

第六章

反 馈

本章基本要求

会判：判断电路中有无反馈及反馈的类型

会算：估算深度负反馈条件下的放大倍数

会引：根据需求引入合适的反馈

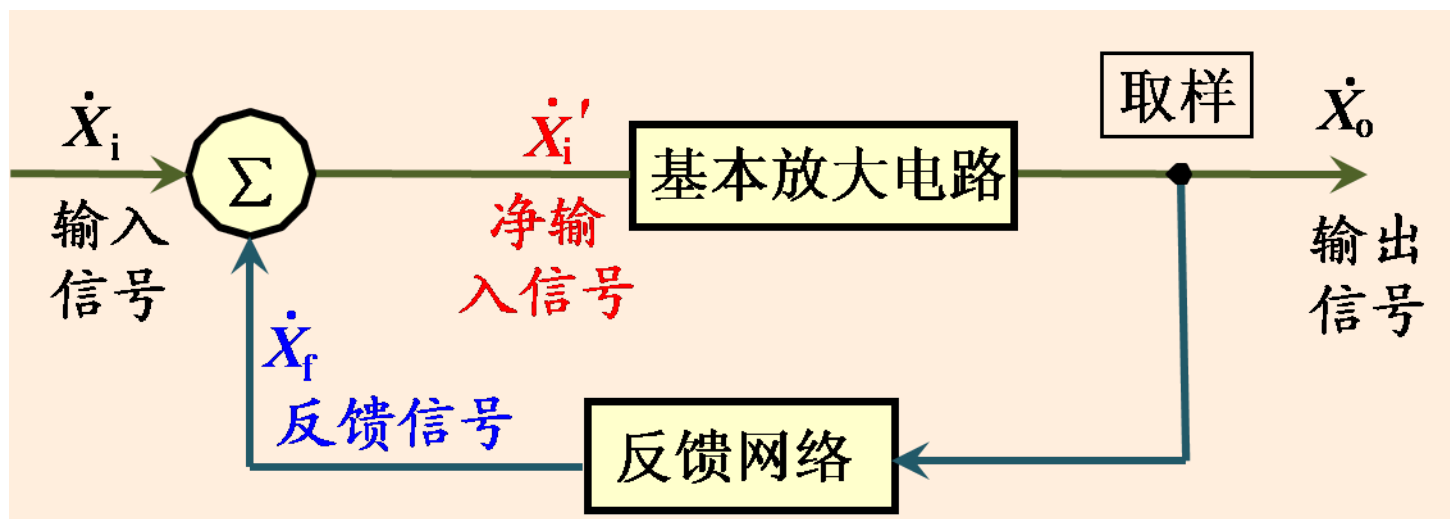
会判：判断电路是否能稳定工作

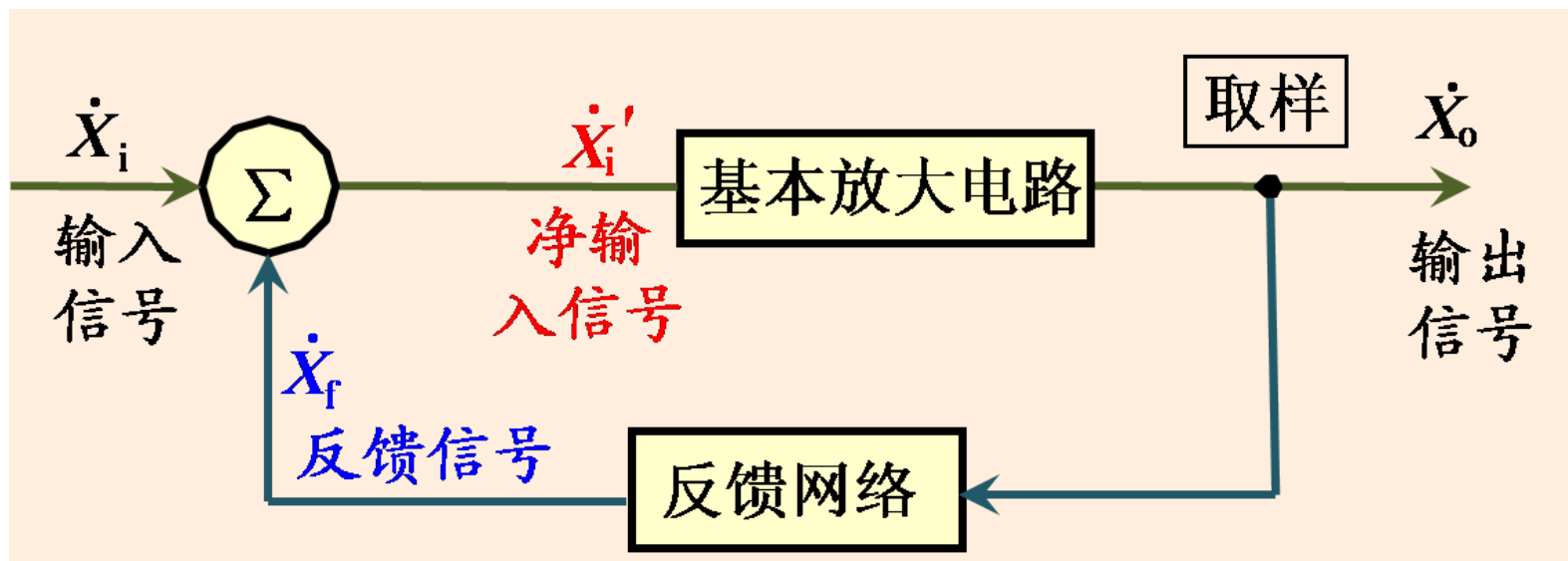
一、为什么引入反馈

在放大电路经常采用(负)反馈的方法来改善电路的性能。

二、什么是反馈

将放大电路的输出量(电压或电流)的一部分或全部通过一定的方式回送到放大电路的输入回路,并对输入量(电压或电流)产生影响,这个过程称为**反馈(Feedback)**。





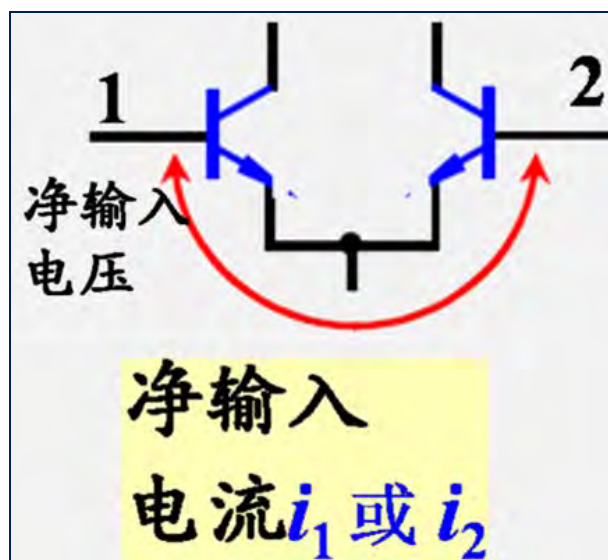
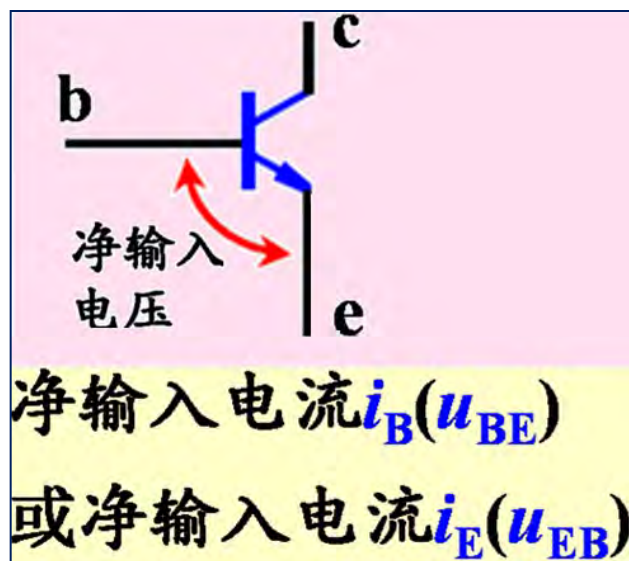
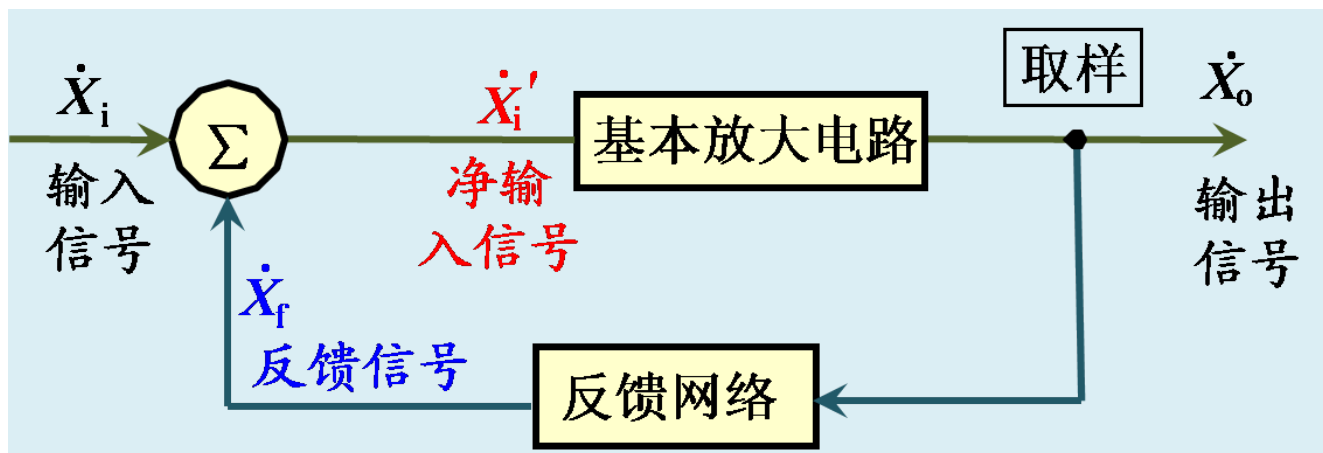
反馈网络——连接输入回路与输出回路的反馈元件，是信号

反向传输的渠道

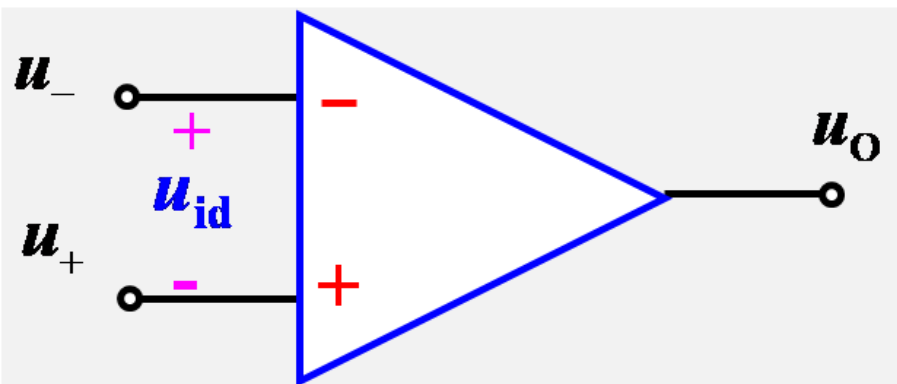
基本放大电路或开环放大电路——没有引入反馈的放大电路

反馈放大电路或闭环放大电路——引入反馈的放大电路

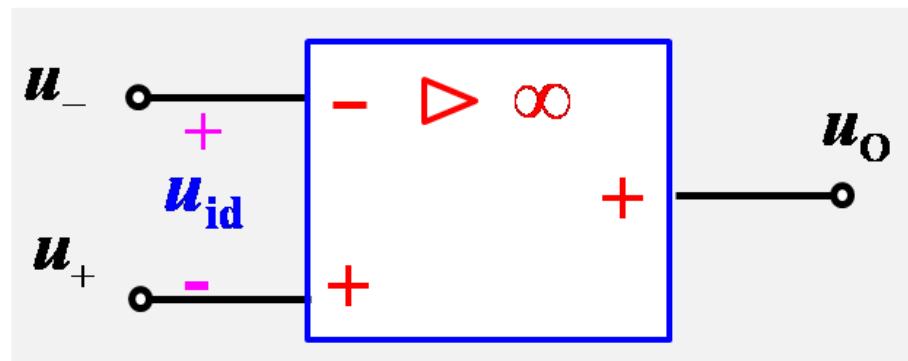
★ PS: 净输入量可以是电压，也可以是电流。



集成运放的电路符号：



旧符号



新符号

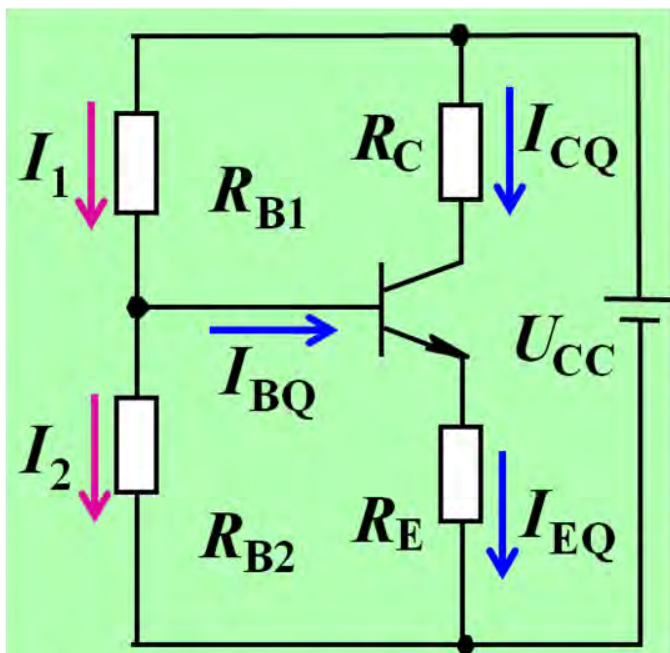
集成运放的净输入电压： $u_{id} = u_- - u_+$

集成运放的净输入电流： i_- 或 i_+

以前接触过的例子：

- ② 为了抑制工作点因外界变化引起的漂移，在电路中引入自动调节机制，用 I_{BQ} 的相反变化去自动抑制 I_{CQ} 的变化，从而使 I_{CQ} 稳定。这种机制通常称为负反馈。实现方法是在发射极加一个电阻 R_E 。

抑制工作点漂移过程如下：

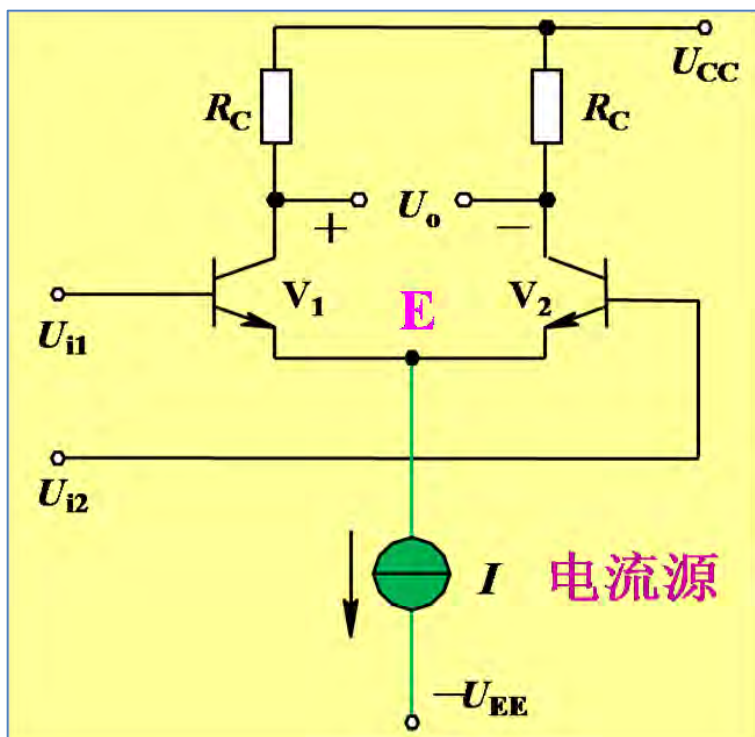


分压式电流负反馈型偏置电路

$$T \uparrow \Rightarrow \beta \uparrow \Rightarrow I_{CQ} \uparrow \Rightarrow I_{EQ} \uparrow \Rightarrow U_{EQ} (I_{EQ} R_E) \uparrow \\ \Rightarrow U_{BEQ} (= U_{BQ} - U_{EQ}) \downarrow \Rightarrow I_{BQ} \downarrow \Rightarrow I_{CQ} \downarrow$$

结果 I_{CQ} 基本不变， U_{CEQ} 也基本不变，从而克服了Q点的漂移。

这里的负反馈是直流电量的负反馈，称为直流负反馈，主要用于稳定静态工作点。



R_E 的共模负反馈作用：抑制每只差分管的集电极电流、电位的变化
 如 $T \uparrow \rightarrow I_{C1} \uparrow I_{C2} \uparrow \rightarrow U_E \uparrow \rightarrow U_{BE} \downarrow$
 $\rightarrow I_{B1} \downarrow I_{B2} \downarrow \rightarrow I_{C1} \downarrow I_{C2} \downarrow$

R_E 对差模信号无反馈作用： R_E 中电流不变，即 U_E 不变

无论是双端输出还是单端输出，负反馈电阻 R_E 的作用都是如此。

1. 反馈的极性：正反馈和负反馈

★ 从输出端看：凡反馈的结果使输出量的变化减小的为负反馈，否则为正反馈；

从输入端看：凡反馈的结果使净输入量减小的为负反馈，否则为正反馈。

负反馈具有自动调节作用，可改善放大器性能。

(负反馈的自动调节作用是以牺牲增益为代价的)

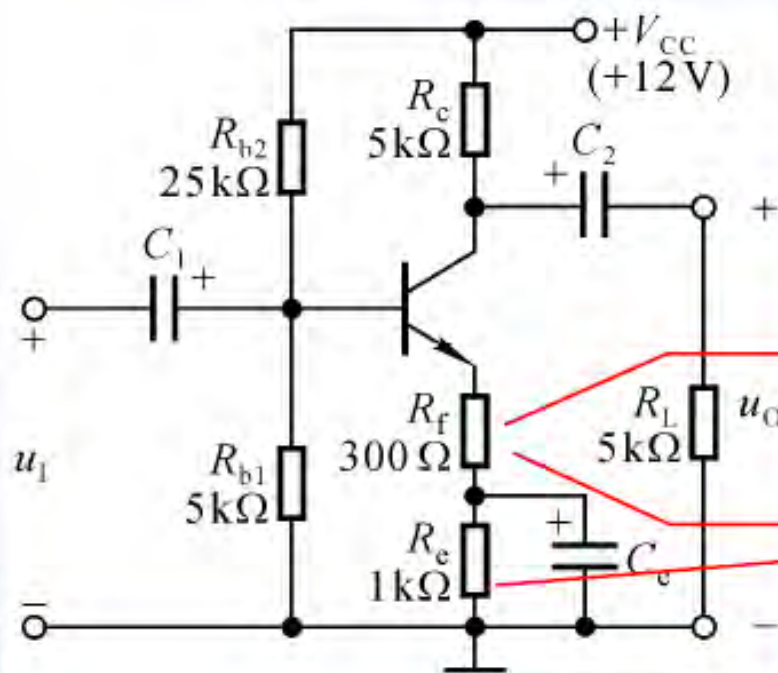
正反馈使放大器工作不稳定，多用于振荡器中。

判断题：若放大电路的放大倍数为“+”，则引入的反馈一定是正反馈；若放大电路的放大倍数为“-”，则引入的反馈一定是负反馈。(×)

2. 直流反馈和交流反馈

直流反馈：直流通路中存在的反馈；稳定静态工作点；

交流反馈：交流通路中存在的反馈；改善放大电路的性能；



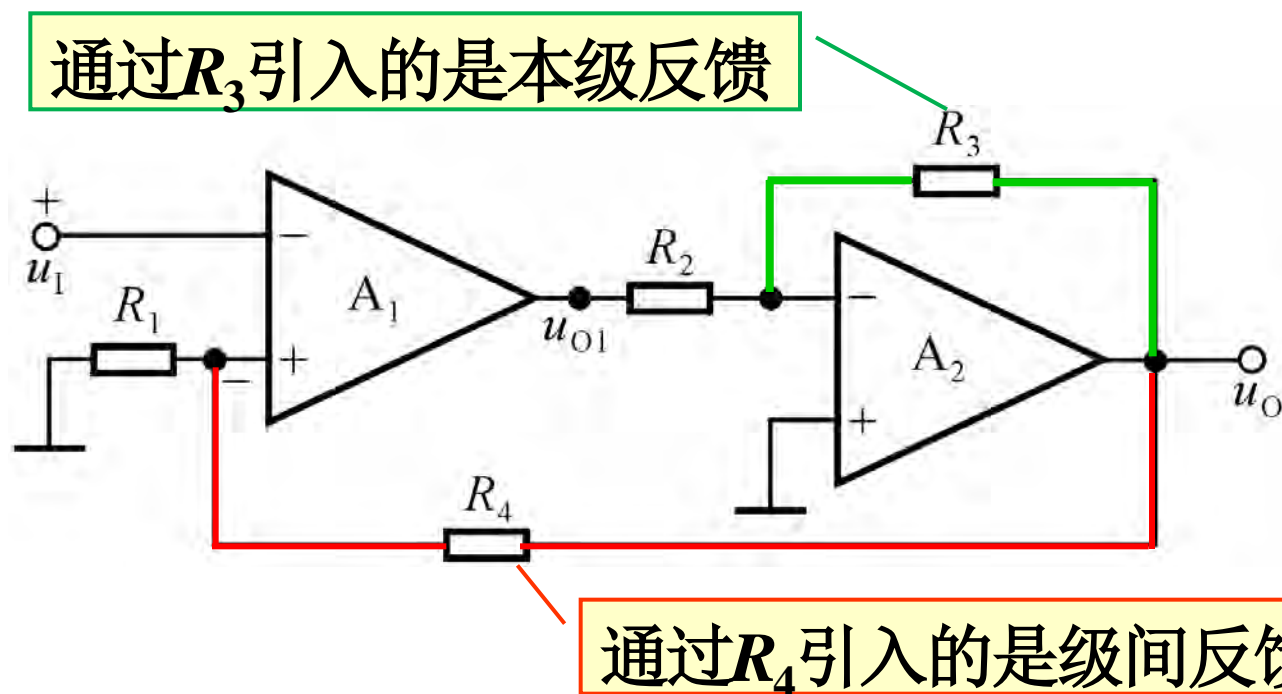
引入交流负反馈

引入直流负反馈

3. 本级反馈和级间反馈

本级反馈： 只对多级放大电路中某一级起反馈作用；

级间反馈： 对多级放大电路起反馈作用；

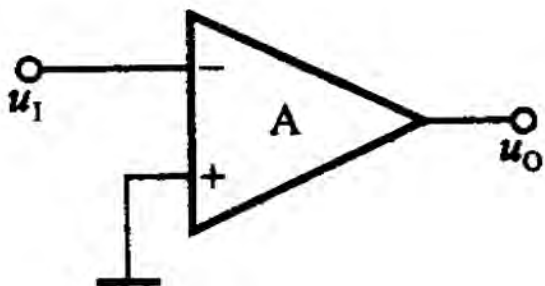


★ 通常，重点研究级间交流负反馈。

4. 反馈的判断

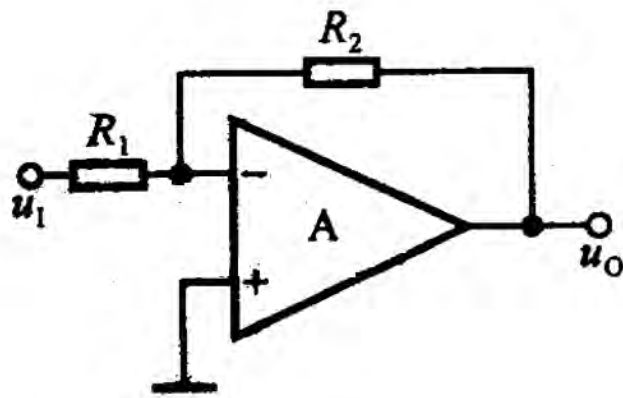
① 有无反馈的判断

- 是否有联系输入、输出回路的反馈网络；
- 是否影响放大电路的净输入。



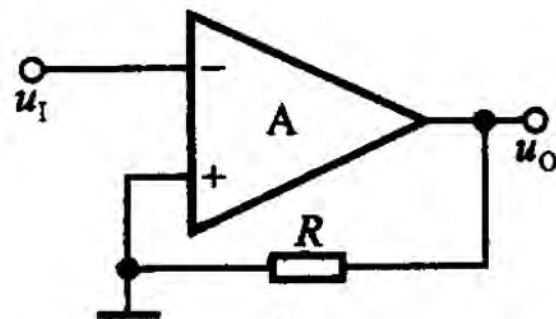
(a)

(a) 没引入反馈



(b)

(b) 引入反馈



(c)

(c) 没引入反馈

② 反馈极性的判断

“看反馈的结果”，即净输入量是被增大还是被减小。

瞬时极性法：

假设输入端电压 u_i 对地的瞬时极性为正（ \oplus ），以此为依据，逐级判断从而得到各点电压的瞬时极性，分析反馈回来的信号对净输入信号的影响，若增强了净输入信号，则为正反馈；若削弱净输入信号，则为负反馈。

★ 正负号的标注规则！！

对于集成运放： u_0 与 u_+ 极性相同， u_0 与 u_- 极性相反；

对于分立元件(晶体管/场效应管)：

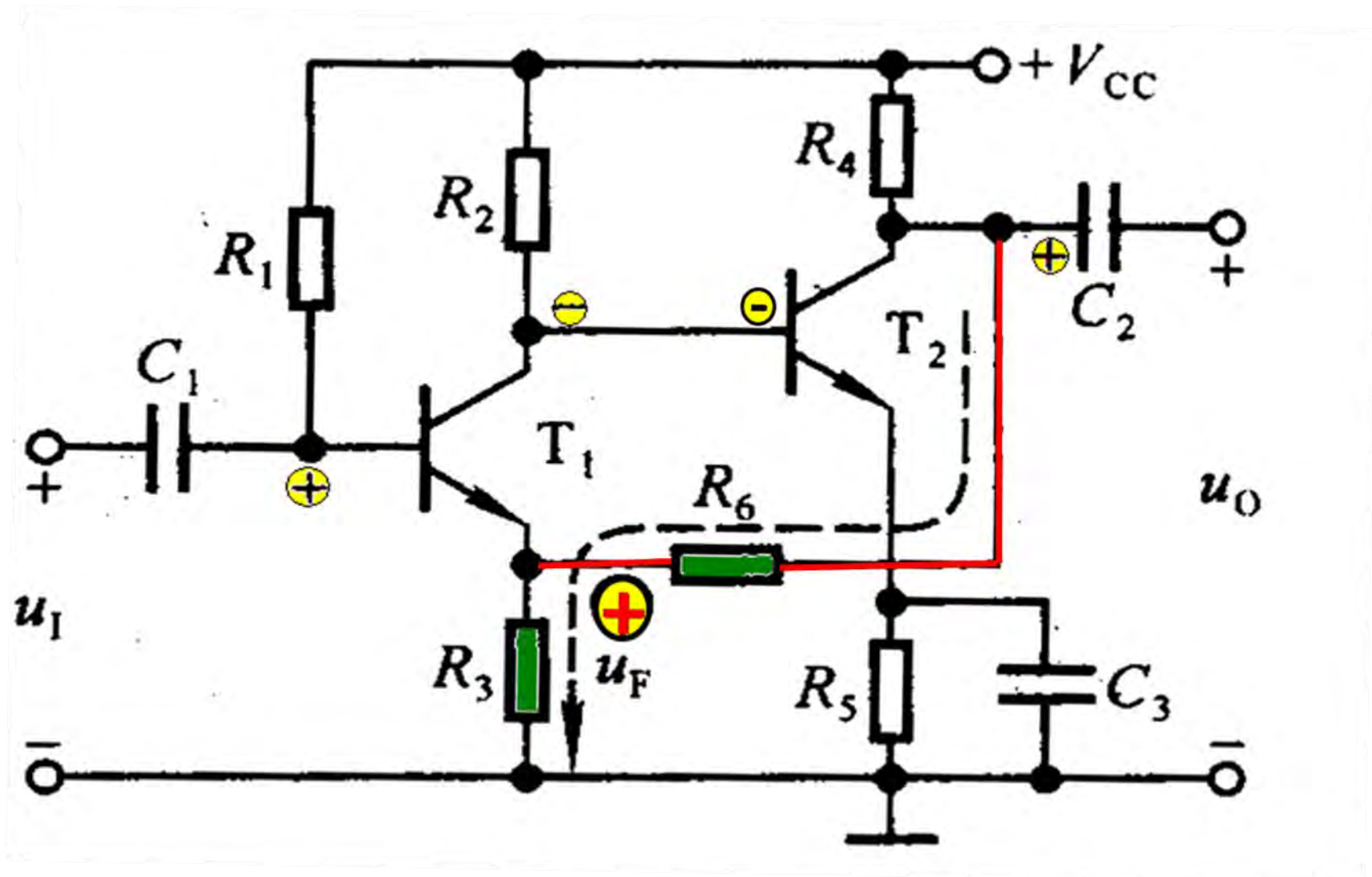
简言之：

b, c极电位瞬时极性在任意组态下都**相反**；

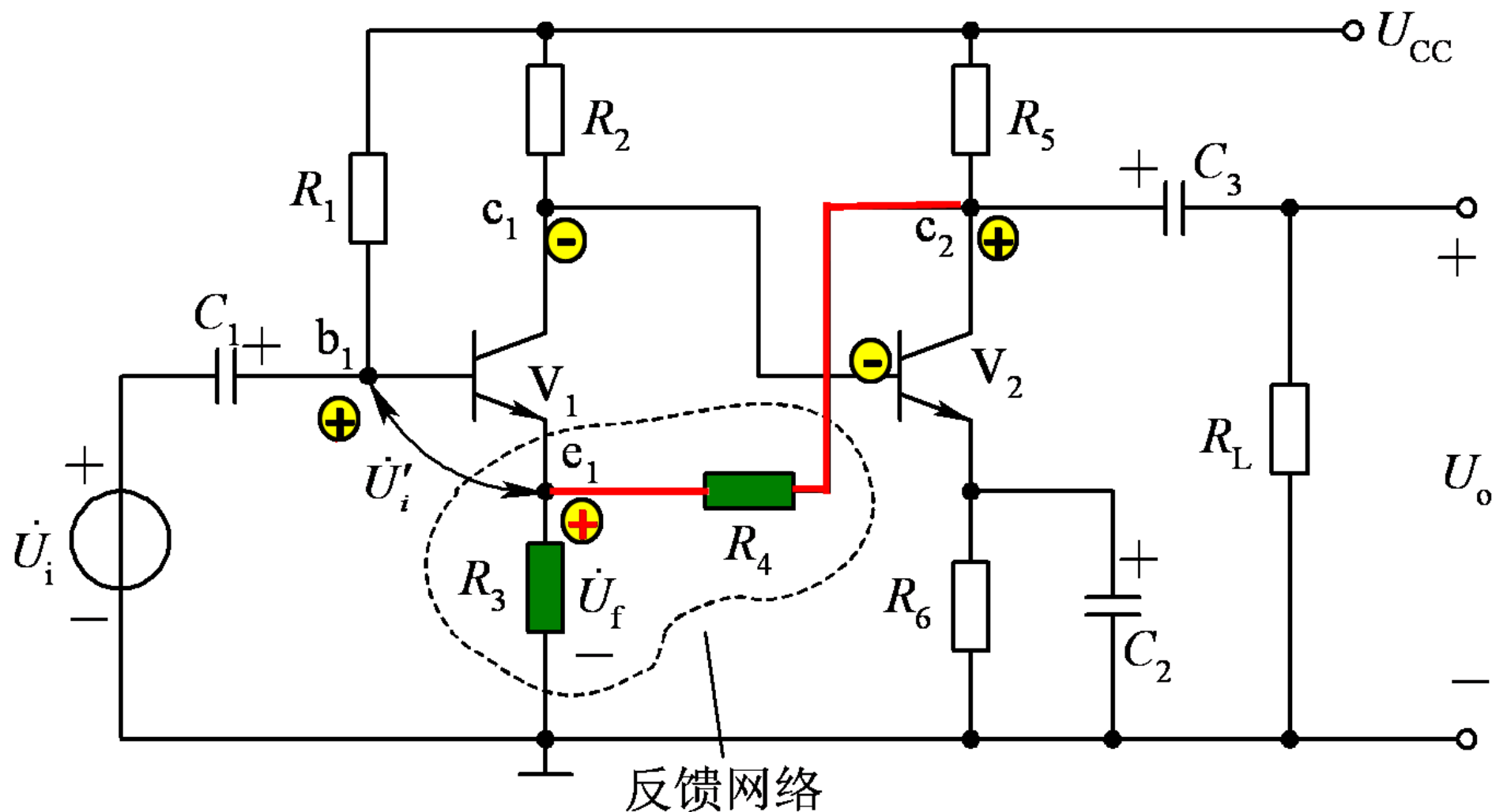
b, e极电位瞬时极性**只在共基组态下相反**；

另外两种组态下相同。

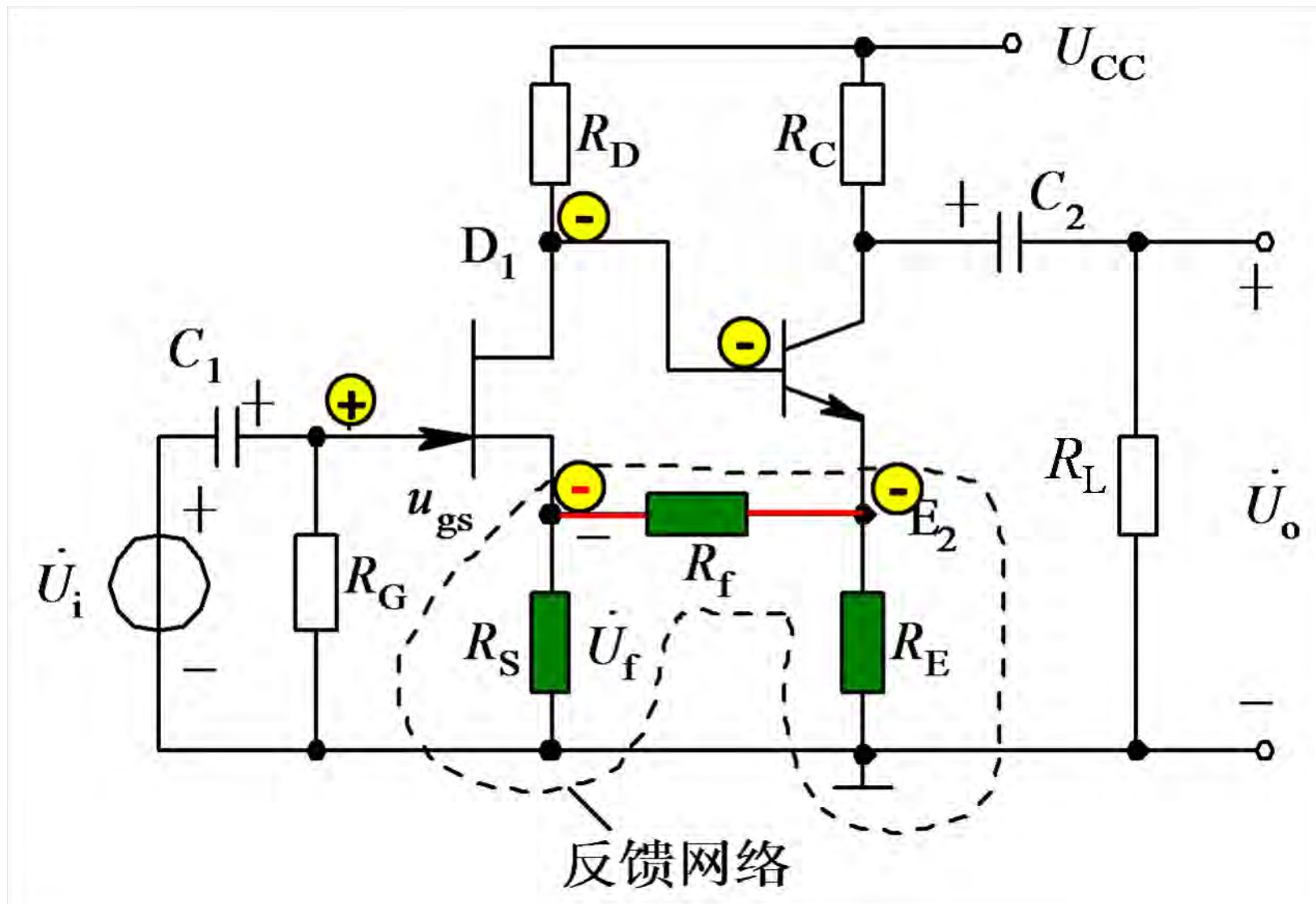
级间：交流负反馈



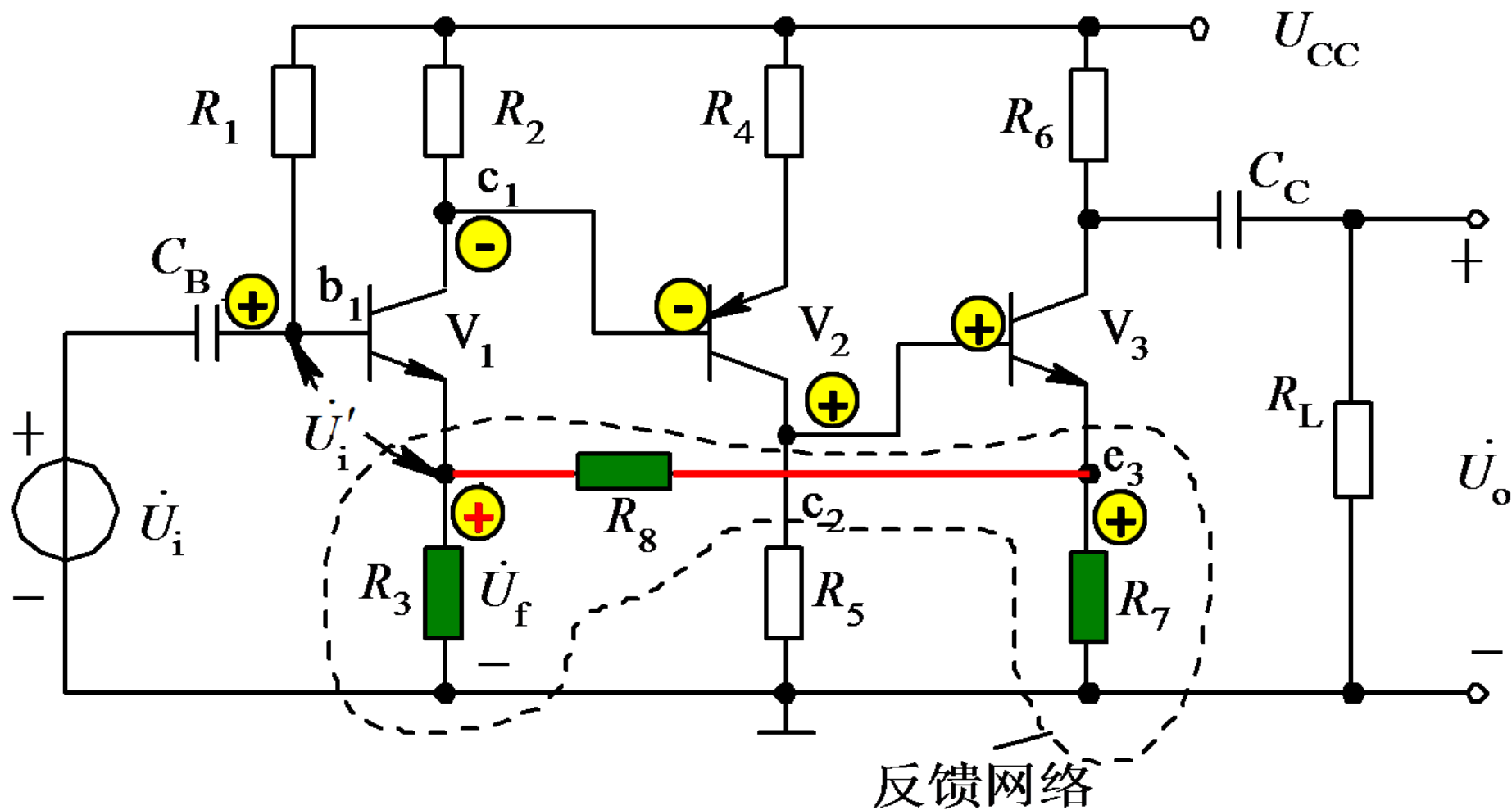
级间：交流负反馈



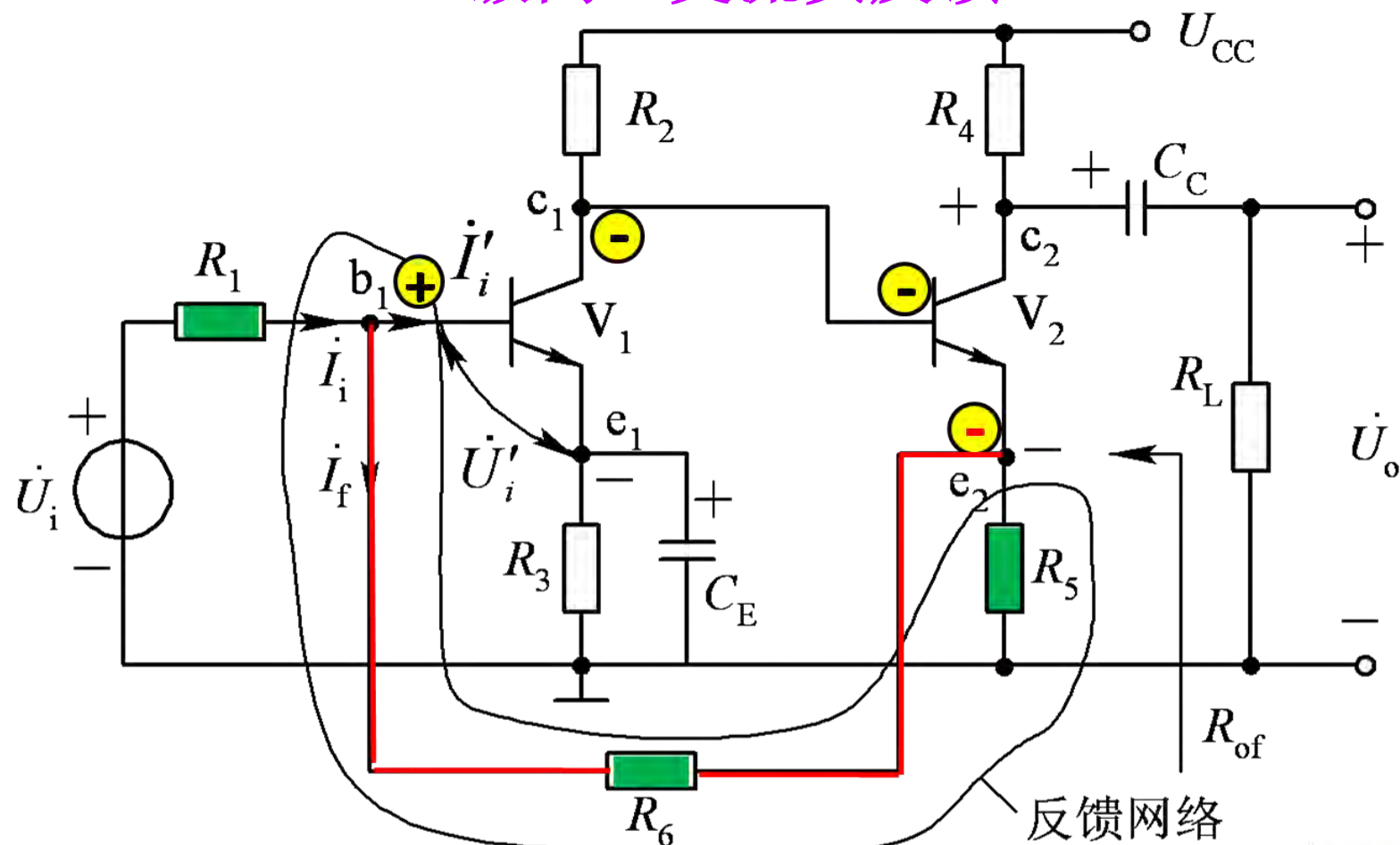
级间：交流正反馈



级间：交流负反馈

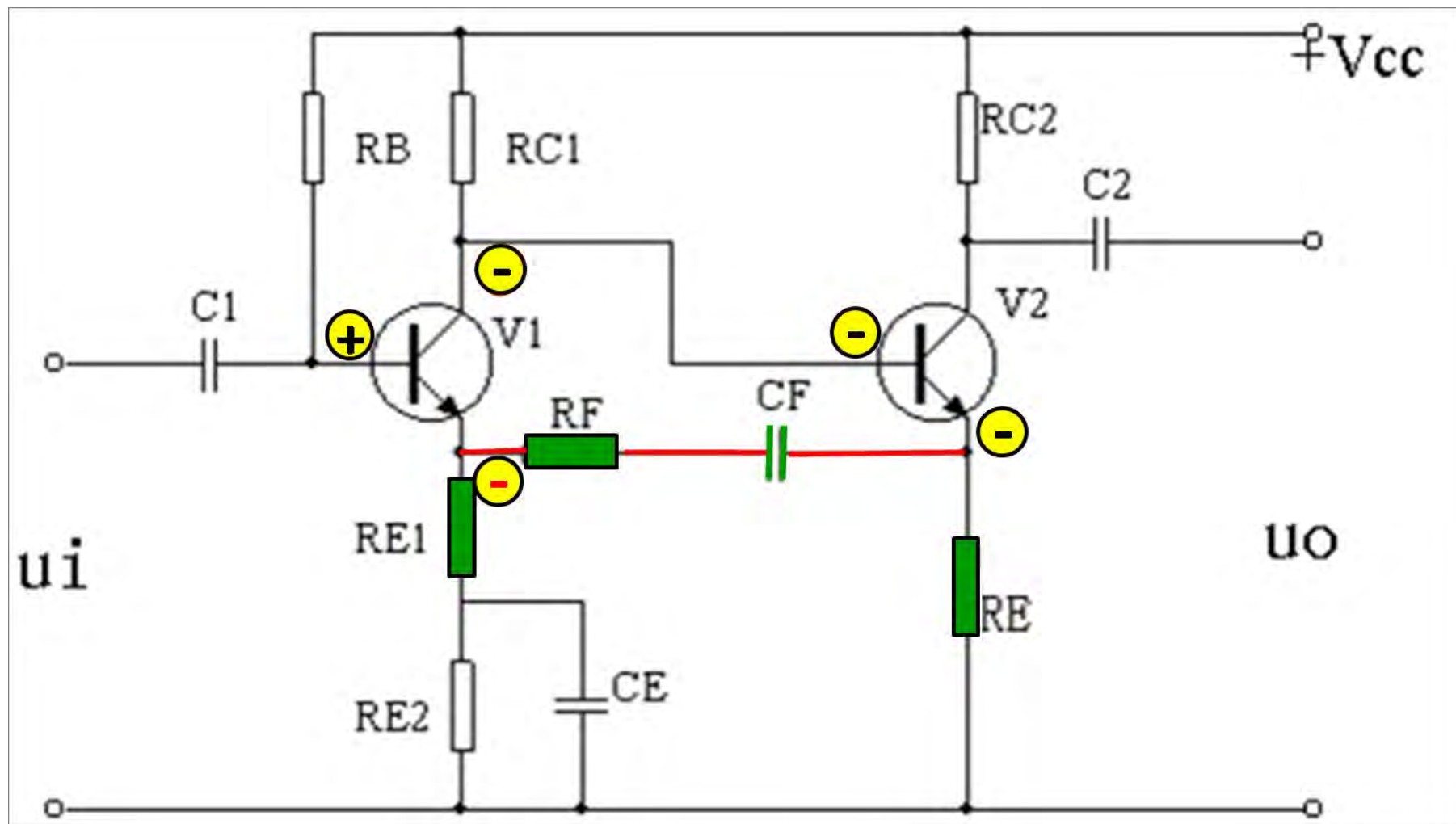


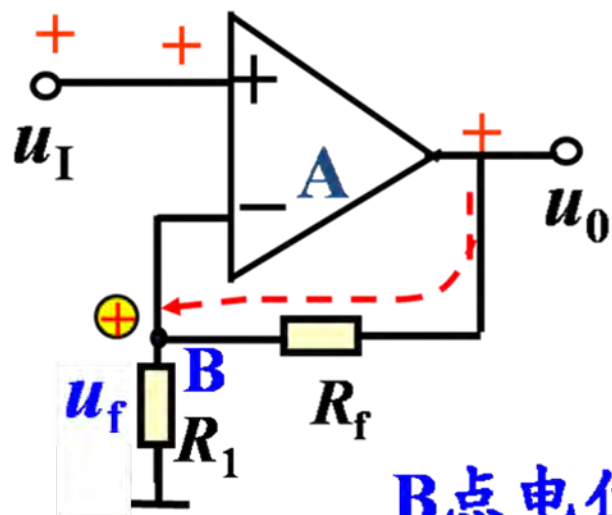
级间：交流负反馈



若不然，就会导致基本放大电路的输入电压是 U_i 恒定，又因为基本放大电路的输入电阻不变，所以 I_i' 将为一定值，因此加入的反馈对净输入电流没影响。

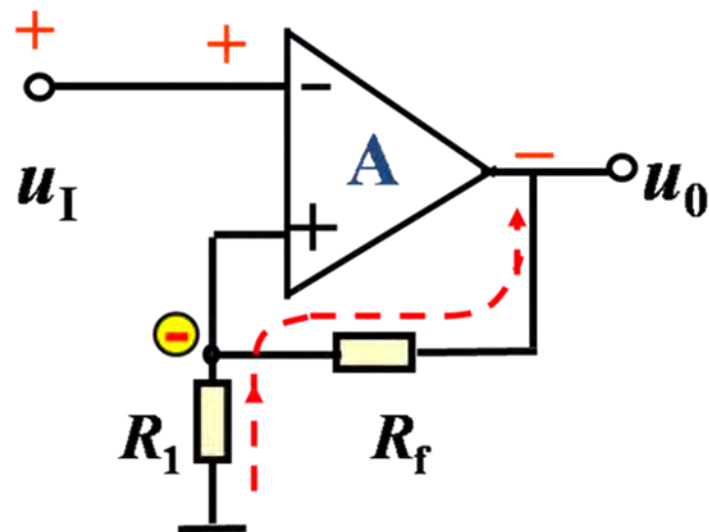
级间：交流正反馈



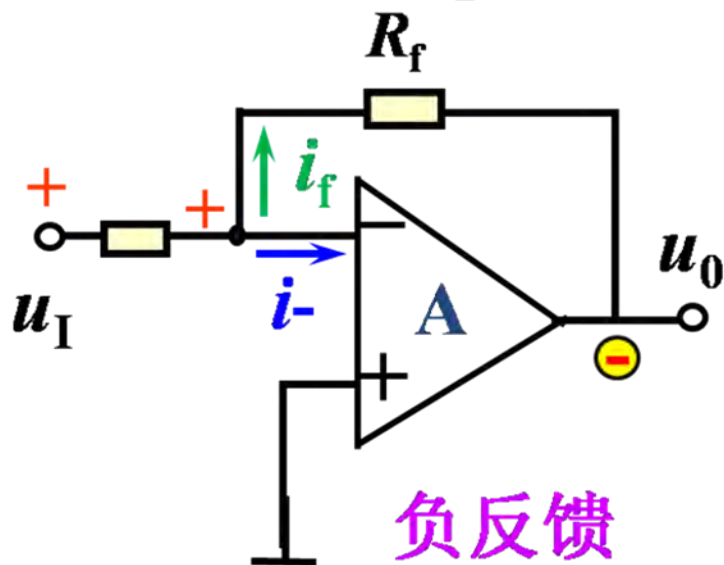


B点电位(u_f)↑,

负反馈 ∴ 输入电压($u_I - u_f$)↓



正反馈



负反馈

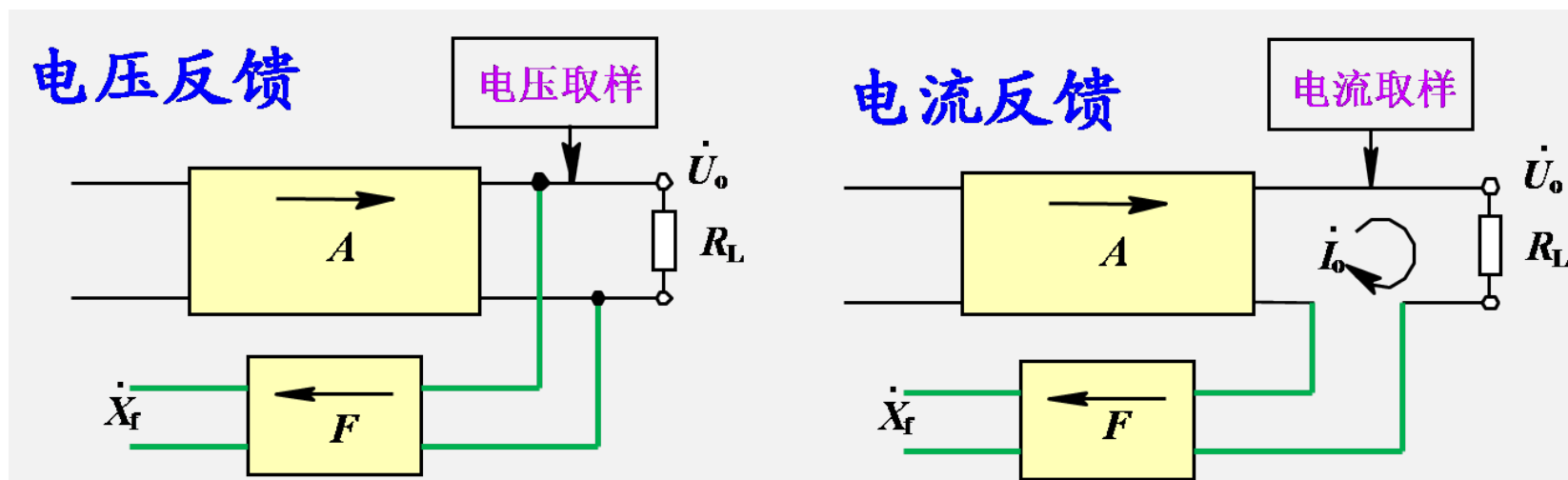
三、负反馈的四种基本类型和组态

1. 四种基本类型

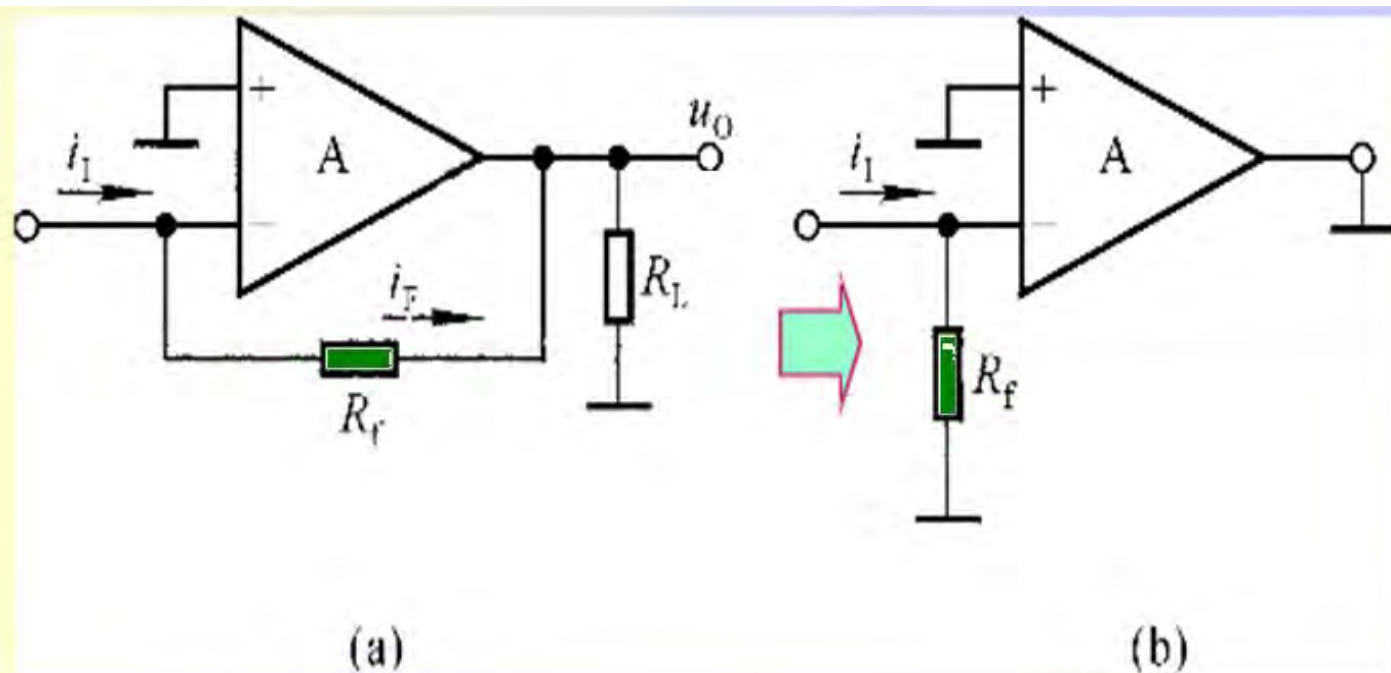
① 按反馈网络在输出端的连接方式，可分为

电压反馈：反馈网络与输出端**并联**连接（不论反馈信号是电压还是电流）；

电流反馈：反馈网络与输出端**串联**连接（不论反馈信号是电压还是电流）。

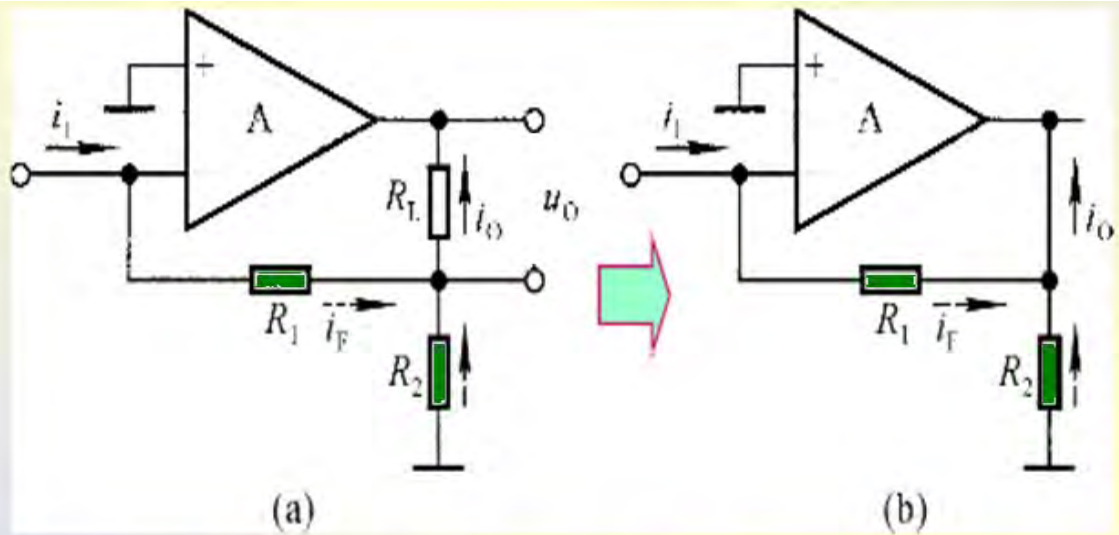
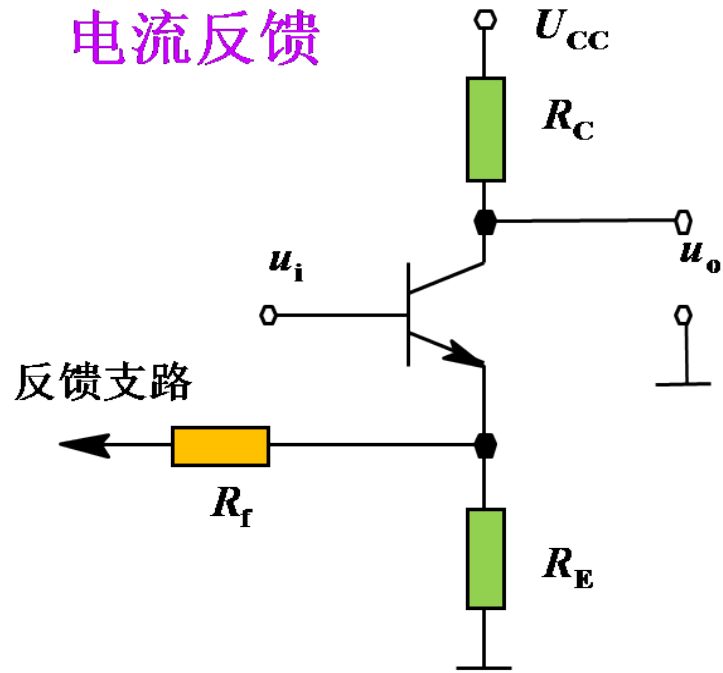


判断方法： 令输出端短路 $u_0=0$ ，
若反馈量也随之为零，则为电压反馈；
若反馈量仍存在，则为电流反馈。



输出电压 u_0 等于0时，反馈等于0，是电压反馈。

电流反馈

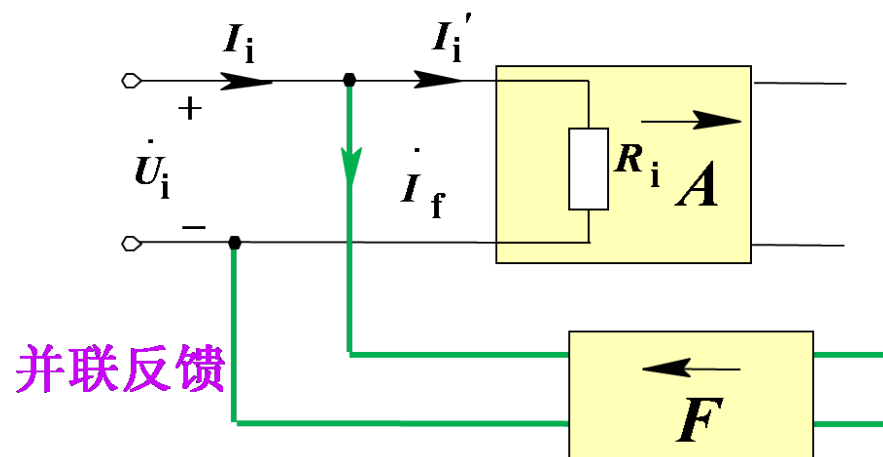
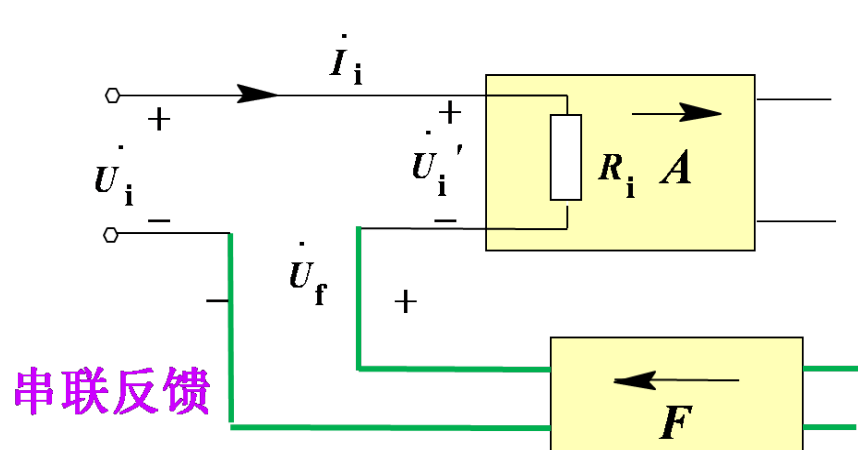


输出电压 u_o 等于0时，仍有反馈，是电流反馈。

② 按反馈网路在输入端的连接方式，可以分为

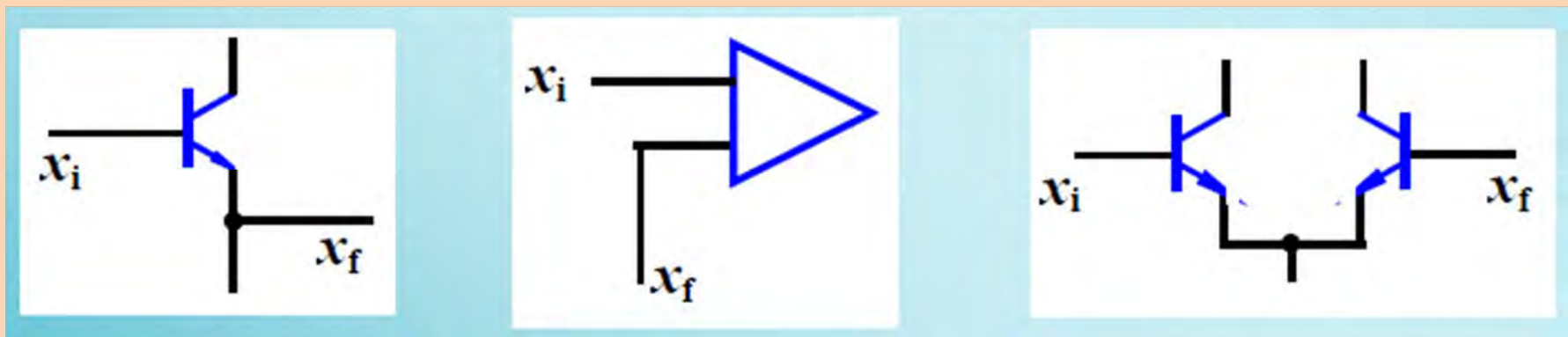
串联反馈：在输入端，反馈网络与基本放大器串接，反馈信号与输入信号以电压形式相叠加；

并联反馈：在输入端，反馈网络与基本放大器并接，反馈信号与输入信号以电流形式相叠加。

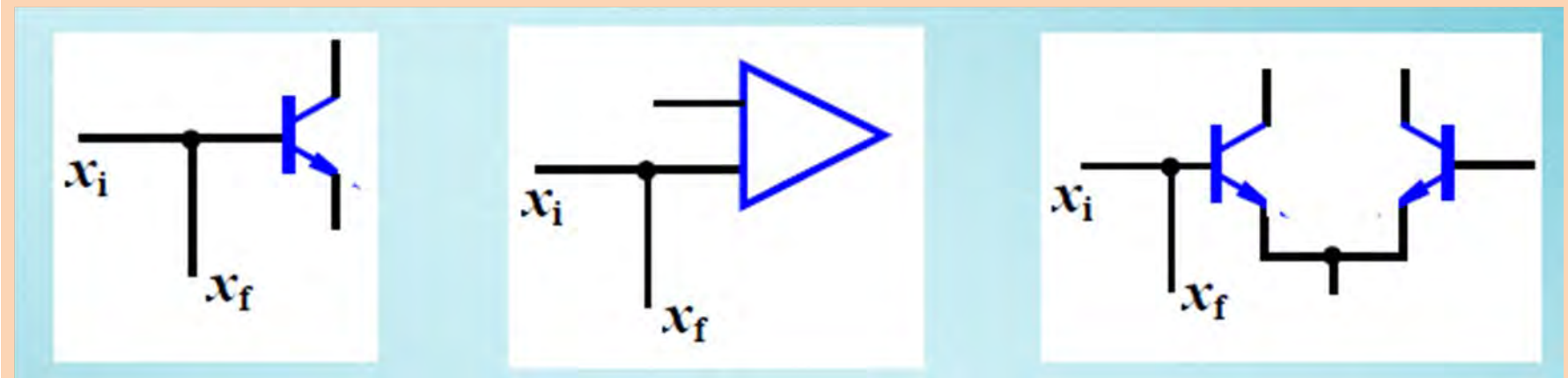


判断方法:

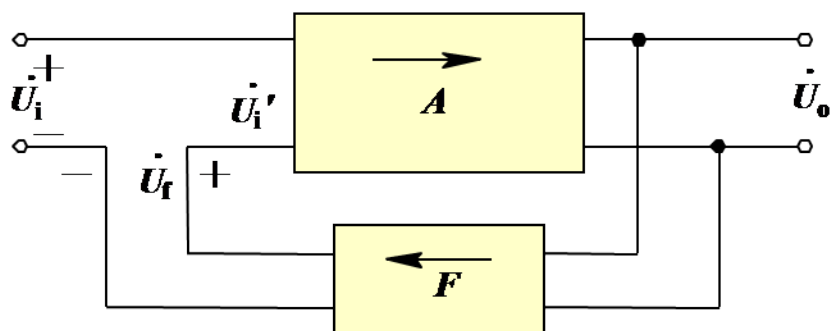
串联反馈: 输入信号与反馈信号加在**不同输入端**;



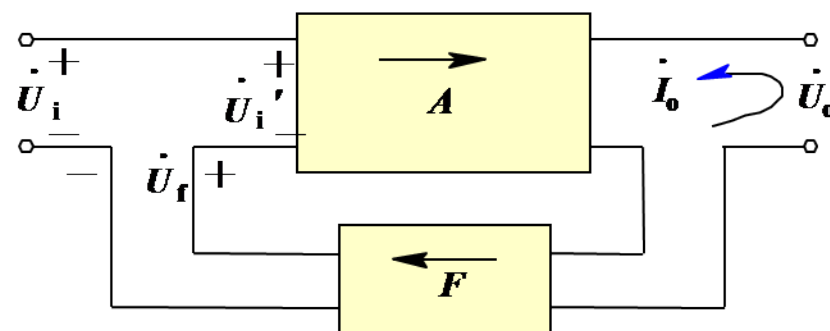
并联反馈: 输入信号与反馈信号加在**同一输入端**。



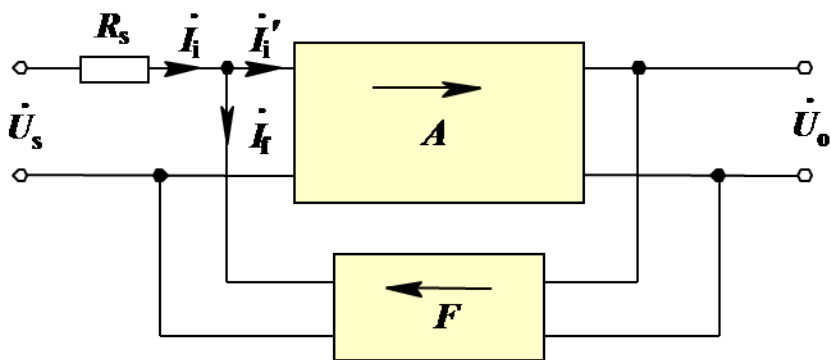
2. 负反馈放大电路的四种组态



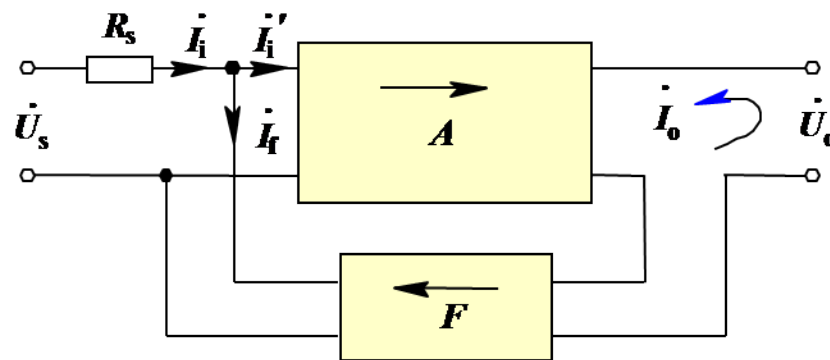
(a) 串联电压负反馈



(b) 串联电流负反馈



(c) 并联电压负反馈

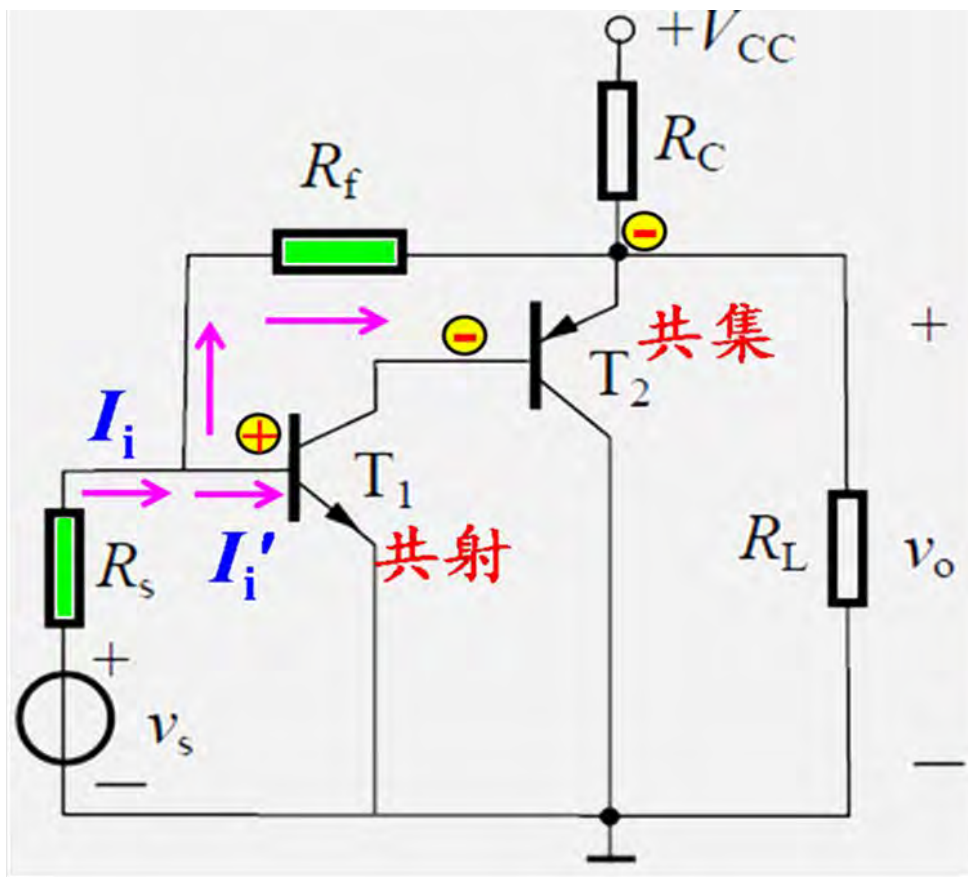


(d) 并联电流负反馈

判断反馈类型的步骤:

- ① 找出反馈网络;
- ② 判断是电压反馈还是电流反馈;
- ③ 判断是串联反馈还是并联反馈;
- ④ 判断反馈极性。方法:
 - a. 采用瞬时极性法
 - b. 在明确串联反馈和并联反馈后, 可根据输入信号和反馈信号的瞬时极性来判断:

串联反馈: $\left\{ \begin{array}{l} \text{瞬时极性相同} \Rightarrow \text{负反馈} \\ \text{瞬时极性相反} \Rightarrow \text{正反馈} \end{array} \right.$; 并联反馈完全相反



判断级间交流反馈

反馈网络： R_s 和 R_f

电压反馈

并联反馈

负反馈

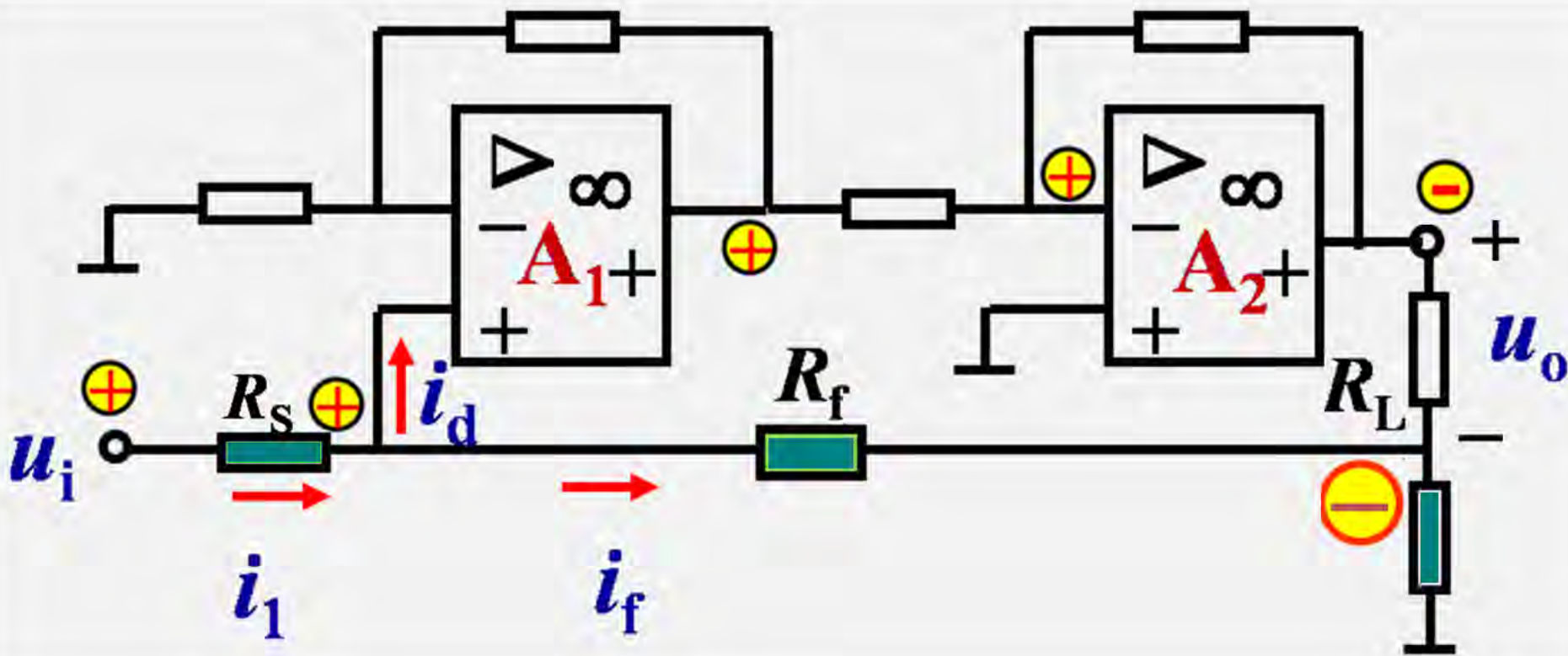
并联反馈时信号源内阻必不可少，且其值不能太小。

并联反馈时，输入端不能加内阻 R_s 很小的恒压源 u_s 。

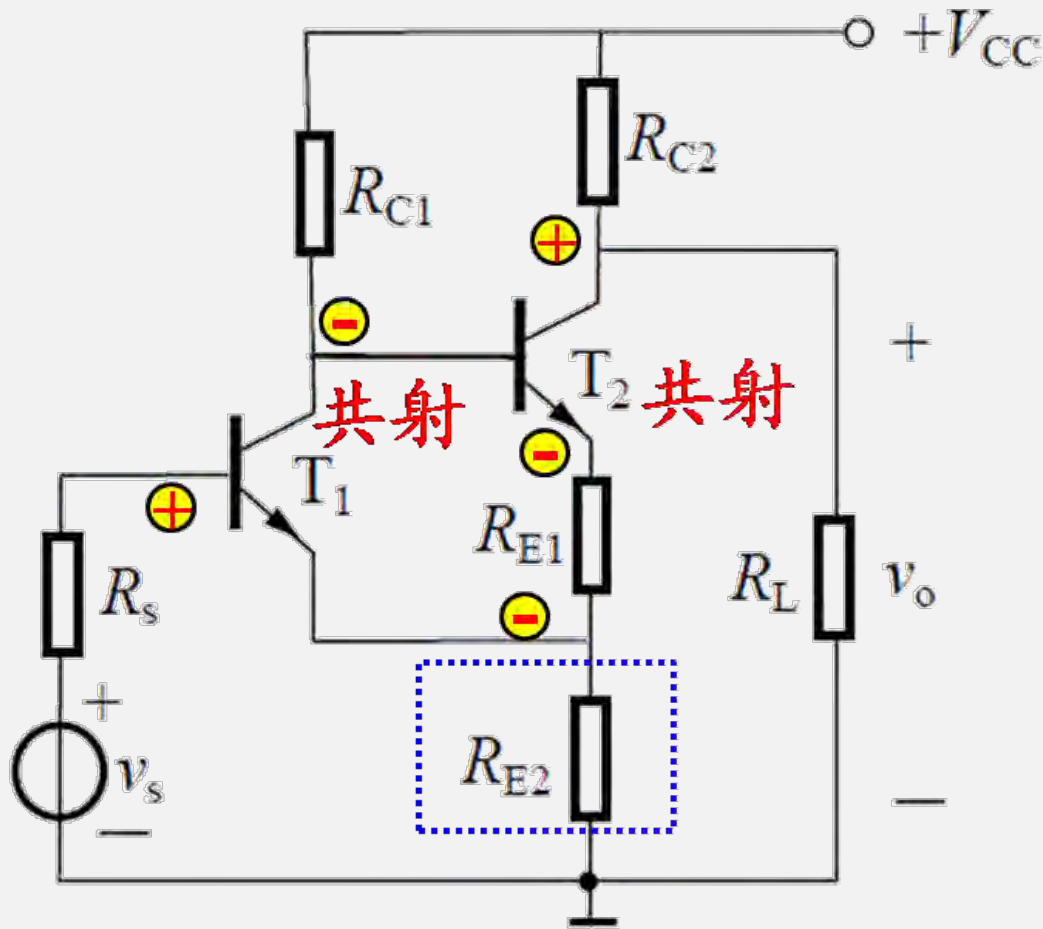
若不然，就会导致基本放大电路的输入电压是 $U_i = u_s$ ，又因为基本放大电路的输入电阻不变，所以 I_i' 将为一定值，因此加入的反馈对净输入电流没影响。

判断级间交流反馈:

R_S 和 $R_f \Rightarrow$ 电流反馈 \Rightarrow 并联反馈 \Rightarrow 负反馈 ($i_d = i_1 - i_f$)

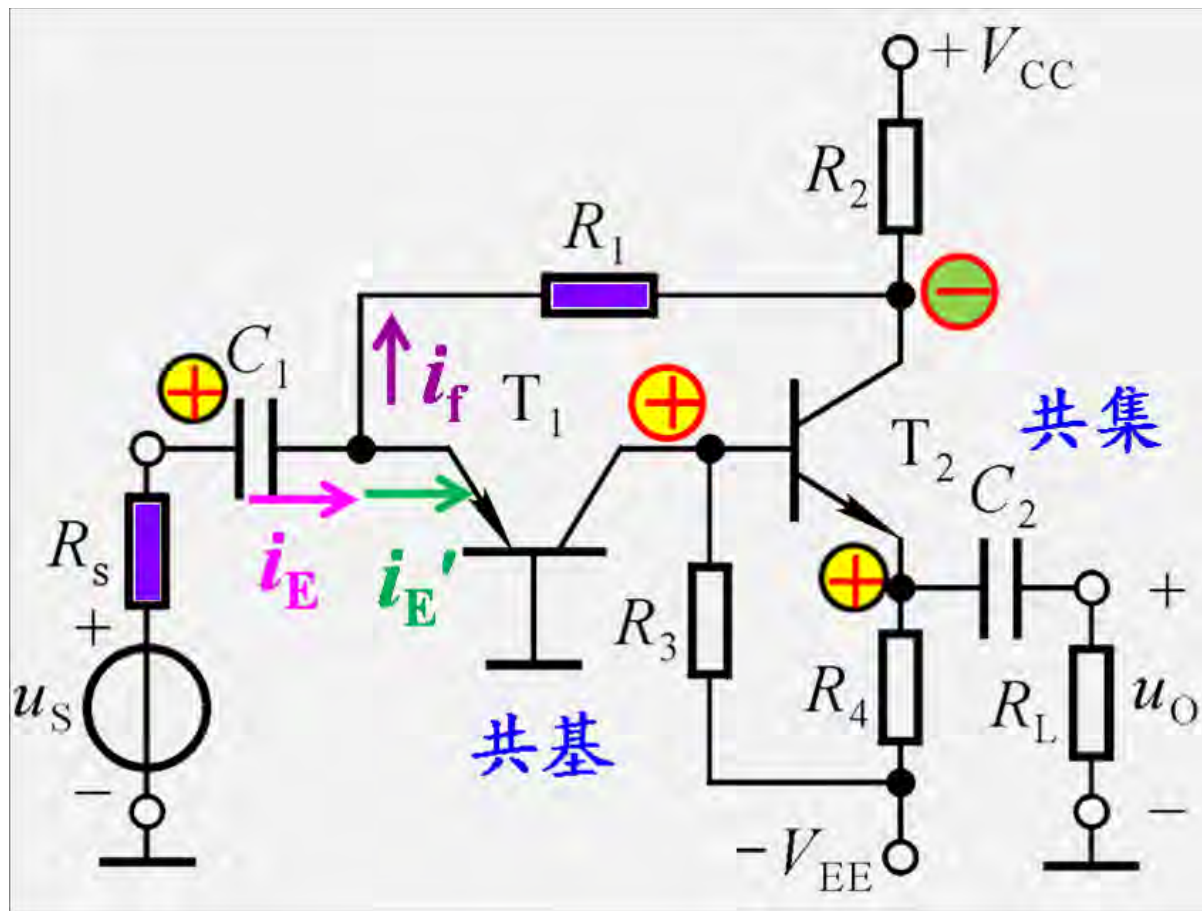


判断级间交流反馈:

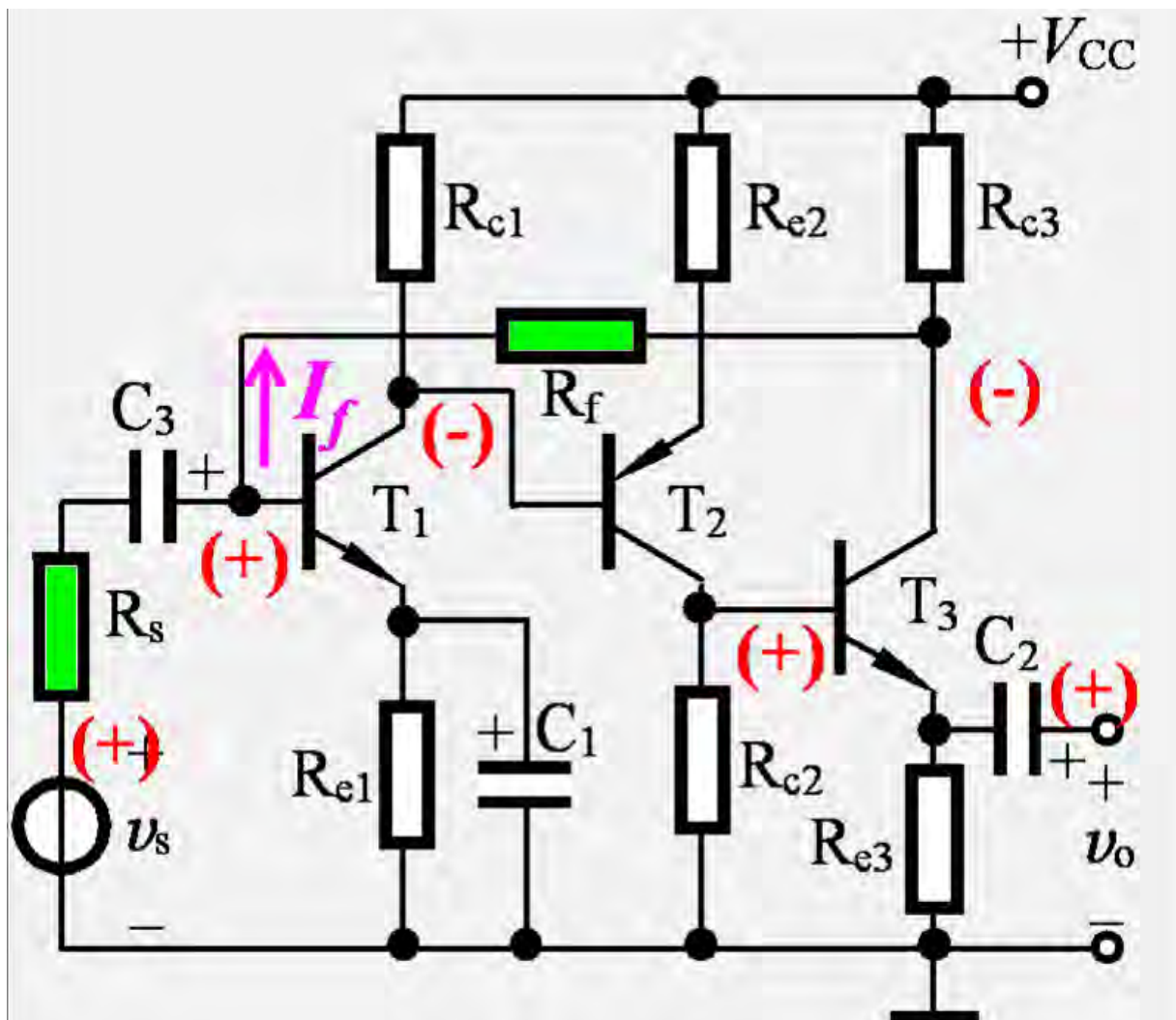


反馈网络: R_{E2}
电流
串联
正反馈

判断级间交流反馈:



判断级间交流反馈:

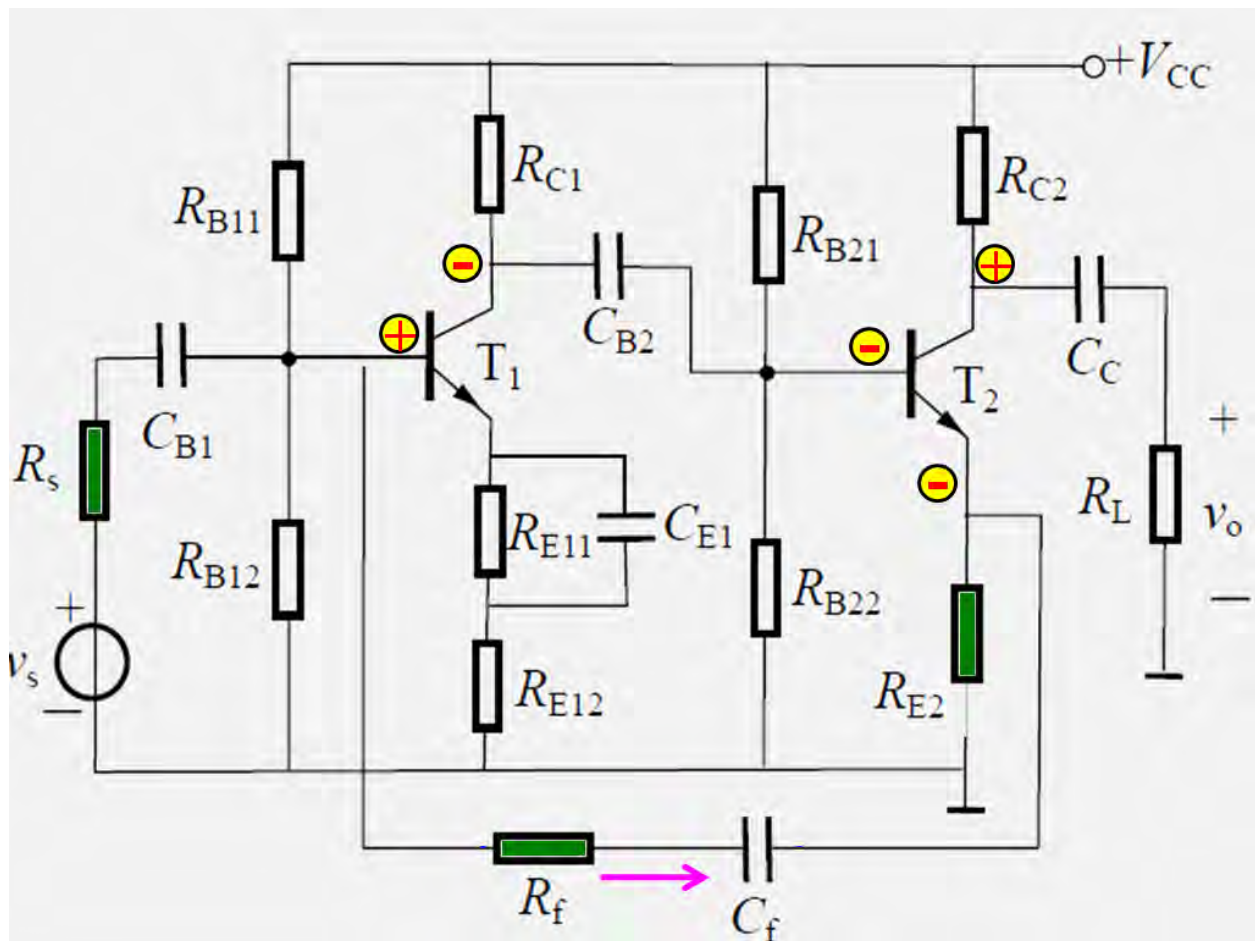


$R_f, R_s \Rightarrow$ 电流 \Rightarrow 并联 \Rightarrow 负反馈

判断级间交流反馈:

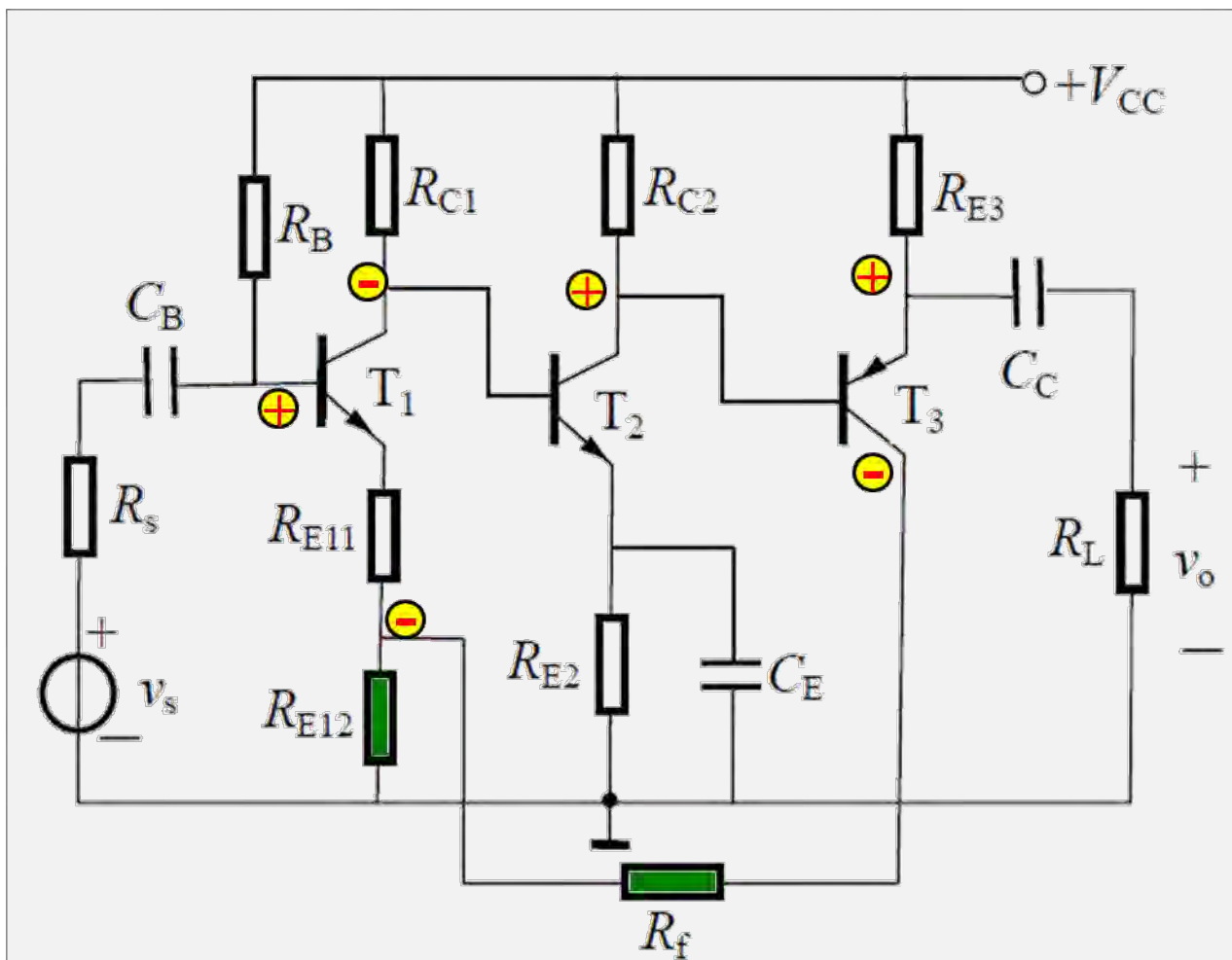
反馈网络: R_{E2} , C_f , R_f 和 R_s

电流 \Rightarrow 并联 \Rightarrow 负反馈



判断级间交流反馈:

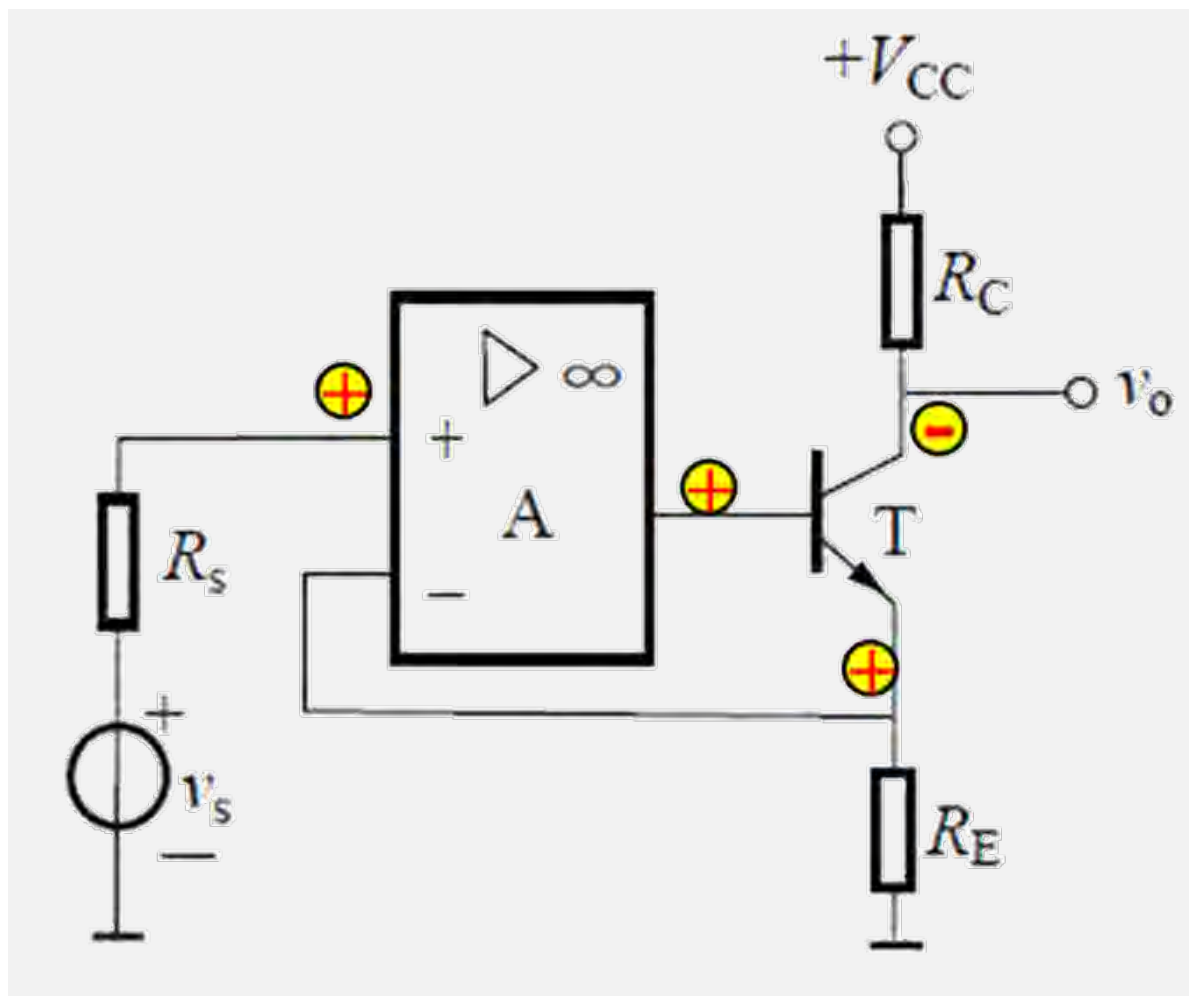
反馈网络: R_f , R_{E12}



电流
串联
正反馈

判断级间交流反馈:

反馈网络: R_E

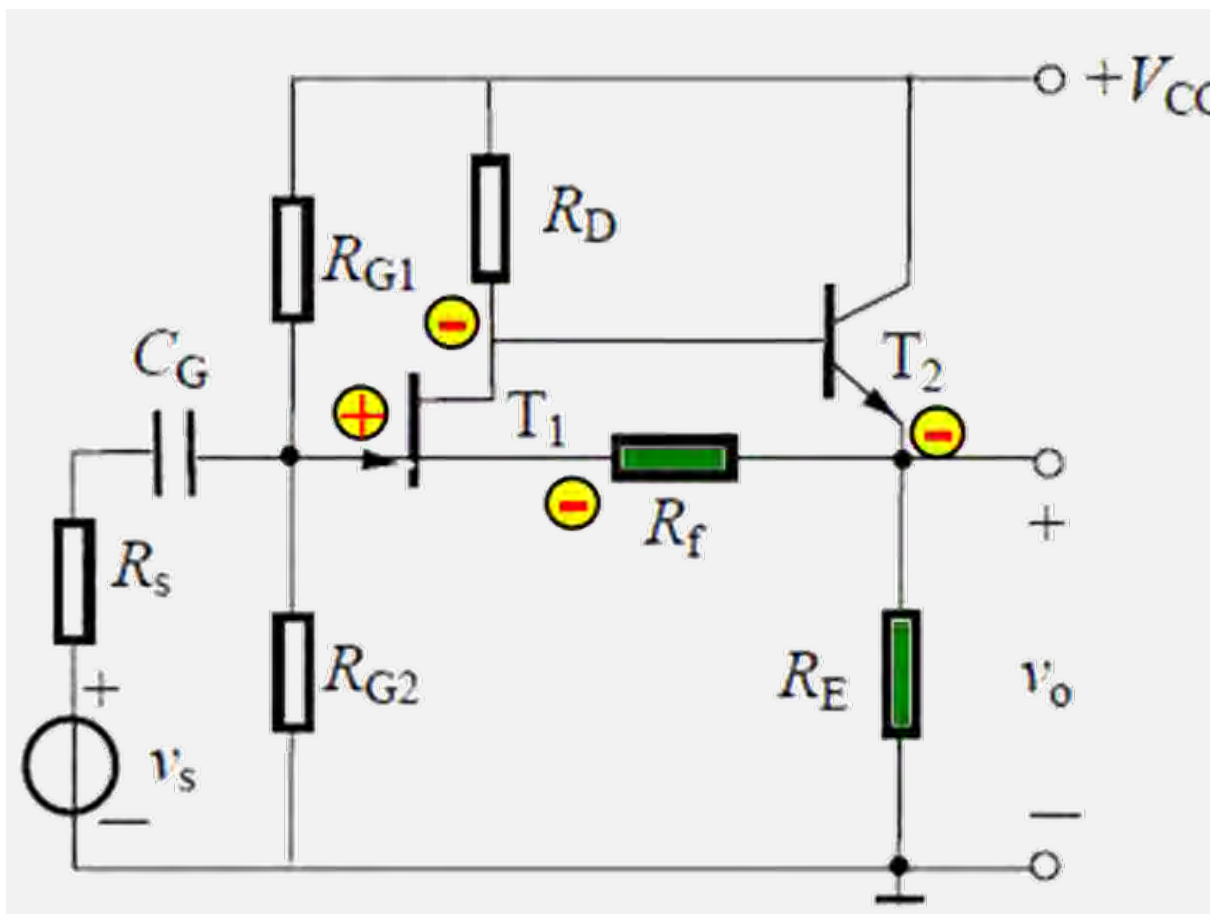


电流
串联
负反馈

判断级间交流反馈:

反馈网络: R_E 和 R_f

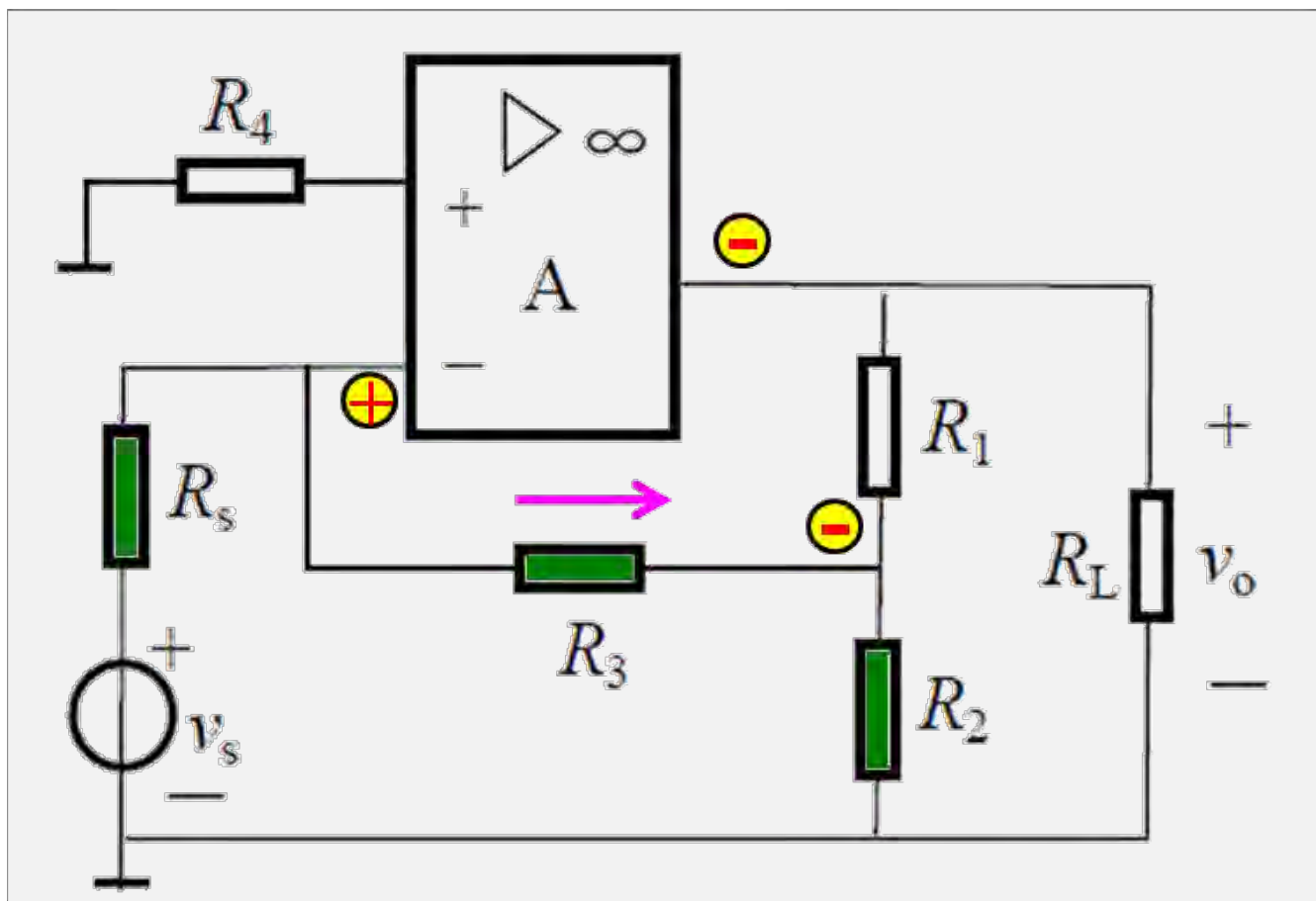
电压 \Rightarrow 串联 \Rightarrow 正反馈



判断本级交流反馈:

反馈网络: R_s 和 R_3 、 R_2

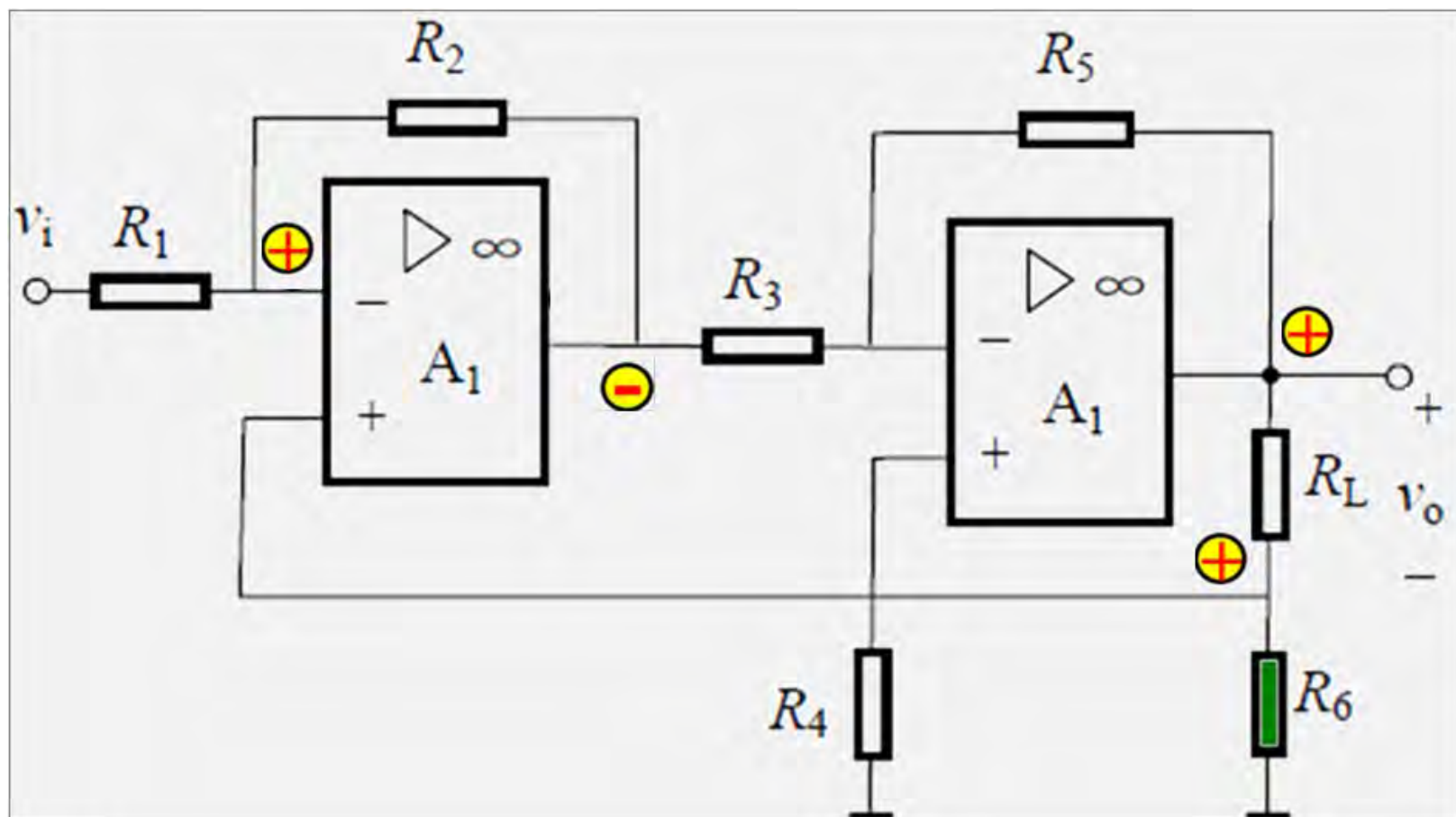
电压 \Rightarrow 并联 \Rightarrow 负反馈

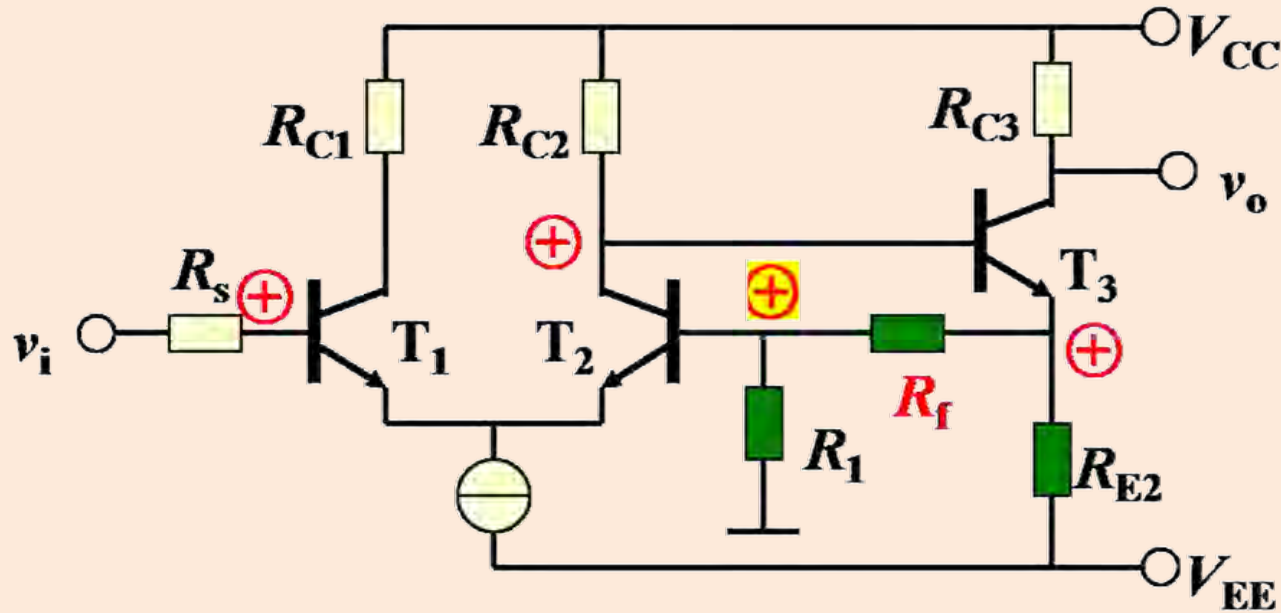


判断级间交流反馈:

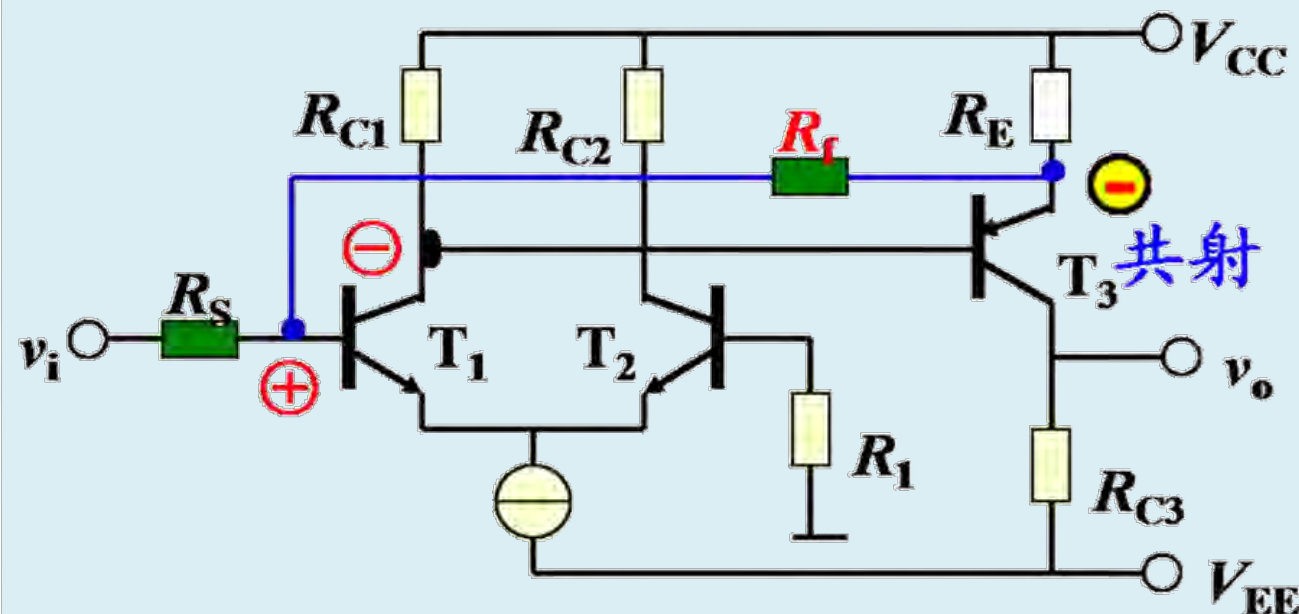
反馈网络: R_6

电流 \Rightarrow 串联 \Rightarrow 负反馈





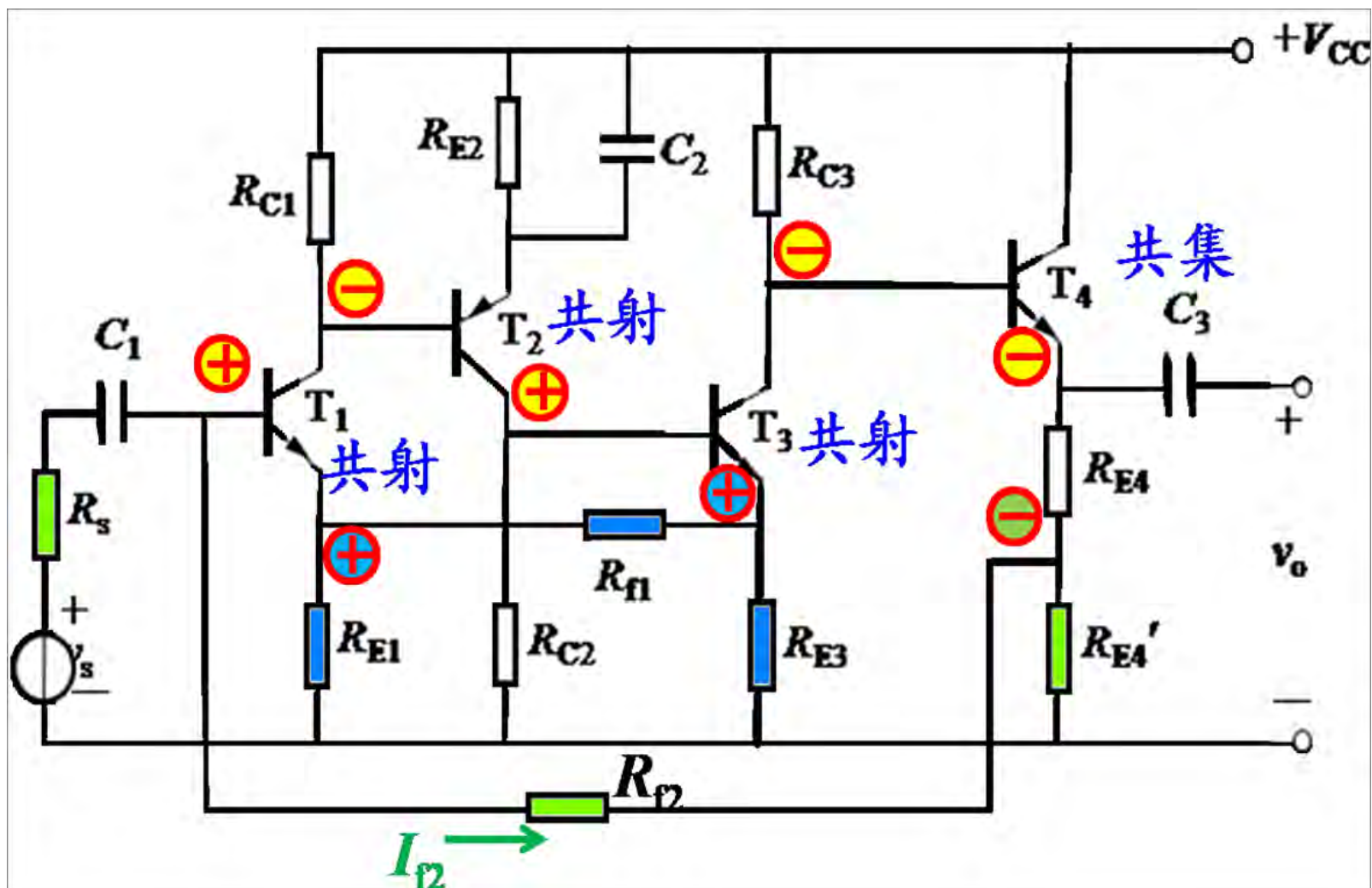
电流串联负反馈



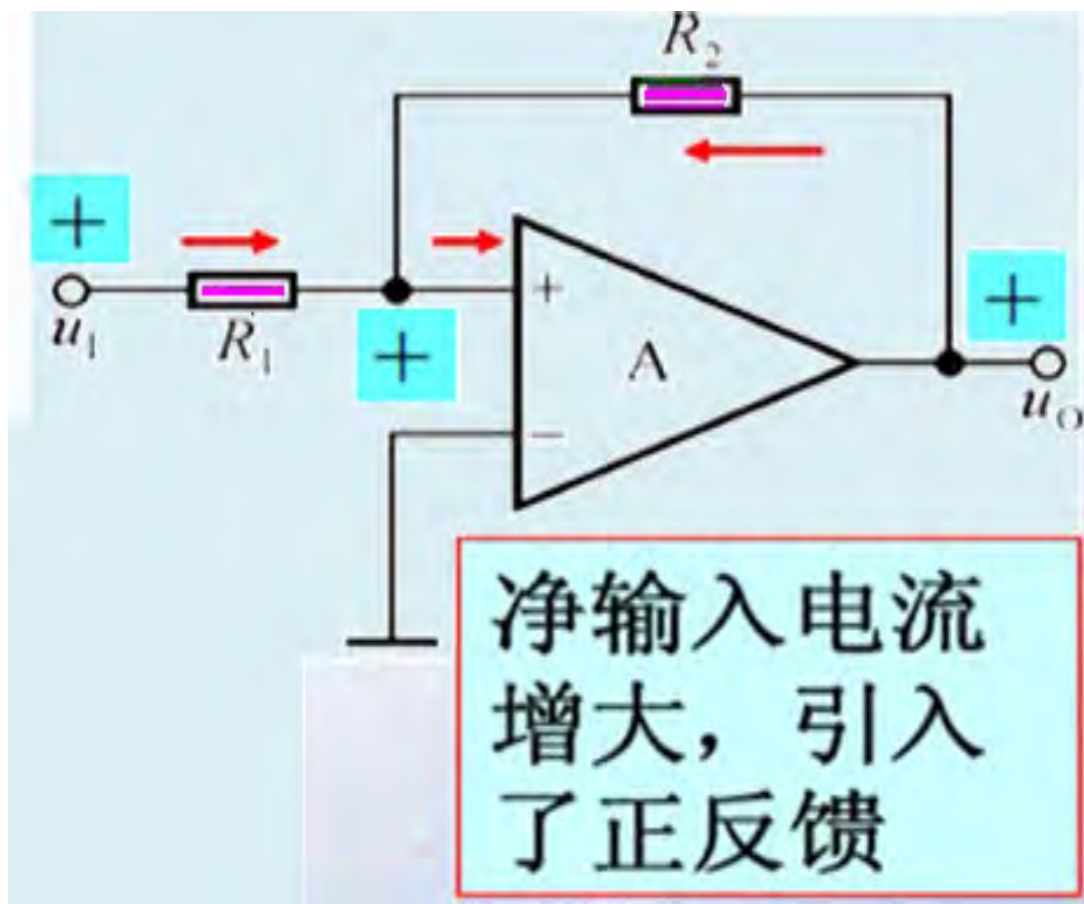
电流并联负反馈

R_{E1} , R_{f1} 和 R_{E3} 在 T_1 和 T_3 之间引入了电流串联负反馈

R_{E4}' , R_{f2} 和 R_S 在 T_1 和 T_4 之间引入了电压并联负反馈



判断本级交流反馈:



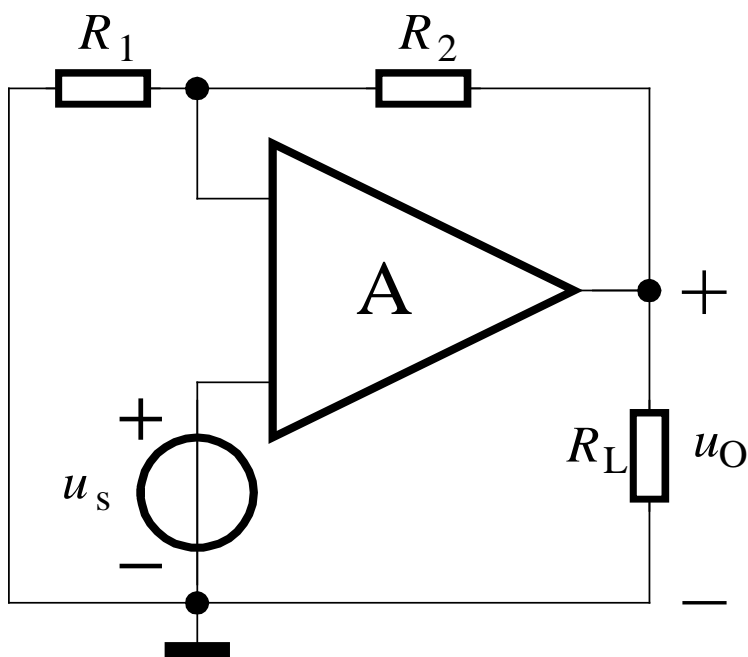
反馈网络: R_1, R_2

电压

并联

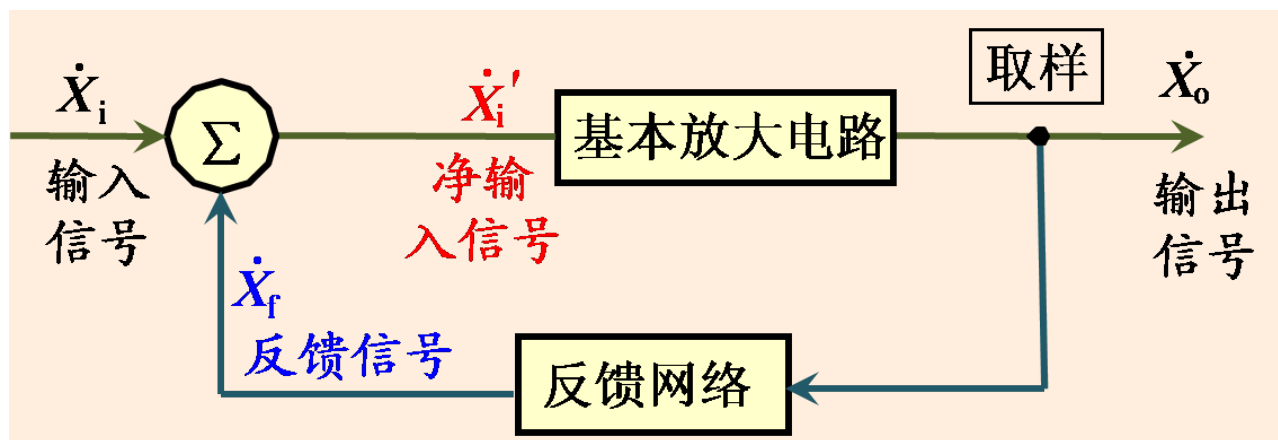
正反馈

由集成运放组成的反馈放大电路如图所示，为使它工作在负反馈状态，试用“+”“-”号分别标出运放A的同相输入端和反相输入端，并说明交流负反馈类型。



上面输入端标“-”，
下面输入端标“+”；
电压串联

四、反馈放大电路的基本方程



$$\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}'_i} \text{ --- 基本放大电路的增益(也称开环增益)}$$

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} \text{ --- 反馈放大电路的增益(也称闭环增益)}$$

$$\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o} \text{ --- 反馈系数}$$

$$\dot{T} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}'_i} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}'_i} \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o} = \dot{A}\dot{F} \quad \text{---环路增益(回归比)}$$

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

---反馈放大器的基本方程

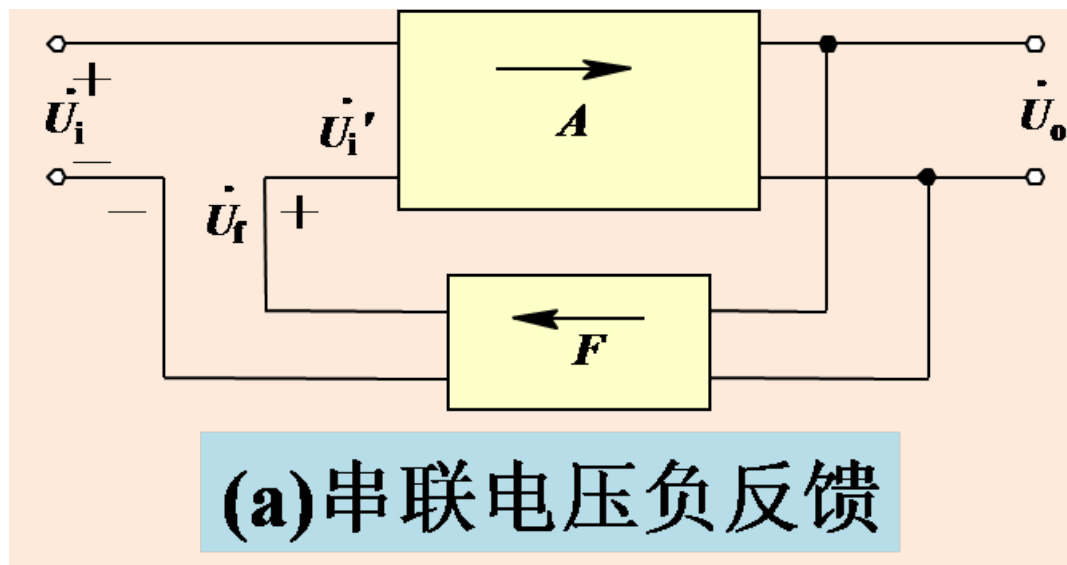
*****注意:** 上述X可以指电压也可以指电流, 因此A、F既可能是电压增益也可能是电流增益, 也可能是互导增益或互阻增益。

讨论： 不特殊说明的均指在中频区，故各量均为实数

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}F} \quad D = 1 + AF \text{ 称为反馈深度}$$

- ① $|1 + AF| > 1$ ，则 $A_f < A$ ，负反馈，负反馈使放大器的增益下降了 $(1 + AF)$ 倍；
- ★ ② $|1 + AF| \gg 1$ ，则 $A_f \approx 1/F$ ，即 $X_i \approx X_f$ ，即反馈信号近似等于输入信号，净输入量近似为 0，深度负反馈；
- ③ $|1 + AF| < 1$ ，则 $A_f > A$ ，正反馈；
- ④ $|1 + AF| = 0$ ，则 $A_f \rightarrow \infty$ ，自激振荡；

五、四种组态负反馈放大电路中各参数的意义

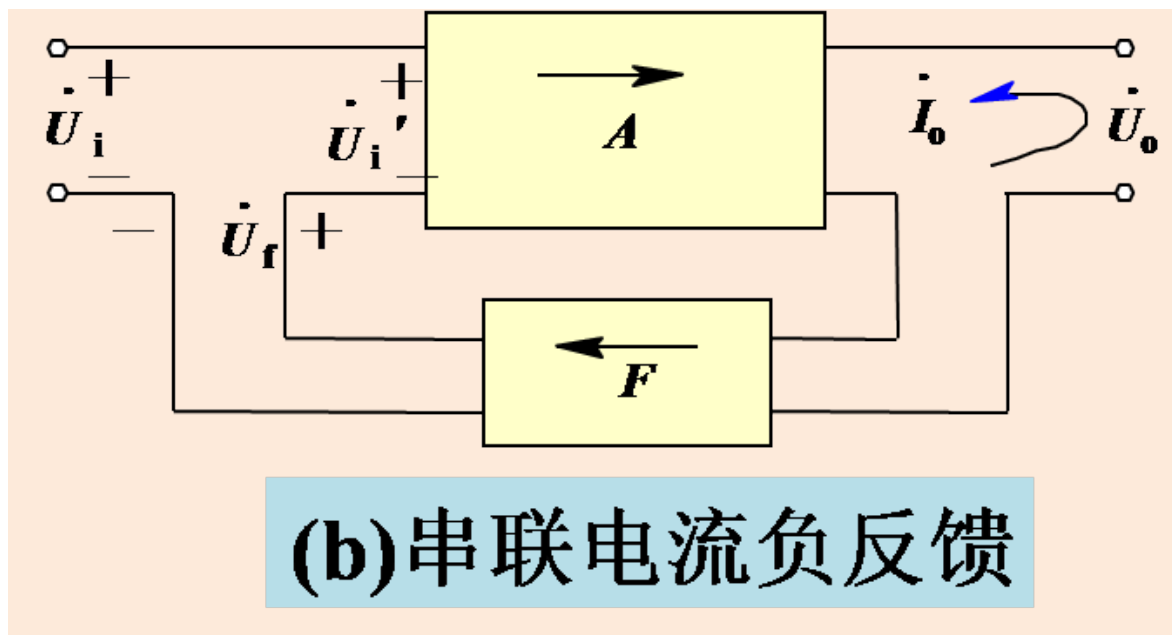


$$A_u = \frac{X_o}{X_i'} = \frac{U_o}{U_i'}, \quad F_u = \frac{X_f}{X_o} = \frac{U_f}{U_o}$$

$$A_{uf} = \frac{X_o}{X_i} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{A_u}{1 + A_u F_u}$$

深度负反馈时，

$$U_i \approx U_f$$

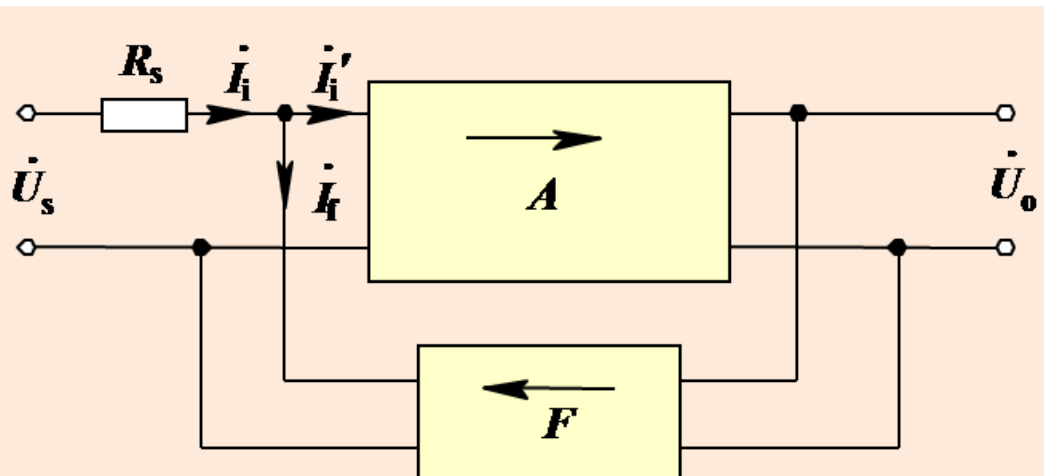


$$A_g = \frac{X_0}{X_i} = \frac{I_0}{U_i}, \quad F_r = \frac{X_f}{X_0} = \frac{U_f}{I_0}$$

$$A_{gf} = \frac{X_0}{X_i} = \frac{I_0}{U_i} = \frac{A_g}{1 + A_g F_r}$$

深度负反馈时，

$$U_i \approx U_f$$



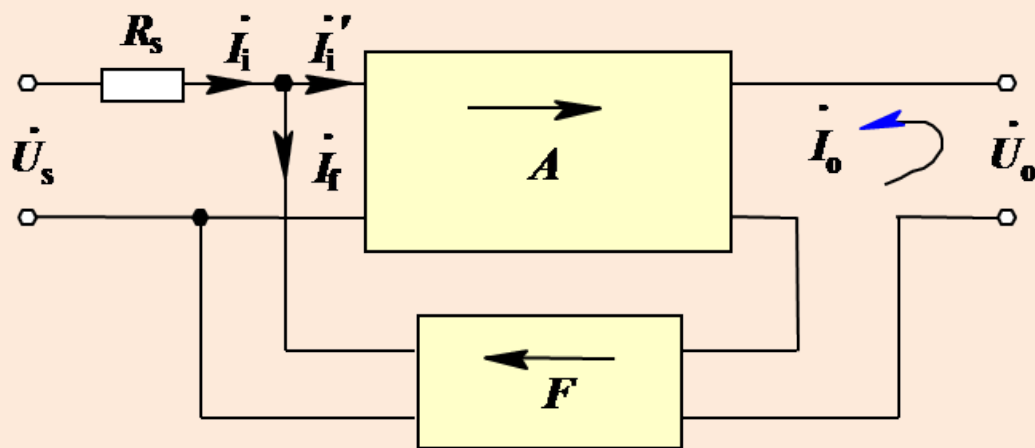
(c) 并联电压负反馈

$$A_r = \frac{U_o}{I_i'}, \quad F_g = \frac{I_f}{U_o}$$

$$A_{rf} = \frac{U_o}{I_i} = \frac{A_r}{1 + A_r F_g}$$

深度负反馈时，

$$I_i \approx I_f$$



(d) 并联电流负反馈

$$A_i = \frac{I_o}{I_i'}, \quad F_i = \frac{I_f}{I_o}$$

$$A_{if} = \frac{I_o}{I_i} = \frac{A_i}{1 + A_i F_i}$$

深度负反馈时，

$$I_i \approx I_f$$

四种组态负反馈放大电路的参数比较

反馈组态	功能	\dot{A}	\dot{F}	\dot{A}_f
电压串联	电压控制电压	\dot{U}_o / \dot{U}_i	\dot{U}_f / \dot{U}_o	\dot{U}_o / \dot{U}_i
电压并联	电流控制电压	\dot{U}_o / \dot{I}_i	\dot{I}_f / \dot{U}_o	\dot{U}_o / \dot{I}_i
电流串联	电压控制电流	\dot{I}_o / \dot{U}_i	\dot{U}_f / \dot{I}_o	\dot{I}_o / \dot{U}_i
电流并联	电流控制电流	\dot{I}_o / \dot{I}_i	\dot{I}_f / \dot{I}_o	\dot{I}_o / \dot{I}_i

负反馈对放大器性能的影响

1. 稳定放大倍数

当 X_i 不变时，若

$$A \downarrow \Rightarrow X_o \downarrow \Rightarrow X_f (= F X_o) \downarrow$$



$$A \uparrow \Leftarrow X_o \uparrow \Leftarrow X'_i (= X_i - X_f) \uparrow$$

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

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

*******即：引入反馈后，虽然放大倍数下降到开环时的 $1/(1+AF)$ 倍，但稳定性却提高到了开环时的 $(1+AF)$ 倍

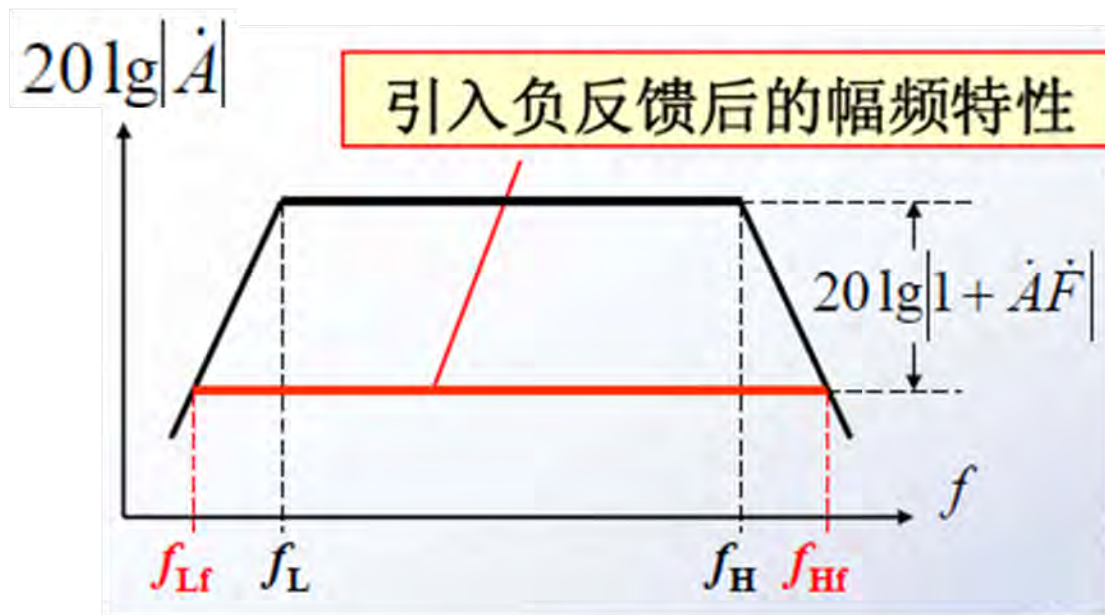
在深度负反馈时， $A_f=1/F$ ，因此，只要 F 稳定， A_f 也将稳定。

注意：负反馈的组态不同，稳定的增益不同（ A_{vf} 、 A_{rf} 、 A_{gf} 、 A_{if} ），与被稳定的对象与反馈信号的取样对象有关。如果取样对象是输出电压，则输出电压将被稳定；如果取样对象是输出电流，则输出电流将被稳定。

2. 展宽通频带

$$A_{If}(jf) = \frac{A_I(jf)}{1 + FA_I(jf)}$$

$$BW_f = (1 + FA_I)BW$$

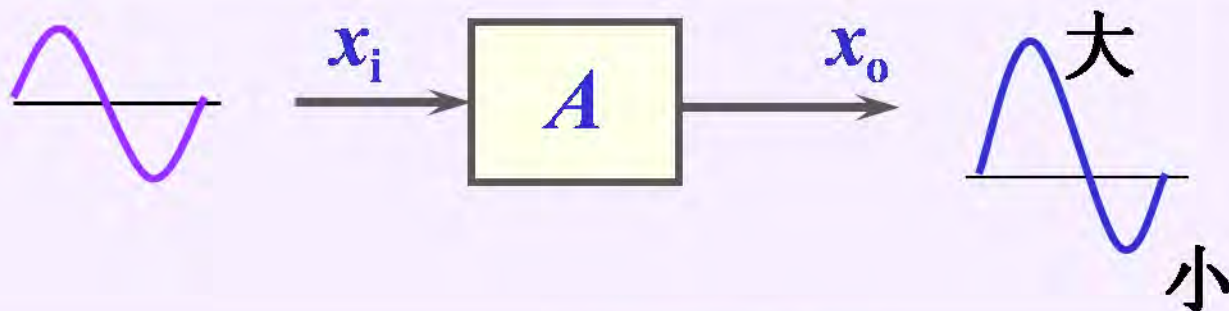


可见，引入负反馈后，放大电路的中频放大倍数减小到无反馈时的 $1/(1+A_I F)$ 倍；但通频带同时也展宽到无反馈时的 $(1+A_I F)$ 倍，所以增益频带积没变。即

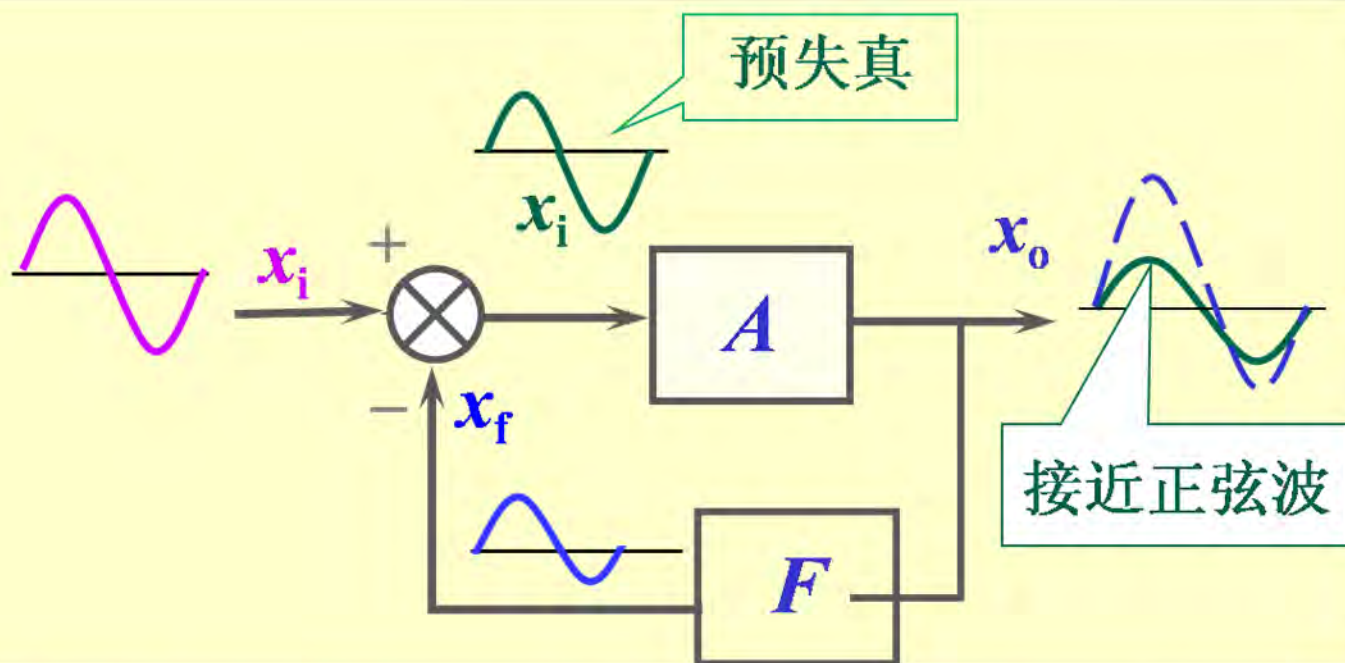
$$|A_{If} \cdot BW_f| = |A_I \cdot BW| \text{ --- 增益频带积}$$

3. 减小非线性失真

无负反馈



加入
负反馈



非线性失真的减小只限于电路内部产生的非线性失真

4. 减小干扰与噪声

利用**负反馈抑制放大器内部噪声及干扰**的机理与减小非线性失真是一样的。负反馈输出噪声下降 $(1+AF)$ 倍。如果输入信号本身不携带噪声和干扰，且其幅度可以增大，输出信号分量保持不变，那么放大器的信噪比将提高 $(1+AF)$ 倍。

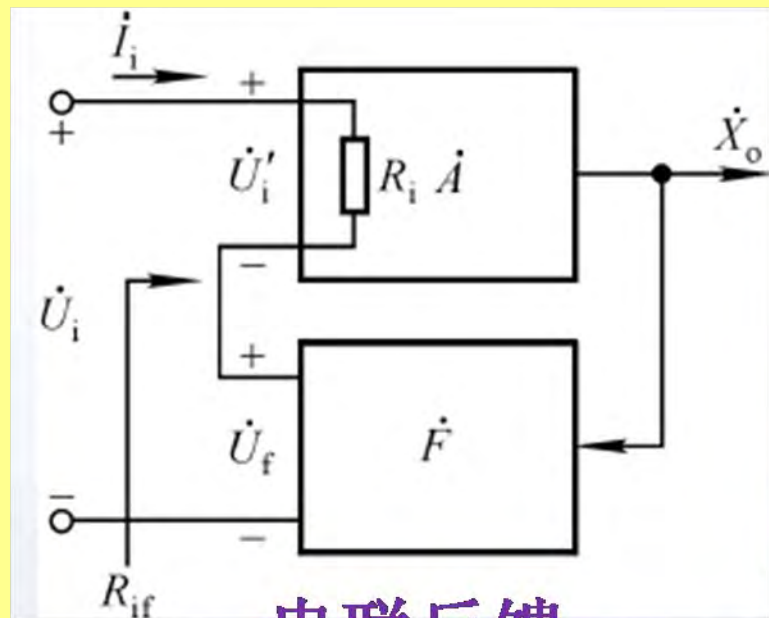
注意：负反馈只能改善由放大器本身引起的非线性失真，抑制反馈环内的干扰和噪声，而不能改善输入信号本身存在的非线性失真，对混入输入信号的干扰和噪声也无能为力。

5. 改变输入电阻和输出电阻

不同类型的负反馈，对输入电阻、输出电阻的影响不同。

(1). 对输入电阻的影响

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。



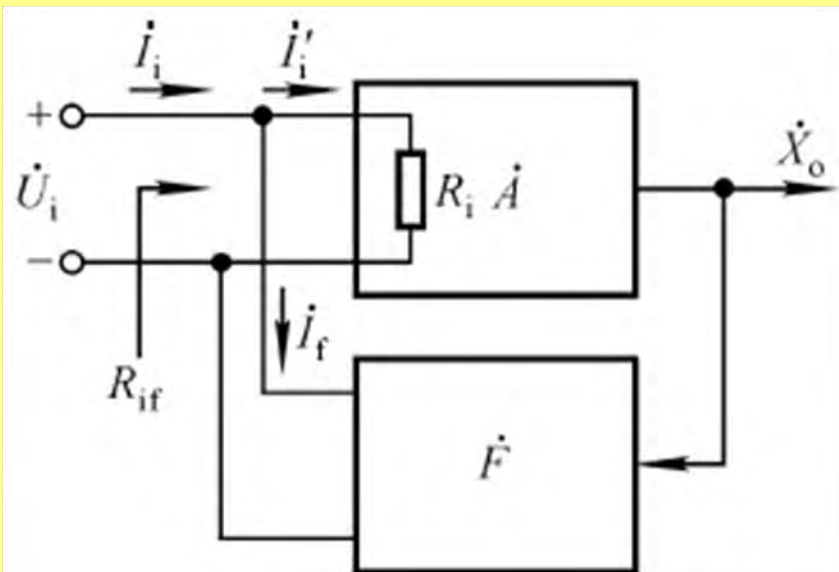
串联反馈

$$R_i = \frac{U_i'}{I_i}$$

$$R_{if} = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i' + U_f}{I_i} = \frac{U_i' + AFU_i'}{I_i}$$

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

串联负反馈增大输入电阻



$$R_i = \frac{U_i}{I'_i}$$

$$R_{if} = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{I'_i + I_f} = \frac{U_i}{I'_i + AF I'_i}$$

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

并联反馈

并联负反馈减小输入电阻

(2). 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。

引入电压负反馈时

电压负反馈稳定输出电压，使输出具有恒压特性，因而输出电阻减小。

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

引入电流负反馈时

电流负反馈稳定输出电流，使输出具有恒流特性，因而输出电阻增大。

$$R_{of} = (1 + AF) R_o$$

归纳: ★

- ① 放大电路中应引入电压/电流负反馈取决于负载欲得到稳定的电压，还是稳定的电流。
- ② 放大电路中应引入串联/并联负反馈取决于输入信号源是恒压源还是恒流源。

- 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
- 要增大输出电阻—— 引电流负反馈
- 要减小输出电阻—— 引电压负反馈

总结：放大电路中的反馈类型、判别方法和对放大性能的影响

反馈类型		定义	判别方法	对放大电路性能的影响
1	电压反馈	反馈信号从输出电压取样 (与 u_0 成正比)	$u_0=0$ 时: 反馈信号不存在	稳定输出电压, 减小输出电阻
	电流反馈	反馈信号从输出电流取样 (与 I_0 成正比)	$u_0=0$ 时: 反馈信号存在	稳定输出电流, 增大输出电阻
2	串联反馈	输入信号为电压	反馈信号与输入信号串联 (u_f 与 u_i 串联)	增大输入电阻
	并联反馈	输入信号为电流	反馈信号与输入信号并联 (I_f 与 I_i 并联)	减小输入电阻

3	直流反馈	反馈信号为直流信号	直流通路中存在反馈	稳定静态工作点
	交流反馈	反馈信号为交流信号	交流通路中存在反馈	改善放大电路性能
4	正反馈	反馈信号使净输入信号加强	作用于同一节点时：极性相同；作用于不同节点时：极性不同。	使 A_u 增加，电路可能工作不稳定
	负反馈	反馈信号使净输入信号减弱	作用于同一节点时：极性不同；作用于不同节点时：极性相同。	使 A_u 减小，电路可能工作稳定
5	本级反馈	反馈信号反送到本级输入回路	反馈信号与本级输出回路联系	改善本级电路性能
	级间反馈	反馈信号反送到前面输入级回路	反馈信号与后级输出回路联系	改善放大电路各项性能



负反馈的特点归纳：

- ① 负反馈使放大器的放大倍数下降，但增益稳定度提高，频带展宽，非线性失真减小，内部噪声干扰得到抑制，且所有性能改善的程度均与反馈深度 $(1+AF)$ 有关。
- ② 负反馈只能改善包含在负反馈环节以内的放大器性能，对反馈环以外的，与输入信号一起进来的失真、干扰、噪声及其它不稳定因素是无能为力的。

为了稳定三极管放大电路的静态工作点，采用直流负反馈，为了稳定交流输出电流采用交流电流负反馈。

在放大电路中，若要求稳定静态工作点，应该引入直流负反馈，若要求稳定放大倍数，应该引入交流负反馈，某些场合要求提高放大倍数，应该引入交流正反馈，要求展宽通频带，应该引入交流负反馈。

深度负反馈放大电路近似计算



深度负反馈下，闭环电压放大倍数 A_{uf} 的近似计算

1. 深度负反馈的实质

①

$|1+AF| \gg 1$ ，则 $A_f \approx 1/F$



即求出 F ，就可求出 A_f ，但四种量纲需转换成 A_{uf} 。

②

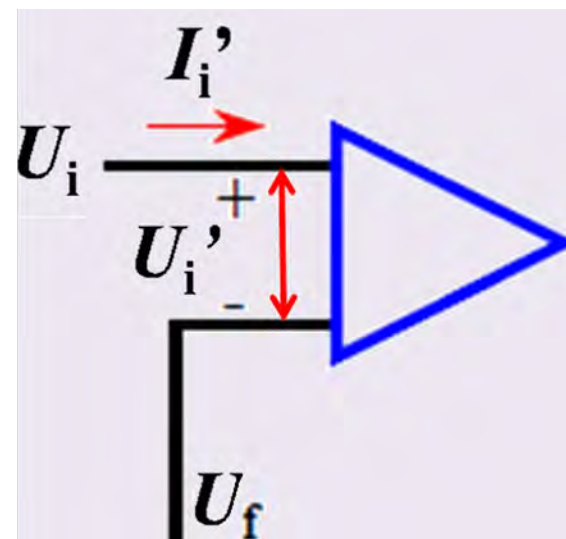
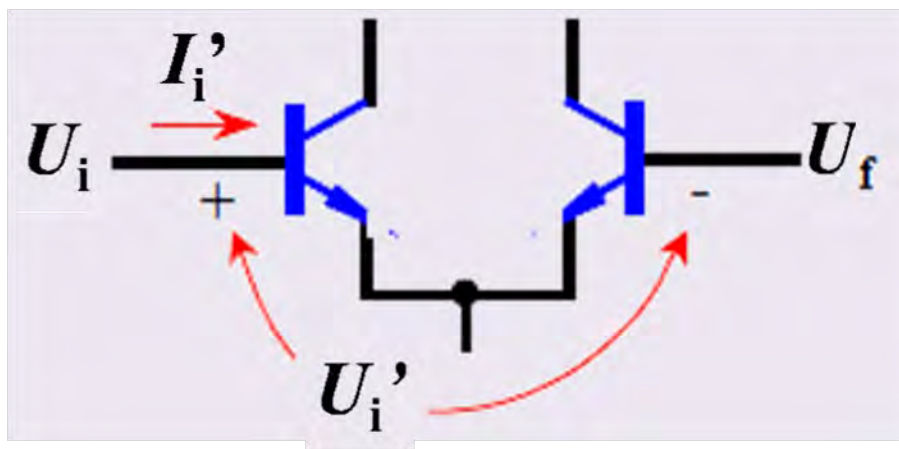
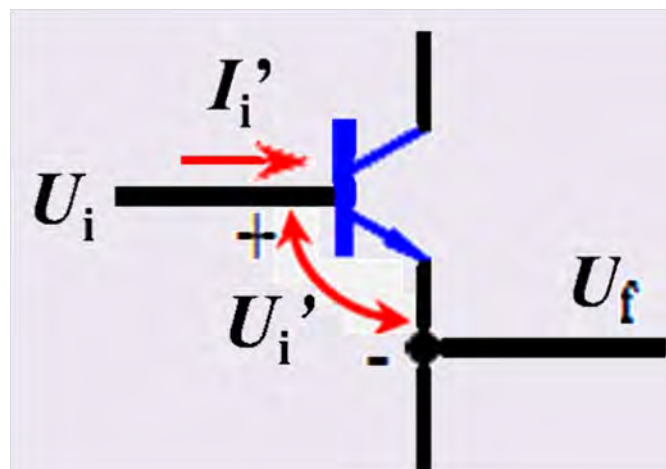


$X_i \approx X_f$ ，即反馈信号近似

等于输入信号，净输入量近似为0

串联反馈： $U_i \approx U_f, U_i' \approx 0$ 输入支路断路

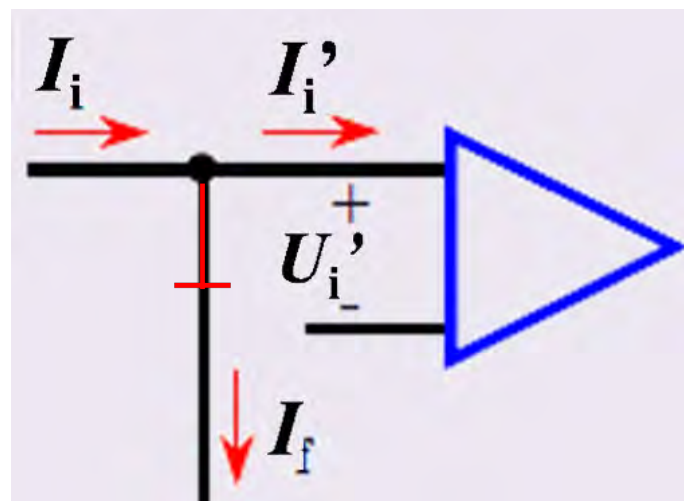
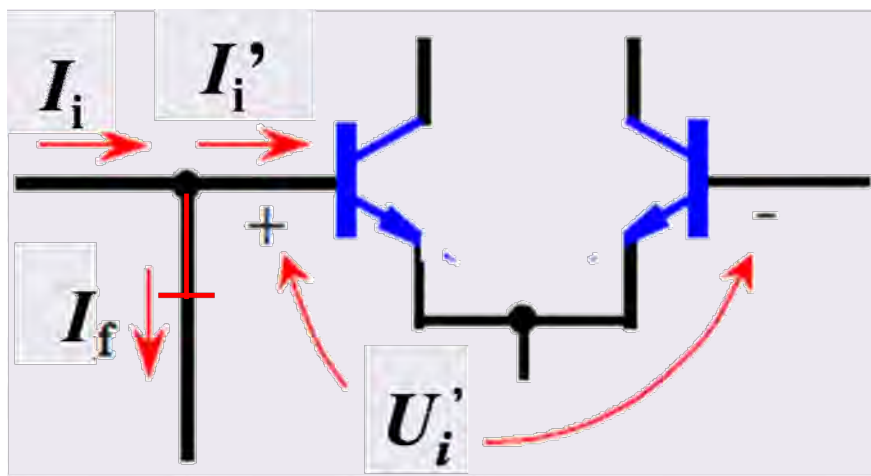
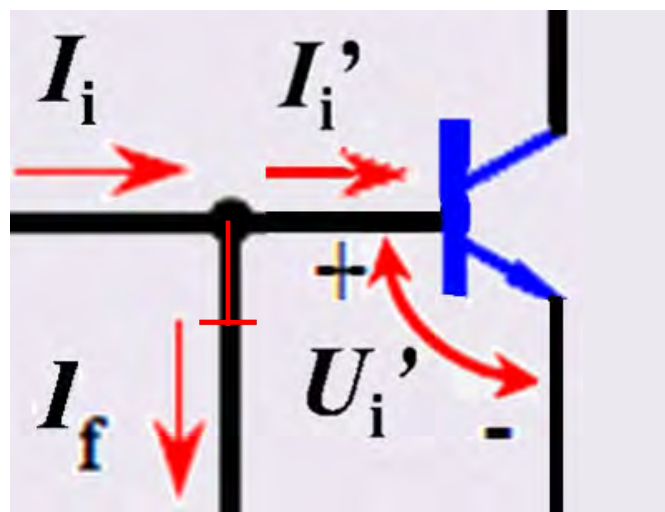
$$\begin{cases} U_i' = U_i - U_f \approx 0 \text{ -- 虚短} \\ I_i' = \frac{U_i'}{R_i} \approx 0 \text{ -- 虚断} \end{cases}$$



并联反馈: $I_i \approx I_f, I'_i \approx 0$

反馈点对地短路

$$\begin{cases} I'_i = I_i - I_f \approx 0 \text{--虚断} \\ U'_i = I'_i R_i \approx 0 \text{--虚短} \end{cases}$$



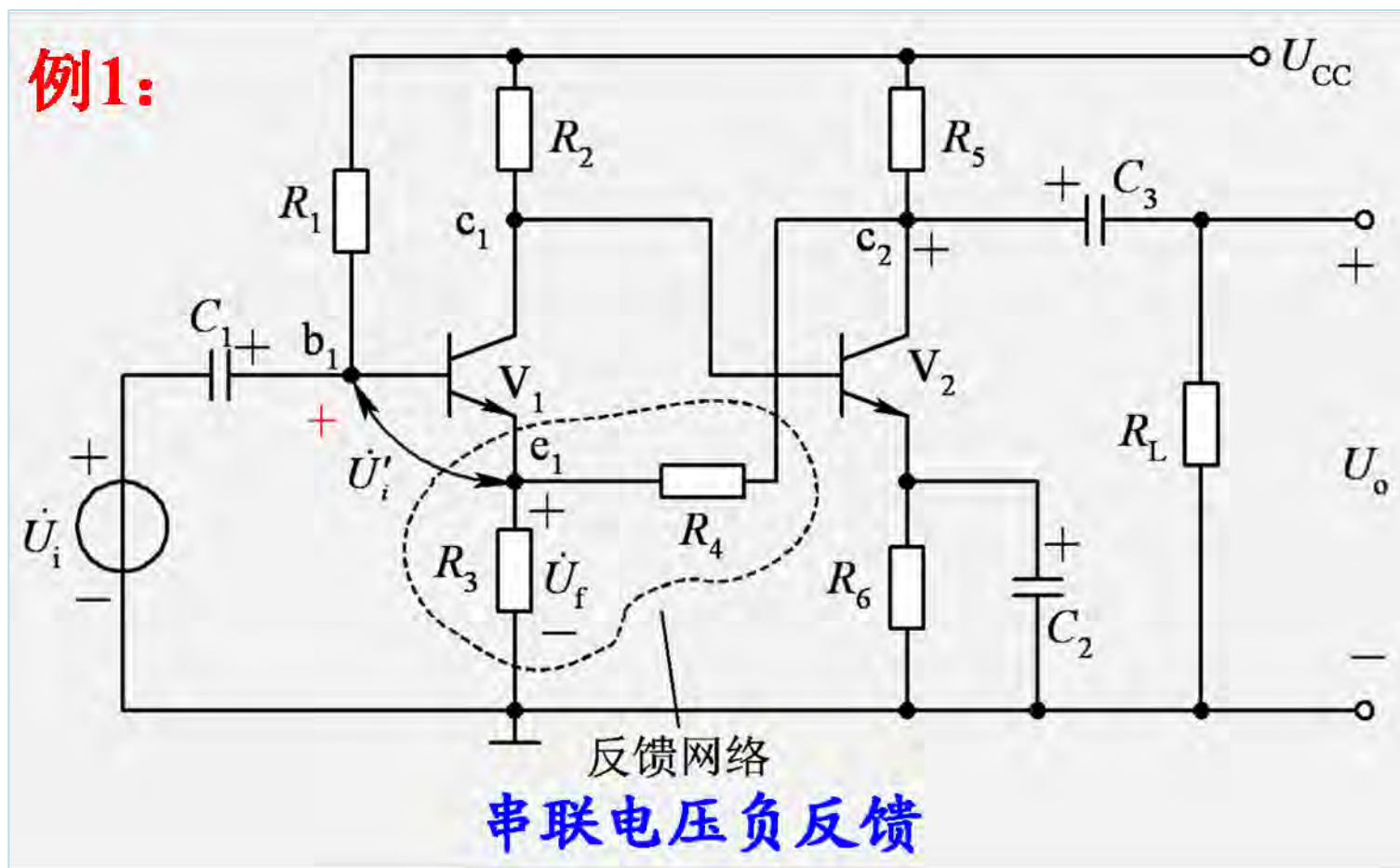
☆☆ $X_i \approx X_f$, 即反馈信号近似
等于输入信号, 净输入量近似为0

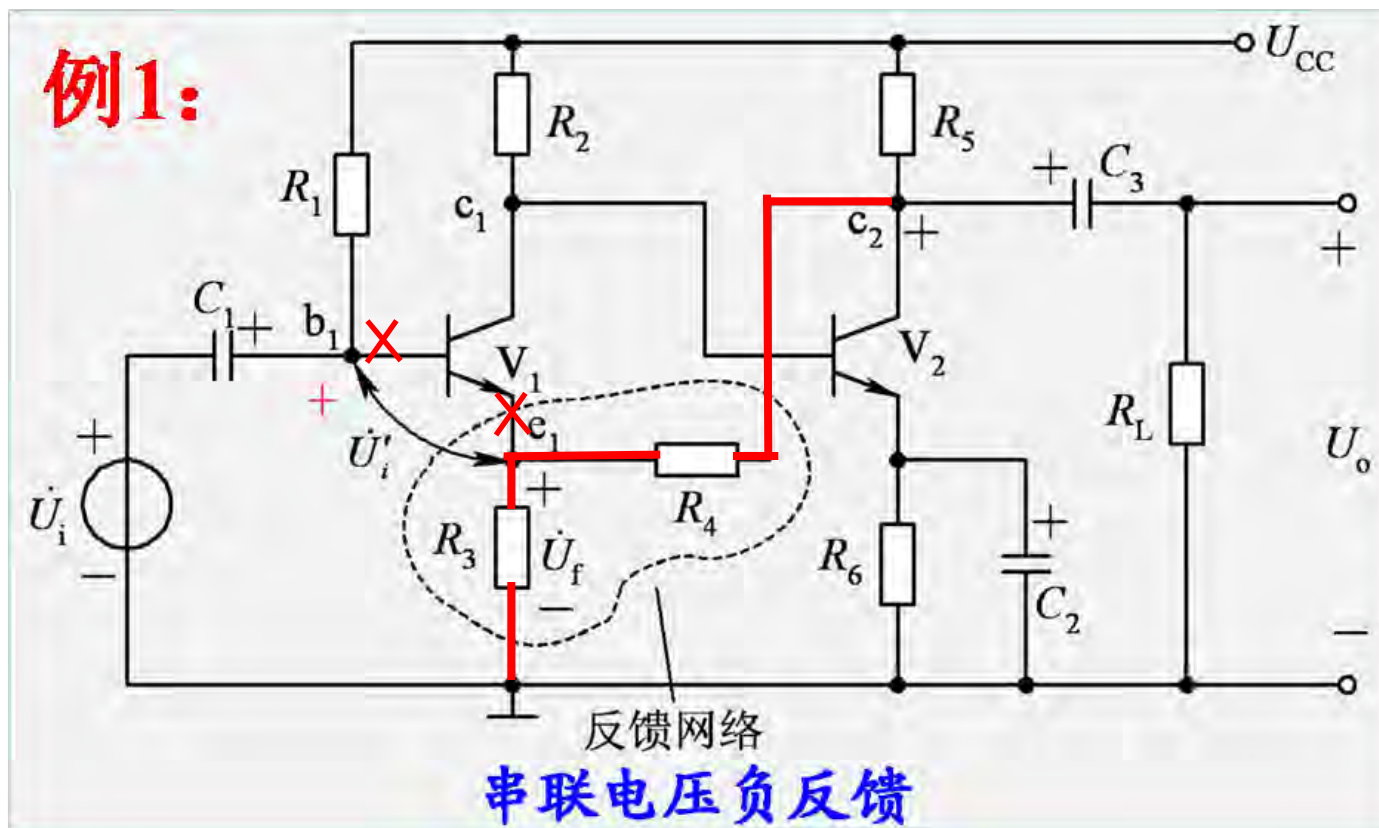
串联反馈: $U_i \approx U_f, U_i' \approx 0$ 输入支路断路

并联反馈: $I_i \approx I_f, I_i' \approx 0$ 反馈点对地短路

2. 深度负反馈下，闭环电压放大倍数 A_{uf} 的近似计算

(1). 电压串联负反馈





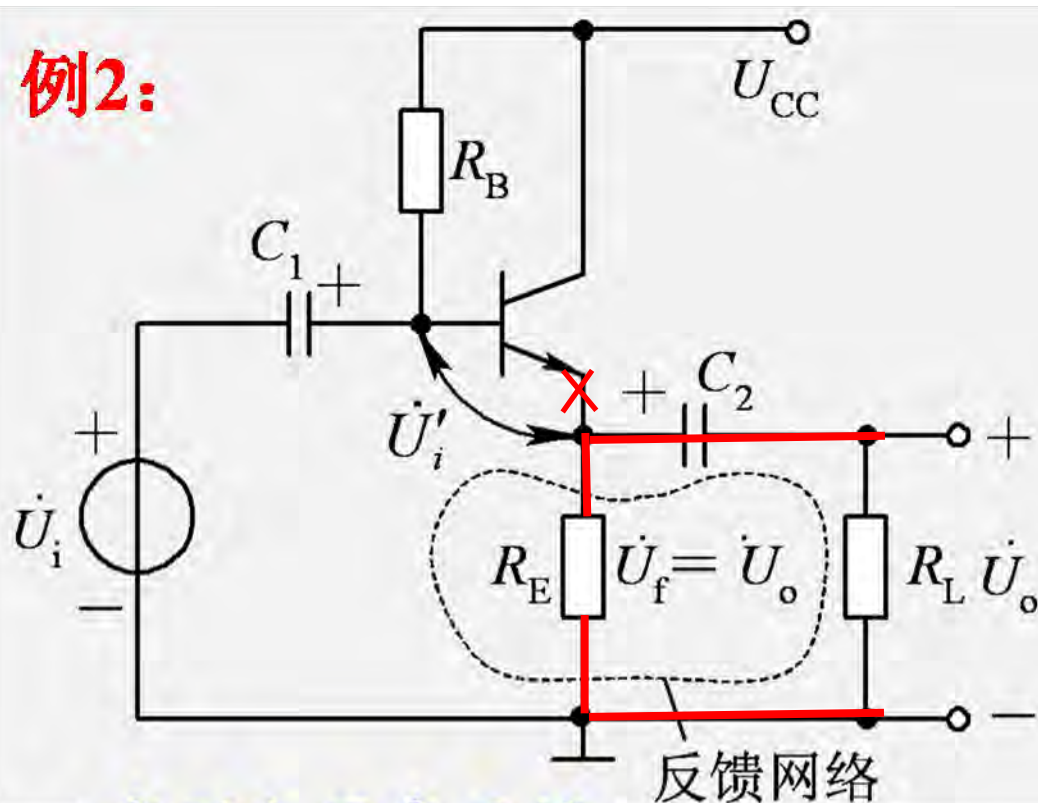
串联反馈时，
输入支路断路

把反馈网络
与输入回路
断开来看

深度负反馈下， $U_i \approx U_f$ (串联负反馈)

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{U_o}{U_f} = \frac{R_3 + R_4}{R_3}$$

例2:

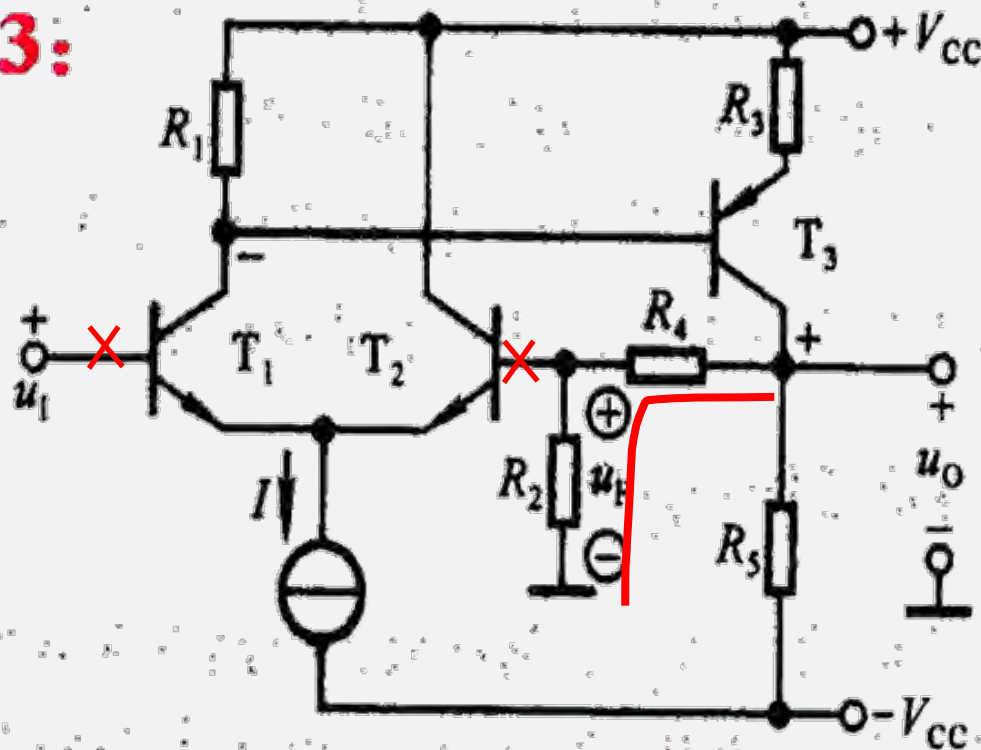


串联电压负反馈

在深反馈条件下： $U_i \approx U_f = U_o$ (串联负反馈)

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{U_o}{U_f} = \frac{U_o}{U_o} = 1$$

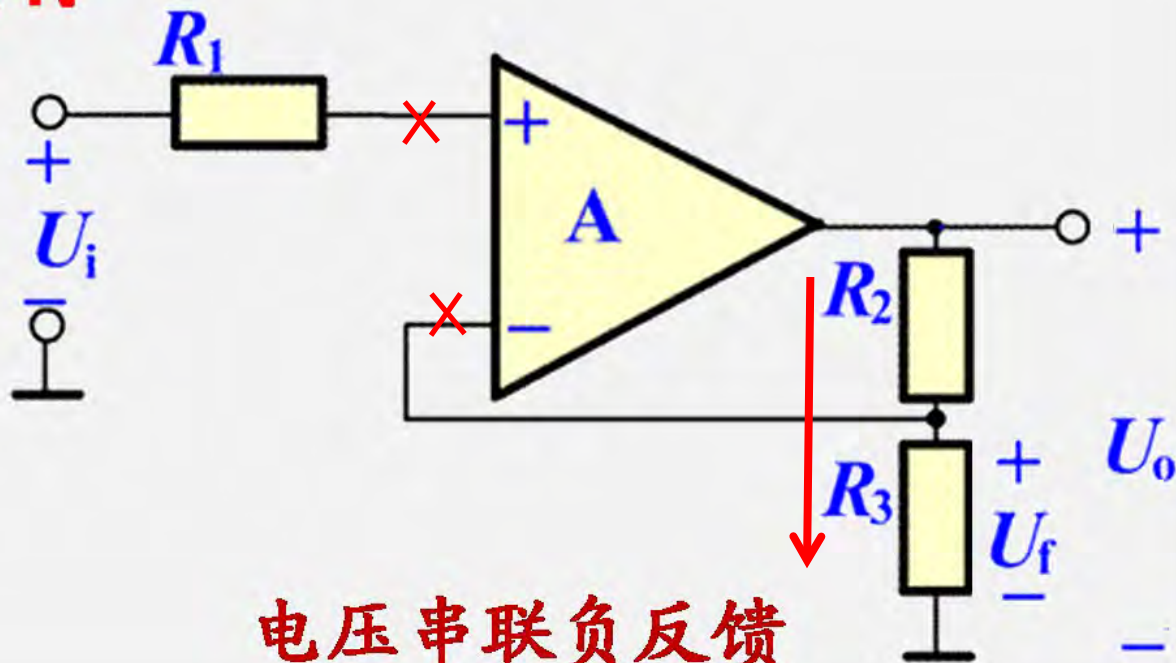
例3:



电压串联负反馈

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{U_o}{U_f} = \frac{R_2 + R_4}{R_2}$$

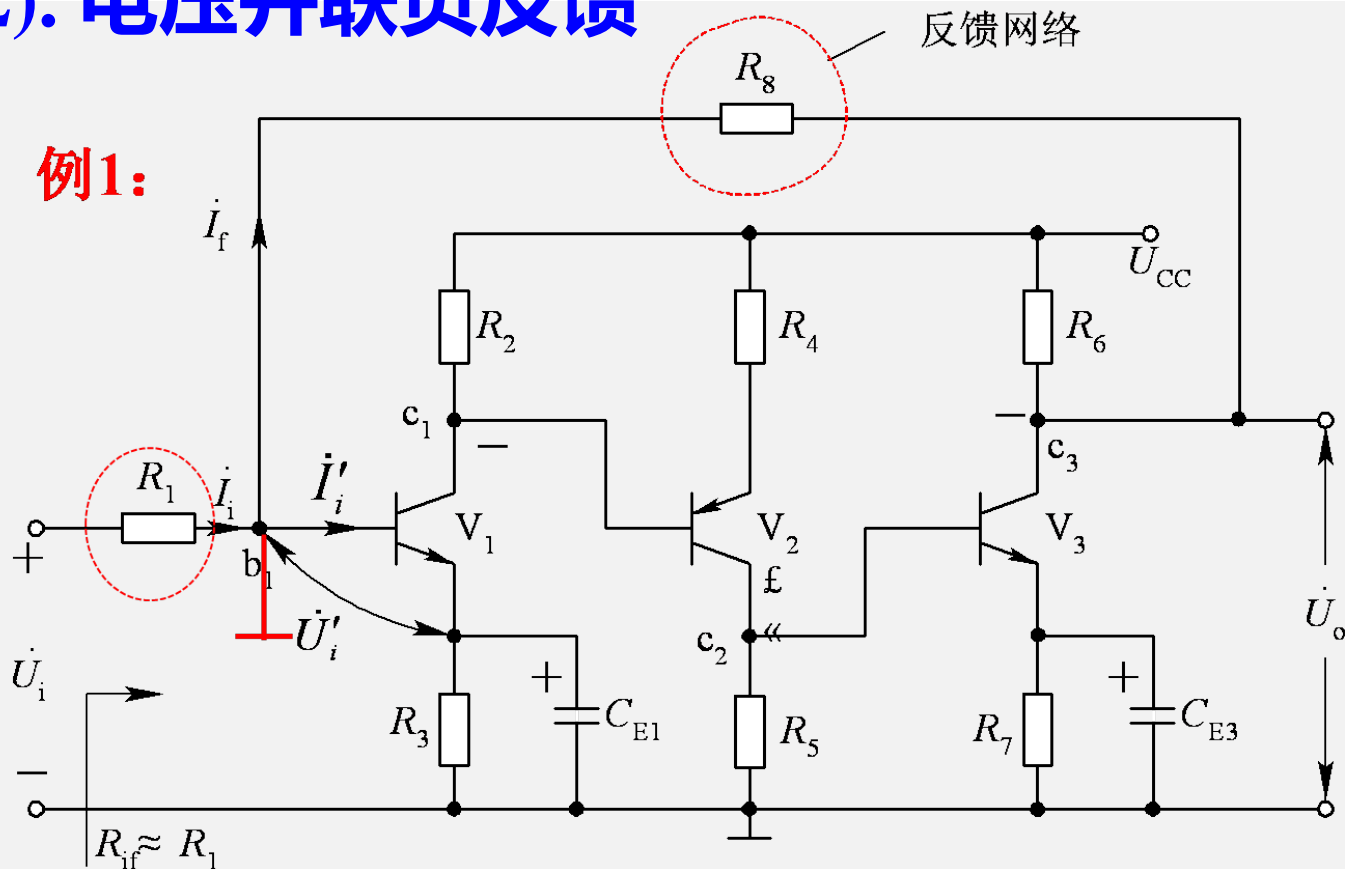
例4:



$$A_{uf} = \frac{U_0}{U_i} \approx \frac{U_0}{U_f = \frac{U_0}{R_2 + R_3} R_3} = \frac{R_2 + R_3}{R_3}$$

(2). 电压并联负反馈

例1:



并联反馈时，
反馈点对地短路

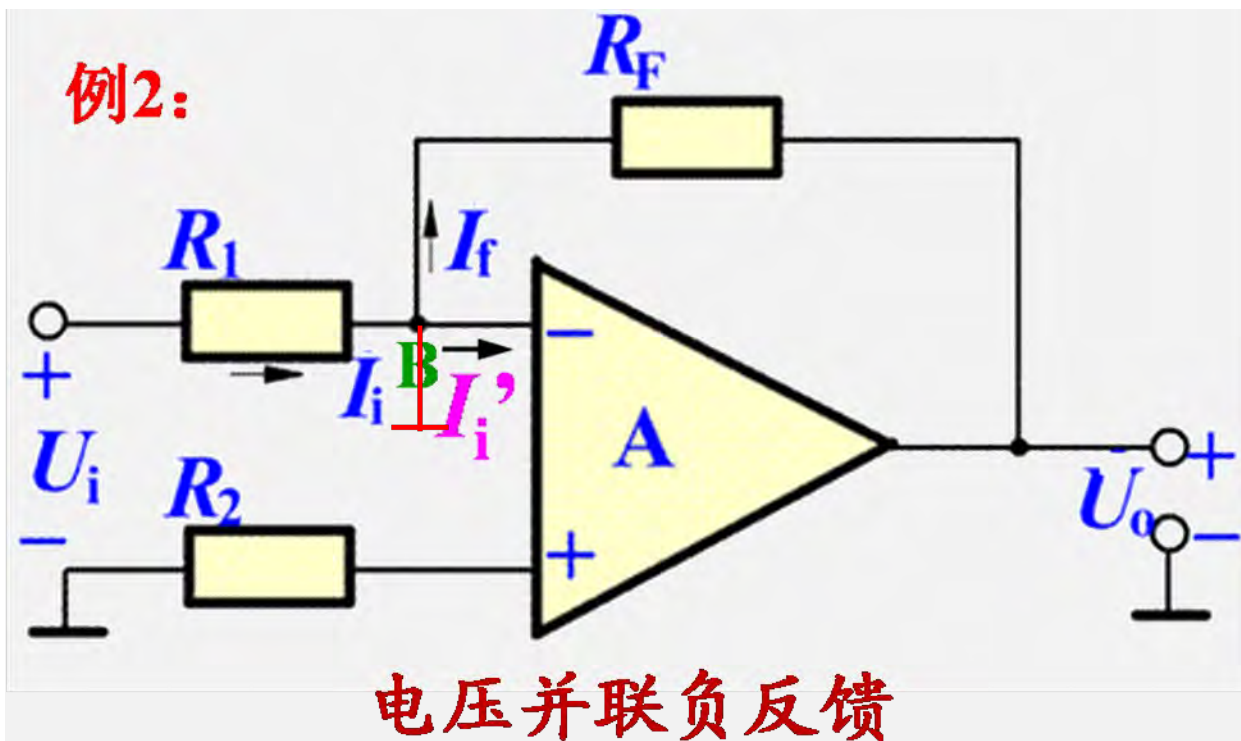
即 $U'_i = 0$

$U_i = I_i R_1 + U'_i$

$\approx I_i R_1$

深度负反馈时， $I_i = I_f$ ，而 $I_i = \frac{U_i - U'_i}{R_1} \approx \frac{U_i}{R_1}$ ，

$I_f = \frac{U'_i - U_o}{R_8} \approx -\frac{U_o}{R_8}$ ，故 $A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{R_8}{R_1}$

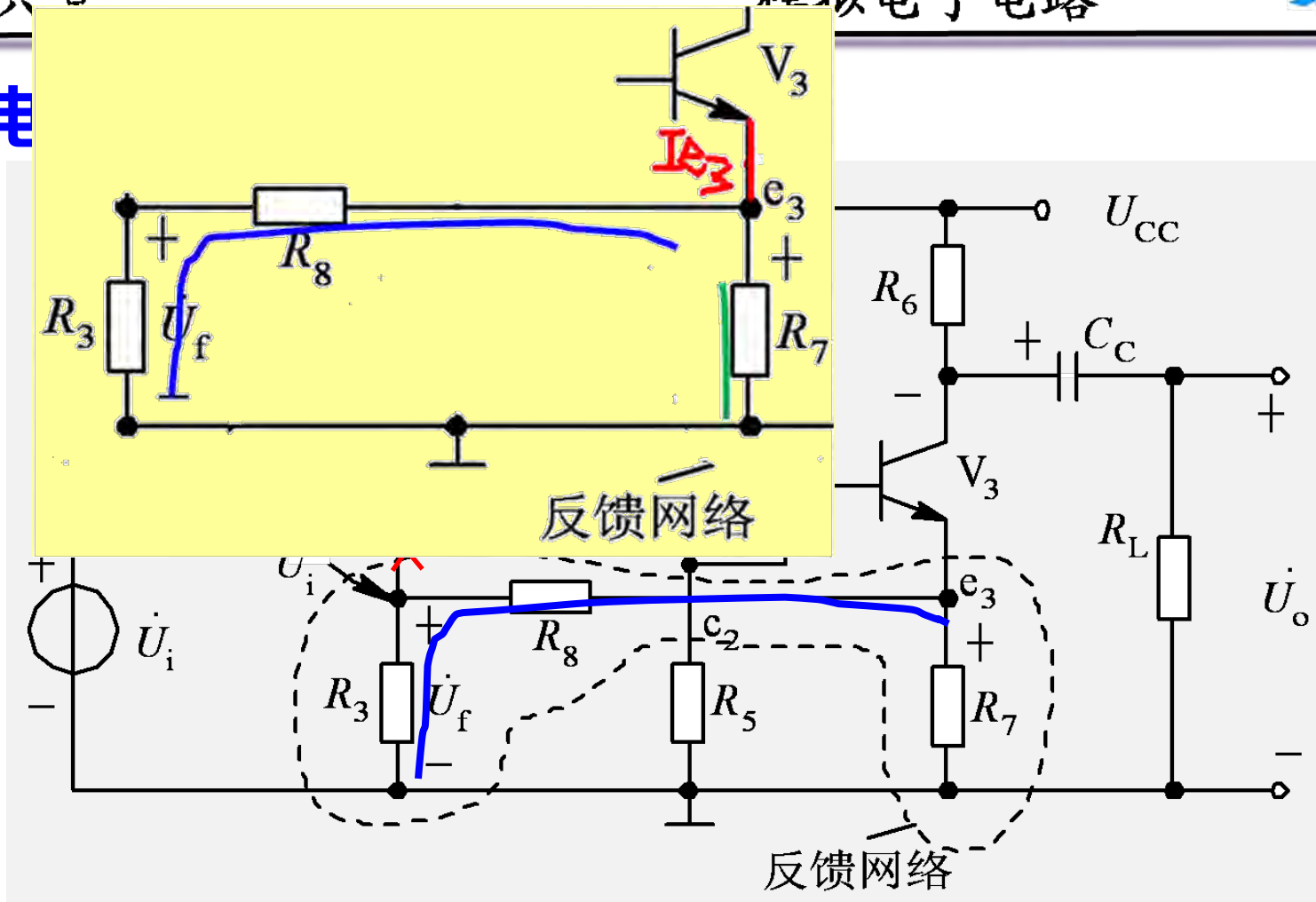


深度负反馈时, $I_i \approx I_f, I_i' \approx 0$ (并联负反馈)

$$\text{而 } I_i = \frac{U_i - U_B}{R_1} \approx \frac{U_i}{R_1}, \quad I_f = \frac{U_B - U_o}{R_F} \approx \frac{-U_o}{R_F}$$

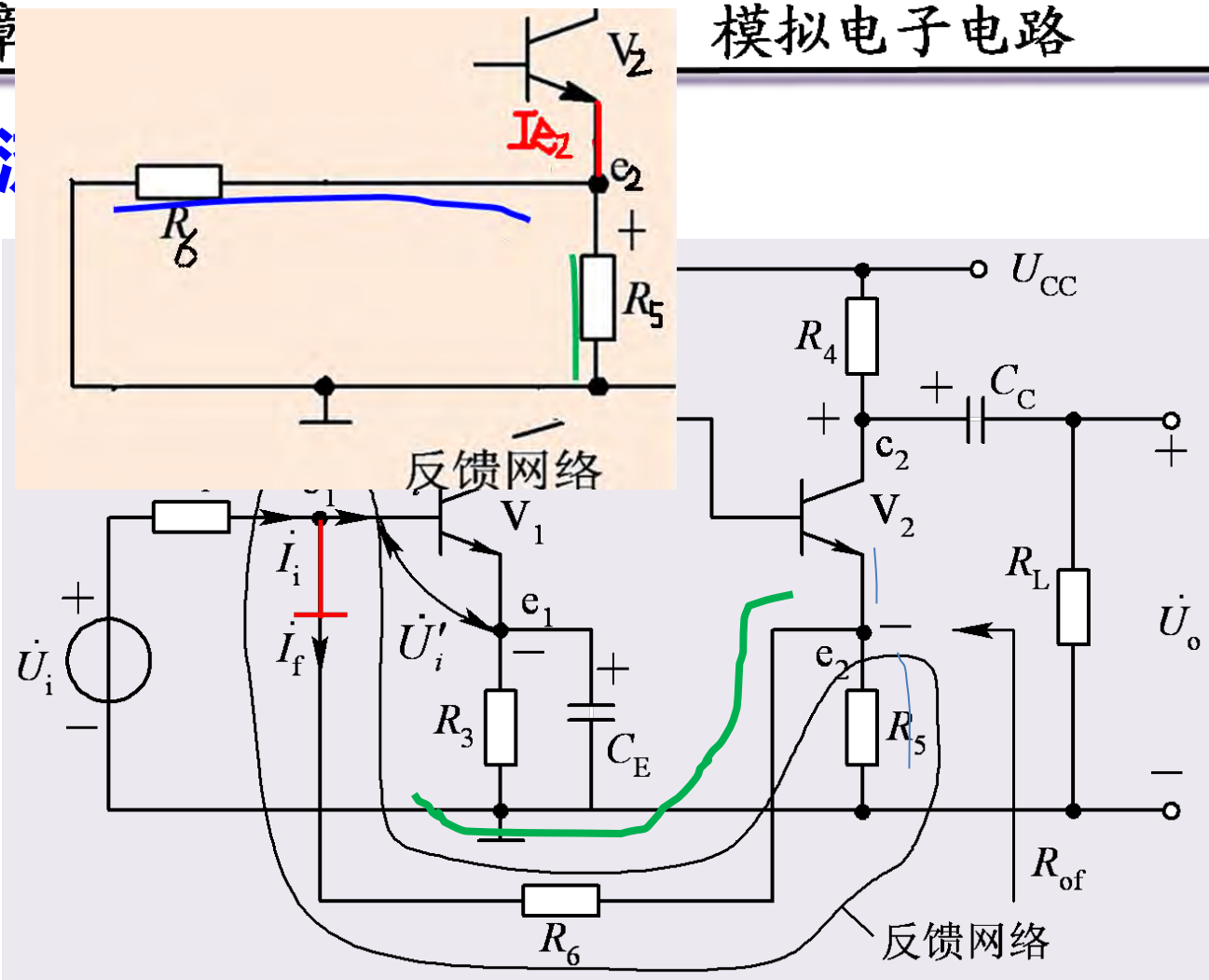
$$\text{故 } A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{R_F}{R_1}$$

(3).电

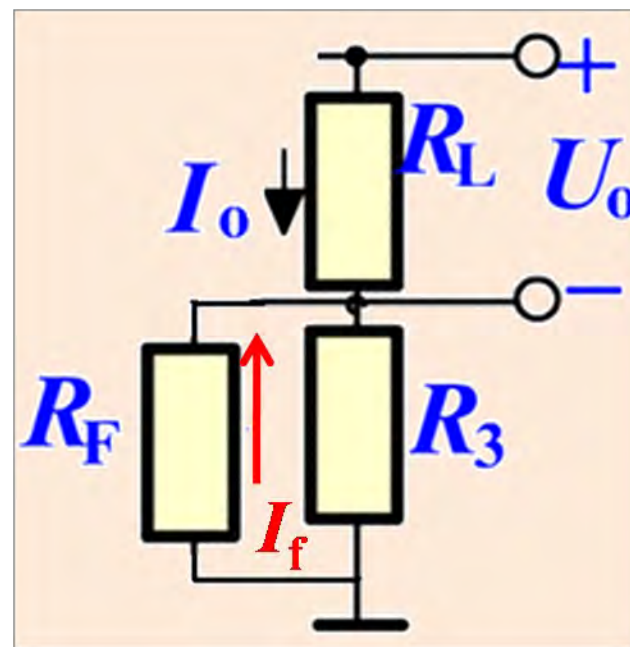
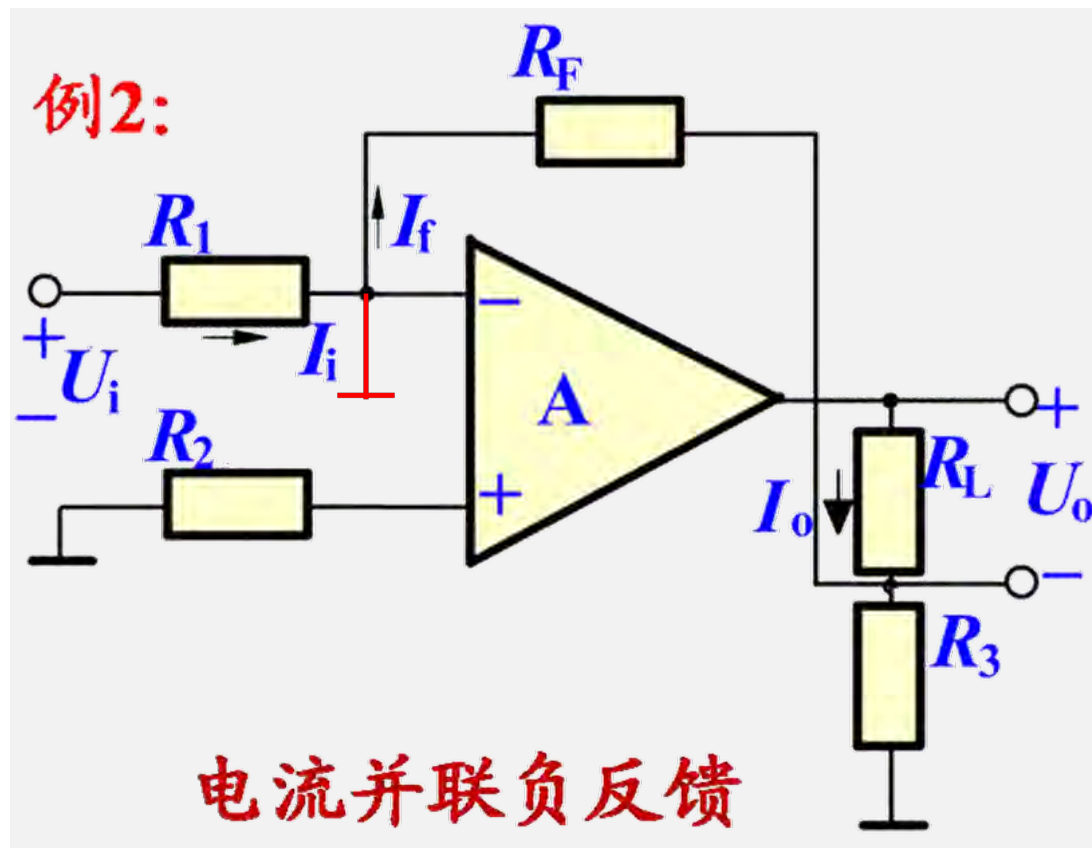


$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{U_o}{U_f} = \frac{-I_{c3}(R_6 \parallel R_L)}{\frac{I_{e3}R_7}{R_3 + R_8 + R_7} \cdot R_3} = -\frac{(R_3 + R_8 + R_7)(R_6 \parallel R_L)}{R_3 \cdot R_7}$$

(4). 电压



$$A_{uf} = \frac{U_0}{U_i} = \frac{-I_{c2}(R_4 \parallel R_L)}{I_i R_1 + U_i' (= 0)} = \frac{-I_f(R_5 + R_6)}{I_i R_1} (R_4 \parallel R_L) \approx \frac{R_5 + R_6}{R_5} \cdot \frac{(R_4 \parallel R_L)}{R_1}$$



$$I_o(R_3 \parallel R_F) = -I_f R_F$$

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{I_o R_L}{R_1 I_i} = \frac{-I_f (R_3 + R_F)}{R_3} R_L \approx -\frac{(R_3 + R_F) R_L}{R_1 R_3}$$

负反馈放大电路的稳定性

在中频时接入负反馈，但放大电路的放大倍数 A 和反馈系数 F 常常是频率的函数。当频率变化时， A 、 F 的模和相位都将随之改变，假如在高频或低频时变为 $|1 + \dot{A}\dot{F}| < 1$ ，即原来中频时的负反馈此时变为正反馈。当 $1 + \dot{A}\dot{F} = 0$ 时， $\dot{A}_f = \infty$ ，说明，即使没有输入信号，也会产生输出信号，这种现象称为自激振荡。

1. 产生自激振荡的平衡条件

$$1 + \dot{A}\dot{F} = 0$$

$$\text{即： } \dot{A}\dot{F} = -1$$

$$|\dot{A}\dot{F}| = 1 \text{ --- 幅值条件}$$

$$\varphi_A + \varphi_F = (2n+1)\pi \quad (n \text{ 为整数}) \text{ --- 相位条件}$$

$$\text{起振条件为 } |\dot{A}\dot{F}| > 1$$

作业：

 6.1

 6.2

 6.3

 6.7

 6.11

 6.13

 6.15

判断反馈类型的步骤:

- ① 找出反馈网络;
- ② 判断是电压反馈还是电流反馈;
- ③ 判断是串联反馈还是并联反馈;
- ④ 判断反馈极性。方法:
 - a. 采用瞬时极性法
 - b. 在明确串联反馈和并联反馈后, 可根据输入信号和反馈信号的瞬时极性来判断:

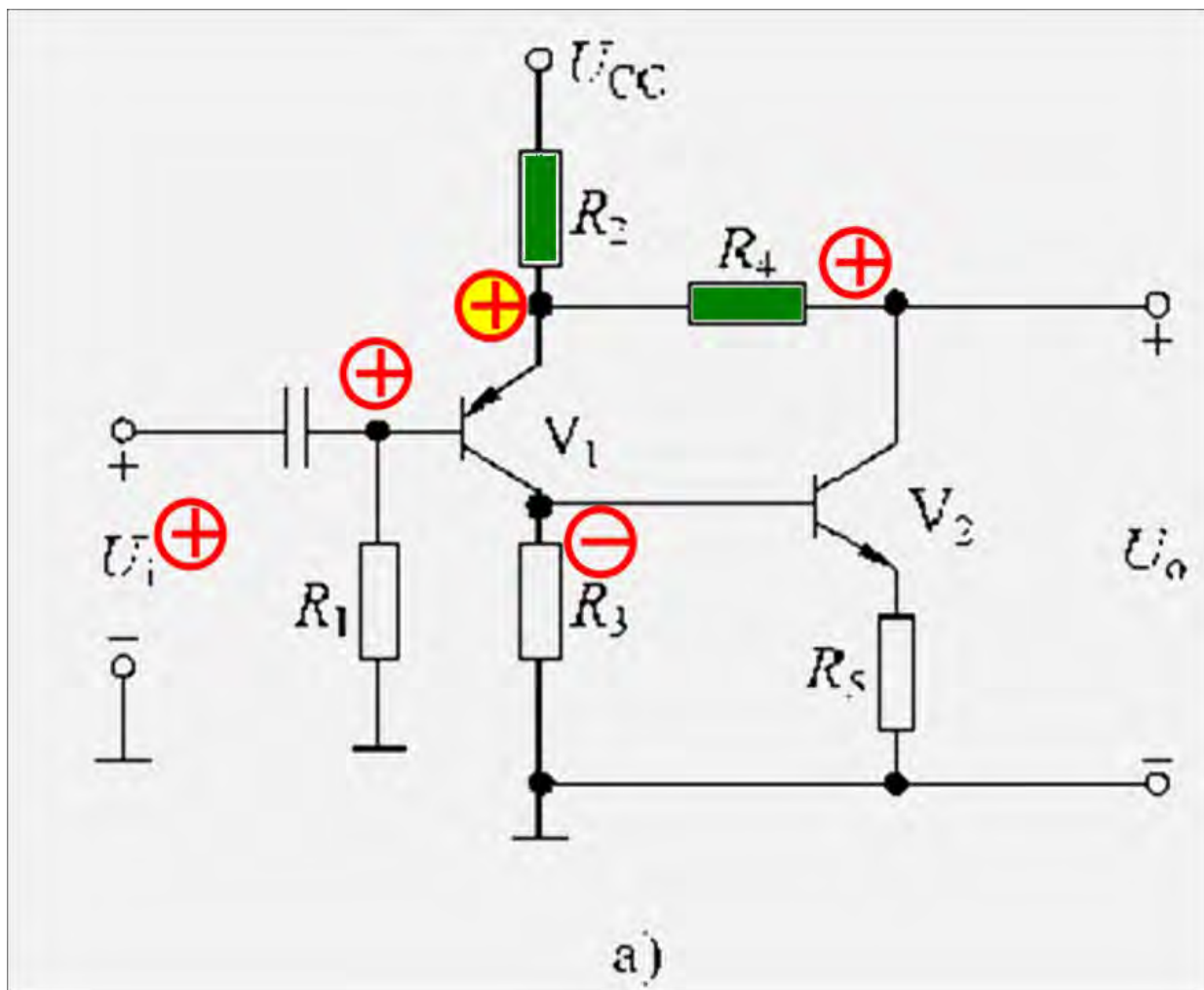
串联反馈: $\left\{ \begin{array}{l} \text{瞬时极性相同} \Rightarrow \text{反反馈} \\ \text{瞬时极性相反} \Rightarrow \text{正反馈} \end{array} \right.$; 并联反馈完全相反

归纳:

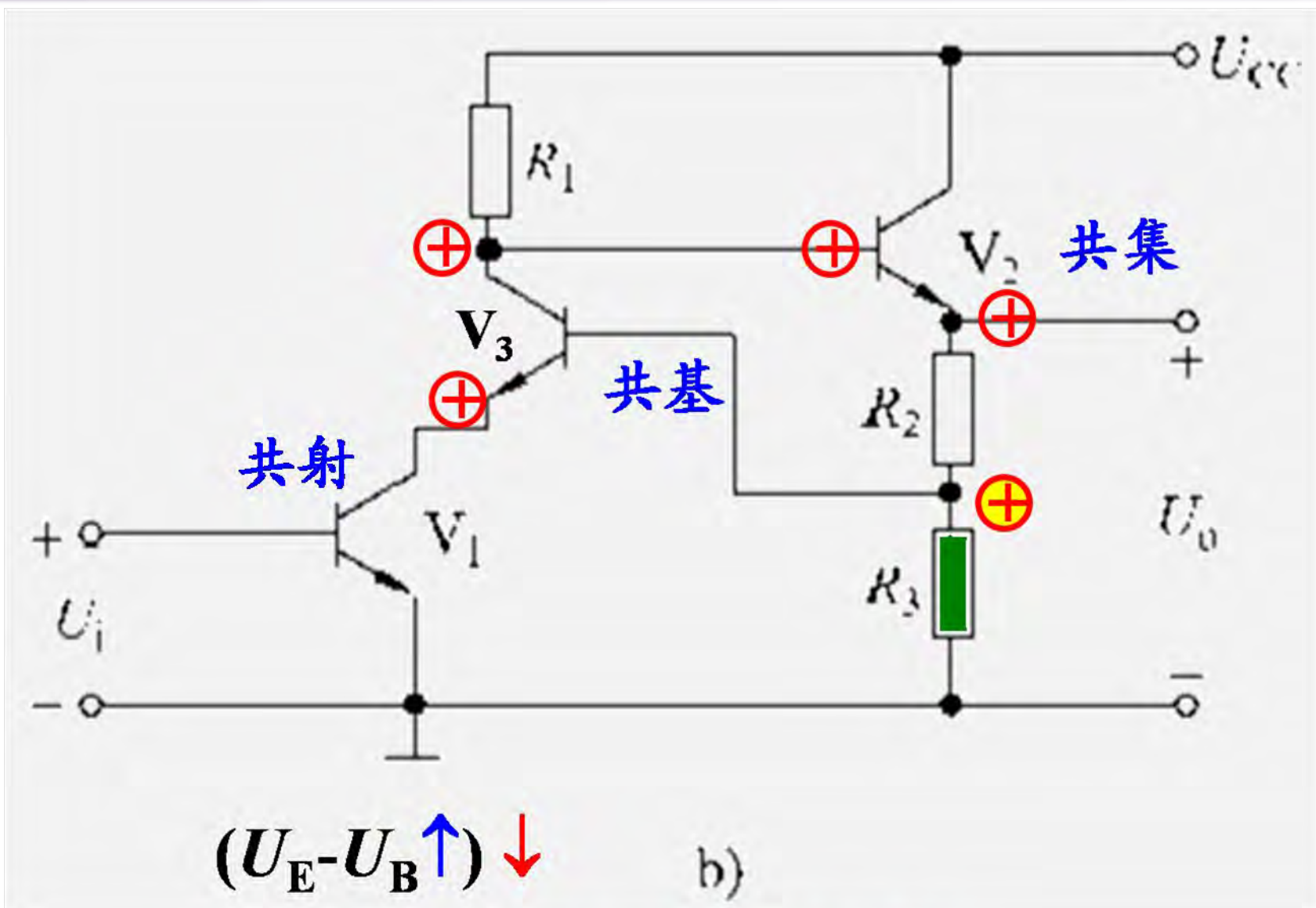
- ① 放大电路中应引入电压/电流负反馈取决于负载欲得到稳定的电压，还是稳定的电流。
- ② 放大电路中应引入串联/并联负反馈取决于输入信号源是恒压源还是恒流源。

- 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
- 要增大输出电阻—— 引电流负反馈
- 要减小输出电阻—— 引电压负反馈

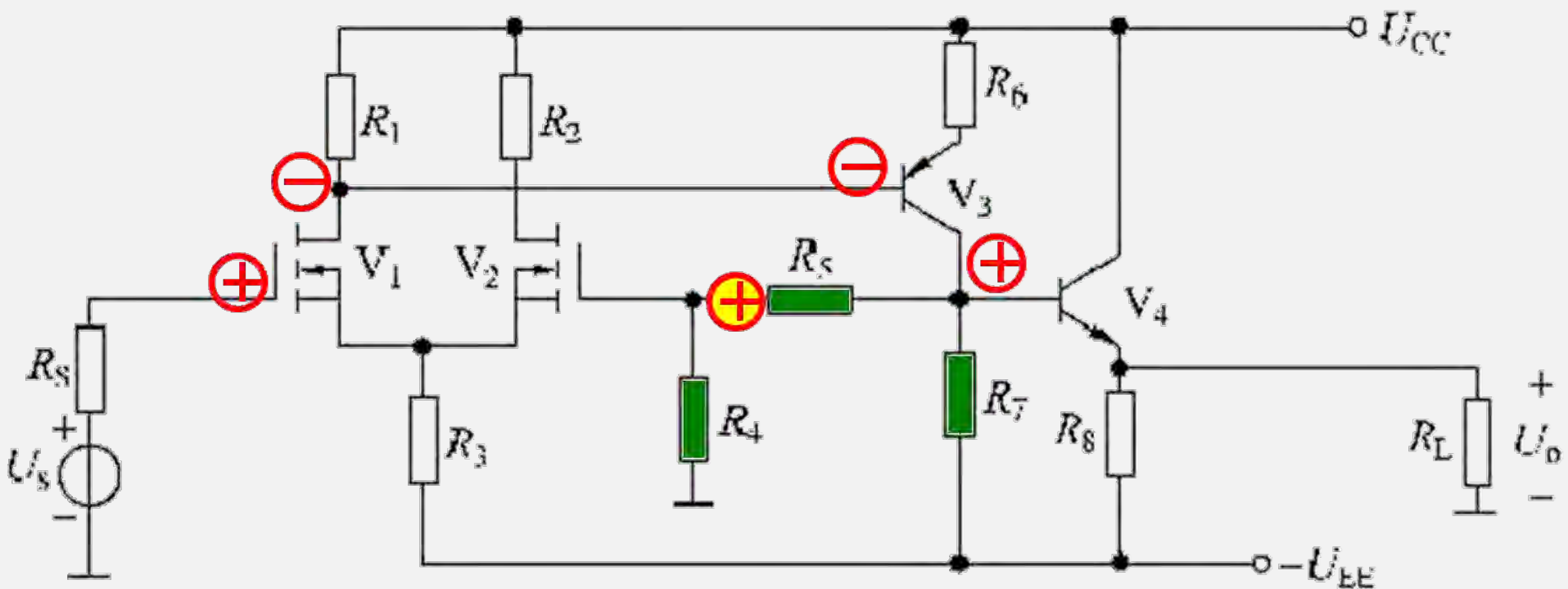
6.1 试判断题图6.1所示各电路的级间反馈类型和反馈极性。



电压
串联
负反馈

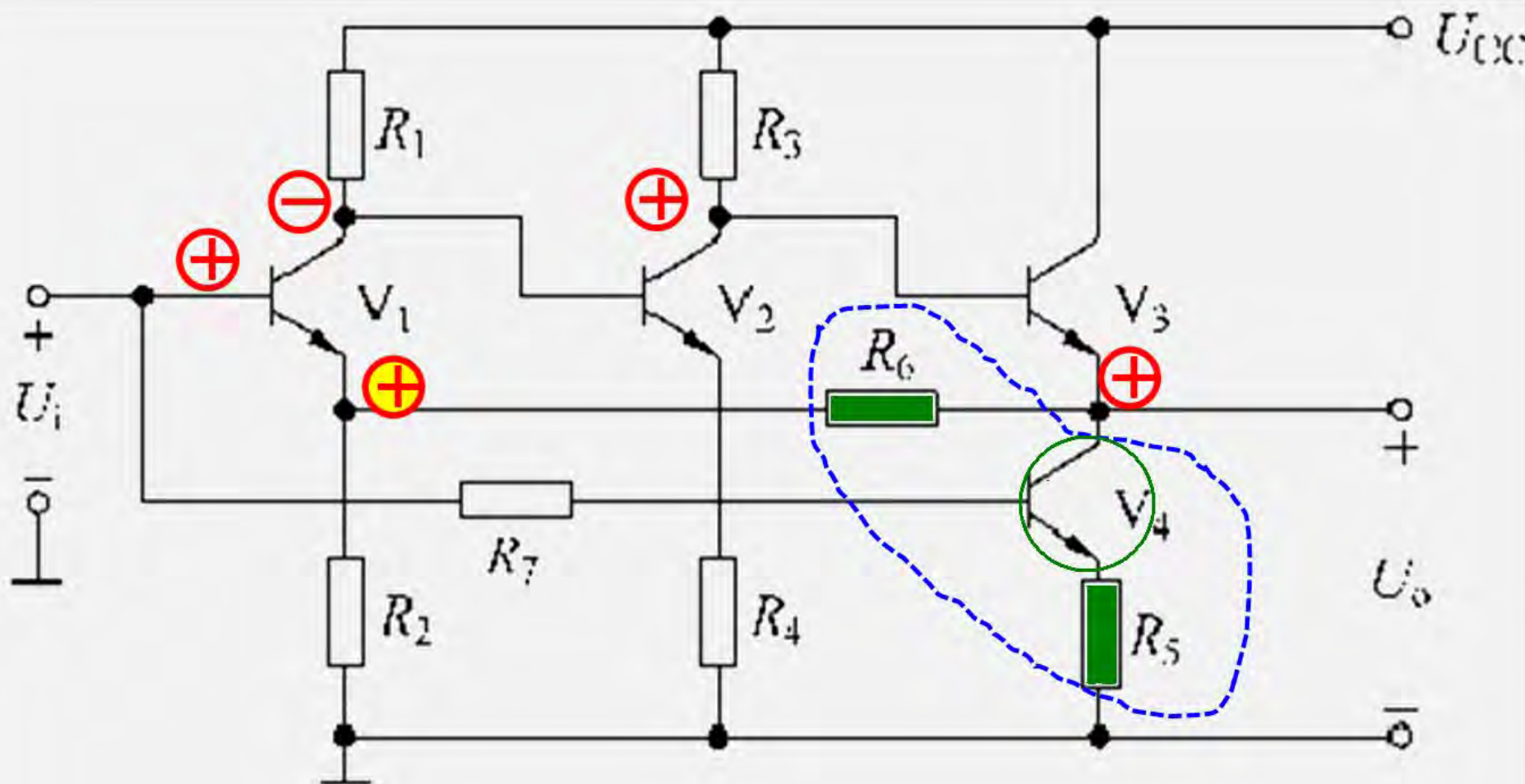


$V_2 - V_3$ 之间 电压 串联 负反馈



c)

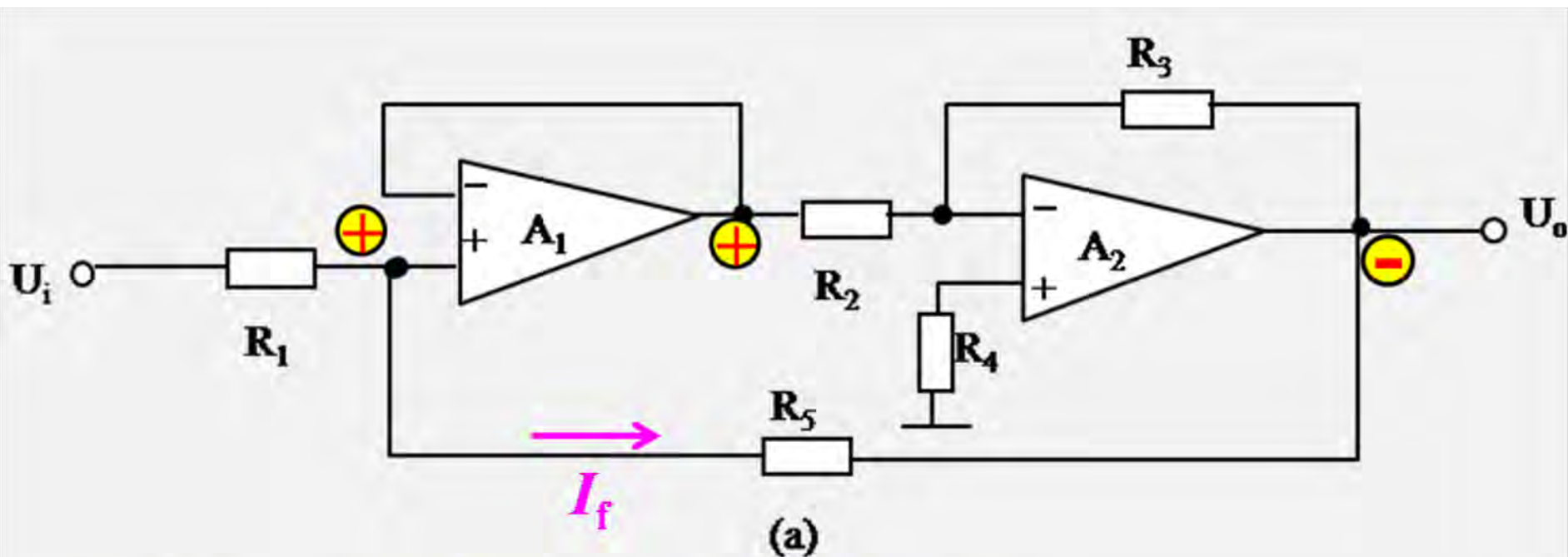
V_1 -- V_3 之间 电压串联负反馈



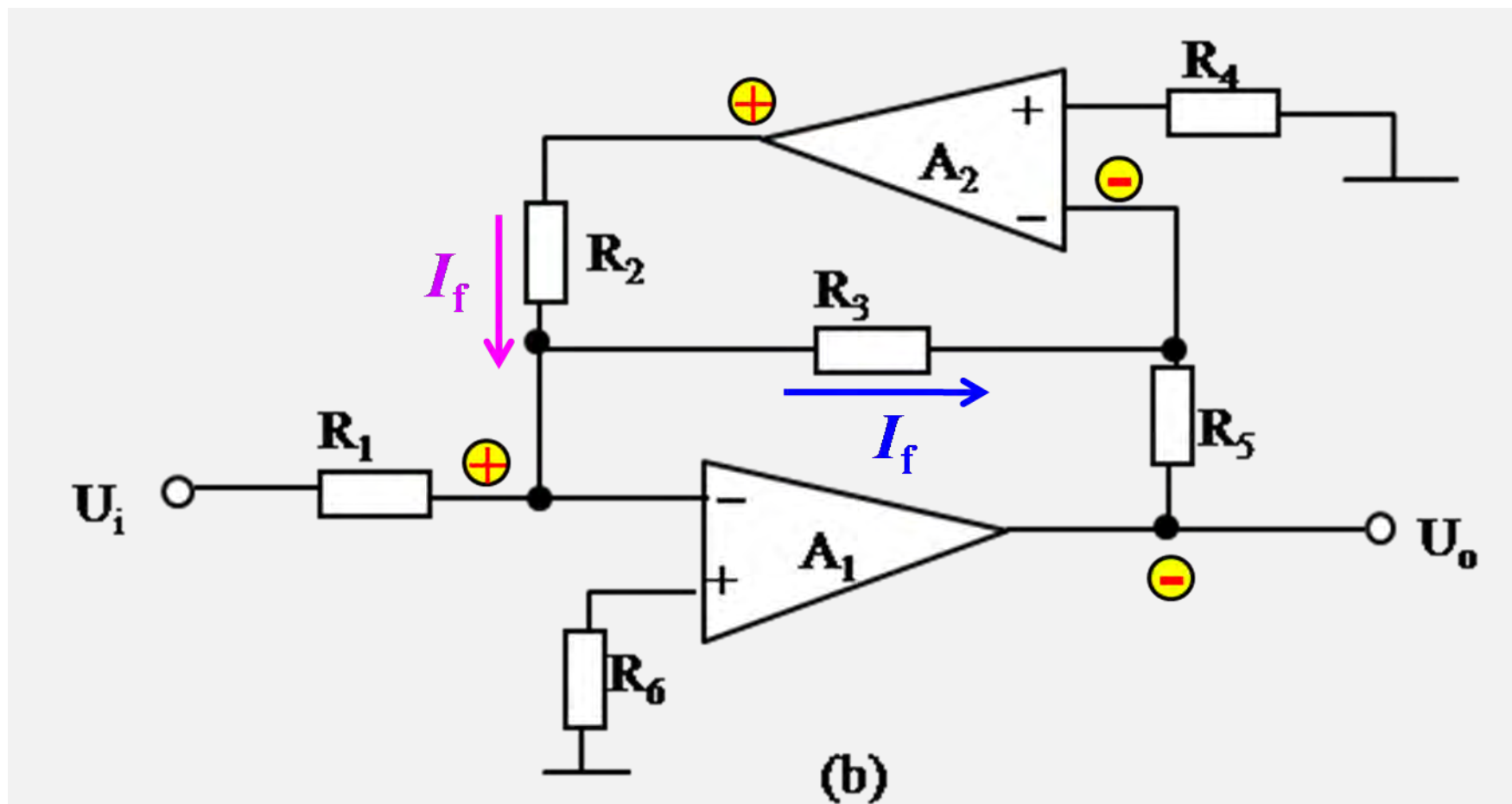
d)

V_1 -- V_3 之间 电压串联负反馈

6.2. 试判别6.2所示各电路的反馈类型和反馈极性。



级间和 A_2 本级都是电压并联负反馈



(b)

级间是电压并联正反馈， A_1 本级是电压并联负反馈

6.3.

一电压串联负反馈放大器，其基本放大器的电压增益 $A_u=100$ ，反馈网络的反馈系数 $B_u=0.1$ 。由于温度变化， A_u 增大到 120，试求负反馈放大电路的电压增益变化率 $\frac{\Delta A_{uf}}{A_{uf}}$ 。

解：

$$\frac{\Delta A_{vf}}{A_{vf}} = \frac{\Delta A_v}{A_v} \cdot \frac{1}{1 + A_v B_v} \approx 1.8\%$$

6.7 某放大器的放大倍数 $A(j\omega)$ 为 $A(j\omega) = \frac{1000}{1 + j\frac{\omega}{10^8}}$

若引入 $F=0.01$ 的负反馈，试问：

(1) 开环中频放大倍数 A_I ? f_H =?

(2) 闭环中频放大倍数 A_{If} =? f_{Hf} =?

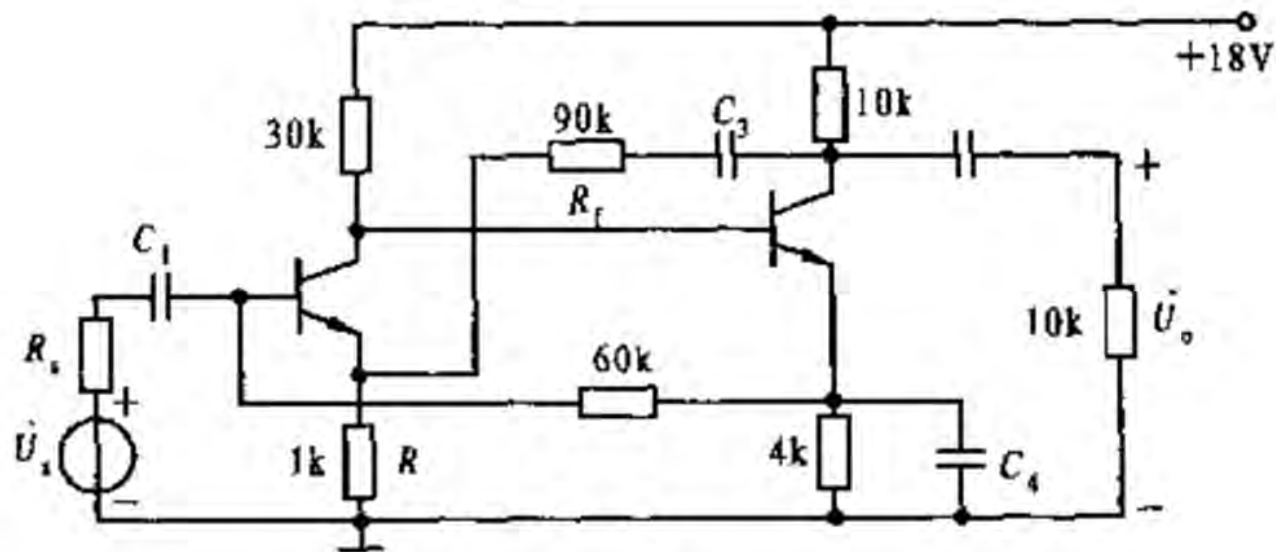
解： (1) $A_I = 1000(60dB)$

$$f_H = \frac{\omega_H}{2\pi} = \frac{10^8}{2\pi} = 15.9MHz$$

$$(2) A_{If} = \frac{A_I}{1 + FA_I} = \frac{1000}{1 + 0.01 \times 1000} = 90.9$$

$$f_{Hf} = (1 + FA_I) f_H = 11 \times 15.9 \times 10^6 = 175MHz$$

6.10



题图 6.11

解：(1) $90\text{ k}\Omega$ 电阻和 $1\text{ k}\Omega$ 电阻构成两级之间的交流串联电压负反馈。 $4\text{ k}\Omega$ 、 $60\text{ k}\Omega$ 以及 V_1 构成两级之间的直流电流负反馈，以保证直流工作点更加稳定。

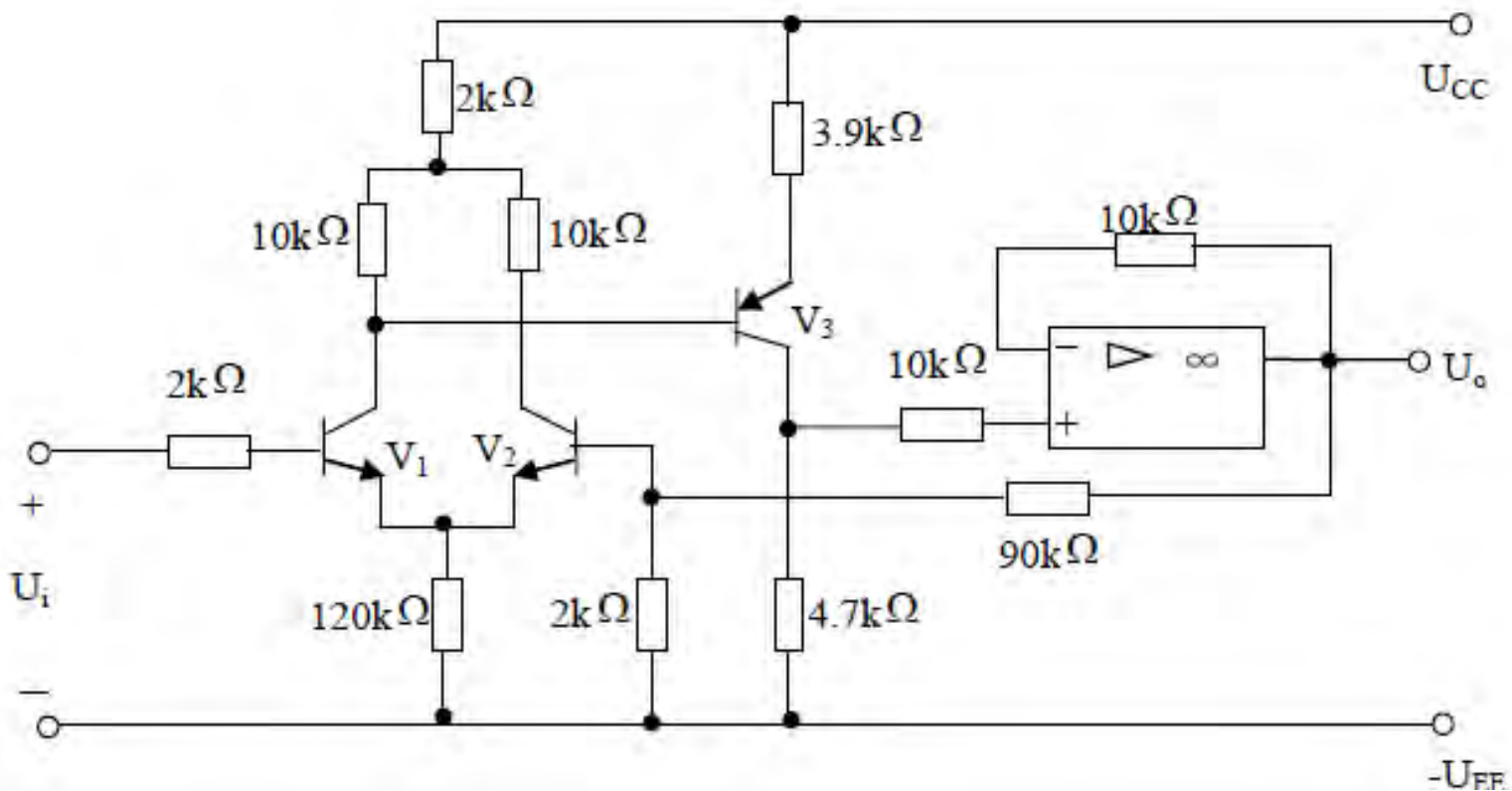
(2) 该电路输入阻抗增大，输出阻抗减小。

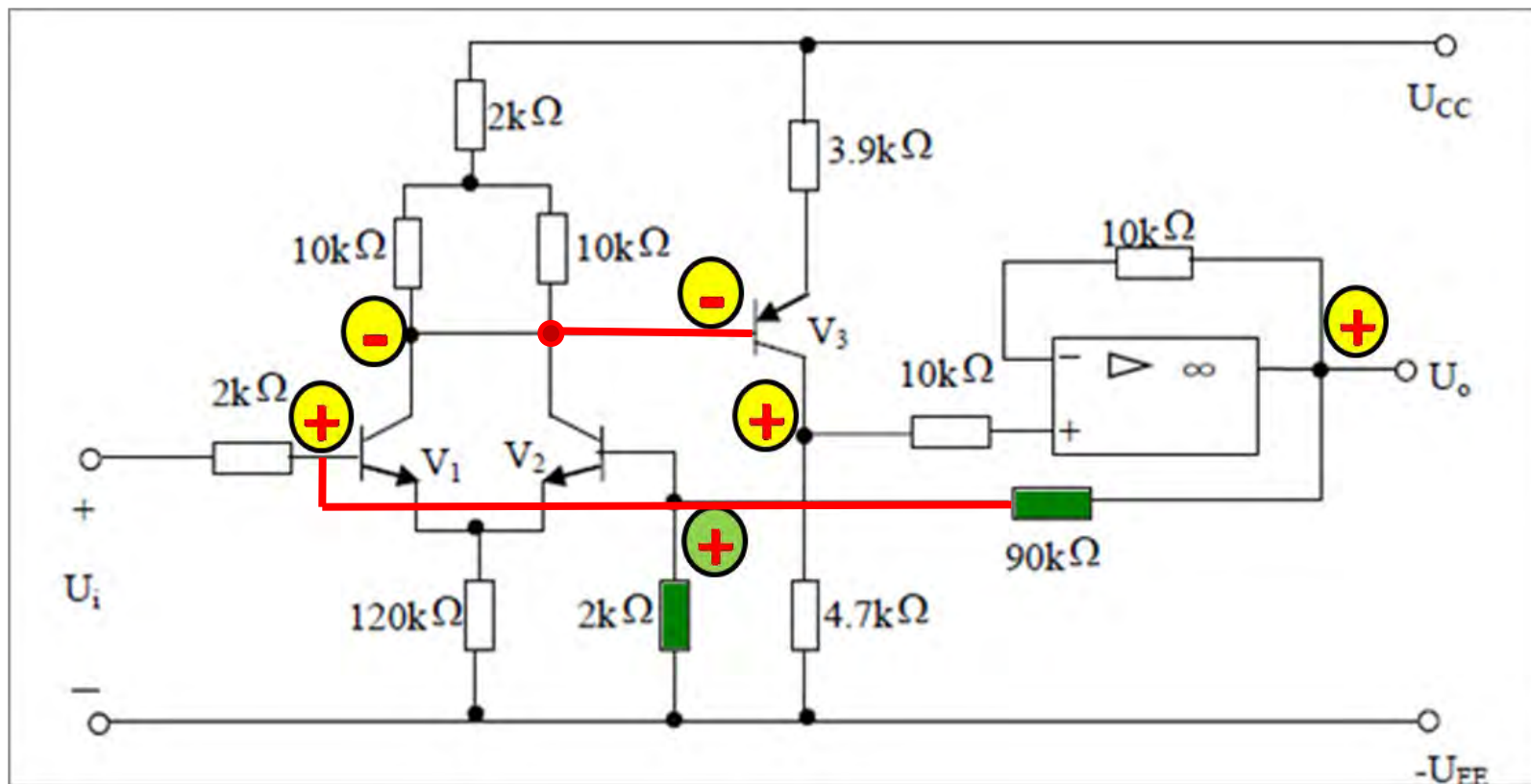
(3) 在深反馈条件下：

$$A_{ui} = \frac{1}{F} = \frac{1\text{ k} + 90\text{ k}}{1\text{ k}} = 91$$

6.11. 负反馈放大电路如题图6.11所示。

- (1) 试判别电路中引入了何种反馈？
- (2) 为得到低输入电阻和低输出电阻，应采用何种类型的负反馈？电路应如何改接？

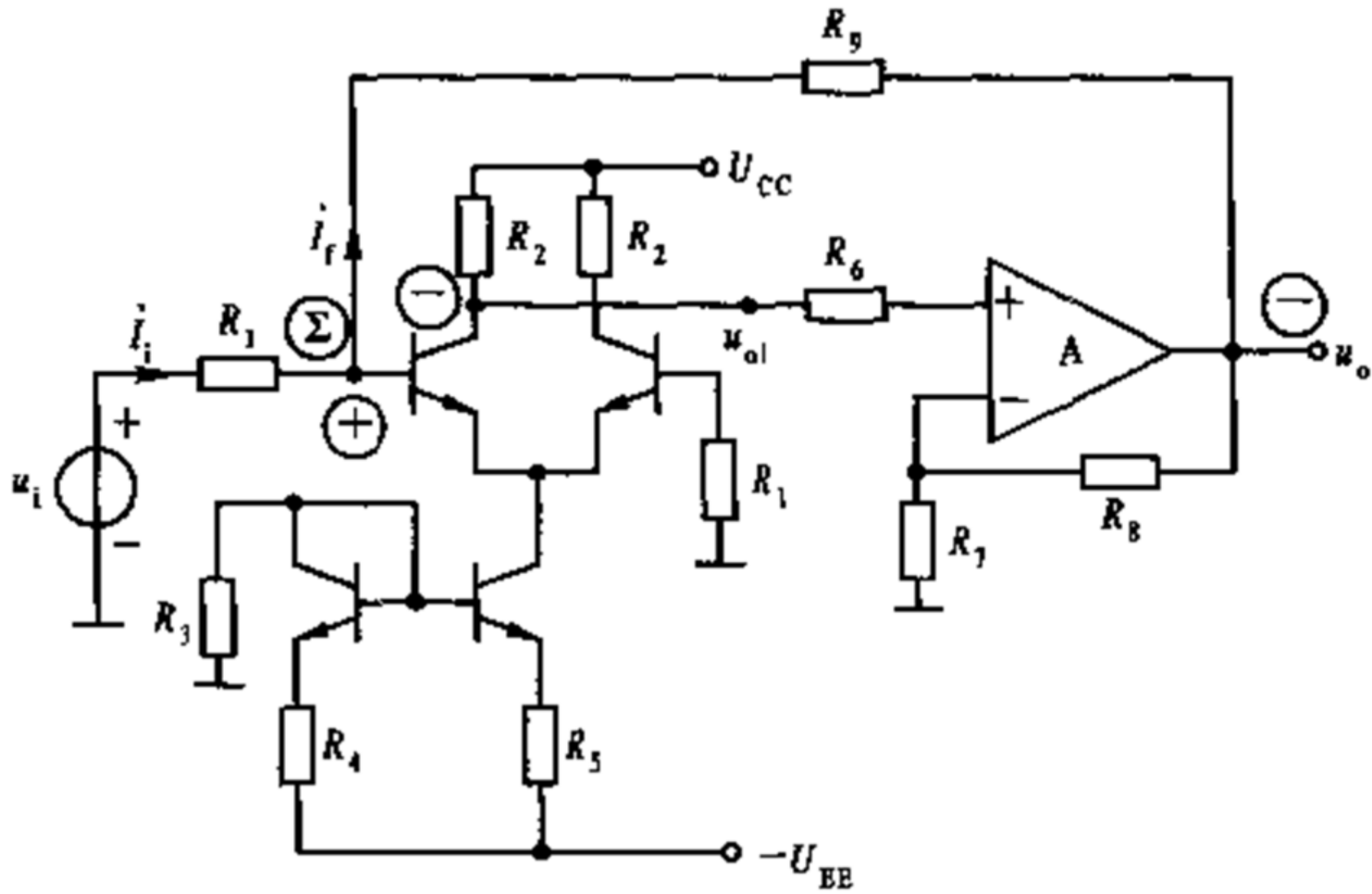




解：(1) 电压串联负反馈。(2) 应采用电压并联负反馈。

其改接方法为：将 V_3 的基极由接在 V_1 的集电极改接到 V_2 的集电极；将输出端的 $90\text{k}\Omega$ 电阻，由接在 V_2 的基极改接到 V_1 的基极。

6.12



6.12

解：(1) 该电路第一级为带恒流源的差分放大器，单端输入，单端输出；第二级为同相比例放大器，引入了单级串联电压负反馈。两级之间通过 R_9 和 R_1 构成了并联电压负反馈（瞬时相位示于图 P6-13 中）。

(2) 求开环增益（设 $R_9 \gg R_1$ ）

$$A_u = \frac{U_{o1}}{U_i} \cdot \frac{U_o}{U_{o1}} = A_{u1} \times A_{u2}$$

$$\text{其中, } A_{u1} = \frac{U_{o1}}{U_i} = -\frac{1}{2} \frac{\beta R_2}{R_1 + r_{be}} \text{ (第二级输入电阻为无穷大)}$$

$$A_{u2} = 1 + \frac{R_8}{R_7}$$

(3) 求闭环增益（引入负反馈的增益）：

$$A_{uf} = \frac{U_{o1}}{U_i} = -\frac{R_9}{R_1}$$

因为深反馈条件下有：

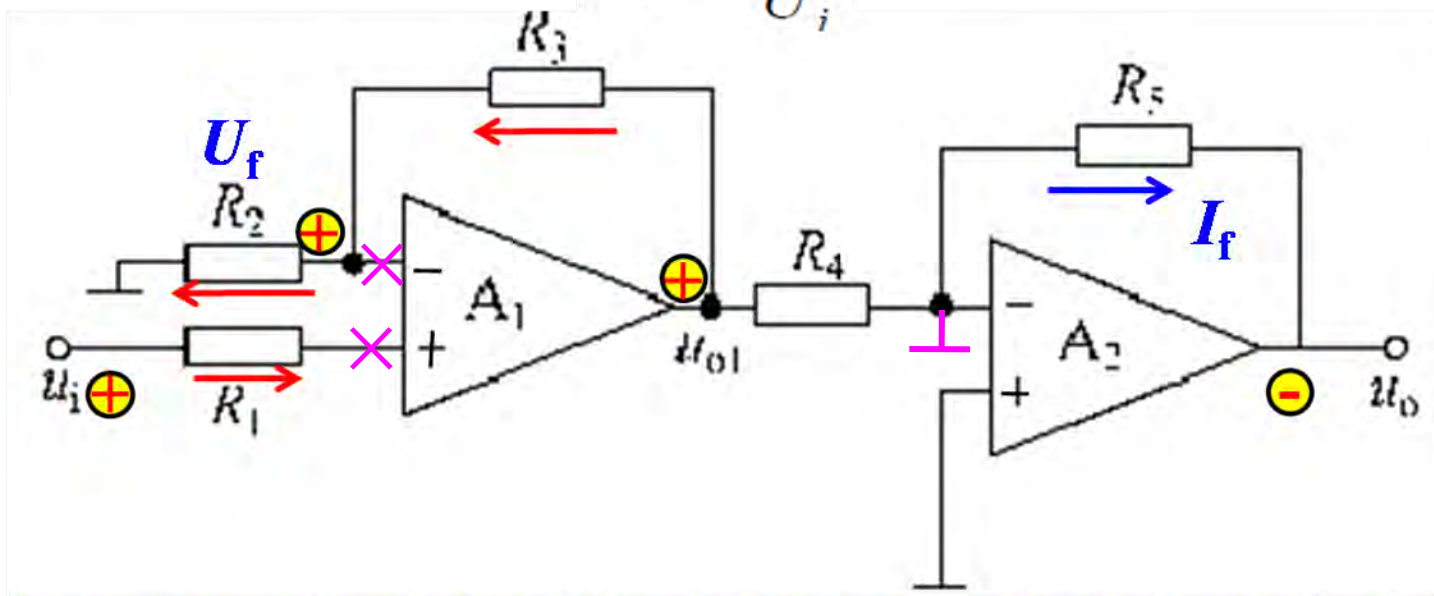
$$I_i \approx I_f, I_i = \frac{U_i - U_\Sigma}{R_1} \approx \frac{U_i}{R_1}, I_f = \frac{U_\Sigma - U_o}{R_9} \approx -\frac{U_o}{R_9}$$

$$\text{所以 } A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{R_9}{R_1}$$

6.13. 电路如图所示，试回答：

(1) 集成运放A1和A2各引进什么反馈？

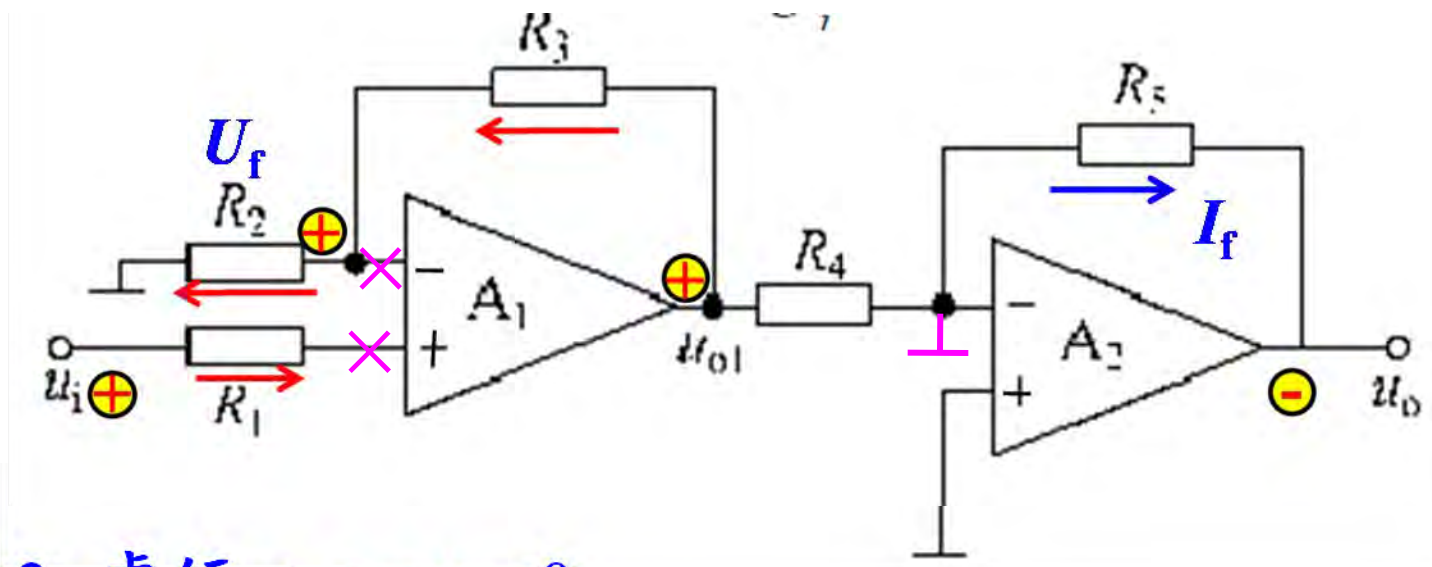
(2) 求闭环增益 $A_{uf} = \frac{U_0}{U_i}$



解：(1). A1：串联电压负反馈； A2：并联电压负反馈。

(2). 线性区间 \Rightarrow A1：虚短 $u_- = u_+ = u_i$

虚断 $\Rightarrow i_{R2}(u_-/R_2) = i_{R3}[(u_{01} - u_-)/R_3] \Rightarrow A_{uf1} = u_{01}/u_i = 1 + R_3/R_2$



A2: 虚短 $\Rightarrow u_- = u_+ = 0$

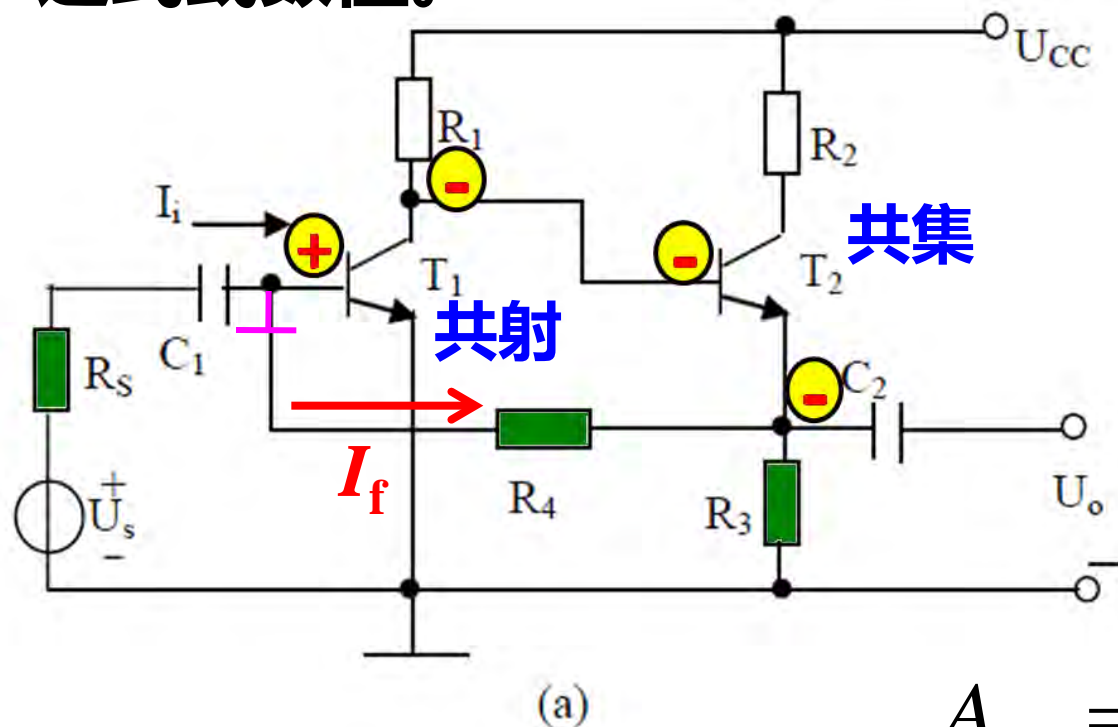
虚断 $\Rightarrow i_{R4}(u_{o1}/R_4) = i_{R5}[(0 - u_o)/R_5] \Rightarrow A_{uf2} = u_o/u_{o1} = -R_5/R_4$

$$\text{所以 } A_{uf} = A_{uf1} * A_{uf2} = \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) \times \left(-\frac{R_5}{R_4}\right) = -\frac{R_5}{R_4} \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right)$$

解法二：深度负反馈隐含条件

6.15. 电路如图(a)和(b)所示, 各电容对信号可视为短路。

- (1) 分别判断电路级间交流反馈的极性和类型。
- (2) 分别写出满足深度反馈条件下的反馈系数的表达式。
- (3) 分别估算满足深度反馈条件下的源电压增益 A_{usf} 的表达式或数值。

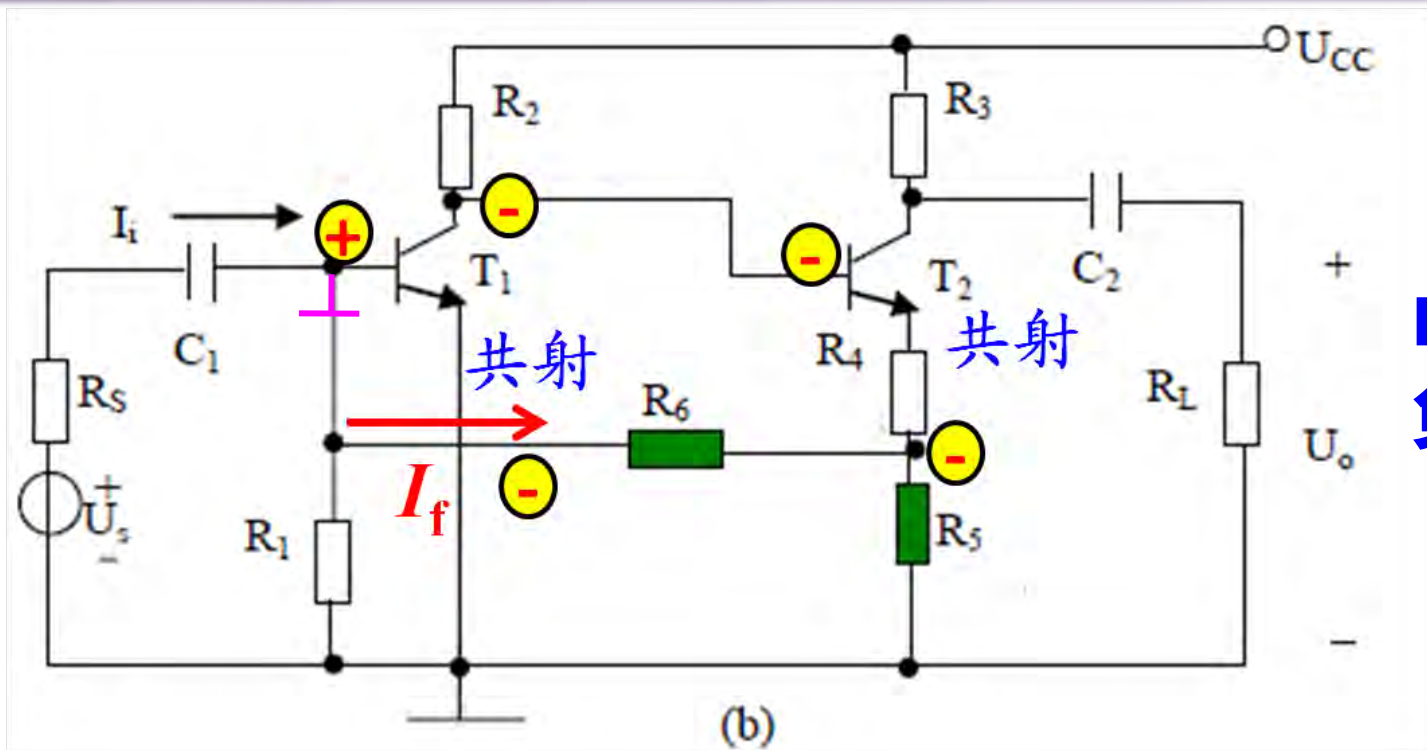


电压并联负反馈

$R_3 \parallel R_4$

$$F_g = \frac{X_f}{X_o} = \frac{I_f}{U_o} = -\frac{1}{R_4}$$

$$A_{usf} = \frac{U_o = -I_f R_4}{U_s = I_i R_s} = -\frac{R_4}{R_s}$$



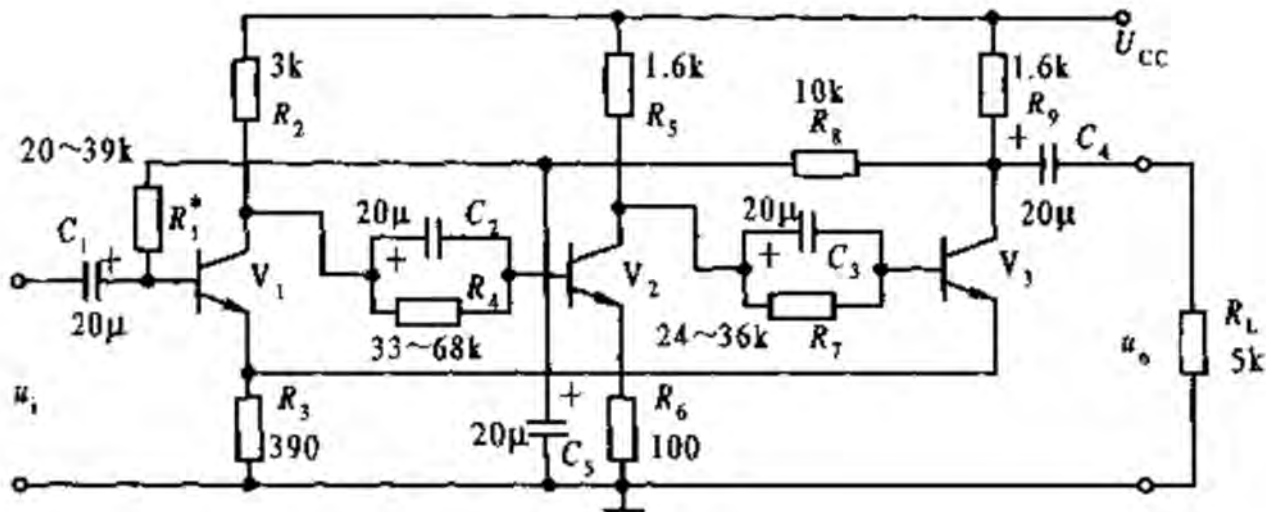
电流并联
负反馈

$$I_{e2}(R_5 \parallel R_6) = U_{R5} = -U_{R6} = -I_f R_6$$

$$F_g = \frac{X_f}{X_o} = \frac{I_f}{I_o = I_{e2}} = -\frac{R_5}{R_5 + R_6}$$

$$A_{usf} = \frac{U_o = -I_{c2}(R_3 \parallel R_L)}{U_s = I_i R_s} = \frac{(R_5 + R_6)(R_3 \parallel R_L)}{R_5 R_s}$$

6.16



题图 6.16

解：该电路第三级发射极与第一级发射极相连，第三级射极电流流过 R_3 构成三级间的串联电流负反馈。另外一路， R_8 、 C_5 、 R_1 构成直流电压负反馈，以稳定工作点。

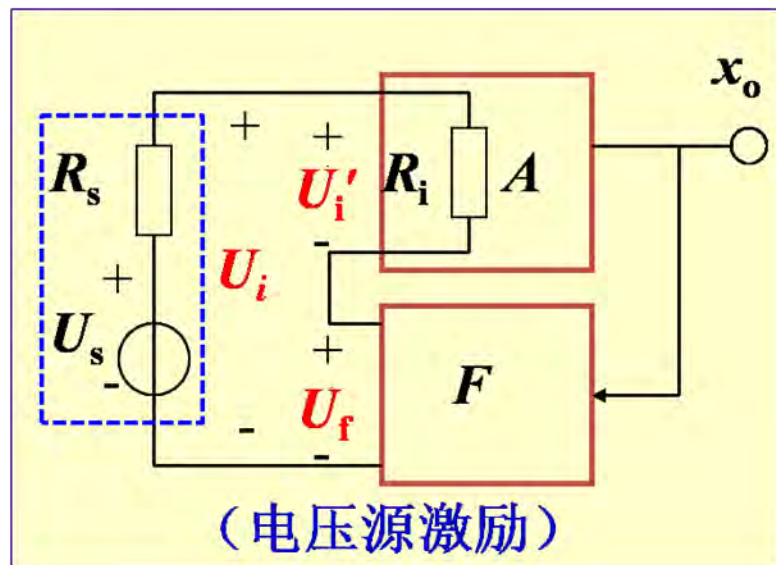
$$\begin{aligned}
 A_{uf} &= \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{-I_{C3}(R_9 // R_L // R_8)}{U_f} \\
 &= \frac{-I_{C3}(R_9 // R_L // R_8)}{I_{C3} \cdot R_3} \approx -\frac{R_9 // R_L // R_8}{R_3} \\
 &= \frac{-1.6K // 5K // 10K}{390} = -2.77
 \end{aligned}$$

反馈效果与 R_S 关系

■ 串联负反馈: U_f

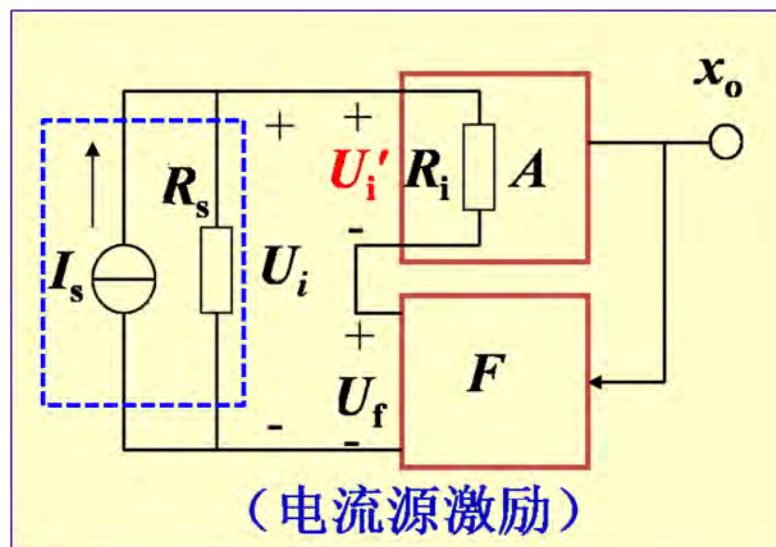
① 采用电压源($R_S \rightarrow 0$)激励时

$U_i' = U_i - U_f \approx U_S - U_f$, 由于 U_S 恒定, 则 U_f 的变化量全部转化为 U_i' 的变化量, 此时反馈效果最强。



② 采用电流源($R_S \rightarrow \infty$)激励时

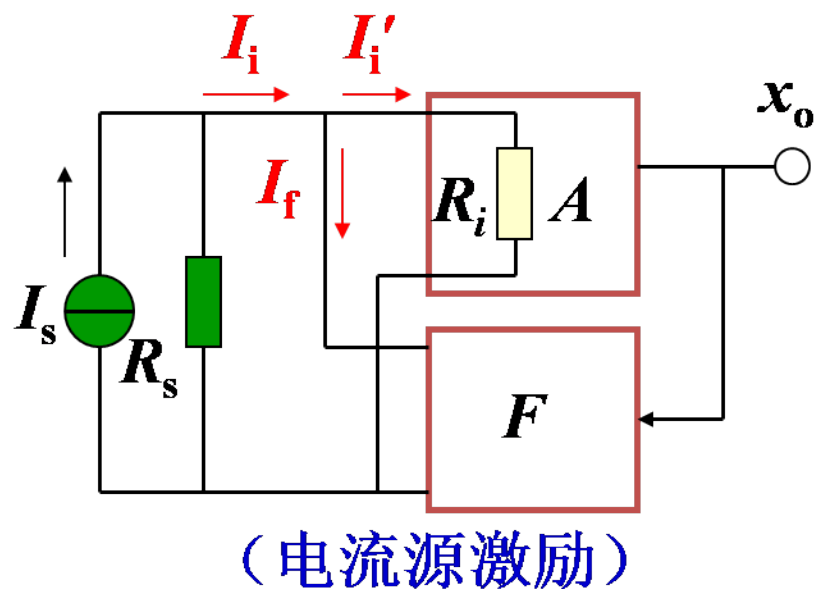
由于 I_S 恒定, $U_i' = I_S R_i$ 固定不变, 结果导致反馈作用消失。



■ 并联负反馈: I_f

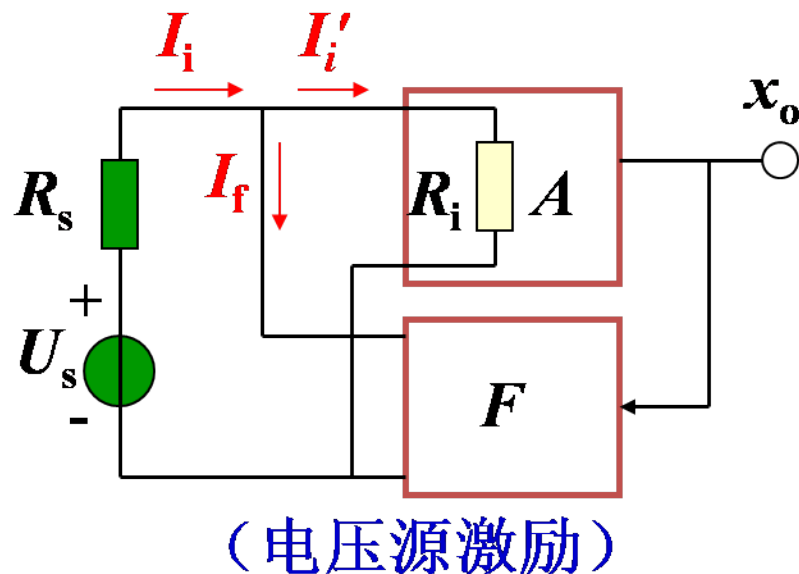
① 采用电流源($R_S \rightarrow \infty$)激励时

$I_i' = I_i - I_f \approx I_S - I_f$, 由于 I_S 恒定, 则 I_f 的变化量全部转化为 I_i' 的变化量, 此时反馈效果最强。

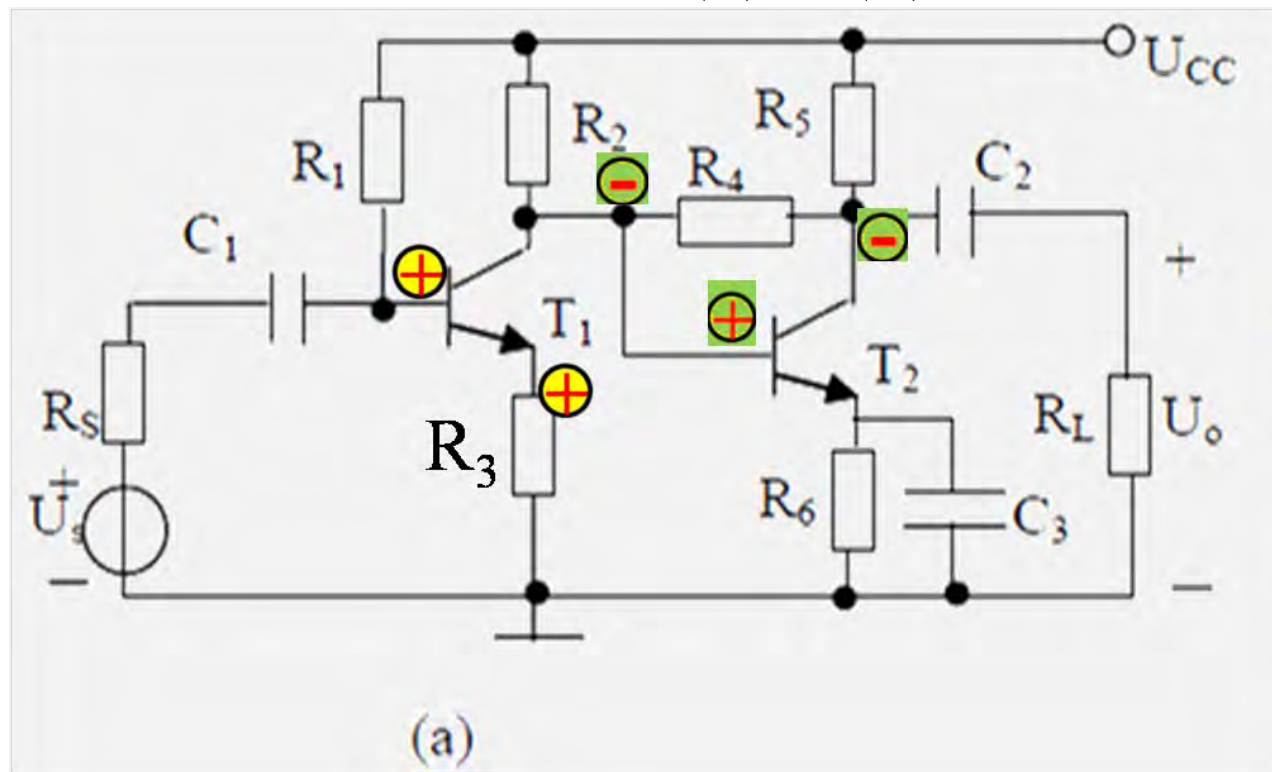


② 采用电压源($R_S \rightarrow 0$)激励时

$U_{R_i} \approx U_S$ 由于 U_S 固定, $I_i' = U_{R_i} / R_i$ 固定不变, 结果导致反馈作用消失。

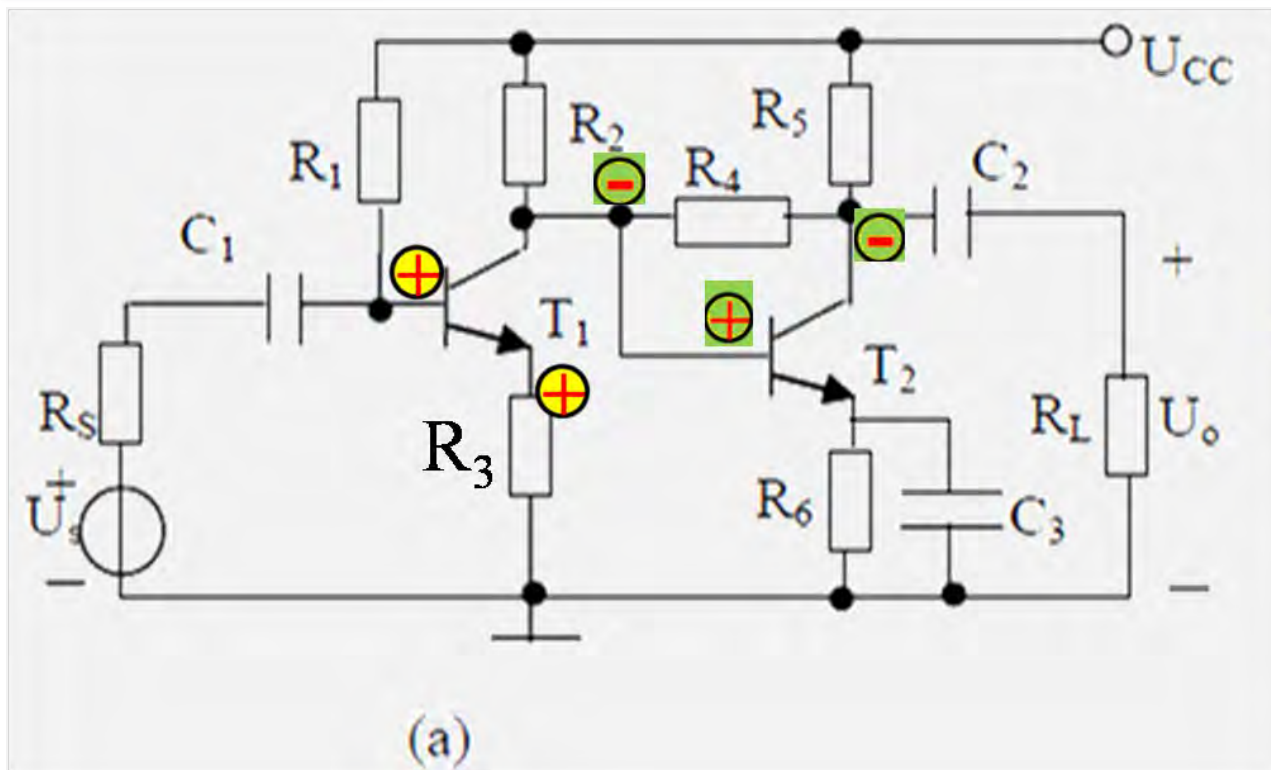


6.9. 电路如题图6.10(a)和(b)所示。试问：



没有级间反馈

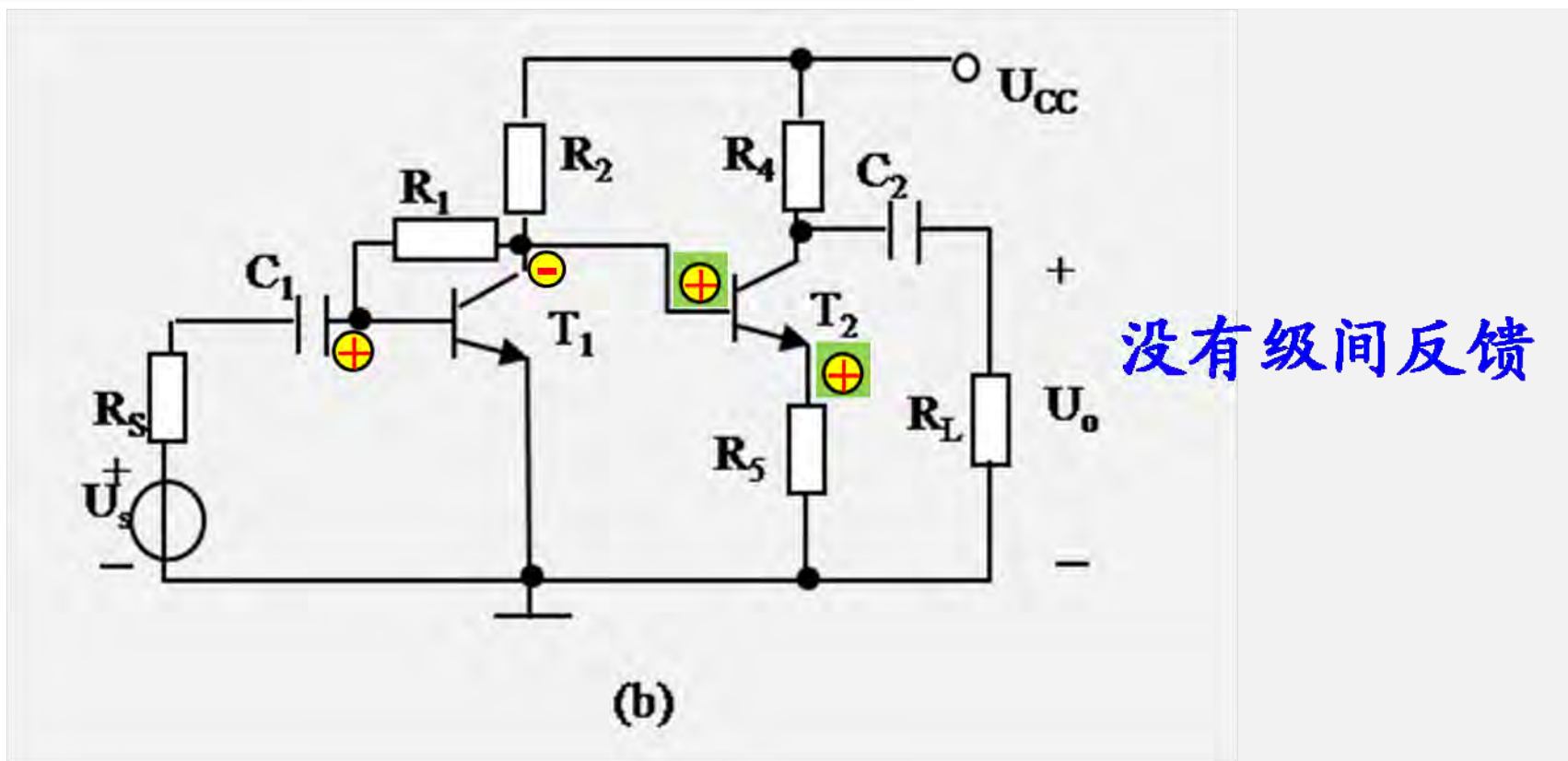
解：(1) 图(a)：第一级是**电流串联负反馈**，第二级是**电压并联负反馈**，对第一级**要求恒压源激励**，以使**电流串联负反馈**起作用，即 **R_S 越小越好**。第一级(**电流负反馈**→**稳定输出电流**)对第二级相当于**恒流源激励**，对第二级是合理的；



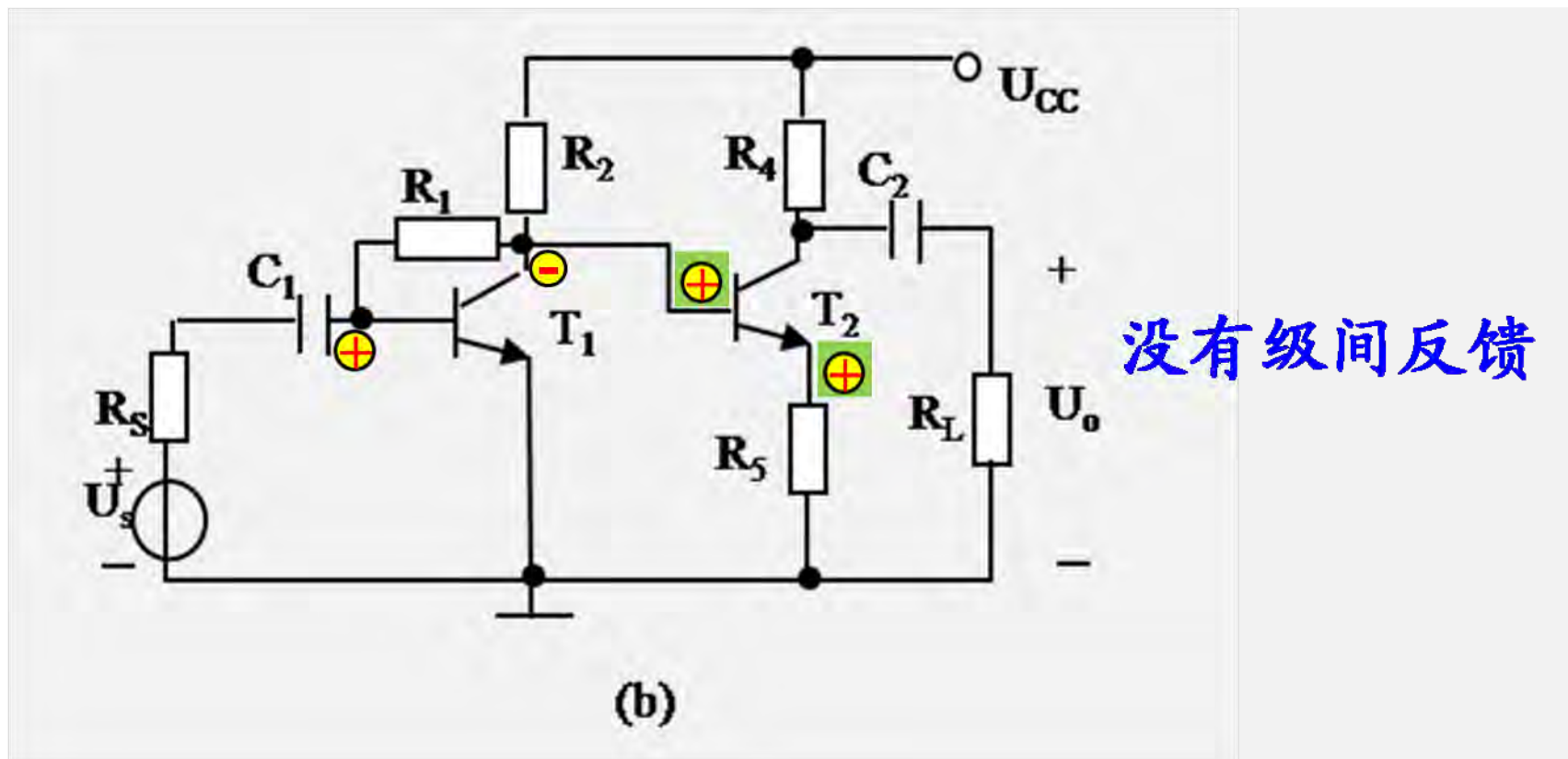
没有级间反馈

(2) 图(a): 输入端是串联负反馈, R_{if} 大, R_S 小, 而且 $R_{if} \gg R_S$, 当 R_S 变化时, 源电压增益的变化不大, 即稳定性较好, 输出电压当然也就稳定。

(3) 图(a): 输出端是电压负反馈, R_{of} 小, 是恒压源, R_L 变化时, 输出电压稳定, 源电压增益也稳定。



(1) 图(b): 第一级是**电压并联负反馈**, 第二级是**电流串联负反馈**, 对第一级要求**恒流源激励**以使电压并联负反馈起作用, 即 R_s **越大越好**。第一级(**电压负反馈**→**稳定输出电压**)对第二级相当于**恒压源激励**, 对第二级是合理的;



(2). 图(b): 输入端是并联负反馈, R_{if} 小, R_S 大, 而且 $R_{if} \ll R_S$, 当 R_S 变化时, 源电压增益不稳定, 输出电压也不稳定。

(3). 图(b): 输出端是电流负反馈, R_{of} 大, 是恒流源, R_L 变化时, 输出电压不稳定, 源电压增益也不稳定。