

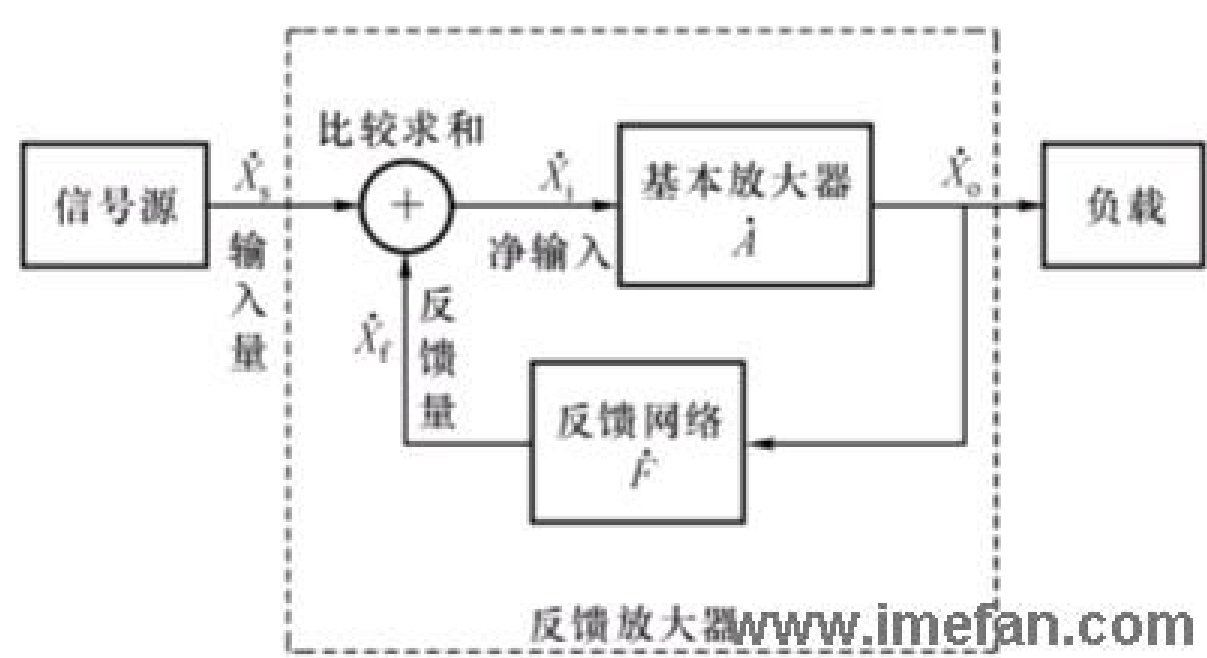
# 反馈放大电路及其应用

## 反馈的基本概念与分类

### 反馈基本概念

反馈: 放大器输出电量 (电压或电流) 中的一部分 (或全部), 通过一定的电路形式 (称反馈网络), 送回到输入回路, 与原输入信号一起加到放大器的净输入端, 从而使输出电量得以自动调节。

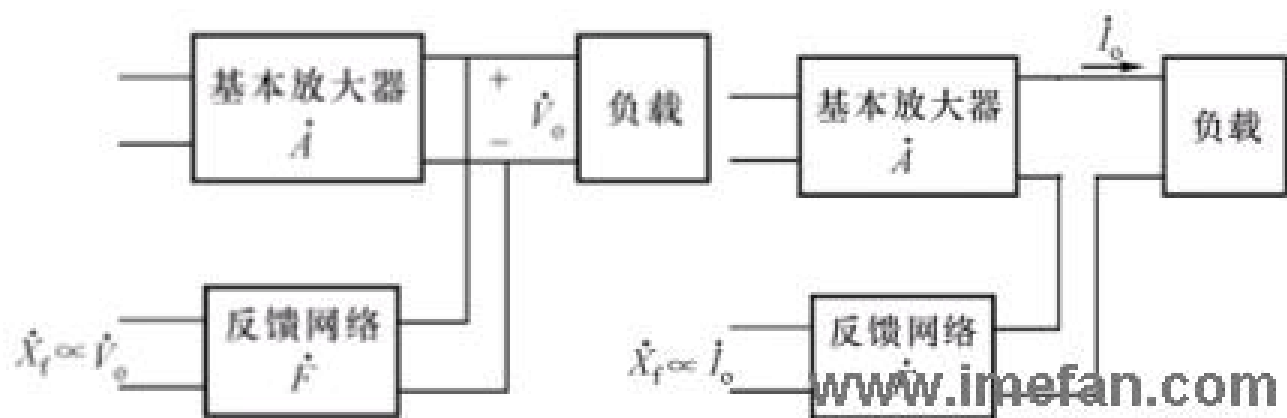
反馈放大器框图表示:



输出电量  $\dot{X}_o$  中的一部分经过反馈网络, 产生反馈量  $\dot{X}_f$ , 送回到输入回路中, 与输入量  $\dot{X}_s$ , 比较求和后, 产生净输入信号  $\dot{X}_i$ , 再由基本放大器放大, 送到输出, 从而形成闭环。虚线内的整个放大器就称为反馈放大器。其中电量  $X$ , 可能是电流量, 也可能是电压量, 由反馈网络与放大电路的输出/输入连接方式决定。

反馈网络: 它向输出电路索取电量, 并将该电量转换成与原输入量纲一致的电量。

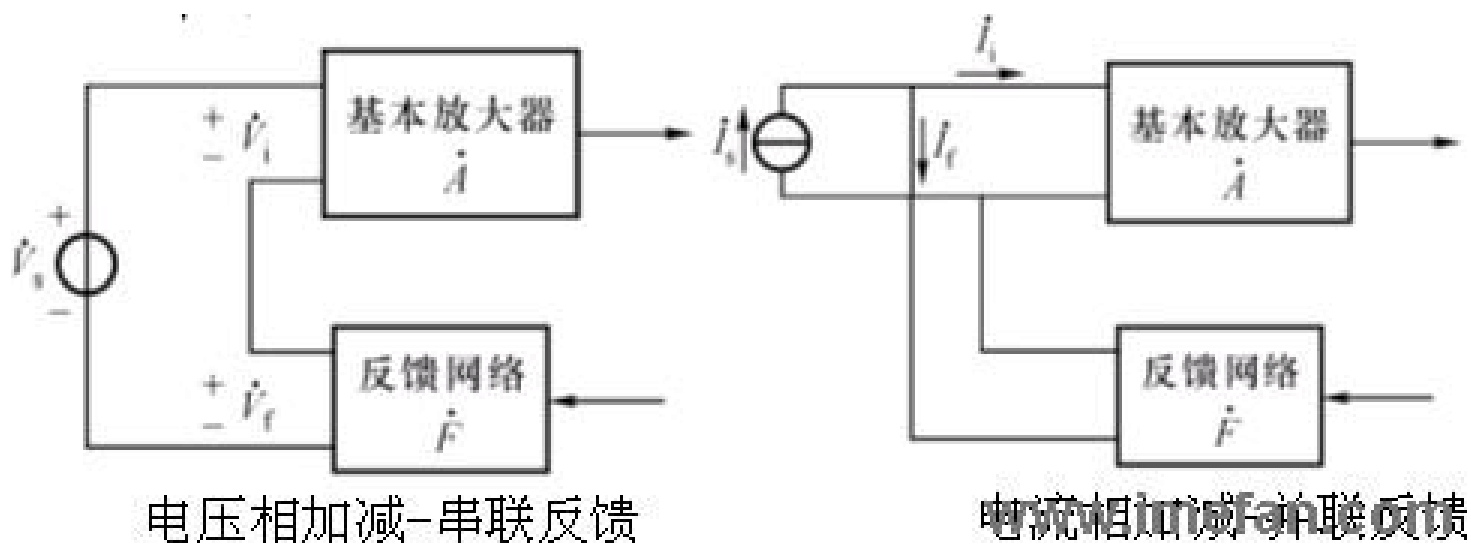
两种取样电路:



电压取样，反馈信号与输出电压成正比-电压反馈；电流取样，反馈信号与输出电流成正比-电流

反馈。由于输入量  $\dot{X}_i$ ，可能是电压量，也可能是电流量，反馈量  $\dot{X}_f$  只有与输入量的量纲相一致时，才能求和，所以，反馈网络还承担信号的变换作用。

比较求和电路：输入量与反馈量在相同的电量下相加减。也有两种电路，如图所示：



串联反馈时  $\dot{V}_i = \dot{V}_s - \dot{V}_f$ ，并联反馈时  $\dot{I}_i = \dot{I}_s - \dot{I}_f$ 。

比较求和后，净输入增加时—正反馈；比较求和后，净输入减少时—负反馈。正反馈一般用在振荡器中，而负反馈通常用在放大器中，以改善放大器的性能指标。

根据取样到的电量和比较求和的电量不同，反馈放大器有以下的分类：

电压反馈：反馈信号与输出电压成正比， $\dot{X}_f \propto \dot{V}_o$ 。

电流反馈：反馈信号与输出电流成正比， $\dot{X}_f \propto \dot{I}_o$ 。

串联反馈：反馈信号是电压，因此与输入信号  $\dot{X}_f = \dot{V}_f$  电压求和，即  $\dot{V}_i = \dot{V}_s - \dot{V}_f$ 。

并联反馈：反馈信号是电流，因此与输入信号电流求和。即  $\dot{I}_i = \dot{I}_s - \dot{I}_f$ 。

正反馈：反馈后，使净输入电量增加，即  $\dot{X}_i = \dot{X}_s + \dot{X}_f$ 。

负反馈：反馈后，使净输入电量减小，即  $\dot{X}_i = \dot{X}_s - \dot{X}_f$ 。

交流反馈：仅存在交流反馈量的反馈。直流反馈：仅存在直流反馈量的反馈。主要应分清楚下面四种反馈：

1. 电压串联负反馈，且反馈量为电压  $\dot{V}_f$  只有在  $\dot{V}_s$  为电压量的情况下，才能与输入信号电压  $\dot{V}_s$  相串联连接，即  $\dot{V}_i = \dot{V}_s - \dot{V}_f$ 。

2. 电压并联反馈

反馈量  $\dot{I}_f$  为电流量。只有在  $\dot{I}_s$  为电流量  $\dot{I}_s$  的情况下，才能与输入信号电流  $\dot{I}_s$  相并联，即  $\dot{I}_i = \dot{I}_s - \dot{I}_f$ 。

3. 电流串联反馈：

反馈量  $\dot{V}_f$  为电压量，只有在  $\dot{V}_s$  为电压量的情况下，才能与输入信号电压  $\dot{V}_s$  相串联，即  $\dot{V}_i = \dot{V}_s - \dot{V}_f$ 。

4. 电流并联反馈：

反馈量  $\dot{I}_f$  为电流量，只有在  $\dot{I}_s$  为电流量的情况下，才能与输入信号电流  $\dot{I}_s$  相并联，即  $\dot{I}_i = \dot{I}_s - \dot{I}_f$ 。

总结：

1. 运放的基本指标

除开环增益、共模抑制比、差模输入电阻、差模输出电阻等外，还有最大共模输入电压  $V_{ICmax}$ ，

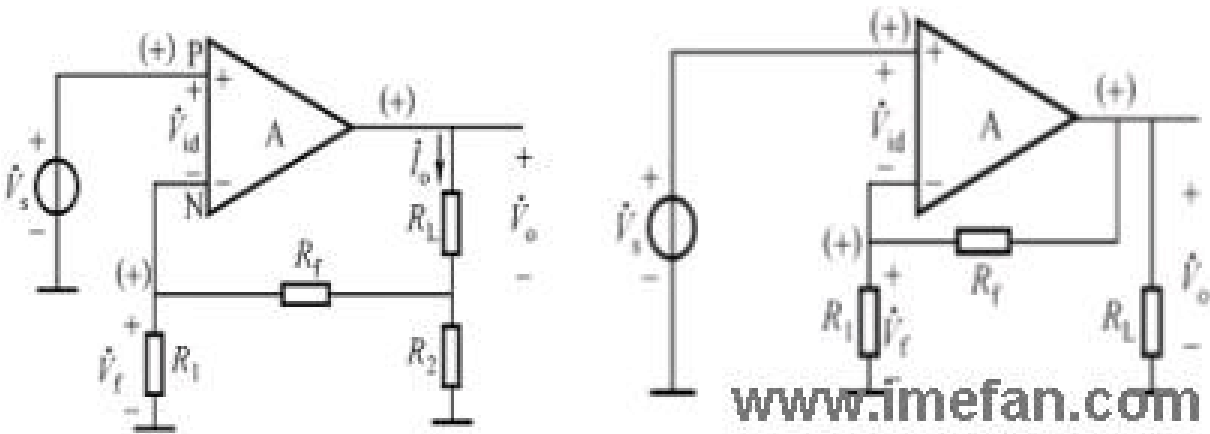
单位增益带宽  $f_{c20\lg A_{mid}-0dB}$ ，转换速率  $SR = \frac{dv_o}{dt}$  大信号运用时的输出电压上升速率；

2. 为减少输出失调电压，在连接上，运放的同相端和反相端的等效输入电阻应取相等，且阻值应小；

3. 电压反馈还是电流反馈取决于反馈量  $X_f$  是正比于输出电压还是正比于输出电流。  $\dot{X}_f \propto \dot{V}_o$

电压反馈，  $\dot{X}_f \propto \dot{I}_o$  电流反馈判断方法：将输出端瞬时短路，即  $R_L=0$ ，  $\dot{V}_o=0$ 。如果此时无反馈了，即  $\dot{X}_f=0$  时，为电压反馈；如果  $\dot{X}_f \neq 0$ ，则为电流反馈。也可用输出开路来做，即  $R_L$  开路，则  $\dot{I}_o=0$  如果此时无反馈了，即  $\dot{X}_f=0$  时，为电流反馈；如果  $\dot{X}_f \neq 0$  则为电压反馈。

4. 串联反馈还是并联反馈—取决于反馈量  $X_f$  是电流量还是电压量，即反馈网络与输入信号的连接方式。



串联反馈：其反馈信号  $X_f$  一定是电压量，电压量才能相串联；并联反馈：其反馈信号  $X_f$  一定是电流量，电流量才能并联，进行电流求和。

5. 正反馈和负反馈 (在频带的中频段)

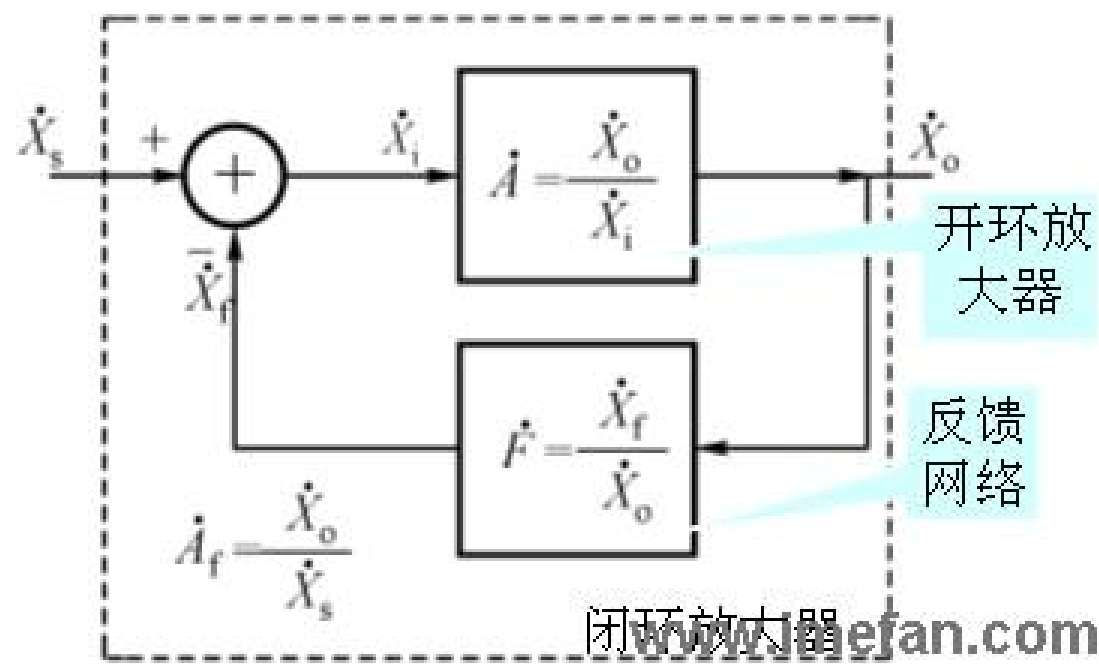
反馈后净输入增加：正反馈；反馈后净输入减少：负反馈。

判断方法：用瞬时极性法：假若在某瞬时输入极性为  $\oplus$ ，然后根据放大器的组态，逐级推出该时刻的瞬时变化极性、经反馈网络后的极性，然后决定反馈信号与原信号的相位关系。

6. 直流反馈和交流反馈

在直流通路中存在的反馈：直流反馈；在交流通路中存在的反馈：交流反馈；在交直流通路中都有反馈：交直流反馈并存。负反馈放大电路的方框图表示及增益函数

一、负反馈放大电路的方框图表示

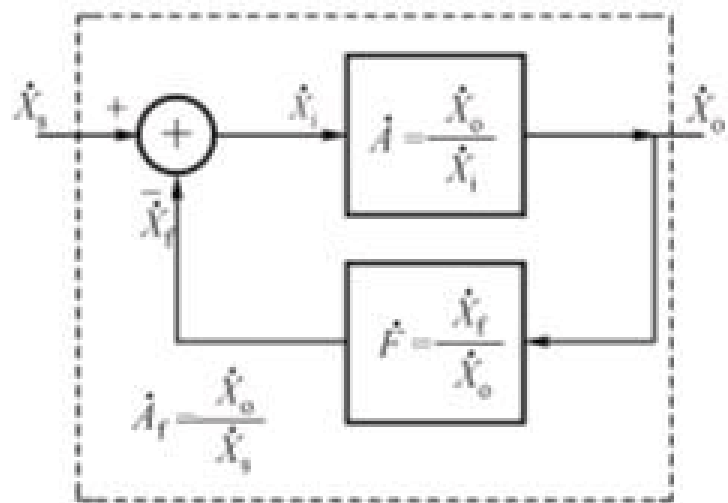


四种反馈下各参数的物理意义：

| 反馈组态    | 开环增益 $\dot{A}$                                 | 闭环增益 $\dot{A}_f$                             | 反馈系数 $\dot{F}_f$                                |
|---------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 电压串联负反馈 | $\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}$ 电压增益 | $\dot{A}_{vf} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s}$ | $\dot{F}_v = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o}$ 电压传输比 |
| 电压并联负反馈 | $\dot{A}_r = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_i}$ 电阻增益 | $\dot{A}_{rf} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_s}$ | $\dot{F}_r = \frac{\dot{I}_f}{\dot{V}_o}$ 电导传输比 |
| 电流串联负反馈 | $\dot{A}_g = \frac{\dot{I}_o}{\dot{V}_i}$ 电导增益 | $\dot{A}_{gf} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{V}_s}$ | $\dot{F}_r = \frac{\dot{V}_f}{\dot{I}_o}$ 电阻传输比 |
| 电流并联负反馈 | $\dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$ 电流增益 | $\dot{A}_{if} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_s}$ | $\dot{F}_i = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o}$ 电流传输比 |

二、负反馈放大电路的增益函数

由负反馈放大器的方块图可知，放大器的闭环增益函数为：



$$\begin{aligned} \dot{A}_f &= \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i + \dot{X}_f} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i + \dot{F} \dot{X}_o} \\ &= \frac{\dot{A} \dot{X}_i}{\dot{X}_i + \dot{A} \dot{F} \dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A} \dot{F}} \end{aligned}$$

www.imefan.com

$$\left| \dot{A}_f \right| = \frac{\left| \dot{A} \right|}{\left| 1 + \dot{A} \dot{F} \right|}$$

式中的项  $\dot{A} \dot{F}$  称《环路增益》或《回路增益》。将上式写成幅模形式后

①如果  $\left| 1 + \dot{A} \dot{F} \right| > 1$ ，闭环增益小于开环增益  $\left| \dot{A}_f \right| < \left| \dot{A} \right|$ 。

则电路为负反馈。若  $\left| 1 + \dot{A} \dot{F} \right| \gg 1$ ，则电路为深度负反馈，此时，其电压增益为：

$$\left| \dot{A}_f \right| = \frac{\left| \dot{A} \right|}{\left| 1 + \dot{A} \dot{F} \right|} \approx \frac{1}{\left| \dot{F} \right|}$$

闭环后的电路增益由反馈系数决定，式中的  $\left| 1 + \dot{A} \dot{F} \right|$  称为反馈深度，它越大，反馈深度越深。

② 当  $\left| 1 + \dot{A} \dot{F} \right| < 1$ ，则  $\left| \dot{A}_f \right| > \left| \dot{A} \right|$  表示其反馈为正反馈。

③ 当  $\left| 1 + \dot{A} \dot{F} \right| = 0$ ，则  $\left| \dot{A}_f \right| \rightarrow \infty$  说明在无输入信号的情况下也有输出，此时电路产生了自激振荡。

负反馈牺牲了放大器增益：提高了放大器的性能指标；正反馈虽提高增益：但稳定性差，会使放大器无法工作。

负反馈对放大电路性能的改善

一、提高闭环增益的稳定性

放大器的增益会因环境的各种因素而发生变化，加了负反馈后会抑制这种变化，使其增益稳定。

假定信号在中频段，且反馈网络为纯电阻，故放大倍数  $\dot{A}$  和反馈系数  $\dot{F}$  都是实数。所以增益函数表达式为：

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}, \quad d\dot{A}_f = \frac{(1 + \dot{A}\dot{F})d\dot{A} - \dot{A}\dot{F}d\dot{A}}{(1 + \dot{A}\dot{F})^2} = \frac{d\dot{A}}{(1 + \dot{A}\dot{F})^2}, \quad \dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}。$$

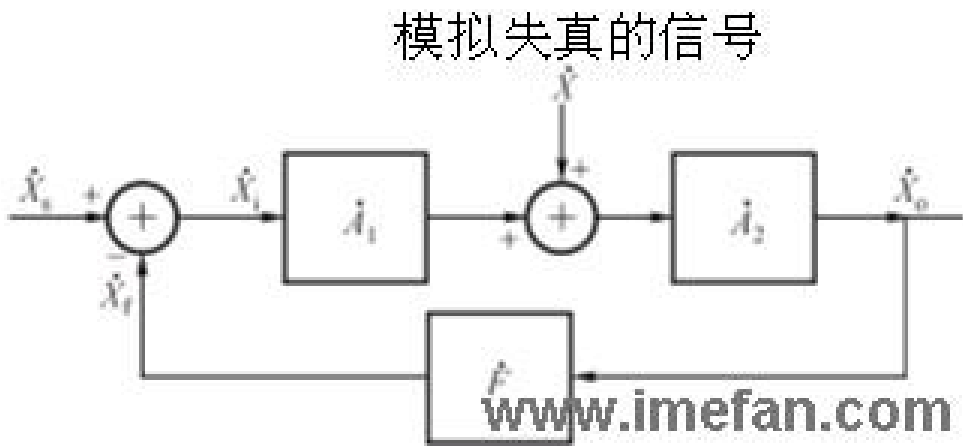
两边同除  $\dot{A}_f$  后得 
$$\frac{d\dot{A}_f}{\dot{A}_f} = \frac{d\dot{A}}{(1 + \dot{A}\dot{F})^2 \dot{A}_f} = \frac{d\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \cdot \frac{1}{(1 + \dot{A}\dot{F}) \dot{A}_f} = \frac{d\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \cdot \frac{1}{\dot{A}}。$$

该式表明：放大器引入了负反馈后，其增益的相对变化量  $d\dot{A}_f/\dot{A}_f$  是无反馈时的  $1/(1+\dot{A}\dot{F})$ 。说明负反馈越深，放大倍数的稳定性越好。

二、改善放大器的非线性失真

非线性失真由器件的非线性特性引起。假定输入信号为正弦，经放大后产生了不对称的输出波形，即产生了失真了。

非线性失真的定量分析：由于非线性失真是信号大了之后引起，所以假定失真由末级引起，如图所示：



开环时：  $\dot{X}_s = \dot{X}_i, \quad \dot{X}_o = \dot{A}_1 \dot{A}_2 \dot{X}_i + \dot{A}_2 \dot{X} = \dot{A} \dot{X}_i + \dot{A}_2 \dot{X} = \dot{A} \dot{X}_s + \dot{A}_2 \dot{X}。$

闭环后：输出信号降低了，并为  $\dot{X}_o = \dot{X}_o / (1 + \dot{A}\dot{F})$  ,  $\dot{X}_o = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \dot{X}_s + \frac{\dot{A}_2}{1 + \dot{A}\dot{F}} \dot{X}$  。式子表明，有用信号  $\dot{X}_s$ ，和失真信号部分  $\dot{X}$  都下降为开环时的  $1/(1 + \dot{A}\dot{F})$ 。比较反馈效果应该在同一输出幅度下才有意义，所以应加大  $\dot{X}_s$ ，使其反馈后的输出电压  $\dot{X}_o$  和反馈前的  $\dot{X}_o$  相等。增大  $\dot{X}_s$  后，

上式变为：
$$\dot{X}_o = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} [(1 + \dot{A}\dot{F}) \dot{X}_s] + \frac{\dot{A}_2}{1 + \dot{A}_2\dot{F}} \dot{X} = \dot{A} \dot{X}_s + \frac{\dot{A}_2}{1 + \dot{A}_2\dot{F}} \dot{X}$$
。式子表明，负反馈后，可以加大有用的输入信号，使损失部分得以补偿，而负反馈将失真部分的信号得到了抑制。这里必须注意：信号本身的非线性，负反馈将无能为力。

### 三、抑制放大电路内部的温漂，噪声及干扰

如果噪声、干扰来自电路内部时，负反馈能起到抑制作用，这时只要加大有用信号，以提高信噪比(S/N)。如果噪声、干扰混在有用信号中或来自电路外部，则负反馈无能为力。只能用屏蔽、隔离、滤波或消除干扰源等手段加以剔除。

### 四、展扩放大器的通频带

假定反馈网络为纯电阻，F 为实数，且放大电路在低频段和高频段都只有一个转折频率(极点频率)。

因此，高低频段频率特性的复数表达式分别为， 高频段：
$$A_H = \frac{A_m}{1 + j \frac{f}{f_H}}$$
， 低频段：

$$A_L = \frac{A_m j \frac{f}{f_L}}{1 + j \frac{f}{f_L}}$$

加了负反馈后的高频段频率特性：

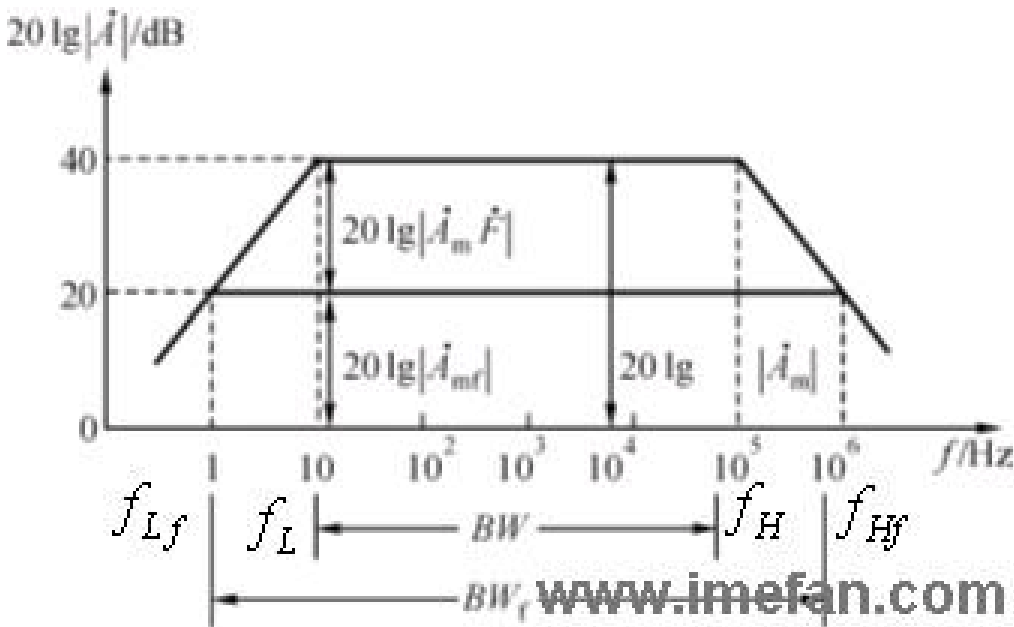
$$A_H = \frac{\dot{A}_H}{1 + \dot{A}_H \dot{F}} = \frac{\frac{\dot{A}_m}{1 + j \frac{f}{f_H}}}{1 + \frac{\dot{A}_m \dot{F}}{1 + j \frac{f}{f_H}}} = \frac{\frac{\dot{A}_m}{1 + \dot{A}_m \dot{F}}}{1 + j \frac{f}{(1 + \dot{A}_m \dot{F}) f_H}} = \frac{\dot{A}_m}{1 + j \frac{f}{f_H}}$$

$$A_{mf} = \frac{A_m}{1 + A_m F}, \quad f_{Lf} = (1 + A_m F) f_{Lf}$$

$$A_{if} = \frac{A_i}{1 + A_i F} = \frac{A_m \frac{j \frac{f}{f_{Li}}}{1 + j \frac{f}{f_{Li}}}}{1 + A_m \frac{j \frac{f}{f_{Li}}}{1 + j \frac{f}{f_{Li}}} F} = \dots = A_{mf} \frac{j \frac{f}{f_{Li}}}{1 + j \frac{f}{f_{Li}}} \frac{1 + A_m F}{1 + A_m F}$$

加了负反馈后的低频段频率特性：

其中， $A_{mf} = \frac{A_m}{1 + A_m F}$ ， $f_{Lf} = f_{Li} / (1 + A_m F)$  可见放大器引入负反馈后，上限频率升高了，下限频率降低了，因而使放大器的通频带扩展了，下图是负反馈使通频带展宽的波特图。



### 五、负反馈对输出电阻的影响

1. 电压反馈使输出电阻减少。 电压串联假定反馈电路中信号单向化传输，取样电路不取电流并无压降；
2. 电流反馈使输出电阻增加。

### 六、负反馈对输入电阻的影响

串联反馈输入电阻增加，
$$R_{if} = \frac{\dot{V}_s}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_i + \dot{V}_f}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_i + \dot{A}\dot{F}\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_i(1 + \dot{A}\dot{F})}{\dot{I}_i} = (1 + \dot{A}\dot{F})R_i$$
；

并联反馈输入电阻减少，无反馈时， $\dot{I}_s = \dot{I}_i$  加了负反馈后， $\dot{I}_s = \dot{I}_f + \dot{I}_i = \dot{I}_i + \dot{A}\dot{F}\dot{I}_i = \dot{I}_i(1 + \dot{A}\dot{F})$ 。

输入电流增加了  $1 + \dot{A}\dot{F}$ ，输入电阻下降了，且为 
$$R_{if} = \frac{\dot{V}_s}{\dot{I}_s} = \frac{1}{1 + \dot{A}\dot{F}} R_i$$
。

## 负反馈放大电路的计算

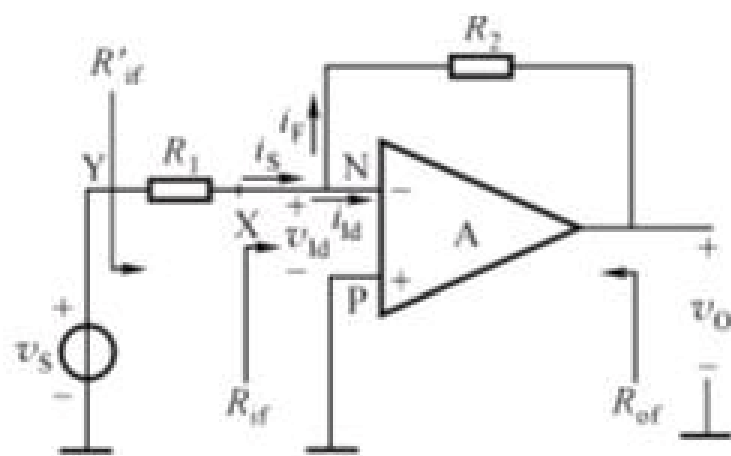
### 一、由集成运放构成的各种运算电路

集成运放的开环增益为无穷大，由运放组成的各种放大电路都满足深度反馈的条件。

#### 1. 比例运算电路

比例运算主要有三种：反相输入，同相输入和差动输入三种形式。

(1) 反相输入方式 (反相 (比例)、求和运算)，该电路属于电压并联负反馈放大器。



$$v_o = -i_f R_2, i_f = i_s = v_s / R_1$$

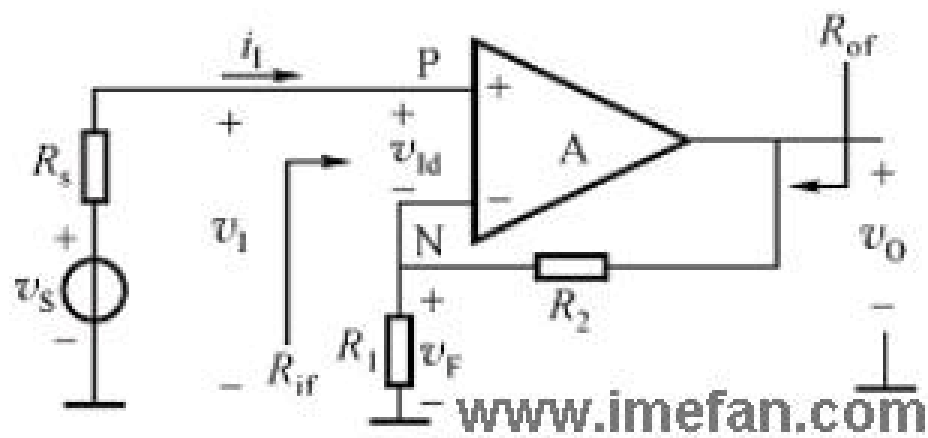
$$v_o = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right)v_s \quad A_{vf} = -R_2 / R_1$$

$$R_{if} = v_{id} / i_s \rightarrow 0$$

$$R'_{if} = v_s / i_s = R_1$$

$$R_{of} \rightarrow 0 \quad \text{www.imefan.com}$$

(2) 同相输入方式 (同相 (比例)求和运算)



信号从运放的同相输入端加入，称同相输入。是电压串联负反馈。由电路可知：

$$v_F = v_o \frac{R_1}{R_1 + R_2} \approx v_s, \quad v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_s, \quad A_f = \frac{v_o}{v_s} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

，所以 或 。当 R1 开路时，电路的输出即为电路的输入，通常称为电压跟随器，即  $v_o = v_s$ 。

输入电阻  $R_{if}$ ：  $R_{if} = \frac{v_I}{i_I} \rightarrow \infty (\because i_I \approx 0)$ ，注意是串联反馈。输出电阻  $R_{of}$ ：

$$R_{of} = R_o / (1 + A F) \rightarrow 0$$

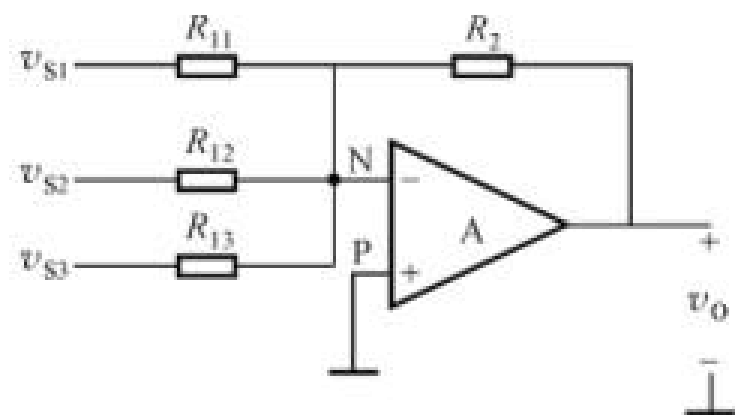
，注意是电压反馈。

### (3) 差分输入方式 (减法输入方式)

两个信号分别加在同相端和反相端，反相端通过 R2 构成闭环。对电路的求解可以采用线性电路的叠加原理进行。

## 2 求和运算

(1) 反相求和运算。由于 N 端是“虚地”，所以有：



$$\frac{v_{s1}}{R_{11}} + \frac{v_{s2}}{R_{12}} + \frac{v_{s3}}{R_{13}} = -\frac{v_o}{R_2}$$

$$v_o = -\left(\frac{R_2}{R_{11}} v_{s1} + \frac{R_2}{R_{12}} v_{s2} + \frac{R_2}{R_{13}} v_{s3}\right)$$

www.imefan.com

(2) 同相求和运算。同样用线性电路的叠加原理求解。由于  $V_P = V_N$  可分别求出  $V_P$  和  $V_N$ 。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/535320101102012004>