

电路分析与电子技术基础

集成运算放大器

(1.6 ~ 1.8)

n 集成运算放大器

ü 通过半导体集成工艺，在很小的硅片上制成的一种高增益、直接耦合式的多级放大器，简称集成运放。

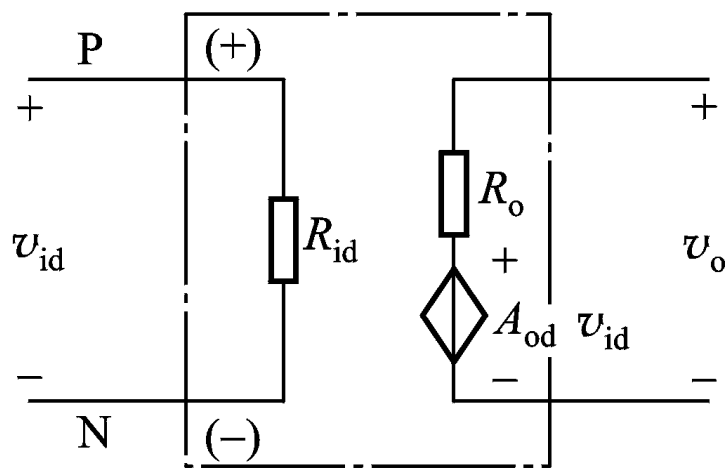
ü 最早应用于模拟信号的运算。

ü 目前广泛应用于信号测量、信号处理、信号产生和变换中，是现代电子电路中最基本的组成单元。

ü 主要技术指标：

电压增益、输入/输出电阻、共模抑制、温度/噪声系数、频率效应等。

ü 理想条件下，集成运算放大器可以等效成一个电压控制电压源（VCVS）。



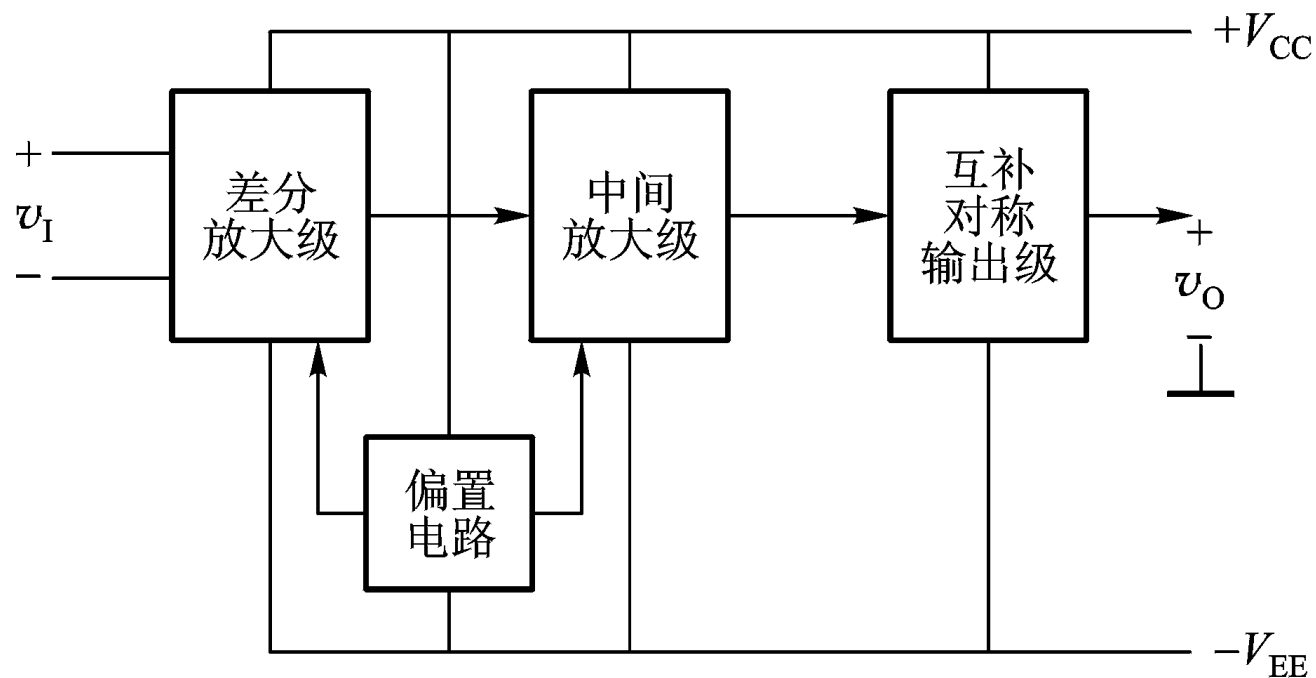
集成运算放大器（典型结构）

输入级：差分放大电路（高输入电阻、高共模抑制比、低温漂）。

中间级：CE / CS 电路（高电压增益）。

输出级：互补对称共集电路（低输出电阻、较强带负载能力）。

偏置电路：电流源电路（提供合适和稳定静态工作点、功耗低）。



Ø 集成运算放大器

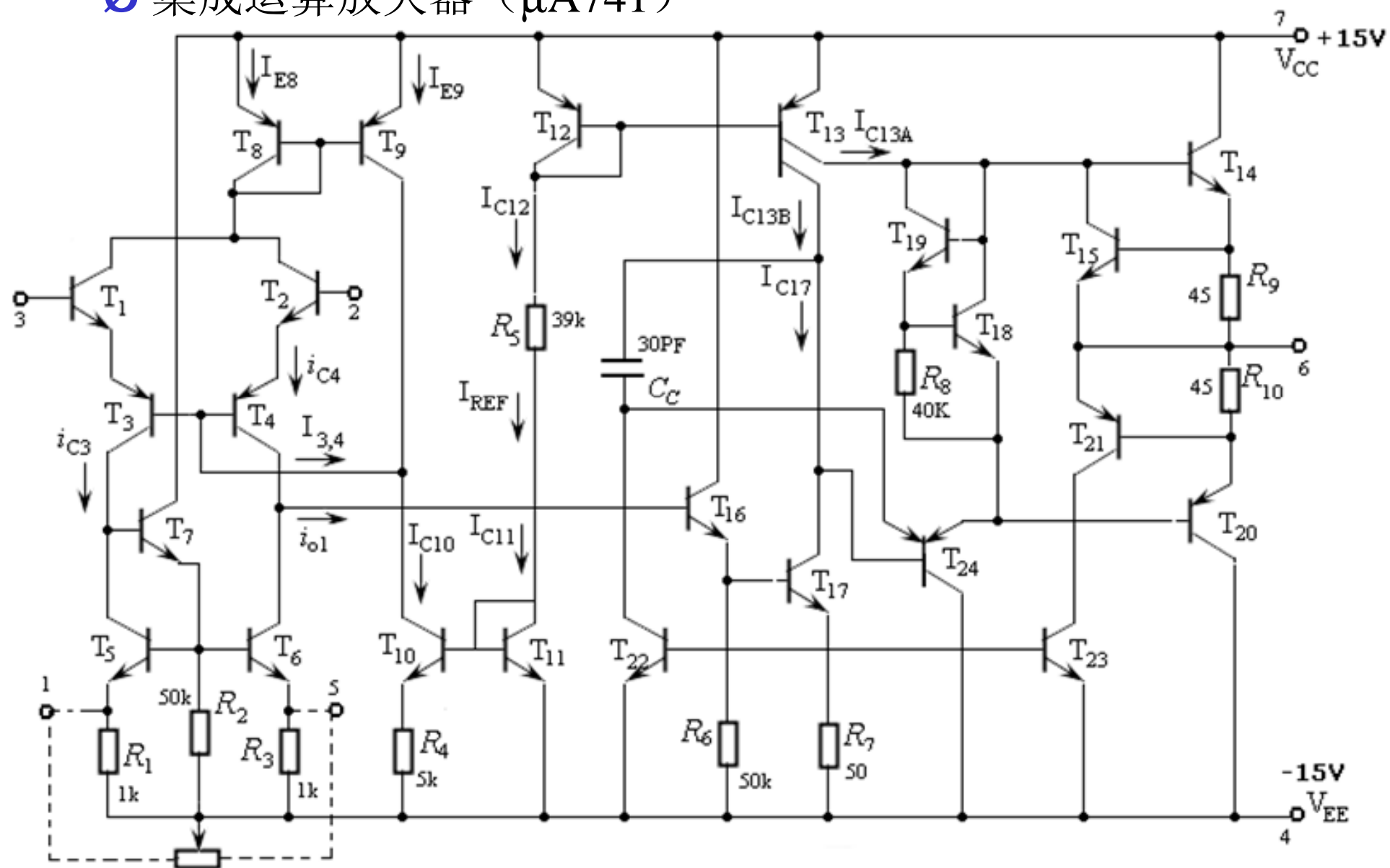
✓ 电流源电路（1.8.3）

✓ 差分放大电路（1.6）

✓ 互补对称共集电路（1.7）

✓ 集成运算放大器（1.8）

集成运算放大器 ($\mu A741$)



✓ 电流源电路

ü 电流源电路：

输出电流稳定，交流等效电阻大；
可作为静态偏置电路，或有源高阻负载。

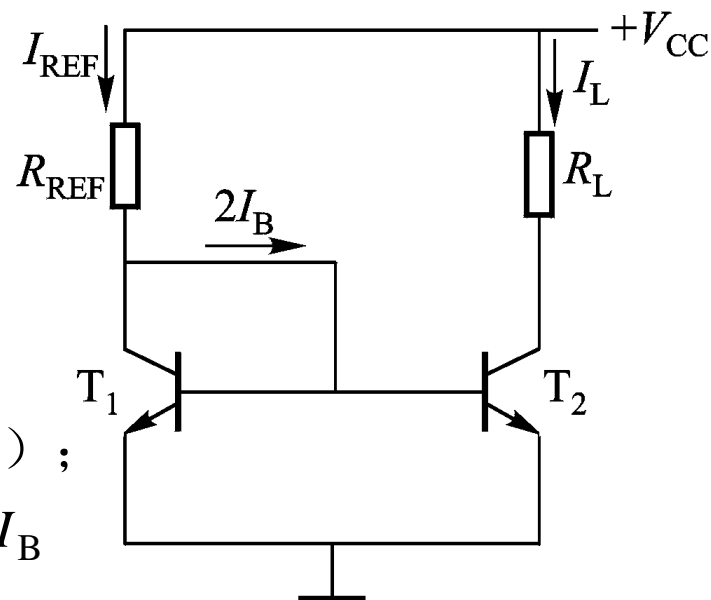
ü 常见电流源电路结构：

基本镜像电流源、跟随型镜像电流源、多路电流源。

Ø 基本镜像电流源

ü 右图所示基本镜像电流源电路。

ü T_1 管 $V_{CE} = V_{BE} = 0.7V$ （保证不进入饱和区）；
 T_1 、 T_2 管参数特性完全相同： $I_{C1} = I_L = b I_B$
所以，使 I_L 和 I_{C1} 呈镜像关系。



ü 电流关系：

$$\begin{cases} I_{C1} + 2I_B = I_{C1} + 2 \times \frac{I_{C1}}{b} = I_{REF} \\ I_{REF} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_{REF}} \end{cases} \Rightarrow I_{C1} = \frac{b}{2+b} \times I_{REF}$$

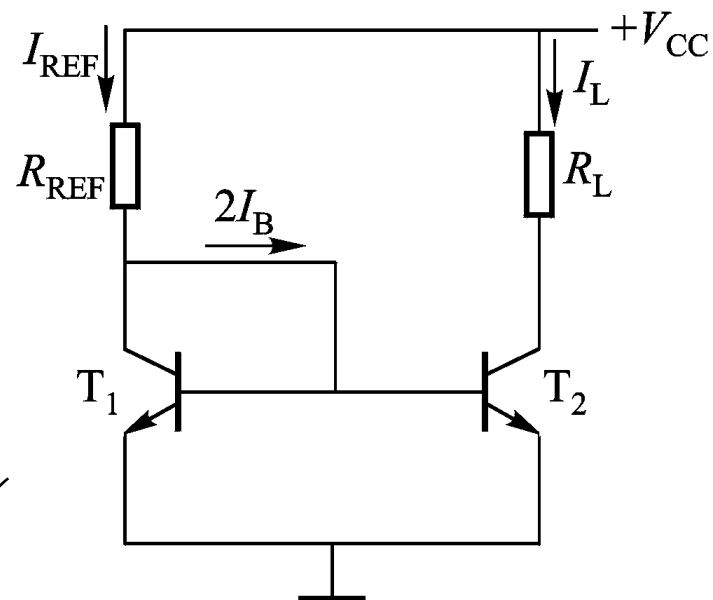
当 $b \gg 2$ 时， $I_L = I_{C1} \approx I_{REF} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_{REF}}$ 电流源

Ø 基本镜像电流源（温度补偿作用）

ü 右图所示基本镜像电流源电路。

该电流源具有一定的温度补偿作用。

$$\begin{aligned} T \uparrow &\Rightarrow I_{C1} \uparrow, I_L \uparrow \Rightarrow R_{REF} \text{压降} \uparrow \Rightarrow V_B \downarrow \Rightarrow I_B \downarrow \\ &\Rightarrow I_{C1} \downarrow, I_L \downarrow \end{aligned}$$



Ø 跟随型镜像电流源

ü 右图所示跟随型镜像电流源电路。

ü T_1 、 T_2 管参数特性完全相同；
(组成镜像电流源)

$$I_L = I_{C2} = I_{C1} \approx I_{REF}$$

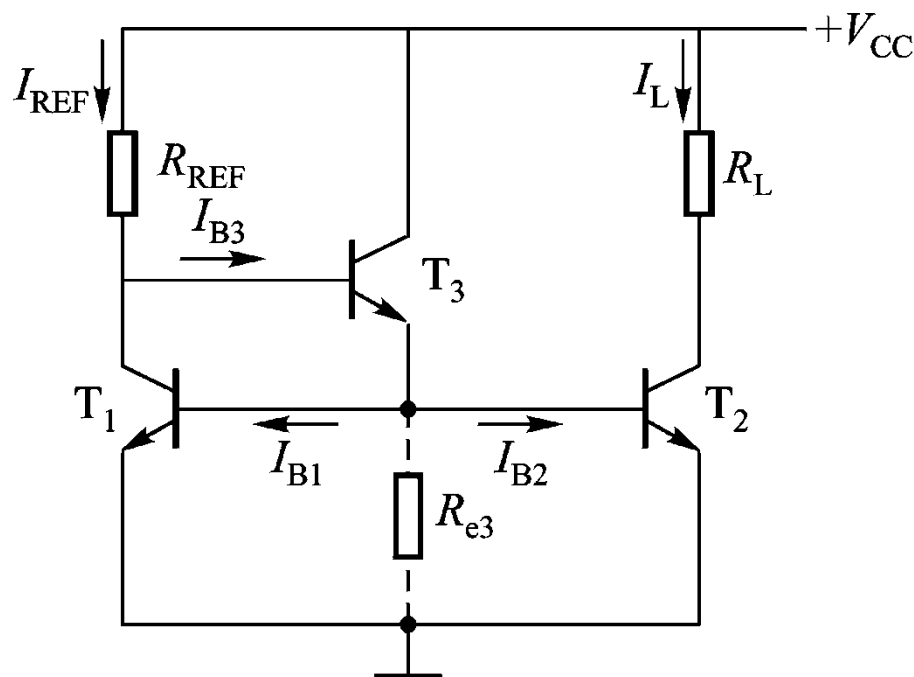
电阻 R_{REF} 确定参考电流 I_{REF} ；

$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - 2V_{BE}}{R_{REF}} \approx \frac{V_{CC}}{R_{REF}}$$

T_3 管作为射极跟随器，减小输出电流与参考电流的误差；

$$I_{B3} = \frac{I_{E3}}{1+b} = \frac{2I_{B1}}{1+b} = \frac{2I_{C1}}{b(1+b)}$$

R_{e3} 用来增大 T_3 管的工作电流，提高 T_3 管的电流放大系数。



Ø 跟随型镜像电流源（温度补偿作用）

ü 右图所示跟随型镜像电流源电路。
该电流源具有一定的温度补偿作用。

$$T \uparrow \Rightarrow I_{C1}、I_L \uparrow \Rightarrow R_{REF} \text{压降} \uparrow$$

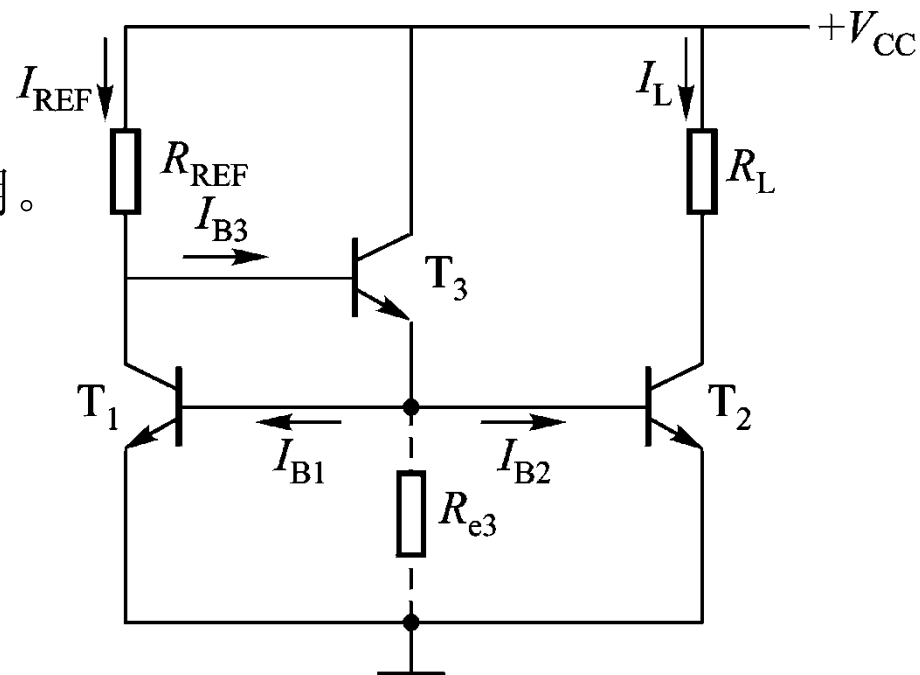
\Downarrow

$$V_B \downarrow$$

\Downarrow

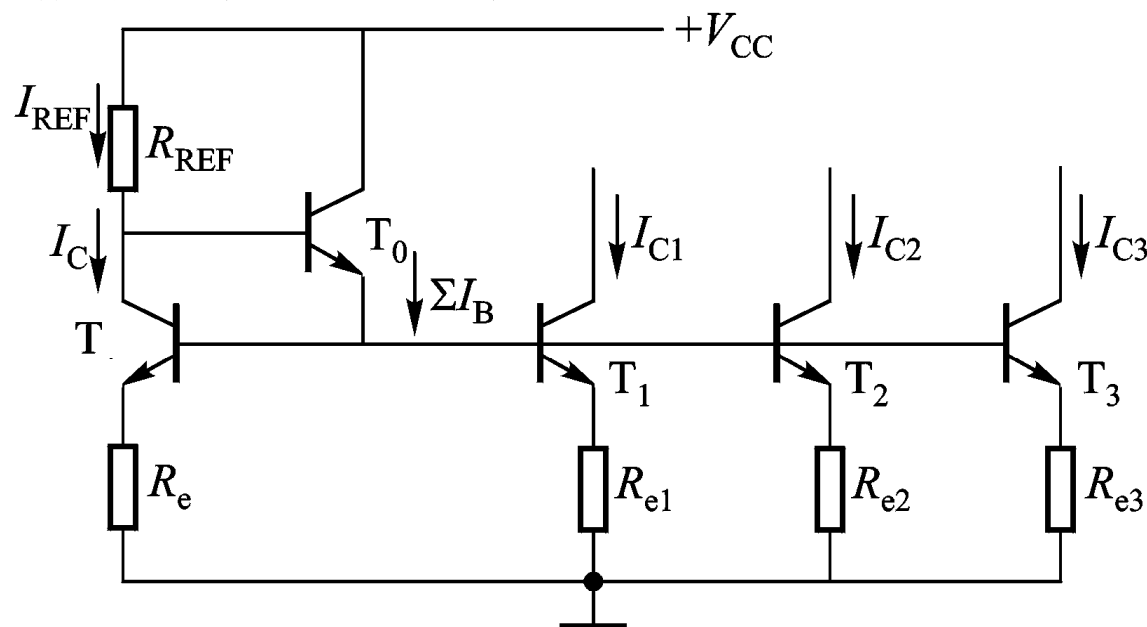
$$I_B \downarrow$$

$$I_{C1}、I_L \downarrow \Leftarrow$$



多路电流源

下图所示多路电流源电路。



相等

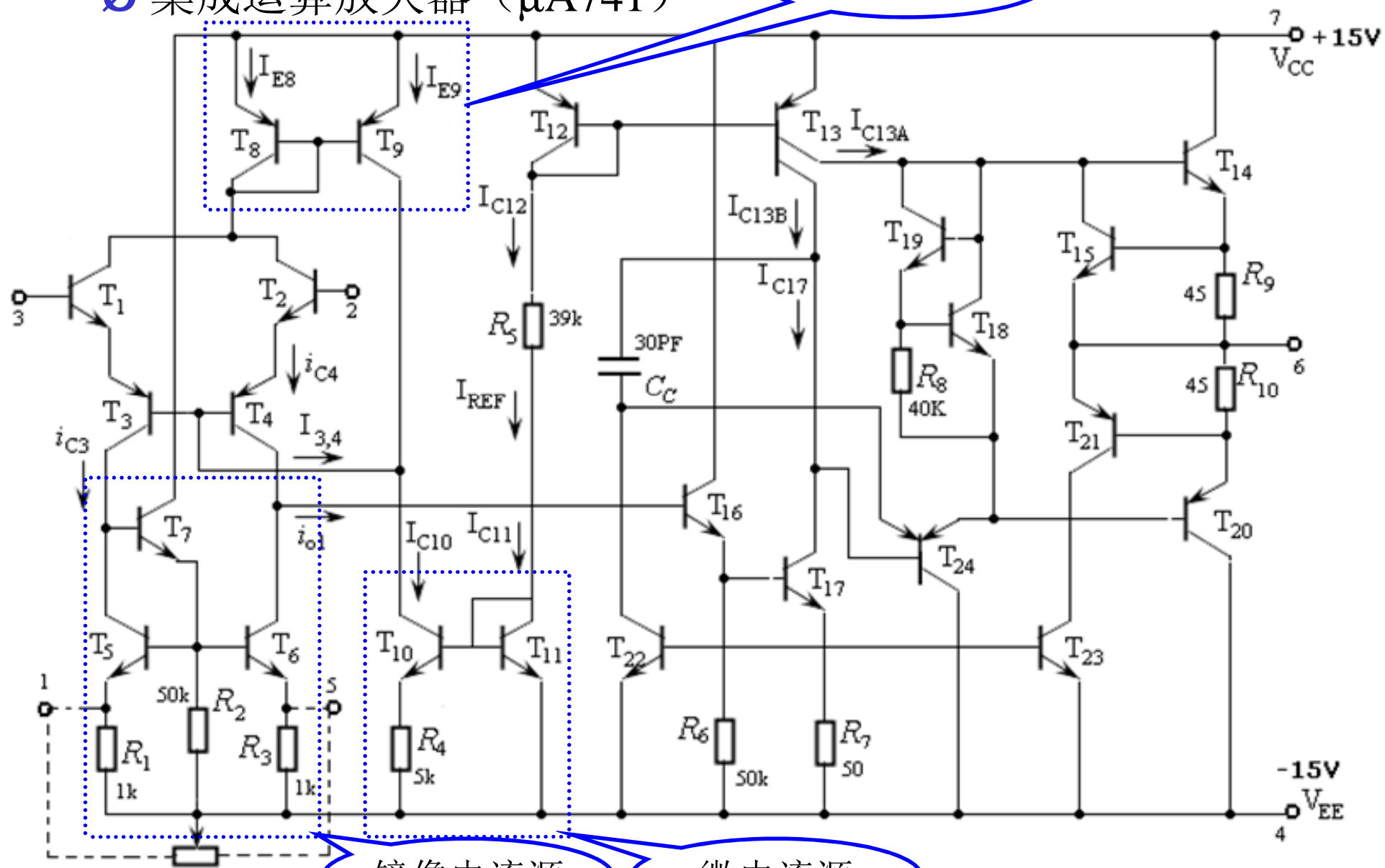
$$V_{BE} + I_E R_e = V_{BE1} + I_{E1} R_{e1} = V_{BE2} + I_{E2} R_{e2} = V_{BE3} + I_{E3} R_{e3} = \mathbf{L} = V_{BE4} + I_{E4} R_{e4}$$

$$I_E R_e \approx I_{E1} R_{e1} \approx I_{E2} R_{e2} \approx I_{E3} R_{e3} \Rightarrow I_{REF} R_e \approx I_{C1} R_{e1} \approx I_{C2} R_{e2} \approx I_{C3} R_{e3}$$

当参考电流 I_{REF} 确定后，调整支路射极电阻，即可获得不同的输出电流。

集成运算放大器 ($\mu A741$)

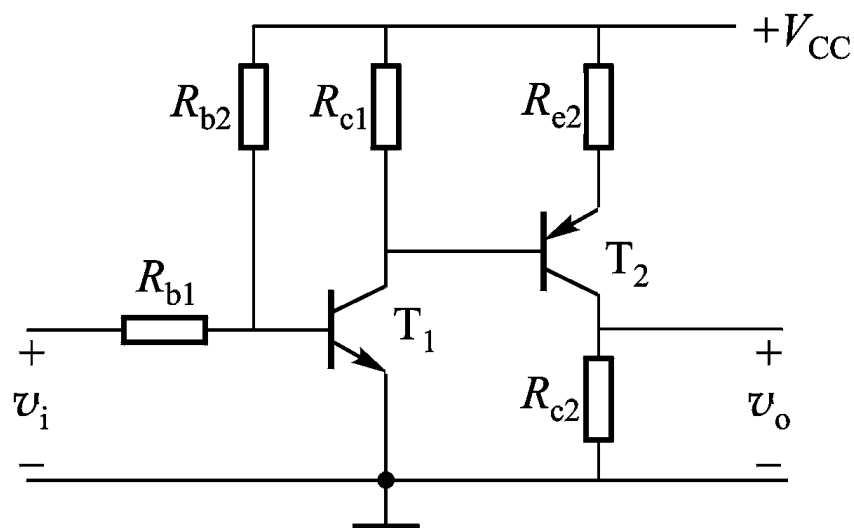
镜像电流源



✓ 差分放大电路

ü 实现对两个信号之差的放大；
又称差动放大电路，简称差放。

ü 能有效解决直接耦合放大器的零点漂移问题；

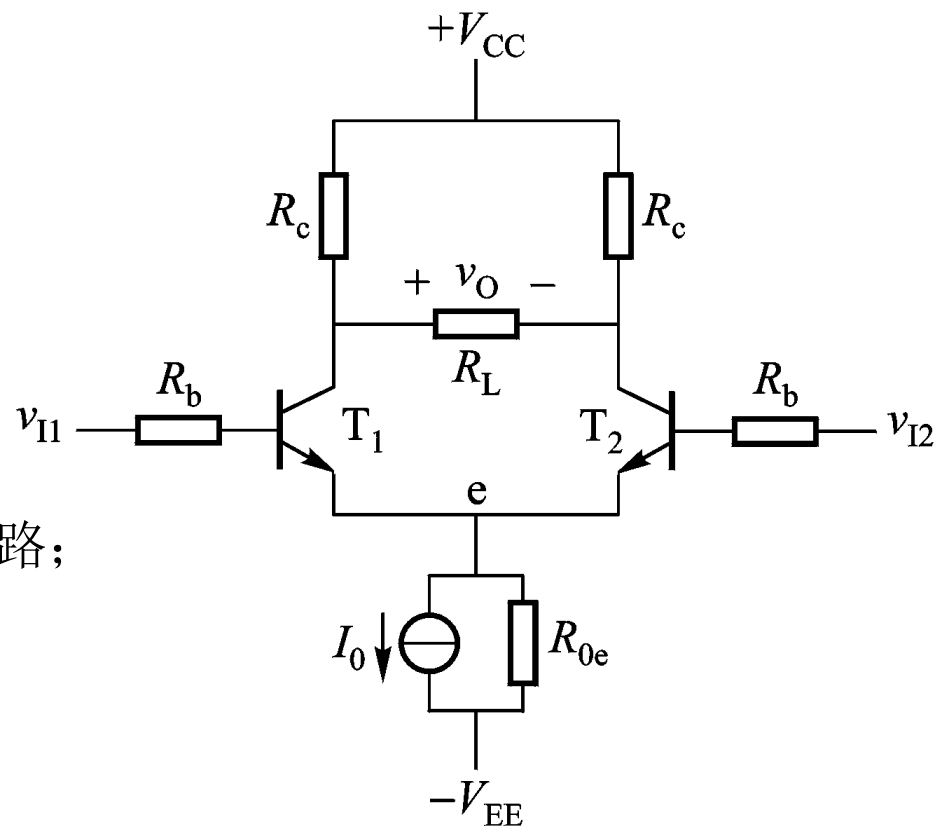


能有效解决双端输入时的共模抑制问题；
常作为集成运放的输入级。

Ø 差分放大电路（典型结构）

ü 右图所示基本差分放大电路。

ü 由参数对称的元件组成对称电路；
T₁、T₂ 管分别构成共射极放大电路；
电流源电路；
两组直流电源；
两个输入端、两个输出端。



❌ 差分放大电路（输入输出方式）

ü 从电路结构看输入输出方式。

ü 两种输入方式：

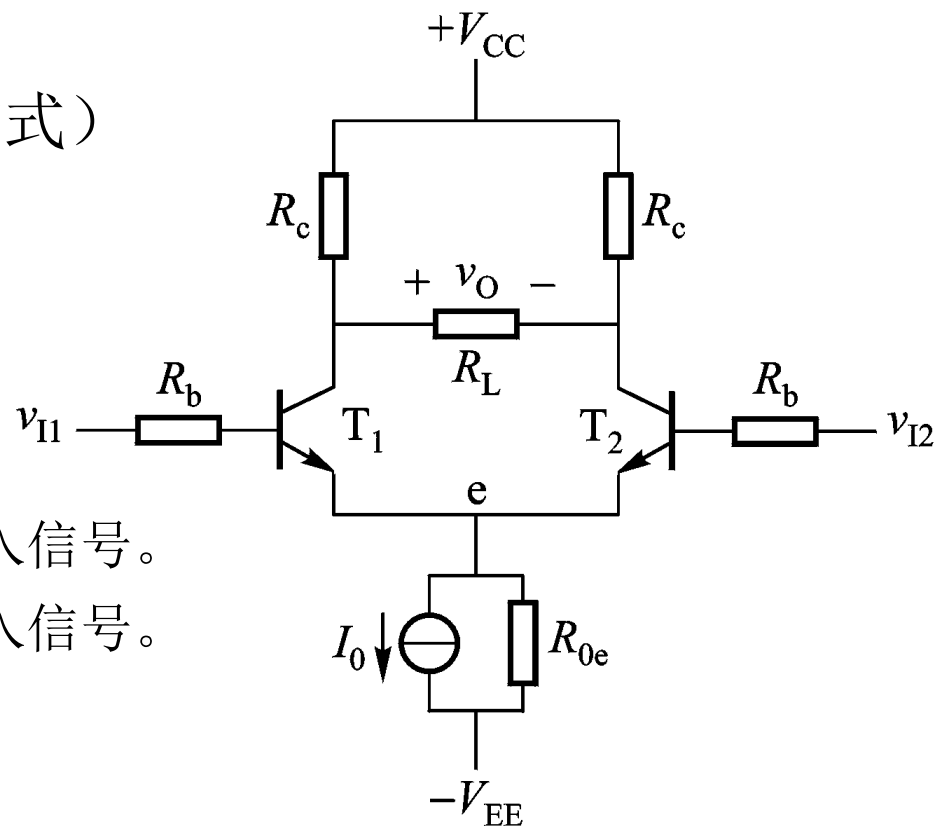
双端输入：两输入端同时对地输入信号。

单端输入：一端接地，另一端输入信号。

ü 两种输出方式：

双端输出：输出信号取自两个集电极。

单端输出：输出信号取自一个集电极对地信号。



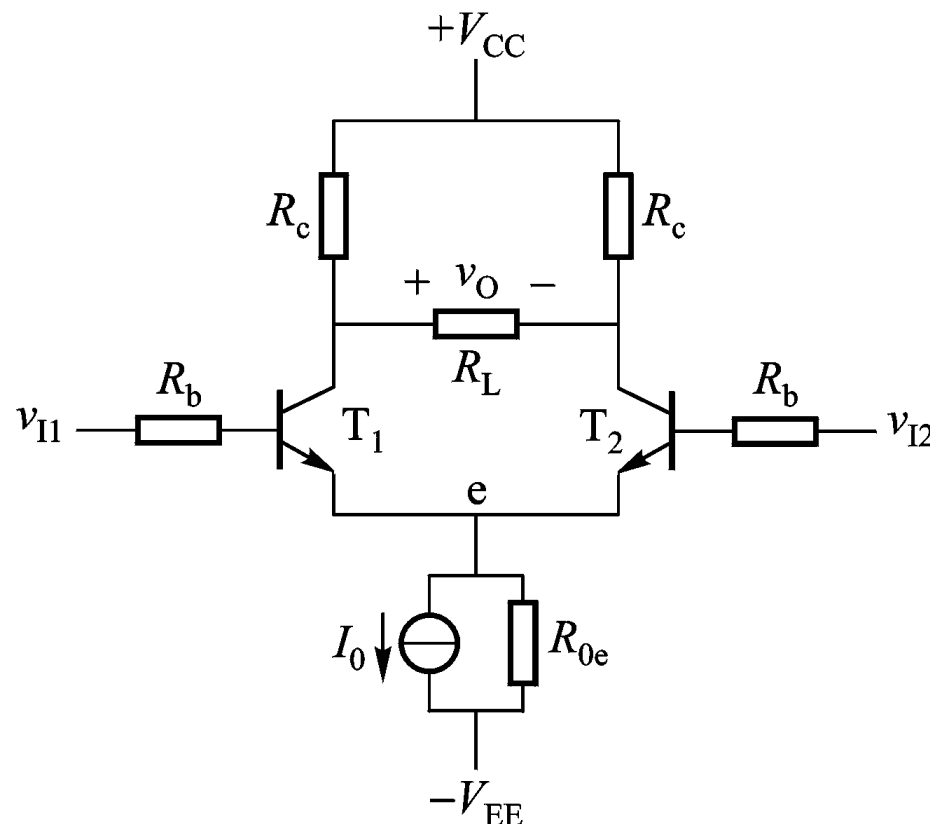
这一结构能有效地解决温度漂移（零点漂移）问题。

Ø 差分放大电路（温漂/零漂）

$$I_{C1Q} = I_{C2Q} = \frac{I_0}{2}$$

$$V_{C1Q} = V_{C2Q} = V_{CC} - I_{CQ}R_c$$

$$V_{OQ} = V_{C1Q} - V_{C2Q} = 0$$



ü 结论：

此电路结构对称，元件参数和特性相同，且恒流源作射极偏置，因此若温度变化，由于 V_{C1Q} 、 V_{C2Q} 的变化始终相等，所以 V_{OQ} 恒等于 0；

有效地抑制温漂（零漂）。

直流分析

ü 若恒流源换成电阻？ $V_{EQ} = ?$

Ø 差分放大电路（差模共模）

ü 定义输入信号 Δv_{I1} , Δv_{I2} 。

ü 差模信号：两个输入信号之差。 $\Delta v_{Id} = \Delta v_{I1} - \Delta v_{I2}$

ü 共模信号：两个输入信号平均值。 $\Delta v_{Ic} = \frac{\Delta v_{I1} + \Delta v_{I2}}{2}$

ü 输入信号：
$$\begin{cases} \Delta v_{I1} = \Delta v_{Ic} + \frac{\Delta v_{Id}}{2} \\ \Delta v_{I2} = \Delta v_{Ic} - \frac{\Delta v_{Id}}{2} \end{cases}$$

ü 差模成分反映了被测信号的变化，需要进一步放大；
共模成分反映了测量的初始条件或外界干扰，需要加以抑制。

Ø 差分放大电路（差模共模）

ü 差分放大电路的输入：

$$\begin{cases} \Delta v_{I1} = \Delta v_{Ic} + \frac{\Delta v_{Id}}{2} \\ \Delta v_{I2} = \Delta v_{Ic} - \frac{\Delta v_{Id}}{2} \end{cases}$$

ü 差分放大电路的（动态）输出： $\Delta v_O = \Delta v_{Od} + \Delta v_{Oc} = A_{vd} \cdot \Delta v_{Id} + A_{vc} \cdot \Delta v_{Ic}$

ü 差模输入方式：只考虑差模信号的输入。

（差分放大电路的输入端加上两个幅度相同、极性相反的信号）

ü 共模输入方式：只考虑共模信号的输入。

（差分放大电路的输入端加上两个幅度相同、极性相同的信号）

ü 差分电路特点：对差模信号进行放大、对共模信号进行抑制。

【例2.1】

右图所示差分放大电路。

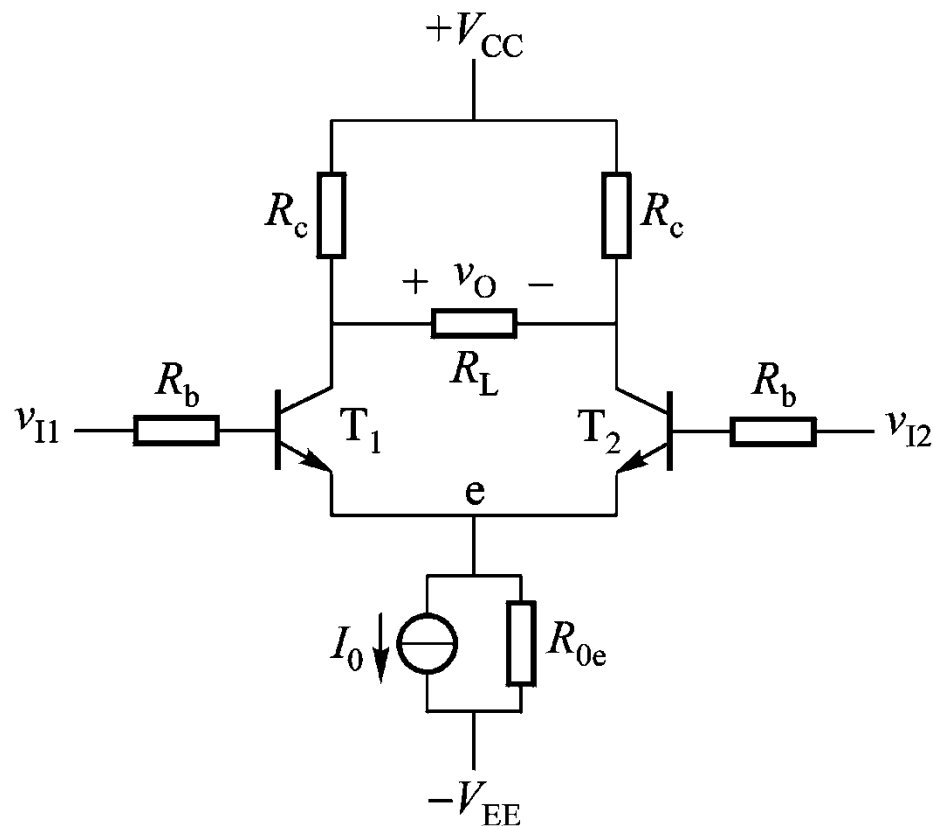
已知： $\Delta v_{I1} = 5.01 \text{ V}$ 、 $\Delta v_{I2} = 4.99 \text{ V}$ ，
 $A_{vd} = -80$ ， $A_{vc} = -0.01$ 。

求： Δv_O 。

解： $\Delta v_{Id} = \Delta v_{I1} - \Delta v_{I2} = 0.02 \text{ V}$

$$\Delta v_{Ic} = \frac{\Delta v_{I1} + \Delta v_{I2}}{2} = 5.0 \text{ V}$$

$$\begin{aligned}\Delta v_O &= A_{vd} \cdot \Delta v_{Id} + A_{vc} \cdot \Delta v_{Ic} \\ &= -80 \times 0.02 + (-0.01) \times 5.0 \\ &= -1.65 \text{ V}\end{aligned}$$



Ø 差分放大电路（动态分析）

ü 将输入信号表示成为差模和共模信号的组合。

ü 依次单独分析差模输入、共模输入方式。

ü 叠加分析结果。

Ø 差分放大电路（差模分析）

ü 右图所示基本差分放大电路。

ü 输入信号：幅度相同、极性相反。

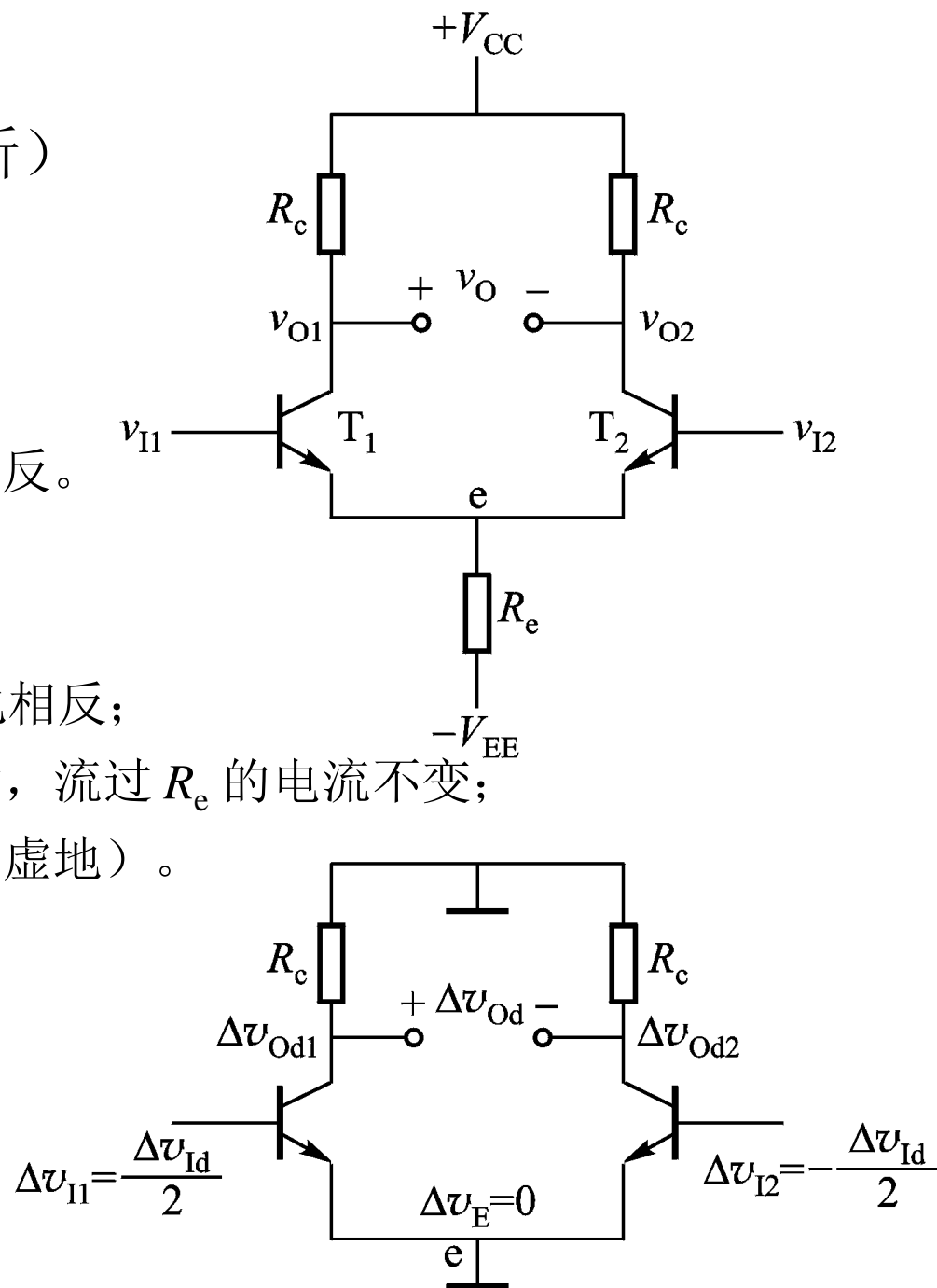
$$\Delta v_{I1} = -\Delta v_{I2} = \frac{\Delta v_{Id}}{2}$$

ü T_1 、 T_2 管的基极电压电流变化相反；

在电路对称（各参数相同）时，流过 R_e 的电流不变；

即： $\Delta v_E = 0$ （差模输入，e 点虚地）。

ü 交流通路



❖ 差分放大电路（差模分析）

🟡 微变等效电路。

🟡 差模增益

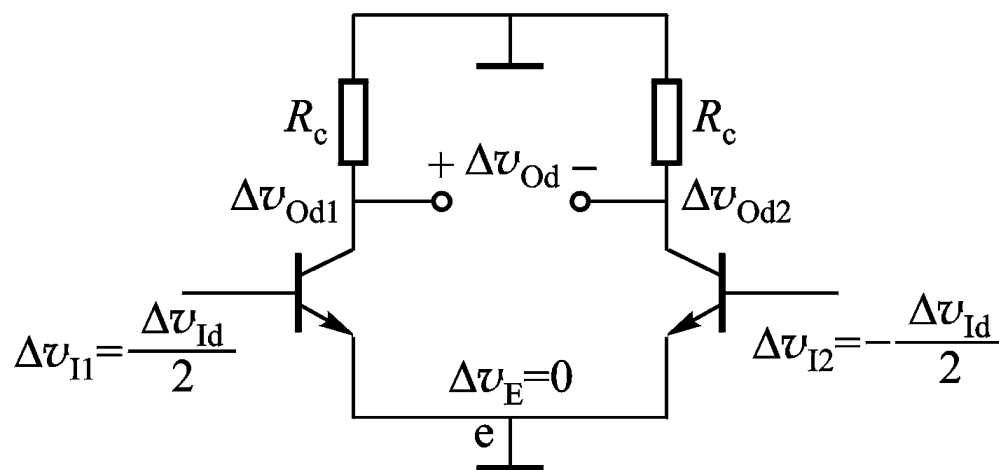
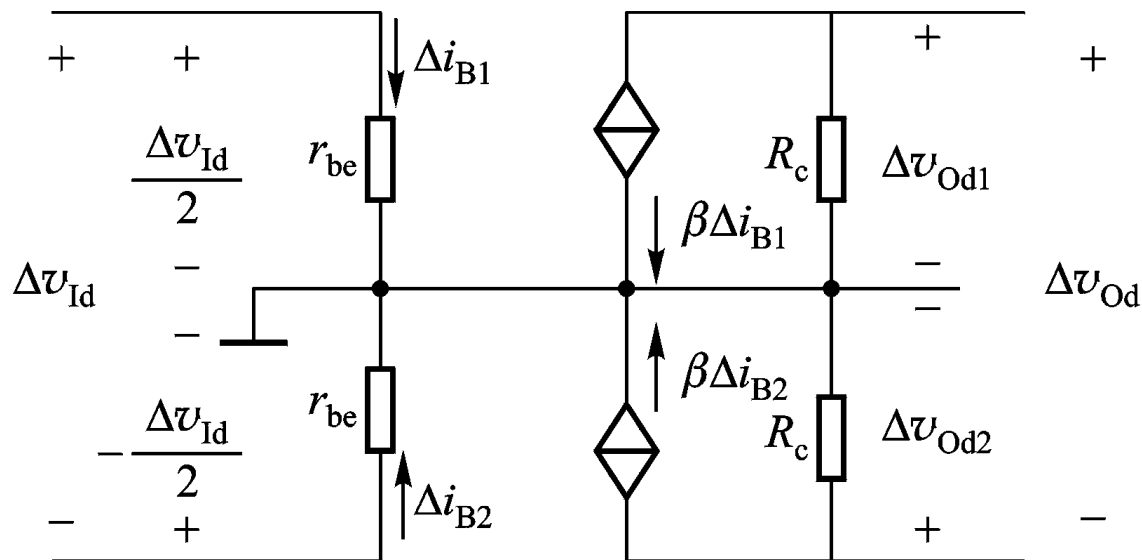
$$\begin{cases} \Delta v_{Od1} = -b \Delta i_{B1} \cdot R_c \\ \frac{\Delta v_{Id}}{2} = \Delta i_{B1} \cdot r_{be} \end{cases}$$

$$A_{vd1} = \frac{\Delta v_{Od1}}{\Delta v_{Id}} = -\frac{\beta R_c}{2r_{be}}$$

🟡 同理：

$$A_{vd2} = \frac{\Delta v_{Od2}}{\Delta v_{Id}} = +\frac{\beta R_c}{2r_{be}}$$

$$A_{vd} = \frac{\Delta v_{Od}}{\Delta v_{Id}} = -\frac{b R_c}{r_{be}}$$



Ø 差分放大电路（差模分析）

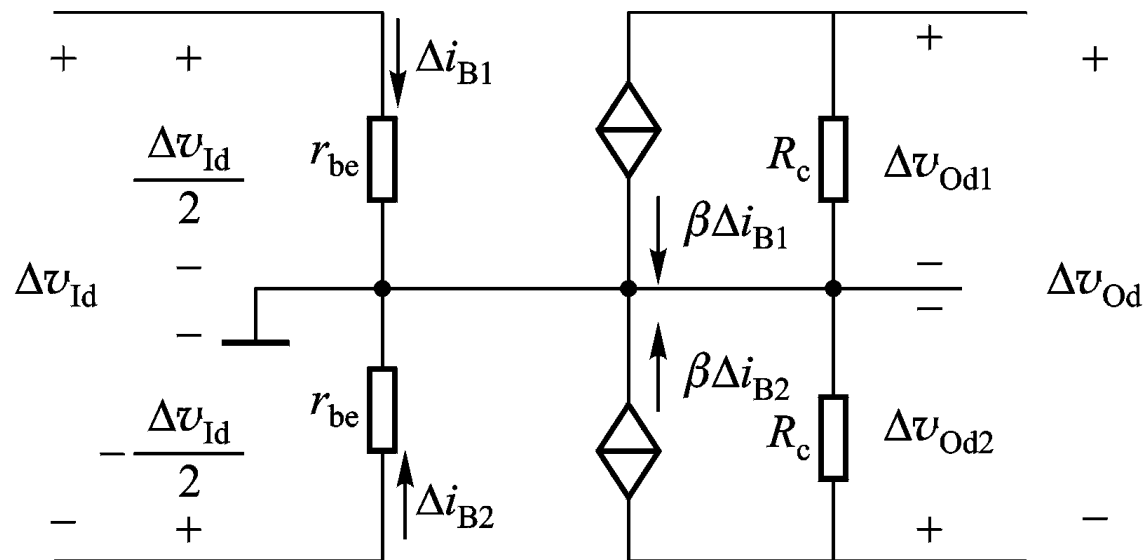
ü 差模输入电阻

$$R_{id} = \frac{\Delta v_{Id}}{\Delta i_{Id}} = 2r_{be}$$

ü 差模输出电阻

$$R_{od} = 2R_c \quad (\text{双端})$$

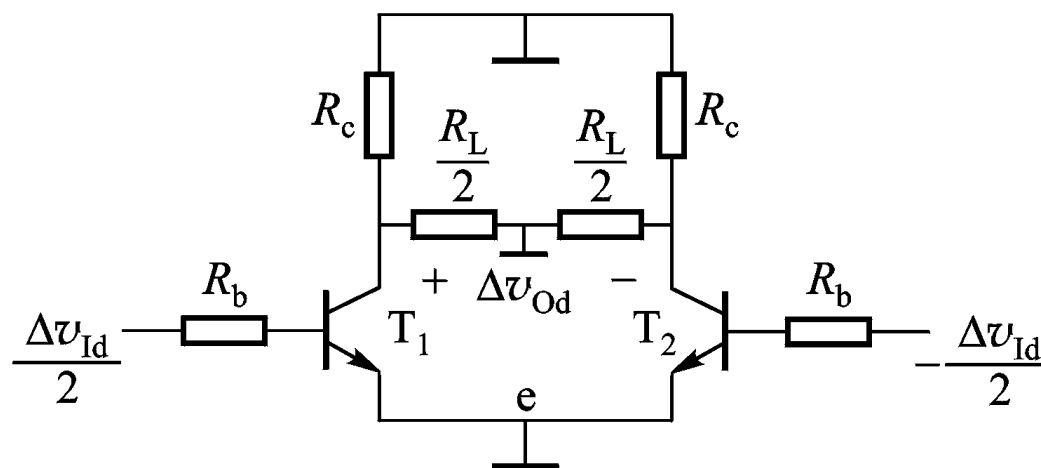
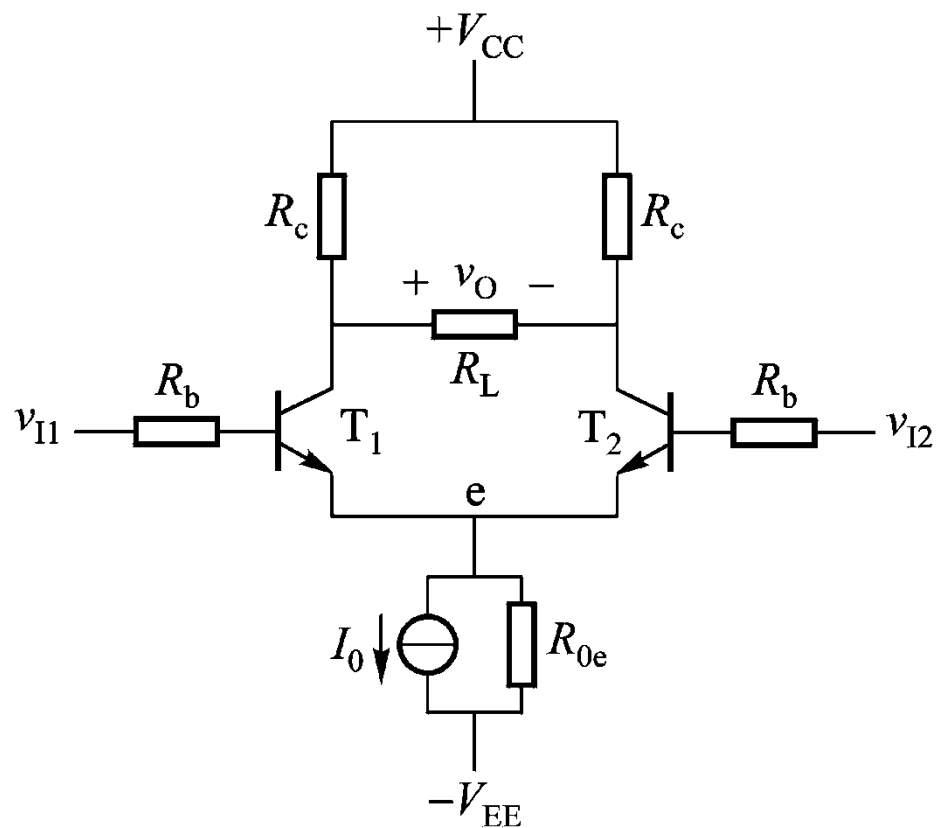
$$R_{od} = R_c \quad (\text{单端})$$



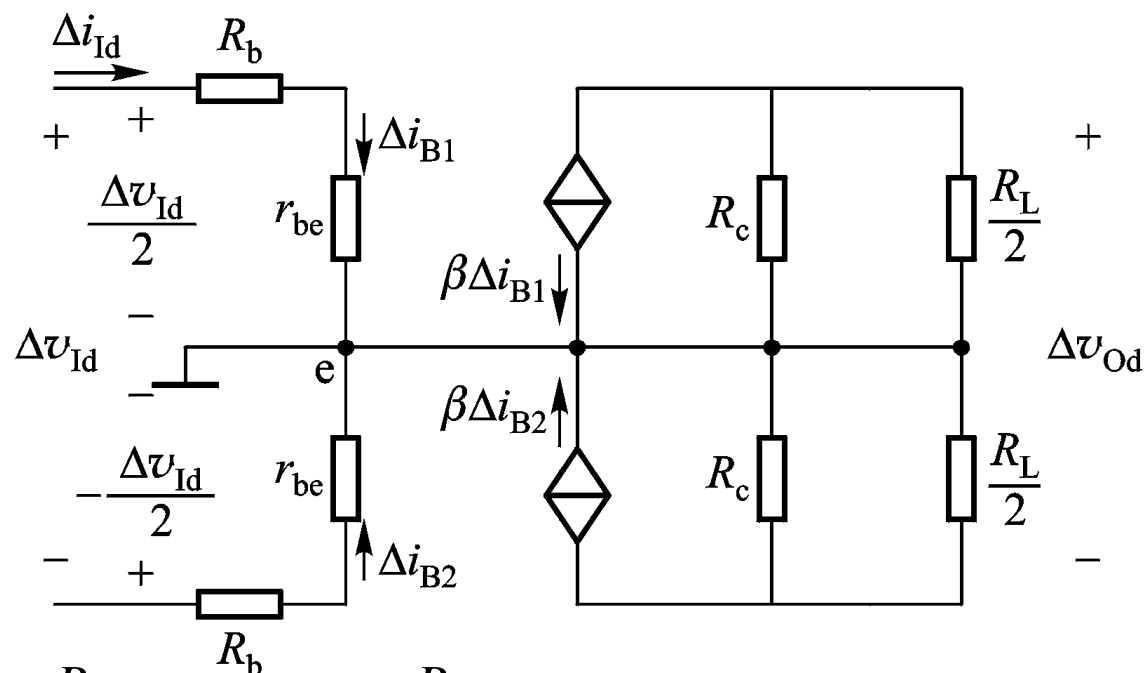
【例2.2】

右图所示差分放大电路。
分析其差模参数。

解：交流通路



微变等效电路。

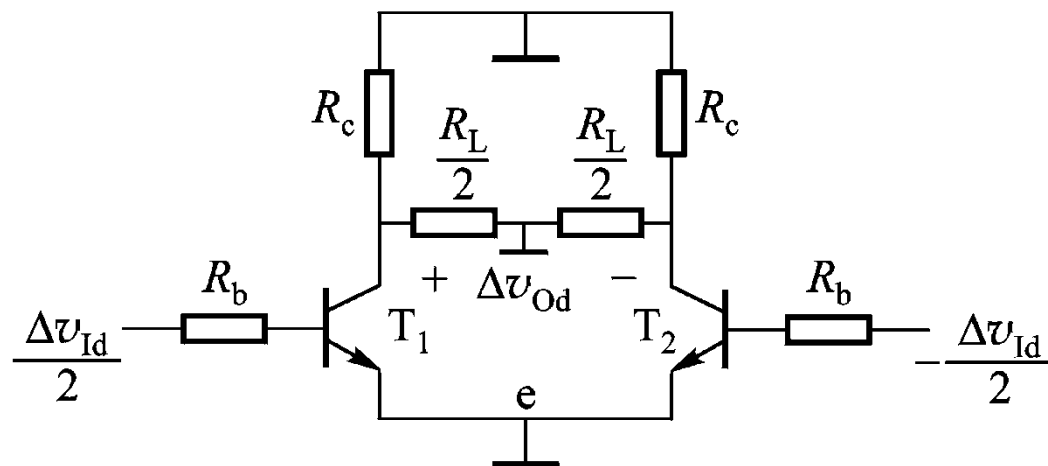


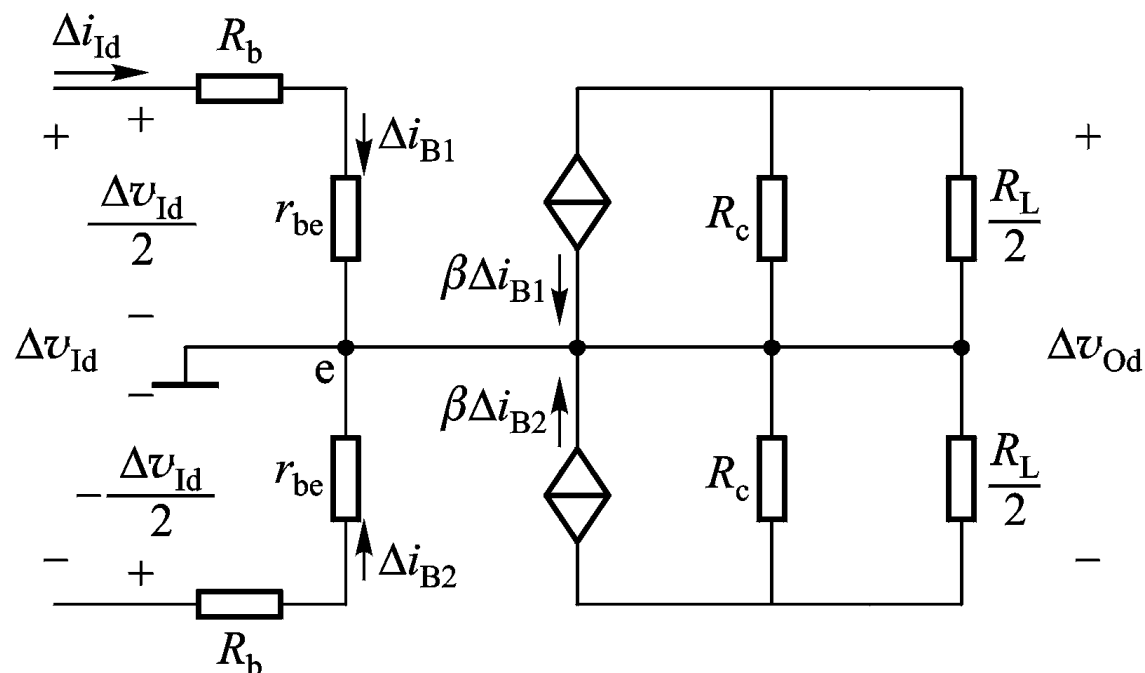
双端输出时：

$$A_{vd} = \frac{\Delta v_O}{\Delta v_{Id}} = \frac{-2b \Delta i_{B1} (R_c // \frac{R_L}{2})}{2 \Delta i_{B1} (R_b + r_{be})} = - \frac{b(R_c // \frac{R_L}{2})}{R_b + r_{be}}$$

$$R_{id} = \frac{\Delta v_{Id}}{\Delta i_{Id}} = 2(R_b + r_{be})$$

$$R_{od} = 2R_c$$





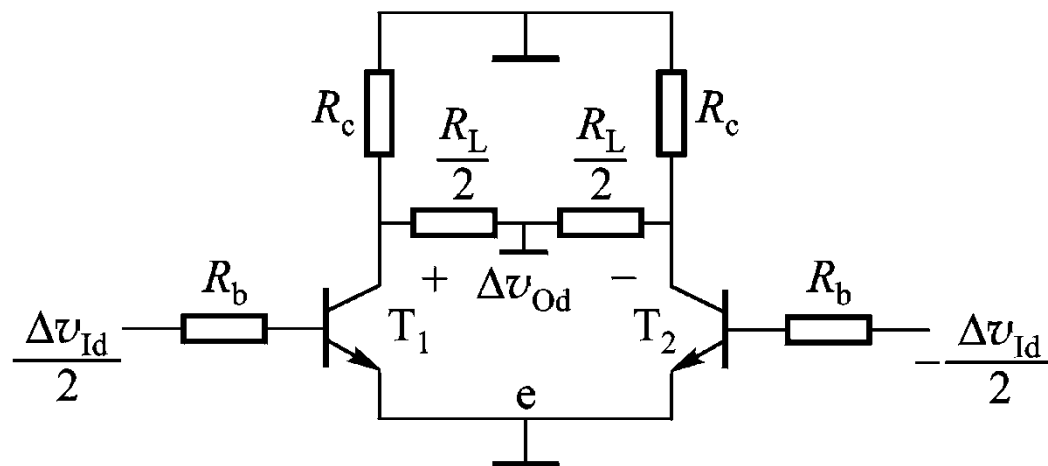
单端输出时：

$$A_{vd1} = \frac{\Delta v_{O1}}{\Delta v_{Id}} = \frac{-b \Delta i_{B1} (R_c // R_L)}{2 \Delta i_{B1} (R_b + r_{be})} = -\frac{b (R_c // R_L)}{2 (R_b + r_{be})}$$

$$A_{vd2} = \frac{\Delta v_{O2}}{\Delta v_{Id}} = +\frac{b (R_c // R_L)}{2 (R_b + r_{be})}$$

$$R_{id} = \frac{\Delta v_{Id}}{\Delta i_{Id}} = 2(R_b + r_{be})$$

$$R_{od} = R_c$$



【例2.3】

右图所示差分放大电路。

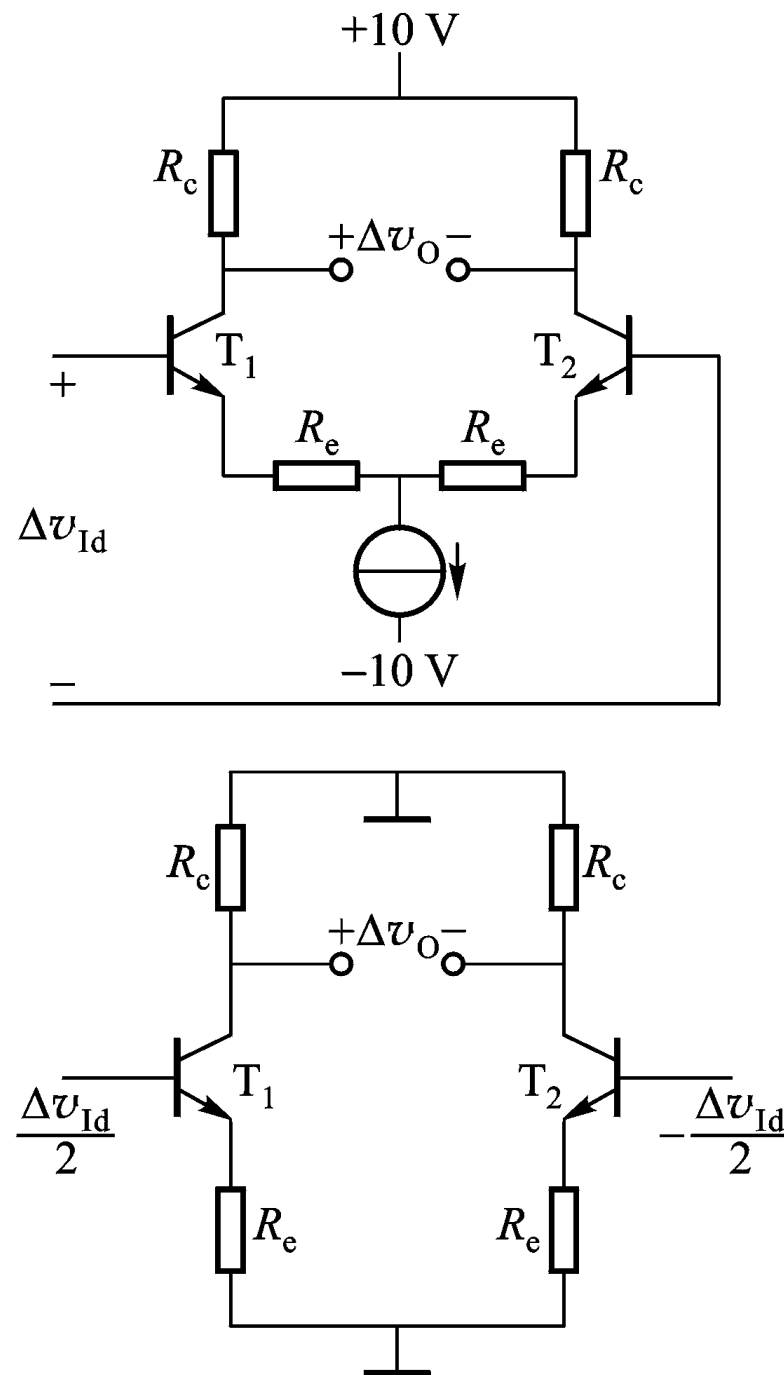
分析其差模参数。

解：交流通路

$$A_{vd} = \frac{\Delta v_O}{\Delta v_{Id}} = \frac{-2b \Delta i_B R_c}{2[\Delta i_B r_{be} + (1+b)\Delta i_B R_e]} \\ = \frac{-b R_c}{r_{be} + (1+b)R_e}$$

$$R_{id} = \frac{\Delta v_{Id}}{\Delta i_{Id}} = 2[r_{be} + (1+b)R_e]$$

$$R_{od} = 2R_c$$



Ø 差分放大电路（共模分析）

ü 右图所示基本差分放大电路。

ü 输入信号：幅度相同、极性相同。

$$\Delta v_{I1} = \Delta v_{I2} = \Delta v_{Ic}$$

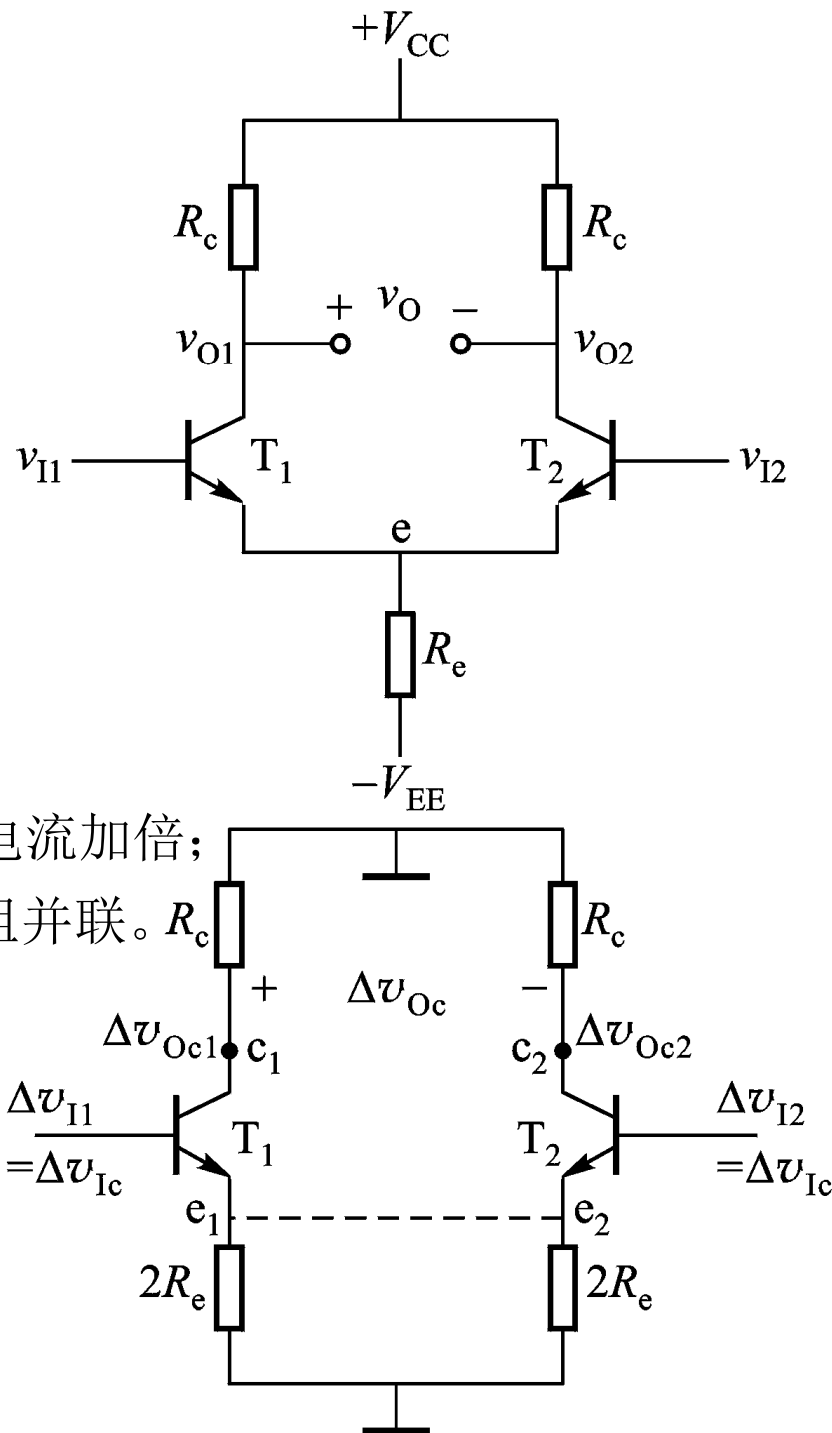
ü T_1 、 T_2 管的基极电压电流变化相同；

在电路对称（各参数相同）时， R_e 的电流加倍；

即： R_e 可等效为两个阻值为 $2R_e$ 的电阻并联。

ü 交流通路

（有点类似例 2.3）



❖ 差分放大电路（共模分析）

ü 共模增益

$$\begin{cases} \Delta v_{Oc1} = -b \Delta i_B R_c \\ \Delta v_{Ic} = \Delta i_B [r_{be} + 2(1+b)R_e] \end{cases}$$

$$A_{vc1} = \frac{\Delta v_{Oc1}}{\Delta v_{Ic}} = -\frac{b R_c}{r_{be} + 2(1+b)R_e}$$

ü 同理：

$$A_{vc2} = \frac{\Delta v_{Oc2}}{\Delta v_{Ic}} = -\frac{b R_c}{r_{be} + 2(1+b)R_e}$$

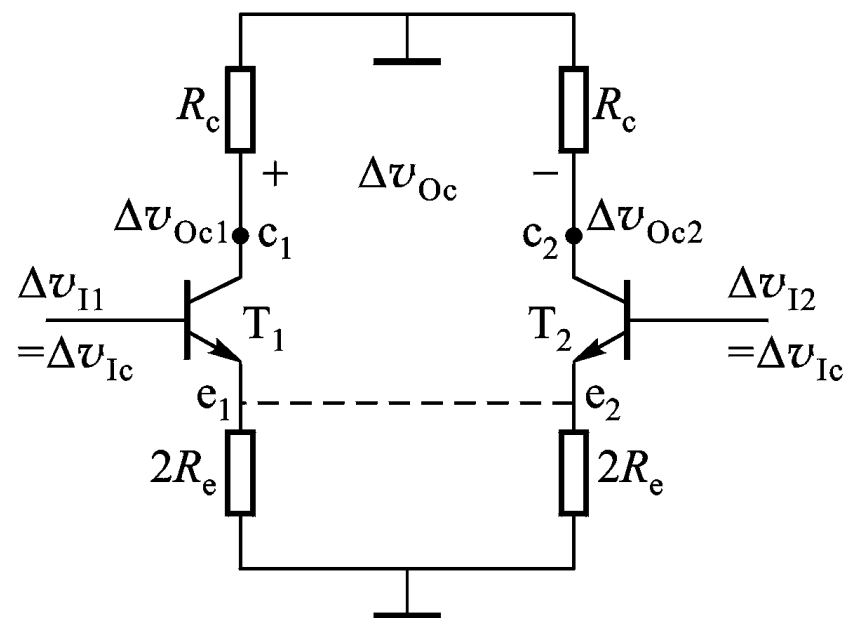
ü 所以：

$$A_{vc} = \frac{\Delta v_{Oc}}{\Delta v_{Ic}} = 0$$

$$R_{ic} = \frac{\Delta v_{ic}}{\Delta i_{Ic}} = r_{be} + 2(1+b)R_e$$

$$R_{oc} = ?$$

A_{vc} 反映了差分放大电路抑制共模干扰和温漂的能力；其值越小，抑制能力越强。



Ø 差分放大电路（共模抑制比）

ü 共模信号：对 T_1 、 T_2 管具有相同影响的外界干扰信号。

（如：电源电压波动，环境温度变化等）

ü 共模抑制比：差模电压放大倍数与共模电压放大倍数之比的绝对值。

$$K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_{\text{vd}}}{A_{\text{vc}}} \right|$$

常用分贝表示： $K_{\text{CMR}} = 20 \lg \left| \frac{A_{\text{vd}}}{A_{\text{vc}}} \right| \text{ (dB)}$

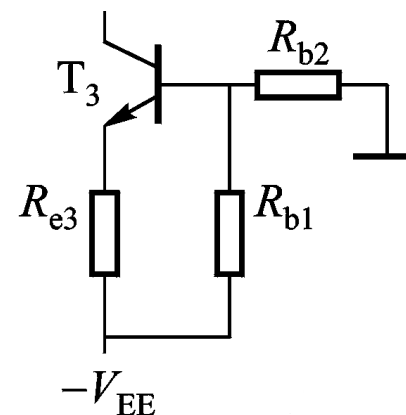
ü 理想的差分放大电路：

双端输出时： $K_{\text{CMR}} \rightarrow \infty$ ；

单端输出时：只有增大 R_e 才能减小共模增益，从而增大共模抑制比。

（电流源电路）

$$A_{\text{vc1}} = A_{\text{vc2}} = -\frac{b R_c}{r_{\text{be}} + 2(1+b)R_e}$$



Ø 差分放大电路（单端输入）

ü 差分放大电路有两个输入端和两个输出端。

ü 差分放大电路的输入输出方式：

双端输入（单端输出、双端输出）；

单端输入（单端输出、双端输出）。

$$\Delta v_{I1} = \Delta v_I, \quad \Delta v_{I2} = 0$$

$$\begin{cases} \Delta v_{Id} = \Delta v_{I1} - \Delta v_{I2} = \Delta v_I \\ \Delta v_{Ic} = \frac{\Delta v_{I1} + \Delta v_{I2}}{2} = \frac{\Delta v_I}{2} \end{cases}$$

$$\Delta v_O = A_{vd} \Delta v_{Id} + A_{vc} \Delta v_{Ic} = A_{vd} \Delta v_I + A_{vc} \frac{\Delta v_I}{2} \approx A_{vd} \Delta v_I$$

Ø 差分放大电路（公式）

ü 双端输出

$$\begin{cases}
 R_{id} = 2(R_b + r_{be}) + (1+b)R_P \\
 R_{ic} = R_b + r_{be} + (1+b) \cdot (2R_e + \frac{R_P}{2}) \\
 R_o = 2R_c \\
 A_{vd} = -\frac{2bR'_L}{R_{id}} \quad R'_L = R_c // \frac{R_L}{2} \\
 A_{vc} = 0
 \end{cases}$$

ü 单端输出

$$\begin{cases}
 R_o = R_c \\
 A_{vd1} = -\frac{bR'_L}{R_{id}} = -A_{vd2} \quad R'_L = R_c // R_L \\
 A_{vc1} = -\frac{bR'_L}{R_{ic}} = A_{vc2}
 \end{cases}$$

【例2.4】

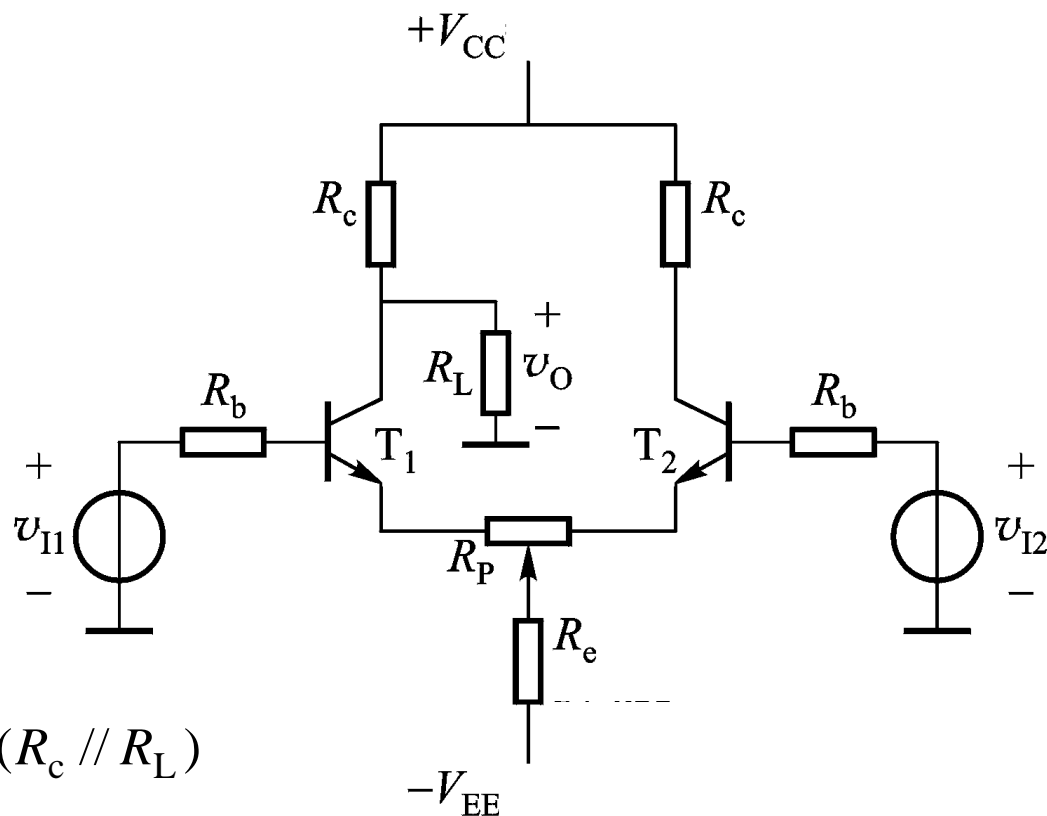
右图所示差分放大电路。

已知： R_P 在中间位置。

求： (1) I_{CQ} 、 V_{OQ} ；

解：
$$I_{CQ} = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{\frac{R_b}{1+b} + \frac{R_P}{2} + 2R_e}$$

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



右图所示差分放大电路。

已知： R_P 在中间位置。

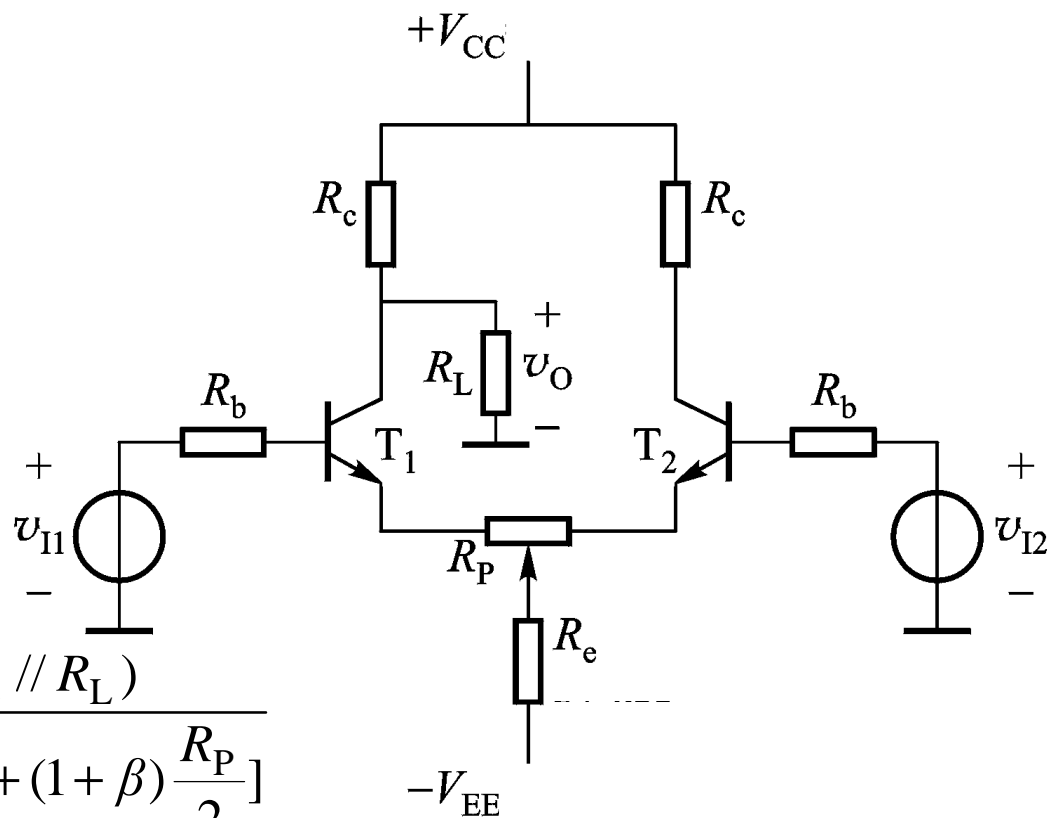
求： (2) A_{vd1} 、 R_i 和 R_o ；

解： $r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{EQ}}$

$$A_{vd1} = \frac{\Delta v_O}{\Delta v_{Id}} = - \frac{b(R_c // R_L)}{2[R_b + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_P}{2}]}$$

$$R_{id} = \frac{\Delta v_{Id}}{\Delta i_{Id}} = 2[R_b + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_P}{2}]$$

$$R_{od} = R_c$$



右图所示差分放大电路。

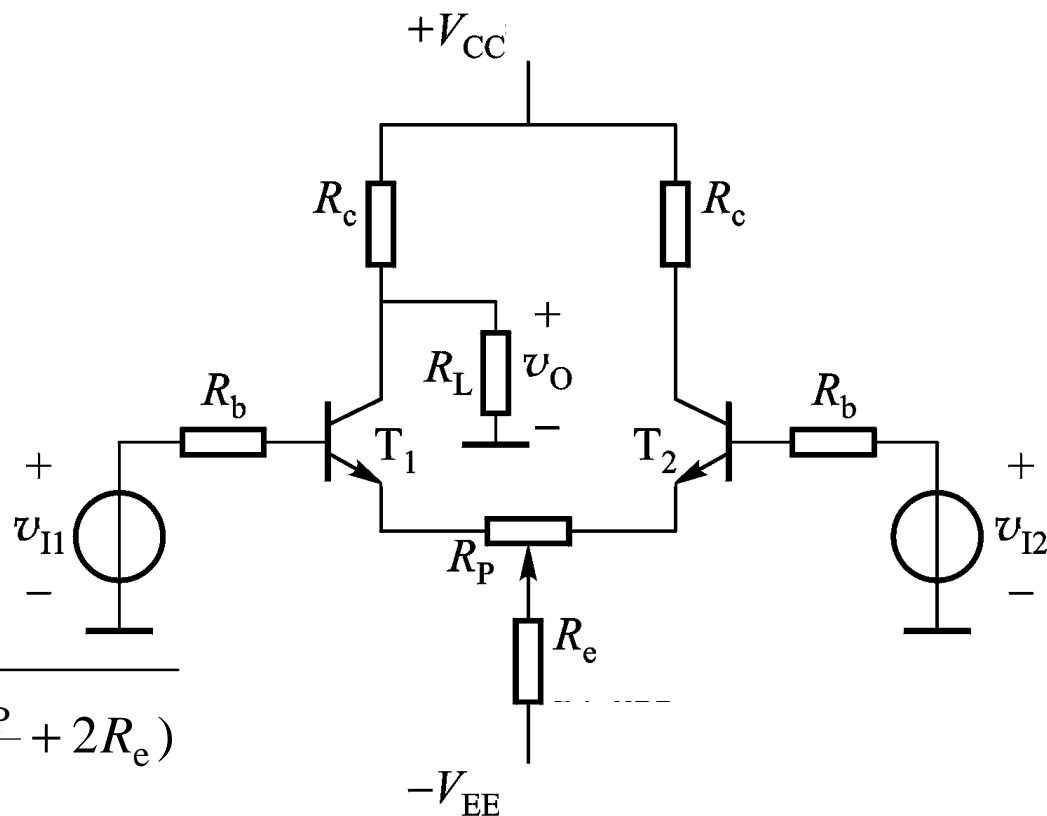
已知： R_P 在中间位置。

求： (3) K_{CMR} ；

解：

$$A_{vc1} = - \frac{b(R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + (1+b)(\frac{R_P}{2} + 2R_e)}$$

$$K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_{vd1}}{A_{vc1}} \right| = \mathbf{L}$$



右图所示差分放大电路。

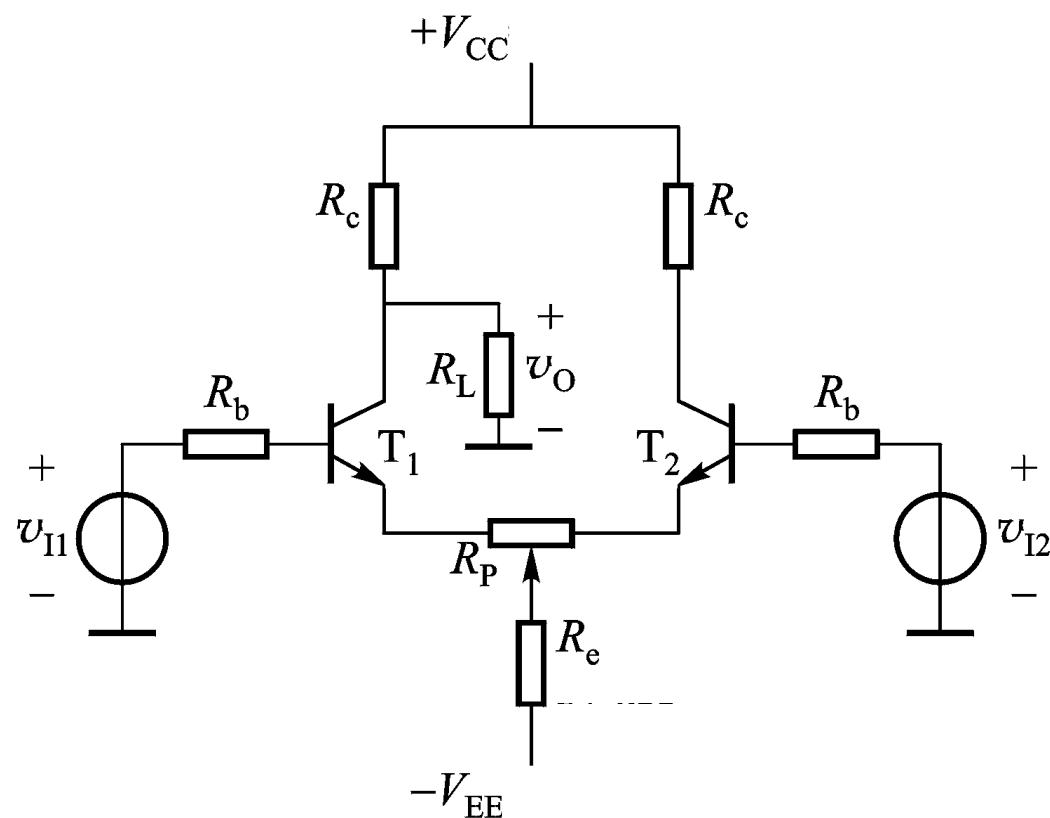
已知： R_p 在中间位置。

$$\Delta v_{I1} = \dots, \Delta v_{I2} = \dots;$$

求： (4) Δv_O 。

$$\text{解：} \begin{cases} \Delta v_{Id} = \Delta v_{I1} - \Delta v_{I2} = \mathbf{L} \\ \Delta v_{Ic} = \frac{\Delta v_{I1} + \Delta v_{I2}}{2} = \mathbf{L} \end{cases}$$

$$\Delta v_O = A_{vd} \Delta v_{Id} + A_{vc} \Delta v_{Ic} = \mathbf{L}$$



【例2.5】

右图所示差分放大电路。

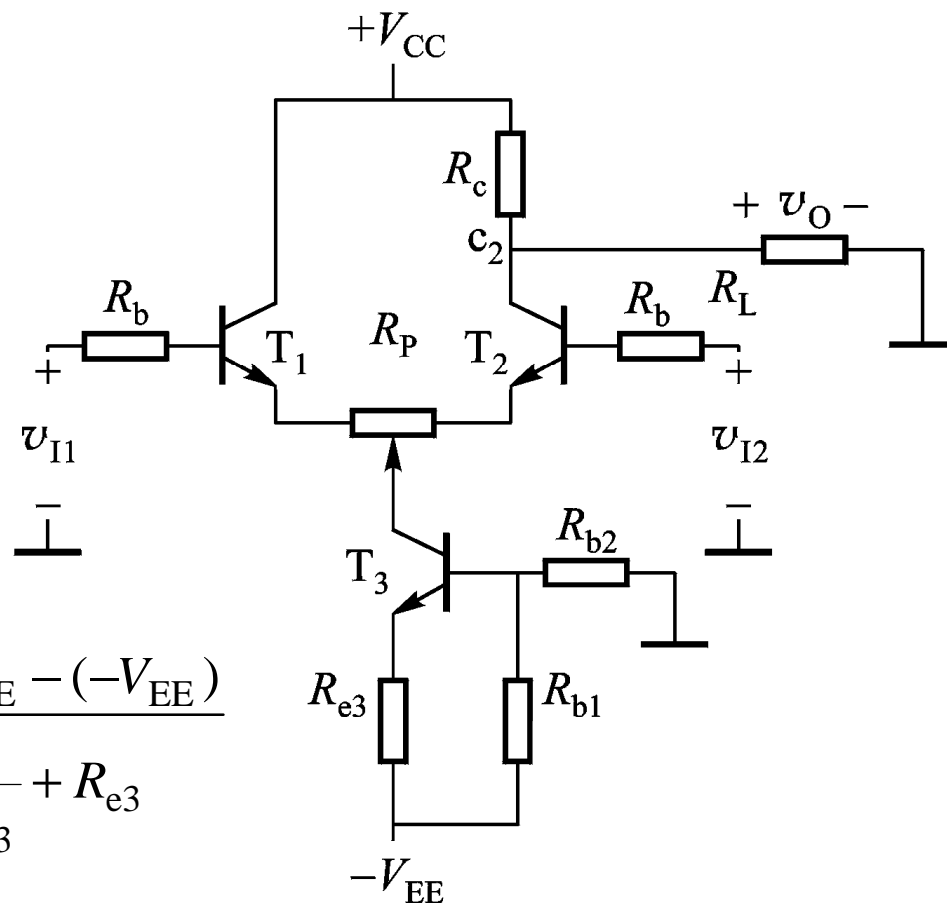
求：（1）静态参数；

$$\text{解: } V_{B3} = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \times (-V_{EE})$$

$$R_{b3} = R_{b1} // R_{b2}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{1}{2} I_{C3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{B3} - V_{BE} - (-V_{EE})}{\frac{R_{b3}}{1 + b_3} + R_{e3}}$$

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



右图所示差分放大电路。

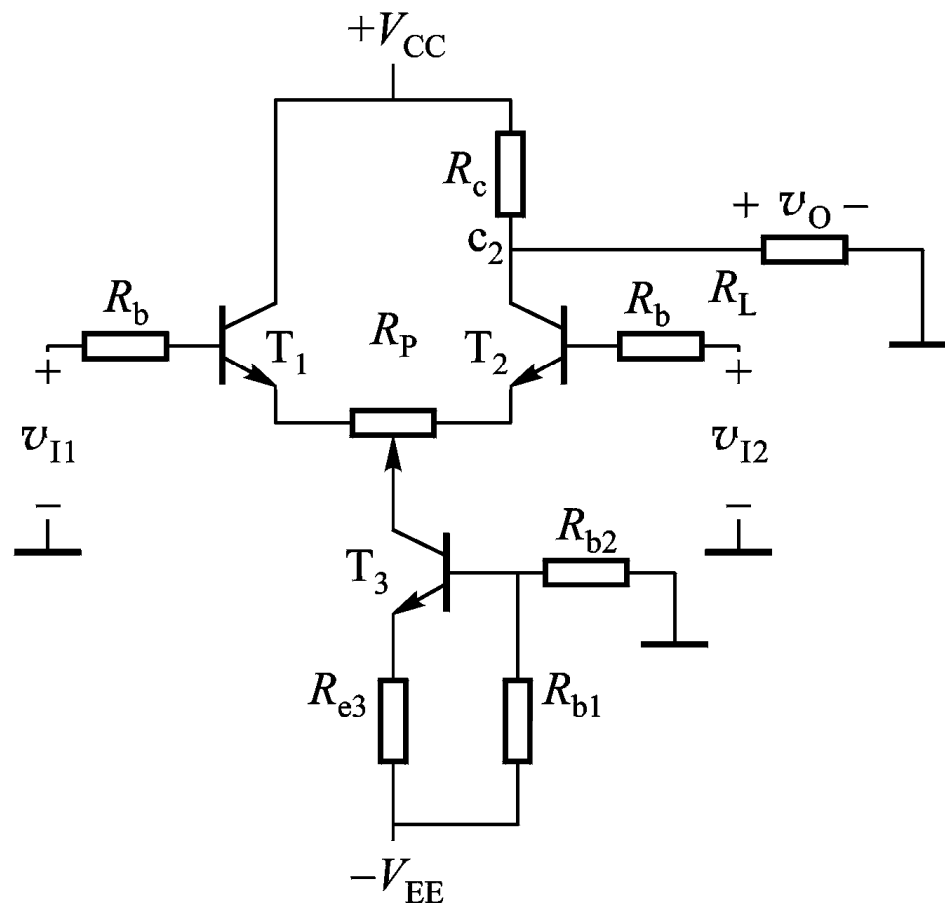
求：（2）差模参数；

解： $r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{EQ}}$

$$A_{vd2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_P}{2}}$$

$$R_{id} = 2[R_b + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_P}{2}]$$

$$R_{od} = R_c$$



右图所示差分放大电路。

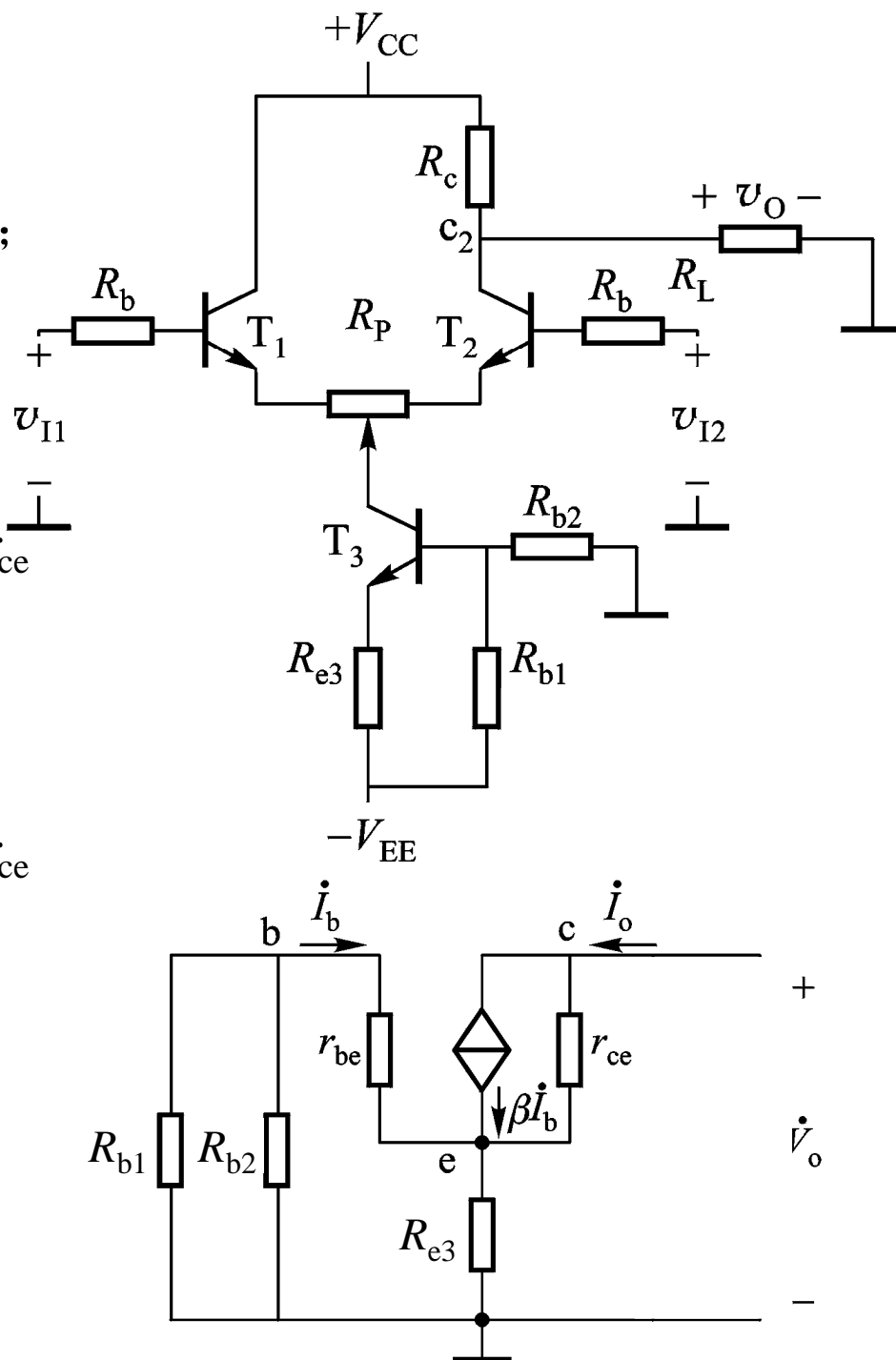
求：（3）电流源的输出电阻 R_{O3} ；

$$\text{解: } R_{O3} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_o}$$

$$= \left(1 + \frac{\beta R_{e3}}{r_{be} + R_{e3} + R_{b1} // R_{b2}} \right) r_{ce} + R_{e3} // (r_{be} + R_{b1} // R_{b2})$$

$$= \left(1 + \frac{\beta R_{e3}}{r_{be} + R_{e3} + R_{b1} // R_{b2}} \right) r_{ce}$$

$$= \beta r_{ce}$$



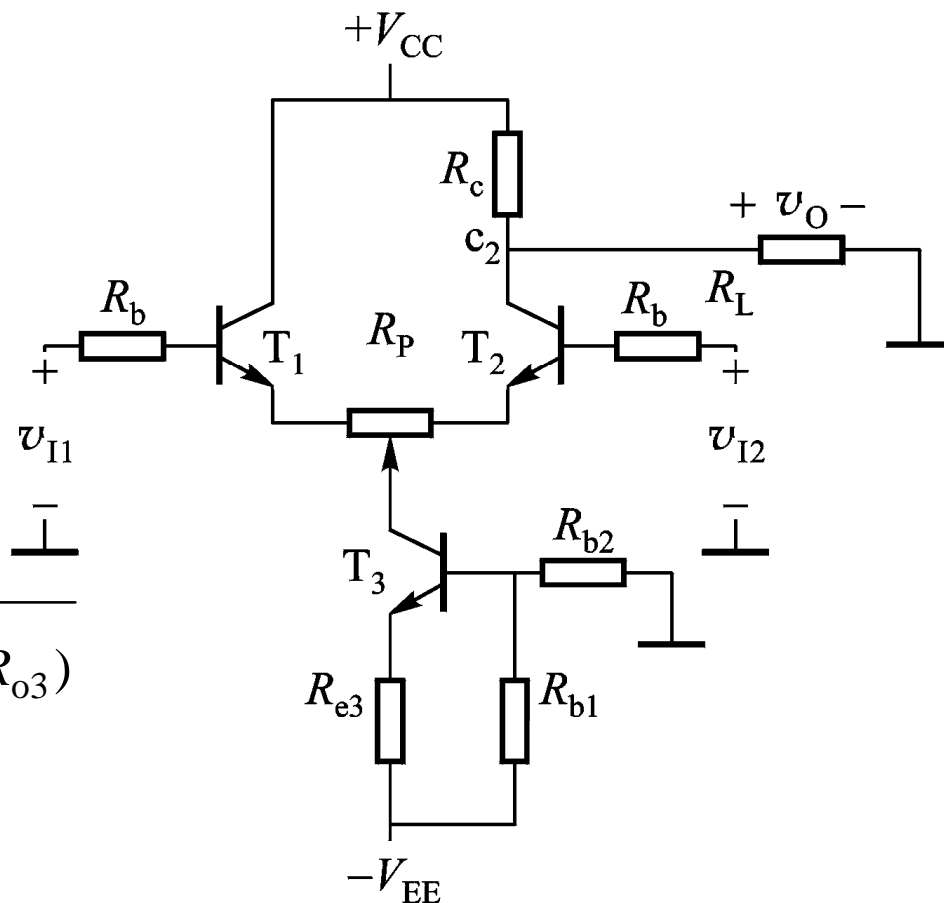
右图所示差分放大电路。

求：（4）共模抑制比；

解：

$$A_{vc2} = - \frac{b(R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + (1+b)(\frac{R_P}{2} + 2R_{o3})}$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{vd2}}{A_{vc2}} \right|$$



Ø 集成运放输入级

ü 集成运放的输入级，通常采用差分放大电路结构。

ü 典型结构：

晶体三极管形式；

场效应管形式；

场效应管 — 晶体三极管混合形式。

ü 为提高共模抑制比，发射极公共电阻 R_e 一般采用一个具有很大交流等效电阻的电流源来代替。

Ø 集成运放输入级（场效应管形式）

ü 右图所示场效应管差分放大电路。

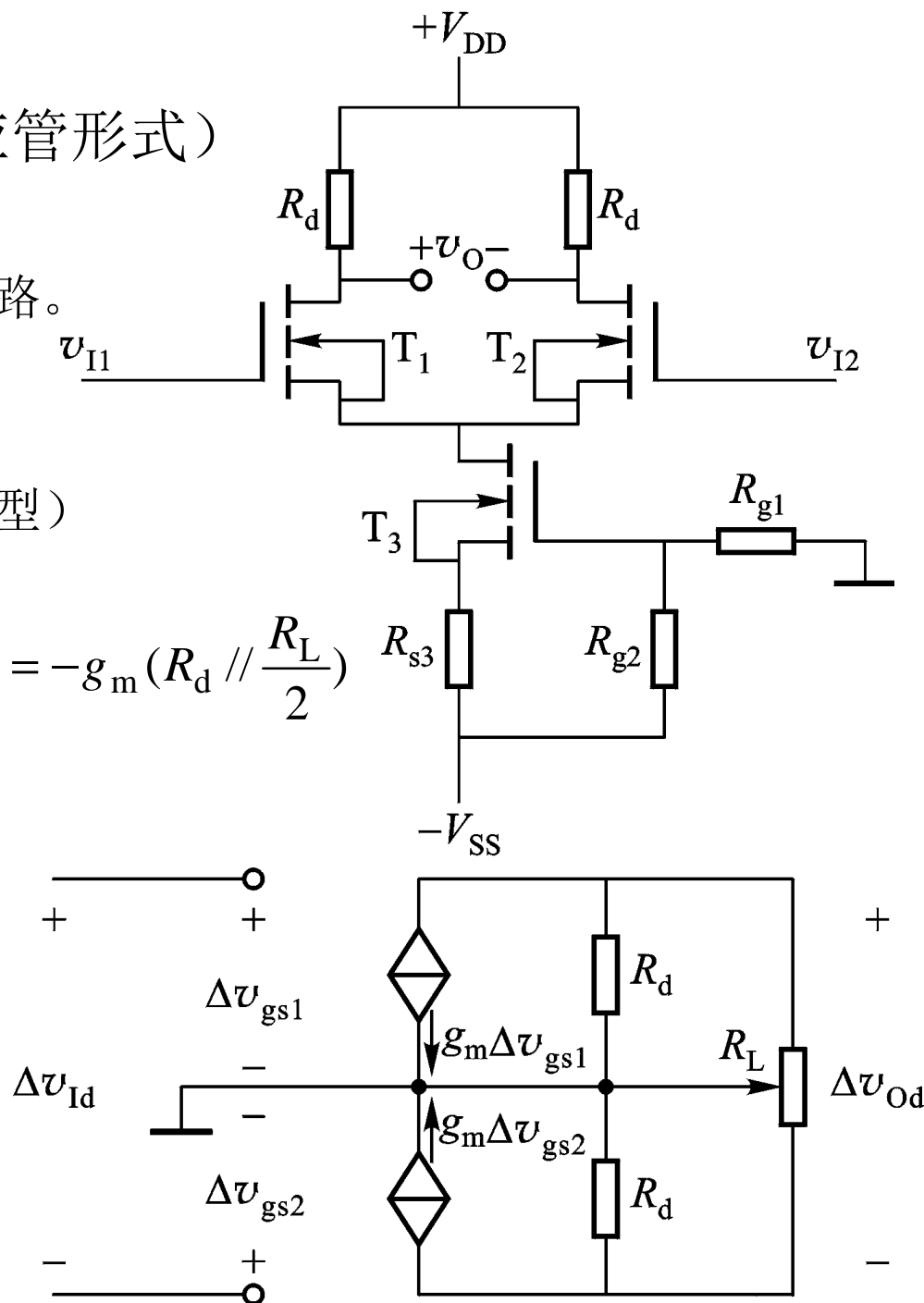
ü 基本分析方法类似于三极管。
（采用场效应管低频小信号模型）

$$A_{vd} = \frac{\Delta v_{Od}}{\Delta v_{Id}} = -\frac{2\Delta v_{I1} g_m (R_d // \frac{R_L}{2})}{2\Delta v_{I1}} = -g_m (R_d // \frac{R_L}{2})$$

$$R_{id} = \frac{\Delta v_{Id}}{\Delta i_{Id}} \rightarrow \infty$$

$$R_{od} = 2R_d$$

ü 高共模抑制比；
高差模输入电阻；
输入偏置电流不对称性小。



集成运放输入级（混合形）

右图所示混合形差分放大电路。

ü 差模输入时:

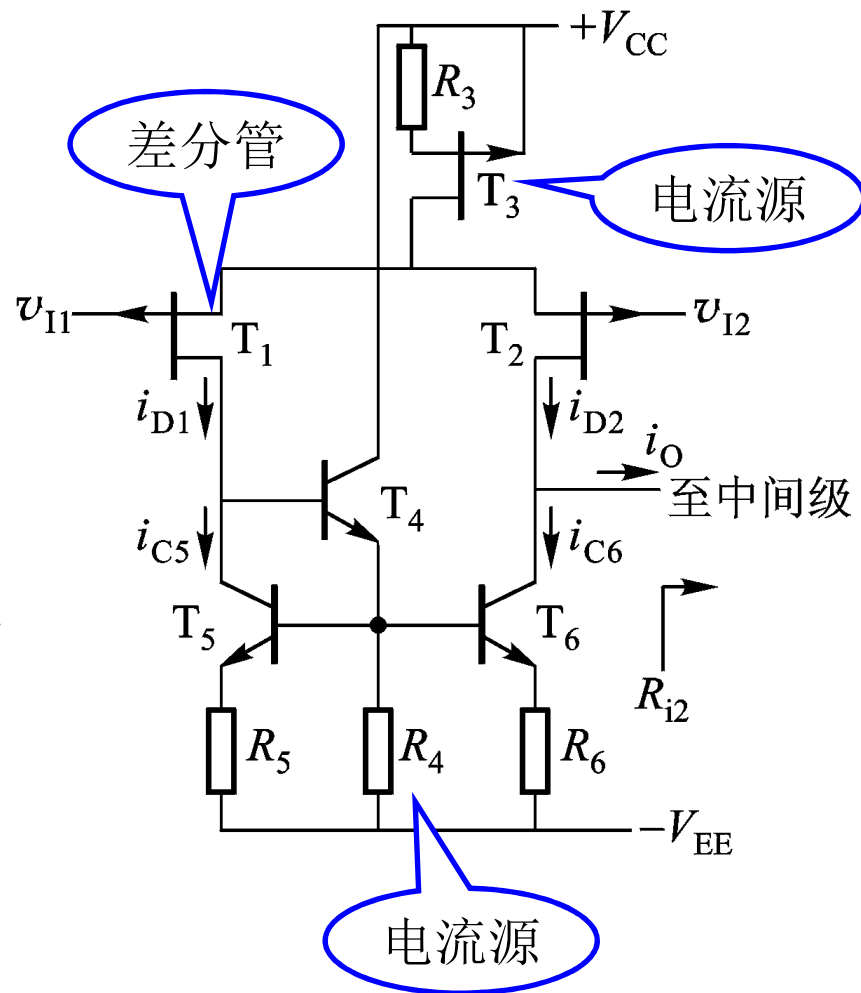
$$\begin{cases} \Delta i_{D1} = -\Delta i_{D2} \\ \Delta i_{D1} \approx \Delta i_{C5} \end{cases} \Rightarrow \Delta i_{C6} = \Delta i_{C5} \approx -\Delta i_{D2}$$

所以: $\Delta i_{\text{Od}} = \Delta i_{\text{D2}} - \Delta i_{\text{C6}} \approx 2\Delta i_{\text{D2}}$

ü 共模输入时:

$$\begin{cases} \Delta i_{D1} = \Delta i_{D2} \\ \Delta i_{D1} \approx \Delta i_{C5} \end{cases} \Rightarrow \Delta i_{C6} = \Delta i_{C5} \approx \Delta i_{D2}$$

所以: $\Delta i_{\text{Oc}} = \Delta i_{\text{D2}} - \Delta i_{\text{C6}} \approx 0$

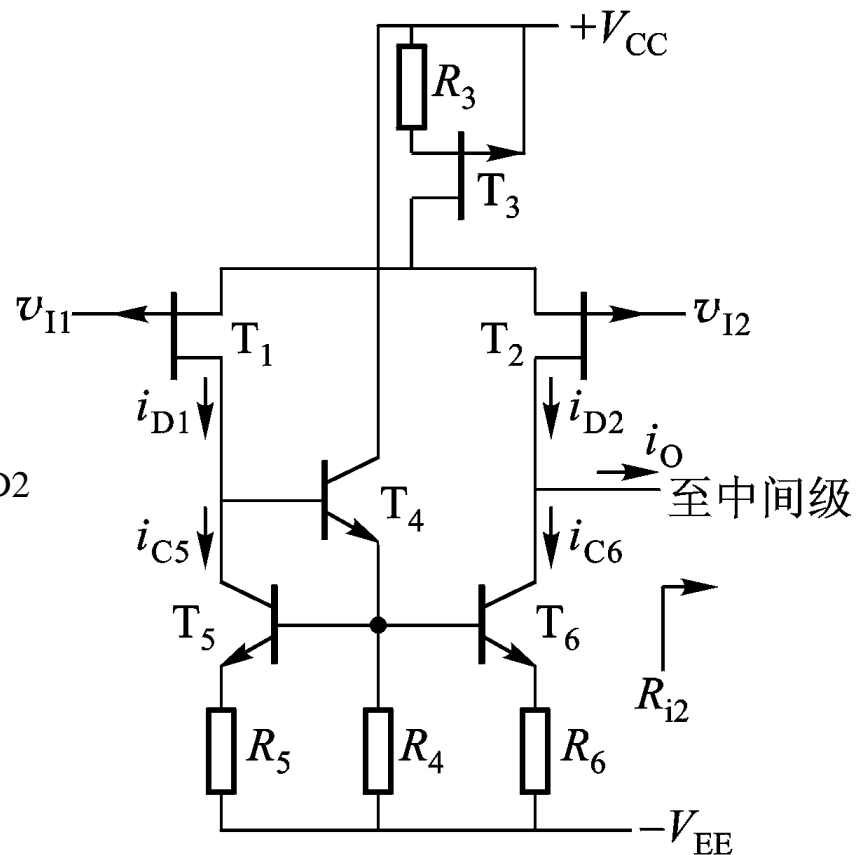


集成运放输入级（混合形）

右图所示混合形差分放大电路。

差模输入时: $\Delta i_{\text{Od}} = \Delta i_{\text{D2}} - \Delta i_{\text{C6}} \approx 2\Delta i_{\text{D2}}$

☺ 共模输入时: $\Delta i_{O_c} = \Delta i_{D2} - \Delta i_{C6} \approx 0$



电路是双端输入单端输出结构;

由于漏极是三管电流源，使得单端输出具有双端输出的共模抑制效果。

ü 差模增益:

$$A_{\text{vd}} = \frac{\Delta v_{\text{Od}}}{\Delta v_{\text{Id}}} = \frac{\Delta i_{\text{Od}} (R_{\text{i2}} // r_{\text{ds2}} // R_{\text{o6}})}{\Delta v_{\text{Id}}} = \frac{2\Delta i_{\text{D2}} R'_{\text{i2}}}{2\Delta v_{\text{GS}}} = \frac{2g_{\text{m}}\Delta v_{\text{GS}} R'_{\text{i2}}}{2\Delta v_{\text{GS}}} = g_{\text{m}} R'_{\text{i2}}$$

✓ 互补对称共集电路

ü 对输出级的要求：

输出电阻小；输入电阻大；最大不失真输出电压尽可能大（电压放大）。
（共集放大电路）

ü 互补对称共集电路

Ø 互补对称共集电路

ü 静态 ($v_i = 0$) :

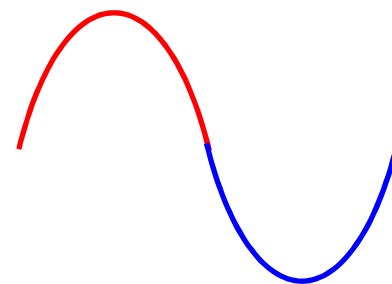
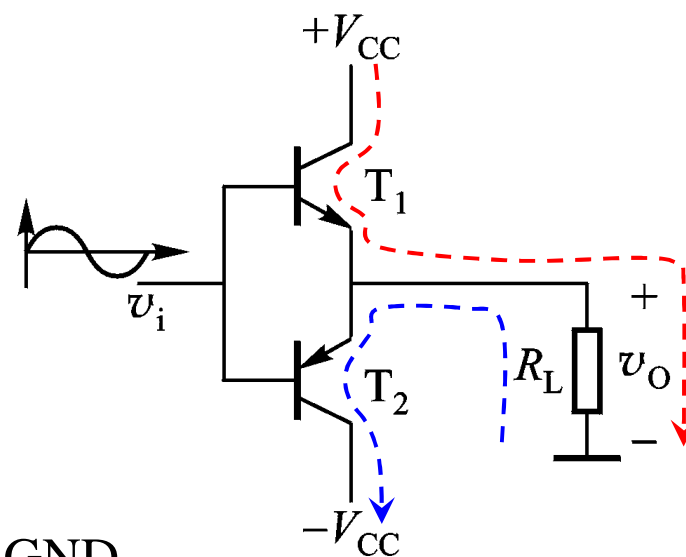
T_1 、 T_2 管均截止, $v_o = 0$ 。

ü 动态正半周 ($v_i > 0$) :

T_1 管导通, T_2 管截止, $+V_{CC} \rightarrow T_1 \rightarrow R_L \rightarrow \text{GND}$ 。

ü 动态负半周 ($v_i < 0$) :

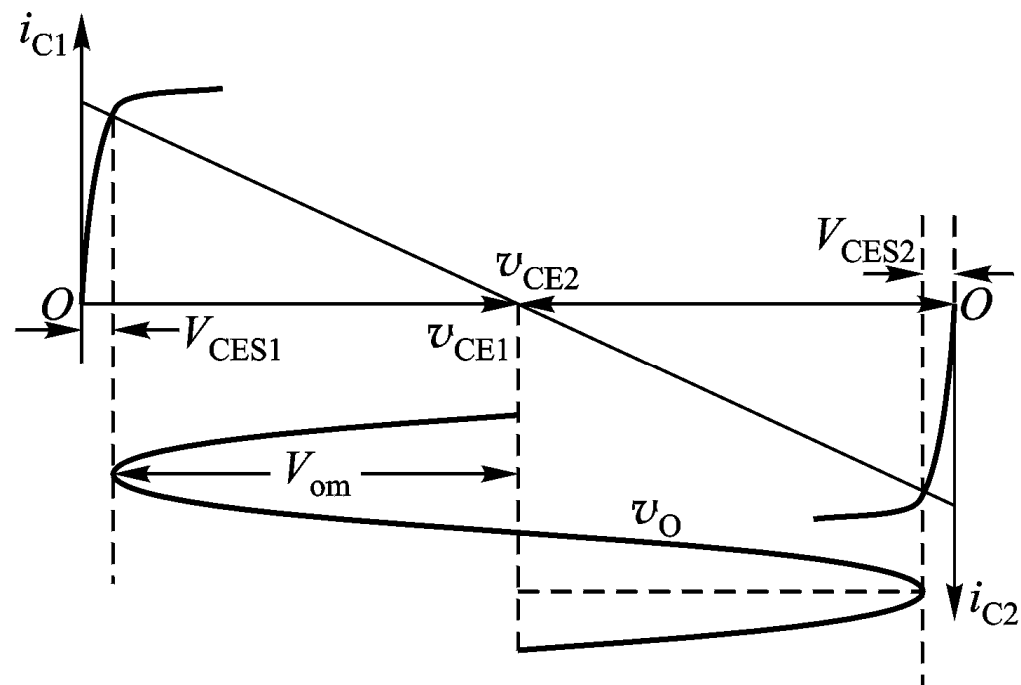
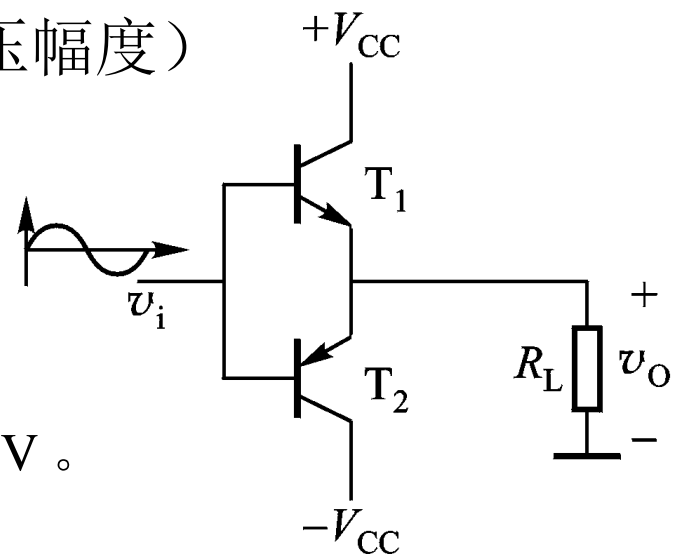
T_1 管截止, T_2 管导通, $\text{GND} \rightarrow R_L \rightarrow T_2 \rightarrow -V_{CC}$ 。



Ø 互补对称共集电路（最大输出电压幅度）

ü 最大输出电压为： $V_{CC} - V_{CES}$ 。

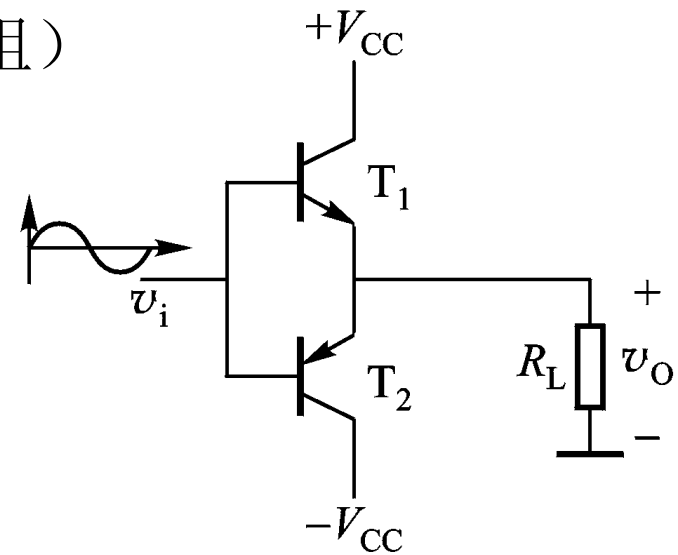
ü 当电源电压为 $\pm 15V$ 时，
最大不失真输出电压幅度一般为 $\pm(12\sim 14)V$ 。



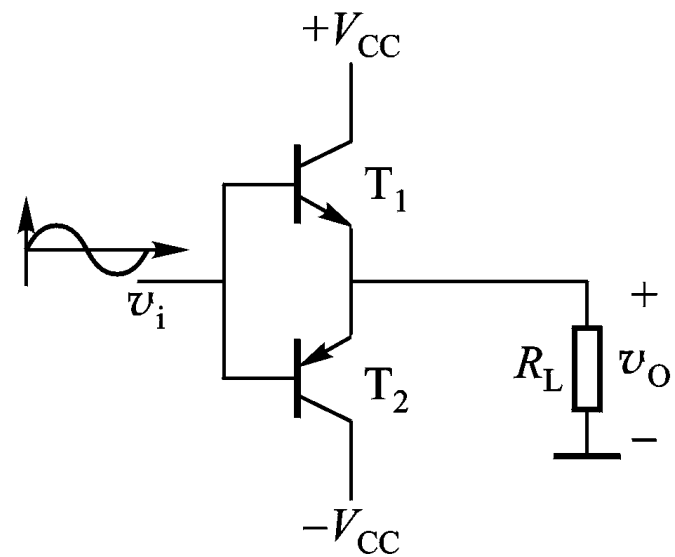
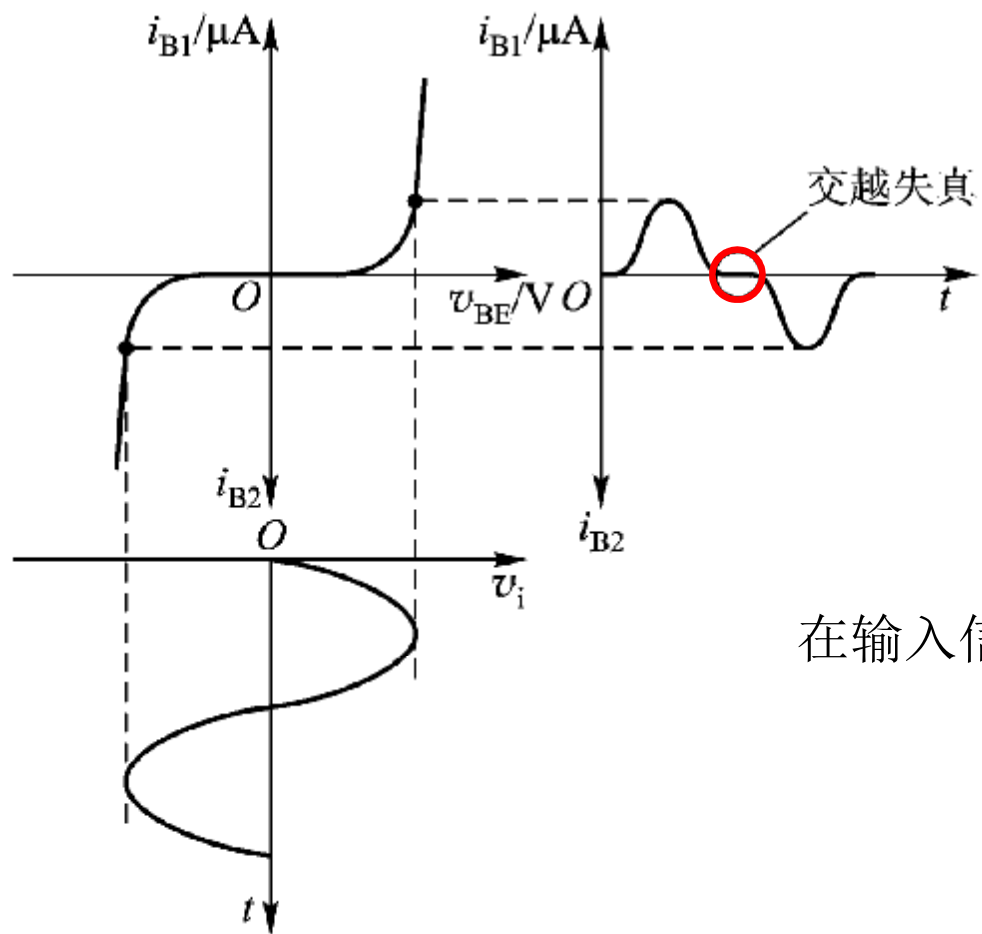
Ø 互补对称共集电路（输入输出电阻）

ü 输入电阻较高： $R_i = r_{be} + (1 + b)R_L$

ü 输出电阻一般较小（共集电路）。



❖ 互补对称共集电路（交越失真）

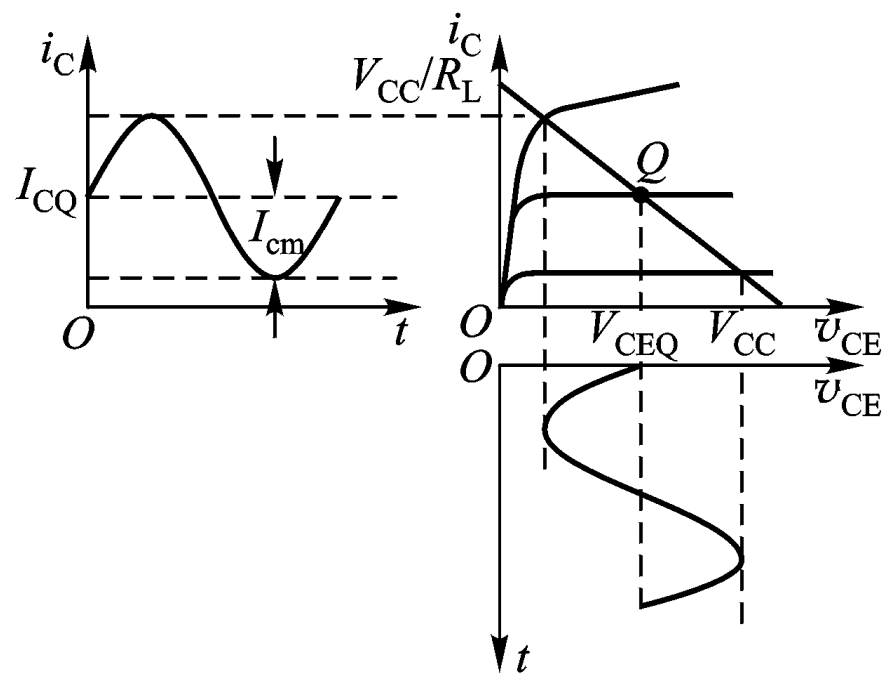


<交越失真>
在输入信号小于三极管的开启电压时，
 T_1 、 T_2 管均截止。

Ø 互补对称共集电路（甲、乙、甲乙类）

Ü 甲类放大：导通角为 $\theta = 2\pi$ 。

（三组态电路、差分电路）

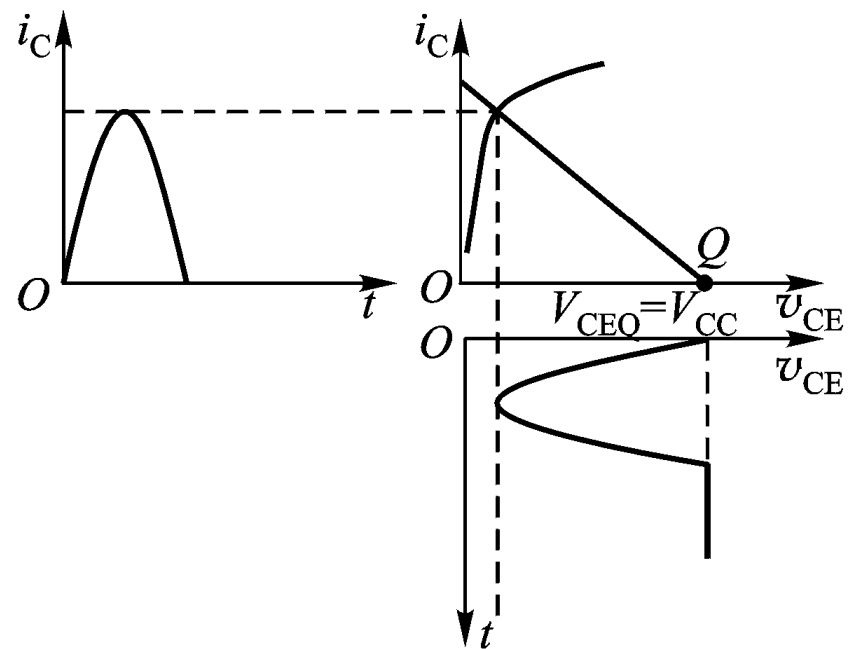


Ø 互补对称共集电路（甲、乙、甲乙类）

Ü 乙类放大：导通角为 $\theta = \pi$ 。

（互补对称共集电路）

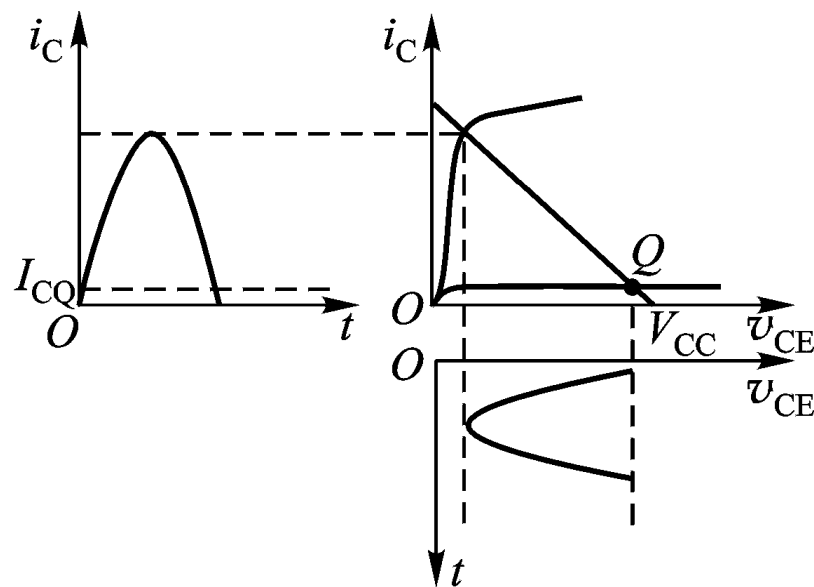
（交越失真）



Ø 互补对称共集电路（甲、乙、甲乙类）

ü 甲乙类放大：导通角介于 π 和 2π 之间。

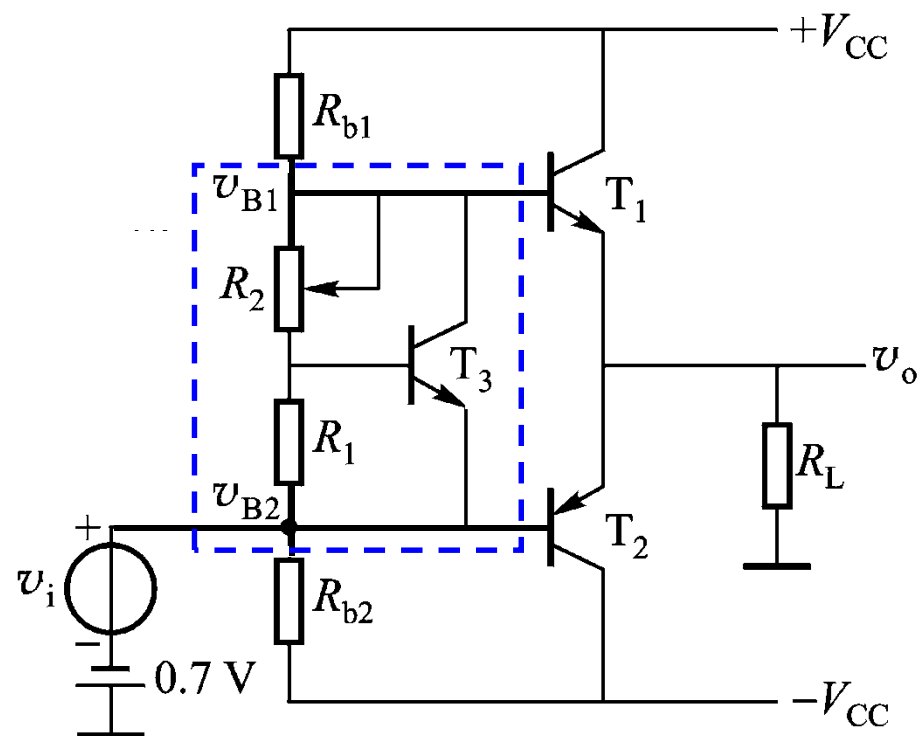
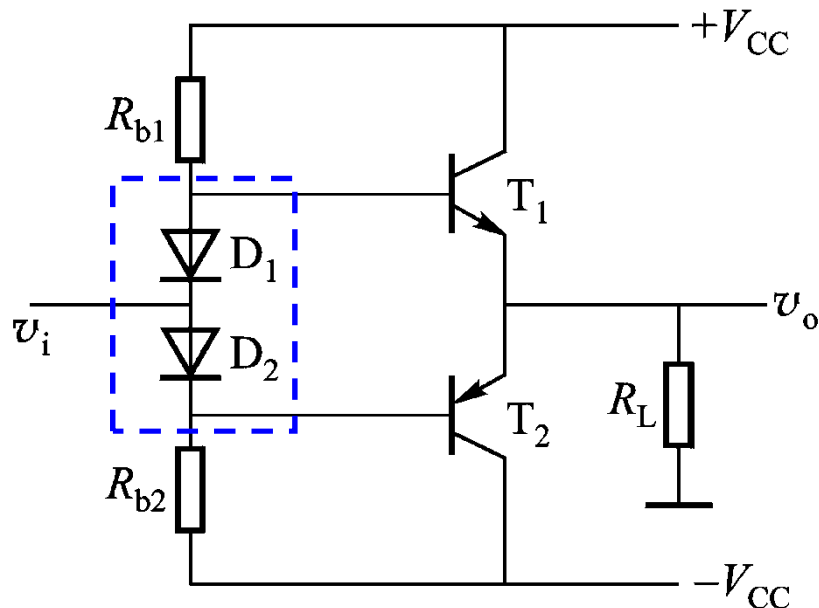
（给管子设置微小的静态工作电流，使其在小的输入信号下也能进入放大区）



Ø 互补对称共集电路（甲乙类）

ü 甲乙类放大：导通角介于 π 和 2π 之间。

（给管子设置微小的静态工作电流，使其在小的输入信号下也能进入放大区）



$$V_{CE3} = (1 + \frac{R_2}{R_1}) V_{BE3}$$

✓ 集成运算放大器（中间级）

ü 集成运放中间级：电压放大电路。

ü 主要任务：高电压增益；

常用电路：共射/共源放大电路。

ü 电压增益：
$$A_v = -\frac{b(R_c // R_L)}{r_{be}}$$

ü 提高电压增益的措施：

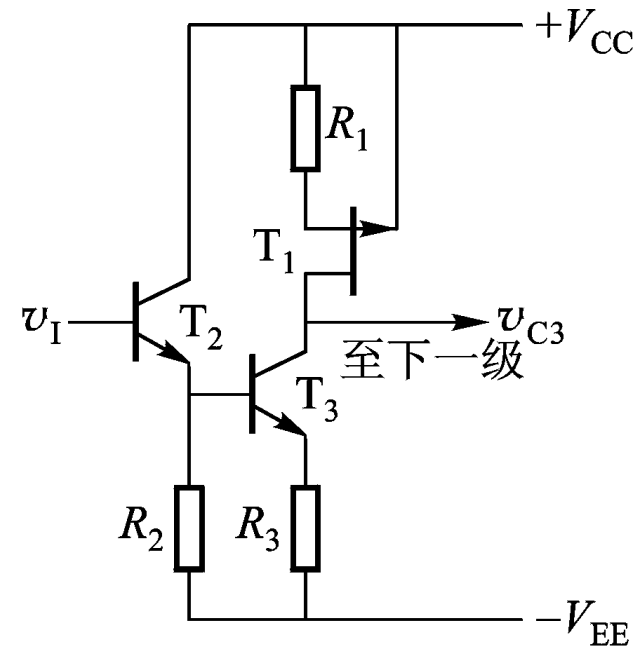
采用达林顿（复合）管，提高 β ；

R_c 以恒流源代替；

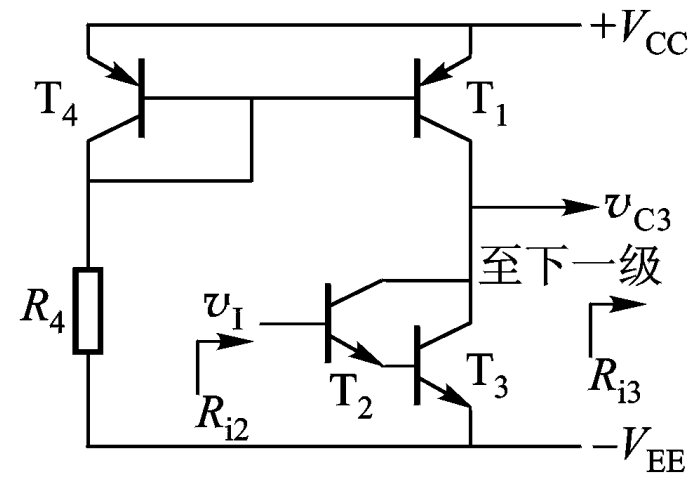
在输入级与中间级之间，增加一级 CC 电路进行阻抗变换。

Ø 集成运放中间级

ü 电流源 + 射级跟随器



ü 电流源 + 复合管



✓ 集成运算放大器

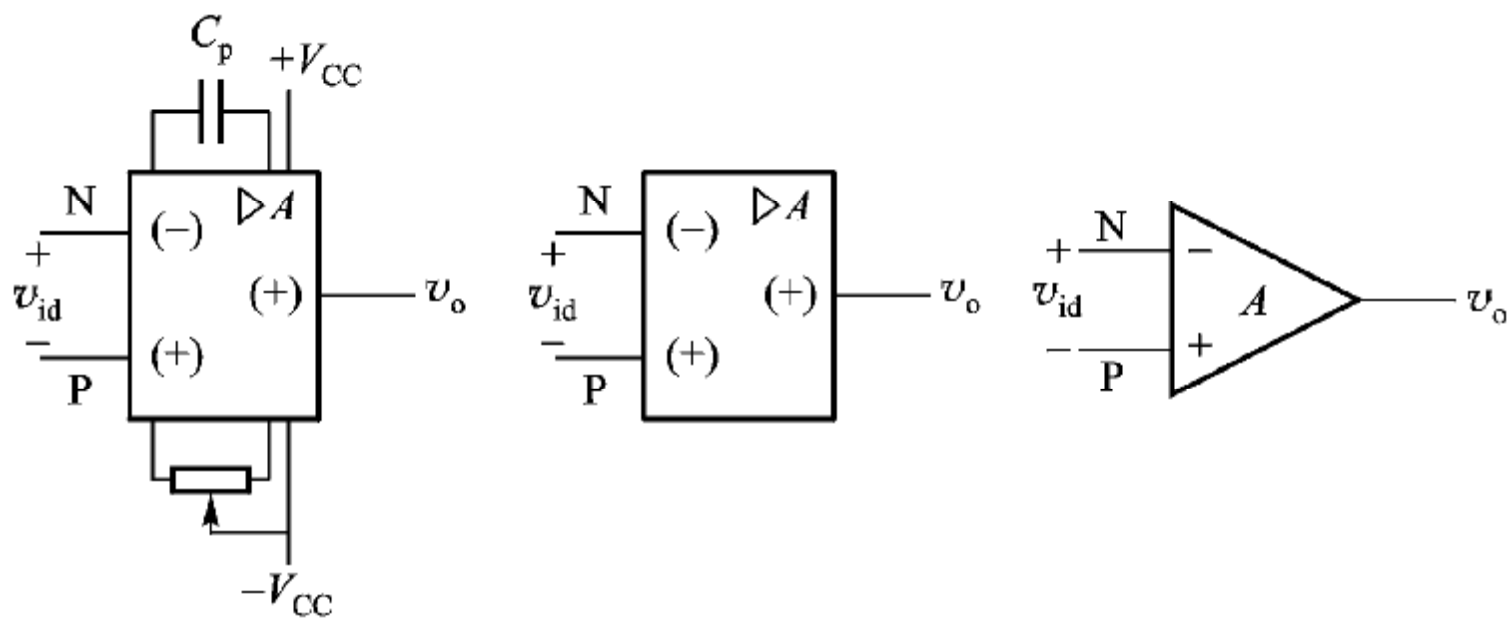
ü 主要特点：

采用对称结构，相同工艺，元件参数具有良好的一致性和同向偏差；
采用微电流源作为偏置及负载，工作电流极小，芯片面积小，功耗低；
采用直接耦合方式（无法制造大容量电容）。

ü 种类繁多。

ü 针对使用者，应以能合理选择，正确使用为主。

集成运放（符号）



Ø 集成运放（电压传输曲线）

ü 电压传输特性曲线：

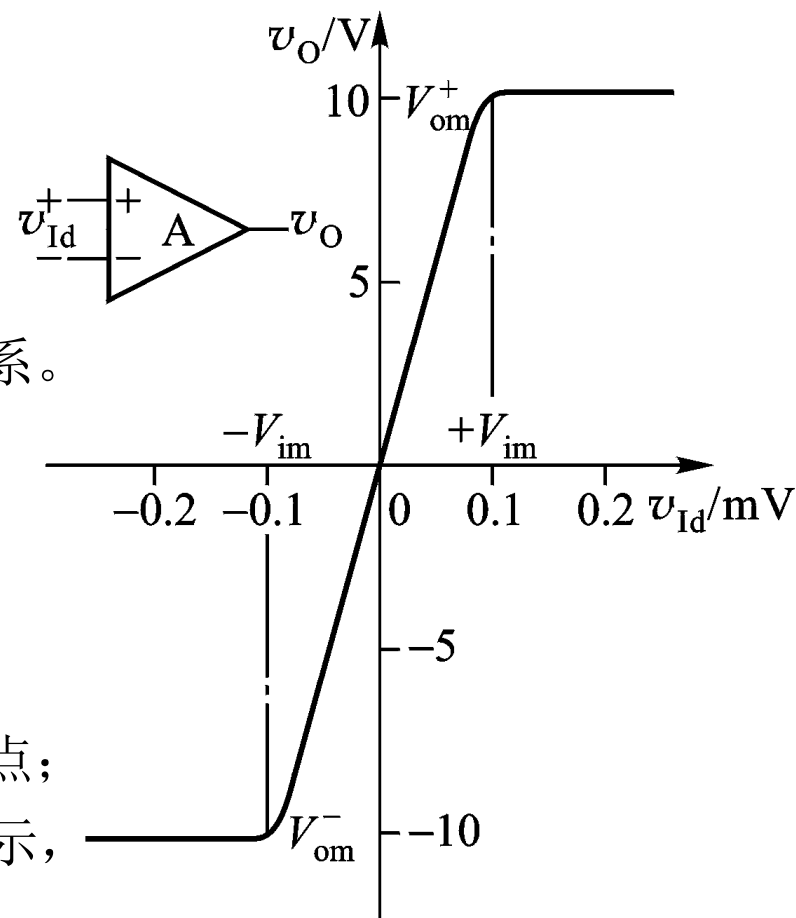
在直流或低频条件下运放的输入、输出关系。

ü 线性放大区 ~ 饱和区。

ü 理想条件下，

集成运放的电压传输特性曲线通过坐标原点；

运放的电压既可以用增量（交流量）表示，也可以用瞬时量、直流量表示。



ü 输出失调：实际运放的电压传输特性曲线不通过坐标原点；

为了弥补输出失调电压，通常在运放输入级电路中设置了调零端。

Ø 集成运放（低频小信号模型）

ü 理想条件下，集成运放可以等效成一个电压控制电压源（VCVS）。

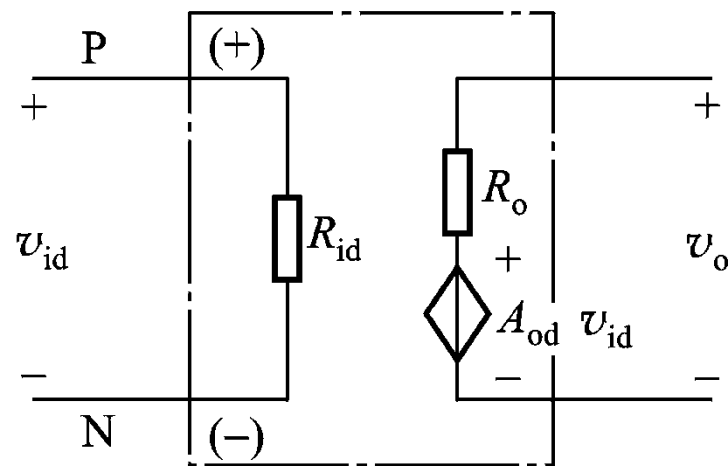
ü 开环差模电压放大倍数：

$$A_{vd} = \frac{\Delta v_O}{\Delta v_{Id}} = \frac{\Delta v_O}{\Delta v_P - \Delta v_N}$$

ü 差模输入电阻：

$$R_{id} = \frac{\Delta v_{Id}}{\Delta i_{Id}} = \frac{\Delta v_P - \Delta v_N}{\Delta i_{Id}}$$

ü 输出电阻：



Ø 集成运放（失调参数）

ü 输出失调电压 V_{OO} ：集成运放在 $v_{Id} = 0$ 时的输出电压；

输入失调电压 V_{IO} ：使输出电压回零，在输入端加的反向补偿电压。

ü 输入失调电压温漂 dV_{IO}/dT ：

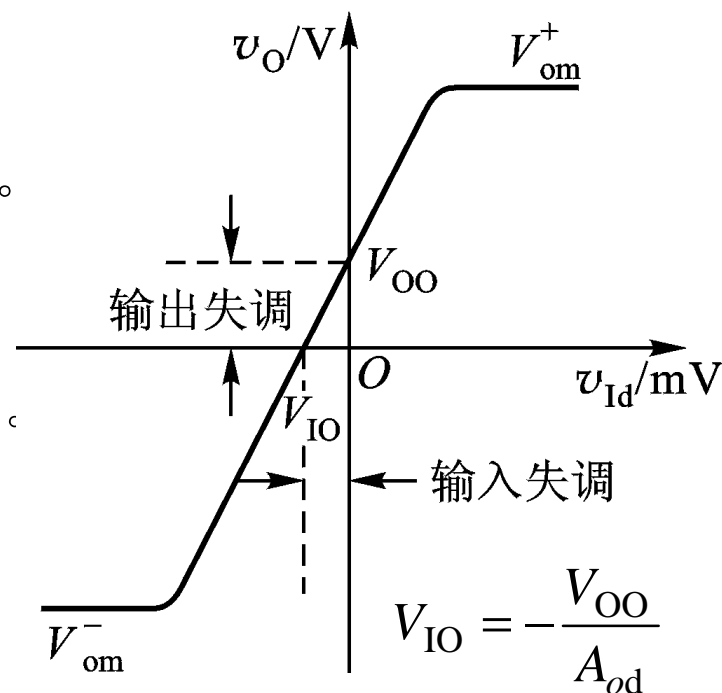
反映输入失调电压 V_{IO} 随温度而变化的程度。

ü 输入失调电流 I_{IO} ：

反映集成运放输入端输入电流的不平衡程度。

ü 输入失调电流温漂 dI_{IO}/dT ：

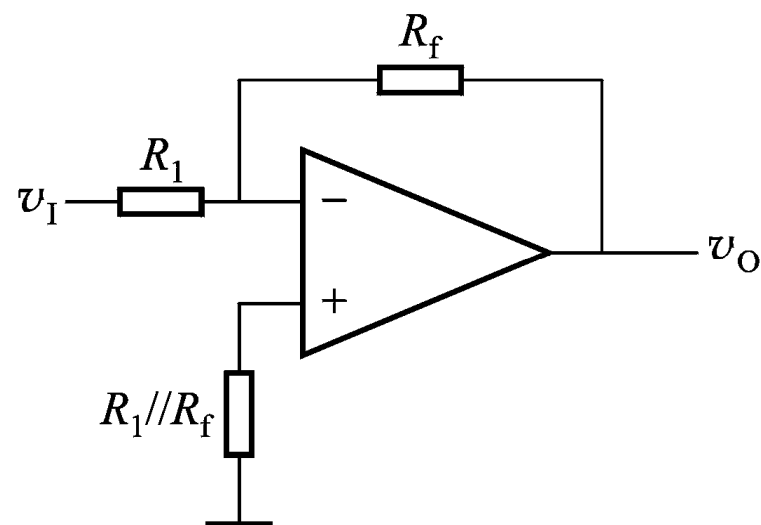
反映输入失调电流 I_{IO} 随温度而变化的程度。



ü 分析输出失调模型（P74）

Ø 集成运放（失调参数）

Ü 平衡补偿电阻



Ø 集成运放（共模参数）

ü 共模抑制比： $K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_{\text{vd}}}{A_{\text{vc}}} \right|$

ü 最大共模输入电压 V_{Icmax} ：

当共模输入电压超出此参数时，将影响运放电路中相关晶体管的工作状态；且运放失去正常的差模放大能力。

ü 共模输入电阻： $R_{\text{ic}} = \left| \frac{\Delta v_{\text{ic}}}{\Delta i_{\text{ic}}} \right|$

Ø 集成运放（时域、频域参数）

Ü -3dB 带宽 f_H : $f_{BW} = f_H - f_L = f_H$

Ü 单位增益带宽 f_c : 运放差模开环电压增益 A_{vd} 下降至0 dB 时的频率。

$$f_c \approx A_{vd} \cdot f_H$$

Ü 转换速率（压摆率） SR : 衡量运放在大幅度信号作用下的工作速度。

$$SR = \left| \frac{dv_O}{dt} \right|_{\max}$$

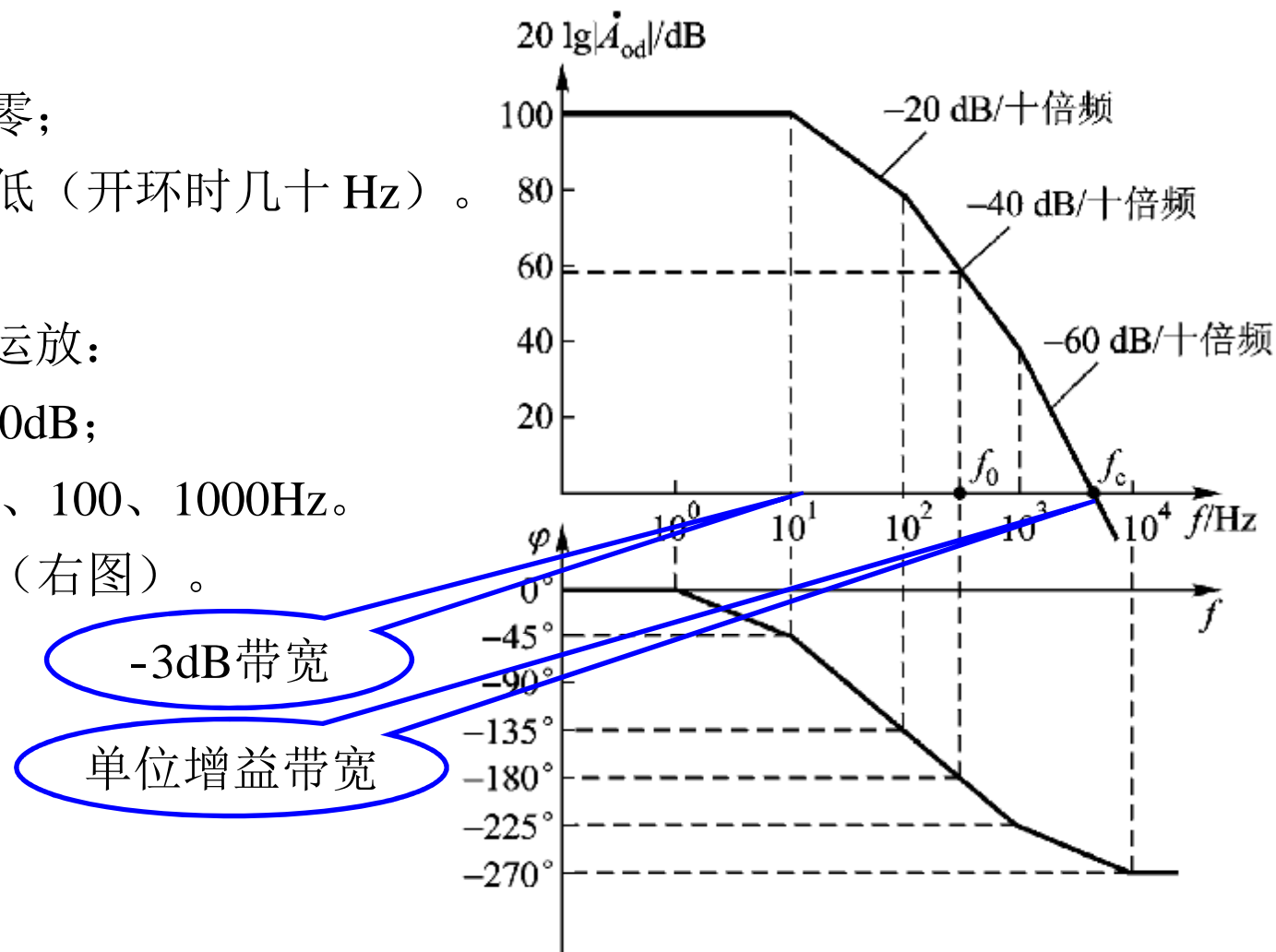
Ü 全功率带宽 f_p : 当运放输出较大幅度电压时，为保证输出波形不产生因 SR 为有限值而引起的波形失真，运放所能工作的最高频率。

集成运放（频率响应）

集成运放是直接耦合式、高增益的多级放大器。

下限频率为零；
上限频率很低（开环时几十 Hz）。

定义某集成运放：
开环增益 100dB；
各级上限 10、100、1000Hz。
频率响应图（右图）。



Ø 集成运放（类型）

- ü 通用型：其性能指标适合于一般性使用，产品量大面广；
- ü 低功耗型：静态功耗在 1mW 左右，可用于便携设备；
- ü 高精度型：失调电压温漂在 $1\mu\text{V}$ 以下；
- ü 高速型：转换速率在 $10\text{V}/\mu\text{s}$ 左右；
- ü 高阻型：输入电阻在 $10^{12}\Omega$ 左右；
- ü 宽带型：单位增益带宽在 10MHz 左右；
- ü 高压型：允许供电电压在 $\pm 30\text{V}$ 以上；
- ü 功率型：允许的供电电压较高可输出电流较大；
- ü 跨导型：输入量为电压，输出为电流；
- ü 差动电流型：输入为差分电流，输出为电压；
- ü 其它：如程控型、电压跟随型等。

Ø 集成运放（应用事项）

ü 应根据输入信号的性质、负载的性质、对运放精度的要求、环境条件等情况选择使用。

ü 不要盲目追求指标先进；

应尽量选择通用型运放；

应考虑能避免冲击电压和电流的保护措施；

要注意单元之间的输出电平配合问题；

要注意性能指标的测量条件；

在弱信号条件下使用时，应注意噪声系数不能太大。

✓ 本节作业

ü 习题1 (P102)

23 (差分电路)

所有的题目，需要有解题过程（不是给一个答案即可）。

✓ 本节作业

ü 习题1（P103）

25（集成电路整体）

所有的题目，需要有解题过程（不是给一个答案即可）。