



# 第五章

## 放大电路中的反馈

§ 5.1 反馈的概念及判断

§ 5.2 负反馈放大电路的方框图及放大倍数的估算

§ 5.3 交流负反馈对放大电路性能的影响

§ 5.4 负反馈放大电路的稳定性

§ 5.5 放大电路中反馈的其它问题

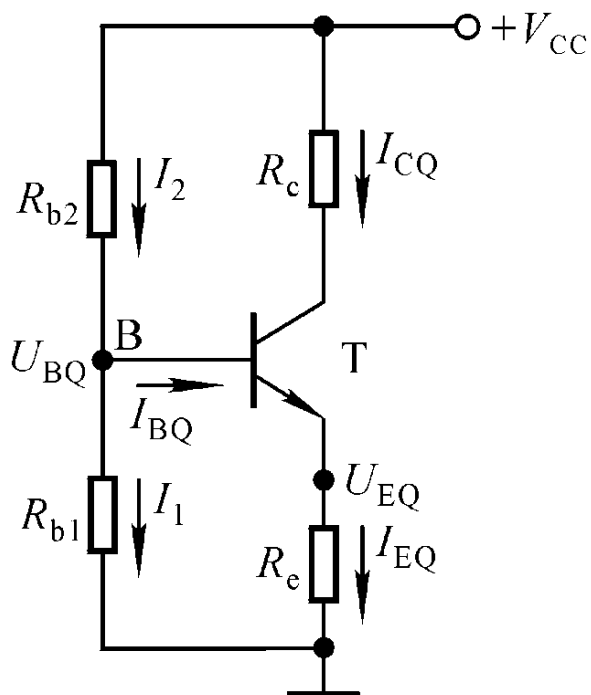


## 本章基本要求

- **会判：**判断电路中有无反馈及反馈的性质
- **会算：**估算深度负反馈条件下的放大倍数
- **会引：**根据需求引入合适的反馈
- **会判振消振：**判断电路是否能稳定工作，会消除自激振荡

## 知识回顾

### 放大电路存在静态工作点不稳定问题



静态工作点稳定电路：

通过 $R_e$ 引入直流负反馈，稳定静态工作点

工作原理：

$$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow U_E \uparrow \rightarrow$$

$$U_{BE} \downarrow \quad (U_B \text{基本不变}) \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$$

反馈使放大电路从理论走向实用！

## ➤ 反馈放大器

□ 起因：放大电路输出失真和不稳定，应用困难

□ 历史：

✓1928.8.2，美国 AT&T 的 H.S. Black 为改善长距离电话传输系统中放大器的输出失真而发明

✓1934年，在 Harry Nyquist 帮助下，解决了反馈放大器的振荡问题

✓1940年，Hendrik Bode 引入半对数坐标系，使频率特性的绘制工作更适合于工程设计

✓1945年，BELL电话公司出版“Network analysis and feedback amplifier design”，标志反馈放大器设计理论的成熟

## ➤ 启发：反馈概念的发明

- 反馈可以解决放大电路的失真和稳定问题
- 反馈还影响电路的其它性能，其影响与反馈的性质有关
- 判断放大电路有无反馈和反馈的性质非常重要
- 定性分析非常必要

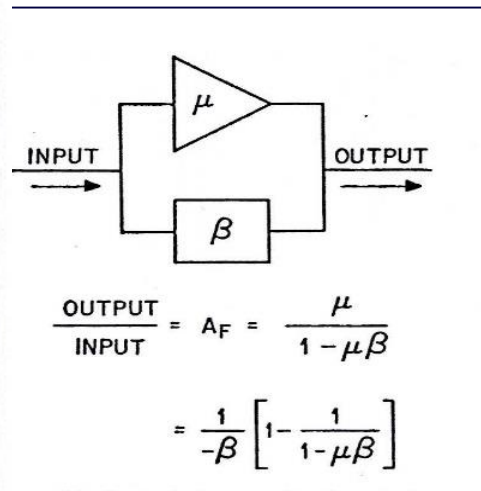


图. Harold Stephen Black及其发明的负反馈原理示意图

## § 5.1 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

□ 将输出量的一部分或全部通过一定的方式引回到输入回路，来影响输入量的措施

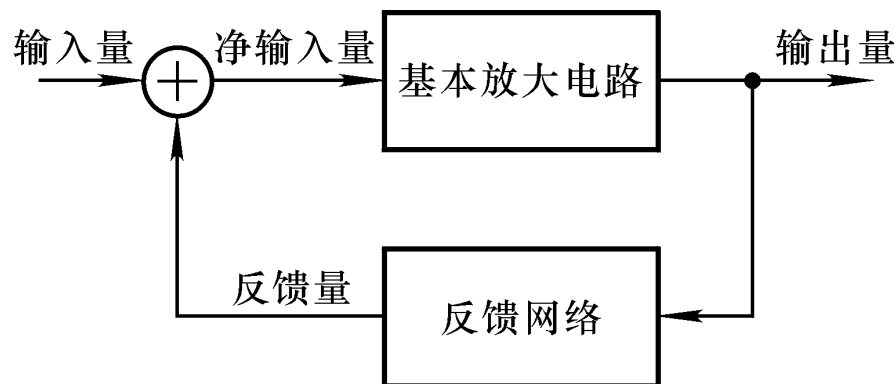
输出电压/  
输出电流

输入电压/  
输入电流

多少

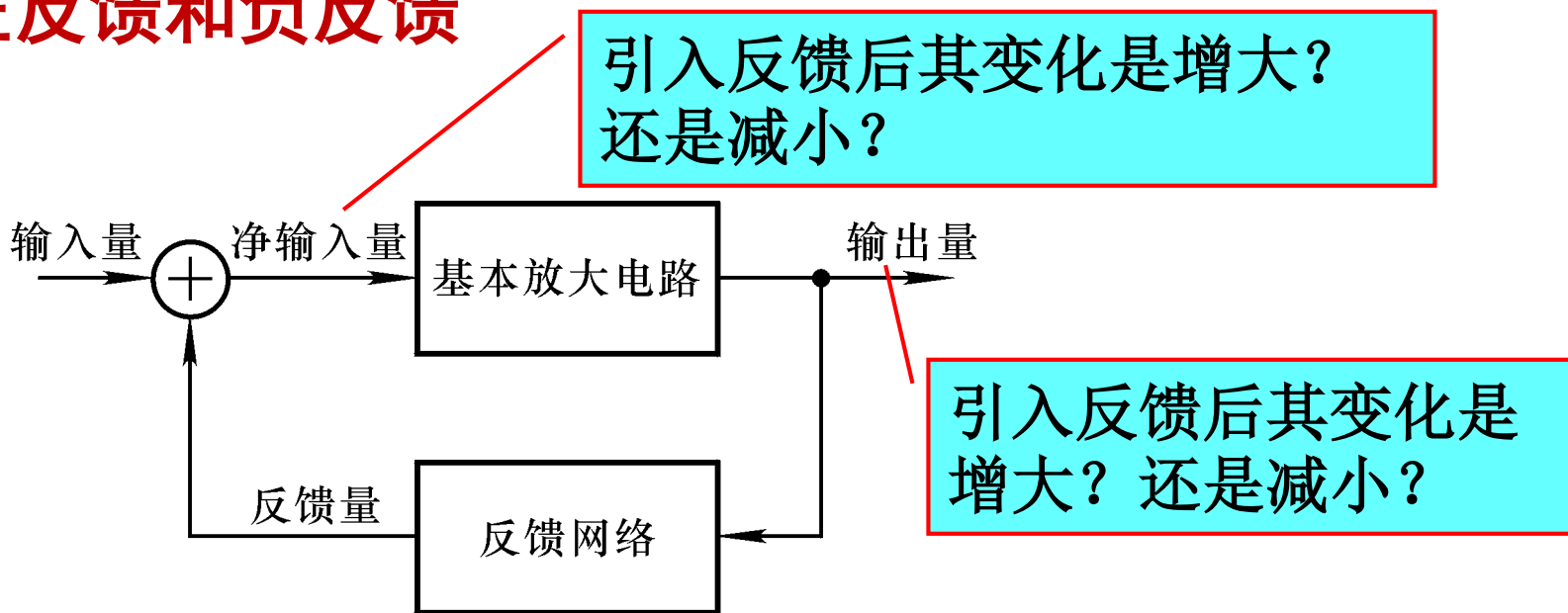
怎样引出

如何引回



□ 反馈要研究哪些问题？

## ➤ 2. 正反馈和负反馈



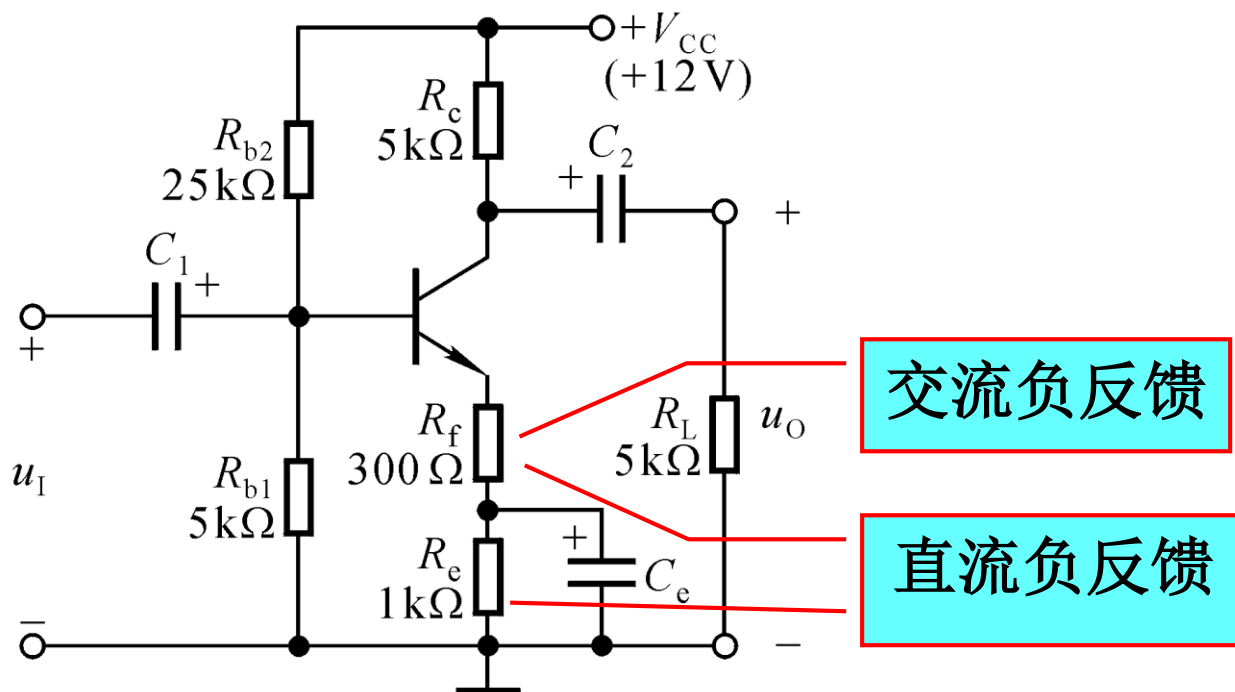
### □ 从反馈的结果来判断：

- ✓ 若反馈的结果使输出量的变化减小，则为负反馈，反之为正反馈
- ✓ 若反馈的结果使净输入量的变化减小，则为负反馈，反之为正反馈



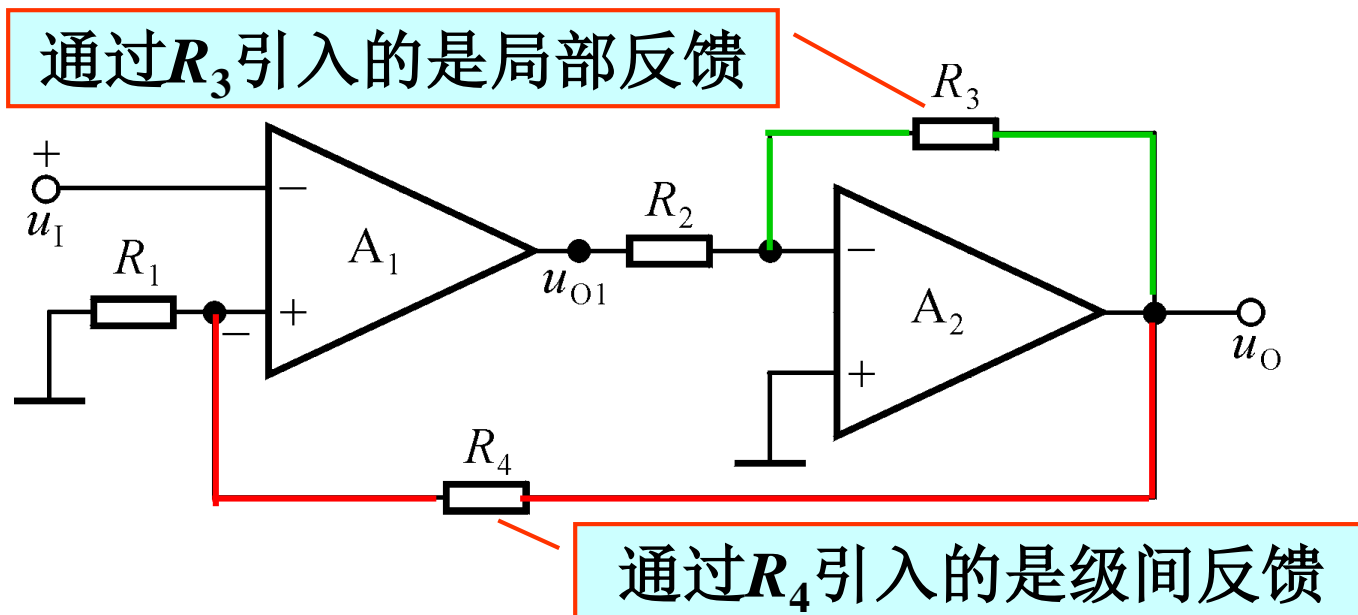
### ➤ 3. 直流反馈和交流反馈

□ 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



## ➤ 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



本章重点研究级间（或称总体）交流负反馈！

## 二、交流负反馈的四种组态

### ➤ 1. 电压反馈和电流反馈

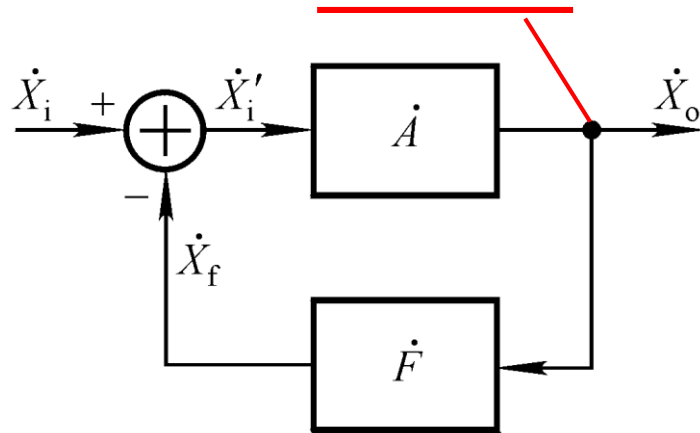
□ 描述放大电路和反馈网络在输出端的连接方式，即反馈网络的取样对象

✓ 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

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

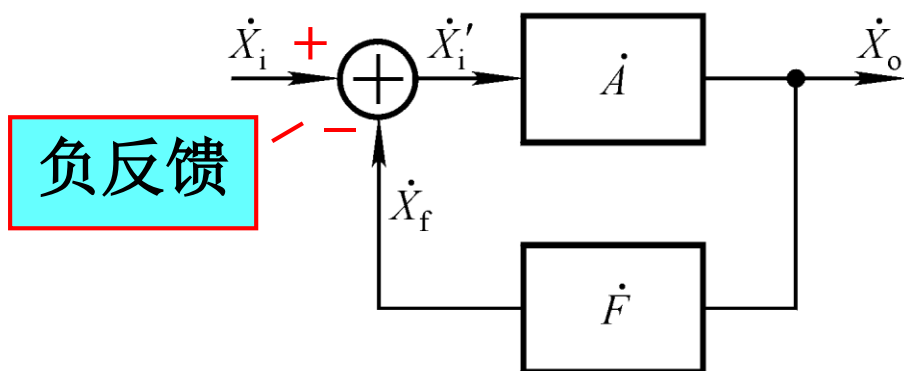
✓ 将输出电流的一部分或全部引回到输入回路来影响净输入量的为电流反馈，即

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



## ➤ 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、净输入量的叠加关系



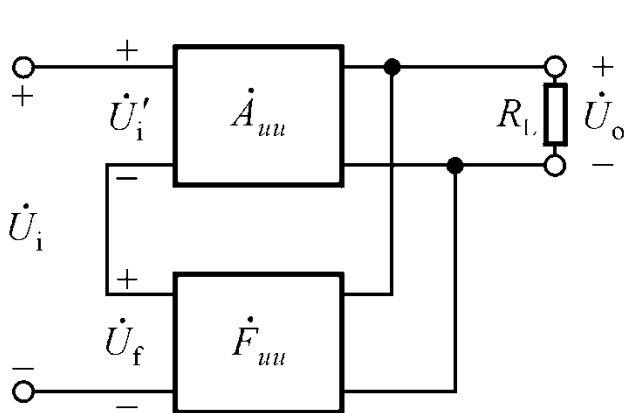
为何串联反馈一定是电压信号的叠加，并联反馈则是电流？

- ✓ 信号的种类？
- ✓ 电压源可以并联么？
- ✓ 电流源可以串联么？

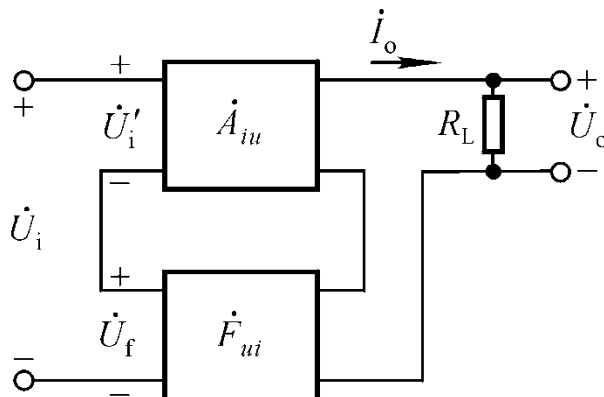
$$\dot{U}_i' = \dot{U}_i - \dot{U}_f \quad \text{--串联负反馈}$$

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

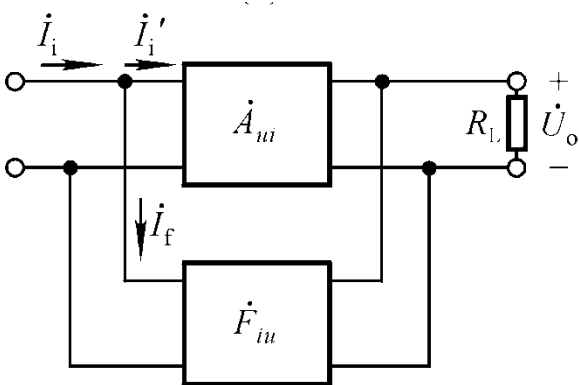
### ➤ 3. 四种反馈组态：注意量纲



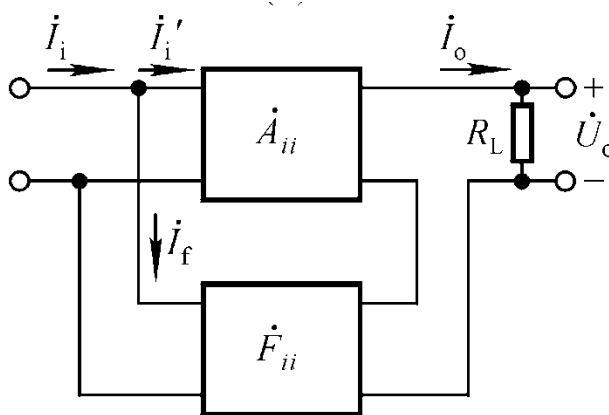
电压串联负反馈



电流串联负反馈



电压并联负反馈



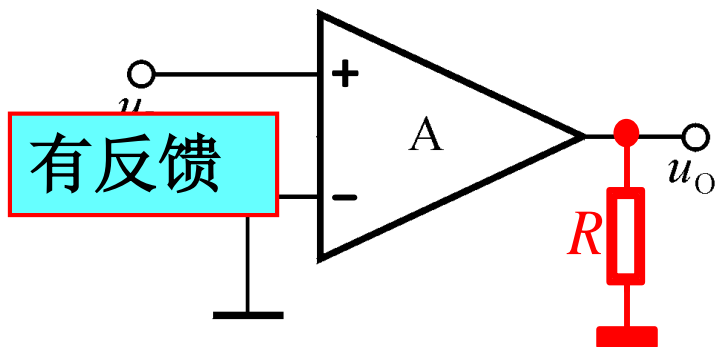
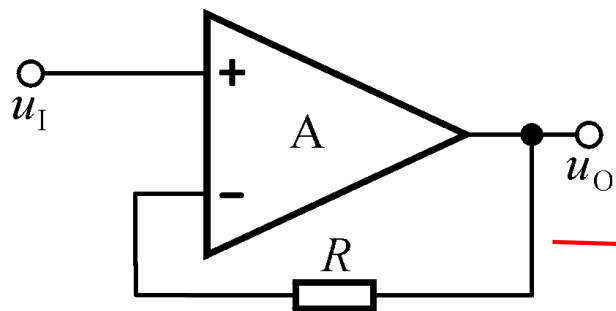
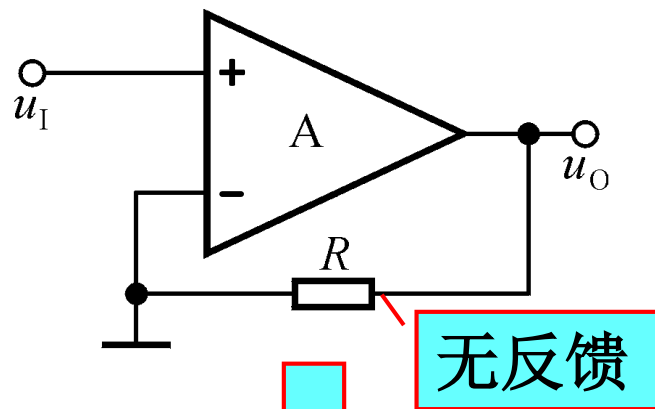
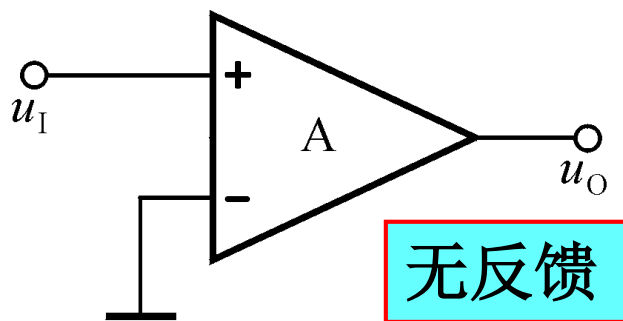
电流并联负反馈

✓ 为何在并联负反馈电路中不加恒压源信号？  
✓ 为何在串联负反馈电路中不加恒流源信号？

### 三、反馈的判断

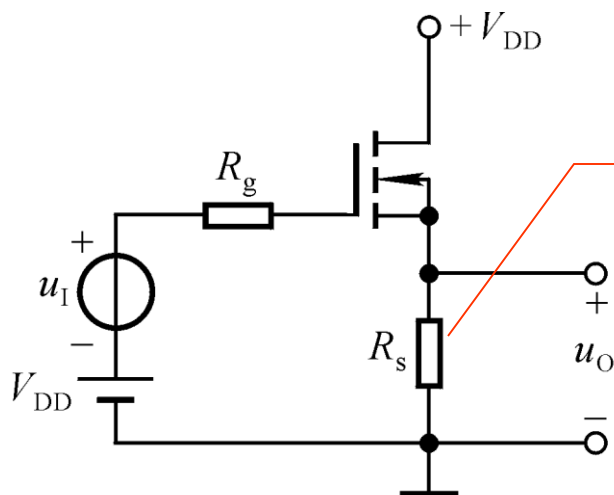
#### ➤ 1. 有无反馈的判断

✓ “找联系”：找输出回路与输入回路的联系，若有则有反馈，否则无反馈



## ➤ 1. 有无反馈的判断

✓ “找联系”：是找输出回路与输入回路的联系，不仅是输出端与输入端的联系！

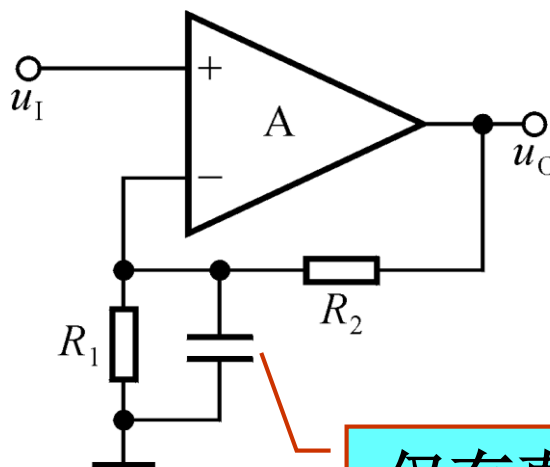


既在输入回路又在输出回路，因而引入了反馈

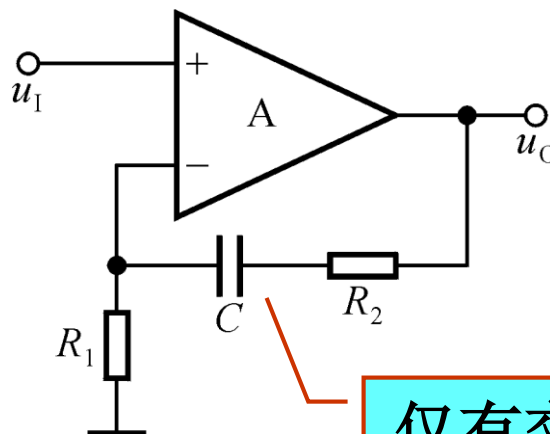
## ➤ 2. 直流反馈和交流反馈的判断

✓ “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



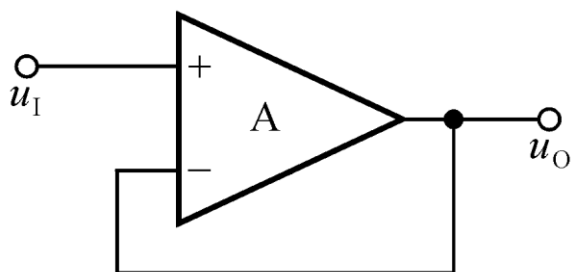
仅有直流  
反馈



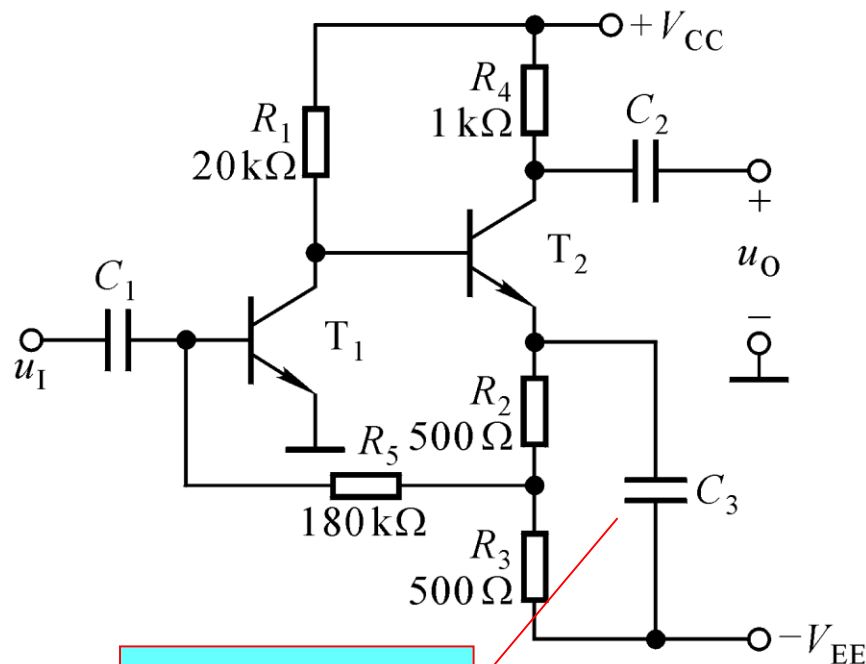
仅有交流  
反馈



## ➤ 2. 直流反馈和交流反馈的判断



交、直  
流反馈  
共存



仅有直流  
反馈

### ➤ 3. 反馈极性和负反馈组态的判断

#### ✓ 输入端信号

✓ 叠加方式：决定串联/并联反馈

✓ 叠加结果：决定正/负反馈

#### ✓ 输出端信号

✓ 采样方式：决定电压/电流反馈

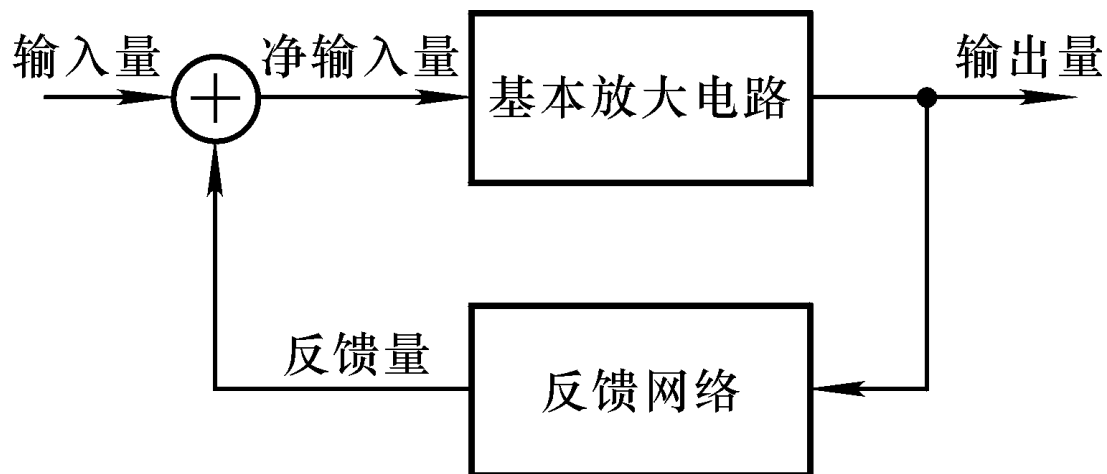
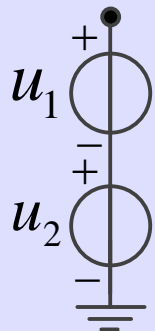
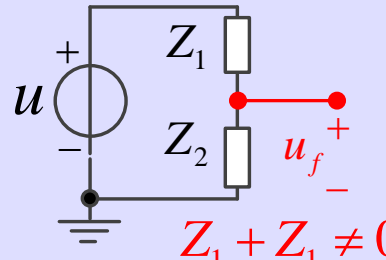
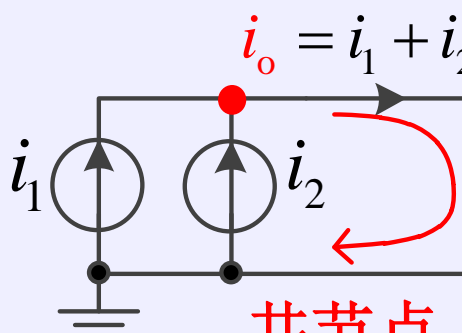
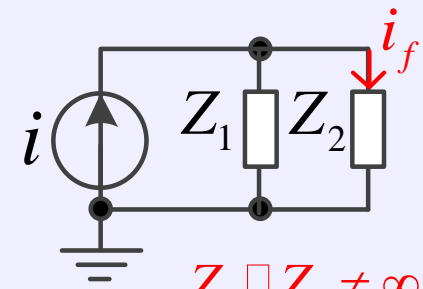


图. 反馈放大电路的方块图

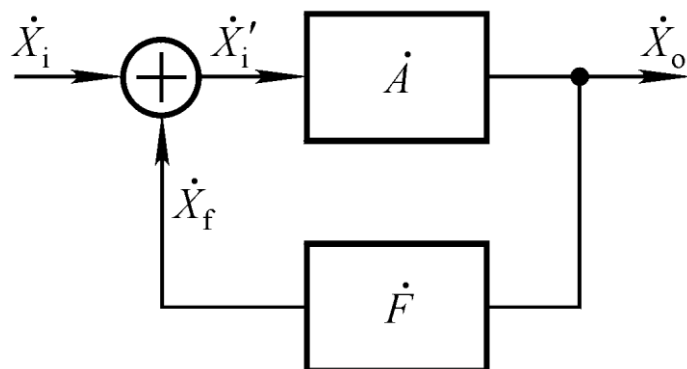
## ➤ 3.1 信号的分类及连接方式

特点 信号源	叠加方式	采样方式
电压信号	<p><b>串联</b></p>  <p><math>u_o = u_1 + u_2</math></p> <p><b>共回路</b></p>	<p><b>串联采样</b></p>  <p><math>Z_1 + Z_2 \neq 0</math></p>
电流信号	<p><b>并联</b></p>  <p><math>i_o = i_1 + i_2</math></p> <p><b>共节点</b></p>	<p><b>并联采样</b></p>  <p><math>Z_1 \parallel Z_2 \neq \infty</math></p>

## ➤ 3.2 由输入端连接关系判断反馈极性和串并联反馈

### ✓ 正/负反馈的判断：“看叠加结果”

- 净输入量被增大 → 正反馈
- 净输入量被减小 → 负反馈



瞬时极性法：

□ 给  $\dot{X}_i$  瞬时扰动，设其扰动极性，以此为依据分析电路中各电流电位的扰动极性从而得到  $\dot{X}_o$  的极性；

□  $\dot{X}_o$  的扰动极性 →  $\dot{X}_f$  的扰动极性 →  $\dot{X}_i$ 、 $\dot{X}_f$ 、 $\dot{X}_i'$  的叠加关系

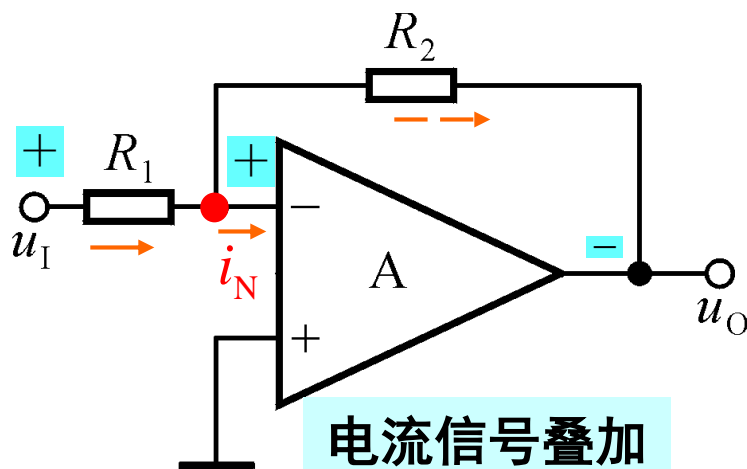
$$\dot{U}_i' = \dot{U}_i - \dot{U}_f \text{ 或 } \dot{I}_i' = \dot{I}_i - \dot{I}_f \quad \text{—— 负反馈}$$

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

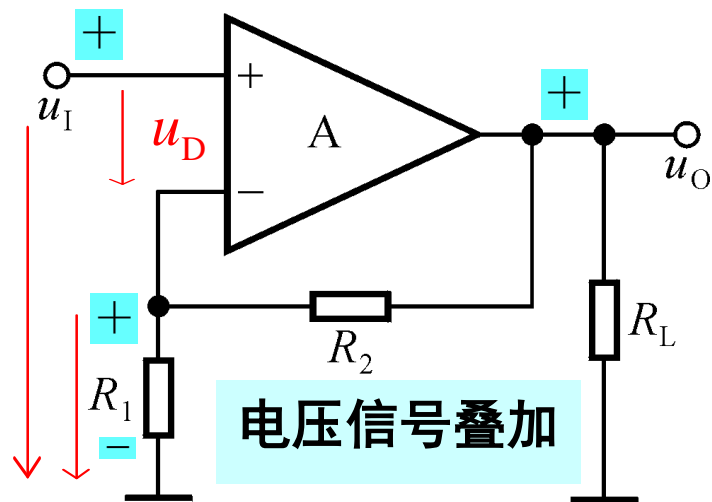
## ➤ 3.2 由输入端连接关系判断反馈极性和串并联反馈

### ✓ 串/并联反馈的判断：“看电路形式”

- 输入量、反馈量共回路 → 电压信号叠加 → 串联反馈
- 输入量、反馈量共节点 → 电流信号叠加 → 并联反馈



引入了并联负反馈

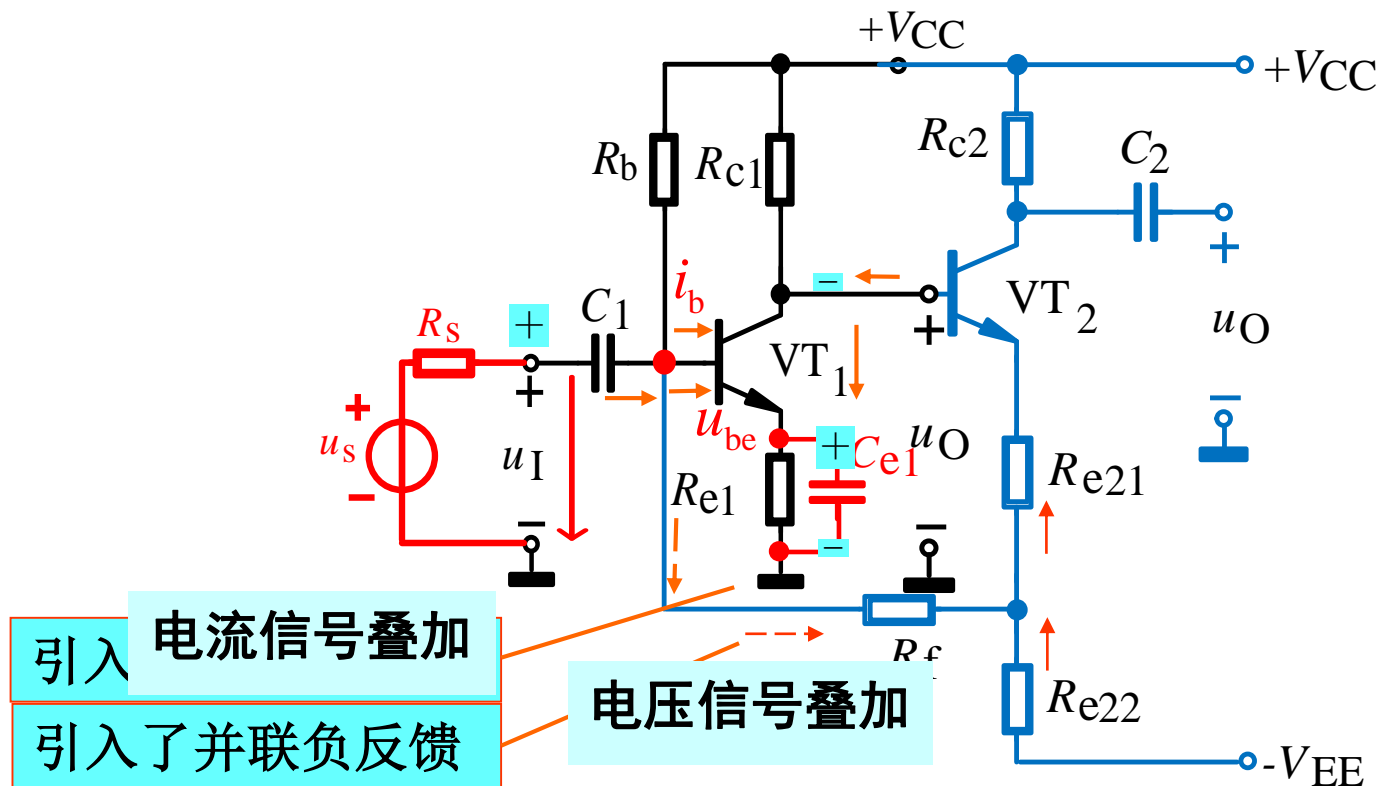


引入了串联负反馈

□ 集成运放构成的反馈放大电路，净输入电压通常指运放两个输入端的电位差，净输入电流指同相或反相输入端电流

## ➤ 3.2 由输入端连接关系判断反馈极性和串并联反馈

✓ 串/并联反馈：输入信号类型必须与串/并联反馈类型吻合



□ 晶体管构成的反馈放大电路，净输入电压通常指第一级放大电路  $u_{be}$ ，净输入电流指第一级放大电路  $i_b$  或  $i_e$  (共基接法)

### ➤ 3.3 由输出端信号采样方式判断电压/电流反馈

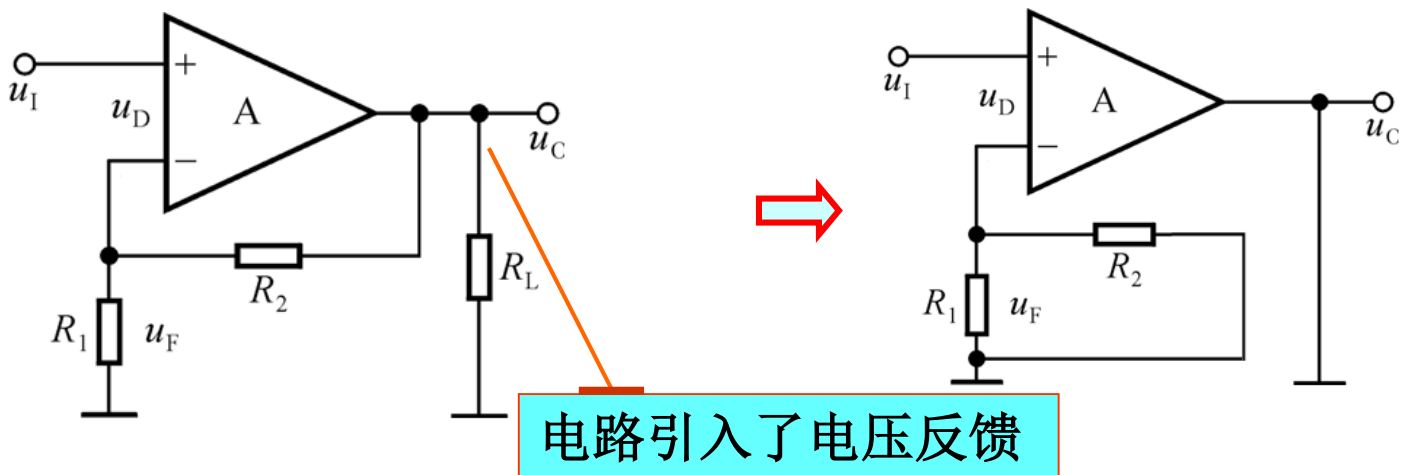
✓ 电压/电流反馈单判断：“看采样方式”

➤ 电压采样：电压反馈

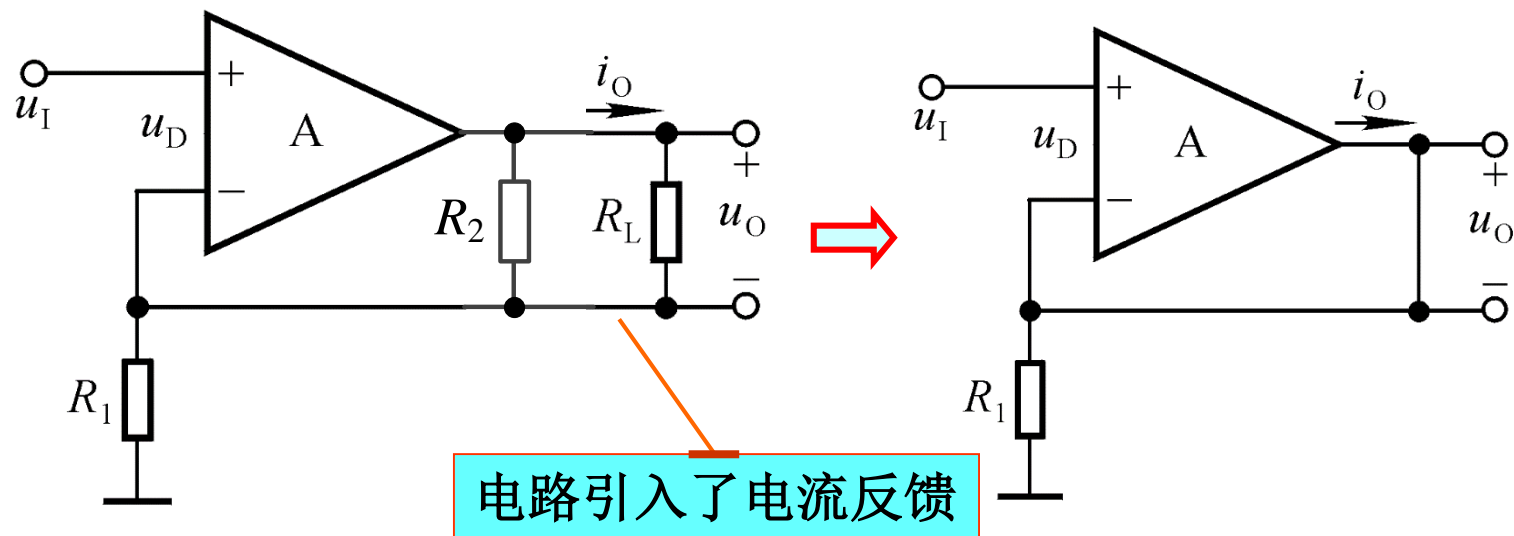
➤ 电流采样：电流反馈

✓ 判断方法：

➤ 令输出短路，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



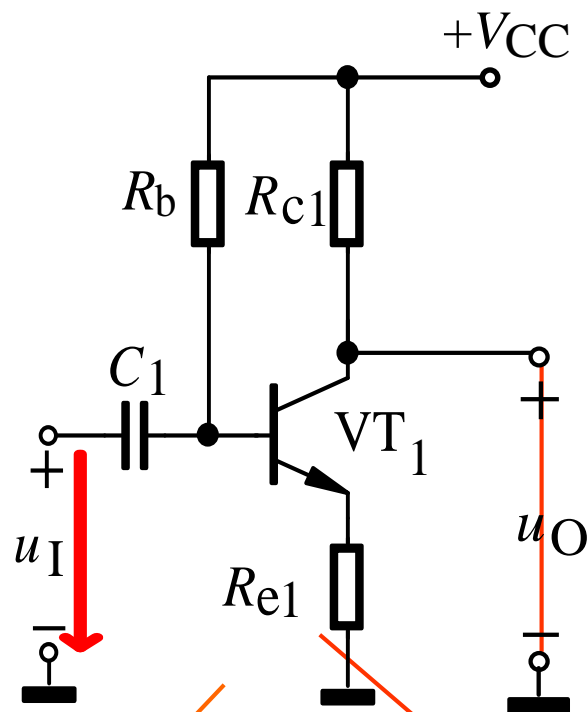
### ➤ 3.3 由输出端信号采样方式判断电压/电流反馈



□ 输出短路时，反馈仍存在



### ➤ 3.3 由输出端信号采样方式判断电压/电流反馈



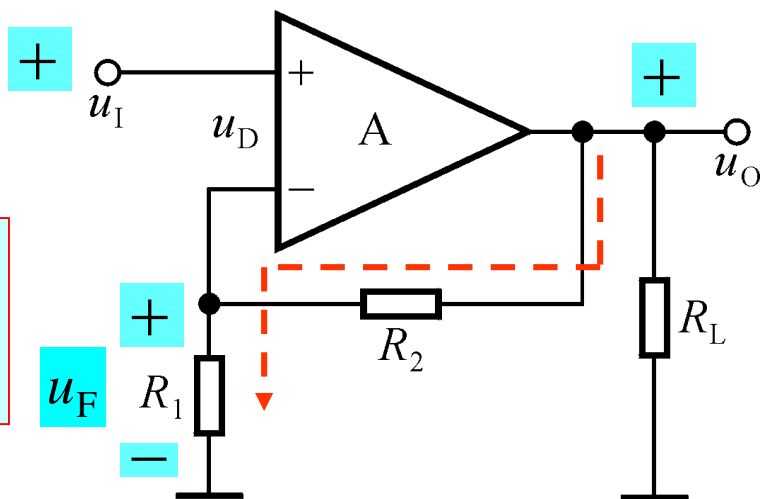
电路引入了电流反馈

仅受基极电流的控制

➤ 注意：反馈量仅决定于输出量

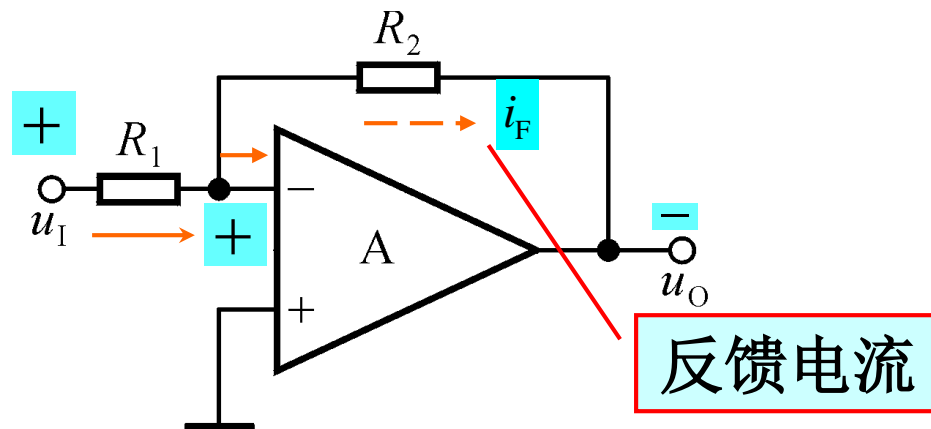
$$u_D = u_I - u_F$$

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



引入了电压串联负反馈

➤ 注意：反馈量仅决定于输出量



引入电压并联负反馈

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

反馈量

反馈量是仅仅决定于输出量的物理量

## ➤ 交流负反馈的四种组态

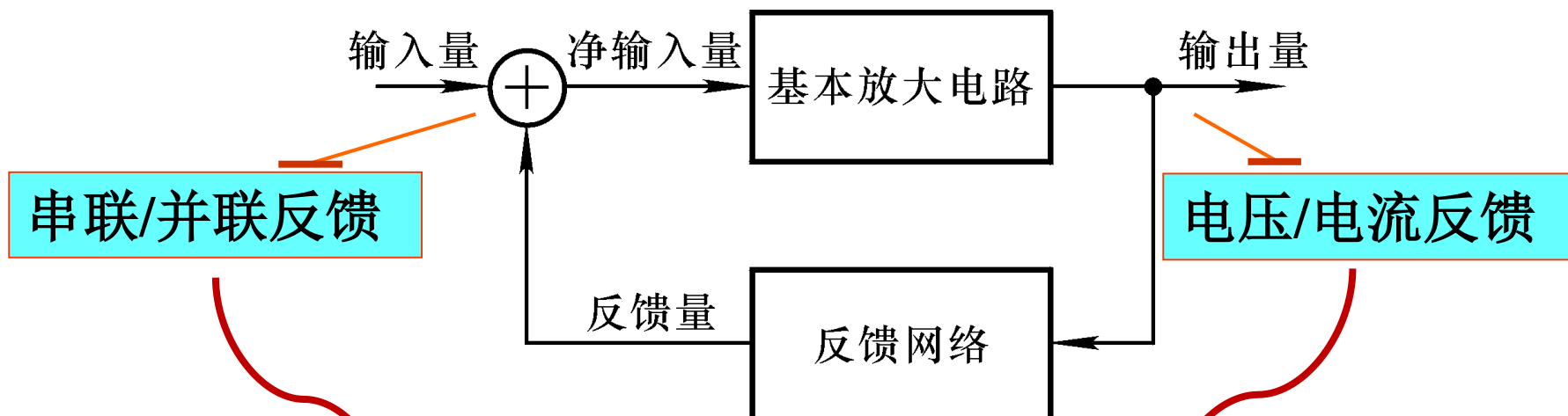


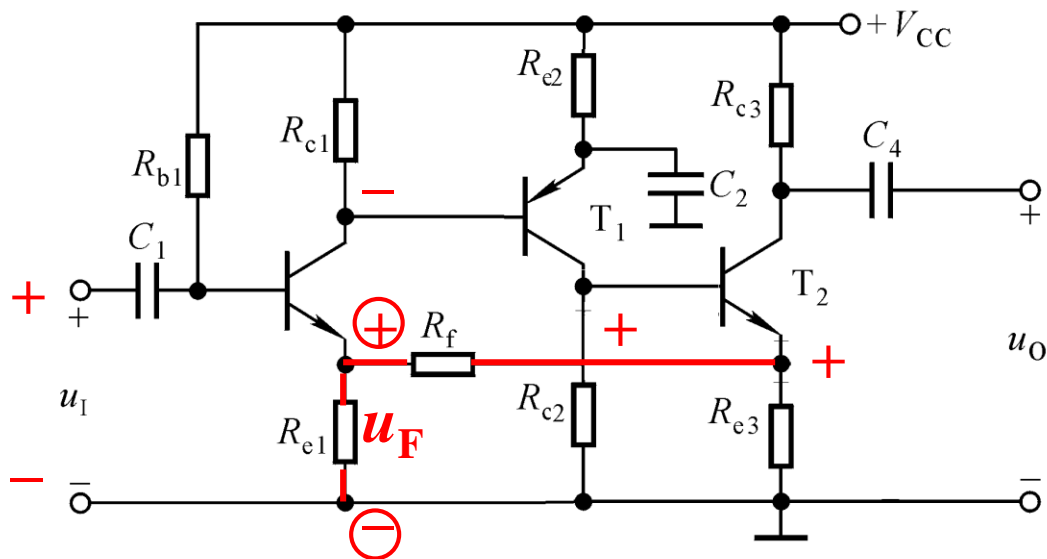
图. 反馈放大电路的方块图

- |           |           |
|-----------|-----------|
| ➤ 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 |

- ✓ 引入串联反馈还是并联反馈决定于信号源的性质
- ✓ 引入电压反馈还是电流反馈决定于负载的需求

## 讨论：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？



引入了电流串联负反馈

1. 若第三级从射极输出，则电路引入了哪种组态的交流负反馈？

2. 若在第一级的射极加旁路电容，则反馈的性质有何变化？

3. 若在第一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？

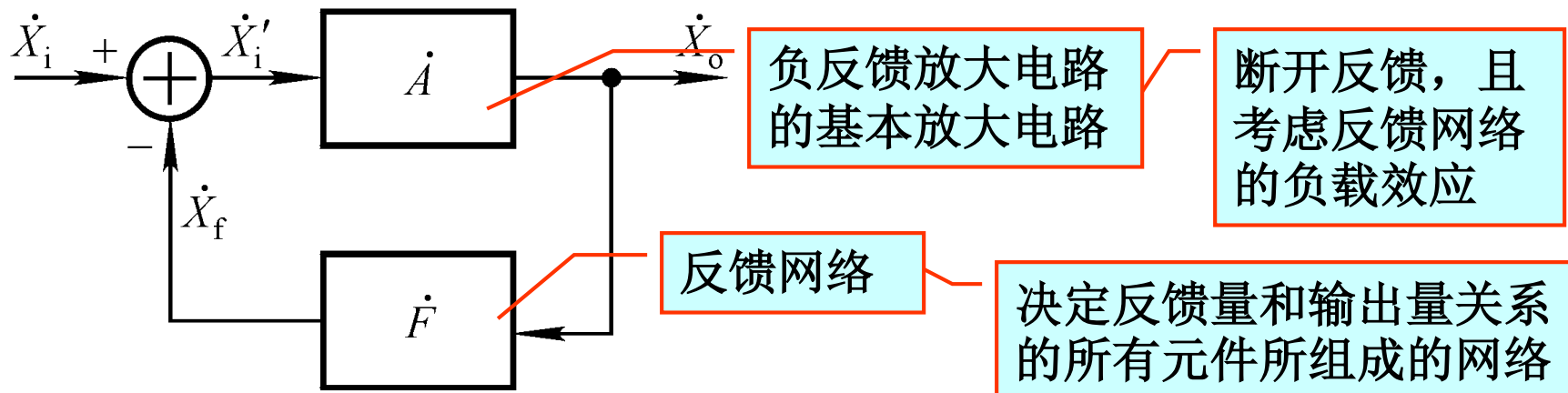
## 分立元件放大电路中的净输入量和输出电流

- 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

## § 5.2 负反馈放大电路的方框图 及放大倍数的估算

- 一、负反馈放大电路的方框图
- 二、放大倍数的一般表达式
- 三、深度负反馈的实质
- 四、基于反馈系数的放大倍数估算方法
- 五、基于理想运放的放大倍数计算方法

# 一、负反馈放大电路的方框图

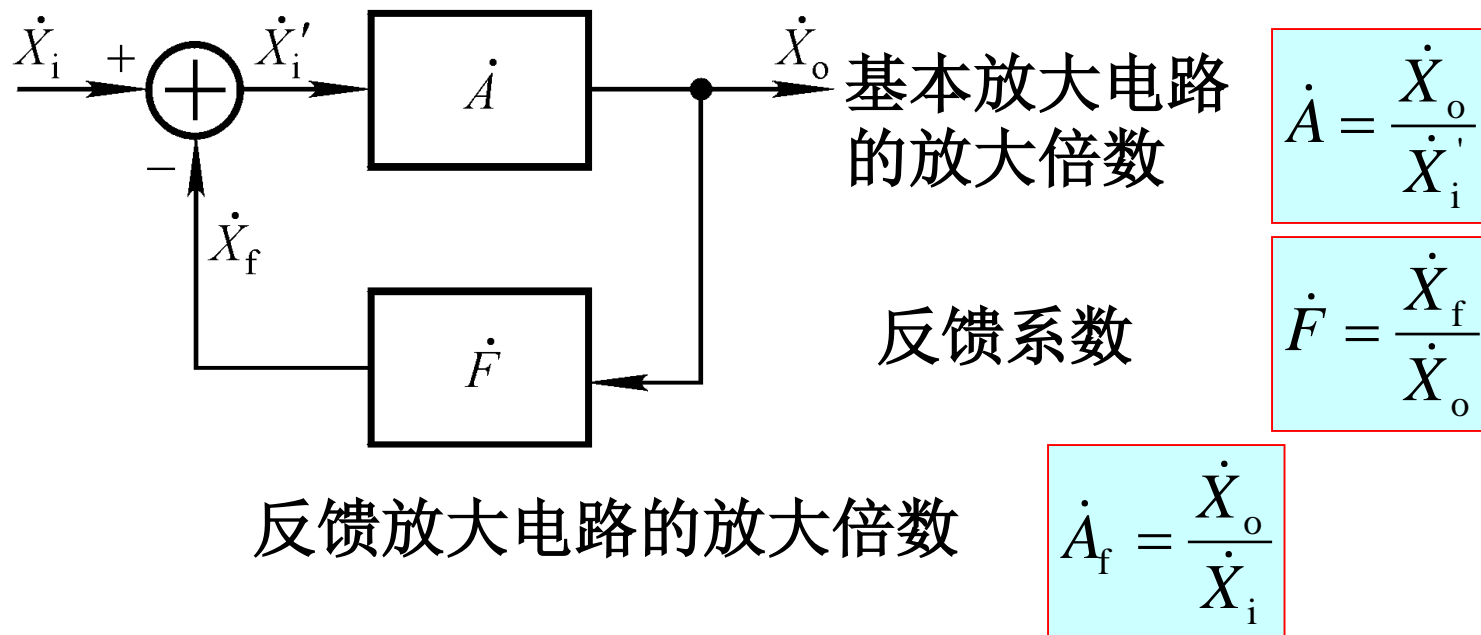


方框图中信号是单向流通的

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

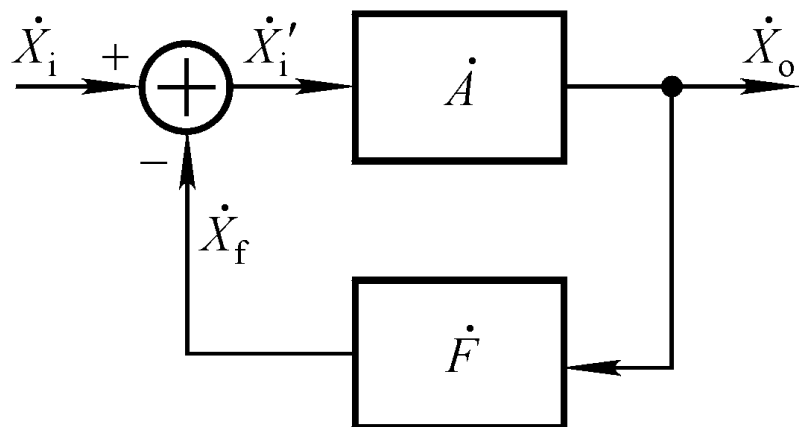


## 二、负反馈放大电路放大倍数的一般表达式



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

# 负反馈放大电路放大倍数的量纲



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

环路放大倍数

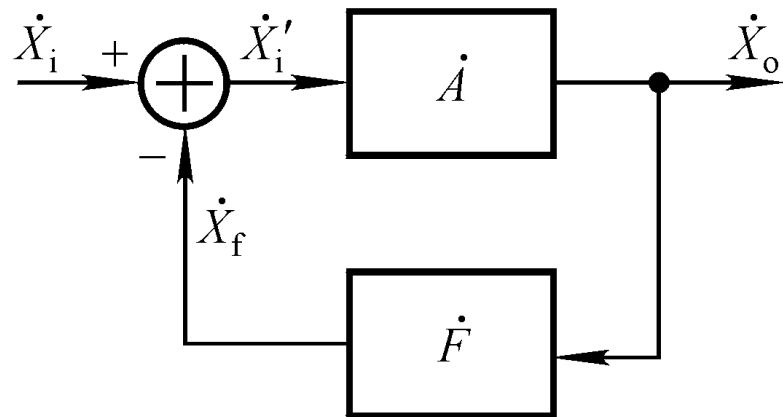
反馈组态	功能	$\dot{A}$	$\dot{F}$	$\dot{A}_f$
电压串联	电压控制电压	$\dot{U}_o / \dot{U}_i'$	$\dot{U}_f / \dot{U}_o$	$\dot{U}_o / \dot{U}_i$
电压并联	电流控制电压	$\dot{U}_o / \dot{I}_i'$	$\dot{I}_f / \dot{U}_o$	$\dot{U}_o / \dot{I}_i$
电流串联	电压控制电流	$\dot{I}_o / \dot{U}_i'$	$\dot{U}_f / \dot{I}_o$	$\dot{I}_o / \dot{U}_i$
电流并联	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

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

只有  $\dot{A}\dot{F} > 0$ ,

电路引入的才为负反馈



若  $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$ , 则  $\dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$ , 即  $X_i \approx X_f$ 。

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

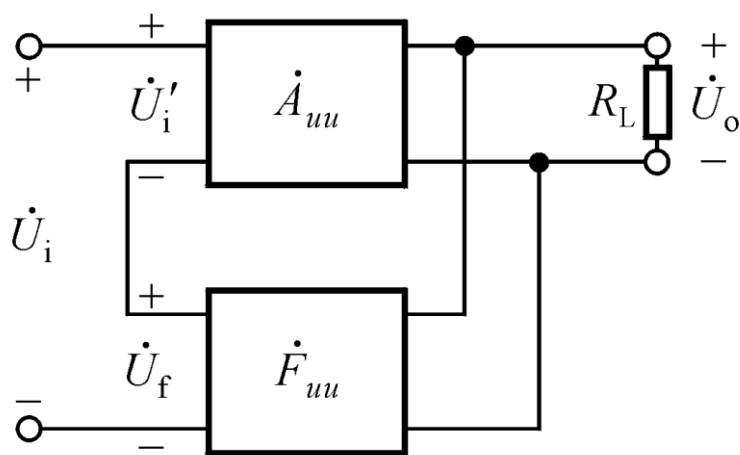
在并联负反馈电路中， $\dot{I}_i \approx \dot{I}_f$

净输入量可  
忽略不计

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

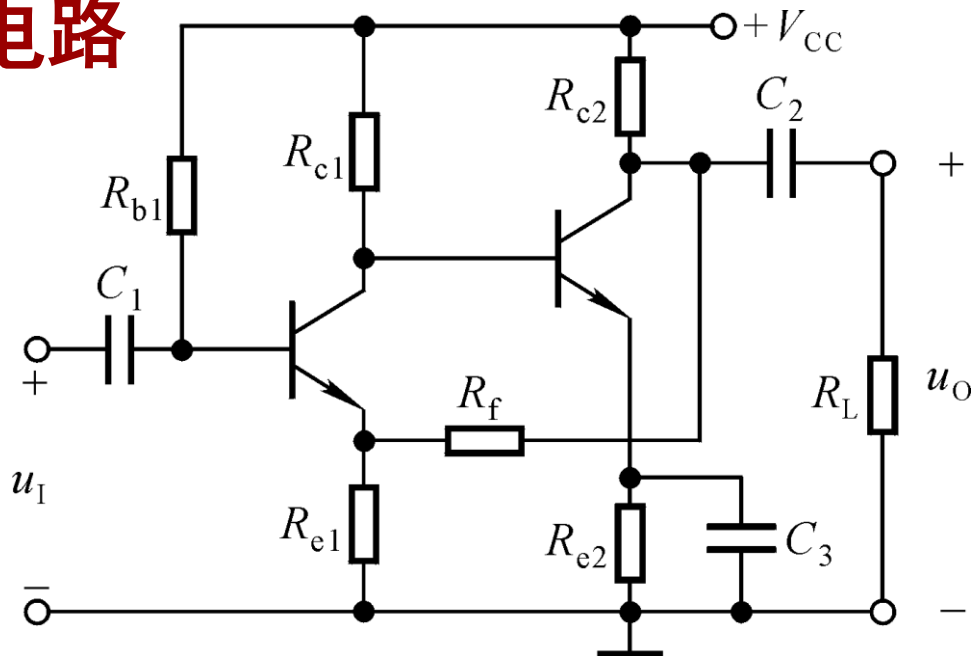
## 四、基于反馈系数的电压放大倍数的估算方法

### 1. 电压串联负反馈电路



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

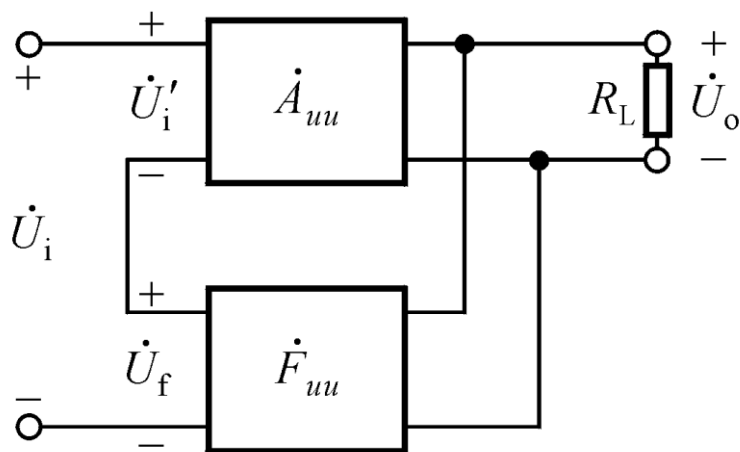
$$\dot{A}_{uuf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = \frac{1}{\dot{F}_{uu}}$$



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

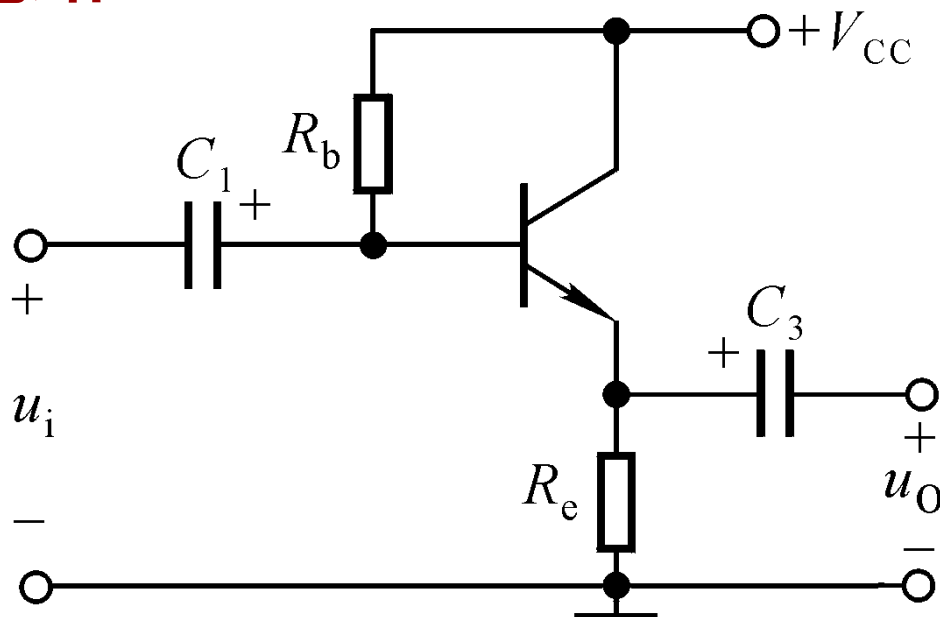
$$\dot{A}_{uuf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{uu}} = 1 + \frac{R_f}{R_{e1}}$$

# 1. 电压串联负反馈电路



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

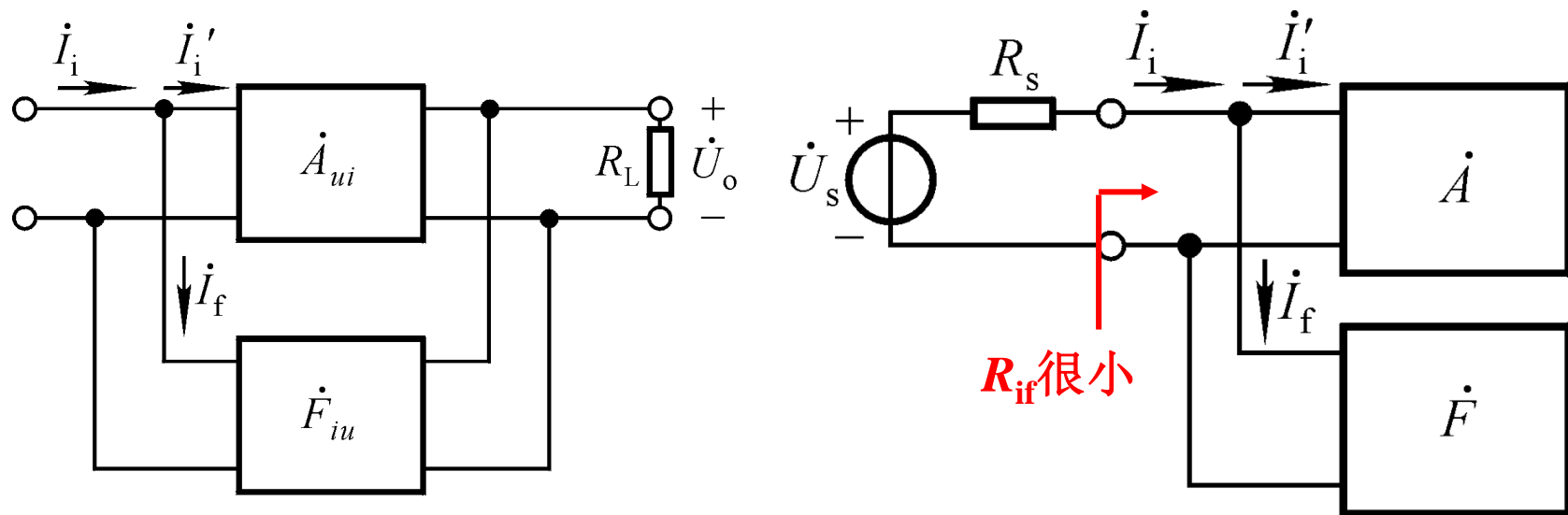
$$\dot{A}_{uuf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = \frac{1}{\dot{F}_{uu}}$$



$$\dot{F}_{uu} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = 1$$

$$\dot{A}_{uuf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{uu}} = 1$$

## 2. 电压并联负反馈电路



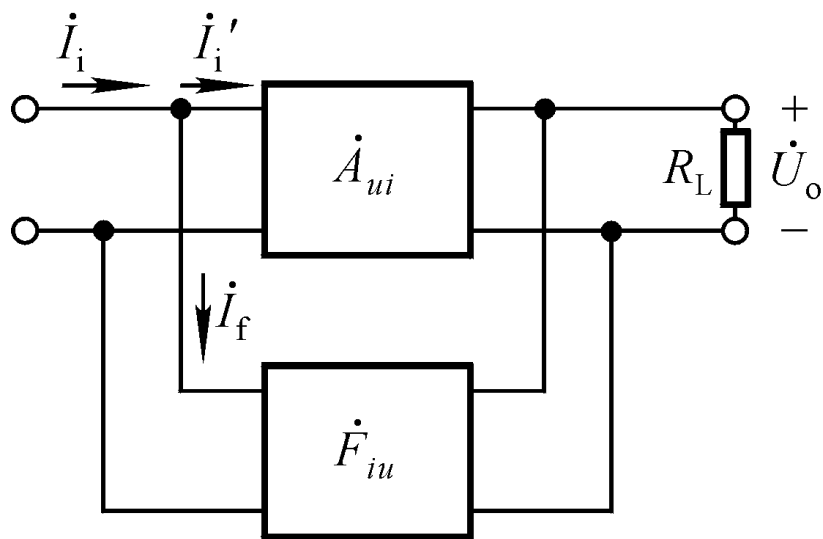
$$\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o}$$

为什么？

为什么？

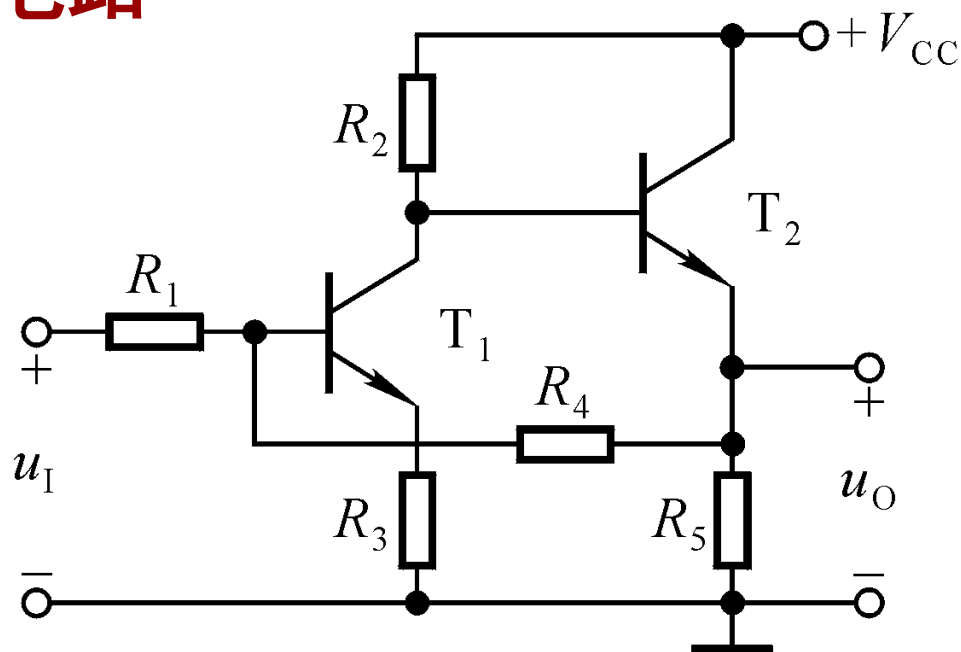
$$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_s R_s} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i R_s} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_f R_s} = \frac{1}{\dot{F}_{ui}} \cdot \frac{1}{R_s}$$

## 2. 电压并联负反馈电路



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

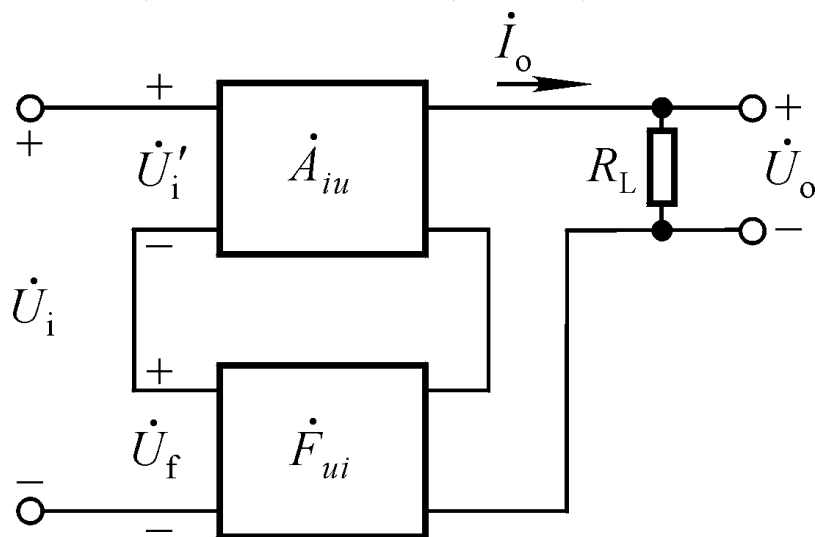
$$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \approx \frac{1}{\dot{F}_{ui}} \cdot \frac{1}{R_s}$$



$$\dot{F}_{iu} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o} = -\frac{1}{R_4}$$

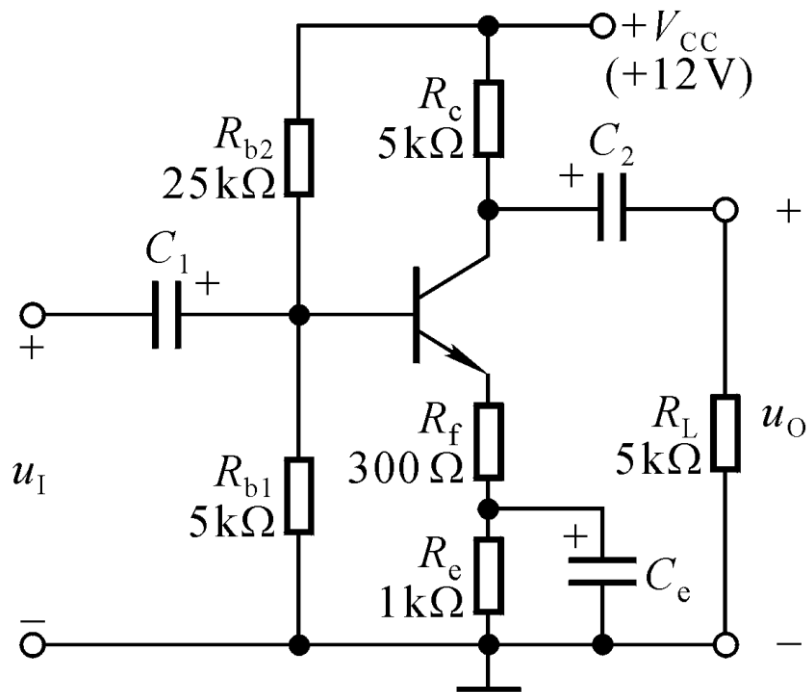
$$\dot{A}_{usf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{iu}} \cdot \frac{1}{R_s} = -\frac{R_4}{R_1}$$

### 3. 电流串联负反馈电路



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

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

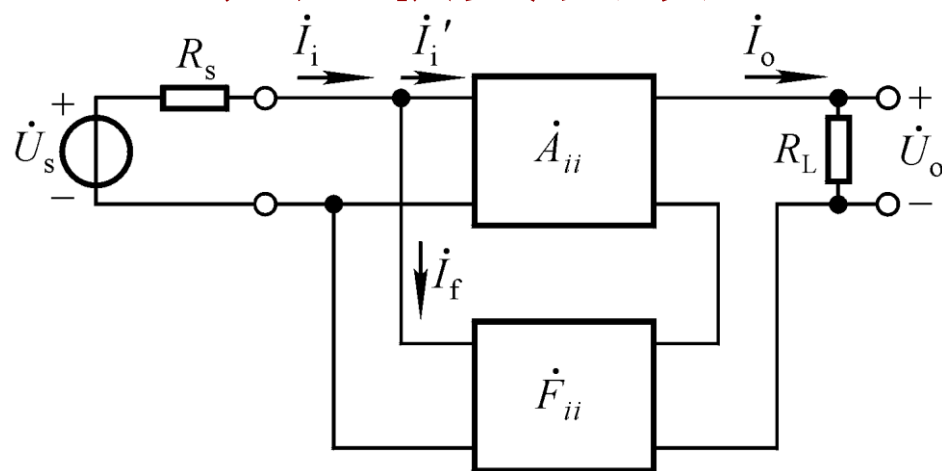


$$\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o} = -R_f$$

$$\dot{A}_{uf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{ui}} \cdot R'_L = -\frac{R_L // R_c}{R_f}$$



## 4. 电流并联负反馈电路



$$\dot{F}_{ii} = \dot{I}_f / \dot{I}_o$$

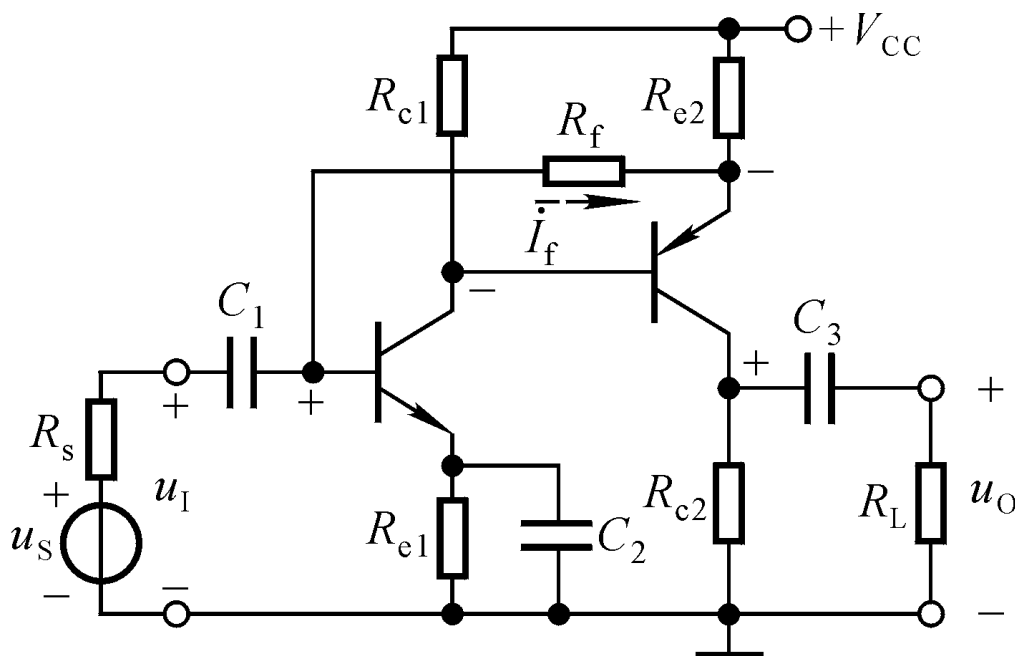
$$\dot{U}_s \approx \dot{I}_f R_s, \quad \dot{U}_o = \dot{I}_o R'_L$$

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

$$\dot{I}_f = \frac{R_{e2}}{R_{e2} + R_f} \cdot \dot{I}_o$$

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

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



## ➤ 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的计算

### ■ 计算方法

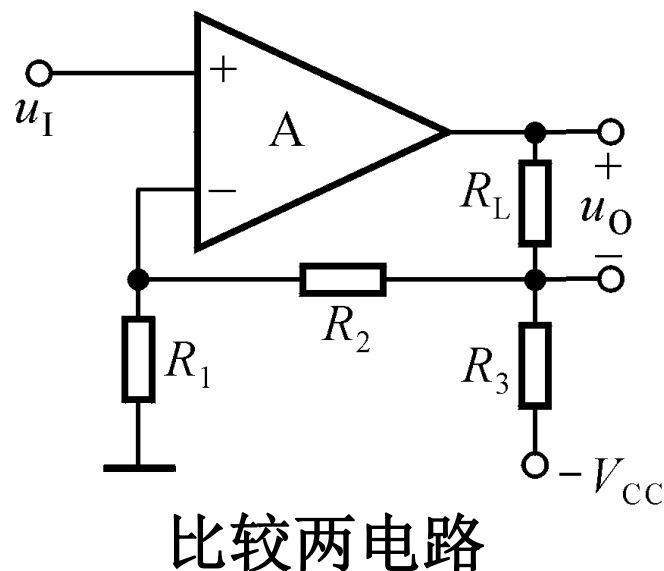
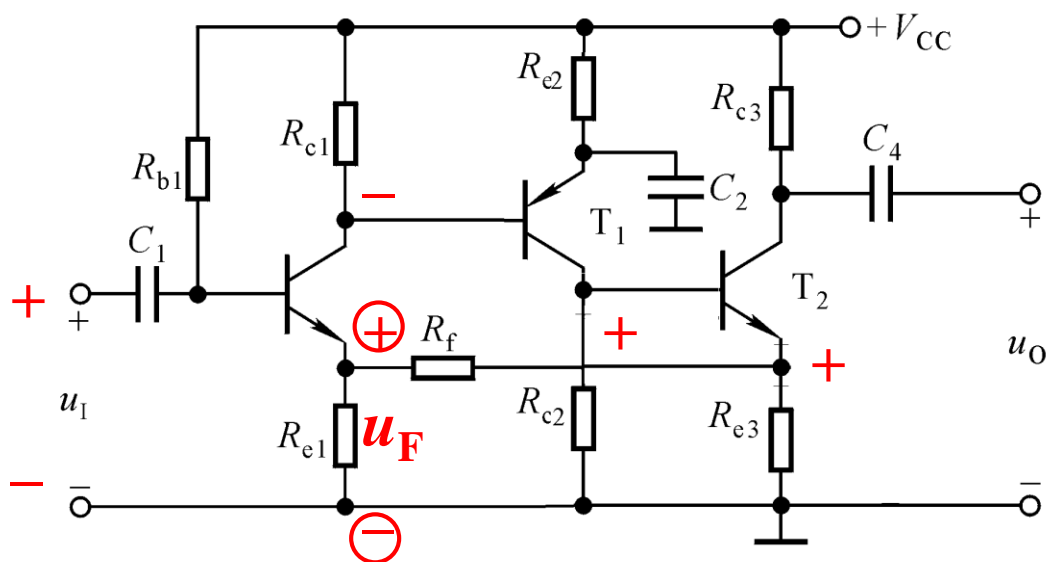
- ✓ 判断反馈组态
- ✓ 求解反馈系数
- ✓ 求解电压放大倍数

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

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

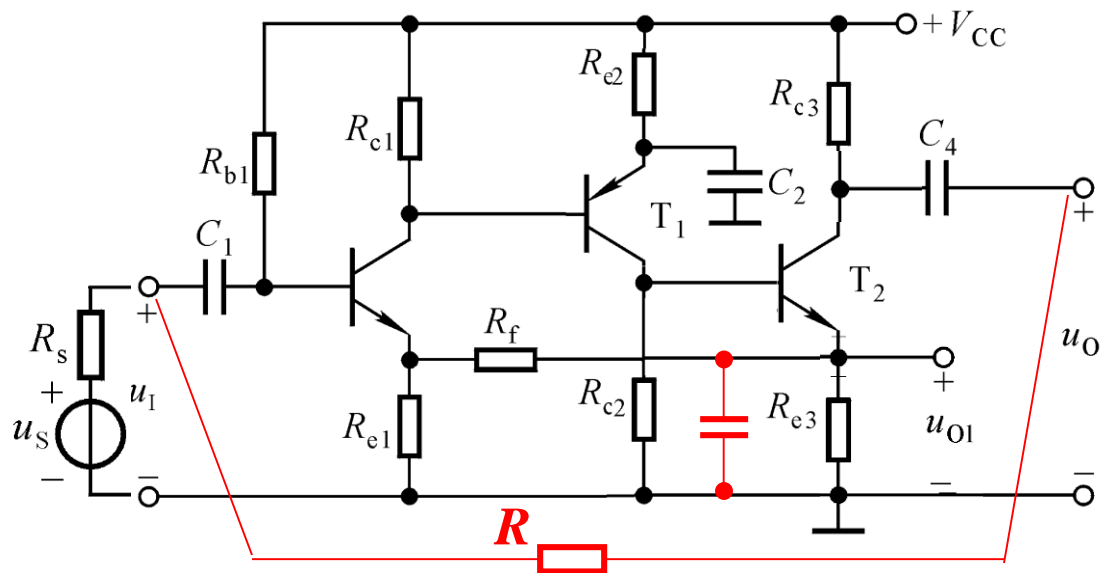


$$\dot{F} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o} = - \frac{R_{e1} R_{e3}}{R_{e1} + R_f + R_{e3}}$$

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

## 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；
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

## 五、基于理想运放的电压放大倍数的计算方法

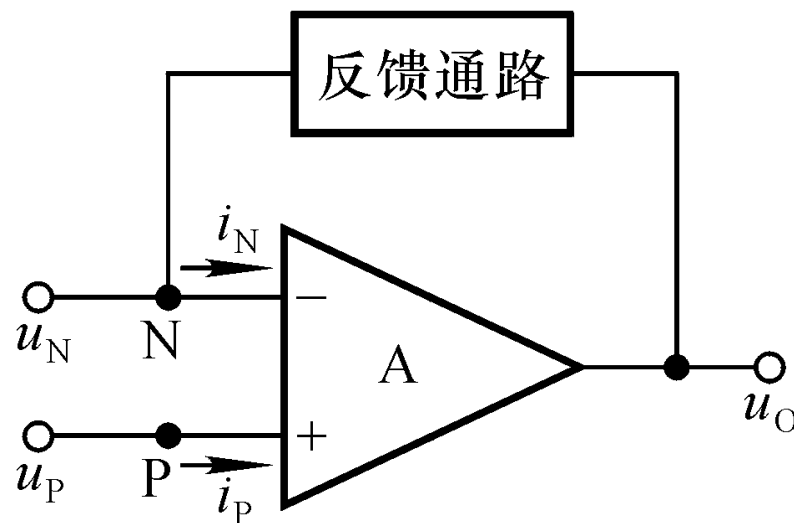
➤ 理想运放参数特点：

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

➤ 电路特征：

□ 引入深度负反馈，工作在  
线性区

□ 反馈网络为无源网络



$$\left. \begin{aligned} u_o &= A_{od} (u_P - u_N) \\ A_{od} &= \infty \end{aligned} \right\} \Rightarrow u_P - u_N = 0 \Rightarrow u_P = u_N$$

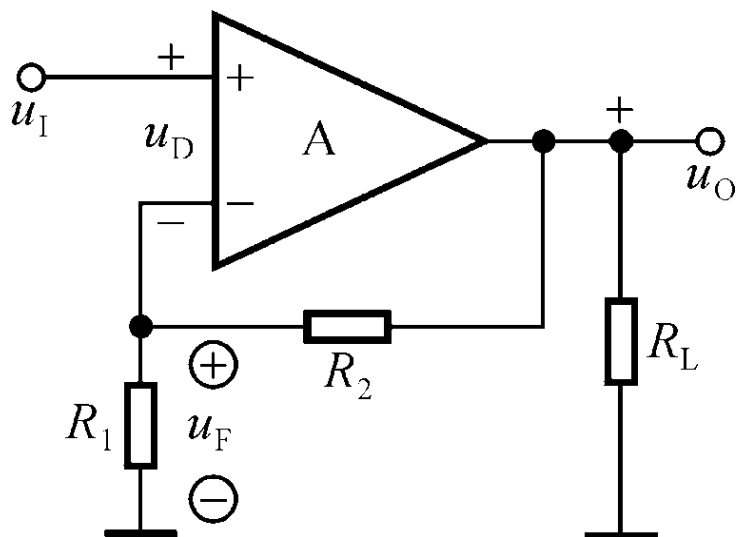
虚短

$$\left. \begin{aligned} u_P - u_N &= 0 \\ r_{id} &= \infty \end{aligned} \right\} \Rightarrow i_P = i_N = 0$$

虚断

求解动态参数的  
基本出发点

## ➤ 利用“虚短”、“虚断”求解电路

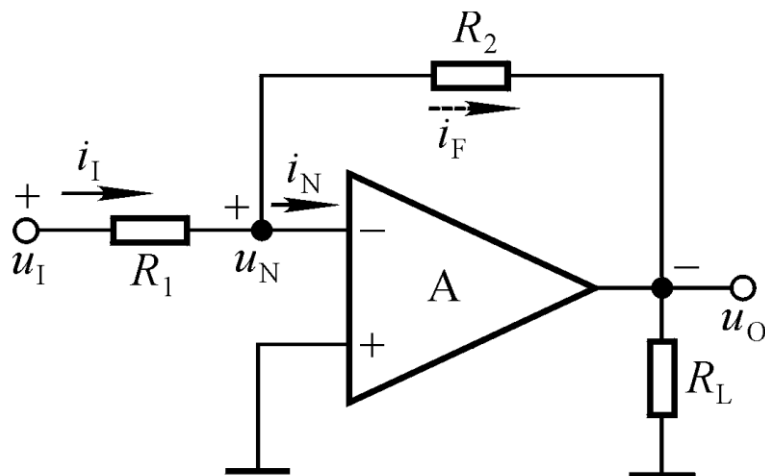


$$u_F = u_I, i_{R_1} = i_{R_2} = u_I / R_1$$

$$u_O = \frac{u_I}{R_1} (R_1 + R_2)$$

$$A_u = \frac{\Delta u_O}{\Delta u_I} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

虚地

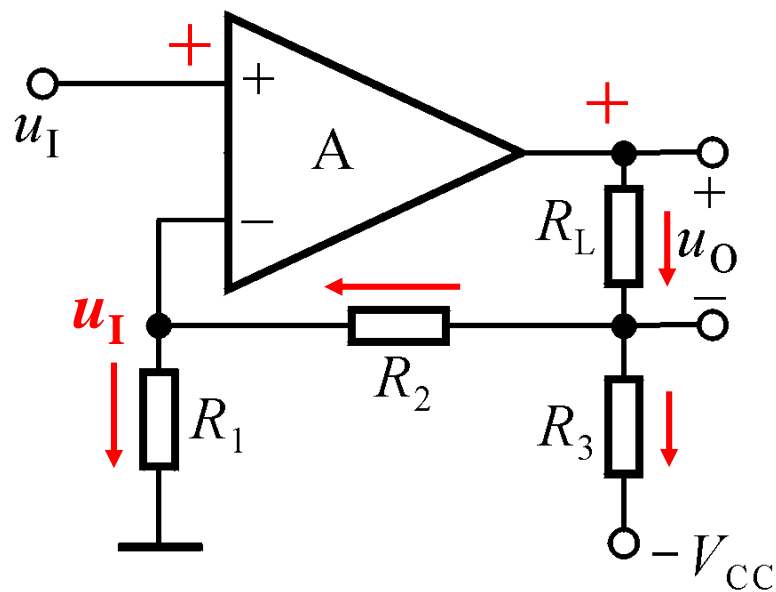


$$u_N = u_P = 0$$

$$i_F = i_I = \frac{u_I}{R_1}, u_O = -i_I R_2$$

$$A_u = \frac{\Delta u_O}{\Delta u_I} = -\frac{R_2}{R_1}$$

## ➤ 利用“虚短”、“虚断”求解电路



$$u_N = u_P = u_I, i_{R2} = i_{R1} = \frac{u_I}{R_1}$$

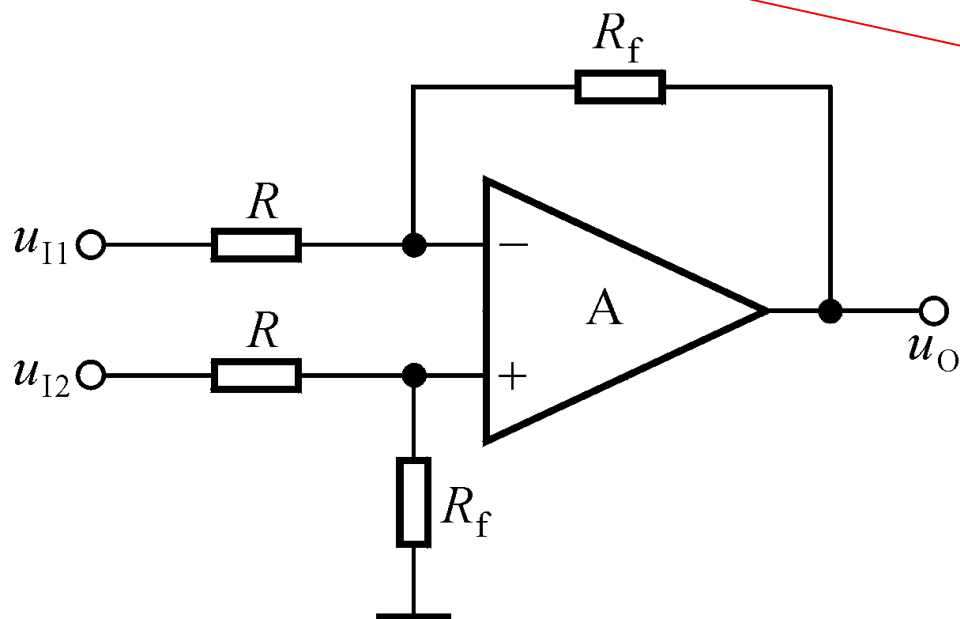
$$i_{R3} = \frac{u_{R1} + u_{R2}}{R_3} = (1 + \frac{R_2}{R_1})u_I / R_3$$

$$i_O = i_{R2} + i_{R3} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 R_3} \cdot u_I$$

$$A_{uf} = \frac{\Delta u_O}{\Delta u_I} = \frac{\Delta i_O R_L}{\Delta u_I} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 R_3} \cdot R_L$$

## 讨论三

利用“虚短”、“虚断”求解电路



$$u_N = u_P \quad i_N = i_P = 0$$

$$u_N = u_P = \frac{R_f}{R_f + R} u_{I2}$$

$$i_{I1} = \frac{u_{I1} - u_N}{R} = i_{Rf} = -\frac{u_o - u_N}{R_f}$$

$$u_O = \frac{R_f}{R} \cdot (u_{I2} - u_{I1})$$

实现了减  
法运算



## § 5.3 交流负反馈对放大电路性能的影响

- 一、提高放大倍数的稳定性
- 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

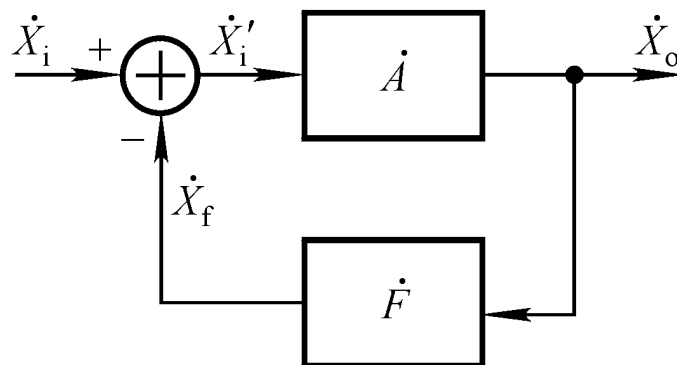
# 一、提高放大倍数的稳定性

在中频段，放大倍数、反馈系数等均为实数

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

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

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



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

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

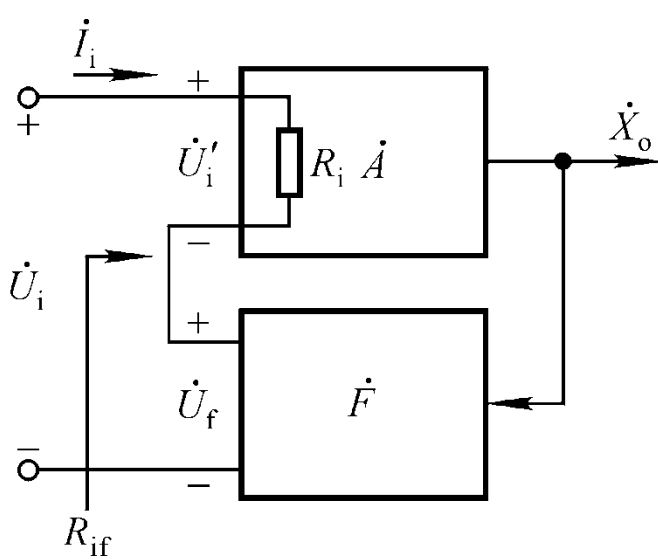
放大倍数的稳定性是基本放大电路的  $(1+AF)$  倍

## 二、改变输入电阻和输出电阻

### 1. 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：  
串联反馈/并联反馈

#### 引入串联负反馈时

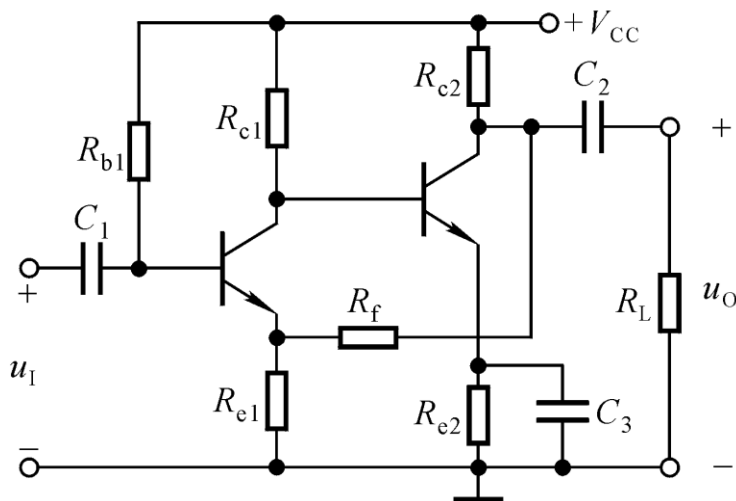
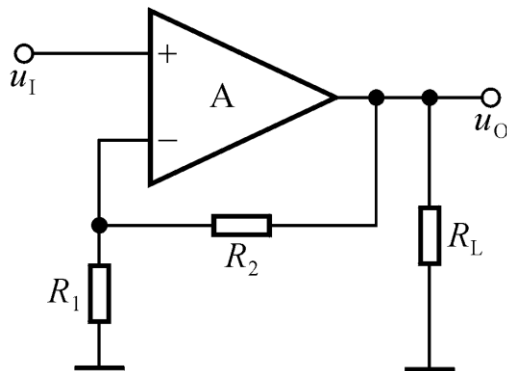


$$R_i = \frac{U_i'}{I_i}$$

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

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

# 讨论



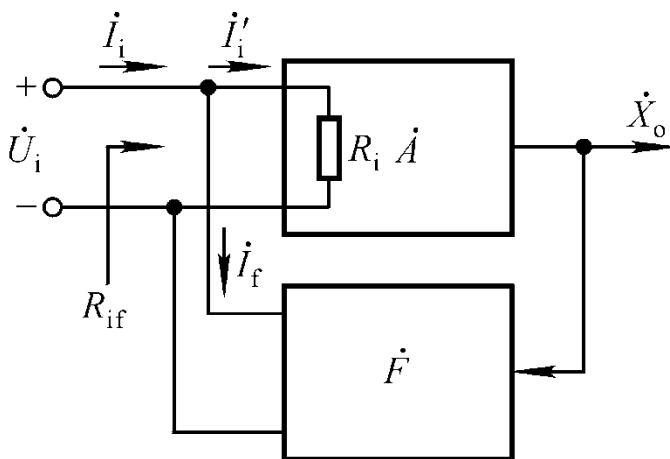
引入串联负反馈，对图示两电路的输入电阻所产生的影响一样吗？

$R_{b1}$ 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

$$R'_{if} = (1 + AF)R'_i$$

## 引入并联负反馈时



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

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

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

串联负反馈增大输入电阻，并联负反馈减小输入电阻

在  $(1 + AF) \rightarrow \infty$  时

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

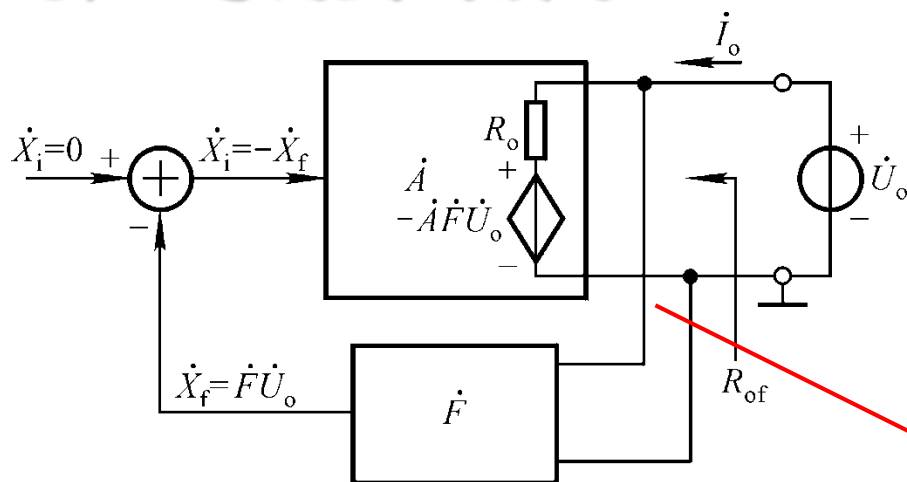
引入并联负反馈  $R_{if} \rightarrow 0$ 。

## 2、对输出电阻的影响

□ 仅与反馈网络与基本放大电路输出端的接法有关：电压反馈/电流反馈

✓ 电压负反馈减小输出电阻，电流负反馈增大输出电阻

引入电压负反馈时

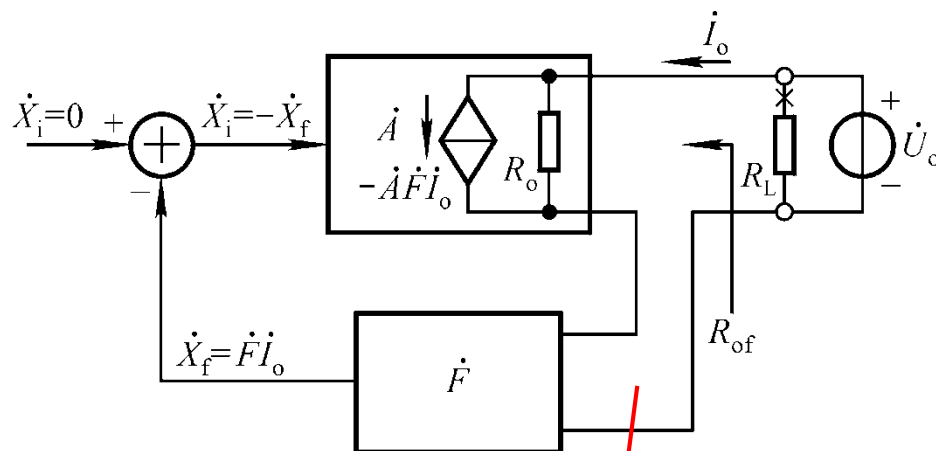


$$R_{of} = \frac{U_o}{I_o} = \frac{U_o}{U_o - (-AFU_o)} R_o$$

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

所取电流已在  
其负载效应中考虑

## 引入电流负反馈时



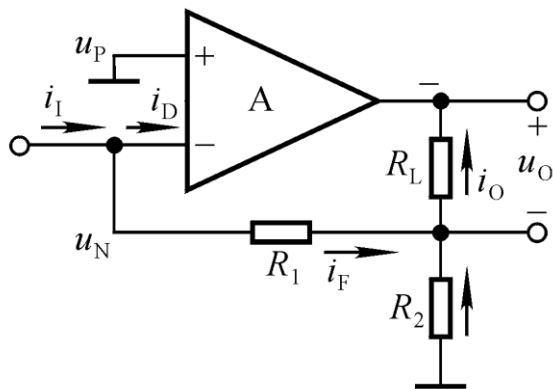
$$\dot{I}_o = \frac{\dot{U}_o}{R_o} + (-\dot{A}\dot{F}\dot{I}_o)$$

$$\dot{I}_o = \frac{\dot{U}_o}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

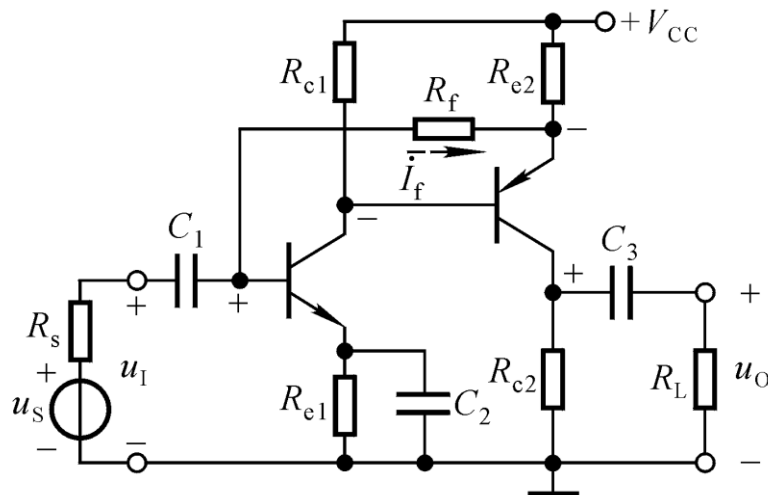
所取电压已在其  
负载效应中考虑

$$R_{of} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} = (1 + \dot{A}\dot{F})R_o$$

# 讨论



(a)



(b)

$R_{c2}$ 支路在引入反馈前后对输出电阻的影响有无变化？

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

$$R'_{of} = (1 + AF)R'_o$$

在  $(1 + AF) \rightarrow \infty$  时

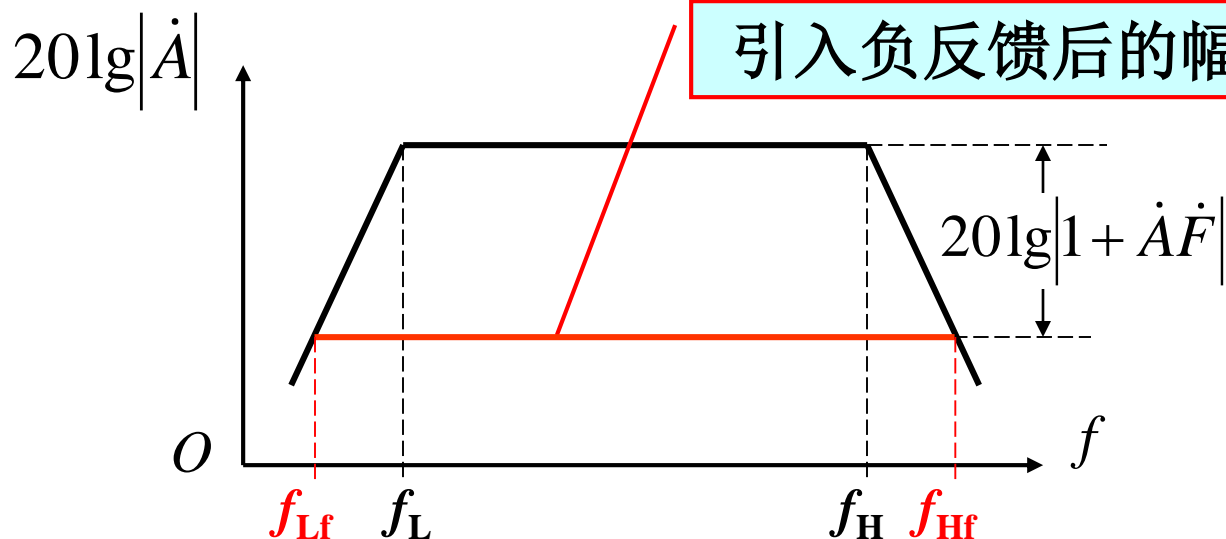
引入电压负反馈  $R_{of} \rightarrow 0$ ;

引入电流负反馈  $R_{of}$  (或  $R'_{of}$ )  $\rightarrow \infty$



### 三、展宽频带

设反馈网络是纯电阻网络



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

$$\dot{A}_L = \frac{\dot{A}_m}{1 + \frac{f_L}{j f}}$$

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

可推导出引入负反馈后的截止频率、通频带

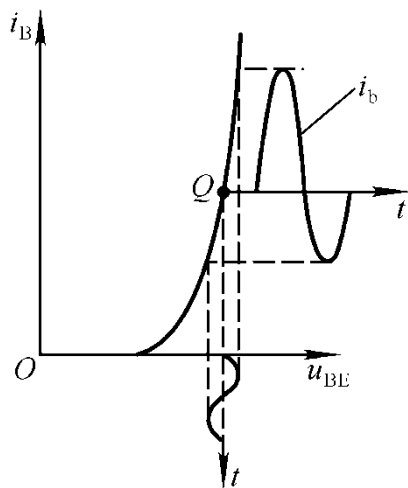


$$f_{Hf} = (1 + AF) f_H$$

$$f_{Lf} = \frac{f_L}{1 + AF}$$

$$f_{bwf} = (1 + AF) f_{bw}$$

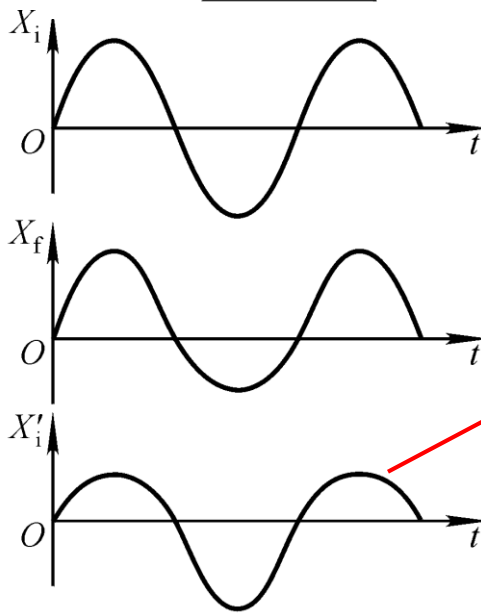
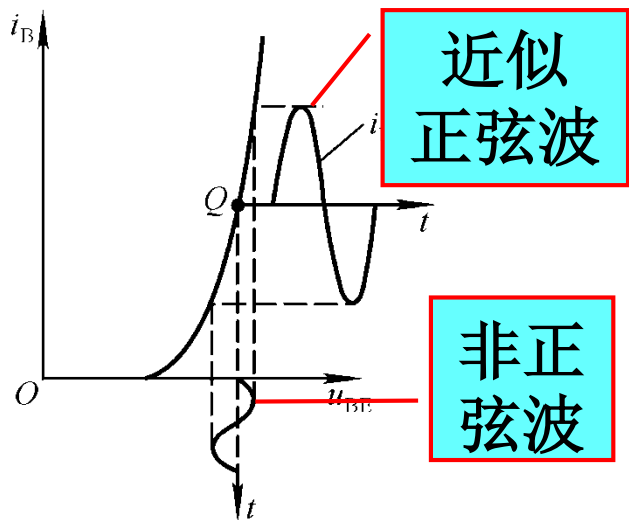
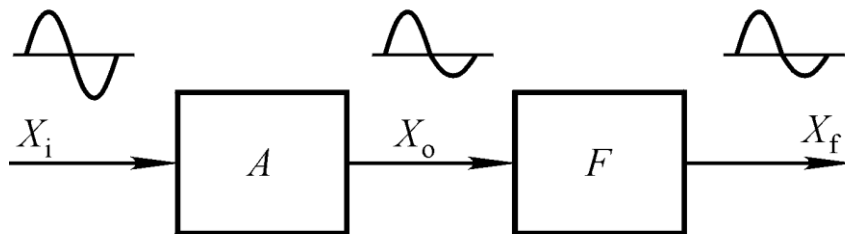
## 四、减小非线性失真



➤ 晶体管输入特性呈非线性 → 放大电路存在非线性失真

✓ 引入负反馈，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



若信号源有足够潜力，非线性失真减小到基本放大电路的  $1/(1+AF)$

净输入信号的正半周幅值小于负半周幅值

## 五、引入负反馈的一般原则

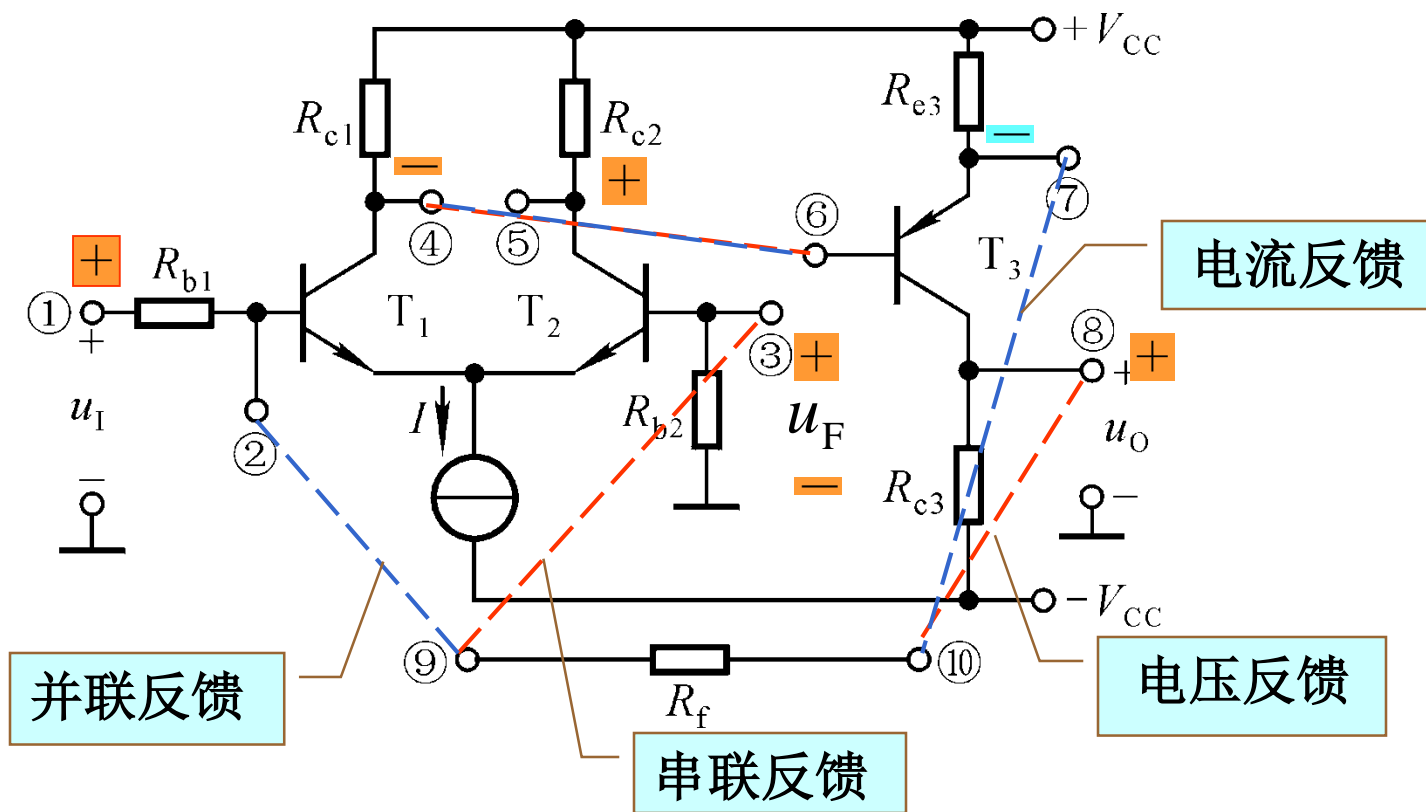
- 了解用途：稳定 $Q$ 点→引直流负反馈；改善动态性能→引交流负反馈
- 考察信号源特点：增大输入电阻→引串联负反馈；减小输入电阻→引并联负反馈
- 考虑负载需求：稳定输出电压 (减小输出电阻) →引电压负反馈；稳定输出电流 (增大输出电阻) →引电流负反馈
- 看信号转换关系：输出电压为输入电压受控源的→电压串联负反馈；输出电压为输入电流受控源的→电压并联负反馈；输出电流为输入电压受控源的→电流串联负反馈；输出电流为输入电流受控源→电流并联负反馈

深度负反馈 ( $(1+AF) \gg 1$ ) 时，转换系数均约为 $1/F$

# 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？
- 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？
- 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？
- 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？

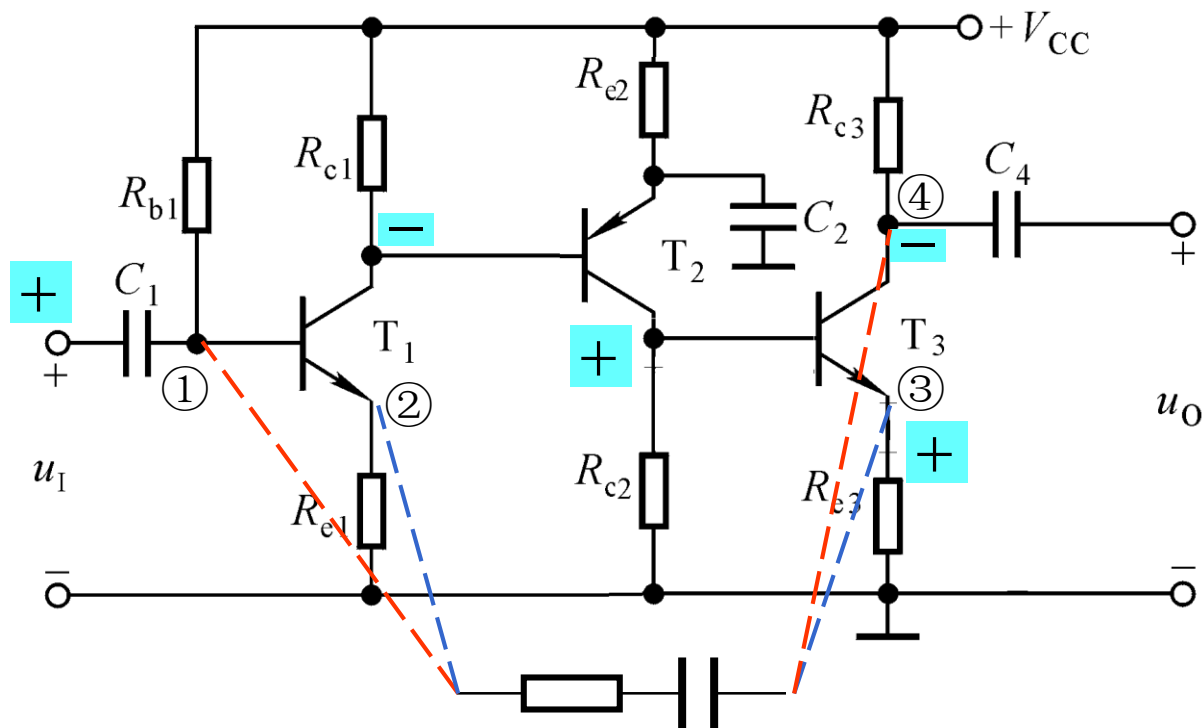
## 讨论二



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？



只可能引入电压并联或电流串联两种组态的交流负反馈

## § 5.4 负反馈放大电路的稳定性

- 一、自激振荡产生的原因及条件
- 二、负反馈放大电路稳定性的分析
- 三、负反馈放大电路稳定性的判断
- 四、消除自激振荡的方法

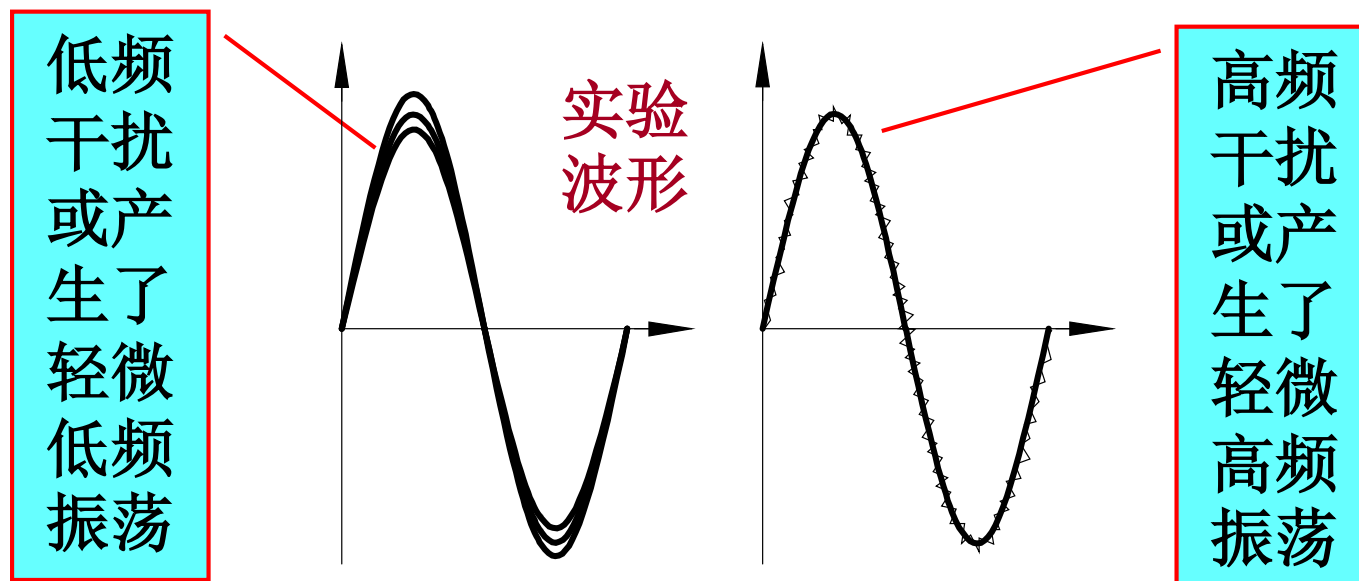
# 一、自激振荡产生的原因及条件

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**

□ 负反馈放大电路自激振荡的频率：

✓ 低频段 → 耦合电容、旁路电容的影响

✓ 高频段 → 半导体元件极间电容的影响



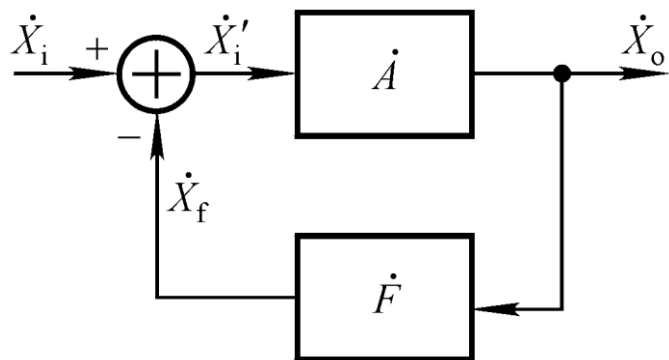


## 2. 原因

在低频段或高频段，存在频率 $f_0$ ，当 $f=f_0$ 时，附加相移为 $\pm\pi$ ，此时有

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

对  $f=f_0$  的信号，净输入量是输入量与反馈量之和

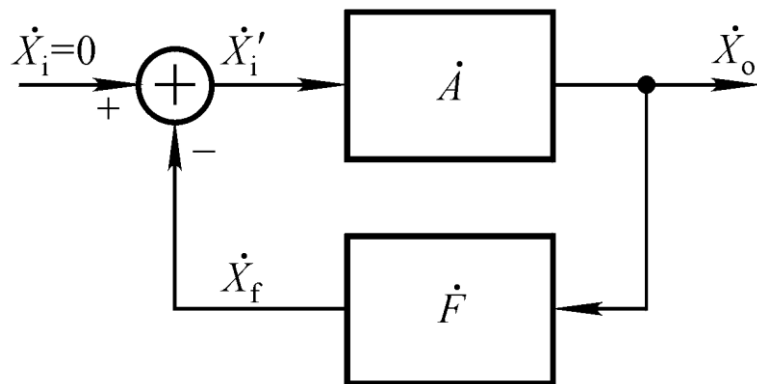


在电扰动下（如合闸通电），必含有频率为 $f_0$ 的信号，对于 $f=f_0$ 的信号，产生正反馈过程：

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

输出量逐渐增大，直至达到动态平衡，电路产生自激振荡

### 3. 自激振荡的条件



$\dot{X}_i = 0$  时,  $\dot{X}_o$  维持  $\dot{X}_o$ .

$$\dot{X}_o = -\dot{A}\dot{F}\dot{X}_o$$

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



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

由于电路通电后输出量有一个从小到大直至稳幅的过程, 起振条件为

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

## 二、负反馈放大电路稳定性的分析

➤ 设反馈网络为电阻网络，放大电路为直接耦合形式

① 附加相移由放大电路决定

② 自激振荡只可能产生在高频段

• 对于单管放大电路:  $f \rightarrow \infty$  时,  $\varphi_A' \rightarrow -90^\circ, |\dot{A}| \rightarrow 0$

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, 有可能满足起振条件, 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/三级以上的直接耦合放大电路引入负反馈后，可能产生高频振荡
- 含三个/三个以上的耦合电容/旁路电容的放大电路，引入负反馈后可能产生低频振荡
- 环路放大倍数  $AF$  越大，越易满足起振条件，闭环后越易产生自激振荡

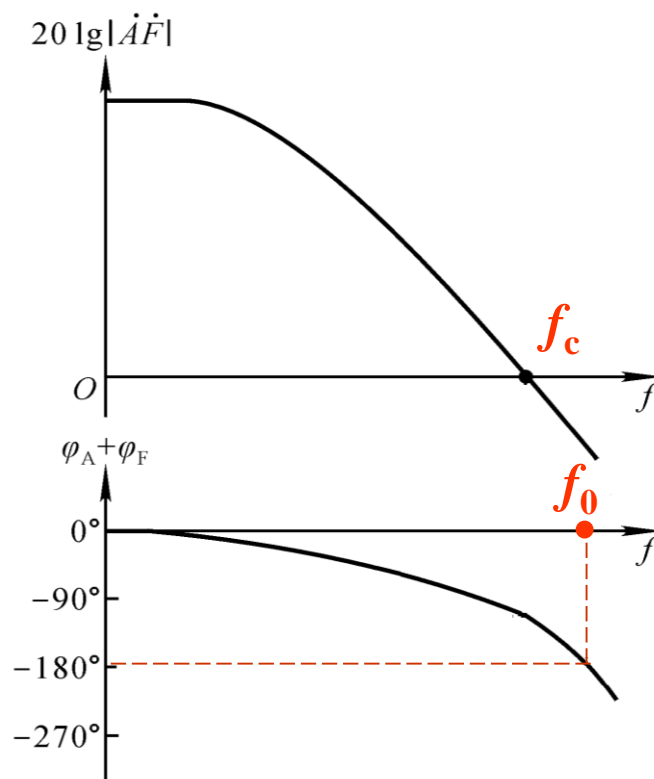
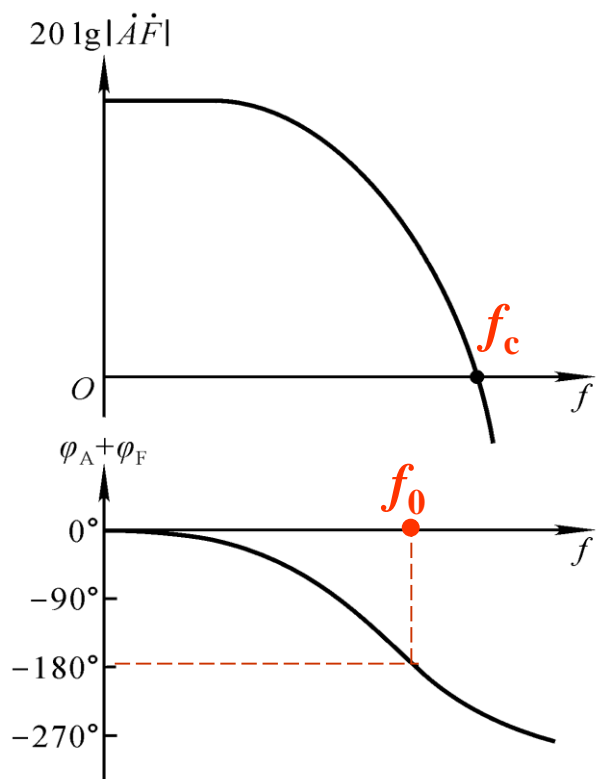
放大电路的级数越多，耦合电容、旁路电容越多，引入的负反馈越深，产生自激振荡的可能性越大

### 三、负反馈放大电路稳定性的判断

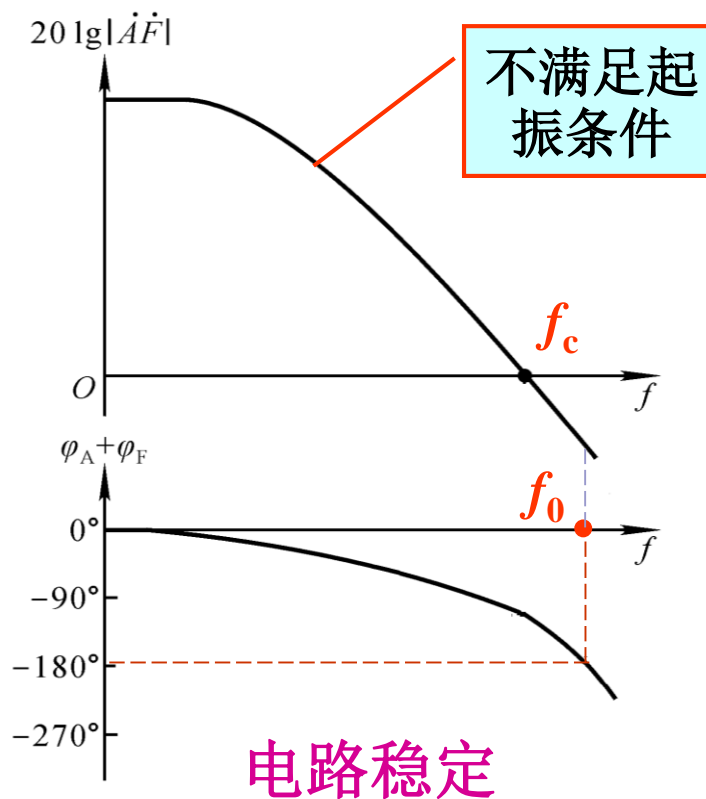
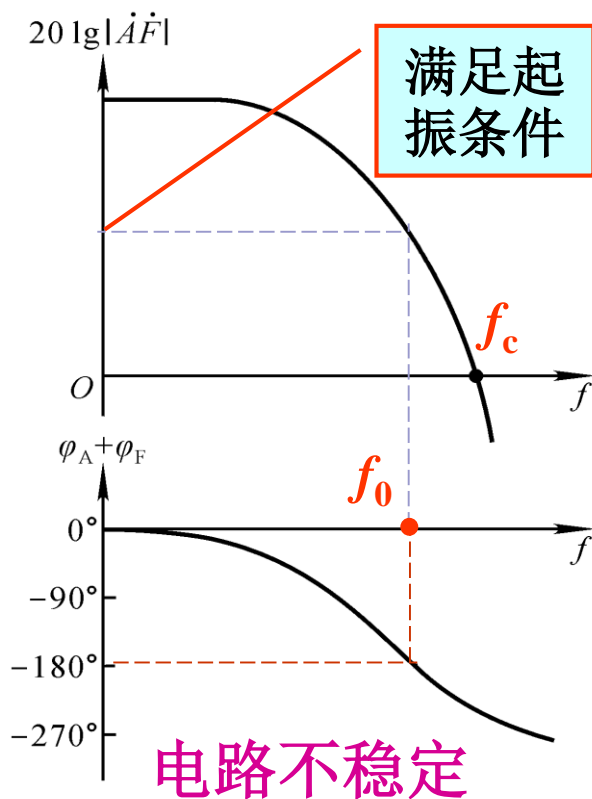
已知环路增益的频率特性来判断闭环后电路的稳定性。

使环路增益下降到0dB的频率，记作 $f_c$ ；

使 $\varphi_A + \varphi_F = (2n+1)\pi$  的频率，记作 $f_0$

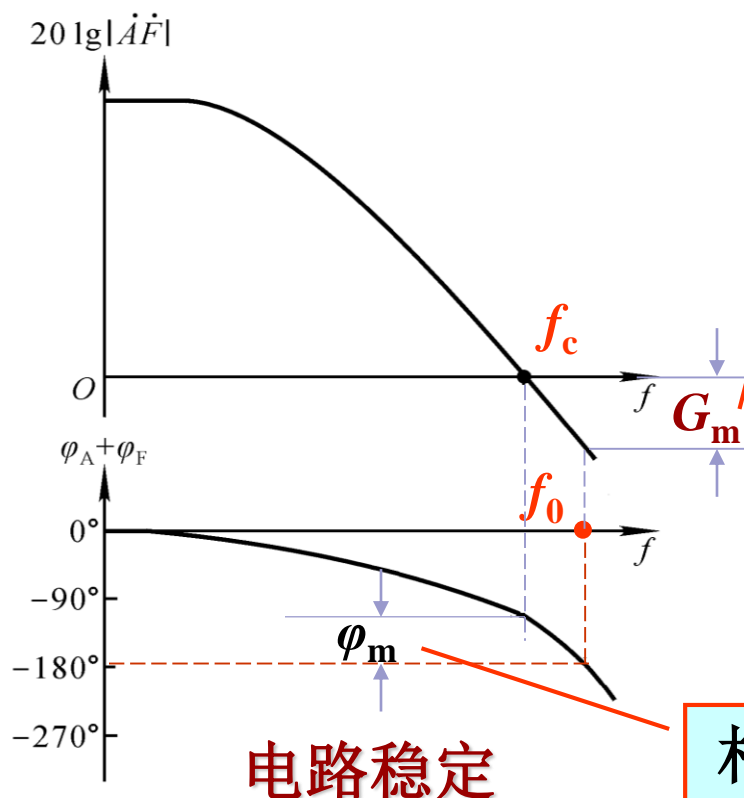


### 三、负反馈放大电路稳定性的判断



$f_0 < f_c$ , 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

# 稳定裕度



幅值裕度

$G_m \leq -10\text{dB}$ , 且  
 $\varphi_m \geq 45^\circ$ ; 负反馈放大  
 电路才具有可靠的稳  
 定性

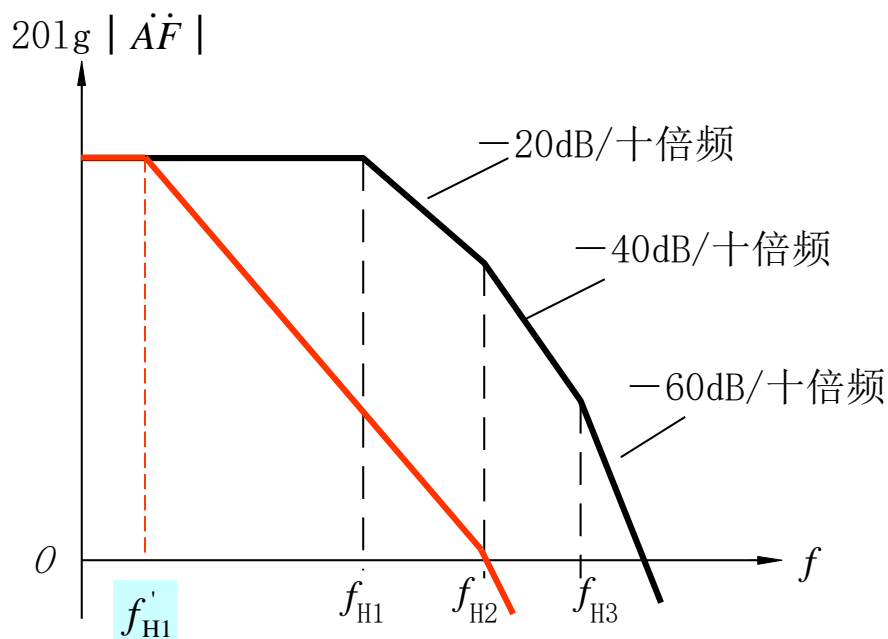
相位裕度

## 四、消除自激振荡的方法

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

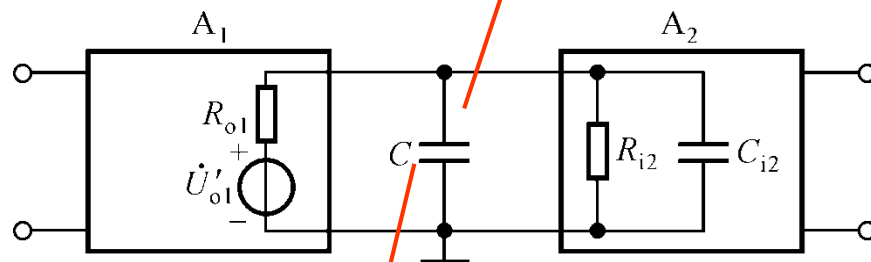
### 1. 简单滞后补偿



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

在最低的上限频率所在回路加补偿电容

补偿电容



取值?



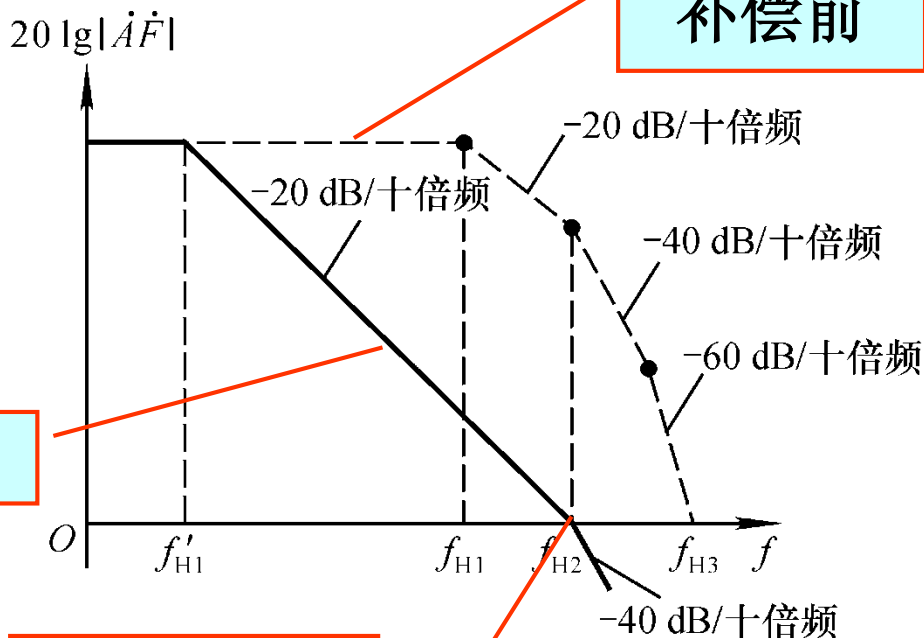
# 1. 简单滞后补偿

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

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

补偿前

补偿后

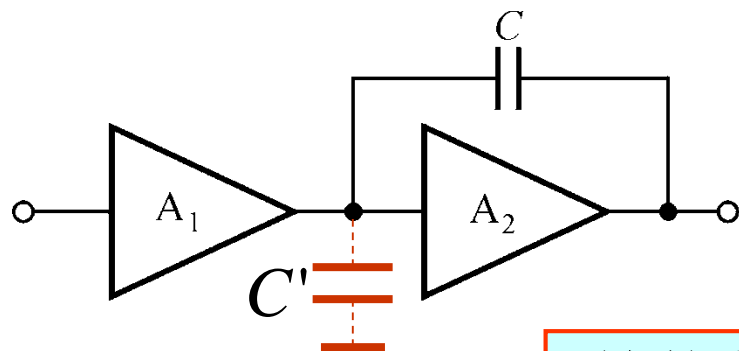


滞后补偿法是以频带变窄为代价来消除自激振荡的

最大附加相移为 $-135^\circ$

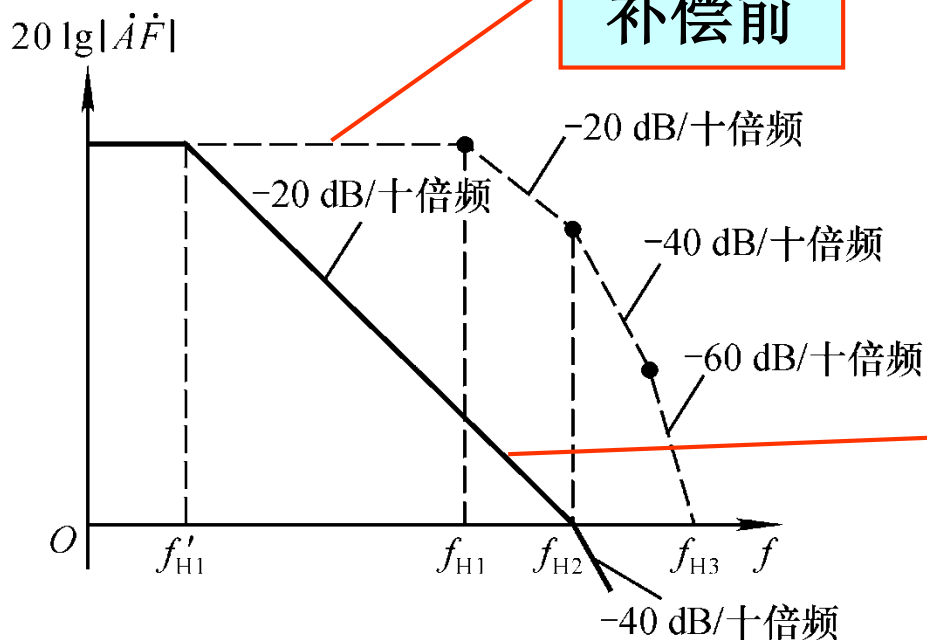
具有 $45^\circ$ 的相位裕度，故电路稳定

## 2. 密勒补偿



在最低的上限频率所在回路加补偿电容

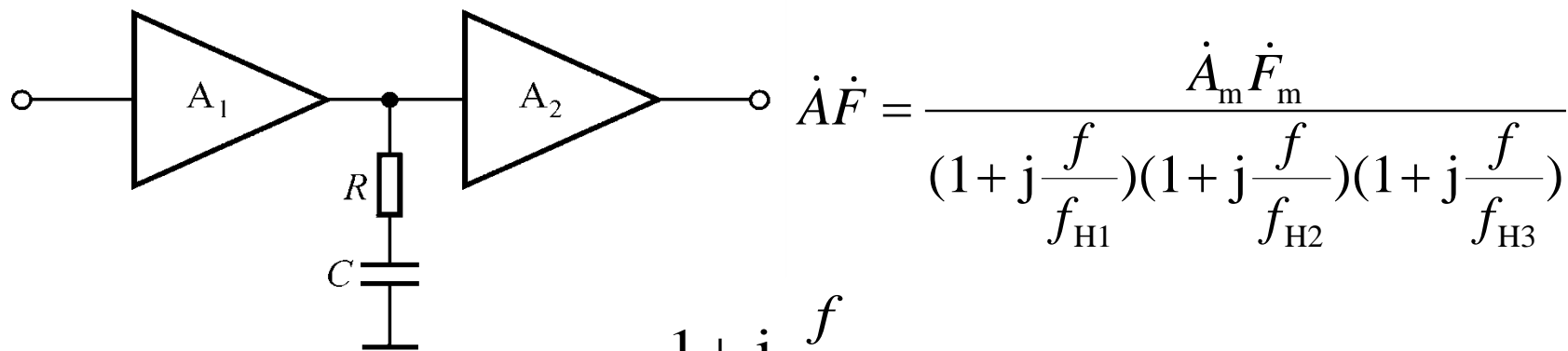
$$C' = (1 + |k|)C$$



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

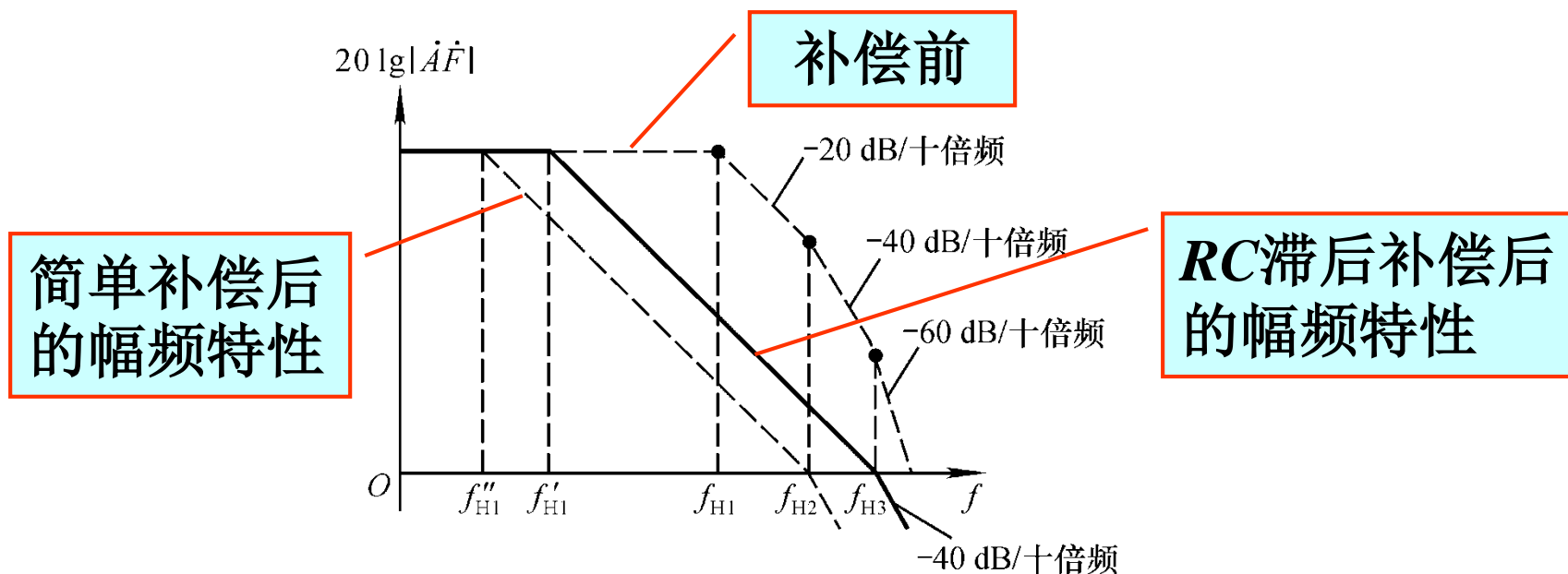


补偿后产生系数： $\frac{1 + j\frac{f}{f'_{H2}}}{1 + j\frac{f}{f'_{H1}}}$ ，取代  $\frac{1}{1 + j\frac{f}{f_{H1}}}$

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

✓ 最大附加相移  $-180^\circ$ ；不满足起振条件，闭环后不会产生自激振荡，电路稳定

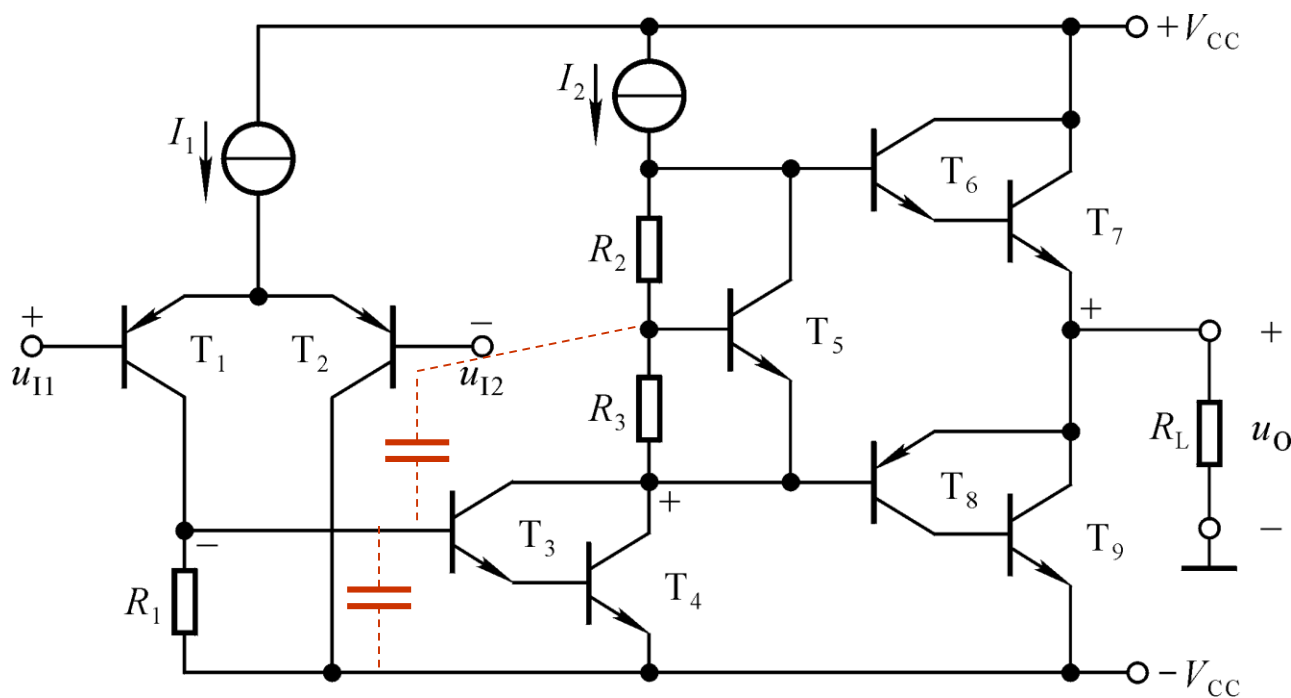
## RC 滞后补偿与简单滞后补偿比较



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

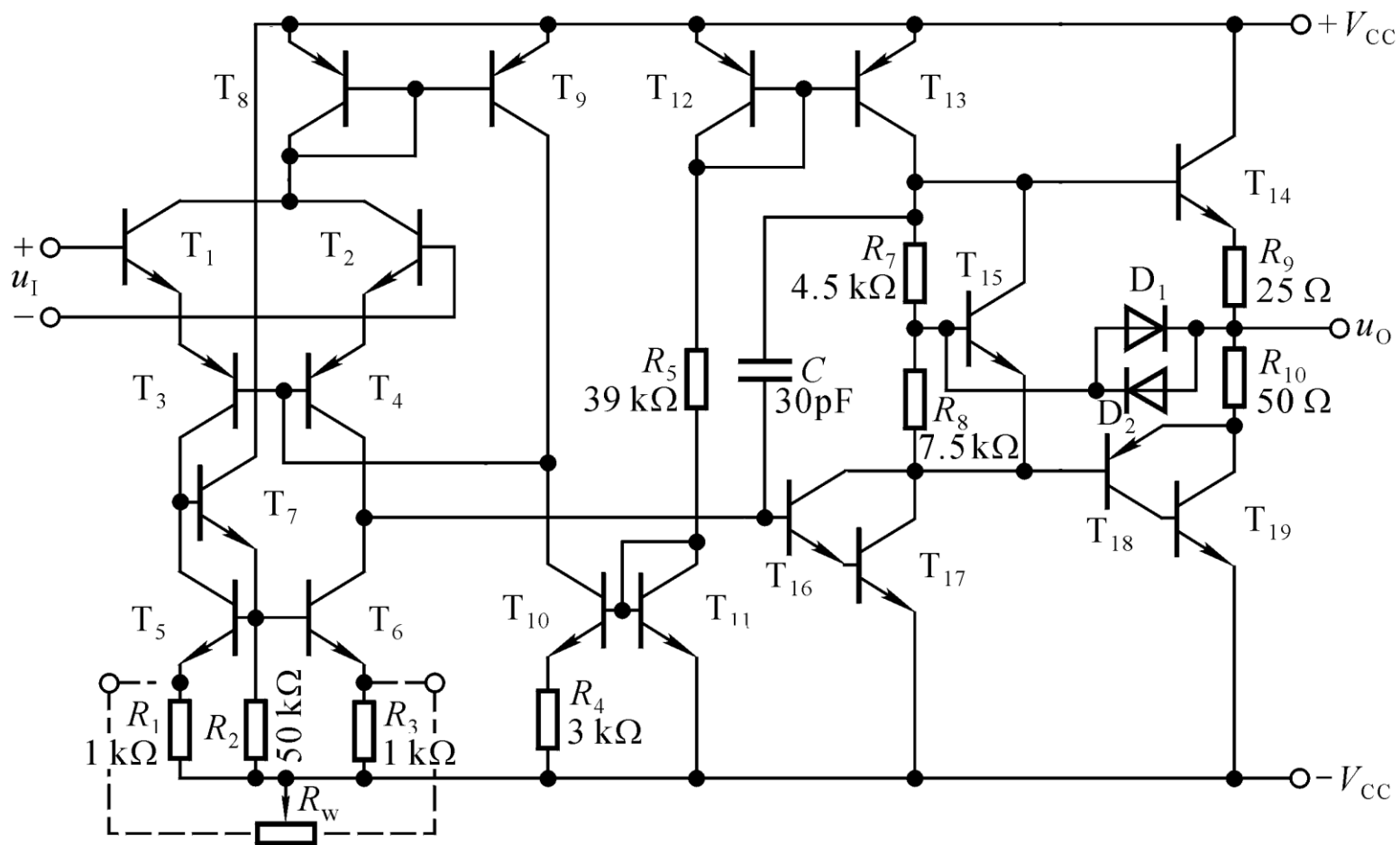
为使消振后频带变化更小，可考虑采用超前补偿的方法，自学

# 讨论一



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？

## 讨论二

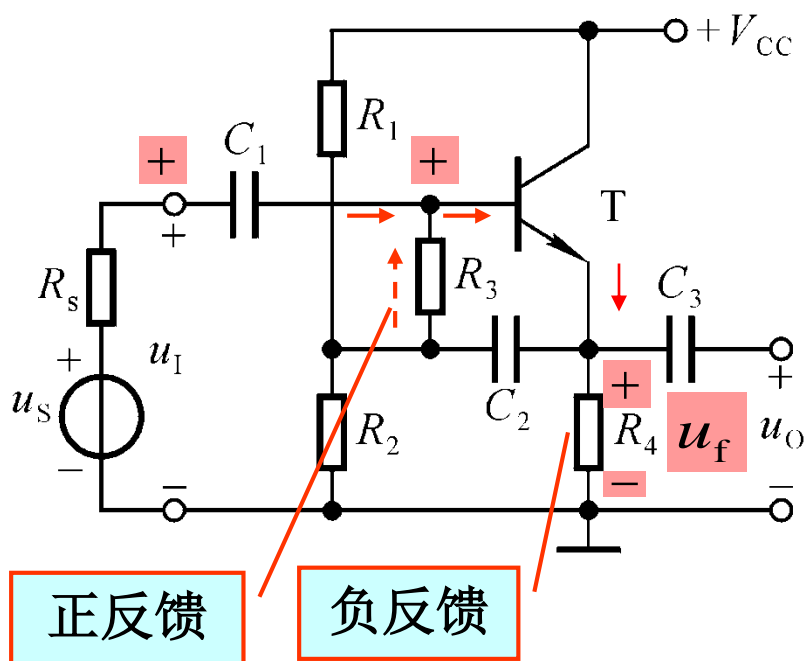


$C$  的作用?

## § 5.5 放大电路中反馈的其它问题

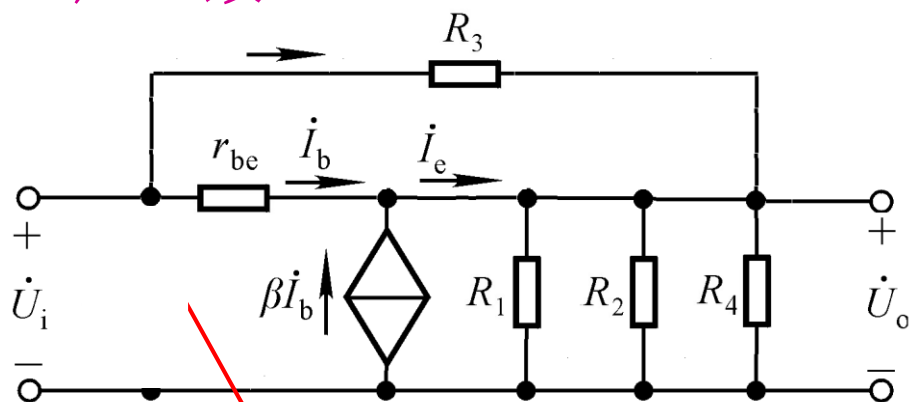
### 一、放大电路中的正反馈

# 一、放大电路中的正反馈



自举电路：通过引入正反馈，提高输入电压；因而增大输入电阻

引入的正、负反馈目标应一致

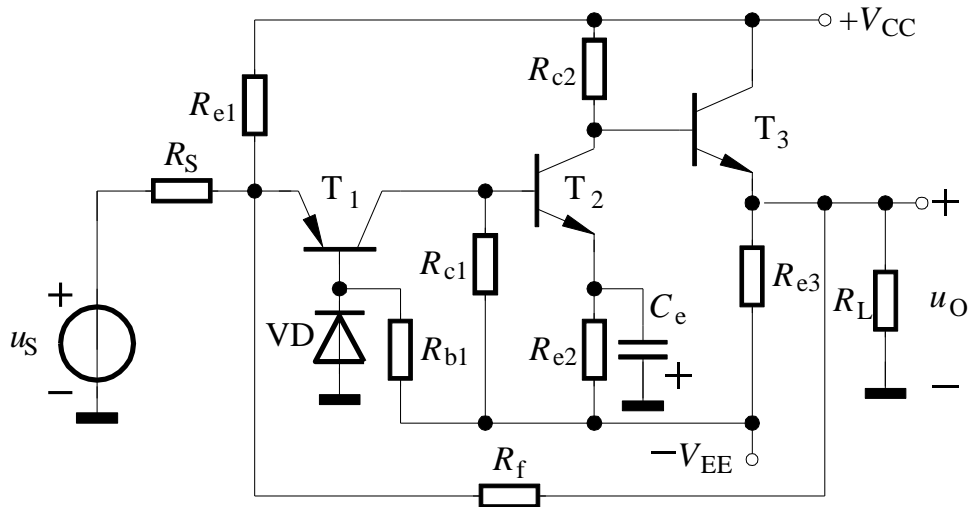
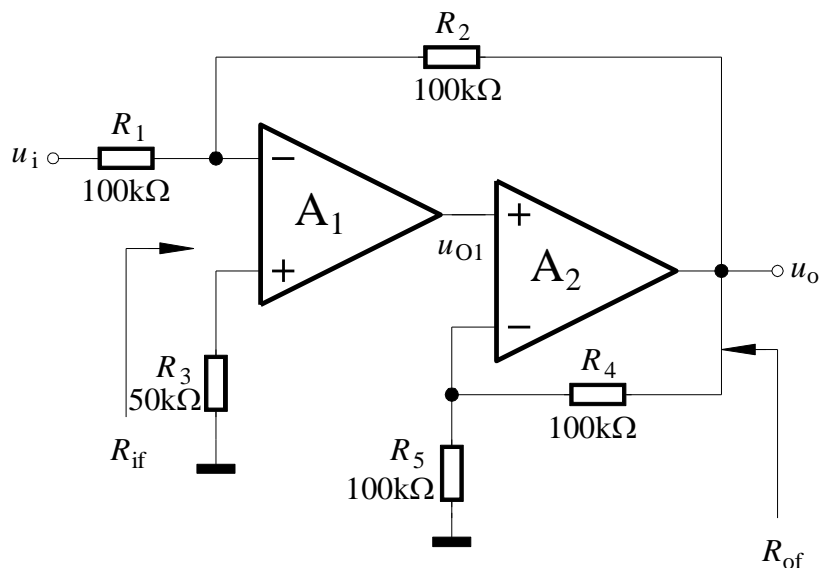


$$\dot{i}_{R_3} = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_o}{R_3} = \frac{(1 - \dot{A}_u) \dot{U}_i}{R_3}$$

$$R_3' = \frac{\dot{U}_i}{\dot{i}_{R_3}} = \frac{R_3}{1 - \dot{A}_u}$$

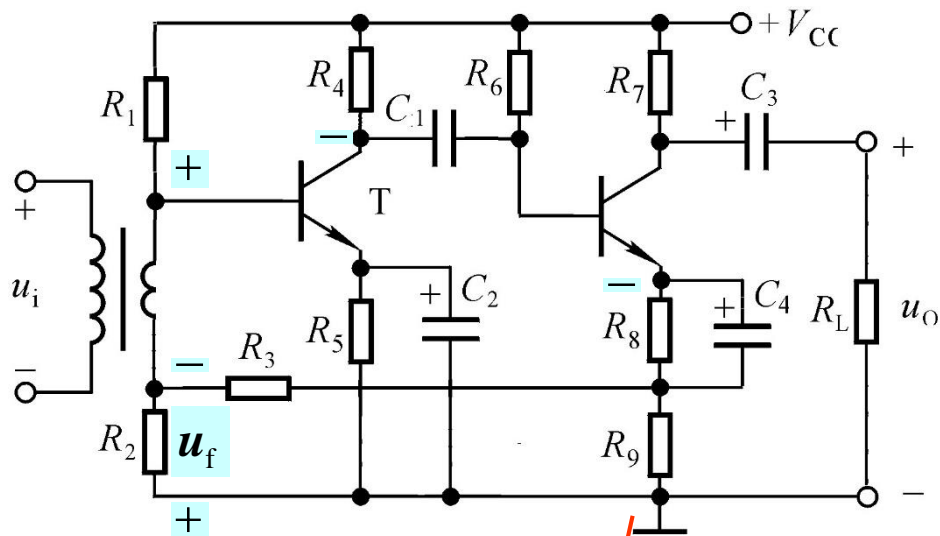


# 讨论一



1. 左图引入了哪种组态的交流负反馈？深度负反馈条件下的电压放大倍数 $\approx$ ？输入电阻 $\approx$ ？输出电阻 $\approx$ ？
2. 右图是几级放大电路？各级分别是哪种基本放大电路？引入了哪种组态的交流负反馈？深度负反馈条件下的电压放大倍数为多少？

## 讨论二



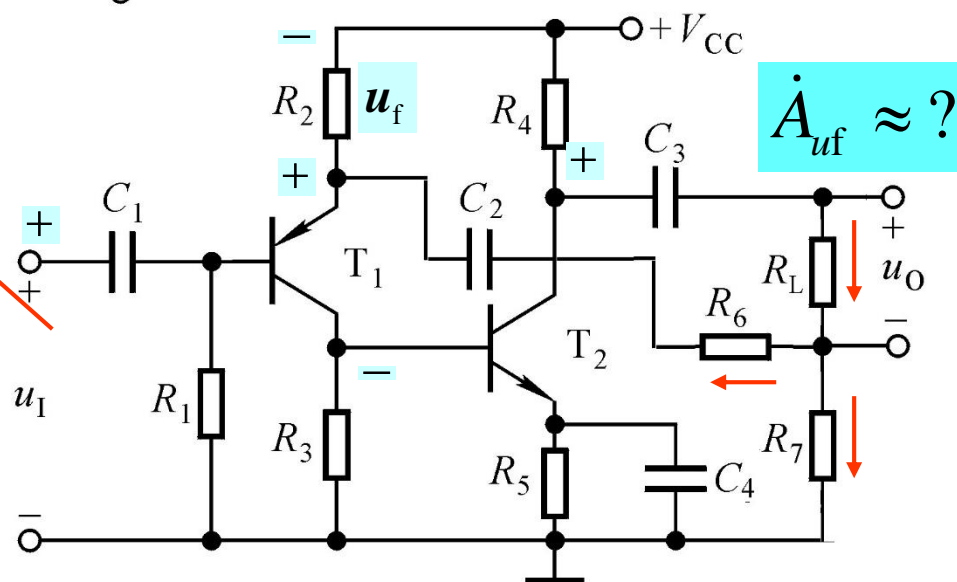
电流串联负反馈

电流串联负反馈

$$\dot{A}_{uf} \approx \frac{(R_2 + R_6 + R_7)R_L}{R_2 R_7}$$

设所有的电容对交流信号均可视为短路。试说明电路中是否引入了交流负反馈；如引入了，则说明其组态

$$\dot{A}_{uf} \approx \frac{(R_2 + R_3 + R_9)R_L}{R_2 R_9}$$



$$\dot{A}_{uf} \approx ?$$