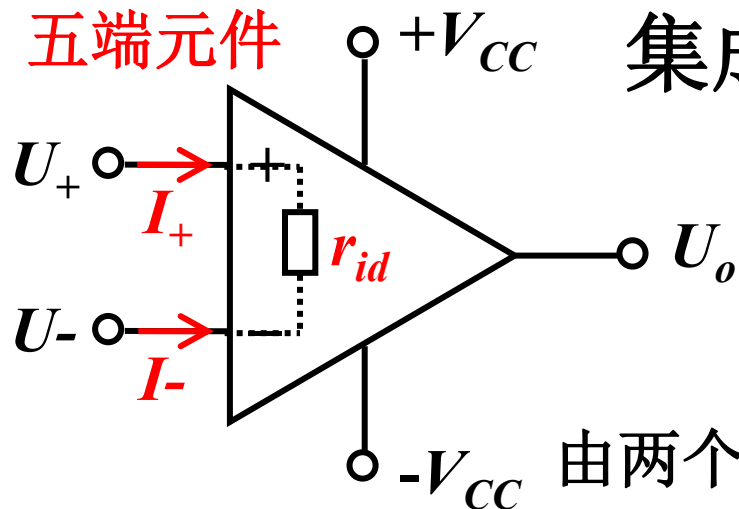


## 五端元件

# 集成运算放大器



1、内部是一个直接耦合多级放大电路

输入信号可以是直流也可以是交流

2、输入级是抑制零漂的差动放大电路

由两个相同电路面对面连接而成→两个输入端

$$U_o = A_{ud}(U_+ - U_-) \leftarrow 3、该电路的共模抑制比  $K_{CMR} \approx \infty$$$

4、无负反馈时  $A_{ud} \approx \infty$   $\because A_{ud} > 0$   $\therefore U_o$  和  $U_+$  同相；  $U_o$  和  $U_-$  反相

5、  $U_{om} < V_{cc}$  ← 输出级是 OCL 功放(双电源)

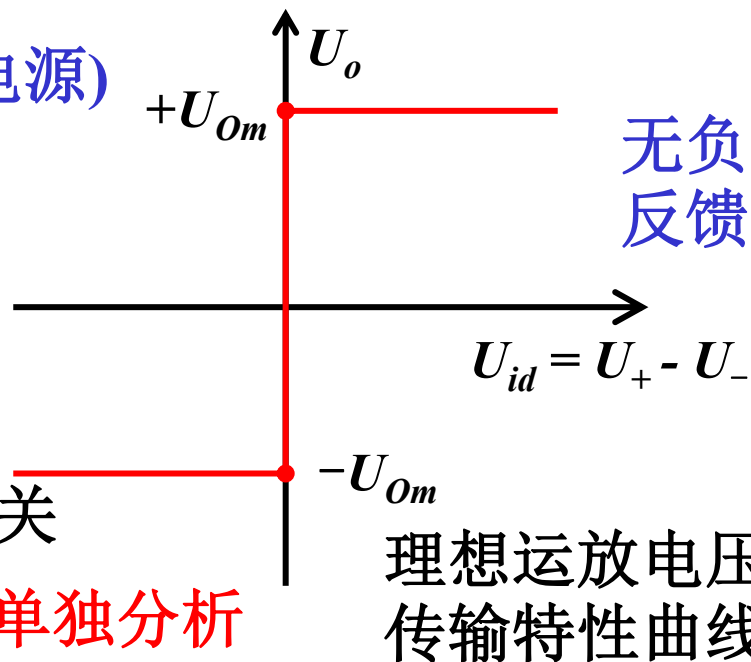
6、开环差模输入电阻  $r_{id} \approx \infty$

$$I_+ = I_- \approx 0 \leftarrow \text{虚断}$$

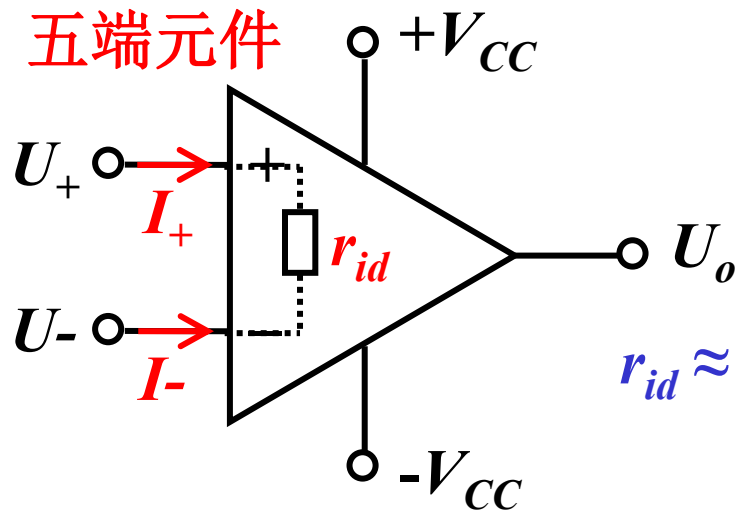
7、开环输出电阻  $r_o = 0$

输出可视为恒压源，  $U_o$  和后续电路无关

当多个运放组合在一起时，每个都可单独分析



# 五端元件



集成运放的应用：引入负反馈

1、在**线性区**的应用→各种信号运算

$$U_+ \approx U_-$$

虚短

运算公式  
推导依据

$$r_{id} \approx \infty \rightarrow$$

$$I_+ = I_- \approx 0$$

虚断

2、在**非线性区**的应用→电压比较器

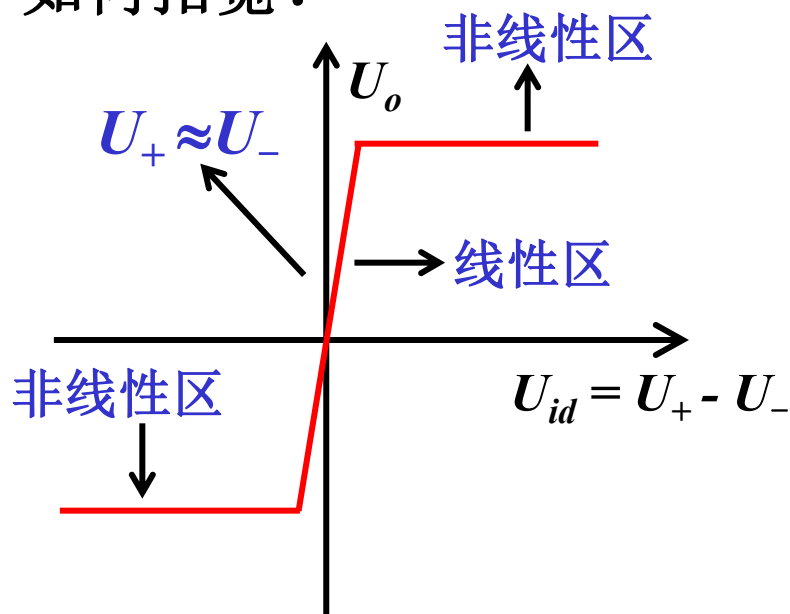
线性区太窄  
如何拓宽？

只有虚断

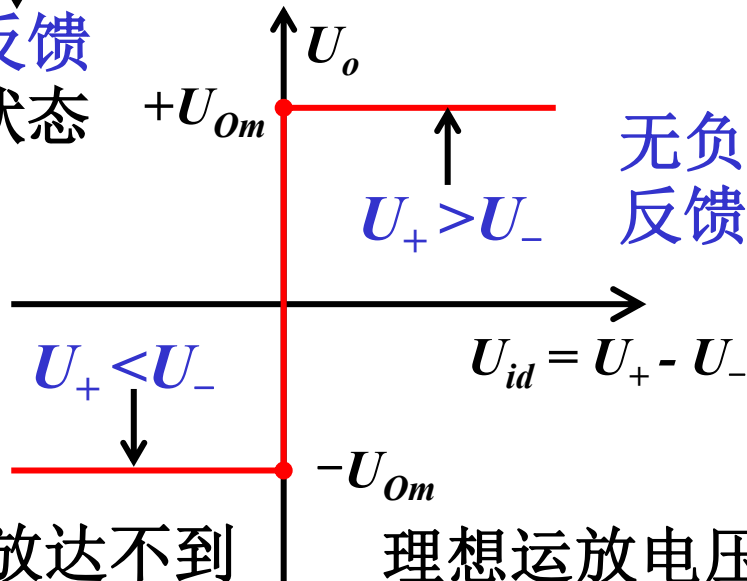
希望  $A_{ud}$  越大越好

根据输出的正负判断  
哪个输入的信号更大

工作在正反馈  
或无反馈状态



实际运放电压传输特性曲线



实际运放达不到

$$A_{ud} \approx \infty$$

理想运放电压  
传输特性曲线

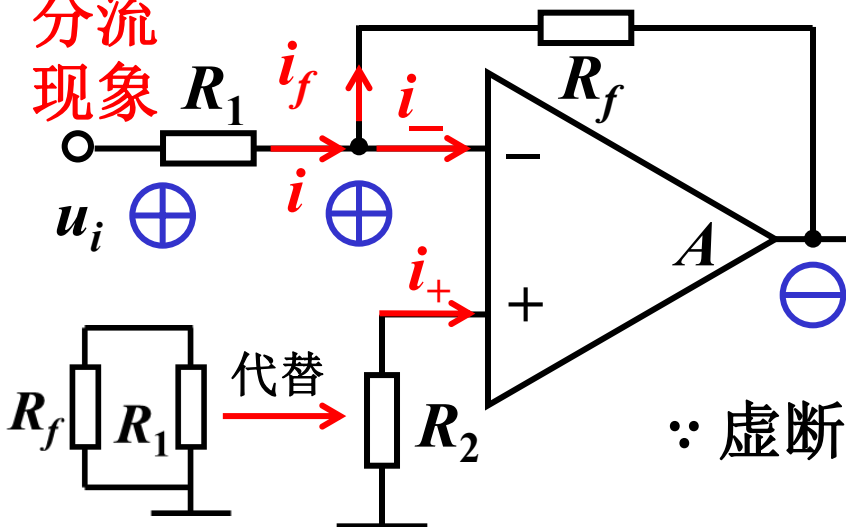
# 只要求掌握集成运放在线性区的应用

当信号从 $U_-$ 进来时

如何引入?  $\leftarrow$  工作在负反馈状态  $\rightarrow$  做法:  $R_f$  接在 $U_-$ 和 $U_o$ 之间

反馈: 利用反馈元件把输出的一部分返送回输入端去影响输入

分流现象



先做假设再用瞬时极性法判断

$$i_- = i - i_f$$

$i_-$  在减小  $\leftarrow i_f = \frac{u_- - u_o}{R_f} > 0$

电压并联负反馈 深度负反馈

反相比例运算

$\because$  虚断  $\rightarrow i_+ = i_- \approx 0 \rightarrow$  净输入  $\approx 0$

$\because$  虚短  $\rightarrow u_- = u_+ = 0$

$i = i_f \rightarrow \frac{u_i - u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_o}{R_f}$

注意1:  $u_o$  必须在  $[-U_{om}, +U_{om}]$  才能正常运算;

注意2:  $R_2$  是用于保证输入端差动电路的对称性;

平衡电阻  $R_2 =$  另一个输入端除源后的等效电阻

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i$$

$$R_2 = R_1 // R_f$$

估算公式只跟反馈路径有关

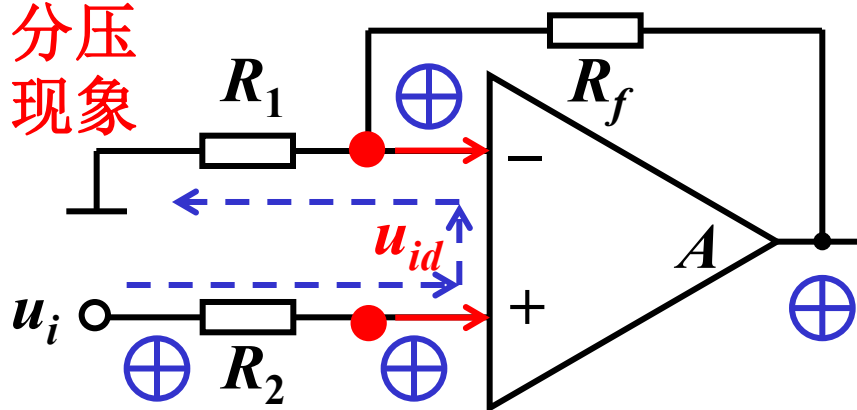
# 只要求掌握集成运放在线性区的应用

无论信号从  $U_-$  或  $U_+$  进

如何引入?  $\leftarrow$  工作在负反馈状态  $\rightarrow$  做法:  $R_f$  接在  $U_-$  和  $U_o$  之间

反馈: 利用反馈元件把输出的一部分返送回输入端去影响输入

分压现象



先假设  $R_f$  的另一端接在 “-”

$$u_{id} = u_i - u_{R2} - u_{R1} \quad \text{无反馈时 } u_{R1} = 0$$

反馈后  $u_{R1} = u_f$  虚断  $\rightarrow i_+ = i_- = 0$

$u_{id} \approx 0$   $u_f > 0 \rightarrow u_{id}$  在减小  $\rightarrow$  负反馈

同相比例运算

$\therefore$  虚短  $\rightarrow u_+ \approx u_-$

电压串联深度负反馈

$\therefore R_2$  无电流

估算公式只跟反馈路径有关

$$u_+ = u_- = u_{R1} = \frac{R_1}{R_1 + R_f} \times u_o$$

$$\therefore u_+ = u_i \quad u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_i$$

平衡电阻

$$R_2 = R_1 // R_f$$

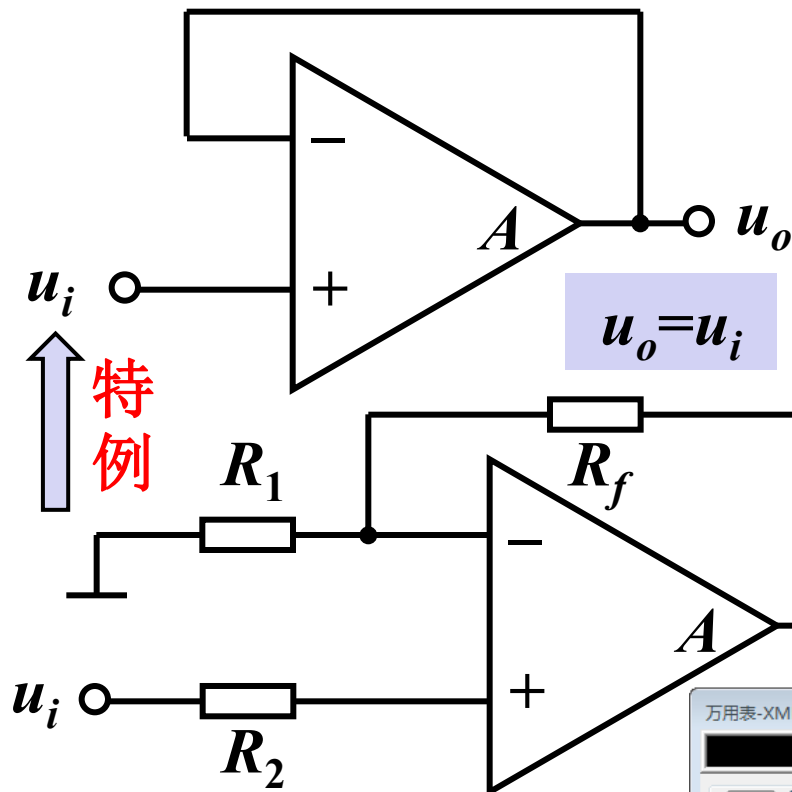
同相输入的通用表达式

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

思考: 如何实现  $u_o = u_i$ ?

$$\text{令 } R_f = 0 \rightarrow R_1 = \infty \rightarrow R_2 = 0 // \infty = 0$$

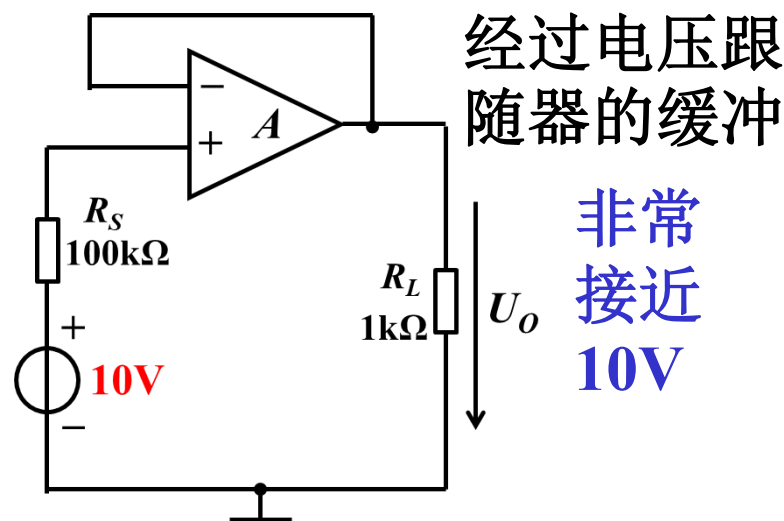
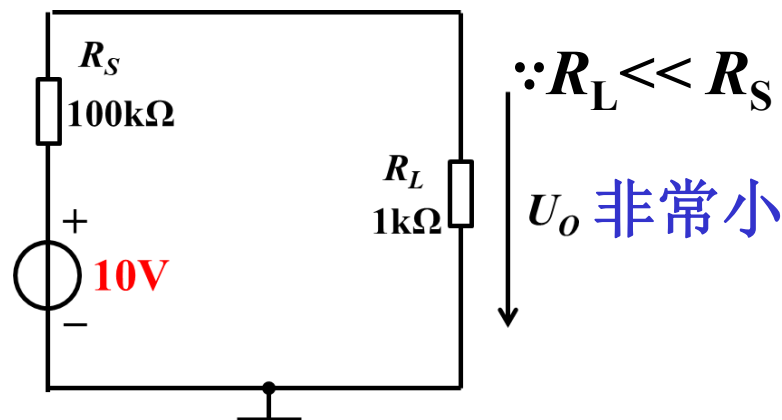
$u_+$  与  $u_i$  的关系要看具体电路



电压跟随器

应用1: 无需电阻, 因此常用于芯片是否损坏的快速检查。

应用2: 因引入电压串联深度负反馈, 输入电阻极大和输出电阻极小, 可解决负载不匹配问题。



同相比例运算

$\because R_2$  无电流

$\because u_+ = u_i$   $u_o = (1 + \frac{R_f}{R_1})u_i$

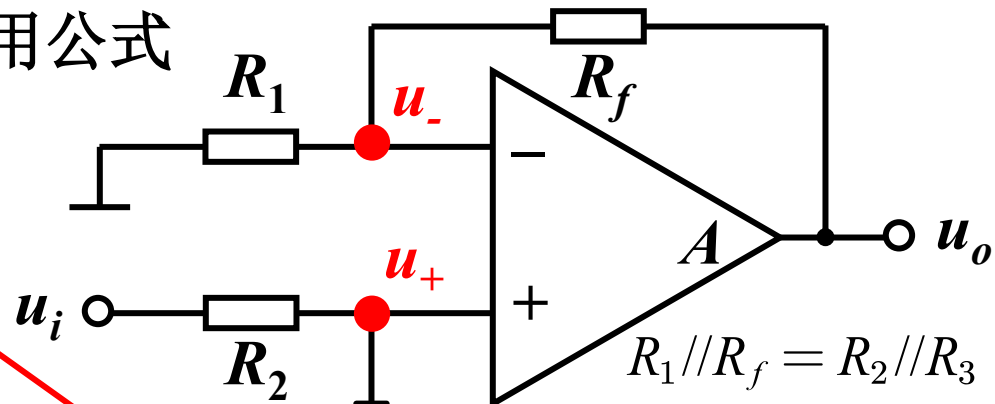
思考: 如何实现  $u_o = u_i$ ?

令  $R_f = 0 \rightarrow R_1 = \infty \rightarrow R_2 = 0 // \infty = 0$

由于反馈路径相同仍然使用通用公式

∴ 虚断  $i_- = 0 \rightarrow R_1$  和  $R_f$  串联

$$\therefore u_- = \frac{R_1}{R_1 + R_f} u_o = u_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \times u_i$$

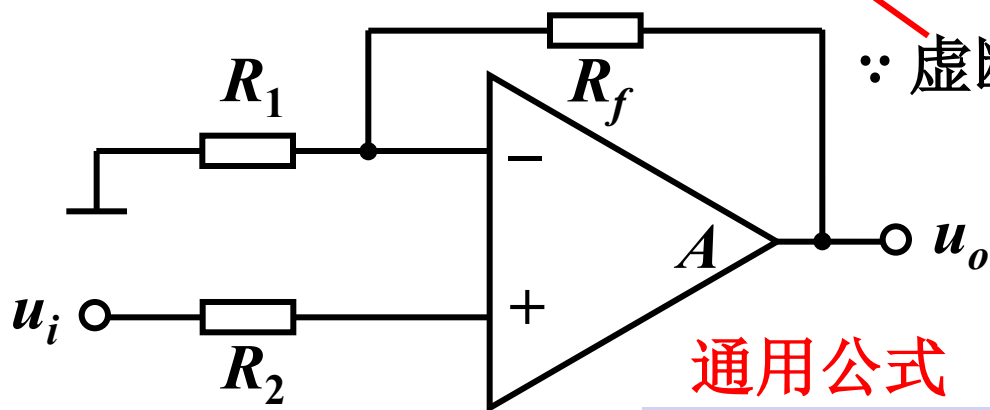


$$R_1 // R_f = R_2 // R_3$$

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_i$$

若  $R_2 = R_1$  且  $R_3 = R_f$

$$u_o = \frac{R_3}{R_1} u_i = \frac{R_f}{R_1} u_i$$



通用公式

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

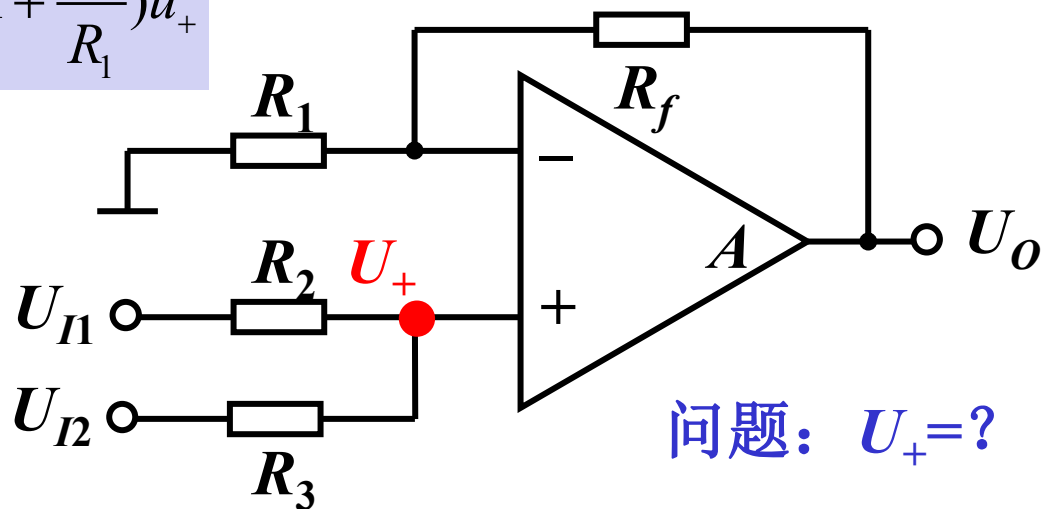
同相比例运算

∴  $R_2$  无电流

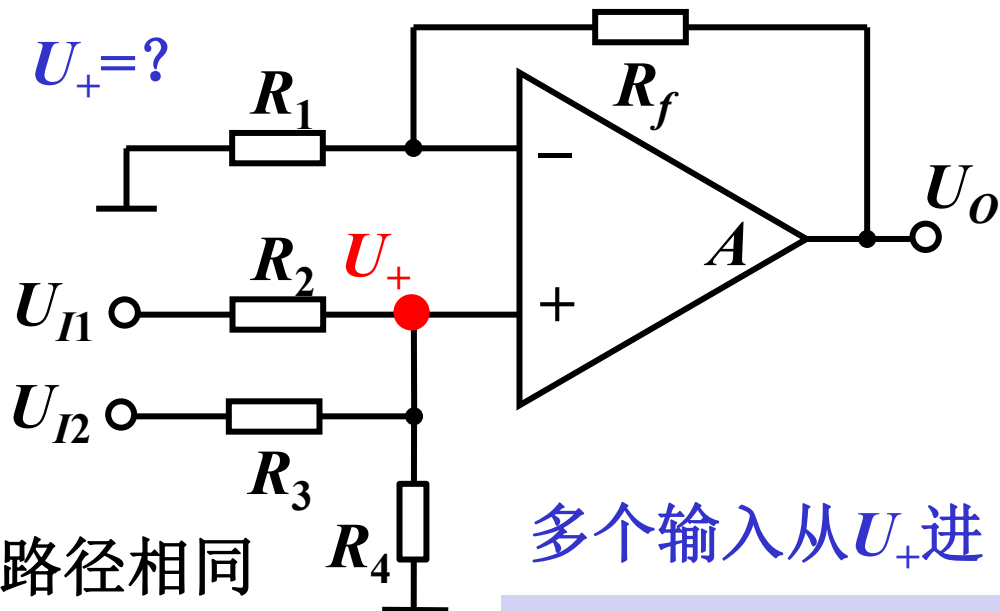
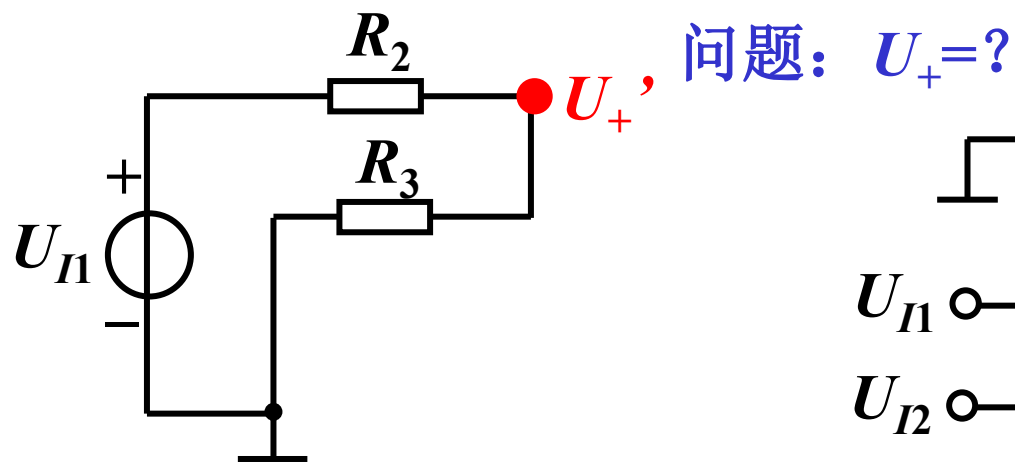
$$\therefore u_+ = u_i \quad u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_i$$

虽然有多输入从  $U_+$  进入

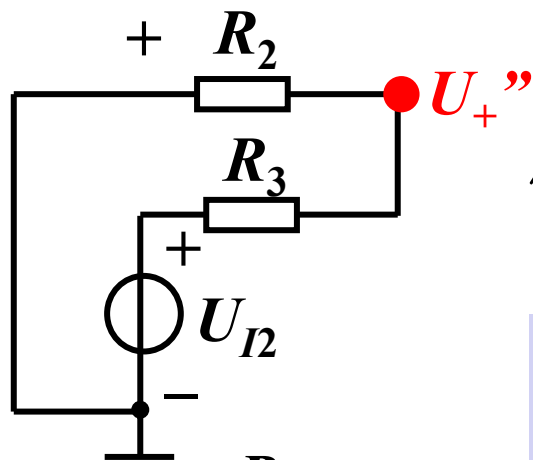
反馈路径相同仍用通用公式



问题:  $U_+ = ?$



叠加原理



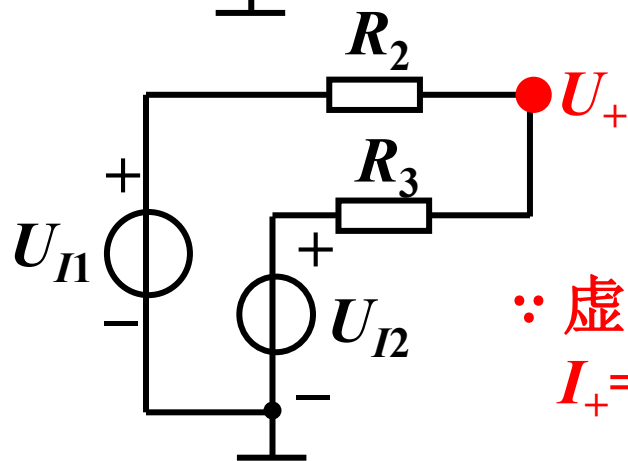
反馈路径相同  
仍然使用通用公式

同相加法运算

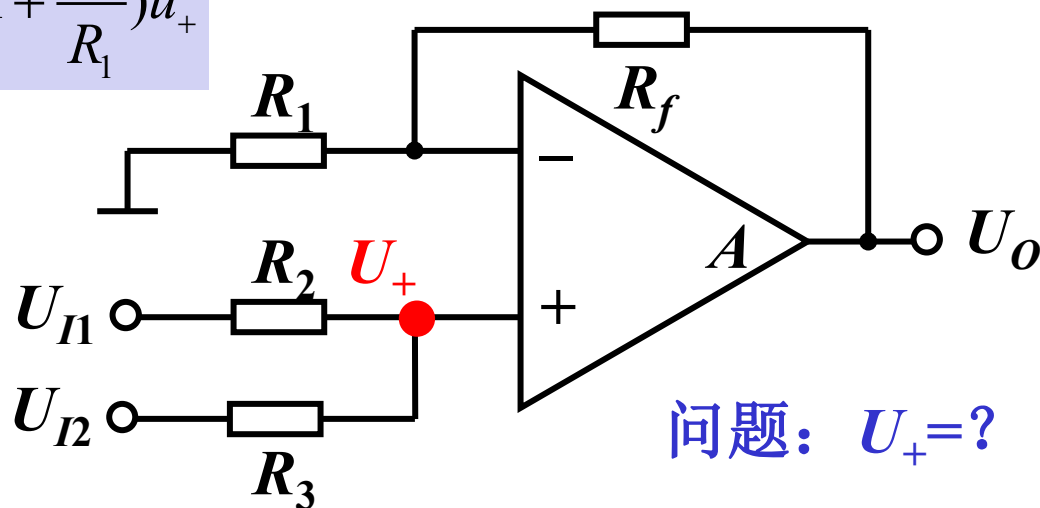
通用公式

$$U_+ = \left( \frac{R_3}{R_2 + R_3} U_{I1} + \frac{R_2}{R_2 + R_3} U_{I2} \right)$$

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

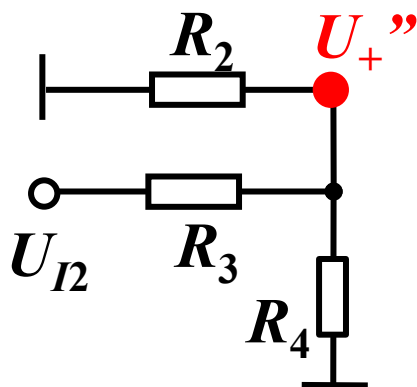
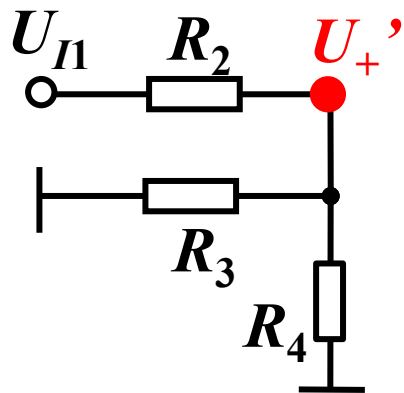


$\because$  虚断  
 $I_+ = 0$

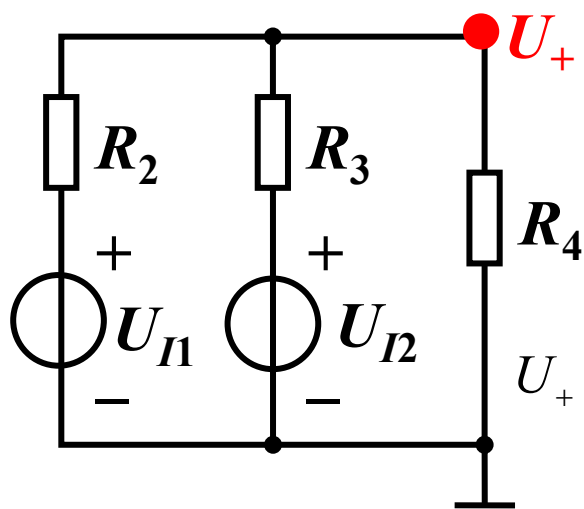


## 方法1: 叠加原理

问题:  $U_+ = ?$



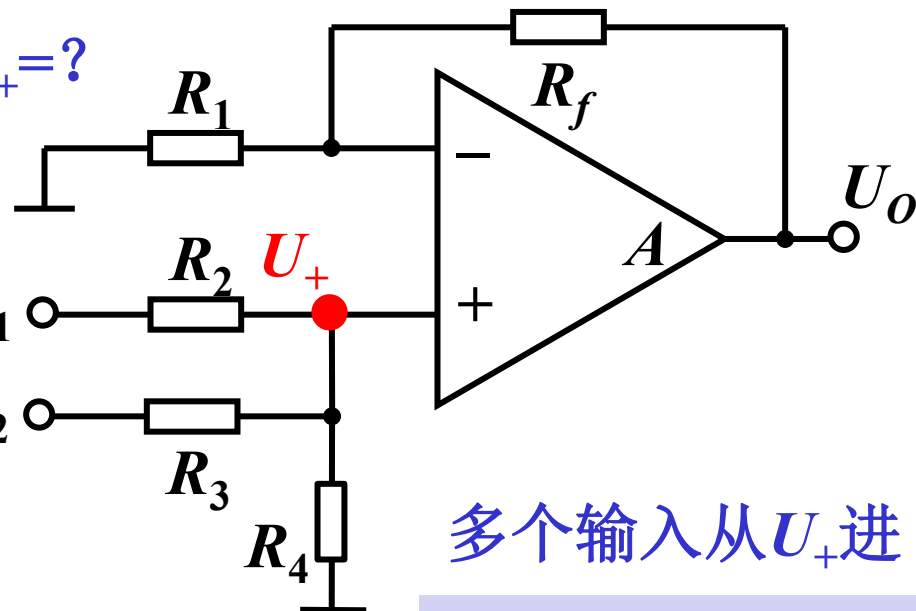
$$\frac{R_3 // R_4}{R_2 + R_3 // R_4} U_{I1} + \frac{R_2 // R_4}{R_3 + R_2 // R_4} U_{I2} = U_+$$



通用公式

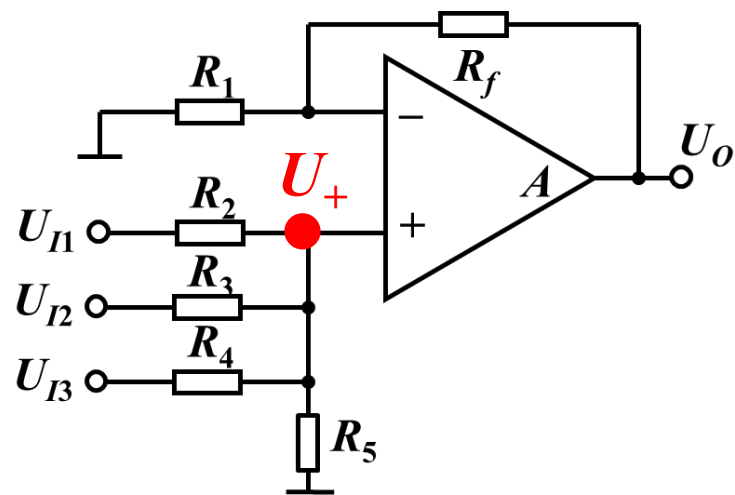
$$u_o = (1 + \frac{R_f}{R_1}) u_+$$

$$U_+ = \frac{\sum \frac{U_s}{R}}{\sum \frac{1}{R}} = \frac{\frac{U_{i1}}{R_2} + \frac{U_{i2}}{R_3}}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}}$$



多个输入从  $U_+$  进

同相加法运算



## 方法2: 两节点电压公式

当输入个数更多时, 用方法二更好



$$U_o = (1 + \frac{R_f}{R_1}) \frac{\frac{U_{I1}}{R_2} + \frac{U_{I2}}{R_3} + \frac{U_{I3}}{R_4}}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}}$$

$$U_+ = \frac{\sum \frac{U_s}{R}}{\sum \frac{1}{R}} = \frac{\frac{U_{I1}}{R_2} + \frac{U_{I2}}{R_3} + \frac{U_{I3}}{R_4}}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}}$$

思考：同相加法运算的缺点？

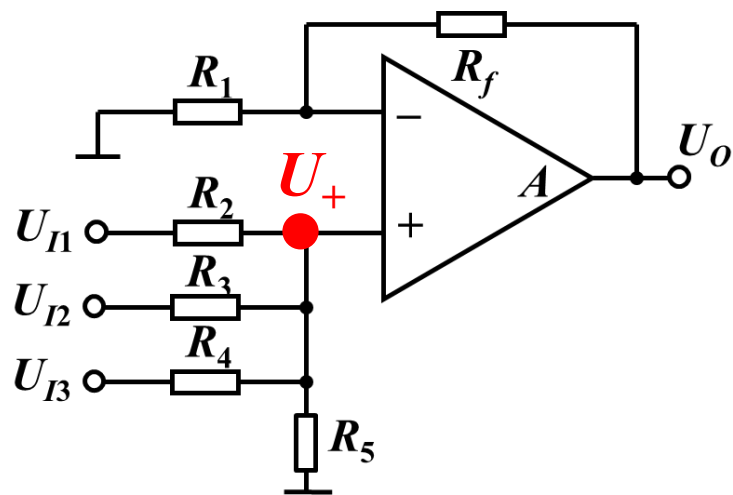
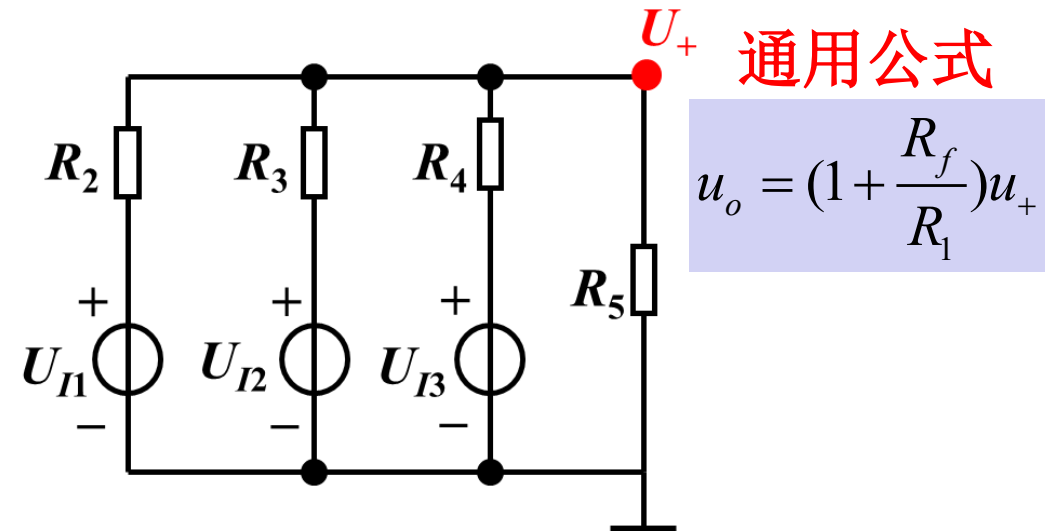
$U_+$ 与各个输入信号的关系较为复杂

$R_1 // R_f = R_2 // R_3 // R_4 // R_5$  电阻相互影响

缺点：无法灵活的调整比例关系

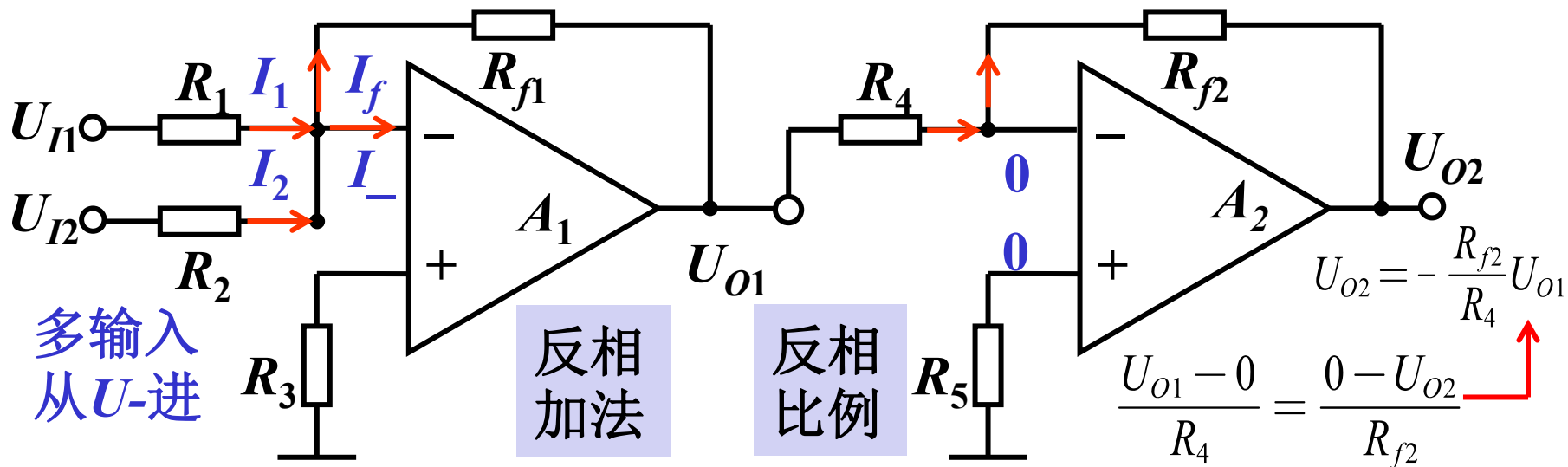
还有什么方法可以实现同相加法？

办法：用反相加法+反相比例的组合电路实现同相加法运算。



方法2：两节点电压公式

当输入个数更多时，用方法二更好

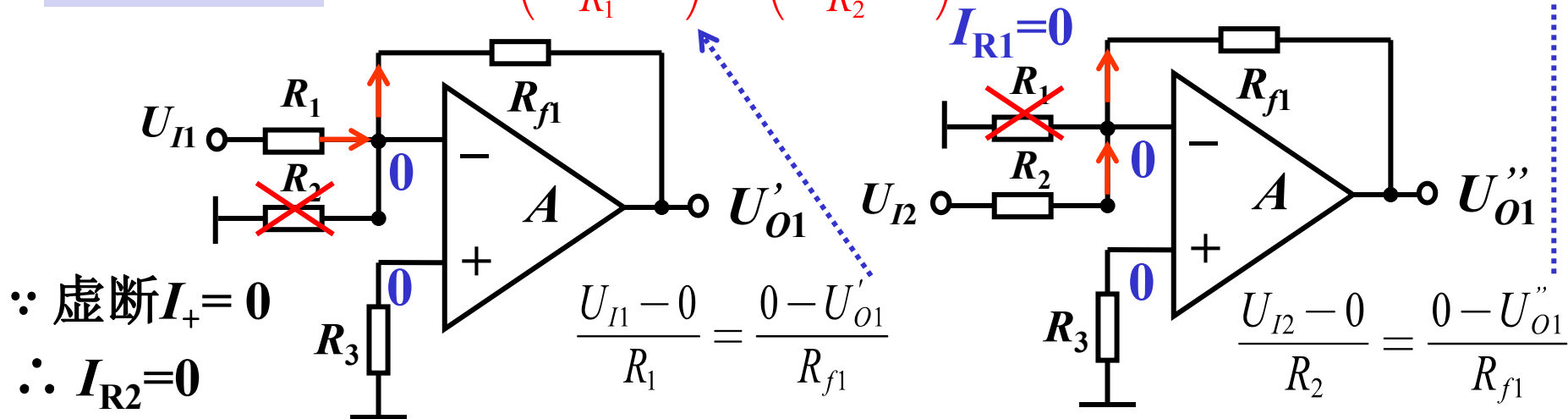


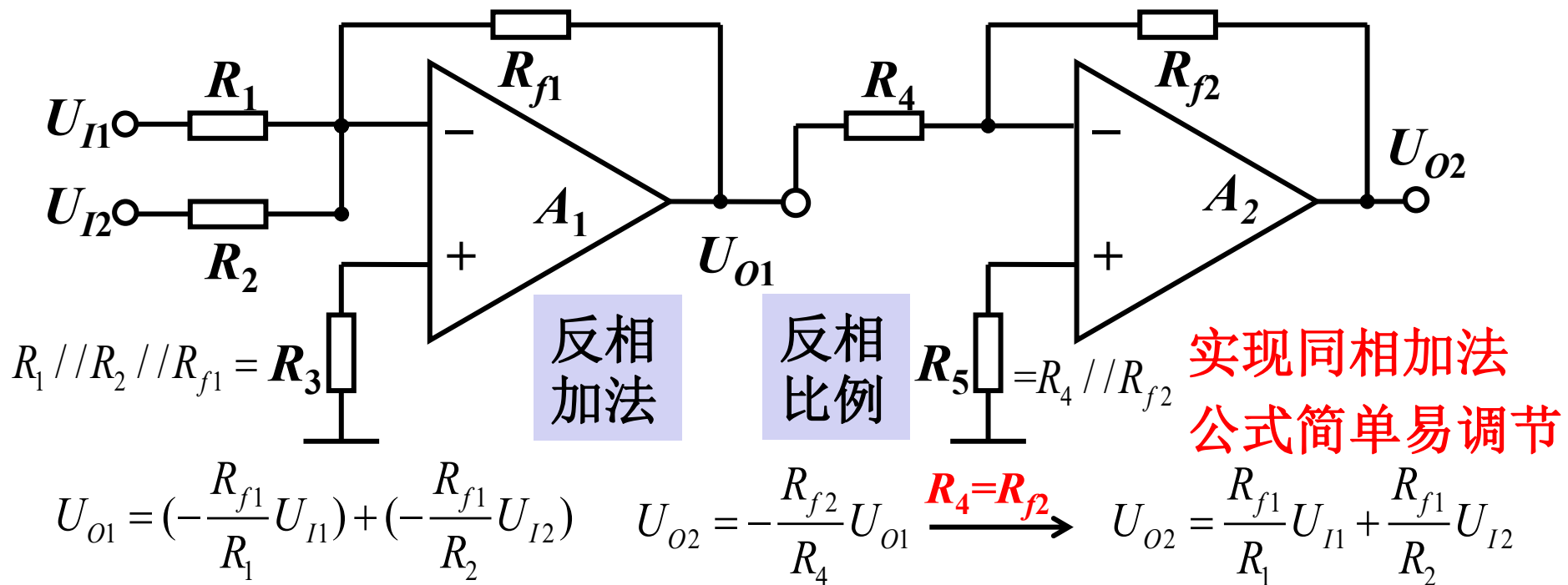
电压并联深度负反馈  $\because$  虚断  $\rightarrow I_+ = I_- = 0$   $\therefore$  KCL:  $I_1 + I_2 = I_f$

$\because$  虚短  $\rightarrow U_- = U_+ = I_+ R_3 = 0$

$$\frac{U_{11} - U_-}{R_1} + \frac{U_{12} - U_-}{R_2} = \frac{U_- - U_{O1}}{R_{f1}}$$

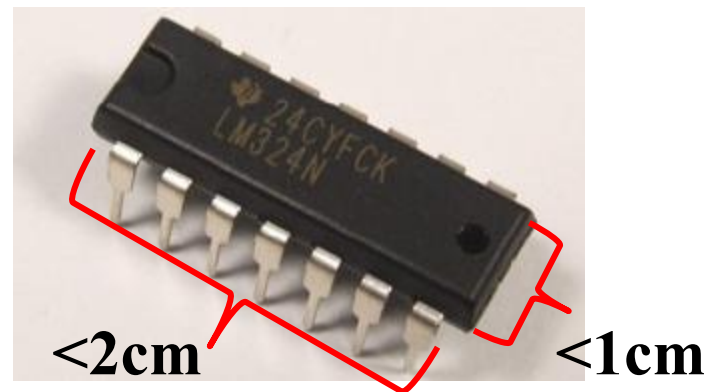
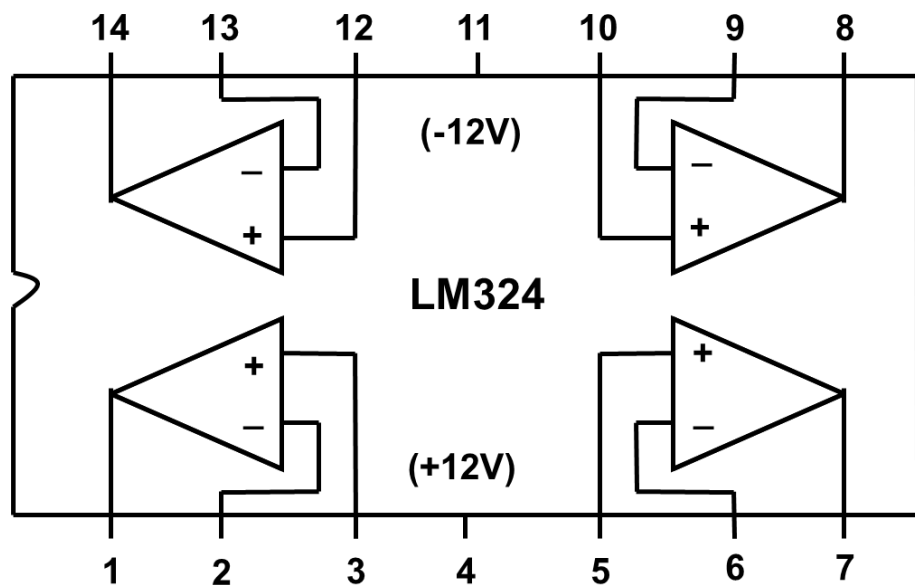
叠加原理  $\leftarrow U_{O1} = \left( -\frac{R_{f1}}{R_1} U_{11} \right) + \left( -\frac{R_{f1}}{R_2} U_{12} \right)$





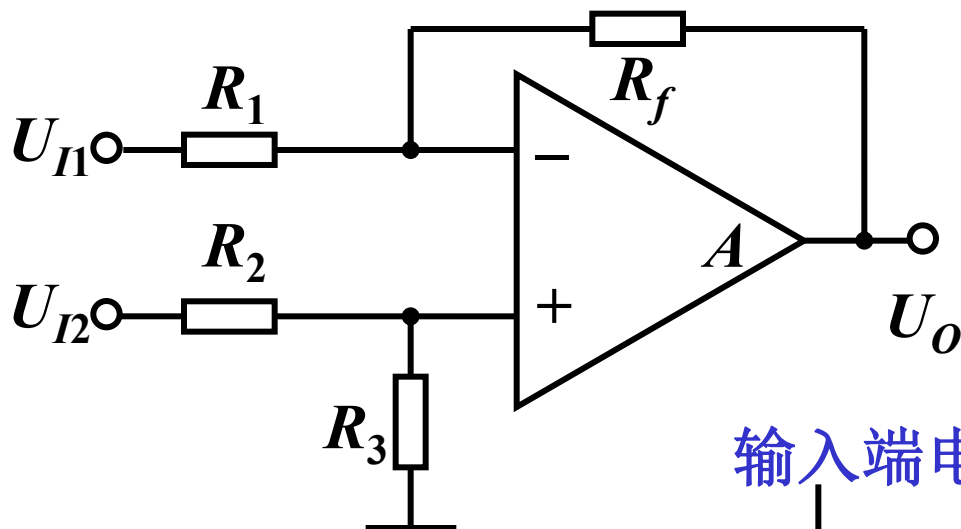
集成芯片中通常集成多个运放，组合电路并不会增加成本。

注意：四个集成运放可以共用驱动芯片的正负直流电源



## 减法运算

特点：信号从不同输入端进来



$U_{I1}$ :  $R_f$ 引入电压并联负反馈

$U_{I2}$ :  $R_f$ 引入电压串联负反馈

$$U_O = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} U_{I2} - \frac{R_f}{R_1} U_{I1}$$

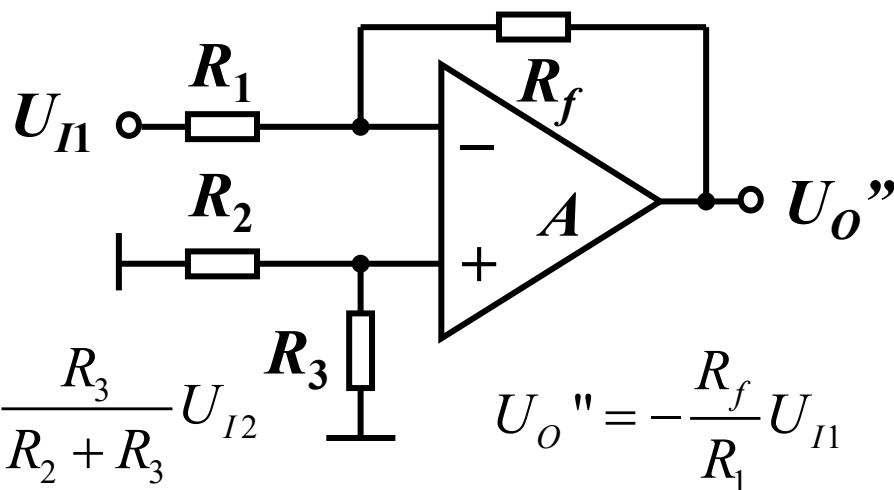
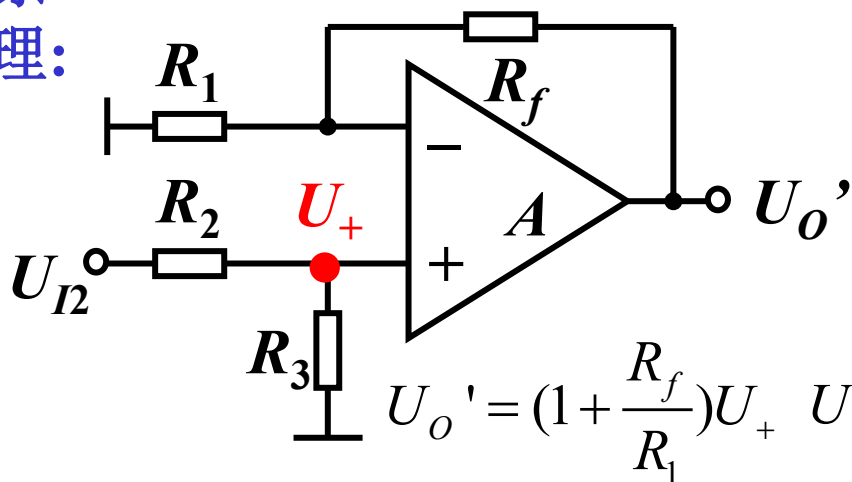
输入端电阻平衡条件:  $R_1 // R_f = R_2 // R_3$

叠加原理:

$$U_O = \frac{R_f}{R_1} (U_{I2} - U_{I1})$$

令  $R_2 = R_1$   
 $R_3 = R_f$

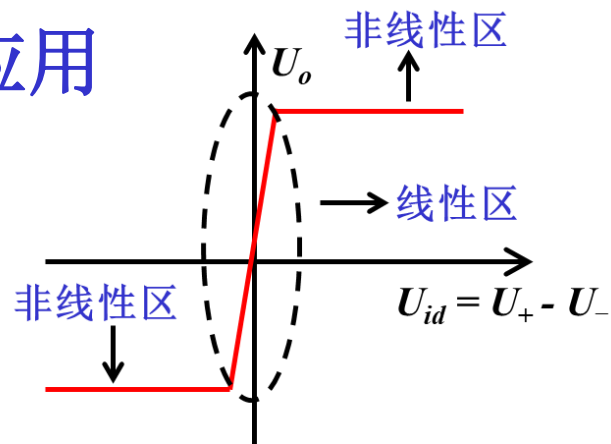
$$U_O = \left(\frac{R_1 + R_f}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} U_{I2} - \frac{R_f}{R_1} U_{I1}$$



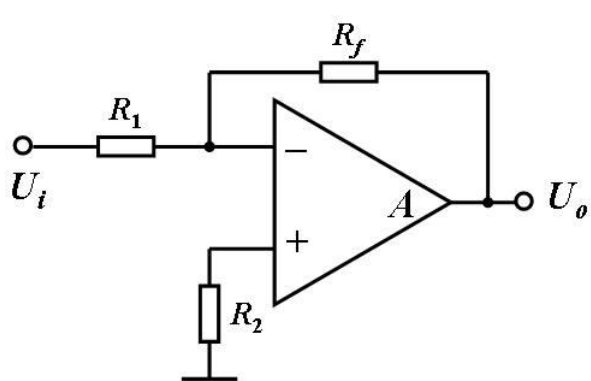
# 集成运放在线性区的应用

特点:  $R_f$  接在  $U_-$  和  $U_o$  之间  $\rightarrow$  负反馈状态

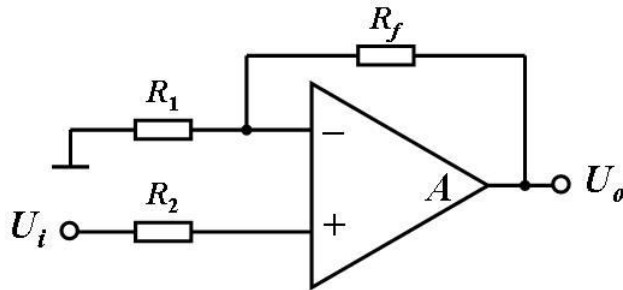
运算电路: 反相比例运算、同相比例运算、反相加法运算、同相加法运算、减法运算



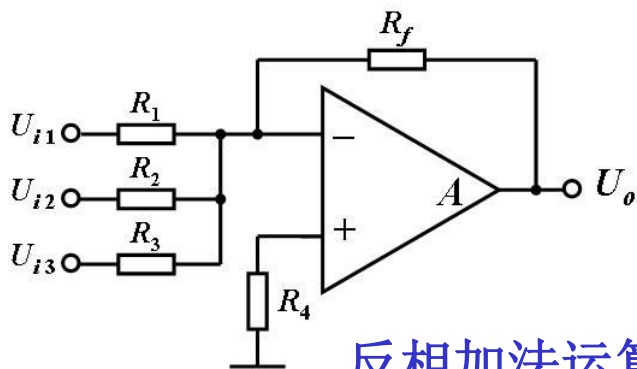
要求 如何区分?  
掌握: 如何计算?



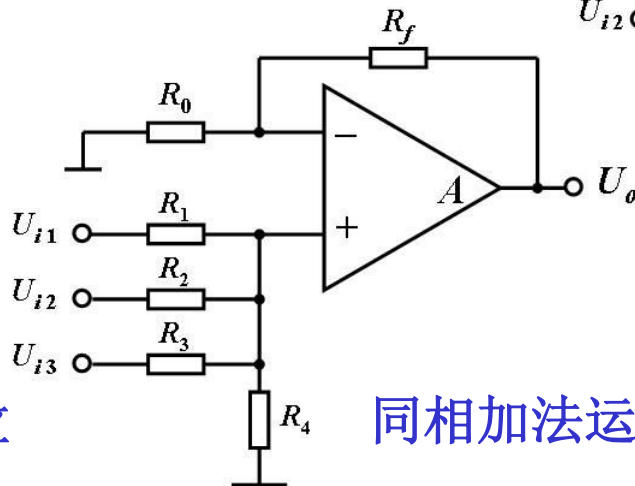
反相比例运算电路



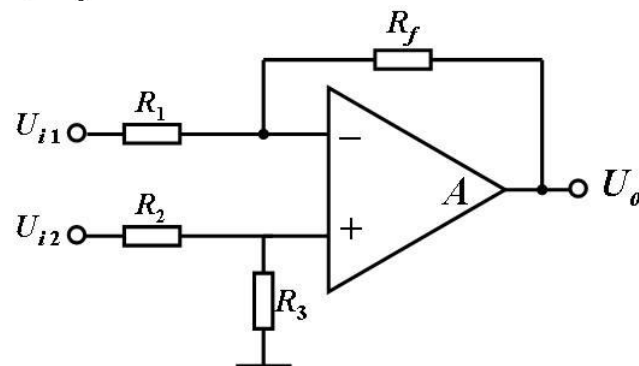
同相比例运算电路



反相加法运算



同相加法运算



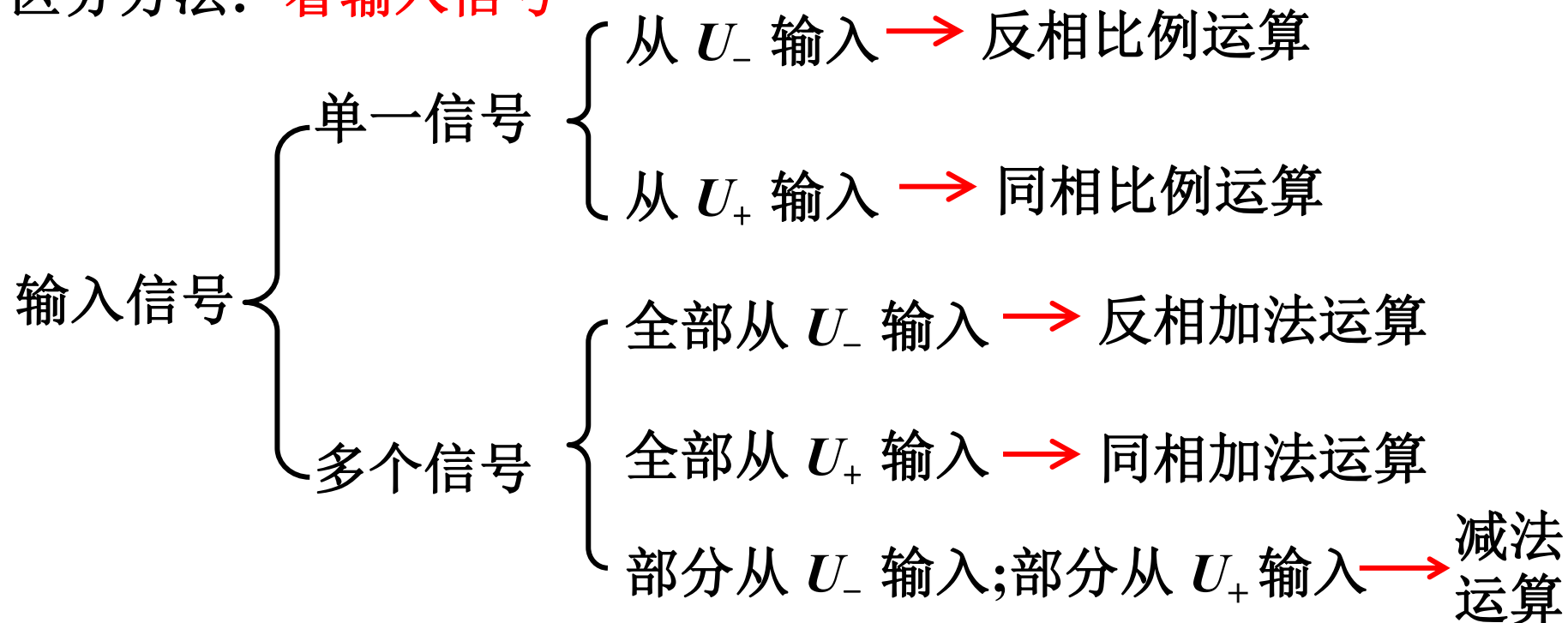
减法运算

# 集成运放在线性区的应用

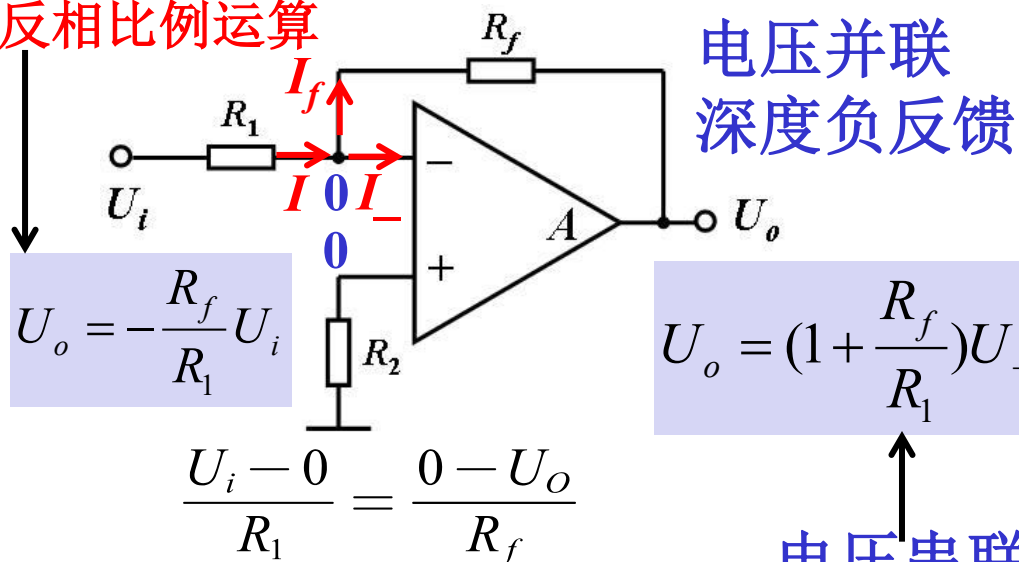
特点:  $R_f$  接在  $U_-$  和  $U_o$  之间  $\rightarrow$  负反馈状态

运算电路: 反相比例运算、同相比例运算、反相加法运算、同相加法运算、减法运算

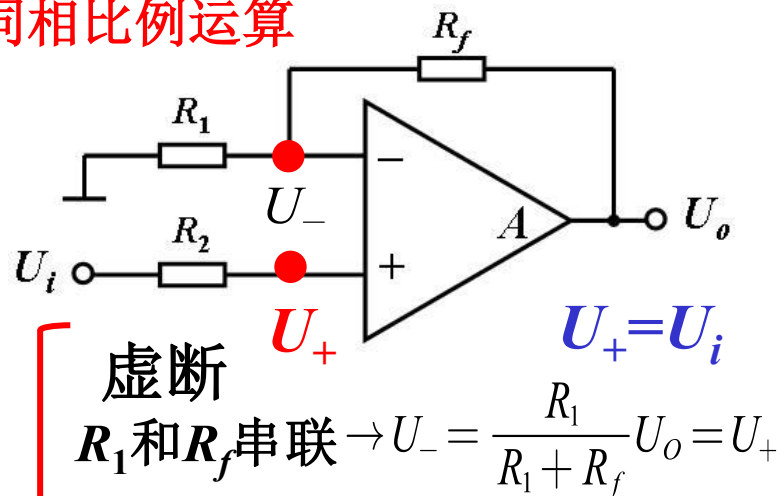
区分方法: 看输入信号



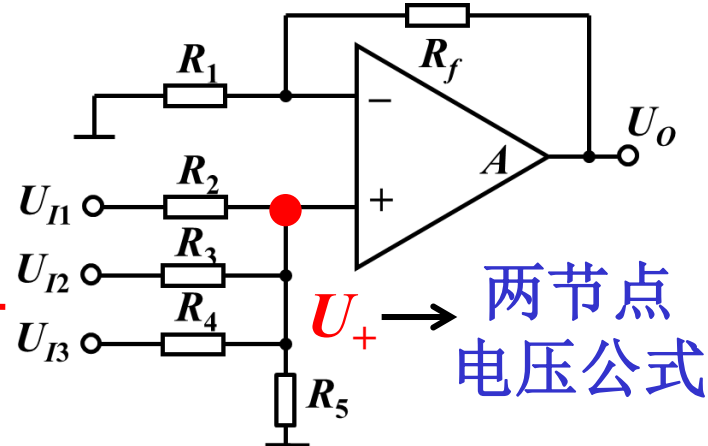
反相比例运算



同相比例运算



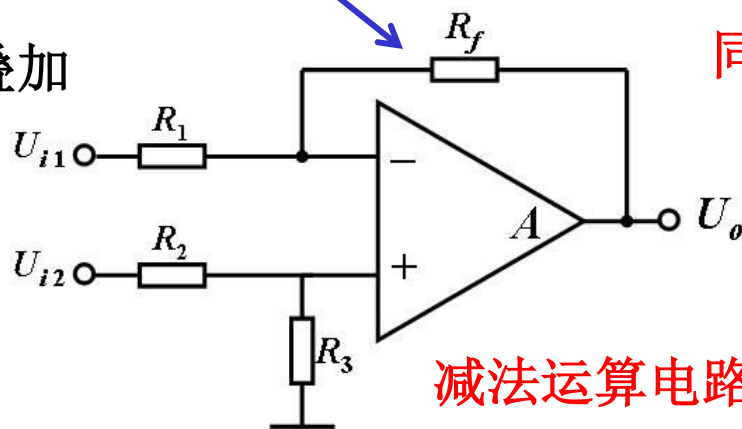
电压串联  
深度负反馈



反相加法  
运算

多个反相比例的叠加

叠加原理



同相加法运算

如何计算?

深度负反馈

公式看反馈路径

线性区特点:

虚短  $\rightarrow U_+ \approx U_-$

虚断  $\rightarrow I_+ = I_- \approx 0$