



第六章 负反馈放大器 及其稳定性

郭圆月

2022年11月15日





本章主要内容

§6.1 反馈的概念及判断

§6.2 负反馈放大器的单环反馈框图模型

§6.3 交流负反馈对放大电路性能的影响

§6.4 负反馈放大器的分析方法

§6.5 多级负反馈放大器的稳定性





§ 6.1 反馈的概念及判断

一、反馈的基本概念

二、交流负反馈的四种组态

三、反馈的判断



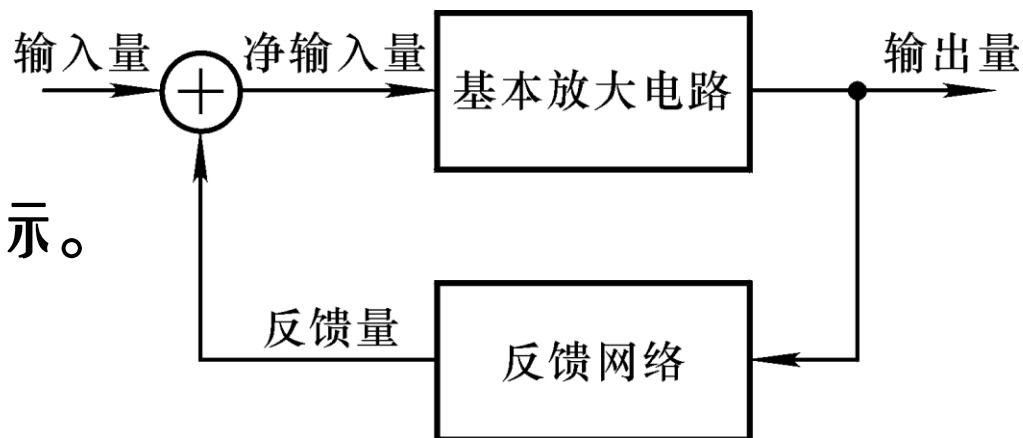


一、反馈的基本概念

1. 什么是反馈？

■ 反馈放大电路可用方框图表示。

■ 要研究哪些问题？



➤ 放大电路 输出量的一部分或全部 通过 一定的方式

引回到输入回路，影响输入，称为反馈。

怎样引回

输出电压还是输出电流

多少

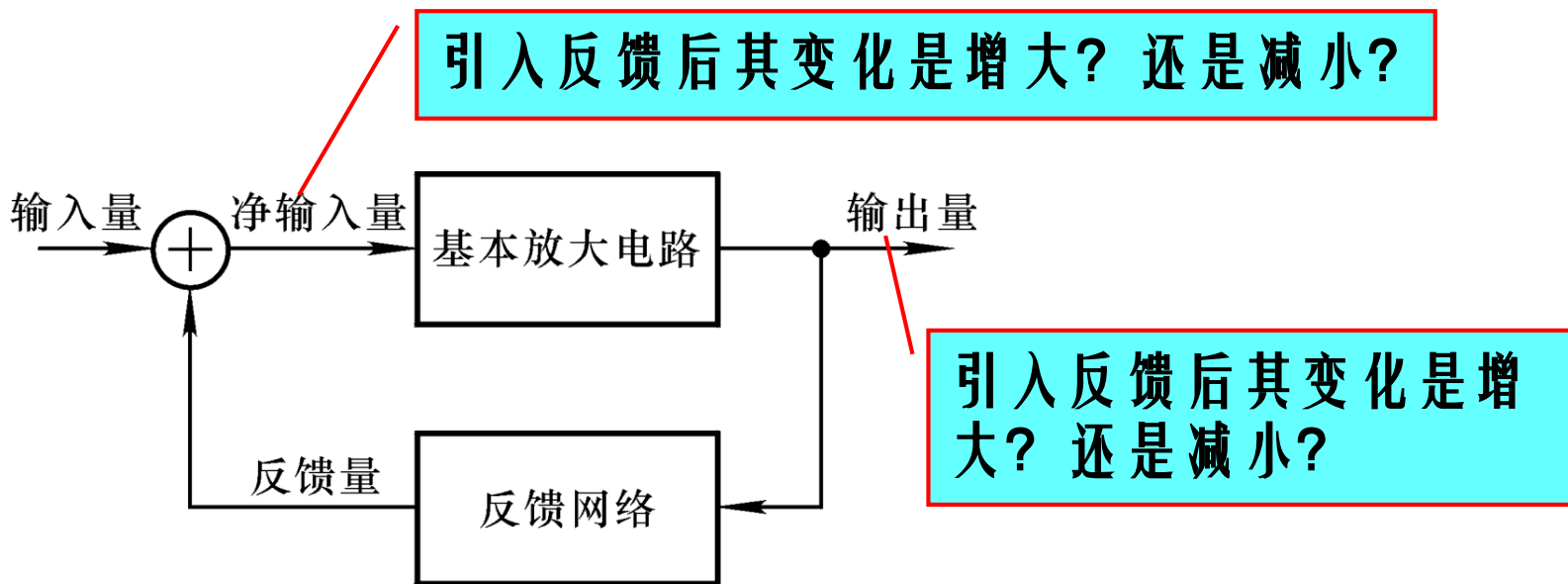
影响放大电路的输入电压还是输入电流

怎样引出





2. 正反馈和负反馈



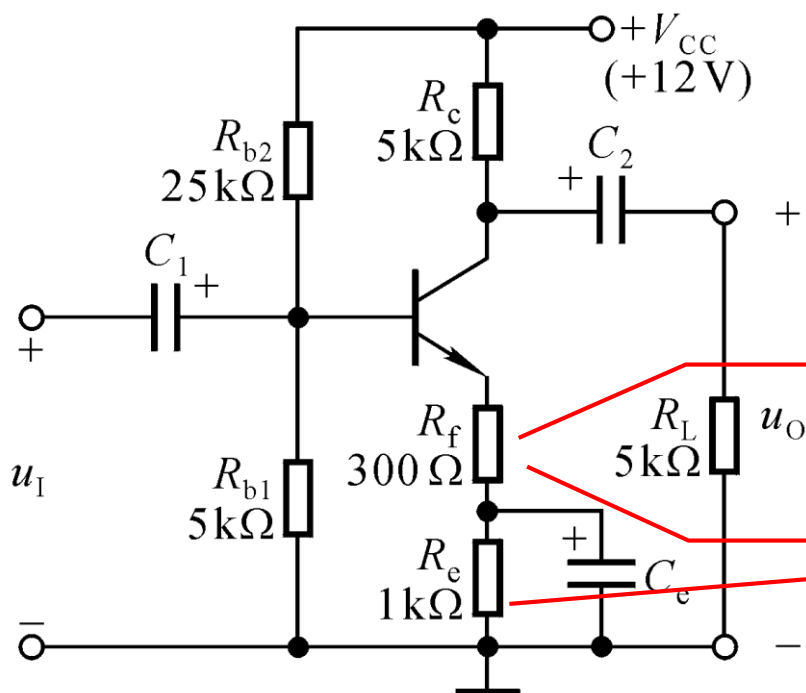
- 从反馈的效果来判断，凡反馈的结果使输出量的变化减小的为负反馈，反之为正反馈；
- 或者，凡反馈的结果使净输入量减小的为负反馈，反之为正反馈。





3. 直流反馈和交流反馈

■ 直流通路中存在的反馈称为直流反馈，交流通路中存在的反馈称为交流反馈。



→ 影响交流动态参数

引入交流负反馈

引入直流负反馈

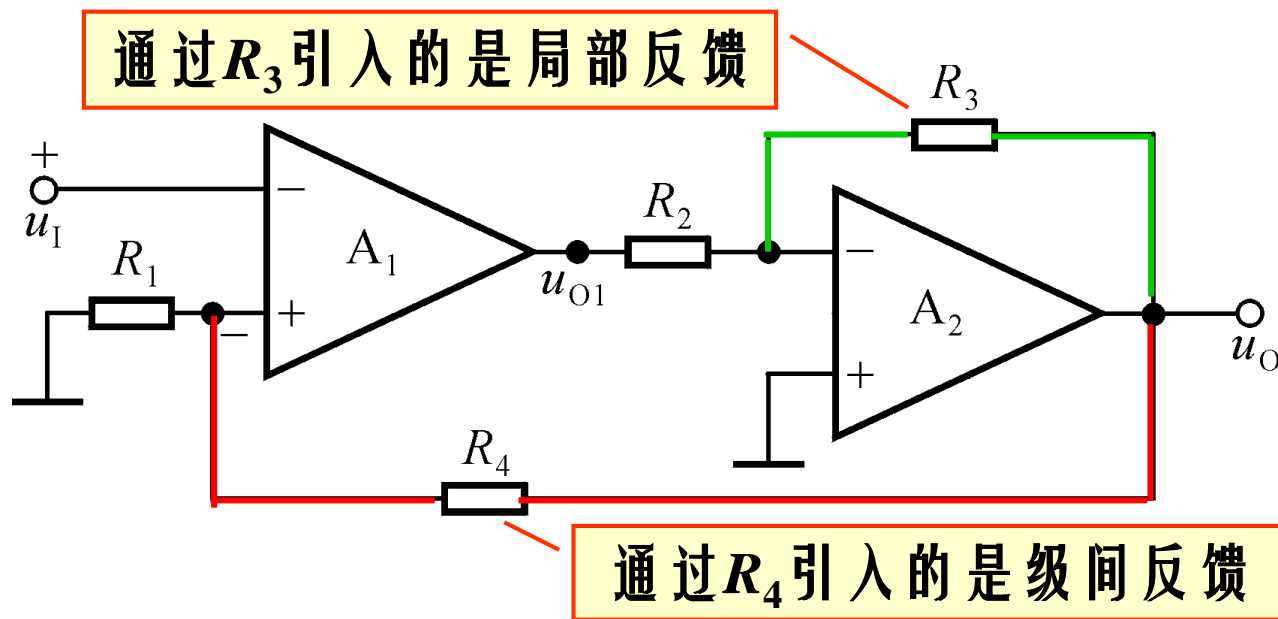
→ 稳定静态工作点Q





4. 局部反馈和级间反馈

- 只对多级放大电路中某一级起反馈作用的称为 **局部反馈**,
- 将多级放大电路的输出量引回到其输入级的输入回路的称为 **级间反馈**。



➤ 通常，重点研究级间反馈或称 **总体反馈**。





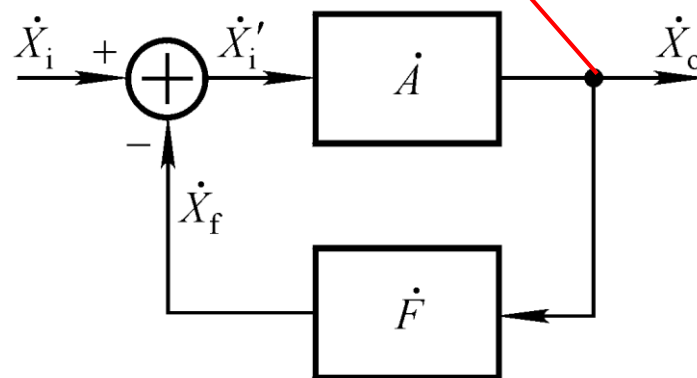
二、交流负反馈的四种组态

1. 电压反馈和电流反馈

- ◆ 描述放大电路和反馈网络在输出端的 连接方式，即反馈网络的 取样形式。

- ◆ 将输出电压的一部分或全部引回到输入回路来影响净输入量的为 电压反馈，即

$$\dot{X}_o = \dot{U}_o$$



- ◆ 将输出电流的一部分或全部引回到输入回路来影响净输入量的为 电流反馈，即

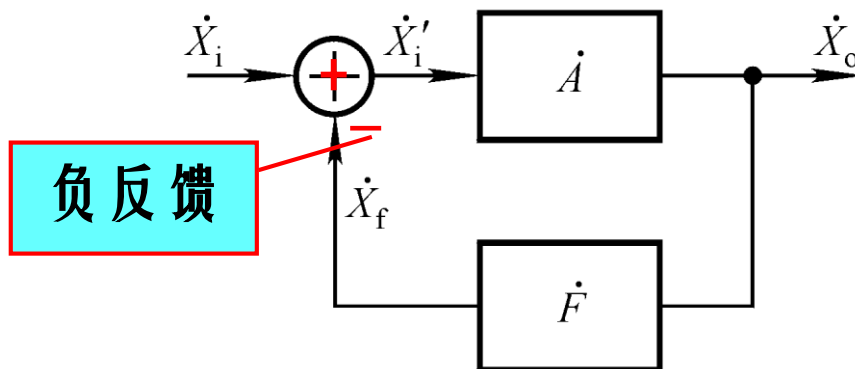
$$\dot{X}_o = \dot{I}_o$$





2. 串联反馈和并联反馈

■ 描述放大电路和反馈网络在**输入端**的连接方式，即输入量、反馈量、净输入量的**叠加形式**。



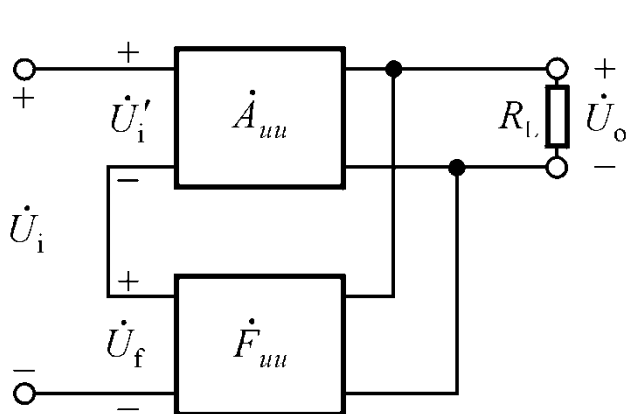
$$\dot{U}_i = \dot{U}_i' + \dot{U}_f \quad \text{-- 串联负反馈}$$

$$\dot{I}_i = \dot{I}_i' + \dot{I}_f \quad \text{-- 并联负反馈}$$

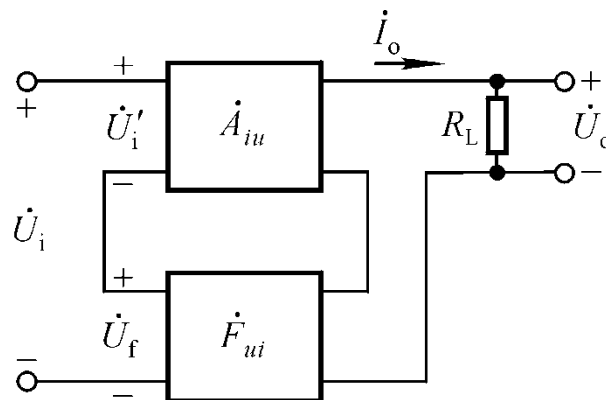




3. 四种反馈组态: 注意量纲

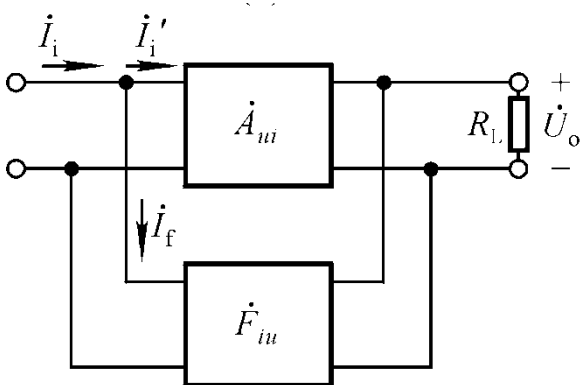


电压串联负反馈

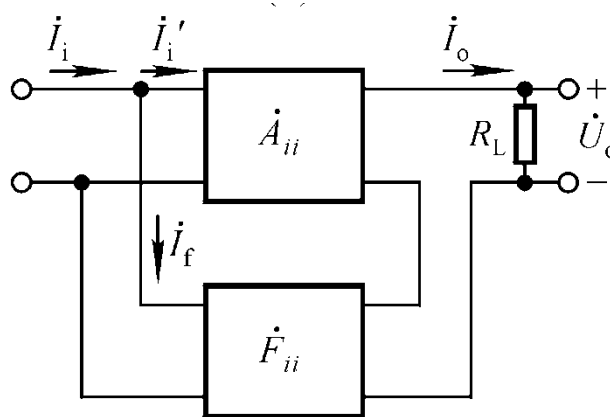


电流串联负反馈

➤ 为什么在并联负反馈电路中不加恒压源信号?



电压并联负反馈



电流并联负反馈

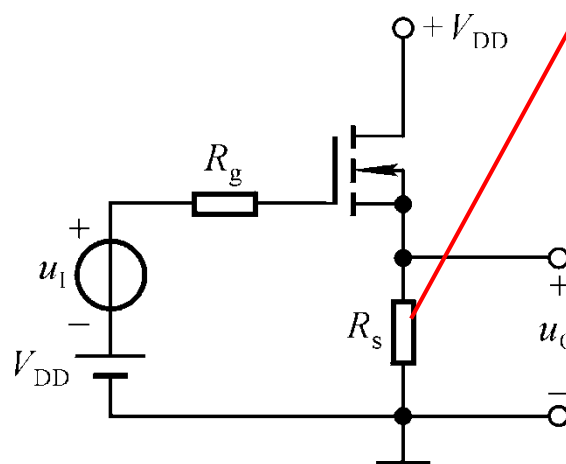
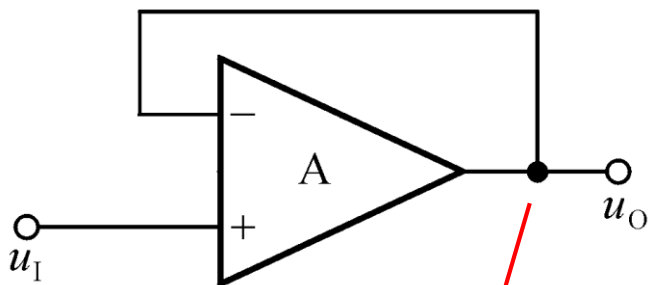
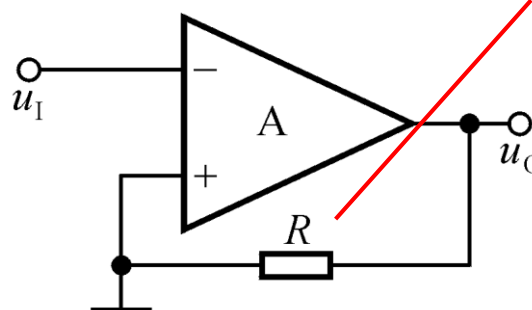
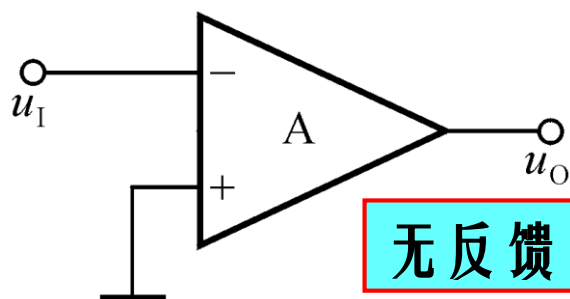
➤ 为什么在串联负反馈电路中不加恒流源信号?





三、反馈的判断

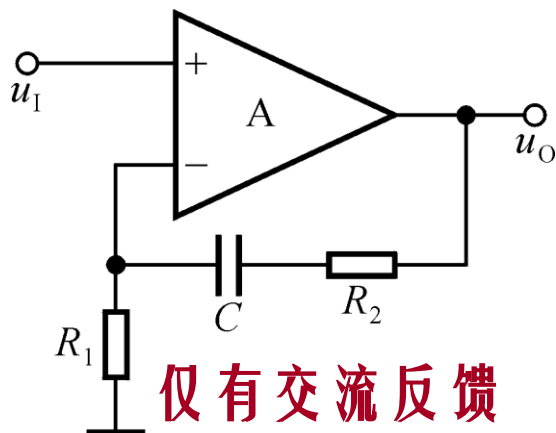
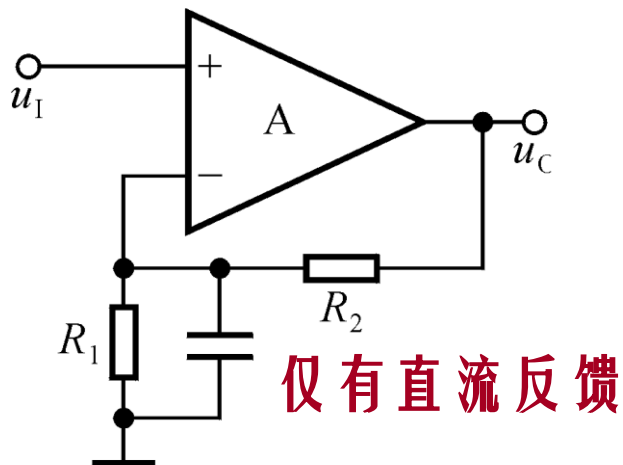
1. “找反馈支路”：找输出回路与输入回路的反馈支路，若有则有反馈，否则无反馈。



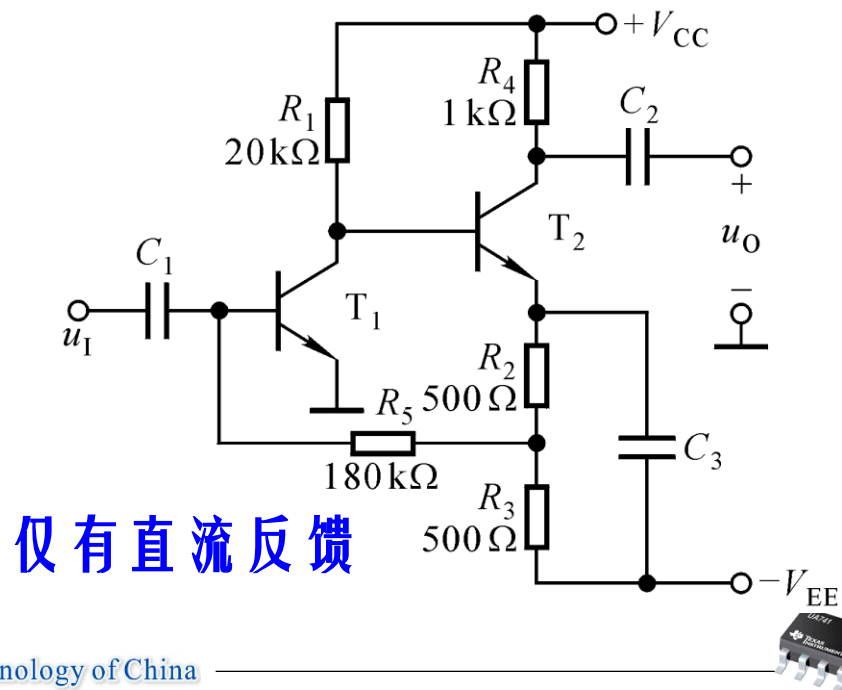
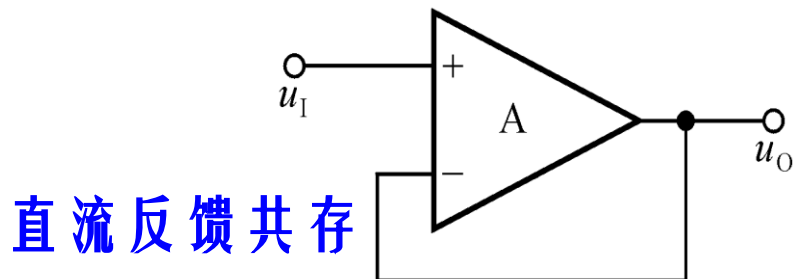


2. 直流反馈和交流反馈的判断

■ “看通路”，即看反馈是存在于直流通路还是交流通路。
设以下电路中所有电容对交流信号均可视为短路。



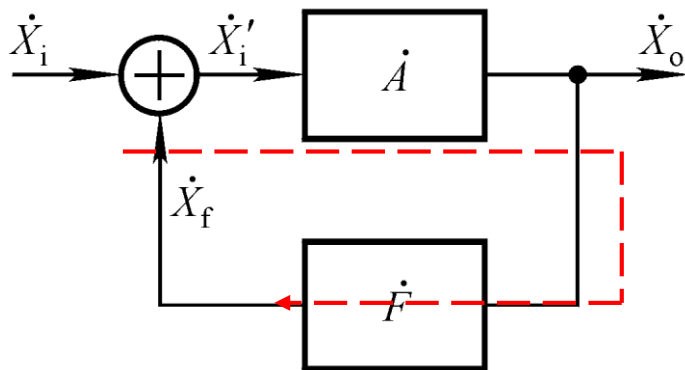
交、直流反馈共存





3. 正、负反馈（**反馈极性**）的判断

■ “看反馈的结果”，即净输入量是被增大还是被减小。



瞬时极性法：给定 \dot{X}_i 瞬时极性，以此为依据分析电路中各电流、电位的极性从而得到 \dot{X}_o 的极性；

■ \dot{X}_o 的极性 $\rightarrow \dot{X}_f$ 的极性 $\rightarrow \dot{X}_i$ 、 \dot{X}_f 、 \dot{X}_i' 的叠加关系！

$$\dot{U}_i' = \dot{U}_i - \dot{U}_f \text{ 或 } \dot{I}_i' = \dot{I}_i - \dot{I}_f \quad \text{-- 负反馈}$$

$$\dot{U}_i' = \dot{U}_i + \dot{U}_f \text{ 或 } \dot{I}_i' = \dot{I}_i + \dot{I}_f \quad \text{-- 正反馈}$$

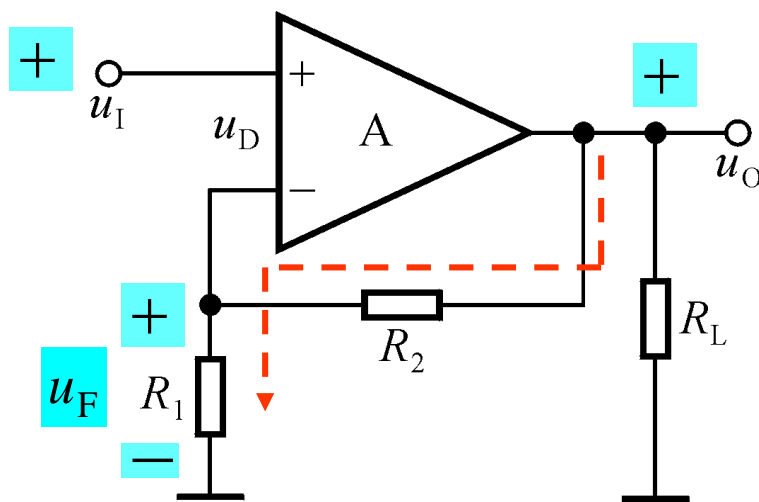




3. 正、负反馈的判断

$$u_D = u_I - u_F$$

$$u_F = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_O$$

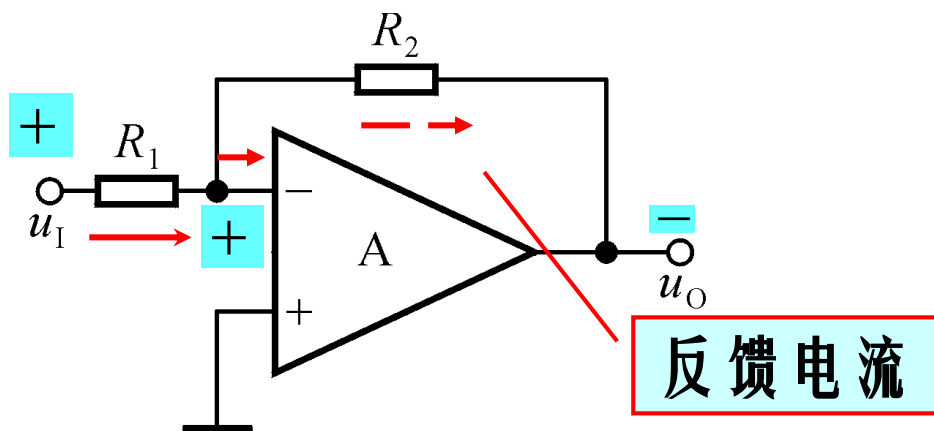


反馈量是仅仅决定于输出量的物理量。





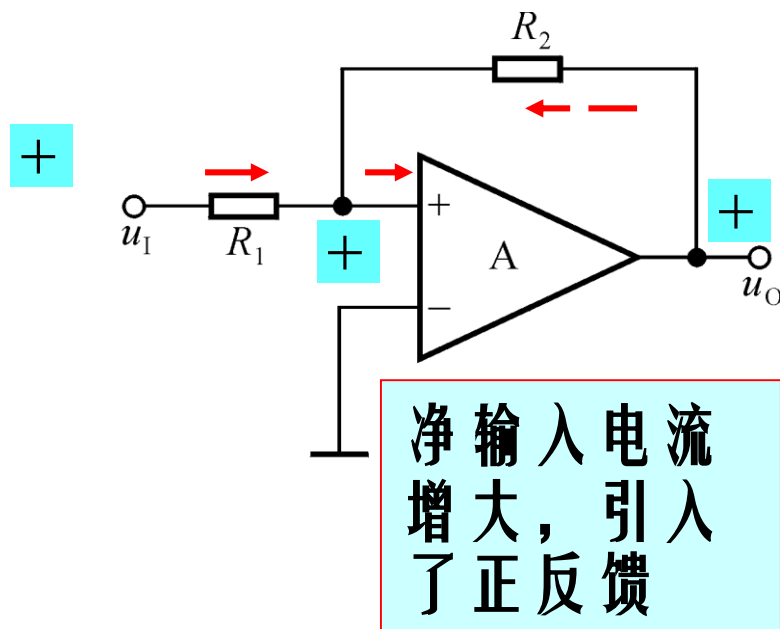
3. 反馈量仅决定于输出量



净输入电流减小，引入了负反馈

$$i_{R_2} = \frac{u_{\text{N}} - u_{\text{O}}}{R_2}$$

反馈量



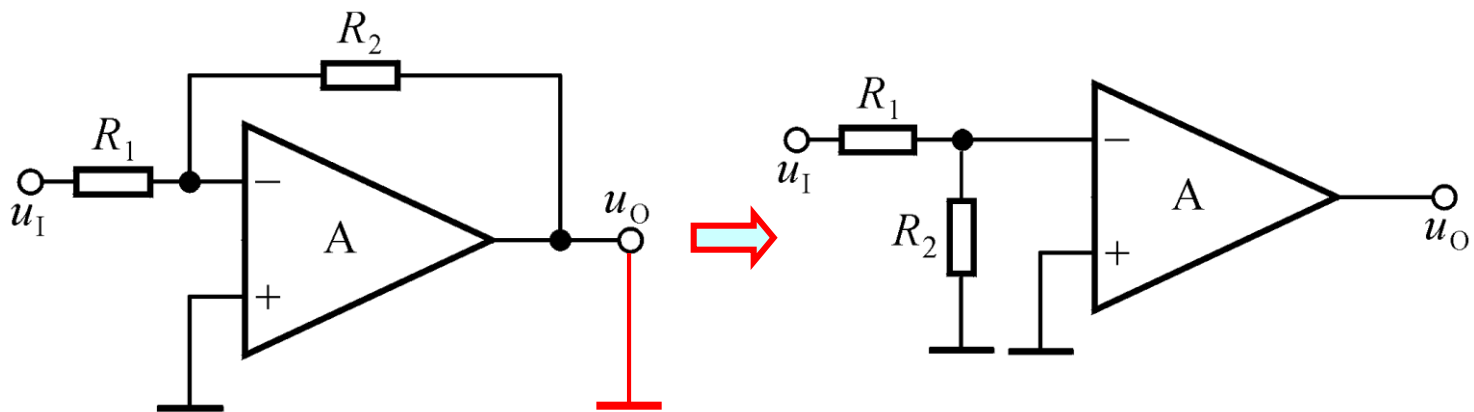
- 在判断集成运放构成的反馈放大电路的反馈极性时，净输入电压指的是集成运放两个输入端的电位差，净输入电流指的是同相输入端或反相输入端的电流。





4. 电压反馈和电流反馈的判断

■ 令输出电压为0，若反馈量随之为0，则为电压反馈；若反馈量依然存在，则为电流反馈。

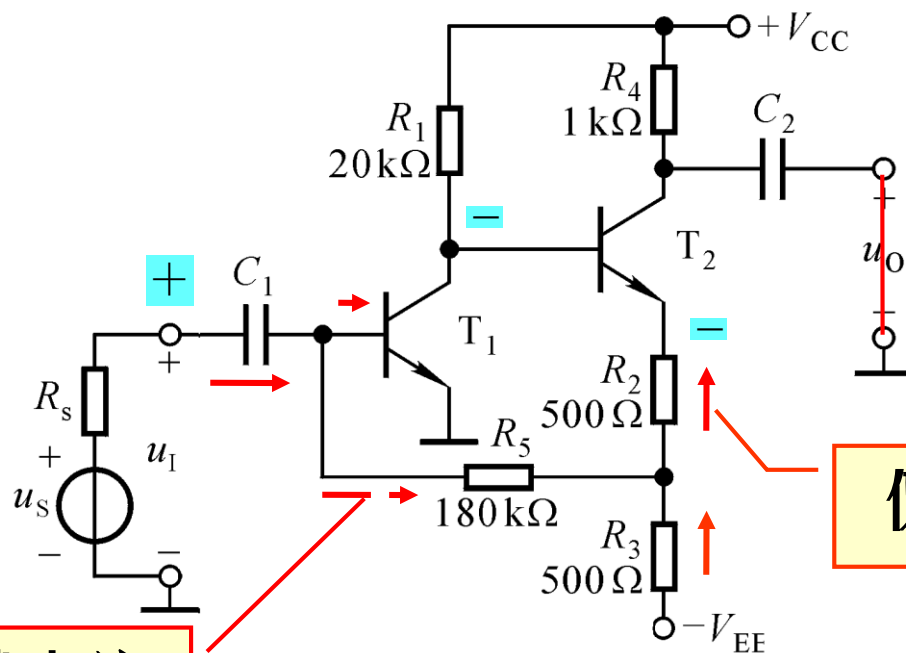


电路引入了电压负反馈





4. 电压反馈和电流反馈的判断



反馈电流

电路引入了电流负反馈

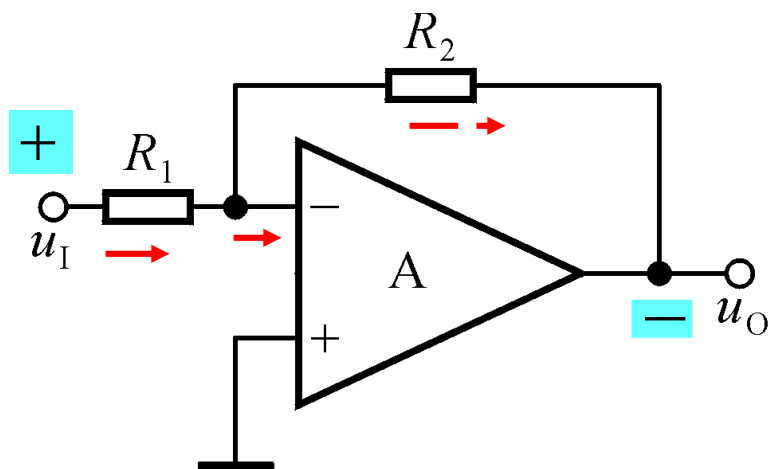
仅受基极电流的控制





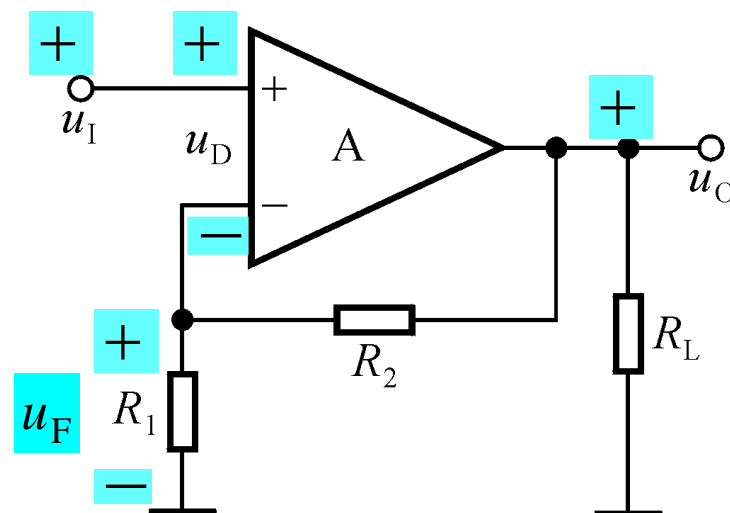
5. 串联反馈和并联反馈的判断

- 在输入端，输入量、反馈量和净输入量以电压的方式叠加，为**串联反馈**；以电流的方式叠加，为**并联反馈**。



$$i_N = i_I - i_F$$

引入了并联反馈



$$u_D = u_I - u_F$$

引入了串联反馈

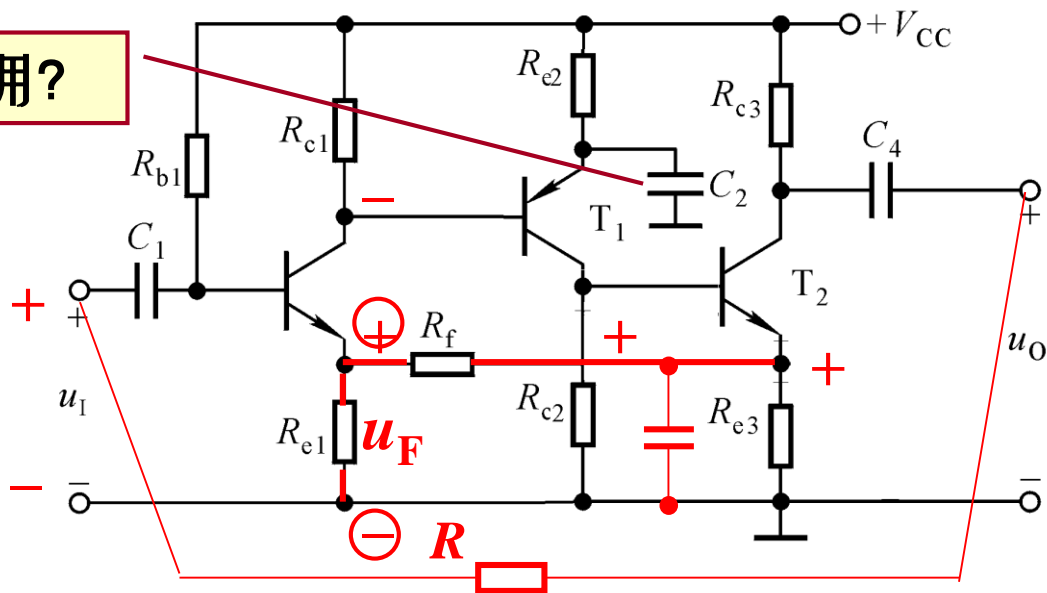




6.分立元件放大电路中反馈的分析

➤ 图示电路有无引入反馈？是直流反馈还是交流反馈？是正反馈还是负反馈？若为交流负反馈，其组态为哪种？

作用？



1. 若从第三级射极输出，则电路引入了哪种组态的交流负反馈？

2. 若在第三级的射极加旁路电容，则反馈的性质有何变化？

引入了电流串联负反馈

注意：反馈网络的构成？

3. 若在第三级的射极加旁路电容，且在输出端和输入端跨接一电阻，则反馈的性质有何变化？

引入了电压并联负反馈

有效？





6.分立元件放大电路中**净输入量**和**输出电流**

■ 在判断分立元件反馈放大电路的反馈极性时，净输入电压常指输入级晶体管的 $b-e$ （ $e-b$ ）间或场效应管 $g-s$ （ $s-g$ ）间的电位差，净输入电流常指输入级晶体管的基极电流（射极电流）或场效应管的栅极（源极）电流。

■ 在分立元件电流负反馈放大电路中，反馈量常取自于输出级晶体管的集电极电流或发射极电流，而不是负载上的电流；此时称输出级晶体管的集电极电流或发射极电流为输出电流，反馈的结果将稳定该电流。





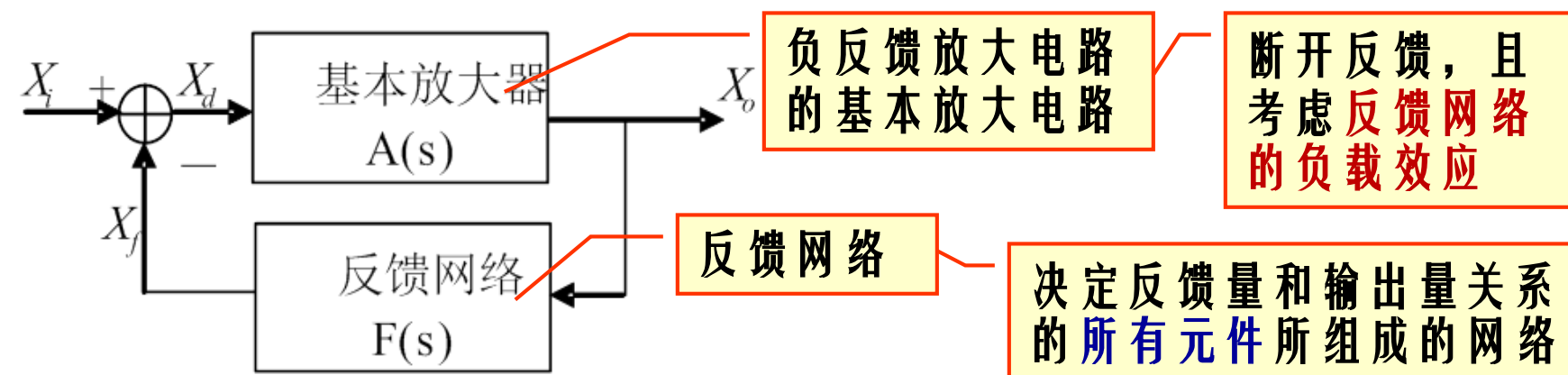
§ 6.2 负反馈放大器的单环反馈模型

- 一、负反馈放大电路的单环方框图模型
- 二、负反馈放大电路增益的基本方程式
- 三、深度负反馈的实质
- 四、基于反馈系数的放大倍数的估算方法





一、负反馈放大器的单环理想方框图模型



由基本放大器A和反馈网络F组成的单环闭合环路，信号是单向流通的。

- 基本放大电路的开环增益函数：
$$\dot{A}(S) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\dot{X}_o(S)}{\dot{X}_i(S)} \Big|_{\dot{X}_f(S)=0} = \frac{\dot{X}_o(S)}{\dot{X}_d(S)}$$
- 反馈函数：
$$\dot{F}(S) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\dot{X}_f(S)}{\dot{X}_o(S)}$$
- 闭环增益函数：
$$\dot{A}_f(S) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\dot{X}_o(S)}{\dot{X}_i(S)}$$
- 信号关系
- $$\begin{cases} X_d(s) = X_i(s) - X_f(s) & \text{同类电量} \\ X_f(s) = F(s)X_o(s) & \text{可不同类} \\ X_o(s) = A(s)X_d(s) & \text{可不同类} \end{cases}$$



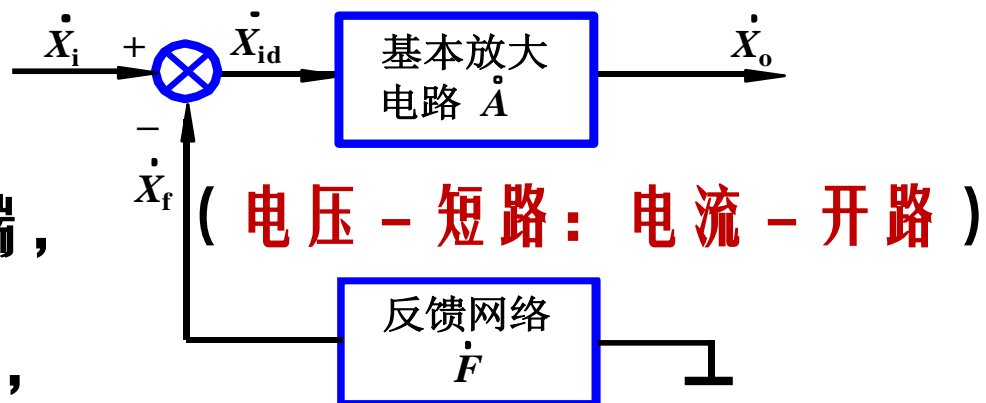


1. 反馈网络 F 的负载等效

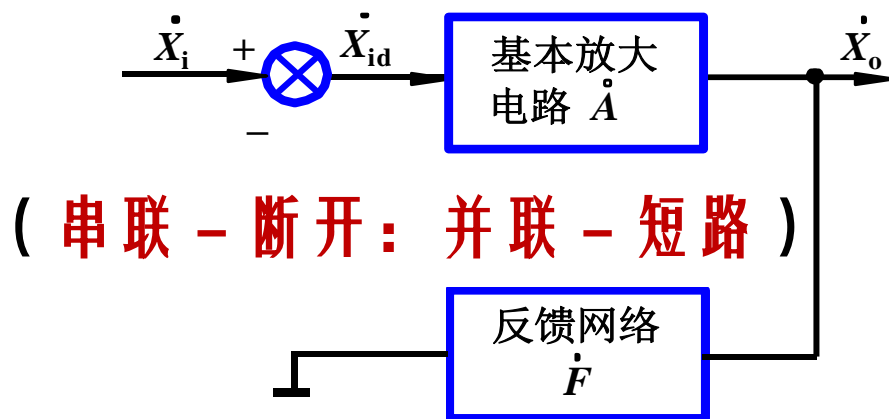
- 为了使信号的传递单向化，将反馈网络作为基本放大电路 A 在输入端和输出端的等效电阻。

- 原则

(1) 反馈网络等效到输入端，
考虑到输入端的负载效应时，
应令输出量为0。



(2) 反馈网络等效到输出端，
考虑到输出端的负载效应时，
应令输入量为0。



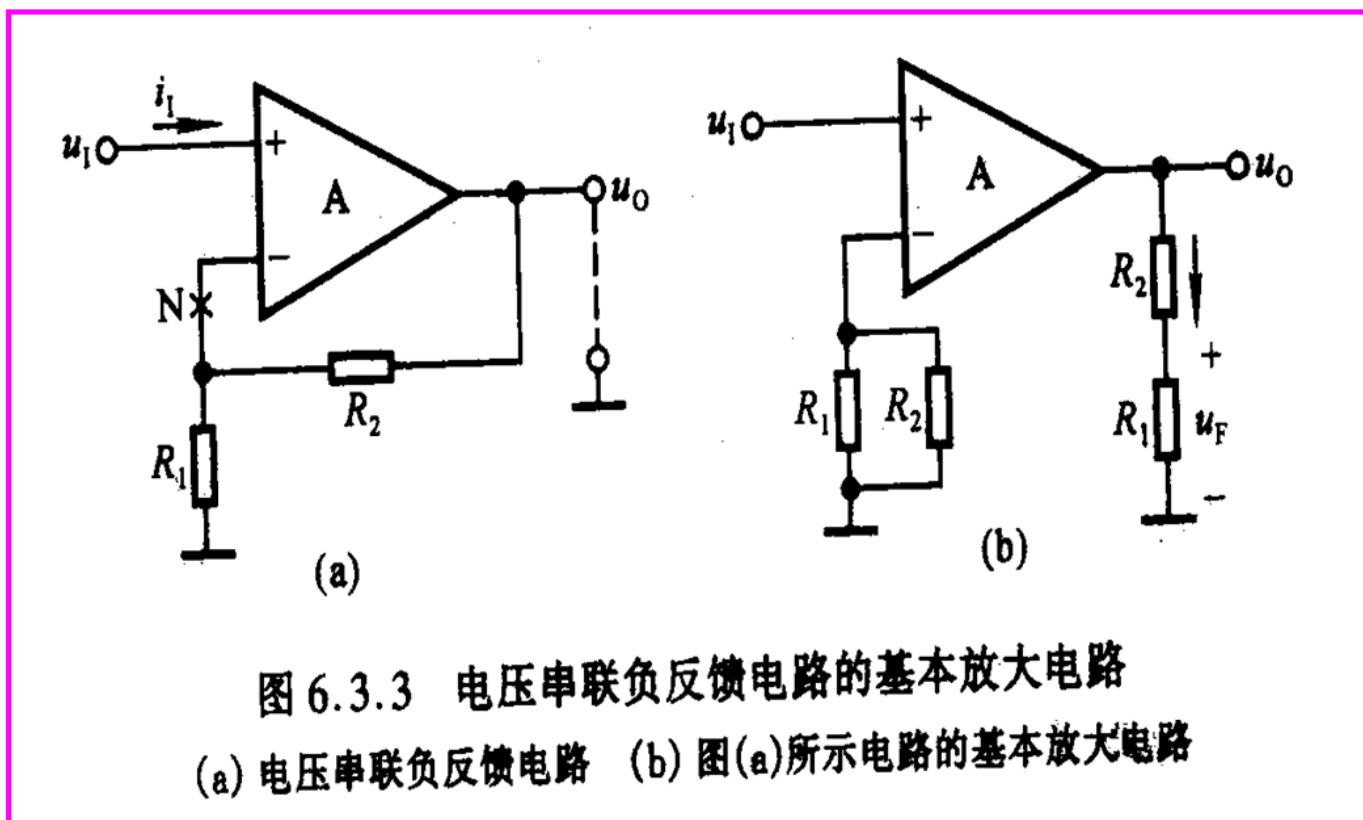


2. 求解基本放大电路

1. 电压串联负反馈

(电压 - 短路： 电流 - 开路)

(串联 - 断开： 并联 - 短路)



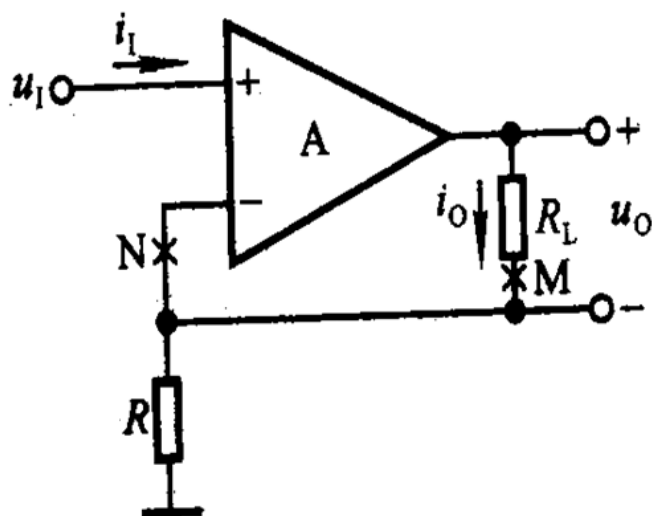


2. 求解基本放大电路

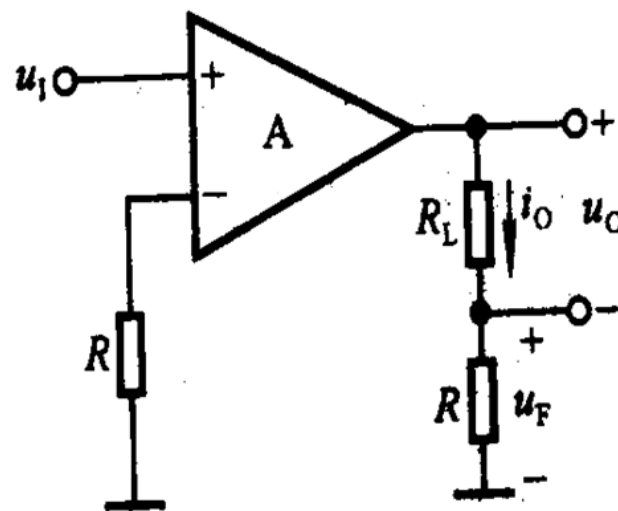
2. 电流串联负反馈

(电压 - 短路：电流 - 开路)

(串联 - 断开：并联 - 短路)



(a)



(b)

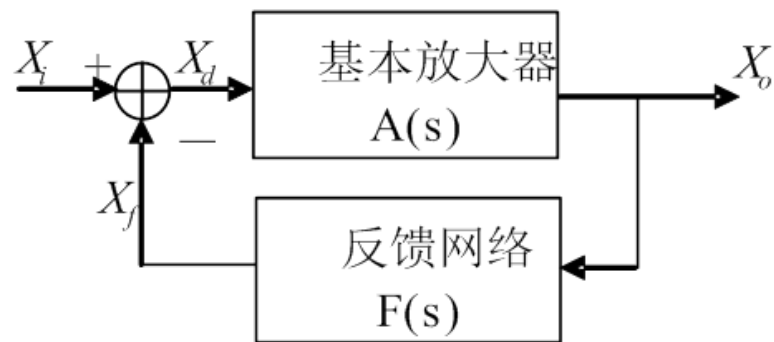
图 电流串联负反馈的基本放大电路

(a) 电流串联负反馈电路 (b) 基本放大电路





一、负反馈放大器的理想单环框图模型

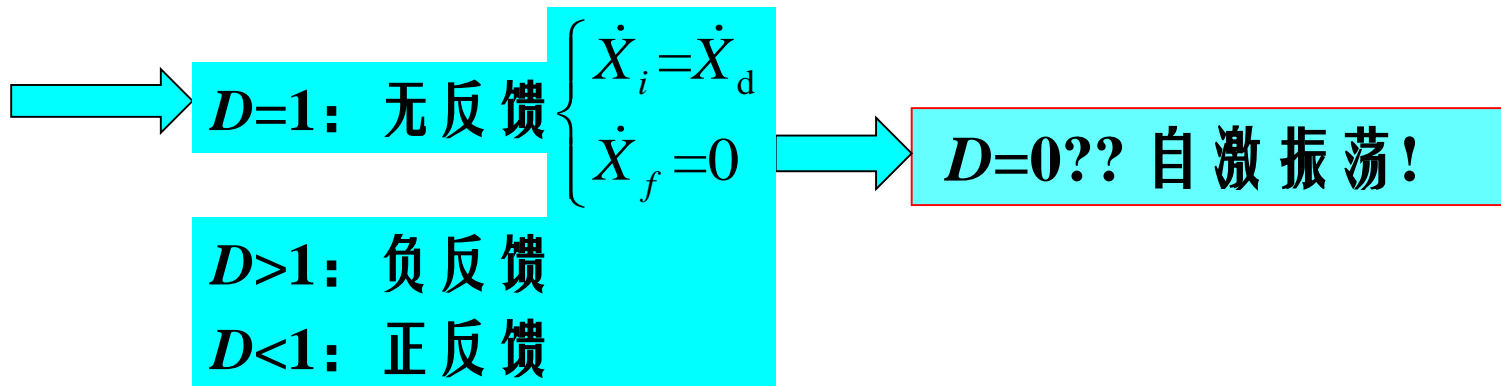


➤ 环路传递函数：

$$T(S) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{-\dot{X}_f}{\dot{X}_d} = \frac{-\dot{X}_f}{\dot{X}_o} \bullet \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_d} = -F(s)A(S)$$

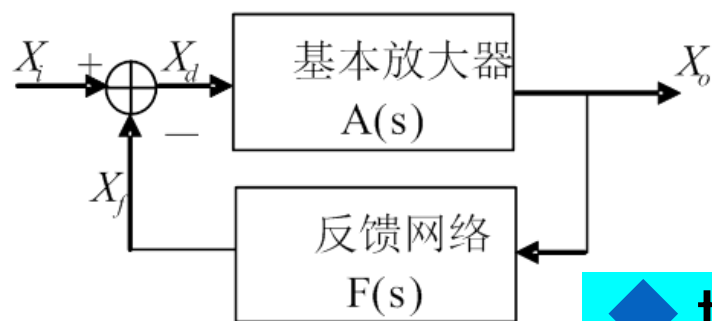
➤ 反馈深度：

$$D(S) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{X_i(S)}{\dot{X}_d(S)} = \frac{\dot{X}_d(S) + \dot{X}_f(S)}{\dot{X}_d(S)} = 1 + A(S)F(s) = 1 - T(S)$$





二、基本反馈方程式

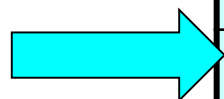


$$A_f(s) = \frac{X_o}{X_i} = \frac{X_o}{X_d} \cdot \frac{X_d}{X_i} = \underbrace{\frac{A(s)}{D(s)}}_{\text{形式一}}$$

◆ 加入负反馈，闭环放大器的增益下降了 D 倍

$$= \underbrace{\frac{A(s)}{1 + A(s)F(s)}}_{\text{形式二}} = \underbrace{\frac{A(s)}{1 - T(s)}}_{\text{形式三}}$$

◆ 闭环增益 A_f 仅由基本放大器开环增益函数 A 和反馈函数 F 决定。



反馈组态	功能	\dot{A}	\dot{F}	\dot{A}_f
电压串联	电压控制电压	\dot{U}_o / \dot{U}_i'	\dot{U}_f / \dot{U}_o	\dot{U}_o / \dot{U}_i
电压并联	电流控制电压	\dot{U}_o / \dot{I}_i'	\dot{I}_f / \dot{U}_o	\dot{U}_o / \dot{I}_i
电流串联	电压控制电流	\dot{I}_o / \dot{U}_i'	\dot{U}_f / \dot{I}_o	\dot{I}_o / \dot{U}_i
电流并联	电流控制电流	\dot{I}_o / \dot{I}_i'	\dot{I}_f / \dot{I}_o	\dot{I}_o / \dot{I}_i

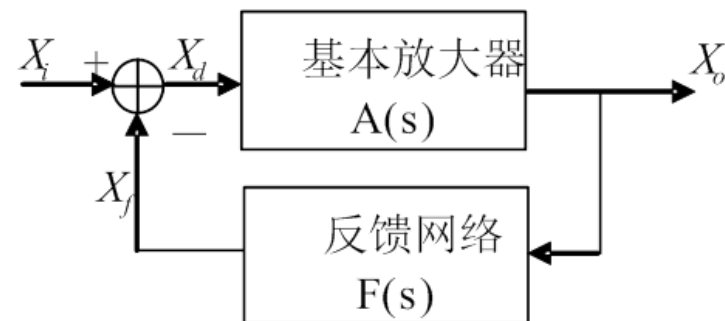




三、深度负反馈的实质

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

环路放大倍数



若 $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$ ，则 $\dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$ ，即 $\dot{X}_i \approx \dot{X}_f$ $\dot{X}_d \approx 0$

净输入量
忽略不计

- 深度负反馈放大器的闭环性质 A_f 完全由反馈网络 F 决定，而与基本放大器无关；→ 不同外部反馈网络，构建不同功能的运放电路；
- 深度负反馈情况下，采用零温度系数电阻反馈网络，构建不受温度等影响的精密放大器。



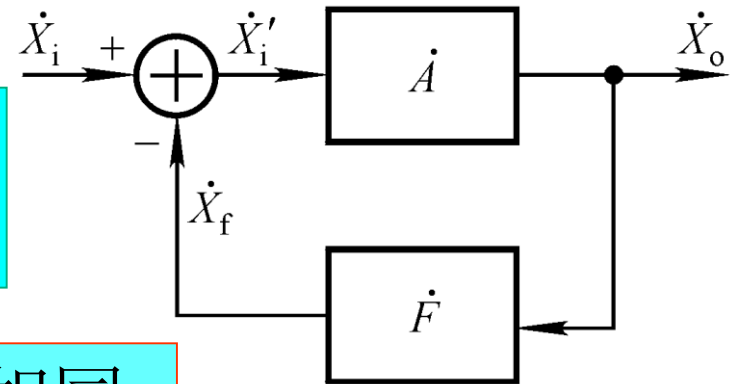


三、深度负反馈的稳定性问题

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

只有 $\dot{A}\dot{F} > 0$,
电路引入的才为负反馈。

在中频段，通常， \dot{A} 、 \dot{F} 、 \dot{A}_f 符号相同。



➤ 高频时，有附加相移，多级放大器的附加相移就可能达到 180° ，
则 AF 变负，负反馈就变成了正反馈。

$$A_f(s) = \frac{A(s)}{D(s)} \Big|_{D(s) \neq 0}$$

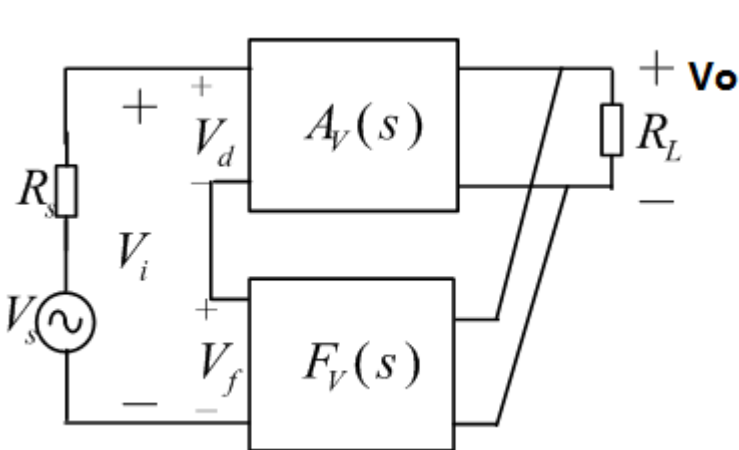




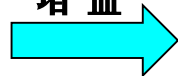
四、四种组态的传递函数

1. 电压串联负反馈电路

(1) 电压增益传递函数



开环增益



$$A_V(s) = \frac{V_o(s)}{V_d(s)}$$

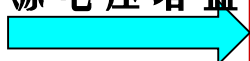
$$F_V(s) = \frac{V_f(s)}{V_o(s)}$$

闭环增益



$$A_{Vf}(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{A_V(s)}{1 + A_V(s)F_V(s)}$$

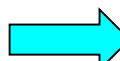
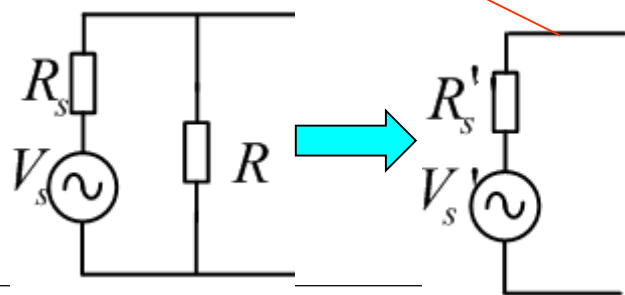
闭环源电压增益



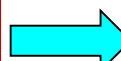
$$A_{Vsf}(s) = \frac{V_o(s)}{V_s(s)} = \frac{A_{Vs}(s)}{1 + A_{Vs}(s)F_V(s)}$$

戴维宁定理

■ 环外电阻的处理



$$R_s' = R \parallel R_s$$



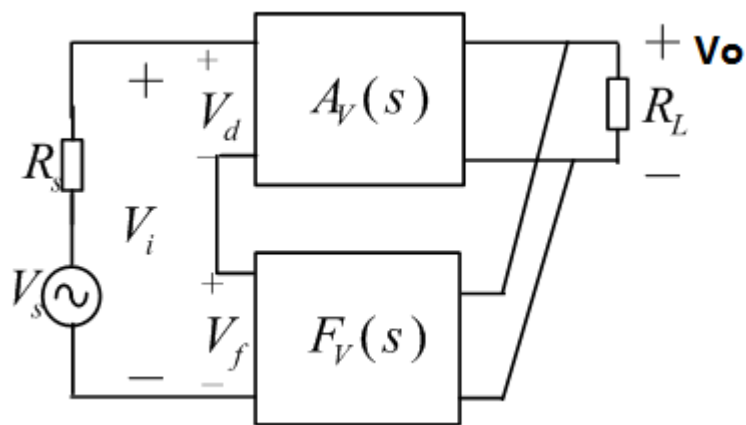
$$V_s' = V_s \cdot \frac{R}{R + R_s}$$





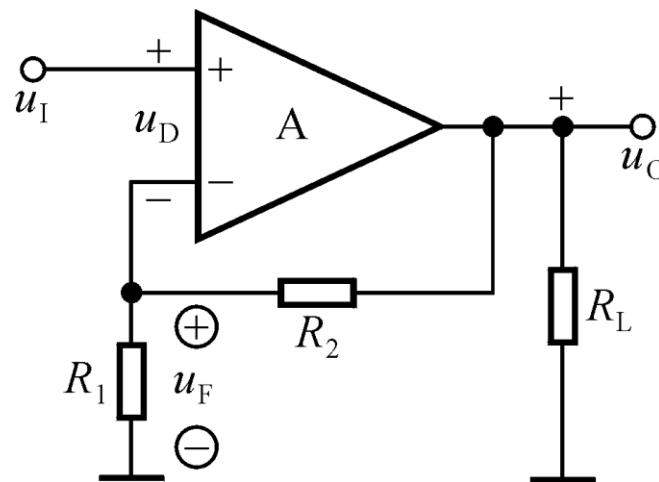
1. 电压串联负反馈电路

(2) 深度负反馈时电压增益估算



➤ 反馈网络系数

$$\dot{F}_{uu} = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o}$$



$$\dot{F}_v = \frac{V_f}{V_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

➤ 深度负反馈闭环电压增益传递函数

$$\dot{A}_{vf} = \frac{V_o}{V_i} \approx \frac{V_o}{V_f} = \frac{1}{\dot{F}_v}$$

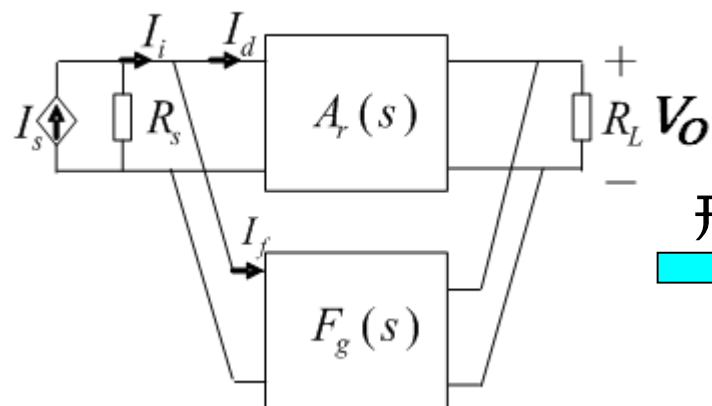
闭环
电压增益

$$\dot{A}_{vf} \approx \frac{1}{\dot{F}_v} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$





2. 电压并联负反馈电路



➤ 电阻传递函数:

开环增益

$$A_r(s) = \frac{V_o(s)}{I_d(s)}$$

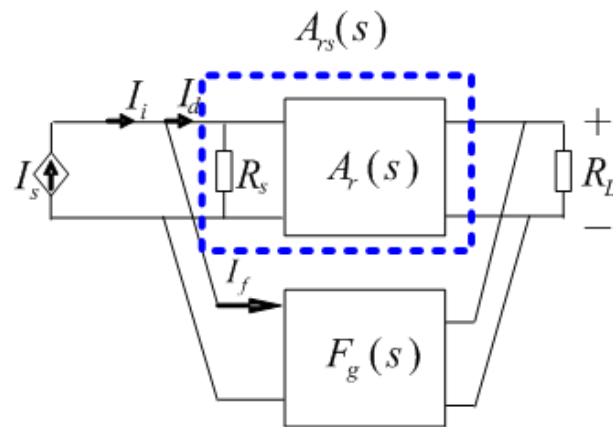
$$F_g(s) = \frac{I_f(s)}{V_o(s)}$$

闭环增益

$$A_{rf}(s) = \frac{V_o(s)}{I_i(s)} = \frac{A_r(s)}{1 + A_r(s)F_g(s)}$$

闭环电流源增益

$$A_{rsf}(s) = \frac{V_o(s)}{I_s(s)} = \frac{A_{rs}(s)}{1 + A_{rs}(s)F_g(s)}$$

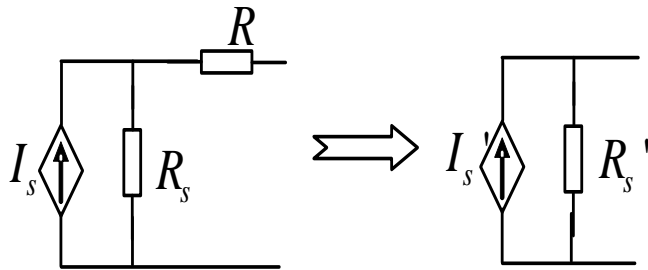




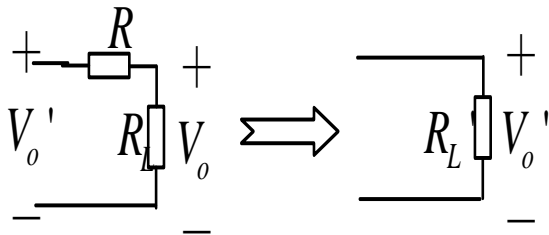
2. 电压并联负反馈电路

(2) 环外电阻的处理方法

输入端存在环外电阻



输出端存在环外电阻



诺顿定理

$$I'_s = I_s \cdot \frac{R_s}{R + R_s}$$

$$R'_s = R + R_s$$

$$V_o = V'_o \cdot \frac{R_L}{R + R_L}$$

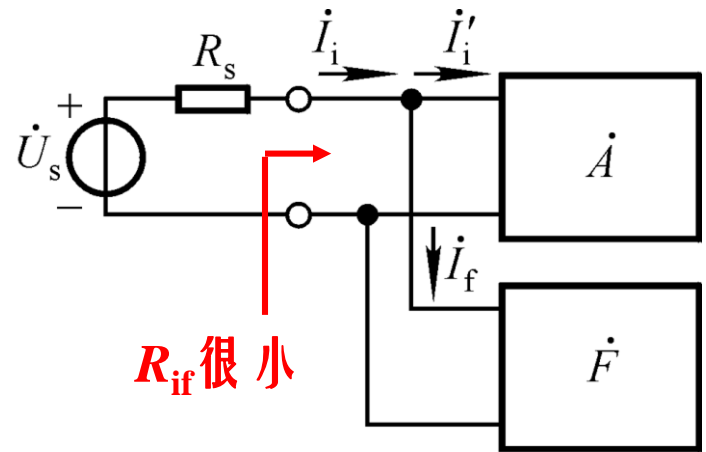
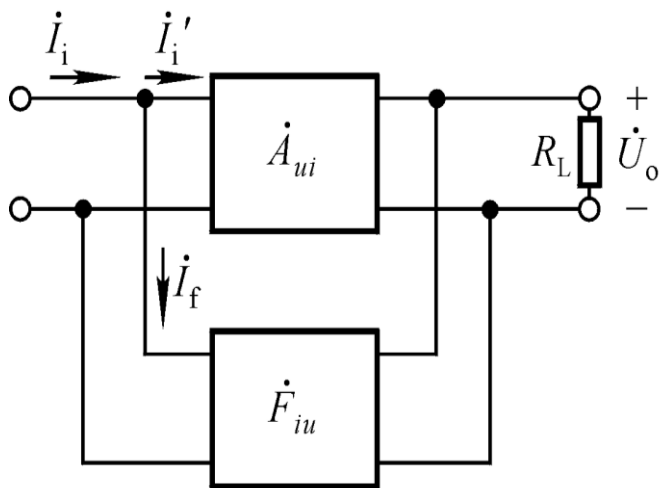
$$R'_L = R + R_L$$

➤ 环外电阻处理后，满足基本反馈方程式的函数就变成了 I'_s 和 V'_o 了，而不再是 I_s 和 V_o ；



2. 电压并联负反馈电路

(3) 深度负反馈时闭环电压增益估算



➤ 反馈网络系数

$$\dot{F}_g = \frac{\dot{I}_f}{U_o}$$

➤ 深度负反馈电压增益

为什么？

$$\dot{A}_{vsf} = \frac{U_o}{\dot{U}_s} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_s R_s} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i R_s}$$

为什么？

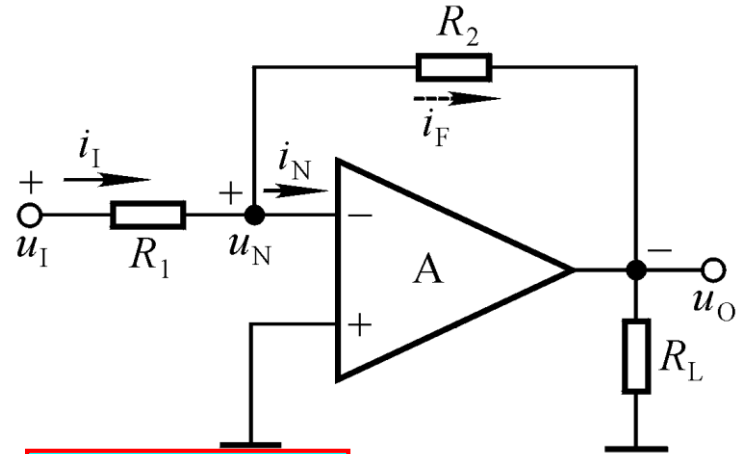
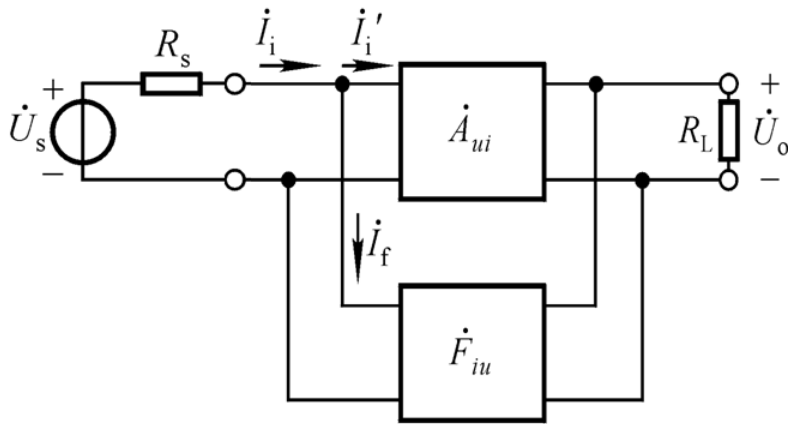
$$\approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_f R_s} = \frac{1}{\dot{F}_{iu}} \cdot \frac{1}{R_s}$$





2. 电压并联负反馈电路

(3) 深度负反馈时源电压增益估算



$$i_{R_2} = \frac{u_N - u_O}{R_2}$$

$$\text{令 } u_N = 0$$

➤ 反馈网络系数

$$\dot{F}_g = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o}$$

$$\dot{F}_{iu} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o} = -\frac{1}{R_2}$$

➤ 深度负反馈电压增益

$$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \approx \frac{1}{\dot{F}_{iu}} \cdot \frac{1}{R_s}$$

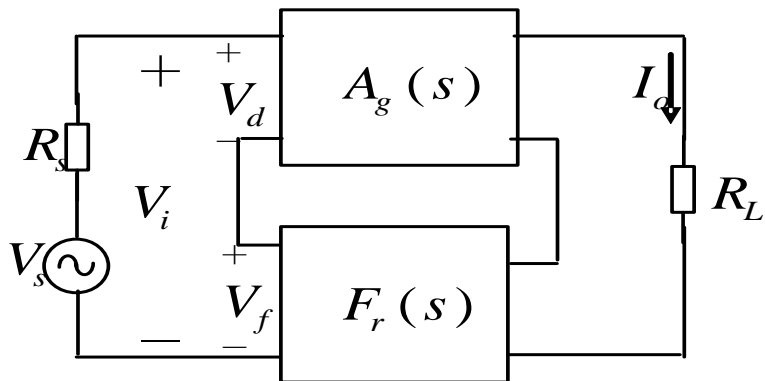
$$\dot{A}_{usf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{iu}} \cdot \frac{1}{R_s} = -\frac{R_2}{R_1}$$





3. 电流串联负反馈电路传递函数

(1) 电导传递函数



开环增益

$$A_g(s) = \frac{I_o(s)}{V_d(s)}$$

$$F_r(s) = \frac{V_f(s)}{I_o(s)}$$

闭环增益

$$A_{gf}(s) = \frac{I_o(s)}{V_i(s)} = \frac{A_g(s)}{1 + A_g(s)F_r(s)}$$

闭环源增益

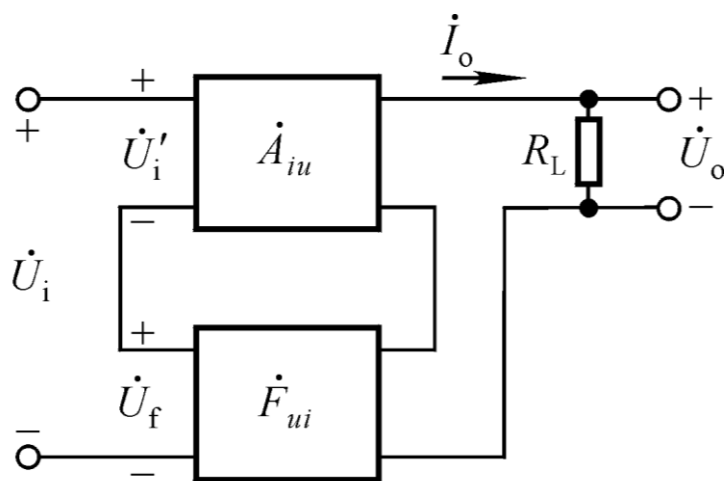
$$A_{gsf}(s) = \frac{I_o(s)}{V_s(s)} = \frac{A_{gs}(s)}{1 + A_{gs}(s)F_r(s)}$$





3. 电流串联负反馈电路传递函数

(2) 深度负反馈时电压增益估算

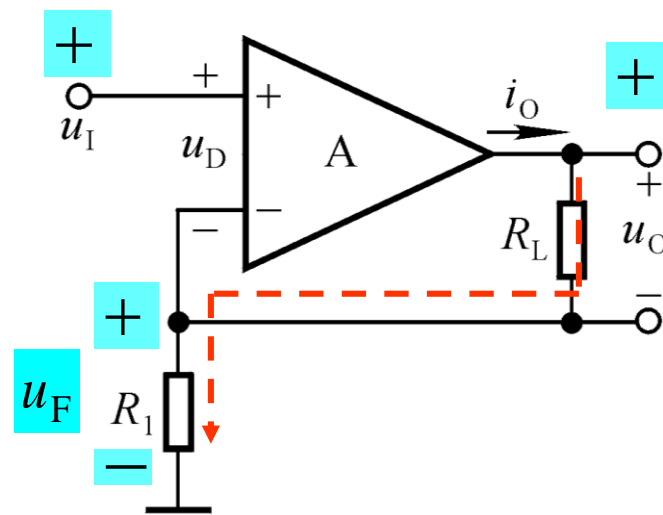


➤ 反馈网络系数

$$\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o}$$

➤ 深度负反馈电压增益

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{I}_o \cdot R'_L}{\dot{U}_f} = \frac{1}{\dot{F}_{ui}} \cdot R'_L$$



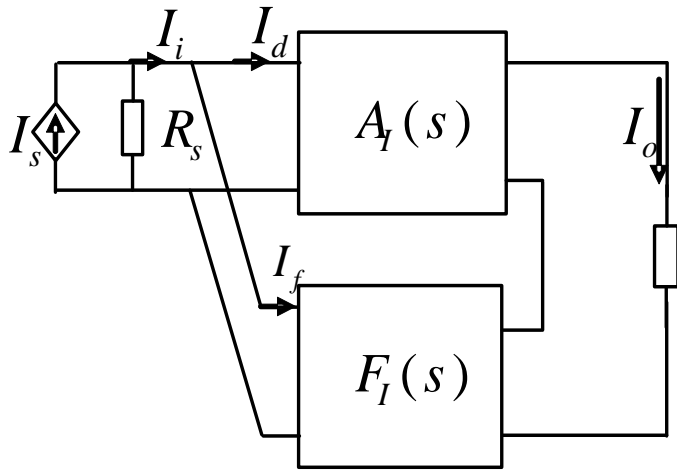
$$\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o} = R_1$$

$$\dot{A}_{uf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{ui}} \cdot R'_L = \frac{R_L}{R_1}$$





4. 电流并联负反馈电路传递函数



(1) 电流传递函数

开环增益

$$A_I(s) = \frac{I_o(s)}{I_d(s)}$$

$$F_I(s) = \frac{I_f(s)}{I_o(s)}$$

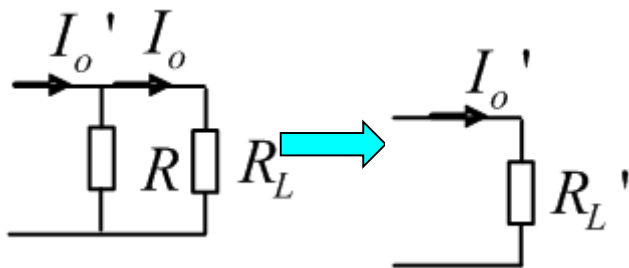
闭环增益

$$A_{If}(s) = \frac{I_o(s)}{I_i(s)} = \frac{A_I(s)}{1 + A_I(s)F_I(s)}$$

闭环源增益

$$A_{Isf}(s) = \frac{I_o(s)}{I_s(s)} = \frac{A_{Is}(s)}{1 + A_{Is}(s)F_I(s)}$$

输出端存在环外电阻



$$R_L' = R \parallel R_L$$

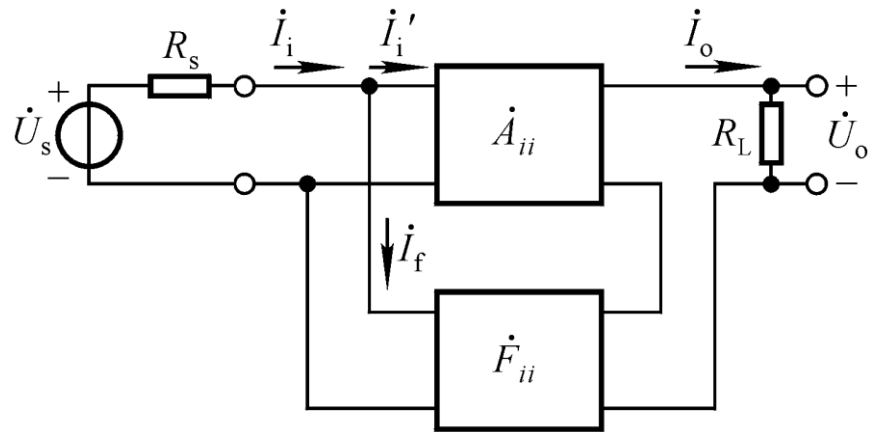
$$I_o' = I_o \cdot \frac{R + R_L}{R_L}$$





4. 电流并联负反馈电路传递函数

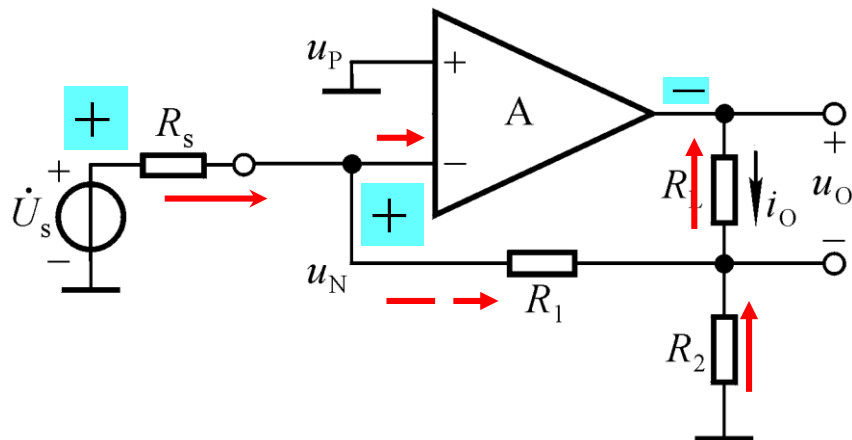
(2) 深度负反馈时源电压增益的估算



$$\dot{F}_I = \dot{I}_f / \dot{I}_o$$

$$\dot{U}_s \approx \dot{I}_f R_s, \quad \dot{U}_o = \dot{I}_o R'_L$$

$$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \approx \frac{1}{\dot{F}_{ii}} \cdot \frac{R'_L}{R_s}$$



$$\dot{F}_{ii} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o} = -\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\dot{A}_{usf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{ii}} \cdot \frac{R'_L}{R_s} = -(1 + \frac{R_1}{R_2}) \frac{R_L}{R_s}$$





5. 四种组态的电压放大倍数

■ 深度负反馈条件下四种组态负反馈放大电路的电压放大倍数

反馈组态	\dot{A}_{uf} 或 \dot{A}_{usf}
电压串联	$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = \frac{1}{\dot{F}_{uu}}$
电压并联	$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \approx \frac{1}{\dot{F}_{iu}} \cdot \frac{1}{R_s}$
电流串联	$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{1}{\dot{F}_{ui}} \cdot R'_L$
电流并联	$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \approx \frac{1}{\dot{F}_{ii}} \cdot \frac{R'_L}{R_s}$

与负载无关

近似恒压源

与总负载成
线性关系

近似恒流源

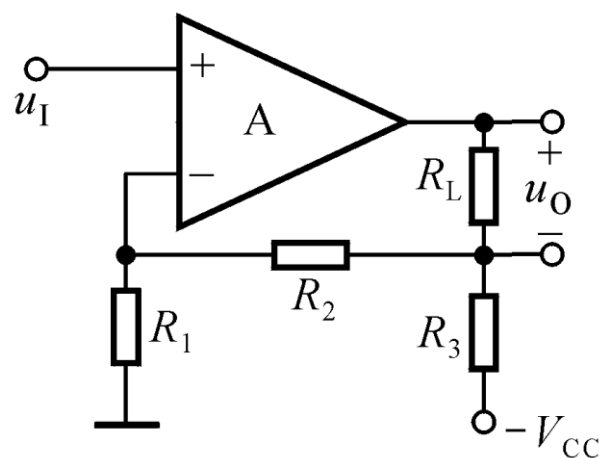
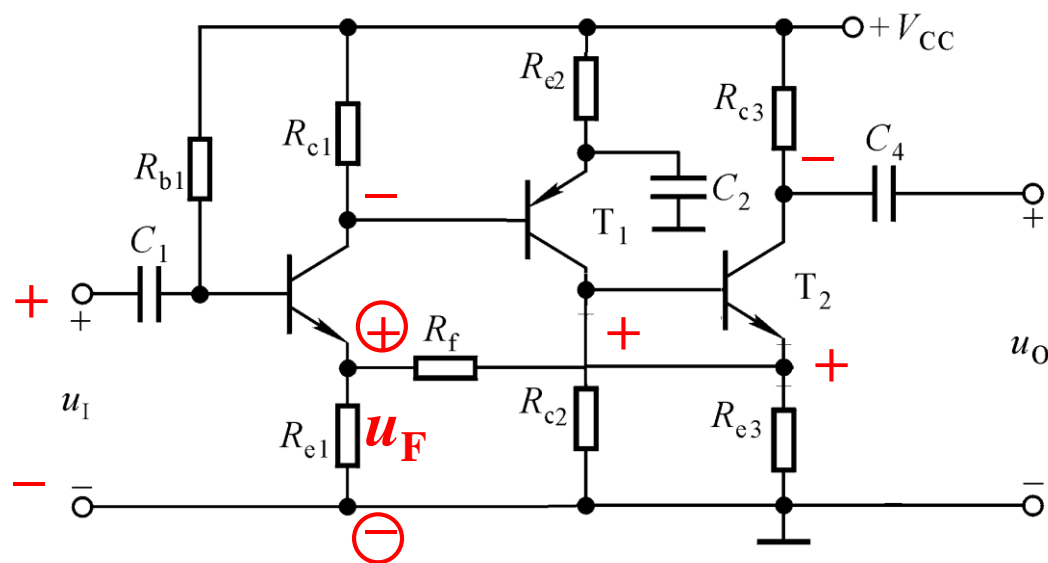
通常， \dot{A}_{uf} (\dot{A}_{usf})、 \dot{A} 、 \dot{F} 、 \dot{A}_f 符号相同。





讨论一

■ 求解在深度负反馈条件下电路的电压放大倍数。



比较两电路

电流串联负反馈

$$\dot{F} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o} = -\frac{R_{e1}R_{e3}}{R_{e1} + R_f + R_{e3}}$$

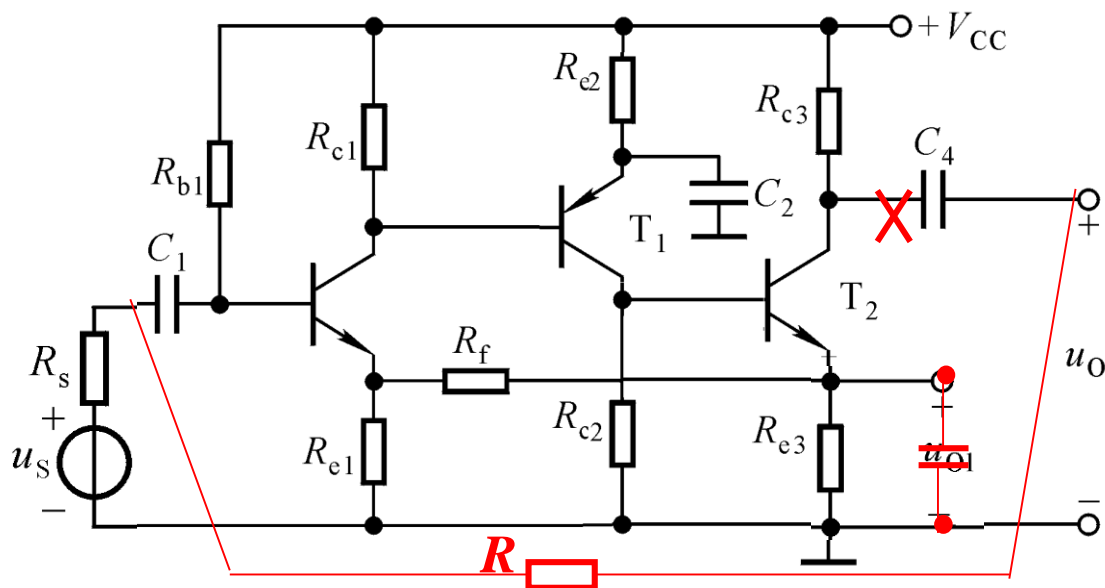
$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx -\frac{R_{e1} + R_f + R_{e3}}{R_{e1}R_{e3}} \cdot (R_{c3} // R_L)$$





讨论二

■ 求解在深度负反馈条件下电路的电压放大倍数。



$$\dot{A}_{uf} = 1 + \frac{R_f}{R_{e1}}$$

$$\dot{A}_{usf} = -\frac{R}{R_s}$$

1. 第三级从射极输出；

电压串联负反馈

2. 若在第三级的射极加旁路电容，且在输出端和输入端跨接一电阻。

电压并联负反馈





§ 6.3 交流负反馈对放大电路性能的影响

- 一、提高增益的稳定性
- 二、改变输入电阻和输出电阻
- 三、展宽频带
- 四、减小非线性失真
- 五、引入负反馈的一般原则





一、提高增益的稳定性

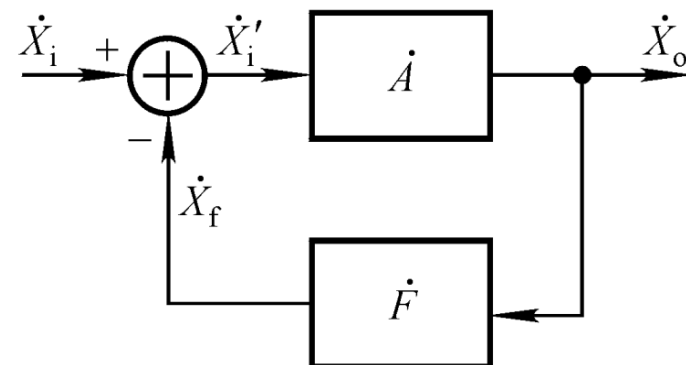
➤ 在中频段，放大倍数、反馈系数等均为实数。

$$A_f(0) = \frac{A(0)}{1 + A(0)F(0)}$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_f}{dA} &= \frac{1}{1 + AF} - \frac{AF}{(1 + AF)^2} \\ &= \frac{1 + AF - AF}{(1 + AF)^2} = \frac{1}{(1 + AF)^2} \end{aligned}$$

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

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



➤ 闭环增益相对变化量减小到开环基本放大电路增益的 $\frac{1}{D(0)}$ ；

➤ 闭环增益稳定性是开环基本放大电路增益的 $D(0)$ 倍。



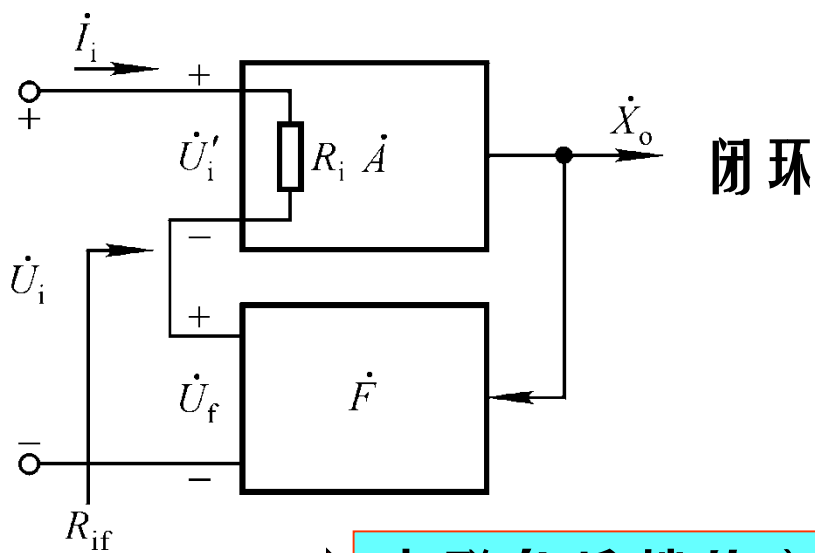


二、改变输入阻抗和输出阻抗

1. 对输入电阻的影响

对输入电阻的影响仅与反馈网络和基本放大电路在输入端的接法有关，即决定于是串联反馈还是并联反馈。

引入串联负反馈时



开环

$$R_i = \frac{U_i |_{U_f=0}}{I_i} = \frac{U_i'}{I_i}$$

闭环

$$R_{if} = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i' + U_f}{I_i} = \frac{U_i' + AFU_i'}{I_i}$$

$$R_{if} = (1 + AF)R_i = DR_i$$

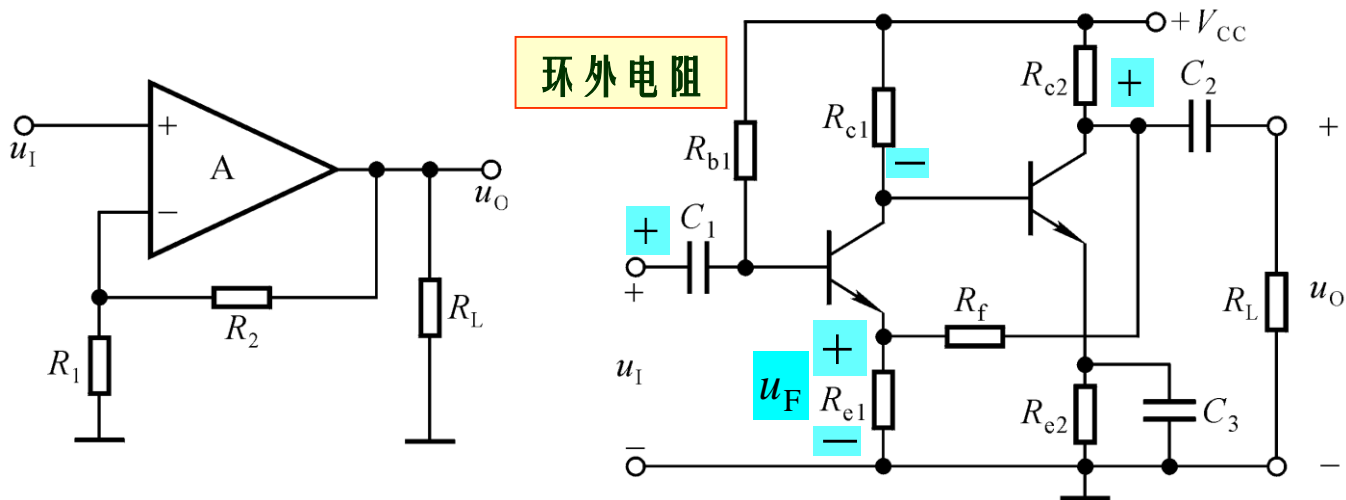


串联负反馈输入电阻增大到原来的 $(1 + AF)$ 倍。





2. 串联负反馈对输入电阻影响的讨论



- 引入串联负反馈，图示两电路输入电阻所产生的影响一样码？
- R_{b1} 支路在引入反馈前后对输入电阻的影响有无变化？

引入串联负反馈，使引入**反馈的支路**的等效电阻增大到原来的 $(1 + AF)$ 倍。

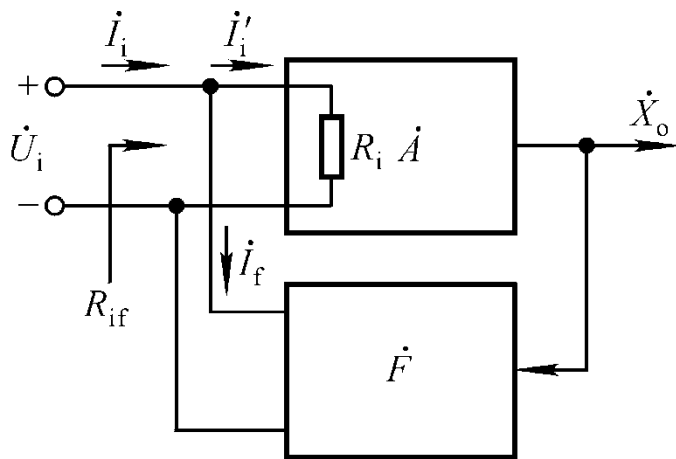
$$\rightarrow R'_{if} = (1 + AF)R'_i \quad R_{if} = R'_{if} \parallel R_{b1}$$





2. 并联负反馈对输入电阻影响

引入并联负反馈时

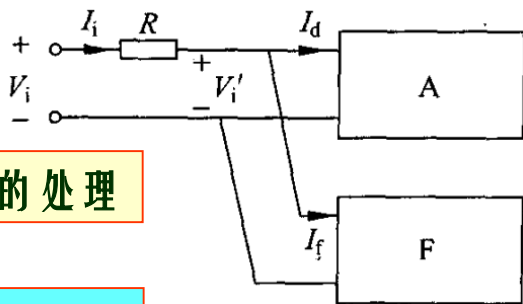


开环 $R_i = \frac{U_i}{I_i'}$

闭环 $R_{if} = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{I_i' + I_f} = \frac{U_i}{I_i' + AF I_i'}$

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

串联负反馈增大输入电阻，并联负反馈减小输入电阻。



环外电阻的处理

$$R_{if}' = \frac{R_i'}{D}$$

$$R_{if} = R_{if}' + R$$

在 $(1 + AF) \rightarrow \infty$ 时

引入串联负反馈 R_{if} (或 R_{if}') $\rightarrow \infty$,
引入并联负反馈 $R_{if} \rightarrow 0$ 。





2. 对输出电阻的影响

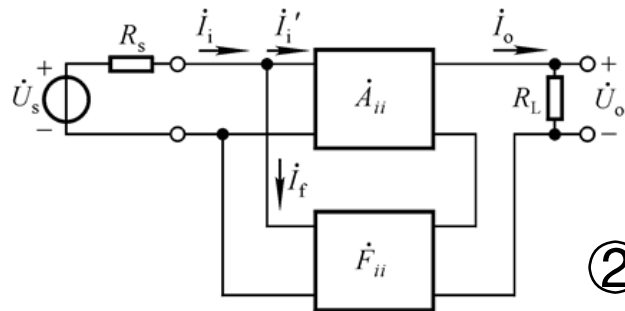
■ 对输出电阻的影响仅与反馈网络和基本放大电路在输出端的接法有关，即决定于是电压反馈还是电流反馈。

$$R_o = \frac{V_{\infty}}{I_{o0}}$$

$$R_{of} = \frac{V_{of\infty}}{I_{of0}}$$

► 电流负反馈

① 输出电阻 R_o 为开路电压与短路电流之比；



开路时， $I_o=0$ ，断开 F 和 R_L ，相当于 F 网络不存在：

$$V_{of\infty} = V_{\infty}$$

② R_o 与信号源内阻 R_s 有关，故取源增益 A_s 和 $D_s = 1 + A_s F$ ；

输出短路时，开环：

$$I_{o0} = A_{s0} x_s$$

闭环：

$$I_{of0} = A_{sf0} x_s$$

x_s 表示电压或电流

$$\begin{aligned} \rightarrow A_{sf0} &= \frac{A_{s0}}{1 + A_{s0} F} & \frac{I_{of0}}{I_{o0}} &= \frac{A_{sf0}}{A_{s0}} = \frac{1}{1 + A_{s0} F} = \frac{1}{(D_s)_0} \rightarrow R_{of} = (D_s)_0 R_o \end{aligned}$$

■ 电流负反馈稳定输出电流，使输出具有恒流特性，因而输出电阻增大。

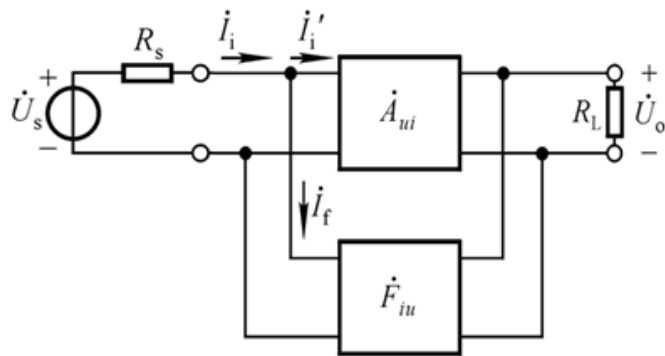




2. 对输出电阻的影响

■ 对输出电阻的影响仅与反馈网络和基本放大电路在输出端的接法有关，即决定于是电压反馈还是电流反馈。

➤ 电压负反馈时



① 输出短路时， $V_o=0$ ，相当于 F 网络去掉；

$$I_{of0} = I_{o0}$$

② 输出开路时，

开环：

$$A_{s\infty} = \frac{V_{o\infty}}{x_s}$$

闭环：

$$A_{sf\infty} = \frac{V_{of\infty}}{x_s}$$

$$\begin{aligned} A_{sf\infty} &= \frac{A_{s\infty}}{1+A_{s\infty}F} \rightarrow \frac{V_{o\infty}}{V_{of\infty}} = \frac{A_{s\infty}}{A_{sf\infty}} = 1+A_{s\infty}F = (D_s)_\infty \rightarrow R_{of} = \frac{R_o}{(D_s)_\infty} \end{aligned}$$

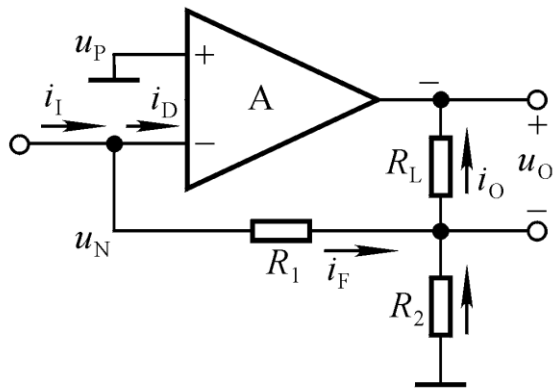
■ 电压负反馈稳定输出电压，使输出具有恒压特性，因而输出电阻减小。



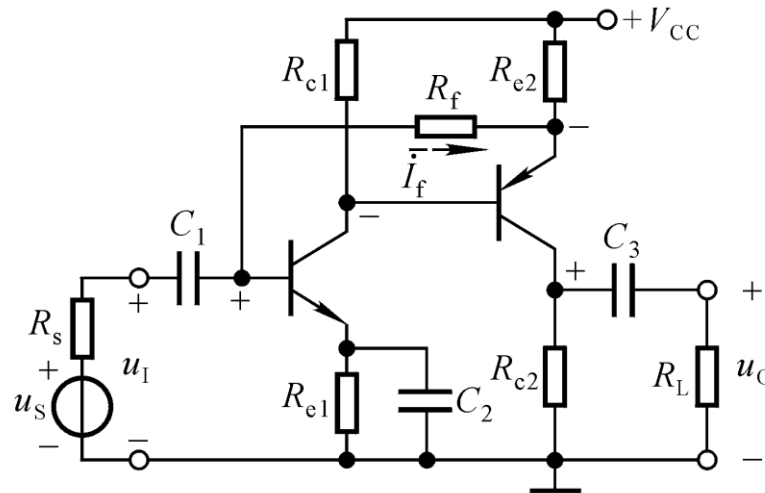


2. 电流负反馈对输出电阻影响的讨论

■ R_{c2} 支路在引入反馈前后对输出电阻的影响有无变化？

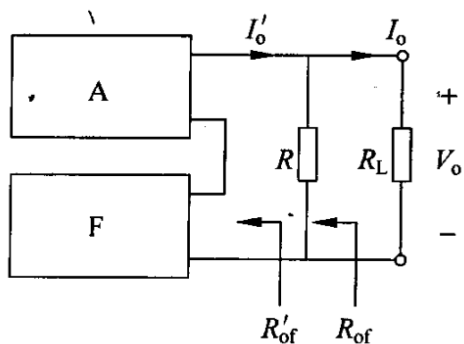


(a)



(b)

引入电流负反馈，使引出反馈的支路的等效电阻增大到原来的 $(1 + AF)$ 倍。



环外电阻的处理

$$R_{of}' = (1 + AF)R_o'$$

$$R_{of} = R_{of}' \parallel R$$

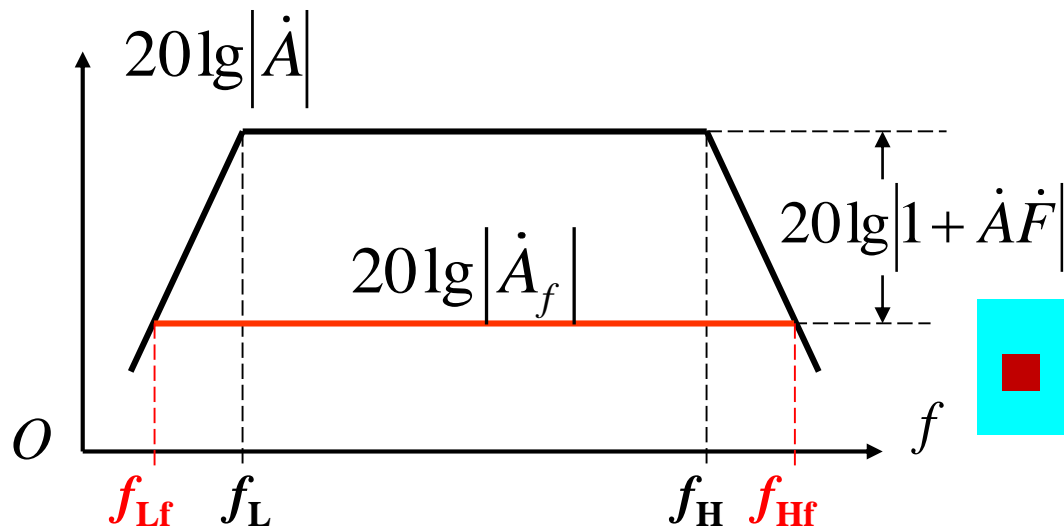
在反馈深度 $(1 + AF) \rightarrow \infty$ 时
引入电压负反馈 $R_{of} \rightarrow 0$;
引入电流负反馈 R_{of} (或 R_{of}') $\rightarrow \infty$ 。





三、展宽频带

- 设反馈网络F是纯电阻网络，开环增益A的上限截止频率 ω_h ：



低通函数

$$\dot{A}_H(S) = \frac{\dot{A}_0}{1 + \frac{S}{\omega_h}}$$

- 闭环增益 A_f 上限截止频率 ω_{hf} ：

$$\dot{A}_f(S) = \frac{\dot{A}_H(S)}{1 + \dot{A}_H(S)\dot{F}_0}$$

$$\text{令 } D = 1 + \dot{A}_H(S)\dot{F}_0 = 0 \quad \dot{A}_H(S)\dot{F}_0 = -1$$

$$\frac{\dot{A}_0 F_0}{1 + \frac{S}{\omega_h}} = -1$$

$$\dot{A}_0 F_0 = -1 - \frac{S}{\omega_h}$$

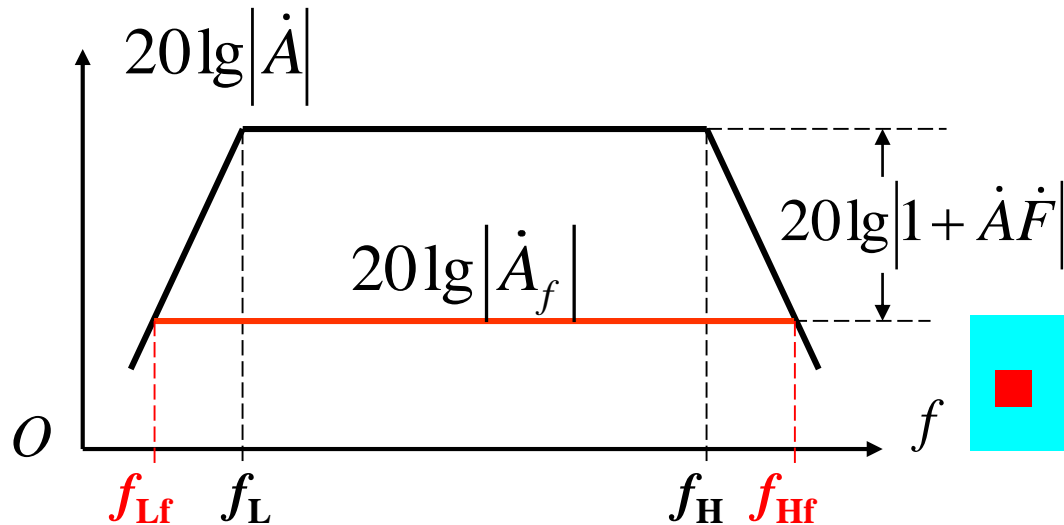
$$S = -(1 + \dot{A}_0 F_0)\omega_h \Rightarrow \omega_{hf} = D_0 \omega_h$$





三、展宽频带

■ 设反馈网络F是纯电阻网络，开环增益A的下限截止频率 ω_l ：



高通函数

$$\dot{A}_L(S) = \frac{\dot{A}_o}{1 + \frac{\omega_l}{S}}$$

■ 闭环增益 A_f 下限截止频率 ω_{lf} ：

$$\dot{A}_f(S) = \frac{\dot{A}_L(S)}{1 + \dot{A}_L(S)\dot{F}_0}$$

令 $D = 1 + \dot{A}_L(S)\dot{F}_0 = 0$ $\dot{A}_L(S)\dot{F}_0 = -1$

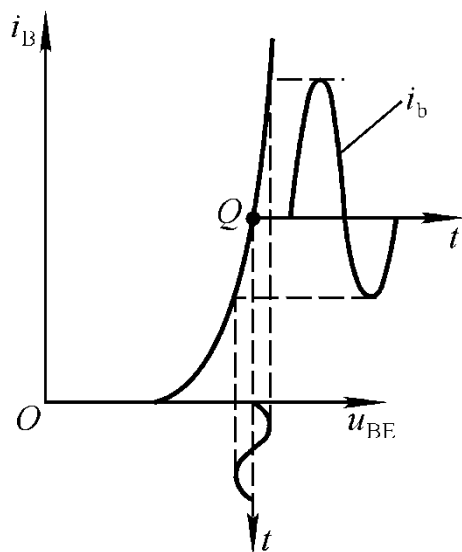
$$\frac{\dot{A}_o F_0}{1 + \frac{\omega_l}{S}} = -1 \quad \dot{A}_o F_0 = -1 - \frac{\omega_l}{S} \quad S = -\frac{\omega_l}{(1 + \dot{A}_o F_0)} \Rightarrow \omega_{lf} = \frac{\omega_l}{D_0} \Rightarrow \omega_{bwf} = D_0 \omega_{bw}$$

⇒ 闭环系统与开环系统相比，3dB截止频率有严格的 D_0 倍关系。



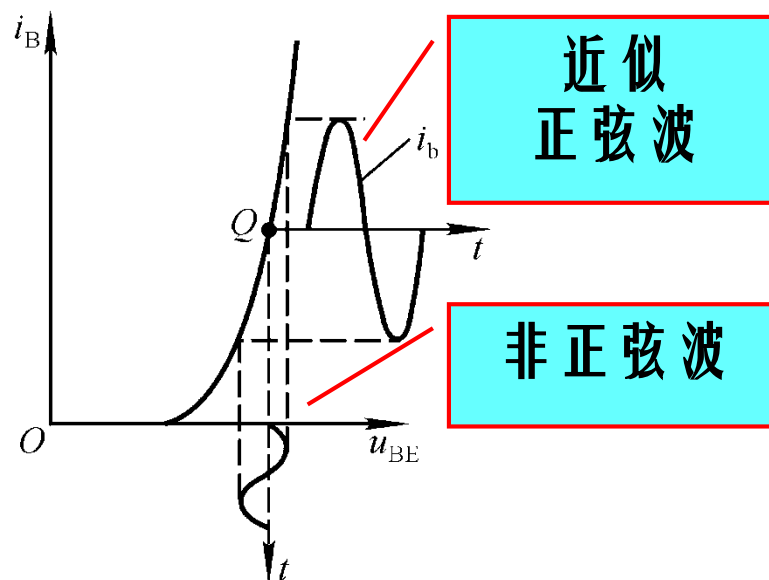


四、减小非线性失真



■ 由于晶体管输入特性的非线性，当b-e间加**正弦波**信号电压时，基极电流的变化**不是正弦波**。（**正半周较大**）

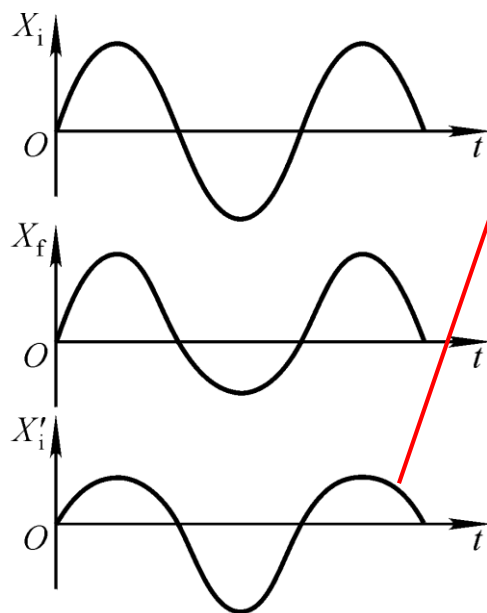
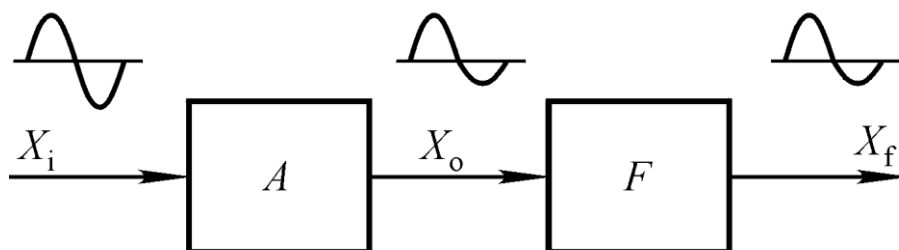
■ 可以设想，若加在b-e之间的电压**正半周幅值小于负半周**的幅值，则其电流失真会减小，甚至为正弦波。





四、减小非线性失真

■ 设基本放大电路的输出信号与输入信号同相。



净输入信号的正半周幅值小于负半周幅值

可以证明，在引入负反馈前后，输出量基波幅值相同的情况下，非线性失真减小到基本放大电路的 $1/(1 + AF)$ 。

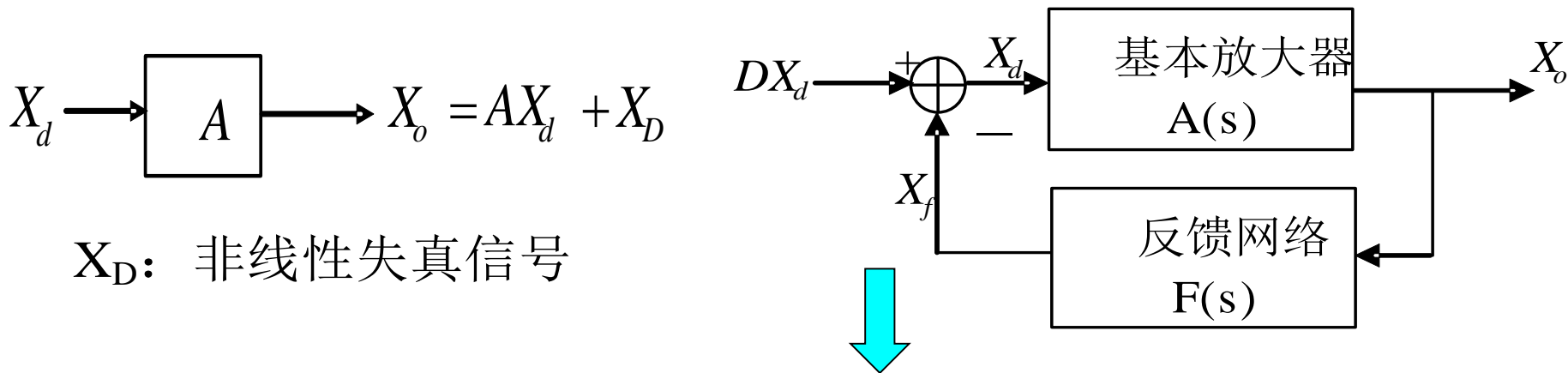
负反馈只能改善放大器本身产生的失真，对输入信号的失真无改善





四. 改善非线性失真

■ 前提条件：在负反馈加入前后，保证基本放大器的**相同输入**都有**相同的非线性失真**。



$$X_o = AX_d + X_D = A(DX_d - X_f) + X_D = ADX_d - AFX_o + X_D$$

$$\Rightarrow X_o = AX_d + \frac{X_D}{D}$$

有用信号不变，而谐波失真减小了 D 倍。





五、引入负反馈的一般原则

- 稳定静态Q点应引入直流负反馈，改善动态性能应引入交流负反馈；
- 根据负载需要，需输出稳定电压（即减小输出电阻）的应引入电压负反馈，需输出稳定电流（即增大输出电阻）的应引入电流负反馈；
- 根据信号源特点，增大输入电阻应引入串联负反馈，减小输入电阻应引入并联负反馈；
- 从信号转换关系看，输出电压是输入电压受控源的为电压串联负反馈，输出电压是输入电流受控源的为电压并联负反馈，输出电流是输入电压受控源的为电流串联负反馈，输出电流是输入电流受控源的为电流并联负反馈；当 $(1 + AF) \gg 1$ 时，它们的转换系数均约为 $1/F$ 。

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





讨论一

■ 为减小放大电路从信号源索取的电流，增强带负载能力，应引入什么反馈？

电压串联负反馈

电流并联负反馈

■ 为了得到稳定的电流放大倍数，应引入什么反馈？

■ 为了稳定放大电路的静态工作点，应引入什么反馈？

直流
负反馈

■ 为了使电流信号转换成与之成稳定关系的电压信号，应引入什么反馈？

电压并联负反馈

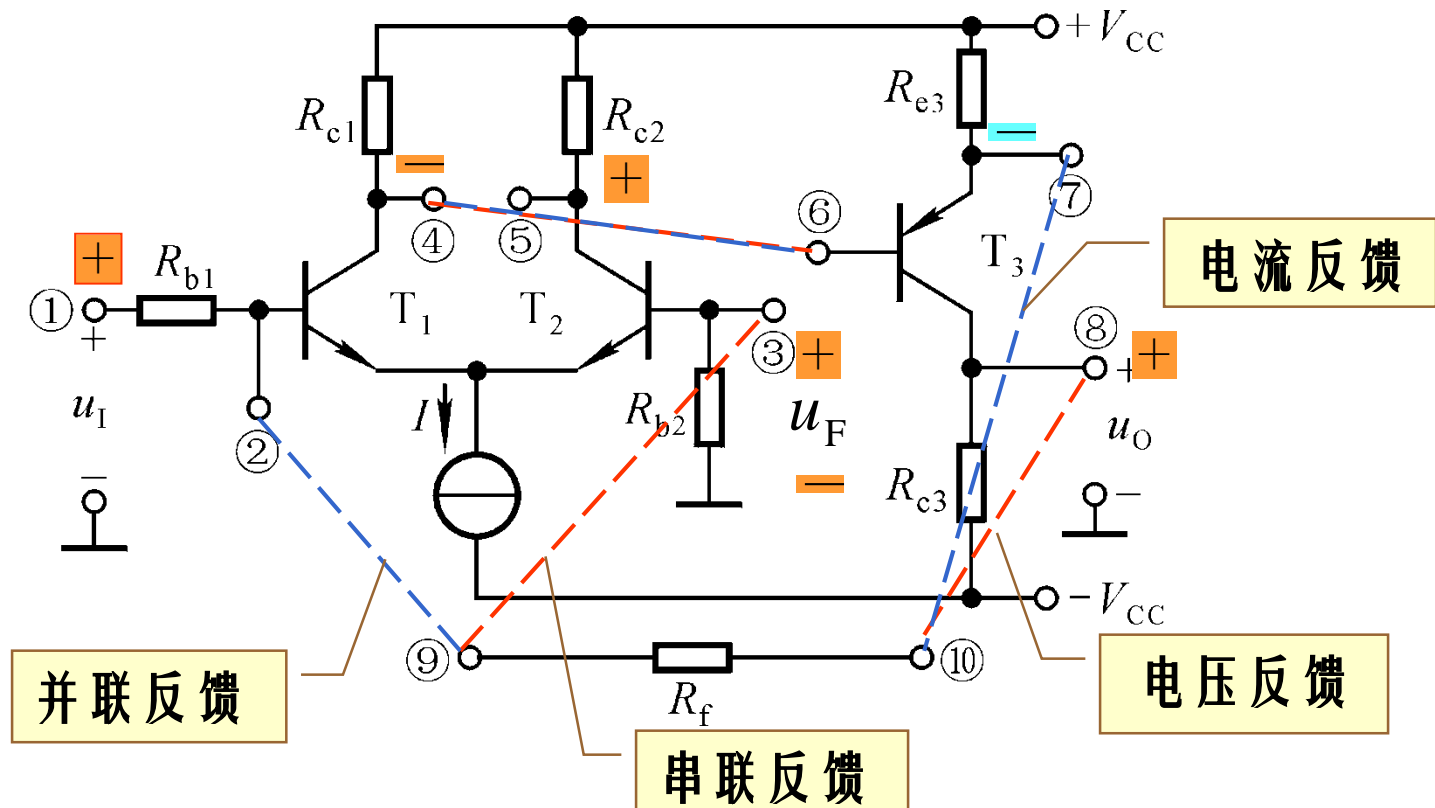
■ 为了使电压信号转换成与之成稳定关系的电流信号，应引入什么反馈？

电流串联负反馈





讨论二



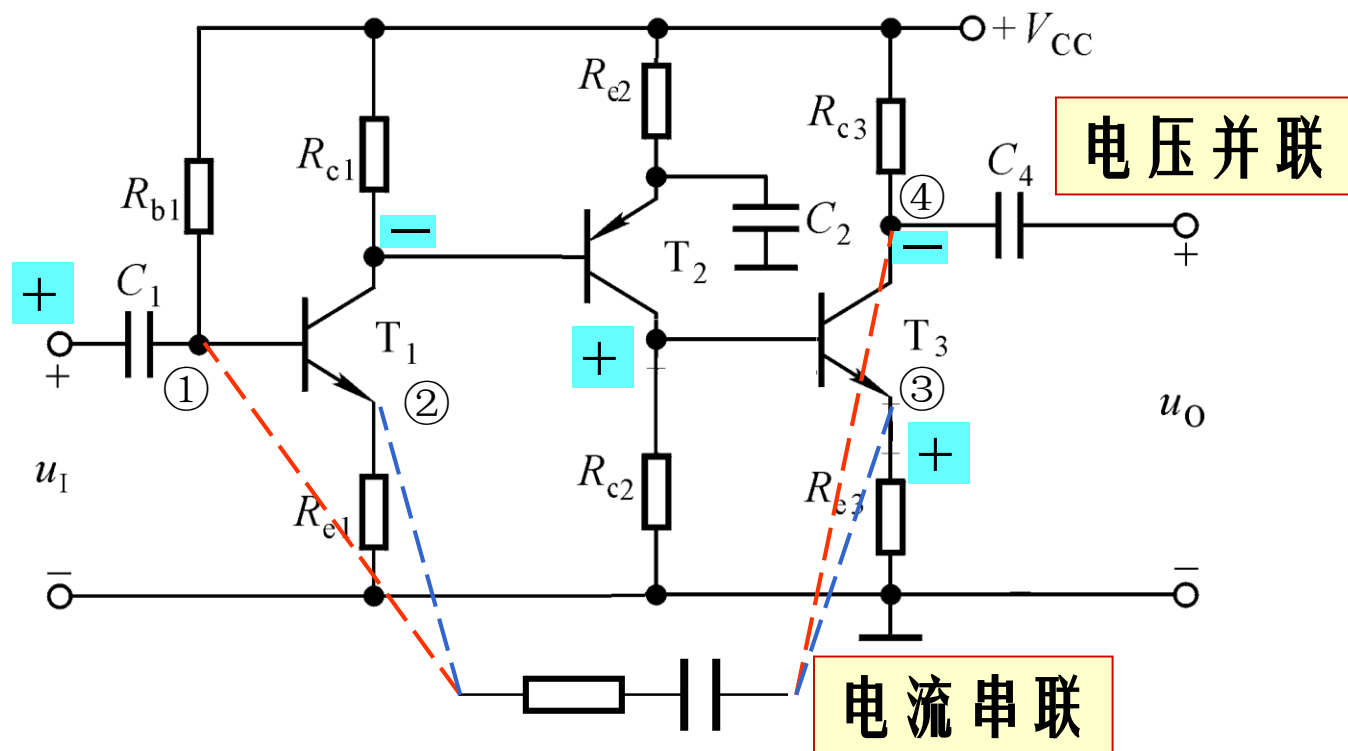
试在图示电路中分别引入四种不同组态的交流负反馈。





讨论三

■ 在图示电路中能够引入哪些组态的交流负反馈？



只可能引入电流串联或电压并联两种组态的交流负反馈。

