

## 第5章 放大电路中的反馈

### 本章要求:

- 一、能够判断电路中是否引入了反馈及反馈的性质，若为交流负反馈，再判断属于哪种组态；
- 二、理解负反馈放大电路的一般表达式及不同反馈组态的物理意义；
- 三、掌握基于理想运放的深度负反馈放大电路放大倍数的分析；
- 四、掌握负反馈对放大电路性能的影响；
- 五、理解负反馈放大电路产生自激振荡的原因、条件和判断方法。

# 目 录

5.1 反馈的基本概念及判断方法

5.2 负反馈放大电路的四种基本组态

5.3 负反馈放大电路的方块图及一般表达式

5.4 深度负反馈放大电路放大倍数的分析

5.5 负反馈对放大电路性能的影响

5.6 负反馈放大电路的稳定性

5.7 放大电路中其它形式的反馈

## 5.1 反馈的基本概念及判断方法

目的是通过输出对输入的影响来改善系统的运行状况及控制效果。

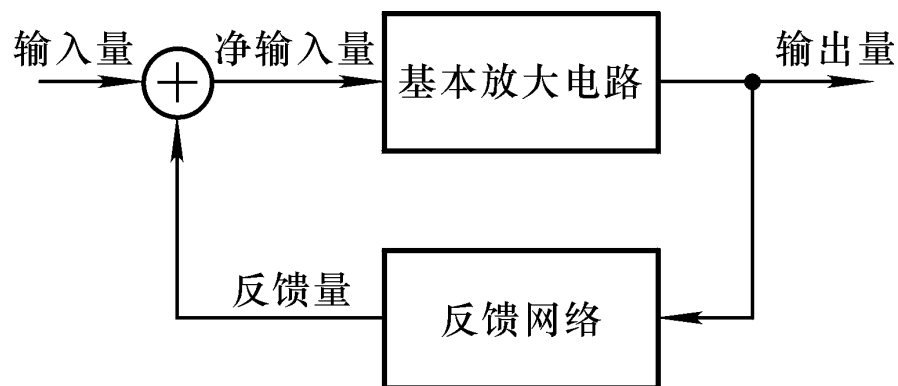
### 一、什么是反馈

在电子电路中，将输出量的一部分或全部通过一定的电路形式引回到输入回路，用来影响输入量，称为反馈。

从输出电压  
还是输出电  
流引出反馈

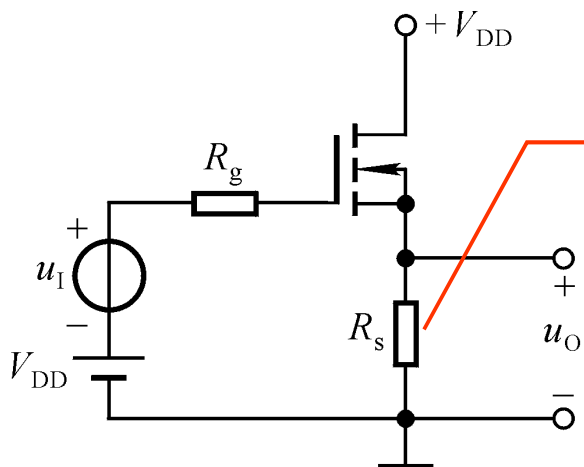
影响输入  
电压还是  
输入电流

### 反馈放大电路的方块图

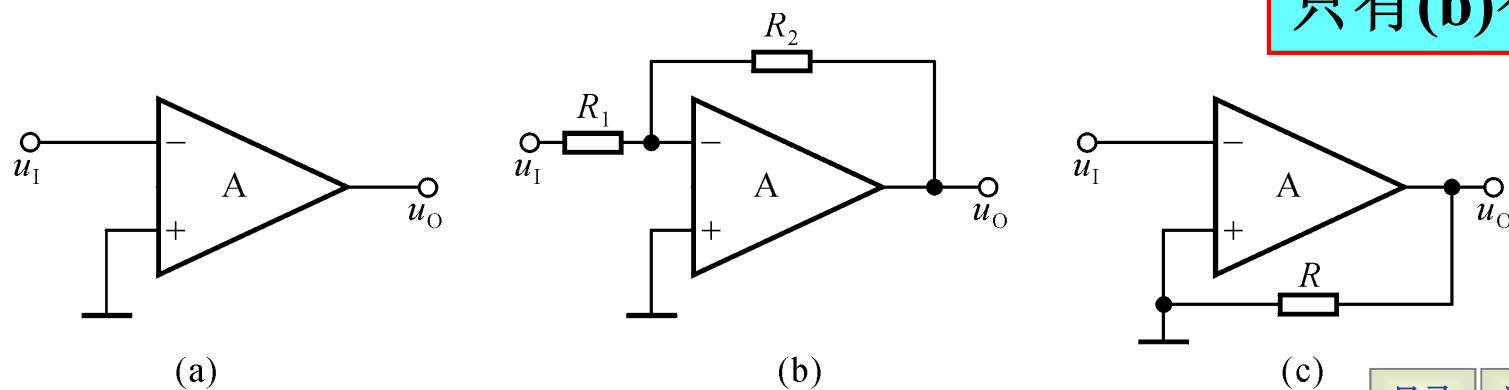


## 有无反馈的判断

**“找联系”**：找将输出回路与输入回路相连接的通路，若有则有反馈，否则无反馈。



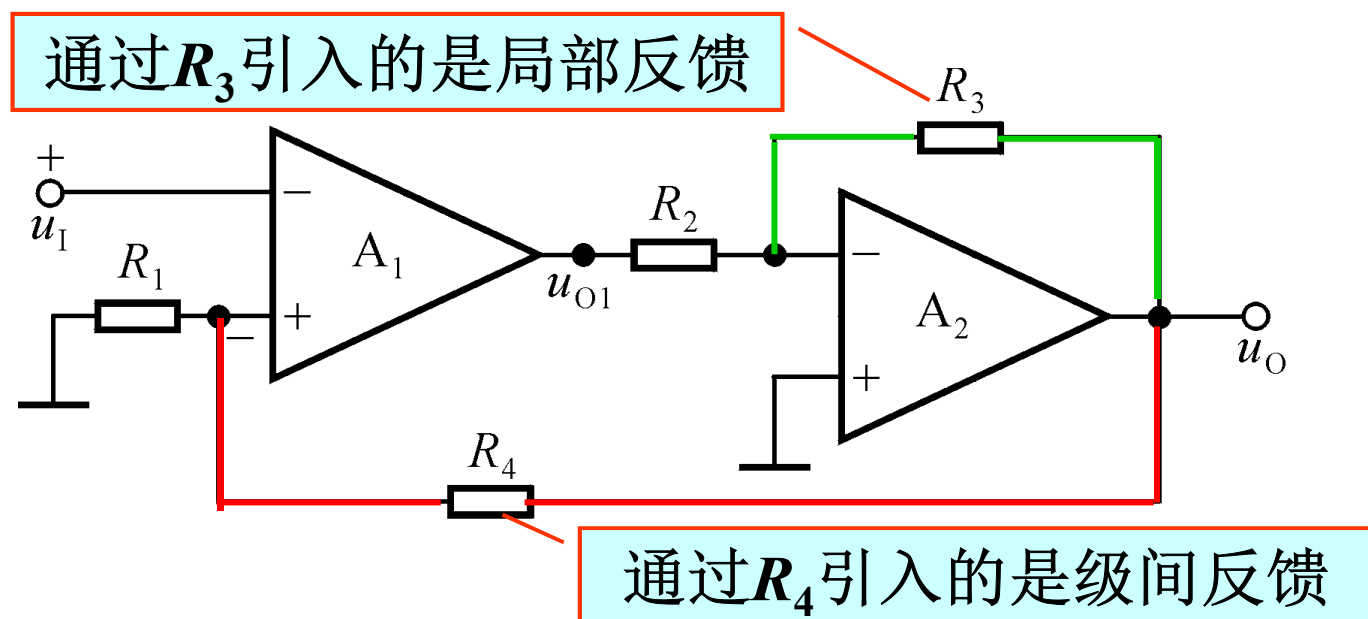
既在输入回路又在输出回路，因而引入了反馈。



只有(b)有反馈

## 二、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。

### 三、直流反馈和交流反馈

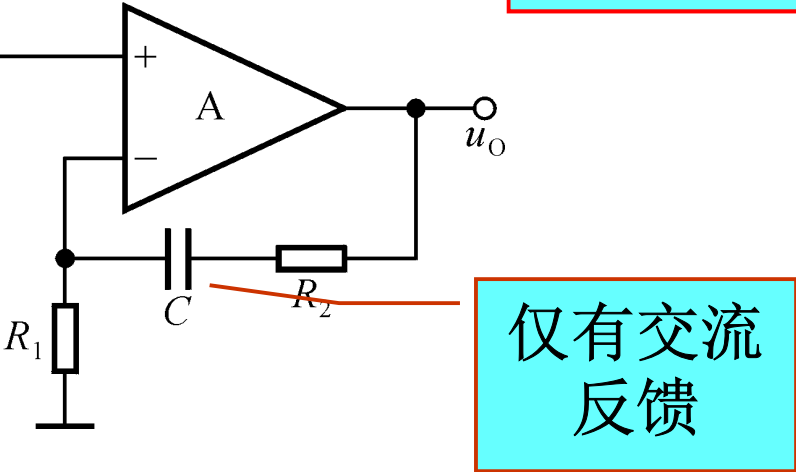
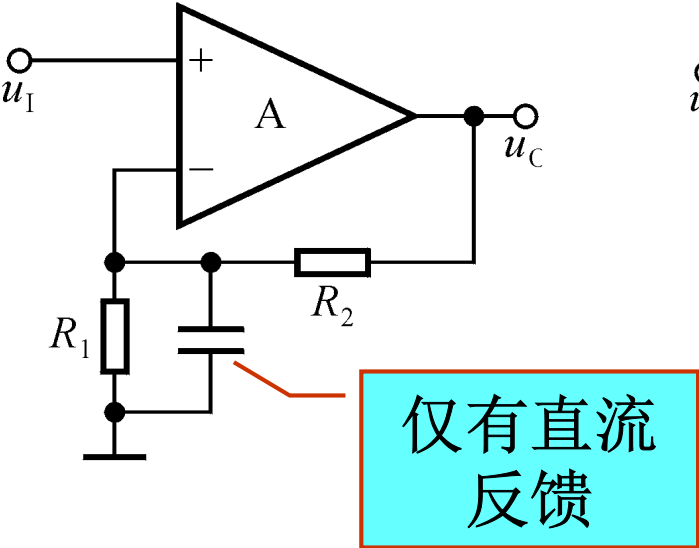
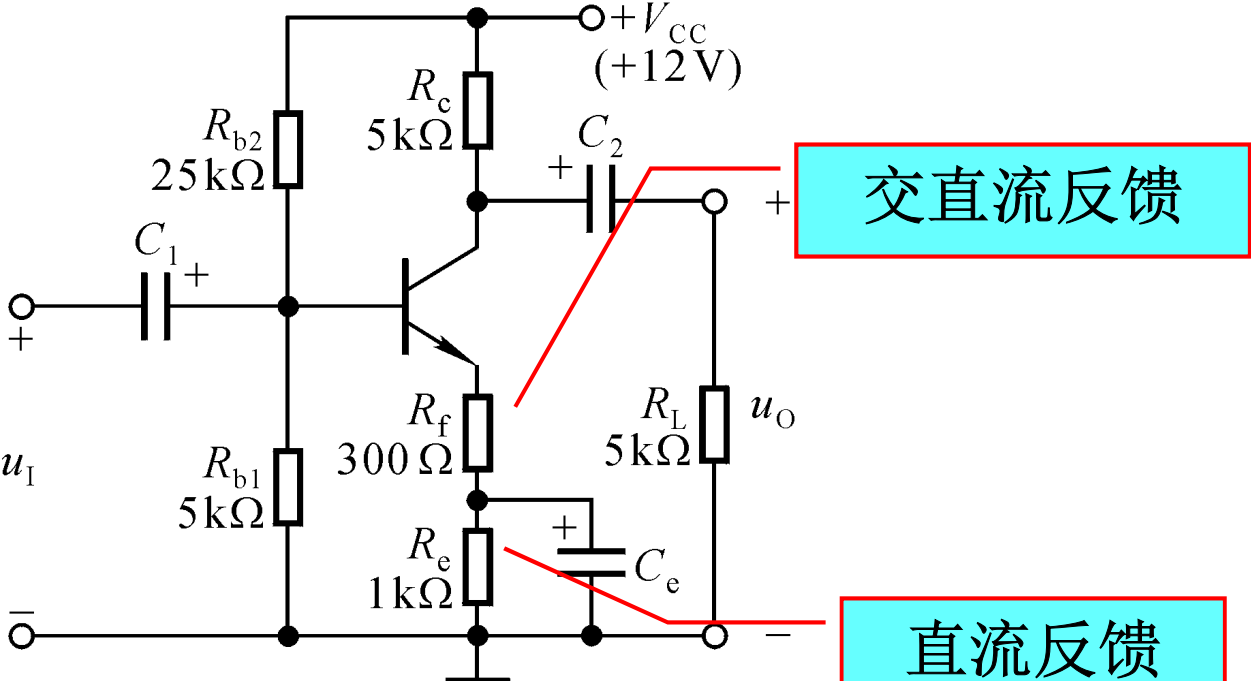
如果反馈量中只含有直流量，则称为直流反馈；  
如果反馈量中只含有交流量，则称为交流反馈。  
或者，仅在直流通路中存在的反馈称为直流反馈，  
仅在交流通路中存在的反馈称为交流反馈。常常是交、直流反馈共存。

### 直流反馈与交流反馈的判断

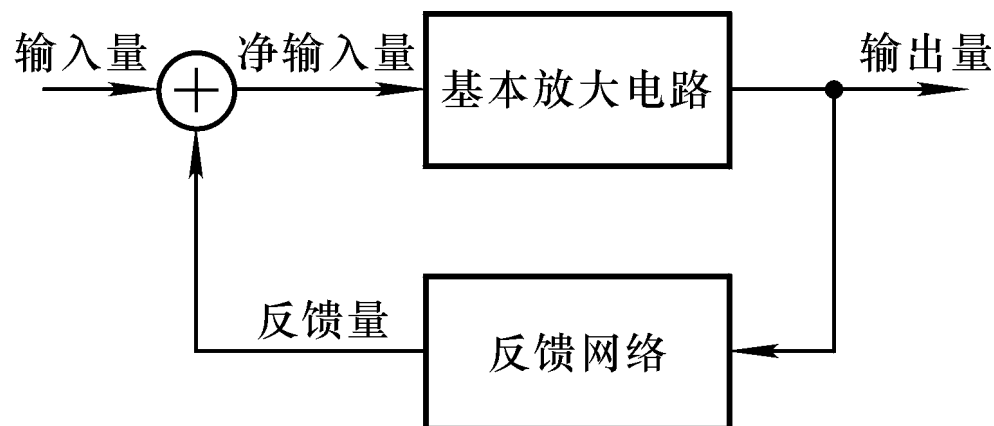
“看通路”：看反馈是存在于直流通路还是交流通路。

5.1 反馈的基本概念及判断方法

电容对交流  
信号可视为  
短路



## 四、正反馈和负反馈



从反馈的效果来看，使净输入量减小的为负反馈，否则为正反馈。

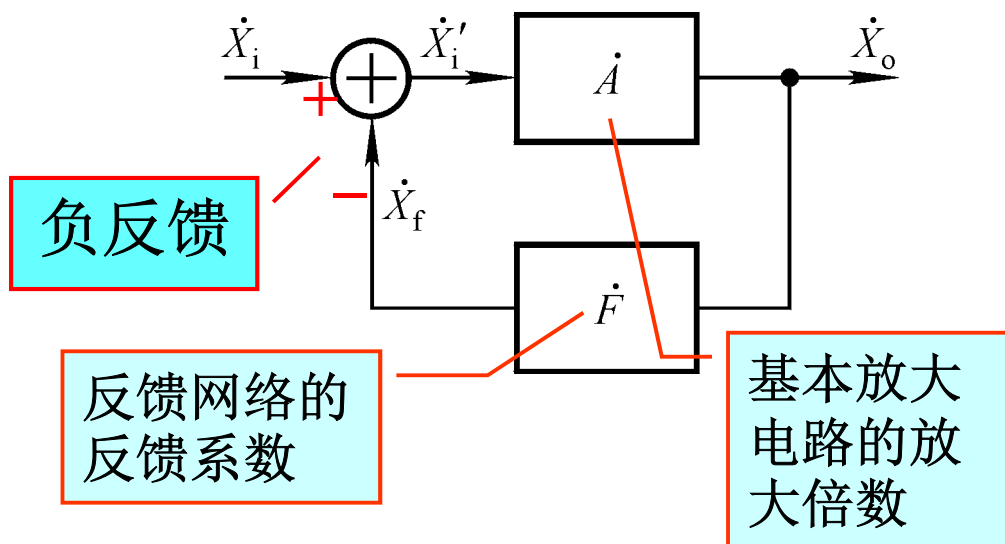
或者，反馈的结果使输出量的变化减小的为负反馈，否则为正反馈；

**引入负反馈能稳定输出量：**引入直流负反馈能稳定直流输出量（即静态工作点）；引入交流负反馈能稳定交流输出量，但会使电路的放大能力下降。引入交流正反馈会使电路的放大能力提高。



## 正负反馈（反馈极性）的判断

“看反馈的效果”：使净输入量增大还是减小。



瞬时极性法：

给定  $\dot{X}_i$  对地的瞬时极性，并以此为依据对放大电路逐级判断各电流的流向和电位的极性，从而得到  $\dot{X}_o$  的极性

根据  $\dot{X}_o$  的极性，通过反馈网络判断出  $\dot{X}_f$  的极性，再比较

$\dot{X}_i$ 、 $\dot{X}_f$ 、 $\dot{X}_i'$  的叠加关系：

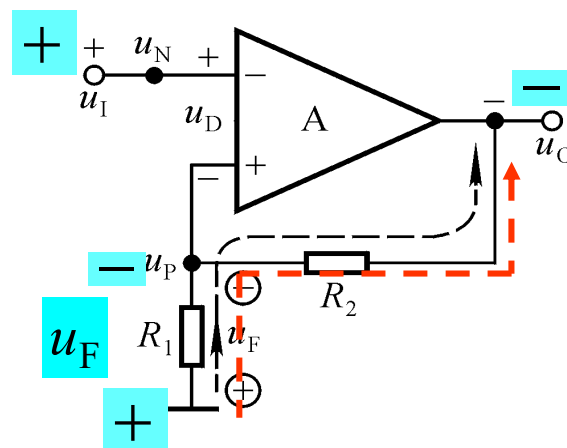
$$\dot{X}_i' = \dot{X}_i - \dot{X}_f$$

——负反馈

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

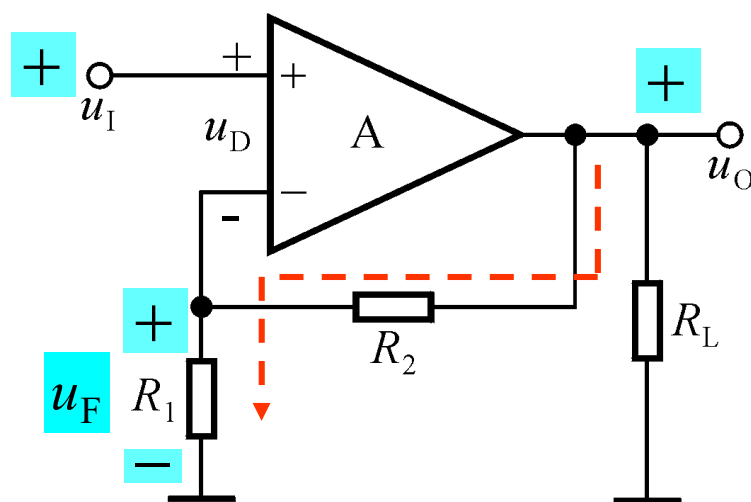
——正反馈

## 判断集成运放组成的放大电路的反馈极性



净输入电压  $u_D = u_N - u_P = u_I + u_F$ ,  
 $\therefore$  是正反馈

## 5.1 反馈的基本概念及判断方法



净输入电压  $u_D = u_I - u_F$ ,  
 $\therefore$  是负反馈

反馈量与输入量以电压方式  
相叠加，为串联反馈。

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

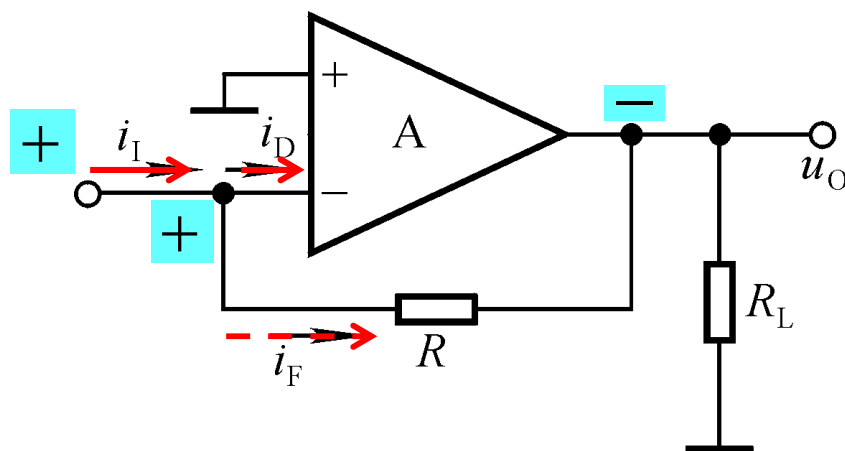
反馈量仅仅由输出量决定，  
而与输入量无关。

反馈量取自输出电压，与输出  
电压成正比，为电压反馈。

反馈量实质上是对输出量的采样，  
其数值与输出量成正比。

电路引入了直流负反馈和交流电压串  
联负反馈

## 5.1 反馈的基本概念及判断方法



净输入电流  $i_D = i_I - i_F$ ,  
 $\therefore$  是负反馈

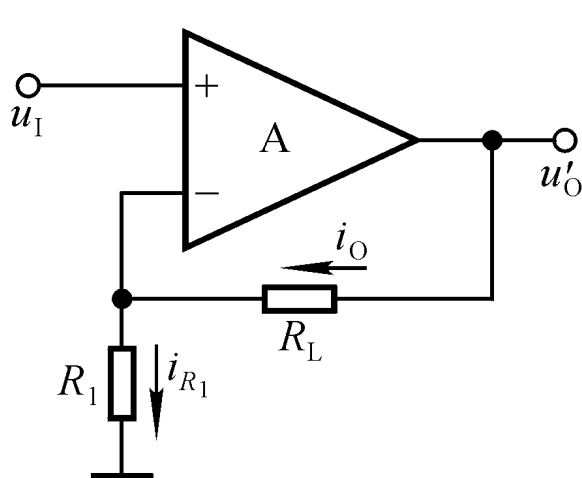
反馈量与输入量以电流方式  
相叠加，为并联反馈。

$$i_F = -\frac{u_O}{R}$$

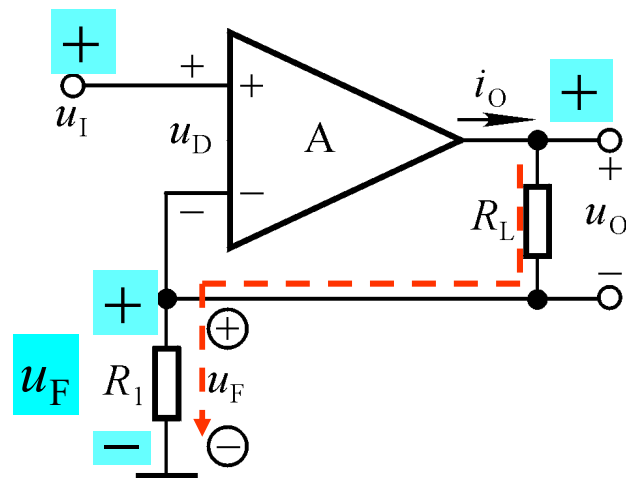
反馈量取自输出电压，  
为电压反馈。

电路引入了直流负反馈和交流电压并联  
负反馈

## 5.1 反馈的基本概念及判断方法



(a)



(b)

净输入电压  $u_D = u_I - u_F$ ,  
 $\therefore$  是负反馈

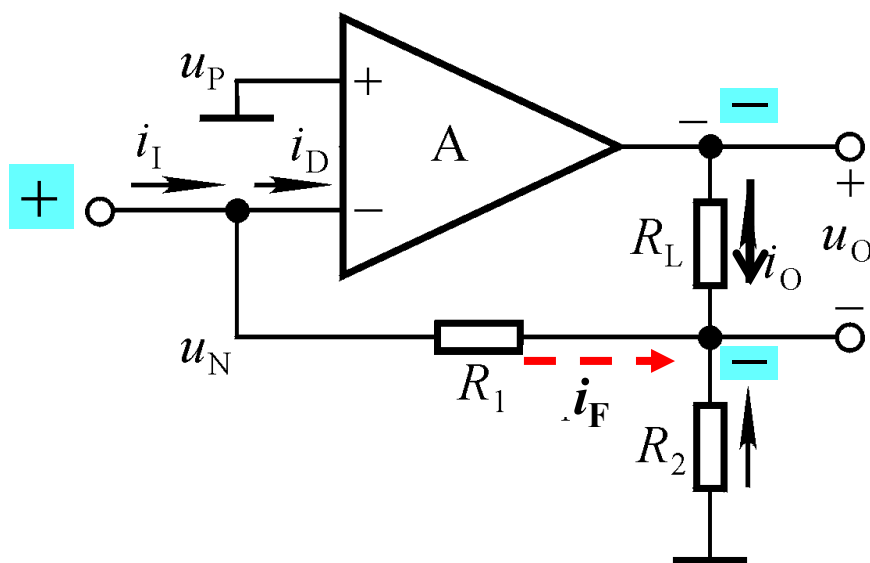
$$u_F = i_O R_1$$

反馈量与输入量以电压方式  
相叠加，为串联反馈。

反馈量取自输出电流，与输出  
电流成正比，为电流反馈。

电路引入了直流负反馈和交流电流串  
联负反馈

## 5.1 反馈的基本概念及判断方法



净输入电流  $i_D = i_I - i_F$ ,  
 $\therefore$  是负反馈

反馈量与输入量以电流方式  
相叠加，为并联反馈。

$$i_F = -\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot i_O$$

反馈量取自输出电流，  
为电流反馈。

电路引入了直流负反馈和交流电流并  
联负反馈

## 5.2 负反馈放大电路的四种基本组态

交流负反馈的四种基本组态：电压串联负反馈、电压并联负反馈、电流串联负反馈和电流并联负反馈。

判断反馈组态的步骤：

- 一、判断有无反馈，找出反馈网络
- 二、判断是局部反馈还是级间反馈
- 三、判断是交流反馈还是直流反馈

## 四、判断是负反馈还是正反馈（采用瞬时极性法）

### 简单判断方法：

1. 若反馈量与输入量加在两个端子上，

两者极性相同为负反馈；

极性相反为正反馈。

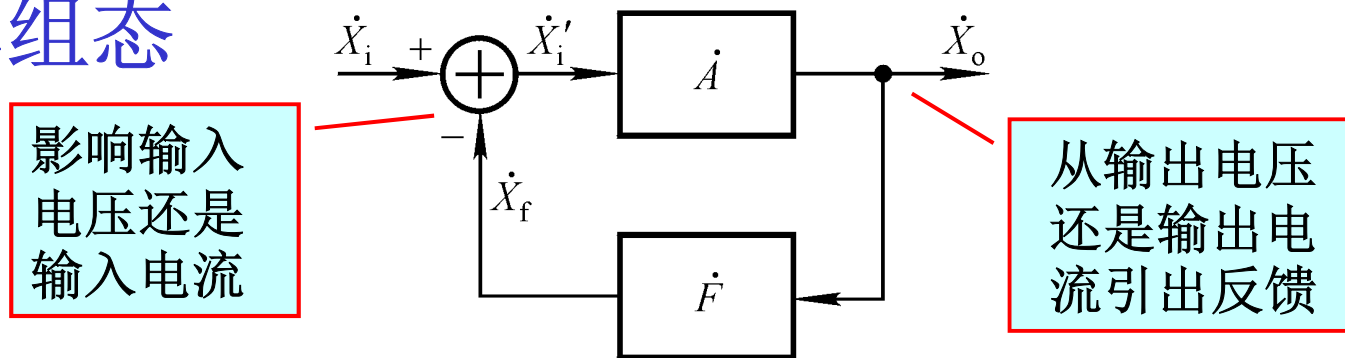
2. 若反馈量与输入量加在同一端子上，

两者极性相反为负反馈；

极性相同为正反馈。



## 五、若是交流负反馈，则继续判断它的四种基本组态



### 1、串联反馈和并联反馈的判断

从输入端看，反馈量与输入量以电压方式相叠加，即  $\dot{U}'_i = \dot{U}_i - \dot{U}_f$ ，则为串联反馈，使净输入电压减小。

反馈量与输入量以电流方式相叠加，即  $\dot{I}'_i = \dot{I}_i - \dot{I}_f$ ，则为并联反馈，使净输入电流减小。

简单判断方法： 在输入端，若反馈量与输入量接在同一个端子上，则为并联反馈，否则为串联反馈。

## 2、电压反馈和电流反馈的判断

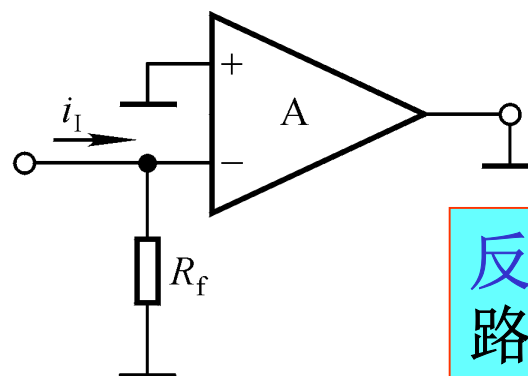
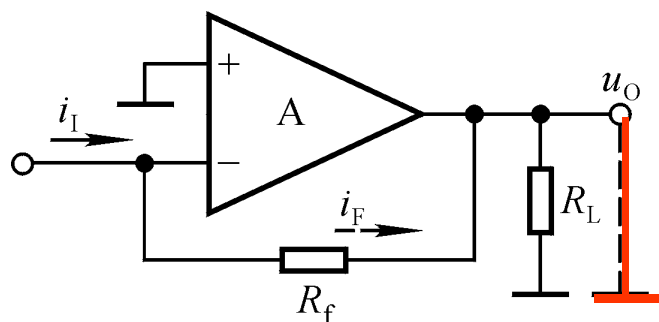
从输出端看，反馈量取自输出电压，即  $\dot{X}_o = \dot{U}_o$ ，反馈量与输出电压成正比，则为电压反馈，使输出电压稳定。

反馈量取自输出电流，即  $\dot{X}_o = \dot{I}_o$ ，反馈量与输出电流成正比，则为电流反馈，使输出电流稳定。

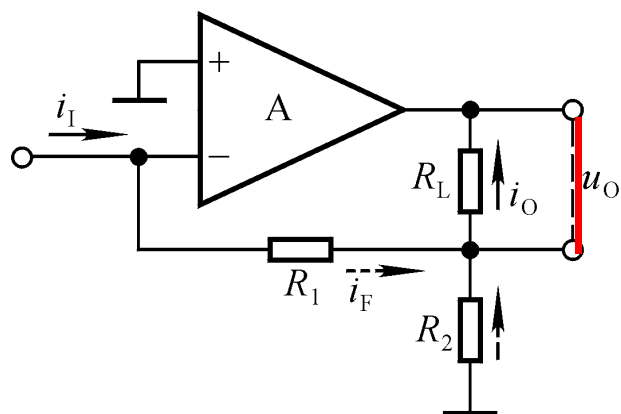
简单判断方法：

在输出端，令输出电压为0，若反馈量不存在，则为电压反馈；若反馈量依然存在，则为电流反馈。

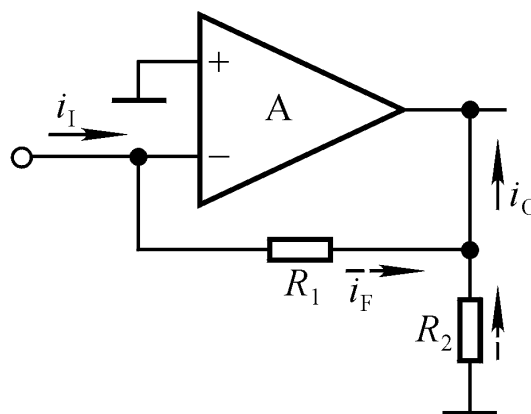
## 5.2 负反馈放大电路的四种基本组态



反馈不存在，所以电路引入了电压反馈

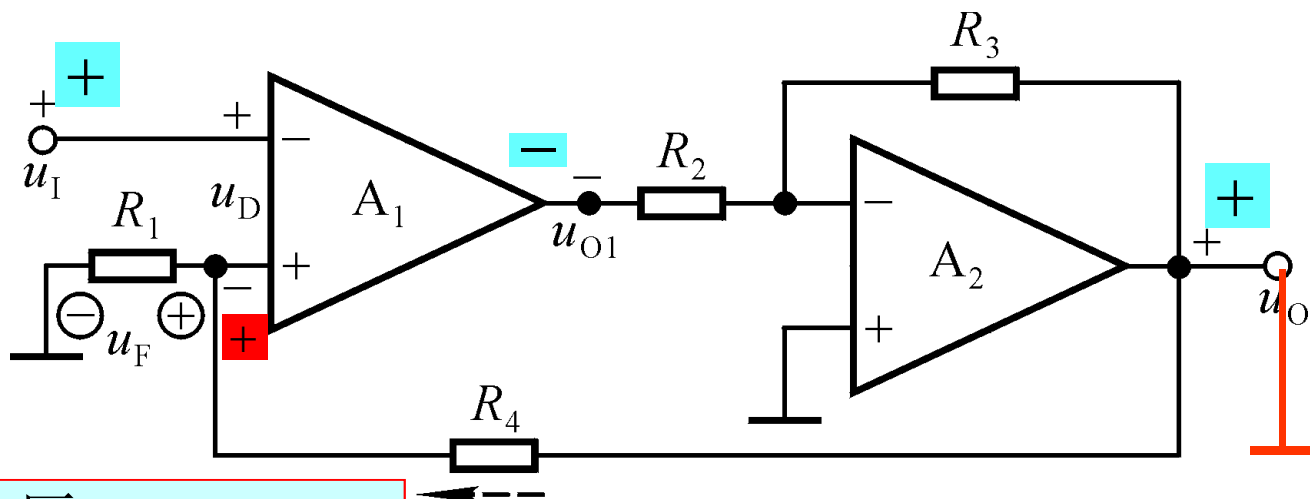


(a)



(b)

反馈依然存在，所以电路引入了电流反馈

**例5.1.1 判断集成运放组成的放大电路的反馈类型**

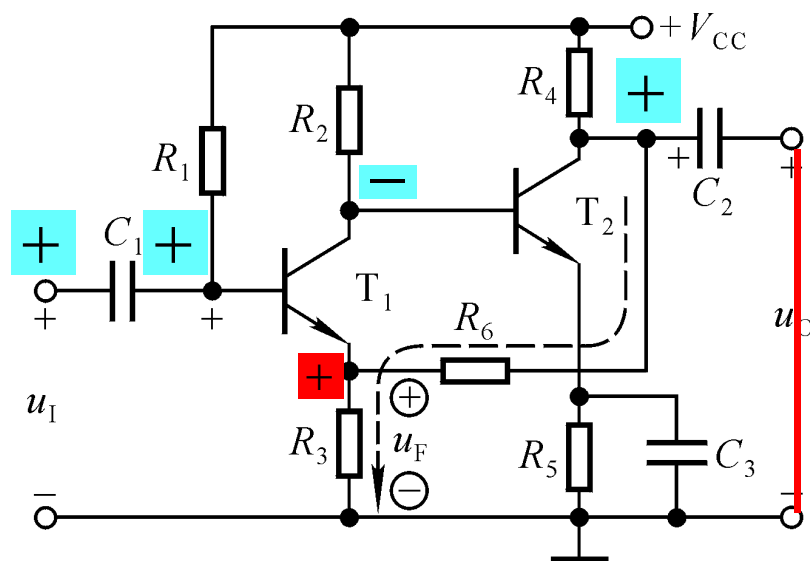
净输入电压  $u_D = u_I - u_F$ ,  
∴ 是负反馈

反馈量与输入量以电压方式  
相叠加，为串联反馈。

或者，直接判断是负反馈，且是串联反馈。

反馈不存在，所以电  
路引入了电压反馈。

电路引入了直流负反馈和交流电压  
串联负反馈

**例** 判断分立元件放大电路的反馈类型

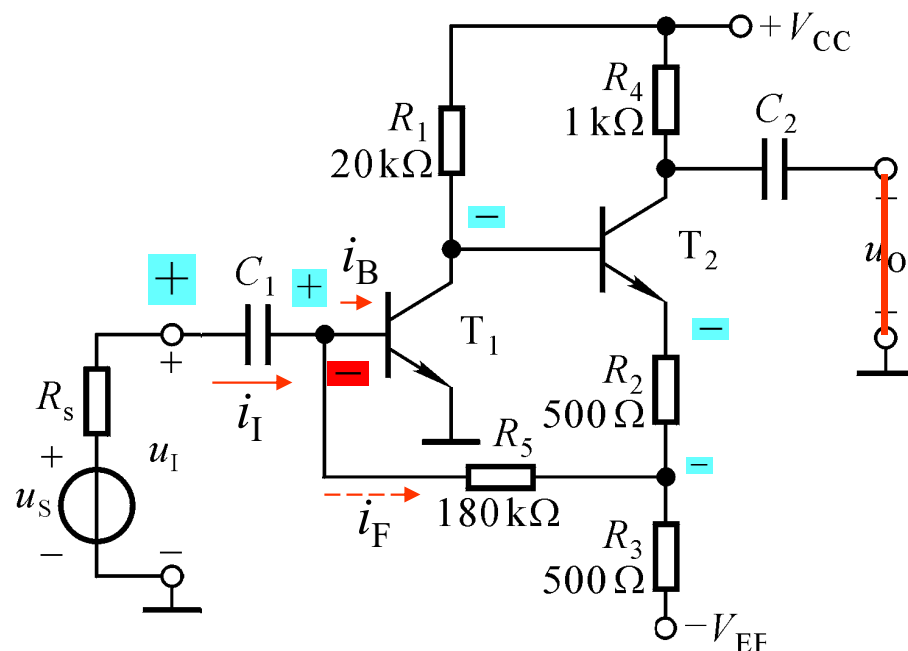
净输入电压  $u_{BE} = u_I - u_F$ ,  
∴ 是负反馈

反馈量与输入量以电压方式  
相叠加，为串联反馈。

或者，直接判断是负反馈，  
且是串联反馈。

反馈不存在，所以电  
路引入了电压反馈。

电路引入了直流负反馈和交流电压串  
联负反馈

**例**

净输入电流  $i_B = i_I - i_F$ ,  
 $\therefore$  是负反馈

反馈量与输入量以**电流方式**  
相叠加，为**并联反馈**。

或者，直接判断是**负反馈**，  
且是**并联反馈**。

反馈依然存在，所以电  
路引入了**电流反馈**。

电路引入了直流负反馈和交流电流  
并联负反馈

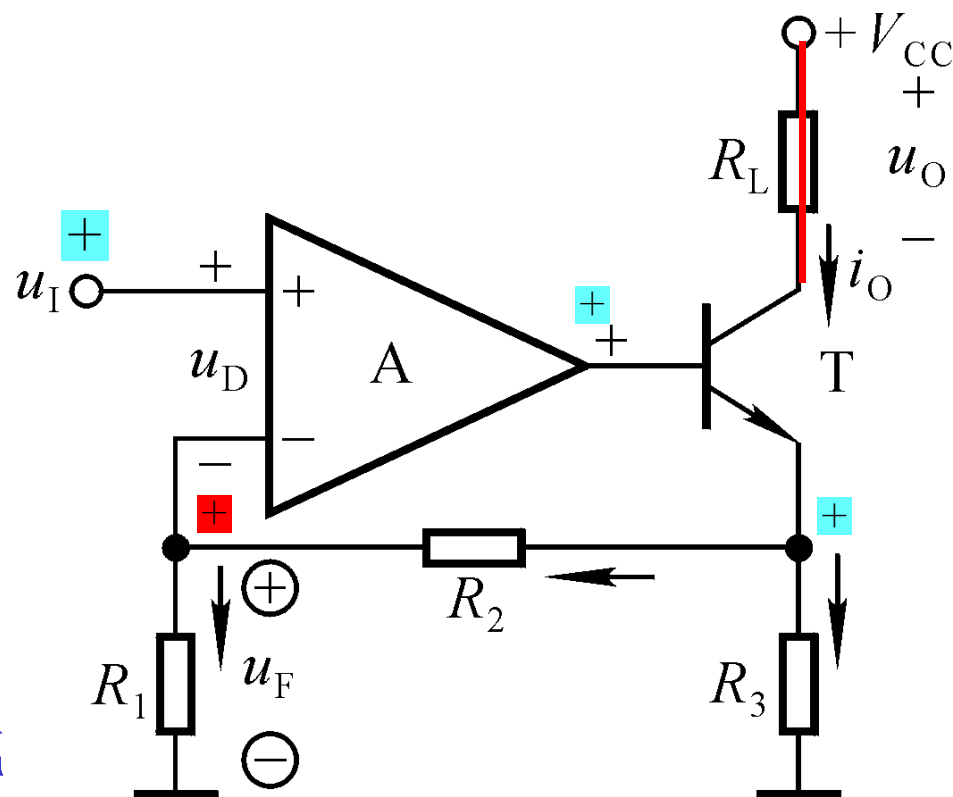
## 例5.2.1

净输入电压  $u_D = u_I - u_F$ ,  
 $\therefore$  是负反馈

反馈量与输入量以电压方式  
相叠加，为串联反馈。

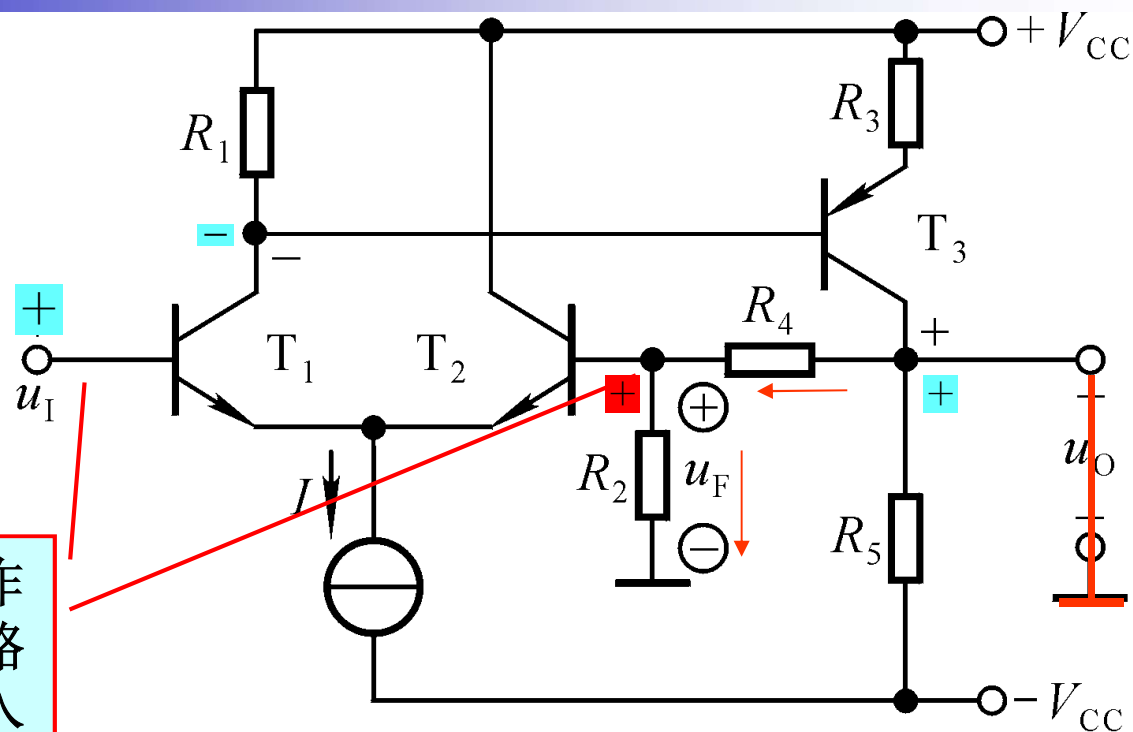
或者，直接判断是负反馈，  
且是串联反馈。

电路引入了直流负反馈和交流电流  
串联负反馈



反馈依然存在，所以电  
路引入了电流反馈。

## 例5.2.2



两者之差作为差分电路的差模输入

净输入电压  $u_{Id} = u_I - u_F$ ,  
 $\therefore$  是负反馈

反馈不存在，所以电路引入了电压反馈。

反馈量与输入量以电压方式相叠加，为串联反馈。

或者，直接判断是负反馈，  
 且是串联反馈。

电路引入了直流负反馈和交流电压串联负反馈

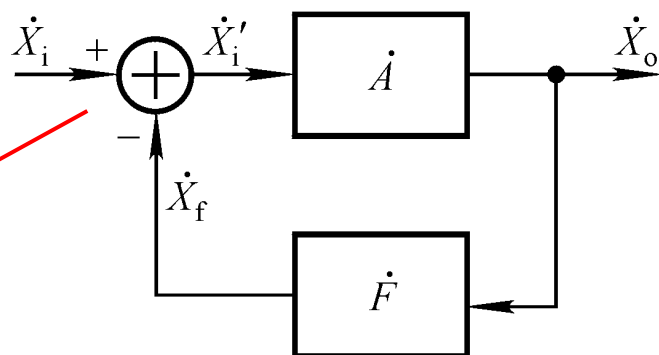


## 5.3 负反馈放大电路的方块图及一般表达式

### 5.3.1 负反馈放大电路的一般表达式

方块图

负反馈



基本放大电路  
的放大倍数

$$\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i'}$$

反馈系数

$$\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$$

负反馈时,  $\dot{X}_i' = \dot{X}_i - \dot{X}_f$

负反馈放大电路的放大倍数  
(即闭环放大倍数)

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$$

环路放大倍数

$$\dot{A}\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_i'}$$

表达式

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

### 5.3 负反馈放大电路的方块图及一般表达式

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

在中频段,且反馈网络为电阻性时,  
 $\dot{A}$ 、 $\dot{F}$ 和 $\dot{A}_f$ 均为实数

若 $\dot{A}\dot{F} > 0$ (正实数), 则表明电路引入负反馈,  
此时 $1 + \dot{A}\dot{F} > 1$ ,所以引入负反馈后放大倍数减小。

此时,  $\dot{A}$ 、 $\dot{F}$ 、 $\dot{A}_f$  符号相同。

$1 + \dot{A}\dot{F}$ 称为反馈深度

若 $1 + \dot{A}\dot{F} \gg 1$ , 则 为深度负反馈,  $\dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$ 。

若 $\dot{A}\dot{F} < 0$ (负实数), 则表明电路引入正反馈,  
此时 $1 + \dot{A}\dot{F} < 1$ ,所以引入正反馈后放大倍数增大。

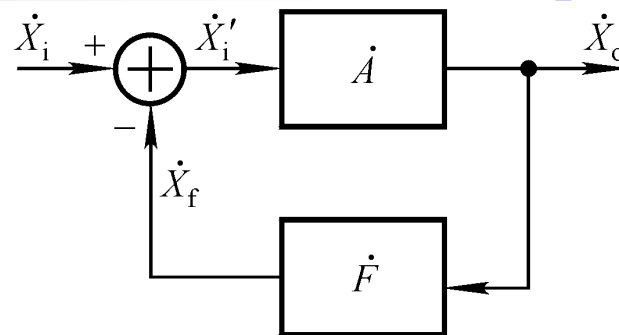
仅仅决定于  
反馈网络,  
稳定性很高

## 5.3 负反馈放大电路的方块图及一般表达式

### 5.3.2 四种组态电路的方块图

反馈组态	$\dot{X}_i$	$\dot{X}'_i$	$\dot{X}_f$	$\dot{X}_o$
电压串联	$\dot{U}_i$	$\dot{U}'_i$	$\dot{U}_f$	$\dot{U}_o$
电流串联	$\dot{U}_i$	$\dot{U}'_i$	$\dot{U}_f$	$\dot{I}_o$
电压并联	$\dot{I}_i$	$\dot{I}'_i$	$\dot{I}_f$	$\dot{U}_o$
电流并联	$\dot{I}_i$	$\dot{I}'_i$	$\dot{I}_f$	$\dot{I}_o$

反馈组态	$\dot{A}$	$\dot{F}$	$\dot{A}_f$
电压串联	$\dot{A}_{uu} = \dot{U}_o / \dot{U}'_i$	$\dot{F}_{uu} = \dot{U}_f / \dot{U}_o$	$\dot{A}_{uuf} = \dot{U}_o / \dot{U}_i$
电流串联	$\dot{A}_{iu} = \dot{I}_o / \dot{U}'_i$	$\dot{F}_{ui} = \dot{U}_f / \dot{I}_o$	$\dot{A}_{iuf} = \dot{I}_o / \dot{U}_i$
电压并联	$\dot{A}_{ui} = \dot{U}_o / \dot{I}'_i$	$\dot{F}_{iu} = \dot{I}_f / \dot{U}_o$	$\dot{A}_{uif} = \dot{U}_o / \dot{I}_i$
电流并联	$\dot{A}_{ii} = \dot{I}_o / \dot{I}'_i$	$\dot{F}_{ii} = \dot{I}_f / \dot{I}_o$	$\dot{A}_{iif} = \dot{I}_o / \dot{I}_i$



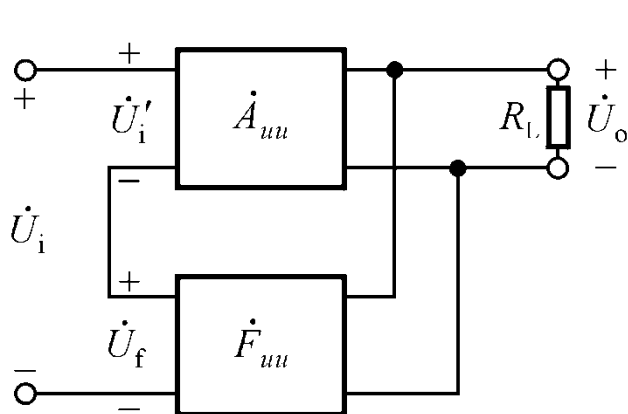
实现电压放大，  
相当于电压控制  
电压源

电压转换成电流，  
相当于电压控制  
电流源

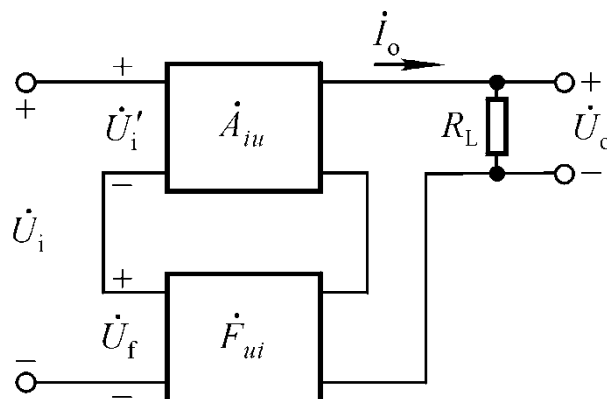
电流转换成电压，  
相当于电流控制  
电压源

实现电流放大，  
相当于电流控制  
电流源

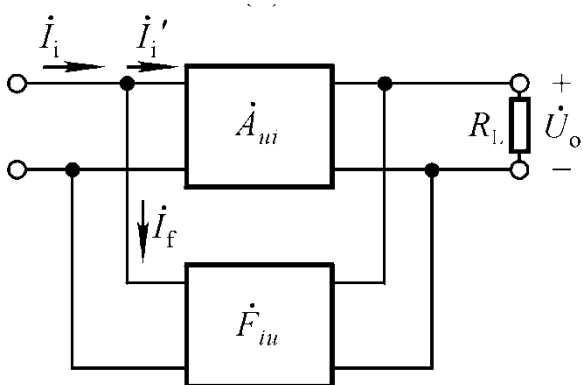
### 四种反馈组态电路的方块图



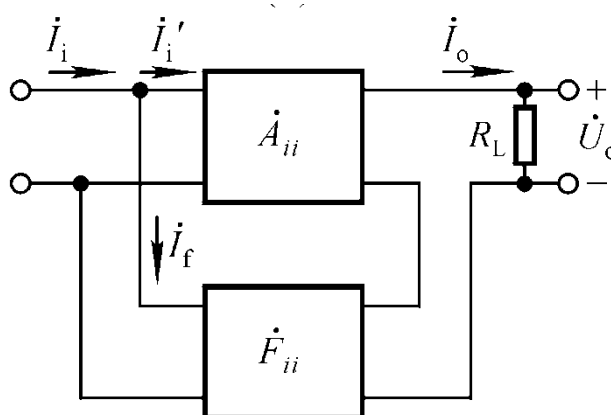
电压串联负反馈



电流串联负反馈



电压并联负反馈

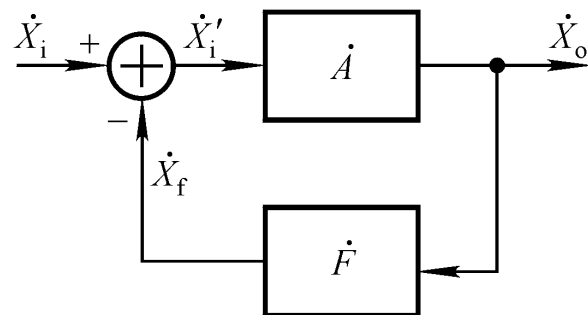


电流并联负反馈

**串联负反馈电路**要输入电压  $u_i$ ，所以所加信号源均为**电压源**（内阻较小）；**并联负反馈电路**要输入电流  $i_i$ ，所以所加信号源均为**电流源**（内阻很大）。

## 5.4 深度负反馈放大电路放大倍数的分析

### 5.4.1 深度负反馈的实质



深度负反馈时， $\dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$ 。

求解深负反馈放大电路放大倍数的一种方法

此时， $\dot{X}_i \approx \dot{X}_f$ 。

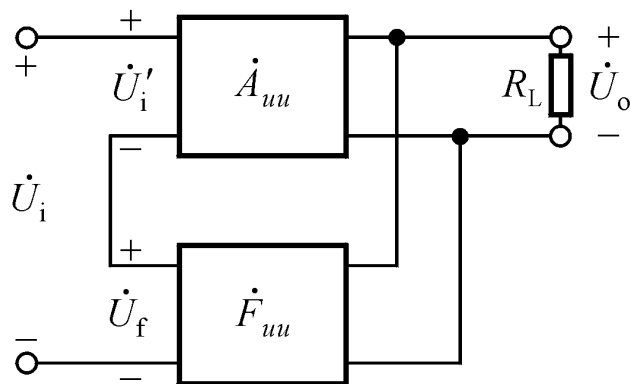
净输入量可忽略不计

上式说明：在深度串联负反馈电路中， $\dot{U}_i \approx \dot{U}_f$

在深度并联负反馈电路中， $\dot{I}_i \approx \dot{I}_f$

## 5.4.2 基于反馈系数的放大倍数分析

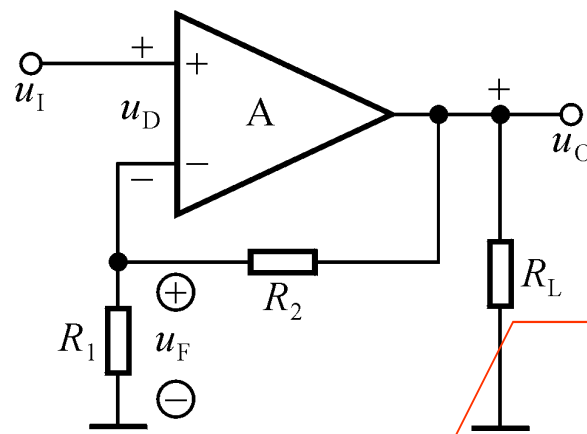
### 1. 电压串联负反馈电路



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

$$\dot{A}_{uuf} = \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = \frac{1}{\dot{F}_{uu}}$$

因为深负反馈的实质



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

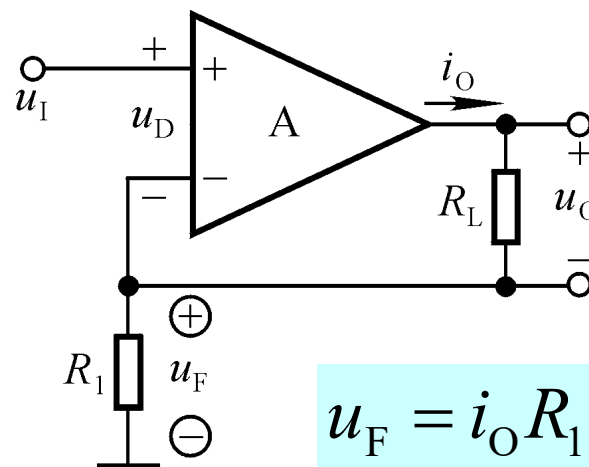
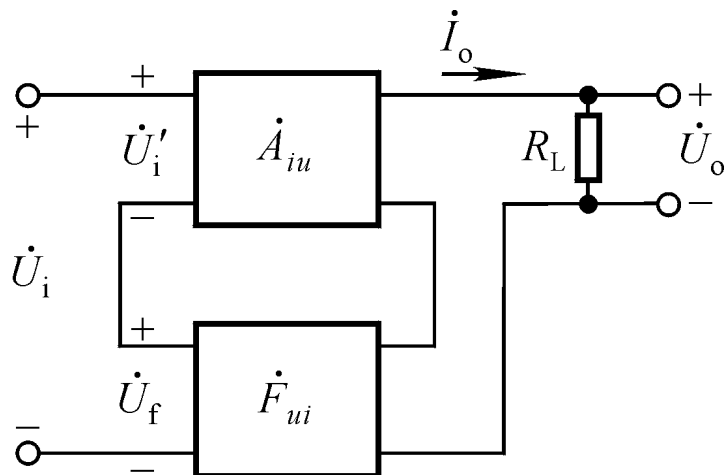
因为反馈量是对输出量的采样

$$\dot{F}_{uu} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\dot{A}_{uf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{uu}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

对于串联负反馈电路，通常求解  $\dot{A}_{uf}$ 。

## 2. 电流串联负反馈电流



$$u_F = i_O R_1$$

$$\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o}, \dot{A}_{iuf} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_f} = \frac{1}{\dot{F}_{ui}}$$

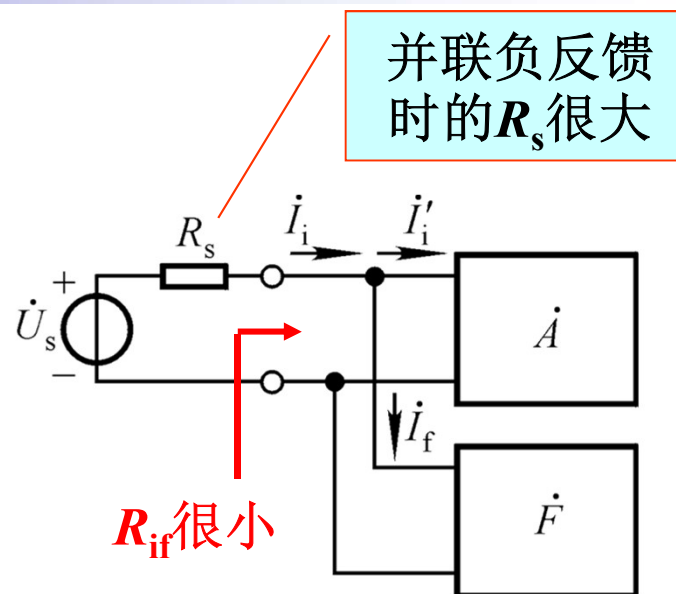
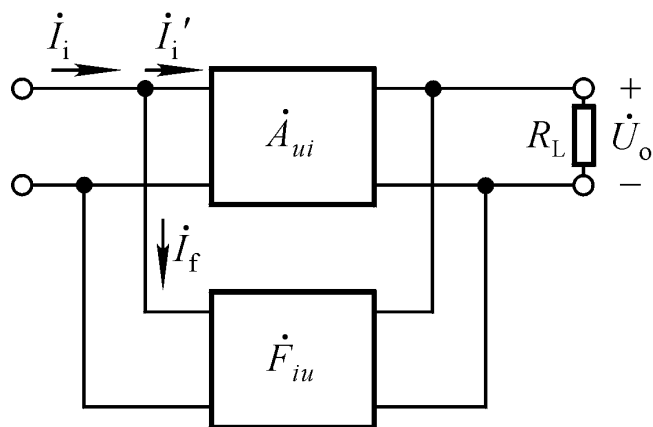
$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{I}_o \cdot R'_L}{\dot{U}_f} = \frac{1}{\dot{F}_{ui}} \cdot R'_L$$

$$\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o} = R_1, \dot{A}_{iuf} \approx \frac{1}{R_1}$$

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

$\dot{U}_o = \dot{I}_o R'_L$ ,  $R'_L$  是输出端所接的总负载

## 3. 电压并联负反馈电路



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

$$\dot{A}_{uif} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_f} = \frac{1}{\dot{F}_{iu}}$$

为什么?

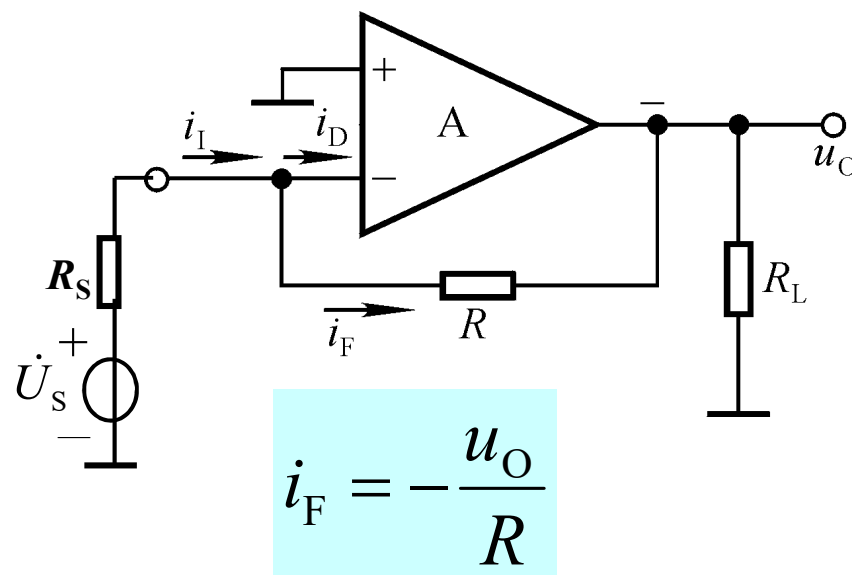
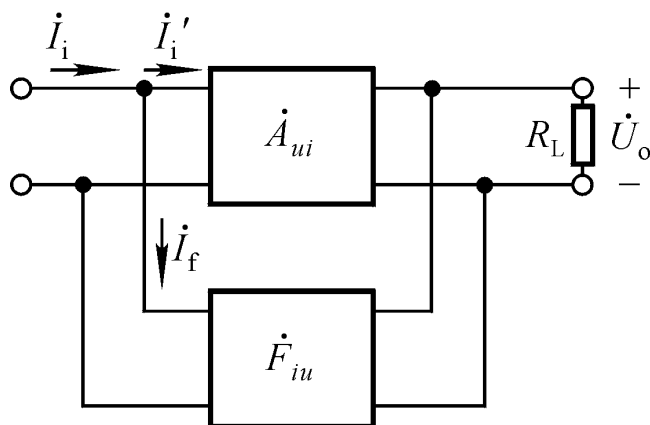
$$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i R_s} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_f R_s} = \frac{1}{\dot{F}_{iu}} \cdot \frac{1}{R_s}$$

因为深负反馈的实质

 $\dot{U}_s \approx \dot{I}_i R_s$ ,  $R_s$  是信号源的内阻



## 5.4 深度负反馈放大电路放大倍数的分析



$$\dot{F}_{iu} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o}, \dot{A}_{uif} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} \approx \frac{1}{\dot{F}_{iu}}$$

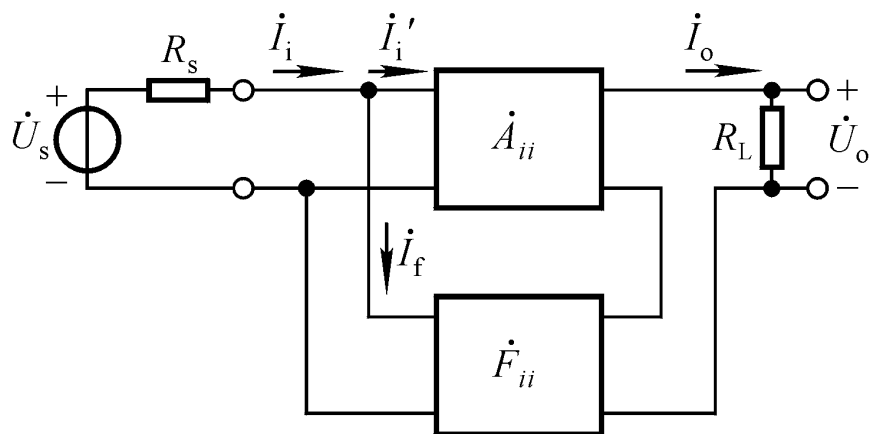
$$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \approx \frac{1}{\dot{F}_{iu}} \cdot \frac{1}{R_s}$$

$$\dot{F}_{iu} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o} = -\frac{1}{R}, \dot{A}_{uif} \approx -R$$

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

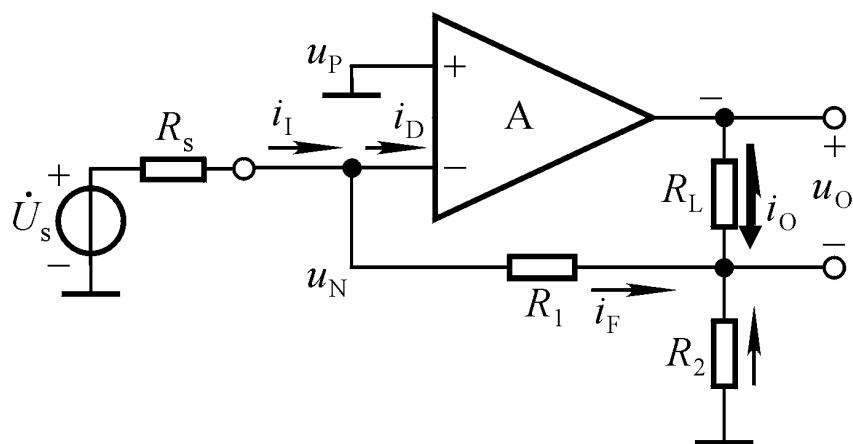
对于并联负反馈电路，通常求解 $\dot{A}_{usf}$ 。

## 4. 电流并联负反馈电路



$$\dot{F}_{ii} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o}, \quad \dot{A}_{iif} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} \approx \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_f} = \frac{1}{\dot{F}_{ii}}$$

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



$$i_F = -\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot i_O$$

$$\dot{F}_{ii} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o} = -\frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad \dot{A}_{iif} \approx -(1 + \frac{R_1}{R_2})$$

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

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

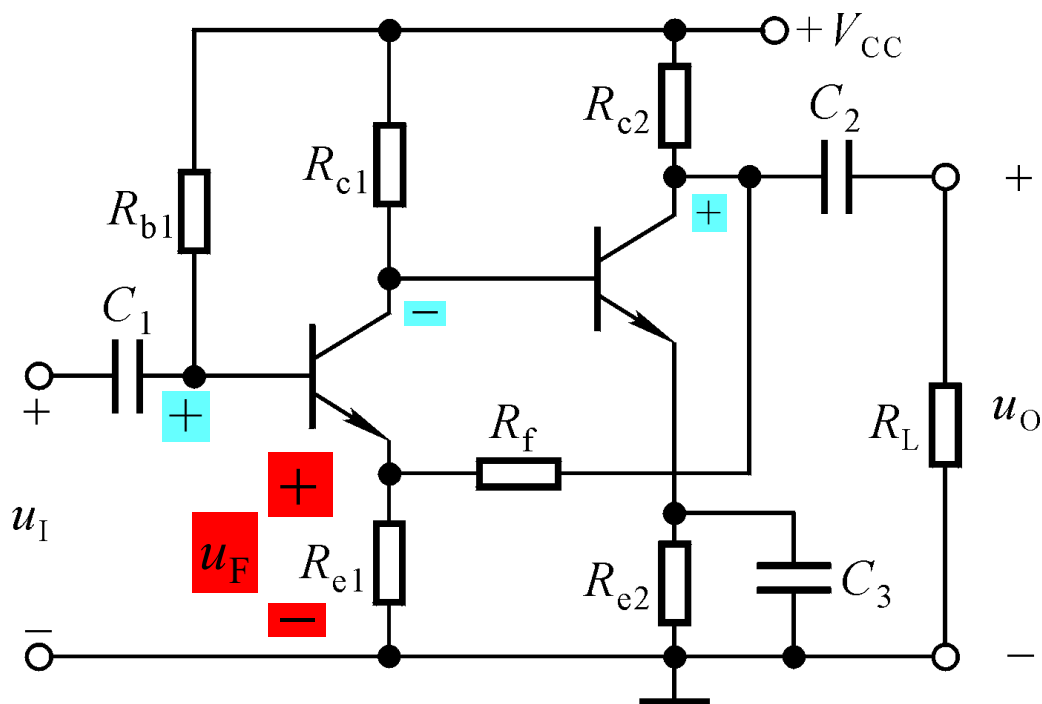
通常， $\dot{A}_{uf}$  ( $\dot{A}_{usf}$ )、 $\dot{A}$ 、 $\dot{F}$ 、 $\dot{A}_f$  符号相同。

求解深度负反馈放大电路放大倍数的一般步骤：

- (1) 正确判断反馈组态；
- (2) 求解反馈系数；
- (3) 利用 $\dot{F}$ 求解 $\dot{A}_f$ 、 $\dot{A}_{uf}$  (或 $\dot{A}_{usf}$ )。

这种方法可用于求解在深度负反馈条件下放大电路的放大倍数，而大多数负反馈放大电路，一般都满足 $1+AF \gg 1$ 的条件，所以以上方法适用于集成运放组成的负反馈放大电路和分立元件负反馈放大电路。

**例5.4.2** 判断电路中引入了哪种组态的交流负反馈；  
求出在深度负反馈条件下的  $\dot{A}_f$  和  $\dot{A}_{uf}$ 。

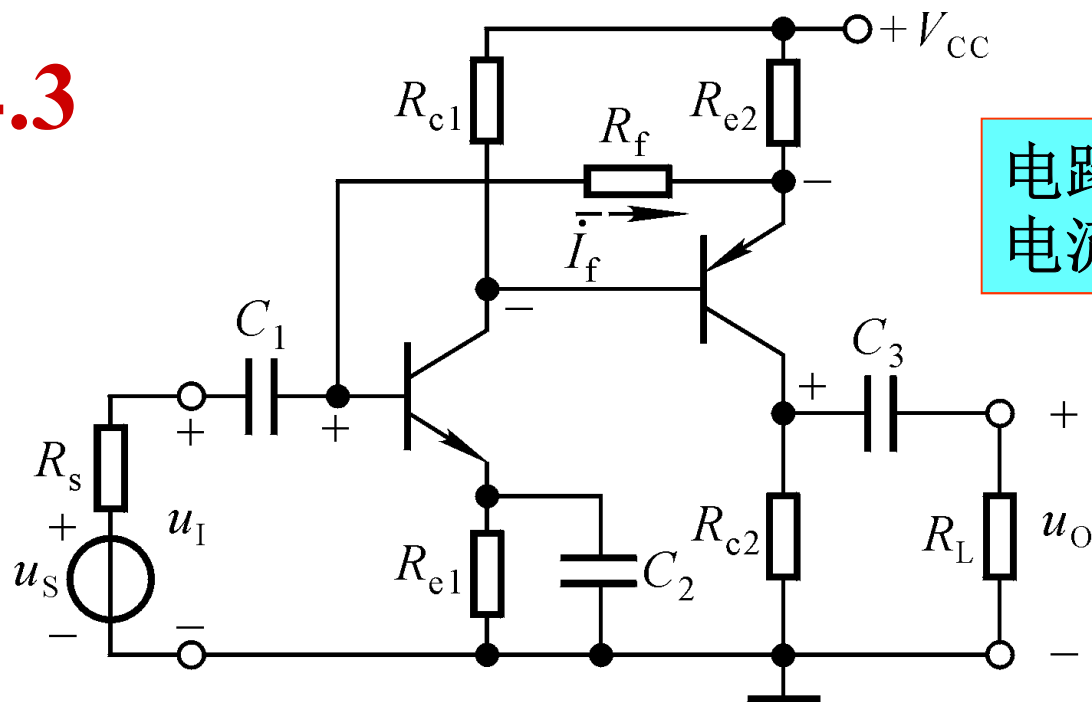


电路引入了交流  
电压串联负反馈

$$\dot{F}_{uu} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_f}$$

$$\dot{A}_f = \dot{A}_{uf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{uu}} = 1 + \frac{R_f}{R_{e1}}$$

## 例5.4.3



电路引入了交流  
电流并联负反馈

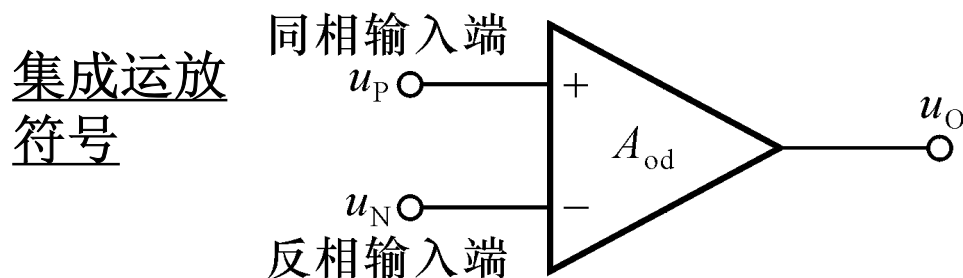
$$\dot{F}_{ii} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o} = \frac{R_{e2}}{R_{e2} + R_f}$$

$$\dot{A}_{iif} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} \approx \frac{1}{\dot{F}_{ii}} = 1 + \frac{R_f}{R_{e2}} = 10$$

$$\dot{A}_{usf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{ii}} \cdot \frac{R'_L}{R_s} = \left(1 + \frac{R_f}{R_{e2}}\right) \cdot \frac{R_{c2} // R_L}{R_s}$$

## 5.4.3 理想运放的工作状态

### 第三章回顾

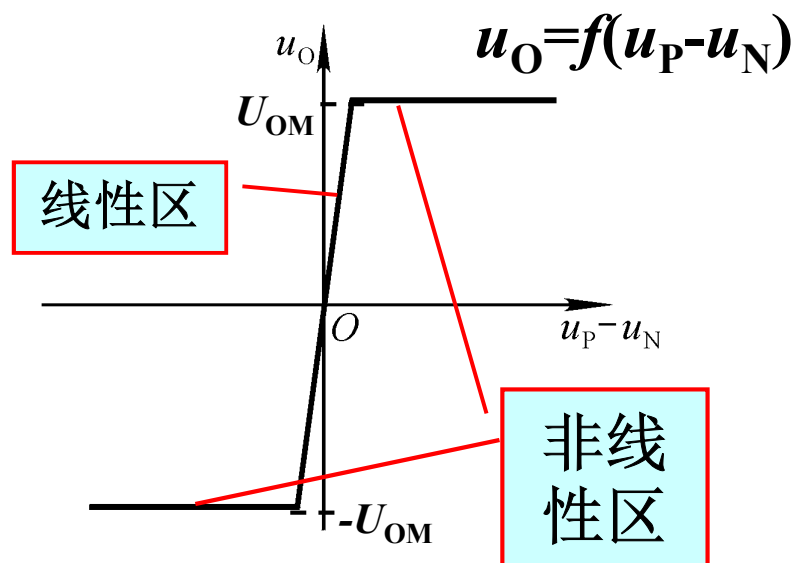


在线性区:

$$u_O = A_{od}(u_P - u_N)$$

$A_{od}$  是差模开环放大倍数。

集成运放  
电压传输特性



由于  $A_{od}$  高达几十万倍，因此线性区非常窄，输入电压  $|u_P - u_N|$  的数值仅为几十~一百多微伏。

$|u_P - u_N|$  的数值大于一定值时，集成运放的输出不是  $+U_{OM}$ ，就是一  $-U_{OM}$ ，即集成运放工作在非线性区。

理想运放主要性能指标的特点：

$$A_{od} = \infty, \quad r_{id} = \infty, \quad r_o = 0。$$

### 理想运放工作在线性区的特点

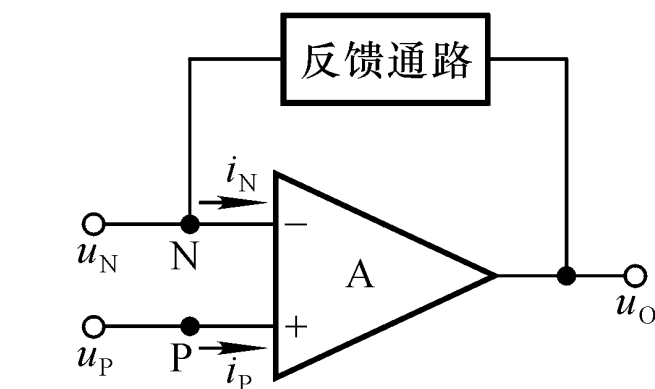
#### 前提：引入深度负反馈

1. 因为 $u_O$ 为有限值， $A_{od} = \infty$ ，所以  $u_P - u_N = 0$ ，即

$$u_N = u_P \text{ —— 虚短路}$$

2. 因为 $r_{id} = \infty$ ，所以

$$i_N = i_P = 0 \text{ —— 虚断路}$$

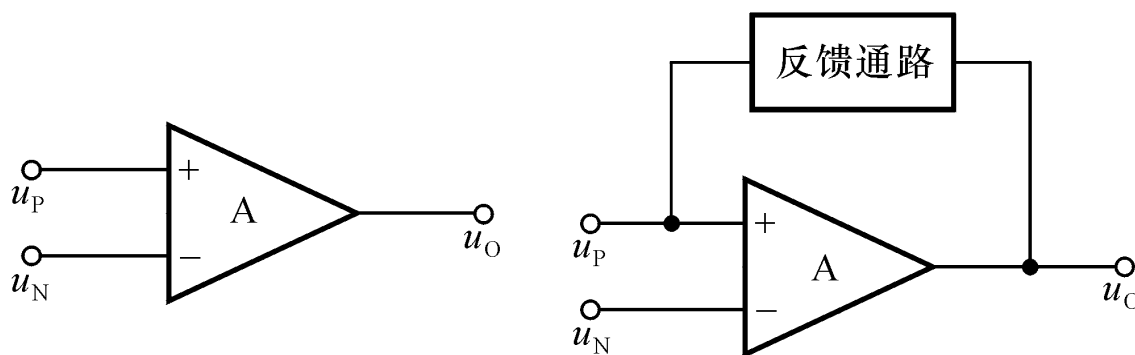


求解深负反馈放大电路放大倍数的另一种方法



### 理想运放工作在非线性区的特点

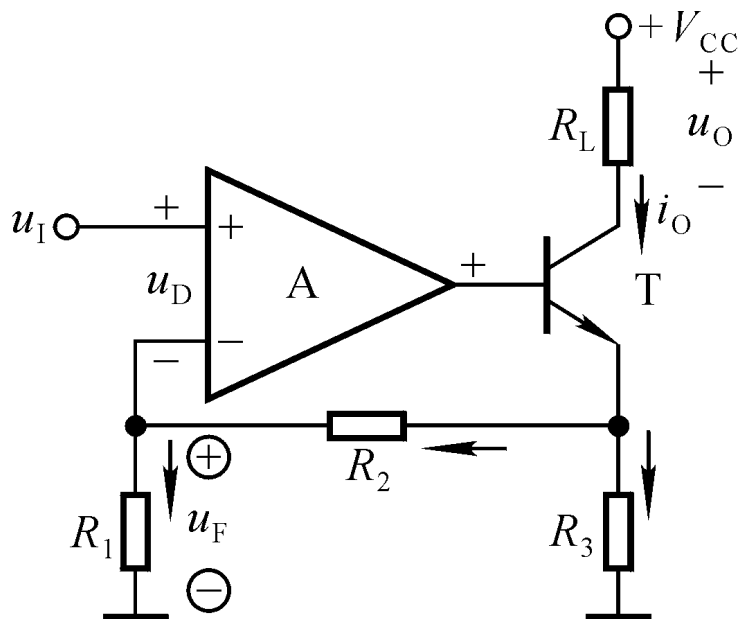
前提：开环或引入正反馈



1.  $i_N = i_P = 0$  —— 仍虚断

2. 当  $u_P > u_N$  时,  $u_O = +U_{OM}$

当  $u_P < u_N$  时,  $u_O = -U_{OM}$

**例5.4.4 利用“虚短”、“虚断”求**

电路引入了直流负反馈和交流电流串联负反馈

$$\dot{U}_i = \dot{U}_P = \dot{U}_N = \dot{U}_F$$

$$\dot{U}_o = \dot{I}_o R_L = \left[ \frac{\dot{U}_i (R_1 + R_2)}{R_1 R_3} + \frac{\dot{U}_i}{R_1} \right] \cdot R_L$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 R_3} \cdot R_L$$

这种方法一般用于分析集成运放组成的负反馈放大电路。而深度负反馈放大电路放大倍数的两种分析方法实际上是相通的。

## 5.5 负反馈对放大电路性能的影响

### 5.5.1 稳定放大倍数

在中频段，且反馈网络为电阻性时，

$\dot{A}$ 、 $\dot{F}$ 和 $\dot{A}_f$ 均为实数，因而可写成：

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

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

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

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

$1 + AF > 1$ ，则 为负反馈，

反馈深度（ $1 + AF$ ）越大，负反馈就越深，其作用就越强。

说明放大倍数减小到基本放大电路的  $\frac{1}{1 + AF}$ ，

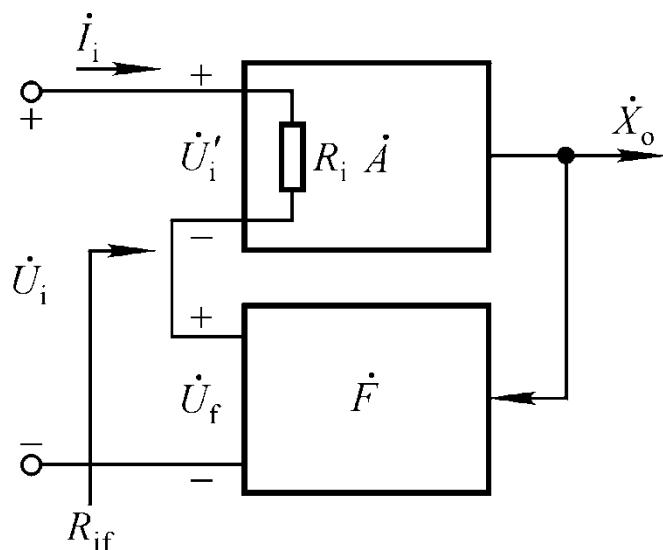
放大倍数的稳定性是基本放大电路的  $(1 + AF)$  倍。

## 5.5.2 改变输入电阻和输出电阻

### 一、对输入电阻的影响

对输入电阻的影响仅与反馈网络与基本放大电路在输入端的连接方式有关，即决定于是串联反馈还是并联反馈。

#### 1. 串联负反馈增大输入电阻



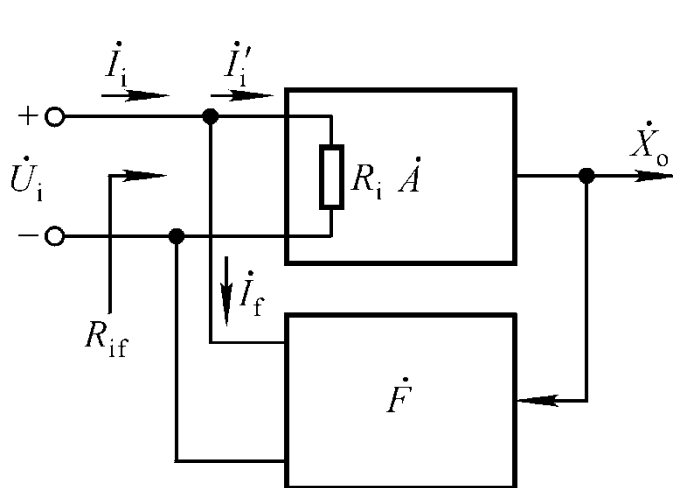
$$R_i = \frac{U_i'}{I_i}$$

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

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

引入串联负反馈，输入电阻增大，为基本放大电路的  $(1 + AF)$  倍。

## 2. 并联负反馈减小输入电阻



$$R_i = \frac{U_i}{I_i'}$$

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

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

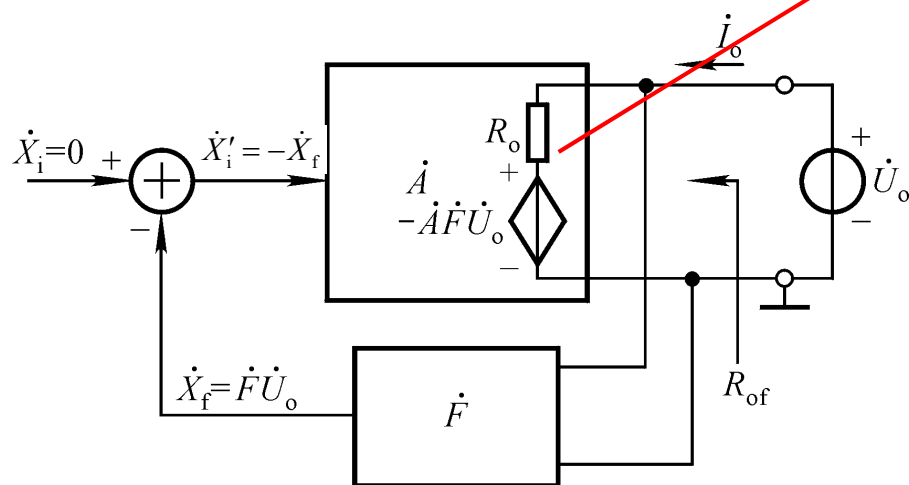
引入并联负反馈，输入电阻减小，仅为基本放大电路的  $(1 + AF)$  分之一。

在深度负反馈  $(1 + AF) \rightarrow \infty$  时：  
 引入串联负反馈  $R_{if} \rightarrow \infty$ ，  
 引入并联负反馈  $R_{if} \rightarrow 0$ 。

## 二、对输出电阻的影响

对输出电阻的影响仅与反馈网络与基本放大电路在输出端的连接方式有关，即决定于是电压反馈还是电流反馈。

### 1. 电压负反馈减小输出电阻



基本放大电路中已考虑反馈网络的负载效应，所以  $R_o$  中的电流为  $I_o$ 。

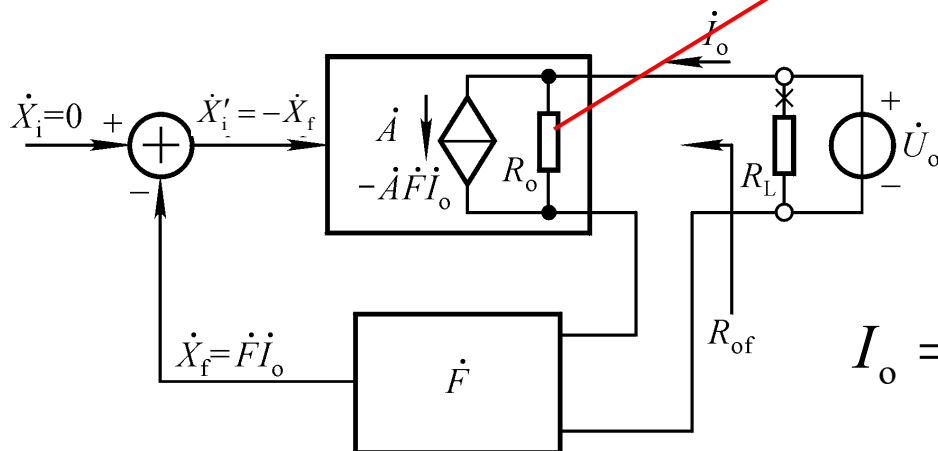
$$R_{of} = \frac{U_o}{I_o} = \frac{U_o}{U_o - (-AFU_o)} R_o$$

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

引入电压负反馈，输出电阻减小，仅为基本放大电路的  $(1 + AF)$  分之一。

## 2. 电流负反馈增大输出电阻

基本放大电路中已考虑反馈网络的负载效应，所以 $R_o$ 上的电压为 $U_o$ 。



$$I_o = \frac{U_o}{R_o} + (-AFI_o), \therefore I_o = \frac{\frac{U_o}{R_o}}{1 + AF}$$

$$R_{of} = \frac{U_o}{I_o} = (1 + AF)R_o$$

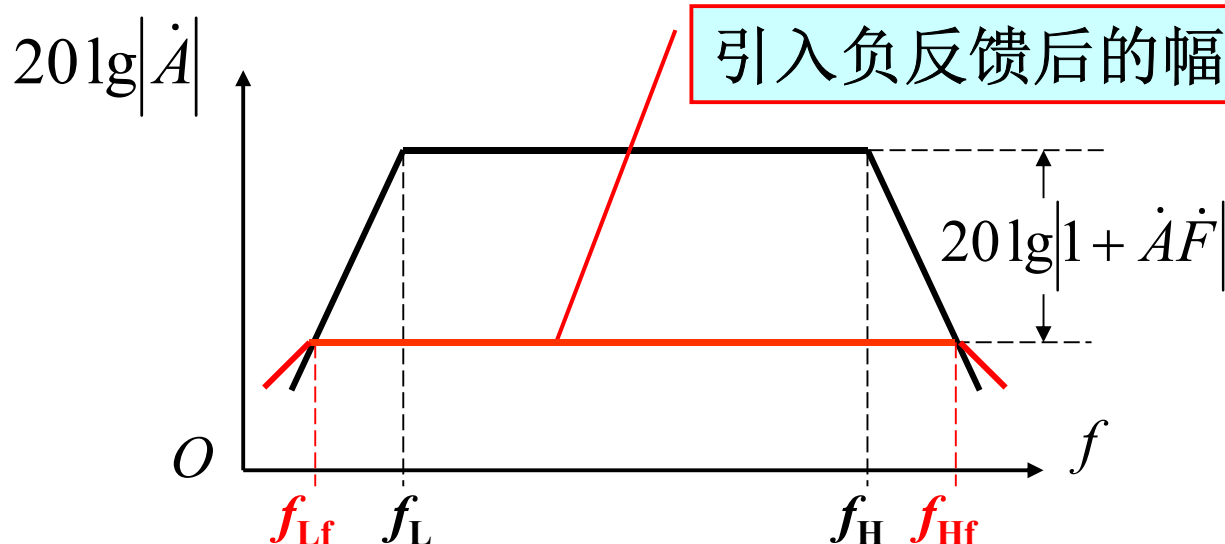
引入电流负反馈，输出电阻增大，为基本放大电路的 $(1 + AF)$ 倍。

在深度负反馈 $(1 + AF) \rightarrow \infty$ 时：

引入电压负反馈，稳定输出电压， $R_{of} \rightarrow 0$ ，等效为恒压源；

引入电流负反馈，稳定输出电流， $R_{of} \rightarrow \infty$ ，等效为恒流源。

### 5.5.3 展宽频带：设反馈网络是纯电阻网络



可推导出引入负反馈后的截止频率、通频带



$$f_{Hf} = (1 + A_m F) f_H$$

$$f_{Lf} = \frac{f_L}{1 + A_m F}$$

$$f_{bwf} \approx f_{Hf} \approx (1 + A_m F) f_{bw}$$

引入负反馈，使频带展宽到基本放大电路的  $(1 + AF)$  倍。

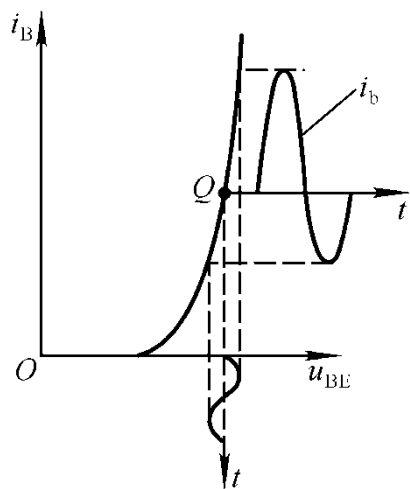
$$\dot{A}_l = \frac{\dot{A}_m}{1 + \frac{f_L}{jf}}$$

$$\dot{A}_h = \frac{\dot{A}_m}{1 + j\frac{f}{f_H}}$$

$$\dot{A}_{l(h)f} = \frac{\dot{A}_{l(h)}}{1 + \dot{A}_{l(h)} \dot{F}_{l(h)}}$$

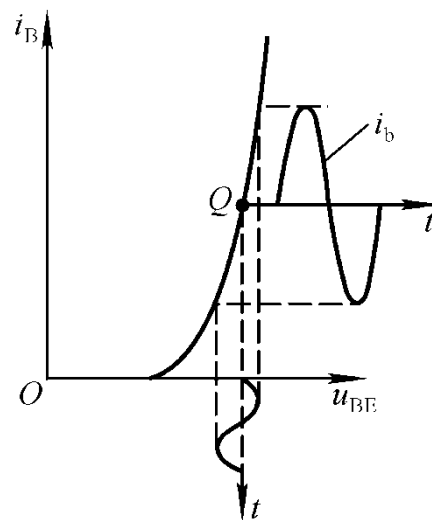


## 5.5.4 减小非线性失真



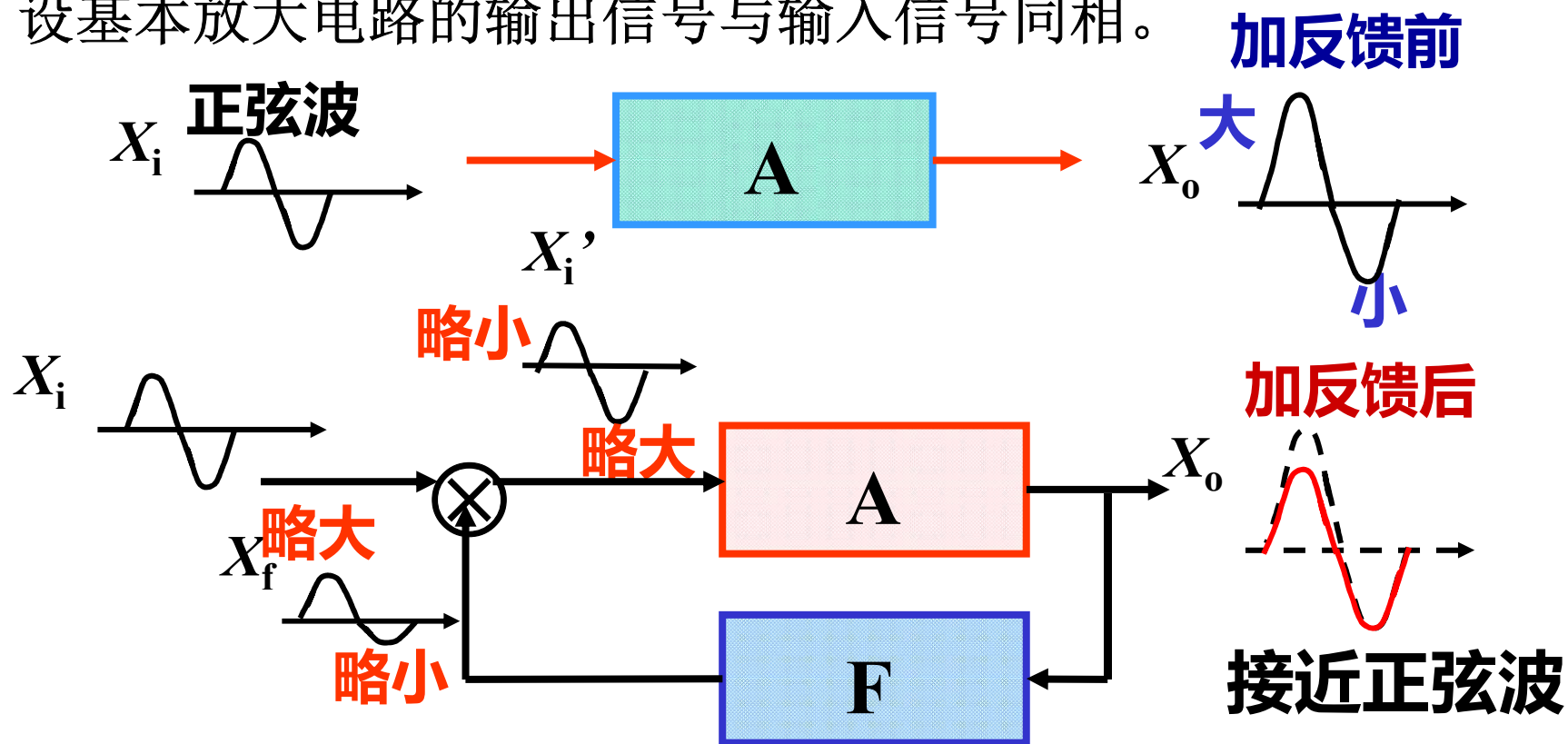
由于晶体管输入特性的非线性，当b-e间加正弦波信号电压时，**基极电流**的变化不是正弦波，而是**正半周幅值大，负半周幅值小**。

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。



## 5.5 负反馈对放大电路性能的影响

设基本放大电路的输出信号与输入信号同相。



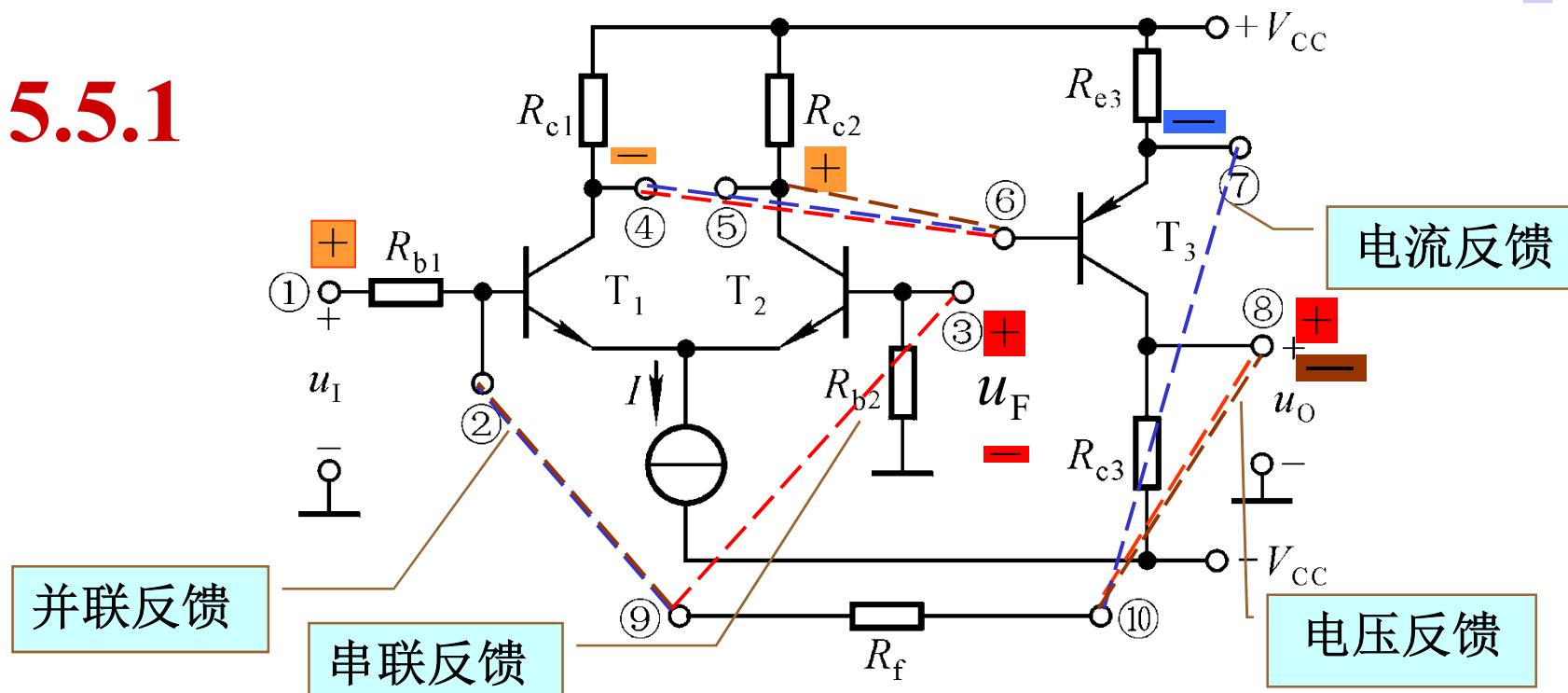
可以证明，在引入负反馈前后输出量基波幅值相同的情况下，非线性失真减小到基本放大电路的 $1/(1+AF)$ 。

负反馈只能减小(不能完全消除)产生于电路内部的非线性失真，而不能抑制输入量或干扰带来的失真。

### 5.5.5 引入负反馈的一般原则

- 欲**稳定 $Q$ 点**应引入**直流负反馈**；欲**改善动态性能**应引入**交流负反馈**。
- 根据信号源的性质：当信号源为电压源（内阻较小）时，为**增大放大电路的输入电阻**，以**减小信号源的输出电流**使放大电路获得更大的输入电压，应引入**串联负反馈**；当信号源为电流源（内阻很大）时，为**减小放大电路的输入电阻**，以**增大信号源的输出电流**，应引入**并联负反馈**。
- 根据负载需要：欲**输出稳定电压**的应引入**电压负反馈**；欲**输出稳定电流**的应引入**电流负反馈**。
- 在需要进行信号变换时，选择合适的组态：欲将**电流信号转换成电压信号**，应引入**电压并联负反馈**；欲将**电压信号转换成电流信号**，应引入**电流串联负反馈**，等等。

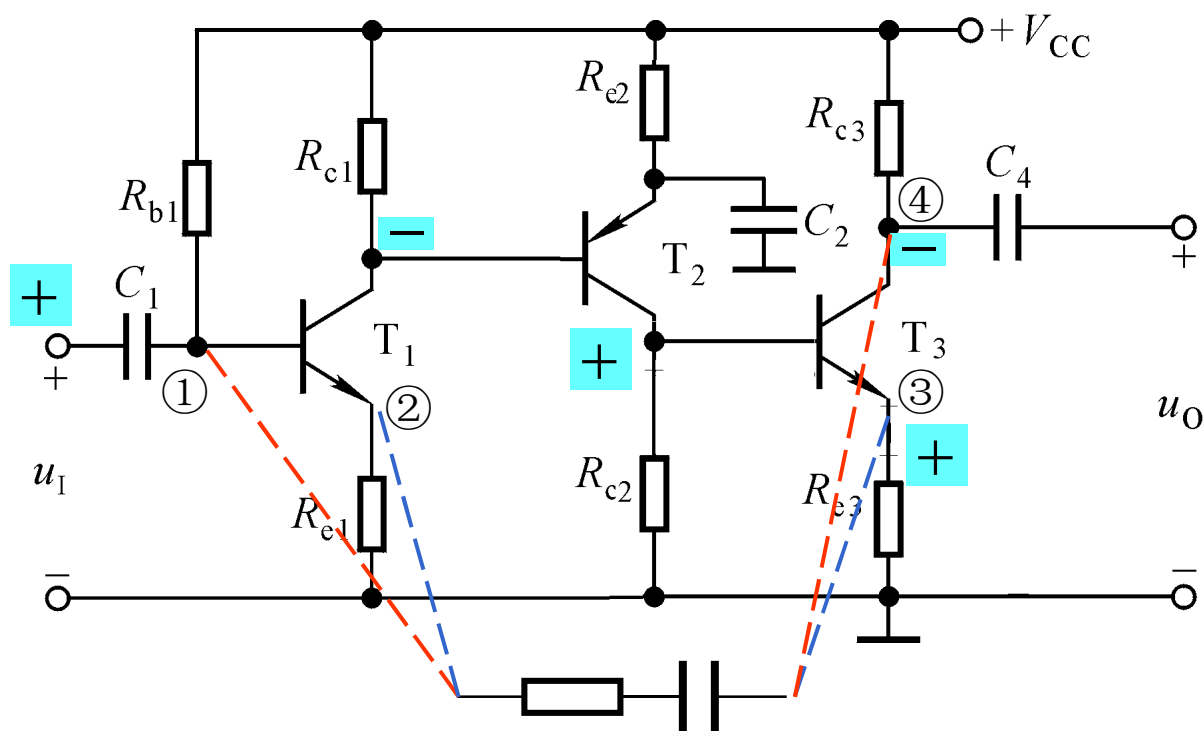
## 例5.5.1



- 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？  
**交流电压串联负反馈**
- 将输入电流转换成与之成稳定线性关系的输出电流，应引入什么反馈？  
**交流电流并联负反馈**
- 将输入电流转换成稳定的输出电压，应引入什么反馈？  
**交流电压并联负反馈**

## 例

在图示电路中能够引入哪些组态的交流负反馈？



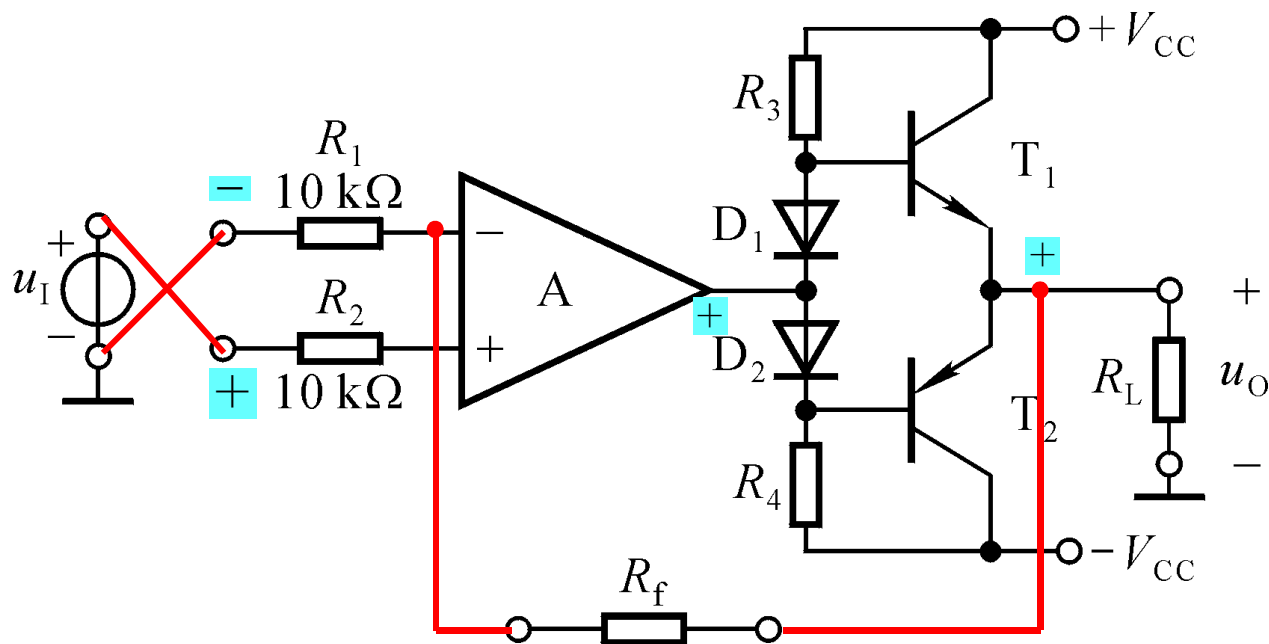
只可能引入电压并联或电流串联两种组态的交流负反馈。

### 自测题三 电路如图所示。

(1) 合理连线，接入信号源和反馈，使电路的输入电阻增大，输出电阻减小； **交流电压串联负反馈**

(2) 若  $|\dot{A}_u| = \frac{U_o}{U_i} = 20$ ，则  $R_F$  应取多少千欧？

根据虚短、虚断， $|\dot{A}_{uf}| = \frac{U_o}{U_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$



## 5.6 负反馈放大电路的稳定性

### 5.6.1 负反馈放大电路自激振荡产生的原因和条件

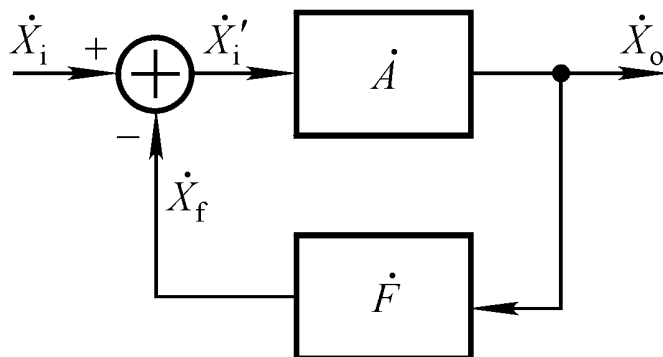
1. 现象：输入信号为0时，输出有一定幅值、一定频率的信号，称电路产生了自激振荡。此时，电路无法正常放大，处于不稳定状态。

#### 2. 产生的原因

在低频段或高频段，若存在一个频率 $f_0$ ，且当 $f=f_0$ 时反馈量相对于中频段产生 $\pm\pi$ 的附加相移，则

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

对  $f=f_0$  的信号，净输入量是输入量与反馈量之和。



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

在输入信号为零时，因为某种电扰动(如合闸通电)，其中含有频率为  $f_0$  的信号，对于  $f=f_0$  的信号，产生正反馈过程：

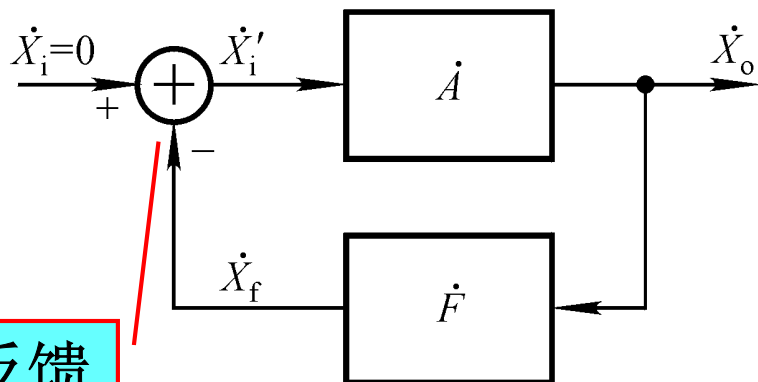
$$|\dot{X}_o| \uparrow \rightarrow |\dot{X}_f| \uparrow \rightarrow |\dot{X}_i'| \uparrow \rightarrow |\dot{X}_o| \uparrow \uparrow$$

输出量逐渐增大，直至达到动态平衡，电路产生了自激振荡。

负反馈放大电路自激振荡的产生原因：在电路的低频段或高频段由于极间电容、耦合电容和旁路电容的影响，相对于中频段产生了  $\pm\pi$  附加相移，从而引起正反馈过程而产生了自激振荡，振荡频率  $f_0$  不可控，应当消除这种自激振荡。



## 3. 自激振荡的条件



负反馈

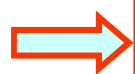
$$\text{负反馈时, } \dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

若  $1 + \dot{A}\dot{F} = 0$  (即  $\dot{A}\dot{F} = -1$ ), 则  $\dot{A}_f \rightarrow \infty$ 。

产生自激振荡

此时  $\dot{X}_i = 0$ , 所以  $\dot{X}_i' = -\dot{X}_f = -\dot{A}\dot{F}\dot{X}_i'$

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



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

由于电路通电后输出量有一个从小到大直至稳幅的过程, 所以起振条件为

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

## 5.6.2 负反馈放大电路稳定性的定性分析

设反馈网络为纯电阻网络，放大电路为直接耦合形式，则：

①附加相移由放大电路决定；

②只有极间电容带来的滞后相移，振荡只可能产生在高频段。

对于单管放大电路： $f \rightarrow \infty$ 时，附加相移  $\varphi_A' \rightarrow -90^\circ, |\dot{A}| \rightarrow 0$   
因没有满足相位条件的频率，故引入负反馈后不可能振荡。

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

因没有满足幅值条件的频率，故引入负反馈后不可能振荡。

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

对于产生 $-180^\circ$ 附加相移的信号频率，有可能满足幅值条件，故引入负反馈后可能振荡。

什么样的放大电路引入负反馈后容易产生自激振荡？

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

$(1+AF)$ 越大，即反馈越深，越容易满足起振条件，就越容易产生自激振荡。

**放大电路的级数越多，耦合电容、旁路电容越多，引入的负反馈越深，产生自激振荡的可能性越大。所以，电路的自激振荡是由其自身条件决定的。**

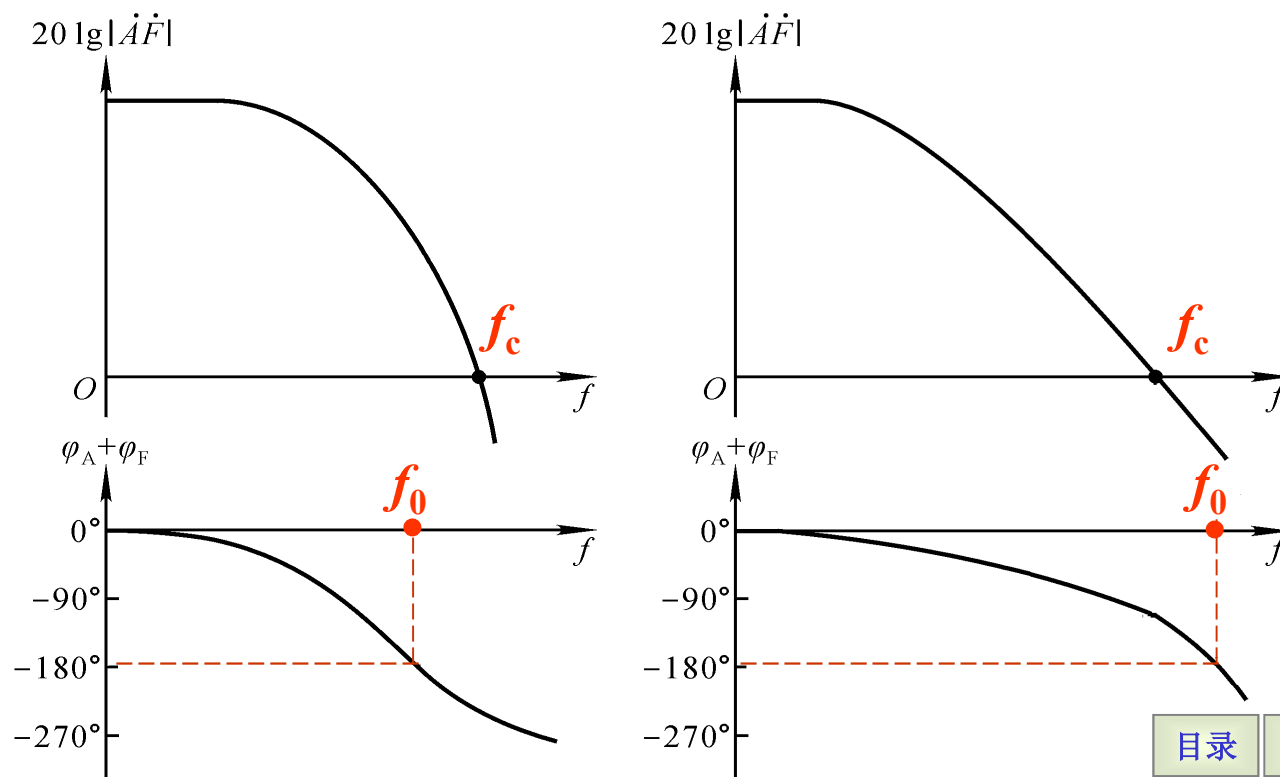
## 5.6.3 负反馈放大电路稳定性的判断

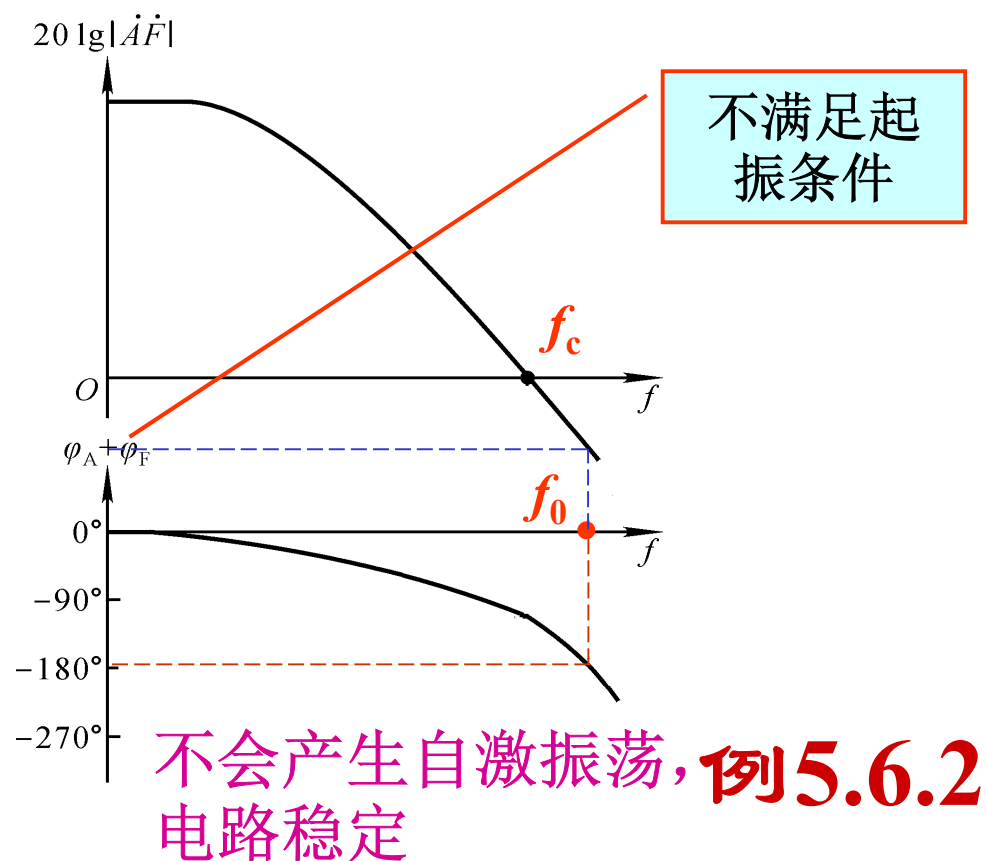
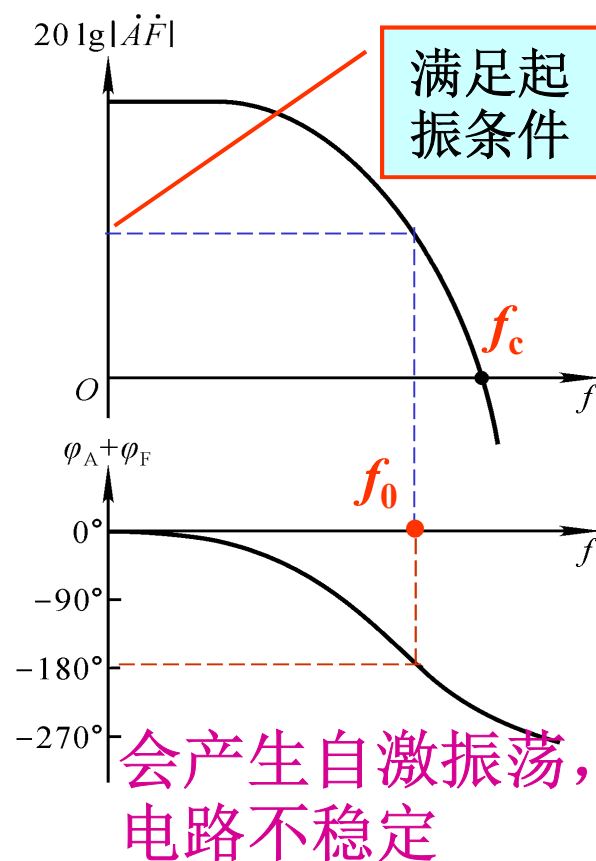
### 一、判断方法

已知**环路增益的频率特性**来判断闭环后电路的稳定性。

满足幅值条件的频率(即环路增益下降到**0dB**的频率), 记作 $f_c$ ;

满足相位条件的频率(即  $\varphi_A + \varphi_F = -180^\circ$  的频率), 记作 $f_0$ 。

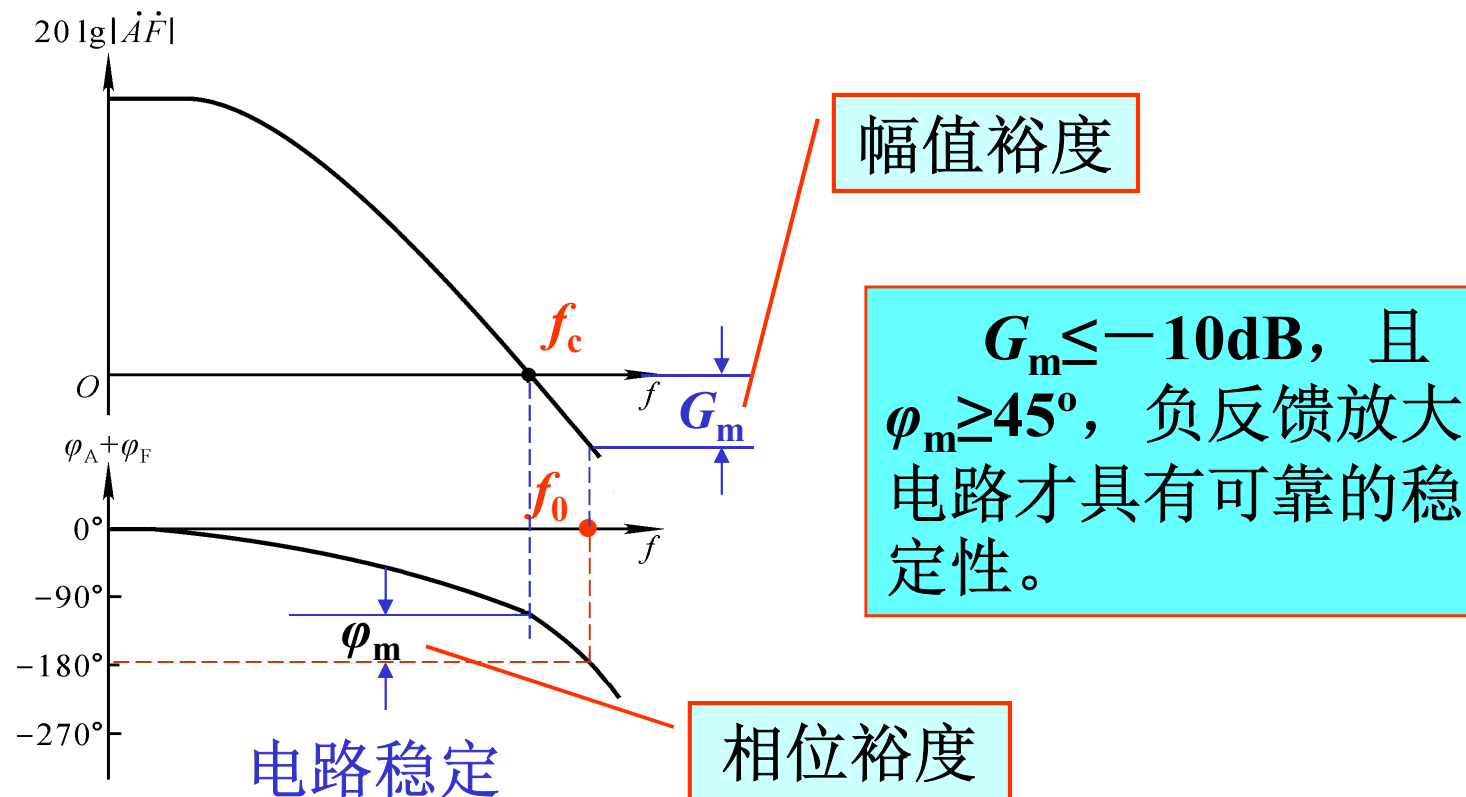


**例5.6.2**

(1) 若不存在  $f_0$ , 则电路稳定。

(2) 若存在  $f_0$ :  $f_0 < f_c$ , 电路不稳定, 会产生自激振荡;  
 $f_0 > f_c$ , 电路稳定, 不会产生自激振荡。

## 二、稳定裕度

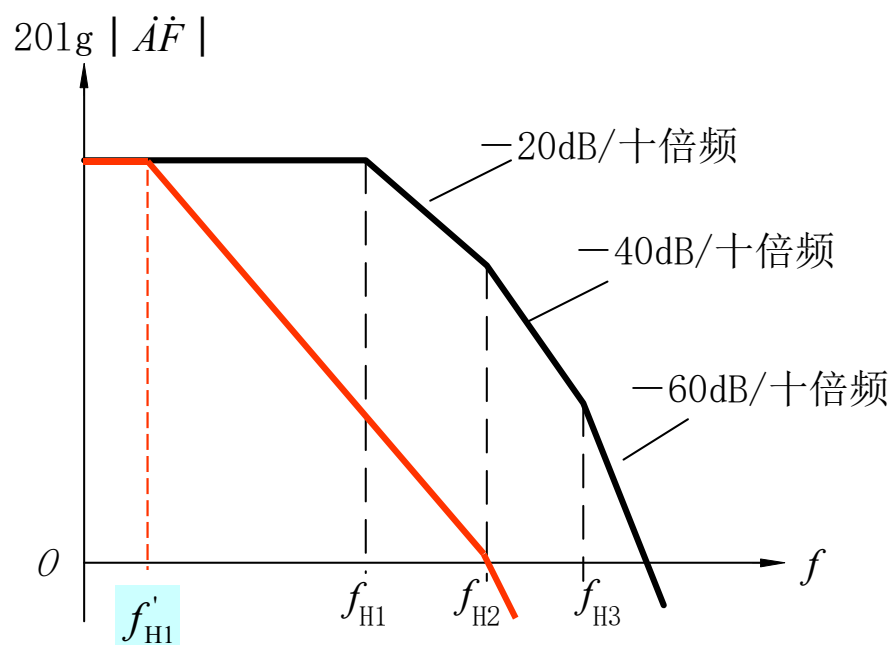


## 5.6.4 负反馈放大电路自激振荡的消除方法

常用的方法为滞后补偿方法。

设放大电路为直接耦合方式，反馈网络为电阻网络。

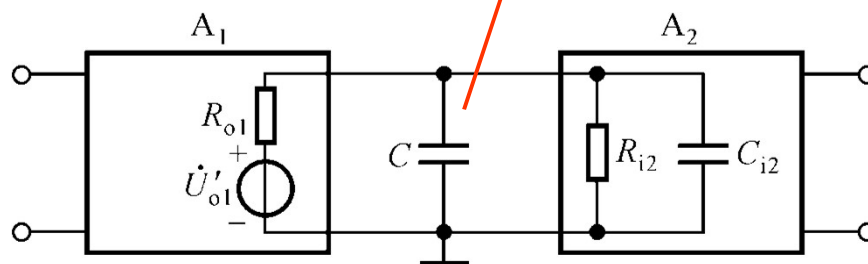
### 1. 简单滞后补偿



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

在最低的上限频率所在回路加补偿电容。

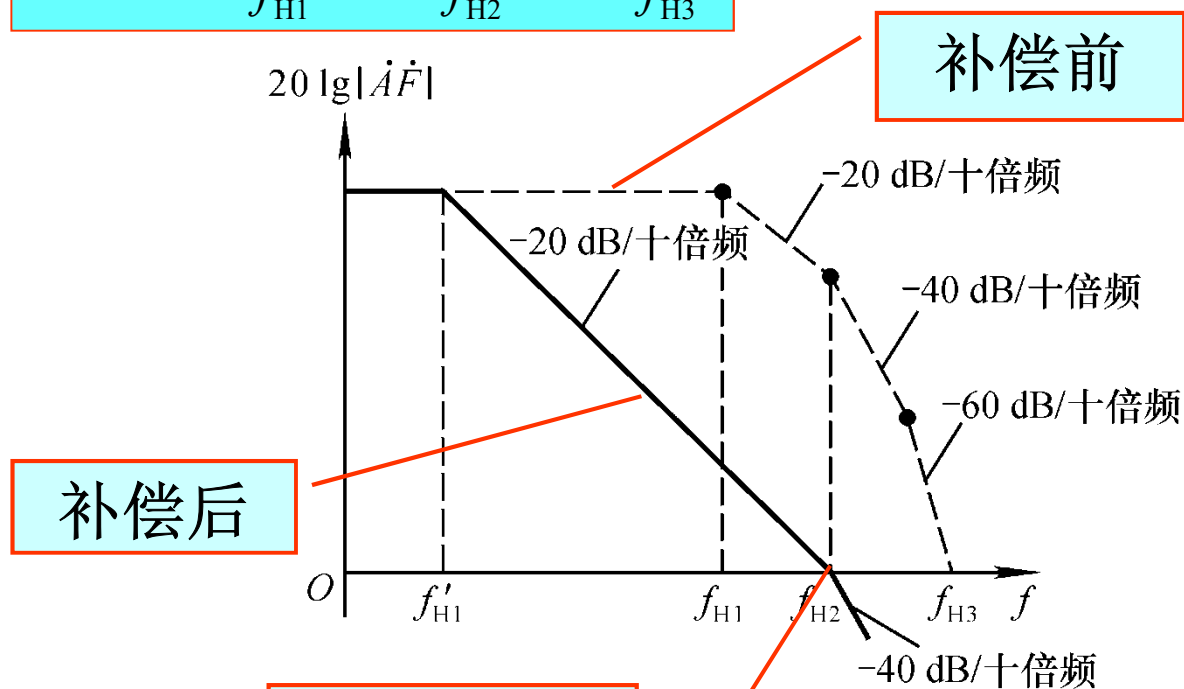
补偿电容



## 5.6 负反馈放大电路的稳定性

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

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



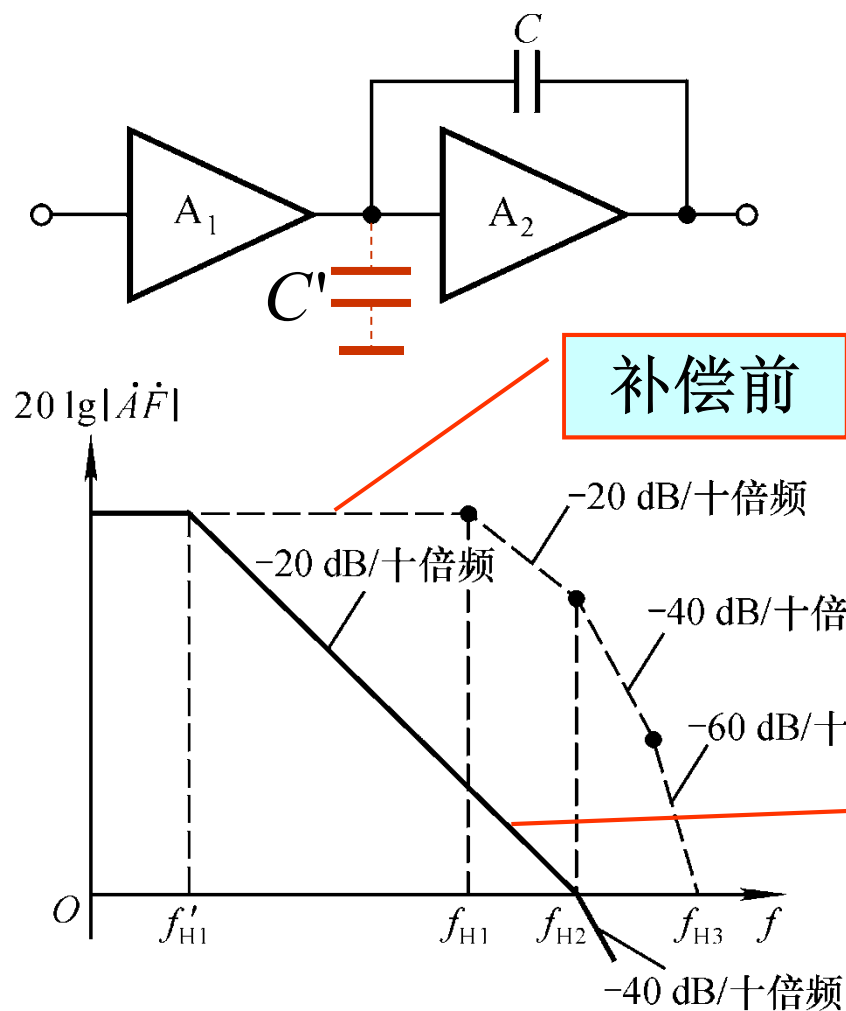
滞后补偿法是以频带变窄为代价来消除自激振荡的。

最大附加相移为 $-135^\circ$

具有 $45^\circ$ 的相位裕度, 故电路稳定



## 2. 密勒补偿



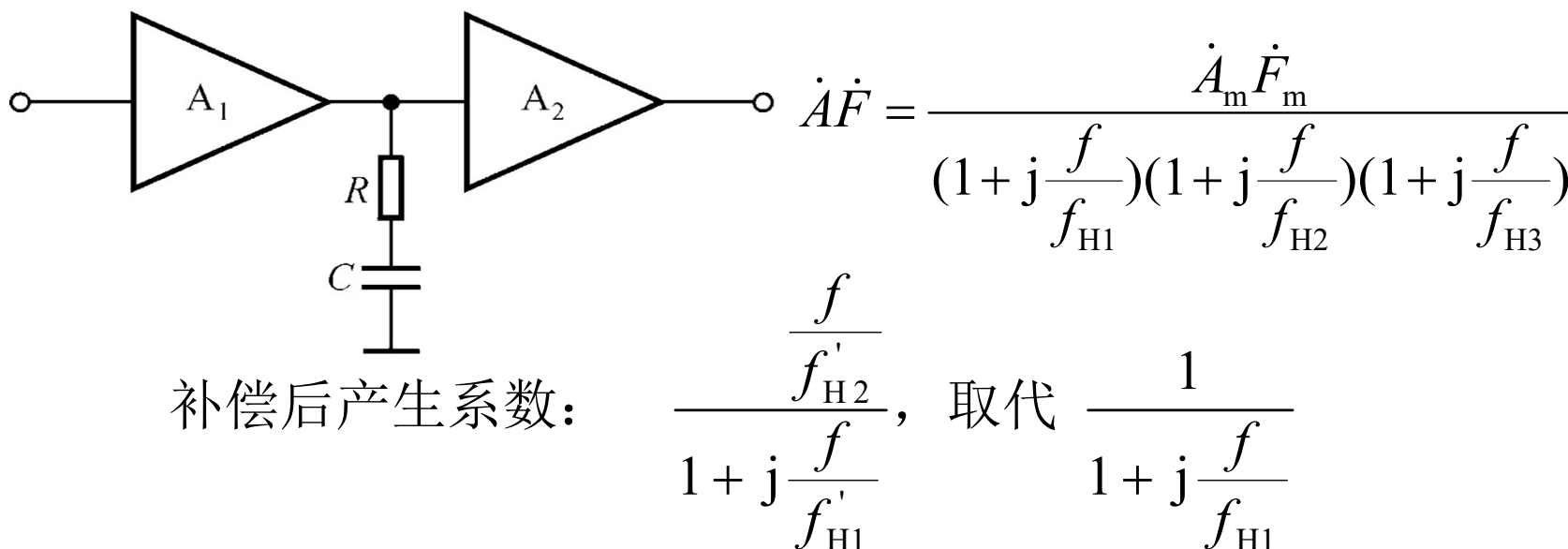
在最低的上限频率所在回路加补偿电容。

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

在获得同样补偿的情况下，补偿电容比简单滞后补偿的电容小得多。

补偿后

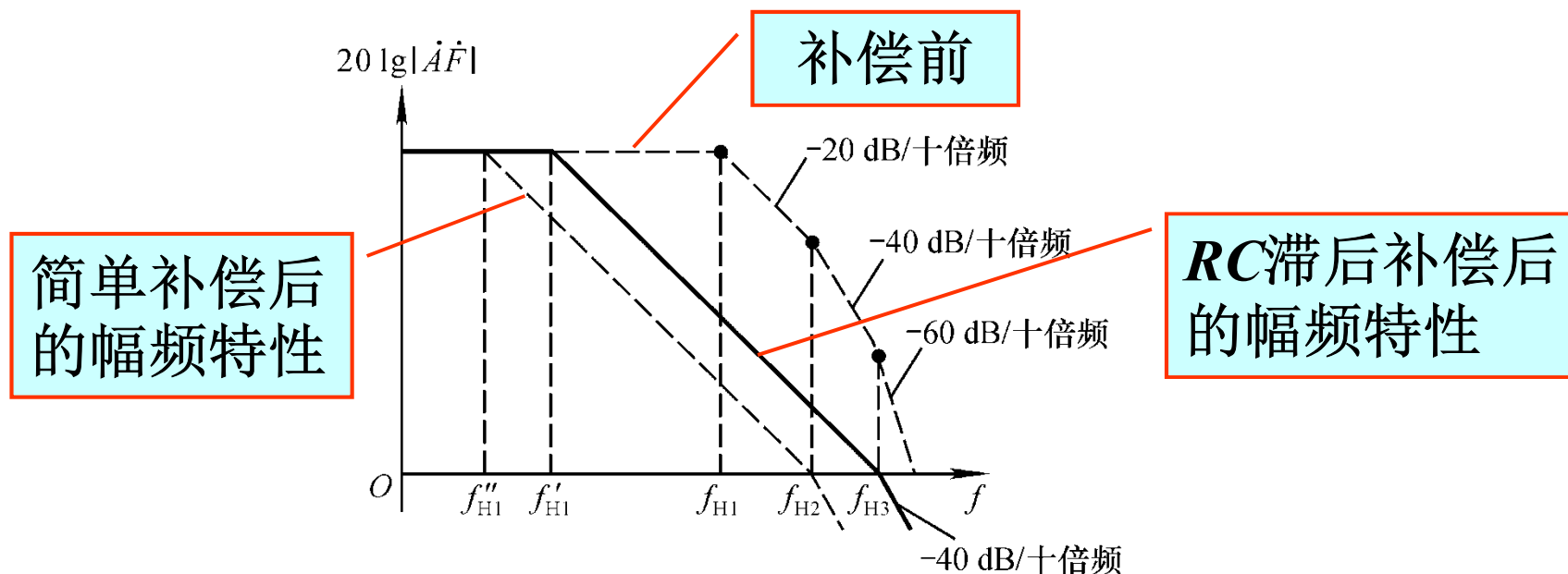
### 3. $RC$ 滞后补偿：在最低的上限频率所在回路加补偿。



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

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

## $RC$ 滞后补偿与简单滞后补偿比较

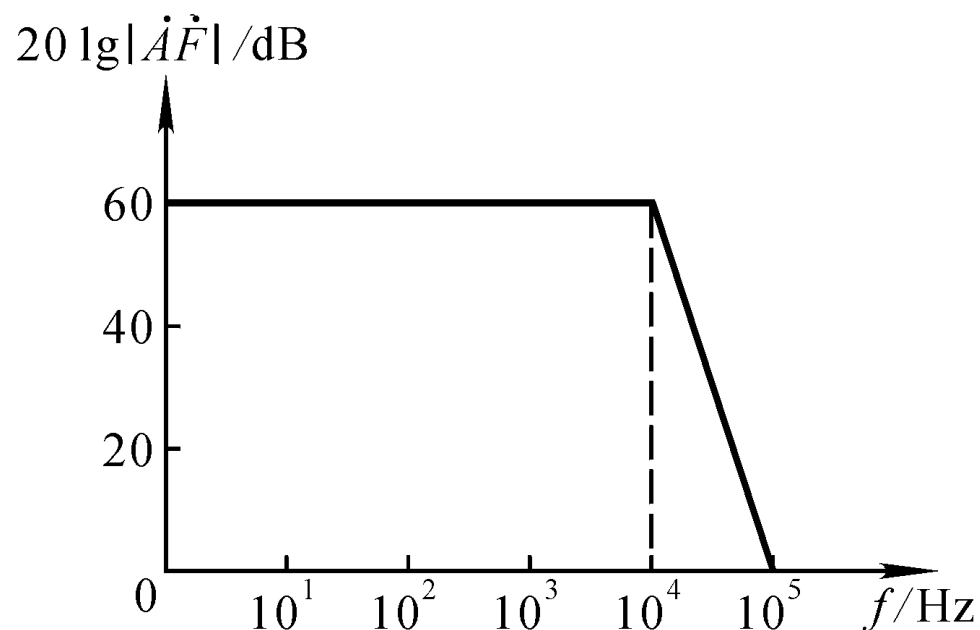


滞后补偿法消振均以频带变窄为代价， $RC$ 滞后补偿较简单电容补偿使频带的变化小些。

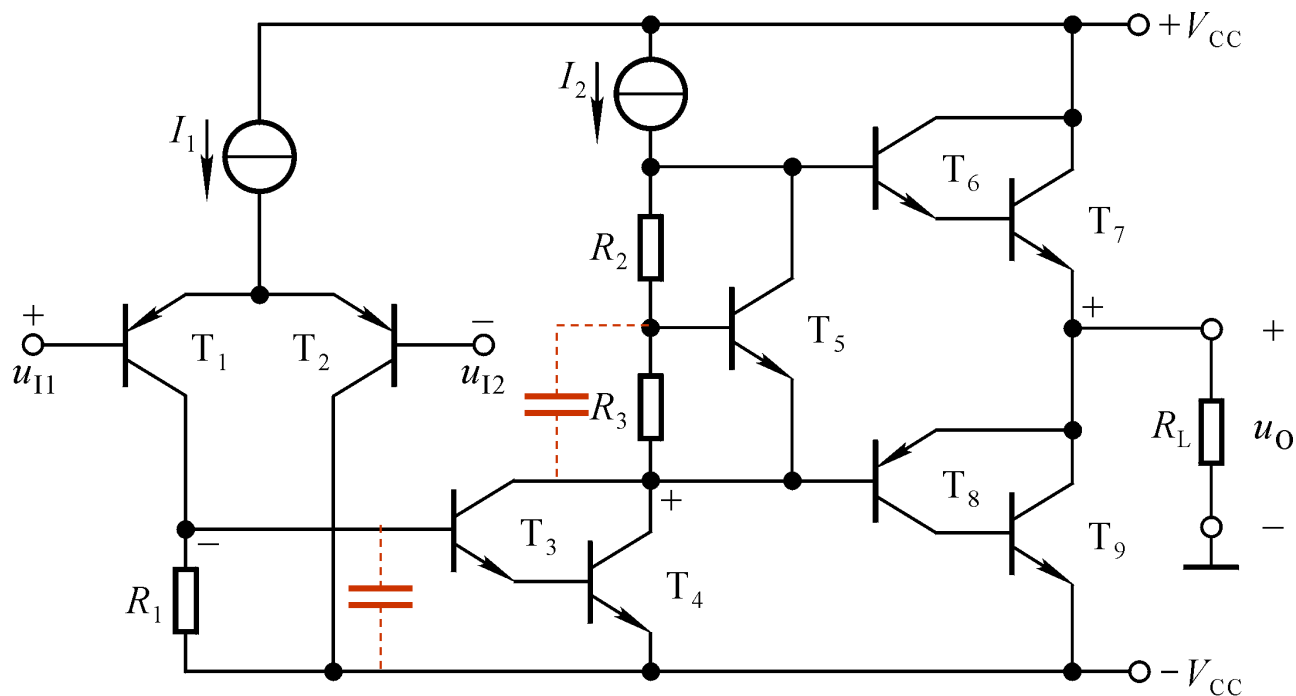
为使消振后频带变化更小，可考虑采用超前补偿的方法，略。

## 讨论一

试问电路闭环后会产生自激振荡吗？若已知反馈网络为纯电阻网络，且  $20\lg|\dot{A}| = 100\text{dB}$ ，则使电路不产生自激振荡的  $20\lg|\dot{F}|$  的上限值为多少？



## 讨论二



判断电路引入负反馈后有可能产生自激振荡吗？  
如可能，则应在电路的哪一级加补偿电容？

# 第 5 章

# 结 束