

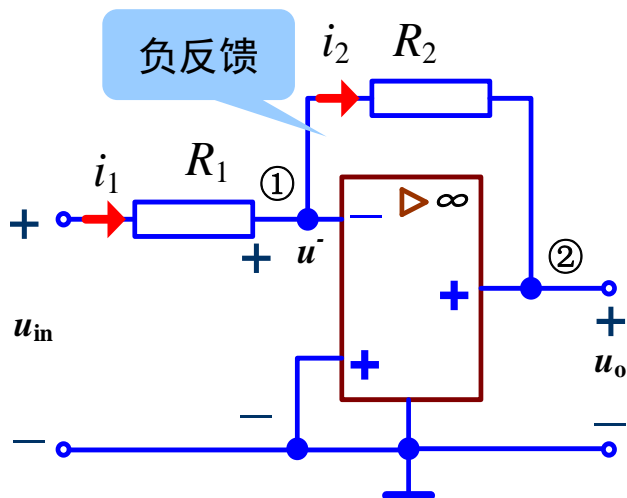
第5章 含运算放大器的电阻电路

本章重点

1. 运算放大器
2. 端子上的电压电流关系
3. 理想运放的“两条规则”
4. 运算电路分析

5.3 含运放的典型运算电路分析

1. 倒向(反相)比例器



$$u_o = -\frac{R_2}{R_1} u_{in}$$

(1) 根据“虚断”：

$$i_1 = i_2$$

$$\frac{u_{in} - u^-}{R_1} = \frac{u^- - u_o}{R_2}$$

(2) 根据“虚短”：

$$u^- = 0$$

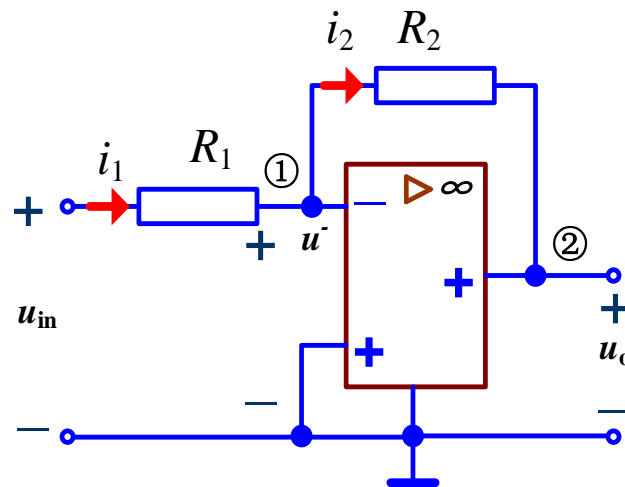
$$\frac{u_{in}}{R_1} = -\frac{u_o}{R_2}$$

$$\frac{u_o}{u_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

5.3 含运放的典型运算电路分析

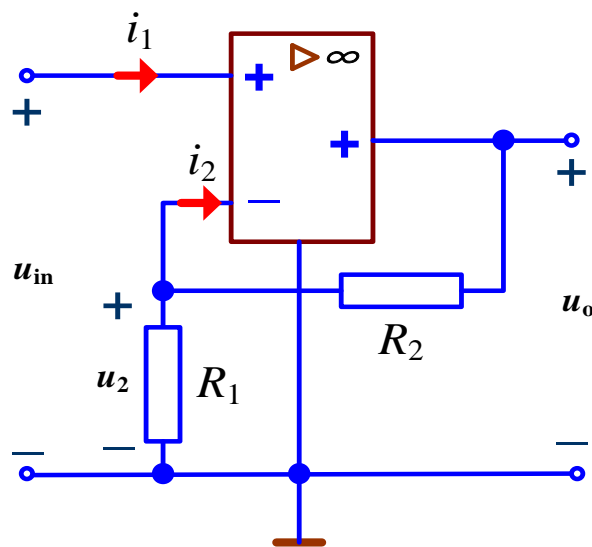
$$\frac{u_o}{u_{in}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad u_o = -\frac{R_2}{R_1} u_{in}$$

- 注意：**
- (1) u_o / u_{in} 只取决于反馈电阻 R_2 与 R_1 比值，而与放大器本身的参数无关。负号表明 u_o 和 u_{in} 总是符号相反(反相)。
 - (2) 当 $R_1 = R_2$ 时, $u_o = -u_{in}$, 为反向器;
 - (3) 当 R_1 和 R_2 确定后, 为使 u_o 不超过饱和电压(即保证工作在线性区), 对 u_{in} 有一定限制。
 - (4) 运放工作在开环状态极不稳定, 振荡在饱和区; 工作在闭环状态, 输出电压由外电路决定。
(R_2 接在输出端和反相输入端, 称为负反馈)。



5.3 含运放的典型运算电路分析

2.非倒向（正相）比例器



根据“虚断”

$$i_1 = i_2 = 0 \quad \frac{u_o - u^-}{R_2} = \frac{u^-}{R_1}$$

$$u_o = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) R_2 u^-$$

根据“虚短”

$$u^+ = u^- = u_{in}$$

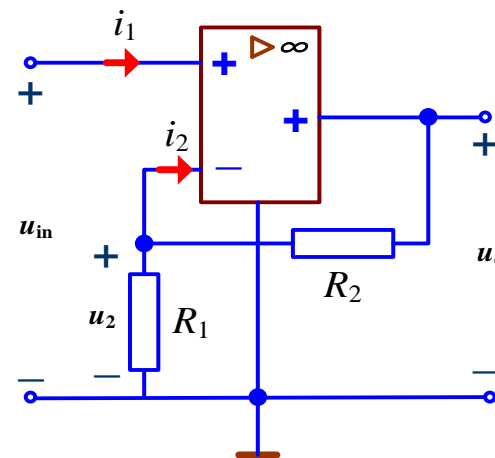
$$u_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) u_{in}$$

5.3 含运放的典型运算电路分析

结论

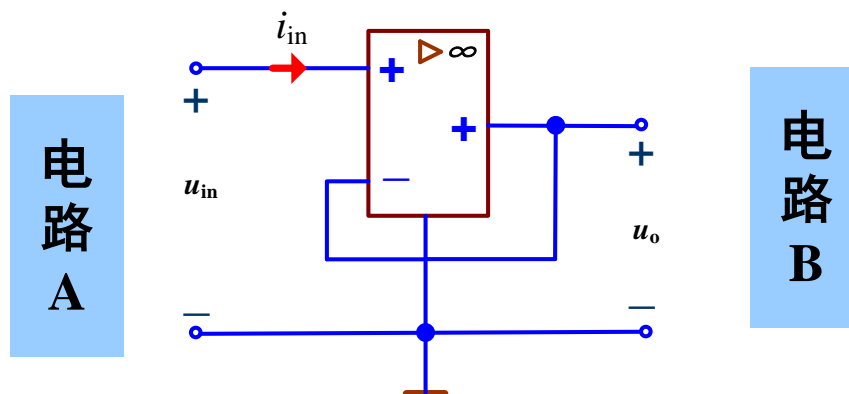
$$u_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_{in}$$

- (1) u_o 与 u_{in} 同相, $u_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_{in}$, u_o 的量值不小于 u_{in} , 输入、输出关系与运放本身参数无关;
- (2) 当 R_1 和 R_2 确定后, 为使 u_o 不超过饱和电压(即保证工作在线性区), 对 u_{in} 有一定限制。
- (3) 运放工作在开环状态极不稳定, 振荡在饱和区; 工作在闭环状态, 输出电压由外电路决定。
- (4) 当 $R_1 = \infty$, $R_2 = 0$ 时, $u_o = u_{in}$, 为电压跟随器。



5.3 含运放的典型运算电路分析

3. 电压跟随器



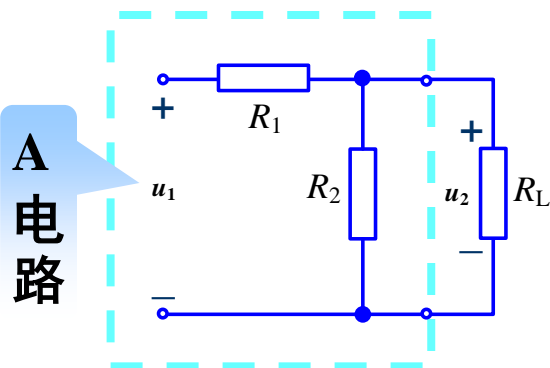
特点

- ① 输入电阻无穷大(虚断);
- ② 输出电阻为零;
- ③ $u_o = u_{in}$ 。

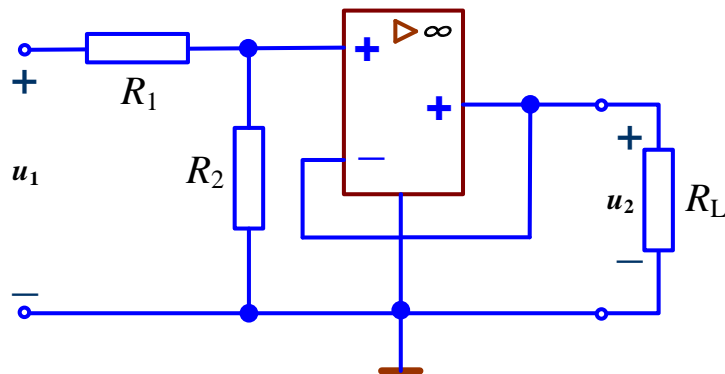
应用：在电路中起隔离前后两级电路的作用。

5.3 含运放的典型运算电路分析

【对比】



$$u_2 \neq \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_1$$

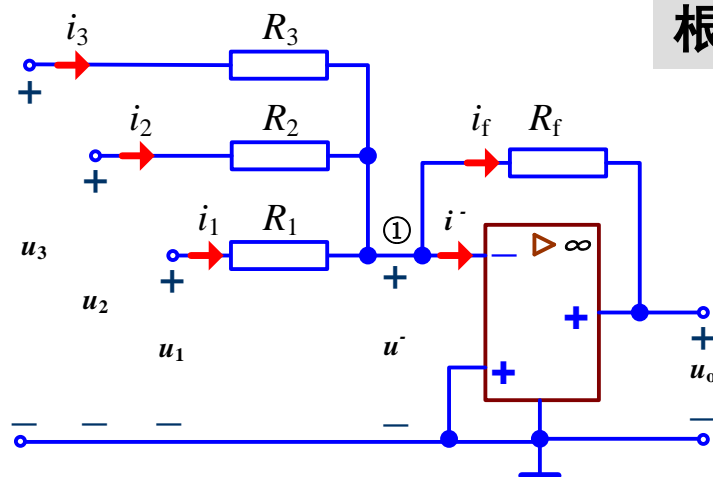


$$u_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_1$$

可见，加入跟随器后，隔离了前后两级电路的相互影响。

5.3 含运放的典型运算电路分析

4. 加法器



根据“虚断”

$$i^- = i^+ = 0$$

$$i_f = i_1 + i_2 + i_3$$

$$-\frac{u_o - u^-}{R_f} = \frac{u_1 - u^-}{R_1} + \frac{u_2 - u^-}{R_2} + \frac{u_3 - u^-}{R_3}$$

根据“虚短”

$$u^- = u^+ = 0$$

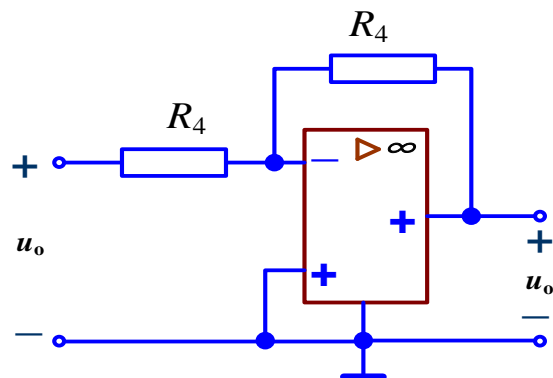
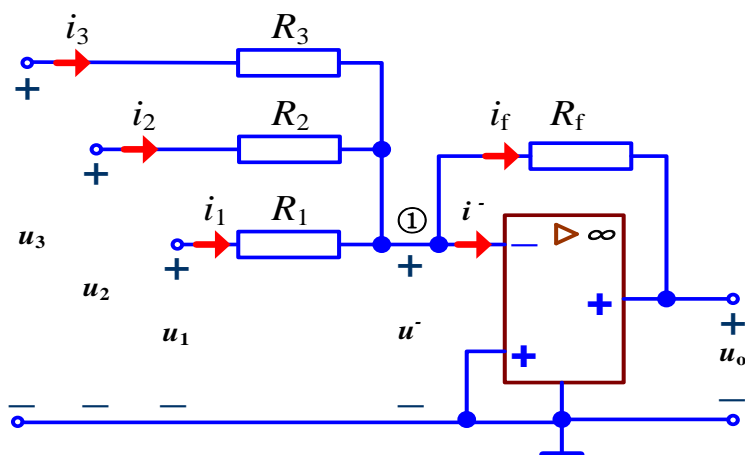
$$-\frac{u_o}{R_f} = \frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \frac{u_3}{R_3}$$

解得： $u_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}u_1 + \frac{R_f}{R_2}u_2 + \frac{R_f}{R_3}u_3\right)$

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$, 则 $u_o = -(u_1 + u_2 + u_3)$

5.3 含运放的典型运算电路分析

若想要得到: $u_0 = u_1 + u_2 + u_3$, 则需再接一个倒向器。



$$u_o' = -u_o = u_1 + u_2 + u_3$$

5.3 含运放的典型运算电路分析

5. 减法器

“虚断”：

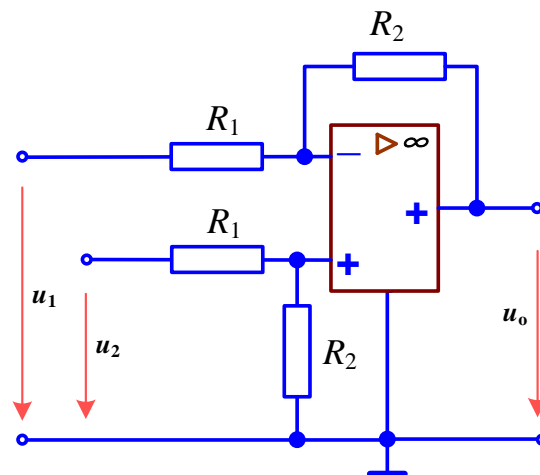
$$\frac{u_1 - u^-}{R_1} = \frac{u^- - u_o}{R_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{u_o}{R_2} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \times u^- - \frac{u_1}{R_1}$$

$$\frac{u_2 - u^+}{R_1} = \frac{u^+}{R_2} \quad \Rightarrow \quad u^+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_2$$

“虚短”： $u^+ = u^-$

$$\frac{u_o}{R_2} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_2 - \frac{u_1}{R_1} \quad u_o = \frac{R_2}{R_1} (u_2 - u_1)$$

若 $R_1 = R_2$ ，则 $u_o = u_2 - u_1$



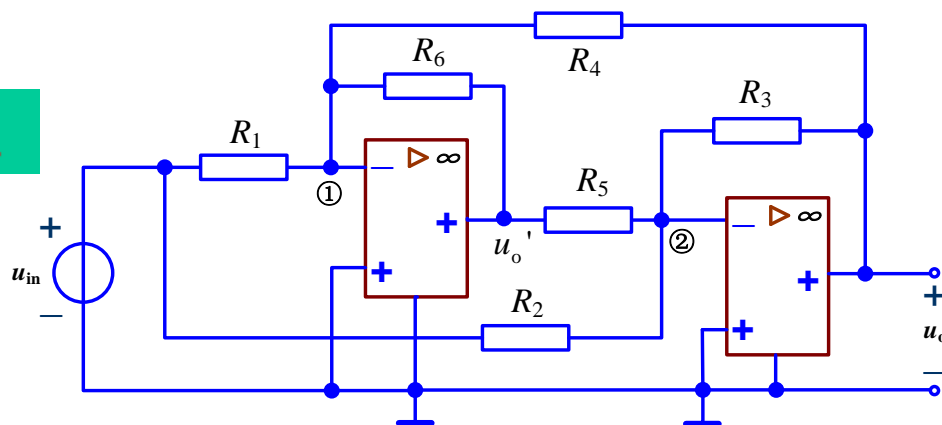
5.4 含运放的一般性电阻电路分析

【例1】已知 $R_5=R_6$ ，求 $u_o/u_{in}=?$

可以对输入结点列写结点电压方程

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_4}\right)u_{n1} - \frac{1}{R_6}u_o' - \frac{1}{R_4}u_o = \frac{1}{R_1}u_{in}$$

$$\left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_2}\right)u_{n2} - \frac{1}{R_5}u_o' - \frac{1}{R_3}u_o = \frac{1}{R_2}u_{in}$$



“虚短”：

$$u^+ = u^- = 0 \quad u_{n1} = 0, u_{n2} = 0$$

$$-\frac{1}{R_6}u_o' - \frac{1}{R_4}u_o = \frac{1}{R_1}u_{in}$$

$$-\frac{1}{R_5}u_o' - \frac{1}{R_3}u_o = \frac{1}{R_2}u_{in}$$

$$\frac{u_o}{u_{in}} = \frac{G_1 - G_2}{G_3 - G_4}$$

5.4 含运放的一般性电阻电路分析

【例2】求电压比 $\frac{u_o}{u_{in}}$

解：对输入结点列结点电压方程

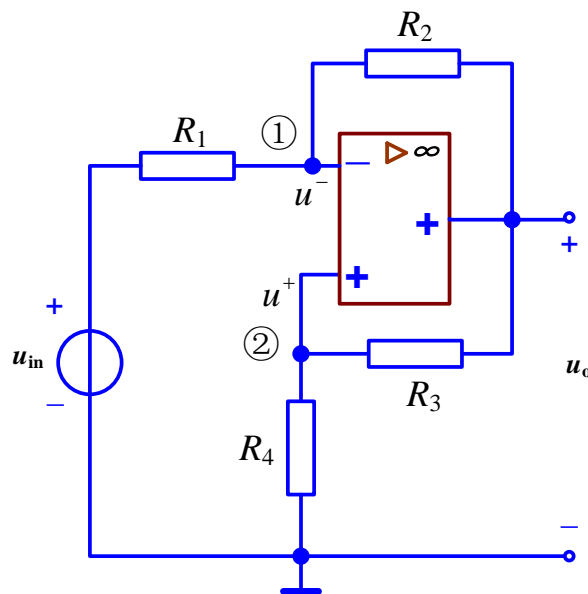
$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) u^- - \frac{1}{R_2} u_o = \frac{1}{R_1} u_{in}$$

$$\left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) u^+ - \frac{1}{R_3} u_o = 0$$

“虚短”：

$$u^+ = u^-$$

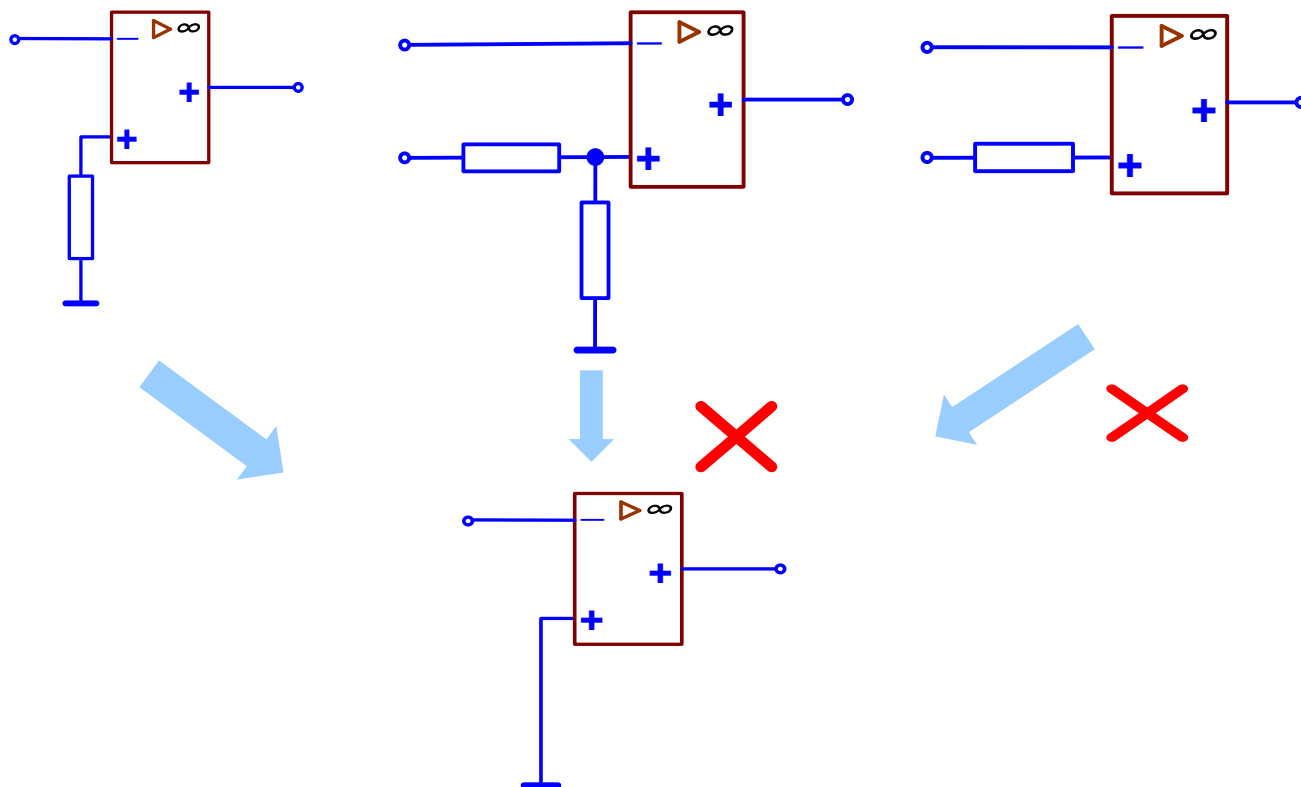
$$\frac{u_o}{u_{in}} = \frac{R_2 R_3 + R_2 R_4}{R_2 R_4 - R_1 R_3}$$



二、含运放的一般性电阻电路分析



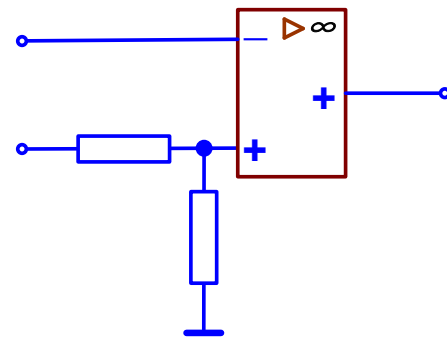
注意区别：



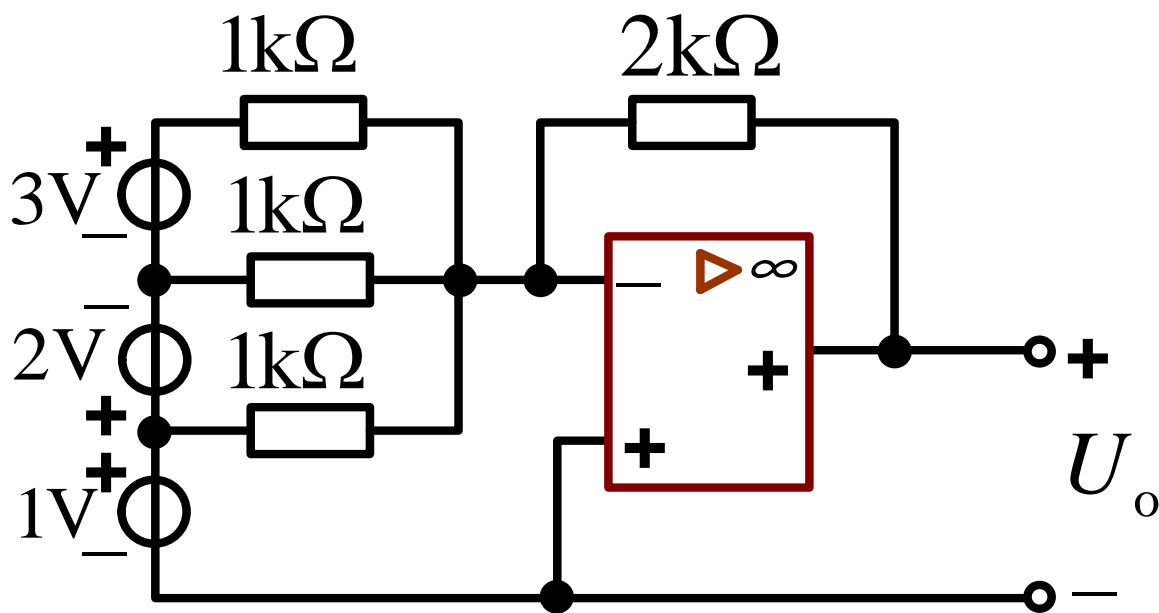
二、含运放的一般性电阻电路分析

含多个运算放大器元件的电路列写结点电压的注意事项

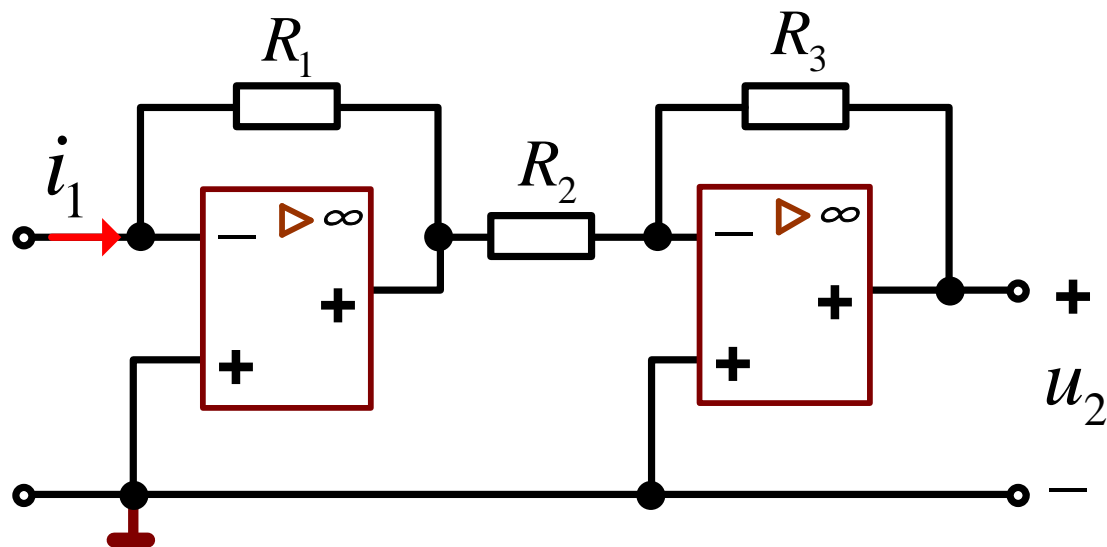
- ① 同单个运放一样分析，根据理想放大器的“虚短”、“虚断”及结点电压方程列写原则，只对**输入端列结点电压方程**，不对运放输出端列方程。
- ② 若同相端接地，则可省去自导项，且不用列写同相输入点电压方程。
- ③ 虽然不用列写输出点结点电压方程，但**不能忽略输出点的存在**，注意列写其他结点与输出结点的互导项。



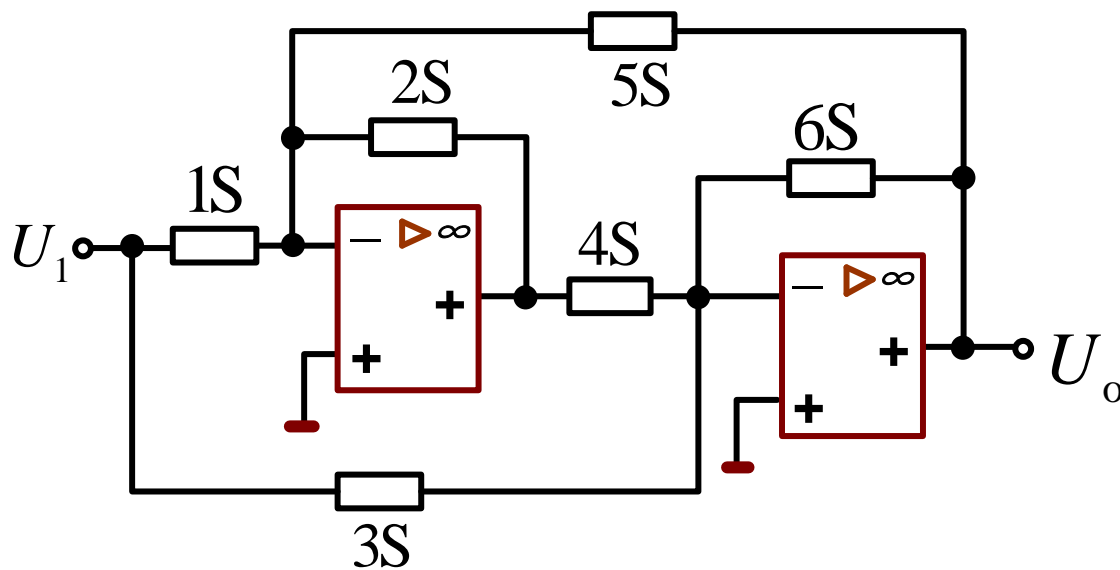
【5-1】 电路如题5-1图所示，求电路中输出电压 U_o 。



【5-2】已知 R_1 , R_2 , R_3 , 电路如图5-2所示, 求 $\frac{u_2}{i_1}$ 。



【5-3】求图示电路的转移电压比 $\frac{U_o}{U_1}$ 。



【5-4】电路如图所示，若 $R_f=16R$ ， $u_1 \sim u_4$ 为输入，求输出 u_o 。

