第7章集成运放的应用 I （信号的运算和处理）

7.1 概述

7.1.1 理想运放的特征

运放的特点：

A 很大：$10^4 \sim 10^7$

K_{CMRR}很大

r_i大：几十kΩ ~ MΩ

r_o小：几十Ω ~ 几百Ω

理想运放的特点

1、开环差模增益 $A_{od}=\infty$

2、差模输入电阻 $r_{id}=\infty$

3、输入偏置电流 $I_{B1}=I_{B2}=0$

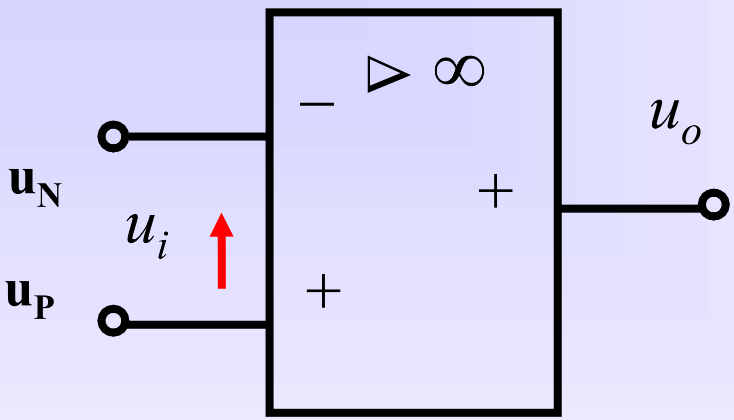
4、输出电阻 $r_0=0$

5、共模克制比 $K_{CMRR}=\infty$

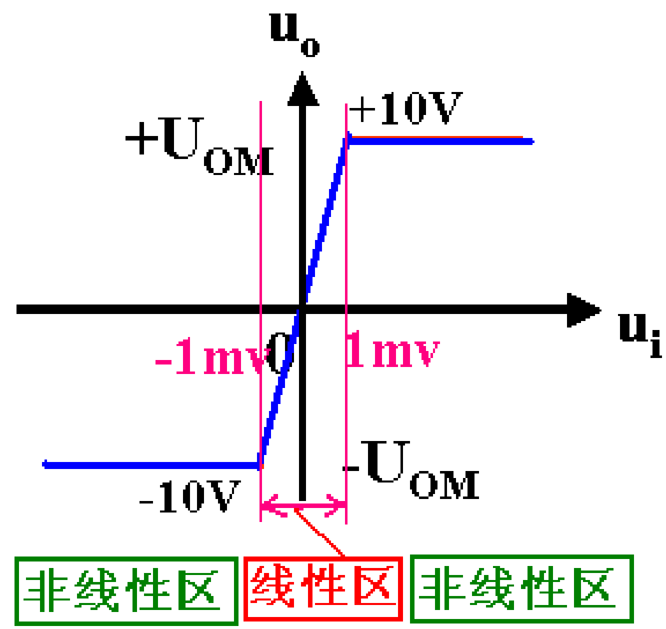
6、频带宽度 $BW=\infty$

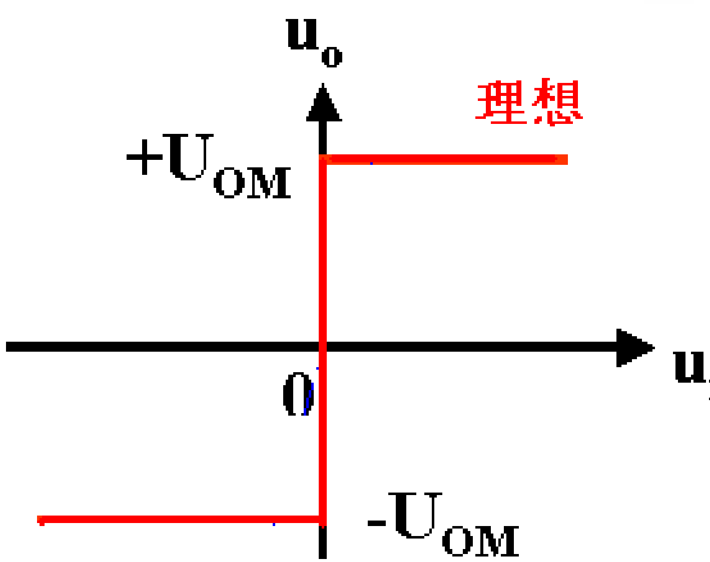
7、输入失调电压、输入失调电流均为零

7.1.2 理想运放的两个工作区

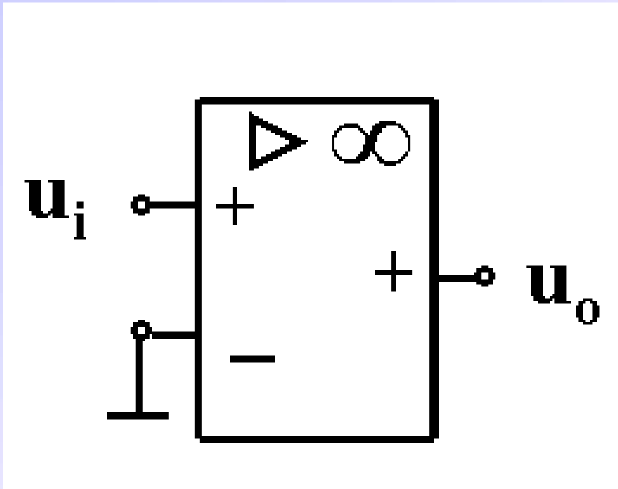


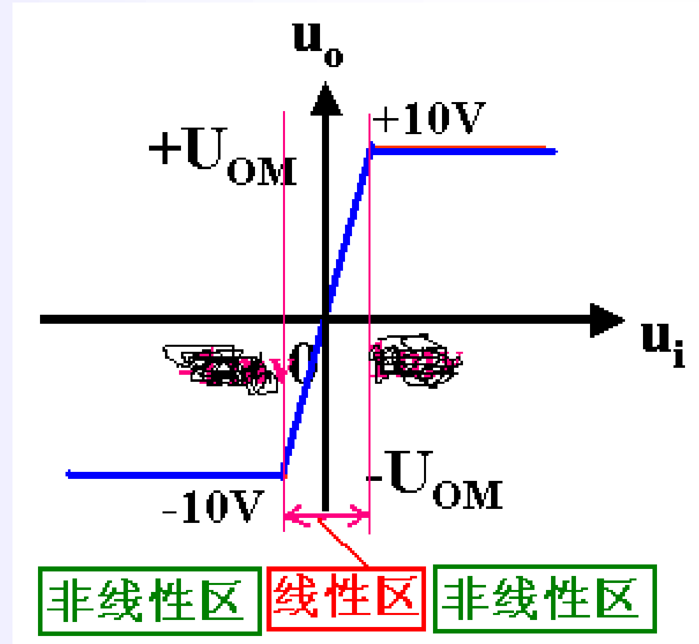
$$u_{o\max} = U_{OM} \approx V_{CC}$$





例：设电源电压±V_{CC}=±10V。运放的$A_{Od}=10^6$，求u_i





$$u_i=\frac{u_o}{A_{od}}=\frac{\pm 10V}{10^6}=\pm 0.01mV$$

$|u_i|\le 0.01$mV时，运放处于线性区。

A_{od}越大，线性区越小，当$A_{0d}\to\infty$时，线性区→0

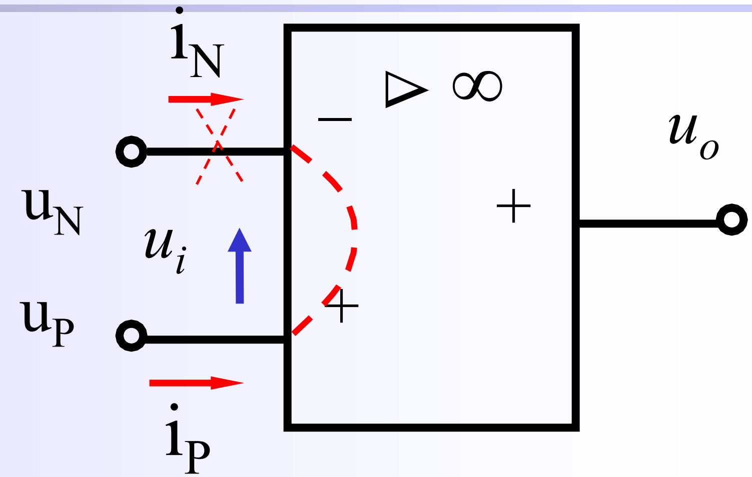
怎样使理想运放工作在线性区？

在输出与输入之间加深度负反馈。

虚短路、虚断路的概念

1、开环增益 $A_{od}=\infty$

2、差模输入电阻 $r_{id}=\infty$



$$A_{od}=\infty$$

$$u_o=A_{od}(u_P-u_N)$$

$$(u_P-u_N)=\frac{u_o}{A_{od}}=\frac{u_o}{\infty}=0 \Longrightarrow u_P=u_N$$

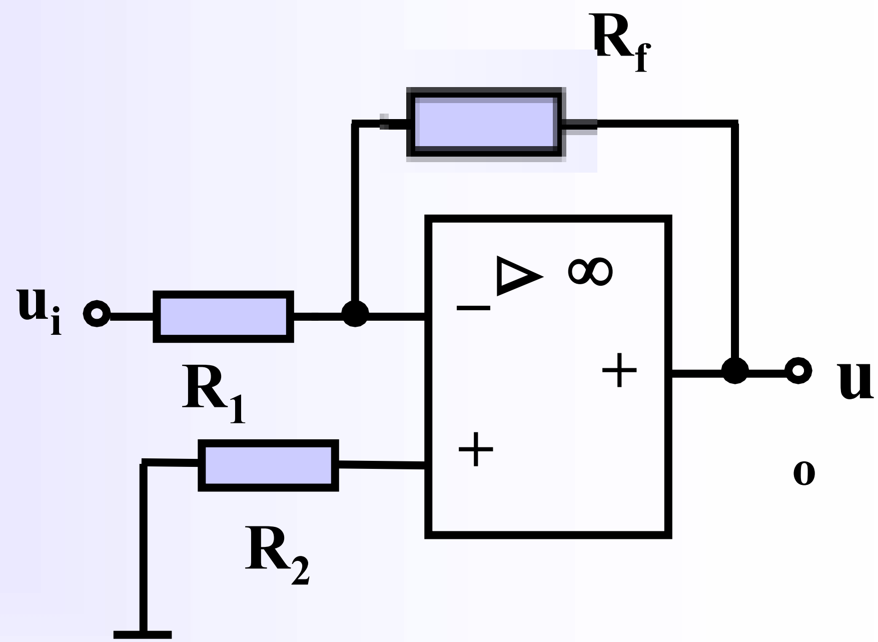
虚短路

虚断路

$$r_{id}=\infty \Longrightarrow i_N=i_P=0$$

7.2 基本运算电路

7.2.1 百分比运算电路



一、反相百分比运算电路

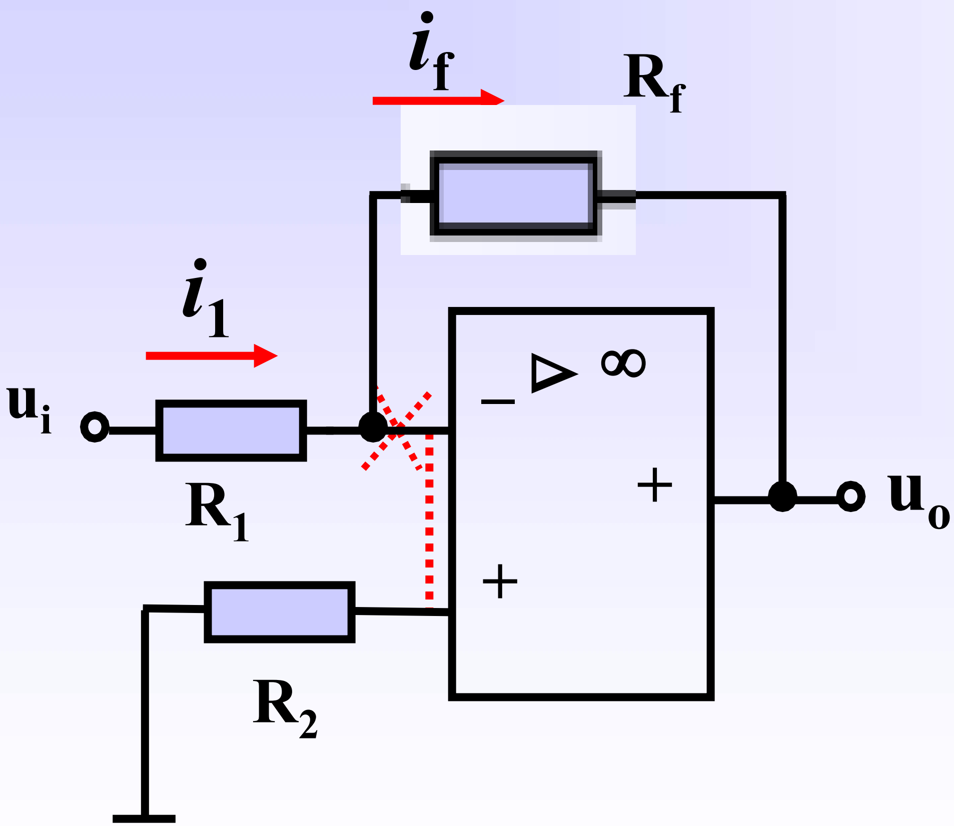
1. 特点

（1）输入信号加在反相输入端；

（2）同相端经过R_2接地，以确保运放工作于对称状态，$R_2=R_f//R_1$；

（3）R_f与R_1构成反馈网络，且为**电压并联负反馈。**

2. 分析



$$u_N = u_P = 0$$

虚地!

$$i_N = i_P = 0$$

$$i_1 = i_f$$

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

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

3. 讨论

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

闭环增益 $$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1} \begin{cases} > 1 \\ = 1 \\ < 1 \end{cases}$$

（1）u_o与u_i反相——反相放大器；

（2）A_{uf}只与R_f，R_1有关，且有三种情况；

（3）当$R_f=R_1$时，$u_o=-u_i$， 此时运放相当于作变号运算。

二、同相百分比运算电路

特点

（1）输入信号加在同相输入端，反馈网络加在反相输入端；

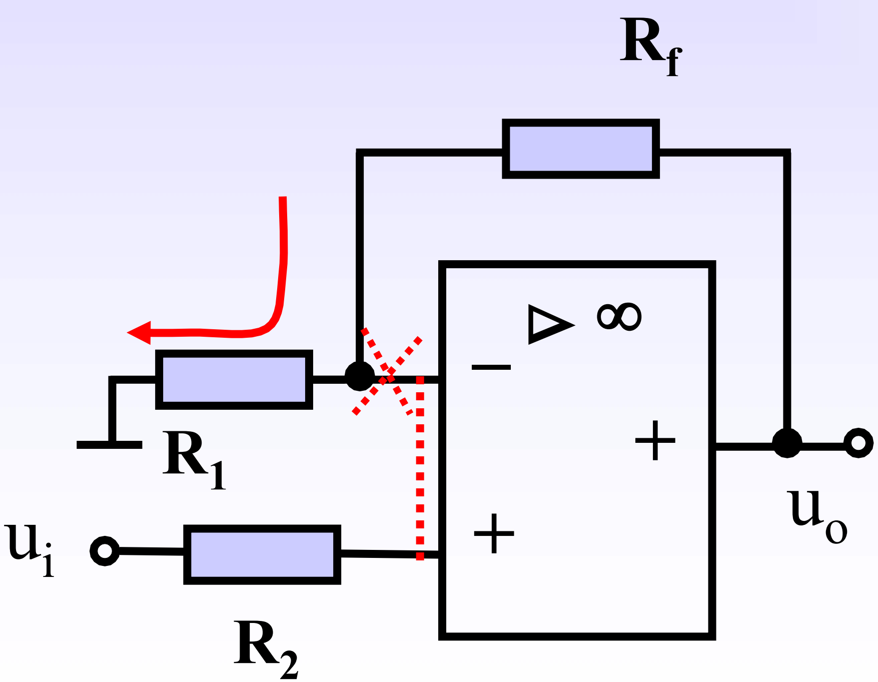
（2）不存在“虚地”。

$$u_N = u_P = u_i$$

$$i_N = i_P = 0$$

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

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

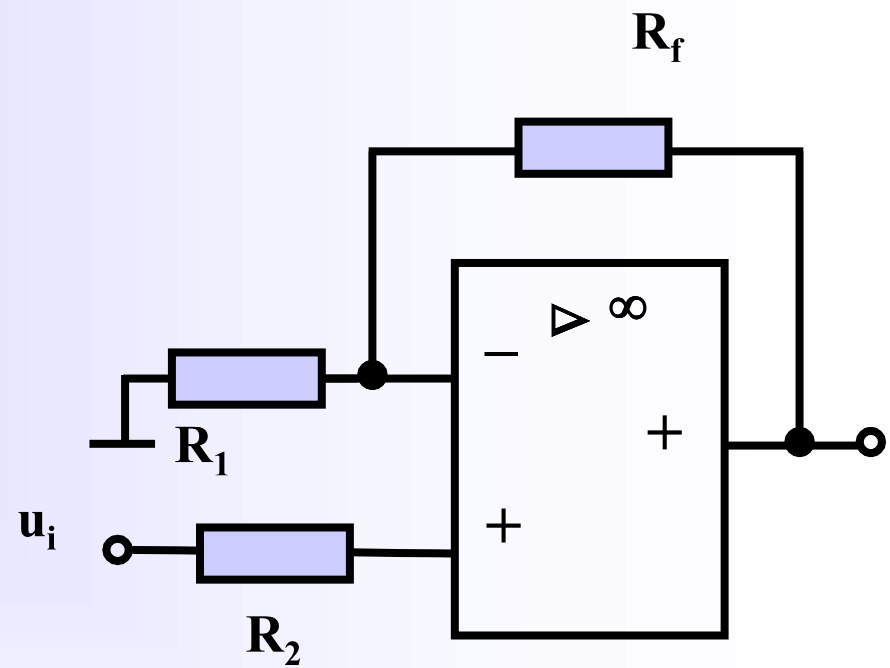


讨论

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

闭环增益：

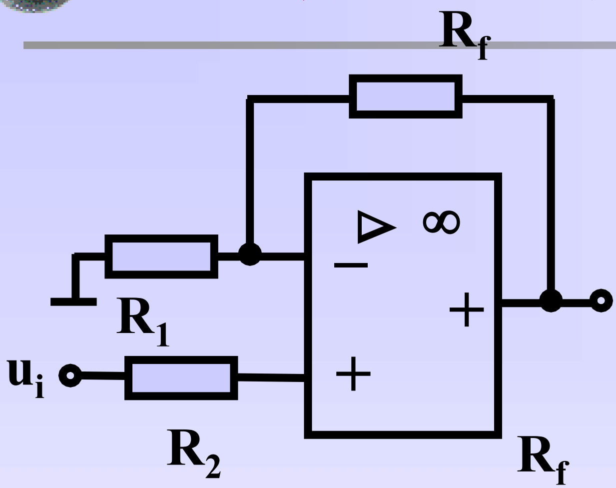
$$A_{uf}=\frac{u_o}{u_i}=1+\frac{R_f}{R_1}>1$$

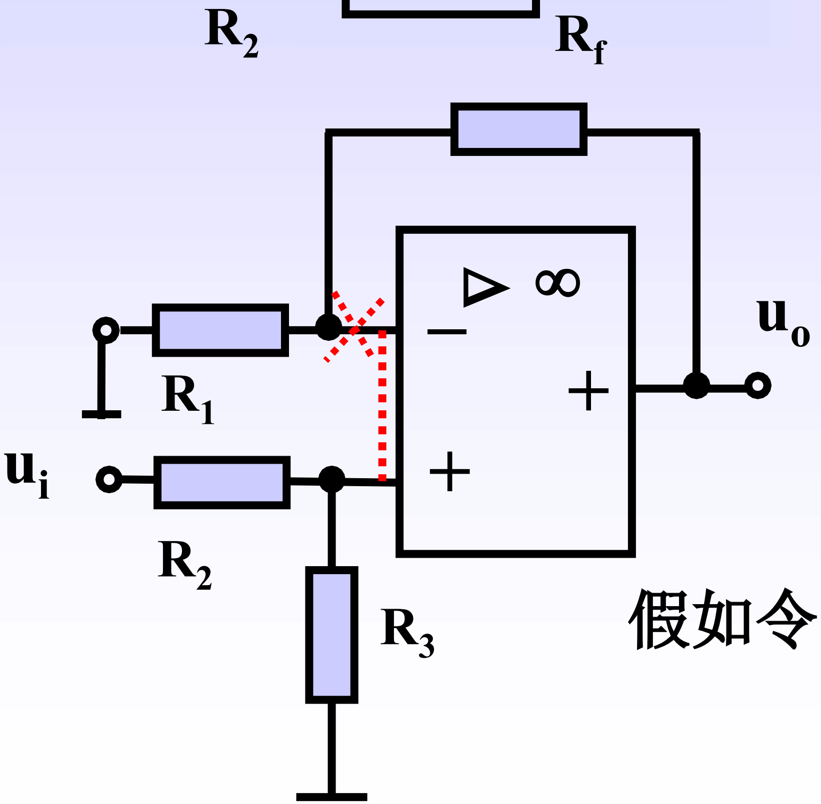


（1）u_o与u_i同相，且$u_o>u_i$，

（2）若令$R_f=0$或$R_1=\infty$，则$A_{uf}=1$即$u_o=u_i$ ——跟随器

另一种同相百分比运算电路





$$u_N = u_P$$

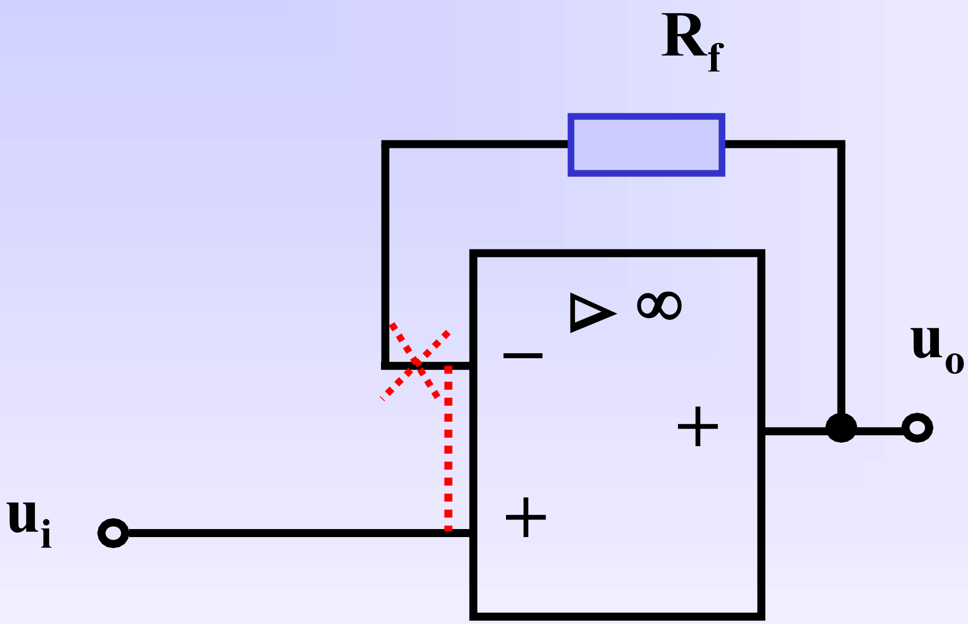
$$u_N = u_P = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_i$$ 分压

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

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

假如令 $\frac{R_f}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$ ⇒ $u_o = \frac{R_f}{R_1} u_i$

三、电压跟随器

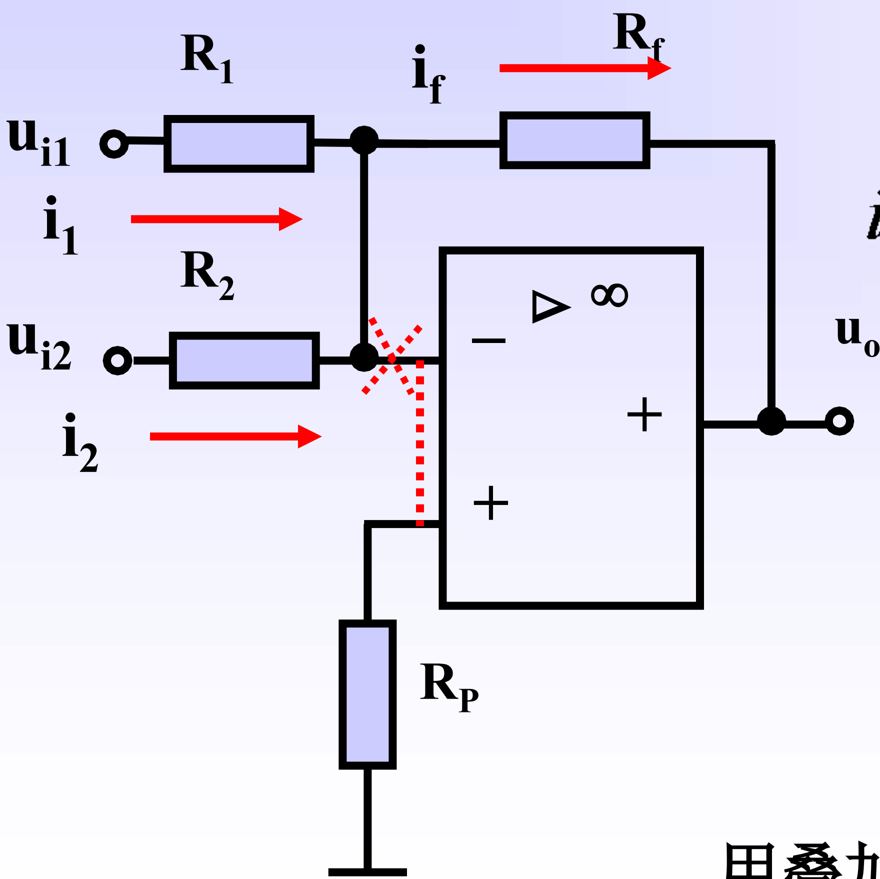


$$u_o = u_N = u_p = u_i$$

电压并联负反馈，输入电阻大，输出电阻小，作用与分立元件的射极输出器相同，但是电压跟随性能好。

7.2.2 加减运算电路

一、反相求和运算电路



$$u_P = u_N = 0$$ 虚地!

$$i_1 = \frac{u_{i1}}{R_1}, i_2 = \frac{u_{i2}}{R_2}, i_f = -\frac{u_o}{R_f},$$

$$i_N = i_P = 0 \Rightarrow i_1 + i_2 = i_f$$

$$-\frac{u_o}{R_f} = \frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2}$$，得

$$u_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}u_{i1} + \frac{R_f}{R_2}u_{i2}\right)$$

用叠加原理怎样？

讨论

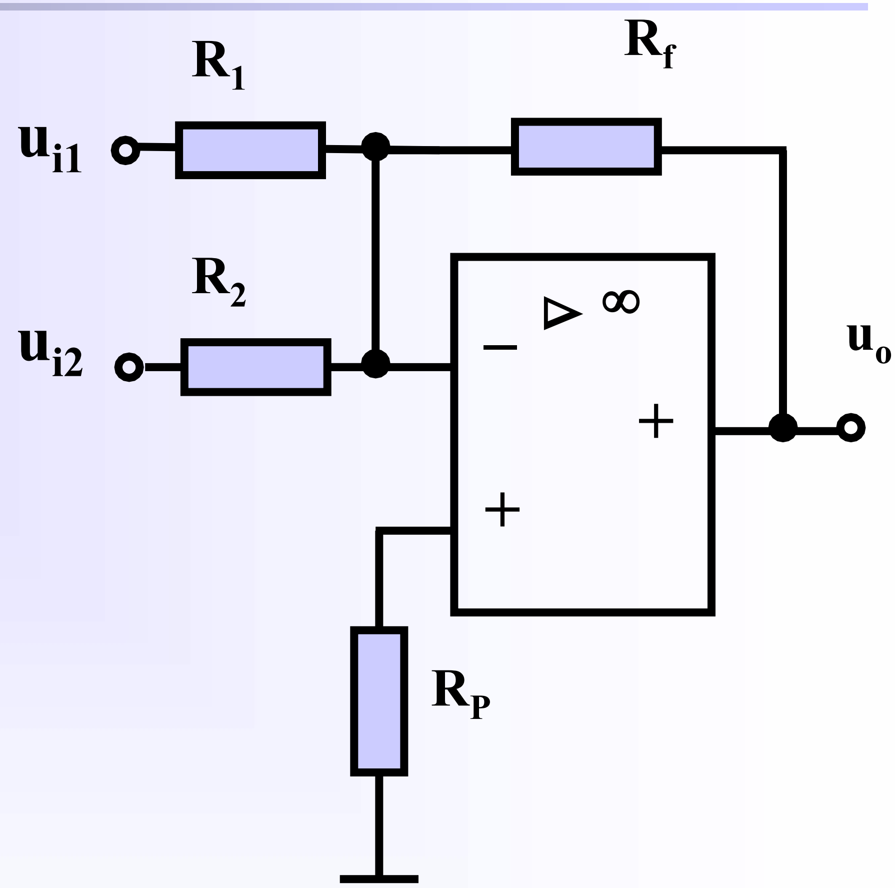
(1) $R_1 = R_2 = R$

$$u_o = -\frac{R_f}{R}(u_{i1} + u_{i2})$$

(2) $R_f = R$

$$u_o = -(u_{i1} + u_{i2})$$

(3) $i_1 + i_2 = i_f$

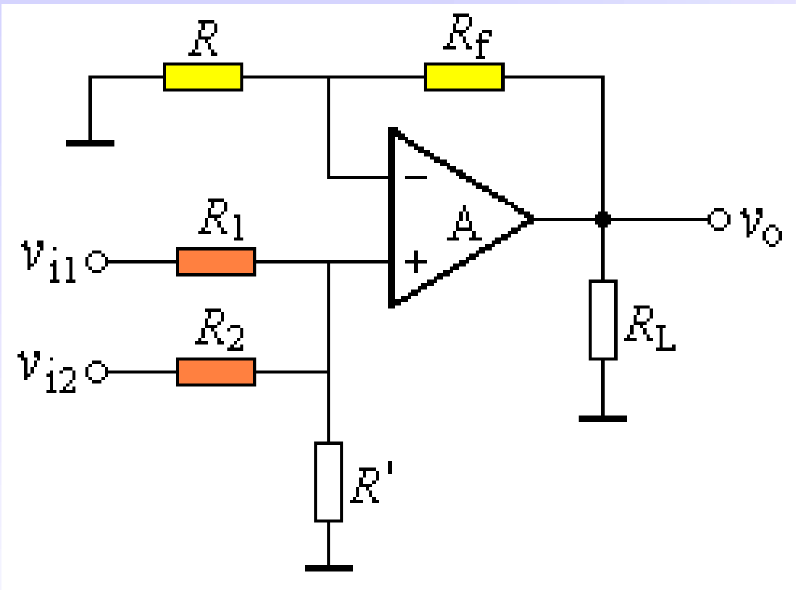


经过电流相加的方法来实现电压相加。

二、 同相求和运算电路

增长一种输入支路，构成同相求和电路。

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

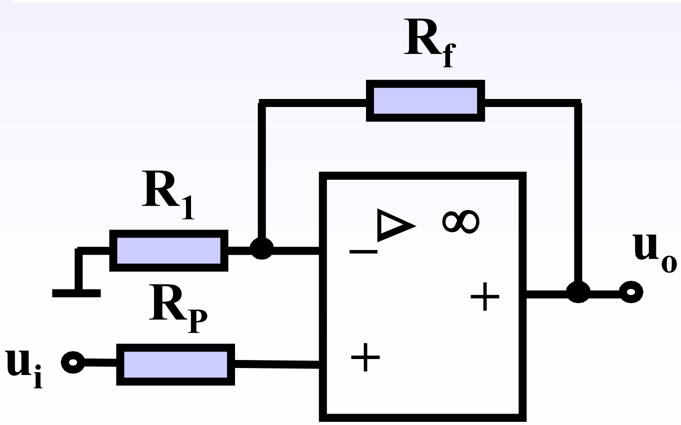


$$\frac{u_{i1} - u_P}{R_1} + \frac{u_{i2} - u_P}{R_2} = \frac{u_P}{R'}$$

解出： $u_P = R_P(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2})$

其中 $R_P = R_1 // R_2 // R'$

$$u_N = \frac{R}{R + R_f} u_o$$



$$\therefore u_o = (1 + \frac{R_f}{R})u_N = (1 + \frac{R_f}{R})u_P$$

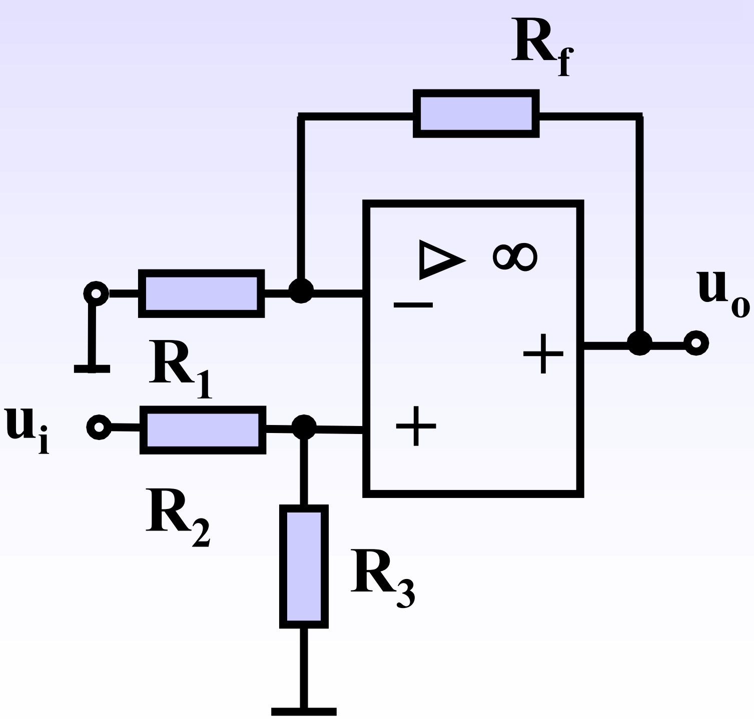
$$= (1 + \frac{R_f}{R})R_P(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2})$$

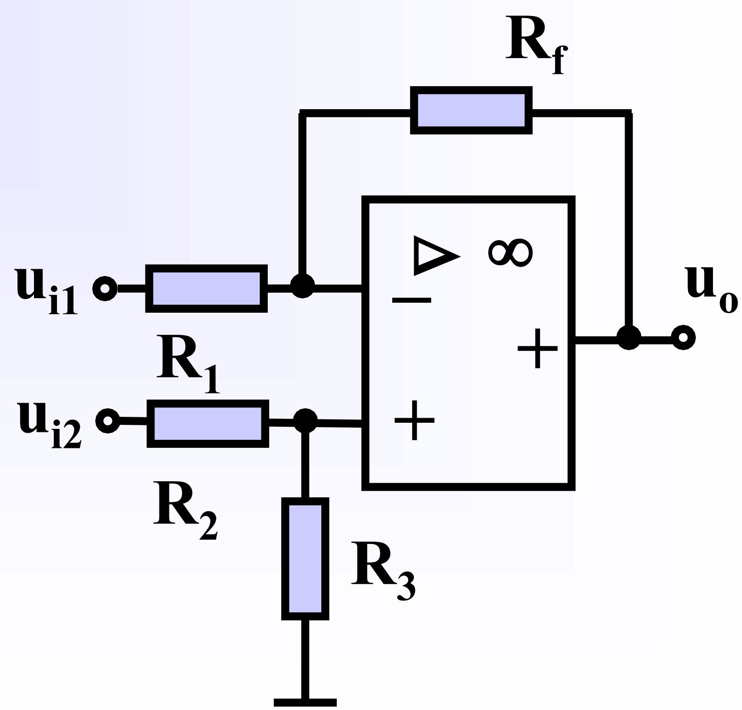
三、 减法运算电路(差动输入)

特点:

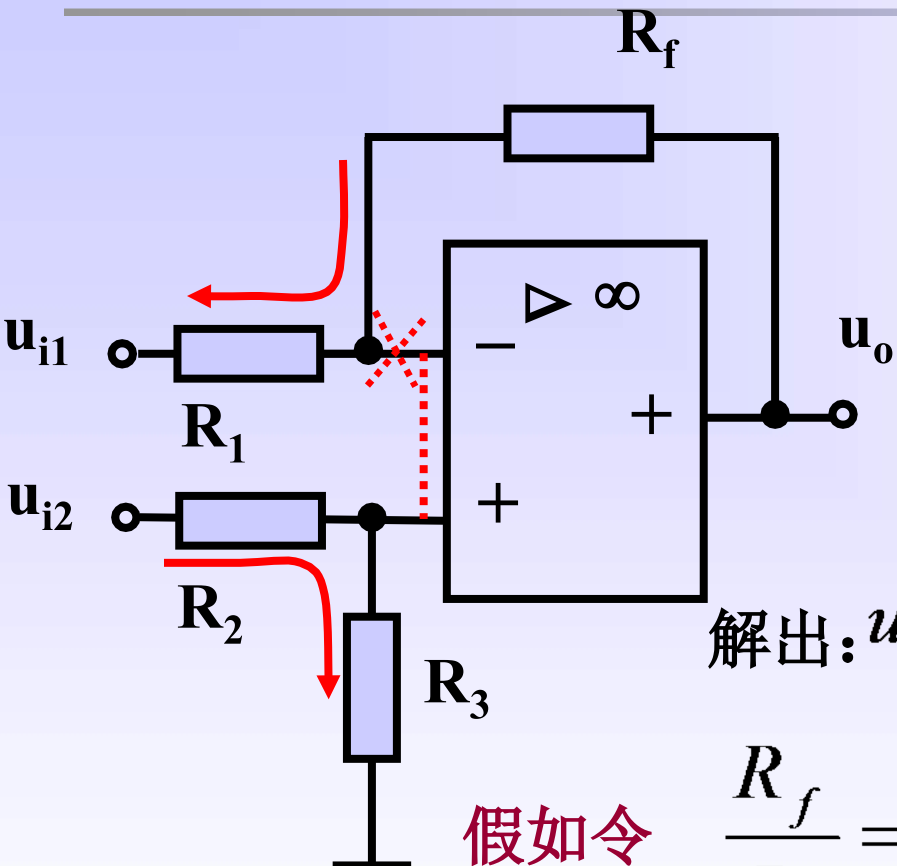
信号分别从同相输入端和反相输入端加入，也称差动输入，

电路不存在“虚地”现象。





分析



$$u_P = u_N \qquad i_N = i_P = 0$$

$$\frac{u_o - u_P}{R_f} = \frac{u_P - u_{i1}}{R_1}$$

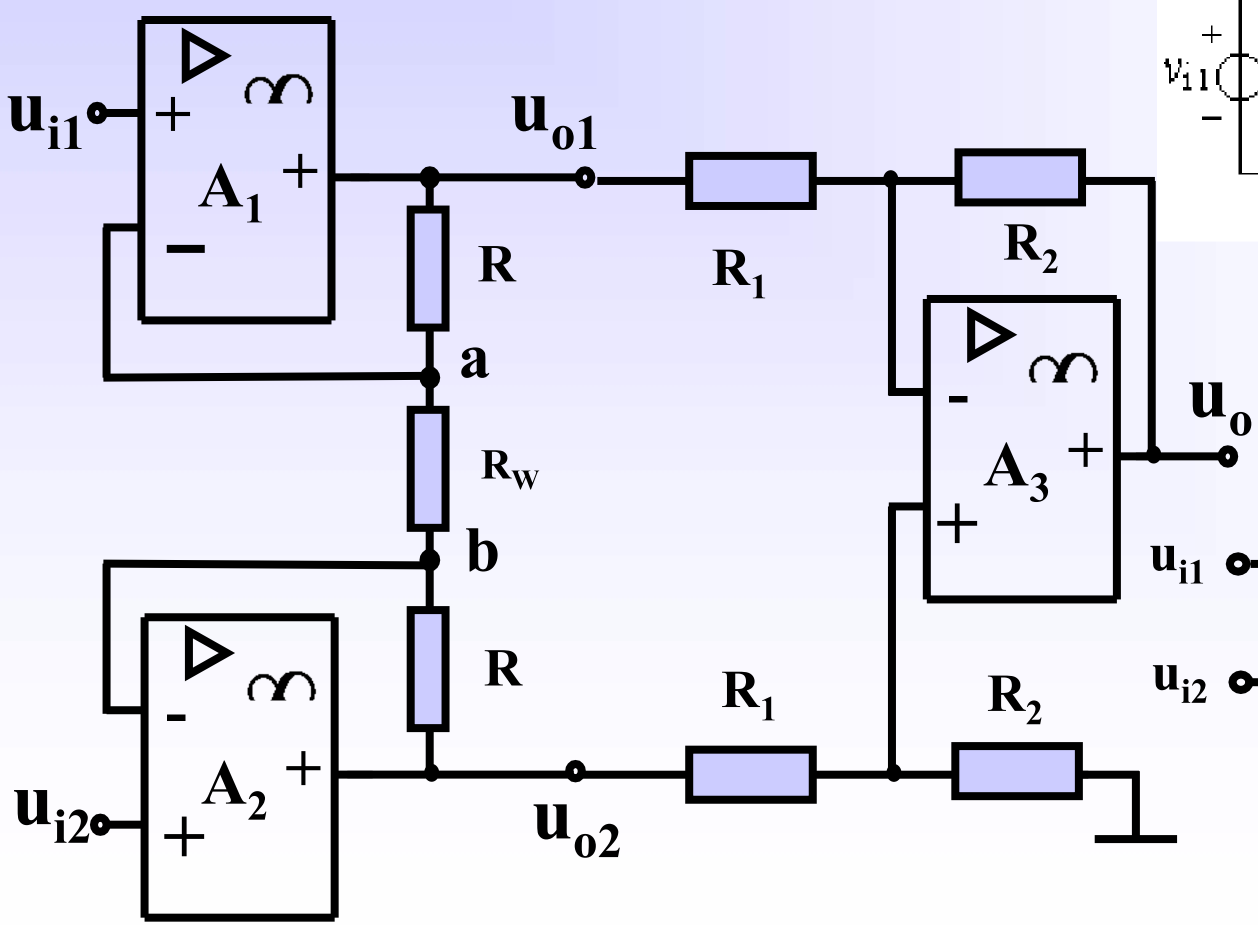
$$u_P = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2}$$

解出：$u_o = (1 + \frac{R_f}{R_1})(\frac{R_3}{R_2 + R_3})u_{i2} - \frac{R_f}{R_1} u_{i1}$

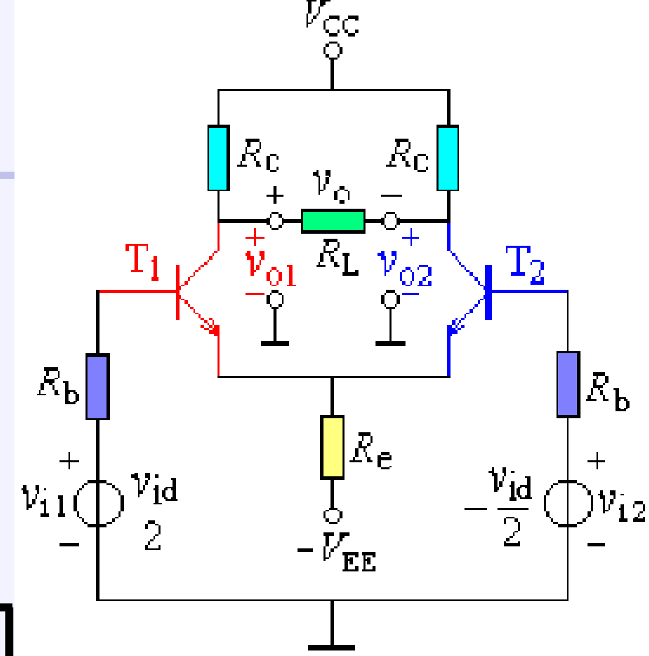
假如令 $\frac{R_f}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$ ⇒ $u_o = \frac{R_f}{R_1}(u_{i2} - u_{i1})$

闭环增益 $A_{uf} = \frac{u_o}{u_{i2} - u_{i1}} = -\frac{R_f}{R_1}$

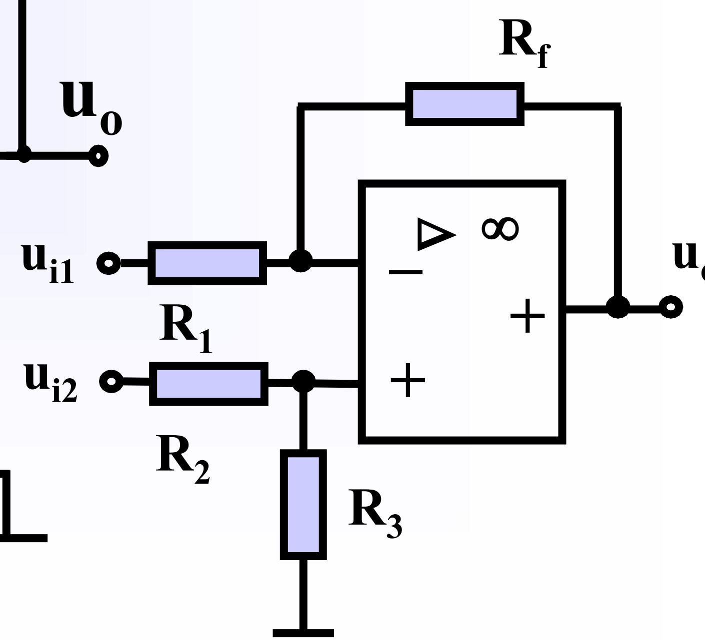
四、 三运放电路



u_i1
A1
u_o1
R
a
Rw
b
R
A2
u_i2
u_o2
R1
R2
R1
R2
A3
u_o

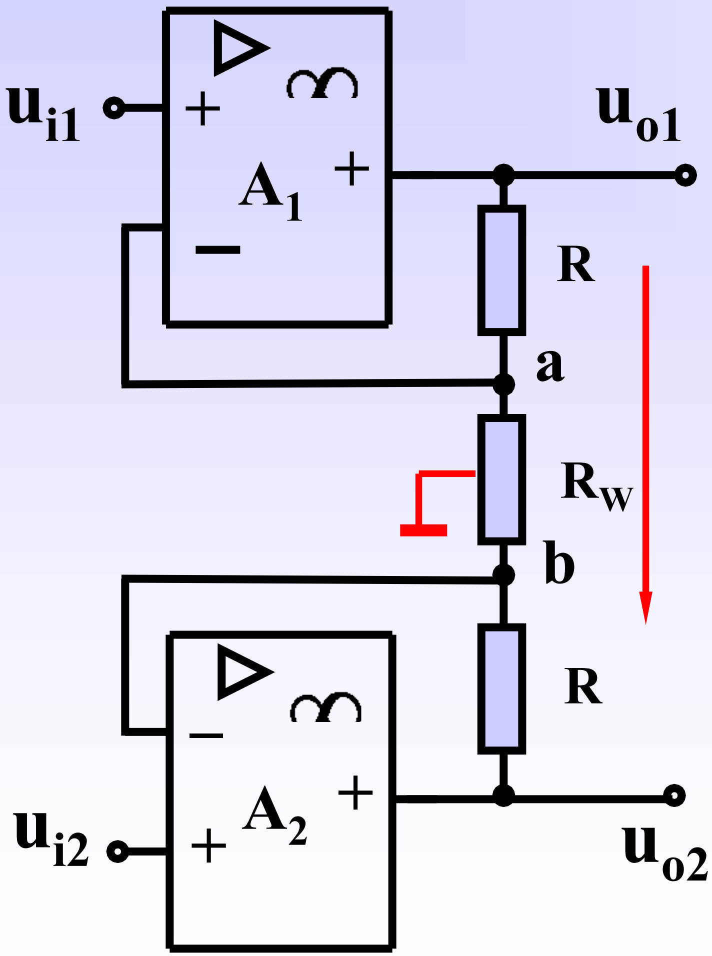


VCC
Rc
Rc
vo
RL
T1
T2
vo1
vo2
Rb
Rb
Re
-VEE
vi1
vid/2
-vid/2
vi2



Rf
u_i1
R1
u_i2
R2
R3
∞

u_{i1}和u_{i2}为差模输入信号，u_{o1}和u_{o2}也是差模信号， R_w的中点为交流零电位。**A3减法运算电路**。



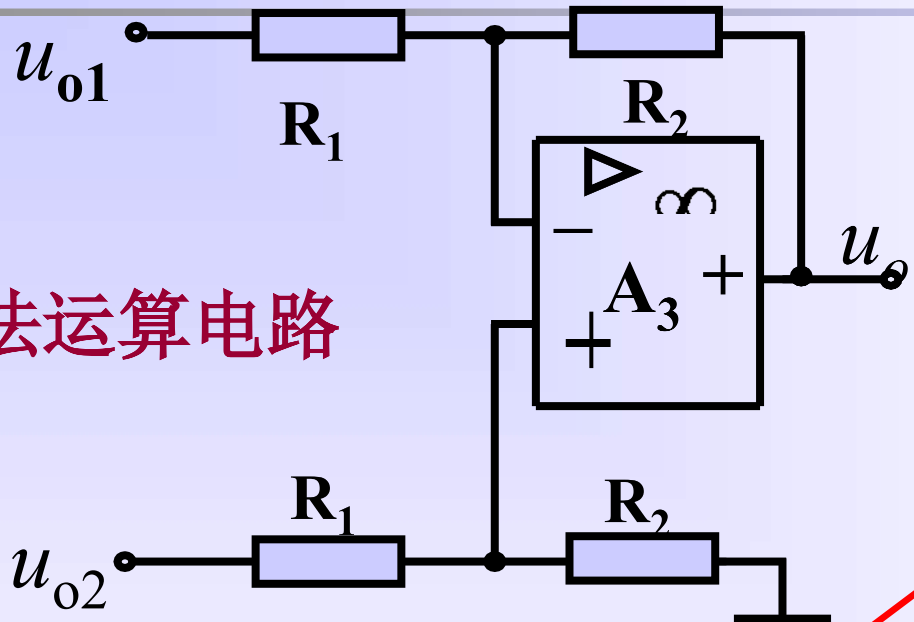
$$u_a = u_{i1} \qquad u_b = u_{i2}$$

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

$$= \frac{u_{i1} - u_{i2}}{R_W}$$

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

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



减法运算电路

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

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

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

讨论

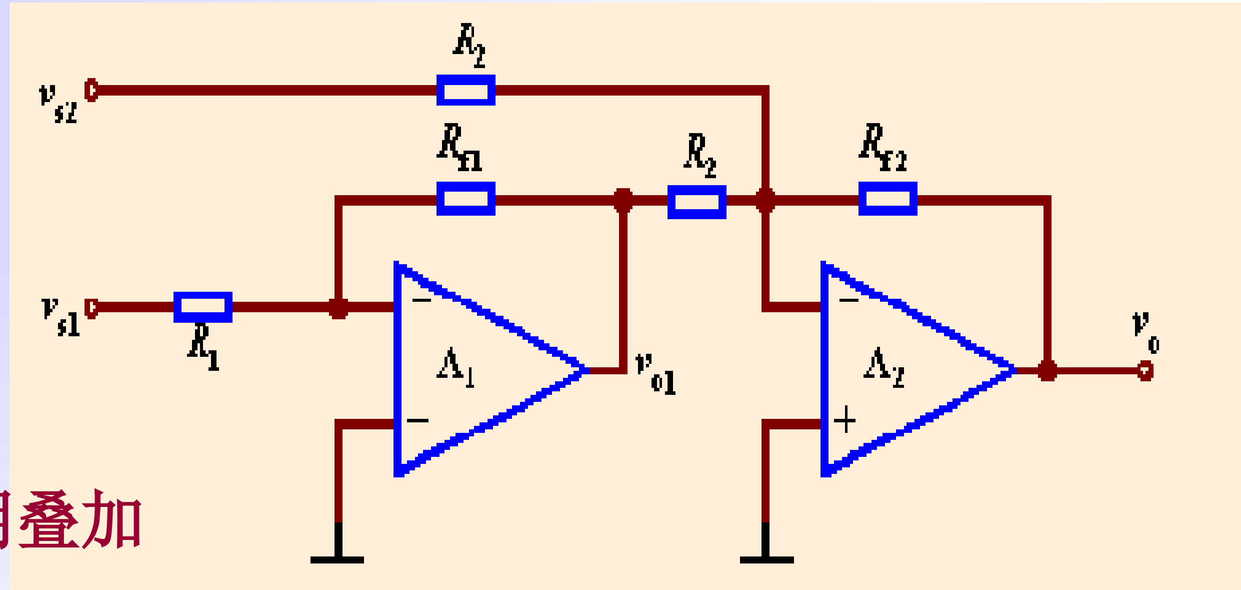
$$u_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{2R + R_W}{R_W}(u_{i2} - u_{i1}) = \frac{R_2}{R_1} \cdot (1 + \frac{2R}{R_W})(u_{i2} - u_{i1})$$

精密放大器

是一种高增益、高输入电阻和高共模克制比的直接耦合放大器，一般具有差动输入，单端输出的形式。用于弱信号放大

调整R_W能够变化放大器的增益。

例 电路如图，设A_1、A_2为理想运放，求输出信号与输入信号之间的函数关系。



解:

第1级反相百分比

$$u_{O1}=-\frac{R_{f1}}{R_1}u_{S1}$$

第2级反相求和　用叠加

$$u_O=-\frac{R_{f2}}{R_2}u_{S2}-\frac{R_{f2}}{R_2}u_{O1}$$

即 $u_O=\frac{R_{f2}}{R_2}\cdot\frac{R_{f1}}{R_1}u_{S1}-\frac{R_{f2}}{R_2}u_{S2}$　当 $R_{f1}=R_1$，$R_{f2}=R_2$ 时

得 $u_O=u_{S1}-u_{S2}$　利用反相求和以实现减法运算

例 电路如图，设A_1、A_2为理想运放，试求输出信号与输入信号之间的函数关系。

解　电路中A_1、A_2为理想运放，由输入端虚短的条件有$V_{P1}=V_{N1}=V_{i1}$、$V_{P2}=V_{N2}=V_{i2}$

各电流值为 $I_1=\frac{V_{i1}}{R_1}$　　$I_3=\frac{V_{i2}-V_{i1}}{R_3}$

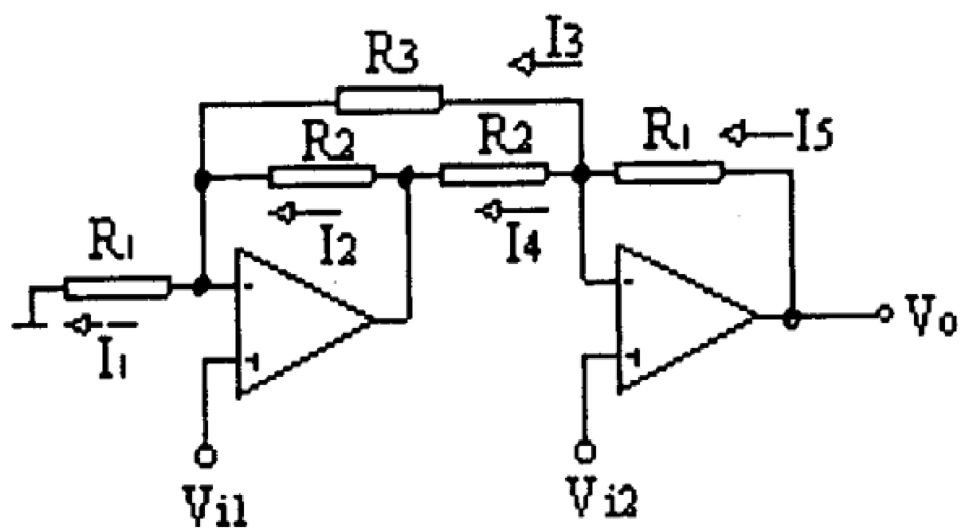
$$I_2=I_1-I_3=\frac{V_{i1}}{R_1}-\frac{V_{i2}-V_{i1}}{R_3} \qquad I_4=\frac{V_{i2}-(I_2\times R_2+V_{i1})}{R_2}$$

又 $I_5=I_3+I_4$

得

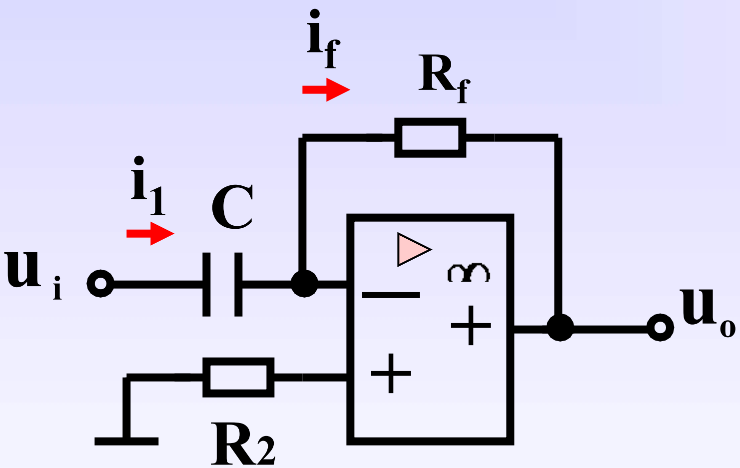
$$V_O=I_5R_1+V_{i2}=(I_3+I_4)\times R_1+V_{i2}$$

$$=\left(1+\frac{R_1}{R_2}+\frac{2R_1}{R_3}\right)(V_{i2}-V_{i1})$$



7.2.3 微积分运算电路

1. 微分运算电路



$$u_N = u_P = 0$$ **虚地!**

$$i_f = -\frac{u_o}{R}$$

$$i_1 = C\frac{du_i}{dt}$$

$$i_1 = i_f$$

⇓

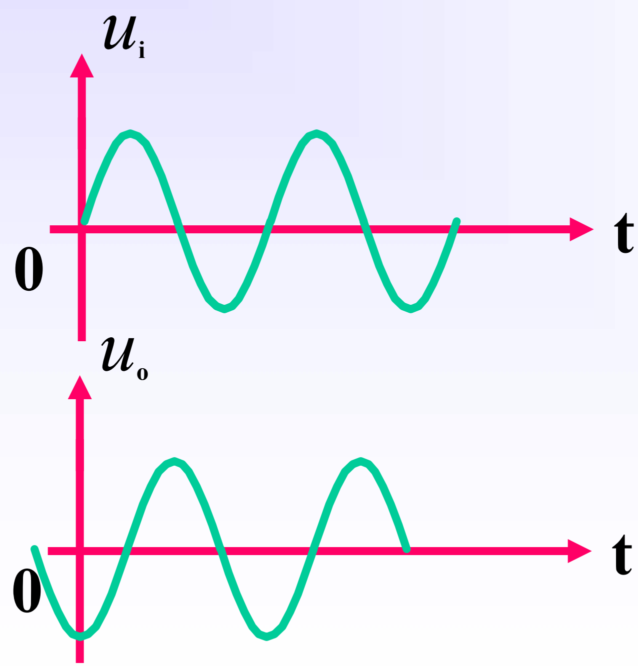
$$u_o = -RC\frac{du_i}{dt}$$

应用举例：

若输入： $u_i = \sin \omega t$ $u_o = -RC\dfrac{du_i}{dt}$

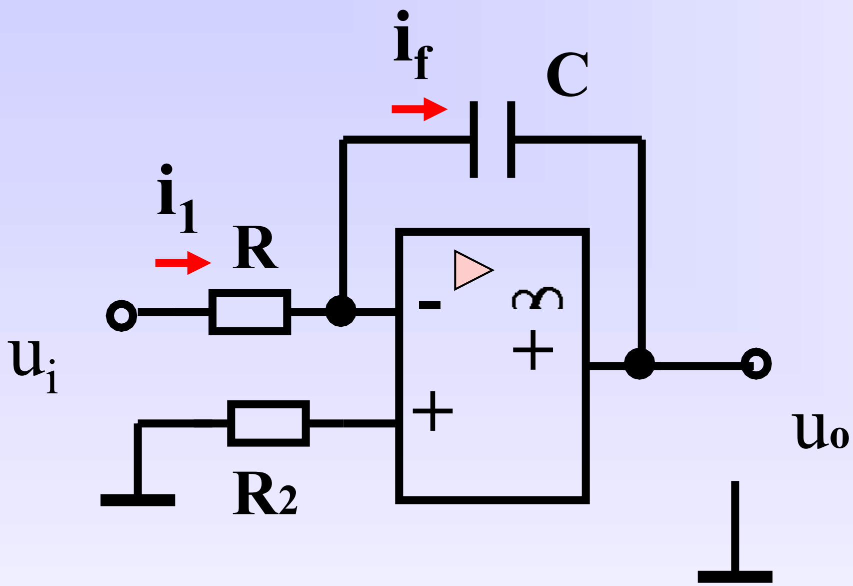
则： $u_o = -RC\cos\omega t$

$= RC\sin(\omega t - 90^{\circ})$



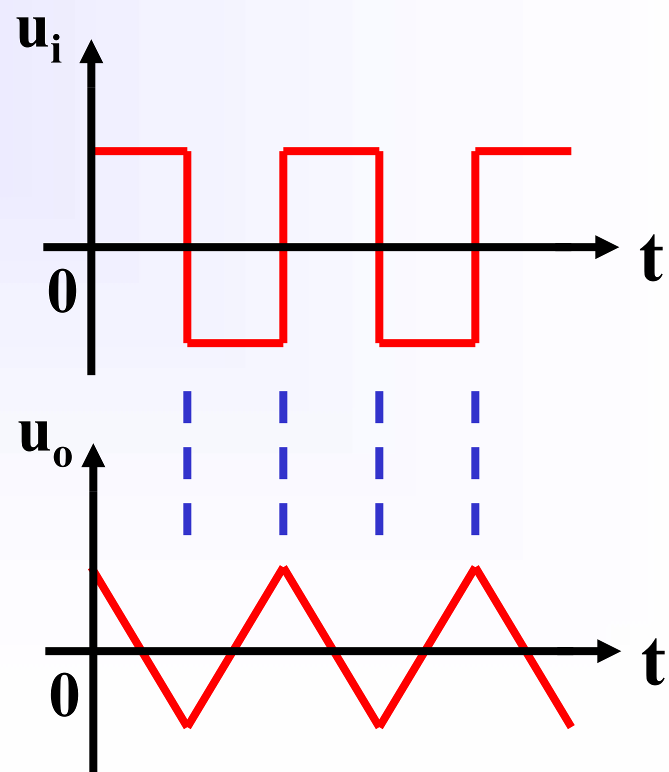
移相

积分运算电路



$$i_1 = \frac{u_i}{R} \qquad i_f = -C\frac{du_o}{dt}$$

$$u_o = -\frac{1}{RC}\int u_i dt$$



应用举例：

(1) 输入方波，输出是三角波 (t_o时刻电容电压为0) 。

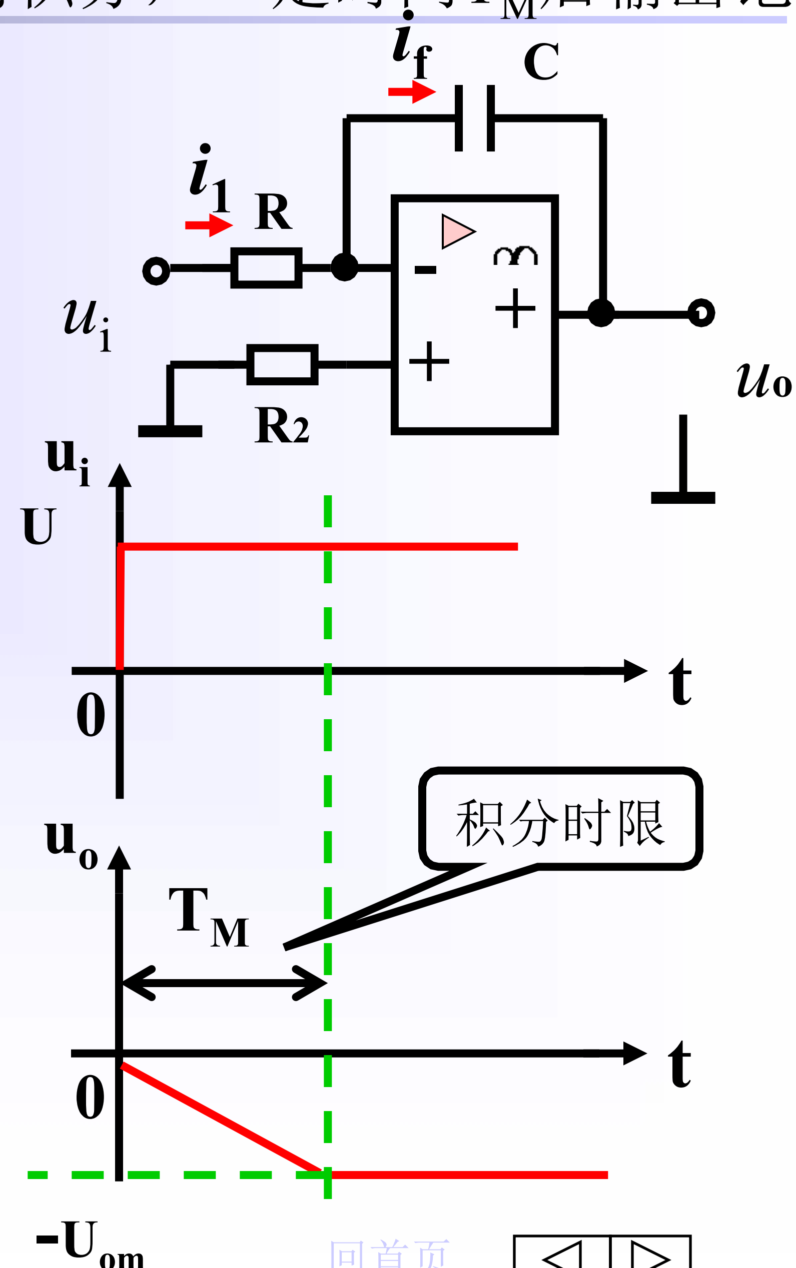
(2) 输入直流电压，输出将反向积分，一定时间T_M后输出饱和,积分停止。

$$u_o = -\frac{1}{RC}\int_0^t U dt$$

$$-U_{om} = -\frac{1}{RC} U T_M$$

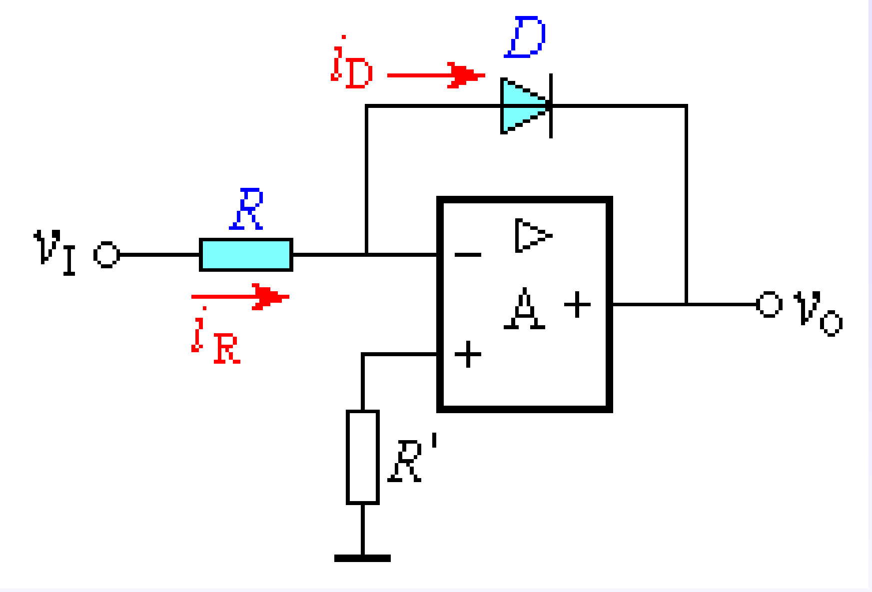
$$T_M = \frac{RCU_{om}}{U}$$

定时！



7.2.4 对数和指数运算电路

对数运算电路



$$u_N = u_P = 0$$

$$u_o = -u_D$$

$$i_N = i_P = 0$$

$$i_R = i_D = \frac{u_I}{R}$$

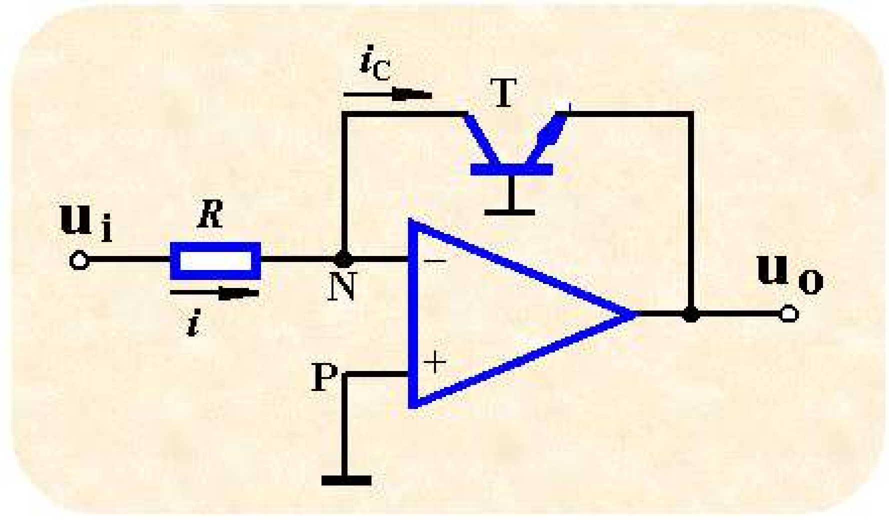
$$i_D = I_S e^{u_D/V_T} = I_S e^{-u_o/V_T}$$

$$u_O = -V_T \ln\frac{i_D}{I_S} = -V_T \ln\frac{u_I}{RI_S}$$

利用三极管实现对数运算

三极管的发射结有

$$i_C = i_E \approx I_S e^{u_{BE}/V_T}$$



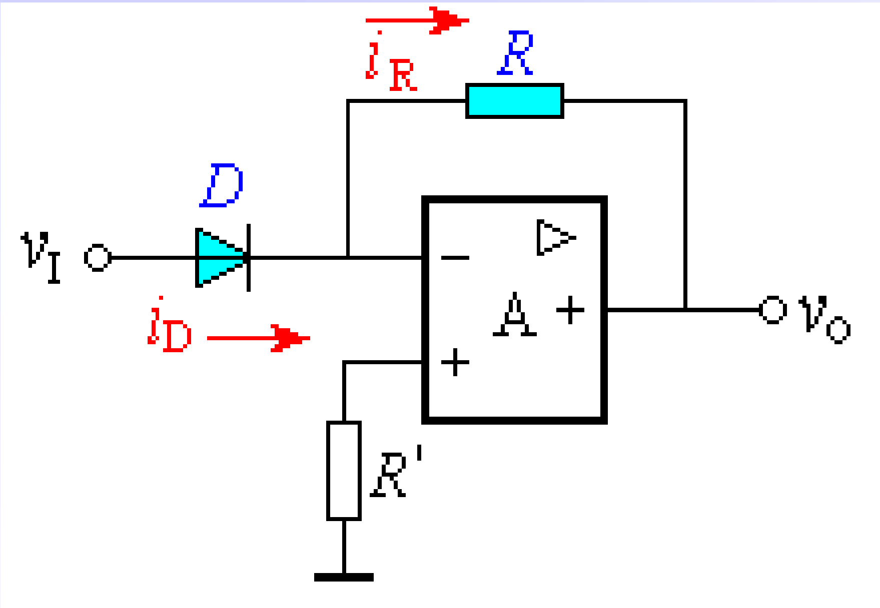
利用虚短和虚断，有

$$\begin{cases} u_O = -u_{BE} \\ i_C = i = \dfrac{u_i}{R} \\ i_C = i_E \approx I_S e^{u_{BE}/V_T} \end{cases} \Rightarrow u_O = -u_{BE} \approx -V_T \ln \frac{u_i}{I_S R}$$

u_O是u_i的对数运算。

注意：u_i必须不小于零，电路的输出电压不不小于0.7伏

指数运算电路



$$u_o = -i_R R = -i_D R$$

$$= -RI_S e^{u_I / V_T}$$

$$= -RI_S \ln^{-1} \frac{u_I}{V_T}$$

指数运算电路相当于反对数运算电路。

课堂练习

1 理想运算放大电路的两个主要结论是________。

a.虚地与反相 b.虚短与虚地 c.虚短与虚断 d.断路和短路

2 集成运放一般分为两个工作区，它们是________工作区。

a.线性与非线性 b.正反馈与负反馈 c.虚短和虚断

3 施加深度负反馈可使运放进入________；使运放开环或加正反馈可使运放进入 ________。

a.非线性区 b.线性工作区

4 集成运放能处理________。

a.交流信号 b.直流信号 c.交流信号和直流信号

5 由理想运放构成的线性应用电路，其电路放大倍数与运放本身的参数________。

a.有关 b.无关 c.有无关系不拟定

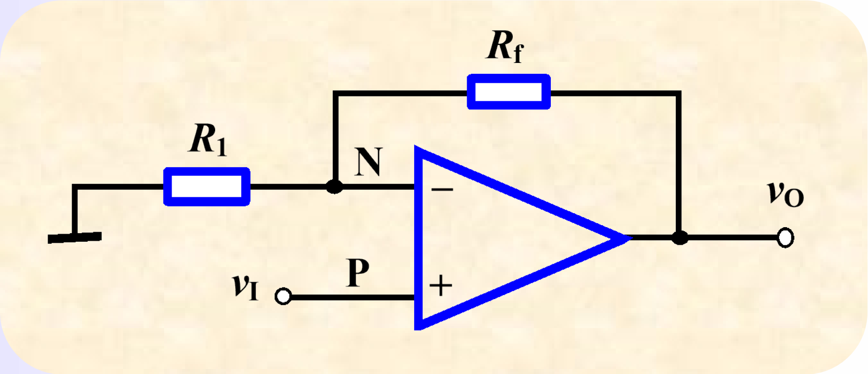
7.2.5 实际运放电路的误差分析

- 共模克制比K_{CMR}为有限值的情况
- 输入失调电压V_{IO}、输入失调电流I_{IO}不为零时的情况

1. 共模克制比K_{CMR}为有限值的情况

同相百分比运算电路

$$\begin{cases} v_P = v_I \\ v_N = v_O \dfrac{R_1}{R_1 + R_f} \\ v_{IC} = \dfrac{v_P + v_N}{2} \\ v_{ID} = v_P - v_N \\ v_O = A_{vD} v_{ID} + A_{vC} v_{IC} \\ K_{CMR} = \dfrac{A_{vD}}{A_{vC}} \end{cases}$$



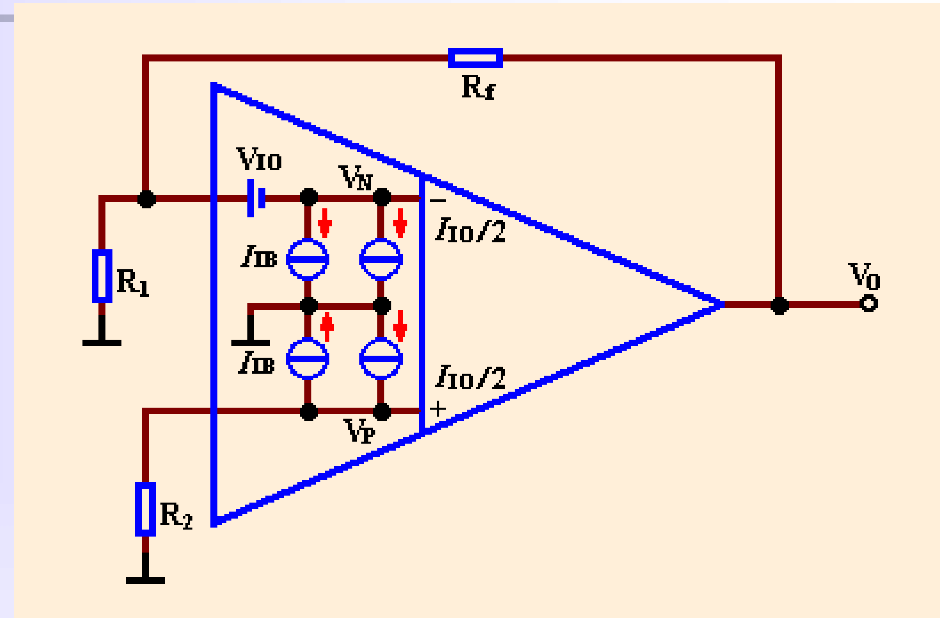
闭环电压增益 $A_{vF} = \dfrac{v_O}{v_I} = (1 + \dfrac{R_f}{R_1}) \cdot \dfrac{1 + \dfrac{1}{2K_{CMR}}}{1 + \dfrac{(R_1 + R_f)/R_1}{A_{vD}} - \dfrac{1}{2K_{CMR}}}$

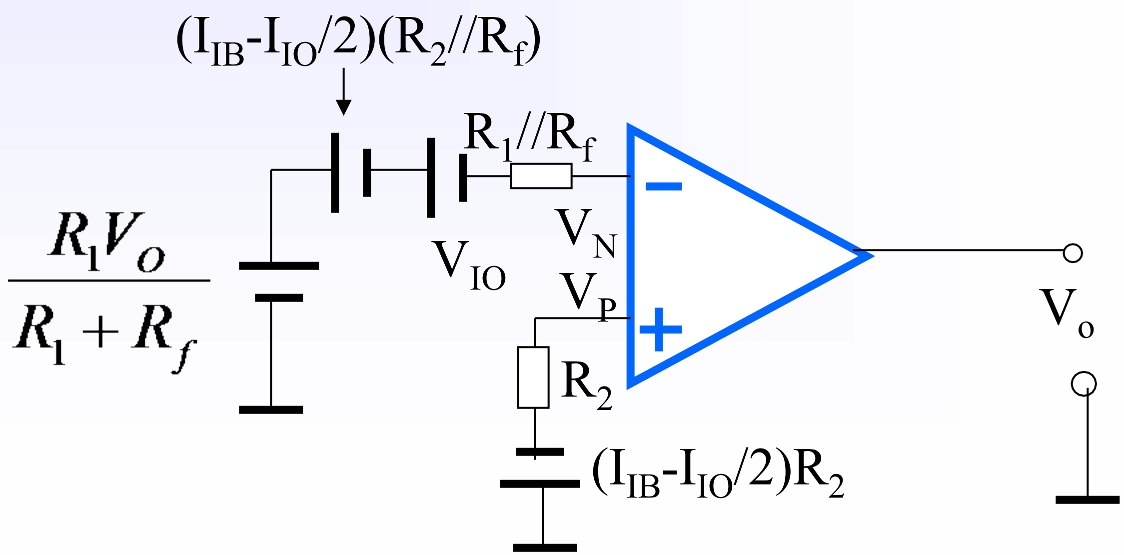
理想情况 $A_{vF} = 1 + \dfrac{R_f}{R_1}$ A_{vD} 和 K_{CMR} 越大，误差越小。

2. 输入失调电压V_{IO}、输入失调电流I_{IO}不为零时的情况

输入为零时的等效电路

$$
\begin{cases}
V_P = -(I_{IB} - \dfrac{I_{IO}}{2})R_2 \\
V_N = V_O \dfrac{R_1}{R_1 + R_f} \\
\quad -(I_{IB} + \dfrac{I_{IO}}{2})(R_1 // R_f) \\
\quad -V_{IO} \\
V_P \approx V_N
\end{cases}
$$





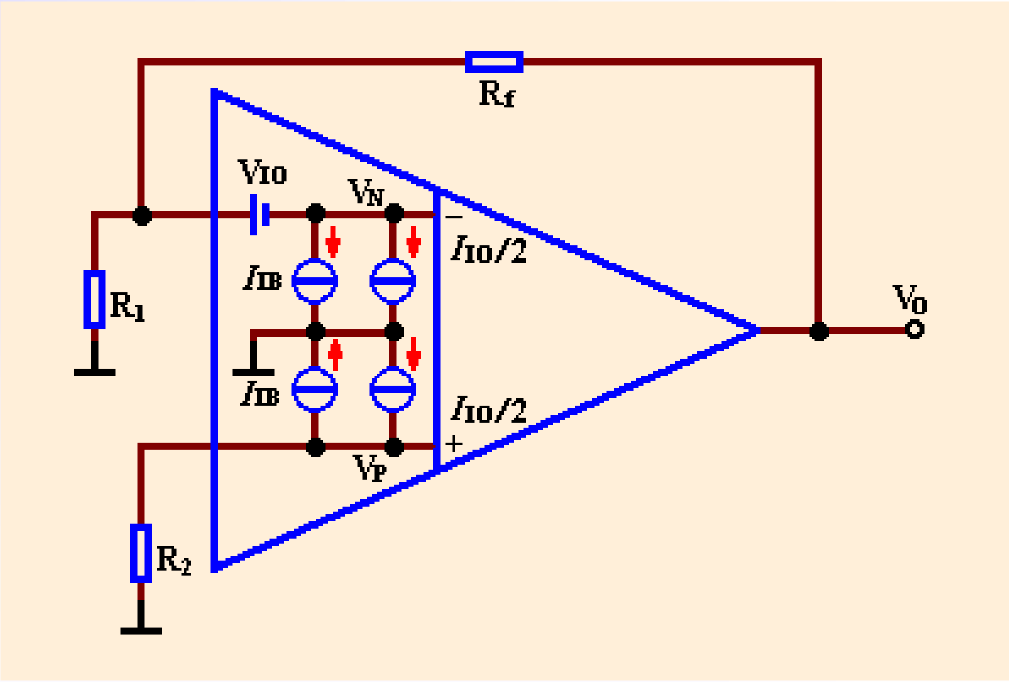
解得误差电压

$$V_O = (1 + R_f / R_1)\left[V_{IO} + I_{IB}(R_1 // R_f - R_2) + \frac{1}{2} I_{IO}(R_1 // R_f + R_2)\right]$$

当 $R_2 = R_1 // R_f$ 时，能够消除偏置电流 I_{IB} 引起的误差，此时

$$V_O = (1 + R_f / R_1)(V_{IO} + I_{IO} R_2)$$

V_{IO} 和 I_{IO} 引起的误差仍存在



当电路为积分运算时，

即 R_f 换成电容 C，则

$$v_O(t) = (1 + \frac{R_f}{R_1})\left\{\left[V_{IO}(t) + I_{IO}(t) R_2\right] + \frac{1}{R_1 C}\left[\int V_{IO}(t)dt + \int I_{IO}(t) R_2 dt\right]\right\}$$

时间越长，误差越大，且易使输出进入饱和状态。