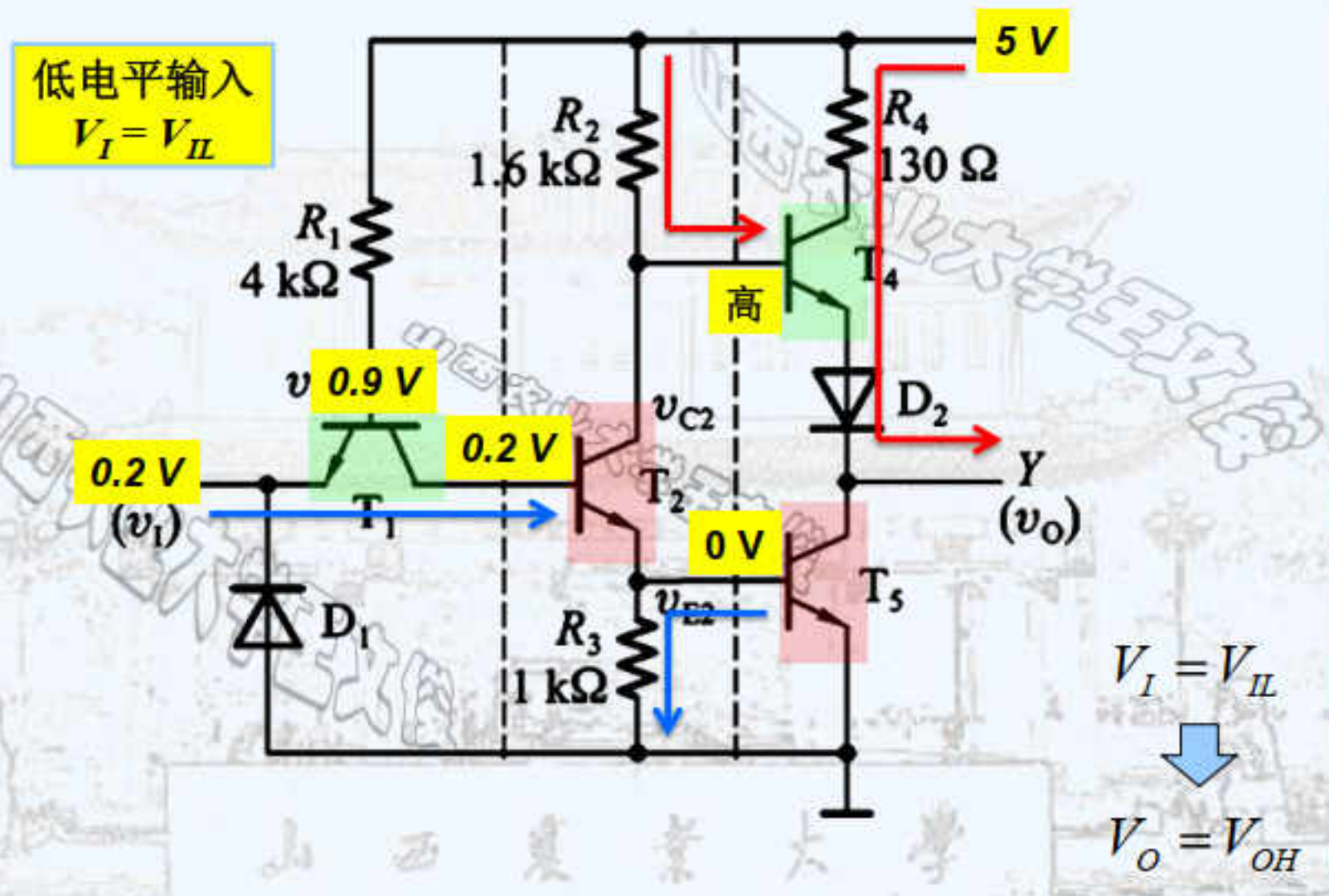


$$Y = A'$$



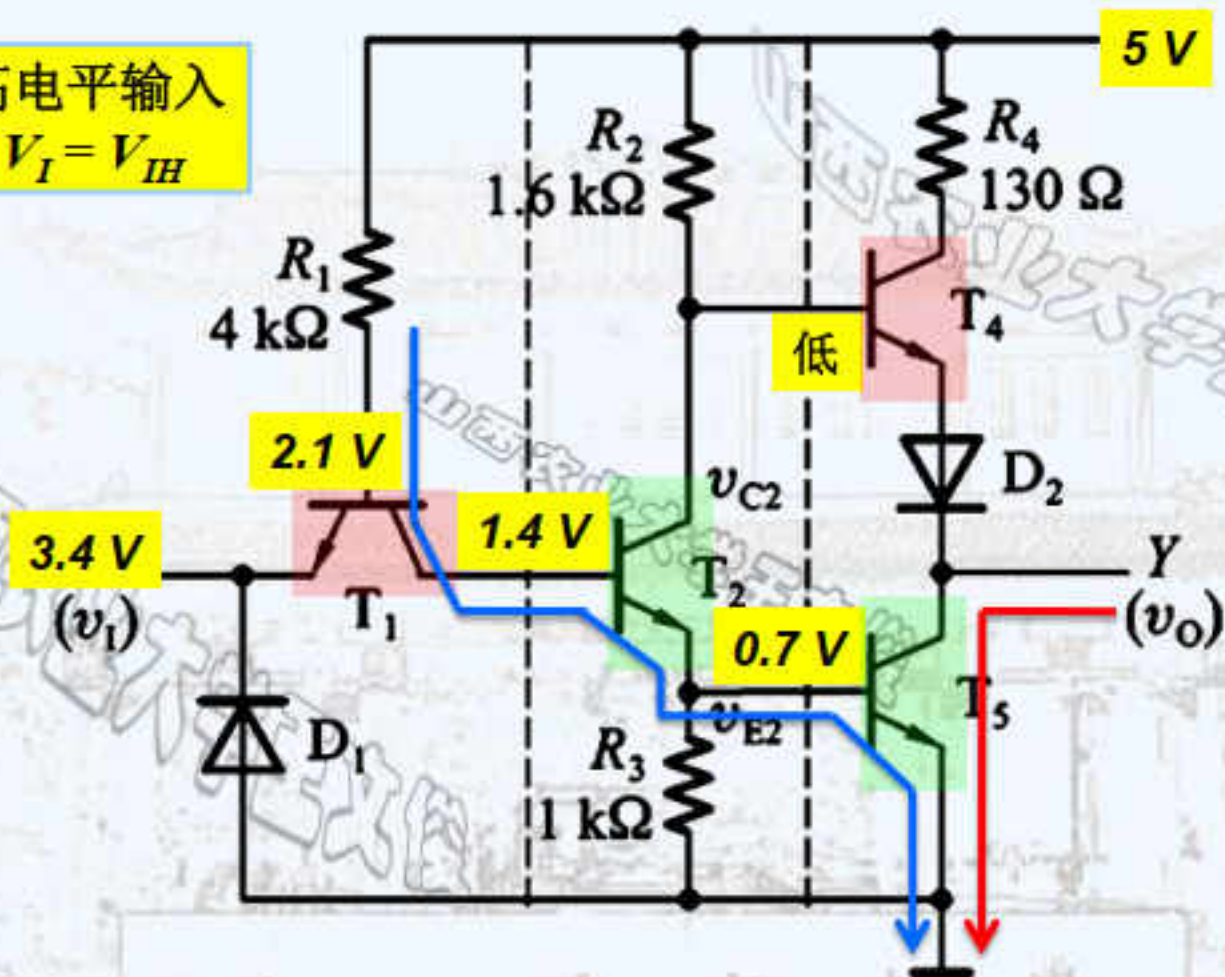
在稳态下,  $T_4$ 和 $T_5$ 总有一个导通、一个截止。  
 推拉式(或图腾柱)输出电路可降低静态功耗, 提高带负载能力。

## 2、TTL反相器的工作原理



高电平输入

$$V_I = V_{IH}$$

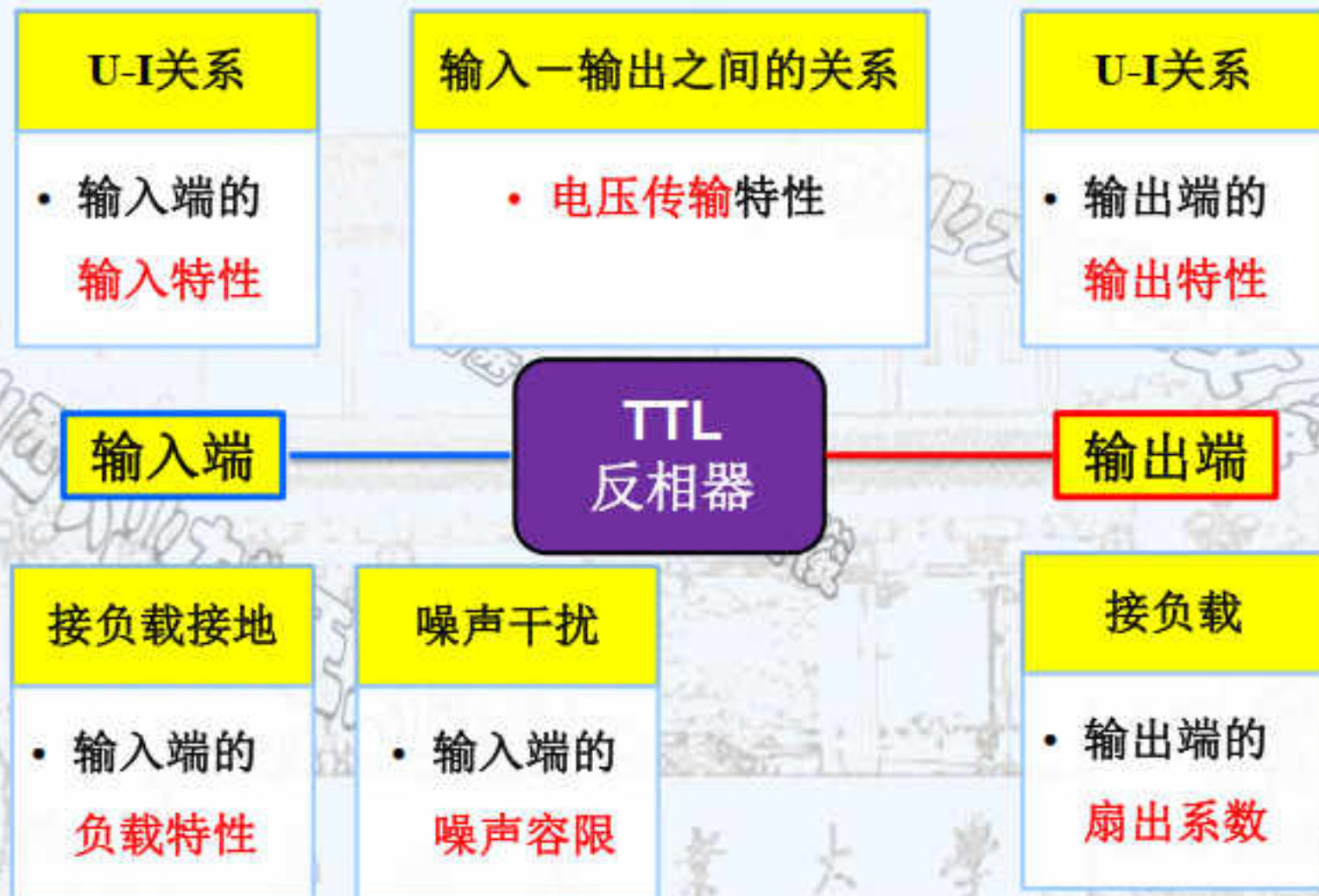


$$V_I = V_{IH}$$



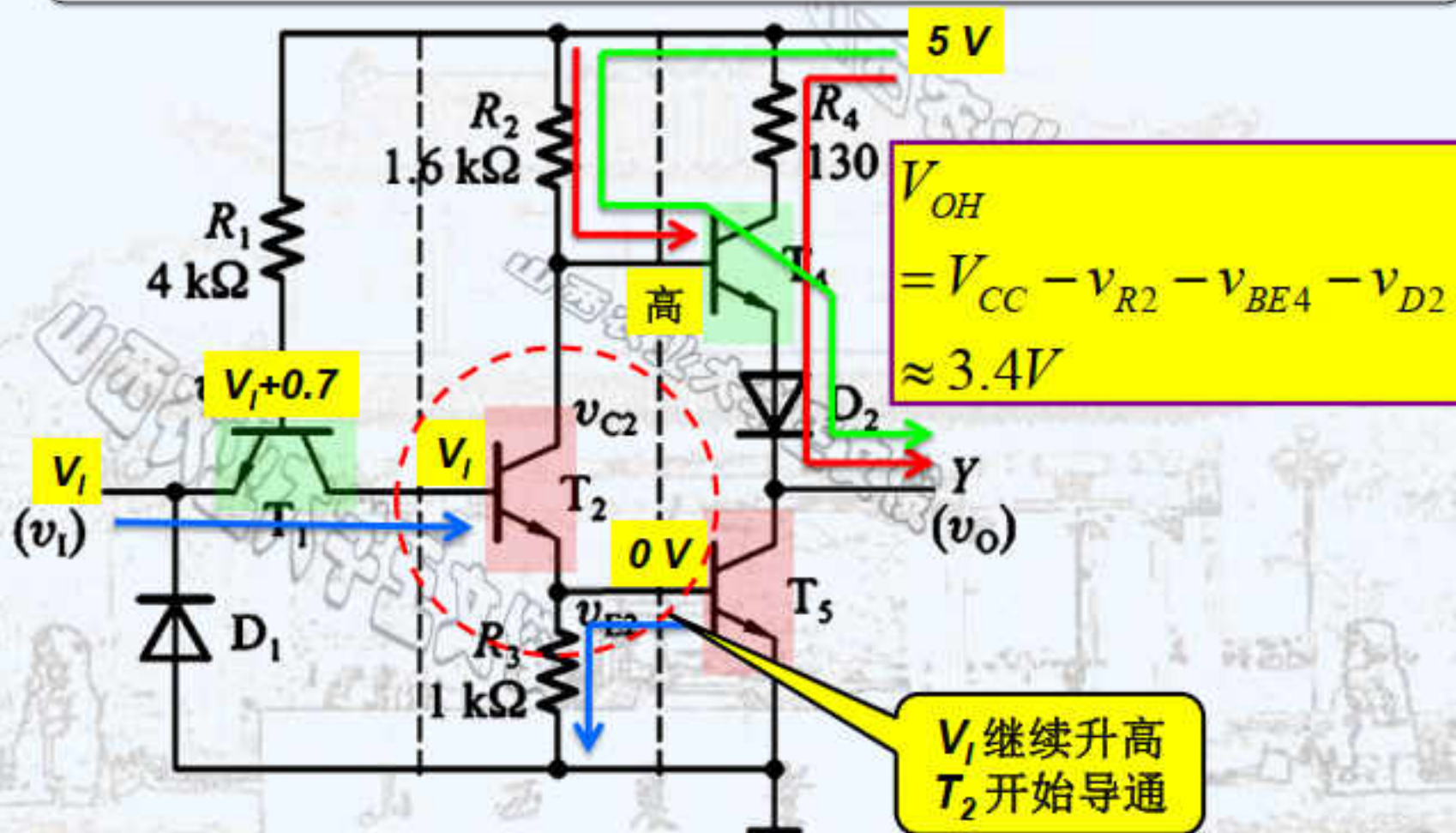


## 十八、TTL反相器的静态特性



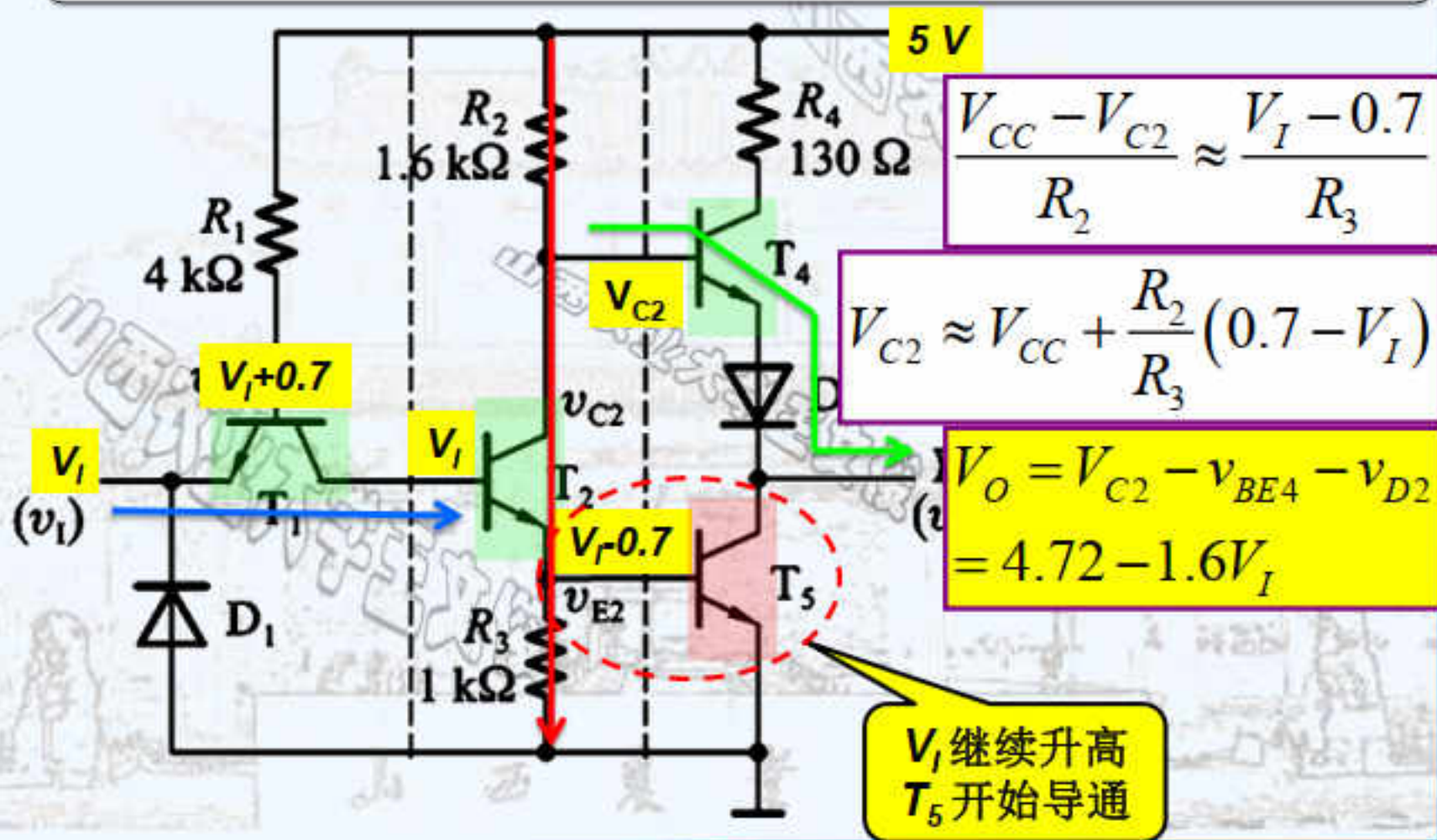
## 1、电压传输特性

① 当  $0 < V_I < 0.6\text{V}$ ,  $T_1$  导通,  $T_2$  截止,  $T_4$  导通,  $T_5$  截止



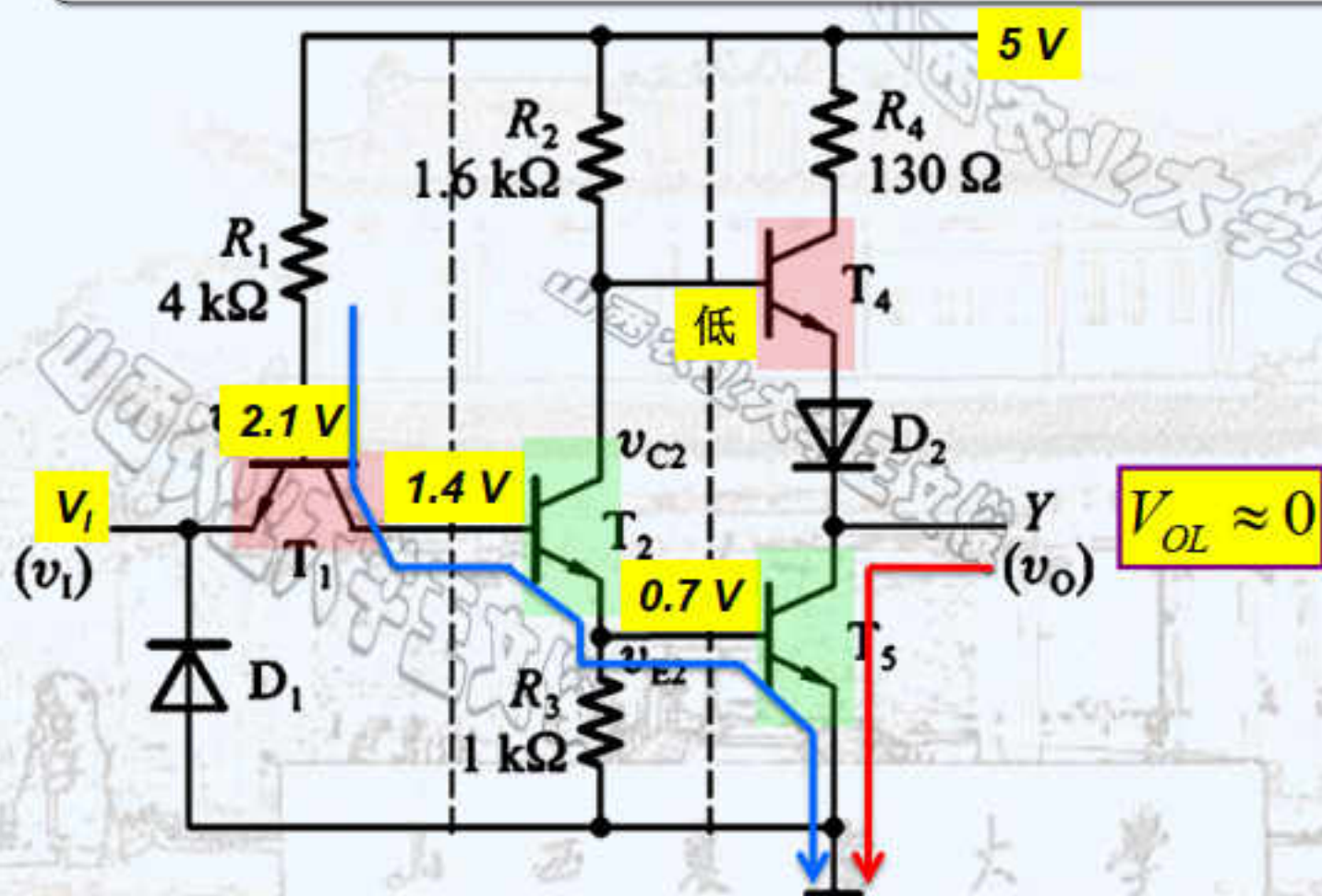


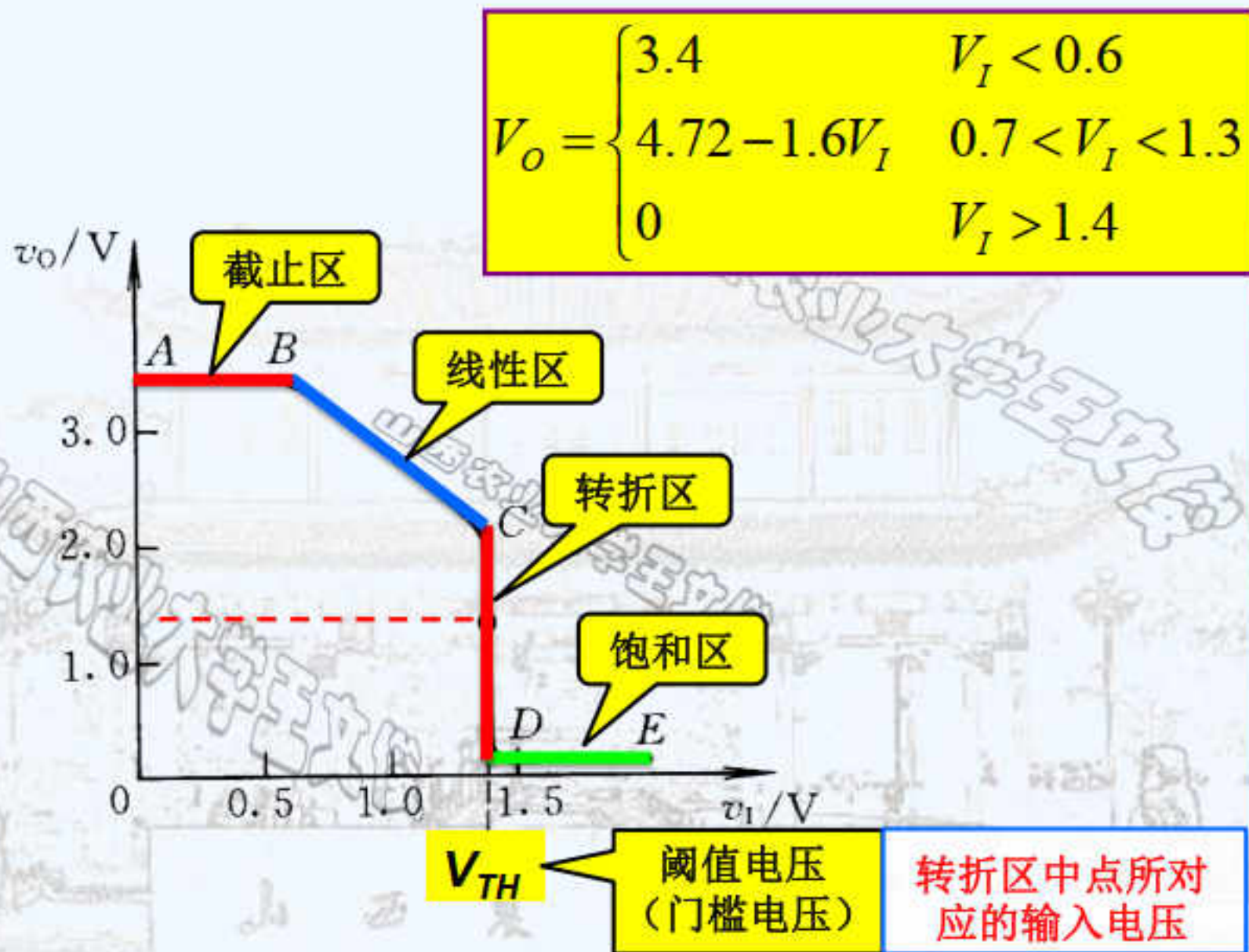
② 当  $0.7\text{ V} < V_I < 1.3\text{ V}$ ,  $T_1$  导通,  $T_2$  导通,  $T_4$  导通,  $T_5$  截止





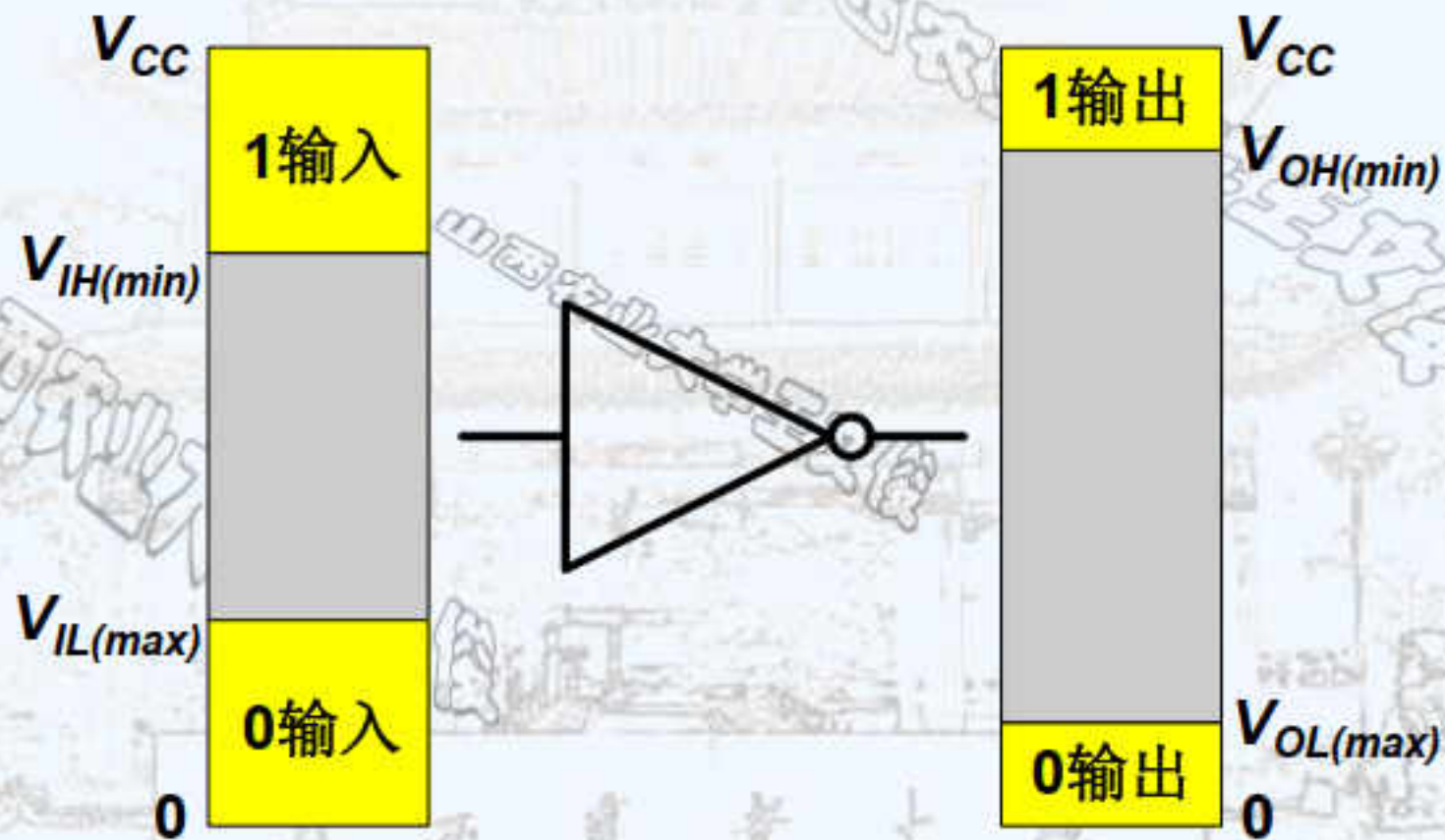
③ 当  $1.4\text{ V} < V_I$ ,  $T_1$ 截止,  $T_2$ 导通,  $T_4$ 截止,  $T_5$ 导通





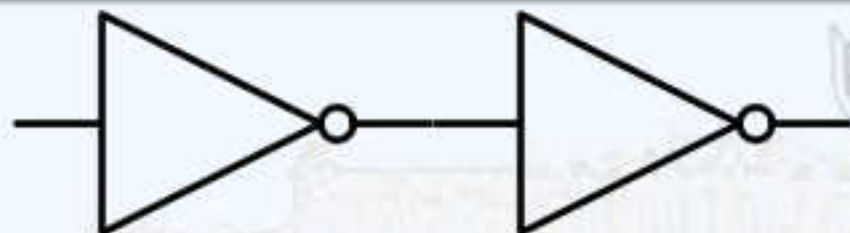
## • 2、输入端的噪声容限

门电路输入端和输出端电平信号存在一个正常的取值范围。



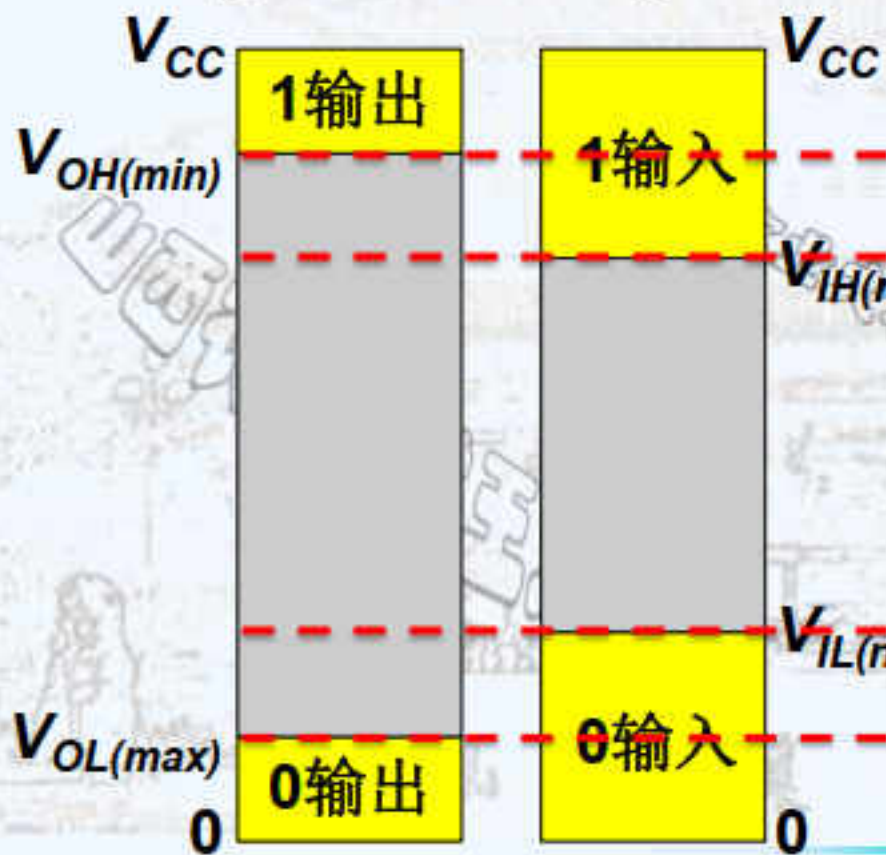


门电路串联：前一级输出为后一级输入



## 噪声容限

保证输出基本不变的条件  
下，允许输入信号的高、  
低电平有一个**波动范围**



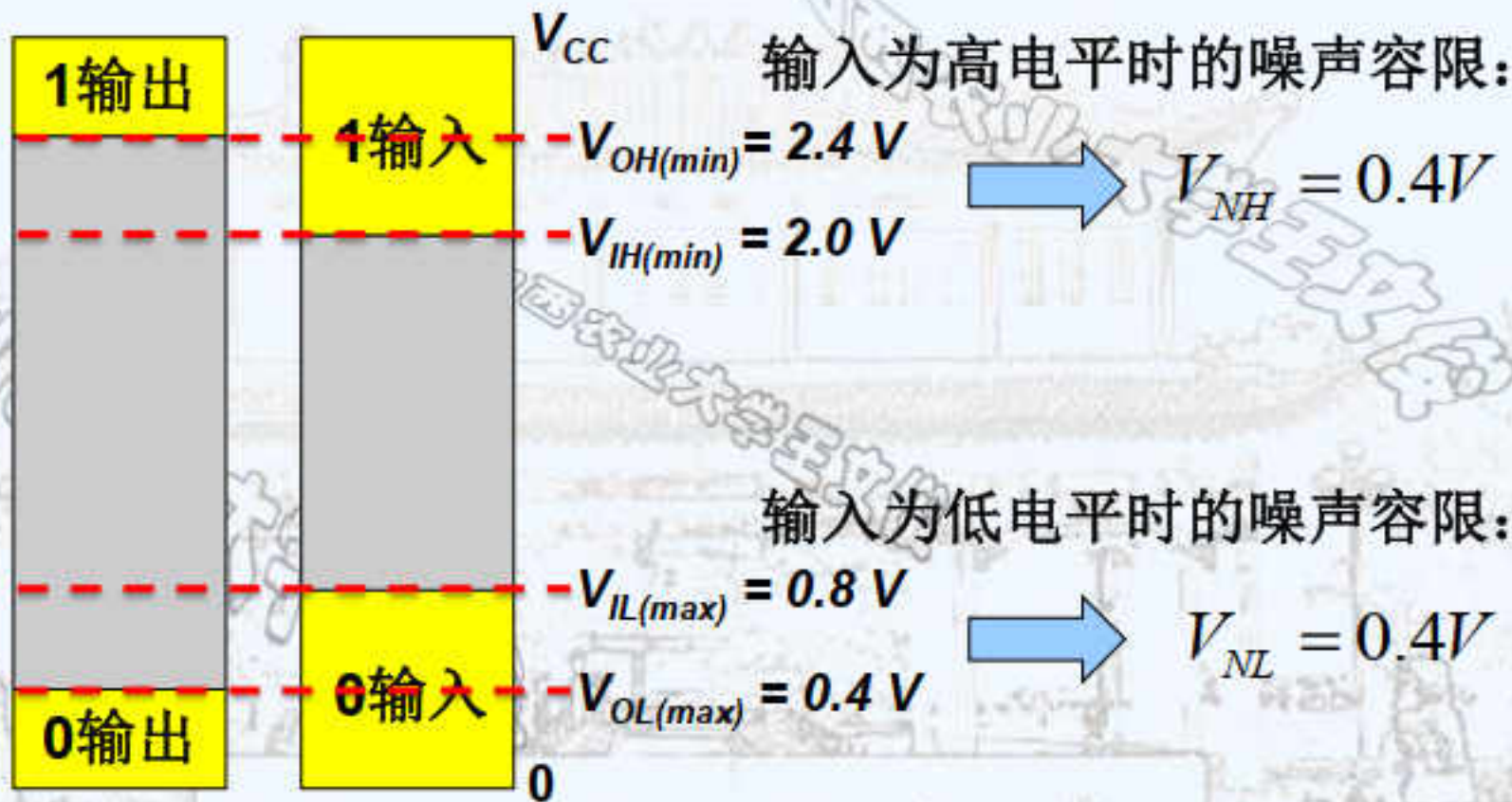
输入为高电平时的噪声容限：

$$V_{NH} = V_{OH(min)} - V_{IH(min)}$$

输入为低电平时的噪声容限：

$$V_{NL} = V_{IL(max)} - V_{OL(max)}$$

- 74系列门电路典型参数:



输入为高电平时的噪声容限:

$$V_{NH} = 0.4V$$

输入为低电平时的噪声容限:

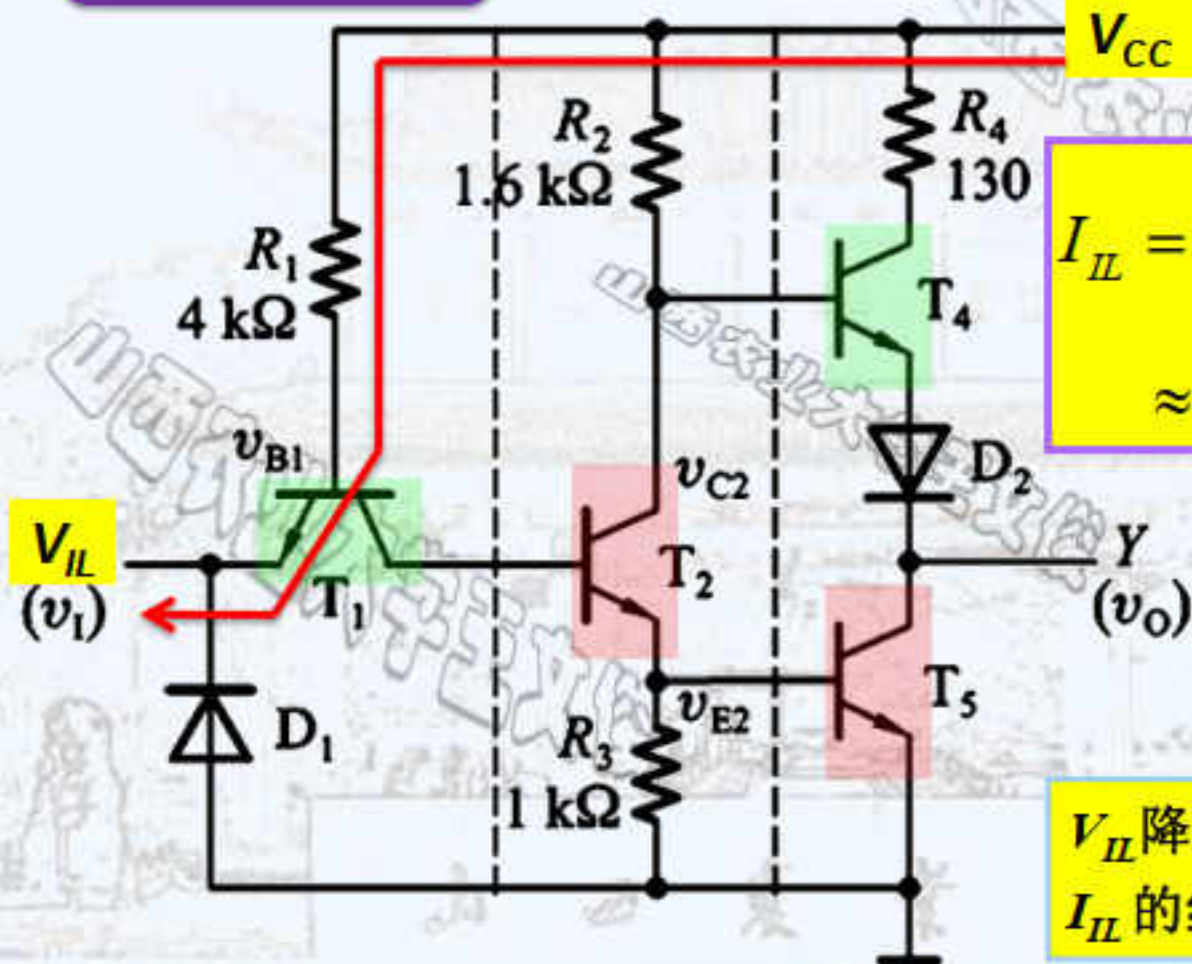
$$V_{NL} = 0.4V$$



### 3、输入端的输入特性

低电平输入

$$V_I = V_{IL} = 0.2 \text{ V}$$



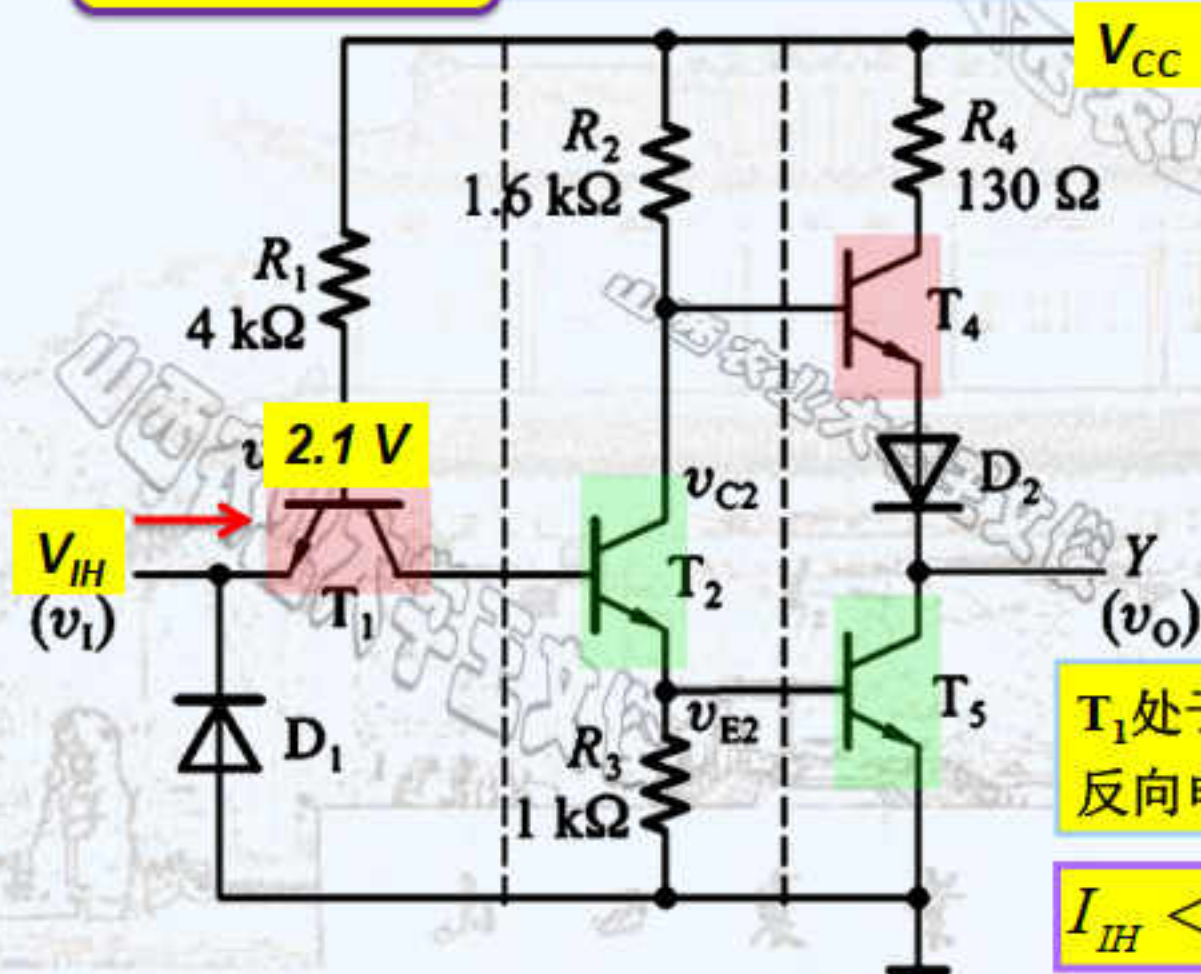
$$I_{IL} = \frac{-(V_{CC} - V_{EB1} - V_{IL})}{R_1} \approx -1 \text{ mA}$$

$V_{IL}$  降低,  $R_1$  两端压差增大,  $I_{IL}$  的绝对值增大



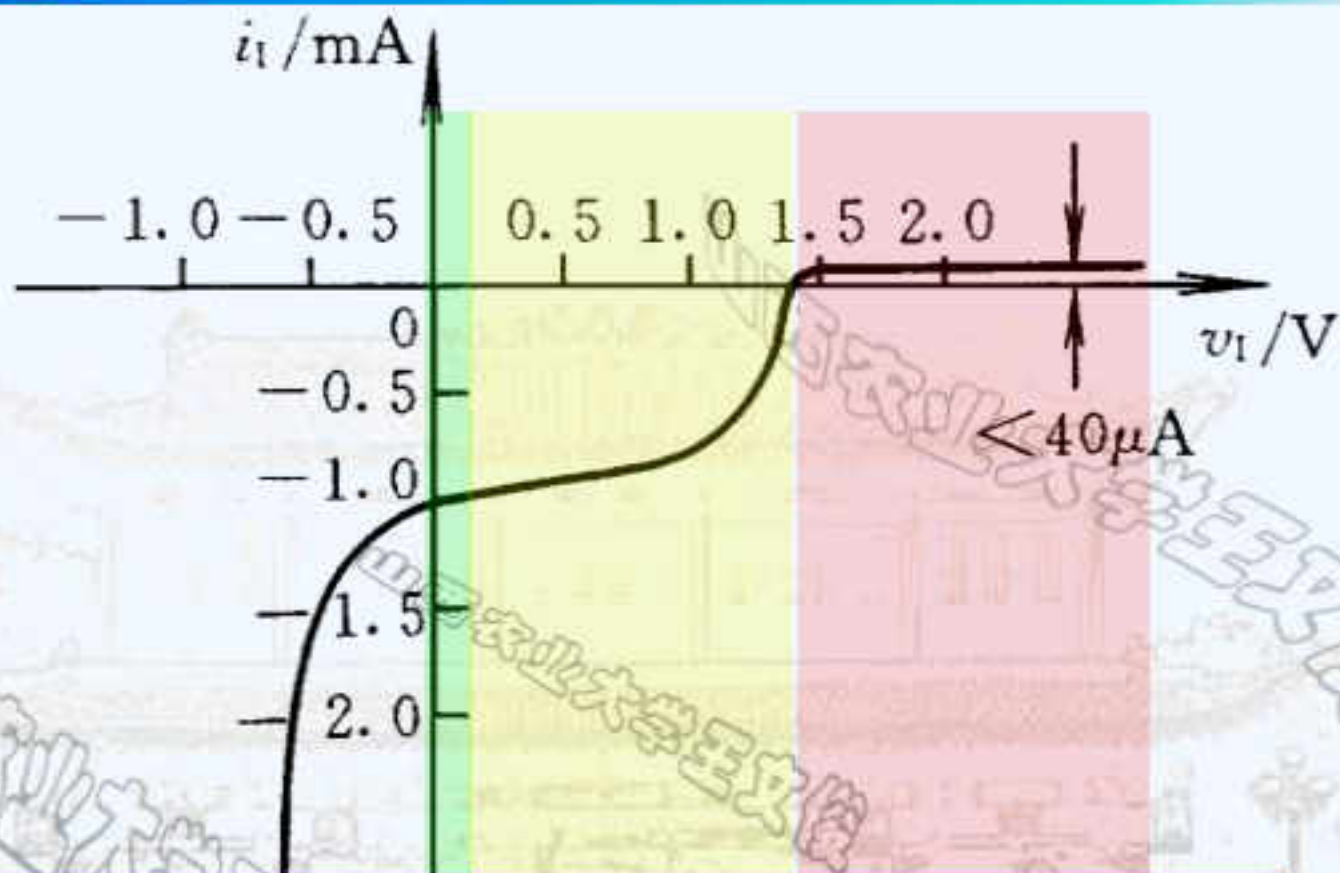
高电平输入

$$V_I = V_{IH} = 3.4 \text{ V}$$



$T_1$ 处于截止状态，  
反向电流极小。

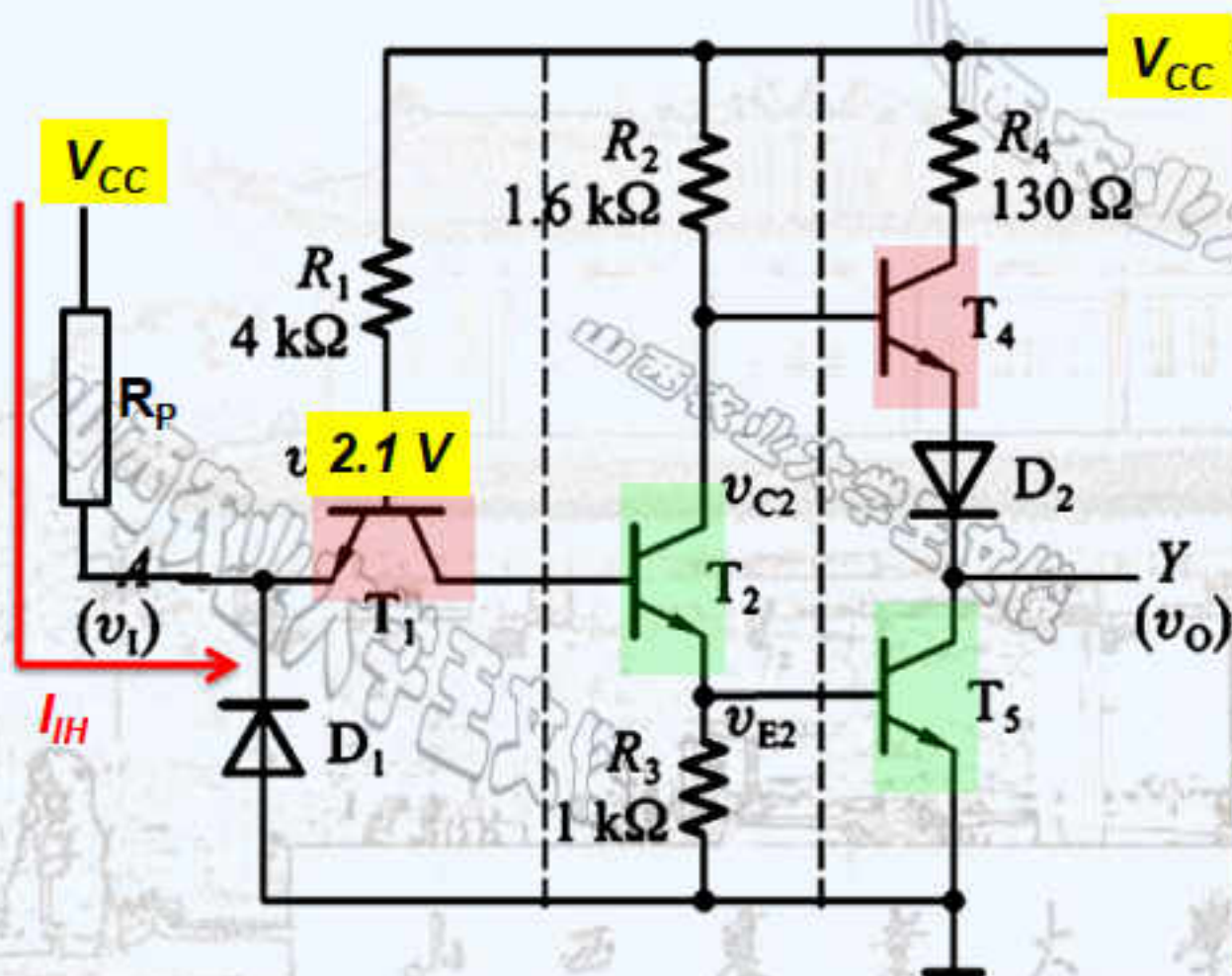
$$I_{IH} < 40 \mu A$$



低电平输入	过渡	高电平输入
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 反向大电流</li> <li>• 约 -1 mA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 时间短</li> <li>• 不分析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 正向小电流</li> <li>• <math>&lt; 40 \mu A</math></li> </ul>

## 带电阻输入

- 电源与输入端之间接入电阻 $R_P$ （几十千欧内）



输入端电流

 $I_{IH}$  很小

输入端

 $v_I \approx V_{CC}$ 

输入端接电源

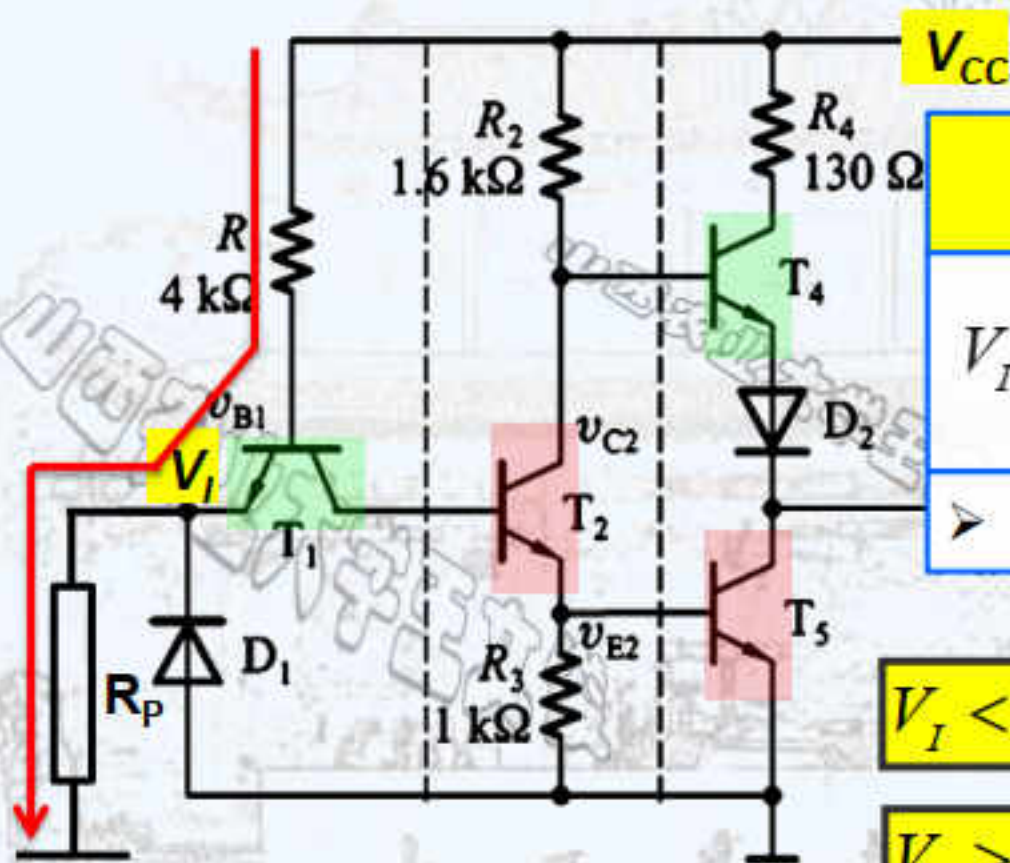
输入均为高电平



## 4、输入端的负载特性

### 负载特性

- 输入端与地之间接入电阻  $R_P$



$$V_I < 0.6 V$$

$$V_I = \frac{R_P}{R_1 + R_P} (V_{CC} - V_{BE1})$$

➤  $R_P$  增大,  $V_I$  随之增大

$$V_I < 0.6V$$

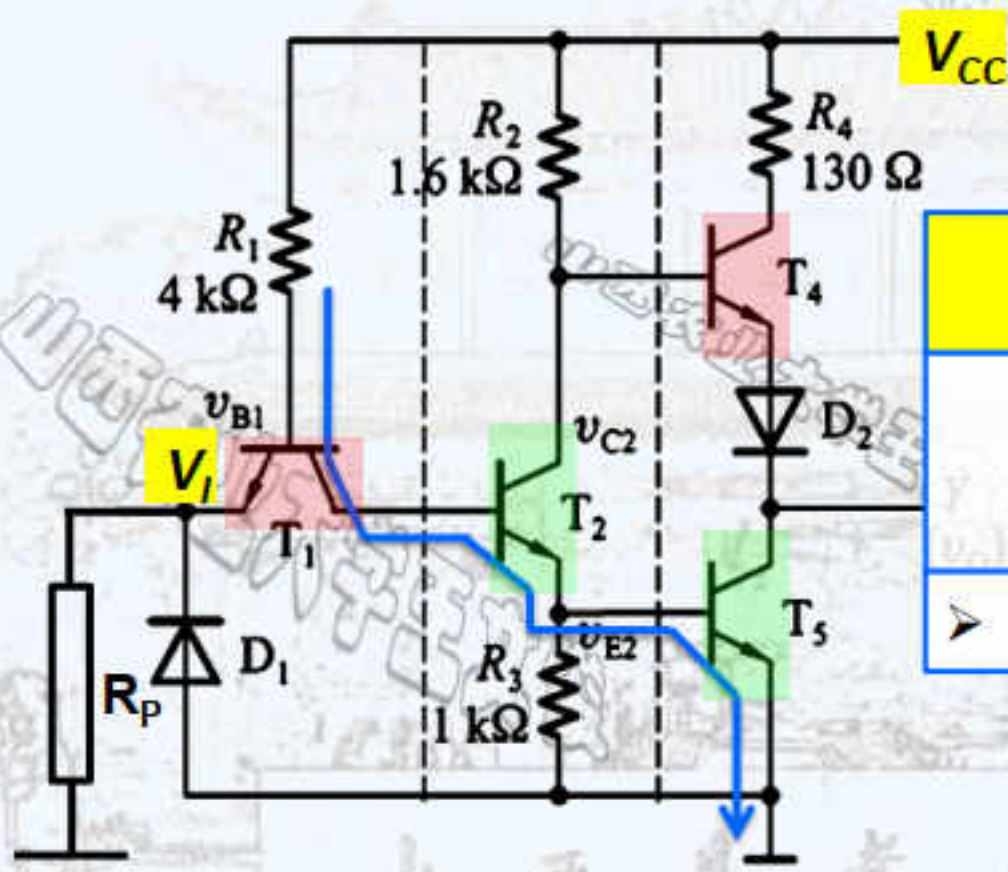
$$R_P < 648\Omega$$

$$V_I > 1.4V$$

$$R_P > 1.9k\Omega$$

## 负载特性

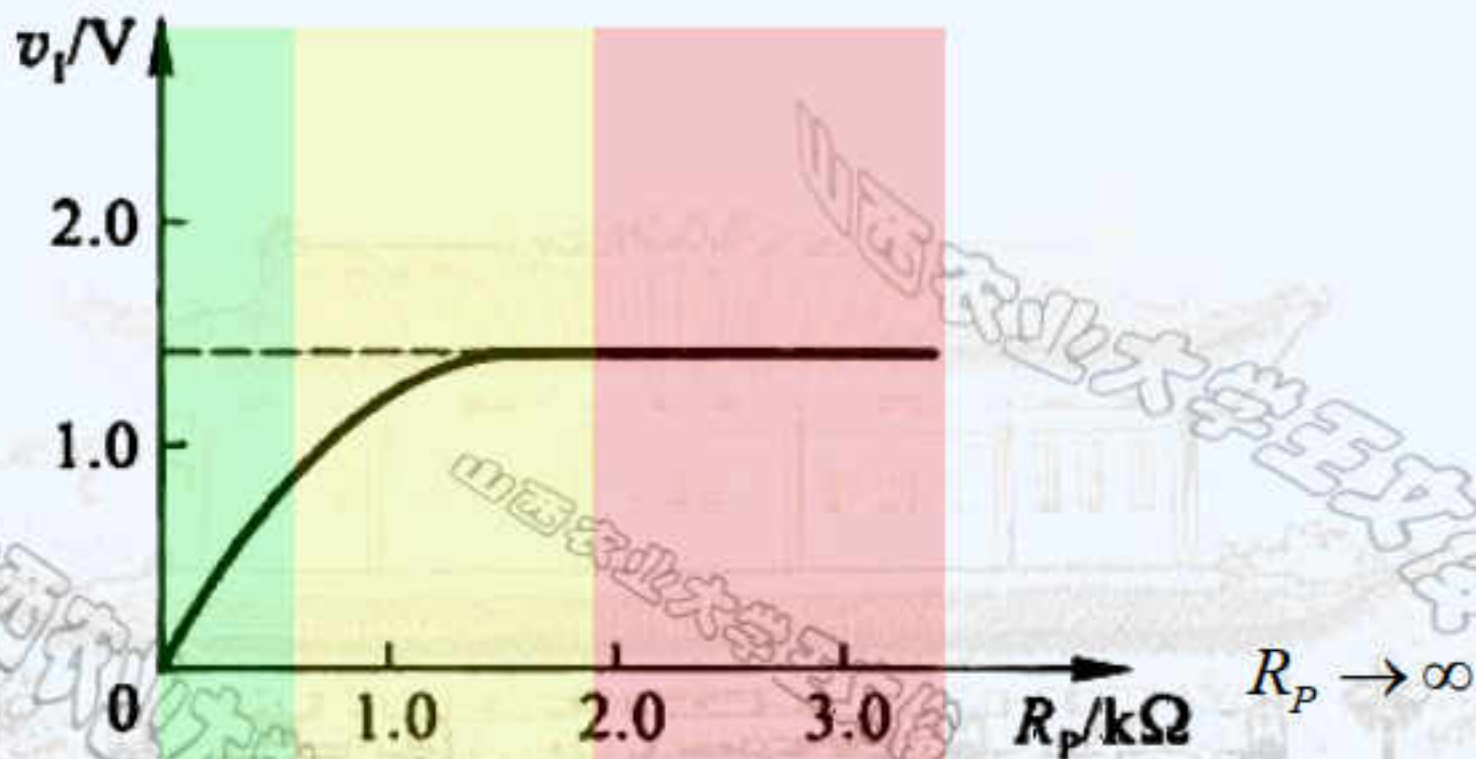
- 输入端与地之间接入电阻 $R_P$



$$V_I > 1.4 V$$

$$V_I = 1.4 V$$

➤  $R_P$  增大,  $V_I$  保持不变



$R_p < 600 \sim 800 \Omega$

• 低电平输入

$R_p > 2 k\Omega$

• 高电平输入



输入端悬空

• 高电平输入



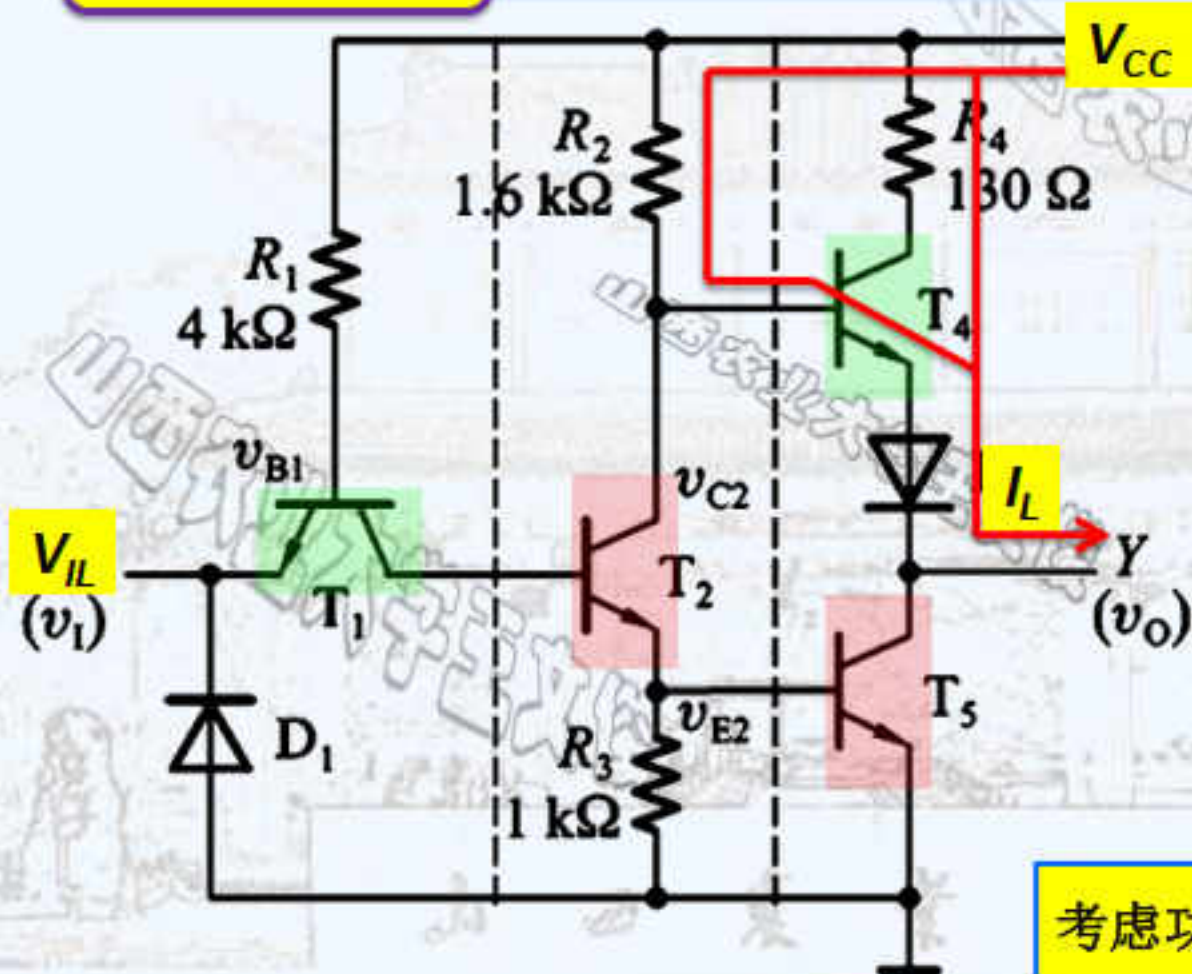
## 输入端接线方式与输入电平的关系总结

输入端接线方式		CMOS 电路	TTL 电路
接线方式	是否串接电阻		
接电源	无电阻	高电平	高电平
	有电阻	高电平	高电平
悬空	—	禁止悬空	高电平
接地	无电阻	低电平	低电平
	有电阻	低电平	小电阻，低电平 大电阻，高电平

## 5、输出特性

### 高电平输出

输出端的高电平输出电压与输出电流的关系



$$|I_L| < 5 \text{ mA}$$

- $T_4$  射级输出
- 输出电阻  $R_o$  小
- $V_{OH}$  变化很小

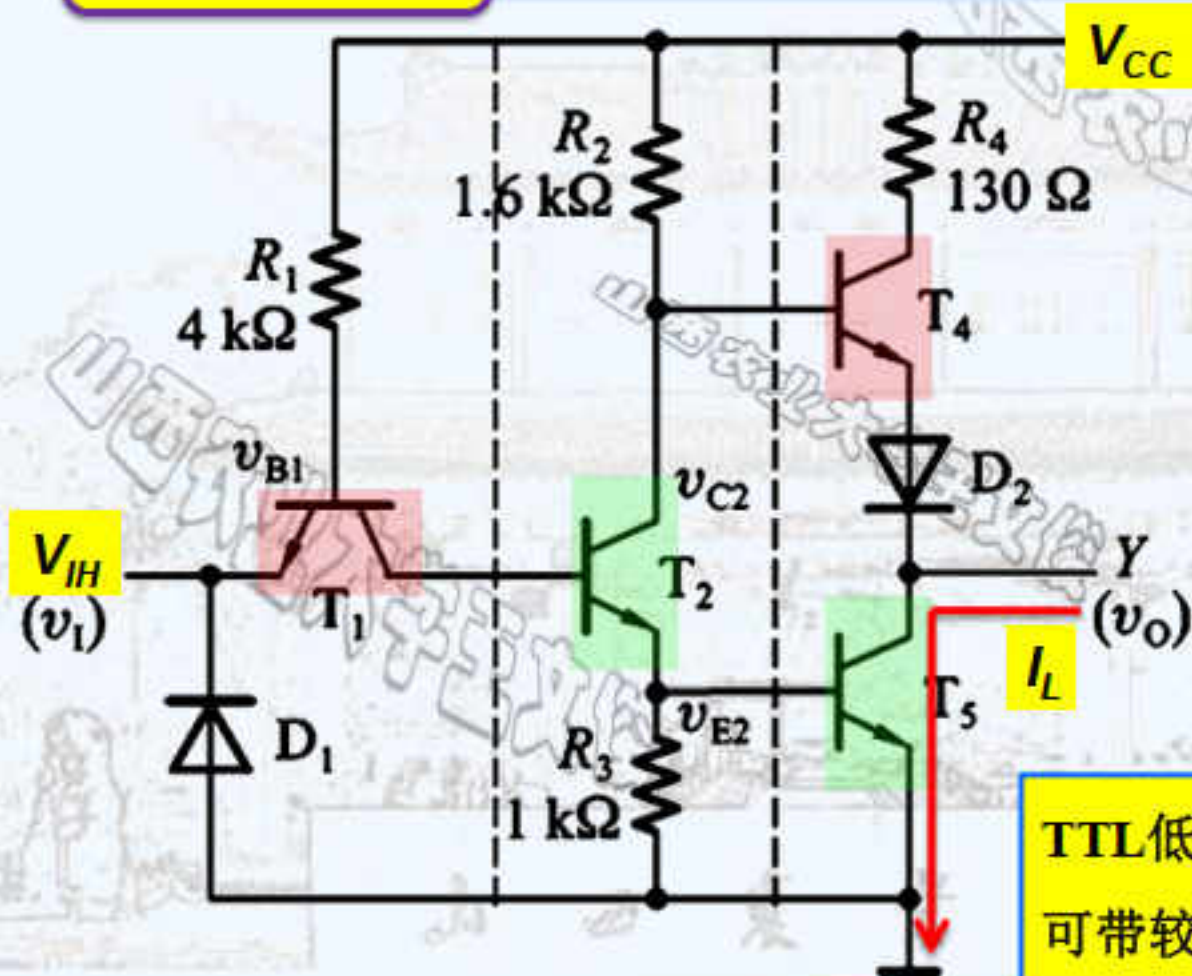
$$|I_L| > 5 \text{ mA}$$

- $T_4$  饱和导通
- $V_{OH}$  线性下降

考虑功耗,  $|i_{L(max)}| < 0.4 \text{ mA}$

## 低电平输出

• 输出端的低电平输出电压与输出电流的关系



$I_L$  在较大范围内

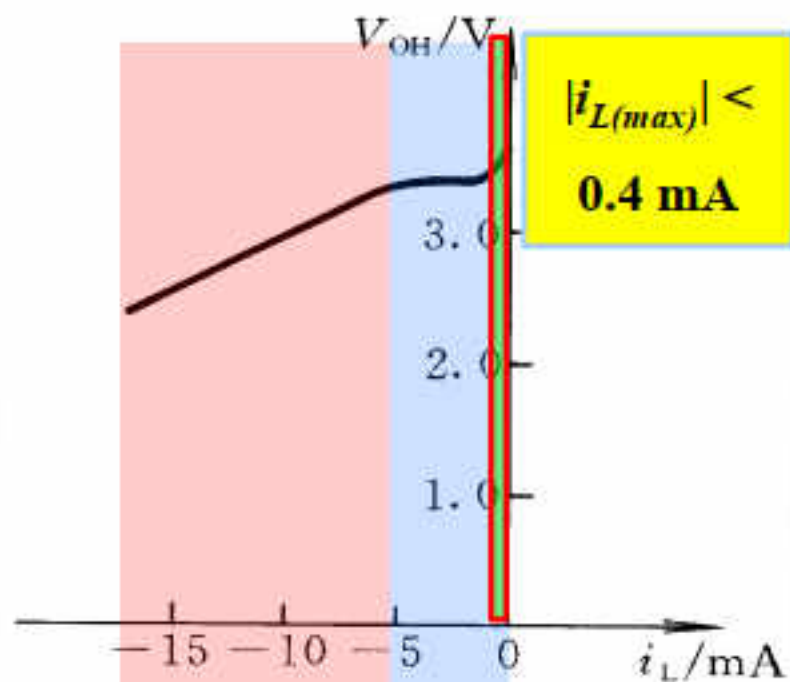
- $T_5$  饱和导通
- 输出电阻  $R_o$  小
- $V_{OL}$  线性升高

$$i_{L(max)} = 16 \text{ mA}$$

TTL低电平时允许较大电流，  
可带较大负载。



## 高电平输出特性



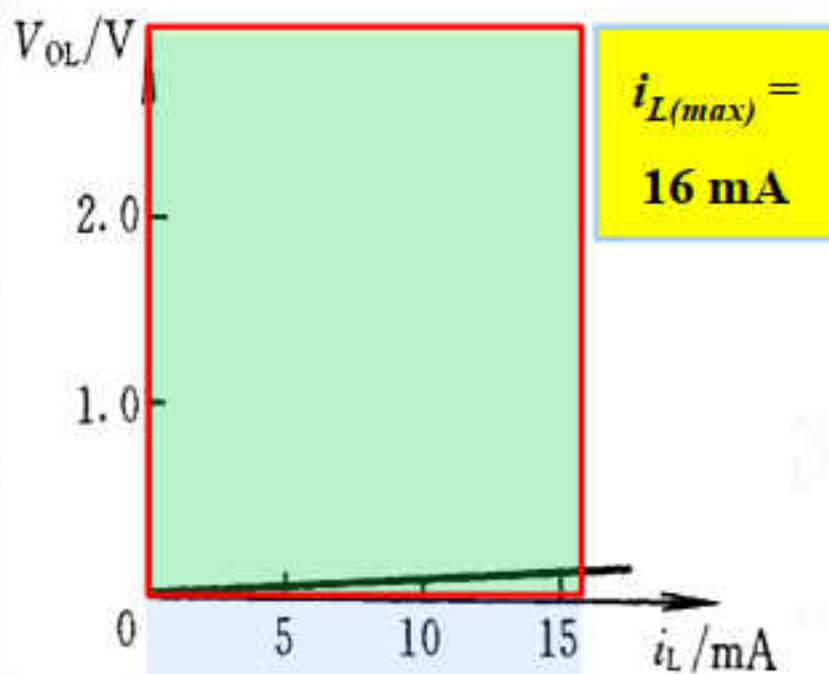
$|I_L| > 5 mA$

• 线性下降

$|I_L| < 5 mA$

• 变化很小

## 低电平输出特性

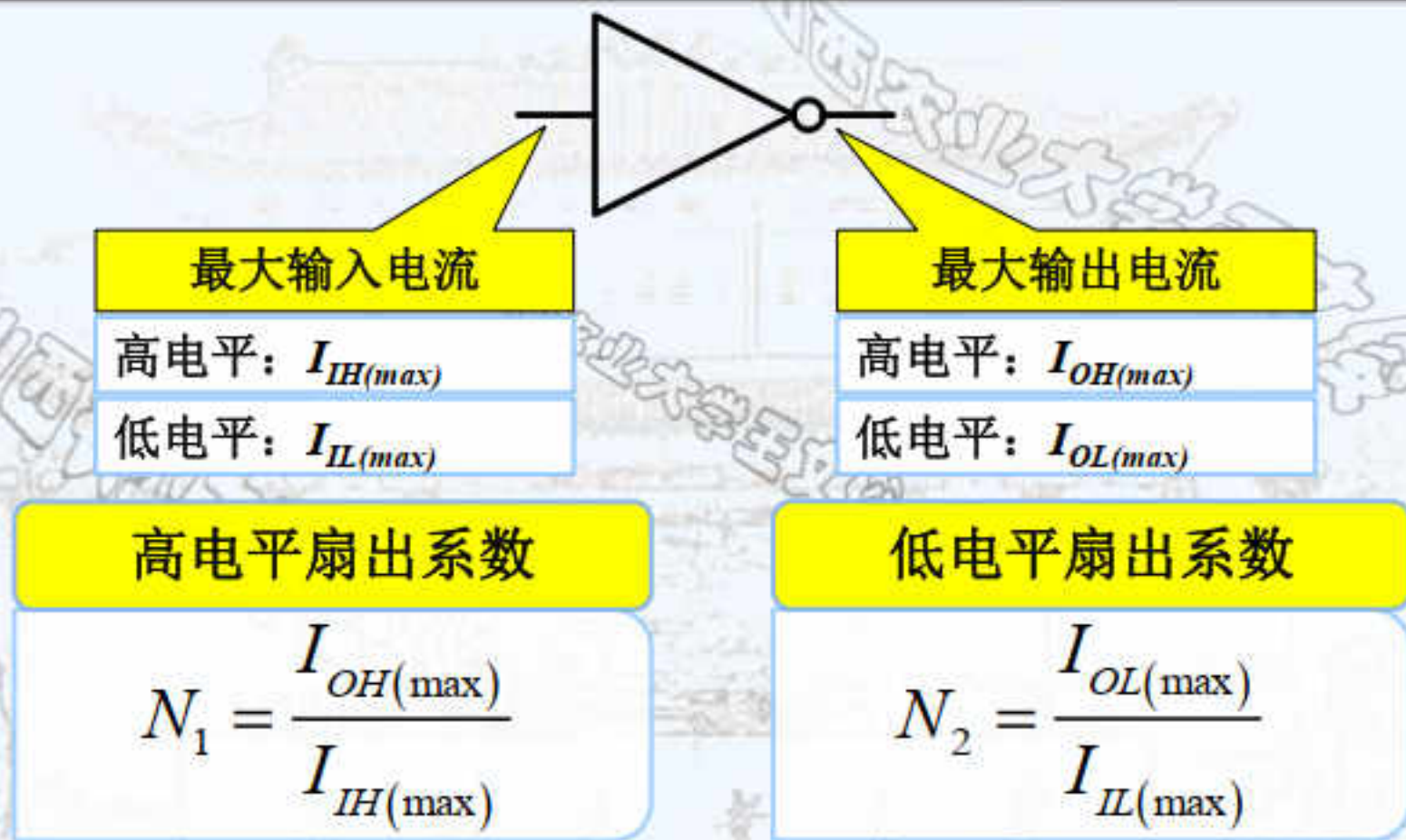


$I_L < 16 mA$

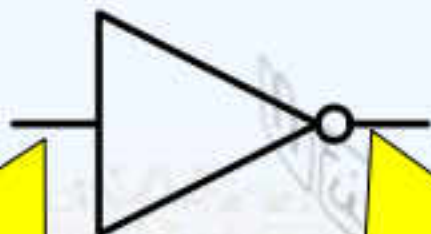
• 线性升高

## • 6、扇出系数

以**数字**表示一个电路**输出端**能够驱动**同类型**负载电路**输入端**的**数目**



- 例5：已知74系列TTL反相器的典型参数，求扇出系数



最大输入电流

高电平:  $I_{IH(max)} = 40 \mu A$

低电平:  $I_{IL(max)} = -1 mA$

最大输出电流

高电平:  $I_{OH(max)} = -0.4 mA$

低电平:  $I_{OL(max)} = 16 mA$

高电平扇出系数

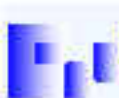
$$N_1 = \frac{I_{OH(max)}}{I_{IH(max)}} = \frac{0.4}{40 \times 10^{-3}} = 10$$

低电平扇出系数

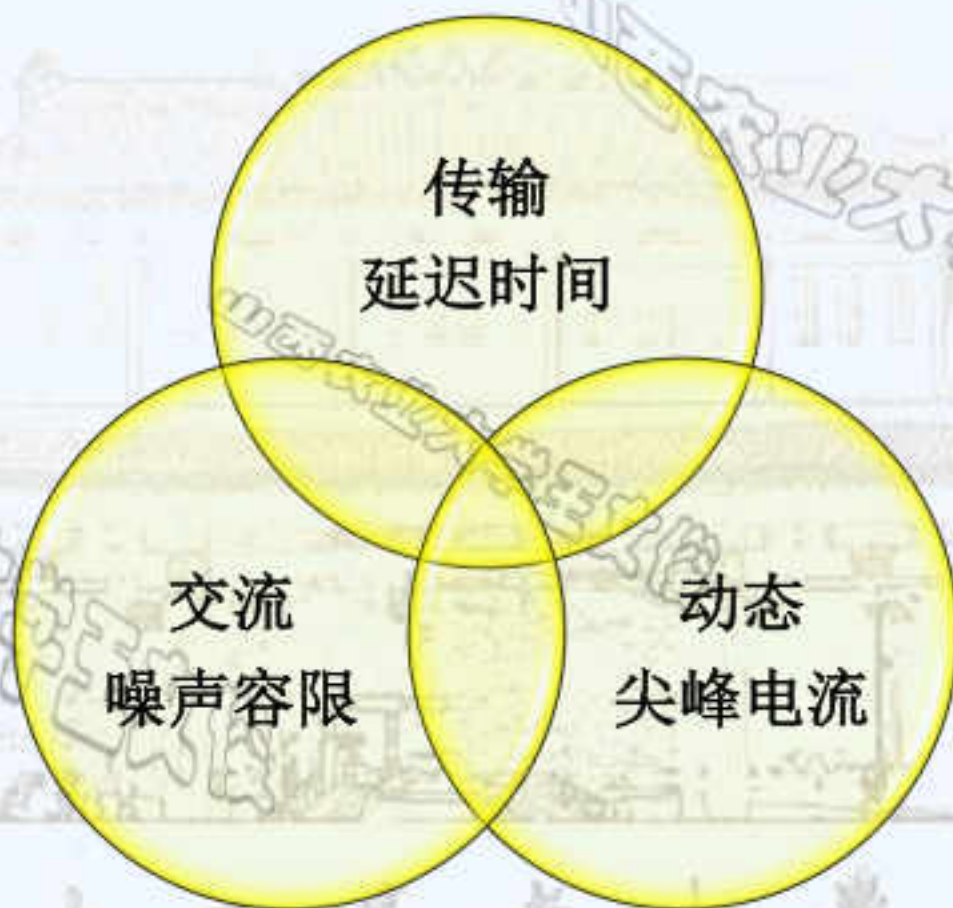
$$N_2 = \frac{I_{OL(max)}}{I_{IL(max)}} = \frac{16}{1} = 16$$

74系列TTL反相器的扇出系数为10。





## 十九、TTL反相器的动态特性



## • 1、传输延迟时间

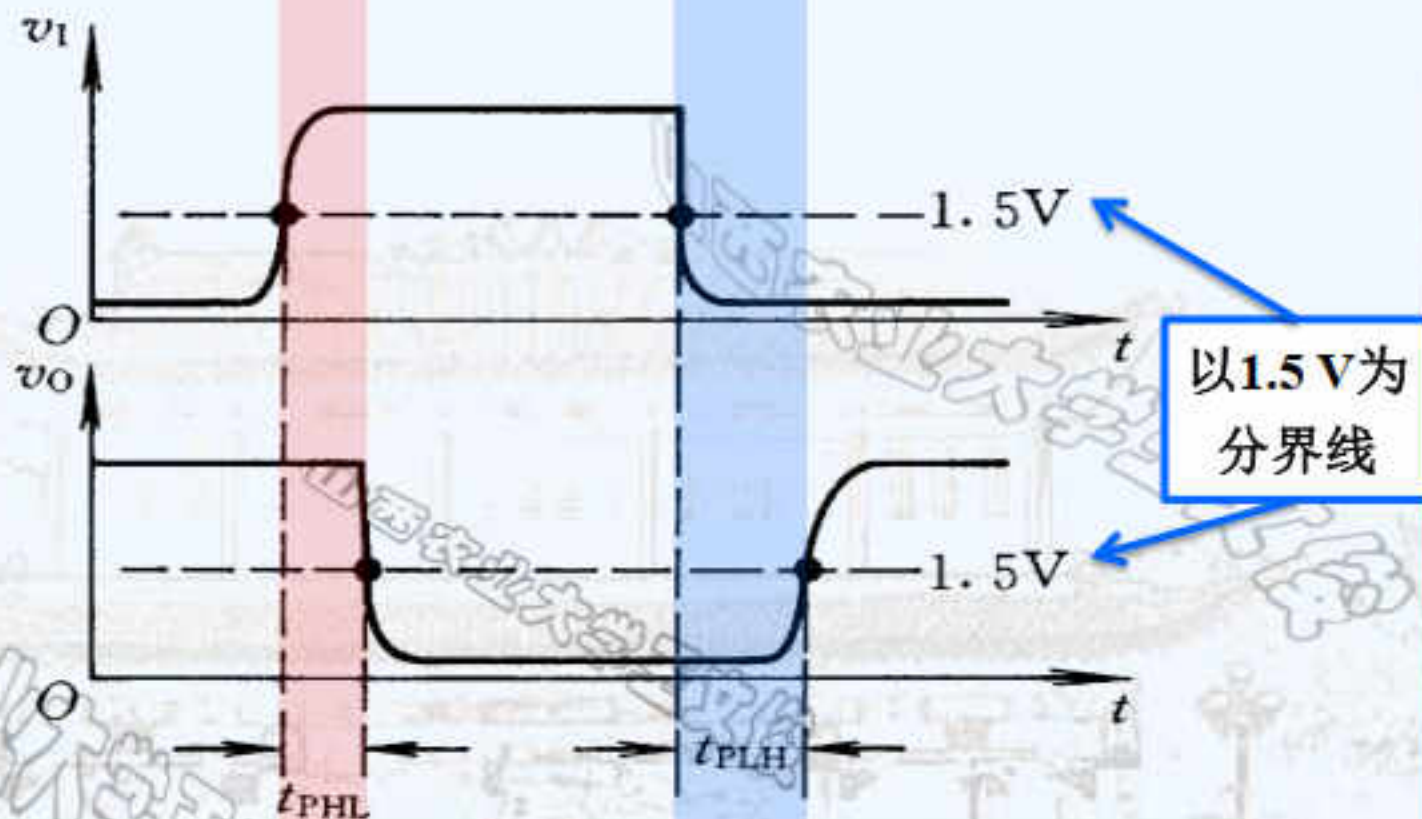
二极管、三极管  
状态转变需要一定时间

二极管、三极管等  
存在寄生电容

输出电压波形  
出现延迟

波形的上升沿与下降沿  
变坏

山西农业大学



输出由**高**电平跳变为**低**电平的传输延迟时间记做  $t_{PHL}$

输出由**低**电平跳变为**高**电平的传输延迟时间记做  $t_{PLH}$

$T_5$ 从深度饱和导通向截止转换用时较长，因此  $t_{PLH}$  略大于  $t_{PHL}$ 。

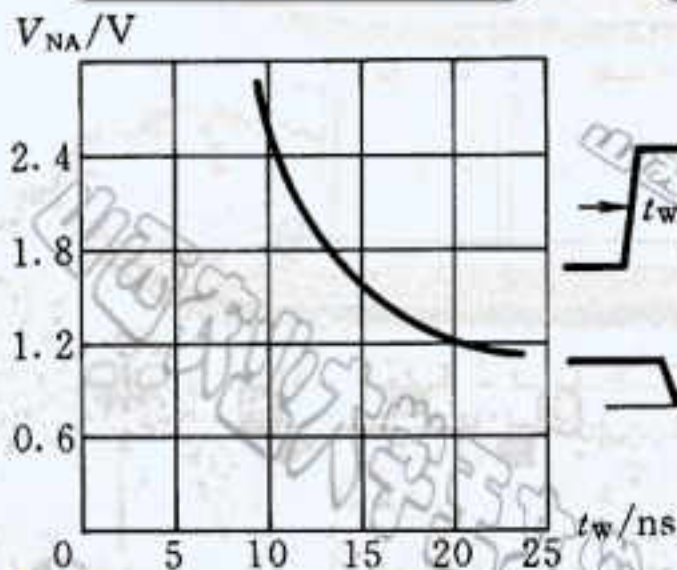


## 2、交流噪声容限

三极管**开关时间**  
分布电容**充放电**

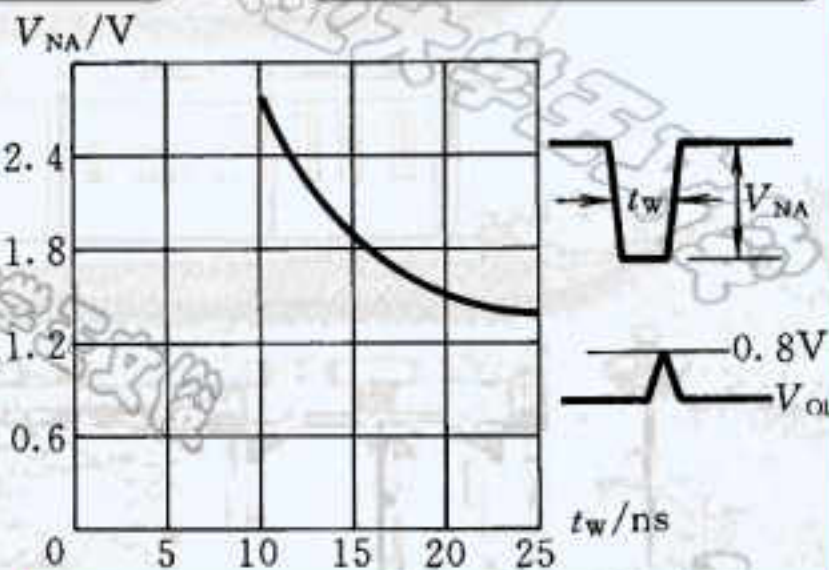
对窄脉冲信号  
具有**缓冲**作用

交流噪声容限**远大于**  
直流噪声容限



正脉冲噪声容限

$V_{OH} \rightarrow V_{IH(min)}(2.0V)$ 的脉冲幅度

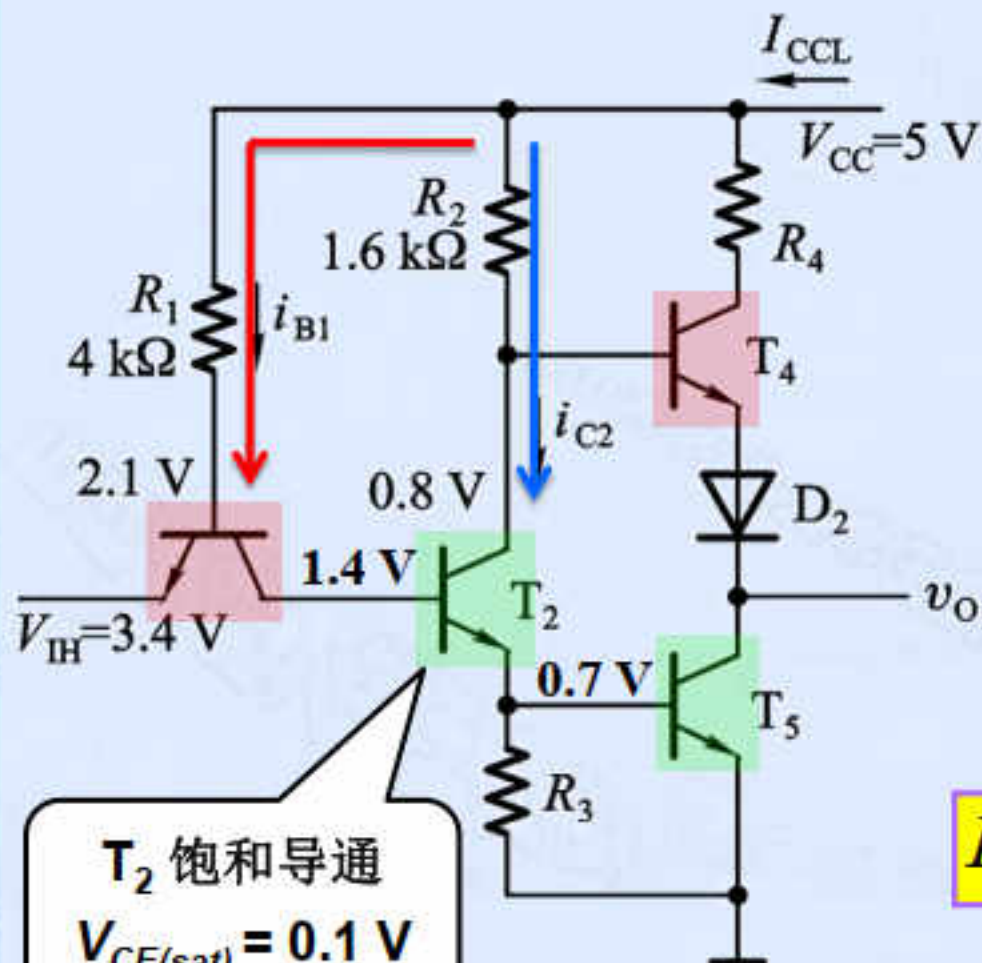


负脉冲噪声容限

$V_{OL} \rightarrow V_{IL(max)}(0.8V)$ 的脉冲幅度

### • 3、动态尖峰电流



低电平输出  $I_{CCL}$ 

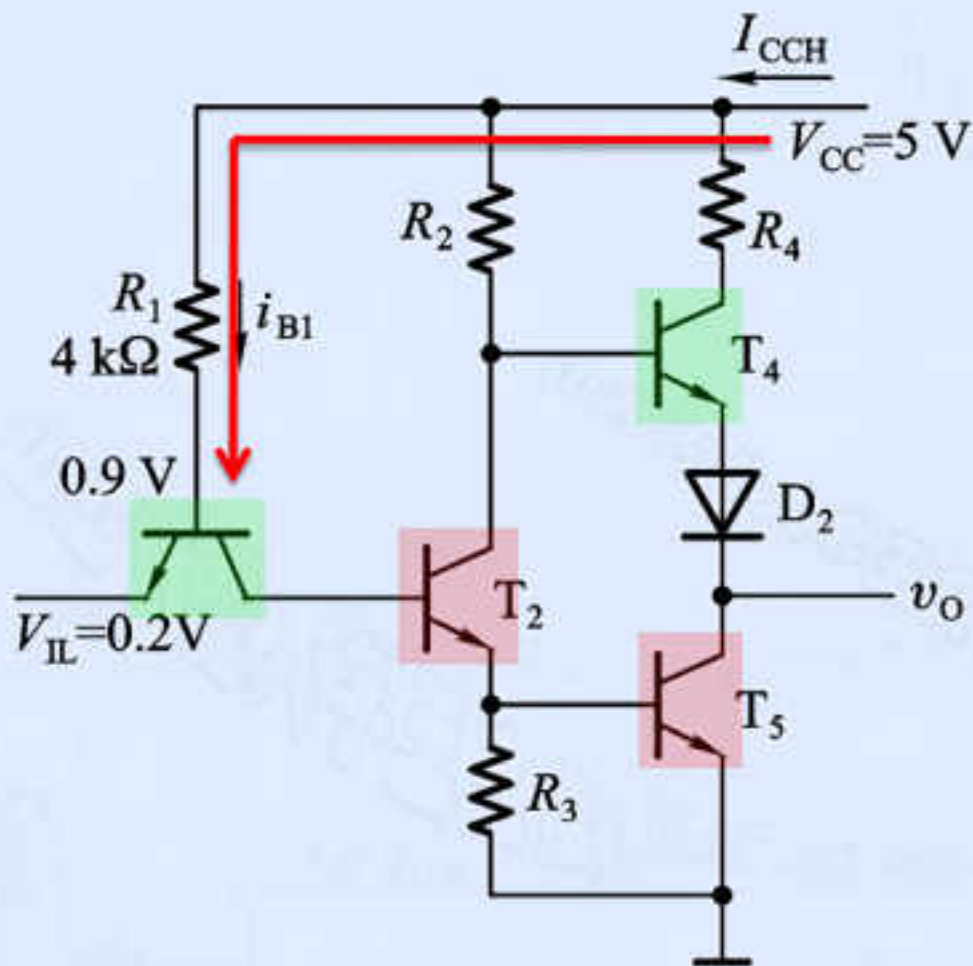
$$i_{B1} = \frac{V_{CC} - V_{B1}}{R_1}$$

$$i_{C2} = \frac{V_{CC} - V_{C2}}{R_2}$$

$$I_{CCL} = i_{B1} + i_{C2} \approx 3.4 \text{ mA}$$

$T_2$  饱和导通  
 $V_{CE(sat)} = 0.1 \text{ V}$



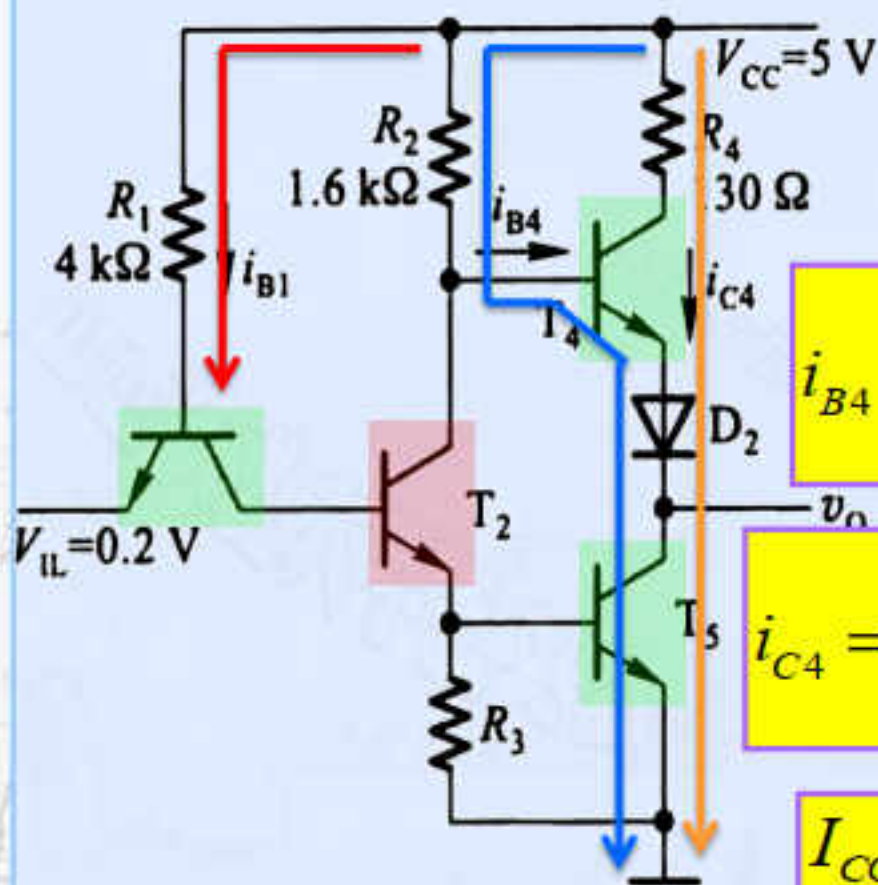
高电平输出  $I_{CCH}$ 

$$i_{B1} = \frac{V_{CC} - V_{B1}}{R_1}$$

$$I_{CCH} = i_{B1} \approx 1 mA$$

低  $\rightarrow$  高  $I_{CCM}$

动态变化时会出现短时间内  $T_4$ 、 $T_5$  同时导通，出现很大的瞬间电流

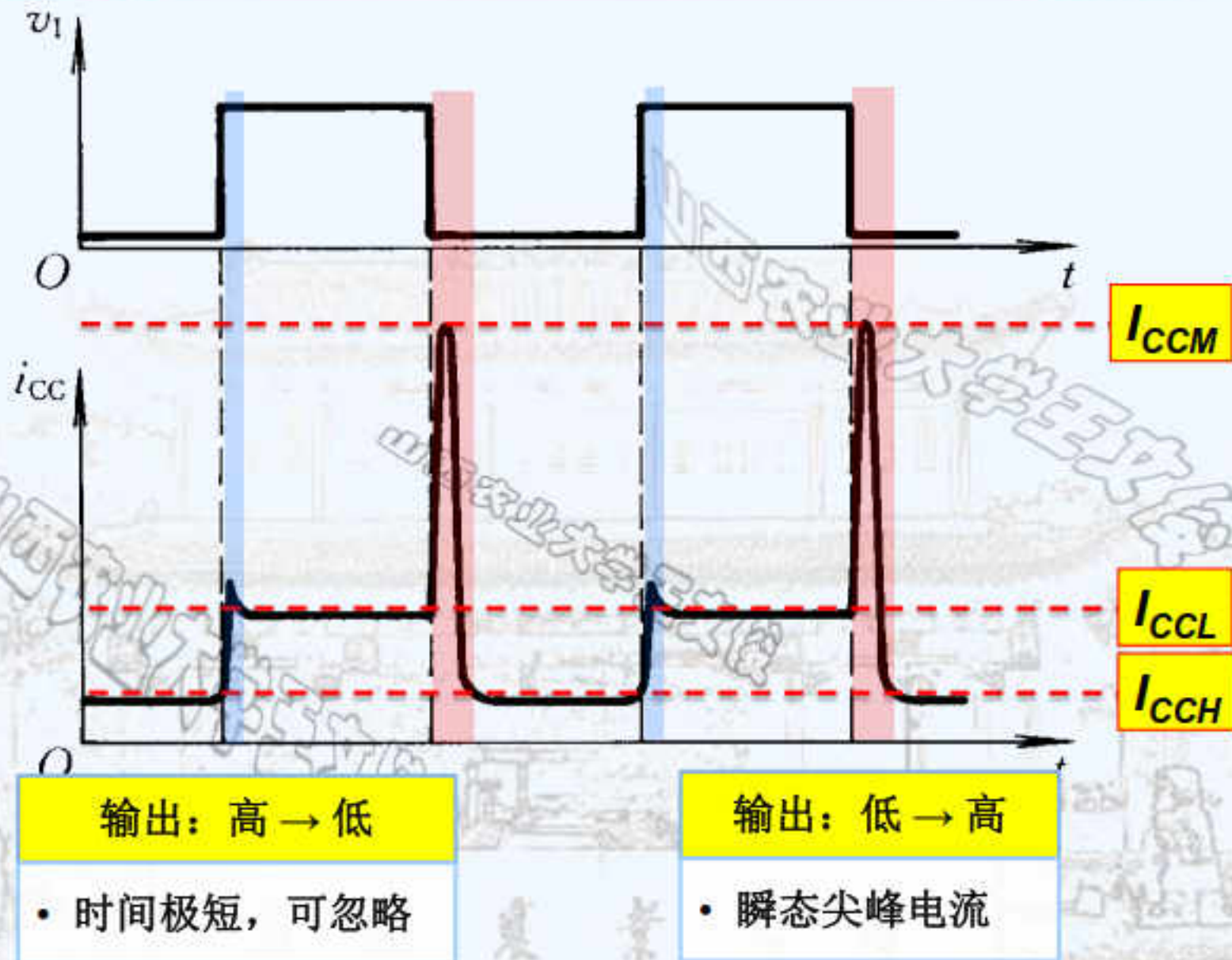


$$i_{B1} = \frac{V_{CC} - v_{B1}}{R_1}$$

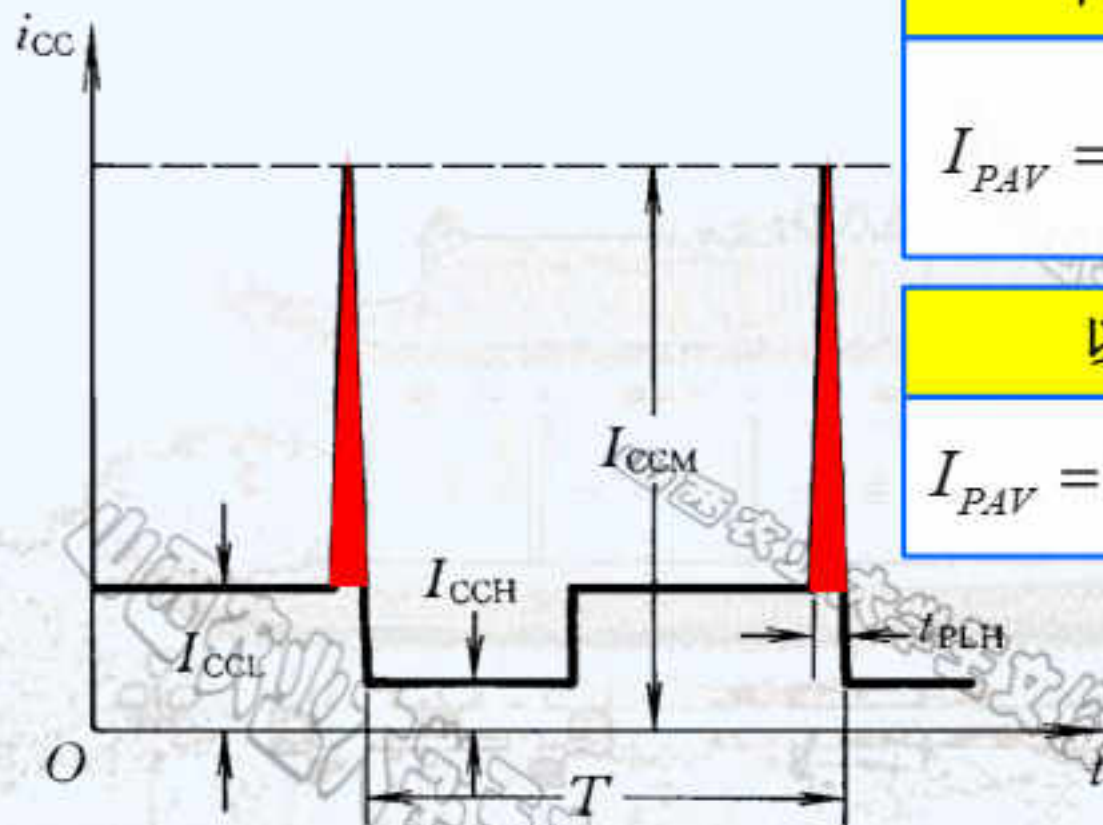
$$i_{B4} = \frac{V_{CC} - v_{BE4} - v_{D2} - V_{CE(sat)5}}{R_2}$$

$$i_{C4} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)4} - v_{D2} - V_{CE(sat)5}}{R_4}$$

$$I_{CCM} = i_{B1} + i_{B4} + i_{C4} \approx 34.7mA$$







一个周期内尖峰脉冲平均值

$$I_{PAV} = \frac{0.5(I_{CCM} - I_{CCL})t_{PLH}}{T}$$

以脉冲重复频率表示

$$I_{PAV} = 0.5f(I_{CCM} - I_{CCL})t_{PLH}$$

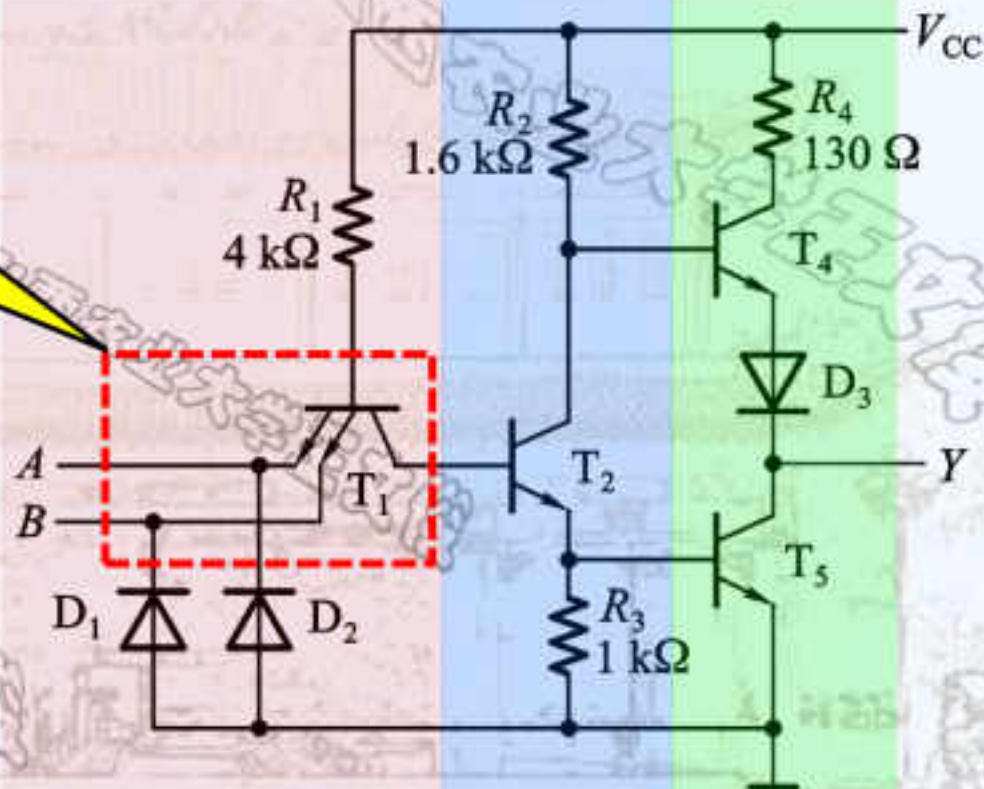
若高低电平持续时间相等，则电源电流的平均值  $I_{CCAV}$  为：

$$I_{CCAV} = 0.5(I_{CCH} + I_{CCL}) + 0.5f(I_{CCM} - I_{CCL})t_{PLH}$$

## 二十、各种逻辑功能的TTL门电路

### • 1、与非门

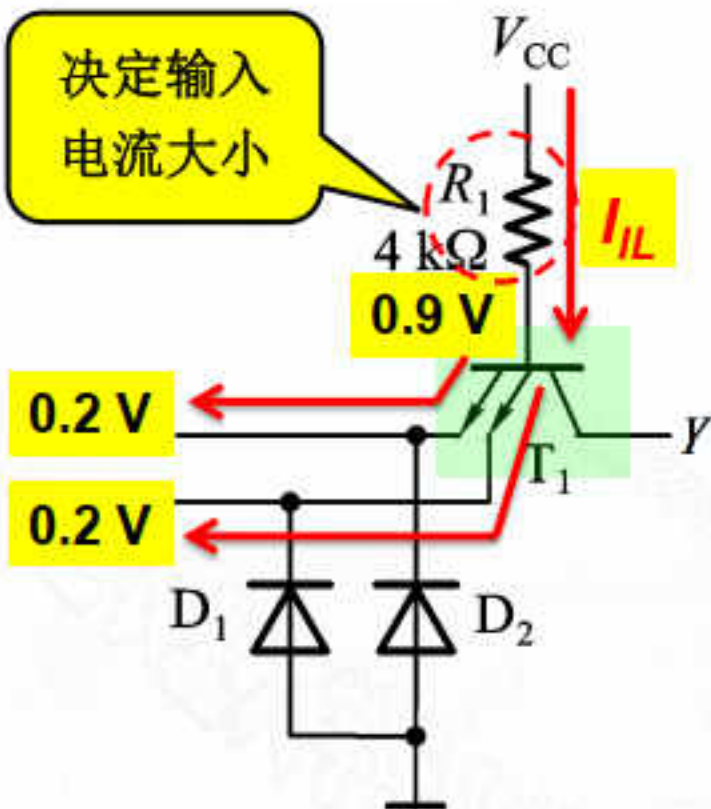
多发射级三极管  
实现与逻辑关系



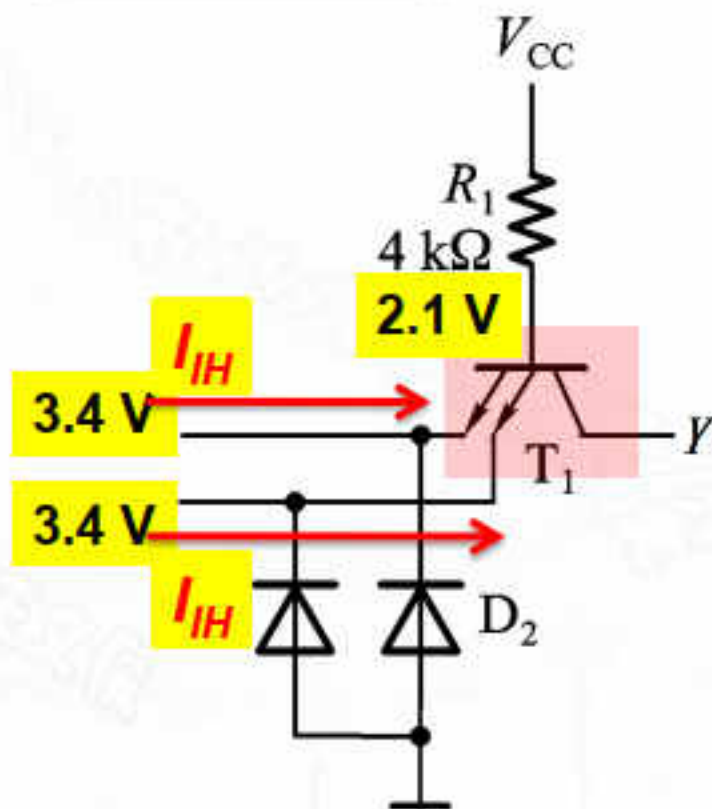
输入级

倒相级

输出级

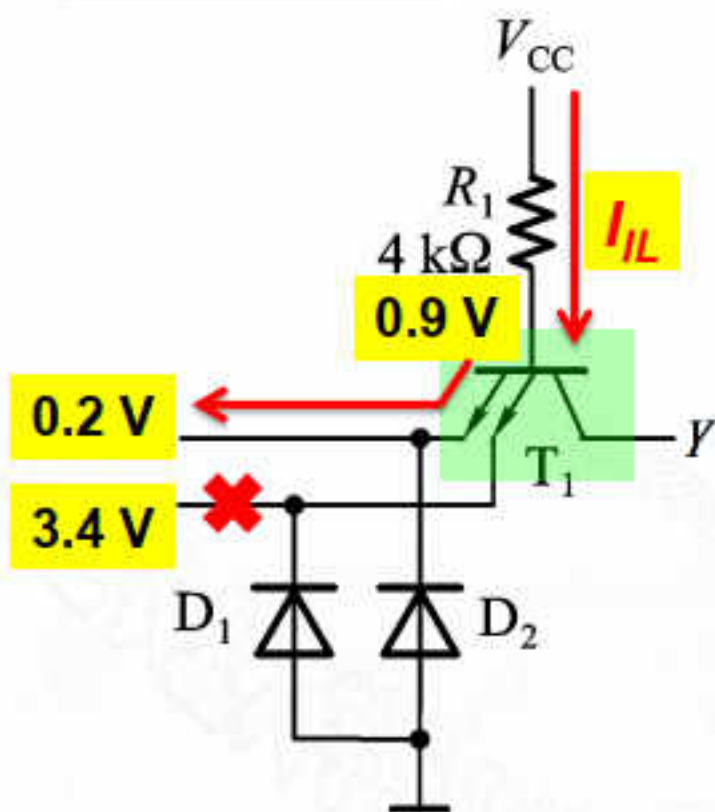
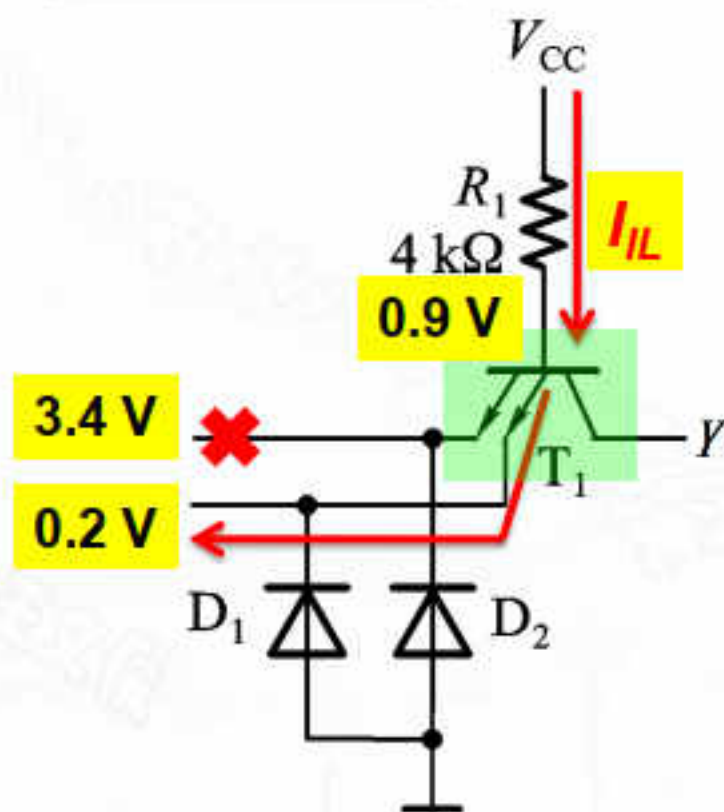
**A = 0, B = 0**决定输入  
电流大小**Y = 0**

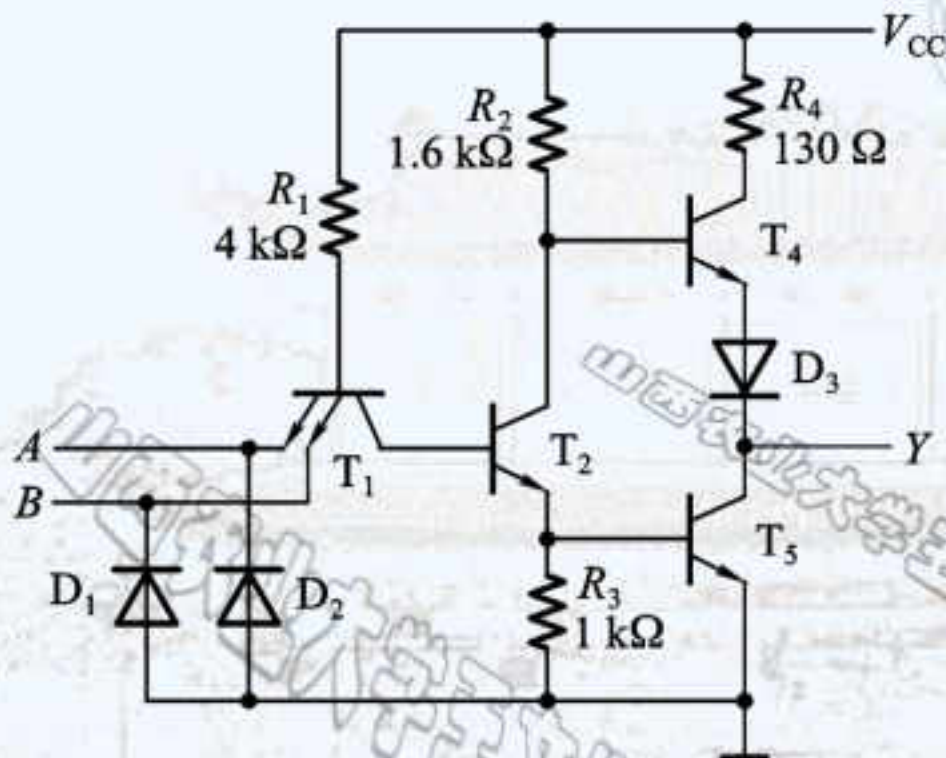
多个输入端共用一个输入电流

**A = 1, B = 1****Y = 1**

每个输入端单独一个输入电流



**A = 0, B = 1****Y = 0****多个输入端共用一个输入电流****A = 1, B = 0****Y = 0****多个输入端共用一个输入电流**



TTL与非门

## 逻辑功能

$$Y = (AB)'$$

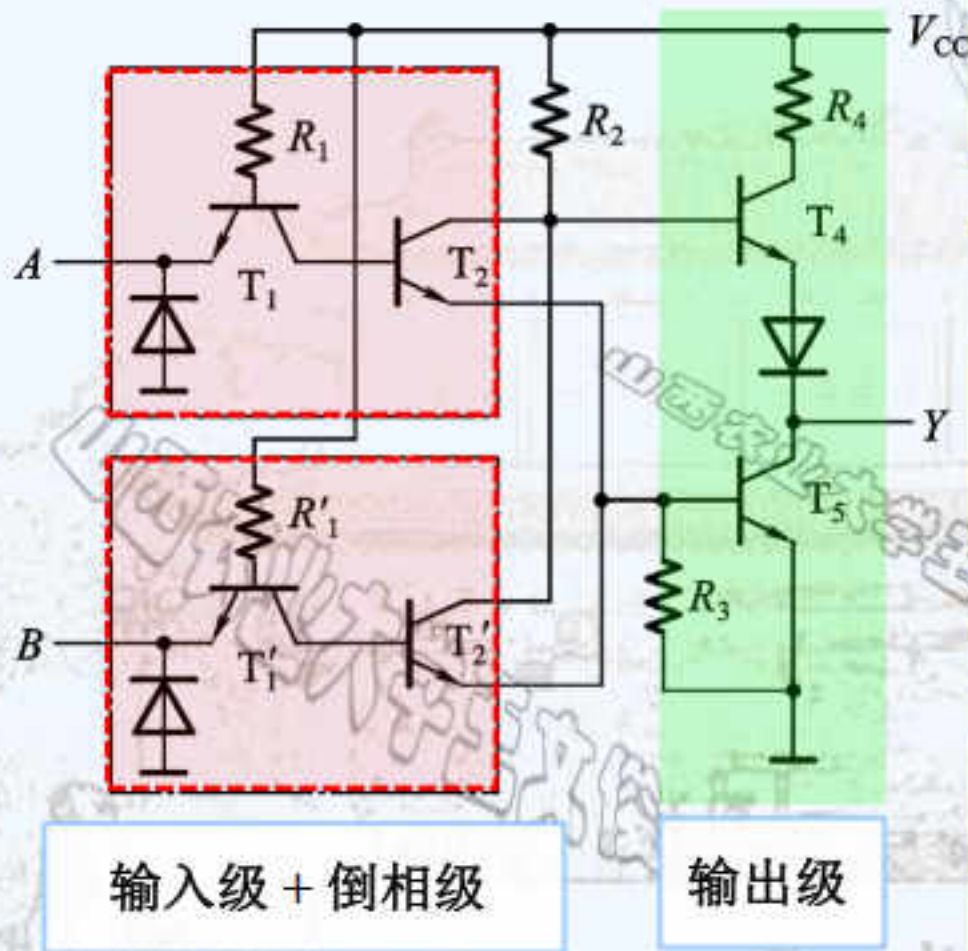
## 低电平输入电流（很重要）

- 与只有一个输入端接地相同
- 并联后看做**只有一个输入端**

## 高电平输入电流

- 每个输入端一个输入电流
- 并联后输入**电流加倍**

## • 2、或非门



TTL或非门

### 逻辑功能

$$Y = (A + B)'$$

### 低电平输入电流

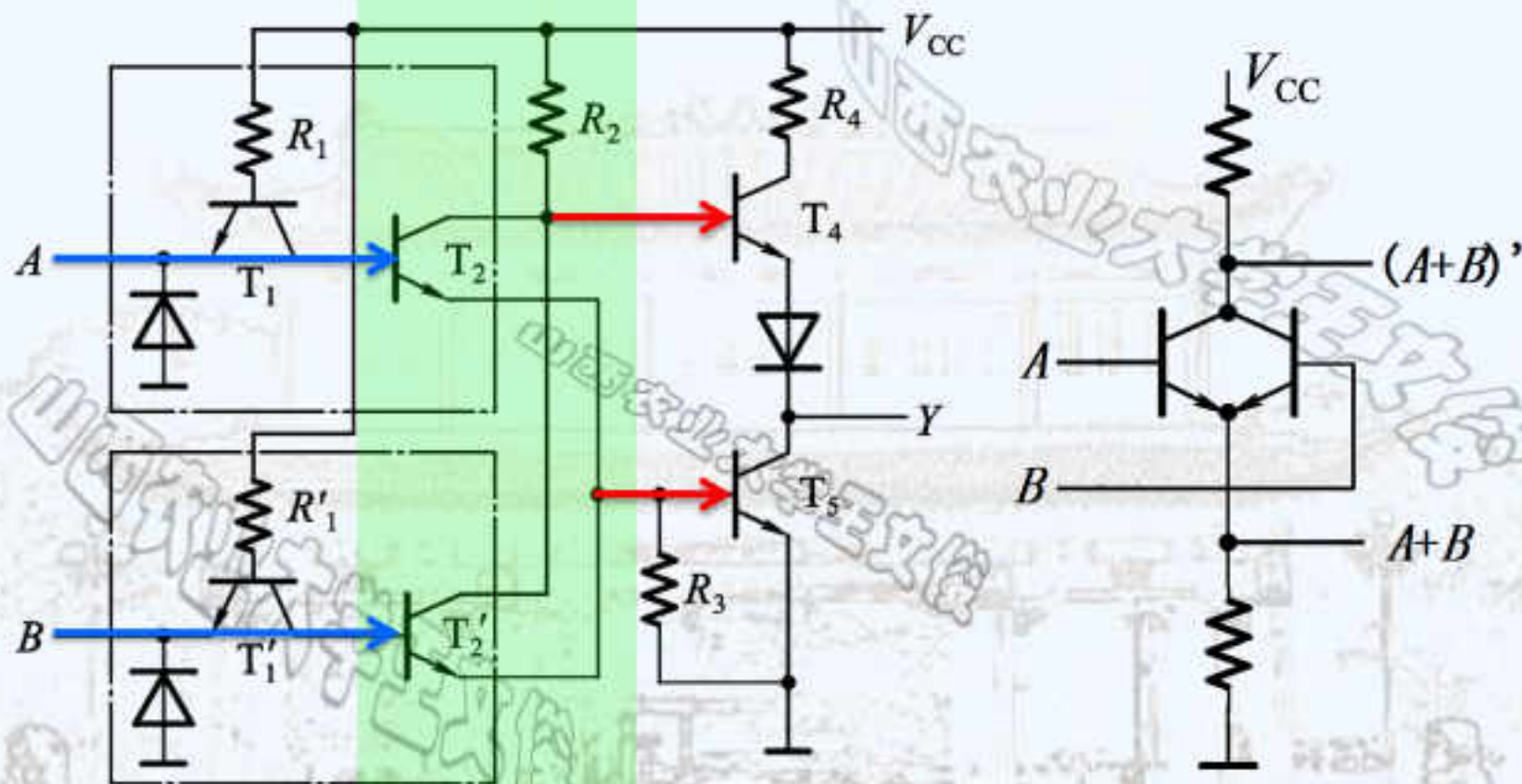
- 每个输入端一个输入电流
- 并联后输入电流加倍

### 高电平输入电流

- 每个输入端一个输入电流
- 并联后输入电流加倍



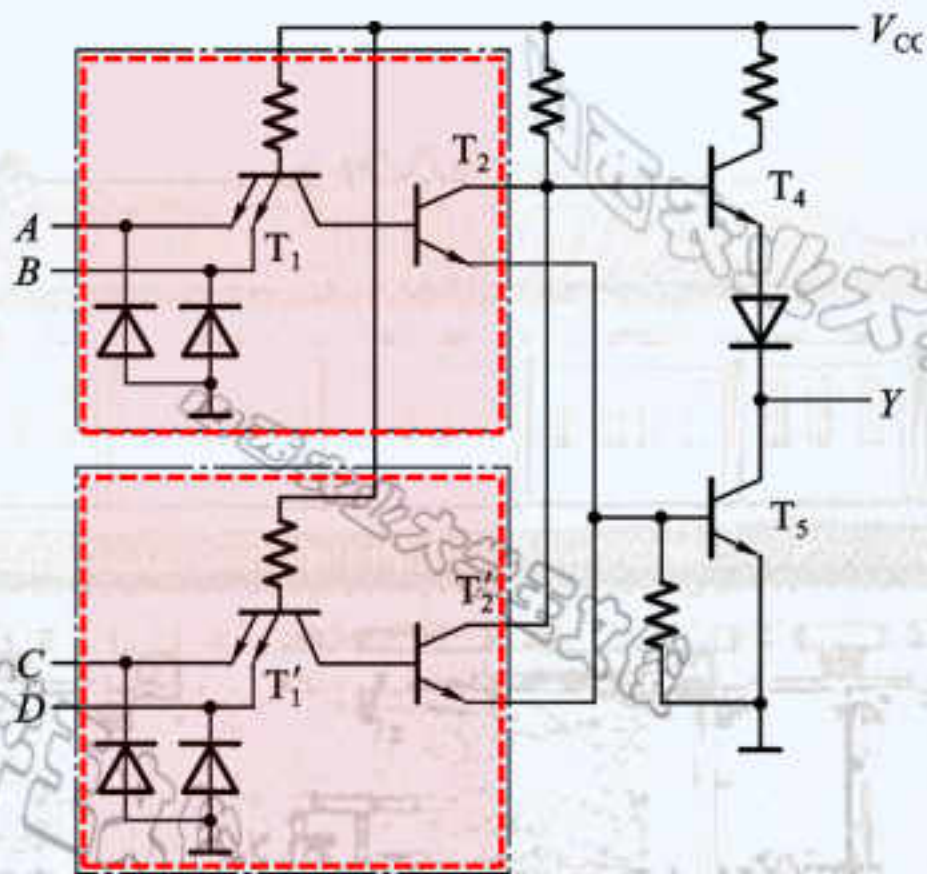
# 或非结构的常见画法



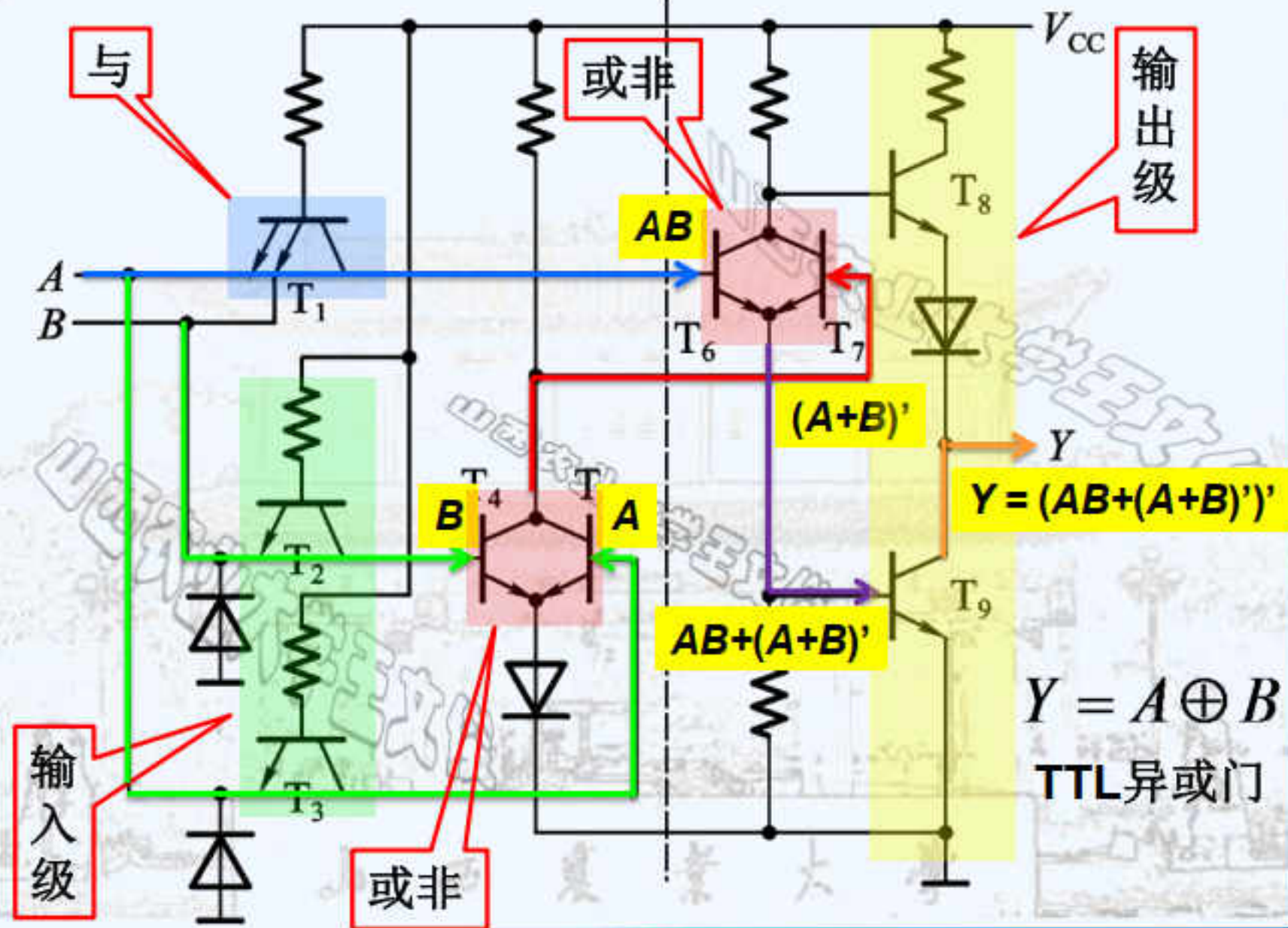
$T_2$ 与 $T_2'$ 并联

或非结构

### • 3、与或非门



TTL与或非门





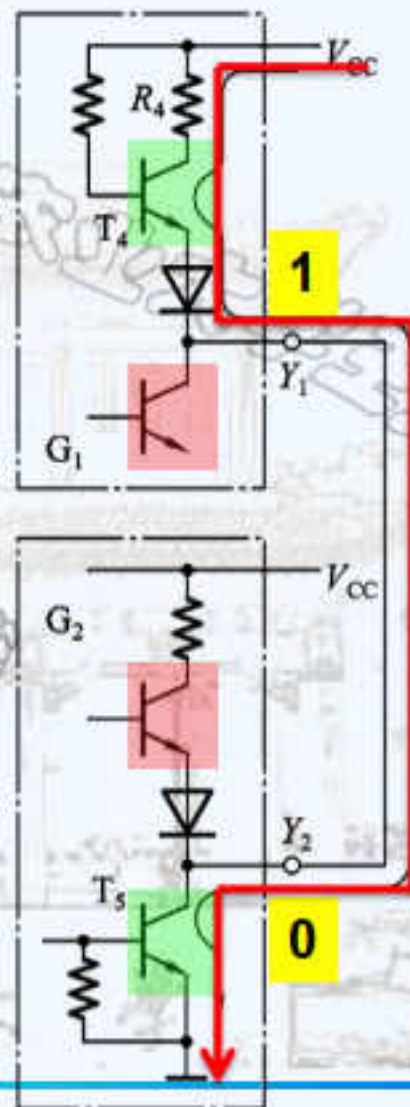
## 二十一、集电极开路输出电路（OC门）

### • 1、推拉式输出电路的局限性

输出高电平不可调，  
无法满足不同输出高电平需要

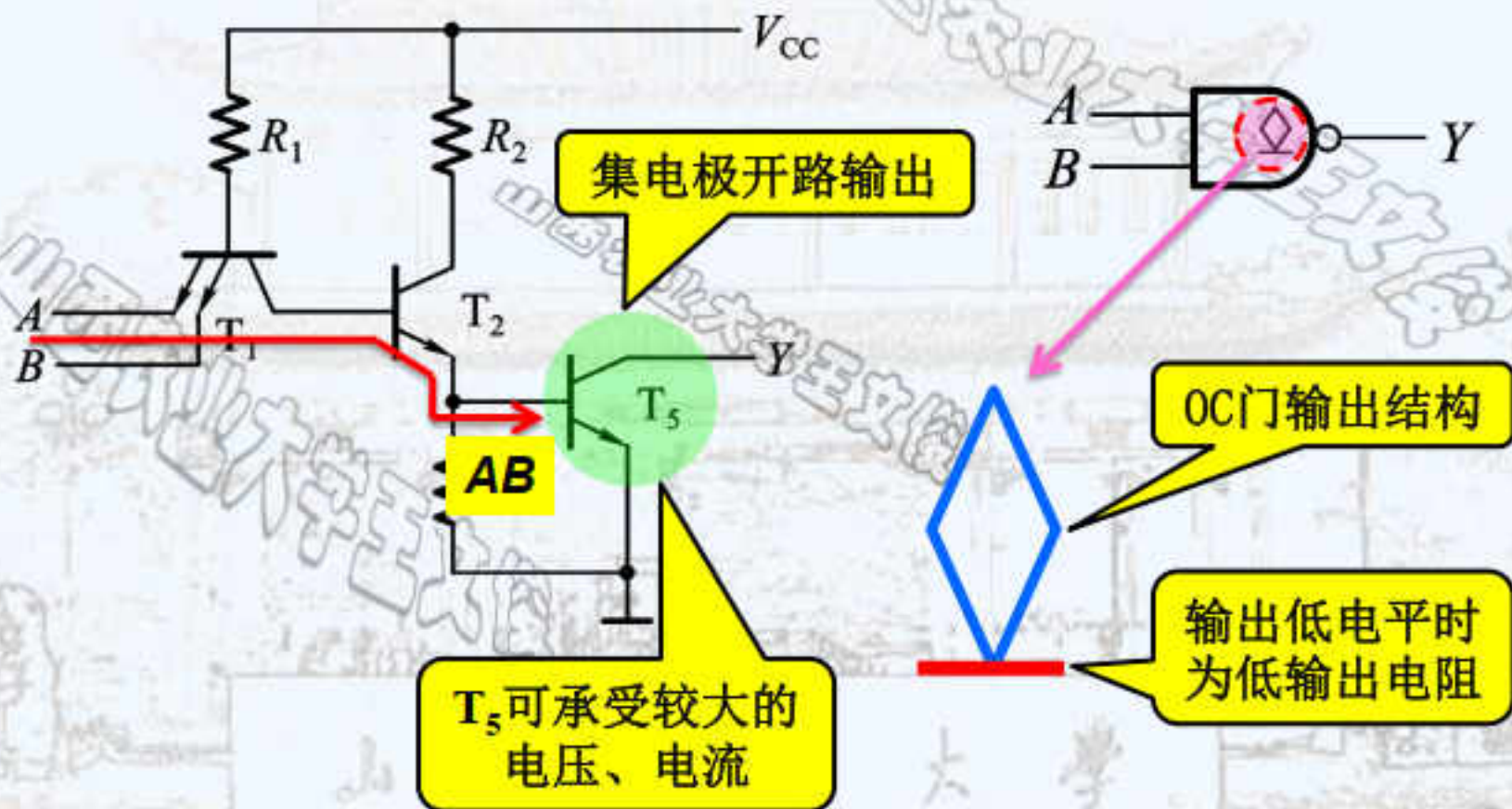
负载能力不强，  
无法满足较大电压、电流负载

输出端不能并联使用  
无法并接成线与结构



## • 2、OC门的结构及表示

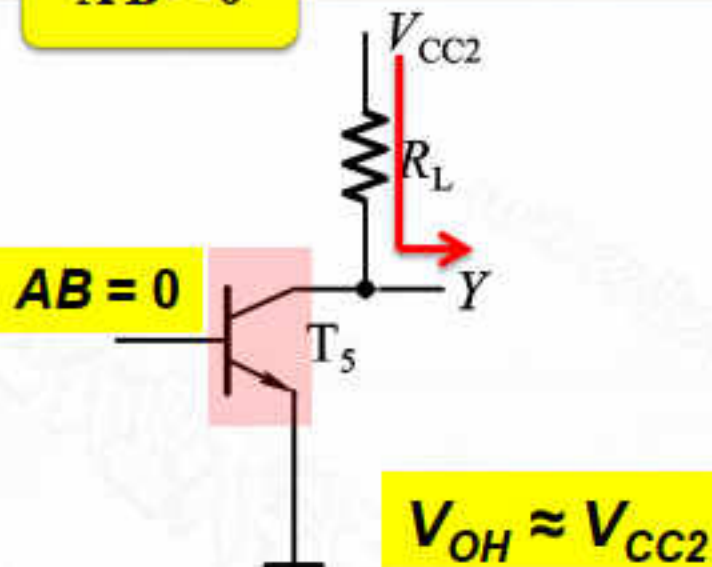
将输出级电路结构改为**集电极开路输出的三极管**，构成OC门。



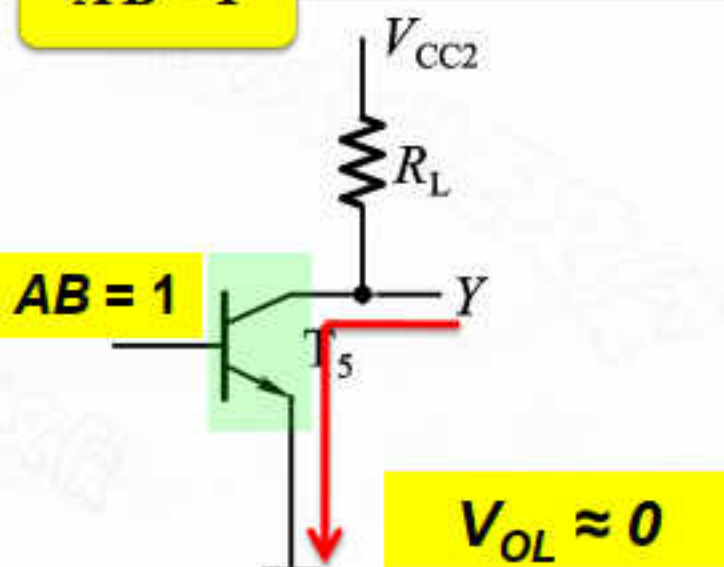
### • 3、OC门的逻辑功能

OC门在工作时需要外接上拉电阻  $R_L$ 、外接电源  $V_{CC2}$ 。

**AB = 0**



**AB = 1**



逻辑功能

•  $Y = (AB)'$

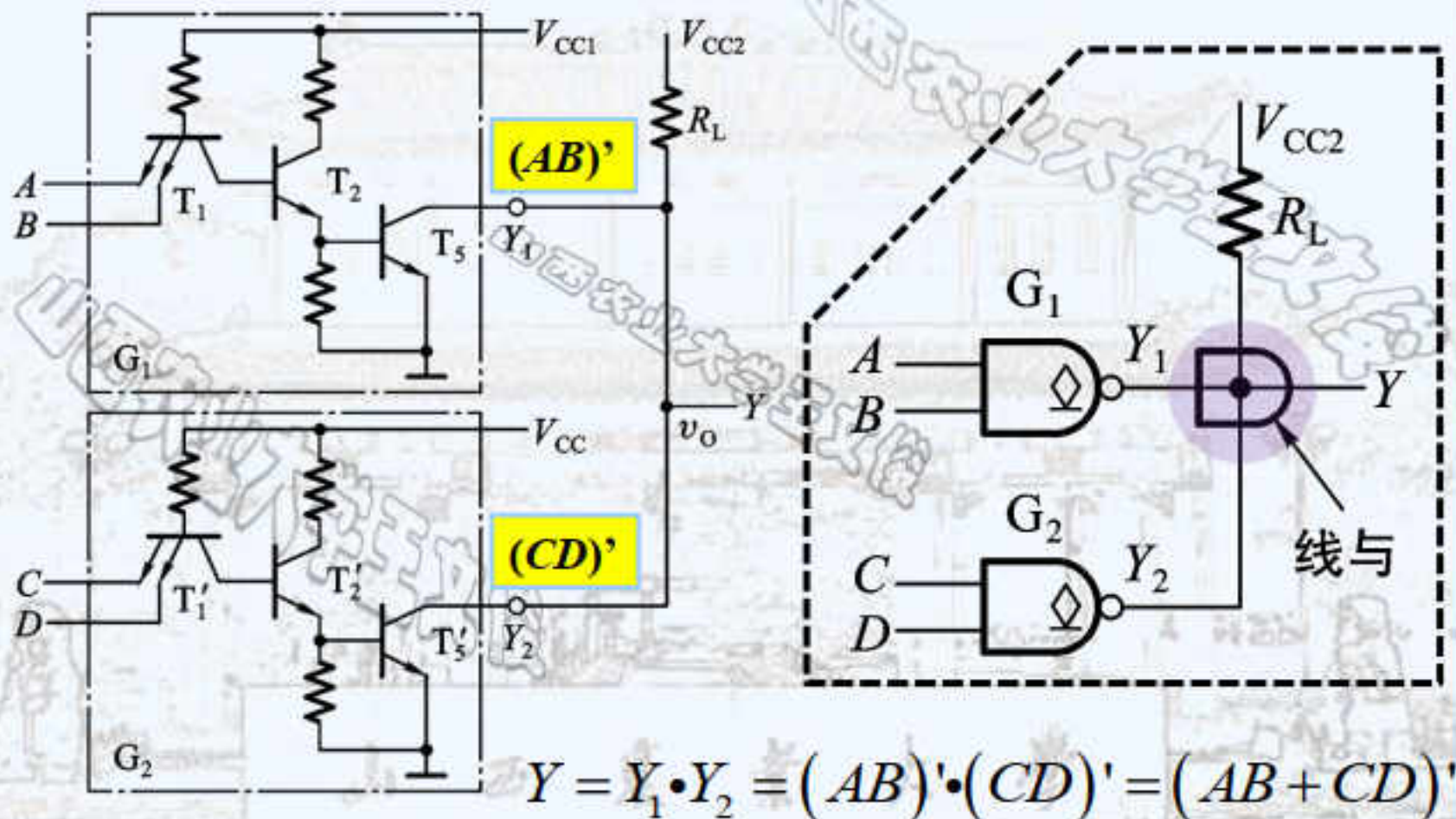
电平变换

• 从  $0 \sim V_{CC1}$  变换为  $0 \sim V_{CC2}$

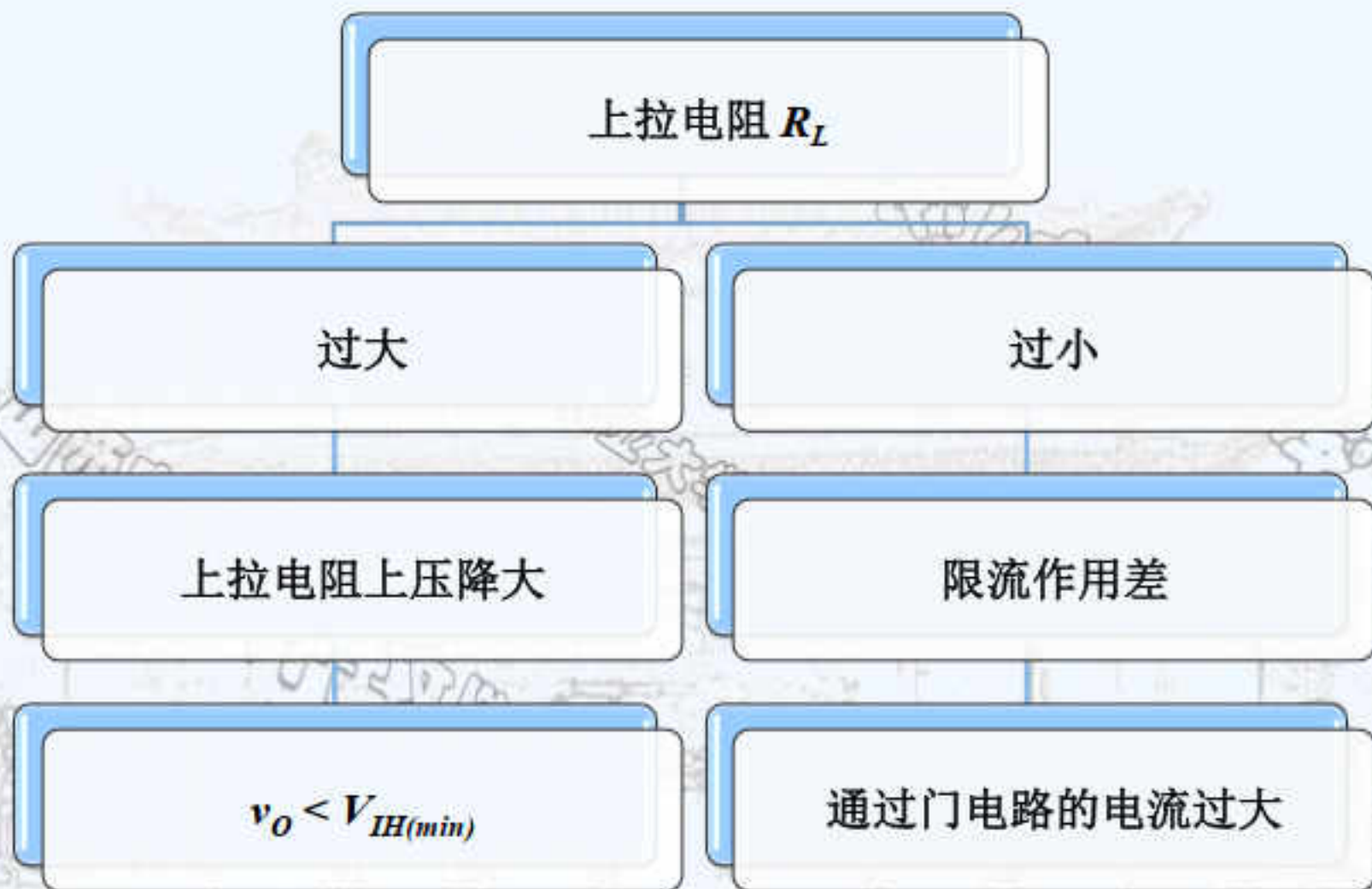


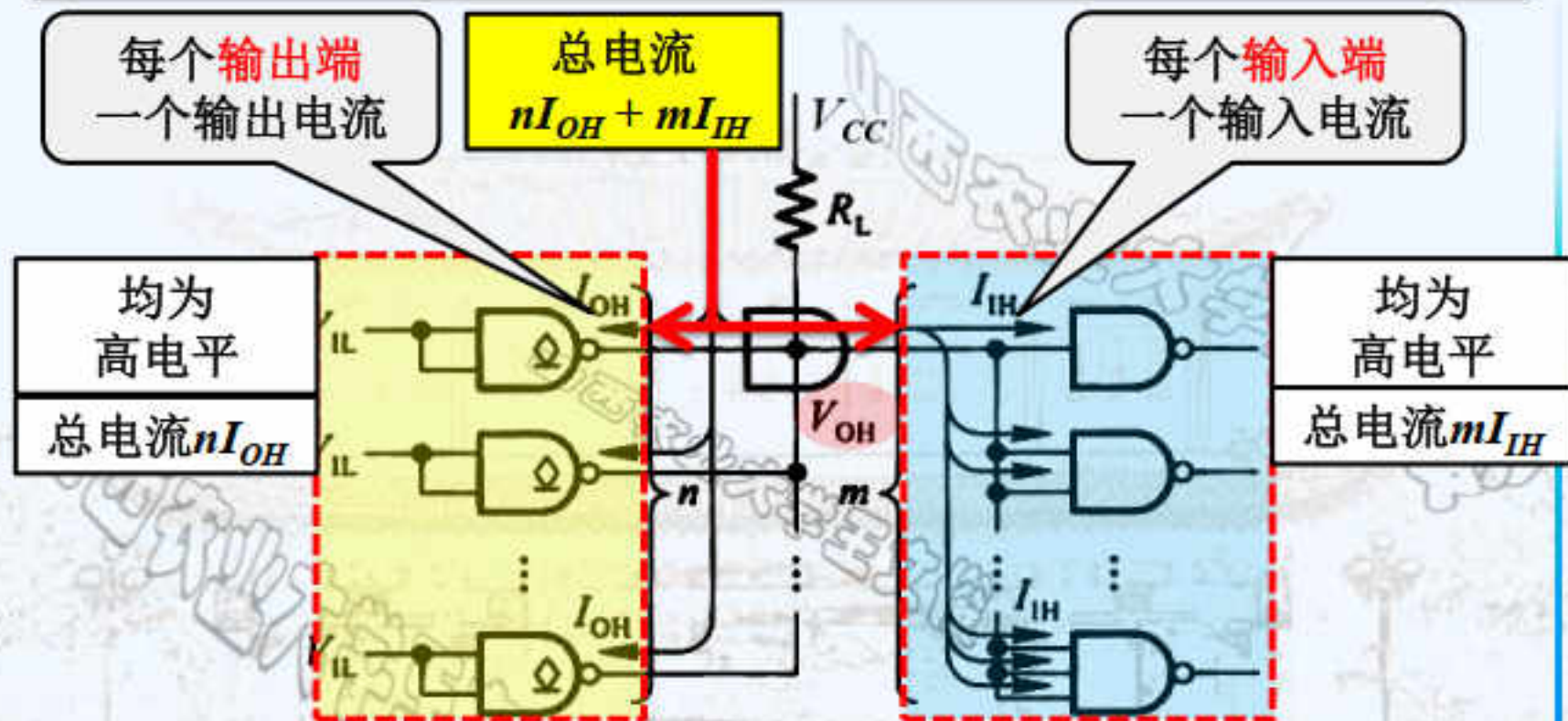
## 4、OC门实现线与连接

将几个OC门的输出端直接相连，即可实现OC门之间的与运算。



## • 5、上拉电阻 $R_L$ 阻值计算

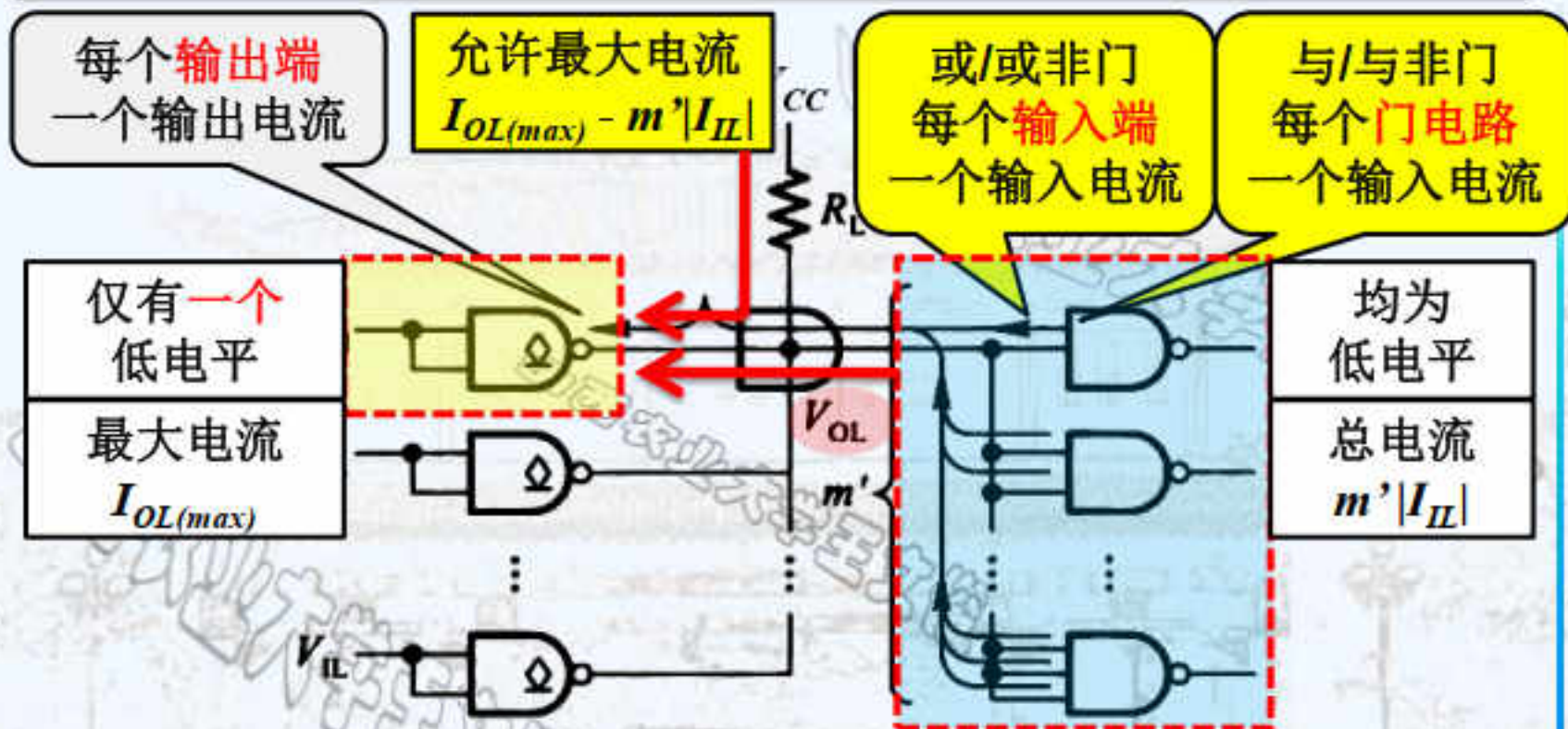


① 最大上拉电阻  $R_L$  计算（防止压降过大）

$$V_{CC} - (nI_{OH} + mI_{IH})R_L \geq V_{OH}$$

$$R_L \leq (V_{CC} - V_{OH}) / (nI_{OH} + mI_{IH}) = R_{L(\max)}$$



② 最小上拉电阻  $R_L$  计算 (防止电流过大)

$$(V_{CC} - V_{OL}) / R_L \leq I_{OL(max)} - m'|I_{IL}|$$

$$R_L \geq (V_{CC} - V_{OL}) / (I_{OL(max)} - m'|I_{IL}|) = R_{L(min)}$$

## 最大外接电阻

$$R_{L(\max)} = (V_{CC} - V_{OH}) / (nI_{OH} + mI_{IH})$$

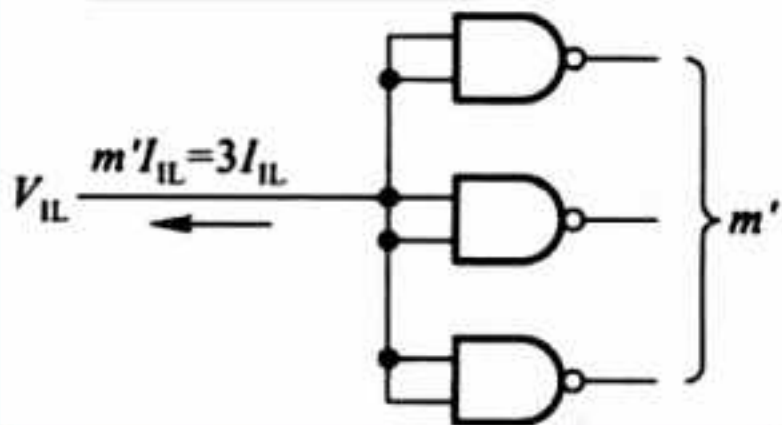
## 最小外接电阻

$$R_{L(\min)} = (V_{CC} - V_{OL}) / (I_{OL(\max)} - m'|I_{IL}|)$$

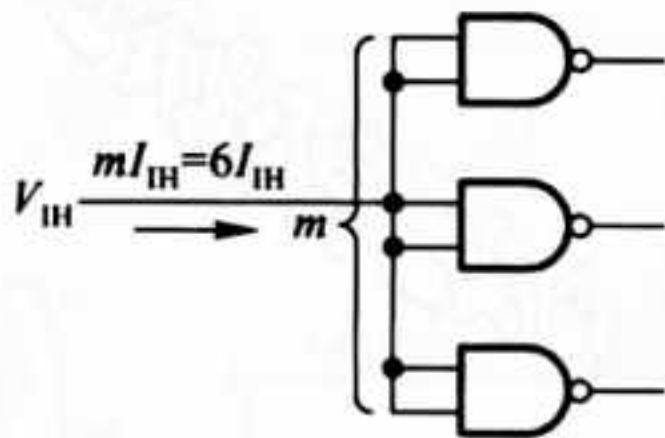
## 外接电阻取值范围

$$R_{L(\min)} \leq R_L \leq R_{L(\max)}$$

## 与输入

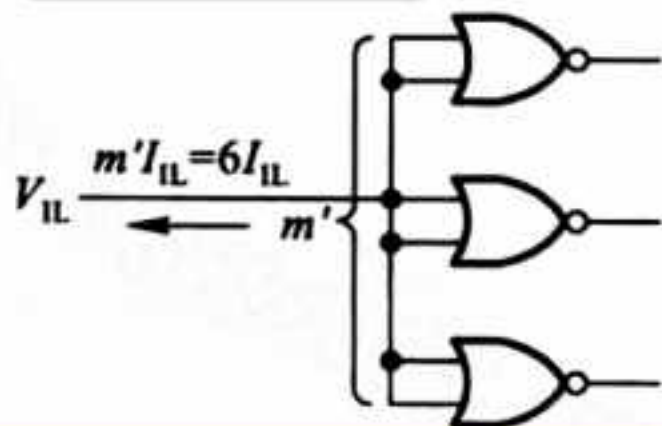


低电平输入：负载门个数

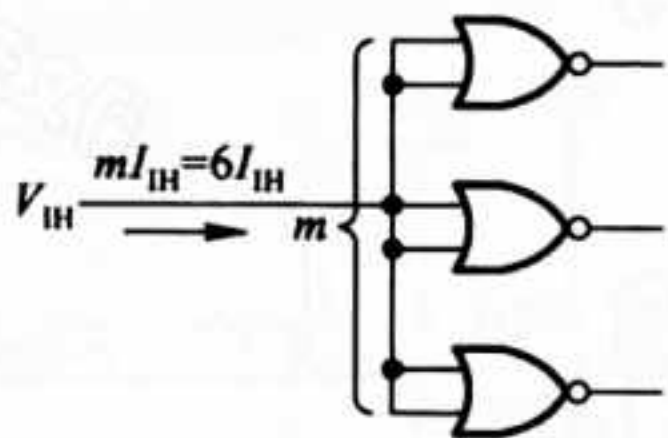


高电平输入：输入端个数

## 或输入



低电平输入：输入端个数



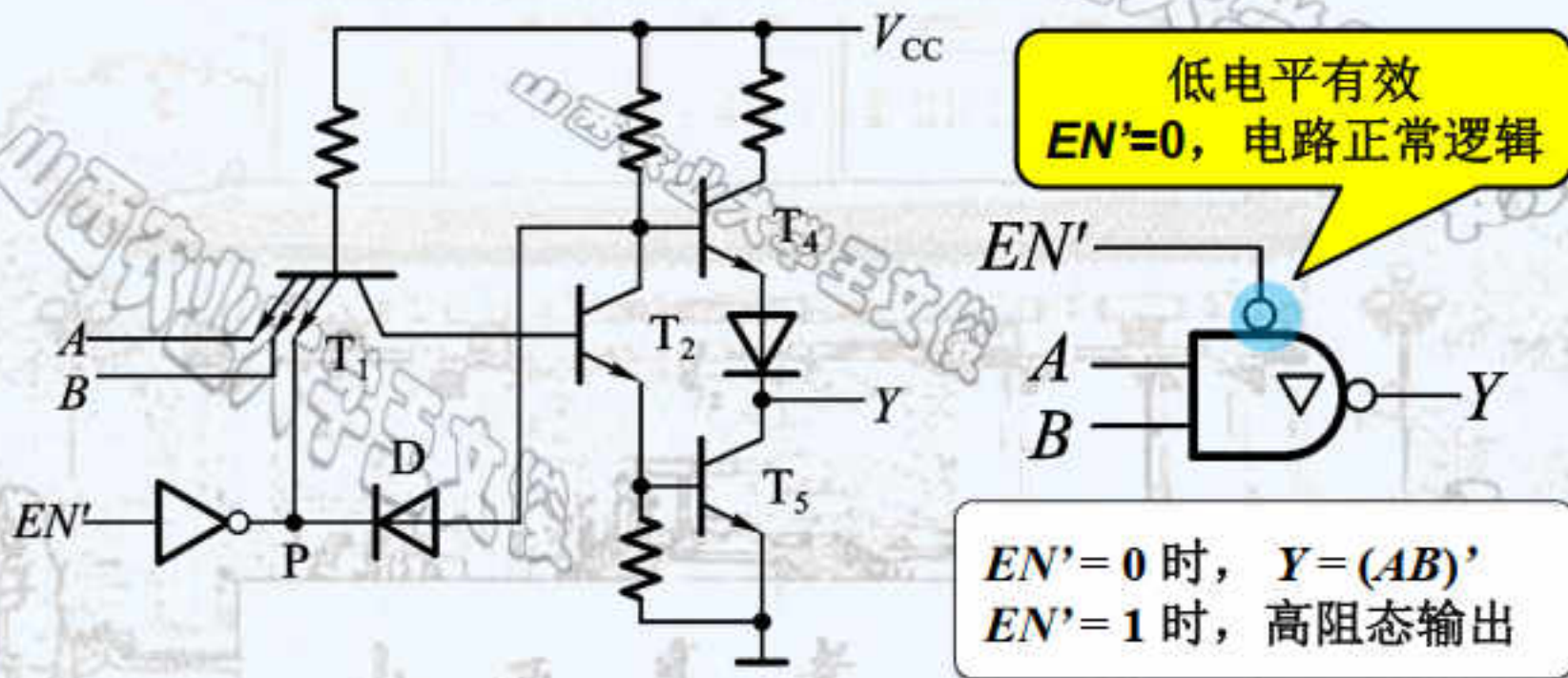
高电平输入：输入端个数



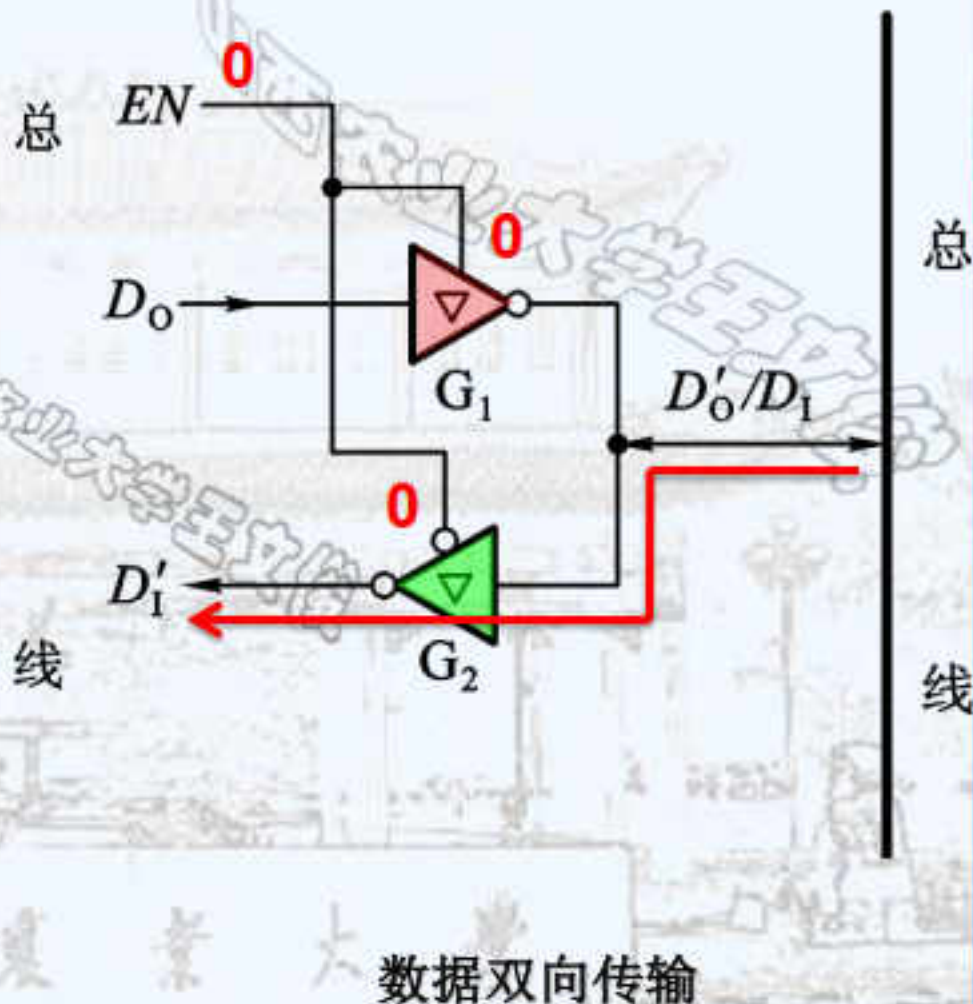
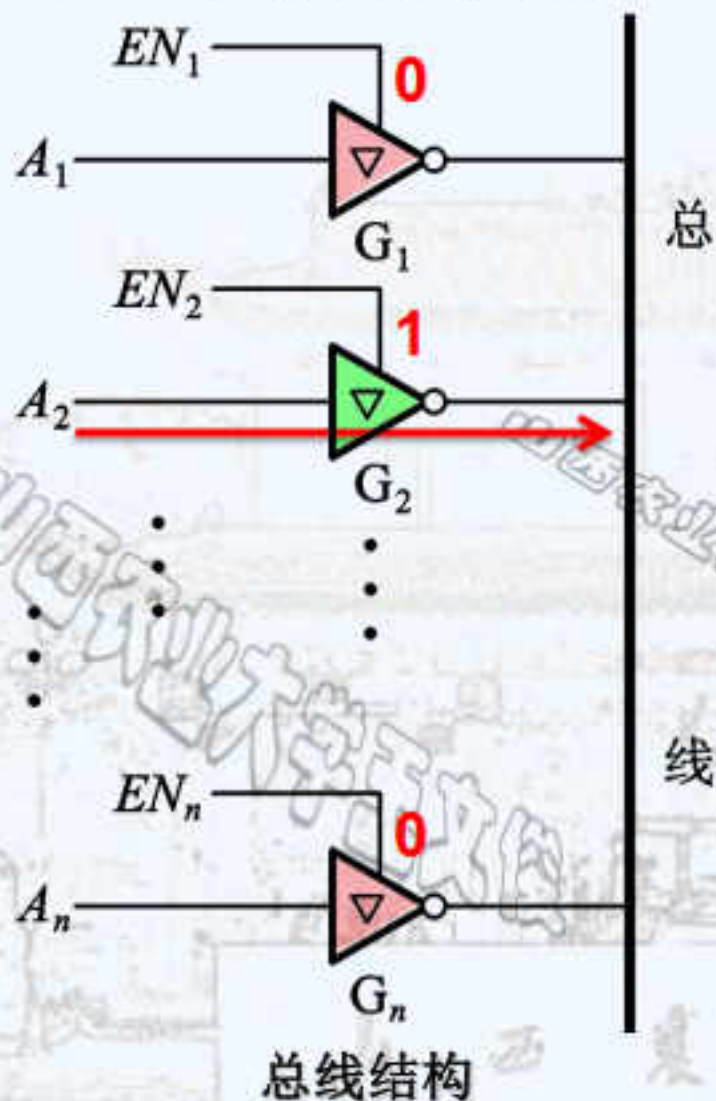
## 二十二、三态输出门（TS门）

### • 1、电路结构

除了输出正常的高、低电平状态外，还可以输出高阻态。



## 2、三态输出门的应用



数据双向传输



# 习 题

- P140 【题3.7】 (a) (b)
- P141 【题3.10】
- P142 【题3.11】
- P142 【题3.12】
- P142 【题3.13】
- P142 【题3.14】
- P143 【题3.16】
- P144 【题3.21】

山西农业大学