



# 模拟电子技术基础

## Fundamentals of Analog Electronic

主讲教师：张静秋

# 第5章 放大电路的反馈

## 教学内容:

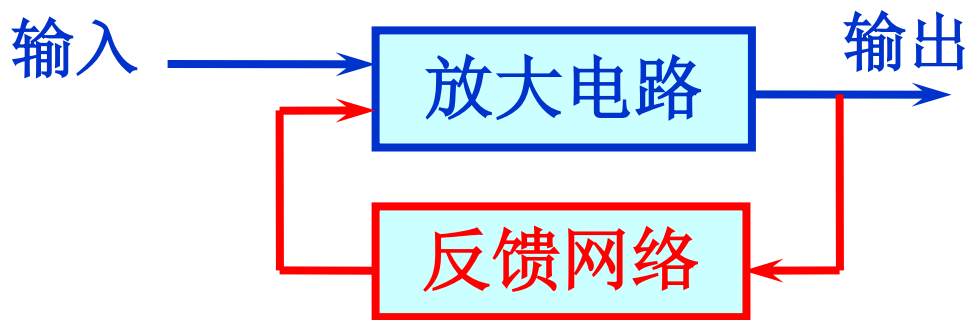
- 5.1 反馈的基本概念和判断方法
- 5.2 负反馈放大电路的方框图
- 5.3 负反馈对放大电路性能的影响
- 5.4 深度负反馈放大电路的近似估算

## 5.1.1 反馈的定义

1. 反馈 — 将电路输出量(电压或电流)的部分或全部, 以一定的方式回送到输入回路并影响输入量(电压或电流)和输出量的过程。

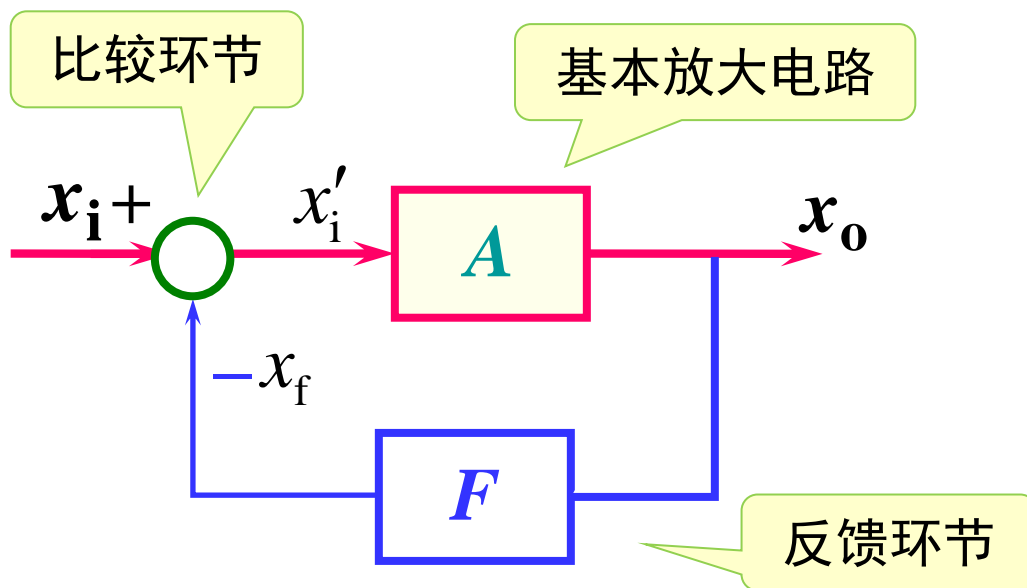
### 2. 信号的两种流向

正向传输: 输入  $\rightarrow$  输出 — 开环 } — 闭环  
反向传输: 输出  $\rightarrow$  输入



## 5.1.1 反馈的定义

### 3. 反馈放大电路的组成



$x_i$  — 输入信号 (  $i_i$  或  $u_i$  )

$x_o$  — 输出信号 (  $i_o$  或  $u_o$  )

$x'_i$  — 净输入信号 (  $i_{id}$  或  $u_{id}$  )

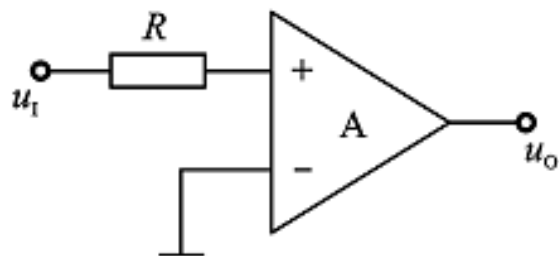
$x_f$  — 反馈信号 (  $i_f$  或  $u_f$  )

## 5.1.2 反馈的判断

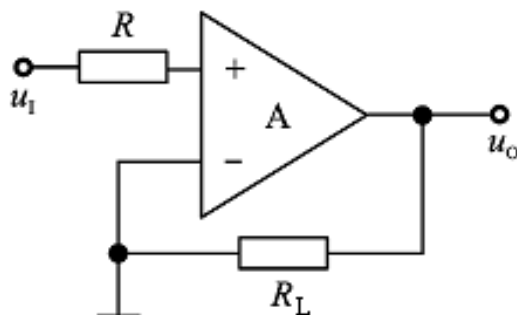
### 1. 有无反馈的判断

放大电路中是否存在反馈通路。

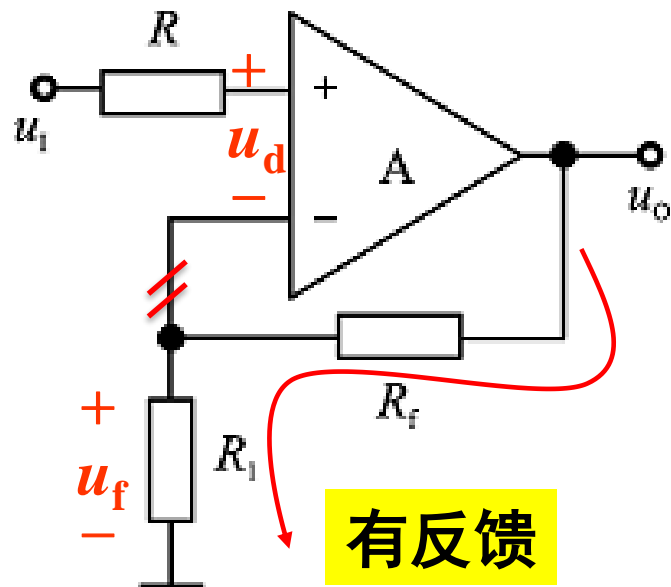
例1-1 判断下列电路有无反馈



开环



开环



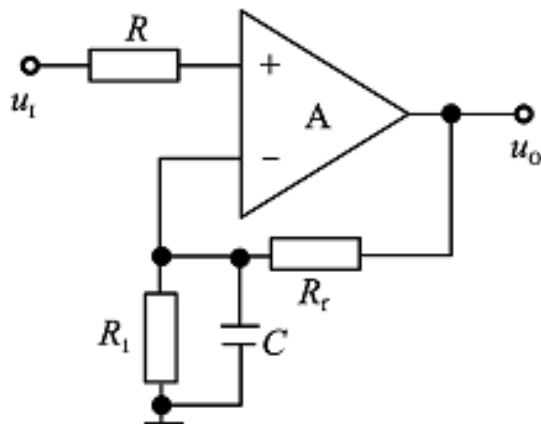
有反馈

## 5.1.2 反馈的判断

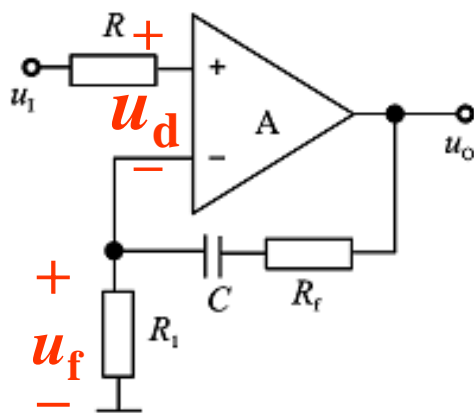
### 2. 直流反馈和交流反馈的判断

- **直流反馈** — 直流信号的反馈(存在于直流通道中的反馈)。
- **交流反馈** — 交流信号的反馈(存在于交流通道中的反馈)。

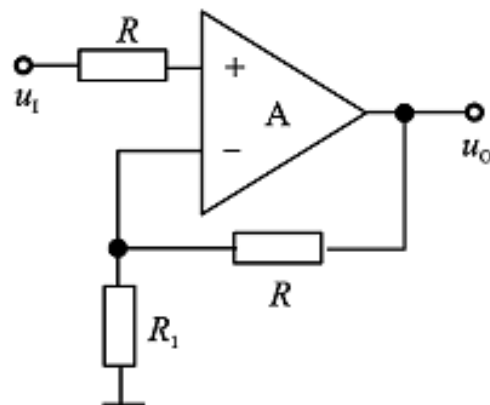
**例1-2** 判断下列电路是否引入了反馈；直流反馈还是交流反馈？



直流反馈



交流反馈



直/交流反馈

## 5.1.2 反馈的判断

### 3.整体反馈的判断

- 本级反馈 — 反馈信号取自本级输出，并且回送到本级的输入回路。
- 级间反馈 — 反馈信号取自后一级输出，然后回送到前一级的输入回路。
- 整体反馈 — 反馈信号取自最后一级输出，回送到最前一级的输入回路。
- 对放大电路影响最大的是整体反馈。

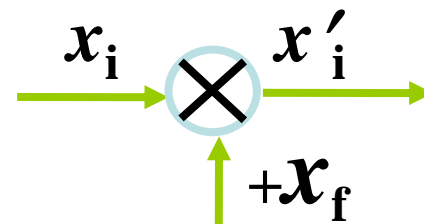
## 5.1.2 反馈的判断

### 4. 反馈极性的判断

正/负反馈判别法：瞬时极性法

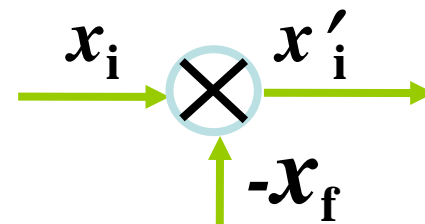
- **正反馈** — 反馈使净输入电量增加，从而使输出量增大。

$$x'_i > x_i$$



- **负反馈** — 反馈使净输入电量减小，从而使输出量减小。

$$x'_i < x_i$$

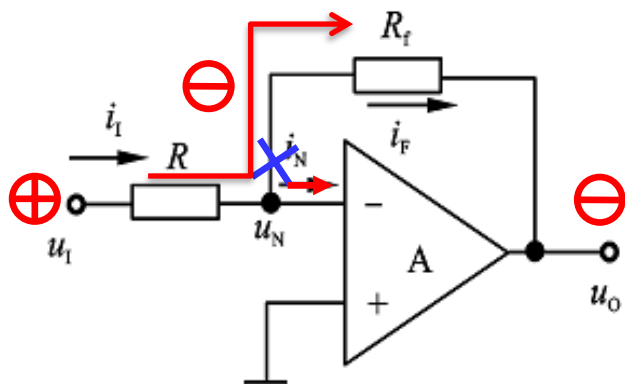




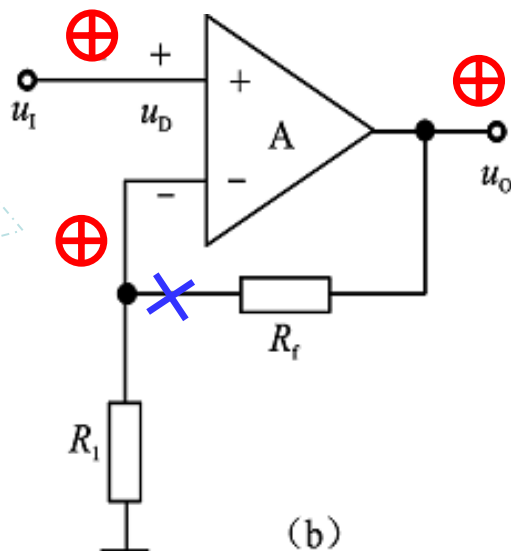
## 5.1.2 反馈的判断

### 例2 判断下图电路的反馈极性。

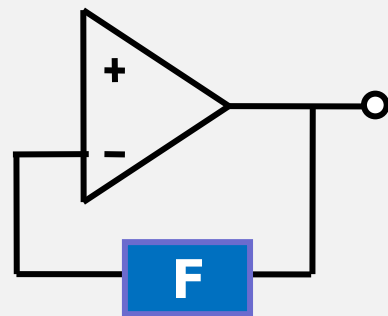
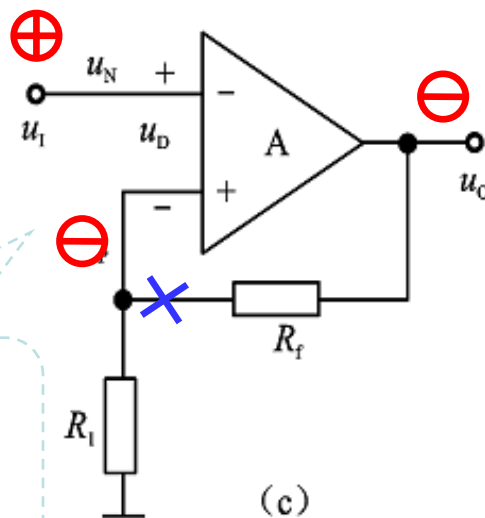
极性相同的信号在不同点  
相加使净输入电压减小  
负反馈



极性相反的信号在同一点  
相加使净输入电流减小  
负反馈



极性相反的信号在  
不同点相加使净输入  
电压增加正反馈



负反馈结构特征

## 5.1.2 反馈的判断

### 5.电压反馈和电流反馈的判断

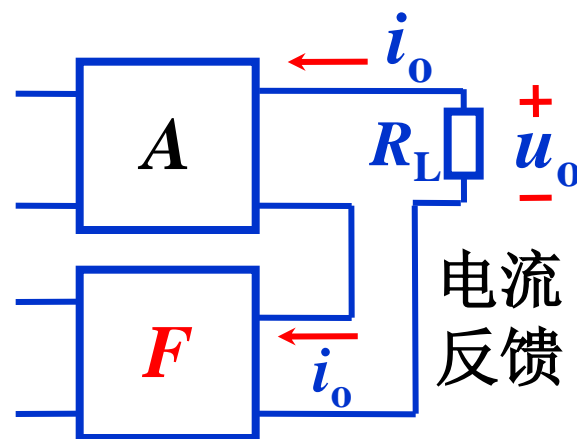
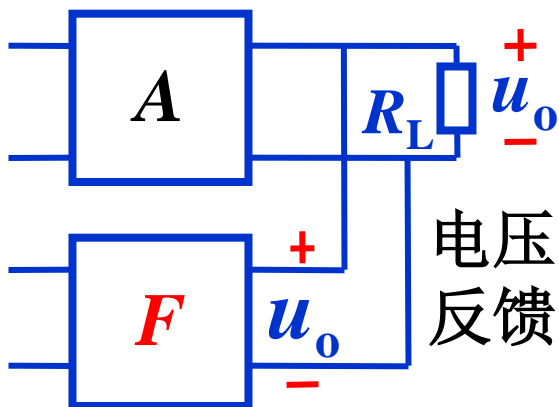
- 电压反馈 — 反馈信号取自输出电压的部分或全部。

判别法：使  $u_o = 0$  ( $R_L$  短路)，若反馈量消失，则为电压反馈。

- 电流反馈 — 反馈信号取自输出电流。

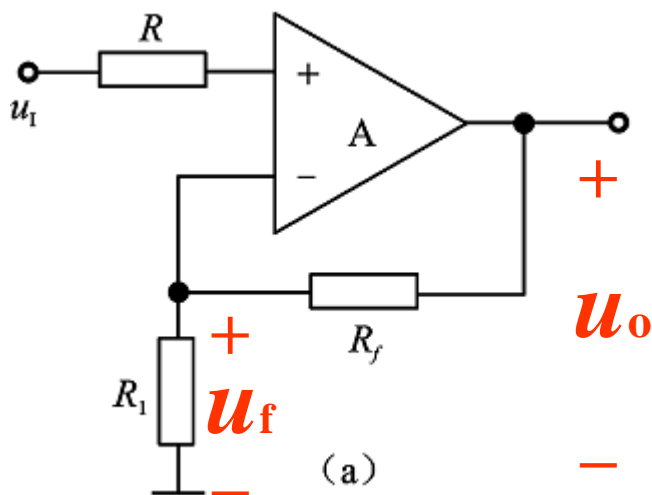
判别法：使  $i_o = 0$  ( $R_L$  开路)，若反馈量消失则为电流反馈。

或：令  $u_o = 0$ ，反馈仍然存在。

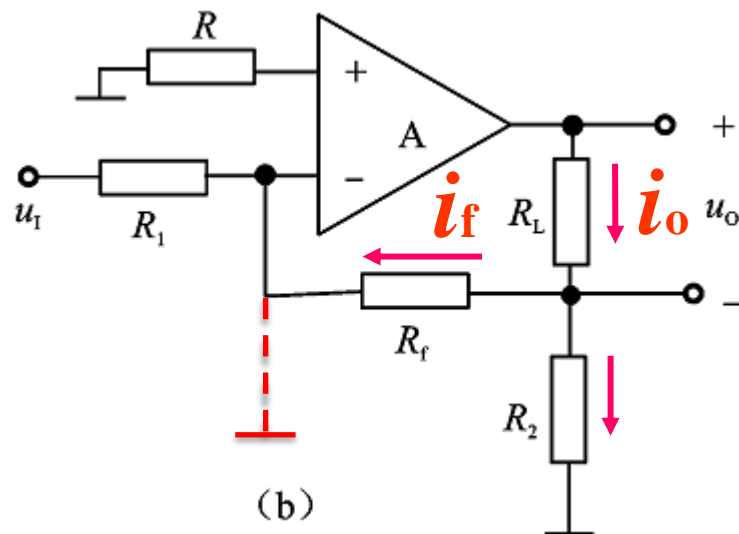


## 5.1.2 反馈的判断

例3-1 判断下列电路引入的是电压反馈还是电流反馈？



$u_f \propto u_o$  因此为电压反馈



$i_f \propto i_o$  因此为电流反馈

- 反馈的判断顺序：

(有/无) 反馈 → (直/交) 流反馈 → 交流 (负/正) 反馈 →  
交流负反馈： 输出端 (电压/电流) 反馈。

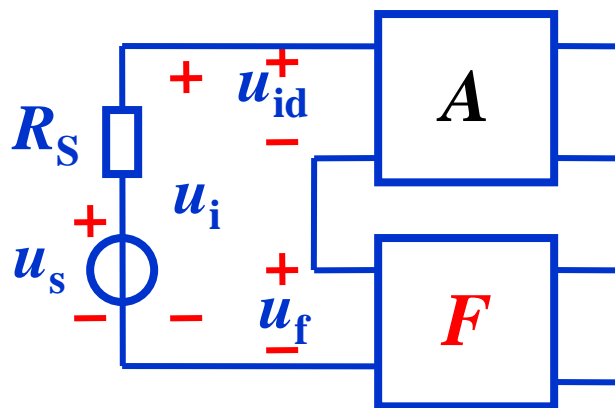
## 5.1.2 反馈的判断

### 6. 串联反馈和并联反馈的判断

➤ 串联反馈：反馈信号与输入信号以**电压相加减**的形式在输入端出现。

$$u_{id} = u_i - u_f$$

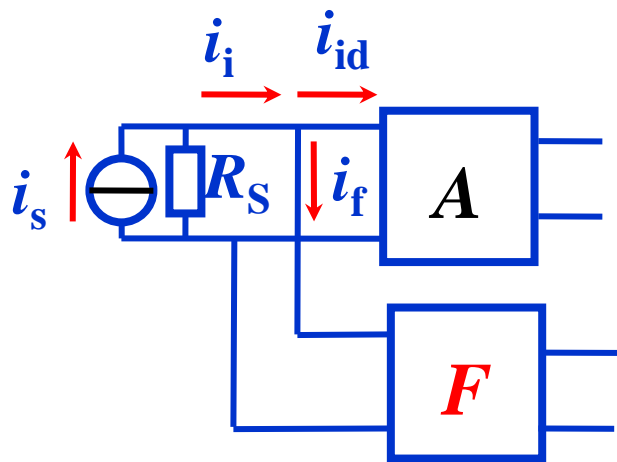
特点：信号源内阻越小，反馈效果越明显。



➤ 并联反馈：反馈信号与输入信号以**电流相加减**的形式在输入端出现。

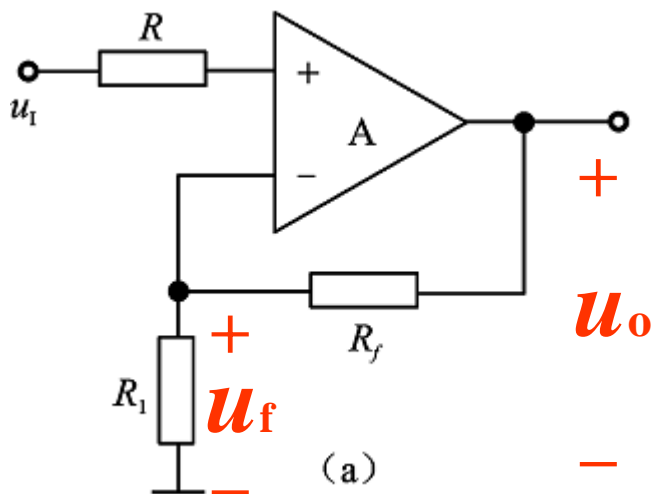
$$i_{id} = i_i - i_f$$

特点：信号源内阻越大，反馈效果越明显。

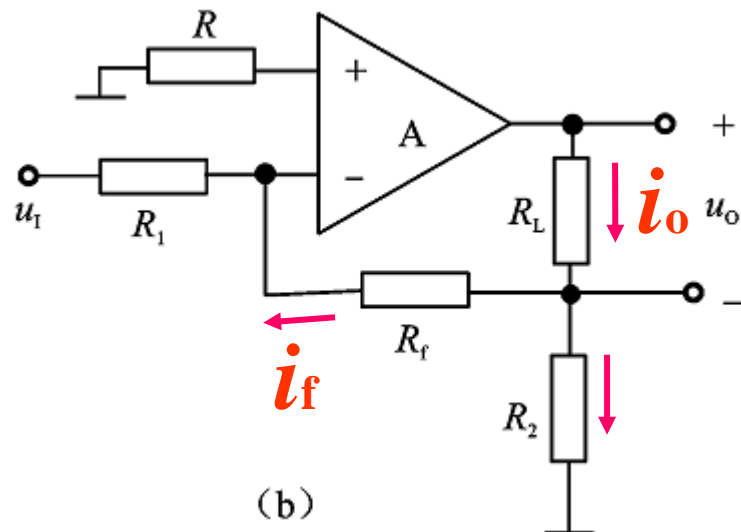


## 5.1.2 反馈的判断

**例3-2** 判断下列电路引入的是串联反馈还是并联反馈？



串联电压负反馈



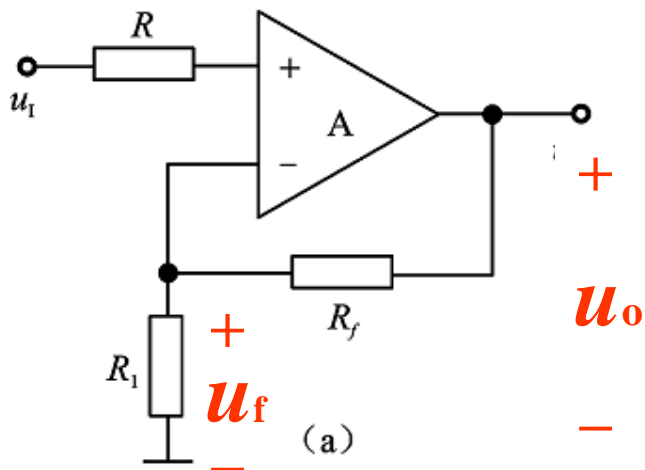
并联电流负反馈

- 反馈的判断顺序：

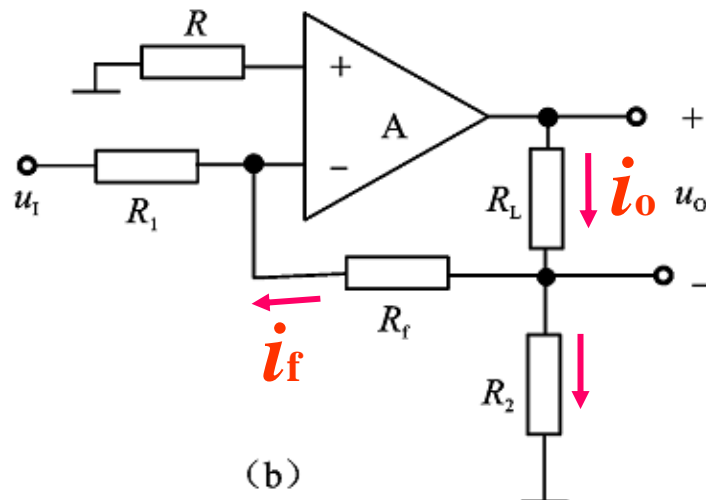
(有/无) 反馈 → (直/交) 流反馈 → 交流 (负/正) 反馈 →  
交流负反馈：  
┌ 输入端 (串联/并联) 反馈；  
└ 输出端 (电压/电流) 反馈。

## 5.1.2 反馈的判断

### 7.反馈类型的分析



存在：直流/交流负反馈；  
输入端为串联反馈；  
输出端为电压反馈。



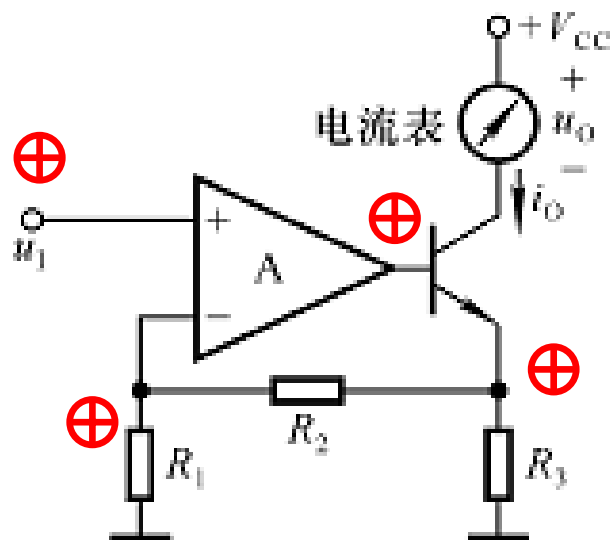
存在：直流/交流负反馈；  
输入端为并联反馈；  
输出端为电流反馈。

### ● 交流负反馈有4种组态：

**电压**串联/并联负反馈；**电流**串联/并联负反馈

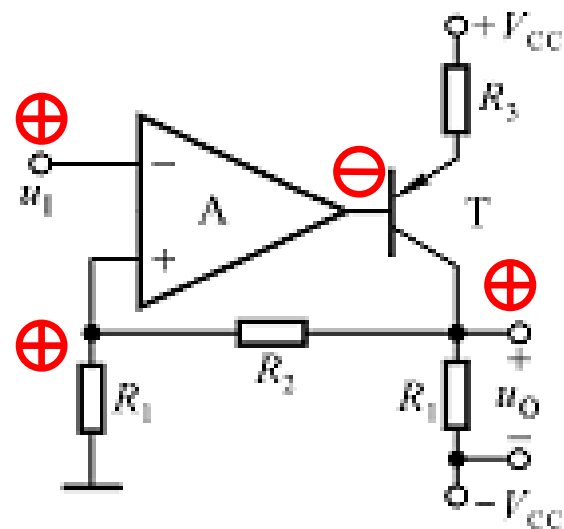
## 5.1.2 反馈的判断

### 7.反馈类型的分析



(c)

(c) 交流电流串联负反馈

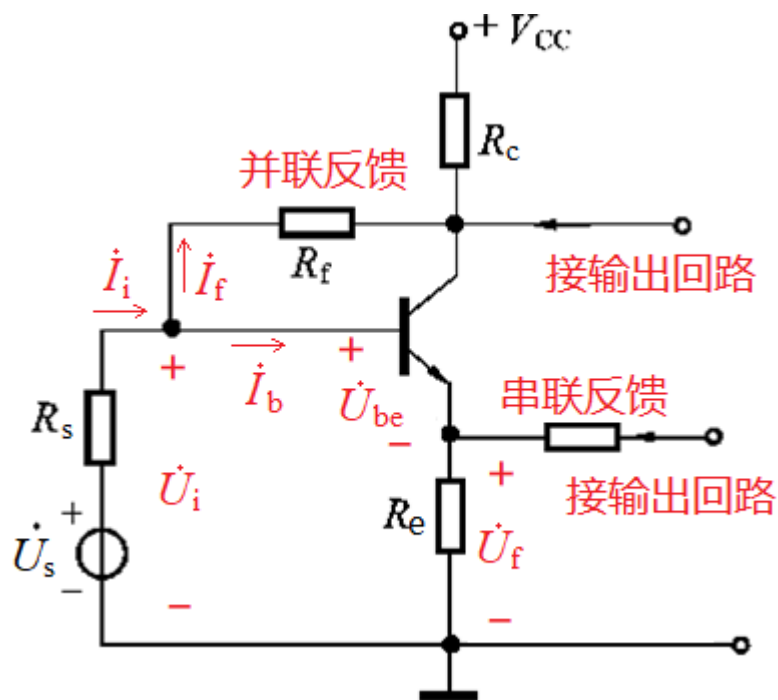


(d)

(d) 交流电压串联负反馈

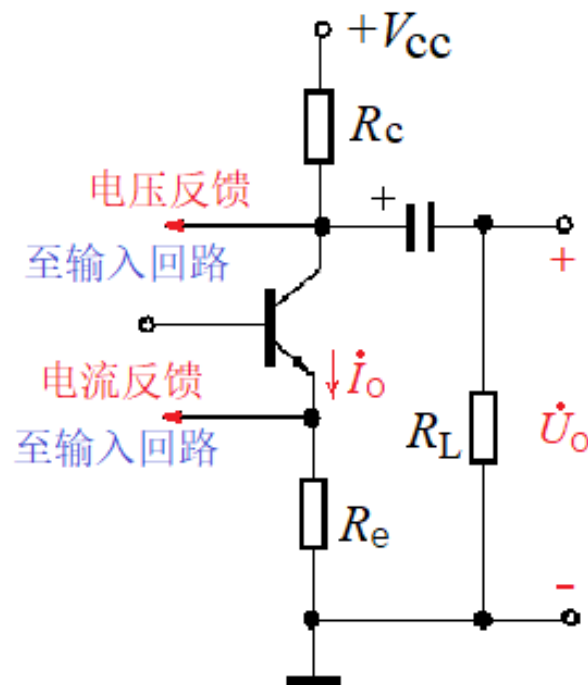
## 5.1.2 反馈的判断

### 例4 分立元件交流负反馈电路，反馈组态判断方法。



并联反馈/串联反馈

$$X_i = X_{id} + X_f$$

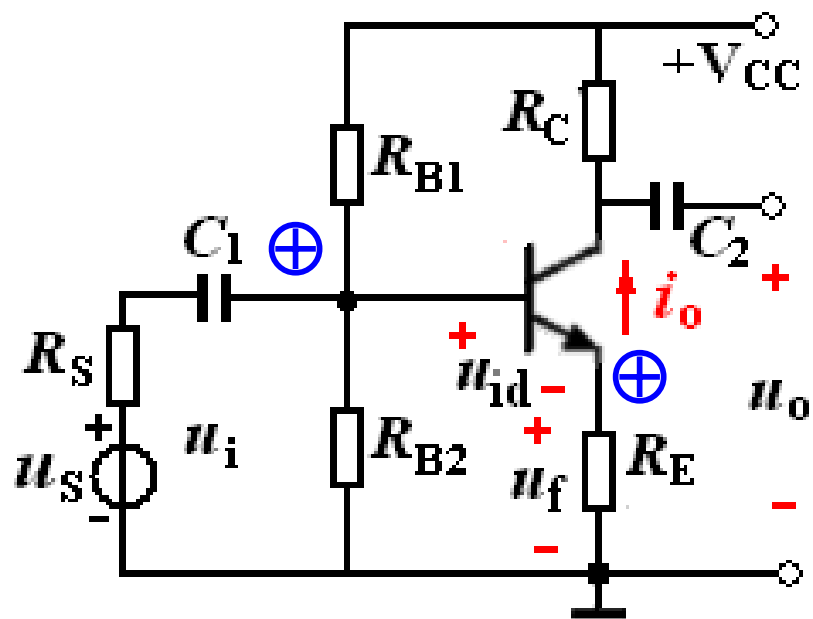


电压反馈/电流反馈

$$X_f \propto X_o$$

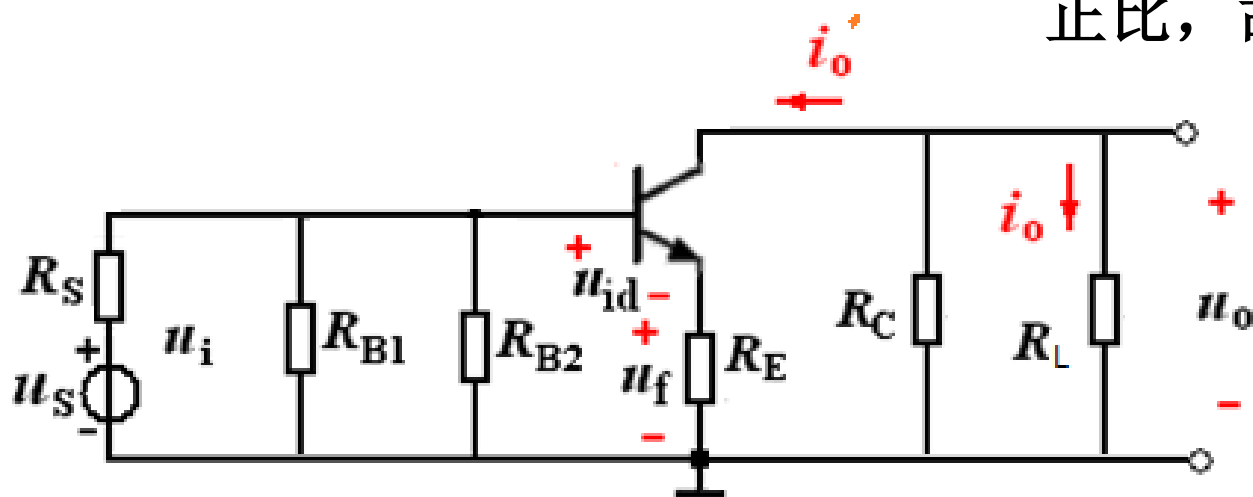


## 例5 判断电路的反馈极性，若为交流负反馈则判断反馈组态。

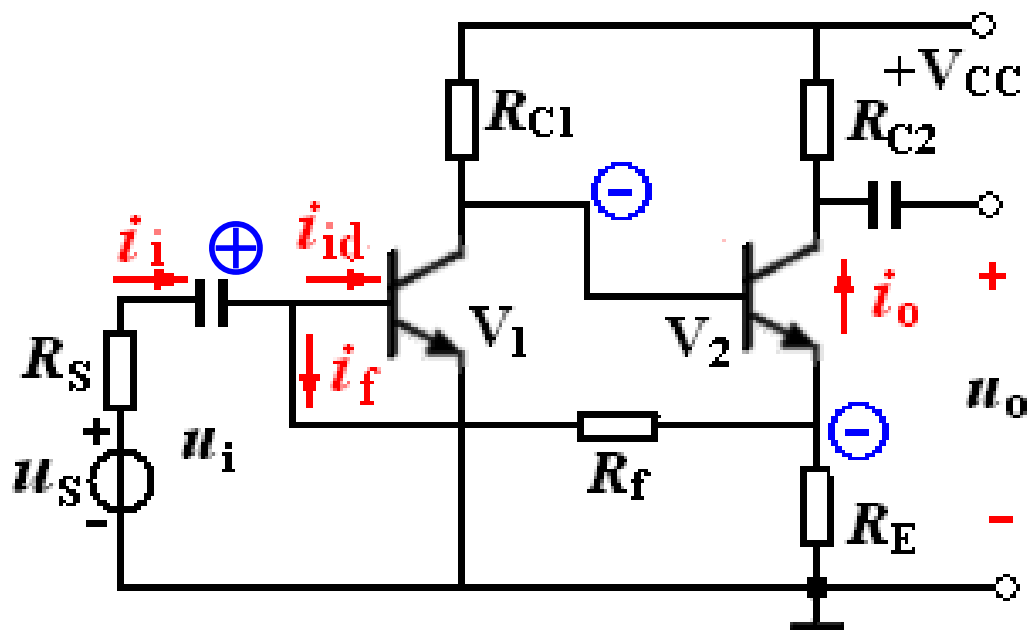


### □ 为什么是电流反馈？

由交流通路可见，  
输出电流  $i_o$  与集电极  
电流  $i_o'$  成正比，  
若将  $i_o$  置零必然使  $i_o'$  为0，  
则反馈量  $u_f$  为0。即  
反馈量与输出电流成  
正比，故为电流反馈。



## 例6 判断电路的反馈极性，若为交流负反馈则判断反馈组态。



$R_E$  — 引入本级  
电流串联负反馈

$R_f$  — 引入级间  
电流并联负反馈

- 反馈信号与输入信号在不同节点比较为串联反馈，在同一节点比较为并联反馈。
- 反馈量直接取自输出端或输出分压端为电压反馈，取自非输出端为电流反馈。

## 5.2 负反馈放大电路的框图描述

在一个带反馈（闭环）的放大电路中，**基本放大电路部分与反馈网络**是紧密相连、混为一体的。

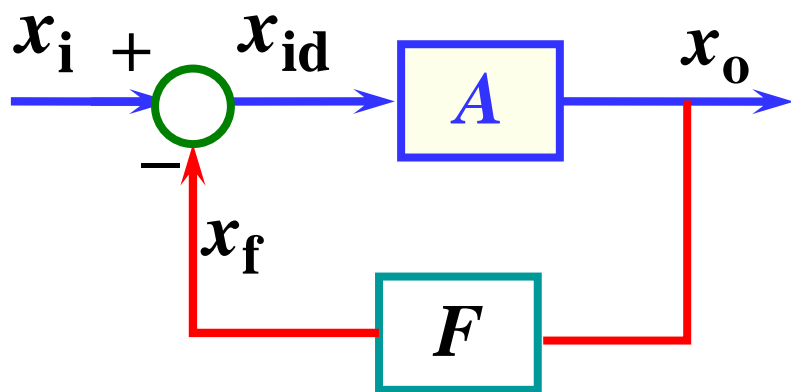
为了突出反馈的作用，分析反馈对放大电路的影响，我们又希望把反馈放大电路分解为**两部分**：

一是不带反馈的“基本放大电路”；

二是“反馈网络”。

所以能这样做，依据的是所谓“信号单方向作用”的假定。

# 1.负反馈放大电路的方框图



$x$  :既可为电压,也可为电流。

$A$  :放大电路的 开环放大倍数

$F$  :放大电路的反馈系数

(1) 定义：开环放大倍数

$$\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_{id}}$$

(2) 定义：反馈系数

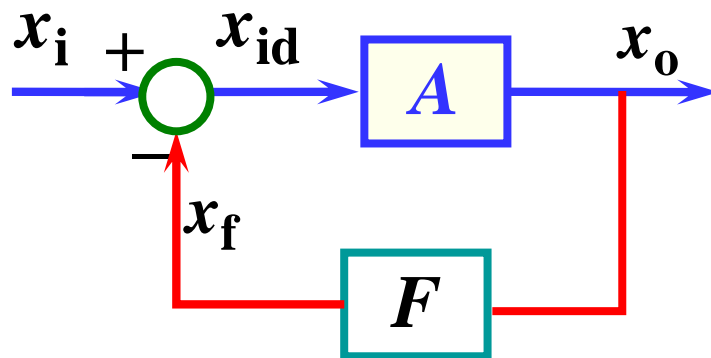
$$\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$$

(3) 定义：环路放大倍数

$$\dot{A}\dot{F} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_{id}} \cdot \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_{id}}$$

(4) 定义：闭环放大倍数

$$A_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$$



## 2. 闭环增益的一般表达式

$$A_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{A \dot{X}_{id}}{(1 + AF) \dot{X}_{id}} = \frac{A}{1 + AF}$$

## 3. 反馈深度

定义：反馈深度  $|1 + AF| = \left| \frac{A}{A_f} \right|$

深度负反馈：  $|1 + AF| \gg 1$  则：  $A_f = \frac{A}{1 + AF} \approx \frac{1}{F}$

- 深度负反馈情况下，放大电路的输出量非常稳定，几乎不受输入量以外的干扰因素的影响。

## 4.反馈极性的判断

1) 如果  $|1 + AF| > 1$  , 则  $A_f < A$  负反馈情况;

2) 如果  $|1 + AF| < 1$  , 则  $A_f > A$  正反馈情况;

$\dot{X}_{id} = \frac{\dot{X}_i}{1 + AF}$  表明反馈的引入削弱/增强输入量的作用, 使闭环增益下降/上升, 导致负/正反馈。

3) 如果  $|1 + AF| = 0$  则  $A_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} \rightarrow \infty$  电路出现自激振荡;

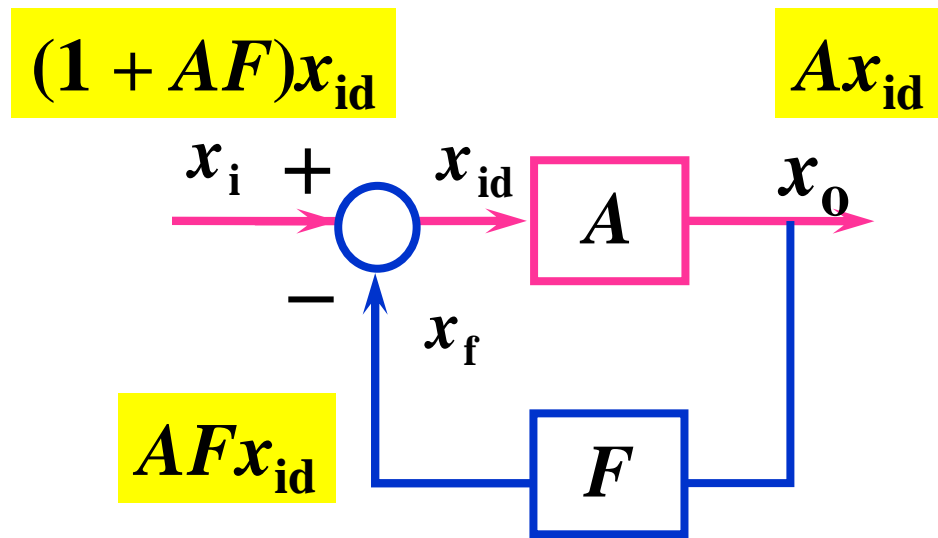
- 放大电路中需要避免出现自激振荡现象, 否则会淹没有用信号。利用自激振荡可以在振荡电路中产生信号。

## 正/负反馈总结：

负反馈减小输出量，正反馈增大输出量。  
仅仅由于输出量与输入量的比较方式不同，产生了截然相反的结果。

寓意：团队中良好组织结构的重要性。大家劲往一处使，形成聚合力，就可以无往而不胜；如果互相拆台内讧，就会一事无成。

## 5.3 深度负反馈电路放大倍数的估算



即:  $x_i \approx x_f$      $x_{id} \approx 0$

➤ 串联负反馈:

$$\begin{cases} u_i \approx u_f \\ u_{id} \approx 0 \end{cases}$$

虚短

➤ 并联负反馈:

$$\begin{cases} i_i \approx i_f \\ i_{id} \approx 0 \end{cases}$$

虚断

由:  $A_f = \frac{X_o}{X_i}$  ,  $F = \frac{X_f}{X_o}$

当  $|1 + AF| \gg 1$  时:

$$A_f = \frac{A}{1 + AF} \approx \frac{1}{F}$$



## 例7-1 在深度负反馈条件下计算电压放大倍数。

### 2) 反馈系数表达式

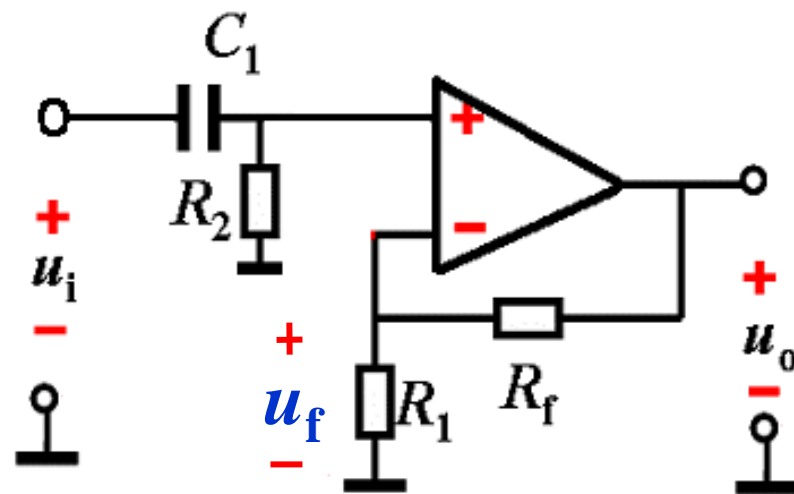
$$F = \frac{u_f}{u_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

### 3) 闭环放大倍数表达式

$$A_f = \frac{u_o}{u_i} \approx \frac{1}{F} = \frac{u_o}{u_f}$$

### 4) 闭环电压放大倍数表达式

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = A_f = \frac{R_1 + R_f}{R_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$



解： 1) 判断反馈组态  
电压串联负反馈

## 例7-2 在深度负反馈条件下计算电压放大倍数。

### 2) 反馈系数表达式

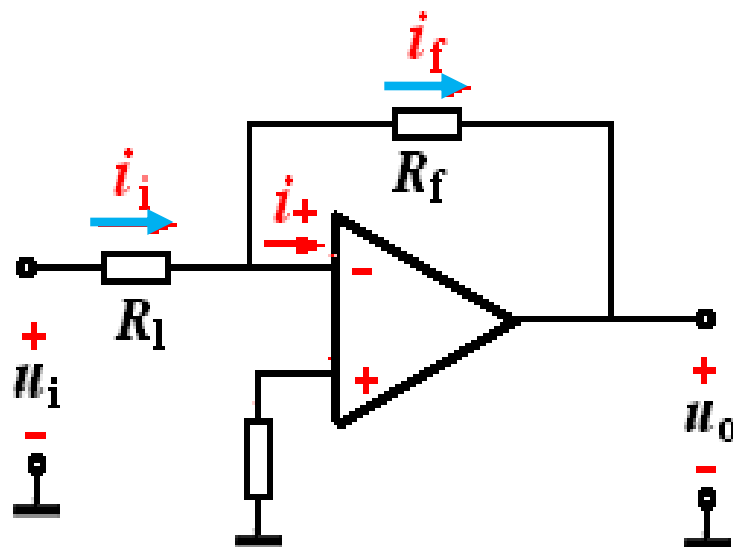
$$F = \frac{i_f}{u_o} = \frac{-u_o / R_f}{u_o} = -\frac{1}{R_f}$$

### 3) 闭环放大倍数表达式

$$A_f = \frac{u_o}{i_i} \approx \frac{1}{F} = \frac{u_o}{i_f}$$

### 4) 闭环电压放大倍数表达式

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_o}{i_i R_1} = \frac{A_f}{R_1} = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{F} = -\frac{R_f}{R_1}$$



解：1) 判断反馈组态  
电压并联负反馈

## 例7-3 在深度负反馈条件下计算电压放大倍数。

### 2) 反馈系数表达式

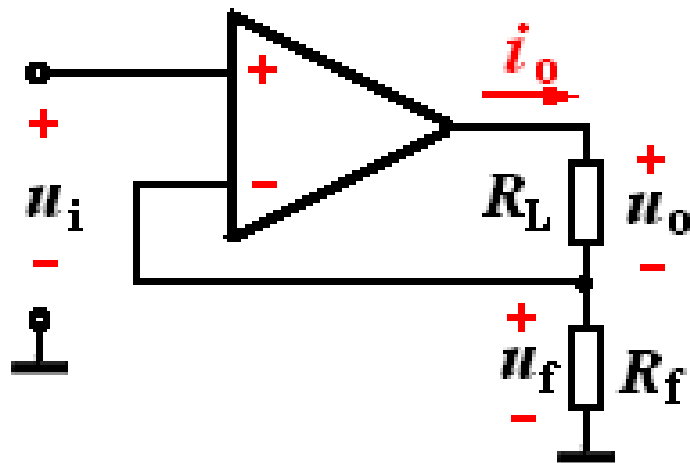
$$F = \frac{u_f}{i_o} = R_f$$

### 3) 闭环放大倍数表达式

$$A_f = \frac{i_o}{u_i} \approx \frac{1}{F} = \frac{i_o}{u_f}$$

### 4) 闭环电压放大倍数表达式

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{i_o R_L}{u_i} = A_f \cdot R_L = \frac{1}{F} \cdot R_L = \frac{R_L}{R_f}$$



解：1) 判断反馈组态

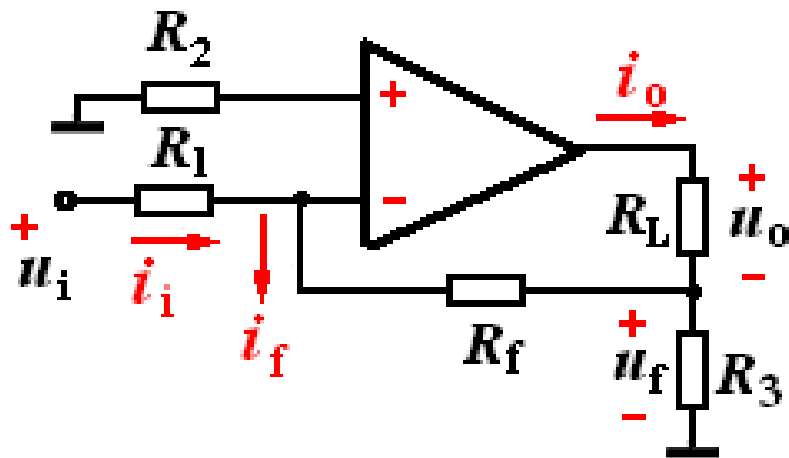
电流串联负反馈

## 例7-4 在深度负反馈条件下计算电压放大倍数。

### 2) 反馈系数表达式

$$F = \frac{i_f}{i_o} = \frac{-R_3 // R_f}{R_f} = -\frac{R_3}{R_3 + R_f}$$

(考虑:  $u_+ \approx u_- = 0$  虚地)



解: 1) 判断反馈组态

电流并联负反馈

### 3) 闭环电压放大倍数表达式

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{R_L \cdot i_o}{R_1 \cdot i_i} = \frac{R_L}{R_1} \cdot A_f = \frac{R_L}{R_1} \cdot \frac{1}{F} = \frac{-(R_3 + R_f)}{R_1 R_3} R_L$$

## 例8-1 在深度负反馈条件下计算电压放大倍数。

解：

1) 判断反馈组态

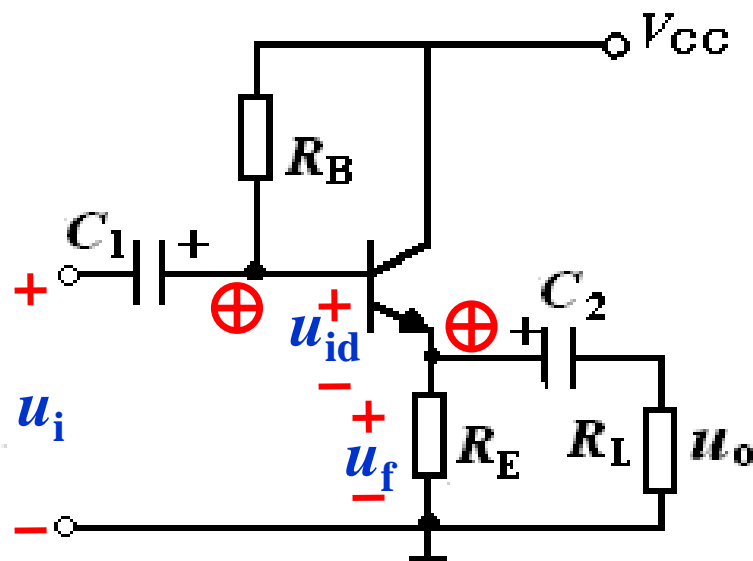
电压串联负反馈

2) 深度串联负反馈特征

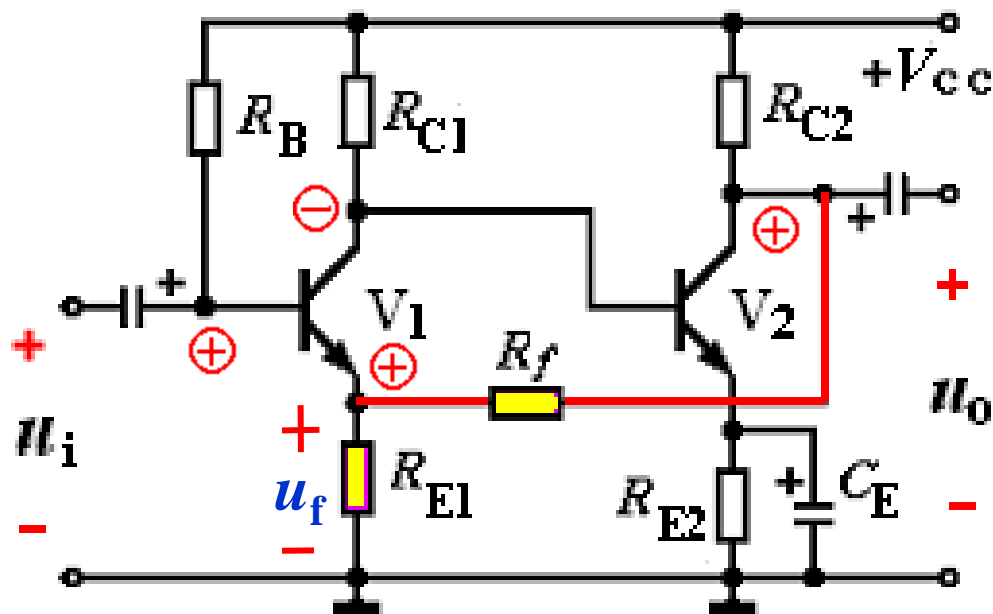
$$u_i \approx u_f \quad u_{id} \approx 0$$

3) 闭环电压放大倍数

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} \approx \frac{u_o}{u_f} \approx 1$$



## 例8-2 在深度负反馈条件下计算电压放大倍数。



解： 1) 判断反馈组态 电压串联负反馈

2) 深度串联负反馈特征  $u_i \approx u_f$

3) 闭环电压放大倍数

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} \approx \frac{u_o}{u_f} = 1 + \frac{R_f}{R_{E1}}$$

## 例8-3 在深度负反馈条件下计算电压放大倍数。

解： 1) 判断反馈组态

电流串联负反馈

2) 深度串联负反馈特征

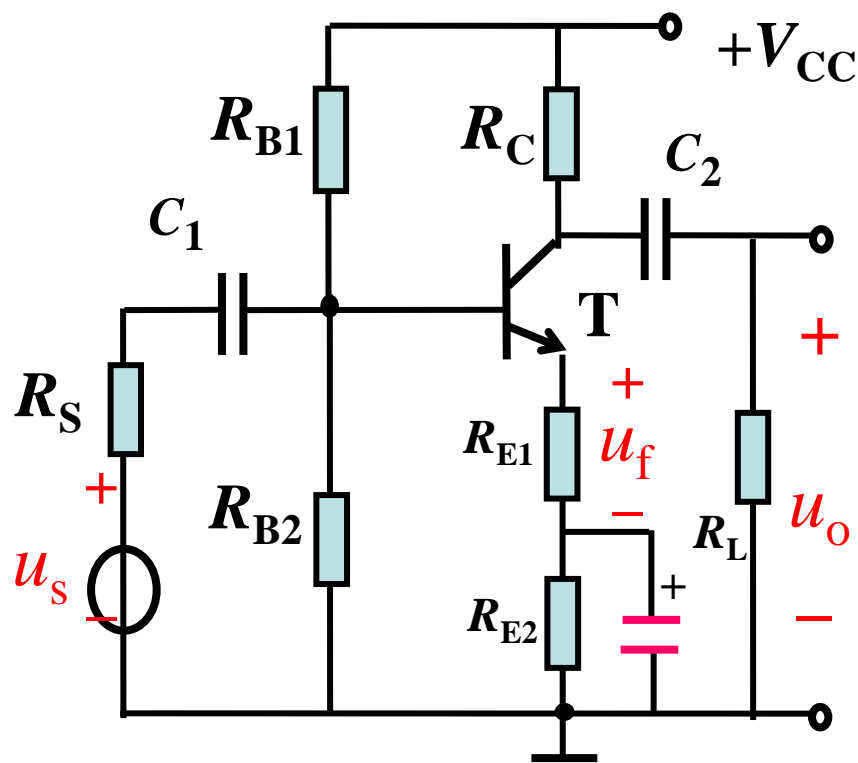
$$u_{id} = u_{be} \approx 0 \quad \text{虚短}$$

$$u_i \approx u_f = i_o R_{E1}$$

$$u_o = -i_o R'_L$$

3) 闭环电压放大倍数

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R'_L}{R_{E1}}$$



## 5.4 负反馈对放大电路性能的影响

5.4.1 提高闭环放大倍数的稳定性

5.4.2 改变放大电路的输入和输出电阻

5.4.3 减少失真和扩展通频带

5.4.4 减少非线性失真

5.4.5 减少噪声、干扰和温漂的影响

5.4.6 放大电路引入负反馈的一般原则



## 5.4.1 提高闭环放大倍数的稳定性

由:  $A_f = \frac{A}{1+AF}$  求微分得:  $dA_f = \frac{dA}{(1+AF)^2}$

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

$A_f$  的相对变化量

$A$  的相对变化量

负反馈,  $1+AF > 1 \therefore \frac{dA_f}{A_f} < \frac{dA}{A}$

- 结论: 负反馈能够提高放大倍数的稳定性。

**例 9** 已知 $A = 10^3$ ，负反馈使放大倍数稳定性提高100 倍，

1) 求  $F$ 、 $A_f$ ；

2) 当 $A$  变化  $\pm 10\%$  时的  $A'_f$ ，以及  $dA_f/A_f$ 。

**解：** 1)  $1 + AF = 100$ ， 则  $F = (100 - 1) / A = 0.099$

$$2) \quad A_f = \frac{A}{1 + AF} = 10^3 / 100 = 10$$

$$3) \quad \frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + AF} \frac{dA}{A} = \frac{1}{100} (\pm 0.1) \approx \pm 0.1\%$$

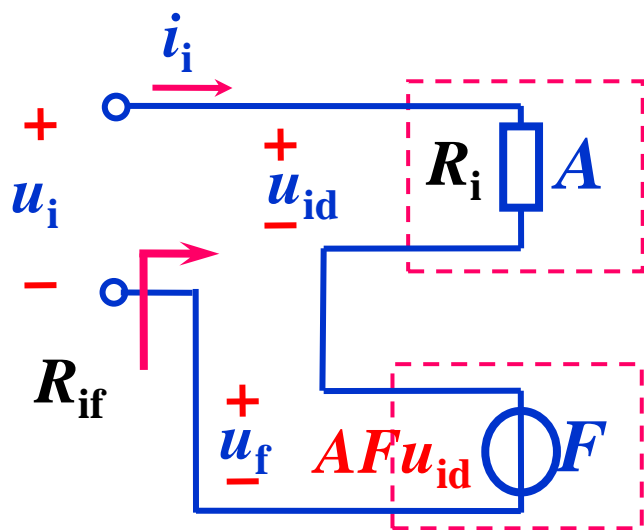
$$\text{此时的 } A'_f = A_f \left(1 + \frac{dA_f}{A_f}\right) = 10(1 \pm 0.1\%)$$

- 可见，负反馈以牺牲放大倍数为代价，换取了放大倍数稳定性的提高。

## 5.4.2 负反馈改善输入电阻和输出电阻

### 1.对输入电阻的影响

#### 《1》 串联负反馈使输入电阻增大



$$R_{if} = \frac{u_i}{i_i} = \frac{u_{id} + u_f}{i_i} = \frac{u_{id} + A F u_{id}}{i_i}$$

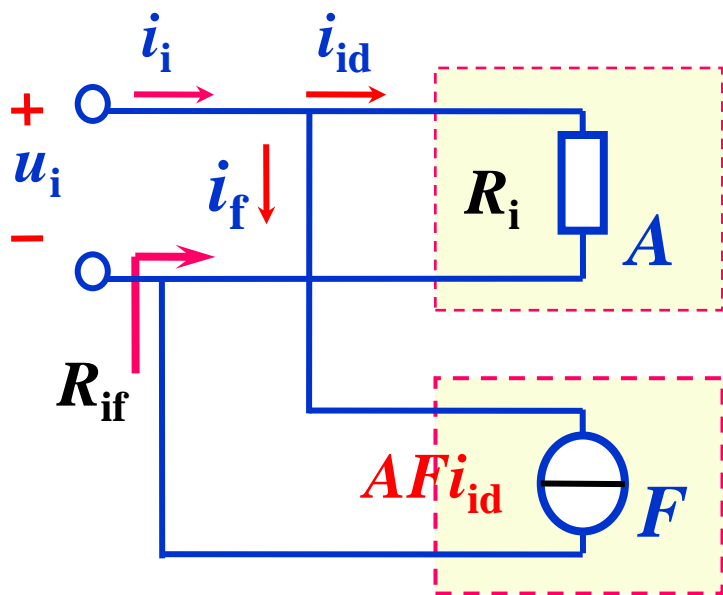
$$R_{if} = (1 + A F) R_i$$

- 深度串联负反馈时:  $R_{if} \rightarrow \infty$

## 5.4.2 负反馈改善输入电阻和输出电阻

### 1. 对输入电阻的影响

#### 《2》 并联负反馈使输入电阻减小



$$R_{if} = \frac{u_i}{i_i} = \frac{u_{id}}{i_{id} + i_f} = \frac{u_{id}}{i_{id} + AFi_{id}}$$

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

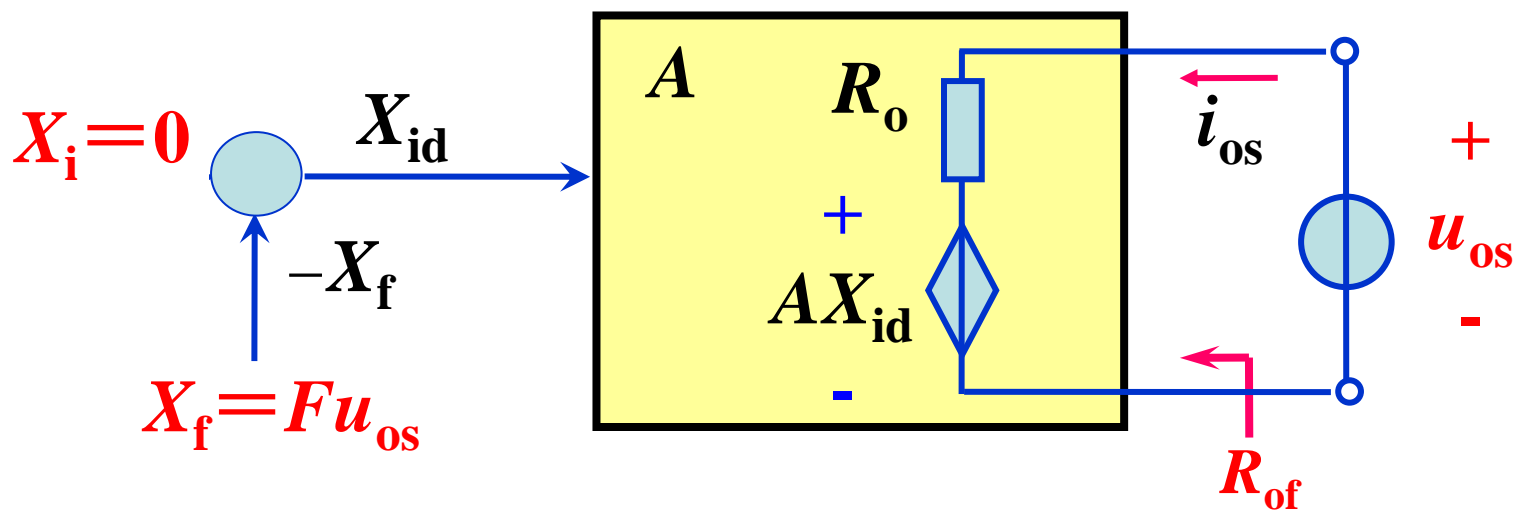
- 深度并联负反馈:  $R_{if} \rightarrow 0$

## 2.对输出电阻的影响

《1》 电压负反馈  $F$  与  $A$  并联，使输出电阻减小。

忽略反馈环节的分流作用，则：

$$R_{of} = \frac{u_{os}}{i_{os}} = \frac{u_{os}}{\frac{u_{os} - AX_{id}}{R_o}} = \frac{u_{os}}{\frac{u_{os} - (-AFu_{os})}{R_o}} = \frac{R_o}{1 + AF}$$

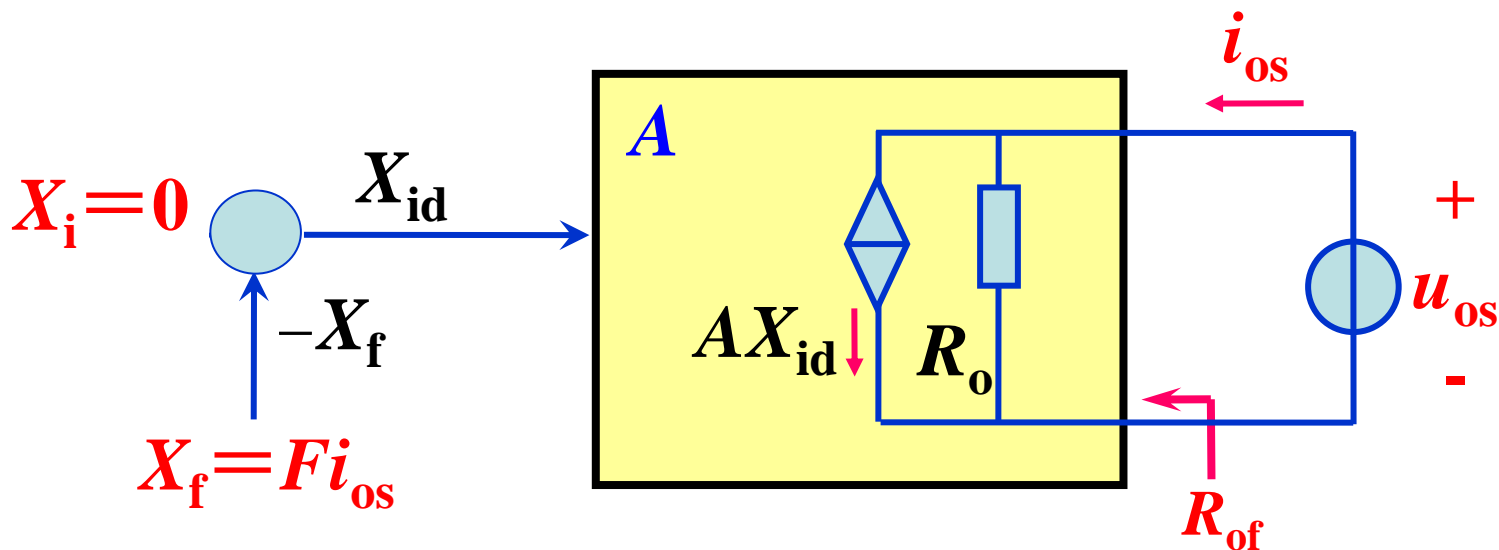


- 深度电压负反馈时：  $R_{of} \rightarrow 0$

## 2.对输出电阻的影响

《2》 电流负反馈  $F$  与  $A$  串联，使输出电阻增大  
忽略反馈环节的分流作用，则：

$$i_{os} = (-AFi_{os}) + \frac{u_{os}}{R_o} \quad \text{则 } R_{of} = \frac{u_{os}}{i_{os}} = (1 + AF)R_o$$



- 深度电流负反馈时：  $R_{of} \rightarrow \infty$

### 5.4.3 负反馈展宽通频带

➤ 无反馈时:

$$f_{BW} = f_H - f_L \approx f_H$$

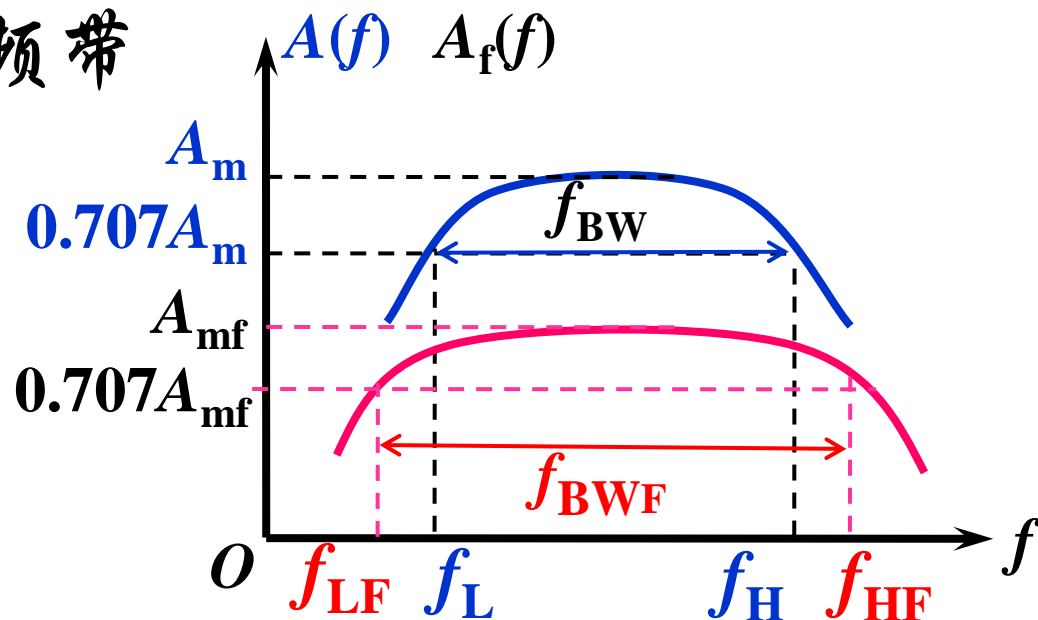
➤ 引入反馈后:

$$\text{由: } A_f = \frac{A}{1 + AF}$$

$$\text{得: } A_{Hf} = \frac{A_H}{1 + A_H F}, \quad A_{mf} = \frac{A_m}{1 + A_m F}, \quad A_{Lf} = \frac{A_L}{1 + A_L F}$$

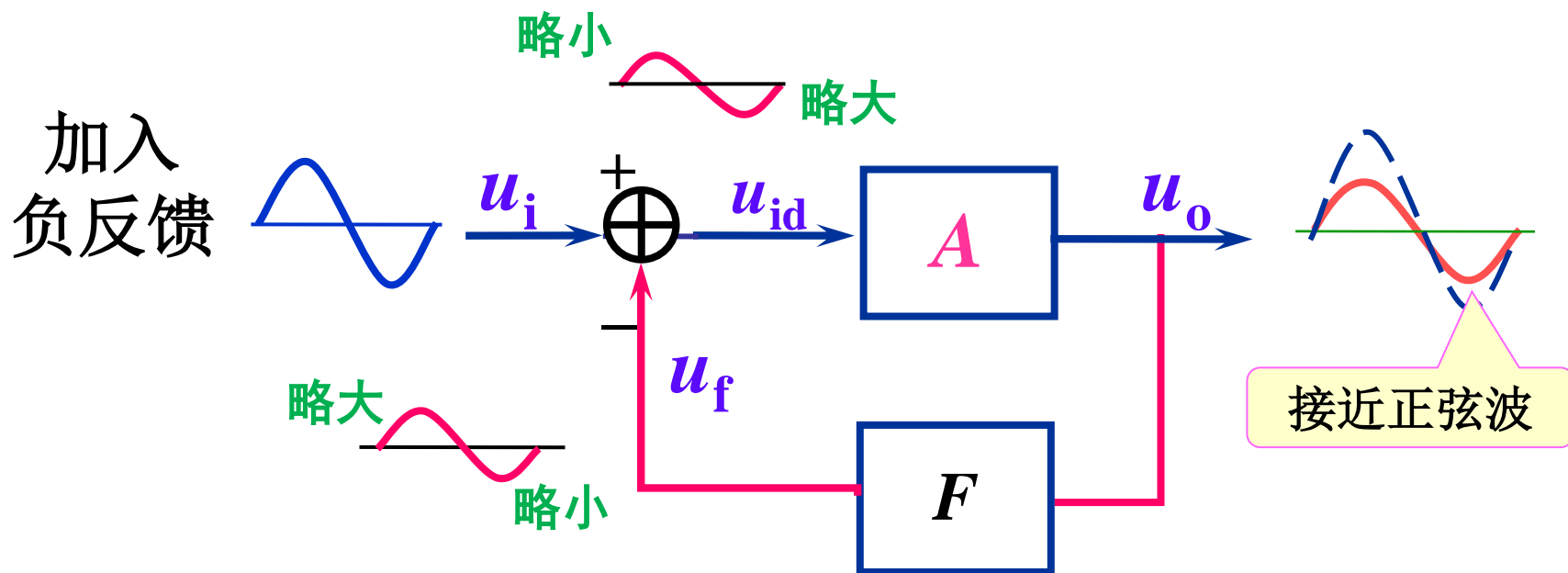
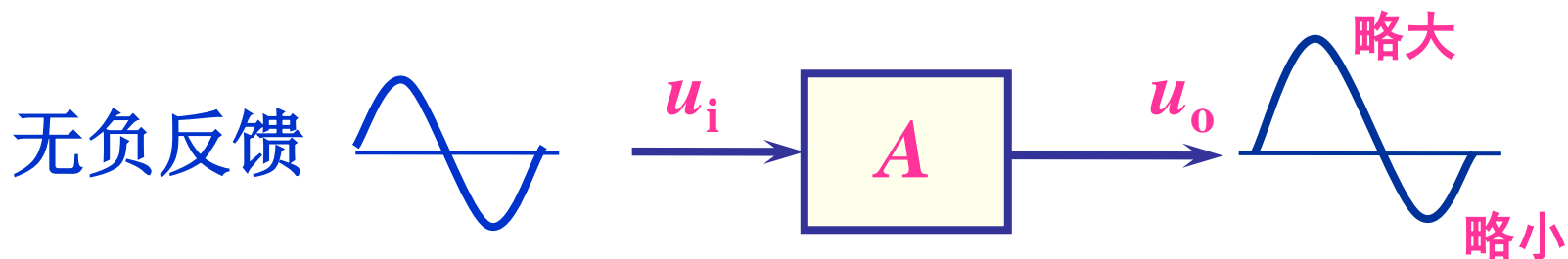
可证明:  $f_{HF} = (1 + AF)f_H$  及  $f_{LF} = f_L / (1 + AF)$

● 闭环负反馈带宽:  $f_{BWF} \approx f_{HF} = (1 + AF)f_{BW}$



### 5.4.4 减少非线性失真

### 5.4.5 减少噪声、干扰和温漂的影响





## 5.4.6 放大电路引入负反馈的一般原则

### 1. 欲稳定某个量，则引该量的负反馈

稳定直流，引直流反馈

稳定输出电压，引电压反馈

稳定交流，引交流反馈

稳定输出电流，引电流反馈

### 2. 根据对输入、输出电阻的要求选择反馈类型

欲提高输入电阻，采用串联反馈

欲降低输入电阻，采用并联反馈

要求高内阻输出，采用电流反馈；

要求低内阻输出，采用电压反馈。

### 3. 根据信号源及负载确定反馈类型

信号源为恒压源，采用串联反馈；

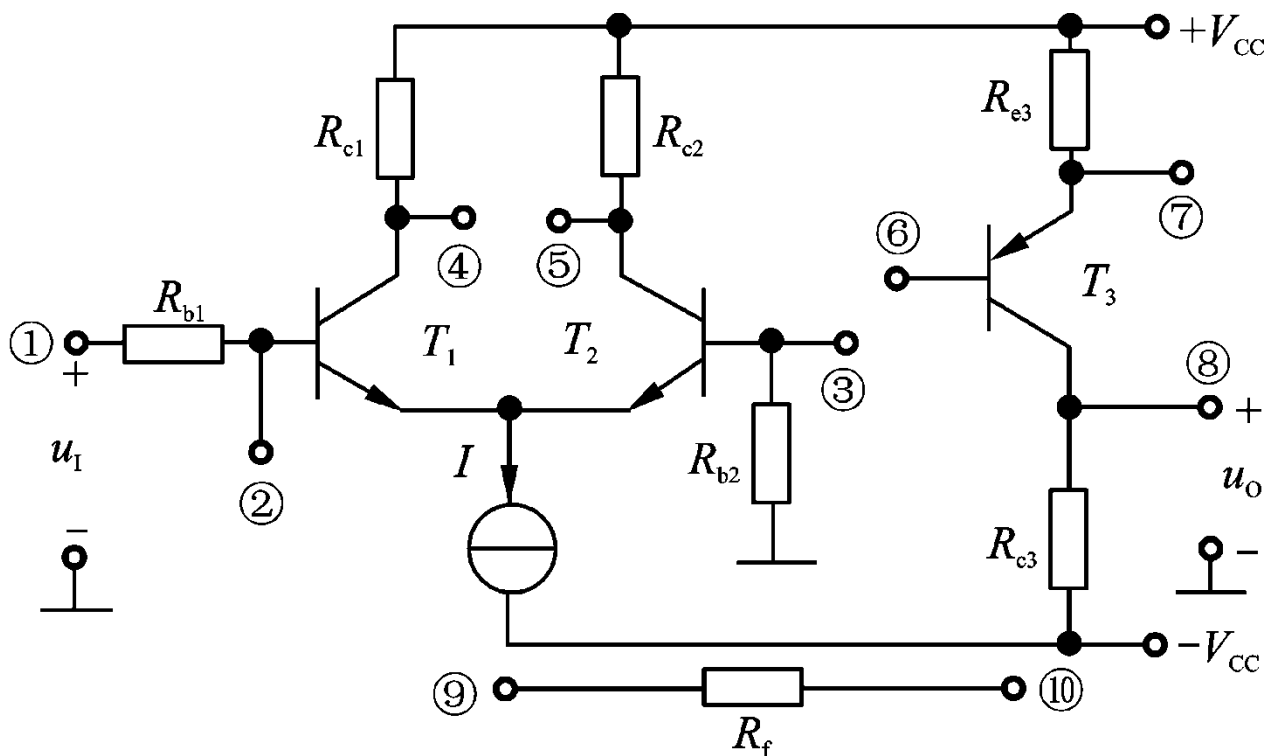
信号源为恒流源，采用并联反馈；

要求负载能力强，采用电压反馈；

要求恒流输出时，采用电流反馈。

**例10** 为达到下列目的，应分别引入哪种组态的负反馈。

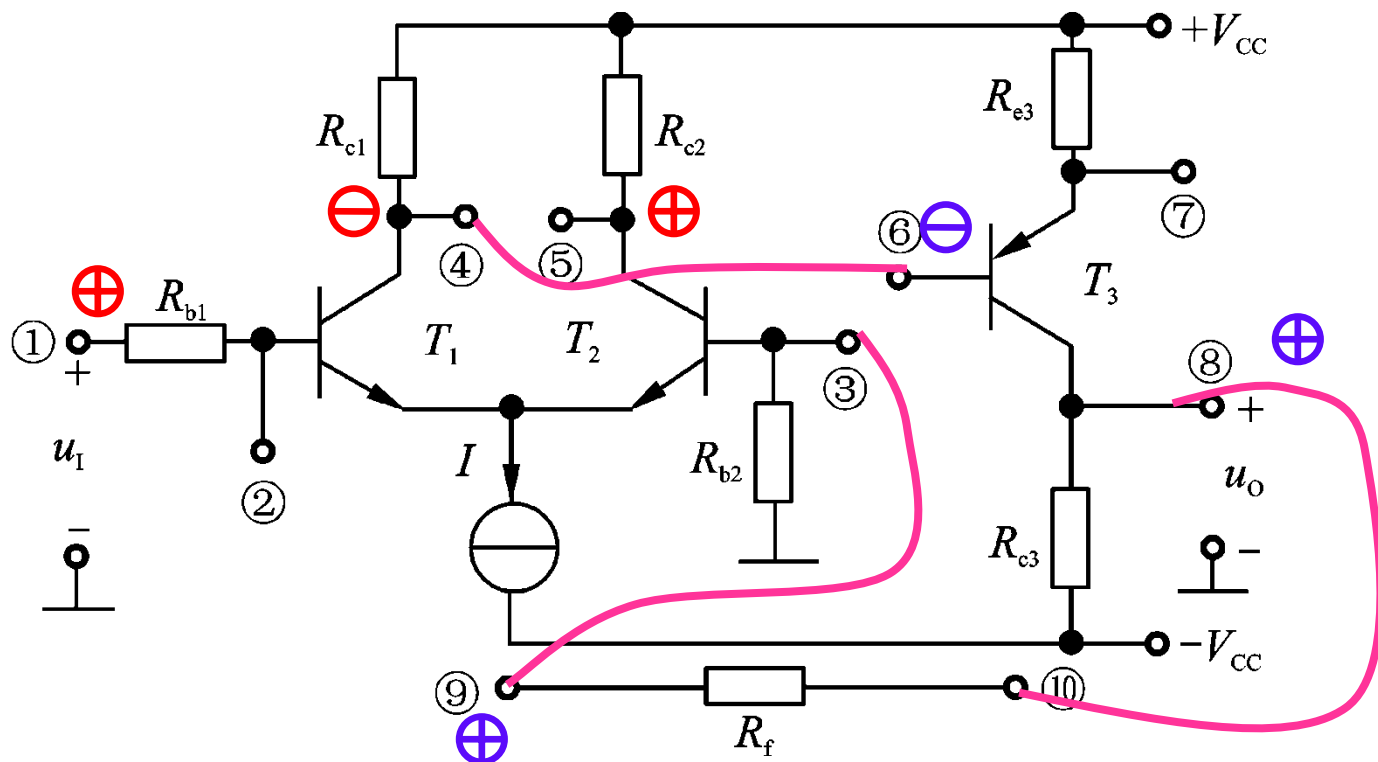
- 1) 减少放大电路从信号源索取的电流并增强带负载能力；
- 2) 将输入电流转换成与之成稳定线性关系的输出电流；
- 3) 将输入电流转换成稳定的输出电压。



## 例10

**1) 减少放大电路从信号源索取的电流并增强带负载能力:**

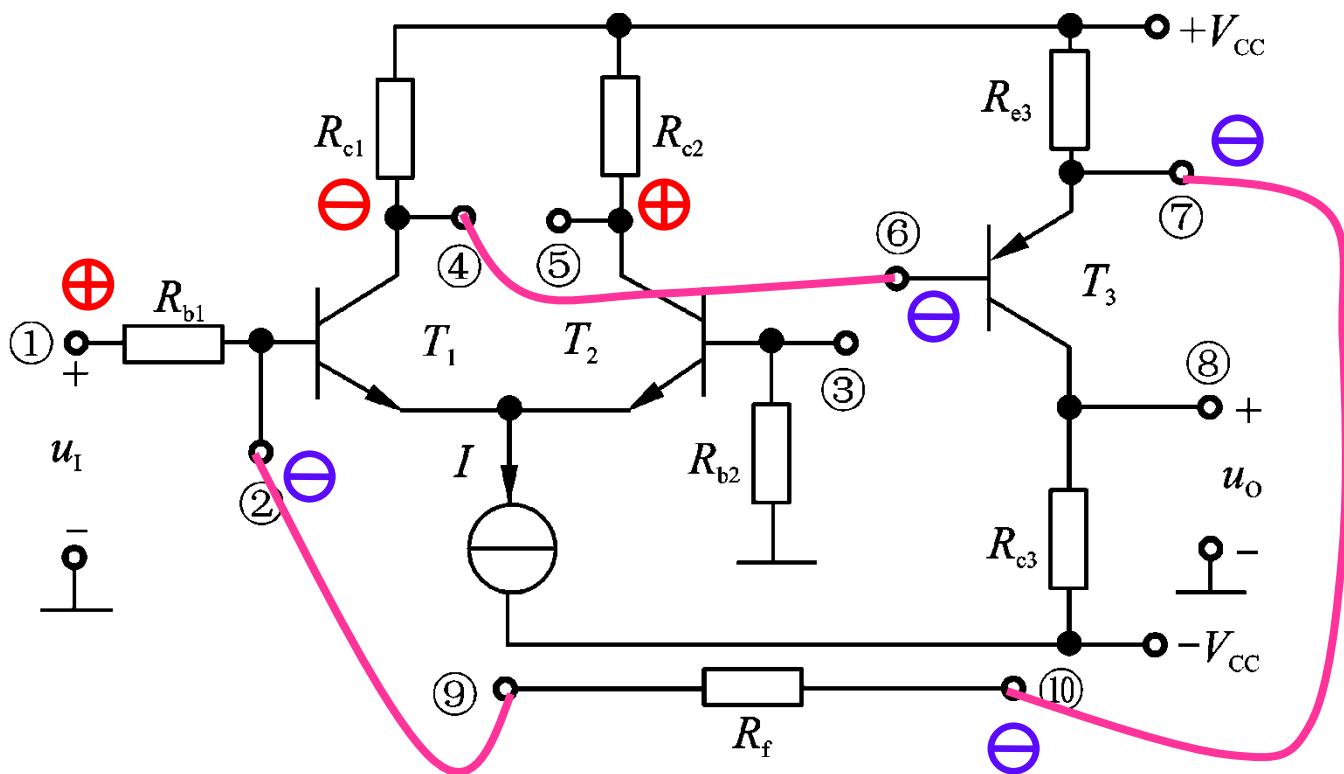
**解：串联—电压负反馈**



## 例10

2) 将输入电流转换成与之成稳定线性关系的输出电流;

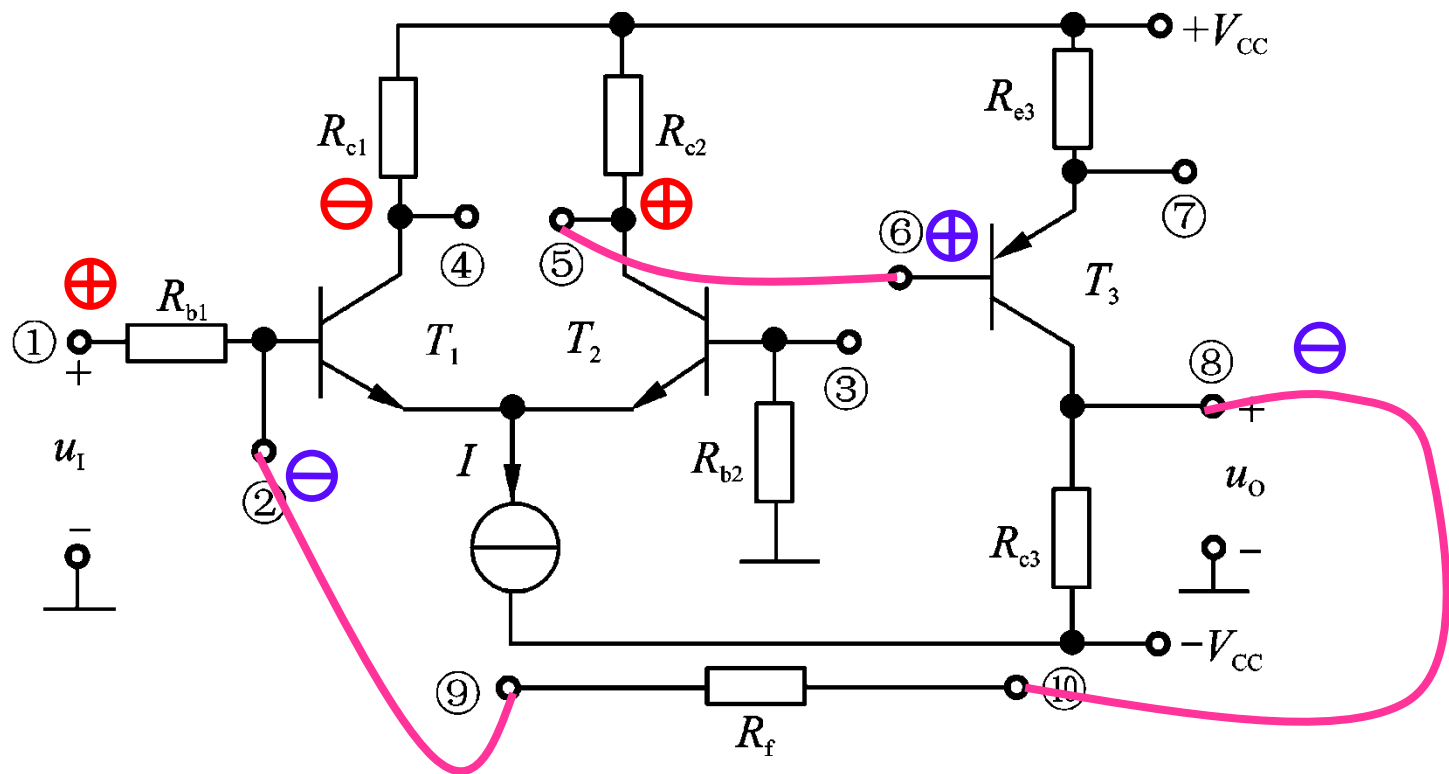
解: 并联—电流负反馈



## 例10

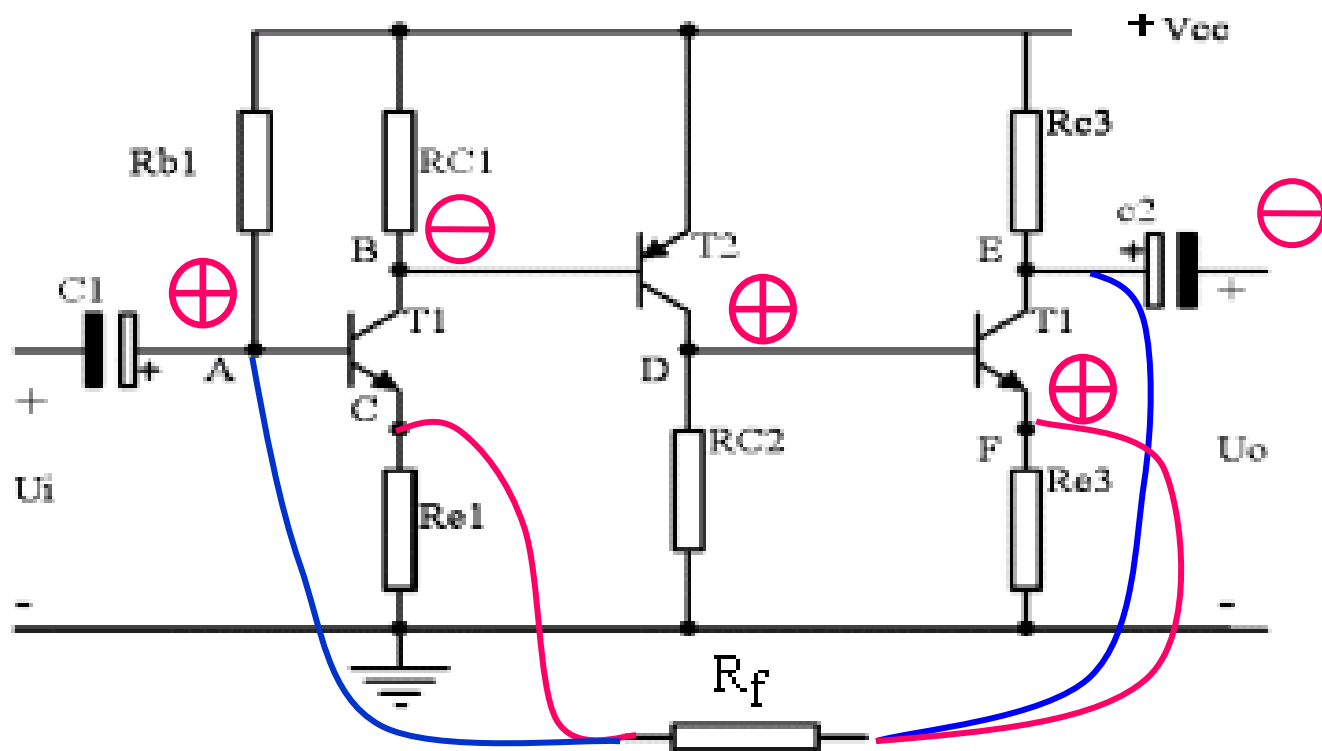
3) 将输入电流转换成稳定的输出电压。

解：并联—电压负反馈



**例11** 图1电路，要求达到以下效果，应该引入什么反馈？

- 1) 希望提高从b1端看进去的输入电阻，接 $R_f$ 从\_\_\_到\_\_\_；
- 2) 希望输出端接上负载 $R_L$ 后， $U_o$ （在给定 $U_i$ 情况下的交流电压有效值）基本不变，接 $R_f$ 从\_\_\_到\_\_\_；

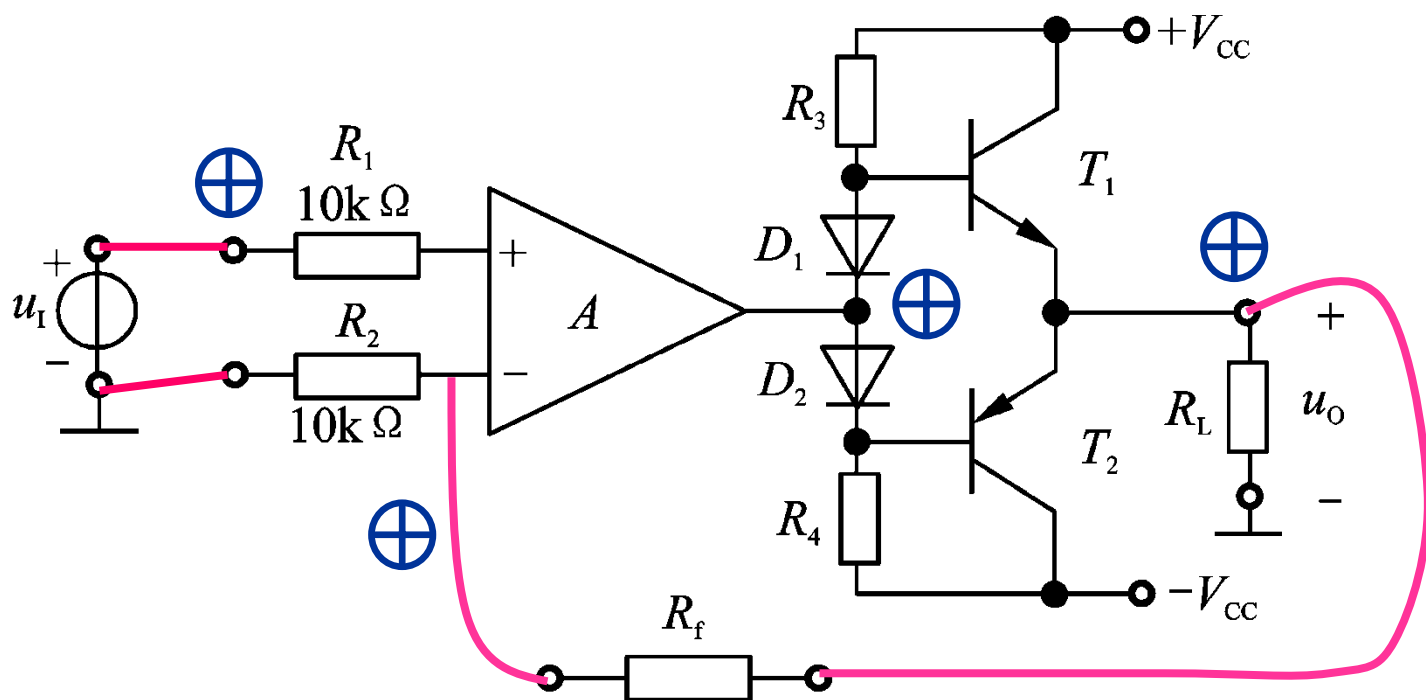


**解：**（串联负反馈）从C到F；（电压负反馈）从A到E；

- 例12** 1) 合理连线, 使电路输入电阻增大, 输出电阻减少;  
2) 若 $A_{uf}=10$ , 则 $R_f$ 应取多少?

**解:** 1) 要求构造串联—电压负反馈;

**OCL**电路不影响极性,  $u_i \approx u_o$ 可看成同相比比例电路



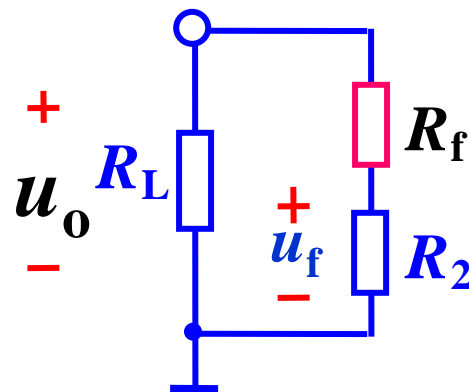
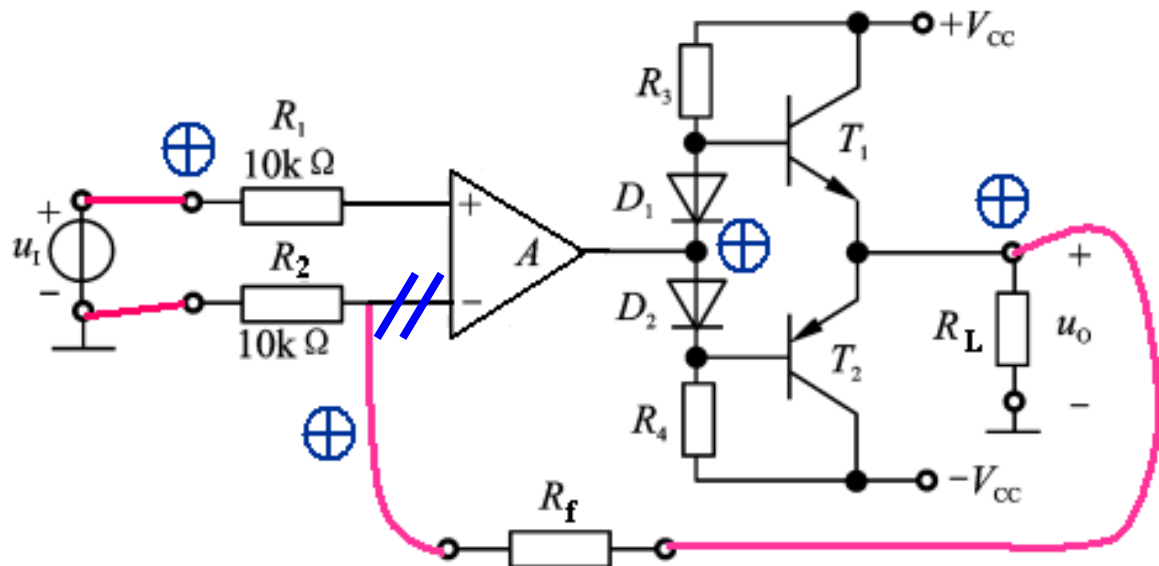
例12 2) 若 $A_{uf}=20$ , 则 $R_f$ 应取多少?

解:

由串联电压负反馈:

$$F = \frac{u_f}{u_o} = \frac{R_2}{R_2 + R_f}$$

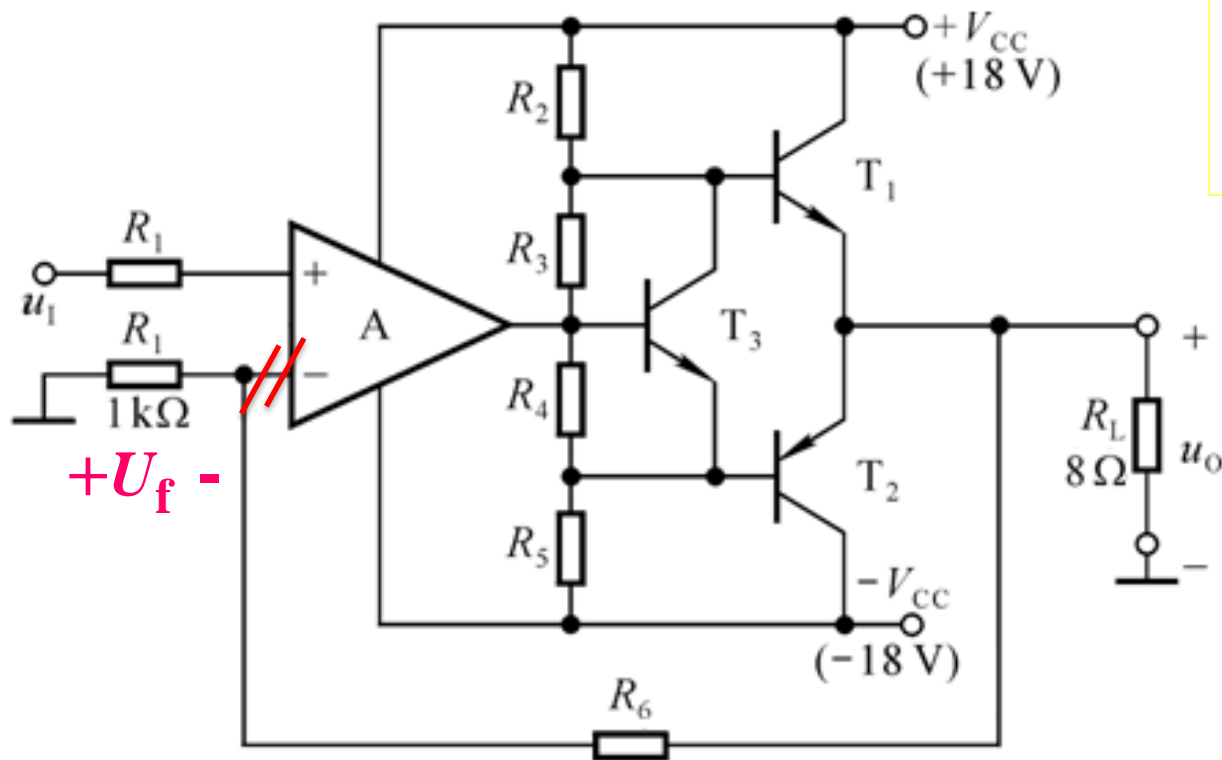
$$A_{uf} \approx \frac{1}{F} = 1 + \frac{R_f}{R_2} = 20$$





**例13** 电路如图所示，直流功耗可忽略不计，已知 $T_1$ 和 $T_2$ 的饱和管压降 $|U_{CES}| = 2V$ 。

- (1)  $R_3$ 、 $R_4$ 和 $T_3$ 的作用是什么？
- (2) 负载上可能获得的最大输出功率 $P_{om}$ 和效率 $\eta$ 各为多少？
- (3) 设输入电压的峰值为1V，电路的输出电压可达到最大不失真峰值，求电阻 $R_6$ 的值应取多少？



$$F = \frac{u_f}{u_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_6}$$

$$A_{uf} = \frac{1}{F} = 1 + \frac{R_6}{R_1}$$

由已知  $A_u = 16$   
求得  $R_6 = 15K\Omega$

## 深度负反馈总结：

深度负反馈以牺牲放大倍数为代价，改善了放大倍数的稳定度、非线性失真、信号获取能力、负载能力、通频带等性能指标，可谓是一损多得。集成运放的差模放大倍数极高，而实际应用时不需要这么大的放大倍数，可以说 $A_{ud}$ 就是用来牺牲的，以换取其他的好处。

**寓意：**鱼和熊掌不可兼得，舍鱼而得熊掌。得到一些即意味着失去另一些，不必急功近利。