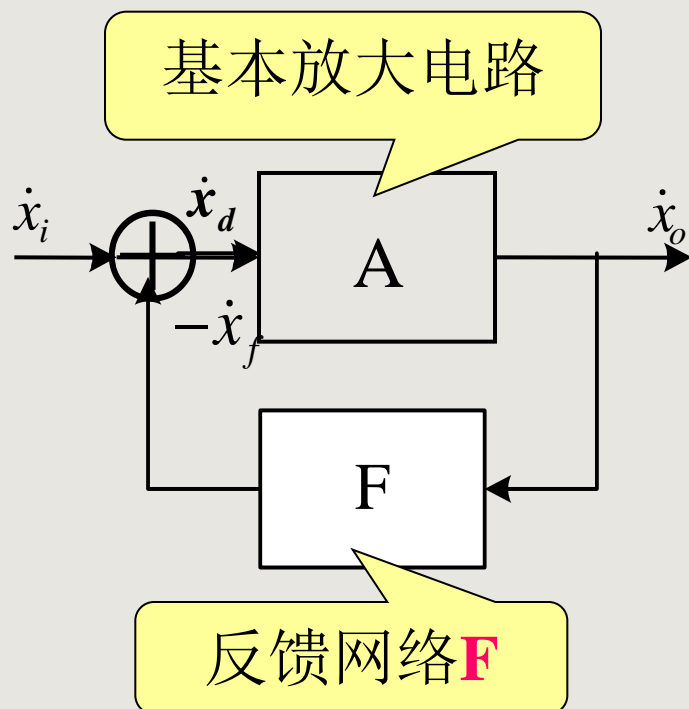


7.3 放大电路中的负反馈

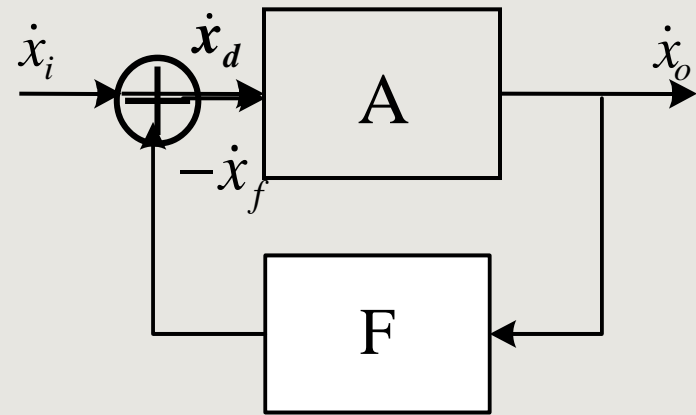
§ 7.3.1 反馈的基本概念与分类

反馈：将放大电路的输出信号（电压或电流）的部分或全部，通过一定的方式，回送到电路的输入端。



\dot{x}_f : 反馈信号

\dot{x}_d : 净输入信号

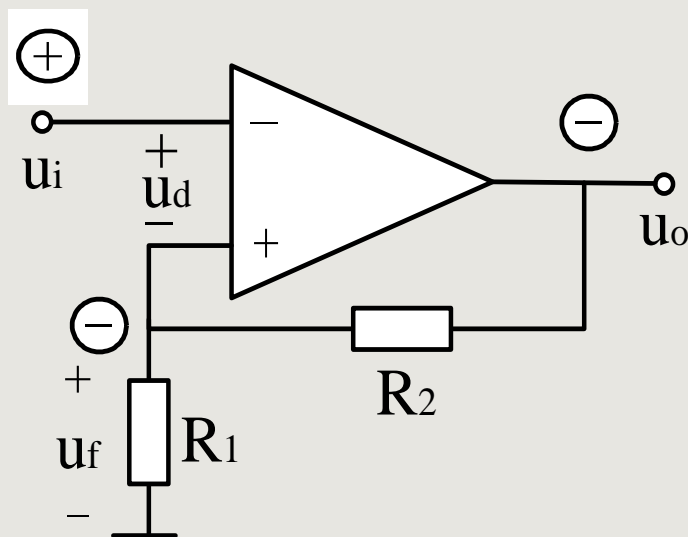


- 若 $\dot{x}_d > \dot{x}_i$ ，反馈使净输入信号增大，则称为**正反馈**.
- 若 $\dot{x}_d < \dot{x}_i$ ，反馈使净输入信号减小，则称为**负反馈**.
- 反馈的正、负称为**反馈极性**，一般采用**瞬时极性法**来判断反馈极性.
- **F**一般由无源元件组成, 没有放大作用, 可忽略其正向传输作用.

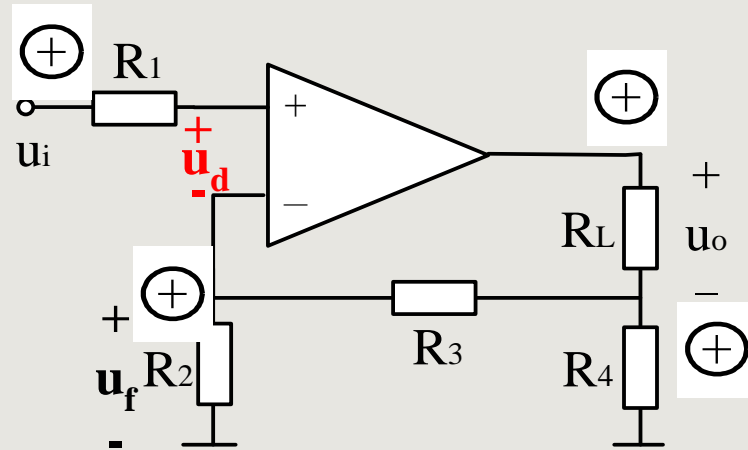


瞬时极性法：

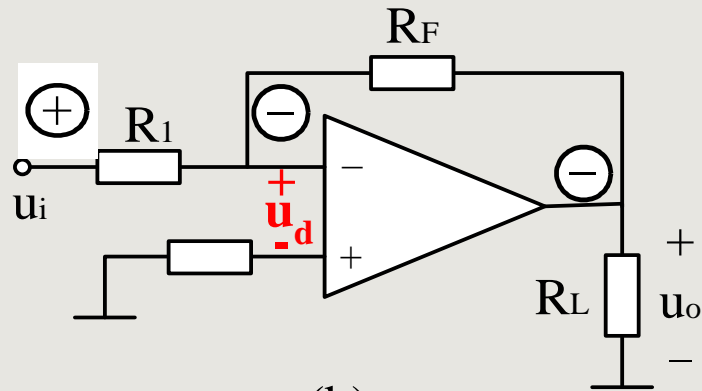
- (1) 假定输入信号在某一瞬时的极性，
- (2) 逐级确定放大电路中有关各点的瞬时极性，
- (3) 判断反馈到输入端的信号是增强了还是削弱了基本放大电路的输入信号。



引入反馈电阻 R_1 和 R_2 后，运放的净输入信号 u_d 增大了，引入的反馈是**正反馈**。



(a)



(b)

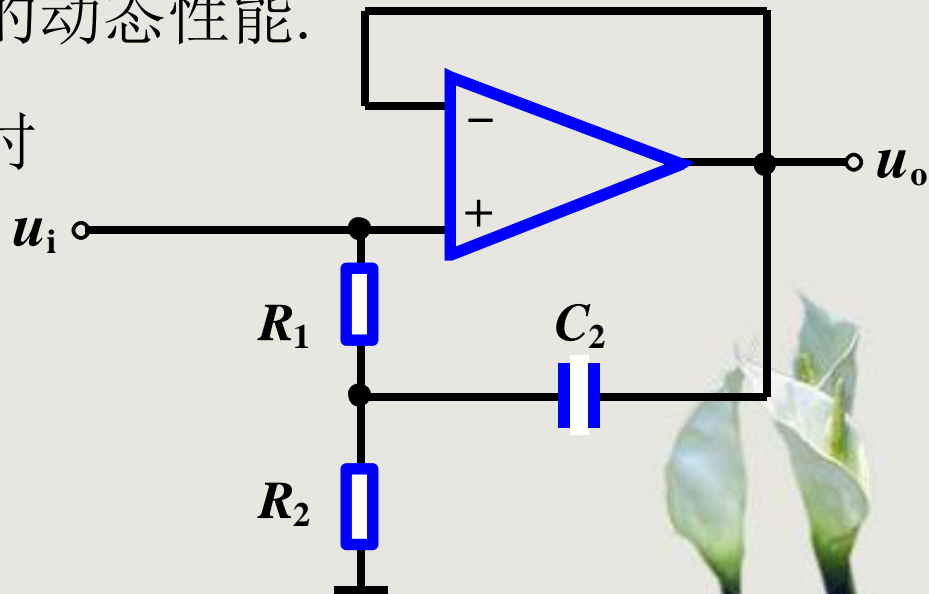
(a)、(b)为负反馈



二、反馈的分类

1. 直流反馈和交流反馈

- 如反馈信号中只有直流成分，则称为直流反馈；
- 如反馈信号中只有交流成分，则称为交流反馈。
- 直流负反馈的作用是稳定工作点，对动态性能无影响；
- 交流负反馈的作用是改善电路的动态性能。
- 在实用的放大电路中，往往同时存在直流负反馈和交流负反馈。



2.电压反馈和电流反馈

根据反馈信号在输出端的采样方式，反馈可分为电压反馈和电流反馈：

如反馈信号取自输出电压，则称为电压反馈；

如反馈信号取自输出电流，则称为电流反馈

判断电压反馈和电流反馈的方法：

将输出电压置零（即设输出电压等于零）：

若反馈信号也为零，则为电压反馈；

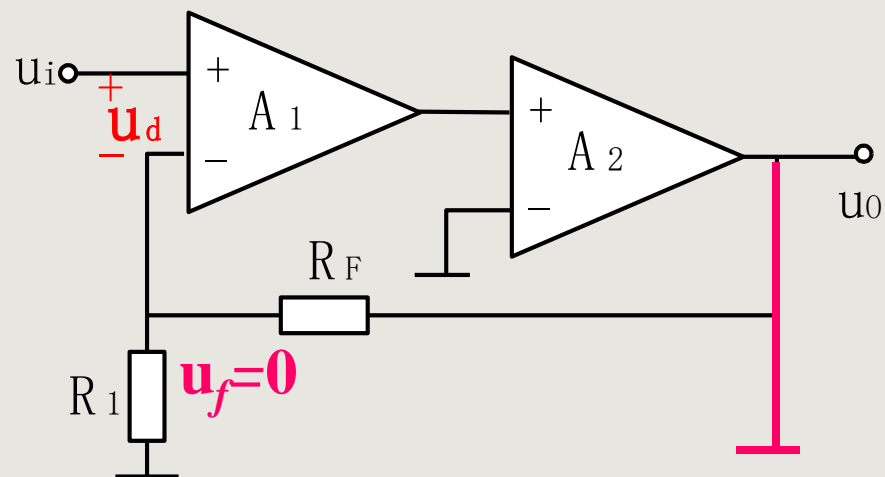
若反馈信号不为零，则为电流反馈。



电压反馈

在放大电路中，引入**电压负反馈**，将使输出电压保持稳定。

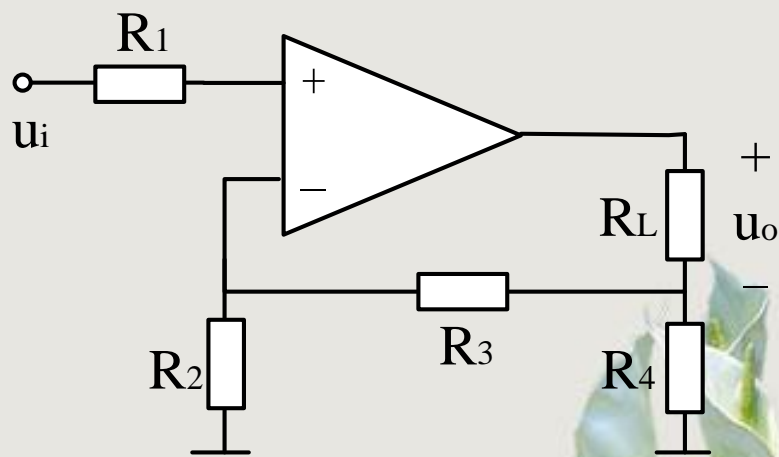
$$R_L \uparrow \rightarrow u_O \uparrow \rightarrow u_f \uparrow \rightarrow u_d \downarrow \rightarrow u_O \downarrow$$



电流反馈 $u_o=0$ 时，反馈不消失

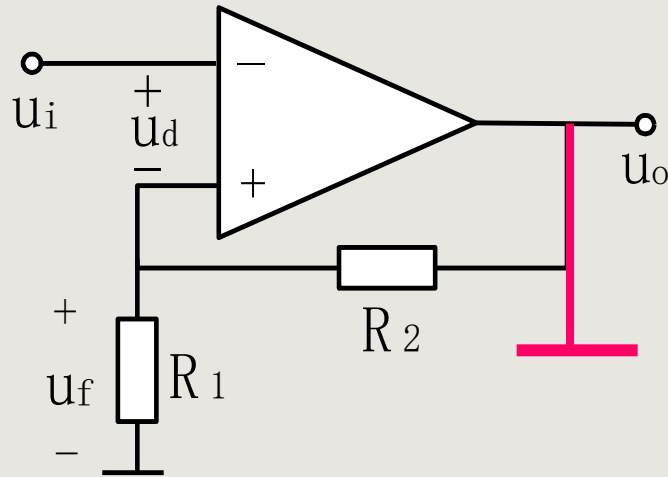
在放大电路中，引入**电流负反馈**，将使输出电流保持稳定。

$$R_L \uparrow \rightarrow I_O \downarrow \rightarrow u_f \downarrow \rightarrow u_d \uparrow \rightarrow u_O \uparrow \rightarrow I_O \uparrow$$





例



当输出电压为零时，同相输入端的对地电压也为零，反馈消失，故是电压反馈。



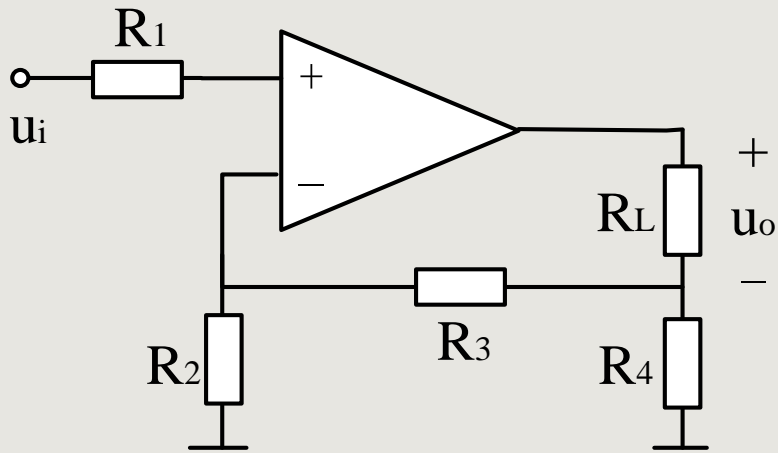
3. 串联反馈和并联反馈

根据反馈信号与输入信号在输入端的连接形式的不同，反馈可分为串联反馈和并联反馈。

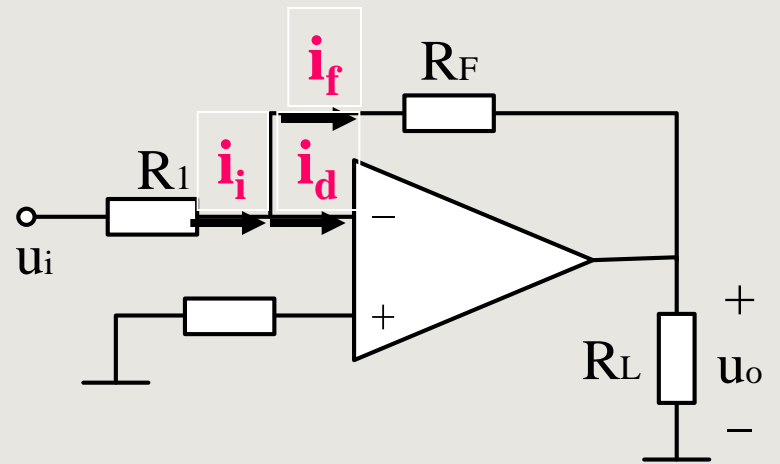
如反馈信号与输入信号在输入端以串联形式叠加，则为串联反馈，若以并联形式叠加，则为并联反馈。

电压信号只能串联，因此串联反馈的反馈信号是电压；
电流信号只能并联，所以并联反馈的反馈信号是电流。





串联反馈



并联反馈





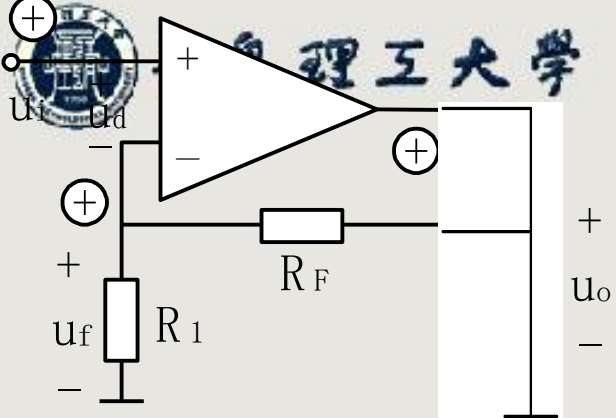
三、负反馈的四种组态

负反馈有四种组态：

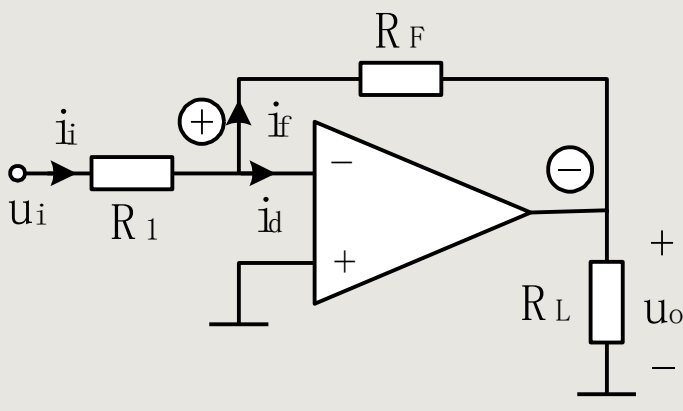
电压串联负反馈、电压并联负反馈、

电流串联负反馈、电流并联负反馈。

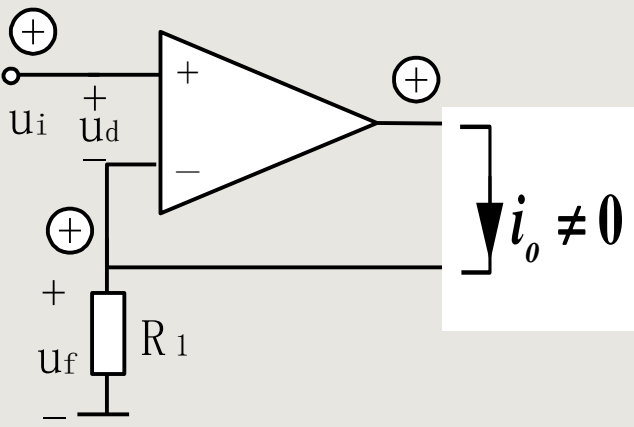




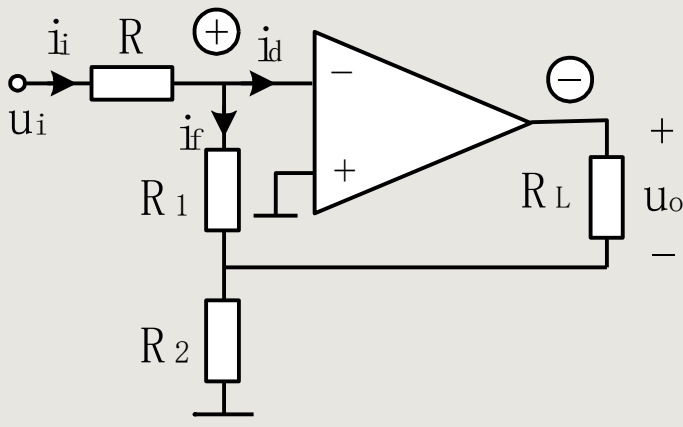
(a)



(b)



(c)



(d)

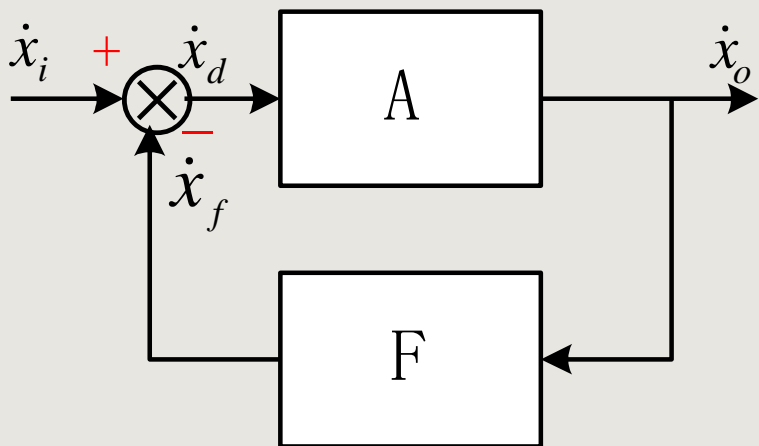
负反馈的四种组态

- (a) 电压串联 (b) 电压并联 (c) 电流串联 (d) 电流并联

结论2:
 若反馈支路与输入支路接在运放的同一输入端, 则为**并联反馈**;
 若是接在不同输入端, 则为**串联反馈**

结论1: 在由运算放大器组成的负反馈放大电路中, 若负载电阻接地, 即**输出电压是对地电压**, 则引入的反馈为**电压负反馈**, 否则为**电流负反馈**;

§ 7.3.2 负反馈对放大电路的影响



基本放大电路A的放大倍数

$$\dot{A} = \frac{\dot{x}_o}{\dot{x}_d}$$

反馈网络F的反馈系数为

$$\dot{F} = \frac{\dot{x}_f}{\dot{x}_o}$$

反馈放大电路的闭环放大倍数为:

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{x}_o}{\dot{x}_i}$$

$$\dot{x}_o = \dot{A}\dot{x}_d \quad \dot{x}_f = \dot{F}\dot{x}_o = \dot{A}\dot{F}\dot{x}_d$$

$$\dot{x}_d = \dot{x}_i - \dot{x}_f$$

$$\dot{x}_i = \dot{x}_d + \dot{x}_f = (1 + \dot{A}\dot{F})\dot{x}_d$$

A和A_f均为广义放大倍数

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{x}_o}{\dot{x}_i} = \frac{\dot{A}\dot{x}_d}{(1 + \dot{A}\dot{F})\dot{x}_d} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

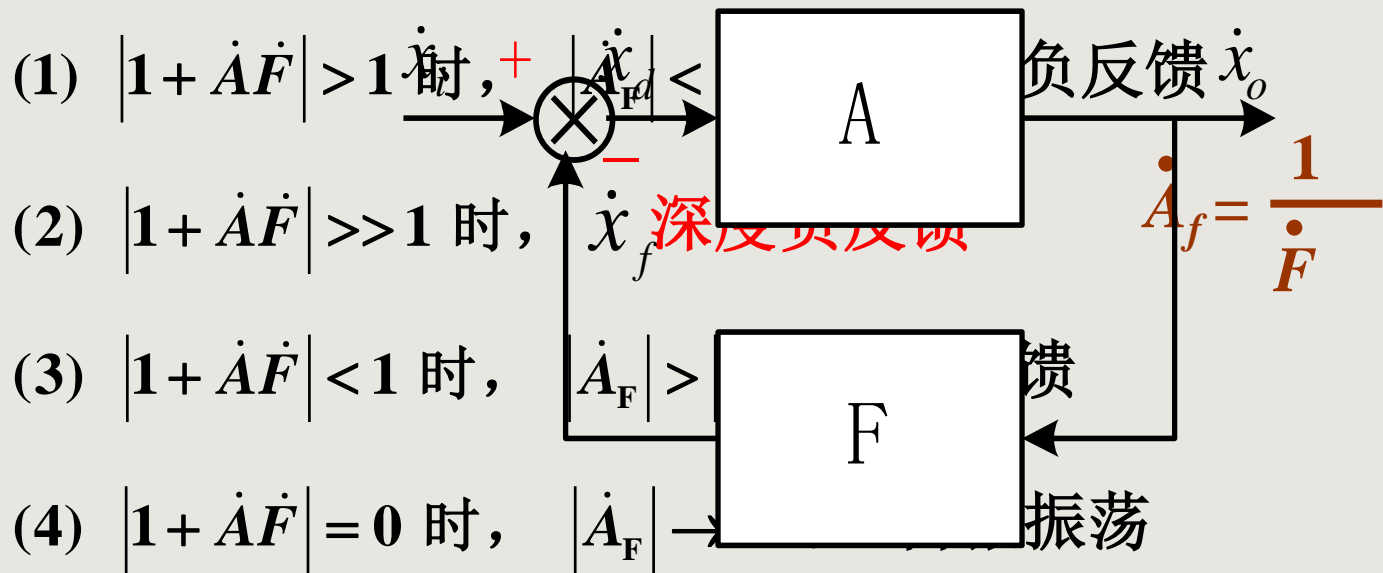
反馈放大电路的基本方程



$$\dot{A}_f = \frac{\dot{x}_o}{x_i} = \frac{\dot{A}\dot{x}_d}{(1 + \dot{A}\dot{F})\dot{x}_d} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

$\dot{A}\dot{F}$ 称为**环路放大倍数**，表示信号沿着基本放大电路和反馈网络组成的环路绕行一周后所得到的放大倍数

$|1 + \dot{A}\dot{F}|$ 称为**反馈深度**，表示引入反馈后放大电路的放大倍数与无反馈时相比减小的倍数



负反馈对放大电路性能的影响

引入负反馈后，电路的放大倍数下降了 $|1+\dot{A}\dot{F}|$ 倍，但电路的其它性能指标得到了改善，如提高了放大倍数的稳定性，减小了非线性失真等，同时可根据需要灵活地改变放大电路的输入电阻和输出电阻。

1 提高放大倍数的稳定性

$$\dot{A} \cdot \dot{F} \text{ 均为实数时 } A_f = \frac{A}{1+AF}$$

$$dA_f = \frac{(1+AF)dA - AFdA}{(1+AF)^2} = \frac{dA}{(1+AF)^2}$$

两边同除以 A_f ，得

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{dA}{(1+AF)^2} \frac{1+AF}{A} = \frac{1}{1+AF} \frac{dA}{A}$$

引入负反馈后，在外界条件有相同的变化时，放大倍数的相对变化量减小了 $(1+AF)$ 倍

例如，当 $1+AF=100$ 时，

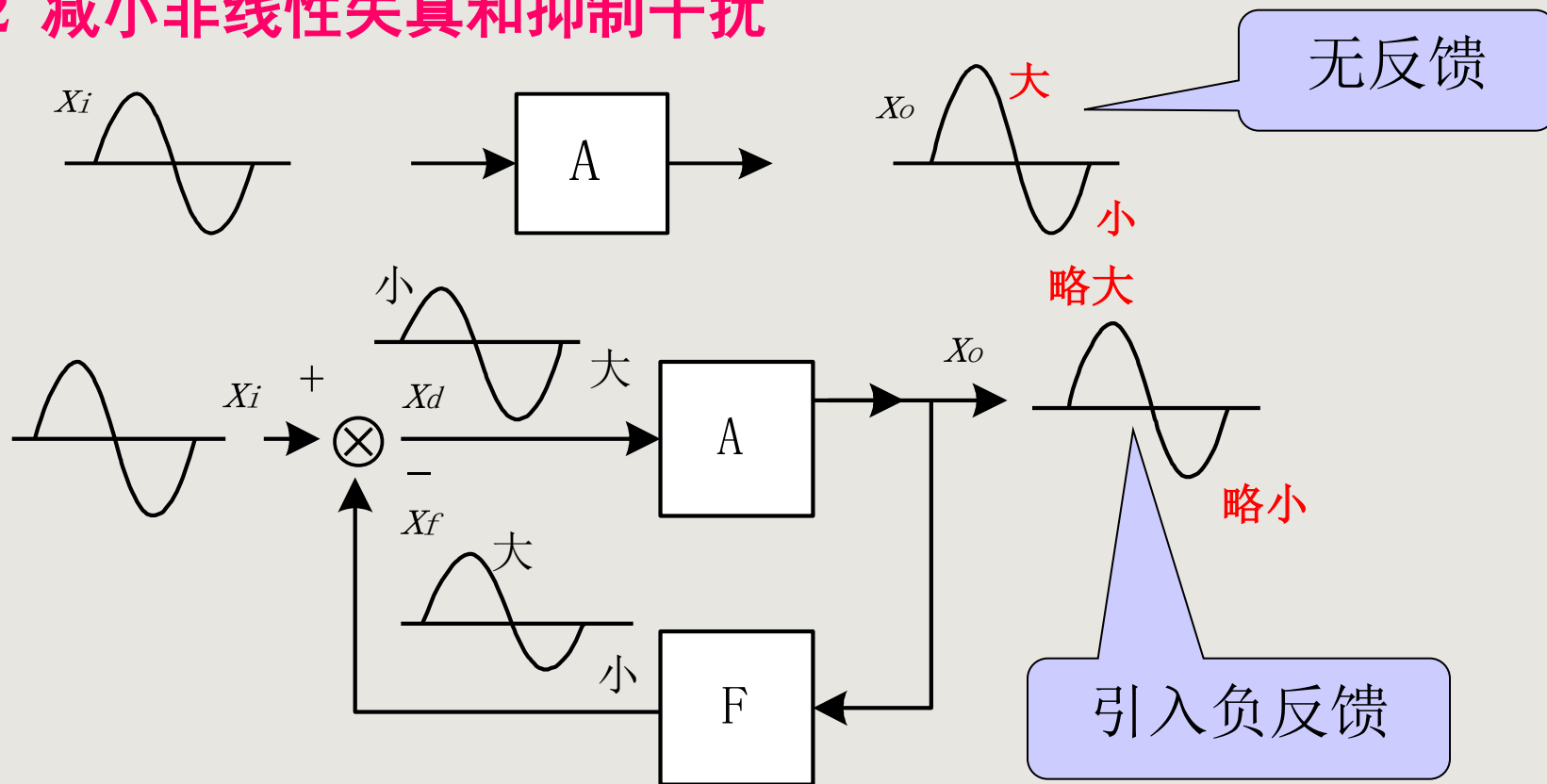
$$\text{若 } \frac{\Delta A}{A} = 10\%$$

$$\text{则 } \frac{\Delta A_f}{A_f} = 0.1\%$$

相对变化量减小了100倍



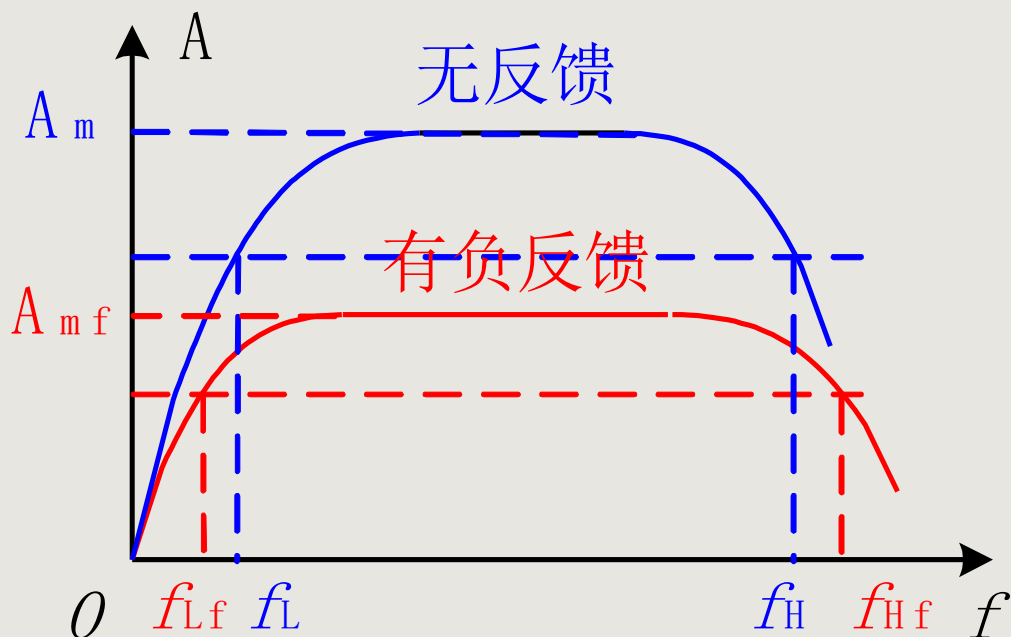
2 减小非线性失真和抑制干扰



可以证明，当非线性失真不太严重时，在基波成份保持不变的情况下，负反馈使输出波形的非线性失真**减小 $(1+AF)$ 倍**。

注意：负反馈是利用失真的波形来改善波形失真，因此，负反馈不能消除失真。

3 展宽频带



$$BW_f = f_{Hf} - f_{Lf} \approx f_{Hf} = (1 + A_m F) f_H = (1 + A_m F) BW$$

引入负反馈后，通频带展宽了 $1 + A_m F$ 倍。

由于引入反馈后中频放大倍数降低了 $(1 + A_m F)$ 倍，故中频放大倍数与通频带的乘积（简称增益带宽积）保持不变：

$$A_{mf} BW_f = A_m BW$$



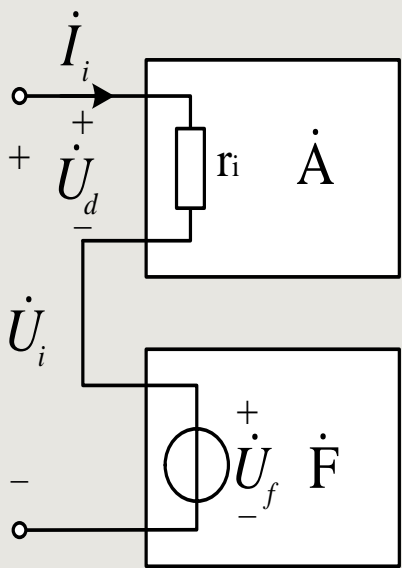
4 对输入电阻和输出电阻的影响

输入电阻与输入回路有关，从负反馈与输入回路的联系看，可把负反馈分为串联型和并联型两类考虑；

输出电阻与输出回路有关，从负反馈与输出回路的联系看，可把负反馈分为电压型和电流型两类考虑



1. 对输入电阻的影响



串联负反馈：反馈信号是电压 $\dot{U}_d = \dot{U}_i - \dot{U}_f$

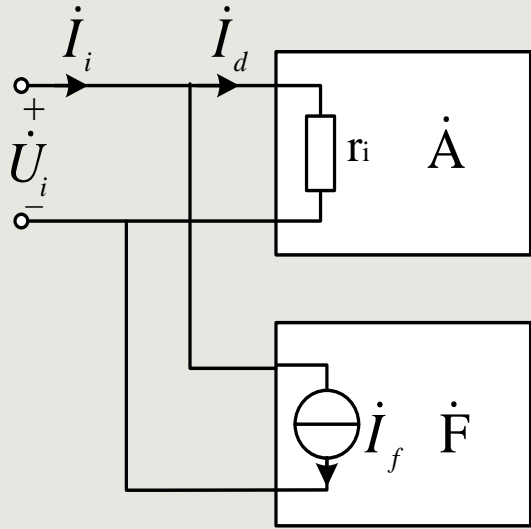
闭环放大电路的输入电阻 $r_{if} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{U}_d + \dot{U}_f}{\dot{I}_i}$

开环放大电路A的输入电阻 $r_i = \frac{\dot{U}_d}{\dot{I}_i}$

U_f 是净输入电压经放大电路放大再经反馈网络后得到的,故 $\dot{U}_f = \dot{A}\dot{F}\dot{U}_d$

$$r_{if} = \frac{(1 + \dot{A}\dot{F})\dot{U}_d}{\dot{I}_i} = (1 + \dot{A}\dot{F})r_i$$





并联负反馈 反馈信号是电流

$$r_{if} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_d + \dot{I}_f} \quad r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_d}$$

I_f 是净输入电流经放大电路放大，再经反馈网络后得到的，故 $\dot{I}_f = \dot{A}\dot{F}\dot{I}_d$

$$r_{if} = \frac{\dot{U}_i}{(1 + \dot{A}\dot{F})\dot{I}_d} = \frac{r_i}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$



2. 对输出电阻的影响

对电压负反馈，将信号源和放大电路看作一个有源二端网络，根据戴维南定理，负载上的电压即输出电压 $\dot{U}_o = \frac{R_L}{r_o + R_L} \dot{U}_{oc}$ ， r_o 越小，负载 R_L 变化时， U_o 的变化就越小。

由于电压负反馈具有稳定输出电压的作用，因此，电压负反馈减小了输出电阻。可以证明，引入电压负反馈后，输出电阻减小 $(1 + A\dot{F})$ 倍，即

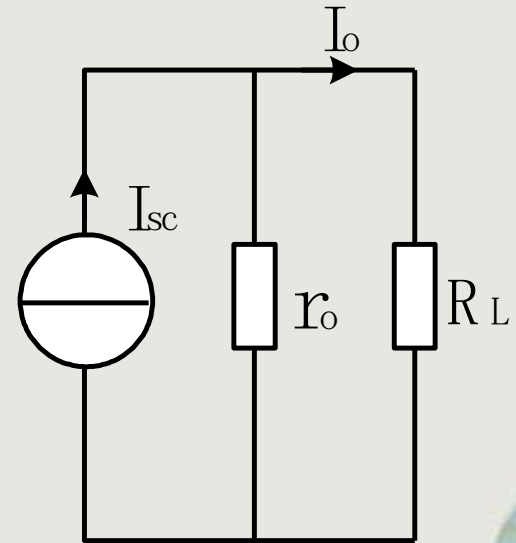
$$r_{of} = \frac{r_o}{1 + A\dot{F}}$$



对**电流负反馈**，按诺顿定理，输出电流 $\dot{I}_o = \frac{r_o}{r_o + R_L} \dot{I}_{sc}$ ，负载变化时，输出电流随之变化，输出电阻越大，输出电流变化就越小。

电流负反馈具有稳定输出电流的使用，因此电流负反馈能增大输出电阻。可以证明，引入电流负反馈后，输出电阻增大 $(1 + \dot{A}\dot{F})$ 倍，即

$$r_{of} = (1 + \dot{A}\dot{F}) r_o$$



综上所述，负反馈对输入、输出电阻的影响可归结为如下：

- ① 串联负反馈提高输入电阻，并联负反馈降低输入电阻；
- ② 电压负反馈降低输出电阻，电流负反馈提高输出电阻；
- ③ 负反馈对输入、输出电阻影响的程度均与反馈深度有关，或增大 $(1 + \dot{A}\dot{F})$ 倍，或减小 $(1 + \dot{A}\dot{F})$ 倍。



§ 7.3.3 负反馈放大电路的分析计算

反馈放大电路的分析：近似估算法和框图法

近似估算法： $1+AF \gg 1$ 时，用 $\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1+\dot{A}F} = \frac{1}{F}$
来估算闭环放大倍数

框图法是从反馈放大电路的框图出发，先求出基本放大电路的开环参数、反馈网络的反馈系数，然后再根据一般公式计算放大倍数、输入、输出电阻等。

用估算法计算时，在 $1+AF > 10$ 的情况下，计算误差小于10%，因此常以 $1+AF > 10$ 作为深度负反馈的判据





由 $\dot{A}_f = \frac{\dot{x}_o}{\dot{x}_i}$ $\dot{F} = \frac{\dot{x}_f}{\dot{x}_o}$ 和 $\dot{A}_f = \frac{1}{\dot{F}}$ 得

$$\dot{x}_i \approx \dot{x}_f$$

$$\dot{x}_d = \dot{x}_i - \dot{x}_f = 0$$

串联负反馈

$$\dot{U}_d \approx 0$$

$$\dot{U}_i \approx \dot{U}_f$$

并联负反馈

$$\dot{I}_d \approx 0$$

$$\dot{I}_i \approx \dot{I}_f$$

