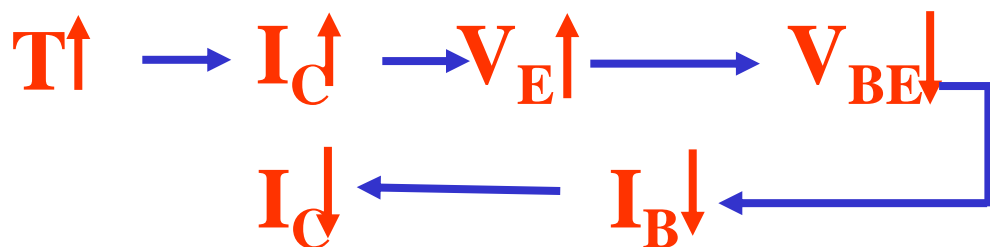


# 第四章 反馈放大电路

## 4.1 反馈的基本概念

### 一. 例——稳定工作点电路

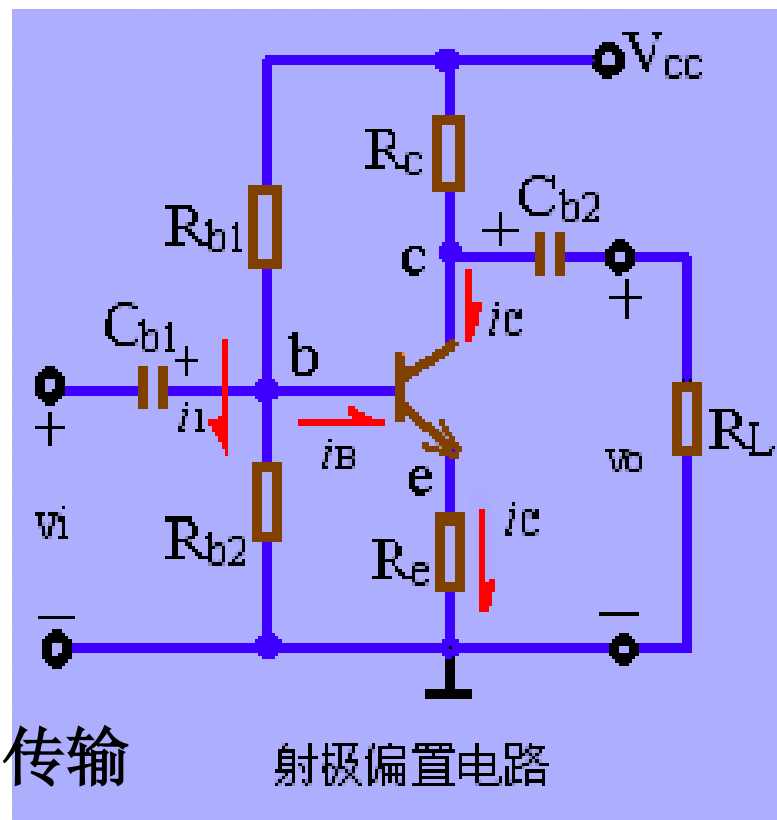


输入量:  $V_i$ 、 $V_{BE}$ 、 $i_B$

输出量:  $V_O$ 、 $V_{CE}$ 、 $i_C$

正向传输——信号从输入端到输出端的传输

反馈——将系统中输出回路的电量（电压或电流），以一定的方式送回到输入回路的过程。



## 4.1.2.直流反馈与交流反馈

### 1.直流反馈与交流反馈

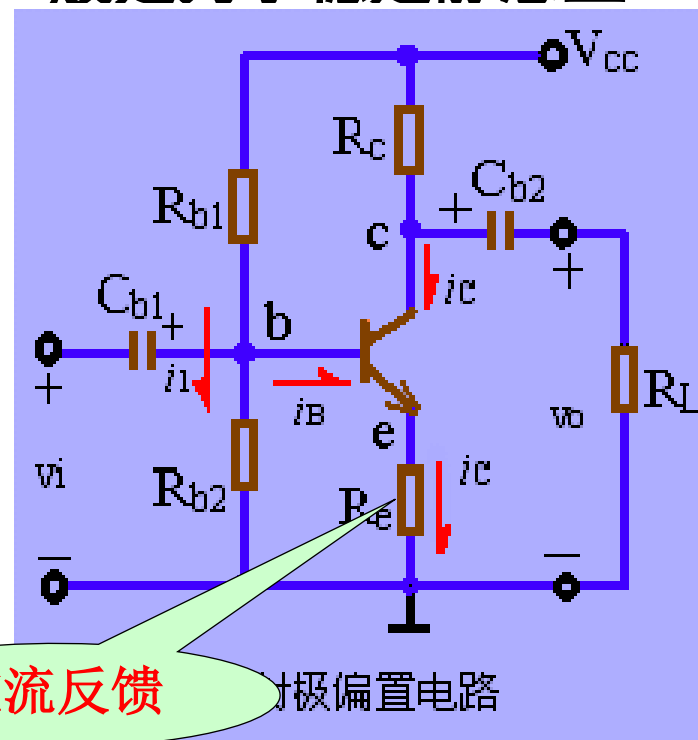
**直流反馈**——若电路将直流量反馈到输入回路，则称直流反馈。

电路中引入直流反馈的目的，一般是为了稳定静态工作点 $Q$ 。

**交流反馈**——若电路将交流量反馈到输入回路，则称交流反馈。

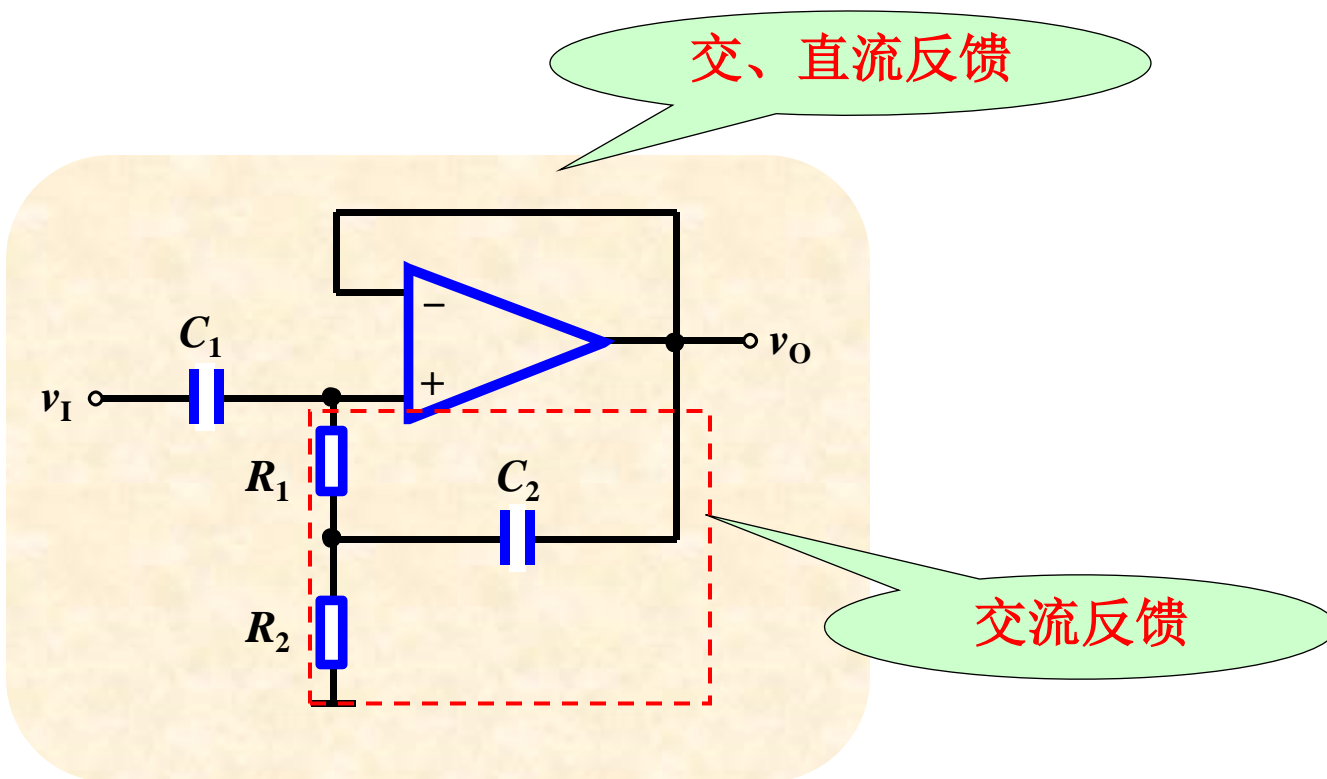
交流反馈，影响电路的交流工作性能。

本图既有直流也有交流反馈



例：判断下图中有哪些反馈回路，是交流反馈还是直流反馈。

解：根据反馈到输入端的信号是交流，还是直流，或同时存在，来进行判别。



## 2.负反馈与正反馈

**负反馈**——输入量不变时，引入反馈后使净输入量减小，放大倍数减小。

**正反馈**——输入量不变时，引入反馈后使净输入量增加，放大倍数增加。

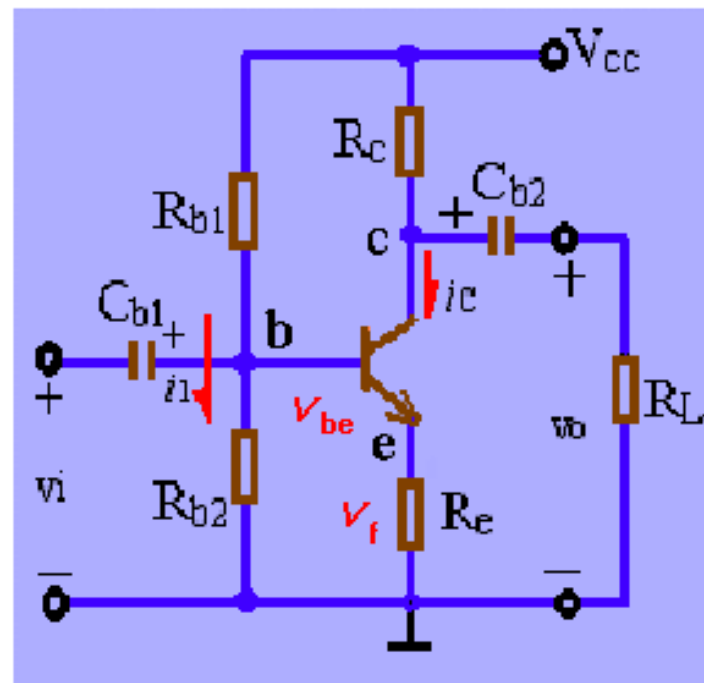
例：基本放大器，无反馈， $R_e=0$ ，净输入量  $V_{be}=V_i$ ，电压放大倍数为：

$$A_v = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}}$$

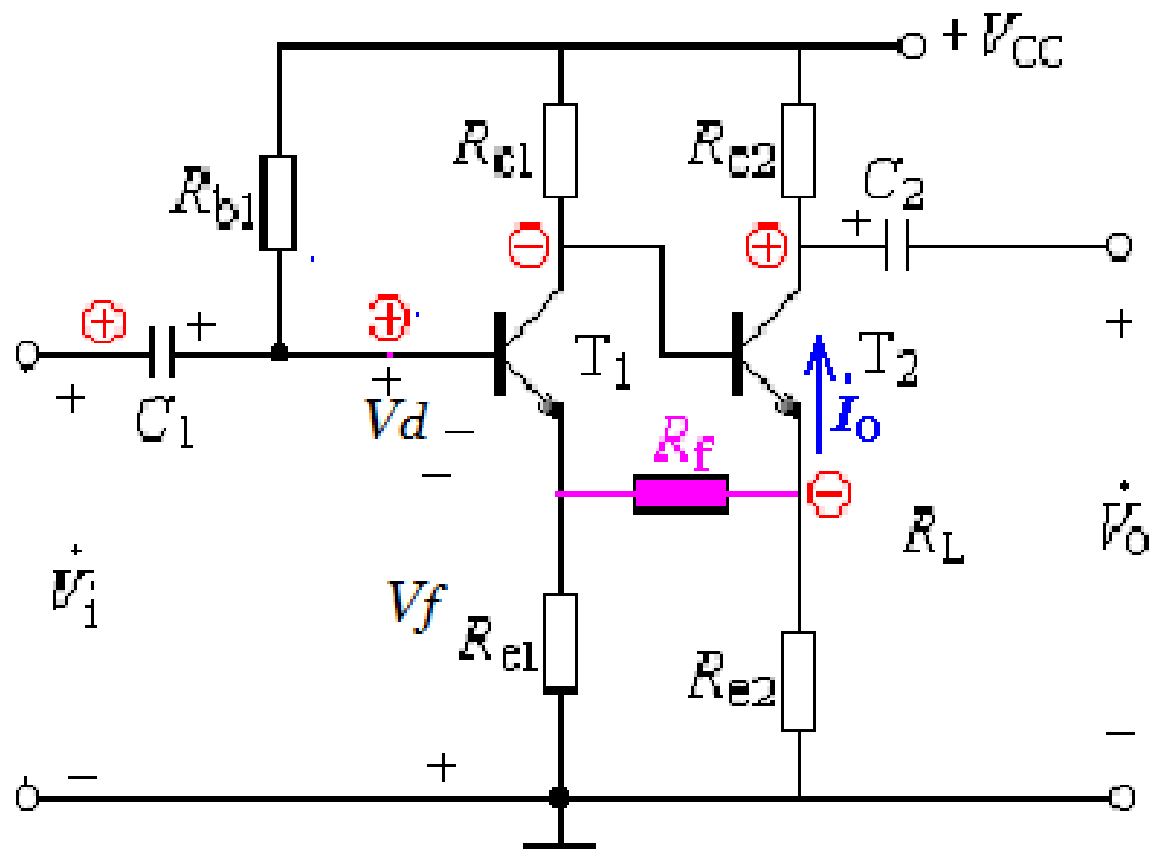
引入反馈后，净输入量  $V_{be}=V_i - V_f$ ，

电压放大倍数为：

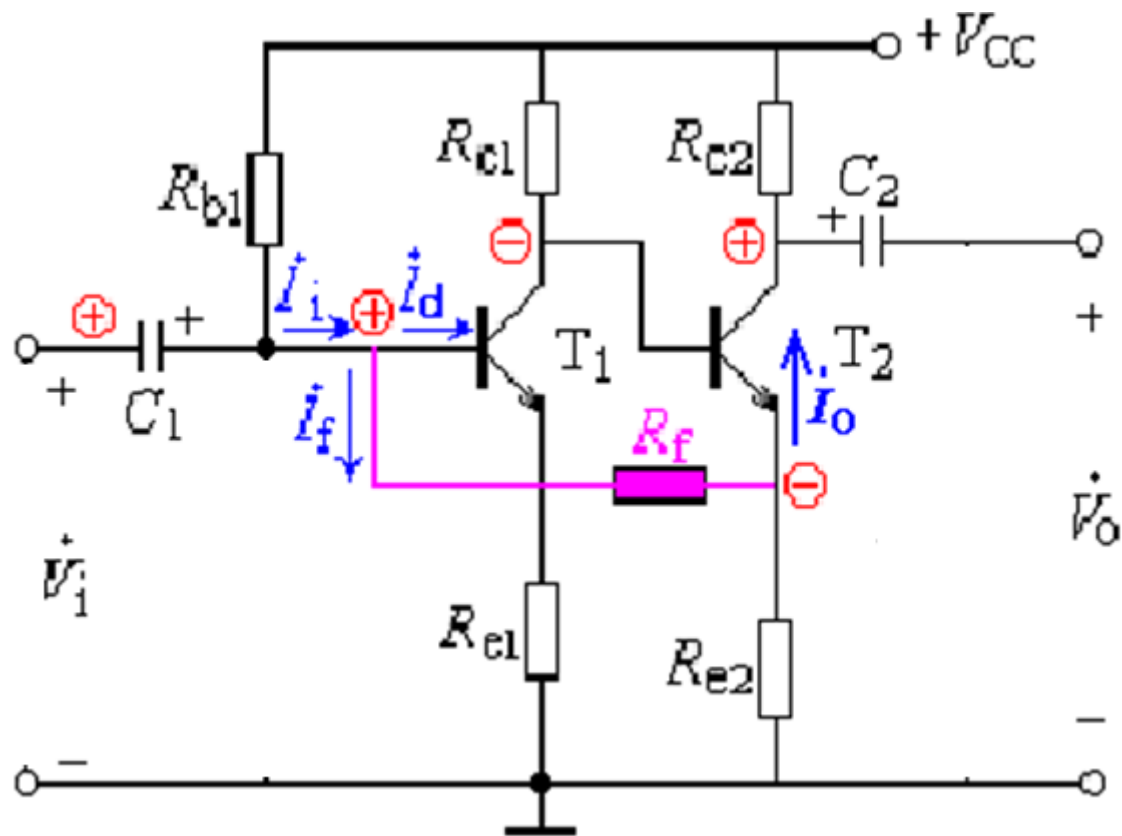
$$A_v = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$



可见，净输入量减小，放大倍数减小，所以是负反馈。



可见， $V_d = V_i + V_f$ ，净输入量增加，放大倍数增加，所以是**正反馈**。



可见， $I_d = I_i - I_f$ ，净输入量减小，放大倍数减小，所以是**负反馈**。

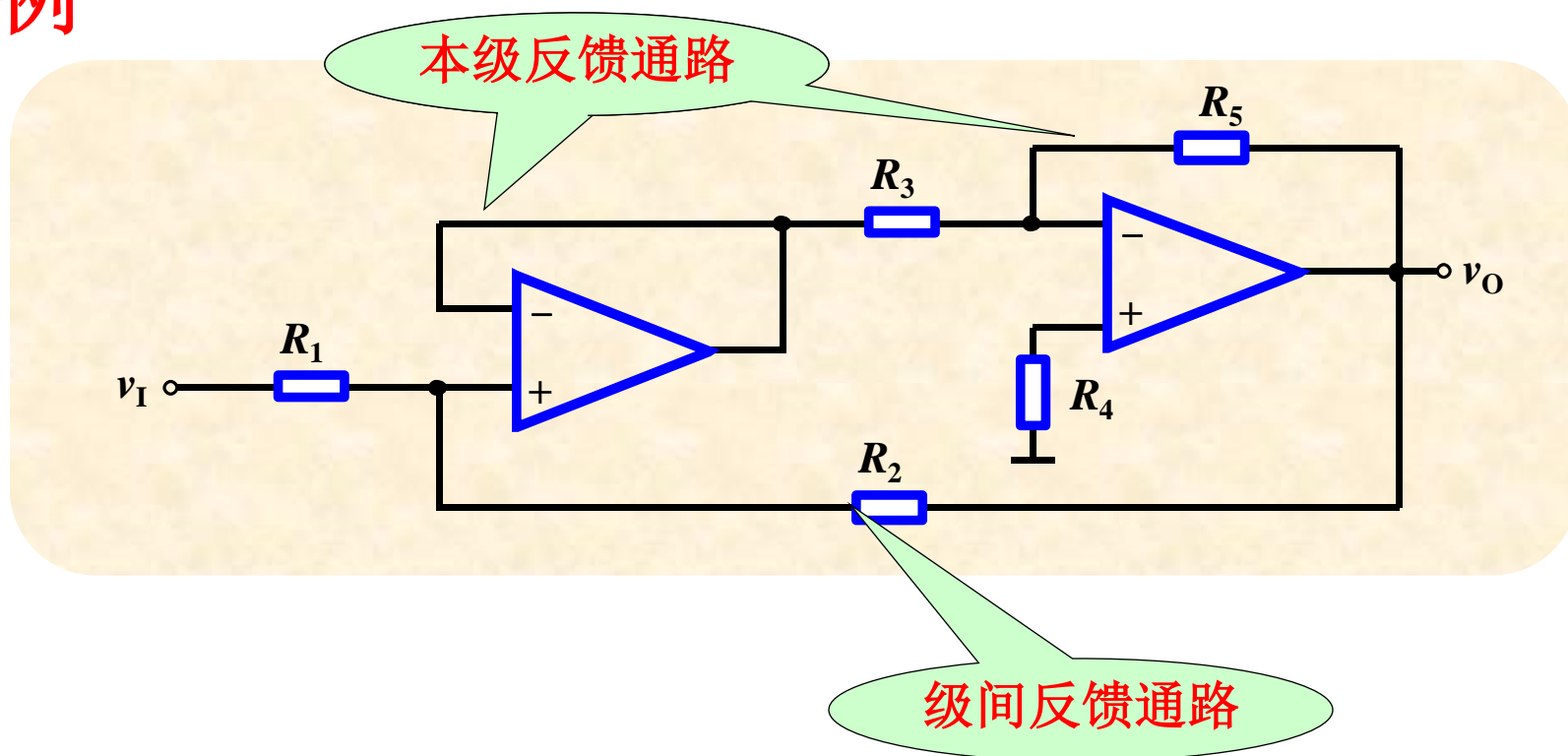
由于正负反馈和比较量（电压、电流）和极性都有关系，所以后面在总结

### 3.本级反馈与级间反馈

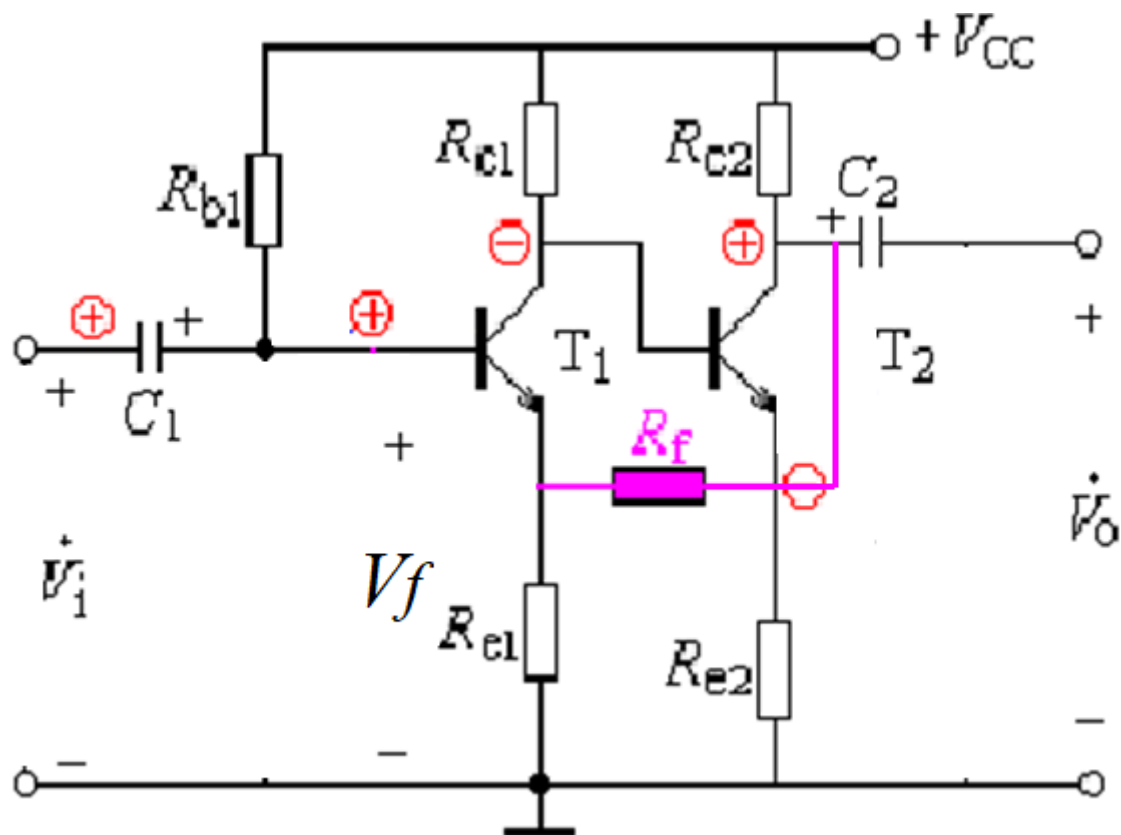
本级反馈——反馈只存在于某一级放大器中

级间反馈——反馈存在于两级以上的放大器中

例

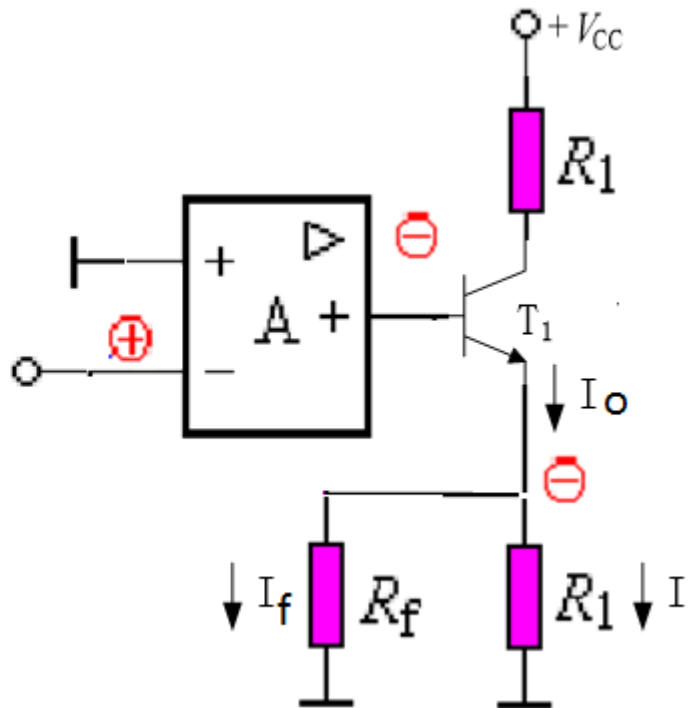
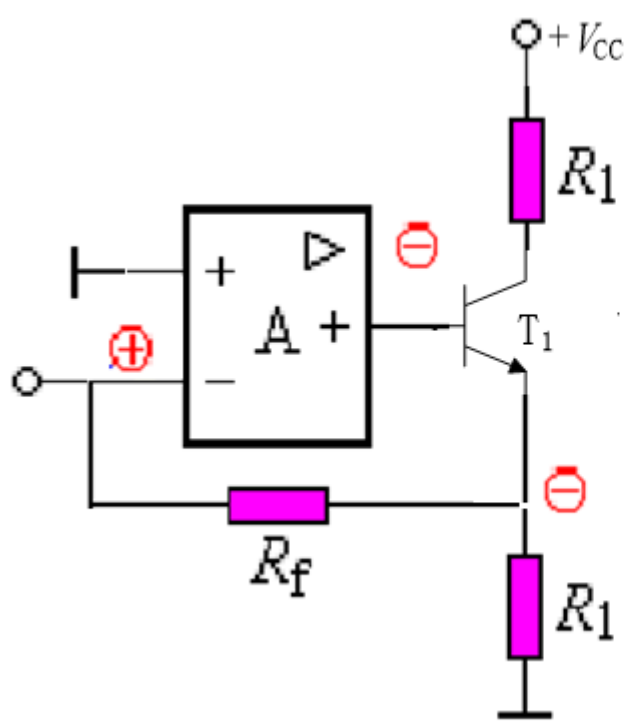


## 4.电压反馈与电流反馈



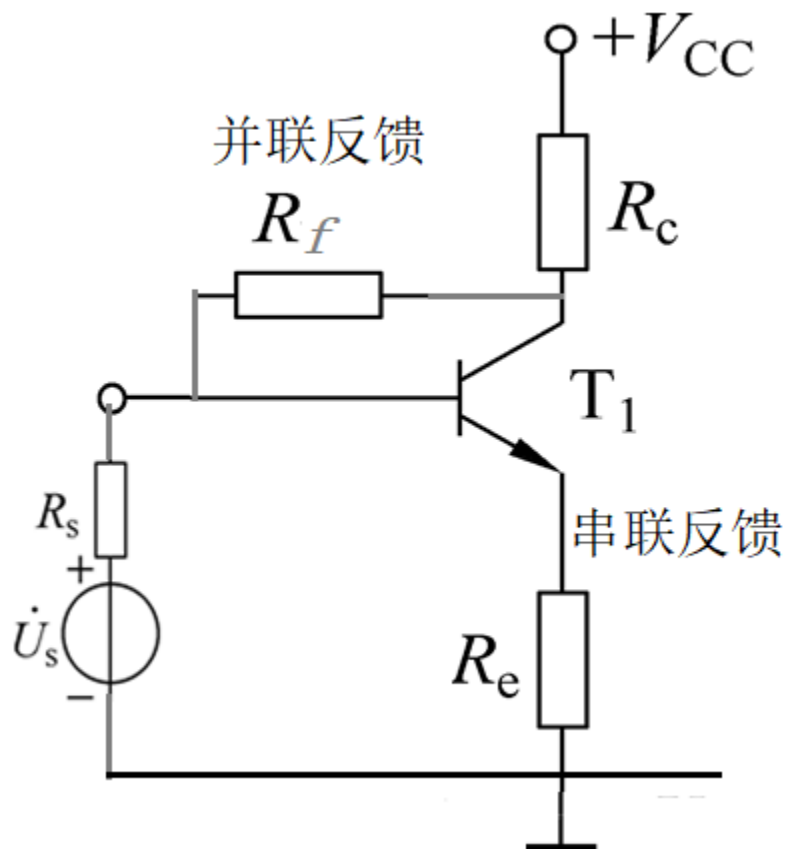
$V_f = V_o * R_{e1} / (R_{e1} + R_f)$ , 反馈和输出电压有关，是电压反馈。





$I_f = I_o * R_1 / (R_1 + R_f)$ , 反馈和输出电流有关，是电流反馈。

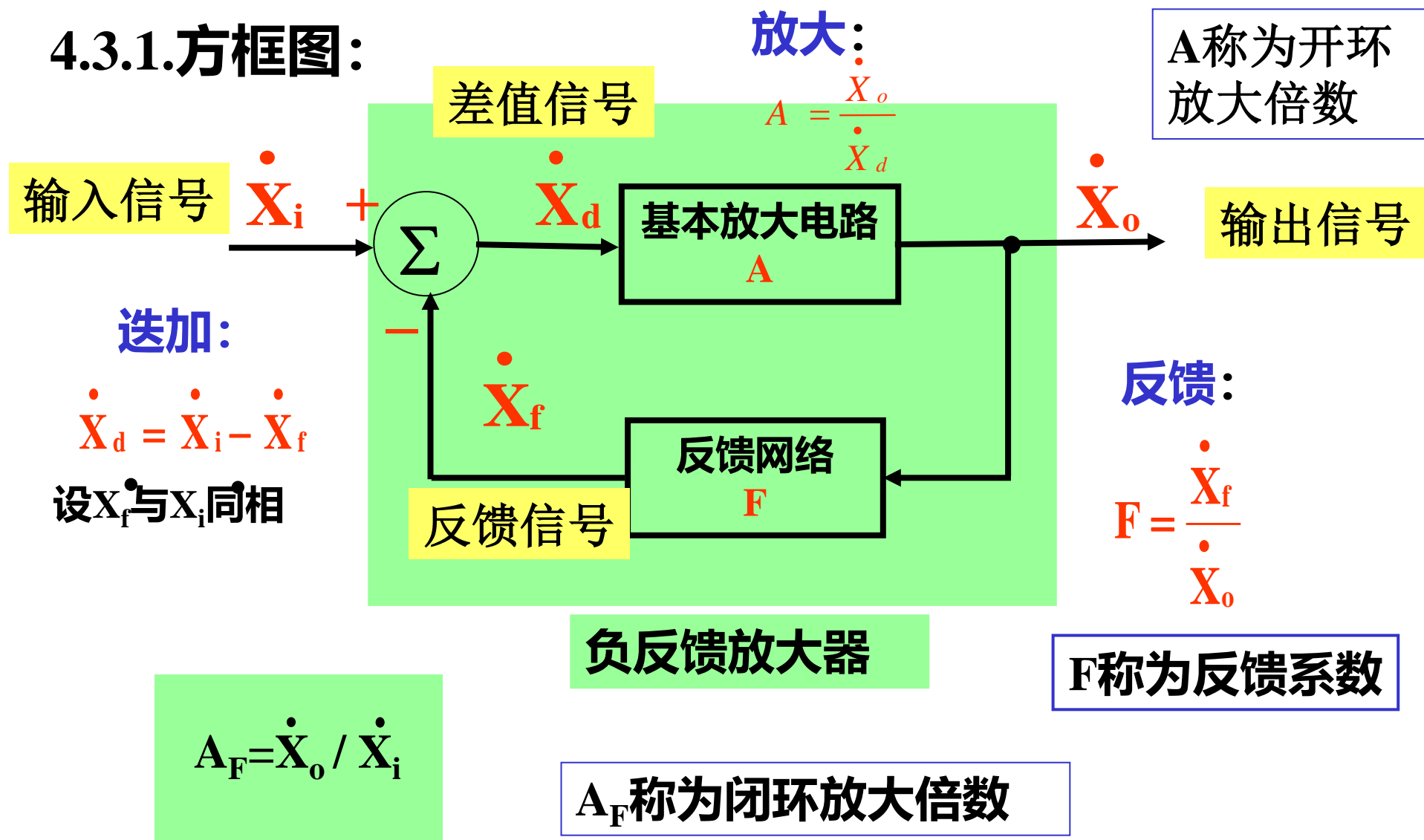
## 5. 并联反馈与串联反馈



**$R_f$ 是并联反馈，  $R_e$ 串联反馈**

## 4.3 负反馈放大电路的方框图和一般表达式

### 4.3.1.方框图:



## 4.3.2 负反馈放大器的一般关系

放大：

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

反馈：

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

迭加：

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

闭环放大倍数：

$$\begin{aligned} A_F = \dot{X}_o / \dot{X}_i &= \dot{X}_o / (\dot{X}_d + \dot{X}_f) = \dot{X}_o / \left( \frac{\dot{X}_o}{A} + \dot{X}_o F \right) \\ &= \frac{1}{\frac{1}{A} + F} = \frac{A}{1 + AF} \end{aligned}$$

### 4.3.3. 关于反馈深度的讨论

$$\dot{A}_F = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \quad |1 + \dot{A}\dot{F}| \text{ 称为反馈深度}$$

- (1)  $|1 + \dot{A}\dot{F}| > 1$  时,  $|\dot{A}_F| < |\dot{A}|$ , 一般负反馈
- (2)  $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$  时, 深度负反馈  $A_F = 1/F$
- (3)  $|1 + \dot{A}\dot{F}| < 1$  时,  $|\dot{A}_F| > |\dot{A}|$ , 正反馈
- (4)  $|1 + \dot{A}\dot{F}| = 0$  时,  $|\dot{A}_F| \rightarrow \infty$ , 自激振荡

## 4.2 负反馈放大器的四种类型

负反馈类型有四种组态：

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

## 反馈类型判断方法:

- 1) 首先判断反馈信号和输入信号是接在同一端（并联反馈，比较电流 $i_d = i_i - i_f$ ），还是接在不同端（串联反馈，比较电压 $u_d = u_i - u_f$ ）。
- 2) 把并联反馈的反馈电流 $i_f$ ，或者串联反馈的反馈电压 $u_f$ ，用输出信号表示出来。如果和输出电压有关就是电压反馈，如果和输出电流有关就是电流反馈。
- 3) 对 $X_d = X_i - X_f$ ，用“瞬时极性法”判断反馈极性：假设某一瞬时，在放大电路的输入端加入一个真实正极性的输入信号，依次判断相关点的瞬时极性，直至判断出反馈信号的瞬时极性。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。

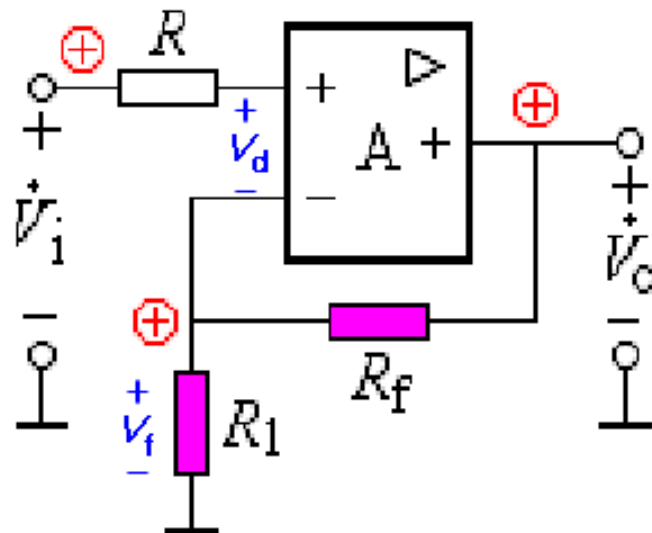
## 4.2.1 电压串联负反馈

因为反馈电压： $V_f = V_o \frac{R_1}{R_1 + R_f}$

反馈量与输出电压成比例，  
所以是电压反馈。

从输入端看，有： $v_d = v_i - v_F$

故为串联电压反馈。



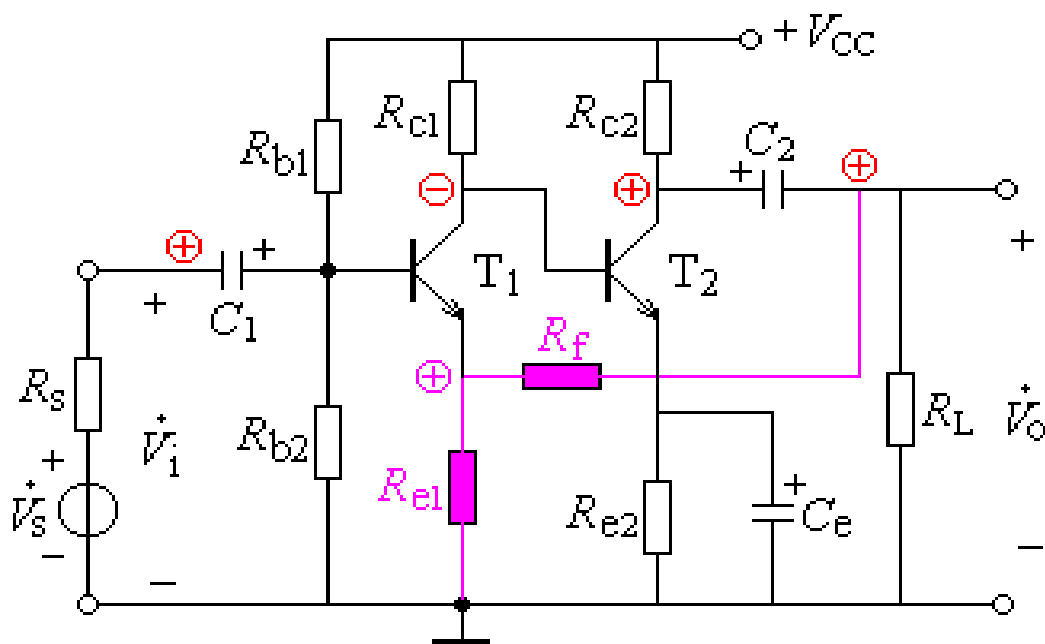
用“瞬时极性法”判断反馈极性：

假设某一瞬时，在放大电路的输入端加入一个正极性的输入信号，按信号传输方向依次判断相关点的瞬时极性，直至判断出反馈信号的瞬时极性。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。

根据瞬时极性判断是负反馈，所以该电路为**电压串联负反馈**



## 分立电路电压串联负反馈



电压负反馈的特性——稳定输出电压

稳定过程： $R_L \downarrow \longrightarrow v_O \downarrow \longrightarrow v_F \downarrow \longrightarrow v_d(v_{be}) \uparrow$   
 $v_O \uparrow$

负载变化时，输出电压稳定——输出电阻 $\downarrow$

## 4.2.2. 电压并联负反馈

因为反馈电流： $I_f = \frac{V_- - V_o}{R_f} \approx -\frac{V_o}{R_f}$

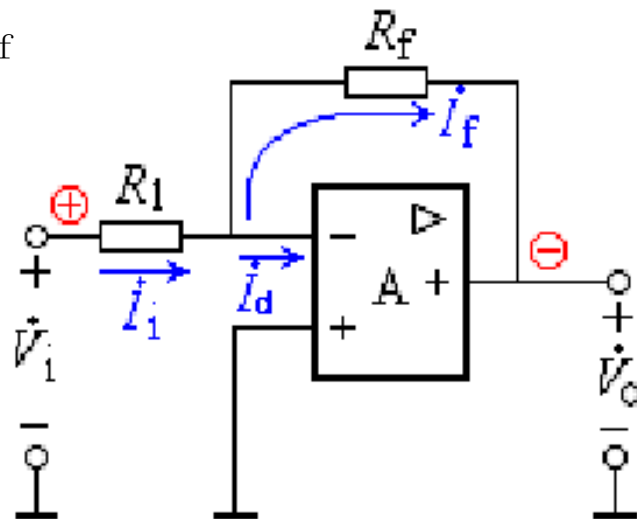
反馈量与输出电压成比例，  
所以是电压反馈。

从输入端看有：

$$i_d = i_i - i_F$$

故为并联负反馈。

根据瞬时极性判断是负反馈，所以该电路为**电压并联负反馈**



## 分立电路电压并联负反馈

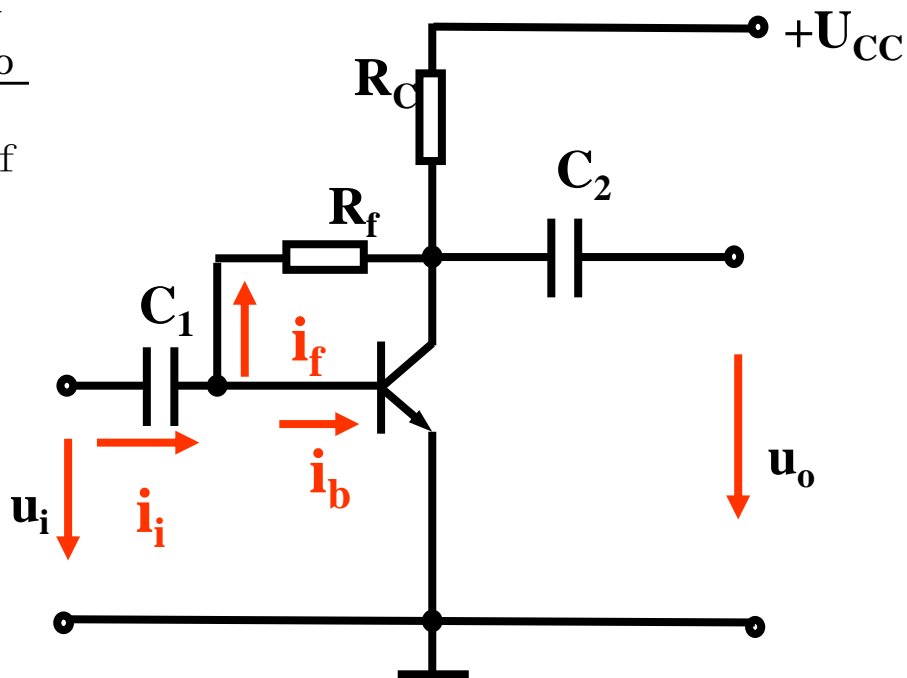
因为反馈电流：

$$I_f = \frac{V_i - V_o}{R_f} \approx -\frac{V_o}{R_f}$$

反馈量与输出电压成比例，  
所以是电压反馈。

在输入端有  $i_d = i_i - i_f$

故为并联负反馈。



根据瞬时极性判断是负反馈，所以该电路为**电压并联负反馈**

## 4. 2. 3. 电流并联负反馈

因为反馈电流：
$$I_f = I_o \frac{R}{R_f + R}$$

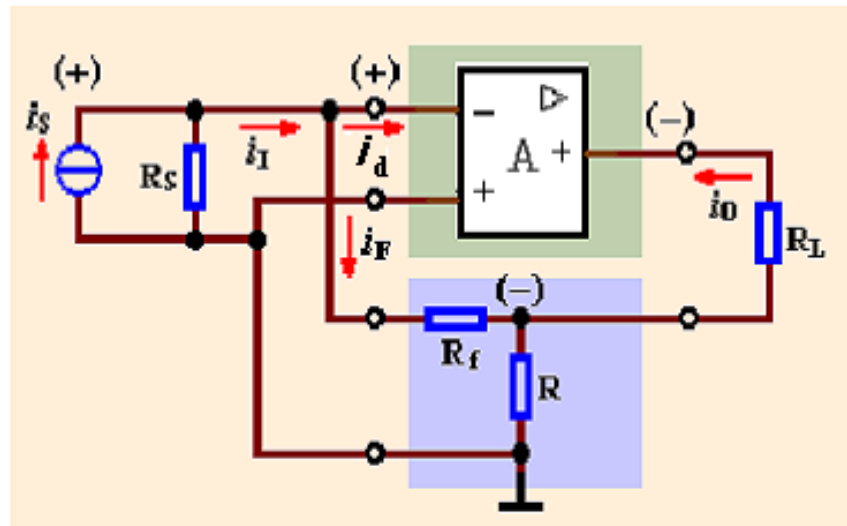
反馈量与输出电流成比例，  
所以是电流反馈。

又因为在输入端有：

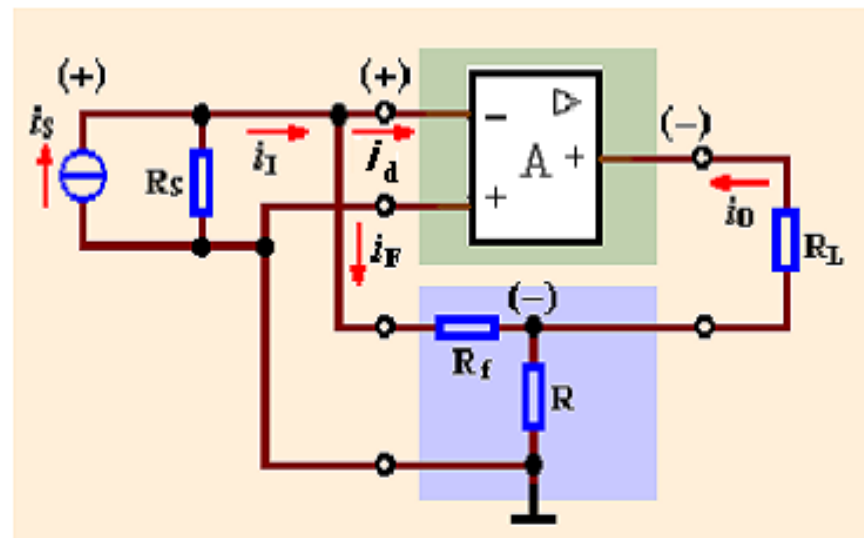
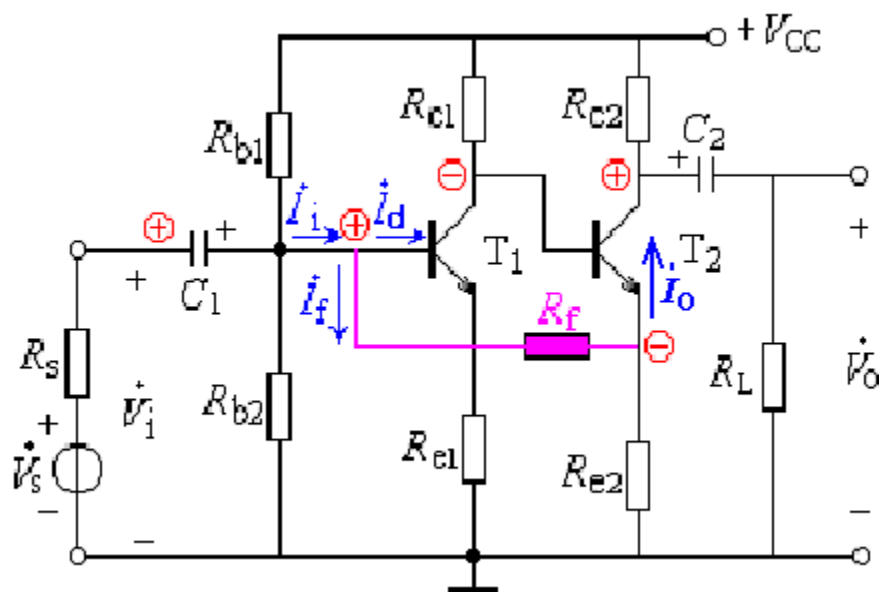
$$i_d = i_I - i_F$$

故为并联负反馈。

根据瞬时极性判断是负反馈，所以该电路为**电流并联负反馈**



# 分立电路组成的电流并联负反馈



引入电流负反馈的目的——稳定输出电流

稳定过程： $R_L \uparrow \longrightarrow i_O \downarrow \longrightarrow i_F \downarrow \longrightarrow i_d \uparrow$   
 $i_O \uparrow$

负载变化时，输出电流稳定——输出电阻 $\uparrow$

## 4.2.4. 电流串联负反馈

因为反馈电压： $U_f = i_o R_f$

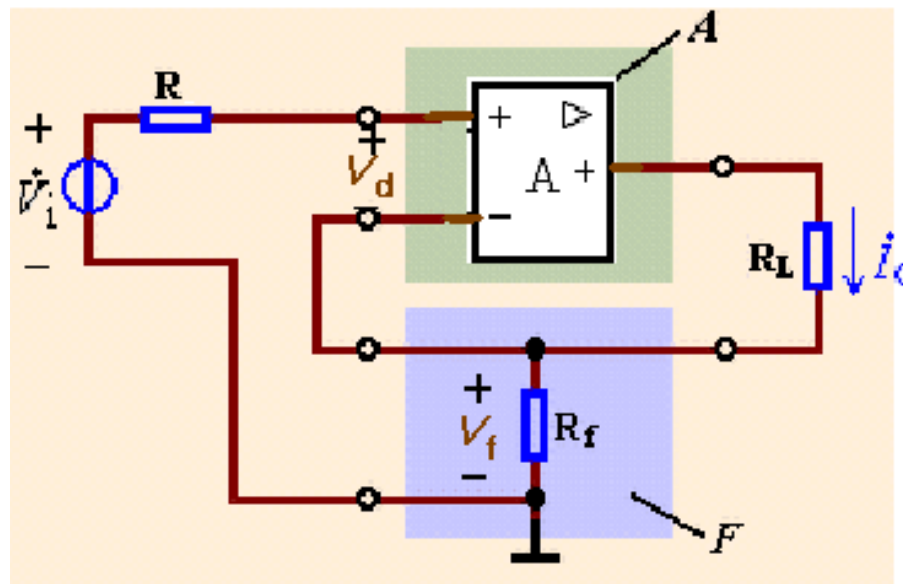
反馈量与输出电流成比例，  
所以是电流反馈。

又因为在输入端有

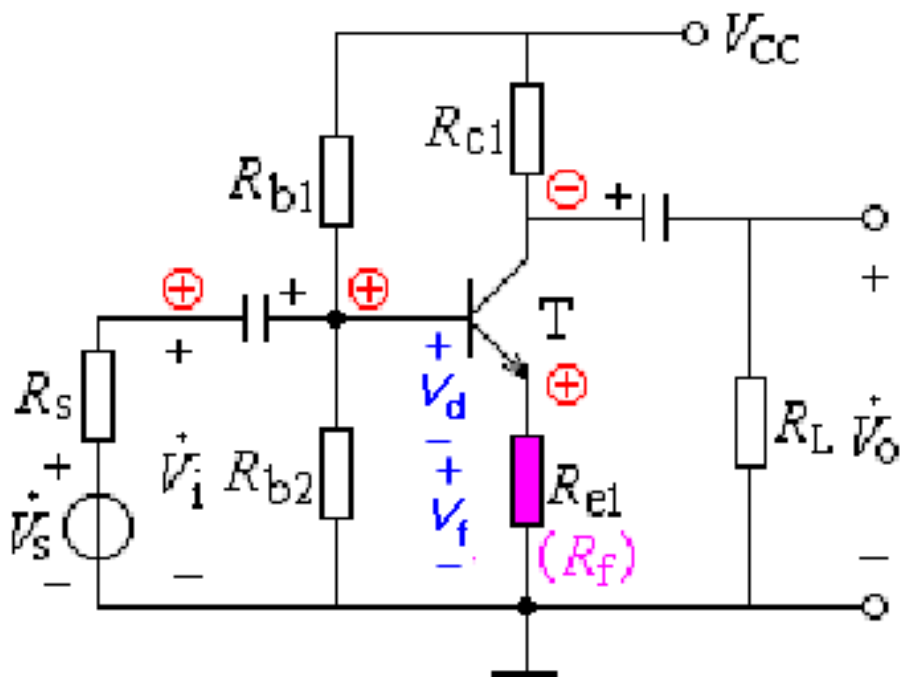
$$v_d = v_i - v_F$$

故为串联负反馈。

根据瞬时极性判断是负反馈，所以该电路为**电流串联负反馈**



# 分立电路组成的电流串联负反馈



引入电流负反馈的目的——稳定输出电流

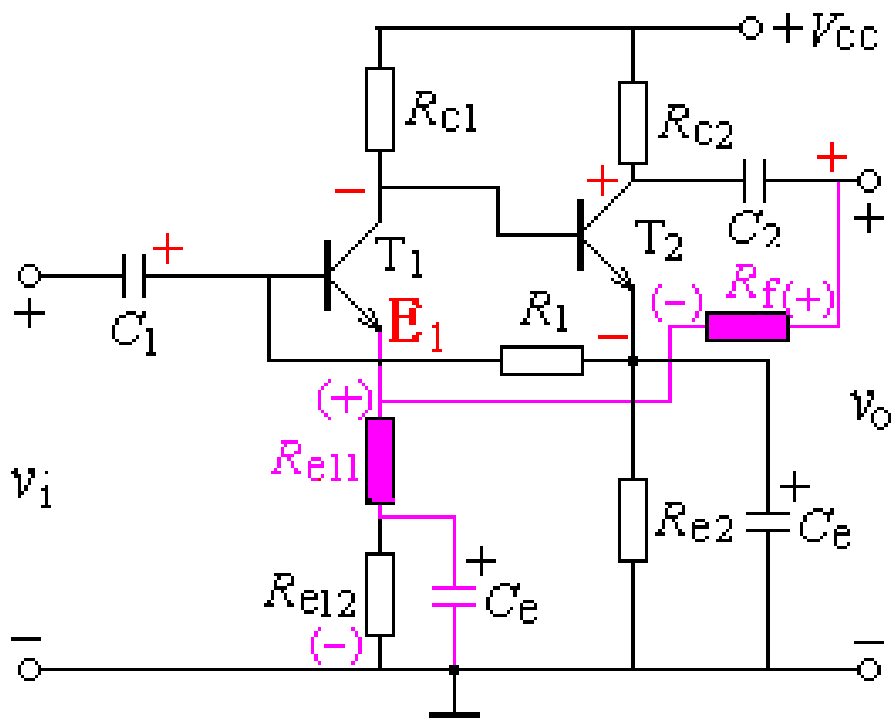
稳定过程： $R_L \downarrow \longrightarrow I_O \uparrow \longrightarrow v_F \uparrow \longrightarrow v_d \downarrow$   
 $I_O \downarrow$

负载变化时，输出电流稳定——输出电阻 $\uparrow$

## 4. 2. 5. 反馈类型及判别方法总结

### 1. 直流反馈与交流反馈——注意电容的“隔直通交”作用

**例题1:**试判断下图电路中有哪些反馈支路，各是直流反馈还是交流反馈？





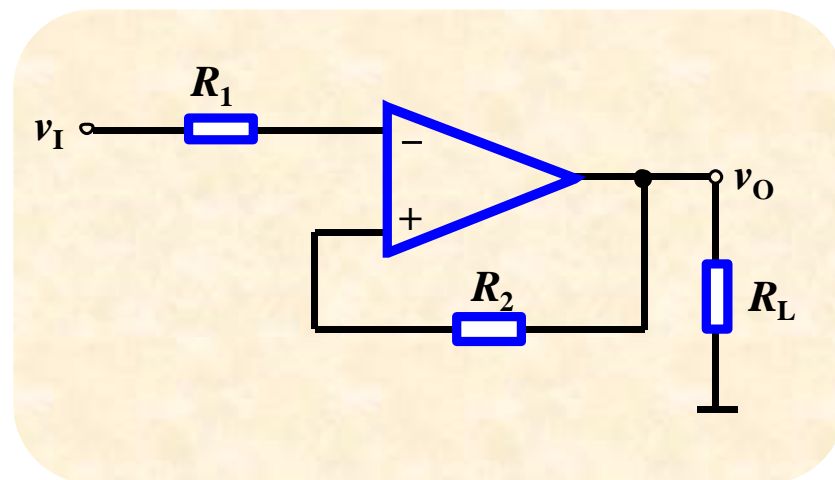
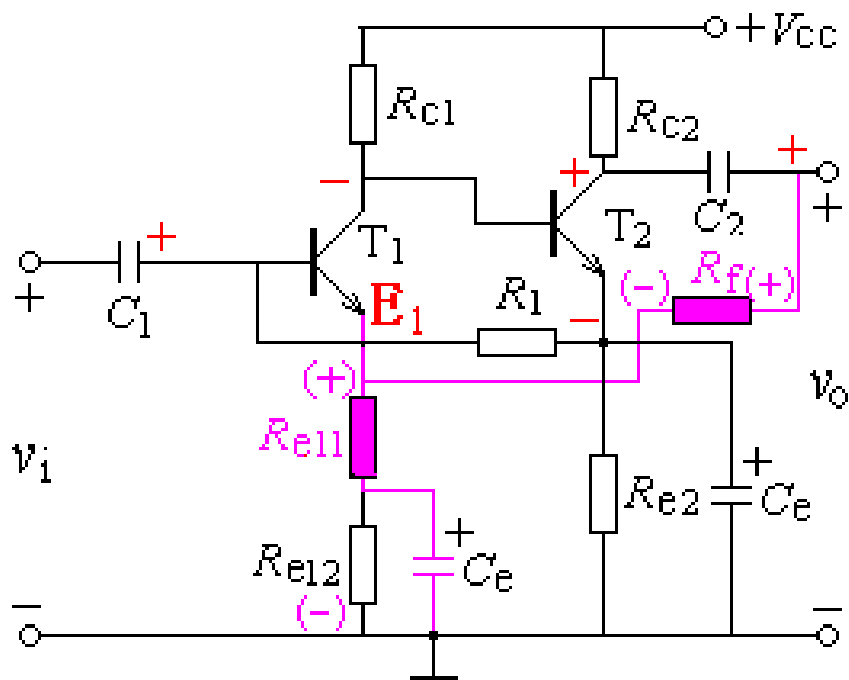
## 2. 反馈极性：正反馈与负反馈

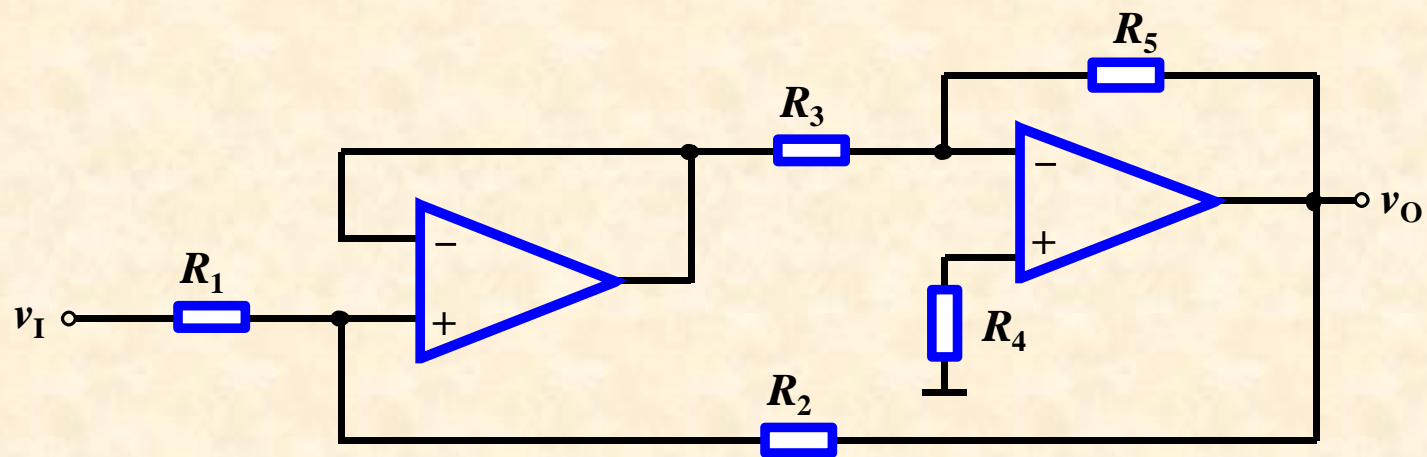
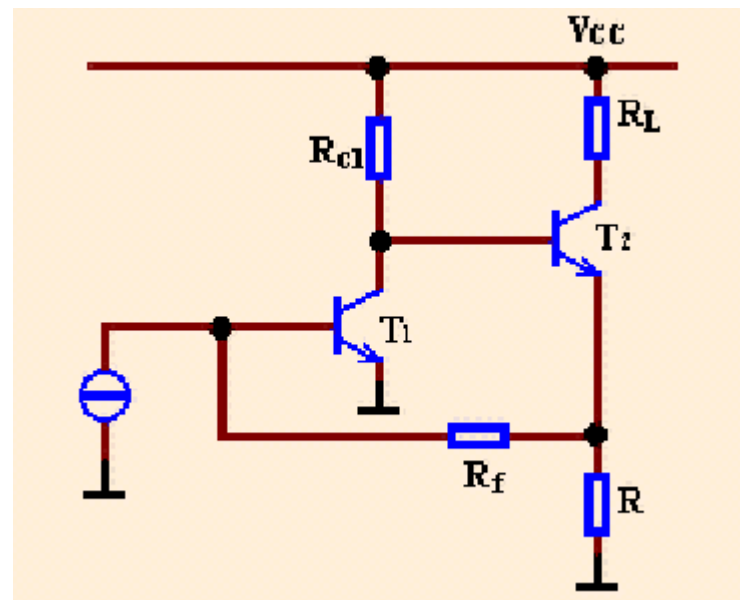
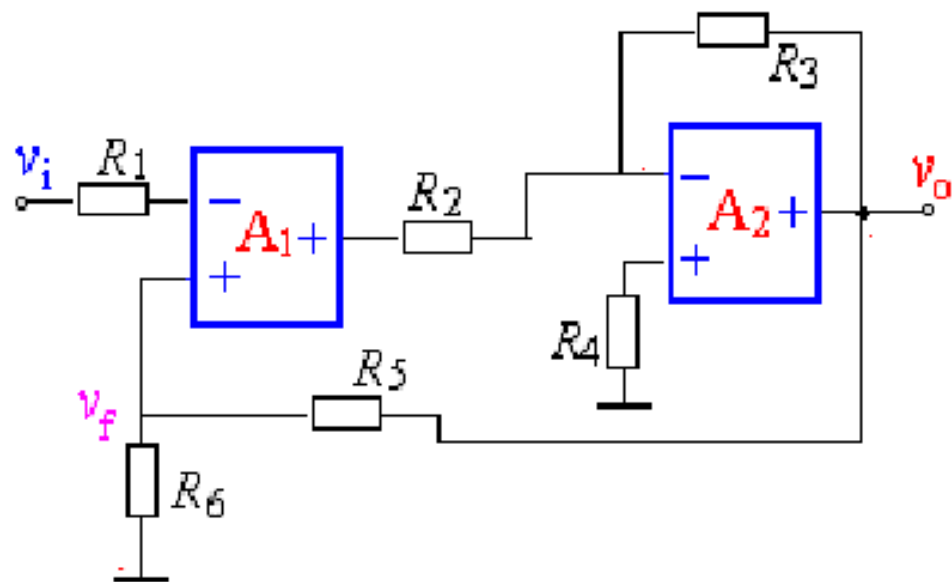
### 判定方法——“瞬时极性法”

**对于串联反馈：**输入量与反馈量作用在不同的两点上，若瞬时极性相同为负反馈，瞬时极性相反为正反馈。

**对于并联反馈：**输入量与反馈量作用在同一点上，若反馈元件两端瞬时极性相反为负反馈，瞬时极性相同为正反馈。

**例题2：**试判断下列电路中反馈支路的反馈极性。





### 3. 取样方式——电压反馈与电流反馈

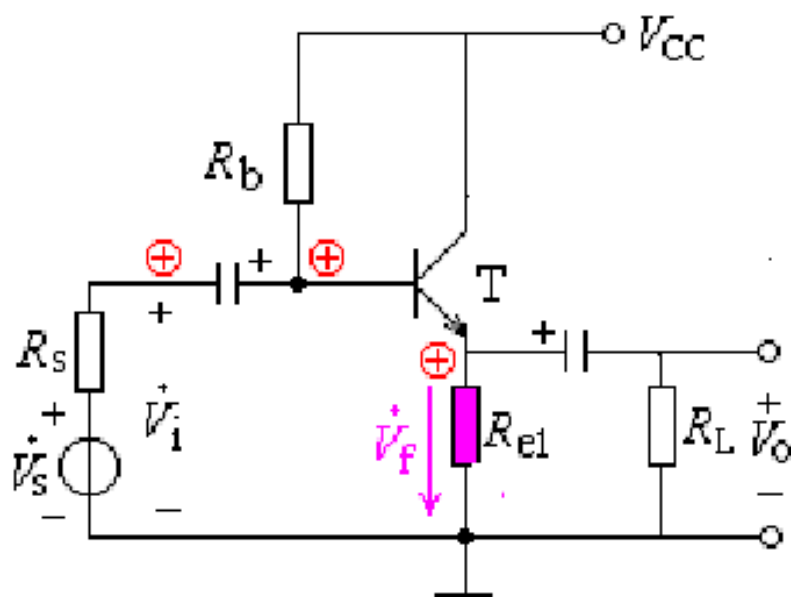
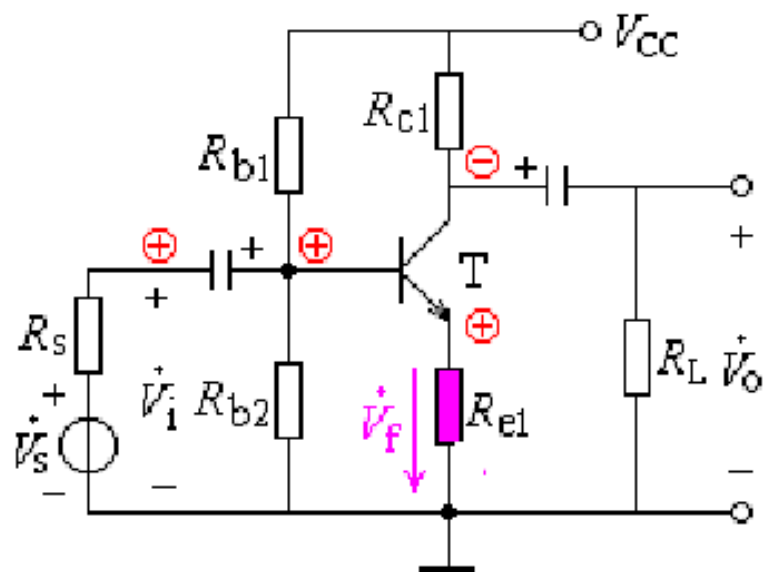
**电压反馈：** 反馈信号的大小与输出电压成比例。

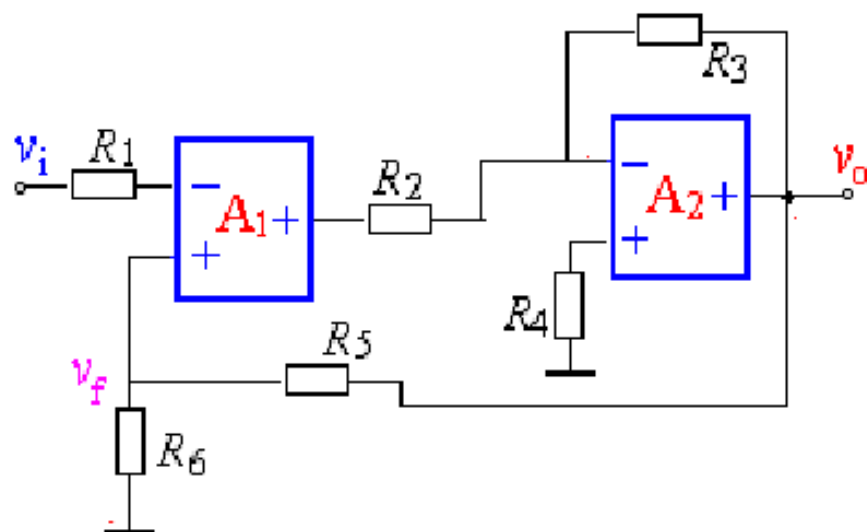
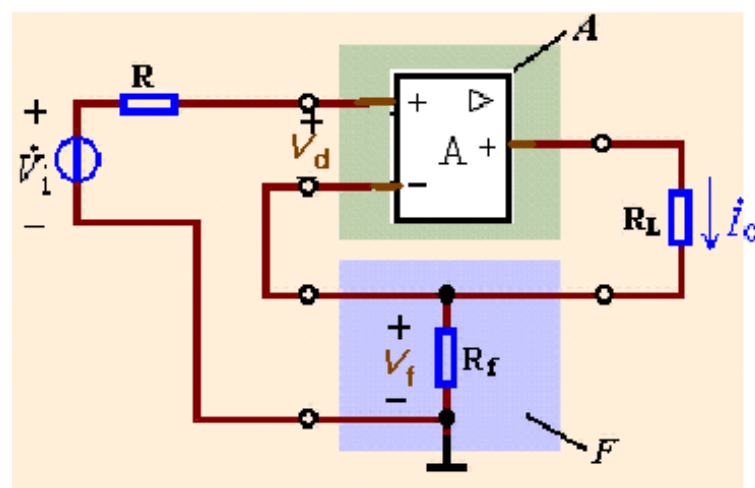
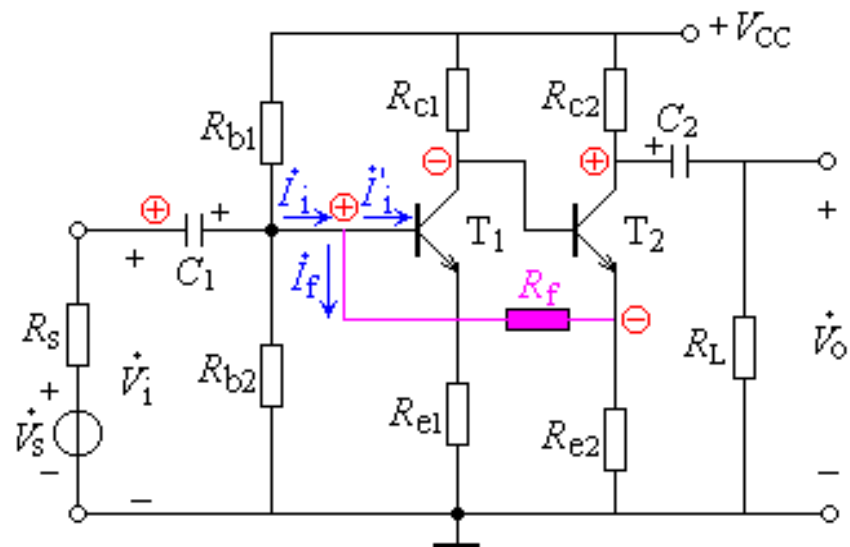
**电流反馈：** 反馈信号的大小与输出电流成比例。

**判断方法——输出短路法：**

假设输出端交流短路（ $R_L=0$ ），即 $U_O=0$ ，若反馈信号消失了，则为电压反馈；若反馈信号仍然存在，则为电流反馈。

**例题3:** 试判断下列电路中引入的反馈是电压反馈还是电流反馈。





## 4.比较方式——

**串联反馈：**反馈信号与输入信号加在放大电路输入回路的两个电极。有： $v_d = v_i - v_F$

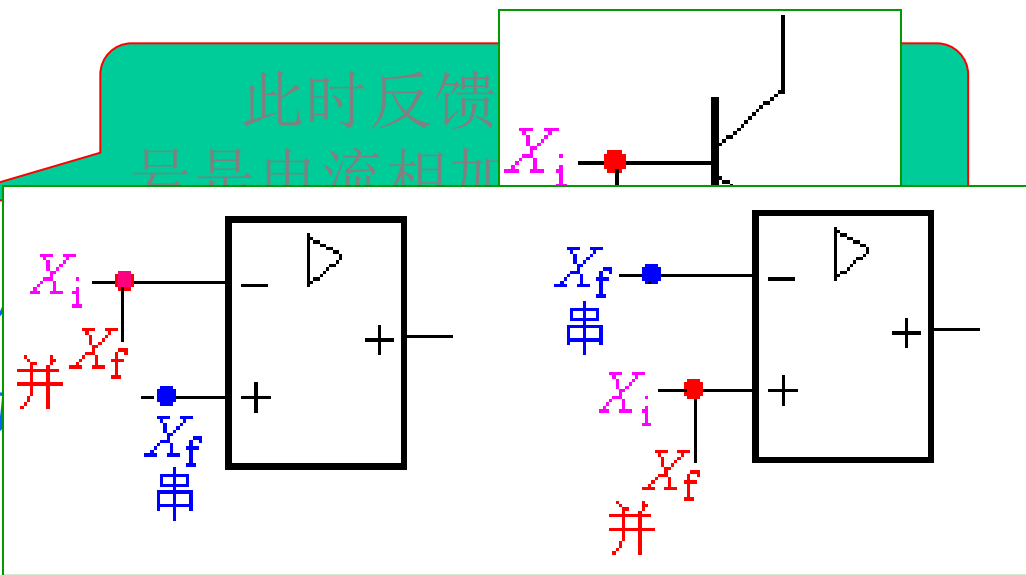
此时反馈信号与输入信号是电压相加减的关系。

**并联反馈：**反馈信号与输入信号加在放大电路输入回路的同一个电极。有：

$$i_d = i_i - i_F$$

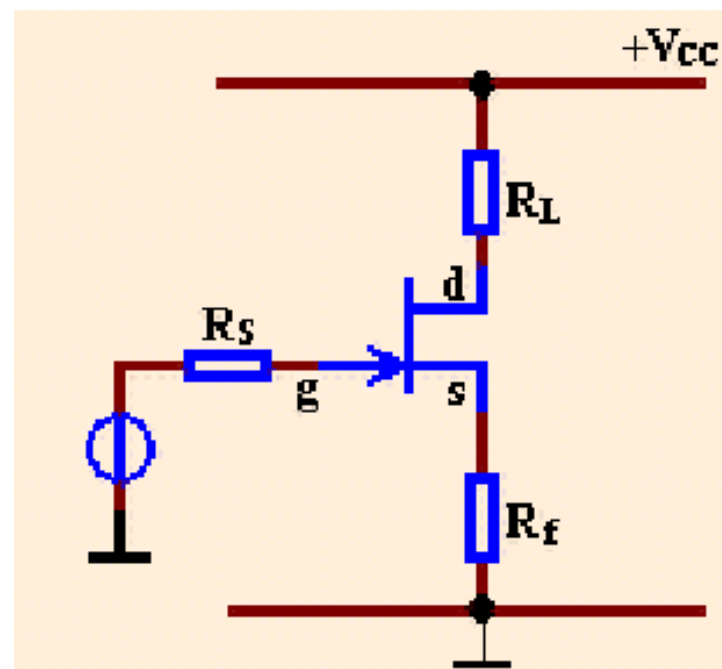
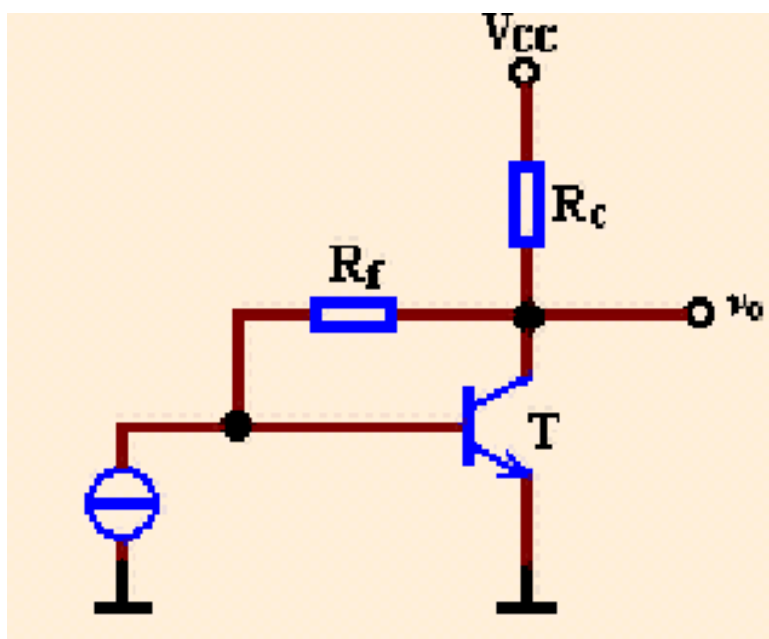
对于三极管来说，反馈信号加在基极或发射极，则为并联反馈；反馈信号加在发射极则为串联反馈。

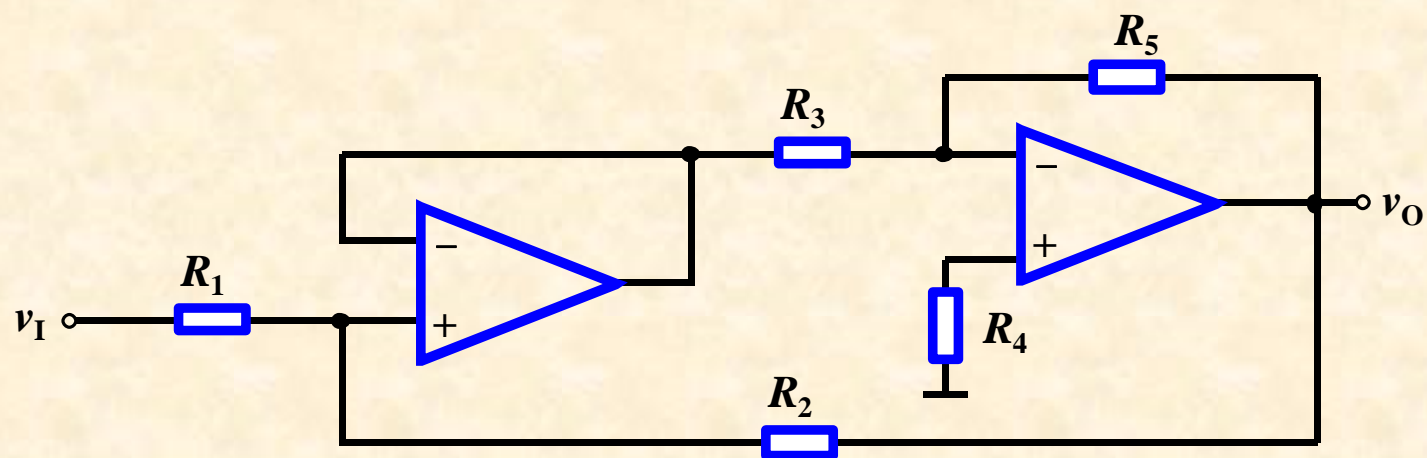
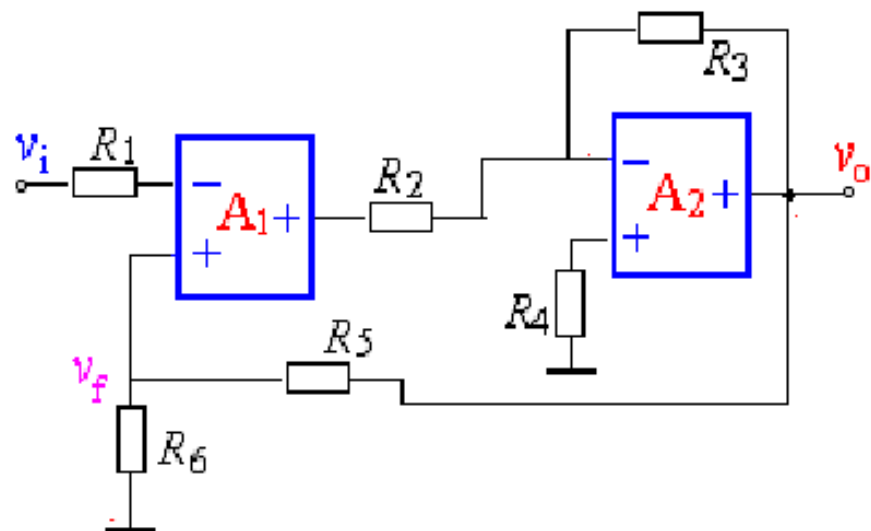
此时反馈信号与输入信号是电流相加减的关系。



对于运算放大器来说，反馈信号与输入信号同时加在同相输入端或反相输入端，则为并联反馈；一个加在同相输入端一个加在反相输入端则为串联反馈。

**例题4:**试判断下列电路中引入的反馈是串联反馈还是并联反馈。

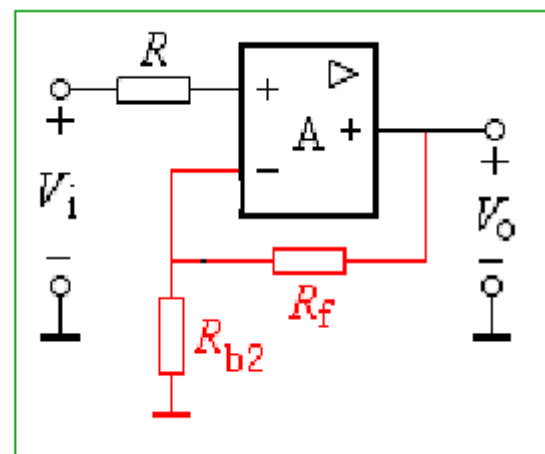
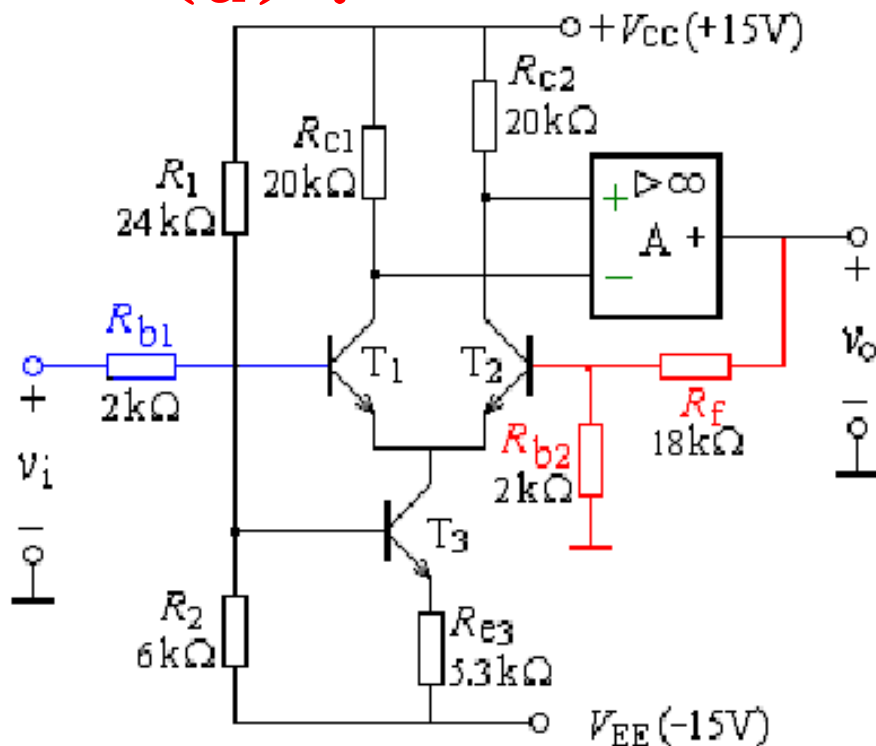






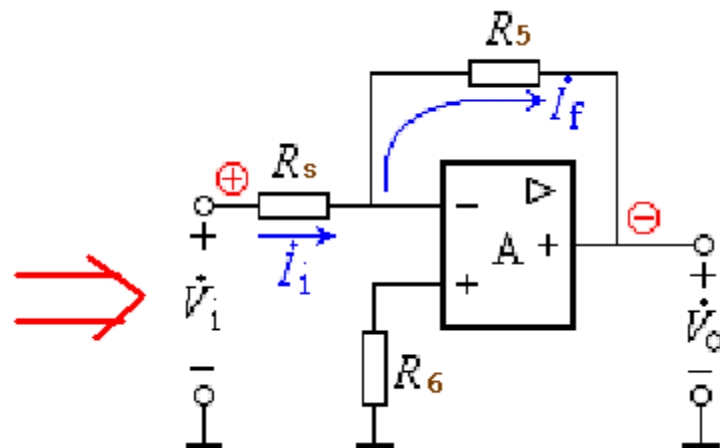
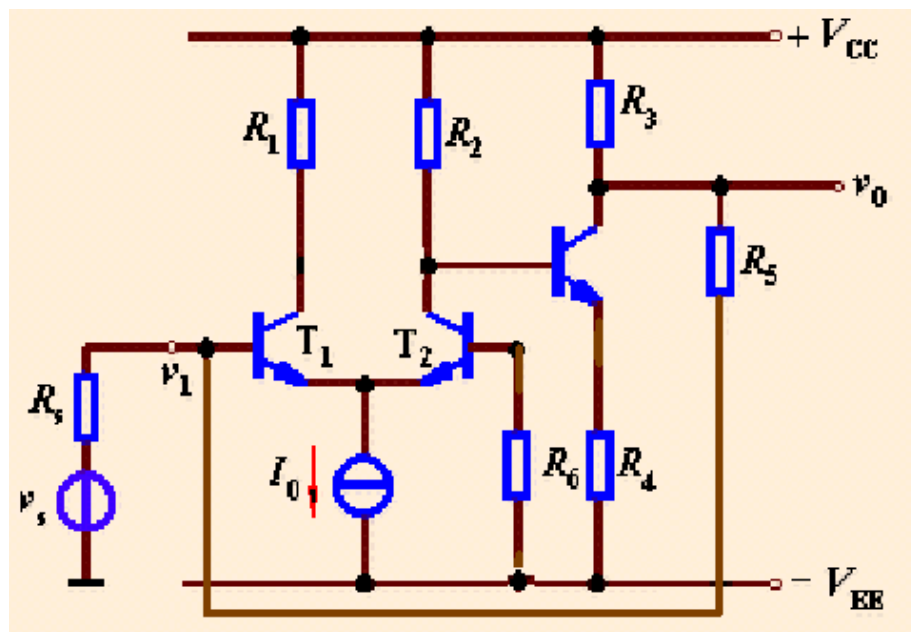
**例题5:**试判断下列电路中的反馈组态。

**(a) :**



**解:**电压串联负反馈。

(b) :



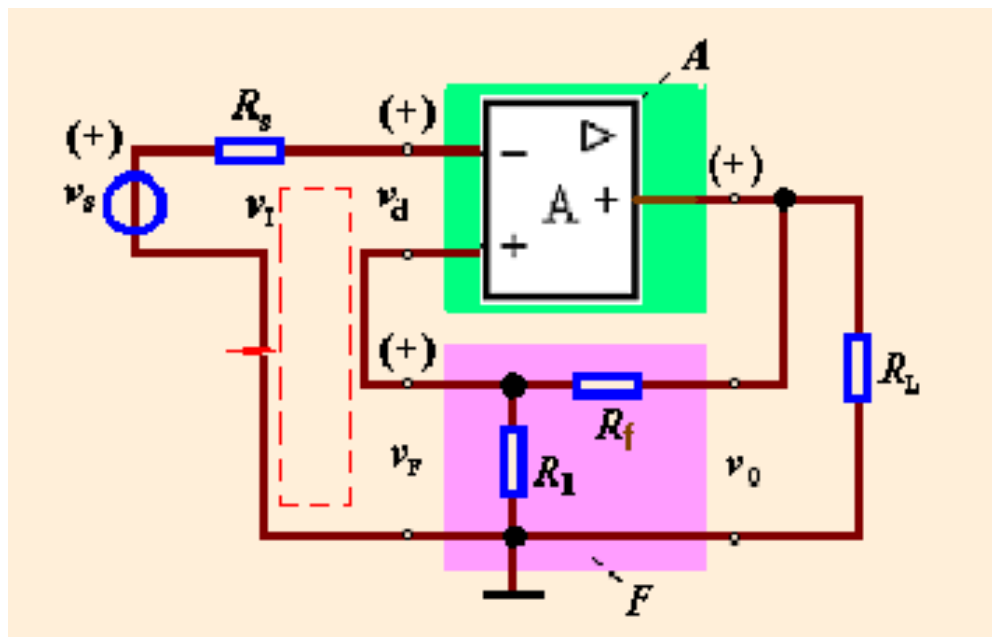
解: 电压并联负反馈。

## 5. 信号源对反馈效果的影响

### (1) 串联反馈

$$v_d = v_I - v_F$$

要想反馈效果明显，就要求  $v_F$  变化能有效引起  $v_d$  的变化。



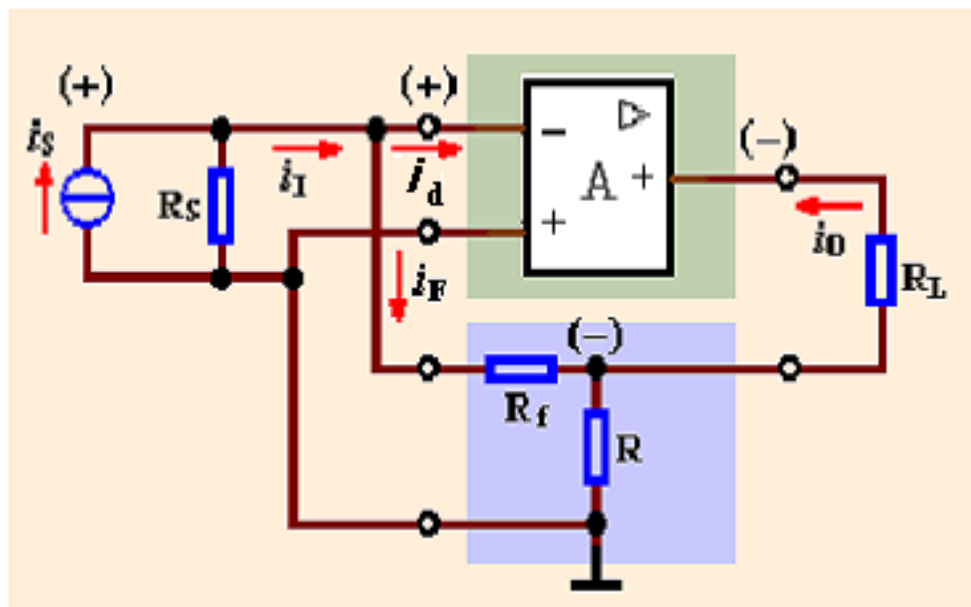
所以  $v_I$  应为恒压源，即信号源内阻  $R_s$  越小越好。

## (2) 并联反馈

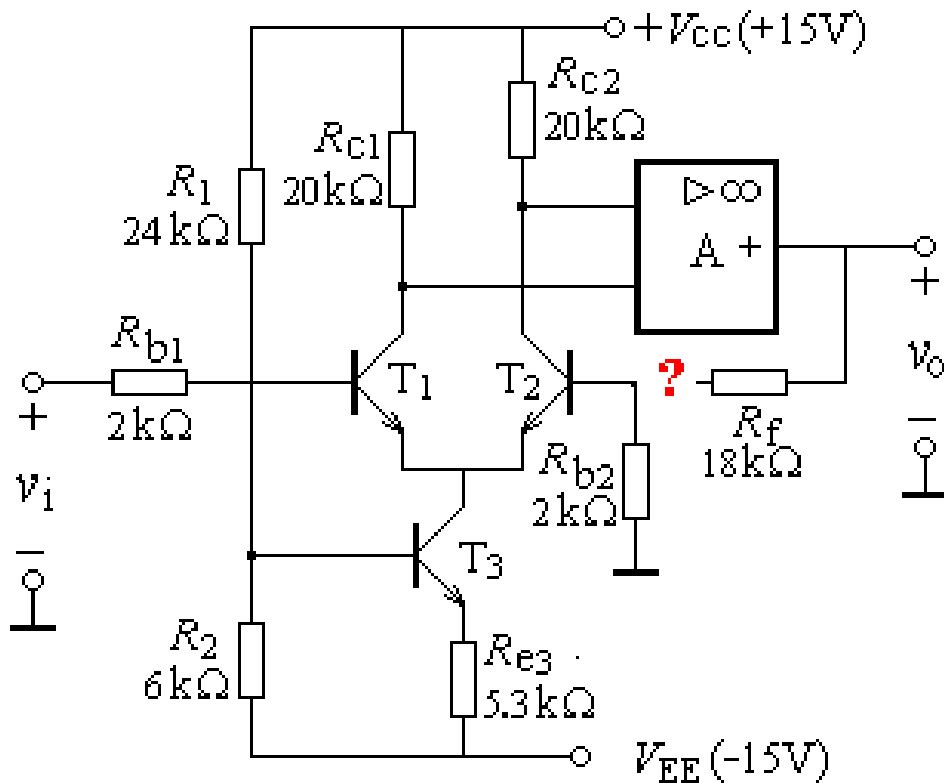
$$i_d = i_I - i_F$$

要想反馈效果明显，就要求 $i_F$ 变化能有效引起 $i_d$ 的变化。

所以 $i_I$ 应为恒流源，  
即信号源内阻 $R_S$ 越大越好。



## 例题：回答下列问题。



1.若要实现串联电压反馈,  $R_f$  应接向何处?

2.要实现串联电压负反馈,运放的输入端极性如何确定?

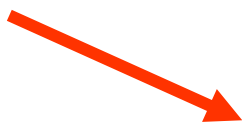
## 4.4 负反馈对放大电路性能的影响

---

在放大器中引入负反馈



降低了放大倍数




使放大器的性能得以改善：

- 提高增益的稳定性
- 减少非线性失真
- 扩展频带
- 改变输入电阻和输出电阻

## 一. 提高放大倍数的稳定性

闭环时  $\dot{A}_F = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$  只考虑幅值有  $A_F = \frac{A}{1 + AF}$

则  $\frac{dA_F}{dA} = \frac{1}{(1 + AF)^2}$

  $\frac{dA_F}{A_F} = \frac{1}{1 + AF} \cdot \frac{dA}{A}$

即闭环增益相对变化量比开环减小了 $1+AF$ 倍

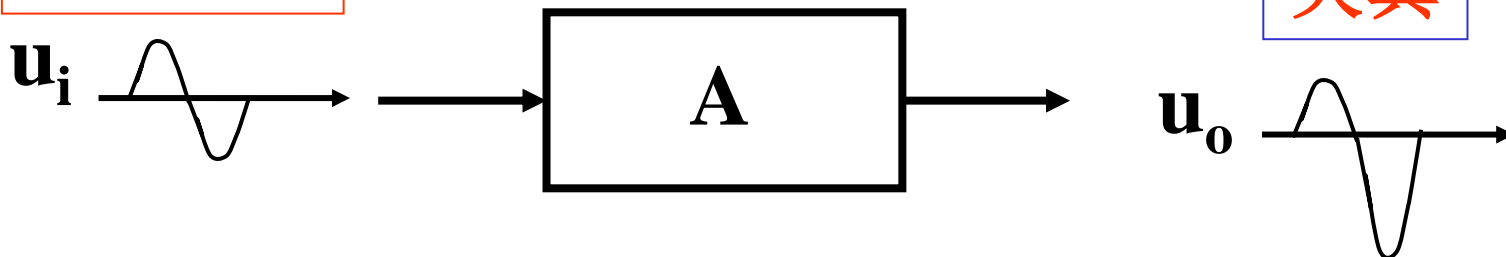
另一方面:

在深度负反馈条件下  $\dot{A}_F \approx \frac{1}{\dot{F}}$

即闭环增益只取决于反馈网络。当反馈网络由稳定的线性元件组成时，闭环增益将有很高的稳定性。

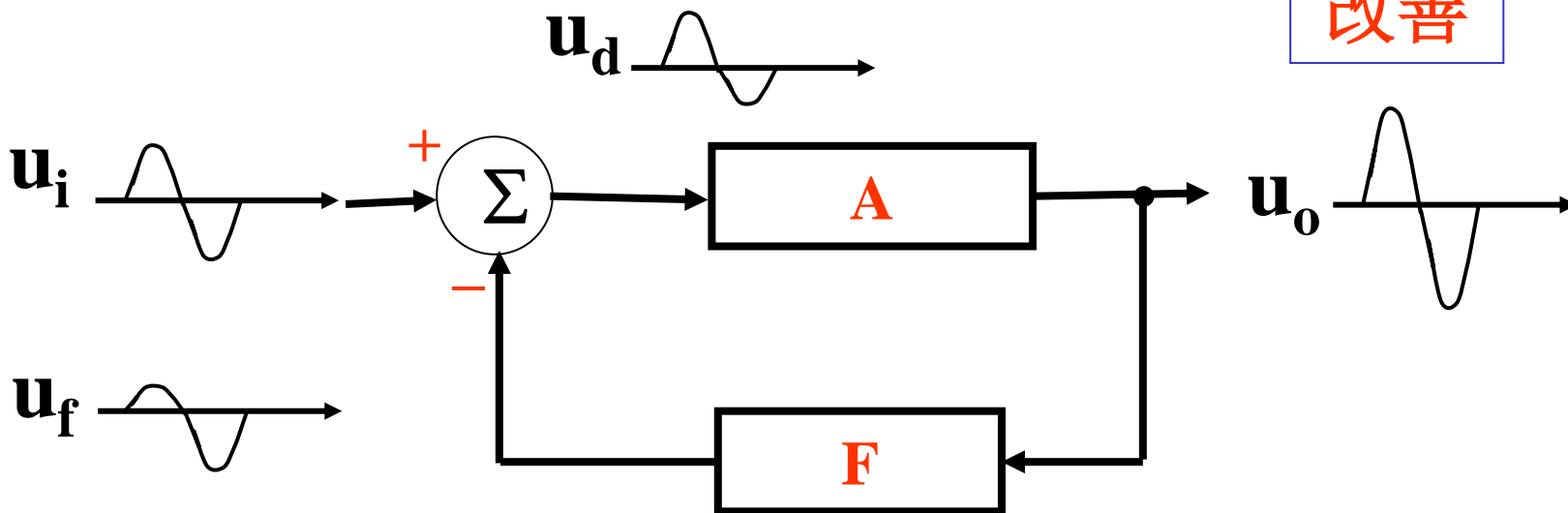
## 2. 改善放大器的非线性失真

加反馈前



失真

加反馈后

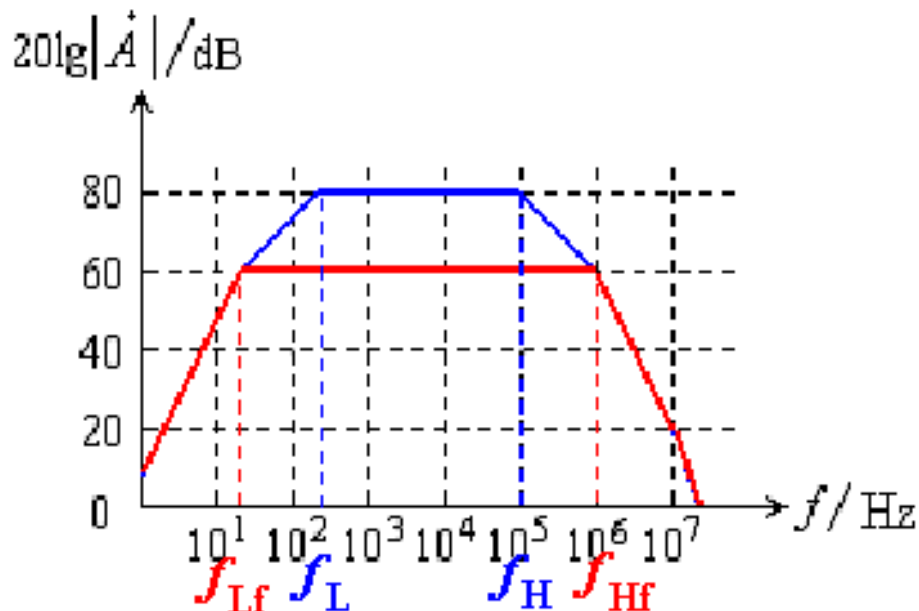


改善



### 3. 扩展放大器的通频带

放大电路加入负反馈后，增益下降，但通频带却加宽了。



无反馈时放大器的通频带： $f_{bw} = f_H - f_L \approx f_H$

有反馈时放大器的通频带： $f_{bwf} = f_{Hf} - f_{Lf} \approx f_{Hf}$

可以证明： $f_{bwf} = (1 + AF) f_{bw}$

放大器的一个重要特性：**增益与通频带之积为常数。**

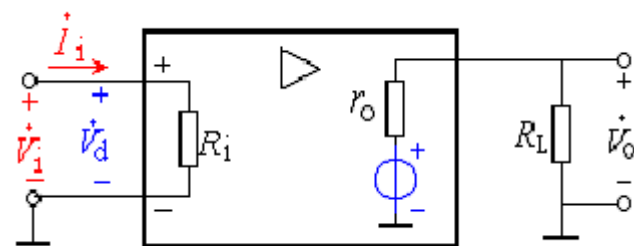
**即：** $A_{mf} \times f_{bwf} = A_m \times f_{bw}$

## 4. 负反馈对输入电阻的影响

### (1) 串联负反馈使输入电阻增加

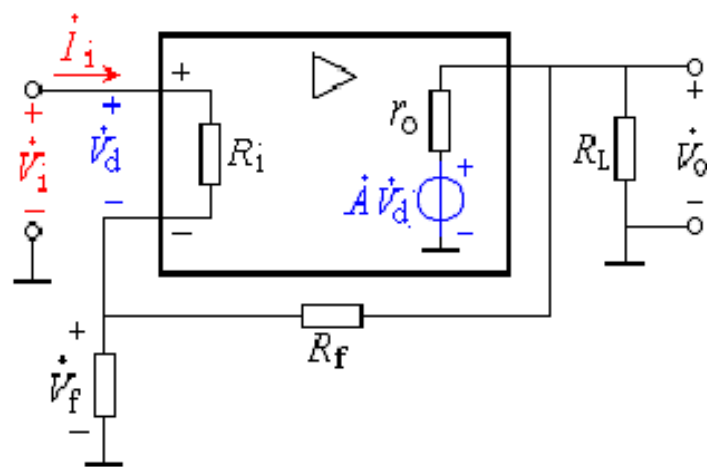
无反馈时:

$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_d}{\dot{I}_i}$$



有反馈时:

$$\begin{aligned} R_{if} &= \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_d + \dot{V}_f}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_d + \dot{V}_o F}{\dot{I}_i} \\ &= \frac{\dot{V}_d + \dot{V}_d A F}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_d (1 + A F)}{\dot{I}_i} \\ &= R_i (1 + A F) \end{aligned}$$

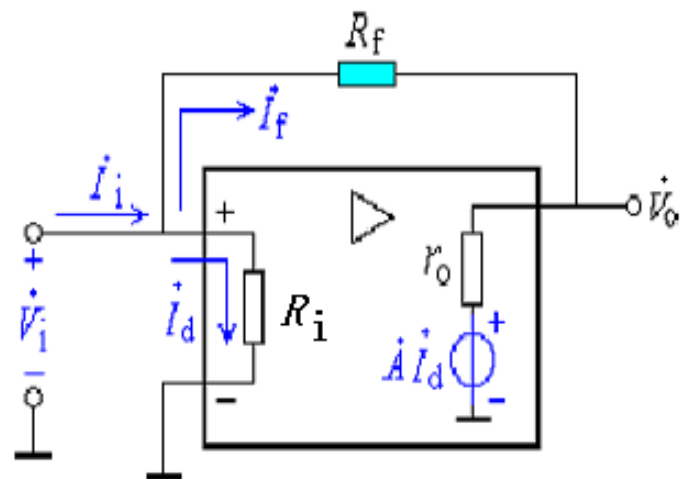
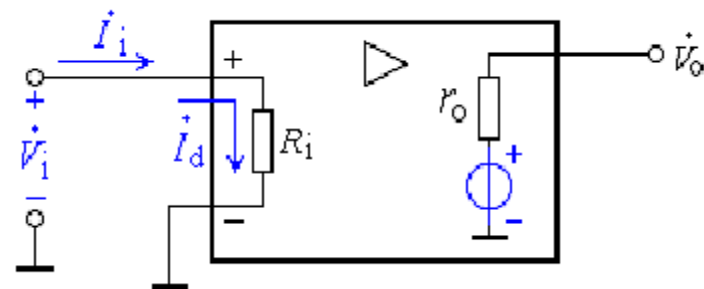


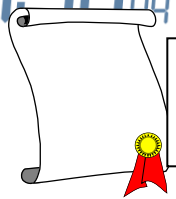
## (2) 并联负反馈使输入电阻减小

无反馈时:  $R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_d}$

有反馈时:

$$\begin{aligned}
 R_{if} &= \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_d + \dot{I}_f} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_d + \dot{V}_o F} \\
 &= \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_d + \dot{I}_d A F} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_d (1 + A F)} \\
 &= \frac{\dot{R}_i}{(1 + A F)}
 \end{aligned}$$





## 5. 负反馈对输出电阻的影响

### (1) 电压负反馈使输出电阻减小

电压负反馈→稳定输出电压（当负载变化时）  
→恒压源→输出电阻小。

### (2) 电流负反馈使输出电阻提高

电流负反馈→稳定输出电流（当负载变化时）  
→恒流源→输出电阻大。

# 为改善性能引入负反馈的一般原则

---

- 要稳定直流量——引直流负反馈
- 要稳定交流量——引交流负反馈
- 要稳定输出电压——引电压负反馈
- 要稳定输出电流——引电流负反馈
- 要增大输入电阻——引串联负反馈
- 要减小输入电阻——引并联负反馈

## 4.5 负反馈放大电路的计算

本节重点讨论深度负反馈条件下的近似计算

### 一. 估算电压增益

#### 1. 估算的依据

深度负反馈： $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$

方法一：

$$\text{由 } |1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1 \quad \text{得} \quad \dot{A}_F = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \approx \frac{\dot{A}}{\dot{A}\dot{F}} = \frac{1}{\dot{F}}$$

即，深度负反馈条件下，闭环增益只与反馈系数有关

## 方法二：

根据  $\dot{A}_F = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \approx \frac{\dot{A}}{\dot{A}\dot{F}} = \frac{1}{\dot{F}}$

将  $\dot{A}_F = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$      $\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$     代入上式

得  $\dot{X}_f \approx \dot{X}_i$  即：输入量近似等于反馈量  $\dot{U}_f \approx \dot{U}_i$      $\dot{I}_f \approx \dot{I}_i$

→  $\dot{X}_d = \dot{X}_i - \dot{X}_f \approx 0$     净输入量近似等于零

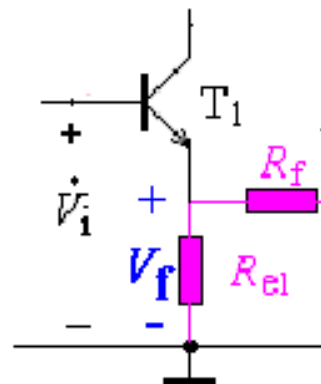
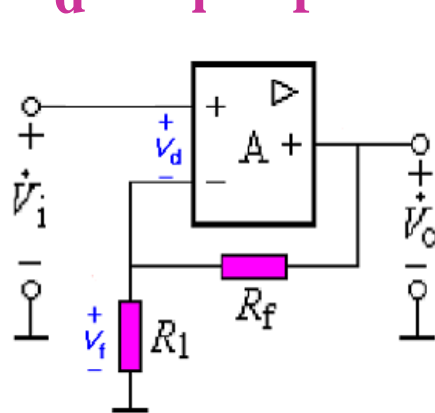
由此可得深度负反馈条件下，基本放大电路  
“虚短”、“虚断”的概念

# “虚短”与“虚断”

深度负反馈条件下： $X_d = X_i - X_f \approx 0$

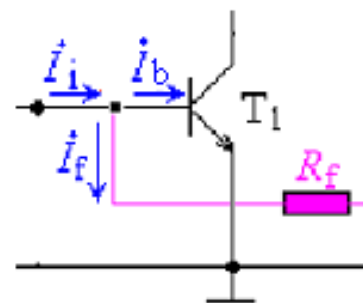
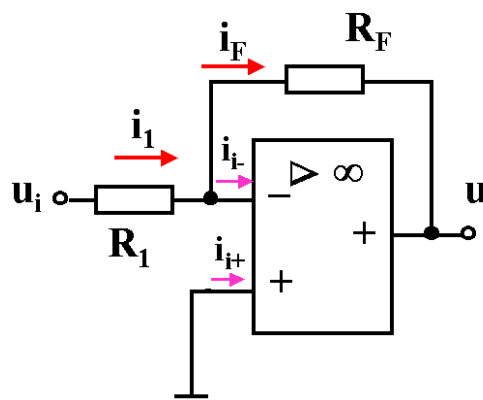
(1) “虚短” ——  $V_d \approx 0$

$$\begin{cases} V_+ = V_- & (\text{运放电路}) \\ V_e = V_b & (\text{三极管电路}) \end{cases}$$



(2) “虚断” ——  $I_d \approx 0$

$$\begin{cases} i_{i+} = i_{i-} = 0 & (\text{运放电路}) \\ i_b = 0 & (\text{三极管电路}) \end{cases}$$





## 2. 举例

### (1) 电压串联负反馈

#### 例1. 分立电路电压串联负反馈

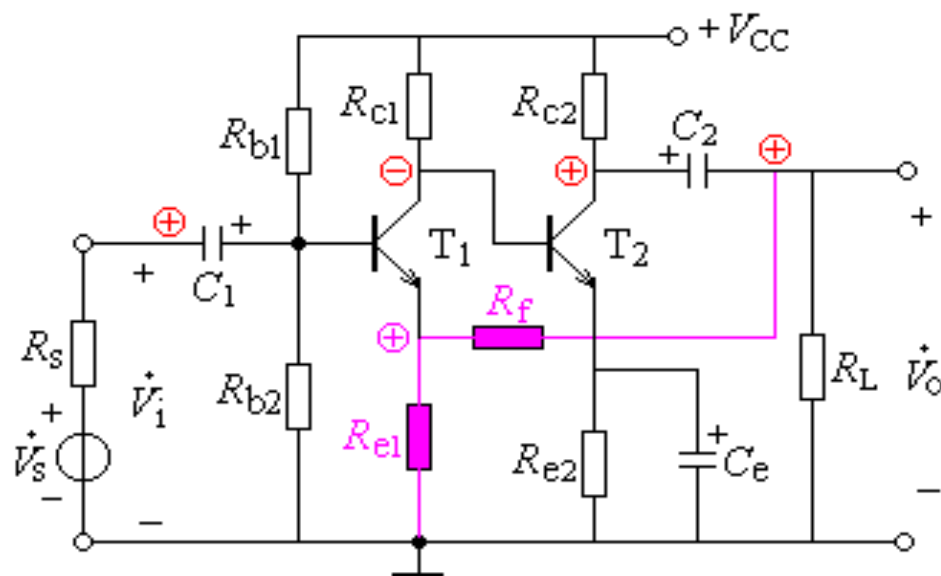
解：用方法一。

求反馈系数：

$$\dot{F}_{uu} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_f}$$

求闭环电压放大倍数：

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{\dot{F}} = \frac{R_{e1} + R_f}{R_{e1}}$$



## 例2.运放组成的电压串联负反馈电路

解：用方法二。

利用虚短和虚断的概念得知

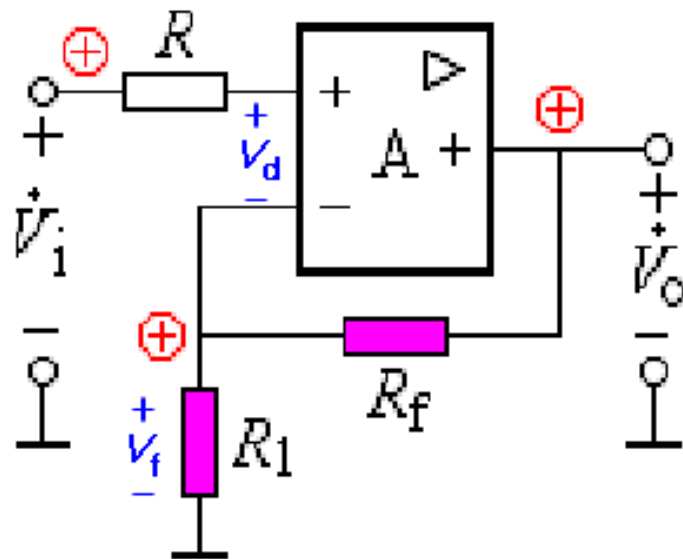
$$\dot{V}_d \approx 0 \quad \dot{I}_i \approx 0$$

则

$$\dot{V}_i \approx \dot{V}_f = \dot{V}_o \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

闭环电压增益

$$\dot{A}_{\text{UF}} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_f} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$



## (2) 电压并联负反馈

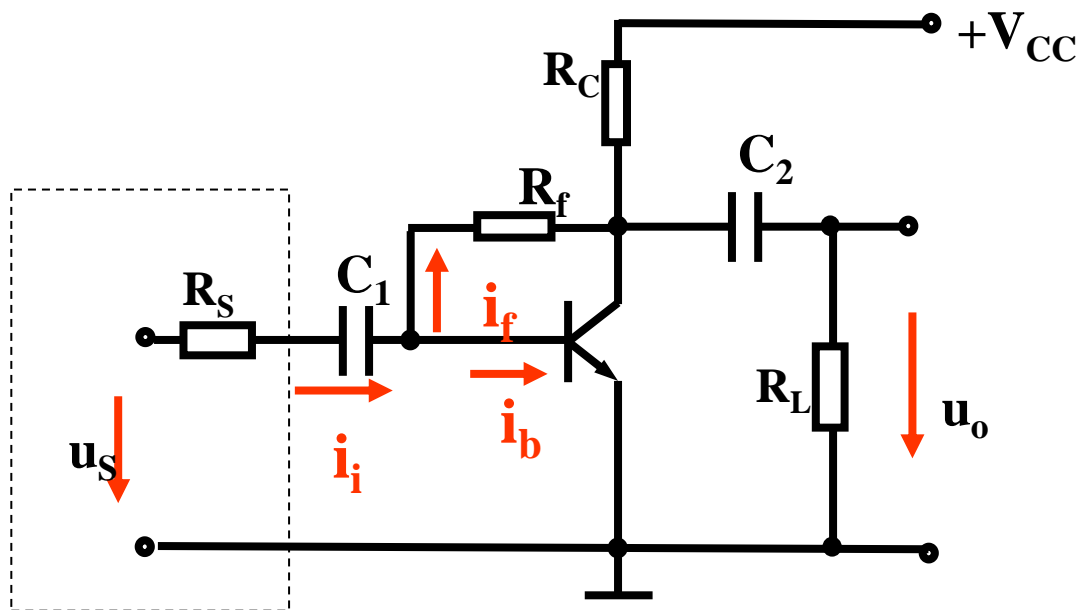
### 例1. 分立电路电压并联负反馈

解：用方法一。

$$I_f = \frac{U_b - U_o}{R_f} \approx -\frac{U_o}{R_f}$$

反馈系数为

$$\dot{F}_{iu} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o} = -\frac{1}{R_f}$$



闭环增益

$$\dot{A}_{uif} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} \approx \frac{1}{\dot{F}_{iu}} = -R_f$$

闭环电压增益

$$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i \cdot R_s} = -\frac{R_f}{R_s}$$

## 例2. 运放组成的电压并联负反馈

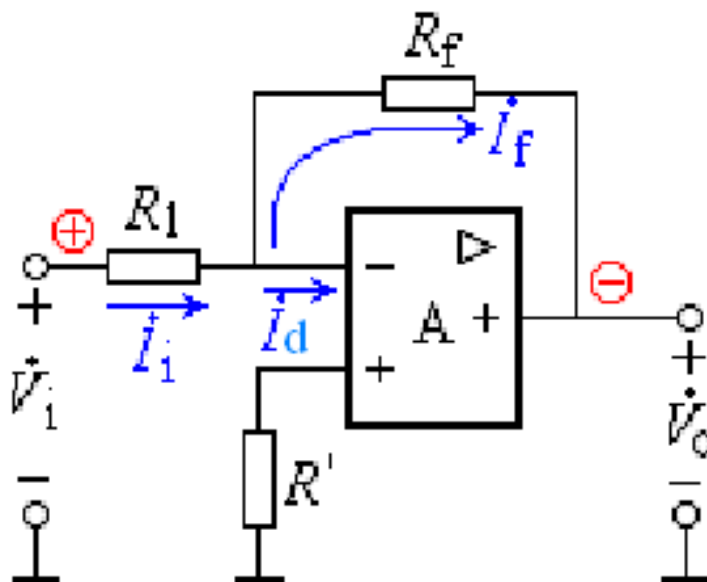
利用虚短和虚断可知

$$V_+ = V_- = 0$$

$$I_i = I_f$$

$$V_i/R_1 = -V_o/R_f$$

$$\text{得: } A_{uf} = V_o/V_i = -\frac{R_f}{R_1}$$



### (3) 电流串联负反馈

#### 例1. 分立元件组成的电流串联负反馈

解：用方法一。

$$U_f = -I_O R_{e1}$$

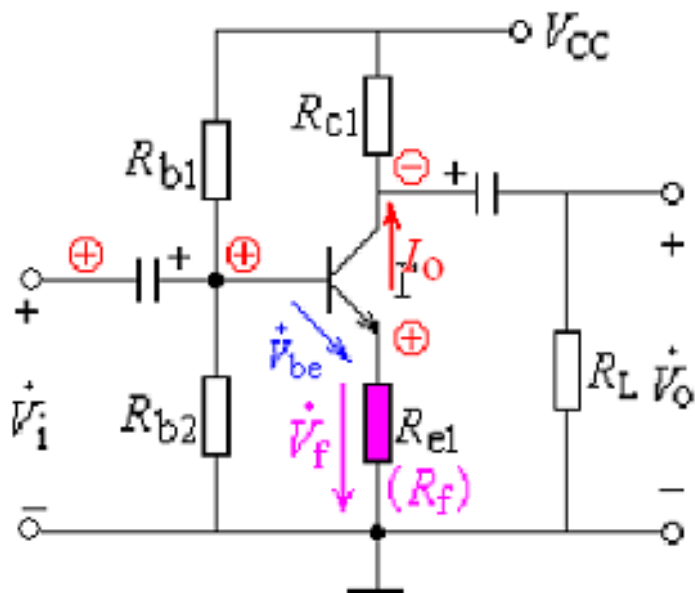
反馈系数为  $\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_O} = -R_{e1}$

闭环增益  $\dot{A}_{iuf} = \frac{\dot{I}_O}{\dot{U}_i} \approx \frac{1}{\dot{F}_{ui}} = -\frac{1}{R_{e1}}$

闭环电压增益  $\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_O}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{I}_O \cdot R'_L}{\dot{U}_i} = -\frac{R'_L}{R_{e1}}, R'_L = R_L // R_{c1}$

由第二章知，该电路闭环电压增益：

$$-\frac{\beta \cdot R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R_{e1}}$$



## 例2. 运放组成的电流串联负反馈

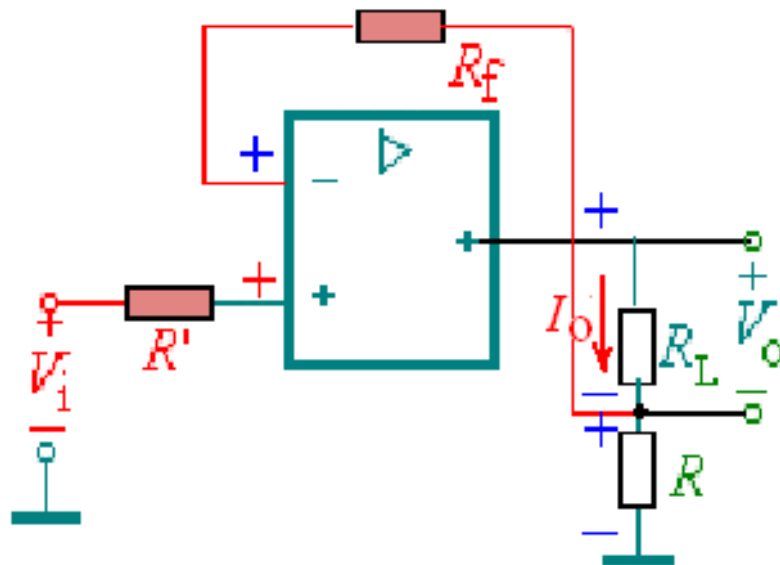
解：用方法二。

利用虚短和虚断可知

$$U_+ = U_- = U_f = U_i$$

闭环电压增益：

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{U_o}{U_f} = \frac{I_o \cdot R_L}{I_o \cdot R} = \frac{R_L}{R}$$



## (4) 电流并联负反馈放大器

### 例1. 分立电路电流并联负反馈

$$R_i = r_{be1} + (1 + \beta_1) R_{e1}$$

解：用方法一。

$$\dot{I}_f \approx \dot{I}_o \frac{R_{e2}}{R_f + R_{e2}}$$

反馈系数为

$$\dot{F}_{ii} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o} = \frac{R_{e2}}{R_f + R_{e2}}$$

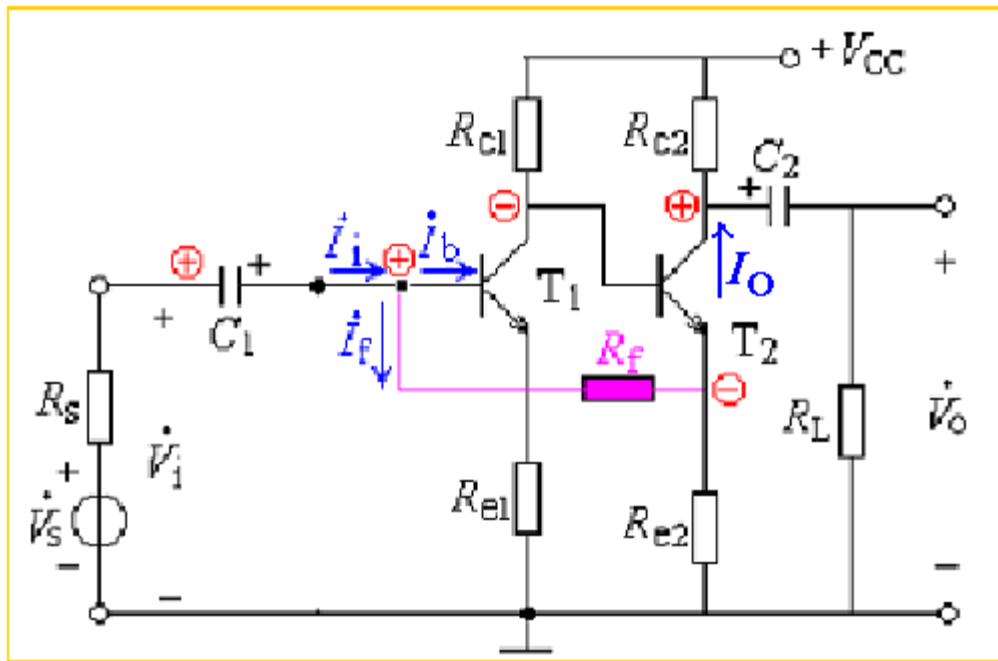
闭环增益

$$\dot{A}_{iif} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_f} \approx \frac{1}{\dot{F}_{ii}} = \frac{R_f + R_{e2}}{R_{e2}}$$

$$\text{因为 } \dot{I}_f \approx \dot{I}_i \quad R_{if} = \frac{R_i}{1 + \dot{A}_{iif} \dot{F}_{ii}} \approx 0$$

闭环电压增益

$$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{I}_o \cdot R'_L}{\dot{I}_i \cdot (R_s + R_{if})} \approx \frac{R_f + R_{e2}}{R_{e2}} \cdot \frac{R'_L}{R_s}$$



## 例2. 运放组成的电流并联负反馈放大器

解：用方法二。

利用虚短和虚断可知

$$V_i = I_i R_1 \quad I_i = I_f$$

$$I_f \approx -\frac{R_2}{R_2 + R_f} \cdot I_o$$

闭环电压增益： $A_{usf} = V_o / V_i = \frac{I_o R_L}{I_i R_1} = \frac{I_o R_L}{I_f R_1}$

$$\approx -\frac{R_f + R_2}{R_2} \cdot \frac{R_L}{R_1}$$

