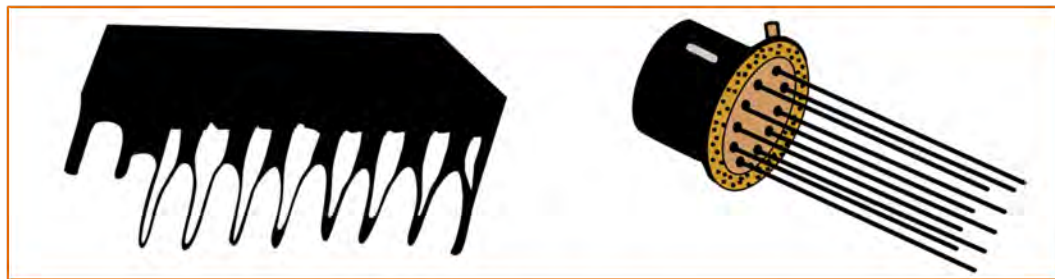


第五章

集成运算放大电路

集成电路：60年代发展起来的一种新型器件，一般是在一块厚0.2~0.5mm、面积约为0.5mm²的P型硅片（称为集成电路的芯片）上通过平面工艺制做成包含众多晶体管、电阻、电容及连线的具有特定功能的电子线路。外型一般用金属圆壳或双列直插结构。



集成电路具有性能好，可靠性高，体积小，耗电少，成本低等优点。

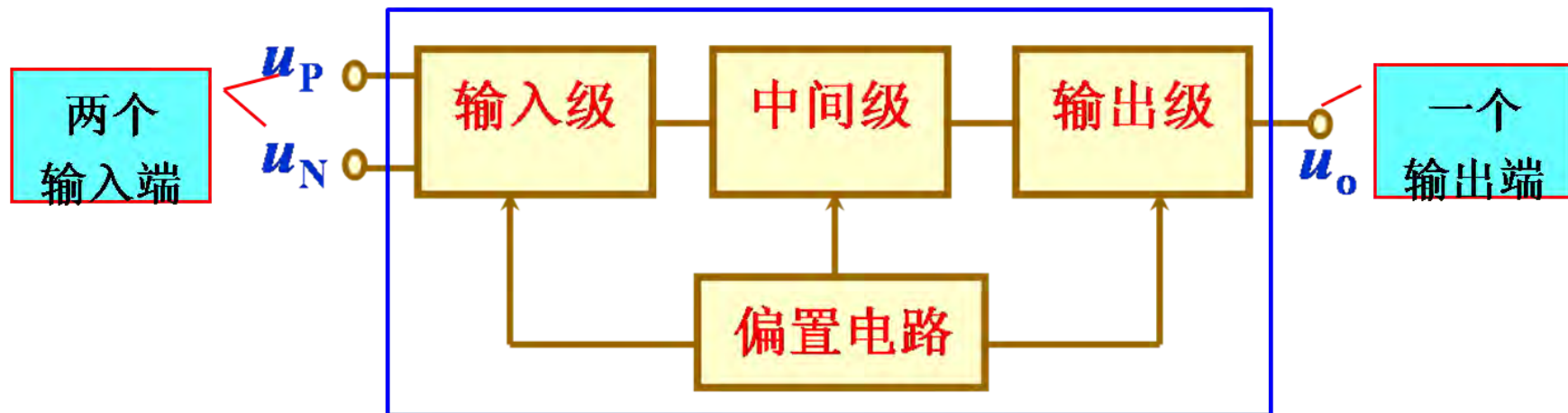
集成运放：是一种模拟集成电路，早期实现各种数学运算，主要用于模拟计算机；现在广泛应用于各种电子系统中。

§ 5.1 集成运算放大器的特点

集成运放电路的组成:实质上是一个具有高增益、输入电阻大、输出电阻小的多级直接耦合放大电路。

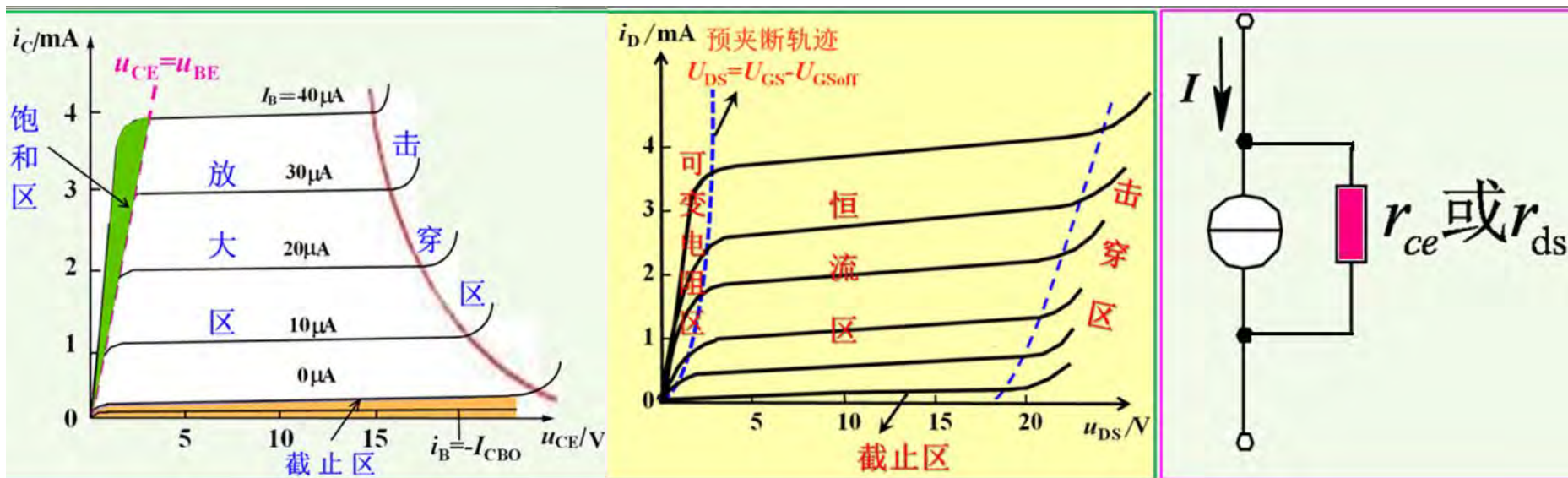
1. 级间**采用直接耦合方式**(采用集成电路工艺不易在芯片上制作大电容和大电感);
2. 尽可能**多采用有源器件**(晶体管)代替无源器件(避免使用大电容、大电阻);
3. 利用**对称结构**改善电路性能(采用对称结构的差动放大器,抑制工作点漂移,**解决温漂**现象)。

集成运算放大电路的结构



1. **输入级:** 采用对称结构的差分放大电路, 可以大大减少温漂。
2. **中间级:** 主放大电路, 采用有源负载的共射(源)电路, 增益大。
3. **输出级:** 采用射随器或互补射随器, 带负载能力强。
4. **偏置电路:** 电流源电路, 为各级提供合适的静态工作点。

§5.2 电流源电路

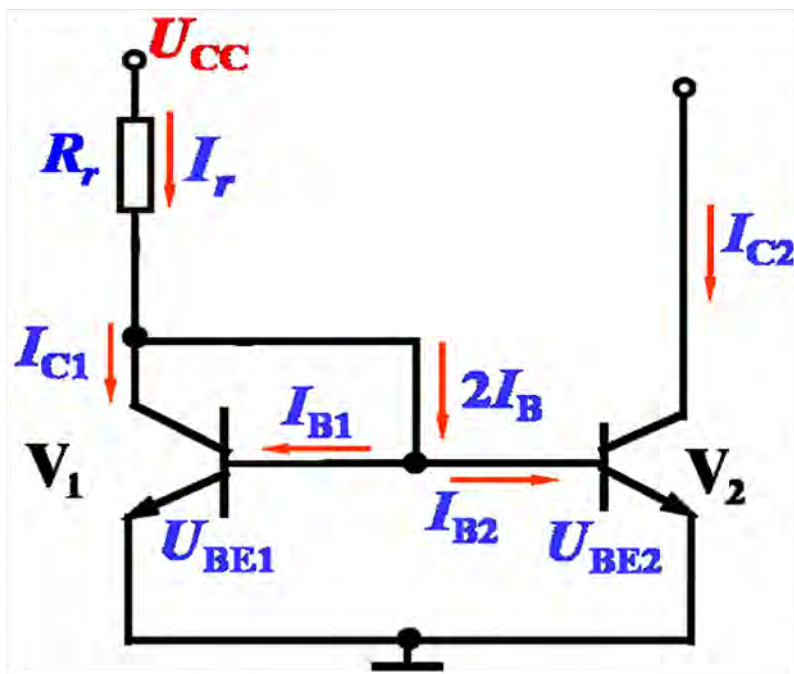


集成运放电路中的晶体管和场效应管除了作为放大管外，还可以：

- (1) 构成电流源电路(恒流特性)为各级提供稳定的静态偏置电流；
- (2) 或作为有源负载(很大的 $|U_A| \Rightarrow$ 很大的输出电阻 r_{ce} 或 r_{ds})取代高阻值电阻。

镜像电流源

V_1 , V_2 是性能参数完全相同的管子。 R_r 与 V_1 管串联作 V_2 管的偏置电路, 并提供基准电流 $I_r = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_r} \approx \frac{U_{CC}}{R_r}$



镜像电流源电路

$\because V_1$ 管的c极与b极连接在一起 ($U_{CB1}=0$, $U_{CE1}=U_{BE1}$), $\therefore V_1$ 管工作在临界饱和状态, $I_{C1}=\beta I_{B1}$ 仍成立。

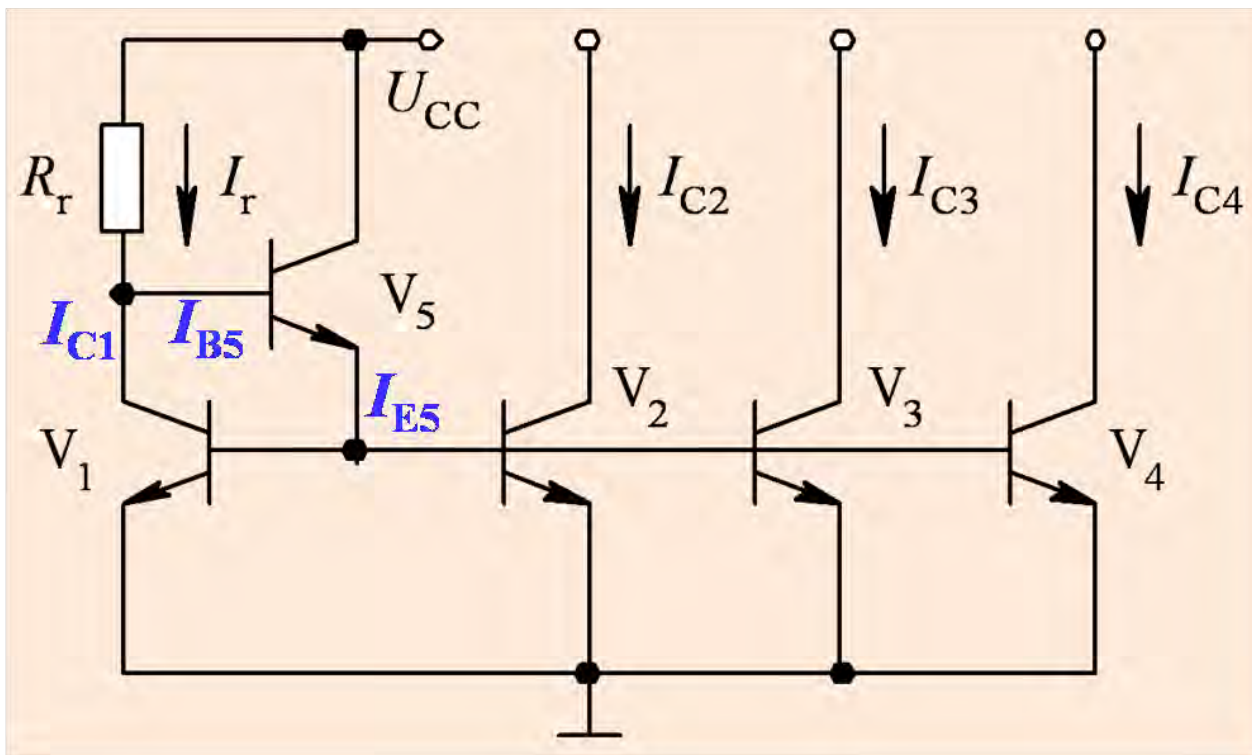
又 $\because U_{BE1}=U_{BE2} \therefore I_{B1}=I_{B2}$, $I_{C1}=I_{C2}$
 $= I_r - 2I_{B1} = I_r - 2I_{C1}/\beta$,

$$\therefore I_{C1} = I_{C2} = \frac{\beta I_r}{\beta + 2}$$

当满足 $\beta \gg 2$ 时，则 $I_{C1} = I_{C2} = I_r = \frac{U_{CC}}{R_r}$

可见，只要 U_{CC} 和 R_r 确定了， I_r 就确定了， I_{C2} 也确定了，常将 I_{C2} 看作 I_r 的镜像。

将镜像电流源推广，可得多路镜像电流源。

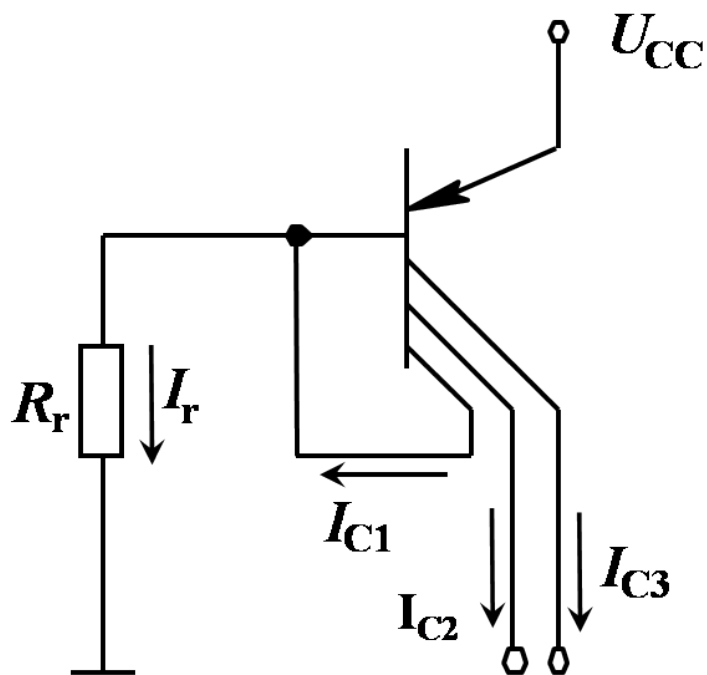


$$I_{C1} = I_r - I_{B5} = I_r - I_{E5} / (1 + \beta_5) = I_r - 4I_{B1} / (1 + \beta_5) = I_r - 4I_{C1} / \beta_1 (1 + \beta_5)$$

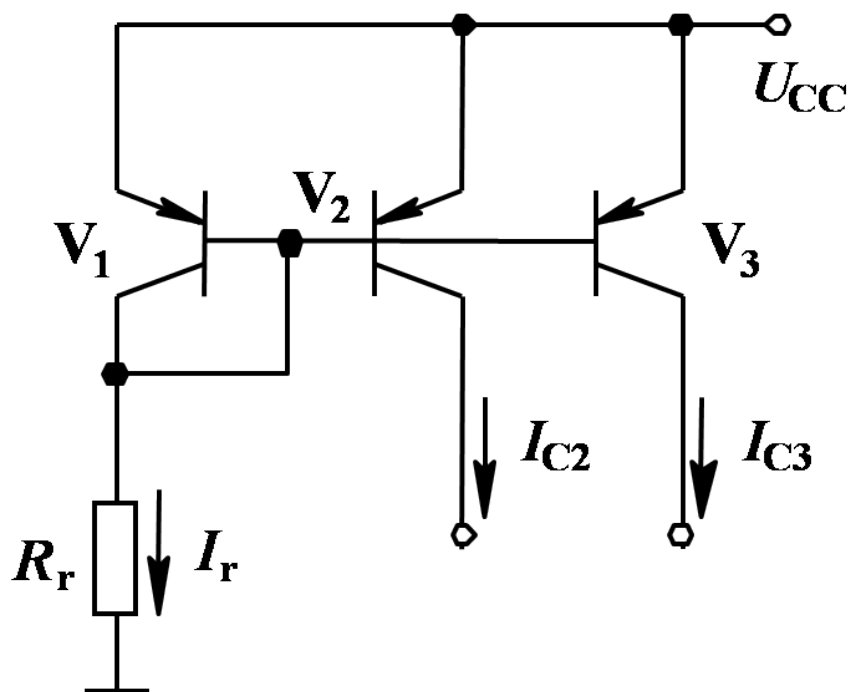
$$I_{C1} = I_{C2} = I_{C3} = I_{C4} = \frac{\beta_1 (1 + \beta_5)}{\beta_1 (1 + \beta_5) + 4} I_r$$

$I_{C2} = I_{C3} = I_{C4}$ 看作 I_r 的镜像。

集成电路中多路镜像电流源是由多集电极晶体管实现的。



(a) 三集电极横向PNP管电路



(b) 等价电路

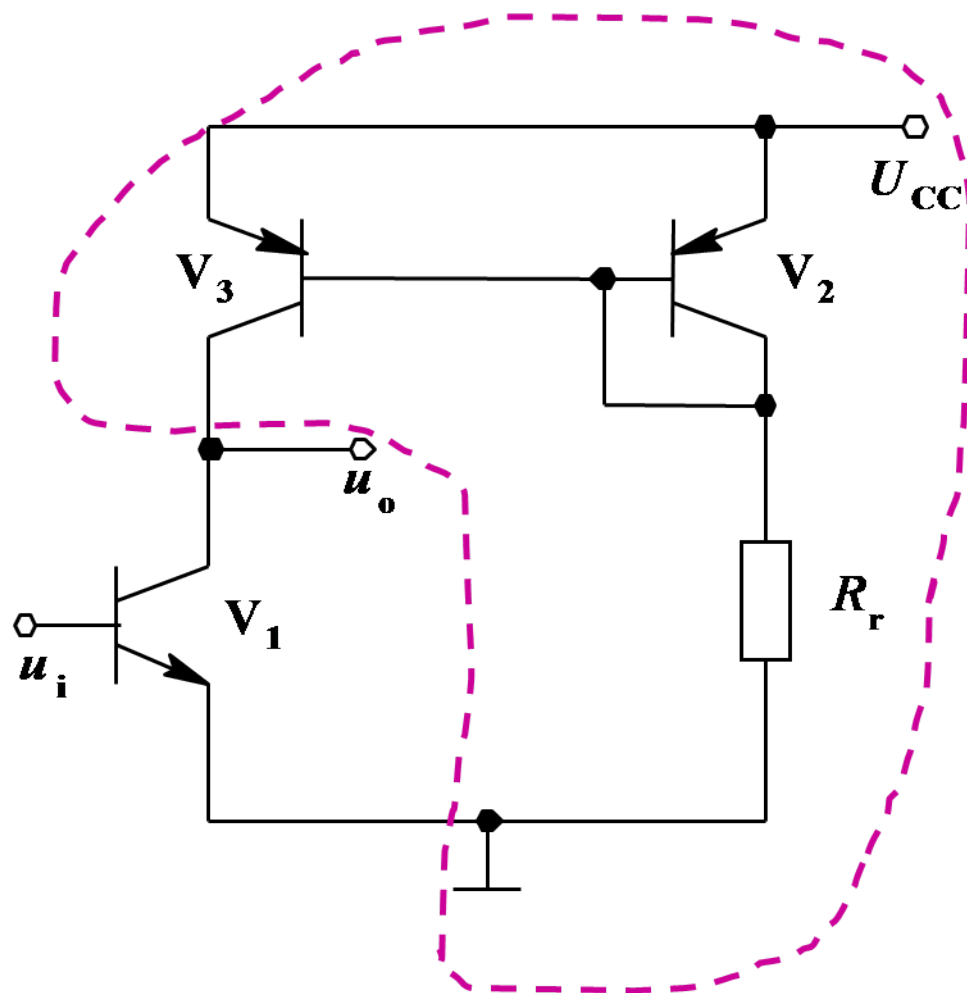
§5.3 以镜像电流源为有源负载的放大电路

由于**电流源具有直流电阻小而交流电阻很大的特点**，在模拟集成电路中，广泛的把它**作为负载使用**。

(用于共射放大电路和差动放大电路)

晶体管和场效应管是有源元件，又可作为负载，故称为有源负载。

有源负载共射放大电路



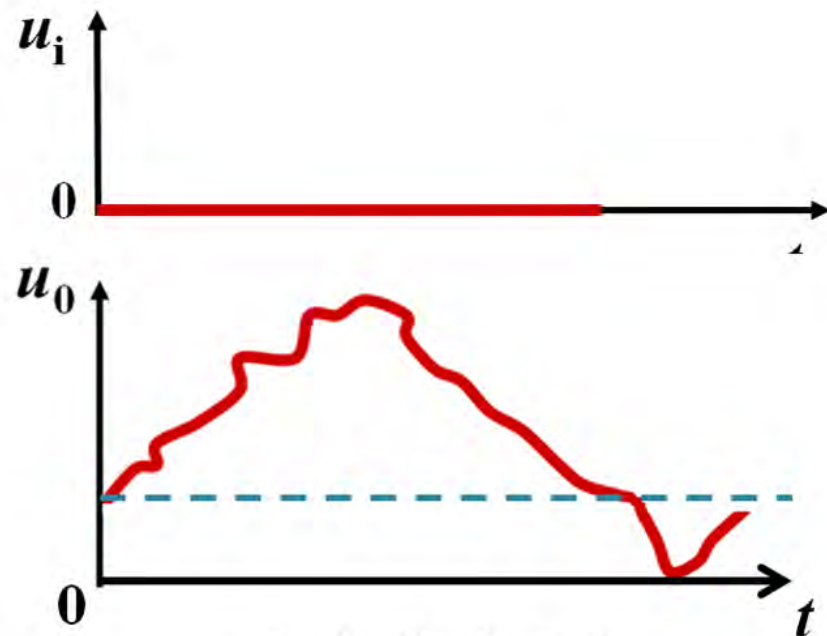
其中 V_1 是共射放大管， V_2 与 V_3 构成的镜像电流源是 V_1 的有源负载。

在共射电路中使用有源负载时，可使每级的电压增益达到 10^3 甚至更高。

§5.4 差动放大电路

零点漂移现象：在直接耦合放大器中，当输入电压为零时，输出电压不稳定，而是缓慢地发生不规则变化的现象。

放大电路级数愈多，放大倍数愈高，零点漂移问题愈严重。



零点漂移现象

抑制温度漂移的方法:

- (1) 引入直流负反馈以稳定 Q 点;
- (2) 利用热敏元件对放大器进行温度补偿;
- (3) 采用特性相同的管子, 在相同的环境下, 两者的零点漂移情况相同, 可以相互抵消, 这就构成了“差动/分放大电路”。——最有效的措施

差动放大电路的工作原理及性能分析

一、静态分析 ($U_{i1}=U_{i2}=0$):

1. 双端输入, 双端输出差动放大电路的静态分析

设流过 R_E 的电流为 I , 则有:

$$U_A - U_B = 0 - (-U_{EE}) = U_{BE} + IR_E$$

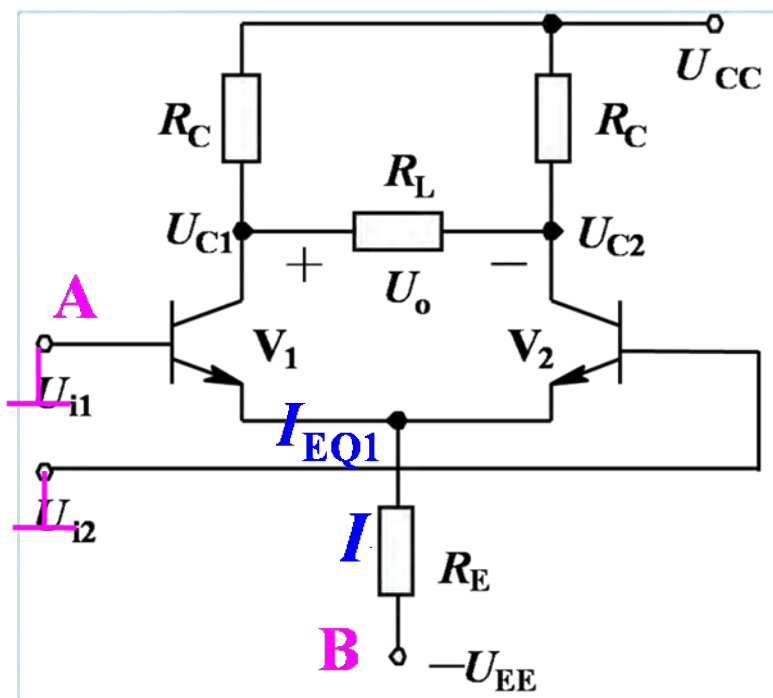
$$\therefore I = (U_{EE} - U_{BE}) / R_E$$

$$= (U_{EE} - 0.7) / R_E$$

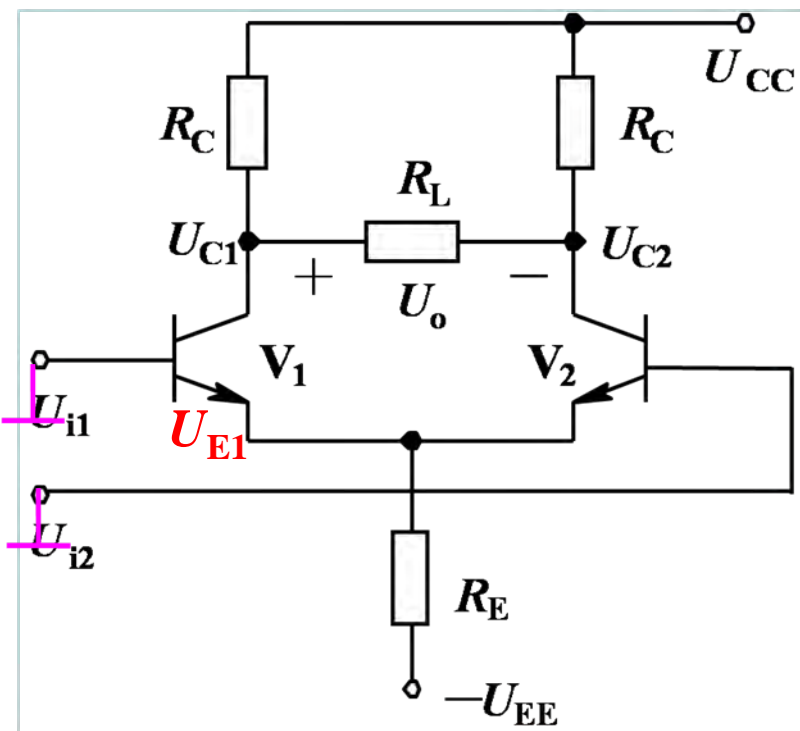
\therefore 因为两管完全对称

$$\therefore I_{CQ1} = I_{CQ2} \approx I_{EQ1} = I_{EQ2} = I/2$$

$$I_{BQ1} = I_{BQ2} = I_{EQ1} / (1 + \beta) = I/2(1 + \beta)$$



长尾式双端输出
差动放大电路



长尾式双端输出
差动放大电路

$$U_{CEQ1} = U_{CEQ2}$$

$$\approx U_{CC} + U_{EE} - (R_C + 2R_E)I_{EQ1}$$

或者： $U_{CC} - U_{E1} = U_{CEQ1} + R_C I_{CQ1}$

而 $0.7V = U_{BE1} = U_{B1} - U_{E1}$

$$= U_{i1} - U_{E1} = 0V - U_{E1}$$

$$\therefore U_{E1} = -0.7V$$

$$\begin{aligned} \therefore U_{CEQ2} = U_{CEQ1} &= U_{CC} - U_{E1} - R_C I_{CQ1} \\ &= U_{CC} + 0.7 - R_C I_{CQ1} \end{aligned}$$

$$U_{CQ1} = U_{CQ2} = U_{CC} - R_C I_{CQ1}$$

$$U_0 = U_{CQ1} - U_{CQ2} = 0$$

2. 双端输入, 单端输出差动放大电路的静态分析

由于输入回路没有变化, 所以 I_{BQ} 、 I_{EQ} 、 I_{CQ} 与双端输出时一样。但是 $U_{CEQ1} \neq U_{CEQ2}$ 。

$$U_{CEQ2} \approx U_{CC} + U_{EE} - (R_C + 2R_E)I_{EQ2}$$

$$\text{或 } U_{CEQ2} = U_{CC} + 0.7 - R_C I_{CQ1}$$

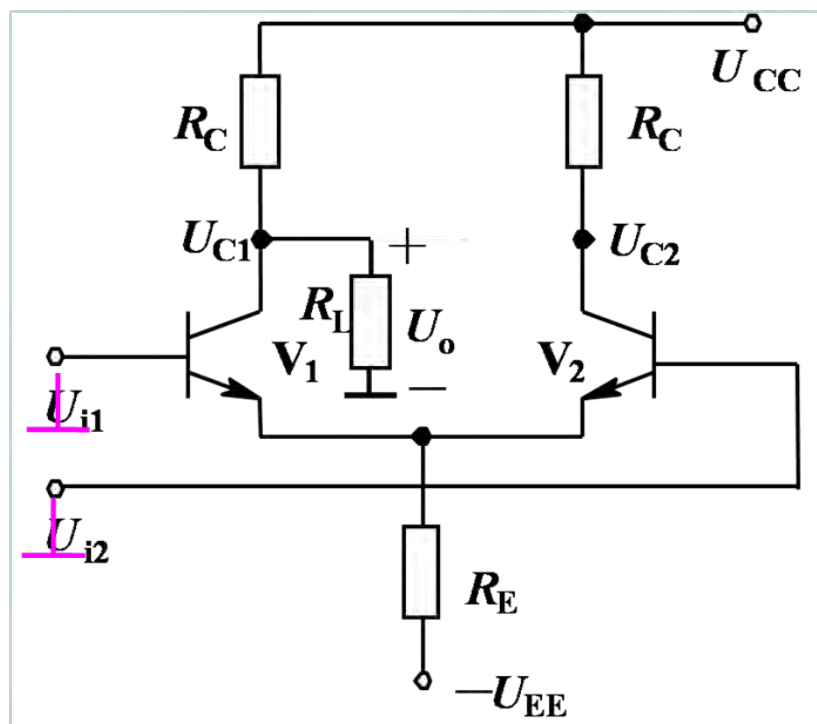
$$U_{CEQ1} = U_{CQ1} - U_{EQ1} = U_{CQ1} + 0.7$$

$$\text{而 } I_{RC} = I_{CQ1} + I_{RL} \quad U_0 = U_{CQ1}$$

$$\text{即 } (U_{CC} - U_{CQ1}) / R_C = I_{CQ1} + U_{CQ1} / R_L$$

$$U_{CQ1} = \frac{R_L}{R_C + R_L} \cdot U_{CC} - I_{CQ1} (R_C // R_L)$$

$$U_{CEQ1} = U_{CQ1} - U_{EQ1} = U_{CQ1} + 0.7$$



长尾式单端输出
差动放大电路

二、动态分析 ($U_{i1} \neq 0$, $U_{i2} \neq 0$):

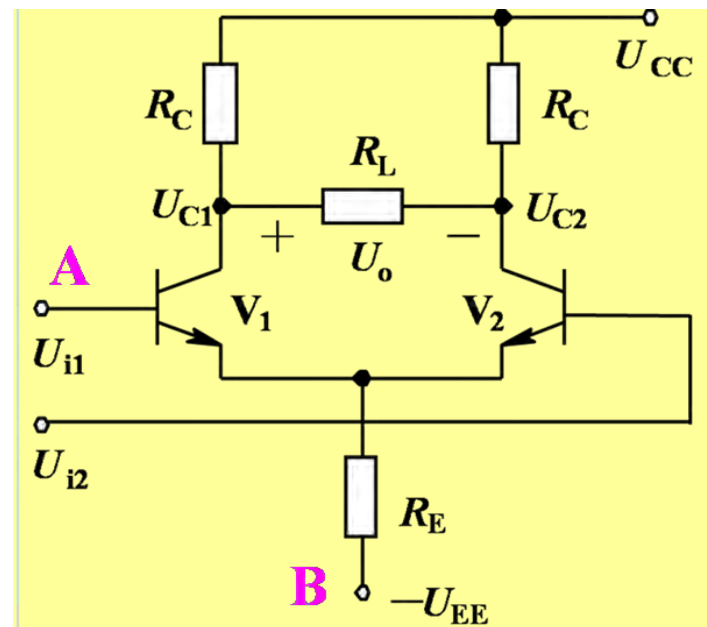
共模信号: 输入信号 U_{i1} 和 U_{i2} 大小相等, 极性相同。

差模信号: 输入信号 U_{i1} 和 U_{i2} 大小相等, 极性相反。

由于差动放大电路的参数理想对称, 温度对两个管子的影响完全相同, 所以零点漂移信号折算到输入端相当于在输入端加上了共模信号。所以以后可以将温漂视为共模信号来讨论。

双端输出的情况:

1. 共模信号输入

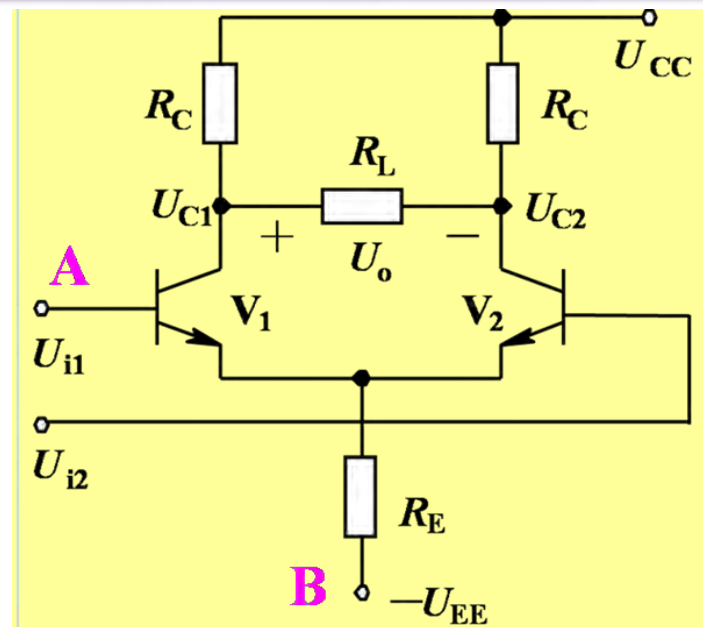


$$\Delta i_{B1} = \Delta i_{B2}, \Delta i_{C1} = \Delta i_{C2}, \Delta u_{C1} = \Delta u_{C2}$$

$$u_O = u_{C1} - u_{C2} = (u_{CQ1} + \Delta u_{C1}) - (u_{CQ2} + \Delta u_{C2}) = 0$$

这说明差动放大电路没有对输入信号进行放大，即对共模信号有抑制作用。共模信号是无用信号，是抑制的对象。

2. 差模信号输入



$$\Delta i_{B1} = -\Delta i_{B2}, \Delta i_{C1} = -\Delta i_{C2}, \Delta u_{C1} = -\Delta u_{C2},$$

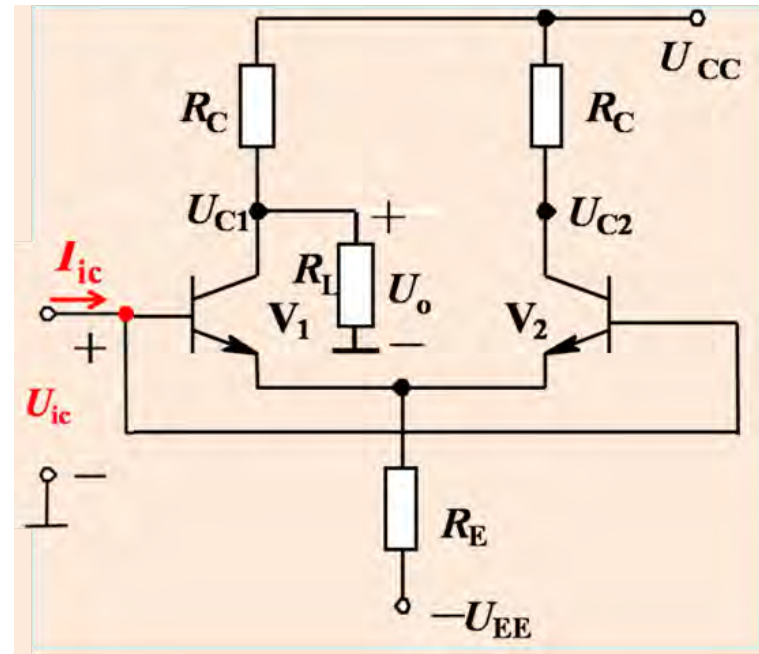
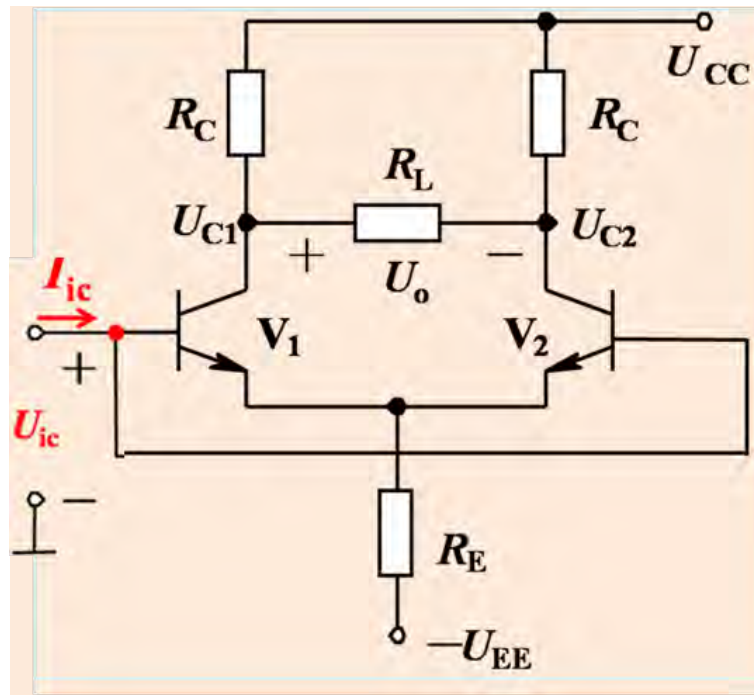
$$u_0 = u_{C1} - u_{C2} = (u_{CQ1} + \Delta u_{C1}) - (u_{CQ2} + \Delta u_{C2}) = 2\Delta u_{C1}$$

这说明差动放大电路对差模信号实现了放大。差模信号是有用信号，是放大的对象。

下面我们来讨论共模抑制和差模放大的各项性能指标：

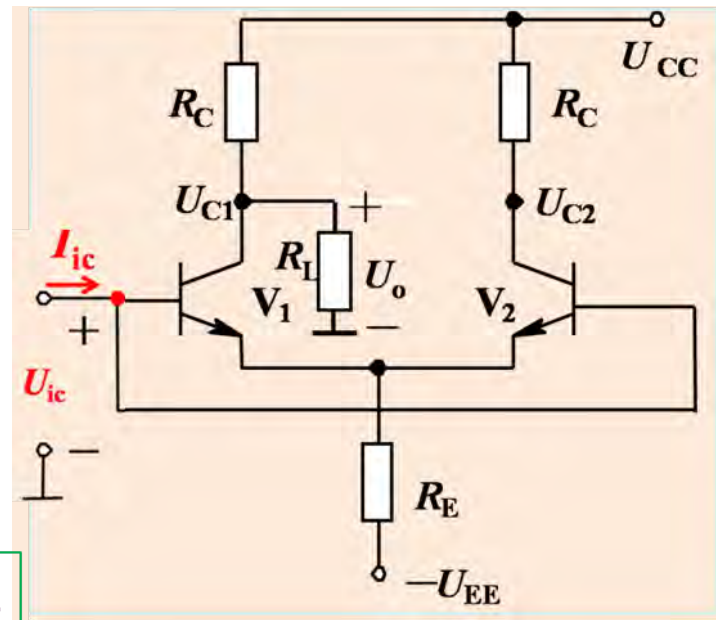
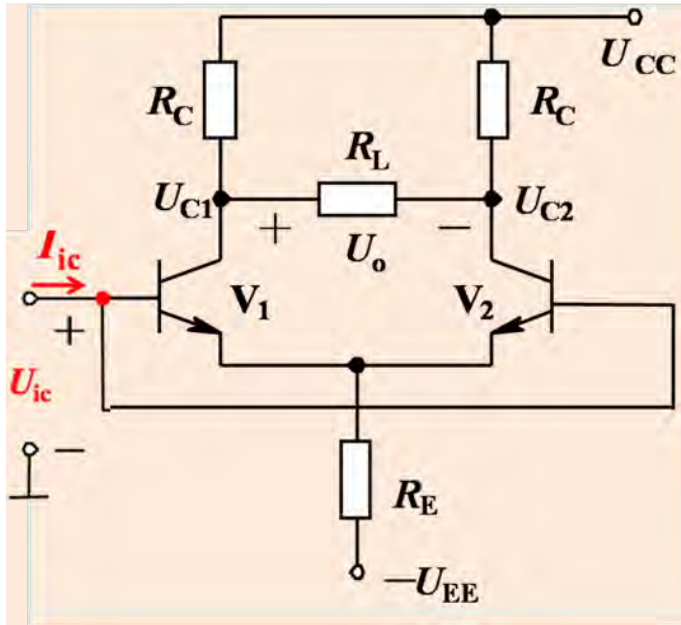
(1). 共模抑制特性分析

共模信号 common mode signal



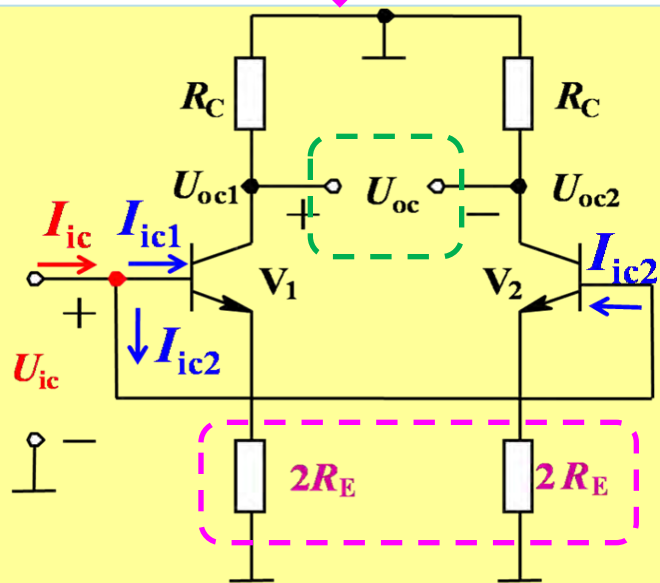
先画出交流通路：

∵ 共模输入时， R_E 上流过的电流为 $2(I_{EQ} + \Delta i_E)$ ，∴ 将 R_E 折算到单管上相当于每个管子的射极各接一个 $2R_E$ 的电阻。

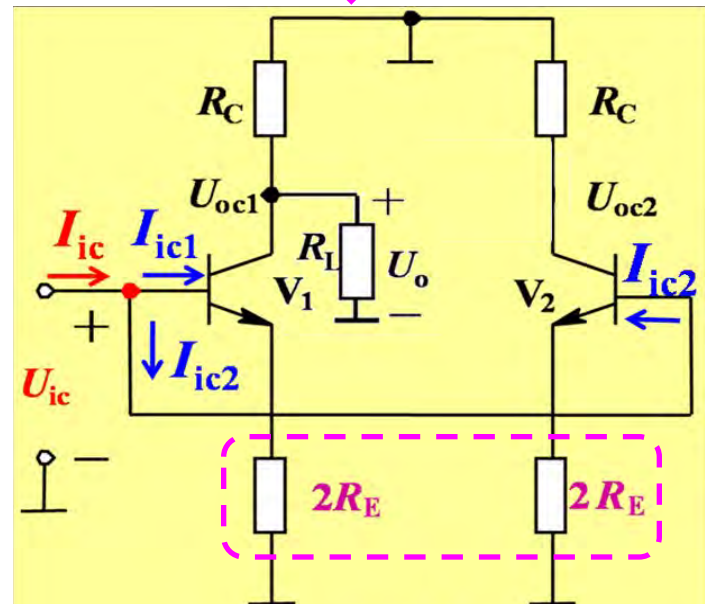


双端输出时，
 $\because u_{C1} = U_{C2}$ ，
 $\therefore R_L$ 中无电
 流流过，相
 当于开路；

交流通路

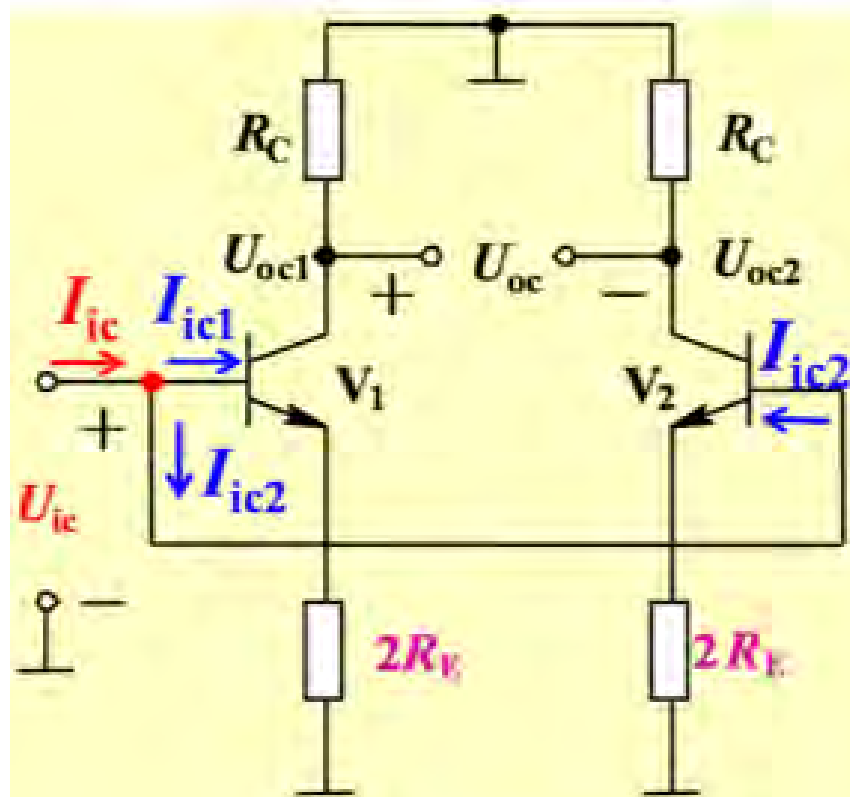


长尾式双端输出差动放
 大电路的共模等效通路



长尾式单端输出差动放
 大电路的共模等效通路

共模输入，双端输出的交流指标



长尾式双端输出差动放大电路的共模等效通路

① 共模电压放大倍数 A_{uc}

$$A_{uc} = \frac{U_{oc}}{U_{ic}} = \frac{U_{oc1} - U_{oc2}}{U_{ic}} = 0$$

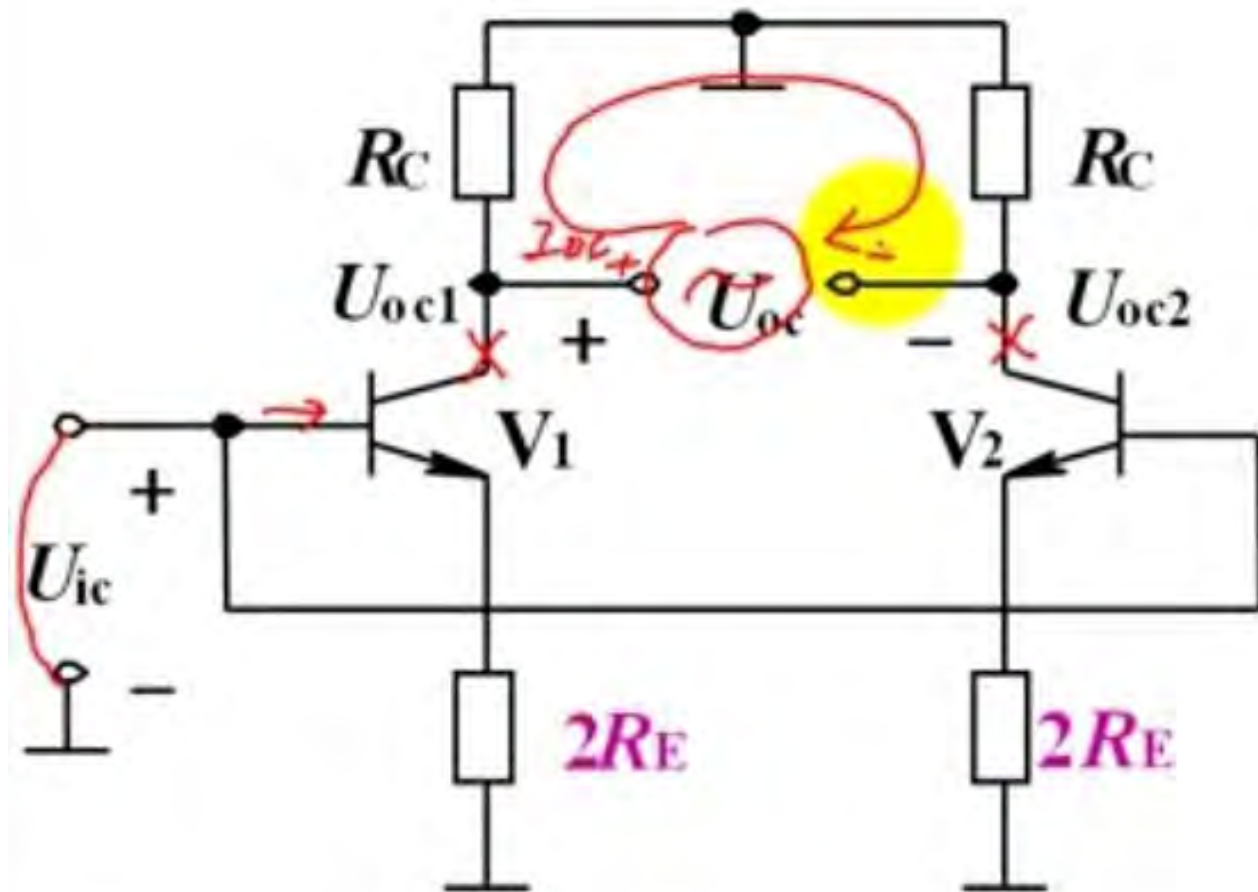
② 共模输入电阻 R_{ic}

$$R_{ic} = \frac{U_{ic}}{I_{ic}} = \frac{U_{ic}}{2I_{ic1}}$$

$$= \frac{1}{2} [r_{be} + (1 + \beta)2R_E]$$

③ 共模输出电阻 R_{oc}

$$R_{oc} = \frac{u_{oc}}{I_{oc}} \Big|_{\substack{U_{ic}=0 \\ R_L=\infty}} = 2R_C$$



③ 共模输出电阻 R_{oc}

$$R_{oc} = \left. \frac{u_{oc}}{I_{oc}} \right|_{\substack{U_{ic}=0 \\ R_L=\infty}} = 2R_c$$

共模输入, 单端输出的交流指标

① 共模电压放大倍数 A_{uc}

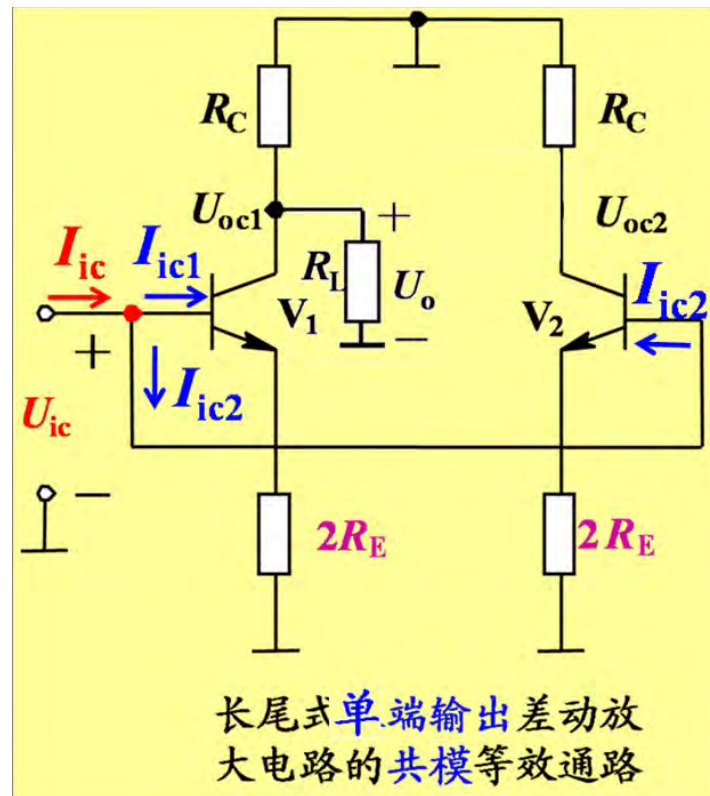
$$A_{uc} = \frac{U_{oc}}{U_{ic}} = \frac{U_{oc1}}{U_{ic}}$$

$$= -\frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)2R_E} \approx -\frac{R_C \parallel R_L}{2R_E}$$

② 共模输入电阻(输入端没变)

$$R_{ic} = \frac{U_{ic}}{I_{ic}} = \frac{U_{ic}}{2I_{ic1}} = \frac{1}{2} [r_{be} + (1 + \beta)2R_E]$$

③ 共模输出电阻 $R_{oc} = R_C$



差模信号 different mode signal

(2). 差模放大特性分析

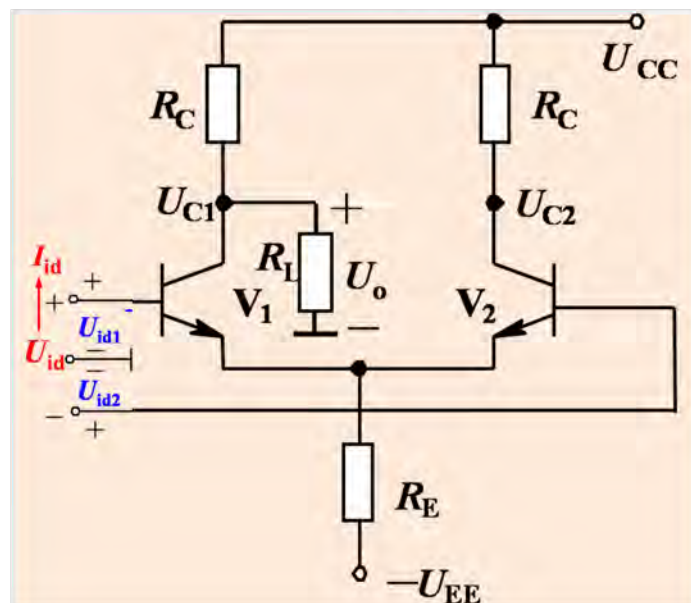
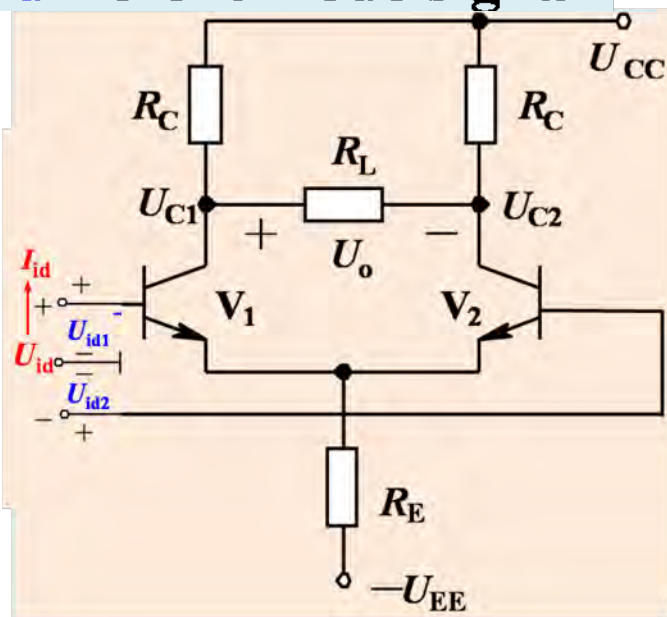
交流通路:

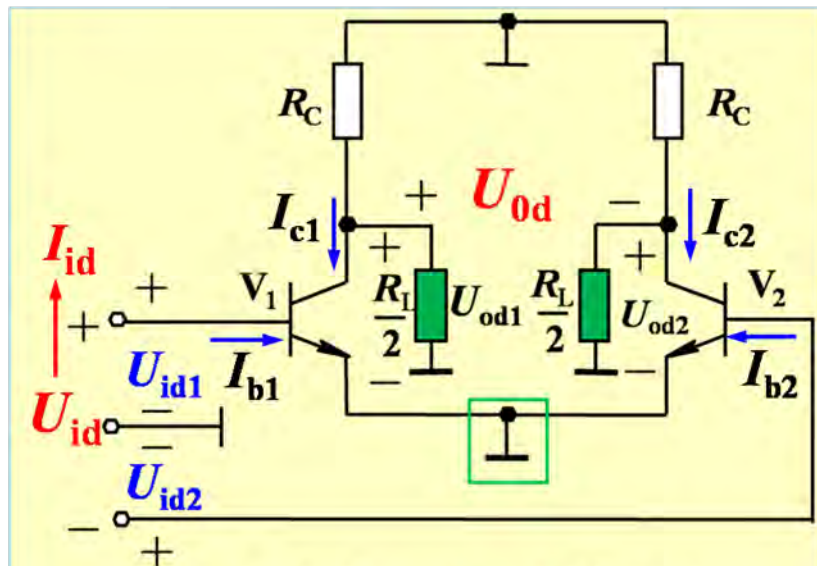
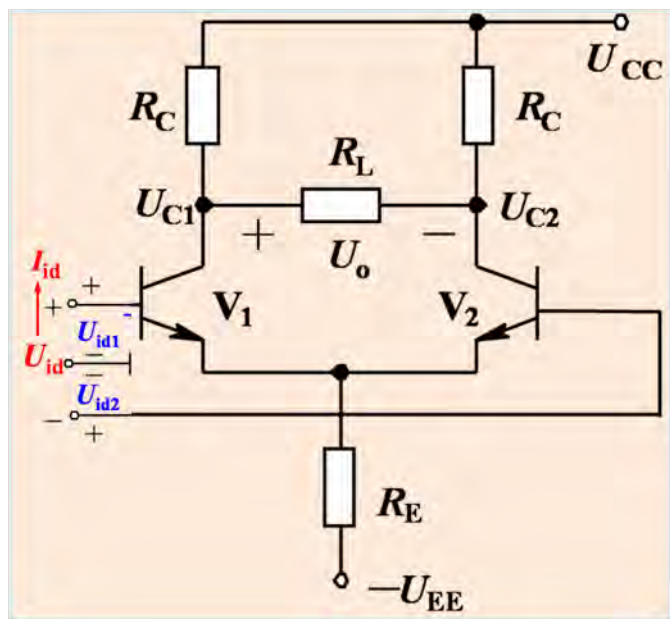
当输入差模信号时,

$$\therefore \Delta i_{E1} = -\Delta i_{E2},$$

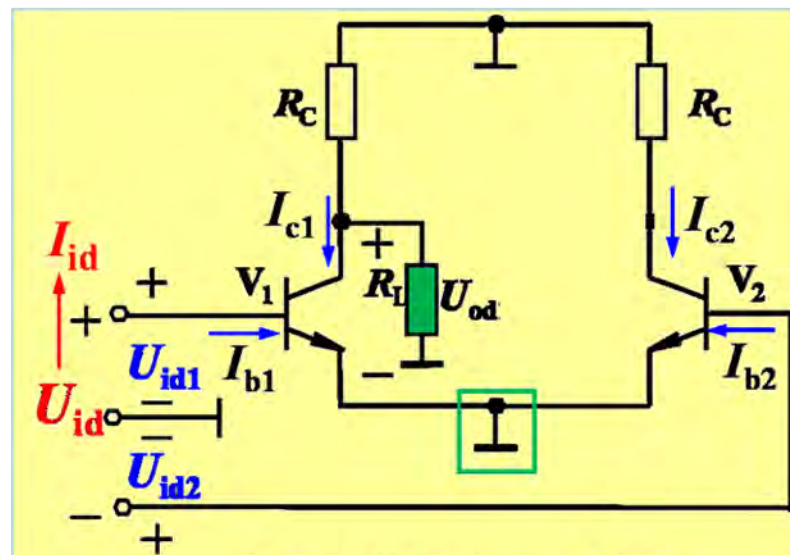
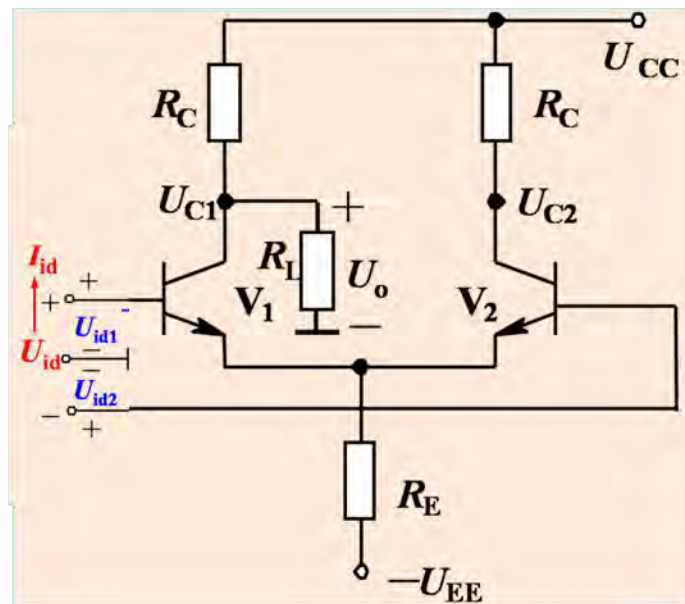
\therefore 流过 R_E 的电流不变, 即 R_E 对差模信号无反馈作用。E点电位在差模信号作用下不变, 相当于接“地”。

双端输出时, $\therefore \Delta i_{C1} = -\Delta i_{C2}$, \therefore 负载电阻 R_L 的中点电位在差模信号作用下不变, 相当于接“地”。



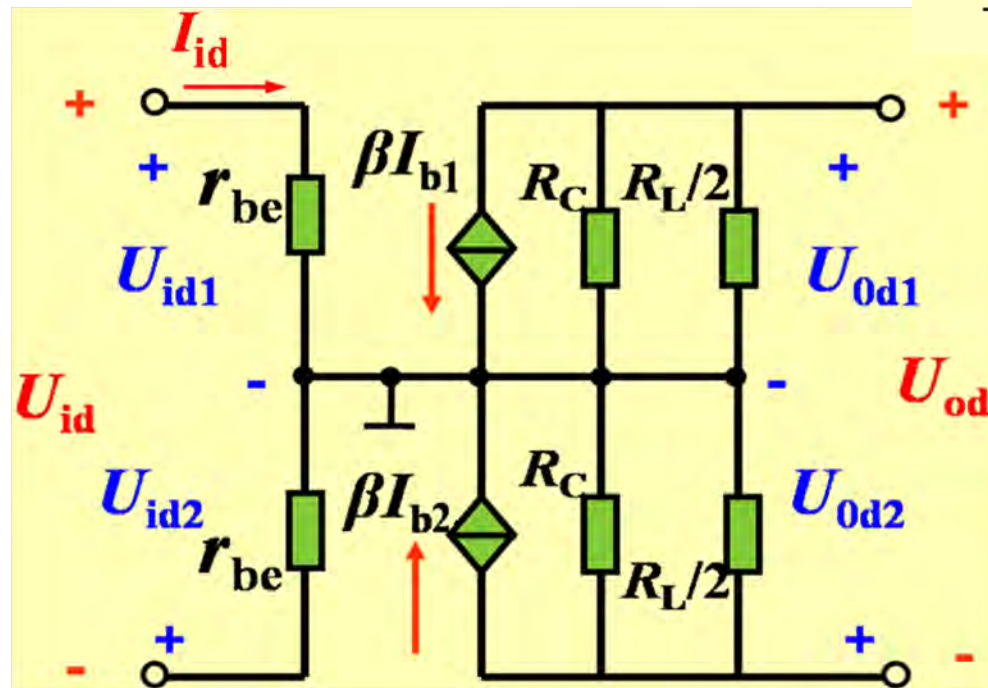
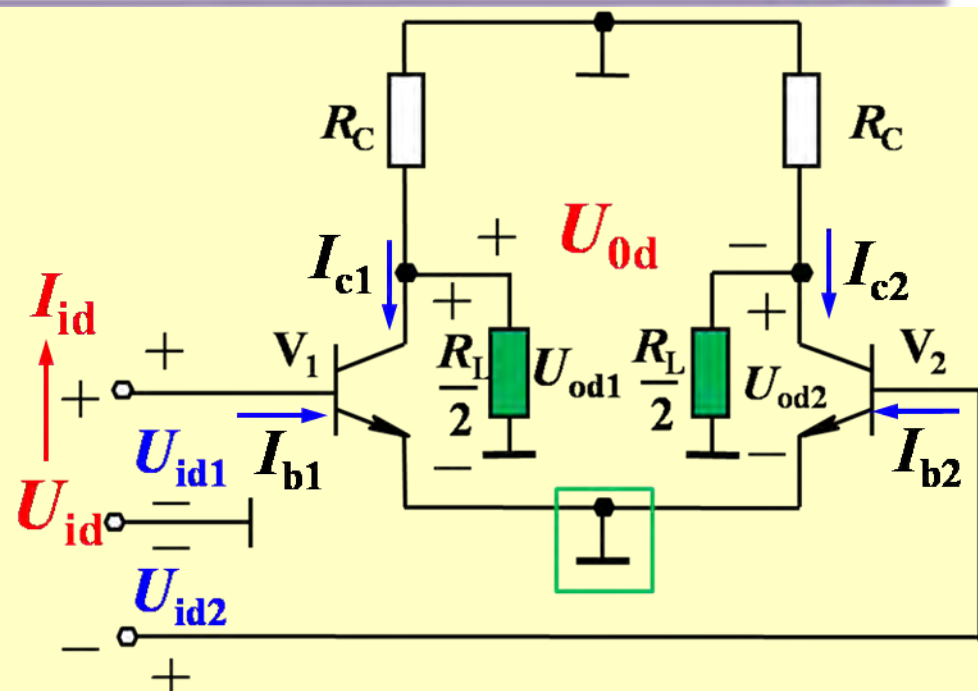


长尾式双端输出差动放大电路的差模等效通路



长尾式单端输出差动放大电路的差模等效通路

差模输入，双端输出 的交流等效电路



注: $I_{id} = I_{b1} = -I_{b2}$

$$U_{id} = U_{id1} - U_{id2}$$

$$= 2U_{id1} = -2U_{id2}$$

差模输入，双端输出的交流指标

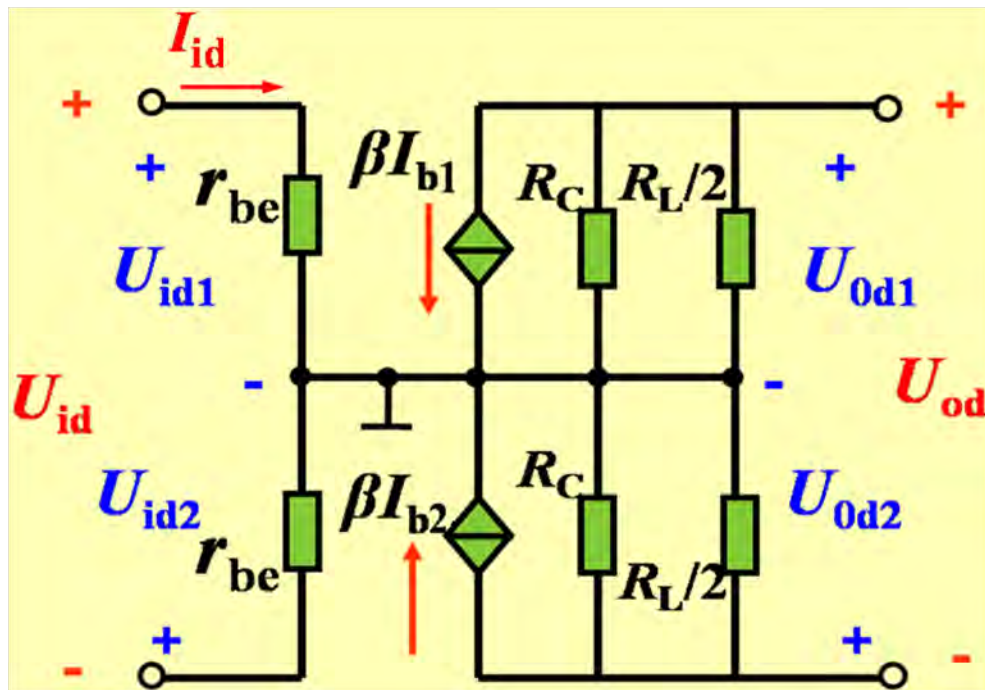
① 差模电压放大倍数 A_{ud}

$$U_{od} = U_{od1} - U_{od2} = 2U_{od1} = -2U_{od2}$$

$$U_{id} = U_{id1} - U_{id2} = 2U_{id1} = -2U_{id2}$$

$$A_{ud} = \frac{U_{od}}{U_{id}} = \frac{U_{od1}}{U_{id1}} = \frac{U_{od2}}{U_{id2}}$$

$$= -\frac{\beta(R_C \parallel \frac{1}{2}R_L)}{r_{be}}$$

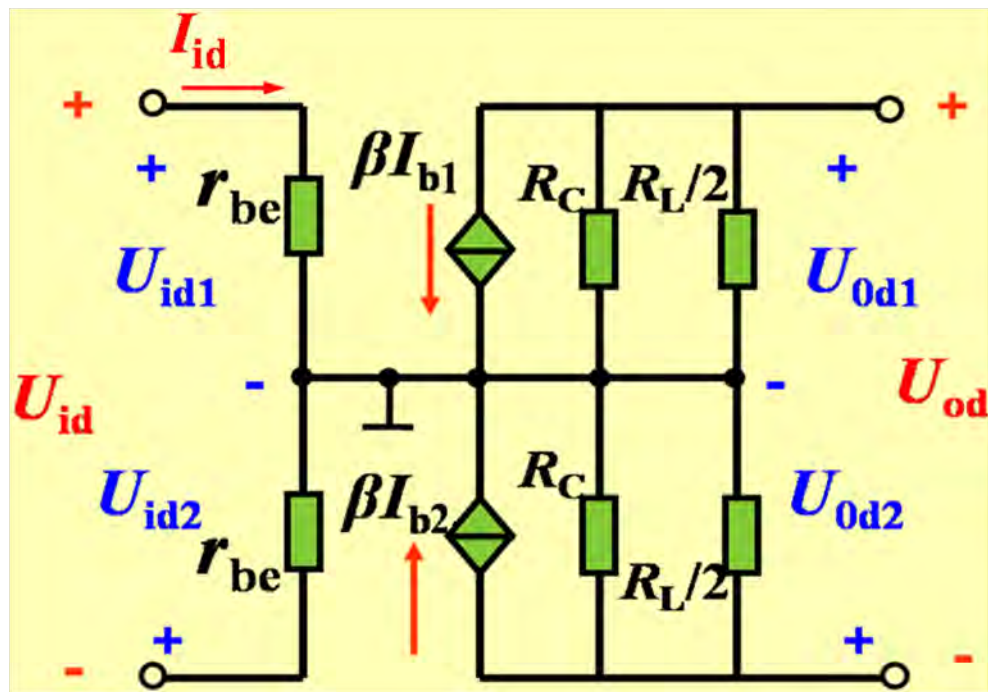


② 差模输入电阻 R_{id}

$$R_{id} = \frac{U_{id}}{I_{id}} = \frac{2U_{id1}}{I_{b1}} = 2r_{be}$$

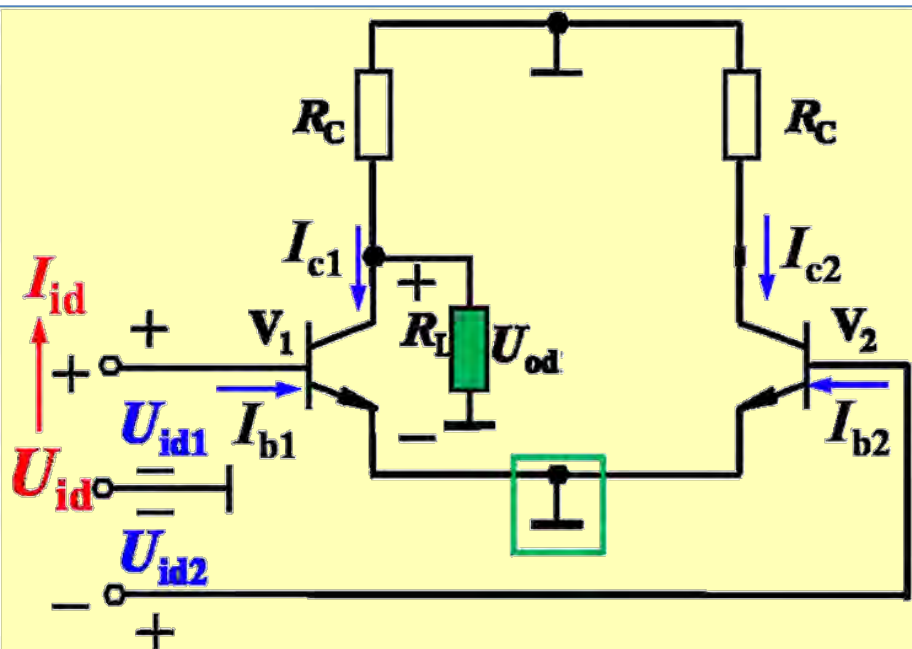
③ 差模输出电阻 R_{od}

$$R_{od} = \frac{U_{od}}{I_{od}} \bigg|_{\substack{U_{id}=0 \\ R_L=\infty}} = 2R_C$$



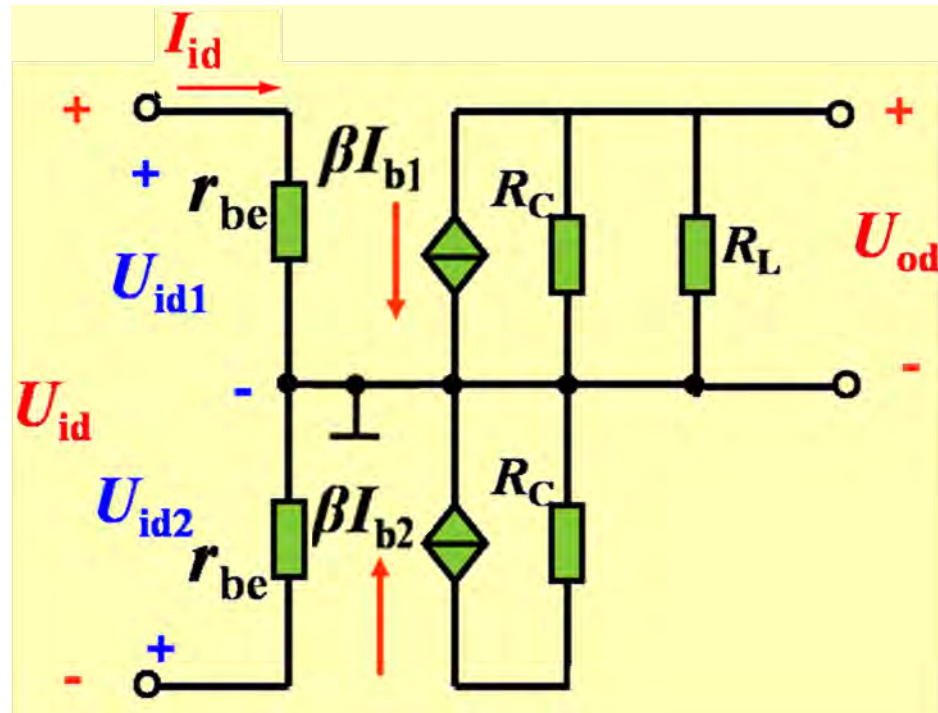
注: $I_{id} = I_{b1} = -I_{b2}$

差模输入，单端输出的交流等效电路



长尾式单端输出差动放大电路的差模等效通路

注: $I_{id} = I_{b1} = -I_{b2}$



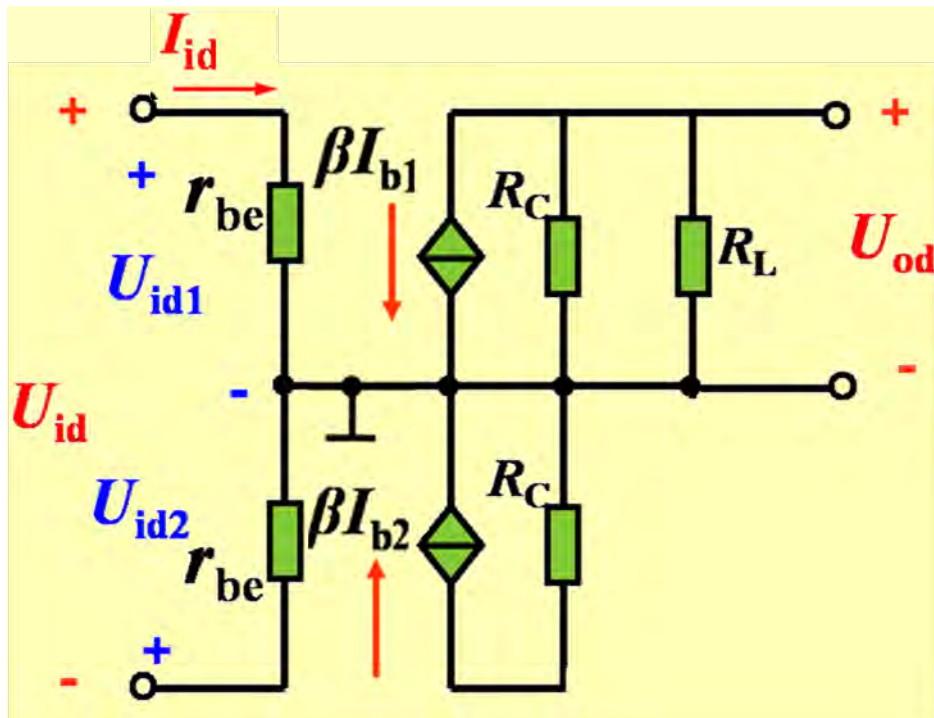
差模输入，单端输出的交流指标

① 差模电压放大倍数 A_{ud}

$$U_{od} = U_{od1}$$

$$\begin{aligned} U_{id} &= U_{id1} - U_{id2} \\ &= 2U_{id1} = -2U_{id2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{ud} &= \frac{U_{od}}{U_{id}} = \frac{U_{od1}}{2U_{id1}} \\ &= -\frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{2r_{be}} \end{aligned}$$



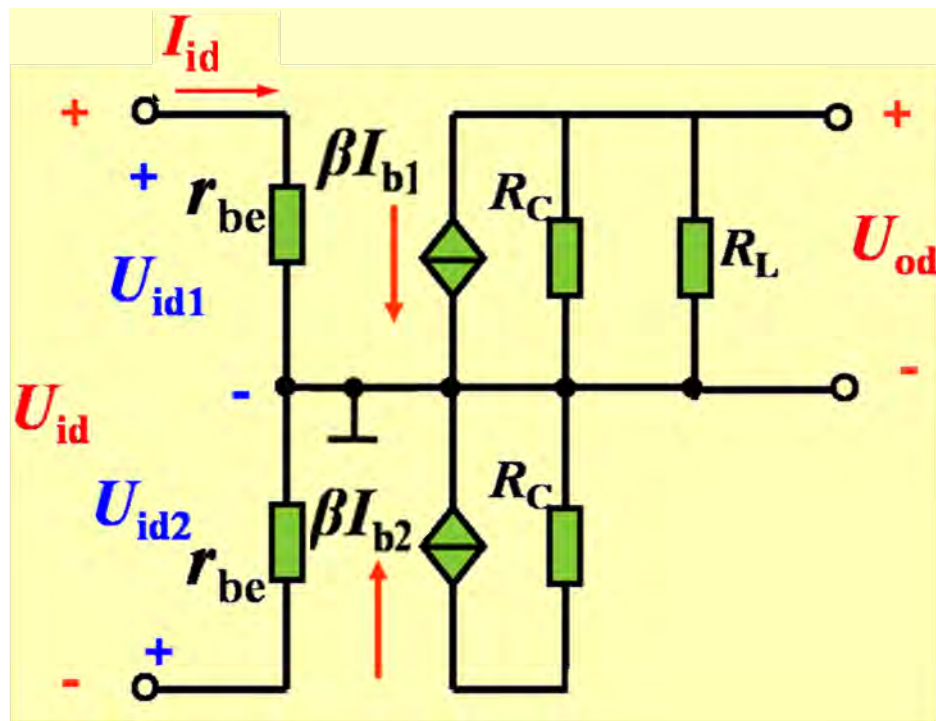
② 差模输入电阻 R_{id} 不变

$$R_{id} = \frac{U_{id}}{I_{id}} = \frac{2U_{id1}}{I_{id}} = 2r_{be}$$

注： $I_{id} = I_{b1} = -I_{b2}$

③ 差模输出电阻 R_{od}

$$R_{od} = R_C$$



(3).共模抑制比 K_{CMR}

差模：需要放大的有用信号，尽可能的放大。

共模：无用的干扰信号，需要抑制。

为了衡量差动放大电路对差模信号的放大和对共模信号的抑制能力，通用共模抑制比来衡量。

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \quad \text{对数形式: } K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| (dB)$$

K_{CMR} 实质上是反映实际差动电路的对称性。

在双端输出理想对称的情况下， $A_{uc}=0$ ， $K_{CMR} \rightarrow \infty$ 。

定量分析时通常用单端输出的

$$K_{CMR(单)} = \left| \frac{A_{ud(单)}}{A_{uc(单)}} \right|$$

(4). 对任意输入信号的动态特性分析

实际使用中，输入信号 U_{i1} 和 U_{i2} 可以既不是共模也不是差模信号。这时我们可以把输入信号分解为一对共模信号和一对差模信号，它们共同作用在差动电路的输入端。

通常定义：

$$\text{共模输入电压： } U_{ic} = \frac{U_{i1} + U_{i2}}{2}$$

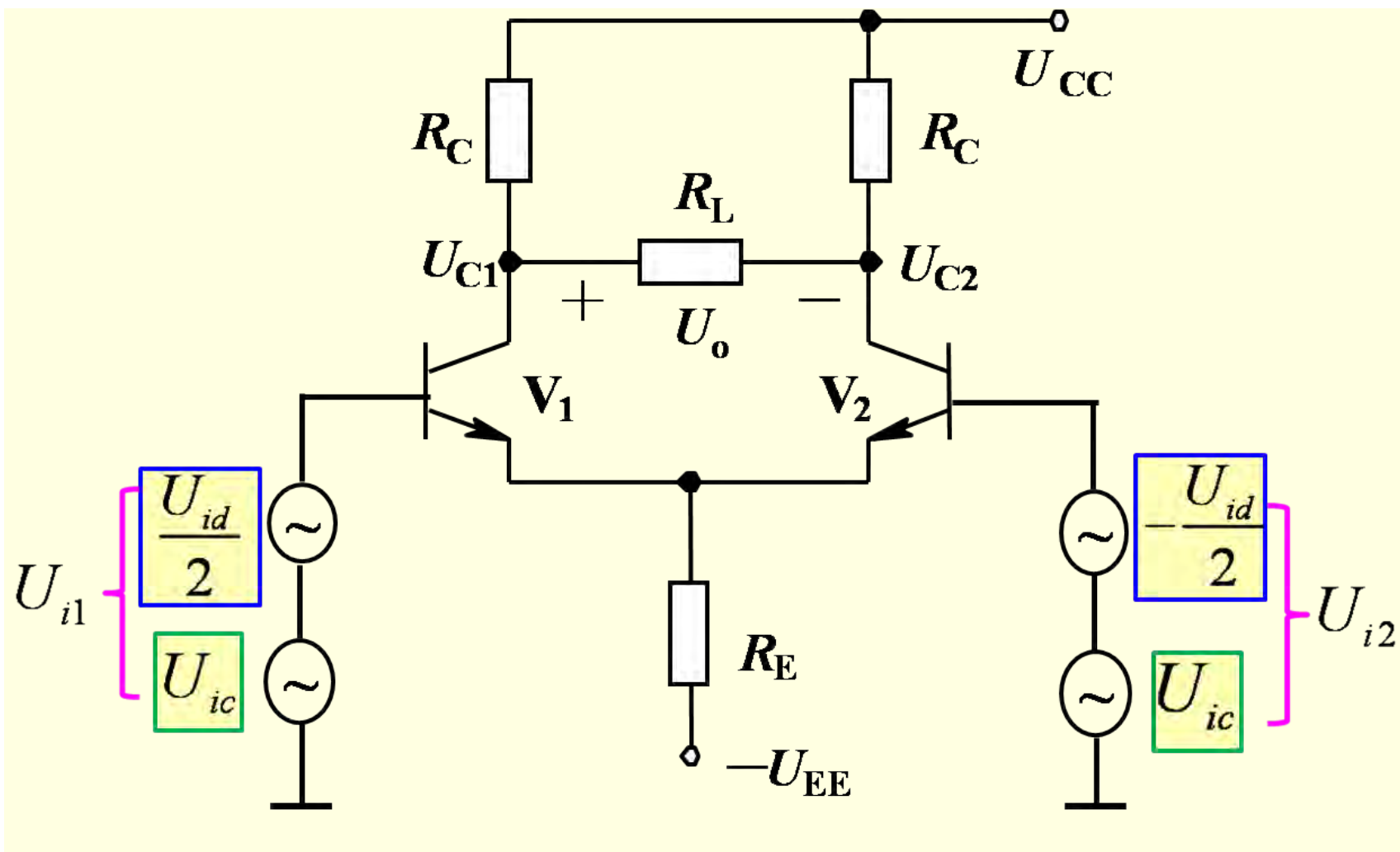
$$\text{差模输入电压： } U_{id} = U_{i1} - U_{i2}$$



→ 输入信号：

$$U_{i1} = \frac{U_{id}}{2} + U_{ic}$$

$$U_{i2} = -\frac{U_{id}}{2} + U_{ic}$$



输出电压:

$$\begin{aligned} \text{双端输出时: } U_o &= U_{od} + U_{oc} = A_{ud}U_{id} + A_{uc}U_{ic} \\ &= A_{ud}U_{id} = A_{ud}(U_{i1} - U_{i2}) \end{aligned}$$

$$\text{单端输出时: } U_{o(\text{单})} = A_{ud(\text{单})}U_{id} + A_{uc(\text{单})}U_{ic}$$

(若共模抑制比足够高, 即 $A_{ud(\text{单})} \gg A_{uc(\text{单})}$ 时)

$$\approx A_{ud(\text{单})}U_{id} = A_{ud(\text{单})}(U_{i1} - U_{i2})$$

可见, 无论是单端还是双端输出, 差动放大电路只放大差模信号。

具有电流源的差动放大电路

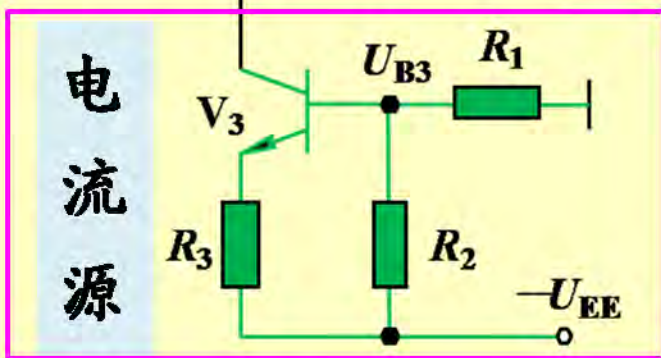
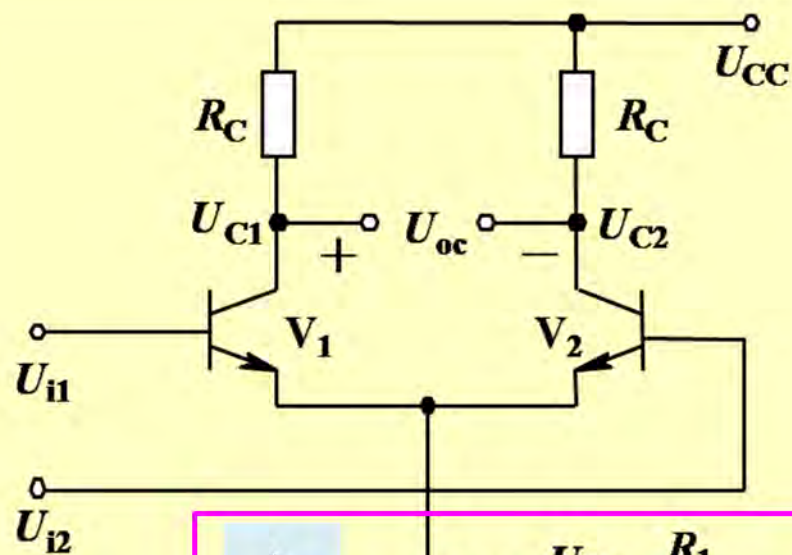
为了提高共模抑制比应加大 R_E ，但 R_E 加大后，考虑到：

$$I_{CQ1}=I_{CQ2}\approx I_{EQ1}=I_{EQ2}=(U_{EE}-0.7)/2R_E$$

所以为保证静态电流 I_{EQ} 不变，必须提高负电源 $-U_{EE}$ 。但 R_E 太大时，所需的大电源不易实现。

而我们需要的是：在低电源条件下，设置合适的 I_{EQ} ，并得到趋于无穷大的 R_E 。

解决方法：采用电流源取代 R_E ！



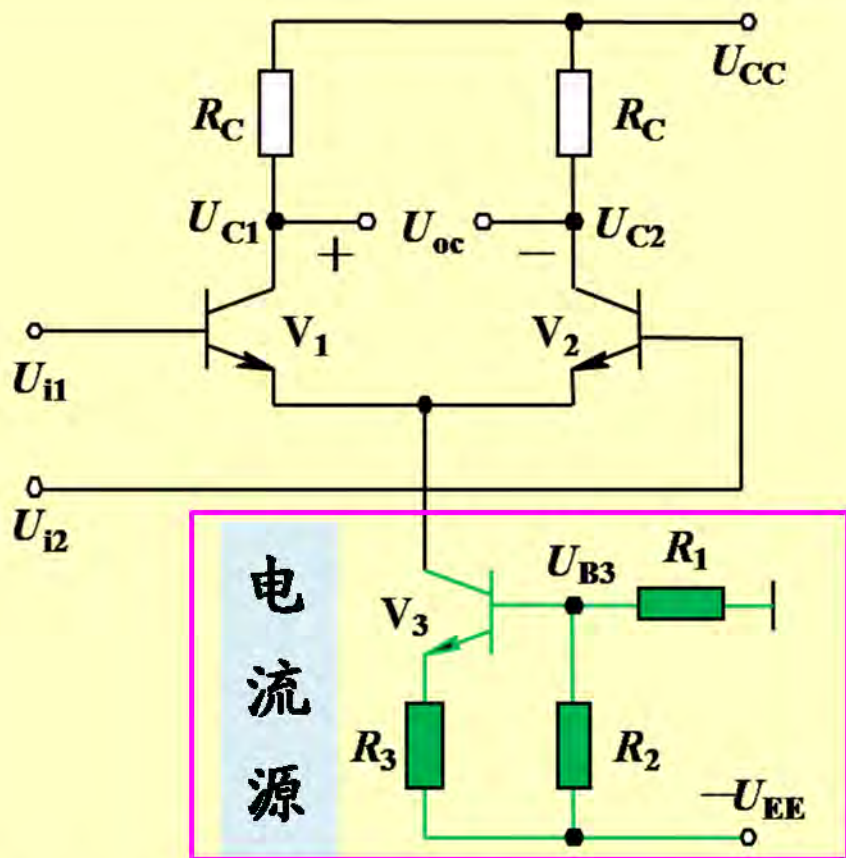
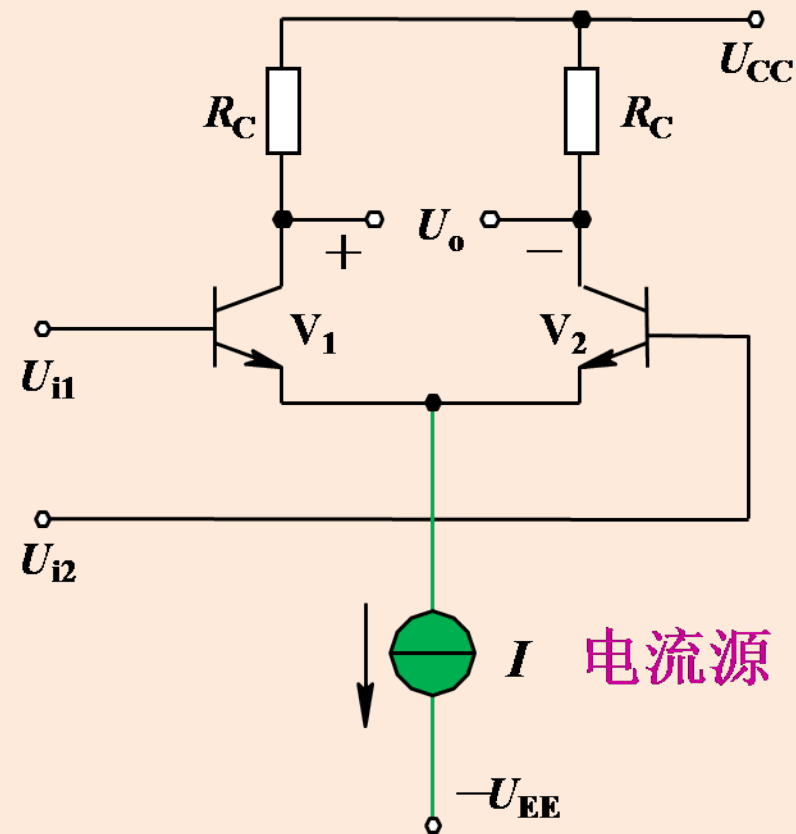
电
流
源

此单管电流源是采用分压式偏置电路。其中管子 V_3 的集电极电流 I_{EQ3} 满足：

$$I_{EQ3}R_3 + U_{BE} = U_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{EE}$$

即管子 V_3 的集电极电流 I_{EQ3} 可保持恒定(恒流源)。

用单管电流源代替 R_E 的差动电路

用单管电流源代替 R_E 的差动电路

电路的简化表示

静态工作点的估算:

$$I_{CQ3} \approx I_{EQ3} = \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{EE} - U_{BE}}{R_3}$$

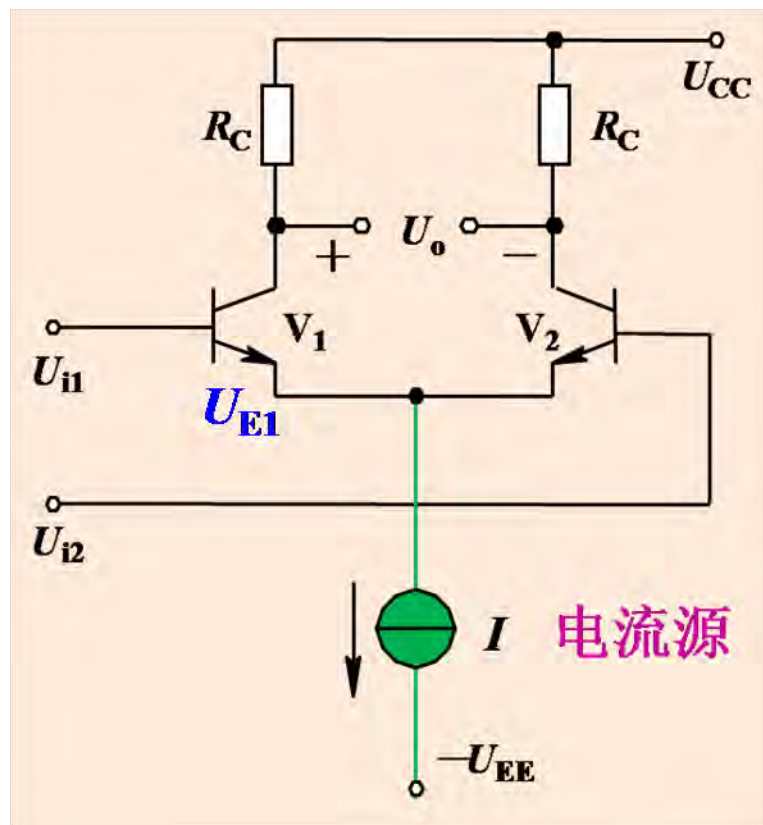
$$I_{C1Q} = I_{C2Q} = \frac{1}{2} I_{CQ3}$$

$$\because U_{CC} - U_{E1} = U_{CEQ1} + R_C I_{CQ1}$$

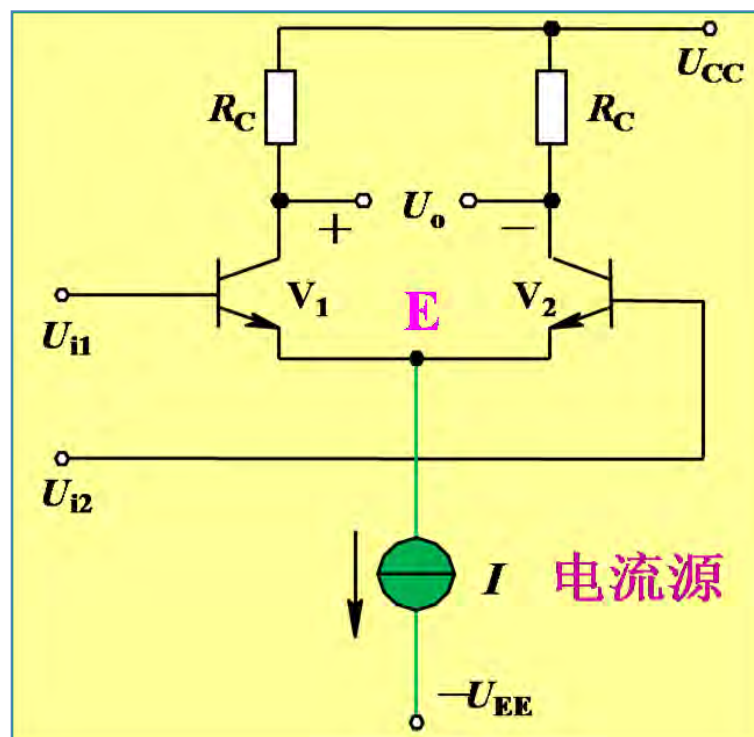
$$\text{而 } 0.7V = U_{BE1} = U_{B1} - U_{E1} = U_{i1} - U_{E1} = 0V - U_{E1}$$

$$\therefore U_{E1} = -0.7V$$

$$\therefore U_{CEQ2} = U_{CEQ1} = U_{CC} - U_{E1} - R_C I_{CQ1} = U_{CC} + 0.7 - R_C I_{CQ1}$$



★ **恒流源**相当于阻值很大的长尾电阻 R_E ，所以它的作用也是引入一个共模负反馈，使共模放大倍数减小，从而**增加共模抑制比**。但恒流源**不影响差模放大倍数**(\because E点电位在差模信号作用下不变，相当于接“地”)。



差动放大电路的大信号分析

上述章节讨论的电压增益往往是小信号情况下的分析，在大信号情况下，差动电路的工作情况又如何？

传输特性：差动放大器输出电流或输出电压与差模输入电压之间的函数关系。

下面我们讨论在大信号范围下，

$$i_{C1} \left(\text{或} i_{C2} \text{或} u_o \right) = f \left(U_{id} \right)$$

电流传输特性:

$$i_{E1} = I_S (e^{u_{BE1}/U_T} - 1) \approx I_S e^{u_{BE1}/U_T}$$

$$i_{E2} = I_S (e^{u_{BE2}/U_T} - 1) \approx I_S e^{u_{BE2}/U_T}$$

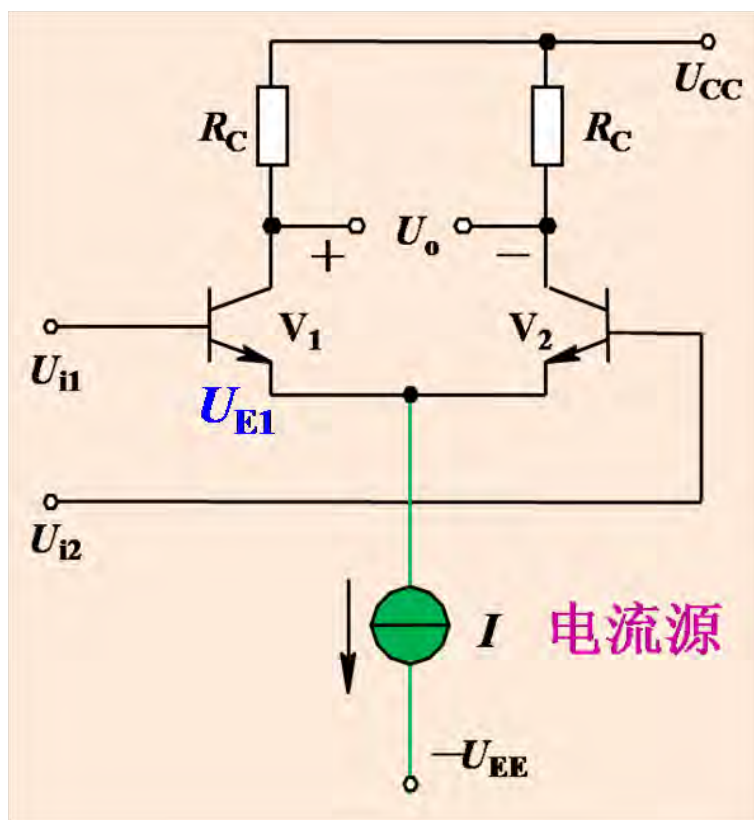
$$I = i_{E1} + i_{E2} = i_{E1} \left(1 + \frac{i_{E2}}{i_{E1}} \right)$$

$$\approx i_{C1} \left(1 + e^{\frac{u_{BE2} - u_{BE1}}{U_T}} \right)$$

$$\therefore i_{C1} = \frac{I}{1 + e^{-\frac{u_{id}}{U_T}}} = \frac{I}{2} + \frac{I}{2} \operatorname{th} \left(\frac{u_{id}}{2U_T} \right)$$

$$i_{C2} = \frac{I}{1 + e^{\frac{u_{id}}{U_T}}} = \frac{I}{2} - \frac{I}{2} \operatorname{th} \left(\frac{u_{id}}{2U_T} \right)$$

$$u_{id} = u_{BE1} - u_{BE2}$$



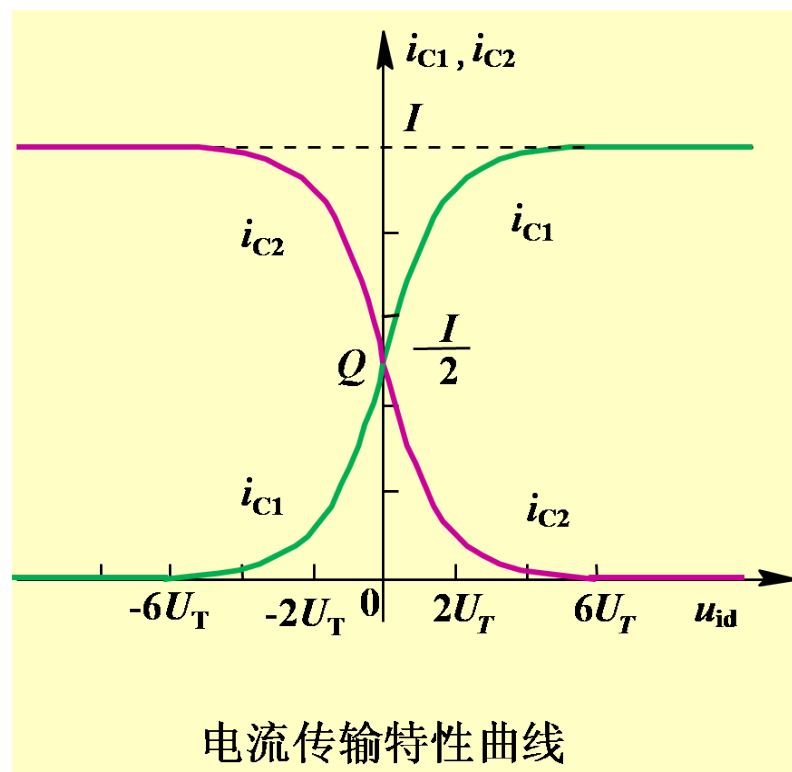
$$i_{C1} = \frac{I}{1 + e^{-\frac{u_{id}}{U_T}}} = \frac{I}{2} + \frac{I}{2} \operatorname{th}\left(\frac{u_{id}}{2U_T}\right)$$

$$i_{C2} = \frac{I}{1 + e^{\frac{u_{id}}{U_T}}} = \frac{I}{2} - \frac{I}{2} \operatorname{th}\left(\frac{u_{id}}{2U_T}\right)$$

(1). 两个管子的集电极电流之和恒等于 I

当 $u_{id}=0$ 时, 差动电路处于静态,

这时 $i_{C1}=i_{C2}=I_{CQ}=I/2$

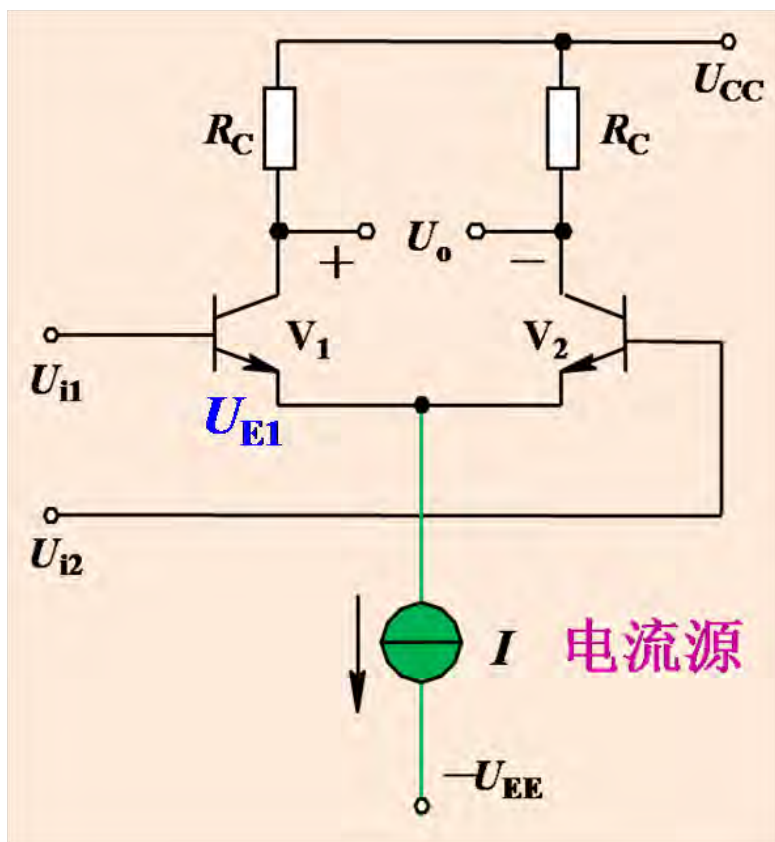


(2). 传输特性具有非线性特性 (约26meV)

① 在静态工作点附近, 即 $|u_{id}| \leq U_T$ (小信号下) 时, 传输特性是线性的。 (约100meV)

② 当 $|u_{id}| \geq 4U_T$ (大信号下) 时, 传输特性是非线性的, 先弯曲, 而后趋于水平。

电压传输特性:



$$\therefore u_o = u_{C1} - u_{C2}$$

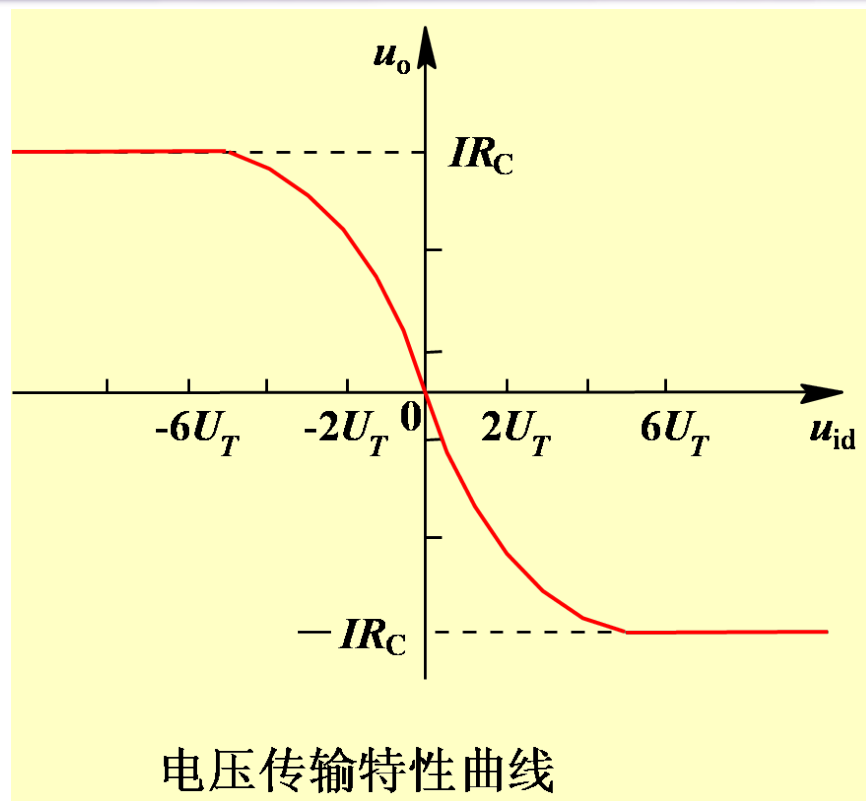
$$= U_{CC} - i_{C1}R_C - (U_{CC} - i_{C2}R_C)$$

$$= -(i_{C1} - i_{C2})R_C$$

$$i_{C1} - i_{C2} = I \operatorname{th}\left(\frac{u_{id}}{2U_T}\right)$$

$$\therefore u_o = -R_C I \operatorname{th}\left(\frac{u_{id}}{2U_T}\right)$$

$$u_o = -R_C I th\left(\frac{u_{id}}{2U_T}\right)$$



(2). 传输特性具有非线性特性 (约26meV)

- ① 在静态工作点附近，即 $|u_{id}| \leq U_T$ (小信号下) 时，传输特性是线性的。 (约100meV)
- ② 当 $|u_{id}| \geq 4U_T$ (大信号下) 时，传输特性是非线性的，先弯曲，而后趋于水平。

差动放大器的失调及温漂

一、差动放大器的失调

当输入信号为零时，由于两晶体管参数和电阻值不可能做到完全对称，使得双端输出电压不为0的现象称为差动放大器的失调。

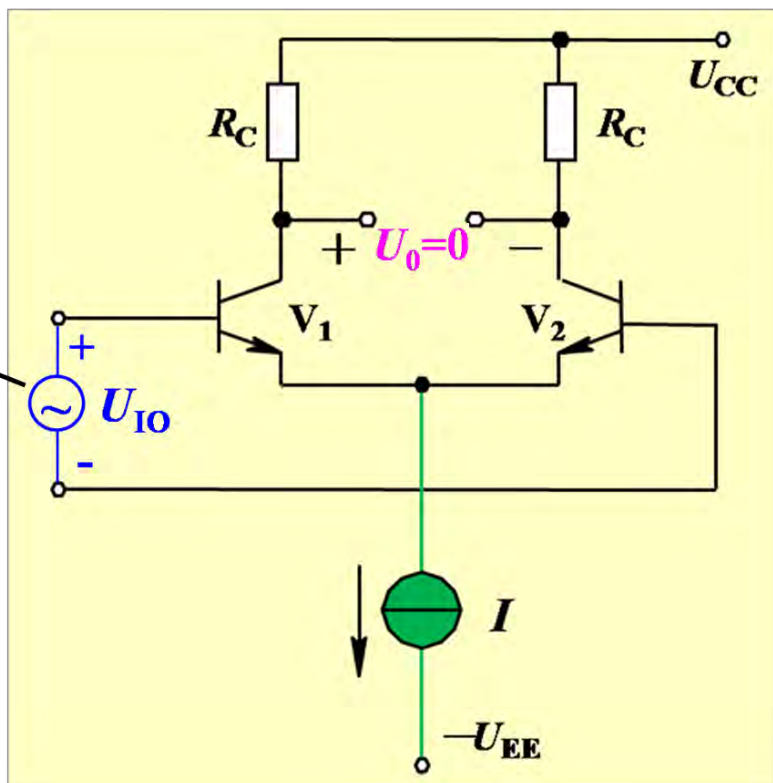
与失调有关的具体因素： R_C I_S β

解决方法：人为地在输入端加补偿电压或补偿电流

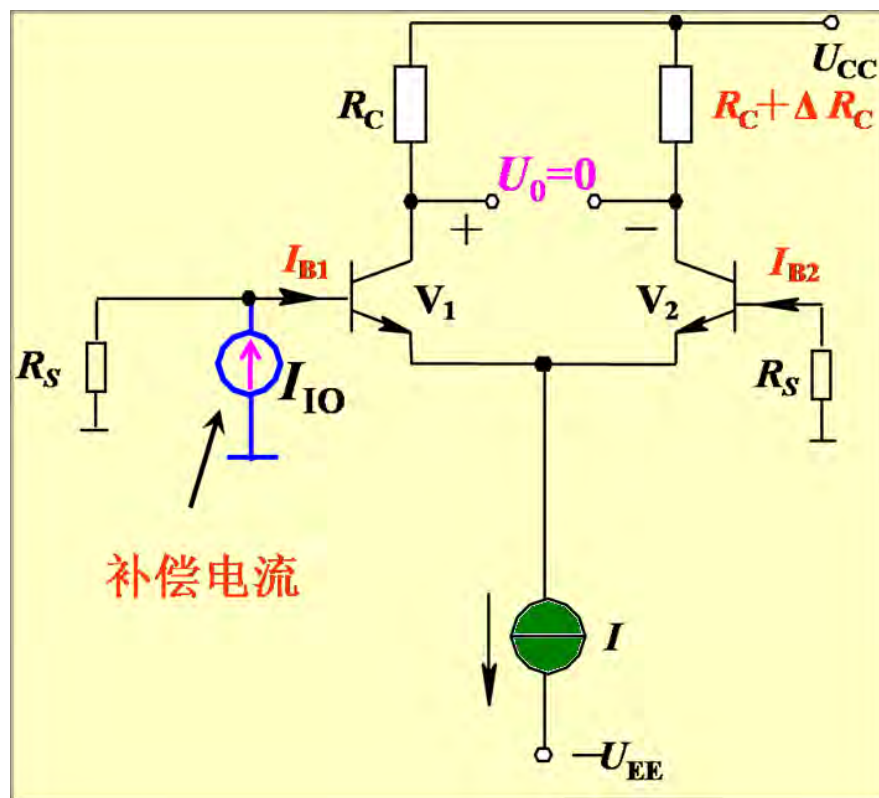
输入失调电压— U_{IO}

输入失调电流— I_{IO}

补偿电压



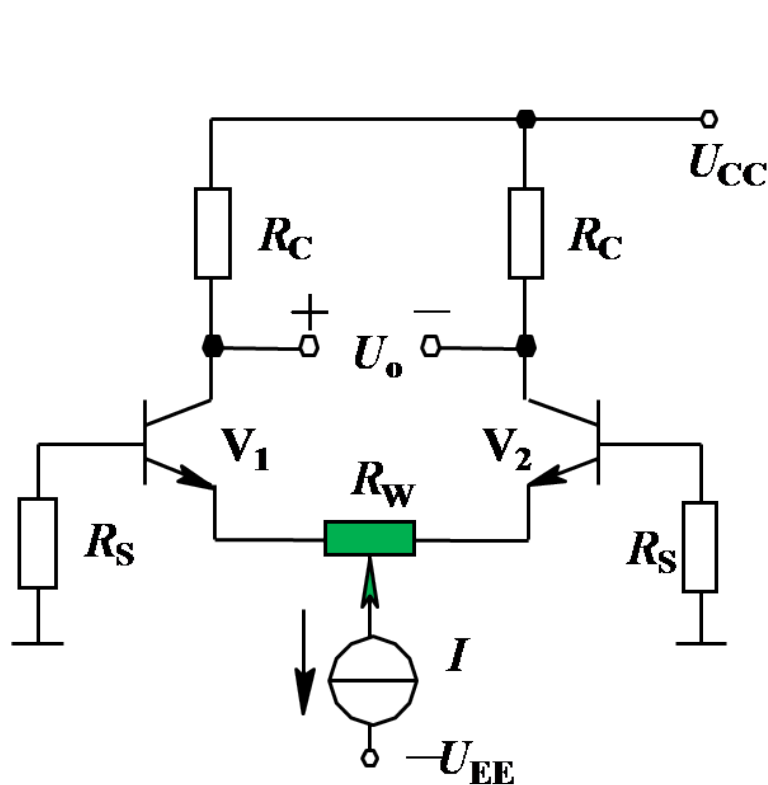
输入失调电压



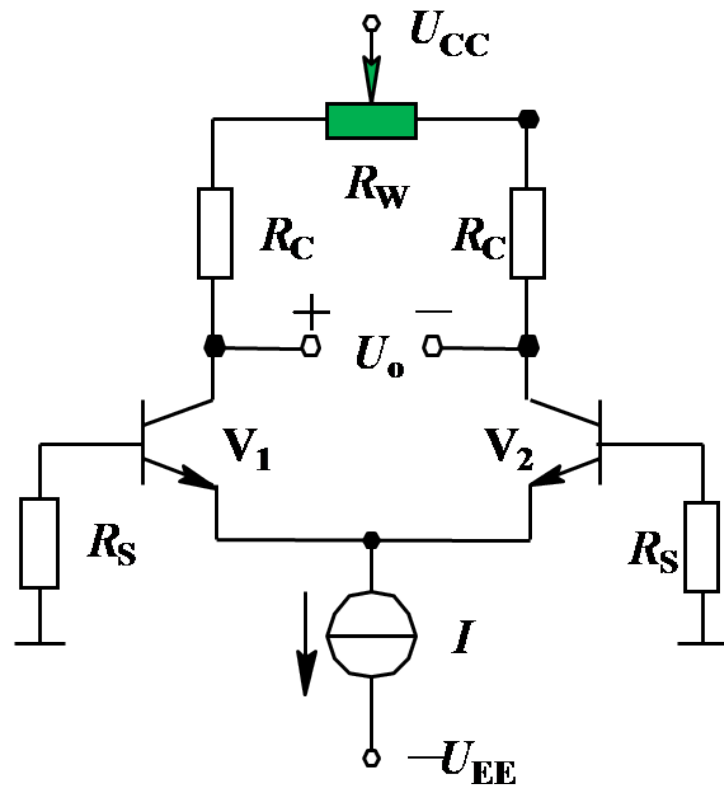
补偿电流

输入失调电流

用来补偿失调的两种常见调零电路：



(a)射极调零



(b)集电极调零

差动电路可以解决多级直接耦合放大器存在的零点漂移现象；
差动放大器的调零电路可以对失调现象进行补偿。

二、失调的温度漂移

差动放大电路虽然可以通过调零措施在某一时刻补偿失调，使输出为0。但失调会随着温度的改变而发生变化，所以差动放大电路仍存在失调的温度漂移现象。

调零电路可以克服失调，但不能克服温漂。

零点漂移: 是指当放大电路**输入信号为零时**，由于受元器件参数变值、环境温度变化，电源电压不稳等因素的影响，使静态工作点发生变化，并被逐级放大和传输，导致电路**输出端电压偏离原固定值而上下漂动的现象。**

当输入信号为零时，由于两晶体管参数和电阻值不可能做到完全对称，使得**双端输出电压不为0**的现象称为差动放大器的失调。

调零电路可在某一特定温度下，使输出为0。但失调会随着温度的改变而发生变化，所以仍存在失调的**温度漂移现象。**

调零电路可以克服失调，但不能克服温漂。

作业：

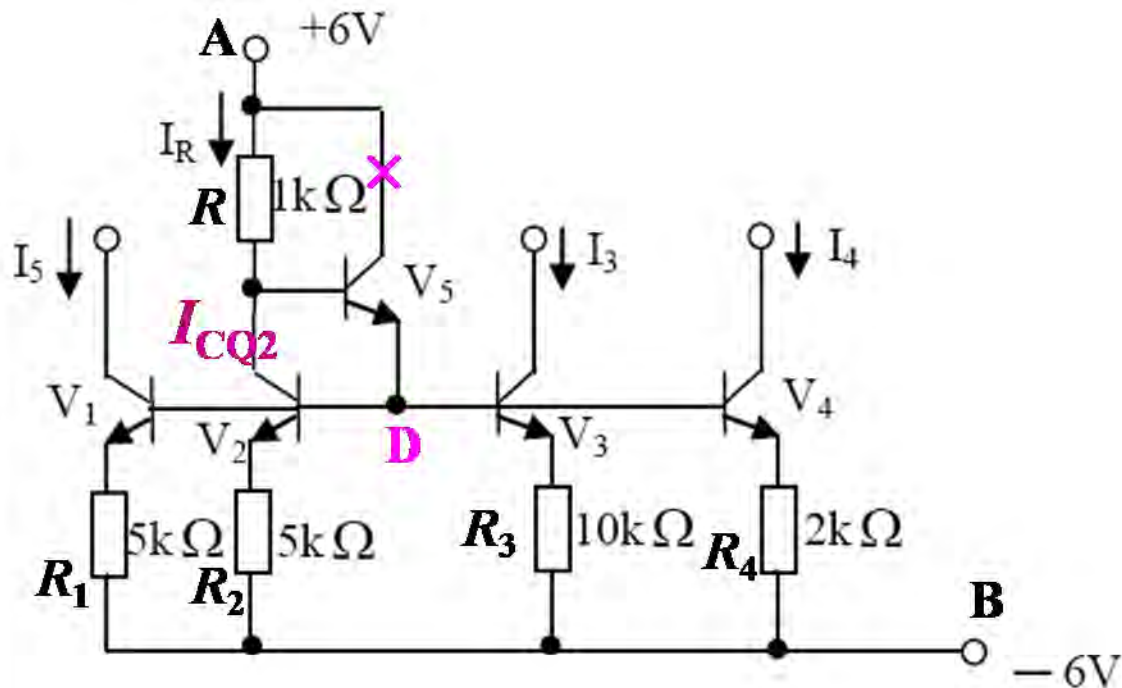
✚ 5.2

✚ 5.4(1),(2),(3)

✚ 5.6(1),(2),(4)

✚ 5.8

5.2 求各支路电流值



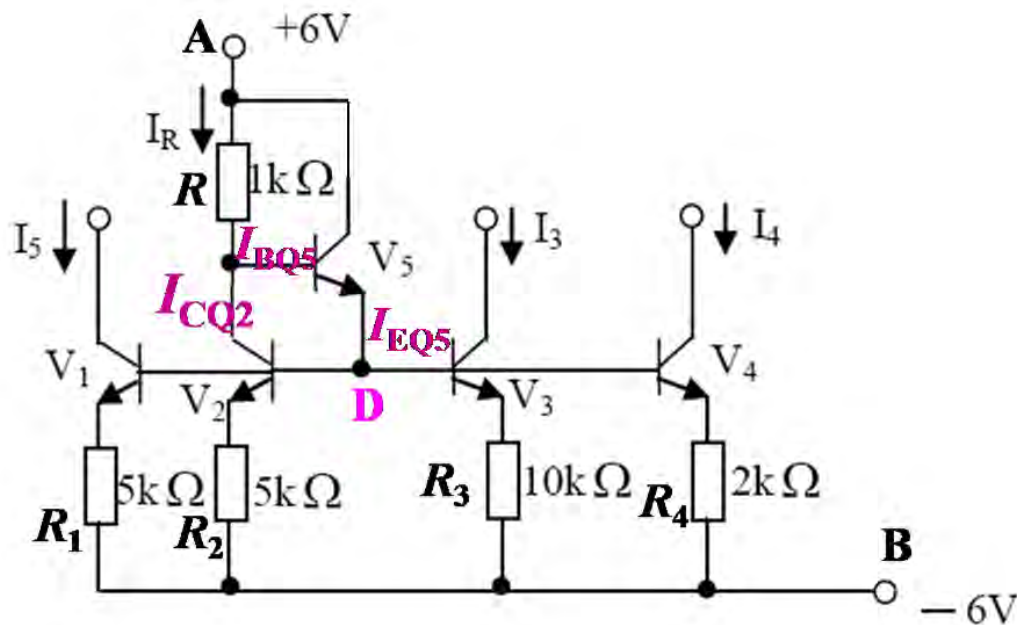
解: $\because U_D - U_B = U_{BE2} + I_{EQ2}(I_{CQ2})R_2 = U_{BE1} + I_{EQ1}(I_5)R_1$
 $= U_{BE3} + I_{EQ3}(I_3)R_3 = U_{BE4} + I_{EQ4}(I_4)R_4$

又 \because 各个管的都一样, 即 $U_{BEQ} = 0.7V$

$$\therefore I_{EQ2}(I_{CQ2})R_2 = I_{EQ1}(I_5)R_1 = I_{EQ3}(I_3)R_3 = I_{EQ4}(I_4)R_4$$

$$(I_5)I_{EQ1} = I_{EQ2} = I_{CQ2}, \quad (I_3)I_{EQ3} = 1/2 I_{CQ2}, \quad (I_4)I_{EQ4} = 5/2 I_{CQ2}$$

5.2



$$I_{EQ5} = (I_{BQ1} + I_{BQ2} + I_{BQ3} + I_{BQ4}) = (I_{EQ1} + I_{EQ2} + I_{EQ3} + I_{EQ4}) / (1 + \beta)$$

$$= 5I_{EQ2} / (1 + \beta) = 5I_{CQ2} / (1 + \beta)$$

$$I_R = I_{CQ2} + I_{BQ5} = I_{CQ2} + I_{EQ5} / (1 + \beta) = I_{CQ2} + 5I_{CQ2} / (1 + \beta) / (1 + \beta)$$

$$= [1 + 5 / (1 + \beta)^2] I_{CQ2} \approx I_{CQ2}$$

$$\because U_{CBQ2} = U_{BEQ5}, \therefore U_{CEQ2} = U_{CBQ2} + U_{BEQ2} = U_{BEQ5} + U_{BEQ2} = 1.4V$$

$$\therefore U_A - U_B = I_R R + U_{CEQ2} (1.4V) + I_{EQ2} (I_R) R_2,$$

$$\therefore I_R = \frac{6 - (-6) - 2 \times 0.7}{1 + 5} = 1.8 \text{ (mA)} = I_5, \quad I_3 = \frac{5}{10} I_R, \quad I_4 = \frac{5}{2} I_R$$

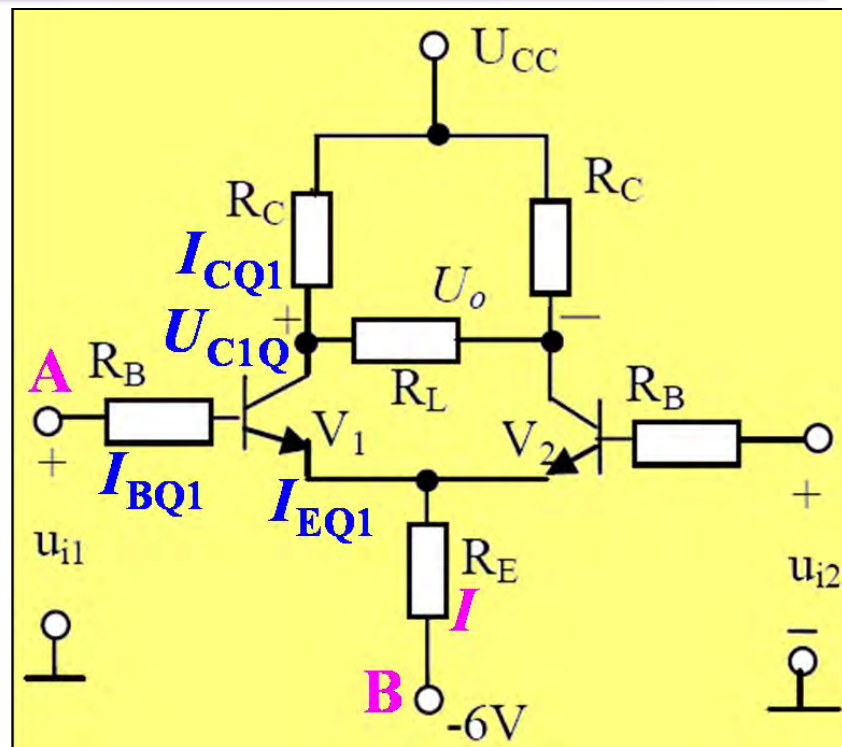
5.4 (1). 求静态集电极电流 I_{CQ} 、 U_{CQ} 和输入电阻 $r_{b'e}$ 。

解: (1)

∵ 因为两管完全对称

$$\therefore I_{CQ1} = I_{CQ2} \approx I_{EQ1} = I_{EQ2} = I/2$$

$$I_{BQ1} = I_{BQ2} = I_{EQ1}/(1+\beta) = I/2(1+\beta)$$



$$U_A - U_B = 0 - (-6) = U_{BE} + IR_E + R_B \cdot \frac{I}{2(1+\beta)} \rightarrow I_{BQ1}$$

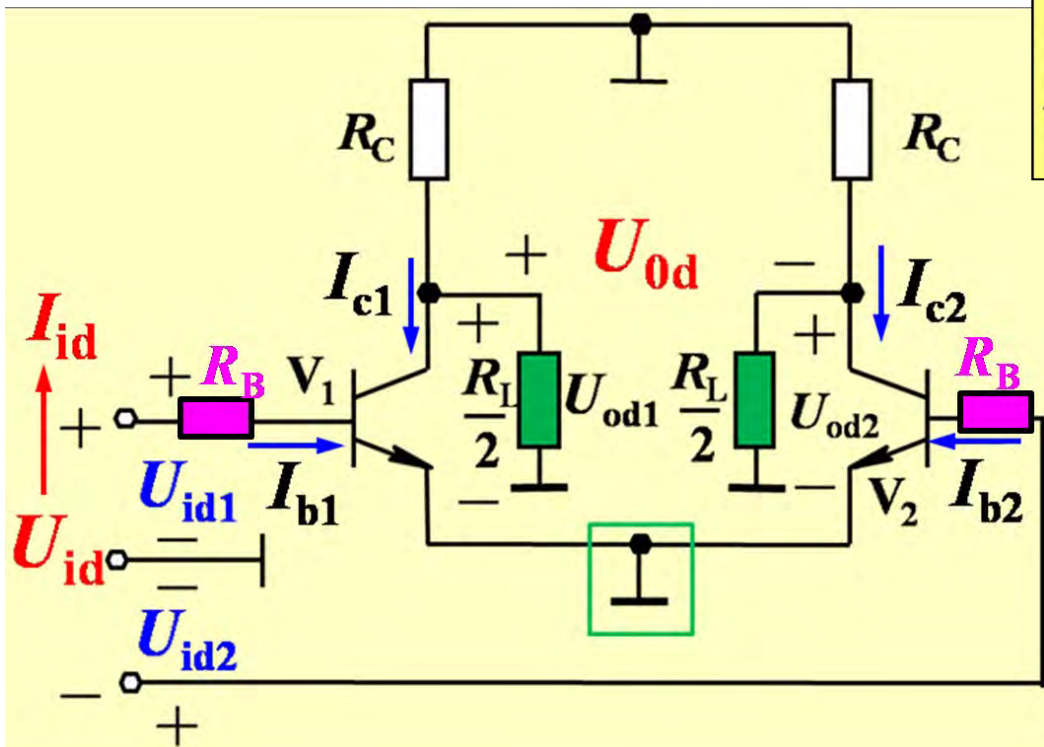
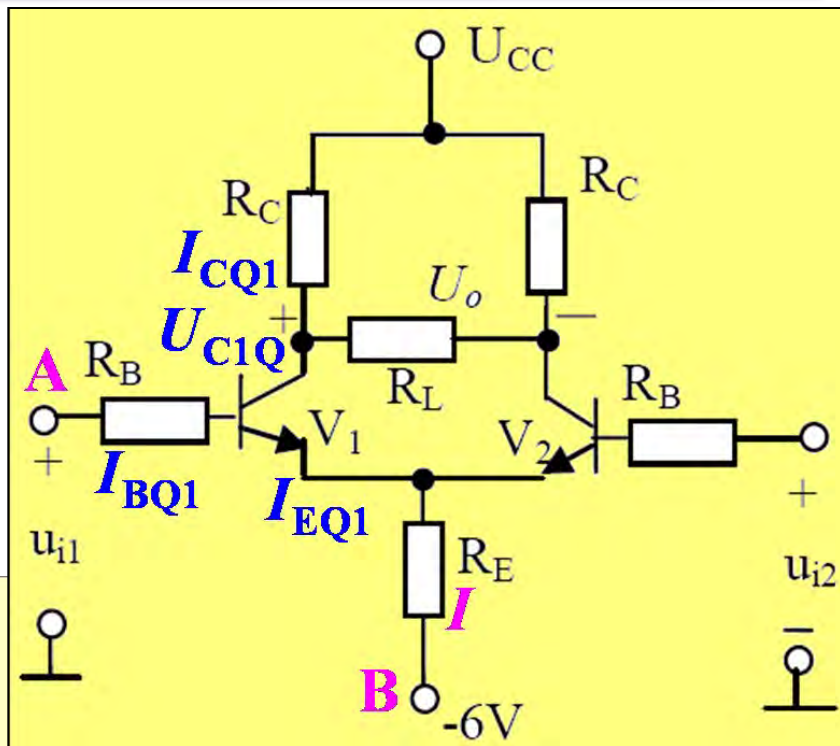
$$\therefore I = \frac{6 - U_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{2(1+\beta)}} = \frac{6 - 0.7}{5.1 + \frac{2}{2(1+50)}} \approx 1.035 \text{ mA}$$

$$I_{C1Q} = I_{C2Q} \approx 0.52 \text{ mA}$$

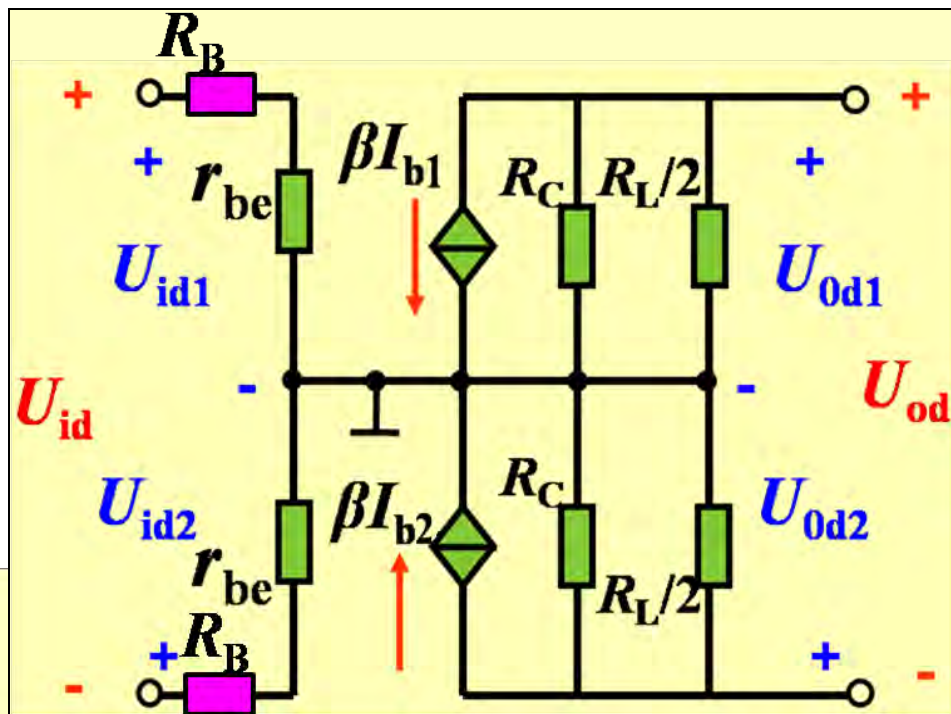
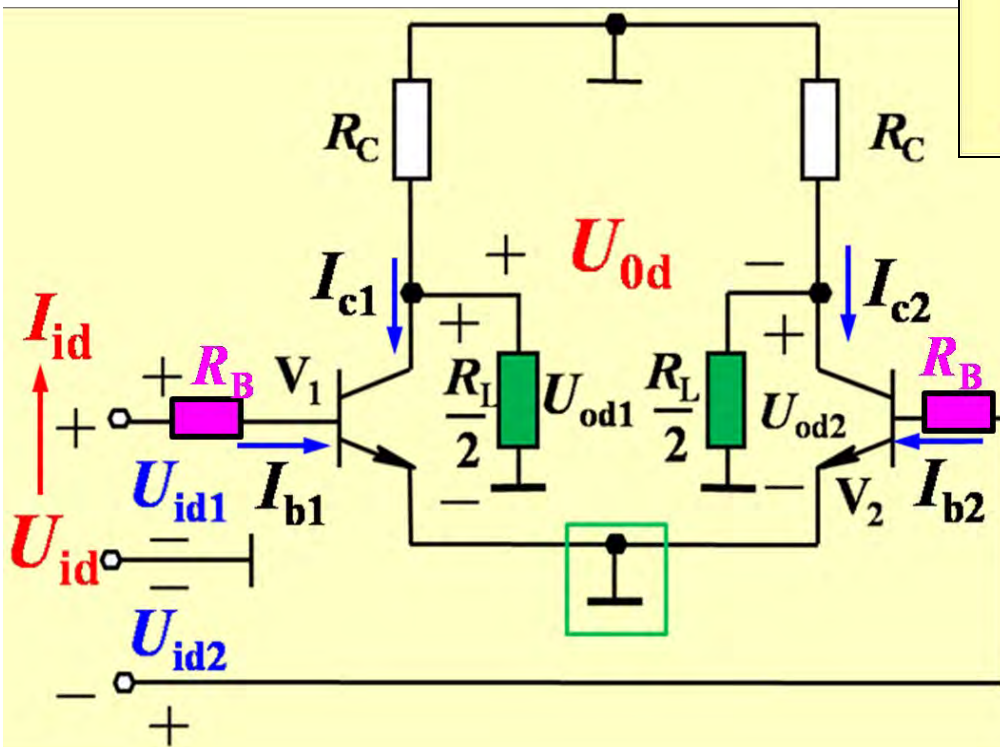
$$U_{CQ1} = U_{CQ2} = U_{CC} - R_C I_{CQ1} \approx 3.35 \text{ V} \quad r_{b'e} = \beta \cdot \frac{U_T}{I_{C1Q}} = 50 \times \frac{26}{0.52} = 2.5 \text{ k}\Omega$$

(2) 差模输入，双端输出时的3个交流指标

交流通路



交流通路



交流等效电路

① 差模电压放大倍数 A_{ud}

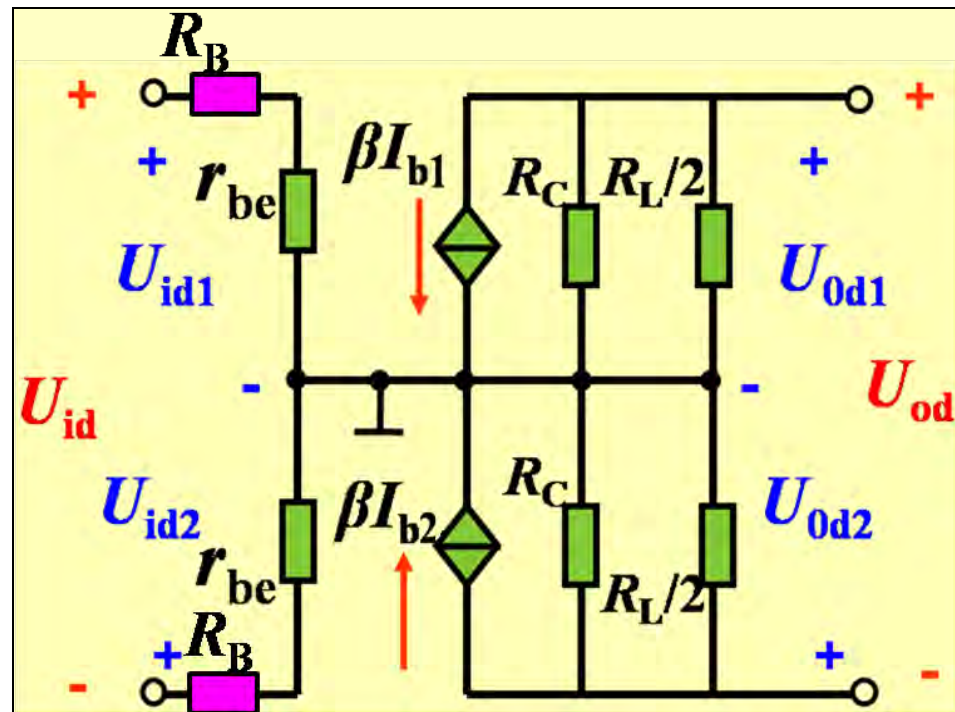
$$U_{od} = U_{od1} - U_{od2} = 2U_{od1} = -2U_{od2}$$

$$U_{id} = U_{id1} - U_{id2} = 2U_{id1} = -2U_{id2}$$

$$A_{ud} = \frac{U_{od}}{U_{id}} = \frac{U_{od1}}{U_{id1}} = \frac{U_{od2}}{U_{id2}}$$

$$= \frac{\beta(R_C \parallel \frac{1}{2}R_L)}{R_B + r_{be}}$$

≈ -19 , 其中 $r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e}$



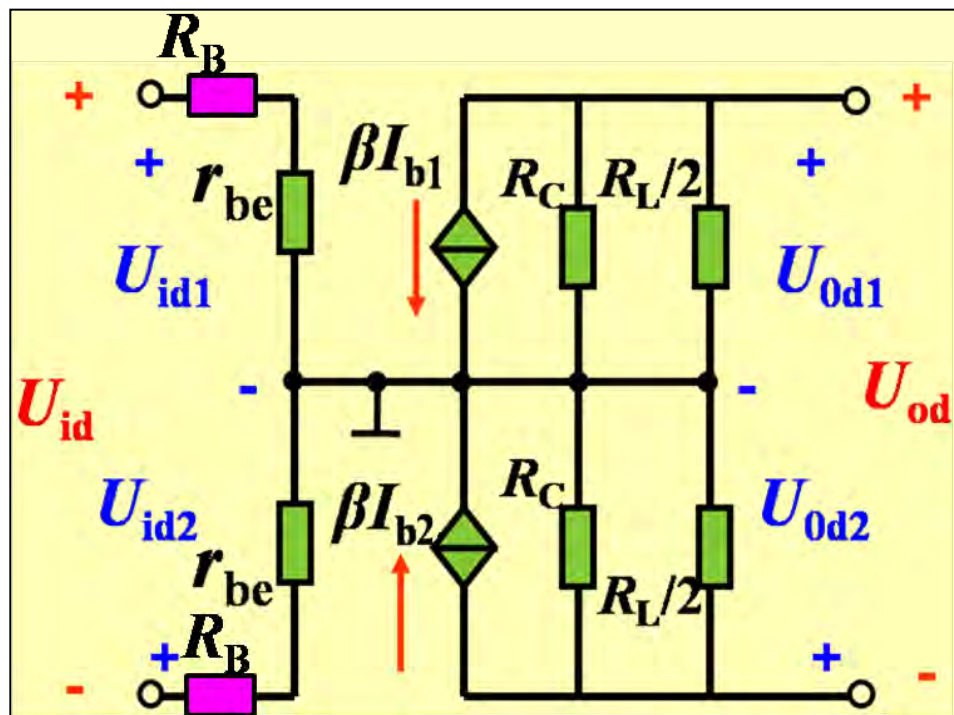
② 差模输入电阻 R_{id}

$$R_{id} = \frac{U_{id}}{I_{id}} = \frac{2U_{id1}}{I_{b1}} = 2(R_B + r_{be}) = 9\text{k}\Omega$$

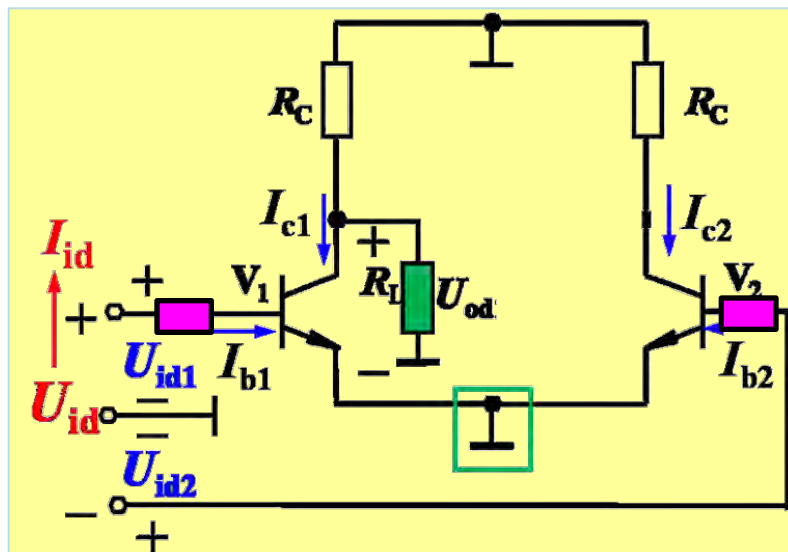
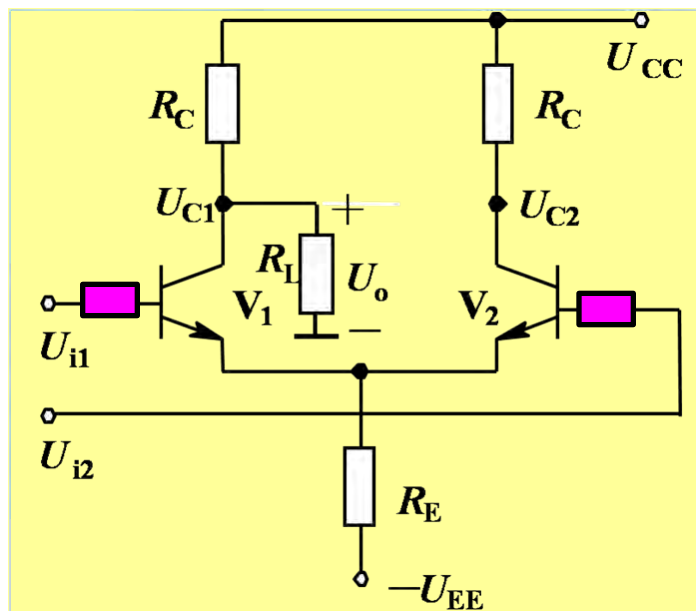
注: $I_{id} = I_{b1} = -I_{b2}$

③ 差模输出电阻 R_{od}

$$R_{od} = \frac{U_{od}}{I_{od}} \bigg|_{\substack{U_{id}=0 \\ R_L=\infty}} = 2R_C = 10.2\text{k}\Omega$$



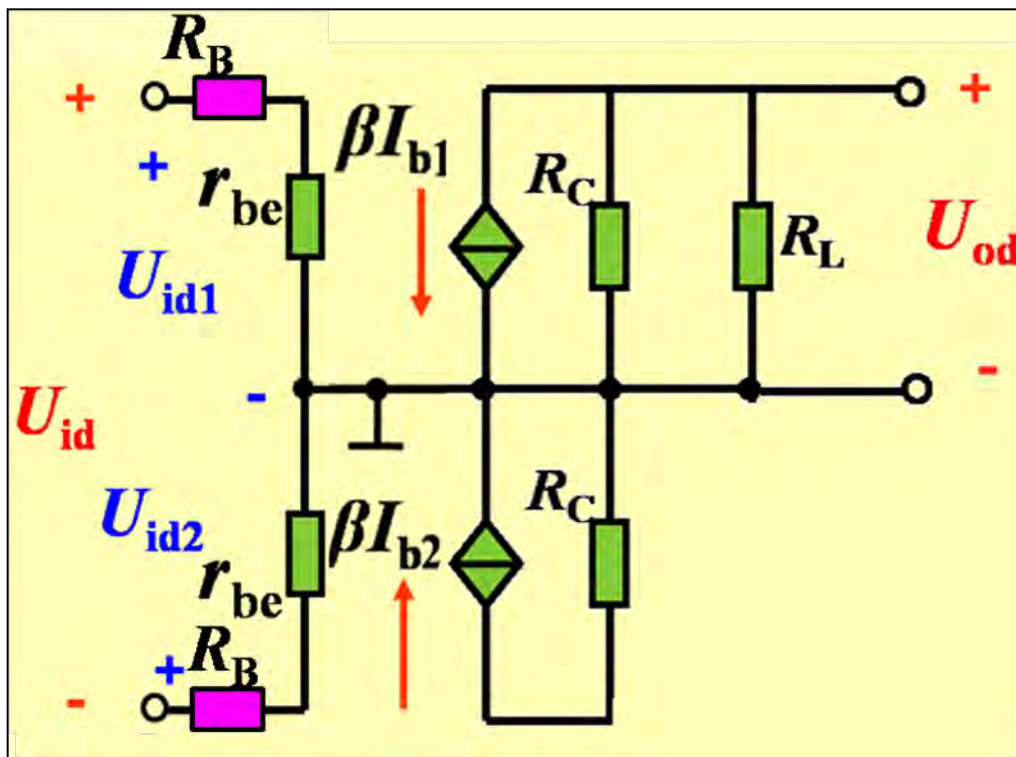
(3)



长尾式单端输出差动放大电路的差模等效通路

差模输入，
单端输出

差模输入，单端输出的交流等效电路



差模电压放大倍数 A_{ud}

$$U_{od} = U_{od1}$$

$$\begin{aligned} U_{id} &= U_{id1} - U_{id2} \\ &= 2U_{id1} = -2U_{id2} \end{aligned}$$

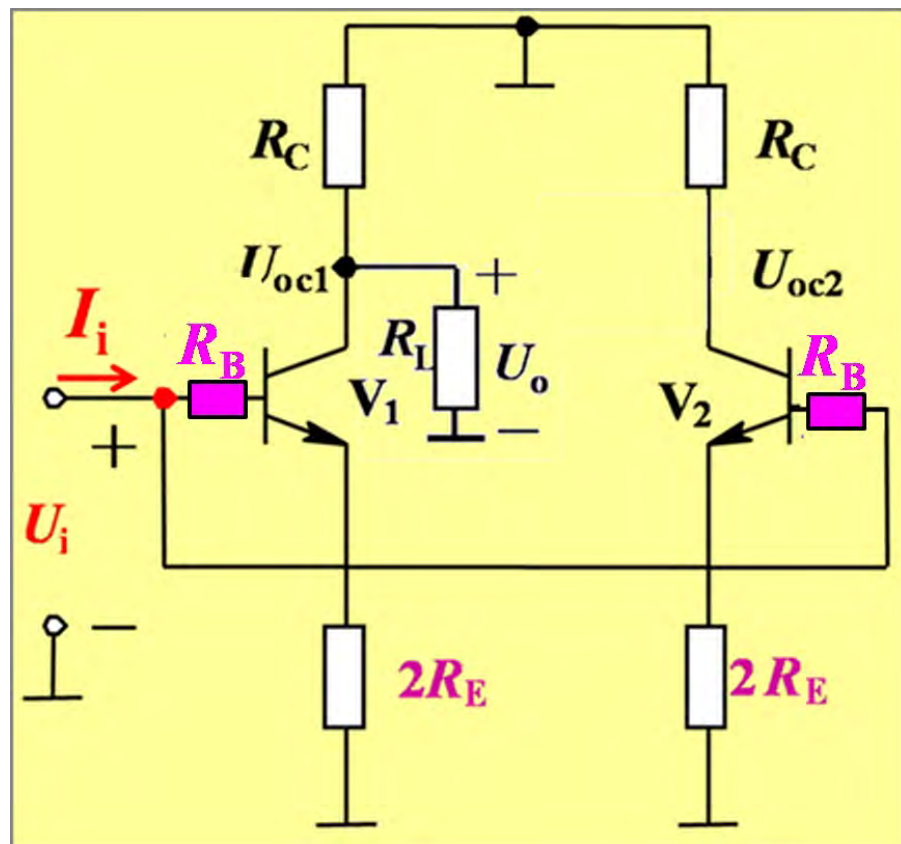
$$\begin{aligned} A_{ud} &= \frac{U_{od}}{U_{id}} = \frac{U_{od1}}{2U_{id1}} \\ &= -\frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{2(R_B + r_{be})} \approx -14.2 \end{aligned}$$

共模电压放大倍数 A_{uc}

单端输出

$$A_{uc} = \frac{U_{oc}}{U_{ic}} = \frac{U_{oc1}}{U_{ic}} = \frac{-\beta(R_C \parallel R_L)}{R_B + r_{be} + (1 + \beta)2R_E} = -0.24$$

$$K_{CMR(\text{单})} = \left| \frac{A_{ud(\text{单})}}{A_{uc(\text{单})}} \right| = 59.2$$



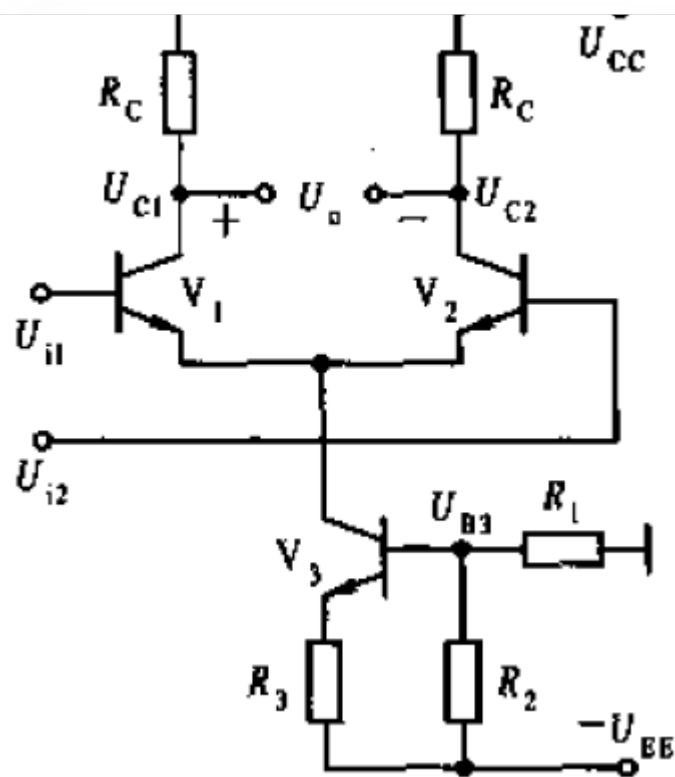
5.6 电路如题图7.6。已知 V_1 、 V_2 、 V_3 管的 $\beta = 50$, $r_{bb'} = 200\Omega$, $U_{CC} = U_{EE} = 15V$ 。

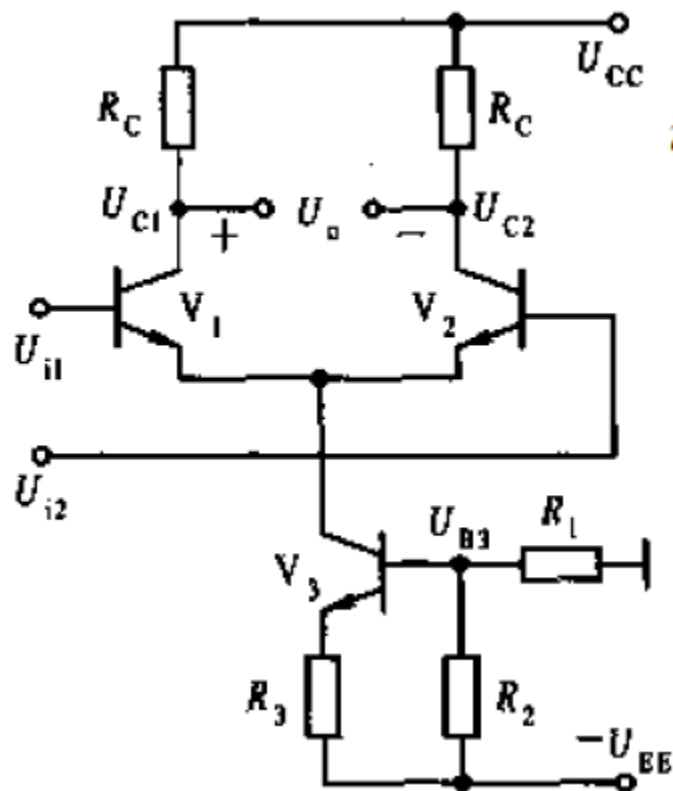
$$R_C = 6K\Omega, R_1 = 20K\Omega, R_2 = 10K\Omega, R_3 = 2.1K\Omega$$

(1) 若 $u_{i1} = 0$, $u_{i2} = 10\sin\omega t$ (mV), 试求 $u_o = ?$

(2) 若 $u_{i1} = 10\sin\omega t$ (mV), $u_{i2} = 5$ mV, 试画出 u_o 的波形图。

(4) 当 R_1 增大时, A_{ud} 、 R_{ud} 将如何变化?





解: (1)

$$u_o = A_{ud}(u_{i1} - u_{i2}) \Rightarrow A_{ud} = \frac{U_o}{U_{i1} - U_{i2}} = -\frac{\beta R_C}{r_{be}}$$

$$U_{R2} = \frac{R_2 U_{EE}}{R_1 + R_2} = \frac{10 \times 15}{20 + 10} = 5V$$

$$I_{C3} \approx I_{E3} = \frac{U_{R2} - U_{BE}}{R_3} = \frac{5 - 0.7}{2.1} = 2mA$$

$$I_{EQ} = \frac{1}{2} I_{C3} = 2 \times \frac{1}{2} = 1mA$$

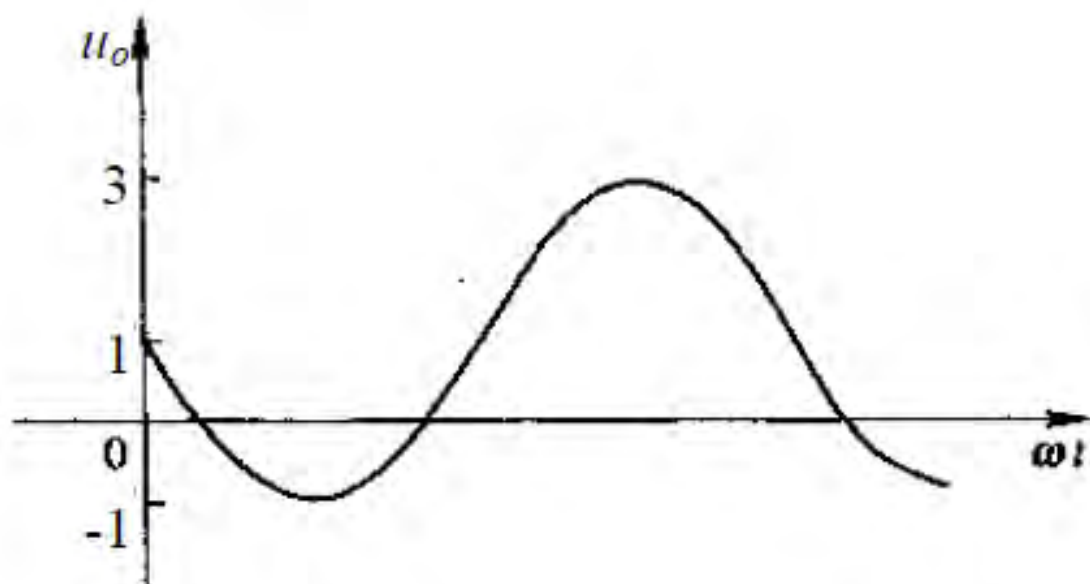
$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_{CQ}} = 200 + 51 \times \frac{26}{1} = 1.5K\Omega$$

$$A_{ud} = \frac{U_o}{U_{i1} - U_{i2}} = -\frac{\beta R_C}{r_{be}} = -\frac{50 \times 6}{1.5} = -200$$

$$u_o = A_{ud}(u_{i1} - u_{i2}) = -200 \times (-10^{-2} \sin \omega t) = 2.14 \sin \omega t (V)$$

$$(2) u_o = A_{ud}(u_{i1} - u_{i2}) = -200 \times (10 \sin \omega t - 5 \text{mV}) = (-2 \sin \omega t + 1) \text{V}$$

其波形如图所示。



$$(4) R_1 \uparrow \rightarrow U_{R2} \downarrow \rightarrow I_{E3} (I_{C1}) \downarrow \rightarrow I_{E1Q} (I_{E2Q}) \downarrow \rightarrow r_{be1} (r_{be2}) \uparrow,$$

使得 A_{ud} 减小，而 R_{id} 增大。

$$R_{id} = \frac{U_{id}}{I_{id}} = \frac{2U_{id1}}{I_{b1}} = 2r_{be}$$

5.8. 解：略去 V_3 基极电流的影响，

$$U_{C2} = 20 - \frac{I_E}{2} R_C = 20 - 1 \times 5 = 15V$$

$$U_{E3} = U_{C2} - U_{BE(on)} = 15 - 0.7 = 14.3V$$

即输出电压的静态电压为14.3。

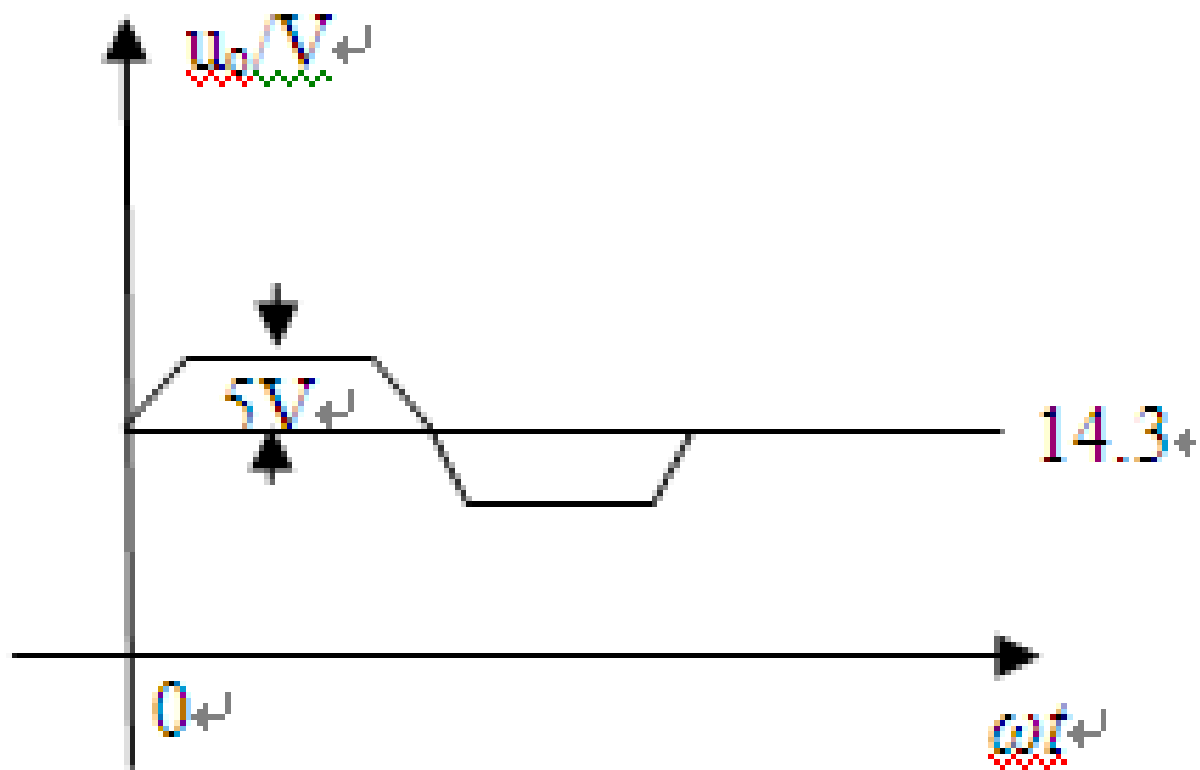
略去 V_3 的输入电阻对 V_2 的负载影响，由图可看出，不失真的输出电压峰值为

$$I_{C2} R_C = \frac{I_E}{2} R_C = \frac{1}{2} \times 2 \times 5 = 5V$$

根据线性放大计算，

$$u_o = \frac{1}{2} \frac{\beta R_C}{r_{b'e}} u_i = \frac{1}{2} \frac{\beta R_C}{\beta \frac{U_T}{I_{C2Q}}} u_i = \frac{1}{2} \frac{R_C I_{C2Q}}{U_T} u_i = 14.42 \sin \omega t (V)$$

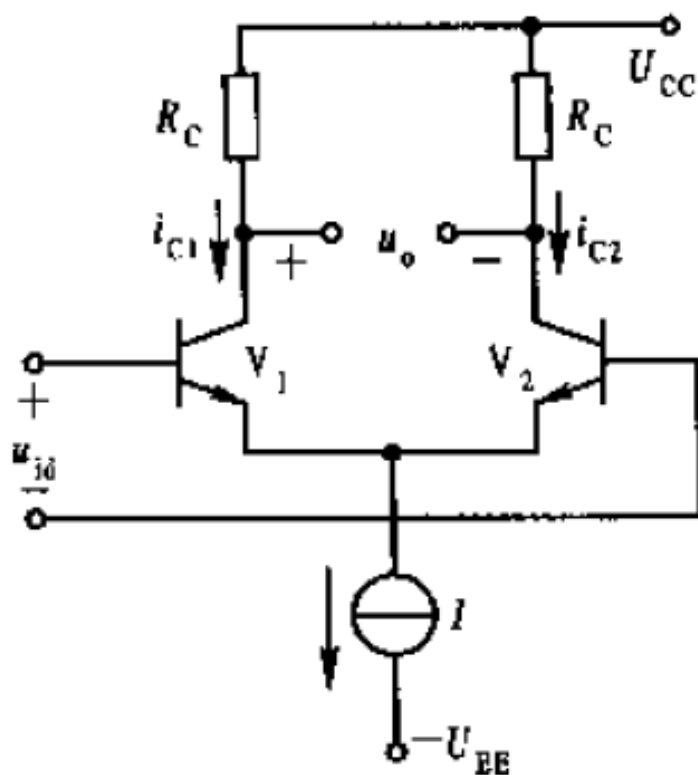
很明显，输出电压失真被双向限幅，如图所示



5.9

设 $U_{CC} = U_{CE} = 15V$, $I = 2mA$, $R_C = 5K\Omega$, $u_{id} = 1.2\sin\omega t(V)$

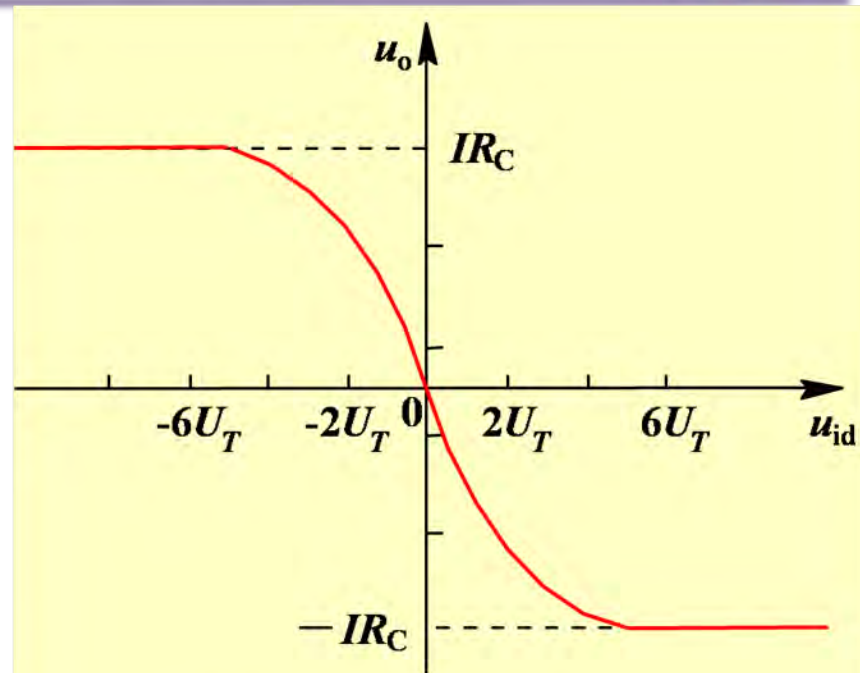
- (1) 试画出 u_o 当波形，并标出波形当幅度。
- (2) 若 R_C 变为 $10k\Omega$ ， u_o 波形有何变化？为什么？



解：(1) 由于 $U_{id}=1.2V \gg 0.1V$,

电路呈现限幅特性,

$$u_o = IR_C = 2\text{mA} * 5\text{k}\Omega = 10\text{V}$$

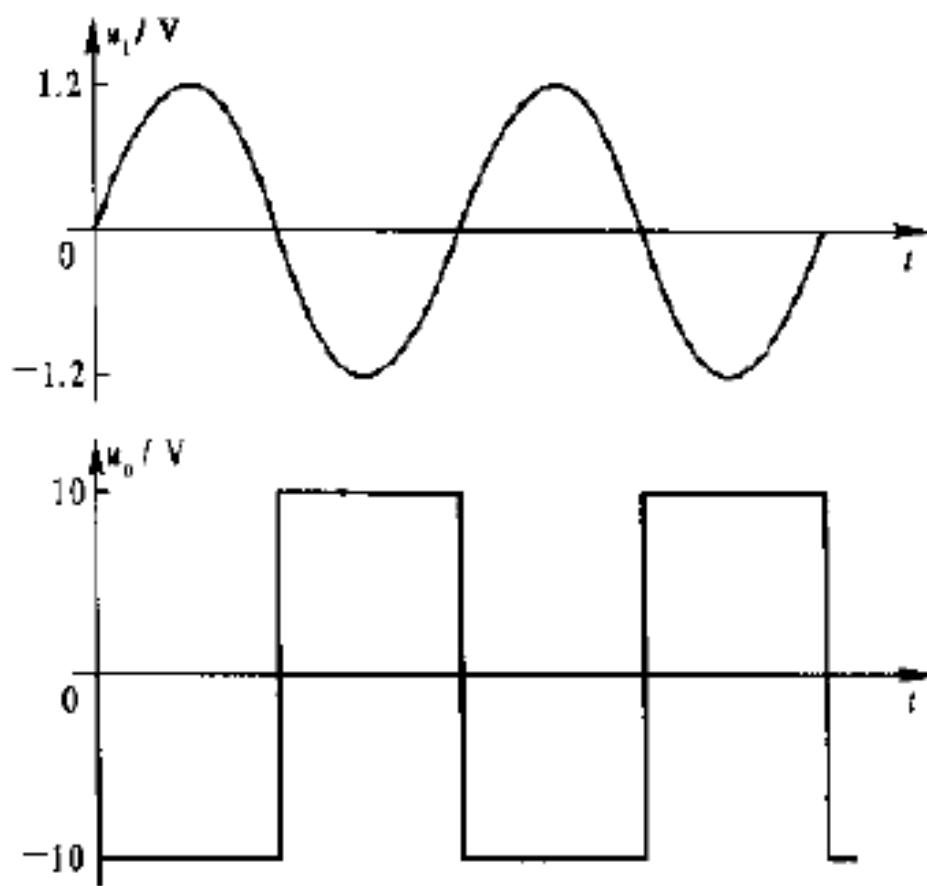


电压传输特性曲线

传输特性具有非线性特性 (约26meV)

- ① 在静态工作点附近, 即 $|u_{id}| \leq U_T$ (小信号下) 时, 传输特性是线性的。 (约100meV)
- ② 当 $|u_{id}| \geq 4U_T$ (大信号下) 时, 传输特性是非线性的, 先弯曲, 而后趋于水平。

u_o 波形如题图



(2) 当 R_C 变为 $10k\Omega$ 时, u_o 幅度增大, 其值接近 $\pm 15V$, 此时, 一管饱和, 另一管截止。