

◇ X为电压或电流

◇ 输入/净输入

增益

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{开环增益 } A = \frac{X_o}{X_i} \quad \text{反馈系数} \\ \text{回路增益 } A\dot{F} = \frac{X_o}{X_i} \cdot \left(\frac{X_f}{X_o} \right) = \frac{X_f}{X_i} \\ \text{闭环增益 } A_f = \frac{X_o}{X_s} \\ X_i = X_s - X_f \Rightarrow A_f = \frac{A}{1 + A\dot{F}} \rightarrow \text{反馈深度} \end{array} \right.$$

若 $\left\{ \begin{array}{l} |1 + A\dot{F}| > 1 \quad \text{负反馈} \\ |1 + A\dot{F}| < 1 \quad \text{正反馈} \\ |1 + A\dot{F}| = 0 \quad \text{自激振荡} \end{array} \right.$

当 $|1 + A\dot{F}| \gg 1$ 时, 深度负反馈, $A_f \approx \frac{1}{F}$

按反馈极性分: 正反馈、负反馈

按取样方式分: 电压反馈、电流反馈

按求和方式分: 并联反馈、串联反馈 (相对输入回路)

按反馈通路分: 直流反馈、交流反馈

按反馈路径个数分: 单环反馈、多环反馈

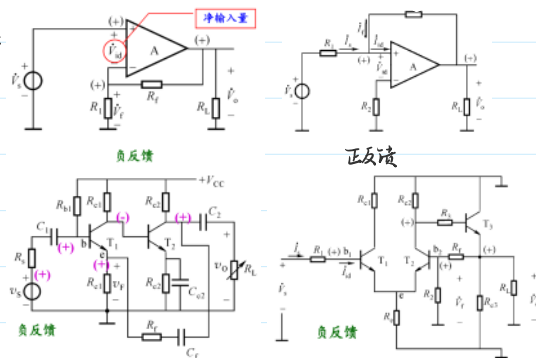
反馈组态	开环增益	物理意义	反馈系数	物理意义
电压串联	$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}$	电压增益	$\dot{F}_v = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o}$	电压传输比
电压并联	$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_i}$	电压增益	$\dot{F}_v = \frac{\dot{I}_f}{\dot{V}_o}$	互阻传输比
电流串联	$\dot{A}_s = \frac{\dot{I}_o}{\dot{V}_i}$	电流增益	$\dot{F}_s = \frac{\dot{V}_f}{\dot{I}_o}$	互阻传输比
电流并联	$\dot{A}_s = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$	电流增益	$\dot{F}_s = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o}$	电流传输比

基本概念

极性

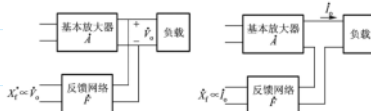
使用瞬时极性法

例:



方法一

方法1: 根据输出回路对电压或电流的取样方式确定。



◇ 基本放大器、负载、反馈网络三者并联, 为电压反馈;

◇ 三者串联为电流反馈。

组态

方法二: 根据反馈表达式

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{电压: } X_f = F \cdot V_o \\ \text{电流: } X_f = F \cdot I_o \end{array} \right.$$

组态

取样

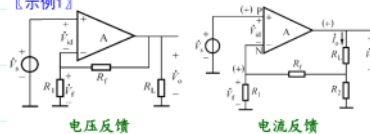
方法二：根据反馈表达式

电流： $X_f = I_o$

方法三：有公共地时，

- 若负载与反馈从放大器件的同一输出端接出，则为电压反馈。
- 若负载与反馈从放大器件的不同输出端接出，或负载没有直接接地，则为电流反馈。

【示例1】



电压反馈

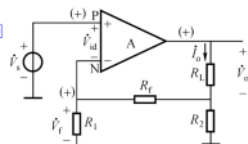
电流反馈

方法4：推论（负载短路法）

方法四：

- 将放大电路的负载短路 ($R_L=0$)，若输入回路中仍然存在反馈量 ($X_f \neq 0$)，则为电流反馈；
- 若输入回路中不存在反馈 ($X_f = 0$)，则为电压反馈。

【示例】



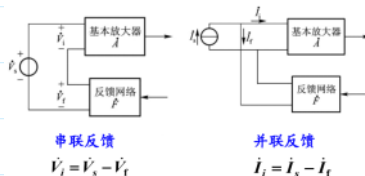
$R_L=0$ 时，反馈仍然存在，所以是电流反馈。

方法一：根据输入回路连接方式

- 基本放大器、信号源、反馈网络三者串联，为串联反馈；
- 三者并联为并联反馈。

方法二：根据求和表达式

- 若以电压量进行比较求和，则为串联反馈。
- 若以电流量进行比较求和，则为并联反馈。



串联反馈

并联反馈

$V_i = V_s - V_f$

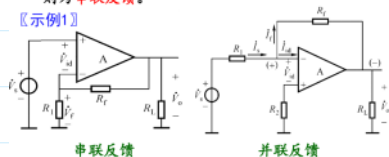
$I_i = I_s - I_f$

求和

方法三：有公共地时，

- 若输入信号与反馈接到放大器件的同一输入端，则为并联反馈。
- 若输入信号与反馈接到放大器件的不同输入端，则为串联反馈。

【示例1】



串联反馈

并联反馈

负反馈对放大电路性能的影响

提高闭环增益稳定性

改善放大电路的非线性

抑制温漂、噪声、干扰

扩展通频带

对输入电阻的影响

串联

$R_{if} \uparrow$

深度 = ∞

采用电压源做负载

并联

$R_{if} \downarrow$

深度 = 0

采用电压源做负载

对输出电阻的影响

电压

$R_{of} \downarrow$

深度 = 0

R_L 尽可能大

电流

$R_{of} \uparrow$

深度 = ∞

R_L 尽可能小

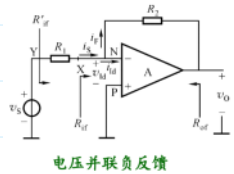
深度负反馈:

$$|1 + A\dot{F}| \gg 1$$

此时 $x_i \rightarrow 0$, 即虚短 / 虚断

比例运算电路

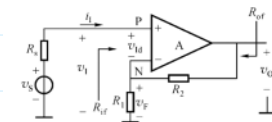
反相输入方式



$$\begin{aligned} v_o &= -i_f R_2 \\ i_f &= i_s = v_s / R_1 \\ v_o &= -\frac{R_2}{R_1} v_s \\ R_{if} &= v_{id} / i_s \rightarrow 0 \\ R_{if}' &= v_s / i_s = R_1 \\ R_{of} &\rightarrow 0 \end{aligned}$$

电压并联负反馈

同相输入方式



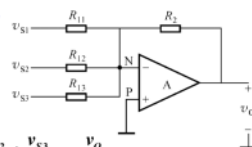
电压串联负反馈

$$\begin{aligned} v_F &= \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o = v_s \\ v_o &= \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_s \\ A_f &= \frac{v_o}{v_s} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \\ R_{if} &\rightarrow \infty \\ R_{of} &= \frac{R_o}{1 + A\dot{F}} \rightarrow 0 \end{aligned}$$

当 R_1 开路时, $v_o = v_s$, 又称电压跟随器。

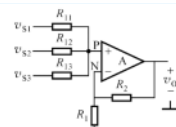
求和运算电路

反相输入



$$\begin{aligned} \frac{v_{S1}}{R_{11}} + \frac{v_{S2}}{R_{12}} + \frac{v_{S3}}{R_{13}} &= -\frac{v_o}{R_2} \\ v_o &= -\left(\frac{R_2}{R_{11}} v_{S1} + \frac{R_2}{R_{12}} v_{S2} + \frac{R_2}{R_{13}} v_{S3}\right) \end{aligned}$$

同相输入



$$\begin{aligned} v_F &= \frac{R_2 // R_{13}}{R_1 + R_2 // R_{13}} v_{S1} + \frac{R_2 // R_{12}}{R_1 + R_2 // R_{13}} v_{S2} + \frac{R_2 // R_{11}}{R_1 + R_2 // R_{13}} v_{S3} \\ &= (R_1 // R_{12} // R_{13}) \left(\frac{v_{S1}}{R_{11}} + \frac{v_{S2}}{R_{12}} + \frac{v_{S3}}{R_{13}} \right) \end{aligned}$$

集成运放构成的负反馈电路分析

差分放大电路

$$v_P = \frac{R_{12} // R_{13}}{R_{11} + R_{12} // R_{13}} v_{S1} + \frac{R_{11} // R_{13}}{R_{12} + R_{11} // R_{13}} v_{S2} + \frac{R_{11} // R_{12}}{R_{13} + R_{11} // R_{12}} v_{S3}$$

$$= (R_{11} // R_{12} // R_{13}) \left(\frac{v_{S1}}{R_{11}} + \frac{v_{S2}}{R_{12}} + \frac{v_{S3}}{R_{13}} \right)$$

$$v_O = (1 + \frac{R_2}{R_1}) v_N = (1 + \frac{R_2}{R_1}) (R_{11} // R_{12} // R_{13}) \left(\frac{v_{S1}}{R_{11}} + \frac{v_{S2}}{R_{12}} + \frac{v_{S3}}{R_{13}} \right)$$

双端输入

$$v_P = \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{S3} + \frac{R_3}{R_3 + R_4} v_{S4}$$

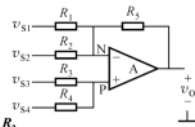
$$v_N = \frac{R_2 // R_5}{R_1 + R_2 // R_5} v_{S1}$$

$$+ \frac{R_1 // R_5}{R_2 + R_1 // R_5} v_{S2} + \frac{R_1 // R_2}{R_5 + R_1 // R_2} v_O$$

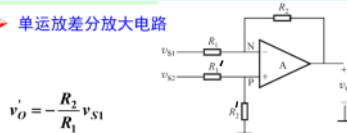
$$v_O = - \frac{R_5 + R_1 // R_2}{R_1 // R_2} \left(\frac{R_2 // R_5}{R_1 + R_2 // R_5} v_{S1} + \frac{R_1 // R_5}{R_2 + R_1 // R_5} v_{S2} \right)$$

$$+ \frac{R_5 + R_1 // R_2}{R_1 // R_2} \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{S3} + \frac{R_3}{R_3 + R_4} v_{S4} \right)$$

$$= - \frac{R_5}{R_1} v_{S1} - \frac{R_5}{R_2} v_{S2} + (1 + \frac{R_5}{R_1 // R_2}) \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{S3} + \frac{R_3}{R_3 + R_4} v_{S4} \right)$$



单运放差分放大电路



$$v_O' = - \frac{R_2}{R_1} v_{S1}$$

$$v_O'' = (1 + \frac{R_2}{R_1}) \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{S2} = \frac{R_2}{R_1} v_{S2}$$

$$v_O = - \frac{R_2}{R_1} v_{S1} + (1 + \frac{R_2}{R_1}) \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{S2}$$

$$v_O = v_O' + v_O'' = \frac{R_2}{R_1} (v_{S2} - v_{S1})$$

三运放测量放大电路

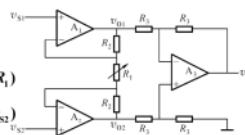
对于获取信号的仪用测量放大器，要求：高输入阻抗、高共模抑制比、低漂移、低噪声、低输出电阻，通常采用三运放的差分放大电路。

$$i_{R1} = \frac{v_{S1} - v_{S2}}{R_1}$$

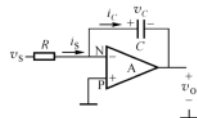
$$v_{O1} - v_{O2} = i_{R1} (2R_2 + R_1)$$

$$= (1 + \frac{2R_2}{R_1}) (v_{S1} - v_{S2})$$

$$v_O = v_{O2} - v_{O1} = (1 + \frac{2R_2}{R_1}) (v_{S2} - v_{S1})$$



积分运算



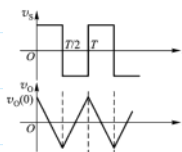
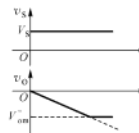
$$i_S = i_C$$

$$\frac{v_S}{R} = -C \cdot \frac{dv_O}{dt}$$

$$\text{设 } v_C(0)=0, \text{ 则 } v_O = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_S dt$$

若输入阶跃信号，则

$$v_O = -\frac{V_S}{RC} t$$



若输入方波，则输出三角波。

$$v_O(t_2) = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} v_S dt + v_O(t_1)$$

积分运算电路

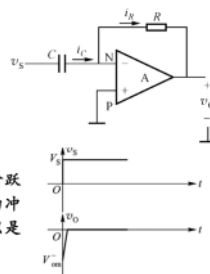
微分运算

$$i_R = i_C = C \frac{dv_S}{dt}$$

$$v_O = -i_R \cdot R$$

$$= -RC \frac{dv_S}{dt}$$

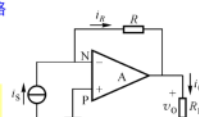
若输入为一个阶跃信号，输出理论上为冲击函数，而实际上只是一种尖顶波。



微分运算电路

电流-电压变换电路

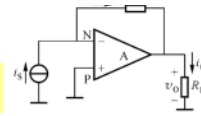
为什么要引入电压源？



电流→电压变换

电流→电压变换

为什么要引入电压并联负反馈？



$$v_o = -i_s \cdot R \quad \text{与负载 } R_L \text{ 无关。}$$

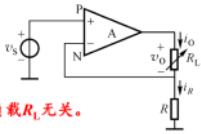
该电路还可以作为电流放大器使用。

电压→电流变换

电压-电流变换电路

应该引入什么组态的负反馈？

负载不接地：

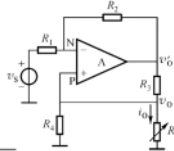


$$i_o = i_R = \frac{v_s}{R}$$

$$i_o = \frac{1}{R} v_s \quad \text{与负载 } R_L \text{ 无关。}$$

有些电路要求负载接地，这时应该如何引入反馈？

负载接地时：



$$v_N = v_s \frac{R_2}{R_1 + R_2} + v_o \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$v_P = v_o = v_o \frac{R_4 // R_L}{R_3 + R_4 // R_L} = i_o R_L$$

$$i_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{v_s}{R_3 + \frac{R_4 R_L}{R_4 + R_L} - \frac{R_2}{R_1} R_L}$$

$$\text{当 } \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4} \text{ 时, } i_o = -\frac{1}{R_4} v_s \quad \text{与负载 } R_L \text{ 无关。}$$

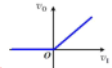
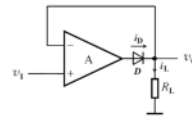
精密半波整流

精密半波整流电路

当 $v_i > 0$ 时， D 导通，运放为电压跟随器， $v_o = v_i$ 。

当 $v_i < 0$ 时， D 截止，反馈回路断开， $v_o = 0$ 。

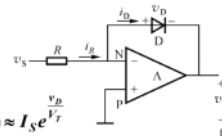
电压传输特性如图。



精密全波整流电路（略，自学）

对数运算电路

对数运算电路



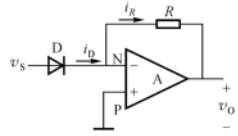
$$i_D = I_S (e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1) \approx I_S e^{\frac{v_D}{V_T}}$$

$$i_R = \frac{v_s}{R} = i_D = I_S e^{\frac{v_D}{V_T}}$$

$$v_o = -v_D = -V_T \ln \frac{v_s}{R \cdot I_S}$$

指数运算电路

指数运算电路



$$v_o = -i_R \cdot R = -i_D \cdot R = -I_S R \cdot e^{v_s/V_T}$$

自激振荡

$$|A\dot{F}| = 1$$

⇒ 幅值

$$\Delta\varphi_{AF} = \Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F = \pm(2n+1)\pi$$

⇒ 相位

稳定性

稳定判据

① 当 $\Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F = \pm 180^\circ$ 时，若 $|A\dot{F}| < 1$ ，则稳定

② 当 $|A\dot{F}| = 1$ 时，若 $|\Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F| < 180^\circ$ ，则稳定

| ② 当 $|AF| = 1$ 时, 若 $|\Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F| < 180^\circ$, 则稳定

稳定裕度

$$\begin{cases} \text{增益裕度 } G_m & G_m \leq -10\text{dB} \\ \text{相位裕度 } \varphi_m & \varphi_m > 45^\circ \end{cases}$$