



第三章 集成运算放大电路

郭圆月

2024年10月14日





本章主要内容

§3.1 多级放大电路的一般问题

§ 3.2 集成运算放大电路概述

§ 3.3 输入级差动放大器

§ 3.4 集成运放中的电流源

§ 3.5 互补输出级

§ 3.6 集成运放的电路分析及其性能指标





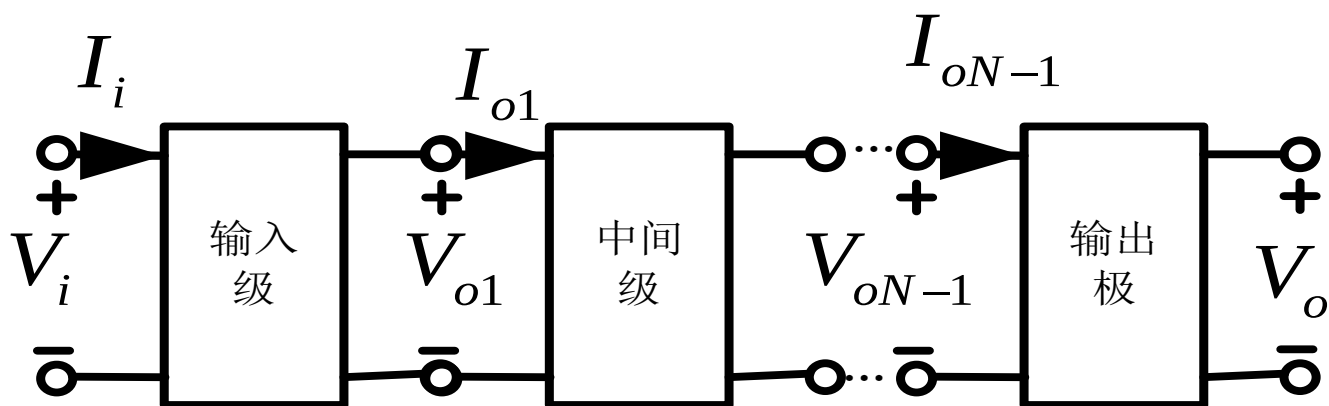
§ 3.1 多级放大电路一般问题

1. 多级放大电路
2. 级间耦合方式
3. 多级放大器的中频增益和阻抗





1. 多级放大器分析



■ **输入级：**完成放大器与信号源的**阻抗匹配**；

➤ 电压信号源→较高的 R_i ； 电流信号源→较低 R_i ；

■ **输出级：**带负载能力强，一定的电压、电流的输出幅度；

➤ 电压输出→较低的 R_o ； 电流输出→较高的 R_o ；

■ **中间级：**实现电压增益、信号处理、频率补偿等功能。





2. 多级放大电路的耦合方式

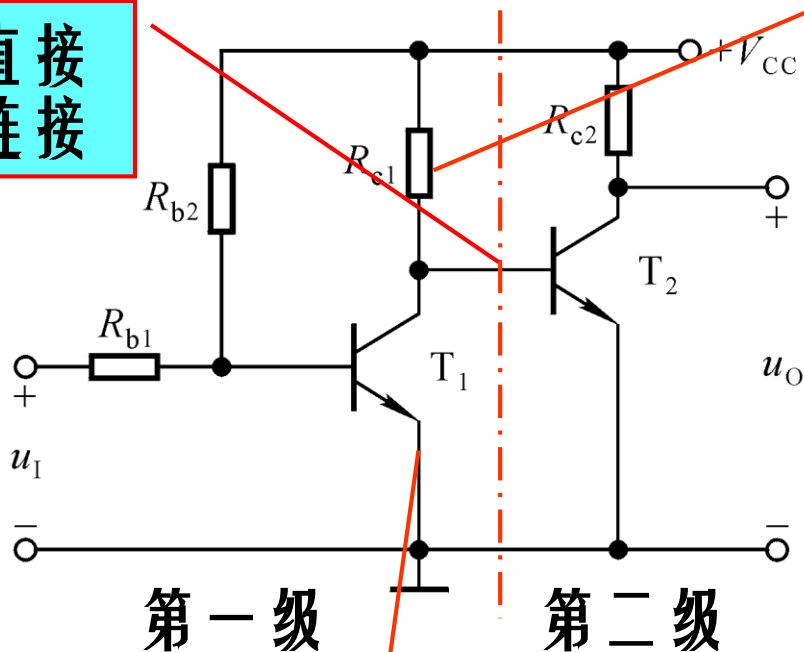
- 一. 直接耦合
- 二. 电容耦合
- 三. 变压器耦合





一、直接耦合

直接
连接



Q_1 合适吗?

当输入信号为零时，前级由温度变化所引起的电流、电位的变化会逐级放大。

求解Q点时应按各回路列多元一次方程，然后解方程组。

既是第一级的集电极电阻，
又是第二级的基极电阻

低频特性好：能够放大变化缓慢的信号，便于集成化，Q点相互影响，存在零点漂移现象。

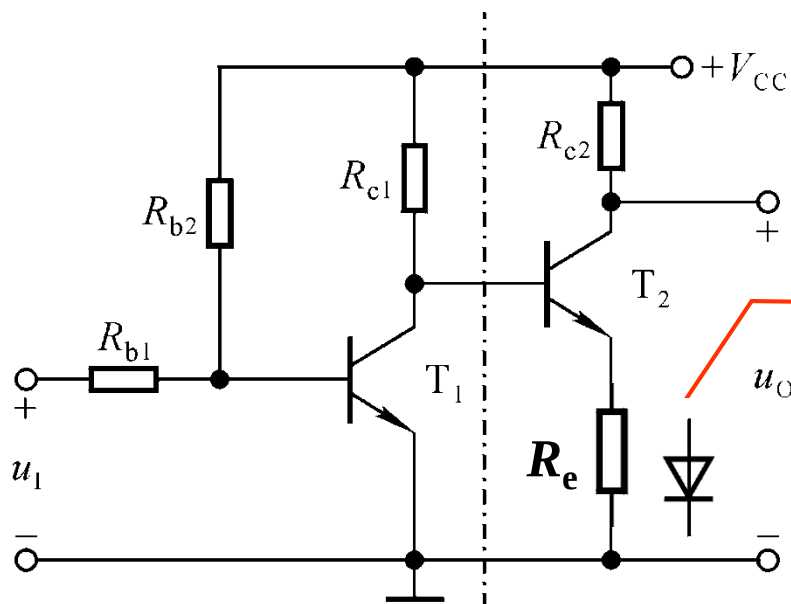
输入为零，输出产生变化的现象称为零点漂移





一、直接耦合

■ 如何设置合适的静态工作点？



对哪些动态参数
产生影响？

用什么元件取代 R_e 既可设置合适的Q点，又可使第二级放大倍数不至于下降太多？

二极管导通电压 $U_D \approx ?$ 动态电阻 r_d 特点？

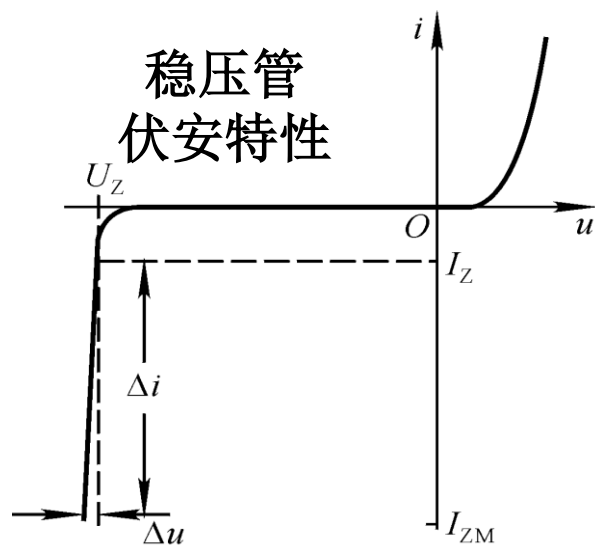
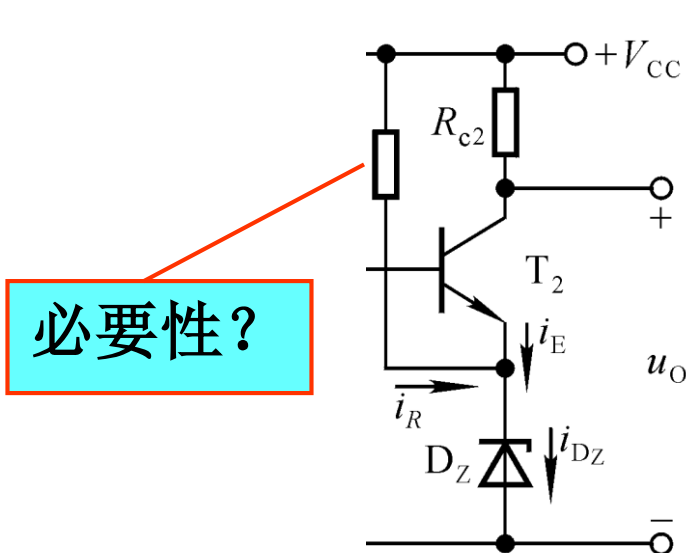
若要 $U_{CEQ} = 5V$ ，则应怎么办？用多个二极管吗？





一、直接耦合

■ 如何设置合适的静态工作点？



若要 $U_{CEQ} = 5V$ ，则应怎么办？用多个二极管吗？

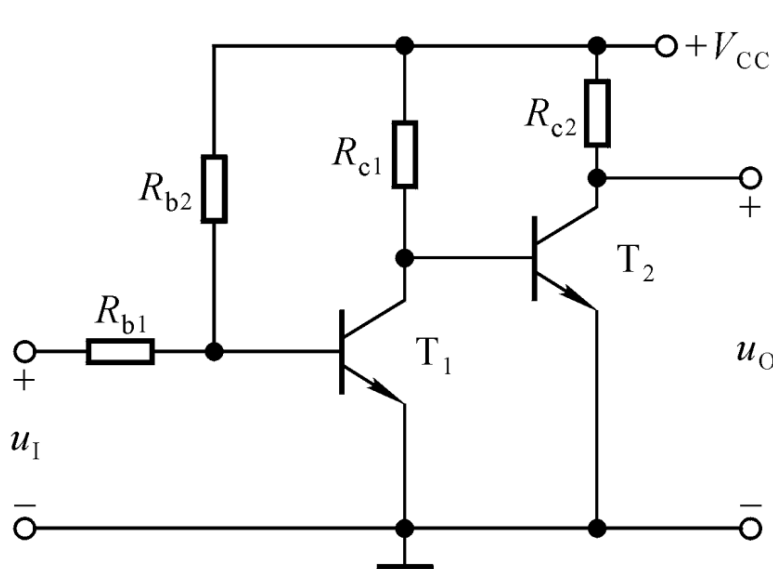
U_{CEQ1} 太小 $\rightarrow$ 加 R_e (A_{u2} 数值 $\downarrow$) $\rightarrow$ 改用 D $\rightarrow$ 若要 U_{CEQ1} 大，则改用 D_Z 。



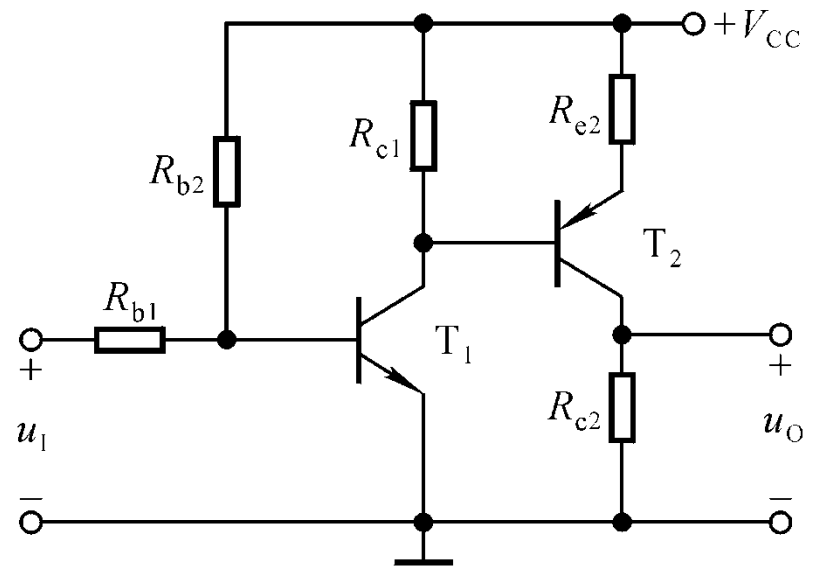


一、直接耦合

■ NPN型管和PNP型管混合使用



$$U_{CQ1} (U_{BQ2}) > U_{BQ1}, U_{CQ2} > U_{CQ1}$$



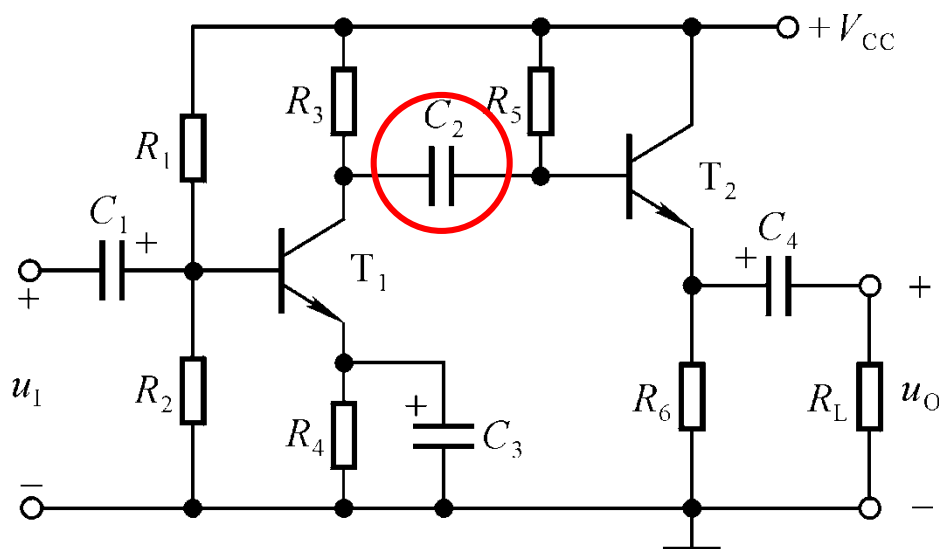
$$U_{CQ1} (U_{BQ2}) > U_{BQ1}, U_{CQ2} < U_{CQ1}$$

在用NPN型管组成 N 级共射放大电路，由于 $U_{CQi} > U_{BQi}$ ，所以 $U_{CQi} > U_{CQ(i-1)}$ ，以致于后级集电极电位接近电源电压， Q 点不合适。





二、阻容耦合



共射电路

共集电路

利用电容连接信号源
与放大电路、放大电路
的前后级、放大电路与
负载，为阻容耦合。

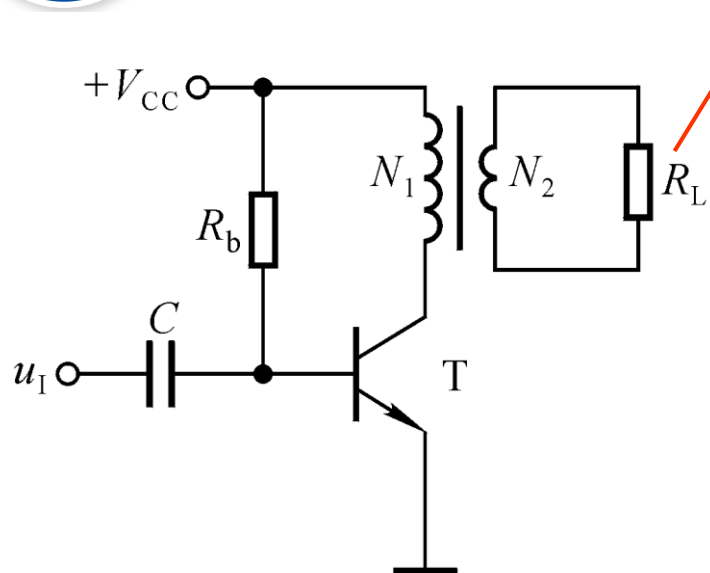
有零点漂移吗？

隔离直流，Q点相互独立。不能放大变化缓慢的信号，低频特性差，不能集成化。



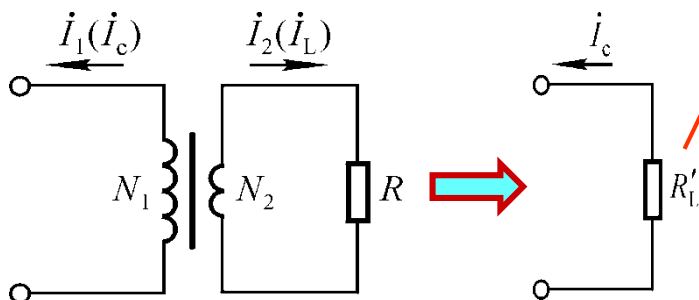


三、变压器耦合



静态时，集电极电阻 R_C 为零，减小了直流损耗；
交流时，阻抗变换增大了管子的动态范围；

可能是实际的负载，也可能是下级放大电路，各级Q点可以独立设置。



从变压器原边看到的等效电阻

$$P_1 = P_2, I_c^2 R'_L = I_l^2 R_L$$

$$R'_L = \frac{I_l^2}{I_c^2} \cdot R_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot R_L$$

实现了阻抗变换功能

缺点：高频性能电感性阻抗，工艺复杂重量等不宜集成；



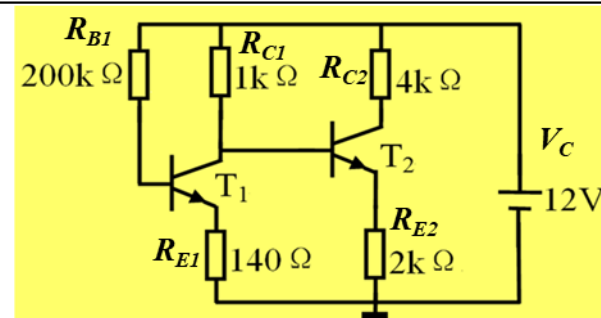


典型题解-多级放大电路静态估算

例：电路如图所示，已知三极管的 $\beta = 100$

$V_{BE} = 0.7V$ ，饱和时 $V_{BC} = 0.4V$

求静态工作时， T_1 、 T_2 管的 I_{C1} I_{C2} V_{CE1} V_{CE2}



解：假设BJT均工作于线性区， $\beta=100 \gg 1$ ，一般忽略二级 I_B 的影响，则：

$$I_{B1} = \frac{V_{CC} - V_{BE1}}{R_{B1} + (1 + \beta)R_{E1}} = \frac{12 - 0.7}{200 + 0.14 \times 101} = 0.053mA$$

$$I_{E1} \approx I_{C1} = \beta I_{B1} = 5.3mA$$

$$V_{CE1} \approx V_{CC} - I_{C1} \cdot R_{C1} - I_{E1} \cdot R_{E1} = 5.96(V)$$

$$V_{C1} \approx V_{CC} - I_{C1} \cdot R_{C1} = 12 - 5.3 = 6.7(V)$$

$$I_{C2} \approx I_{E2} = \frac{V_{C1} - V_{BE2}}{R_{E2}} = \frac{6.7 - 0.7}{2} = 3mA$$

$$V_{CE2} = V_{CC} - I_{C2} \cdot R_{C2} - I_{E2} \cdot R_{E2} = -6(V)$$

所以 T_1 工作于线性区， T_2 工作于饱和区，此时基极电流 I_{B2} 一般不能忽略其影响。

$$V_{B2} = V_{CC} - (I_{C1} + I_{B2}) \cdot R_{C1} = 6.7 - I_{B2}$$

$$I_{E2} = \frac{V_{B2} - V_{BE2}}{R_{E2}} = \frac{6 - I_{B2}}{2} (mA) \quad I_{C2} = \frac{V_{CC} - V_{B2} - V_{CB}}{R_{C2}} = \frac{5.7 + I_{B2}}{4} (mA)$$

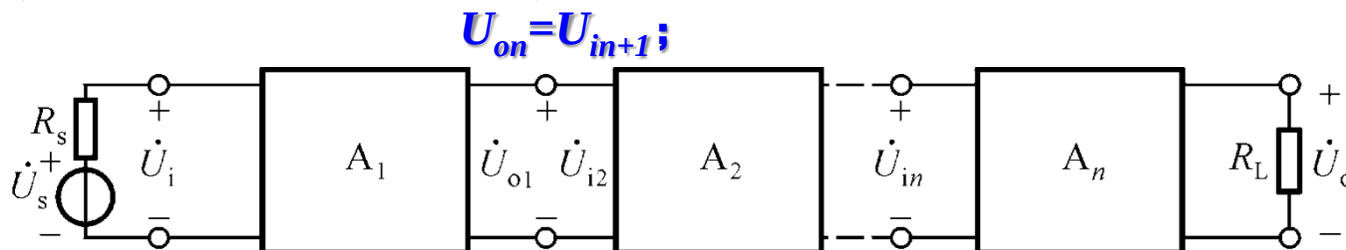
$$\text{而 } I_{B2} + I_{C2} = I_{E2}, \text{ 得到 } I_{B2} = 0.9(mA) \quad I_{C2} = \frac{5.7 + 0.9}{4} = 1.65(mA) \quad I_{E2} = \frac{6 - 0.9}{2} = 2.55(mA)$$

$$I_{C1} = 5.3mA, \quad V_{CE1} = V_{CC} - (I_{C1} + I_{B2}) \cdot R_{C1} - I_{E1} \cdot R_{E1} = 5(V) \quad V_{CE2} = V_{CC} - I_{C2} \cdot R_{C2} - I_{E2} \cdot R_{E2} = 0.3(V)$$



3. 多级放大器的中频增益和阻抗

1. 中频电压增益（考虑负载效应）



$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_{o2}}{\dot{U}_{i2}} \cdots \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{in}} = \prod_{j=1}^n \dot{A}_{uj}$$

$$A_{us} = A_u \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

2. 输入电阻

$$R_i = R_{i1}$$

3. 输出电阻

$$R_o = R_{on}$$

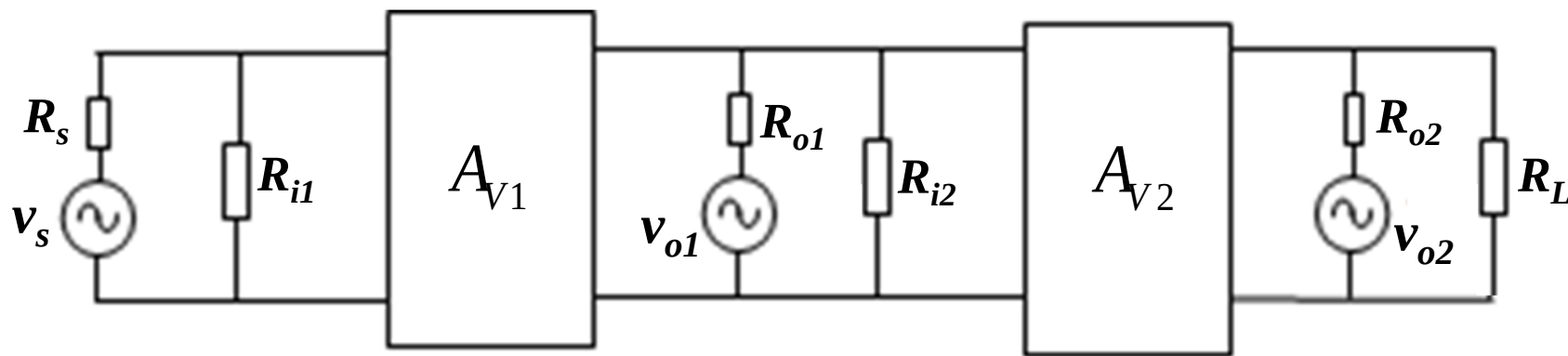
对电压放大电路的要求： R_i 大， R_o 小， A_u 的数值大，最大不失真输出电压大。





3. 级间影响和级间匹配

■ 下一级输入阻抗：前级负载；前级输出阻抗：下一级信号源内阻。



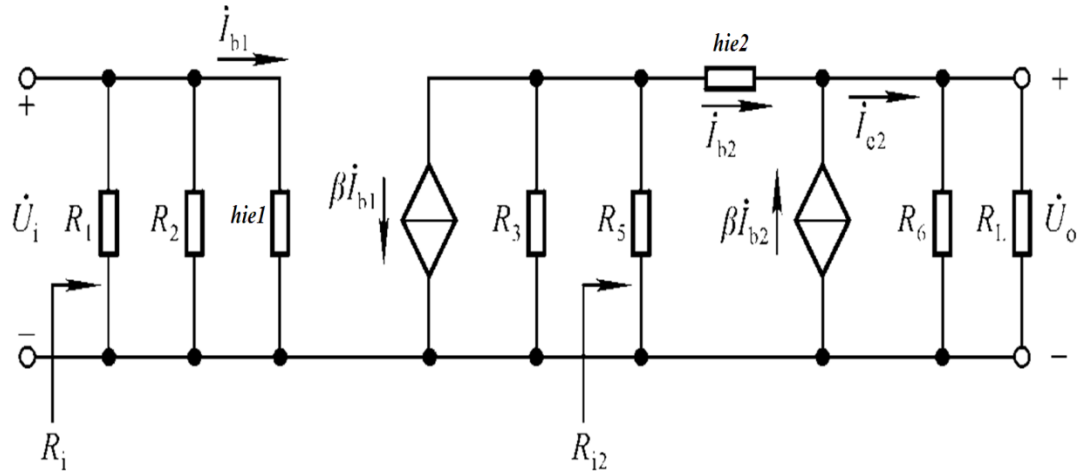
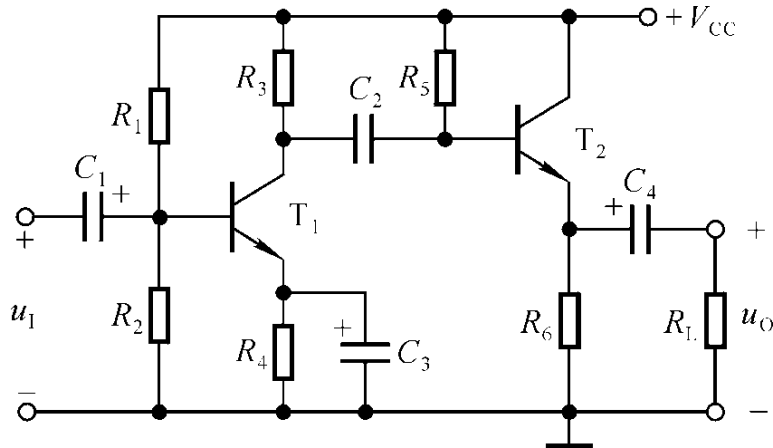
例放大器由两级组成，每级的空载电压增益 $A_v=100$ ， $R_i=5\text{k}\Omega$ ， $R_o=10\text{k}\Omega$ ，整个放大器接的信号源内阻 R_s 为 $1\text{k}\Omega$ ，负载 R_L 为 $10\text{k}\Omega$ ，求总的源电压增益 A_{V_s} 。

$$\rightarrow A_{V_s} = \underbrace{\frac{5}{5+1}}_{\text{阻抗匹配}} \cdot (-100) \cdot \underbrace{\frac{5}{5+10}}_{\text{阻抗匹配}} \cdot (-100) \cdot \underbrace{\frac{10}{10+10}}_{\text{阻抗匹配}}$$





3. 典型分析举例



$$\dot{A}_{u1} = -\frac{\beta(R_3 // R_{i2})}{h_{ie1}}$$

$$\dot{A}_{u2} = \frac{(1+\beta_2)(R_6 // R_L)}{h_{ie2} + (1+\beta_2)(R_6 // R_L)}$$

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2}$$

$$R_{i2} = R_5 // [h_{ie2} + (1+\beta_2)(R_6 // R_L)]$$

$$R_i = R_1 // R_2 // h_{ie1}$$

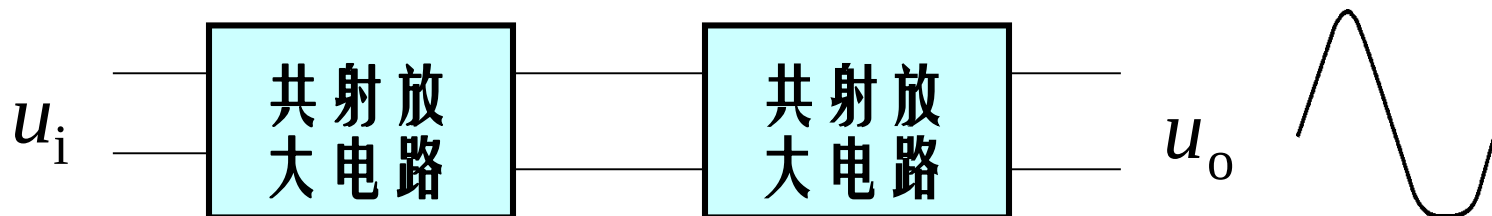
$$R_o = R_6 // \frac{R_3 // R_5 + h_{ie2}}{1+\beta}$$





讨论一

■ 失真分析：由NPN型管组成的两级共射放大电路



饱和失真？截止失真？

首先确定在哪一级出现了失真，再判断是什么失真。

比较 U_{om1} 和 U_{im2} ，则可判断在输入信号逐渐增大时哪一级首先出现失真。

在前级均未出现失真的情况下，多级放大电路的最大不失真电压等于输出级的最大不失真电压。





讨论二：放大电路的选用

1. 按下列要求组成两级放大电路：

① $R_i = 1 \sim 2\text{k}\Omega$, A_u 的数值 ≥ 3000 ;

② $R_i \geq 10\text{M}\Omega$, A_u 的数值 ≥ 300 ;

③ $R_i = 100 \sim 200\text{k}\Omega$, A_u 的数值 ≥ 150 ;

④ $R_i \geq 10\text{M}\Omega$, A_u 的数值 ≥ 10 , $R_o \leq 100\Omega$ 。

注意级联时两级的相互影响！

①共射、共射；②共源、共射；

③共集、共射；④共源、共集。





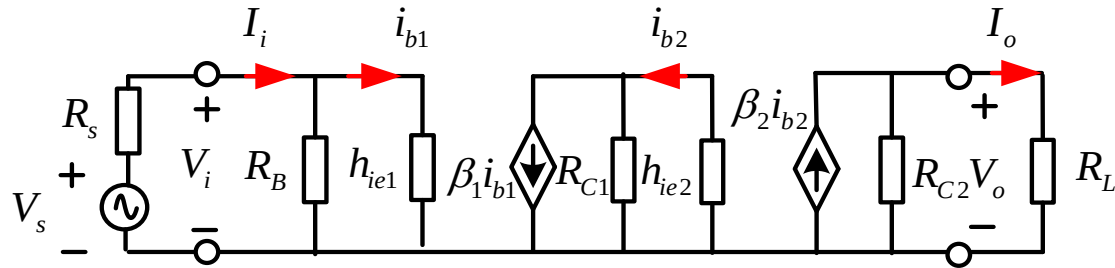
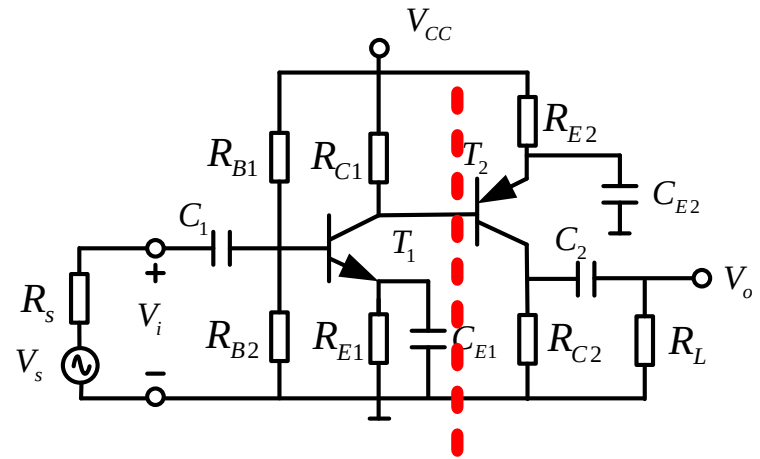
例. 多级放大器中频分析

■ 例: 已知两管参数 β_1, h_{ie1} , β_2, h_{ie2} , 求中频电压增益及输入阻抗、输出阻抗

$$A_{V1} = -\frac{\beta_1 (R_{C1} \parallel R_{i2})}{h_{ie1}}$$

$$A_{V2} = -\frac{\beta_2 (R_{C2} \parallel R_L)}{h_{ie2}}$$

$$R_{i2} = h_{ie2}$$



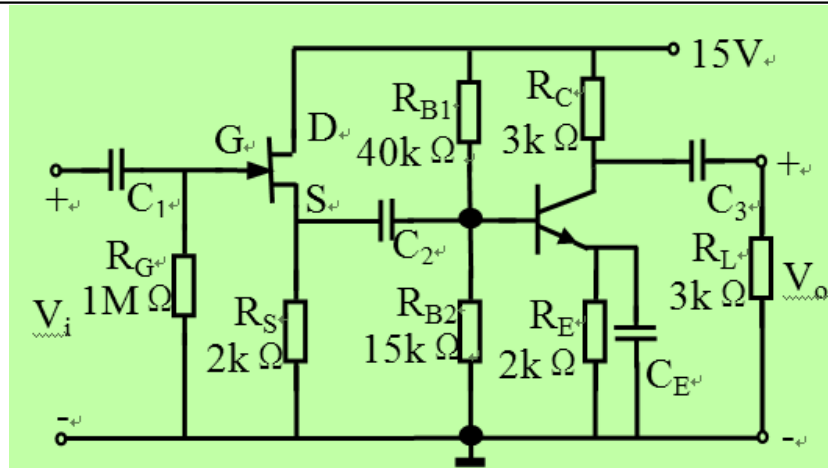
$$\Rightarrow A_V = A_{V1} A_{V2} = \frac{\beta_1 (R_{C1} \parallel h_{ie2})}{h_{ie1}} \frac{\beta_2 (R_{C2} \parallel R_L)}{h_{ie2}} \Rightarrow \begin{cases} R_i = R_{i1} = h_{ie1} \parallel R_B \\ R_o = R_{o2} = R_{C2} \end{cases}$$





典型题解1 多级场效应管放大电路

例 如图所示电路为JFET和BJT混合放大电路，已知场效应管的 $g_m=4mS$ ， $r_{ds}=\infty$ ，晶体管的 $\beta=50$ ， $r_b=220\Omega$ ， $V_{BE}=0.7V$ ， $r'_c=\infty$ 。所有电容均可视为交流短路。



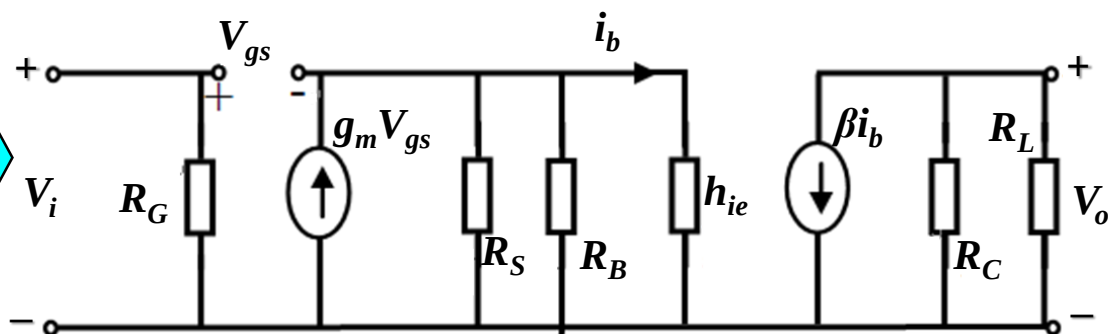
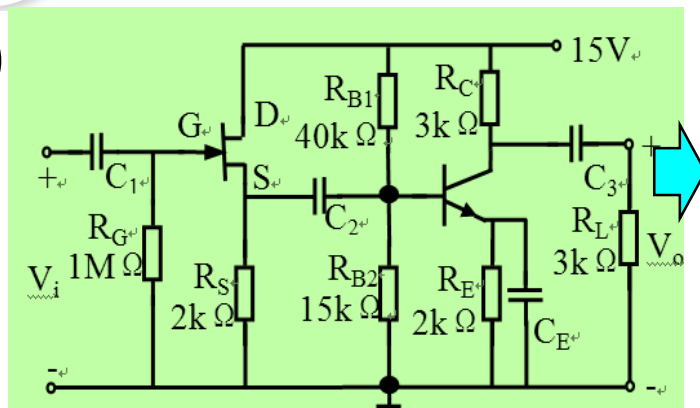
1. 画出该电路的交流小信号等效电路；
2. 计算中频电压增益 $A_V = \frac{V_o}{V_i}$ ；
3. 求电路的输入阻抗和输出阻抗。





典型题解1 多级场效应管放大电路

(1)



两级静态分析：阻容耦合，独立静态工作点；

一级FET放大电路，给出 g_m ，隐含其处于饱和区，无需静态分析！

二级BJT放大电路需静态分析：分压式直流偏置

$$V_E = V_B - 0.7 = 15 \cdot \frac{15}{15 + 40} - 0.7 = 4.1 - 0.7 = 3.4(\text{V})$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{3.4}{2} = 1.7(\text{mA})$$

$$V_{CE} \approx 15 - I_E (R_C + R_E) = 6.6\text{V} \xrightarrow{\text{放大区}} r_{be} = r_b + (1 + \beta) r_e = 0.22 + 51 \times \frac{26}{1.7} = 1(\text{k}\Omega)$$

$$(2) \quad A_V = \frac{V_o}{V_i} = A_{V1} * A_{V2} = \frac{g_m (R_S \parallel R_B \parallel r_{be})}{1 + g_m (R_S \parallel R_B \parallel r_{be})} \times \frac{-\beta (R_C \parallel R_L)}{r_{be}} = -53.66$$

$$(3) \quad R_i = R_G = 1\text{M}\Omega \quad R_o = R_C = 3\text{k}\Omega$$





典型题解2 多级放大电路

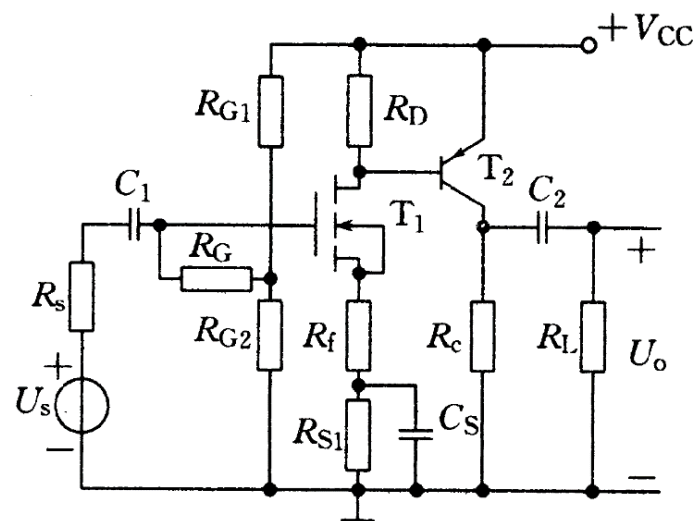
例 场效应管和 BJT 晶体管构成的两级放大电路。

已知 T_1 $g_m = 0.6 \text{ mA/V}$, T_2 的 $r_{be} = 1 \text{ k}\Omega$, $\beta = 100$ 。

又知 $R_G = 1 \text{ M}\Omega$, $R_{G1} = R_{G2} = 200 \text{ k}\Omega$, $R_s = 10 \text{ k}\Omega$,

$R_D = 10 \text{ k}\Omega$, $R_f = 1 \text{ k}\Omega$, $R_c = 2 \text{ k}\Omega$, $R_L = 20 \text{ k}\Omega$ 。

1. 画出图电路的微变等效电路图；
2. 计算电路的输入电阻 R_i 与输出电阻 R_o ；
3. 计算电压放大倍数 A_u 、 A_{us} 。

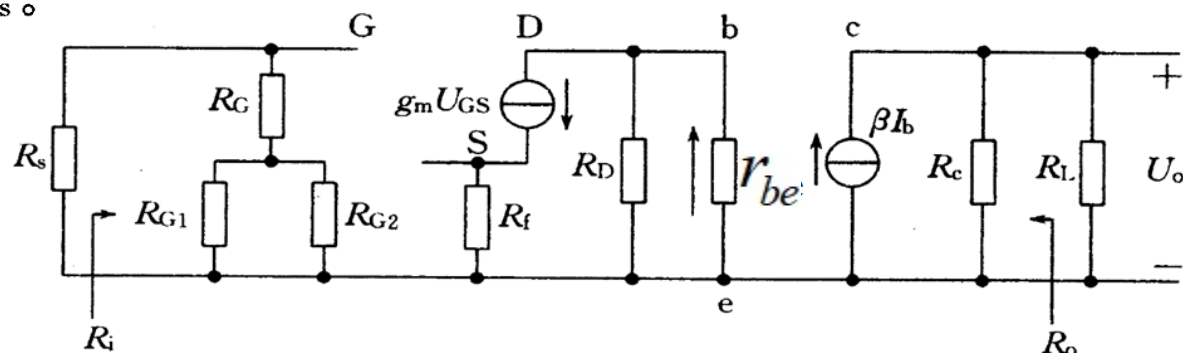


解 1. 画微变等效电路图

两级组态分析：

一级 **CS** + R_s

二级 **CE** **PNP** 型



图中 T_1 管漏极、源极间为电流源 $g_m U_{GS}$, S 经电阻 R_f 接地。
 T_2 管的基极 b 和 T_1 管的漏极 D 相连, c 、 e 间为电流源 βI_b ,
因 T_2 管为 PNP 型, 故电流源方向由 e 流向 c 。



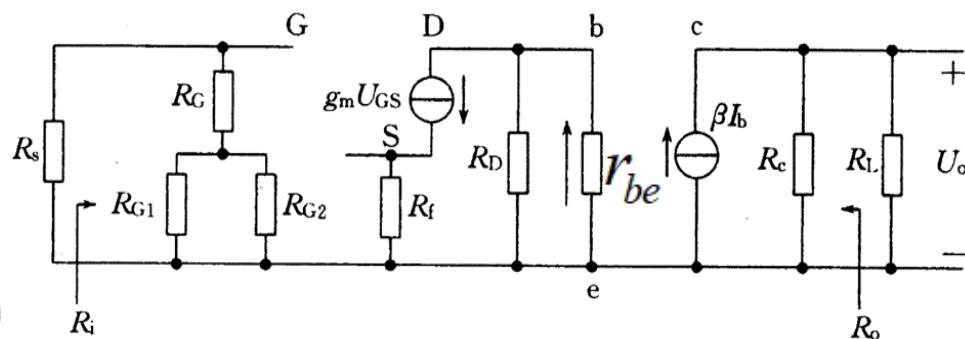


典型题解2 多级混合放大电路

2. 输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o

由微变等效电路,可直接得到 R_i :

$$R_i = R_G + R_{G1} // R_{G2} = 1000 + 200 // 200 = 1.1(\text{M}\Omega)$$



电路的输出电阻 R_o 为 $R_o = R_c = 2\text{k}\Omega$

3. 电压放大倍数 A_u 、 A_{us}

$$\begin{aligned} A_u &= A_{u1} \cdot A_{u2} = \frac{-g_m \cdot R_D // r_{be}}{1 + g_m \cdot R_f} \times \frac{-\beta R_C // R_L}{r_{be}} \\ &= \frac{0.6 \times 10 // 1}{1 + 0.6 \times 1} \times \frac{100 \times 2 // 20}{1} = 620 \end{aligned}$$

考虑信号源内阻 R_s 时的电压放大倍数 A_{us} 为

$$A_{us} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_u = \frac{1100}{1100 + 10} \times 620 = 614$$

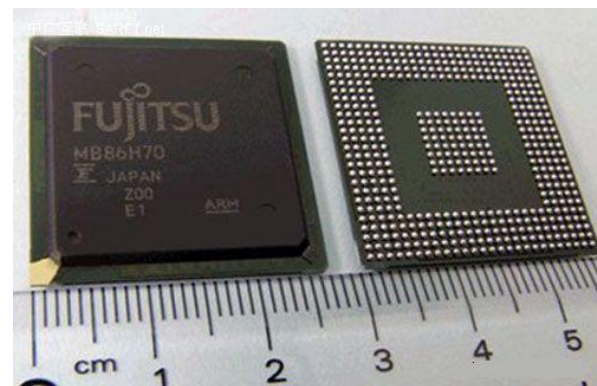




3.2 集成运放的概念

■ 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.





3.2 集成运放的特点

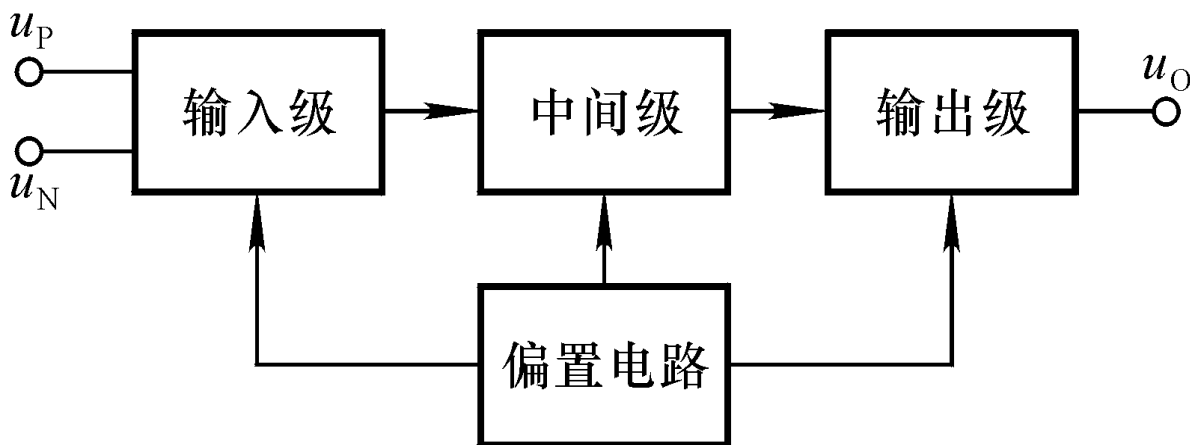
■ 集成运算放大电路：首先用于信号的运算，简称**集成运放**，本质是一个**高性能**的直接耦合多级放大电路。

- (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。





3.2 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**。

要求输入电阻 **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。

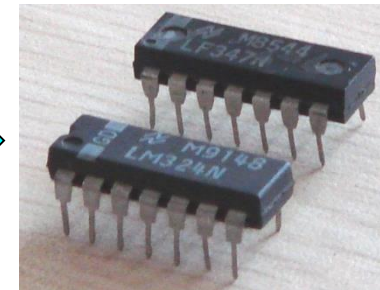
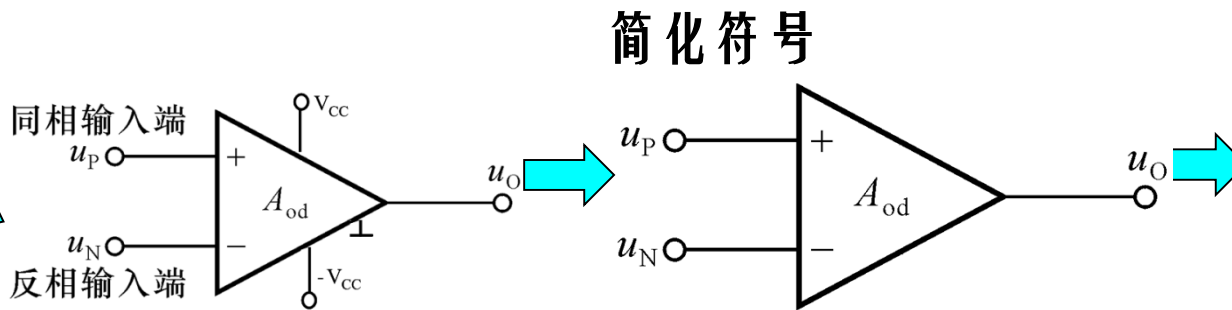
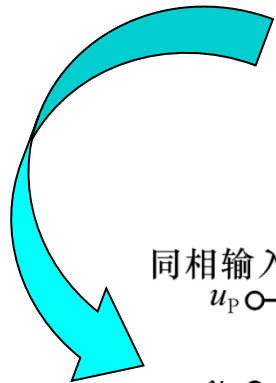
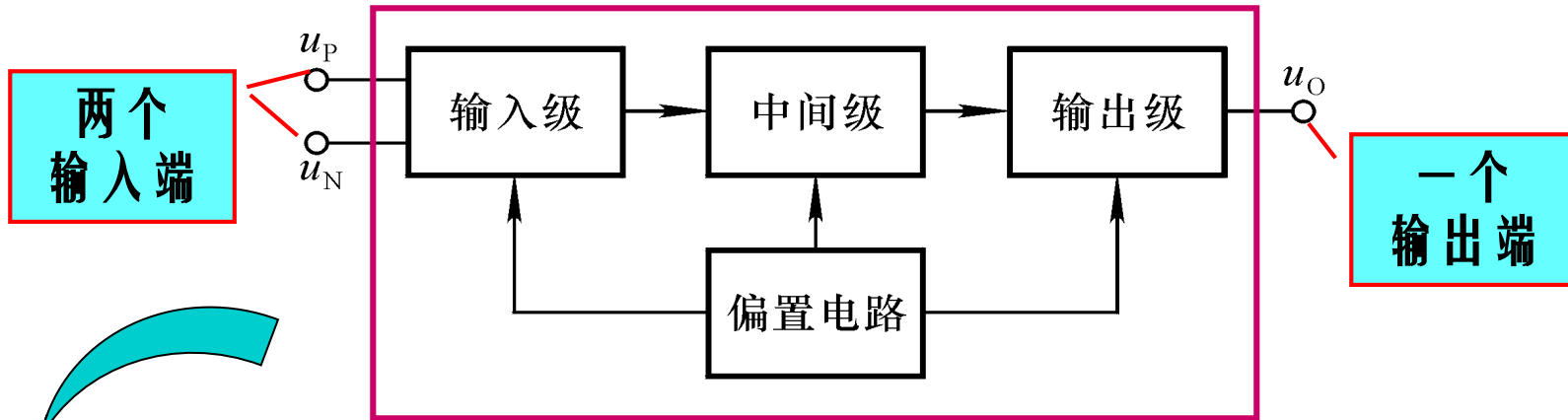
输出级：功率级，多采用**准互补输出级**。要求其输出电阻 **R_o** 小，最大不失真输出电压尽可能大。

偏置电路：各级设置合适的静态工作点，采用**电流源电路**。





3.2 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。

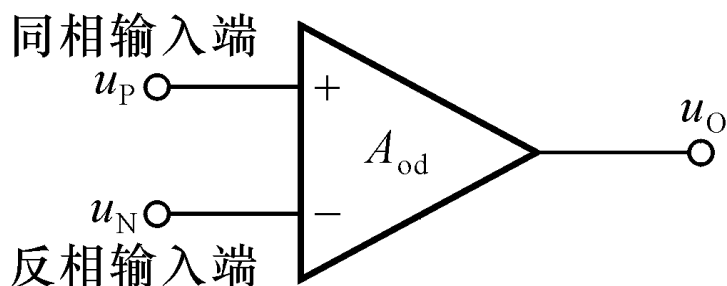




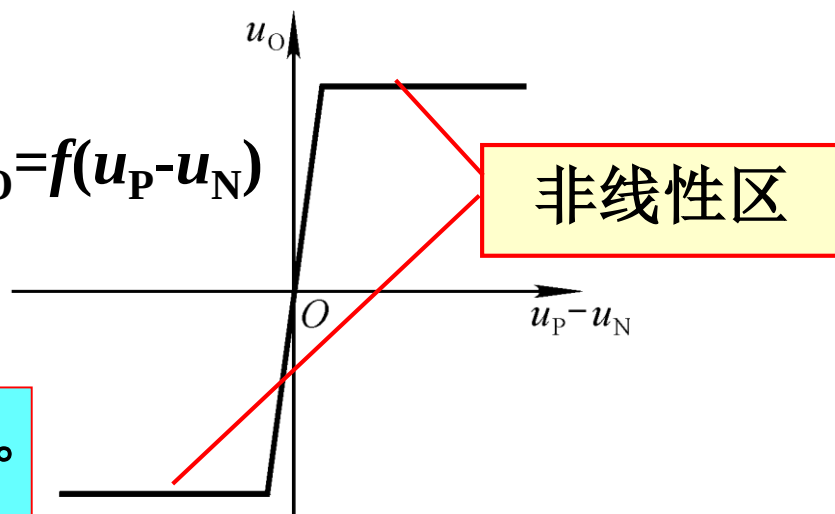
3.2 集成运放的电压传输特性

■ 集成运放有线性区和饱和区两部分

- 由于 A_{od} 高达十万倍，所以集成运放工作在线性区时的最大输入电压 $(u_P - u_N)$ 的数值仅为几十~一百多微伏
- 饱和区工作时，集成运放的输出不是 U_{OM} ，就是 $-U_{OM}$



$$u_O = f(u_P - u_N)$$



在线性区： A_{od} 是开环差模放大倍数。

$$u_O = A_{od}(u_P - u_N)$$





§ 3.3 差动放大电路

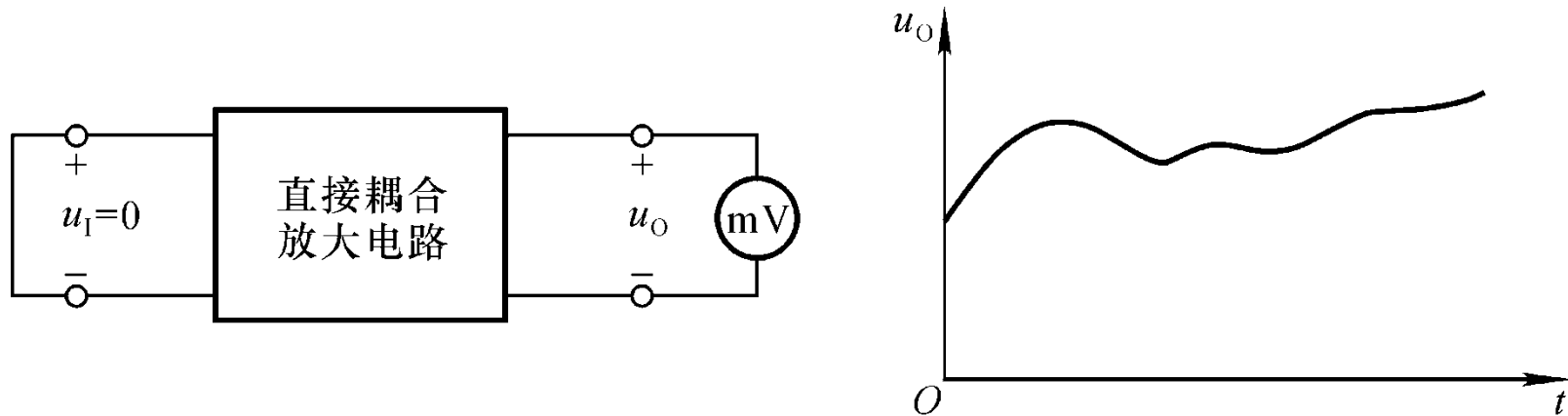
- 一、零点漂移现象及其产生的原因
- 二、长尾式差动放大电路的组成
- 三、长尾式差动放大电路的交流分析
- 四、具有恒流源的差动放大电路





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。

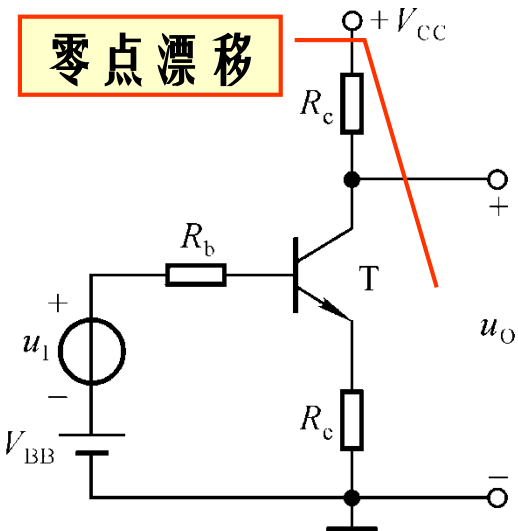
典型电路：差动放大电路



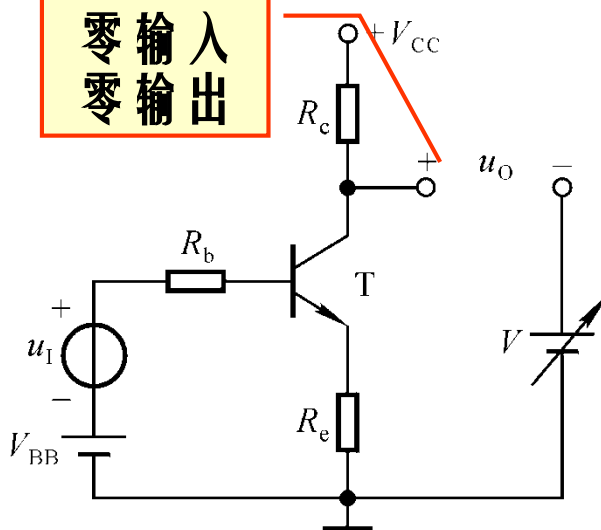


二、长尾式差动放大电路的组成

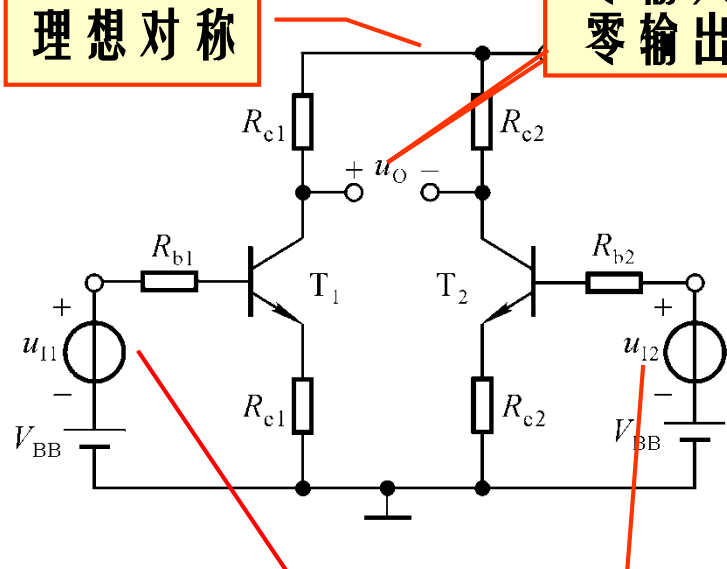
零点漂移



零输入
零输出

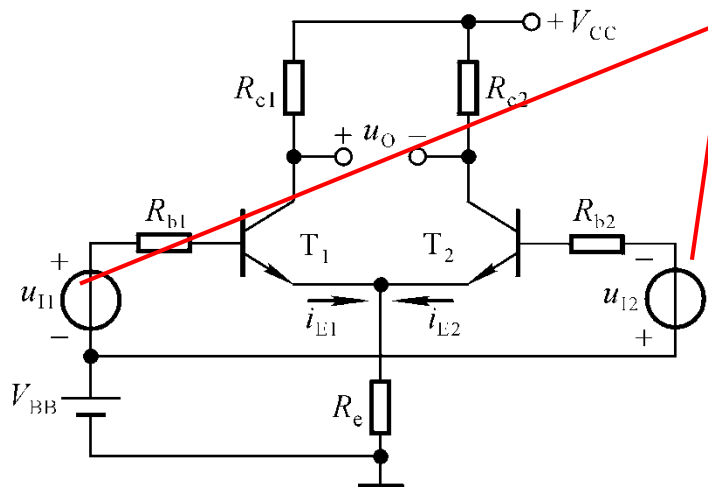


理想对称



零输入
零输出

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。

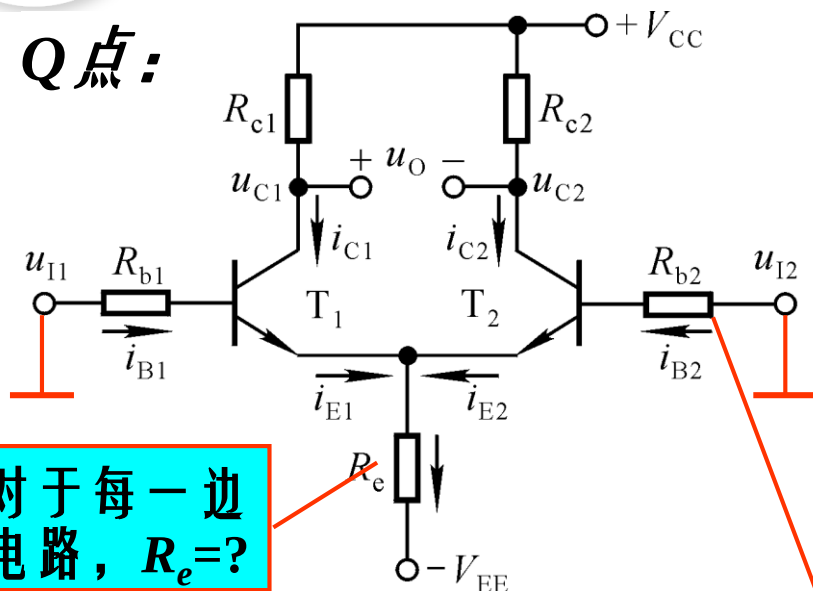
射极耦合差动放大器





1、长尾式差动放大电路静态分析

1. Q点:



对于每一边
电路, $R_e = ?$

R_b 是必要的吗?

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

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

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

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

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

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 $u_{I1} = u_{I2} = u_{Ic}$

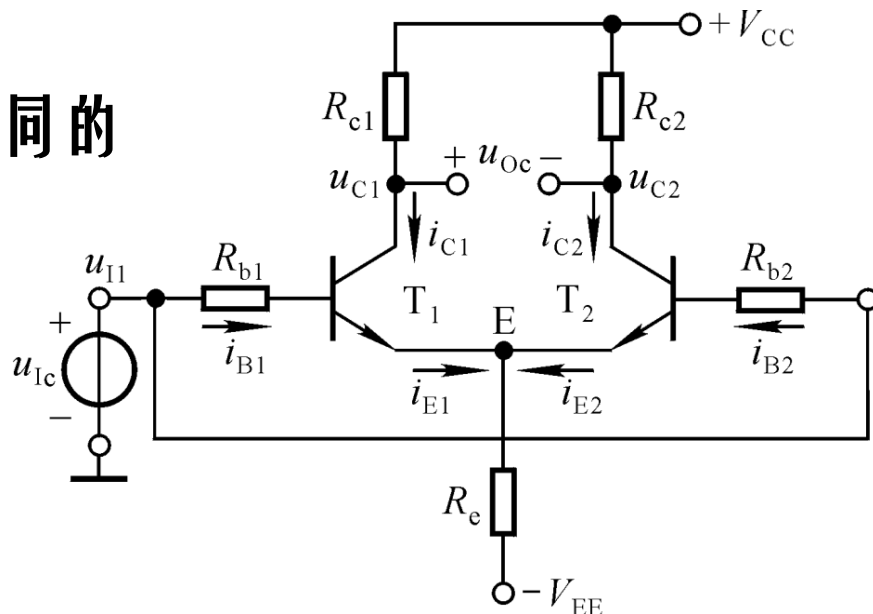
$$\Delta i_{B1} = \Delta i_{B2}$$

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

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

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

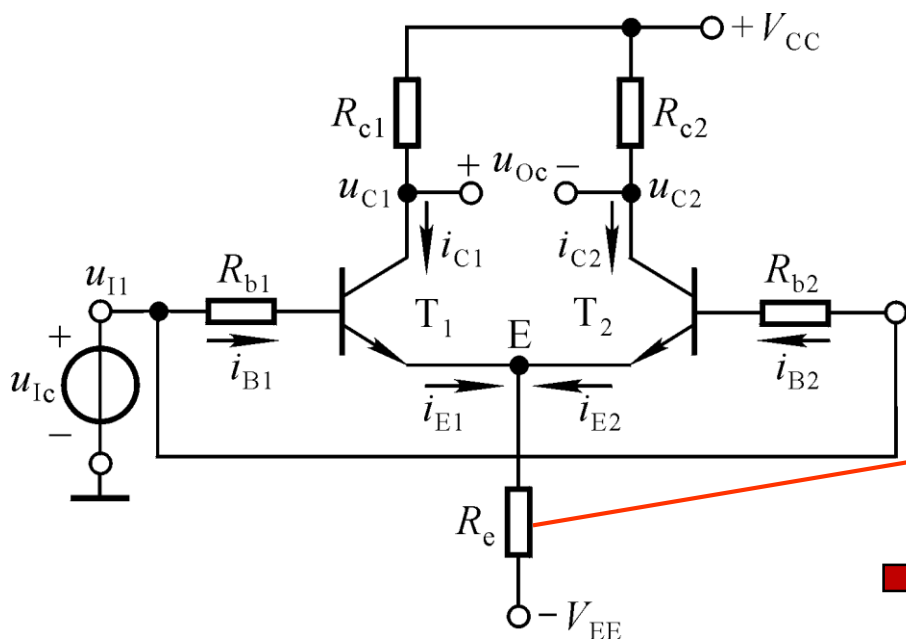
$$\text{共模放大倍数 } A_c = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}}, \text{ 参数理想对称时 } A_c = 0$$





2. 抑制共模信号

2. R_e 的共模负反馈作用



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。

$$u_{I1} = +\frac{u_{Id}}{2}$$

$$u_{I2} = -\frac{u_{Id}}{2}$$

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

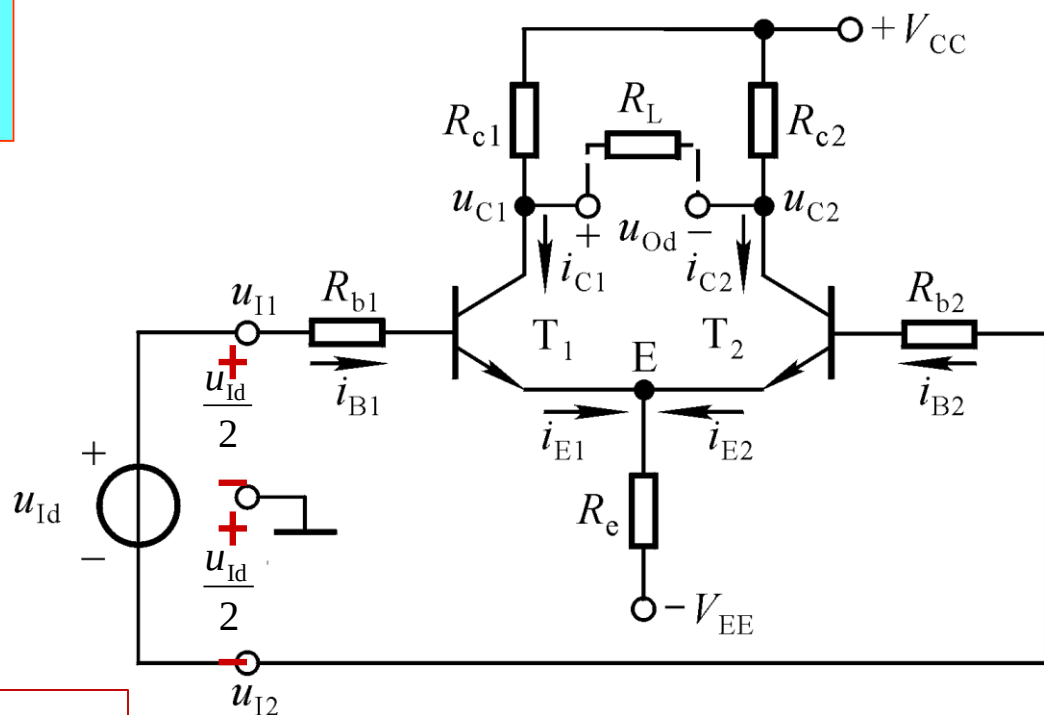
$$\Delta i_{C1} = -\Delta i_{C2}$$

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

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



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。

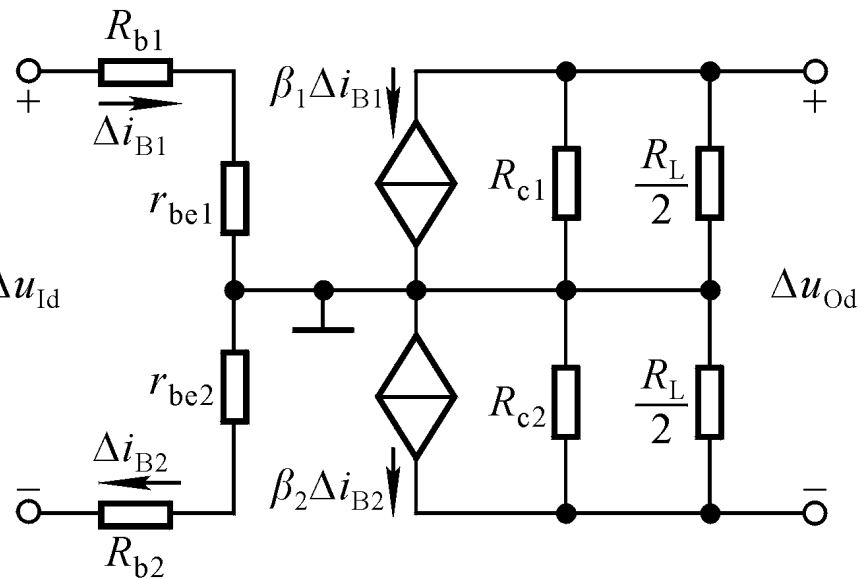
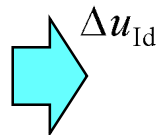
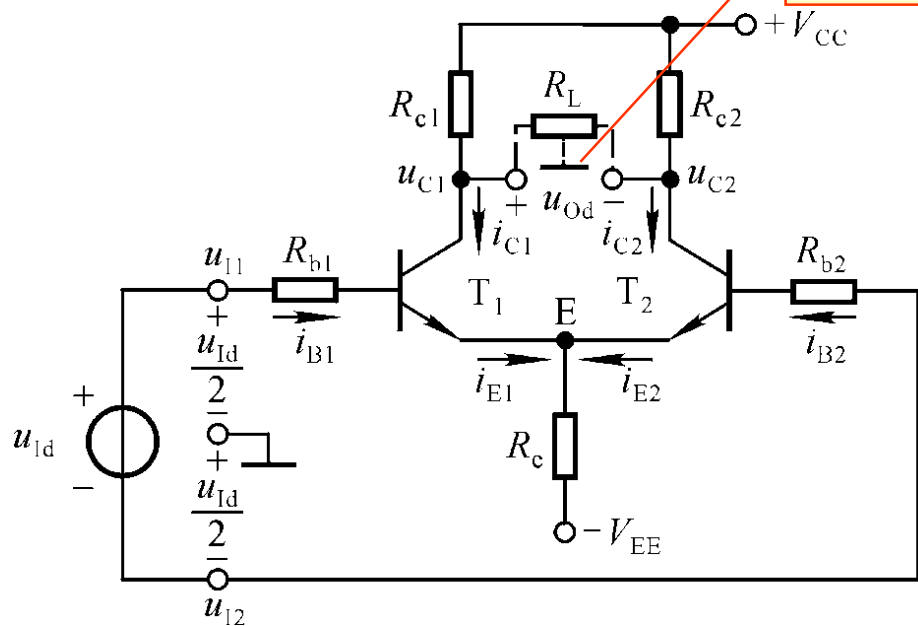




三. 基本型差动放大器的交流分析

■ 典型电路的动态分析-放大差模信号

为什么？



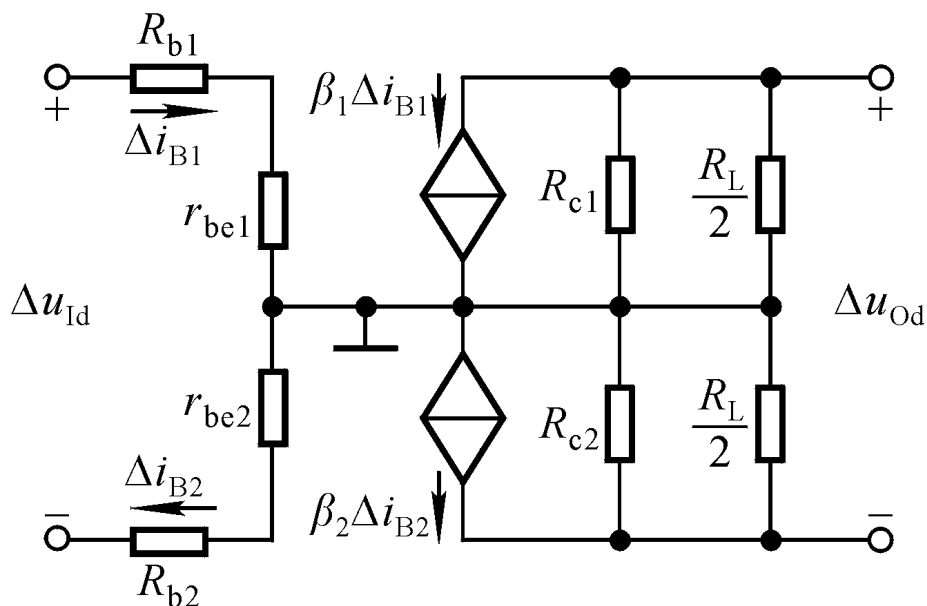
注意：差模时 R_E 取0；





三. 基本型差动放大器的交流分析

■ 典型电路的动态分析-放大差模信号



$$\Delta u_{Id} = \Delta i_B \cdot 2(R_b + r_{be})$$

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

差模增益

$$A_d = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Id}} = -\frac{\beta (R_c // \frac{R_L}{2})}{R_b + r_{be}}$$

$$R_i = 2(R_b + r_{be}), \quad R_o = 2R_c$$

➤ R_L 的处理：双端输出时取 $R_L/2$

■ 共模抑制比 K_{CMR}

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

在参数理想对称的情况下, $K_{CMR} = \infty$





三.基本型差动放大器的交流分析

■ 典型电路的动态分析-四种接法

- 双端输入双端输出
- 双端输入单端输出
- 单端输入双端输出
- 单端输入单端输出

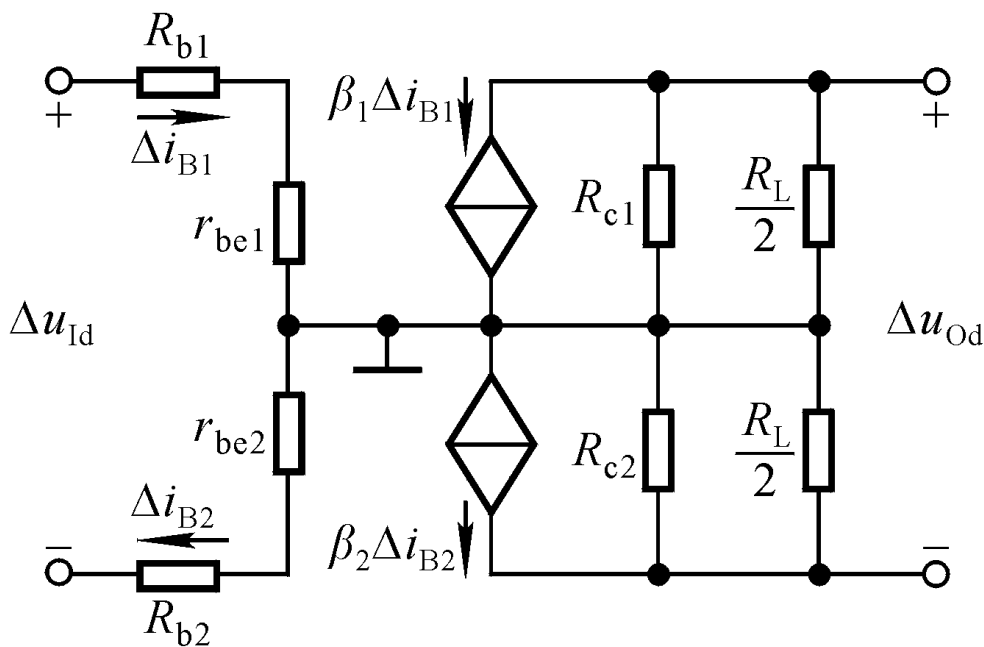




三.基本型差动放大器的交流分析

■ 典型电路的动态分析-四种接法

➤ 双端输入双端输出



共模增益

$$A_c = 0$$

差模增益

$$A_d = -\frac{\beta (R_c // \frac{R_L}{2})}{R_b + r_{be}}$$

$$R_i = 2(R_b + r_{be}), \quad R_o = 2R_c$$

$$K_{CMR} = \infty$$

➤ R_L 的处理：双端输出时取 $R_L/2$





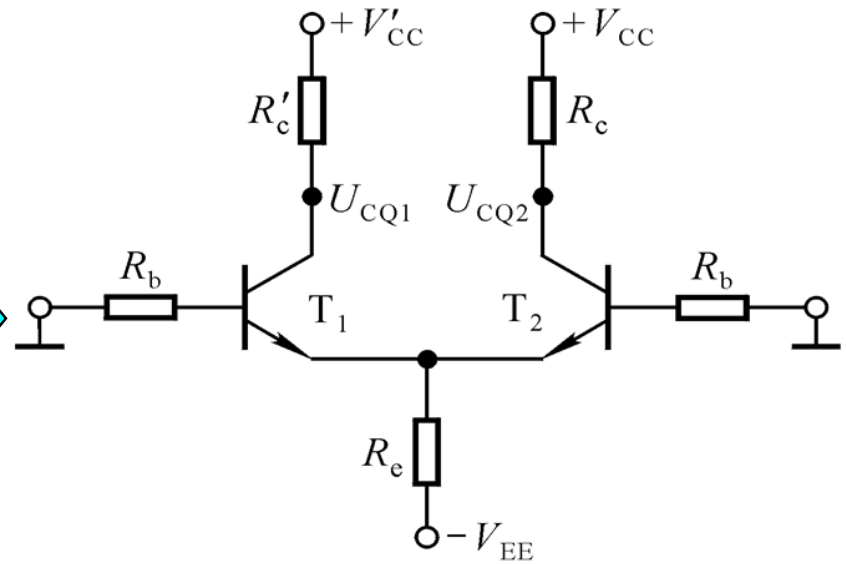
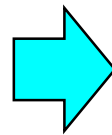
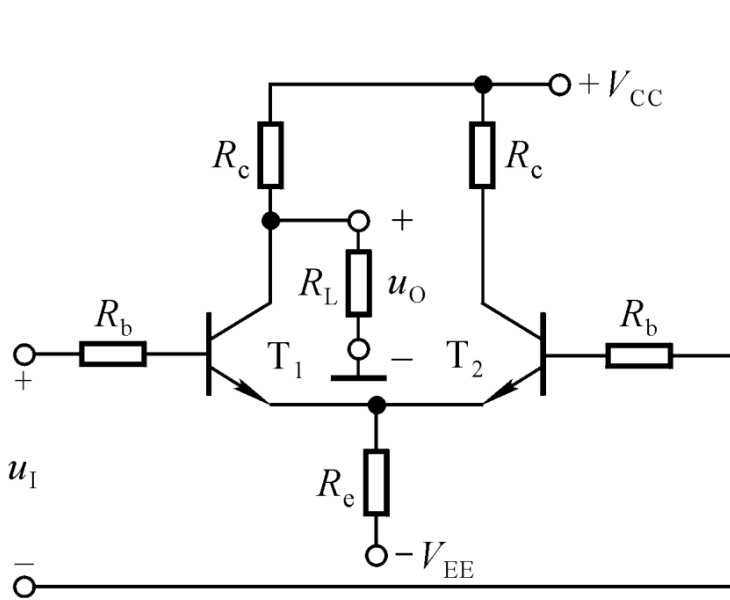
三. 基本型差动放大器的交流分析

■ 典型电路的动态分析-四种接法

➤ 双端输入单端输出——静态分析

$$V_{CC}' = \frac{R_L}{R_c + R_L} \cdot V_{CC}$$

$$R_c' = R_c // R_L$$



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

$$U_{CQ2} = V_{CC} - I_{CQ}R_c$$

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



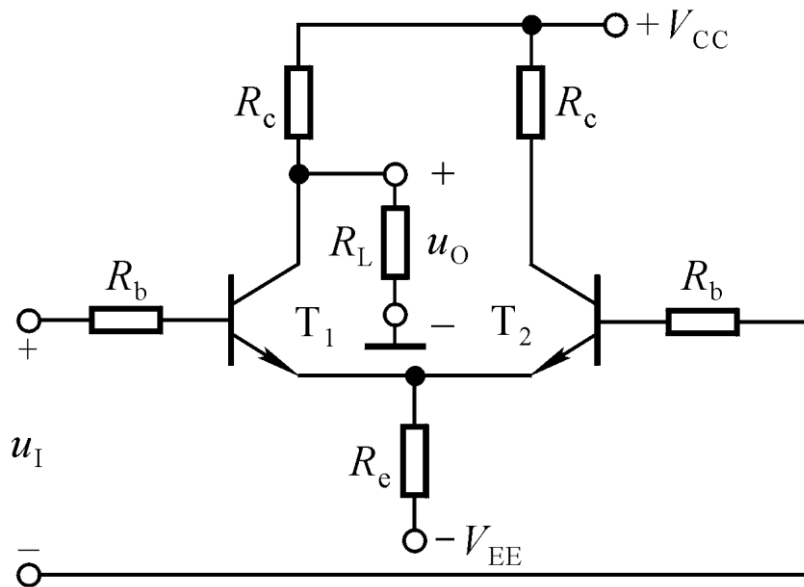


三.基本型差动放大器的交流分析

■ 典型电路的动态分析-四种接法

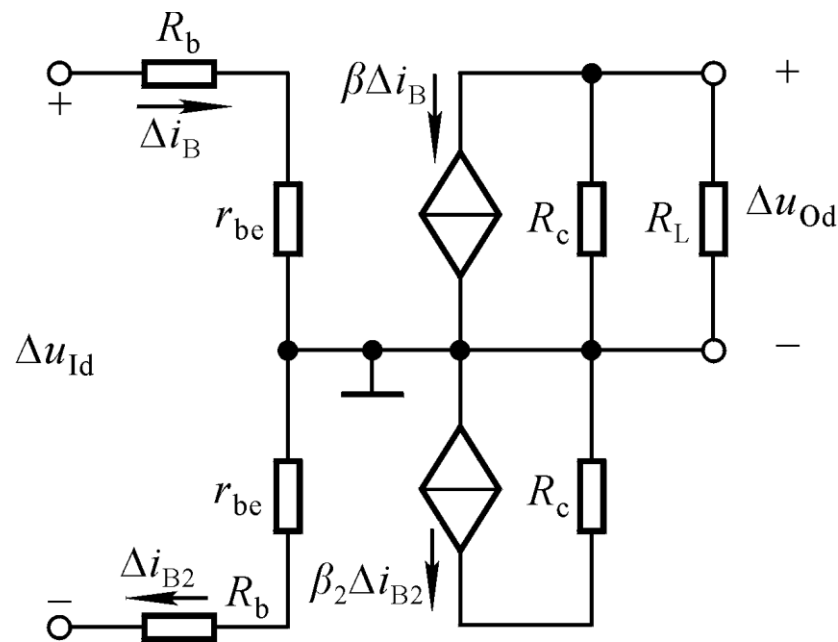
► 双端输入单端输出——差模输入

A_d 可以为+吗



► R_L 的处理：单端输出时取 R_L

$$A_d = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$



$$R_i = 2(R_b + r_{be}), \quad R_o = R_c$$

差模放大倍数是单管共射放大电路电压放大倍数的一半吗？

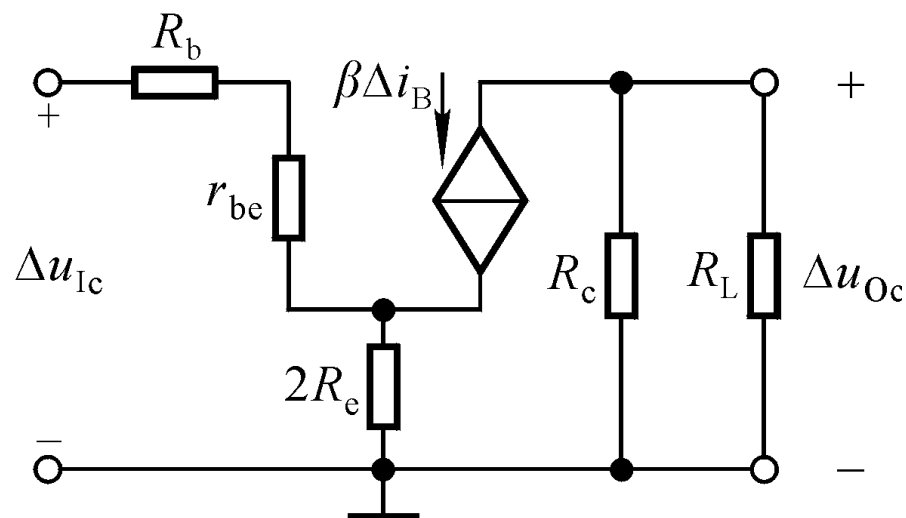
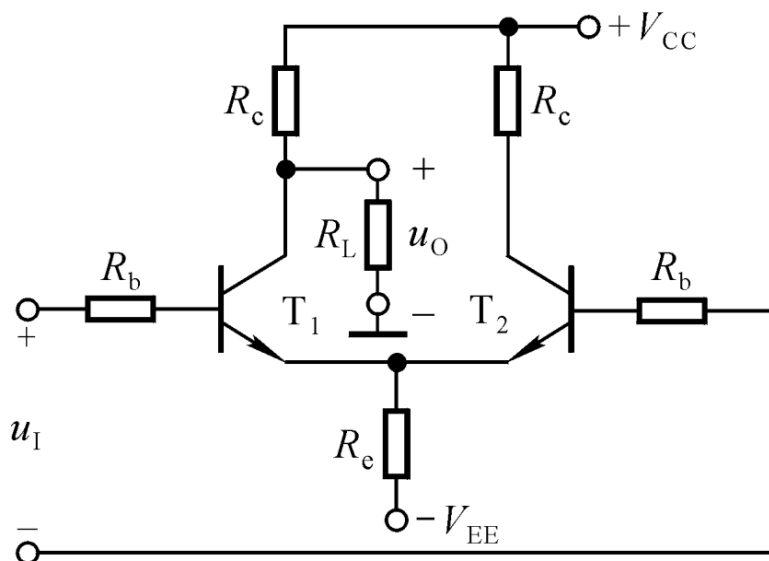




三.基本型差动放大器的交流分析

■ 典型电路的动态分析-四种接法

➤ 双端输入单端输出——共模输入



$$A_c = - \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}$$

$$A_d = - \frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

$$K_{CMR} = \frac{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}{2(R_b + r_{be})}$$

(1) T_2 的 R_c 可以短路吗?



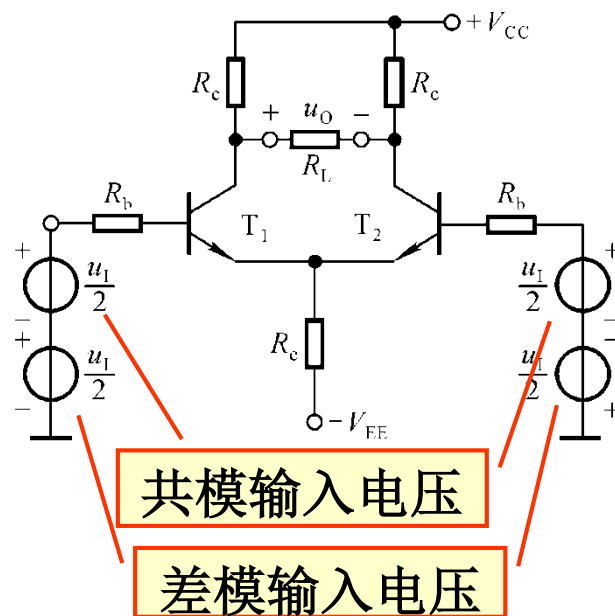
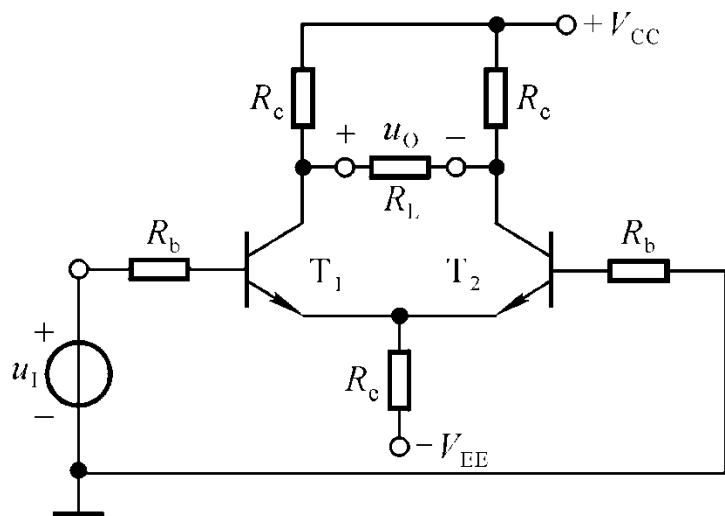


三.基本型差动放大器的交流分析

■ 典型电路的动态分析-四种接法

➤ 单端输入双端输出

$$u_{Id} = u_I, \quad u_{Ic} = u_I / 2$$



✓ 在输入信号作用下发射极的电位变化吗？说明什么？

✓ 输入差模信号的同时总是伴随着共模信号输入。

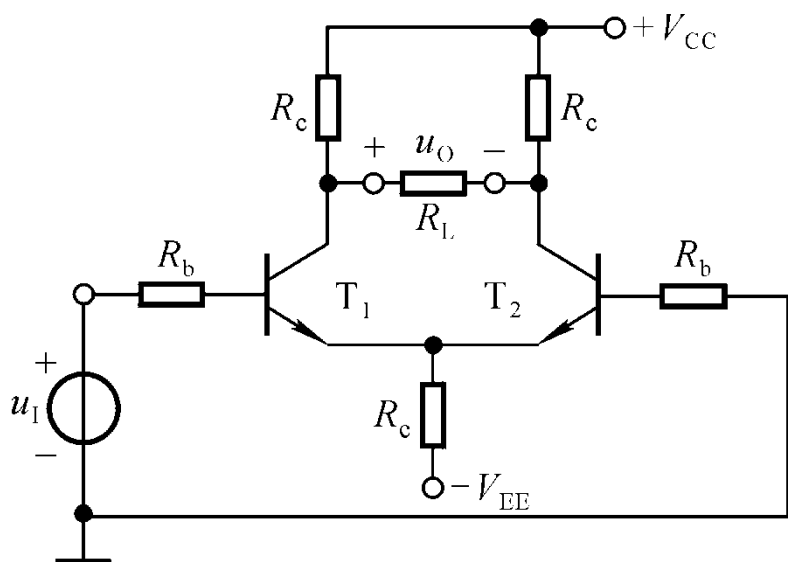




三.基本型差动放大器的交流分析

■ 典型电路的动态分析-四种接法

➤ 单端输入双端输出



问题讨论:

(1) U_{OQ} 产生的原因?

(2) 如何减小共模输出电压?

静态时的值

测试:

$$u_O = A_d \cdot u_I + A_c \cdot \frac{u_I}{2} + U_{OQ}$$

差模输出

共模输出





三.基本型差动放大器的交流分析

■ 典型电路的动态分析-四种接法比较

➤ 输入方式: R_i 均为 $2(R_b + r_{be})$

➤ 输出方式: Q 点、 A_d 、 A_c 、 K_{CMR} 、 R_o 均与输出方式有关

$$\begin{aligned} \text{双端输出: } A_d &= -\frac{\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{R_b + r_{be}} \\ A_c &= 0 \\ K_{CMR} &= \infty \\ R_o &= 2R_c \end{aligned}$$

$$\text{单端输出: } A_d = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{2(R_b + r_{be})}$$

$$A_c = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}$$

$$K_{CMR} = \frac{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}{2(R_b + r_{be})}$$

$$R_o = R_c$$

➡ 如何进一步提升共模抑制比 K_{CMR} ?

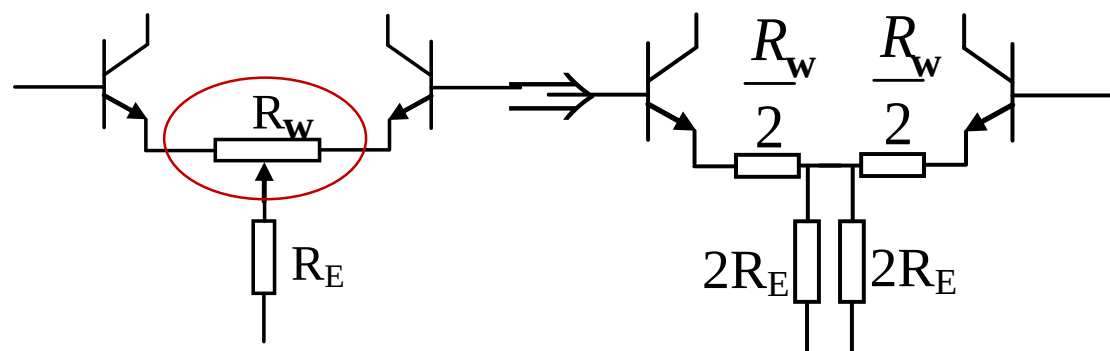




三. 基本型差动放大器的交流分析

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

发射极调零电路



$$A_d = - \frac{\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_W}{2}}$$

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。

$$R_i = 2(R_b + r_{be}) + (1 + \beta)R_W$$

➤ 如何改善实际电路 **单端输出** 时的 $CMRR$ ？

$$K_{CMR} = \frac{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}{2(R_b + r_{be})}$$

如何进一步提高实际电路单端输出时的 K_{CMR} ？





四. 电流源偏置的差动放大器

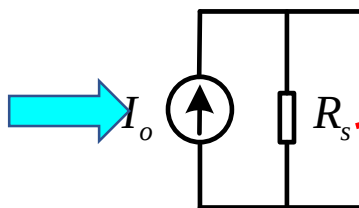
- 电流源电路能够提供较大的直流电流，可满足电源和功耗要求。
- 电流源交流时呈现极高阻抗，作为发射极偏置使用亦可满足提高 $CMRR$ 的要求；
- 电路结构

解决方法：采用电流源取代 R_e ！

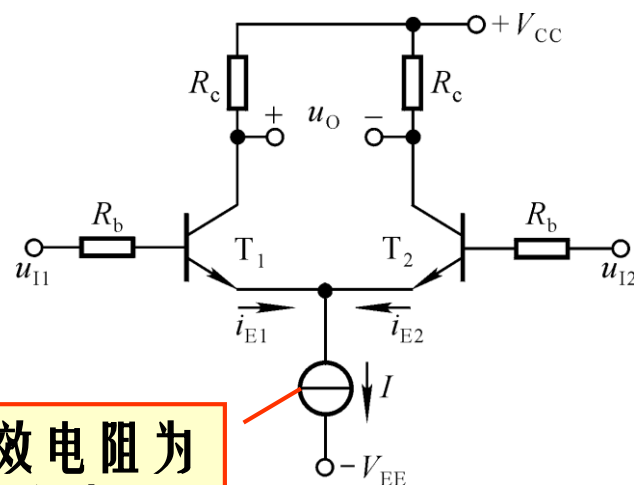
➤ 理想电流源偏置

单端输出
共模抑制比

$$K_{CMR} = \frac{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}{2(R_b + r_{be})}$$



R_s 等效电阻为
无穷大





四. 电流源偏置的差动放大器

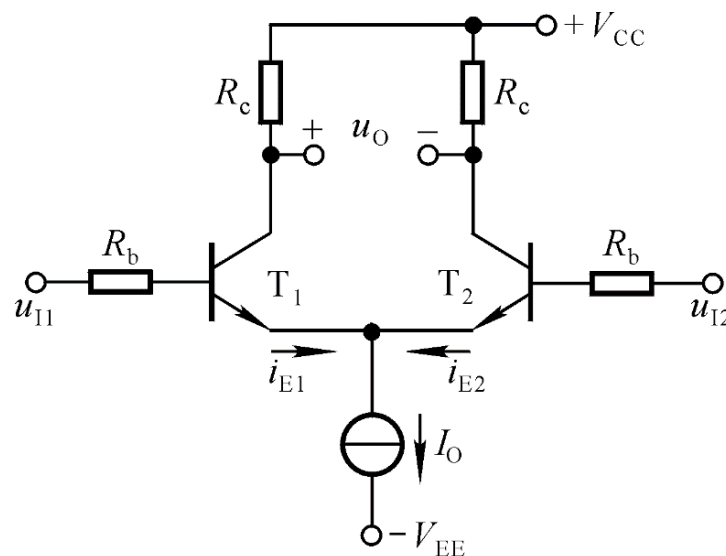
■ 工作原理

静态: $I_{E1} + I_{E2} = I_o$

动态: $R_s = \infty$

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

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



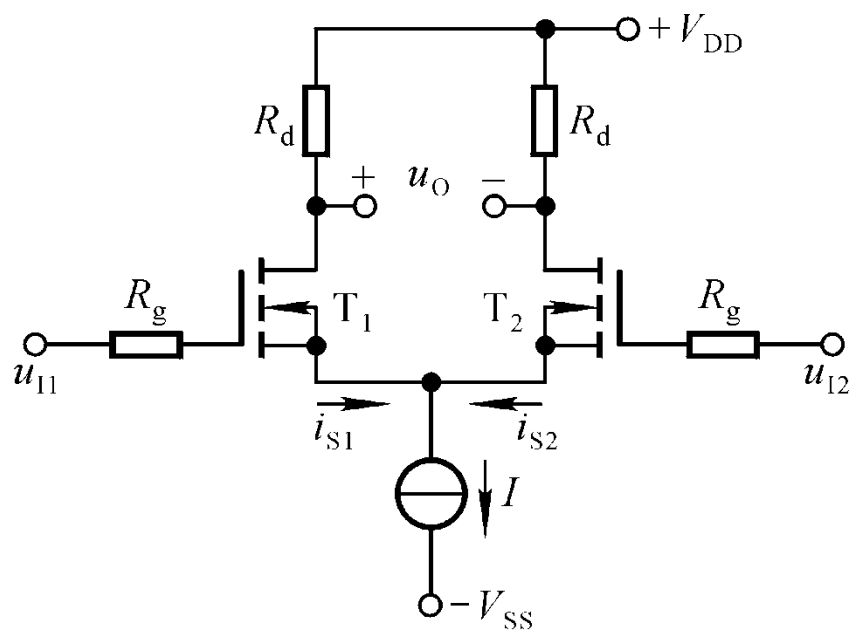
➤ 理想电流源偏置的差动放大器，只允许信号有差模变化，共模信号输入时，共模输出为0，即 K_{CMR} 可达无穷；





四. 电流源偏置的差动放大器

■ 改进型差分放大电路——场效应管差分放大电路



➤ 高输入阻抗的差分放大电路；

$$A_d = -g_m R_d$$

$$R_i = \infty$$

$$R_o = 2R_d$$

➤ 适合直接耦合多级放大电路的输入级；





四. 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

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

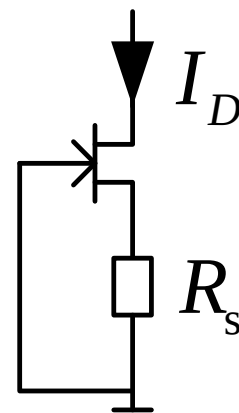
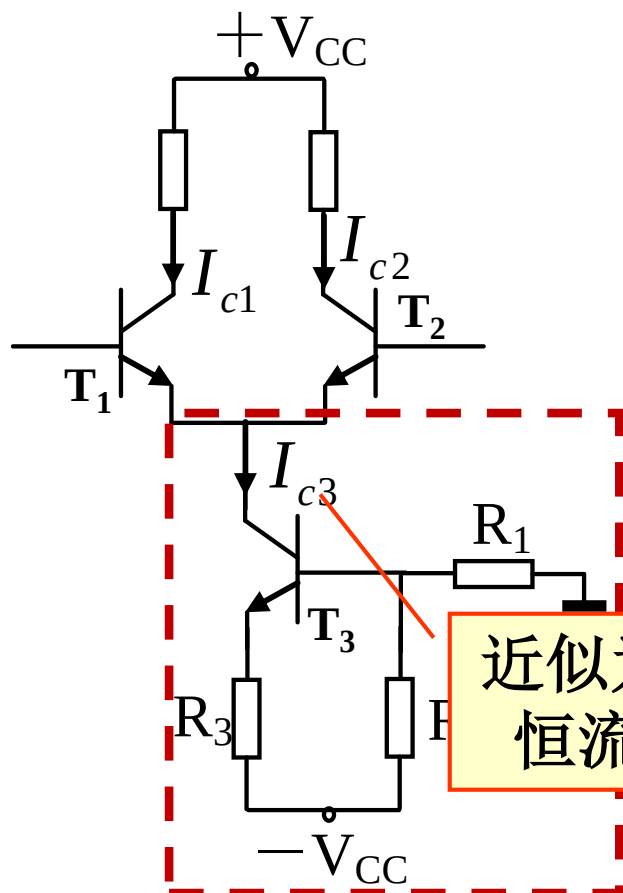
$$I_{C3} = \frac{V_{B3} - V_{BEON} - (-V_{CC})}{R_3 + \frac{R_1 \parallel R_2}{1 + \beta}}$$

近似为
恒流

I_{C3} 为恒定，提供 T_1 、 T_2
的射极电流 I_{E1} 、 I_{E2} 。

工作点稳定电路

FET偏置在饱和电流区



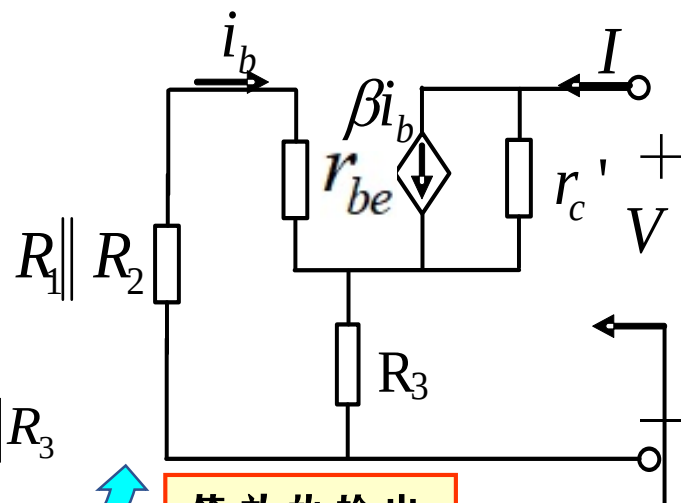


四. 电流源偏置的差动放大器

■ 对基本电流源电路作交流分析

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

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



等效的输出电阻很大!

■ 分析差动电路的单端输出共模增益

$$A_c = - \frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_o} \approx - \frac{R_c \parallel R_L}{2R_o}$$

■ 共模抑制比

$$A_d = - \frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{2(R_b + r_{be})}$$

$$K_{CMR} = \frac{\beta R_o}{R_b + r_{be}}$$

共模抑制比有很大的提升

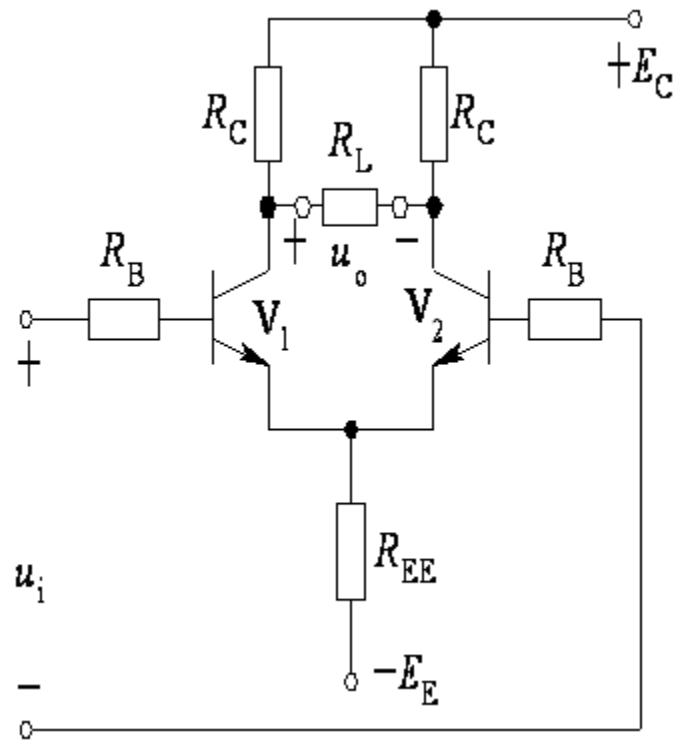




典型举例

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

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

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

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

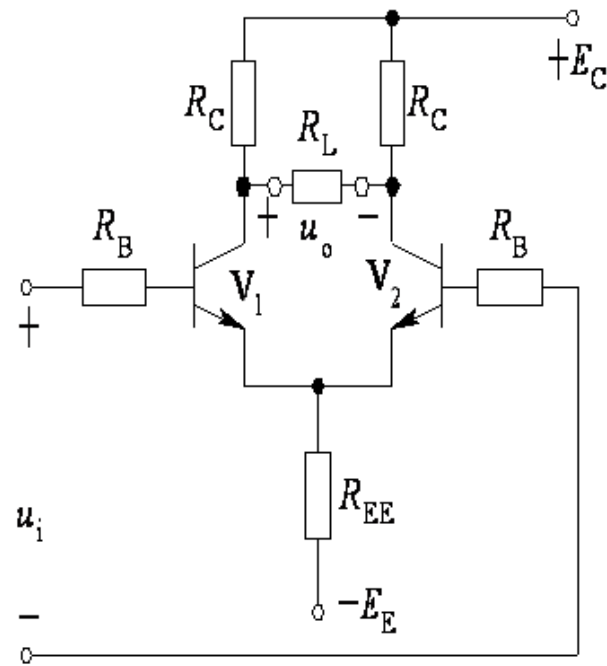
$$(2) \quad r_{be1} = r_{be2} = r_{be} = r_{bb'} + \frac{26}{I_B} = 300 + 2364 \approx 2.66 \text{ k}\Omega$$

$$A_{ud} = -\frac{\beta(R_C // \frac{R_L}{2})}{R_B + r_{be}} = -\frac{50 \times (10 // 5)}{20 + 2.66} = -7.36$$

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

$$(4) \quad R_{id} = 2(R_B + r_{be}) = 2(20 + 2.66) = 45.32 \text{ k}\Omega$$

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

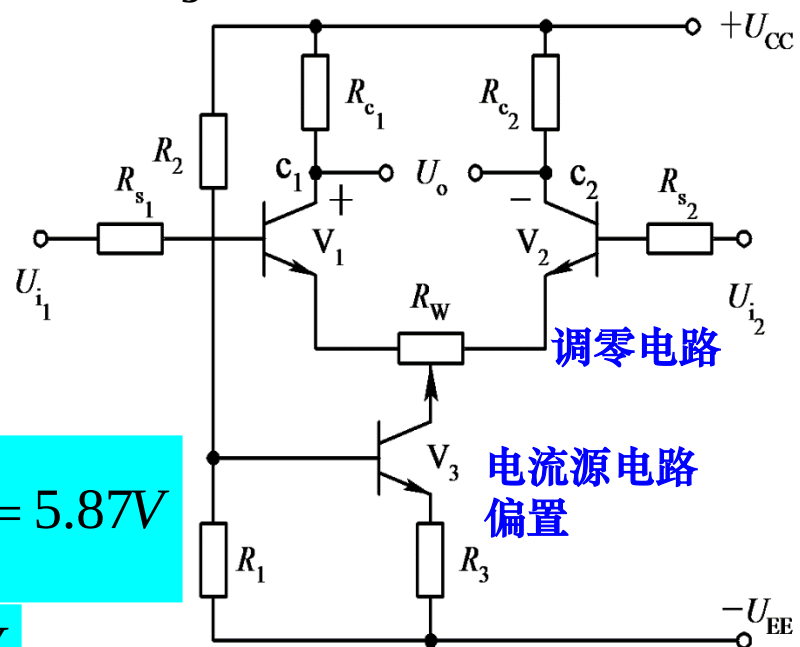




例题

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

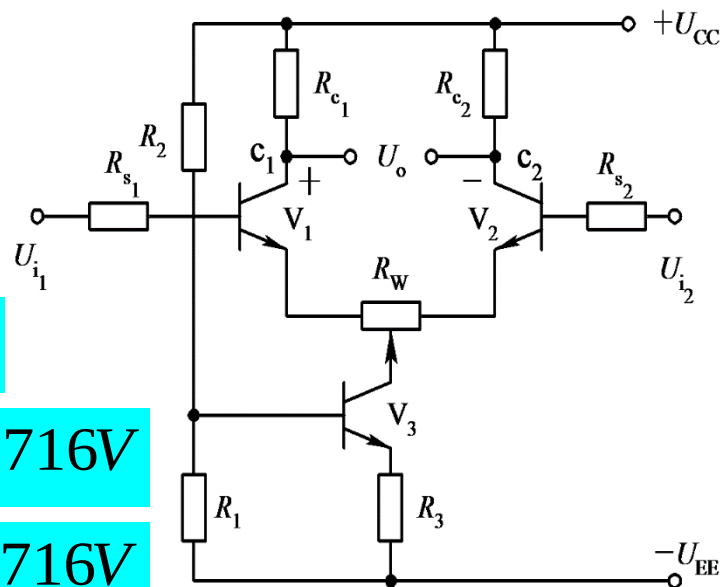
一般静态估算时, 认为两输入端接地 $U_{i1}=U_{i2}=0$ 。

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

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

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

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



差模电压放大倍数:

$$A_{ud} = - \frac{\beta_1 (R_c // \frac{R_L}{2})}{R_{s1} + r_{be1} + (1 + \beta_1) \frac{R_W}{2}} \quad \text{其中 } R_L = \infty$$

$$r_{be1} = r_b + (1 + \beta_1) \frac{26}{I_{E_1}} = 200 + 51 \times \frac{26}{0.08} \approx 16.9k\Omega$$

$$A_{ud} = - \frac{50 \times 100}{10 + 16.9 + 51 \times 0.1} \approx -156$$





例题

(2) 当 $R_L = 100 \text{ k}\Omega$ 时:

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

$$A_{ud} = - \frac{\beta_1 R'_L}{R_{s1} + r_{be1} + (1 + \beta_1) \frac{R_W}{2}} = - \frac{50 \times 33.3}{10 + 16.9 + 51 \times 0.1} \approx -52$$

(3) 当单端输出时(从 V_1 管 c_1 极输出):

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

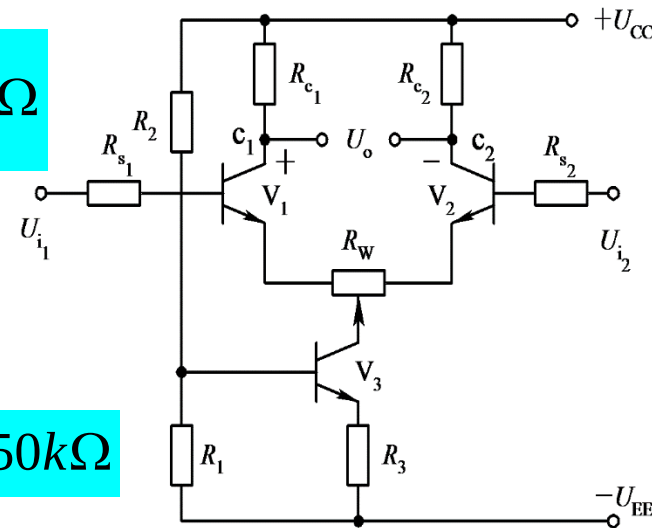
$$A_{ud\text{单}} = - \frac{\beta R'_L}{R_{s1} + r_{be1} + (1 + \beta_1) \frac{R_W}{2}} = - \frac{50 \times 50}{10 + 16.9 + 51 \times 0.1} \approx -39$$

单端输出时, 共模电压放大倍数为

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

$$A_{uc\text{单}} = - \frac{\beta R'_L}{R_{s1} + r_{be1} + (1 + \beta) \left(\frac{R_W}{2} + 2r_{o3} \right)}$$

$$r_{be3} = r_b + (1 + \beta) \frac{26}{I_{E3}} = 200 + 51 \times \frac{26}{0.16} \approx 8.6 \text{ k}\Omega$$





例题

式中

$$r_{o_3} \approx \left(1 + \frac{\beta R_3}{r_{be_3} + R_3 + R_1 // R_2} \right) r_{ce}$$

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

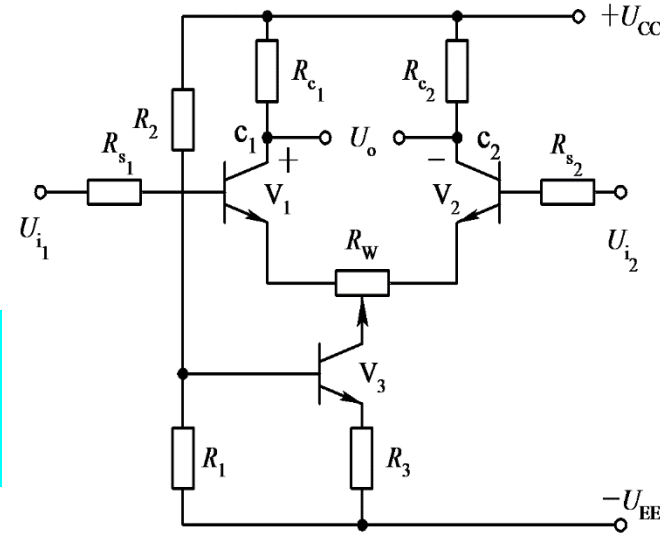
故

$$A_{uc单} = - \frac{\beta R'_L}{R_{s_1} + r_{be_1} + (1 + \beta) \left(\frac{R_W}{2} + 2r_{o_3} \right)} = \frac{50 \times 50}{10 + 16.9 + 51 \times 3800} \approx -0.013$$

其共模抑制比为

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

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





§ 3.4 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



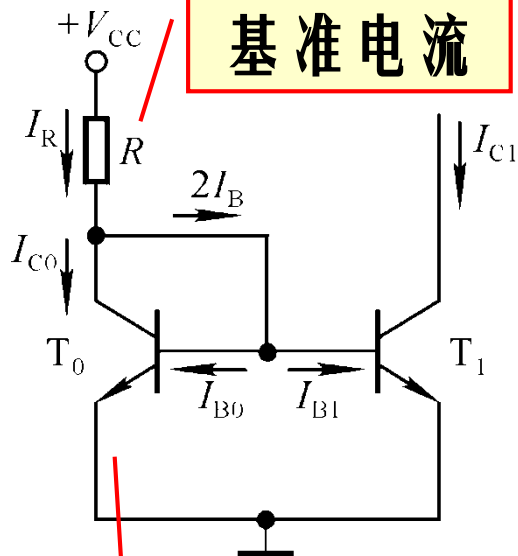


一、镜像电流源

■ 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。

基准电流



T_0 什么状态?

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

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

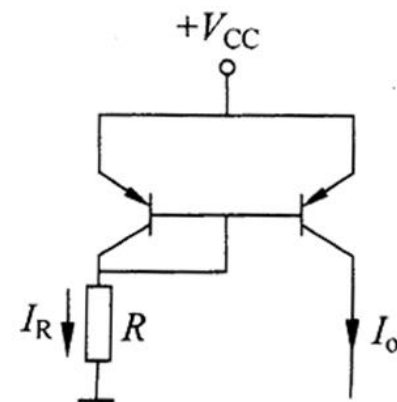
$$I_{C1} = I_{C0} = I_C$$

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

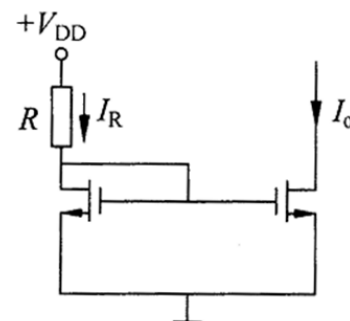
$$I_C = \frac{\beta}{\beta + 2} \cdot I_R = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}} \cdot I_R$$

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



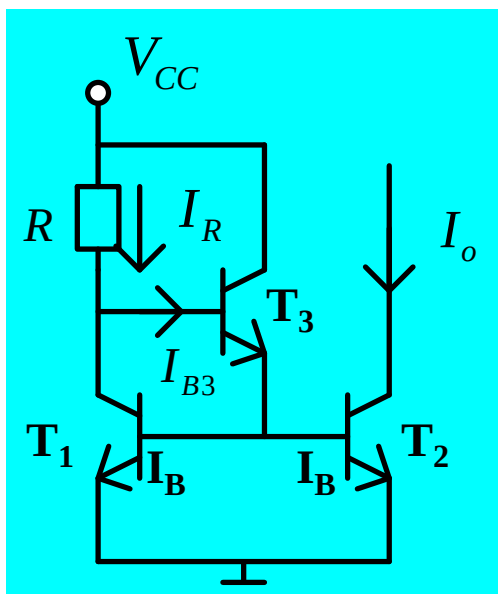
FET 管完全镜像电流源





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: $r_o \approx r_c'$



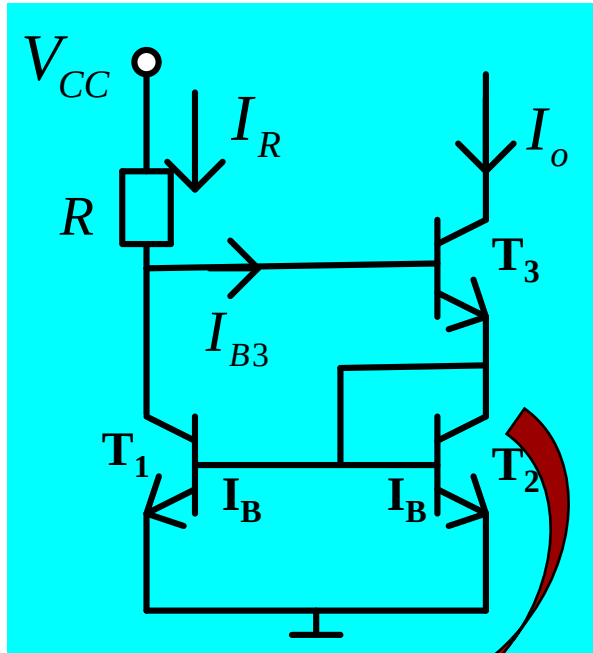


一、镜像电流源——Wilson

■ 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： $r_o \approx \frac{\beta}{2} r_c'$

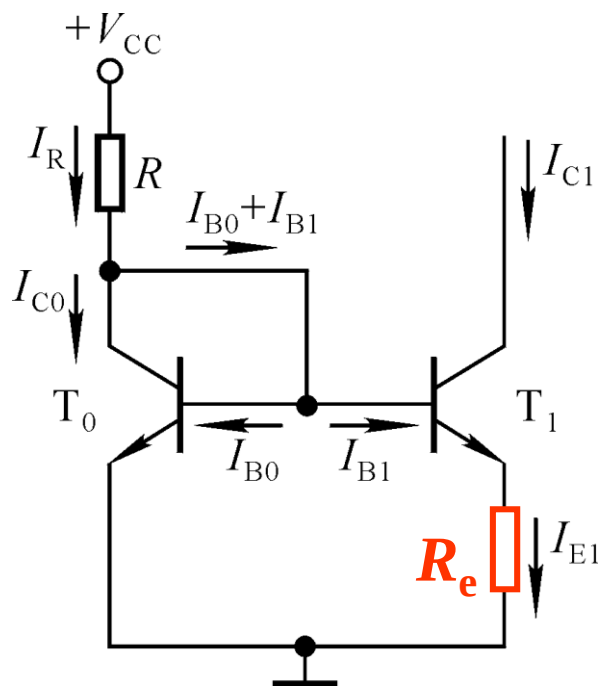
输出电阻更大！





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

- 比例电流源：改变镜像电流源中输出电流和基准电流相等的关系

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

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

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

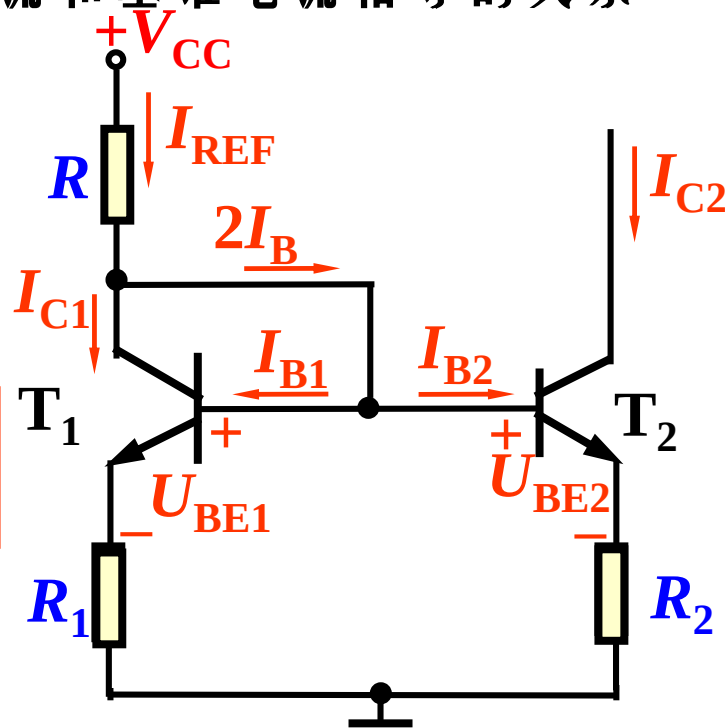
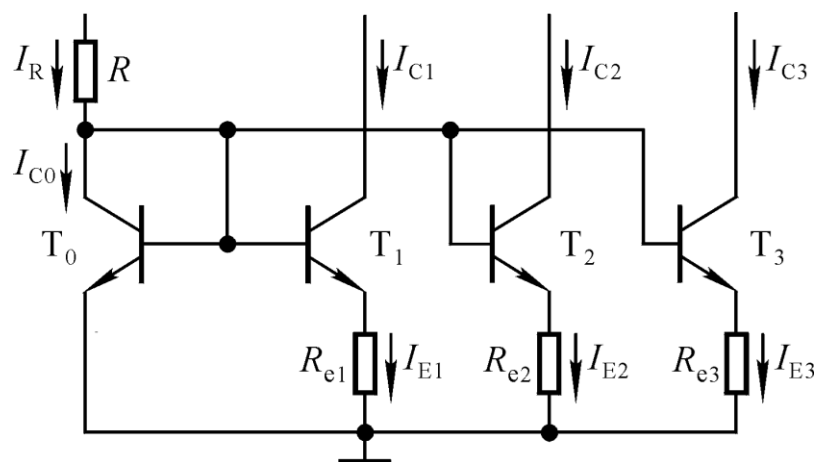


图 比例电流源

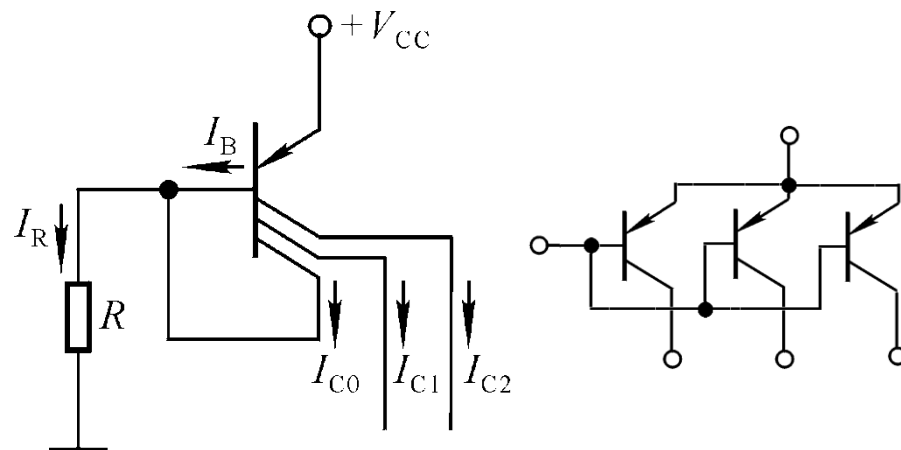




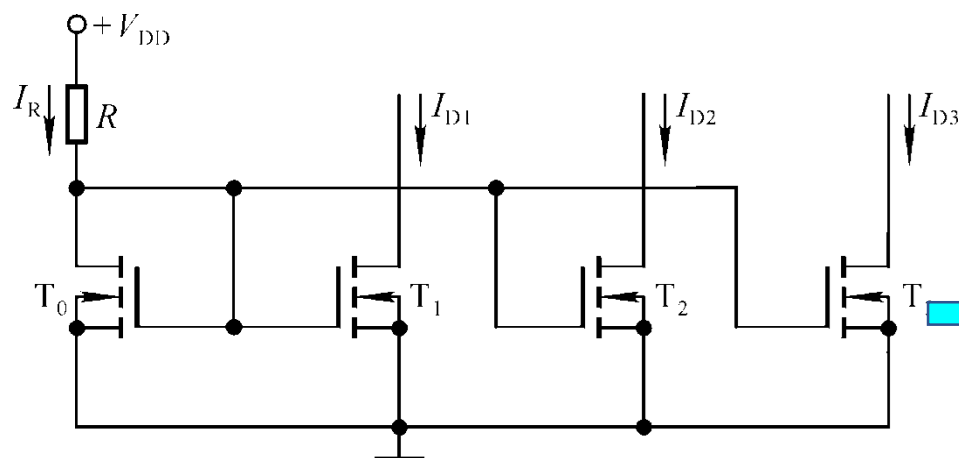
三、多路电流源



■ 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} 。

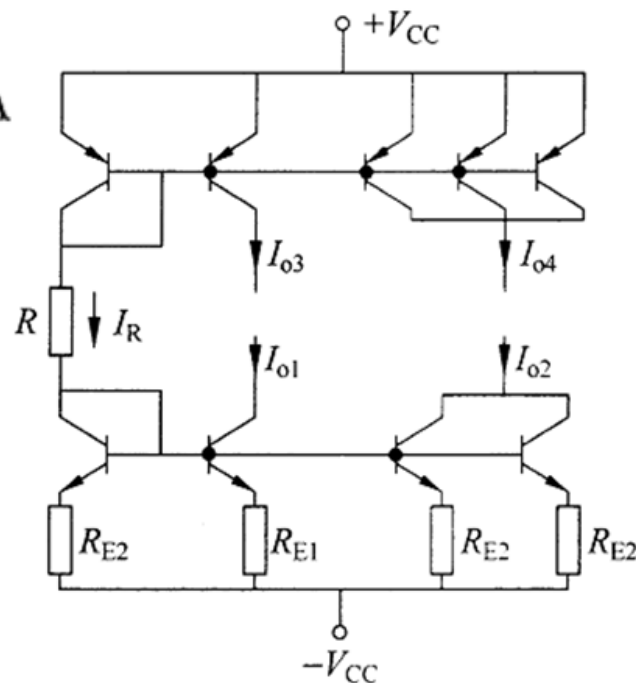
解
$$I_R = \frac{2(V_{CC} - V_{BE})}{R + R_{E2}} = \frac{2 \times 9.3}{(6.2 + 1) \times 10^3} = 2.58\text{mA}$$

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

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

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

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





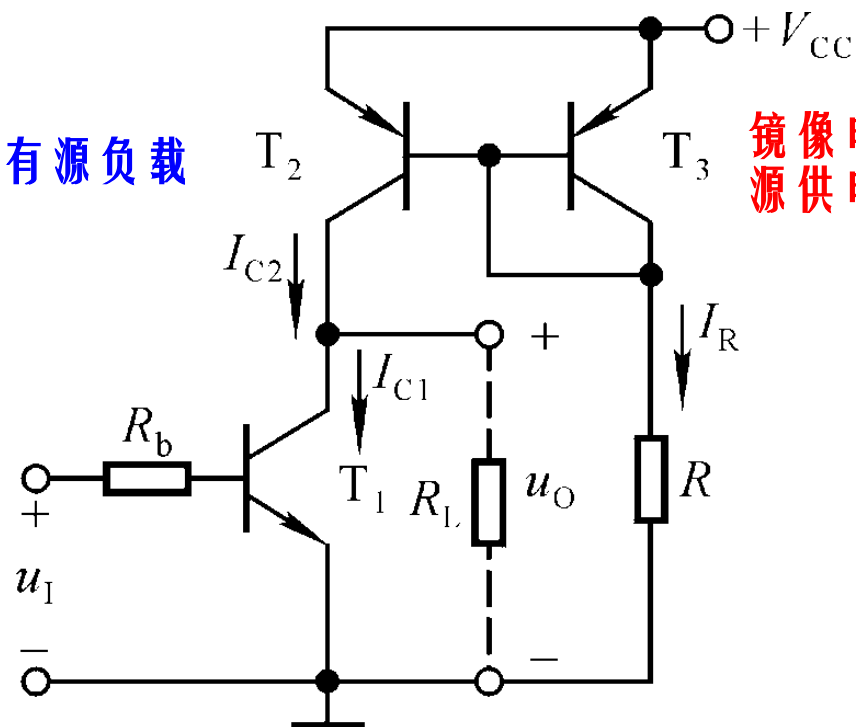
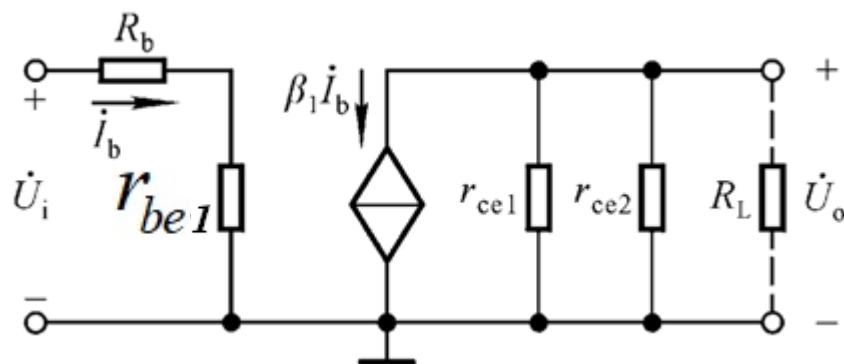
四、有源负载

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} ？

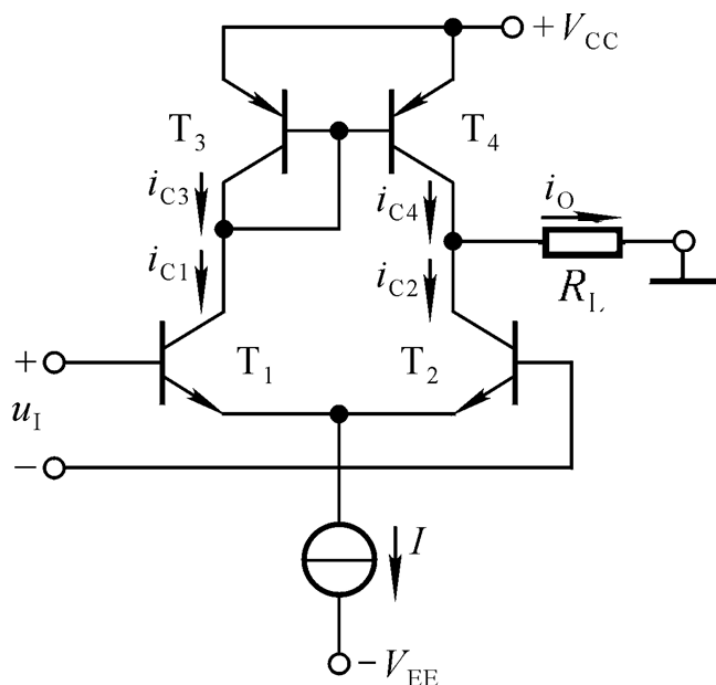
$$\dot{A}_u = - \frac{\beta_1 (r_{ce1} // r_{ce2} // R_L)}{R_b + r_{be1}}$$

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

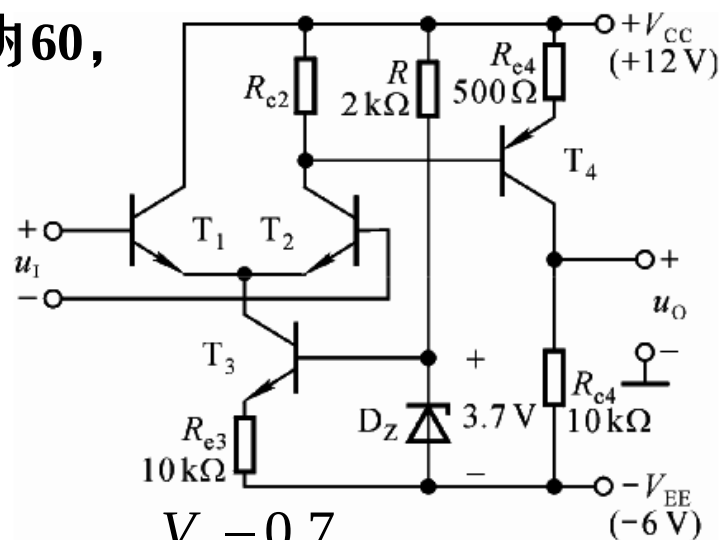




典型例题

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， $I_{C4} = \frac{V_{EE}}{R_{C4}} = 0.6mA$ $I_{E4} \approx I_{C4} = 0.6mA$

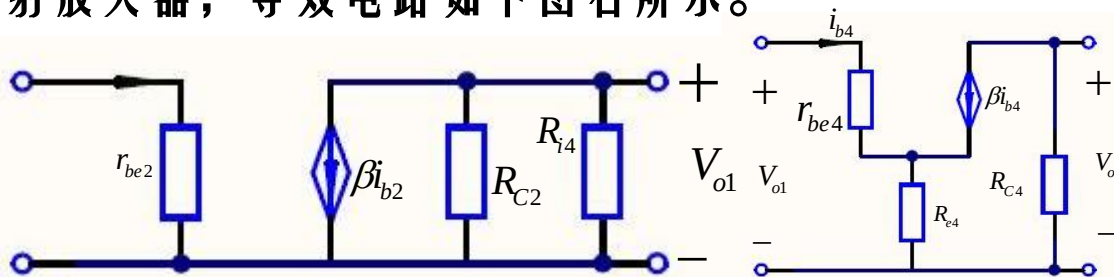
由 $I_{C2} R_{C2} = 0.7 + I_{E4} R_{E4}$ 可知： $R_{C2} = 6.67k\Omega$





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。



$$r_{e2} = \frac{V_T}{I_{E2}} = \frac{26}{0.15} = 173.3\Omega \quad r_{be2} = r_b + (1 + \beta)r_{e2} = 10.7k\Omega$$

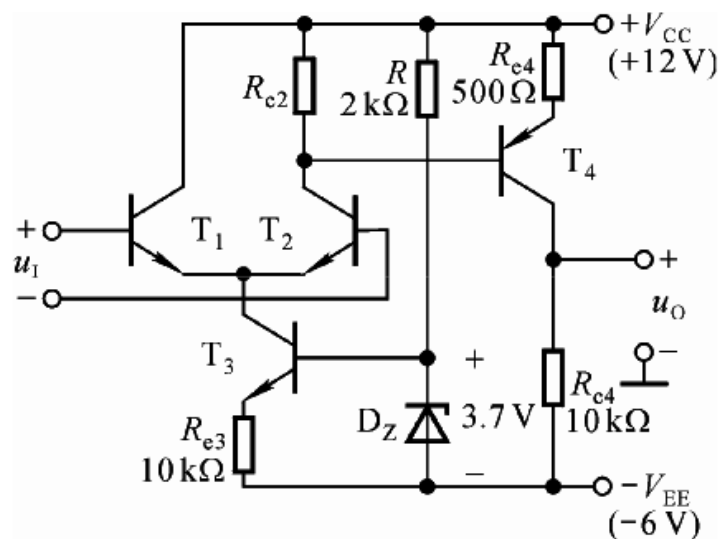
$$r_{e4} = r_b + (1 + \beta)r_{e4} = 2.74k\Omega \quad R_{i4} = r_{be4} + (1 + \beta)R_{e4} = 33.24k\Omega$$

$$A_d = -\beta \frac{R_{C2} \parallel R_{i4}}{2r_{be2}} = -15.57$$

$$A_4 = \frac{V_o}{V_{o1}} = -\beta \frac{R_{C4}}{r_{be4} + (1 + \beta)R_{e4}} = -18.05$$

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

$$A = \frac{V_o}{V_{i1} - V_{i2}} = A_d A_4 = 281.15$$



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





§ 3.5 直接耦合**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；

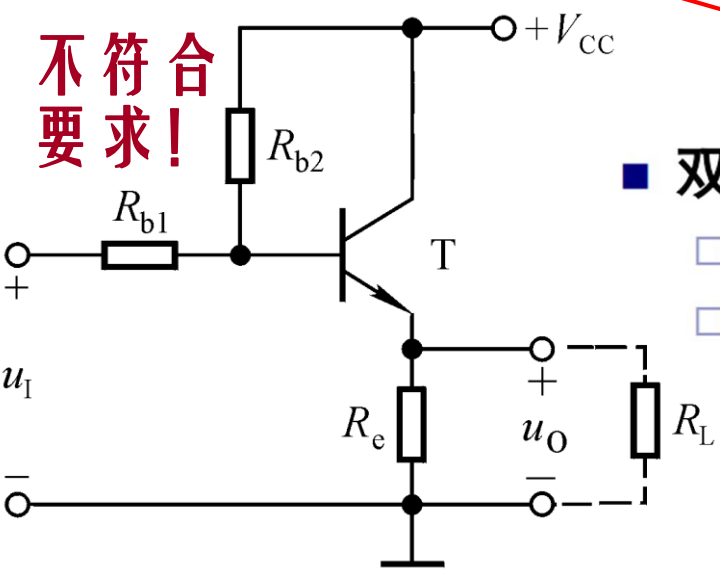
射极输出形式

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。

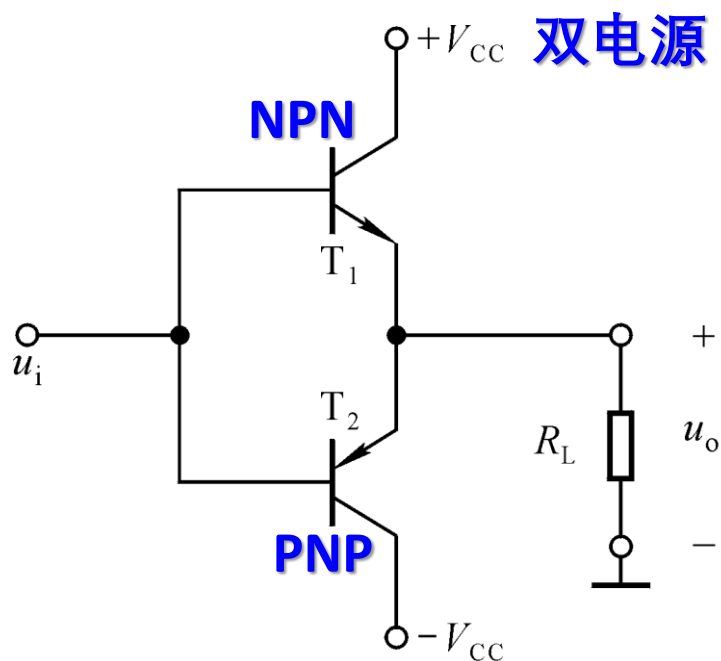
双管互补输出电路



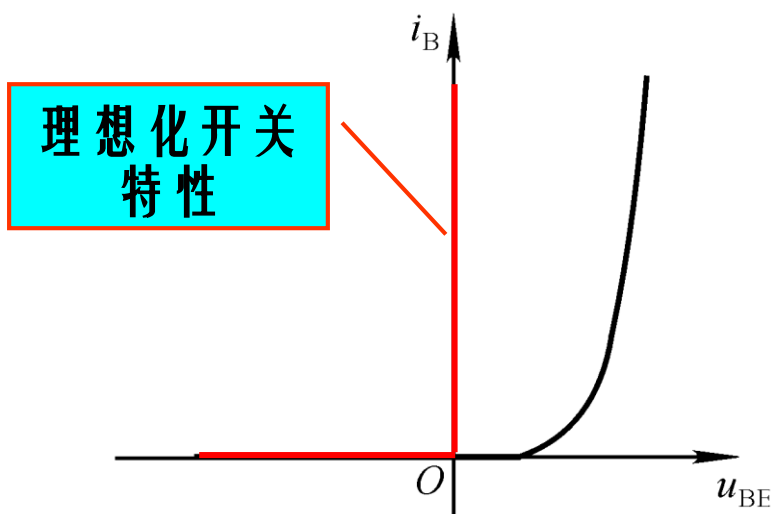


二、互补输出级基本电路

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



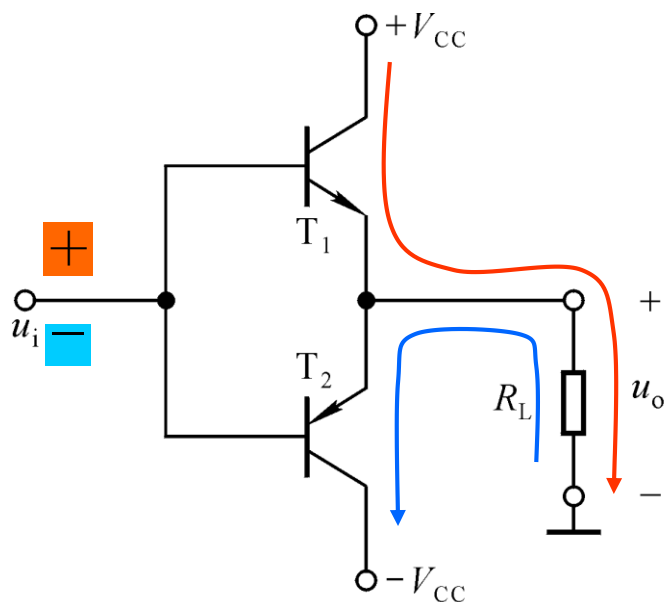
忽略开启电压、导通电压，近似为0

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：

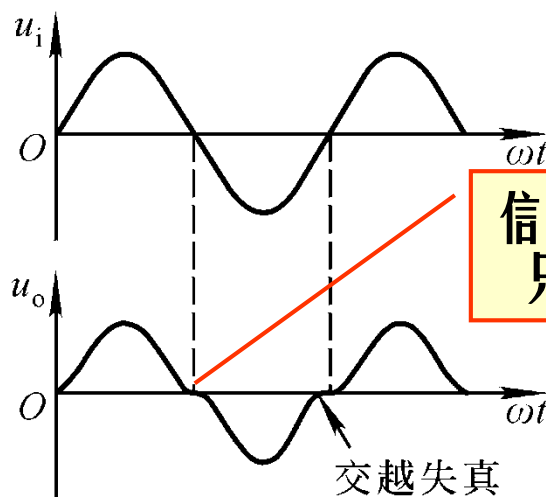
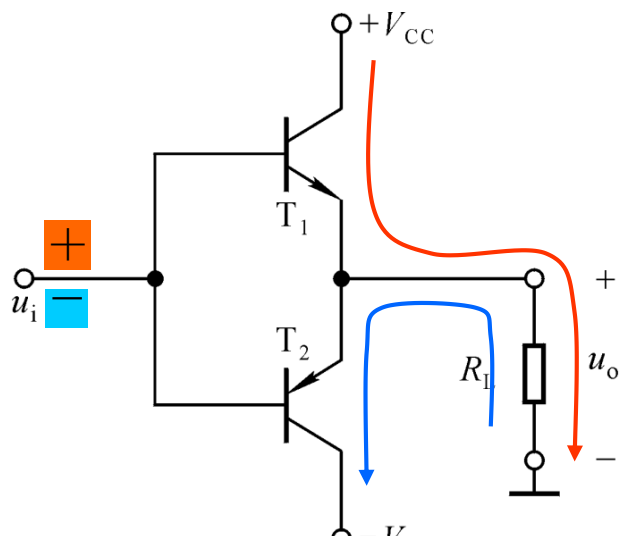
$\text{地} \rightarrow R_L \rightarrow T_2 \rightarrow -V_{CC}$ ， $u_o = u_i$

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！





三. 补输出级交越失真



信号在零附近两
只管子均截止

管子导通角 $<180^\circ$ 度,
乙丙中间类

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；
管子导通时间略大于半个周期

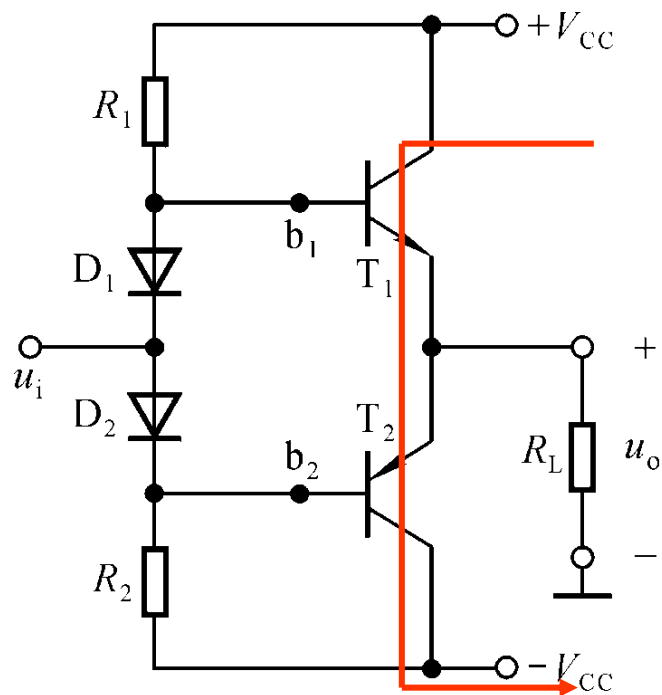
② 直流偏置电路对**动态性能**影响要小。

开启电压不为0，
有交越失真存在





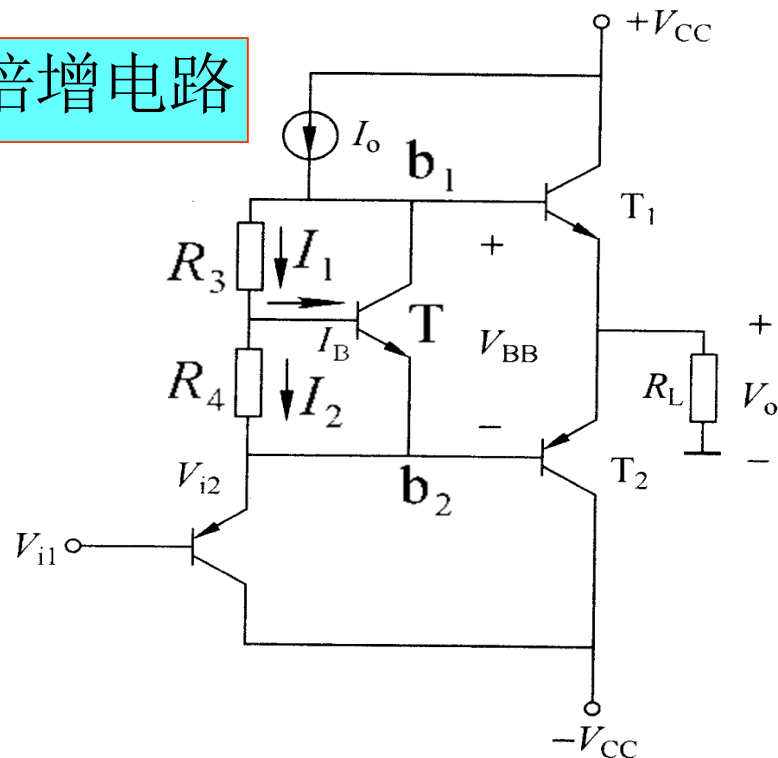
三. 消除交越失真的互补输出级



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

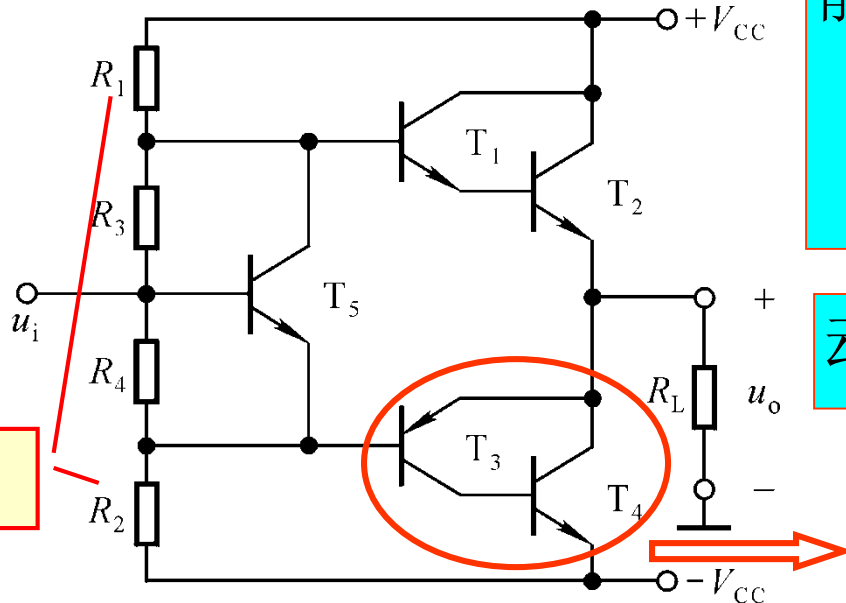
动态: $u_{b1} \approx u_{b2} \approx u_{i1}$





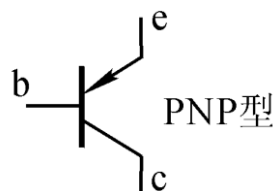
四、准互补输出级

■ 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 $V_{BE3}=0.7V$ ，

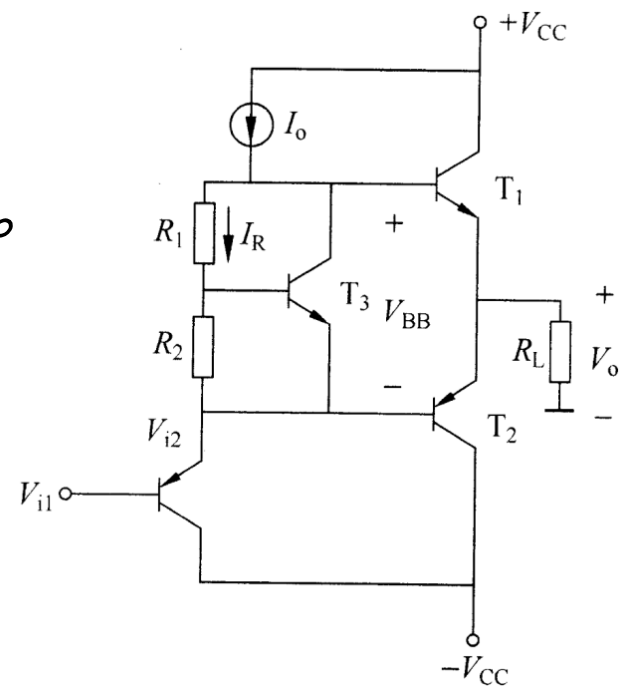
所以 $V_{BE3} \approx I_R R_2$ 由解，求得： $R_2 \approx V_{BE3}/I_R = 3.5k\Omega$ 。

再由公式

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

求得 R_1

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





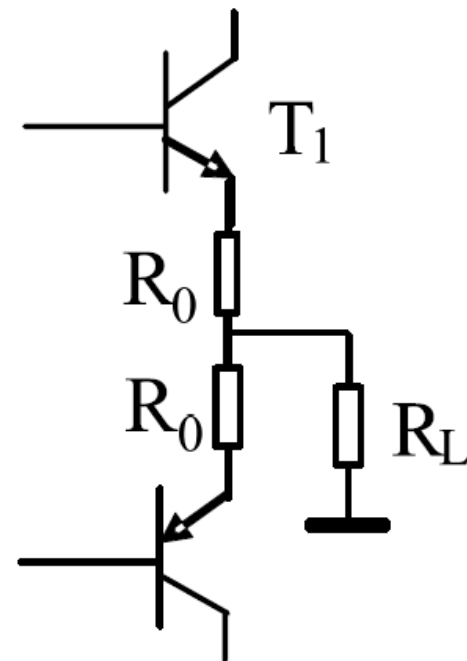
四、互补输出级的过载保护

■ 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；





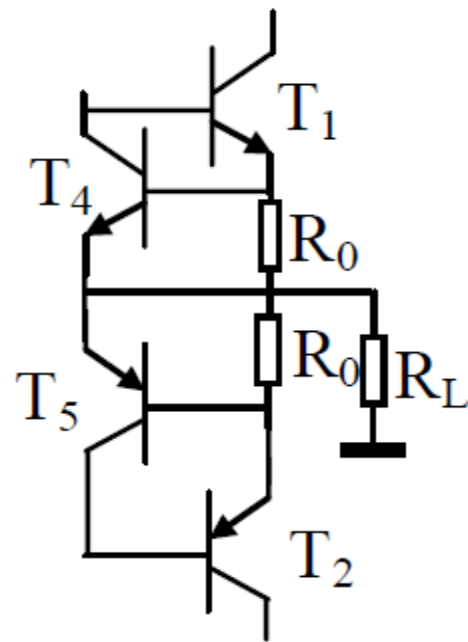
四、互补输出级的过载保护

■ 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；





3.6 集成运放的电路分析及其性能指标

一. 复杂集成运放电路的读图方法

- 1. 化整为零:**先将偏置电路分离出来，然后根据信号流通顺序将放大部分分为输入级、中间级和输出级三级；
- 2. 分析功能原理:**对每部分电路弄清每一级电路属于哪种基本放大电路、有何性能特点；
- 3. 通观整体:**研究各部分电路相互间的联系，理解电路如何实现所具有的功能；
- 4. 估算参数:**必要时再进行。

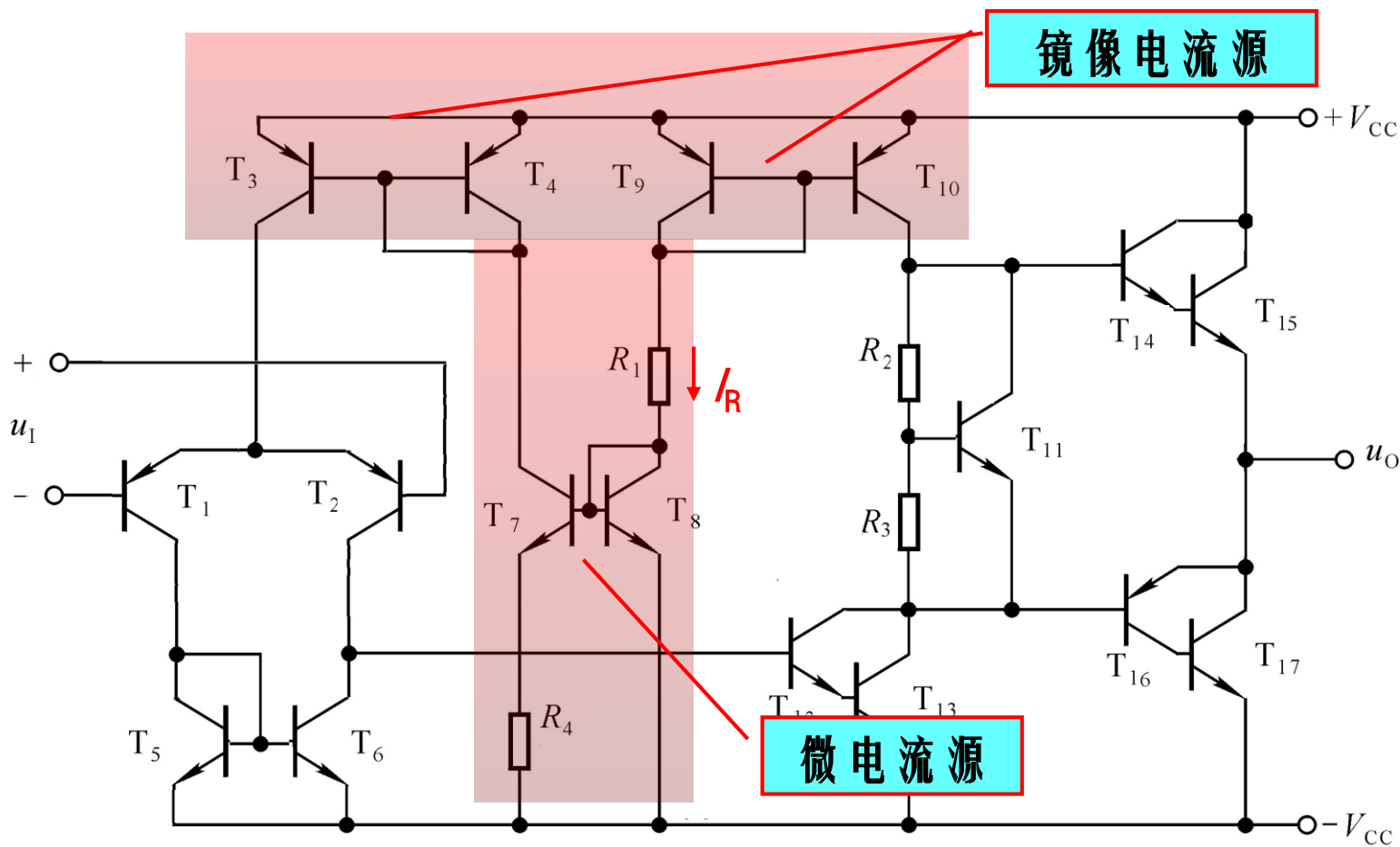




3.6 集成运放的电路分析及其性能指标

(1) 化整为零，识别电路

■ 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



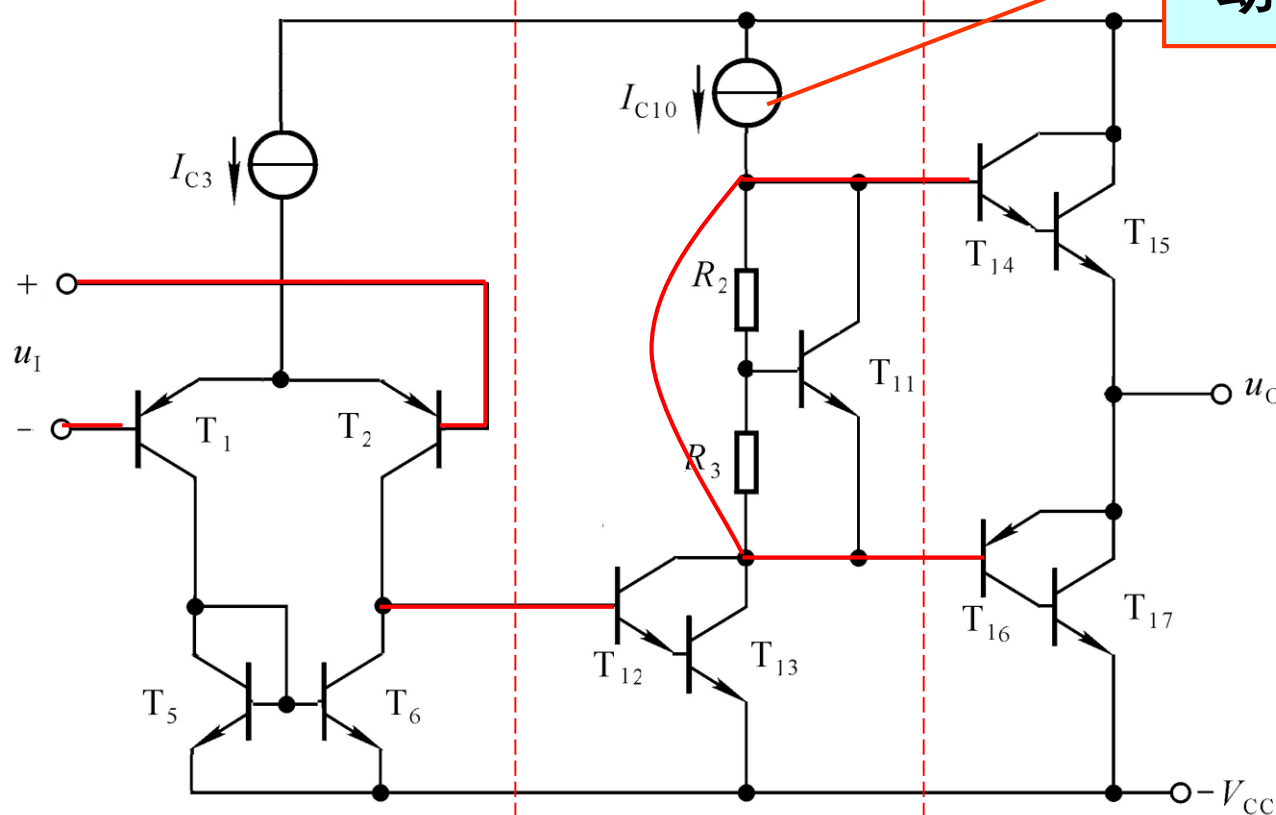
若在集成运放电路中能够估算出某一支路的电流，则这个电流往往是偏置电路中的基准电流——**镜像电流源偏置**。





3.6 一个完整的原理电路分析

■ 电路原理：三级放大电路



动态电阻无穷大

分离出电流源，
简化电路；按
信号流通顺序
分析放大电路。

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**

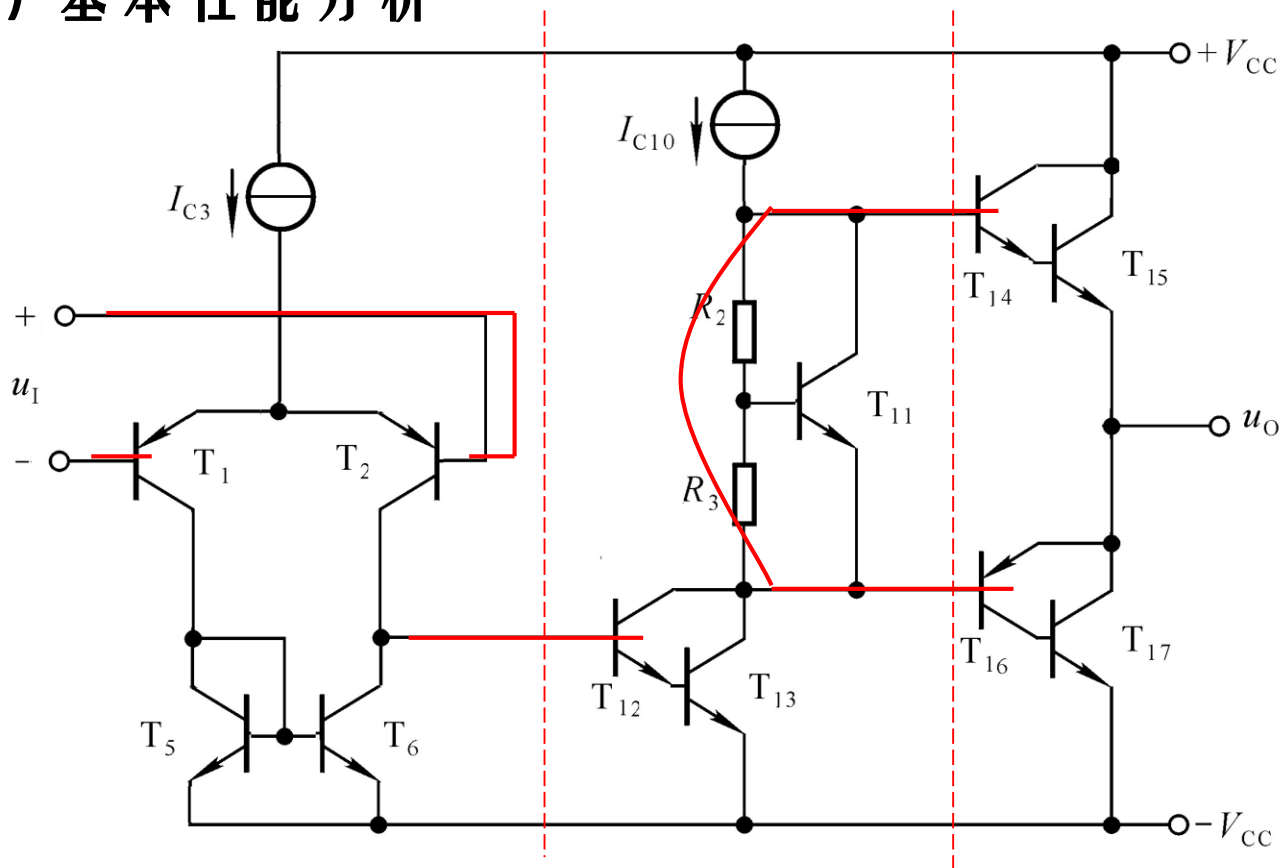
用 U_{BE} 倍增电路消除
交越失真的 **准互补
输出级**





3.6 一个完整的原理电路分析

(2) 基本性能分析



输入电阻为 $2r_{be}$ 、电压放大倍数较大、输出电阻很小、最大不失真输出电压的峰值接近电源电压。

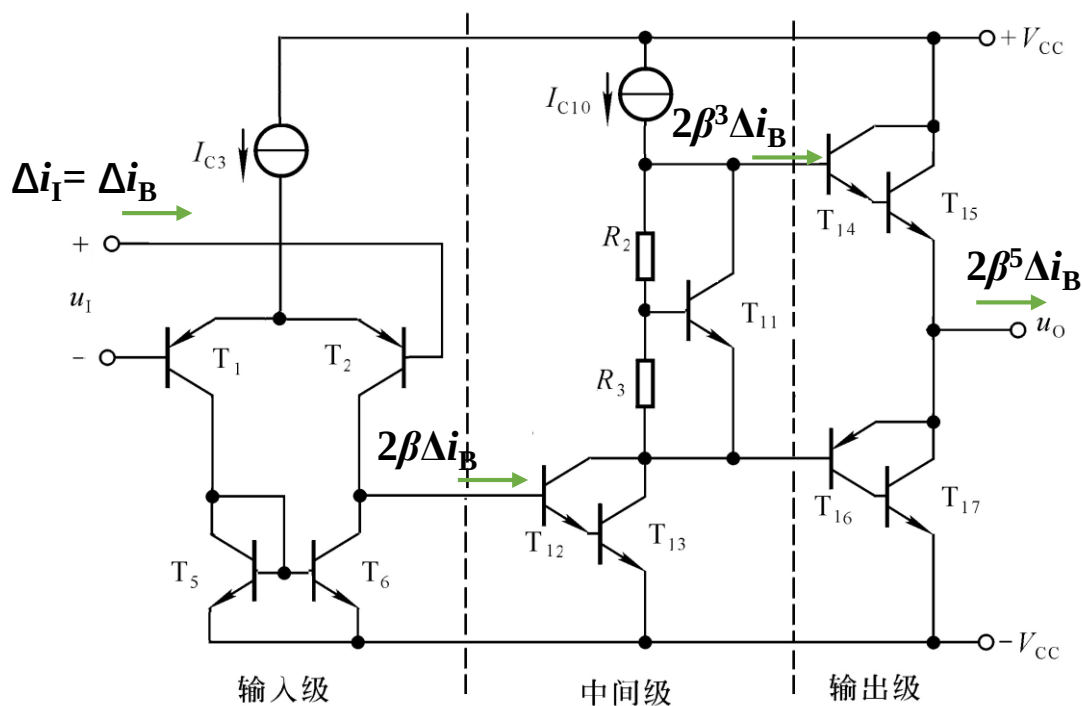
整个电路可等效为一个双端输入单端输出的差分放大电路。





3.6 集成运放原理电路分析

基本性能估算



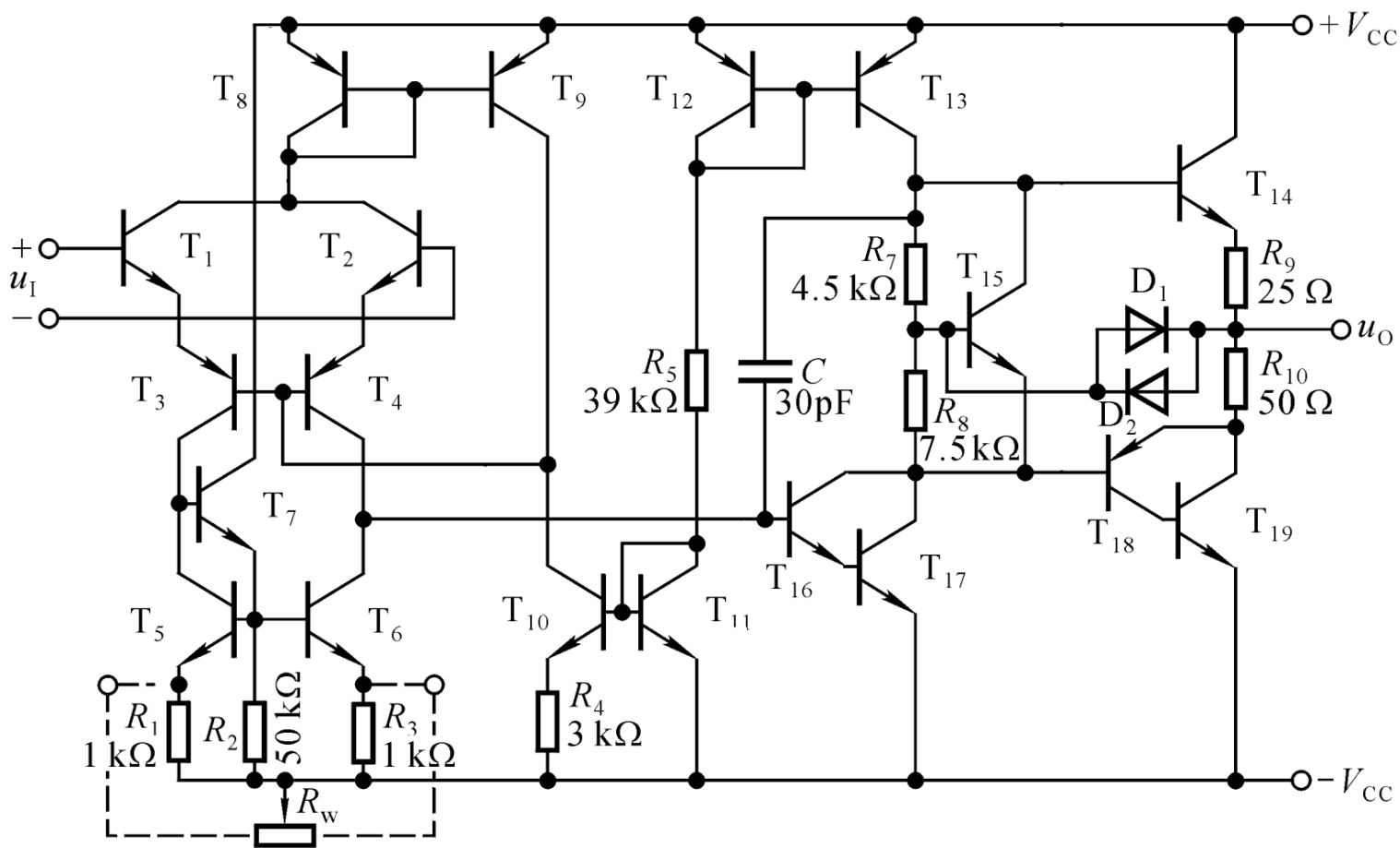
集成运放的高电压放大倍数是靠晶体管电流放大倍数的积累得到的。





2.实例：F007——通用型集成运放

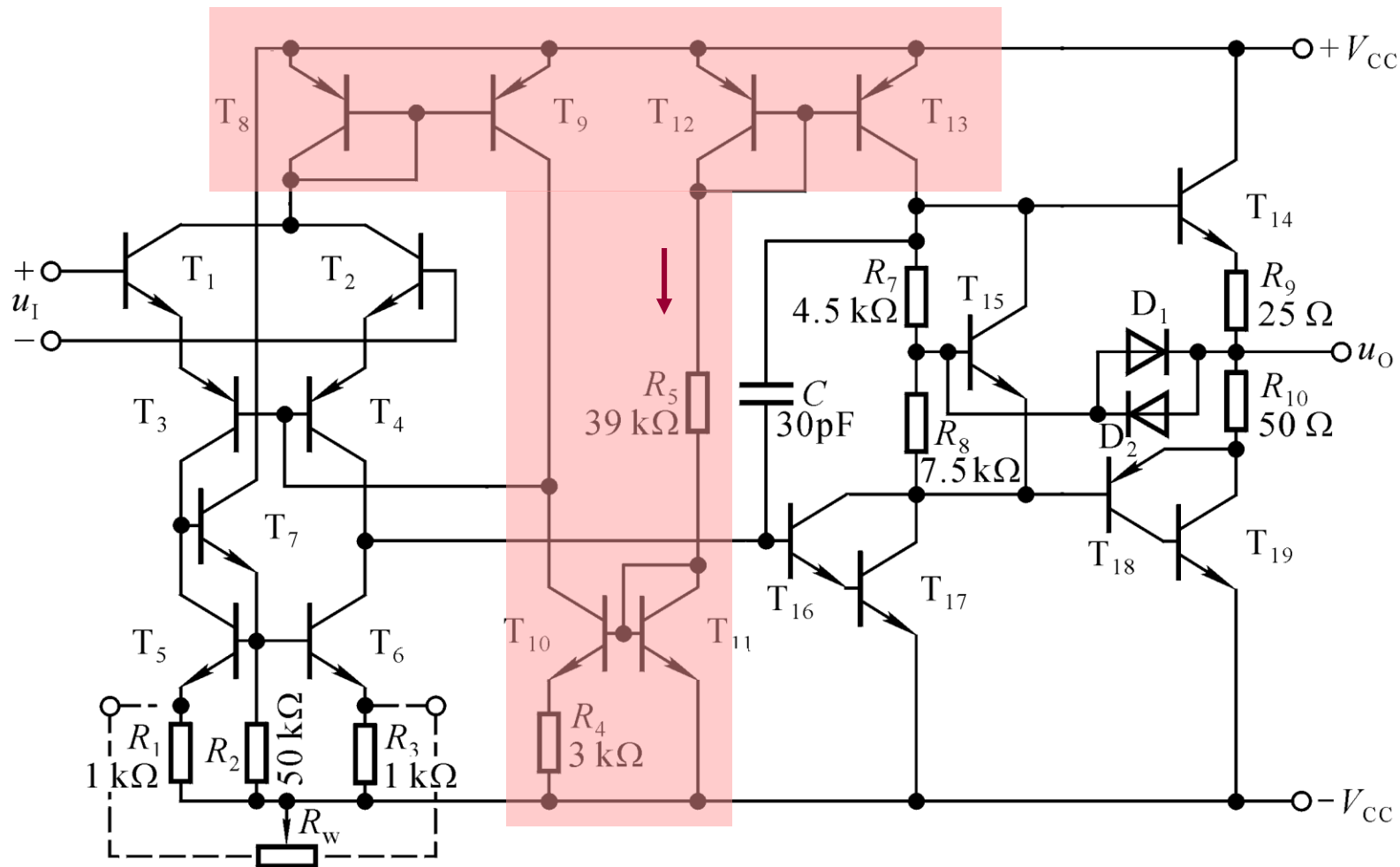
对于集成运放电路，应首先找出偏置电路，然后根据信号流通顺序，将其分为输入级、中间级和输出级电路。





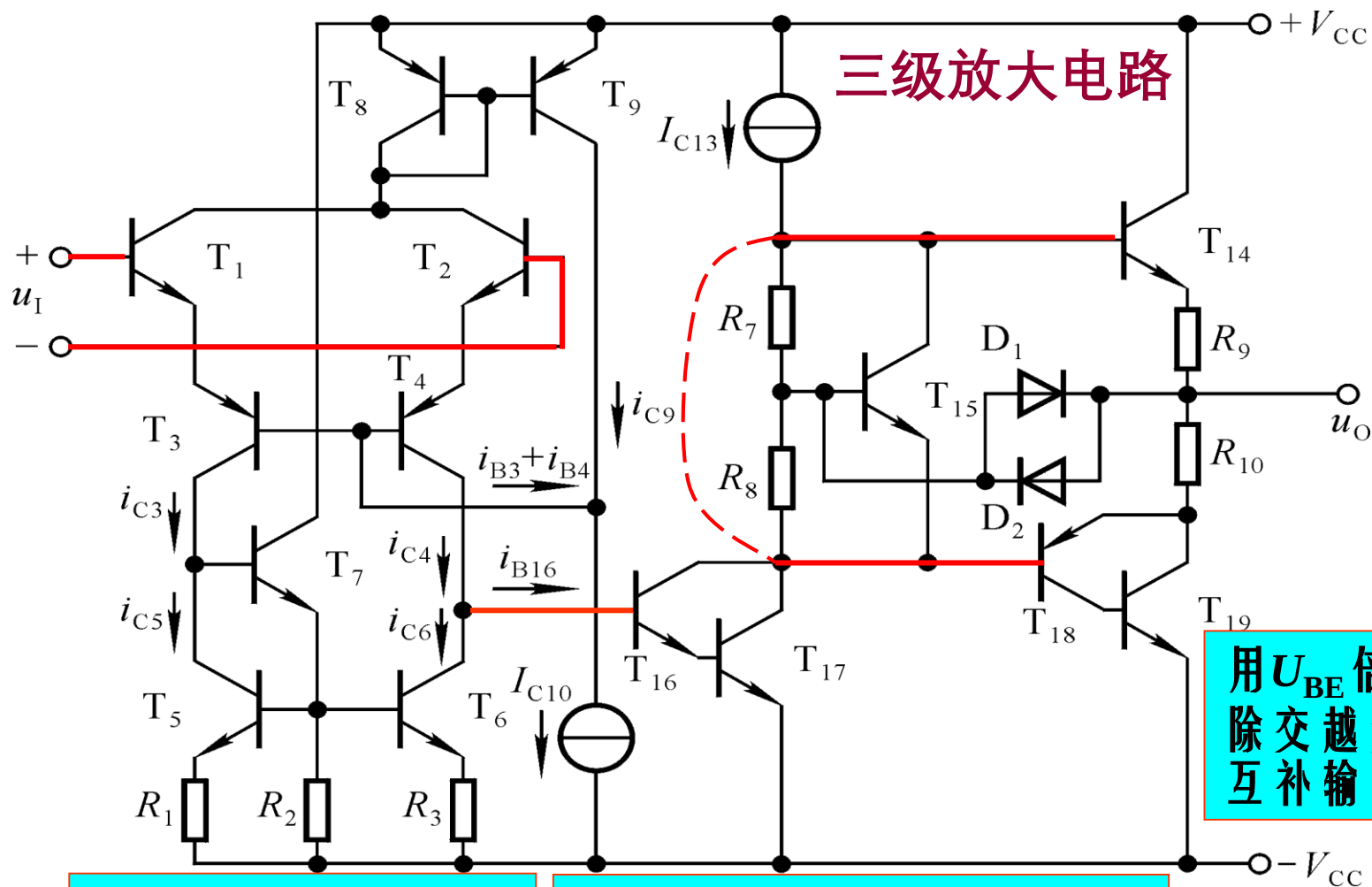
找出偏置电路

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。





简化电路分解电路



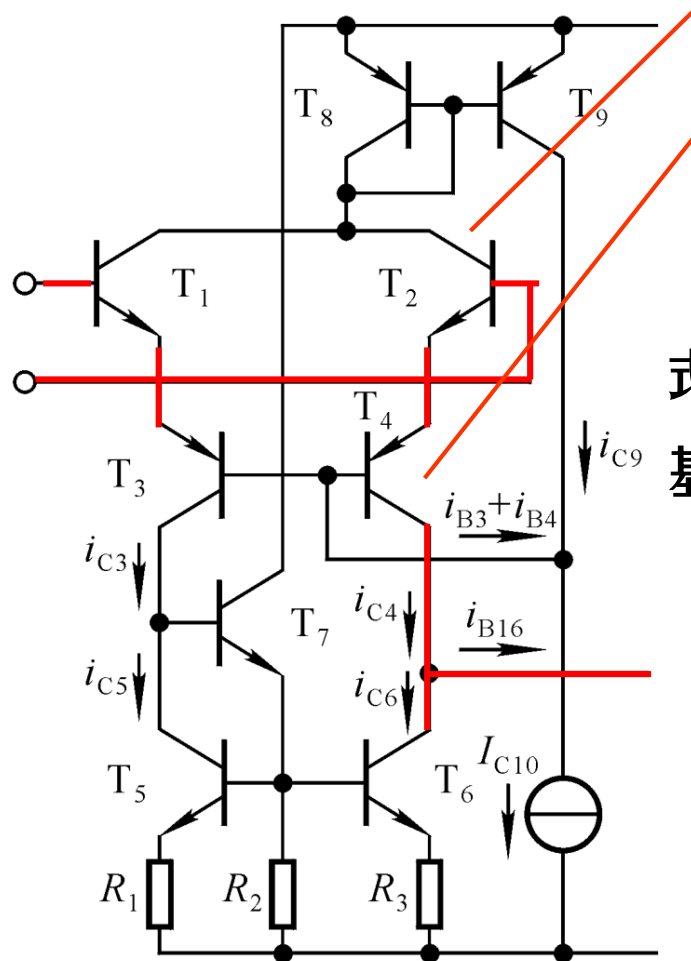


输入级的分析

共集-共基形式

T_1 和 T_2 从基极输入、射极输出

T_3 和 T_4 从射极输入、集电极输出



T_3 、 T_4 为横向PNP型管，输入端耐压高。共集形式，输入电阻大，允许的共模输入电压幅值大。共基形式频带宽。

Q点的稳定:

$$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_{C1} \uparrow I_{C2} \uparrow \rightarrow I_{C8} \uparrow$$

$$I_{C9} \text{ 与 } I_{C8} \text{ 为镜像关系} \rightarrow I_{C9} \uparrow, \text{ 因 } I_{C10} \text{ 不变} \rightarrow I_{B3} \downarrow I_{B4} \downarrow \\ \rightarrow I_{C3} \downarrow I_{C4} \downarrow \rightarrow I_{C1} \downarrow I_{C2} \downarrow$$





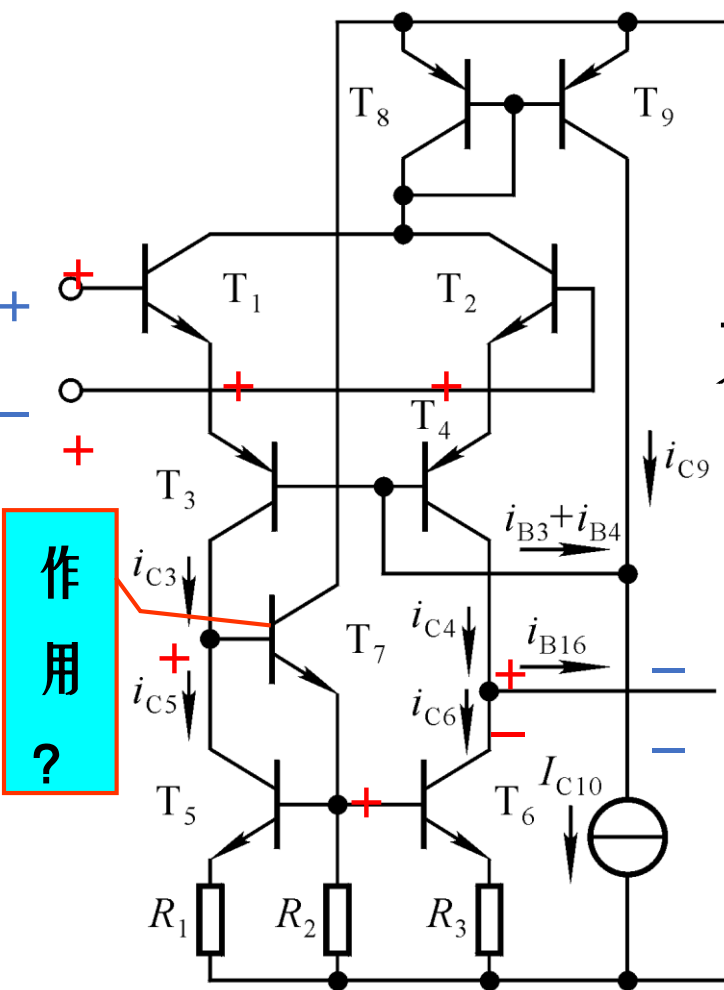
输入级的分析

T_7 的作用：抑制共模信号
放大差模信号

T_5 、 T_6 分别是 T_3 、 T_4 的有源负载，而 T_4 又是 T_6 的有源负载，增大电压放大倍数。

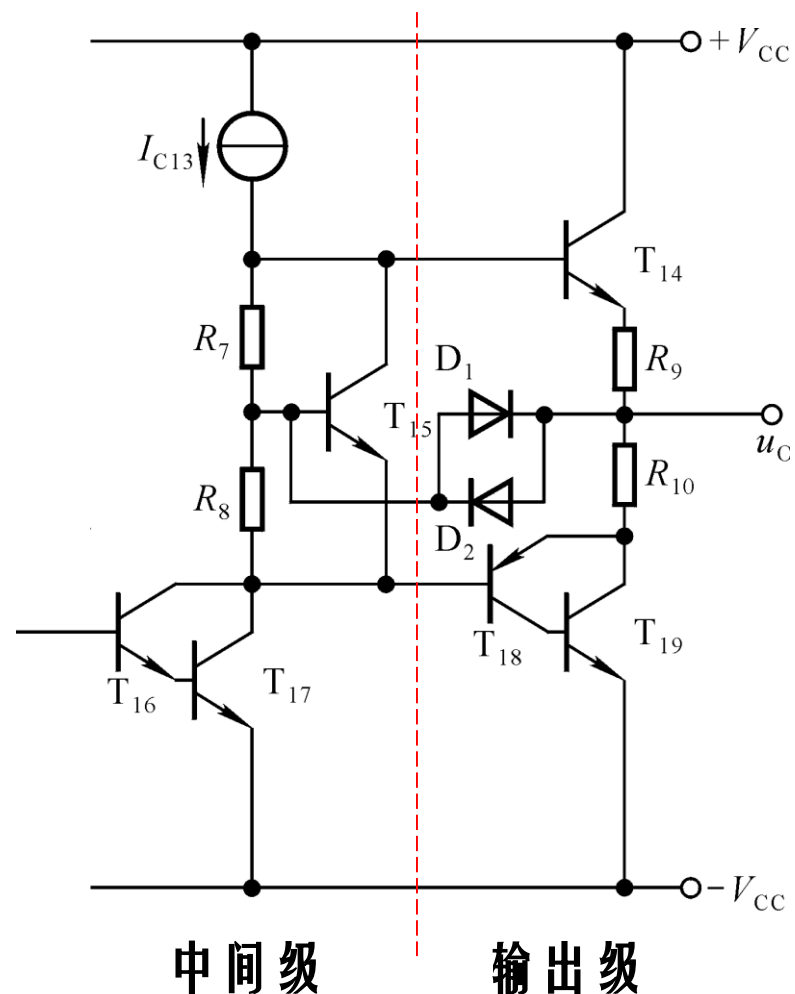
特点：

输入电阻大、差模放大倍数大、共模放大倍数小、输入端耐压高，并完成电平转换（即对“地”输出）。





中间级的分析



中间级是主放大器，它所采取的一切措施都是为了增大放大倍数。

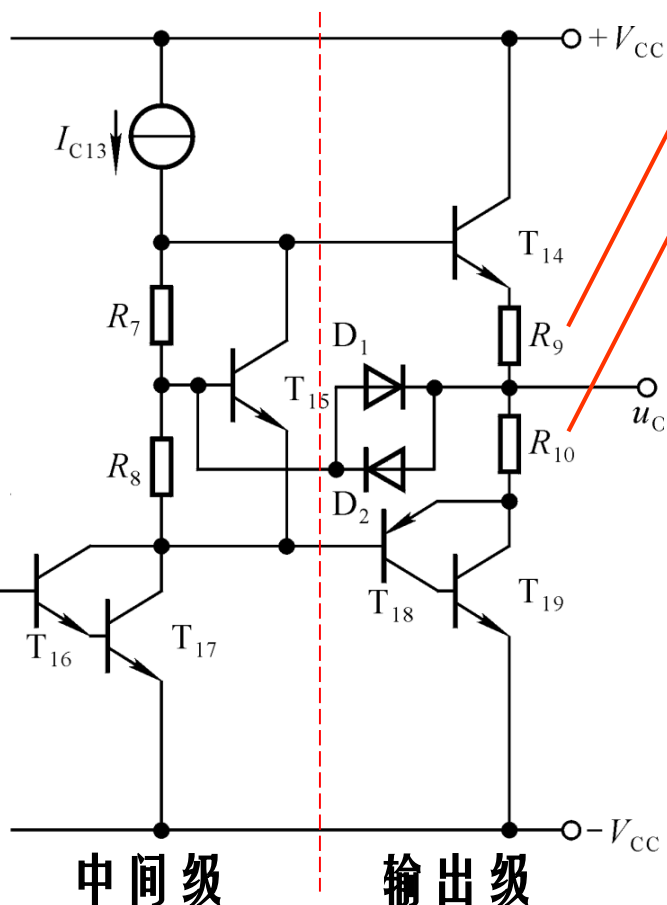
F007的中间级是以复合管为放大管、采用有源负载的共射放大电路。由于等效的集电极电阻趋于无穷大，故动态电流几乎全部流入输出级。





输出级的分析

■ 准互补输出级， U_{BE} 倍增电路消除交越失真。



电流采样电阻

D_1 和 D_2 起过流保护作用，未过流时，两只二极管均截止。

$$U_{D1} = U_{BE14} + i_O R_9 - U_{R7}$$

i_O 增大到一定程度， D_1 导通，为 T_{14} 基极分流，从而保护了 T_{14} 。

特点：

输出电阻小

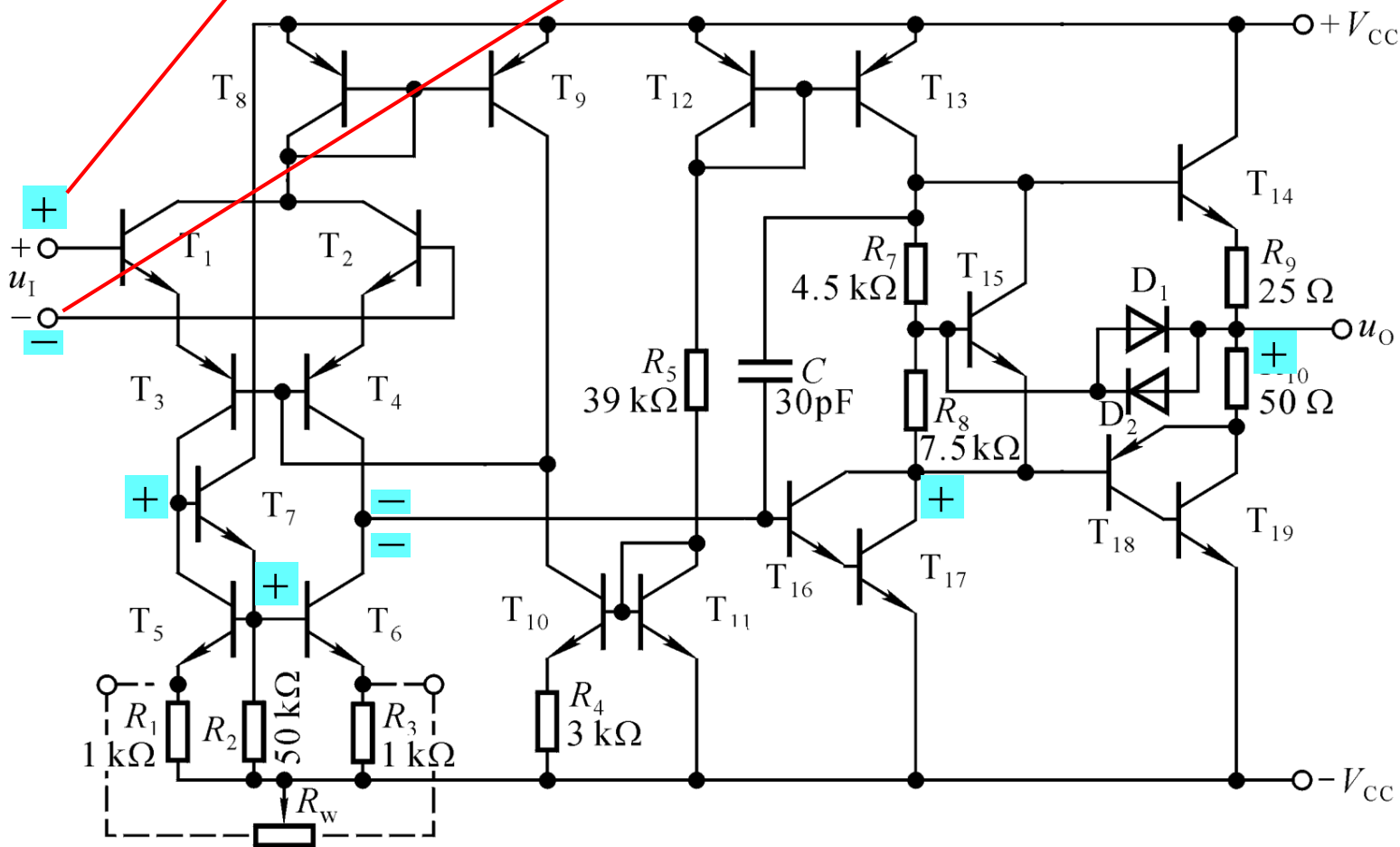
最大不失真输出电压高





判断同相输入端和反相输入端

同相输入端和反相输入端



输入电阻大、差模增益大、输出电阻小、共模抑制能力强、允许的共模输入电压高、输入端耐压高等。



3.6 集成运放的主要性能指标

指标参数	$20\lg A_{od} $	F007典型值	理想值
■ 开环差模增益 A_{od}		106dB	∞
■ 差模输入电阻 r_{id}		2M Ω	∞
■ 共模抑制比 K_{CMR}		90dB	∞
■ 输入失调电压 U_{IO}		1mV	0
■ U_{IO} 的温漂 $d U_{IO}/dT(^{\circ}C)$		几 $\mu V/^{\circ}C$	0
■ 输入失调电流 $I_{IO} (I_{B1} - I_{B2})$		20nA	0
■ I_{IO} 的温漂 $d I_{IO}/dT(^{\circ}C)$		几nA/ $^{\circ}C$	0
■ 最大共模输入电压 U_{Icmax}		$\pm 13V$	
■ 最大差模输入电压 U_{Idmax}		$\pm 30V$	
■ -3dB带宽 f_H		10Hz	∞
■ 转换速率 $SR(=du_O/dt _{max})$		0.5V/ μS	∞

使 u_O 为0在
输入端所加的
补偿电压

超过此值不
能正常放大
差模信号

超过此值
输入级放
大管击穿





3.7 集成运放的种类

按照性能特点分类：

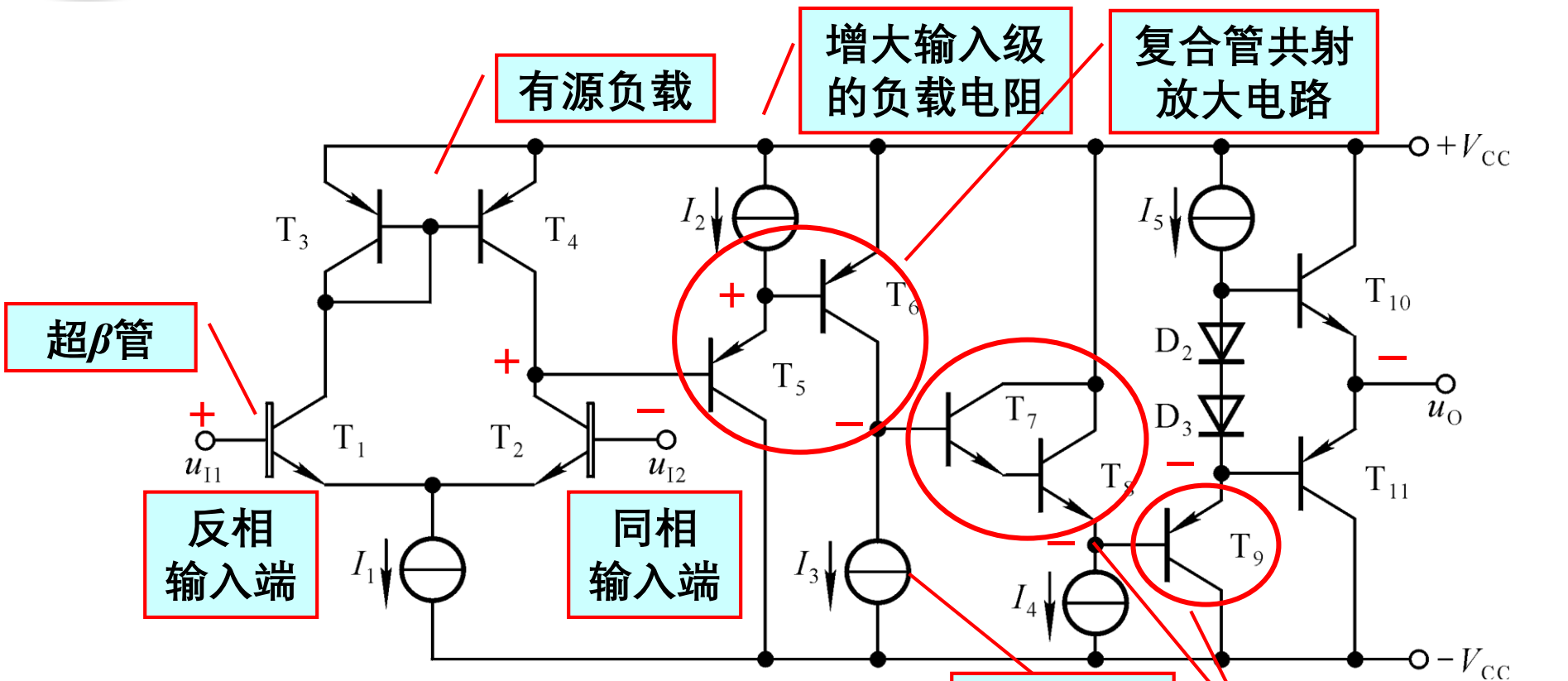
- ①通用性 ②高阻型 ③高速型 ④高精度型
⑤低功耗型 ⑥高电压型 ⑦大功率型

- (1) 作低频放大器，应选用___。
(2) 作宽频带放大器，应选用___。
(3) 作幅值为 $1\mu\text{V}$ 以下微弱信号的测量放大器，应选用___。
(4) 作内阻为 $100\text{k}\Omega$ 信号源的放大器，应选用___。
(5) 负载需 5A 电流驱动的放大器，应选用___。
(6) 要求输出电压幅值为 $\pm 80\text{V}$ 的放大器，应选用___。
(7) 宇航仪器中所用的放大器，应选用___。





讨论



1. 输入级采用什么措施增大放大倍数?
2. 中间级采用什么措施增大电压放大倍数?
3. 如何消除交越失真?
4. u_{I1} 、 u_{I3} 哪个是同相输入端? 哪个是反相输入端?

