

下篇 模拟电子电路

(Analog electronic circuit)

2. 放大电路的稳定性与性能改善

2.1 反馈的基本概念

2.2 负反馈对放大电路性能的改善

2.3 集成运放的负反馈放大电路

2.4 深度负反馈放大电路

2.5 负反馈放大电路的稳定性

第2章 负反馈放大电路

2.1 反馈的基本概念

1 负反馈原理框图及基本概念

2 负反馈放大电路的基本分类

2.2 负反馈对放大电路性能的改善

1 提高闭环增益的稳定性

2 改善放大器的非线性

3 抑制放大器内部的温漂、噪声和干扰

4 扩展通频带

5 负反馈对输入电阻的影响

6 负反馈对输出电阻的影响

第2章 负反馈放大电路

2.3 集成运放的负反馈放大电路的分析

- 1 比例运算电路的分析
- 2 求和运算电路的分析
- 3 积分和微分运算电路
- 4 对数和指数运算电路
- 5 电压/电流 和 电流/电压 变换电路
- 6 非线性电路应用
- 7 跨导运算放大器

2.4 深度负反馈放大电路的分析

2.5 负反馈放大电路的稳定性

- 1 产生自激振荡的原因和条件
- 2 利用波特图判定放大电路的稳定性
- 3 消除自激振荡的方法

2.1 反馈的基本概念与分类

反馈是自动控制和自动调节中一个必不可少的环节。不管是工业控制或是社会经济管理，人的机体调理，都存在着各种各样的反馈。

集成运放在开环下不能正常工作（增益高、频响差），只有在引入负反馈的闭环条件下才能稳定地工作。

放大电路引入负反馈后能改善电路的许多技术指标，如：提高放大电路的工作稳定性，改善非线性失真，抑制噪声，提高输入电阻，降低输出电阻，展宽通频带等。

■ 一、反馈的基本概念

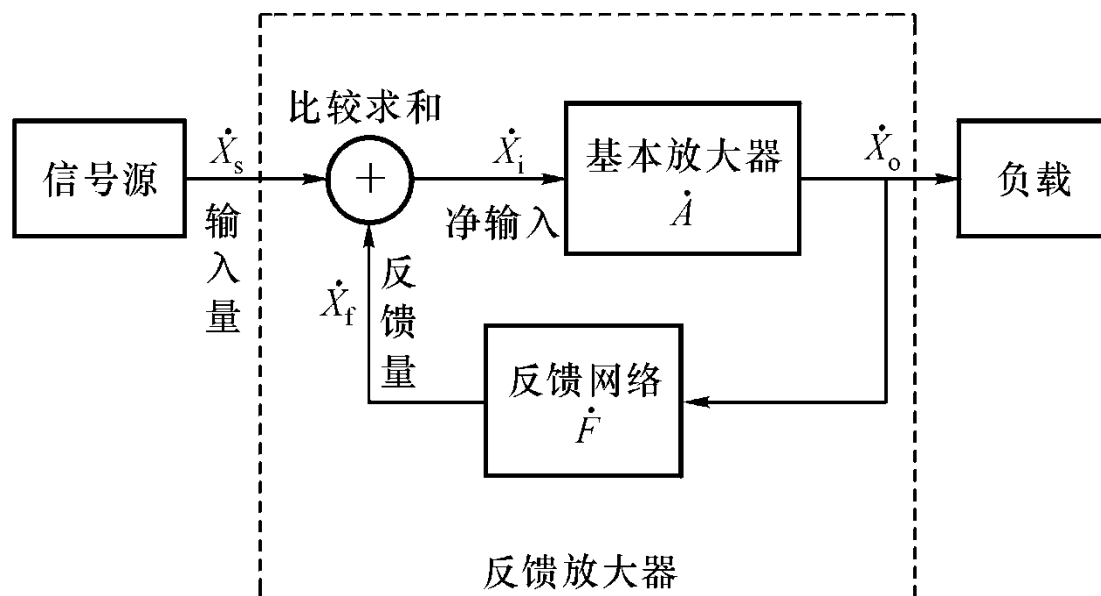
❖ 反馈：

放大器输出回路中的电量（电压或电流）的一部分（或全部），通过一定的电路形式（**反馈网络**），送回到输入回路中，以对放大器的输入量产生影响，从而使输出量得到自动调节。

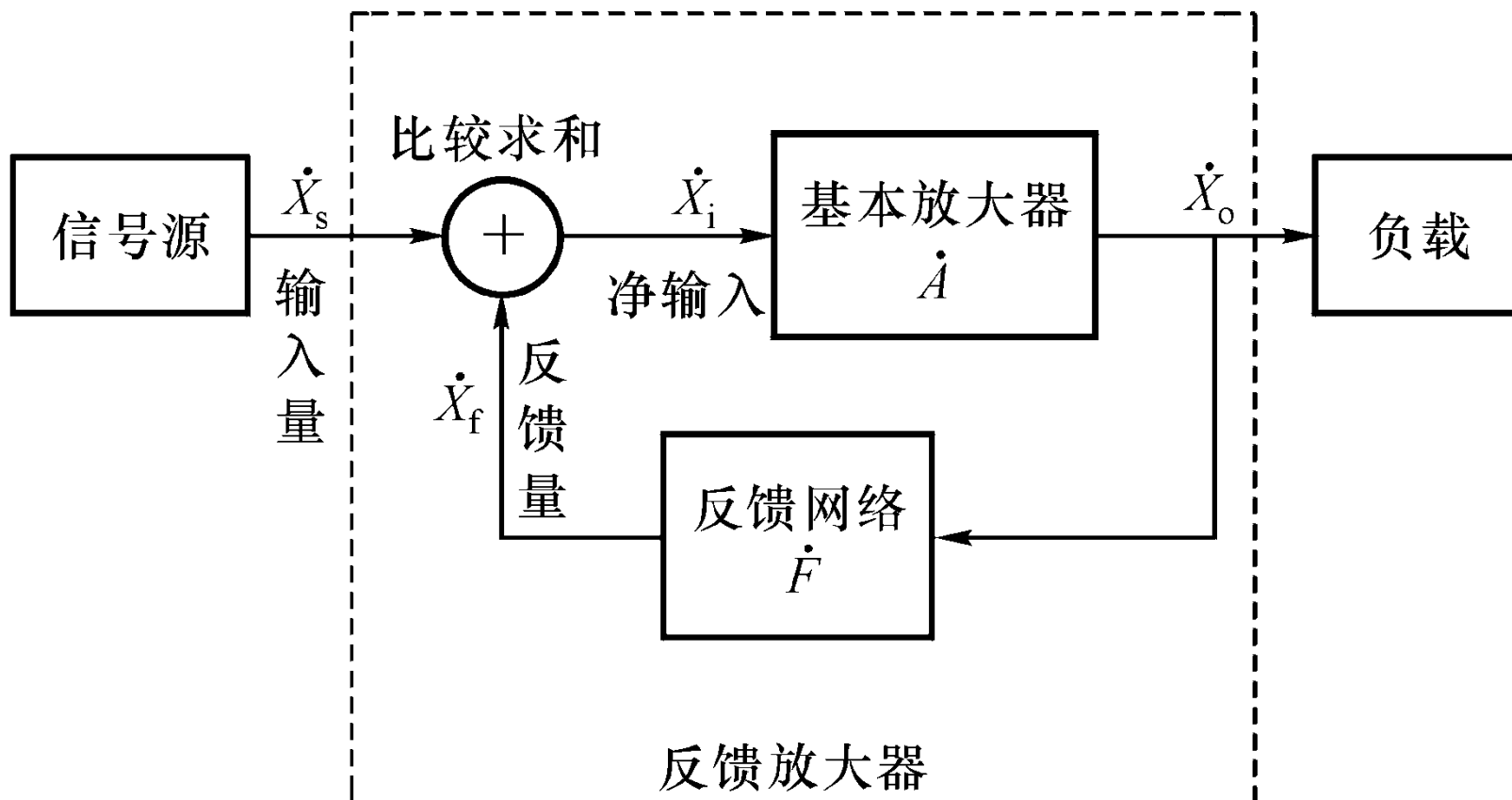
❖ 反馈放大器：

放大器和反馈网络组成的一个**闭环系统**，称为**反馈放大器**；

未加反馈的放大器称为**开环放大器**。



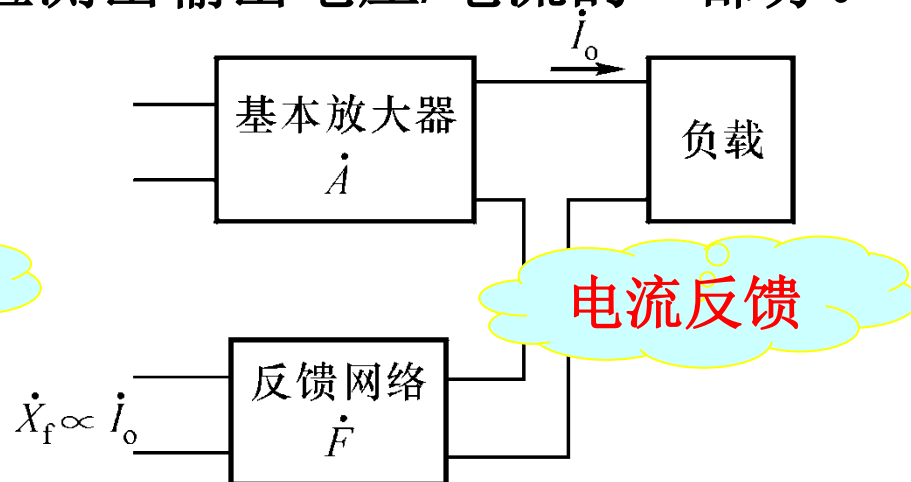
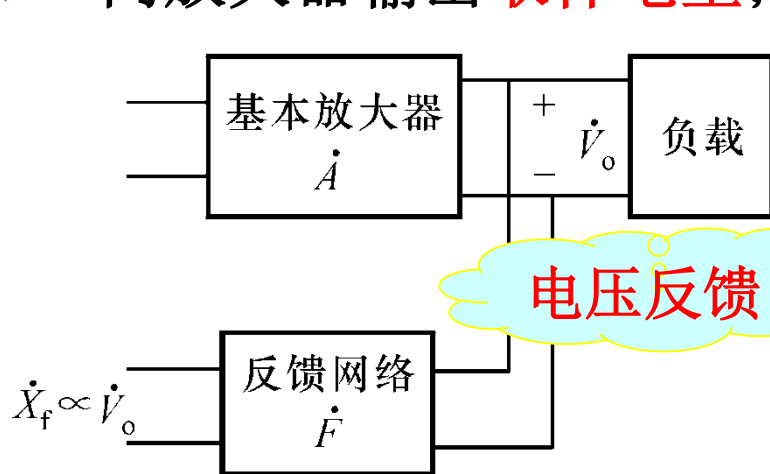
❖ 反馈放大器框图



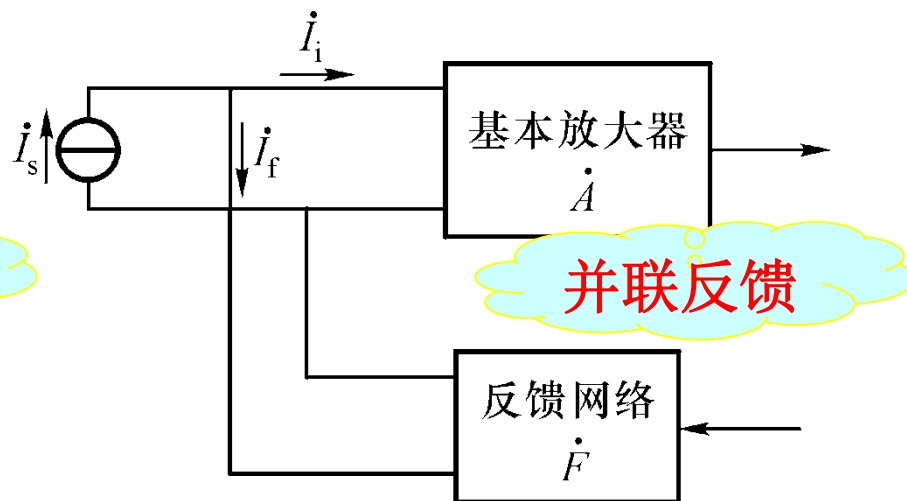
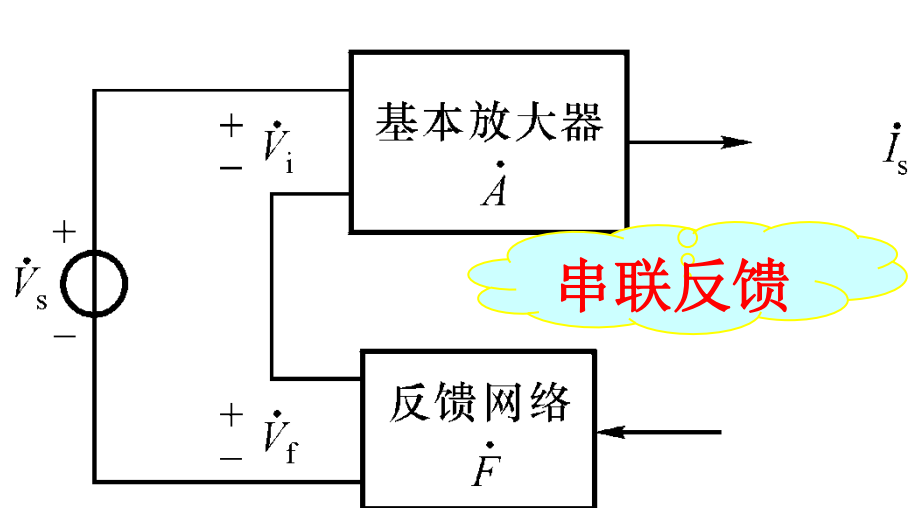
$\dot{X}_s, \dot{X}_f, \dot{X}_i$ 同为电压/电流信号
 \dot{A}, \dot{F} 为单向传输网络

❖ 反馈网络的主要功能

- 向放大器输出**取样电量**；检测出输出电压/电流的一部分。



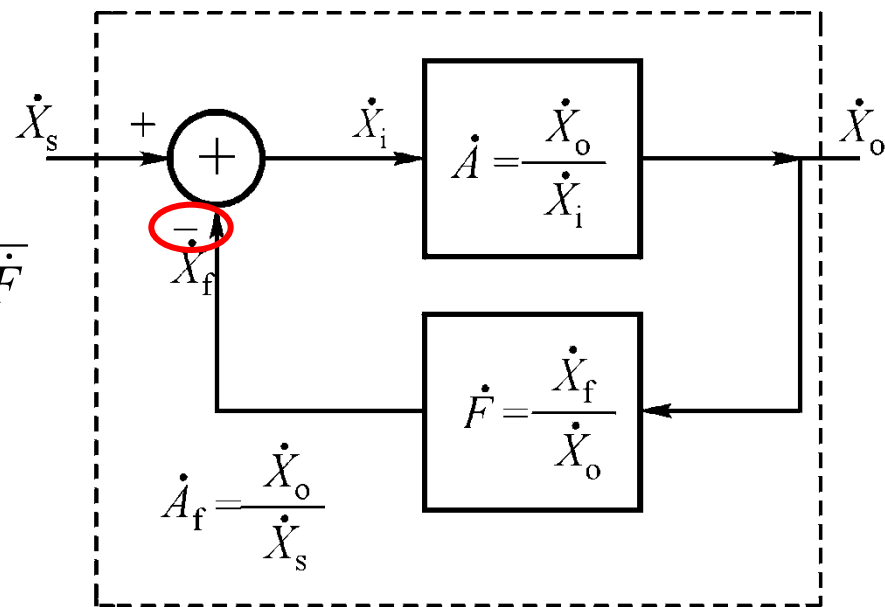
- 将取样电量送回放大器输入回路，与输入信号进行**比较求和**；



■ 二、反馈放大器的增益函数

在放大器的通带内：

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



➤ $\dot{A}\dot{F}$: 回路（或环路）增益

➤ $|1 + \dot{A}\dot{F}|$: 反馈深度

- ✓ 若 $|1 + \dot{A}\dot{F}| > 1$ ，说明所引入的反馈是负反馈；
若 $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$ ，则为深度负反馈。 $\longrightarrow \dot{A}_f \approx \frac{\dot{A}}{\dot{A}\dot{F}} = \frac{1}{\dot{F}}$
- ✓ 若 $|1 + \dot{A}\dot{F}| < 1$ ，说明放大电路中引入了正反馈。
- ✓ 若 $|1 + \dot{A}\dot{F}| = 0$ ，此时放大器产生了自激振荡。

■ 三、反馈放大器的分类

❖ 按反馈信号对输出回路的取样对象划分

- 反馈量正比于输出电压：电压反馈
- 反馈量正比于输出电流：电流反馈

❖ 按反馈信号在输入回路中的叠加方式划分

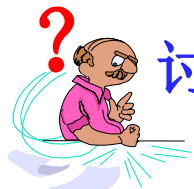
- 对电压比较求和：串联反馈
- 对电流比较求和：并联反馈

❖ 按反馈的极性划分

- 引入反馈后使净输入量增加：正反馈
- 引入反馈后使净输入量减少：负反馈

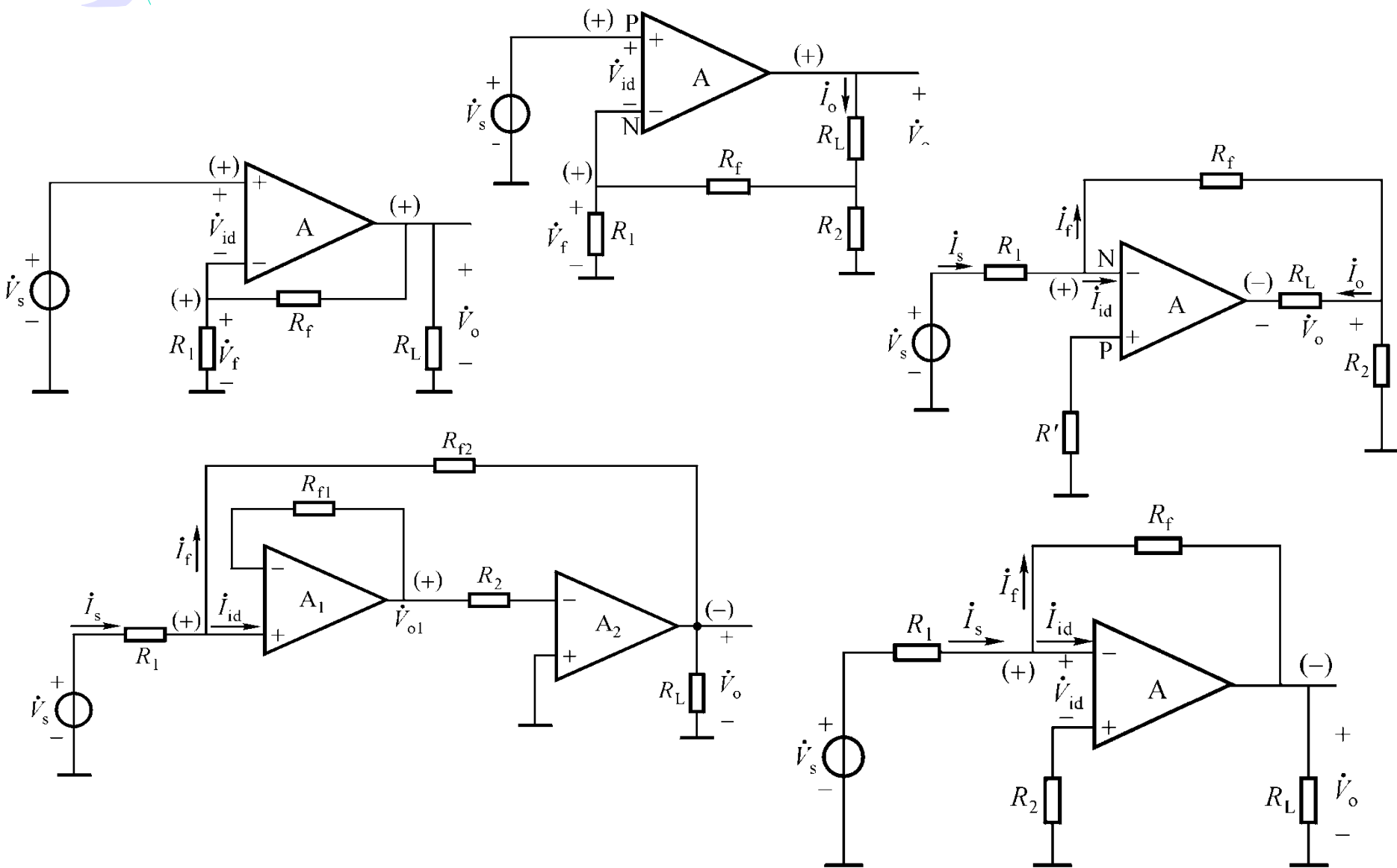
❖ 按反馈量性质或反馈通路划分

- 只包含直流反馈量/仅在直流通路中存在反馈：直流反馈
- 只包含交流反馈量/仅在交流通路中存在反馈：交流反馈



讨论

【例1】 判别反馈类型



❖ 分析反馈放大器的几条规律及步骤

➤ 明确反馈网络

➤ 串联/并联反馈

取决于反馈信号与输入信号的连接方式。

若为串联结构，则串联反馈；若为并联结构，则并联反馈。

明确 $X_f = U_f$ 还是 I_f 。

➤ 电压/电流反馈

取决于反馈信号对何种输出信号进行取样。

写出 X_f 关于 V_O 或 I_O 的表达式，

令输出端对地短路（令 $R_L = 0$ ，则 $V_O = 0$ ， $I_O \neq 0$ ），

若 $X_f = 0$ ，则电压反馈；若 $X_f \neq 0$ ，则电流反馈。

➤ 正/负反馈（一般指在中频段）

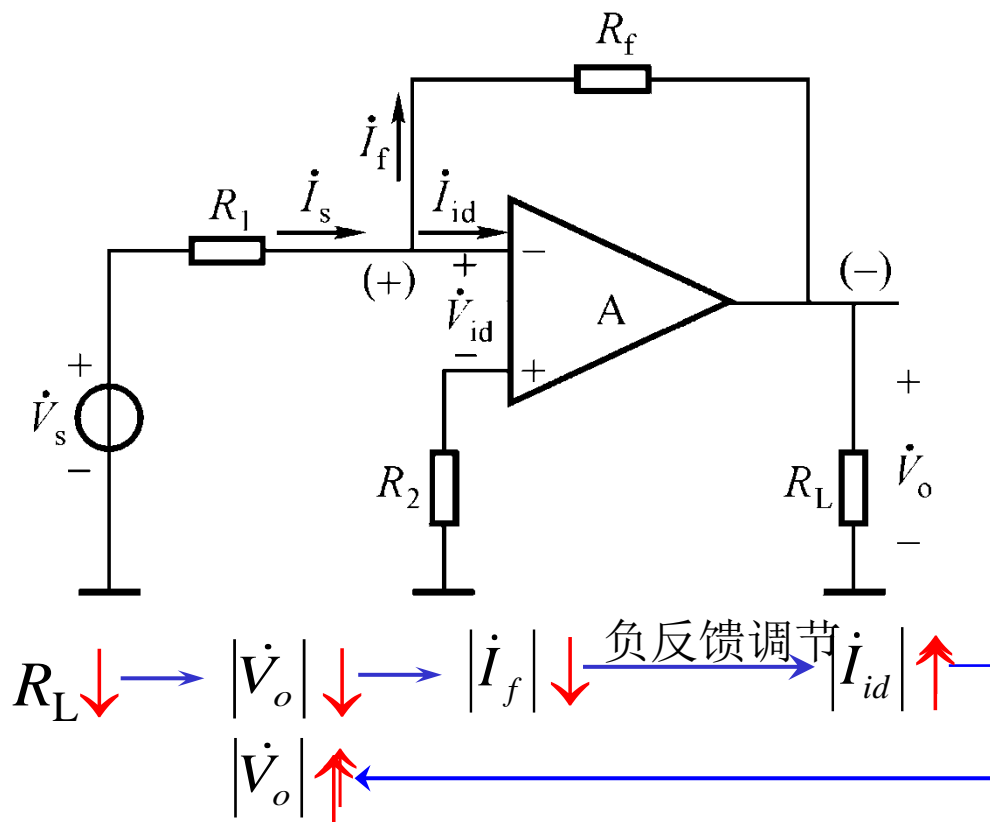
采用瞬时极性法，再判断 $X_i = X_s +$ 还是 $-X_f$

若引入反馈后使净输入量减小，则负反馈；

若引入反馈后使净输入量增加，则正反馈。

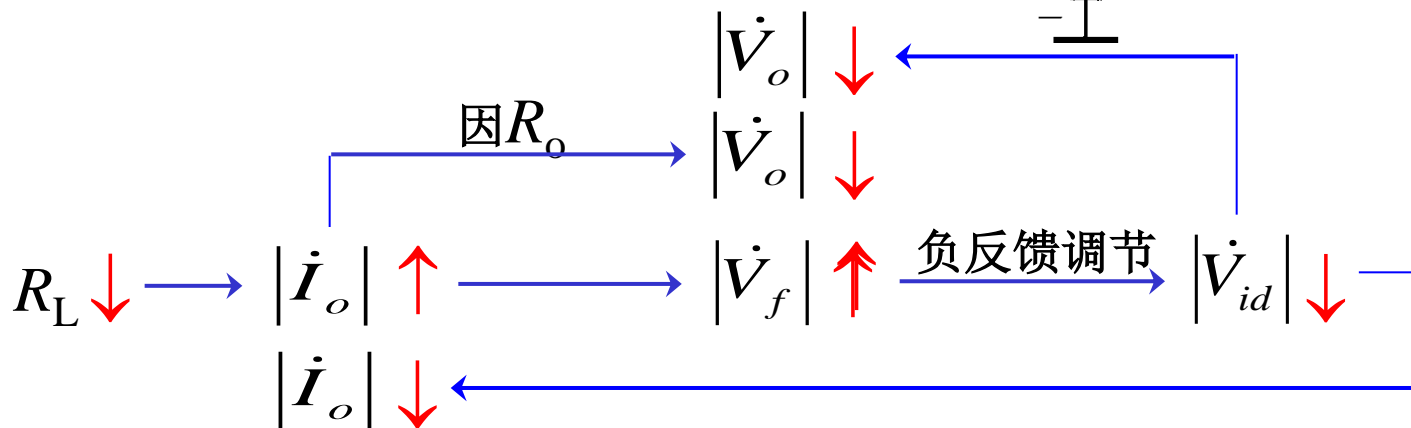
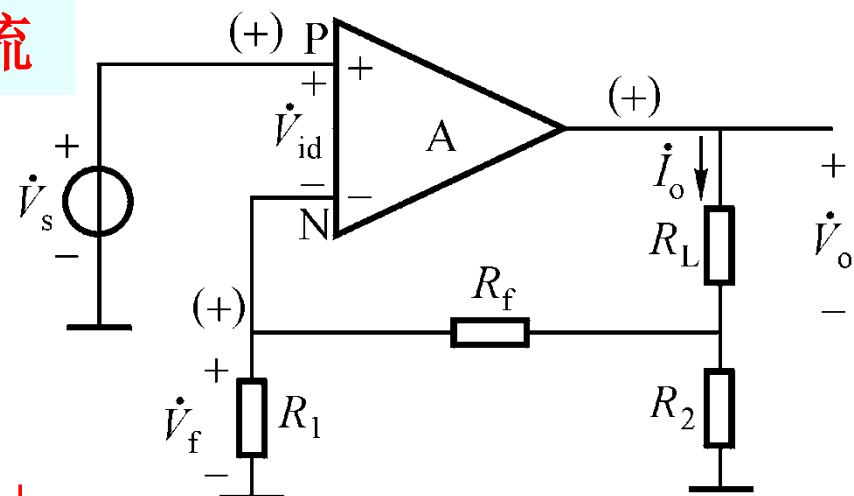


电压负反馈的作用是**稳定输出电压**
 电流负反馈的作用是**稳定输出电流**



结果是 \dot{V}_o 趋于稳定（略有减小），
 因而电压负反馈的结果是稳定输出电压。

电压负反馈的作用是**稳定输出电压**
 电流负反馈的作用是**稳定输出电流**



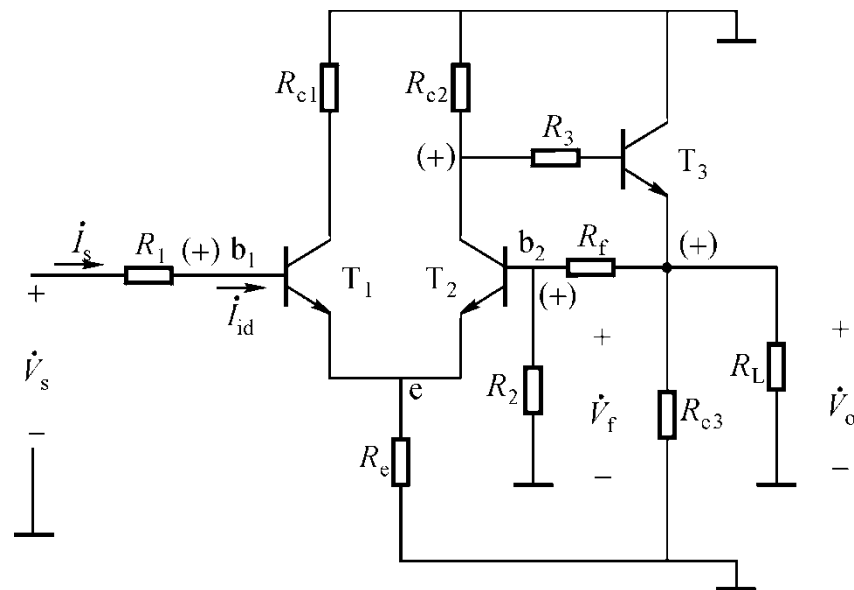
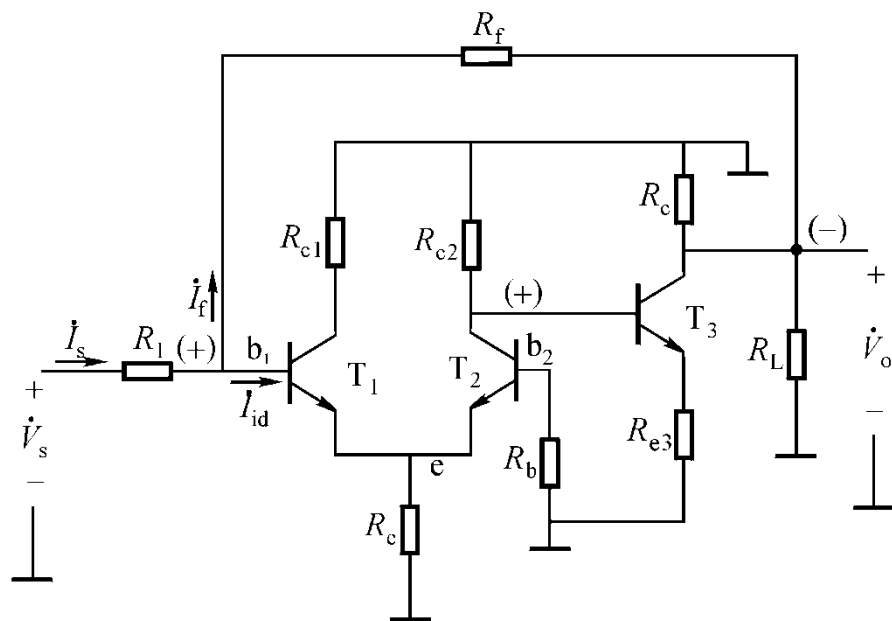
结果是输出电流趋于稳定，
 输出电压非但不能稳定，反而更加减小，
 因而电流负反馈的结果是稳定输出电流。

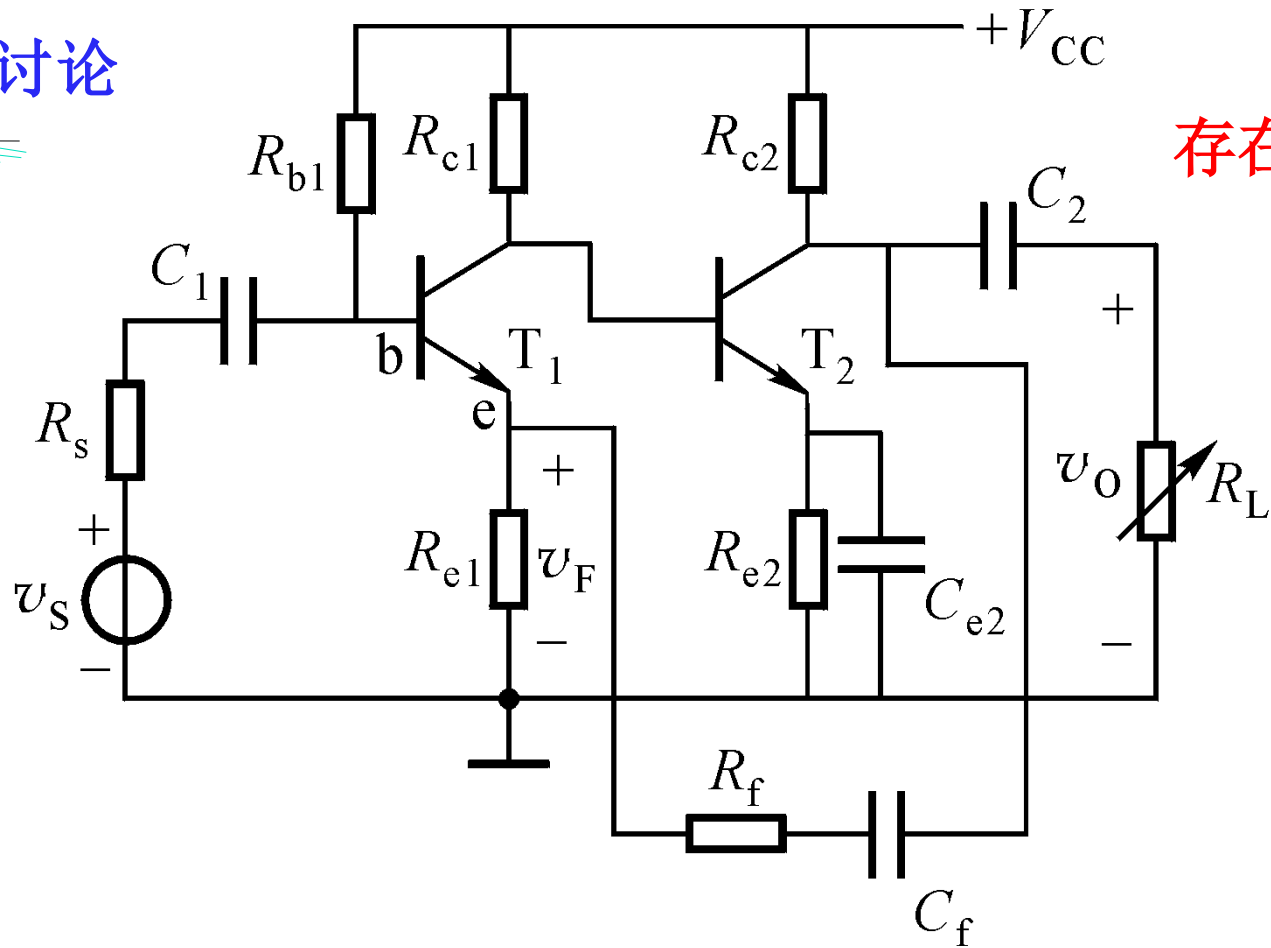
❖不同组态下增益和反馈系数的不同含义

反馈组态	开环增益	物理意义	反馈系数	物理意义
电压串联	$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}$	电压增益	$\dot{F}_v = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o}$	电压传输比
电压并联	$\dot{A}_r = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_i}$	互阻增益	$\dot{F}_g = \frac{\dot{I}_f}{\dot{V}_o}$	互导传输比
电流串联	$\dot{A}_g = \frac{\dot{I}_o}{\dot{V}_i}$	互导增益	$\dot{F}_r = \frac{\dot{V}_f}{\dot{I}_o}$	互阻传输比
电流并联	$\dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$	电流增益	$\dot{F}_i = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o}$	电流传输比



【例2】 判别反馈类型





存在哪些反馈?

2.2 负反馈对放大电路性能的改善

■ 一、提高闭环增益的稳定性

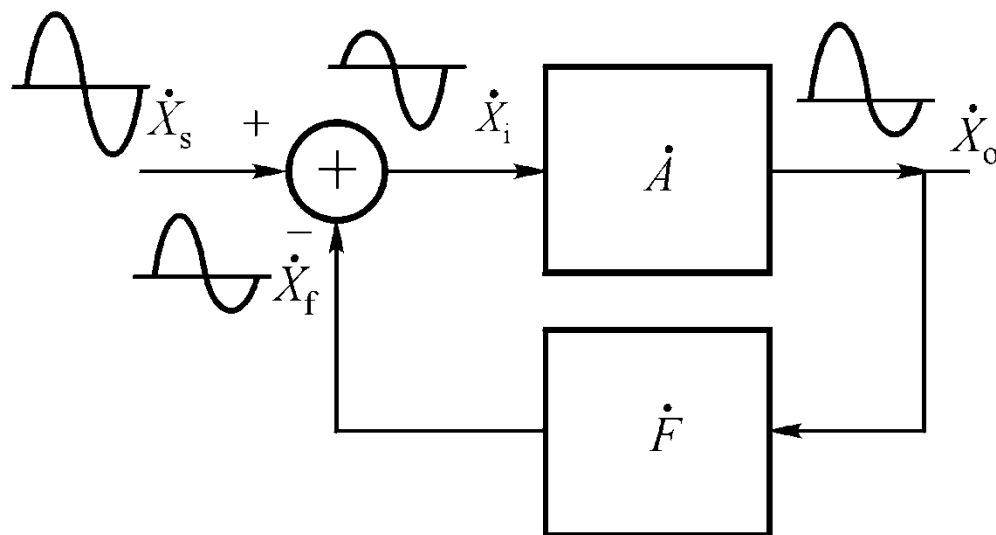
$$A_f = \frac{A}{1 + AF}$$

$$dA_f = \frac{(1 + AF)dA - AFdA}{(1 + AF)^2} = \frac{dA}{(1 + AF)^2}$$

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

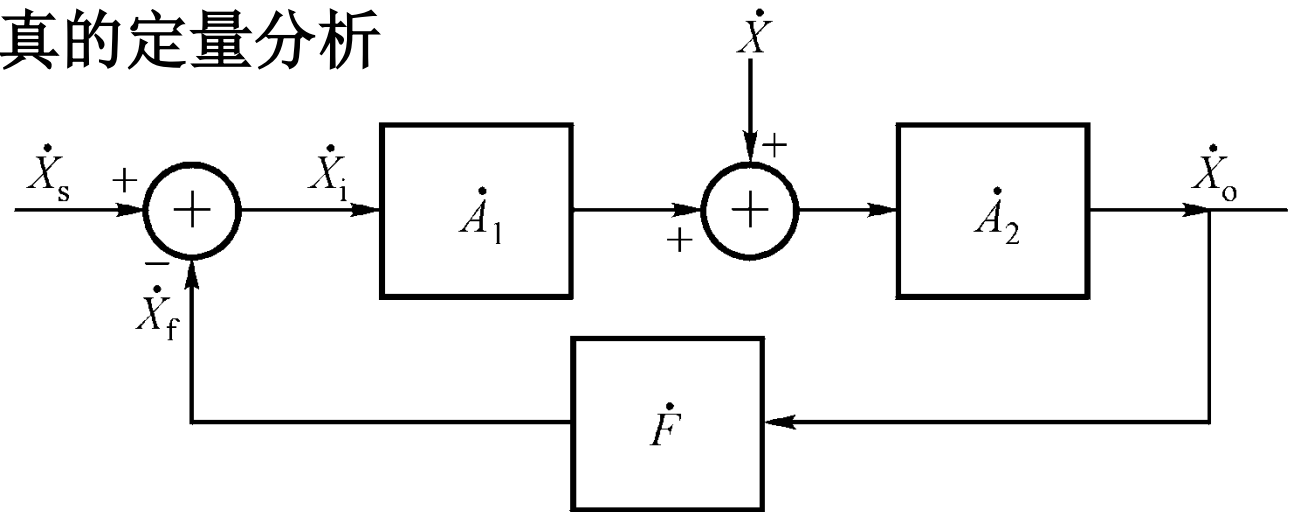
引入负反馈后，增益的相对变化量是无反馈时的 $1 / (1 + AF)$

■ 二、改善放大电路的非线性



假设基本放大器的输出正半周略大于负半周；
则经负反馈后，反馈信号正半周也大，
使净输入信号正半周略小，从而弥补基本放大器的失真。

❖ 改善非线性失真的定量分析



➤ 放大器开环: $\dot{X}_o = \dot{A}_1 \dot{A}_2 \dot{X}_i + \dot{A}_2 \dot{X} = \dot{A} \dot{X}_s + \dot{A}_2 \dot{X}$

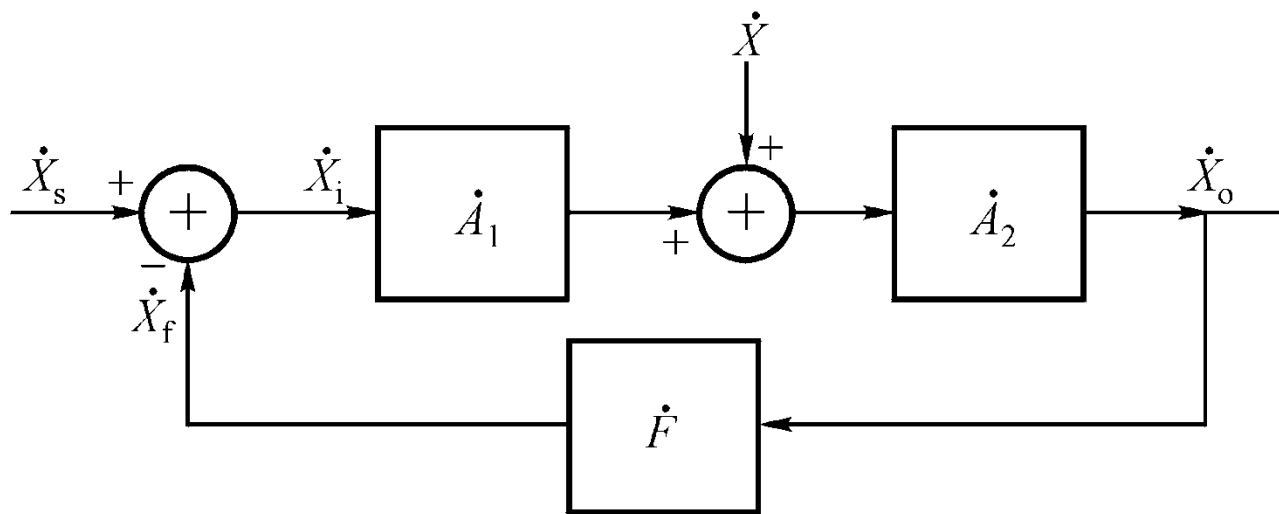
➤ 放大器闭环: $\dot{X}_o' = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \dot{X}_s + \frac{\dot{A}_2}{1 + \dot{A}\dot{F}} \dot{X}$ 闭环后输出信号降低

$$\dot{X}_o' = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \left[(1 + \dot{A}\dot{F}) \dot{X}_s \right] + \frac{\dot{A}_2}{1 + \dot{A}\dot{F}} \dot{X} = \dot{A} \dot{X}_s + \frac{\dot{A}_2}{1 + \dot{A}\dot{F}} \dot{X}$$

负反馈对非线性失真的改善程度是 $1 / (1 + \dot{A}\dot{F})$

式子表明, 有用信号和失真信号部分都下降。比较反馈效果应该在同一输出幅度下才有意义, 所以应加大 X_s 使其反馈后的输出电压 X_o' 和反馈前的 X_o 相等。

■ 三、抑制放大电路内部的温漂、噪声及干扰



- 引入负反馈后，电路内部的干扰和噪声都减小为原来的 $1 / (1 + \dot{A}\dot{F})$ ；为弥补有用信号，应加大 \dot{X}_s 以提高信噪比 (S/N)。
- 如果噪声、干扰混在有用信号中或来自电路外部，则负反馈无能为力。只能用屏蔽、隔离、滤波或消除干扰源等手段加以剔除。

■ 四、扩展通频带

负反馈可展宽放大器的通频带

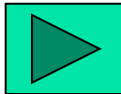
➤ 开环高频增益: $\dot{A}_H = \frac{A_m}{1 + j \frac{f}{f_H}}$

➤ 闭环增益:
$$\begin{aligned}\dot{A}_{Hf} &= \frac{\dot{A}_H}{1 + \dot{A}_H F} = \frac{\frac{A_m}{1 + j \frac{f}{f_H}}}{1 + \frac{A_m F}{1 + j \frac{f}{f_H}}} = \frac{\frac{A_m}{1 + A_m F}}{1 + j \frac{f}{(1 + A_m F) f_H}} \\ &= \frac{A_{mf}}{1 + j \frac{f}{f_{Hf}}}\end{aligned}$$

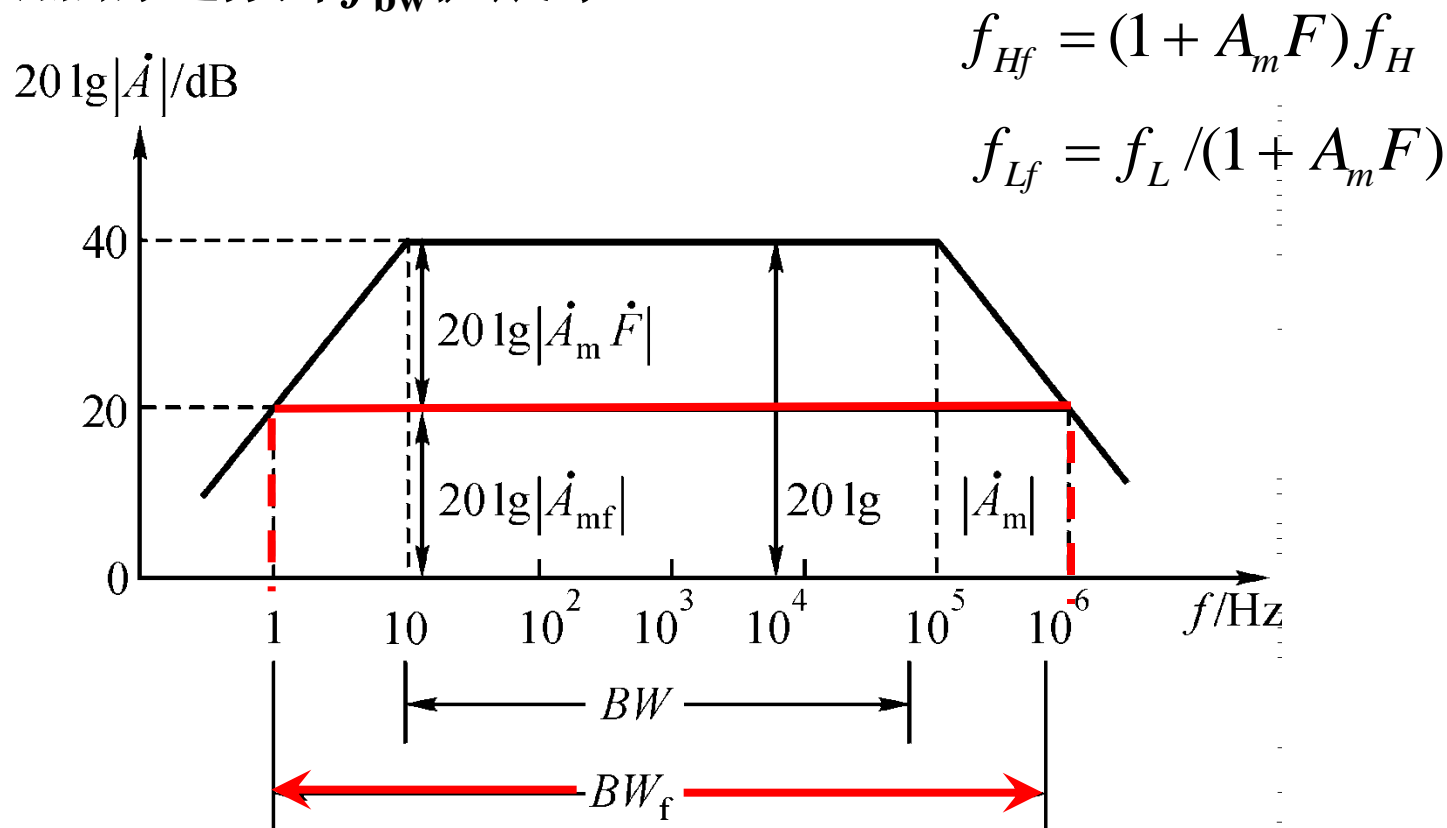
闭环时中频增益为开环时的 $1 / (1 + A_m F)$

闭环时上限频率为开环时的 $(1 + A_m F)$

闭环时下限频率为开环时的 $1 / (1 + A_m F)$



放大器引入负反馈后，上限频率升高，下限频率降低，
因而使放大器的通频带 f_{bw} 扩展了。



增益带宽积近似为一常数： $A_{mf} \cdot BW_f \approx A_m \cdot BW$

加了负反馈后的低频段频率特性

$$\dot{A}_L = \frac{A_m j \frac{f}{f_L}}{1 + j \frac{f}{f_L}}$$

$$\dot{A}_{Lf} = \frac{\dot{A}_L}{1 + \dot{A}_L F} =$$

$$\frac{A_m \frac{j \frac{f}{f_L}}{1 + j \frac{f}{f_L}}}{1 + A_m \frac{j \frac{f}{f_L}}{1 + j \frac{f}{f_L}} F} = \dots = \dot{A}_{mf} \frac{j \frac{f}{f_L}}{1 + j \frac{f}{f_L}}$$

闭环后，中频段增益下降

$$f_{Lf} = f_L / (1 + A_m F)$$

闭环后，下限频率展宽了。

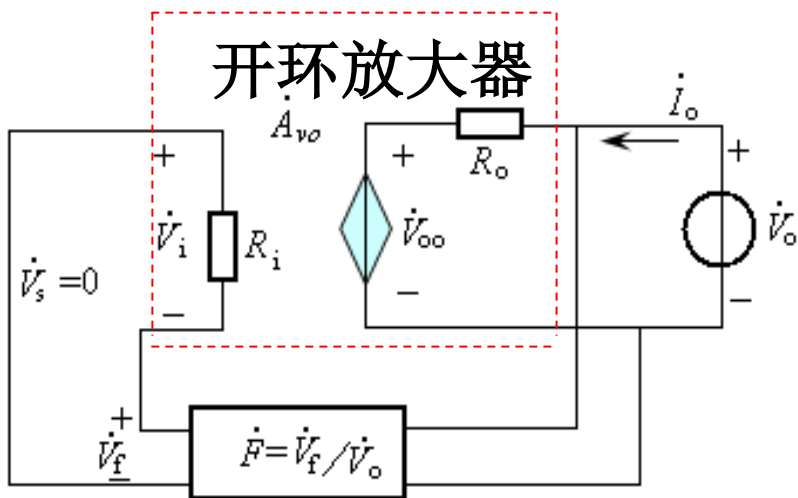
其中 $\dot{A}_{mf} = \frac{A_m}{1 + A_m F}$

$$\frac{j \frac{f}{f_L}}{1 + A_m F}$$

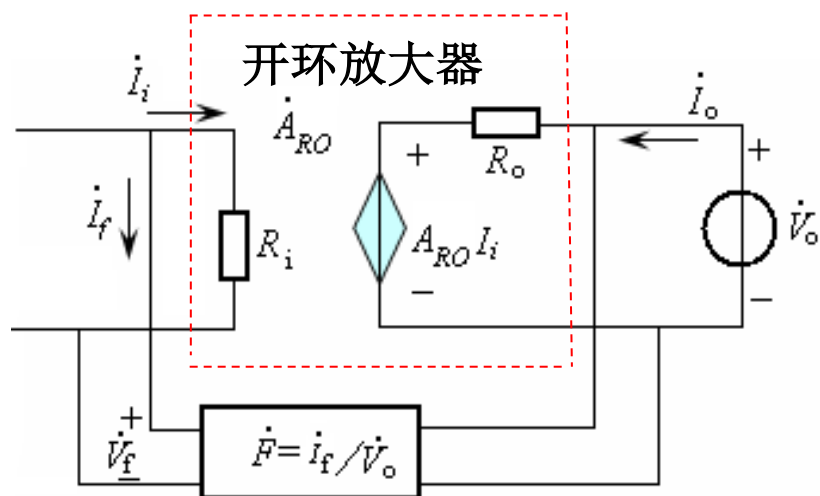
$$= \dot{A}_{mf} \frac{j \frac{f}{f_{Lf}}}{1 + j \frac{f}{f_{Lf}}}$$

■ 五、负反馈的主要效果

负反馈形式	稳定对象	输入电阻	输出电阻
电压串联	$\dot{V}_o \quad \dot{A}_{vf}$	$R_i \cdot 1 + \dot{A}\dot{F} $	$R_o / 1 + \dot{A}\dot{F} $
电压并联	$\dot{V}_o \quad \dot{A}_{rf}$	$R_i / 1 + \dot{A}\dot{F} $	$R_o / 1 + \dot{A}\dot{F} $
电流串联	$\dot{I}_o \quad \dot{A}_{gf}$	$R_i \cdot 1 + \dot{A}\dot{F} $	$R_o \cdot 1 + \dot{A}\dot{F} $
电流并联	$\dot{I}_o \quad \dot{A}_{if}$	$R_i / 1 + \dot{A}\dot{F} $	$R_o \cdot 1 + \dot{A}\dot{F} $



电压串联反馈



电压并联反馈

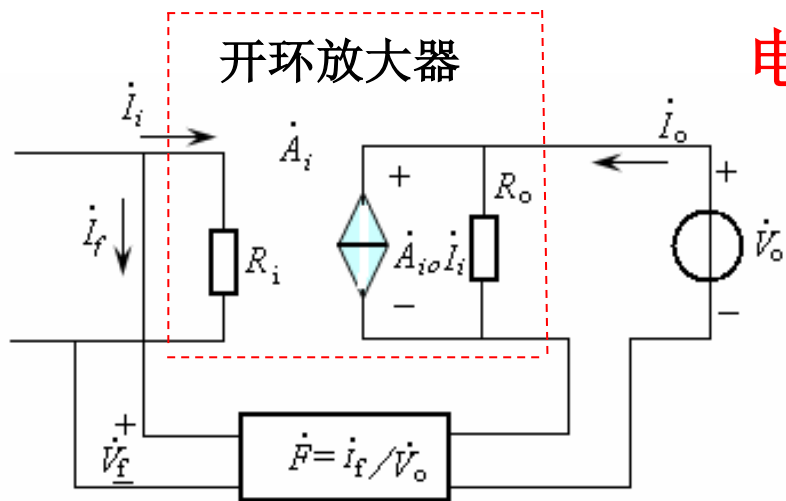
假定反馈电路中信号单向化传输，取样电路不取电流并无压降；

$$\begin{aligned}\dot{V}_o &= \dot{I}_o R_o + \dot{V}_{oo} = \dot{I}_o R_o + \dot{A}_{vo} \dot{V}_i \\ &= \dot{I}_o R_o - \dot{A}_{vo} \dot{V}_f = \dot{I}_o R_o - \dot{A}_{vo} \dot{F} \dot{V}_o\end{aligned}$$

$$R_{of} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_o} = \frac{1}{1 + \dot{A}_{vo} \dot{F}} R_o$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_o &= \dot{I}_o R_o + \dot{V}_{oo} = \dot{I}_o R_o + \dot{A}_{Ro} \dot{I}_i \\ &= \dot{I}_o R_o - \dot{A}_{Ro} \dot{I}_f = \dot{I}_o R_o - \dot{A}_{Ro} \dot{F} \dot{V}_o\end{aligned}$$

$$R_{of} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_o} = \frac{1}{1 + \dot{A}_{Ro} \dot{F}} R_o$$

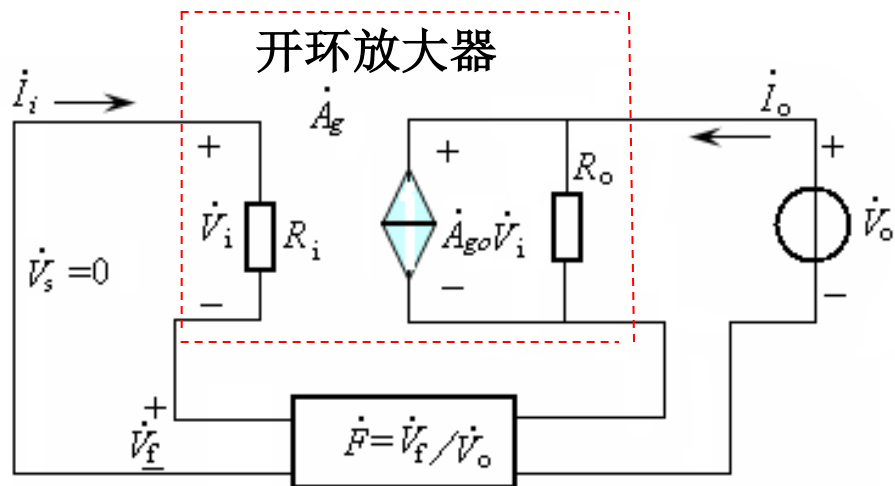


电流并联反馈

$$\dot{I}_o = \frac{\dot{V}_o}{R_o} + \underline{\dot{A}_{io} \dot{I}_i}$$

$$= \frac{\dot{V}_o}{R_o} - \dot{A}_{io} \dot{I}_f = \frac{\dot{V}_o}{R_o} - \dot{A}_{io} \dot{F} \dot{I}_o$$

$$R_{of} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_o} = (1 + \dot{A}_{io} \dot{F}) R_o$$



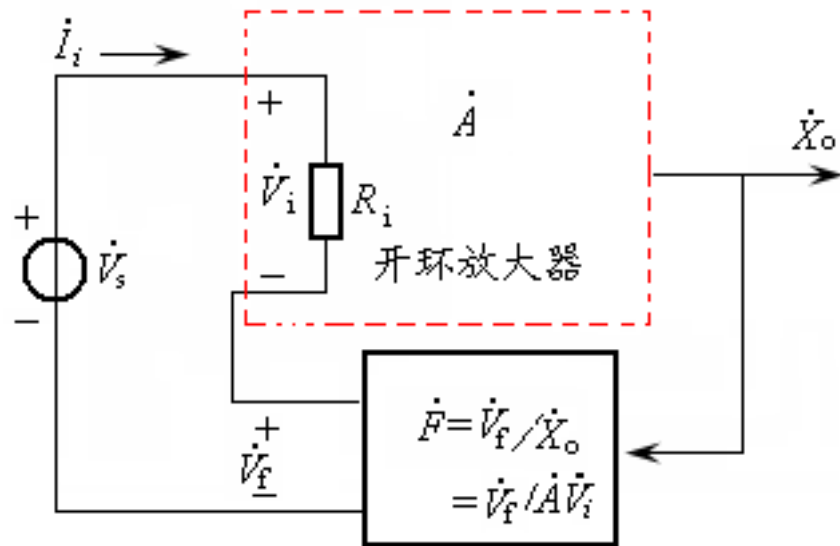
电流串联反馈

$$\dot{I}_o = \frac{\dot{V}_o}{R_o} + \underline{\dot{A}_{go} \dot{V}_i}$$

$$= \frac{\dot{V}_o}{R_o} - \dot{A}_{go} \dot{V}_f = \frac{\dot{V}_o}{R_o} - \dot{A}_{go} \dot{F} \dot{I}_o$$

$$R_{of} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_o} = (1 + \dot{A}_{go} \dot{F}) R_o$$

串联反馈



$$R_{if} = \frac{\dot{V}_s}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_i + \dot{V}_f}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_i + \dot{A} \dot{F} \dot{V}_i}{\dot{I}_i}$$

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

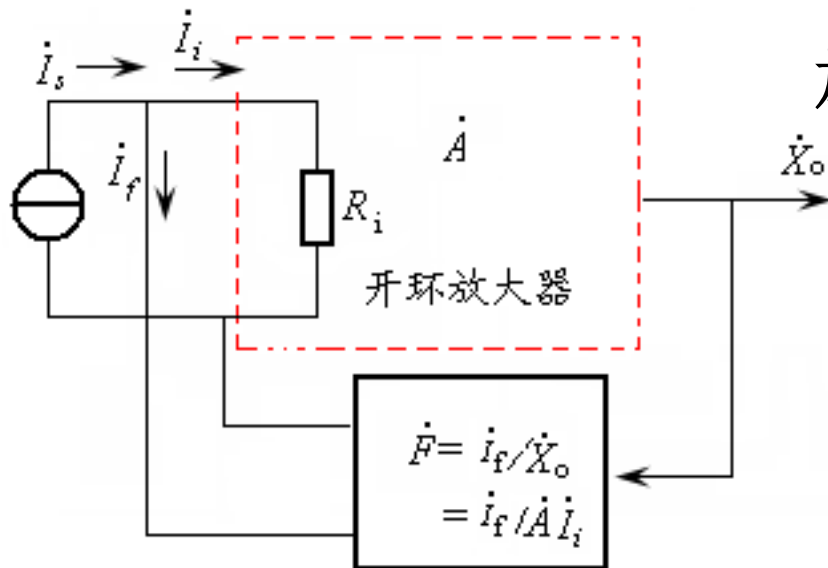
并联反馈

无反馈时, $\dot{I}_s = \dot{I}_i$

加了负反馈后 $\dot{I}_s = \dot{I}_f + \dot{I}_i = \dot{I}_i + \dot{A} \dot{F} \dot{I}_i$

$$= \dot{I}_i (1 + \dot{A} \dot{F})$$

输入电流增加了 $1 + \dot{A} \dot{F}$



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

2.3 集成运放构成的负反馈电路

一、运算规则

一定同时具有虚短和虚断

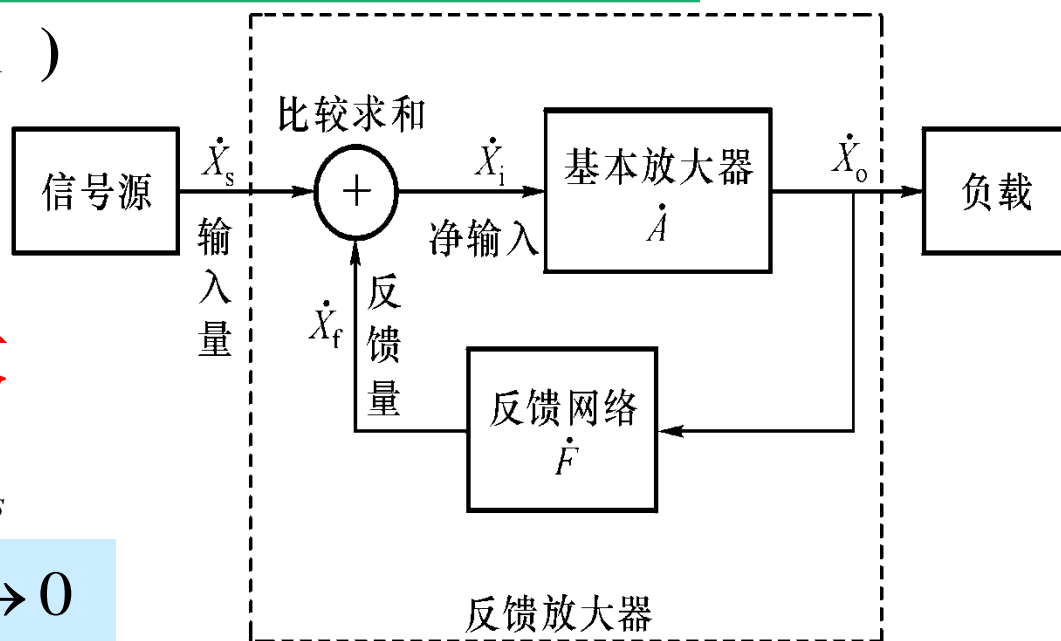
对于深度负反馈($|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$)

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

闭环增益取决于反馈系数

$$\dot{X}_f = \dot{A}\dot{F}\dot{X}_i \approx (1 + \dot{A}\dot{F})\dot{X}_i = \dot{X}_s$$

净输入: $\dot{X}_i = \dot{X}_s - \dot{X}_f \rightarrow 0$

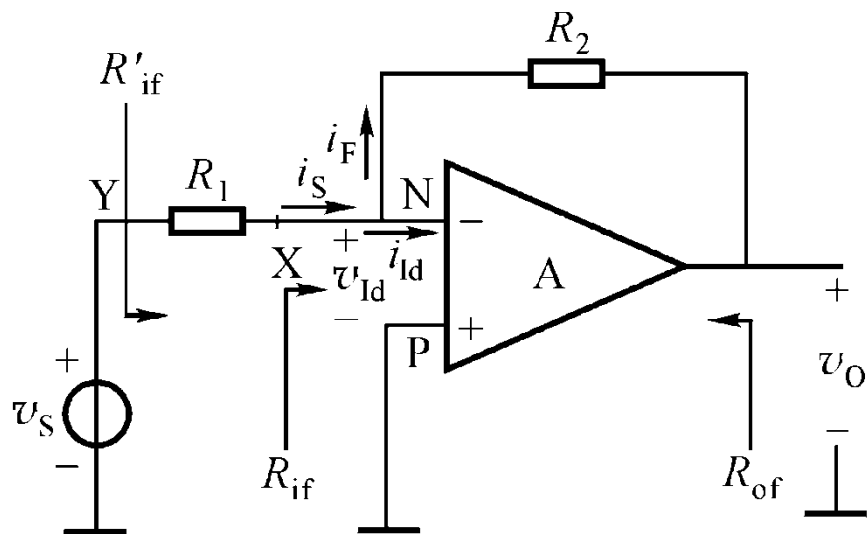


串联负反馈, $\dot{X}_i = \dot{V}_i \rightarrow 0$, 称为“虚短” $R_{if} = (1 + AF)R_i \rightarrow \infty$ 虚断

并联负反馈, $\dot{X}_i = \dot{I}_i \rightarrow 0$, 称为“虚断” $R_{if} = \frac{R_i}{1 + AF} \rightarrow 0$ 虚短

■ 二、由集成运放构成的各种运算电路

❖ 比例运算电路

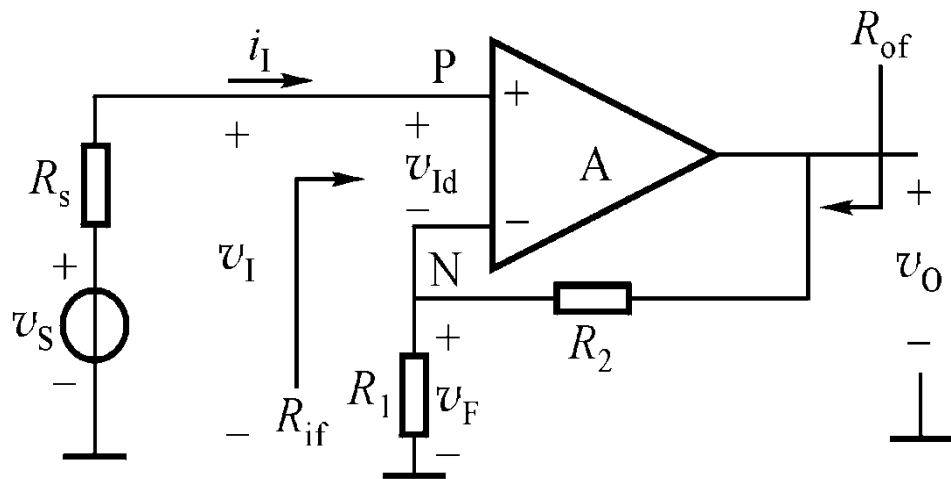


✓ 反向输入方式

$$v_O = -\frac{R_2}{R_1} \cdot v_S$$

$$R'_{if} = v_S / i_S = R_1$$

$$R_{of} \rightarrow 0$$



✓ 同向输入方式

$$A_f = \frac{v_o}{v_s} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$R_{if} \rightarrow \infty$$

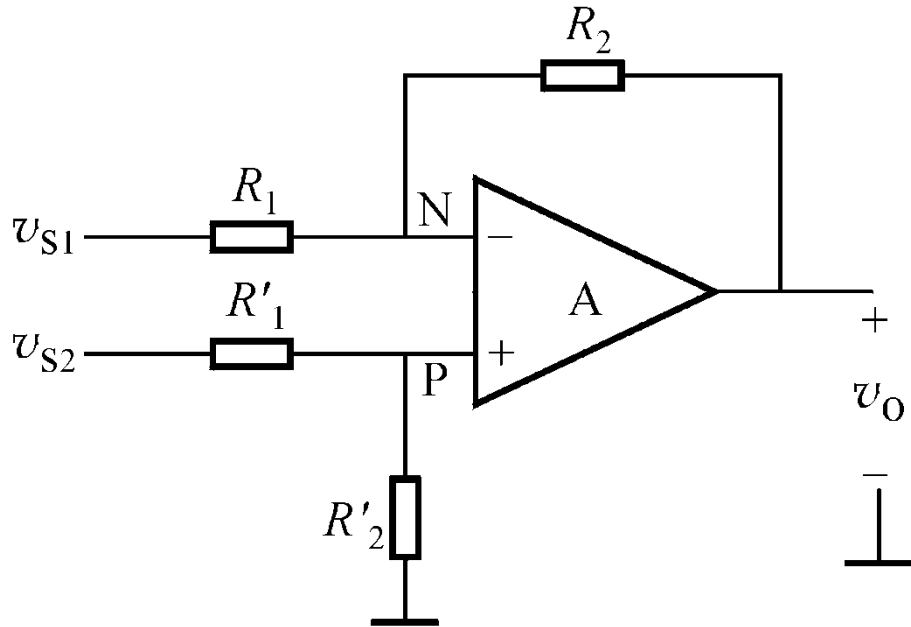
$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + AF} \rightarrow 0$$

✓ 差分输入方式

$$v'_O = -\frac{R_2}{R_1} v_{S1}$$

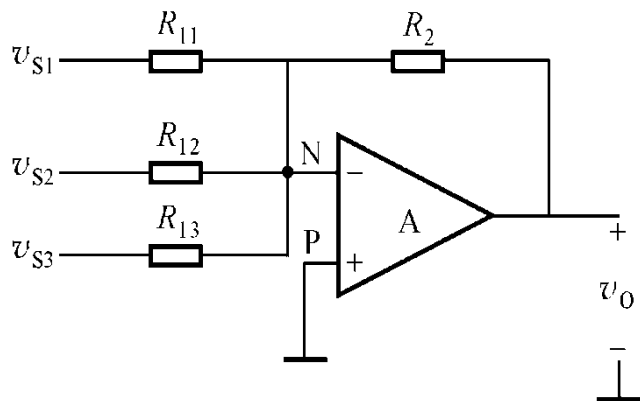
$$v''_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R'_2}{R'_1 + R'_2} v_{S2}$$

$$v_O = v'_O + v''_O = -\frac{R_2}{R_1} v_{S1} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R'_2}{R'_1 + R'_2} v_{S2}$$

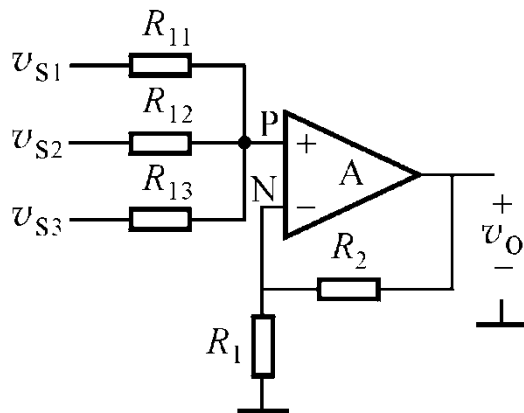


当 $R_1 = R'_1$, $R_2 = R'_2$ 时, $v_O = \frac{R_2}{R_1} (v_{S2} - v_{S1})$

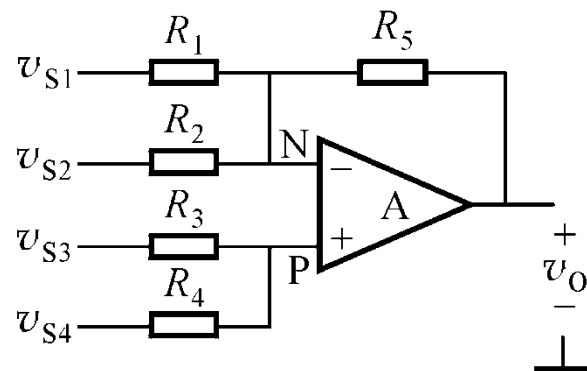
❖ 求和运算电路



✓ 反向输入方式



✓ 同向输入方式



✓ 双端输入方式

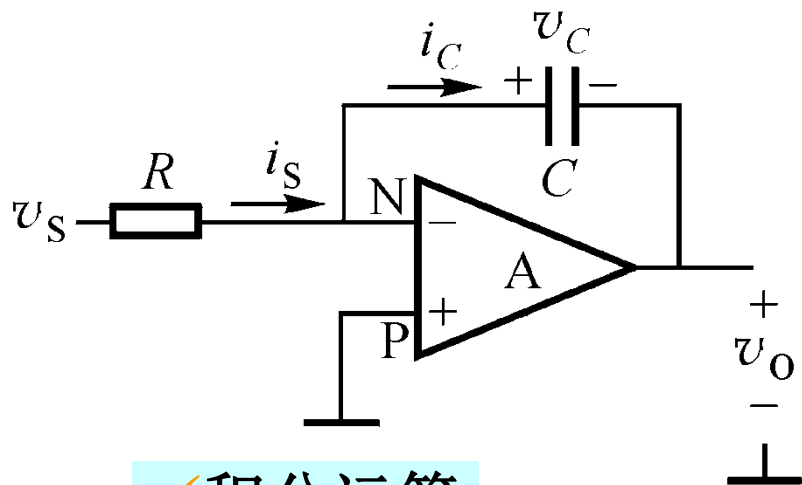
$$v_O = -\left(\frac{R_2}{R_{11}}v_{S1} + \frac{R_2}{R_{12}}v_{S2} + \frac{R_2}{R_{13}}v_{S3}\right)$$

电阻*电流得到的 v_N

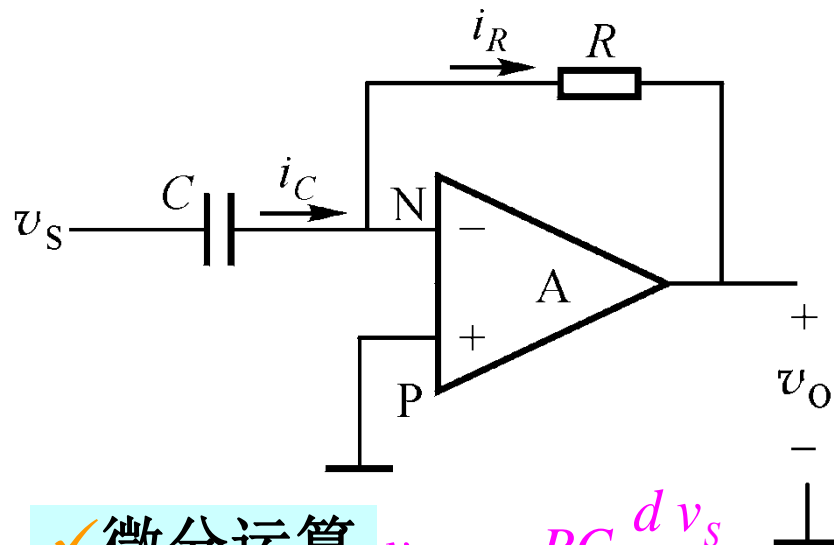
$$v_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)v_N = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)(R_{11} \parallel R_{12} \parallel R_{13})\left(\frac{v_{S1}}{R_{11}} + \frac{v_{S2}}{R_{12}} + \frac{v_{S3}}{R_{13}}\right)$$

$$v_O = -\frac{R_5}{R_1}v_{S1} - \frac{R_5}{R_2}v_{S2} + \left(1 + \frac{R_5}{R_1 \parallel R_2}\right)\left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}v_{S3} + \frac{R_3}{R_3 + R_4}v_{S4}\right)$$

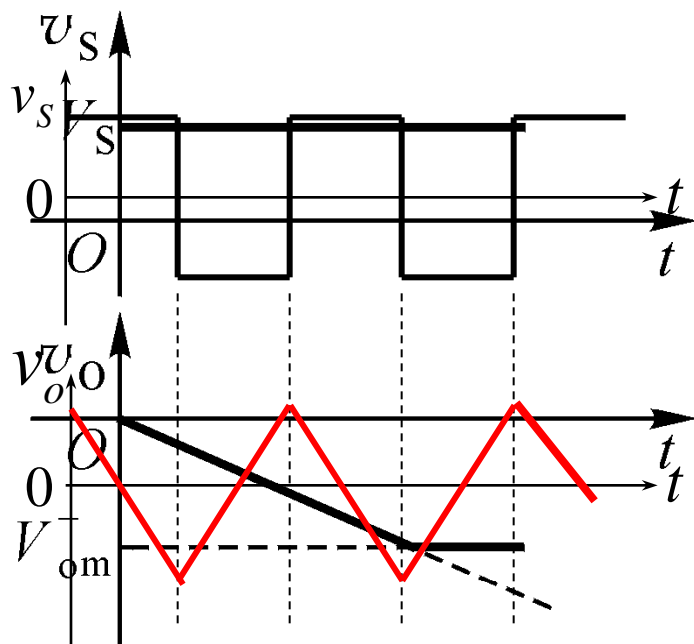
❖ 积分和微分运算电路



✓ 积分运算



✓ 微分运算 $v_o = -RC \frac{dv_s}{dt}$

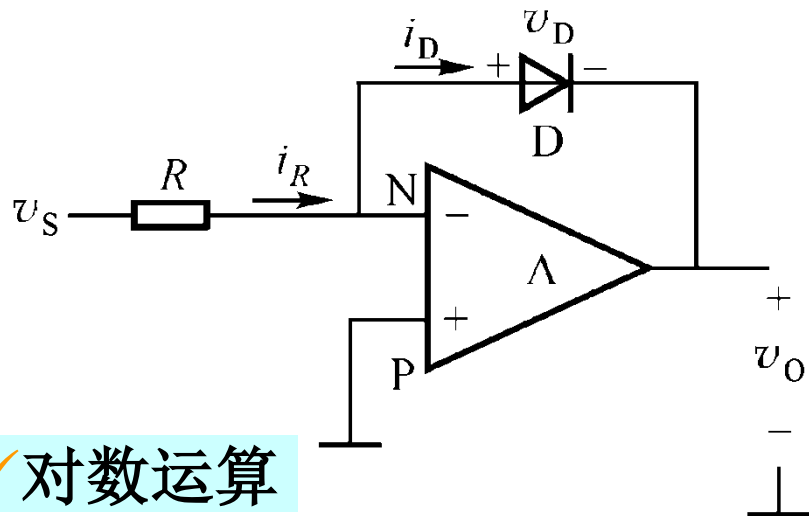


若输入阶跃信号，则： $v_o = -\frac{V_S}{RC}t$

$$\frac{v_s}{R} = -C \cdot \frac{dv_o}{dt}$$

设 $v_C(0) = 0$ ，则： $v_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_s dt$

❖ 对数和指数运算电路

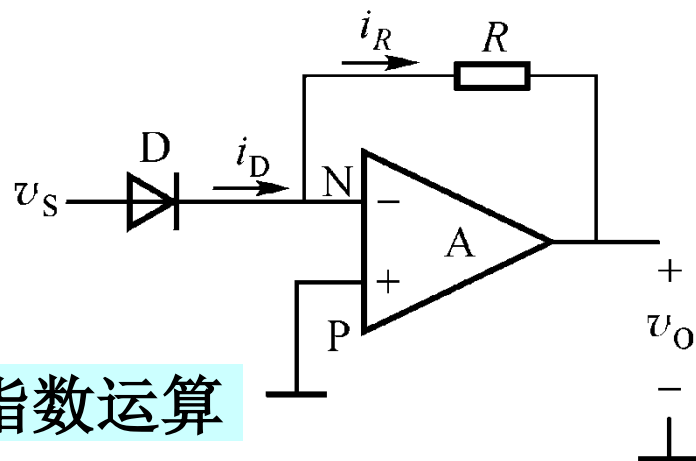


$$v_O = -v_D = -V_T \ln \frac{v_S}{R \cdot I_S}$$

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1 \right) \approx I_S e^{\frac{v_D}{V_T}}$$

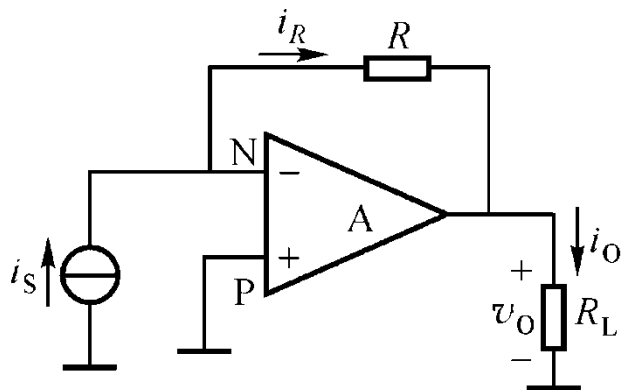
$$i_R = \frac{v_S}{R} = i_D = I_S e^{\frac{v_D}{V_T}}$$

$$i_R = i_D$$



$$v_O = -I_S R \cdot e^{v_S / V_T}$$

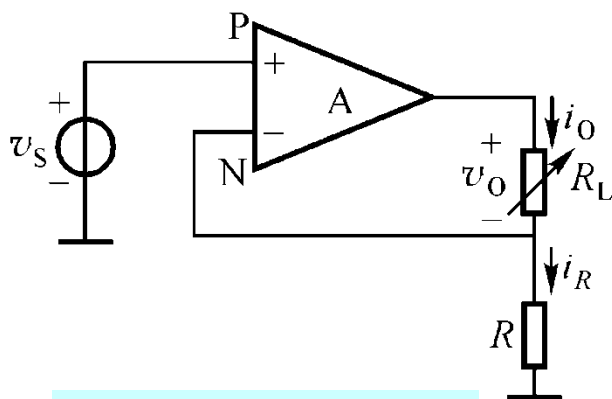
❖ 电流电压变换电路



$$v_o = -i_s \cdot R$$

而与负载 R_L 无关

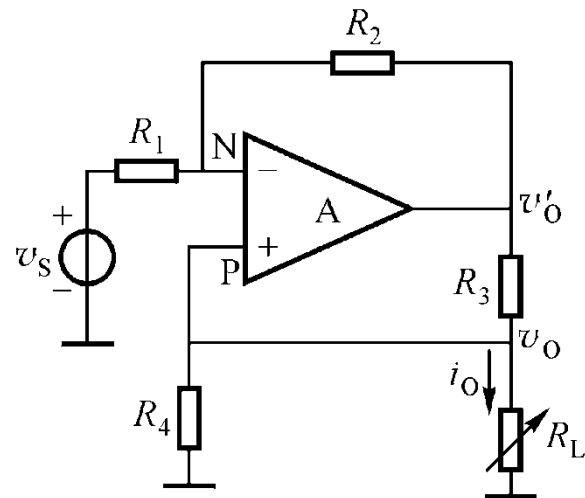
❖ 电压电流变换电路



✓ 负载不接地

$$i_o = i_R = \frac{v_s}{R}$$

与负载 R_L 无关



✓ 负载接地

$$i_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{v_s}{R_3 + \frac{R_3}{R_4} R_L - \frac{R_2}{R_1} R_L}$$

当 $R_2/R_1 = R_3/R_4$ 时，

$$i_o = -\frac{1}{R_4} v_s$$

与负载 R_L 无关。



注意

运算电路中输出端都是和反相输入端相连接的，说明在放大电路中全部构成负反馈。

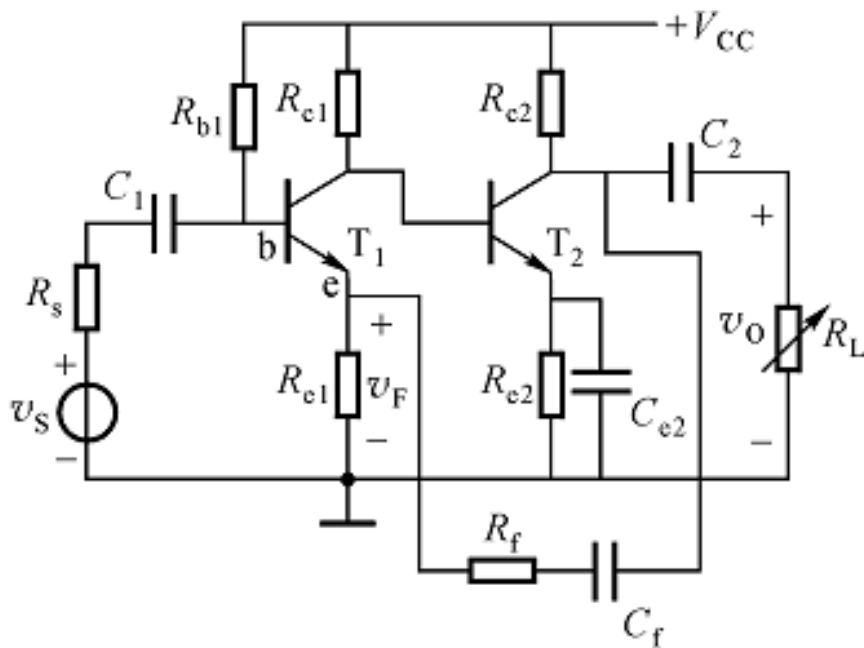
不可能引回到运放的同相端，否则成为正反馈，就不是线性放大了。

2.4 深度负反馈放大电路的分析

——分立元件多级负反馈放大电路的近似计算



【例】分析并估算深度负反馈电路的 A_{vf} , R_{if} , R_{of} 。

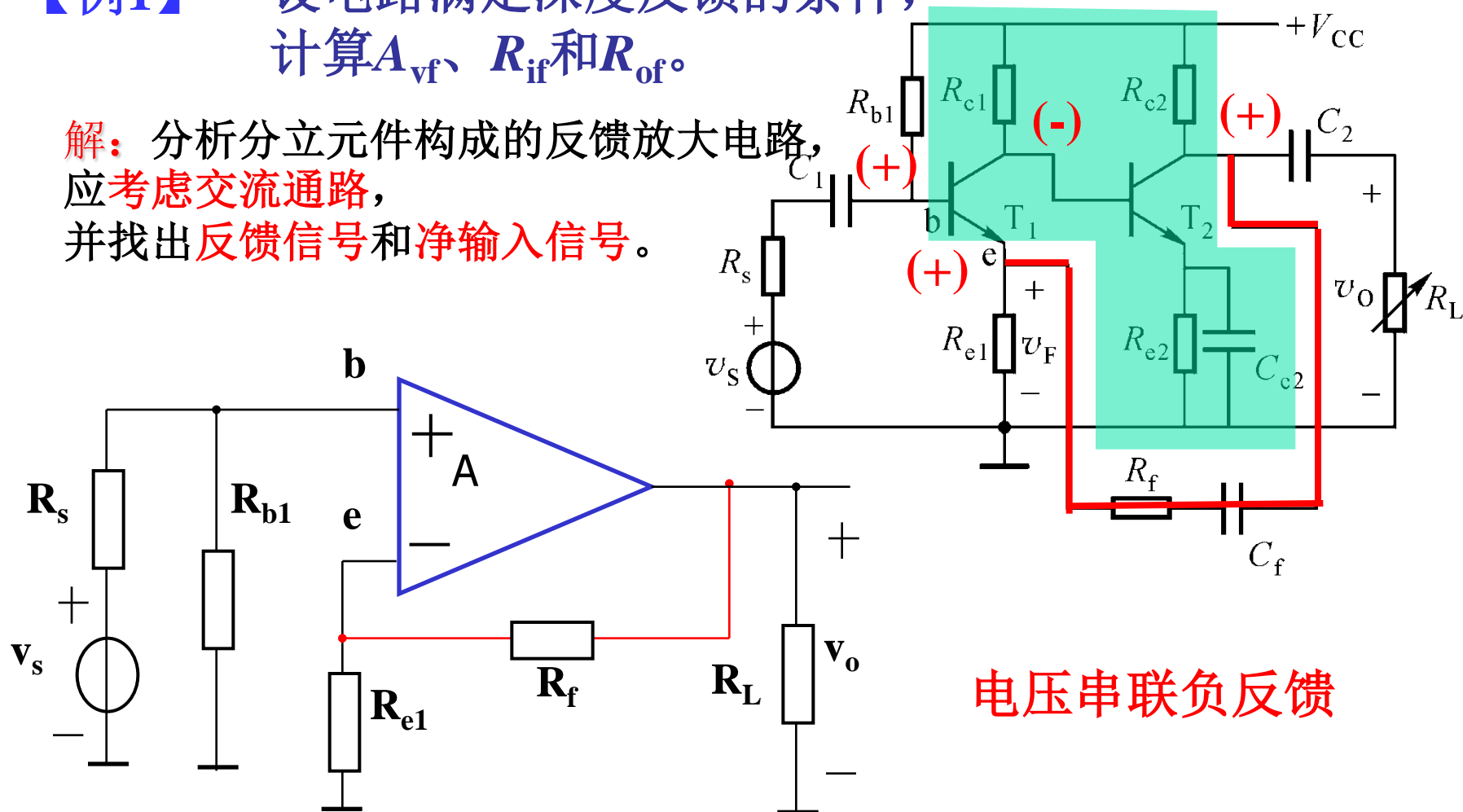


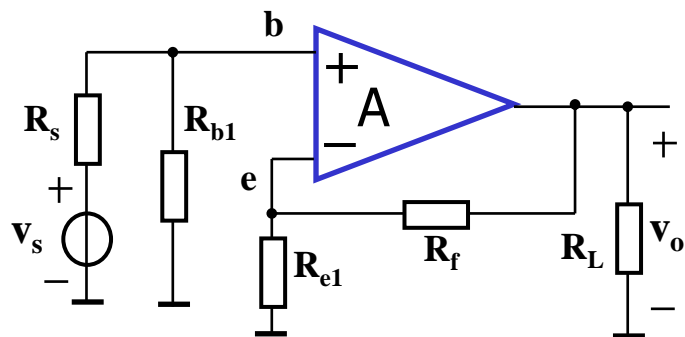
2.4 深度负反馈放大电路的分析

——分立元件多级负反馈放大电路的近似计算

【例1】 设电路满足深度反馈的条件，
计算 A_{vf} 、 R_{if} 和 R_{of} 。

解：分析分立元件构成的反馈放大电路，
应考虑交流通路，
并找出反馈信号和净输入信号。





$$\dot{A}_{vf} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = 1 + \frac{R_f}{R_{e1}}$$

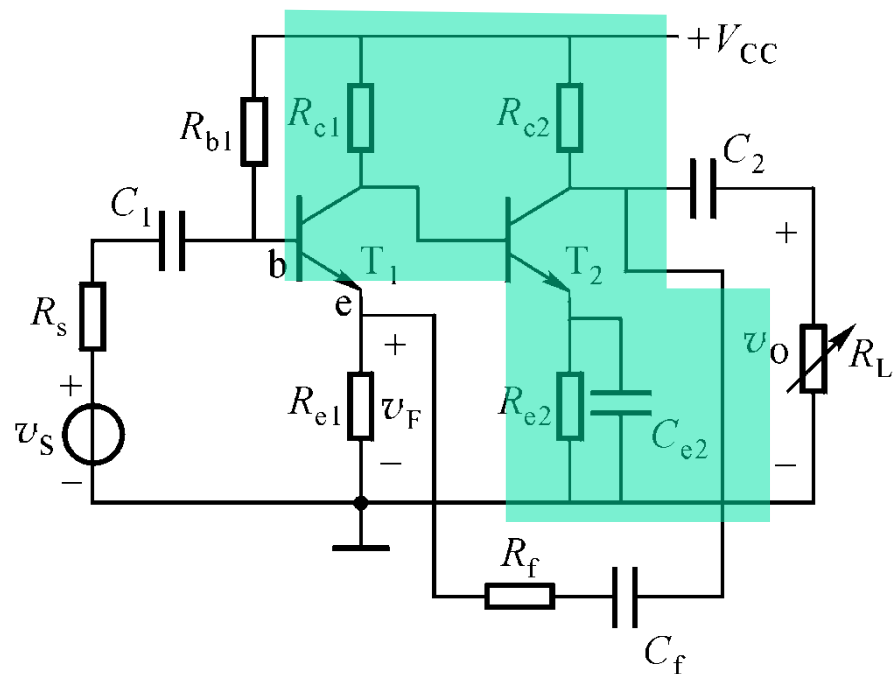
$$R_{if} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_{b1}} \Rightarrow \infty$$

$$R_{of} \Rightarrow 0$$

$$R'_{if} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = R_{b1}$$

$$R'_{of} = R_{c2} // R_{of} = 0$$

电压串联负反馈



【例2】

净输入量为零

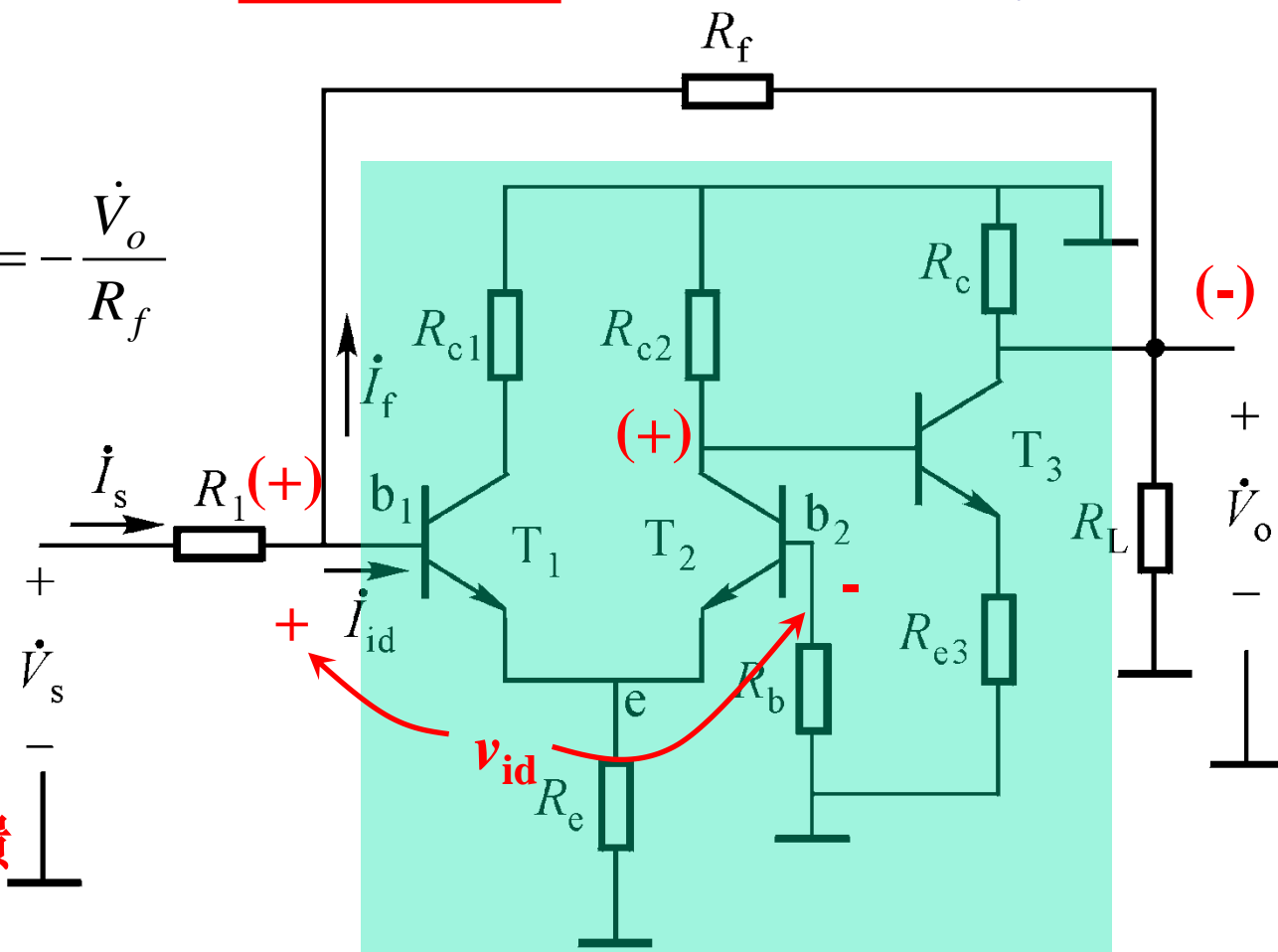
差放输入级构成的多级负反馈放大器如图所示（交流通路），假设电路能满足深度负反馈的条件，试分析计算 \dot{A}_{vf} 。

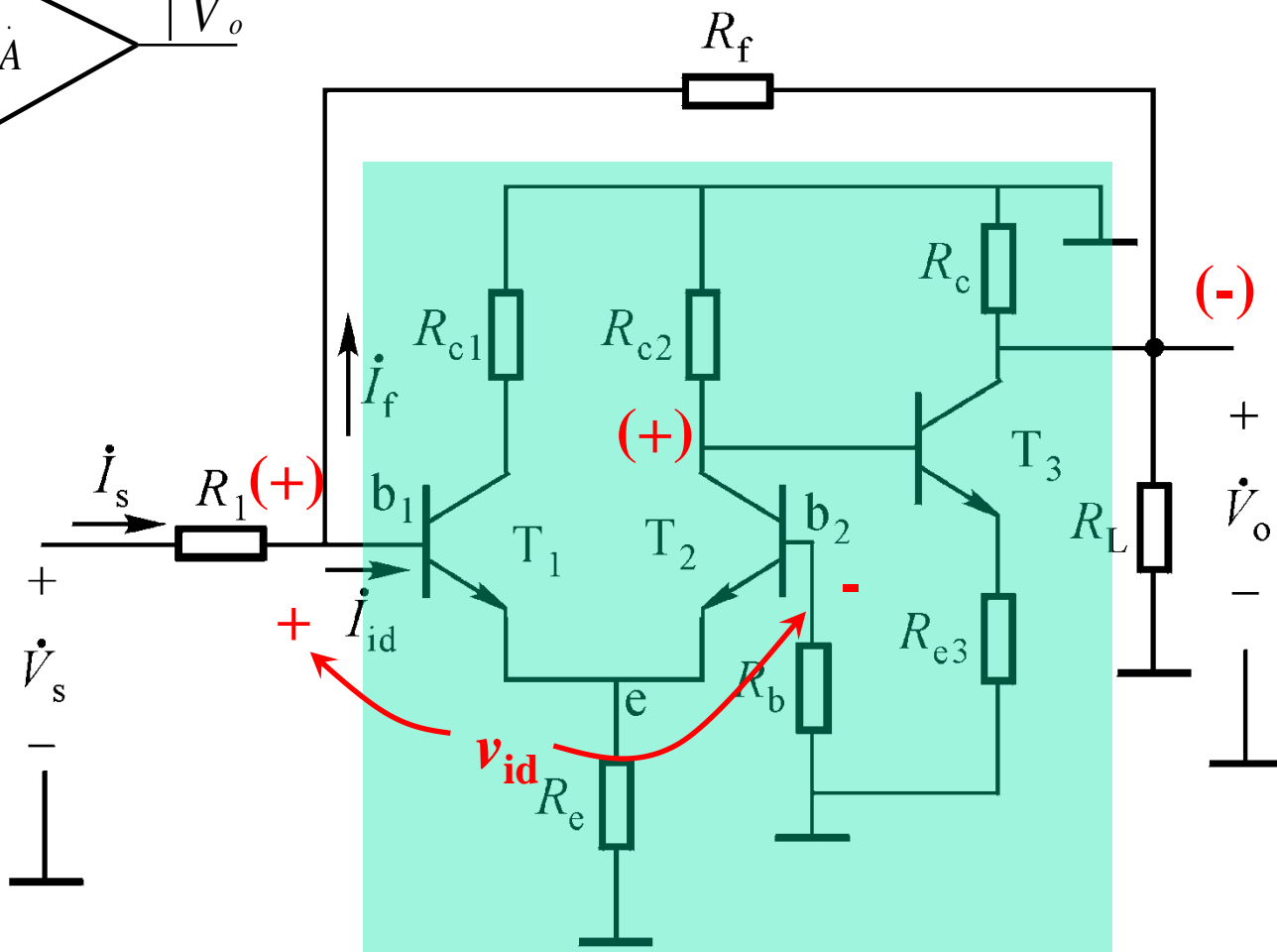
解：

$$\dot{I}_S = \frac{\dot{V}_S}{R_1} = \dot{I}_f = -\frac{\dot{V}_o}{R_f}$$

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

电压并联负反馈





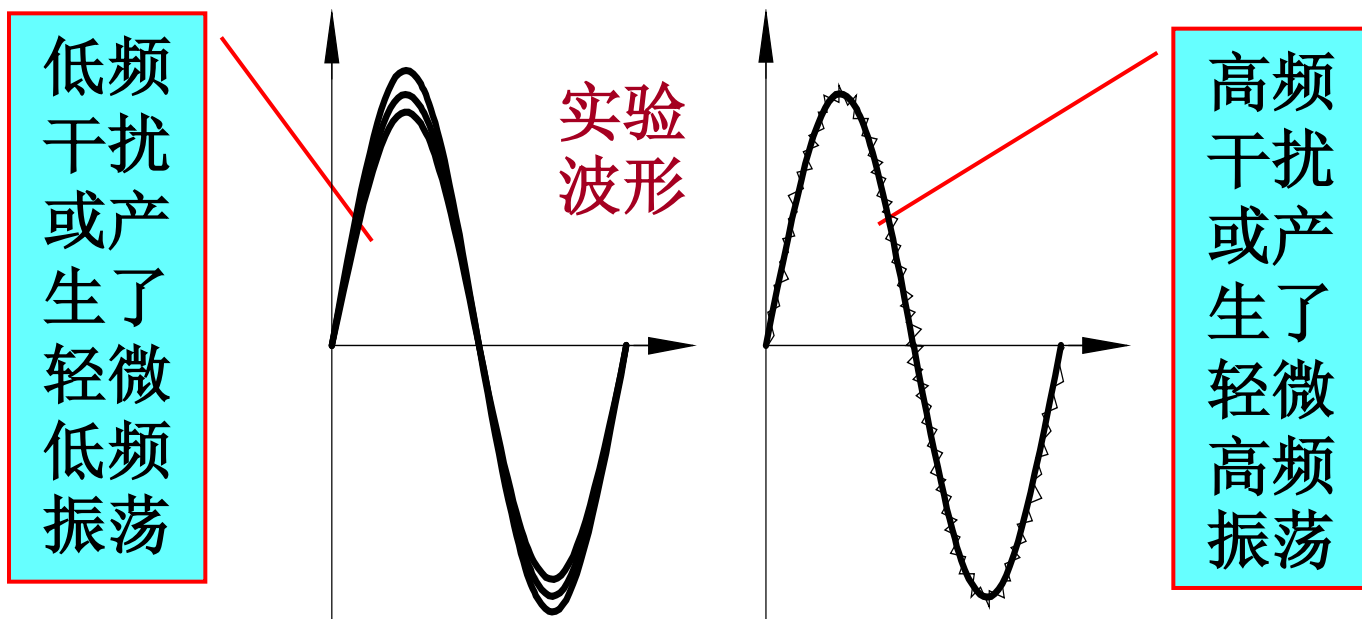
§ 2.5 负反馈放大电路的稳定性

- 一、自激振荡产生的原因及条件
- 二、负反馈放大电路稳定性的分析
- 三、负反馈放大电路稳定性的判断
- 四、消除自激振荡的方法

一、自激振荡产生的原因及条件

1. 现象：输入信号为0时，输出有一定幅值、一定频率的信号，称电路产生了自激振荡。

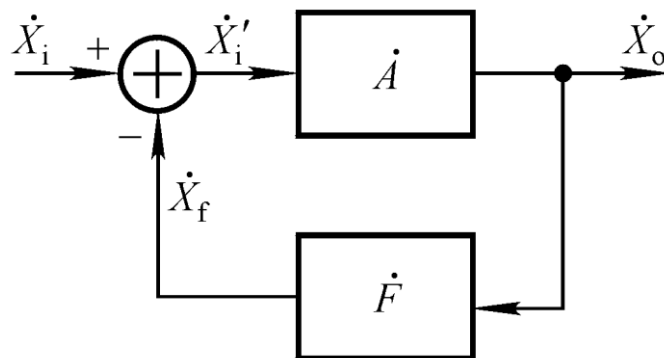
负反馈放大电路自激振荡的频率在低频段或高频段。



2. 原因

在低频段或高频段，若存在一个频率 f_0 ，且当 $f=f_0$ 时附加相移为 $\pm\pi$ ，则

$$|\dot{X}_i'| = |\dot{X}_i| + |\dot{X}_f|$$

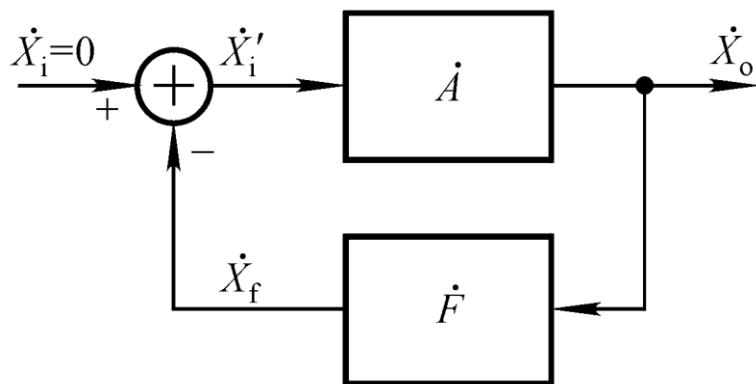


在电扰动下，如合闸通电，必含有频率为 f_0 的信号，对于 $f=f_0$ 的信号，产生正反馈过程

$$|\dot{X}_o| \uparrow \rightarrow |\dot{X}_f| \uparrow \rightarrow |\dot{X}_i'| \uparrow \rightarrow |\dot{X}_o| \uparrow \uparrow$$

输出量逐渐增大，直至达到动态平衡，电路产生了自激振荡。

3. 自激振荡的条件



$$\dot{X}_i = 0 \text{ 时, } \dot{X}_f \text{ 维持 } \dot{X}_o.$$
$$\dot{X}_o = -\dot{A}\dot{F}\dot{X}_o$$

幅值平衡条件

相位平衡条件

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



$$\begin{cases} |\dot{A}\dot{F}| = 1 \\ \varphi_A + \varphi_F = (2n+1)\pi \quad (n \text{ 为整数}) \end{cases}$$

由于电路通电后输出量有一个从小到大直至稳幅的过程，起振条件为

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

二、负反馈放大电路稳定性的分析

设反馈网络为电阻网络，放大电路为直接耦合形式。

①附加相移由放大电路决定；

②振荡只可能产生在高频段。

对于单管放大电路： $f \rightarrow \infty$ 时， $\varphi_A' \rightarrow -90^\circ, |\dot{A}| \rightarrow 0$

因没有满足相位条件的频率，故引入负反馈后不可能振荡。

对于两级放大电路： $f \rightarrow \infty$ 时， $\varphi_A' \rightarrow -180^\circ, |\dot{A}| \rightarrow 0$

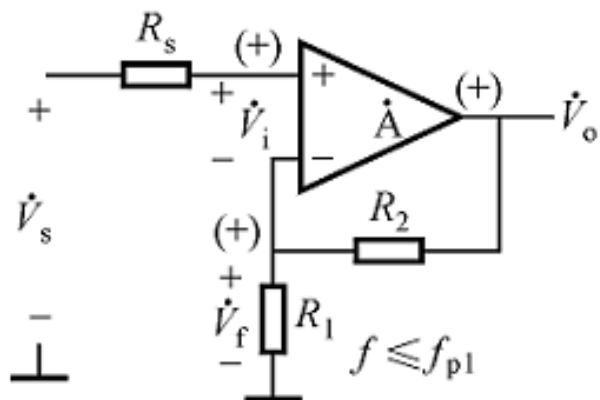
因没有满足幅值条件的频率，故引入负反馈后不可能振荡。

对于三级放大电路： $f \rightarrow \infty$ 时， $\varphi_A' \rightarrow -270^\circ, |\dot{A}| \rightarrow 0$

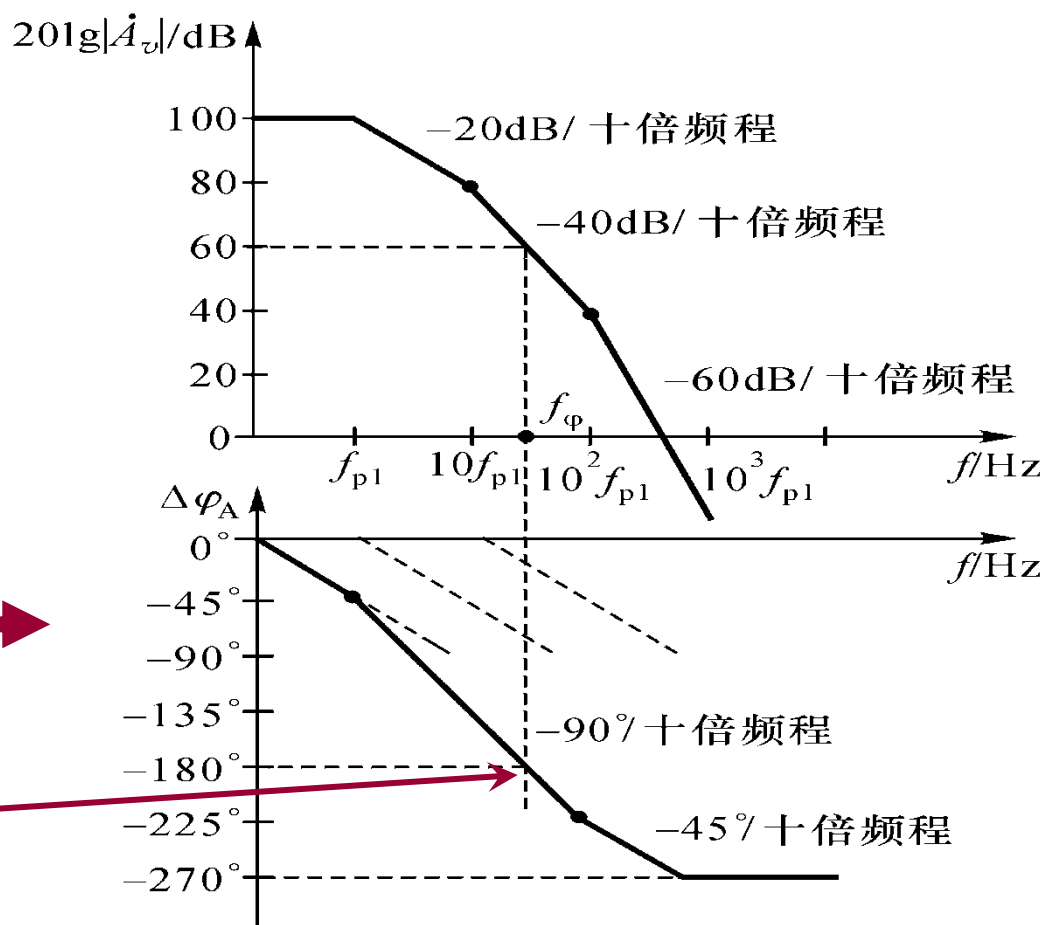
对于产生 -180° 附加相移的信号频率，有可能满足起振条件，故引入负反馈后可能振荡。

放大器产生自激振荡原理说明

电压串联负反馈放大器频率特性：



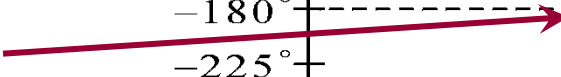
$$\dot{A}_v = \frac{10^5}{(1 + j \frac{f}{f_{p1}})(1 + j \frac{f}{10f_{p1}})(1 + j \frac{f}{10^2 f_{p1}})}$$

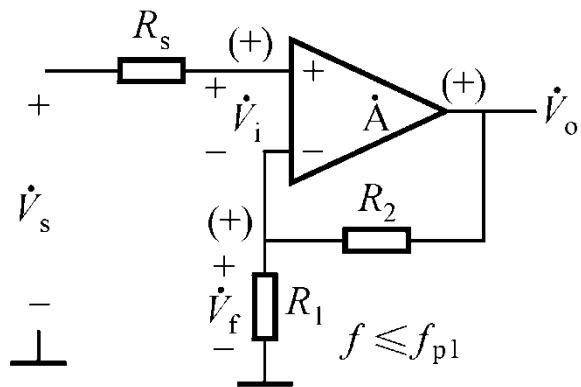


三级放大器的开环频率特性曲线

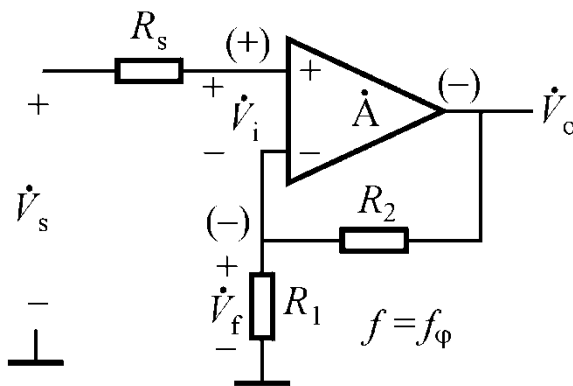


输出电压相位滞后 180°





(a)



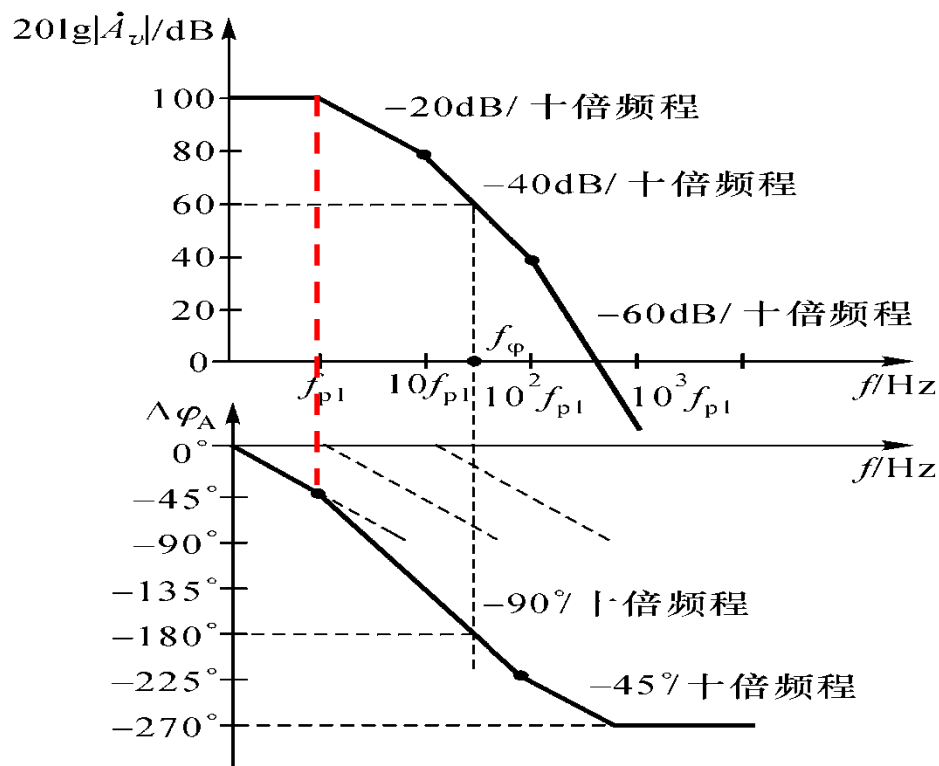
(b)

(a) 放大器在通频带以内是负反馈;

(b) 在通频带以外的某一频率上,

原负反馈已变成了正反馈;

结果: 导致放大器工作不稳定, 可能自激。



什么样的放大电路引入负反馈后容易产生自激振荡？

三级或三级以上放大电路引入负反馈后有可能产生高频振荡；同理，耦合电容、旁路电容等为三个或三个以上的放大电路，引入负反馈后有可能产生低频振荡。

环路放大倍数 AF 越大，越容易满足起振条件，闭环后越容易产生自激振荡。

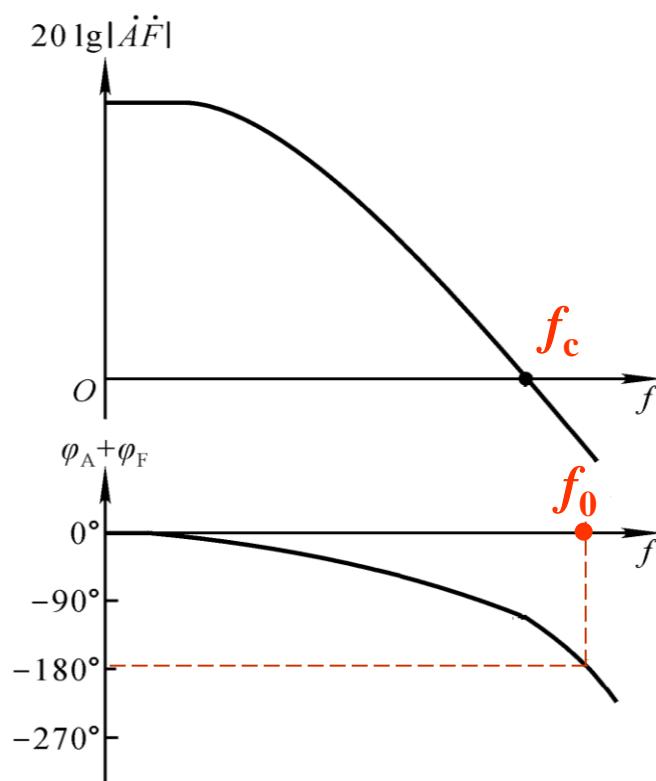
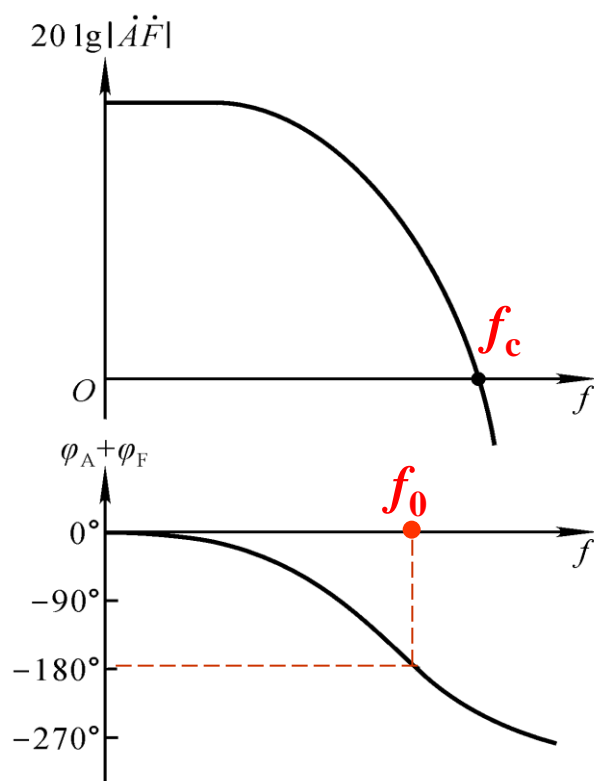
放大电路的级数越多，耦合电容、旁路电容越多，引入的负反馈越深，产生自激振荡的可能性越大。

三、负反馈放大电路稳定性的判断

已知环路增益的频率特性来判断闭环后电路的稳定性。

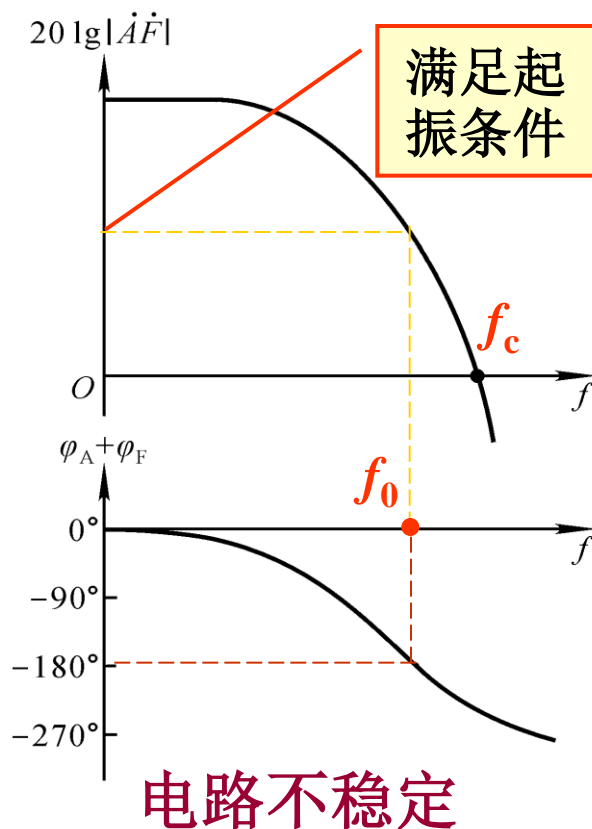
使环路增益下降到0dB的频率，记作 f_c ；

使 $\varphi_A + \varphi_F = (2n+1)\pi$ 的频率，记作 f_0 。

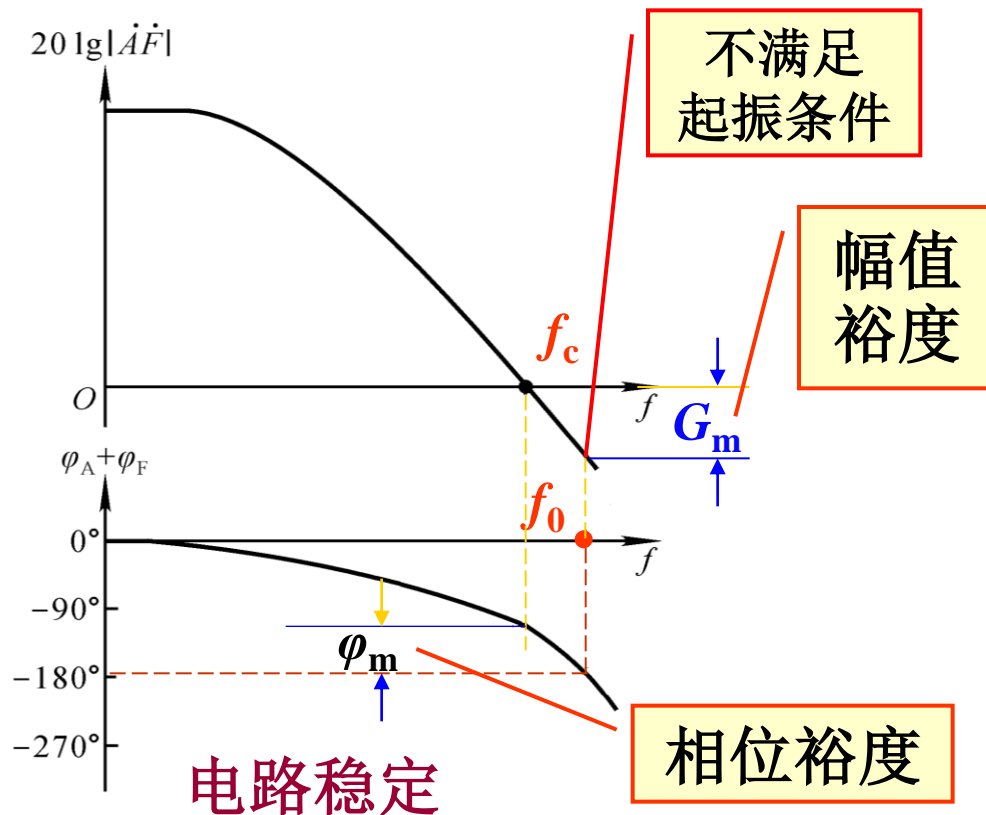


稳定性的判断

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

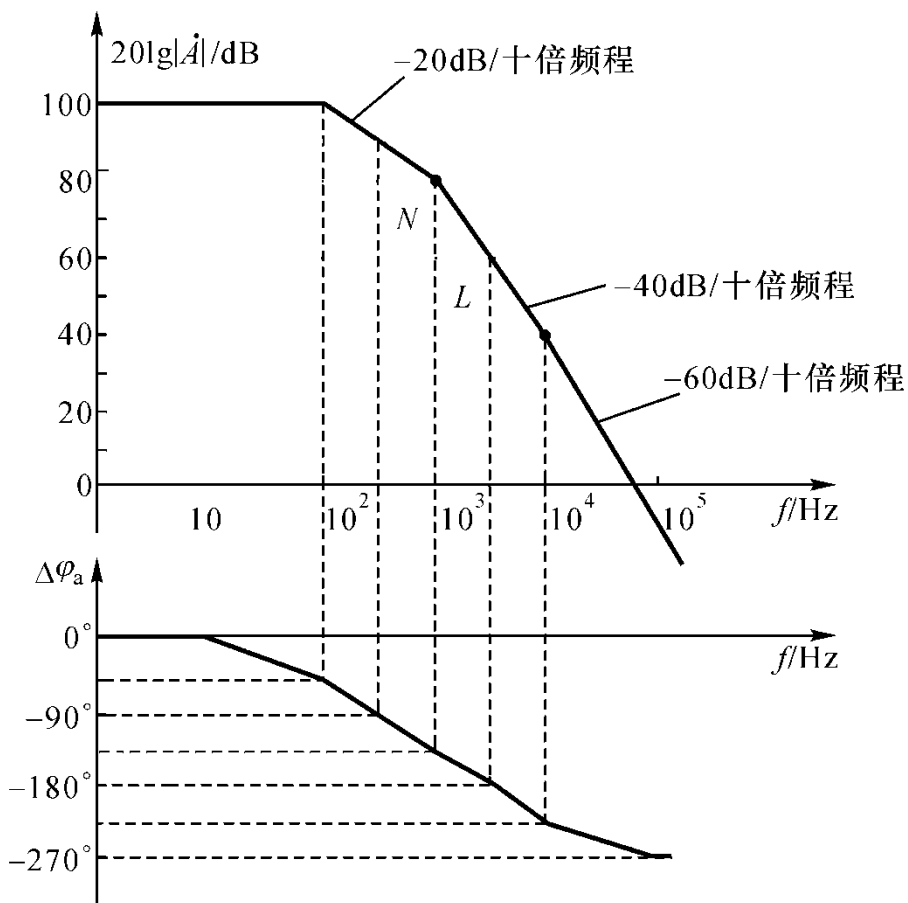


当 $G_m \leq -10\text{dB}$ 且 $\varphi_m > 45^\circ$ ，才具有可靠的稳定性。

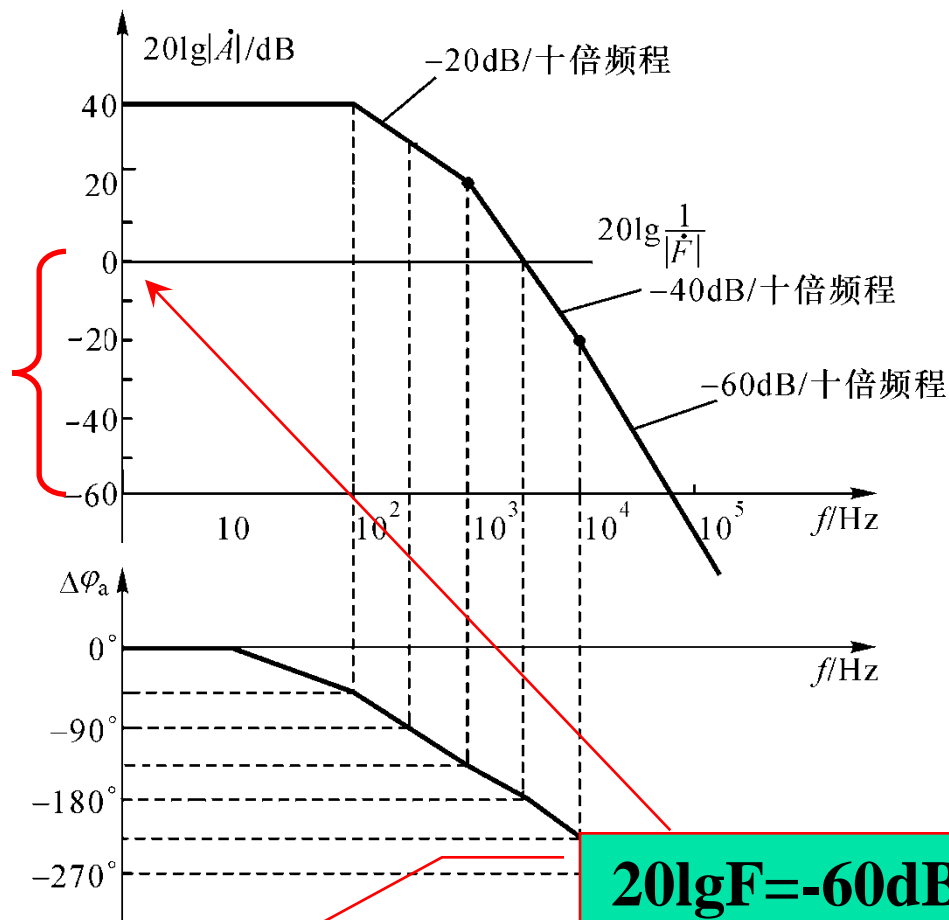


$f_0 < f_c$ ，电路不稳定，会产生自激振荡； $f_0 > f_c$ ，电路稳定，不会产生自激振荡。

从开环特性波特图来判断负反馈放大电路稳定性



$$20\lg|\dot{A}_v|$$



$$20\lg F = -60\text{dB}$$

$$F = 10^{-3}$$

$$20\lg|\dot{A}_v F|$$

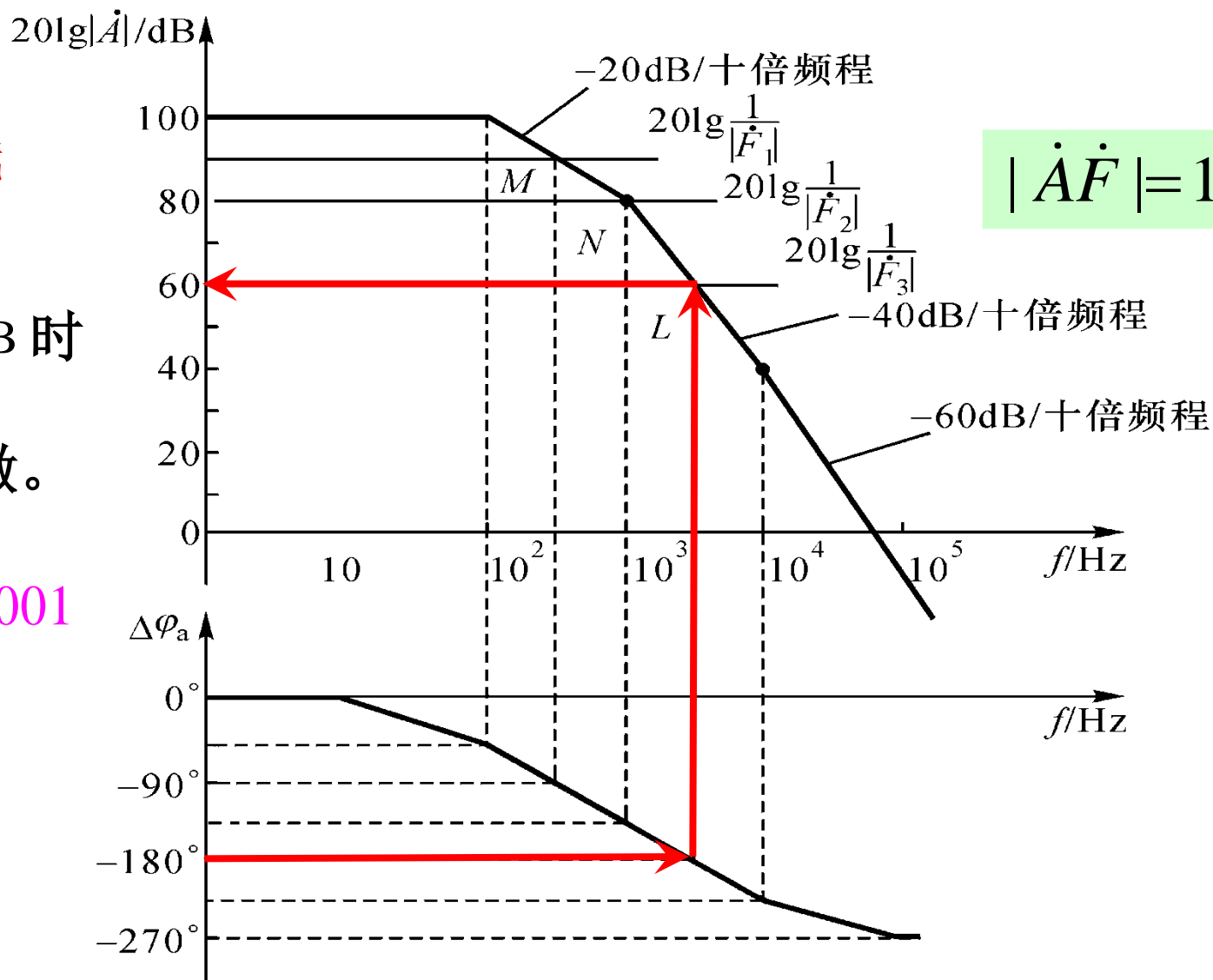
【例1】某负反馈放大电路的开环幅频和相频特性曲线如图。设反馈网络由纯电阻构成，为防止自激振荡， $|\dot{F}|$ 必须小于多少？

解：作反馈线

$$20\lg \frac{1}{|\dot{F}|} > 60\text{dB 时}$$

不会产生自激。

$|\dot{F}|$ 应小于 0.001



这说明，在一定的开环增益下，反馈越深，越容易自激。
说明负反馈对性能改善和稳定性应合理考虑。

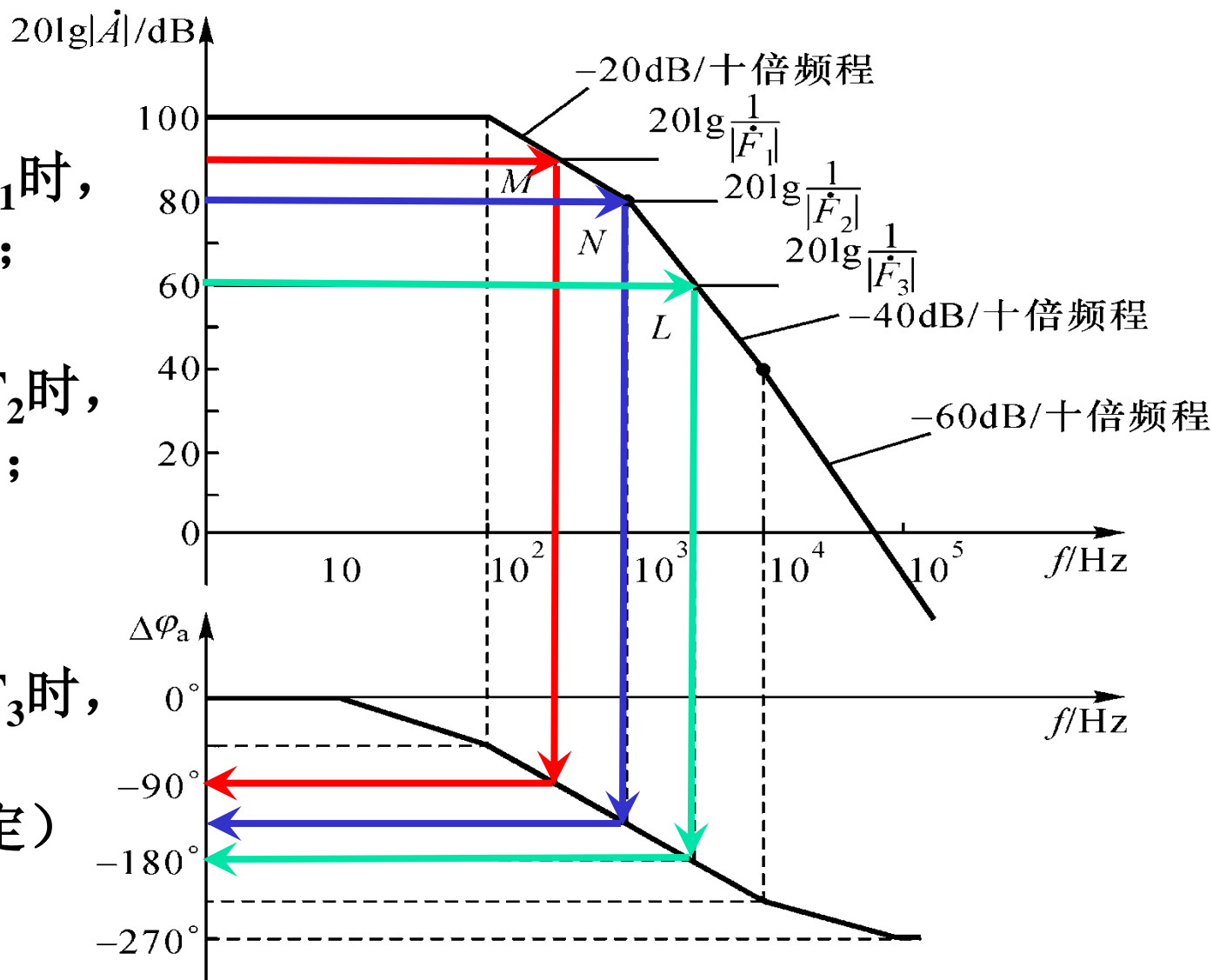
当反馈系数为 F_1 时，
相位裕度为 90° ；

当反馈系数为 F_2 时，
相位裕度为 45° ；

$$F_2 = \frac{1}{10000}$$

当反馈系数为 F_3 时，
相位裕度为 0° ；
(临界，不稳定)

$$F_3 = \frac{1}{1000}$$

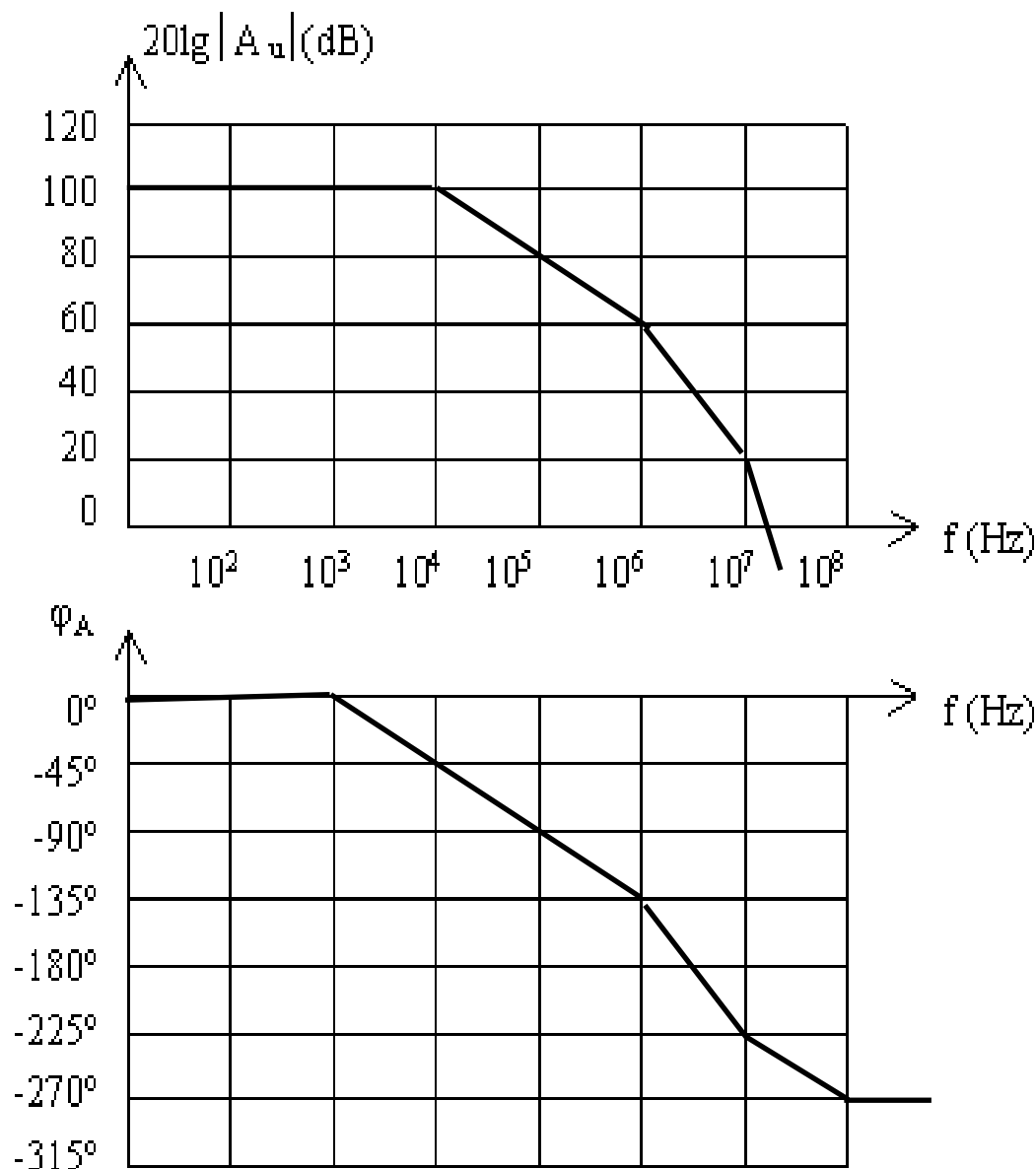


【例 2】 负反馈放大器的开环增益波特图

1) 写出放大器的开环电压增益表达式；

2) 当所加负反馈系数 $F = 0.1$ 时，判断放大电路闭环时能否稳定工作；

3) 若要求留有 45° 的相位裕度，则所加的负反馈系数 F 应为多大？



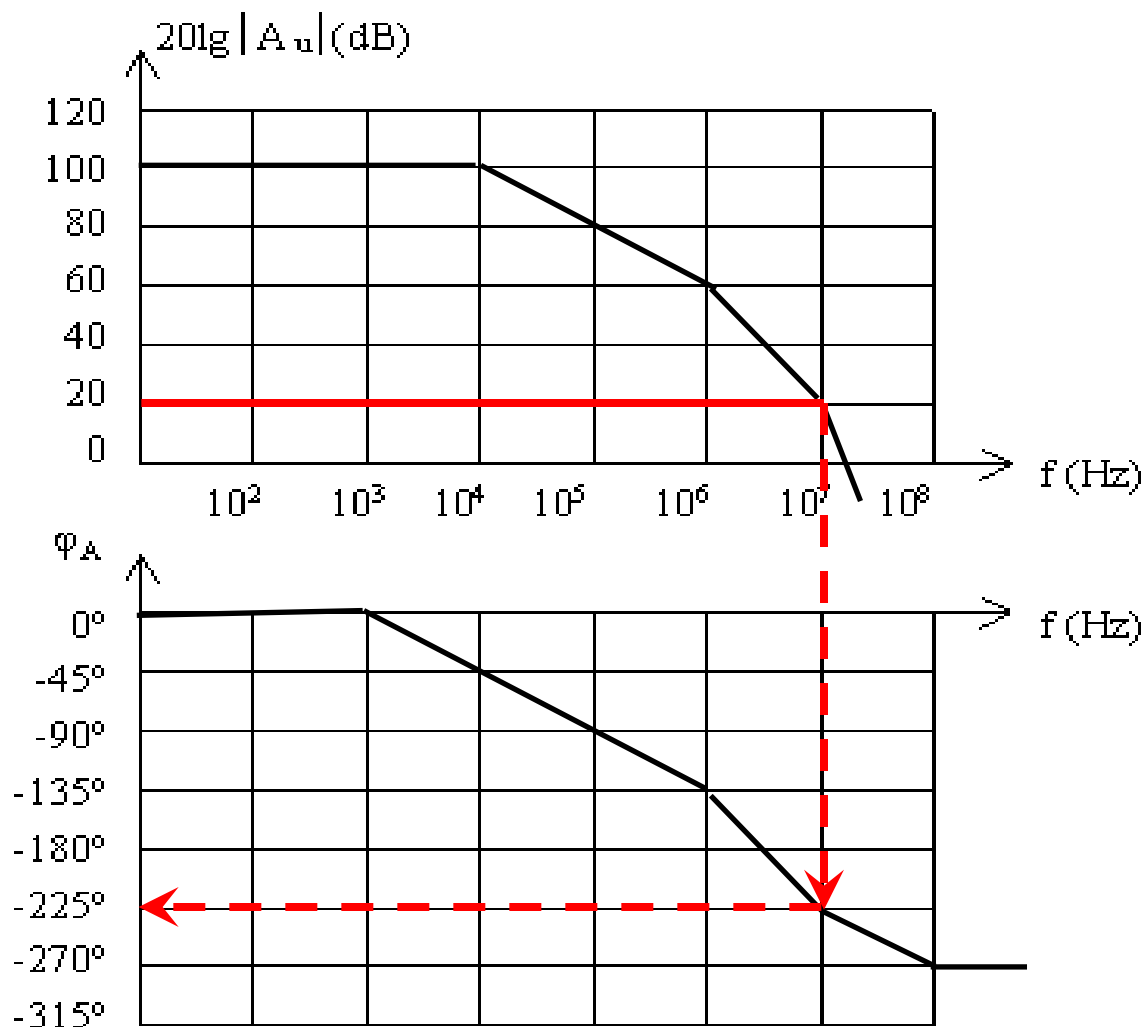
开环电压增益: $\dot{A}_v = \frac{10^5}{(1 + j \frac{f}{10^4})(1 + j \frac{f}{10^6})(1 + j \frac{f}{10^7})}$

负反馈系数 $F = 0.1$ 时,

反馈线 $20\lg \left| \frac{1}{F} \right| = 20$

对应附加相移为 -225°

不能稳定工作

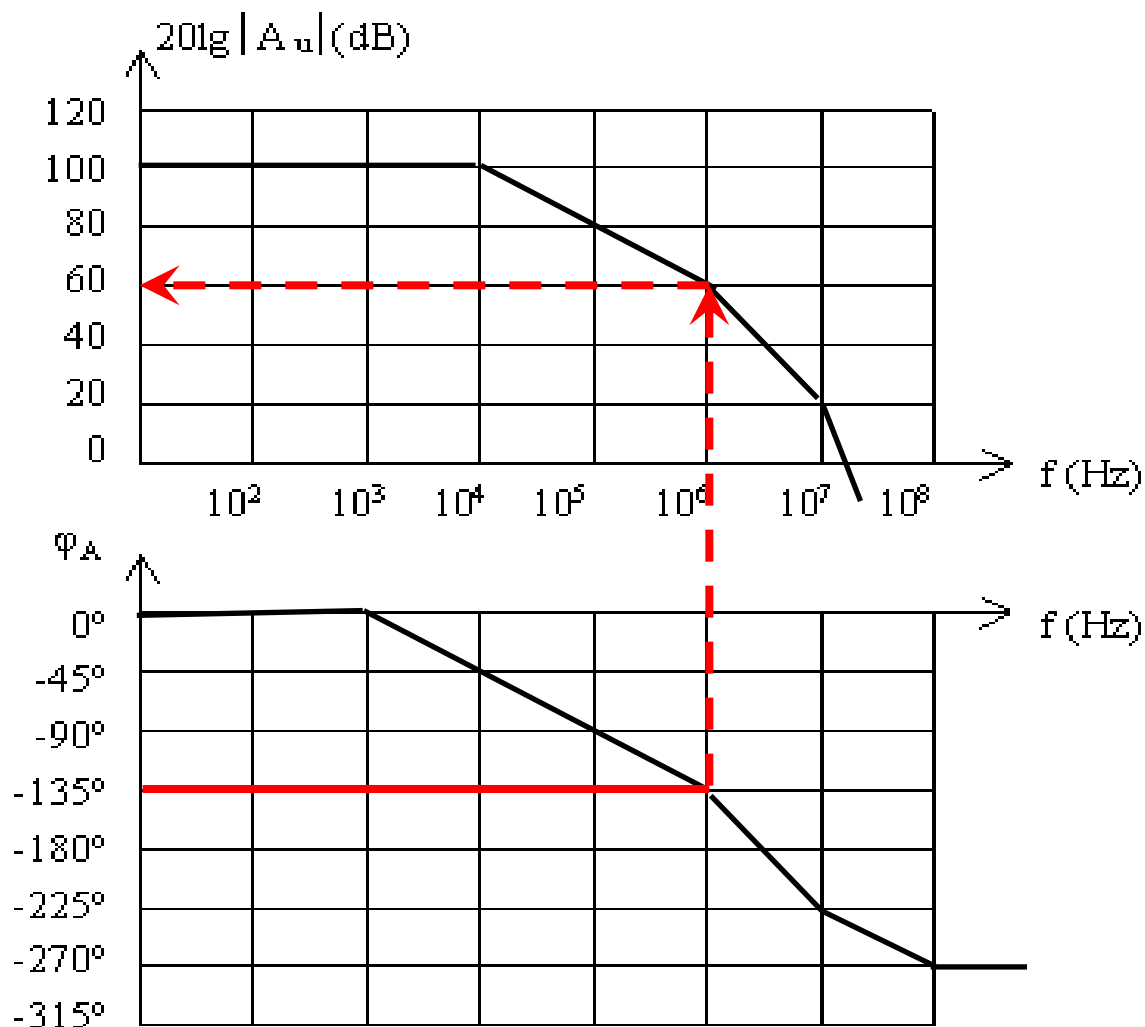


若要求留有45°的相位裕度，则所加的负反馈系数 F 应为多大？

对应附加相移为 -135°

反馈线 $20\lg\left|\frac{1}{F}\right| = 60$

负反馈系数 $F = 0.001$

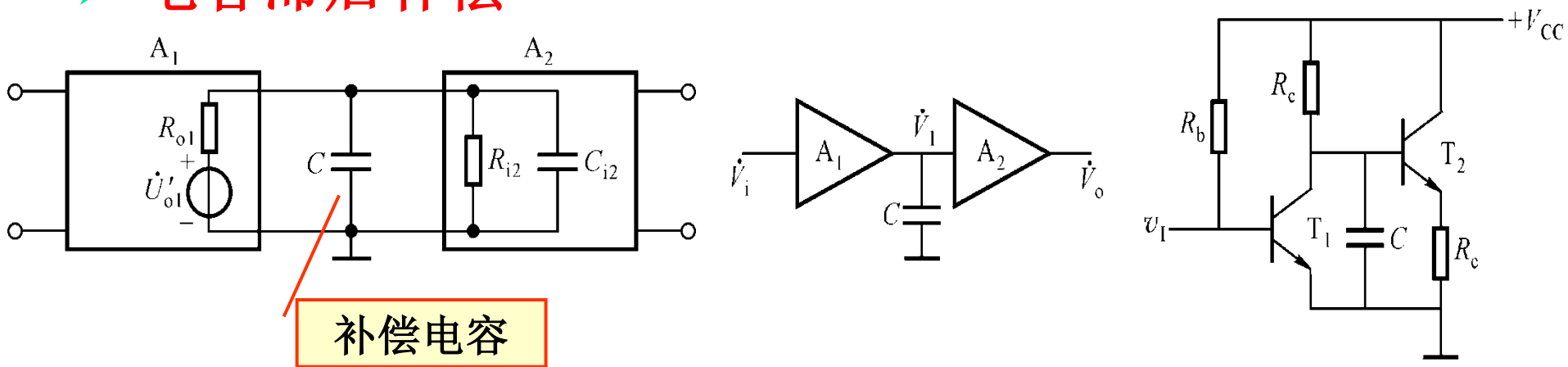


四、消除自激振荡的方法

减小反馈系数法：简单可行，但使反馈深度下降，不利于放大电路其它性能指标的改善。

相位补偿法（频率补偿法）：在反馈放大电路的适当处加入RC网络，改变环路增益的频率响应，使反馈放大电路在满足增益裕度和相位裕度的前提下，能获得较大的环路增益。

➤ 电容滞后补偿



通常将电容接在时间常数最大的回路中。
补偿后通频带变窄，又称**窄带补偿**。

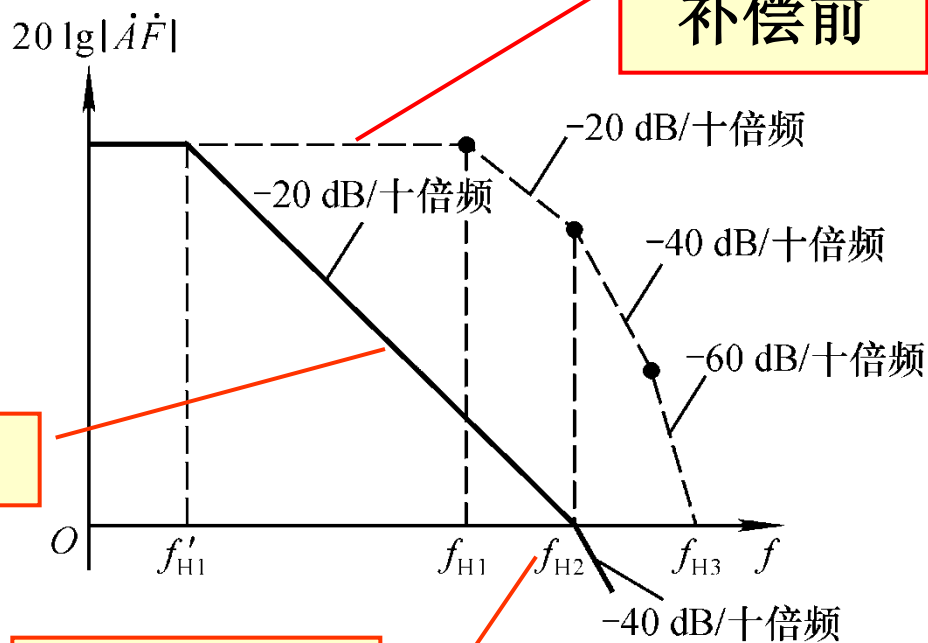
简单滞后补偿

$$\dot{A}\dot{F} = \frac{\dot{A}_m \dot{F}_m}{(1 + j\frac{f}{f_{H1}})(1 + j\frac{f}{f_{H2}})(1 + j\frac{f}{f_{H3}})}$$

补偿后, 当 $f = f_{H2}$ 时, $20\lg|\dot{A}\dot{F}| = 0\text{dB}$ 。

补偿前

补偿后

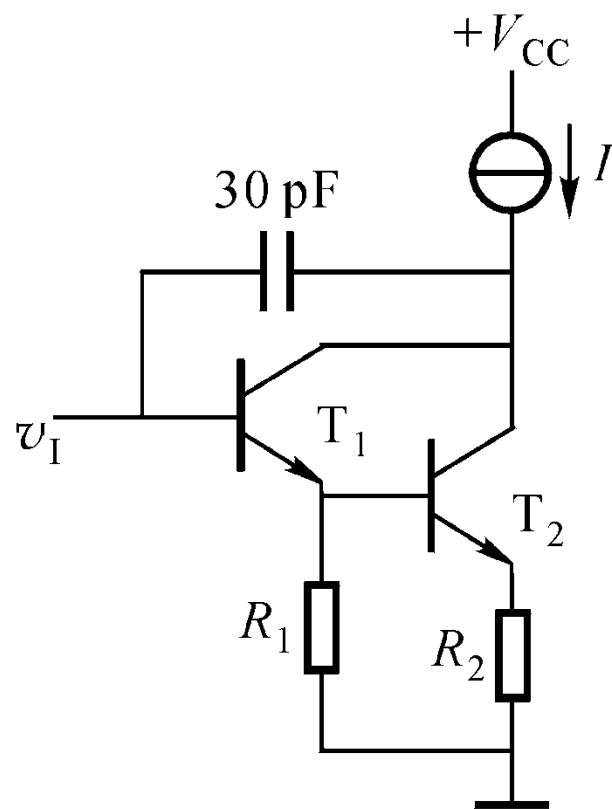
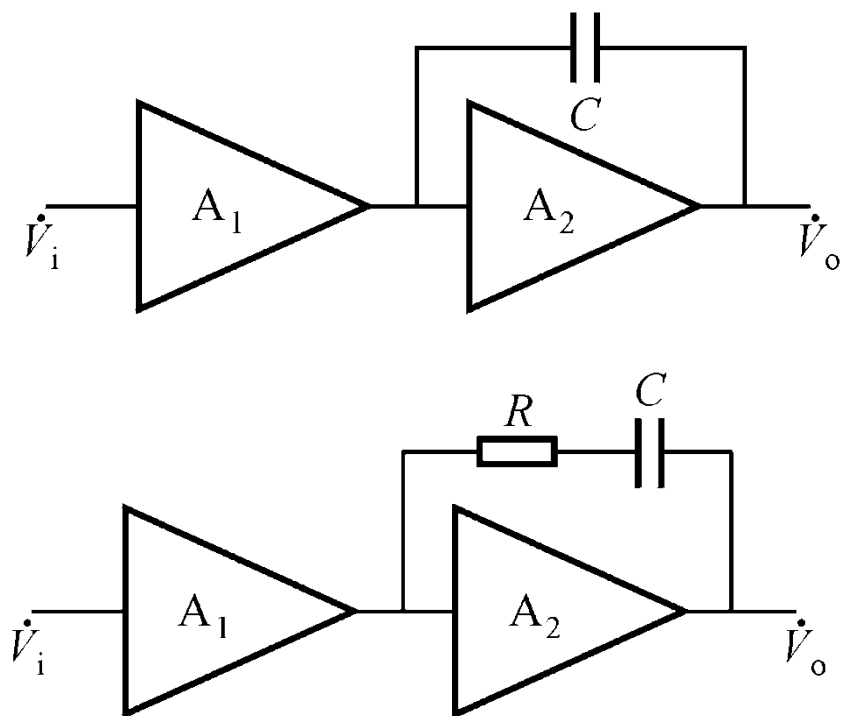


滞后补偿法是以频带变窄为代价来消除自激振荡的。

最大附加相移为 -135°

具有 45° 的相位裕度, 故电路稳定

➤ 密勒效应补偿

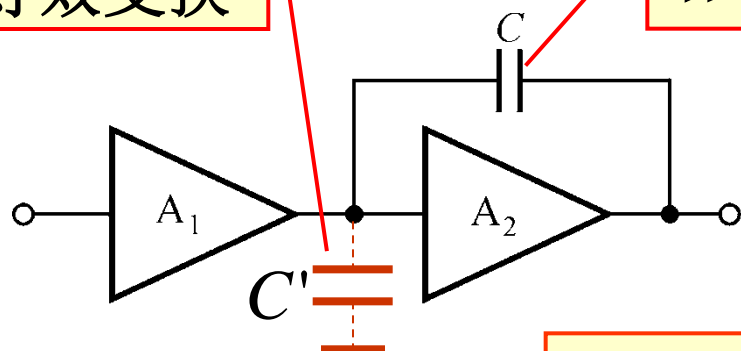


将补偿电容或RC补偿网络跨接在电路中，利用密勒效应可以达到增大电容的作用，因此补偿电容可以较小。

密勒补偿

等效变换

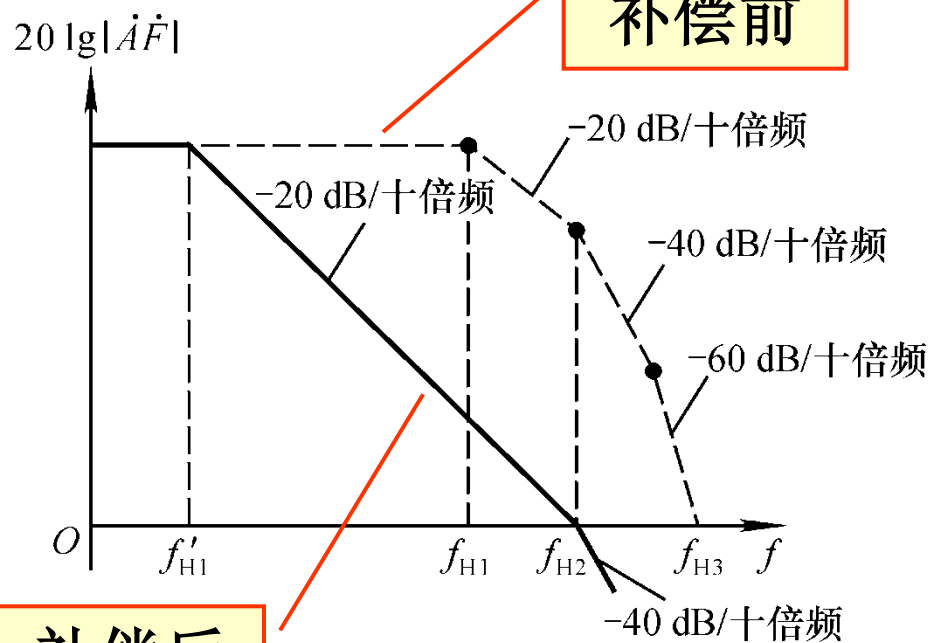
补偿电容



在最低的上限频率所在放大电路中加补偿电容。

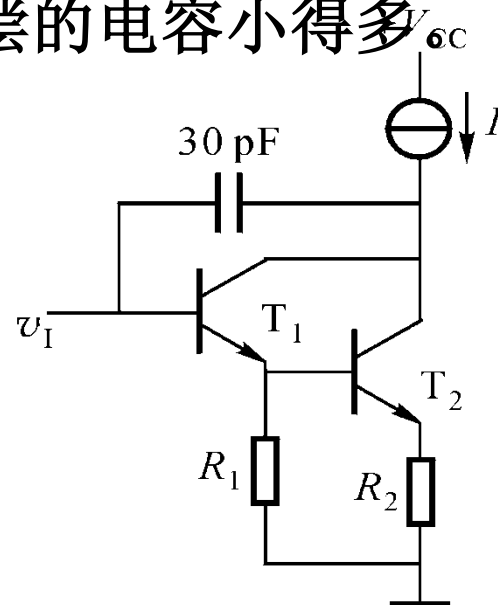
$$C' = (1 + |k|)C$$

补偿前

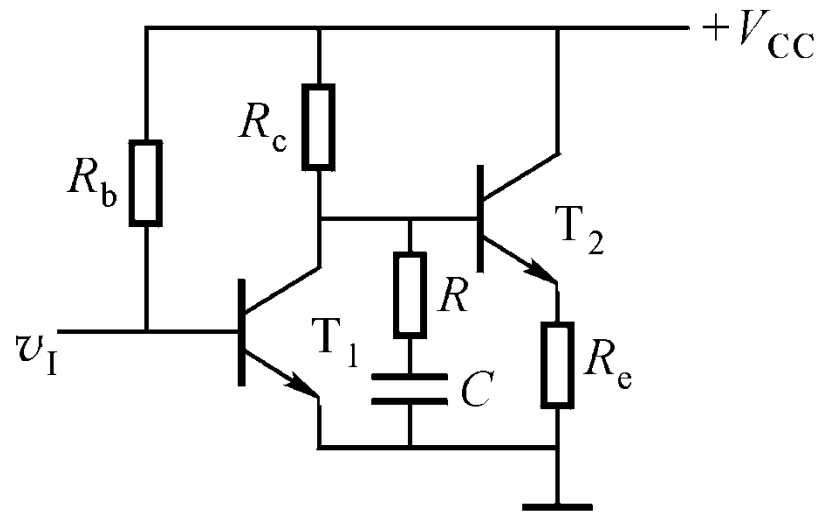
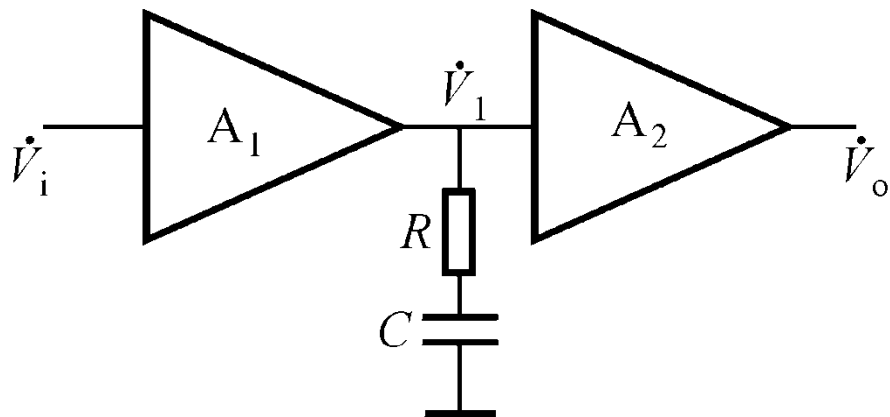


补偿后

在获得同样补偿的情况下，补偿电容比简单滞后补偿的电容小得多

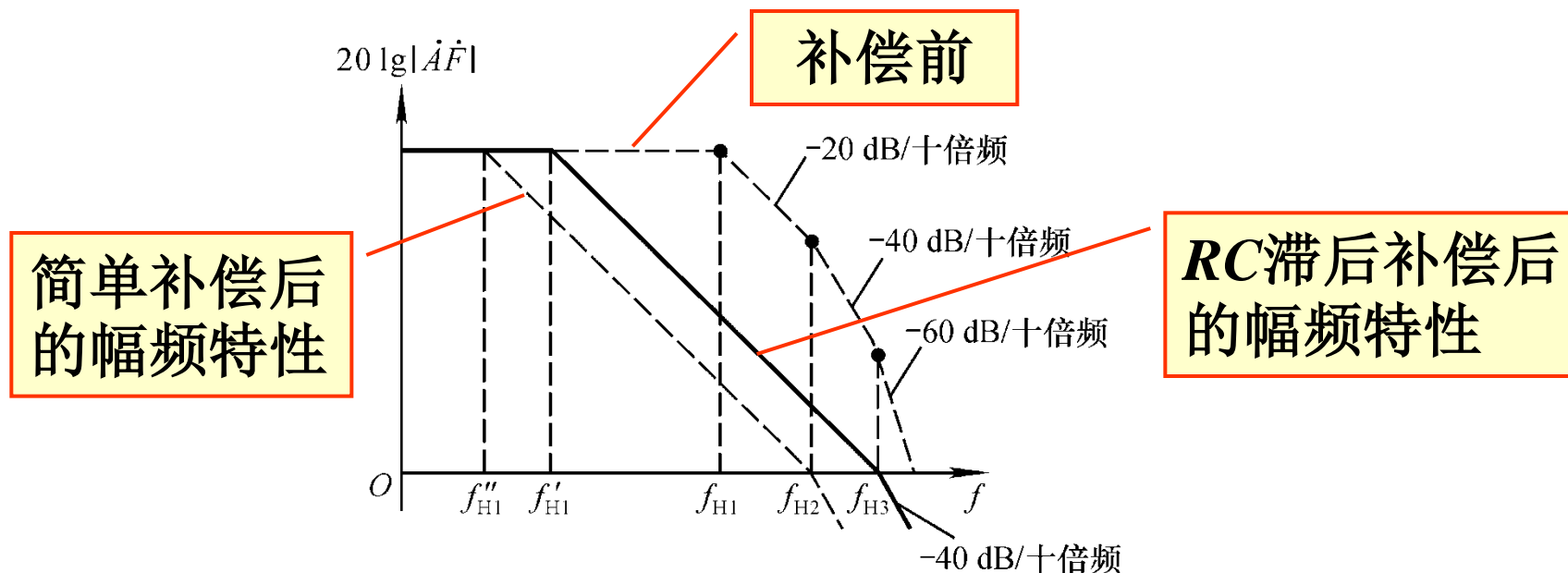


➤ RC滞后补偿



通常将RC网络接在时间常数最大的回路中。补偿后的频带比电容补偿时损失小一些。

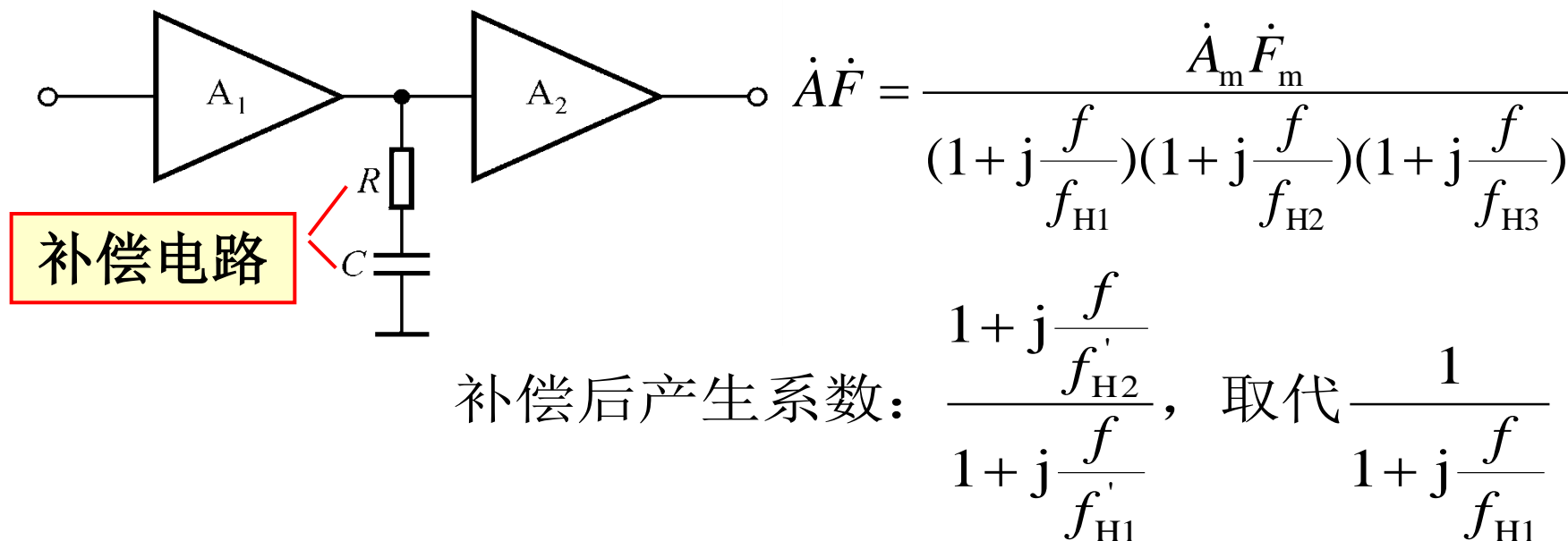
RC 滞后补偿与简单滞后补偿比较



滞后补偿法消振均以频带变窄为代价，RC 滞后补偿较简单电容补偿使频带的变化小些。

为使消振后频带变化更小，可考虑采用超前补偿的方法。

RC 滞后补偿： 在最低的上限频率所在回路加补偿。

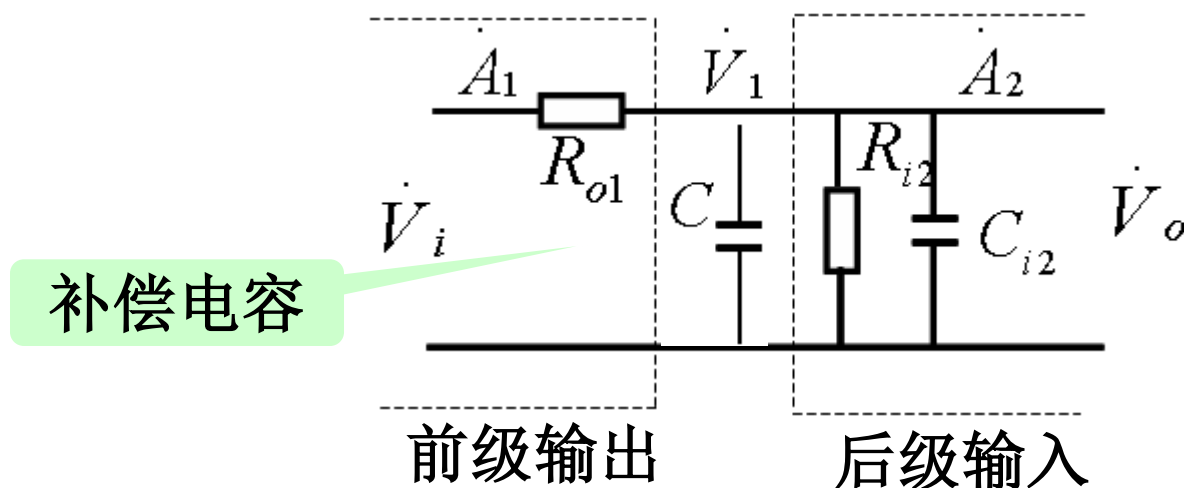


$$\text{若 } f'_{H2} = f_{H2}, \text{ 则 } \dot{A}\dot{F} = \frac{\dot{A}_m \dot{F}_m}{(1 + j\frac{f}{f'_{H1}})(1 + j\frac{f}{f_{H3}})}$$

上式表明，最大附加相移为 -180° ，不满足起振条件，闭环后一定不会产生自激振荡，电路稳定。

将补偿电容连接在前一级的输出电阻和后一级的输入电阻都比较大的回路。

目的是使决定上限的截止频率下移。

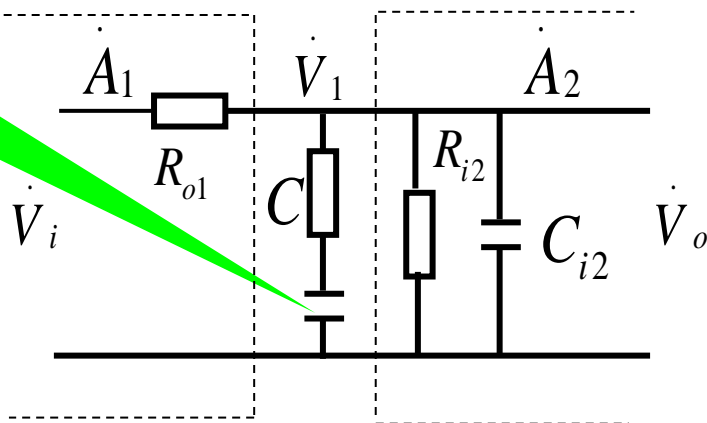


在未接补偿电容 C 前，其上限频率为：
$$f_p = \frac{1}{2\pi(R_{o1} // R_{i2})C_{i2}}$$

接入补偿电容 C 后，上限频率变为：
$$f_p' = \frac{1}{2\pi(R_{o1} // R_{i2})(C_{i2} + C)}$$

在同样相位裕度条件下，补偿后可使 AF 增加，即反馈系数 F 增加，性能改善

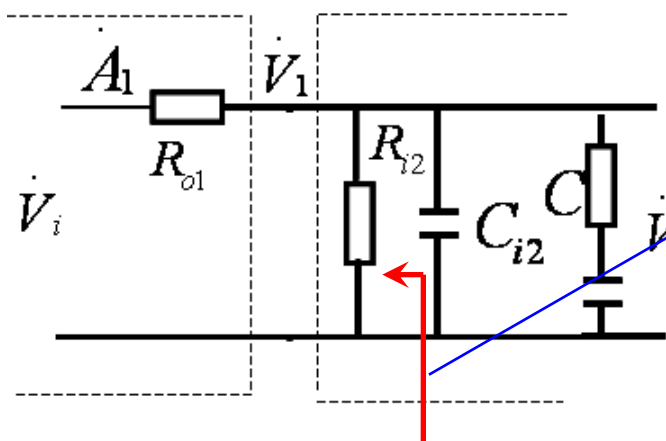
阻容补偿 等效电路



$$R \ll R_{o1} // R_{i2} \quad C \gg C_{i2}$$

$$\dot{V}_1 = \frac{R_{i2}}{R_{o1} + R_{i2}} \dot{V}_i$$

$$R' = R_{o1} // R_{i2}$$



$$\dot{V}_o = \frac{R + \frac{1}{j\omega C}}{R' + R + \frac{1}{j\omega C}} \dot{V}_1 = \frac{1 + j \frac{f}{f'_{H2}}}{1 + j \frac{f}{f'_{H1}}} \dot{V}_1$$

在未接补偿 RC 前，其上限频率为： $f_p = \frac{1}{2\pi(R_{o1} // R_{i2})C_{i2}}$

接入 RC 后，若取 $f'_{H2} = f_p$ ，上限频率： $f'_P = \frac{1}{2\pi(R_{o1} // R_{i2} + R)C}$

简单滞后补偿 C $f'_P = \frac{1}{2\pi(R_{o1} // R_{i2})(C_{i2} + C)}$

作业

- **2.1** 判断反馈
- **2.2~7** 讨论
- **2.9, 11, 12, 13, 14** 运放电路
- **2.16, 17** 稳定性

小结

- 多级放大电路频响特性、上下限频率、带宽
- 频率特性与波特图
- 由频率特性判定放大器的稳定性（负反馈放大器的稳定性条件、幅值裕度、相位裕度、开环增益波特图、反馈线、环路增益波特图）
- 开环增益、闭环增益、环路增益、自激
- （滞后）频率补偿