

7 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 负反馈对放大电路性能的影响
- 7.5 深度负反馈条件下的近似计算
- 7.6 负反馈放大电路设计
- 7.7 负反馈放大电路的频率响应
- 7.8 负反馈放大电路的稳定性



7.1 反馈的基本概念与分类

7.1.1 什么是反馈

7.1.2 直流反馈与交流反馈

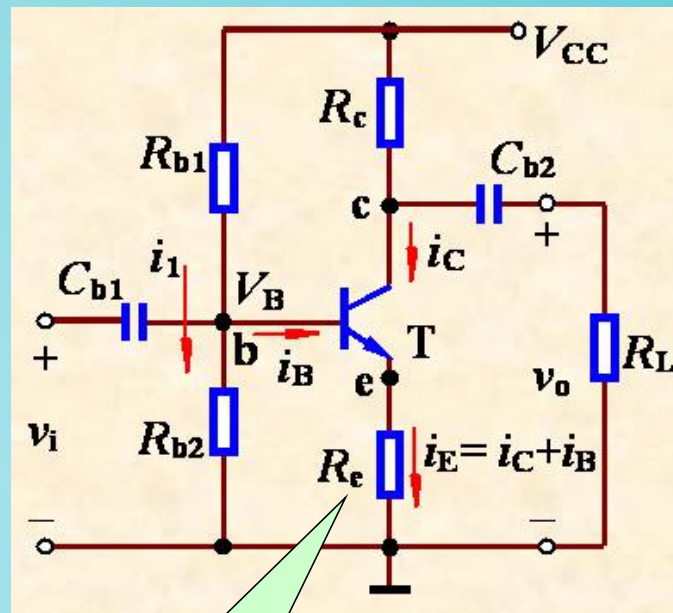
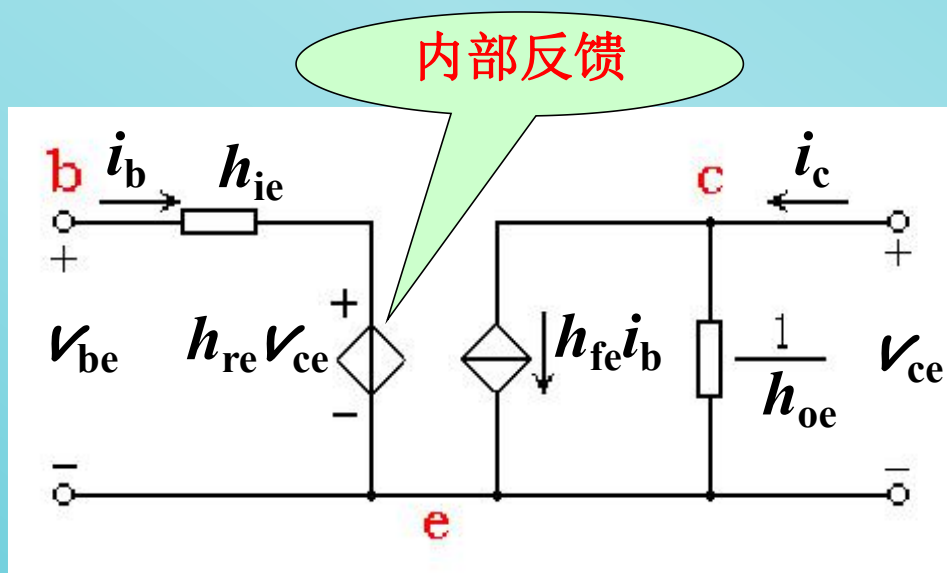
7.1.3 正反馈与负反馈

7.1.4 串联反馈与并联反馈

7.1.5 电压反馈与电流反馈

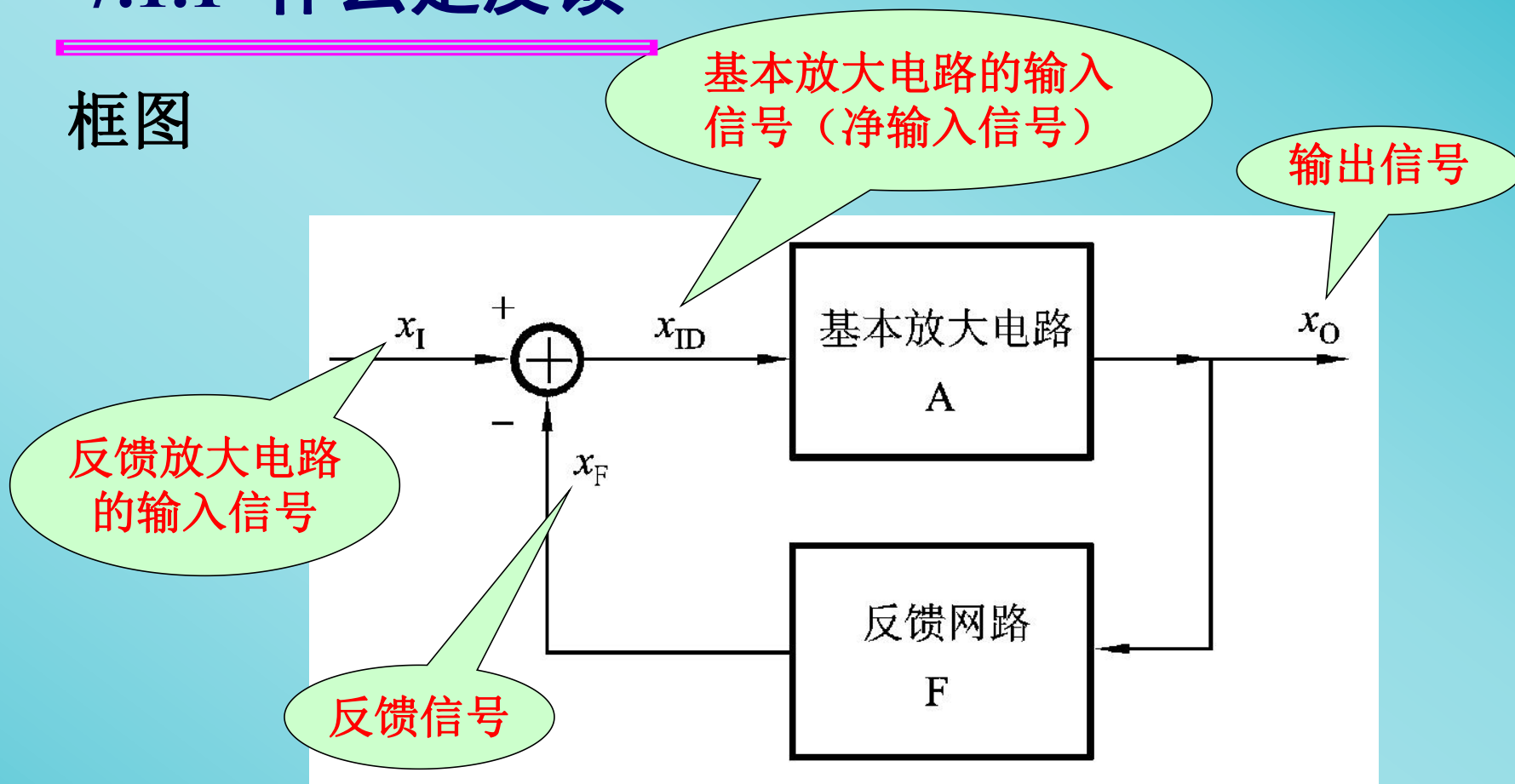
7.1.1 什么是反馈

将电子系统输出回路的电量（电压或电流）送回到输入回路的过程。



7.1.1 什么是反馈

框图



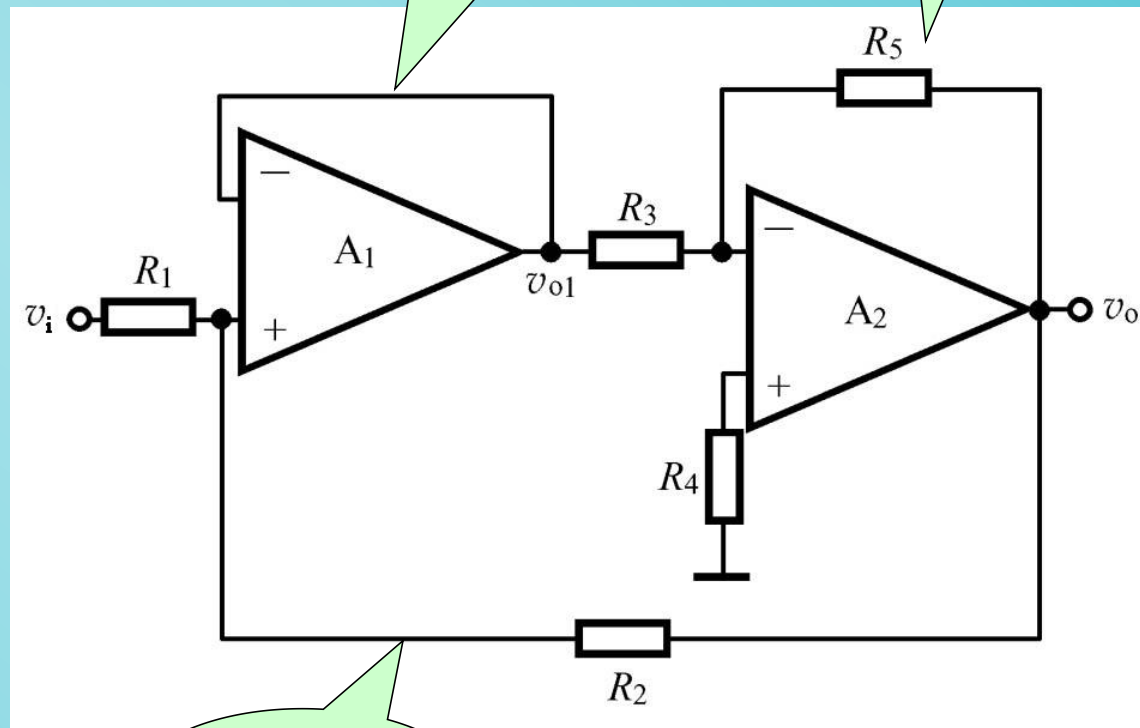
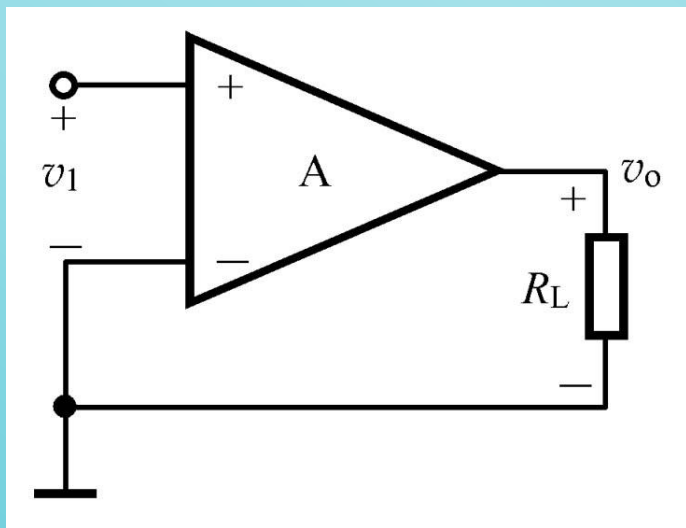
反馈通路 —— 信号反向传输的渠道

开环 —— 无反馈通路

闭环 —— 有反馈通路

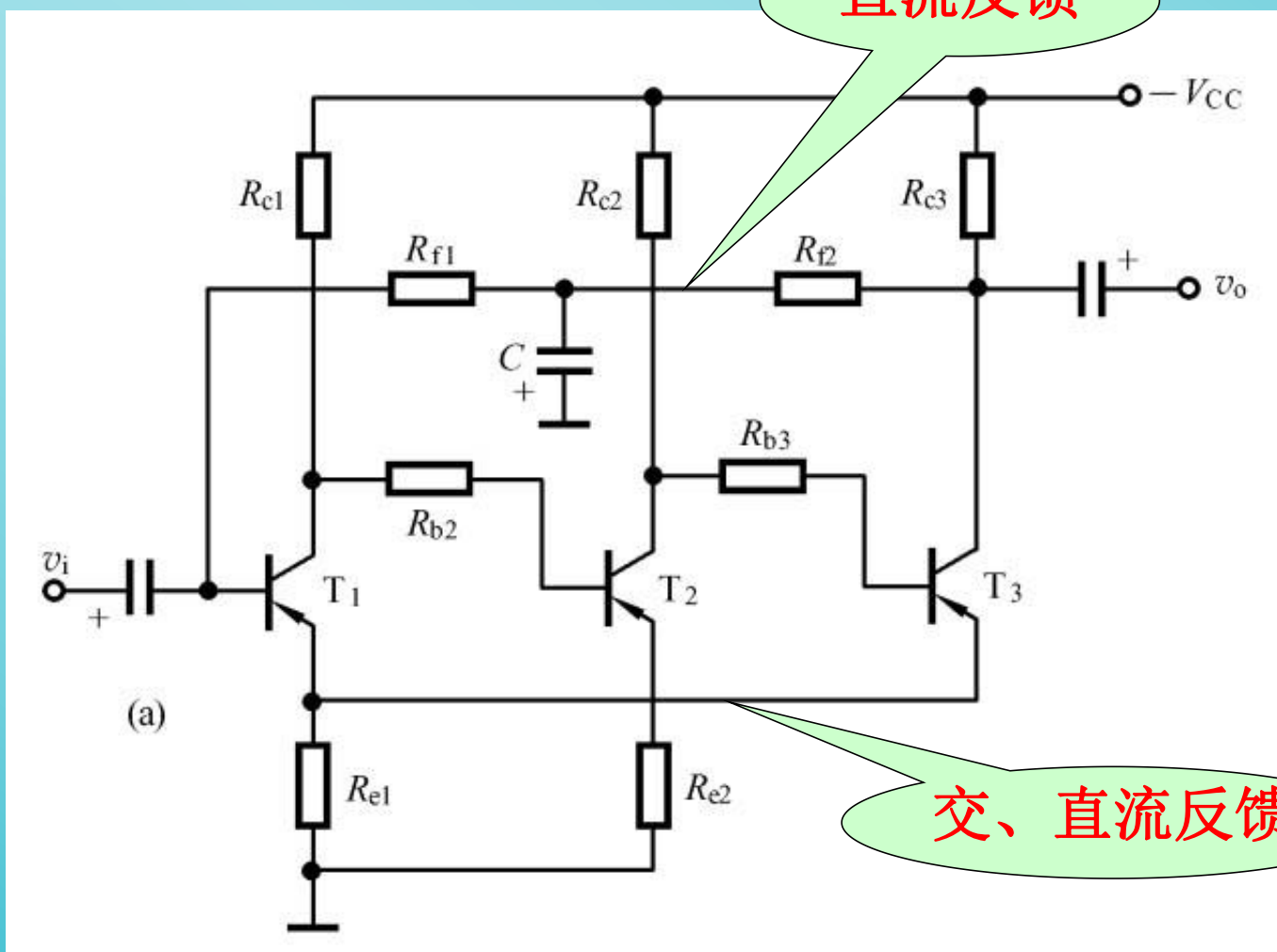
7.1.1 什么是反馈

判断电路是否存在反馈通路

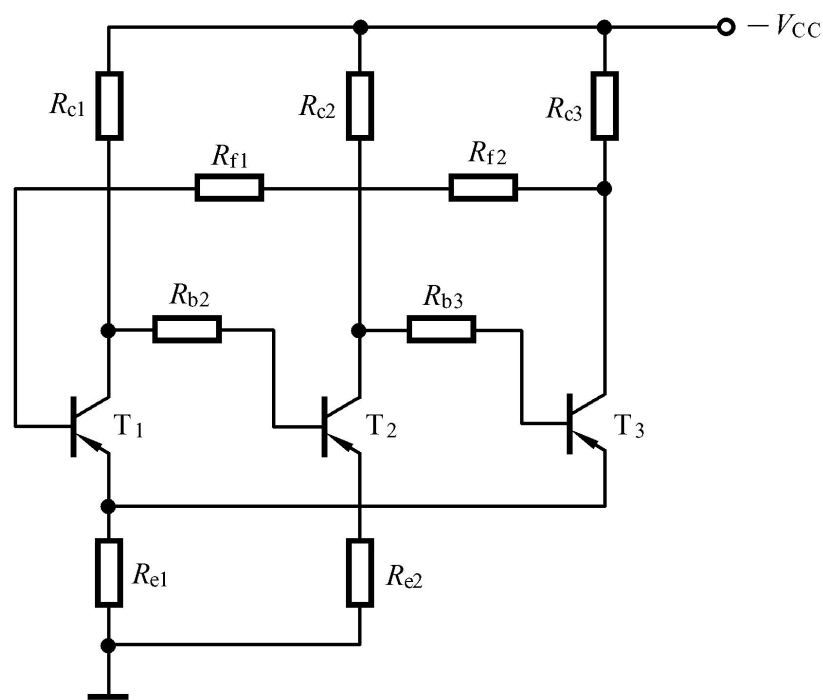


7.1.2 直流反馈与交流反馈

根据反馈到输入端的信号是交流，还是直流，或同时存在，来进行判别。

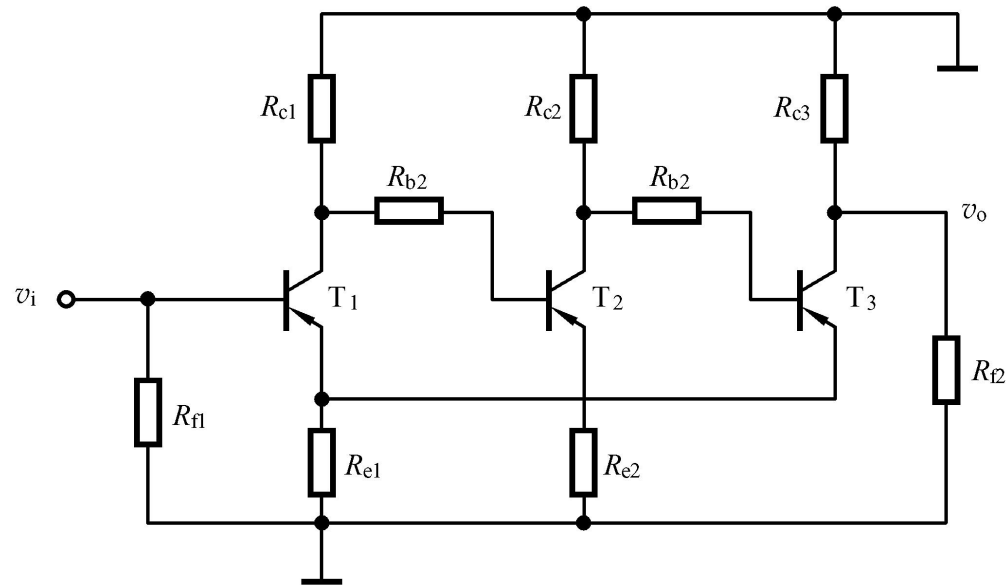


7.1.2 直流反馈与交流反馈



(a)

(a) 直流通路



(b)

(b) 交流通路

7.1.3 正反馈与负反馈

从输出端看

正反馈：输入量不变时，引入反馈后输出量变大了。

负反馈：输入量不变时，引入反馈后输出量变小了。

从输入端看

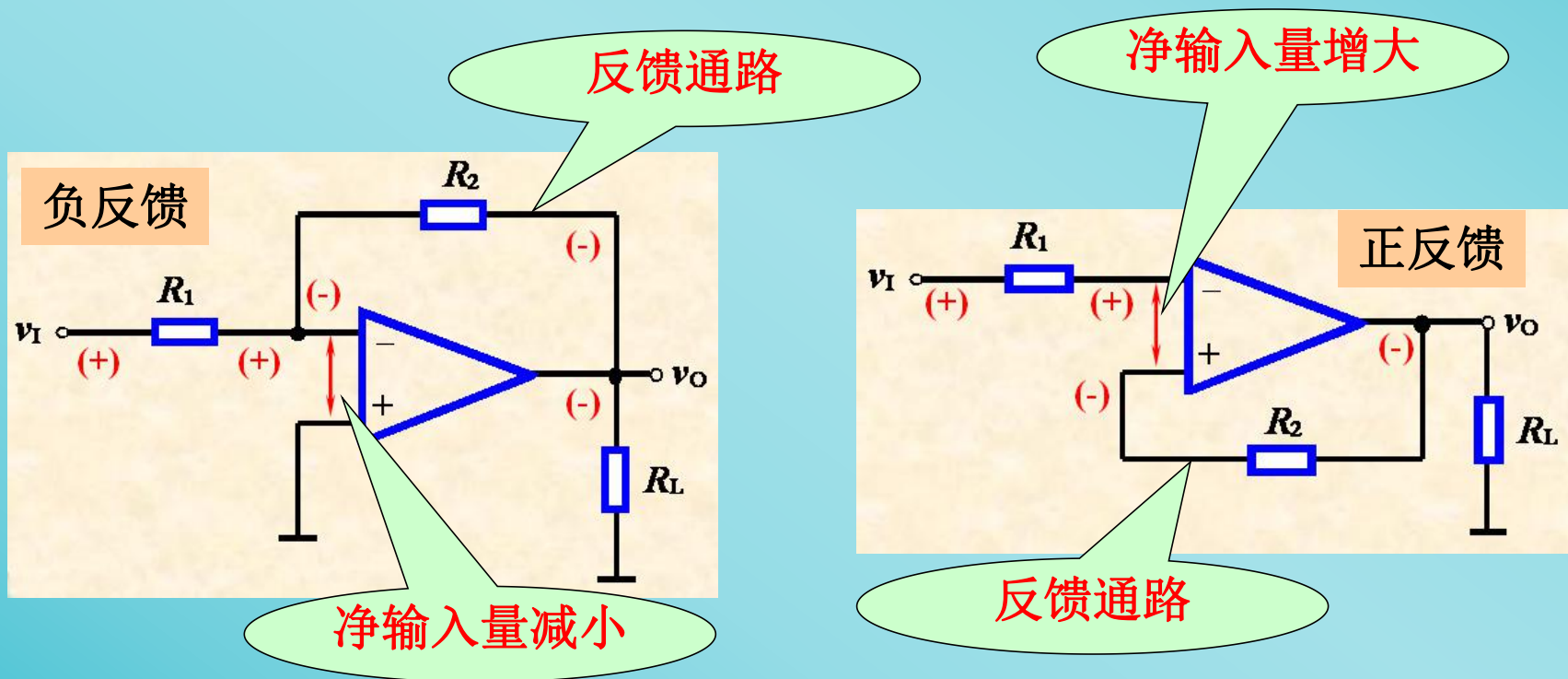
正反馈：引入反馈后，使净输入量变大了。

负反馈：引入反馈后，使净输入量变小了。

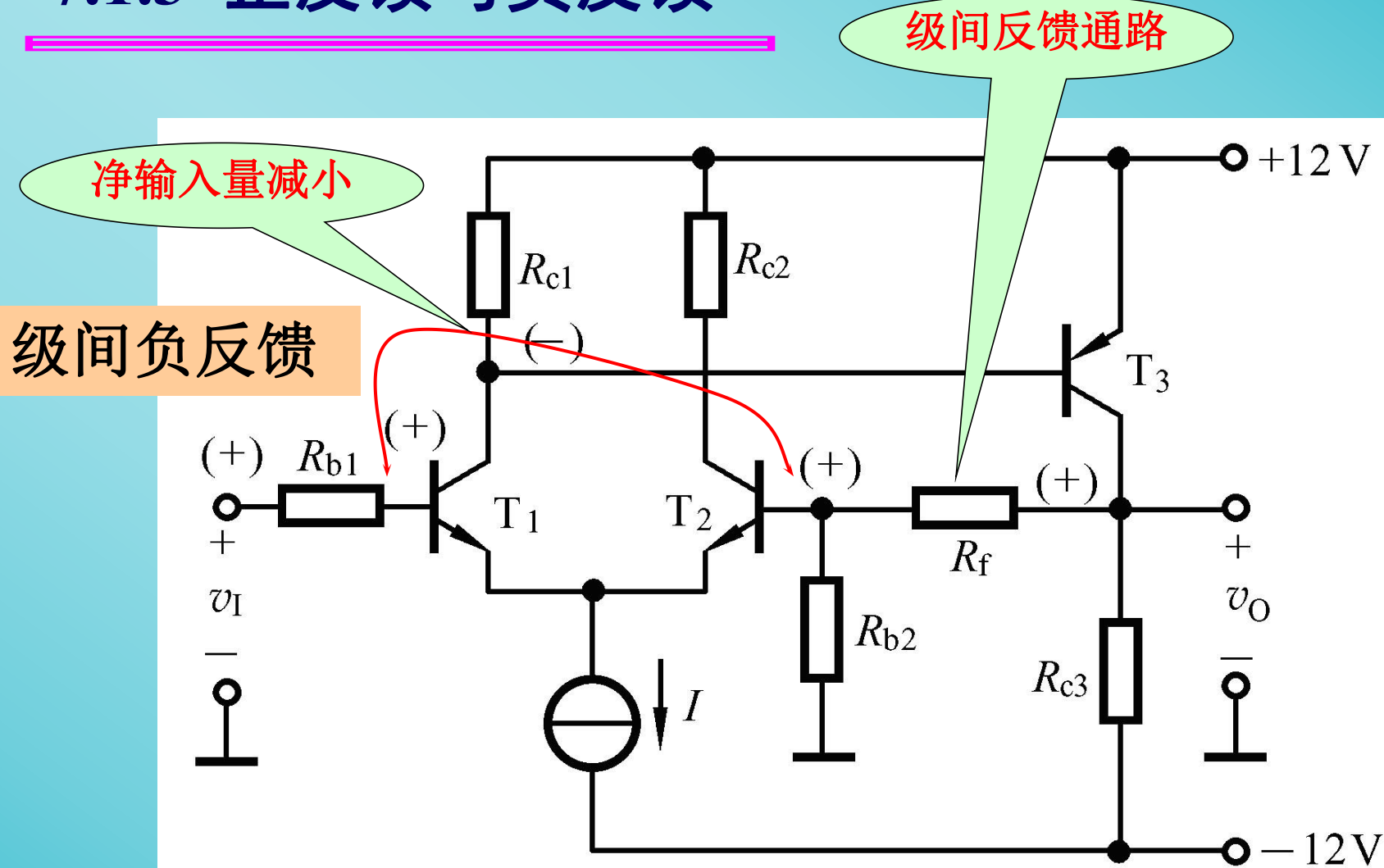
净输入量可以是电压，也可以是电流。

7.1.3 正反馈与负反馈

判别方法：**瞬时极性法**。即在电路中，从输入端开始，沿着信号流向，标出某一时刻有关节点电压变化的斜率（正斜率或负斜率，用“+”、“-”号表示）。

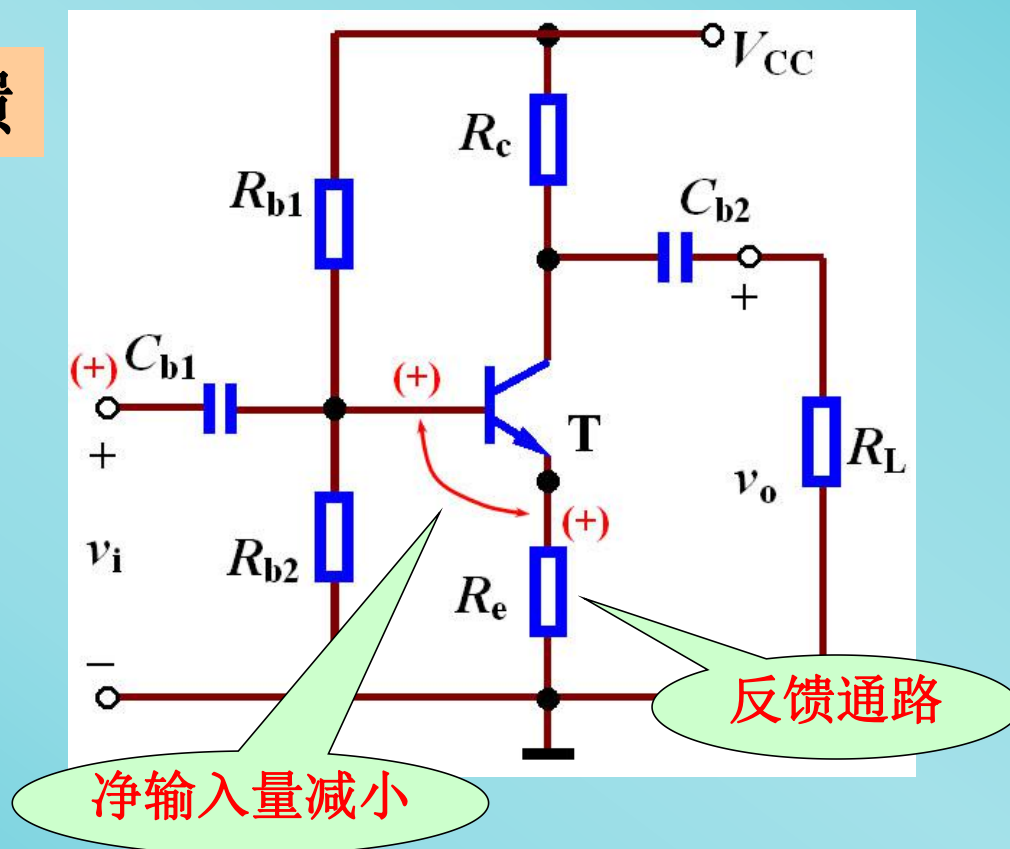


7.1.3 正反馈与负反馈



7.1.3 正反馈与负反馈

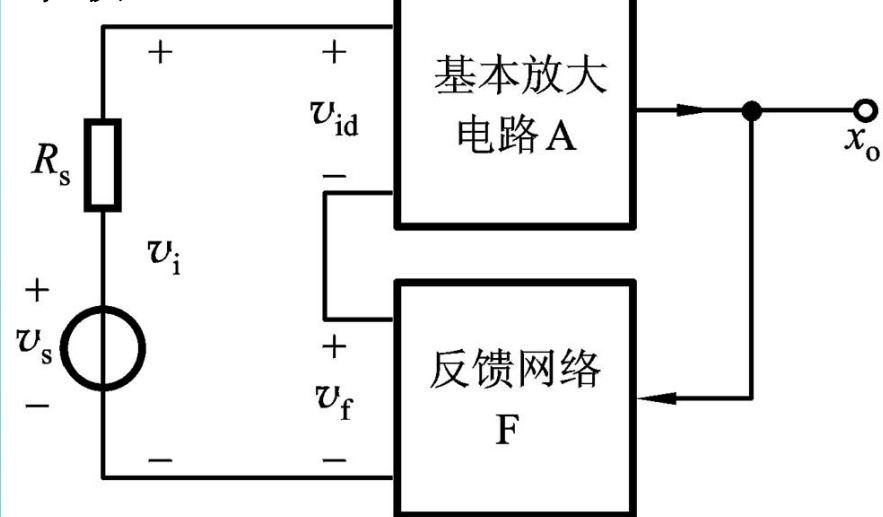
本级负反馈



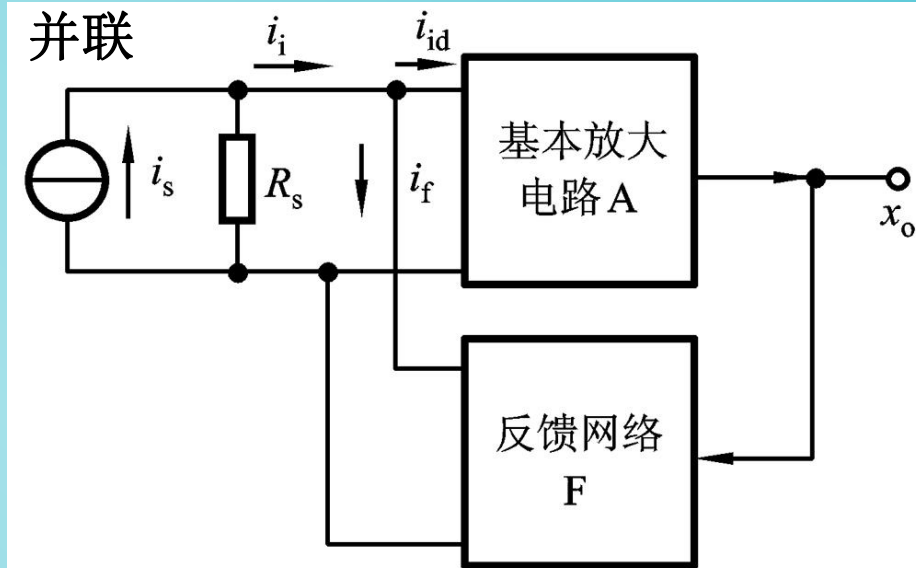
7.1.4 串联反馈与并联反馈

由反馈网络在放大电路输入端的连接方式判定

串联



并联



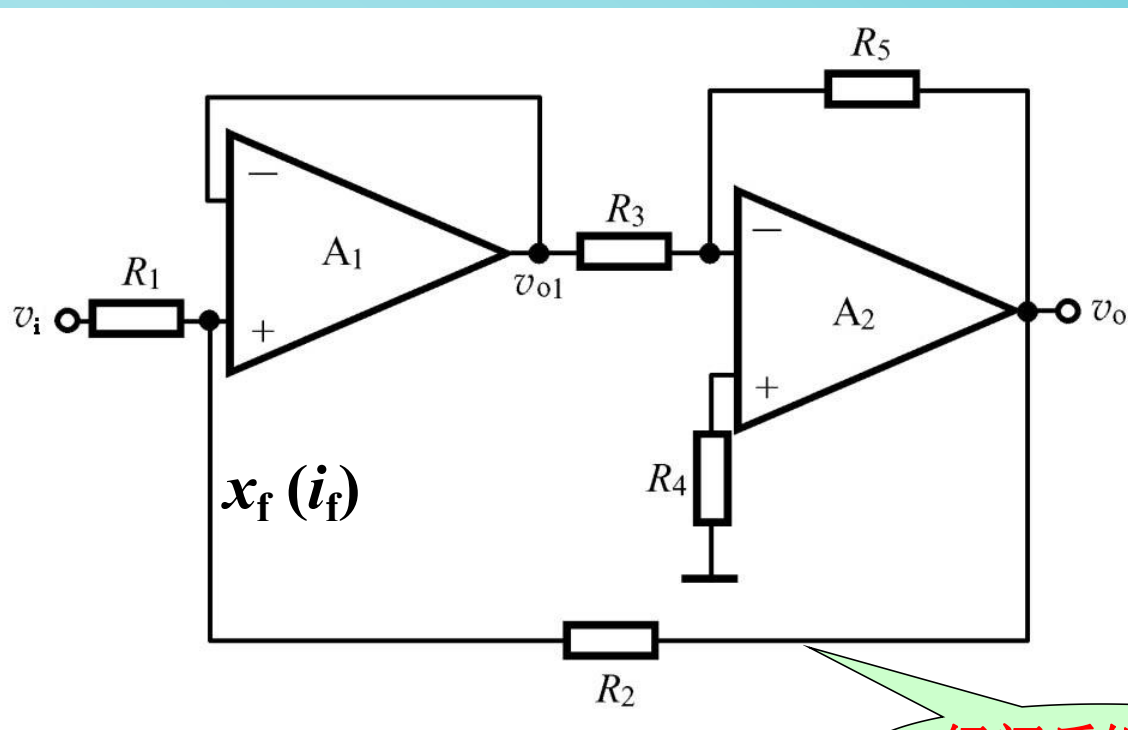
串联： 输入以电压形式求和 (KVL) $-v_i + v_{id} + v_f = 0$ 即 $v_{id} = v_i - v_f$

并联： 输入以电流形式求和 (KCL) $i_i - i_{id} - i_f = 0$ 即 $i_{id} = i_i - i_f$

7.1.4 串联反馈与并联反馈

判断电路中的级间交流反馈是串联反馈还是并联反馈

并联反馈

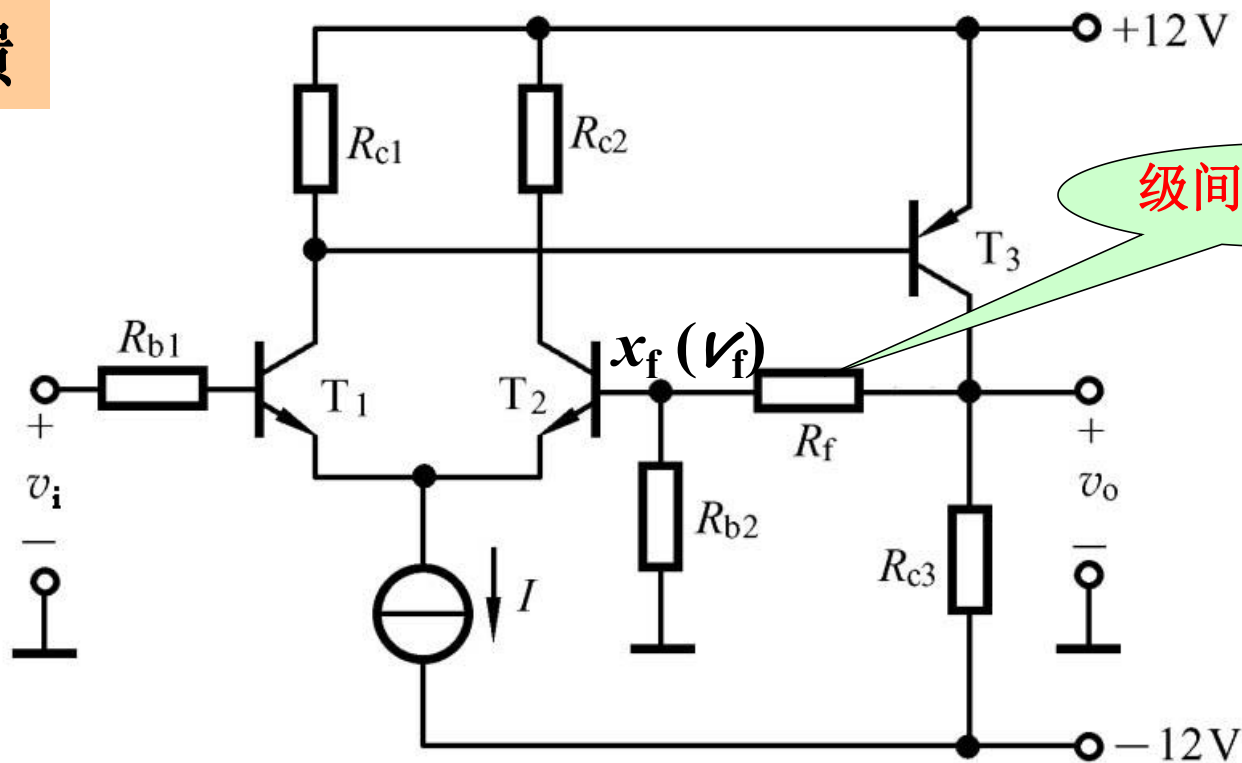


级间反馈通路

7.1.4 串联反馈与并联反馈

判断电路中的级间交流反馈是串联反馈还是并联反馈

串联反馈

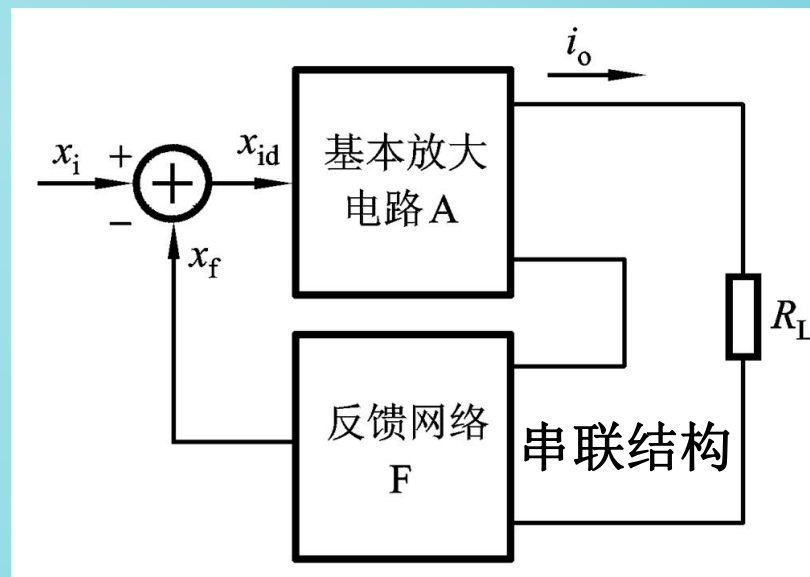
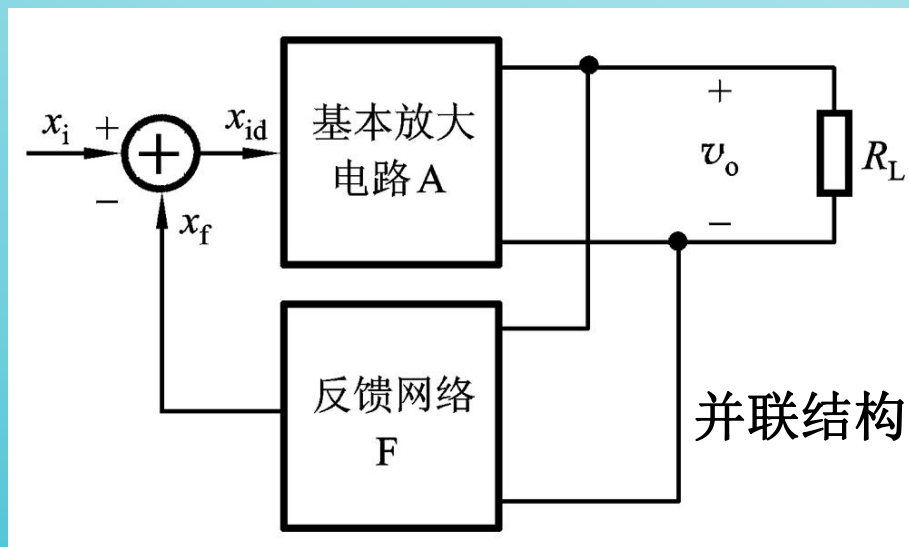


7.1.5 电压反馈与电流反馈

电压反馈与电流反馈由反馈网络在放大电路输出端的取样对象决定

电压反馈：反馈信号 x_f 和输出电压成比例，即 $x_f = Fv_o$

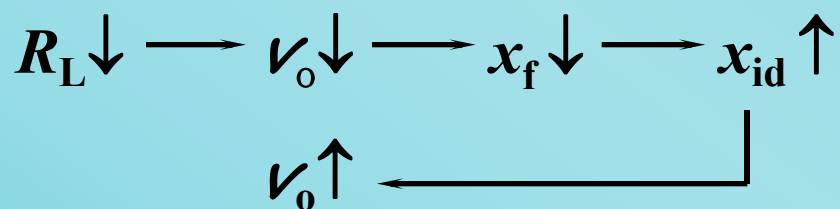
电流反馈：反馈信号 x_f 与输出电流成比例，即 $x_f = Fi_o$



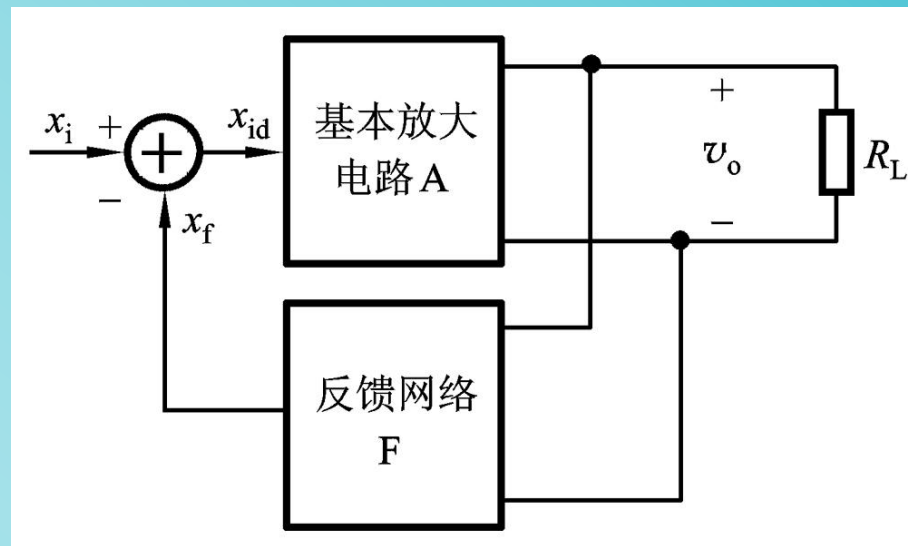
7.1.5 电压反馈与电流反馈

电压负反馈

$$x_f = F v_o, \quad x_{id} = x_i - x_f$$



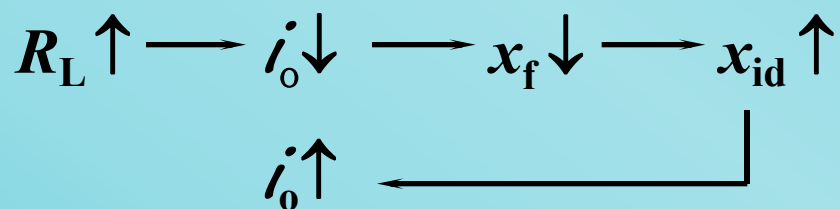
- 电压负反馈稳定输出电压



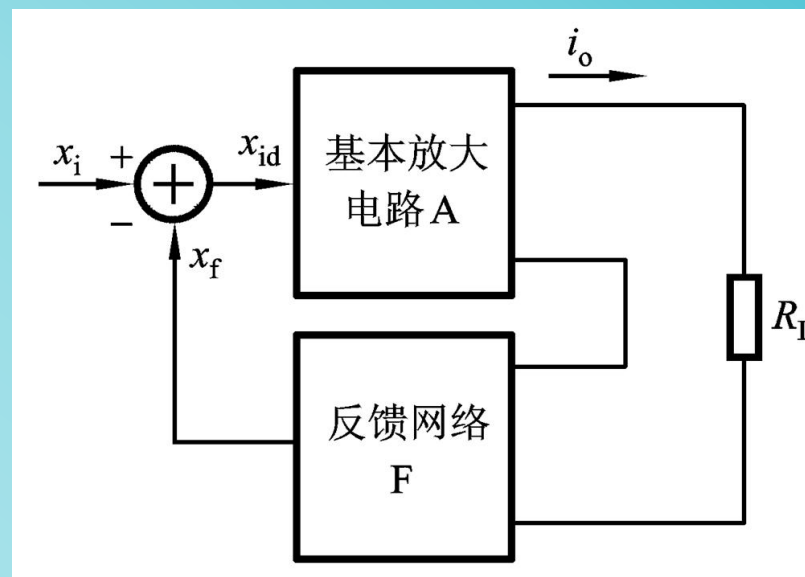
7.1.5 电压反馈与电流反馈

电流负反馈

$$x_f = F \dot{i}_o, \quad x_{id} = x_i - x_f$$



■ 电流负反馈稳定输出电流

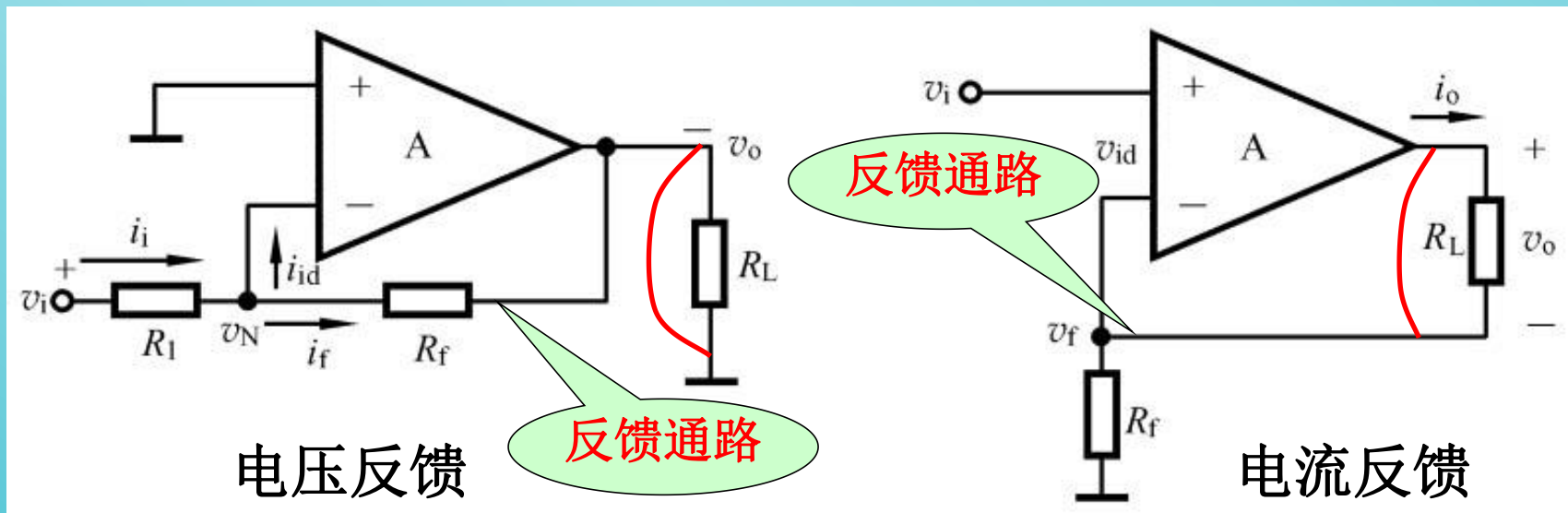


7.1.5 电压反馈与电流反馈

判断方法：负载短路法

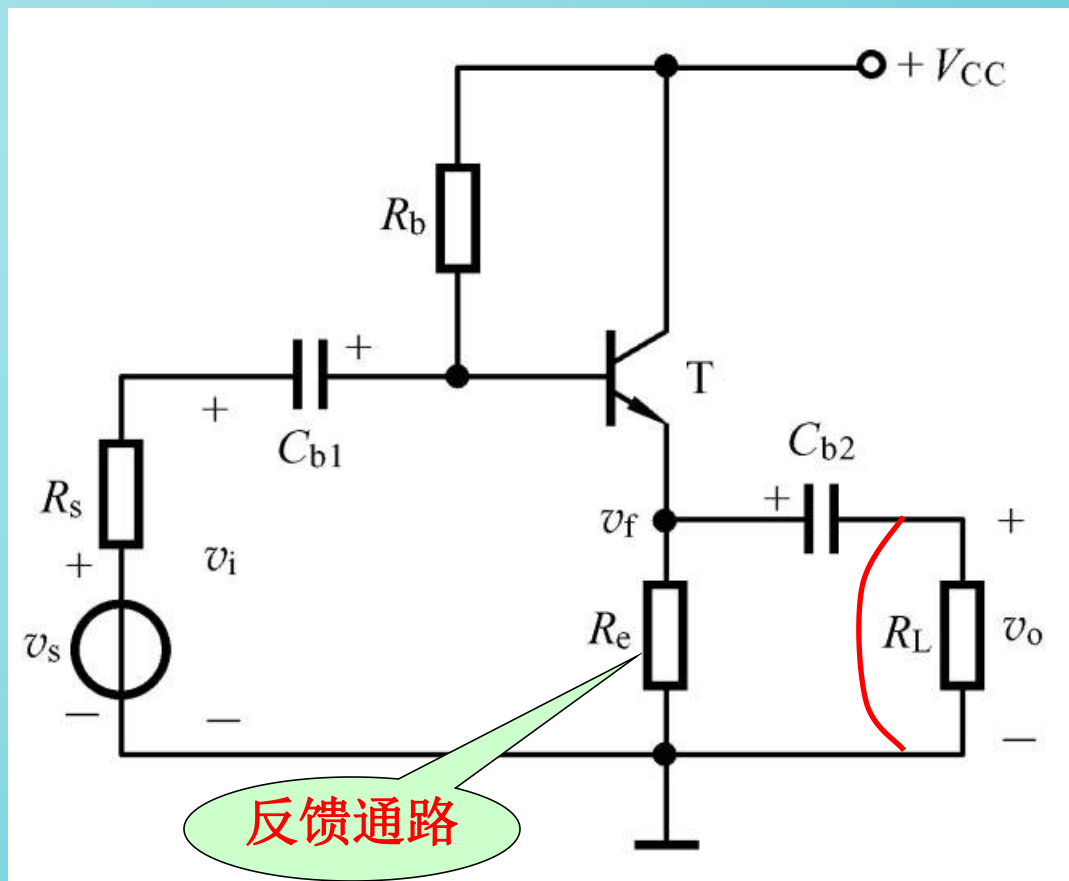
将**负载**短路（未接负载时输出对地短路），反馈量为零——电压反馈。

将**负载**短路，反馈量仍然存在——电流反馈。



7.1.5 电压反馈与电流反馈

电压反馈





7.2 负反馈放大电路的四种组态

7.2.1 电压串联负反馈放大电路

7.2.2 电压并联负反馈放大电路

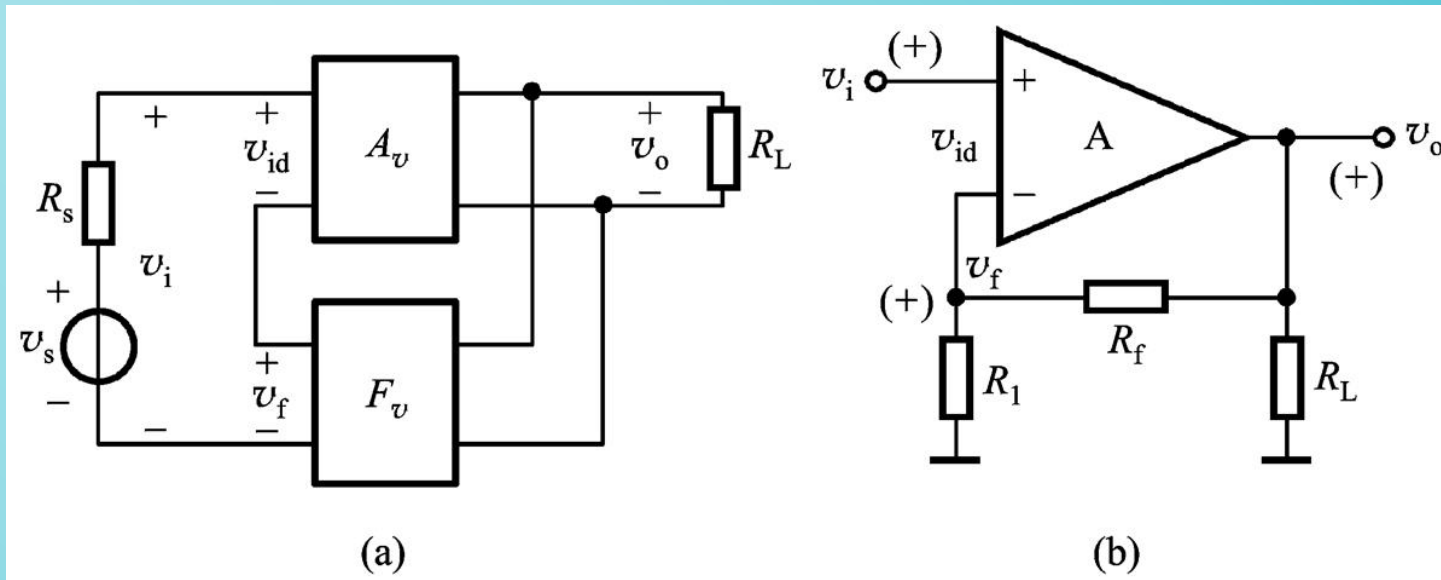
7.2.3 电流串联负反馈放大电路

7.2.4 电流并联负反馈放大电路

反馈组态判断举例（交流）

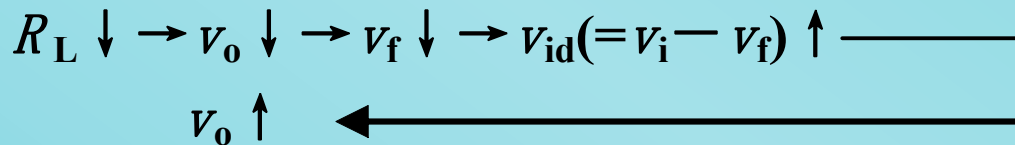
信号源对反馈效果的影响

7.2.1 电压串联负反馈放大电路

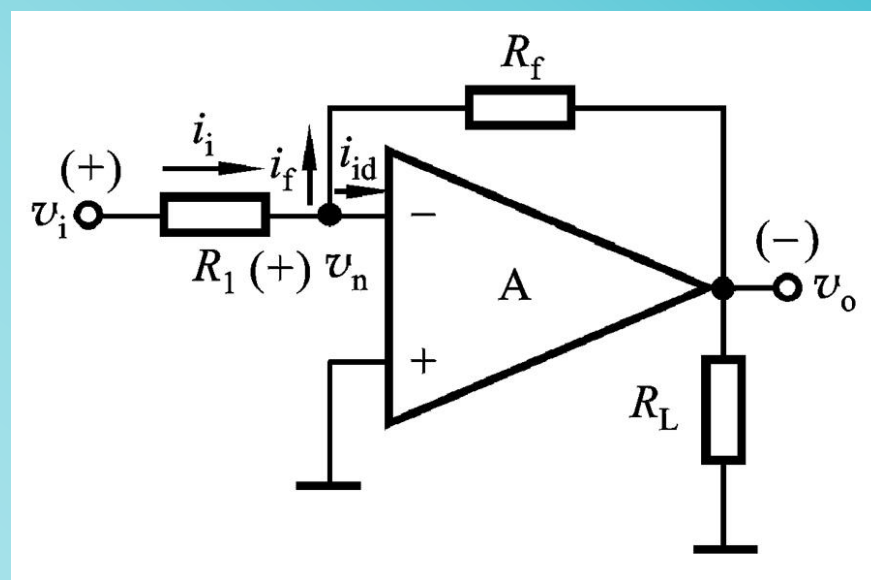
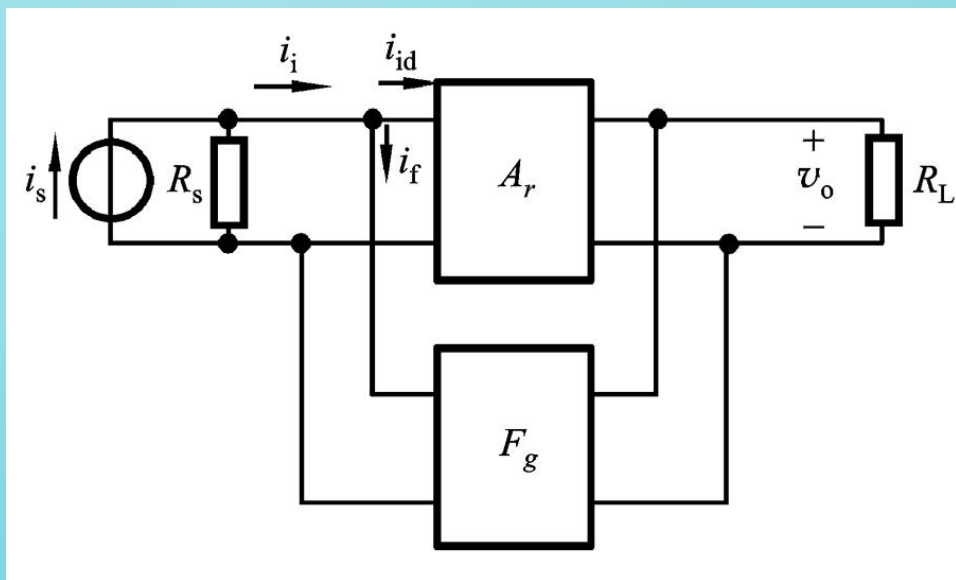


特点:

- 输入以电压形式求和 (KVL) : $v_{id} = v_i - v_f$
- 稳定输出电压
- 电压控制的电压源



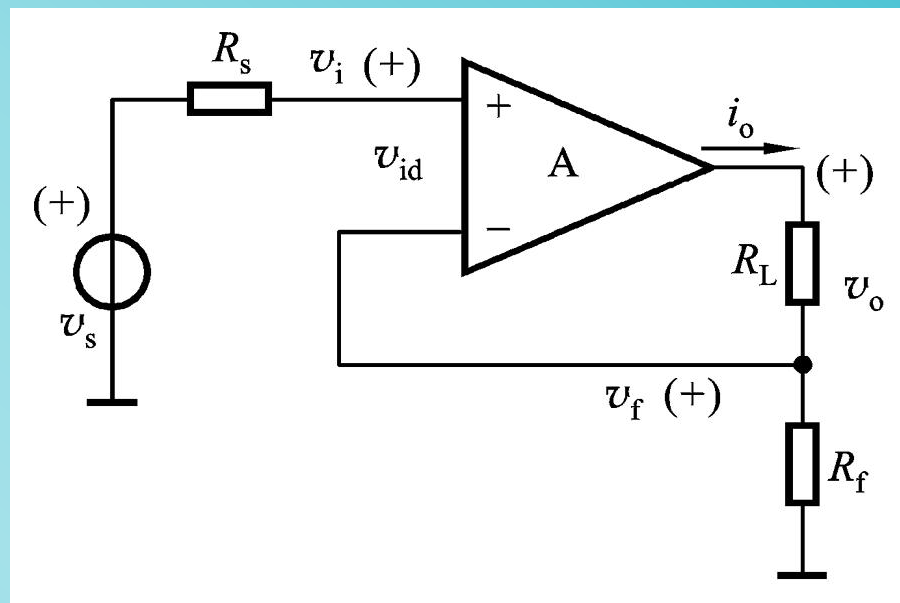
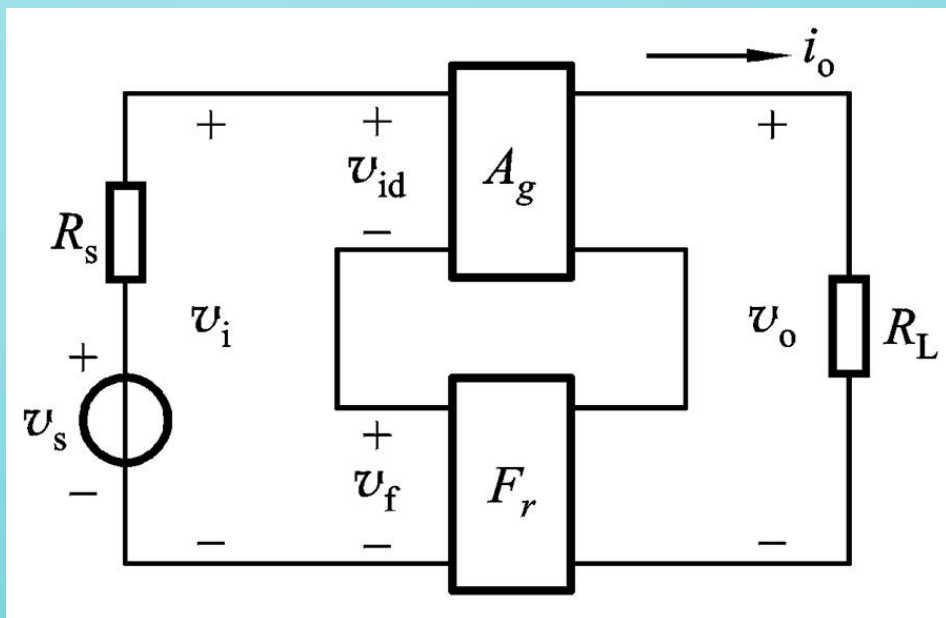
7.2.2 电压并联负反馈放大电路



特点:

- 输入以电流形式求和 (KCL) : $i_{id} = i_i - i_f$
- 稳定输出电压
- 电流控制的电压源

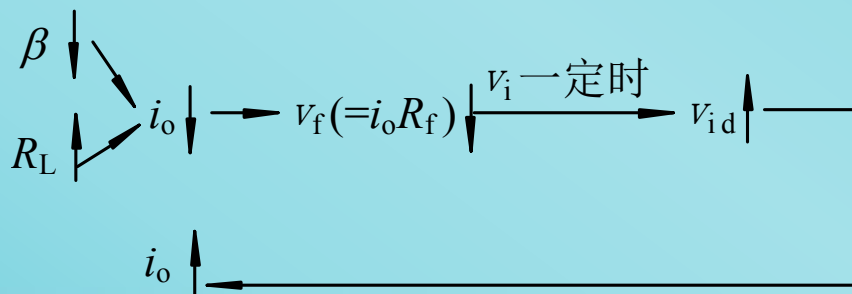
7.2.3 电流串联负反馈放大电路



特点:

- 输入以电压形式求和 (KVL) : $v_{id} = v_i - v_f$

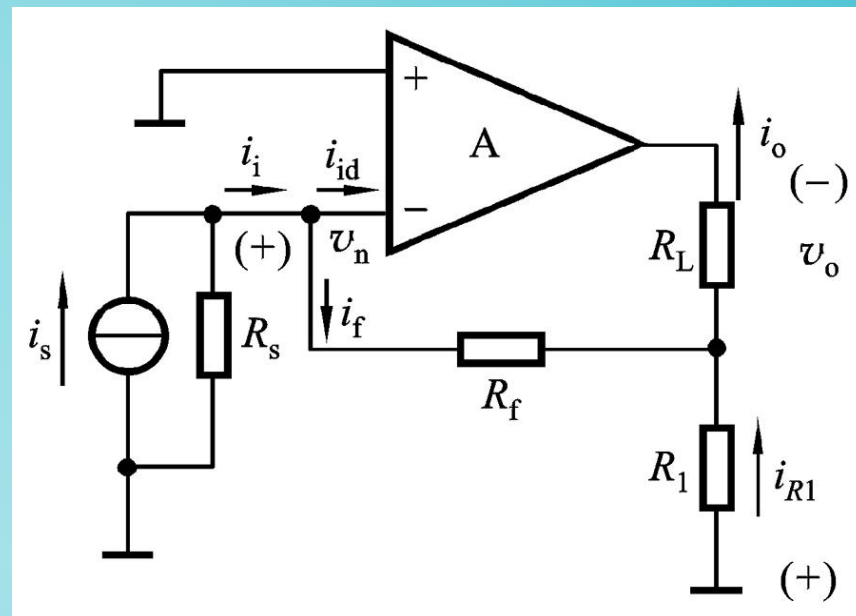
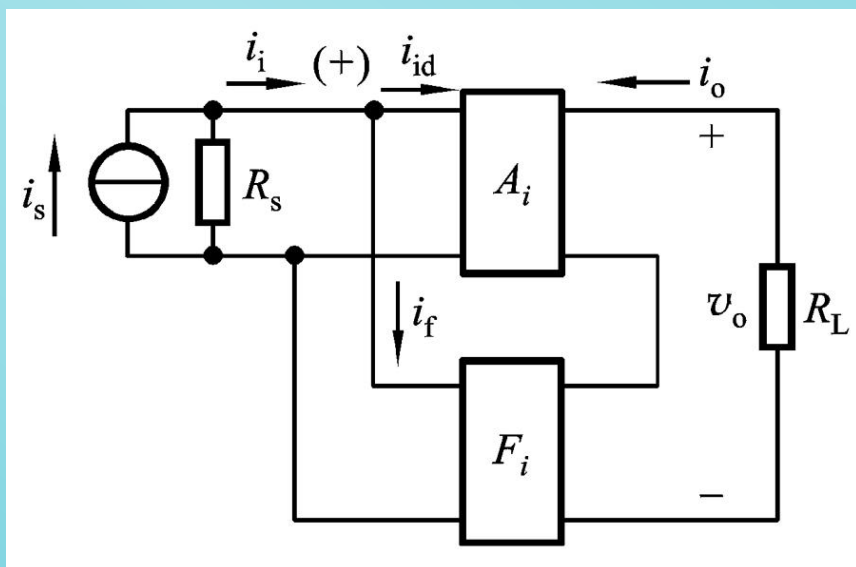
- 稳定输出电流



- 电压控制的电流源

川北医学院生物医学工程

7.2.4 电流并联负反馈放大电路



特点:

- 输入以电流形式求和 (KCL) : $i_{id} = i_i - i_f$
- 稳定输出电流
- 电流控制的电流源



特点小结:

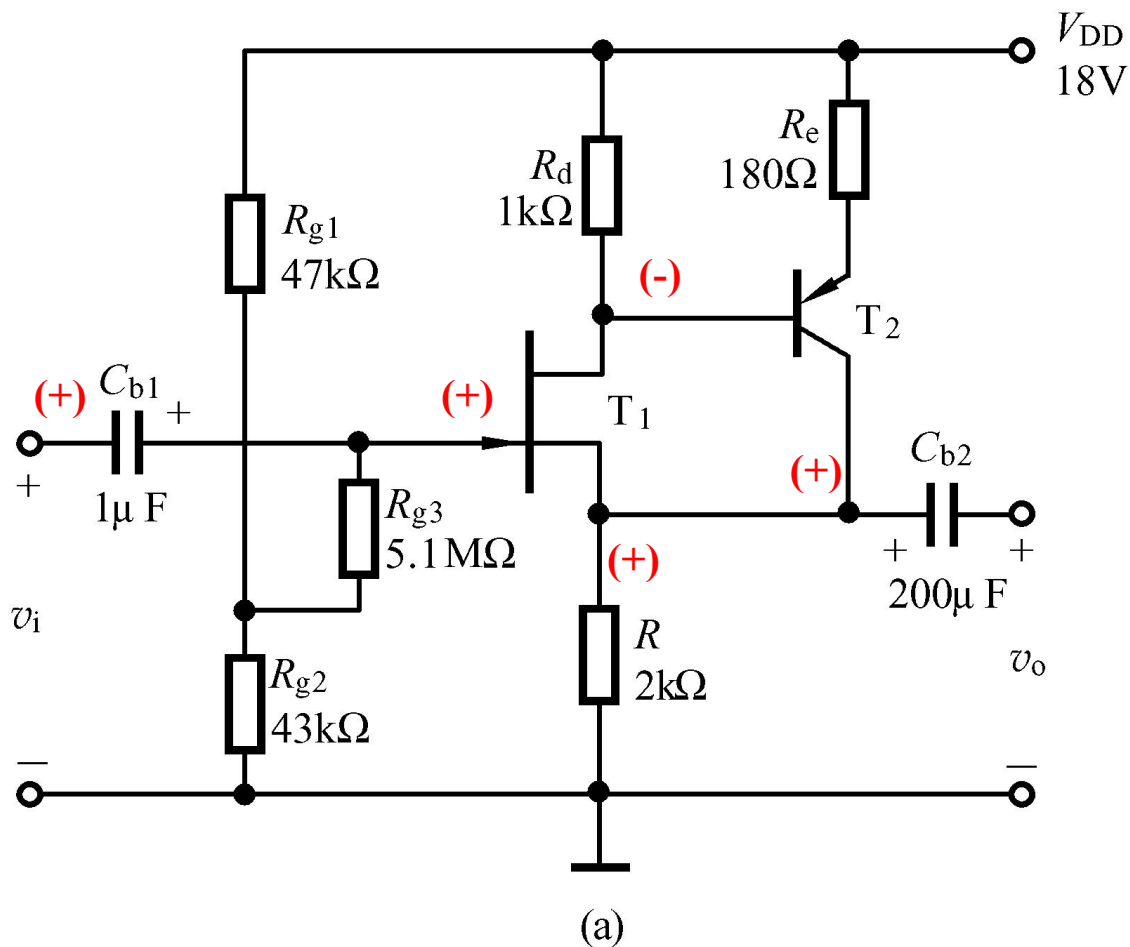
串联反馈: 输入端电压求和 (KVL)

并联反馈: 输入端电流求和 (KCL)

电压负反馈: 稳定输出电压, 具有恒压特性

电流负反馈: 稳定输出电流, 具有恒流特性

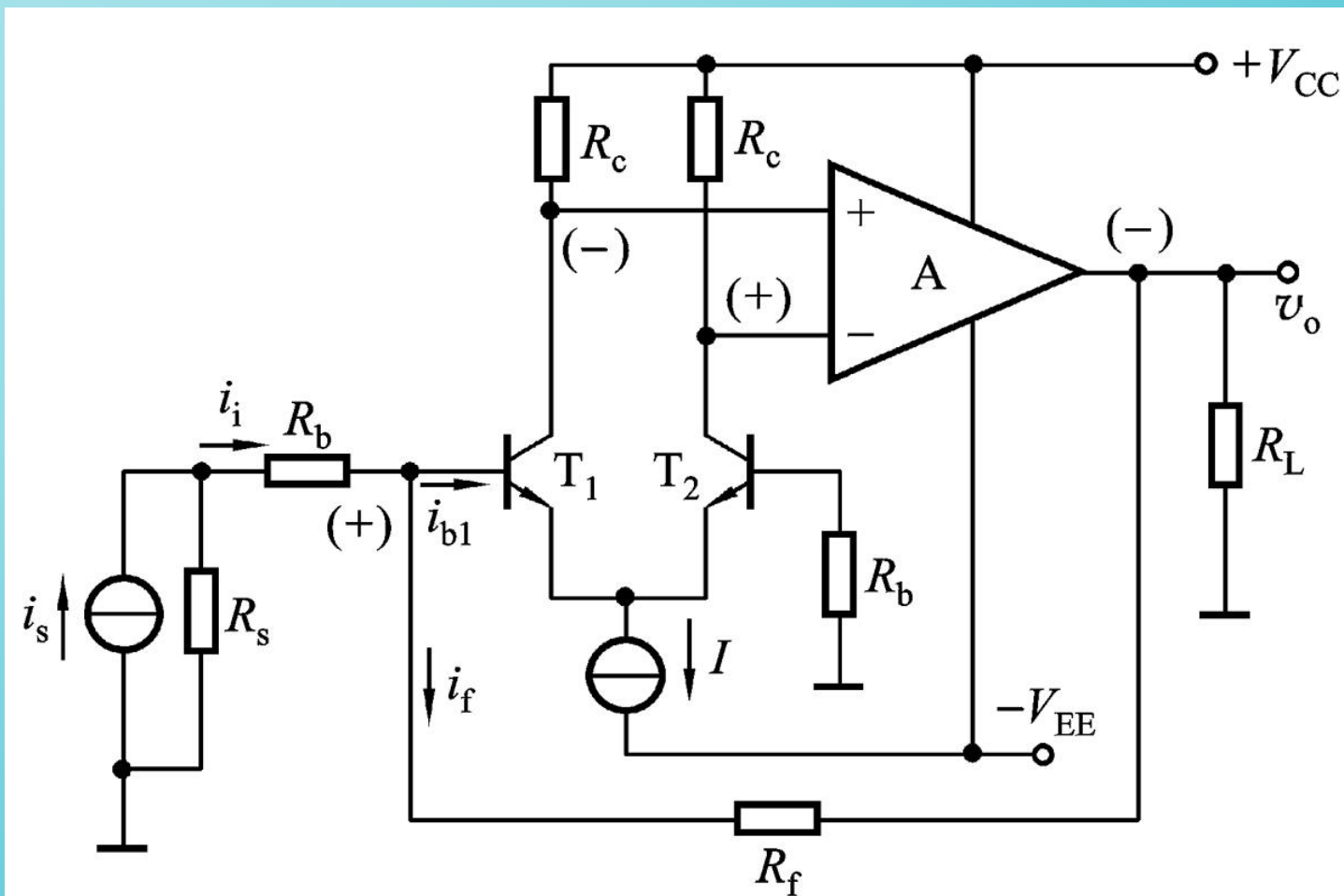
反馈组态判断举例（交流）



级间电压串联负反馈

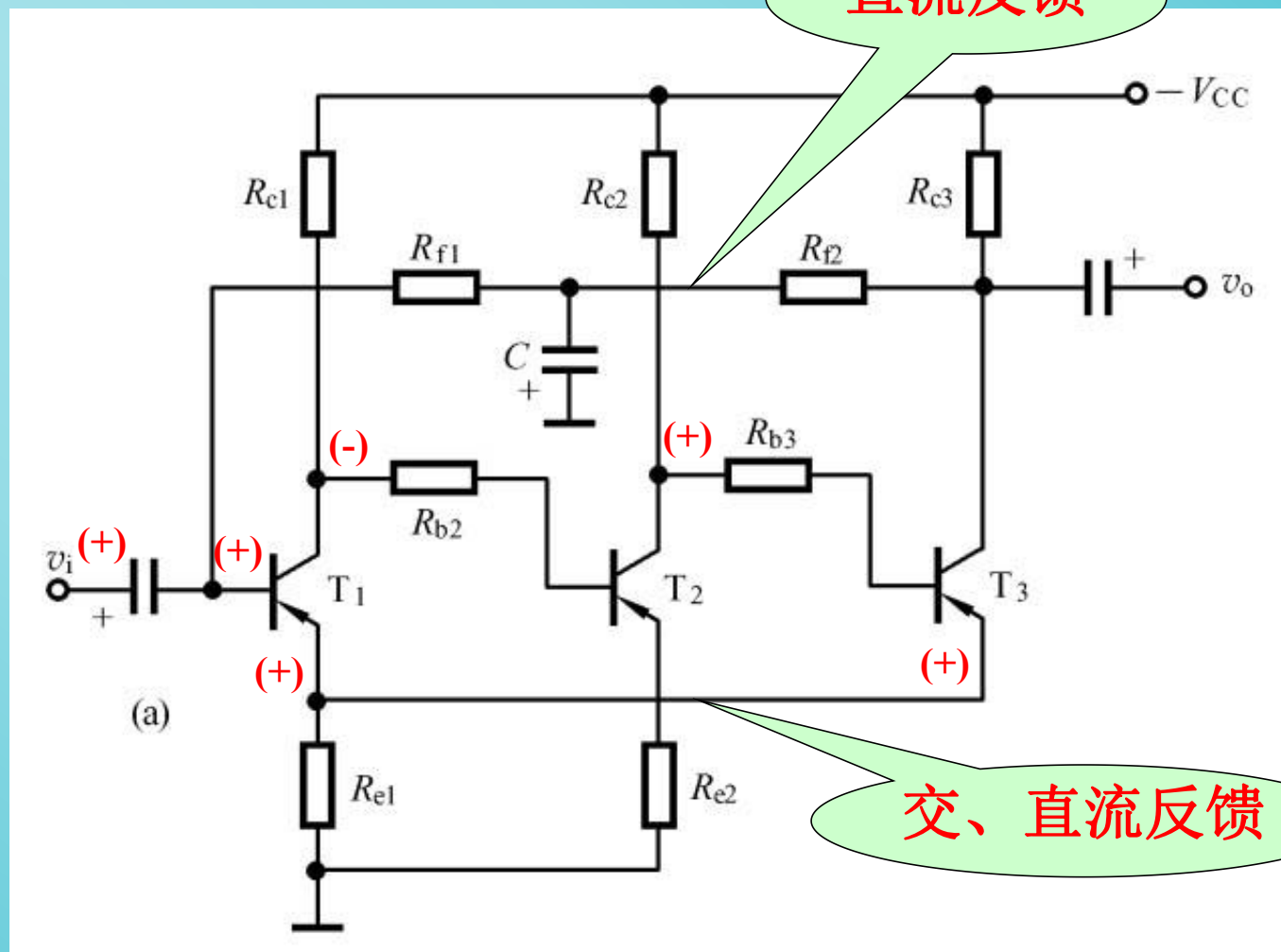
川北医学院生物医学工程

反馈组态判断举例（交流）



电压并联负反馈

反馈组态判断举例（交流）



电流串联负反馈

川北医学院生物医学工程

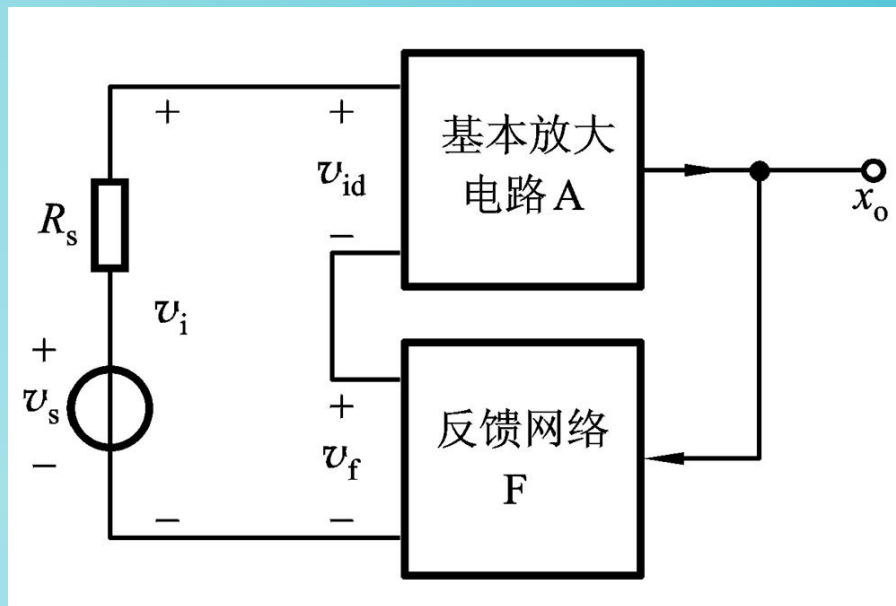
信号源对反馈效果的影响

串联负反馈

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

要想反馈效果明显，就要求 v_f 变化能有效引起 v_{id} 的变化。

则 v_i 最好为恒压源，即信号源内阻 R_s 越小越好。



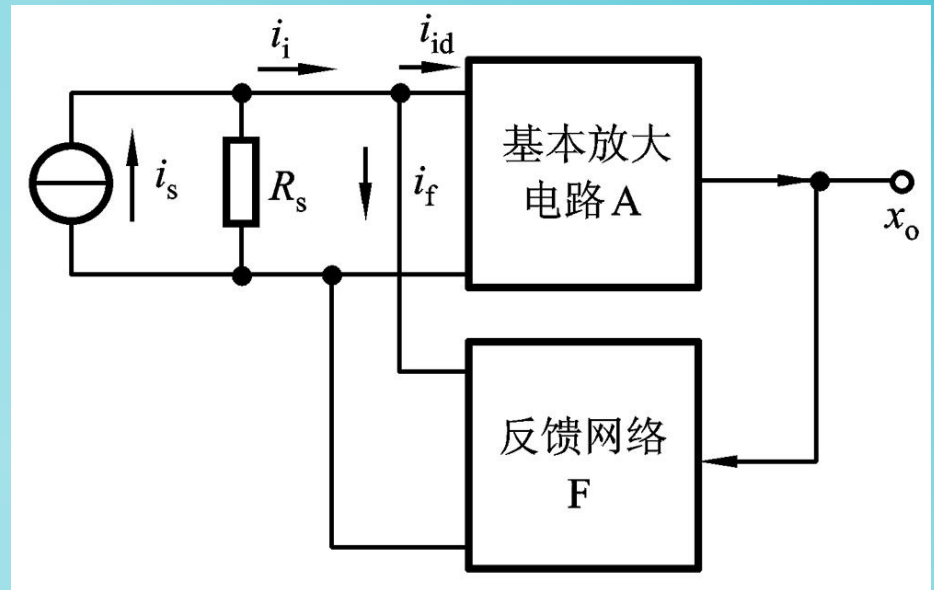
信号源对反馈效果的影响

并联负反馈

$$i_{id} = i_i - i_f$$

要想反馈效果明显，就要求 i_f 变化能有效引起 i_{id} 的变化。

则 i_i 最好为恒流源，即信号源内阻 R_s 越大越好。





7.3 负反馈放大电路增益的一般表达式

1. 闭环增益的一般表达式
2. 反馈深度讨论

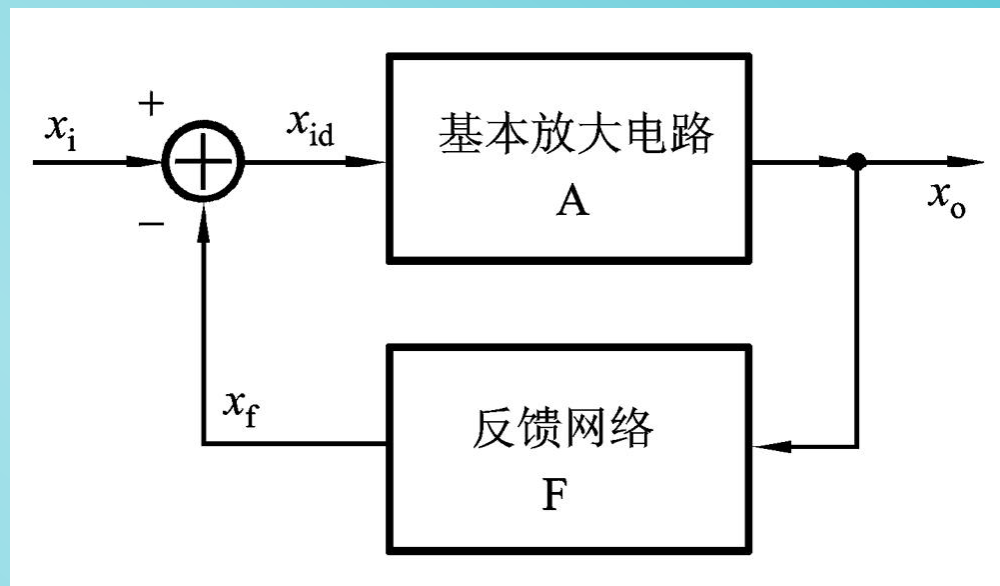
7.3 负反馈放大电路增益的一般表达式

1. 闭环增益的一般表达式

已知 $A = \frac{X_o}{X_{id}}$ 开环增益

$F = \frac{X_f}{X_o}$ 反馈系数

$A_f = \frac{X_o}{X_i}$ 闭环增益



因为 $x_{id} = x_i - x_f \Rightarrow x_i = x_{id} + x_f$

所以 $A_f = \frac{X_o}{X_i} = \frac{X_o}{x_{id} + x_f} = \frac{X_o}{X_o / A + X_o F} = \frac{A}{1 + AF}$

即

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

闭环增益的一般表达式

7.3 负反馈放大电路增益的一般表达式

负反馈放大电路中各种信号量的含义

信号量或 信号传递比	反馈类型			
	电压串联	电流并联	电压并联	电流串联
x_o	电压	电流	电压	电流
x_i 、 x_f 、 x_{id}	电压	电流	电流	电压
$A = x_o / x_{id}$	$A_v = v_o / v_{id}$	$A_i = i_o / i_{id}$	$A_v = v_o / i_{id}$	$A_g = i_o / v_{id}$
$F = x_f / x_o$	$F_v = v_f / v_o$	$F_i = i_f / i_o$	$F_g = i_f / v_o$	$F_v = v_f / i_o$
$A_f = x_o / x_i$ $= \frac{A}{1 + AF}$	$A_{vf} = v_o / v_i$ $= \frac{A_v}{1 + A_v F_v}$	$A_{if} = i_o / i_i$ $= \frac{A_i}{1 + A_i F_i}$	$A_{rf} = v_o / i_i$ $= \frac{A_v}{1 + A_v F_g}$	$A_{gf} = i_o / v_i$ $= \frac{A_g}{1 + A_g F_v}$
功能	v_i 控制 v_o ，电压放大	i_i 控制 i_o ，电流放大	i_i 控制 v_o ，电流转换为电压	v_i 控制 i_o ，电压转换为电流

7.3 负反馈放大电路增益的一般表达式

2. 反馈深度讨论

一般情况下， A 和 F 都是频率的函数，当考虑信号频率的影响时， A_f 、 A 和 F 分别用 $\dot{A}_f$ 、 $\dot{A}$ 和 $\dot{F}$ 表示。

即
$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \quad (1 + \dot{A}\dot{F}) \text{ 称为反馈深度}$$

(1) $|1 + \dot{A}\dot{F}| > 1$ 时， $|\dot{A}_f| < |\dot{A}|$ ， 一般负反馈

(2) $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$ 时， **深度负反馈**

(3) $|1 + \dot{A}\dot{F}| < 1$ 时， $|\dot{A}_f| > |\dot{A}|$ ， 正反馈

(4) $|1 + \dot{A}\dot{F}| = 0$ 时， $|\dot{A}_f| \rightarrow \infty$ ， 自激振荡



7.4 负反馈对放大电路性能的影响

7.4.1 提高增益的稳定性

7.4.2 减小非线性失真

7.4.3 抑制反馈环内噪声

7.4.4 对输入电阻和输出电阻的影响

7.4.1 提高增益的稳定性

闭环时 $\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}F}$ 只考虑幅值有 $A_f = \frac{A}{1 + AF}$

对 A 求导得 $\frac{dA_f}{dA} = \frac{1}{(1 + AF)^2}$

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

即闭环增益相对变化量是开环时的 $\frac{1}{1 + AF}$

另一方面, 在深度负反馈条件下 $\dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$

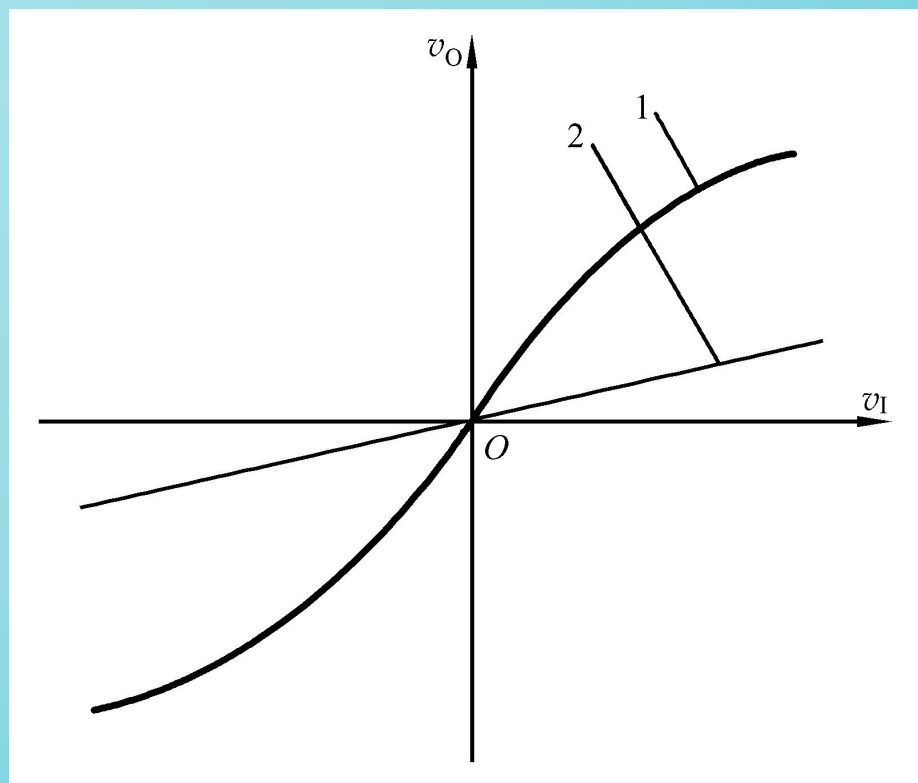
即闭环增益只取决于反馈网络。当反馈网络由稳定的线性元件组成时, 闭环增益将有很高的稳定性。

负反馈的组态不同, 稳定的增益不同 (A_{vf} 、 A_{rf} 、 A_{gf} 、 A_{if})

7.4.2 减小非线性失真

闭环时增益减小，线性度变好。

- 1——开环特性
- 2——闭环特性



只能减少环内放大电路产生的失真，如果输入波形本身就是失真的，即使引入负反馈，也无济于事。

7.4.3 抑制反馈环内噪声

电压的信噪比

$$\frac{S}{N} = \frac{|\dot{V}_s|}{|\dot{V}_n|}$$

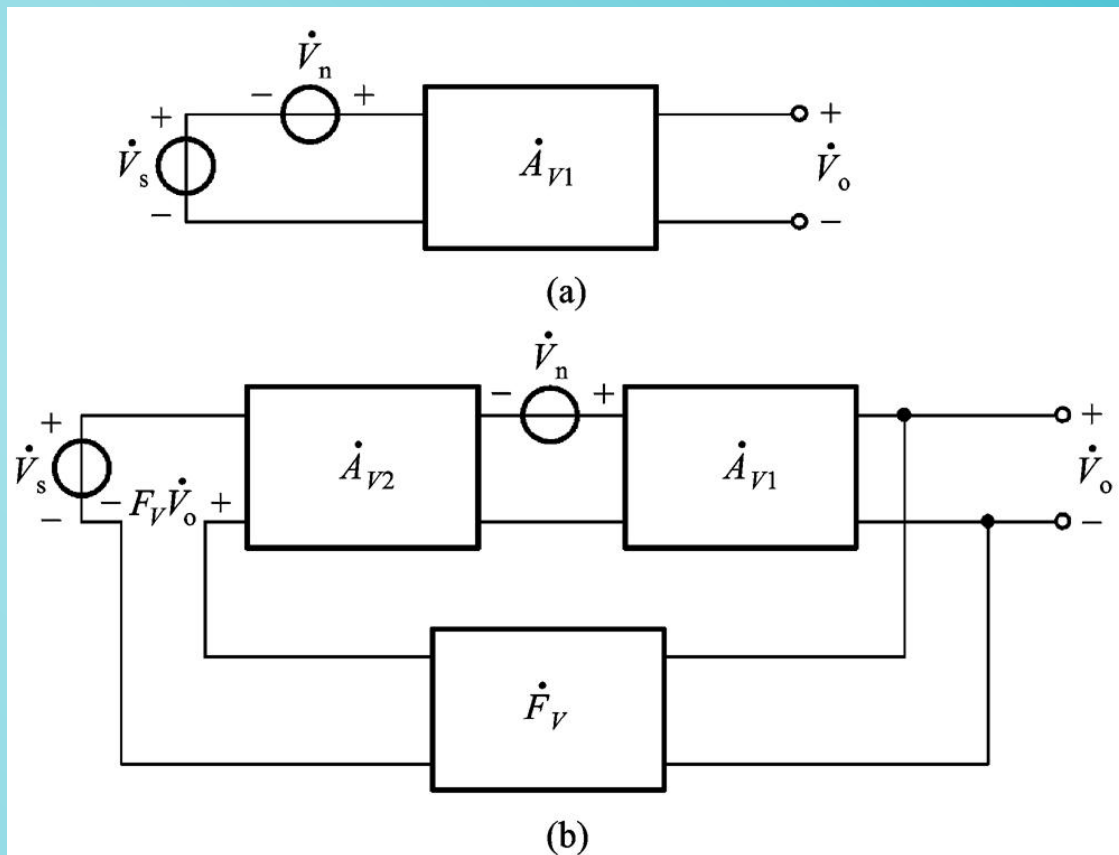
增加一前置级 $\dot{A}_{V2}$

并认为该级为无噪声的

$$\begin{aligned} \dot{V}_o &= \dot{V}_s \frac{\dot{A}_{V1} \dot{A}_{V2}}{1 + \dot{A}_{V1} \dot{A}_{V2} \dot{F}_V} \\ &+ \dot{V}_n \frac{\dot{A}_{V1}}{1 + \dot{A}_{V1} \dot{A}_{V2} \dot{F}_V} \end{aligned}$$

新的信噪比 $\frac{S}{N} = \frac{|\dot{V}_s|}{|\dot{V}_n|} |\dot{A}_{V2}|$

比原有的信噪比提高了 $|\dot{A}_{V2}|$ 倍



7.4.4 对输入电阻和输出电阻的影响

1. 对输入电阻的影响

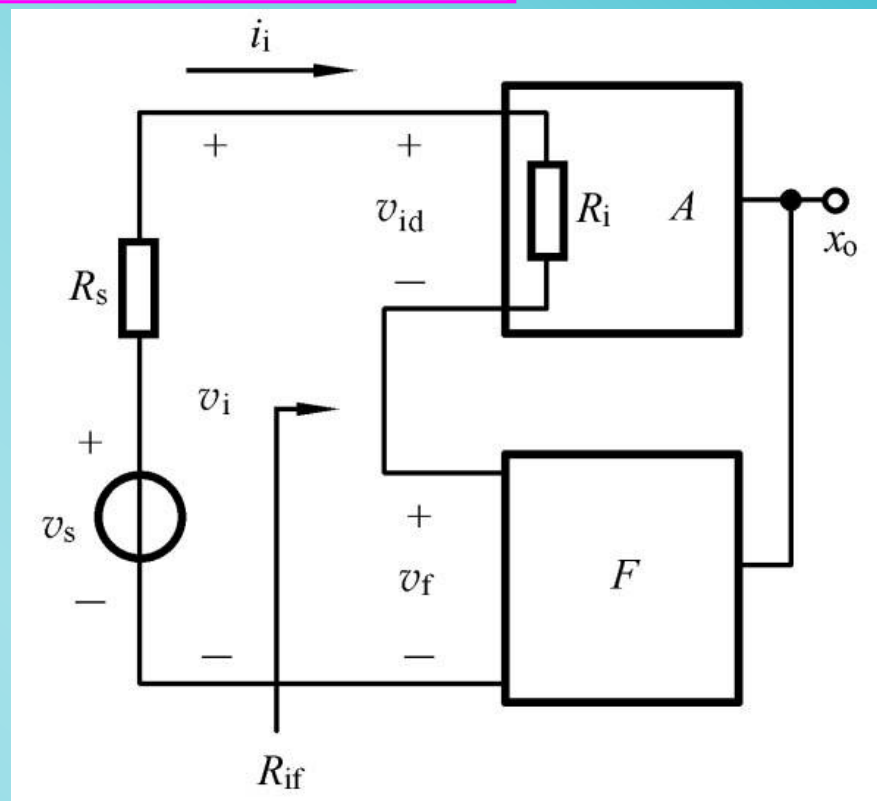
串联负反馈

开环输入电阻 $R_i = v_{id} / i_i$

闭环输入电阻 $R_{if} = v_i / i_i$

因为 $v_f = F x_o$ $x_o = A \cdot v_{id}$

所以 $v_i = v_{id} + v_f = (1 + AF) v_{id}$



闭环输入电阻 $R_{if} = v_i / i_i = (1 + AF) \frac{v_{id}}{i_i} = (1 + AF) R_i$

引入串联负反馈后，输入电阻增加了。

7.4.4 对输入电阻和输出电阻的影响

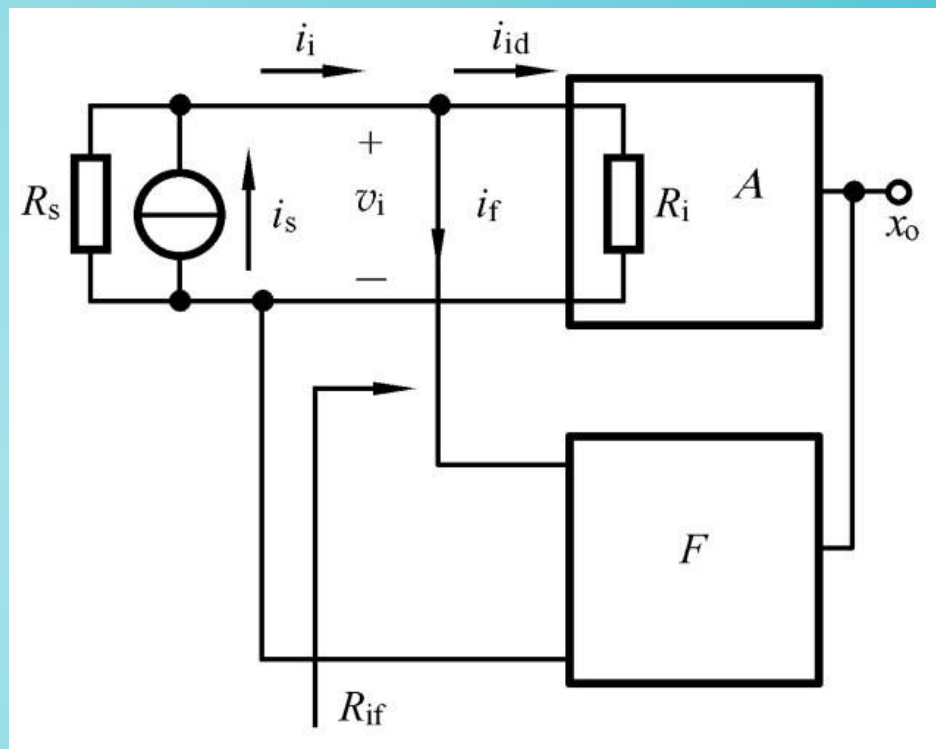
1. 对输入电阻的影响 并联负反馈

闭环输入电阻

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

引入并联负反馈后，
输入电阻减小了。

注意：反馈对输入电阻的影响仅限于环内，对环外不产生影响。

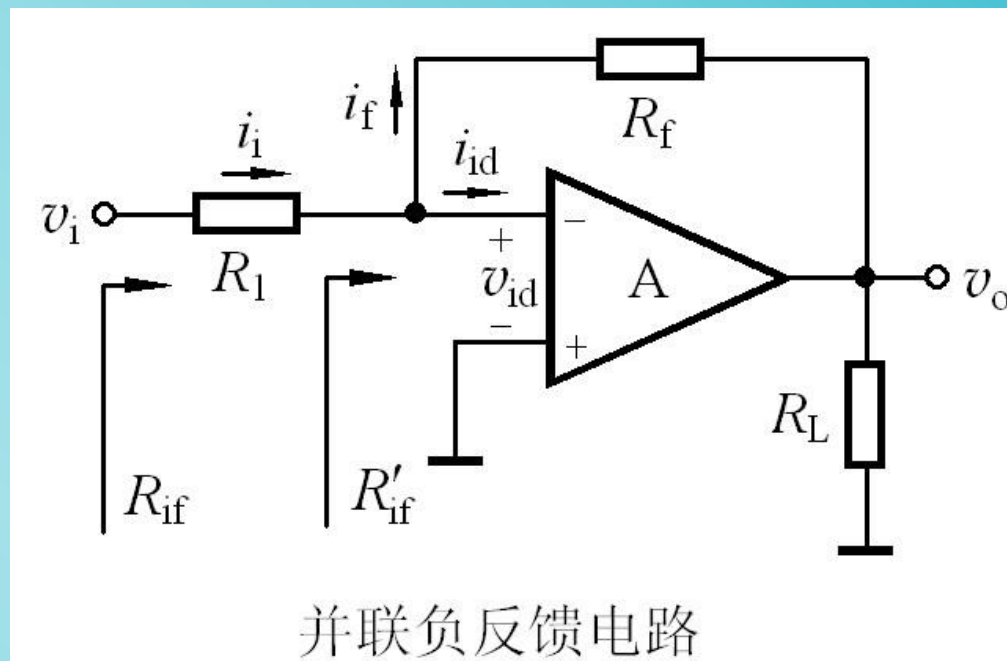


例如

图中 R_1 不在环内

$$R'_{if} = \frac{R_i}{1 + AF}$$

但是 $R_{if} = R_1 + R'_{if}$

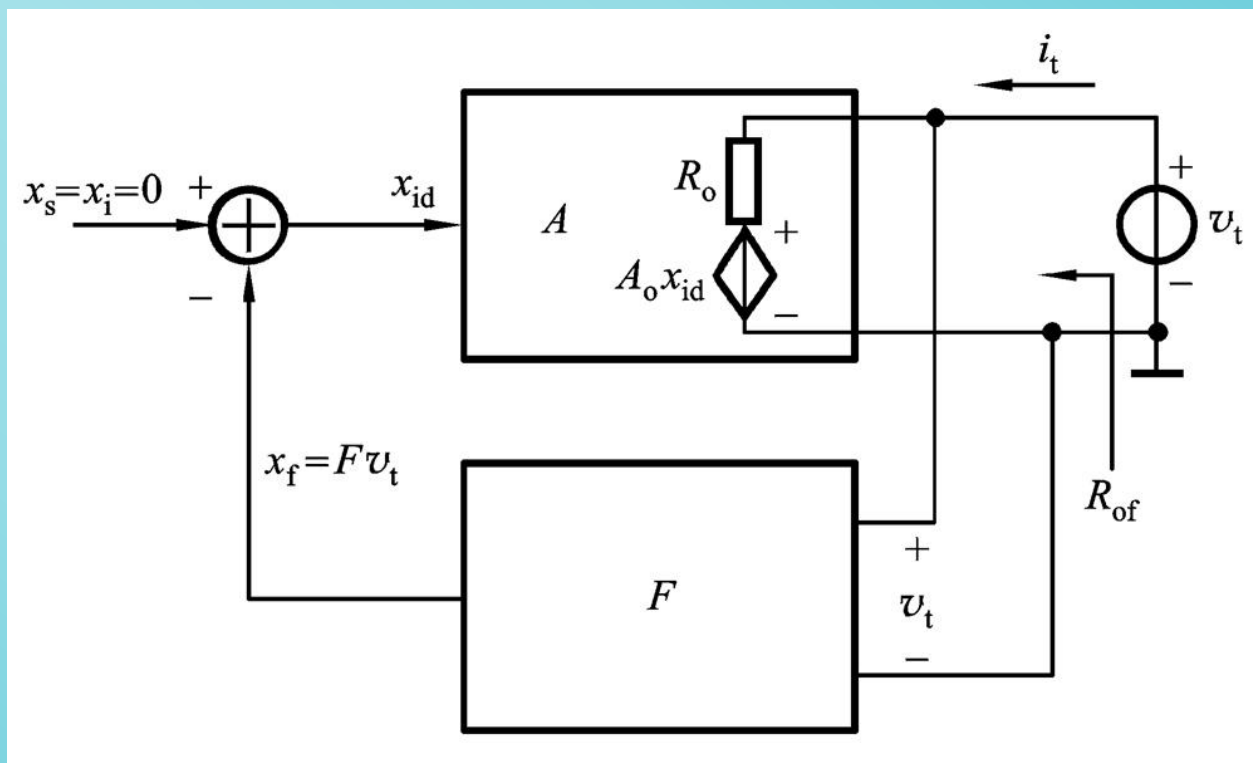


当 $R_1 \gg R'_{if}$ 时，反馈对 R_{if} 几乎没有影响。

7.4.4 对输入电阻和输出电阻的影响

2. 对输出电阻的影响

电压负反馈



2. 对输出电阻的影响

电压负反馈

闭环输出电阻

$$R_{of} = \frac{V_t}{i_t}$$

忽略反馈网络对 i_t 的分流

$$V_t = i_t R_o + A_o X_{id}$$

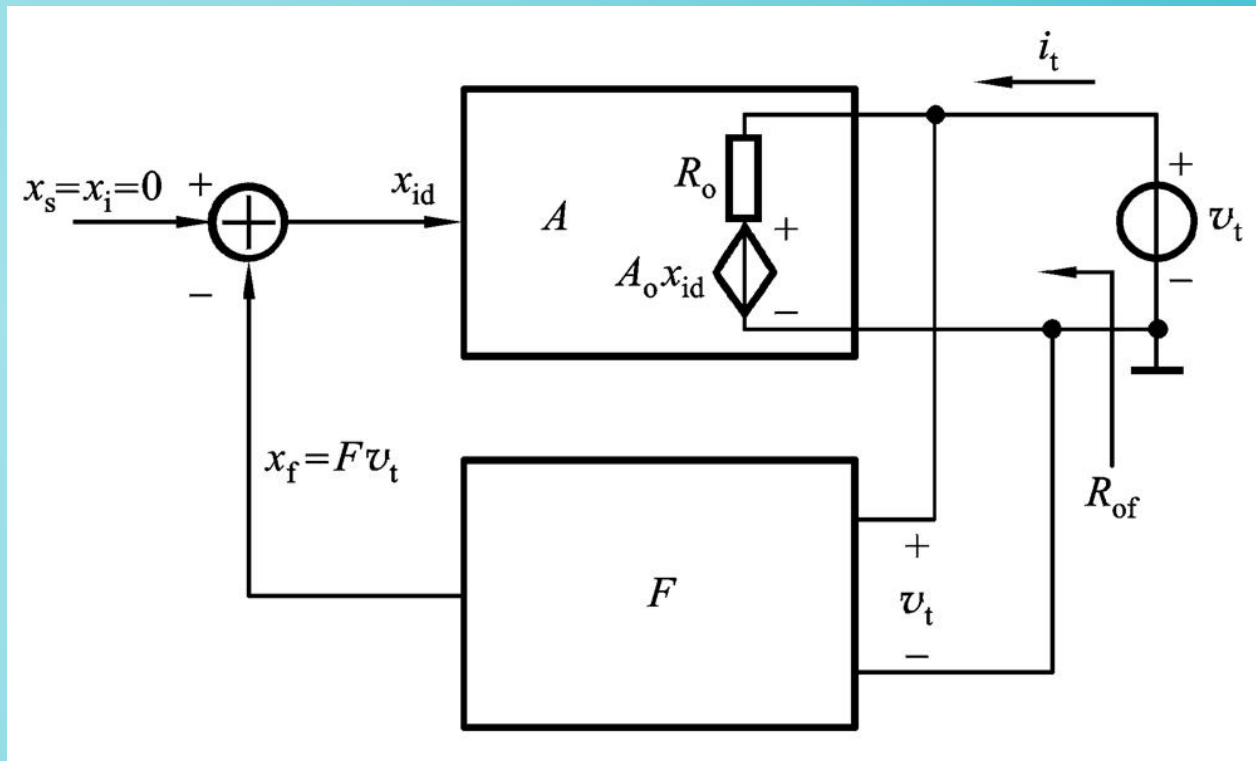
$$\text{而 } X_{id} = -X_f = -F V_t$$

所以

$$V_t = i_t R_o - A_o F V_t$$

$$\longrightarrow R_{of} = \frac{V_t}{i_t} = \frac{R_o}{1 + A_o F}$$

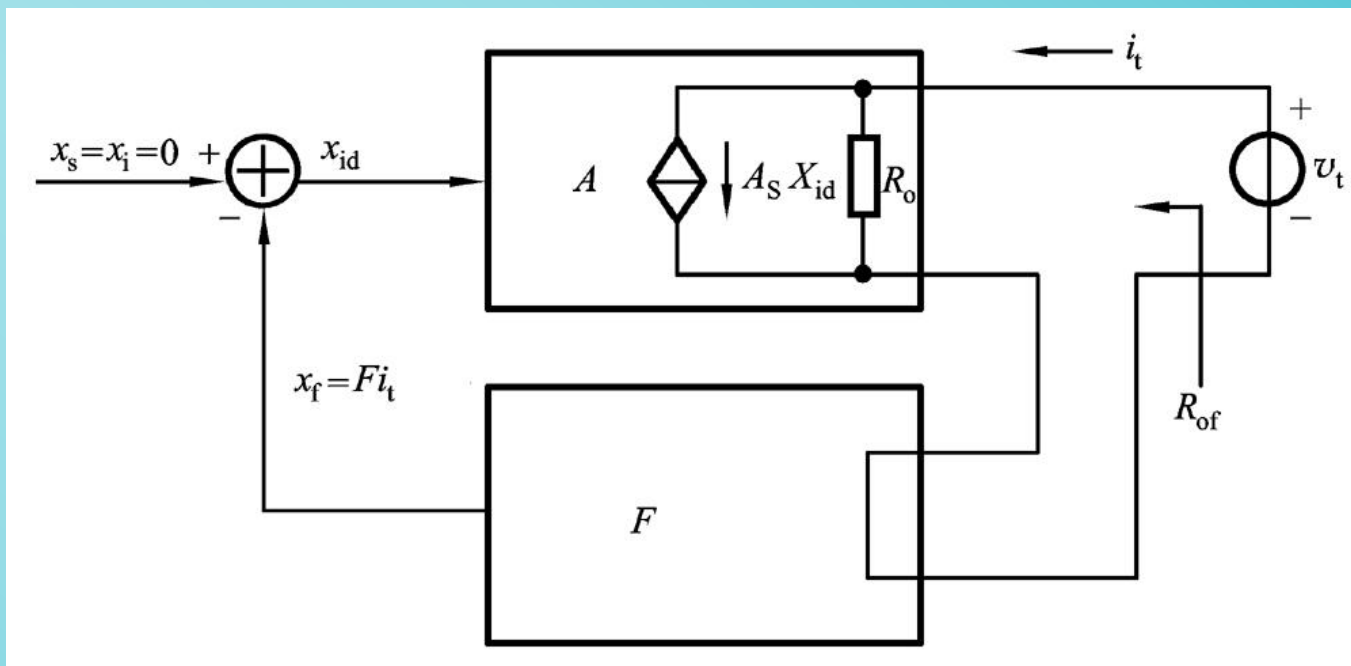
引入电压负反馈后，输出电阻减小了。



7.4.4 对输入电阻和输出电阻的影响

2. 对输出电阻的影响

电流负反馈



闭环输出电阻

$$R_{of} = \frac{V_t}{i_t} = (1 + A_s F) R_o$$

引入电流负反馈后，输出电阻增大了。

注意：反馈对输出电阻的影响仅限于环内，对环外不产生影响。

7.4.4 对输入电阻和输出电阻的影响

串联负反馈 —— 增大输入电阻

并联负反馈 —— 减小输入电阻

电压负反馈 —— 减小输出电阻，稳定输出电压

电流负反馈 —— 增大输出电阻，稳定输出电流

特别注意表7.4.1的内容

负反馈对放大电路性能的改善，是以牺牲增益为代价的，且仅对环内的性能产生影响。



7.5 深度负反馈条件下的近似计算

1. 深度负反馈的特点
2. 举例

1. 深度负反馈的特点

由于 $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$ 则 $\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \approx \frac{\dot{A}}{\dot{A}\dot{F}} = \frac{1}{\dot{F}}$

即，深度负反馈条件下，闭环增益只与反馈网络有关

又因为 $\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$ $\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$ 代入上式

得 $\dot{X}_f \approx \dot{X}_i$ (也常写为 $x_f \approx x_i$) 输入量近似等于反馈量

→ $\dot{X}_{id} = \dot{X}_i - \dot{X}_f \approx 0$ ($x_{id} \approx 0$) 净输入量近似等于零

由此可得深度负反馈条件下，基本放大电路“两虚”的概念

1. 深度负反馈的特点

深度负反馈条件下

$$x_{id} = x_i - x_f \approx 0$$

串联负反馈，输入端电压求和

$$\begin{cases} v_{id} = v_i - v_f \approx 0 & \text{虚短} \\ i_{id} = \frac{v_{id}}{r_i} \approx 0 & \text{虚断} \end{cases}$$

并联负反馈，输入端电流求和

$$\begin{cases} i_{id} = i_i - i_f \approx 0 & \text{虚断} \\ v_{id} = i_{id} r_i \approx 0 & \text{虚短} \end{cases}$$

2. 举例

设电路满足深度负反馈条件，试写出该电路的闭环电压增益表达式。

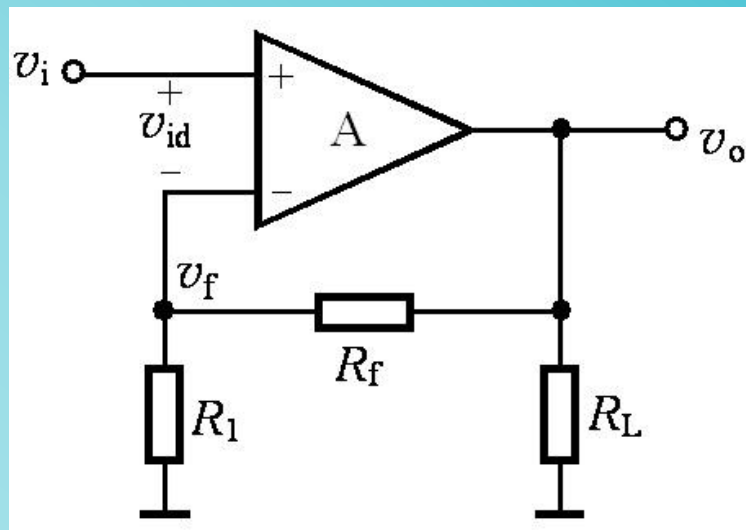
解：电压串联负反馈

根据虚短、虚断

$$\text{反馈系数 } F_v = \frac{V_f}{V_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

$$\begin{aligned} &\text{闭环增益} \\ &(\text{就是闭环电压增益}) \quad A_{vf} = \frac{V_o}{V_i} \approx \frac{1}{F_v} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \end{aligned}$$

实际上该电路就是第2章介绍的同相比例放大电路，该结果与第2章所得结果相同



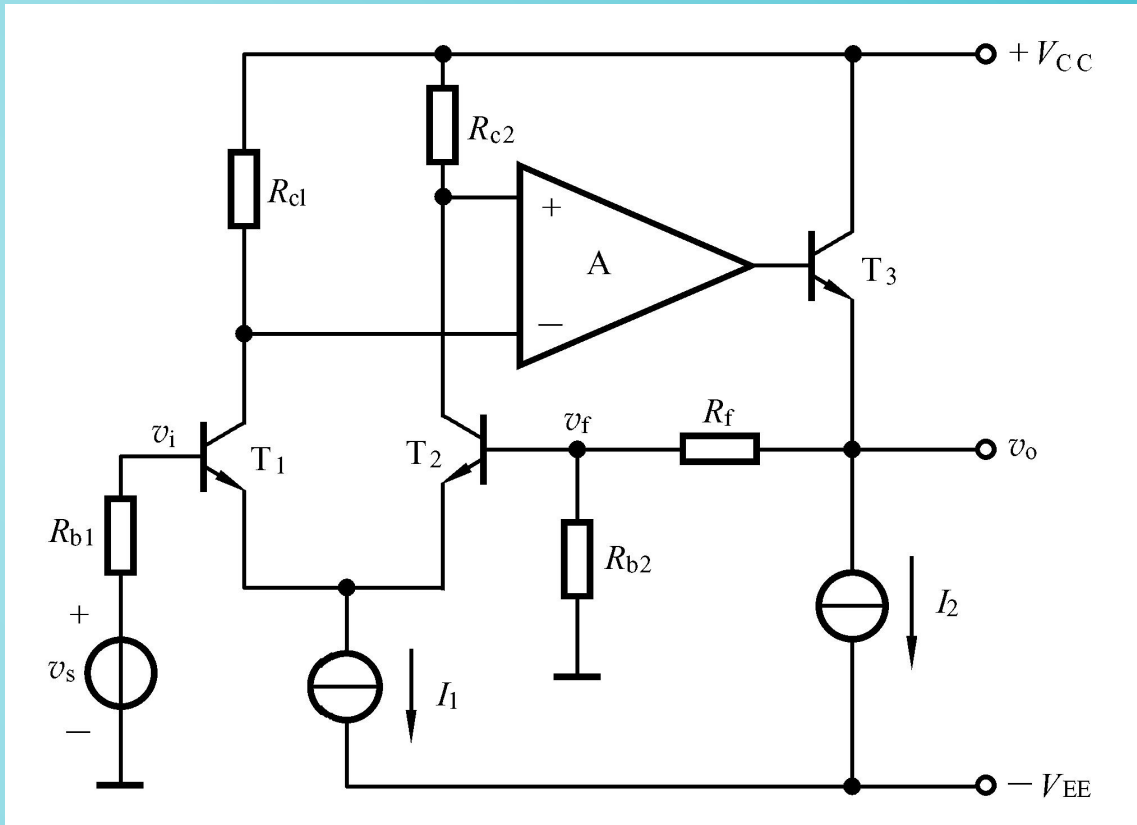
2. 举例 (例7.5.1)

设电路满足深度负反馈条件，试写出该电路的闭环电压增益表达式。

解：电压串联负反馈
根据虚短、虚断

$$\begin{cases} V_f = V_i \\ V_f = \frac{R_{b2}}{R_{b2} + R_f} V_o \end{cases}$$

闭环电压增益 $A_{vf} = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_f}{R_{b2}}$



2. 举例 (例7.5.4)

设电路满足深度负反馈条件，试写出该电路的闭环增益和闭环源电压增益表达式。

解： 电流并联负反馈

根据虚短、虚断

$$\begin{cases} i_f = i_i \\ -i_f R_f = i_R R \\ i_f = i_R + i_o \end{cases}$$

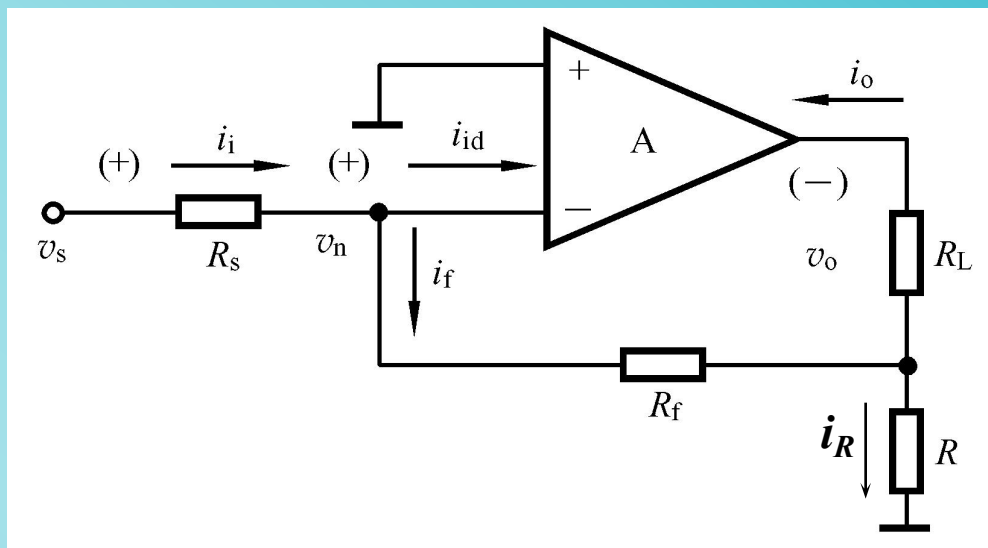
闭环增益 $A_{if} = \frac{i_o}{i_i} = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right)$

又因为 $v_n = v_p = 0$ $v_s = i_i R_s$ $v_o = -i_o R_L$

所以闭环电压增益 $A_{vf} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{-i_o R_L}{i_i R_s} = -\left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \frac{R_L}{R_s}$

注意：若 i_o 参考方向不同，将影响闭环增益的结果

川北医学院生物医学工程



2. 举例

例7.5.5 ... (3) 求大环反馈的闭环增益以及对信号源的闭环电压增益; ...

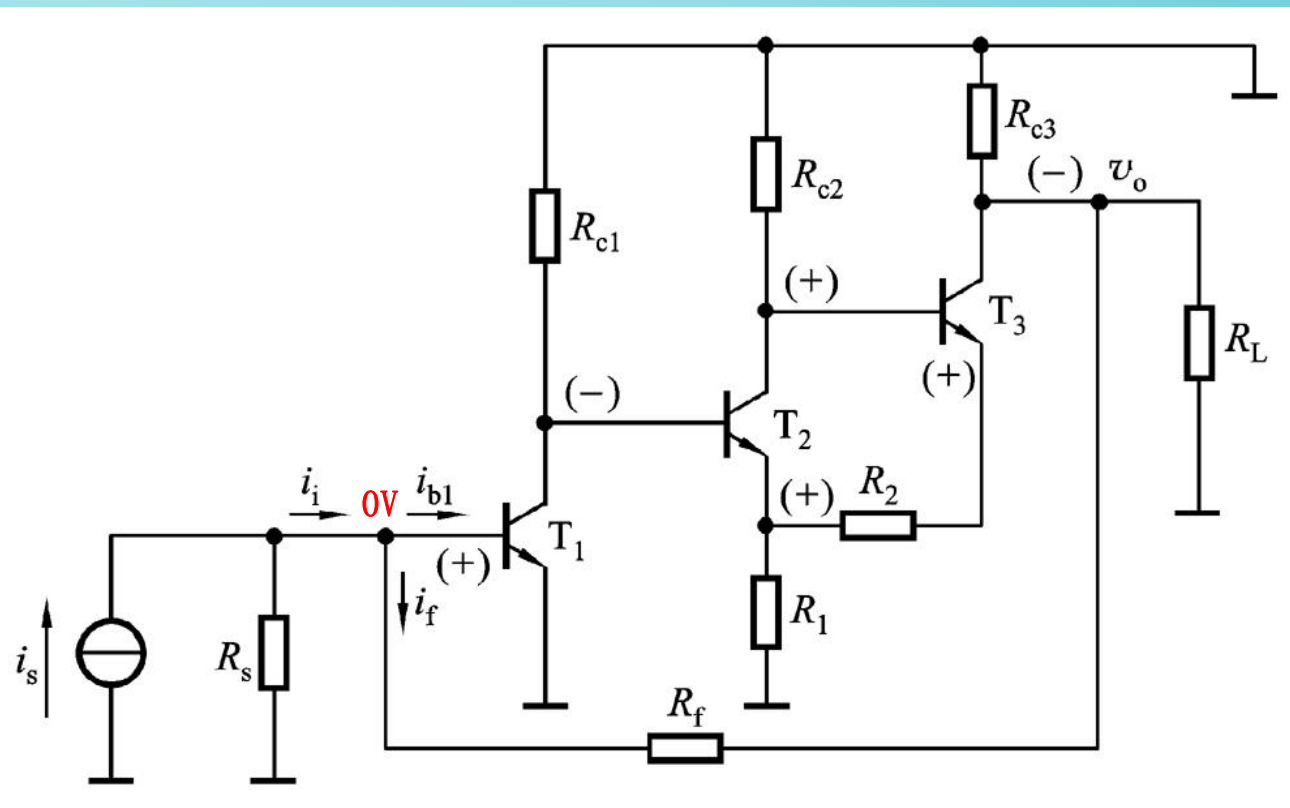
解: (3) 电压并联负反馈

根据虚短、虚断

$$\begin{cases} \dot{i}_f = \dot{i}_i \\ V_o = -\dot{i}_f R_f \end{cases}$$

闭环增益

$$A_{rf} = \frac{V_o}{\dot{i}_i} = -R_f$$





7.6 负反馈放大电路设计

7.6.1 设计负反馈放大电路的一般步骤

7.6.2 设计举例

7.6.1 设计负反馈放大电路的一般步骤

1. 选定需要的反馈类型

信号源性质 对输出信号的要求

对输入、输出电阻的要求

对信号变换的要求 ($V-V$ 、 $V-I$ 、 $I-V$ 、 $I-I$)

2. 确定反馈系数的大小

$$\text{深度负反馈时 } A_f \approx \frac{1}{F}$$

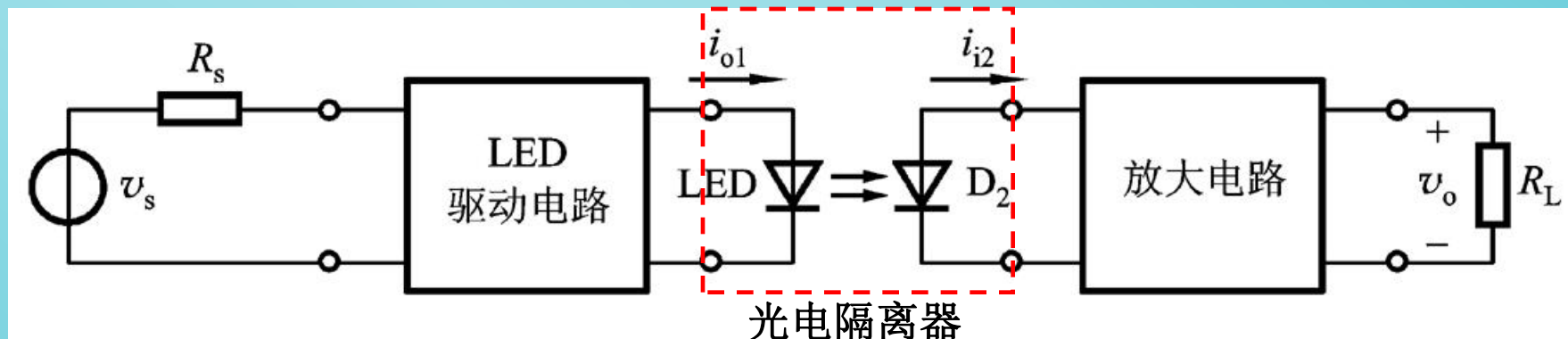
3. 适当选择反馈网络中的电阻阻值

尽量减小反馈网络对基本放大电路的负载效应

4. 通过仿真分析，检验设计是否满足要求

7.6.2 设计举例

例7.6.2 设计一个带负反馈的光电隔离器的驱动电路。设 v_s 的变化范围为 $0\sim 5V$ ，内阻 $R_s=500\ \Omega$ 。要求LED的 $i_{o1}=10^{-3}v_s(A)$ 。已知运放的 $A_{vo}=10^4$ ， $R_i=5k\ \Omega$ ， $R_o=100\ \Omega$ 。设计后仿真检验发光二极管的电流。



解： 已知LED的光强度——^{线性}流过LED的电流 i_{o1} ——^{线性}电压信号 v_s

驱动电路需要将电压 v_s 转换为电流 i_{o1}

选用电流串联负反馈电路

7.6.2 设计举例

例7.6.2 设计一个带负反馈的光电隔离器的驱动电路。设 v_s 的变化范围为 $0\sim 5V$ ，内阻 $R_s=500\ \Omega$ 。要求LED的 $i_{o1}=10^{-3}v_s(A)$ 。已知运放的 $A_{vo}=10^4$ ， $R_i=5k\ \Omega$ ， $R_o=100\ \Omega$ 。设计后仿真检验发光二极管的电流。

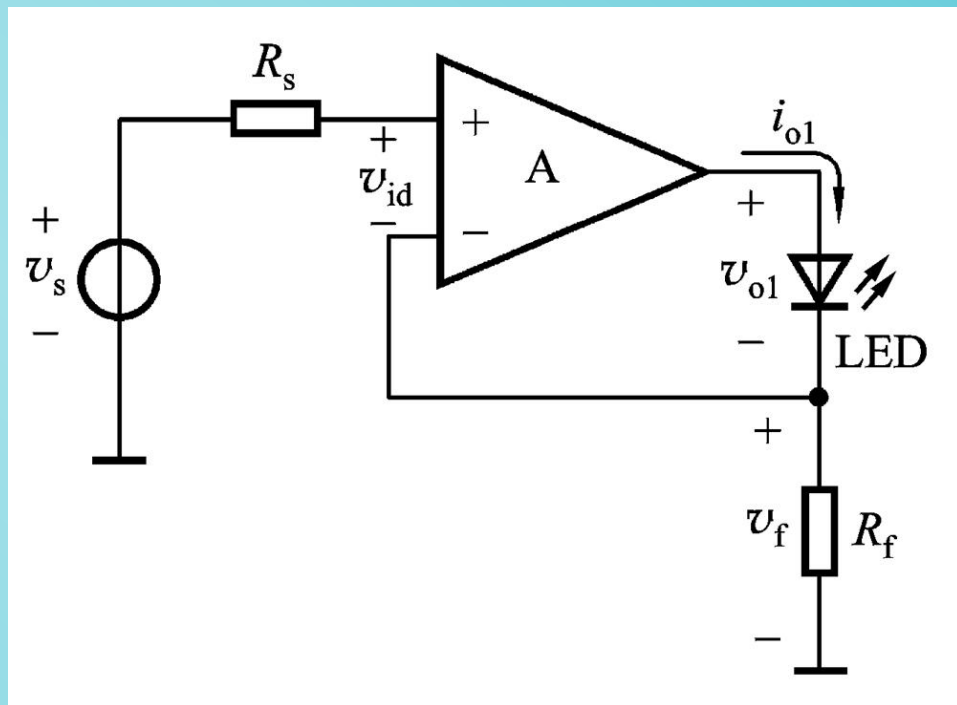
解：选用电流串联负反馈电路

$$A_{gfs} = \frac{i_{o1}}{V_s} = 10^{-3}\ S$$

深度负反馈时 $A_f \approx \frac{1}{F}$

$$F_r = \frac{1}{A_{gfs}} = 1000\ \Omega = 1k\Omega$$

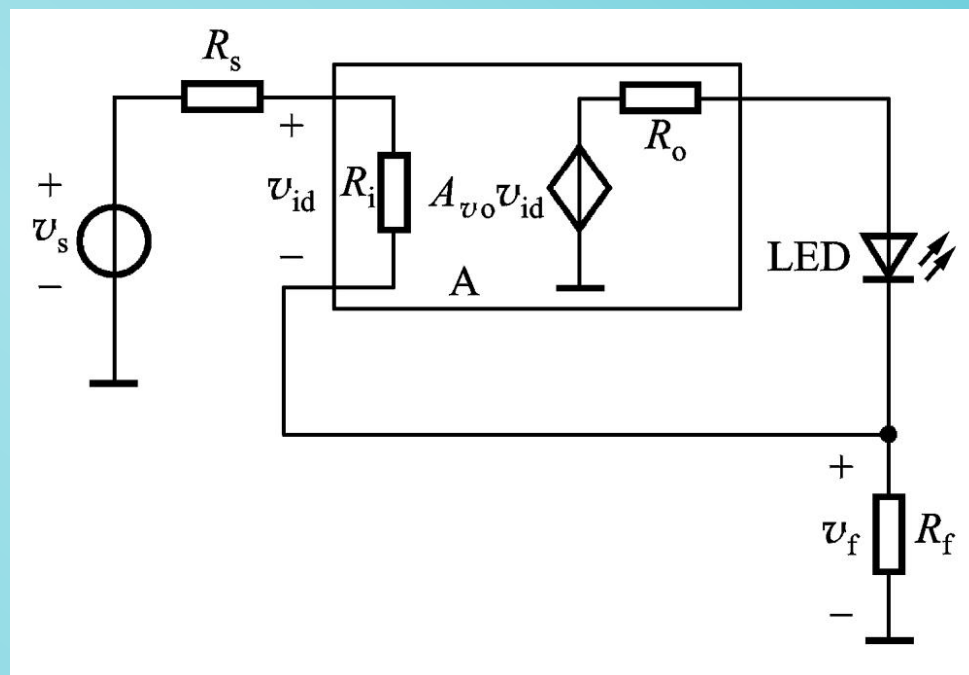
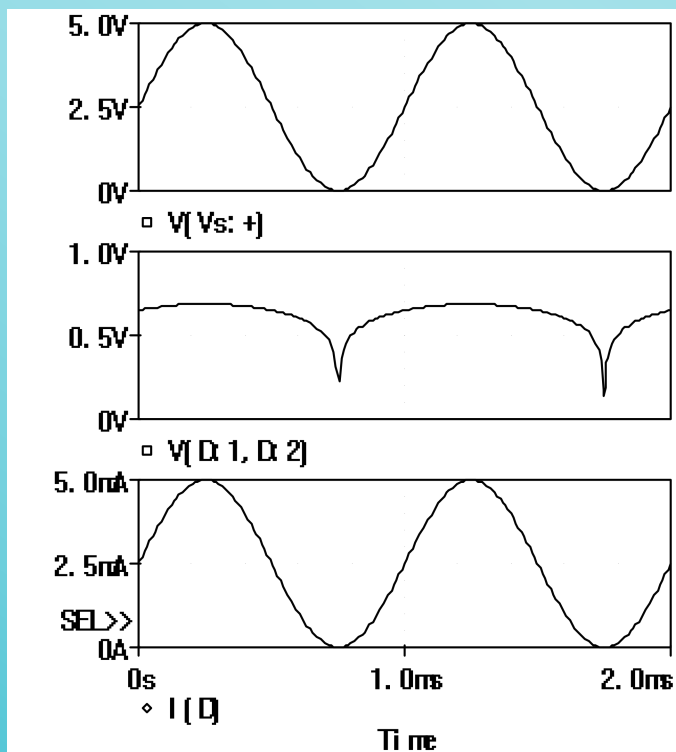
又因为根据虚断有 $F_r = \frac{V_f}{i_{o1}} = R_f$ 所以 $R_f=1k\ \Omega$



7.6.2 设计举例

例7.6.2 设计一个带负反馈的光电隔离器的驱动电路。设 v_s 的变化范围为 $0\sim 5V$ ，内阻 $R_s=500\ \Omega$ 。要求LED的 $i_{o1}=10^{-3}v_s(A)$ 。已知运放的 $A_{vo}=10^4$ ， $R_i=5k\ \Omega$ ， $R_o=100\ \Omega$ 。设计后仿真检验发光二极管的电流。

解： 仿真电路



i_{o1} 与 v_s 的呈线性关系， $i_{o1}=10^{-3}v_s$ ，
放大电路满足设计要求。



7.7 负反馈放大电路的频率响应

7.7.1 频率响应的一般表达式

7.7.2 增益-带宽积

7.7.1 频率响应的一般表达式

基本放大电路的高频响应 $\dot{A}_H = \frac{\dot{A}_M}{1 + j\frac{f}{f_H}}$ $\dot{A}_M$ 为基本放大电路通带增益

根据闭环增益表达式有
(设反馈网络为纯阻网络) $\dot{A}_{Hf} = \frac{\dot{A}_H}{1 + \dot{A}_H F} = \frac{\dot{A}_{Mf}}{1 + j\frac{f}{f_{Hf}}}$

其中 $\dot{A}_{Mf}$ ——通带闭环增益

$f_{Hf} = (1 + \dot{A}_M F) f_H$ ——闭环上限频率 比开环时增加了

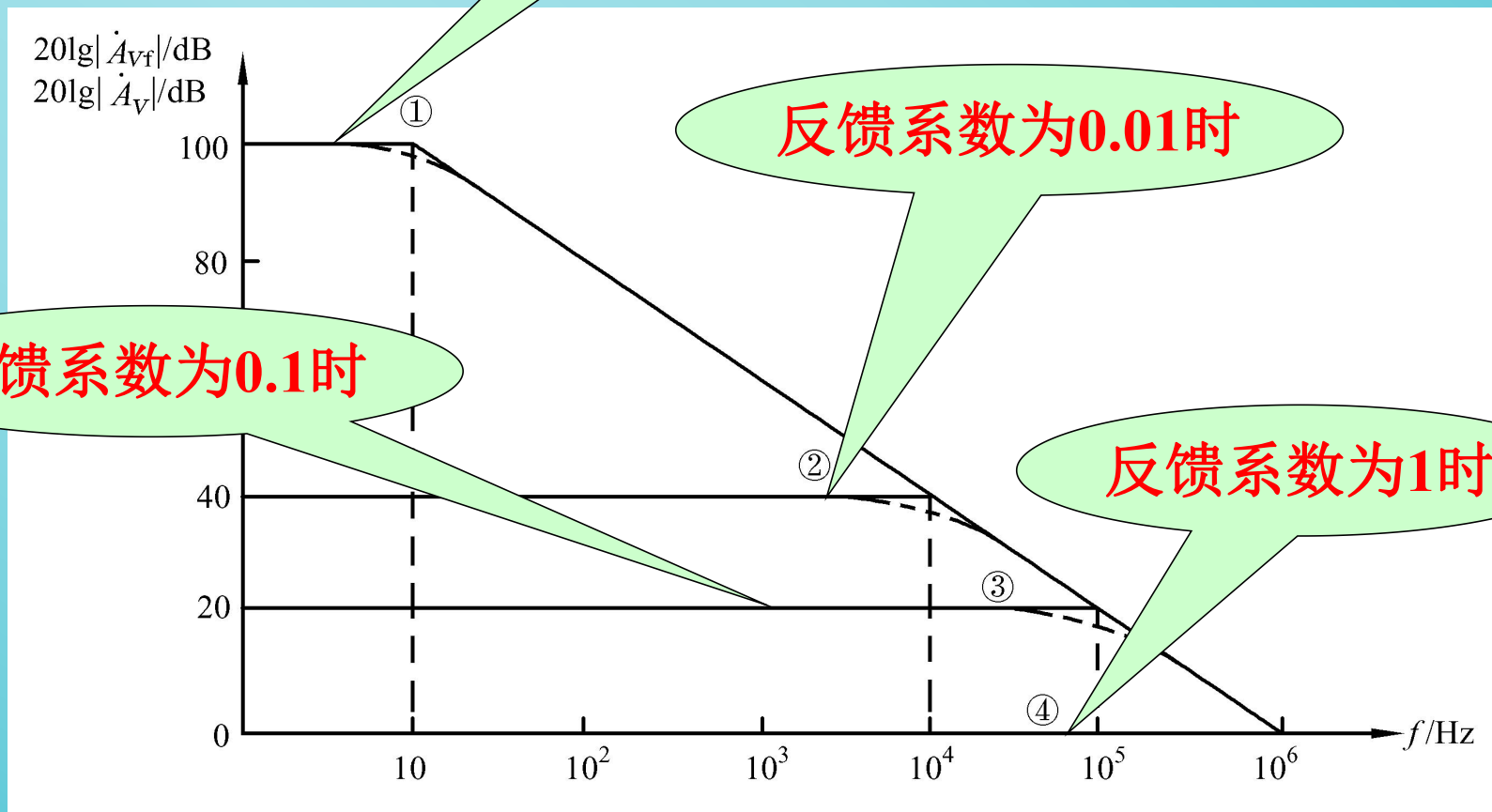
同理可得

$f_{Lf} = \frac{f_L}{1 + \dot{A}_M F}$ ——闭环下限频率 比开环时减小了

$BW_f = f_{Hf} - f_{Lf} \approx f_{Hf}$ 引入负反馈后, 放大电路的通频带展宽了

7.7.1 频率响应的一般表达式

例7.7.1的波特图



7.7.2 增益-带宽积

放大电路的增益-带宽积为常数

$$A_f f_{Hf} = \frac{A}{1 + AF} \times [(1 + AF) f_H] = Af_H$$

闭环增益-带宽积

开环增益-带宽积



7.8 负反馈放大电路的稳定性

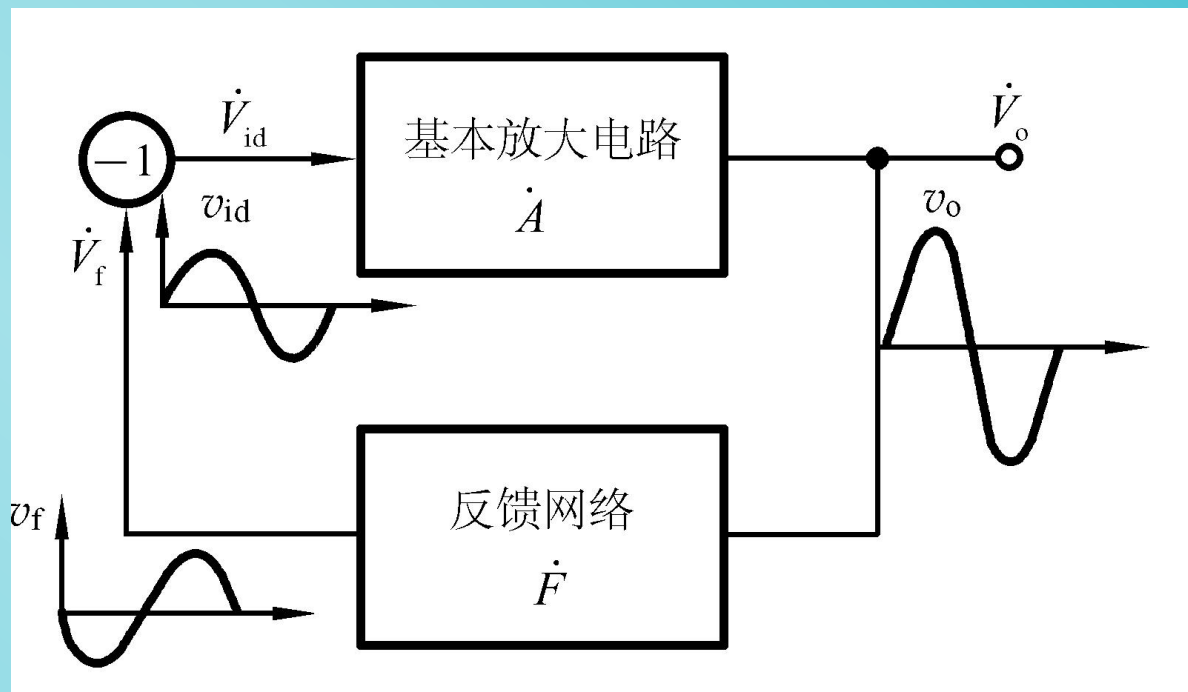
7.8.1 负反馈放大电路的自激振荡及 稳定工作的条件

*7.8.2 频率补偿

7.8.1 负反馈放大电路的自激振荡及稳定工作的条件

1. 自激振荡现象

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。



2. 产生原因

$\dot{A}$ 和 $\dot{F}$ 在高频区或低频区产生的附加相移达到 180° ，使中频区的负反馈在高频区或低频区变成了正反馈，当满足了一定的幅值条件时，便产生自激振荡。

7.8.1 负反馈放大电路的自激振荡及稳定工作的条件

3. 自激振荡条件

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

反馈深度 $|1 + \dot{A}\dot{F}| = 0$ 时,
自激振荡

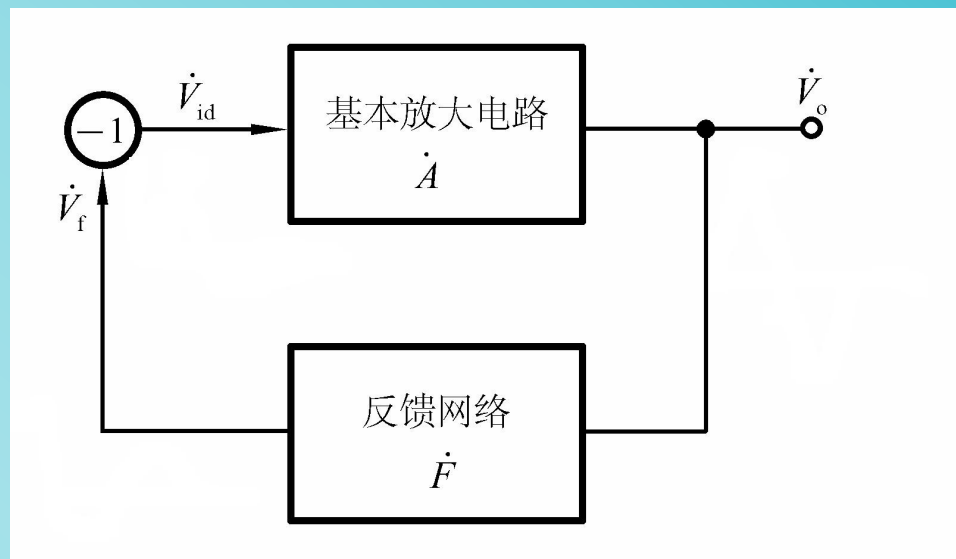
即 $\dot{A}\dot{F} = -1$ ($\dot{A}\dot{F}$ 为环路增益)

又 $\dot{A}\dot{F} = |\dot{A}(\omega) \cdot \dot{F}(\omega)| \angle \varphi_a(\omega) + \varphi_f(\omega)$

得自激振荡条件

$$\begin{cases} |\dot{A}(\omega_k) \cdot \dot{F}(\omega_k)| = 1 & \text{幅值条件} \\ \varphi_a(\omega_k) + \varphi_f(\omega_k) = (2n + 1) \times 180^\circ & \text{相位条件 (附加相移)} \end{cases}$$

注：输入端求和的相位 (-1) 不包含在内





7.8.1 负反馈放大电路的自激振荡及稳定工作的条件

4. 稳定工作条件

破坏自激振荡条件

$$\begin{cases} |\dot{A}\dot{F}| < 1 \\ \varphi_a + \varphi_f = (2n+1)180^\circ \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} |\dot{A}\dot{F}| = 1 \\ |\varphi_a + \varphi_f| < 180^\circ \end{cases}$$

写成等式，且幅值用分贝数表示时

$$\begin{cases} 20\lg|\dot{A}\dot{F}| + G_m = 0 \\ \varphi_a + \varphi_f = (2n+1)180^\circ \end{cases} \quad \begin{cases} 20\lg|\dot{A}\dot{F}| = 0 \\ |\varphi_a + \varphi_f| + \varphi_m = 180^\circ \end{cases}$$

其中 G_m ——**幅值裕度**，一般要求 $G_m \leq -10\text{dB}$ （保证可靠稳定，留有余地）
 φ_m ——**相位裕度**，一般要求 $\varphi_m \geq 45^\circ$

当反馈网络为纯电阻网络时， $\varphi_f = 0^\circ$ 。

7.8.1 负反馈放大电路的自激振荡及稳定工作的条件

4. 稳定工作条件

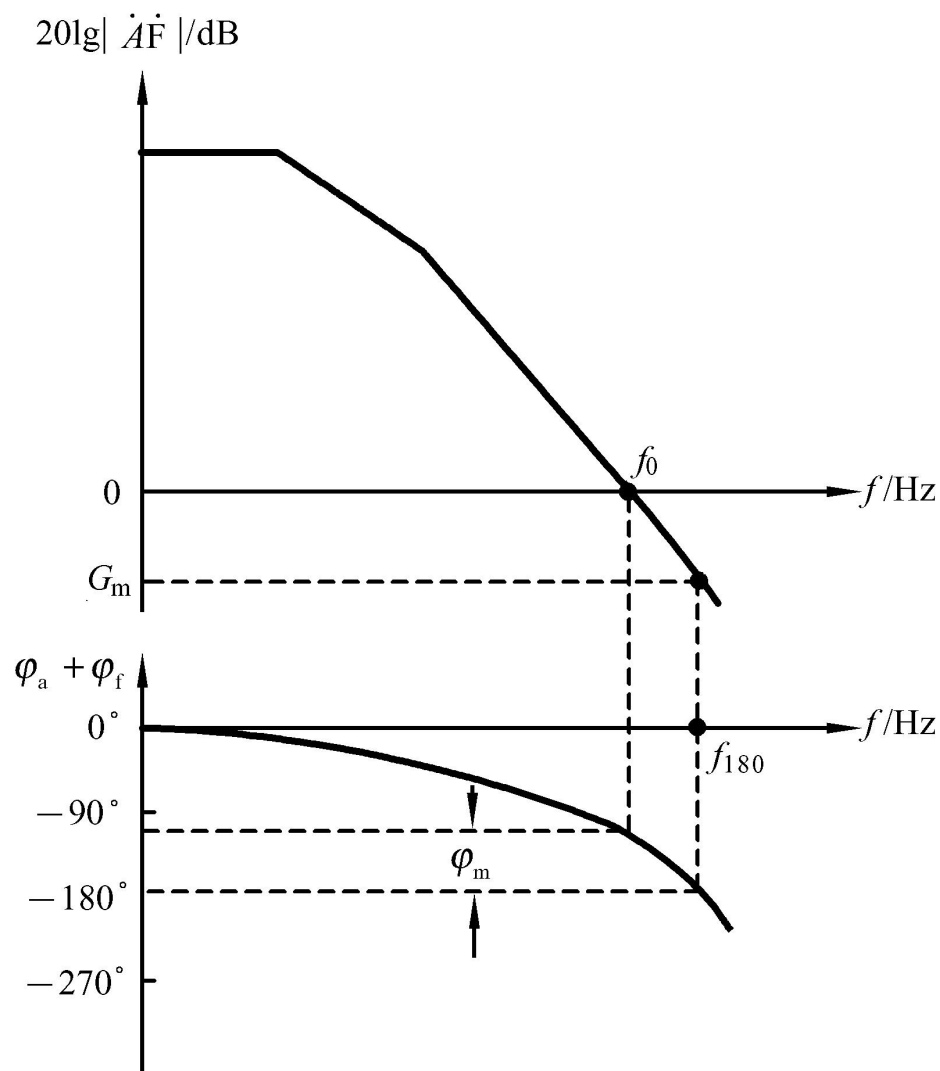
用波特图表示

$$\begin{cases} 20\lg|\dot{A}\dot{F}| + G_m = 0 \\ \varphi_a + \varphi_f = (2n+1)180^\circ \end{cases}$$

或

$$\begin{cases} 20\lg|\dot{A}\dot{F}| = 0 \\ |\varphi_a + \varphi_f| + \varphi_m = 180^\circ \end{cases}$$

$$G_m \leq -10\text{dB} \quad \text{或} \quad \varphi_m \geq 45^\circ$$





7.8.1 负反馈放大电路的自激振荡及稳定工作的条件

5. 负反馈放大电路稳定性分析

利用波特图分析

环路增益的幅频响应写为 $20\lg|\dot{A}\dot{F}| = 20\lg|\dot{A}| - 20\lg\left|\frac{1}{\dot{F}}\right|$

一般 $\dot{F}$ 与频率无关，则 $20\lg\left|\frac{1}{\dot{F}}\right|$ 的幅频响应是一条水平线

水平线 $20\lg\left|\frac{1}{\dot{F}}\right|$ 与 $20\lg|\dot{A}|$ 的交点为 $20\lg\left|\frac{1}{\dot{F}}\right| = 20\lg|\dot{A}|$

即该点满足 $|\dot{A}\dot{F}| = 1$

关键是作出 $\dot{A}$ 的幅频响应和相频响应波特图



7.8.1 负反馈放大电路的自激振荡及稳定工作的条件

5. 负反馈放大电路稳定性分析

判断稳定性方法

(1) 作出 $\dot{A}$ 的幅频响应和相频响应波特图

(2) 作 $20\lg\left|\frac{1}{\dot{F}}\right|$ 水平线

(3) 判断是否满足相位裕度 $\varphi_m \geq 45^\circ$

在水平线 $20\lg\left|\frac{1}{\dot{F}}\right|$ 与 $20\lg|\dot{A}|$ 的交点作垂线交于相频响应曲线的一点。若该点 $|\varphi_a| \leq 135^\circ$ ，满足相位裕度，稳定；否则不稳定。

或 在相频响应的 $\varphi_a = -135^\circ$ 点处作垂线与 $20\lg|\dot{A}|$ 交于 P 点

若 P 点在 $20\lg\left|\frac{1}{\dot{F}}\right|$ 水平线之下，稳定；否则不稳定。

P 点交在 $20\lg|\dot{A}|$ 的 $-20\text{dB}/\text{十倍频程}$ 处，放大电路是稳定的。

5. 负反馈放大电路稳定性分析

$|\dot{F}|$ 越大，水平线

$20\lg\left|\frac{1}{\dot{F}}\right|$ 下移，越

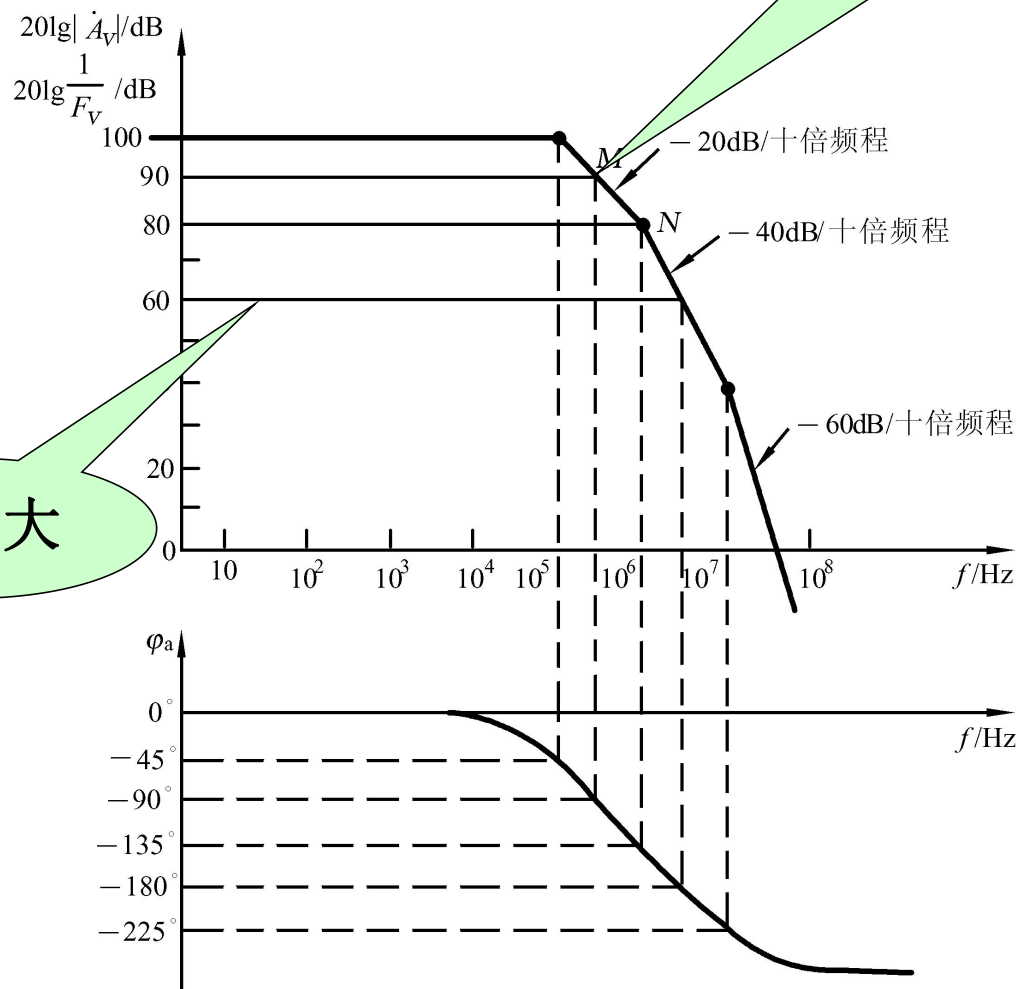
容易自激

$|\dot{F}|$ 越大，表明
反馈深度越深

反馈深度越深，
越容易自激。

$|\dot{F}|$ 增大

$|\dot{A}\dot{F}| = 1$ 点





*7.8.2 频率补偿

不作要求