

模拟电子线路

Analog Circuits

大连理工大学

电信学部 余隽

课件资源基于《电子技术基础模拟部分》康华光，大连理工模电组郝育文、林秋华、巢明等教师的课件编写。

第七章 反馈放大电路

7.1 反馈的基本概念与分类

7.2 负反馈放大电路的四种组态

7.3 负反馈放大电路增益的一般表达式

7.4 深度负反馈条件下的近似计算

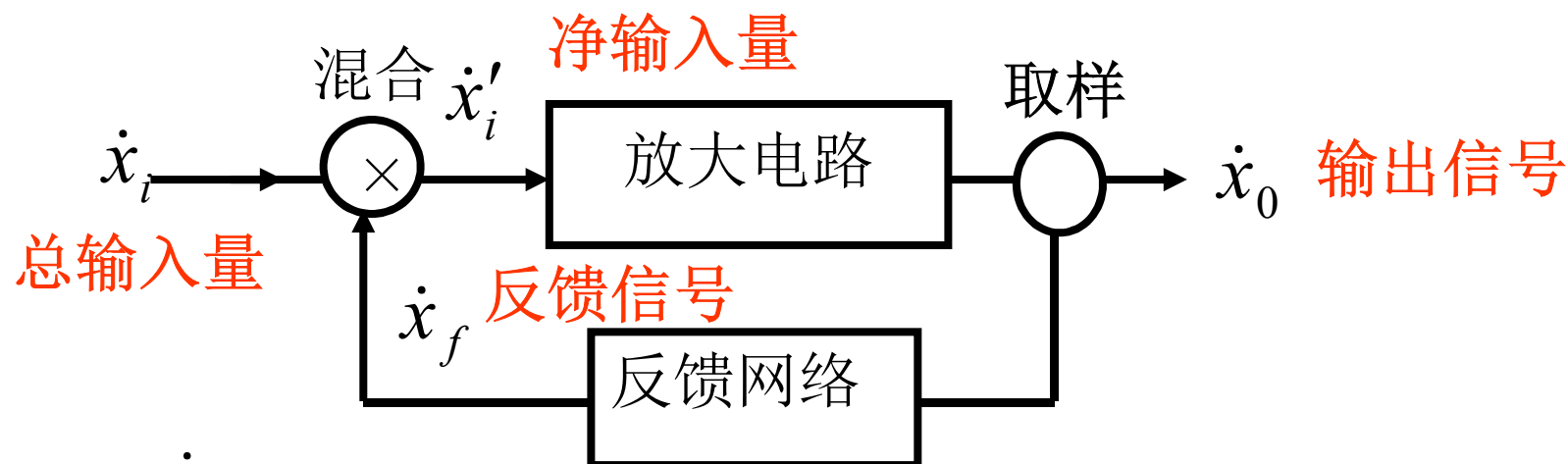
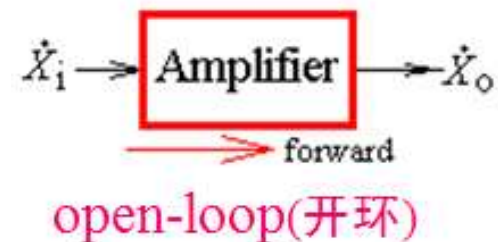
7.5 负反馈对放大电路性能的影响

7.1 反馈的基本概念与分类

7.1.1 什么是反馈

1. 反馈

反馈是指将输出量的一部分或全部，按一定的方式送回到输入回路，来影响输入量（电压或电流）的一种连接方式



$$\dot{A}_o = \frac{\dot{x}_o}{\dot{x}'_i}$$

开环增益

$$\dot{A}_{of} = \frac{\dot{x}_o}{\dot{x}_i}$$

闭环增益

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

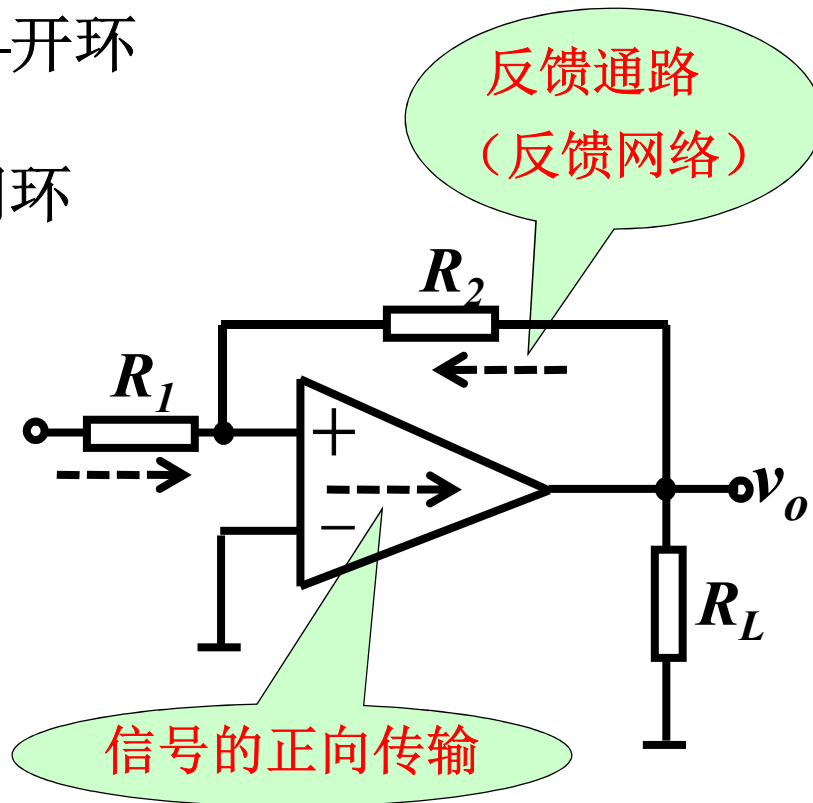
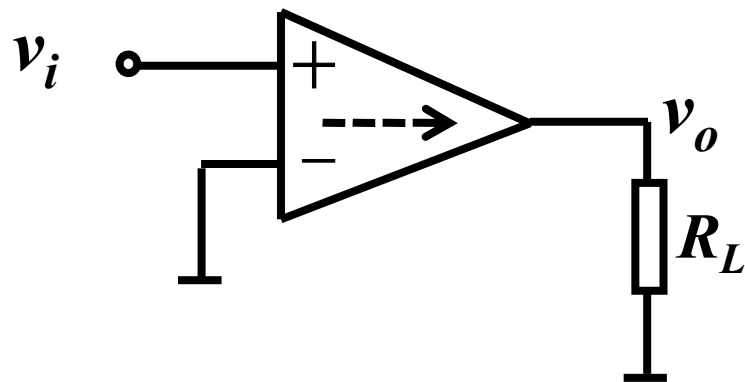
反馈系数

2. 反馈与反馈通路

我们判断一个电路是否有反馈，是通过分析它是否存在反馈通路而进行的，而反馈通路是跨接在输出和输入间的网络。

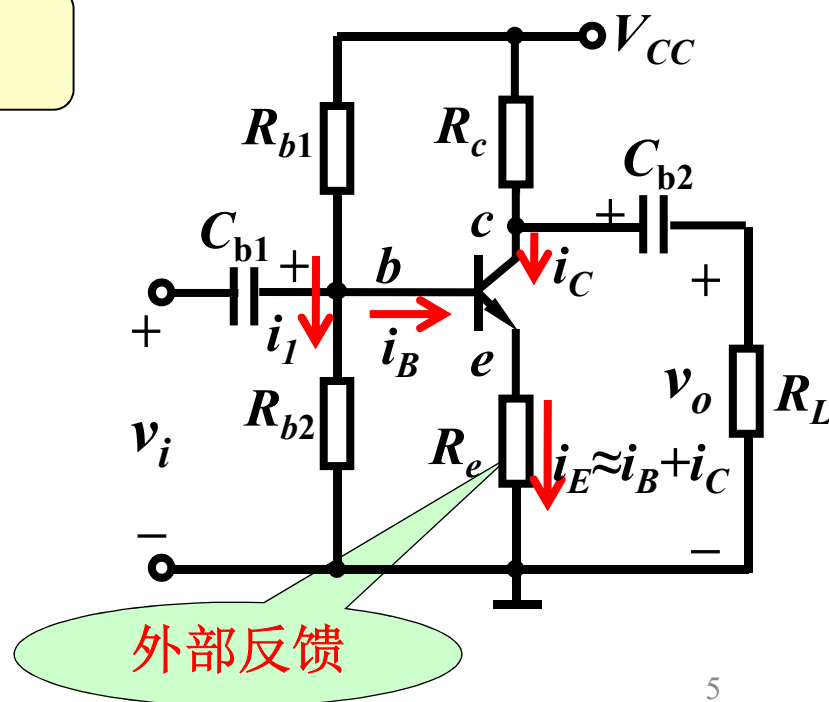
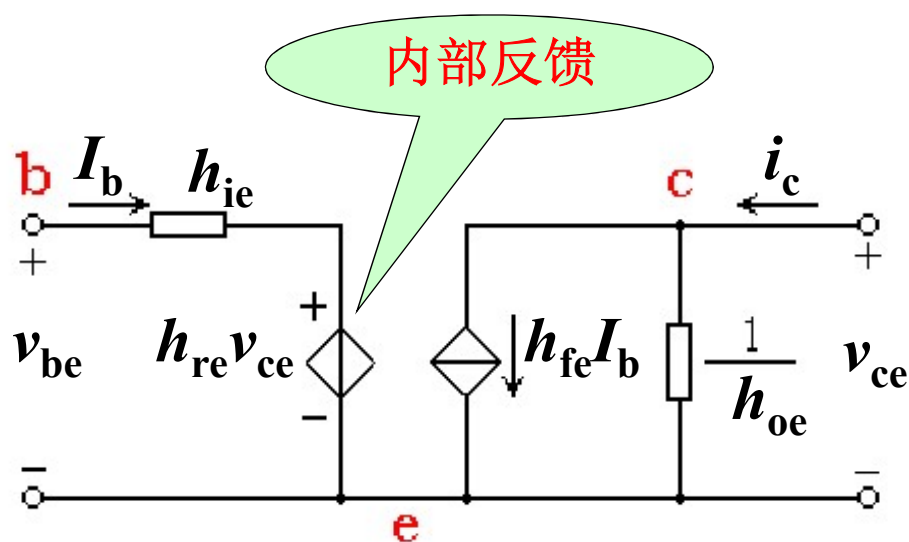
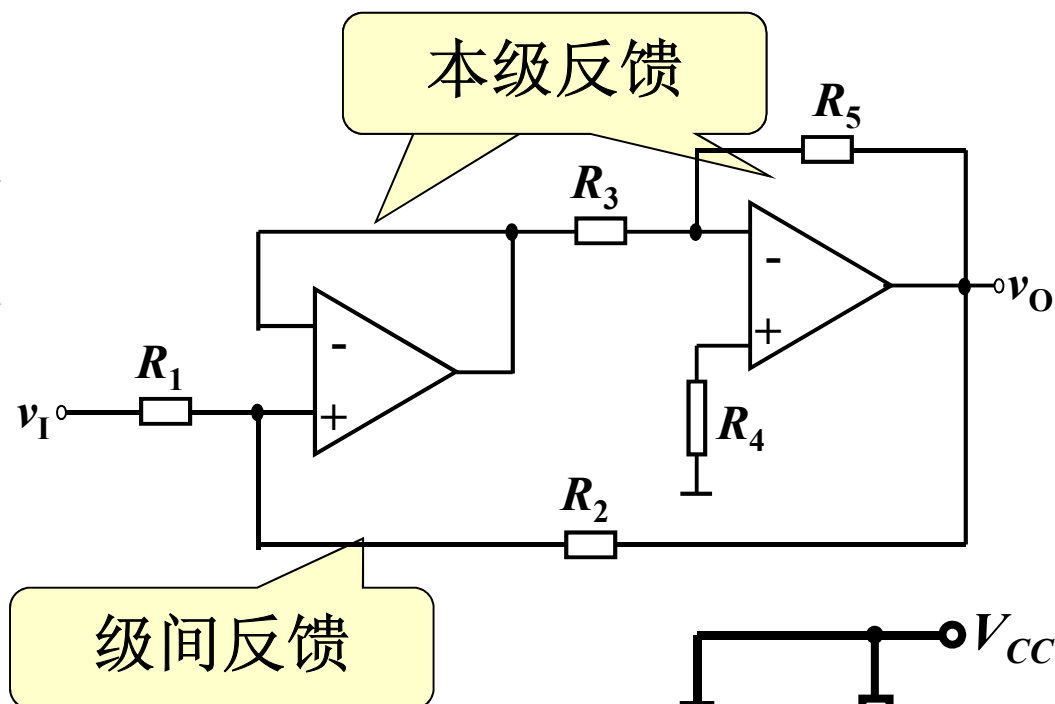
(1) 若电路中不存在反馈——开环

(2) 若电路中存在反馈——闭环



3.内部反馈与外部反馈

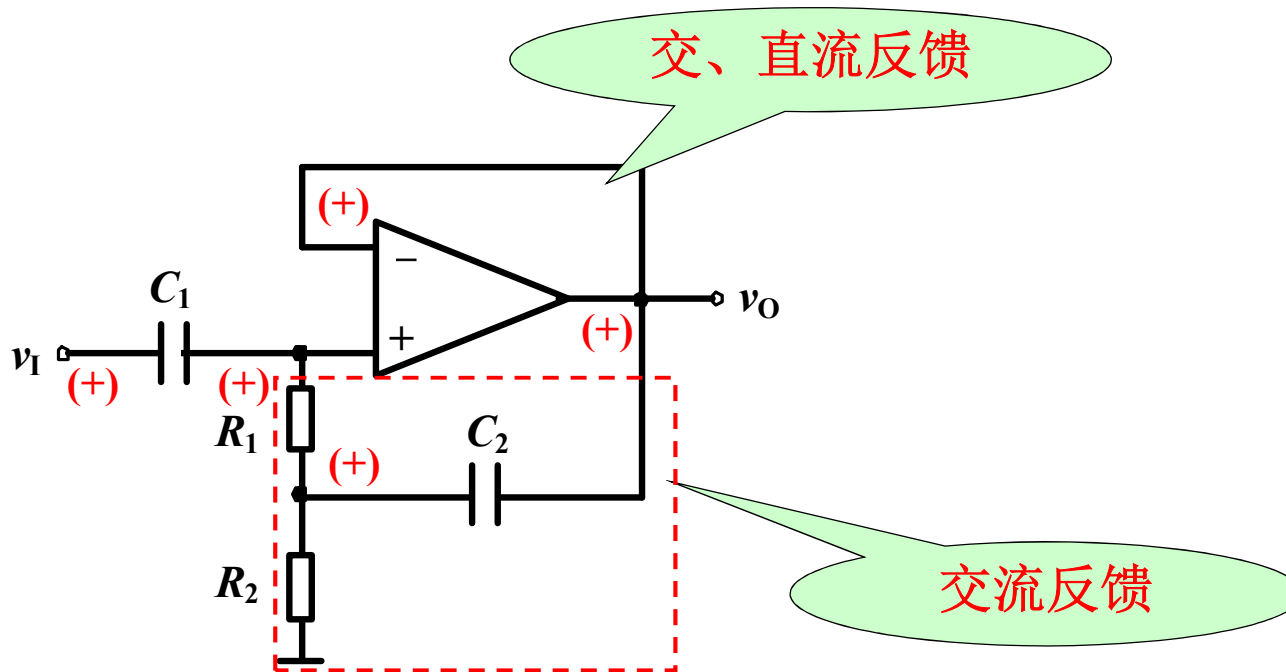
4.本级反馈与级间反馈

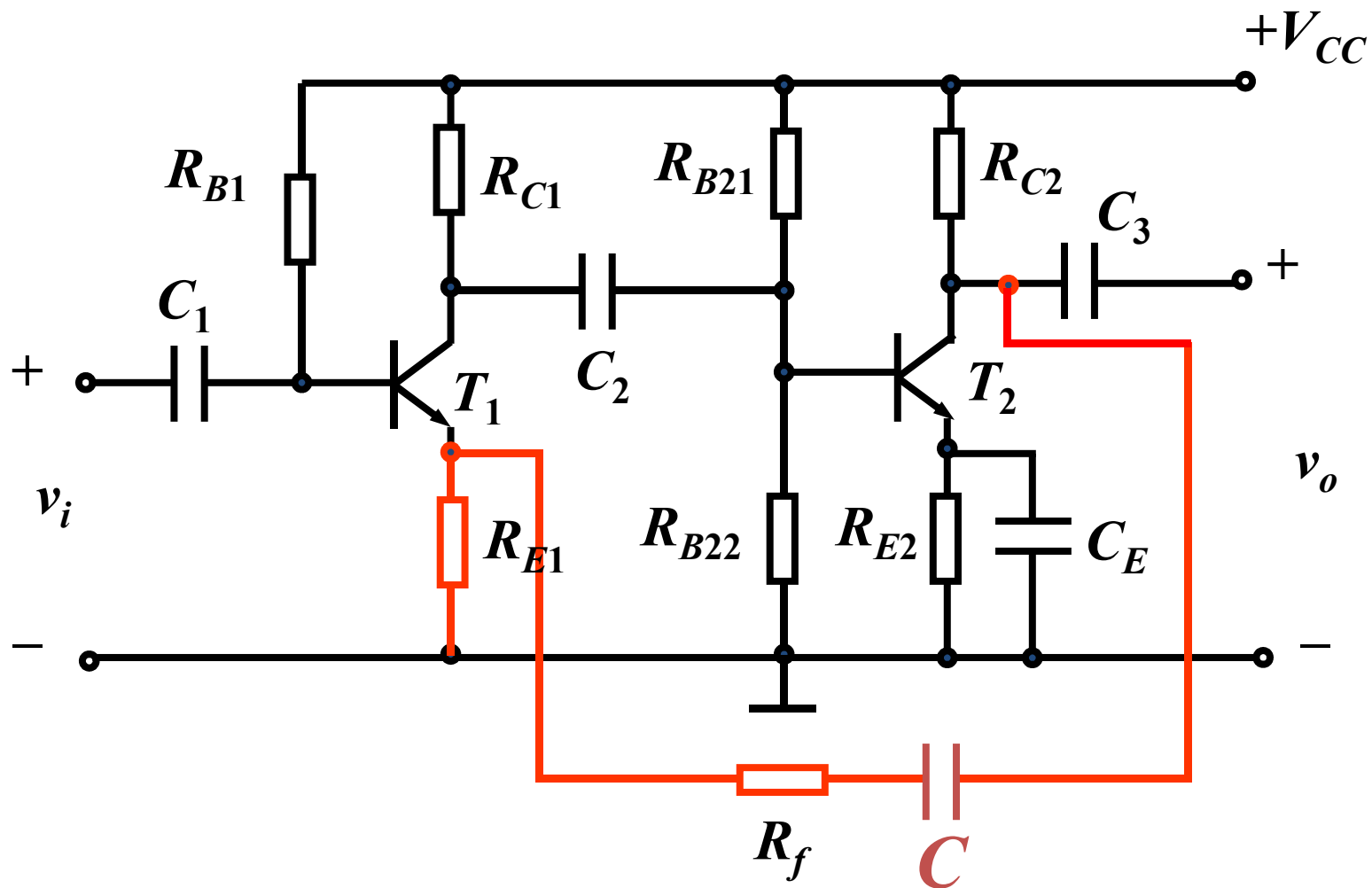


7.1.2 直流反馈与交流反馈

若反馈信号中只包含直流成份——直流反馈

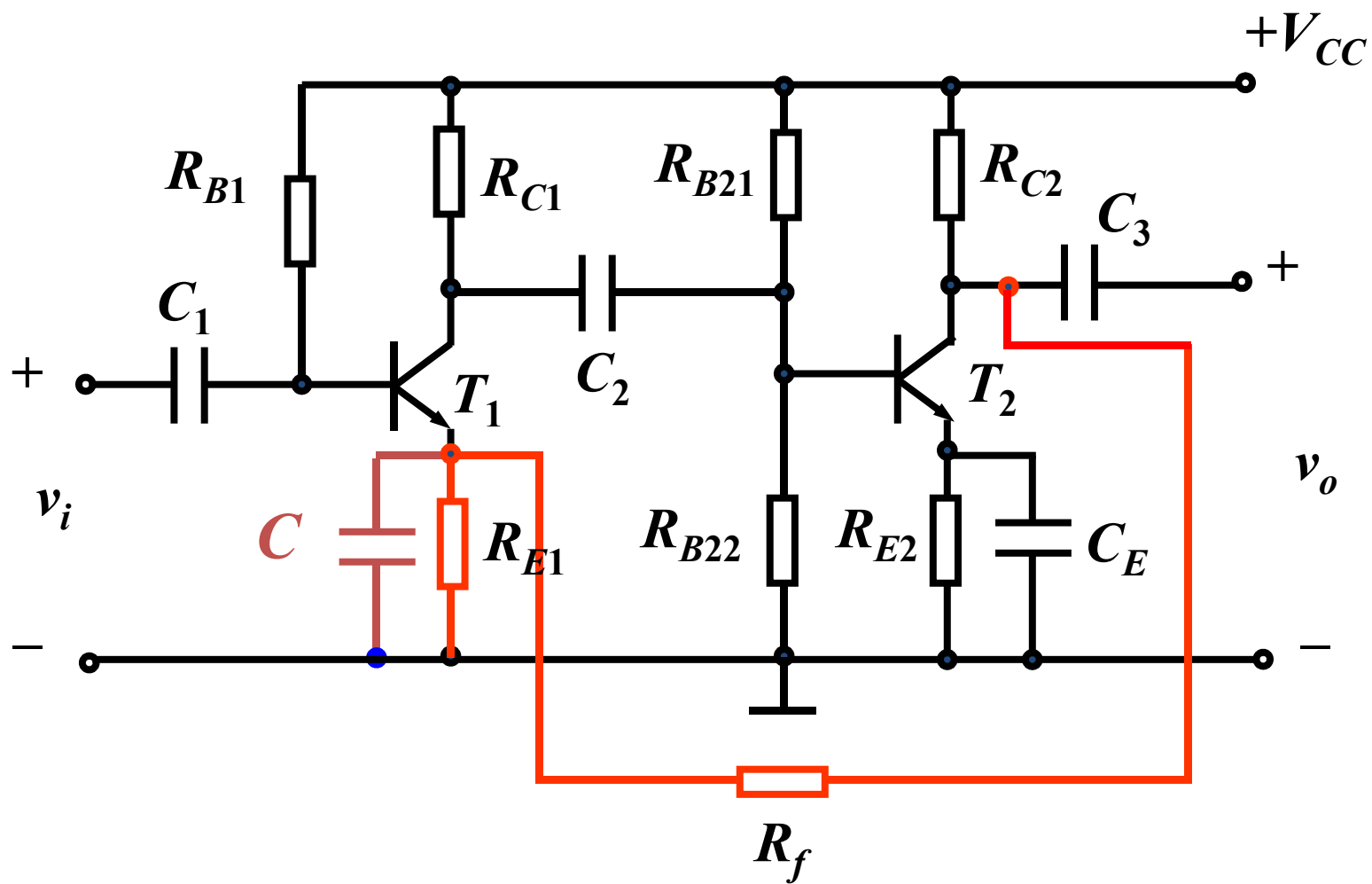
若反馈信号中只包含交流成份——交流反馈





增加隔直电容 C 后， R_f 只对交流起反馈作用。

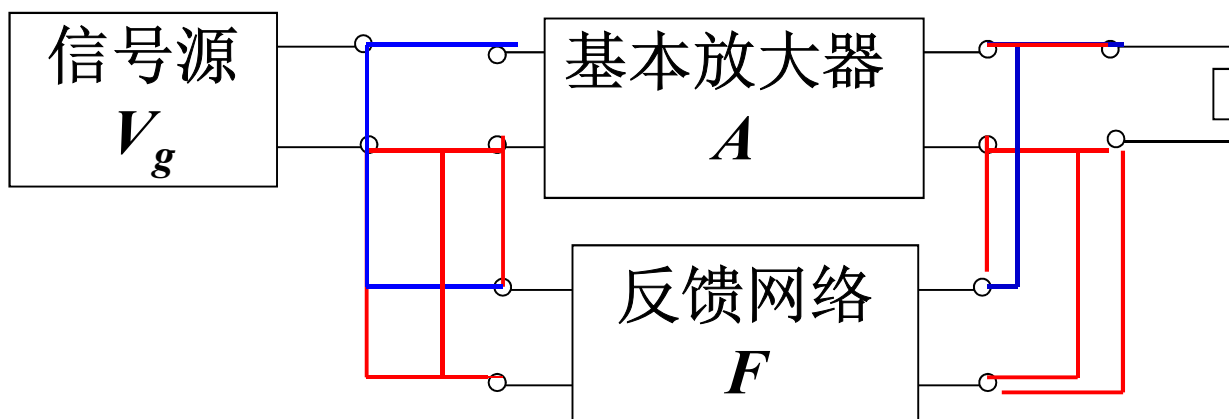
注：本电路中 C_1 、 C_2 也起到隔直作用。



增加旁路电容 C 后， R_f 只对直流起反馈作用。

7.1.3 电路的基本反馈形式

负反馈对放大器性能的影响同反馈的类型有关，当考虑到信号源和负载时，负反馈放大器包含四个部分：



输入端：反馈信号在输入端的联接方式分为 **串联** **并联**

输出端：反馈信号在输出端分为取 **电压** **电流**

根据四个部分连接方式的不同，反馈可以分为四种类型

电压串联反馈

电流并联反馈

电流串联反馈

电压并联反馈

1) 输出端获取反馈信号类型:

电压? 电流?

$$\dot{X}_o \rightarrow \dot{V}_o$$



电压反馈

$$\dot{X}_o \rightarrow \dot{I}_o$$



电流反馈

$$\dot{X}_f = F \bullet \dot{V}_o$$



$$\dot{X}_f = F \bullet \dot{I}_o$$



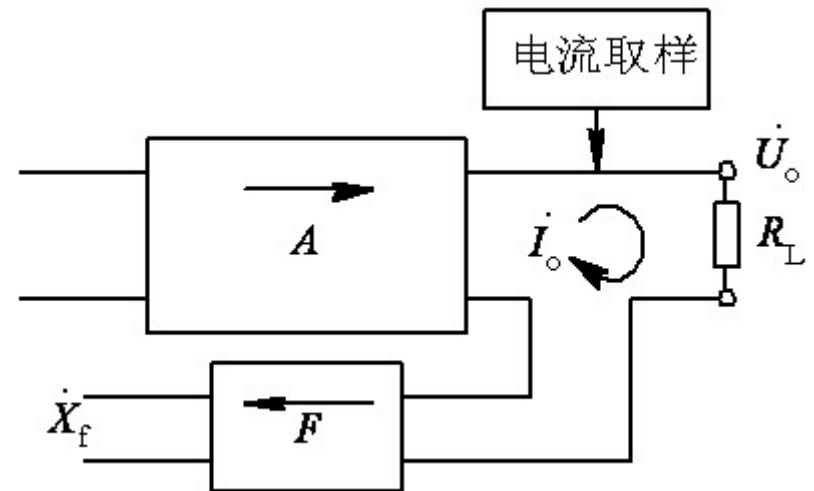
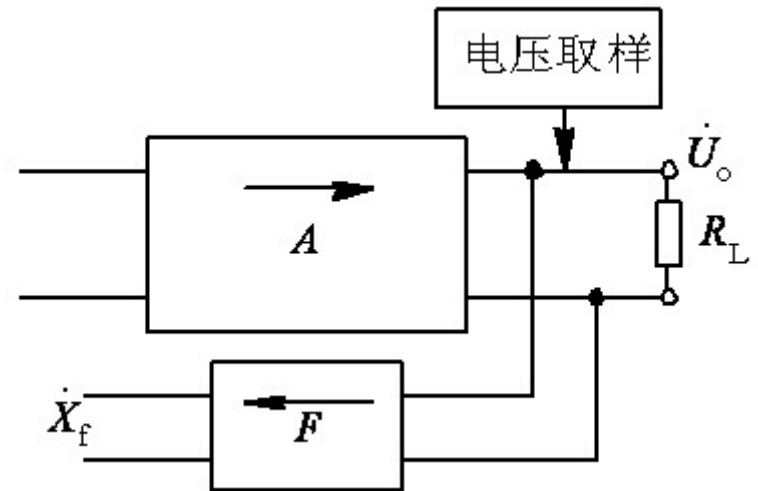
$$\dot{X}_f = 0$$



$$\dot{X}_f \neq 0$$



$$\dot{V}_o = 0$$

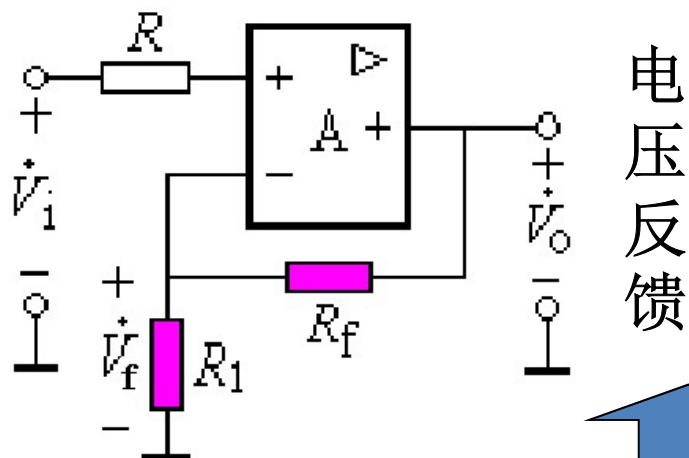


如何判别?

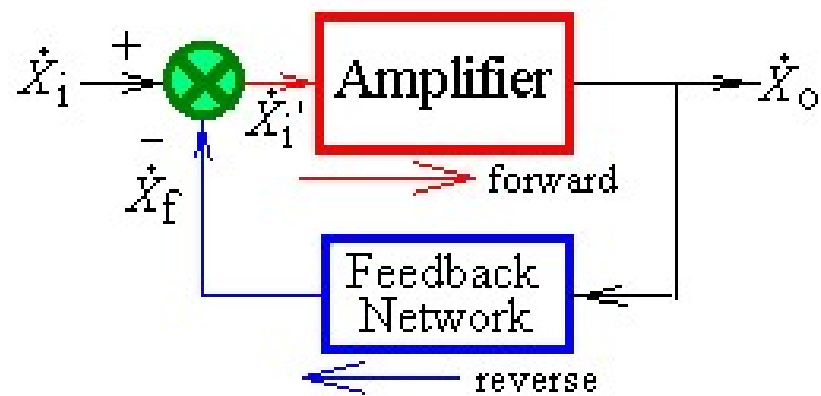
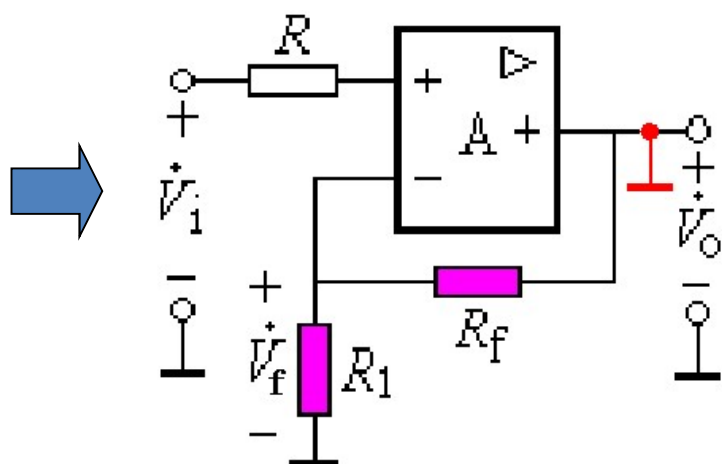
Let $R_L=0$ (负载短路法)

Example 1: 判别输出反馈类型

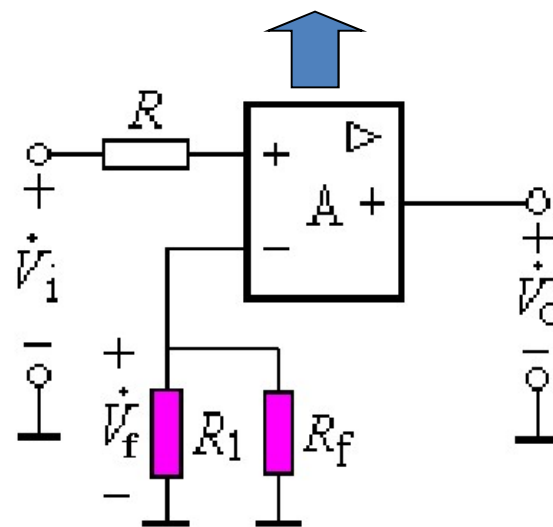
连接入出的元件/连线 $\rightarrow R_f$



Let $R_L=0 \rightarrow V_o=0$

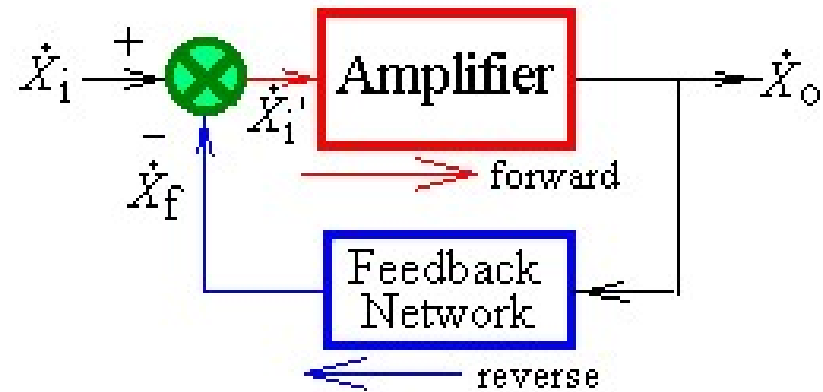
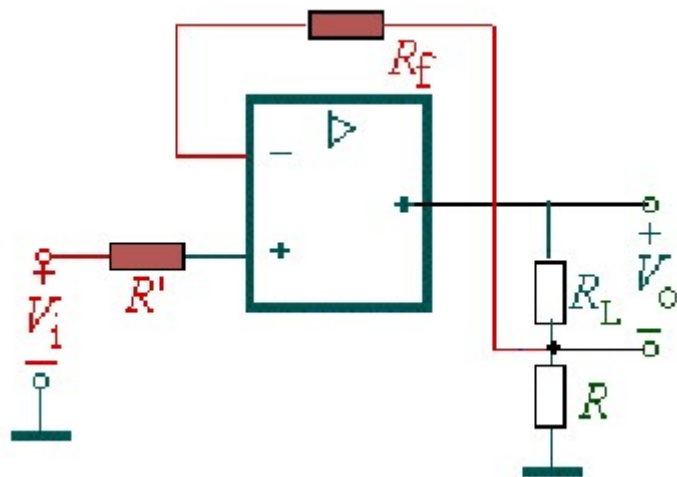


$X_f=0$ (反馈消失/无连接)



Example 2: 判别输出反馈类型

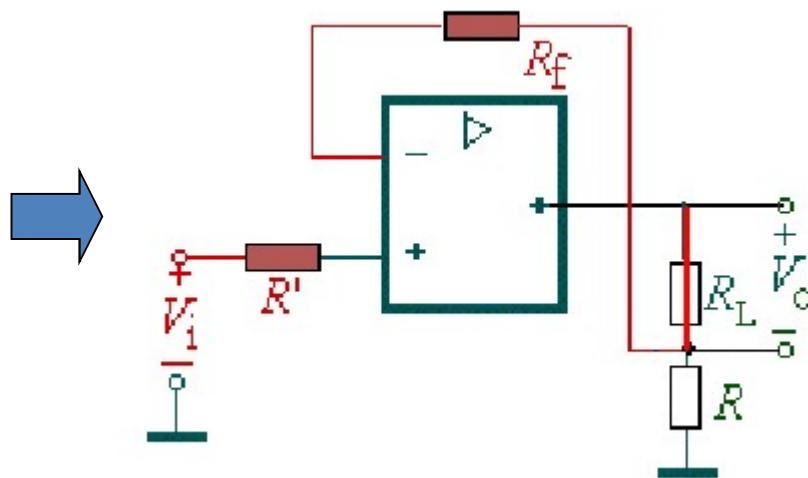
反馈元件? $\rightarrow R_f$



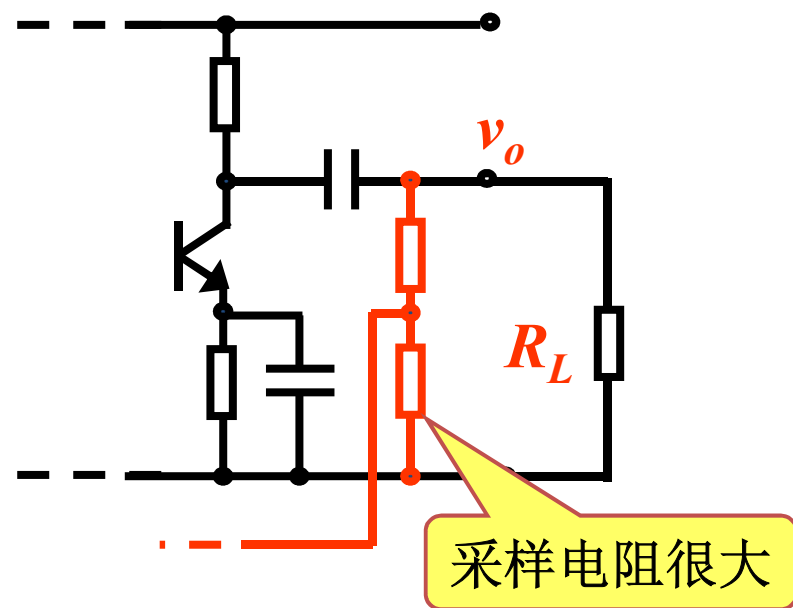
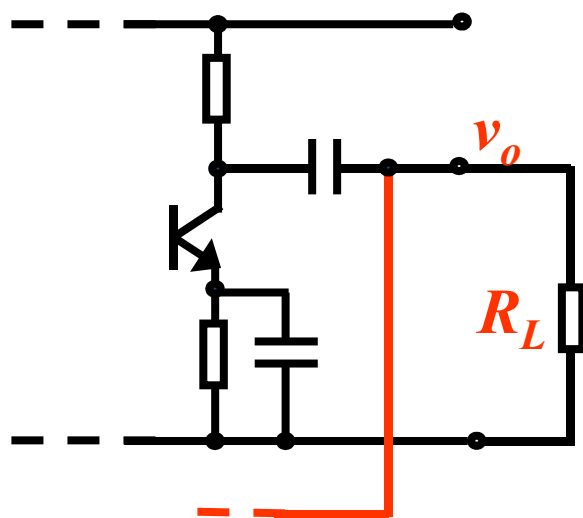
Let $R_L=0 \rightarrow V_o=0$

$X_i \neq 0$

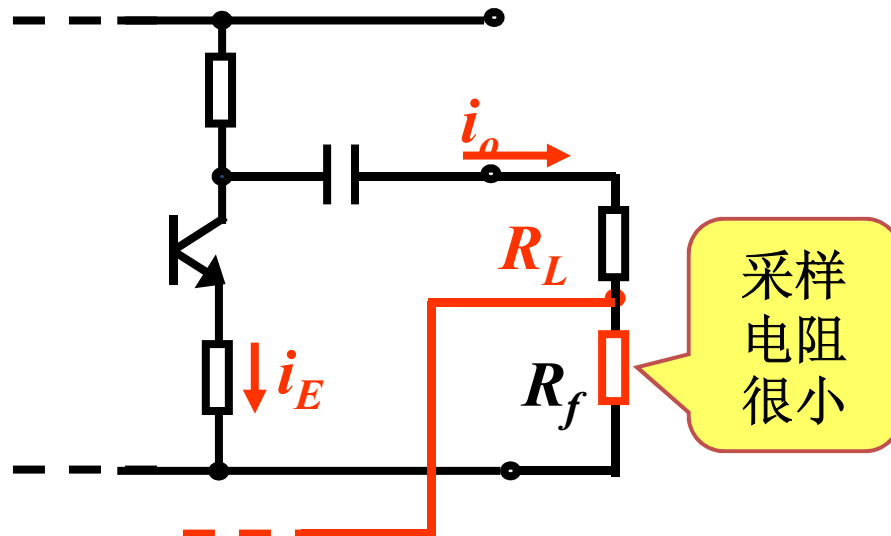
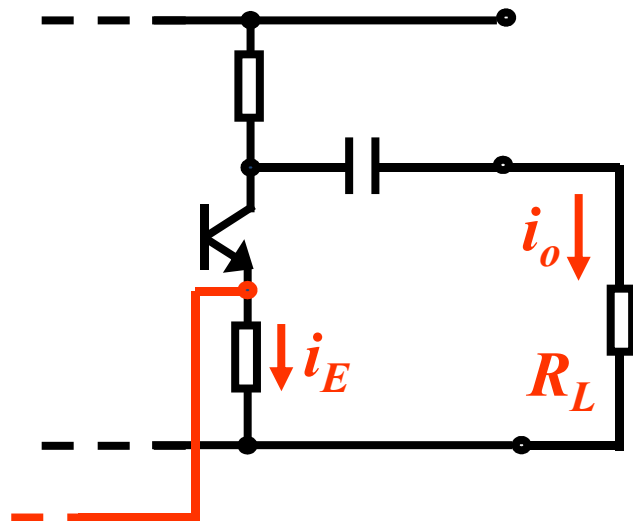
(反馈存在/有连接)



电压反馈采样的两种形式：



电流反馈采样的两种形式：



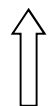
2) 输入端反馈类型:

串联? 并联?

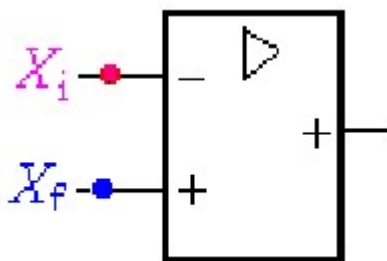
$$\dot{X} \rightarrow \dot{V}$$



串联反馈



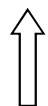
X_i 、 X_f 接到两个不同的输入端



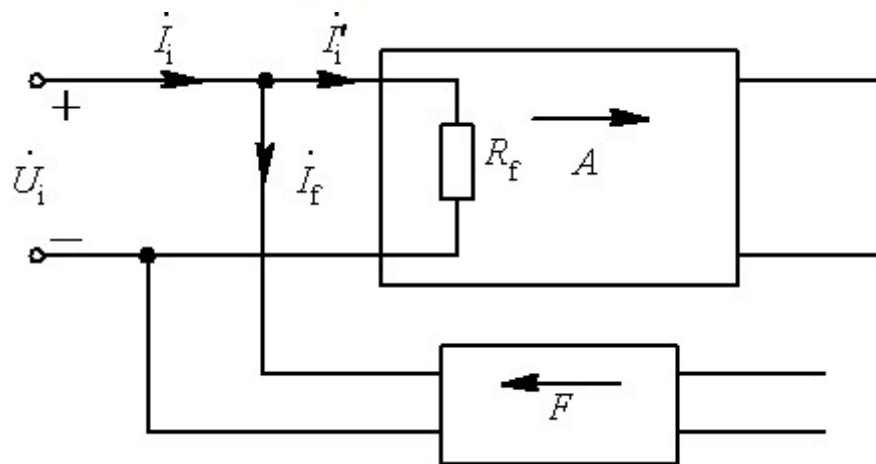
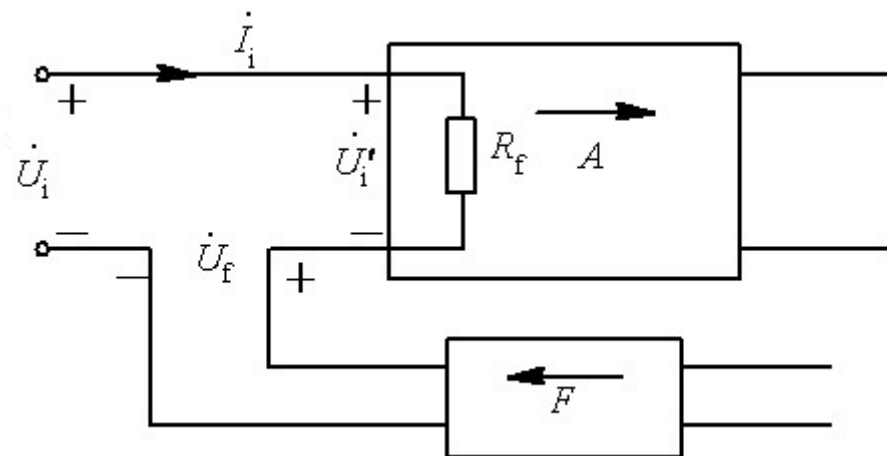
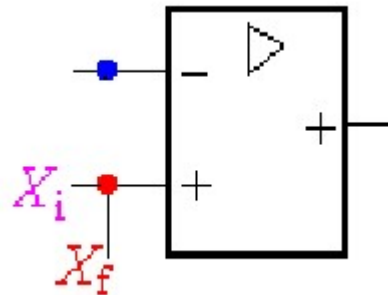
$$\dot{X} \rightarrow \dot{I}$$



并联反馈



X_i 、 X_f 接到相同的输入端



如何判别?

$$\dot{X}_i \quad \dot{X}_f$$

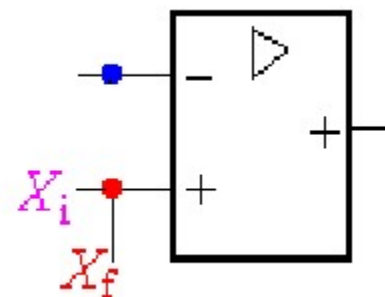
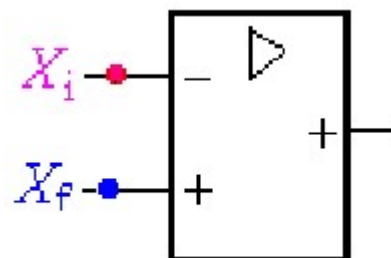
连接方式

放大电路的两个输入端:

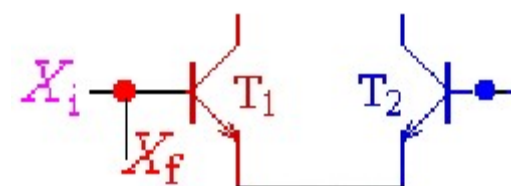
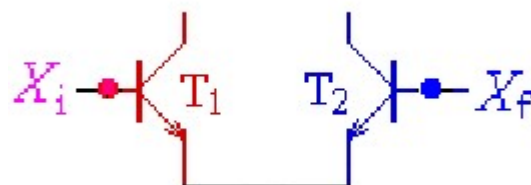
串联反馈

并联反馈

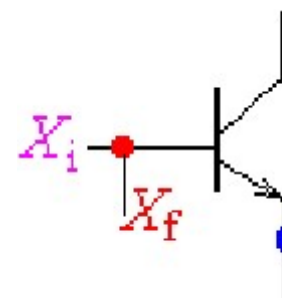
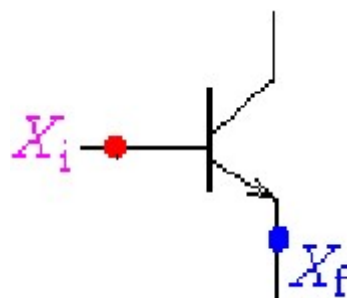
Op-amp



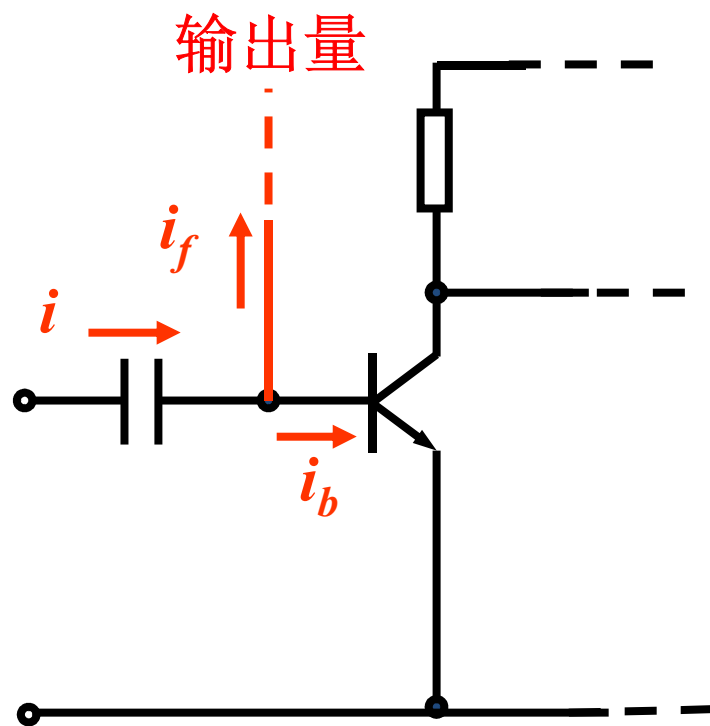
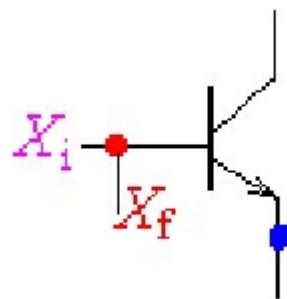
Diff-amp



BJT
FET

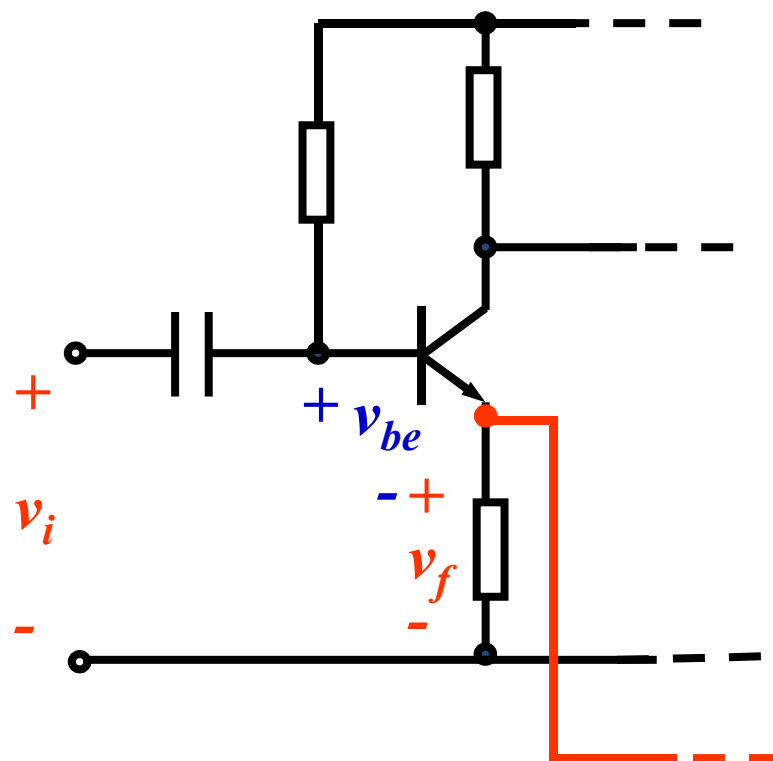
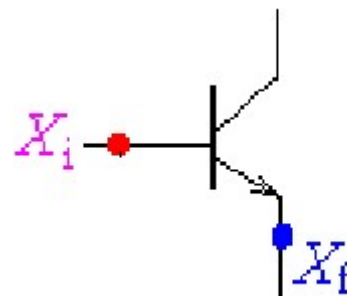


并联反馈



$$i_b = i - i_f$$

串联反馈

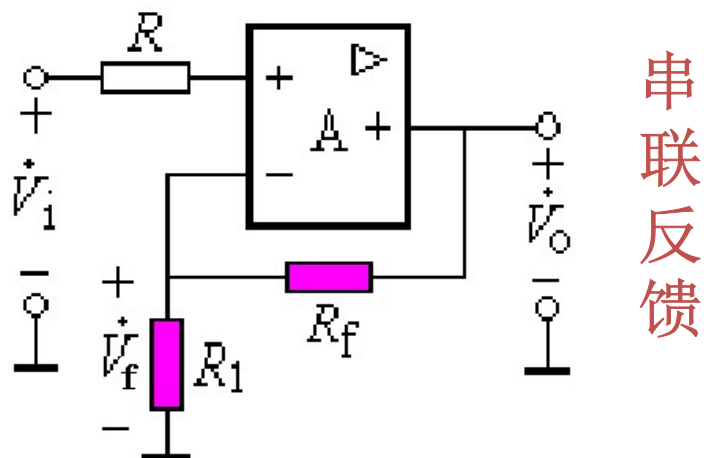


$$v_{be} = v_i - v_f$$

输出量

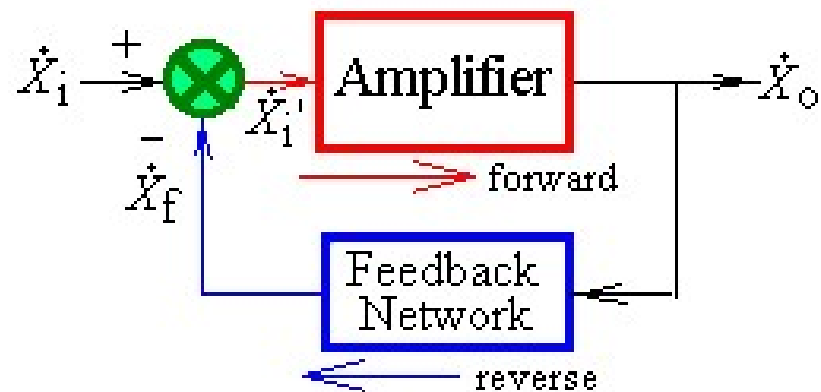
Examples: 判别输入反馈类型（串联？并联？）

反馈元件？ $\rightarrow R_f$

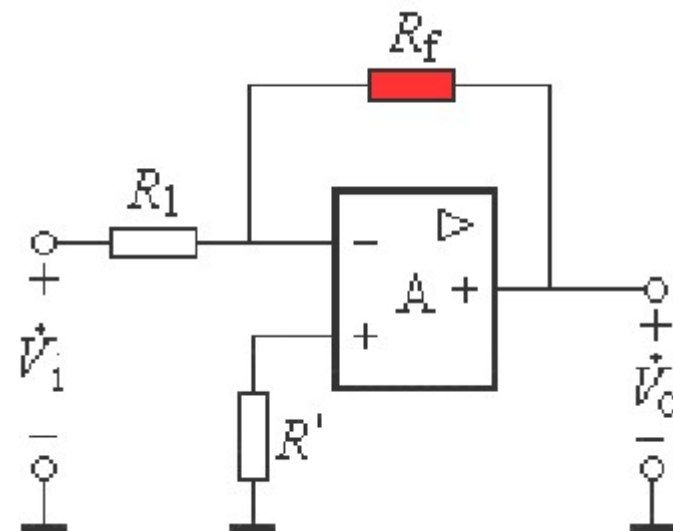


X_i 、 X_f 接到不同的输入端

X_i 、 X_f 接到相同的输入端

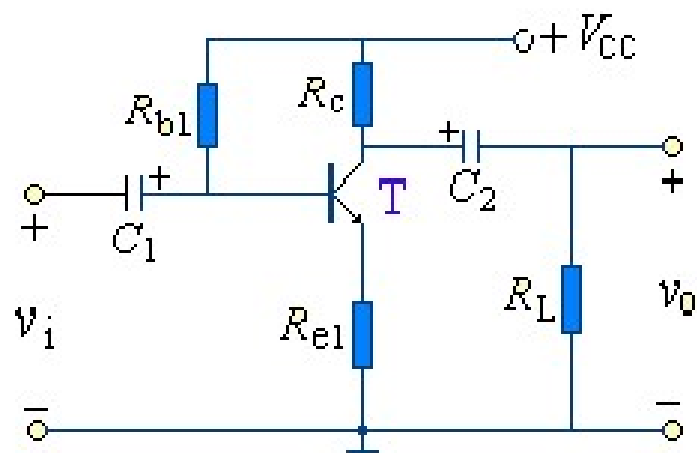


并联反馈

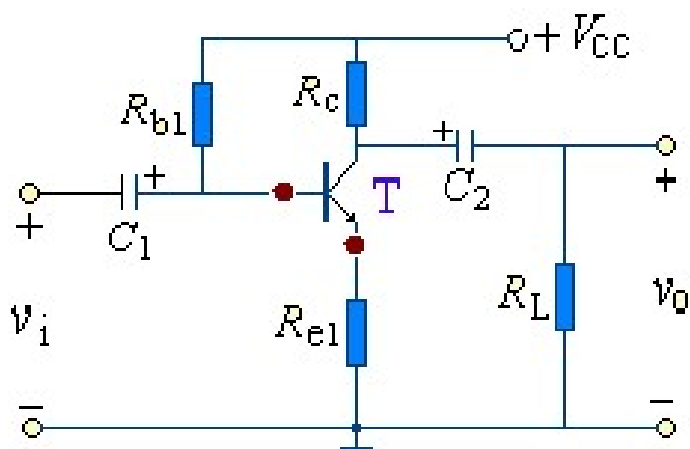


反馈元件？ $\rightarrow R_f$

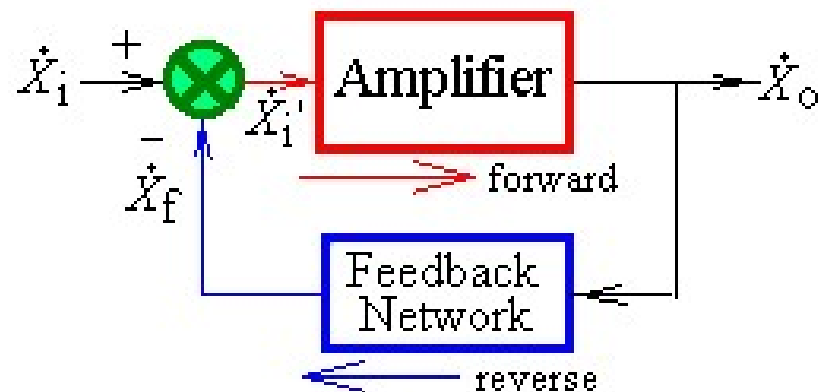
Example: BJT电路，判别输入反馈类型



反馈元件? $\rightarrow R_{e1}$



串联反馈

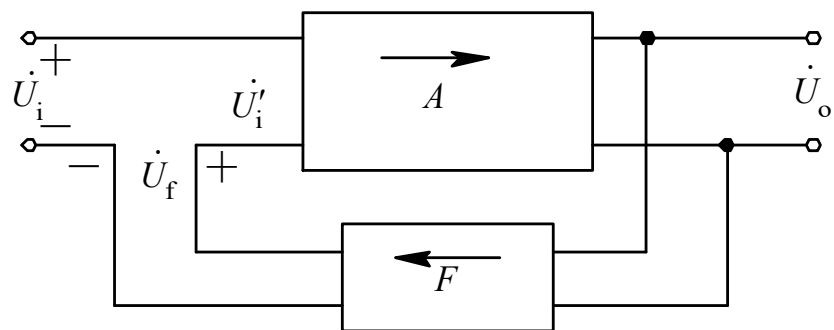


输入反馈类型?

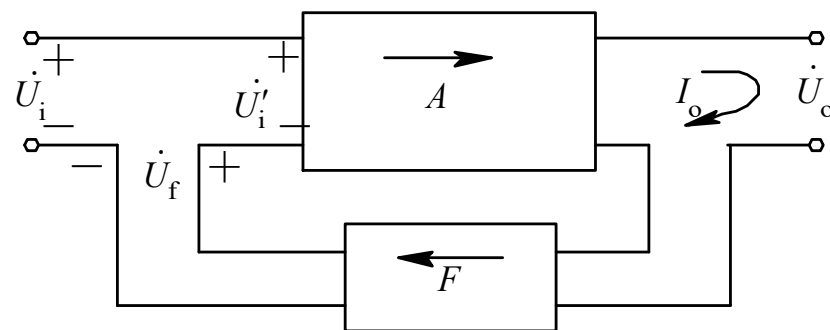
X_i 、 X_f 接到不同的输入端

输出反馈类型?

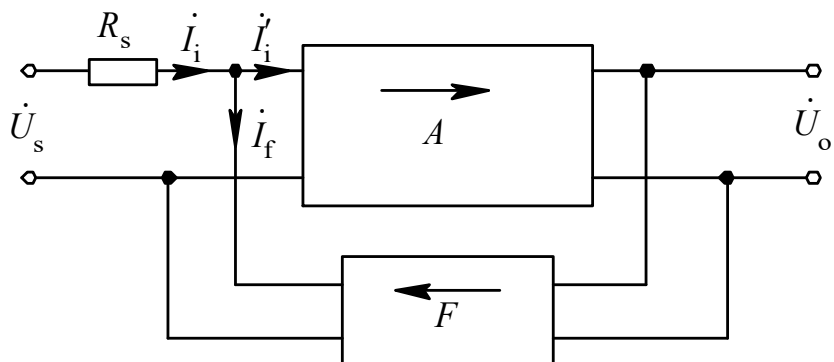
\rightarrow 电流反馈



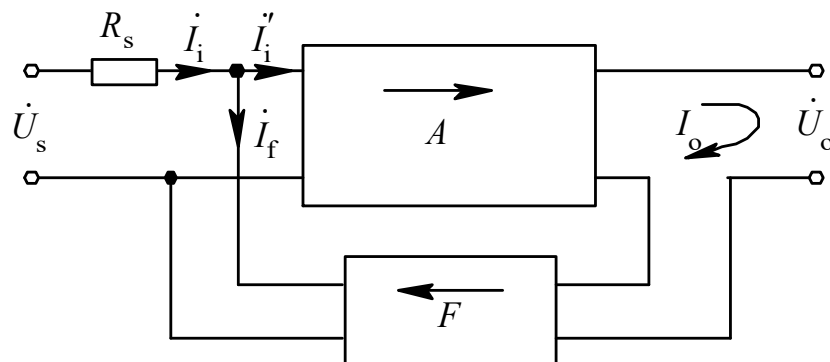
(a)



(b)



(c)



(d)

四种典型的负反馈组态电路

(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

3). 反馈的极性

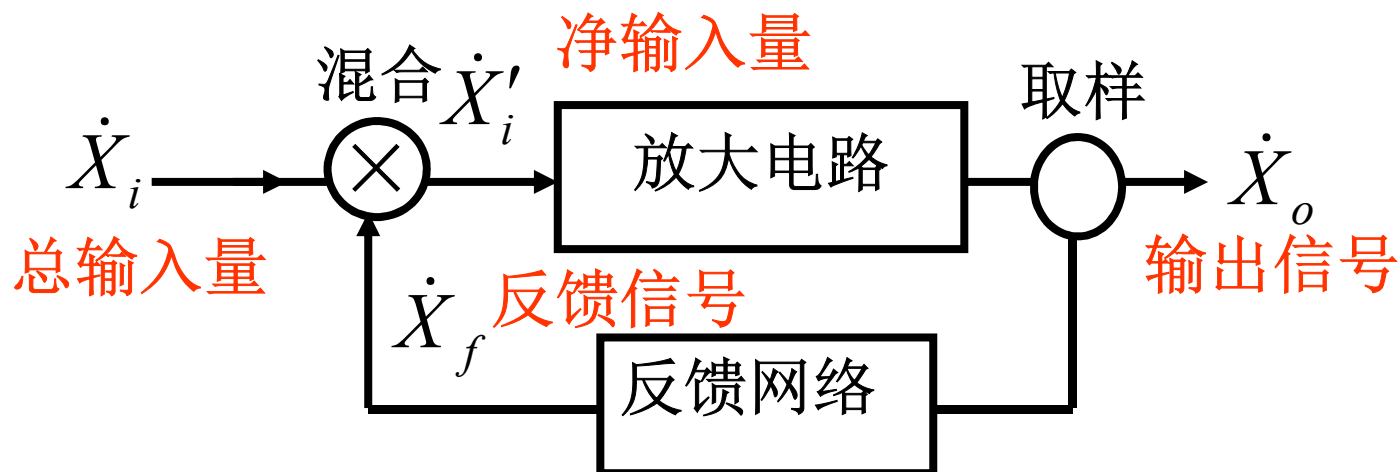
$$|\dot{X}'_i| < |\dot{X}_i|$$

**negative
feedback**
(负反馈)

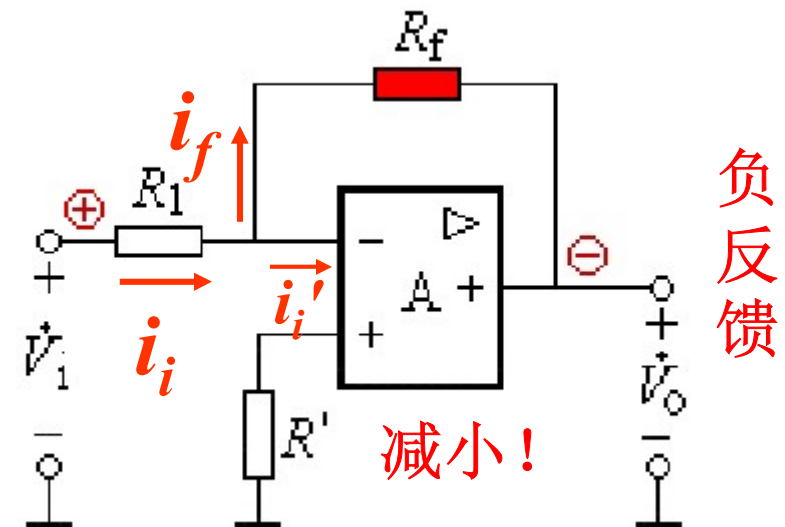
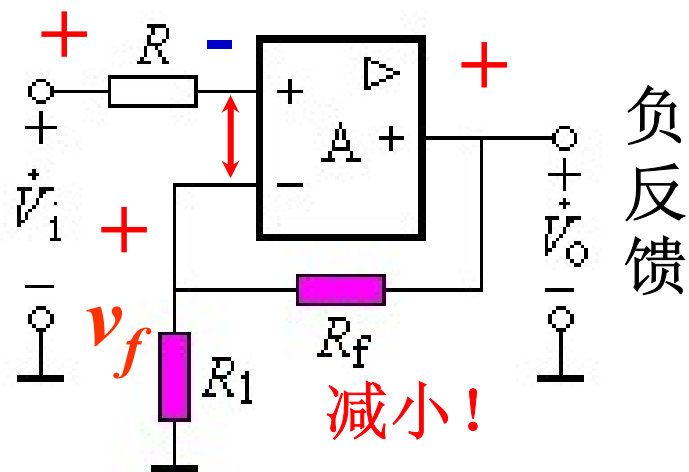
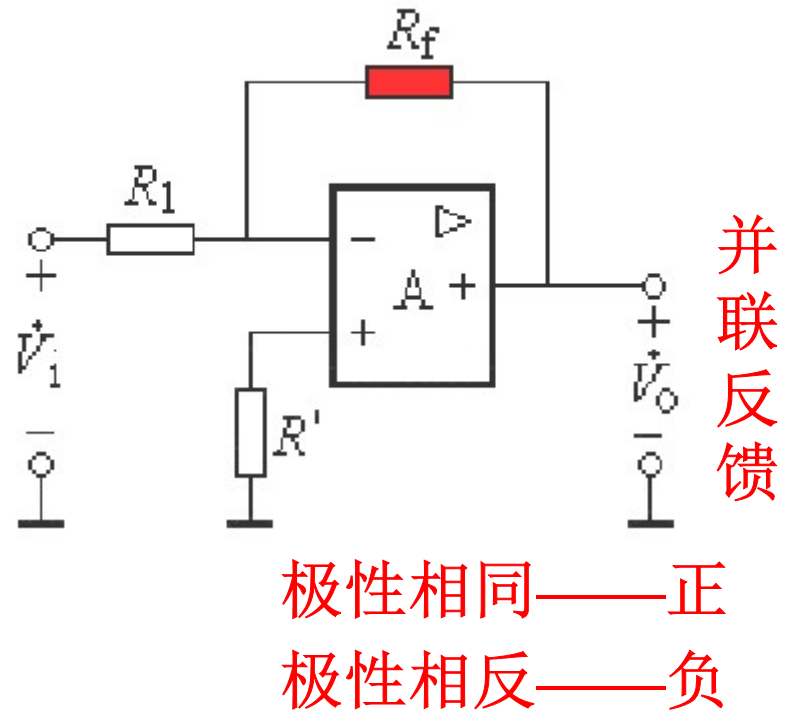
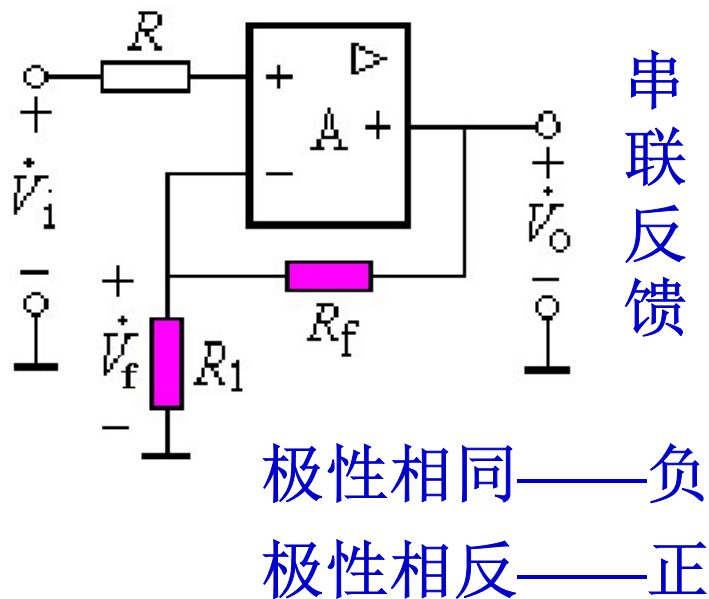
$$|\dot{X}'_i| > |\dot{X}_i|$$

**positive
feedback**
(正反馈)

瞬时极性（对地）法
与输入反馈类型有关



Examples: 反馈极性?



综合： 反馈放大器类型描述：

类型 = (交、直流) + 输出 + 输入 + 极性

有
反
馈
？

交流反馈	电压反馈	串联反馈	负反馈
直流反馈	电流反馈	并联反馈	正反馈

例如： 交流电压串联负反馈

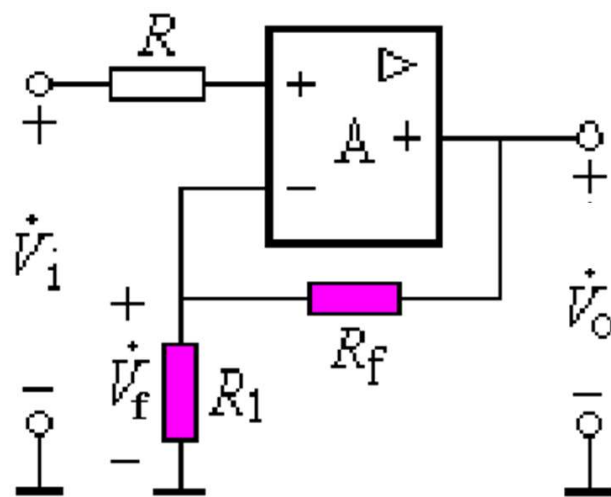
a 串联电压
b 并联电压
c 串联电流
d 并联电流

综合：反馈放大器类型描述：

类型 = (交、直流) + 输出 + 输入 + 极性

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
有 反 馈?	交流反馈	电压反馈	串联反馈	负反馈
	直流反馈	电流反馈	并联反馈	正反馈

类型判别举例：——五步法



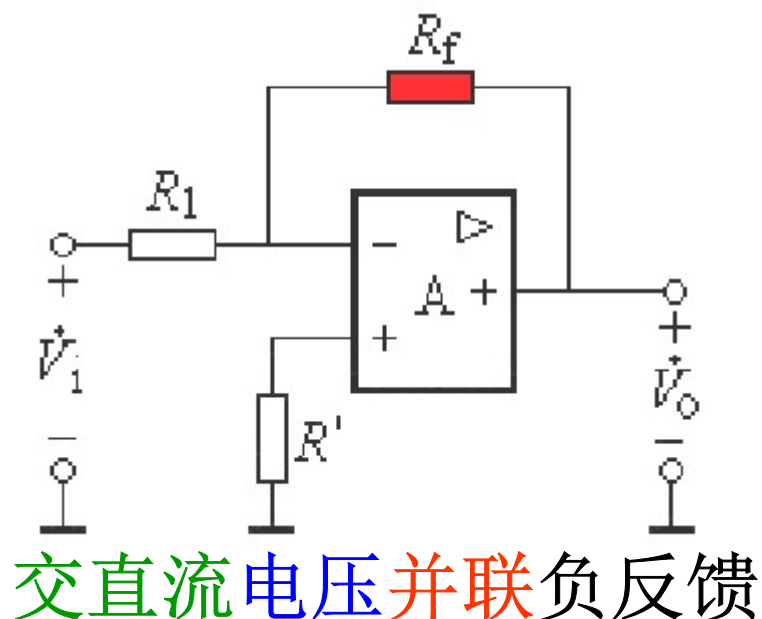
交直流电压串联负反馈

- (1)有反馈 R_f
- (2)交直流反馈
- (3)电压反馈
- (4)串联反馈
- (5)负反馈

综合：反馈放大器类型描述：

类型 = (交、直流) + 输出 + 输入 + 极性				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
有反馈?	交流反馈	电压反馈	串联反馈	负反馈
	直流反馈	电流反馈	并联反馈	正反馈

类型判别举例：——五步法

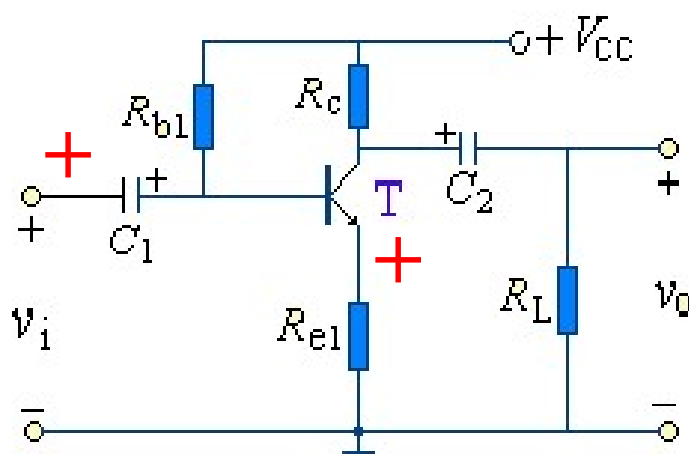


- (1)有反馈 R_f
- (2)交直流反馈
- (3)电压反馈
- (4)并联反馈
- (5)负反馈

综合：反馈放大器类型描述：

类型	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	有反馈?	交流反馈	电压反馈	串联反馈	负反馈
		直流反馈	电流反馈	并联反馈	正反馈

类型判别举例：——五步法



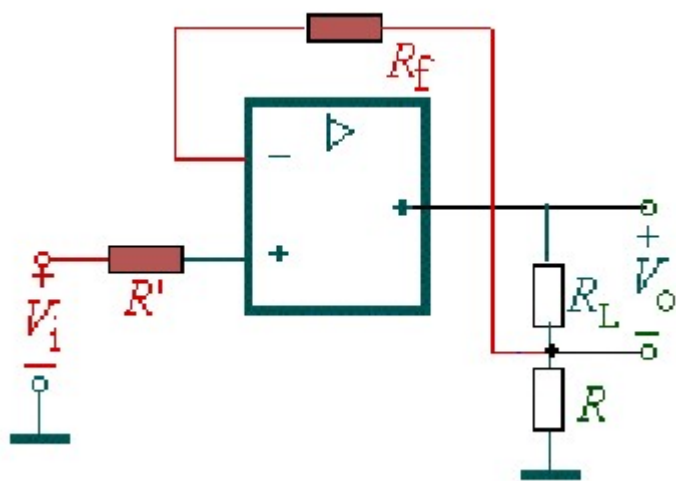
- (1)有反馈 R_{e1}
- (2)交直流反馈
- (3)电流反馈
- (4)串联反馈
- (5)负反馈

交直流电流串联负反馈

综合：反馈放大器类型描述：

类型 = (交、直流) + 输出 + 输入 + 极性				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
有反馈?	交流反馈	电压反馈	串联反馈	负反馈
	直流反馈	电流反馈	并联反馈	正反馈

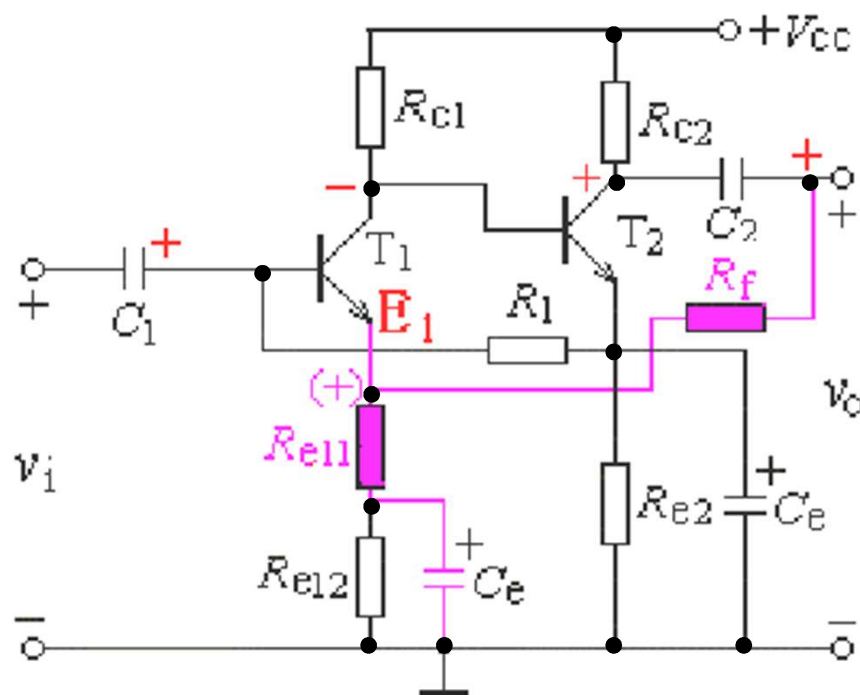
类型判别举例：——五步法



交直流电流串联负反馈

- (1)有反馈 R_f
- (2)交直流反馈
- (3)电流反馈
- (4)串联反馈
- (5)负反馈

例题7.1: 试判断图示电路 R_1 、 R_f 各引入何种反馈？



解：1、 R_1 加在 B_1 上：

(1) 直流反馈

(2) 电流反馈

(3) 并联反馈

(4) 负反馈

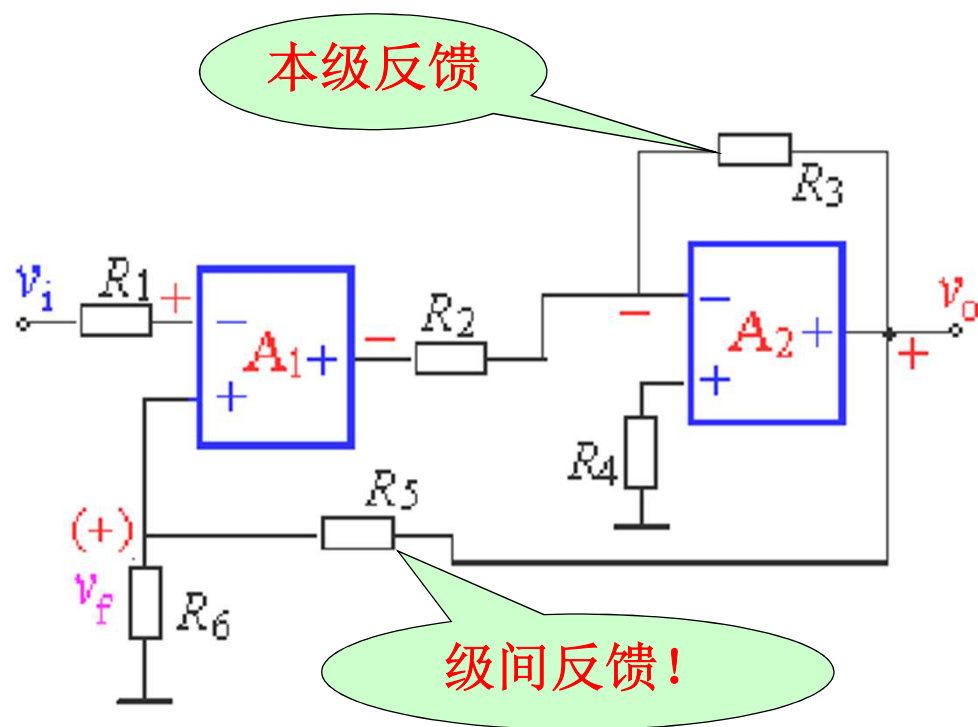
引入直流
电流并联负反馈

2、 R_f 加在 E_1 上：

(1) 交流 (2) 电压 (3) 串联 (4) 负反馈

引入交流电压串联负反馈

例题7.2: 试判断图示电路的反馈组态(反馈类型)?



结论:
交直流
电压
串联
负反馈

主要反馈元件: R_5

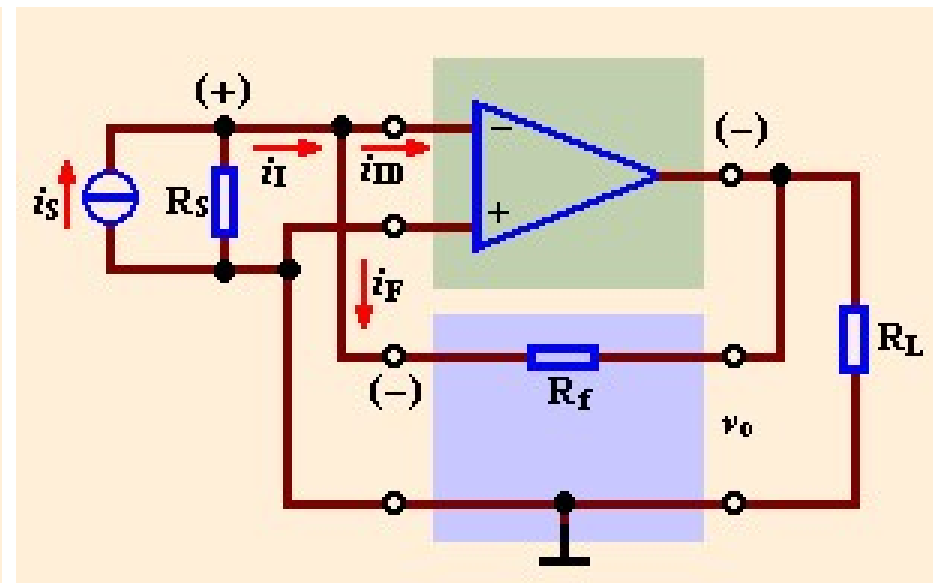
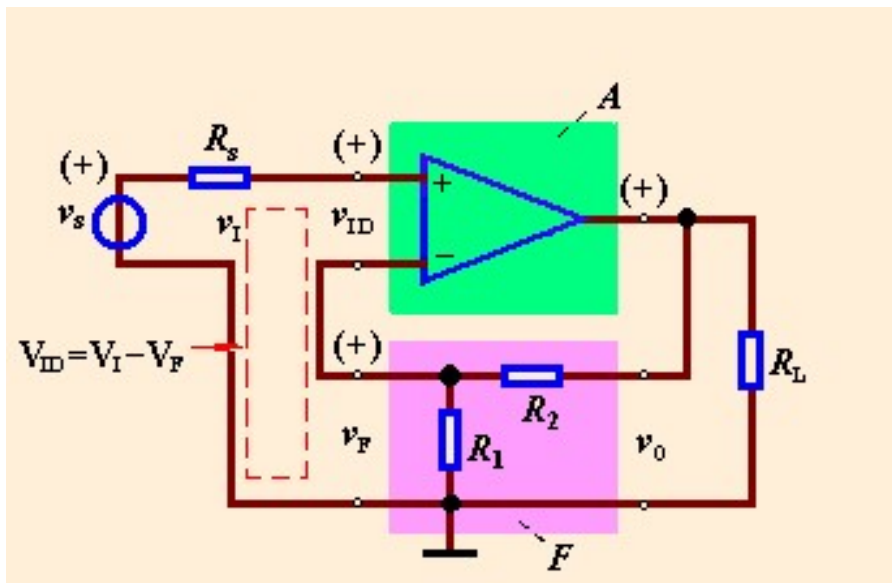
(1)交直流 (2)电压 (3)串联 (4)负反馈

作业:

P374: 7.2.4

练习: 所有反馈电路的类型判别 (重要!)

P374: 7.1.1, 7.1.2, 7.1.3 (R_s 影响)



串联反馈: R_s 越小越好 (因为分压) 并联反馈: R_s 越大越好 (因为分流)

7.3 负反馈放大电路增益的计算方法 P339

7.3.1 闭环放大倍数的一般表达式

7.3.2 反馈深度

7.3.3 环路增益

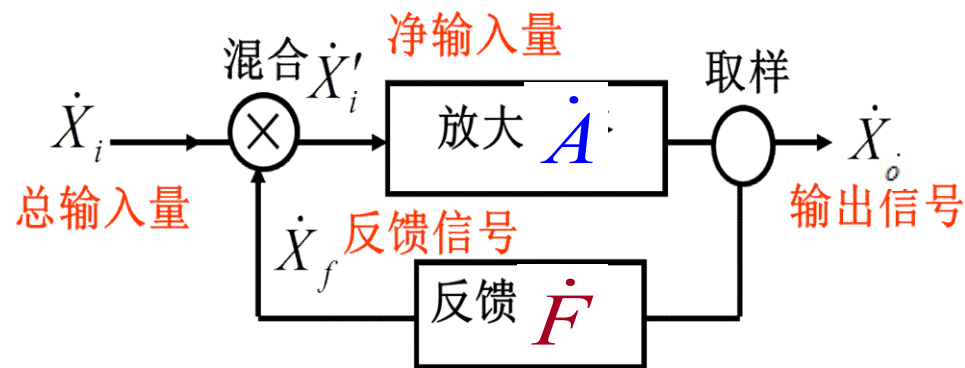
7.3.1 闭环放大倍数的一般表达式

开环增益：
Open loop gain

$$\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}'_i}$$

反馈系数：
Feedback transfer function

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



闭环增益：
Closed-loop signal gain

$$\begin{cases} \dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} \\ \dot{X}'_i = \dot{X}_i - \dot{X}_f \end{cases}$$

量纲说明

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

A_f 量纲说明
(P341 表7.3.1)

四种负反馈类型各物理量的含义

负反馈类型	输入量 $x_i \ x_f \ x_{id}$	输出量 x_o	$A=x_o/x_{id}$	$A_f=x_o/x_i$	$F=x_f/x_o$
电压 串联	电压	电压	A_v	A_{vf}	F_v
电压 并联	电流	电压	A_r	A_{rf}	F_g
电流 串联	电压	电流	A_g	A_{gf}	F_r
电流 并联	电流	电流	A_i	A_{if}	F_i

7.3.2 反馈深度

$1 + \dot{A}\dot{F}$ 称为反馈深度

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

反映反馈对放大电路影响的程度

三种情况:

(1) 当 $|1 + \dot{A}\dot{F}| > 1$ 时, $|\dot{A}_f| < |\dot{A}|$, 相当负反馈

(2) 当 $|1 + \dot{A}\dot{F}| < 1$ 时, $|\dot{A}_f| > |\dot{A}|$, 相当正反馈

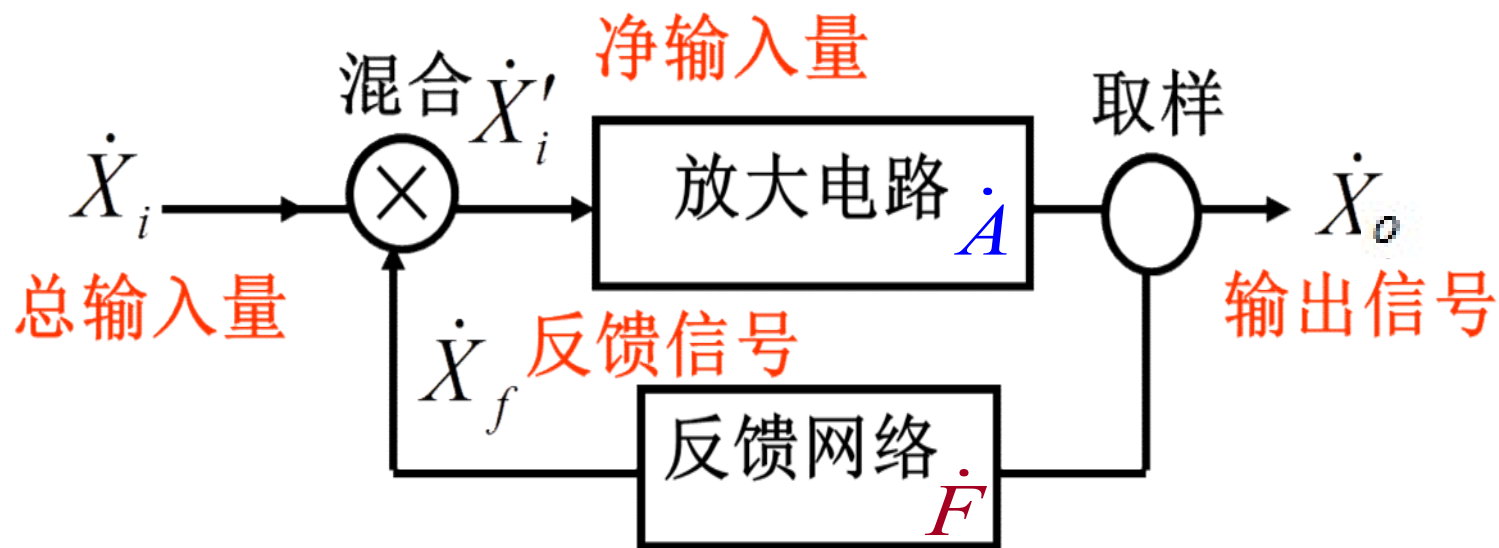
(3) 当 $|1 + \dot{A}\dot{F}| = 0$ 时, $|\dot{A}_f| = \infty$, “自激状态”

$|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$ 称为深度负反馈 $\dot{A}_f = \frac{1}{\dot{F}}$

7.2.3 环路增益 $| \dot{A} \dot{F} |$

Loop Gain

是指放大电路和反馈网络所形成环路的增益。



7.4 深度负反馈条件下的近似计算 (P350)

深(度)负反馈: $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$

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

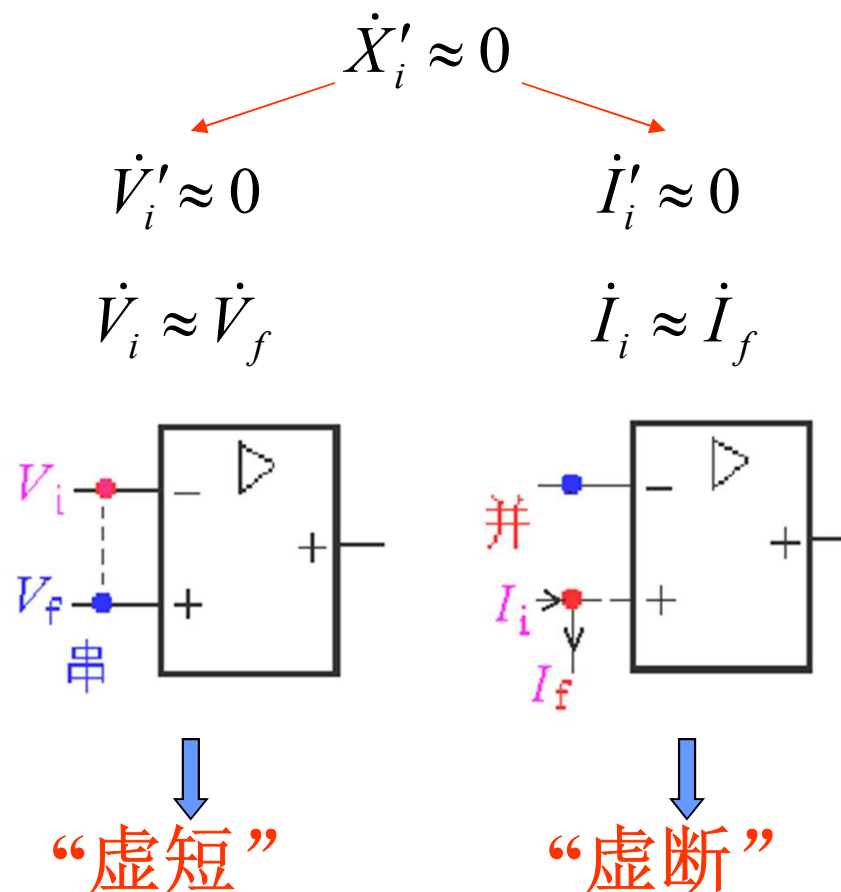
\downarrow
 $\frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$

≈

\downarrow
 $\frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_f}$

$$\therefore \dot{X}_i \approx \dot{X}_f$$

$$\therefore \dot{X}'_i = \dot{X}_i - \dot{X}_f \approx 0$$



深负反馈时计算 \dot{A}_{vf}

方法：

应用深负反馈下

两结论：

“虚短” + “虚断”



F网络



$$\dot{A}_{vf} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}$$

7.4.1 电压串联负反馈

7.4.2 电压并联负反馈

7.4.3 电流串联负反馈

7.4.4 电流并联负反馈

7.4.1 Series-shunt configuration

电压串联负反馈

对应反馈类型标出电量：

电压负反馈：标 V_o

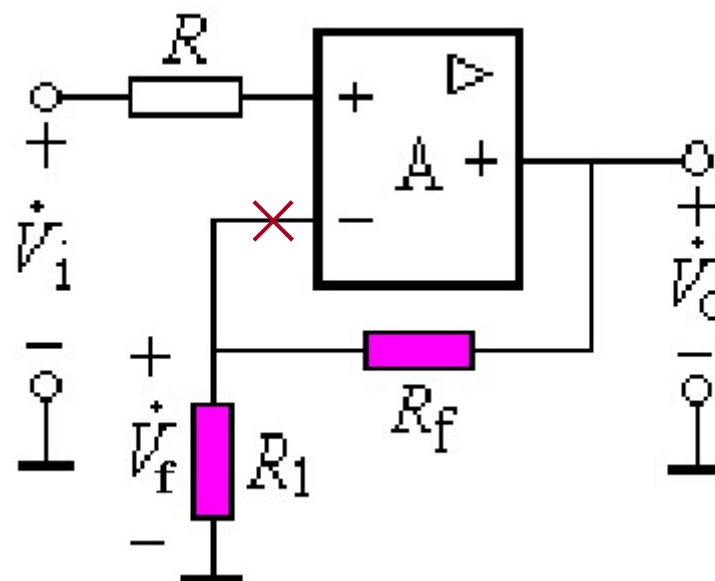
串联负反馈：标 V_f

(1) 反馈类型？

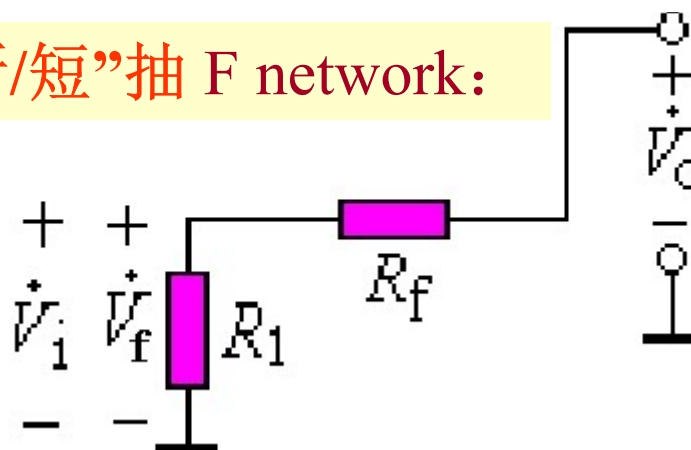
(2) 闭环电压放大倍数

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

$$\dot{A}_{vf} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$



“虚断/短”抽 F network:



7.4.2 Shunt-shunt configuration

电压并联负反馈

- (1) 反馈类型?
- (2) 闭环电压放大倍数

$$\begin{aligned}\dot{A}_{vf} &= \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_i R_1} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_f R_1} = \frac{1}{\dot{F}} \cdot \frac{1}{R_1} \\ &= - \frac{R_f}{R_1}\end{aligned}$$

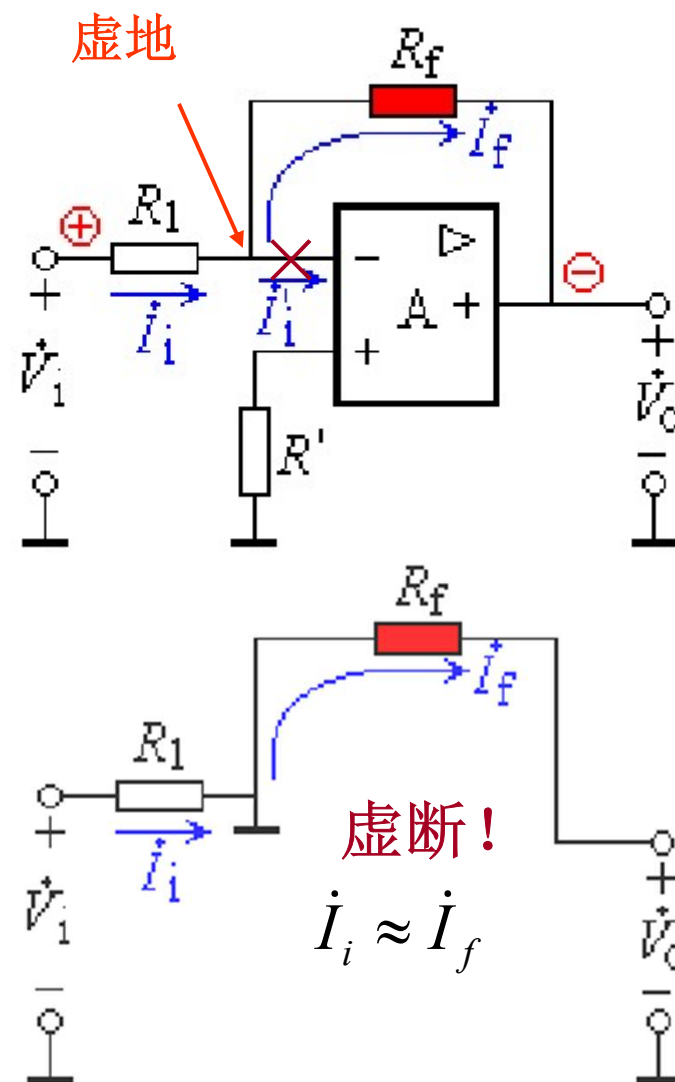
“虚断/短”抽

F network:

对应反馈类型标出电量:

电压负反馈: 标 V_o

并联负反馈: 标 I_f (I_i)



7.4.3 Series-series configuration

电流串联负反馈

对应反馈类型标出电量：

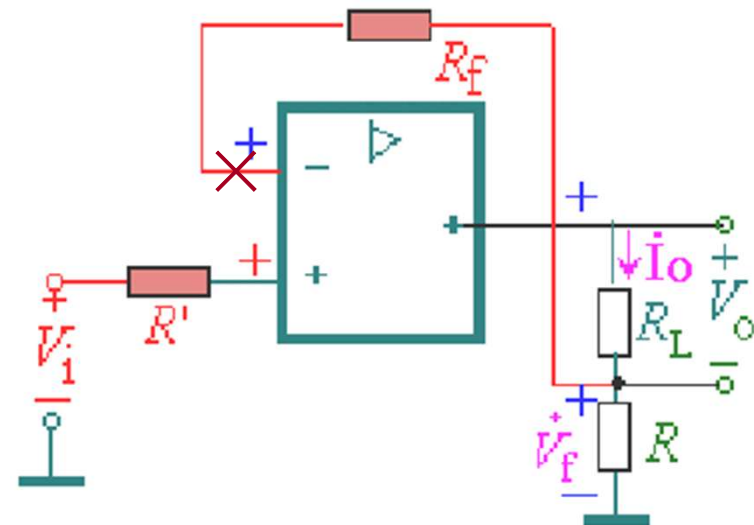
电流负反馈：标 I_o

串联负反馈：标 V_f

(1) 反馈类型？

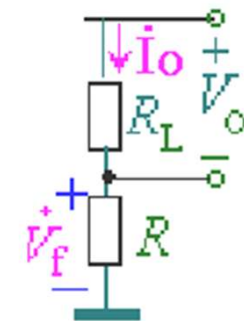
(2) 闭环电压放大倍数

$$\begin{aligned}\dot{A}_{vf} &= \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{\dot{I}_o R_L}{\dot{V}_f} = \frac{1}{\dot{F}} \cdot R_L \\ &= \frac{R_L}{R}\end{aligned}$$



“虚断/短”抽

F network:



7.4.4 Shunt-series configuration

电流并联负反馈

对应反馈类型标出电量：

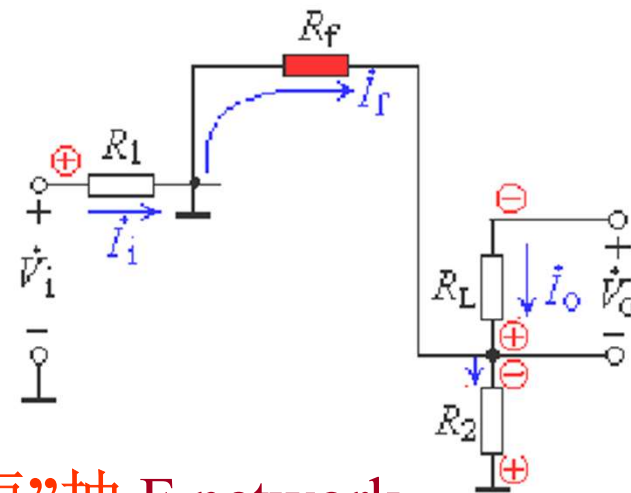
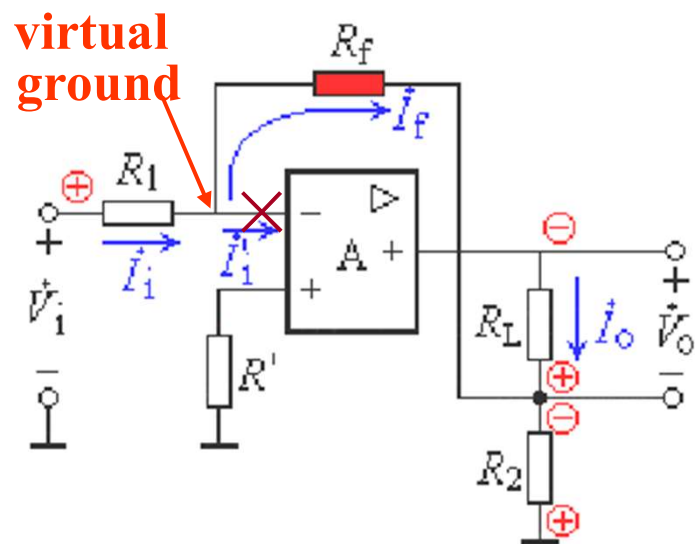
电流负反馈：标 I_o

并联负反馈：标 I_f (I_i)

(1) 反馈类型？

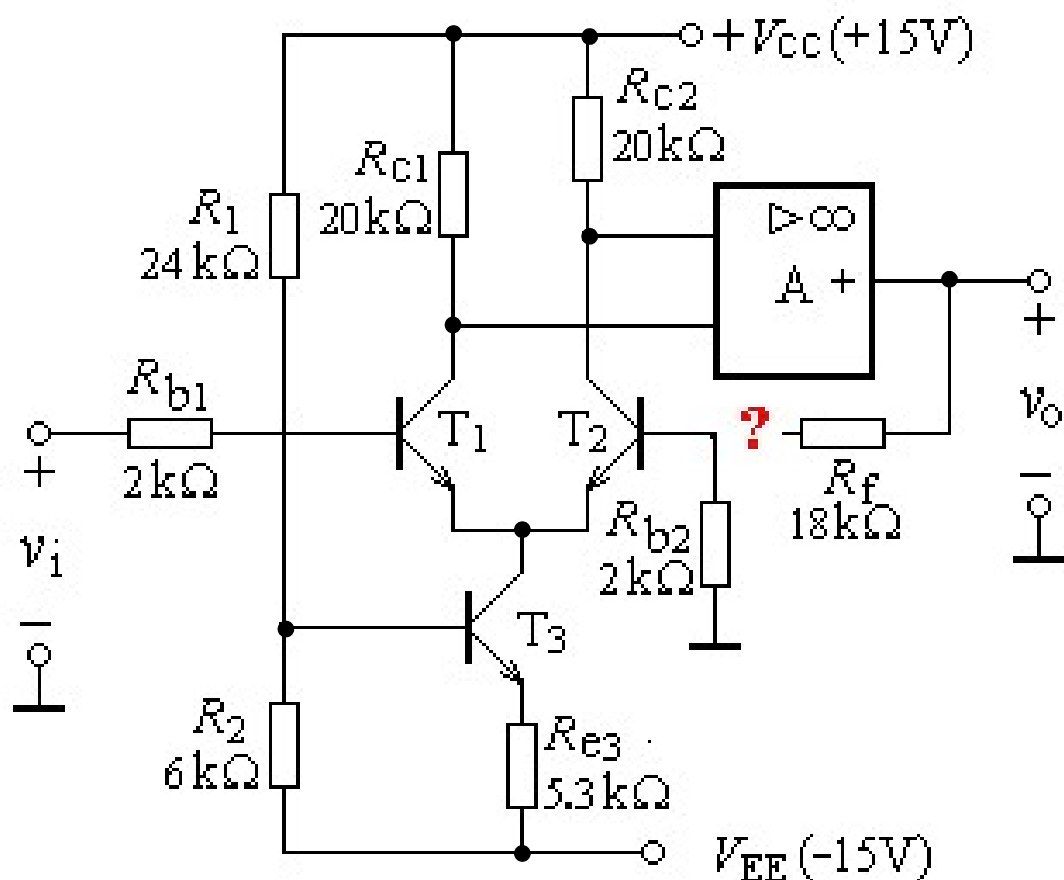
(2) 闭环电压放大倍数

$$\begin{aligned}\dot{A}_{vf} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} &= \frac{\dot{I}_o R_L}{\dot{I}_f R_1} = \frac{1}{\dot{F}} \cdot \frac{R_L}{R_1} \\ &= \frac{\dot{I}_o R_L}{-\frac{R_2}{R_2 + R_f} \dot{I}_o R_1} \\ &= -\left(1 + \frac{R_f}{R_2}\right) \frac{R_L}{R_1}\end{aligned}$$



“虚断/短”抽 F network:

例题：回答下列问题。



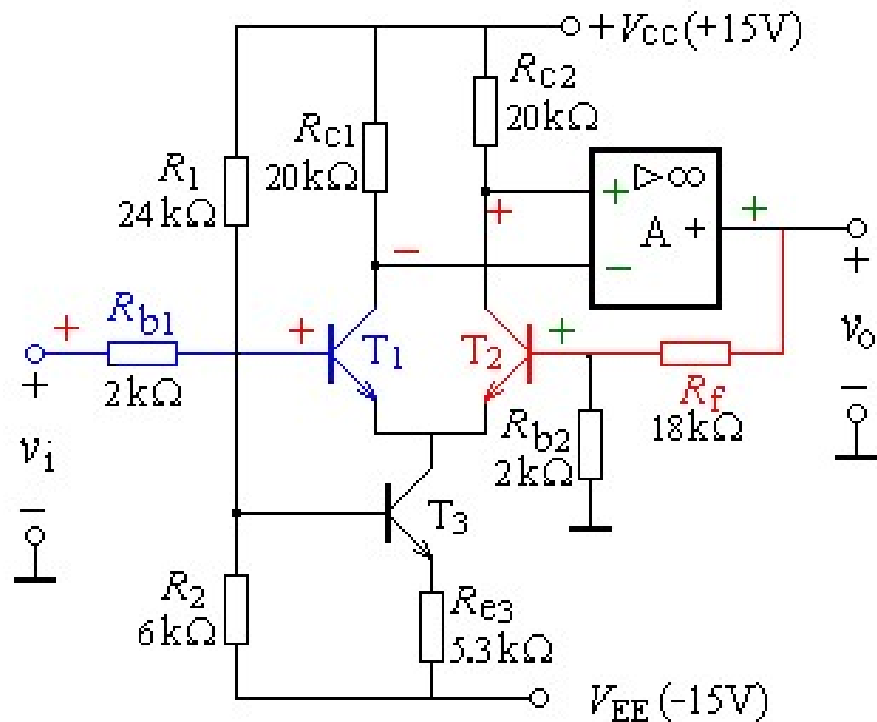
①求静态时运放的共模输入电压；

②若要实现串联电压反馈, R_f 应接向何处？

③要实现串联电压负反馈, 运放的输入端极性如何确定？

④求引入电压串联负反馈后的闭环电压放大倍数。

解：①静态时运放的共模输入电压



$$I_{C3} = \frac{V_{R2} - V_{BE}}{R_{e3}} = \frac{6 - 0.7}{5.3} = 1 \text{ mA}$$

$$V_{R2} = \frac{V_{CC} - V_{EE}}{R_1 + R_2} R_2 = \frac{15 + 15}{24 + 6} 6 = 6 \text{ V}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{I_{C3}}{2} = 0.5 \text{ mA}$$

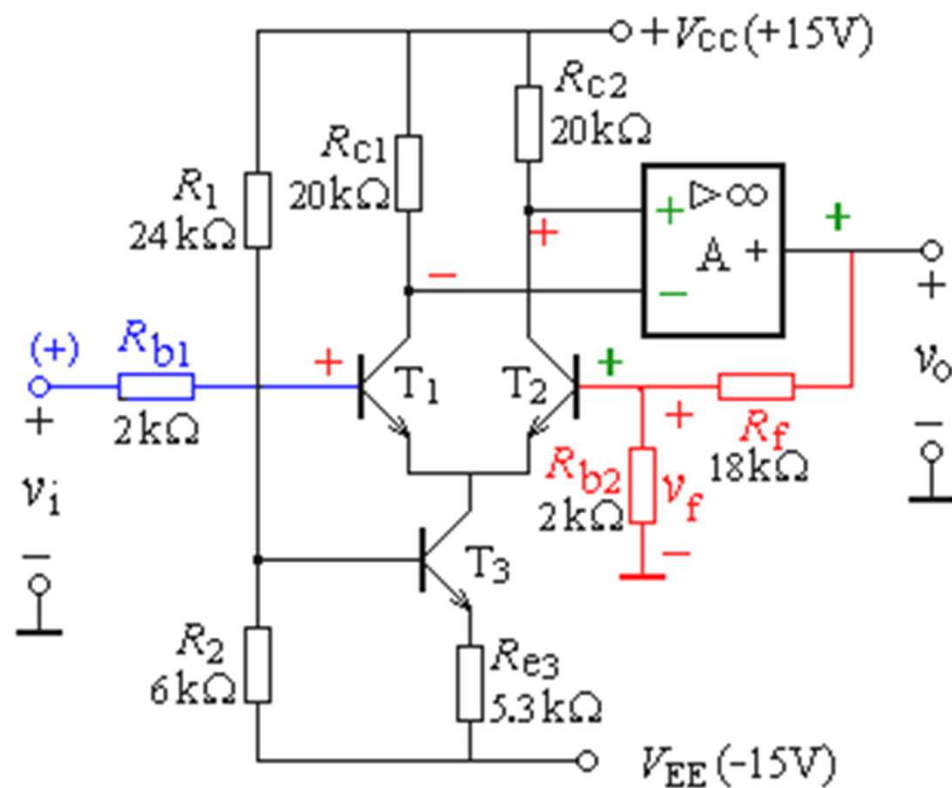
$$V_{C1} = V_{C2} = V_{CC} - I_{C1} R_{c1} = 5 \text{ V}$$

$$V_{IC} = (V_{C1} + V_{C2}) / 2 = 5 \text{ V}$$

②若要实现串联电压反馈, R_f 应接向何处? 应接T2基极

③要实现串联电压负反馈,运放的输入端极性如何确定

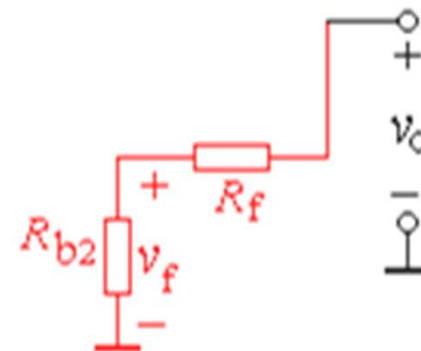
解④:求引入电压串联负反馈后的闭环电压增益



$$\dot{A}_{vf} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} \approx \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_f}$$

$$= 1 + \frac{R_f}{R_{b2}}$$

F网络



带Re的BJT共射电路

对应反馈类型标出电量：
 电流负反馈：标 I_o (BJT的 $I_o=I_c$)
 串联负反馈：标 V_f

$$A_v = -\frac{\beta \cdot (R_c \parallel R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_e}$$

(1) 反馈类型？ 电流串联负反馈

(2) 闭环电压放大倍数

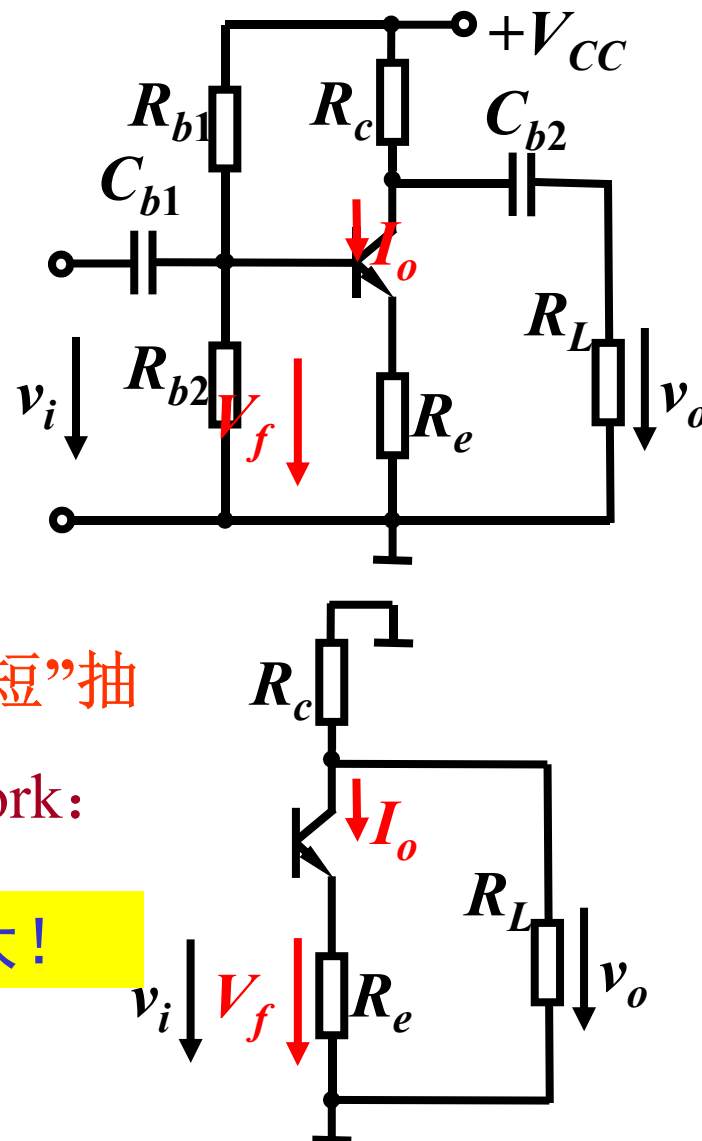
$$\begin{aligned} \dot{A}_{vf} &= \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{-\dot{I}_o(R_C \parallel R_L)}{\dot{V}_f} = -\frac{1}{\dot{F}} \cdot (R_C \parallel R_L) \\ &= \frac{-\dot{I}_o(R_C \parallel R_L)}{\dot{I}_o R_e} \\ &= -\frac{R_C \parallel R_L}{R_e} \end{aligned}$$

“虚断/短”抽

F network:

深负反馈：Re很大！

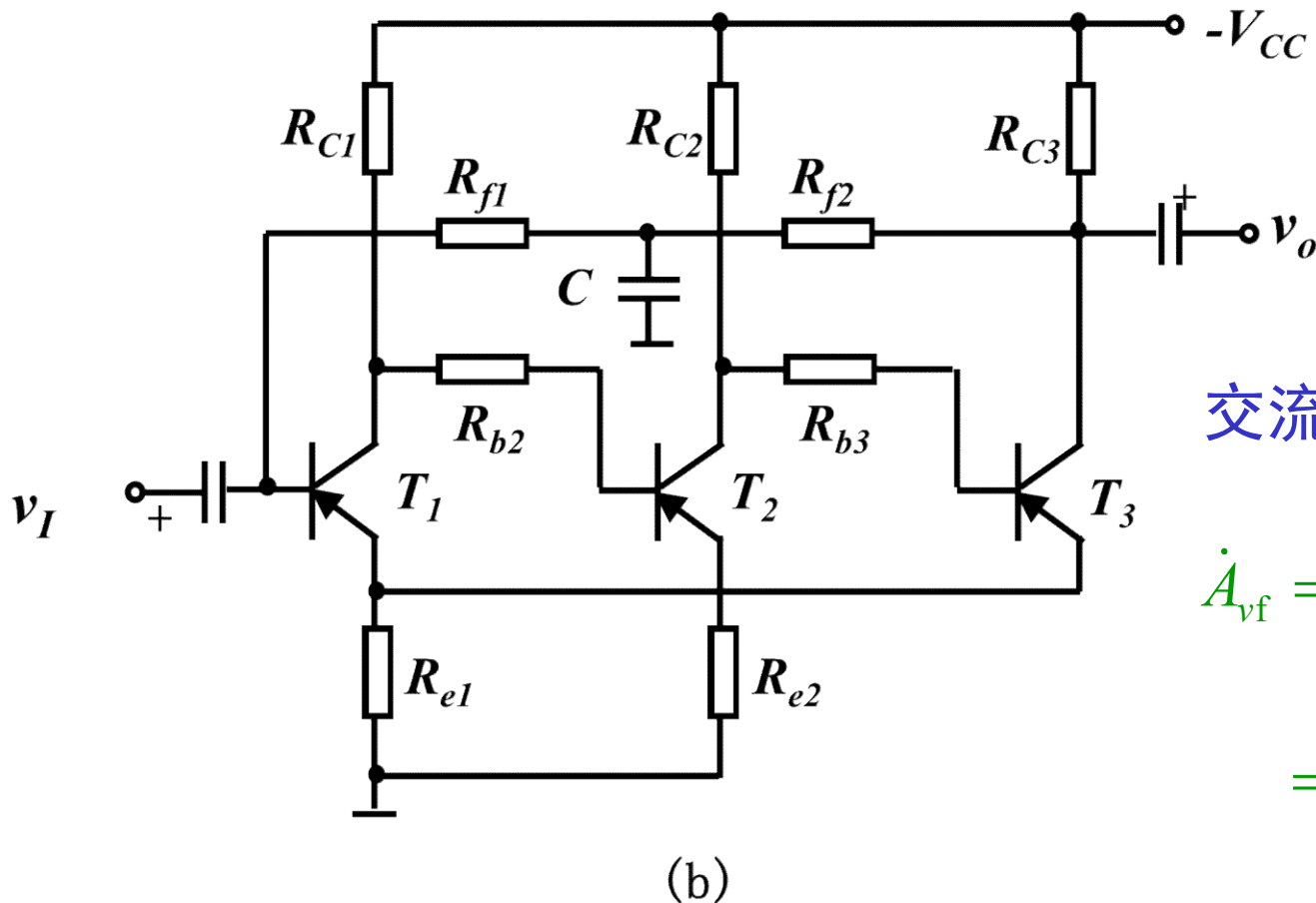
→ 原 $A_v \approx A_{vf}$



作业：

P378: 7.5.2（深度负反馈下的电压增益）

练习：所有负反馈放大器



交流电流串联负反馈

$$\begin{aligned}\dot{A}_{vf} &= \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} \\ &= \frac{-\dot{I}_o R_{c3} \parallel R_{f2}}{\dot{I}_o R_{e1}}\end{aligned}$$

7.5 反馈的影响

7.5.1 对增益稳定性的影响

7.5.2 对输入电阻的影响

7.5.3 对输出电阻的影响

7.5.4 对带宽/通频带的影响

7.5.5 对非线性失真的影响

7.5.6 对噪声的影响

7.5.1 对增益稳定性的影响

$$\therefore \dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$$

Reduction of Gain Sensitivity

提高增益的稳定性

$$\therefore \dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$
$$\therefore \frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{(1 + AF)} \cdot \frac{dA}{A}$$

即闭环增益相对变化量比开环的减小了 $1+AF$ 倍

例： $A=1000 \pm 10\%$ 即 $dA/A=10\%$

当 $1+AF=100$ 时， 则 $A_f=10 \pm 0.1\%$

7.5.2 对输入电阻的影响

Control of Input Impedance Levels

与输入反馈类型有关:

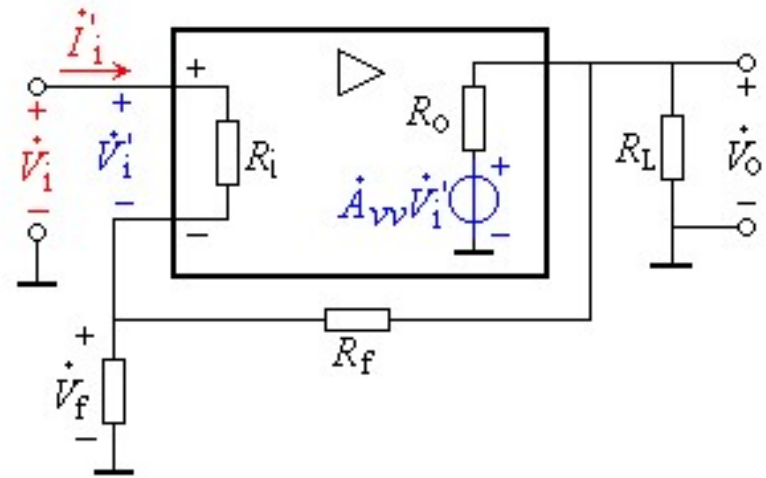
(1) 串联反馈: R_{if} 增大

$$R_{if} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_i' + \dot{V}_f}{\dot{V}_i'} R_i = \left(1 + \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i'} \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o} \right) R_i$$

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

(2) 并联反馈: R_{if} 减小

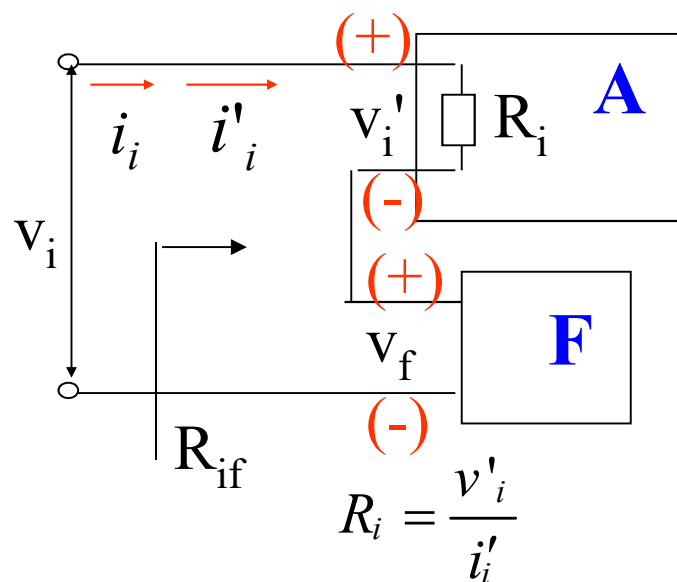
$$R_{if} = \frac{R_i}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$



7.5.2 对输入电阻的影响

Control of Input Impedance Levels

证明: **Serial feedback: $R_{if} \uparrow$**



$$i_i = i'_i \quad v_i = v'_i + v_f$$

$$\therefore R_{if} = \frac{v_i}{i_i} = \frac{v'_i + v_f}{i'_i}$$

若取样是电压: 则

$$v_f = F_{vv} v_o = F_{vv} A_{vv} v'_i$$

$$R_{if} = \frac{v'_i + F_{vv} A_{vv} v'_i}{i'_i} = (1 + F_{vv} A_{vv}) R_i$$

若取样是电流: 则

$$v_f = F_{vi} i_o = F_{vi} A_{iv} v'_i$$

$$R_{if} = \frac{v'_i + F_{vi} A_{iv} v'_i}{i'_i} = (1 + F_{vi} A_{iv}) R_i$$

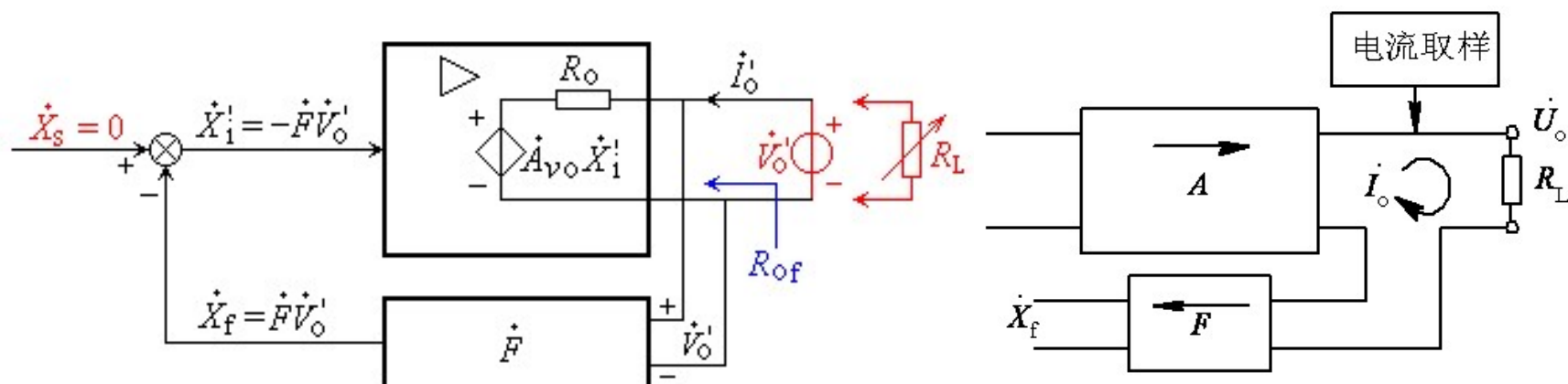
结论:

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

7.5.3 对输出电阻的影响

Control of Output Impedance Levels

与输出反馈类型有关:



(1) 电压反馈:

$R_o \downarrow (1/1+AF) \rightarrow \text{稳定 } V_o$

(2) 电流反馈:

$R_o \uparrow (1+AF) \rightarrow \text{稳定 } I_o$

7.5.4 对带宽/通频带的影响 (P361)

Bandwidth Extension

带宽 $BW = f_H - f_L \approx f_H$

根据P361式7.7.1~7.7.3推导，单极点放大电路：

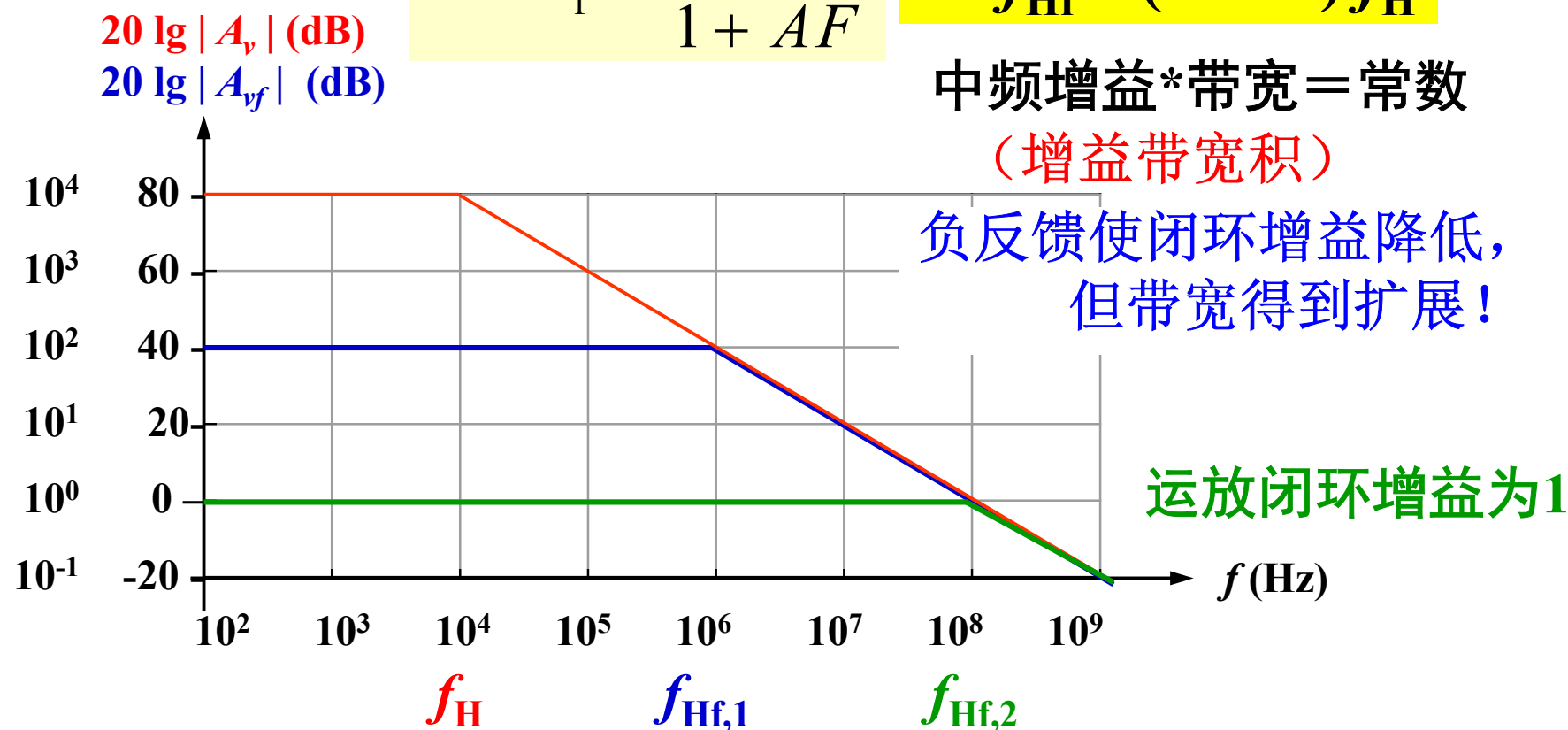
$$\therefore \dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

$$\rightarrow f_{Hf} = (1 + AF) f_H$$

中频增益*带宽=常数

(增益带宽积)

负反馈使闭环增益降低，
但带宽得到扩展！



7.5.5 对非线性失真的影响 (P343)

Reduction of Nonlinear Distortion

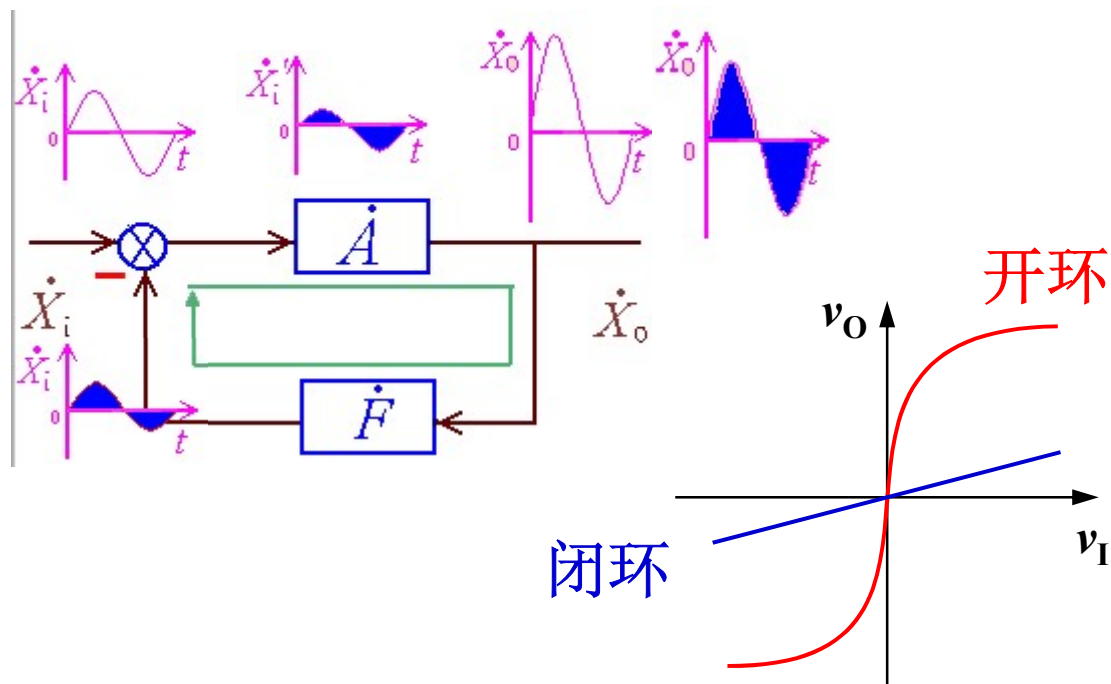
$$\therefore \dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$$

反馈前（开环）：

存在非线性失真！

反馈后（闭环）：

非线性失真减小！



适用范围： 负反馈只能改善**放大器内部**所产生的非线性失真。

若输入信号本身就是失真波形，则不能靠引入负反馈来改善。

7.5.6 对噪声的影响 P345

抑制反馈环内噪声

适用范围： 负反馈只能减低放大器内部所产生的噪声，
但需加前置低噪声放大器(Refer to Fig.7.4.2 on p345)
因为引入负反馈后，放大电路的信噪比并没有提高。
若输入信号本身含噪，则不能靠引入负反馈来抑制。

结论

- 负反馈可以改善放大电路的性能，改善程度取决于反馈深度 $(1+AF)$ ，但要牺牲放大倍数！
- 只能改善反馈环内的性能！
 - 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
 -

存在稳定性问题：

反馈过深时，可能出现自激震荡！

作业:

P378: 7.4.4 , 7.4.5

练习:

P374: 7.2.1, 7.2.2, 7.2.3

FA Design: P354: 7.6,

P355: 例 7.6.1

7.6 负反馈放大电路的稳定性 P363

在某些频率处，A、F产生的附加相移达到 180° ，使负反馈变成了正反馈，造成系统不稳定。

例如：在不加任何输入信号的情况下，放大电路仍会产生一定频率的信号输出。

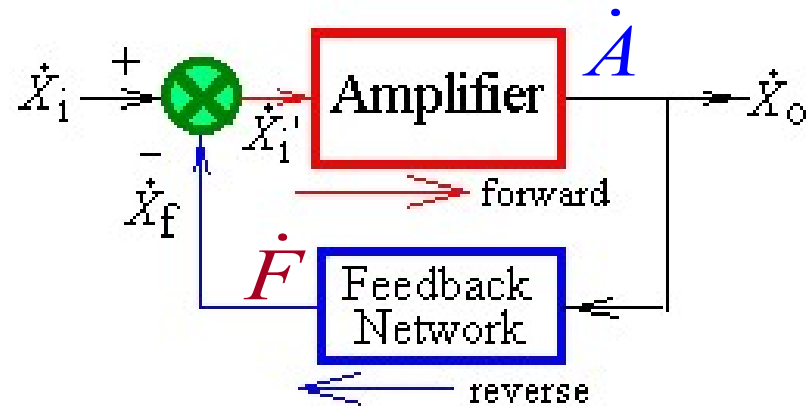
→ 自激振荡

7.5.1 自激振荡条件

7.5.2 稳定工作条件

7.5.3 相位和增益裕度

7.5.4 频率补偿



7.6.1 自激振荡条件

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

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

$$\text{即, } \dot{A}\dot{F} = -1$$

Rewrite it as:

1) 幅值条件

$$|\dot{A}\dot{F}| = 1$$

2) 相位条件

$$\varphi_{AF} = \varphi_A + \varphi_F = (2n+1)\pi$$

$$n=0,1,2,3\dots$$

7.6.2 稳定工作条件

Example: 三极点放大器

$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_{id}} = \frac{10^5}{(1 + j\frac{f}{10^4})(1 + j\frac{f}{10^6})(1 + j\frac{f}{10^7})}$$

用波特图判断引入反馈是否会产生自激

判断自激的方法

当 $AF=1$
($A=1/F$), 检查
 $\varphi_A = -180^\circ$?

稳定 $\leftarrow \varphi_A = -90^\circ \leftarrow F_1 = 10^{-4} (P)$

稳定 $\leftarrow \varphi_A = -135^\circ \leftarrow F_1 = 10^{-3} (P')$

$\varphi_A = -180^\circ \leftarrow F_1 = 10^{-2} (P'')$

振荡! 负反馈变成正反馈

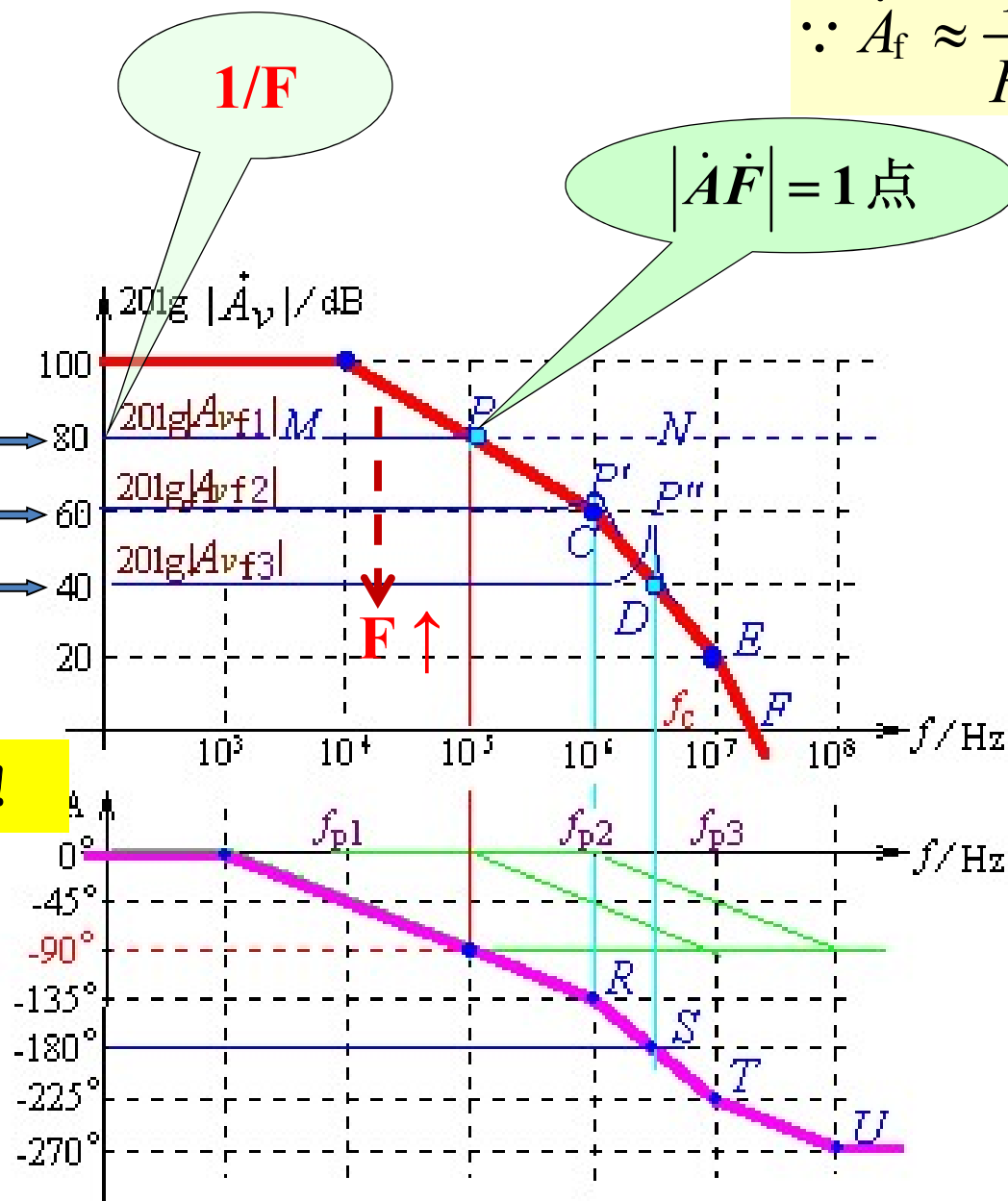
通用运放: $|A_f| = 1$ 时也稳定!

稳定原则:

20dB/十倍频程段 是稳定的 (单极点、双极点放大器)

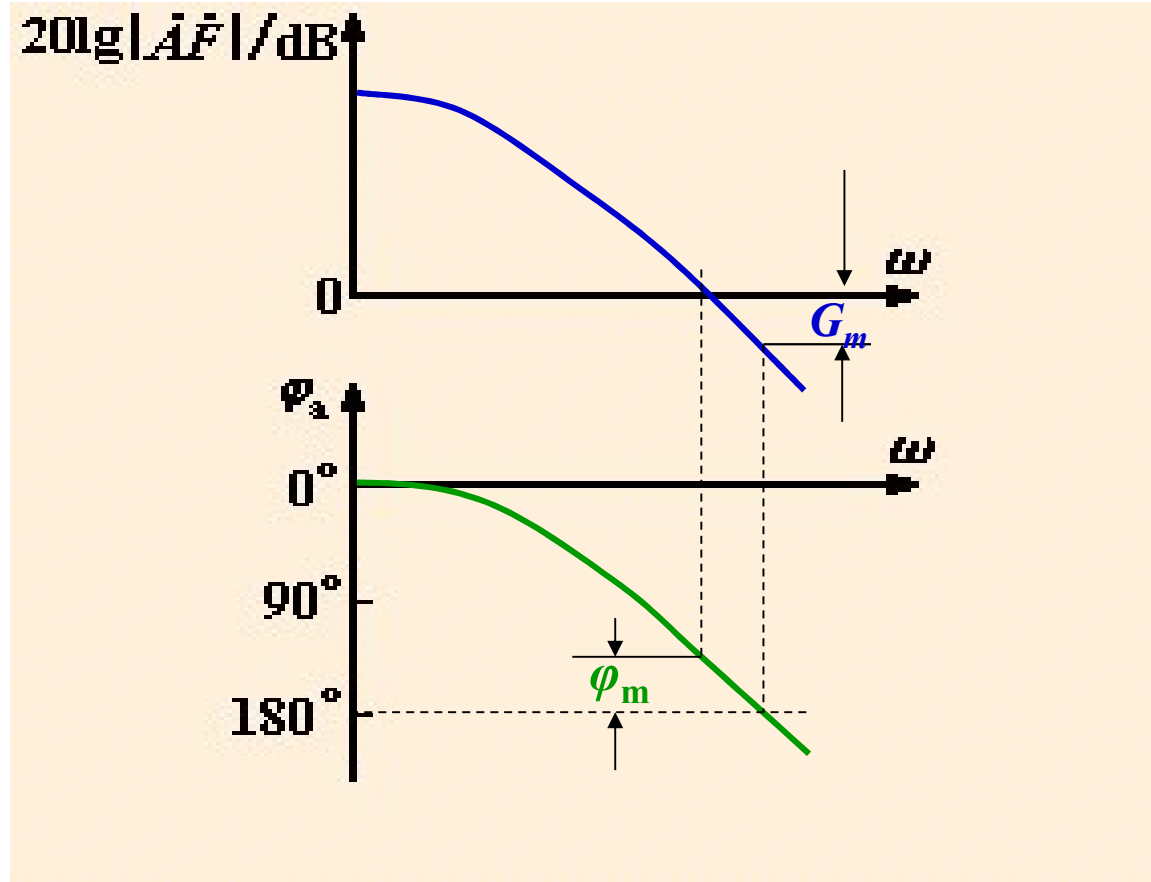
三极点放大器不稳定!

$$\because \dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$$



反馈深度越深, 越容易自激。

7.6.3 相位和增益裕度



相位裕度: $\varphi_m \geq 45^\circ$

增益裕度: $G_m \leq -10\text{dB}$

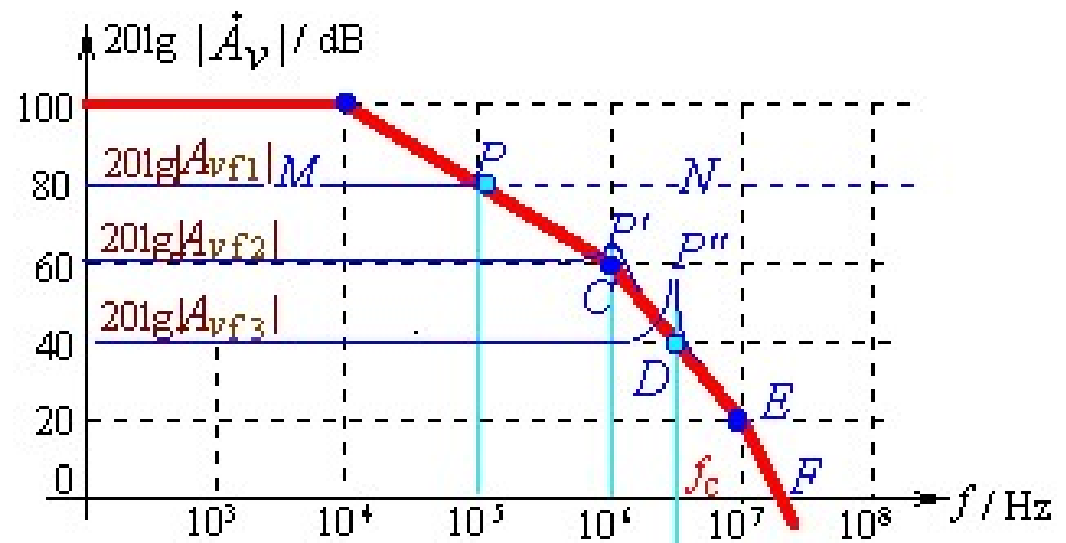
7.6.4 消除自激方法_频率补偿

P367-369

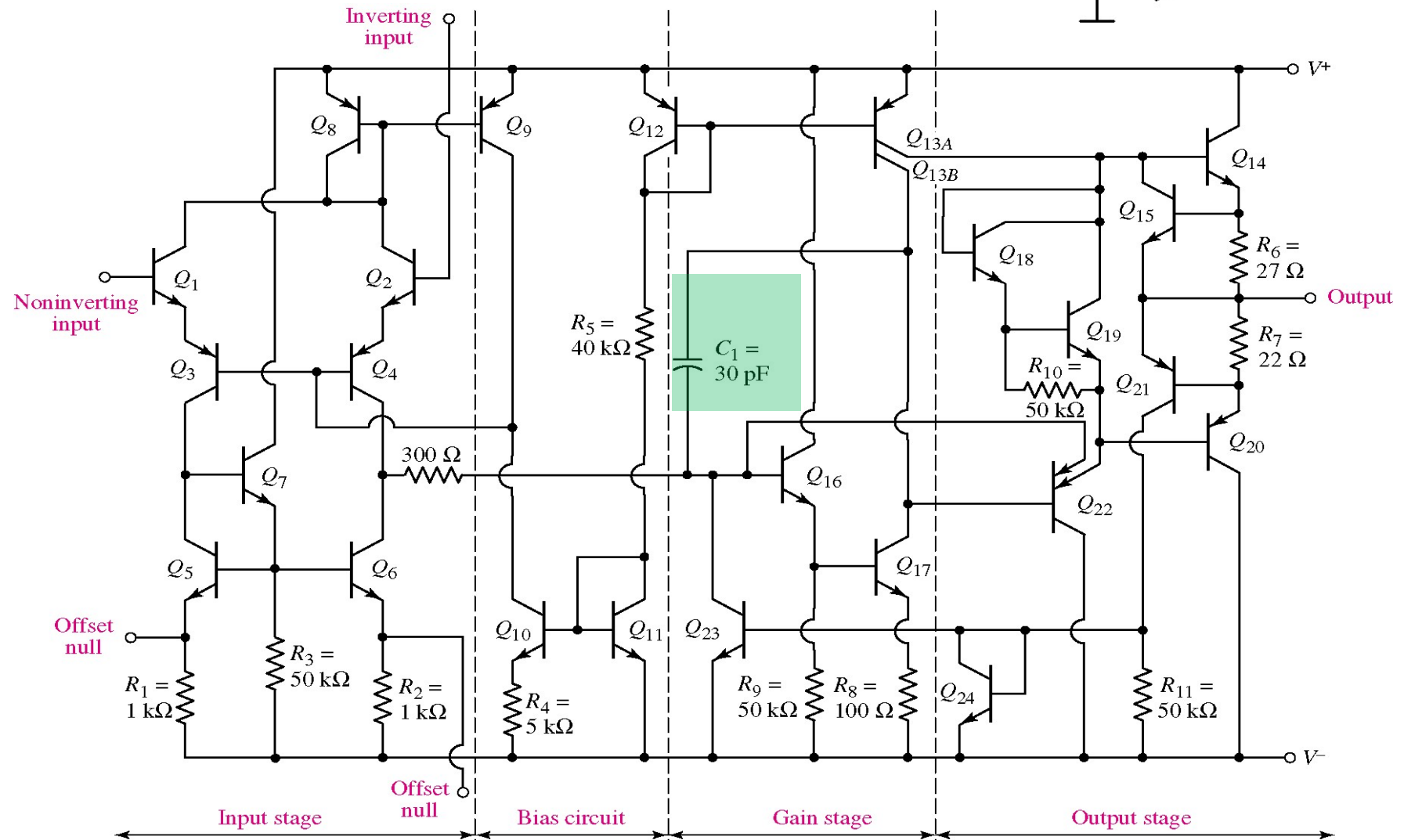
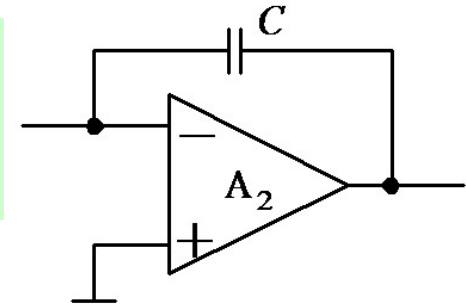
根据 $1/F$ 交于 20dB/dec 段稳定的结论：

频率补偿思想：

增长 20dB/dec 段，即通过增加一些元件（如 R 、 C ），人为拉大主极点与相近极点间距。



米勒补偿 Miller compensation



本章小结

1. 了解反馈的基本概念，虚短、虚断；
2. 掌握反馈类型和判别方法；
3. 掌握深度负反馈时闭环增益的推导计算；
4. 了解负反馈对放大器性能的影响；
5. 了解反馈放大器的稳定性问题。