



第五章 集成运算放大电路

郭圆月

2022年11月16日





本章主要内容

§5.1 概述

§5.2 差动放大器

§5.3 集成运放中的电流源

§5.4 互补输出级

§5.5 集成运放的电路分析及其性能指标

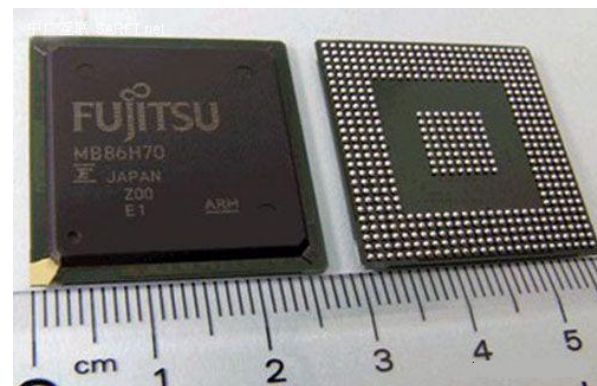




5.1 集成运放的概念

■ 集成电路

- 集成电路是一种在半导体材料上制作的微型化元器件和电路，满足特定功能.



■ 集成运算放大器

- 集成运算放大器是模拟集成电路的基本器件，发展最早，主要应用于模拟数学运算、信号发生、放大、有源滤波、直流稳压等.





5.1 集成运放的特点

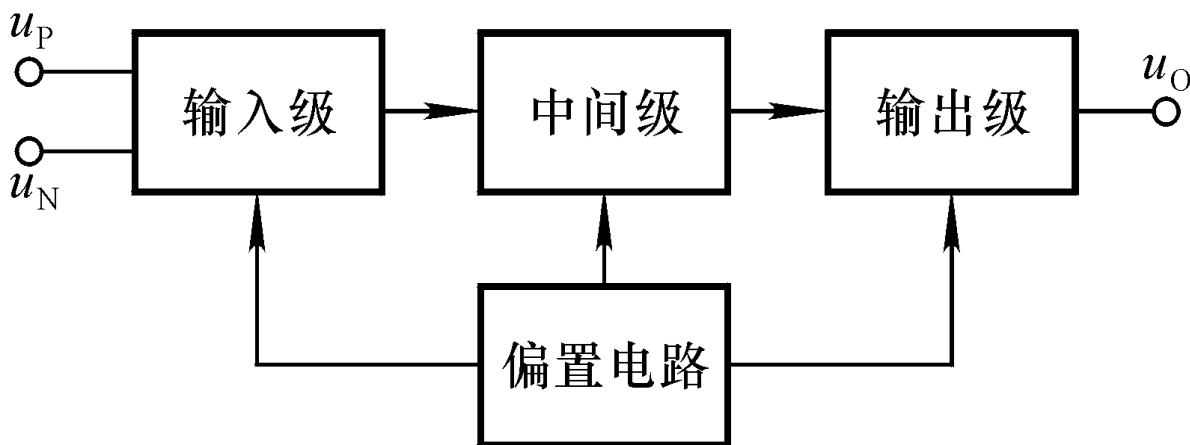
■ 集成运算放大电路：首先用于信号的运算，简称**集成运放**，是一个**高性能**的直接耦合多级放大电路。

- (1) 直接耦合方式：充分利用管子性能良好的一**致性**，采用**差动放大电路**和**电流源**电路。
- (2) 用**复杂**电路实现**高性能**的放大电路，因为电路的复杂化并不带来工艺的复杂性。
- (3) 用**有源**元件替代**无源**元件，如用晶体管取代难于制作的大电阻。





5.1 集成运放电路四个组成部分的作用



输入级：前置级，多采用**差动放大电路**，抑制**零漂**。

要求 R_i 大，输入端耐压高。

中间级：**主放大级**，多采用共射放大电路。要求有足够的放大能力。

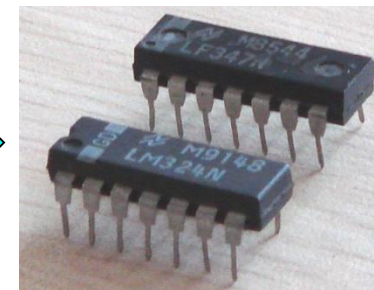
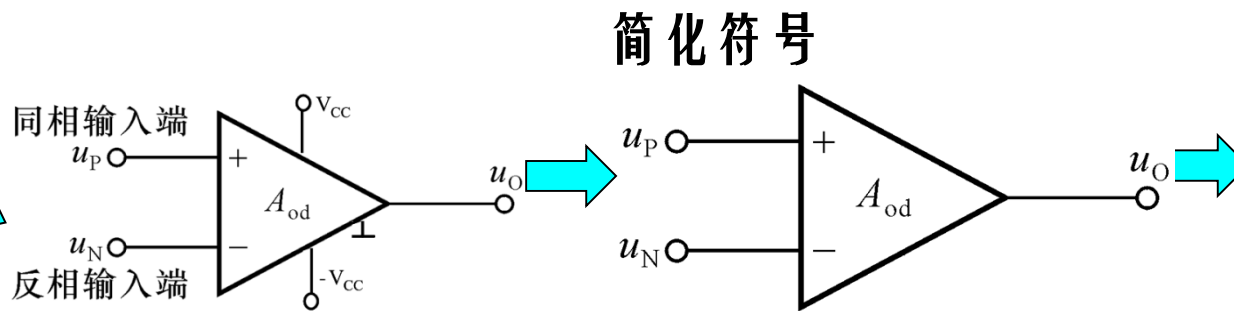
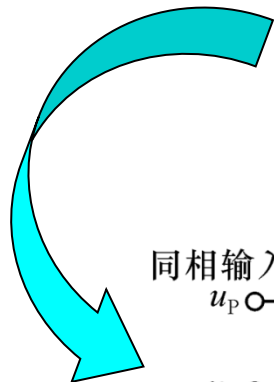
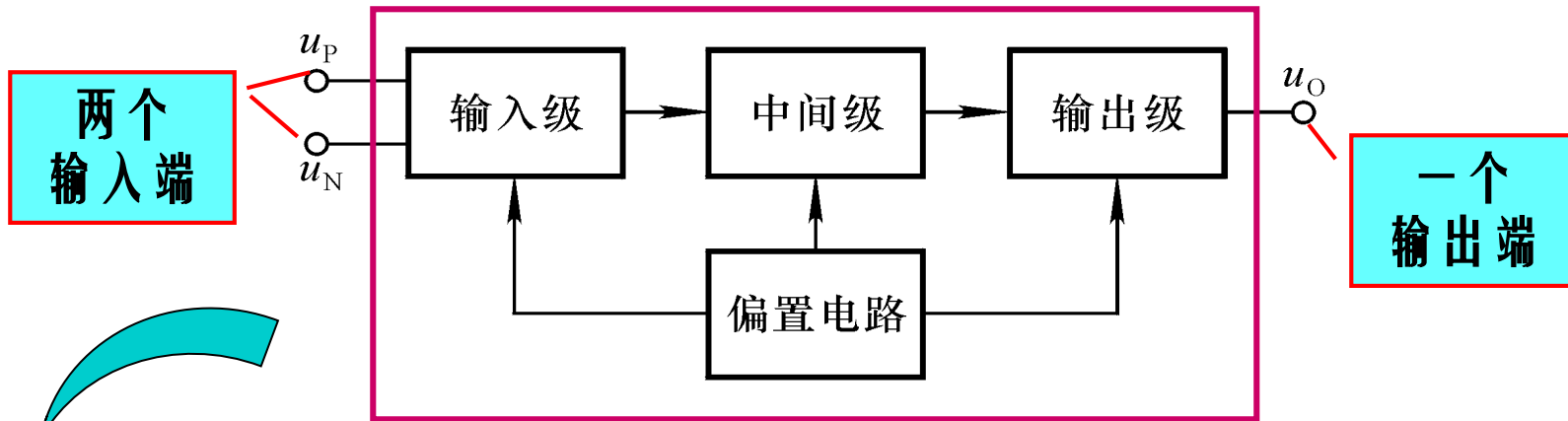
输出级：功率级，多采用**准互补输出级**。要求 R_o 小，最大不失真输出电压尽可能大。

偏置电路：各级设置合适的静态工作点，采用**电流源电路**。





5.1 集成运放电路的组成



若将集成运放看成为一个“黑盒子”，则可等效为一个
双端输入、单端输出的差动放大电路。





5.1 输入信号预处理

■ 把输入信号分成共模信号（相同部分）和差模信号（不同部分）

$$\begin{cases} V_{i1} = V_c + V_d \\ V_{i2} = V_c - V_d \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_c = \frac{1}{2}(V_{i1} + V_{i2}) \\ V_d = \frac{1}{2}(V_{i1} - V_{i2}) \end{cases}$$

■ **差模增益**和**共模增益**：将放大器对原输入信号的放大能力，等效为对差模信号和对共模信号的放大能力

叠加原理

共模增益 $\Rightarrow A_c = \frac{V_{oc}}{V_c} = \frac{V_o}{V_c} \Big|_{V_d=0}$ **差模增益** $\Rightarrow A_d = \frac{V_{od}}{V_d} = \frac{V_o}{V_d} \Big|_{V_c=0}$





5.1 输入信号预处理

■ 差动增益

$$A_{od} = \frac{V_o}{V_{i1} - V_{i2}} \Rightarrow A_{od} = \frac{A_c V_c + A_d V_d}{2V_d} = \frac{A_c}{2} \cdot \frac{V_c}{V_d} + \frac{A_d}{2}$$

➤ 不仅与电路有关，还与输入信号有关，这与基本线性放大电路的交流性能指标不同。

■ 共模抑制比CMRR

$$CMRR = \frac{|A_d|}{|A_c|}$$

$$CMRR(dB) = 20\lg CMRR$$

CMRR表明一个差动放大器对共模信号的抑制能力，实际应用时，微弱信号通常以差模形式传输，而干扰一般是共模的，CMRR越大，表明放大电路抗干扰的能力越强。

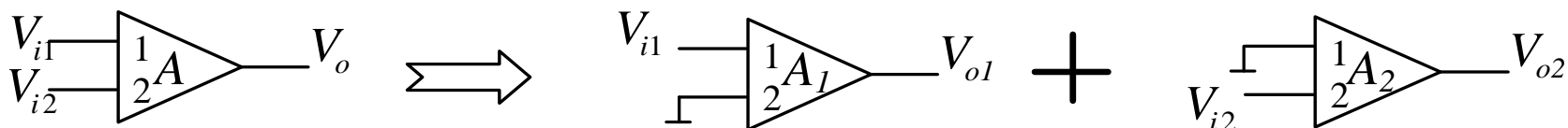




5.1 差动电路的交流性能指标

■ 单端输入情况

➤ 将双端输入拆解为两个独立的单端输入情况，即一端接信号源时，另一端交流接地



$$V_o = A_1 V_{i1} + A_2 V_{i2} = A_1 (V_c + V_d) + A_2 (V_c - V_d) = A_c V_c + A_d V_d$$

$$\Rightarrow \begin{cases} A_c = A_1 + A_2 \\ A_d = A_1 - A_2 \end{cases}$$





举例

单端输出差动放大器，满足

$$\left. \begin{matrix} V_{i1} = 10mV \\ V_{i2} = 0 \end{matrix} \right\} \Rightarrow V_o = 5.5V, \left. \begin{matrix} V_{i1} = 0 \\ V_{i2} = 15mV \end{matrix} \right\} \Rightarrow V_o = -6.75V$$

求 A_d ， A_c 及 $CMRR$ 。

解：

方法1

依题意，有

$$\begin{cases} A_1 = \frac{5.5}{10 \times 10^{-3}} = 550 \\ A_2 = \frac{-6.75}{15 \times 10^{-3}} = -450 \end{cases}$$

则

$$\begin{cases} A_c = A_1 + A_2 = 100 \\ A_d = A_1 - A_2 = 1000 \end{cases}$$





举例

单端输出差动放大器，满足

$$\left. \begin{matrix} V_{i1} = 10mV \\ V_{i2} = 0 \end{matrix} \right\} \Rightarrow V_o = 5.5V, \left. \begin{matrix} V_{i1} = 0 \\ V_{i2} = 15mV \end{matrix} \right\} \Rightarrow V_o = -6.75V$$

求 A_d ， A_c 及 $CMRR$ 。

解 对条件1：作信号分解： $V_c = \frac{1}{2}(V_{i1} + V_{i2}) = 5mV$ ， $V_d = \frac{1}{2}(V_{i1} - V_{i2}) = 5mV$

$$\text{由 } V_o = A_c V_c + A_d V_d \Rightarrow 5.5 \times 10^3 = A_c \cdot 5 + A_d \cdot 5$$

$$\left. \begin{matrix} \text{对条件2: } V_c = 7.5mV \\ V_d = -7.5mV \end{matrix} \right\} \Rightarrow -6.75 \times 10^3 = A_c \cdot 7.5 + A_d \cdot (-7.5)$$

$$\Rightarrow \begin{matrix} A_d = 1000 \\ A_c = 100 \end{matrix} \Rightarrow CMRR = \frac{A_d}{A_c} = 10$$





§ 5.2 差动放大电路

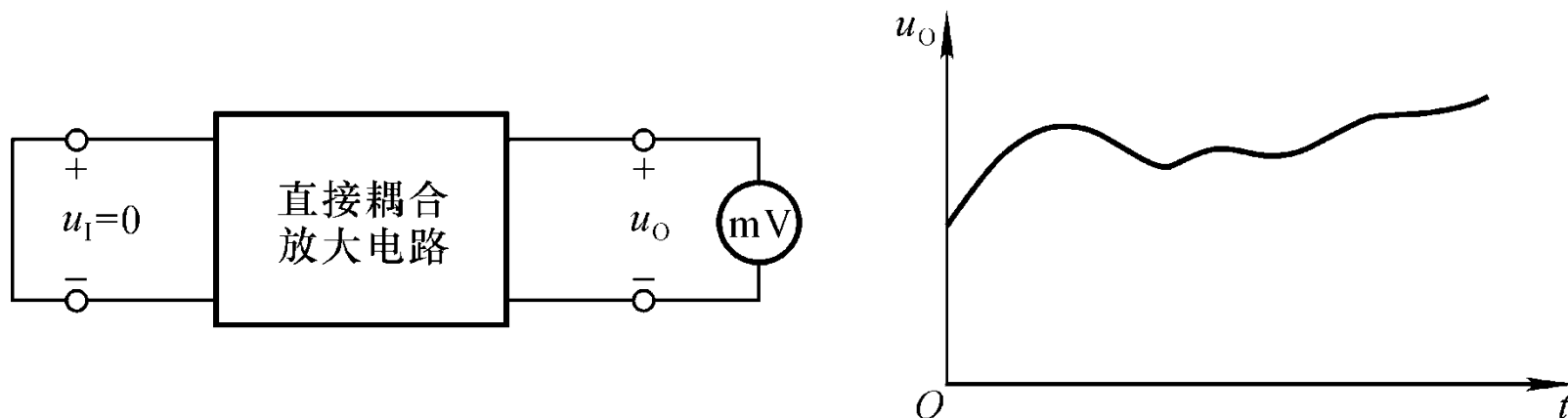
- 一、零点漂移现象及其产生的原因
- 二、长尾式差动放大电路的组成
- 三、半电路分析方法
- 四、长尾式差动放大电路的交流分析
- 五、具有恒流源的差动放大电路





一、零点漂移现象及其产生的原因

1. 什么是零点漂移现象： $\Delta u_I = 0$ ， $\Delta u_O \neq 0$ 的现象。



产生原因：温度变化，直流电源波动，元器件老化。其中晶体管的特性对温度敏感是主要原因，故也称零漂为温漂。

克服温漂的方法：引入直流负反馈，温度补偿。

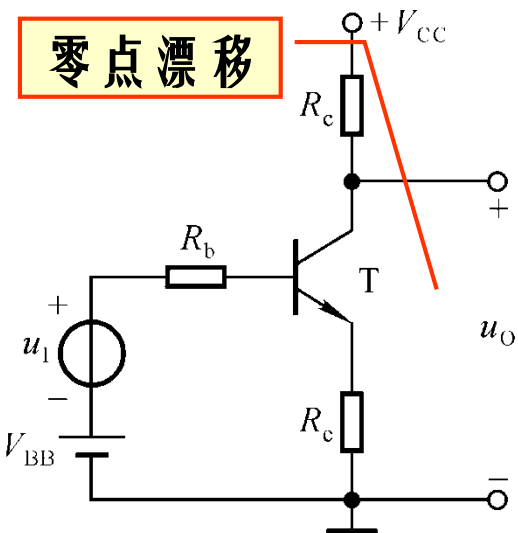
典型电路：差动放大电路



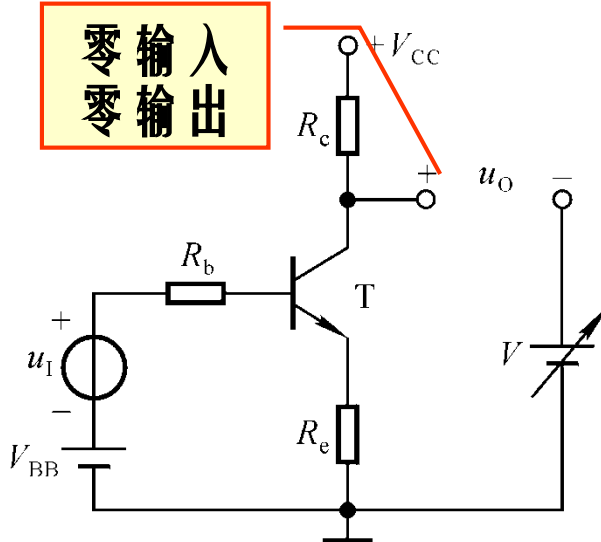


二、长尾式差动放大电路的组成

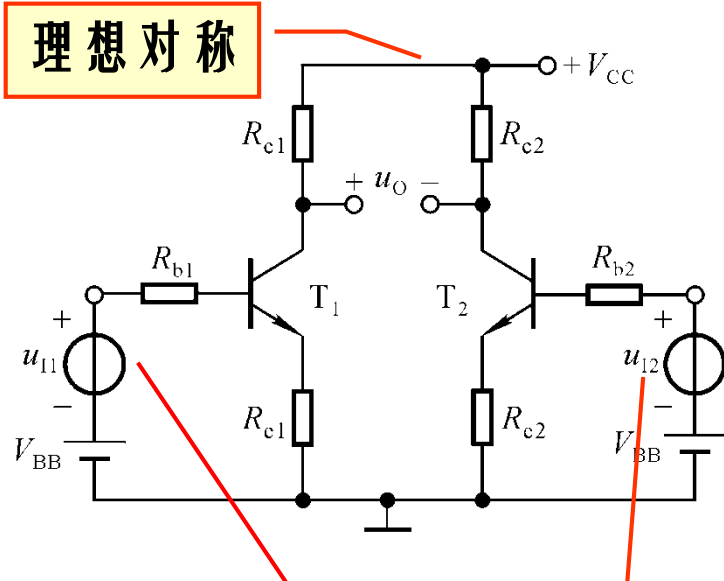
零点漂移



零输入
零输出

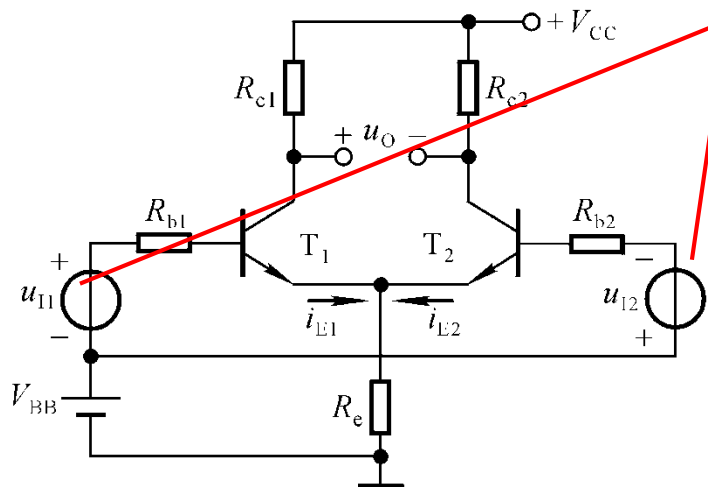


理想对称



信号特点？
能否放大？

信号特点？ 能否放大？



共模信号：大小相等，极性相同。

差模信号：大小相等，极性相反。

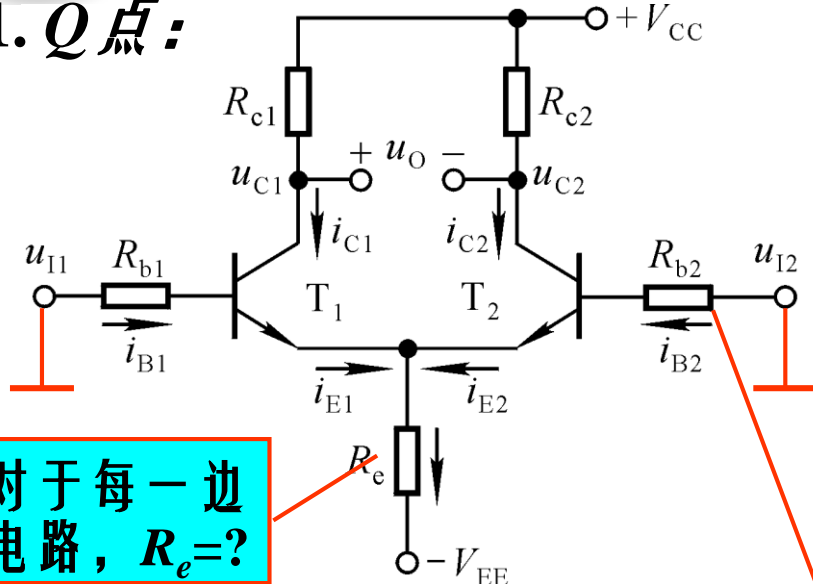
射极耦合差动放大器





三、长尾式差动放大电路静态分析

1. Q点:



对于每一边电路, $R_e = ?$

$$I_{BQ1} = I_{BQ2} = I_{BQ}$$

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} = I_{CQ}$$

$$I_{EQ1} = I_{EQ2} = I_{EQ}$$

$$U_{CQ1} = U_{CQ2} = U_{CQ}$$

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

R_b 是必要的吗?

对称性: 半电路分析

晶体管输入回路方程: $V_{EE} = I_{BQ}R_b + U_{BEQ} + 2I_{EQ}R_e$

通常, R_b 较小, 且 I_{BQ} 很小, 故

$$I_{EQ} \approx \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{2R_e}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$$

$$U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}R_c + U_{BEQ}$$

选合适的 V_{EE} 和 R_e 就可得合适的 Q





2. 抑制共模信号

共模信号：数值相等、极性相同的

输入信号，即 $u_{I1} = u_{I2} = u_{Ic}$

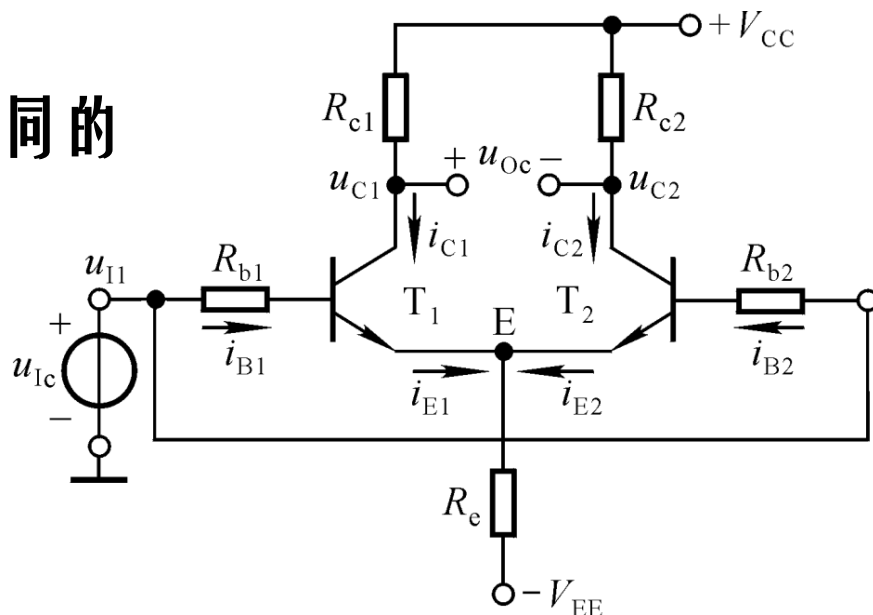
$$\Delta i_{B1} = \Delta i_{B2}$$

$$\Delta i_{C1} = \Delta i_{C2}$$

$$\Delta u_{C1} = \Delta u_{C2}$$

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

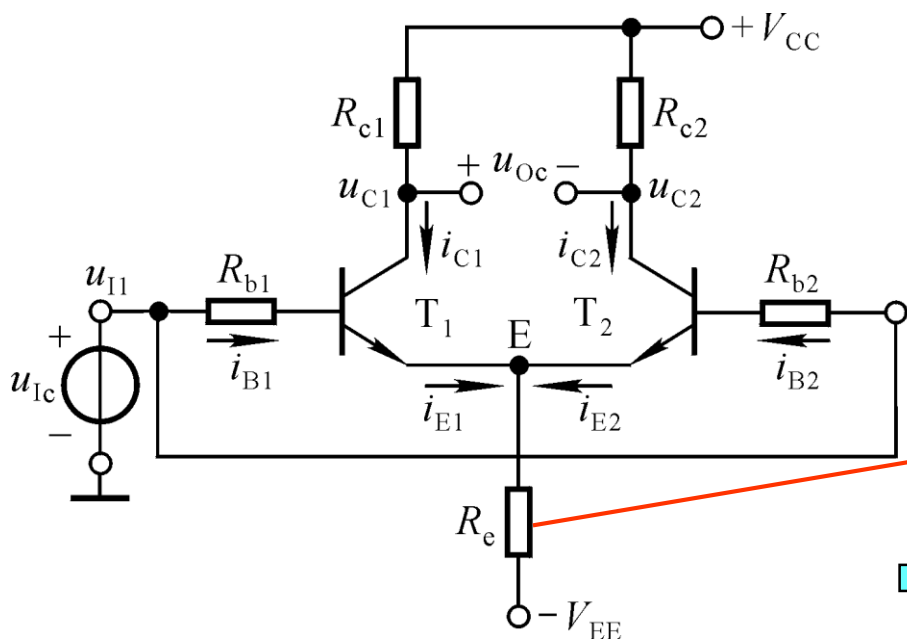
$$\text{共模放大倍数 } A_c = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}}, \text{ 参数理想对称时 } A_c = 0$$





2. 抑制共模信号

2. R_e 的共模负反馈作用



$$\text{共模放大倍数 } A_c = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}}$$

参数理想对称时 $A_c = 0$

R_e 中流过电流?

双重抑制共模信号的能力!

R_e 的共模负反馈作用：温度变化所引起的变化等效为共模信号

如 $T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_{C1} \uparrow \quad I_{C2} \uparrow \rightarrow U_E \uparrow \rightarrow I_{B1} \downarrow \quad I_{B2} \downarrow \rightarrow I_{C1} \downarrow \quad I_{C2} \downarrow$

抑制了每只差动管集电极电流、电位的变化。





3. 放大差模信号

■ **差模信号**：数值相等，极性相反的输入信号。

$$u_{I1} = -u_{I2} = u_{Id} / 2$$

$$\Delta i_{B1} = -\Delta i_{B2}$$

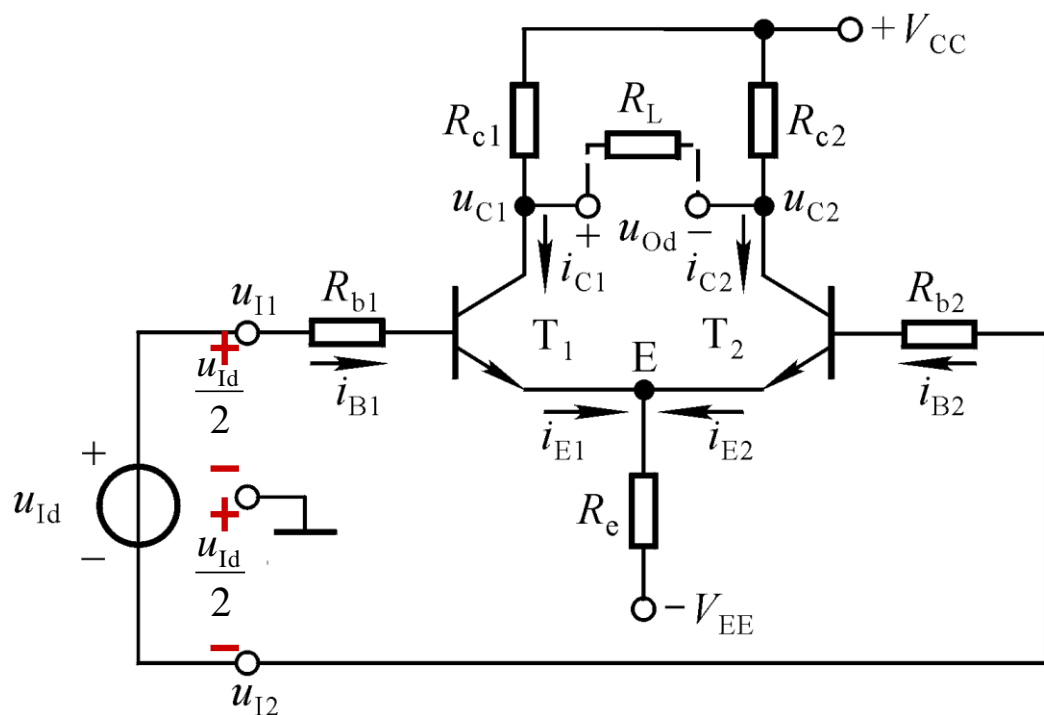
$$\Delta i_{C1} = -\Delta i_{C2}$$

$$\Delta u_{C1} = -\Delta u_{C2}$$

$$\Delta u_O = 2\Delta u_{C1}$$



放大差模信号的能力！



$\Delta i_{E1} = -\Delta i_{E2}$, R_e 中电流不变，即 R_e 对差模信号无反馈作用。

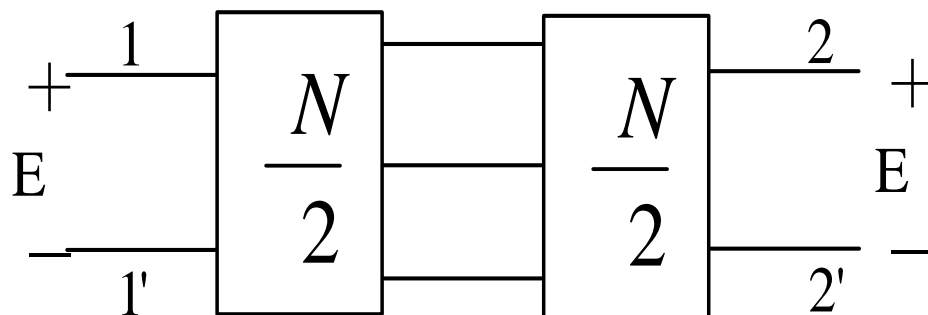
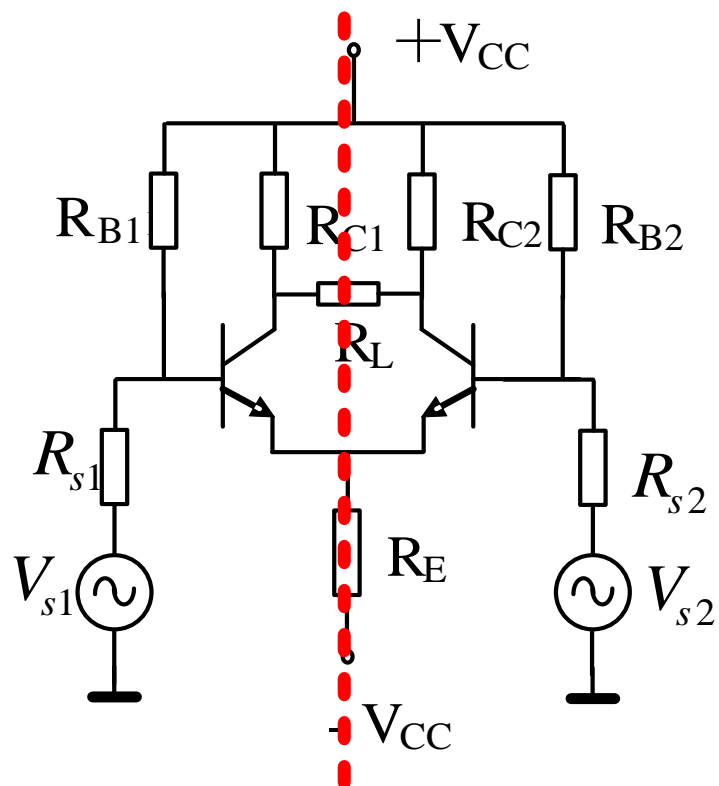




4. 动态分析 — 半电路分析方法

■ 思路: 垂直对称网络的二等分定理

- 将全电路的分析简化为对称半电路的分析;
- 输出电压的合成。

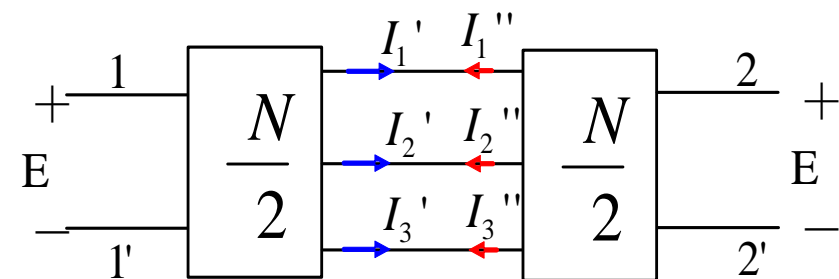


差动放大器的垂直对称电路结构

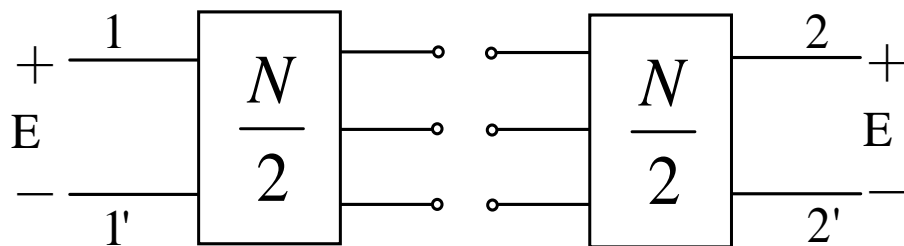


4. 半电路分析方法

■ 共模输入情况

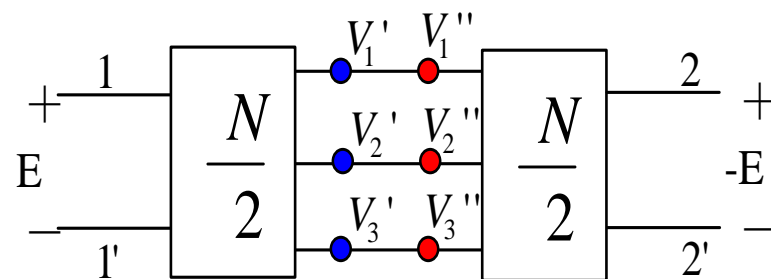


$$I_1 = I_1' + I_1'' = 0$$

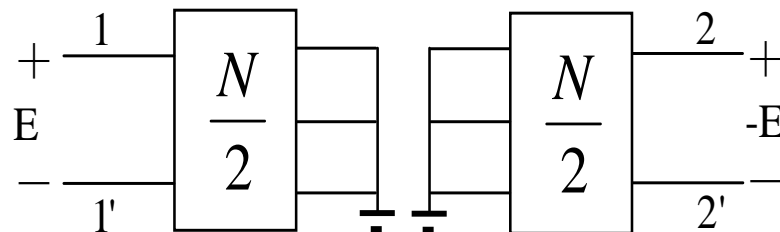


开路处理

■ 差模输入情况



$$V_1 = V_1' + V_1'' = 0$$



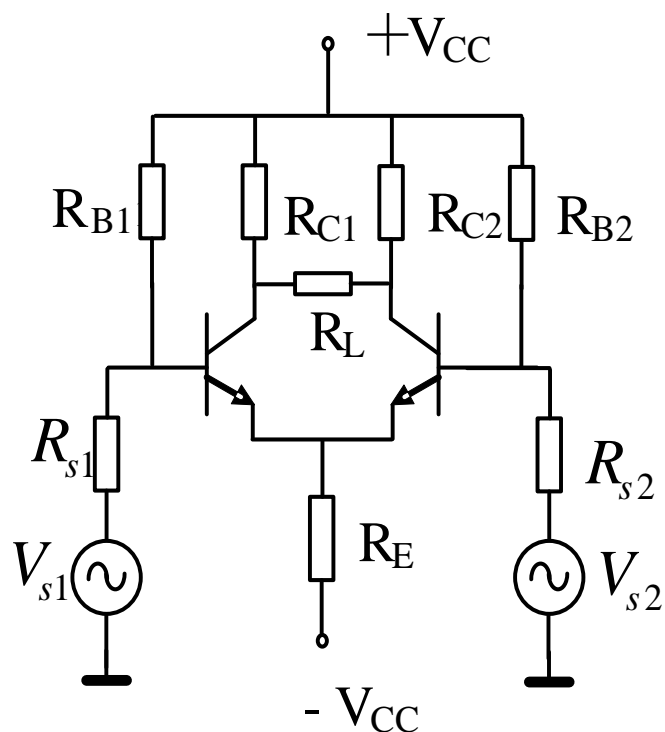
短路接地处理





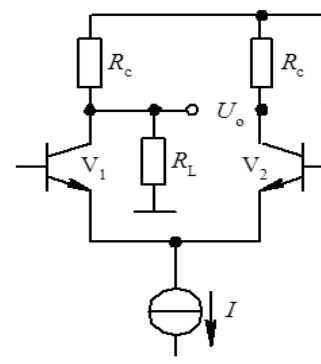
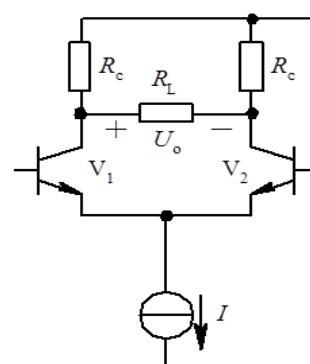
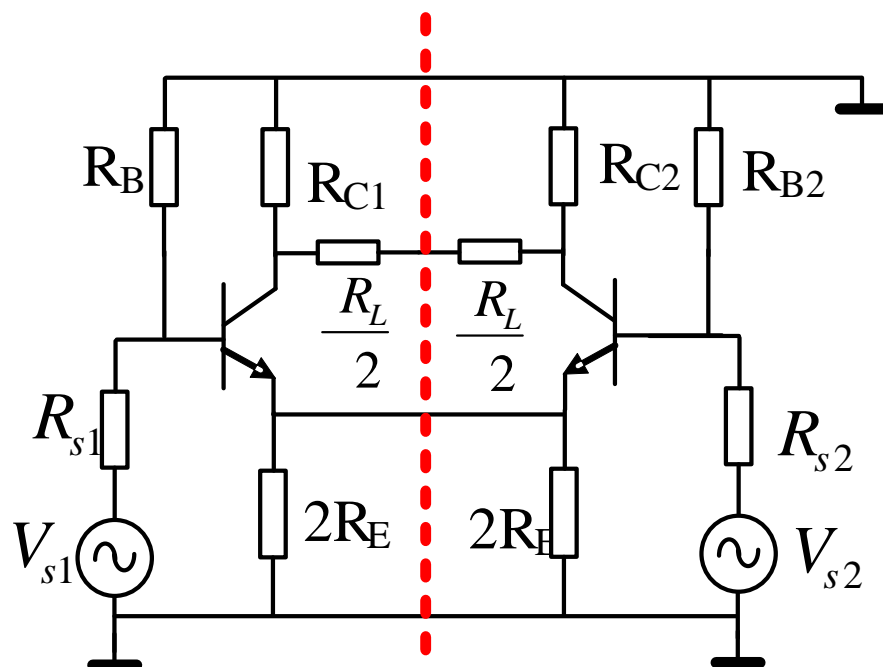
5. 基本型差动放大器的交流分析

■ 电路结构



两种输出方式：双端输出

■ 对称性改造



单端输出

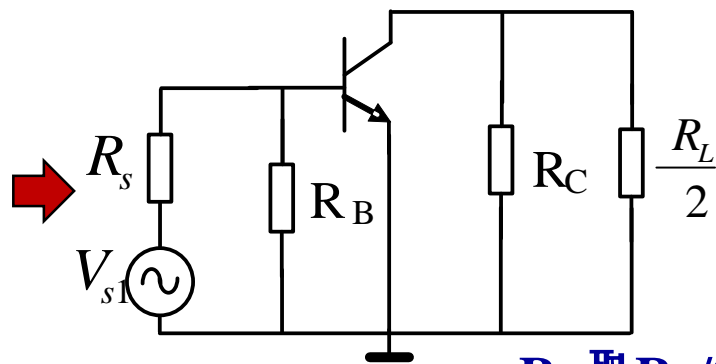
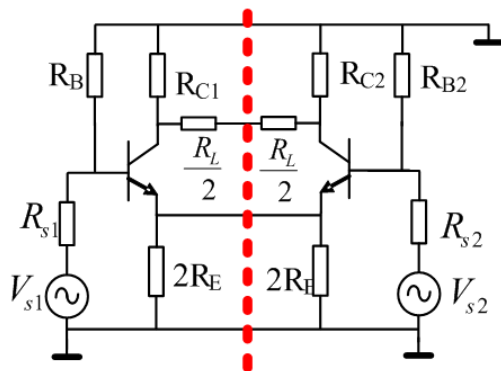




5. 基本型差动放大器的交流分析

■ 差模半电路分析:

(1) 双端输出

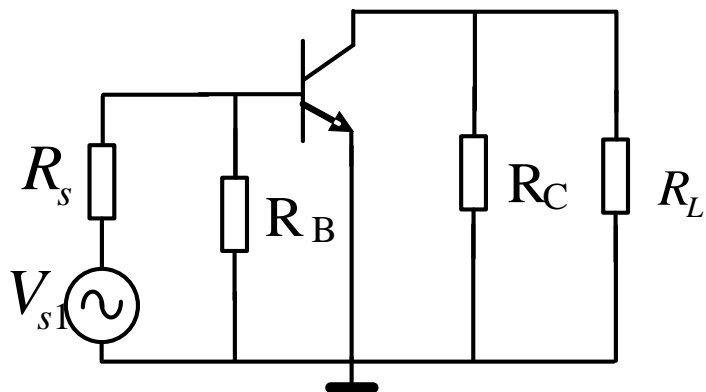


R_L 取 $R_L/2$

$2R_E$ 被旁路

$$A_{d\text{半}} = \frac{-\beta(R_C \parallel \frac{R_L}{2})}{h_{ie}} \frac{R_B \parallel h_{ie}}{R_B \parallel h_{ie} + R_s} = -\frac{\beta(R_C \parallel \frac{R_L}{2})}{h_{ie} + R_s \parallel R_B} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B} \text{ (对源)}$$

(2) 单端输出



R_L 取 R_L

$$A_{d\text{半}} = -\frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{h_{ie} + R_s \parallel R_B} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B}$$

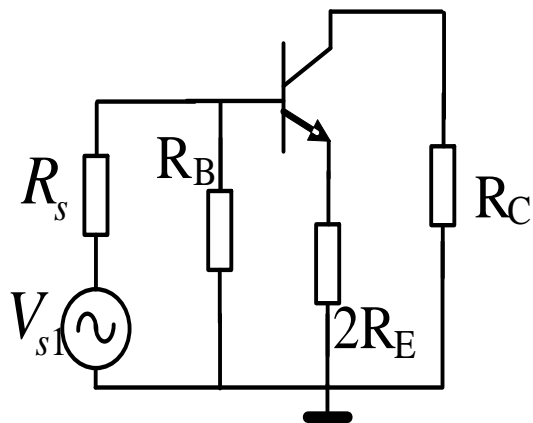
注意：差模时 R_E 取 0；





5. 基本型差动放大器的交流分析

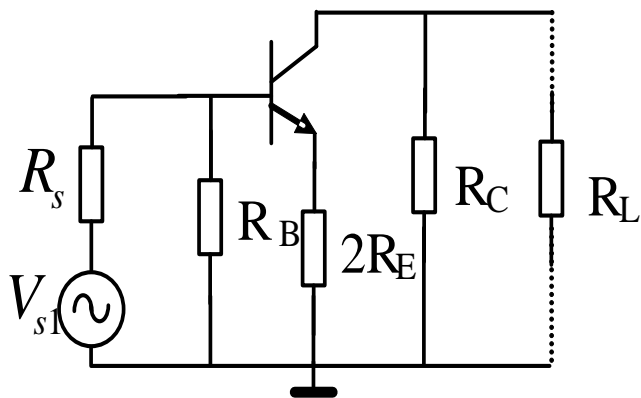
■ 共模半电路分析 (1) 双端输出



R_L 取无穷

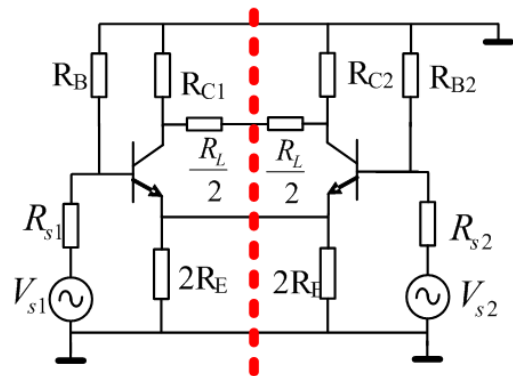
$$A_{c\frac{1}{2}} = - \frac{\beta R_C}{h_{ie} + R_s \parallel R_B + 2(1 + \beta)R_E} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B} \approx \frac{-R_C}{2R_E}$$

(2) 单端输出 R_L 取 R_L



$$A_{c\frac{1}{2}} = - \frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{h_{ie} + R_s \parallel R_B + 2(1 + \beta)R_E} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B}$$
$$\approx - \frac{(R_C \parallel R_L)}{2R_E}$$

注意：共模时 R_E 取 $2R_E$ ；





5. 基本型差动放大器的交流分析

■ 全电路分析：(1) 双端输出

$$A_{d\frac{1}{2}} = -\frac{\beta(R_C \parallel \frac{R_L}{2})}{h_{ie} + R_s \parallel R_B} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B} \quad A_{c\frac{1}{2}} = -\frac{\beta R_C}{h_{ie} + R_s \parallel R_B + 2(1 + \beta)R_E} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B} \approx \frac{-R_C}{2R_E}$$

$$\text{双端输出: } \begin{cases} V_o = V_{o1} - V_{o2} \\ V_{o1} = A_{c\frac{1}{2}} V_c + A_{d\frac{1}{2}} V_d \Rightarrow V_o = 2A_{d\frac{1}{2}} V_d = A_{d\frac{1}{2}} (V_{i1} - V_{i2}) \\ V_{o2} = A_{c\frac{1}{2}} V_c - A_{d\frac{1}{2}} V_d \end{cases}$$

$$\Rightarrow \text{交流指标: } \begin{cases} A_c = 0 \\ A_d = 2A_{d\frac{1}{2}} \\ A_{od} = A_{d\frac{1}{2}} \\ CMRR = \infty \end{cases}$$





5. 基本型差动放大器的交流分析

(2) 单端输出

$$\begin{cases} V_o = V_{o1} \text{ 或 } V_{o2} \\ V_{o1} = A_{c\frac{1}{2}} V_c + A_{d\frac{1}{2}} V_d \\ V_{o2} = A_{c\frac{1}{2}} V_c - A_{d\frac{1}{2}} V_d \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A_d = A_{d\frac{1}{2}} \\ A_c = A_{c\frac{1}{2}} \end{cases} \Rightarrow CMRR = \left| \frac{A_{d\frac{1}{2}}}{A_{c\frac{1}{2}}} \right| \neq \infty$$

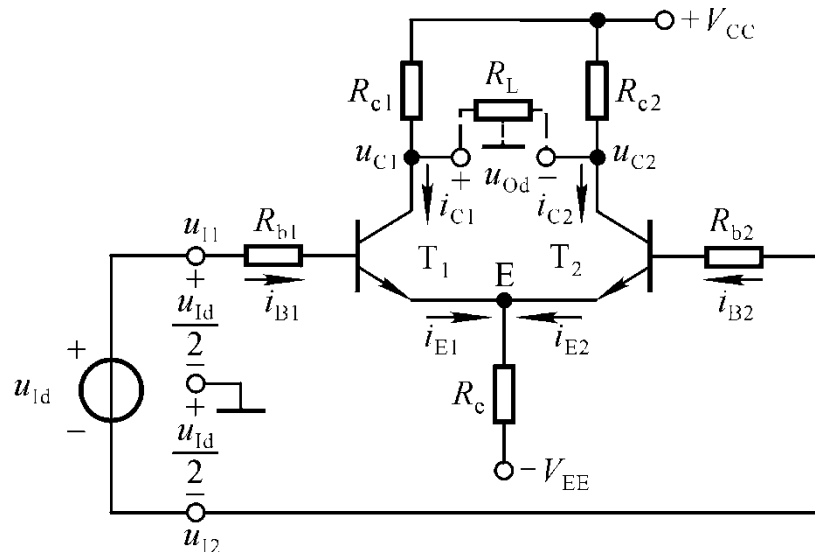
$$A_{d\frac{1}{2}} = -\frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{h_{ie} + R_s \parallel R_B} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B} \quad A_{c\frac{1}{2}} = -\frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{h_{ie} + R_s \parallel R_B + 2(1 + \beta)R_E} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B}$$

$$\Rightarrow CMRR = \frac{-\frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{h_{ie} + R_s \parallel R_B}}{-\frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{h_{ie} + R_s \parallel R_B + 2(1 + \beta)R_E}} \approx \frac{2(1 + \beta)R_E}{h_{ie} + R_s \parallel R_B}$$

- 求 $A_{c\frac{1}{2}}$ 和 $A_{d\frac{1}{2}}$ 主要区别是对发射极电阻的处理，分别为 $2R_E$ 和0；
- 单端输出和双端输出的主要区别是对 R_L 的处理，单端输出时均取 R_L ，双端求 $A_{c\frac{1}{2}}$ 时为无穷，求 $A_{d\frac{1}{2}}$ 时 $R_L/2$ ；



1. 差模信号作用时动态阻抗分析



1 双端输出：

输入内阻：

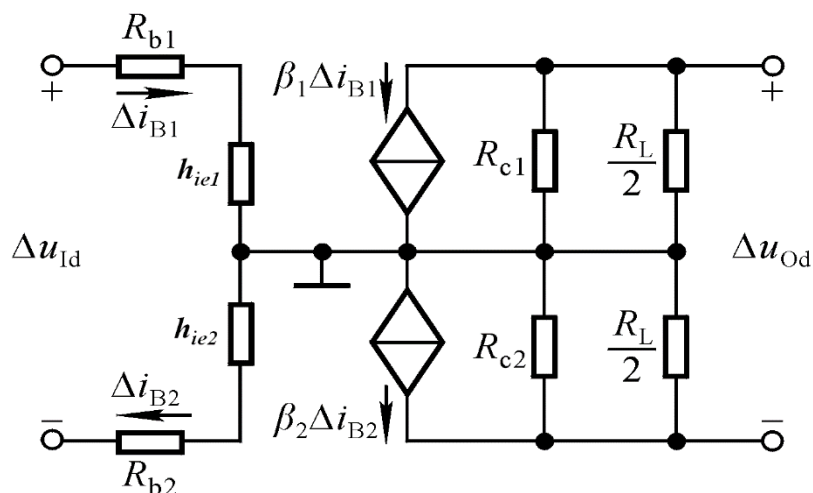
$$\Delta u_{Id} = \Delta i_B \cdot 2(R_b + h_{ie})$$

$$R_i = 2(R_b + h_{ie})$$

输出内阻：

$$\Delta u_{Od} = -\Delta i_C \cdot 2(R_c // \frac{R_L}{2})$$

$$R_o = 2R_c$$





1. 差模信号作用时动态阻抗分析

2. 单端输出:

输入内阻:

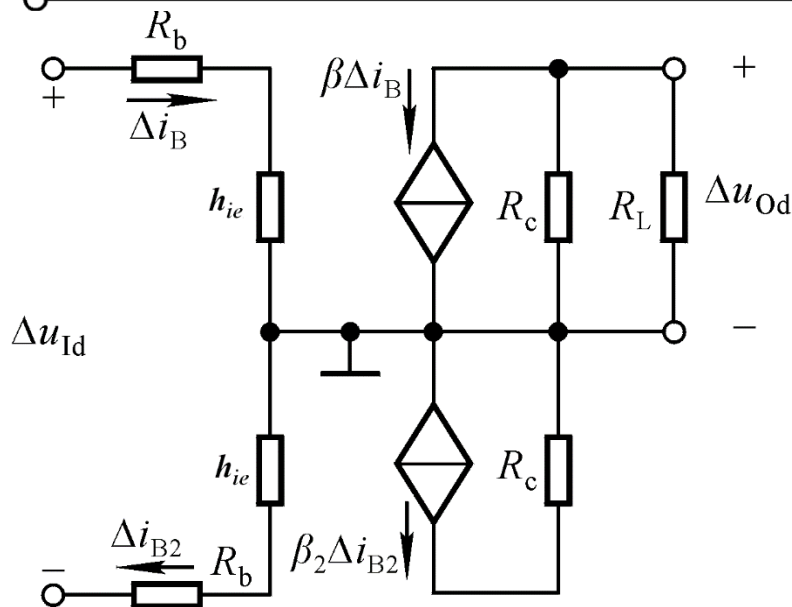
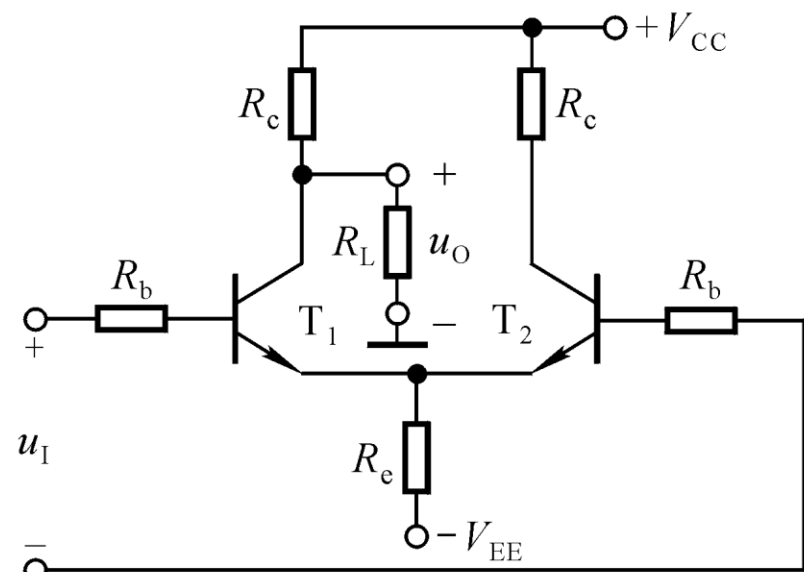
$$\Delta u_{Id} = \Delta i_B \cdot 2(R_b + h_{ie})$$

$$R_i = 2(R_b + h_{ie})$$

输出内阻:

$$\Delta u_{Od} = -\Delta i_C \cdot (R_c // R_L)$$

$$R_o = R_c$$





小结：长尾式差动放大电路的动态性能比较

不同输出模式下的比较：

电路参数理想对称条件下

双端输出

$$\text{差模增益: } A_d = 2A_{d\frac{1}{2}} = 2 \cdot \frac{\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{h_{ie} + R_B // R_S} \cdot \frac{R_B}{R_B + R_S}$$

$$\text{共模增益: } A_c = 0$$

$$\text{差动增益: } A_{od} = A_{d\frac{1}{2}} = \frac{\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{h_{ie} + R_B // R_S} \cdot \frac{R_B}{R_B + R_S}$$

$$\text{差模输入电阻: } R_i = 2(R_B + h_{ie})$$

$$\text{差模输出电阻: } R_o = 2R_c$$

$$\text{共模抑制比: } CMRR = \infty$$

单端输出

$$\text{差模增益: } A_d = A_{d\frac{1}{2}} = \frac{\beta(R_c // R_L)}{h_{ie} + R_B // R_S} \cdot \frac{R_B}{R_B + R_S}$$

$$\text{共模增益: } A_c = A_{c\frac{1}{2}} = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{h_{ie} + R_S // [R_B + 2(1 + \beta)R_E]} \cdot \frac{R_B}{R_S + R_B}$$

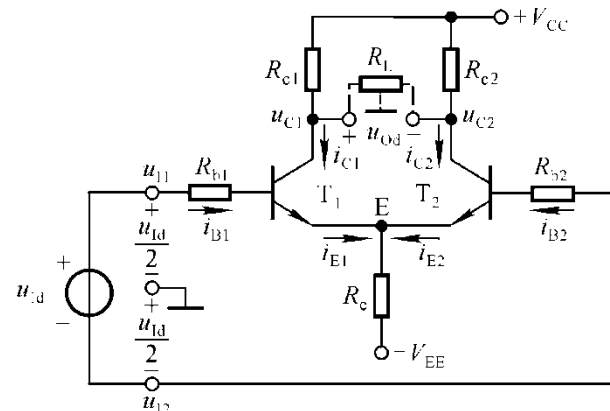
$$\text{差动增益: } A_{od} = \frac{1}{2} A_d + A_c \frac{V_d}{V_c}$$

$$\text{差模输入电阻: } R_i = 2(R_B + h_{ie})$$

$$\text{差模输出电阻: } R_o = R_c$$

$$\text{共模抑制比: } CMRR = \frac{2\beta R_E}{h_{ie} + R_S // R_B}$$

如何进一步提升共模抑制比CMRR?

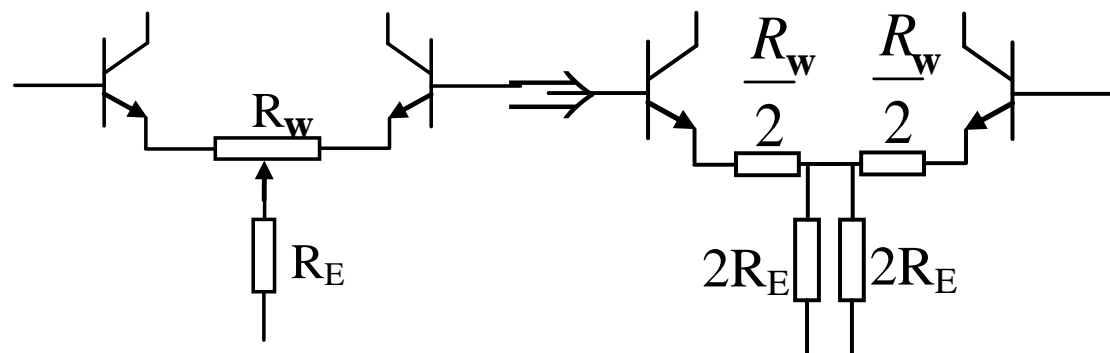




5. 基本型差动放大器的交流分析

■ 思考：如何改善实际电路 **双端输出** 的CMRR？ **电路参数的理想对称性**

发射极调零电路



1) R_W 取值应大些？还是小些？

2) R_W 对动态参数的影响？

3) 若 R_W 滑动端在中点，写出 A_d 、 R_i 的表达式。

$$A_d = - \frac{2\beta R_c}{R_b + h_{ie} + (1 + \beta) \frac{R_W}{2}}$$

$$R_i = 2(R_b + h_{ie}) + (1 + \beta)R_W$$

$$CMRR \approx \frac{2(1 + \beta)R_E}{h_{ie} + R_s \parallel R_B}$$

➤ 如何改善实际电路 **单端输出** 时的CMRR？

如何进一步提高实际电路单端输出时的CMRR？



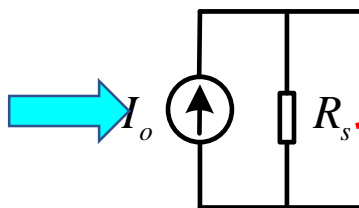


6. 电流源偏置的差动放大器

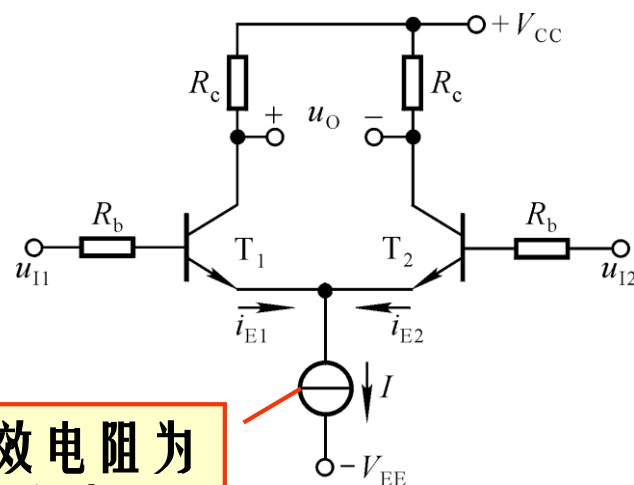
- 电流源电路能够提供较大的直流电流，可满足电源和功耗要求。
- 电流源交流时呈现极高阻抗，作为发射极偏置使用亦可满足提高CMRR的要求；
- 电路结构

➤ 理想电流源偏置

$$CMRR \approx \frac{2(1+\beta)R_E}{h_{ie} + R_s \parallel R_B}$$



R_s 等效电阻为无穷大





6. 电流源偏置的差动放大器

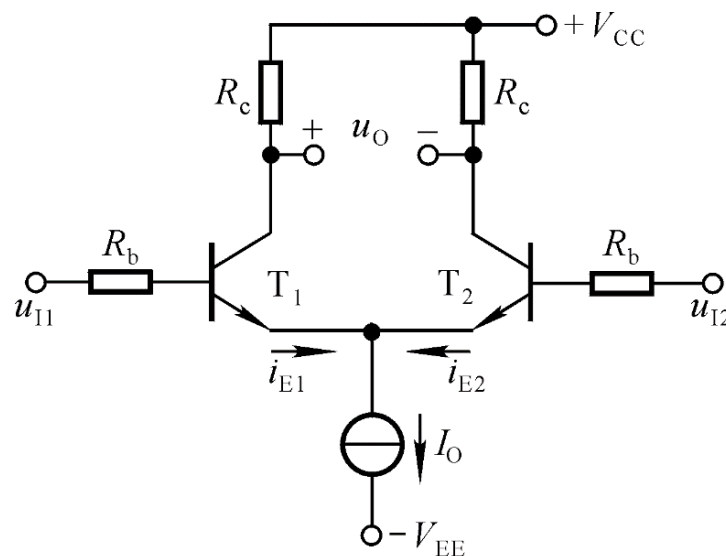
■ 工作原理

静态: $I_{E1} + I_{E2} = I_o$

动态: $R_S = \infty$

$$I_{E1} + i_{e1} + I_{E2} + i_{e2} = I_o$$

$$\Rightarrow i_{e1} = -i_{e2} \Rightarrow i_{o1} = -i_{o2} \Rightarrow A_c = 0$$



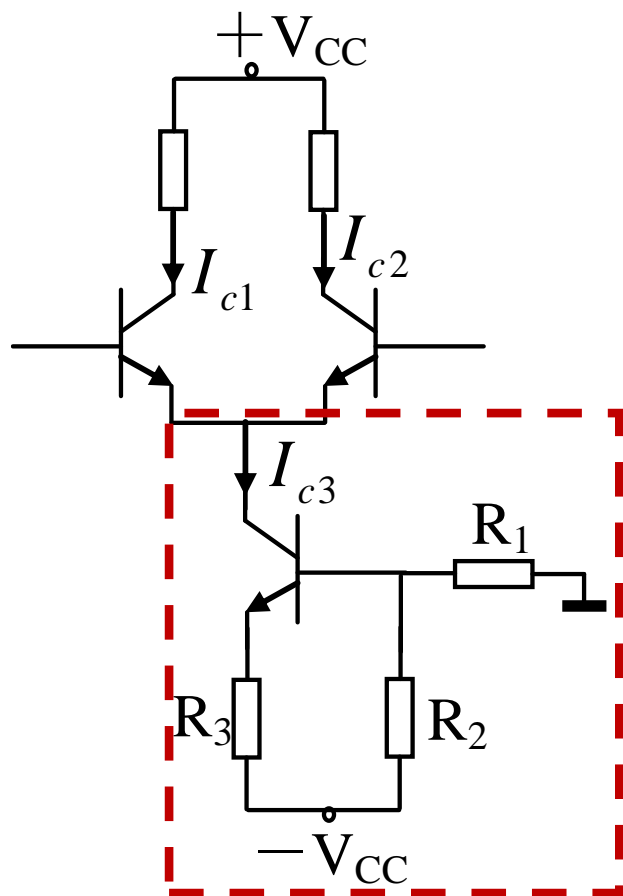
➤ 理想电流源偏置的差动放大器，只允许信号有差模变化，共模信号输入时，共模输出为0，即**CMRR可达无穷**；





6. 电流源偏置的差动放大器

■ 例：BJT基本电流源电路偏置的差动放大器分析



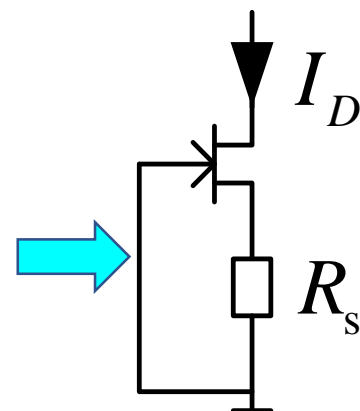
➤ 对BJT基本电流源电路作直流分析

用戴维宁等效，得到

$$V_{B3} = -V_{CC} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$I_{C3} = \frac{V_{B3} - V_{BEON} - (-V_{CC})}{R_3 + \frac{R_1 \parallel R_2}{1 + \beta}}$$

I_{c3} 为恒定，提供 T_1 、 T_2 的射极电流 I_{E1} 、 I_{E2} 。



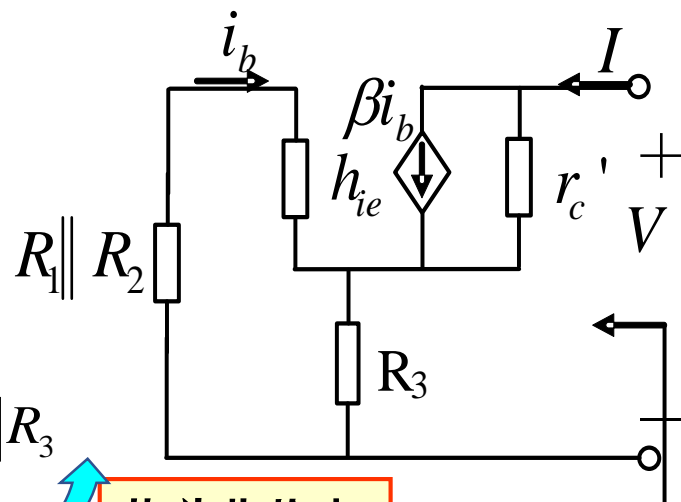


6. 电流源偏置的差动放大器

■ 对基本电流源电路作交流分析

$$\begin{cases} V = (I - \beta i_b) r_c' + (I + i_b) R_3 \\ -i_b (R_1 \parallel R_2 + h_{ie}) = (I + i_b) R_3 \end{cases}$$

$$R_o = \frac{V}{I} = r_c' \left(1 + \frac{\beta R_3}{h_{ie} + R_1 \parallel R_2 + R_3} \right) + (R_1 \parallel R_2 + h_{ie}) \parallel R_3$$



等效的输出电阻很大!

■ 分析差动电路的 **单端输出** 共模增益

$$A_{c\text{半}} = - \frac{\beta R_L'}{h_{ie} + R_s \parallel R_B + 2(1 + \beta) R_o} \approx - \frac{R_L'}{2 R_o} \downarrow$$

■ 共模抑制比

$$A_{d\text{半}} = \frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{h_{ie} + R_B \parallel R_S} \cdot \frac{R_B}{R_B + R_S} \rightarrow CMRR = \frac{2\beta R_o}{h_{ie} + R_s \parallel R_B}$$

共模抑制比有很大的提升

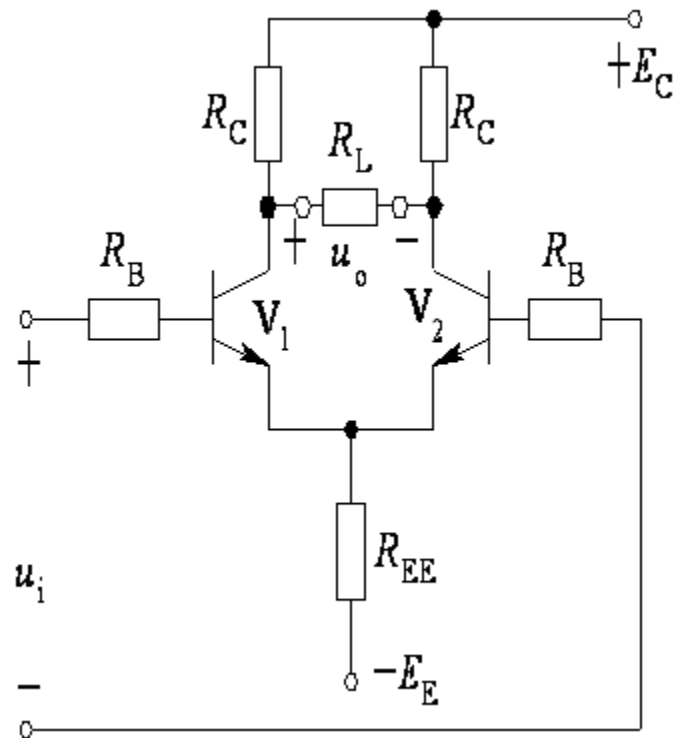




典型举例

例 差动放大器如图所示，假设电路完全对称，电路参数为： $E_C=E_E=12\text{V}$ ， $R_B=20\text{k}\Omega$ ， $R_C=R_L=R_{EE}=10\text{k}\Omega$ ，管子参数 $\beta=50$ ， $r_b=300\Omega$ ， $U_{BEQ}=0.6\text{V}$ 。求：

- (1) 电路静态时的 I_{B1} ， I_{C1} ， U_{CE1} ；
- (2) 双端输出差模电压放大倍数 A_{ud} ；
- (3) 双端输出共模电压放大倍数 A_{uc} 及共模抑制比CMRR；
- (4) 差模输入电阻 R_{id} ；
- (5) 输出电阻 R_o 。





举例

$$\text{解 (1) } I_{B1} = I_{B2} = I_B = \frac{E_E - U_{BEQ}}{R_B + 2(1 + \beta)R_{EE}} = \frac{12 - 0.6}{20 + 2 \times 51 \times 10} \approx 0.011 \text{ mA}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = I_C = \beta I_B = 50 \times 0.011 = 0.55 \text{ mA}$$

$$U_{CE1} = U_{CE2} = U_{CE} \approx E_C + E_E - I_C(R_C + 2R_{EE}) = 12 + 12 - 0.55(10 + 2 \times 10) = 7.50 \text{ V}$$

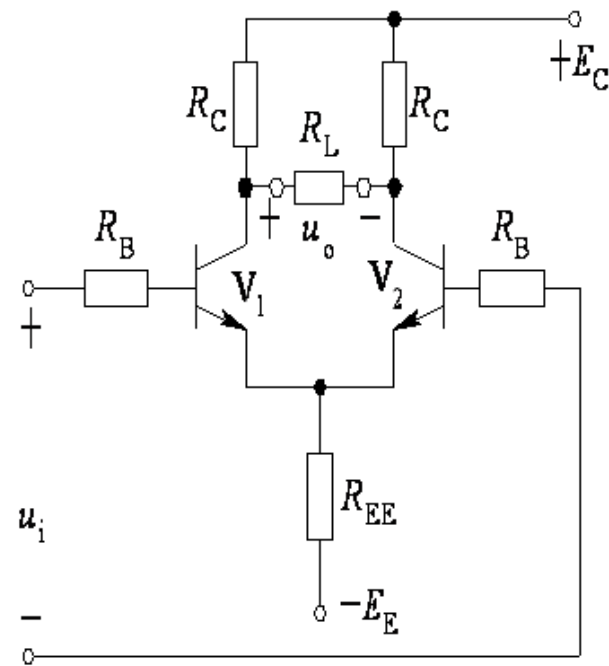
$$(2) h_{ie1} = h_{ie2} = h_{ie} = r_{bb'} + \frac{26}{I_B} = 300 + 2364 \approx 2.66 \text{ k}\Omega$$

$$A_{ud} = -\frac{2\beta(R_C // \frac{R_L}{2})}{R_B + h_{ie}} = -\frac{2 \times 50 \times (10 // 5)}{20 + 2.66} = -14.72$$

(3) 由于电路对称, 有 $A_{uc} = 0$, $CMRR \rightarrow \infty$ 。

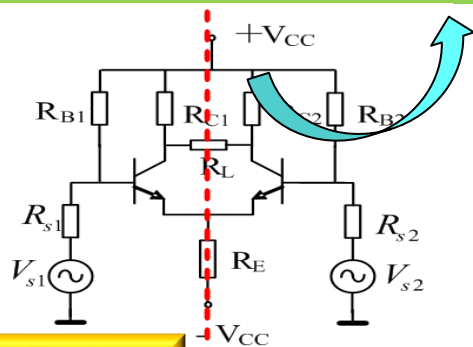
$$(4) R_{id} = 2(R_B + h_{ie}) = 2(20 + 2.66) = 45.32 \text{ k}\Omega$$

$$(5) R_o = 2R_C = 20 \text{ k}\Omega$$



回顾：集成运放输入级差动放大电路分析

差动结构

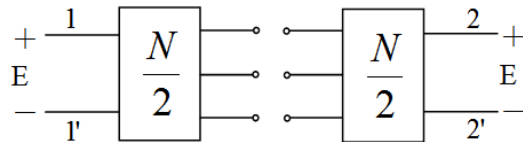


理想对称性

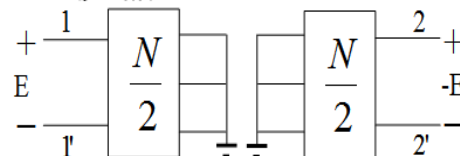
半电路分析

全电路

■ 共模输入



■ 差模输入



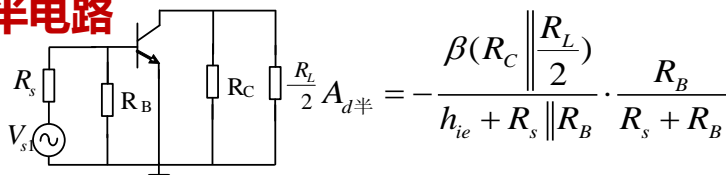
交流特性分析

(1) 双端输出

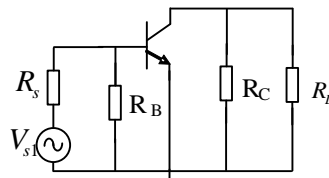


(2) 单端输出

■ 差模半电路

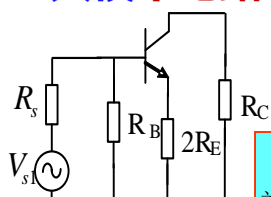


$$A_{d\frac{1}{2}} = -\frac{\beta(R_C \parallel \frac{R_L}{2})}{h_{ie} + R_s \parallel R_B} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B}$$

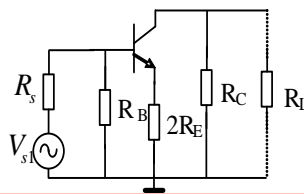


$$A_{d\frac{1}{2}} = -\frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{h_{ie} + R_s \parallel R_B} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B}$$

■ 共模半电路



$$A_{c\frac{1}{2}} = -\frac{\beta R_C}{h_{ie} + R_s \parallel R_B + 2(1 + \beta)R_E} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B} \approx -\frac{R_C}{2R_E}$$



$$A_{c\frac{1}{2}} = -\frac{\beta R_L'}{h_{ie} + R_s \parallel R_B + 2(1 + \beta)R_E} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B} \approx -\frac{R_L'}{2R_E}$$

全差动电路
交流指标

$$\text{差模增益: } A_d = 2A_{d\frac{1}{2}} = 2 \cdot \frac{\beta(R_C \parallel \frac{R_L}{2})}{h_{ie} + R_s \parallel R_B} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B}$$

$$\text{共模增益: } A_c = 0$$

$$\text{差动增益: } A = A_{d\frac{1}{2}} = \frac{\beta(R_C \parallel \frac{R_L}{2})}{h_{ie} + R_s \parallel R_B} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B}$$

$$\text{差模输入电阻: } R_i = 2(R_B + h_{ie})$$

$$\text{差模输出电阻: } R_o = 2R_C$$

$$\text{共模抑制比: } CMRR = \infty$$

$$\text{差模增益: } A_d = A_{d\frac{1}{2}} = \frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{h_{ie} + R_s \parallel R_B} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B}$$

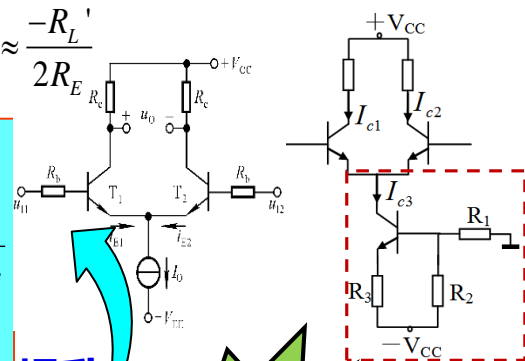
$$\text{共模增益: } A_c = A_{c\frac{1}{2}} = -\frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{h_{ie} + R_s \parallel R_B + 2(1 + \beta)R_E} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B}$$

$$\text{差动增益: } A = \frac{1}{2} A_d + A_c \frac{V_d}{V_c}$$

$$\text{差模输入电阻: } R_i = 2(R_B + h_{ie})$$

$$\text{差模输出电阻: } R_o = R_C$$

$$\text{共模抑制比: } CMRR = \frac{2\beta R_E}{h_{ie} + R_s \parallel R_B}$$



提升

电流源
偏置电路

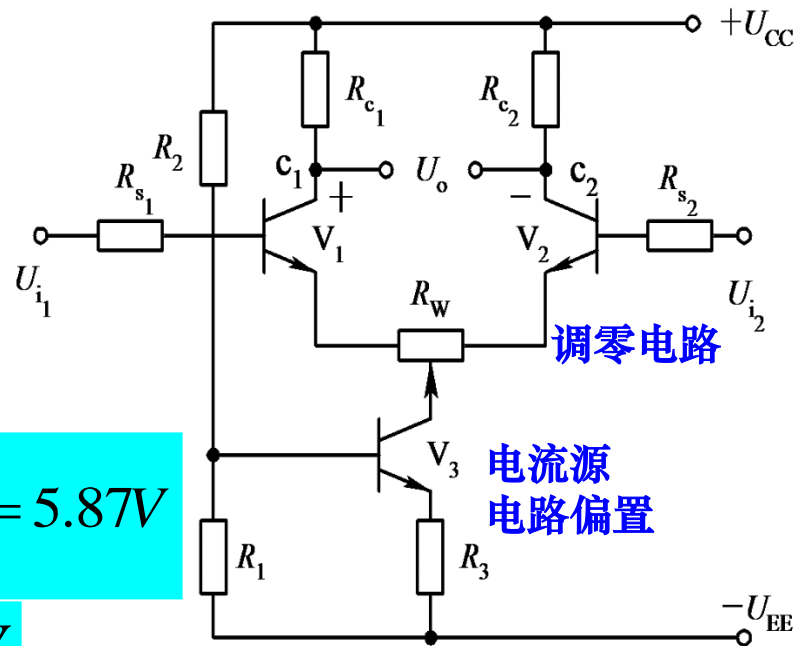




例题

例：电路如图，设 $U_{CC}=U_{EE}=12V$, $\beta_1=\beta_2=50$, $R_{c1}=R_{c2}=100k\Omega$, $R_W=200\Omega$, $R_3=33k\Omega$, $R_2=6.8k\Omega$, $R_1=2.2k\Omega$, $R_{s1}=R_{s2}=10k\Omega$ 。 $r_{ce3}=50 k\Omega$

- (1) 求静态工作点，差模电压放大倍数？
- (2) 求 $R_L=100k\Omega$ 时，差模电压放大倍数。
- (3) 从 V_1 管集电极输出，求差模电压放大倍数和共模抑制比 CMRR。



解 (1) 静态工作点: $U_{R_1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (U_{CC} + U_{EE}) = 5.87V$

设 $U_{BE3}=0.7V$, 则 $U_{R_3} = 5.87 - 0.7 = 5.17V$

所以

$$I_{E_3} = \frac{U_{R_3}}{R_3} \approx 0.16mA = 160\mu A$$

$$I_{E_1} = I_{E_2} = \frac{1}{2} I_{E_3} = 80\mu A,$$

$$I_{E_1} \approx I_{C_1}, I_{E_2} \approx I_{C_2}$$

$$U_{C_1} = U_{C_2} = U_{CC} - I_{C_1} R_{C_1} = 12 - 0.08 \times 100 = 4V$$





例题

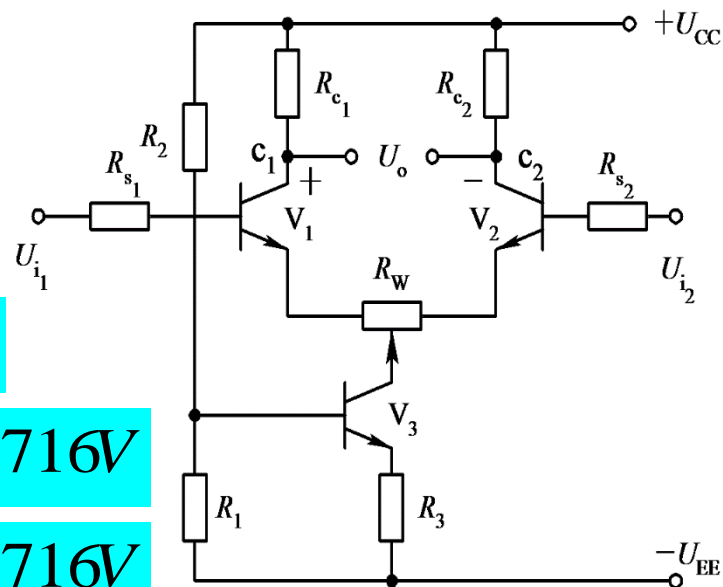
一般静态估算时, 认为两输入端接地 $U_{i1}=U_{i2}=0$ 。

$$I_{B_1} = I_{B_2} = \frac{I_{c_1}}{\beta_1} = \frac{80}{50} = 1.6\mu A$$

$$U_{B_1} = U_{B_2} = 0 - I_{B_1} R_{s_1} = -1.6 \times 10^{-6} \times 10^4 = -0.016V$$

$$U_{E_1} = U_{E_2} = U_{B_1} - U_{BE_1} = -0.016 - 0.7 = -0.716V$$

$$U_{CE_1} = U_{CE_2} = U_{c_1} - U_{E_1} = 4 - (-0.716) = 4.716V$$



差模电压放大倍数:

$$A_{ud} = - \frac{2\beta_1 R'_L}{R_{s_1} + h_{ie_1} + (1 + \beta_1) \frac{R_W}{2}}$$

其中

$$R'_L = R_c$$

$$h_{ie_1} = r_b + (1 + \beta_1) \frac{26}{I_{E_1}} = 200 + 51 \times \frac{26}{0.08} \approx 16.9k\Omega$$

$$A_{ud} = - \frac{2 \times 50 \times 100}{10 + 16.9 + 51 \times 0.1} \approx -312$$





例题

(2) 当 $R_L = 100 \text{ k}\Omega$ 时:

$$R'_L = R_{c1} // \frac{R_L}{2} = 100 // 50 \approx 33.3 \text{ k}\Omega$$

$$A_{ud} = - \frac{2\beta_1 R'_L}{R_{s1} + h_{ie1} + (1 + \beta_1) \frac{R_W}{2}} = - \frac{2 \times 50 \times 33.3}{10 + 16.9 + 51 \times 0.1} \approx -104$$

(3) 当单端输出时(从 V_1 管 c_1 极输出):

$$R'_L = R_{c1} // R_L = 50 \text{ k}\Omega$$

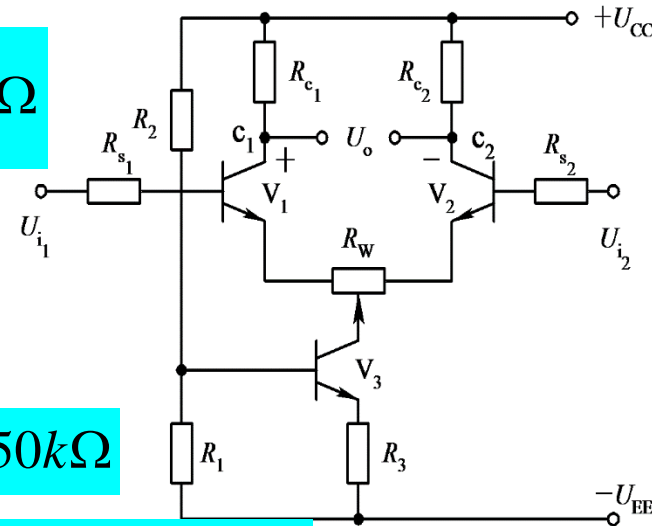
$$A_{ud\text{单}} = - \frac{\beta R'_L}{R_{s1} + h_{ie1} + (1 + \beta_1) \frac{R_W}{2}} = - \frac{50 \times 50}{10 + 16.9 + 51 \times 0.1} \approx -39$$

单端输出时, 共模电压放大倍数为

式中

$$R'_L = R_c // R_L = 50 \text{ k}\Omega$$

$$h_{ie3} = r_b + (1 + \beta) \frac{26}{I_{E3}} = 200 + 51 \times \frac{26}{0.16} \approx 8.6 \text{ k}\Omega$$



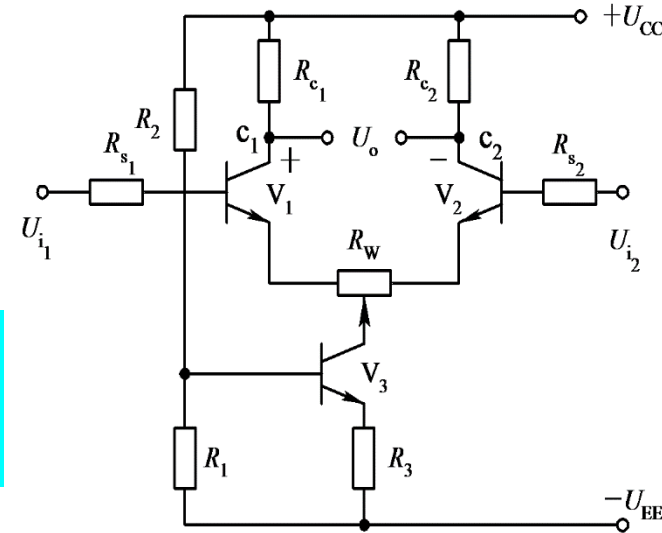


例题

式中

$$r_{o3} \approx \left(1 + \frac{\beta R_3}{h_{ie3} + R_3 + R_1 // R_2} \right) r_{ce}$$

$$= \left(1 + \frac{50 \times 33}{8.6 + 33 + 1.7} \right) \times 50 \approx 1.96 \times 10^6 \Omega$$



故

$$A_{uc单} = - \frac{\beta R'_L}{R_{s1} + h_{ie1} + (1 + \beta) \left(\frac{R_W}{2} + 2r_{o3} \right)} = \frac{50 \times 50}{10 + 16.9 + 51 \times 3800} \approx -0.013$$

其共模抑制比为

$$CMRR = \left| \frac{A_{ud单}}{A_{uc单}} \right| = \frac{39}{0.013} = 3000$$

$$CMR = 201g \left| \frac{A_{ud单}}{A_{uc单}} \right| = 201g 3000 \approx 69.5dB$$





§ 5.2 集成运放中的电流源

一、镜像电流源

二、微电流源

三、多路电流源

四、有源负载

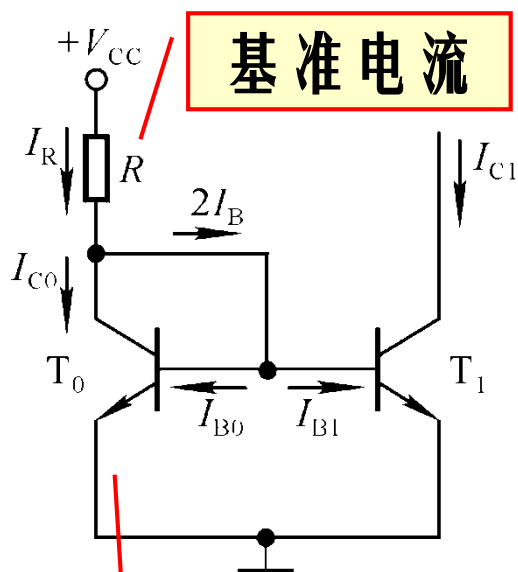




一、镜像电流源

■ 利用结构对称性+晶体管性能一致性

T_0 和 T_1 特性完全相同。



T_0 什么状态?

$$I_R = (V_{CC} - U_{BE}) / R$$

$$U_{BE1} = U_{BE0}, \quad I_{B1} = I_{B0}$$

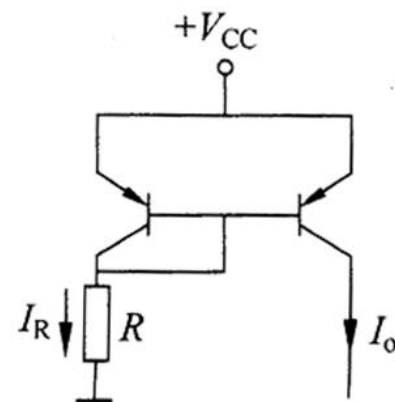
$$I_{C1} = I_{C0} = I_C$$

$$I_R = I_{C0} + I_{B0} + I_{B1} = I_C + \frac{2I_C}{\beta}$$

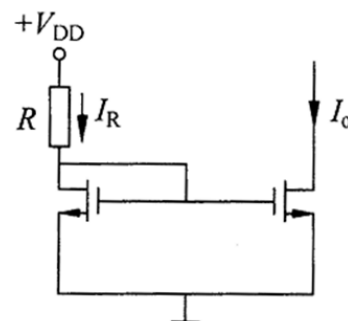
$$I_C = \frac{\beta}{\beta + 2} \cdot I_R = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}} \cdot I_R$$

若 $\beta \gg 2$, 则 $I_O = I_C \approx I_R$

→ 恒流源大电流场合



PNP 镜像电流源



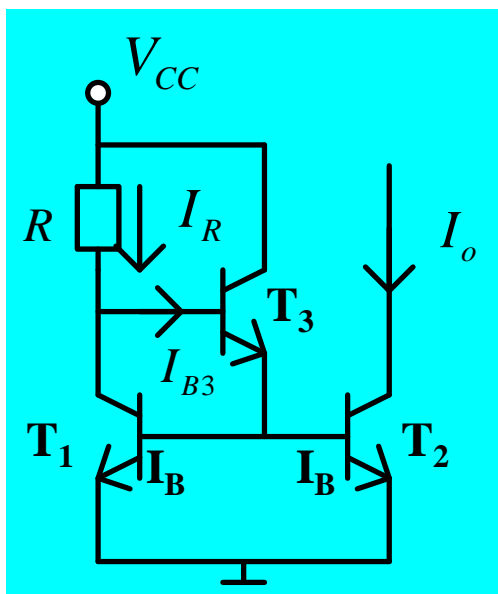
FET 管完全镜像电流源





一、镜像电流源改进型

- 尽可能减小两管基极电流 I_B 对基准电流的分流影响，或者说，降低晶体管 β 值对电流精度和稳定性的影响。



基极电流补偿的镜像电流源

$$\text{基准电流: } I_R = \frac{V_{CC} - 2V_{BE}}{R}$$

$$I_R = I_{C1} + I_{B3} = I_{C1} + \frac{2I_B}{1 + \beta}$$

$$= I_{C1} \left(1 + \frac{2}{\beta(1 + \beta)} \right)$$

I_0 更接近 I_R

$$\Rightarrow I_o = I_{C1} = \frac{I_R}{1 + \frac{2}{\beta(1 + \beta)}}$$

降低 β 的影响

输出阻抗: $r_o \approx r_c'$



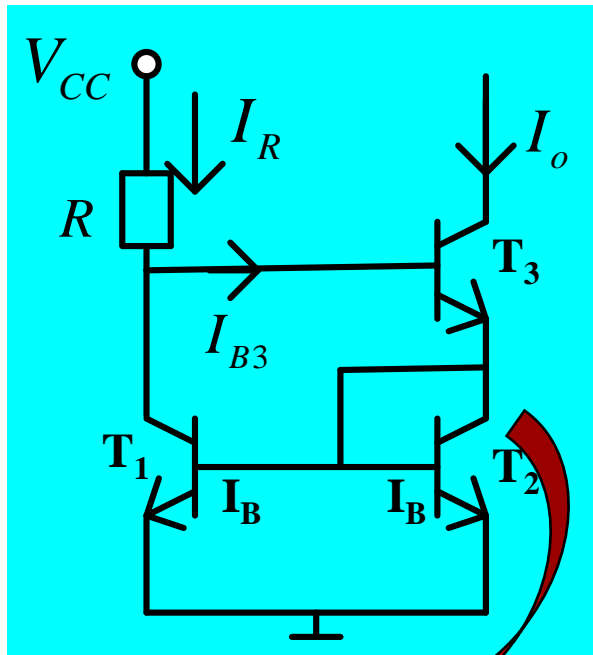


一、镜像电流源——Wilson

■ 反馈型：

➤ 直流分析

基准电流：
$$I_R = \frac{V_{CC} - 2V_{BE}}{R}$$



电流负反馈：
稳定输出电流；

$$I_R = I_{C1} + I_{B3} = \beta I_B + \frac{2I_B + \beta I_B}{1 + \beta} = I_B \left(\beta + \frac{2 + \beta}{1 + \beta} \right)$$

$$\Rightarrow I_B = \frac{I_R}{\beta + \frac{2 + \beta}{1 + \beta}}$$

$$\Rightarrow I_o = \beta I_{B3} = \beta \frac{2 + \beta}{1 + \beta} \frac{I_R}{\beta + \frac{2 + \beta}{1 + \beta}} = \frac{I_R}{1 + \frac{2}{\beta(\beta + 2)}}$$

输出阻抗：
$$r_o \approx \frac{\beta}{2} r_c'$$

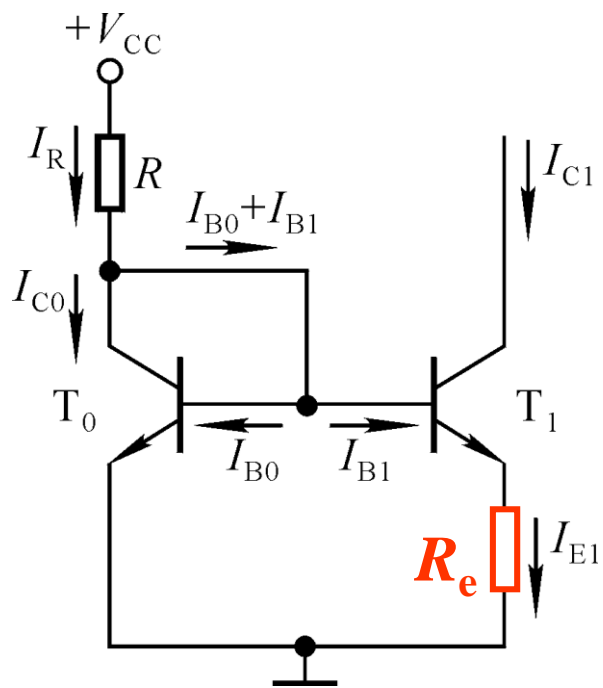
输出电阻更大！





二、微电流源

■ 要求提供很小的静态电流，又不能用大电阻。



$$I_{E1} = (U_{BE0} - U_{BE1}) / R_e$$

$$I_E \approx I_S e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}, \quad \frac{I_{E0}}{I_{E1}} \approx e^{\frac{(U_{BE0} - U_{BE1})}{U_T}}$$

$$U_{BE0} - U_{BE1} = U_T \ln \frac{I_{E0}}{I_{E1}} = I_{E1} R_e$$

超越方程

$$I_{E1} \approx I_{C1} = I_O$$

$$I_{E0} \approx I_{C0} \approx I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE0}}{R}$$

$$U_T \ln \frac{I_R}{I_O} \approx I_O R_e$$

$$I_O = \frac{U_T}{R_e} \ln \frac{I_R}{I_O}$$

→ U_{BE1} 降低，从而 I_{C1} 降低

设计过程很简单，若 I_R 和 I_O 已知，可求选定 R 和 R_e 。





三、比例电流源

由图可得

$$U_{BE1} + I_{E1}R_1 = U_{BE2} + I_{E2}R_2$$

$$I_{E2}R_2 - I_{E1}R_1 = U_{BE1} - U_{BE2} = U_T \ln \frac{I_{E1}}{I_{E2}}$$

当 $\frac{1}{10} < \frac{I_{E1}}{I_{E2}} < 10$ 时, $|U_T \ln \frac{I_{E1}}{I_{E2}}| < 26\text{mV} \times \ln 10 = 60\text{mV}$,

一般 $I_{E1}R_1$ 、 $I_{E2}R_2 \gg 60\text{mV}$, 所以:

$$I_{E1}R_1 \approx I_{E2}R_2$$

忽略基极电流, 可得

$$I_{C2} \approx \frac{R_1}{R_2} I_{C1} \approx \frac{R_1}{R_2} I_{REF}$$

$$I_{REF} \approx \frac{V_{CC} - V_{BE1}}{R + R_1}$$

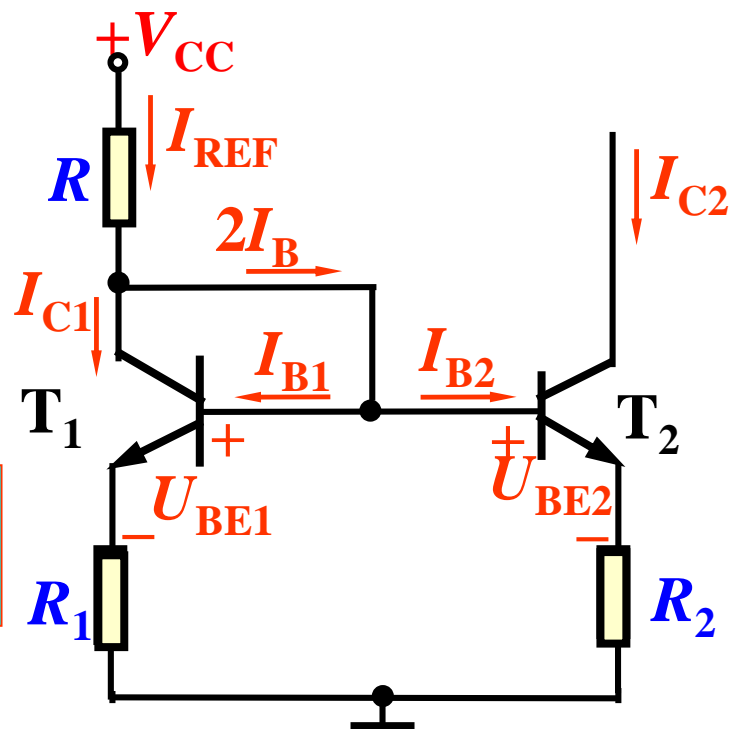
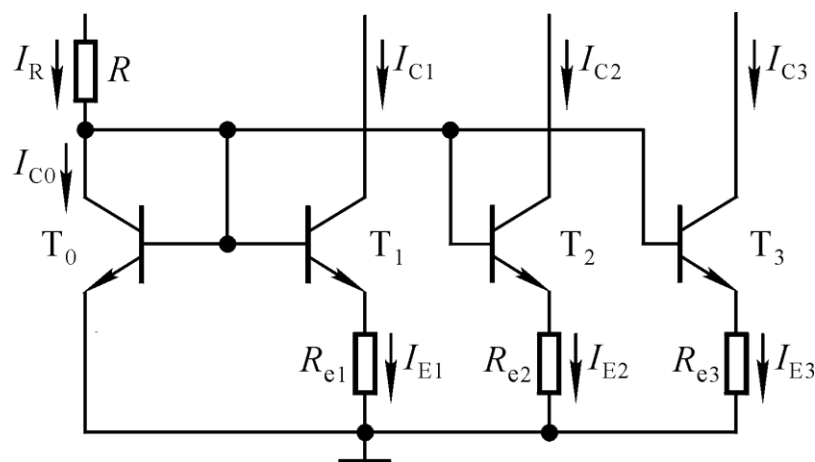


图 比例电流源

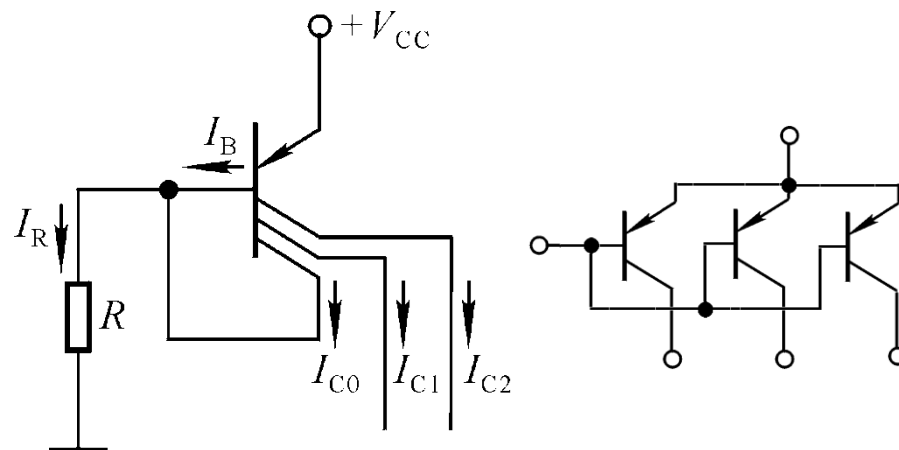




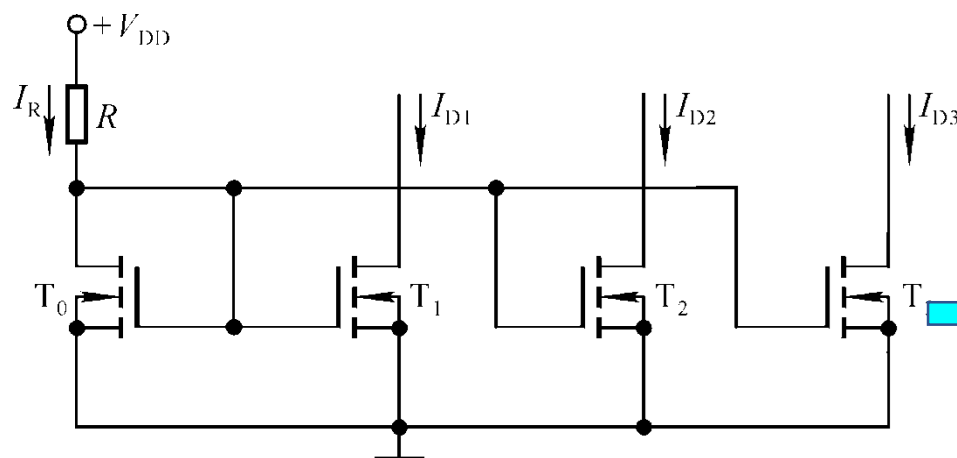
三、多路电流源



■ 根据所需静态电流，来选取发射极电阻的数值。



■ 根据所需静态电流，来确定集电结面积。



■ 根据所需静态电流，来确定沟道尺寸。

$$\frac{I_{D1}}{I_{D0}} = \frac{S_1}{S_0}, \frac{I_{D2}}{I_{D0}} = \frac{S_2}{S_0}, \frac{I_{D3}}{I_{D0}} = \frac{S_3}{S_0}$$





典型例题

例 已知图所示的多路输出电流源电路中的电源电压 $V_{CC} = 10V$, $R = 6.2k\Omega$, $R_{E1} = 3k\Omega$

$R_{E2} = 1k\Omega$, 各管的发射结电压按 $0.7V$ 估算, 且 $\beta \gg 1$, 试求 I_{o1} 、 I_{o2} 、 I_{o3} 和 I_{o4} 。

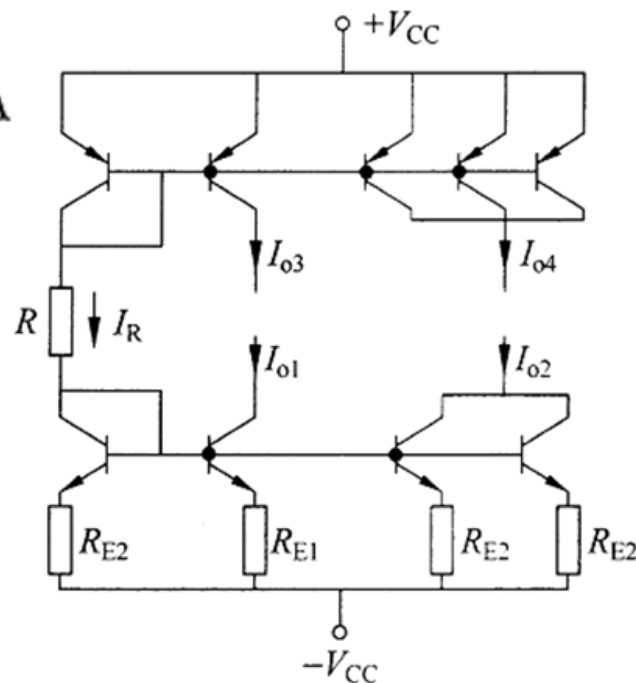
解
$$I_R = \frac{2(V_{CC} - V_{BE})}{R + R_{E2}} = \frac{2 \times 9.3}{(6.2 + 1) \times 10^3} = 2.58mA$$

$$I_{o1} \approx \frac{R_{E2}}{R_{E1}} I_R = \frac{1}{3} \times 2.58 = 0.86mA$$

$$I_{o2} \approx 2I_R = 5.16mA$$

$$I_{o3} \approx I_R = 2.58mA$$

$$I_{o4} \approx 3I_R = 7.74mA$$





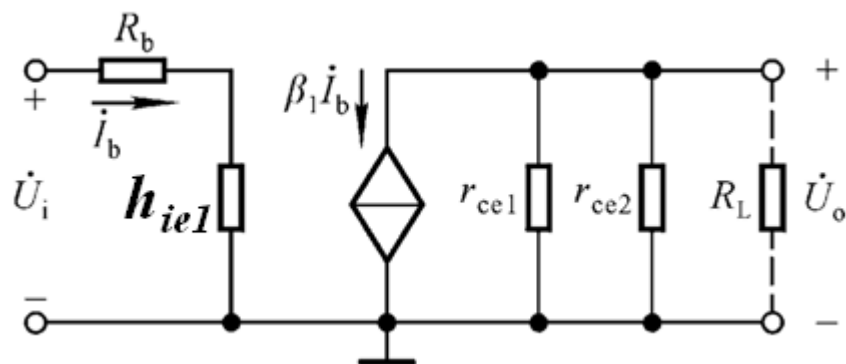
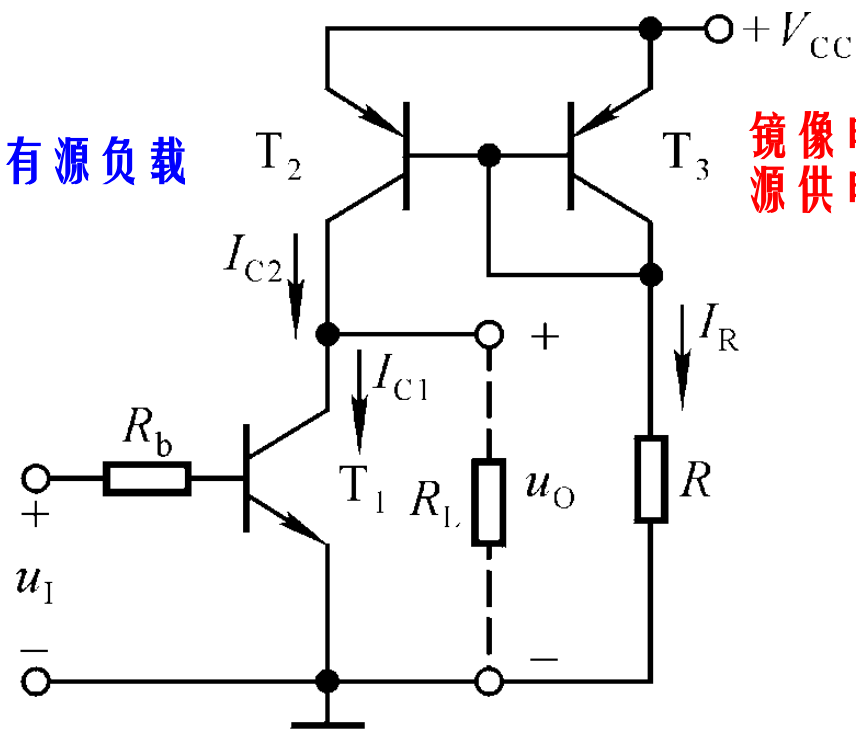
四、有源负载

1. 用于共射放大电路

- ①哪只管子为放大管？
- ②其集电结静态电流约为多少？
- ③静态时 U_{IQ} 为多少？

R_c 为有源负载

镜像电流源供电



④为什么要考虑 r_{ce1} ?

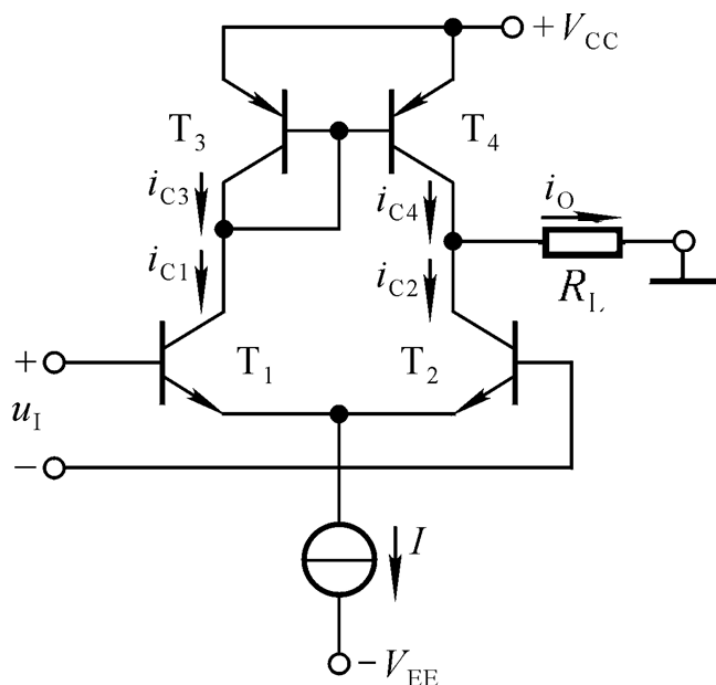
$$\dot{A}_u = -\frac{\beta_1 (r_{ce1} // r_{ce2} // R_L)}{R_b + h_{ie1}}$$

R_o 很大有什么好处？





2. 用于差分放大电路



单端输出电路的差模放大倍数近似等于双端输出时差模放大倍数。

改善差模放大特性

① 电路的输入、输出方式？

② 如何设置静态电流？

③ 静态时， I_O 约为多少？

④ 动态差模时， Δi_O 约为多少？

静态：

$$I_{C1} = I_{C2}, \quad I_{C3} \approx I_{C1}, \quad I_{C4} = I_{C3} \rightarrow I_{C4} \approx I_{C2}$$

$$I_O = I_{C4} - I_{C2} \approx 0$$

动态差模：

$$\Delta i_{C1} = -\Delta i_{C2}, \quad \Delta i_{C4} = \Delta i_{C3} \approx \Delta i_{C1},$$

$$\Delta i_O = \Delta i_{C4} - \Delta i_{C2} \approx 2\Delta i_{C1}$$

共模放大能力如何？

类似双端输出的平衡抵消作用

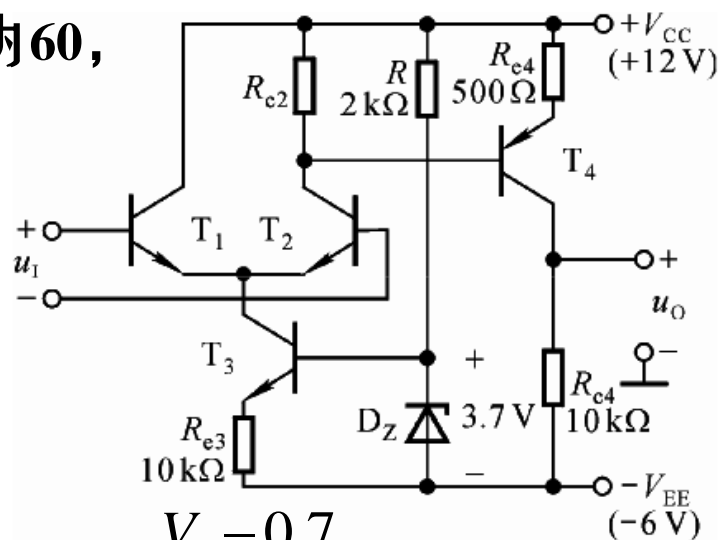




典型例题

例：电路如图所示，所有晶体管均为硅管， β 均为60， $r_b=100\Omega$ ，静态时 $|U_{BEQ}|\approx 0.7V$ 。试求：

- (1) 静态时 T_1 管和 T_2 管的发射极电流。
- (2) 若静态时 $u_o > 0$ ，则应如何调节 R_{c2} 的值才能使 $u_o = 0V$ ？若静态 $u_o = 0V$ ，则 $R_{c2} = ?$
- (3) 电压放大倍数为多少？



解 (1) 经分析稳压管两端电压恒定为 $V_Z = 3.7V$
$$I_{E3} = \frac{V_Z - 0.7}{R_{e3}} = 0.3mA$$
 由对称性可知：
$$I_{E1} = I_{E2} = \frac{1}{2} I_{E3} = 0.15mA$$

(2) 1) 若 u_o 由大于零减小到零，则 I_{C4} 减小，则 I_{B4} 减小， $I_{C2} = I_{Rc2} + I_{B4}$ ，而 I_{C2} 是不变的，所以 I_{Rc2} 要增大，应减小 R_{C2} 。

2) 当 $u_o = 0V$ 时，
$$I_{C4} = \frac{V_{EE}}{R_{C4}} = 0.6mA \quad I_{E4} \approx I_{C4} = 0.6mA$$

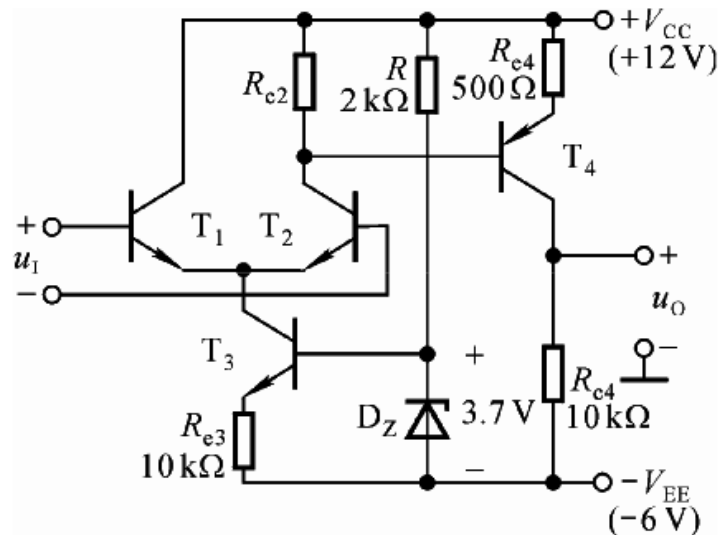
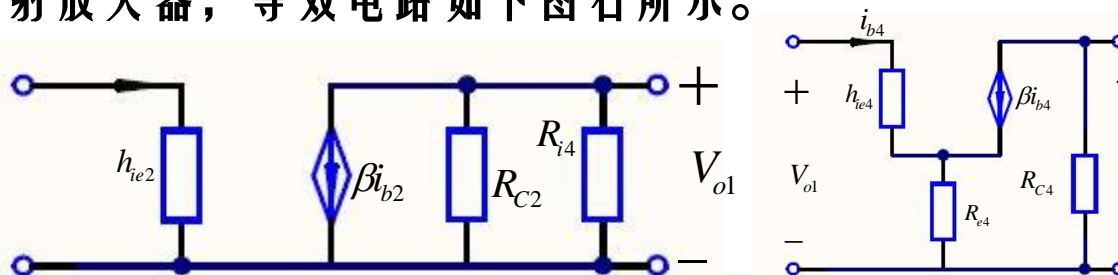
由 $I_{C2} R_{C2} = 0.7 + I_{E4} R_{E4}$ 可知： $R_{C2} = 6.67k\Omega$





典型例题

3) 该放大电路由两级构成：第一级为一个单端输出差动放大电路，求差模增益的半电路等效电路图如下图左所示，第二级为一个射极串小电阻的共射放大器，等效电路如下图右所示。



$$r_{e2} = \frac{V_T}{I_{E2}} = \frac{26}{0.15} = 173.3\Omega \quad h_{ie2} = r_b + (1 + \beta)r_{e2} = 10.7k\Omega$$

$$r_{e4} = \frac{V_T}{I_{E4}} = \frac{26}{0.6} = 43.3\Omega$$

$$h_{ie4} = r_b + (1 + \beta)r_{e4} = 2.74k\Omega \quad R_{i4} = h_{ie4} + (1 + \beta)R_{e4} = 33.24k\Omega$$

$$A_{d\frac{1}{2}} = \frac{V_{o1}}{(v_{i1} - v_{i2})/2} = -\beta \frac{R_{C2} \parallel R_{i4}}{h_{ie2}} = -31.15 \quad A_4 = \frac{V_o}{V_{o1}} = -\beta \frac{R_{C4}}{h_{ie4} + (1 + \beta)R_{e4}} = -18.05$$

因为第一级为差动放大器的发射极接的是电流源，其共模增益为零，所以只有差模增益，故 $A = \frac{V_o}{v_{i1} - v_{i2}} = A_{od}A_4 = \frac{1}{2}A_{d\frac{1}{2}}A_4 = 281.15$





回顾：集成运放电流源电路分析

工作原理

组成结构对称性+晶体管性能一致性

镜像电流源

改进型

反馈型Wilson

微电流源

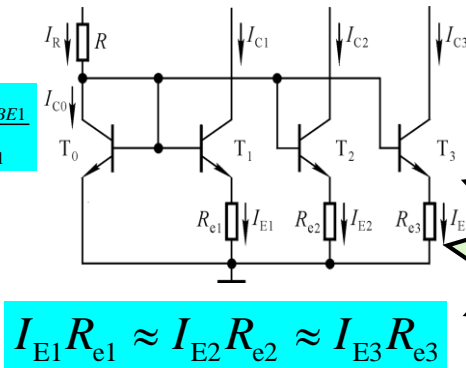
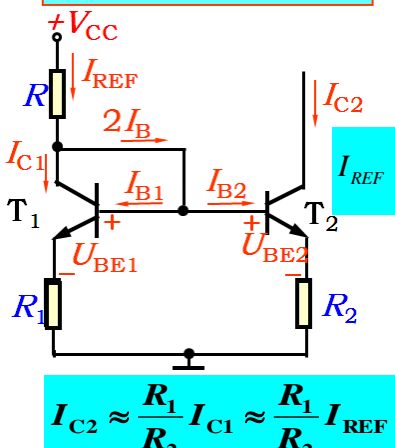
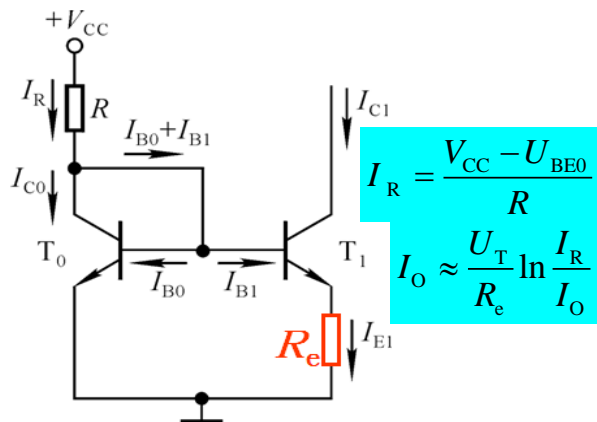
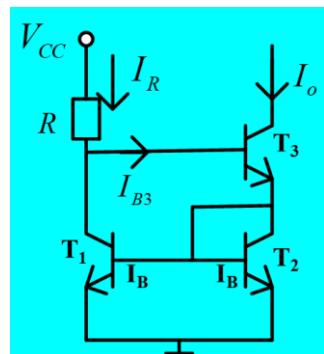
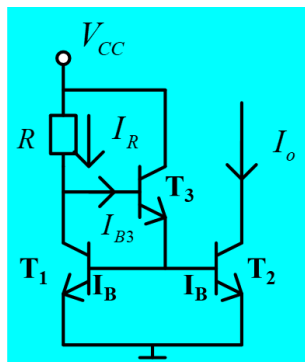
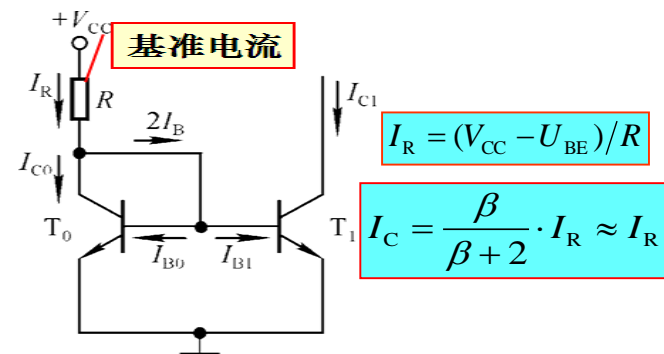
比例电流源

多路电流源

有源负载应用

输出级电路?

基准电流





§ 5.3 互补输出级

- 一、对输出级的要求
- 二、基本电路
- 三、消除交越失真的互补输出级
- 四、准互补输出级





一、对输出级的要求

➤ **互补输出级**是直接耦合的功率放大电路。

➤ 对输出级的要求：带负载能力强；直流功耗小；负载电阻上无直流功耗；

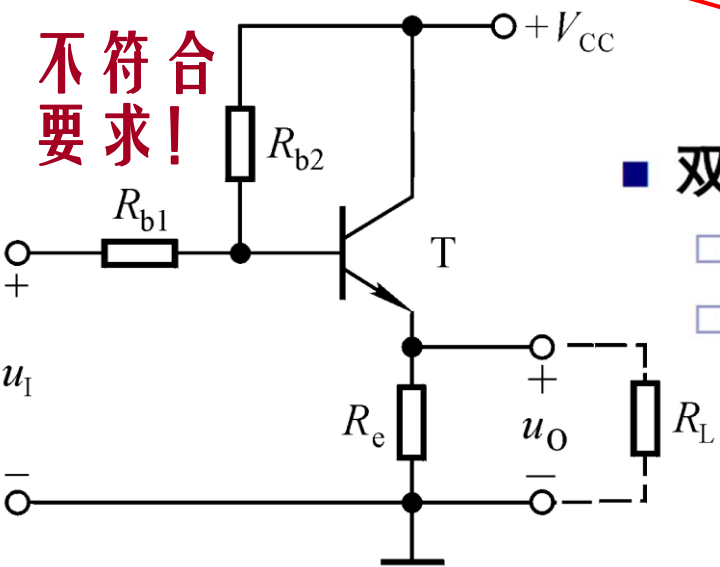
射极输出形式

静态Q点电流小

➤ 最大不失真动态输出电压最大。

输入为零时输出为零

不符合要求！



■ 双电源共集输出级

- 双电源解决零输出
- 共集有低输出阻抗

■ 两缺点

- 有较大的静态功耗
- 输出电压幅度正、负不对称，大信号时易失真

单电源供电 U_{om} 的峰值接近二分之一电源电压。

双电源供电时 U_{om} 的峰值接近一个电源电压。

双管互补输出电路

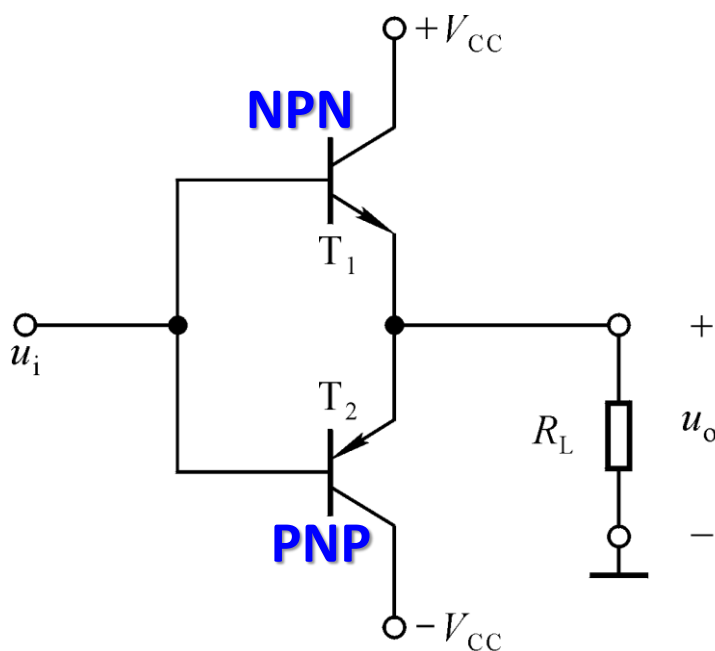




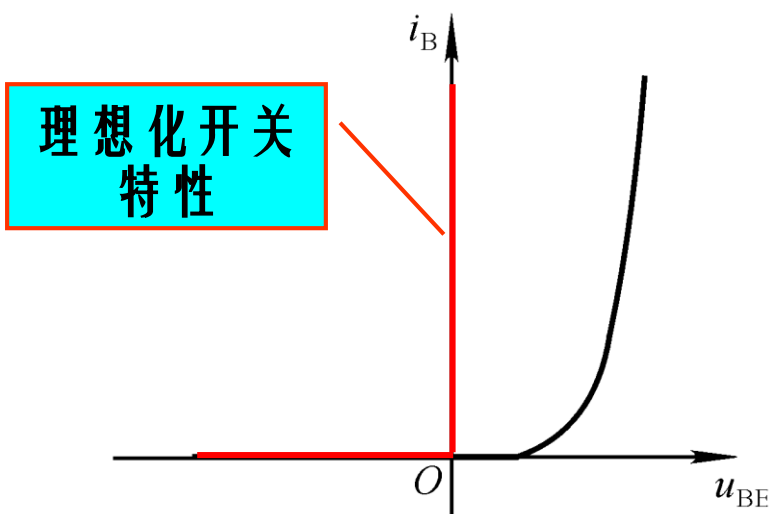
二、互补输出级基本电路

1. 特征： T_1 、 T_2 特性理想互补对称+输入为理想开关特性。

2. 静态分析



T_1 的输入特性



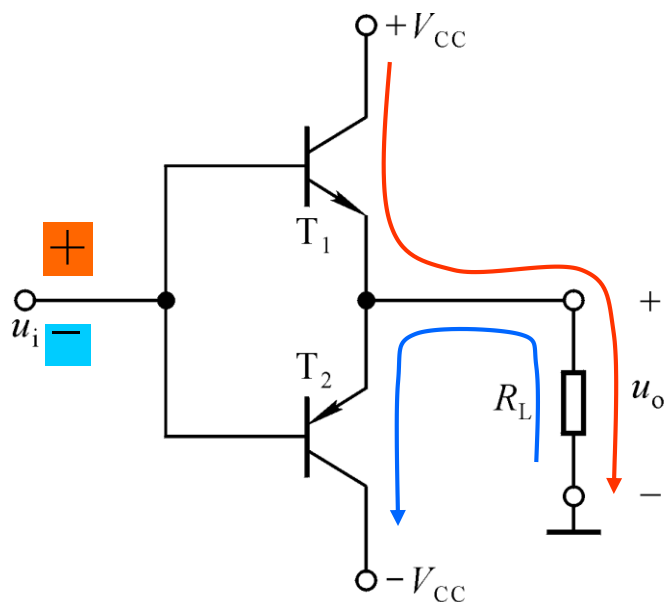
忽略开启电压、导通电压，近似为0

静态时 T_1 、 T_2 均截止， $U_B=0$ ， $U_E=0$ ；没有直流功耗。





3. 补输出级动态分析



■ u_i 正半周，电流通路为

$+V_{CC} \rightarrow T_1 \rightarrow R_L \rightarrow \text{地}$ ， $u_o = u_i$

■ u_i 负半周，电流通路为：

$\text{地} \rightarrow R_L \rightarrow T_2 \rightarrow -V_{CC}$ ， $u_o = u_i$

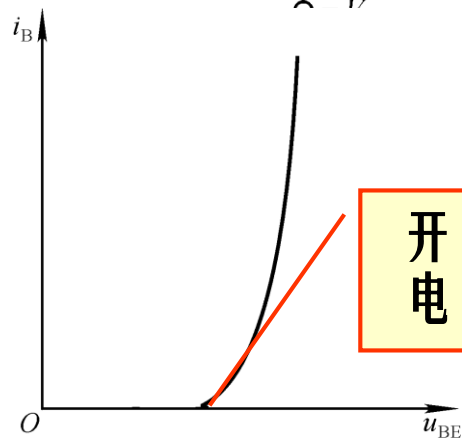
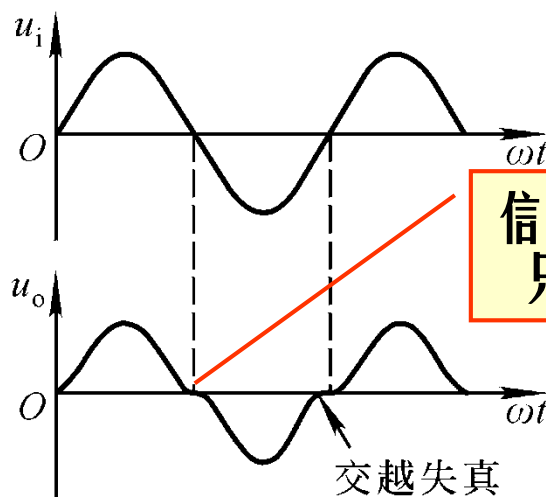
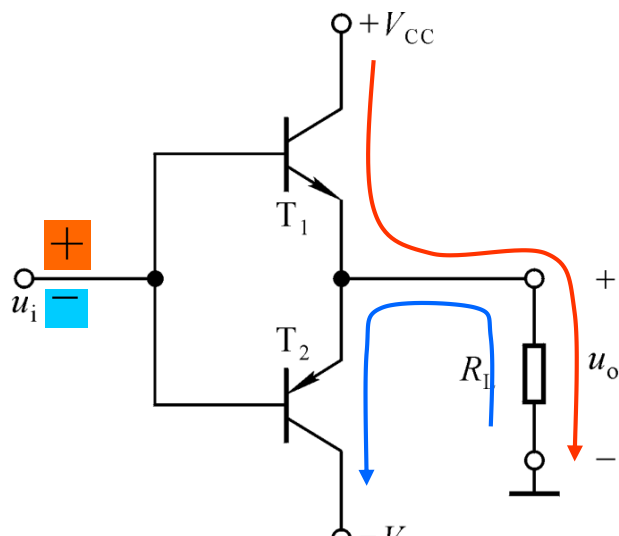
推挽输出：两只管子交替导通工作，两路电源交替供电，

双向跟随输出完整信号，波形上下对称。→乙类工作状态！





4. 补输出级交越失真



消除失真的方法：设置合适的静态工作点。

① 静态时 T_1 、 T_2 处于临界导通状态，有信号时至少有一只导通；

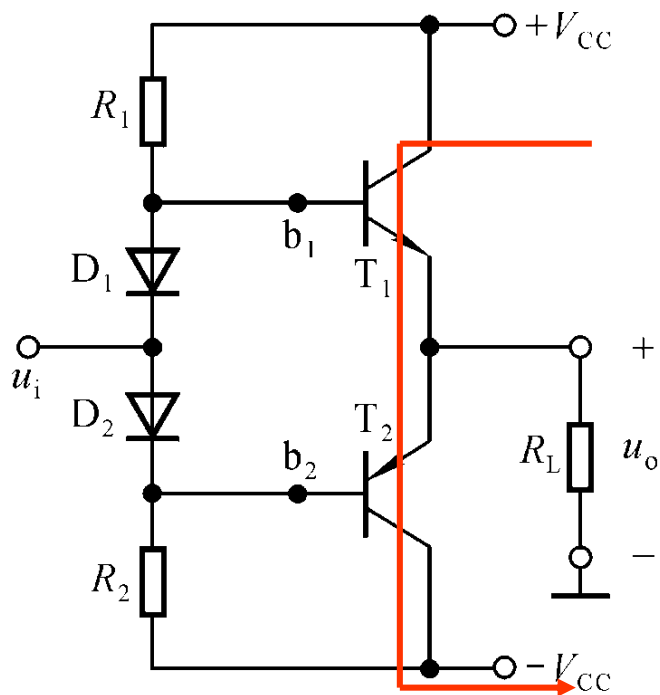
② 偏置电路对动态性能影响要小。

管子导通角 $< 180^\circ$ ，乙丙中间类





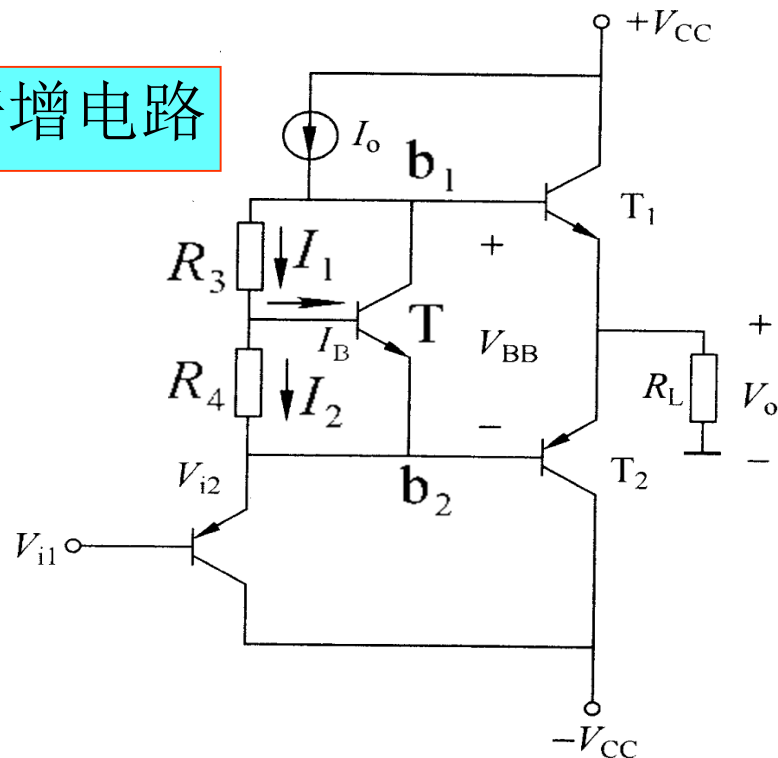
三、消除交越失真的互补输出级



静态: $U_{B1B2} = U_{D1} + U_{D2}$

动态: $u_{b1} \approx u_{b2} \approx u_i$

U_{BE} 倍增电路



若 $I_2 \gg I_B$, 则 $U_{B1B2} \approx \frac{R_3 + R_4}{R_4} \cdot U_{BE}$

$U_{BE1} = +\frac{1}{2} U_{B1B2}$; $U_{BE2} = -\frac{1}{2} U_{B1B2}$

零输出

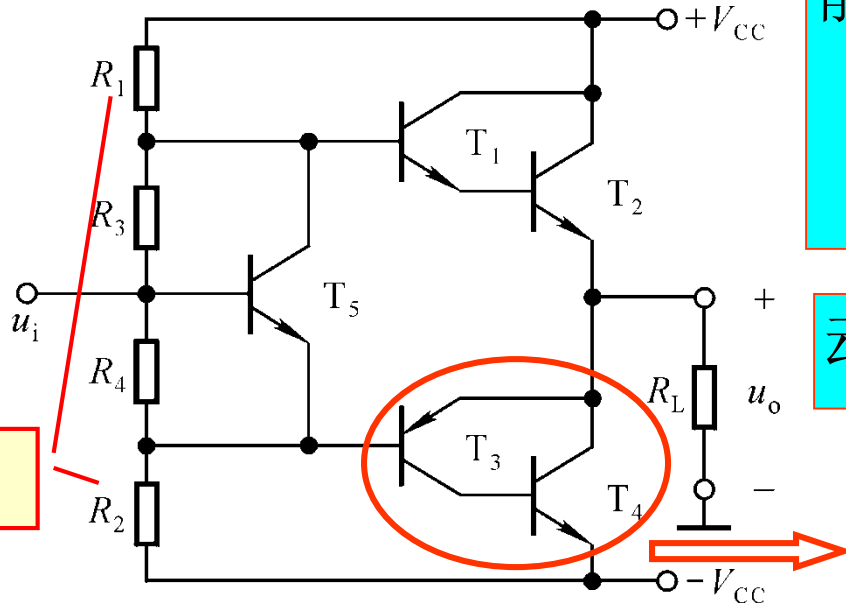
动态: $u_{b1} \approx u_{b2} \approx u_{i1}$





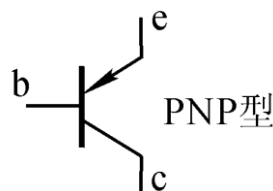
四、准互补输出级

■ 为保持输出管的良好对称性，输出管应为同类型晶体管。



静态时: $U_{BE1} + U_{BE2} + U_{EB3}$
 $\approx (1 + \frac{R_3}{R_4}) U_{BE5}$

动态时: $u_{b1} \approx u_{b3} \approx u_i$



→ 如果二极管代替，用几个二极管呢？ 2？ 3？ 4？





典型例题

例 对于图示具有 V_{BE} 倍增器的互补电路，若要求 T_1 和 T_2 管开启 $V_{BE1}=V_{BE2}=0.6V$ ，电源电压 $V_{CC}=15V$ ，电流源 $I_o=1mA$ ， T_1 和 T_2 管的 $\beta=100$ 。设置 $I_R=0.2mA$ 和 $I_{C3}=0.8mA$ 。设计 V_{BE} 倍增器。

解： T_3 管在 $I_{C3}=0.8mA$ 时的导通 $V_{BE3}=0.7V$ ，

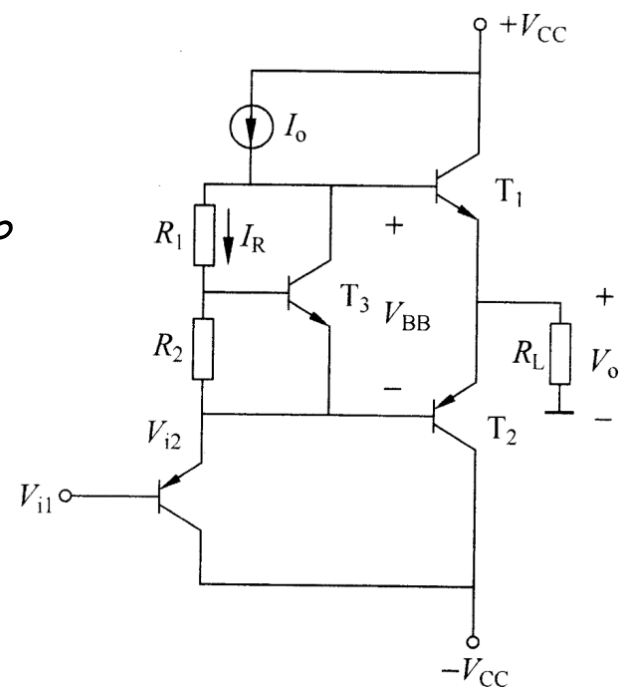
所以 $V_{BE3} \approx I_R R_2$ 由解，求得： $R_2 \approx V_{BE3}/I_R = 3.5k\Omega$ 。

再由公式

$$V_{BB} \approx \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot V_{BE3}$$

求得 R_1

$$R_1 = \left(\frac{V_{BB}}{V_{BE3}} - 1 \right) R_2 = \left(\frac{1.2}{0.7} - 1 \right) \times 3.5 \times 10^3 = 6k\Omega$$





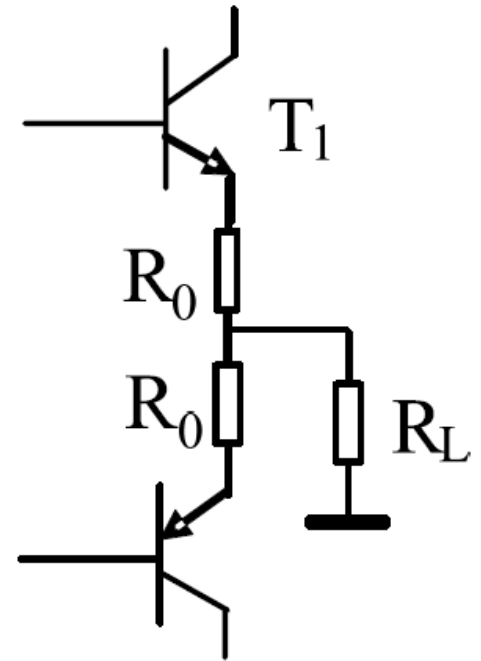
四、互补输出级的过载保护

■ 过载保护电阻

由：

$$U_{BE1} = \frac{1}{2} U_{BB} - I_E R_0$$

- 若短路，使得 $I_{E1} \uparrow$ ， U_{BB} 不变，所以 $U_{BE1} \downarrow$
- 从而导致 $I_{E1} \downarrow$ ，直至 T_1 截止；
- 可见， R_0 起到限制输出电流的作用；





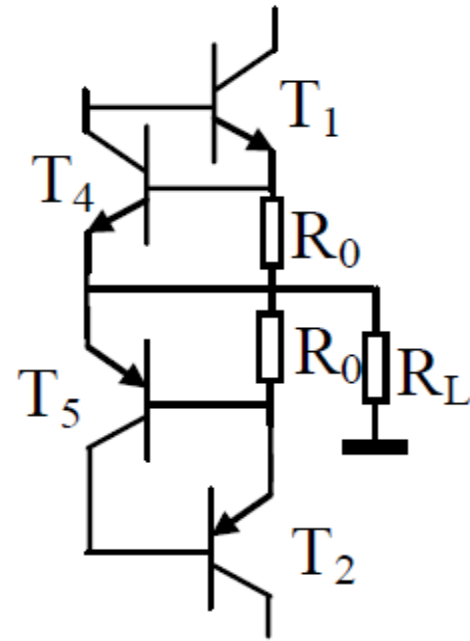
四、互补输出级的过载保护

■ 旁路晶体管

➤ 由电阻 R_0 上压降增大，导致旁路晶体管导通，从而旁路了驱动级向输出级提供的基极电流，使得输出电流下降；

—正常时， $I_{E1}R_0 < U_{BE}$ ， T_4 和 T_5 截止；

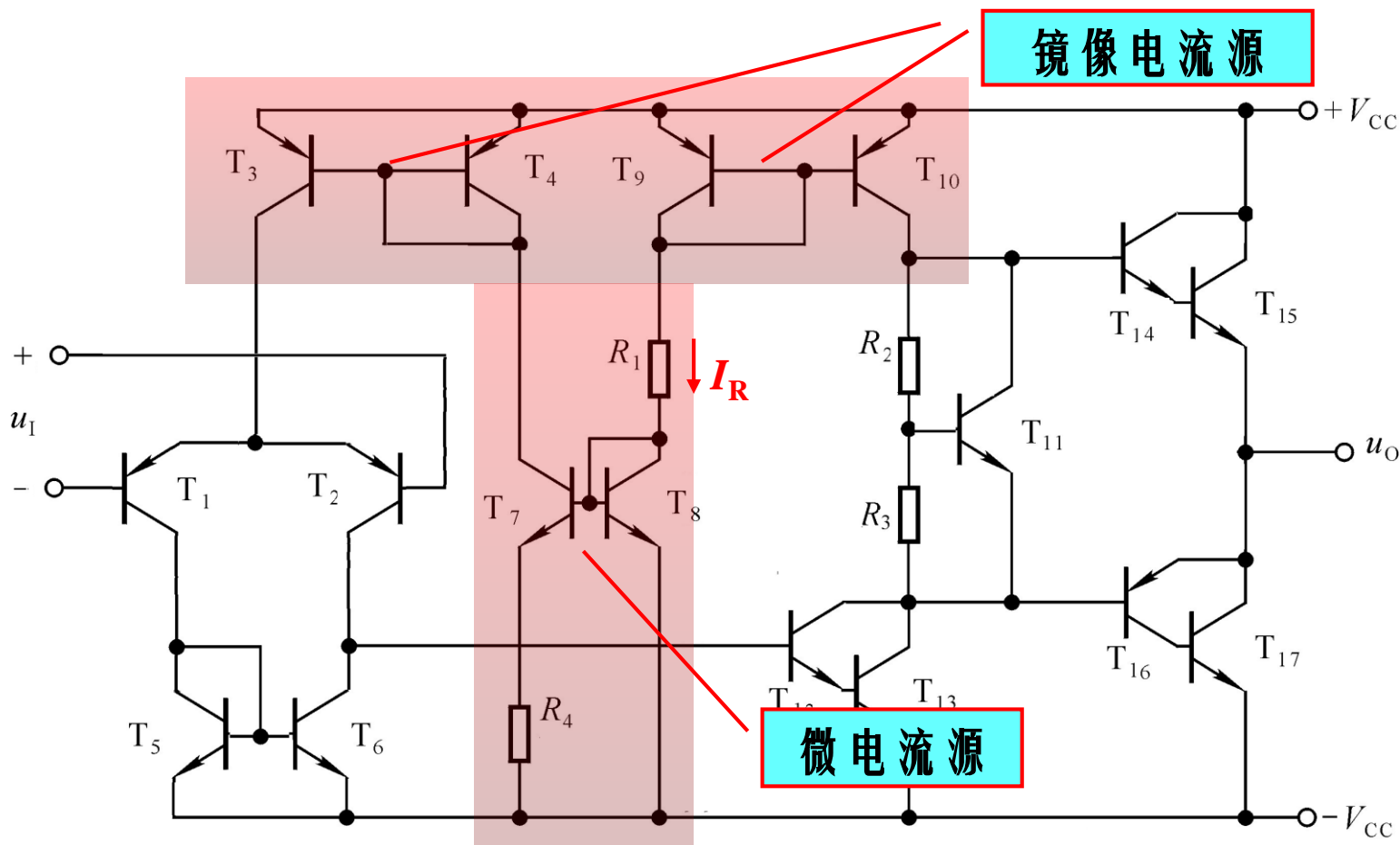
—过载时， T_4 和 T_5 导通，分流一部分过载电流；





5.4 一个完整的原理电路分析

■ 一个完整集成运放4部分：差动输入级+中间放大级+电流源+互补输出级

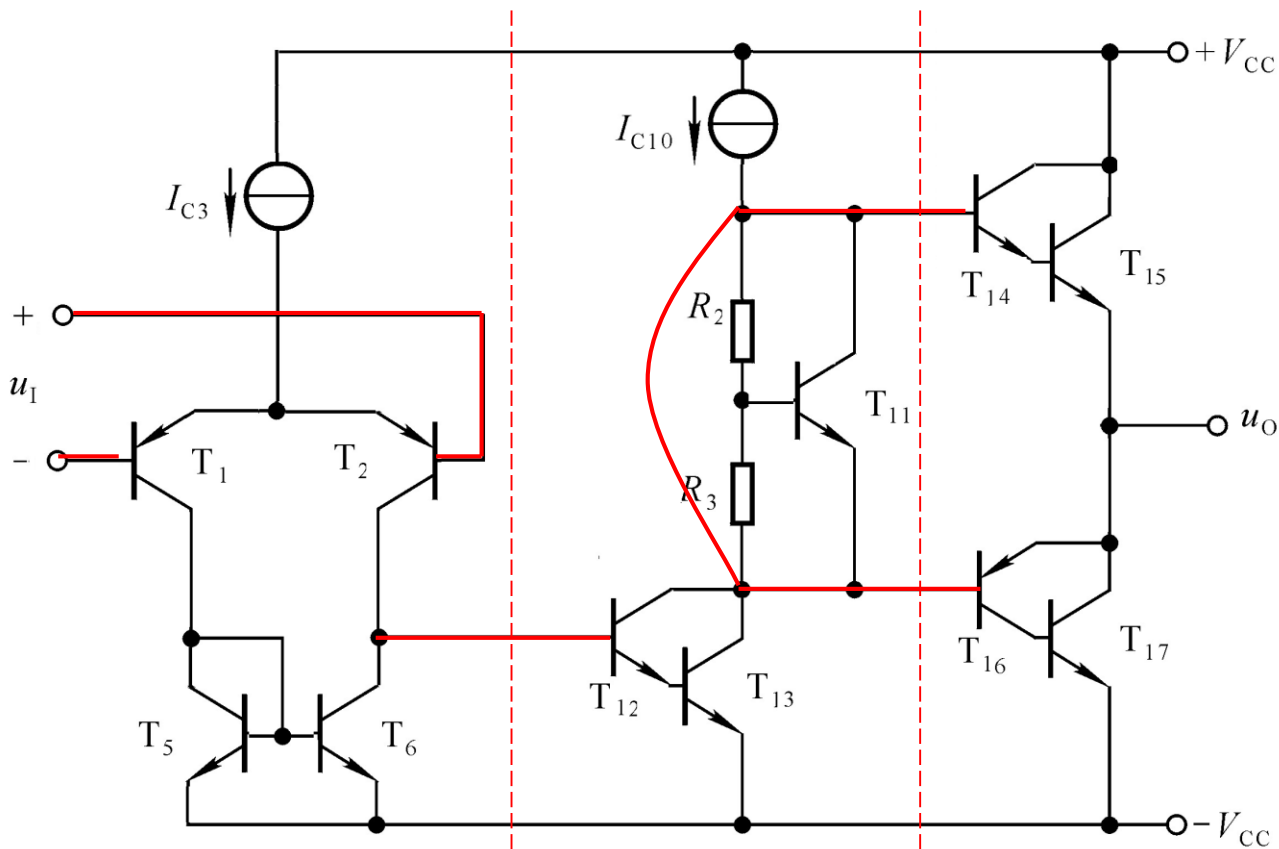


若在集成运放电路中能够估算出某一支路的电流，则这个电流往往是偏置电路中的基准电流—**镜像电流源偏置**。





5.4 一个完整的原理电路分析



双端输入、单端输出
差分放大电路 **输入级**

以复合管为放大管、
恒流源作负载的共射
放大电路 **中间级**

用 U_{BE} 倍增电路消除
交越失真的 **准互补**
输出级





本章小结

■ 差动放大器

- 理解直接耦合式多级放大电路中存在的零点偏移现象；
- 熟悉差动电路的作用以及交流性能指标的定义；
- 理解CMRR的物理意义；
- 熟悉差动放大器的基本结构及其直流分析方法；
- 掌握差动放大器的半电路分析方法；
- 熟悉电流源偏置的差动放大器交直流分析方法；





本章小结

■ 电流源电路

- 熟悉电流源电路的基本特点和作用；
- 掌握基本镜像电流源、微电流源、比例电流源以及多路输出电流源的基本结构、工作原理和静态输出电流；

■ 互补输出级

- 了解互补输出电路的特点；
- 熟悉电压倍增器电路的工作原理；

