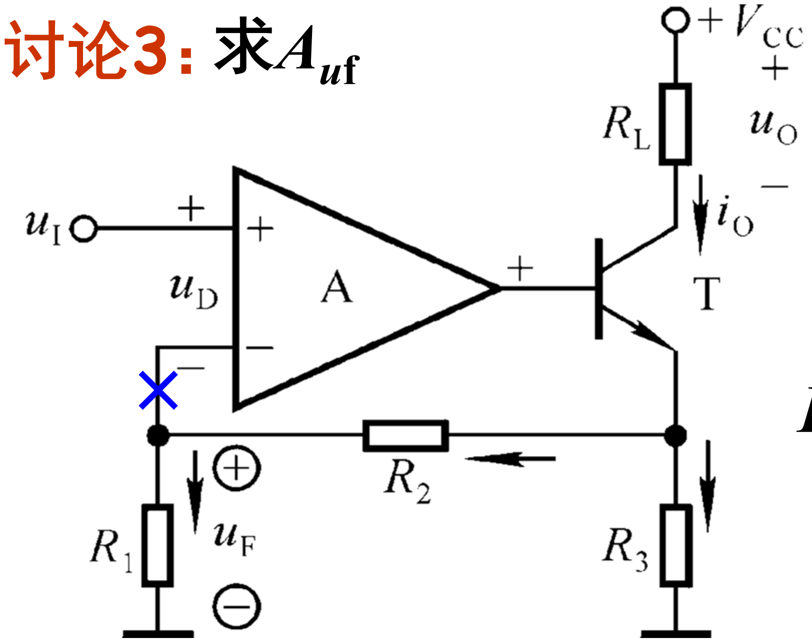
讨论3：求A_{uf}



电流串联负反馈

反馈电压仅仅由输出电流决定

$$\dot{F}_{ui}=\frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o}\approx\frac{\dfrac{R_3}{R_1+R_2+R_3}\dot{I}_o\times R_1}{\dot{I}_o}$$

$$=\frac{R_1R_3}{R_1+R_2+R_3}$$

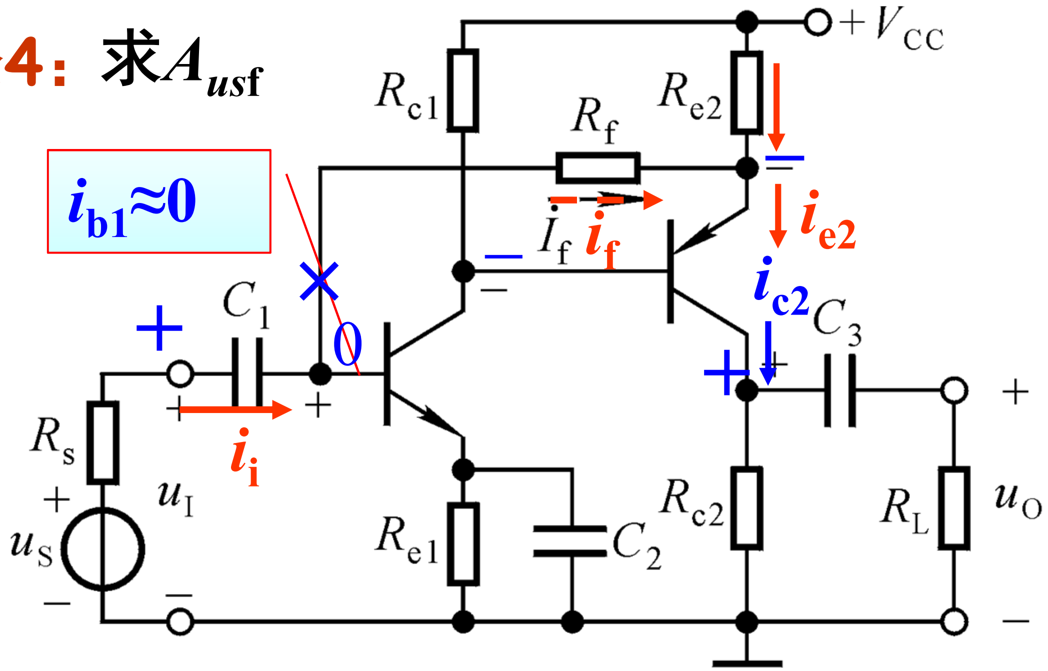
$$\dot{A}_{iuf}=\frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i}\approx\frac{1}{\dot{F}_{ui}}$$

$$\approx\frac{R_1+R_2+R_3}{R_1R_3}$$

$$\dot{A}_{uf}=\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}=\frac{\dot{I}_o\cdot R_L}{\dot{U}_i}$$

$$=\dot{A}_{iuf}\cdot R_L\approx\frac{(R_1+R_2+R_3)R_L}{R_1R_3}$$

讨论4：求A_{usf}



电流并联负反馈

分立元件电路从交流等效电路分析放大倍数，其输出电流是指i_c或i_e(i_d或i_s)

$$\dot{F}_{ii}=\frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_{c2}}\approx\frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_{e2}}=\frac{R_{e2}}{R_f+R_{e2}}$$

$$\dot{A}_{usf}\approx\frac{\dot{I}_{c2}(R_{c2}//R_L)}{\dot{I}_i R_s}\approx\dot{A}_{iif}\cdot\frac{(R_{c2}//R_L)}{R_s}$$

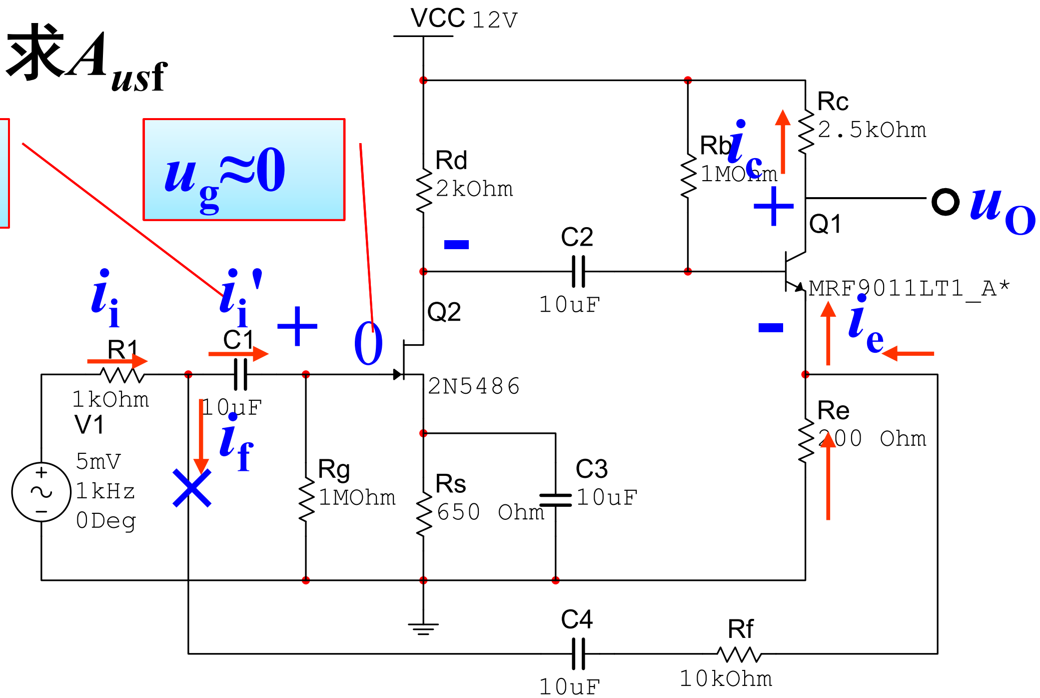
$$\dot{A}_{iif}=\frac{\dot{I}_{c2}}{\dot{I}_i}\approx\frac{1}{\dot{F}_{ii}}\approx 1+\frac{R_f}{R_{e2}}$$

$$\approx(1+\frac{R_f}{R_{e2}})\frac{R_{c2}//R_L}{R_s}$$

深度并联负反馈存在虚断，即i_{b1}近似为零，因此u_{be1}也近似为零

思考题：求A_{usf}

$i_i' \approx 0$　　$u_g \approx 0$



电流并联负反馈

深度并联负反馈存在虚断，即i_i'近似为零，因此u_g也近似为零

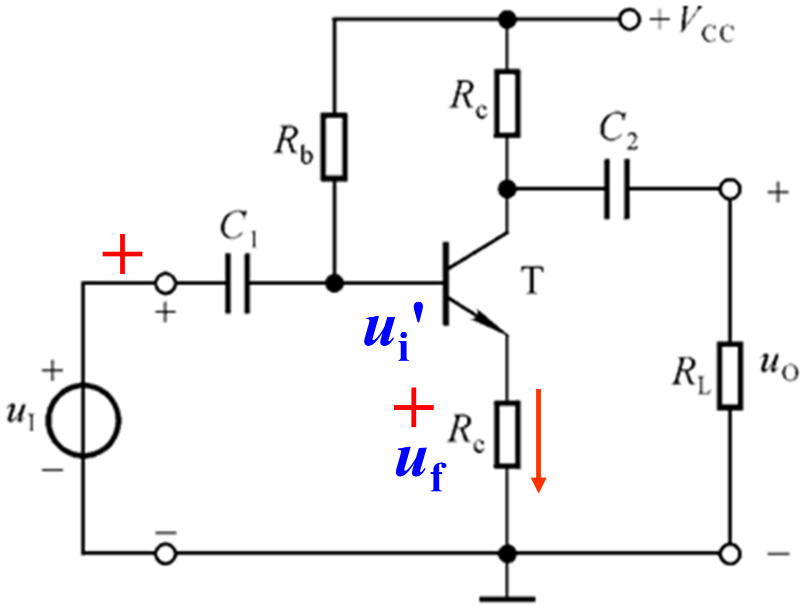
$$\dot{F}_{ii} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_c} \approx \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_e} = \frac{R_e}{R_f + R_e}$$

$$\dot{A}_{usf} \approx \frac{\dot{I}_c R_c}{\dot{I}_i R_1} \approx \dot{A}_{iif} \cdot \frac{R_c}{R_1}$$

$$\dot{A}_{iif} = \frac{\dot{I}_c}{\dot{I}_i} \approx \frac{1}{\dot{F}_{ii}} \approx 1 + \frac{R_f}{R_e}$$

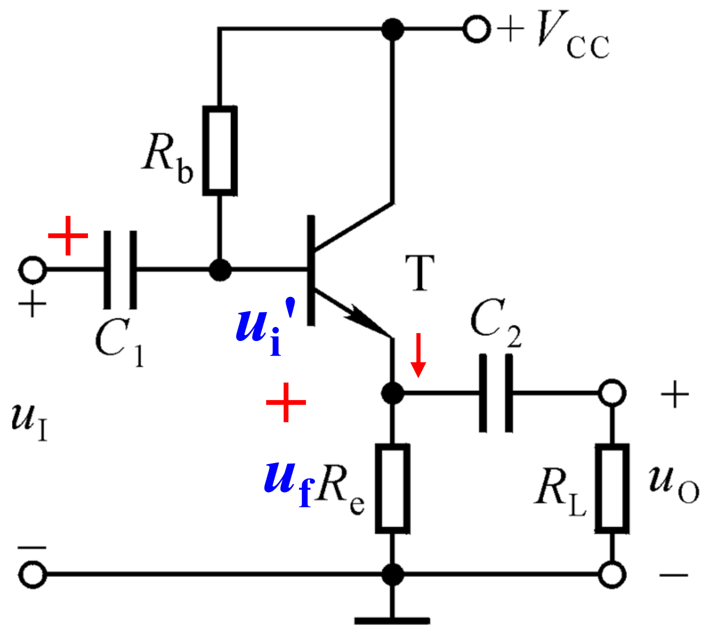
$$\approx (1 + \frac{R_f}{R_e}) \frac{R_c}{R_1}$$

思考题：求A_{uf}



电流串联负反馈

$$\dot{U}_f \approx \dot{U}_i \qquad \dot{A}_{uf} \approx -\frac{R_c // R_L}{R_e}$$



电压串联负反馈

$$\dot{U}_i \approx \dot{U}_f = \dot{U}_o \qquad A_{uf} \approx 1$$

三、集成运放深度负反馈下电压放大倍数的估算（通过虚短虚断求）

当放大电路为理想运放时，深度负反馈下同时存在′虚短′和′虚断′

理想运放特点：

$A_{od}=\infty$

$R_{id}=\infty$

$R_{od}=0$

理想运放引入负反馈后，输出与输入呈线性关系：

$U_o=U_{id}*A_{od}$

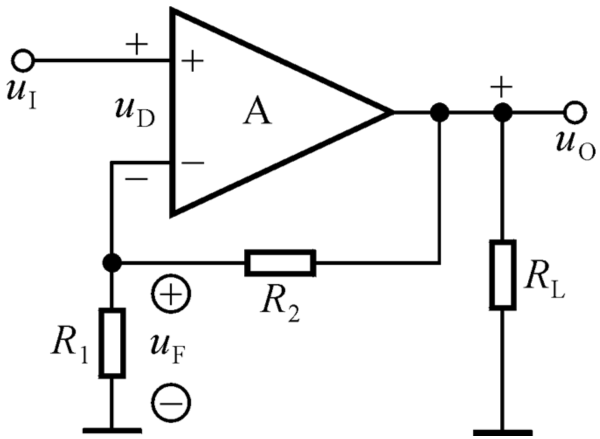
$U_o<U_{om}$，$A_{od}=\infty \rightarrow U_i' \approx 0$

$R_{id}=\infty \rightarrow I_i' \approx 0$

集成运放引入任何组态的深度负反馈时，同时存在′虚短′和′虚断′

三、集成运放深度负反馈下电压放大倍数的估算（通过虚短虚断求）

- 电压串联



虚短 $\dot{U}_i \approx \dot{U}_f$

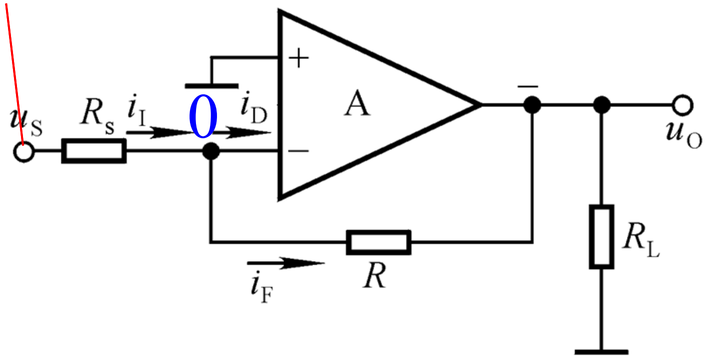
虚断 $\dot{U}_f = \dfrac{R_1}{R_1 + R_2}\dot{U}_o$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

并联负反馈信号源必须为有内阻的电压源或者恒流源

电压负反馈稳定输出电压，输出电压与负载无关

- 电压并联



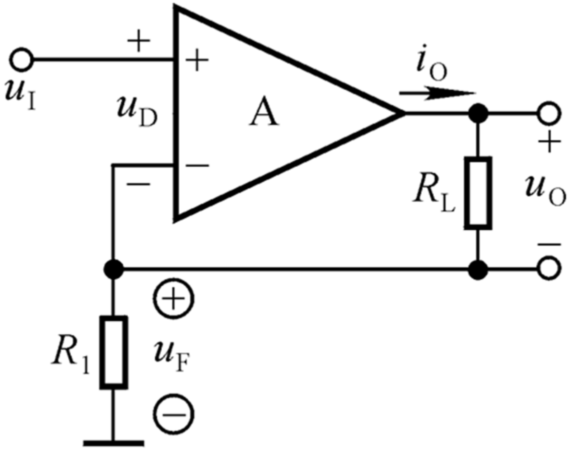
虚短 $\dot{U}_s \approx \dot{U}_i R_s$

$\dot{U}_o = -\dot{I}_f R_f$

虚断 $\dot{I}_i \approx \dot{I}_f$

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

- **电流串联**

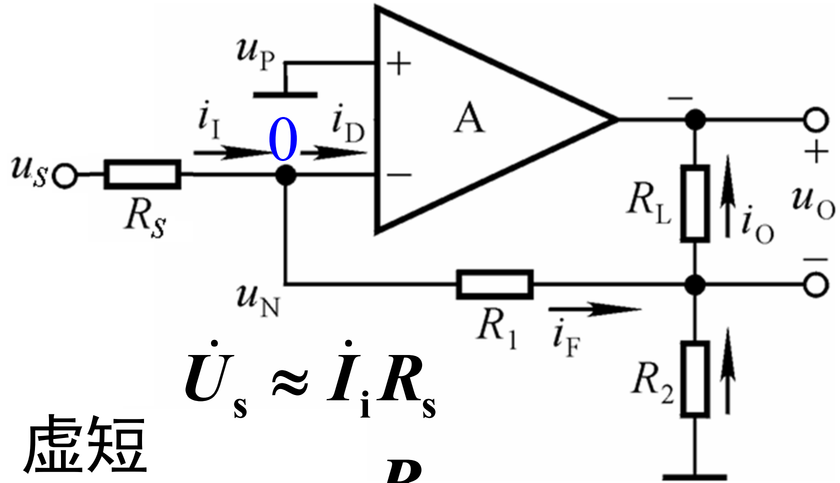


虚短 $\dot{U}_i \approx \dot{U}_f$

虚断 $\dot{U}_f = \dot{I}_o R_1$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{I}_o R_L}{\dot{I}_o R_1} = \frac{R_L}{R_1}$$

- **电流并联**



$\dot{U}_s \approx \dot{I}_i R_s$

虚短

$$\dot{I}_f = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \dot{I}_o$$

虚断 $\dot{I}_i \approx \dot{I}_f$

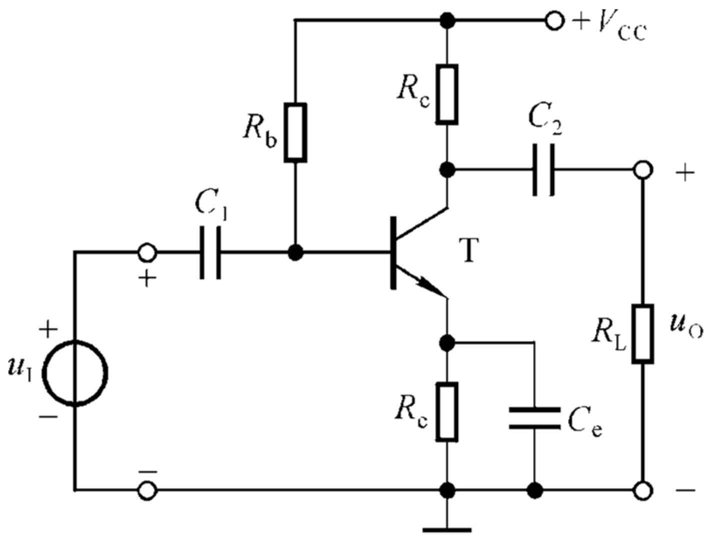
$$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{-\dot{I}_o R_L}{\dot{I}_i R_s} = -(1 + \frac{R_1}{R_2})\frac{R_L}{R_s}$$

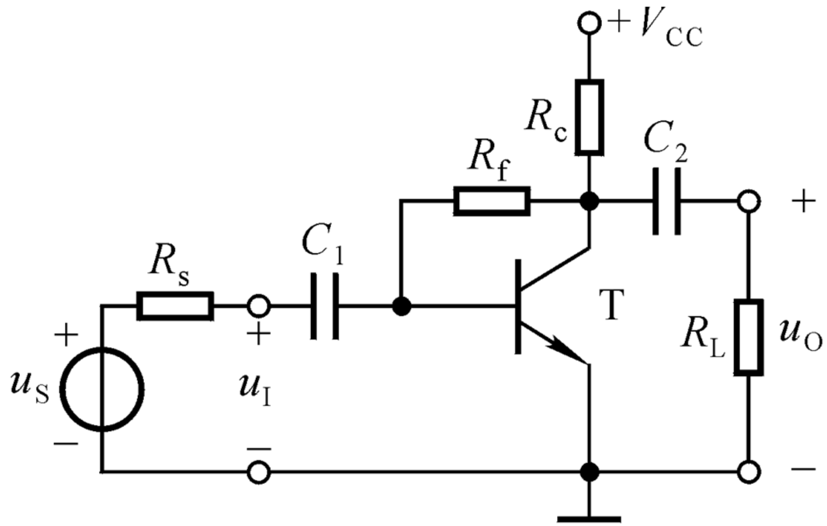
电流负反馈稳定输出电流，
输出电流与负载无关

6.5 负反馈对放大电路性能的影响

- 直流负反馈对静态工作点的影响
- 交流负反馈对动态性能的影响
- 引入负反馈的原则

一、直流负反馈：稳定Q点，抑制温漂





若$T\uparrow \rightarrow I_C\uparrow$、$I_E\uparrow$

$\rightarrow R_e$上的$U_F\uparrow$

$\rightarrow$净输入电压$U_{BE}\downarrow \rightarrow I_C\downarrow$

若$T\uparrow \rightarrow I_C\uparrow \rightarrow U_C\downarrow$

$\rightarrow R_f$上的$I_F\downarrow$

$\rightarrow$净输入电流$I_B\downarrow \rightarrow I_C\downarrow$

二、交流负反馈对动态性能的影响

1. 使放大倍数下降

集成运放开环放大倍数A即A_{od}一般>10^5

多级放大电路开环放大倍数A_u一般>1000

而深度负反馈放大电路$A_f \approx 1/F$， 一般为几到几十倍

2. 提高放大倍数的稳定性

需要证明：在相同条件下，A_f的变化量比A小：$\dfrac{\Delta A_f}{A_f} < \dfrac{\Delta A}{A}$

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

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

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

交流负反馈使放大倍数的稳定性提高了$1+AF$倍

例如： A_1=1000， A_2=990， A变化1%

F=0.1， A_{f1}=9.901， A_{f2}=9.9， A_f变化0.01%

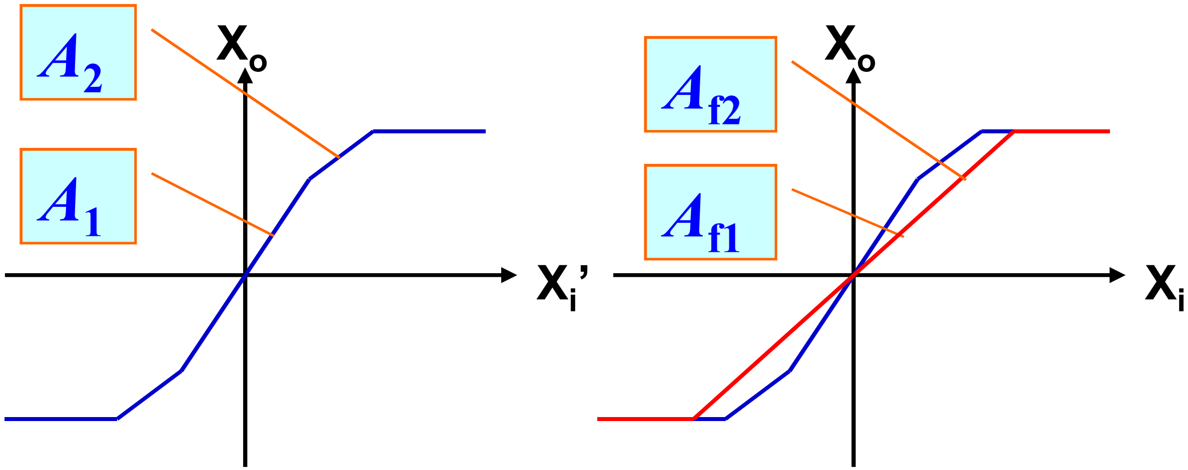
3．展宽频带

$$f_{bwf}=(1+AF)f_{bw}$$

交流负反馈使频带展宽了1+*AF*倍

4．减小非线性失真及抑制内部噪声

由于半导体器件的非线性，当输出信号较大时存在非线性失真。



例如： $F=0.1$, $A_1=1000$, $A_2=990$

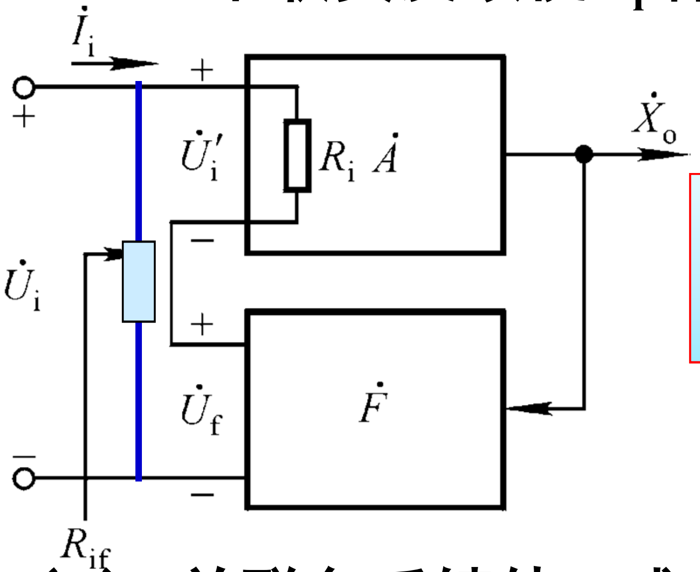
$A_{f1}=9.901$, $A_{f2}=9.9$

交流负反馈使非线性失真减小了1+*AF*倍

5. 改变R_i和R_O

当反馈回路外有并联电阻R_b时，$R_i=R_b//R_{if}$

（1） 串联负反馈使R_i增大



$$R_{if}=\frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}=\frac{\dot{U}_i'+\dot{U}_f}{\dot{I}_i}$$

$$=\frac{\dot{U}_i'+\dot{F}\cdot\dot{X}_o}{\dot{I}_i}=\frac{\dot{U}_i'+\dot{A}\cdot\dot{F}\cdot\dot{U}_i'}{\dot{I}_i}$$

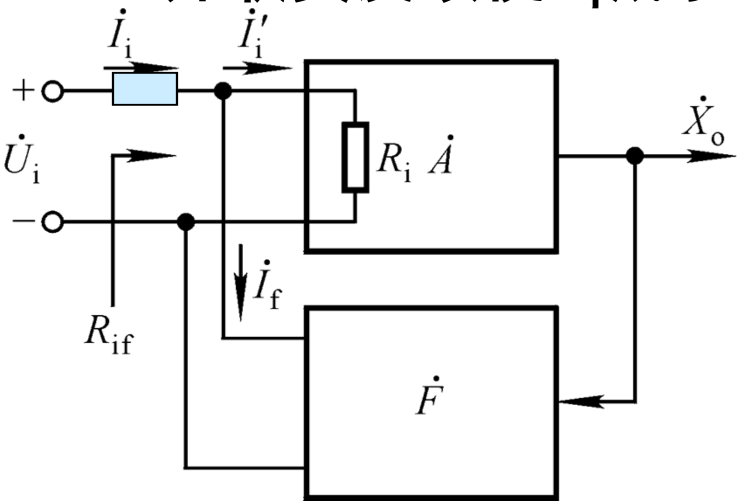
$$=(1+\dot{A}\dot{F})\frac{\dot{U}_i'}{\dot{I}_i}=(1+\dot{A}\dot{F})R_i$$

理想情况下$R_{if}\to\infty$

（2） 并联负反馈使R_i减小

当反馈回路外有串联电阻R_s时，

$R_i=R_s+R_{if}$

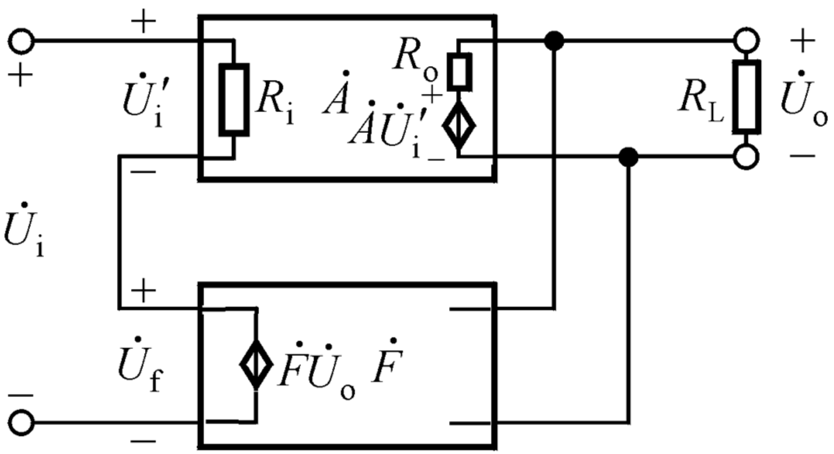


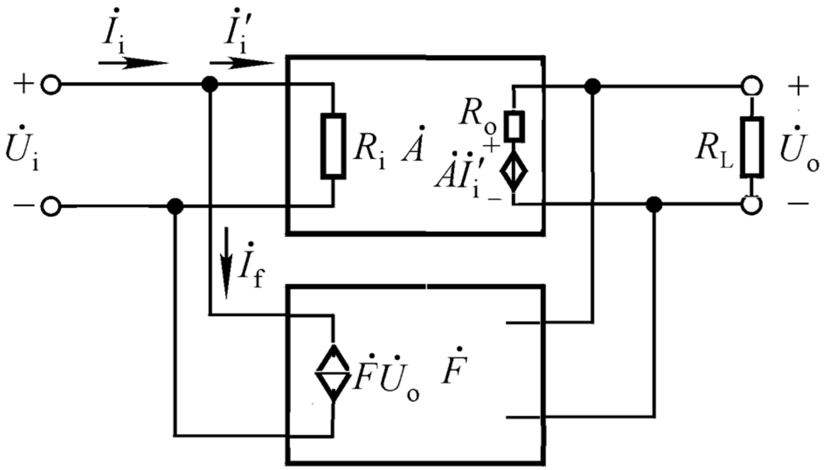
$$R_{if}=\frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}=\frac{\dot{U}_i}{\dot{I}'_i+\dot{I}_f}$$

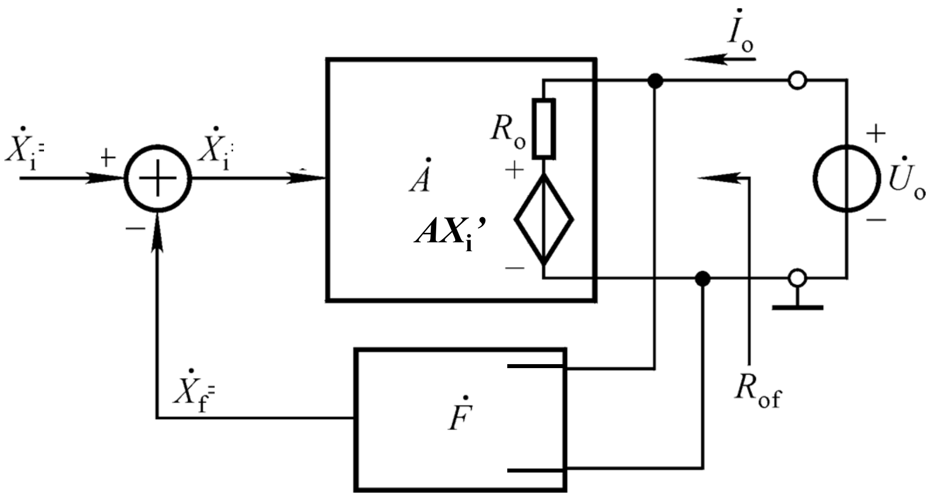
$$=\frac{\dot{U}_i}{\dot{I}'_i+\dot{A}\dot{F}\dot{I}'_i}=\frac{1}{1+\dot{A}\dot{F}}R_i$$

理想情况下$R_{if}\to 0$

（3） 电压负反馈使R_o减小







$$R_{of}=\frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o}=\frac{\dot{U}_o}{\dfrac{\dot{U}_o-(-\dot{A}\dot{F}\dot{U}_o)}{R_o}}$$

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

理想情况→0

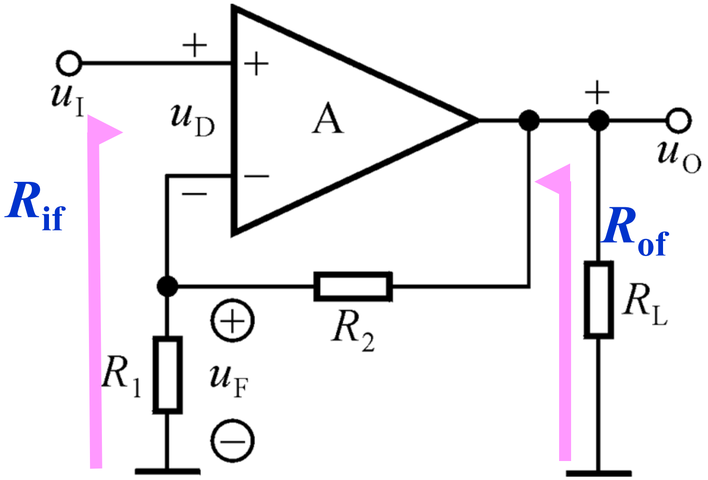
理想情况→∞

（4） 电流负反馈使R_o增大

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

当反馈回路外有并联电阻R_c时，$R_o=R_c//R_{of}$

讨论1 求 R_{if}，R_{of}

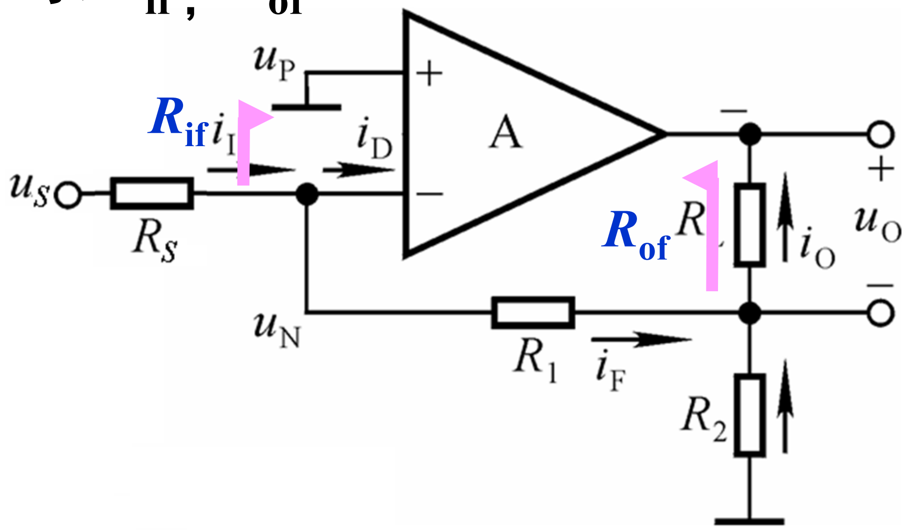


电压串联负反馈

串联负反馈　　**电压负反馈**

$R_{if} \to \infty$　　$R_{of} \approx 0$

讨论2　求 R_{if}，R_{of}



电流并联负反馈

并联负反馈

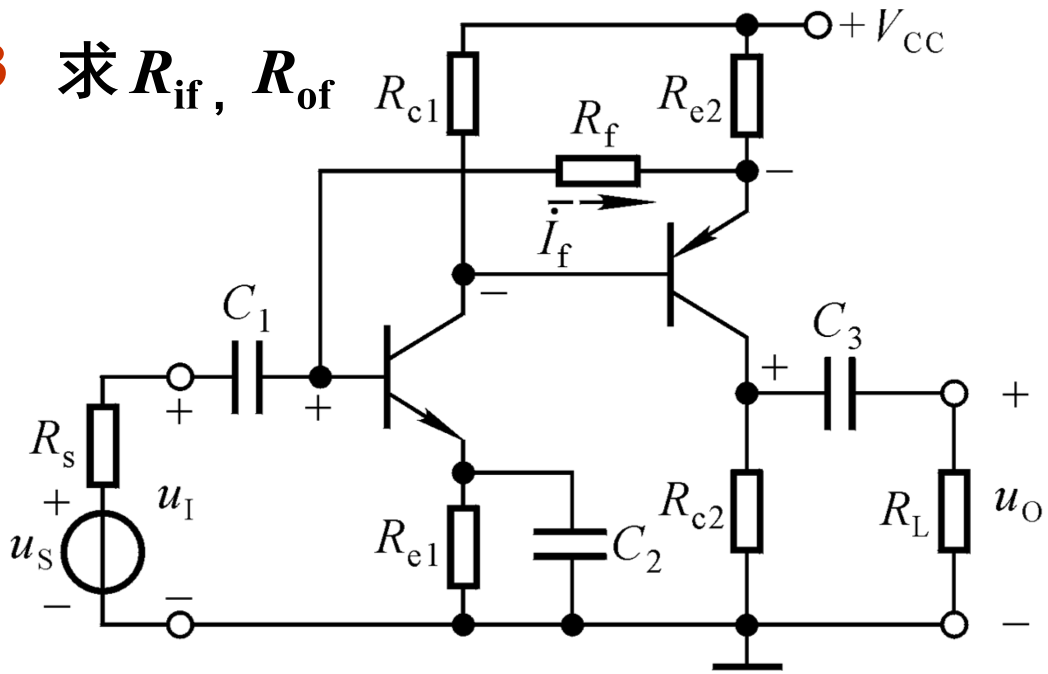
$R_{if} \approx 0$

$R_{is} = R_s + R_{if} \approx R_s$

电流负反馈

$R_{of} \to \infty$

讨论3　求 R_{if}，R_{of}



电流并联负反馈

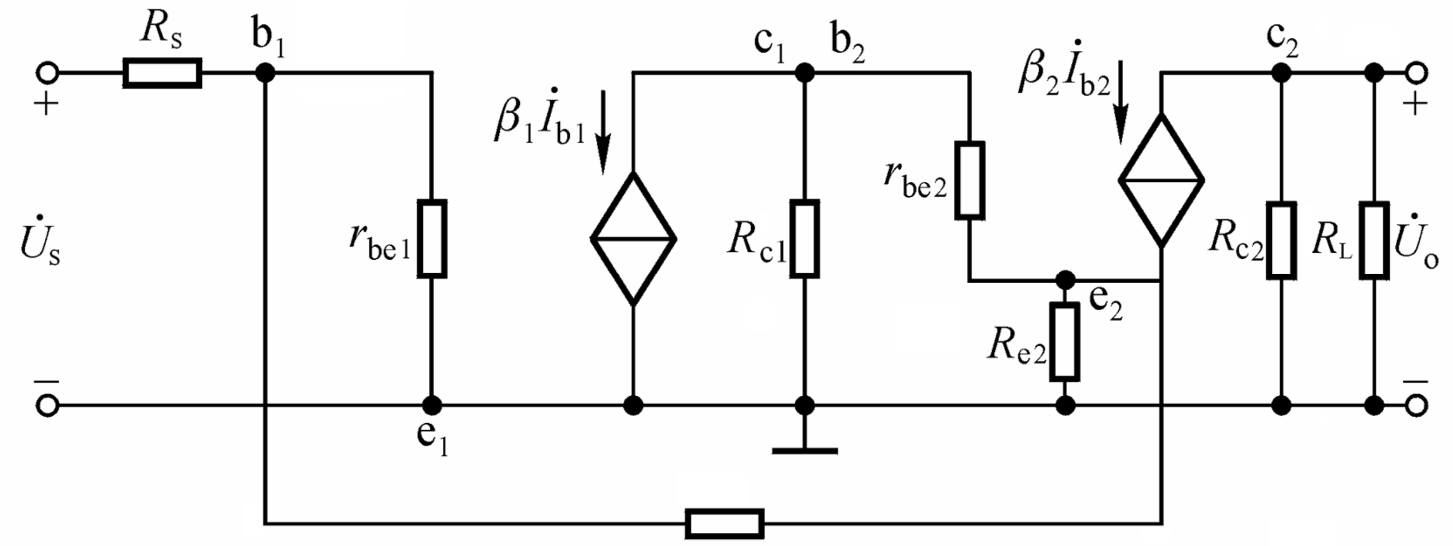
并联负反馈

$R_{if} \approx 0$

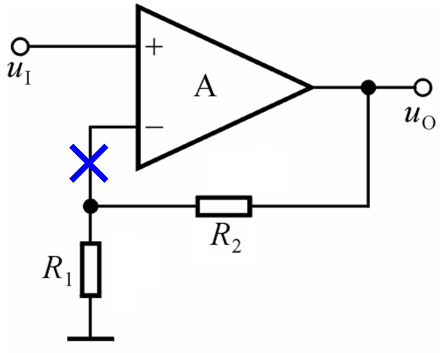
电流负反馈

$R_{of} \to \infty$

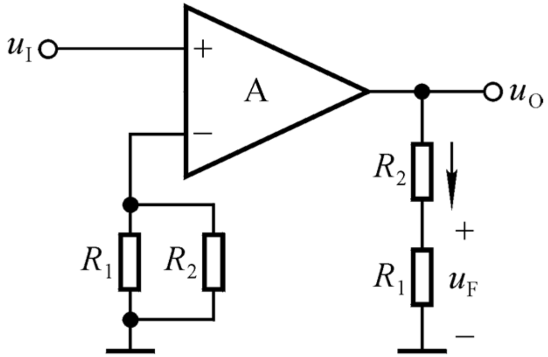
$R'_{of} \approx R_{c2}$



补充：反馈网络的负载效应



基本放大电路A

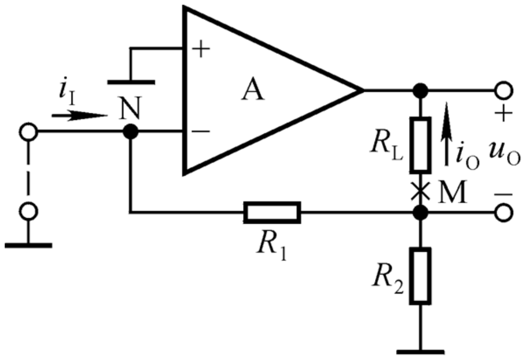


输入端等效电路：

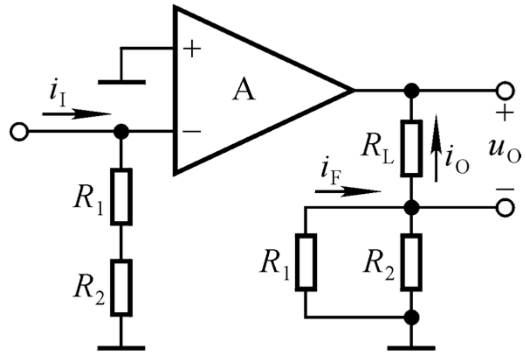
- 电压反馈令u_o=0
- 电流反馈令i_o=0

输出端等效电路：

- 串联反馈令i_i=0
- 并联反馈令u_i=0



(a)



(b)

三、引入负反馈的原则

1. 为了稳定Q点，抑制温漂，应引直流负反馈

2. 为了改善动态性能，应引交流负反馈

（1） 根据四种不同反馈组态电路的功能，针对不同的信号转换要求选择不同的反馈组态。

要实现电压放大——引电压串联负反馈
要实现电流放大——引电流并联负反馈
要实现互阻放大——引电压并联负反馈
要实现互导放大——引电流串联负反馈

（2） 根据信号源对输入阻抗的要求决定采用串联或并联负反馈

（3） 根据负载对输出信号的要求决定采用电压或电流负反馈

信号源为恒压源或内阻较小的电压源时，需要提高R_i——应引串联负反馈

信号源为恒流源或内阻较大的电流源时，需要减小R_i——应引并联负反馈

当负载要求稳定的输出电压，需要减小R_o—应引电压负反馈

当负载要求稳定的输出电流，需要增大R_o—应引电流负反馈