

7.4 深度负反馈条件下的近似计算 (P350) ★

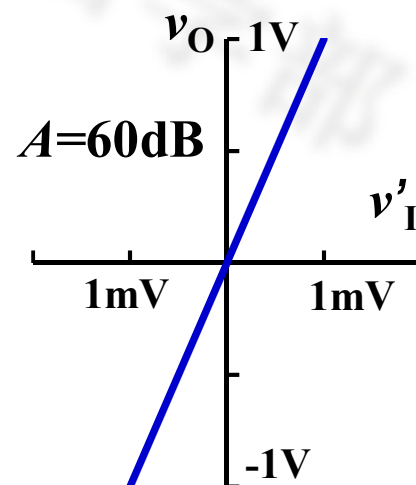
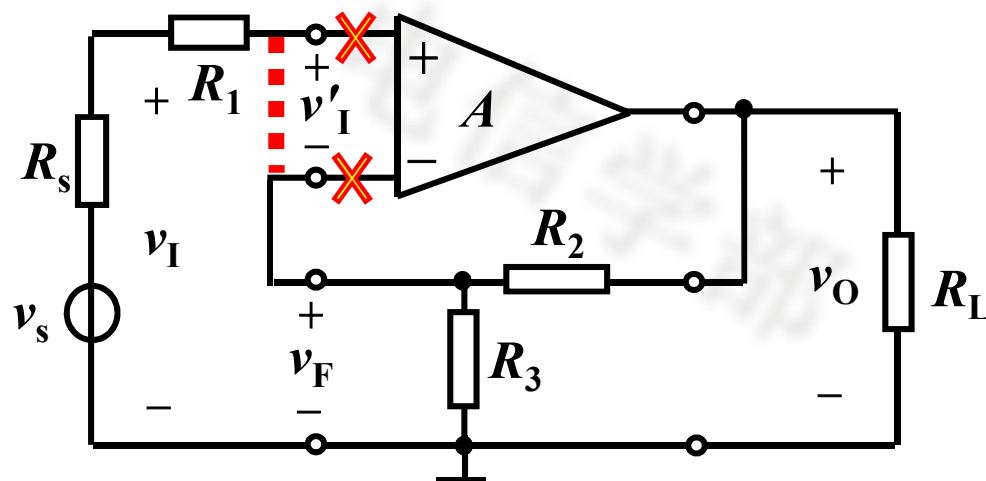
深度负反馈 { 输出有限的、不失真的信号 x_o
 $|1+AF| \gg 1 \iff |A| \gg 1$ (理想运放增益无穷大)

则: $x'_i = \frac{x_o}{A} \approx 0$ 净输入信号趋于0!!!

$$\begin{cases} v'_i = v_+ - v_- \approx 0 \\ i'_i \approx 0 \end{cases}$$

virtual short (虚短)

virtual open (虚断)



注意:

① 计算闭环增益时, 净输入信号可忽略不计!

② 微弱的净输入信号变化引起输出信号变化!

7.4 深度负反馈条件下的近似计算 (P350)

实用放大电路都工作在深负反馈状态。

闭环增益 $A_f = \frac{1}{F} = \frac{x_o}{x_f}$ 闭环电压增益 $A_{vf} = \frac{v_o}{v_i}$

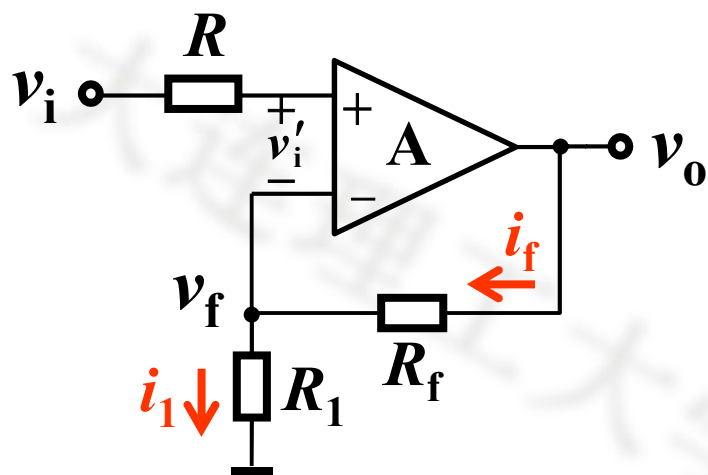
近似计算方法：应用深负反馈下两个重要结论：

“虚短” + “虚断”

- 1 电压串联负反馈
- 2 电压并联负反馈
- 3 电流串联负反馈
- 4 电流并联负反馈

1. 电压串联负反馈

$$x_o = v_o \quad x_f = v_f = v_n$$



虚断：运放输入电流为0

$$\begin{cases} \text{同相端} & v_p = v_i \\ \text{反相端} & i_1 = i_f \end{cases}$$

虚短：运放差分输入电压为0

$$v_n = v_p = v_i$$

闭环增益

$$\begin{aligned} A_f &= \frac{1}{F} = \frac{x_o}{x_f} = \frac{v_o}{v_f} \\ &= \frac{i_1 R_1 + i_f R_f}{i_1 R_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \end{aligned}$$

闭环电压增益

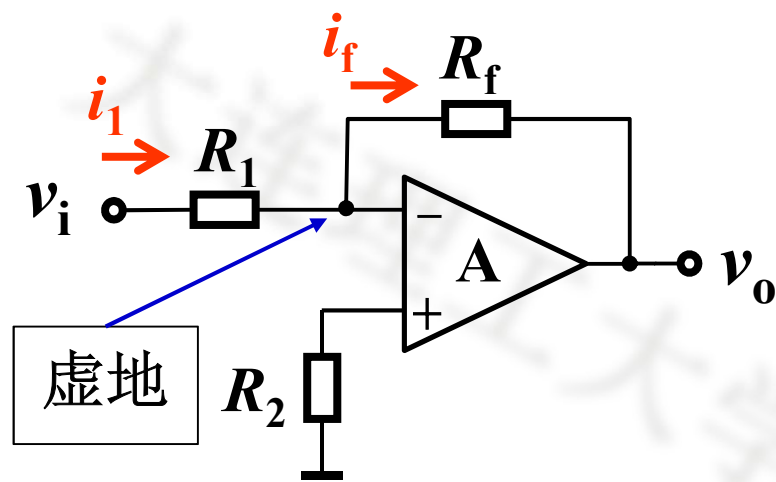
$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_f} = A_f$$

电压串联
负反馈

$$A_f = A_{vf} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

2. 电压并联负反馈

$$x_o = v_o \quad x_f = i_f$$



虚断：运放输入电流为0

$$\begin{cases} \text{反相端} & i_1 = i_f \\ \text{同相端} & v_p = 0 \end{cases}$$

虚短：运放差分输入电压为0

$$v_n = v_p = 0$$

闭环增益

$$A_f = \frac{1}{F} = \frac{x_o}{x_f} = \frac{v_o}{i_f} = -R_f$$

闭环电压增益

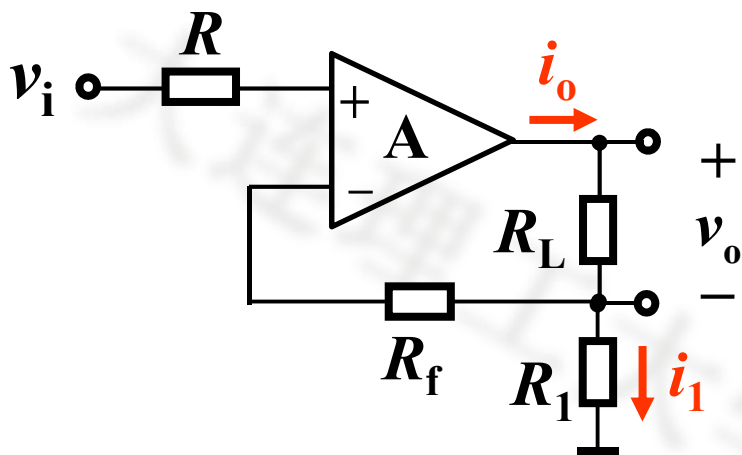
$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{i_1 R_1} = \frac{v_o}{i_f R_1} = \frac{A_f}{R_1} = -\frac{R_f}{R_1}$$

可直接
推导

$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-i_f R_f}{i_1 R_1} = -\frac{R_f}{R_1}$$

3. 电流串联负反馈

$$x_o = i_o \quad x_f = v_f = v_n$$



虚断：运放输入电流为0

$$\begin{cases} \text{同相端} & v_p = v_i \\ \text{反相端} & i_o = i_1 \end{cases}$$

虚短：运放差分输入电压为0

$$v_p = v_n$$

闭环增益

$$\begin{aligned} A_f &= \frac{1}{F} = \frac{x_o}{x_f} = \frac{i_o}{v_f} = \frac{i_o}{i_1 R_1} \\ &= \frac{1}{R_1} \end{aligned}$$

闭环电压增益

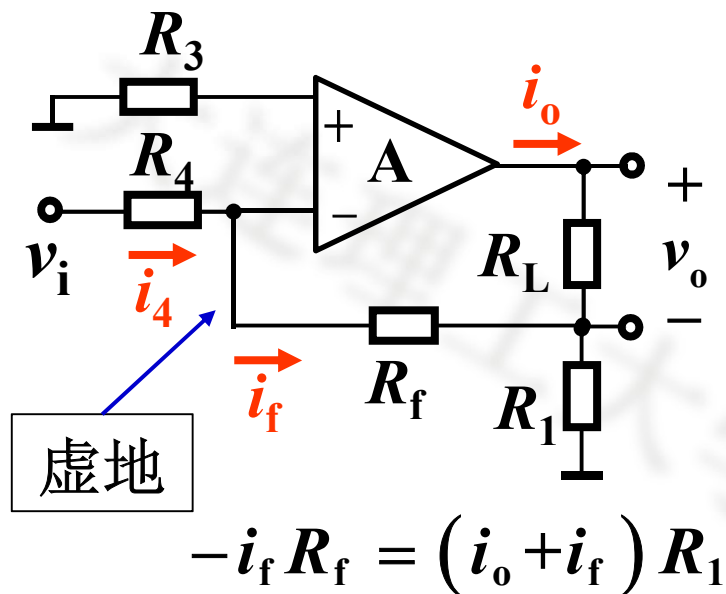
$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o R_L}{v_f} = A_f R_L = \frac{R_L}{R_1}$$

可直接
推导

$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o R_L}{i_1 R_1} = \frac{R_L}{R_1}$$

4. 电流并联负反馈

$$x_o = i_o \quad x_f = i_f$$



闭环增益

$$A_f = \frac{1}{F} = \frac{x_o}{x_f} = \frac{i_o}{i_f}$$

$$= - \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right)$$

虚断：运放输入电流为0

$$\begin{cases} \text{同相端} & v_p = 0 \\ \text{反相端} & i_4 = i_f \end{cases}$$

虚短：运放差分输入电压为0

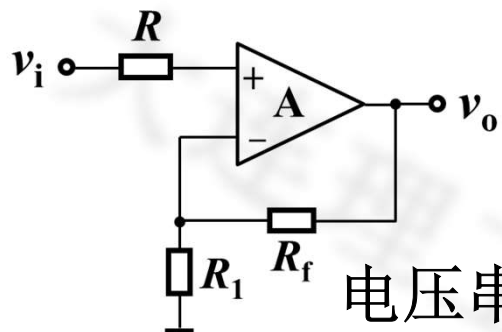
$$v_n = v_p = 0$$

闭环电压增益

$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o R_L}{i_4 R_4} = A_f \frac{R_L}{R_4}$$

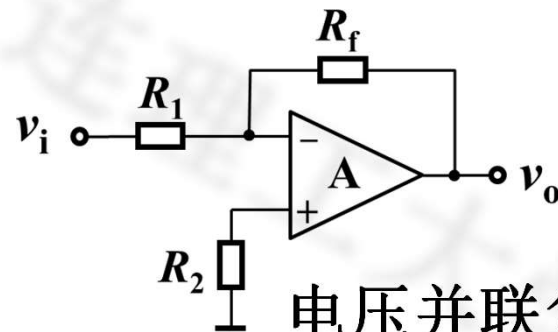
$$A_{vf} = - \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \frac{R_L}{R_4}$$

7.4 深度负反馈条件下的近似计算



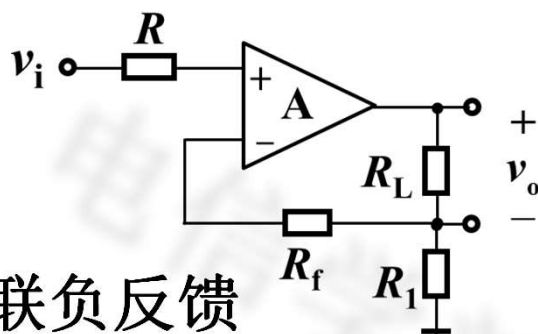
电压串联负反馈

$$A_f = A_{vf} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$



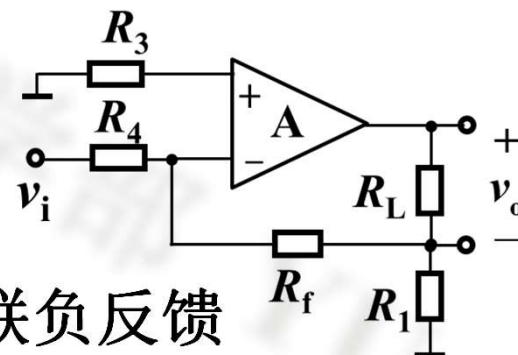
电压并联负反馈

$$A_f = -R_f \quad A_{vf} = -\frac{R_f}{R_1}$$



电流串联负反馈

$$A_f = \frac{1}{R_1} \quad A_{vf} = \frac{R_L}{R_1}$$



电流并联负反馈

$$A_f = -\left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \quad A_{vf} = -\left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_L}{R_4}$$

例：带 R_e 的BJT共射电路

小信号分析结果： $A_{vf} = -\frac{\beta \cdot (R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_e}$

β 足够大（开环增益大），且 R_e 足够大（闭环增益足够小）时，满足深度负反馈条件。

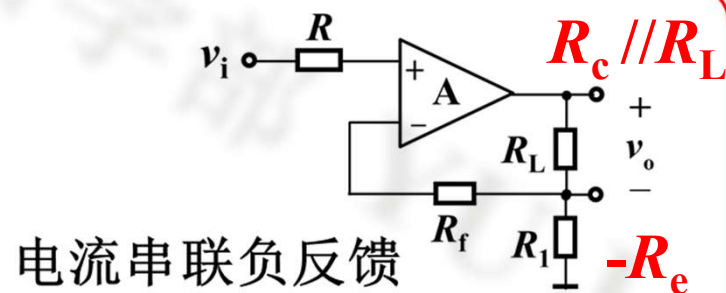
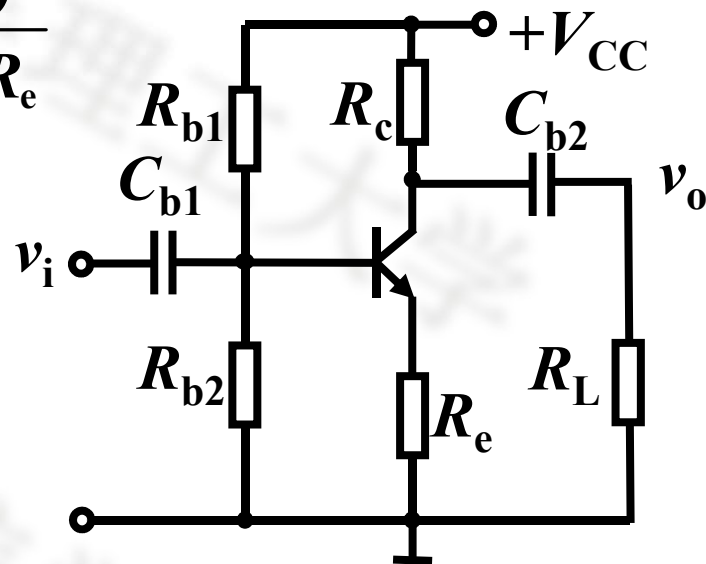
$$A_{vf} \approx -\frac{R_c // R_L}{R_e}$$

(1) 反馈类型？ 电流串联负反馈

(2) 闭环电压放大倍数

BJT的交流小信号负载是 $R_c // R_L$

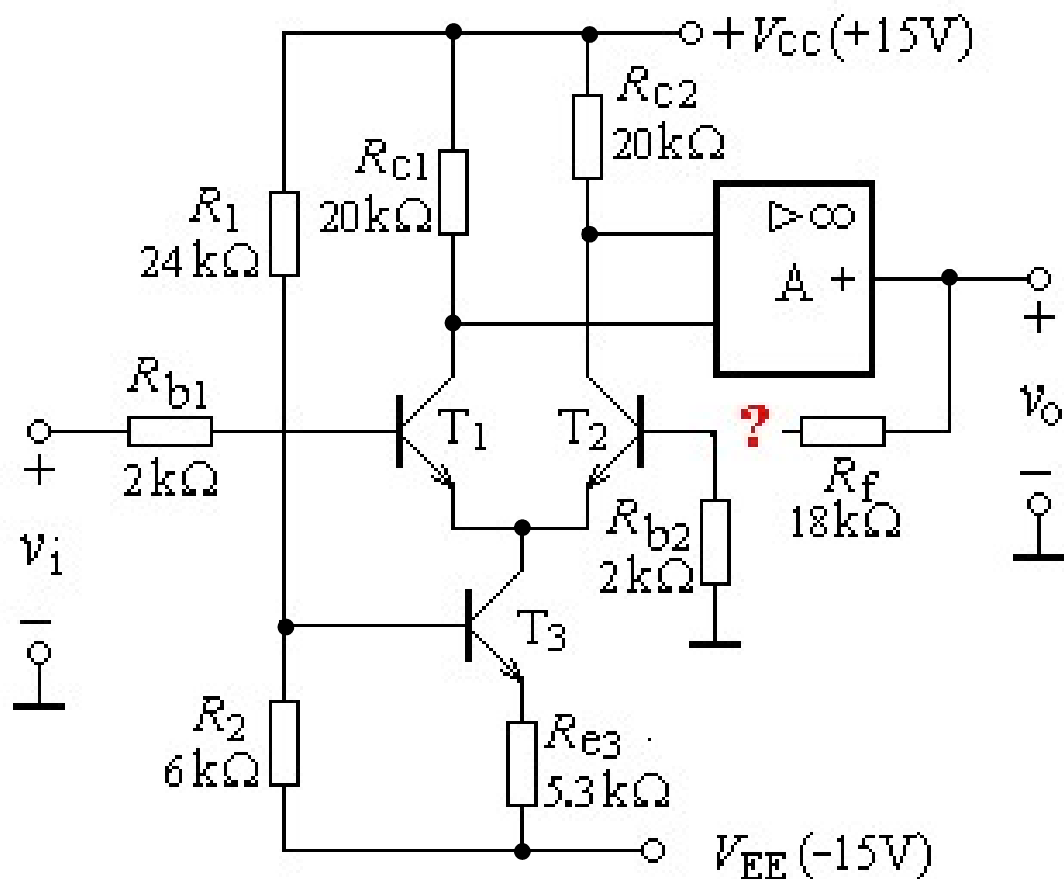
对比套用公式： $A_{vf} = -\frac{R_c // R_L}{R_e}$



电流串联负反馈

$$A_f = \frac{1}{R_1} \quad A_{vf} = \frac{R_L}{R_1}$$

例题：回答下列问题。



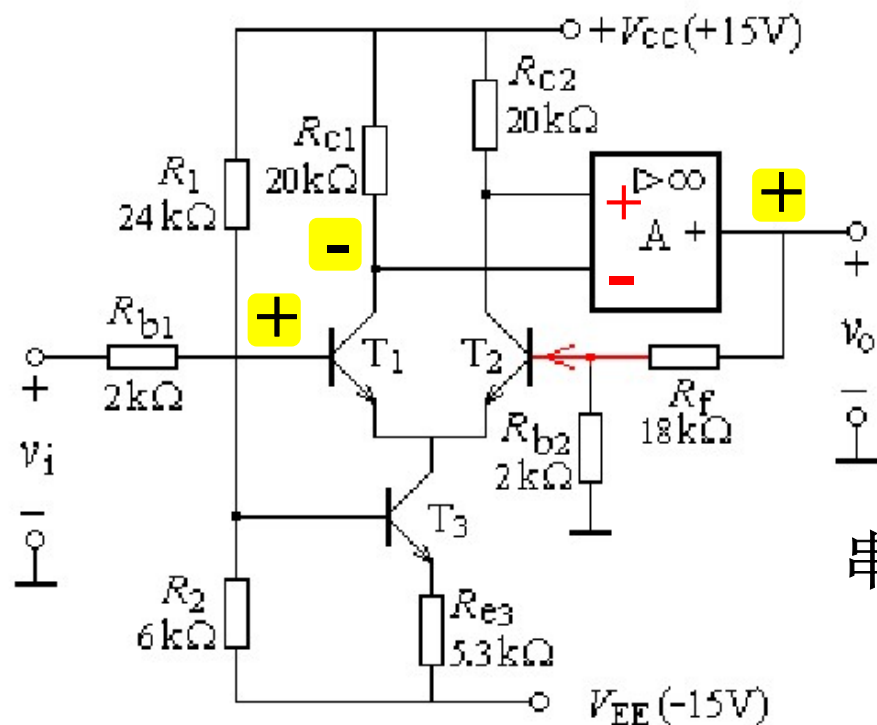
① 若要实现电压串联反馈, R_f 应接向何处?

已经是电压反馈

串联反馈, 反馈点接另一个输入端。

R_f 应接 T_2 基极

例题：回答下列问题。



②要实现电压串联负反馈，
运放输入端极性如何确定？

假设输入端瞬时极性为 +

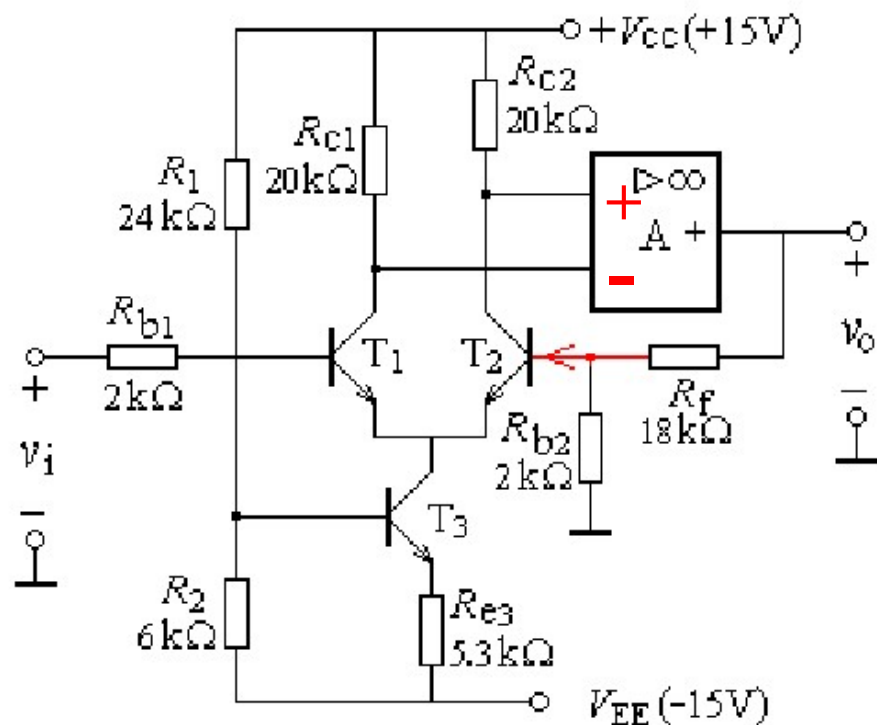
则T1集电极的极性为 -

串联负反馈要求A输出极性为正

因此A接T1的端为反相端

A接T2的端为同相端

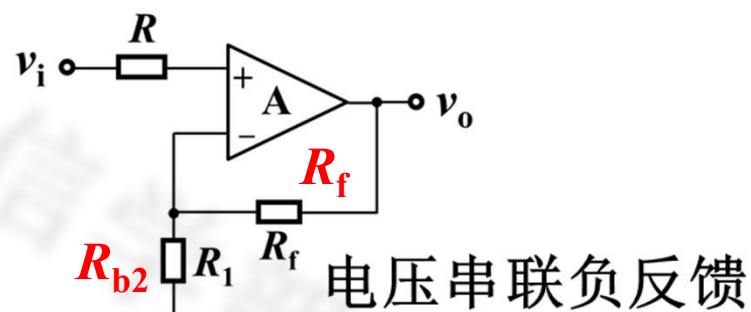
例题：回答下列问题。



③求引入电压串联负反馈后的闭环电压增益

虚短虚断分析法（略）

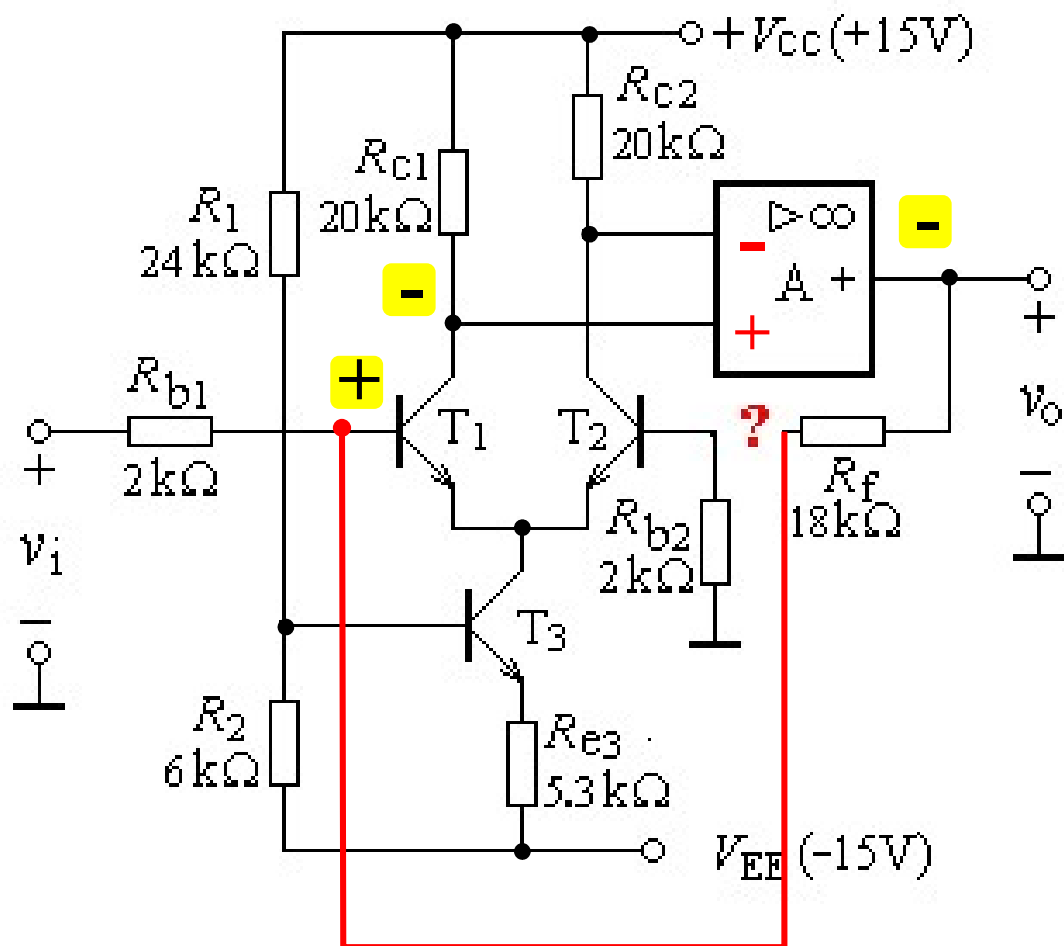
对比套用公式法：



$$A_f = A_{vf} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

则闭环电压增益为： $A_{vf} = 1 + \frac{R_f}{R_{b2}}$

例题：回答下列问题。

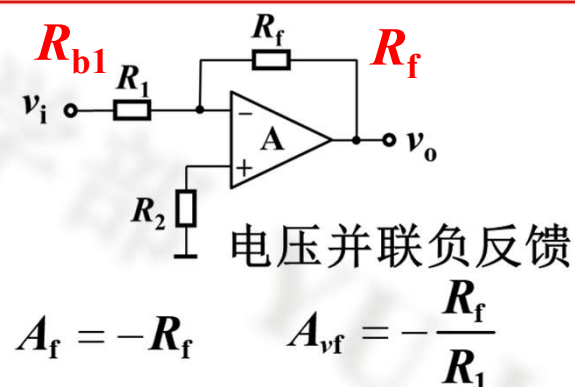


④ 若要实现电压并联负反馈呢？

并联 ~~串联~~ 反馈，反馈点与输入接同一个输入端。

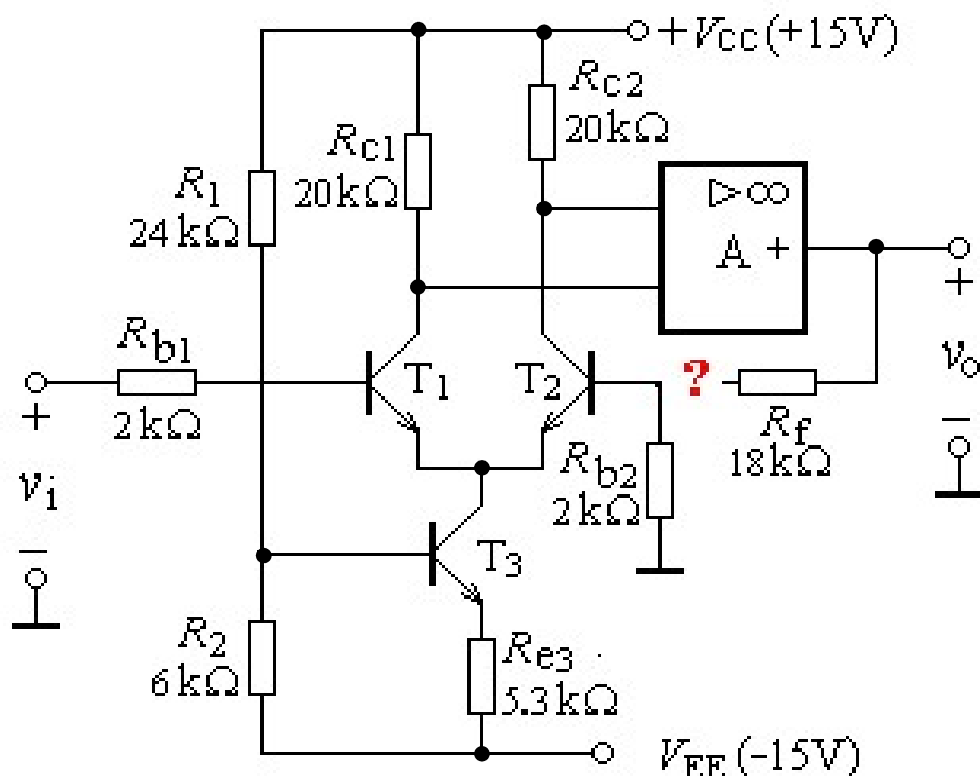
R_f 应接 T_1 基极

判断A的同/反相端。



$$\dot{A}_{vf} = -\frac{R_f}{R_{b1}}$$

例题：回答下列问题。



⑤ 求静态时运放A的共模输入电压。

求差放的静态输出电压

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

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

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

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

$$V_{IC} = \frac{V_{C1} + V_{C2}}{2} = 5 \text{ V}$$

7.5 负反馈对放大电路性能的影响

- 1 对增益稳定性的影响
- 2 对输入电阻的影响
- 3 对输出电阻的影响
- 4 对带宽/通频带的影响
- 5 对非线性失真的影响
- 6 对噪声的影响

1 对增益稳定性的影响

提高增益的稳定性

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

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

即闭环增益**相对变化量**比开环的缩小了 $1+AF$ 倍

例： $A=1000 \pm 10\%$ 即 $dA/A=10\%$

当 $F=0.1$ 即 $1+AF \approx 100$ 时， 则 $dA_f/A_f=10\%$

即 $A_f=10 \pm 0.1\%$

2 对输入电阻的影响

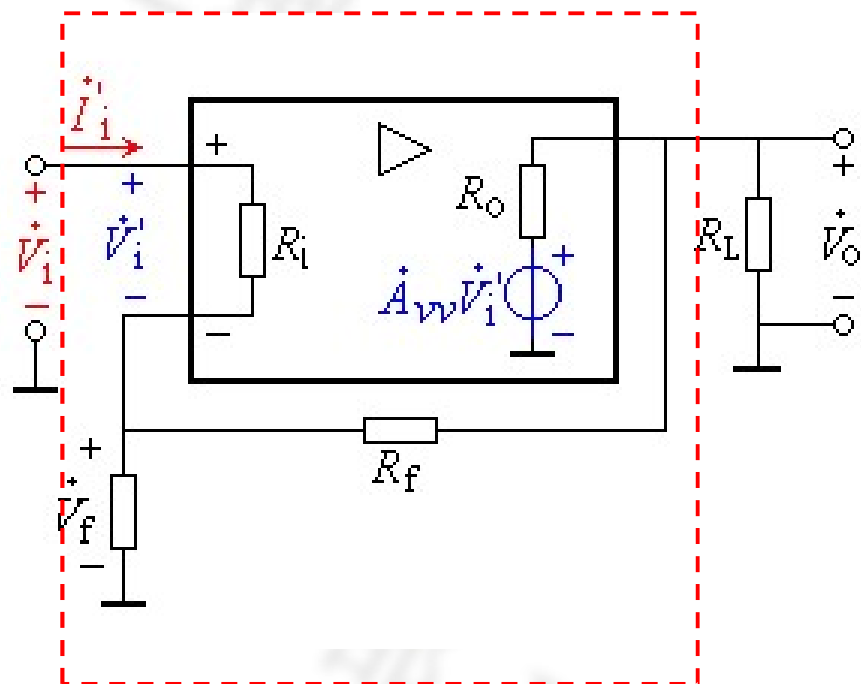
与输入反馈类型有关：

(1) 串联反馈： R_{if} 增大

$$R_{if} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i'} = \frac{\dot{V}_i' + \dot{V}_f}{\dot{V}_i' / R_i}$$

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

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

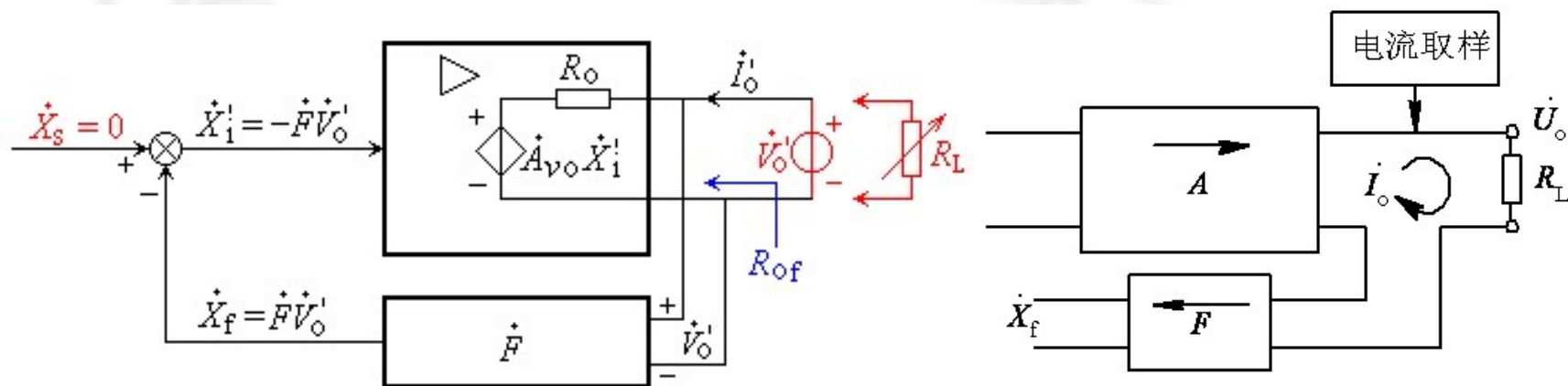


(2) 并联反馈： R_{if} 减小

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

3 对输出电阻的影响

与输出反馈类型有关:



(1) 电压反馈: $R_o \downarrow (1/1+AF)$ 负载变化也能得到稳定的 v_o .

(2) 电流反馈: $R_o \uparrow (1+AF)$ 负载变化也能得到稳定的 i_o .

4 对带宽/通频带的影响 (P360)

负反馈时, A_f 比 A 缩小 $1+AF$ 倍

上限频率扩展 $1+AF$ 倍

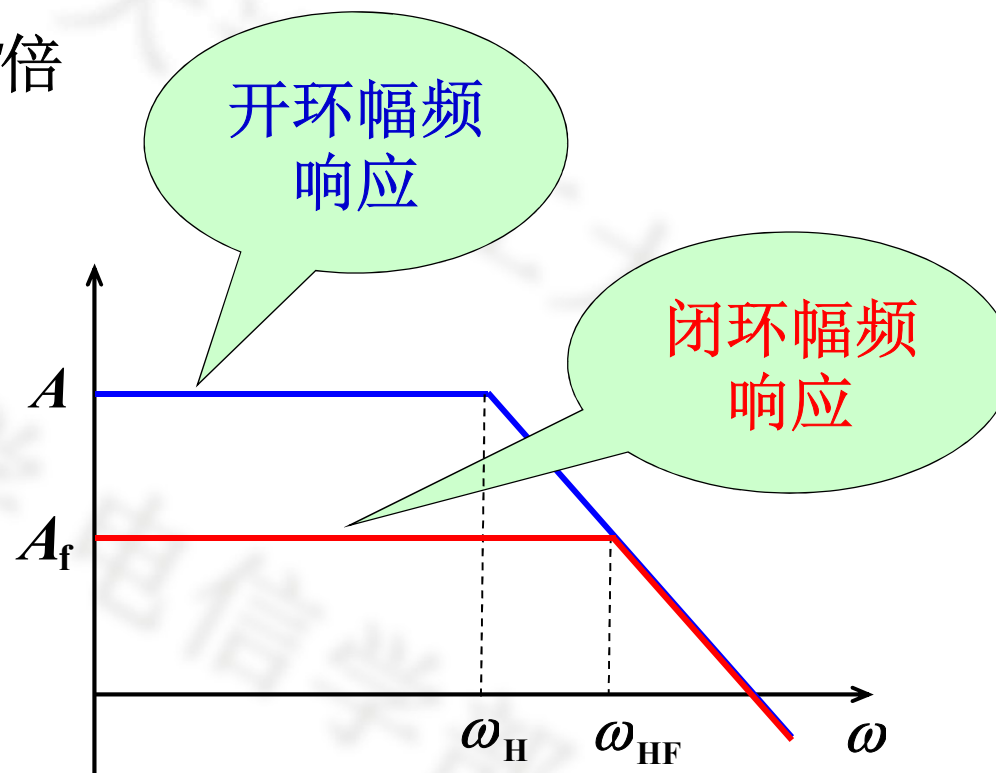
$$\omega_{HF} = \omega_H (1 + AF)$$

下限频率降低 $1+AF$ 倍

$$\omega_{LF} = \frac{\omega_L}{1 + AF}$$

$$BW_f \approx \omega_{HF} = (1 + AF)\omega_H \quad \text{带宽扩展 } 1+AF \text{ 倍}$$

增益-带宽积不变: $BW \times A = BW_f \times A_f$



5 对非线性失真的影响

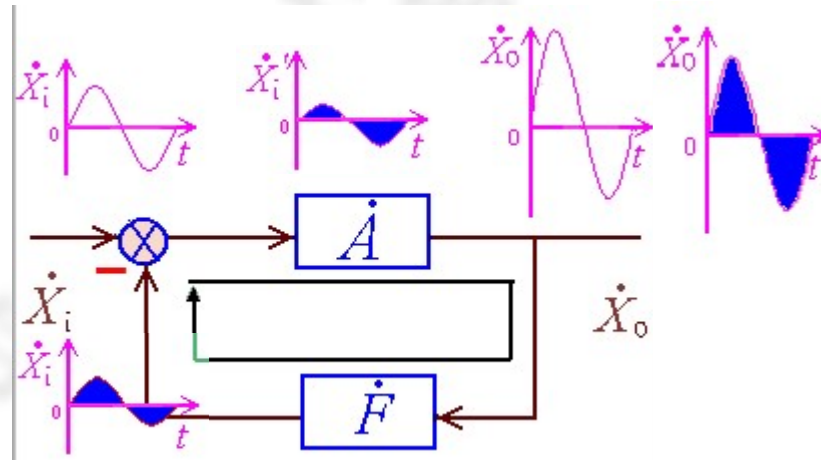
$$\therefore \dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$$

反馈前：

存在非线性失真！

反馈后：

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。

6 对噪声的影响

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。

7.5 负反馈对放大电路性能的影响

负反馈对运放性能的改善因子为 $(1+AF)$!

Cost: The close-loop gain is reduced by the factor
代价 $(1+AF)$ compared to the basic amplifier.
闭环增益减小 $(1+AF)$ 倍

Stability: There is a possibility that the feedback circuit
稳定性 may become unstable (oscillate) at **high frequencies** (反馈过深, 高频振荡, 不稳定).

7.5 负反馈对放大电路性能的影响

为改善性能引入负反馈的一般原则：

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

.....

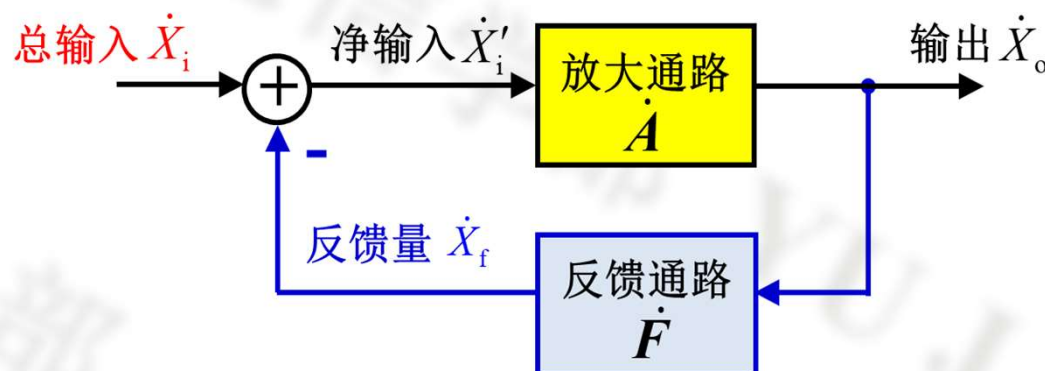
7.6 负反馈放大器的稳定性

在某些频率处， A 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。

现象：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

- 1 自激振荡条件
- 2 稳定工作条件
- 3 相位和增益裕度
- 4 频率补偿



1 自激振荡条件

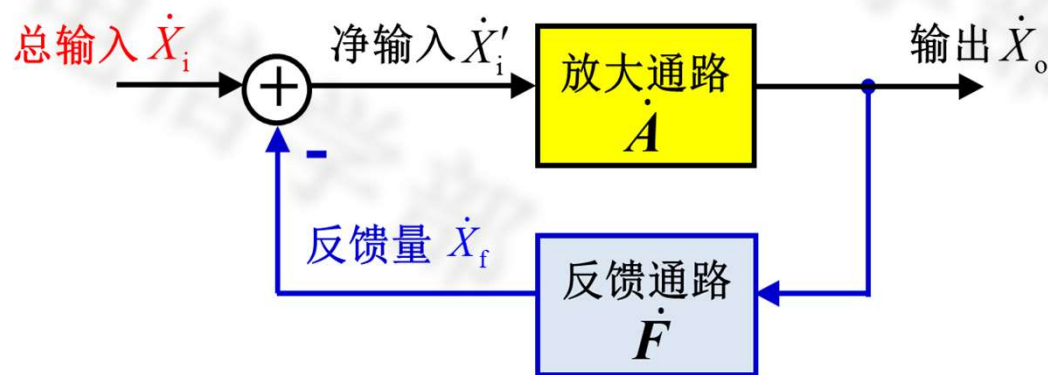
闭环增益 $\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$

如果在某一频率处, $|1 + \dot{A}\dot{F}| = 0$ 即: $\dot{A}\dot{F} = -1$

则 $\dot{A}_f = \infty$ 自激振荡

1) 幅值条件 $|\dot{A}\dot{F}| = 1$

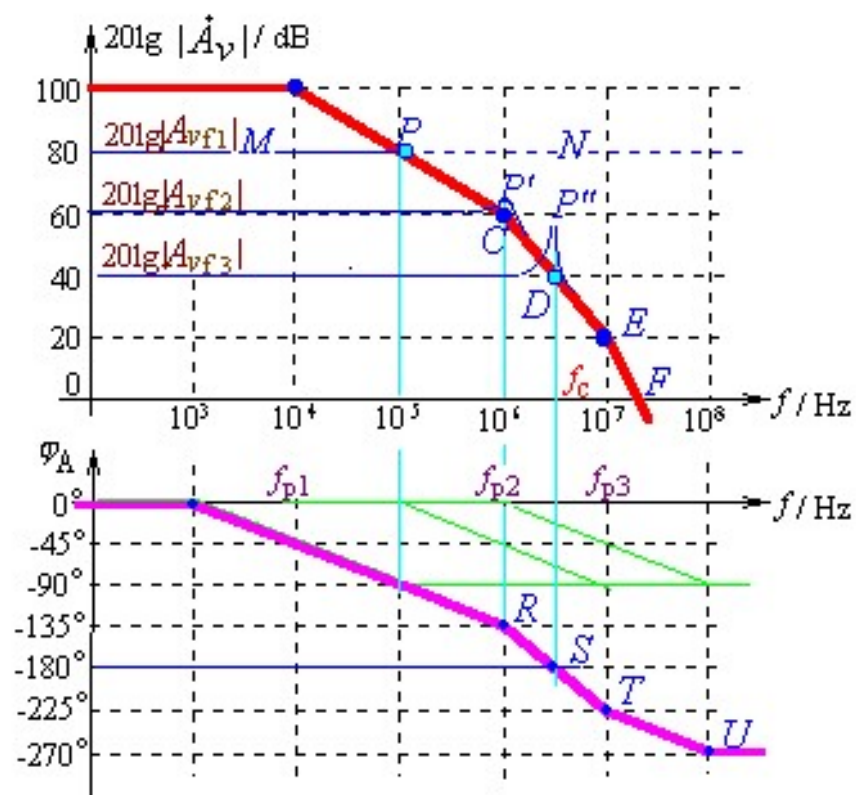
2) 相位条件 $\varphi_{AF} = \varphi_A + \varphi_F = (2n+1)\pi$, 其中 $n = 0, 1, 2, 3 \dots$



2 稳定工作条件

例: 三极点放大器

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



三个极点: f_{p1} , f_{p2} , f_{p3} ;

当 $\varphi_A = -180^\circ$, A 反相!

即 $f = f_c$ (at **S**),

负反馈变成正反馈;

如果此时 $AF=1$,

则自激振荡!

判断自激的方法

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

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!

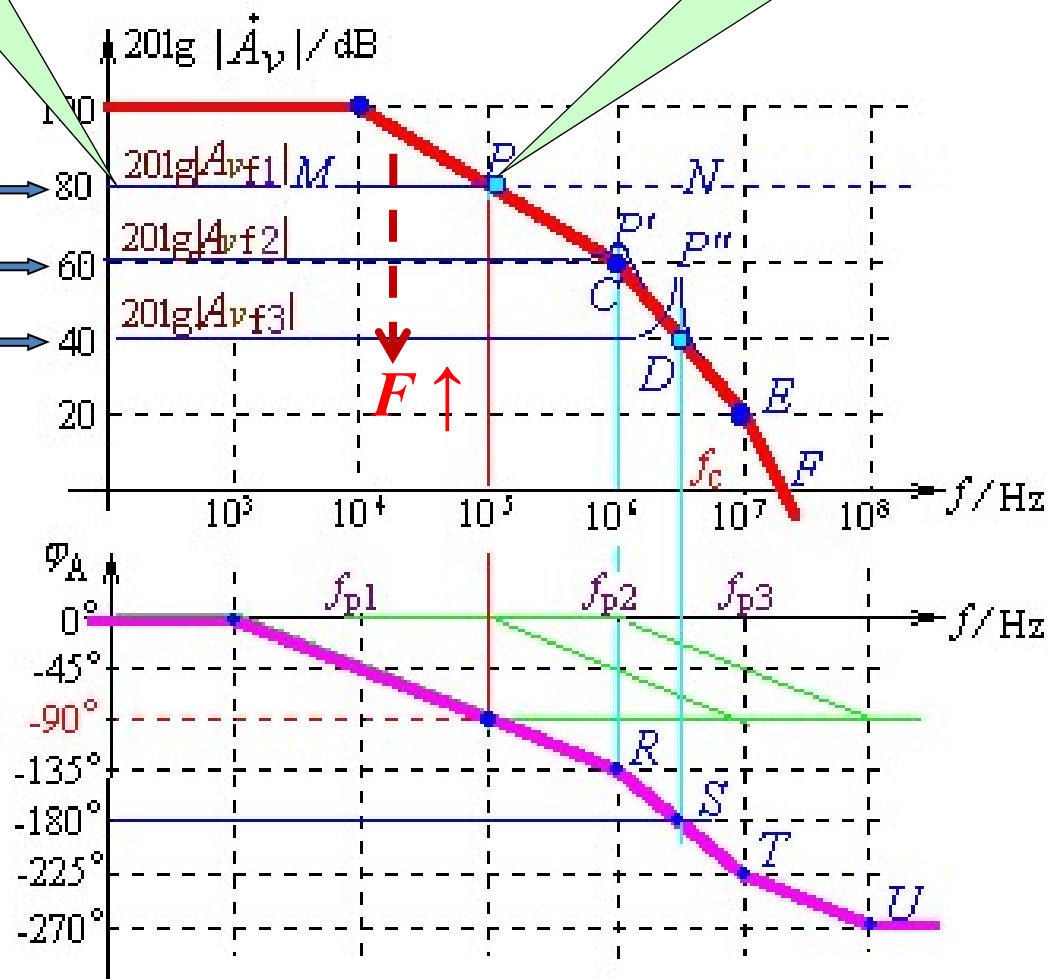
稳定原则:

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!

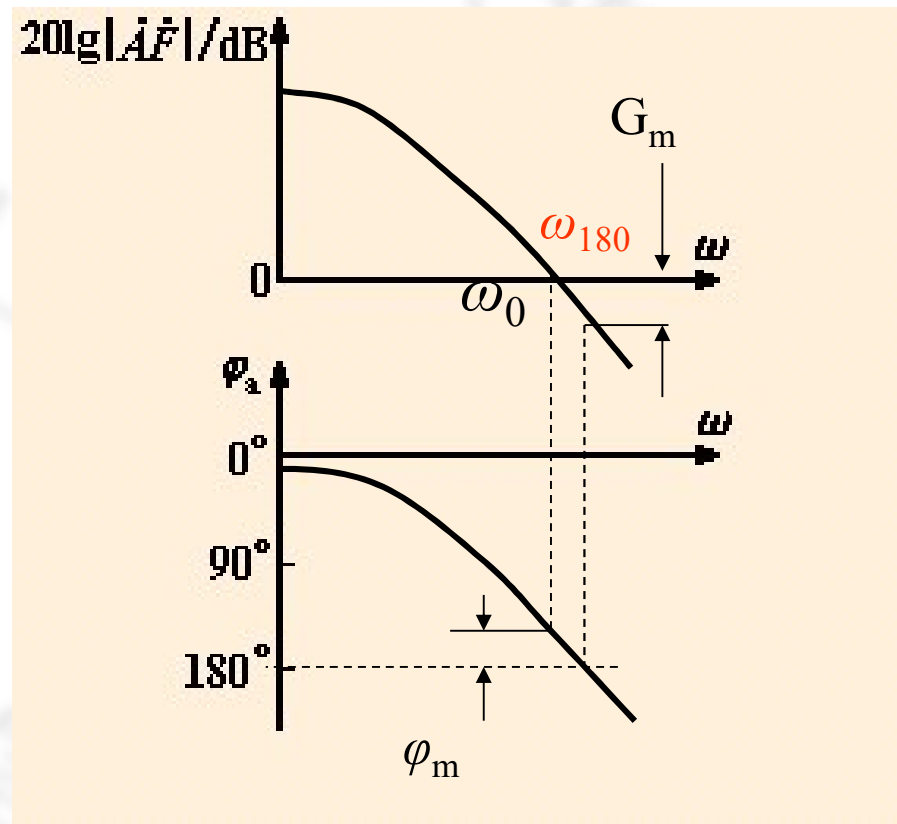
$1/F$

$|\dot{A}\dot{F}|=1$ 点



反馈深度越深，越容易自激。

3 相位和增益裕度



相位裕度: $\varphi_m \geq 45^\circ$

增益裕度: $G_m \leq -10\text{dB}$

4 频率补偿

ref to: p367-369

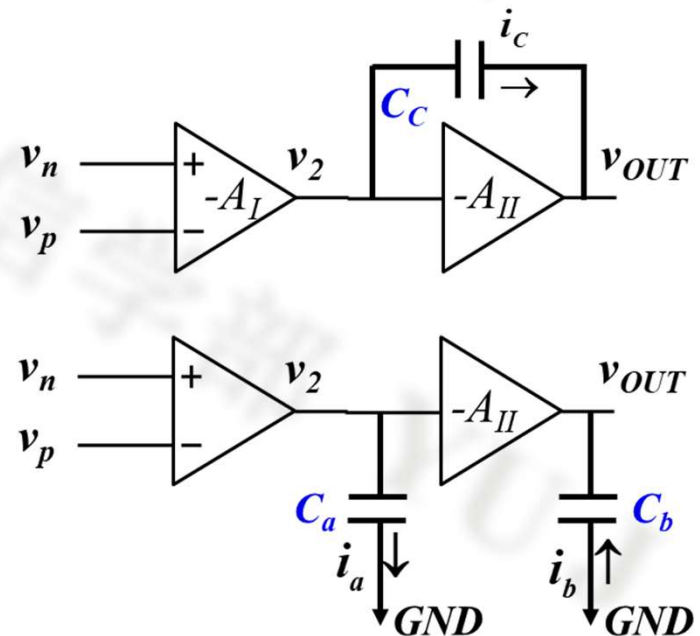
1. 主极点补偿

(1) 增加主极点 (P368图7.8.4)

(2) 改变主极点

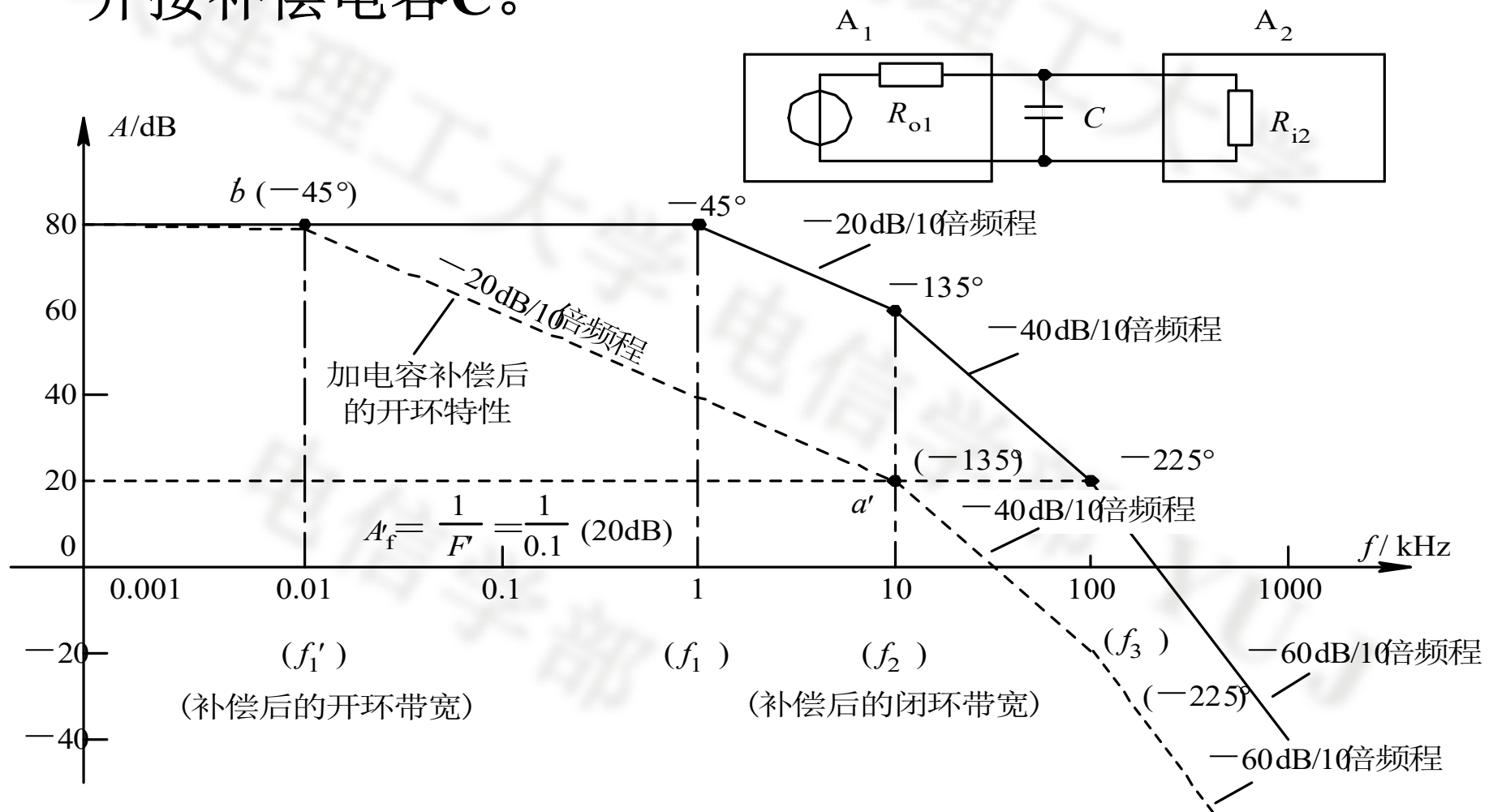
2. 密勒补偿

在电压增益级上并联一个较小的电容 C_c ，可达到减小主极点和增大第二极点的效果，从而实现稳定的运算放大器。

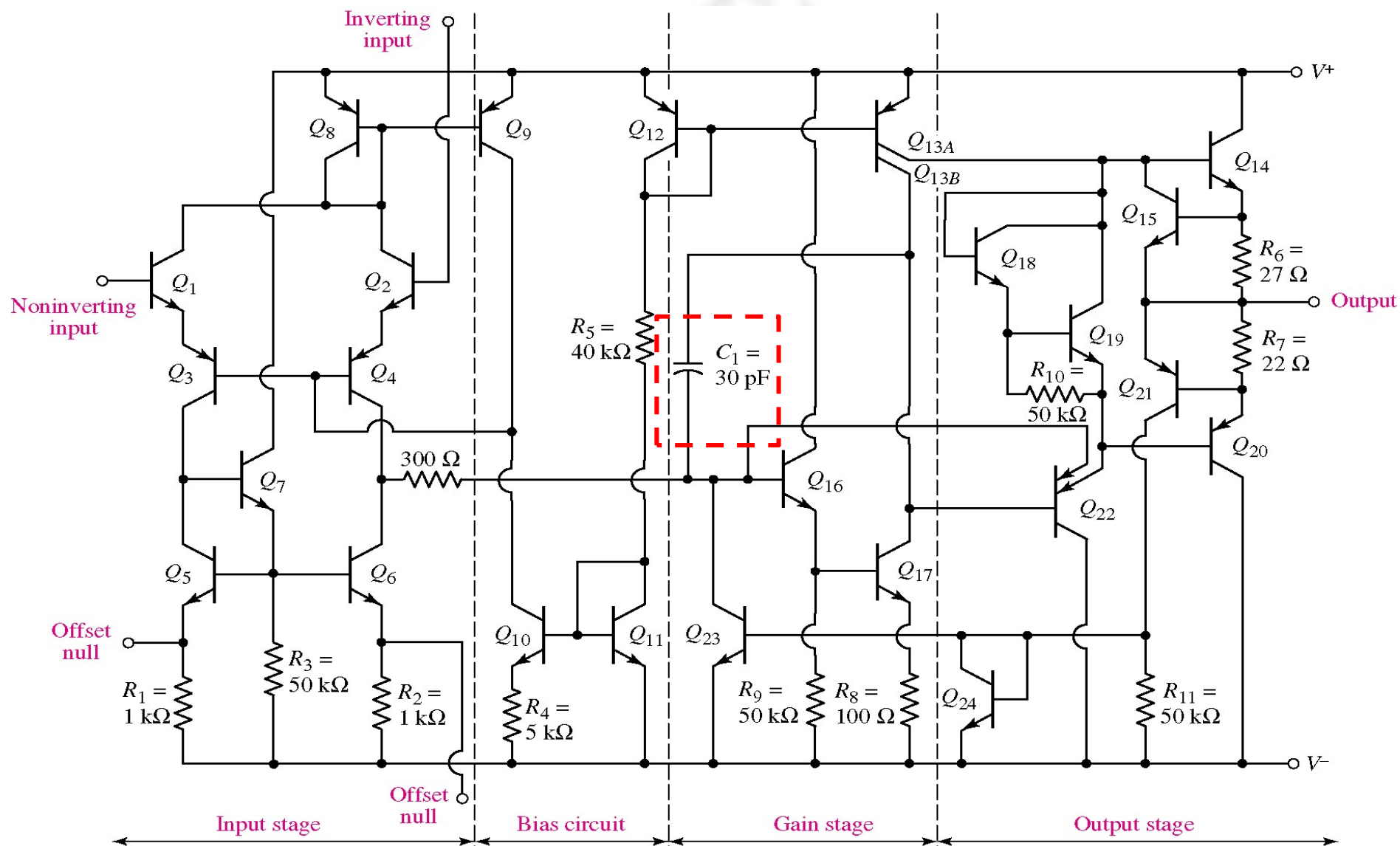


电容滞后补偿（改变主极点）

在放大器时间常数最大的那一级里
 并接补偿电容C。



集成运放中的密勒补偿电容



7 反馈放大电路

小结

掌握：判断反馈放大电路的类型

掌握：深度负反馈条件下的闭环增益计算

掌握：根据要求设计反馈放大电路

预习：模拟运算电路（第2章）

作业

P378 7.5.2 重要！ 7.4.4, 7.4.5

练习（不交）： P374: 7.2.1, 7.2.2, 7.2.

自学 FA Design: P355: 例 7.6.1

