

第5章 集成运算放大器

5.1 集成运算放大器的构成（差分放大电路）

5.2 集成运算放大器

5.3 集成运算放大器的基本运算电路

5.4 集成运算放大器的非线性应用

集成运算放大器的构成

1、输入级：抑制噪声与干扰（温漂）

- 双端输入/双端输出的差分放大电路

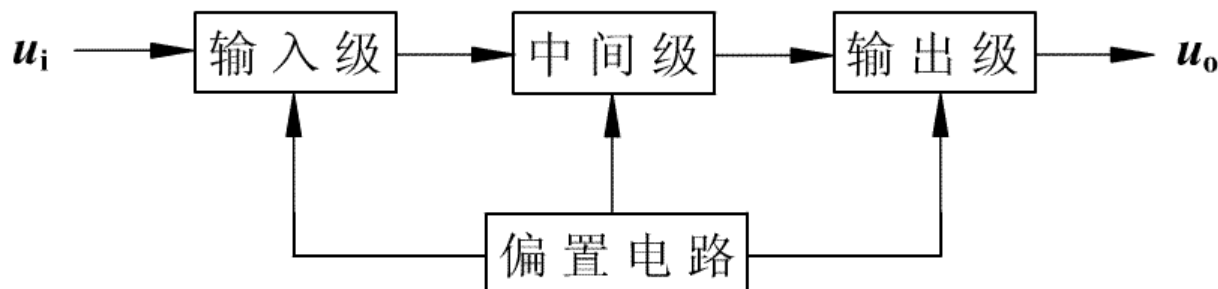
2、中间级：电压放大

- 高电压增益的一级/多级放大电路

3、输出级：适配并驱动负载

- 功率放大器

4、偏置电路：提供合适的静态工作点

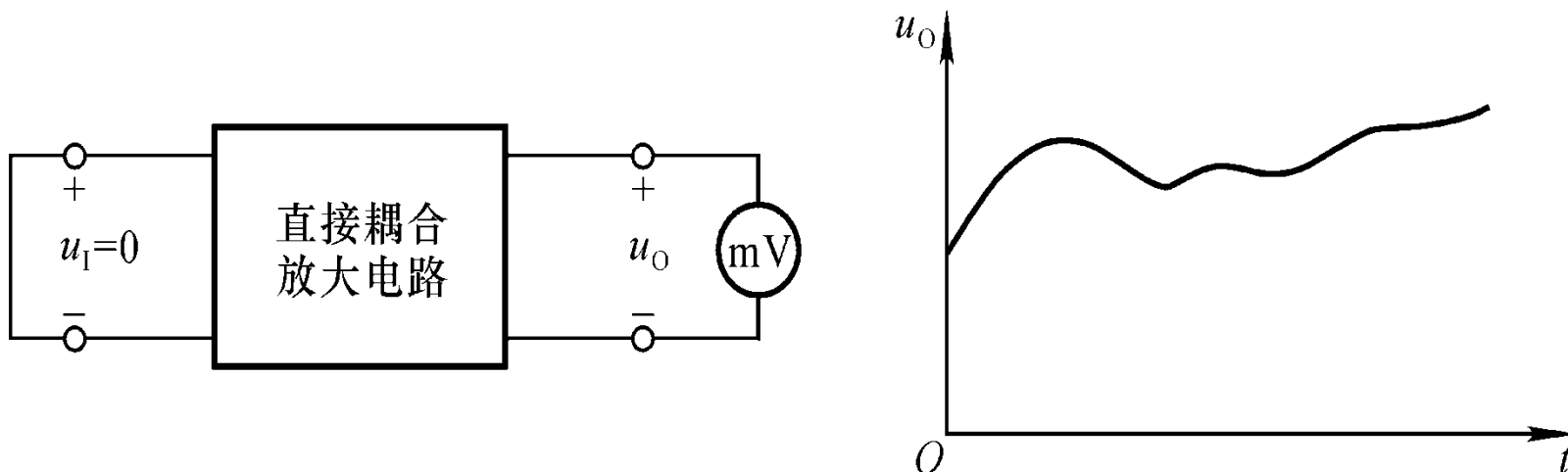


5.1 差分放大电路

- 一、零点漂移现象及其产生的原因
- 二、长尾式差分放大电路的组成
- 三、长尾式差分放大电路的分析
- 四、差分放大电路的四种接法
- 五、具有恒流源的差分放大电路
- 六、差分放大电路的改进

一、零点漂移现象及其产生的原因

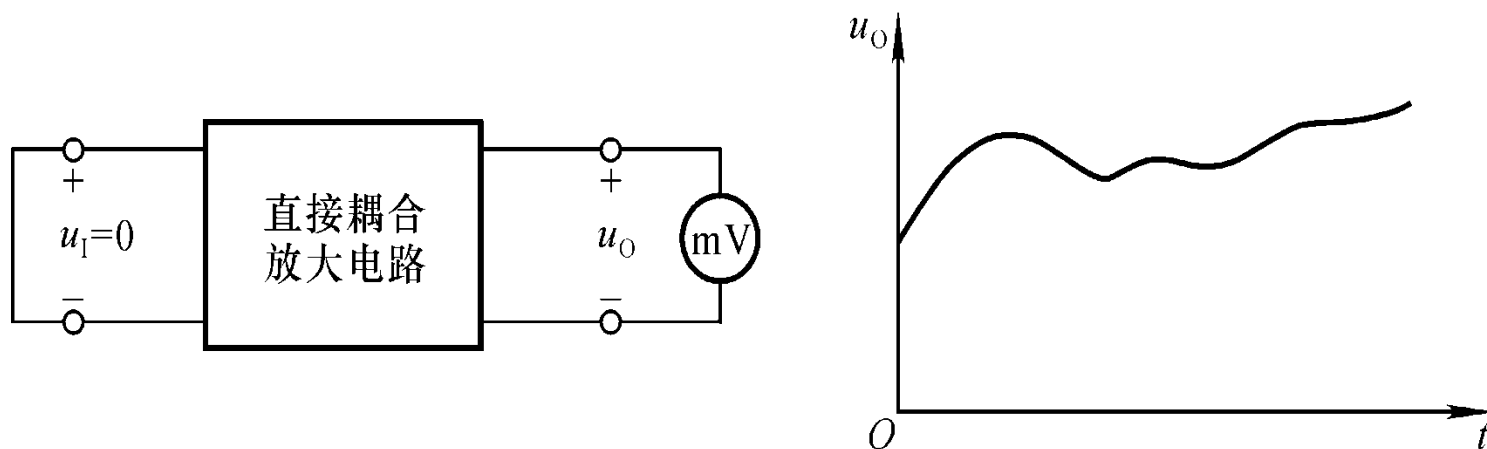
1、什么是零点漂移现象： $\Delta u_i = 0$ ， $\Delta u_o \neq 0$ 的现象。



零点漂移现象：

输入电压 u_i 为0,而输出电压 u_o 不为0并且缓慢变化的现象

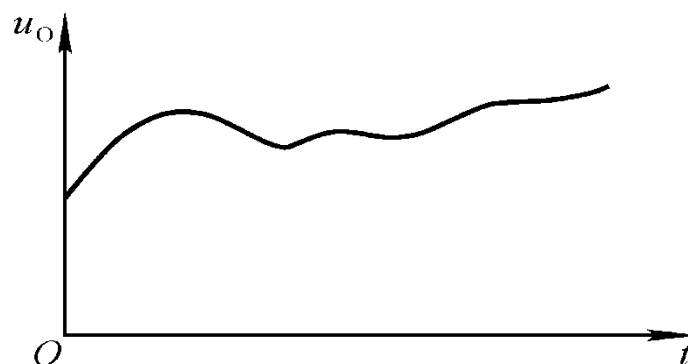
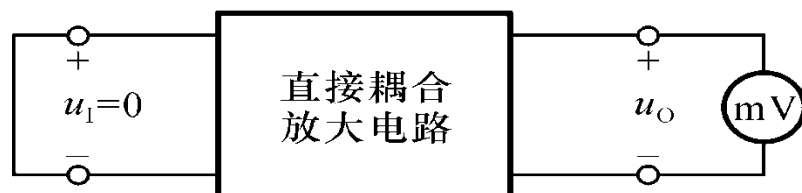
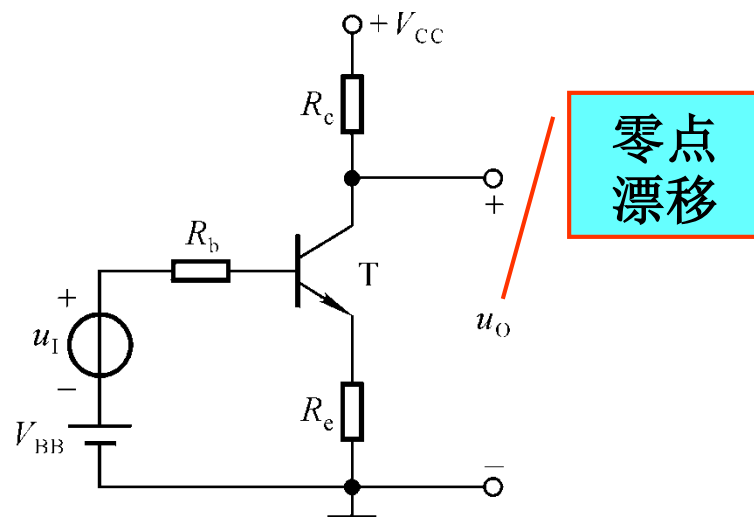
一、零点漂移现象及其产生的原因



产生原因：温度变化，直流电源波动，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。

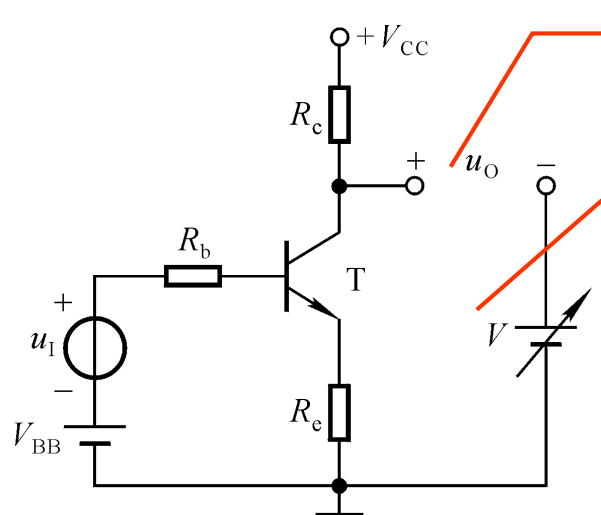
二、差分放大电路的组成

在典型工作点稳定电路中，温度变化时 I_{CQ} 总是有微小变化，导致输出电压 u_o 的微小变化，所以也存在温漂问题



如何抑制温漂

改变电压输出端，找到一
受温度控制的直流电压源V
电压值与 U_{CQ} 同步变化



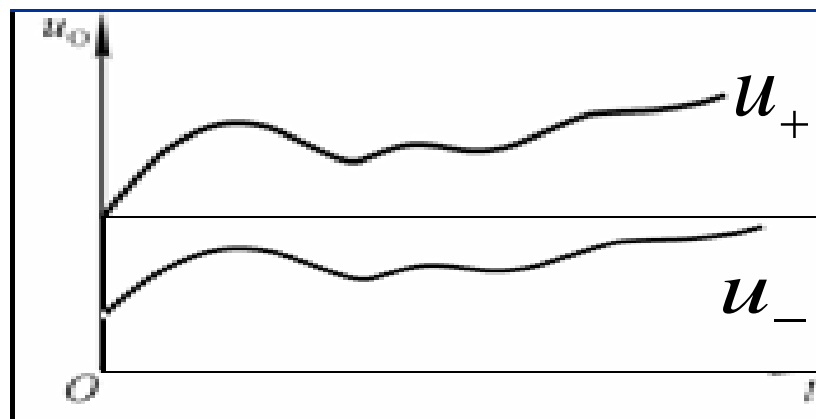
零输入
零输出

若V与 U_C 的
变化一样，
则输出电压
就没有漂移

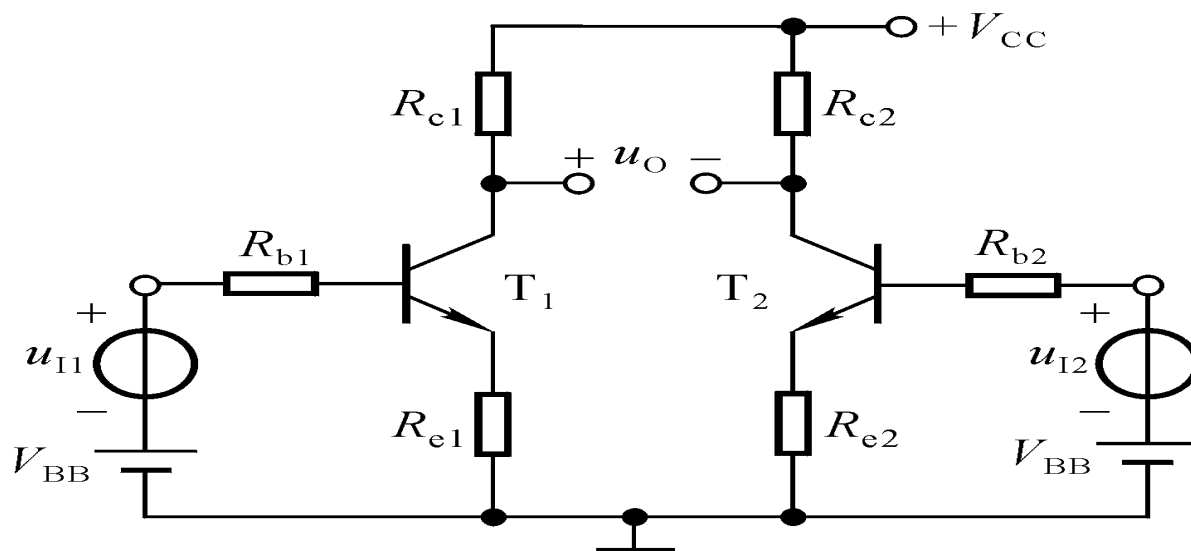
当输入信号 $u_i=0$ 时

$$u_o = u_+ - u_- = 0$$

可以抑制温漂



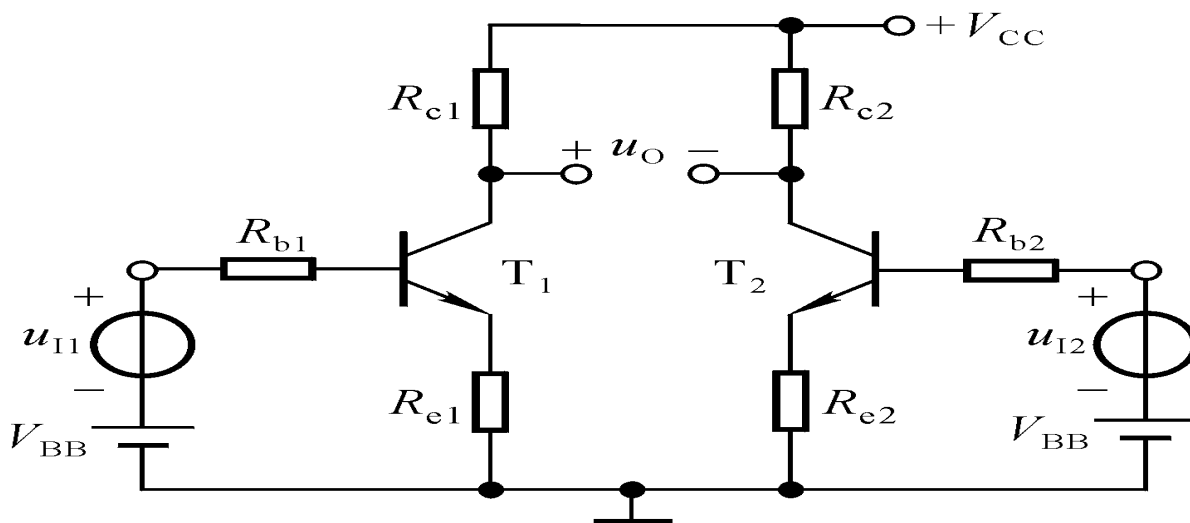
如何实现 温控电压源 V



采用电路参数完全相同，管子特性完全相同的电路，则两管子的集电极电位 U_{CQ1} 和 U_{CQ2} 同步变化 能够抑制温漂

参数理想对称： $R_{b1}=R_{b2}$ ，
 $R_{c1}=R_{c2}$ ， $R_{e1}=R_{e2}$ ；
T₁、T₂在任何温度下特性均相同。

差分放大电路

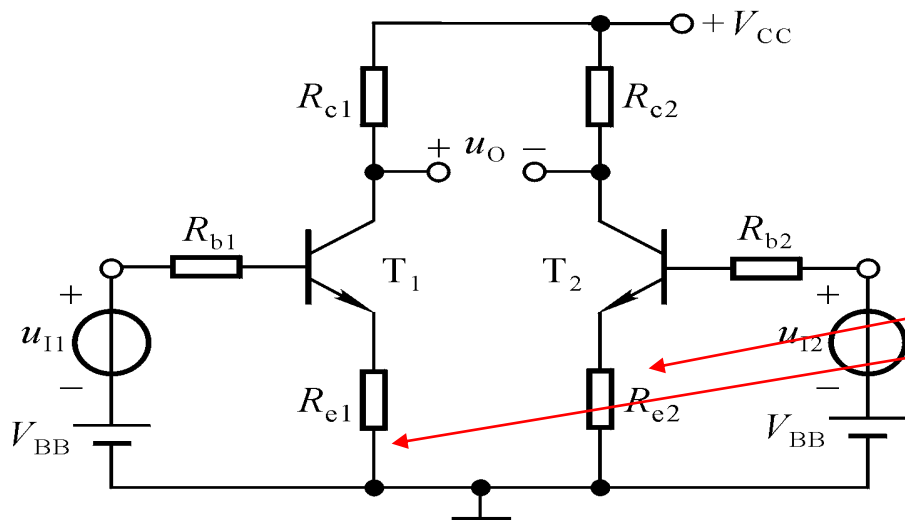


共模信号

U_{i1} 与 U_{i2} 为大小相等，极性相同的输入信号（共模信号）时，输出电压

$$u_o = u_{C1} - u_{C2} = 0$$

差分放大电路对共模信号有很好的抑制作用



**Re1和Re2的存在，
降低了电路的电压
放大能力**

差模信号

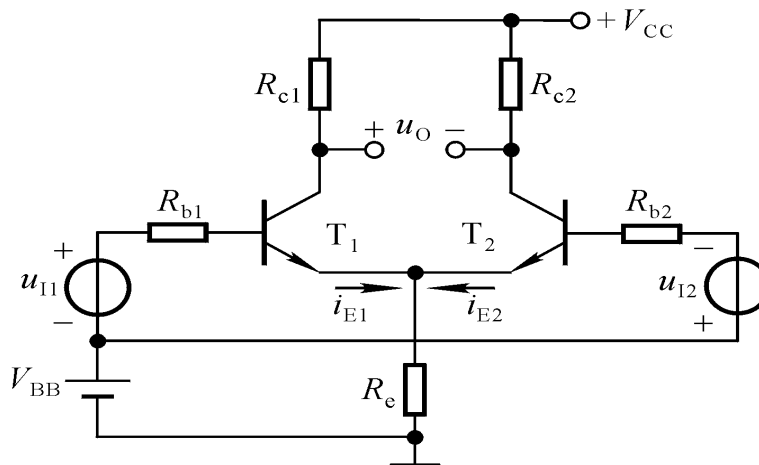
**U_{i1} 与 U_{i2} 为大小相等，极性相反的输入
信号（差模信号）时，输出电压**

$$\Delta u_o = \Delta u_{c1} - (-\Delta u_{c2}) = 2\Delta u_{c1}$$

差分放大电路对差模信号能够实现放大

改进差分放大电路

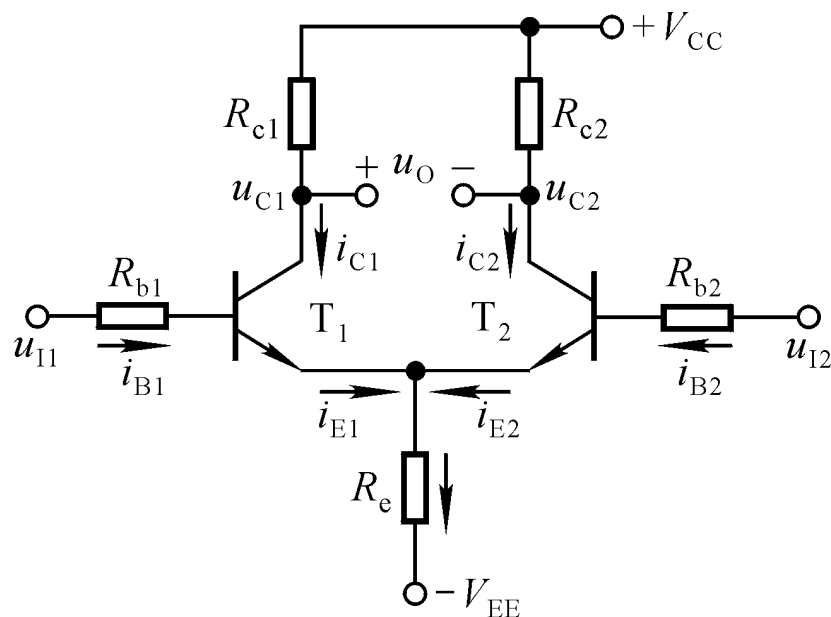
克服 R_{e1} 和 R_{e2} 对电压放大能力的影响



改进后的差分放大电路，在差模信号作用下，流经 R_e 的电流变化为0， R_e 对差模信号没有反馈作用，相当于短路，可以提高对差模信号的放大能力

对电路进一步简化，并实现信号源和电源的共地得到经典的长尾式放大电路

电路参数理想对称

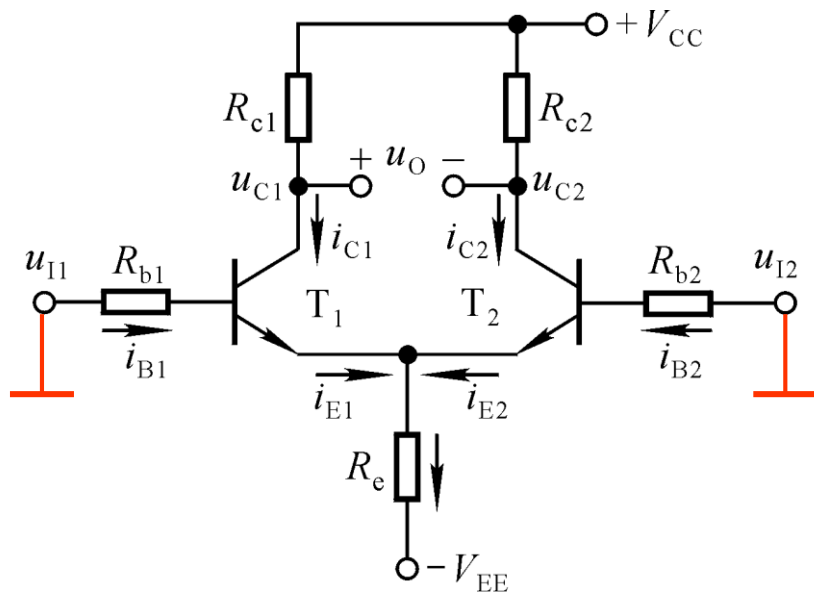


在理想对称的情况下：

- 1、克服零点漂移；
- 2、零输入零输出。

三、长尾式差分放大电路的分析

1、Q点：令 $u_{I1} = u_{I2} = 0$



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

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

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

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

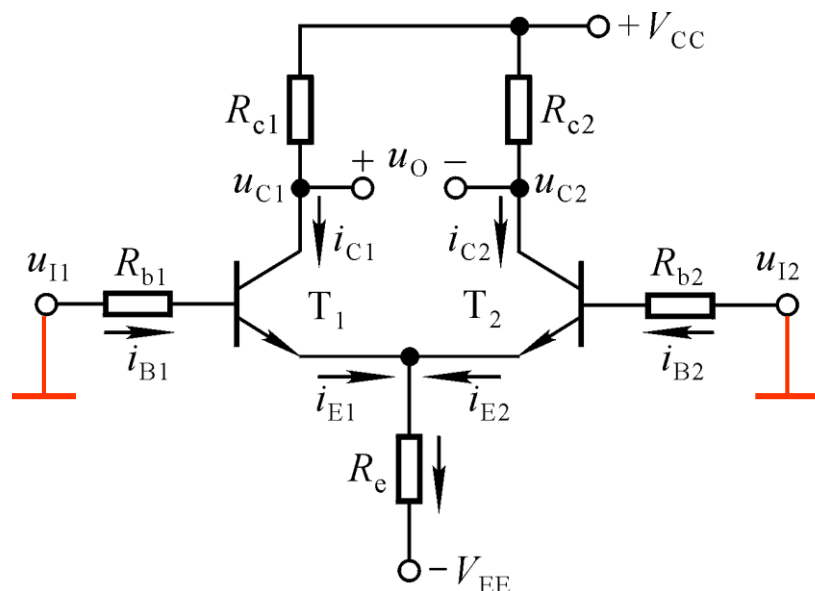
$$u_O = U_{CQ1} - U_{CQ2} = 0$$

$$V_{EE} = I_{BQ} R_b + U_{BEQ} + 2I_{EQ} R_e$$

因为 R_b 小，且 I_{BQ} 很小，所以

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

1、Q点



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

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

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}, \quad U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ} R_c - (-U_{BEQ})$$

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

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

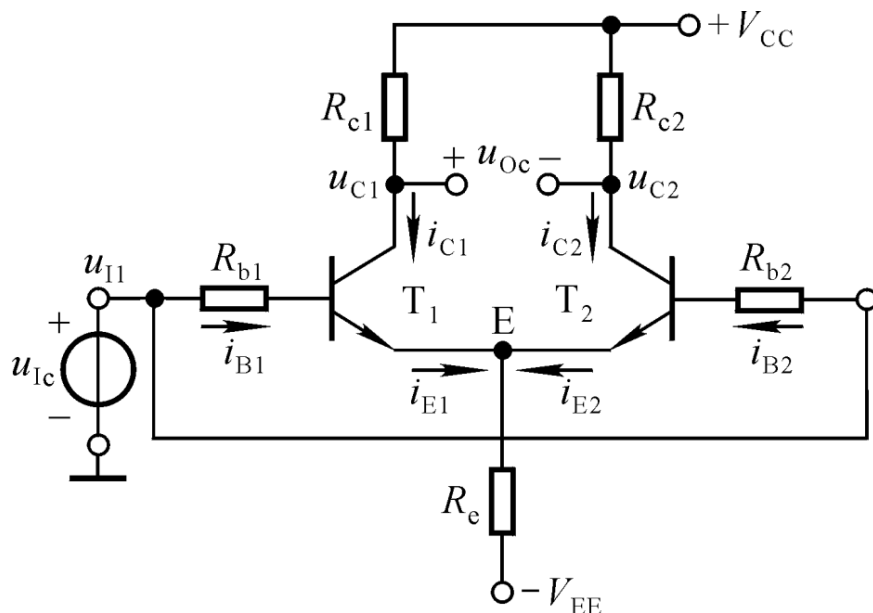
$$\Delta i_{B1} = \Delta i_{B2}$$

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

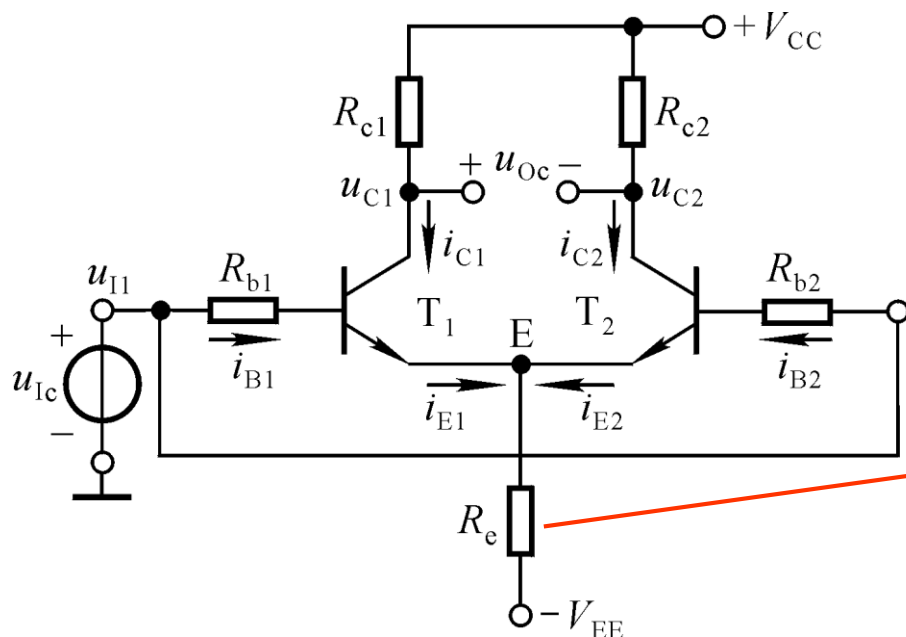
$$\Delta u_{C1} = \Delta u_{C2}$$

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

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



2、抑制共模信号：Re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 $A_c = 0$

对于每一边
电路， $R_e = ?$

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

抑制了每只差分管集电极电流、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，
即

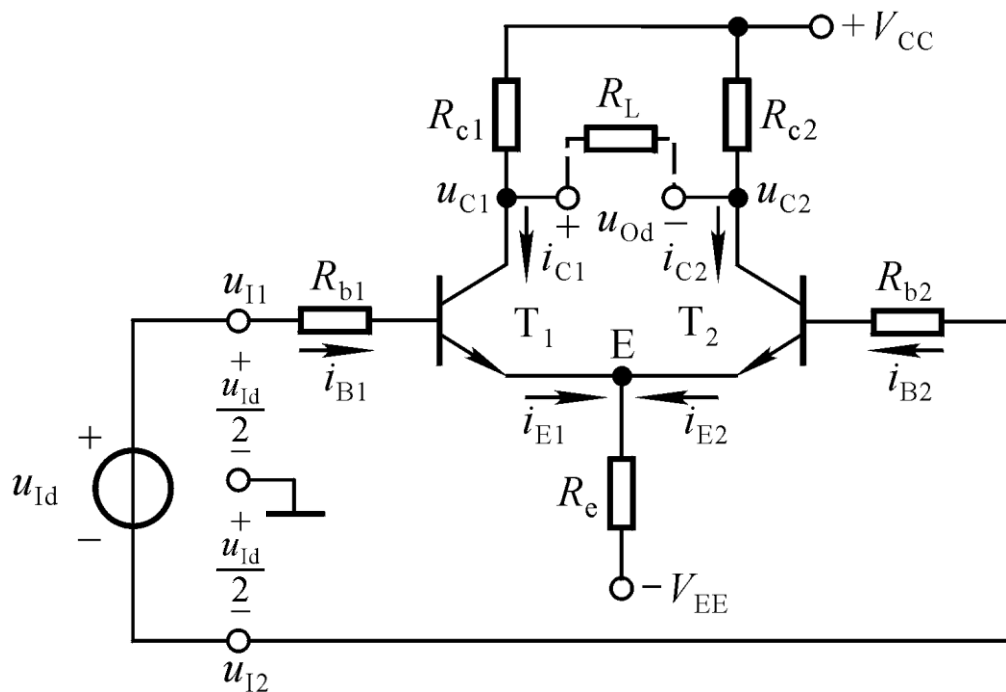
$$u_{I1} = u_{I2} = u_{Id} / 2$$

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

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

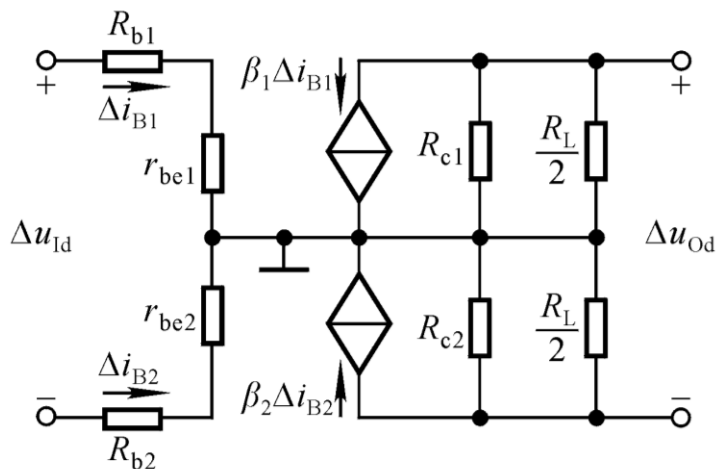
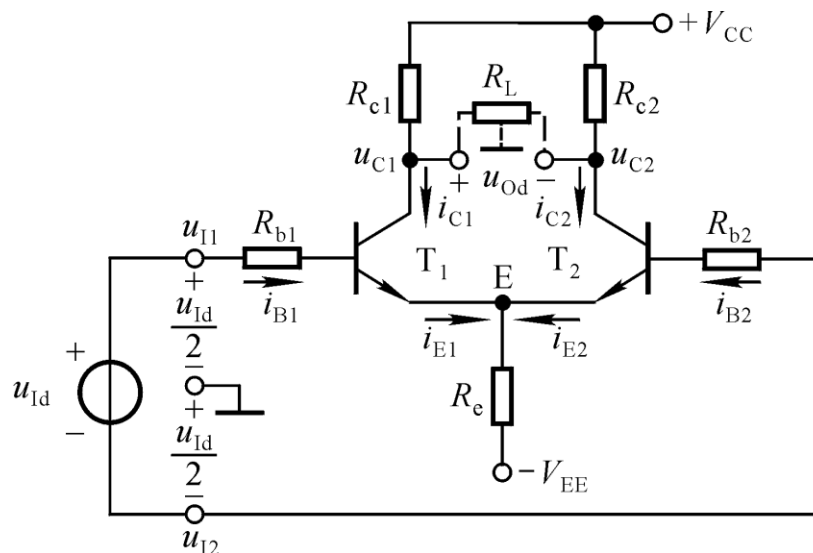
$$\Delta u_{C1} = -\Delta u_{C2}$$

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



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

差模信号作用时的动态分析



差模放大倍数

$$A_d = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}}$$

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

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

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

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

4、 动态参数： A_d 、 R_i 、 R_o 、 A_c 、 K_{CMR}

共模抑制比 K_{CMR} ：综合考察差分放大电路放大差模信号的能力和抑制共模信号的能力。

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

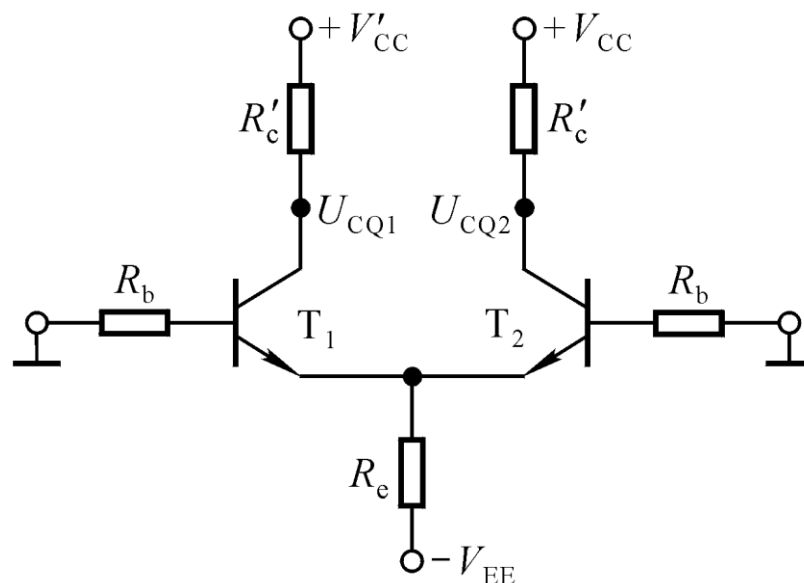
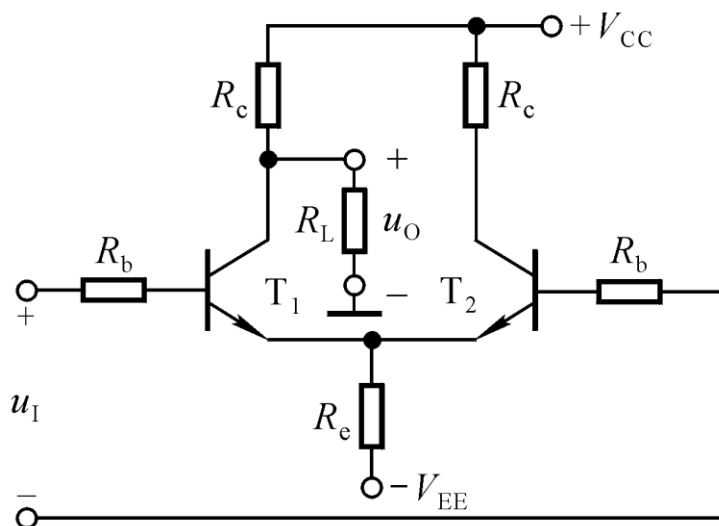
在参数理想对称的情况下， $K_{CMR} = \infty$ 。

在实际应用时，信号源需要有“接地”点，以避免干扰；或负载需要有“接地”点，以安全工作。

根据信号源和负载的接地情况，差分放大电路有四种接法：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。

四、差分放大电路的四种接法

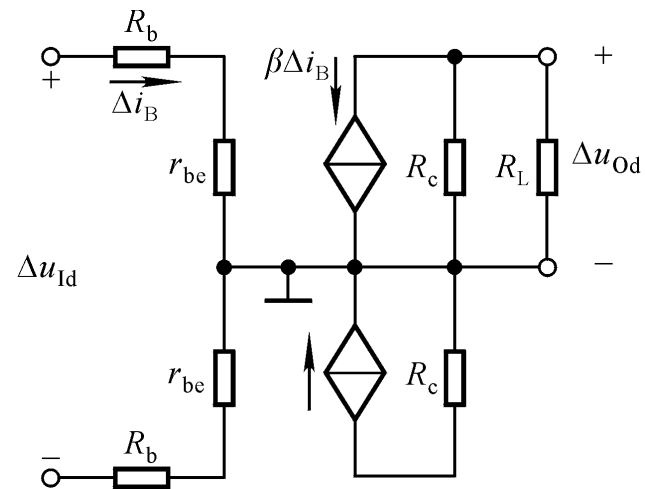
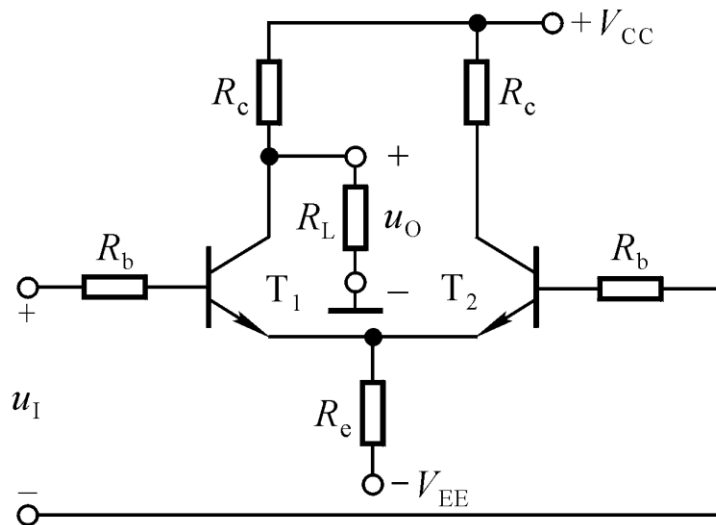
1、双端输入单端输出：Q点分析



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 $U_{CEQ1} \neq U_{CEQ2}$ 。

$$U_{CQ1} = \frac{R_L}{R_c + R_L} \cdot V_{CC} - I_{CQ}(R_c // R_L)$$
$$U_{CQ2} = V_{CC} - I_{CQ}R_c$$

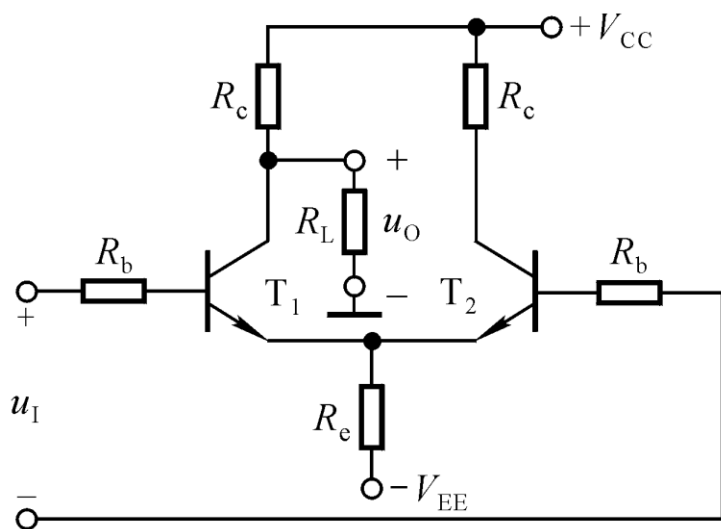
1、双端输入单端输出：差模信号作用下的分析



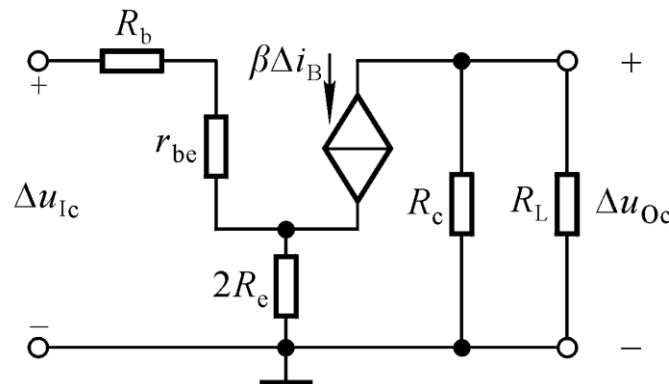
$$A_d = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

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

1、双端输入单端输出：共模信号作用下的分析



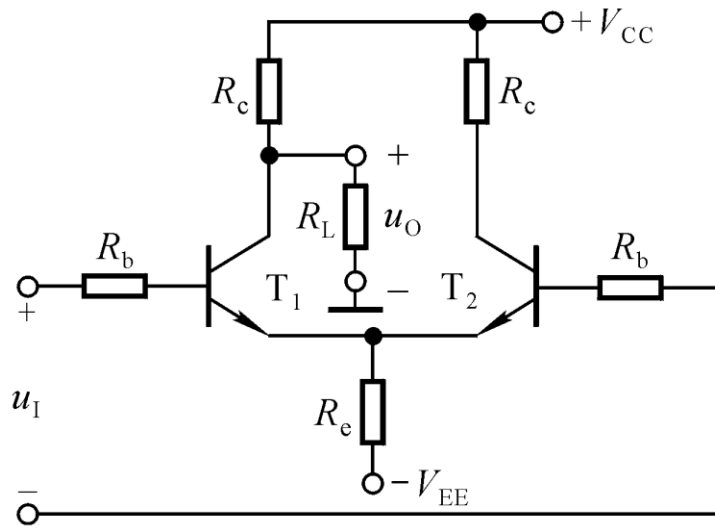
$$A_d = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$



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

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

1、双端输入单端输出

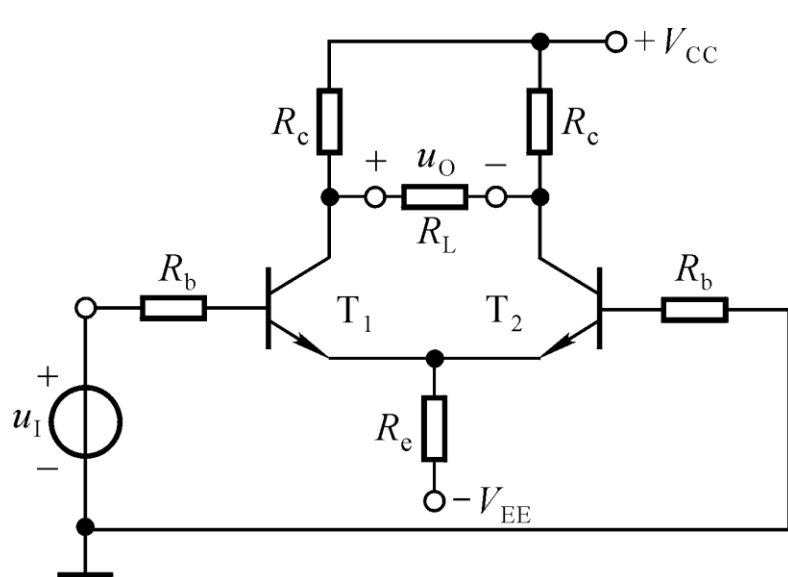


$$A_d = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

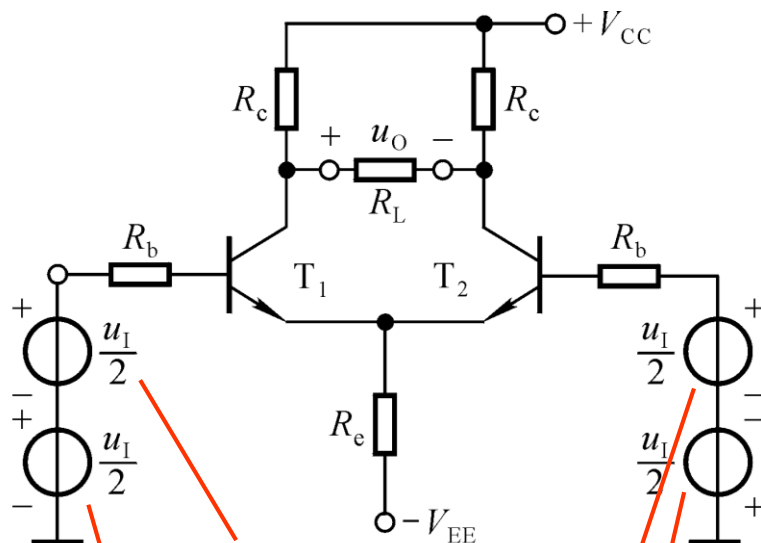
$$K_{CMR} = \frac{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}{2 * (R_b + r_{be})}$$

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

2、单端输入双端输出



在输入信号作用下发射极的电位变化吗？说明什么？



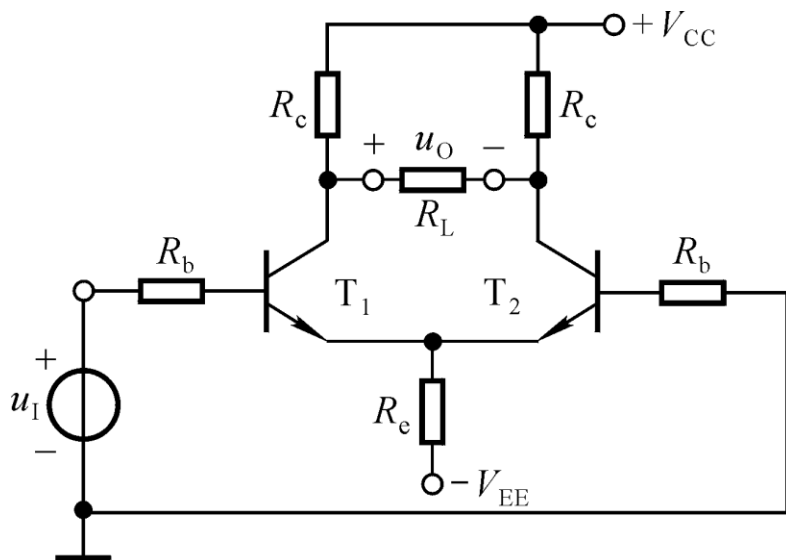
共模输入电压

差模输入电压

输入差模信号的同时总是伴随着共模信号输入：

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

2、单端输入双端输出



静态时的值

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

差模输出

共模输出

3、四种接法的比较：电路参数理想对称条件下

输入方式： R_i 均为 $2(R_b + r_{be})$ ；双端输入时无共模信号输入，单端输入时有共模输入。

输出方式： Q 点、 A_d 、 A_c 、 K_{CMR} 、 R_o 均与之有关。

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

$$\begin{aligned}\text{单端输出: } A_d &= -\frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{2(R_b + r_{be})} \\ A_c &= -\frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e} \\ K_{CMR} &= \frac{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}{2(R_b + r_{be})} \\ R_o &= R_c\end{aligned}$$

五、具有恒流源的差分放大电路

为什么要采用电流源？

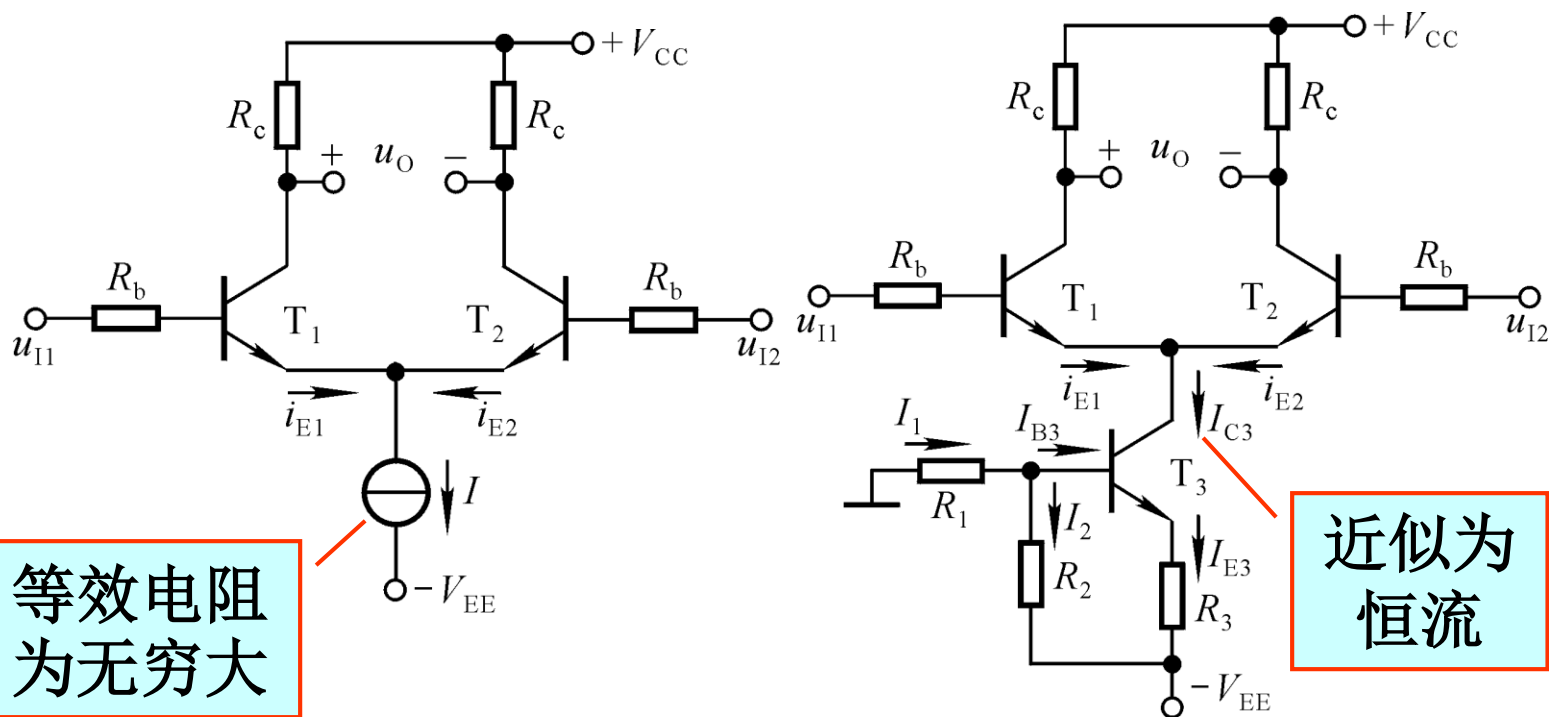
R_e 越大，共模负反馈越强，单端输出时的 A_c 越小， K_{CMR} 越大，差分放大电路的性能越好。

但为使静态电流不变， R_e 越大， V_{EE} 越大，以至于 R_e 太大就不合理了。

需在低电源条件下，得到趋于无穷大的 R_e 。

解决方法：采用电流源！

五、具有恒流源的差分放大电路



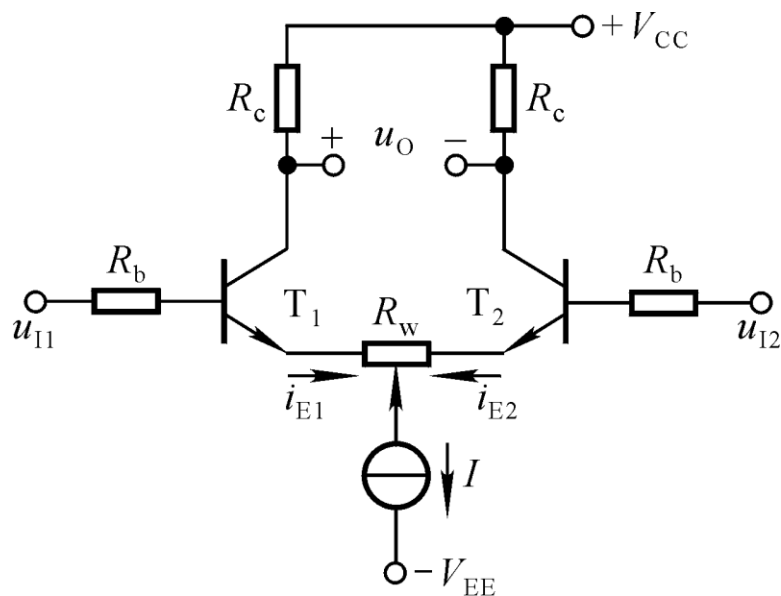
等效电阻
为无穷大

近似为
恒流

$$I_2 \gg I_{B3}, \quad I_{E3} \approx \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{EE} - U_{BEQ}}{R_3}$$

六、差分放大电路的改进

1、加调零电位器 R_W



1) R_W 取值应大些？还是小些？

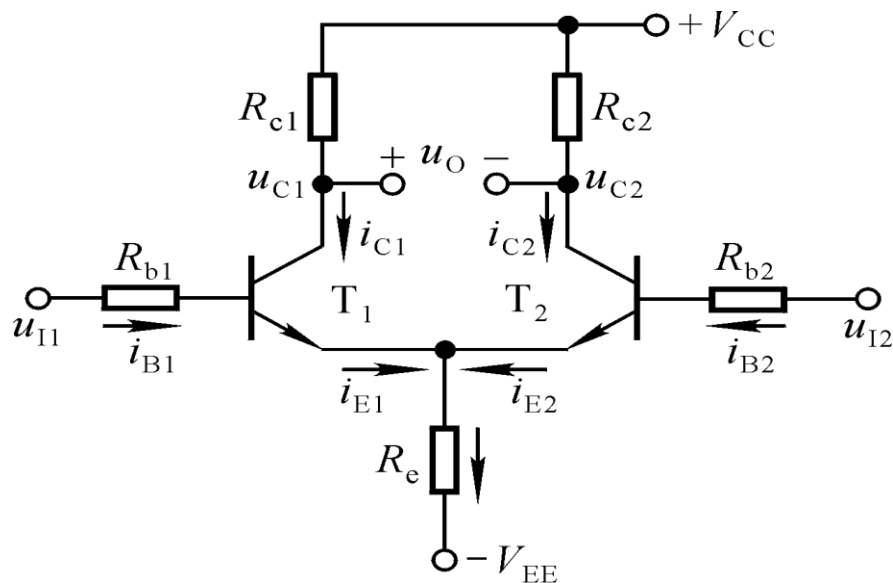
2) R_W 对动态参数的影响？

3) 若 R_W 滑动端在中点，写出 A_d 、 R_i 的表达式。

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

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

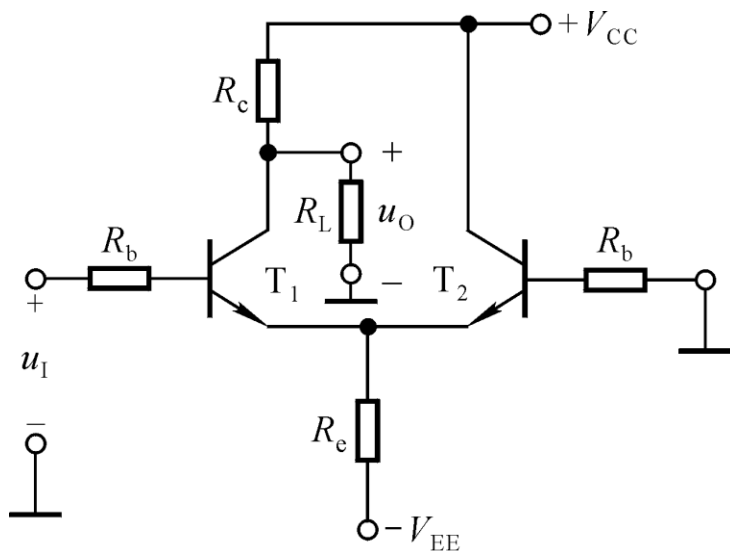
讨论一



若 $u_{I1}=10\text{mV}$ ， $u_{I2}=5\text{mV}$ ，则 $u_{Id}=?$ $u_{Ic}=?$

$$u_{Id}=5\text{mV} , \quad u_{Ic}=7.5\text{mV}$$

讨论二



- 1、 $u_I=10\text{mV}$ ，则 $u_{Id}=?$ $u_{Ic}=?$
- 2、若 $A_d=-10^2$ 、 $K_{\text{CMR}}=10^3$
用直流表测 u_O ， $u_O=?$

$$u_{Id}=?\text{mV} , u_{Ic}=?\text{mV}$$

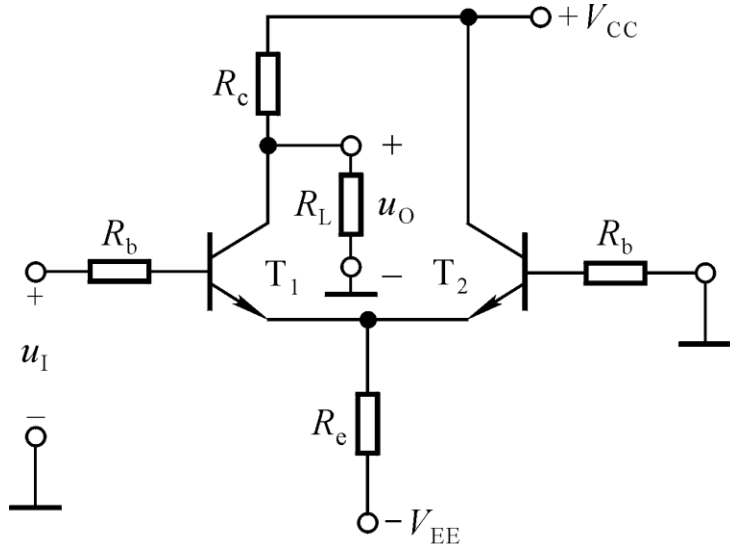
=?

$$u_O = A_d u_{Id} + A_c u_{Ic} + U_{\text{CQ1}}$$

=?

=?

讨论二



1、 $u_I=10\text{mV}$ ，则 $u_{Id}=?$ $u_{Ic}=?$

2、若 $A_d=-10^2$ 、 $K_{CMR}=10^3$
用直流表测 u_O ， $u_O=?$

$$u_{Id} = 10\text{mV}, u_{Ic} = 5\text{mV}$$

$$A_d = -10^2$$

$$A_c = -\frac{|A_d|}{K_{CMR}} = -10^{-1}$$

$$u_{CQ1} = \frac{R_L}{R_C + R_L} V_{cc} - I_{CQ}(R_C // R_L)$$

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

$$u_O = A_d u_{Id} + A_c u_{Ic} + U_{CQ1}$$

集成运算放大器及其基本应用电路

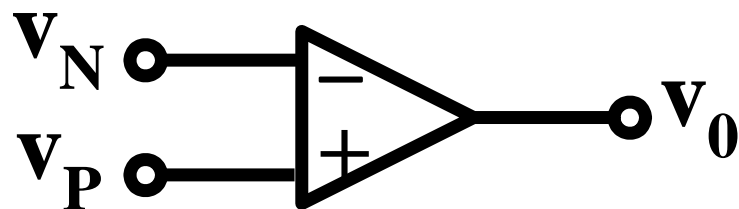
基本概念

1. 什么是集成运放 Operation Amplifier (OPA)

- 多级、直接耦合、高增益集成电路。

＋：同相输入端

－：反相输入端



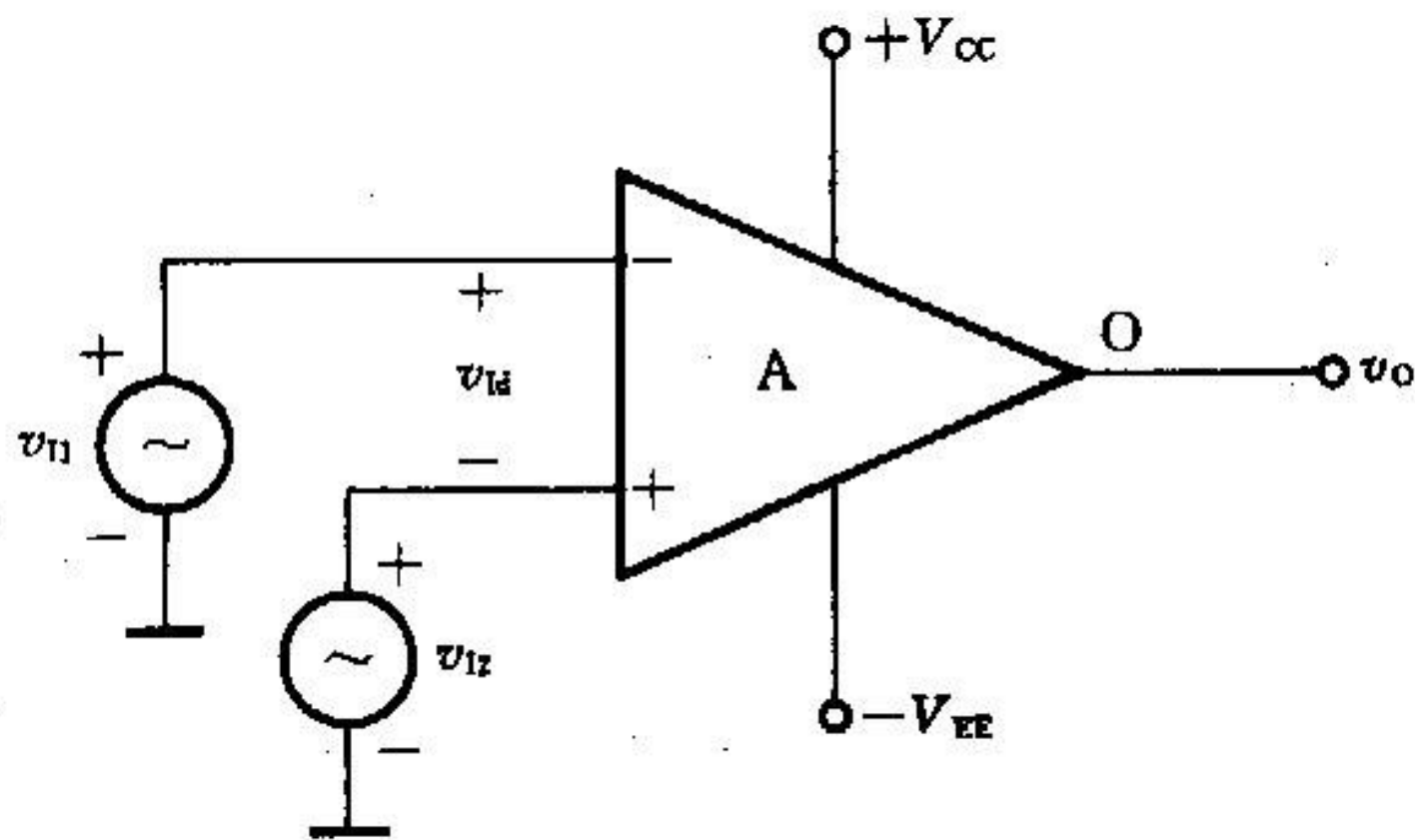
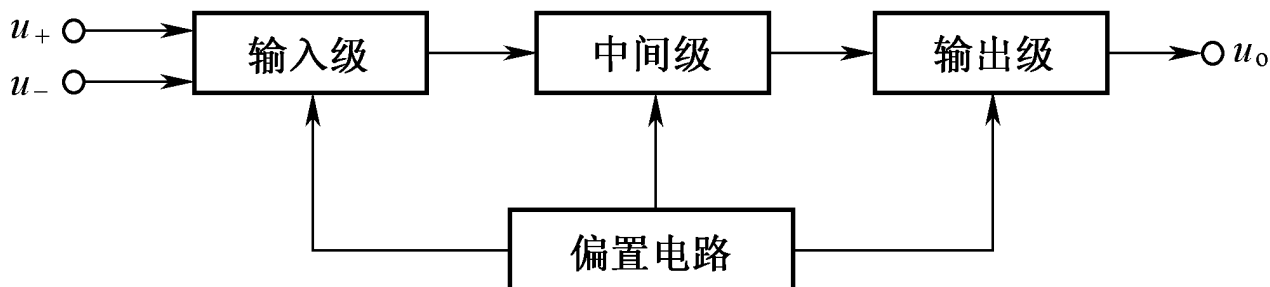


图 4.1.1 集成运放符号

集成运放的结构特点

作为一个电路元件，集成运放是一种理想的增益器件，它的放大倍数可达 $10^4 \sim 10^7$ 。集成运放的输入电阻从几十千欧到几十兆欧，而输出电阻很小，仅为几十欧姆，而且在静态工作时有零输入时零输出的特点。



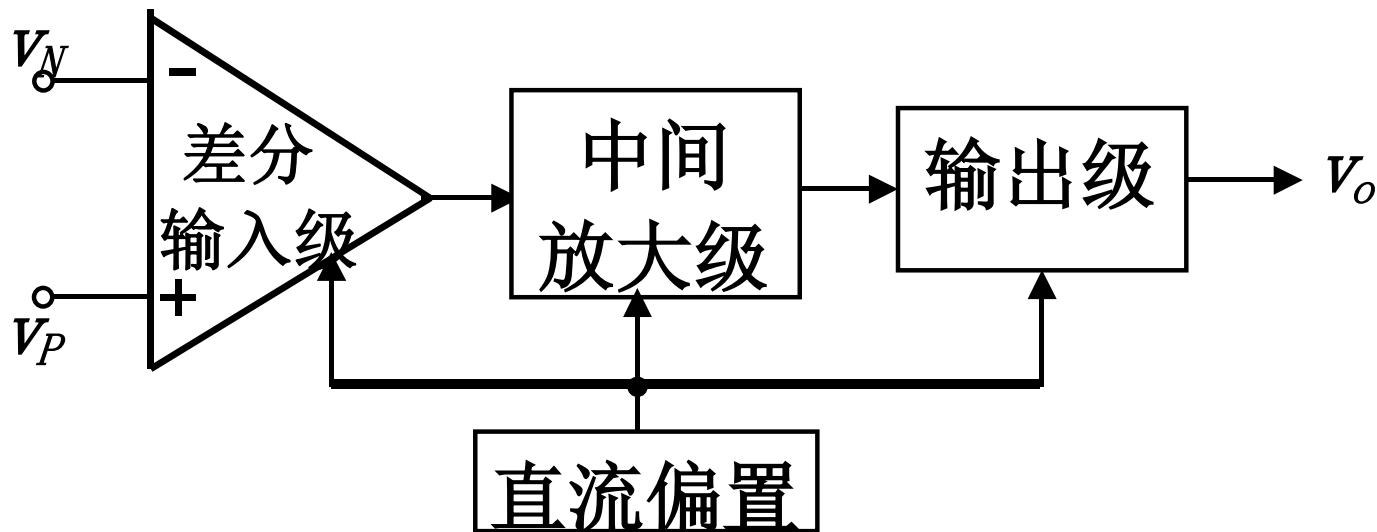
输入级是具有恒流源的差动放大电路，电路中输入级要求能够获得尽可能低的失调和尽可能高的共模抑制比及输入电阻。

中间级的主要任务是提供足够大的电压放大倍数。从对中间级的要求来说，不仅要具有较高的电压增益，同时还应具有较高的输入电阻以减少本级对前级电压放大倍数的影响。中间级通常用1~2级直接耦合放大电路组成。

输出级的主要作用是给出足够的电流以满足负载的需要，同时还要具有较低的输出电阻和较高的输入电阻，以起到将放大级和负载隔离的作用。输出级常采用互补对称OCL功放输出级电路。输出级大多为互补推挽电路，除此之外，还应该有过载保护，以防输出端短路或过载电流过大。

偏置电路采用恒流源电路，为各级电路设置稳定的直流偏置。集成运放内部除以上几个组成部分以外，电路中还附有双端输入到单端输出的转换电路，实现零输入、零输出所要求的电平位移电路及输出过载保护电路等。

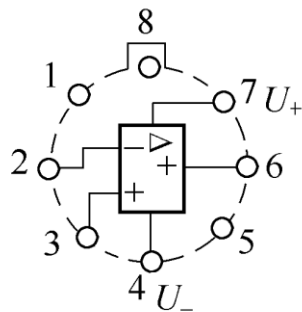
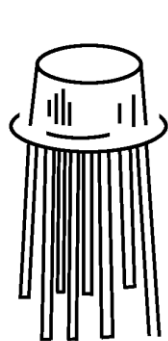
4 . OPA的组成



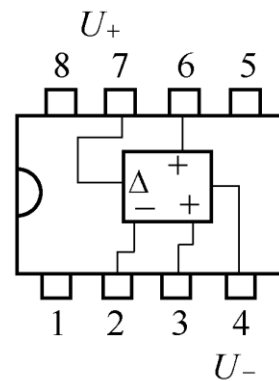
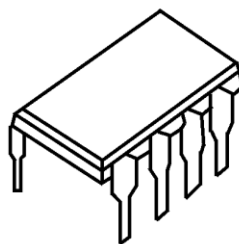
集成运放的典型组成框图

- (1) 差分输入级 （组合电路）
- (2) 中间级 （提供高增益）
- (3) 输出级 （互补输出）
- (4) 附加电路 （直流偏置、相位补偿、调零电路等）

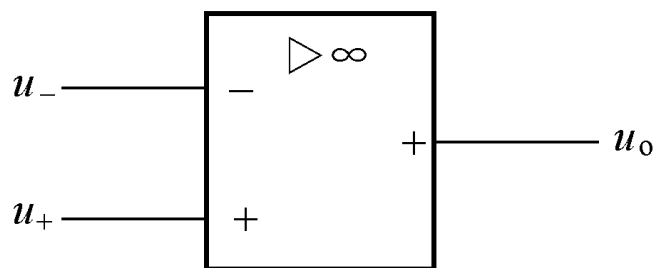
集成运放的外形与外部引出端子



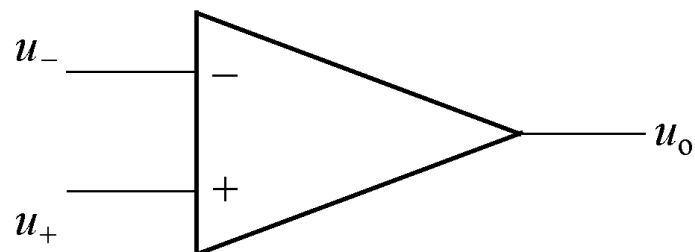
(a)



(b)



(a) 新符号



(b) 旧符号

在分析信号运算电路时对运放的处理

由于运放的开环放大倍数很大，输入电阻高，输出电阻小，在分析时常将其理想化，称其所谓的**理想运放**。

理想运放的条件

运放工作在线性区的特点

$$A_o = \infty$$



$$u_o = A_o (u_+ - u_-)$$

虚短路

$$r_i = \infty$$



$$I_i = 0$$

虚开路

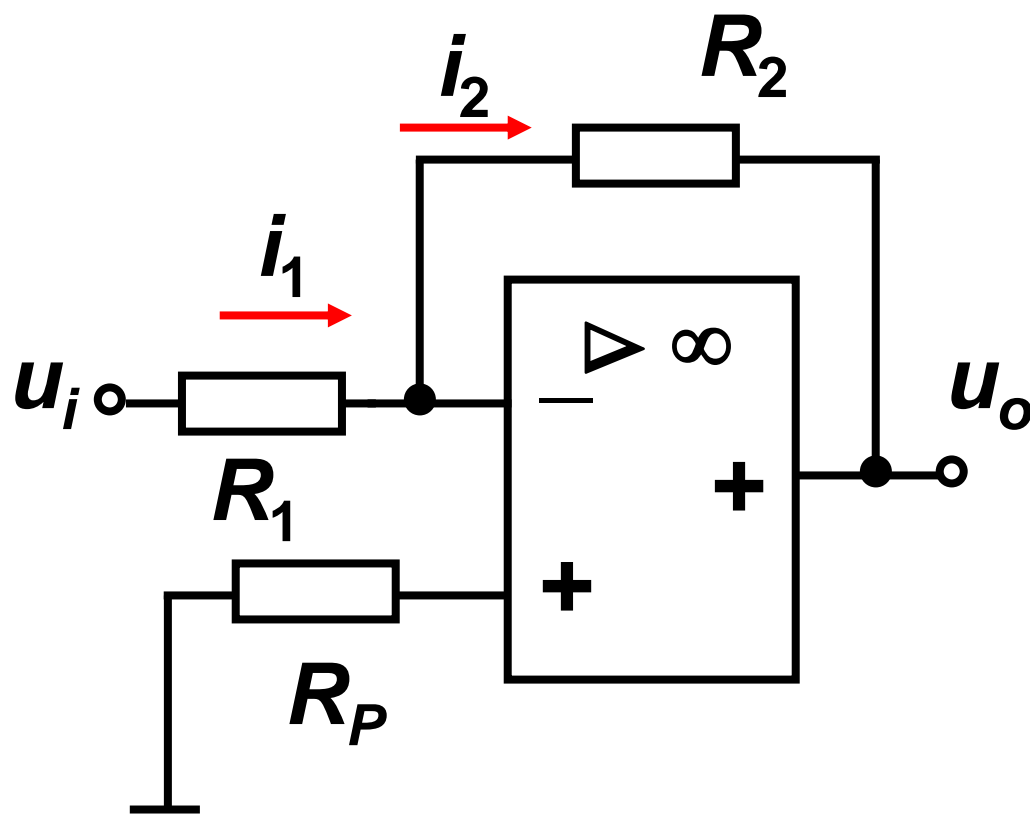
$$u_+ = u_-$$

$$r_o = 0$$



放大倍数与负载无关。分析多个运放级联组合的线性电路时可以分别对每个运放进行。

一、反相比例运算电路



1. 放大倍数

$$u_+ = u_- = 0$$

虚开路

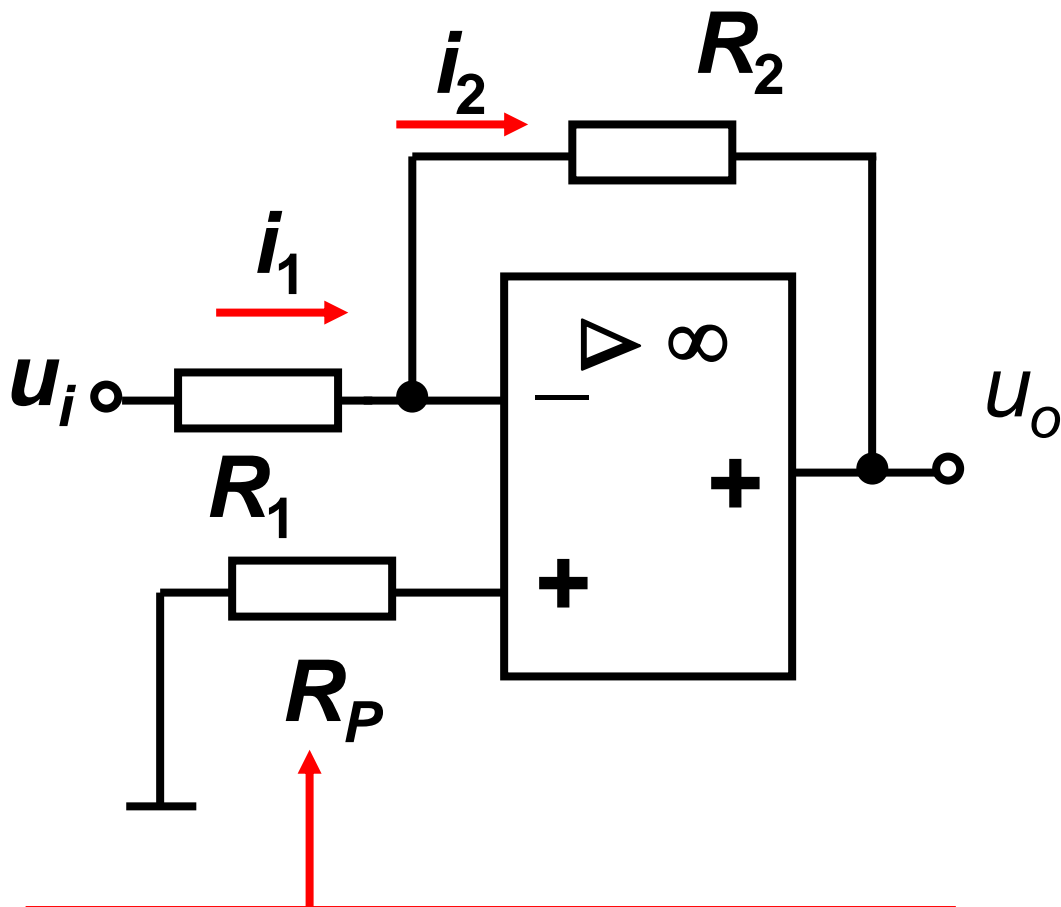
虚短路

$$i_1 = i_2$$

虚开路

$$\Rightarrow \frac{u_i}{R_1} = -\frac{u_o}{R_2}$$

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$



2. 电路的输入电阻 $r_i = R_1$

$$R_P = R_1 \parallel R_2$$

为保证一定的输入电阻，当放大倍数大时，需增大 R_2 ，

平衡电阻，使输入端对地的静态电阻相等，保证静态时输入级的对称性。

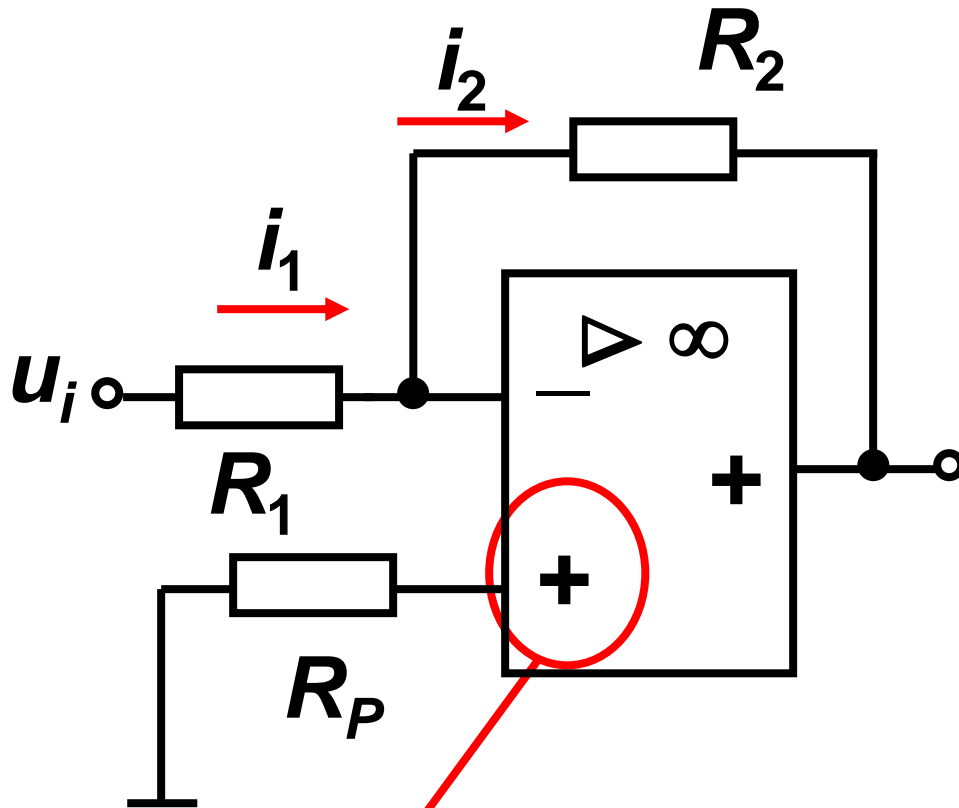
3. 反馈方式

电压并联负反馈

输出电阻很小!

4. 共模电压

$$\frac{u_+ + u_-}{2} = 0$$



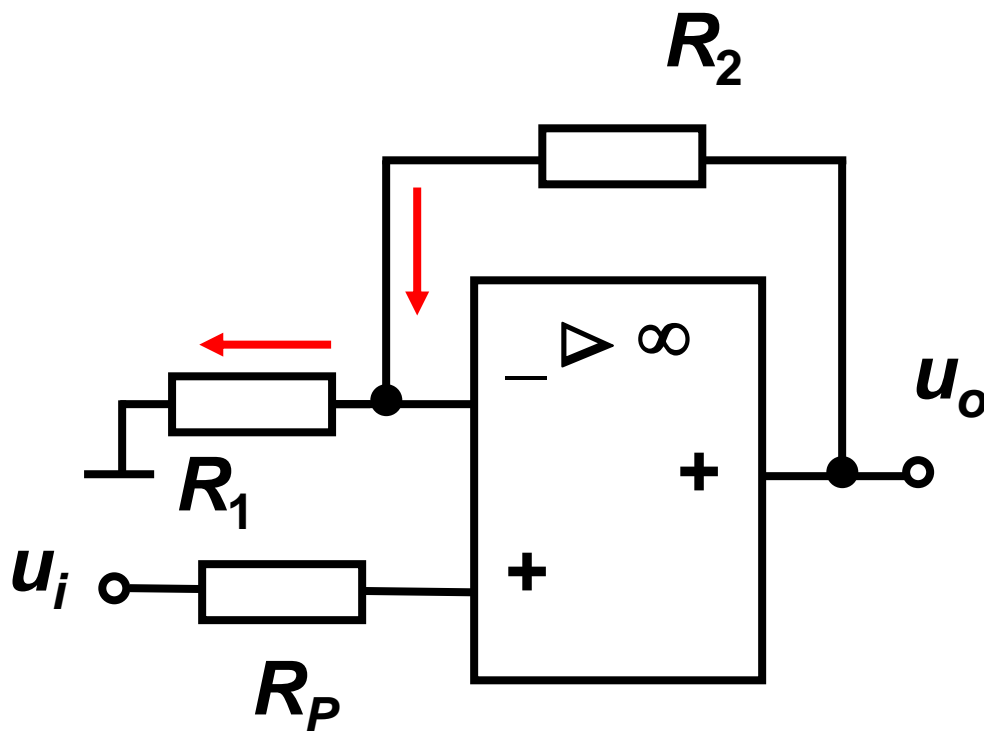
电位为0，虚地

输入电阻小、共模电压为 0 以及“虚地”是反相输入的特点。

反相比例电路的特点:

1. 共模输入电压为**0**，因此对运放的共模抑制比要求低。
2. 由于电压负反馈的作用，输出电阻小，可认为是**0**，因此带负载能力强。
3. 由于并联负反馈的作用，输入电阻小，因此对输入电流有一定的要求。

二、同相比例运算电路



结构特点：负反馈引到反相输入端，信号从同相端输入。

反馈方式：电压串联负反馈。输入电阻高。

虚短路

虚开路

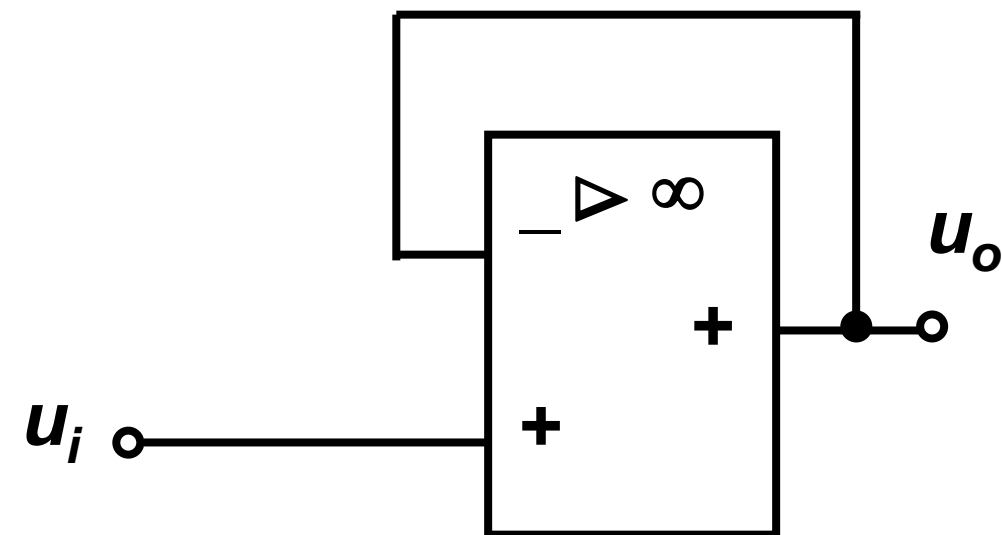
虚开路

$$u_- = u_+ = u_i$$
$$\frac{u_o - u_i}{R_2} = \frac{u_i}{R_1}$$
$$u_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_i$$
$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

同相比例电路的特点:

1. 由于电压负反馈的作用，输出电阻小，可认为是**0**，因此带负载能力强。
2. 由于串联负反馈的作用，输入电阻大。
3. 共模输入电压为 u_i ，因此对运放的共模抑制比要求高。

三、电压跟随器

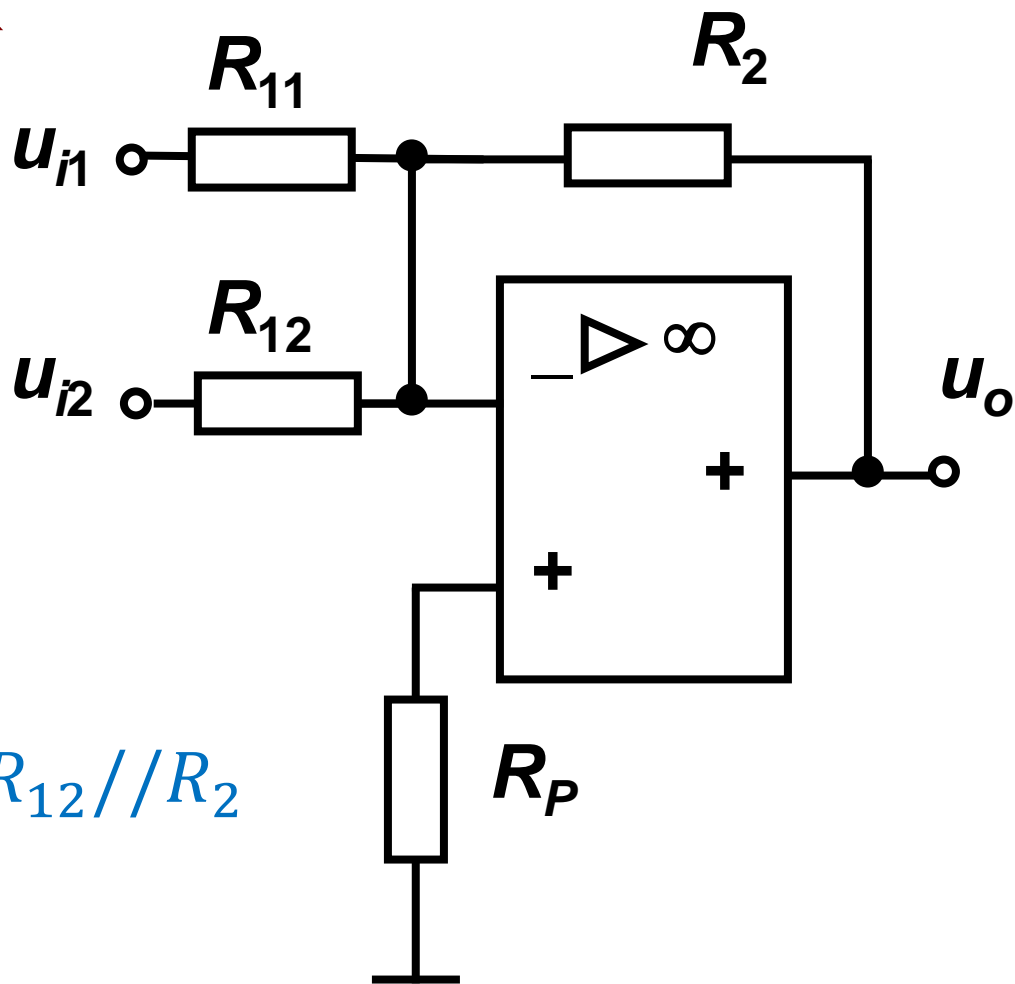


结构特点：输出电压全部引到反相输入端，信号从同相端输入。电压跟随器是同相比例运算放大器的特例。

$$u_o = u_- = u_+ = u_i$$

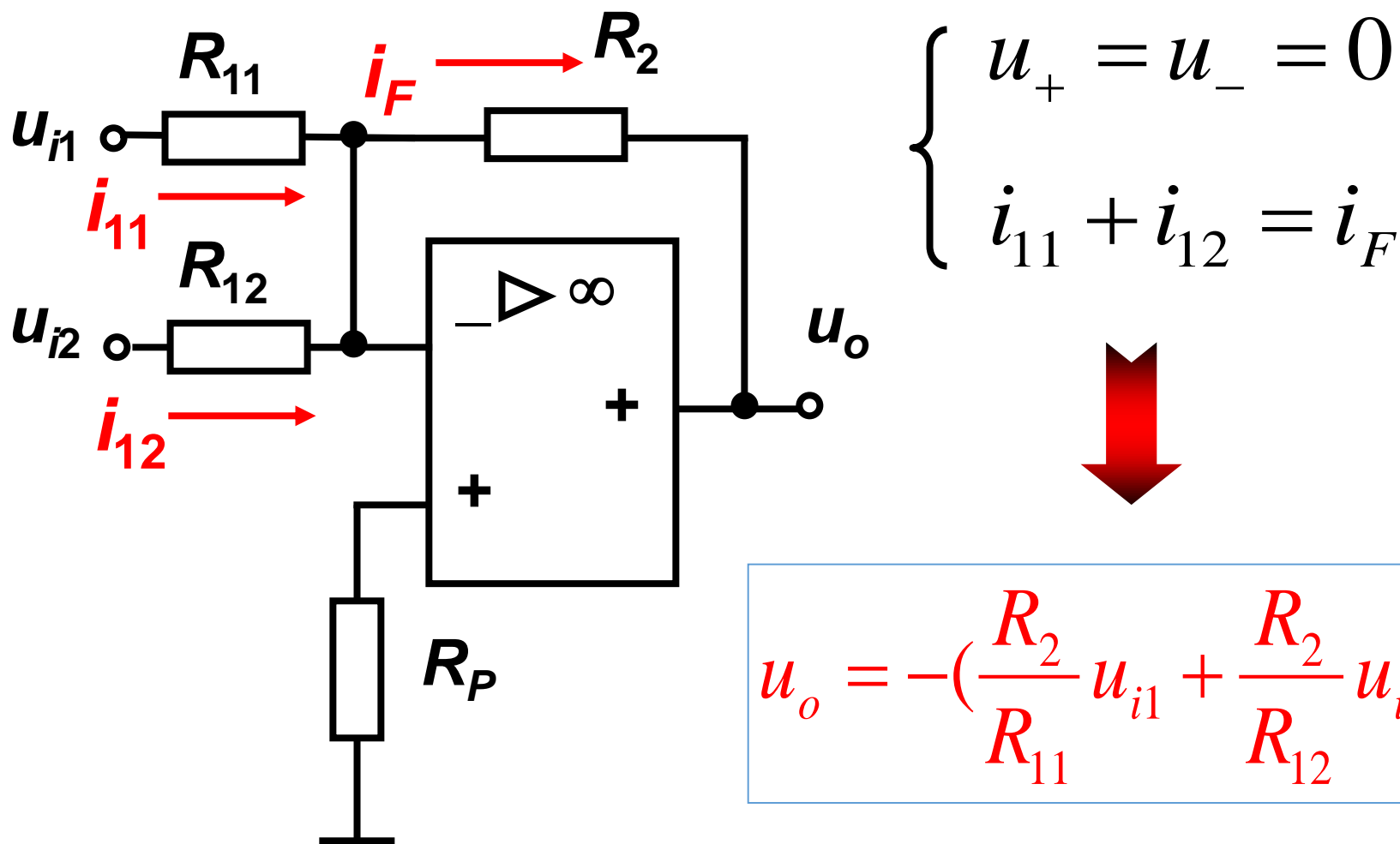
此电路是电压串联负反馈，输入电阻大，输出电阻小，起到阻抗匹配作用（提高较弱信号的带负载能力）。

一、反相求和运算



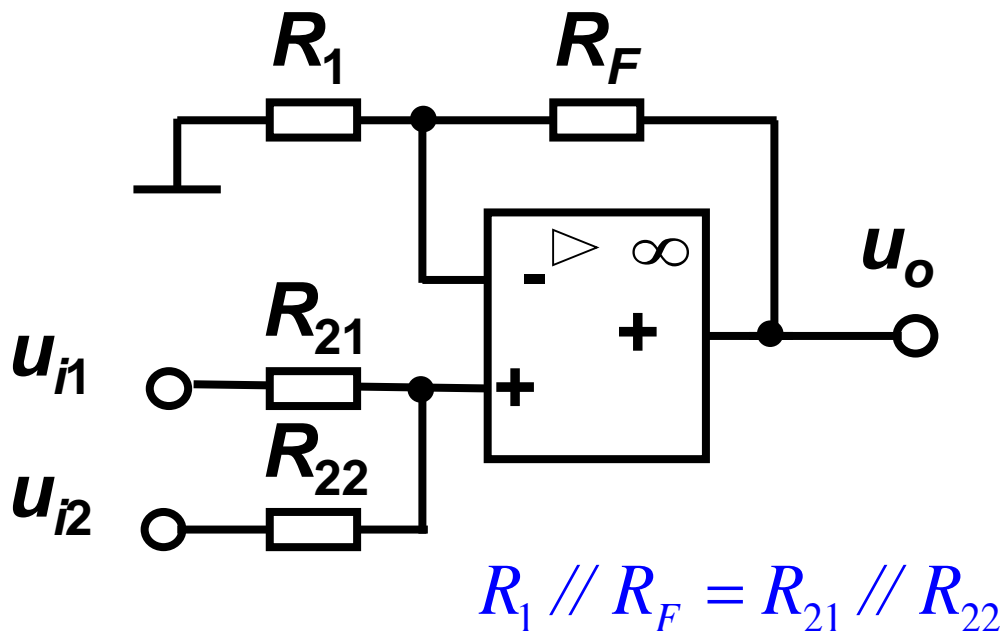
$$R_P = R_{11} // R_{12} // R_2$$

实际应用时可适当增加或减少输入端的个数，以适应不同的需要。

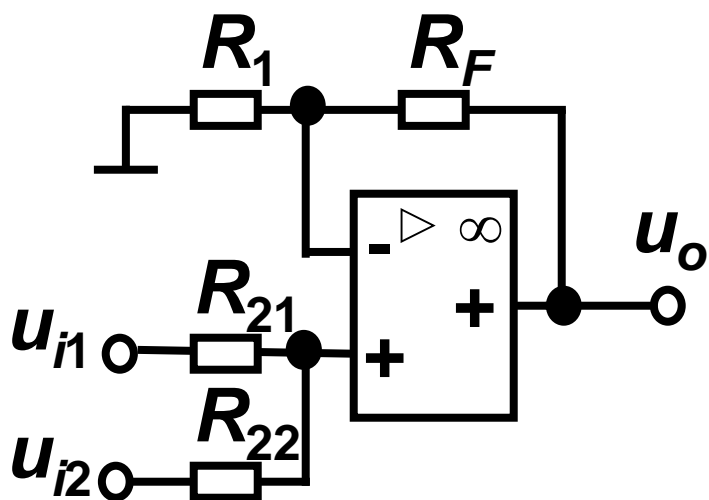


调节反相求和电路的某一路信号的输入电阻，不影响输入电压和输出电压的比例关系，调节方便。

二、同相求和运算



实际应用时可适当增加或减少输入端的个数，以适应不同的需要。



u_+ 与 u_{i1} 和 u_{i2}
的关系如何?

此电路如右图所示，
则输出为：

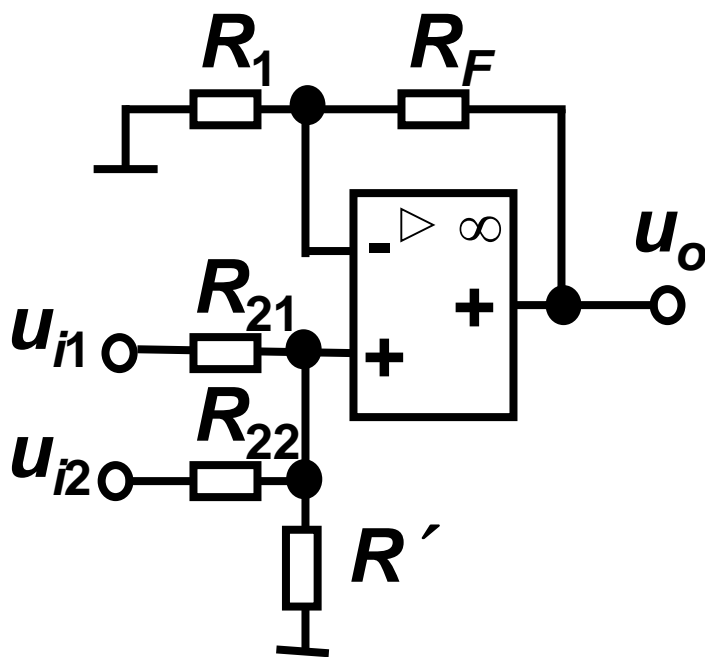
$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_+$$

流入运放输入端的电流为0（虚开路）

$$\Rightarrow u_+ = \frac{R_{22}}{R_{21} + R_{22}} u_{i1} + \frac{R_{21}}{R_{21} + R_{22}} u_{i2}$$

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \left(\frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}} u_{i1} + \frac{R_{11}}{R_{11} + R_{12}} u_{i2} \right)$$

注意：同相求和电路的各输入信号的放大倍数互相影响，不能单独调整。

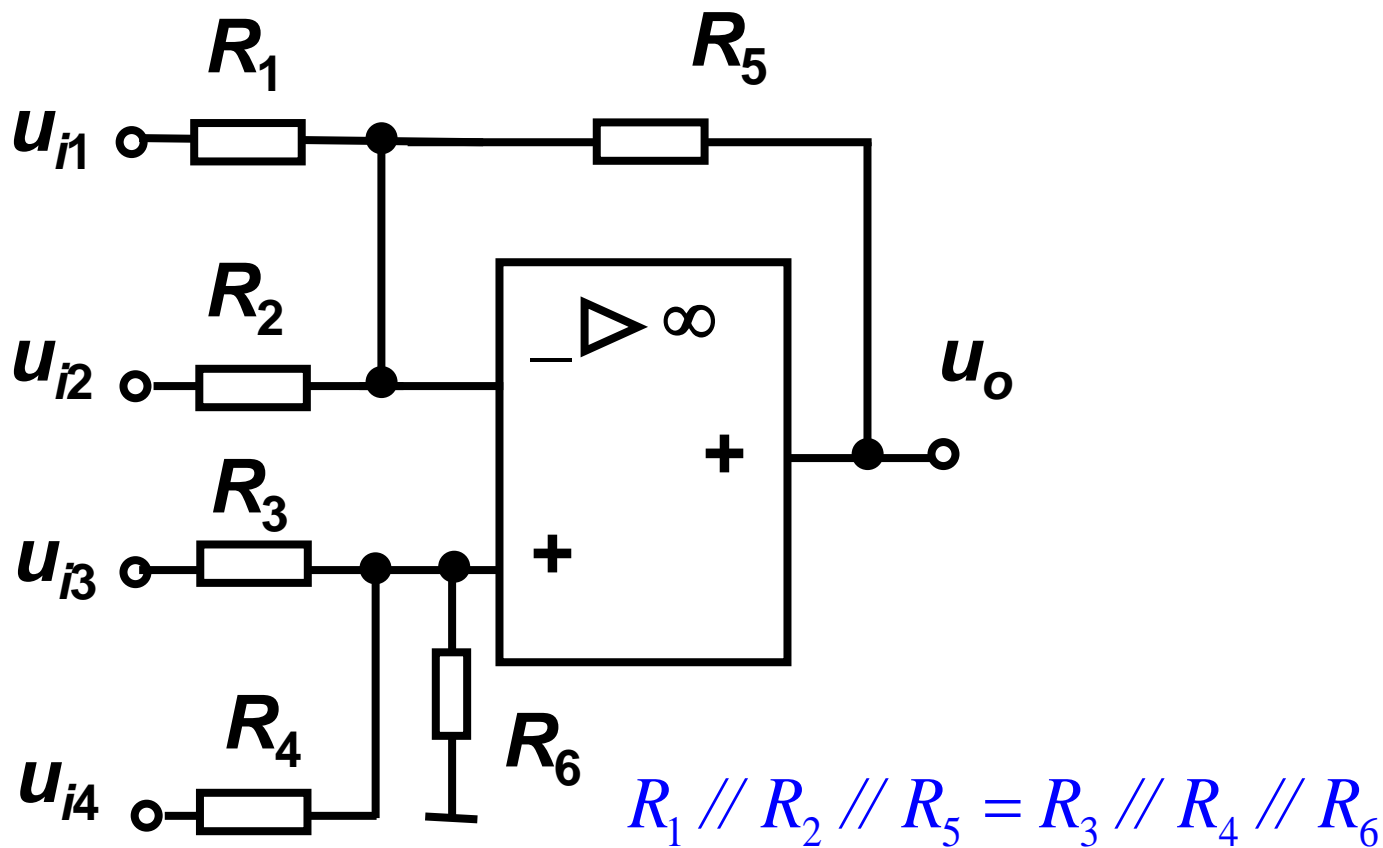


左图也是同相求和运算电路，如何求同相输入端的电位？

提示：

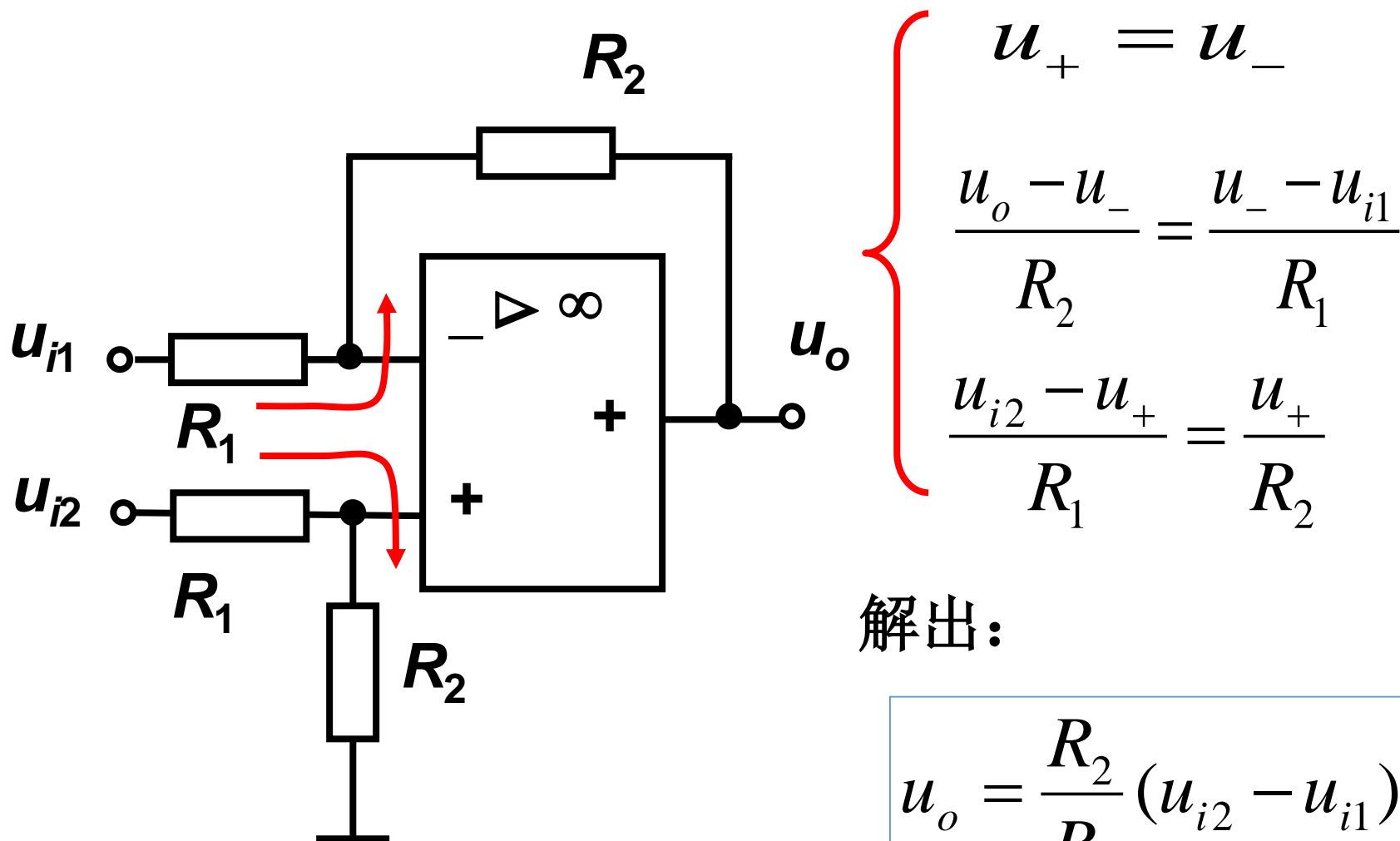
1. 虚开路：流入同相端的电流为**0**。
2. 节点电位法求 u_+ 。

三、单运放的加减运算电路



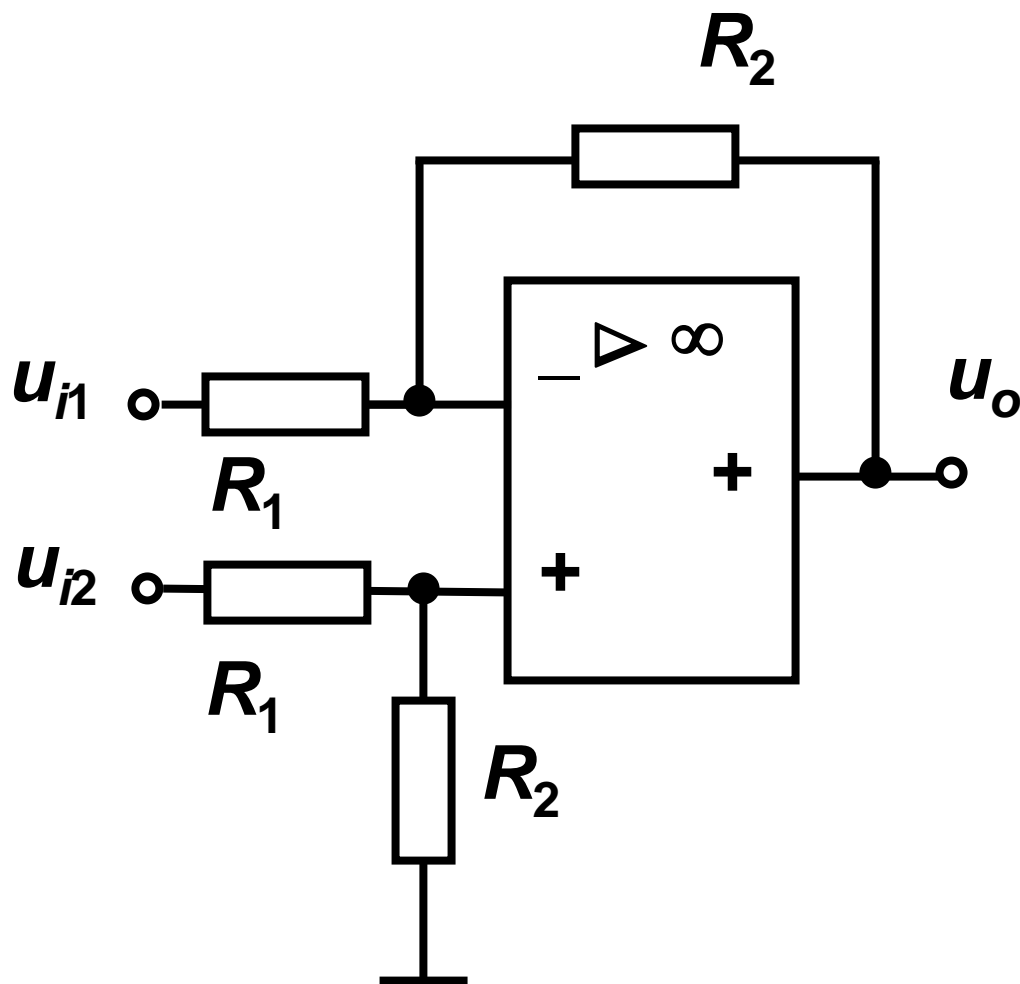
实际应用时可适当增加或减少输入端的个数，以适应不同的需要。

单运放的加减运算电路的特例：差动放大器



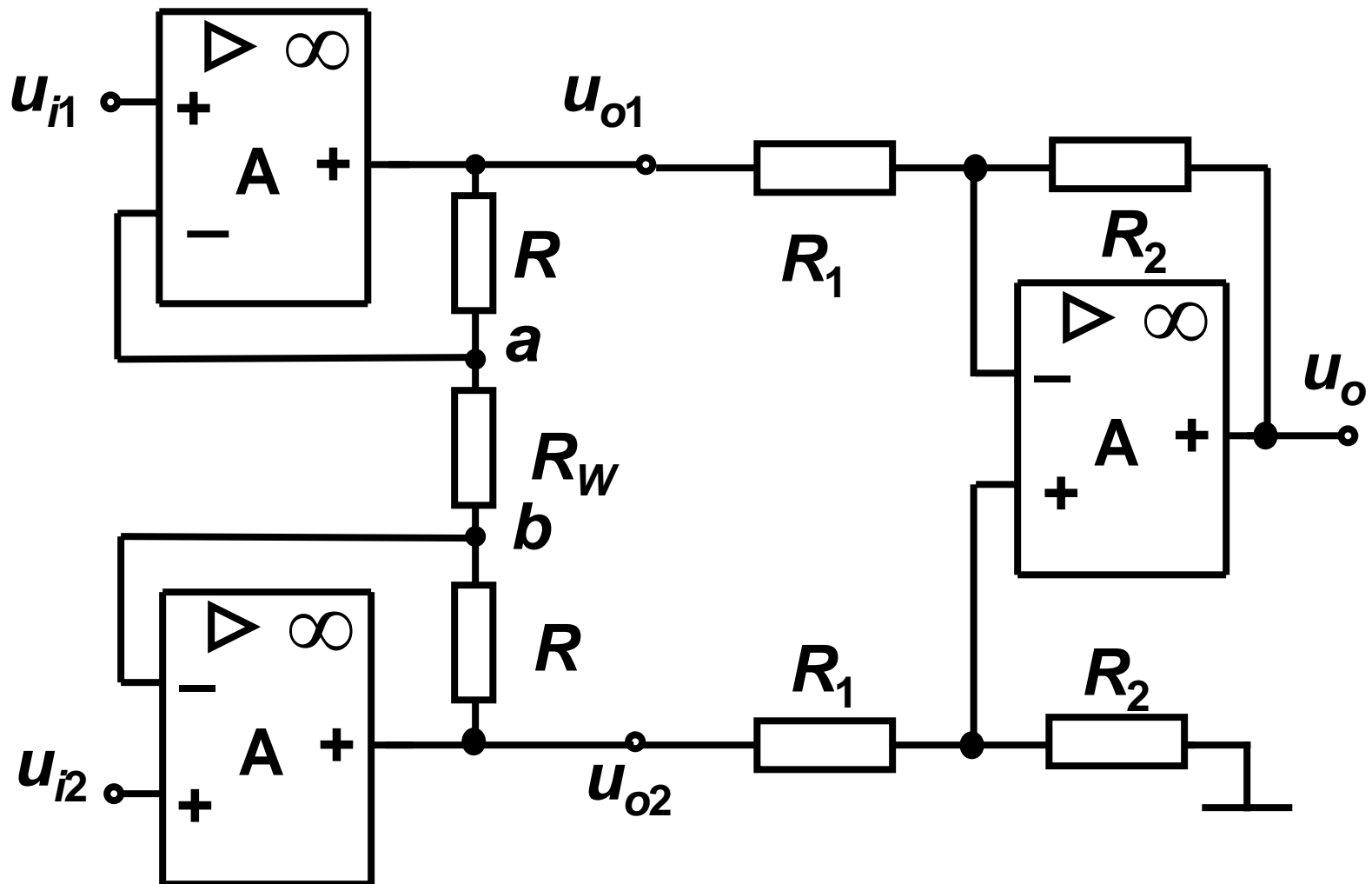
解出：

$$u_o = \frac{R_2}{R_1} (u_{i2} - u_{i1})$$

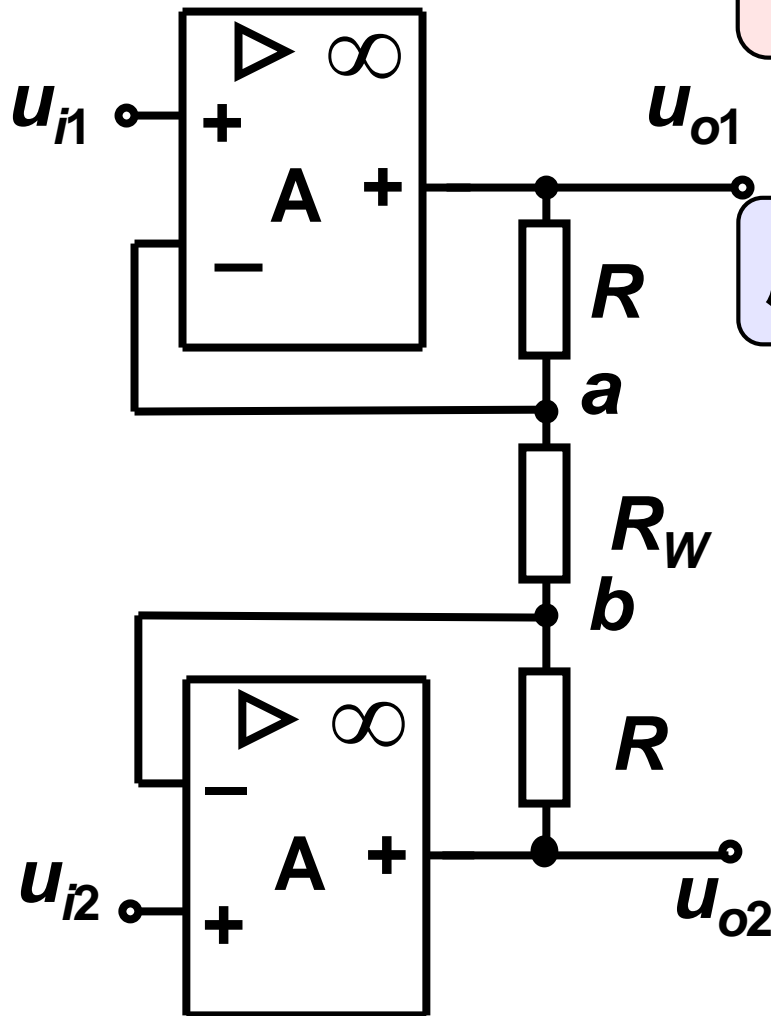


差动放大器放大了两个信号的差，但是它的输入电阻不高（ $=2R_1$ ），这是由于反相输入造成的。

三运放电路



虚短路:



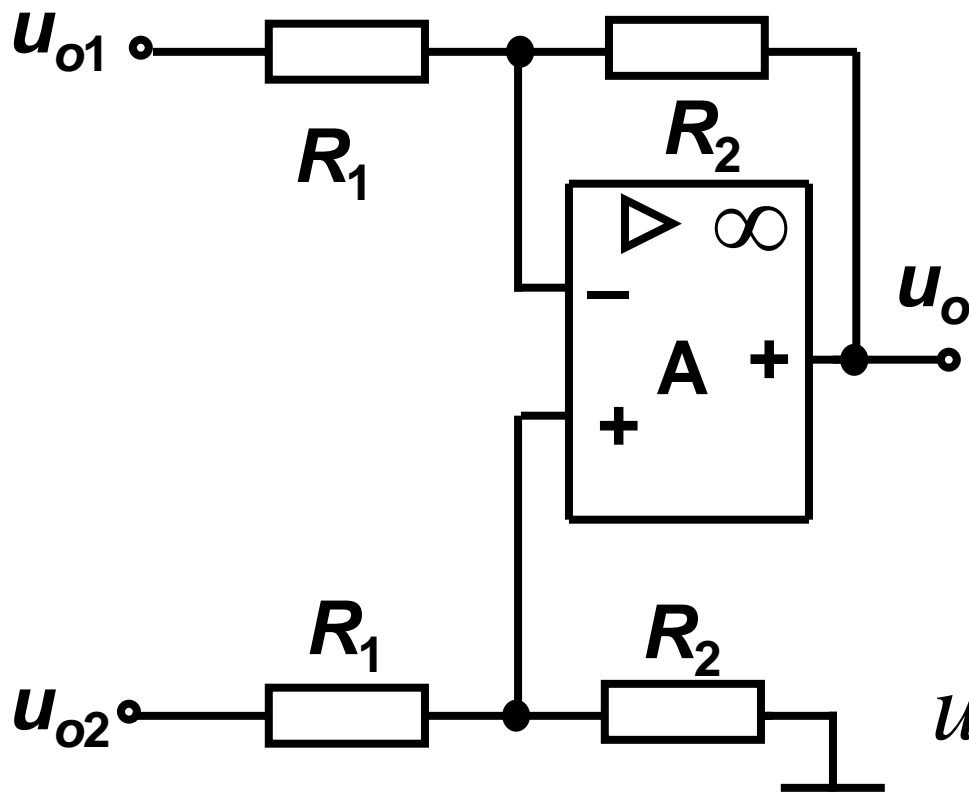
虚开路:

$$u_a = u_{i1} \quad u_b = u_{i2}$$

$$\frac{u_{o1} - u_{o2}}{2R + R_W} = \frac{u_a - u_b}{R_W} = \frac{u_{i1} - u_{i2}}{R_W}$$

$$u_{o2} - u_{o1} =$$

$$\frac{2R + R_W}{R_W} (u_{i2} - u_{i1})$$

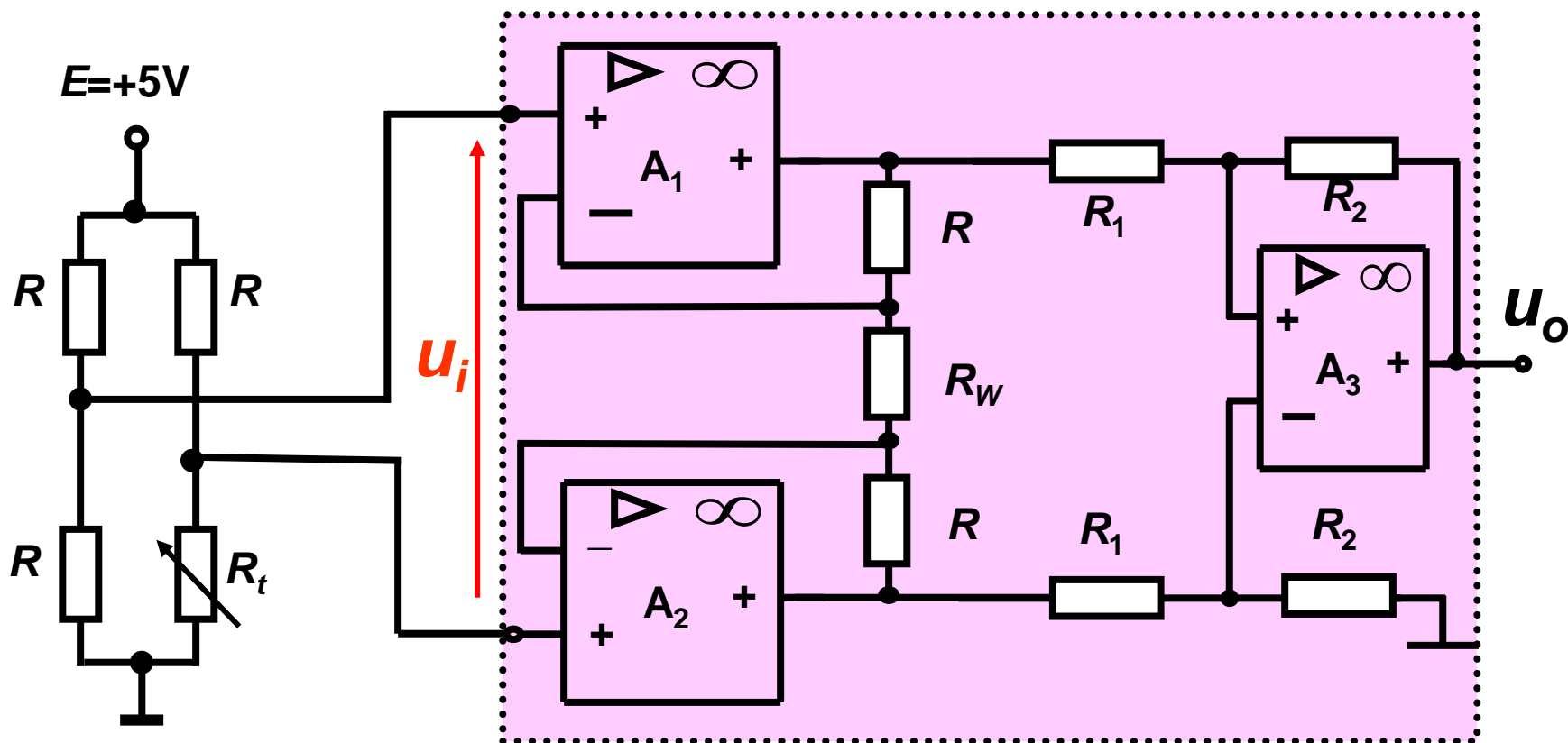


- 三运放电路是差动放大器，放大倍数可变。
- 由于输入均在同相端，此电路的输入电阻高。

$$u_o = \frac{R_2}{R_1} (u_{o2} - u_{o1})$$

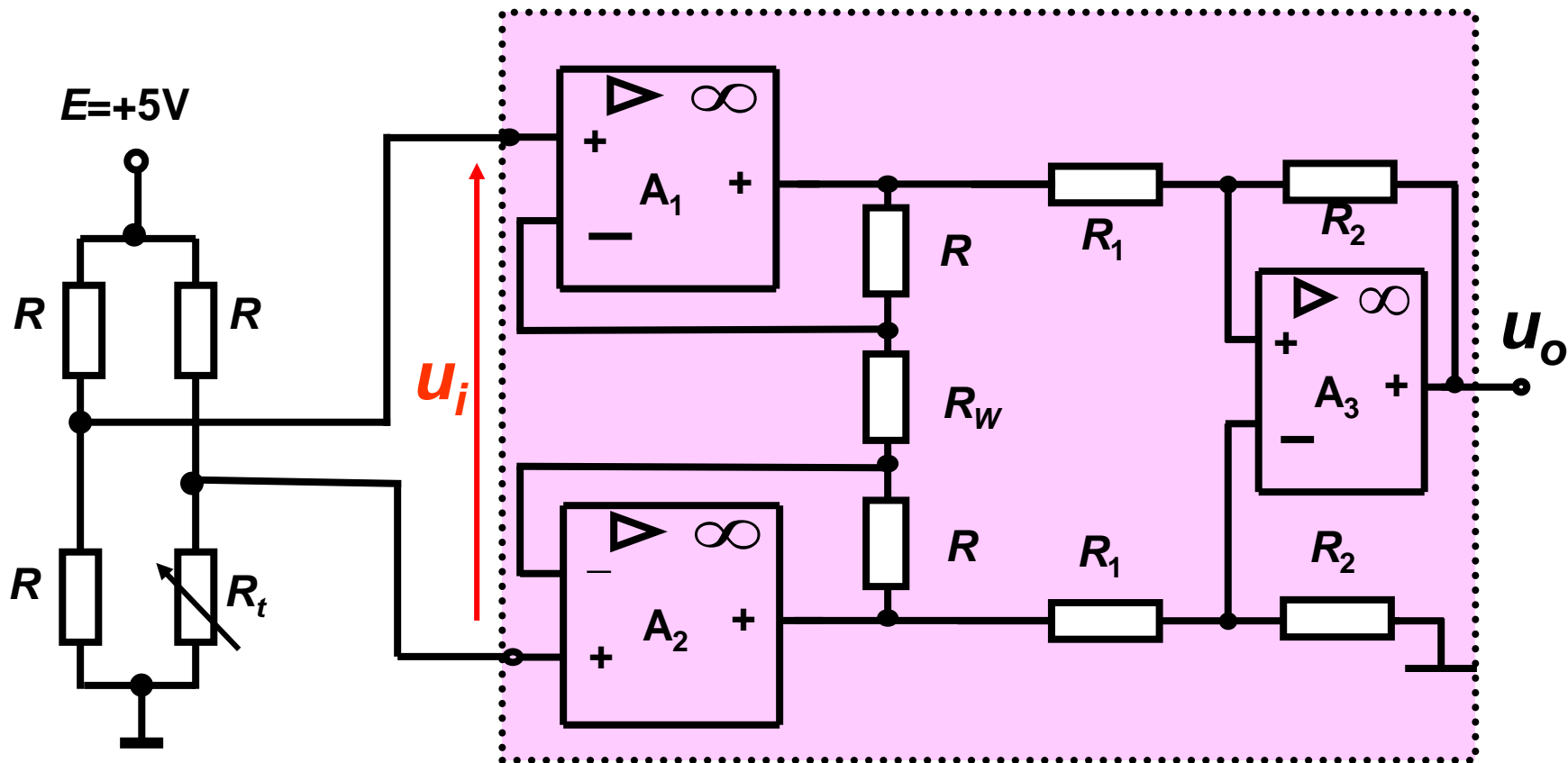
$$u_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{2R + R_W}{R_W} (u_{i2} - u_{i1})$$

例： 由三运放放大器组成的温度测量电路。



R_t : 热敏电阻

集成化:仪表放大器



$$R_t = f(T^\circ \text{ C}) \quad u_i = \frac{R_t}{R_t + R} E - \frac{E}{2} = \frac{R_t - R}{2(R_t + R)} E$$

$$u_o = \frac{R_2}{R_1} \times \frac{2R + R_w}{R_w} u_i = \frac{R_2}{R_1} \times \frac{2R + R_w}{R_w} \times \frac{R_t - R}{2(R_t + R)} E$$