

电路分析与电子技术基础

负反馈放大电路

(2)

n 负反馈放大电路

ü 反馈是自动控制和自动调节中一个必不可少的环节；

无论工业控制、社会经济管理，还是人的机体调理，都存在着各种各样的反馈。

ü 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。

ü 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。

Ø 负反馈放大电路

✓ 反馈的基本概念与分类（2.1）

✓ 负反馈对放大电路性能的改善（2.2）

✓ 集成运放负反馈放大电路分析（2.3）

✓ 分立元件负反馈放大电路分析（2.4）

✓ 负反馈放大电路的稳定性（2.5）

✓ 反馈的基本概念与分类

ü 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，并且对放大器的输入量产生影响，从而使输出量得到自动调节。

ü 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；

将取样电量送回至放大器的输入回路，与输入信号进行比较求和。

ü 正反馈：引入反馈后，实际的输入信号大于原输入信号；

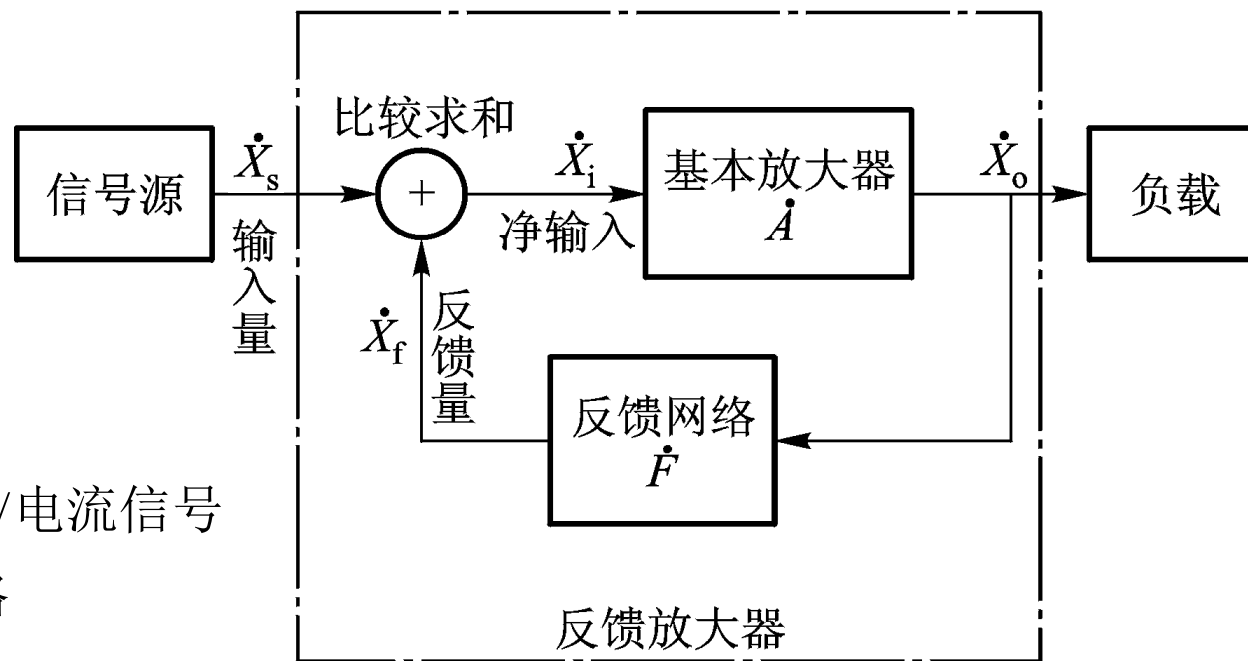
负反馈：引入反馈后，实际的输入信号小于原输入信号。

Ø 反馈的基本概念（反馈放大器）

ü 反馈放大器：放大器和反馈网络组成的一个闭环系统。

（开环放大器：未加反馈的放大器）

ü 反馈放大器框图

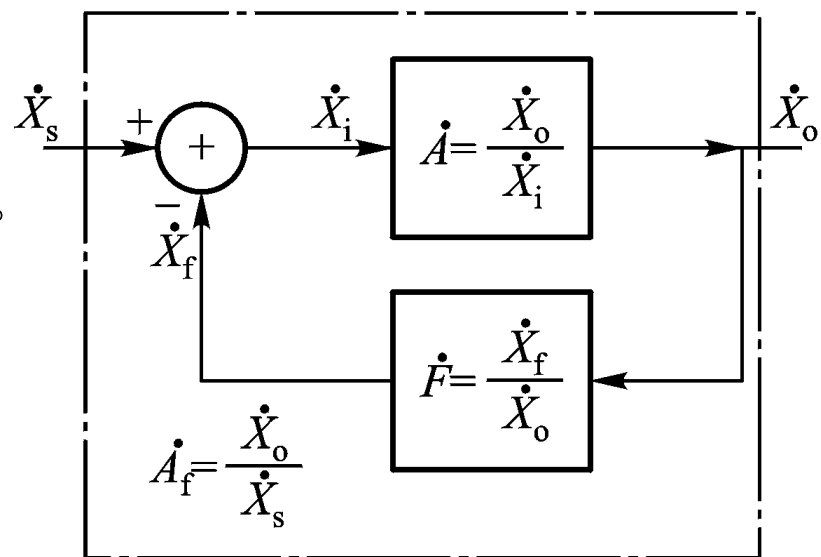


$\dot{X}_s, \dot{X}_f, \dot{X}_i$ 同为电压/电流信号

\dot{A}, \dot{F} 为单向传输网络

Ø 反馈的基本概念（增益函数）

ü 右图所示（负）反馈放大器增益框图。



ü 开环（基本）放大器增益： $A = \frac{X_o}{X_i}$

ü 反馈网络的反馈系数： $F = \frac{X_f}{X_o}$

ü 闭环放大器增益： $A_f = \frac{X_o}{X_s} = \frac{AX_i}{X_i + FX_o} = \frac{A}{1 + AF}$

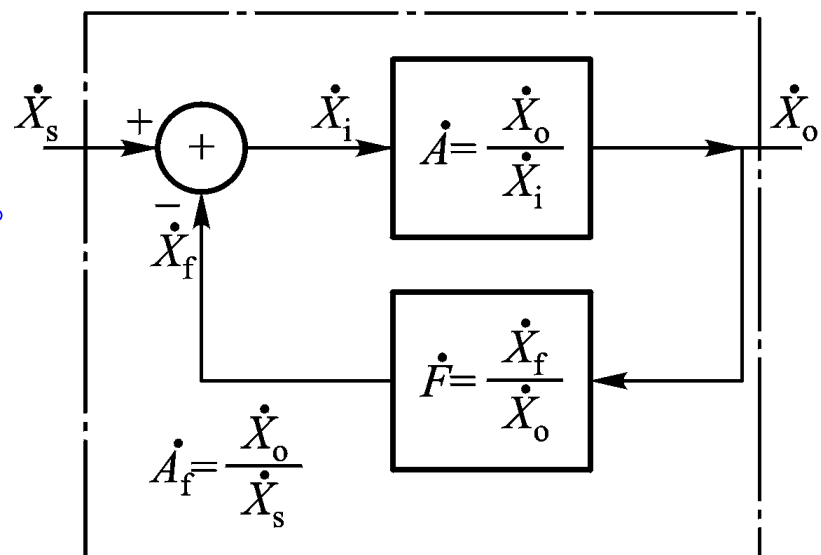
ü 回路（环路）增益： AF

ü 反馈深度： $1 + AF$

Ø 反馈的基本概念（反馈深度）

ü 右图所示（负）反馈放大器增益框图。

ü 反馈深度的大小，
反映了反馈对净输入量的影响程度。



ü 若 $|1 + AF| > 1$ ，则： $|A_f| < |A|$ （负反馈）

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

若 $|1 + AF| \gg 1$ ，则： $|A_f| \approx \frac{1}{F}$ （深度负反馈）

ü 若 $|1 + AF| < 1$ ，则： $|A_f| > |A|$ （正反馈）

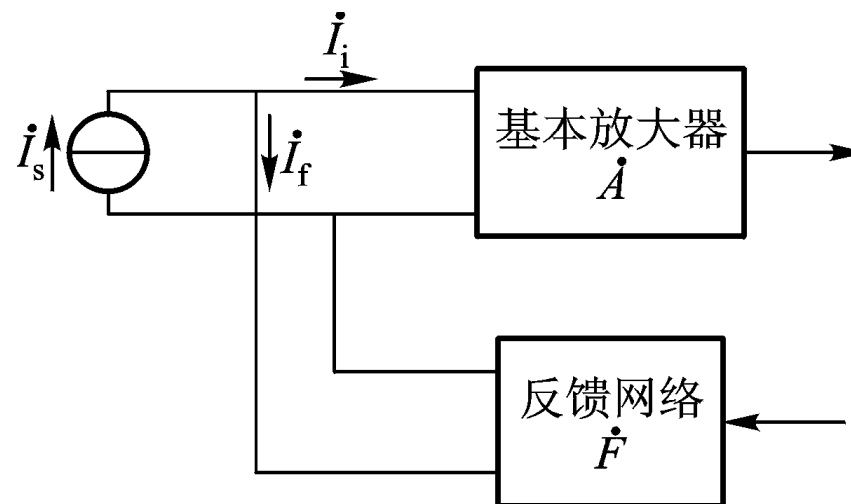
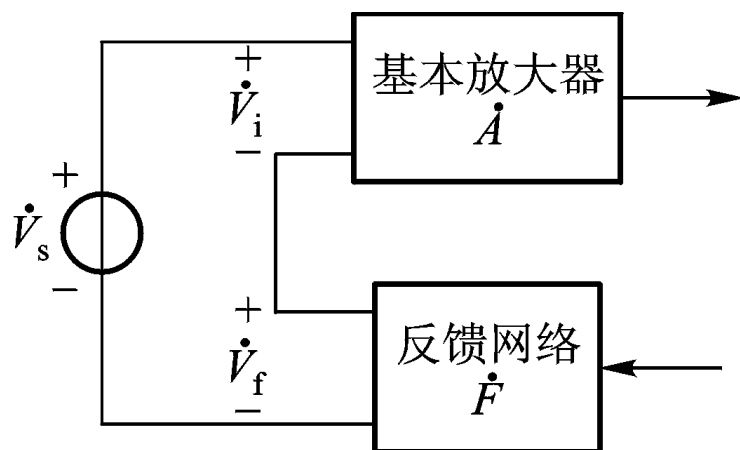
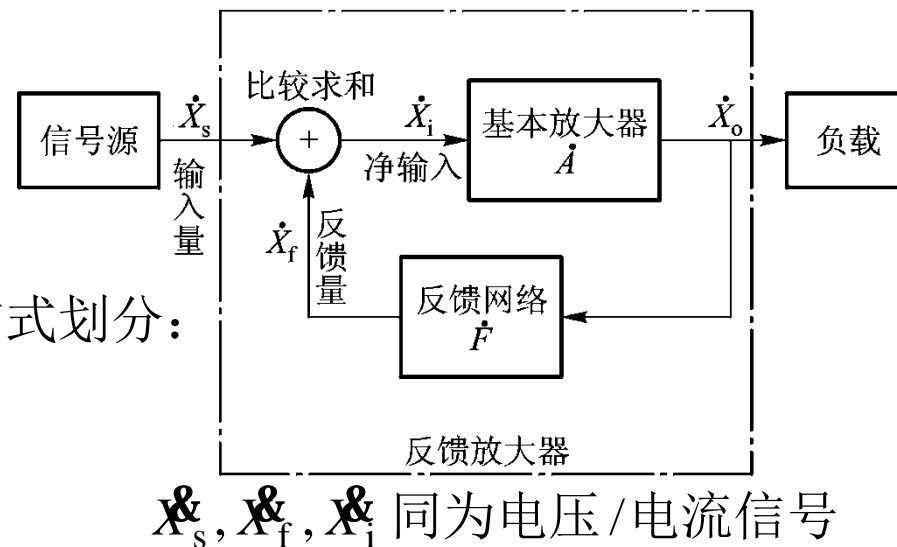
若 $|1 + AF| = 0$ ，则： $|A_f| \rightarrow \infty$ （自激振荡）

Ø 反馈的基本概念（分类）

ü 按反馈信号在输入回路中的叠加方式划分：

串联反馈：对电压比较求和；

并联反馈：对电流比较求和。

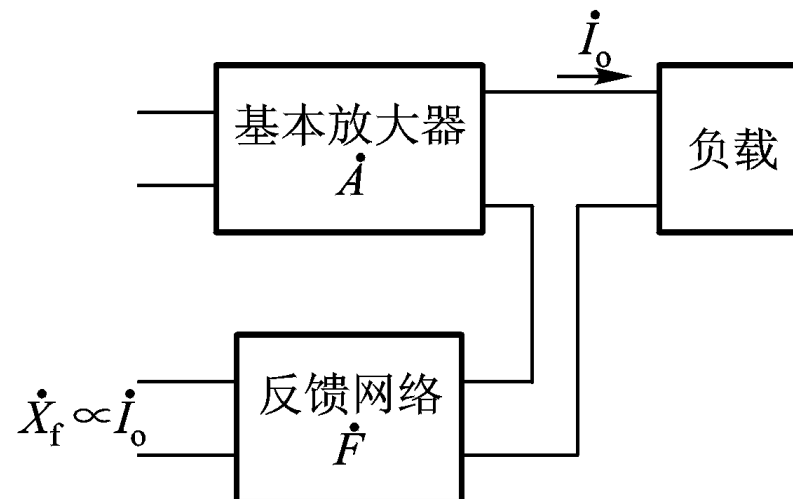
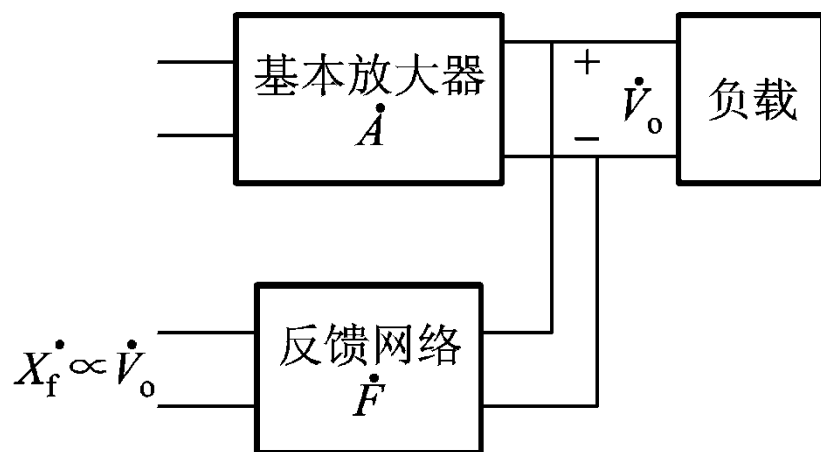
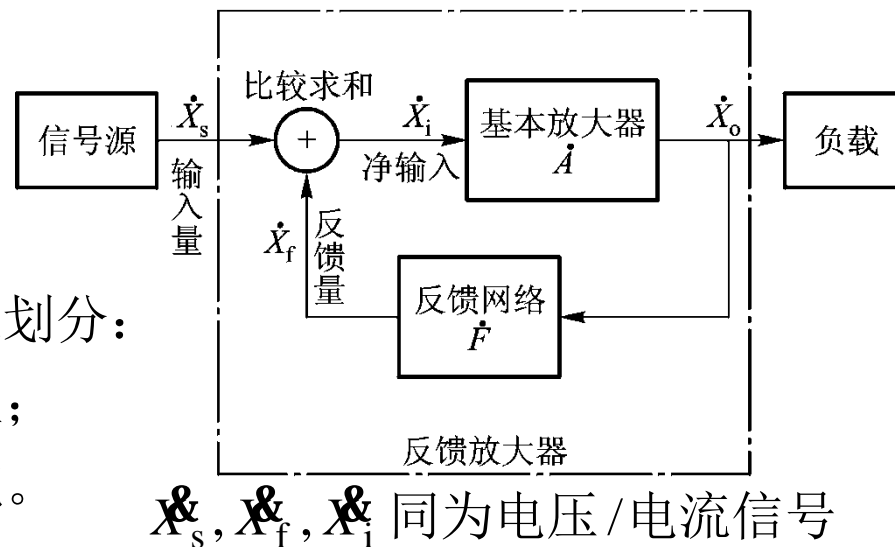


Ø 反馈的基本概念（分类）

ü 按反馈信号对输出回路的取样对象划分：

电压反馈：反馈量正比于输出电压；

电流反馈：反馈量正比于输出电流。



Ø 反馈的基本概念（分类）

ü 串联反馈、并联反馈；
电压反馈、电流反馈。

ü 按反馈的极性划分：

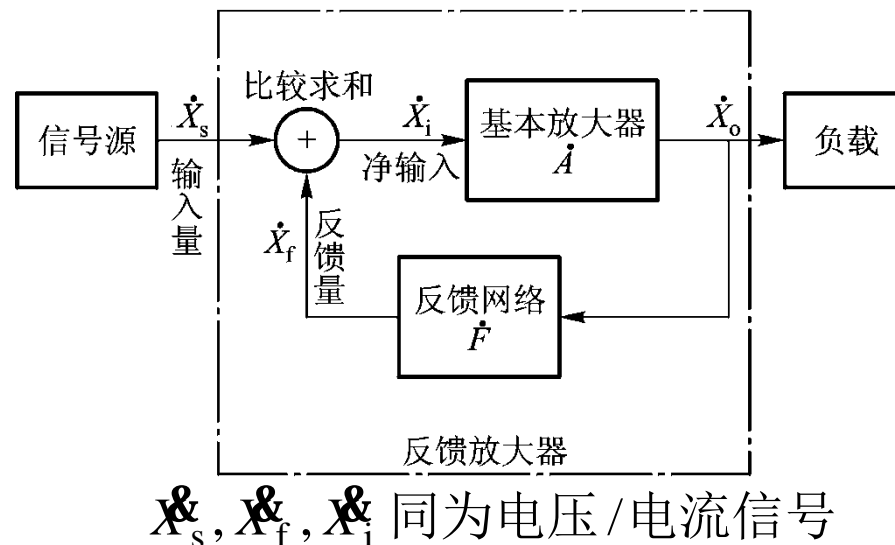
正反馈：引入反馈后，净输入量增加（闭环增益大于开环增益）；

负反馈：引入反馈后，净输入量减少（闭环增益小于开环增益）。

ü 按反馈量性质或反馈通路划分：

直流反馈：只包含直流反馈量（仅在直流通路中存在反馈）；

交流反馈：只包含交流反馈量（仅在交流通路中存在反馈）。

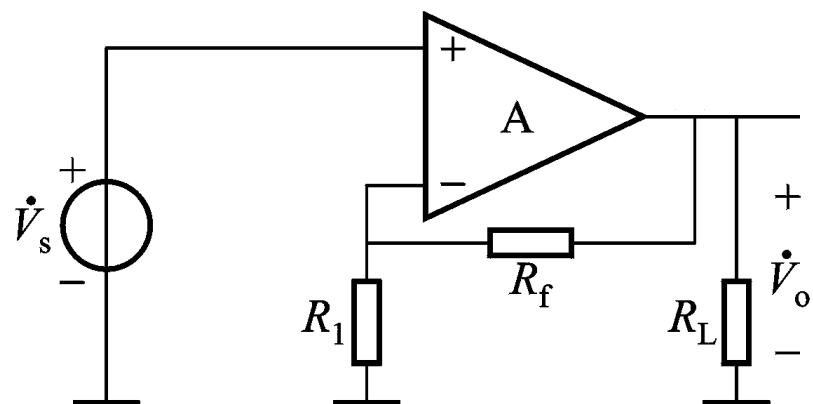


【例3.1-1】

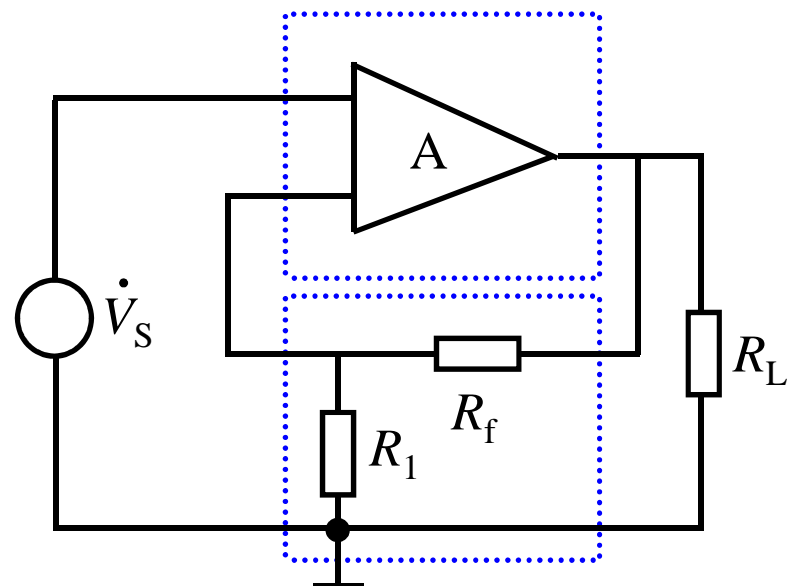
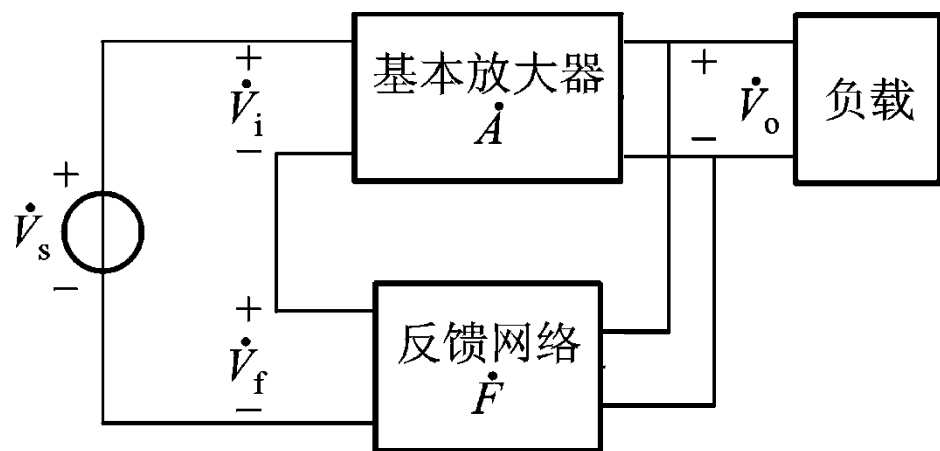
右图所示反馈放大电路。

判断反馈类型。

（串/并、电压/电流、正/负）



解：电压串联（负反馈）



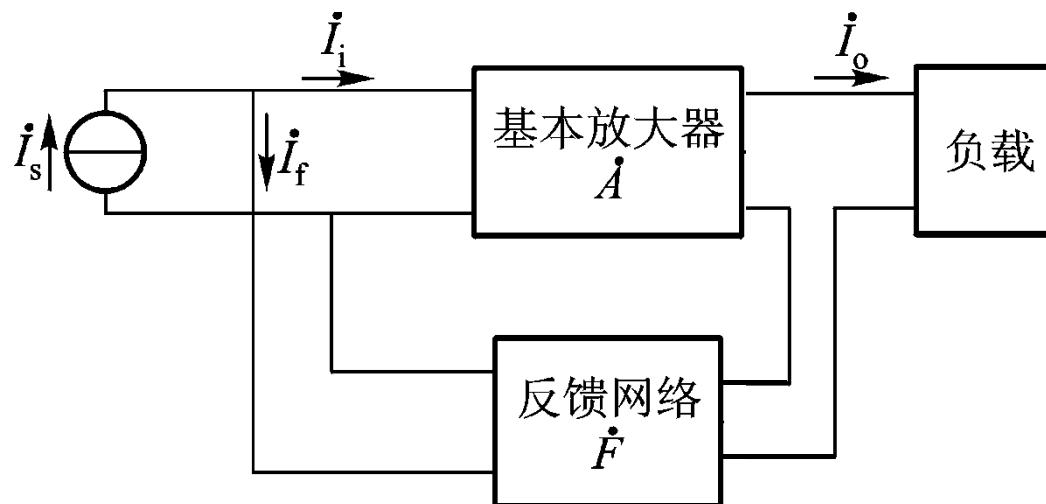
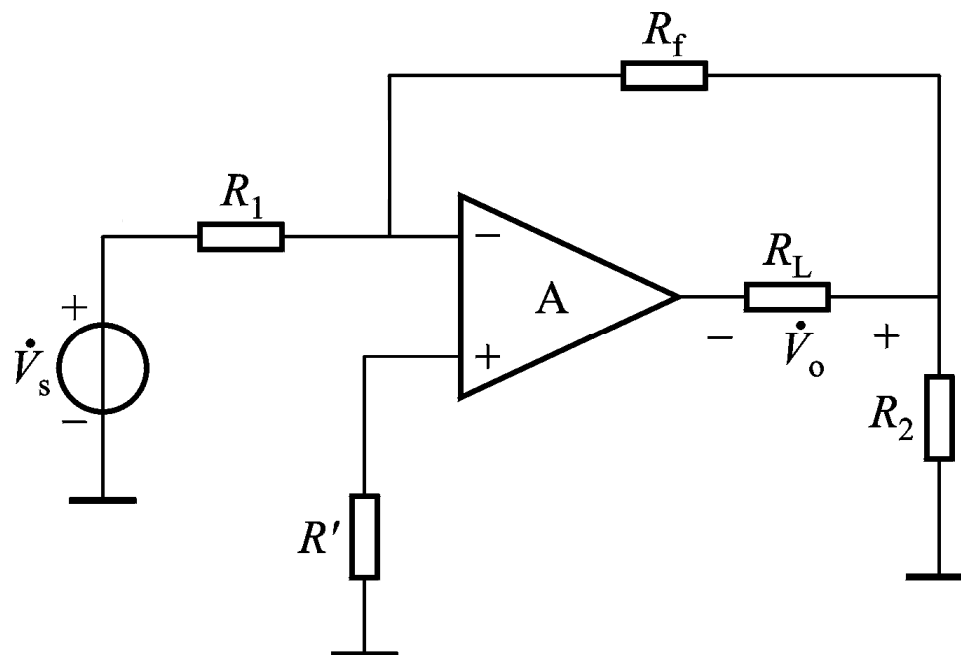
【例3.1-2】

右图所示反馈放大电路。

判断反馈类型。

（串/并、电压/电流、正/负）

解：电流并联（负反馈）



Ø 反馈的基本概念（分类判断）

ü 明确反馈网络。

（原则上：输入输出之间，除了放大器以外的部分）

ü 判断串联/并联反馈：

（观察电路中反馈端与输入端的连接方式）

若为串联结构，则串联反馈；

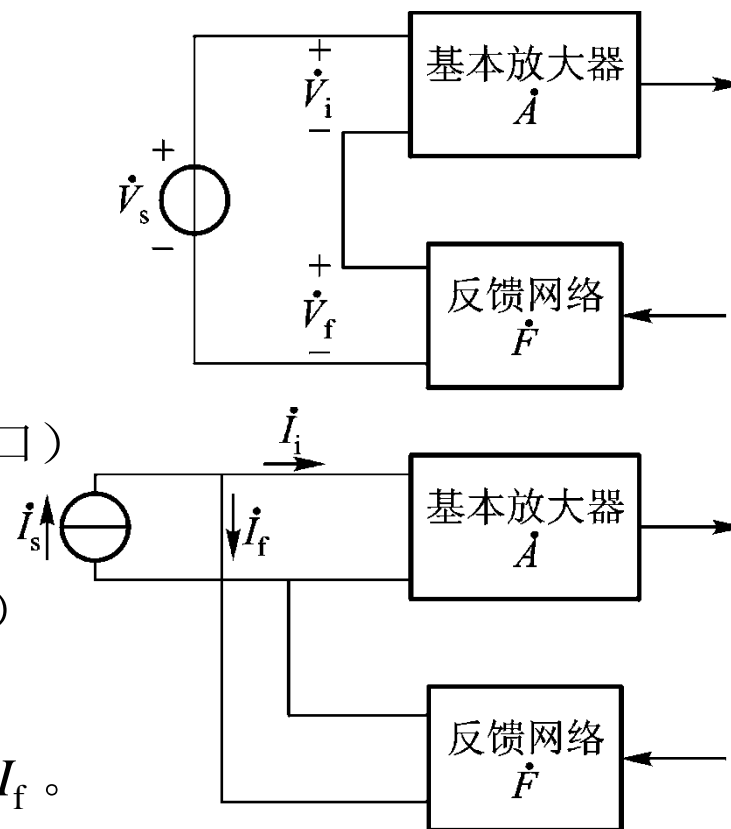
（反馈端与输入端分别接入放大器的两个端口）

若为并联结构，则并联反馈；

（反馈端与输入端接入放大器的同一个端口）

由此，可确定实际的反馈量 X_f 是 V_f 还是 I_f 。

（ V_f 指反馈端对地电压， I_f 指反馈端口电流）



Ø 反馈的基本概念（分类判断）

ü 判断电压/电流反馈：

（取决于反馈信号对何种输出信号进行取样）

由串并联决定

写出反馈信号（ V_f 或 I_f ）关于输出信号（ V_o 或 I_o ）的表达式；
令输出端对地短路（即 $R_L = 0$ ，则 $V_o = 0$ ， $I_o \neq 0$ ）。

若反馈信号为零，说明反馈信号取自输出电压信号，电压反馈；
若反馈信号不为零，说明反馈信号非取自输出电压信号，电流反馈。

负载短路法

Ø 反馈的基本概念（分类判断）

ü 判断正/负反馈（一般针对中频段）：
（取决于引入反馈后的净输入信号增量）

所有的信号类型，
由之前的分析结论确定

定义输入信号（ V_s 或 I_s ）的瞬时极性（正或负）；

沿着信号的传输方向，依次确定净输入信号（ V_i 或 I_i ）、输出信号（ V_o 或 I_o ）、反馈信号（ V_f 或 I_f ）的瞬时极性。

若输入信号与反馈信号的瞬时极性相反，
即：净输入 = 输入 - 反馈，说明引入反馈后的净输入信号减少，负反馈；

若输入信号与反馈信号的瞬时极性相同，
即：净输入 = 输入 + 反馈，说明引入反馈后的净输入信号增加，正反馈。

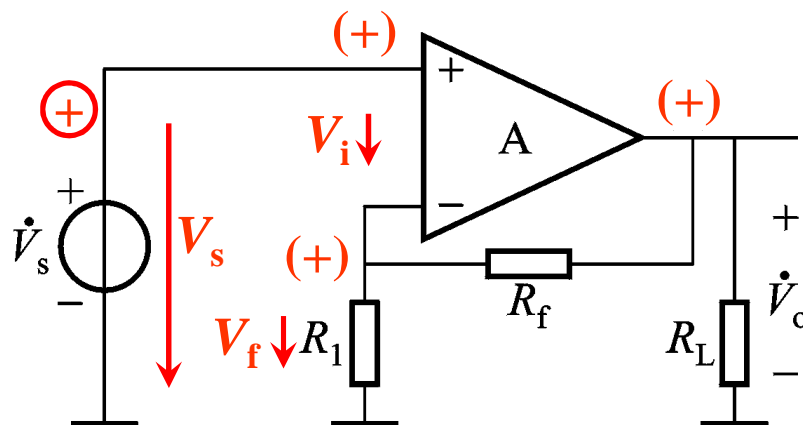
瞬时极性法

【复例3.1-1】

右图所示反馈放大电路。

判断反馈类型。

（串/并、电压/电流、正/负）



解：反馈网络为 R_1 、 R_f 。

根据电路结构，反馈端与输入端分别接入运算放大器的两个端口，所以为串联结构，反馈量为 V_f （即 R_1 两端电压）

$$\text{根据电路，有：} V_f = V_o \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

根据负载短路法原则：若短接负载，则 $V_o = 0$ ， $V_f = 0$ ，所以为电压反馈。

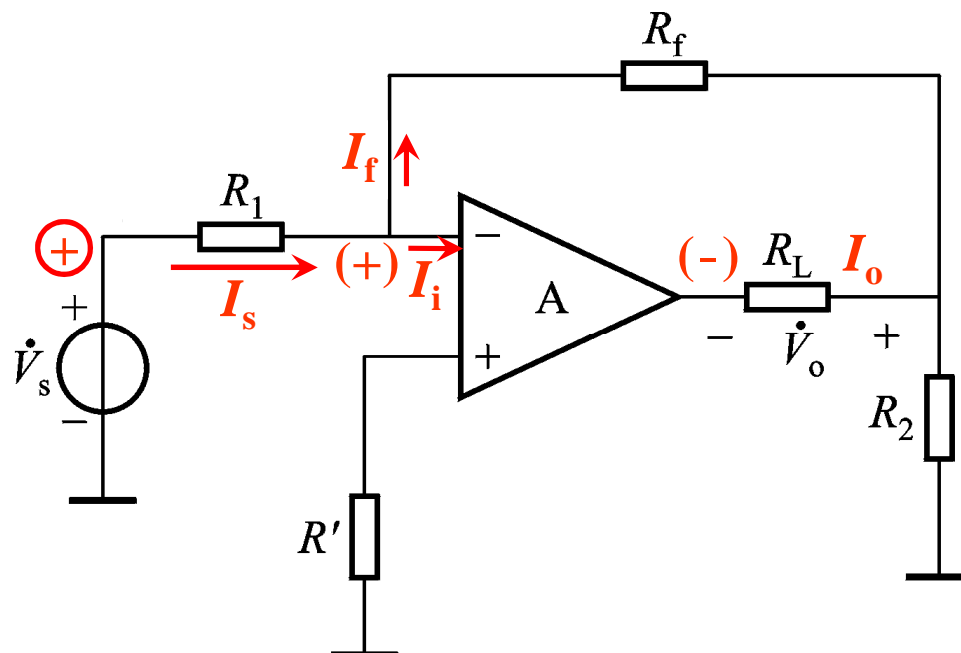
根据图中所作的瞬时极性， $V_i = V_s - V_f$ ，所以为负反馈。

【复例3.1-2】

右图所示反馈放大电路。

判断反馈类型。

(串/并、电压/电流、正/负)



解：反馈网络为 R_f 。

根据电路结构，反馈端与输入端接入运算放大器的同一个端口，所以为并联结构，反馈量为 I_f （即通过 R_f 的电流）

$$\text{根据电路，有：} I_f = \pm I_o \frac{R_2}{R_2 + R_1 + R_f} \quad I_f = \pm I_o \frac{R_2}{R_2 + R_f}$$

根据负载短路法原则：若短接负载，则 $I_o \neq 0$ ， $I_f \neq 0$ ，所以为电流反馈。

根据图中所作的瞬时极性， $I_i = I_s - I_f$ ，所以为负反馈。

Ø 反馈的基本概念（分类判断小结）

ü 明确反馈网络（原则上：输入输出之间，除了放大器以外的部分）。

ü 判断串联/并联反馈（**观察**电路中反馈端与输入端的连接方式）：

串联反馈：双端口模式；并联反馈：单端口模式；由此，可确定实际的反馈量 X_f 是 V_f 还是 I_f 。

ü 判断电压/电流反馈（负载短路法）：

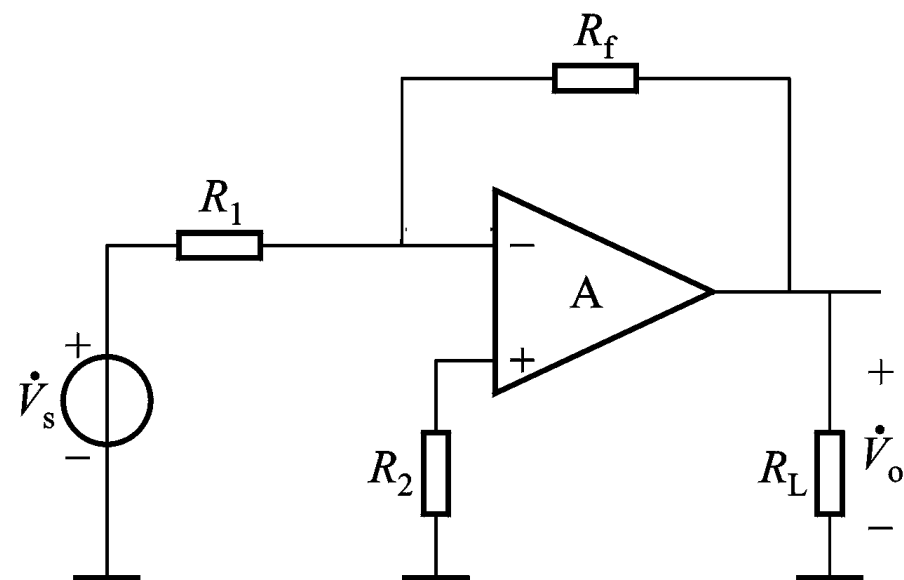
写出反馈信号关于输出信号的表达式；令输出端对地短路，若反馈信号为零，电压反馈；否则电流反馈。

ü 判断正/负反馈（瞬时极性法）：

在图中，依次**标注**输入、净输入、输出、反馈信号的瞬时极性；根据净输入 = 输入 - 反馈，负反馈；否则正反馈。

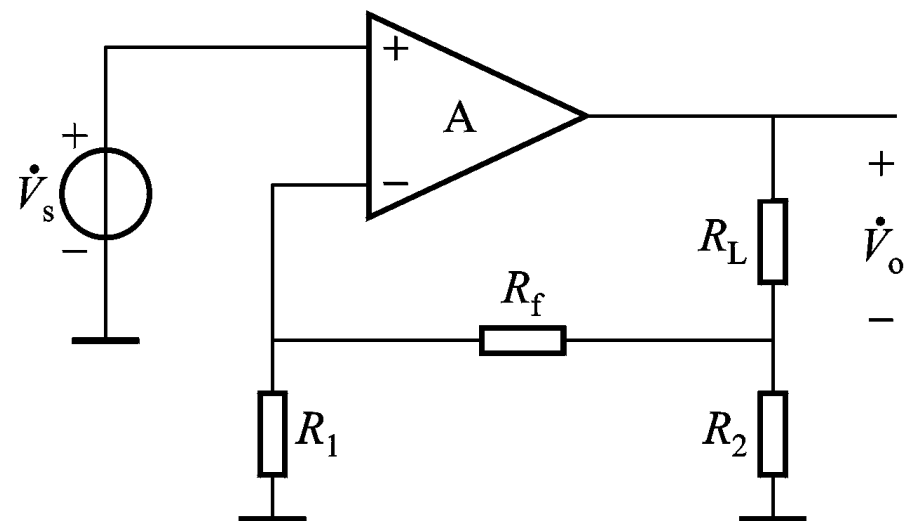
【例3.2-1】

判断反馈类型。



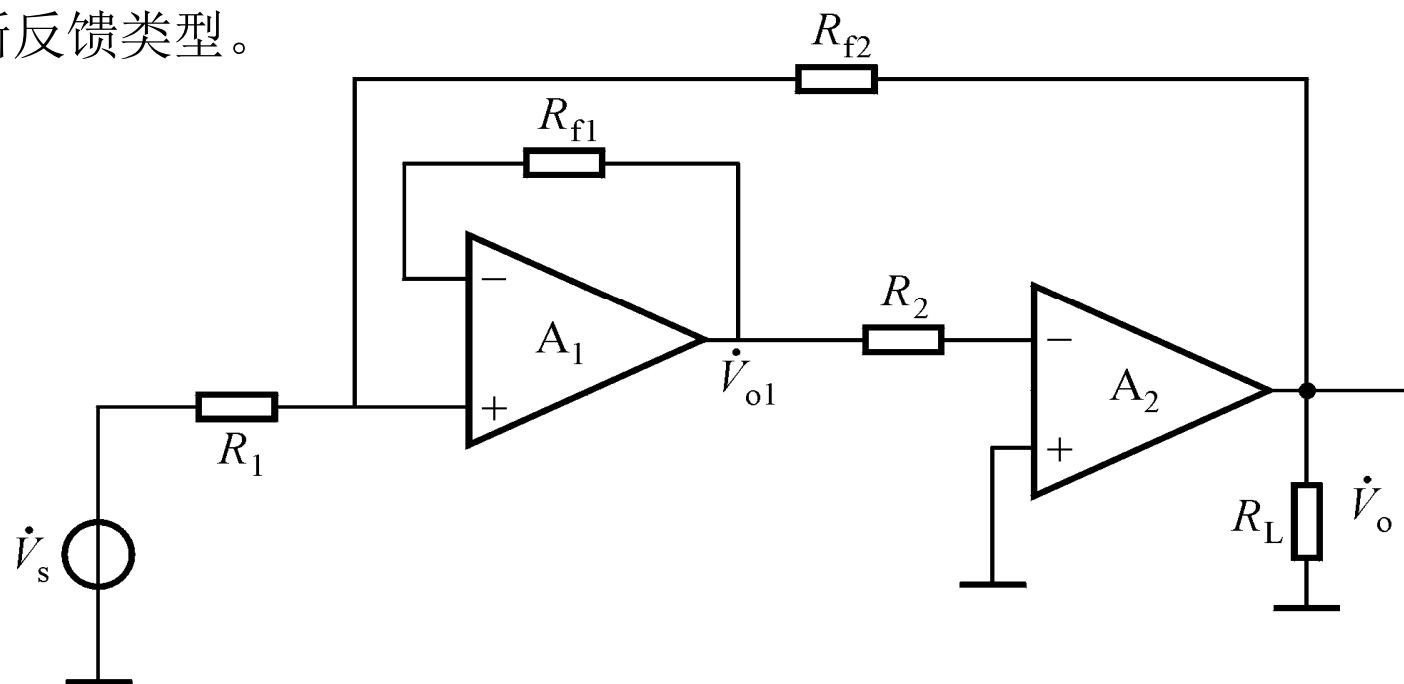
【例3.2-2】

判断反馈类型。



【例3.2-3】

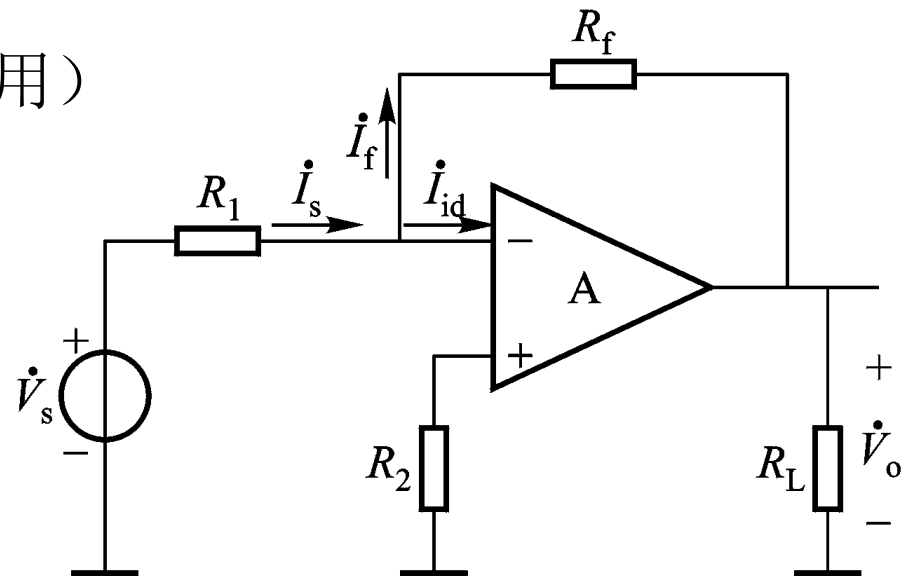
判断反馈类型。



Ø 反馈的基本概念（负反馈作用）

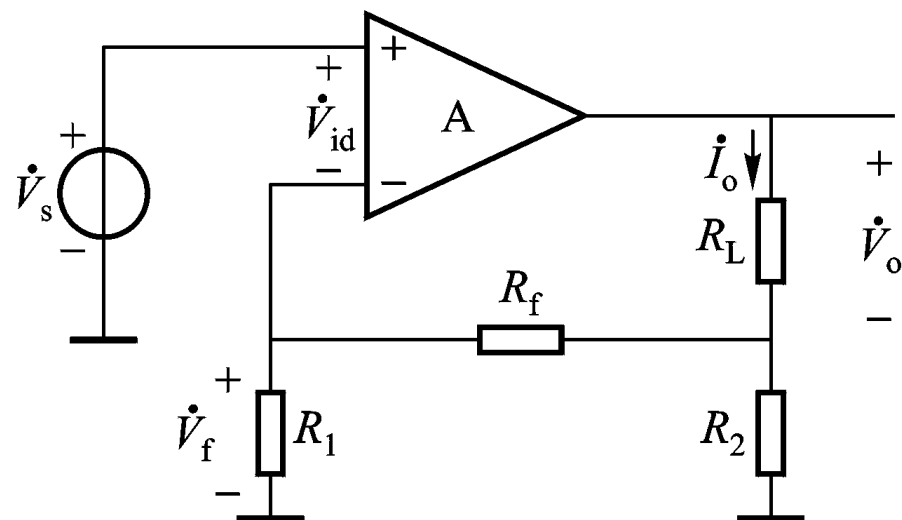
ü 电压负反馈：稳定输出电压。

$$\begin{aligned}
 &|\dot{\mathcal{A}}_o| \uparrow \\
 &\uparrow (R_o \text{ 因素}) \\
 R_L \downarrow &\Rightarrow |\dot{\mathcal{A}}_o| \downarrow \Rightarrow |\dot{\mathcal{A}}_f| \downarrow \Rightarrow |\dot{\mathcal{A}}_{id}| \uparrow \Rightarrow |\dot{\mathcal{A}}_o| \uparrow \\
 &\Rightarrow |\dot{\mathcal{A}}_o| \uparrow
 \end{aligned}$$



ü 电流负反馈：稳定输出电流。

$$\begin{aligned}
 &|\dot{\mathcal{A}}_o| \downarrow \\
 &\uparrow (R_o \text{ 因素}) \\
 R_L \downarrow &\Rightarrow |\dot{\mathcal{A}}_o| \uparrow \Rightarrow |\dot{\mathcal{A}}_f| \uparrow \Rightarrow |\dot{\mathcal{A}}_{id}| \downarrow \Rightarrow |\dot{\mathcal{A}}_o| \downarrow \\
 &\Rightarrow |\dot{\mathcal{A}}_o| \downarrow
 \end{aligned}$$



Ø 反馈的基本概念（不同组态下各参数意义）

ü 四种反馈组态：电压串联、电压并联、电流串联、电流并联。

ü 三种参数：开环增益、反馈系数、闭环增益。

ü 参讲义 P117 表 2.1.1 。

Ø 反馈的基本概念（分类判断 — 分立元件放大电路）

ü 原则上：与集成电路一致。

ü 关键点：如何将分立元件放大电路对应至相应的集成放大电路形式。

ü 三组态放大电路：

原输入端、输出端，分别对应集成运放的某一输入端、输出端；
原公共端，对应为集成运放的另一输入端。

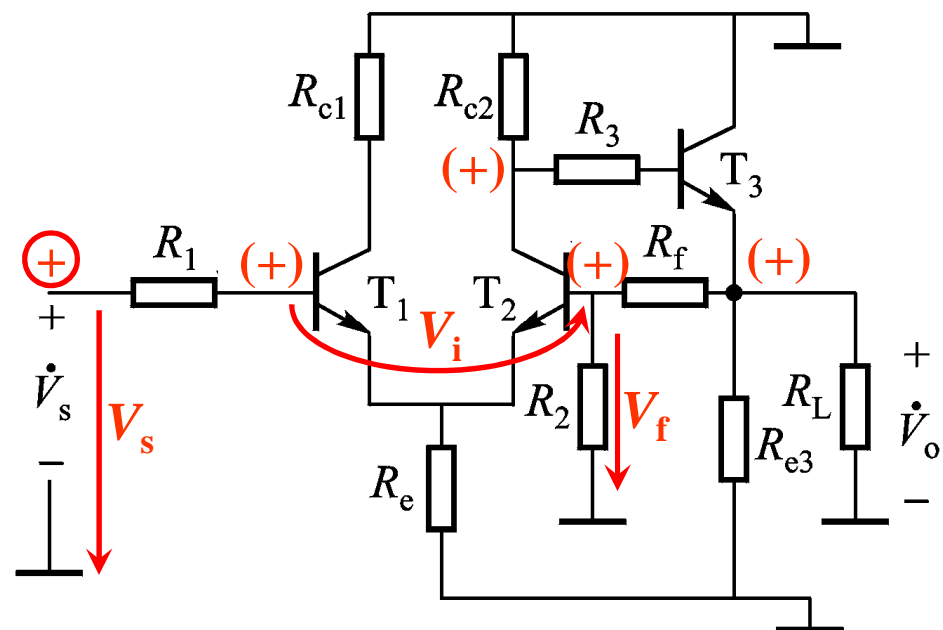
ü 差分放大电路：

原两个输入端、输出端，分别对应集成运放的输入端、输出端。

【例3.3-1】

右图所示反馈放大电路。

判断反馈类型。

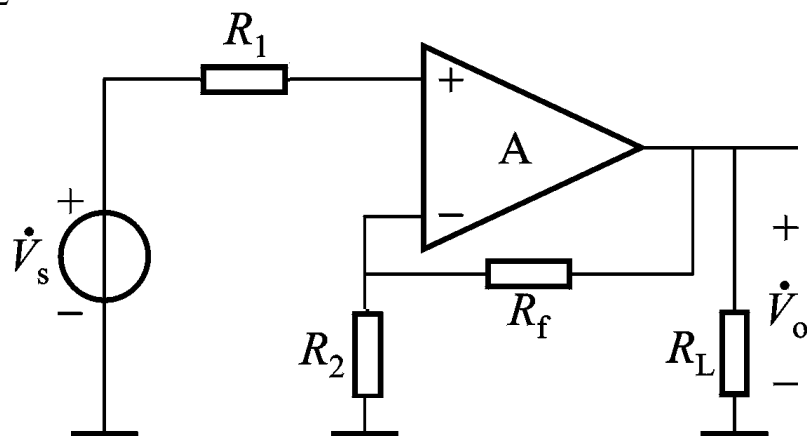


解：反馈网络为 R_2 、 R_f 。

根据电路结构，反馈端与输入端分别接入放大器的两个端口，所以为串联结构，反馈量为 V_f （即 R_2 两端电压）

$$\text{根据电路，有：} V_f = V_o \frac{R_2}{R_2 + R_f}$$

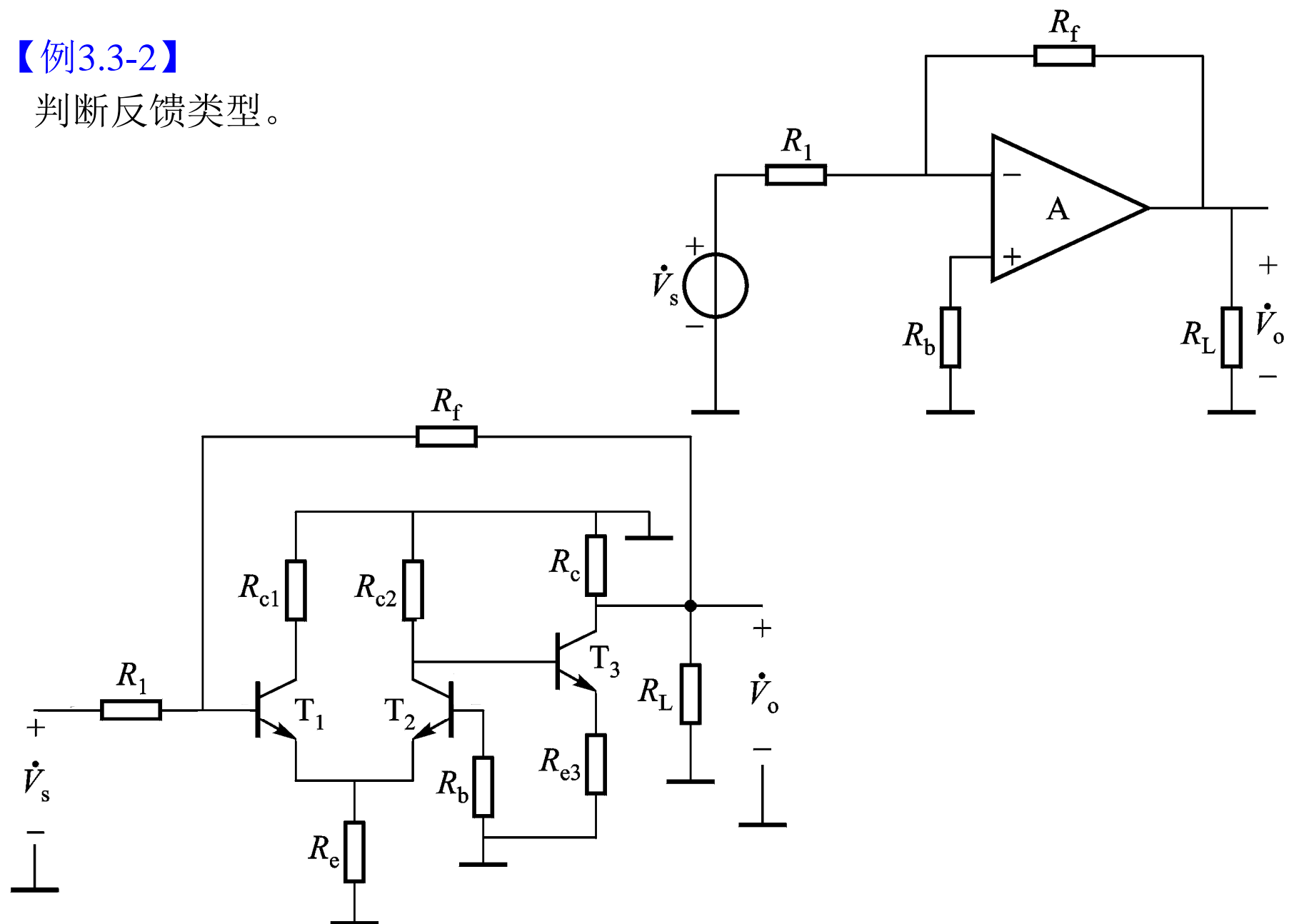
根据负载短路法原则：若短接负载，则 $V_o = 0$ ， $V_f = 0$ ，所以为电压反馈。



根据图中所作的瞬时极性， $V_i = V_s - V_f$ ，所以为负反馈。

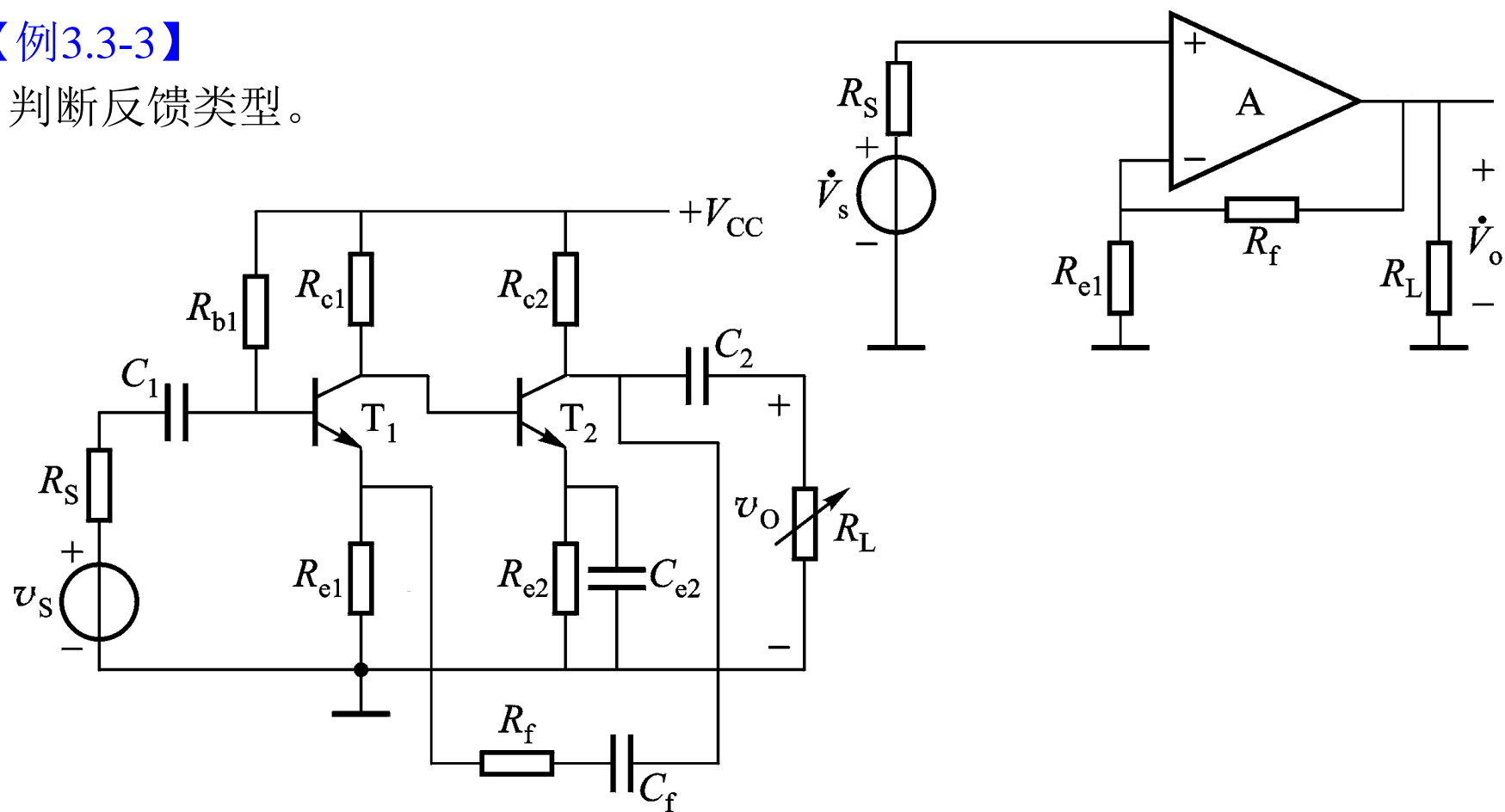
【例3.3-2】

判断反馈类型。



【例3.3-3】

判断反馈类型。



R_{e2} 只存在直流反馈，没有交流反馈；

R_f 、 C_f 只存在交流反馈，没有直流反馈；

R_{e1} 既存在直流反馈，同时也存在交流反馈。

✓ 负反馈对放大电路性能的改善

ü 负反馈：

闭环增益下降；

其它许多性能得以改善。

（稳定性、非线性、温漂、通频带、输入输出电阻）

Ø 提高闭环增益的稳定性

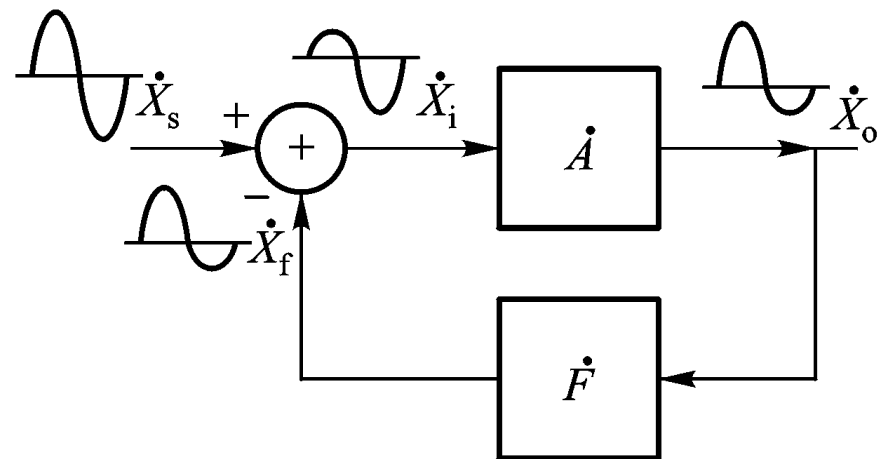
$$A_f = \frac{A}{1 + AF}$$

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

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

引入负反馈后，增益的相对变化量是无反馈时的 $1 / (1 + AF)$

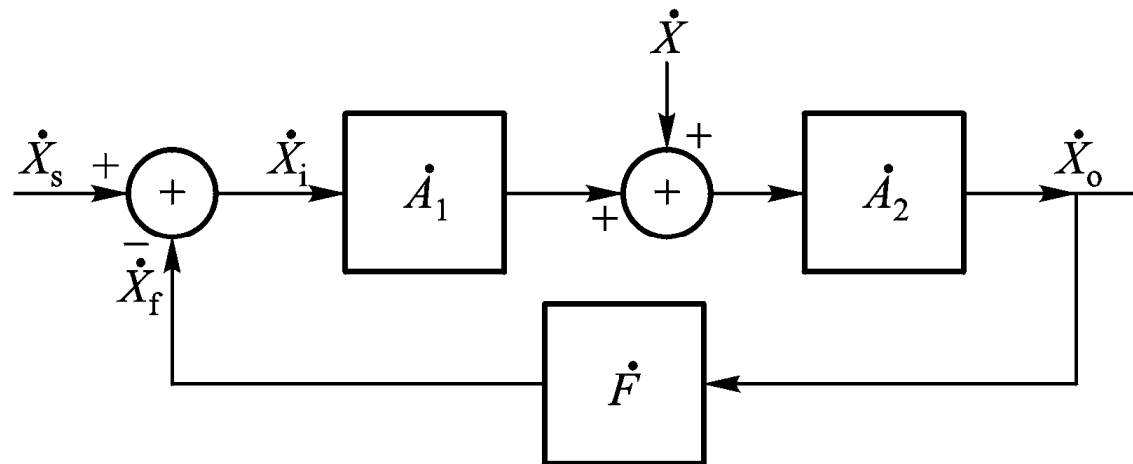
Ø 改善放大电路的非线性



ü 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。

Ø 改善放大电路的非线性（定量分析）



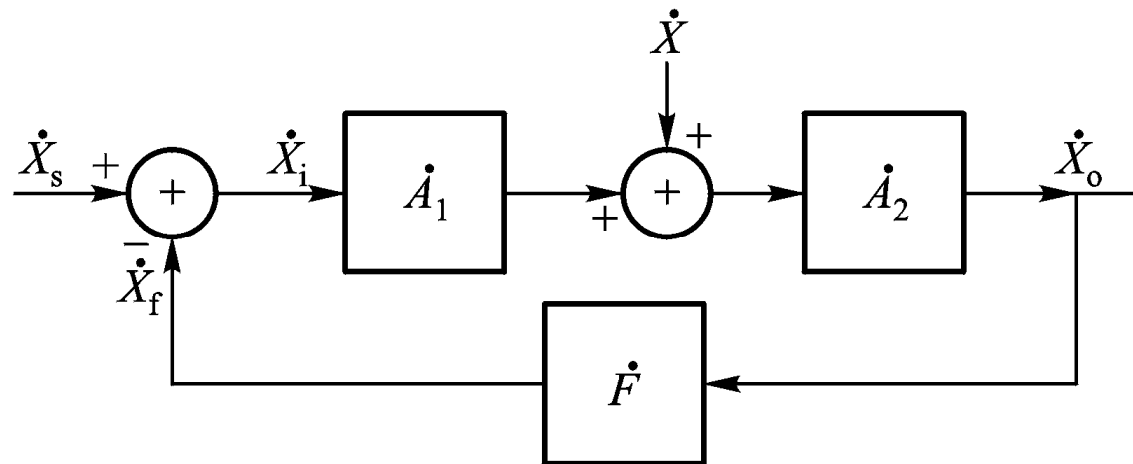
放大器开环: $X_o = A_1 A_2 X_i + A_2 X = A X_s + A_2 X$

放大器闭环: $X_o = \frac{A}{1 + AF} X_s + \frac{A_2}{1 + AF} X$

$$X_o = \frac{A}{1 + AF} [(1 + AF) X_s] + \frac{A_2}{1 + AF} X = \frac{A}{1 + AF} X_s + \frac{A_2}{1 + AF} X$$

负反馈对非线性失真的改善程度是 $1 / (1 + AF)$

Ø 抑制放大电路内部的温漂、噪声和干扰



ü 引入负反馈后，电路内部的干扰和噪声都减小为原来的 $1 / (1 + AF)$ 。

ü 为弥补有用信号，应加大 X_s 。

ü 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。

Ø 扩展通频带

ü 开环高频增益: $A_H = \frac{A_m}{1 + j \frac{f}{f_H}}$

ü 闭环高频增益: $A_{Hf} = \frac{A_H}{1 + A_H F} = \frac{\frac{A_m}{1 + j \frac{f}{f_H}}}{1 + \frac{A_m F}{1 + j \frac{f}{f_H}}} = \frac{\frac{A_m}{1 + A_m F}}{1 + j \frac{f}{(1 + A_m F) f_H}} = \frac{A_{mf}}{1 + j \frac{f}{f_{Hf}}}$

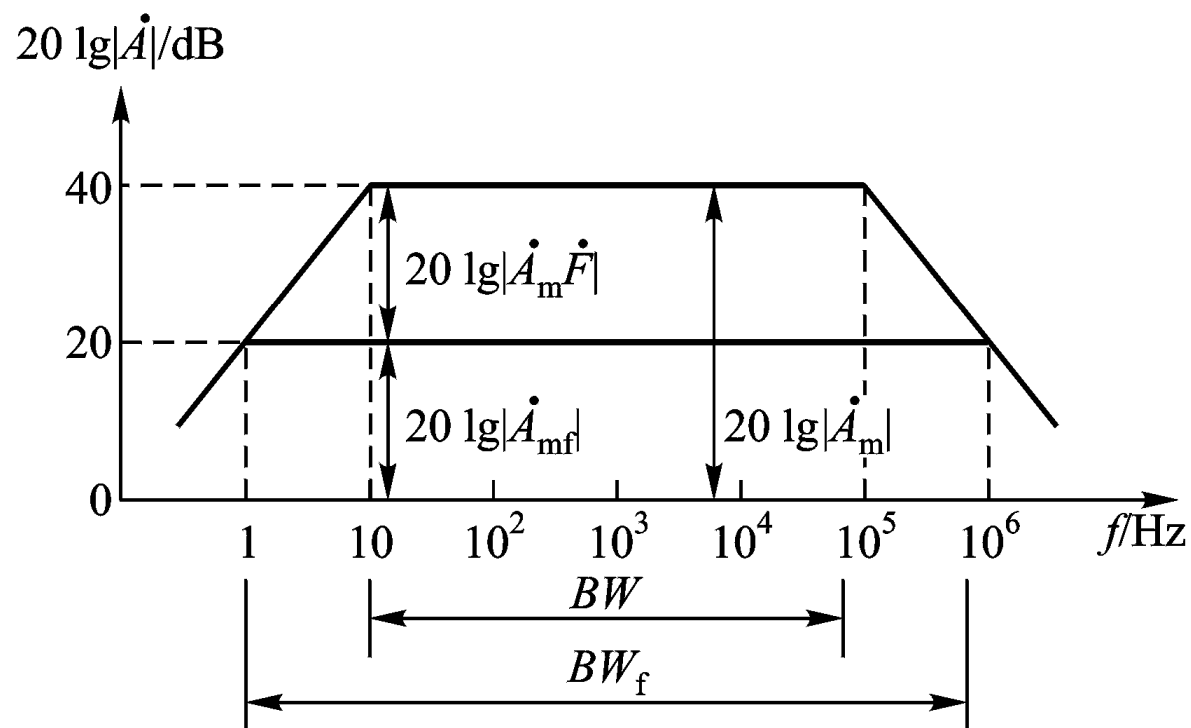
闭环时中频增益为开环时的 $1 / (1 + A_m F)$

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 $1 / (1 + A_m F)$

Ø 扩展通频带

ü 放大电路引入负反馈后，上限频率升高，下限频率降低，通频带扩展。



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

Ø 对输入输出电阻的影响

ü 电压负反馈能稳定输出电压，相当于输出电阻减小了；
闭环输出电阻 R_{of} 为开环输出电阻 R_o 的 $1 / (1+AF)$ ；
深度电压负反馈时， $R_{of} = 0$ 。

ü 电流负反馈能稳定输出电流，相当于输出电阻增大了；
闭环输出电阻 R_{of} 为开环输出电阻 R_o 的 $(1+AF)$ 倍；
深度电流负反馈时， $R_{of} = \infty$ 。

ü 并联负反馈后的输入电阻是减小的， $R_{if} = R_i / (1+AF)$ ；
深度并联负反馈时， $R_{if} = 0$ 。

ü 串联负反馈后的输入电阻是增大的， $R_{if} = R_i (1+AF)$ ；
深度串联负反馈时， $R_{if} = \infty$ 。

✓ 集成运放负反馈放大电路分析

ü 集成运放负反馈放大电路分析：

模型，等效电路，电路方程（组）—— 复杂；
近似（工程）估算。

ü 深度负反馈。

深度负反馈

深度负反馈: $|1 + AF| \gg 1$

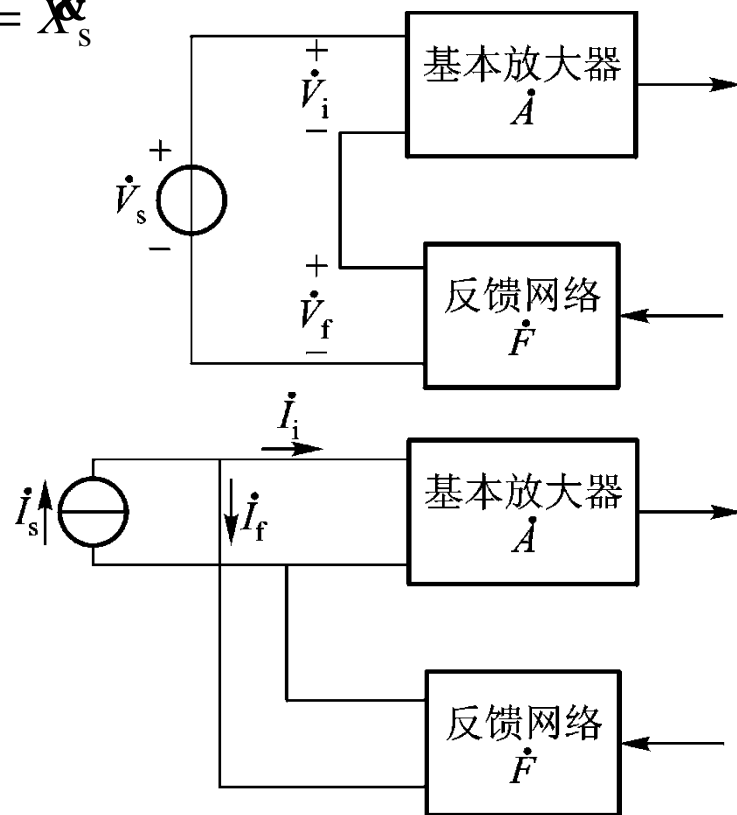
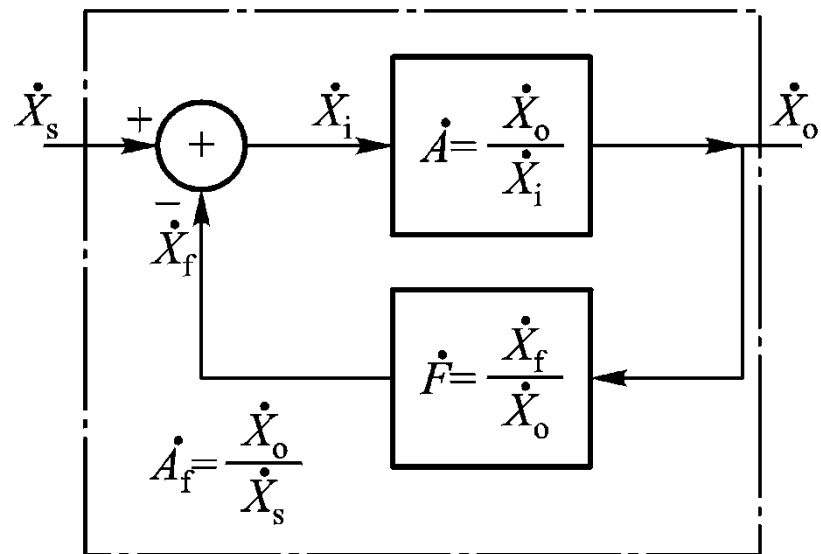
$$A_f = \frac{X_o}{X_s} = \frac{A}{1 + AF} \approx \frac{1}{F}$$

$$X_f = AF X_i \approx (1 + AF) X_i = X_s$$

净输入量: $X_i = X_s - X_f \rightarrow 0$

针对串联负反馈: $X_i = V_i \rightarrow 0$
(虚短)

针对并联负反馈: $X_i = I_i \rightarrow 0$
(虚断)

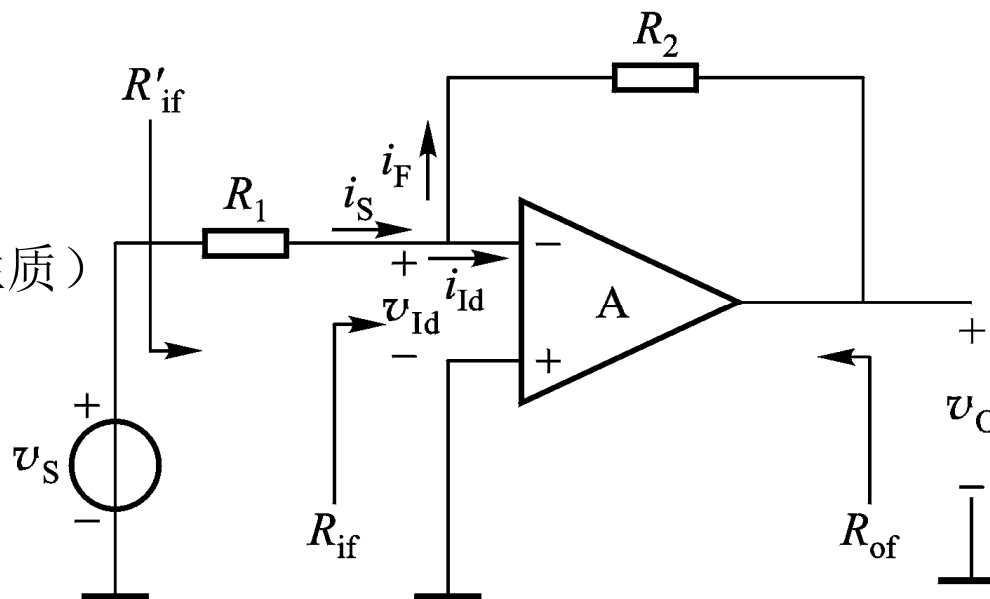


比例运算电路

$$i_F = -\frac{v_O - v_{Id}}{R_2} = -\frac{v_O}{R_2} \quad (\text{虚短性质})$$

$$i_S = \frac{v_S - v_{Id}}{R_1} = \frac{v_S}{R_1} \quad (\text{虚短性质})$$

$$(\text{虚断性质}) : i_F = i_S$$



电压并联负反馈

闭环电压增益: $A_{vf} = \frac{v_O}{v_S} = -\frac{R_2}{R_1}$

闭环输入电阻: $R_{if} \rightarrow 0$, $R'_{if} = R_1$

闭环输出电阻: $R_{of} \rightarrow 0$

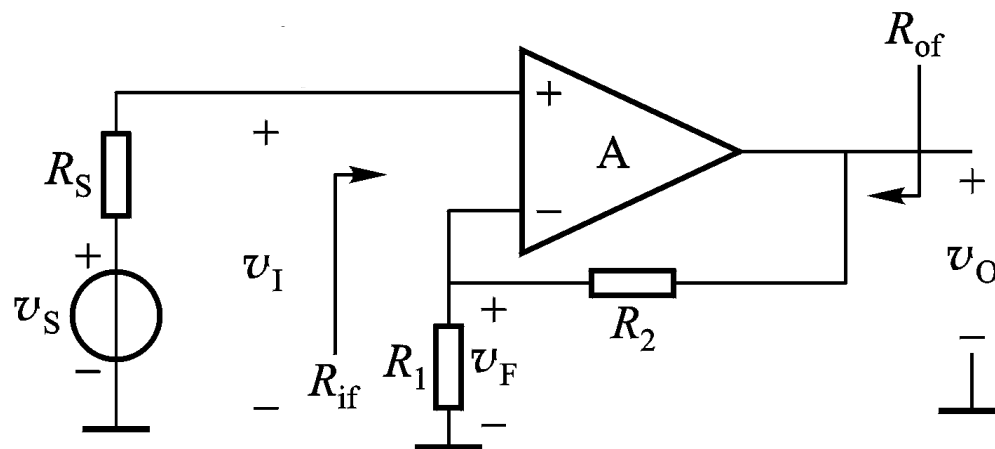
反相输入式比例运算电路

比例运算电路

$$v_+ = v_S$$

||

$$v_- = v_F = v_O \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



闭环电压增益: $A_f = \frac{v_O}{v_S} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

电压串联负反馈

闭环输入电阻: $R_{if} \rightarrow \infty$

闭环输出电阻: $R_{of} \rightarrow 0$

同相输入式比例运算电路

当 R_1 开路时, $v_o = v_s$, 又称电压跟随器。

Ø 集成运放负反馈放大电路分析

ü 利用深度负反馈虚短、虚断性质，近似计算各类参数。

ü 分析步骤：

(1) 判断反馈类型；

(2) 并联反馈：

$i_s = i_f$ ，且 i_s 、 i_f 分别与输入信号、输出（反馈）信号关联；

串联反馈：

$v_+ = v_-$ ，且 v_+ 、 v_- 分别与输入信号、输出（反馈）信号关联；

由此，可求得闭环电压增益 A_{vf} 。

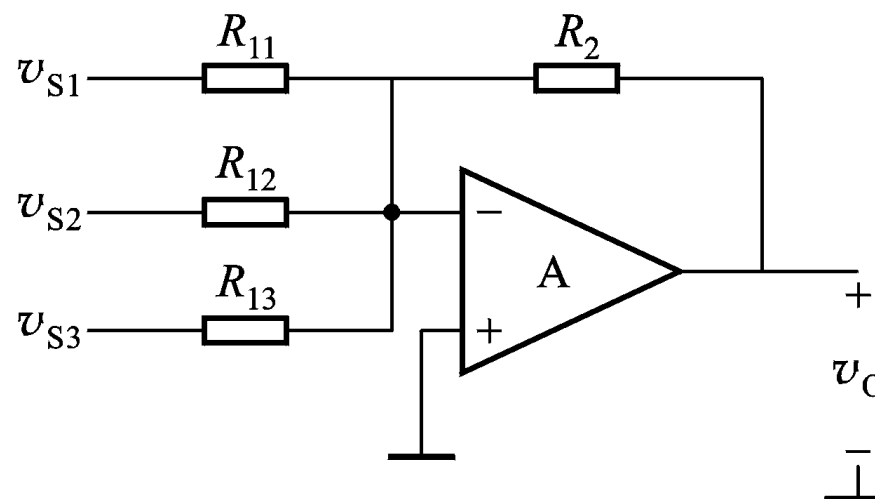
(3) 根据串联/并联类别，求得闭环输入电阻 R_{if} 。

(4) 根据电压/电流类别，求得闭环输出电阻 R_{of} 。

判断电压/电流反馈（负载短路法）：写出反馈信号关于输出信号的表达式

Ø 求和运算电路

反相输入式求和运算电路

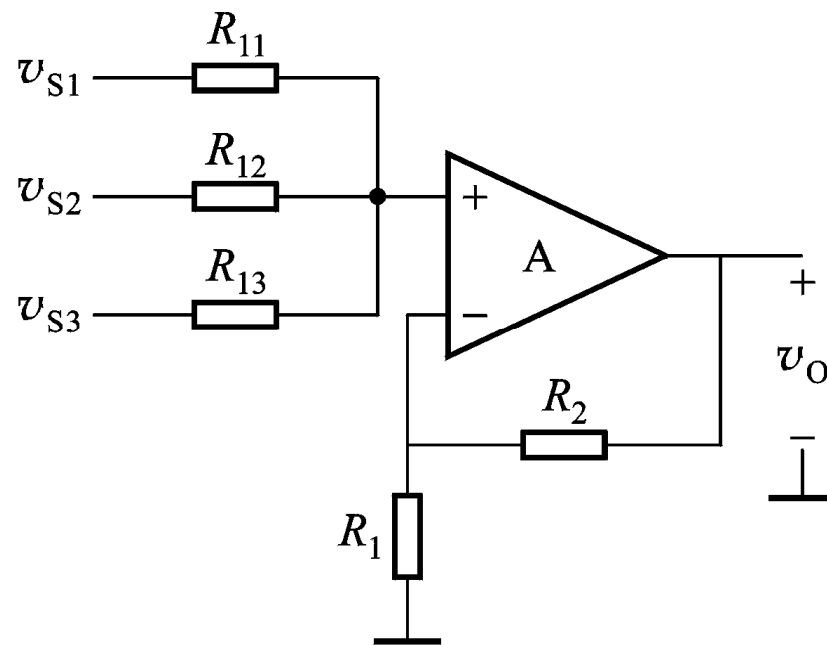


$$\frac{v_{S1}}{R_{11}} + \frac{v_{S2}}{R_{12}} + \frac{v_{S3}}{R_{13}} = -\frac{v_O}{R_2}$$

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

Ø 求和运算电路

同相输入式求和运算电路



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

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

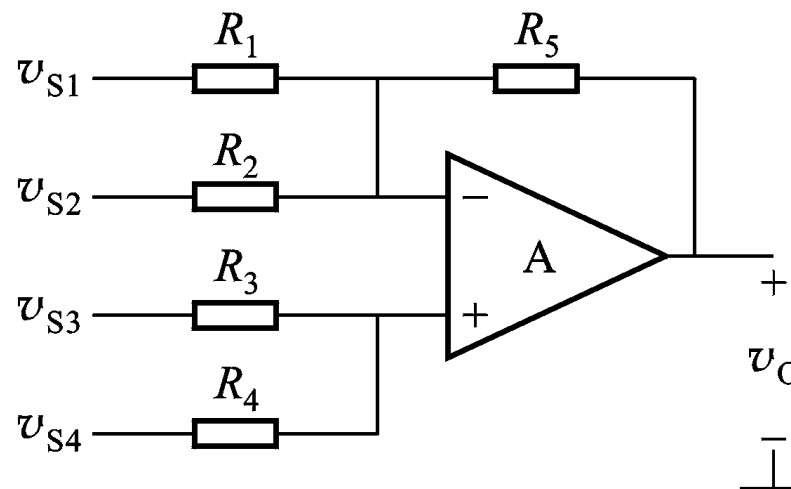
Ø 求和运算电路

双端输入式求和运算电路

$$v_+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{S3} + \frac{R_3}{R_3 + R_4} v_{S4}$$

$$v_- = \frac{R_2 // R_5}{R_1 + R_2 // R_5} v_{S1} + \frac{R_1 // R_5}{R_2 + R_1 // R_5} v_{S2} + \frac{R_1 // R_2}{R_5 + R_1 // R_2} v_O$$

$$\begin{aligned} v_O &= -\frac{R_5 + R_1 // R_2}{R_1 // R_2} \left(\frac{R_2 // R_5}{R_1 + R_2 // R_5} v_{S1} + \frac{R_1 // R_5}{R_2 + R_1 // R_5} v_{S2} \right) \\ &\quad + \frac{R_5 + R_1 // R_2}{R_1 // R_2} \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{S3} + \frac{R_3}{R_3 + R_4} v_{S4} \right) \\ &= -\frac{R_5}{R_1} v_{S1} - \frac{R_5}{R_2} v_{S2} + \left(1 + \frac{R_5}{R_1 // R_2} \right) \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{S3} + \frac{R_3}{R_3 + R_4} v_{S4} \right) \end{aligned}$$



Ø 差分放大电路

(叠加定理)

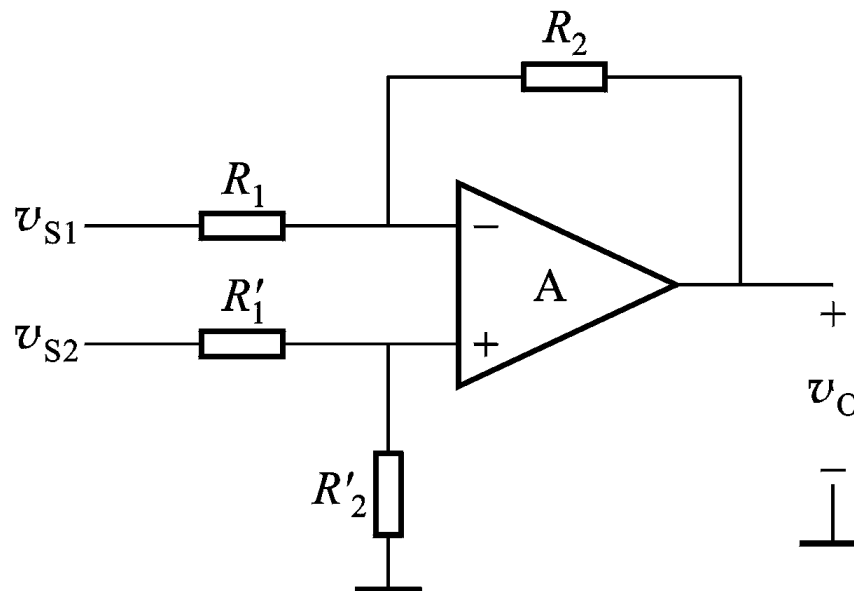
$$v_{O1} = -\frac{R_2}{R_1} v_{S1}$$

$$v_{O2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R'_2}{R'_1 + R'_2} v_{S2}$$

$$v_O = v_{O1} + v_{O2} = -\frac{R_2}{R_1} v_{S1} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R'_2}{R'_1 + R'_2} v_{S2}$$

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

单运放差分放大电路



积分电路

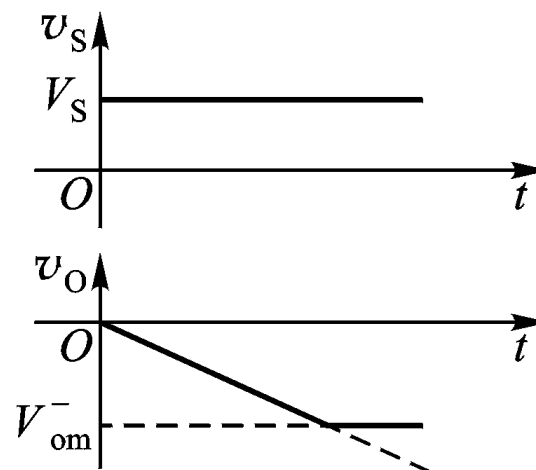
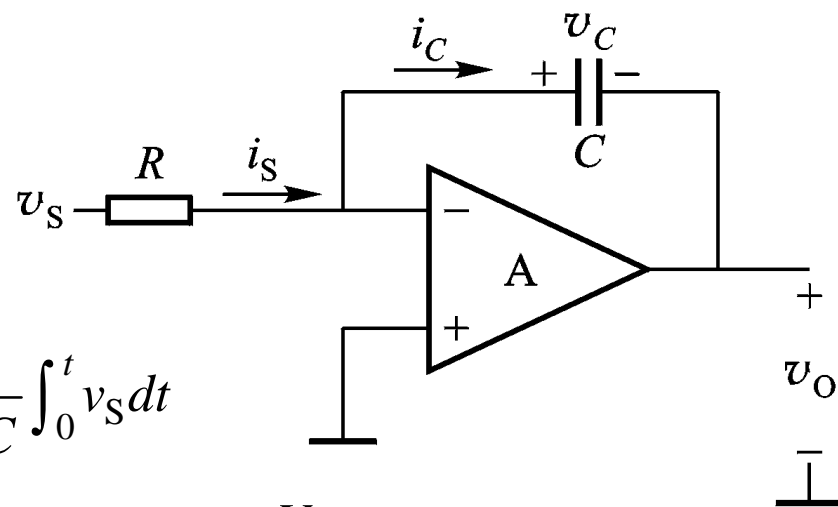
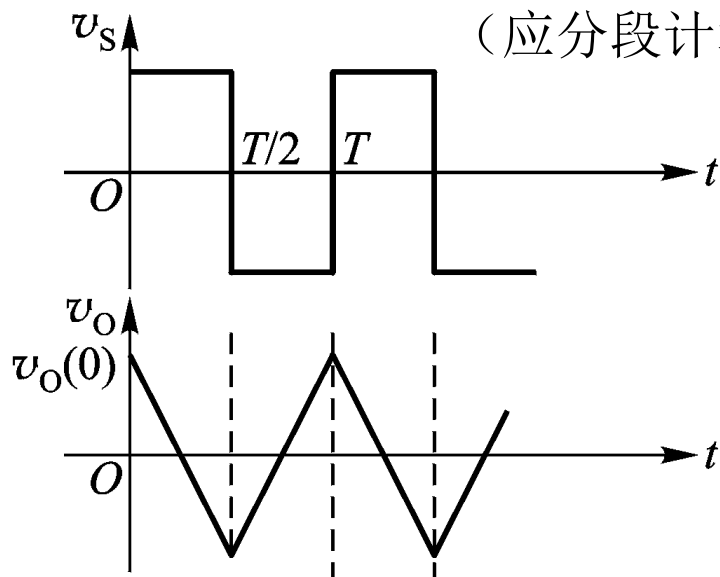
$$i_S = \frac{v_S}{R}, \quad i_C = C \cdot \frac{dv_C}{dt} = -C \cdot \frac{dv_O}{dt}$$

若初始条件 $v_C(0) = 0$, 则: $v_O = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_S dt$

若输入端加阶跃信号, 则: $v_O = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_S dt = -\frac{V_S}{RC} t$

若输入方波, 则一定条件下可输出三角波。

(应分段计算输出电压)



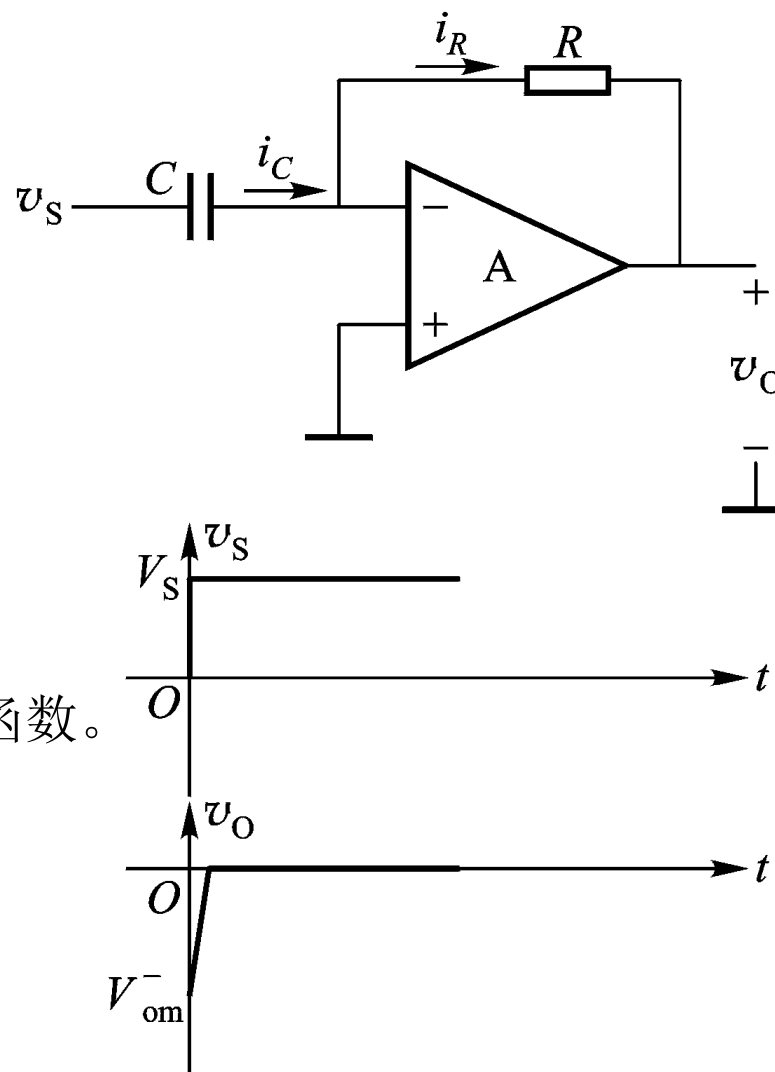
微分电路

$$i_C = C \frac{dv_S}{dt}$$

$$i_R = -\frac{v_O}{R}$$

$$v_O = -RC \frac{dv_S}{dt}$$

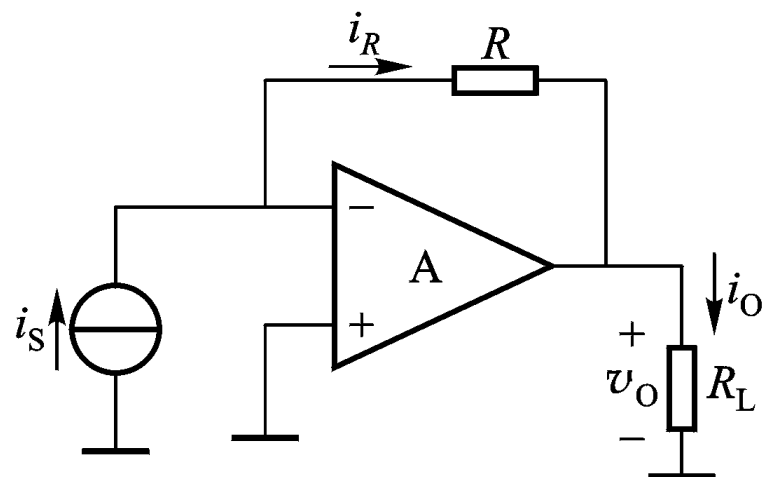
若输入端加阶跃信号，则输出为冲击函数。



Ø 电流/电压变换电路

$$v_O = -i_S \cdot R$$

与负载 R_L 无关。

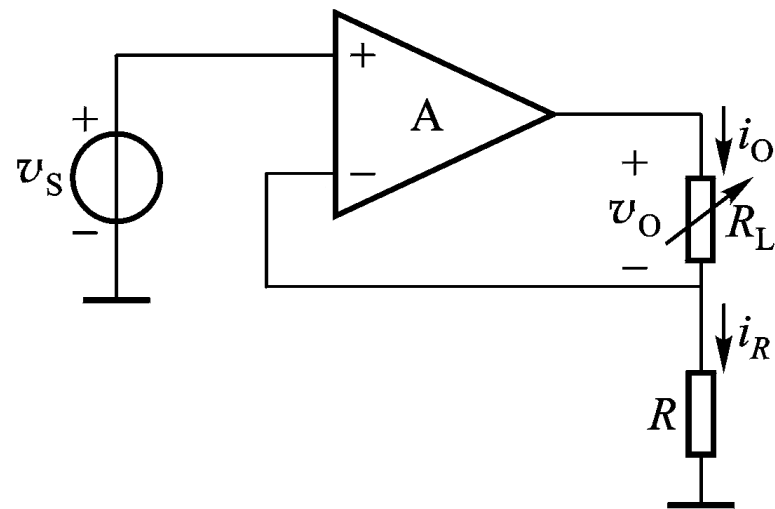


Ø 电压/电流变换电路

$$i_O = i_R = \frac{v_S}{R}$$

与负载 R_L 无关。

负载不接地



Ø 电压/电流变换电路

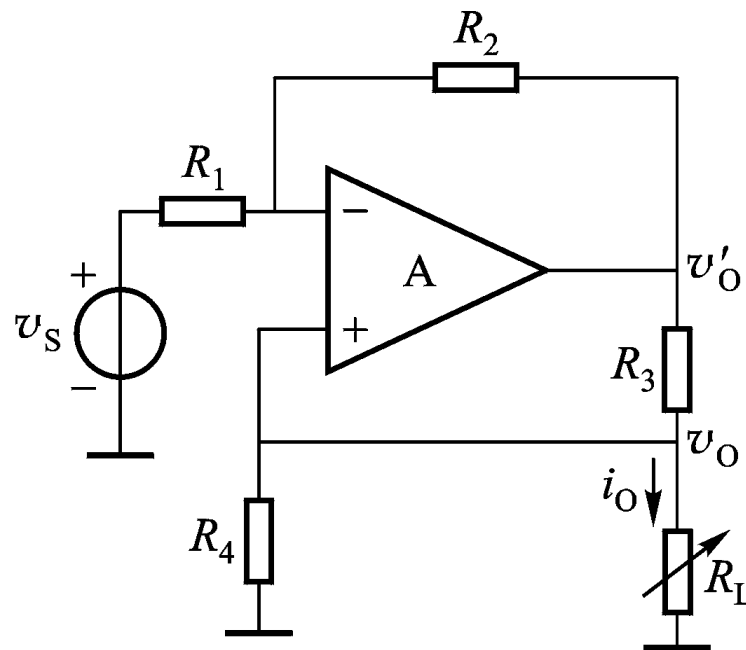
$$v_- = v_S \frac{R_2}{R_1 + R_2} + v'_O \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$v_+ = v_O = i_O R_L = v'_O \frac{R_4 // R_L}{R_3 + R_4 // R_L}$$

$$i_O = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{v_S}{R_3 + \frac{R_3}{R_4} R_L - \frac{R_2}{R_1} R_L}$$

ü 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。

负载接地



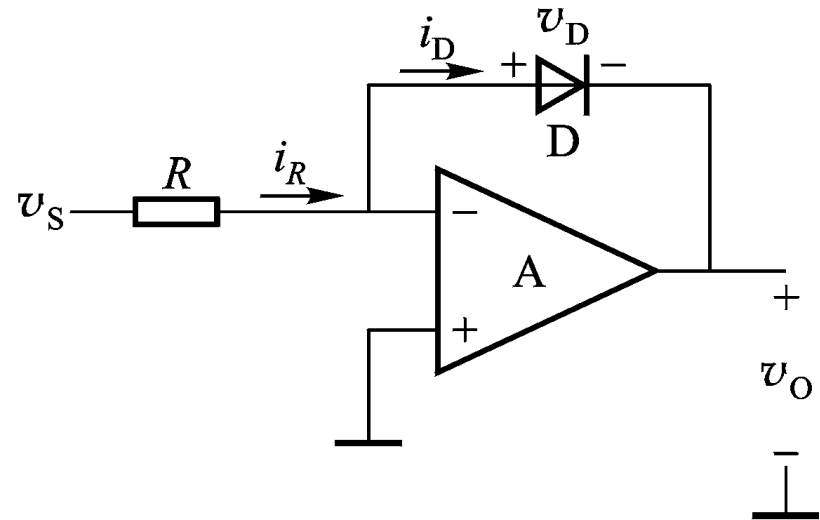
∅ 非线性电路

$$i_R = \frac{v_S}{R}$$

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

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

对数运算电路



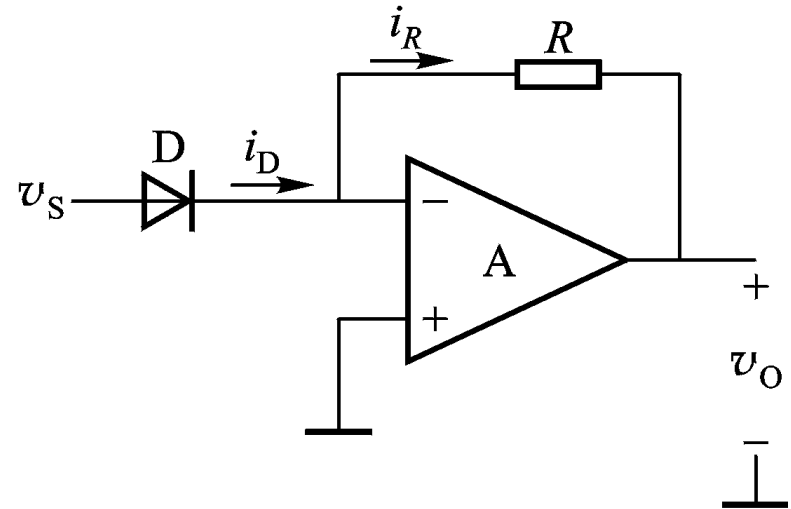
∅ 非线性电路

$$i_R = -\frac{v_O}{R}$$

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

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

指数运算电路



✓ 分立元件负反馈放大电路分析

ü 借助集成运放深度负反馈放大电路的分析方法。
(虚短、虚断)

【例3.4-1】

右图所示电路。

分析动态参数。

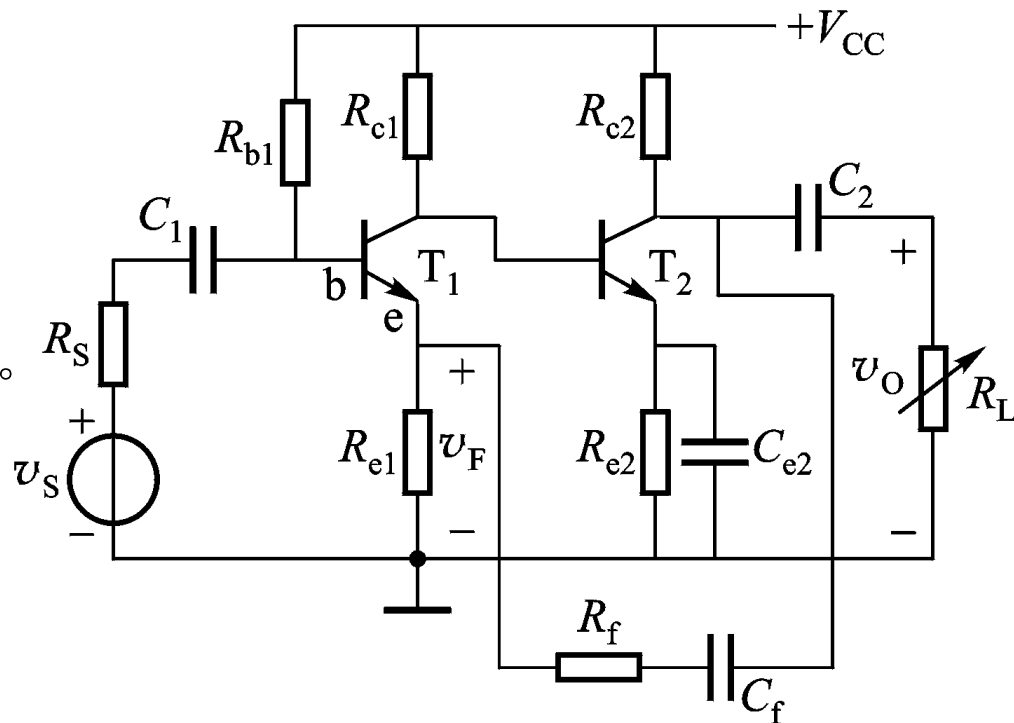
解：反馈类型：电压串联负反馈。

$$v_S \sim v_b = v_e = v_F$$

$$v_F = v_O \frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_f}$$

$$A_{vf} = \frac{v_O}{v_b} = \mathbf{L} \quad , \quad A_{vsf} = \frac{v_O}{v_S} = \mathbf{L}$$

$$R_{if} \rightarrow \infty \text{ 或 } R_{b1} \quad , \quad R_{of} \rightarrow 0$$



【例3.4-2】

右图所示电路。

分析动态参数。

解：反馈类型：电压并联负反馈。

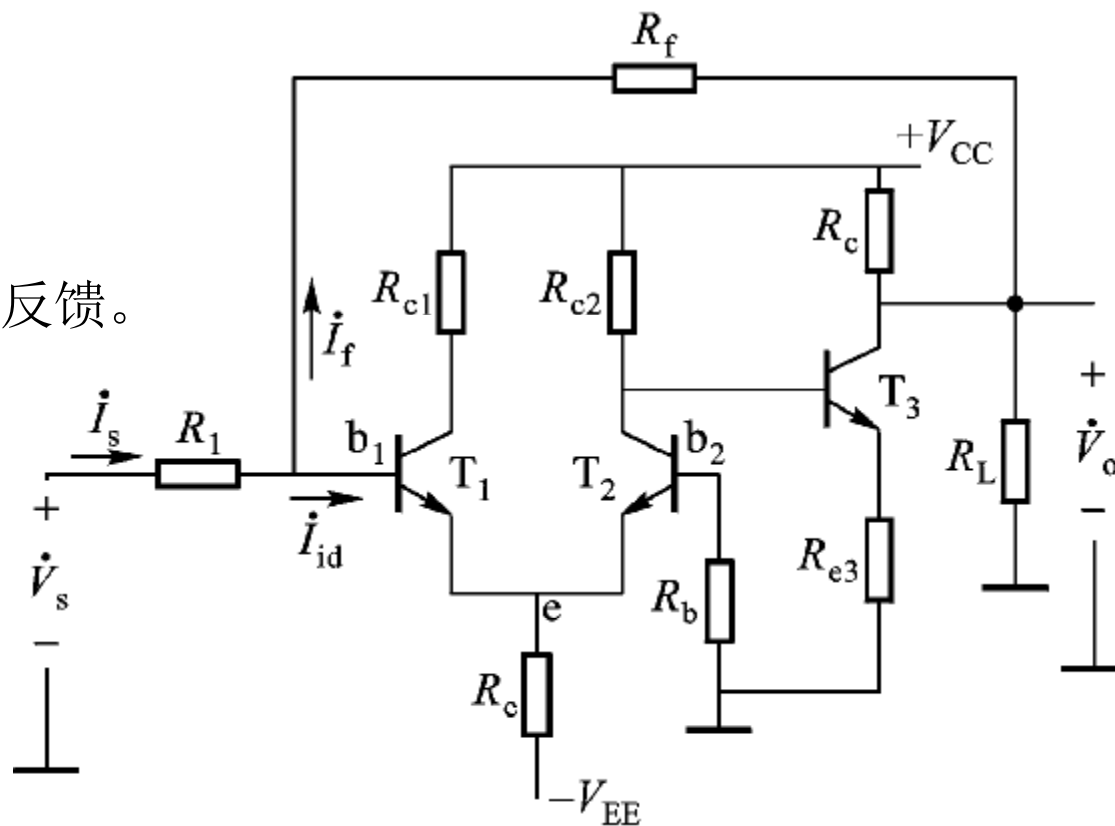
$$\dot{V}_s \sim \dot{I}_s = \dot{I}_f \sim \dot{V}_o$$

$$\dot{V}_{b1} = \dot{V}_{b2} = 0$$

$$\dot{I}_s = \frac{\dot{V}_s}{R_1}, \quad \dot{I}_f = -\frac{\dot{V}_o}{R_f}$$

$$A_{vsf} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = \mathbf{L}$$

$$R_{if} \rightarrow 0 \text{ 或 } R_1, \quad R_{of} \rightarrow 0$$



✓ 负反馈放大电路的稳定性

ü 负反馈能改善放大器的性能；

反馈深度越大，改善的效果越好；

在一定条件下，若反馈深度太大，负反馈放大器将变为自激振荡器。

ü 自激振荡：没有输入信号（ $v_i = 0$ ）时，放大电路也有输出（ $v_o \neq 0$ ）；
（通常可用示波器观察到输出振荡波形）

此时，放大电路的闭环增益趋于无穷大。

ü 自激振荡，不依赖于外加输入信号；

其输出信号仅取决于电路自身的反馈，振荡频率也由自身参数决定。

Ø 自激振荡（生成原因）

ü 通频带以内：

外部耦合电容和内部结电容分别作交流短路和交流开路处理；
输出信号与输入信号之间的相位为同相或反相关系。

ü 通频带以外：

各电抗元件将产生 $0 \sim \pm 90^\circ$ 的相移；

当电抗元件的数量 ≥ 3 时，则将产生 $0 \sim \pm 270^\circ$ 的相移；

因此，就有可能在某个特定频率点正好产生 $\pm 180^\circ$ 的相移；

那么，原来的负反馈在这一频率点下，就变成了正反馈。

ü 此时，若反馈信号的幅度大于或等于原输入信号的幅度；
则：即使输入信号等于零，放大器仍有输出。

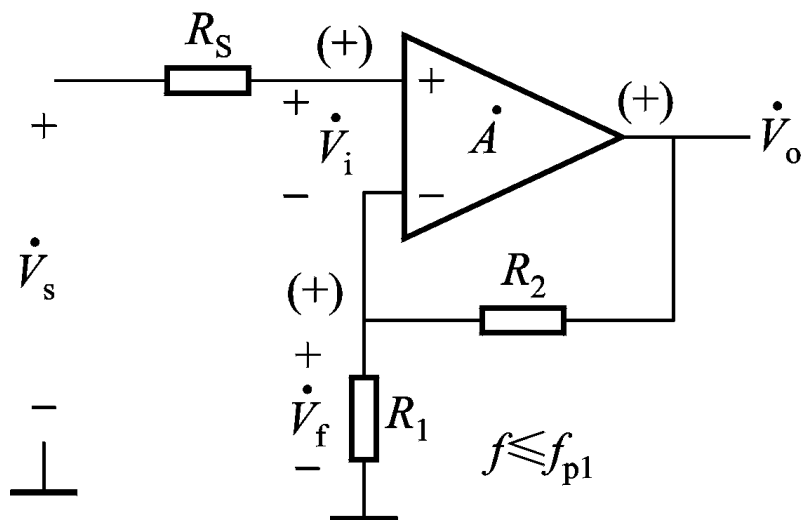
产生了自激振荡

⊘ 自激振荡（生成原因：图例）

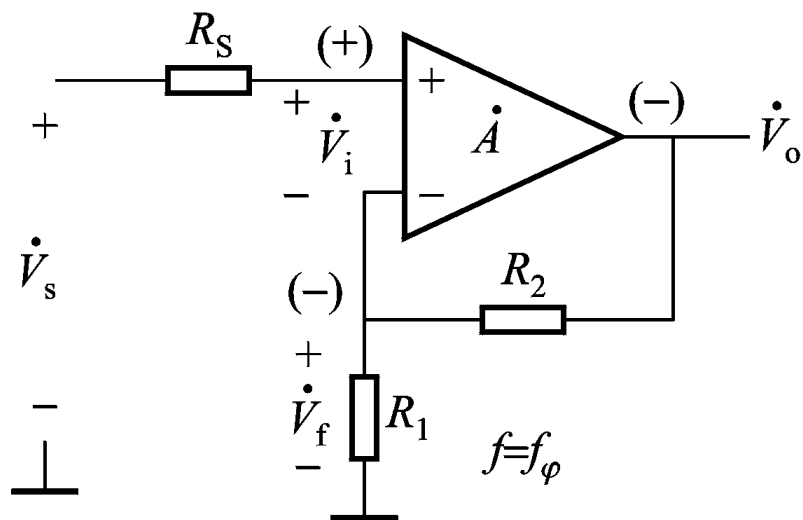
ü 例：具有三个极点频率的放大电路，其增益的频率特性表达式为：

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

通带内（ $f \leq f_{p1}$ ）



通带外（ $f = f_j$ ）

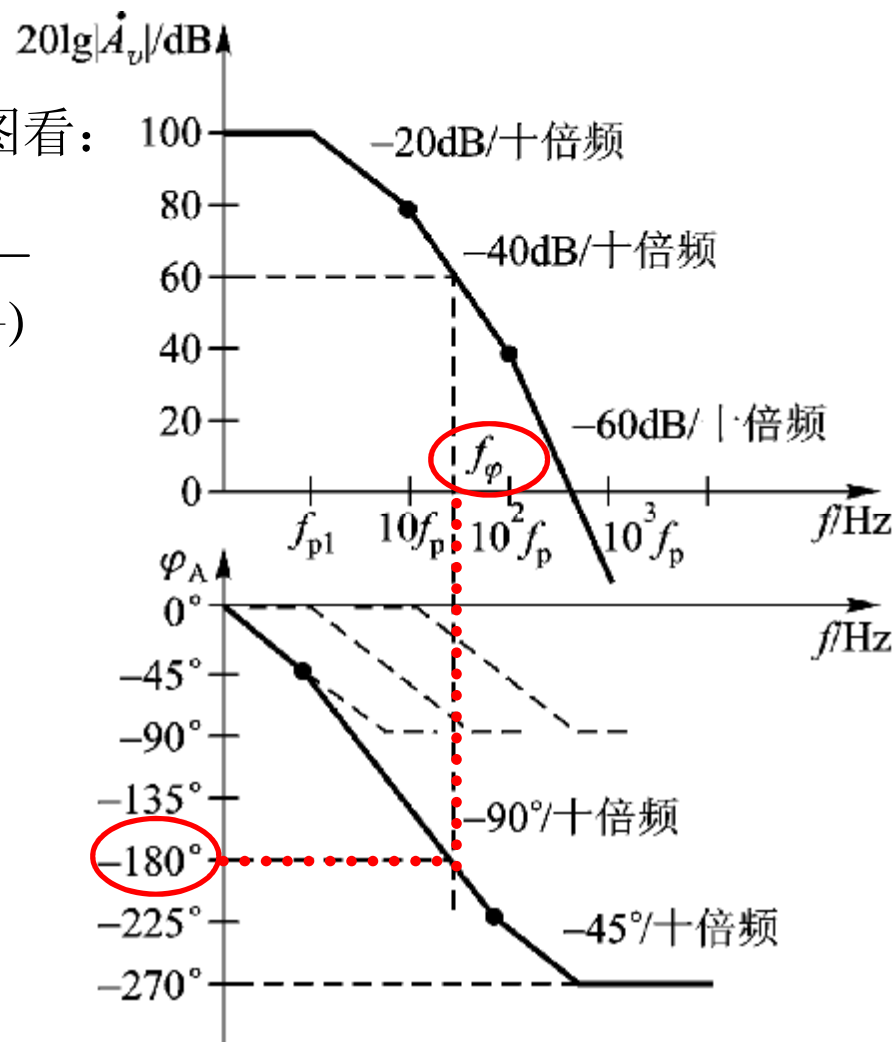


在通频带外的某个频率点，负反馈变成了正反馈。

Ø 自激振荡（生成原因：图例）

Ü 从增益的频率特性曲线（波特）图看：

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



在通频带外的某个频率点，负反馈变成了正反馈。

Ø 自激振荡（生成条件）

ü 幅值平衡条件： $|A_F|=1$ （或 $20\lg |A_F|=0$ ）

相位平衡条件： $\angle A_F = \angle A + \angle F = \pm(2n+1)\pi$

ü 只有同时满足上述两个条件，电路才会产生自激振荡。

ü 起振时，要求： $|A_F|>1$

如此，才能使振荡幅度不断增大，直到满足幅值平衡条件。

Ø 自激振荡（稳定判据）

ü 判据 1： $|A_F| = 1$ 时， $|\Delta j_A + \Delta j_F|$ 是否 $< 180^\circ$

判据 2： $|\Delta j_A + \Delta j_F| = \pm 180^\circ$ 时， $|A_F|$ 是否 < 1

ü 只要上述两个条件的任一满足，电路是稳定的（不会自激振荡）；
（两个条件同时满足时，临界自激）

ü 通常利用环路增益的波特图来判别是否会产生自激振荡。

【例3.5-1】

右下图所示某电路的环路增益频率特性曲线（波特）图。

判断电路的稳定性。

$|A\dot{F}| = 1$ 时, $|\Delta j_A + \Delta j_F|$ 是否 $< 180^\circ$

$|\Delta j_A + \Delta j_F| = \pm 180^\circ$ 时, $|A\dot{F}|$ 是否 < 1

解法 1（根据相位条件满足时，看幅度参数）：

由图，当： $|\Delta j_A + \Delta j_F| = 180^\circ$

对应： $20\lg |A\dot{F}| > 0$ ($|A\dot{F}| > 1$)

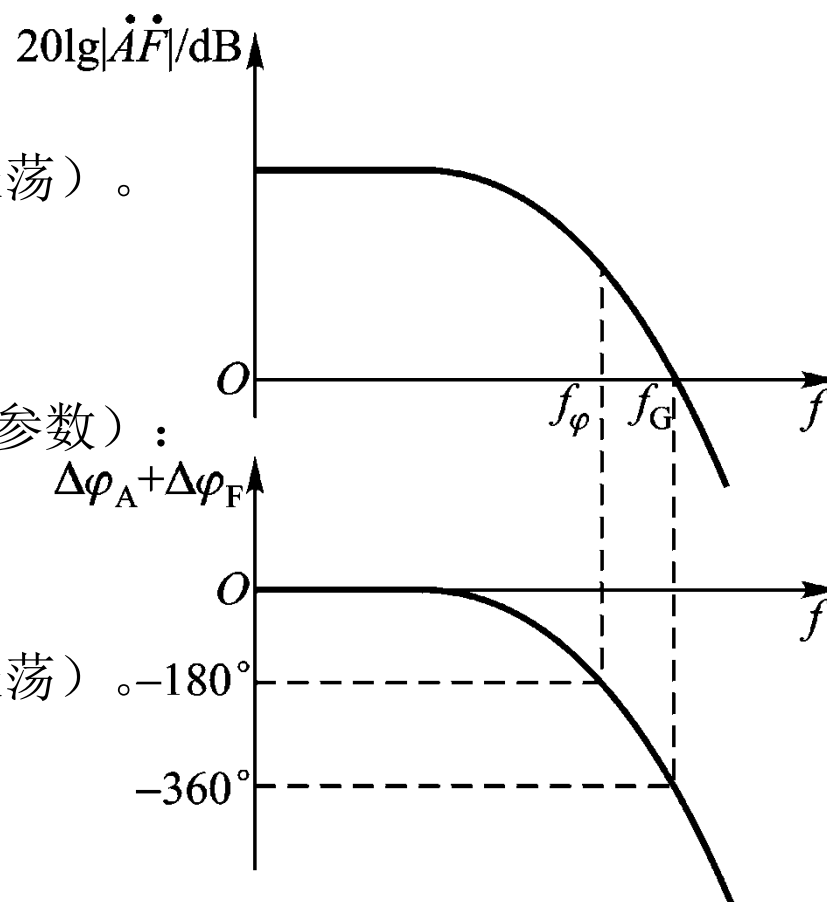
所以，电路是不稳定的（会产生自激振荡）。

解法 2（根据幅度条件满足时，看相位参数）：

由图，当： $20\lg |A\dot{F}| = 0$ ($|A\dot{F}| = 1$)

对应： $|\Delta j_A + \Delta j_F| > 180^\circ$

所以，电路是不稳定的（会产生自激振荡）。



【例3.5-2】

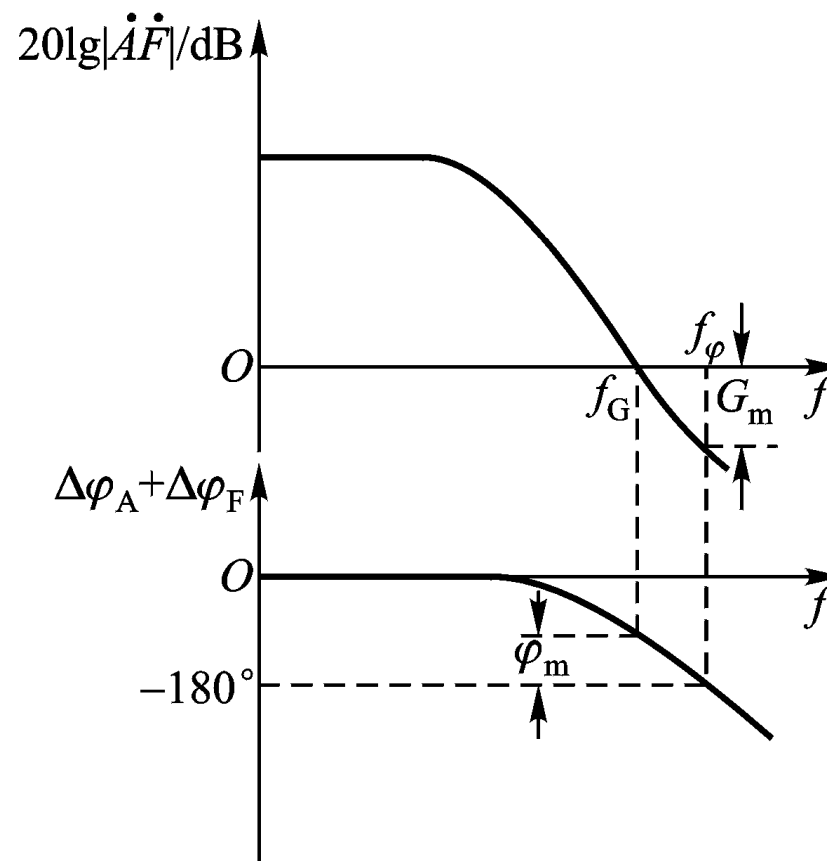
右下图所示某电路的环路增益频率特性曲线（波特）图。

判断电路的稳定性。

$|A\dot{F}| = 1$ 时, $|\Delta j_A + \Delta j_F|$ 是否 $< 180^\circ$

$|\Delta j_A + \Delta j_F| = \pm 180^\circ$ 时, $|A\dot{F}|$ 是否 < 1

解：... 电路是稳定的（不会产生自激振荡）。



Ø 自激振荡（稳定裕度）

ü 增益裕度 G_m (dB):

定义: $f = f_j$ 时, 附加相移满足相位平衡条件;

即: $|\Delta j_A + \Delta j_F|_{f=f_j} = \pm 180^\circ$

此时的环路增益与临界自激时的环路增益之差:

$$G_m = 20\lg |\dot{A}\dot{F}|_{f=f_j} - 0$$

ü 相位裕度 j_m :

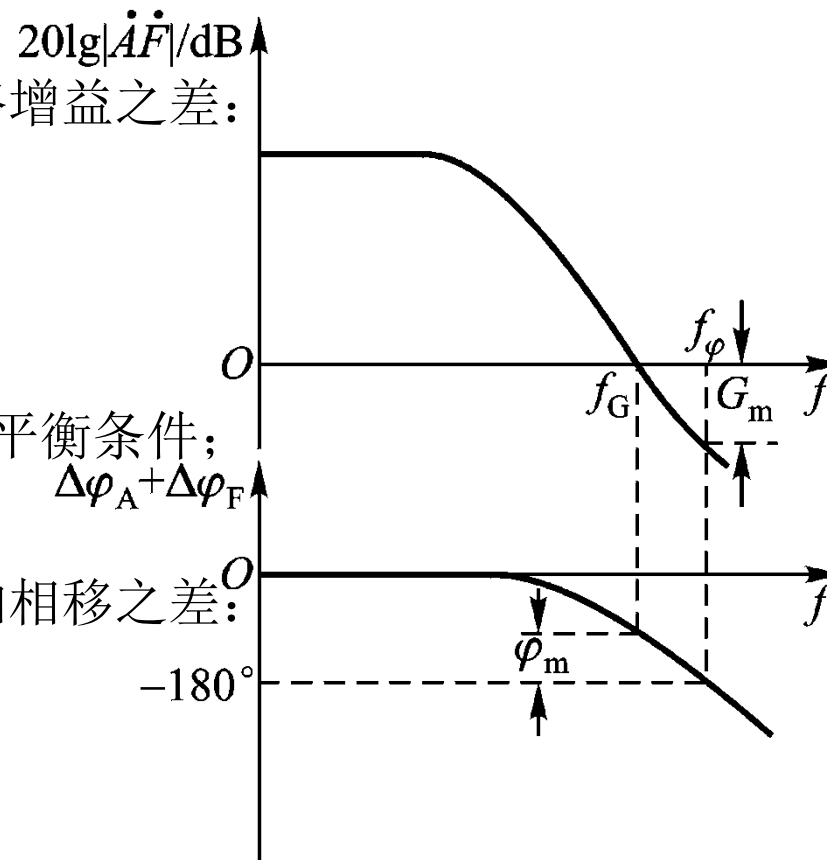
定义: $f = f_G$ 时, 环路增益满足幅值平衡条件;

即: $20\lg |\dot{A}\dot{F}|_{f=f_G} = 0$ ($|\dot{A}\dot{F}|_{f=f_G} = 1$)

此时的附加相移与临界自激时的附加相移之差:

$$j_m = 180^\circ - |\varphi(f_G)|$$

ü 工程上要求: $G_m \leq -10\text{dB}$, $j_m \geq 45^\circ$



【例3.6】

右下图所示某负反馈放大电路的开环增益幅频和相频波特图。

已知：反馈网络由纯电阻构成。

问：为防止自激振荡，
反馈系数必须小于多少？

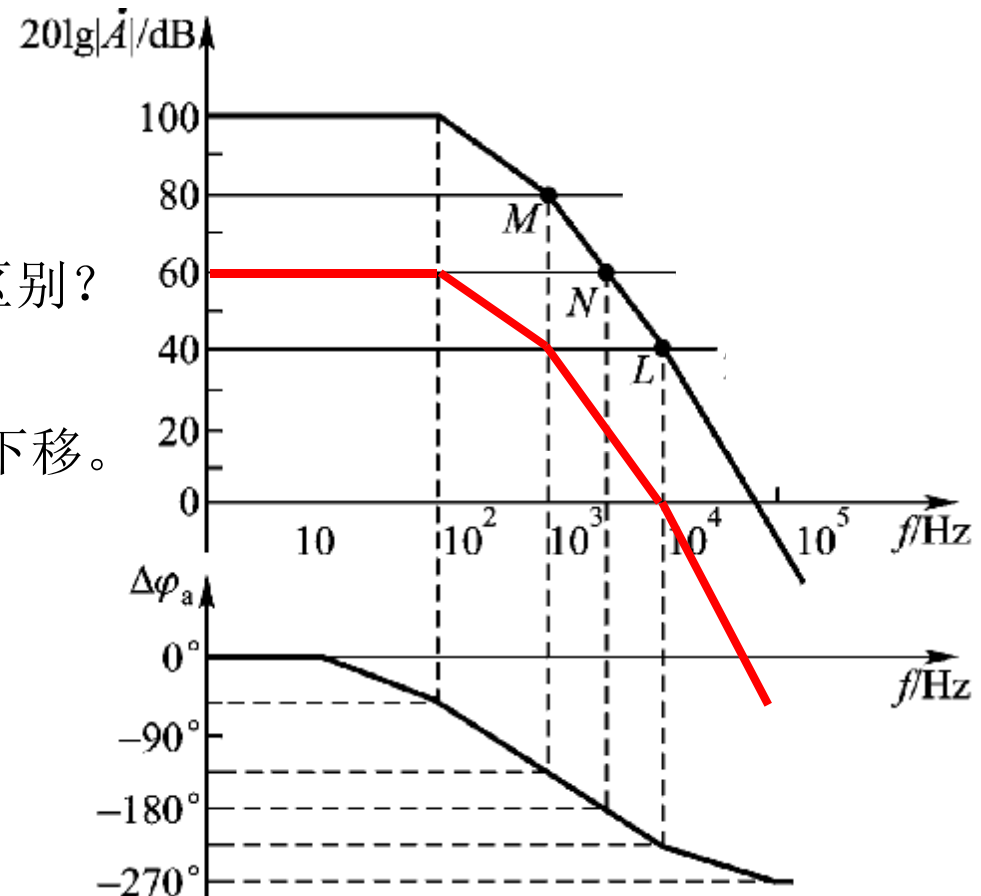
思考：环路、开环增益幅频图区别？

$$20\lg|\dot{A}\dot{F}| = 20\lg|\dot{A}| + 20\lg|\dot{F}|$$

若反馈系数为常数，则整体上/下移。

例：反馈系数为 0.01 时的
环路增益幅频图
(右图红线)

环路、开环增益相频图？



右下图所示某负反馈放大电路的开环增益幅频和相频波特图。

已知：反馈网络由纯电阻构成。

问：为防止自激振荡，
反馈系数必须小于多少？

解：找到相位平衡点。

作反馈线（右图）。

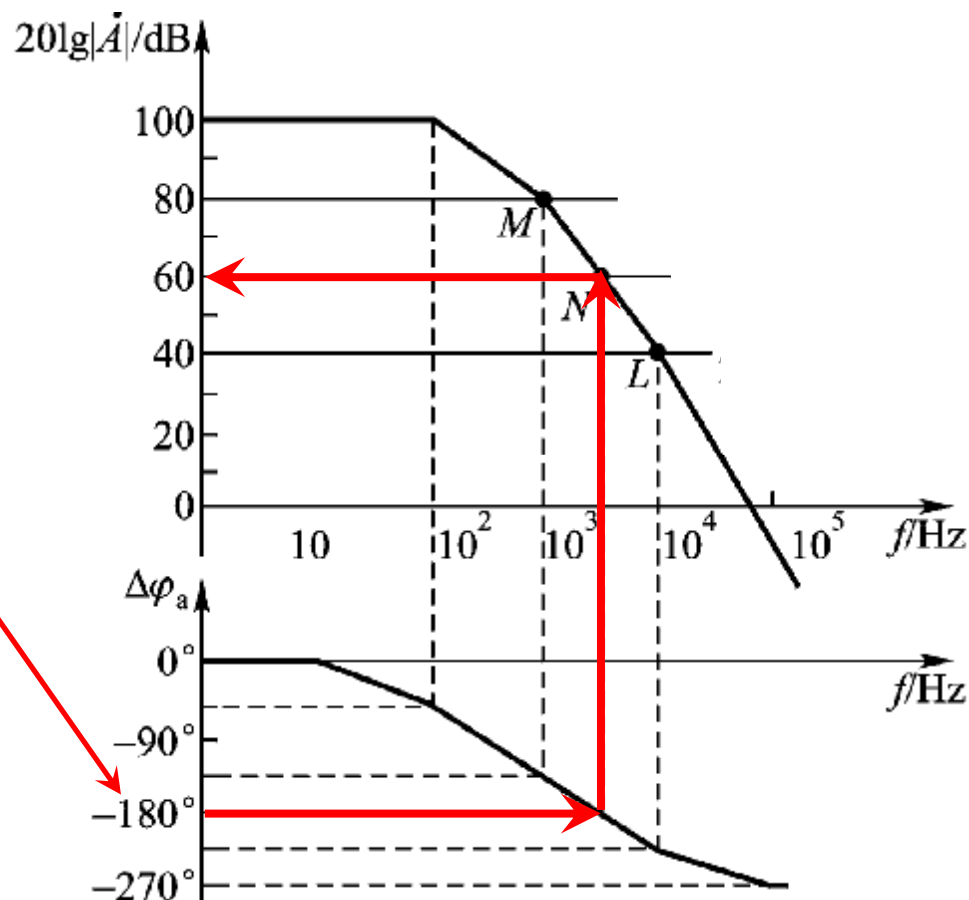
由图，得： $20\lg|\dot{A}| = 60\text{dB}$

电路稳定（不自激）的条件是：

$$20\lg|\dot{A}\dot{F}| < 0$$

所以： $20\lg|\dot{F}| < -60\text{dB}$

即： $|\dot{F}| < 0.001$



（或，根据临界自激的条件判断 ...）

右下图所示某负反馈放大电路的开环增益幅频和相频波特图。

已知：反馈网络由纯电阻构成。

若反馈系数为 10^{-2} ：

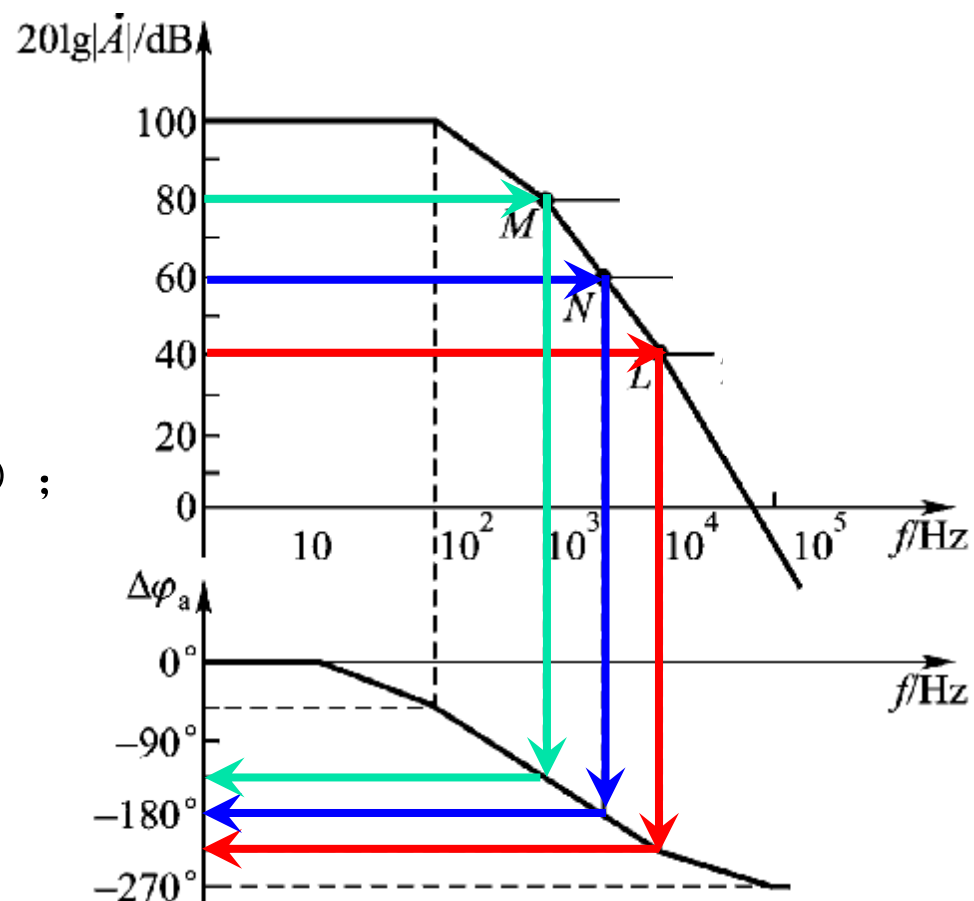
相位裕度为 -45° （自激）；

若反馈系数为 10^{-3} ：

相位裕度为 0° （临界自激）；

若反馈系数为 10^{-4} ：

相位裕度为 45° （稳定）；



在一定的开环增益下，反馈越深，越容易自激。

负反馈对性能改善和稳定性应合理考虑。

Ø 自激振荡（消除方法）

ü 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。

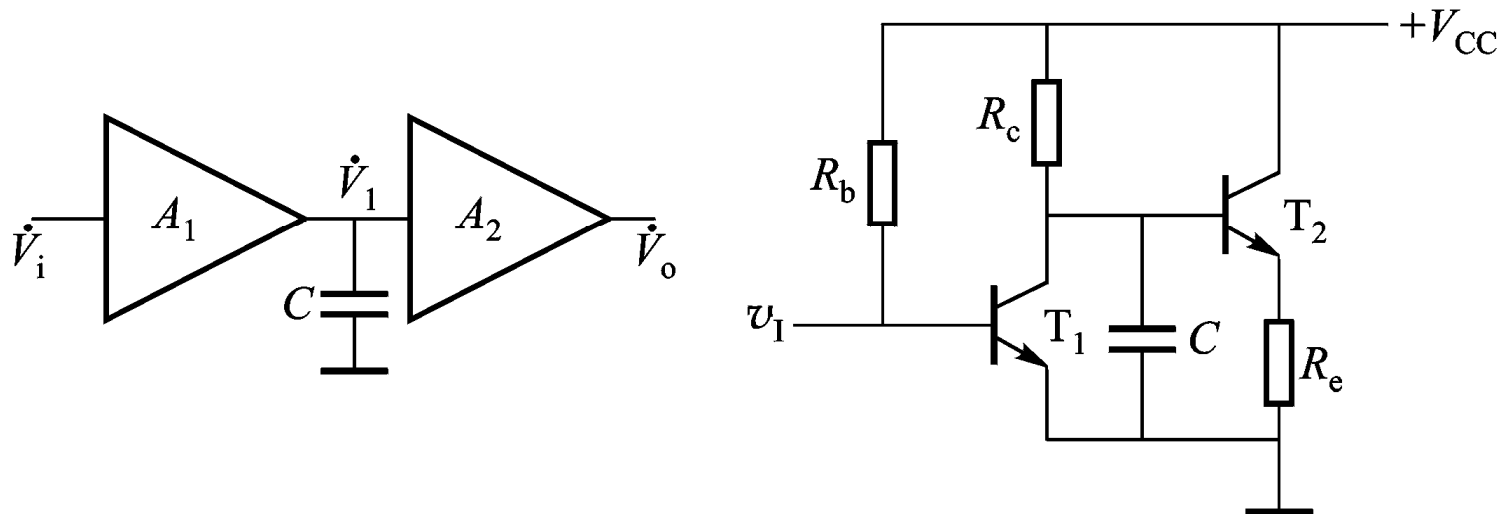
ü 相位补偿法（频率补偿法）：

在反馈放大电路的适当部位加入 RC 网络；

改变环路增益的频率响应；

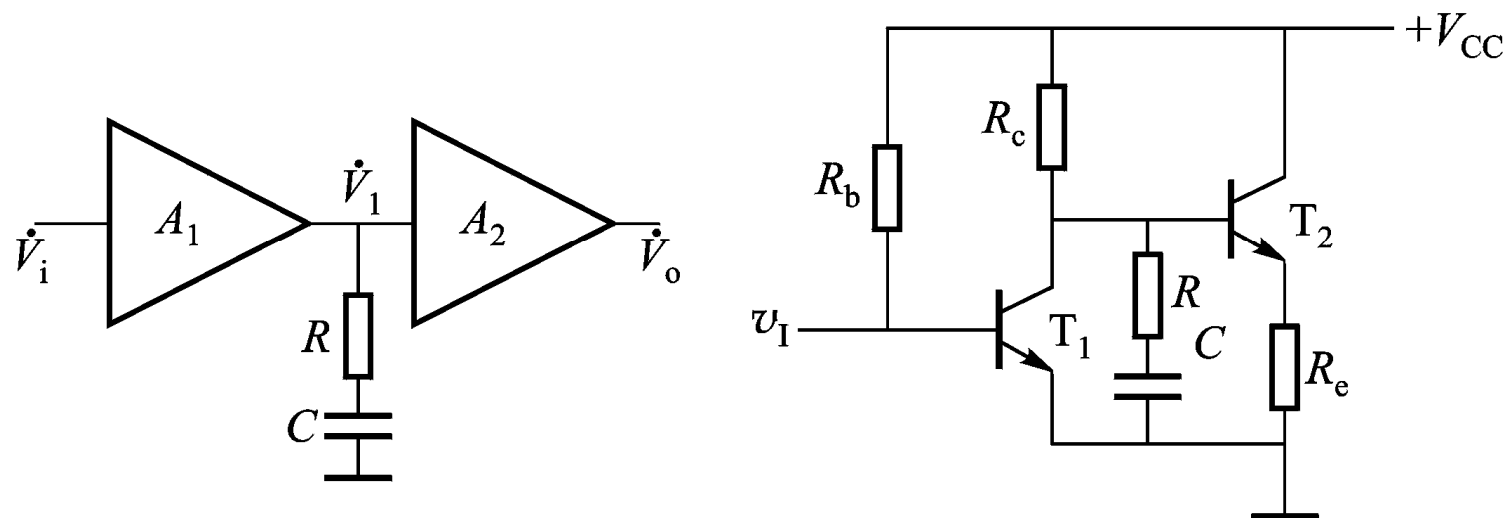
放大电路在增益和相位裕度满足要求的前提下，获得较大的环路增益。

Ø 自激振荡（电容滞后补偿）



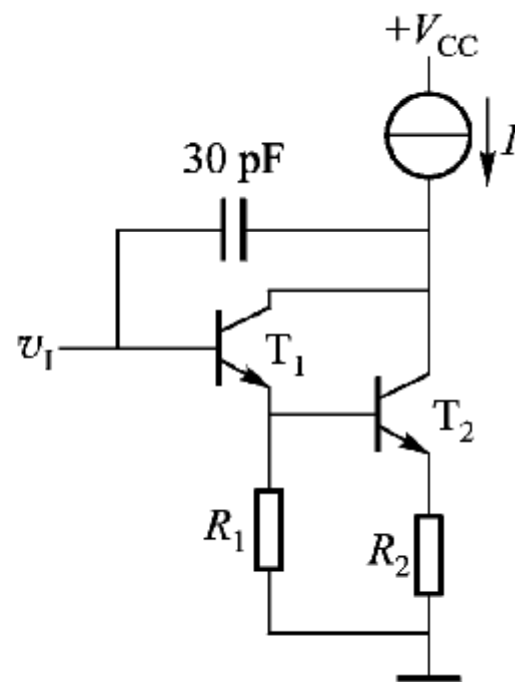
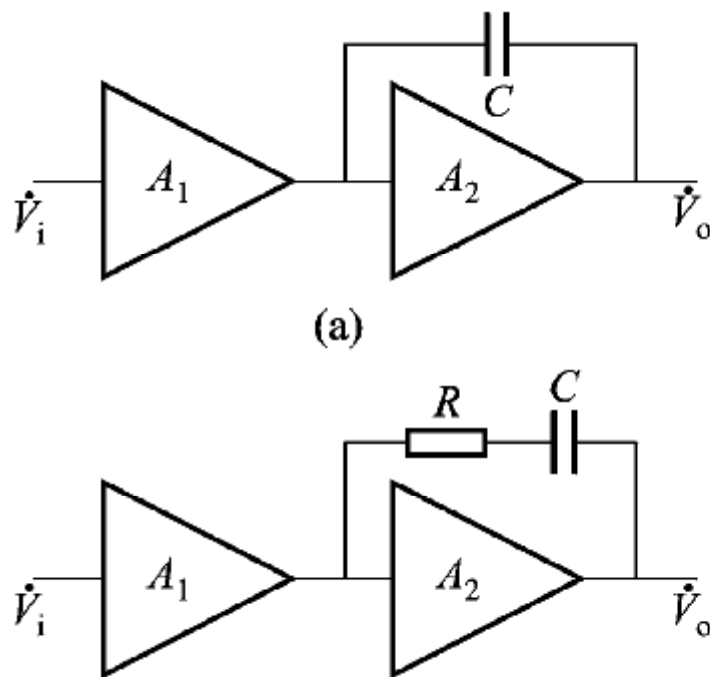
ü 通常将电容接在时间常数最大的回路中；
补偿后通频带变窄，又称窄带补偿。

Ø 自激振荡 (RC 滞后补偿)



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

Ø 自激振荡（密勒效应补偿）



ü 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。

✓ 本节作业

ü 习题 2 (P152)

1 (反馈类型)

ü 题 2.1: **分析并判断**各电路的反馈类型 (其它解题不要)。
(串联/并联、电压/电流、正/负)

特别提醒: 不是问答题!

所有的题目, 需要有解题过程 (不是给一个答案即可)。

✓ 本节作业

ü 习题 2 (P154)

9、10、12、15abeg (深度负反馈)

所有的题目，需要有解题过程（不是给一个答案即可）。

✓ 本节作业

ü 习题 2 (P158)

22 (自激振荡)

所有的题目，需要有解题过程（不是给一个答案即可）。