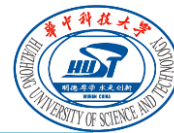


8 反馈放大电路



8.1 反馈的基本概念与分类

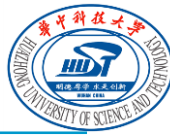
8.2 负反馈放大电路增益的一般表达式

8.3 负反馈对放大电路性能的影响

8.4 深度负反馈条件下的近似计算

8.5 负反馈放大电路的稳定性

8.1 反馈的基本概念与分类



8.1.1 反馈的基本概念

8.1.2 直流反馈与交流反馈

8.1.3 正反馈与负反馈

8.1.4 串联反馈与并联反馈

8.1.5 电压反馈与电流反馈

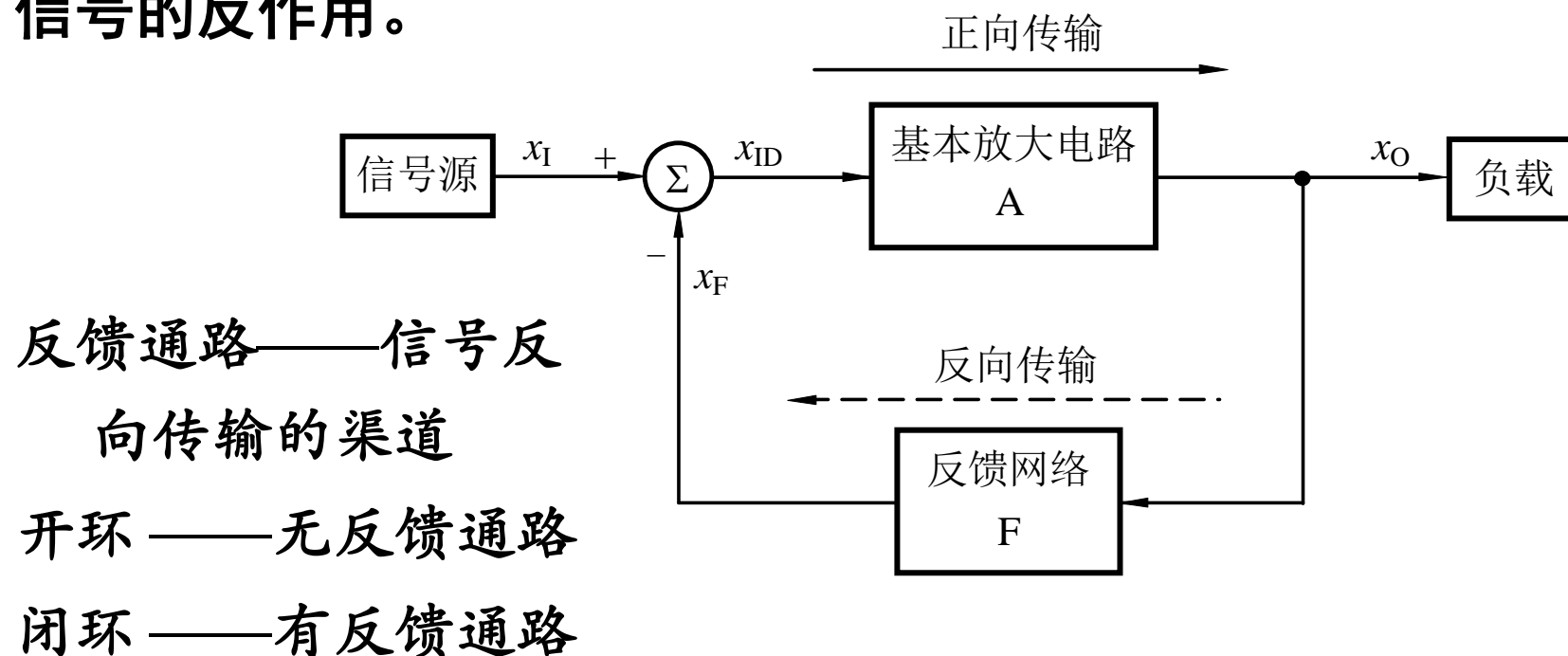
8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

8.1.1 反馈的基本概念

1. 什么是反馈

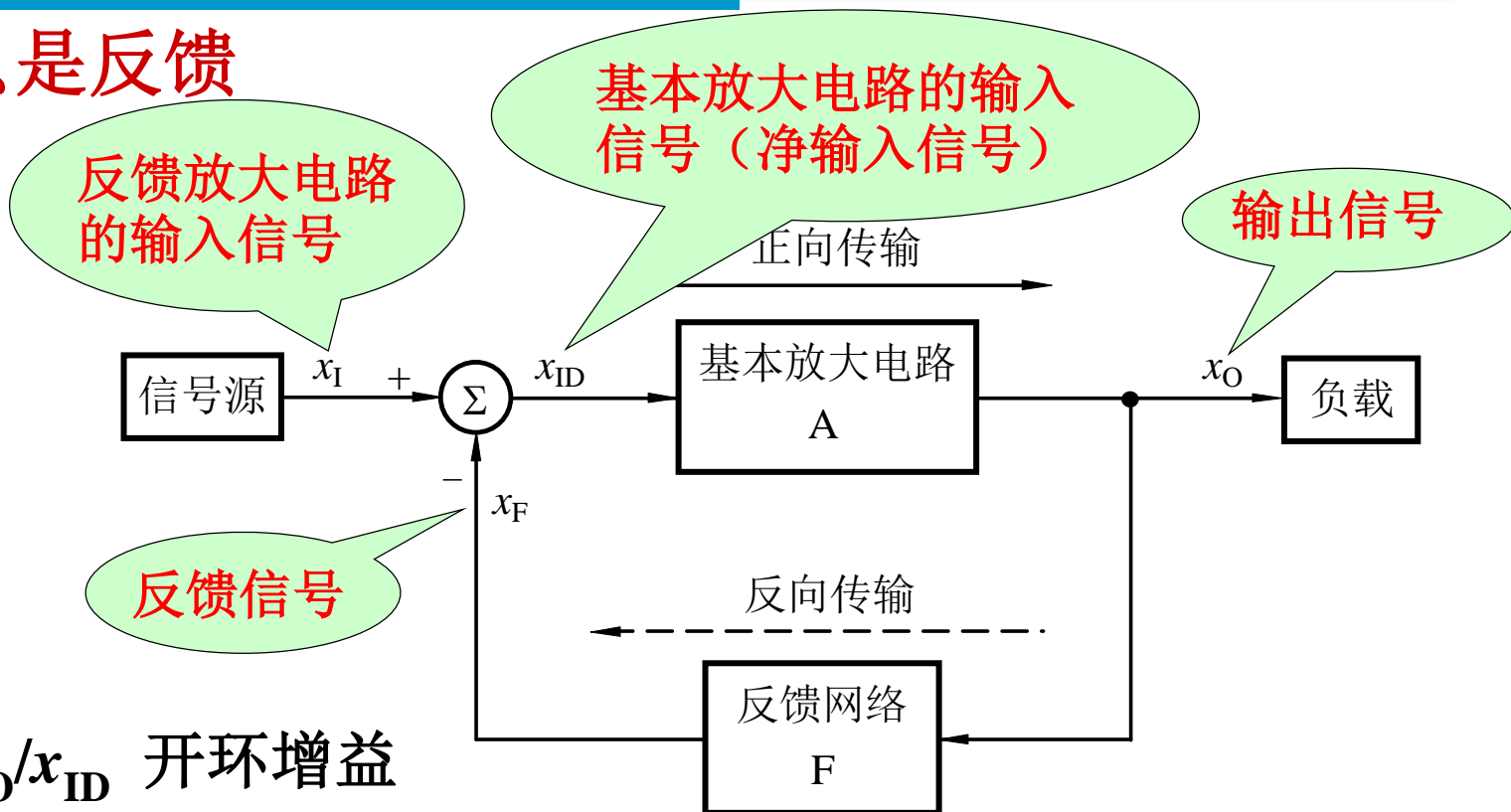
将放大电路输出量（电压或电流）的一部分或全部，通过某种电路（称为反馈网络）送回到输入回路的过程。

反馈是信号的反向传输过程，体现了输出信号对输入信号的反作用。



8.1.1 反馈的基本概念

1. 什么是反馈



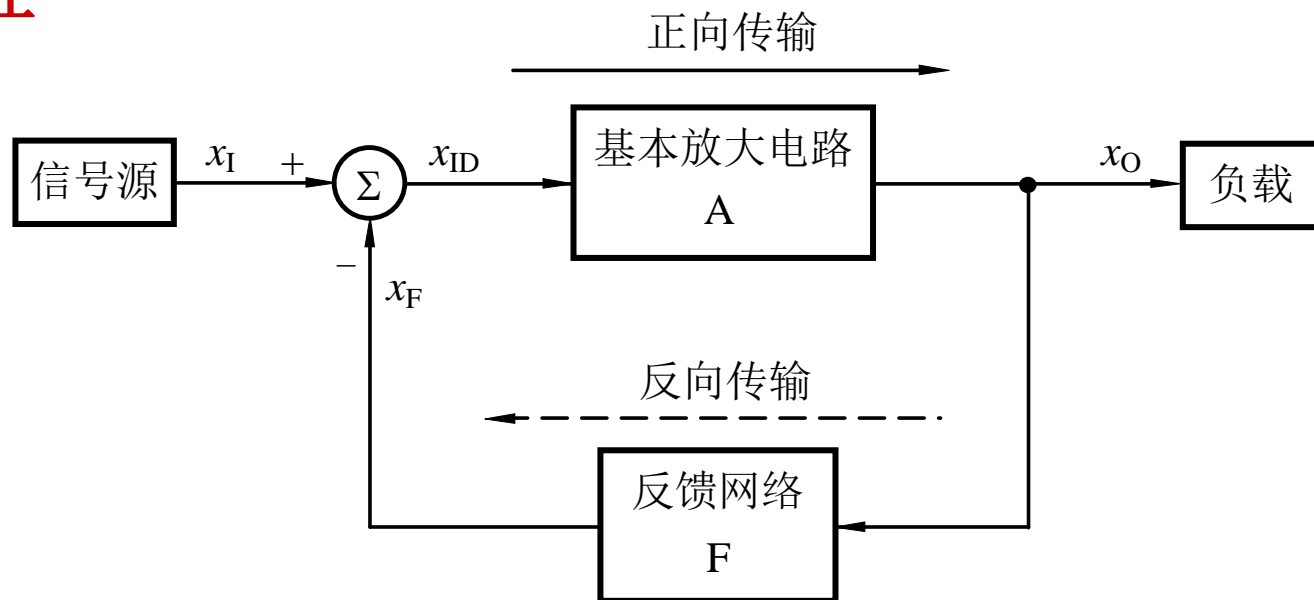
$$A = x_O / x_{ID} \quad \text{开环增益}$$

$$F = x_F / x_O \quad \text{反馈系数}$$

$$A_f = x_O / x_I \quad \text{闭环增益}$$

8.1.1 反馈的基本概念

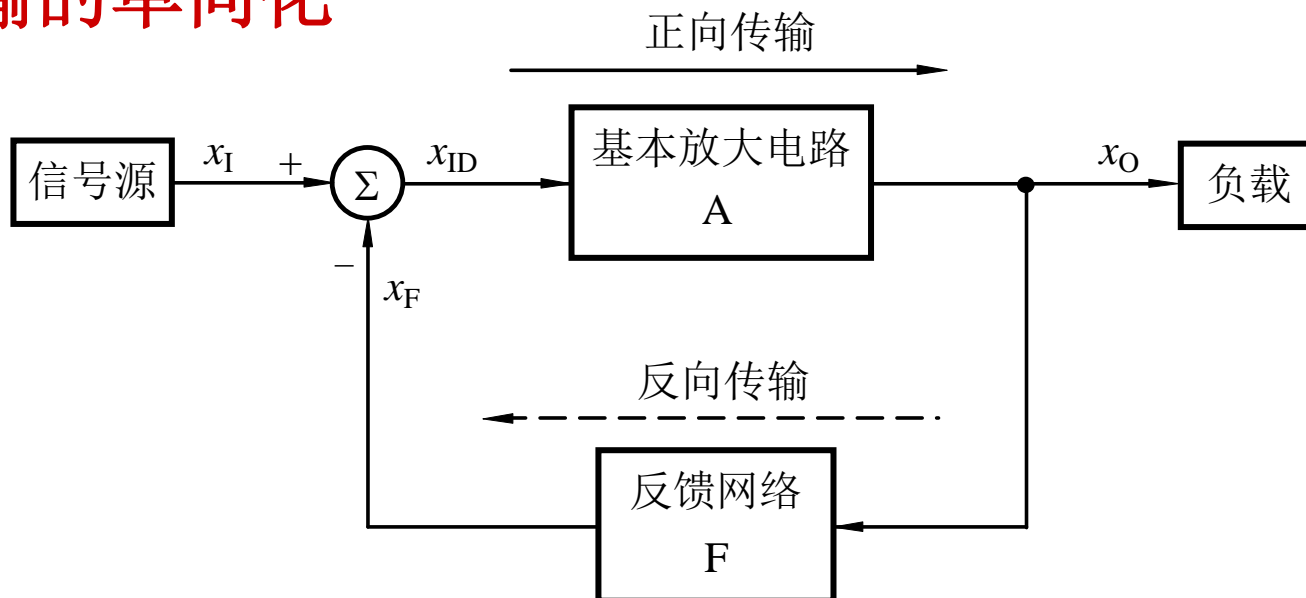
2. 反馈极性



负反馈——在输入信号 x_I 不变的情况下，当引入反馈后使输出量 x_O 变小时，称为负反馈，反之则为正反馈。

8.1.1 反馈的基本概念

3. 信号传输的单向化



正向传输：

信号由输入到输出的传输

反向传输：

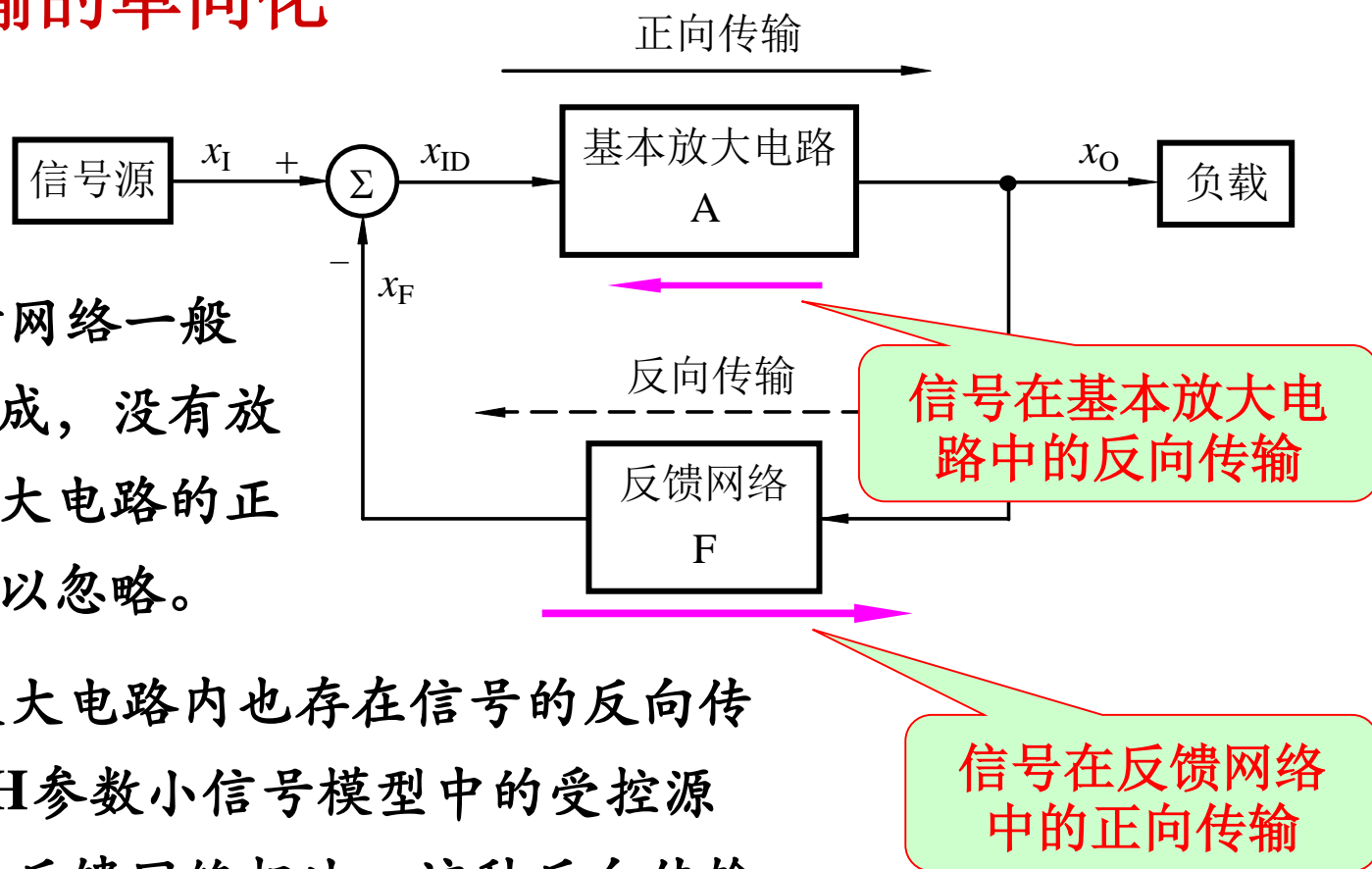
信号由输出到输入的传输

8.1.1 反馈的基本概念

3. 信号传输的单向化

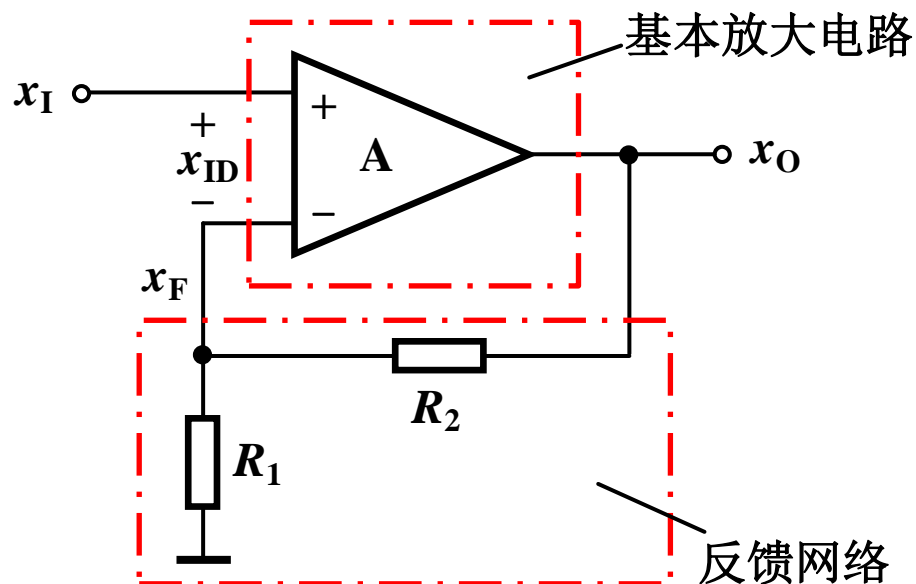
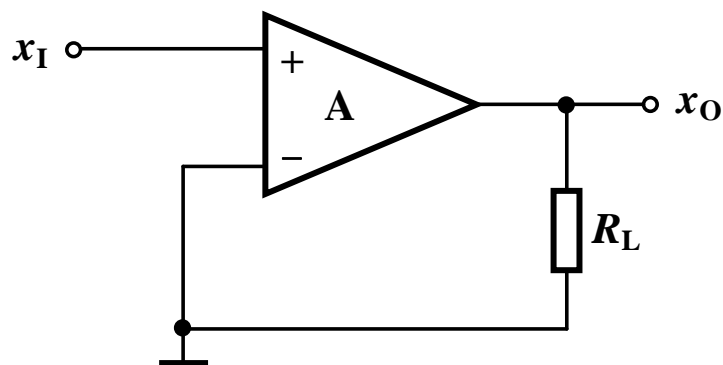
因为反馈网络一般由无源元件组成，没有放大作用，与放大电路的正向传输相比可以忽略。

在基本放大电路内也存在信号的反向传输（如BJT的H参数小信号模型中的受控源 $h_{re}v_{ce}$ ），但与反馈网络相比，这种反向传输作用非常微弱，也都忽略不计。



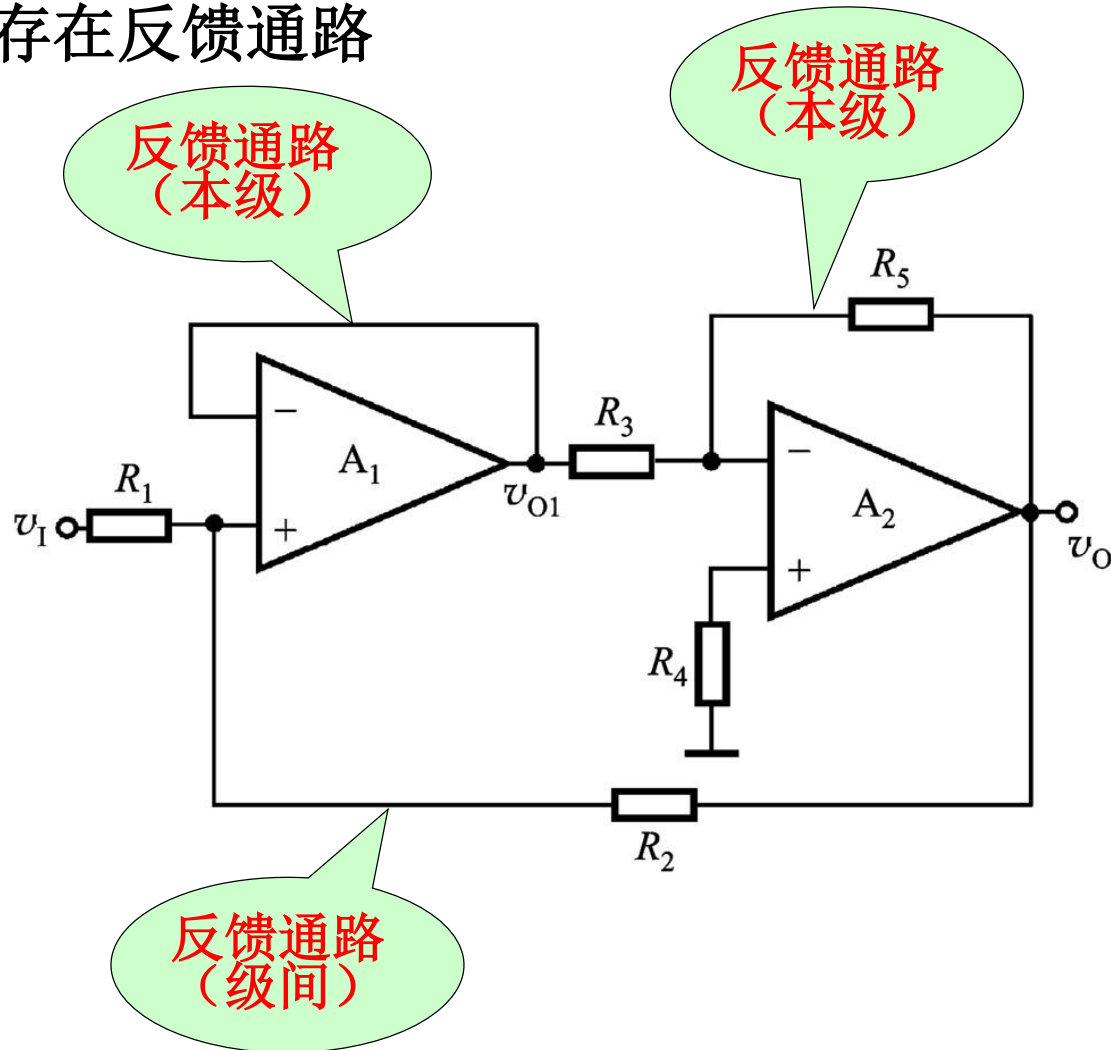
8.1.1 反馈的基本概念

判断电路是否存在反馈通路



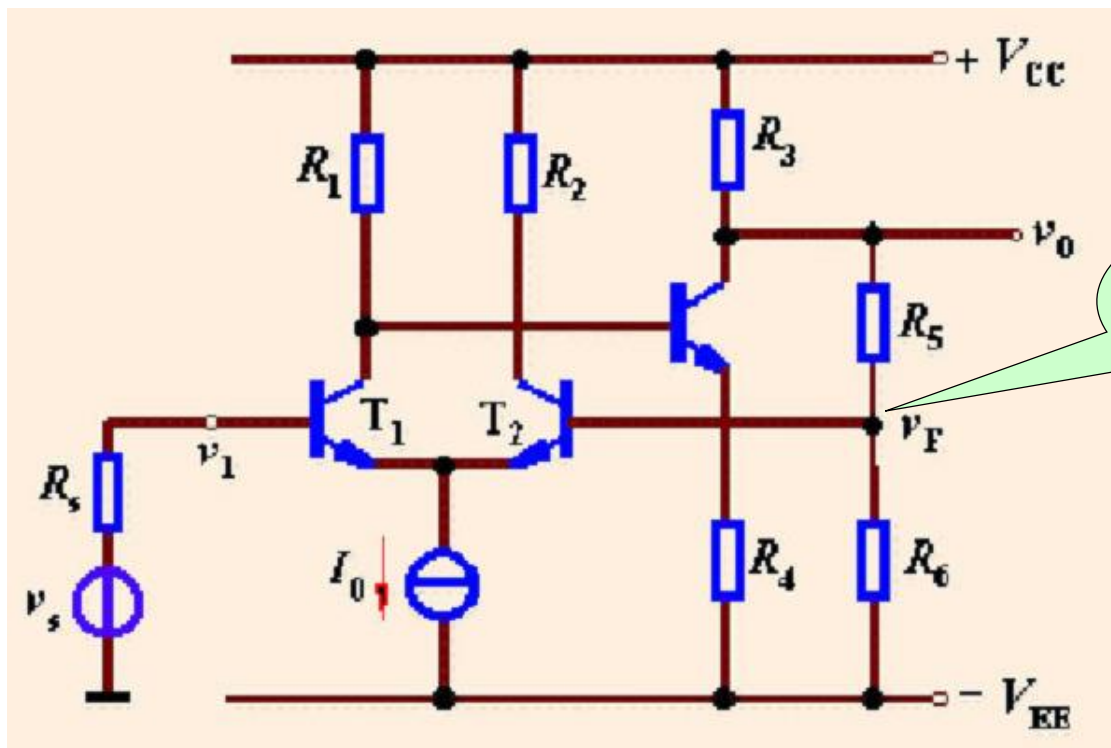
8.1.1 反馈的基本概念

判断电路是否存在反馈通路



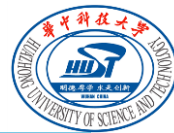
8.1.1 反馈的基本概念

判断电路是否存在反馈通路



理论上，电源线 and 地线不能作为反馈通路

8.1 反馈的基本概念与分类



8.1.1 反馈的基本概念

8.1.2 直流反馈与交流反馈

8.1.3 正反馈与负反馈

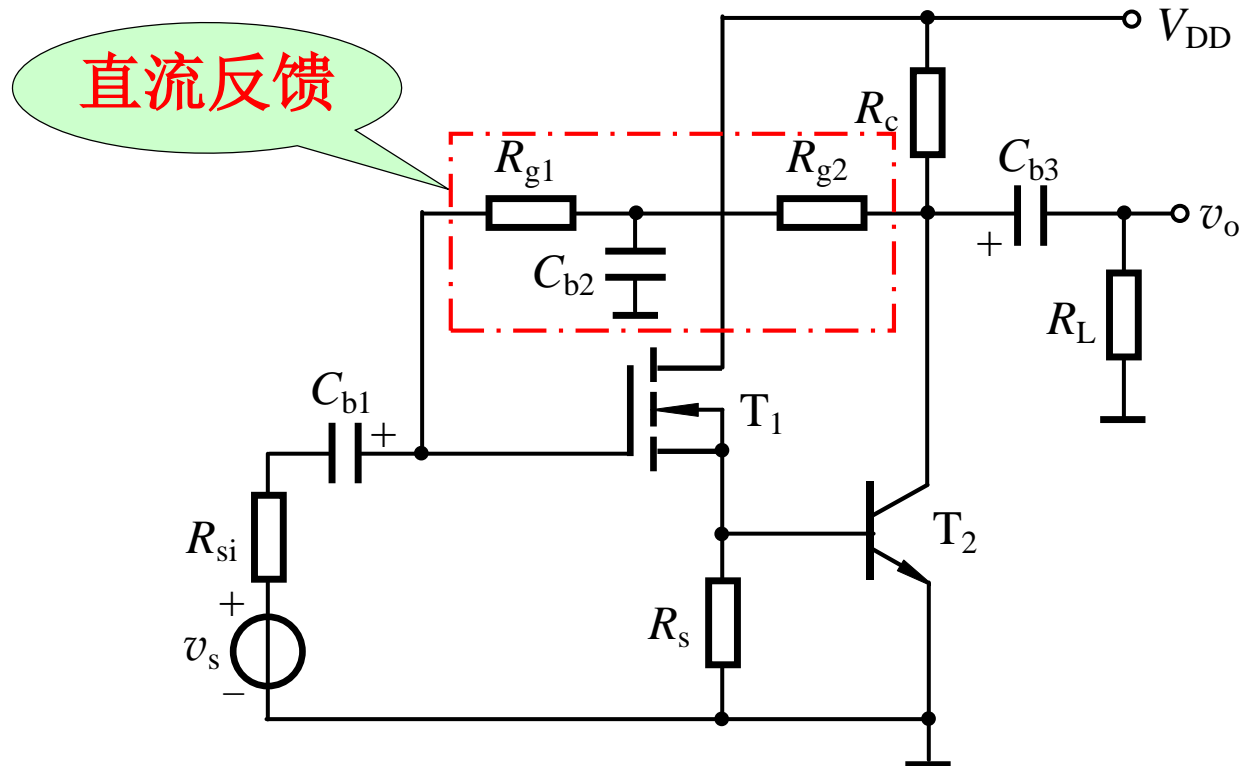
8.1.4 串联反馈与并联反馈

8.1.5 电压反馈与电流反馈

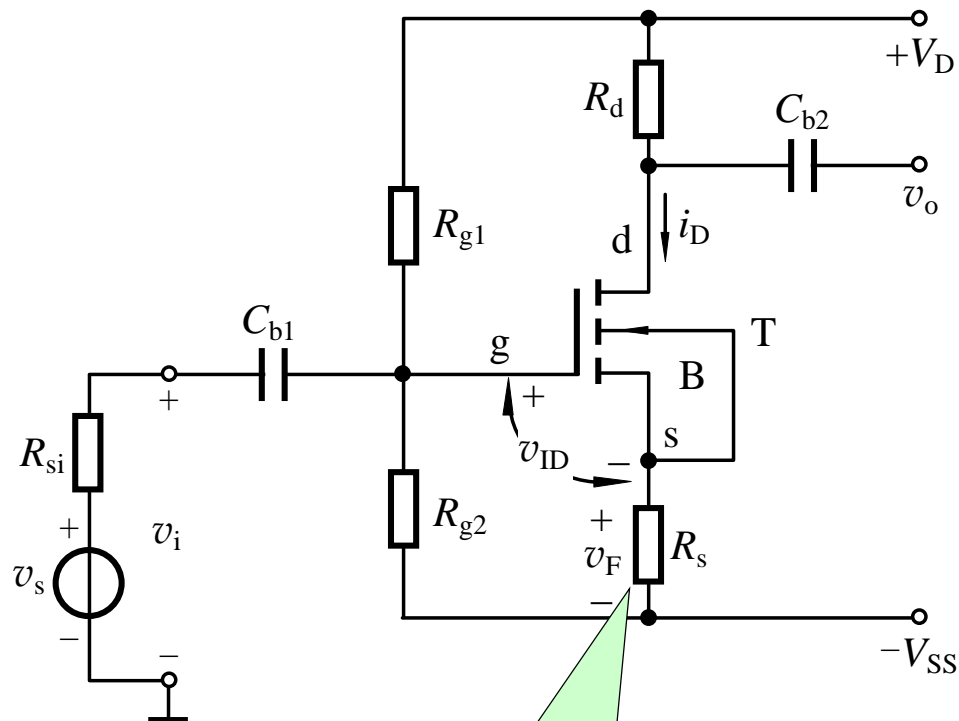
8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

8.1.2 直流反馈与交流反馈

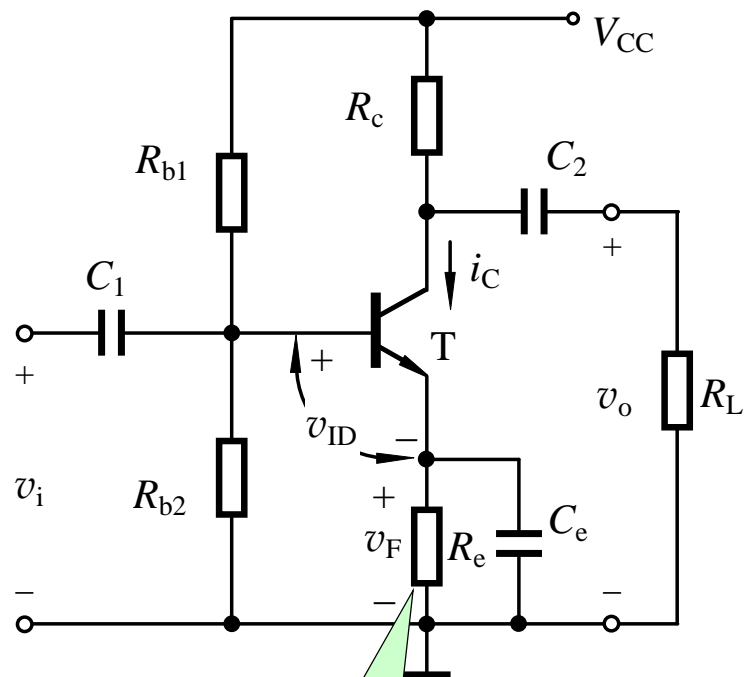
根据反馈到输入端的信号是交流，还是直流，或同时存在，来进行判别。



8.1.2 直流反馈与交流反馈

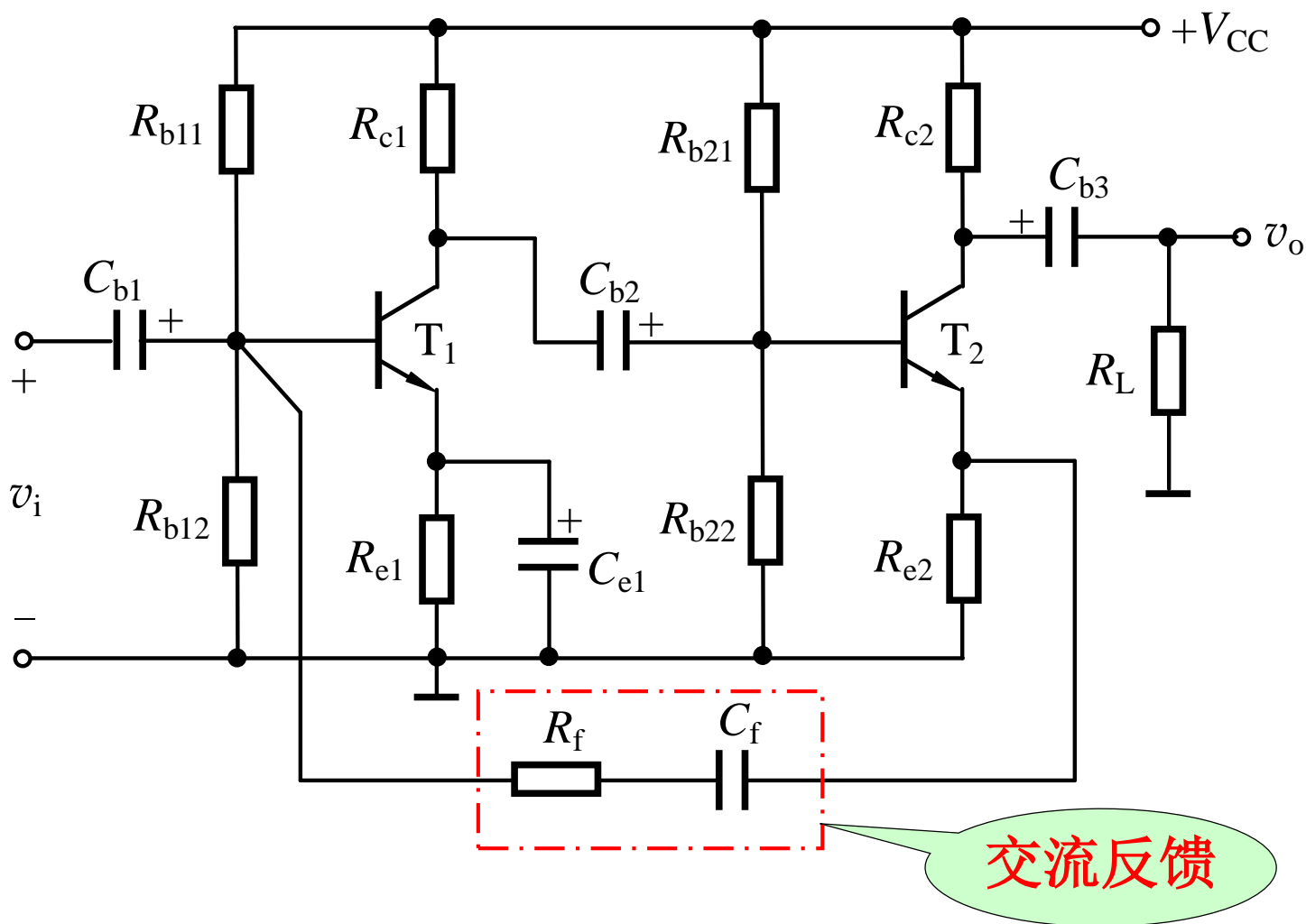


交、直流反馈

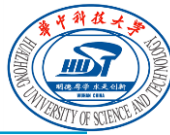


直流反馈

8.1.2 直流反馈与交流反馈



8.1 反馈的基本概念与分类



8.1.1 反馈的基本概念

8.1.2 直流反馈与交流反馈

8.1.3 正反馈与负反馈

8.1.4 串联反馈与并联反馈

8.1.5 电压反馈与电流反馈

8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

8.1.3 正反馈与负反馈

从输出端看

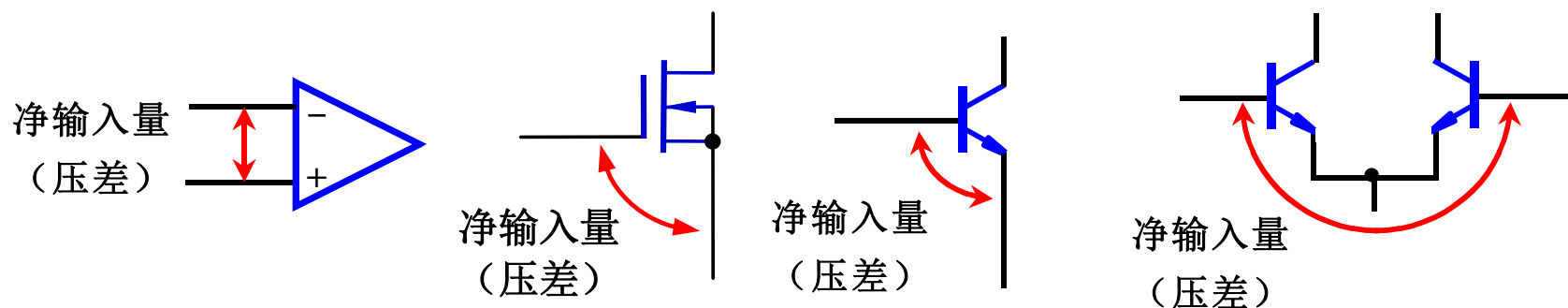
正反馈：输入量不变时，引入反馈后输出量变大了。

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。

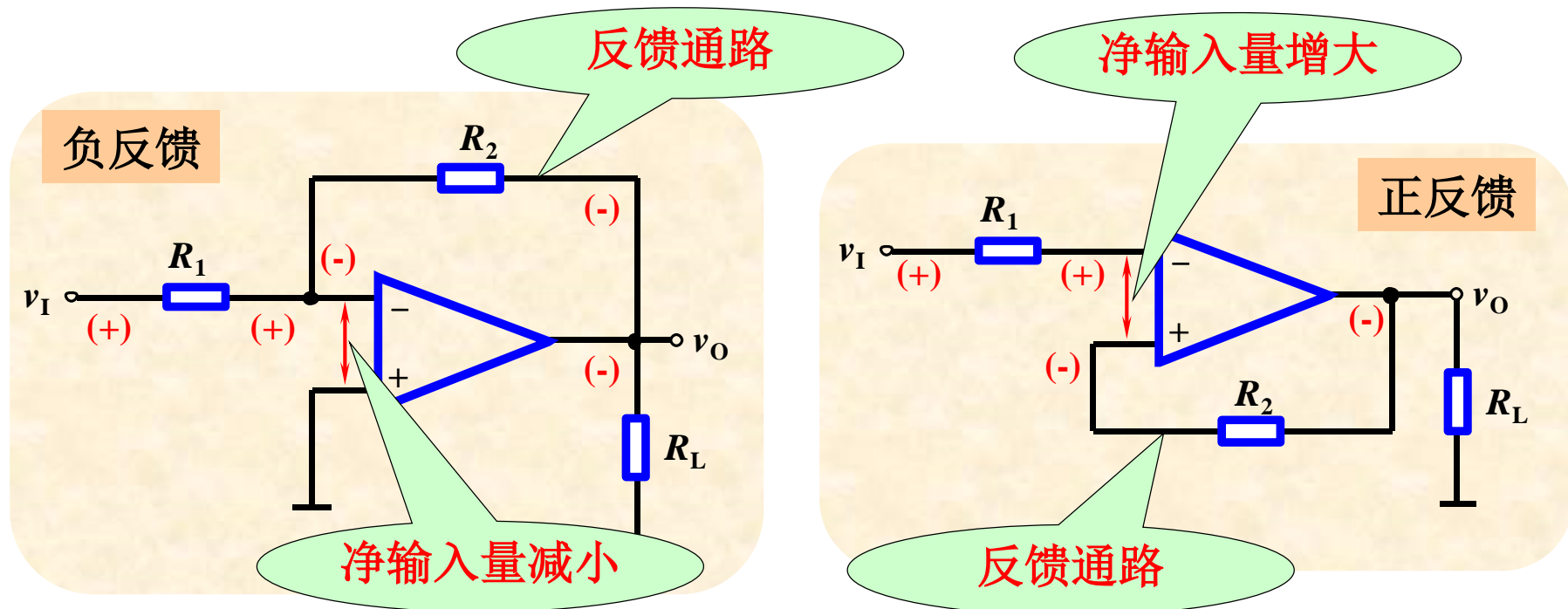
负反馈：引入反馈后，使净输入量变小了。



净输入量可以是电压，也可以是电流。

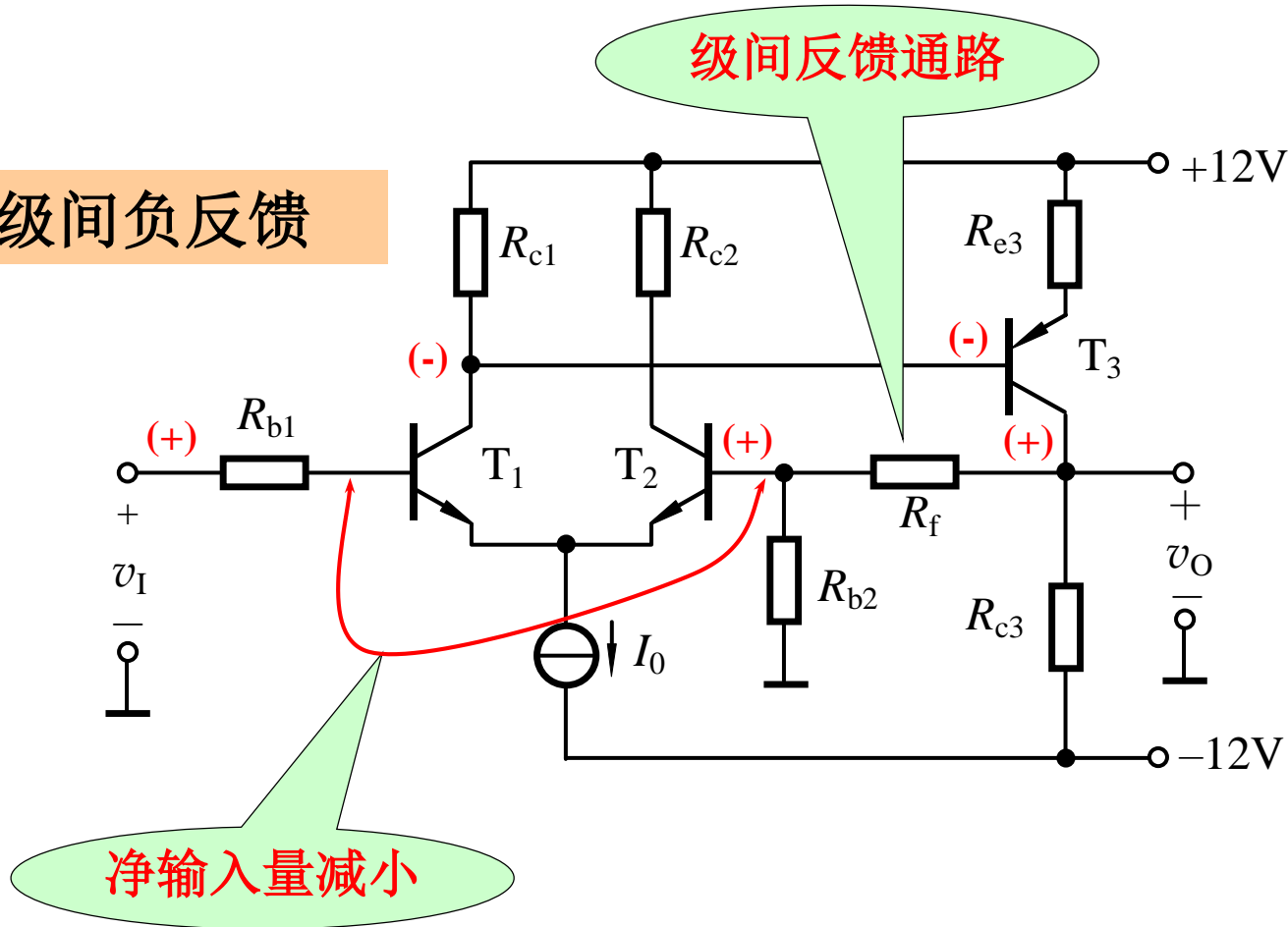
8.1.3 正反馈与负反馈

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）。



8.1.3 正反馈与负反馈

级间负反馈

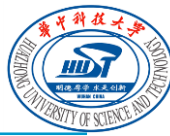


8.1.3 正反馈与负反馈

判断反馈极性时，注意：

- (1) 正确划分出基本放大电路和反馈网络；
- (2) 运用瞬时极性法时，一定要沿着信号传输方向依次标注极性，即在基本放大电路中从输入到输出，在反馈网络中从输出到输入；
- (3) 一定要熟知各种基本放大电路（如共源、共漏、共栅、共射、共基、共集电路，差分放大电路及运算放大器 etc）输出信号与输入信号间的相位关系；
- (4) 正确确定净输入量的位置。

8.1 反馈的基本概念与分类



8.1.1 反馈的基本概念

8.1.2 直流反馈与交流反馈

8.1.3 正反馈与负反馈

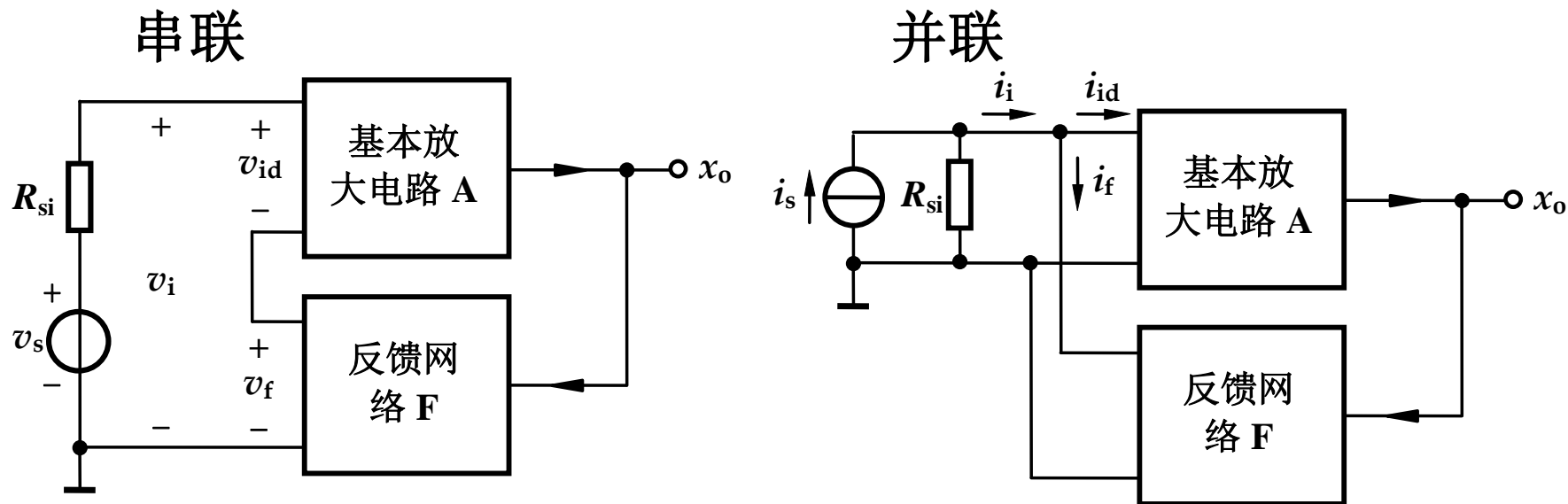
8.1.4 串联反馈与并联反馈

8.1.5 电压反馈与电流反馈

8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

8.1.4 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



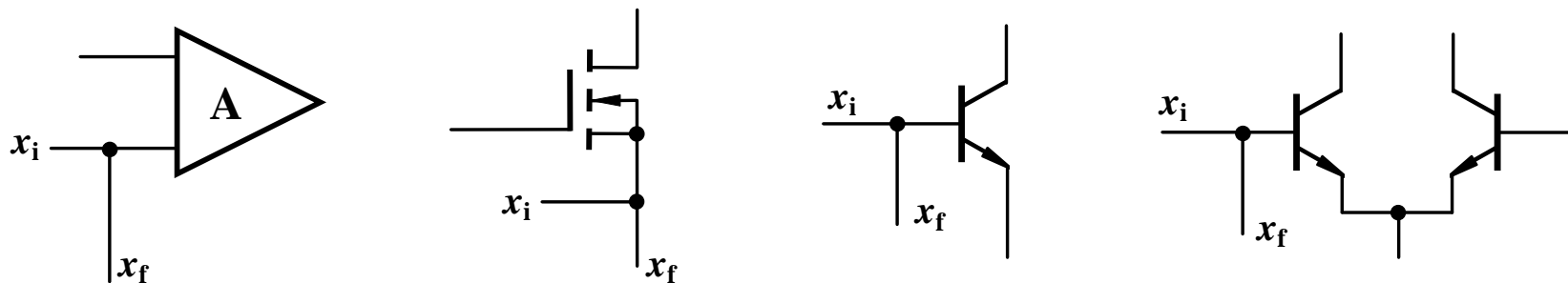
串联: 输入以电压形式求和 (KVL) $-v_i + v_{id} + v_f = 0$ 即 $v_{id} = v_i - v_f$

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

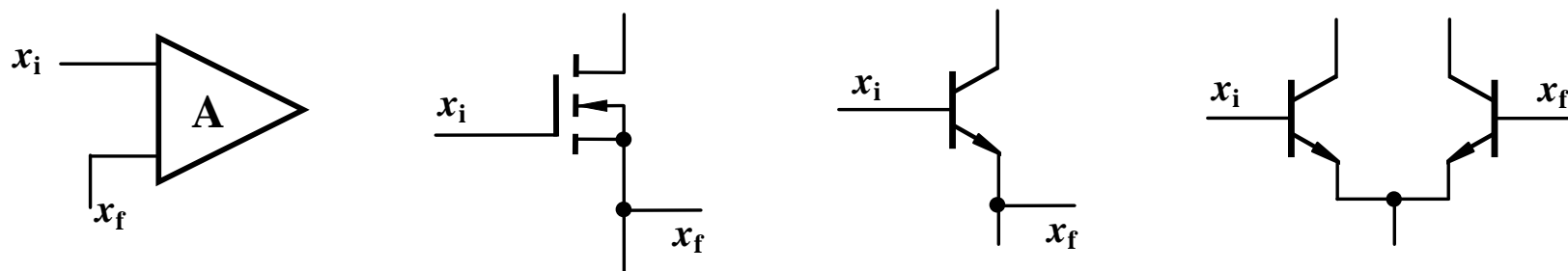
8.1.4 串联反馈与并联反馈

判断串、并联反馈的更快捷的方法

并联：反馈量 x_f 和输入量 x_i 接于同一输入端。

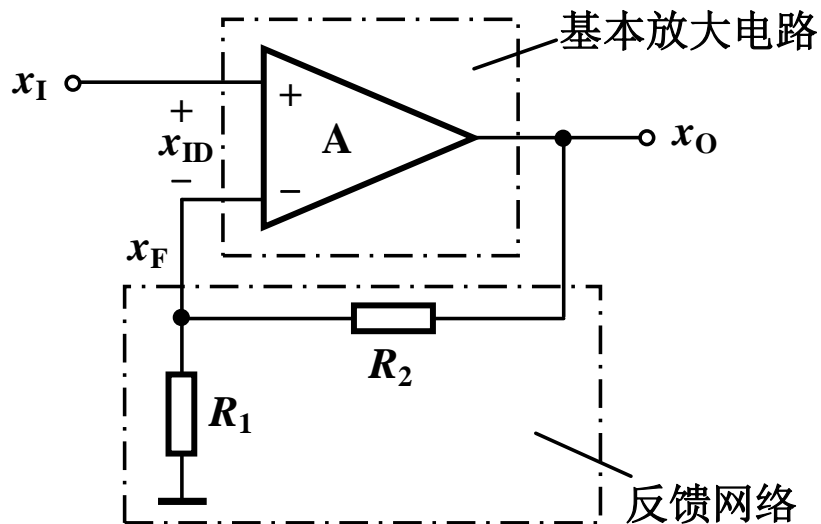


串联：反馈量 x_f 和输入量 x_i 接于不同的输入端。

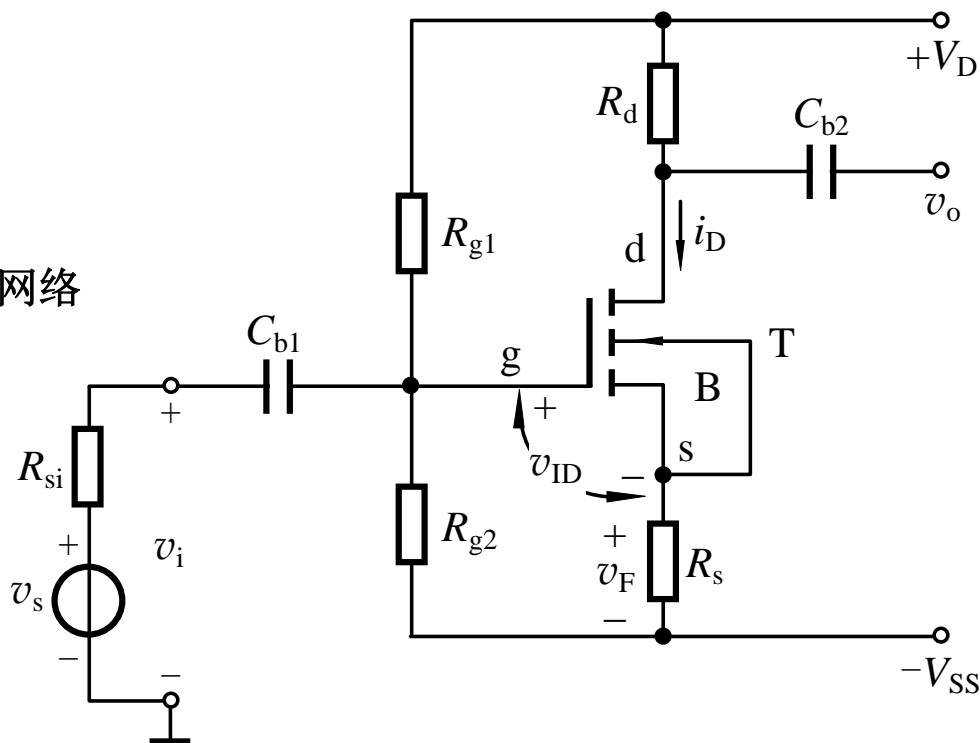


8.1.4 串联反馈与并联反馈

串联反馈

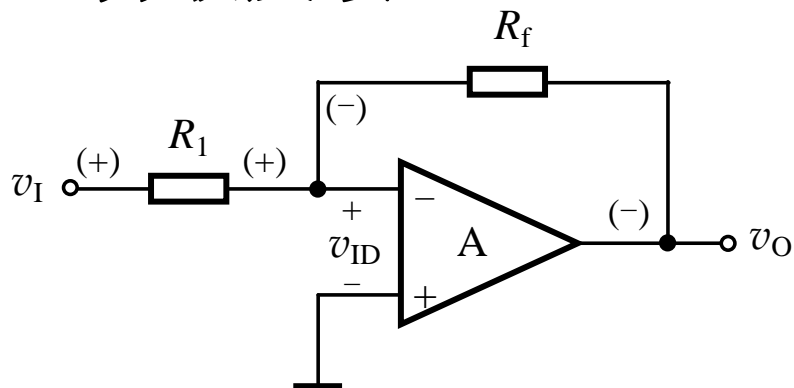


串联反馈

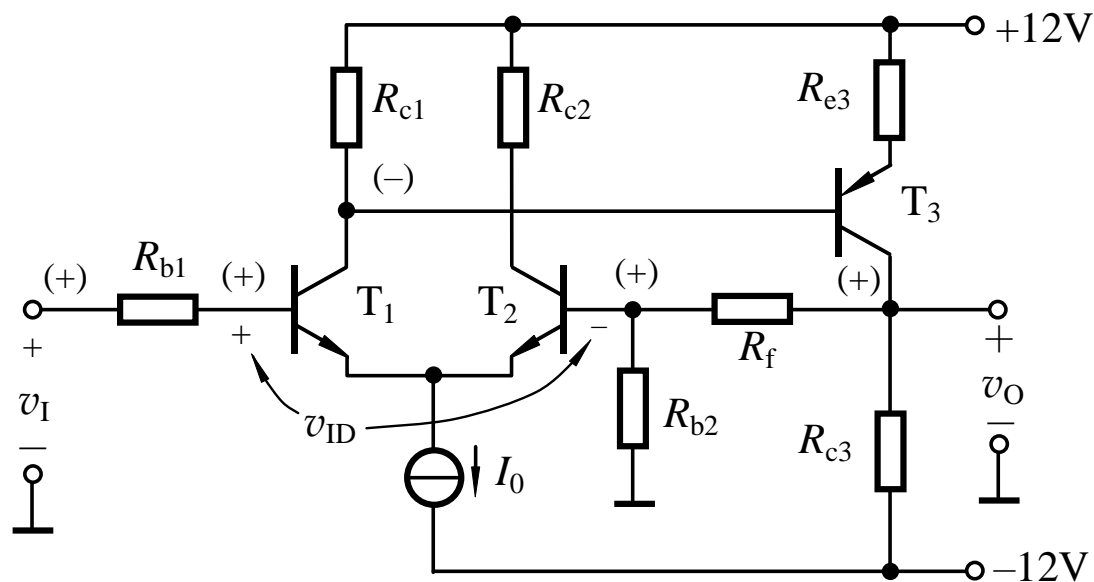


8.1.4 串联反馈与并联反馈

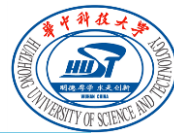
并联反馈



串联反馈



8.1 反馈的基本概念与分类



8.1.1 反馈的基本概念

8.1.2 直流反馈与交流反馈

8.1.3 正反馈与负反馈

8.1.4 串联反馈与并联反馈

8.1.5 电压反馈与电流反馈

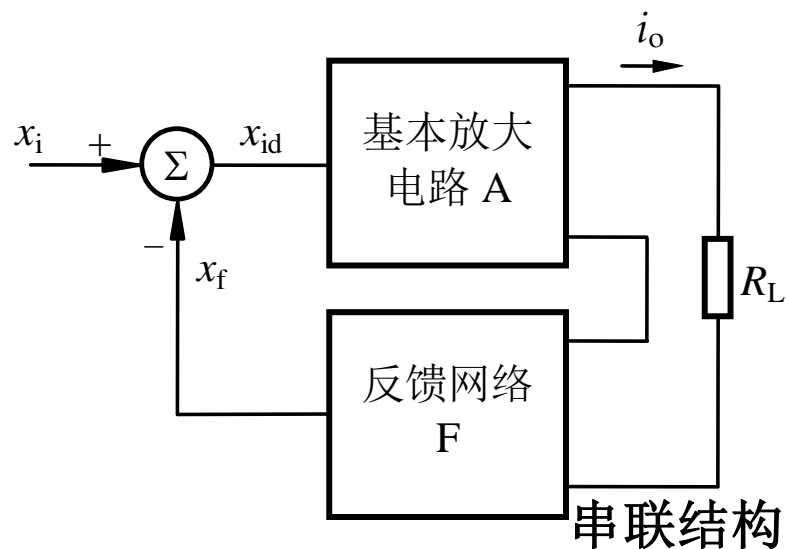
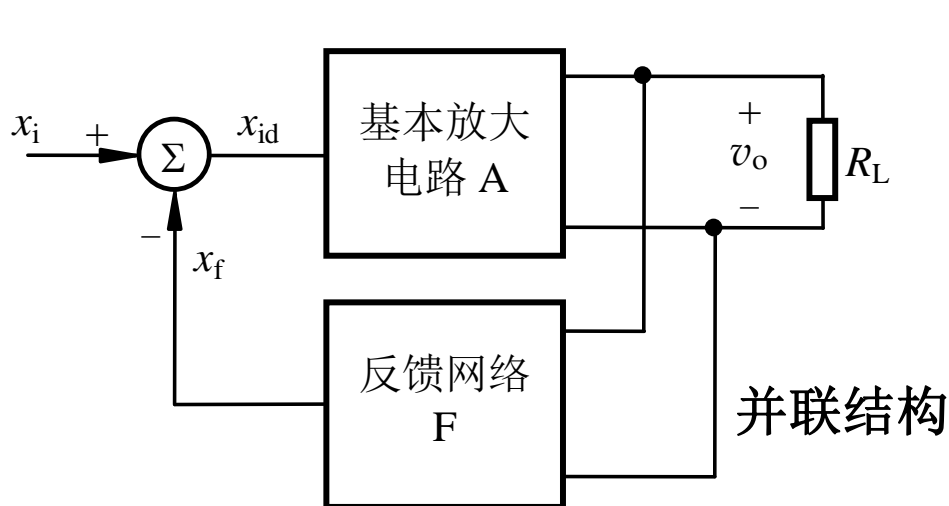
8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

8.1.5 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 $x_f = Fi_o$

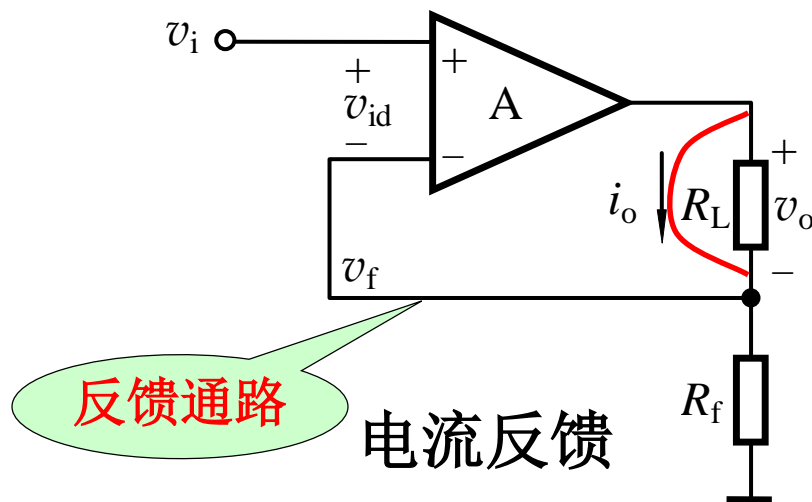
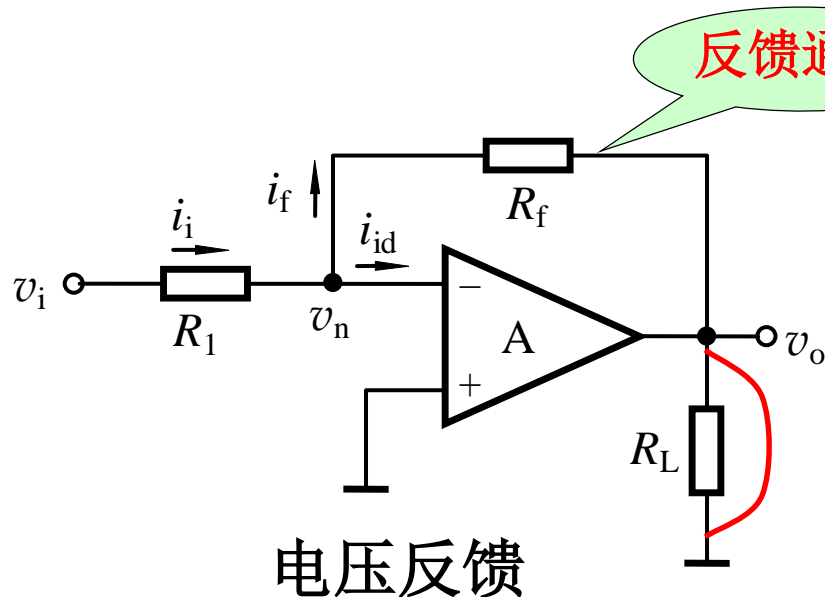


8.1.5 电压反馈与电流反馈

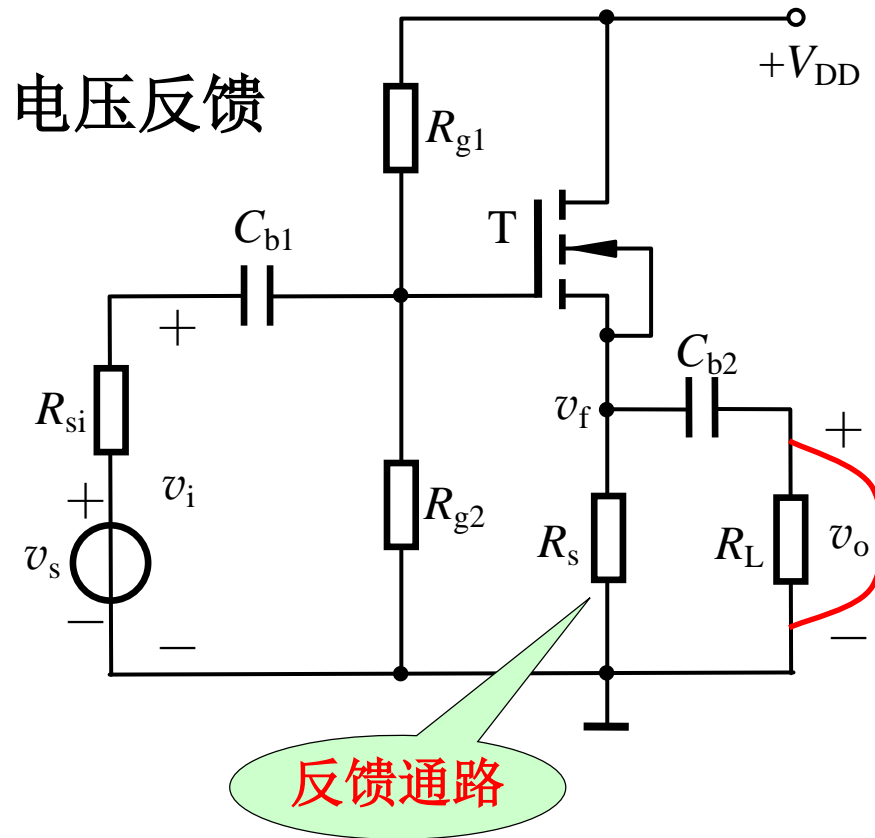
判断方法：负载短路法

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。

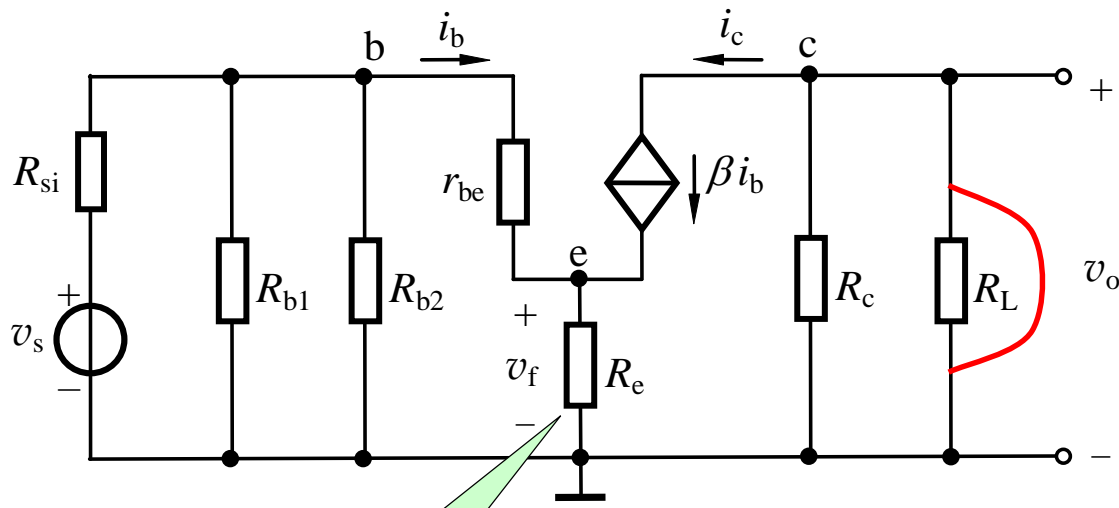
将**负载**短路，反馈量仍然存在——电流反馈。



8.1.5 电压反馈与电流反馈

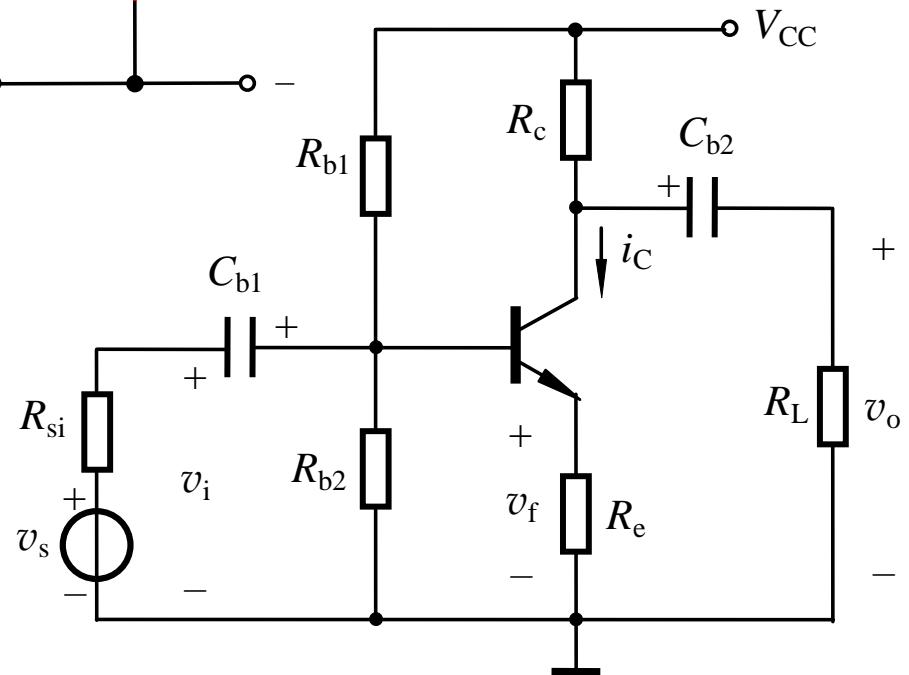


8.1.5 电压反馈与电流反馈



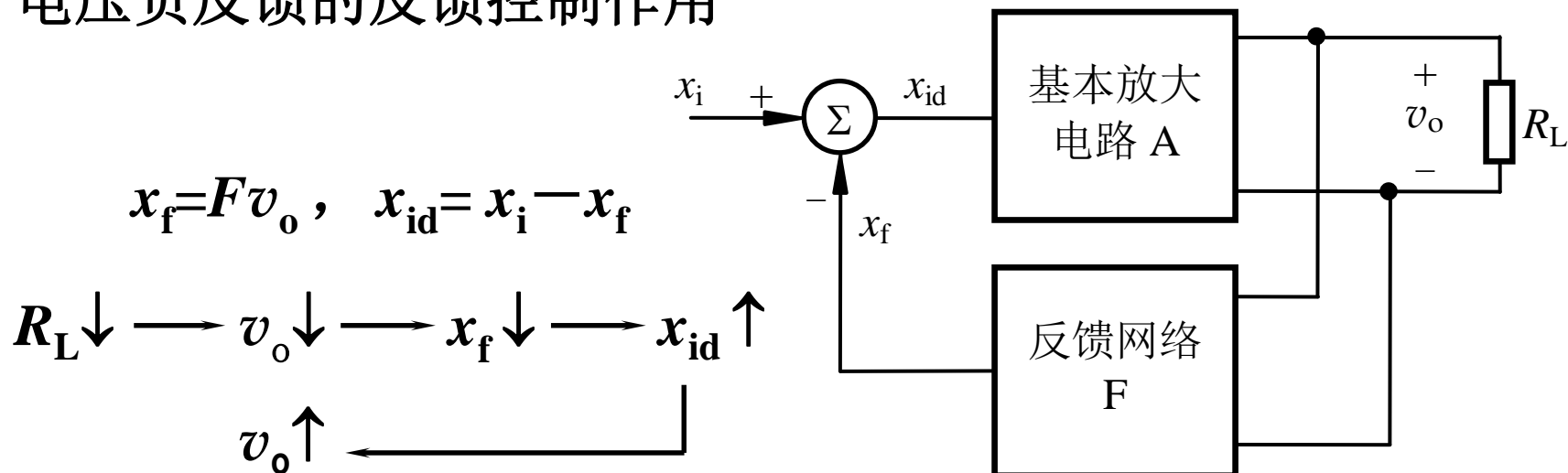
电流反馈

反馈通路



8.1.5 电压反馈与电流反馈

电压负反馈的反馈控制作用

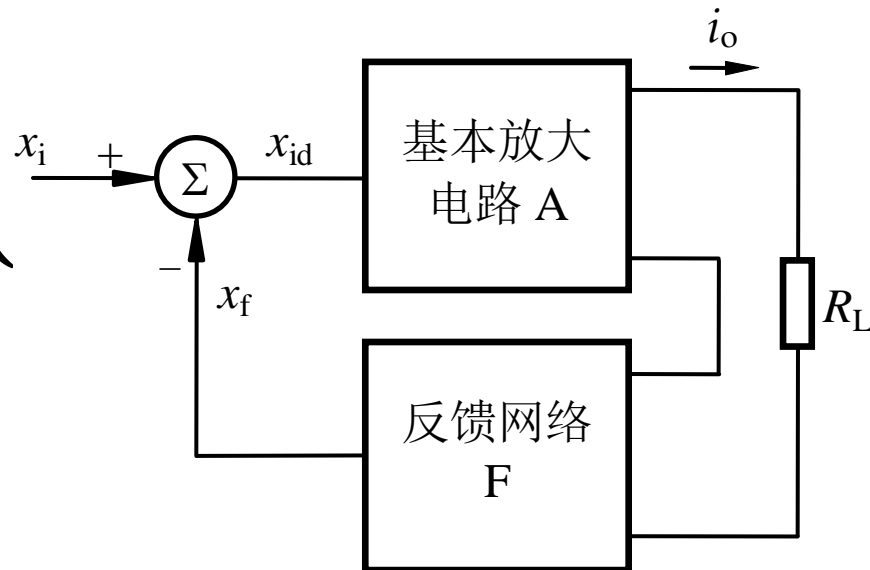
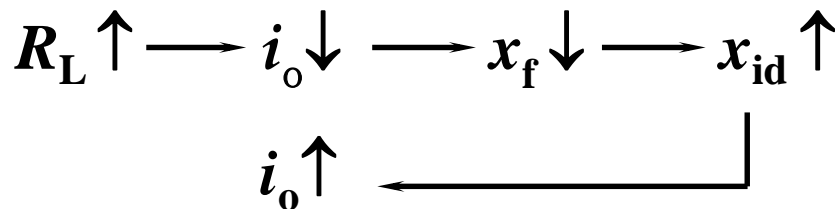


■ 电压负反馈稳定输出电压

8.1.5 电压反馈与电流反馈

电流负反馈的反馈控制作用

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



■ 电流负反馈稳定输出电流

8.1 反馈的基本概念与分类



8.1.1 反馈的基本概念

8.1.2 直流反馈与交流反馈

8.1.3 正反馈与负反馈

8.1.4 串联反馈与并联反馈

8.1.5 电压反馈与电流反馈

8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

输入端：反馈网络在放大电路输入端的连接分为**串联**和**并联**两种方式。

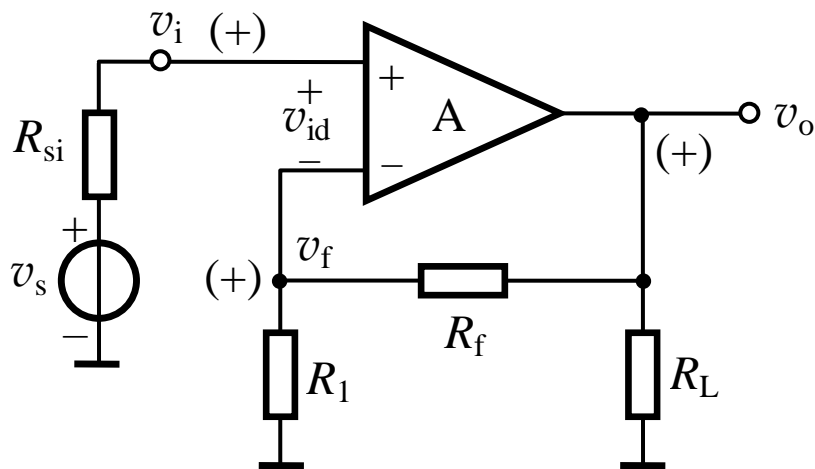
输出端：反馈信号在输出端分为**电压取样**和**电流取样**两种方式。

由此可组成四种组态：

电压串联 电压并联 电流串联 电流并联

8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

1. 电压串联负反馈放大电路（电压放大器）

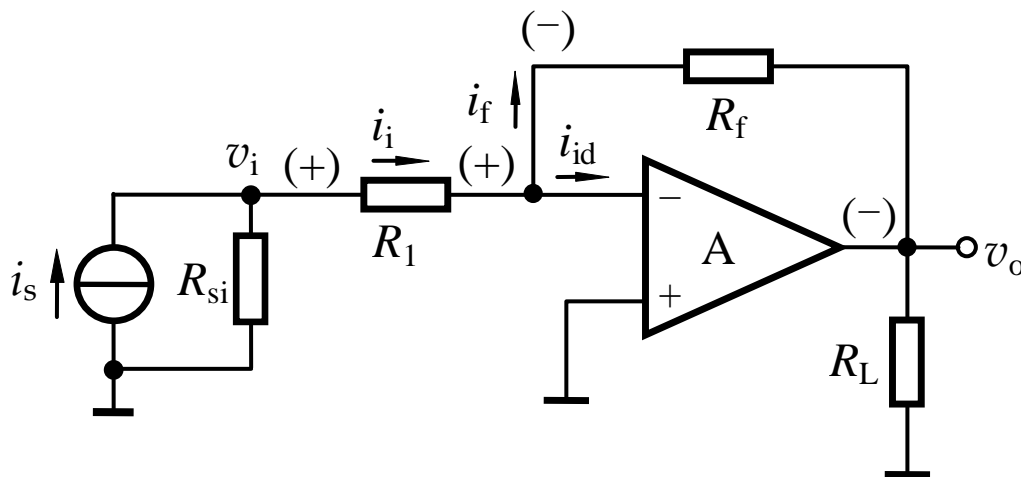


特点：

- 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（**VCVS**），电压/电压转换

8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

2. 电压并联负反馈放大电路（互阻放大器）

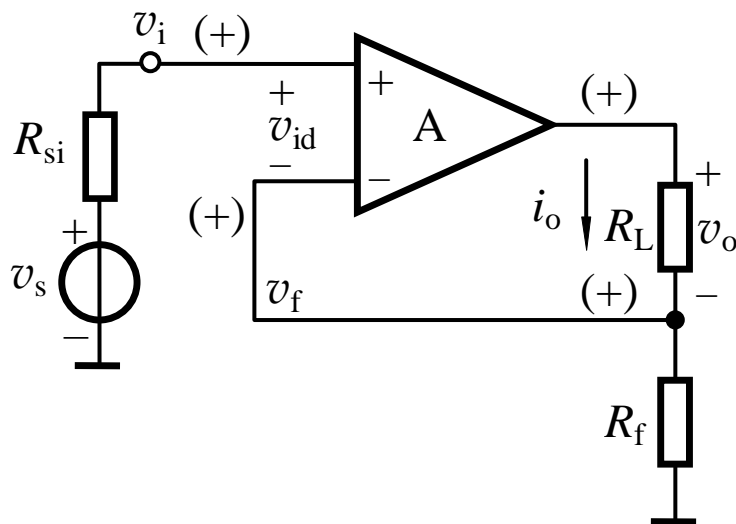


特点：

- 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（**CCVS**），电流/电压转换

8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

3. 电流串联负反馈放大电路（互导放大器）

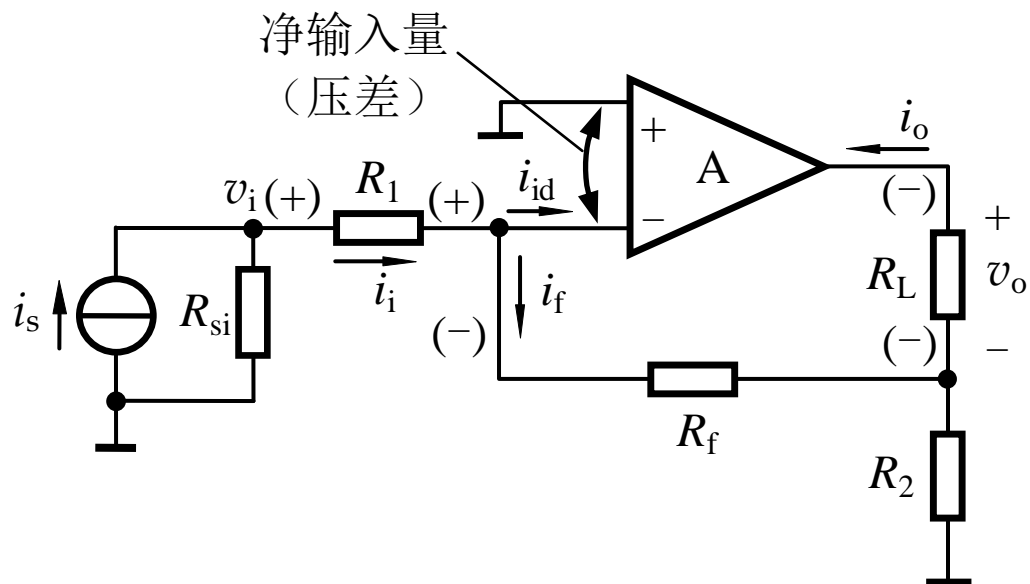


特点：

- 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（**VCCS**），电压/电流转换

8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

4. 电流并联负反馈放大电路（电流放大器）



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（**CCCS**），电流/电流转换

8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

不同反馈的影响及特点

正反馈：增大增益，易使系统不稳定，很少用

负反馈：减小增益，还有其它好处

串联反馈：输入端电压求和（KVL）（压控）

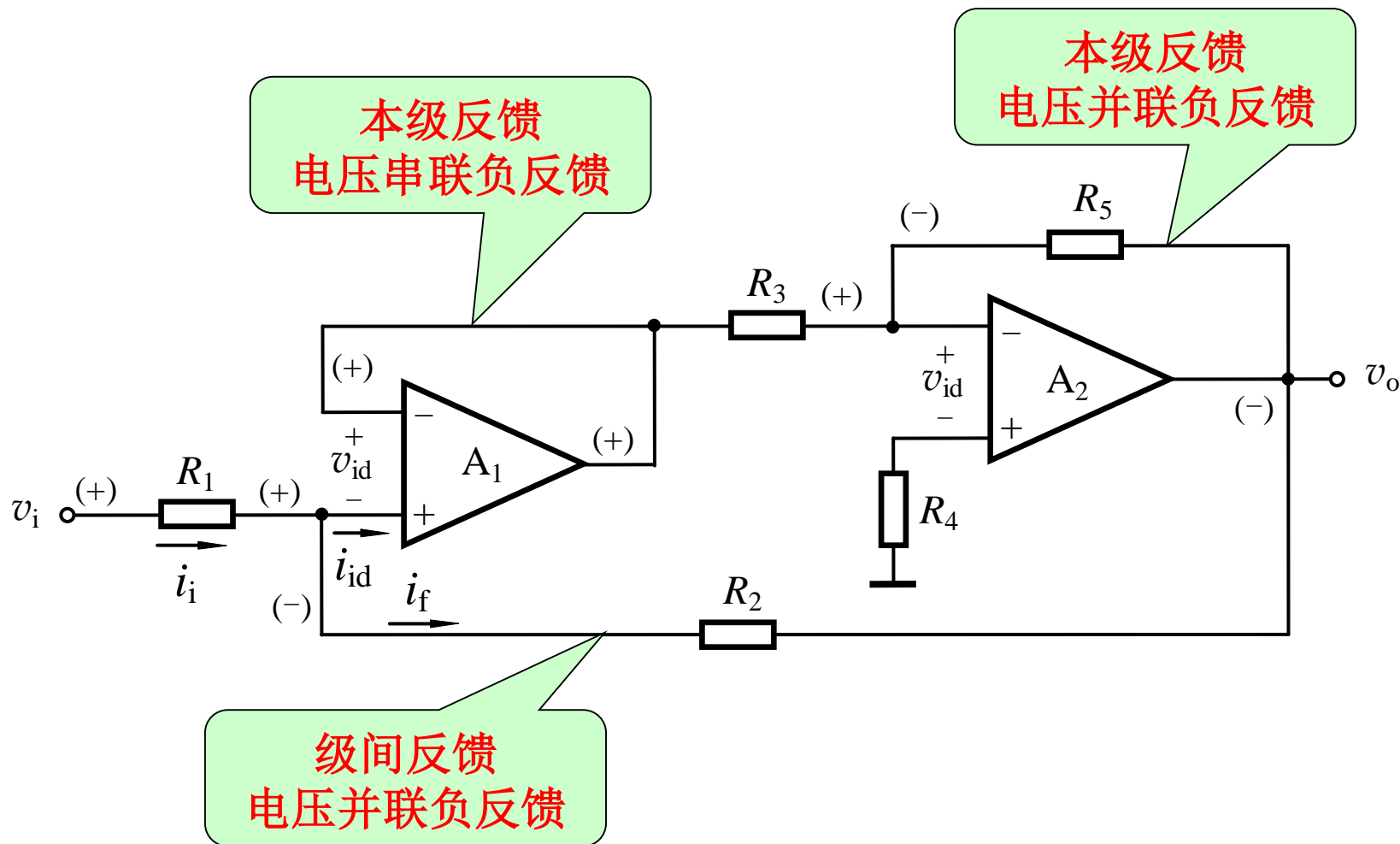
并联反馈：输入端电流求和（KCL）（流控）

电压负反馈：稳定输出电压，具有恒压特性（电压源）

电流负反馈：稳定输出电流，具有恒流特性（电流源）

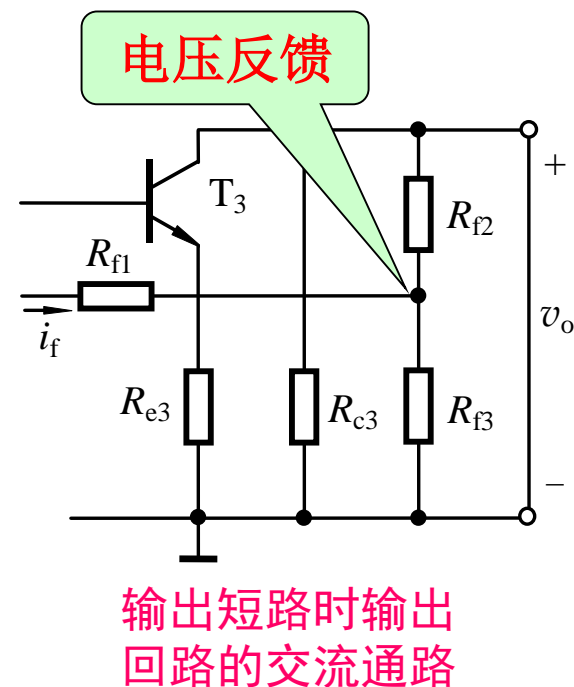
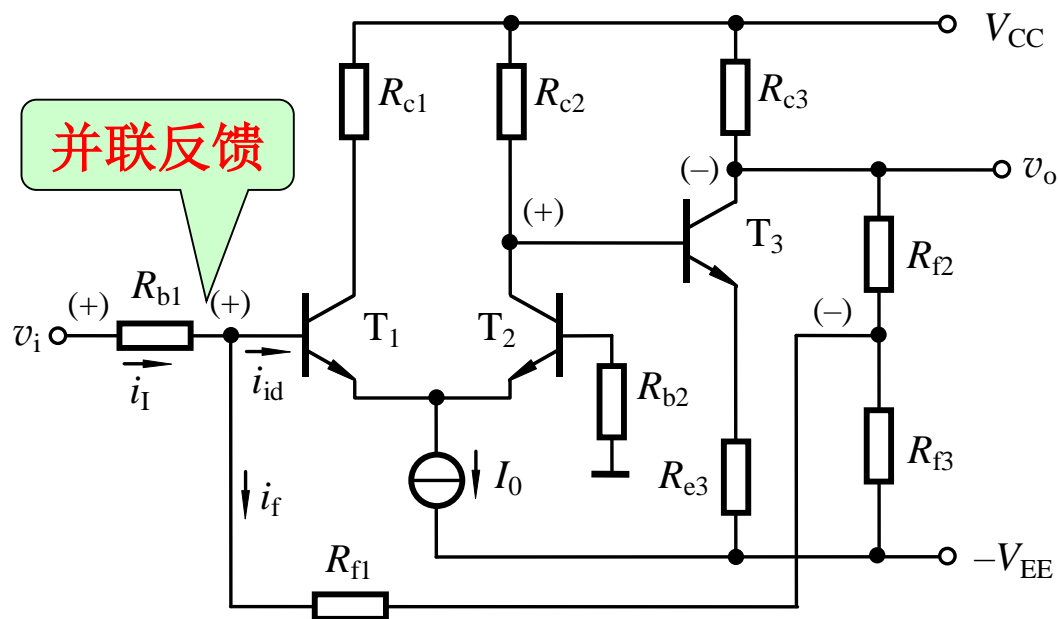
电压串联	电压并联	电流串联	电流并联
电压控制的电压源	电流控制的电压源	电压控制的电流源	电流控制的电流源
电压/电压转换	电流/电压转换	电压/电流转换	电流/电流转换

8.1.6 负反馈放大电路的四种组态



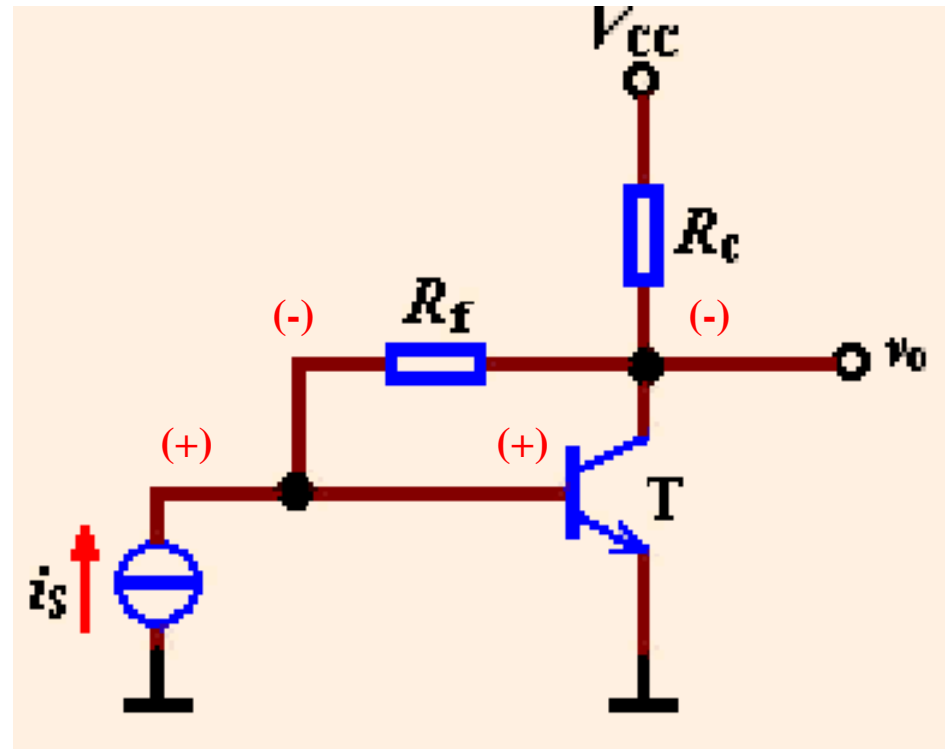
8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

电压并联负反馈



8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

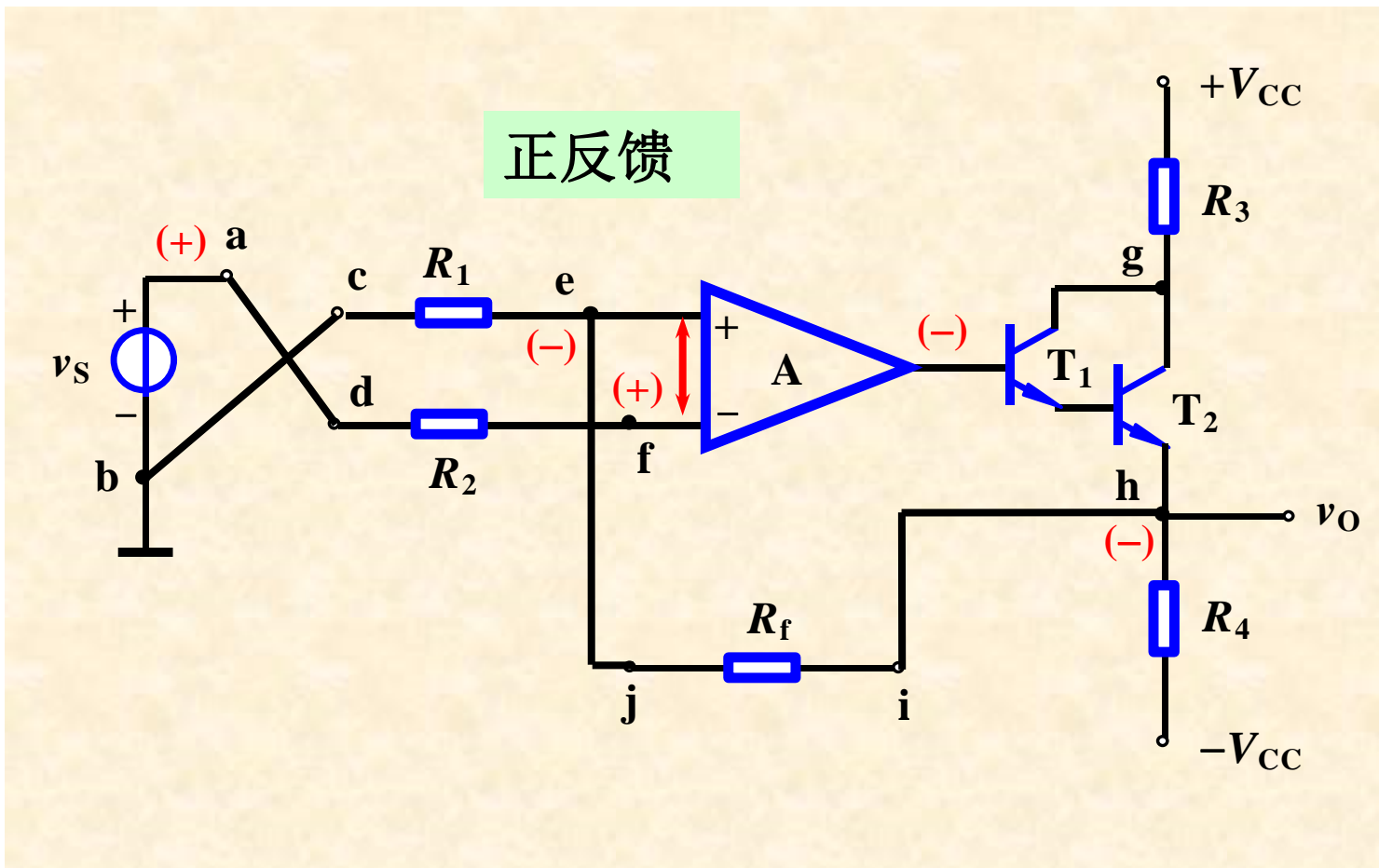
电压并联负反馈



8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

例 求: (1) 引入电压串联负反馈

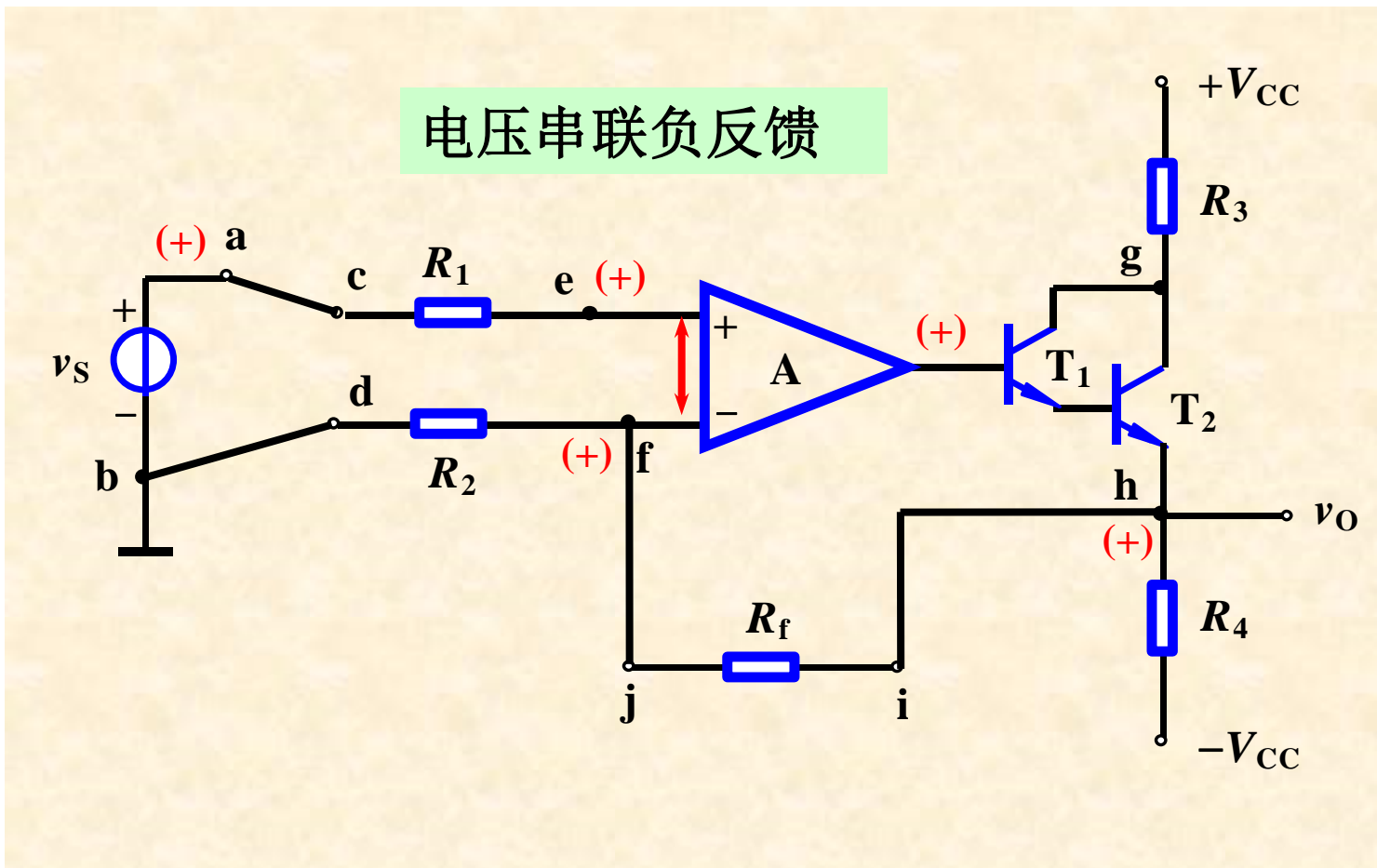
解:



8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

例 求: (1) 引入电压串联负反馈

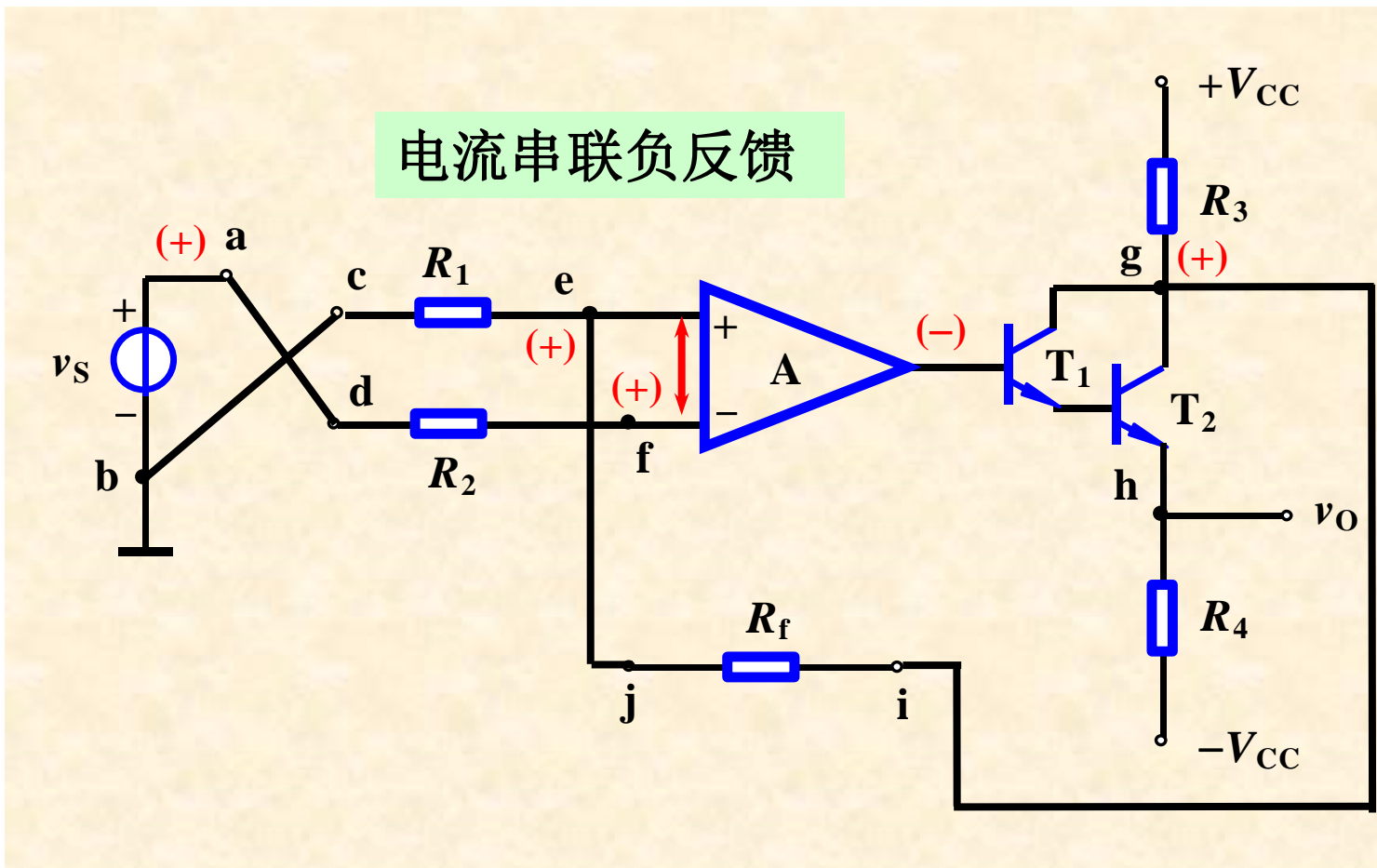
解:



8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

例 求: (2) 引入电流串联负反馈

解:



8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

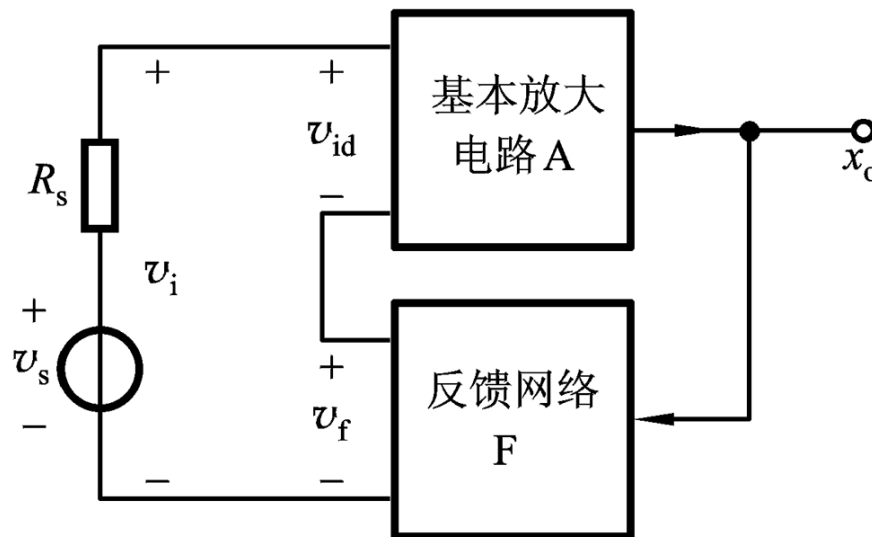
信号源对反馈效果的影响

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。



从另一角度看，对于电压信号源，引串联负反馈效果更好。
(压控)

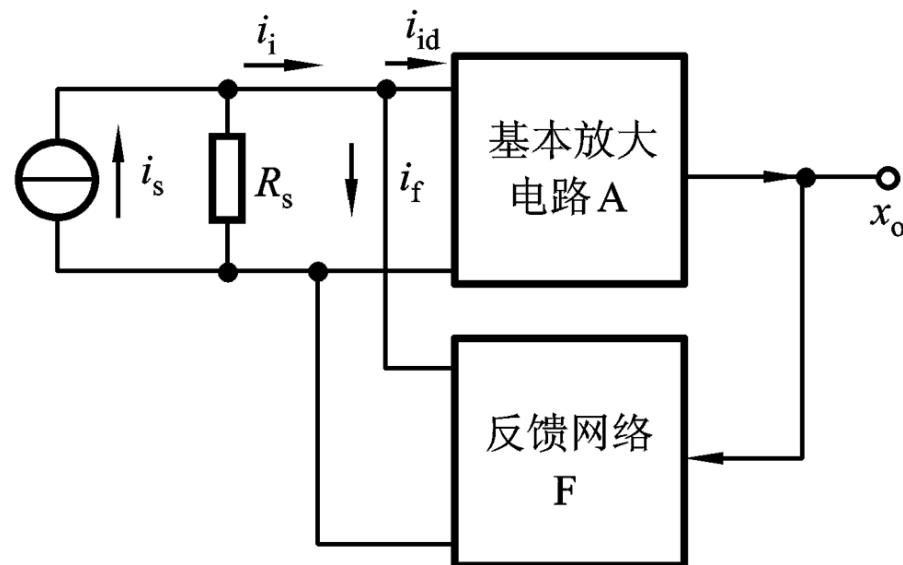
8.1.6 负反馈放大电路的四种组态

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。

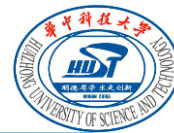


则 i_i 最好为恒流源，即信号源内阻 R_s 越大越好。

从另一角度看，对于电流信号源，引并联负反馈效果更好。

(流控)

8 反馈放大电路



8.1 反馈的基本概念与分类

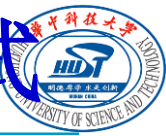
8.2 负反馈放大电路增益的一般表达式

8.3 负反馈对放大电路性能的影响

8.4 深度负反馈条件下的近似计算

8.5 负反馈放大电路的稳定性

8.2 负反馈放大电路增益的一般表达式

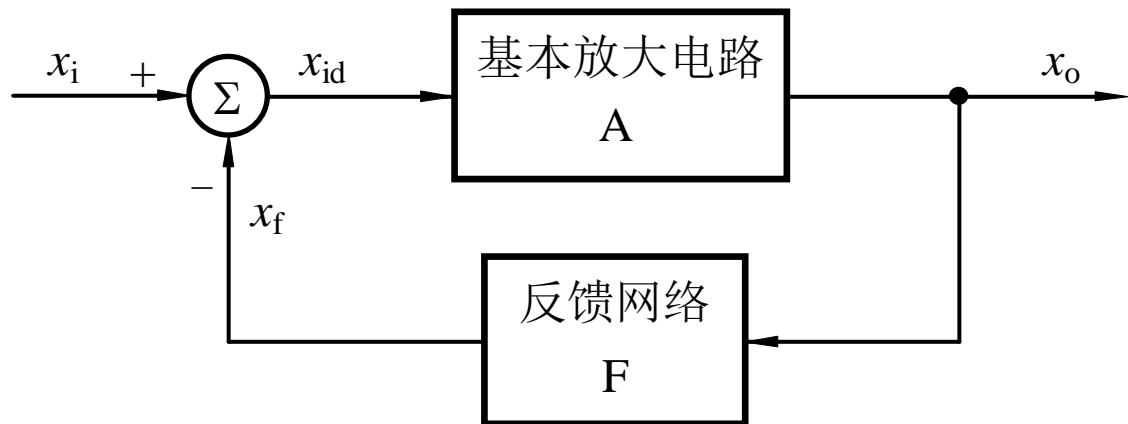


已知

$$A = \frac{x_o}{x_{id}} \quad \text{开环增益}$$

$$F = \frac{x_f}{x_o} \quad \text{反馈系数}$$

$$A_f = \frac{x_o}{x_i} \quad \text{闭环增益}$$



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

$$\text{所以 } A_f = \frac{x_o}{x_i} = \frac{x_o}{x_{id} + x_f} = \frac{x_o}{x_o / A + x_o F} = \frac{A}{1 + AF}$$

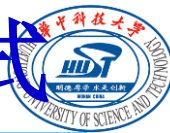
即

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

闭环增益的一般表达式

$(1+AF)$ 称为**反馈深度**

8.2 负反馈放大电路增益的一般表达式



一般情况下， A 是频率的函数， F 有时也是频率的函数。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

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

反馈深度则表示为 $|1 + \dot{A}\dot{F}|$

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

引入负反馈时， AF 为正实数， x_f 与 x_i 相位相同。

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

(3) 当 $\dot{A}\dot{F} < 0$ 时， 环路增益 $\dot{A}\dot{F}$ 产生 -180° 附加相移，

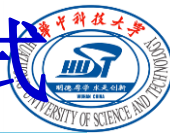
x_f 与 x_i 相位相反，反馈已从原来的负反馈变成了正反馈。

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

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	反馈组态			
	电压串联	电流并联	电压并联	电流串联
x_o	v_o	i_o	v_o	i_o
x_i 、 x_f 、 x_{id}	v_i 、 v_f 、 v_{id}	i_i 、 i_f 、 i_{id}	i_i 、 i_f 、 i_{id}	v_i 、 v_f 、 v_{id}
$A=x_o/x_{id}$	$A_v=v_o/v_{id}$	$A_i=i_o/i_{id}$	$A_r=v_o/i_{id}$	$A_g=i_o/v_{id}$
$F=x_f/x_o$	$F_v=v_f/v_o$	$F_i=i_f/i_o$	$F_g=i_f/v_o$	$F_r=v_f/i_o$
$A_f=x_o/x_i$ $=\frac{A}{1+AF}$	$A_{vf}=v_o/v_i$ $=\frac{A_v}{1+A_vF_v}$	$A_{if}=i_o/i_i$ $=\frac{A_i}{1+A_iF_i}$	$A_{rf}=v_o/i_i$ $=\frac{A_r}{1+A_rF_g}$	$A_{gf}=i_o/v_i$ $=\frac{A_g}{1+A_gF_r}$
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

8.2 负反馈放大电路增益的一般表达式



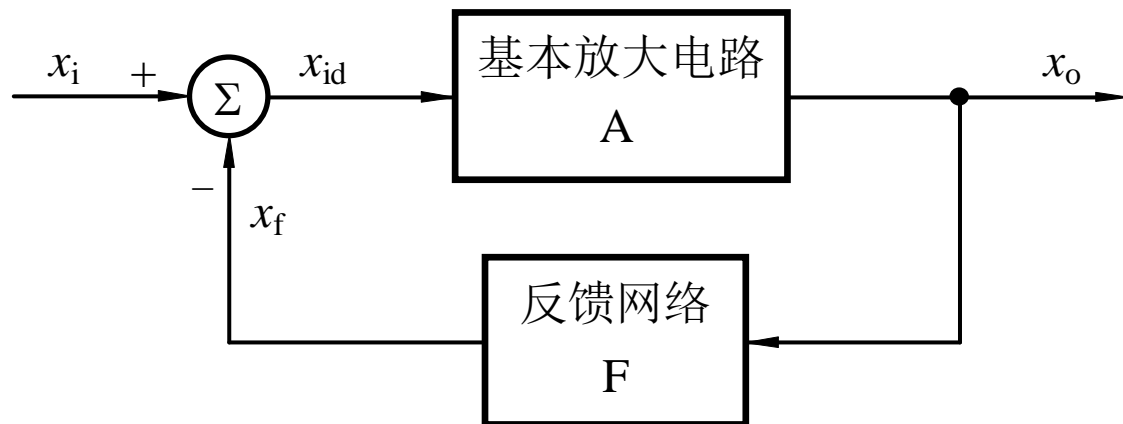
环路增益

信号经过基本放大电路和反馈网络构成的环路绕行一周获得的增益称为环路增益，即 $\dot{A}\dot{F}$ 。

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

环路增益

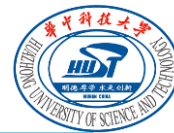
$$G = \dot{A}\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_{id}}$$



注意，环路增益表达式中未包含求和环节中反馈信号的“-”号。

环路增益与放大电路增益是完全不同的两种增益

8 反馈放大电路



8.1 反馈的基本概念与分类

8.2 负反馈放大电路增益的一般表达式

8.3 负反馈对放大电路性能的影响

8.4 深度负反馈条件下的近似计算

8.5 负反馈放大电路的稳定性

8.3 负反馈对放大电路性能的影响



8.3.1 提高增益的稳定性

8.3.2 减小反馈环内非线性失真

8.3.3 对输入电阻和输出电阻的影响

8.3.4 扩展带宽

8.3.1 提高增益的稳定性

闭环时 $A_f = \frac{A}{1 + AF}$

A' : 变化后的开环增益

A'_f : 变化后的闭环增益

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{A_f - A'_f}{A_f} = 1 - \frac{A'_f}{A_f} = 1 - \frac{\frac{A'}{1 + A'F}}{\frac{A}{1 + AF}} = 1 - \frac{A'(1 + AF)}{A(1 + A'F)}$$

$$= \frac{1}{1 + A'F} \cdot \frac{A - A'}{A} = \frac{1}{1 + A'F} \cdot \frac{dA}{A} = \left(\frac{A'_f}{A'} \right) \cdot \frac{dA}{A}$$

即闭环增益相对变化量比开环减小了 $1 + AF$

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

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})

8.3 负反馈对放大电路性能的影响



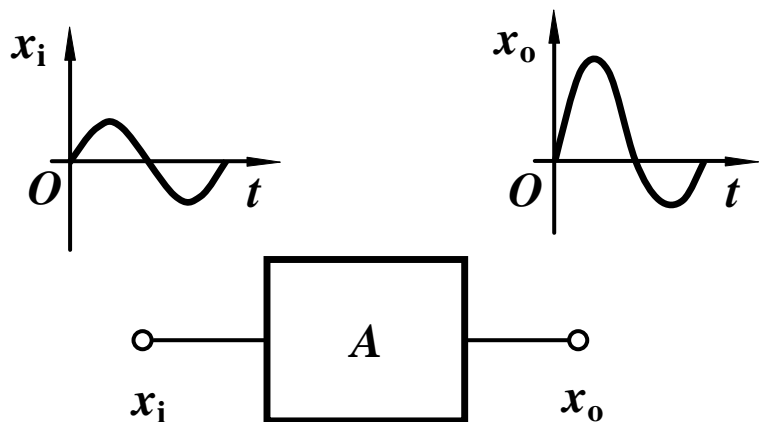
8.3.1 提高增益的稳定性

8.3.2 减小反馈环内非线性失真

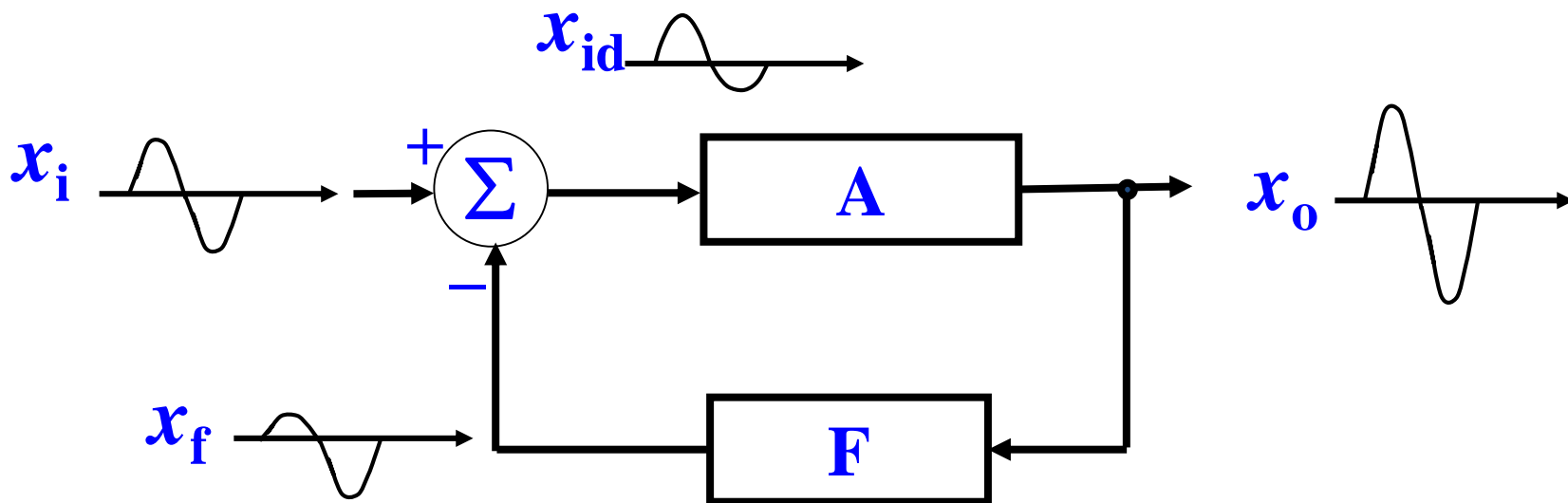
8.3.3 对输入电阻和输出电阻的影响

8.3.4 扩展带宽

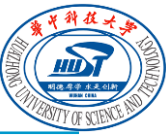
8.3.2 减小反馈环内非线性失真



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。



8.3 负反馈对放大电路性能的影响



8.3.1 提高增益的稳定性

8.3.2 减小反馈环内非线性失真

8.3.3 对输入电阻和输出电阻的影响

8.3.4 扩展带宽

8.3.3 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

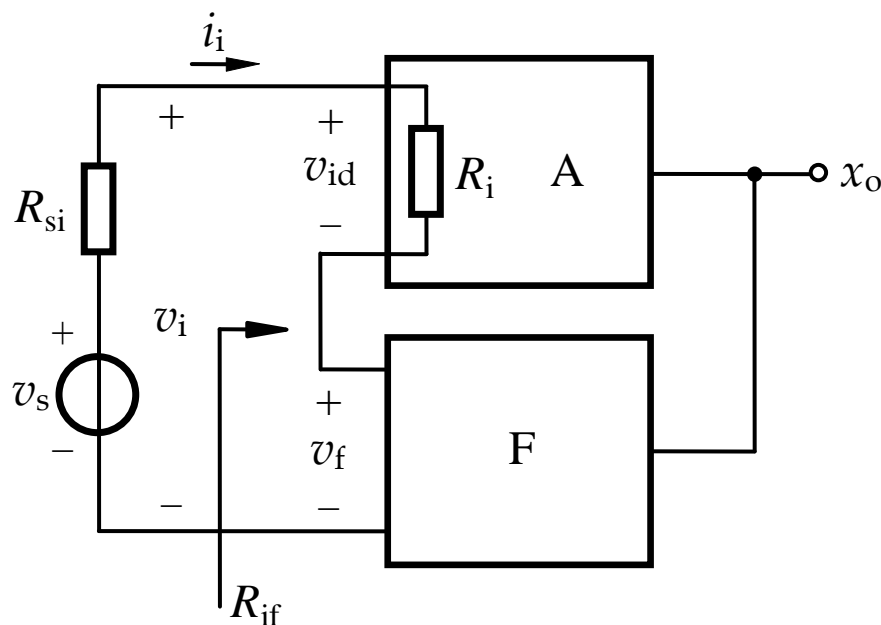
开环输入电阻 $R_i = v_{id}/i_i$

闭环输入电阻 $R_{if} = v_i/i_i$

因为 $v_f = F x_o$ $x_o = A v_{id}$

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，输入电阻增大了。

8.3.3 对输入电阻和输出电阻的影响

1. 对输入电阻的影响

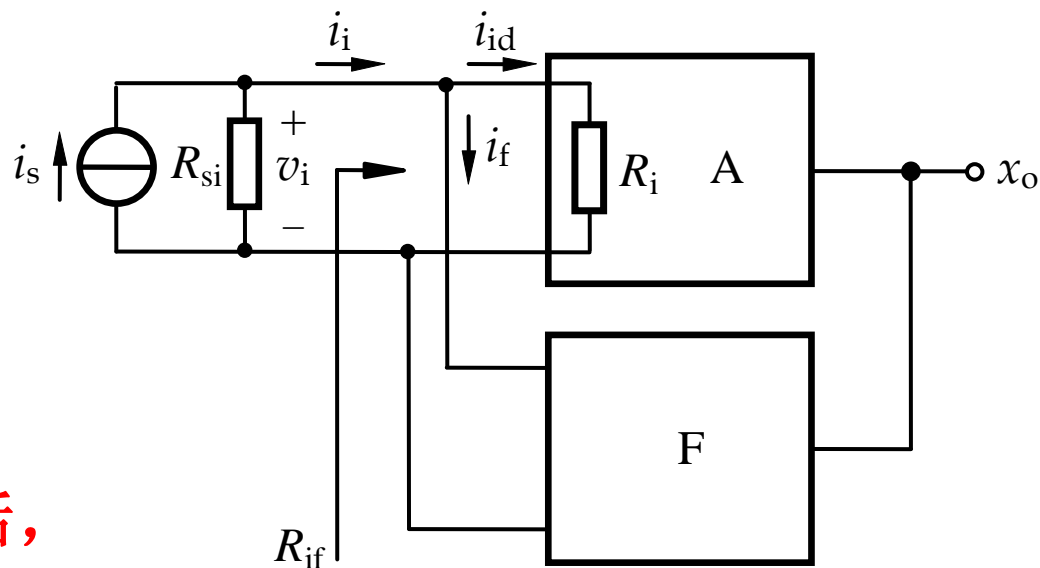
并联负反馈

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。



8.3.3 对输入电阻和输出电阻的影响

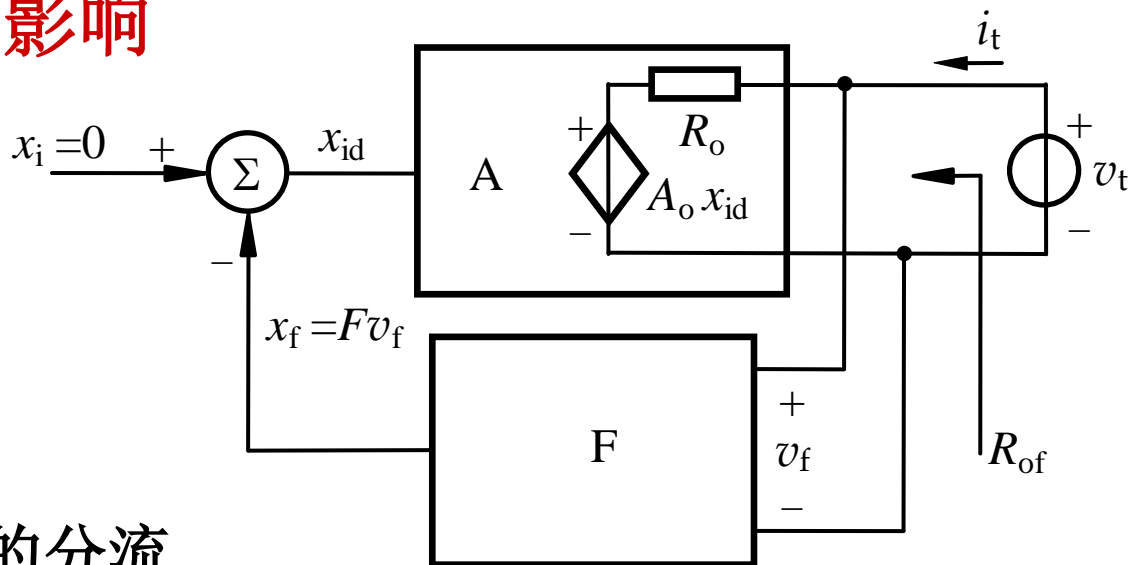
2. 对输出电阻的影响

电压负反馈

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



$$v_t = i_t R_o + A_o x_{id} \quad \text{而} \quad x_{id} = -x_f = -F v_t$$

$$\text{所以} \quad v_t = i_t R_o - A_o F v_t$$

$$\Rightarrow R_{of} = \frac{v_t}{i_t} = \frac{R_o}{1 + A_o F}$$

引入电压负反馈后，
输出电阻减小了。

8.3.3 对输入电阻和输出电阻的影响

2. 对输出电阻的影响

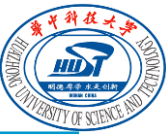
电流负反馈

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。

8.3 负反馈对放大电路性能的影响



8.3.1 提高增益的稳定性

8.3.2 减小反馈环内非线性失真

8.3.3 对输入电阻和输出电阻的影响

8.3.4 扩展带宽

8.3.4 扩展带宽

1. 闭环增益的带宽

基本放大电路的高频响应 $\dot{A}_H = \frac{A_M}{1 + j(f/f_H)}$ 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)

$$\dot{A}_{Hf} = \frac{\dot{A}_H}{1 + \dot{A}_H F} = \frac{A_M}{1 + A_M F} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{f}{(1 + A_M F) f_H}} = \frac{A_{Mf}}{1 + j(f/f_{Hf})}$$

其中 $A_{Mf} = \frac{A_M}{1 + A_M F}$ ——与频率无关的闭环通带增益

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

同理可得 $f_{Lf} = \frac{f_L}{1 + A_M F}$ ——闭环下限频率 比开环时减小了

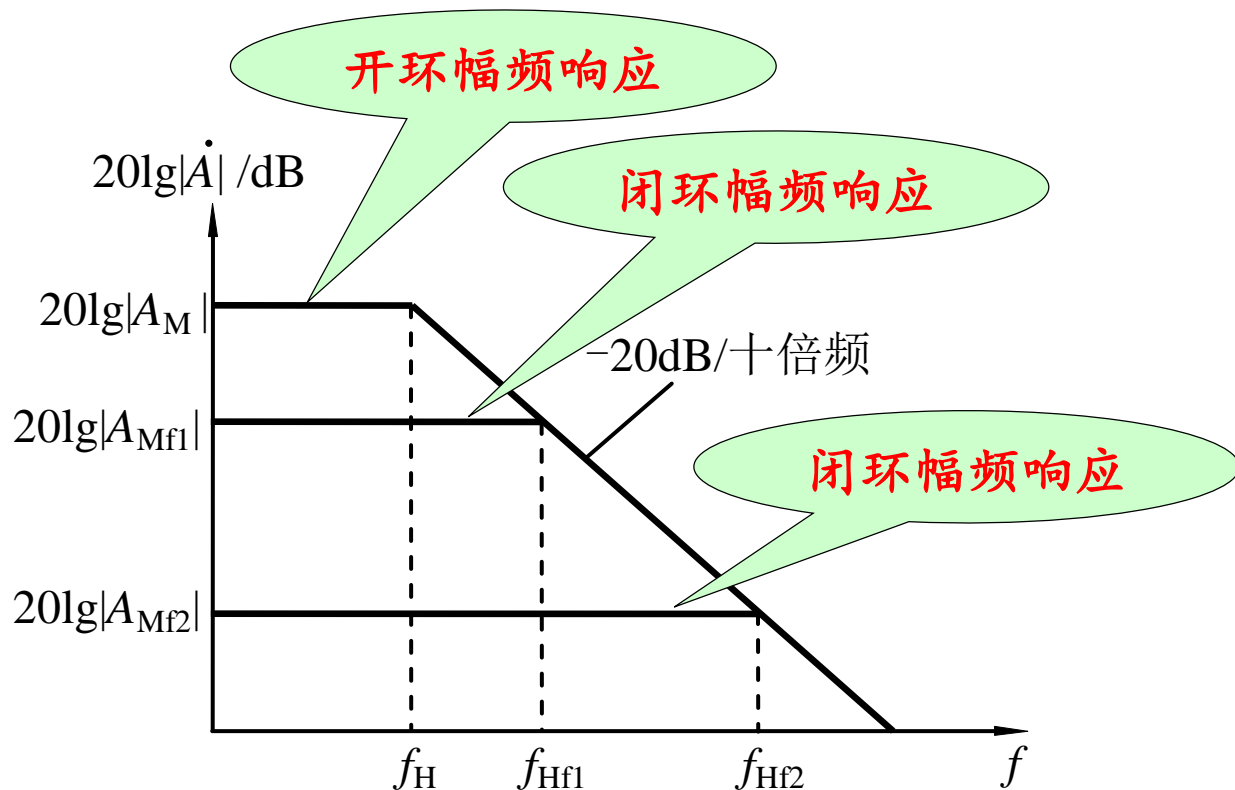
$BW_f = f_{Hf} - f_{Lf} \approx f_{Hf}$ 引入负反馈后, 放大电路的通频带展宽了

8.3.4 扩展带宽

2. 增益-带宽积

设反馈网络
是纯电阻网络

放大电路的
增益-带宽积为常
数 (-20 dB/十倍
频的增益衰减斜
率)

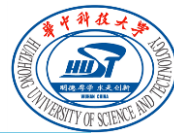


$$|A_{f1}| f_{Hf1} = |A_{f2}| f_{Hf2} = |A_f| f_{Hf} = \frac{|A|}{|1 + AF|} \cdot (|1 + AF| f_H) = |A| f_H$$

闭环增益-带宽积

开环增益-带宽积

8.3 负反馈对放大电路性能的影响



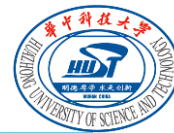
- 提高增益的稳定性
- 减小非线性失真
- 调整输入电阻和输出电阻
- 扩展频带
- 实现信号变换

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。

为改善性能引入负反馈的一般原则

- 要稳定直流量——引入直流负反馈
 - 要稳定交流量——引入交流负反馈
 - 要稳定输出电压——引入电压负反馈
 - 要稳定输出电流——引入电流负反馈
 - 要增大输入电阻——引入串联负反馈
 - 要减小输入电阻——引入并联负反馈
 - 要增大输出电阻——引入电流负反馈
 - 要减小输出电阻——引入电压负反馈
 - 将电压信号变换为电流信号——引入电流串联负反馈
 - 将电流信号变换为电压信号——引入电压并联负反馈
 - 将电压信号变换为电压信号——引入电压串联负反馈
 - 将电流信号变换为电流信号——引入电流并联负反馈
- 对于电压信号源——引串联负反馈效果更明显
 - 对于电流信号源——引并联负反馈效果更明显

8 反馈放大电路



8.1 反馈的基本概念与分类

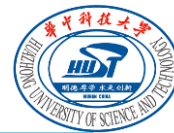
8.2 负反馈放大电路增益的一般表达式

8.3 负反馈对放大电路性能的影响

8.4 深度负反馈条件下的近似计算

8.5 负反馈放大电路的稳定性

8.4 深度负反馈条件下的近似计算



1. 深度负反馈的特点

$$(1+AF) \gg 1 \text{ 时} \quad A_f = \frac{A}{1+AF} \approx \frac{1}{F}$$

即，深度负反馈条件下，闭环增益只与反馈网络有关

$$\text{又因为 } A_f = \frac{x_o}{x_i} \quad F = \frac{x_f}{x_o} \quad \text{代入上式}$$

$$\text{得 } x_f \approx x_i \quad \longrightarrow \quad x_{id} = x_i - x_f \approx 0 \quad \text{净输入量近似等于零}$$

由此可得深度负反馈条件下，基本放大电路“两虚”的概念

8.4 深度负反馈条件下的近似计算

1. 深度负反馈的特点

深度负反馈条件下

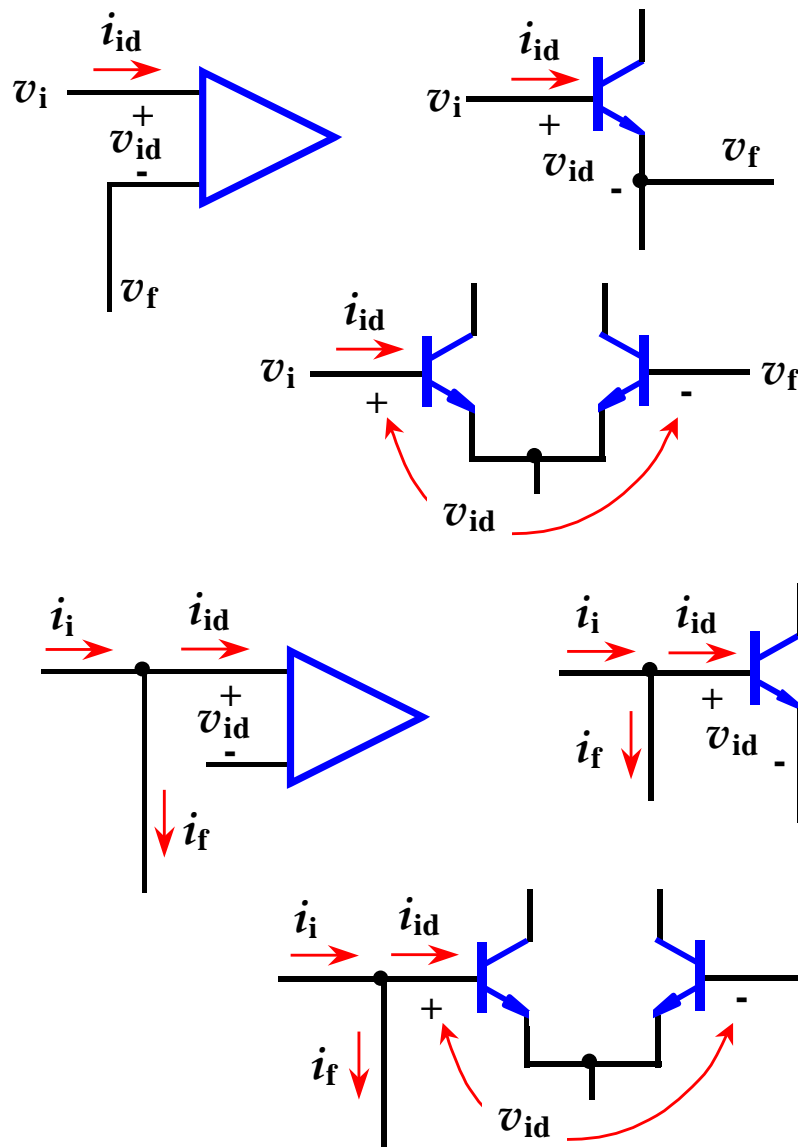
$$x_{id} = x_i - x_f \approx 0$$

串联负反馈，输入端电压求和

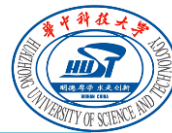
$$\begin{cases} v_{id} = v_i - v_f \approx 0 & \text{虚短} \\ i_{id} = \frac{v_{id}}{r_i} \approx 0 & \text{虚断} \end{cases}$$

并联负反馈，输入端电流求和

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



8.4 深度负反馈条件下的近似计算



只要放大电路处于深度负反馈，就出现了“虚短”和“虚断”现象。放宽了虚短、虚断应用的条件，不再限于集成运放中应用。

深度负反馈条件下 $A_f = \frac{A}{1 + AF} \approx \frac{1}{F} \quad (|1 + AF| \gg 1)$

闭环增益只与反馈网络有关

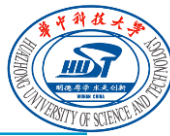
之前的运放基本放大电路的结论正是这一结果的体现

运放的同相放大 $A = 1 + \frac{R_f}{R_1}$ 反相放大 $A = -\frac{R_f}{R_1}$

既然深度负反馈条件下，闭环增益只与反馈网络有关，那么是否意味着基本放大电路的增益A已经无关紧要了？

如何满足深度负反馈条件？

8.4 深度负反馈条件下的近似计算

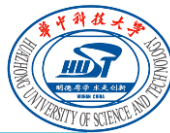


2. 一般分析步骤

- (1) 找出信号放大通路和反馈通路
- (2) 用瞬时极性法判断正、负反馈
- (3) 判断交、直流反馈
- (4) 判断反馈组态
- (5) 标出输入量、输出量及反馈量
- (6) 估算深度负反馈条件下电路的 F 、 A_f 、 A_{vf} 。

(常常利用虚短和虚断直接列表达式求解。)

8.4 深度负反馈条件下的近似计算



3. 分析举例

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。

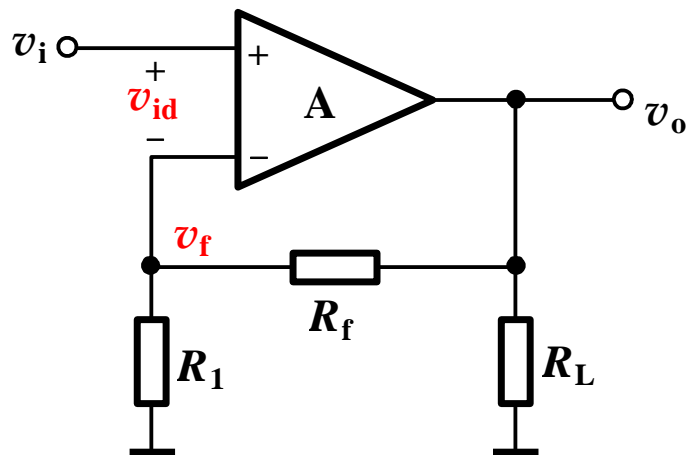
解：电压串联负反馈

根据虚短、虚断

$$\text{反馈系数 } F_v = \frac{v_f}{v_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

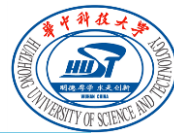
$$\text{闭环增益} \quad A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} \approx \frac{1}{F_v} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

(就是闭环电压增益)



实际上该电路就是第2章介绍的同相比例放大电路，此处结果与第2章所得结果相同。

8.4 深度负反馈条件下的近似计算



3. 分析举例

设电路满足深度负反馈条件，试计算它的闭环电流增益，并定性分析它的输入电阻。

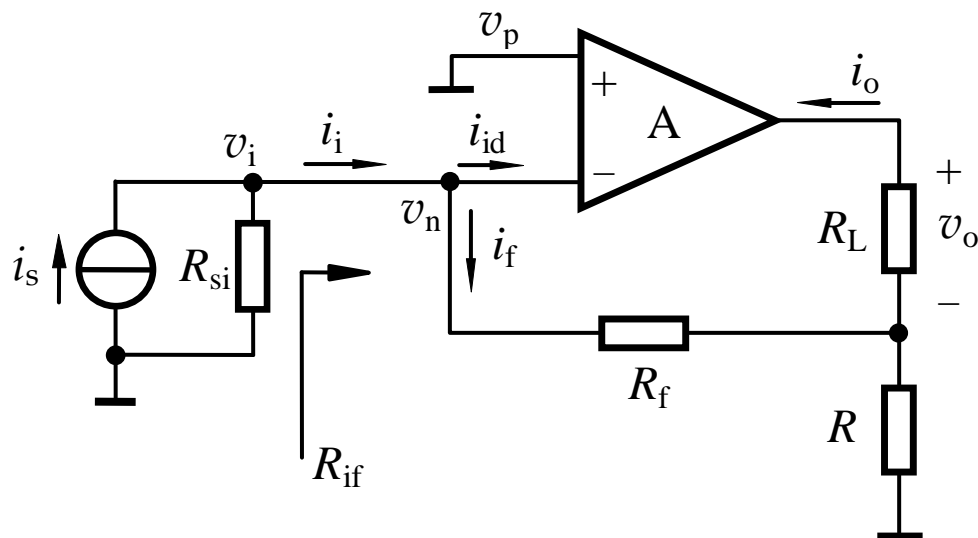
解：电流并联负反馈
根据虚短、虚断

$$\text{有 } i_f = \frac{R}{R_f + R} i_o$$

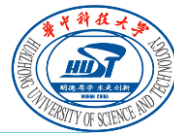
$$\text{闭环电流增益 } A_{if} = \frac{i_o}{i_i} \approx \frac{i_o}{i_f} = \frac{R_f + R}{R}$$

注意，结果与图中标电流的参考方向有关。

考虑到 $i_i \neq 0$ 和 $v_i = v_n \approx 0$ ，所以 $R_{if} \approx v_i / i_i \approx 0$



8.4 深度负反馈条件下的近似计算



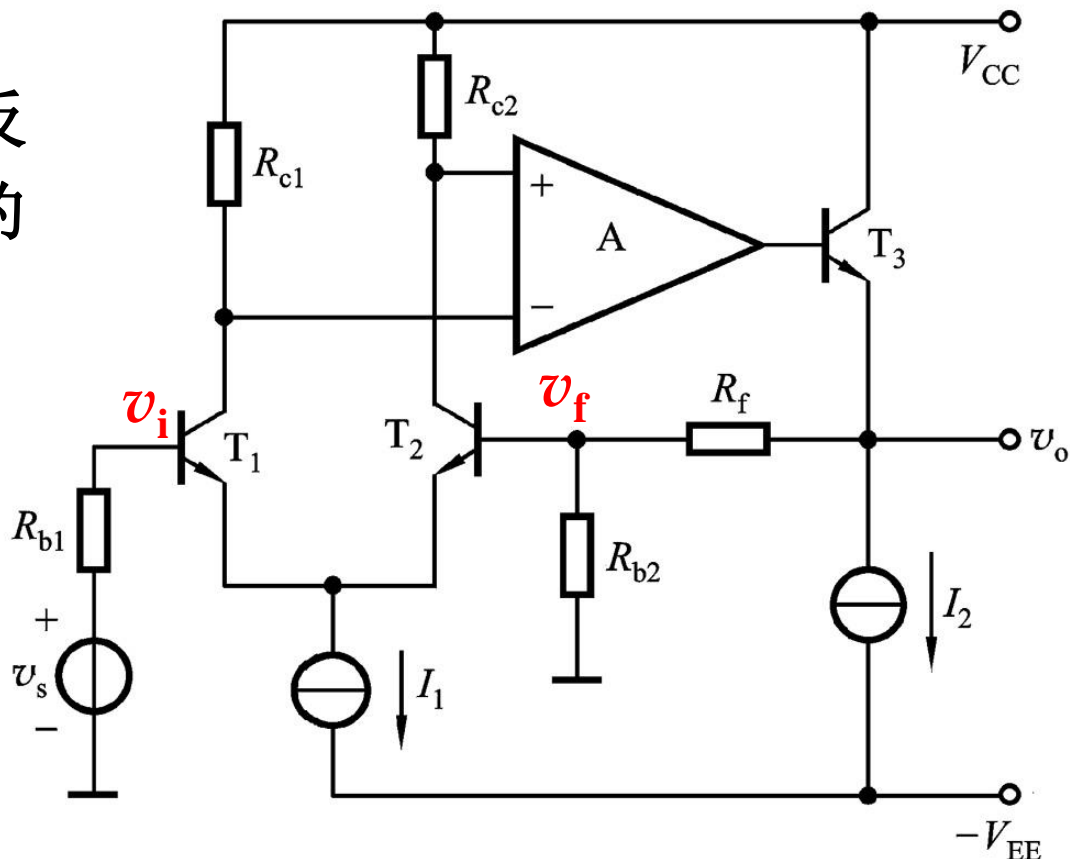
3. 分析举例

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。

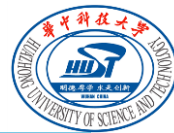
解：电压串联负反馈
根据**虚短**、**虚断**

$$\begin{cases} v_f = v_i \\ v_f = \frac{R_{b2}}{R_{b2} + R_f} v_o \end{cases}$$

$$\text{闭环电压增益 } A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_f}{R_{b2}}$$



8.4 深度负反馈条件下的近似计算



3. 分析举例

某多级放大电路的交流通路如图8.4.4所示。(1) 试判断电路中级间反馈的组态和极性；(2) 若电路满足深度负反馈条件，试求电路的闭环电压增益。

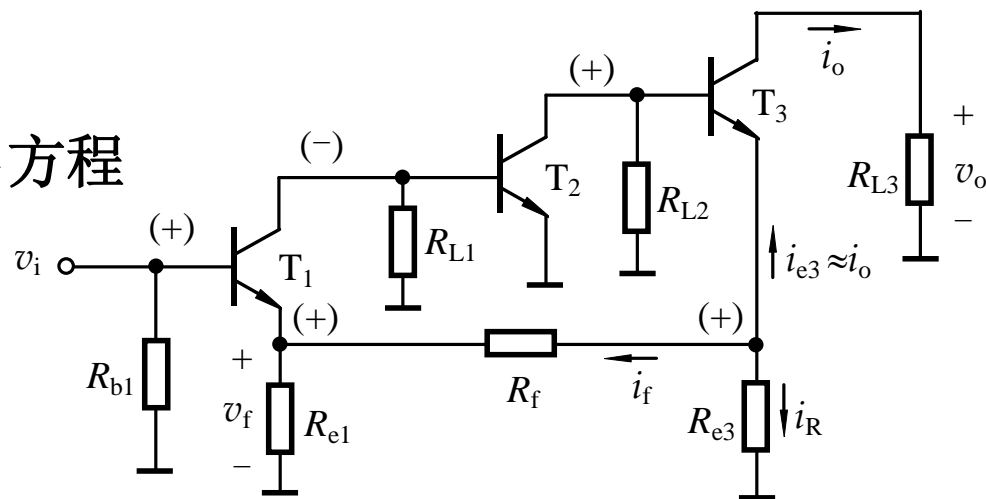
解：(1) 电流串联负反馈

(2) 根据虚短、虚断可列出方程

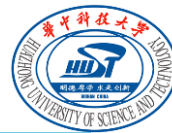
$$\left\{ \begin{array}{l} v_i = v_f \\ v_f = i_f R_{e1} \\ i_R = \frac{i_f (R_{e1} + R_f)}{R_{e3}} \\ i_R + i_f + i_o = 0 \\ v_o = R_{L3} i_o \end{array} \right.$$

得闭环电压增益

$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = - \frac{(R_{e1} + R_f + R_{e3}) R_{L3}}{R_{e1} R_{e3}}$$



8.4 深度负反馈条件下的近似计算



4. 近似计算带来的误差

深度负反馈条件下 ($|1+AF| \gg 1$, 或 $G = AF \gg 1$, G —— 环路增益)

$$\text{设} \quad A_f = \frac{A}{1+AF} \quad A'_f = \frac{1}{F}$$

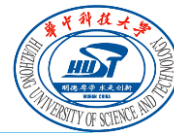
近似计算产生的相对误差:

$$E_r = \left| \frac{A'_f - A_f}{A_f} \right| \times 100\% = \left| \frac{1}{AF} \right| \times 100\% = \frac{1}{AF} \times 100\% = \frac{1}{G} \times 100\%$$

即环路增益直接影响着误差的大小, 环路增益越大, 误差越小。

注: 此处忽略了频率变化导致 A 减小带来的影响

8 反馈放大电路



8.1 反馈的基本概念与分类

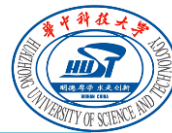
8.2 负反馈放大电路增益的一般表达式

8.3 负反馈对放大电路性能的影响

8.4 深度负反馈条件下的近似计算

8.5 负反馈放大电路的稳定性

8.5 负反馈放大电路的稳定性



8.5.1 产生自激振荡的原因和条件

8.5.2 负反馈放大电路的稳定裕度

8.5.3 负反馈放大电路稳定性分析

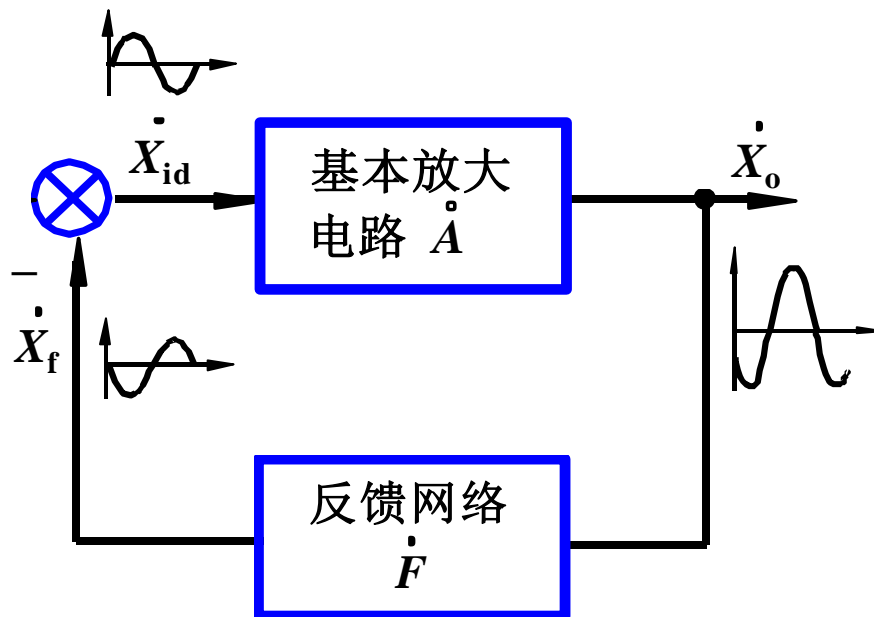
8.5.4 自激振荡的消除

8.5.1 产生自激振荡的原因和条件

1. 产生自激振荡的原因

自激振荡是指，在没有任何输入信号的情况下，放大电路的输出端仍会连续不断地产生某种频率的输出波形。

将通频带上、下限频率附近以及通带外产生的相移称为放大电路的**附加相移**。



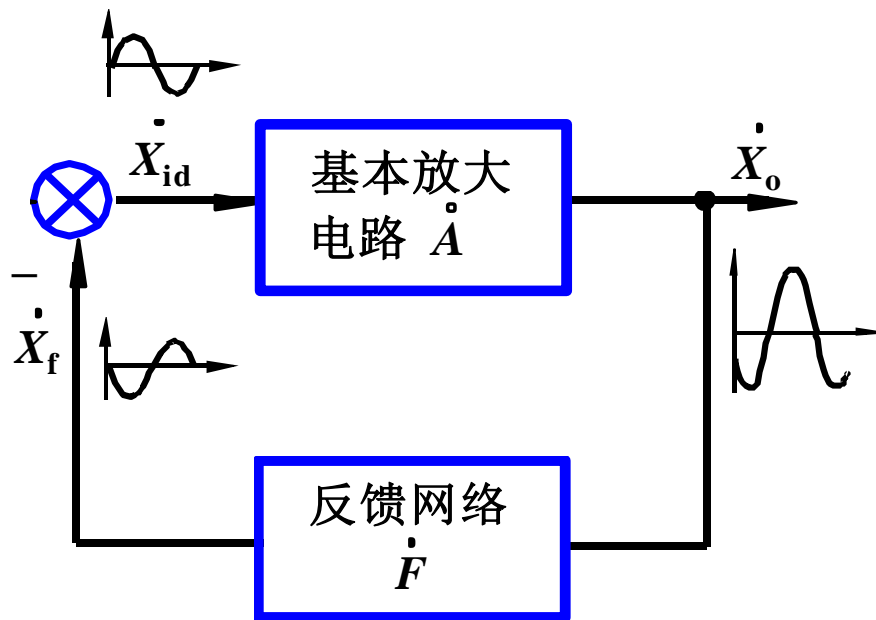
\dot{A} 和 \dot{F} 在高频区或低频区产生的**附加相移**达到 180° ，使中频区的负反馈在高频区或低频区变成了正反馈，当满足了一定的幅值条件时，便产生自激振荡。

8.5.1 产生自激振荡的原因和条件

1. 产生自激振荡的原因

自激振荡往往并非由信号引起，因为信号的频率通常落在放大电路的通频带内。但是电路中的各种元器件总是存在噪声的，也会有其他的干扰和扰动。它们的频率分布很广，在放大电路的通带外也普遍存在，往往是自激振荡真正的“信源”。

负反馈放大电路是否自激振荡实际上与输入信号无关。

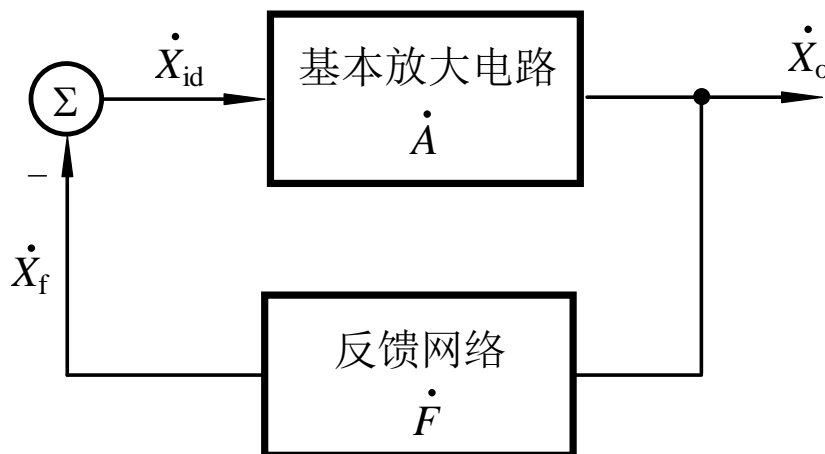


8.5.1 产生自激振荡的原因和条件

2. 自激振荡的条件

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)

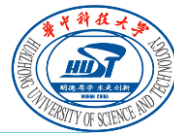
又 $\dot{A}\dot{F} = |\dot{A}(\omega) \cdot \dot{F}(\omega)| \angle \varphi_a(\omega) + \varphi_f(\omega)$

得自激振荡条件

$$\begin{cases} |\dot{A}(\omega_k) \cdot \dot{F}(\omega_k)| = 1 & \text{幅值条件} \quad \omega_k \text{是满足条件的某角频率} \\ \Delta\varphi_a(\omega_k) + \Delta\varphi_f(\omega_k) = \pm(2n+1) \times 180^\circ & \text{相位条件 (附加相移)} \end{cases}$$

注：输入端求和的相位 (-1) 不包含在内

8.5 负反馈放大电路的稳定性



8.5.1 产生自激振荡的原因和条件

8.5.2 负反馈放大电路的稳定裕度

8.5.3 负反馈放大电路稳定性分析

8.5.4 自激振荡的消除

8.5.2 负反馈放大电路的稳定裕度

避免自激振荡条件

$$\begin{cases} |\dot{A}\dot{F}| < 1 \\ \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_f = \pm 180^\circ \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} |\dot{A}\dot{F}| = 1 \\ |\Delta\varphi_a + \Delta\varphi_f| < 180^\circ \end{cases}$$

写成等式，且幅值用分贝数表示时

$$\begin{cases} 20\lg |\dot{A}\dot{F}| + G_m = 0 \\ \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_f = \pm 180^\circ \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} 20\lg |\dot{A}\dot{F}| = 0 \\ |\Delta\varphi_a + \Delta\varphi_f| + \varphi_m = 180^\circ \end{cases}$$

其中 G_m ——幅值裕度，一般要求 $G_m \geq 10\text{dB}$

φ_m ——相位裕度，一般要求 $\varphi_m \geq 45^\circ$

(保证可靠稳定，留有余地)

8.5.2 负反馈放大电路的稳定裕度

$$\begin{cases} 20\lg |\dot{A}\dot{F}| + G_m = 0 \\ \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_f = \pm 180^\circ \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} 20\lg |\dot{A}\dot{F}| = 0 \\ |\Delta\varphi_a + \Delta\varphi_f| + \varphi_m = 180^\circ \end{cases}$$

$$G_m = 0 - 20\lg |\dot{A}\dot{F}|_{|\Delta\varphi_a + \Delta\varphi_f| = 180^\circ} \quad (\text{dB})$$

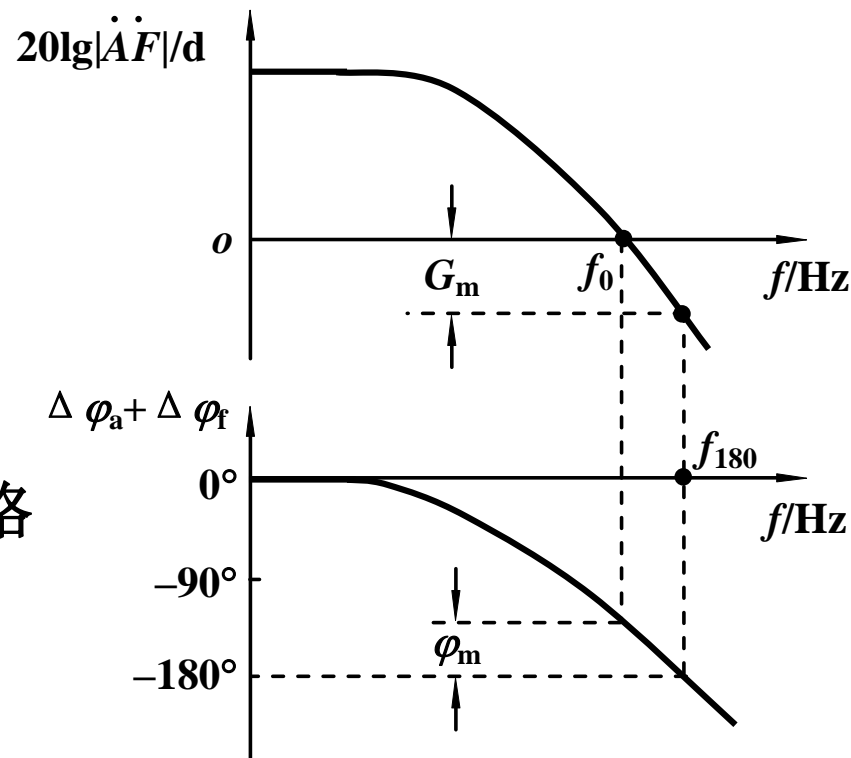
$$\varphi_m = 180^\circ - |\Delta\varphi_a + \Delta\varphi_f|_{|\dot{A}\dot{F}| = 1}$$

一般要求 $G_m \geq 10\text{dB}$

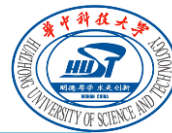
或 $\varphi_m \geq 45^\circ$

当反馈网络为纯电阻网络

时, $\Delta\varphi_f = 0^\circ$ 。



8.5 负反馈放大电路的稳定性



8.5.1 产生自激振荡的原因和条件

8.5.2 负反馈放大电路的稳定裕度

8.5.3 负反馈放大电路稳定性分析

8.5.4 自激振荡的消除

8.5.3 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 $20\lg\frac{1}{\dot{F}}$ 的幅频响应是一条水平线。

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

即该点满足 $|\dot{A}\dot{F}| = 1$ 。

关键作出 \dot{A} 的幅频响应和相频响应波特图

8.5.3 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 $20\lg \frac{1}{F}$ 水平线

(3) 判断两线交点对应的相位是否满足相位裕度 ($\varphi_m \geq 45^\circ$)

在水平线 $20\lg \frac{1}{F}$ 与 $20\lg |\dot{A}|$ 的交点作垂线交相频响应曲线的一点

若该点 $|\Delta\varphi_a| \leq 135^\circ$ 满足相位裕度，稳定；否则不稳定。

或

在相频响应的 $\Delta\varphi_a = -135^\circ$ 点处作垂线交 $20\lg |\dot{A}|$ 于 P 点。

若 P 点在 $20\lg \frac{1}{F}$ 水平线之下 ($|\dot{A}_p F| < 1$)，稳定；否则不稳定。

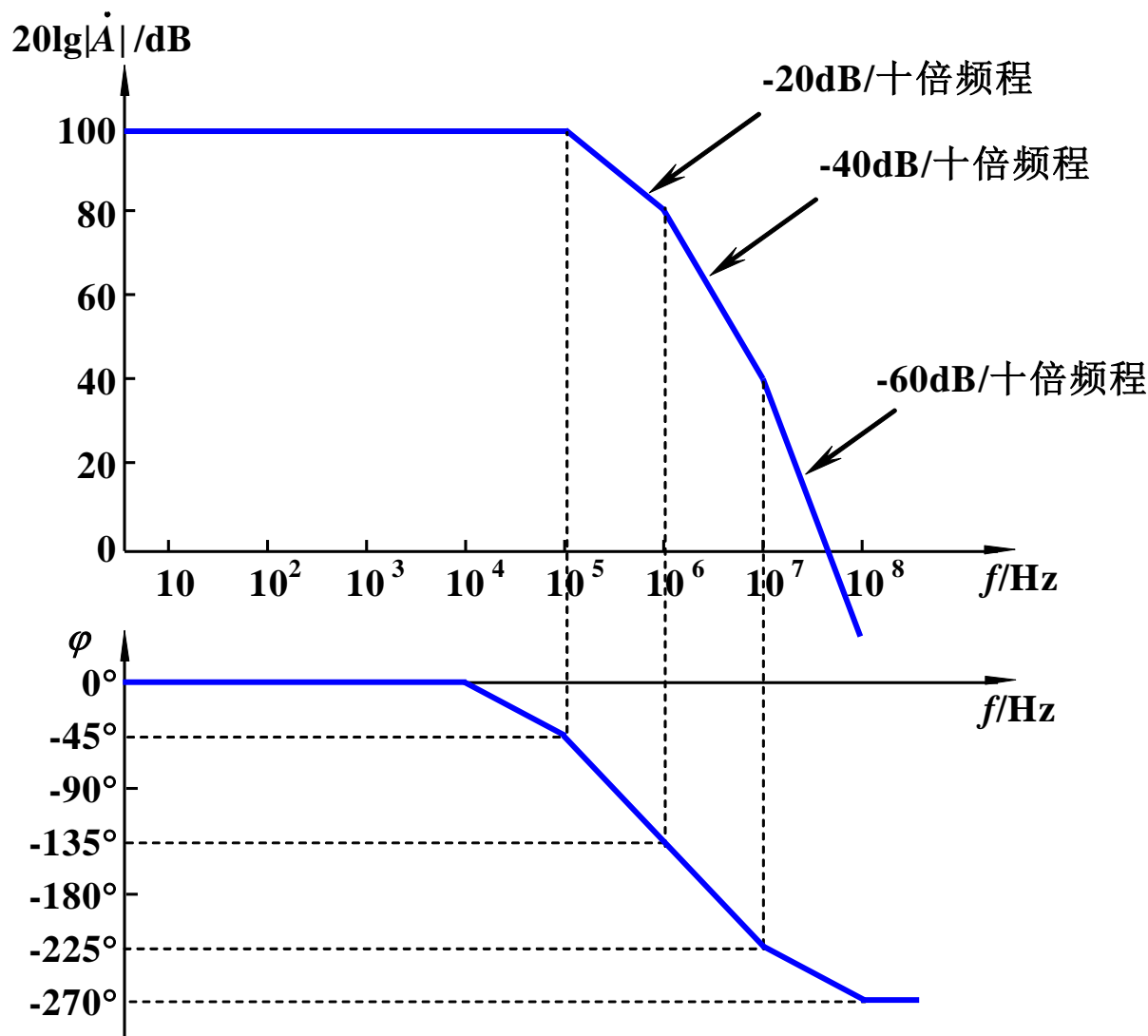
8.5.3 负反馈放大电路稳定性分析

例 已知某直接耦合基本放大电路的频率响应波特图如图所示。它有三个转折频率： 10^5Hz 、 10^6Hz 和 10^7Hz ，产生的附加相移最大达到 -270° 。在放大电路中引入负反馈，问：

(1) 反馈系数

$F_1=3 \times 10^{-5}$ 时，反馈放大电路是否能稳定工作？(2) 反馈系数 $F_2=10^{-4}$ 时，反馈放大电路是否能稳定工作？

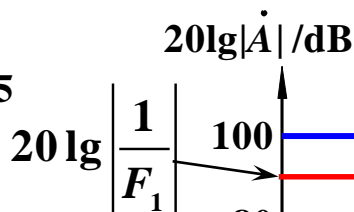
(3) 反馈系数大于 10^{-4} 时，情况又怎样？



8.5.3 负反馈放大电路稳定性分析

解:

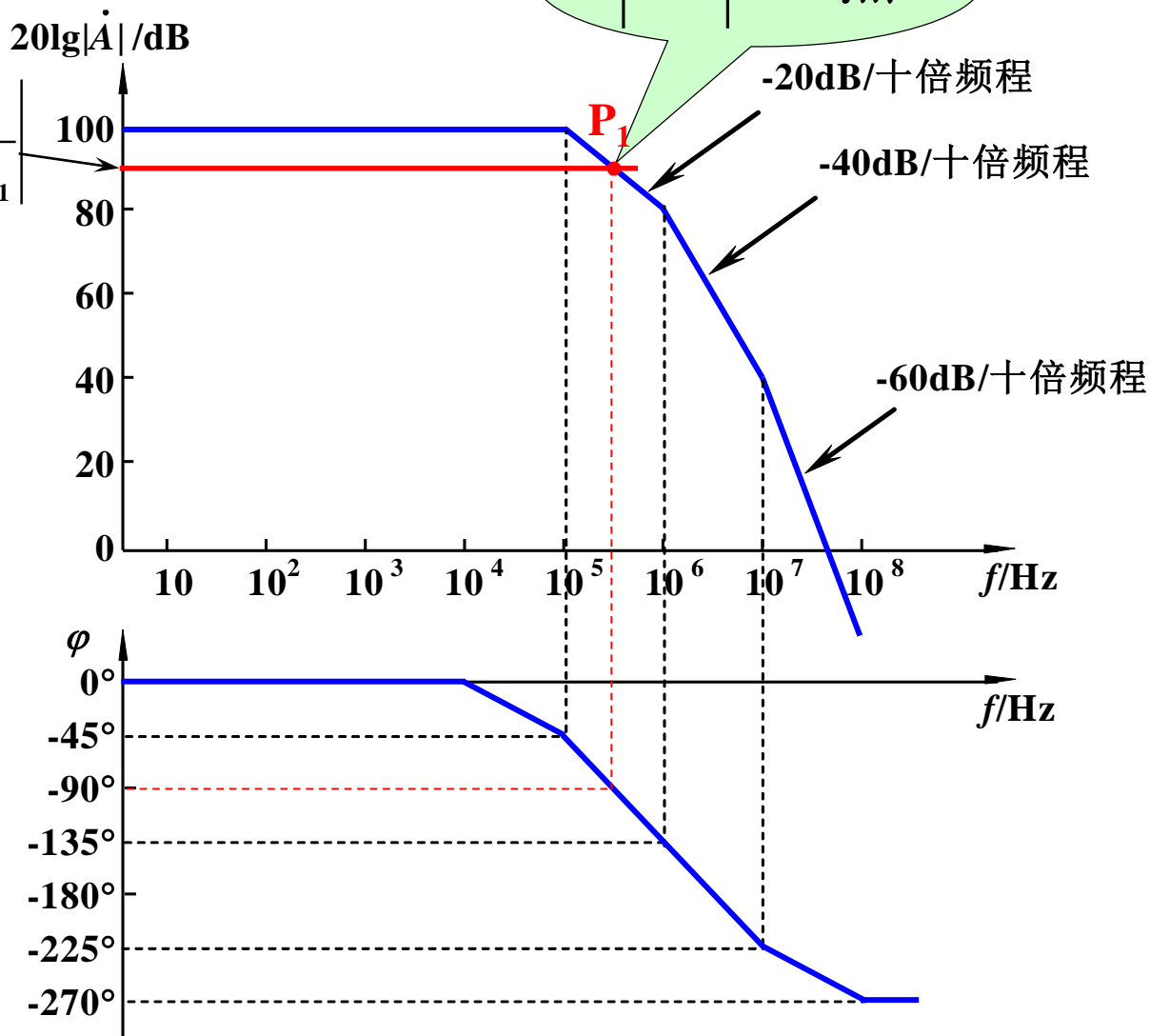
(1) $F_1 = 3 \times 10^{-5}$



反馈系数为 F_1 时

$$\varphi_m = 180^\circ - |\Delta\varphi_a|_{f=f_M} = 90^\circ \geq 45^\circ$$

负反馈放大
电路稳定



8.5.3 负反馈放大电路稳定性分析

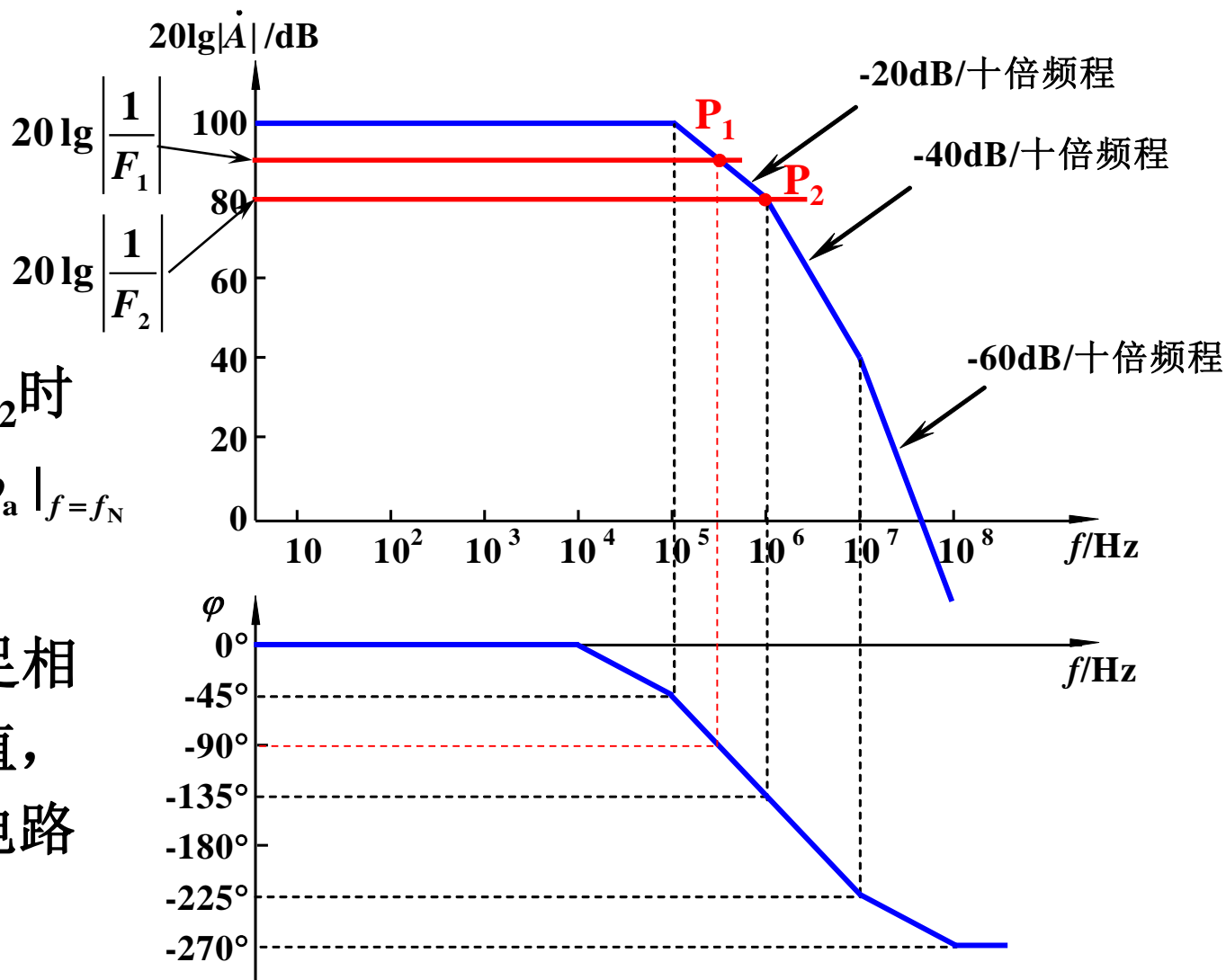
解:

(2) $F_2=10^{-4}$

反馈系数为 F_2 时

$$\varphi_m = 180^\circ - |\Delta\varphi_a|_{f=f_N} = 45^\circ$$

刚刚满足相位裕度最小值，
负反馈放大电路
稳定。

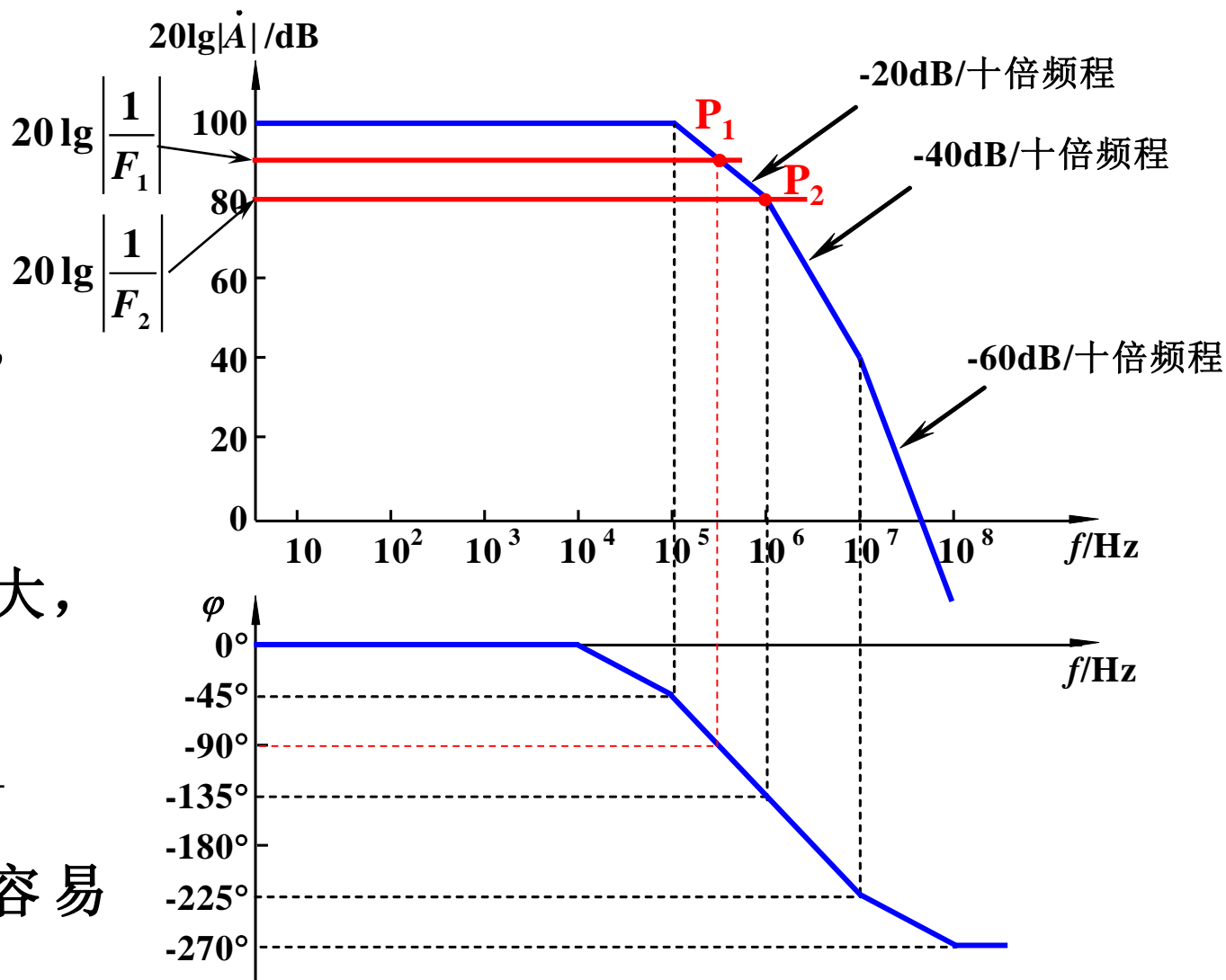


8.5.3 负反馈放大电路稳定性分析

解：（3）

由（2）可知反馈系数为 F_2 时已达临界值，若再增大，则电路将不稳定。

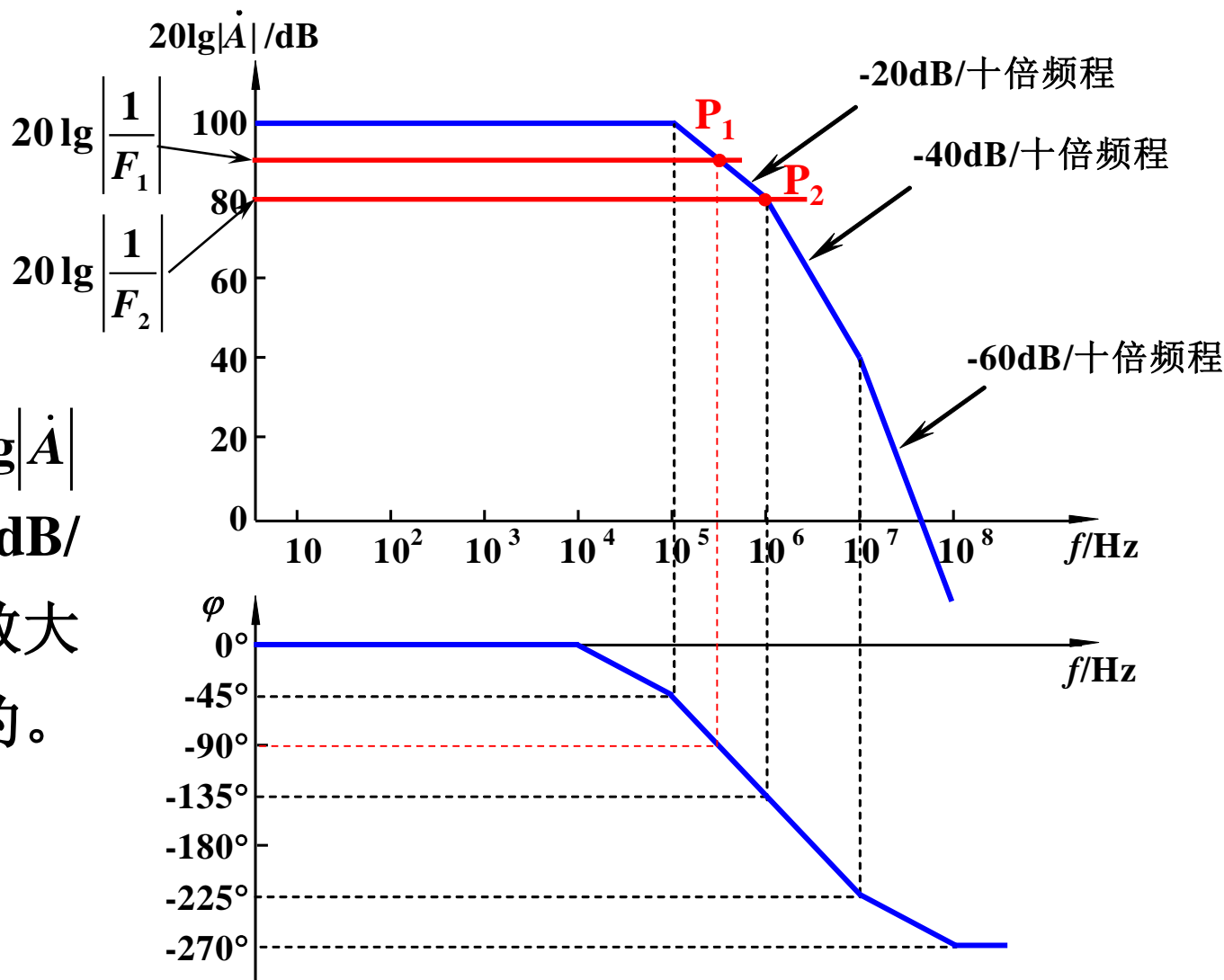
可见， F 越大，反馈深度越深，水平线 $20\lg \frac{1}{F}$ 越下移，越容易产生自激。



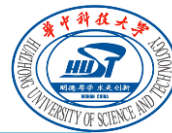
8.5.3 负反馈放大电路稳定性分析

推论：

交点在 $20\lg|\dot{A}|$
的斜率为 $-20\text{dB}/$
十倍频处，放大
电路是稳定的。



8.5 负反馈放大电路的稳定性



8.5.1 产生自激振荡的原因和条件

8.5.2 负反馈放大电路的稳定裕度

8.5.3 负反馈放大电路稳定性分析

8.5.4 自激振荡的消除

8.5.4 自激振荡的消除

1. 通用型频率补偿的思路

对于由电阻构成的反馈网络，反馈系数的最大值 $F_{\max}=1$ 。

$20\lg \frac{1}{F_{\max}} = 0 \text{ dB}$ ，水平线与横轴重合，其他反馈深度的水平线均在横轴上方。

根据推论， $20\lg \frac{1}{F}$ 与 $20\lg|\dot{A}|$ 交在 $20\lg|\dot{A}|$ 的斜率为 $-20\text{dB}/十倍频处$ ，放大电路是稳定的。

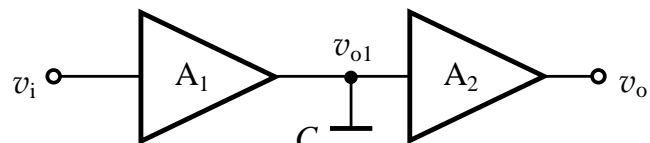
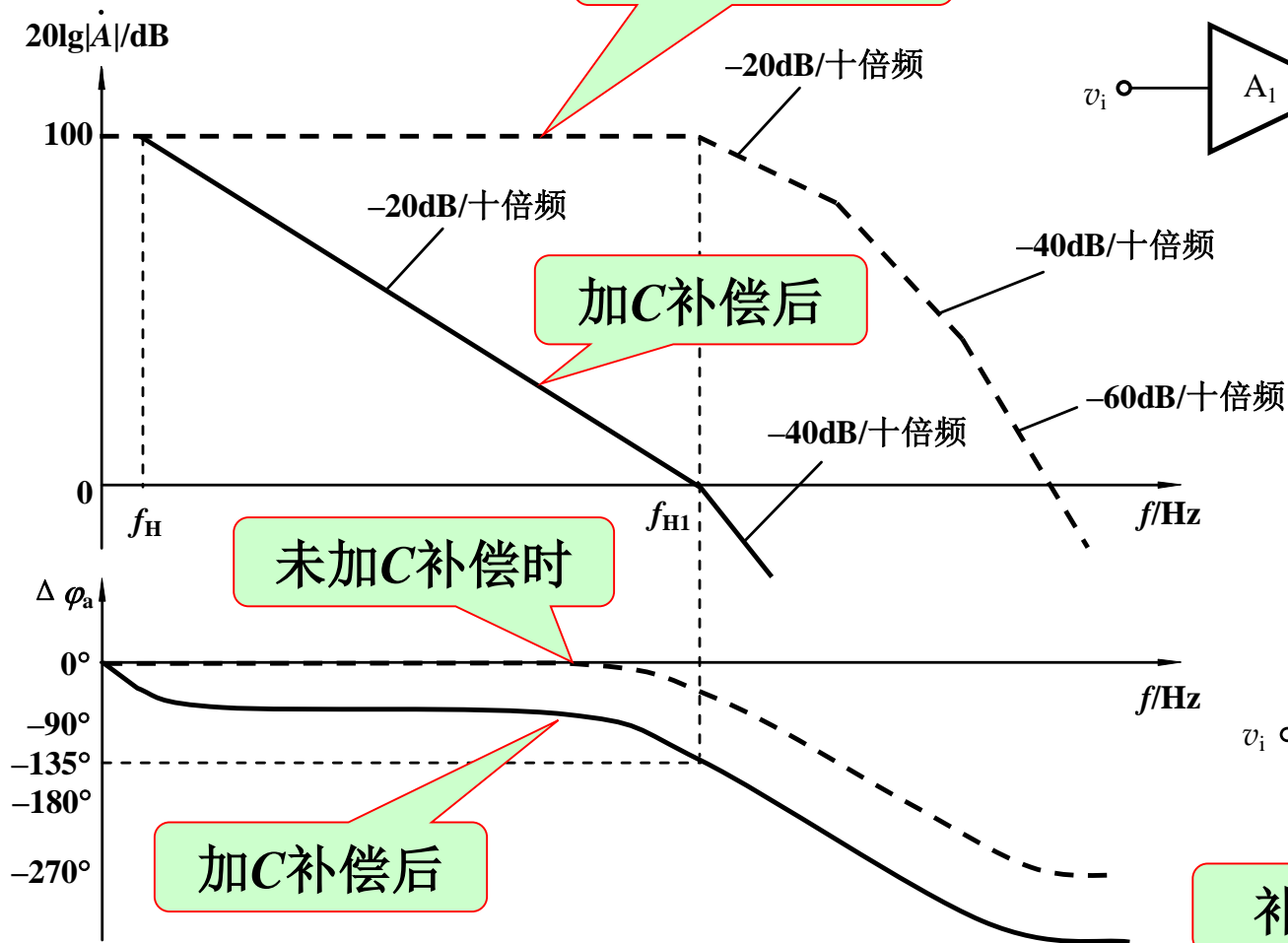
所以，如果通过补偿方式，将 $20\lg|\dot{A}|$ 曲线横轴以上的部分，均变为 $-20\text{dB}/十倍频$ 的斜率，那么，无论引入多深的反馈（电阻反馈网络），放大电路总是稳定的。

思路：0 分贝水平线上增益的衰减斜率只有 $-20\text{dB}/十倍频程$

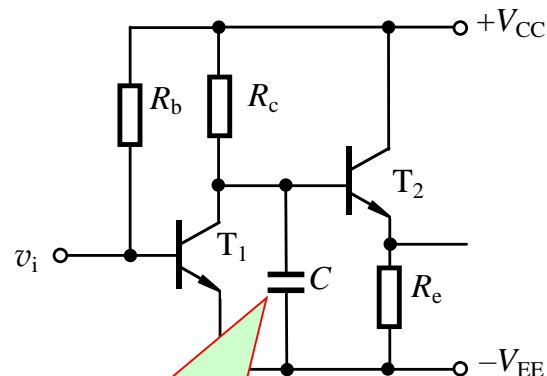
8.5.4 自激振荡的消除

2. 电容滞后补偿

未加C补偿时



补偿电容



补偿电容

补偿后0 分贝线上增益的衰减斜率只有 $-20\text{dB}/\text{十倍频}$

8.5.4 自激振荡的消除

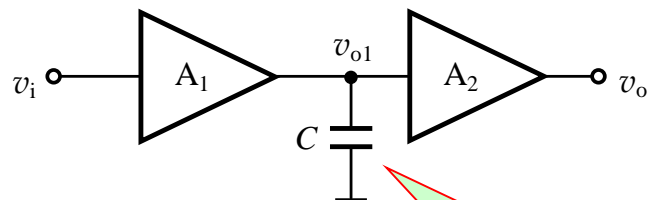
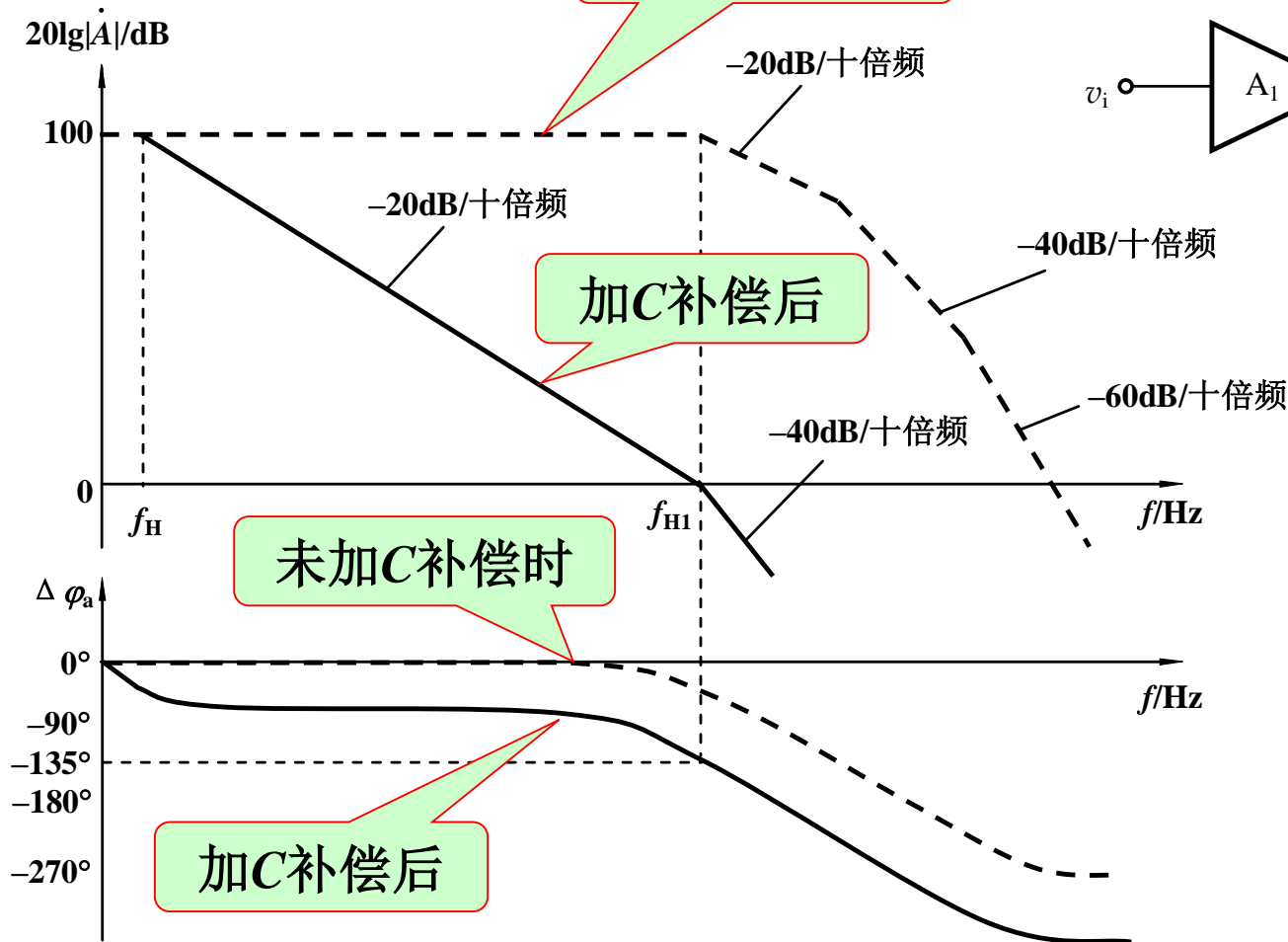
2. 电容滞后补偿

未加C补偿时

加C补偿后

未加C补偿时

加C补偿后

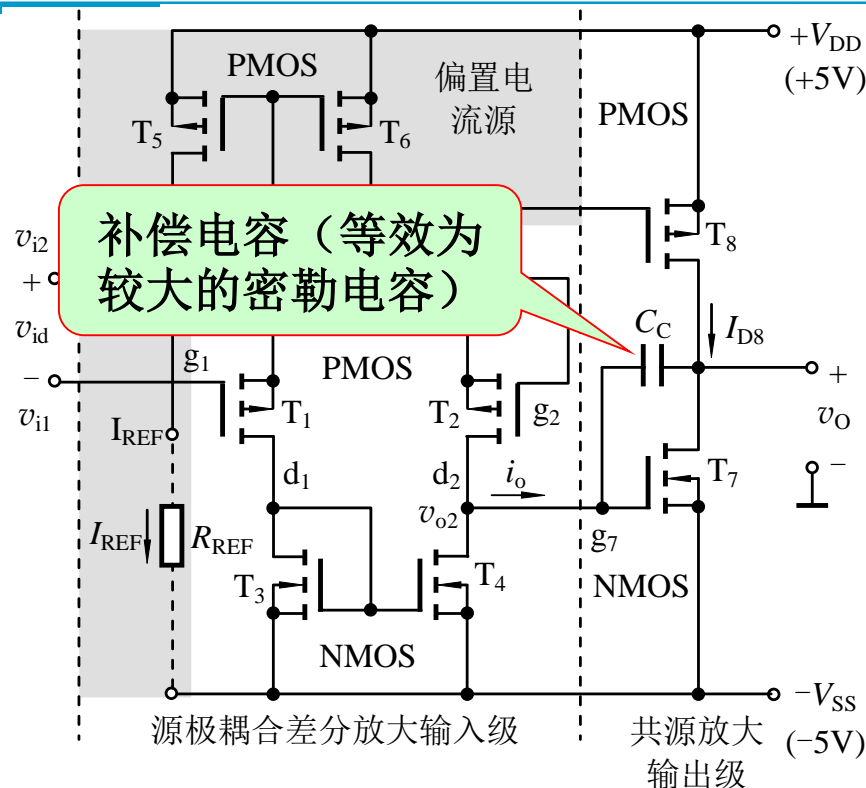
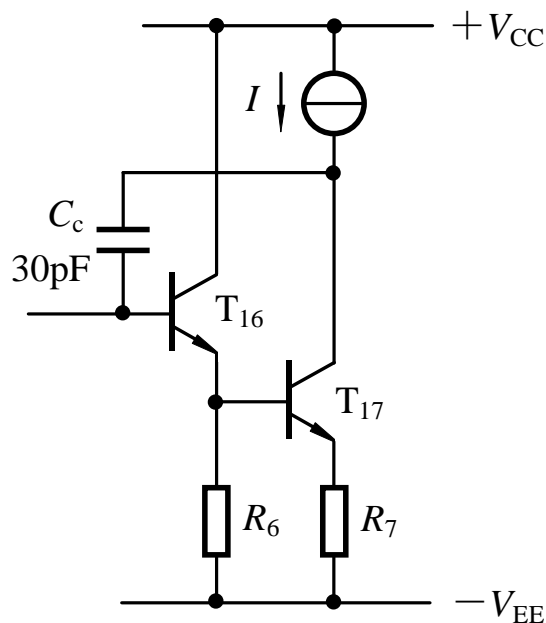
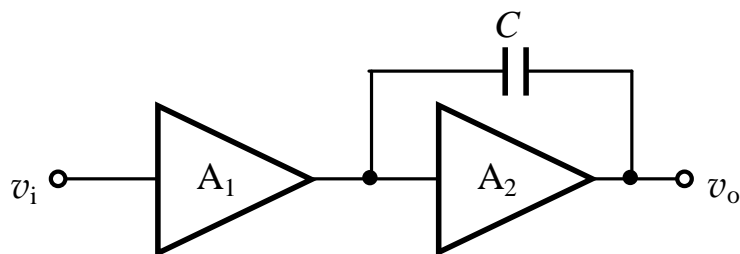


补偿电容

补偿后0 分贝线上增益的衰减斜率只有 $-20\text{dB}/\text{十倍频}$

8.5.4 自激振荡的消除

3. 密勒效应补偿



利用密勒电容效应，就可以将较小的电容等效为较大的电容实现频率补偿。实际上，集成运算放大器14573和741内部，就加入了补偿电容 C_c 来实现频率补偿。

Questions and Answers