

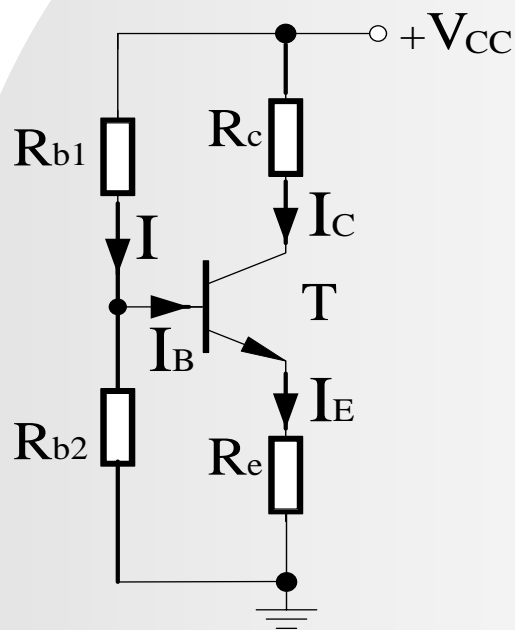
# 第8章 负反馈放大电路





“反馈”就是通过一定的电路形式（反馈网络），把放大电路输出信号的一部分或全部反向回送到放大电路的输入端。

反馈是电子技术和自动控制中的一个重要概念，负反馈可以改善放大电路的多方面性能，在实用的放大电路中，几乎都采用了负反馈。



①适当选择,  $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$ , 使  $I_1 \gg I_B$ ,  $V_B \approx V_{CC} \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}}$

②电路中接入 $R_e$ ——“采样”

$$V_E = I_E R_e \approx I_C R_e = V_{Re}$$

$R_e$ 一定时,  $V_{Re}$ 的变化就反映了 $I_C$ 的变化。

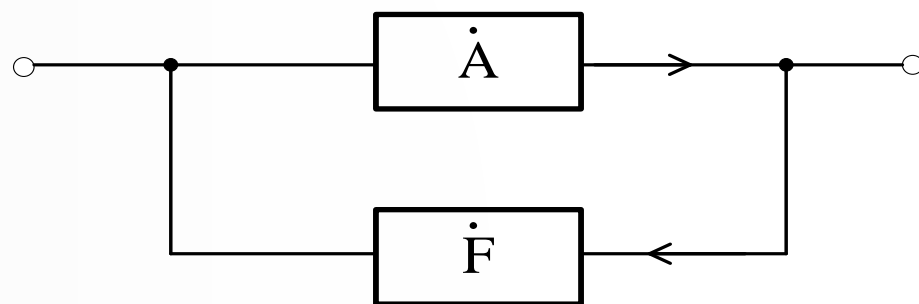
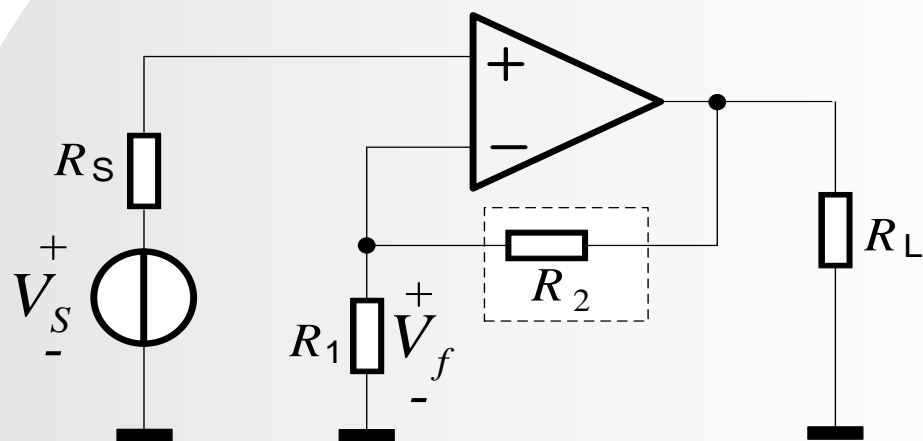
③输入回路的情况

反馈回来的 $V_{Re}$ 和原来的输入 $V_B$ 串联相减后, 加到三极管发射结上的 $V_{BE}$ , 即

$$V_{BE} = V_B - V_E \approx V_B - I_C R_e$$

所以, 输出量 $I_C$ 的变化是通过 $R_e$ 采样变成 $V_E$ , 从而反馈到输入回路去改变 $V_{BE}$ 。用 $V_{BE}$ 的变化再去调节 $I_B$ 和 $I_C$ , 使 $I_C$ 在三极管温度变化时接近稳定。

反馈过程:  $T \uparrow \rightarrow I_{CQ} \uparrow \rightarrow V_E (\approx I_C R_e) \uparrow \rightarrow V_{BE} (=V_B - V_E) \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_{CQ} \downarrow$



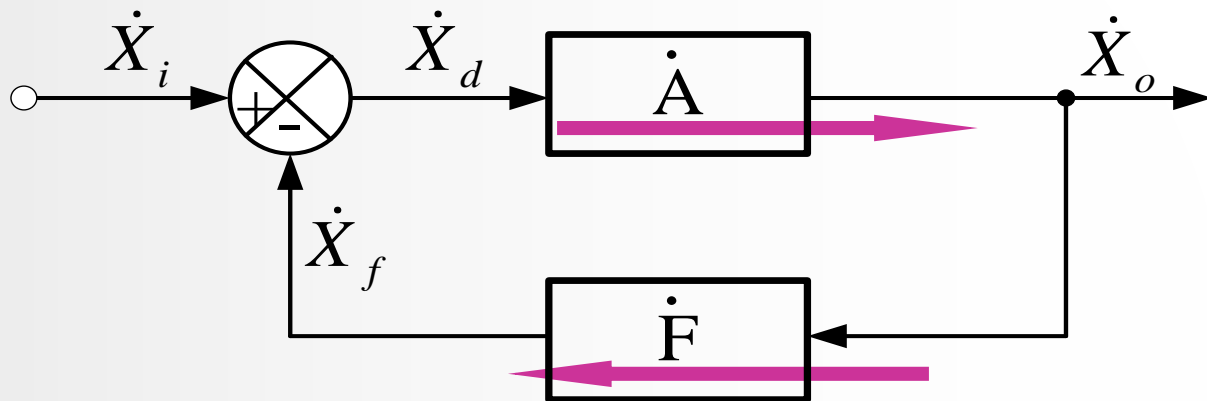
反馈放大电路必有两部分组成

- 基本放大器  $\dot{A}$ : 未加反馈的单级、多级放大电路或集成运放;
- 反馈网络  $\dot{F}$ :  $R$ 、 $L$ 、 $C$ 或半导体器件组成。

**F由无源器件组成，没有放大作用，故其正向传输作用可忽略。**



## 反馈放大器的一般模型

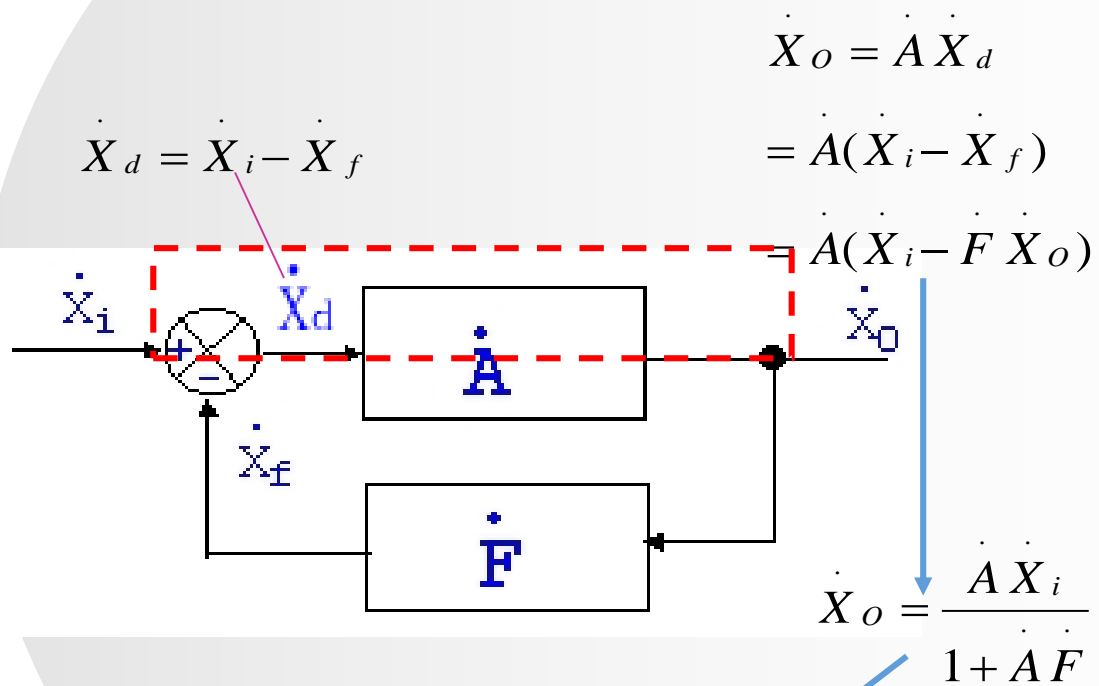


输入端的信号交汇之处表示求和环节，输入信号 和反馈信号 通过这个环节进行求和。这里信号 既可以代表电压也可以代表电流。

为简化分析，设反馈环中信号是单向传输的，即信号正向流动只通过基本放大器，反向流动只通过反馈网络。

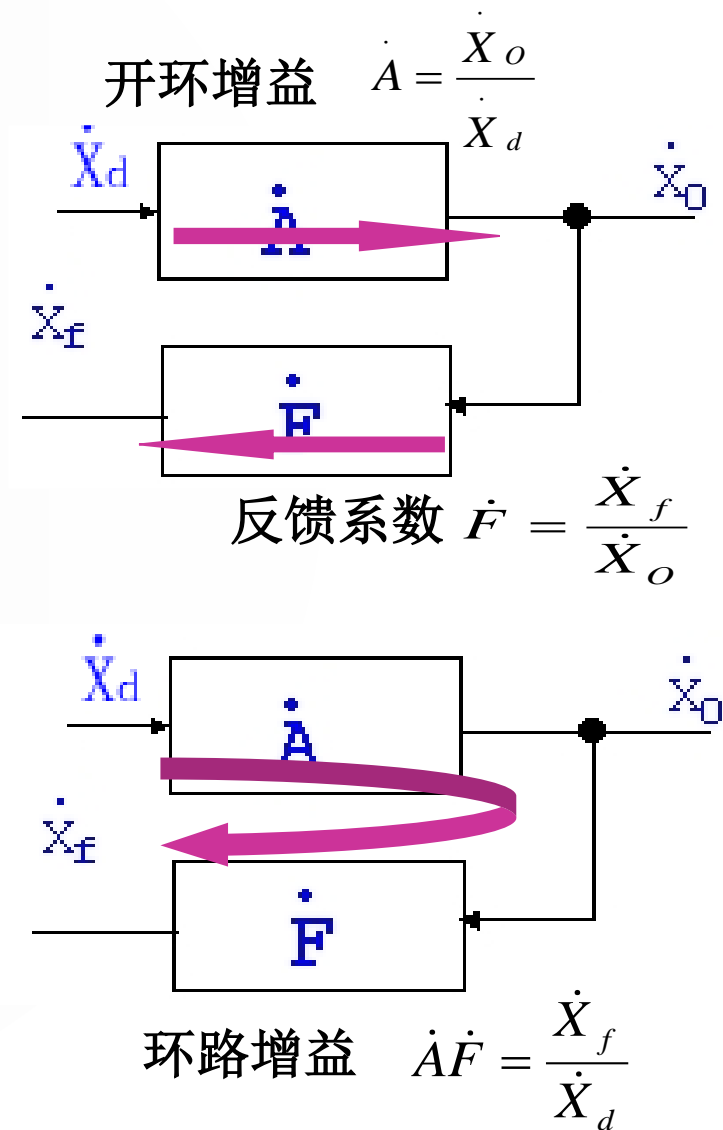
基本放大器是指电路中没有信号的反向流动（即没有反馈）但是又考虑了反馈网络负载效应的放大电路；反馈网络是指所有和信号反向流动有关的元器件组成的电路。

在反馈放大电路中存在一个传递信号的闭合环路，放大器的输入信号经过放大电路传递成为输出信号，输出信号经过反馈电路反向传递成为反馈信号，再输入放大电路，循环往复。



闭环增益

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A} \dot{F}}$$

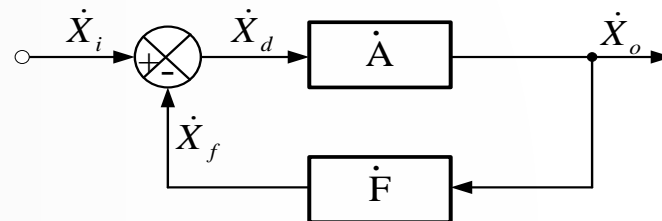




## 反馈深度

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

$1 + \dot{A}\dot{F}$  --- 表示负反馈作用强弱程度的量，称为反馈深度，用D表示。



### 讨论

(1) 若  $|1 + \dot{A}\dot{F}| > 1$ ，则  $|\dot{A}_f| < |\dot{A}|$ ，即引入反馈后，增益变小。这是负反馈。

典型的负反馈是  $\dot{A}\dot{F}$  为正实数， $\dot{X}_d$  与  $\dot{X}_f$  同相。因而  $-\dot{X}_f$  与  $\dot{X}_i$  迭

加的结果，使  $|\dot{X}_d| < |\dot{X}_i|$ 。即负反馈使基本放大器的输入信号小于

信号源提供的信号，表现为  $|\dot{A}_f| < |\dot{A}|$ 。通常将  $D \gg 1$  的情况

称为深度负反馈。

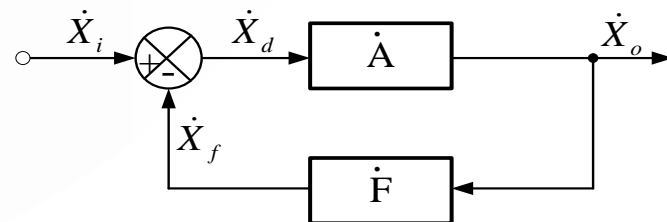


(2) 若  $|1 + \dot{A}\dot{F}| < 1$ , 则  $|\dot{A}_f| > |\dot{A}|$ , 即引入反馈后, 增益变大。这是正反馈。

典型的正反馈为  $\dot{A}\dot{F}$  为负实数,  $\dot{X}_f$  与  $\dot{X}_d$  反相。因而  $|\dot{X}_d| > |\dot{X}_i|$ , 即正反馈使基本放大器的输入信号大于信号源提供的信号, 表现为  $|\dot{A}_f| > |\dot{A}|$ 。

若  $|1 + \dot{A}\dot{F}| = 0$  即  $\dot{A}\dot{F} = -1$  则  $\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} \rightarrow \infty$

这种情况下, 即使信号源提供的信号为无限小量, 也可能有输出信号, 由于实际电路中总存在噪声, 即总有弱信号存在, 因而实际上可以没有输入信号而有输出信号。这称为**自激振荡**。







- ❖ 正反馈和负反馈是两种不同性质的反馈。其差异是，

$$\dot{A}\dot{F} \longrightarrow \varphi_{AF} = 2n\pi (\text{同相}) —$$

$$\varphi_{AF} = (2n+1)\pi (\text{反相}) —$$

所以，反馈的性质主要决定于信号绕环路一周产生的相移。

- ❖ 由  $\dot{A}\dot{F}$  的相角来看，自激电路是正反馈电路，是一种较强的特殊的正反馈电路。任何反馈放大电路，只要在某一频率满足自激条件，整个电路就进入自激状态，因而不是放大电路。



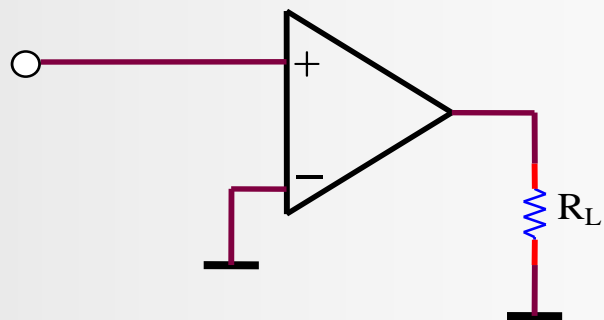
## 反馈电路的定性分析

- ❖ 有没有反馈和不同的反馈形式对于放大电路性能的影响是很不相同的。
- ❖ 具体分析问题之前，要弄清这个电路是不是含有反馈？反馈量是什么？反馈量使输入量的作用是加强了还是削弱了？

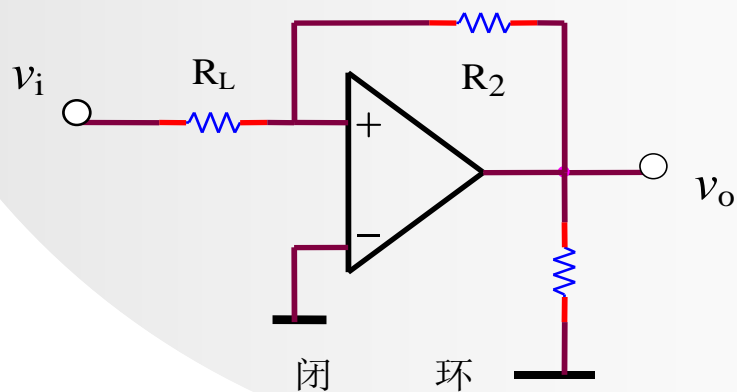


## 1) 反馈与反馈通路

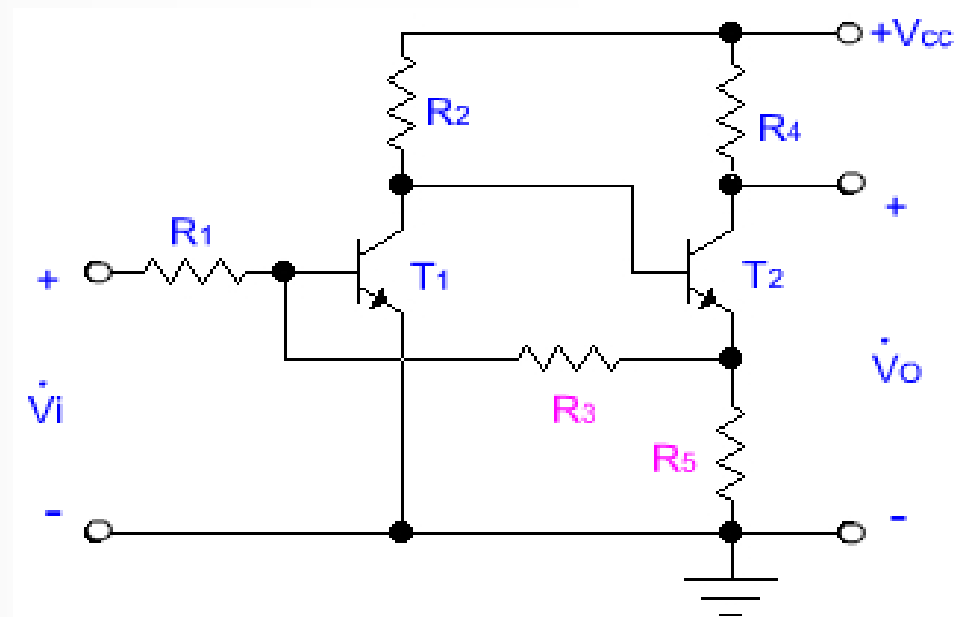
判断一个电路是否有反馈，是通过分析是否存在反馈通路而进行的。



开 环



闭 环





## 2) 正反馈与负反馈

反馈电路中，由于将输出量送回到输入回路影响输入量，从而影响输出量，这个影响的结果有两种可能：

- ❖ 在输入量不变时经过反馈后，输出量比没有反馈时变大了——正反馈。
- ❖ 在输入量不变时经过反馈后，输出量比没有反馈时变小了——负反馈。

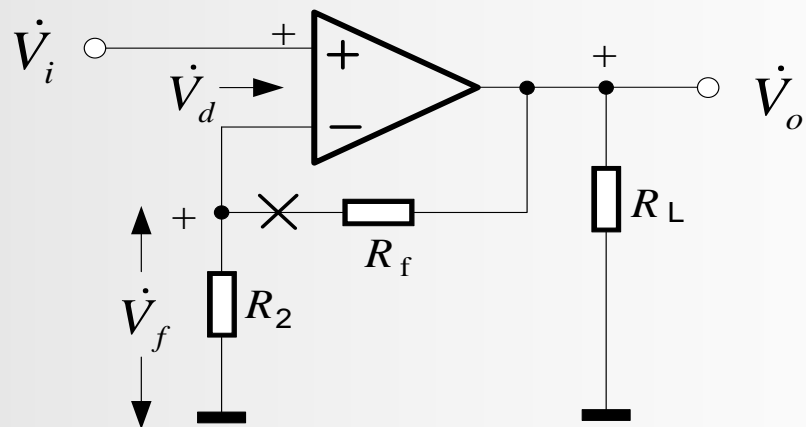
判断反馈极性的思路：

先假定反馈通路在适当地方断开（一般在与输入回路的连接处），再假定输入瞬时值有一个变化量，然后分析这个变化量经过放大再反馈回来对原输入量的影响。若其趋势使输入量变化的趋势得到加强，就是正反馈；反之，为负反馈。

**具体方法 —— 瞬时极性法：**假定输入信号在某一瞬时的极性，逐级推出各点瞬时极性，判断反馈到输入端的信号是增强还是削弱基本放大电路的输入信号。



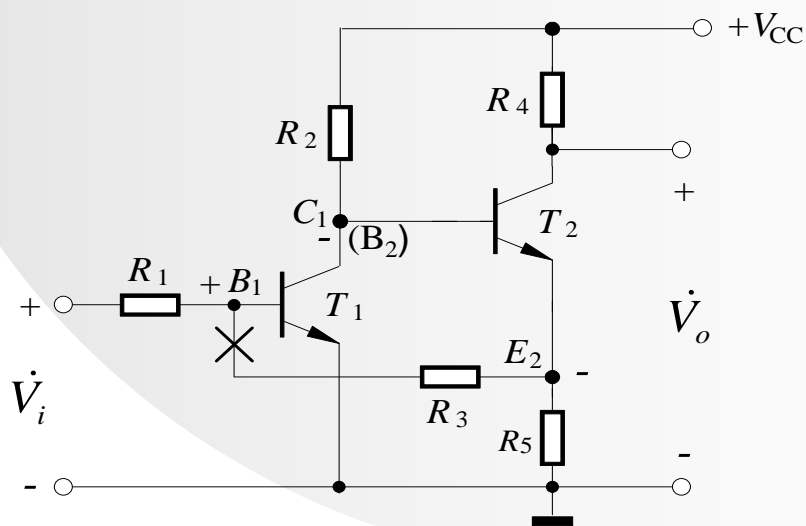
## 2) 正反馈与负反馈



反馈过程是：

$$\dot{V}_O \uparrow \rightarrow \dot{V}_f \uparrow \rightarrow \dot{V}_d \downarrow \rightarrow \dot{V}_O \downarrow$$

$$|\dot{V}_d| < |\dot{V}_i| \text{ --- 负反馈}$$



$$v_i \uparrow \rightarrow v_{B1} \uparrow \rightarrow v_{C1} \downarrow \rightarrow v_{B2} \downarrow$$

$$v_{B1} \downarrow \leftarrow v_{E2} \downarrow \leftarrow i_{B2} \downarrow \leftarrow$$

----级间负反馈

$$v_{B2} \uparrow \rightarrow i_{B2} \uparrow \rightarrow i_{E2} \uparrow \rightarrow v_{E2} \uparrow$$

$$i_{B2} \downarrow \leftarrow v_{BE} \downarrow \leftarrow$$

-----本级负反馈

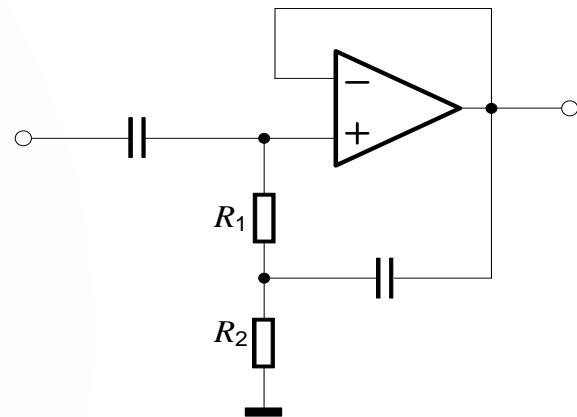


### 3) 交流反馈与直流反馈

若反馈电路的信号是交流量，则对输入中的交流成分有影响，会影响电路的交流性能，为交流反馈。

若反馈电路的信号是直流量，则会影响电路的直流性能，如Q点等，为直流反馈。

在放大和反馈通路都能同时通过交、直流信号的情况下，反馈对电路的两种性能都有影响。



**直流负反馈的作用：稳定工作点，对动态性能无影响；**

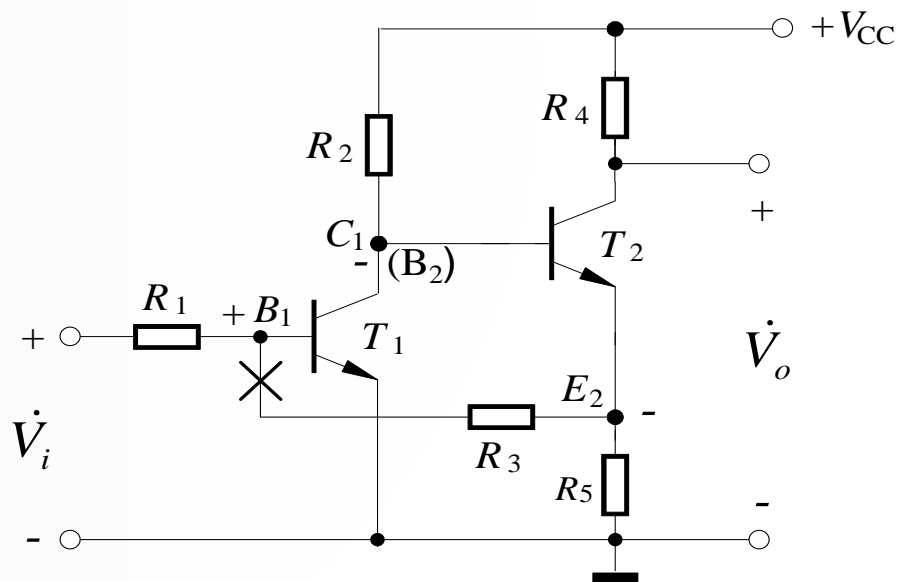
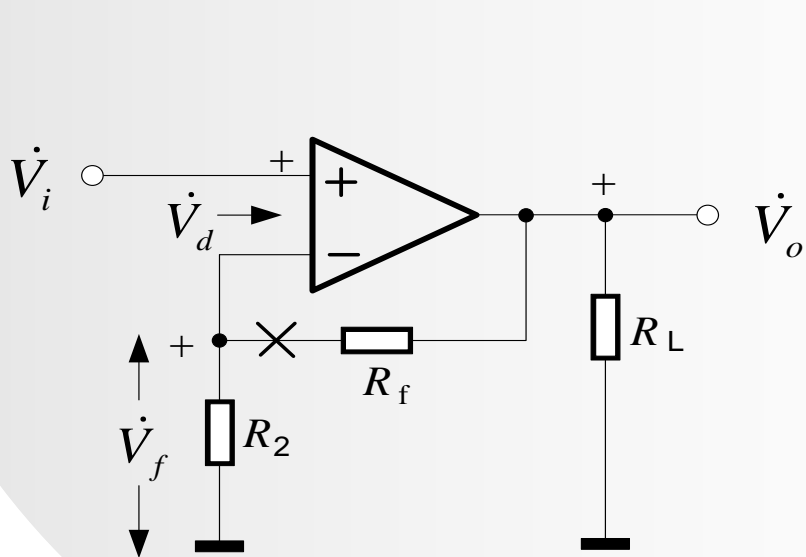
**交流负反馈的作用：改善电路的动态性能。**

**一个实用电路中，往往同时存在直流负反馈和交流负反馈。**



## 8.2 负反馈放大电路的组态

从上面所举的一些反馈例子可见，即使同是负反馈，反馈的连接方式也不同。从输入端看，有的反馈通路与输入连于同一节点，有的则连到不同的节点。从输出端看，有的反馈通路直接从输出端引出，有的则不是。不同的连接方式对于电路的影响也是不同的。





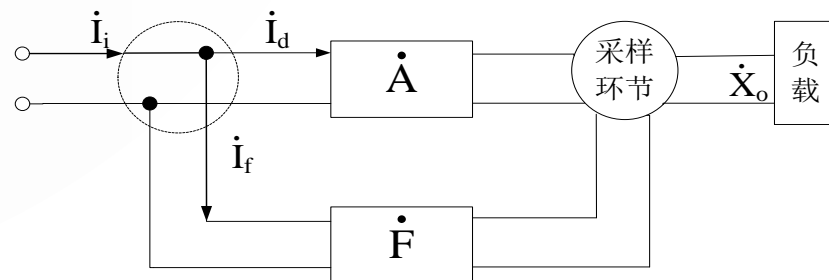
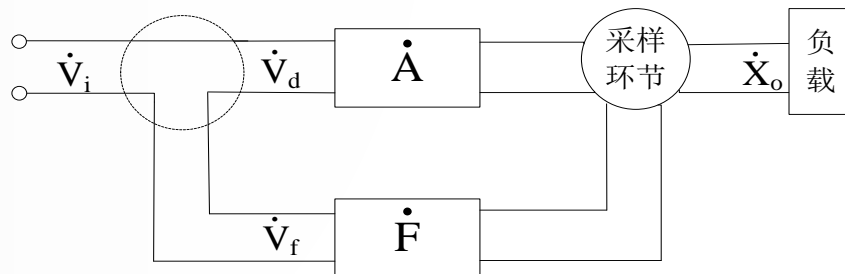
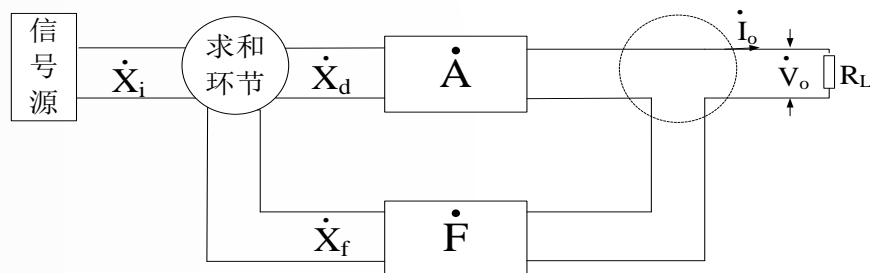
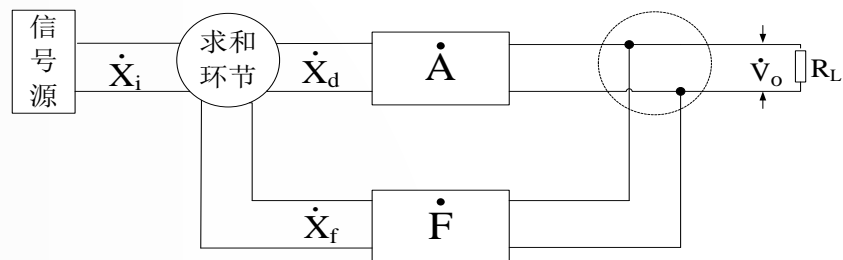
## 有四种典型反馈电路

从输出采样网络看，若反馈环路的反馈信号直接依赖于输出电压信号，为**电压反馈**。

从输出采样网络看，若反馈环路的反馈信号直接依赖于输出电流信号，为**电流反馈**。

从输入求和网络看，若是电压信号，放大电路与反馈网络串接，组成电压相加电路，为**串联反馈**。

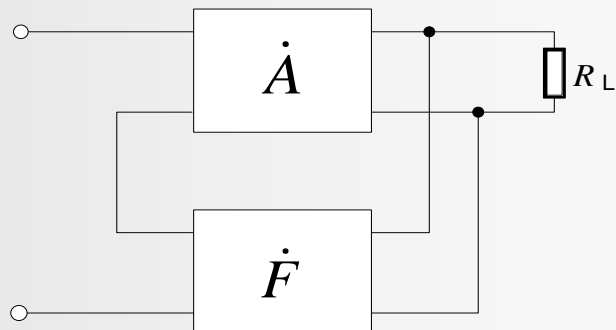
从输入求和网络看，若是电流信号，放大电路与反馈网络并接，组成电流相加电路，为**并联反馈**。



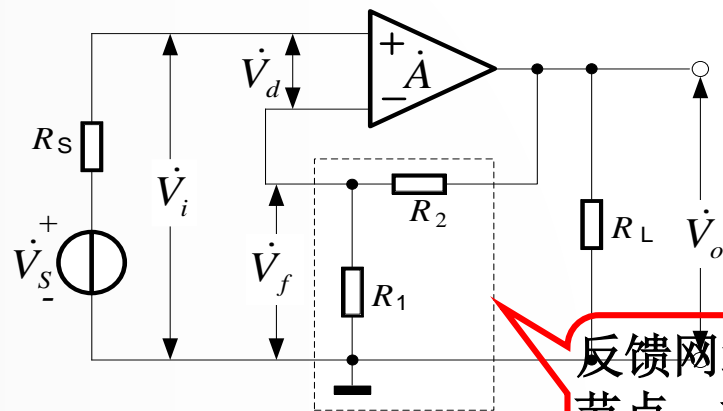




# 1. 电压串联负反馈



(a) 框图



(b) 实际电路

反馈网络连接到输出节点，如果负载短路，反馈消失，电压反馈。

1) 反馈电压与输出电压成比例。

利用这个特点可以很简便地判断一个负反馈电路是不是电压负反馈。

2) 电路的输出电压趋向于维持恒定。

——电压负反馈的重要特点。

$$R_L \downarrow \rightarrow V_o \downarrow \rightarrow V_f \downarrow \rightarrow V_d \uparrow \rightarrow V_o \uparrow$$

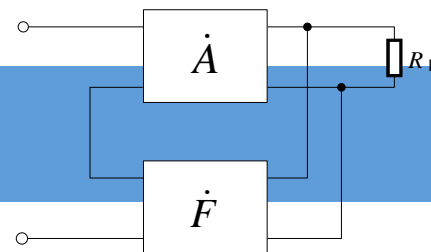
3) 由于是串联反馈，输入端用电压求和的方式反映电路有反馈时对输入信号的影响。

$$V_d = V_i - V_f \quad \text{当 } V_i \text{ 一定时, } V_f \text{ 越大 (即反馈越强), 净输入电压 } V_d \text{ 越小;}$$

$R_S$  越小，串联负反馈的效果越明显，理想信号源是恒压源。



## 电压串联负反馈——A、F参量



电压串联负反馈电路中，由于输入量、输出量、反馈量均为电压，所以放大网络参数为

$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_d}$$

输出电压与输入电压直接比较，A无量纲，因此这种组态称为电压放大器。反馈网络的参数：

$$\dot{F}_v = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o}$$

由这些参数可得

$$\dot{V}_o = \dot{A}_v \dot{V}_d = \dot{A}_v (\dot{V}_i - \dot{V}_f) = \dot{A}_v (\dot{V}_i - \dot{F}_v \dot{V}_o)$$

于是

$$\dot{A}_{vf} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{\dot{A}_v}{1 + \dot{A}_v \dot{F}_v}$$

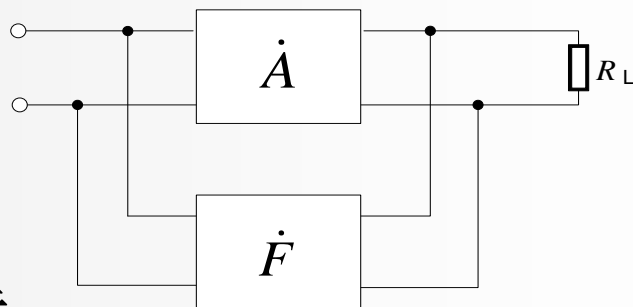
---注意下标的含义！



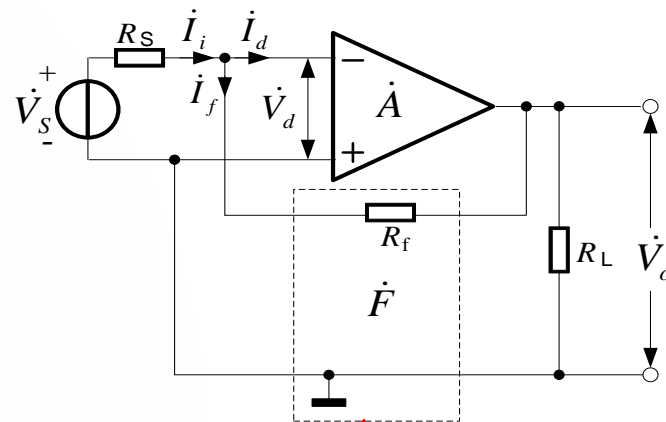
## 2. 电压并联负反馈

特点:

- 1) 输出短路时，反馈消失。
- 2) 输出电压趋向于维持恒定。
- 3) 输入端用电流求和的方式，反映反馈对输入信号的影响。



(a) 框图



(b) 实际电路

反馈网络连接输出节点，电压反馈。

$I_d = I_i - I_f$  当  $I_i$  一定时,  $I_f$  越大 (反馈越强), 净输入电流越小。

信号源内阻越大 ( $I_i$  越趋于恒定), 并联负反馈作用越强。

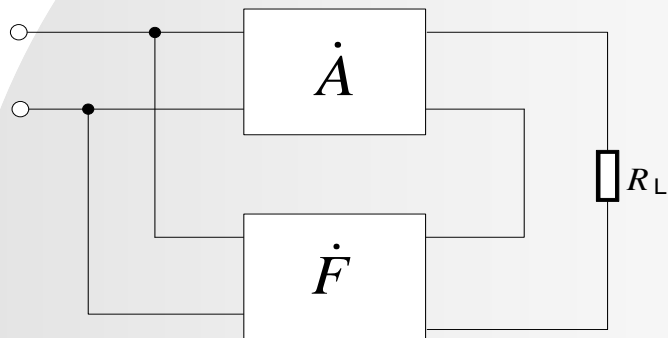
A、F参量: (传输电阻)

$$\dot{A}_{vi} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_d}$$

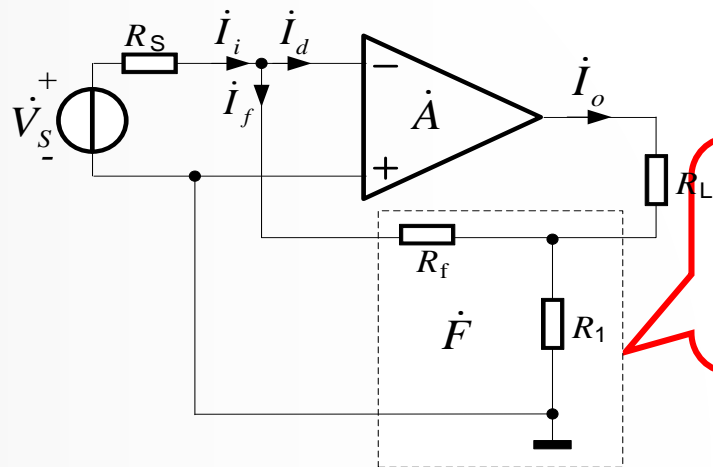
$$\dot{F}_{iv} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{V}_o}$$



### 3. 电流并联负反馈



(a) 框图



(b) 实际电路

反馈网络串接于输出回路。反馈信号的来源是输出电流，电流反馈。

#### 1) 反馈电流与输出电流成比例

输出短路时，反馈存在；输出开路时，反馈消失。利用这个特点，可以很简便地判断一个电路是否电流反馈。

#### 2) 电路的输出趋向于维持 $I_0$ 恒定。

-----电流反馈的重要特点。

#### 3) 输入端用电流求和的方式反映反馈对输入信号的影响， $I_d = I_i - I_f$ 。

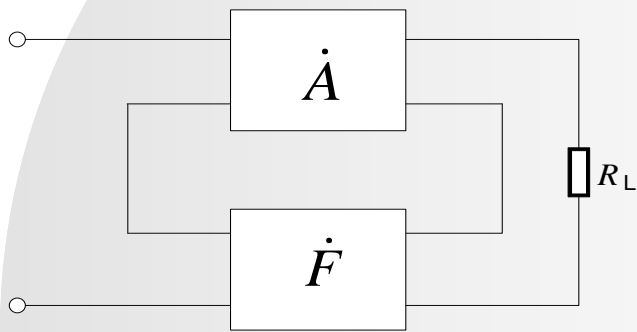
A、F参量：

$$\dot{A}_{ii} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_d}$$

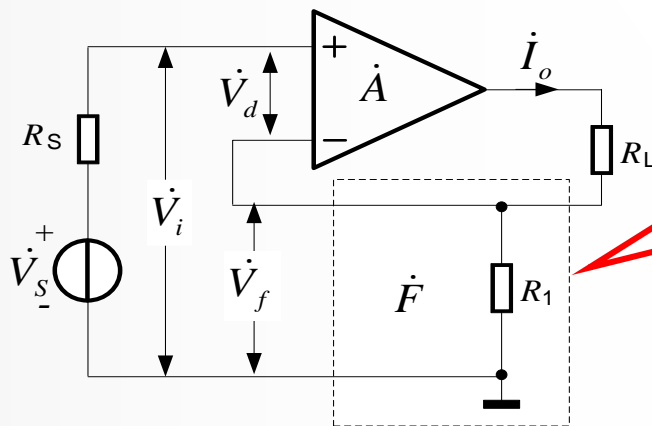
$$\dot{F}_{ii} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o}$$



## 4. 电流串联负反馈



(a) 框图



(b) 实际电路

反馈网络串接于输出回路。反馈信号的来源是输出电流，电流反馈。

1) 反馈电流与输出电流成比例。

输出短路时，反馈存在；  
输出开路时，反馈消失。

2) 输出电流趋向于维持恒定。

3) 输入端用电压求和的方式反映电路有反馈时对输入信号的影响。

$$V_d = V_i - V_f$$

A、F参量：

$$\dot{A}_{iv} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{V}_d} \quad (\text{传输电导})$$

$$\dot{F}_{vi} = \frac{\dot{V}_f}{\dot{I}_o}$$

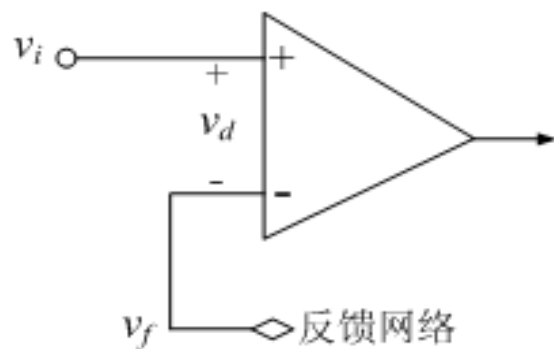


# 负反馈放大电路四种组态总结

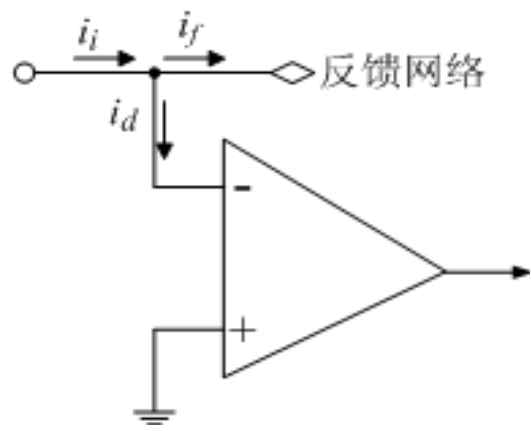
组态	输入信号 $\dot{X}_i$	输出信号 $\dot{X}_o$	净输入信号 $\dot{X}_d$	基本放大网络参数 $\dot{A}$	反馈网络参数 $\dot{F}$
电压串联	电压	电压	电压	$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_d}$	$\dot{F}_v = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o}$
电压并联	电流	电压	电流	$\dot{A}_z = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_d}$	$\dot{F}_g = \frac{\dot{I}_f}{\dot{V}_o}$
电流串联	电压	电流	电压	$\dot{A}_g = \frac{\dot{I}_o}{\dot{V}_d}$	$\dot{F}_z = \frac{\dot{V}_f}{\dot{I}_o}$
电流并联	电流	电流	电流	$\dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_d}$	$\dot{F}_i = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o}$



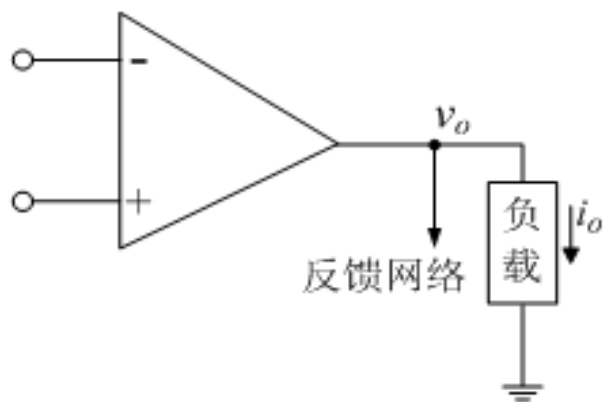
# 反馈类型的判别



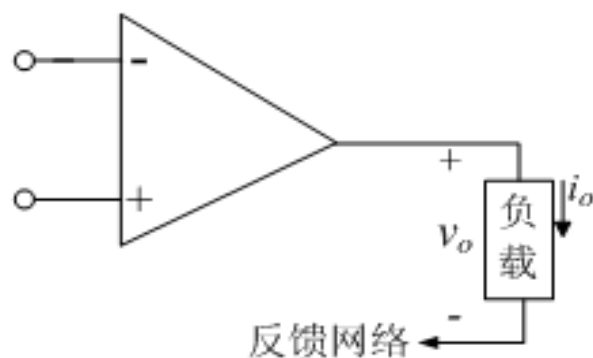
(a) 输入端串联



(b) 输入端并联



(c) 输出端并联（电压取样）

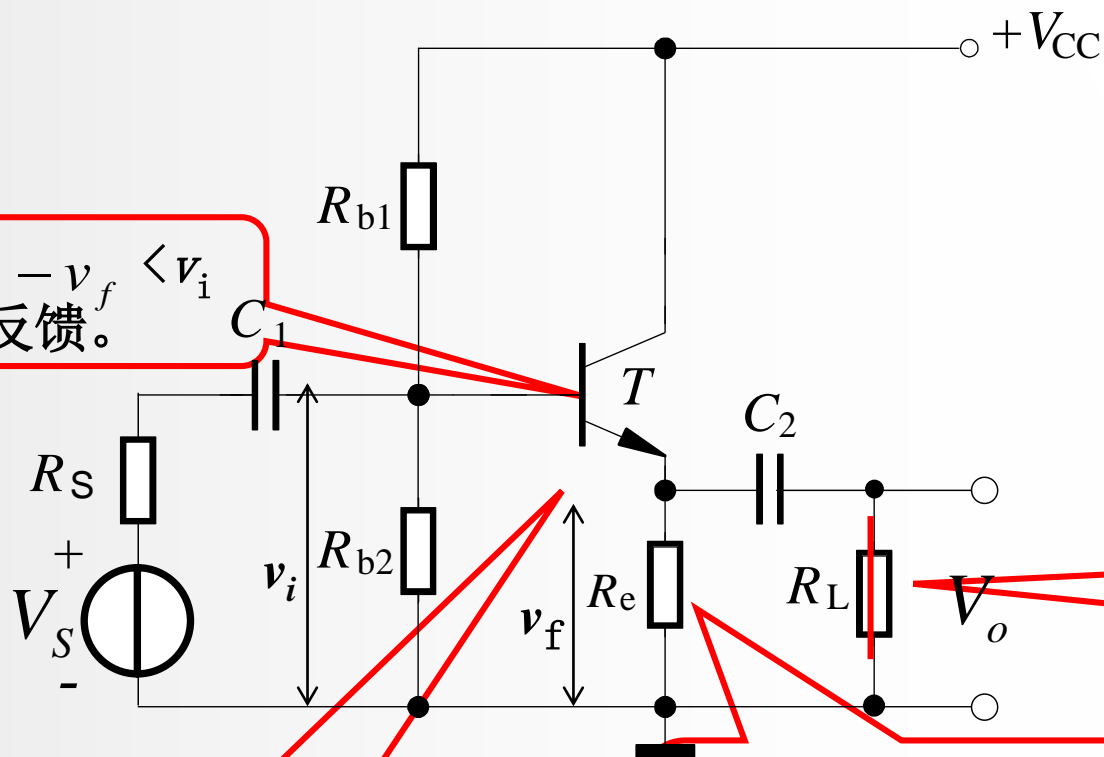


(d) 输出端串联（电流取样）



## 例题：所示电路为何种组态的反馈电路？

### 【例8.2.1】



净输入  $v_{be} = v_i - v_f < v_i$   
----负反馈。

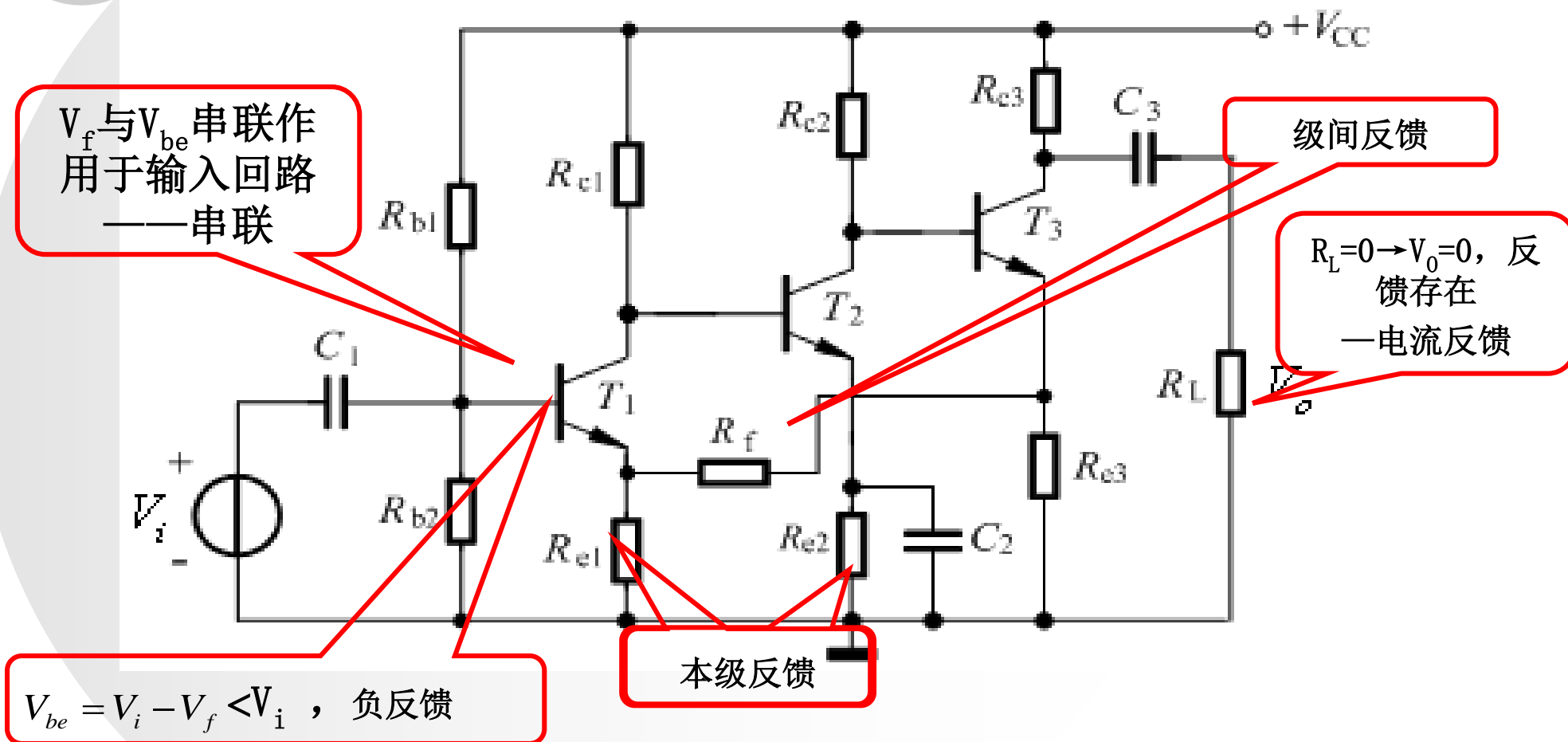
$\dot{V}_o = 0 \rightarrow \dot{V}_f = 0$   
----电压反馈

$V_{be}$  与  $V_f$  在输入回路以  
电压形式相加减，  
----串联反馈

$R_e$  是输出和输入回路的  
共有元件，通过它把输  
出信号返送到输入回路，  
所以电路存在反馈。

结论：电压串联负反馈





结论: 电流串联负反馈



## 8.3 负反馈对电路性能的影响

### 1. 提高增益的稳定性

引入负反馈，可以稳定输出电压和电流，进而使增益稳定。

从数学式看 
$$\dot{A}_F = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

当反馈很深，即  $\left| 1 + \dot{A}\dot{F} \right| \gg 1$ （深度负反馈）时，
$$\dot{A}_F \approx \frac{\dot{A}}{\dot{A}\dot{F}} = \frac{1}{\dot{F}}$$

深度负反馈条件下，增益只决定于反馈网络，而与基本放大器无关（与开环放大倍数无关）。

**反馈网络由无源器件组成，一般是电阻网络，很稳定！**



为定量说明放大倍数稳定的程度，可将开环增益  $A$  与闭环增益  $A_F$  的相对变化量进行比较。

不考虑相位关系时， $A$ 、 $F$  用实数表示。

$$A_F = \frac{A}{1 + AF}$$

$$dA_F = \frac{dA}{(1 + AF)^2} - \frac{A^2}{(1 + AF)^2} \cdot dF$$



$$\frac{dA_F}{A_F} = \frac{1}{(1 + AF)} \cdot \frac{dA}{A} - \frac{A}{1 + AF} dF$$

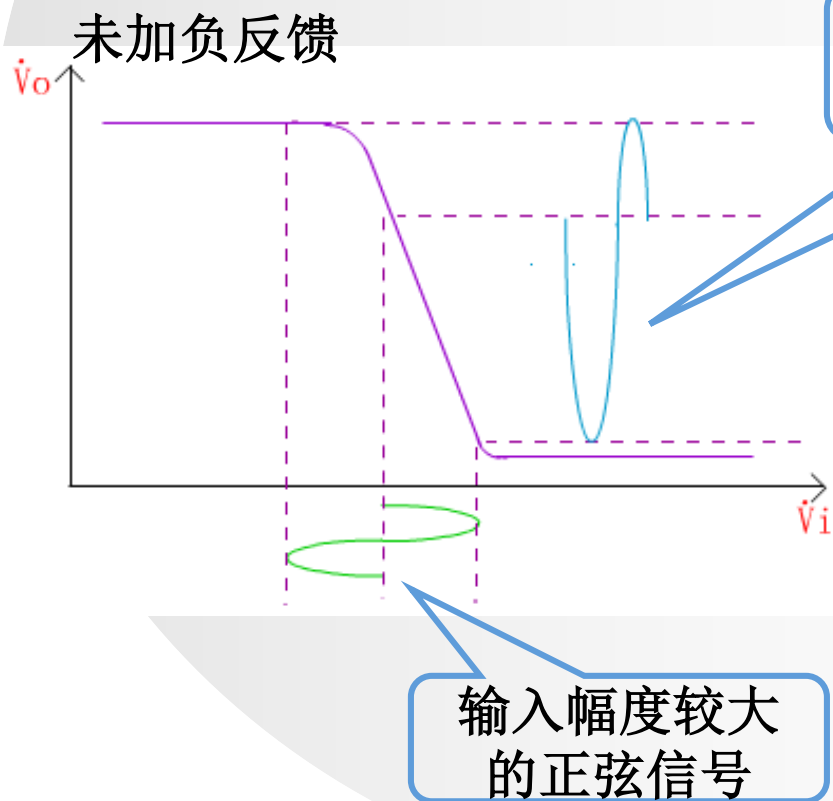
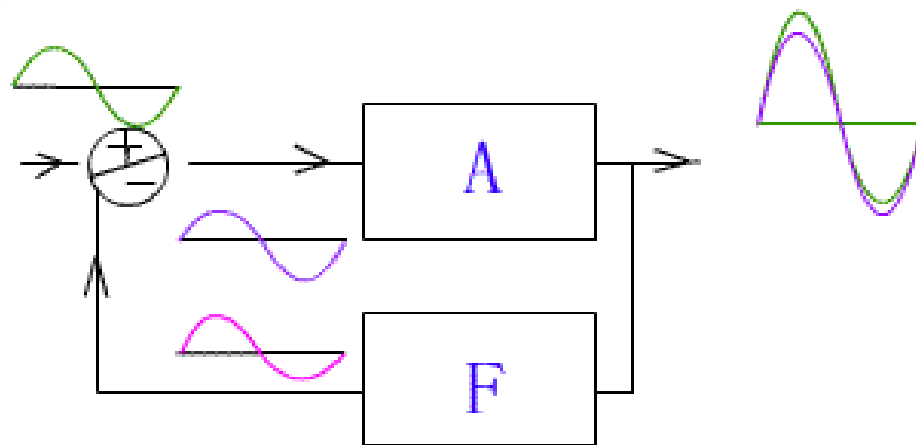
①若  $F$  稳定，则  $dF=0$ ，有  $\frac{dA_F}{A_F} = \frac{dA}{A} \left( \frac{1}{1 + AF} \right)$

对负反馈， $|1 + AF| > 1$ ，于是有  $\frac{dA_F}{A_F} < \frac{dA}{A}$ ，

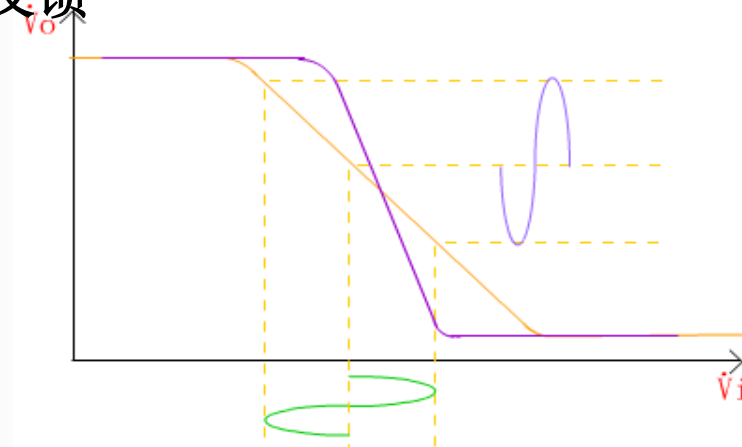
②若  $A$  稳定，有  $\frac{dA_F}{A_F} = A_F dF$ 。对于一定量的  $dF$ ， $A_F$  大时， $\left| \frac{dA_F}{A_F} \right|$  相对变化量也大。



## 2. 减少非线性失真



引入负反馈





## 1、有无反馈的判断

**是否有某些元件或网络，将输出信号引回到输入信号，并影响输入量。**



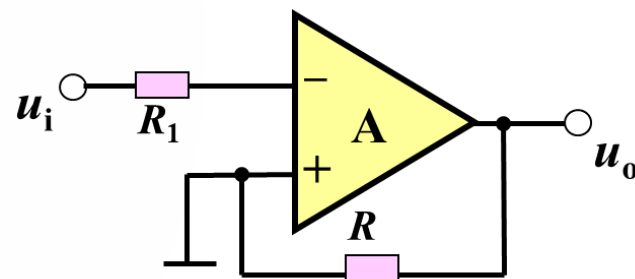
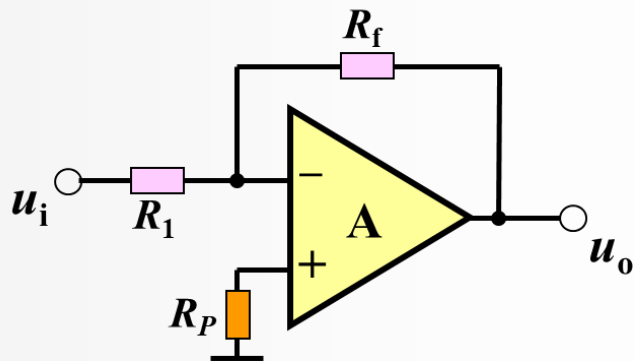
以下两个电路中有无反馈

A 都有

B 均没有

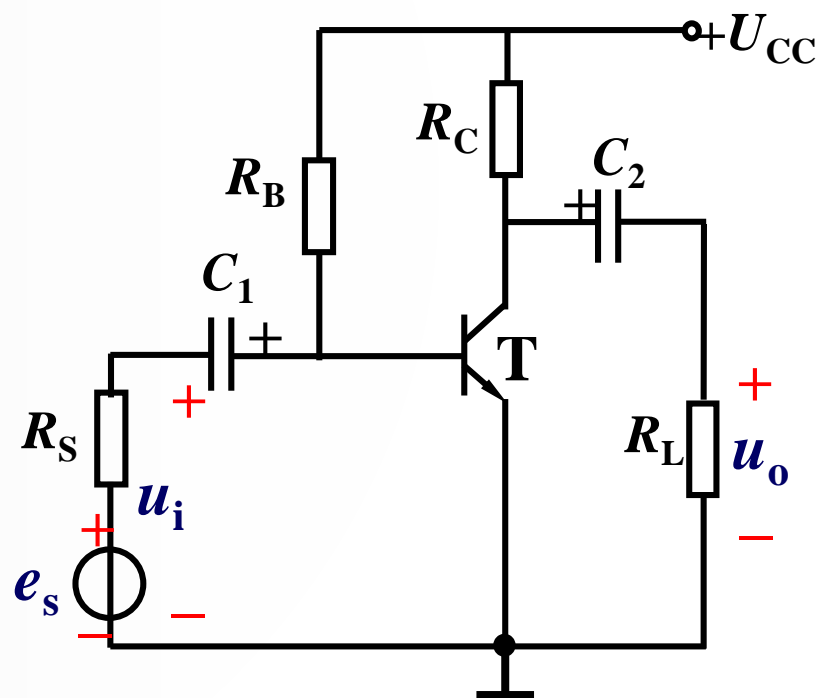
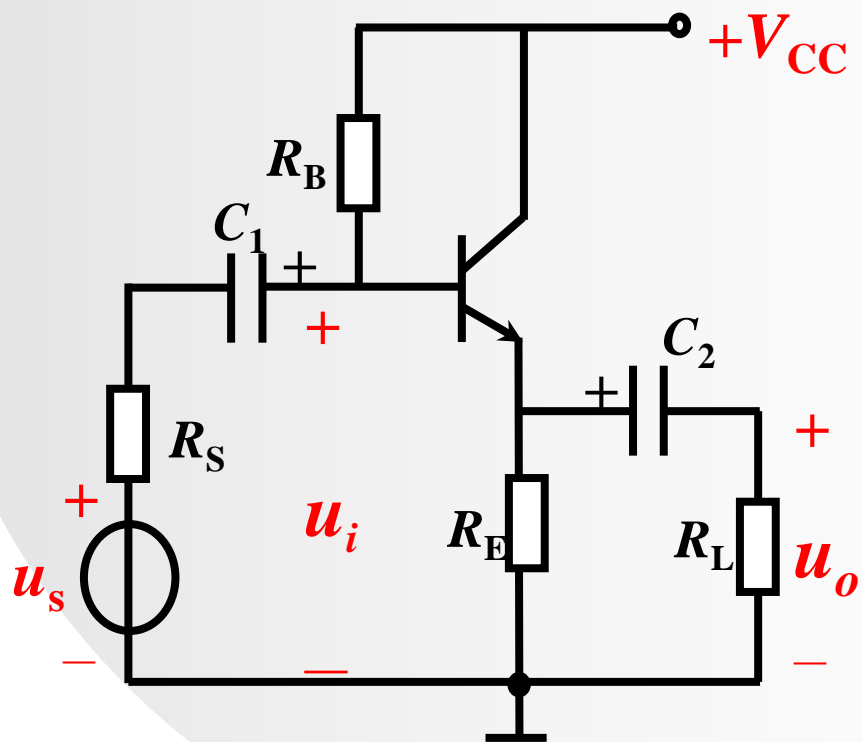
**C 有、无**

D 无、有





# 1、有无反馈的判断





## 2、交直流反馈的判断

**反馈是存在于直流通路中还是交流通路中。**

**(电容观察法)**



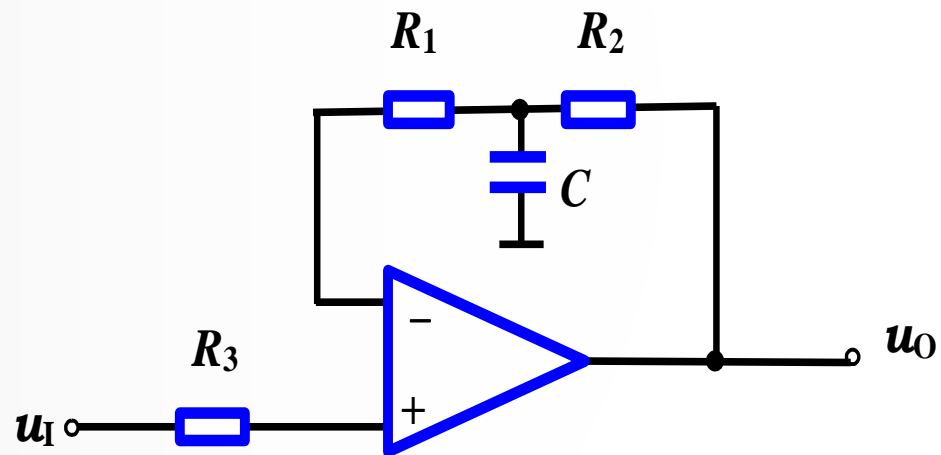


电路中的反馈是交流还是直流反馈？

A 交流

B 直流

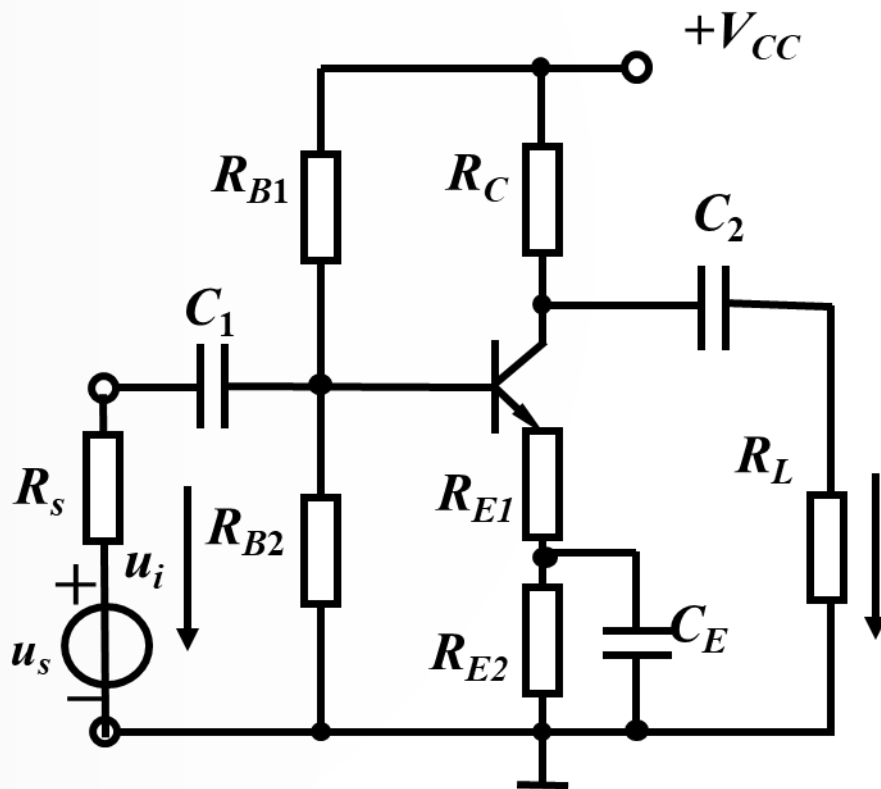
C 交直流





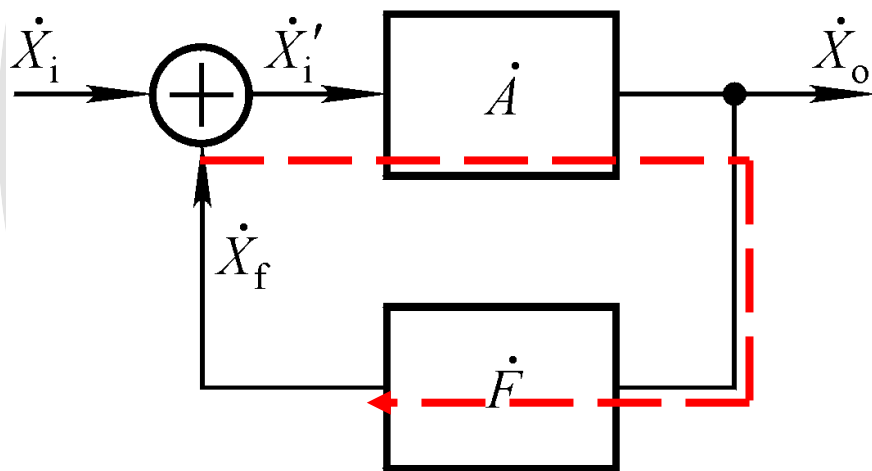
电路中的 $R_{E1}$ 和 $R_{E2}$ 引入的反馈是交流还是直流反馈？

- A 交流、直流
- B 直流、交流
- C 交直流、交流
- ☒ D 交直流、直流





### 3、反馈极性的判断

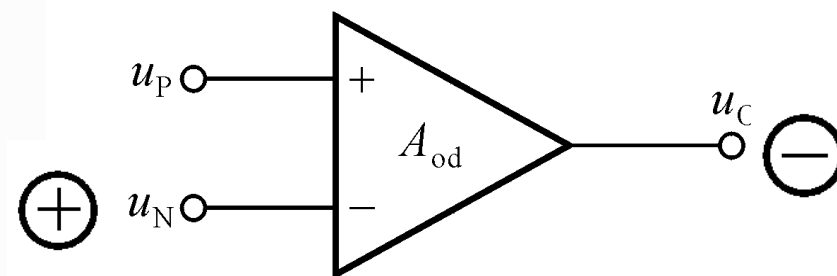
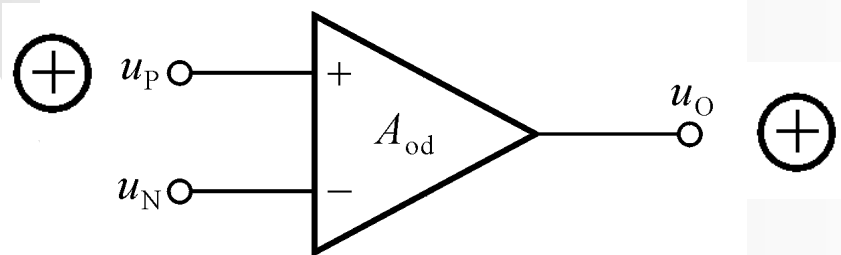
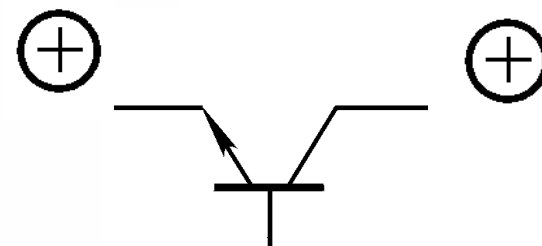
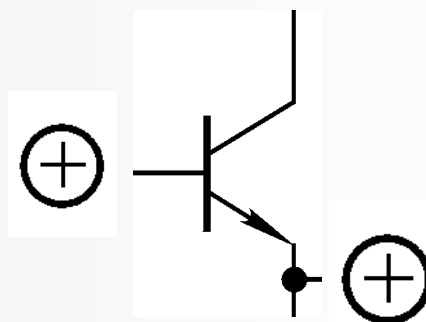
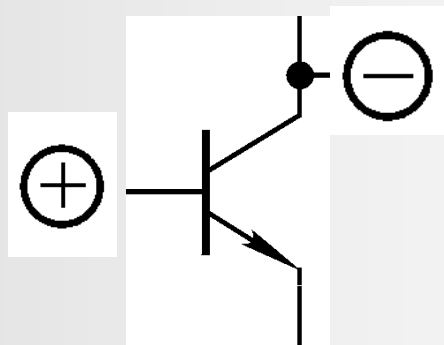


#### 瞬时极性法：

- (1) 假设输入信号在某瞬时的极性为 (+)
- (2) 沿着放大电路、反馈网络，逐级标出电路中各点的瞬时极性，直至判断出反馈信号的瞬时极性
- (3) 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。



### 3、反馈极性的判断





### 3、反馈极性的判断

反馈信号与输入信号加在放大器的**相同输入端**

反馈信号与原输入信号瞬时极性相反 —— 负反馈

反馈信号与原输入信号瞬时极性相同 —— 正反馈

反馈信号与输入信号加在放大器的**不同输入端**

反馈信号与原输入信号瞬时极性相反 —— 正反馈

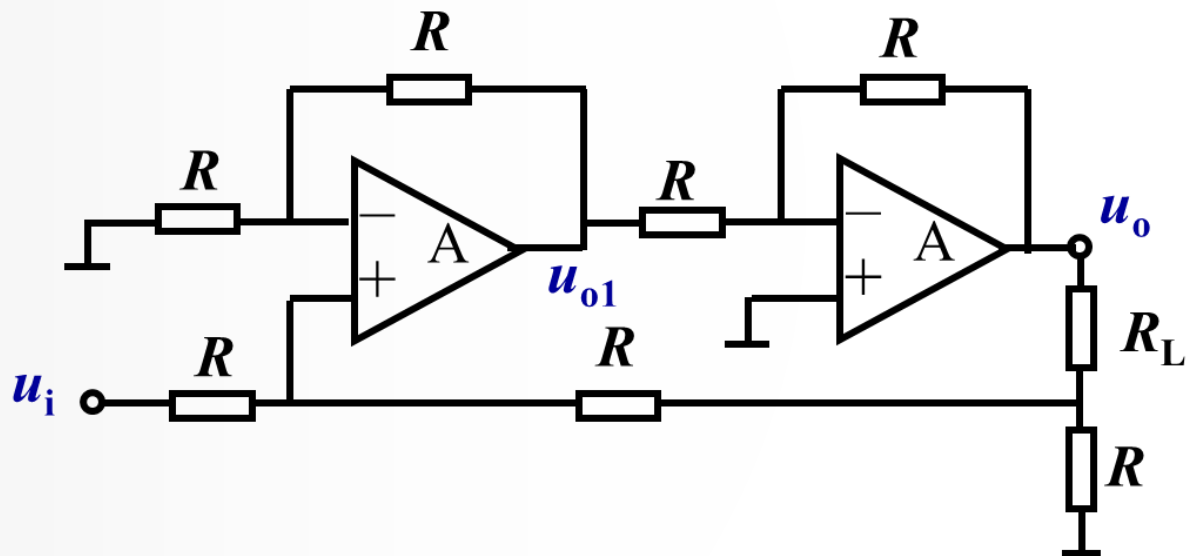
反馈信号与原输入信号瞬时极性相同 —— 负反馈



以下电路中的极间反馈的极性为 ( )

A 正反馈

B 负反馈





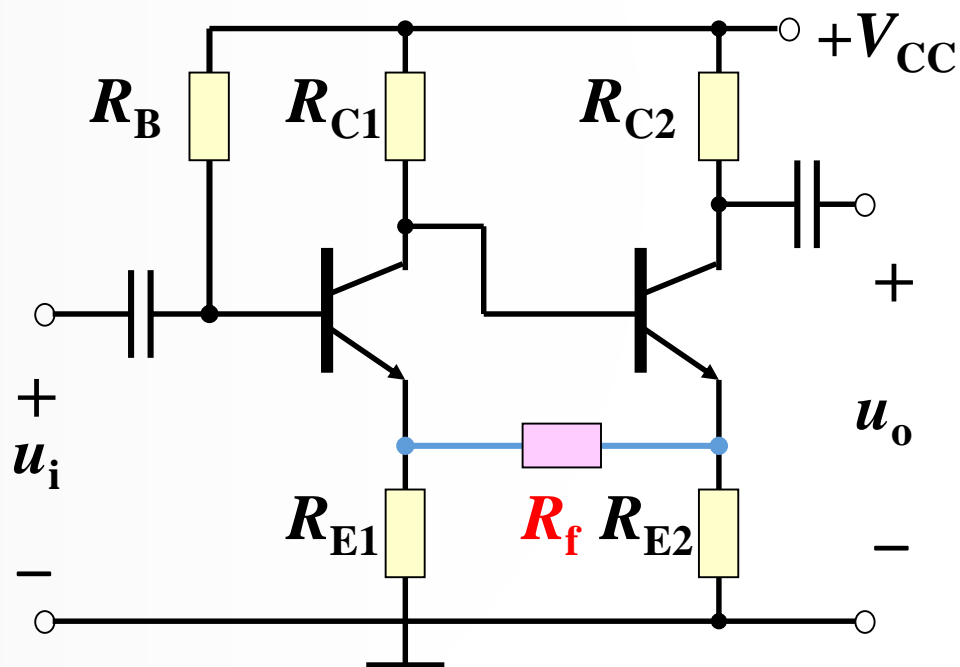
以下电路中的极间反馈的极性为 ( )

A

正反馈

B

负反馈





## 4、串联并联类型的判断

反馈信号和输入信号接于放大器的**同一输入端**

—— 并联反馈

反馈信号和输入信号接于放大器的**不同输入端**

—— 串联反馈

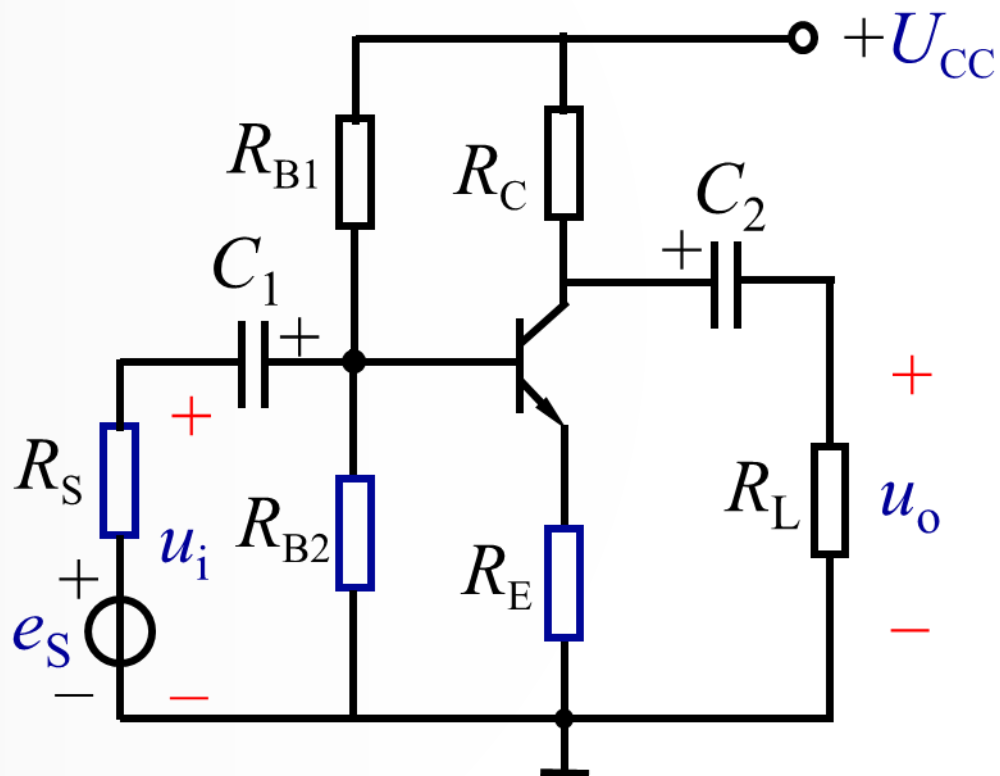




以下电路中的反馈的为 ( )

A 串联反馈

B 并联反馈

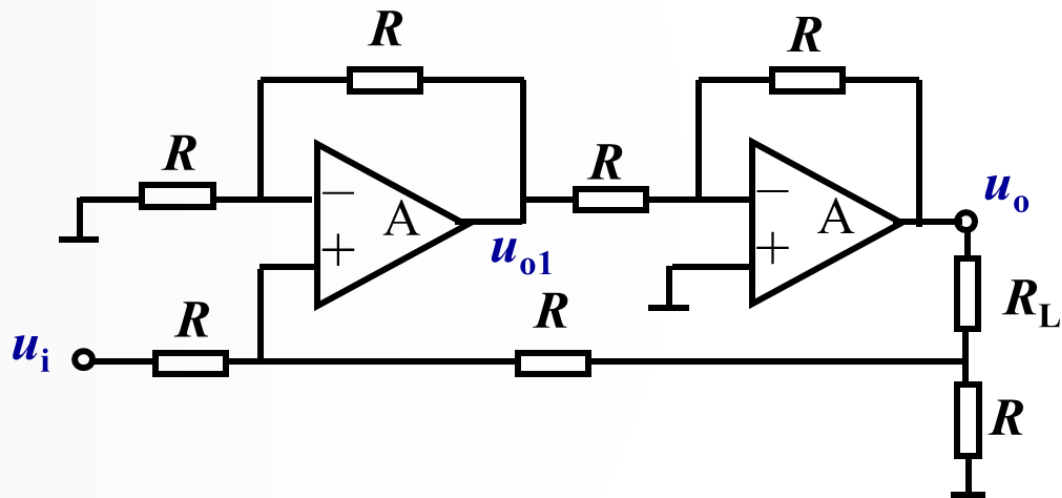




以下电路中的反馈的为 ( )

A 串联反馈

B 并联反馈





## 5、电压电流类型的判断

将负载短路（未接负载时输出对地短路），**反馈量为零**

—— **电压反馈**

将负载短路，**反馈量仍然存在**

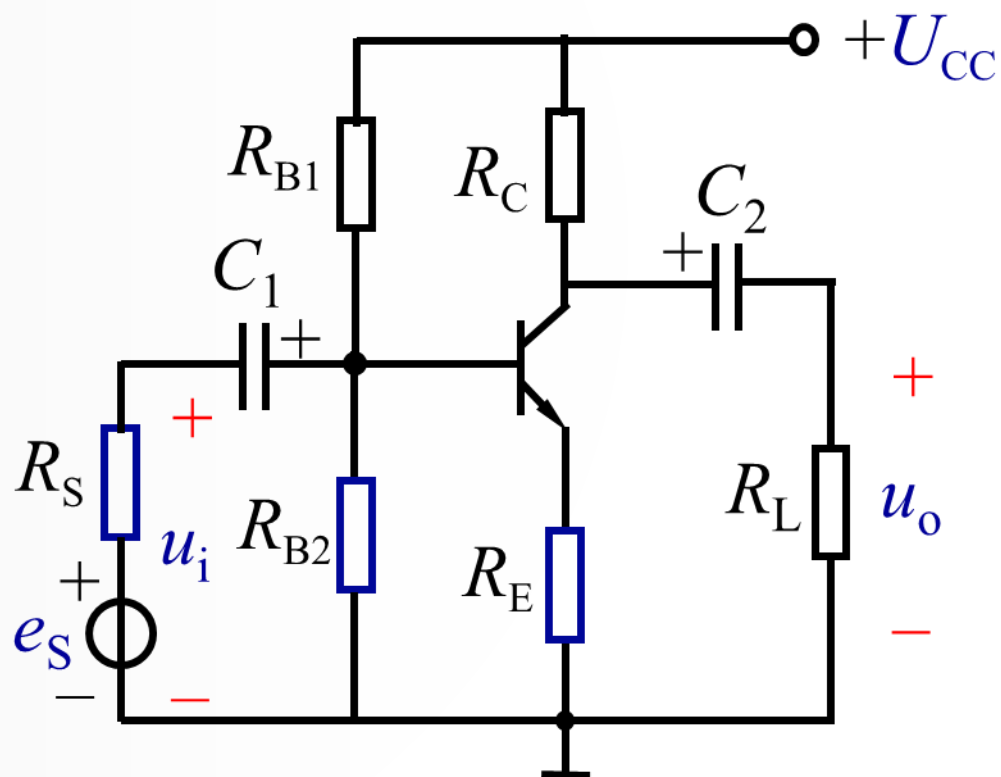
—— **电流反馈**



以下电路中的反馈的为 ( )

A 电压反馈

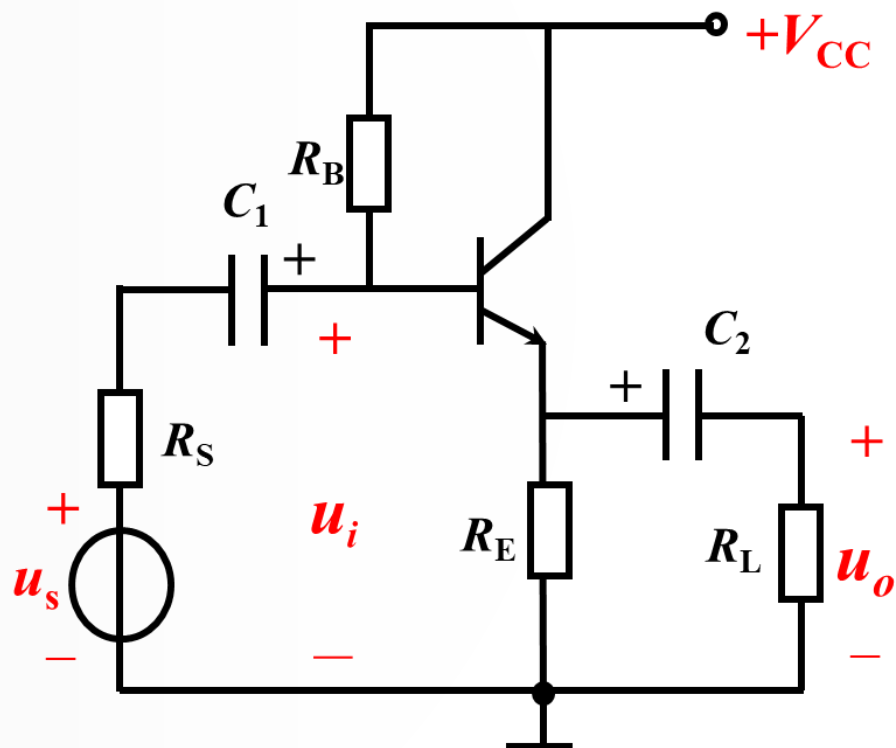
B 电流反馈





以下电路中的反馈的为 ( )

- A 电压反馈
- B 电流反馈





以下电路中的交流反馈类型为 ( )

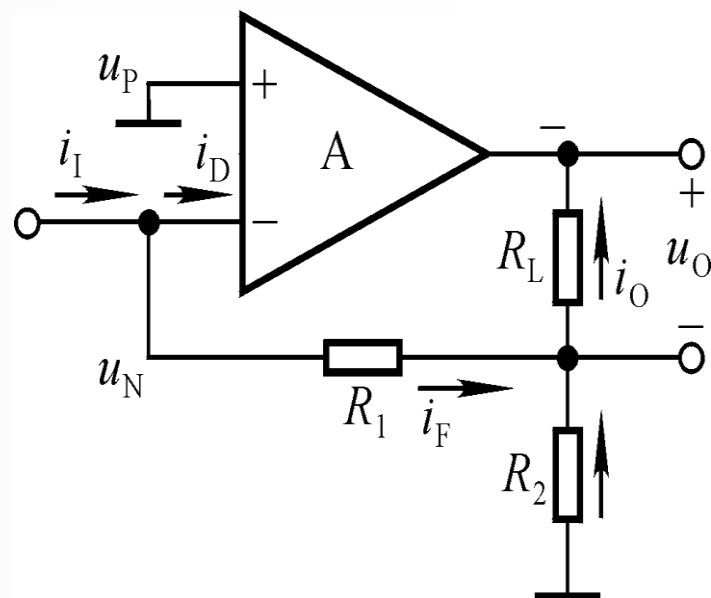
A 电压串联负反馈

B 电流串联负反馈

C 电压并联负反馈

**D 电流并联负反馈**

E 正反馈





以下电路中的交流反馈类型为 ( )

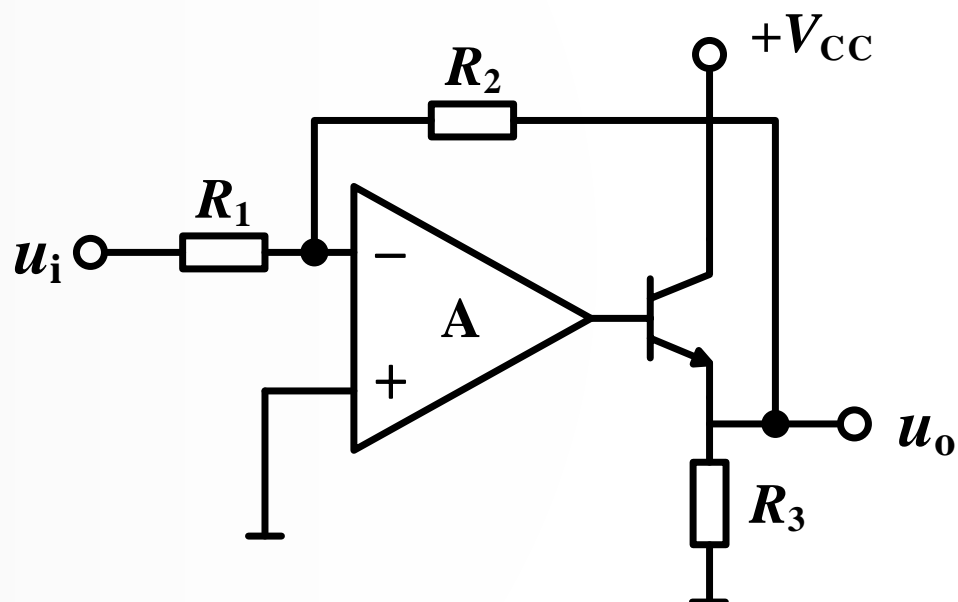
A 电压串联负反馈

B 电流串联负反馈

C 电压并联负反馈

D 电流并联负反馈

E 正反馈





以下电路中的交流反馈类型为 ( )

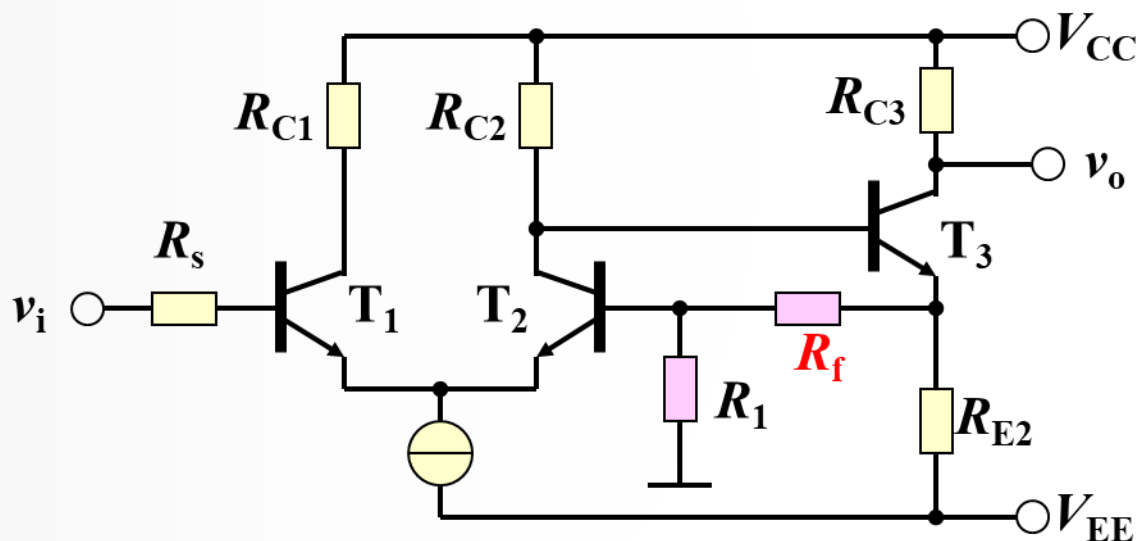
A 电压串联负反馈

**B 电流串联负反馈**

C 电压并联负反馈

D 电流并联负反馈

E 正反馈







### 3. 负反馈抑制放大电路内部的干扰和噪声

#### 干扰和噪声

放大电路的干扰和噪声来自于外部环境和内部本身。

放大电路如有较大的干扰和噪声，在输入微弱信号时，则输出也较弱，甚至可能淹没在噪声之中而无法区别。

干扰噪声与信号间关系通常用信噪比表示：

$$\text{信噪比} = \frac{\text{输出信号功率}}{\text{输出端的噪声功率}}$$

#### 另一种定义

输入信噪比  $(SNR)_i = \frac{S_i}{N_i} = \frac{v_i}{v_n}$

式中， $S_i = v_i$  是信号源提供的输入信号， $N_i = v_n$  是输入噪声信号。

输出信噪比  $(SNR)_o = \frac{S_o}{N_o} = \frac{A_i S_i}{A_n N_i}$

式中， $A_i$  是源信号的增幅因子， $A_n$  是噪声信号的增幅因子。



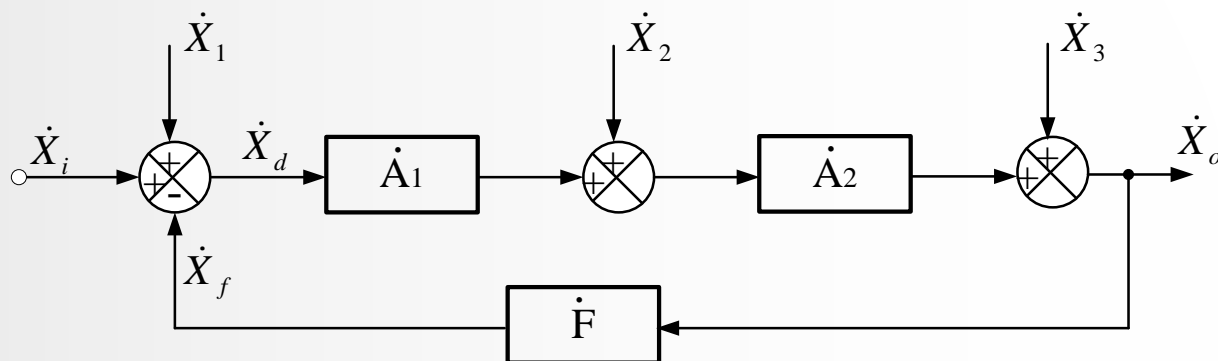
## 负反馈抑制噪声

引入负反馈以后，信号与噪声同时减小。输出端信噪比并未改变。

但信号的减小可通过提高输入幅度弥补，而噪声是固定的，这样，可提高信噪比。



## 负反馈抑制噪声



$$\begin{aligned}\dot{X}_o &= \dot{X}_3 + \dot{A}_2(\dot{X}_2 + \dot{A}_1\dot{X}_d) \\ &= \dot{X}_3 + \dot{A}_2\dot{X}_2 + \dot{A}_1\dot{A}_2(\dot{X}_i + \dot{X}_1 - \dot{X}_f) \\ &= \dot{X}_3 + \dot{A}_2\dot{X}_2 + \dot{A}_1\dot{A}_2(\dot{X}_i + \dot{X}_1 - \dot{F}\dot{X}_o)\end{aligned}$$

$$\dot{X}_o = \frac{\dot{A}_1\dot{A}_2}{1 + \dot{A}_1\dot{A}_2\dot{F}} \left( \dot{X}_i + \dot{X}_1 + \frac{1}{\dot{A}_1} \dot{X}_2 + \frac{1}{\dot{A}_1\dot{A}_2} \dot{X}_3 \right)$$

注：与信号同时混入的噪声，是不能用负反馈抑制的。



1. 负反馈所能抑制的干扰和噪声是()。

A 输入信号所包含的干扰和噪声

☒ B 反馈环内的干扰和噪声

C 反馈环外的干扰和噪声

D 输出信号中的干扰和噪声



#### 4. 负反馈展宽频带

从本质上说，频带限制是由于电路对不同频率的信号呈现出不同的放大倍数而造成的。

负反馈具有稳定闭环增益的作用，因而对于频率增加（或减小）引起的放大倍数下降同样具有稳定作用。也就是说，它能减小频率变化对闭环增益的影响，从而展宽闭环增益的频带。

设反馈网络为纯电阻网络，放大电路在高、低频段仅有一个拐点，其高、低频段增益表示为：

$$\dot{A}_H = \frac{\dot{A}_m}{1 + j \frac{f}{f_H}} \quad \dot{A}_L = \frac{\dot{A}_m}{1 - j \frac{f_L}{f}}$$



引入反馈系数为  $F$  的负反馈后，闭环高频增益：

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

放大电路闭环中频增益：

$$\dot{A}_{mf} = \frac{\dot{A}_m}{1 + \dot{A}_m F}$$

闭环放大电路的上限频率：

$$f_{Hf} = (1 + \dot{A}_m F) f_H$$

同理，可推导出闭环放大电路的下限频率：

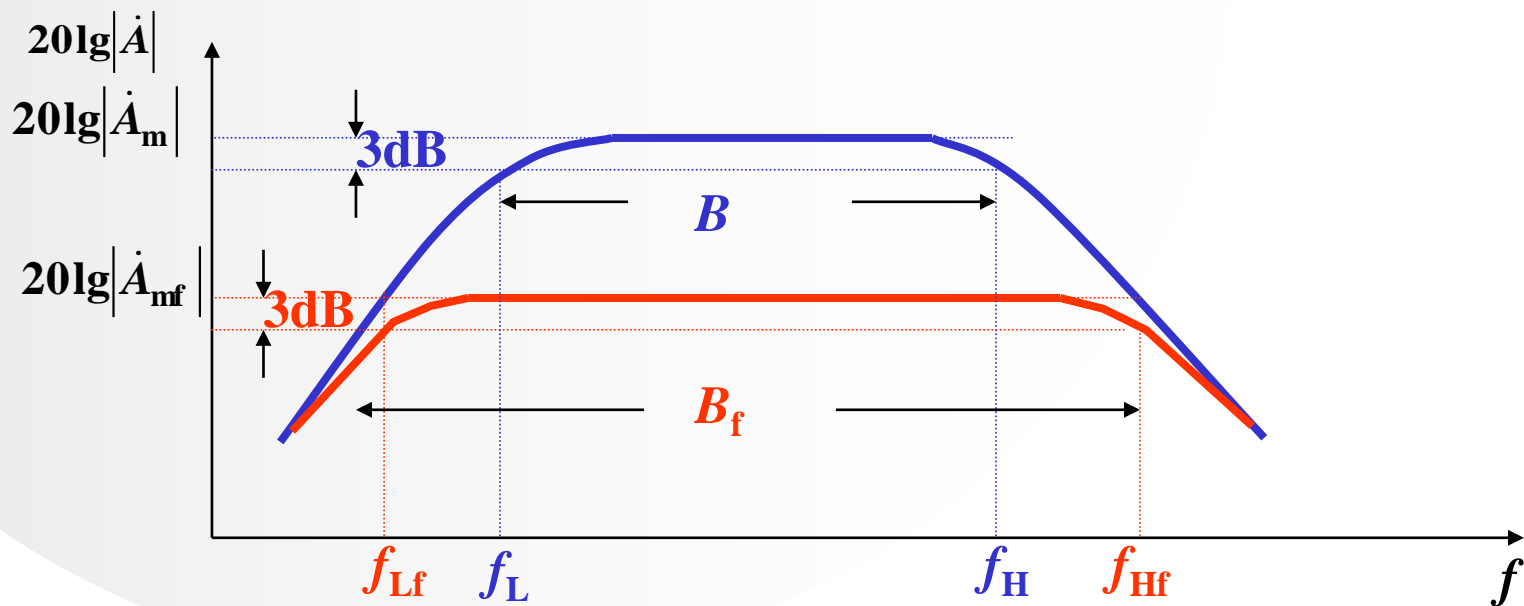
$$f_{Lf} = \frac{f_L}{1 + \dot{A}_m F}$$



放大器的带宽:  $BW = f_H - f_L \approx f_H$

反馈放大器的带宽:  $BW_f = f_{Hf} - f_{Lf} \approx f_{Hf} = (1 + A_m F) \times BW$

引入负反馈后，带宽增大到无反馈时的  $1 + AF$  倍





引入负反馈后，上限频率增加  $(1 + A_m F)$  倍；下限频率减少  $(1 + A_m F)$  倍，频带得到展宽。

$$\left. \begin{array}{l} \text{闭环频带展宽}(1 + A_m F)\text{倍} \\ \text{中频放大倍数下降}(1 + A_m F)\text{倍} \end{array} \right\} A_{mF} \cdot BW_F = A_m BW = C$$

负反馈愈深，中频放大倍数下降越多，通频带越宽。

注：①上面讨论的是电压串联负反馈情况，其它三种类型能否展宽电压增益的频带还和其它条件有关。如电流串联  $\dot{A}_{vf} = \dot{A}_{gf} Z_L$ ， $Z_L$  影响频带。

②负反馈使上限频率  $f_H$  增加  $(1 + A_m F)$  倍的结论只有在基放电路只有一个极点时才是正确的。如果有两个极点以上，频带会展宽，但没有这种简单关系。



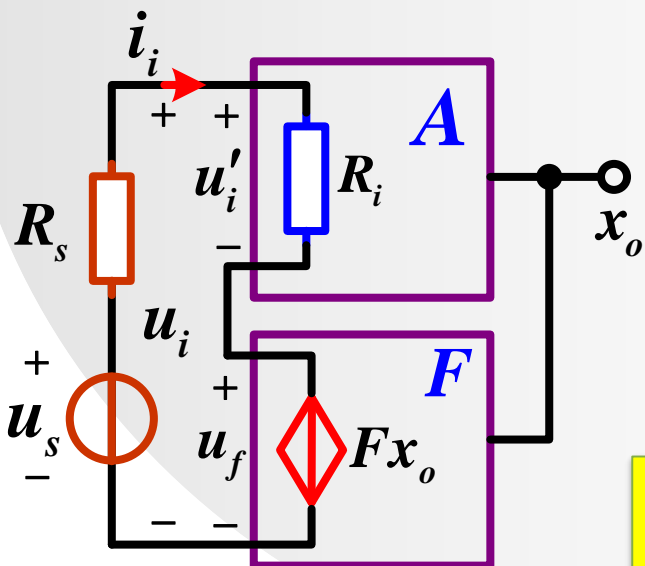


## 5. 负反馈对输入电阻和输出电阻的影响

对输入电阻的影响仅与反馈网络和基本放大电路在输入端的接法有关，即决定于是串联反馈还是并联反馈。

引入串联负反馈

基本放大电路输入电阻  $R_i = U'_i / I_i$



反馈电路输入电阻

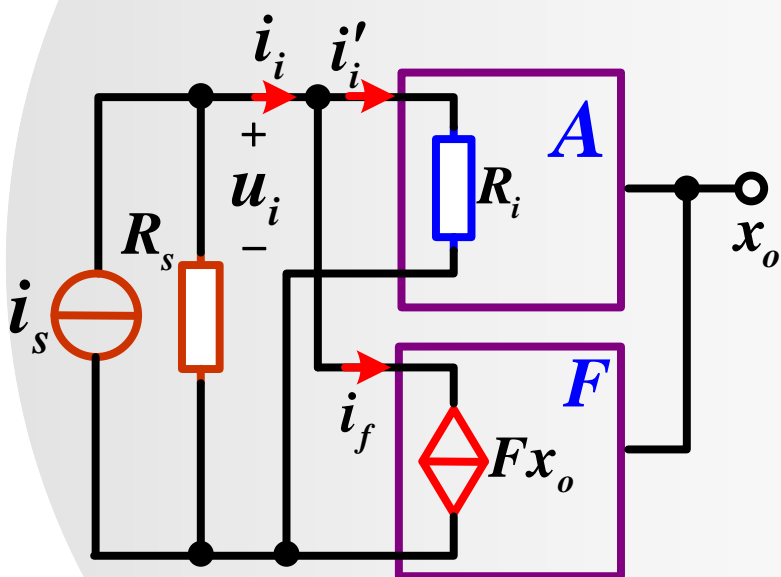
$$R_{if} = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U'_i + U_f}{I_i} = \frac{U' + Fx_o}{I_i} = \frac{U' + FAU'}{I_i}$$

$$R_{if} = (1 + AF)R_i$$

引入串联负反馈，输入电阻增大为无反馈时的  $(1 + AF)$  倍



## 引入并联负反馈



基本放大电路输入电阻  $R_i = \frac{U_i}{I'_i}$

反馈电路输入电阻

$$R_{if} = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{I'_i + I_f} = \frac{U_i}{I'_i + FX_o} = \frac{U_i}{I'_i + FAI'_o}$$

$$R_{if} = \frac{R_i}{1 + AF}$$

引入并联负反馈后，输入电阻减小为无负反馈时的 $1/(1 + AF)$



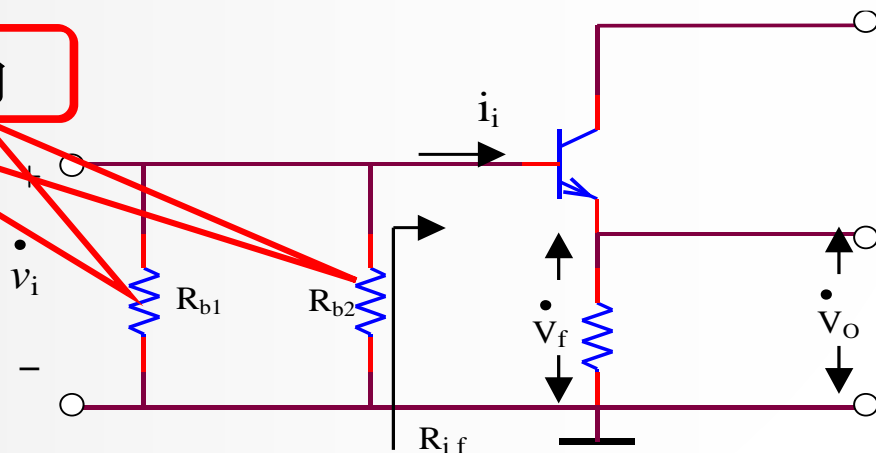
## 对输入电阻的影响

注：

① 有的电阻不在反馈网络内，这些电阻不受影响。

②  $R_{if} = (1 + \dot{A}\dot{F})R_i$ ，这里  $R_i$  指的是  $\frac{\dot{V}_d}{\dot{I}_i}$ ，其中  $\dot{V}_d$  是基放的净输入电压。

不包括在反馈路内



闭环总的输入电阻为  $R'_{if} = R_{b1} // R_{b2} // R_{if} = R_{b1} // R_{b2} // (1 + \dot{A}\dot{F})R_i$



## 对输出电阻的影响

对输出电阻的影响仅与反馈网络和基本放大电路在输出端的接法有关，即决定于是电压反馈还是电流反馈。

### 引入电压负反馈

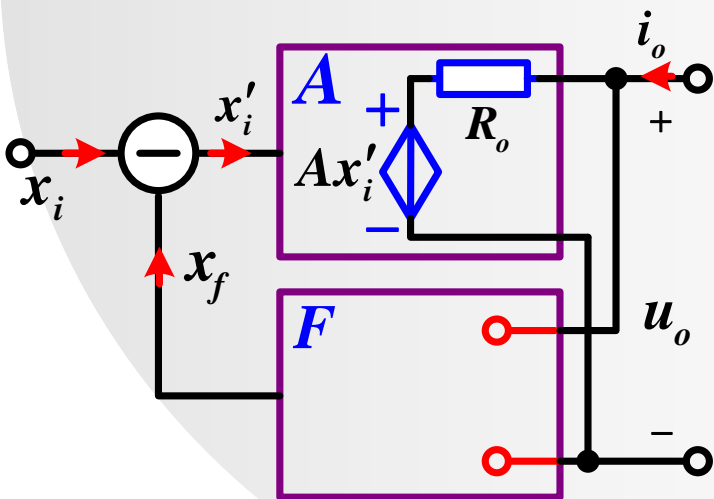
令  $x_i=0$ ；则：  $x'_i = -x_f = -Fu_o$

$$u_o = i_o R_o + Ax'_i = i_o R_o - AFu_o$$

$$R_{of} = \frac{U_o}{I_o} = \frac{R_o}{1 + AF}$$

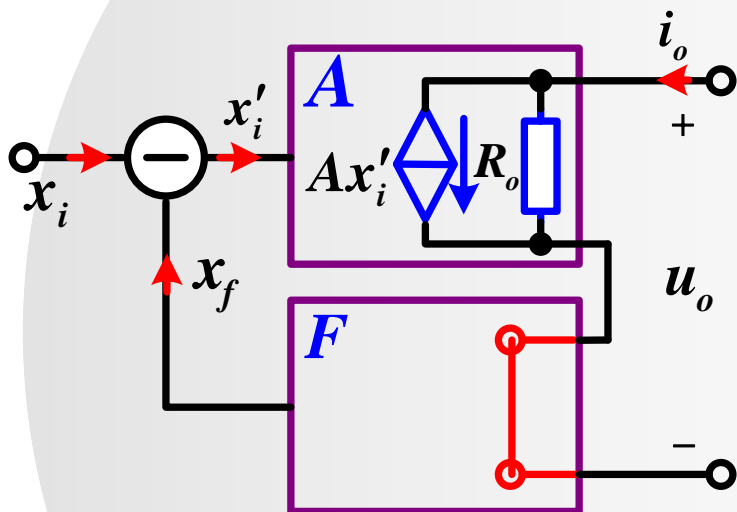
电压负反馈稳定输出电压，使之输出趋近于恒压源

引入电压负反馈后，输出电阻减小到无反馈时的  $1/(1 + AF)$





## 引入电流负反馈



令  $x_i=0$ ; 则:  $x'_i = -x_f = -Fi_o$

$$i_o = \frac{u_o}{R_o} + Ax'_i = \frac{u_o}{R_o} - AFi_o$$

$$R_{of} = \frac{U_o}{I_o} = R_o (1 + AF)$$

引入电流负反馈后，输出电阻增大到无反馈时的  $1 + AF$  倍

电流负反馈稳定输出电流，使之输出趋近于恒流源

注：有的电阻不在反馈网络内，这些电阻不收影响。



1. 对于电流串联负反馈而言,下列哪个回答是正确的?( )

A

输入电阻变大,输出电阻变大

B

输入电阻变大,输出电阻变小

C

输入电阻变小,输出电阻变大

D

输入电阻变小,输出电阻变小



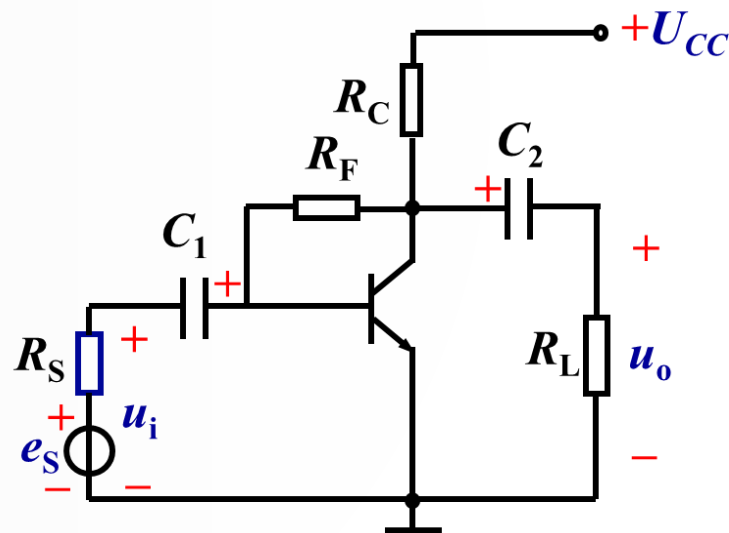
电路中 $R_F$ 引入的负反馈，对放大电路的输入电阻和输出电阻的影响为（）

A 增大 $R_i$ ，减小 $R_o$

**B 减小 $R_i$ ，减小 $R_o$**

C 增大 $R_i$ ，增大 $R_o$

D 减小 $R_i$ ，增大 $R_o$





综上所述，负反馈对放大器性能影响主要表现为：

① 降低增益

② 提高增益稳定性（或减小增益灵敏度）

③ 改变电路输入、输出电阻

	电压串联	电流串联	电压并联	电流并联
$R_i$	增大	增大	减小	减小
$R_o$	减小	增大	减小	增大

④ 减小频率失真（或扩展通频带）

⑤ 减小非线性失真





在下列四种反馈组态中，能够使输出电压稳定，并提高输入电阻的负反馈是（ ）。

A 电压并联负反馈

☒ B 电压串联负反馈

C 电流并联负反馈

D 电流串联负反馈



## 按需引入反馈

**放大电路设计时引入负反馈的一般原则：**

**根据需影响的信号对象确定交直流反馈：**

- 为了稳定静态工作点应该引入直流负反馈；
- 为了改善电路的动态性能，应该引入交流负反馈。

**根据信号源的性质确定串并联负反馈：**

- 当信号源是恒压源或内阻很小的电压源时应该引入串联负反馈；
- 当信号源是恒流源或内阻很大的电流源时应该引入并联负反馈。



## 按需引入反馈

**根据负载对放大电路的要求确定电压电流负反馈：**

- 若需要稳定的电压输出或 $R_o$ 小，应该引入电压负反馈；
- 若需要稳定的电流输出或 $R_o$ 大，应该引入电流负反馈。

**根据电路对信号源索取电流大小确定串并联负反馈：**

- 若要求 $R_i$ 大或索取信号源电流小，应引入串联负反馈；
- 若要求 $R_i$ 小或索取信号源电流大，应引入并联负反馈。

**根据四种组态交流负反馈放大电路的功能，选择合适的组态来实现信号的变换。**



what

which

why

how

基本概念

分类  
判别

影响  
分析

按需  
引入

估算  
增益

稳定  
性

会判

会诊

会算

会用



## 反馈判别：

- 有无反馈-找联系；
- 交直流反馈-电容观察法；
- 反馈极性-瞬时极性法；
- 串并联-反馈叠加接入点；
- 电压电流-输出短路法。



## 负反馈影响：

- 对增益的影响- 增强稳定性、减小增益；
- 对输入电阻影响
  - 串联负反馈增大输入电阻
  - 并联负反馈减小输入电阻
- 对输出电阻影响
  - 电压负反馈减小输出电阻-稳定输出电压
  - 电流负反馈增大输出电阻-稳定输出电流



(1) 欲从信号源获得更大的电流，负载变化输出电压几乎不变，应在放大电路中引入何种类型负反馈？

A 电压串联负反馈

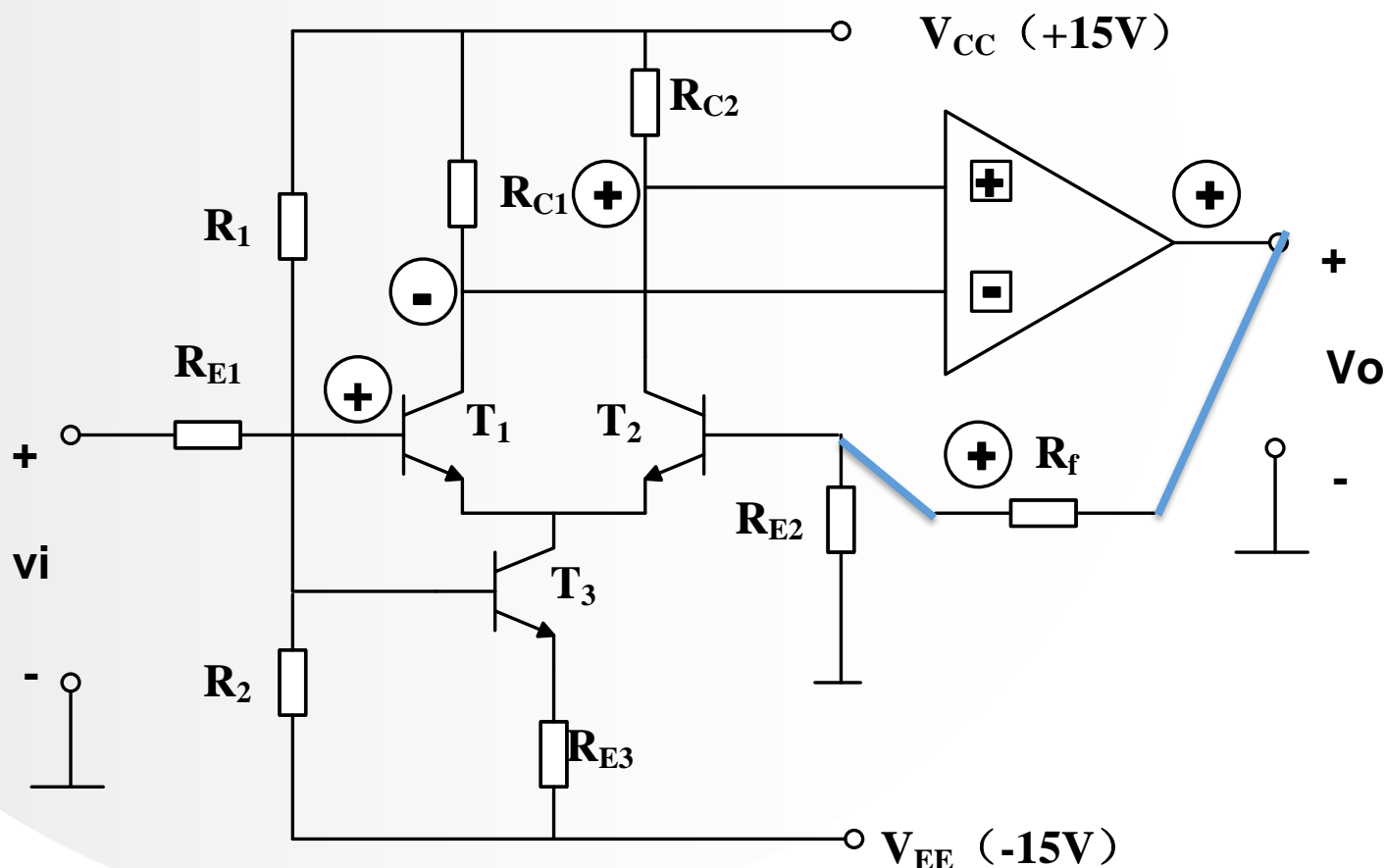
☒ B 电压并联负反馈

C 电流串联负反馈

D 电流并联负反馈



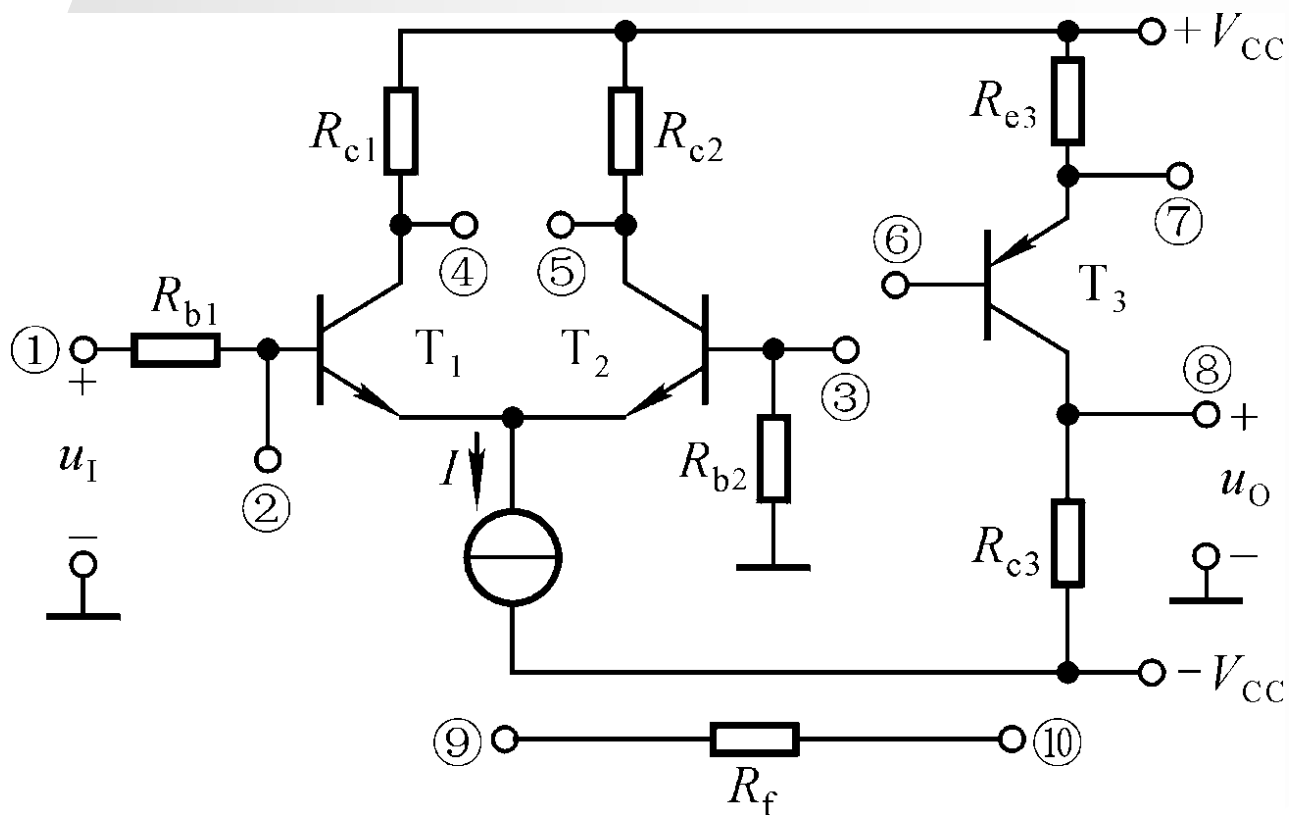
(2) 要使电路具有稳定的输出电压和高的输入电阻，应接入何种负反馈？ $R_f$ 应如何接入？标注图中各点和集成运放输入端的极性。







(3) 试在图示电路中分别引入四种不同组态的交流负反馈。



(1) 电压串联负反馈:

10-8    9-3    4-6

(2) 电压并联负反馈:

10-8    9-2    5-6

(3) 电流串联负反馈:

10-7    9-3    5-6

(4) 电流并联负反馈:

10-7    9-2    4-6



## 8.4 负反馈放大电路性能指标分析

- 1、闭环输入电阻和输出电阻的讨论**
- 2、闭环增益的再认识**
- 3、深度负反馈条件下闭环增益的估算方法**



## 深度负反馈放大电路输入输出电阻的估算

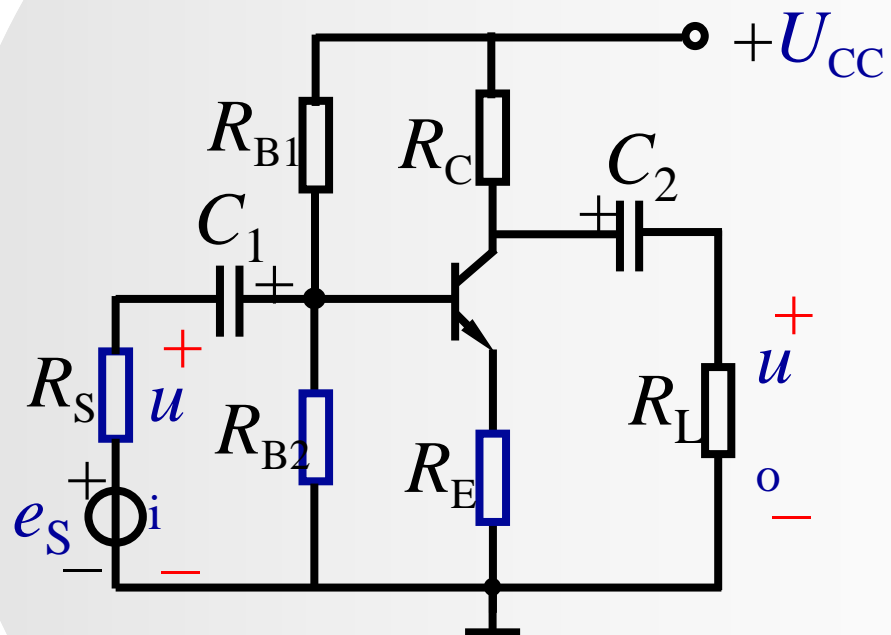
串联反馈电路输入电阻:  $R_{if} = R_i (1 + AF) \rightarrow \infty$

并联反馈电路输入电阻:  $R_{if} = R_i / (1 + AF) \rightarrow 0$

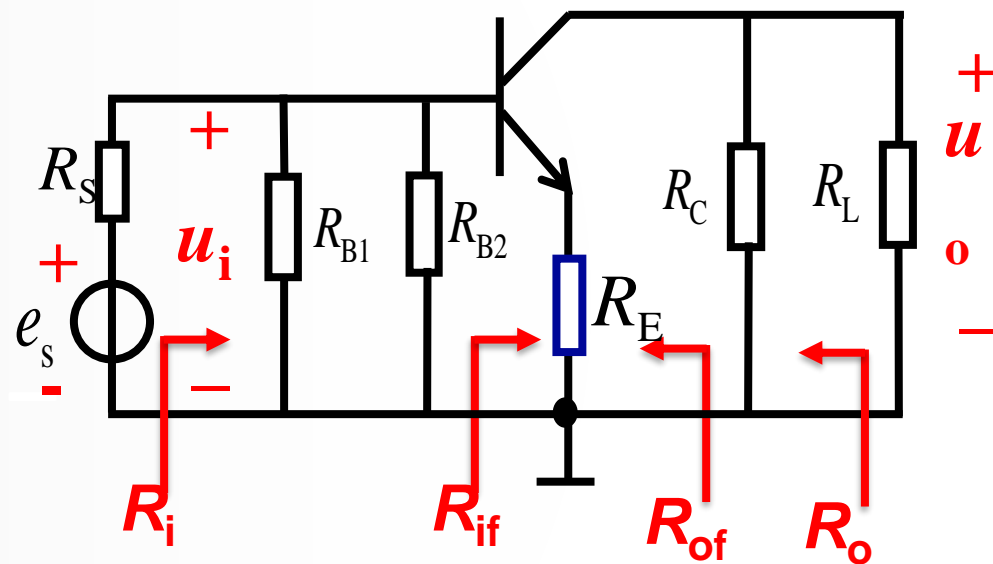
电压反馈电路输出电阻:  $R_{of} = R_o / (1 + AF) \rightarrow 0$

电流反馈电路输出电阻:  $R_{of} = R_o (1 + AF) \rightarrow \infty$

上述输入和输出电阻是指反馈环内的电阻，而有些电路的电阻可能不在环内，反馈对它不产生影响，在计算时应予以考虑。



电流串联负反馈



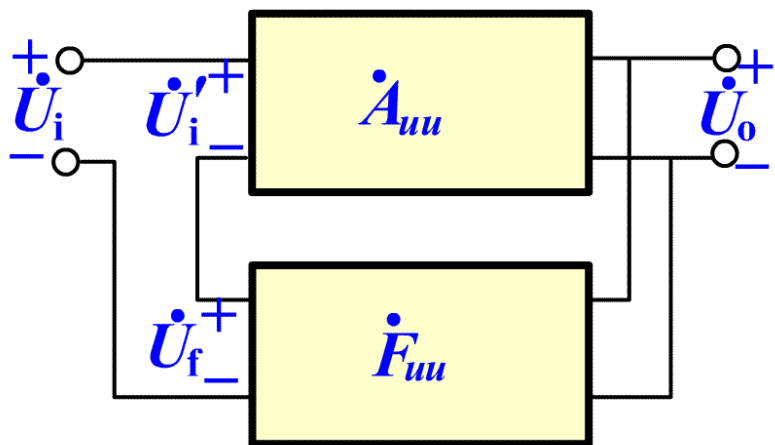
$$R_o = R_{of} // R_C = R_C$$

$$R_i = R_{if} // R_{B1} // R_{B2} \approx R_{B1} // R_{B2}$$



## 2、深度负反馈放大电路闭环增益的再认识

### (1) 电压串联负反馈 (Series-shunt)



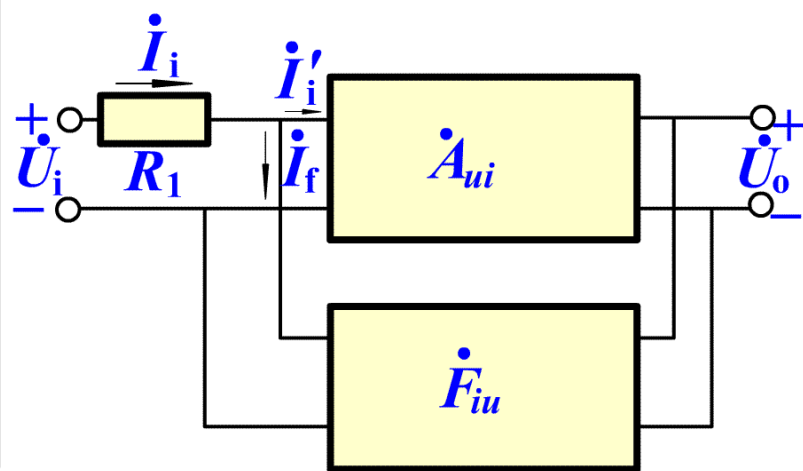
开环电压放大倍数:  $\dot{A}_{uu} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}'_i}$

电压反馈系数:  $\dot{F}_{uu} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o}$

闭环电压增益  $\dot{A}_{uf} = \dot{A}_{uu} / (1 + \dot{A}_{uu} \dot{F}_{uu})$



## (2) 电压并联负反馈 (Shunt-shunt)



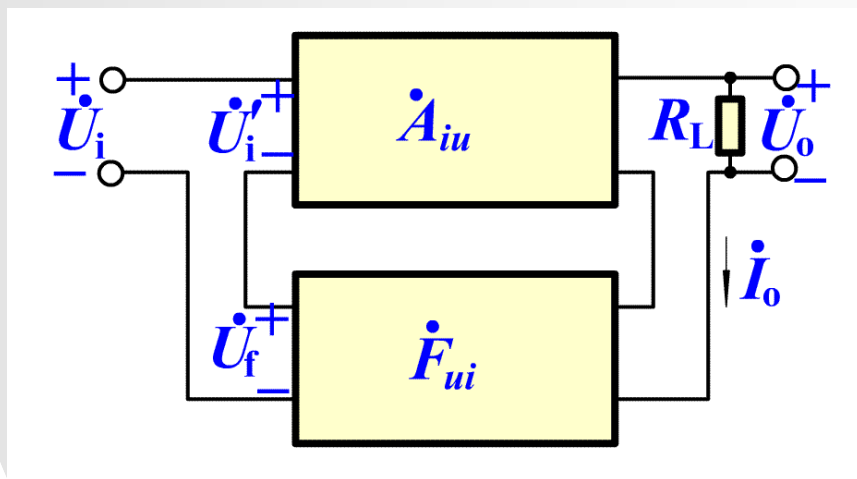
开环互阻放大倍数:  $\dot{A}_{ui} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}'_i}$

互导反馈系数:  $\dot{F}_{iu} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o}$

闭环互阻增益  $\dot{A}_{rf} = \dot{A}_{ui} / (1 + \dot{A}_{ui} \dot{F}_{iu})$



### (3) 电流串联负反馈 (Series-series)



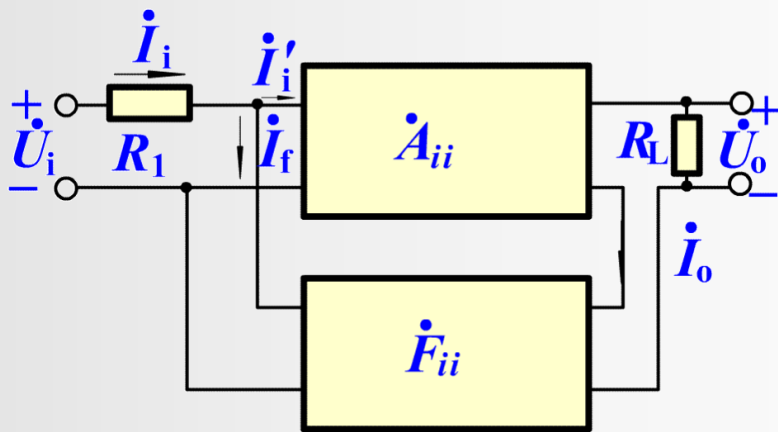
开环互导放大倍数:  $\dot{A}_{iu} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i'}$

互阻反馈系数:  $\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o}$

闭环互导增益  $\dot{A}_{gf} = \dot{A}_{iu} / (1 + \dot{A}_{iu} \dot{F}_{ui})$



## (4) 电流并联负反馈 (Shunt-series)



开环电流放大倍数:  $\dot{A}_{ii} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}'_i}$

电流反馈系数:  $\dot{F}_{ii} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o}$

闭环电流增益  $\dot{A}_{if} = \dot{A}_{ii} / (1 + \dot{A}_{ii} \dot{F}_{ii})$





## 四种负反馈组态的比较

	输出信号	反馈信号	开环放大倍数	反馈系数	闭环放大倍数	功能
电压串联式	$\dot{U}_o$	$\dot{U}_f$	电压放大倍数 $\dot{A}_{uu} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$	$\dot{F}_{uu} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o}$	电压放大倍数 $\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{A}_{uu}}{1 + \dot{A}_{uu}\dot{F}_{uu}}$	压控电压源
电压并联式	$\dot{U}_o$	$\dot{I}_f$	转移电阻 $\dot{A}_{ui} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} (\Omega)$	$\dot{F}_{iu} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o} (S)$	互阻放大倍数 $\dot{A}_{rf} = \frac{\dot{A}_{ui}}{1 + \dot{A}_{ui}\dot{F}_{iu}}$	流控电压源
电流串联式	$\dot{I}_o$	$\dot{U}_f$	转移电导 $\dot{A}_{iu} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i} (S)$	$\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o} (\Omega)$	互导放大倍数 $\dot{A}_{gf} = \frac{\dot{A}_{iu}}{1 + \dot{A}_{iu}\dot{F}_{ui}}$	压控电流源
电流并联式	$\dot{I}_o$	$\dot{I}_f$	电流放大倍数 $\dot{A}_{ii} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$	$\dot{F}_{ii} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o}$	电流放大倍数 $\dot{A}_{if} = \frac{\dot{A}_{ii}}{1 + \dot{A}_{ii}\dot{F}_{ii}}$	流控电流源



1. 对于电压串联负反馈,反馈系数 $F$ 的量纲为()。

A 电阻

B 电导

☒ C 无量纲



2. 对于电流串联负反馈, **闭环增益**的量纲为()。

A 电阻

**B 电导**

C 无量纲



3. 为了使电压信号转换成与之成稳定关系的电流信号，应引入什么反馈？

A 电压串联负反馈

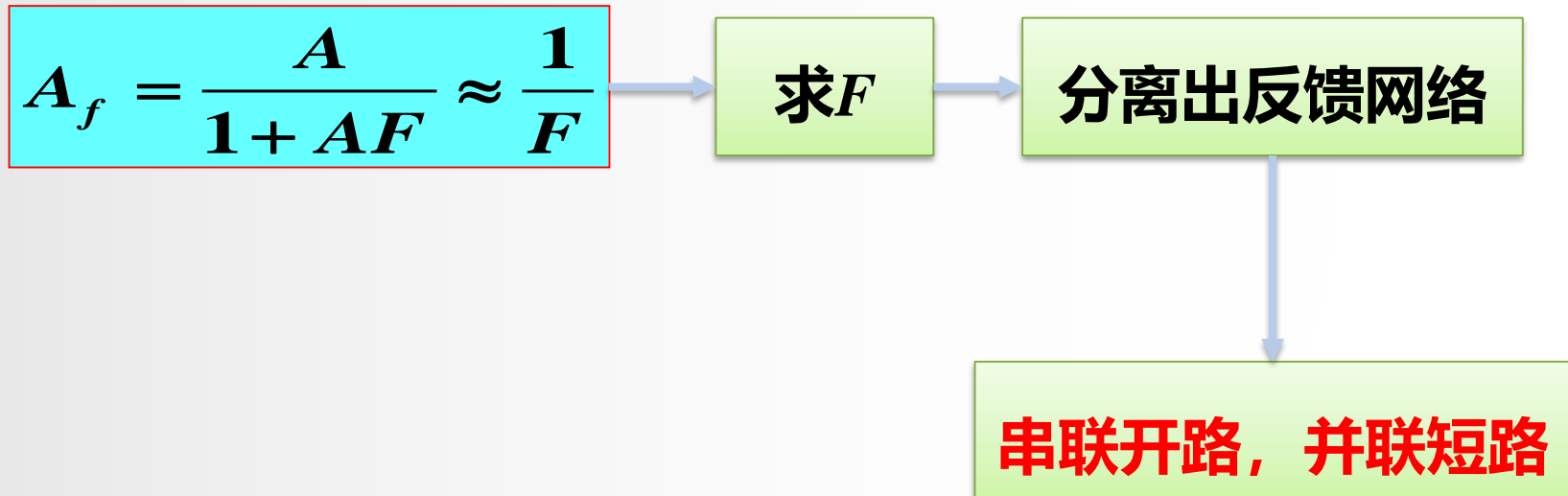
B 电压并联负反馈

☒ C 电流串联负反馈

D 电流并联负反馈



### 3、深度负反馈放大电路闭环增益的估算





## 分析步骤:

1. 确定反馈类型
2. 找出反馈网络
3. 根据反馈类型确定  $\dot{F}$  的含义, 并计算  $\dot{F}$ :

若串联反馈: 将反馈接入的输入端交流开路  
若并联反馈: 将反馈接入的输入端交流短路 } 计算此时  $\dot{X}_o$  产生的  $\dot{X}_f$

则反馈系数  $\dot{F} = \dot{X}_f / \dot{X}_o$

4. 计算  $\dot{A}_f = 1 / \dot{F}$  ;

5. 确定  $\dot{A}_f = \dot{X}_o / \dot{X}_s$  含义, 将  $\dot{A}_f$  转换成  $\dot{A}_{usf} = \dot{U}_o / \dot{U}_s$



**1. 在深度负反馈条件下,为了估算负反馈放大电路的增益,对于串联负反馈,可()。**

**A 将反馈接入的输入端交流短路**

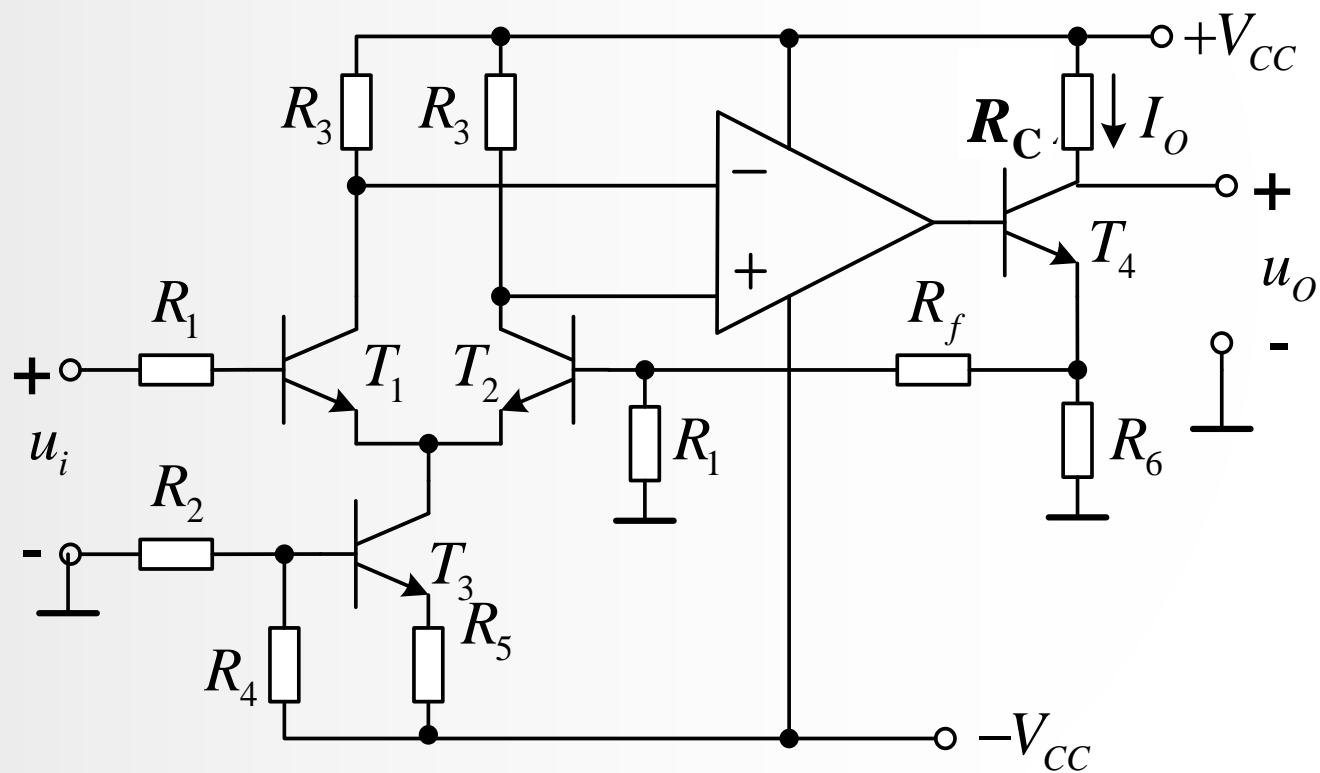
**B 将反馈引出端交流短路**

**C 将反馈引出端交流开路**

**D 将反馈接入的输入端交流开路**



## 在深度负反馈条件下求闭环电压增益

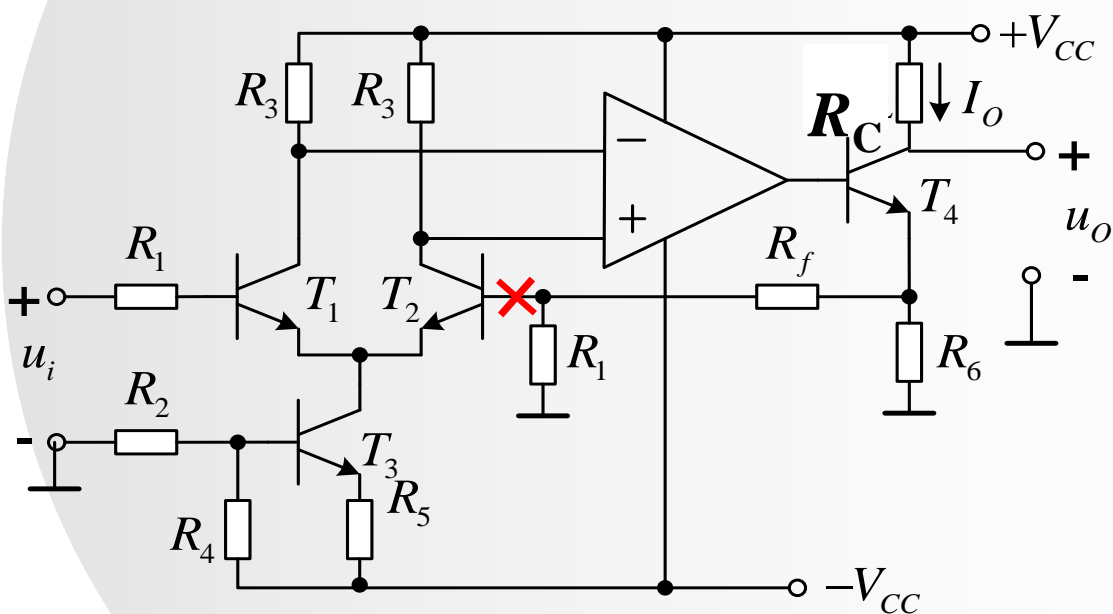


电流串联负反馈





## 在深度负反馈条件下求闭环电压增益



电流串联负反馈

将反馈输入端交流开路

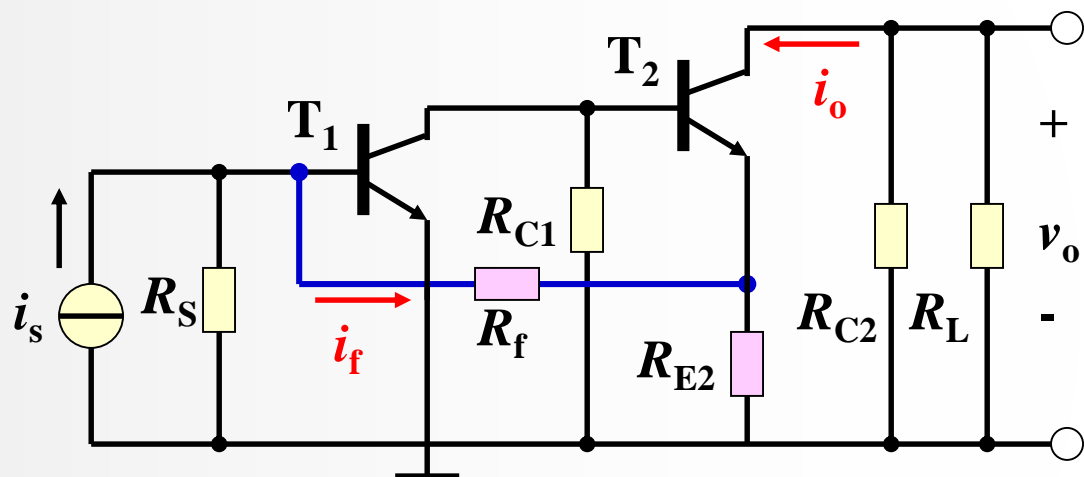
$$\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o} = \frac{R_1 R_6}{R_1 + R_6 + R_f}$$

$$\dot{A}_{gf} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R_1 + R_6 + R_f}{R_1 R_6}$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\dot{I}_o R_C}{\dot{U}_i} = -\frac{R_1 + R_6 + R_f}{R_1 R_6} R_C$$



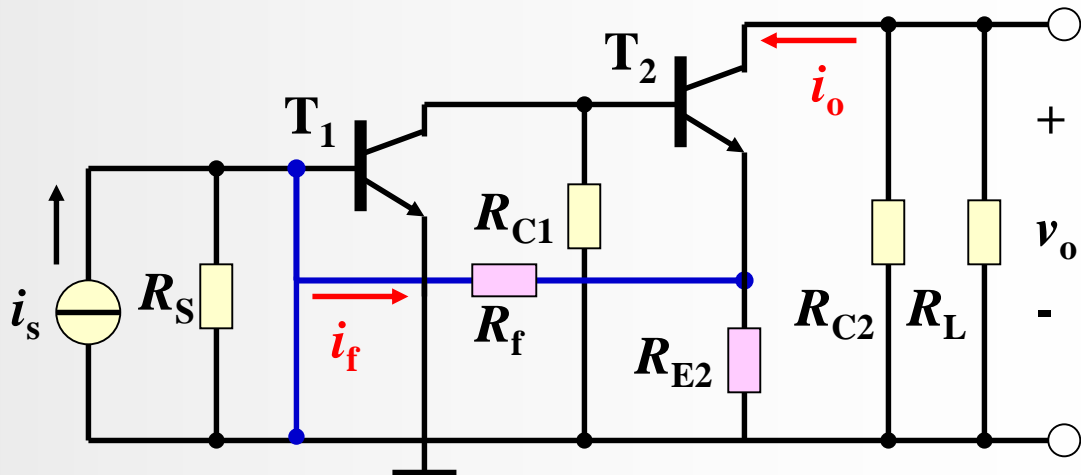
例：图示电路，试在深度负反馈条件下估算 $A_{u_{fs}}$



电流并联负反馈



**例：** 图示电路，试在深度负反馈条件下估算  $A_{ufs}$



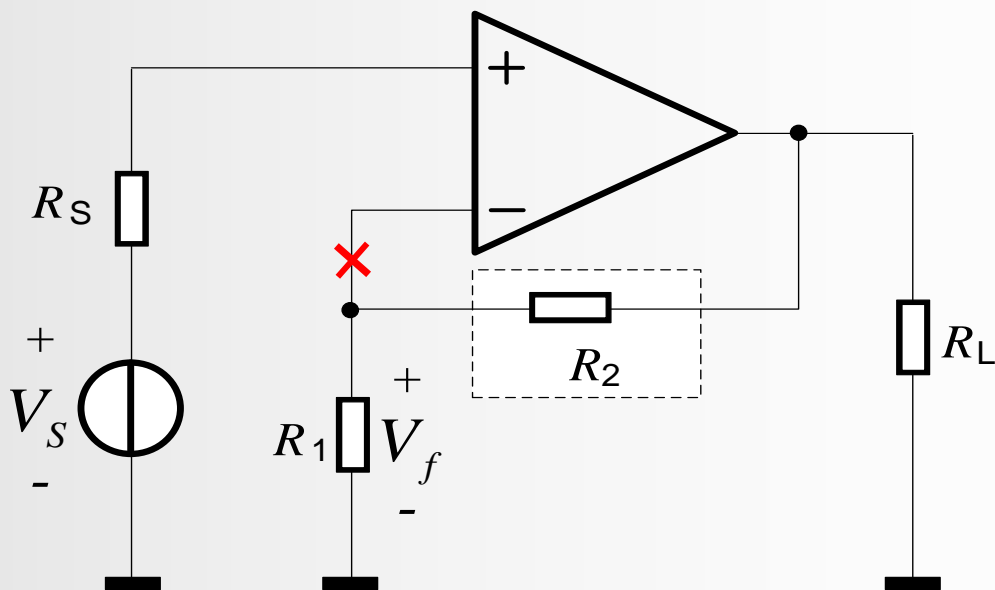
**解：** 将输入端交流短路，即将  $T_1$  管基极交流接地：

则 
$$F_i = \frac{i_f}{i_o} = -\frac{R_{E2}}{R_{E2} + R_f} \quad A_{ifs} = \frac{i_o}{i_s} = \frac{1}{F_i} = -(1 + \frac{R_f}{R_{E2}})$$

因此 
$$A_{vfs} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{-i_o (R_{C2} // R_L)}{i_s R_{s_{92}}} = -A_{ifs} \frac{R'_L}{R_s} = (1 + \frac{R_f}{R_{E2}}) \cdot \frac{R'_L}{R_s}$$



【例8.4-1】求图 8.4-1电路的闭环增益



$$\dot{F}_V = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_O} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\dot{A}_{VF} \approx \frac{1}{F} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

电压串联负反馈电路

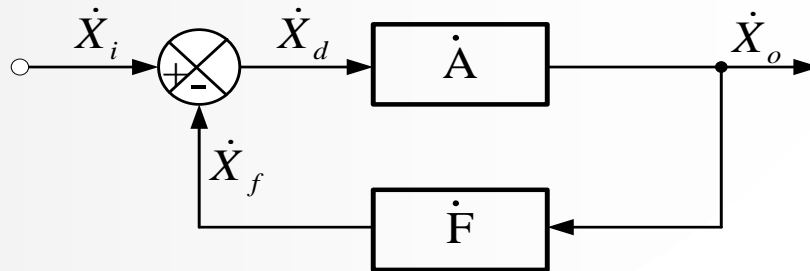


## 深度负反馈下“虚短”的概念

$|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$ 下，由前面所述信号量之间的关系

$$\frac{\dot{X}_d}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{X}_d}{\dot{X}_o} \cdot \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{1}{\dot{A}} \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{1}{\dot{A}} \cdot \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \rightarrow 0 \quad \text{即} \quad \dot{X}_d \approx 0$$

又因为  $\frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o} \cdot \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \dot{F} \cdot \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \approx 1$  有  $\dot{X}_f \approx \dot{X}_i$  (输入量  $\approx$  反馈量)





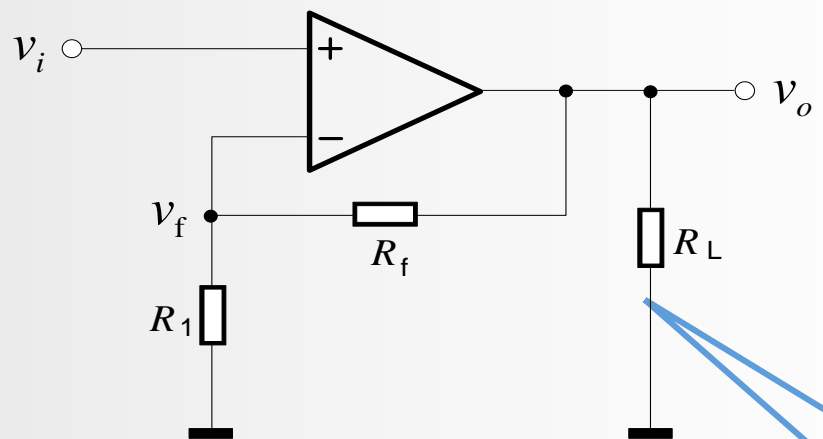
$$\dot{X}_d \approx 0 \quad \xrightarrow{\text{?}}$$

$\dot{V}_d = 0$  运放的两输入端间的电压差为0。

$$v_d = v_- - v_+ \approx 0 \rightarrow v_- \approx v_+$$

$\dot{I}_d \approx 0$  运放的两输入端不取电流。

因此,  $\dot{X}_d \approx 0$ 意味着以上两条重要结论, 从而有“虚短”的概念。



由于  $v_+ = v_-$ , 得

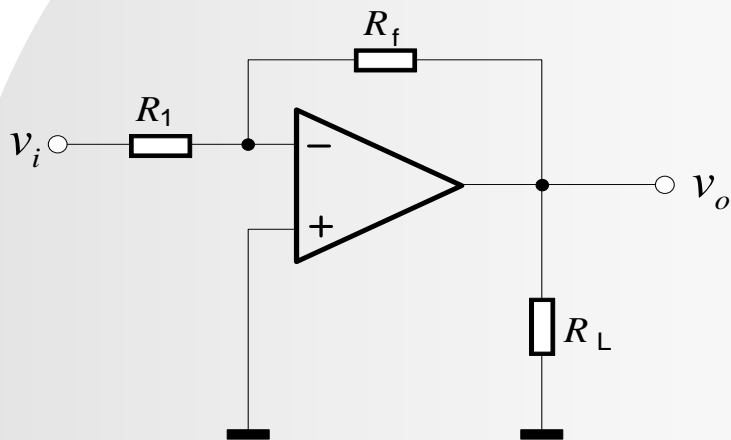
$$\begin{aligned} A_{VF} &= \frac{v_o}{v_i} \approx \frac{v_o}{v_f} = \frac{v_i \frac{R_1 + R_f}{R_1}}{v_i} \\ &= \frac{R_1 + R_f}{R_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \end{aligned}$$

如果  $R_f = 0$ ,  $A_{vf} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_f} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_o} = 1$

电压跟随器



如图所示电路为电压并联负反馈。



$v_- \approx v_+ = 0$ ,  $i_d \approx 0$  ---- 反相输入端为“虚地”。

$$A_{RF} = \frac{v_o}{i_i} = \frac{-i_f R_f}{i_i} = -R_f$$

$$A_{VF} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-i_f R_f}{i_i R_1} = -\frac{R_f}{R_1}$$

“虚地”是“虚短”在反相输入运放电路中的特殊表现形式；只有在反相输入时才可能有“虚地”状态。