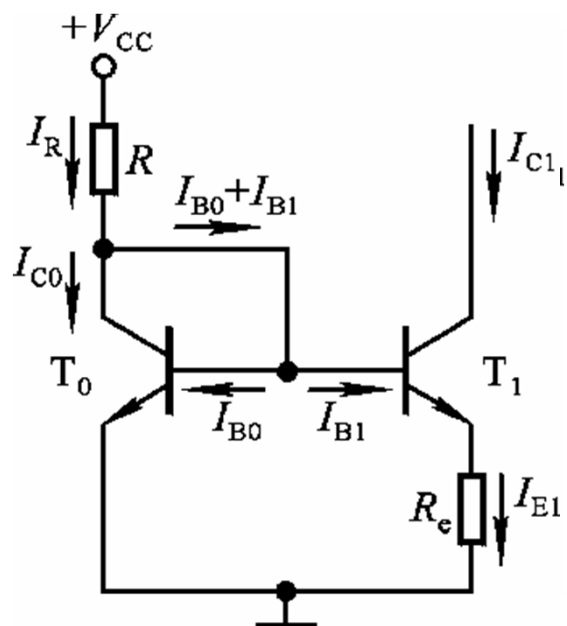


(3) 微电流源(Widlar Current Mirror)



$$I_{E1} R_e = U_{BE0} - U_{BE1}$$

$$I_{E0} \approx I_s e^{U_{BE0}/U_T}, I_{E1} \approx I_s e^{U_{BE1}/U_T}$$

$$\frac{I_{E0}}{I_{E1}} \approx e^{(U_{BE0} - U_{BE1})/U_T}$$

$$I_{E0} \approx I_R$$

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

$$U_{BE0} - U_{BE1} \approx U_T \ln\left(\frac{I_{E0}}{I_{E1}}\right) = I_{E1} R_e$$

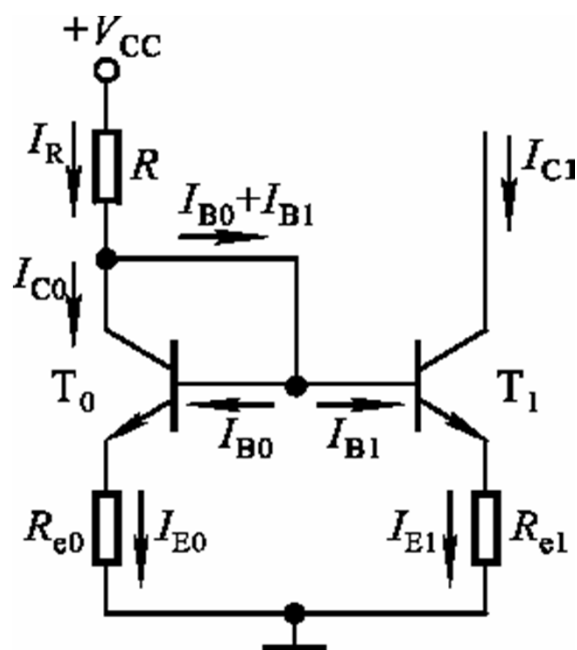
$$I_{C1} \approx \frac{U_T}{R_e} \ln\left(\frac{I_R}{I_{C1}}\right)$$

通过增加射极电阻得到小而稳定的 I_{C1} (μA), 同时可提高输出电阻

实际电路设计时, 先确定所需的 I_{C1} 和 I_R , 再确定 R 和 R_e

(4) 比例电流源和多路电流源

• 比例电流源



$$I_{E0}R_{e0} + U_{BE0} = I_{E1}R_{e1} + U_{BE1}$$

$$U_{BE0} \approx U_{BE1}$$

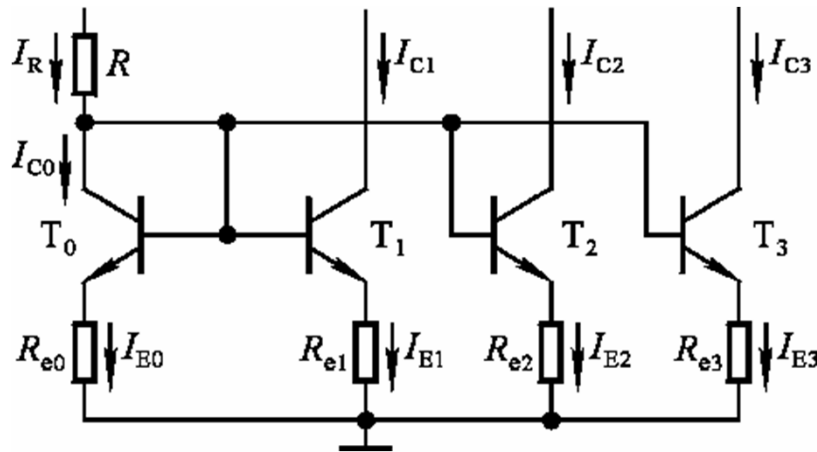
$$I_{E1} \approx \frac{R_{e0}}{R_{e1}} I_{E0} \quad I_{E0} = I_{C0} + I_{B0} \approx I_R$$

$$I_{C1} \approx \frac{R_{e0}}{R_{e1}} I_R$$

$$I_R \approx \frac{V_{CC} - U_{BE0}}{R + R_{e0}}$$

改变 R_{e0} 和 R_{e1} 的比值，可获得不同的 I_{C1}

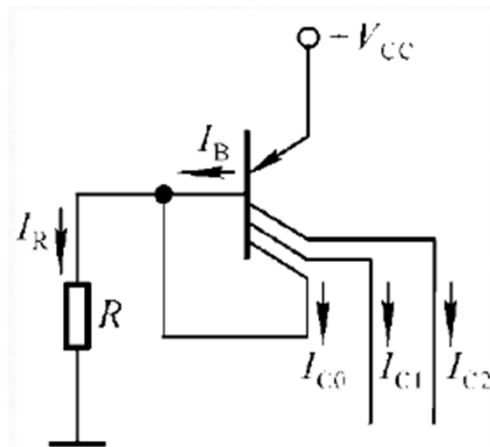
- 晶体管多路电流源(Multi-output Current Mirror)



$$I_{E0}R_{e0} \approx I_{E1}R_{e1} \approx \dots$$

$$I_{E0} \approx I_R$$

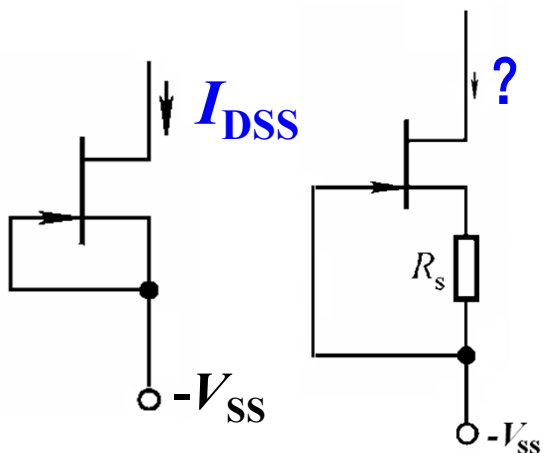
改变 R_{e0} 和 R_{ei} 的比值，可获得不同的 I_{Ci} ， $i=1,2,\dots$



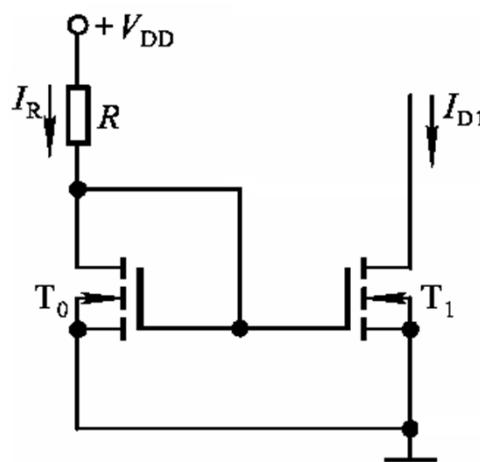
多集电极晶体管：利用集电结面积成比例实现多路比例电流源

2. 场效应管电流源

(1) JFET恒流源



(2) MOSFET比例电流源

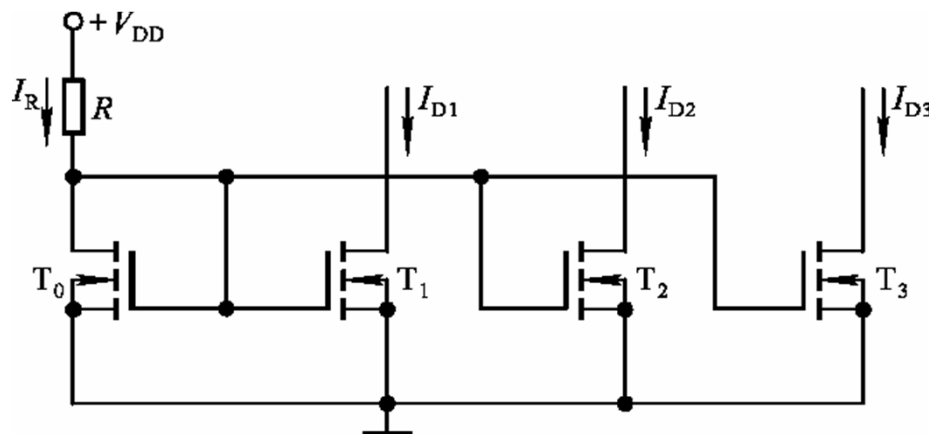


$$i_D = \frac{1}{2} k_n' \left(\frac{W}{L} \right) (U_{GS} - U_{GS(th)})^2$$

沟道宽
长比S

$$\frac{I_{D1}}{I_{D0}} = \frac{I_{D1}}{I_R} = \frac{S_1}{S_0} \quad I_R = ?$$

(3) MOSFET多路电流源



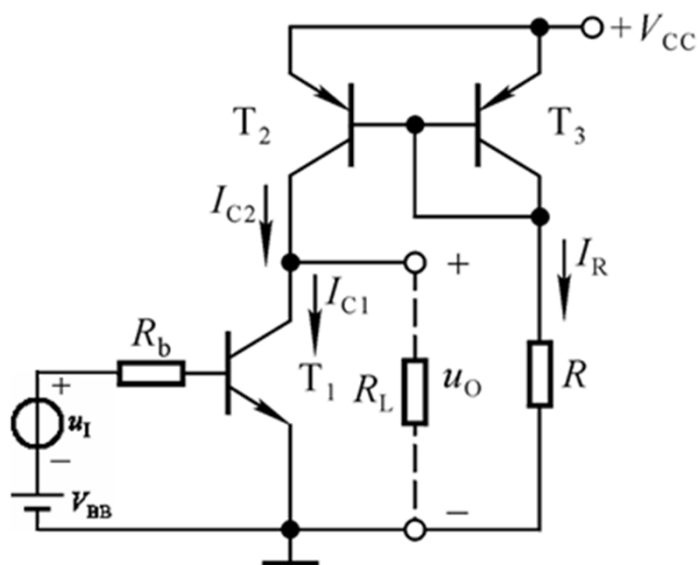
$$\frac{I_R}{S_0} = \frac{I_{D1}}{S_1} = \frac{I_{D2}}{S_2} = \frac{I_{D3}}{S_3}$$

3. 有源负载 (Active Load) 放大电路

电流源电路除了设置静态电流外，还可以作为放大电路的有源负载，取代大阻值的电阻，提高电压放大倍数

(1) 有源负载共射放大电路

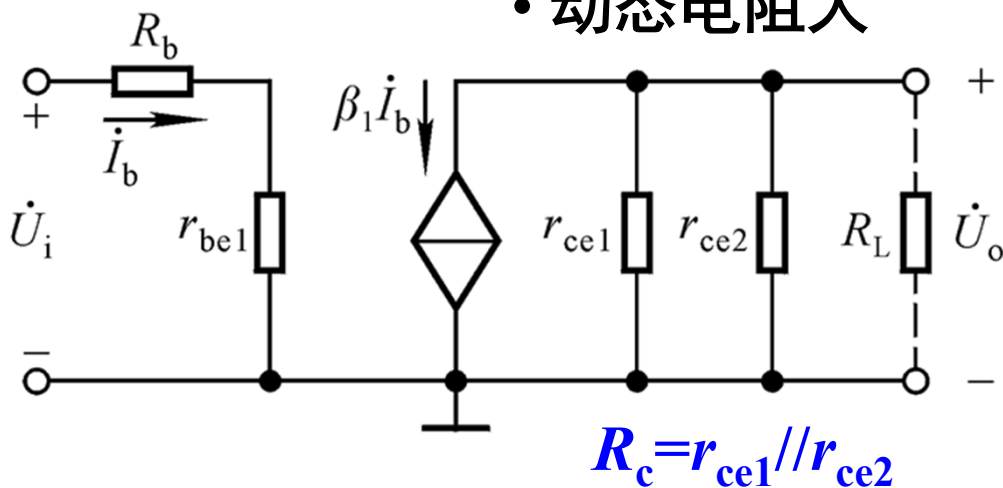
$$R_c \uparrow \rightarrow |A_u| \uparrow$$



$$\dot{A}_u = -\beta \frac{R_c // R_L}{r_{be}}$$

用电流源代替 R_c :

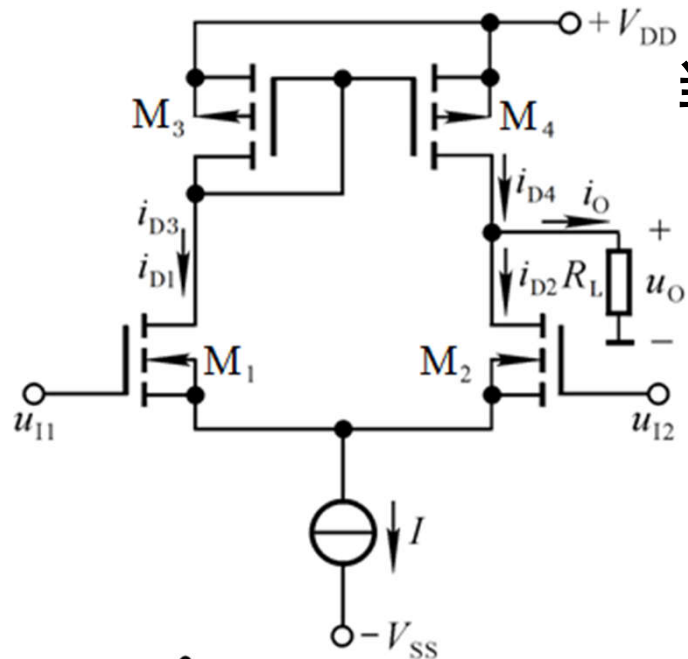
- 静态电流可以设置
- 动态电阻大



有源负载可以提高共射放大电路的电压放大倍数

(2) 有源负载差分放大电路

M_3 、 M_4 组成镜象电流源，作为 M_2 的有源负载



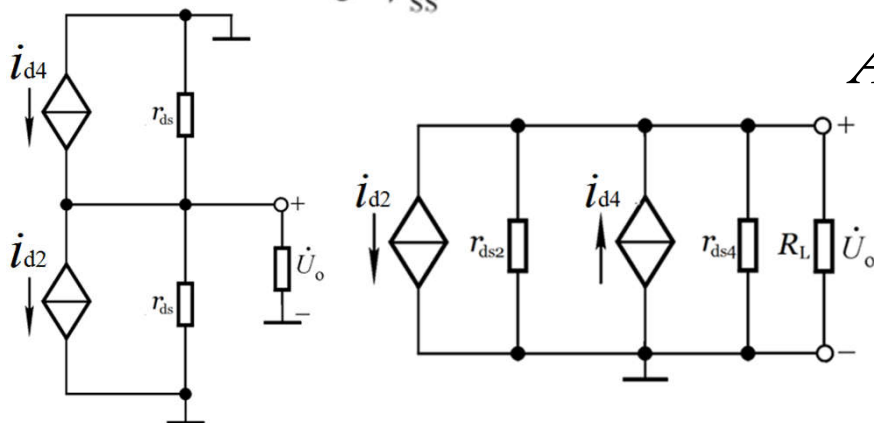
当 u_{Id} 引起 i_{D1} 增加 Δi 时，即 $\Delta i_{D1} = \Delta i = g_m \Delta u_{Id} / 2$

$$\Delta i_{D2} = -\Delta i_{D1} = -\Delta i$$

$$\Delta i_{D3} = \Delta i_{D1} = \Delta i$$

$$\Delta i_{D4} = \Delta i_{D3} = \Delta i$$

$$\Delta i_O = \Delta i_{D4} - \Delta i_{D2} \approx 2 \Delta i = g_m \Delta u_{Id}$$



$$A_d = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}} = \frac{\Delta i_O \cdot (r_{ds2} // r_{ds4} // R_L)}{\Delta u_{Id}} = g_m \cdot (r_{ds2} // r_{ds4} // R_L)$$

镜象电流源可以使单端输出的差分放大电路的 $|A_d|$ 提高近一倍

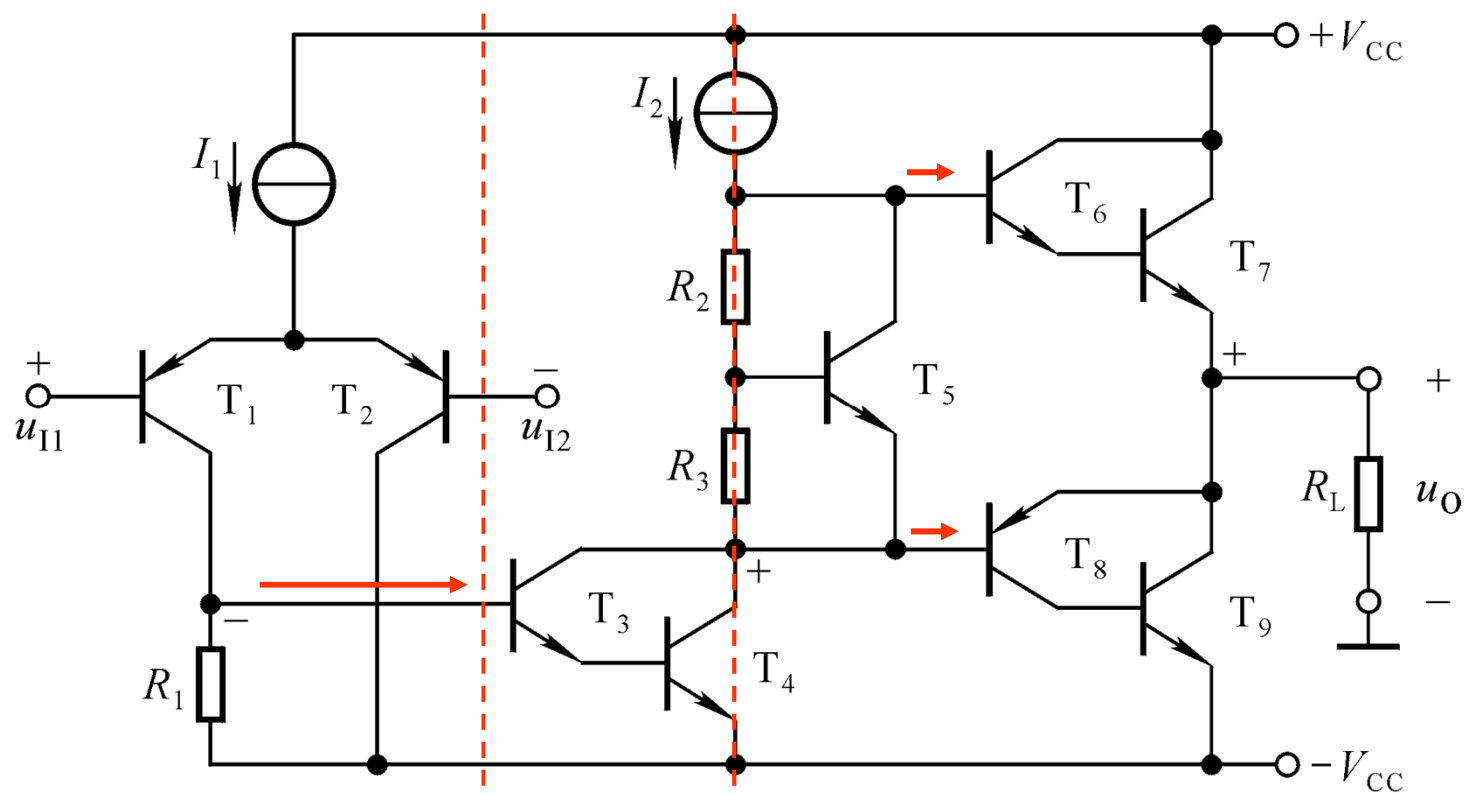


4.5 集成运放电路简介

集成运放读图步骤：

1. 合理分块：按信号的流向找出输入级、中间级、输出级，并确定偏置电路；
2. 分析功能：分析各块的功能和工作原理；
3. 统观整体：定性分析电路整体功能和性能特点；
4. 性能估算：定量估算静态工作点和动态性能指标。

简单双极型集成运放



双入单出差
分放大电路

复合管
共射放
大电路

U_{BE} 倍
增电路

准互补
电路

分析步骤

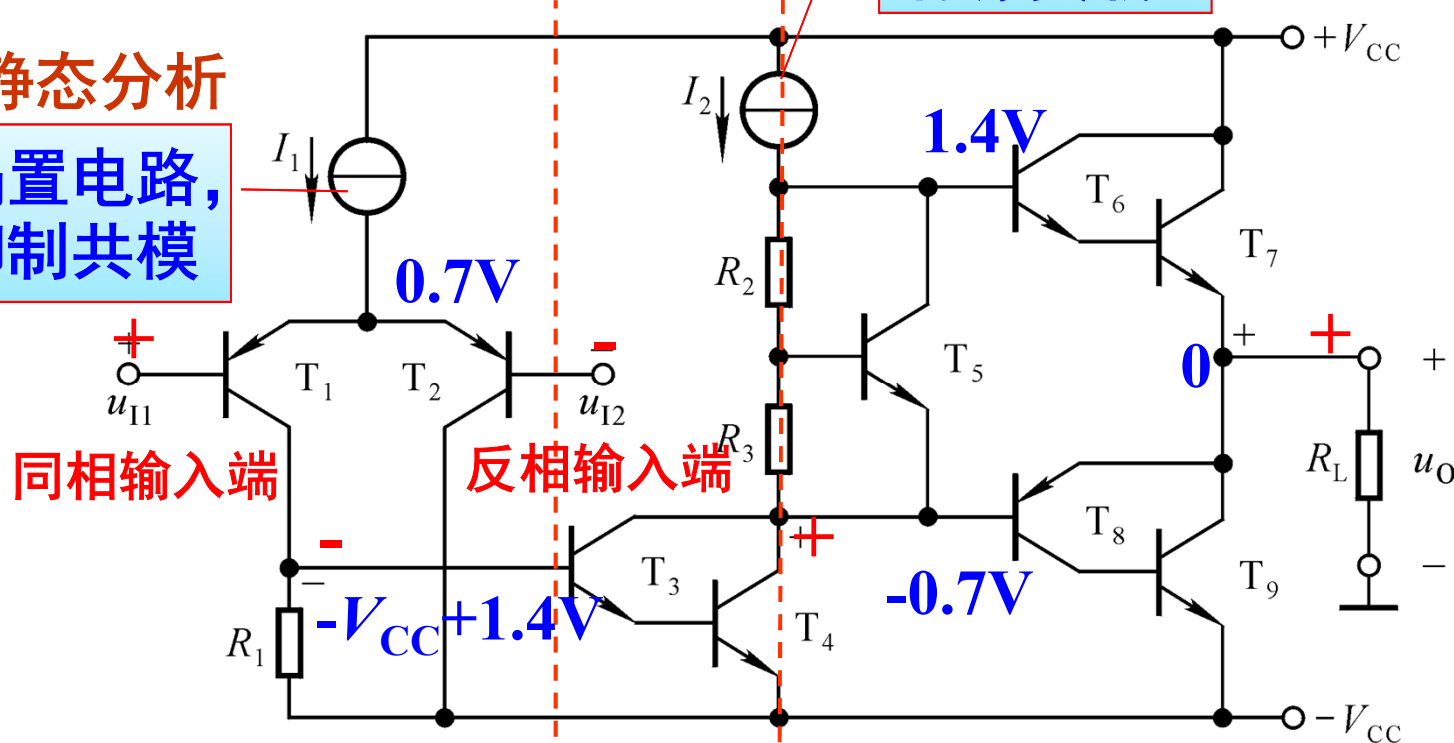
- .合理分块
- .功能分析
- .静态分析
- .动态分析

简单双极型集成运放

静态分析

偏置电路, 抑制共模

偏置电路, 有源负载



$$I_{R_1} \approx \frac{1.4}{R_1}$$

$$I_{B3} = \frac{1}{2} I_1 - I_{R_1}, \quad I_{C3C4} \approx \beta_3 \cdot \beta_4 \cdot I_{B3}$$

$$I_2 = I_{C3C4} + I_{B6} + I_{B8}$$

动态分析

输入差模信号时，E点相当于交流接地点

等效为

$$r_{be} = r_{be6} + (1 + \beta_6)r_{be7}$$

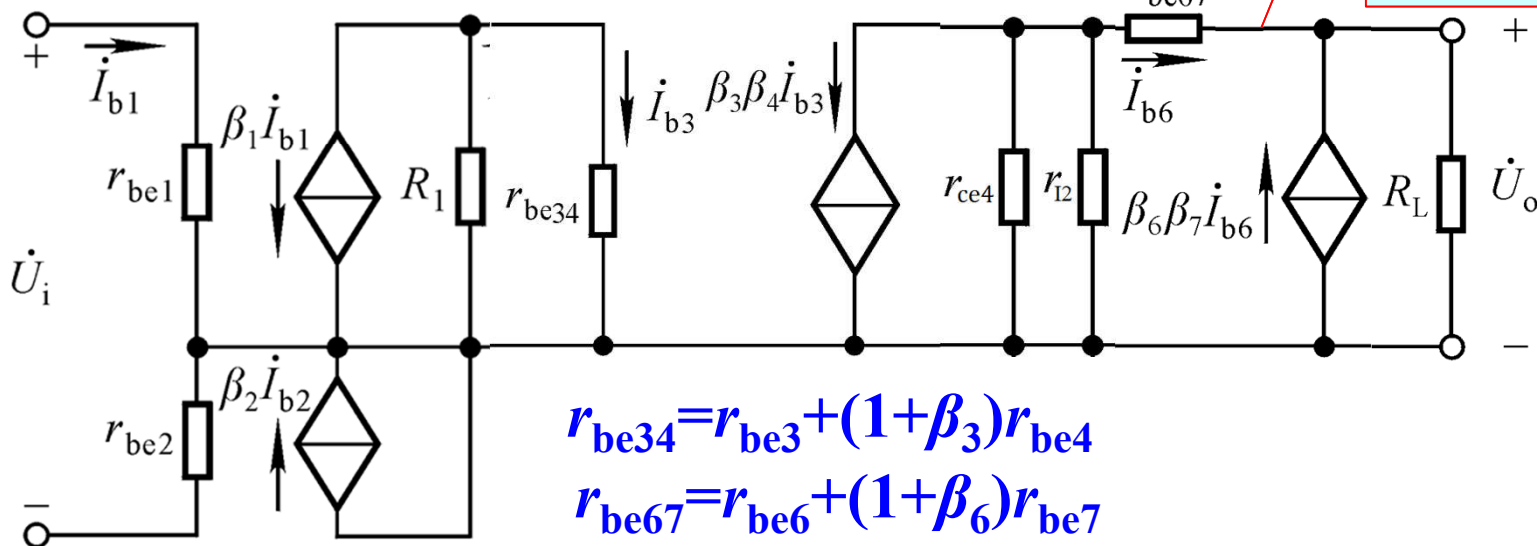
$$\beta \approx \beta_6\beta_7 \text{ 的晶体管}$$

等效为

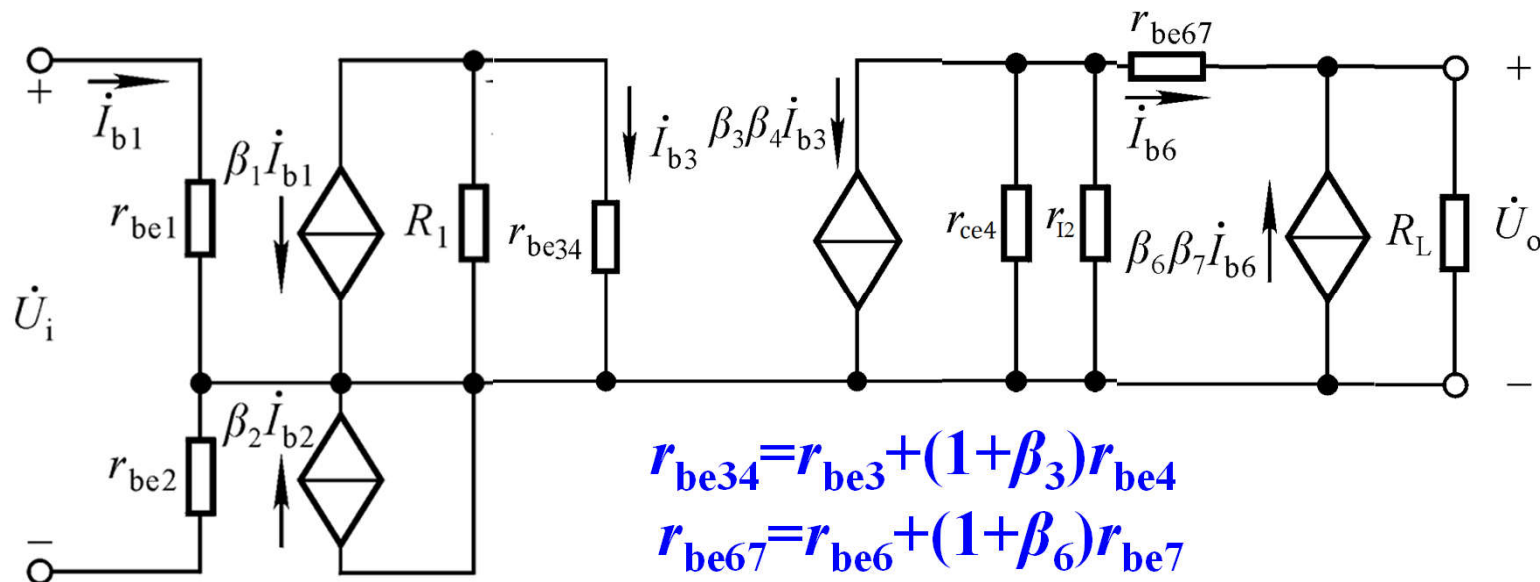
$$r_{be} = r_{be3} + (1 + \beta_3)r_{be4}$$

$$\beta \approx \beta_3\beta_4 \text{ 的晶体管}$$

为何只画 T_6 、 T_7 的等效电路



动态分析



$$A_{u1} = -\frac{1}{2} \frac{\beta_1 \cdot (R_1 // r_{be34})}{r_{be1}}$$

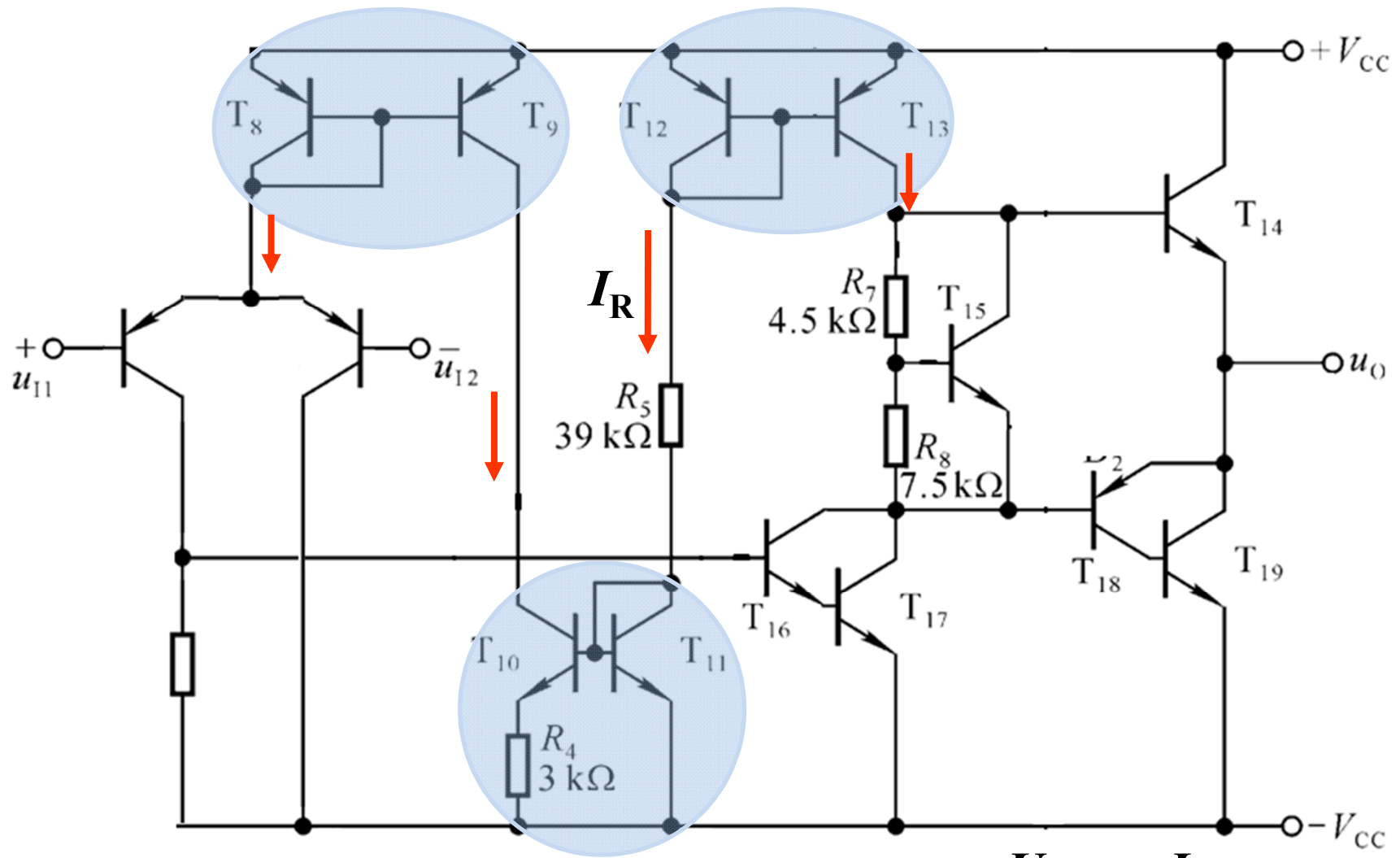
$$A_{u3} \approx 1$$

$$A_{u2} = -\frac{\beta_3 \beta_4 \cdot [r_{ce4} // r_{i2} // [r_{be67} + (1 + \beta_6 \beta_7)R_L]]}{r_{be34}}$$

问题:

• $R_i = ?$

• $R_o = ?$



$$I_R = \frac{2V_{CC} - 2U_{BEQ}}{R_5} \approx 0.73\text{mA} \approx I_{C13}$$

$$I_{C10} \approx \frac{U_T}{R_4} \ln\left(\frac{I_R}{I_{C10}}\right)$$

$$I_{C10} = I_{C9} \approx I_{C8} \approx 28\mu\text{A}$$

设置静态，抑制共模

(A741) 电路分析

偏置电路，有源负载 $\uparrow |A_u|$

CC-CB

$\uparrow R_i$

$\uparrow f_{bw}$

过流保护

有源负载

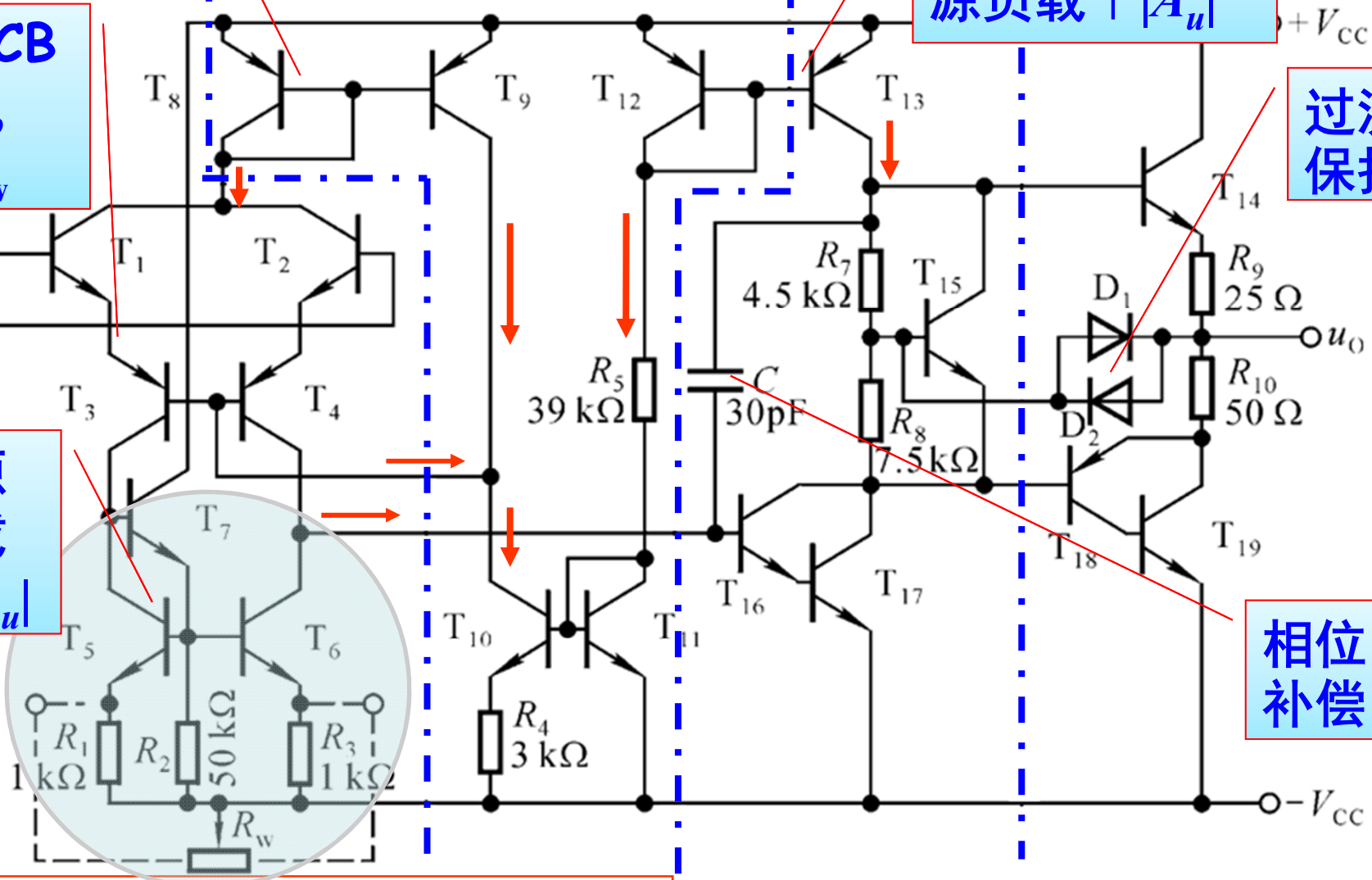
$\uparrow |A_u|$

相位补偿

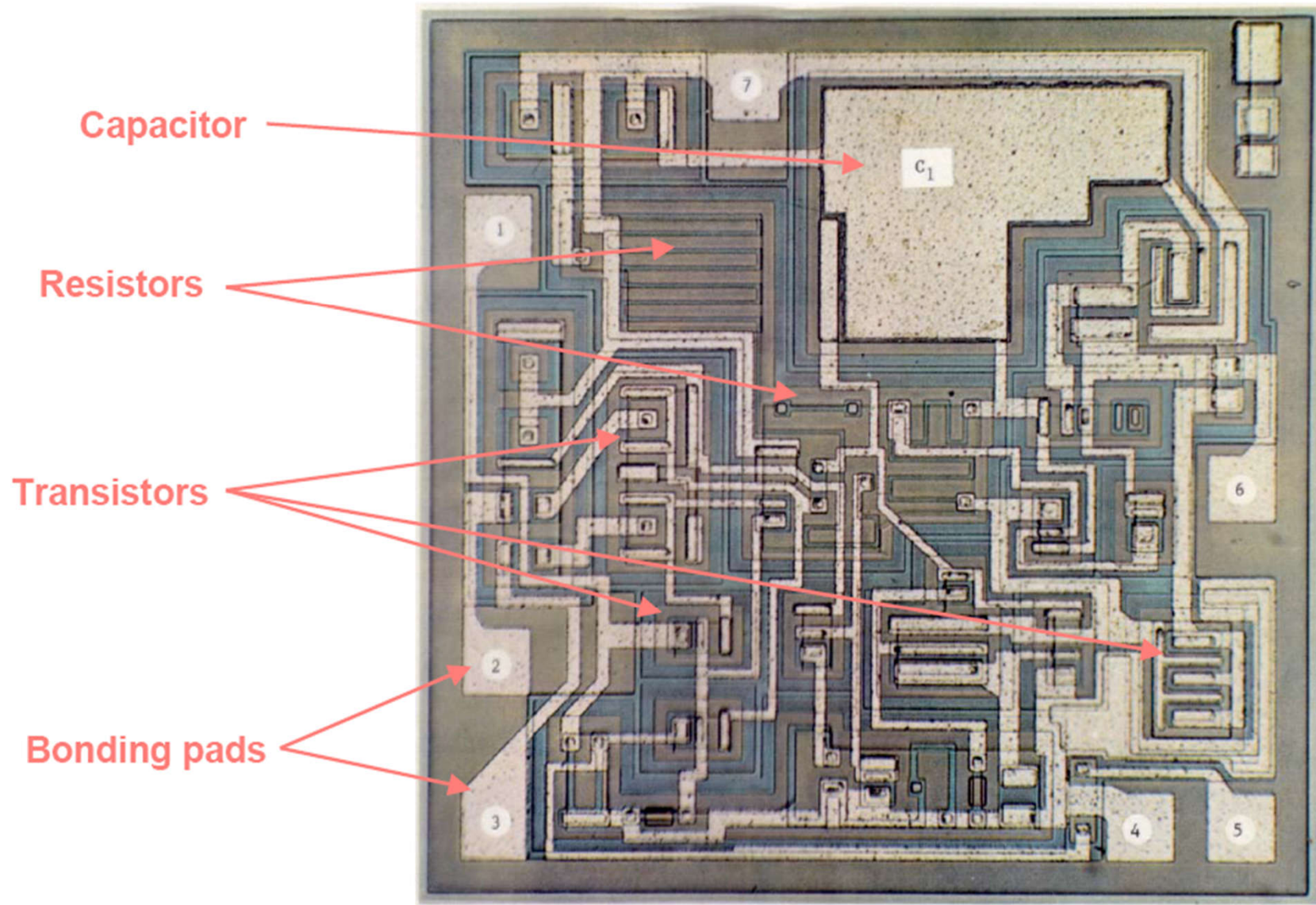
$$I_{C9} = \frac{I_{C10}}{1 + \frac{(\beta_8 + 2)(1 + \beta_2)}{\beta_8 \beta_2 (1 + \beta_4)}} \approx I_{C10}$$

中间级

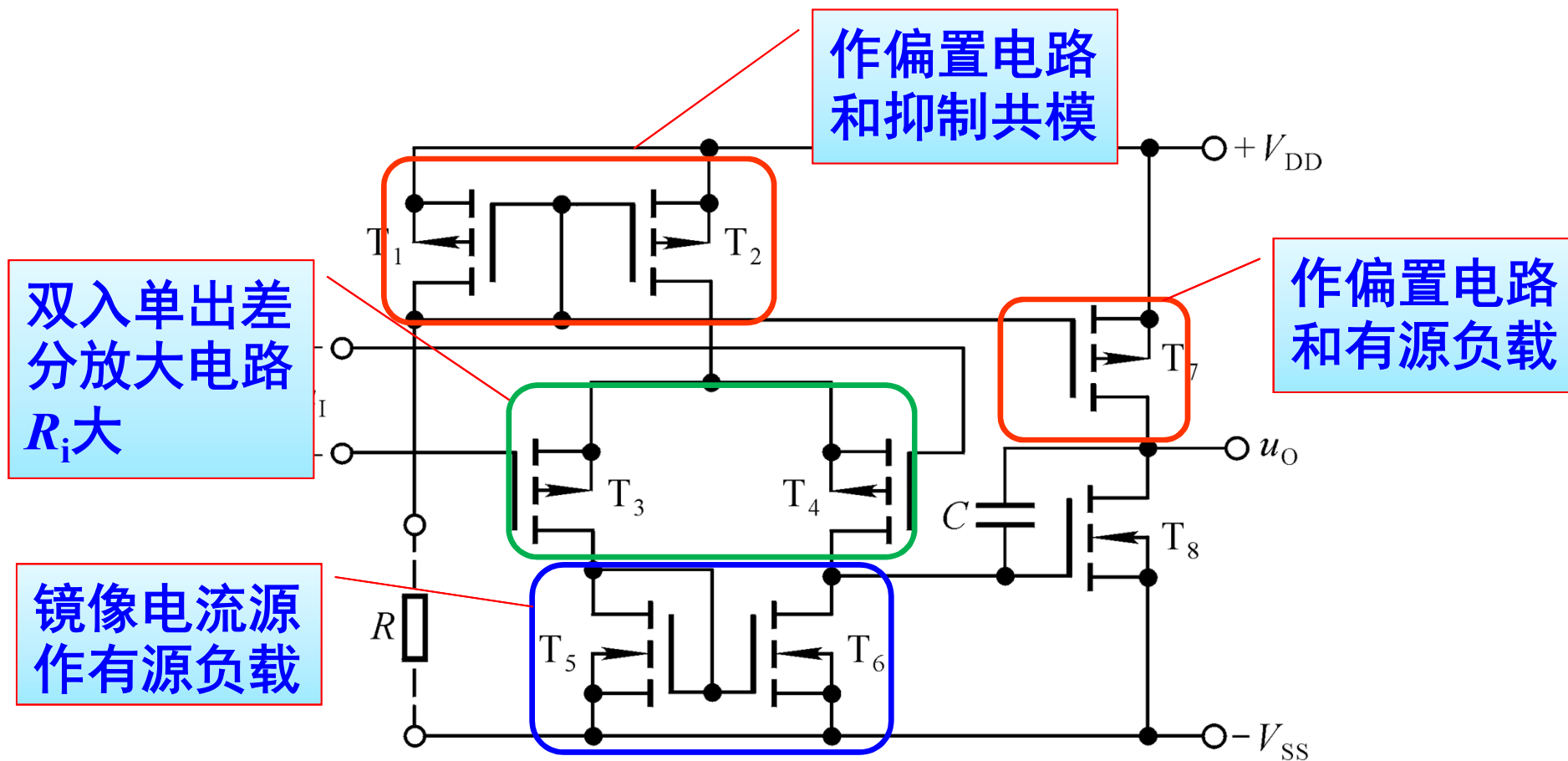
输出级



μ A741版图



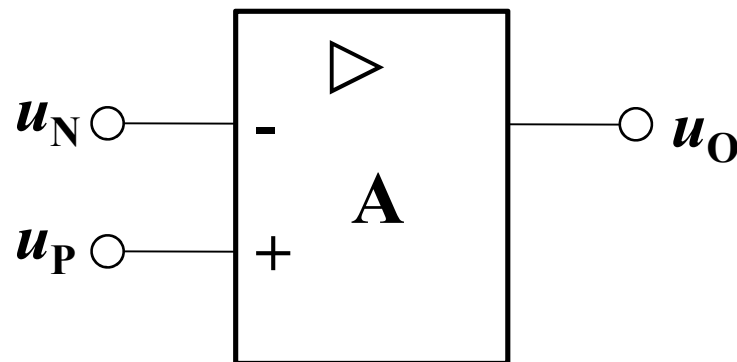
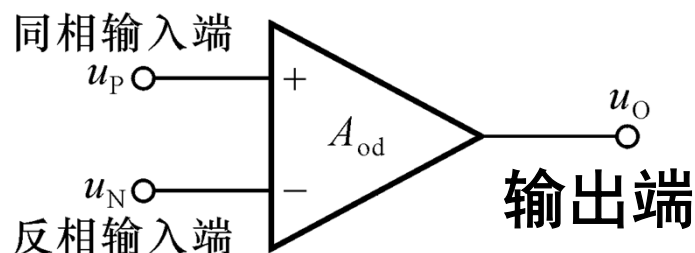
MOSFET集成运放C14573电路





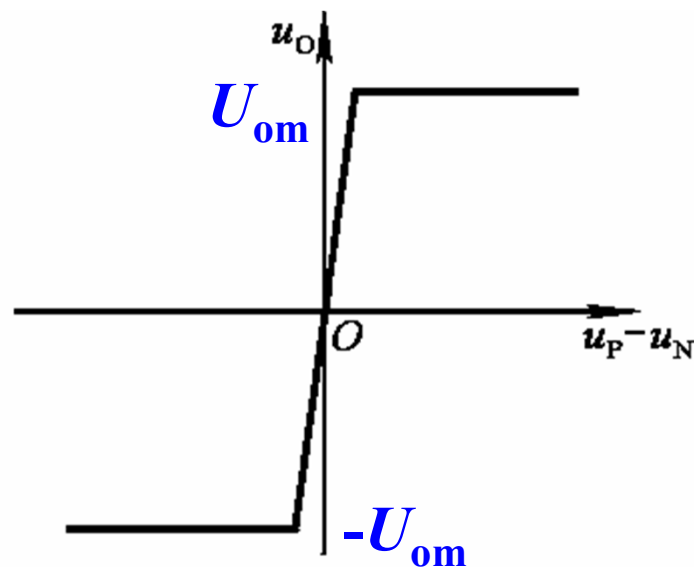
4.6 集成运放的性能指标和低频等效电路

一、集成运放符号

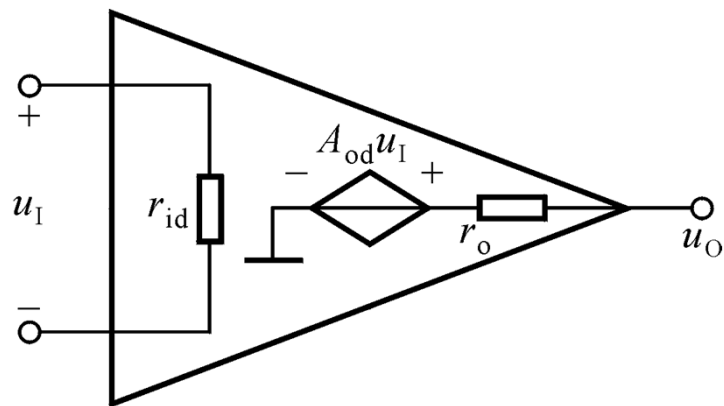


三、集成运放的电压传输特性

- 开环差模电压放大倍数 A_{od} 一般为 10^5 以上
- U_{om} 一般为 14V 左右 ($\pm 15V$ 电源)
- 当 $|u_o| \leq U_{om}$ 时, $u_o = A_{od} * (u_P - u_N)$



三、集成运放低频等效电路



简化的集成运放低频等效电路

四、集成运放性能指标

1. 开环差模增益 A_{od} : $20\lg|A_{od}|$, 分贝(dB)

2. 共模抑制比 $K_{CMR}=|A_{od}/A_{oc}|$

3. 开环差模输入电阻 r_{id}

4. 输入失调电压 U_{IO} 、输入失调电流 I_{IO}

$$U_{IO} = -\frac{U_O|_{u_i=0}}{A_{od}}$$

$$I_{IO} = |I_{B1} - I_{B2}|$$

5. 输入偏置电流 I_{IB}

$$I_{IB} = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$$

6. 最大差模输入电压 U_{Idmax} 、最大共模输入电压 U_{Icmax}

7. -3dB带宽 f_H (A_{od} 下降3dB), 单位增益带宽 f_c (A_{od} 下降到=1)

