

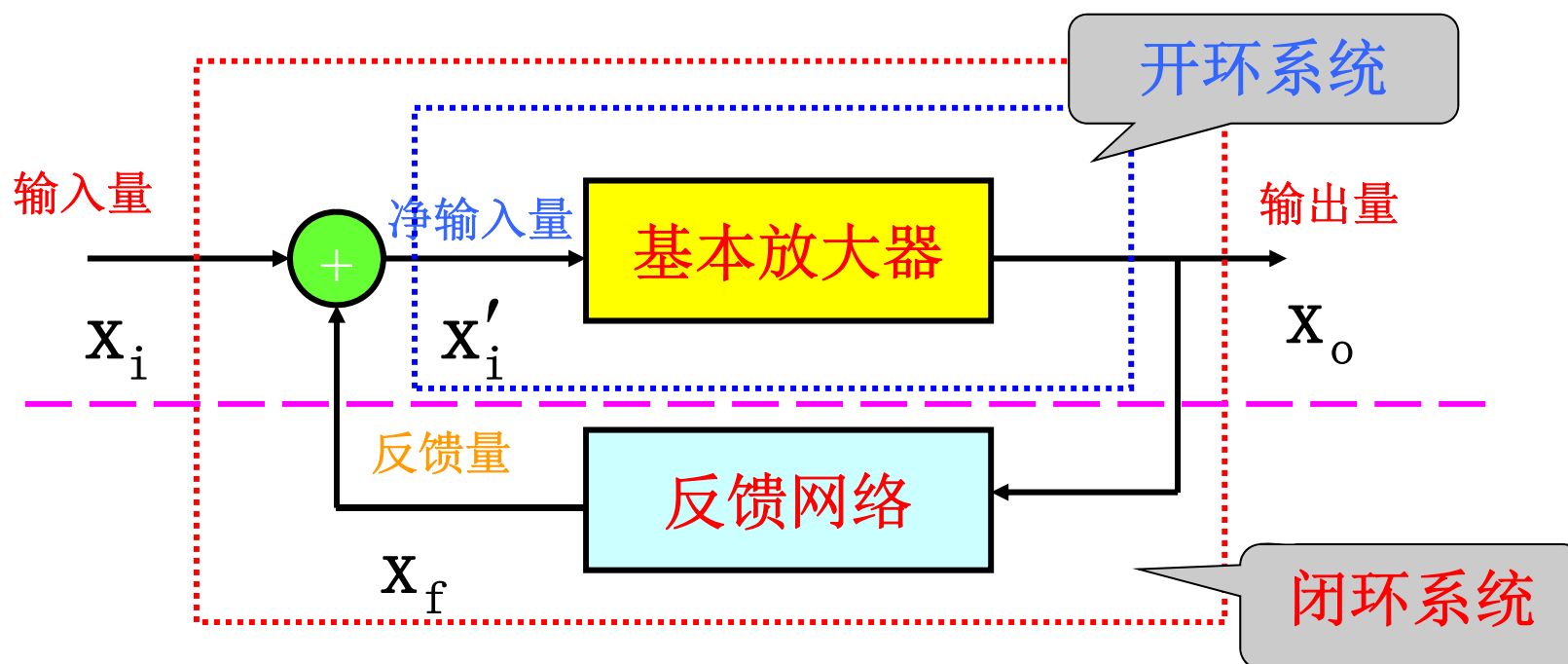
# 第五章 放大电路中的负反馈

- 反馈放大电路基本概念、极性判断
- 负反馈放大电路的组态及其判断
- 负反馈对放大电路性能的影响
- 负反馈放大电路的分析
- 负反馈放大电路的稳定性

# 5.1 反馈的基本概念

## 1、反馈放大电路的组成

**反馈定义：**将放大器输出信号的一部分或全部，以一定的方式回送到放大器输入端的过程。

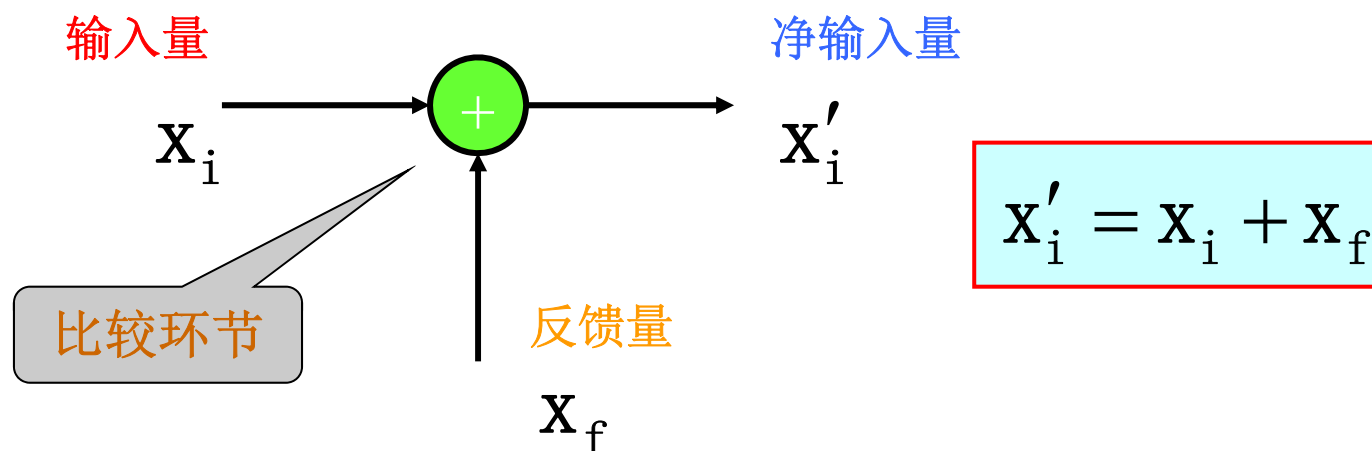


## 反馈放大电路特点：

- 由基本放大电路和反馈网络组成，基本放大电路实现放大功能，反馈网络实现将部分输出返回输入端的功能，组成反馈网络的元件称为反馈元件
- 当无反馈网络时，组成开环系统；当存在反馈网络时，组成闭环系统
- 存在两种信号流向：正向传输（从放大电路输入到输出）和反向传输（从反馈网络输入到输出）
- 输入量、净输入量、输出量，反馈量既可以是电压信号也可以是电流信号。
- 反馈放大电路的输出不仅与输入有关而且与其输出有关。

## 2、反馈极性

### ➤ 正反馈和负反馈



**正反馈：**使净输入量增大的反馈，即净输入量**大于**输入量，也就是反馈量与输入量极性**相同**。

**负反馈：**使净输入量减小的反馈，即净输入量**小于**输入量，也就是反馈量与输入量极性**相反**。

比较环节决定了反馈放大电路的正负反馈

## ➤ 直流反馈和交流反馈



直流反馈：反馈网络存在于直流通路中的反馈，即反馈量为直流信号。

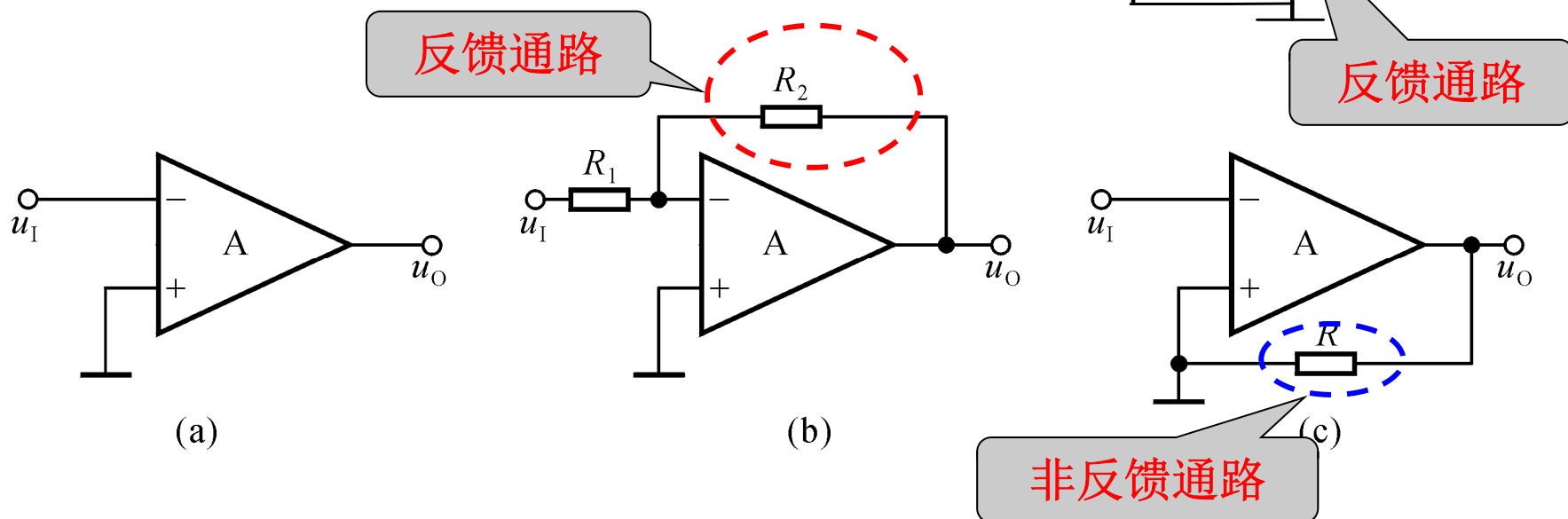
交流反馈：反馈网络存在于交流通路中的反馈，即反馈量为交流信号。

反馈同时存在于直流通路和交流通路中时，则同时组成直流反馈和交流反馈

### 3、反馈极性判定

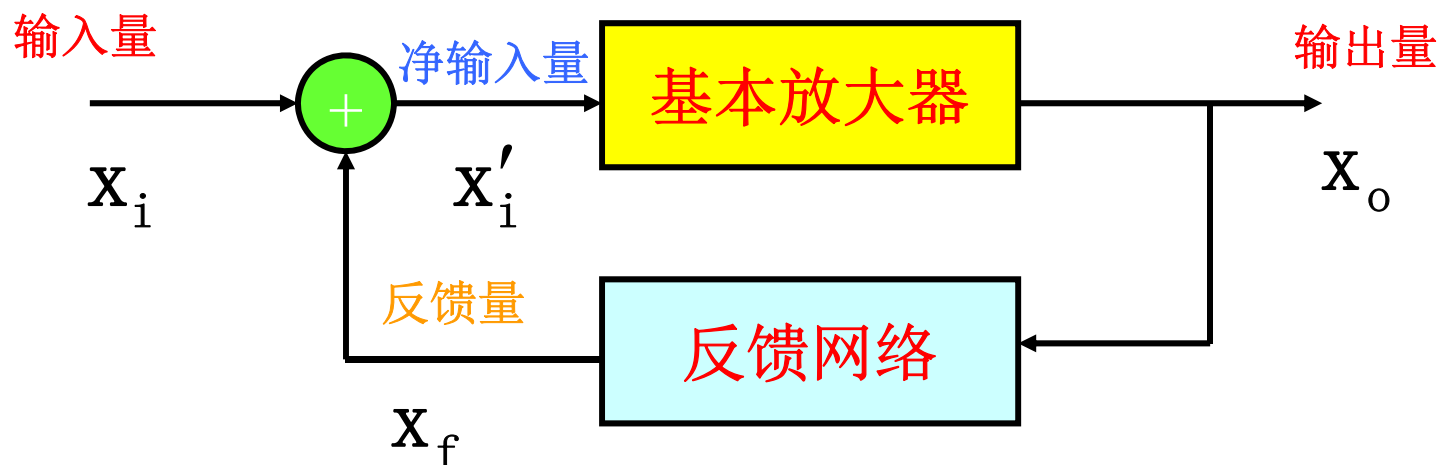
#### 1) 有无反馈判定

是否存在连接输出和输入的反馈通路，使得输出影响放大电路的净输入。



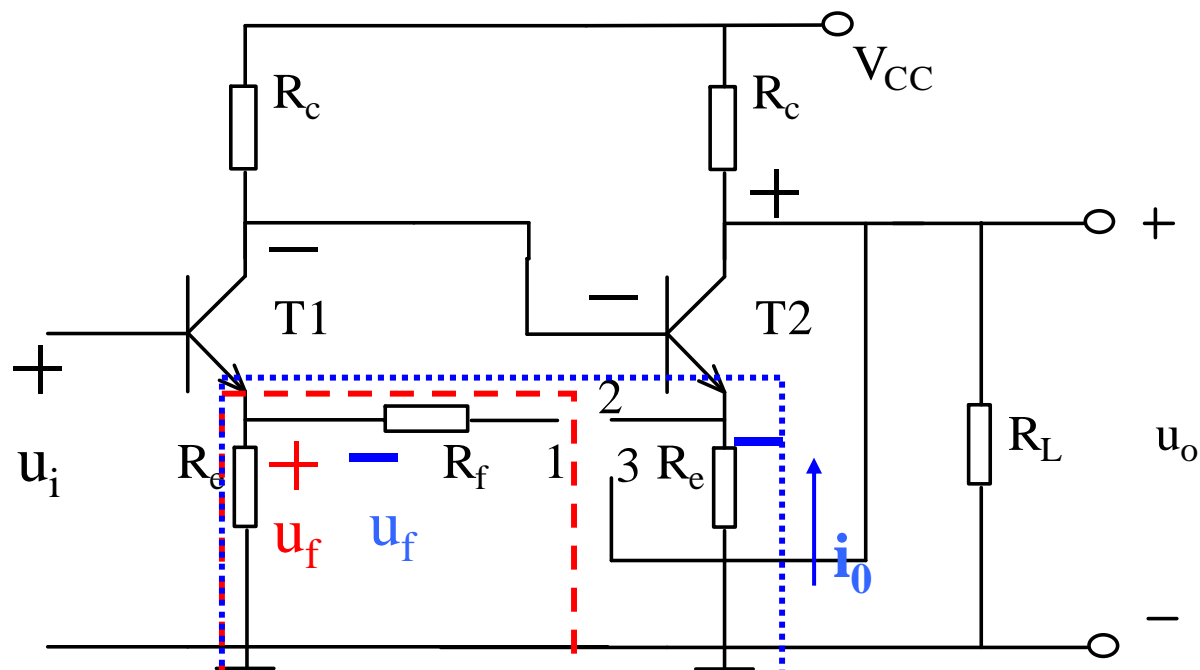
## 2) 正反馈与负反馈判定

根据净输入量的变化判定正负反馈



### 瞬时极性法

假定某瞬时时刻，激励源极性为正，按信号传输方向逐级推出各极瞬时极性，直至反馈网络的输出，如果反馈信号的瞬时极性使净输入减小，则为负反馈；反之为正反馈。



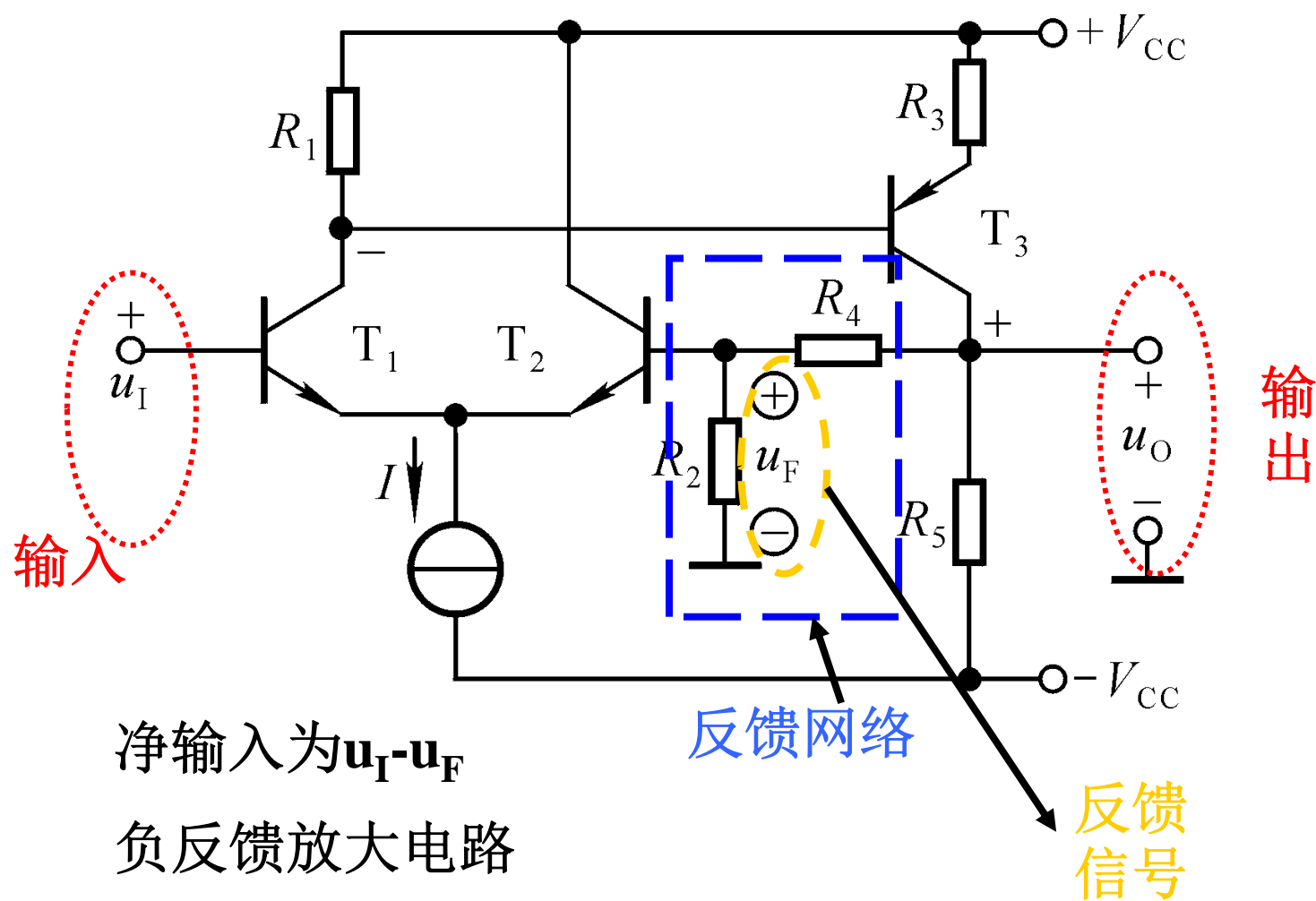
12连: 正反馈

13连: 负反馈

13相连时的  
反馈网络

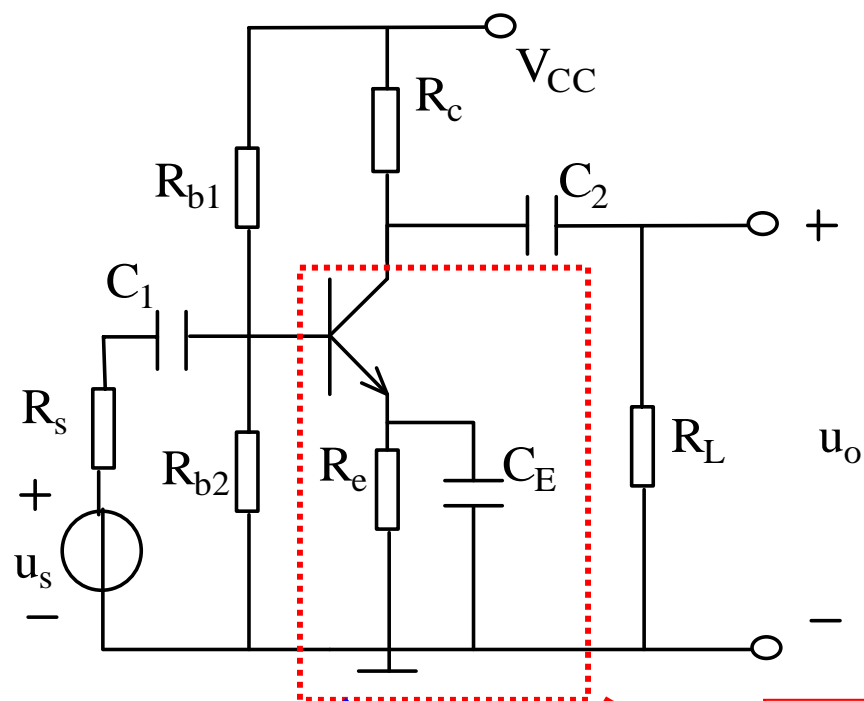
12相连时的反馈  
网络





如果T3的基极接在T2管的集电极，而不是接在T1管的集电极，那又会是怎样？？？

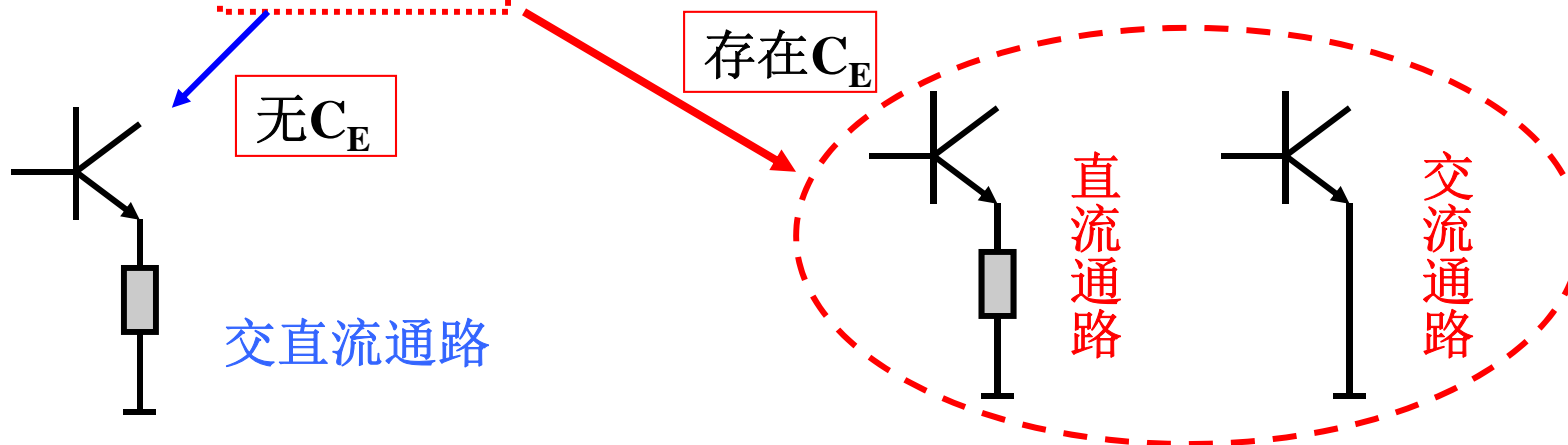
### 3) 直流反馈与交流反馈判定



**$R_e$ :** 反馈电阻

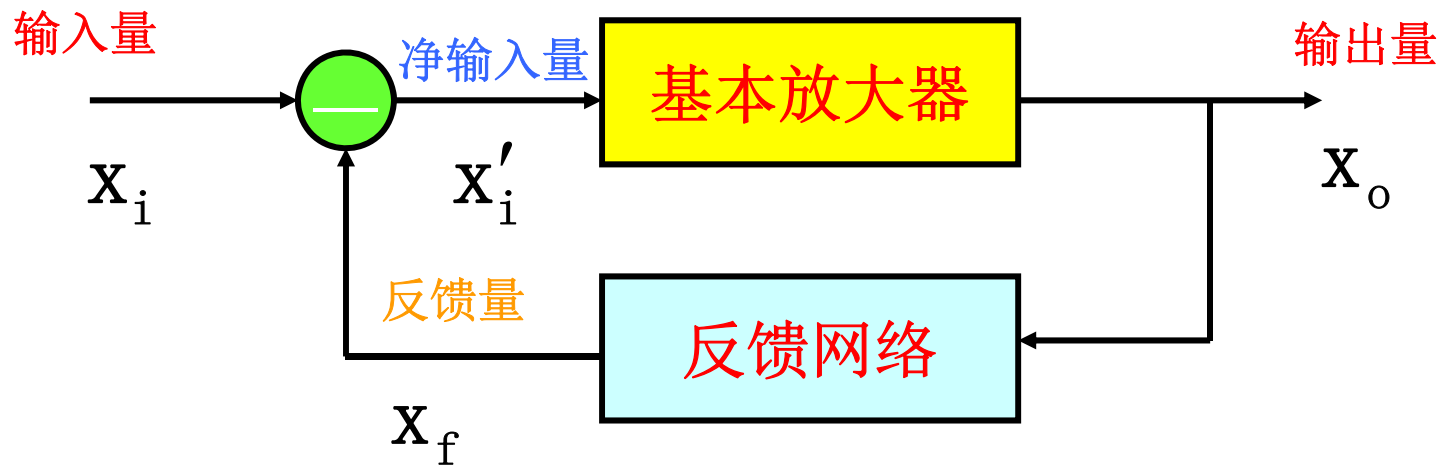
➤ 存在  $C_E$ : 直流反馈

➤ 不存在  $C_E$ : 既有直流反馈, 又有交流反馈



## 5.2 负反馈放大器

### 1、负反馈放大电路的结构



**x信号：** 电压或电流

$$X'_i = X_i - X_f$$

负反馈放大电路具有  
稳定输出的功能

## 2、负反馈放大电路的方程

基本放大电路增益： $\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i'}$   $\longrightarrow$  开环增益

反馈网络增益： $\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$   $\longrightarrow$  反馈系数

负反馈放大电路增益：

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A} \cdot \dot{X}_i'}{\dot{X}_i' + \dot{X}_f} = \frac{\dot{A}}{1 + \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o} \cdot \frac{X_o}{\dot{X}_i'}} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A} \cdot \dot{F}} \longrightarrow \text{闭环增益}$$

$\dot{A} \cdot \dot{F}$  环路增益，回归比

$1 + \dot{A} \cdot \dot{F}$  反馈深度

### 3、负反馈放大电路的分类

根据基本放大电路与反馈网络之间的端口连接来进行分类。

#### a) 输出端:

电压反馈: 采样电压信号

电流反馈: 采样电流信号

#### b) 输入端:

串联反馈: 串联连接

并联反馈: 并联连接

组成四种负反馈放大电路:

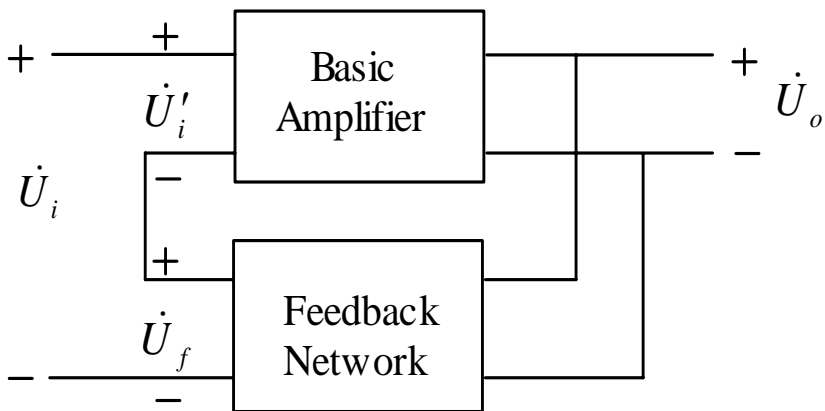
电压串联负反馈

电压并联负反馈

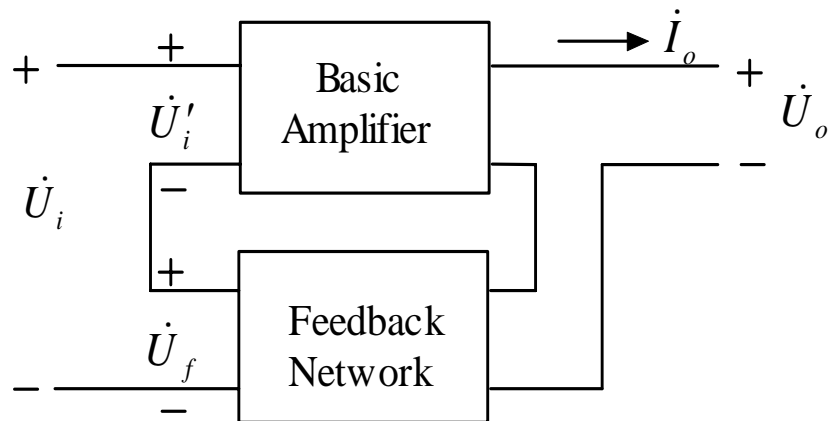
电流串联负反馈

电流并联负反馈

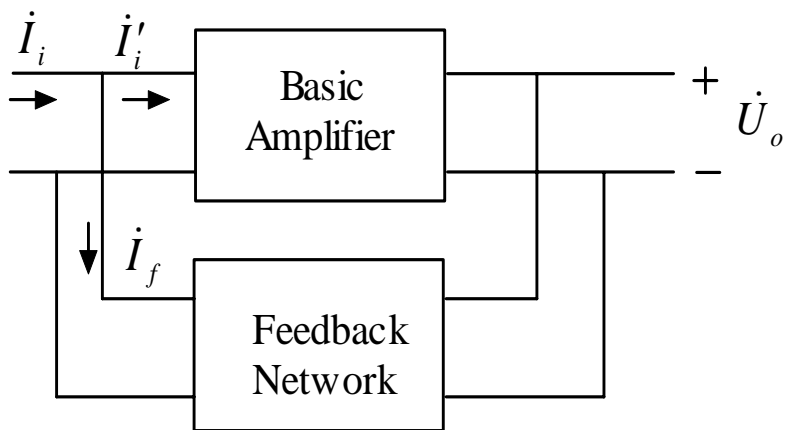
通常针对交流负反馈而言



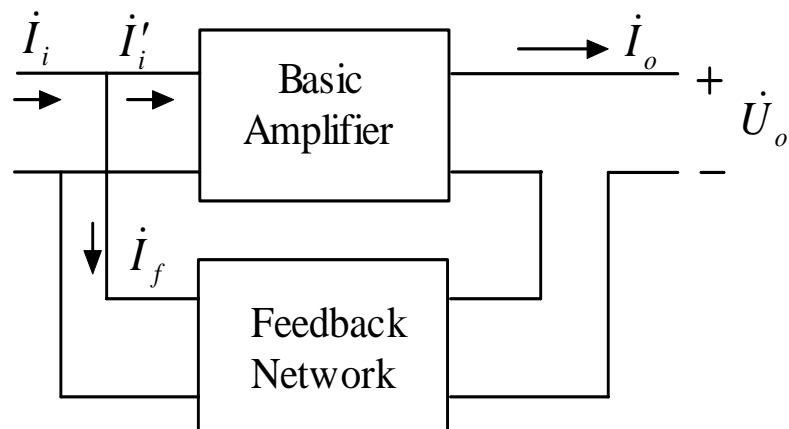
电压串联负反馈



电流串联负反馈

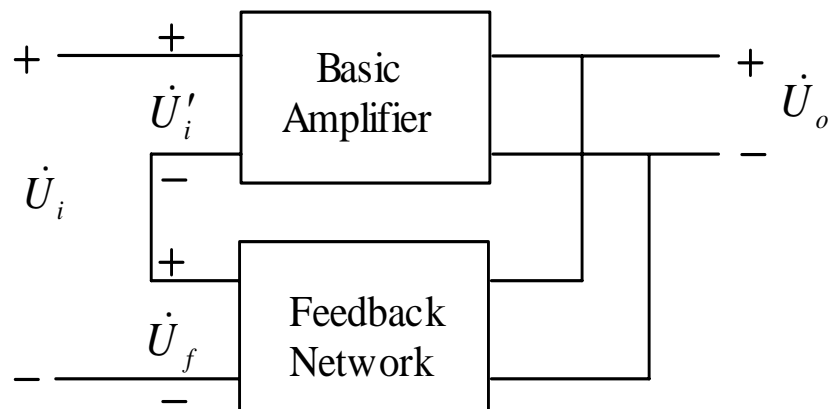


电压并联负反馈



电流并联负反馈

## 电压串联负反馈



$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}'_i} \quad \dot{F}_u = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o}$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{A}_u}{1 + \dot{A}_u \cdot \dot{F}_u}$$

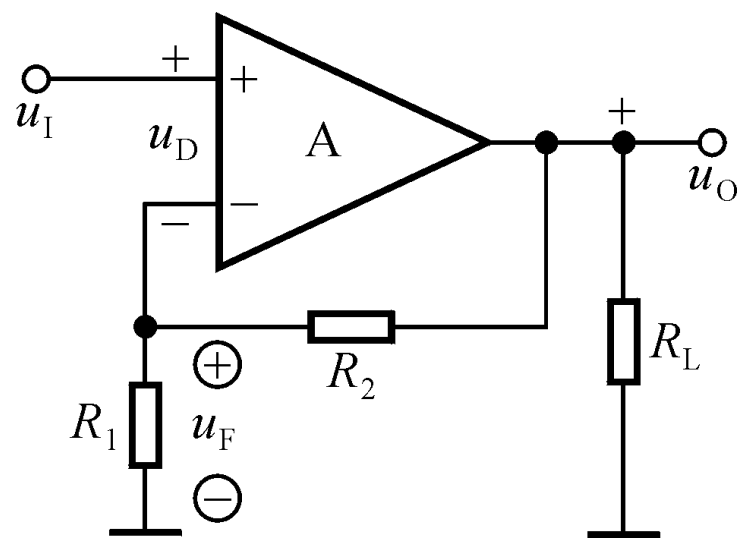
输出端：反馈网络**并接**在输出电压的两端，采样**电压**信号

输入端：调整**电压信号**，即净输入为原输入电压减去反馈电压

基本放大电路为**电压放大电路**，闭环放大电路实现电压电路

当输入信号一定时，可以**稳定放大电路的输出电压**，以及**稳定放大电路的电压增益**

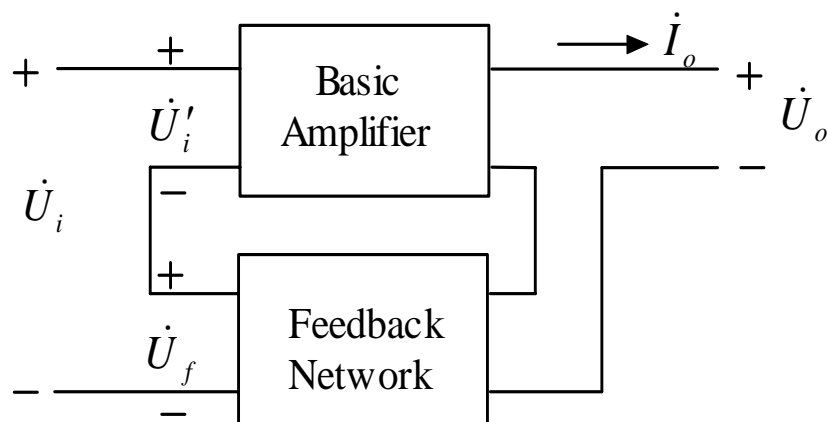
闭环增益比开环增益要小



电压串联负反馈



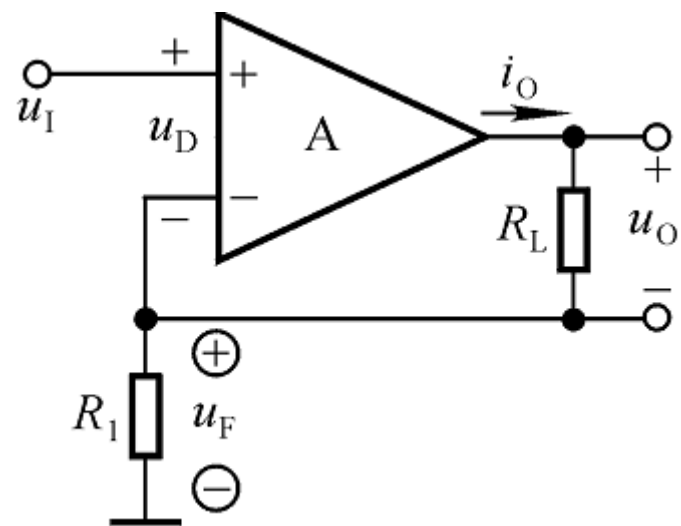
## 电流串联负反馈



$$\dot{A}_{iu} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}'_i} \quad \dot{F}_{ui} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o}$$

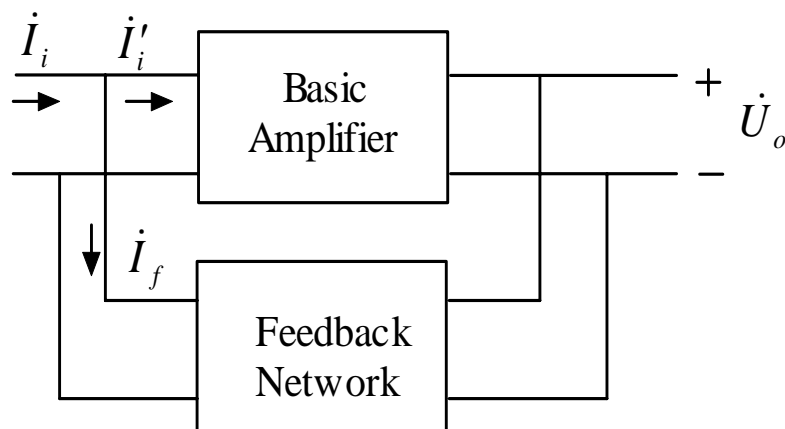
$$\dot{A}_{iuf} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{A}_{iu}}{1 + \dot{A}_{iu} \cdot \dot{F}_{ui}}$$

- ❑ 反馈网络串接在输出电流回路中，采样电流信号
- ❑ 调整电压信号，即净输入为原输入电压减去反馈电压
- ❑ 基本放大电路为互导放大电路，闭环放大电路实现互导增益，闭环增益小于开环增益
- ❑ 当输入信号一定时，可以稳定放大电路的输出电流，以及稳定放大电路的互导增益



电流串联负反馈

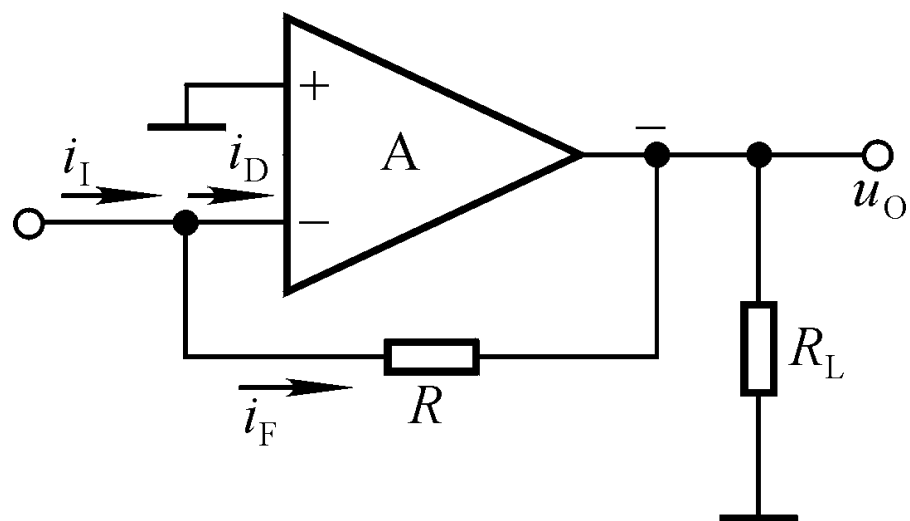
## 电压并联负反馈



$$\dot{A}_{ui} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}'_i} \quad \dot{F}_{iu} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o}$$

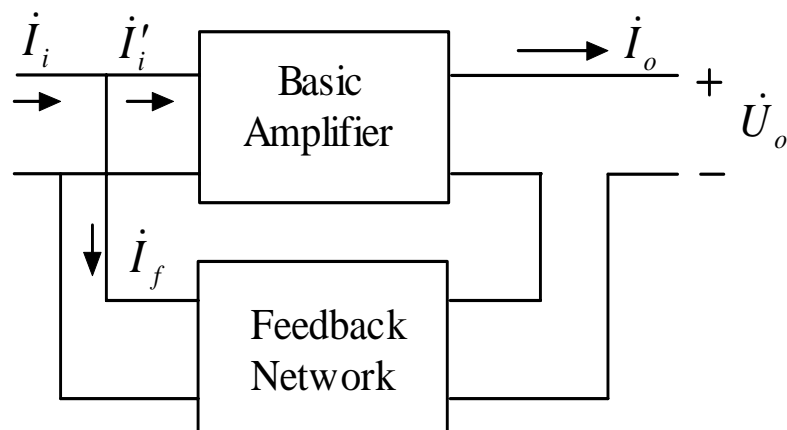
$$\dot{A}_{uif} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{A}_{ui}}{1 + \dot{A}_{ui} \cdot \dot{F}_{iu}}$$

- ❑ 反馈网络**并联**在输出电压两端，采样**电压**信号
- ❑ 调整**电流**信号，即净输入为原输入电流减去反馈电流
- ❑ 基本放大电路为**互阻放大电路**，闭环放大电路实现互阻增益，闭环增益小于开环增益
- ❑ 当输入信号一定时，可以**稳定放大电路的输出电压**，以及**稳定放大电路的互阻增益**



电流并联负反馈

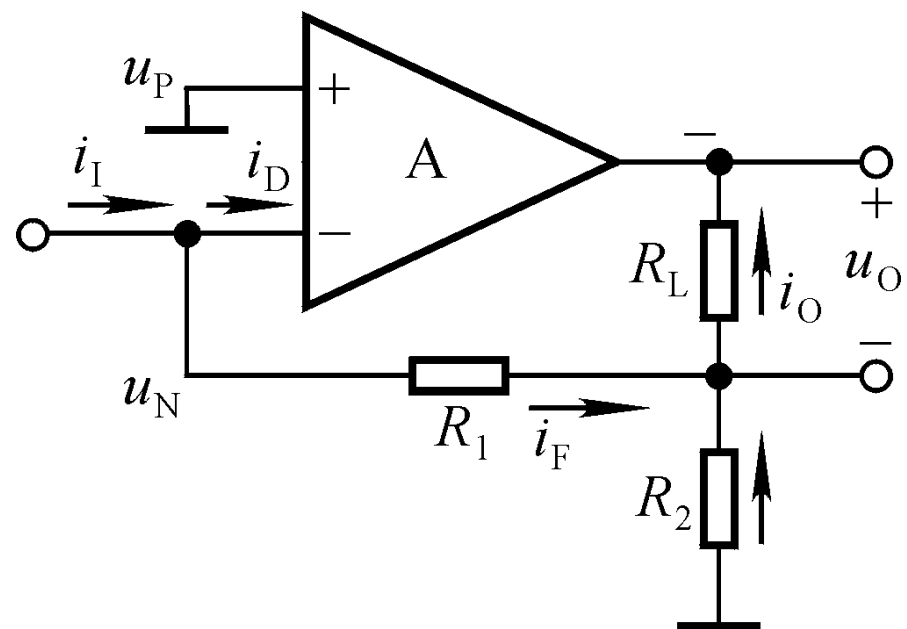
## 电流并联负反馈



$$\dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}'_i} \quad \dot{F}_i = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o}$$

$$\dot{A}_{if} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{A}_i}{1 + \dot{A}_i \cdot \dot{F}_i}$$

- ❑ 反馈网络串接在输出电流回路中，采样电流信号
- ❑ 调整电流信号，即净输入为原输入电流减去反馈电流
- ❑ 基本放大电路为电流放大电路，闭环放大电路实现电流增益，闭环增益小于开环增益
- ❑ 当输入信号一定时，可以稳定放大电路的输出电流，以及稳定放大电路的电流增益



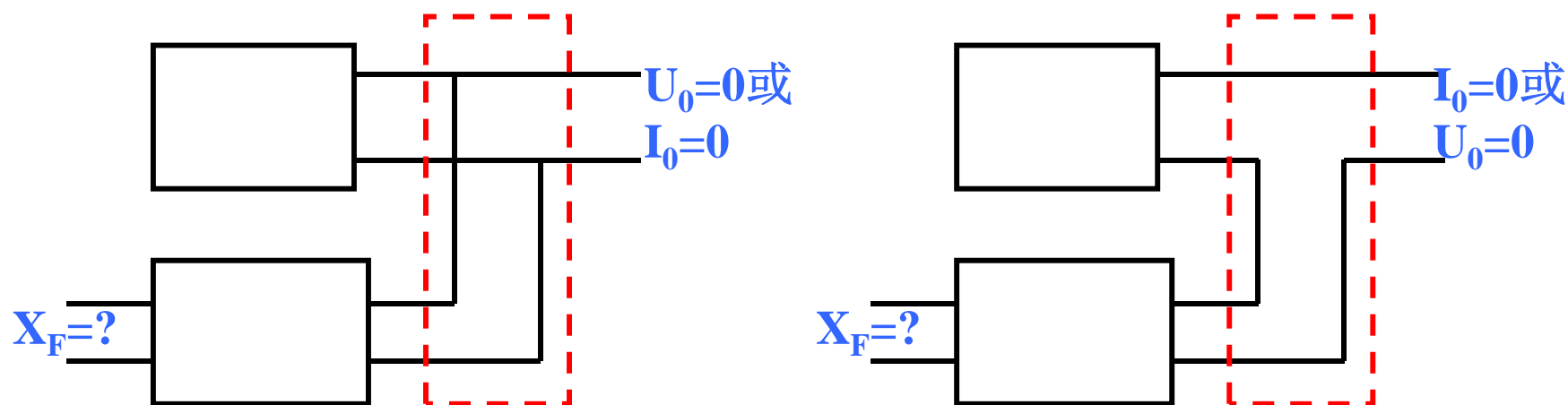
电流并联负反馈

## 负反馈放大电路的特点：

- 电压反馈稳定输出电压，电流反馈稳定输出电流；
- 输入为电压信号时宜采用串联反馈，输入为电流信号时宜采用并联反馈；
- 不同组态负反馈放大电路对应不同的增益，并具有稳定该增益的功能；
- 稳定的增益是以牺牲增益大小为代价
- 串联反馈使输入电阻增大，并联反馈使输入电阻减小；
- 电压反馈使输出电阻减小，电流反馈使输出电阻增大。

## 4、负反馈放大电路类型的判断

### □ 电压反馈和电流反馈的判断—从输出端来判断



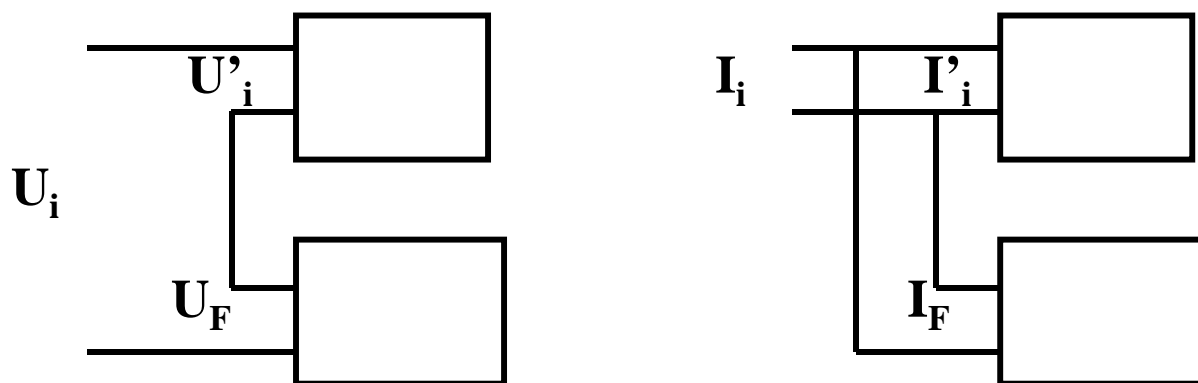
### 判断方法:

将放大器的**输出交流短路**（令 $U_o = 0$ ），看反馈网络的输出:

- a) 若反馈信号消失, 则为电压反馈
- b) 若反馈信号存在, 则为电流反馈



## □ 串联反馈和并联反馈的判断—从输入端来判断



当 $U_i$ 或 $I_i$ 为零时， $U'_i$ 和 $I'_i$ 将如何？？？

### 判断方法：

看输入端净输入信号

a) 如果  $x'_i = v'_i = v_i - v_f$ ，则为串联反馈

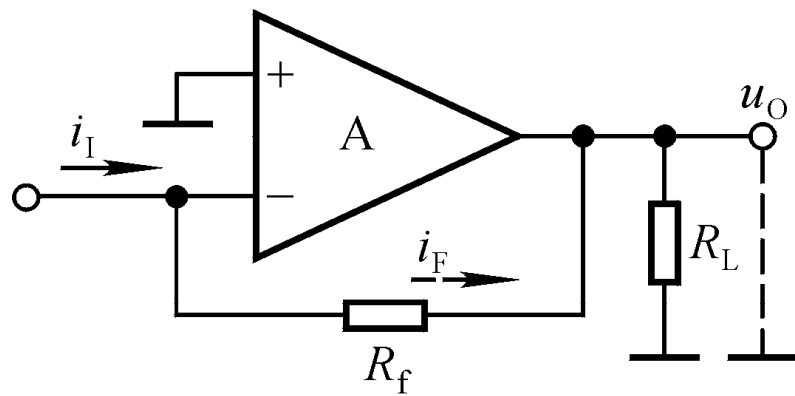
b) 如果  $x'_i = i'_i = i_i - i_f$ ，则为并联反馈

或者将输入端短路

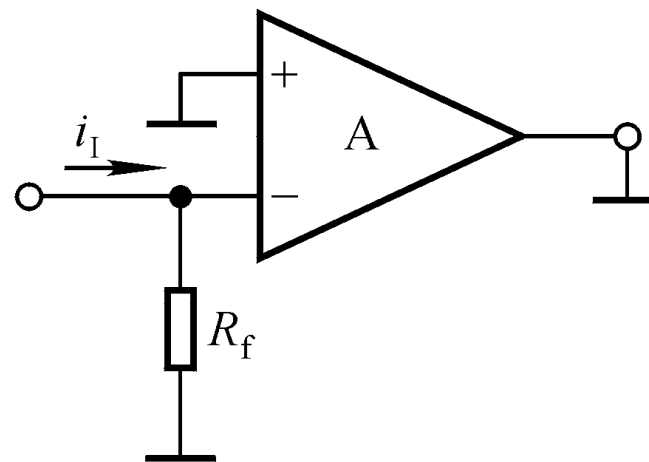
a) 如果反馈信号加不到放大器输入端，则为并联反馈

b) 如果可以，则为串联反馈。

1)



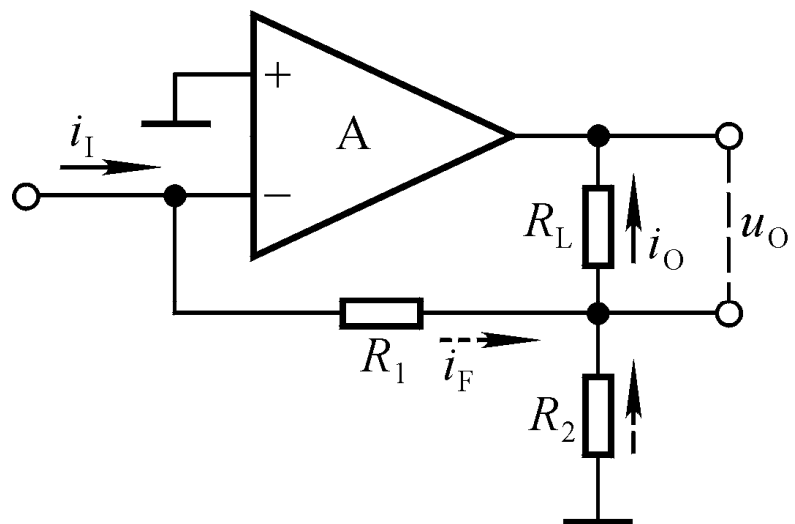
(a)



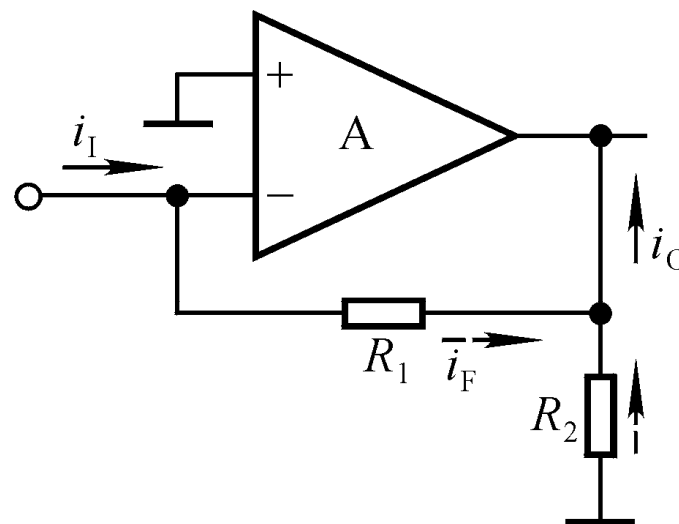
(b)

电压并联负反馈

2)



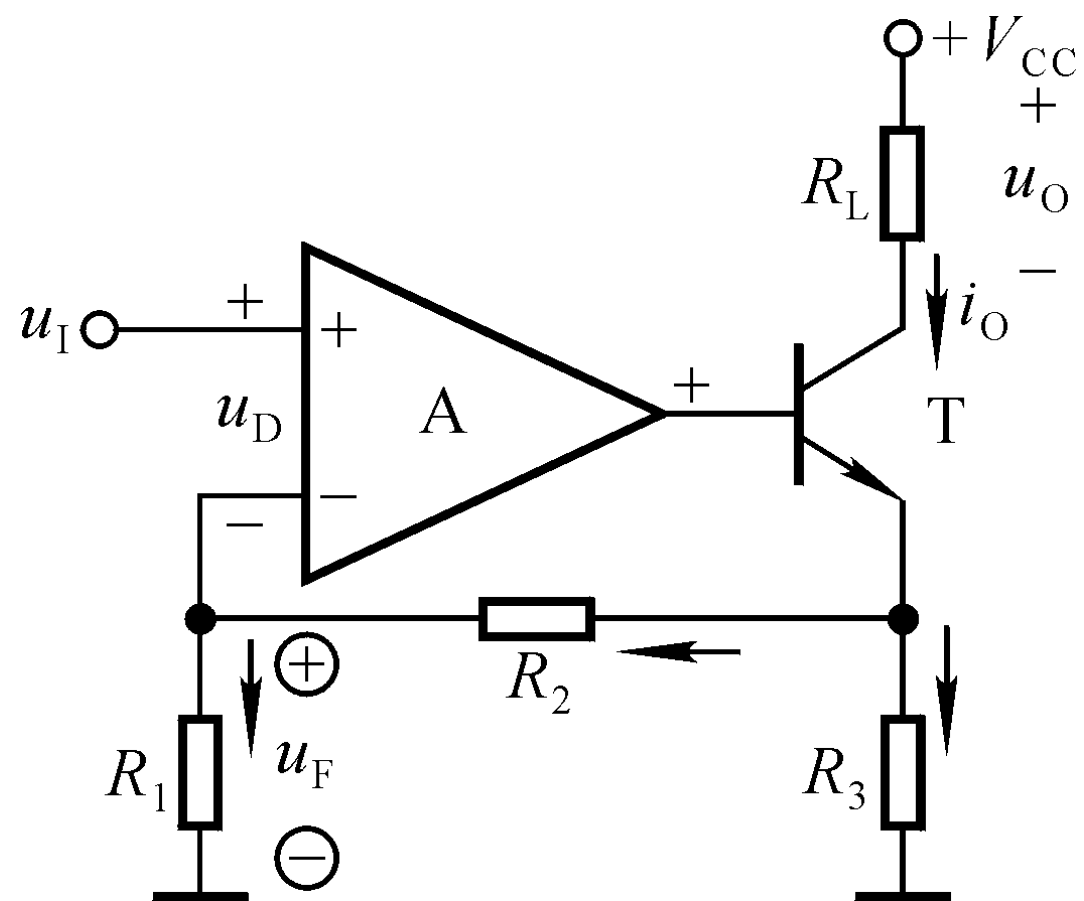
(a)



(b)

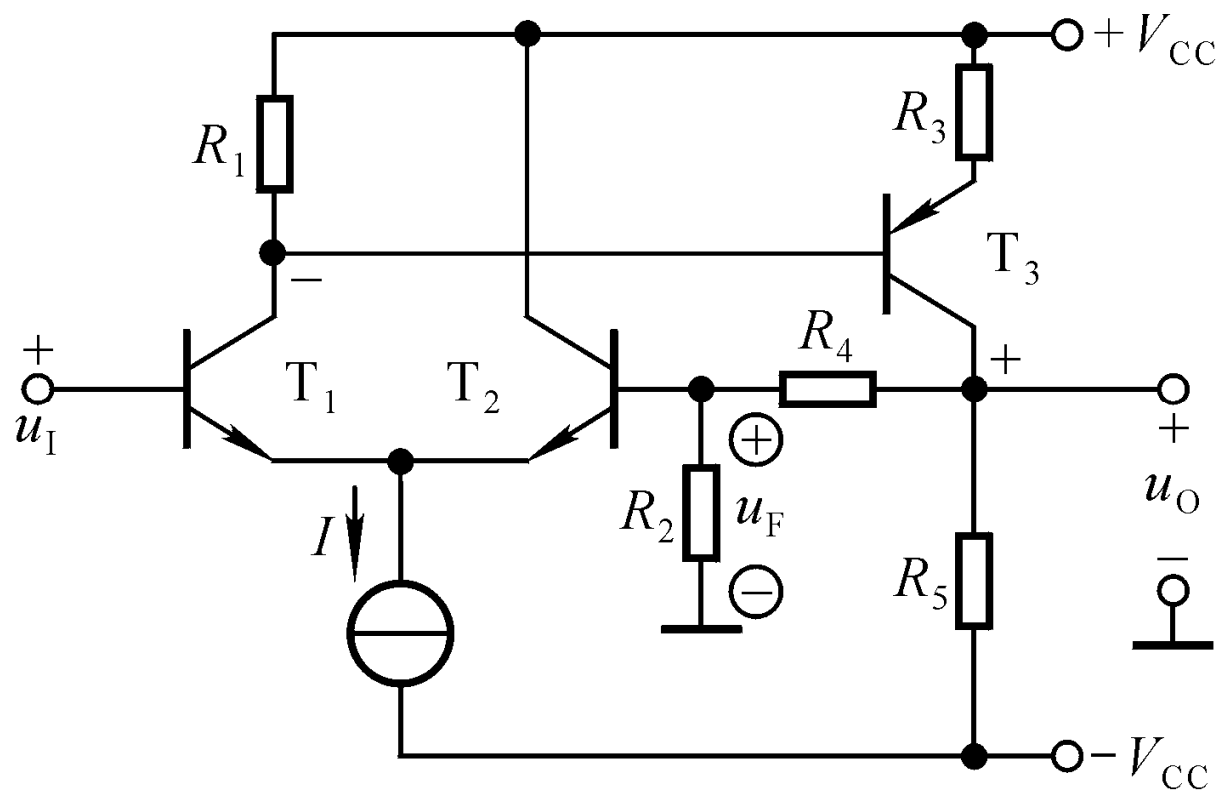
电流并联负反馈

3)



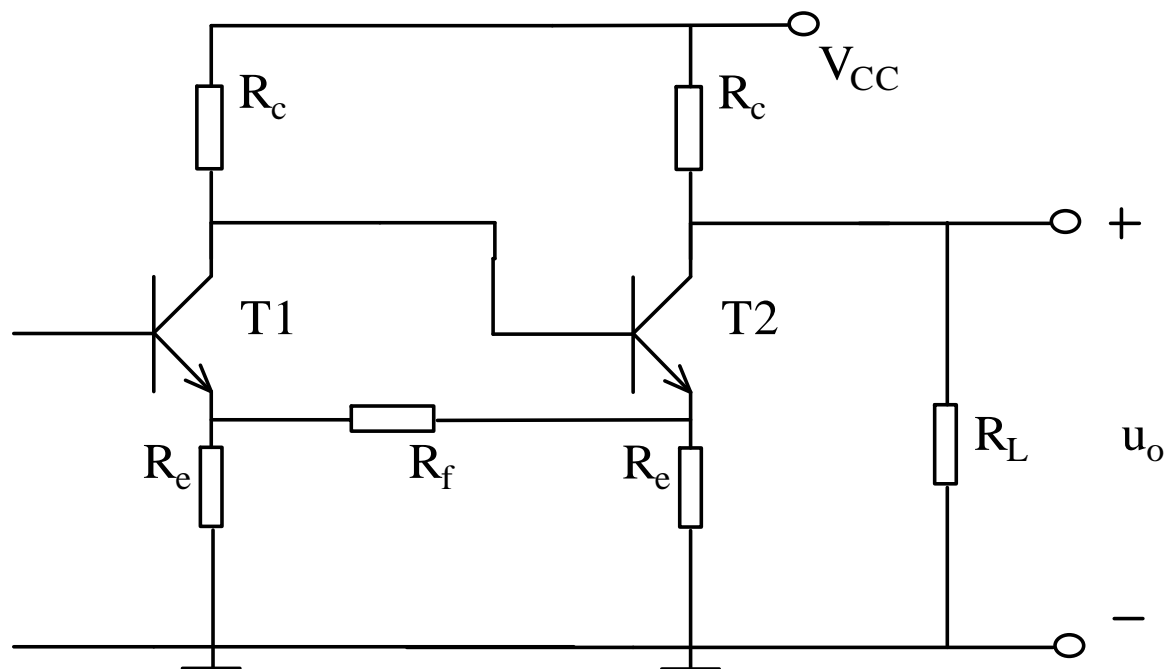
电流串联负反馈

4)



电压串联负反馈

5)



电流串联正反馈

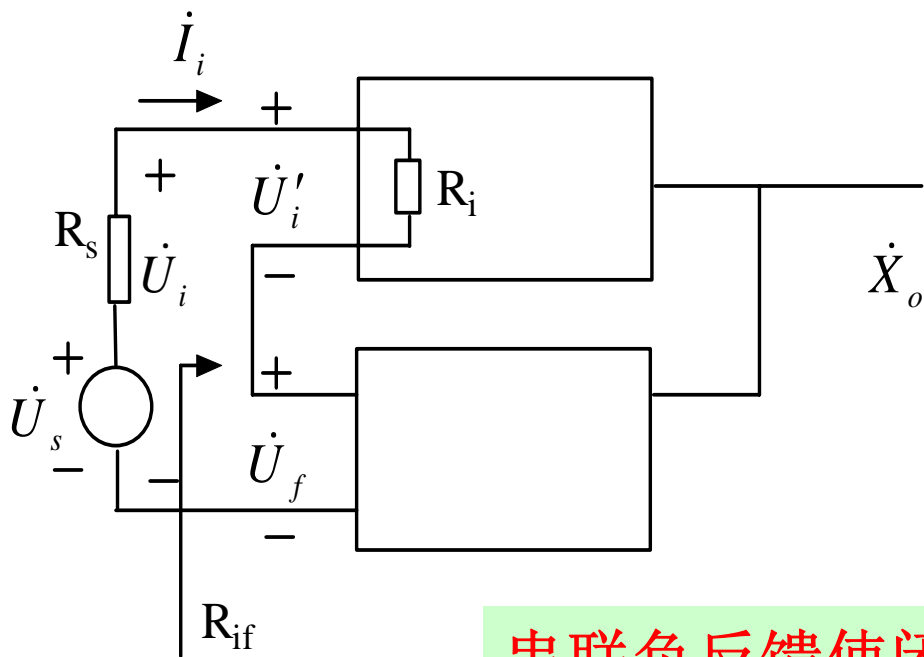
## 负反馈放大电路组态的一般规律：

- 一般电压反馈的采样点与输出电压在相同端点；电流反馈的采样点与输出电压在不同端点；
- 如果输入信号 $X_i$ 与反馈信号 $X_f$ 在输入回路的不同端点，则为串联反馈；若输入信号 $X_i$ 与反馈信号 $X_f$ 在输入回路的相同端点，则为并联反馈

## 5.3 负反馈对放大电路性能的影响

### 一、对输入电阻的影响

#### 1、串联负反馈



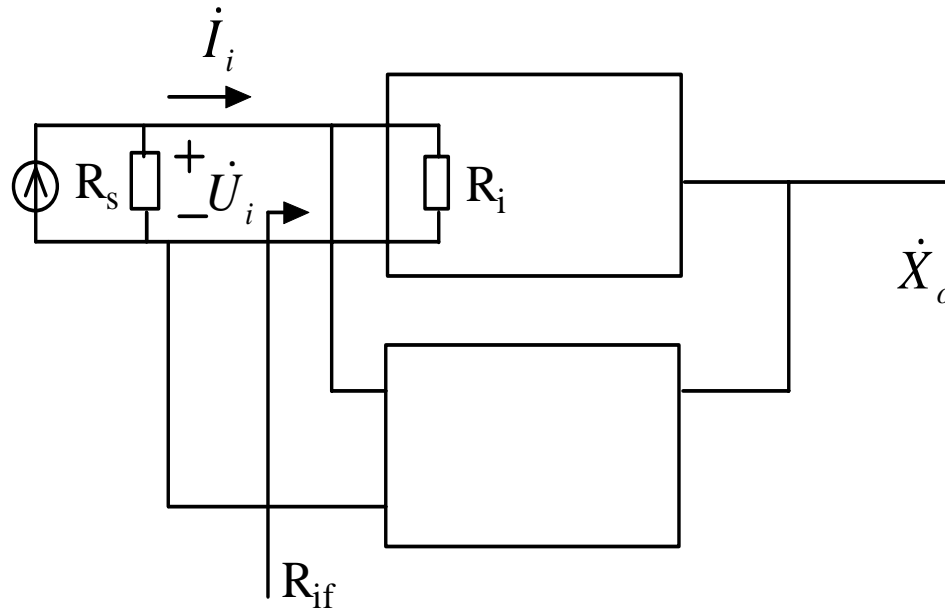
$R_i$  基本放大器输入电阻

反馈放大器输入电阻

$$R_{if} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_i \cdot (1 + A \cdot F)$$

串联负反馈使闭环输入电阻增加到基本放大电路输入电阻的 $(1+AF)$ 倍

## 2、并联负反馈



闭环输入电阻

$$R_{if} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_i \cdot \frac{1}{(1 + A \cdot F)}$$

并联负反馈使闭环输入电阻减小到基本放大电路输入电阻的 $1/(1+AF)$ 倍

## 二、对增益稳定性的影响

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A} \cdot \dot{F}}$$

$$A_f = \frac{A}{1 + A \cdot F}$$

闭环增益稳定性

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + A \cdot F} \cdot \frac{dA}{A}$$

闭环增益稳定性比开环增益稳定性高 $1+AF$ 倍

注意：

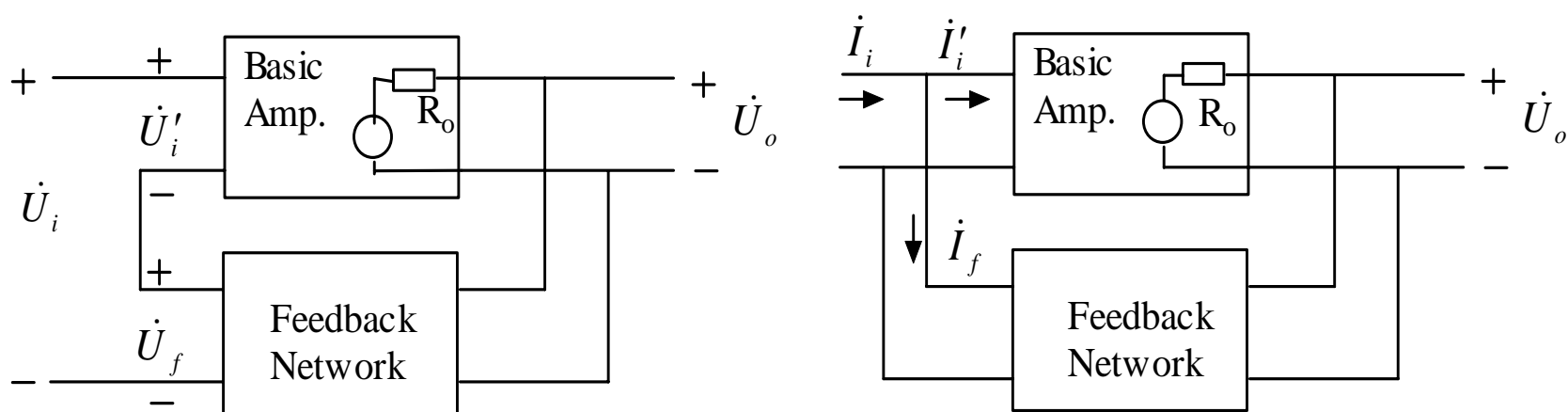
某一类型的负反馈（四种组态），只能稳定该组态对应的增益，而不能稳定其他的增益





### 三、对输出电阻的影响

#### 1、电压反馈

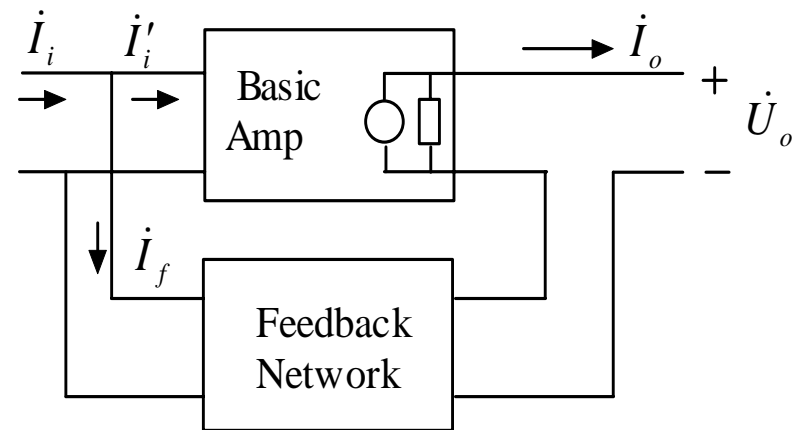
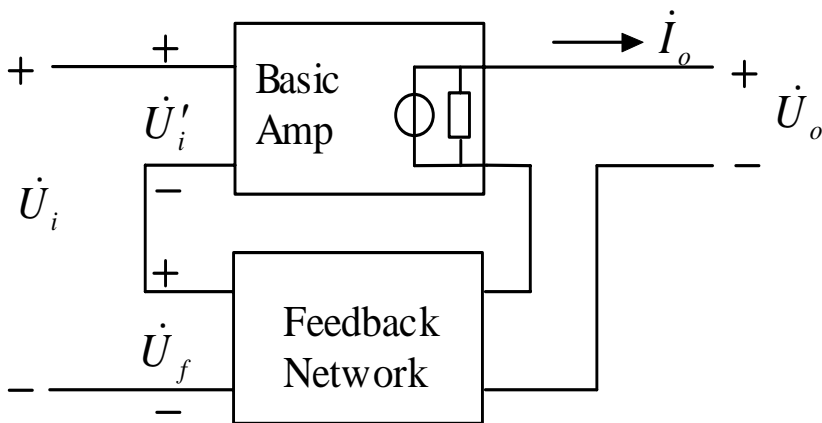


$$R_{of} = R_o \cdot \frac{1}{(1 + A \cdot F)}$$

输出电阻减小 $1+AF$ 倍

**A:** 负载开路时的（源）电压增益-----串联反馈  
负载开路时的（源）互阻增益-----并联反馈

## 2、电流反馈



$$R_{of} = R_o \cdot (1 + A \cdot F)$$

输出电阻增大 $1+AF$ 倍

**A:** 负载短路时的（源）互导增益-----串联反馈

负载短路时的（源）电流增益-----并联反馈

## 四、扩展通频带

无反馈时  $f_{BW} = f_H - f_L$

引入负反馈后

$$f_{Hf} = (1 + AF) f_H$$

$$f_{Lf} = \frac{f_L}{1 + AF}$$

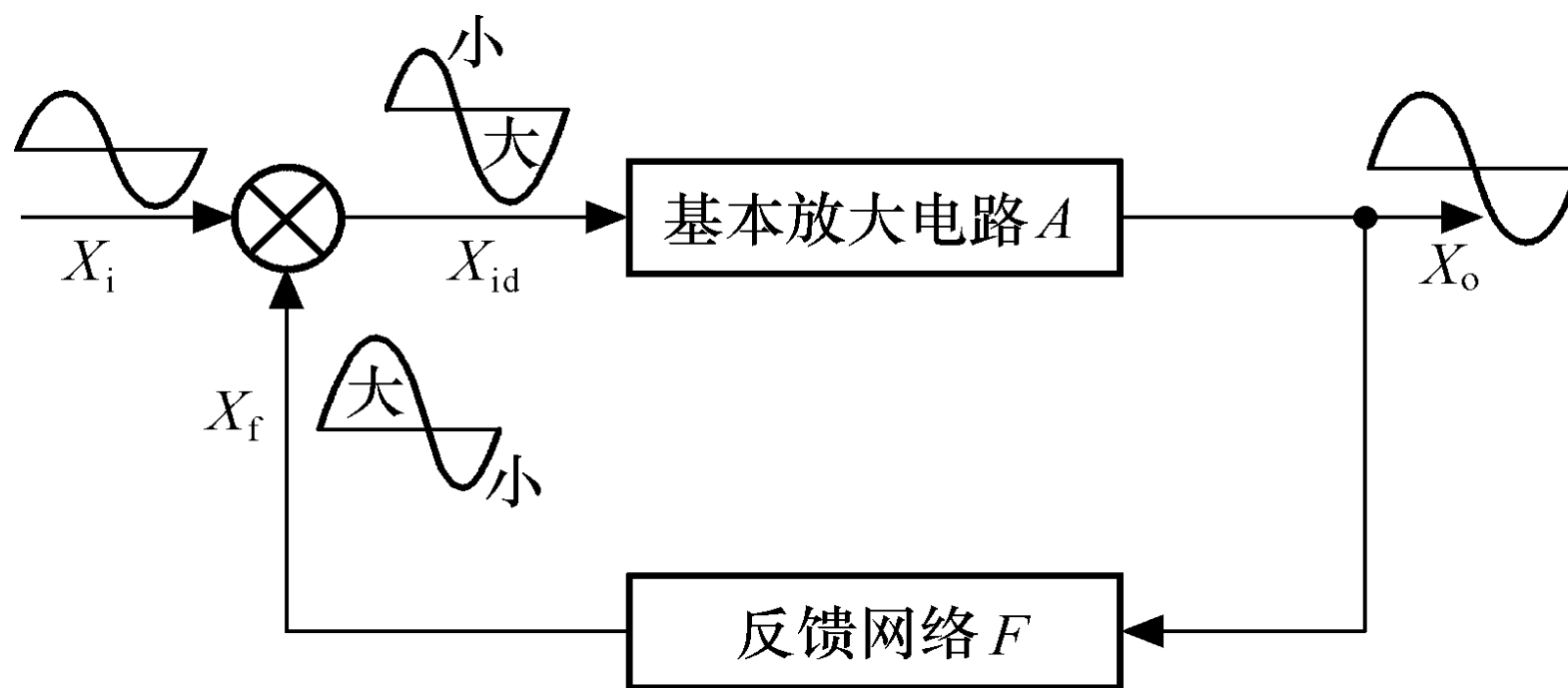
$$f_{BWf} = f_{Hf} - f_{Lf}$$

引入负反馈可以使放大电路的带宽增大

## 五、减少非线性失真



(a) 无反馈



(b) 有负反馈

## 总结:

- 性能的改变是以降低增益为代价
- 负反馈可以提高对应增益的稳定性
- 串联反馈使输入电阻增大，并联反馈使输入电阻减少；电压反馈使输出电阻减少，电流反馈使输出电阻增大
- 负反馈可以扩展带宽，但只能扩展相应增益的带宽
- 负反馈可以减小非线性失真，但不能抑制从输入端引入的非线性干扰分量

# 如何在放大电路中引入负反馈？

## □ 直流反馈和交流反馈的引入

- 为了稳定直流量，则引入直流反馈
- 为了改善交流性能，则引入交流反馈

## □ 串联反馈和并联反馈的引入

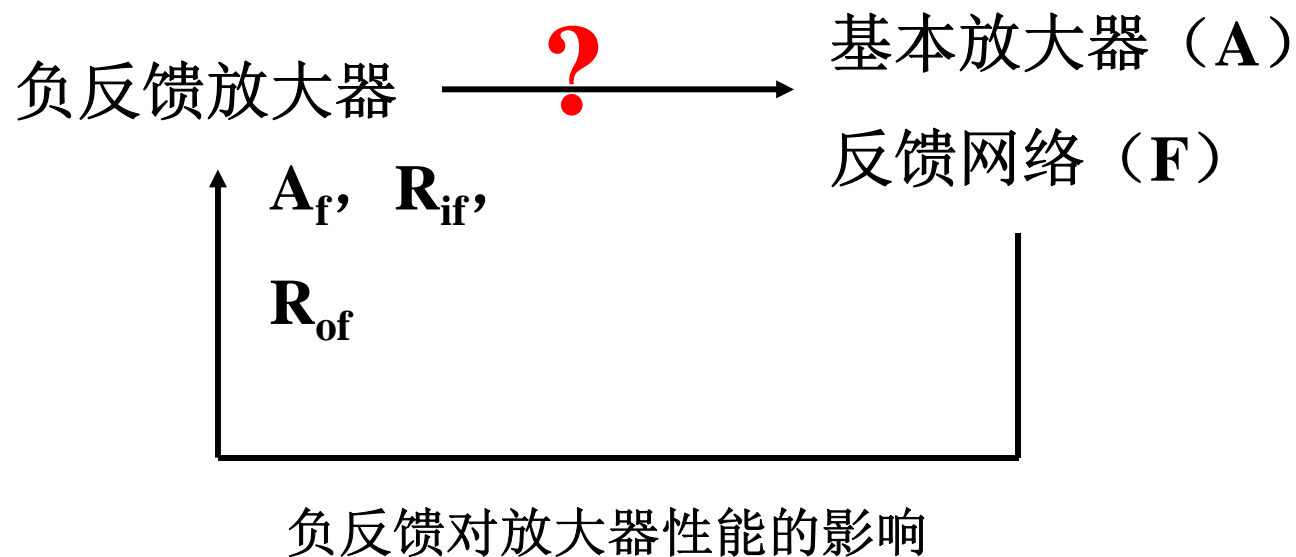
- 如果是电压源激励或为了提高输入电阻，则引入串联反馈
- 如果是电流源激励或为了降低输入电阻，则引入并联反馈

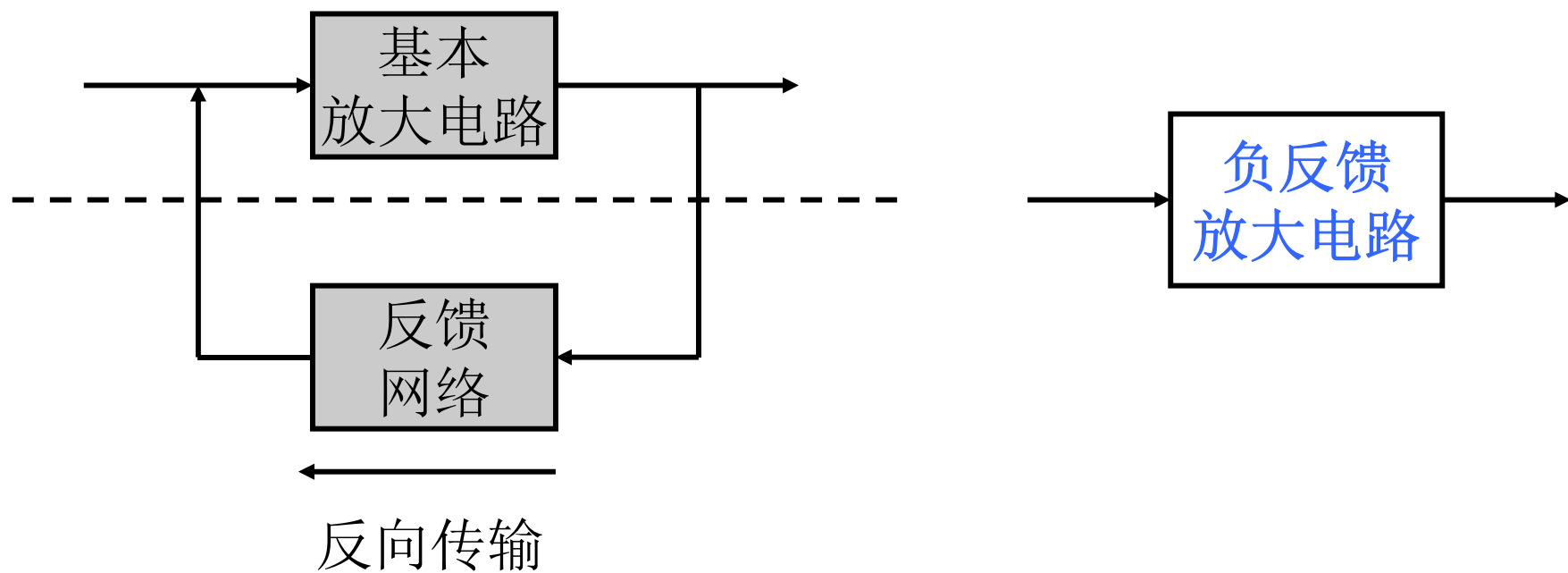
## □ 电压反馈和电流反馈的引入

- 如果要稳定输出电压信号，增大电压驱动能力，则引入电压反馈
- 如果要稳定输出电流信号，增大电流驱动能力，则引入电流反馈

## 5.4 负反馈放大电路性能分析

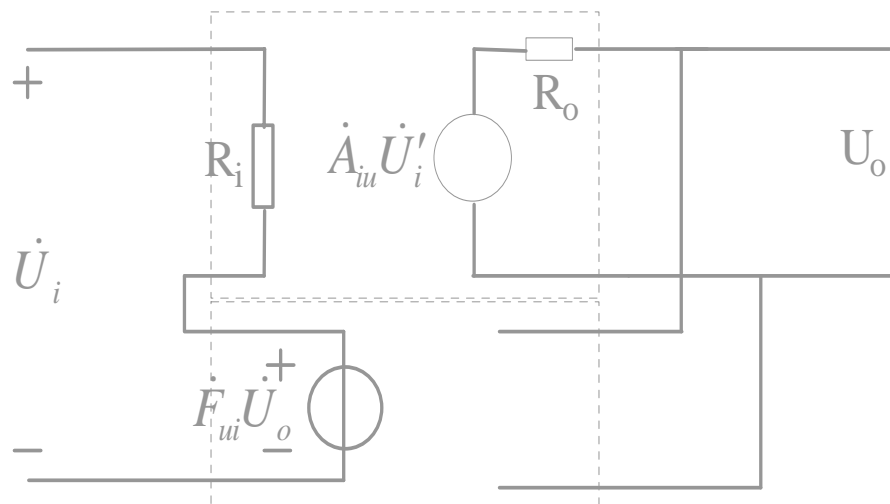
### 负反馈放大电路的分析方法



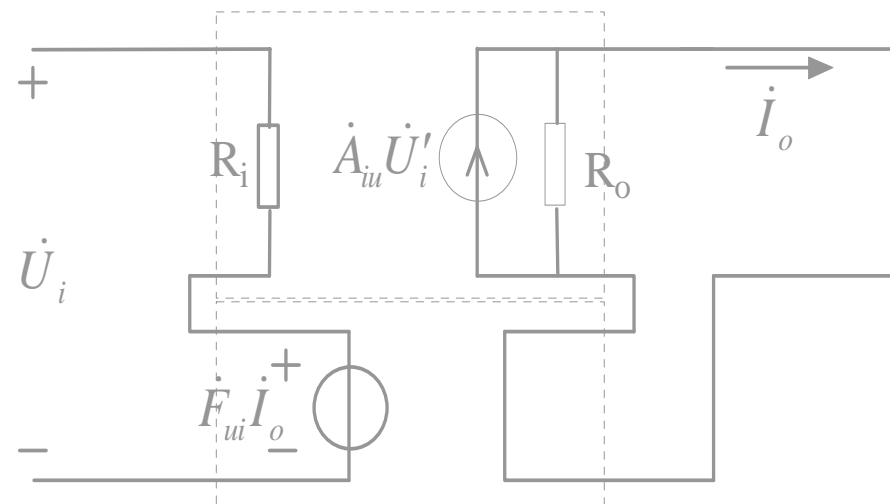


需要从一个实际负反馈放大电路中提取出基本放大电路和反馈网络

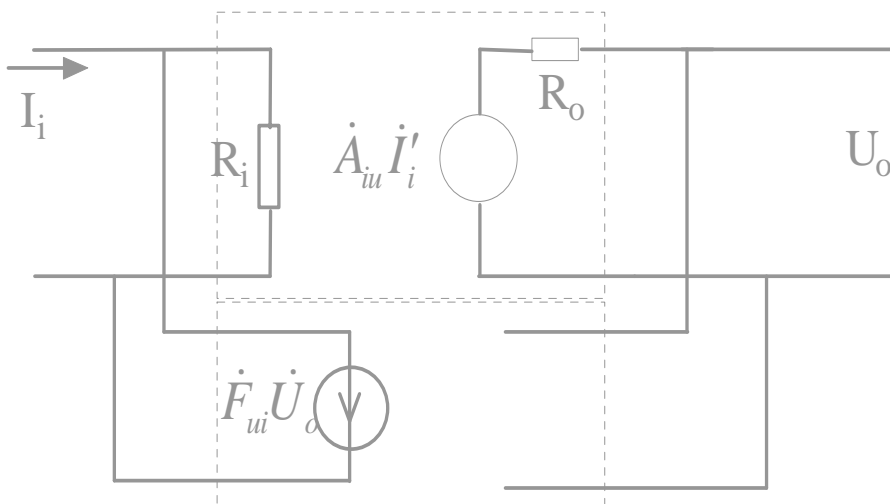




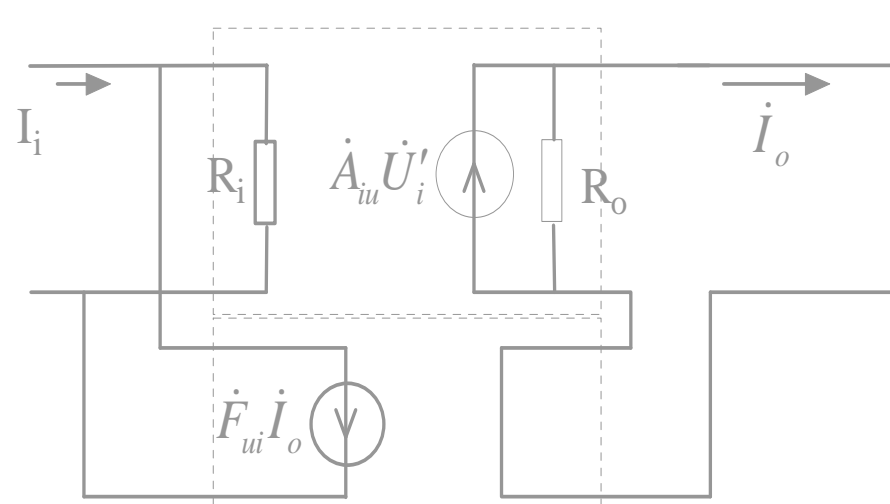
电压串联负反馈



电流串联负反馈



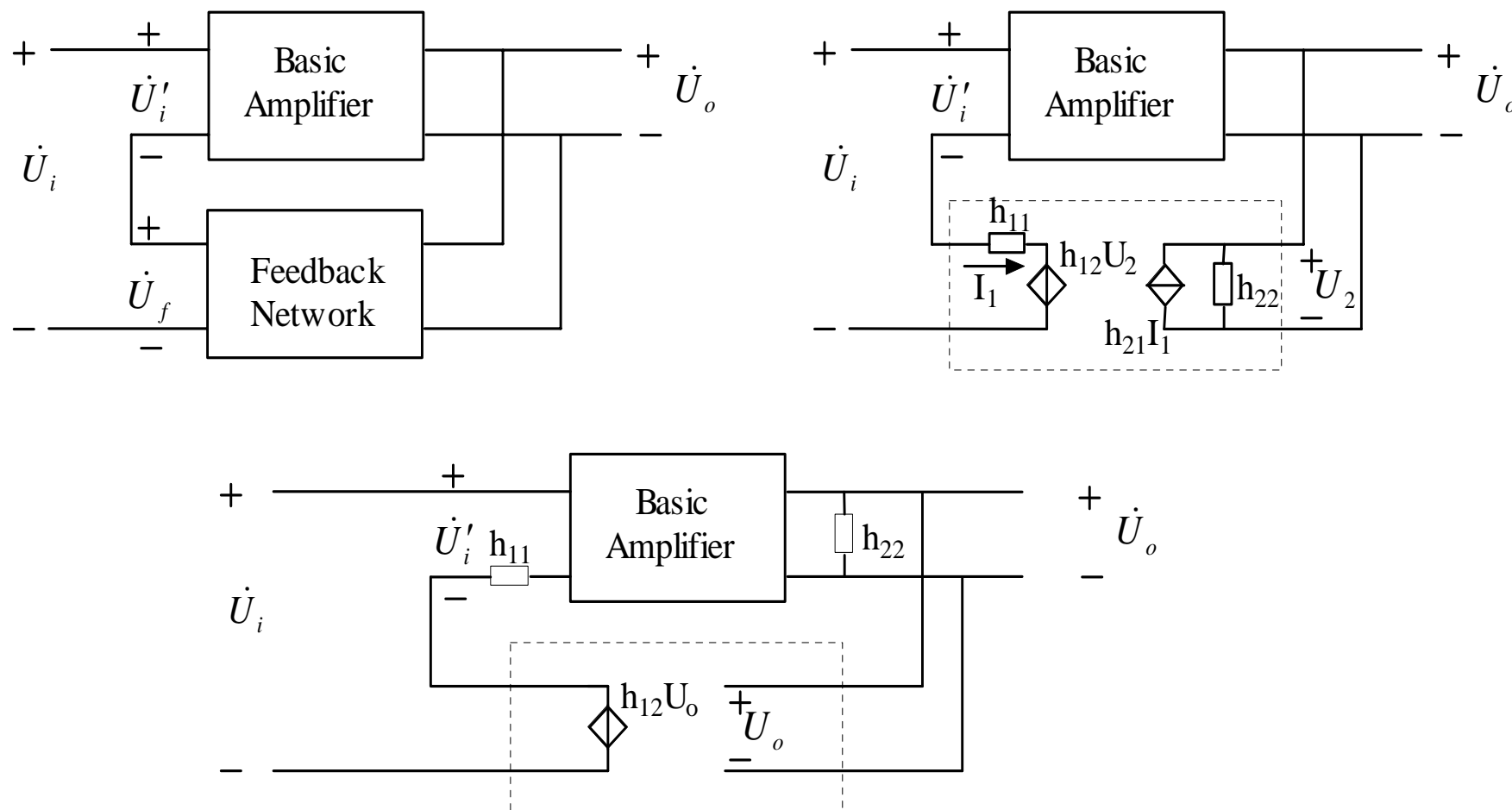
电压并联负反馈



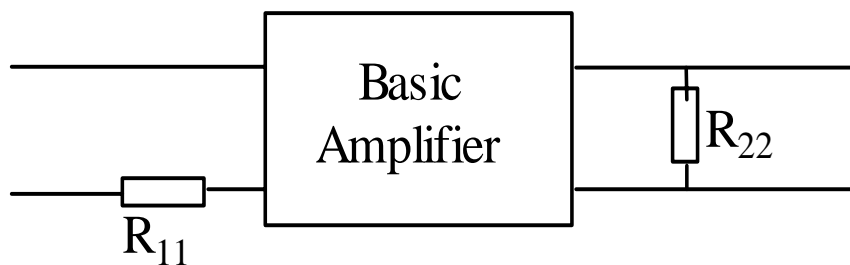
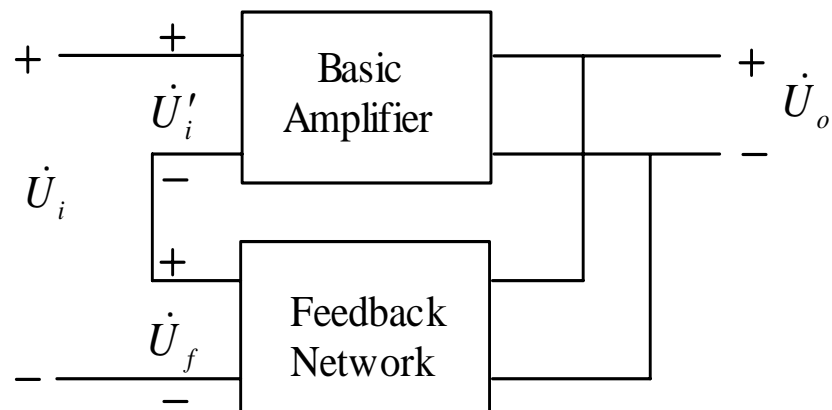
电流并联负反馈

# 一、基本放大器分析（拆环原理）

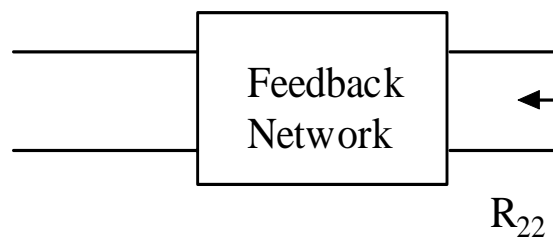
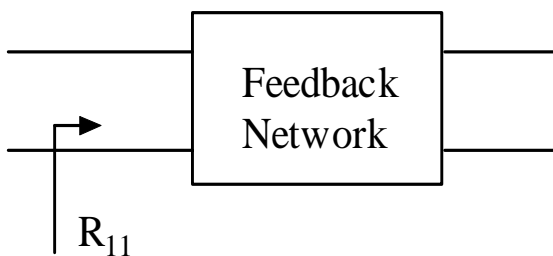
以电压串联负反馈放大电路为例



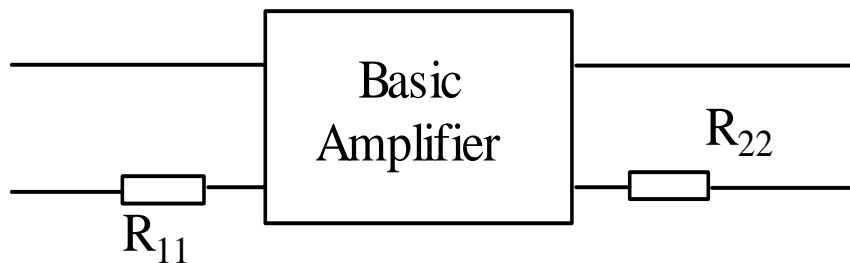
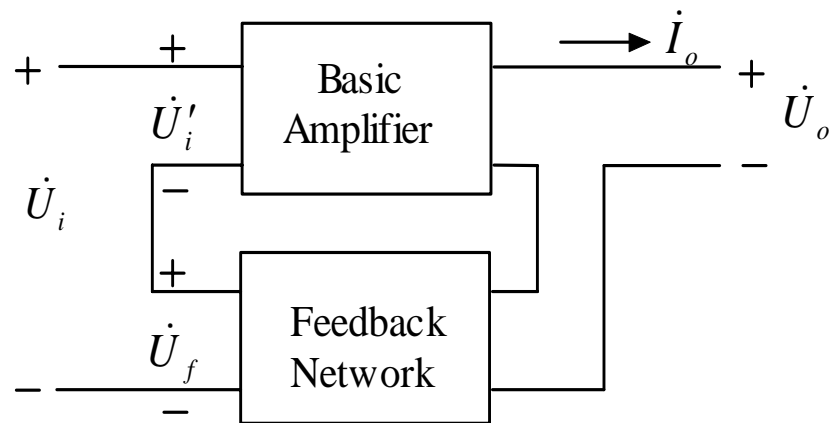
# 电压串联负反馈放大电路



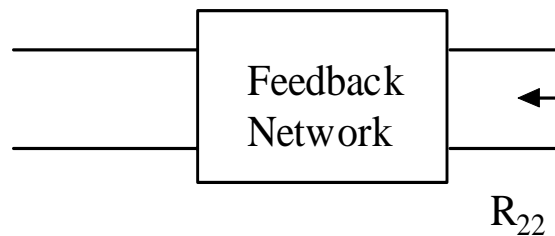
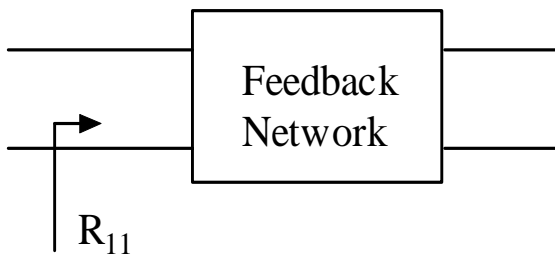
负反馈放大电路的基本放大器



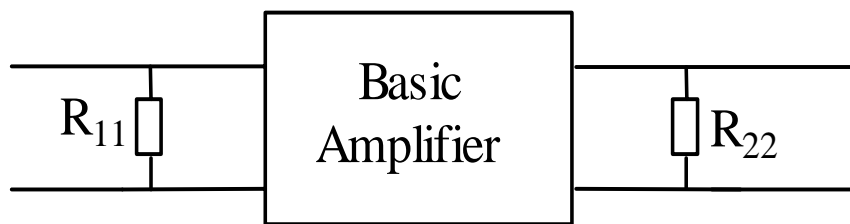
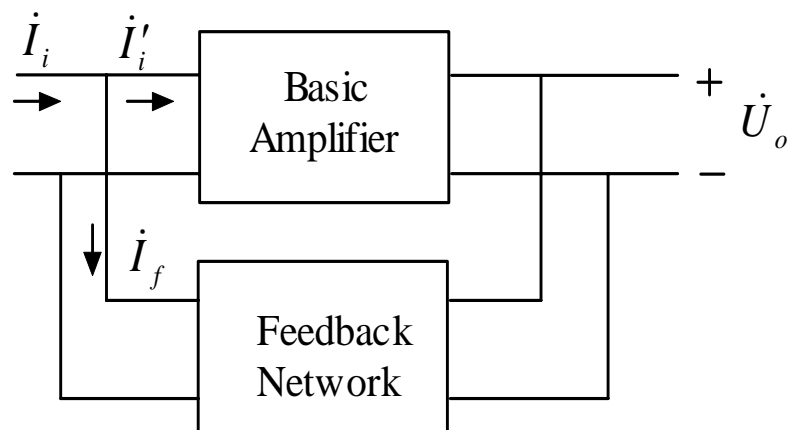
# 电流串联负反馈放大电路



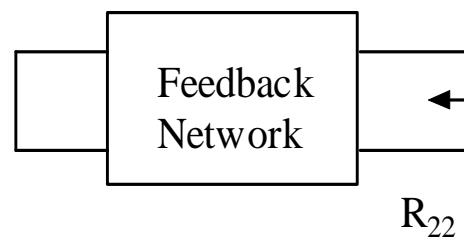
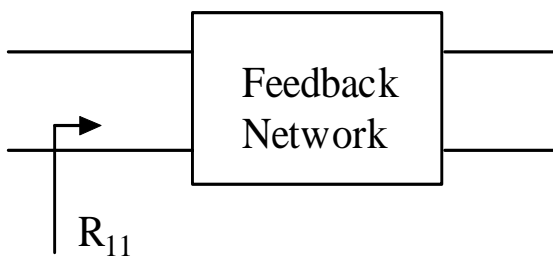
负反馈放大电路的基本放大器



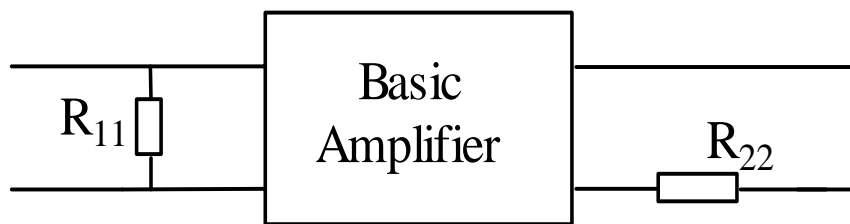
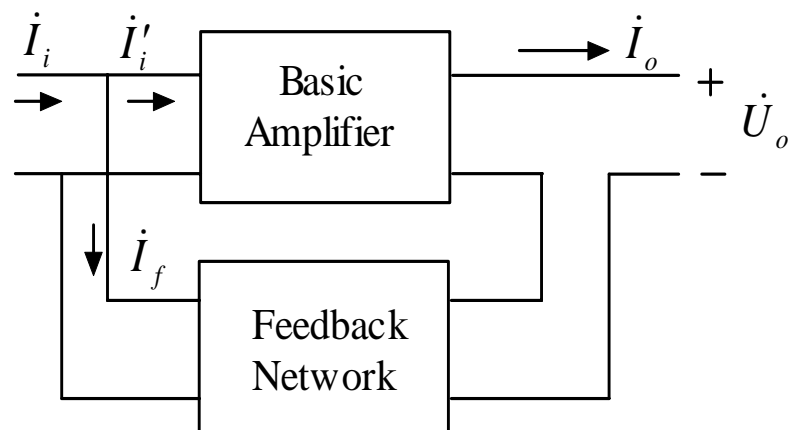
# 电压并联负反馈放大电路



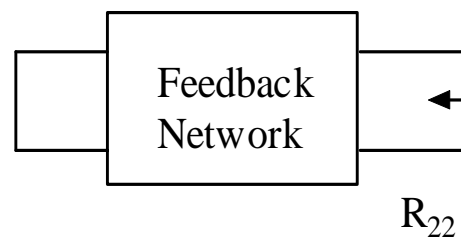
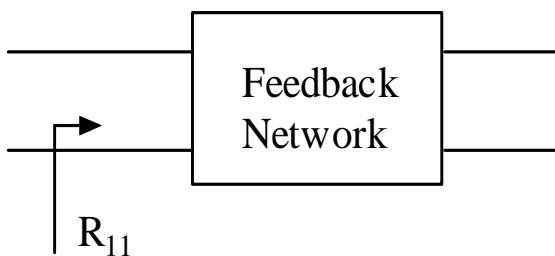
负反馈放大电路的基本放大器



# 电流并联负反馈放大电路



负反馈放大电路的基本放大器



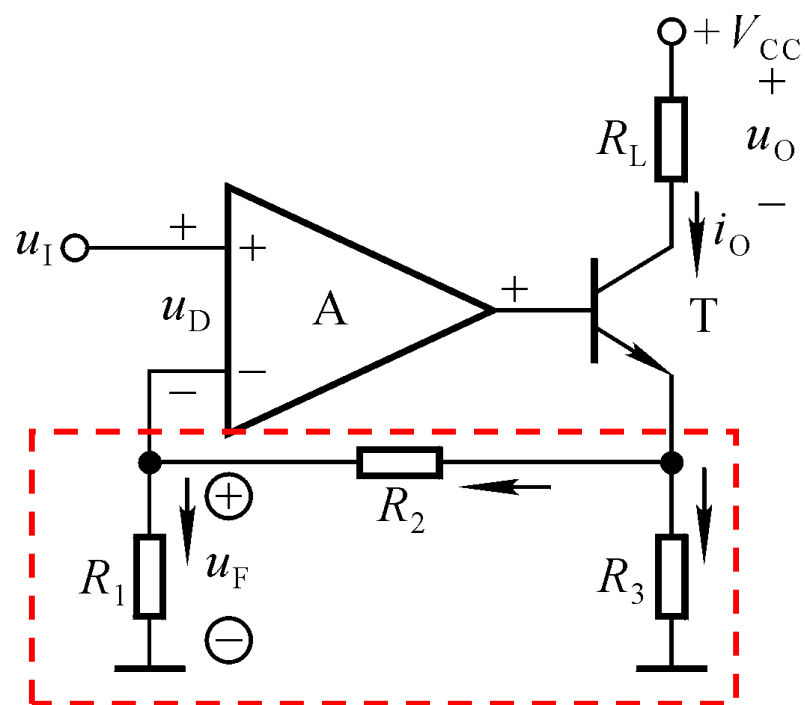
## 拆环原理:

1. 将放大器输出端交流短路（电压反馈）或交流开路（电流反馈），这时的实际放大器的输入回路就是计及反馈网络负载效应的基本放大器的输入回路。
2. 将实际放大器的输入端交流短路（并联反馈）或交流开路（串联反馈），这时实际放大器的输出回路就是计及反馈网络负载效应的基本放大器的输出回路。

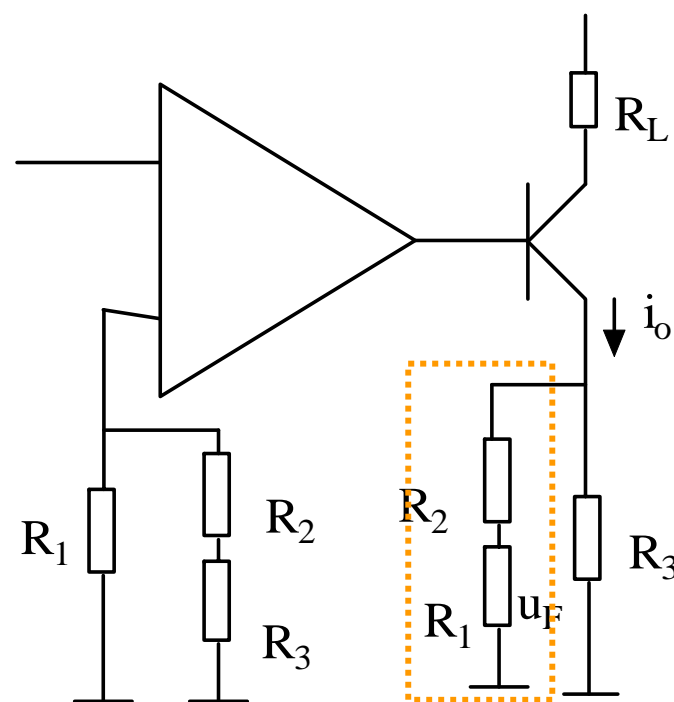
## 负反馈放大电路的分析过程:

1. 利用拆环原理得到基本放大电路，并计算基本放大电路的交流性能
2. 在基本放大器的输出回路中计算出反馈系数或利用反馈网络计算反馈系数
3. 利用负反馈对放大电路性能的影响计算出负反馈放大电路的交流性能

例：



实际负反馈放大器

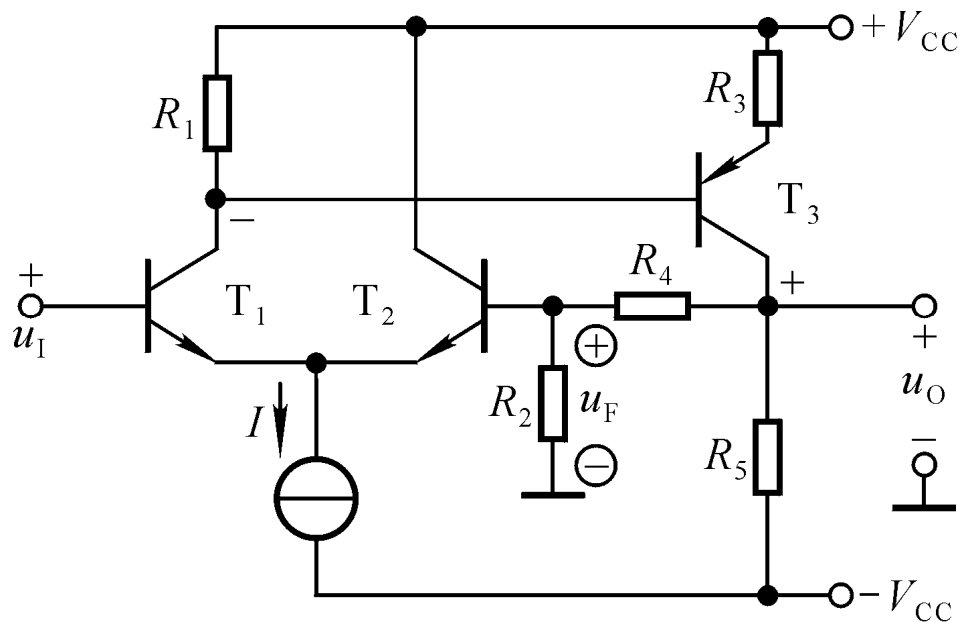


基本放大器

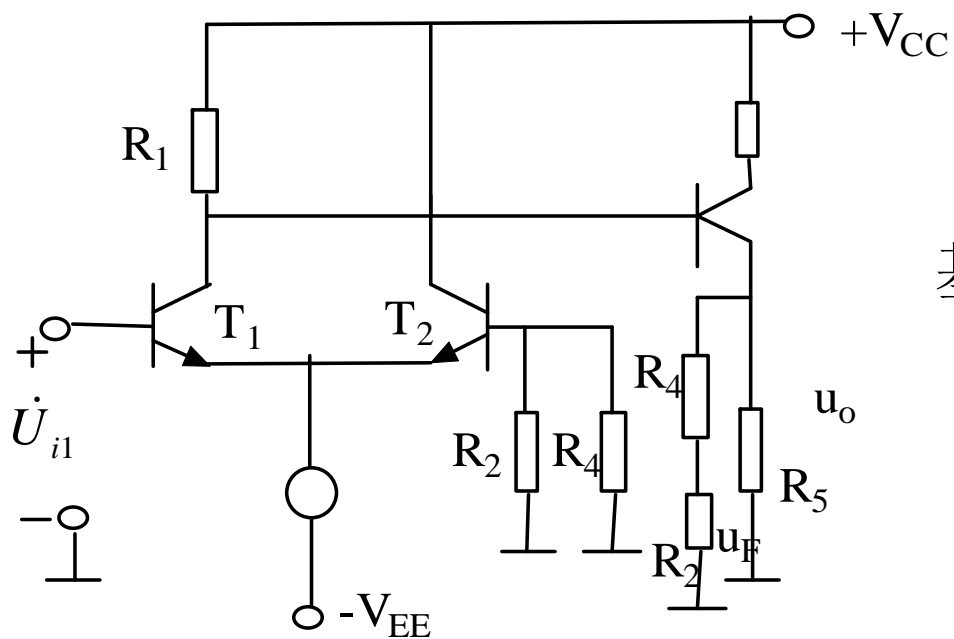
反馈系数：

$$F = \frac{u_F}{i_o} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$





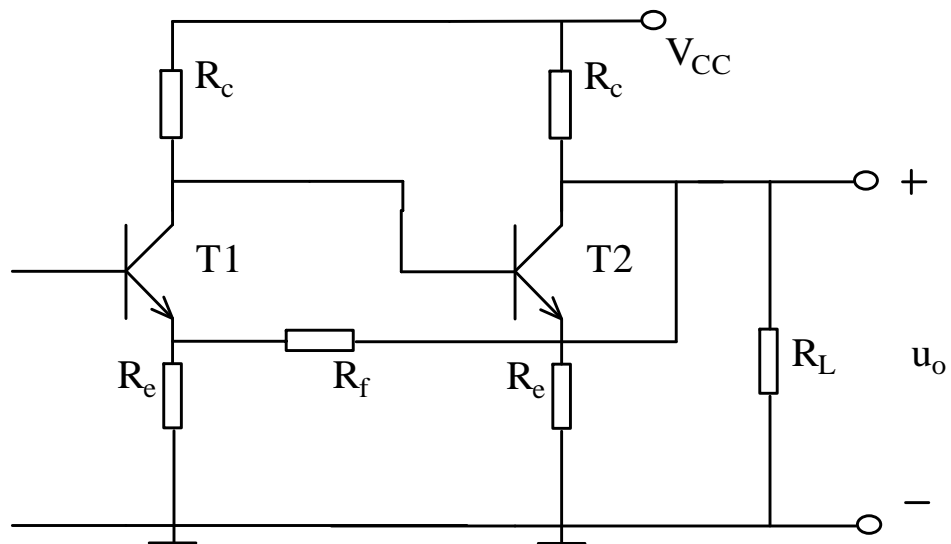
实际负反馈放大器



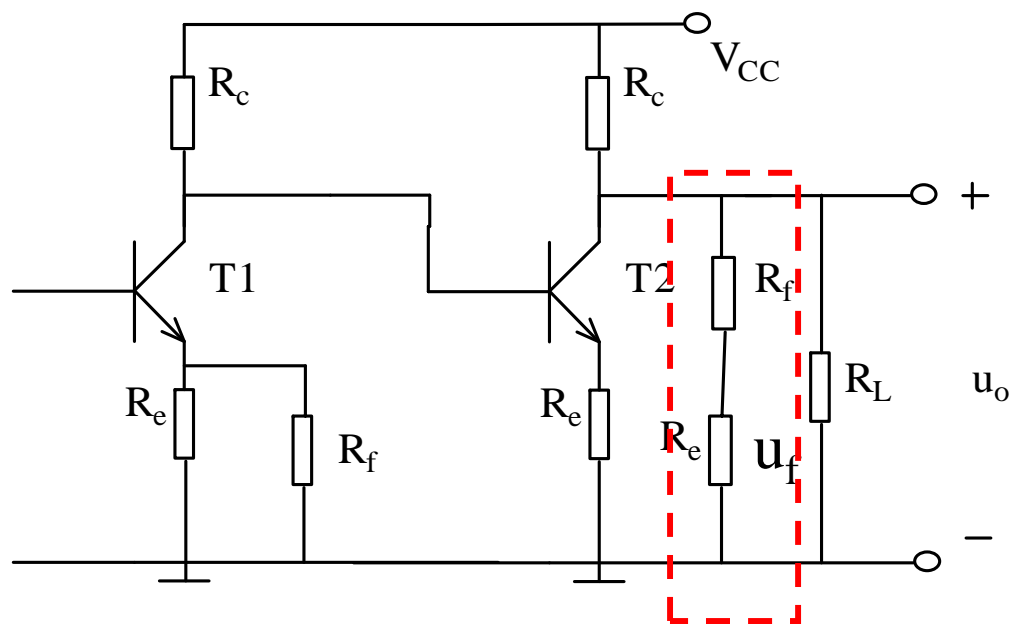
基本放大器

反馈系数

$$F = \frac{u_F}{u_o} = \frac{R_2}{R_2 + R_4}$$



反馈系数



$$F = \frac{u_F}{u_o} = \frac{R_e}{R_e + R_f}$$

## 二、深度负反馈放大电路分析

负反馈放大器

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A} \cdot \dot{F}}$$

### 1、反馈深度

$$1 + \dot{A} \cdot \dot{F} = \frac{\dot{A}}{\dot{A}_f} \quad \text{反馈深度}$$

反映了反馈对放大电路影响的程度

$$\left\{ \begin{array}{ll} |1 + \dot{A} \cdot \dot{F}| > 1 & \text{闭环增益小于开环增益，相当于负反馈} \\ |1 + \dot{A} \cdot \dot{F}| < 1 & \text{闭环增益大于开环增益，相当于正反馈} \\ |1 + \dot{A} \cdot \dot{F}| = 0 & \text{闭环增益无穷大，产生振荡} \end{array} \right.$$

## 2、深度负反馈

负反馈放大电路  $|1 + \dot{A} \cdot \dot{F}| > 1$

$|1 + \dot{A}\dot{F}|$ 越大，负反馈对放大电路的影响越大，反馈深度越深

如果反馈深度远大于1，则称此类负反馈放大器为**深度负反馈放大器**，即满足

$$\dot{A} \cdot \dot{F} \gg 1$$

深度负反馈放大器增益

$$\dot{A}_f = \frac{1}{\dot{F}}$$

只与反馈系数有关，与开环增益无关，性能稳定

### 3、深度负反馈放大电路的性能

增益:  $\dot{A}_f = \frac{1}{\dot{F}}$

$$\dot{A}_{uuf} = \frac{1}{\dot{F}_{uu}} \quad \dot{A}_{uif} = \frac{1}{\dot{F}_{iu}} \quad \dot{A}_{iuf} = \frac{1}{\dot{F}_{ui}} \quad \dot{A}_{iif} = \frac{1}{\dot{F}_{ii}}$$

输入电阻:

$$R_{if} = R_i \cdot (1 + A \cdot F) \rightarrow \infty$$

串联反馈

$$R_{if} = R_i \cdot \frac{1}{(1 + A \cdot F)} \rightarrow 0$$

并联反馈

输出电阻:

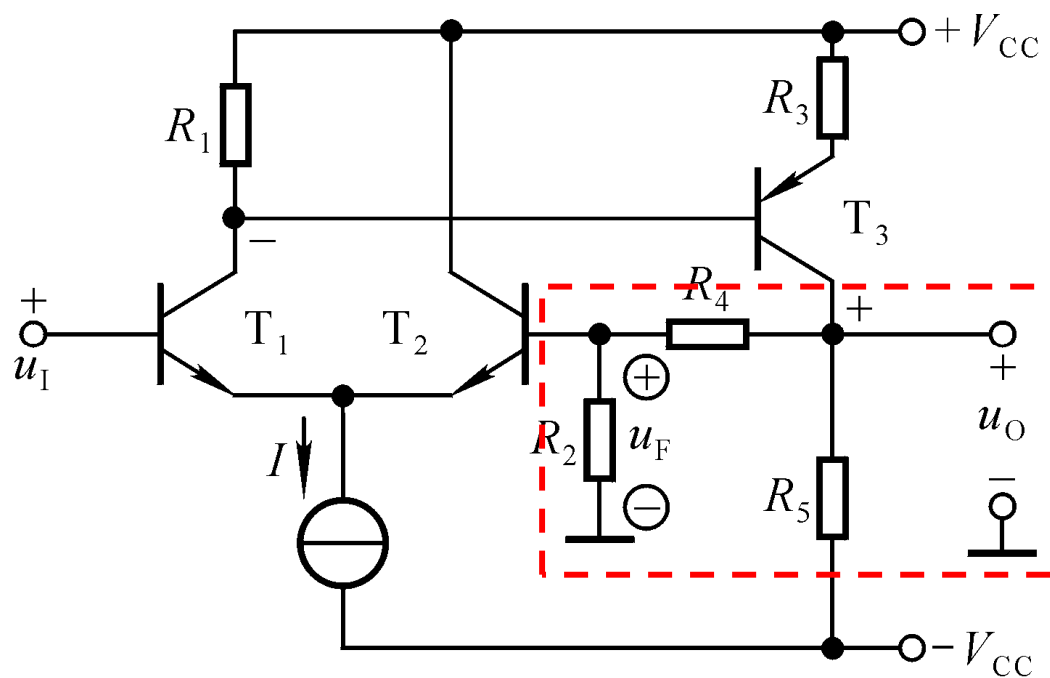
$$R_{of} = R_o \cdot \frac{1}{(1 + A \cdot F)} \rightarrow 0$$

电压反馈

$$R_{of} = R_{of} \cdot (1 + A \cdot F) \rightarrow \infty$$

电流反馈

例：

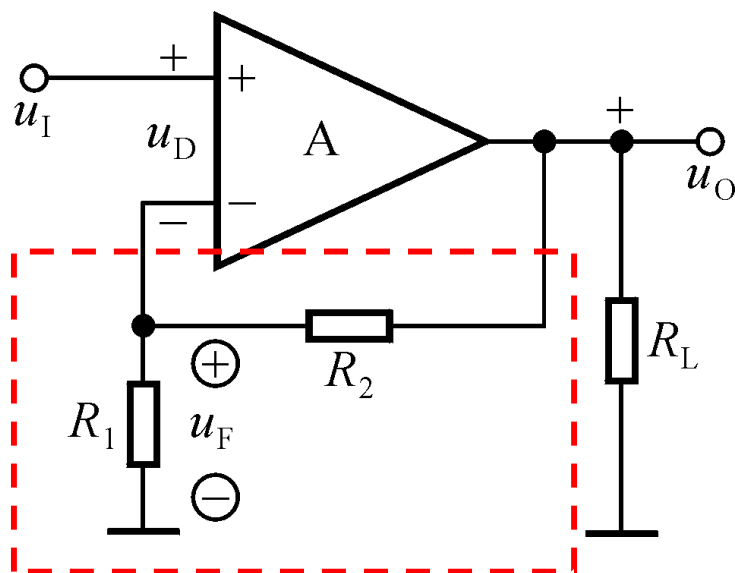


电压串联负反馈

$$F = \frac{u_F}{u_o} = \frac{R_2}{R_2 + R_4}$$

电压增益

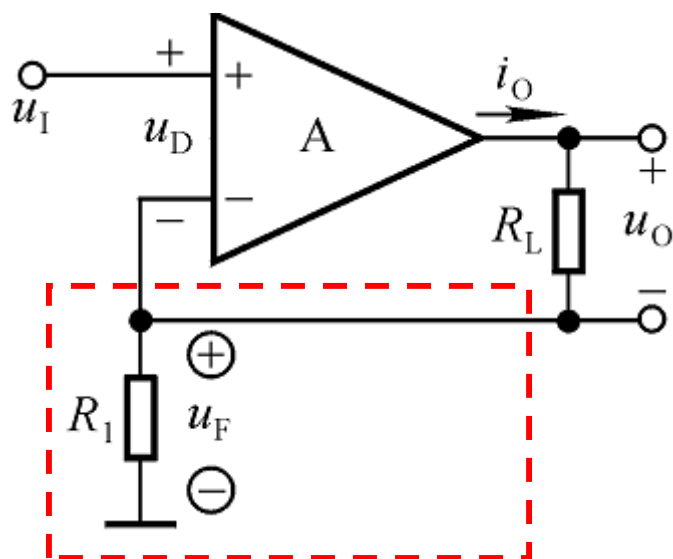
$$A_{uuf} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{1}{F} = 1 + \frac{R_4}{R_2}$$



$$F_u = \frac{u_F}{u_O} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$A_f = \frac{u_O}{u_I} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

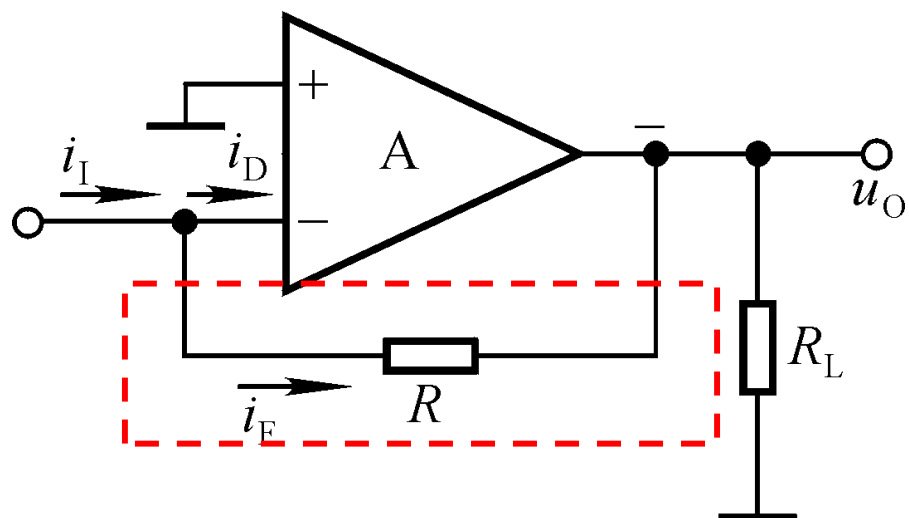
电压增益



$$F_{ui} = \frac{u_F}{i_O} = R_1$$

$$A_f = \frac{i_O}{u_I} = \frac{1}{R_1}$$

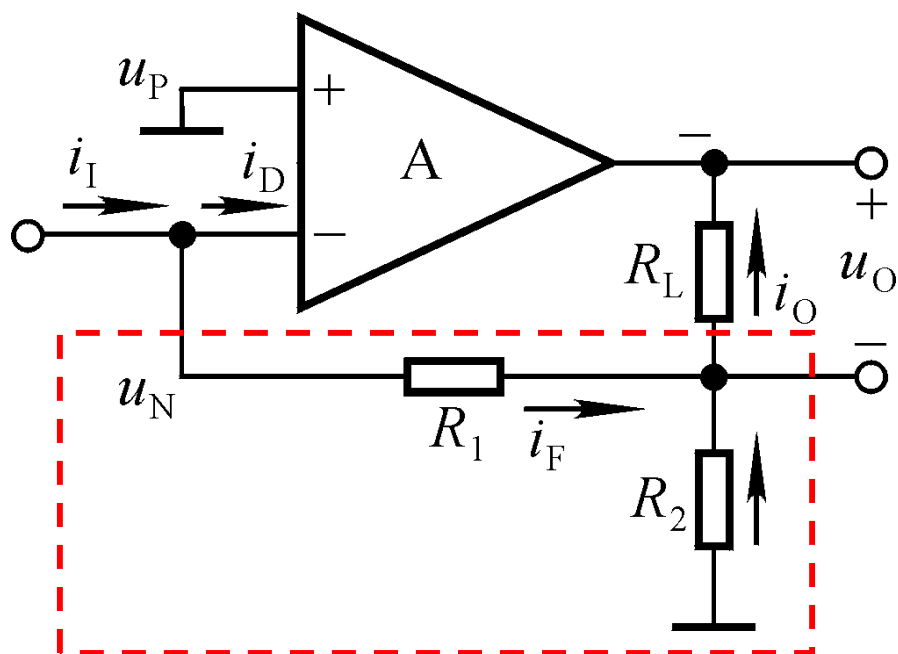
互导增益



$$F_{iu} = \frac{i_F}{u_0} = -\frac{1}{R}$$

$$A_f = \frac{u_0}{i_I} = -R$$

互阻增益



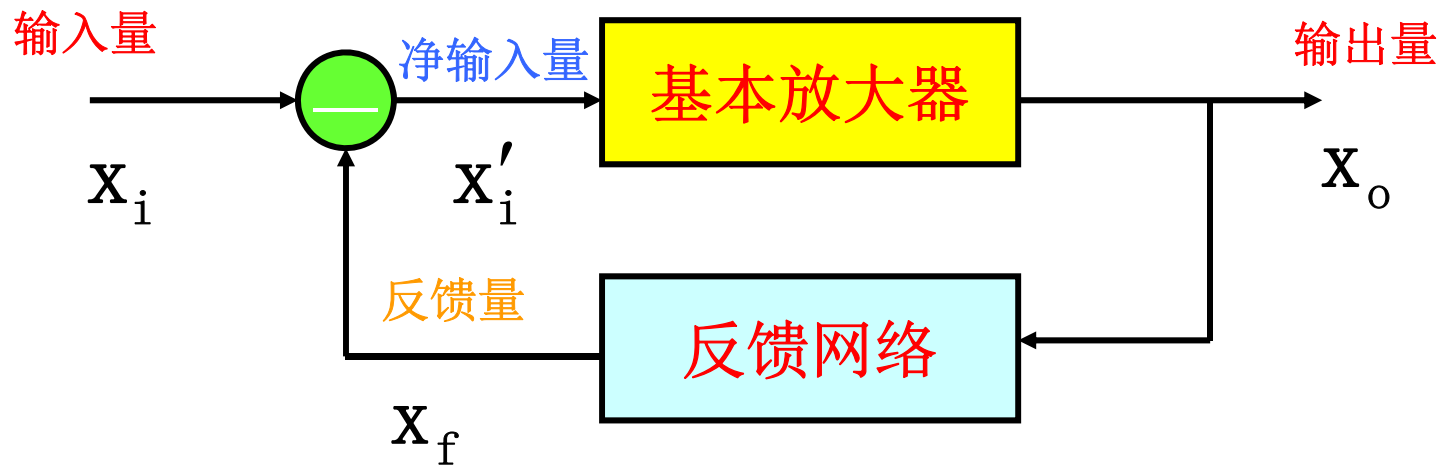
$$F_{iu} = \frac{i_F}{i_0} = -\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$A_f = \frac{i_0}{i_I} = -(1 + \frac{R_1}{R_2})$$

电流增益



## 5.5 负反馈放大器的稳定性



$$A_f(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{1 + A(j\omega) \cdot F(j\omega)}$$

$$\dot{X}'_i = \dot{X}_i - \dot{X}_f = \dot{X}_i - \dot{X}'_i \cdot A(j\omega) \cdot F(j\omega)$$

负反馈放大电路

## 稳定性问题

$$\dot{X}'_i = \dot{X}_i - \dot{X}_f = \dot{X}_i - \dot{X}'_i \cdot A(j\omega) \cdot F(j\omega)$$

负反馈

存在相移

当满足一定条件时

$$\dot{X}'_i = \dot{X}_i - \dot{X}_f = \dot{X}_i + \dot{X}'_i \cdot A(j\omega) \cdot F(j\omega)$$

正反馈

产生结果：

- 当有信号输入时，不再能够放大信号。
- 产生自激振荡：未有信号输入时，在输出端有特定频率的信号输出

# 1、自激振荡条件

自激振荡：

$$A_f(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{1 + A(j\omega) \cdot F(j\omega)}$$

当  $T(j\omega) = A(j\omega) \cdot F(j\omega) = -1$  即

$$\begin{cases} T(\omega) = 1 \\ \varphi_T(\omega) = \pm\pi \end{cases}$$

自激振荡的振幅条件

自激振荡的相位条件

时（必须同时满足），负反馈放大器产生自激振荡

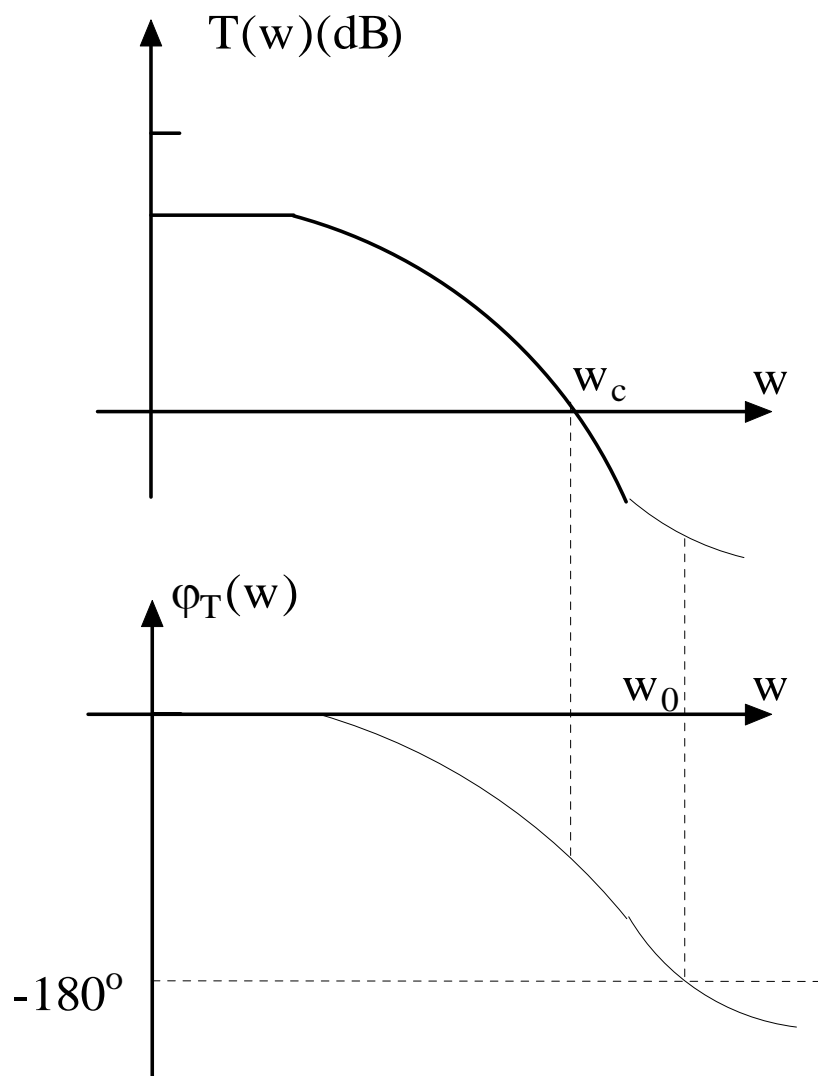
## 2、负反馈放大器稳定性判断

1) 不产生自激振荡条件:

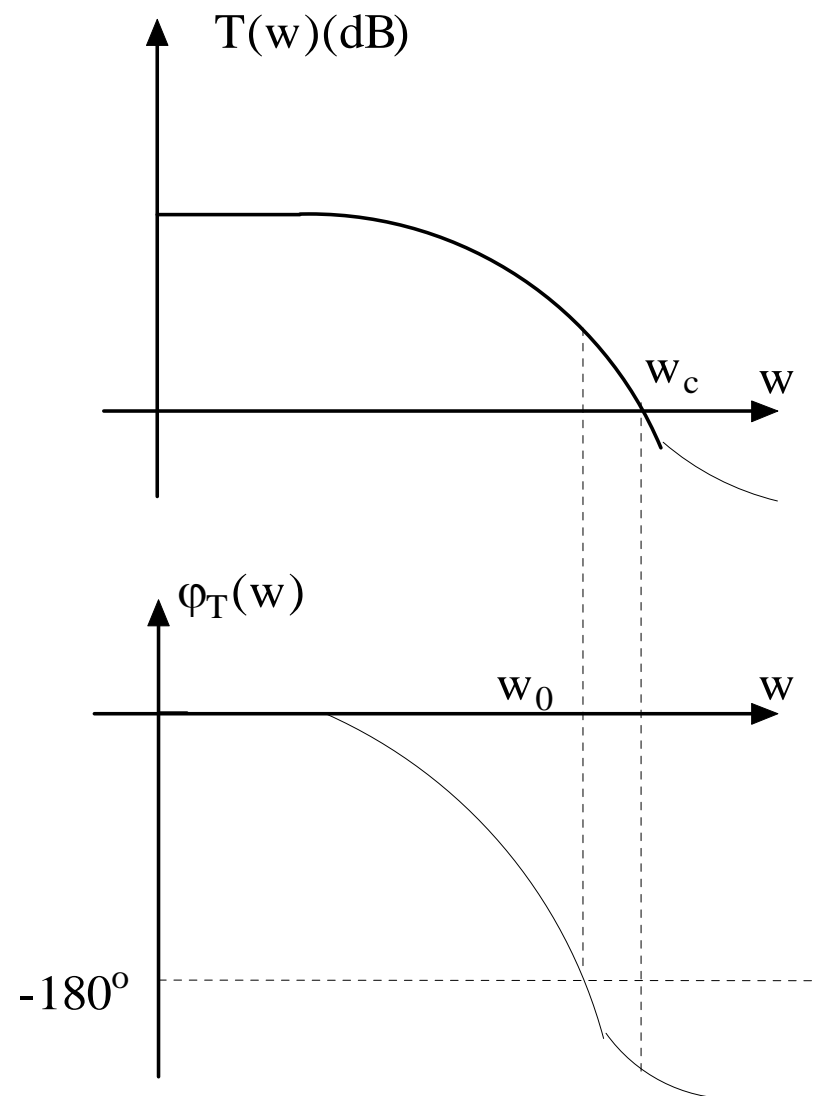
(1) 当  $\varphi_T(\omega) = \pm\pi$  时,  $T(\omega) < 1$

或者,

(2) 当  $T(\omega) = 1$  时,  $|\varphi_T(\omega)| < \pi$



$\omega_c < \omega_0$ , 系统不会自激



$\omega_c > \omega_0$ , 系统会自激

## 2) 稳定裕量

a) 增益裕量 $\gamma_g$  (幅度裕量 $G_m$ )

当频率为 $\omega_0$ 时,  $T(\omega_0)$ 小于0dB的数值, 即

$$\gamma_g = 0 - T(\omega_0)$$

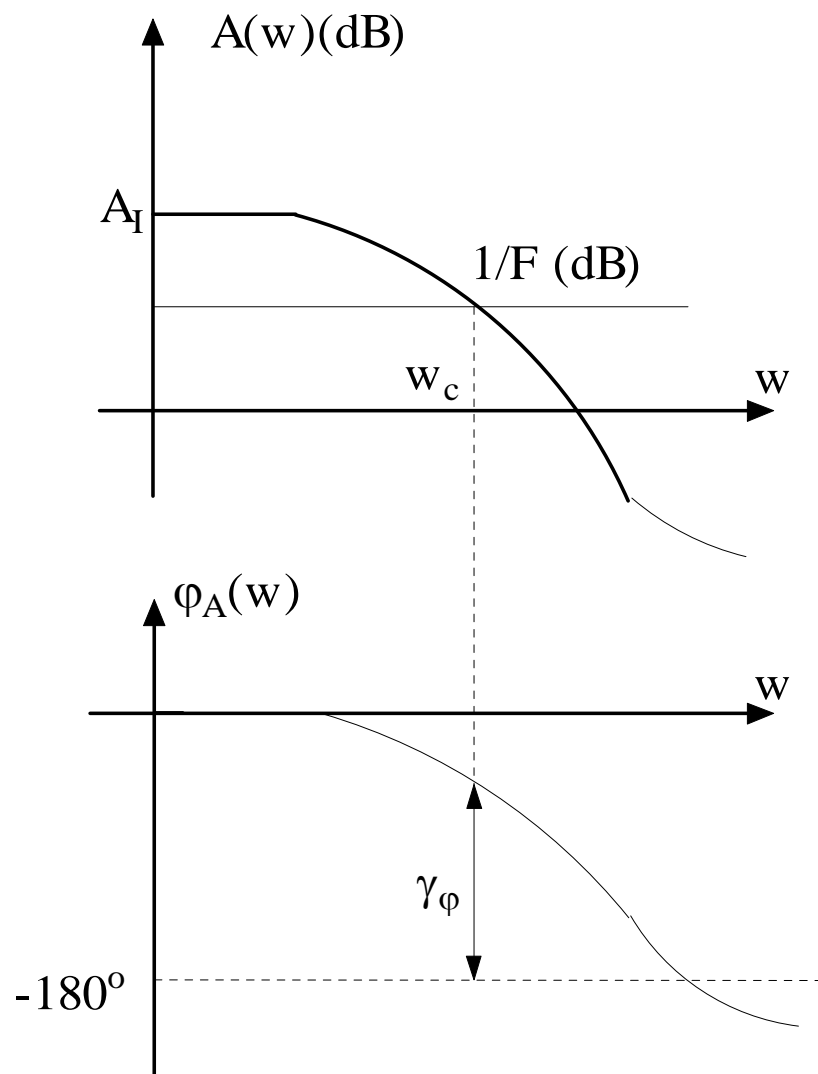
b) 相位裕量 $\gamma_\varphi$  ( $\varphi_m$ )

当频率为 $\omega_c$ 时,  $|\varphi_T(\omega_c)|$ 偏离180°的数值, 即

$$\gamma_\varphi = 180^\circ - |\varphi_T(\omega_c)|$$

工程上, 一般认为当 $\gamma_g \geq 6\text{dB}$ , 并且 $\gamma_\varphi \geq 45^\circ$ 时系统稳定

### 3) 利用基本放大器 $A(j\omega)$ 来判别系统稳定性



过程:

1) 在 $A(\omega)$ 图上作 $1/F$ (dB)的水平线, 该水平线与 $A(\omega)$ 的交点所对应的频率即为 $\omega_c$

2) 求附加相移 $\varphi_A(\omega_c)$

3) 计算相位裕量 $\gamma_\varphi$

$$\gamma_\varphi = 180^\circ - |\varphi_A(\omega_c)|$$

4) 当 $\gamma_\varphi \geq 45^\circ$ 时, 系统稳定