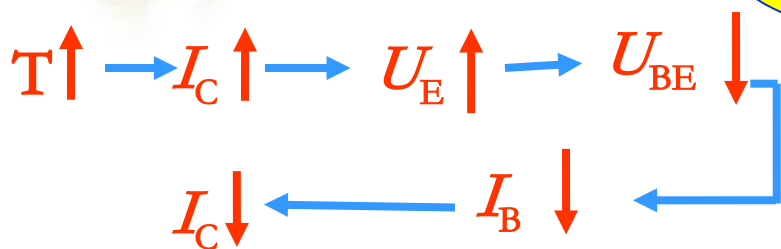


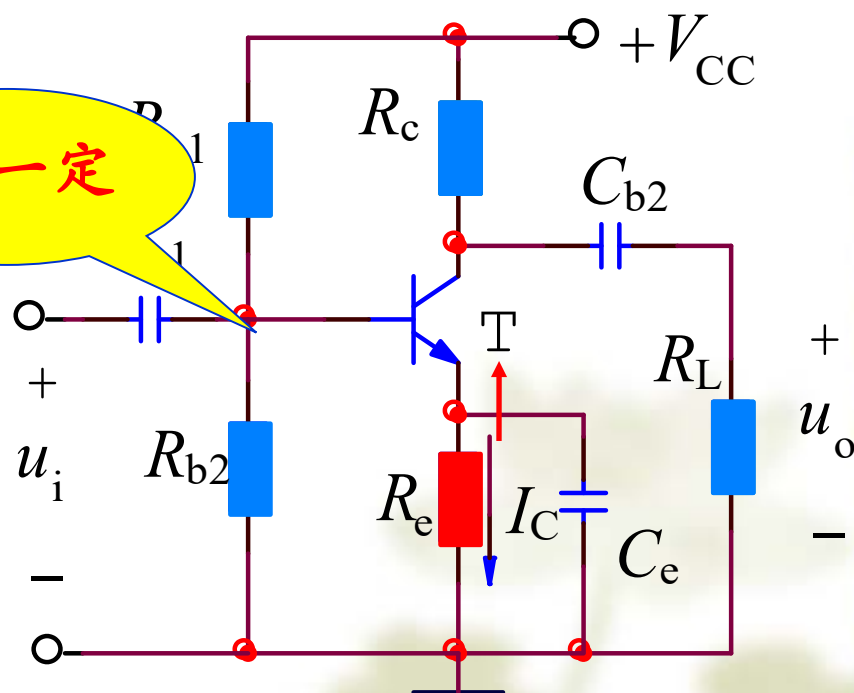


## 第八章 放大电路中的负反馈

稳定工作点电路：



$U_B$  一定



# 基本放大电路

基本  
放大  
电路

静态工作点不稳定 输出信号不稳定  
放大倍数不能灵活设置  
输入电阻  $r_i$  不够大  
输出电阻  $r_o$  不够小  
通频带  $f_{BW}$  不够宽

负反馈电路

集成运算放大电路  
+ 负反馈电路



加减乘除运算、积分微分运算、  
以及各种数字电路。



## 8.1 反馈的基本概念与分类

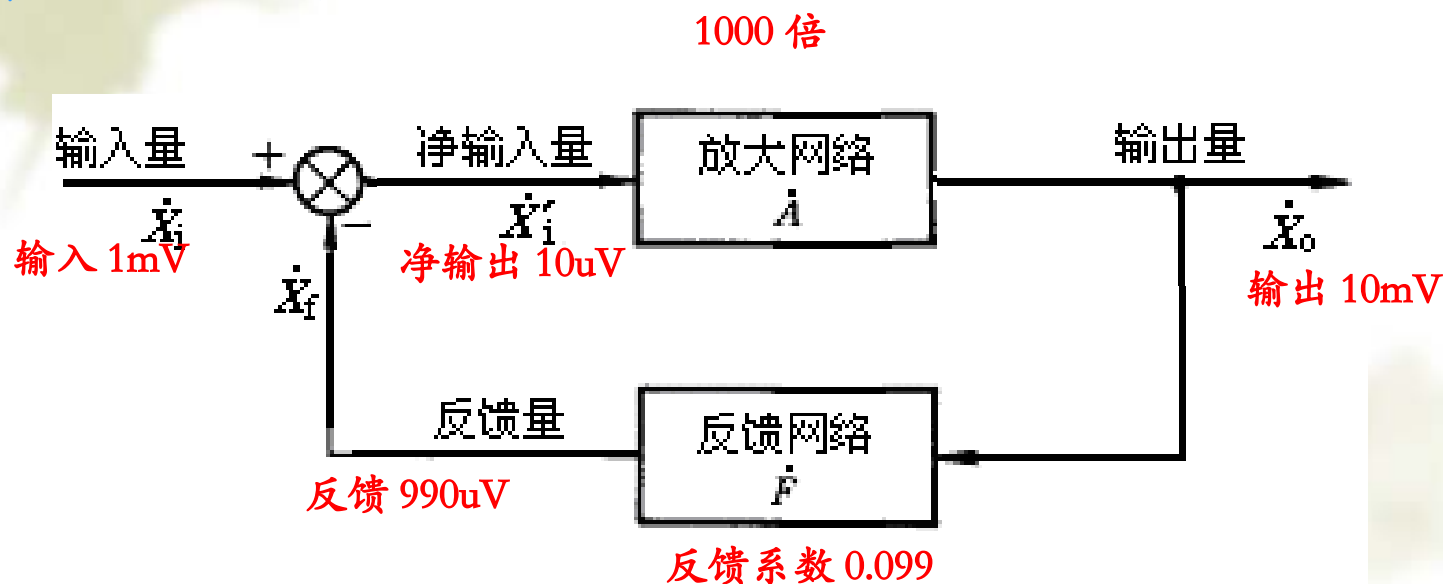
### 8.1.1 反馈的基本概念

### 8.1.2 反馈的判断

## 8.2 负反馈对放大电路性能的影响

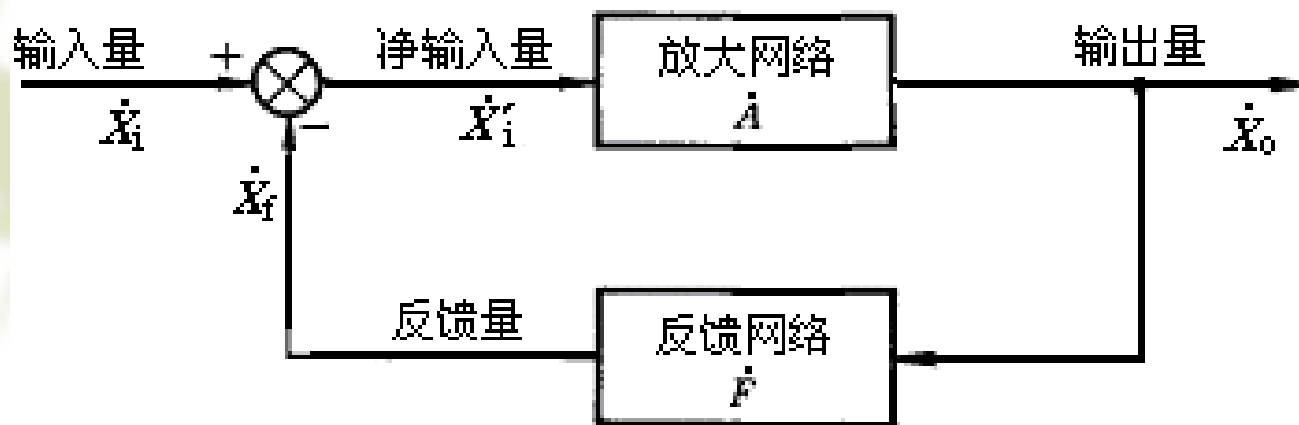
## 8.1.1 反馈的基本概念

### 一、什么是反馈



问题：希望实际放大器放大倍数为 10 倍，怎么办？

**反馈**——将输出量（电压或电流）的一部分或全部，通过一定的反馈网络反送到输入端，从而影响净输入量的变化，这种作用称为反馈。



## 反馈的四个环节：

**基本放大网络  $A$**  —— 放大电路放大倍数

**反馈网络  $F$**  —— 反馈网络放大倍数

**采样网络** —— 将输出信号取出

**求和网络** —— 输入端信号的叠加



## 8.1 反馈的基本概念与分类

### 8.1.1 反馈的基本概念

### 8.1.2 反馈的判断

## 8.2 负反馈对放大电路性能的影响

## 8.1.2 反馈的判断

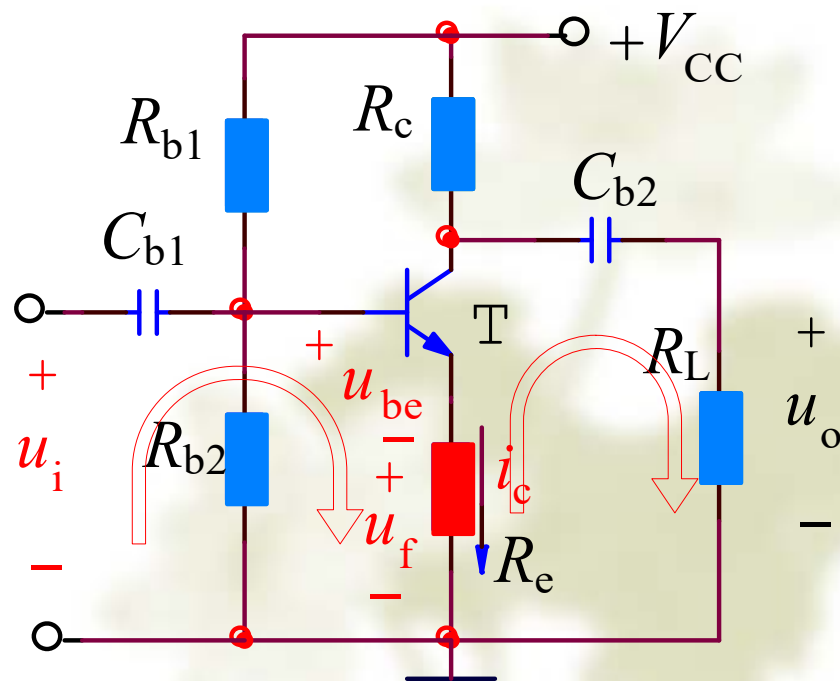
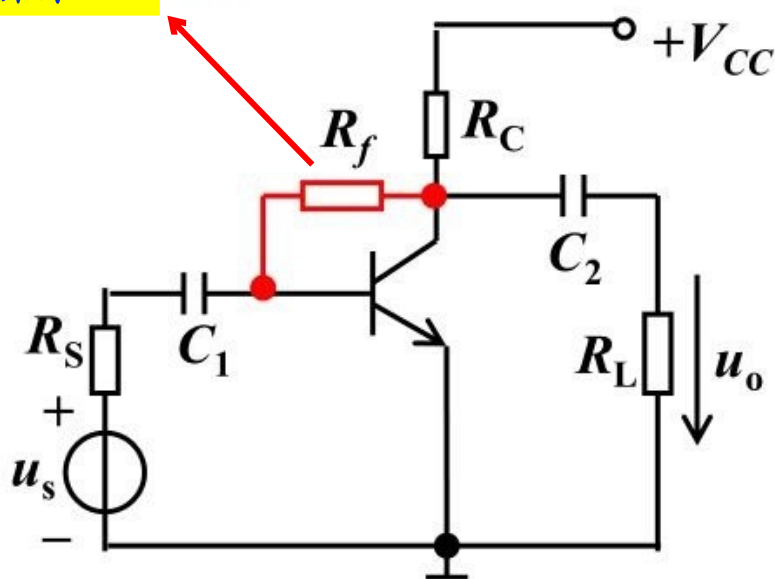
### 一、反馈类型的判断 → 步骤1：找到反馈元件

反馈：采集输出信号的一部分返送到输入端去影响输入信号

反馈元件必须既和输出回路有关，又和输入回路有关。

反馈元件的接法：① 一端接输入回路，一端接输出回路  
② 输入回路和输出回路所共有的元件

信息传送  
的桥梁



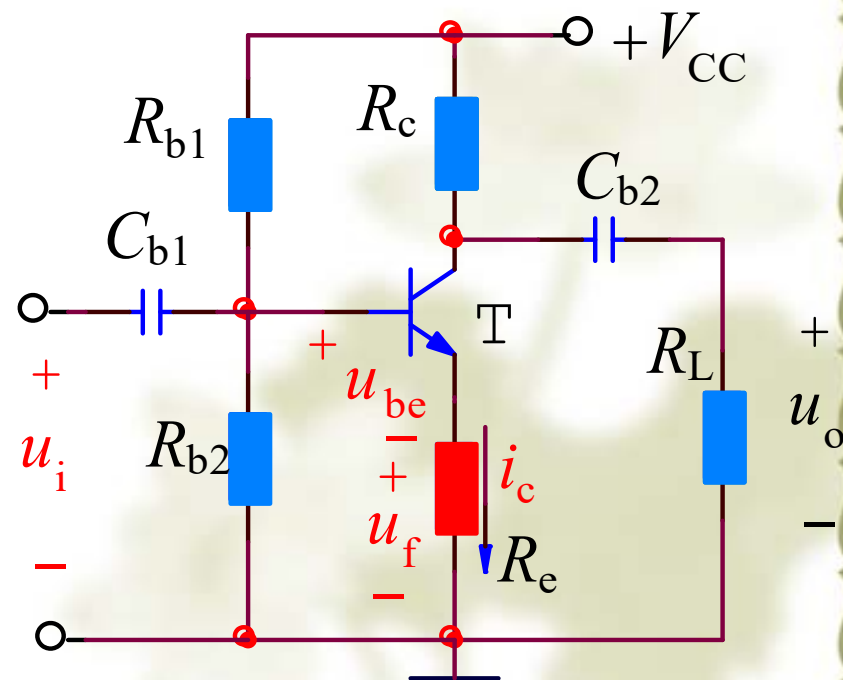
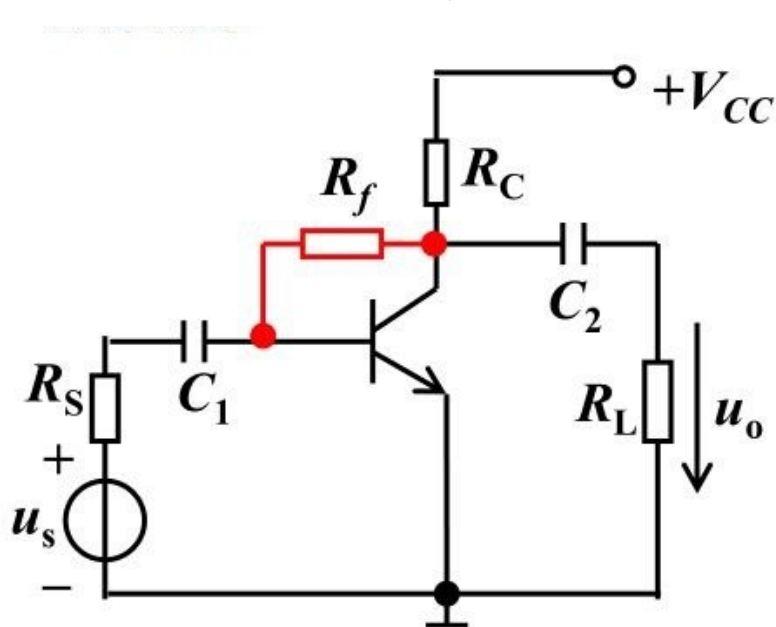


## 步骤2：判断反馈元件与输出信号的关系

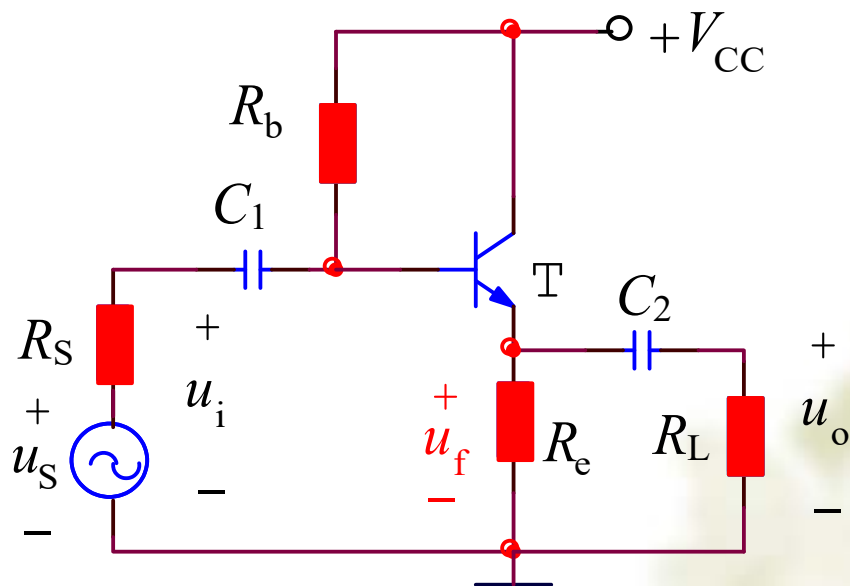
反馈：采集输出信号的一部分返送到输入端去影响输入信号

首先要判断反馈元件采集的是输出端的电压信号还是电流信号？

方法：看  $R_f$  和  $u_o$  和  $R_f$  接在同一极 → 采集电压（电位）→ 电压反馈  
和  $u_o$  的联接 →  $u_o$  和  $R_f$  接在不同极 →  $i_C \approx i_E$  采集电流 → 电流反馈



**例：**试判断下列电路中引入的反馈是电压反馈还是电流反馈。



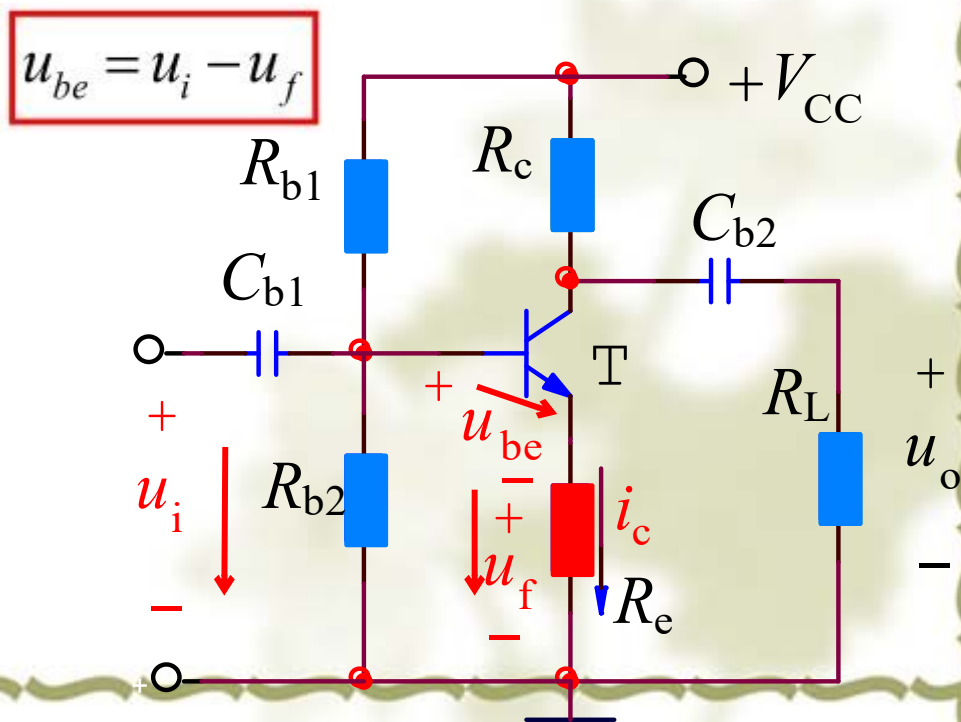
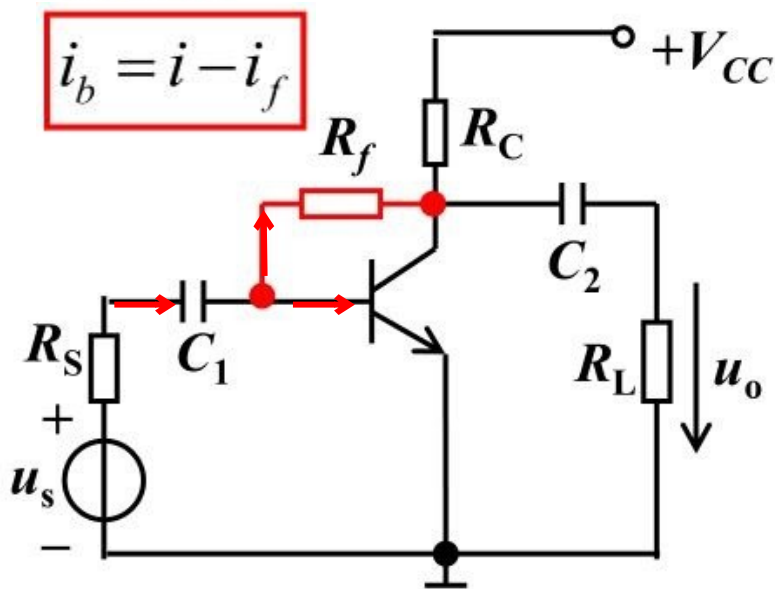
电压反馈

步骤3：判断反馈元件与输入信号的关系

决定了反馈会造成输入信号的分压或分流

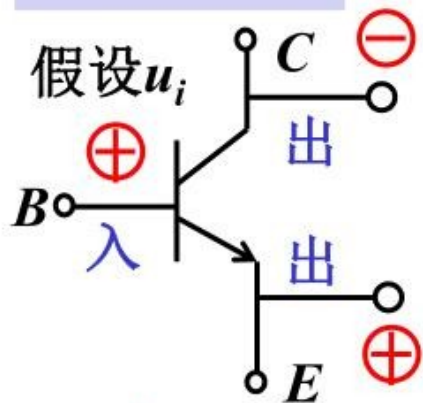
方法：看  $R_f$  和  $u_i$  接在 **同一极** → 信号分流 → 并联反馈  
和  $u_i$  的联接 →  $u_i$  和  $R_f$  接在 **不同极** → 信号分压 → 串联反馈

步骤4：判断是正反馈还是负反馈（净输入是增大还是减小？）



# 步骤4：判断是正反馈还是负反馈（净输入是增大还是减）

**瞬时极性法** → 根据信号的传输，对各点的电位用⊕ 或 ⊖ 标识



⊕ → 在某个瞬间  $u > 0$  或称  $u$  处于正半周期

⊖ → 在某个瞬间  $u < 0$  或称  $u$  处于负半周期

共发射极接法

区别

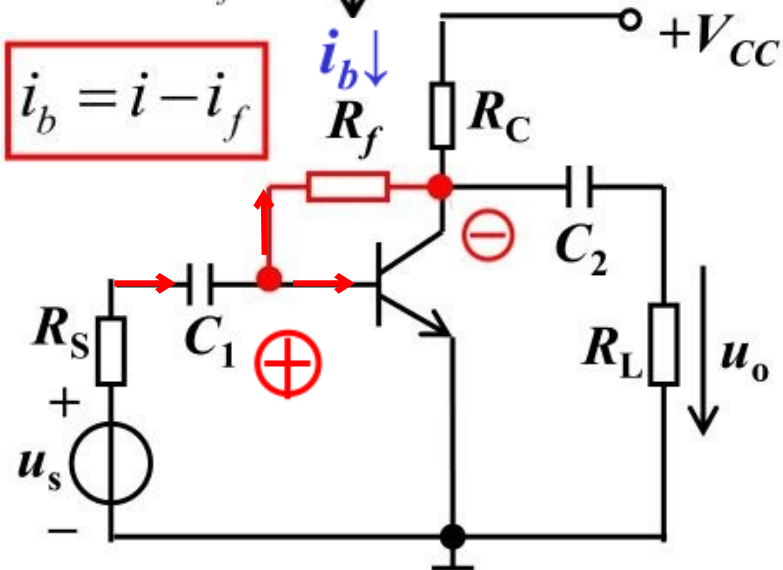
共集电极接法

反相放大

同相跟随

$$i_f = \frac{u_i - u_o}{R_f} > 0$$

电压并联负反馈



$$i_b = i - i_f$$

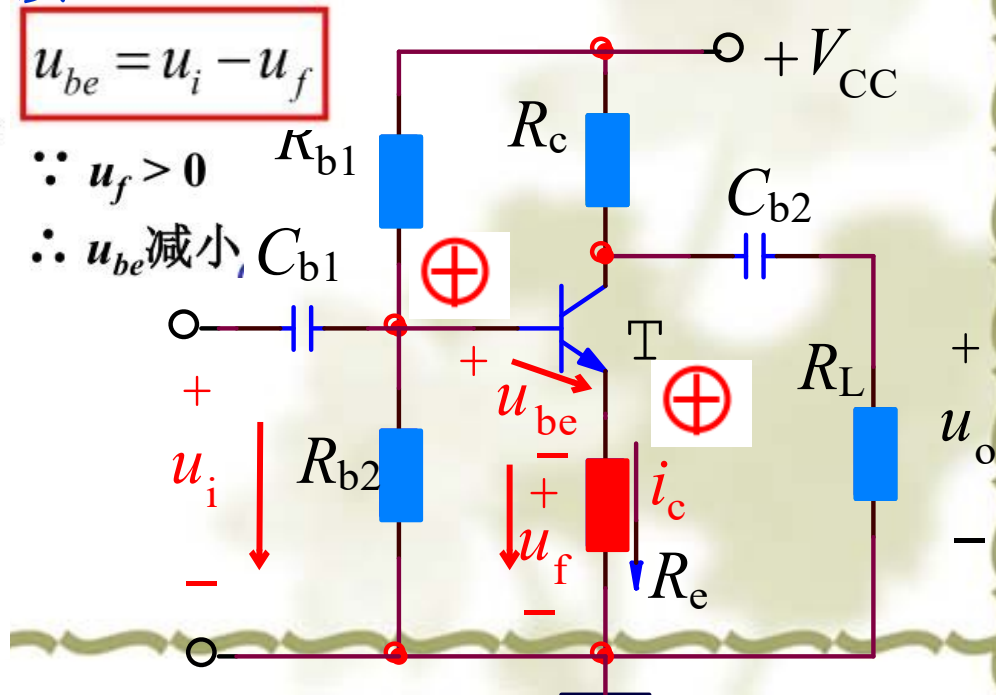
$i_b \downarrow$

电流串联负反馈

$$u_{be} = u_i - u_f$$

$\because u_f > 0$

$\therefore u_{be}$  减小,  $C_{b1}$

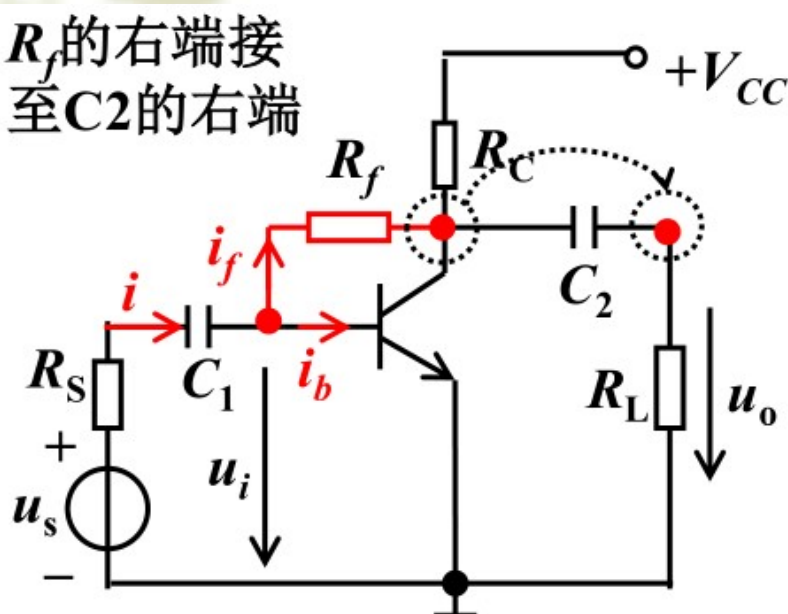


## 步骤5：判断反馈对直流成分还是交流成分起作用

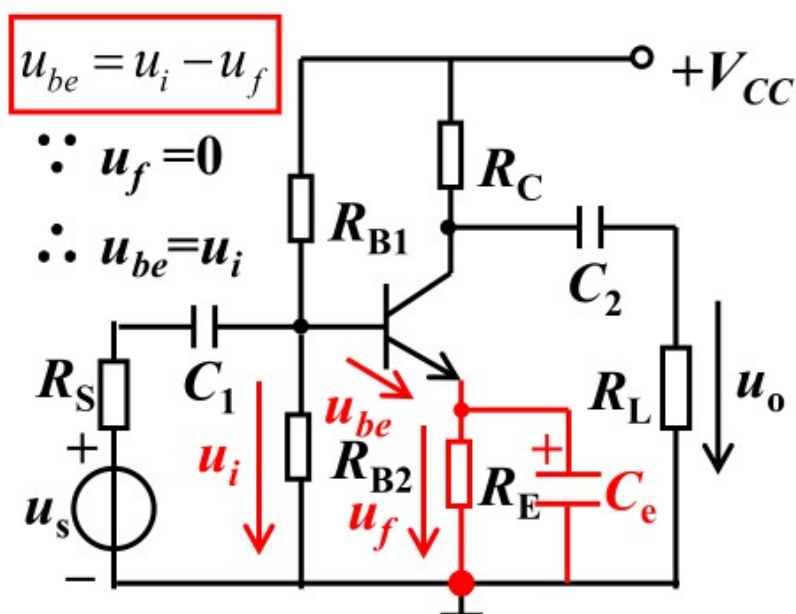
直流反馈：只对直流成分起作用；  
交流反馈：只对交流成分起作用；  
交直流负反馈：既对直流也对交流起作用；——可简称负反馈

利用电容隔直通交的效果来进行区分

$R_f$ 的右端接至 $C_2$ 的右端



电压 并联交流负反  
馈



电流串联直流负反馈

反馈：采集输出信号的一部分返送到输入端去影响输入信号

缺一不可



例1: 请判断该电路反馈类型

思考1: 反馈元件是什么?

思考2: 若 $R_{E1}$ 不存在?

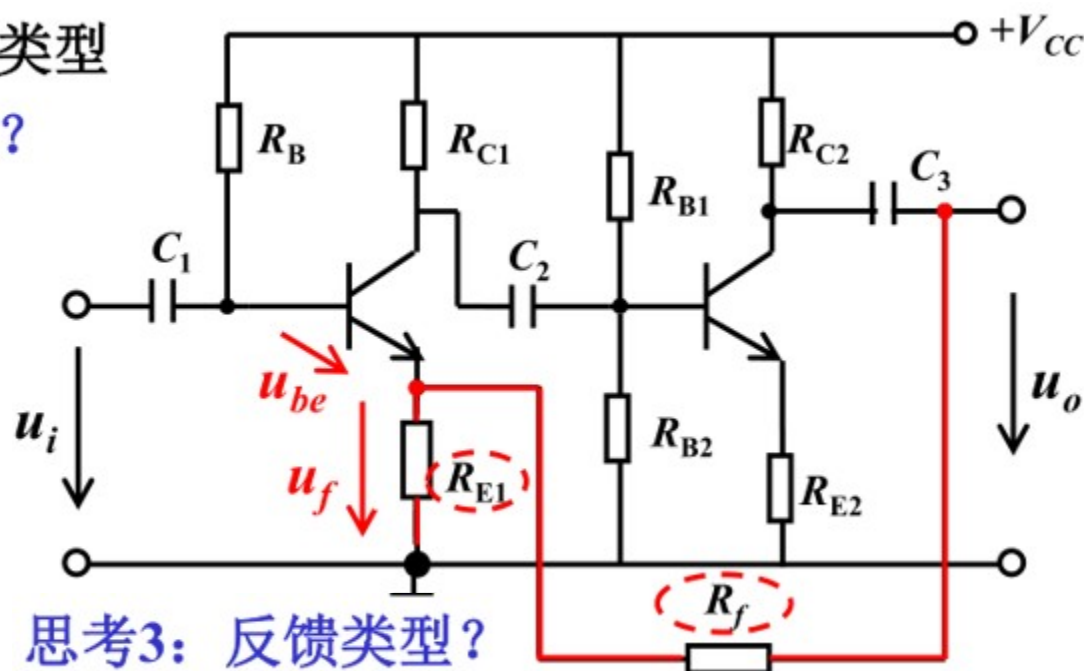
$u_{be} = u_i$ , 不受 $u_o$ 影响

$$u_{be} = u_i - u_f$$

∴ 反馈元件:  $R_f + R_{E1}$

$$u_f \neq u_{Rf}$$

$$u_f = u_{RE1}$$



思考3: 反馈类型?

1、根据**输出量**的采集方式, 判断是**电压**反馈或**电流**反馈

∵  $u_o$ 和 $R_f$ 接在同一极 ∴ 可采集电压(电位), 属于**电压**反馈

2、根据**输入量**是被分压或被分流, 判断是**串联**反馈或**并联**反馈

∵  $u_i$ 和 $R_{E1}$ 接在不同极 ∴ 输入量是**被分压**, 属于**串联**反馈

3、根据**净输入量**是变大还是变小, 判断是**正**反馈或**负**反馈

反馈: 采集输出信号的一部分**返送**到输入回路去**影响**输入信号

## 瞬时极性法

首先假设 $u_i$ 的极性为 $\oplus$

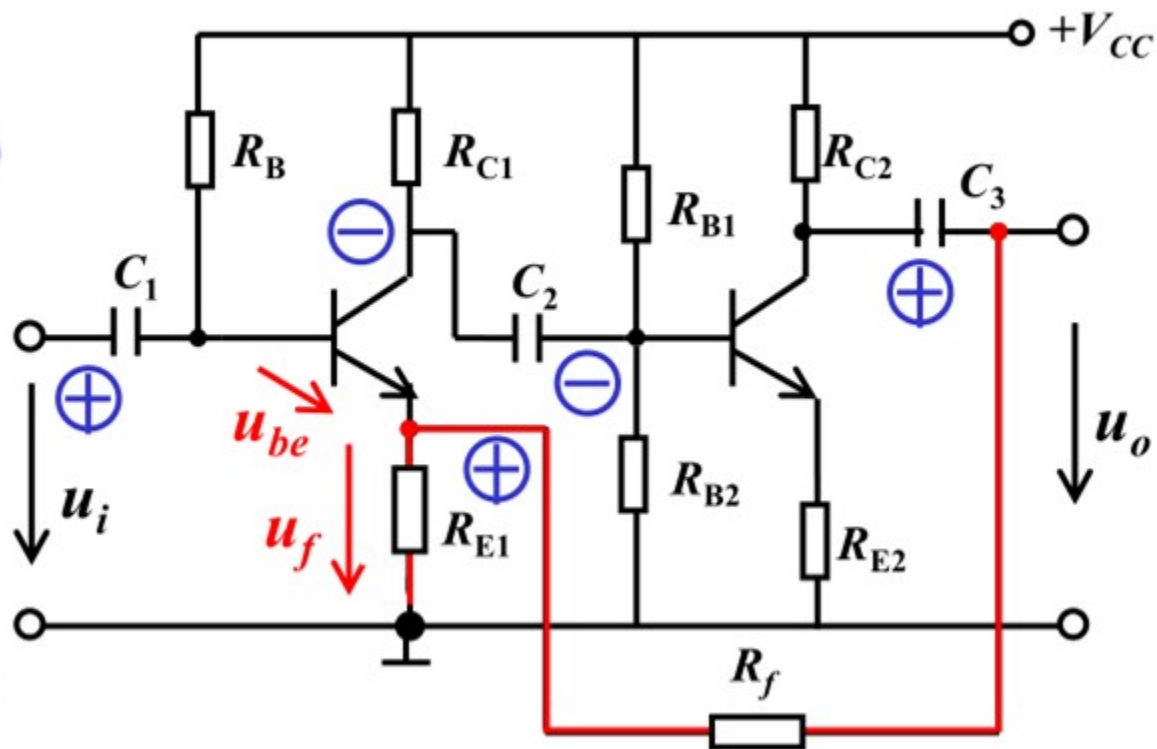
注意： $u_f$ 受 $u_o$ 影响更大，极性应与 $u_o$ 一致

$$u_{be} = u_i - u_f \quad \because u_f > 0$$

$\therefore u_{be}$ 减小

$\therefore$  返送的仅有交流电压

$\therefore$  电压串联交流负反馈



1、根据**输出量**的采集方式，判断是**电压**反馈或**电流**反馈

$\because u_o$ 和 $R_f$ 接在同一极  $\therefore$  可采集电压，属于**电压**反馈

2、根据**输入量**是被分压或被分流，判断是**串联**反馈或**并联**反馈

$\because u_i$ 和 $R_{E1}$ 接在不同极  $\therefore$  输入量是**被分压**，属于**串联**反馈

3、根据**净输入量**是变大还是变小，判断是**正**反馈或**负**反馈

4、根据**反馈**对何种信号起作用，判断是**直流**反馈或**交流**反馈



例2：请判断该电路反馈类型

反馈元件： $R_f$ 、 $R_{E1}$  和  $R_{E2}$

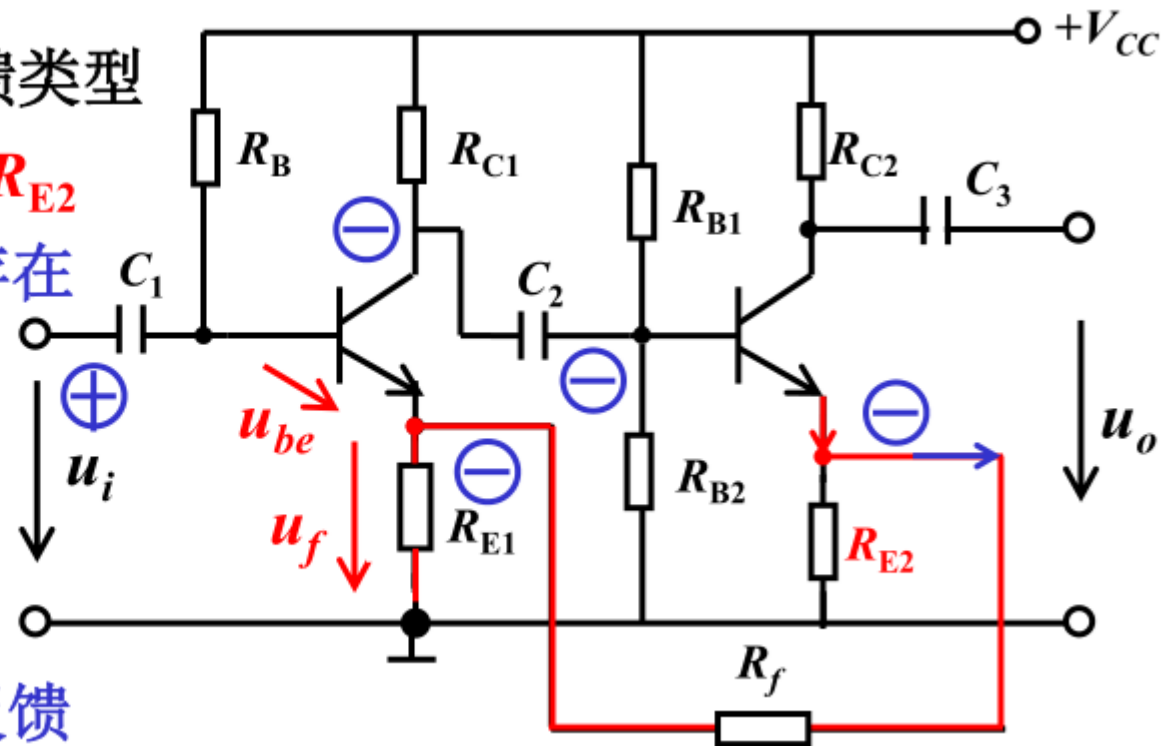
若 $R_{E2}$ 不存在，反馈不存在

$$u_{be} = u_i - u_f$$

$\because u_f < 0 \therefore u_{be}$  增大

$\therefore$  反馈不经过电容

$\therefore$  电流串联交直流正反馈



1、根据**输出量**的采集方式，判断是**电压**反馈或**电流**反馈

$\because u_o$  和  $R_f$  接在不同极  $\therefore$  只能利用  $i_C \approx i_E$  采集电流，属于**电流**反馈

2、根据**输入量**是被分压或被分流，判断是**串联**反馈或**并联**反馈

$\because u_i$  和  $R_{E1}$  接在不同极  $\therefore$  输入量是**被分压**，属于**串联**反馈

3、根据**净输入量**是变大还是变小，判断是**正**反馈或**负**反馈

4、根据**反馈**对何种信号起作用，判断是**直流**反馈或**交流**反馈



例3：请判断该电路反馈类型

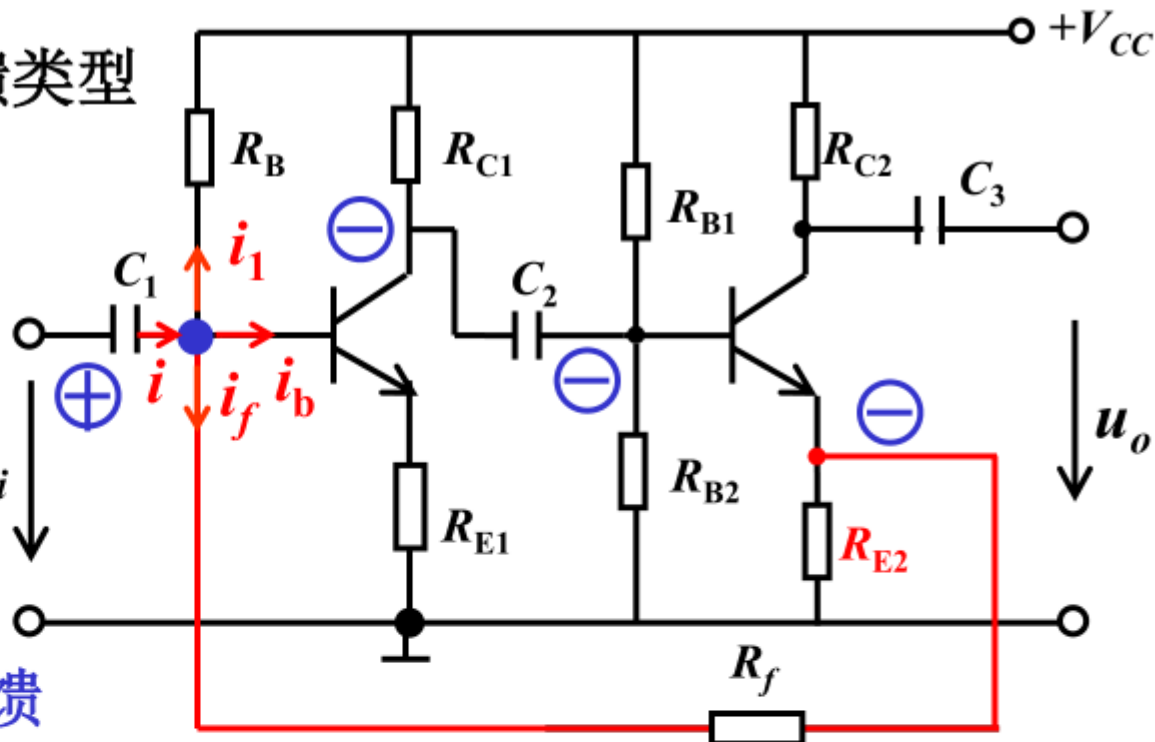
反馈元件： $R_f$ 和  $R_{E2}$

$$i_b = i - i_1 - i_f$$

$$i_f = \frac{u_i - u_{e2}}{R_f} > 0 \rightarrow i_b \text{ 减小 } u_i$$

$\therefore$  负反馈

$\therefore$  电流并联交直流负反馈



1、根据输出量的采集方式，判断是电压反馈或电流反馈

$\because u_o$ 和  $R_f$ 接在不同极  $\therefore$  只能利用  $i_C \approx i_E$  采集电流，属于电流反馈

2、根据输入量是被分压或被分流，判断是串联反馈或并联反馈

$\because u_i$ 和  $R_f$ 接在同一极  $\therefore$  输入量是被分流，属于并联反馈

3、根据净输入量是变大还是变小，判断是正反馈或负反馈

4、根据反馈对何种信号起作用，判断是直流反馈或交流反馈

例4：请判断该电路反馈类型

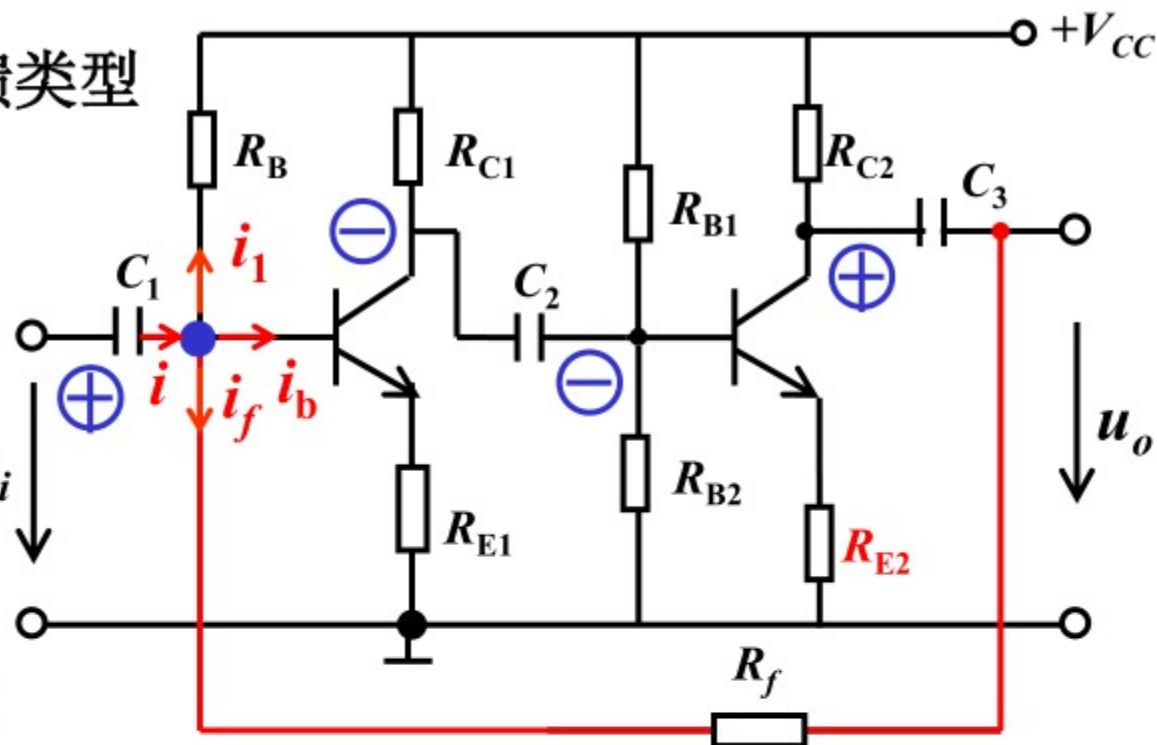
反馈元件： $R_f$

$$i_b = i - i_1 - i_f$$

$$i_f = \frac{u_i - u_o}{R_f} < 0 \rightarrow i_b \text{ 增大 } u_i$$

∴ 正反馈

∴ 电压并联交流正反馈



1、根据**输出量**的采集方式，判断是**电压**反馈或**电流**反馈

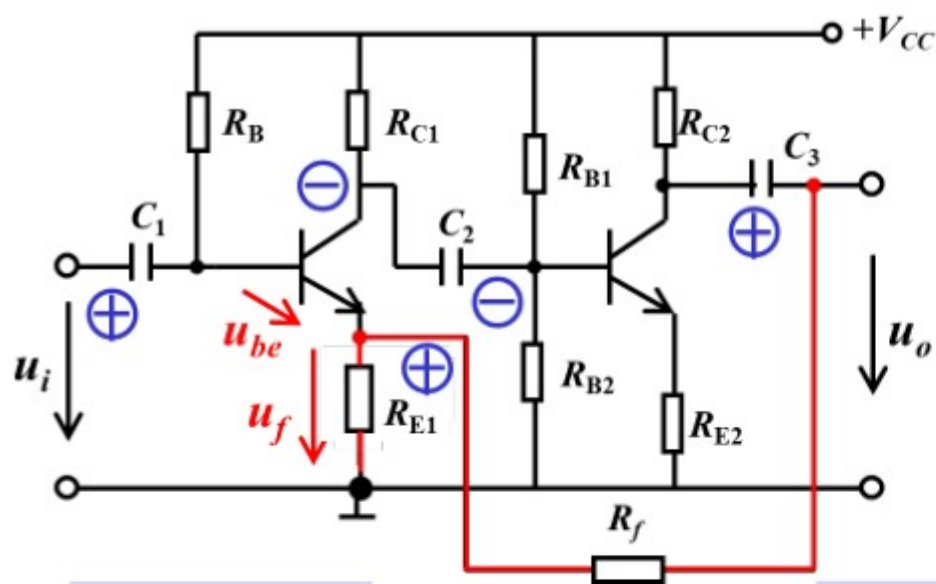
∵  $u_o$  和  $R_f$  接在同一极 ∴ 可采集电压，属于**电压**反馈

2、根据**输入量**是被分压或被分流，判断是**串联**反馈或**并联**反馈

∵  $u_i$  和  $R_f$  接在同一极 ∴ 输入量是**被分流**，属于**并联**反馈

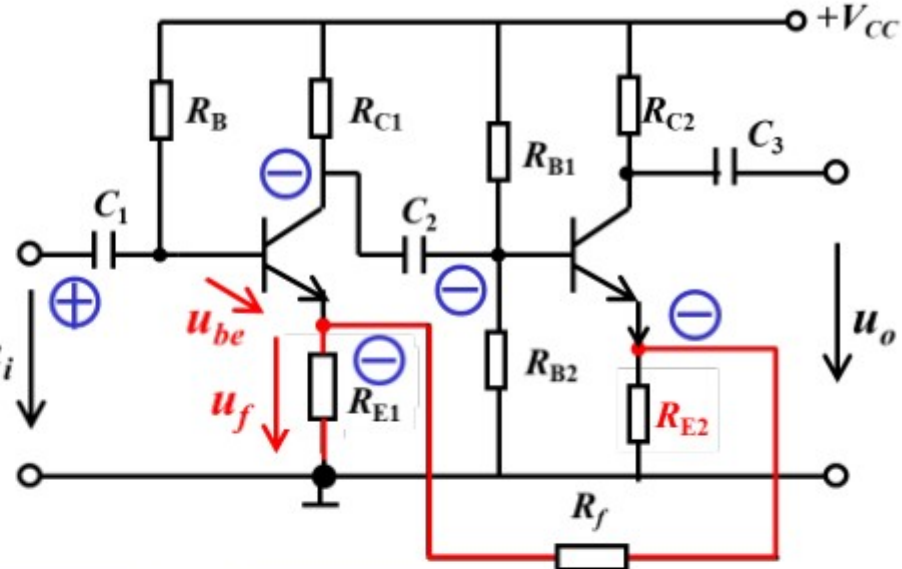
3、根据**净输入量**是变大还是变小，判断是**正**反馈或**负**反馈

4、根据**反馈**对何种信号起作用，判断是**直流**反馈或**交流**反馈

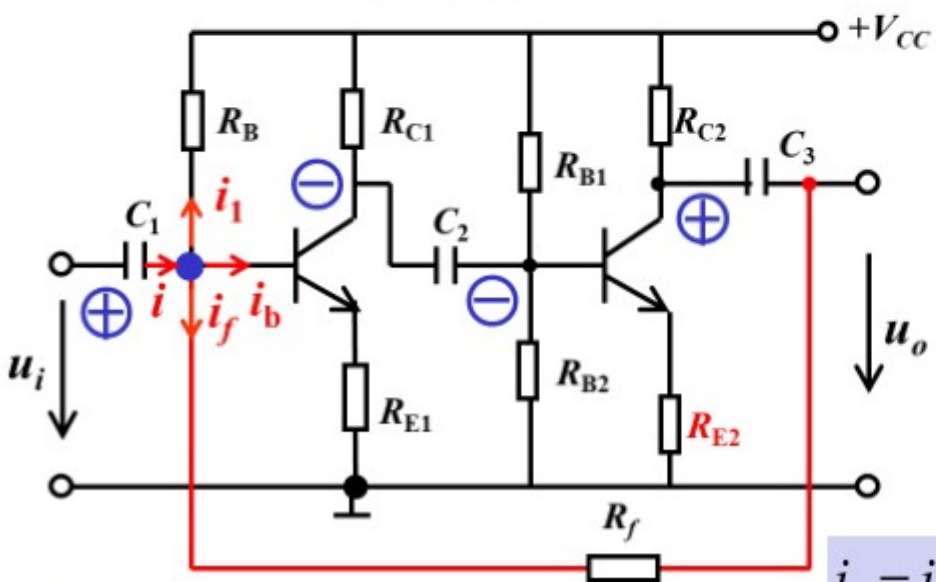


电压串联 负反馈

$$u_{be} = u_i - u_f$$

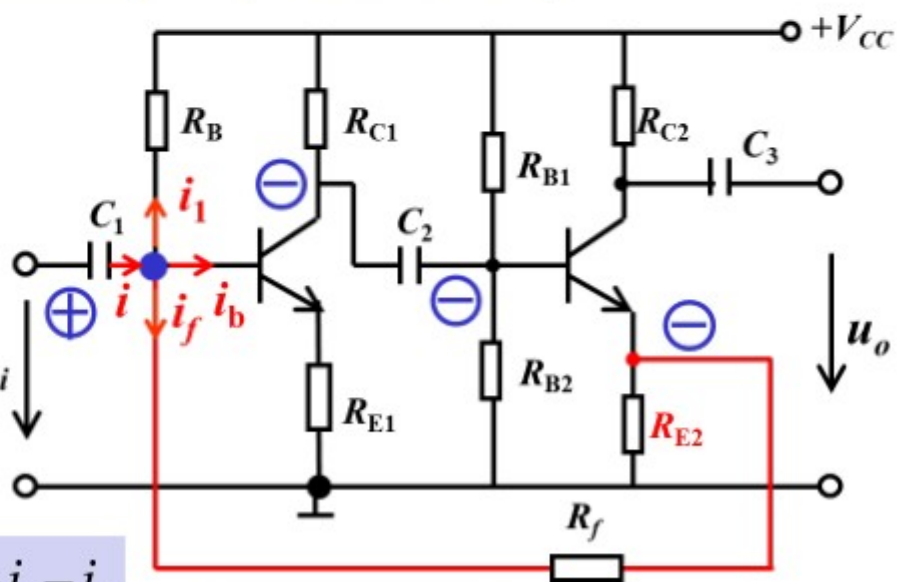


电流串联 正反馈



电压并联 正反馈

$$i_b = i - i_1 - i_f$$



电流并联 负反馈



## 二、反馈类型的判断

电压串联；电流串联  
电压并联；电流并联



结论1：对于同一张电路图，反馈的四种组态，只有两种会实现负反馈，另外两种实现的必然是正反馈。

结论2：当反馈的一端固定时，另一端的两种接法中，必然一种实现的是负反馈，一种实现的是正反馈。

结论3：不同电路图，实现负反馈的组态是不同的。

步骤1：找到反馈元件，明确反馈路径

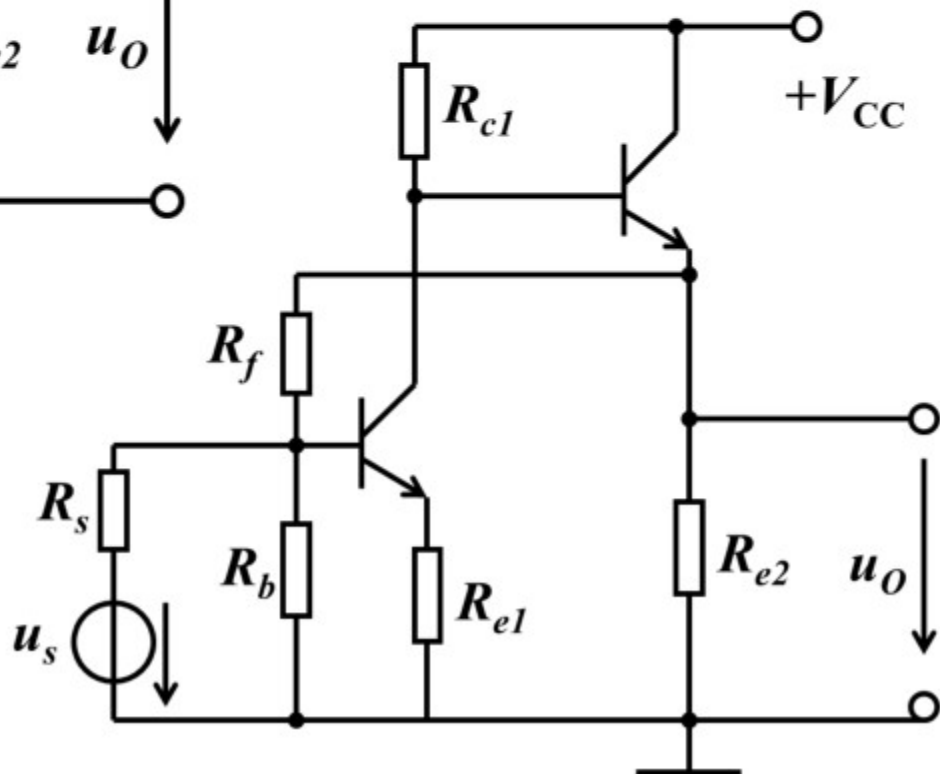
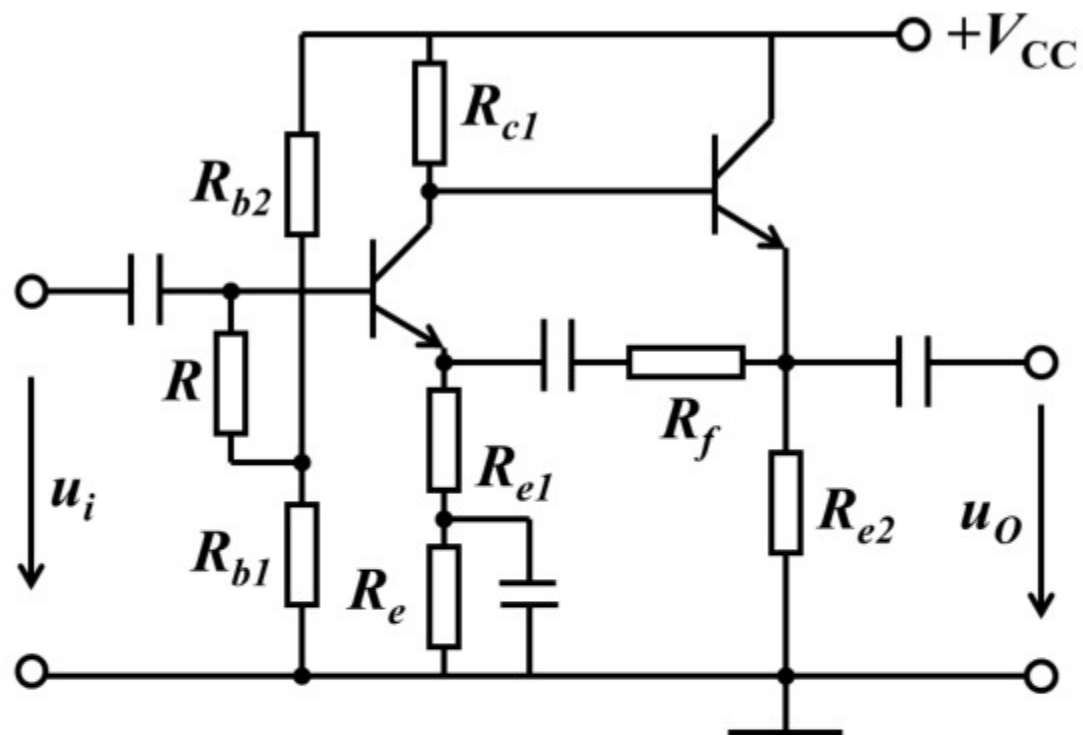
步骤2：判断反馈元件采集到输出端的什么信号？→电压or电流

步骤3：判断反馈造成输入信号的分压还是分流？→串联or并联

步骤4：判断反馈造成了净输入的增大还是减小？→正or负反馈

步骤5：判断反馈对直流成分或交流成分起作用？→直流or交流

# 8-1 (b) (c) 判断反馈类型



8-1 (b) : ① 找反馈元件 → 找总输出和总输入之间的关系

反馈: 采集输出信号的一部分返送到输入回路去影响输入信号

② 做四项判断; 先判断输出再判断输入。

∵ 反馈元件 $R_f$ 和 $u_o$ 接在同一级 ∴ 采集输出电压, 属于电压反馈

∵ 反馈元件 $R_{e1}$ 和 $u_i$ 接在不同级 ∴ 造成信号的分压, 是串联反馈

利用瞬时极性法标出各点电位的极性

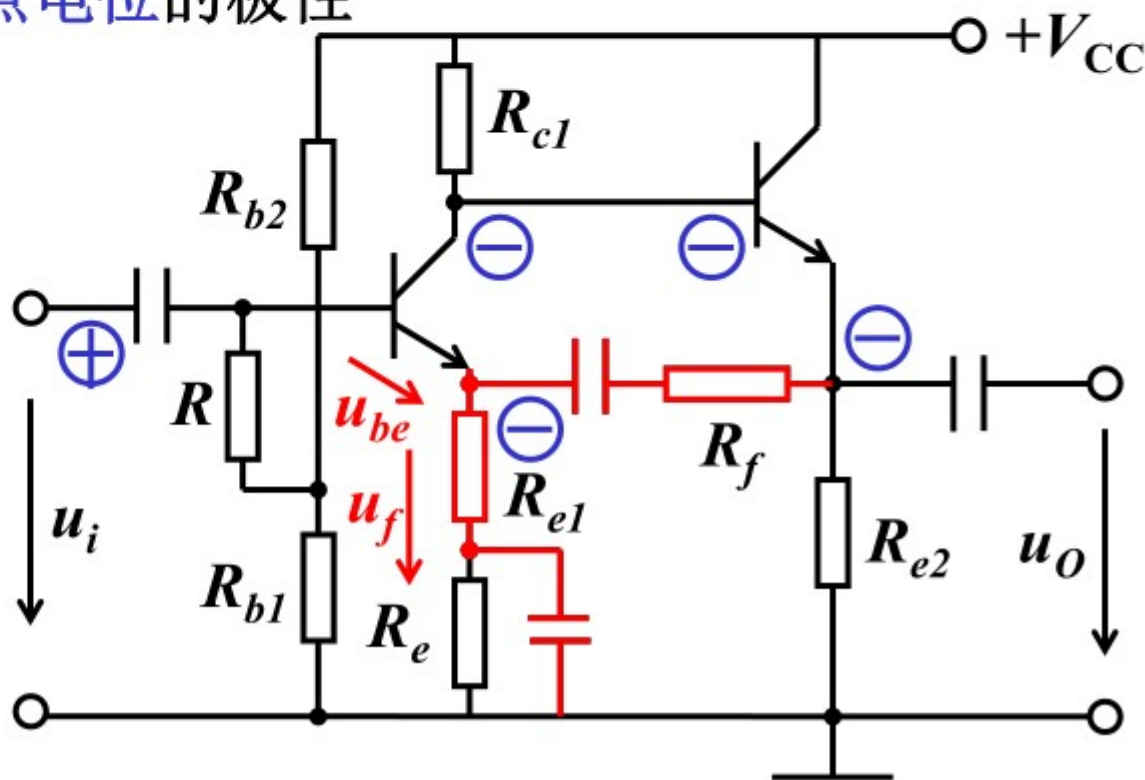
$$u_{be} = u_i - u_f$$

$u_f < 0 \rightarrow u_{be}$  增大

∴ 是正反馈

∵ 只有交流信号能通过

∴ 电压串联交流正反馈





8-1 (c) : ① 找反馈元件 → 找总输出和总输入之间的关系

② 做四项判断；先判断输出再判断输入。

∵ 反馈元件 $R_f$ 和 $u_o$ 接在同一级 ∴ 采集输出电压，属于电压反馈

∵ 反馈元件 $R_f$ 和 $u_i$ 接在同一级 ∴ 造成信号的分流，是并联反馈

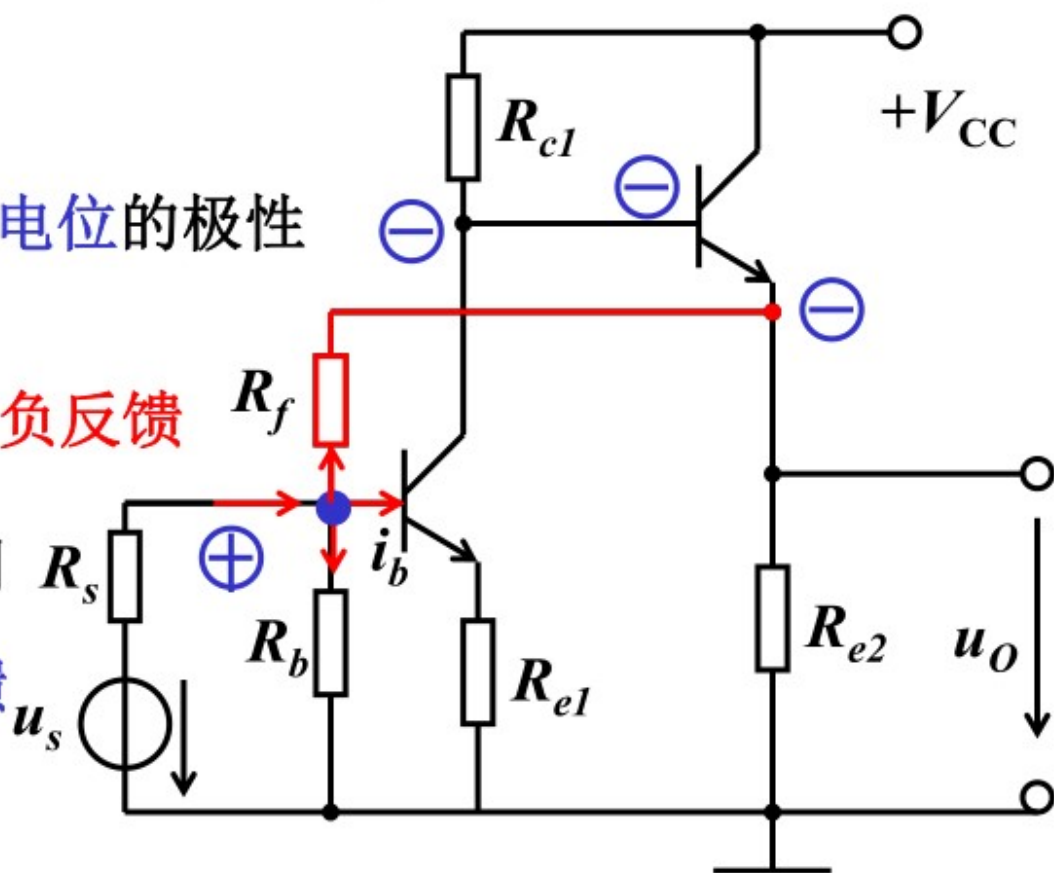
$$i_b = i - i_{Rb} - i_f$$

利用瞬时极性法标出各点电位的极性

$$i_f = \frac{u_i - u_o}{R_f} > 0 \rightarrow i_b \rightarrow \text{负反馈}$$

∴ 对直流和交流均起作用

∴ 电压并联交直流负反馈





## 8.1 反馈的基本概念与分类

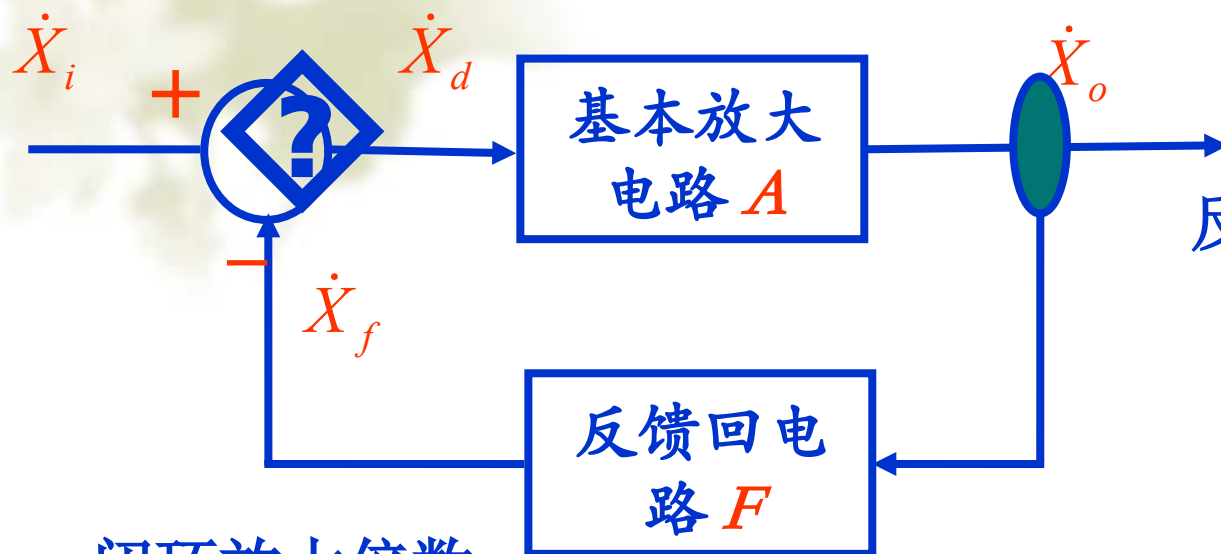
### 8.1.1 反馈的基本概念

### 8.1.2 反馈的判断

## 8.2 负反馈对放大电路性能的影响



### 三 反馈的关系表达式



负反馈电路的  
基本方程：

开环放大  
倍数  $A = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_d}$

反馈系数  $F = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$

净输  
入量  $\dot{X}_d = \dot{X}_i - \dot{X}_f$

闭环放大倍数

$$\begin{aligned} A_F = \dot{X}_o / \dot{X}_i &= \dot{X}_o / (\dot{X}_d + \dot{X}_f) = \dot{X}_o / \left( \frac{\dot{X}_o}{A} + \dot{X}_o F \right) \\ &= \frac{1}{\frac{1}{A} + F} = \frac{A}{1 + AF} \end{aligned}$$

$$(1) \quad A_F = \frac{A}{1 + AF}$$

$\therefore A_f$ 、 $A$ 可正可负 P227

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

$|1 + AF|$  称为反馈深度

它决定了  $|A_f|$  与  $|A|$  的大小关系

1、 $|1 + AF| > 1 \rightarrow |A_f| < |A| \rightarrow$  负反馈

可利用反馈支路快速估算  $A_f$

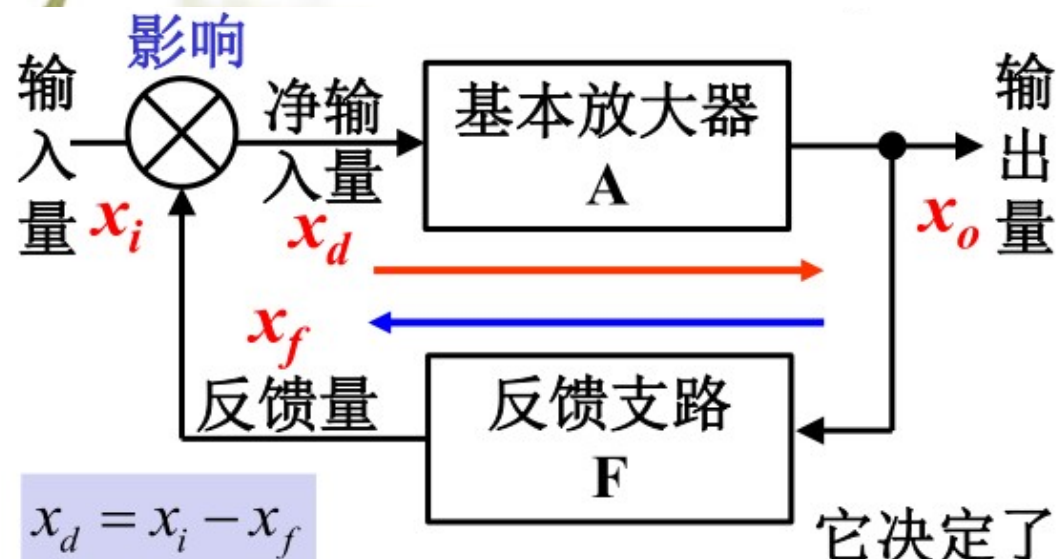
2、 $|1 + AF| \gg 1 \rightarrow |AF| \gg 1 \rightarrow A_f \approx \frac{1}{F} \rightarrow$  深度负反馈

3、 $|1 + AF| < 1 \rightarrow |A_f| > |A| \rightarrow$  正反馈

4、 $|1 + AF| = 0 \rightarrow |A_f| = \infty \rightarrow$  自激振荡  $\rightarrow$  放大电路不可控

反馈放大器无输入信号  $x_i$  时，仍有输出信号  $x_o$

说明：第3和第4种情况不做要求，仅讨论第1和第2种情况。



$A_f$ 、 $A$ 、 $F$ 均是广义增益

$\because A_f$ 、 $A$ 可正可负 P227

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

$|1 + AF|$  称为反馈深度

它决定了  $|A_f|$  与  $|A|$  的大小关系

1、 $|1 + AF| > 1 \rightarrow |A_f| < |A| \rightarrow$  负反馈

2、 $|1 + AF| \gg 1 \rightarrow |AF| \gg 1 \rightarrow A_f \approx \frac{1}{F}$

可利用反馈支路快速估算  $A_f$

深度负反馈

#### 四、深度负反馈下的估算

$$x_d \approx 0$$

$$x_i \approx x_f$$

$$\frac{x_o}{x_i} \approx \frac{x_o}{x_f}$$

$A_f$ 只与反馈支路有关而与基本放大器无关

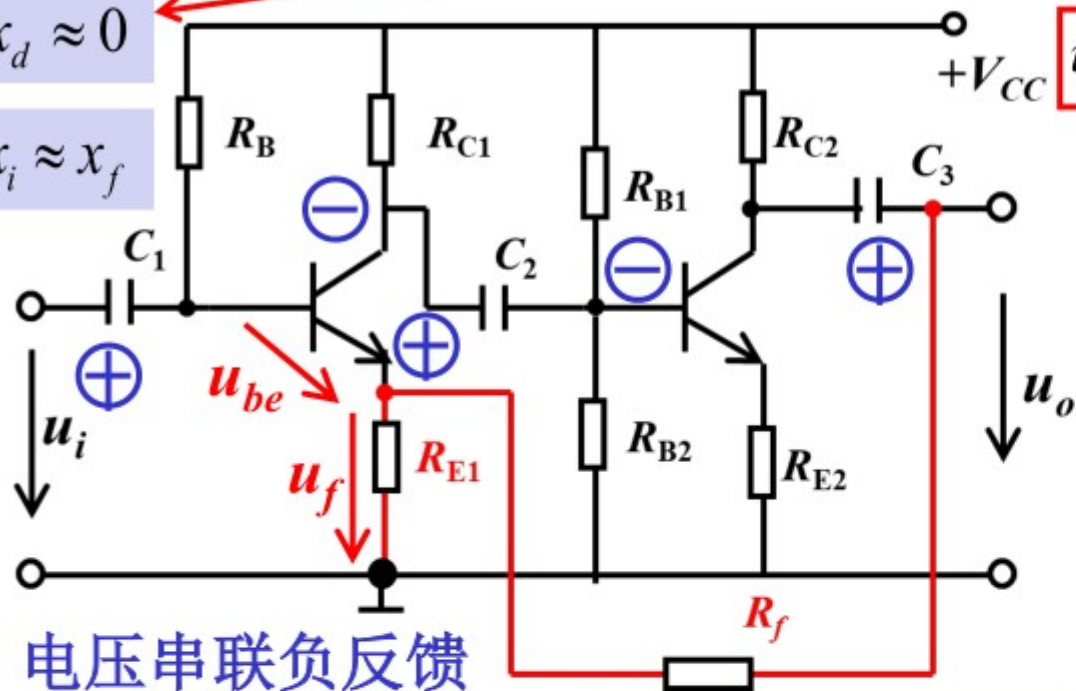
闭环放大倍数  $A_f = \frac{x_o}{x_i}$  反馈系数  $F = \frac{x_f}{x_o}$

只需要在反馈路径中找  $x_f$  和  $x_o$  的关系即可

例题：要求在深度负反馈下估算闭环电压放大倍数  $A_{uf}$

$x_d \approx 0$

$x_i \approx x_f$



电压串联负反馈

串联深度负反馈

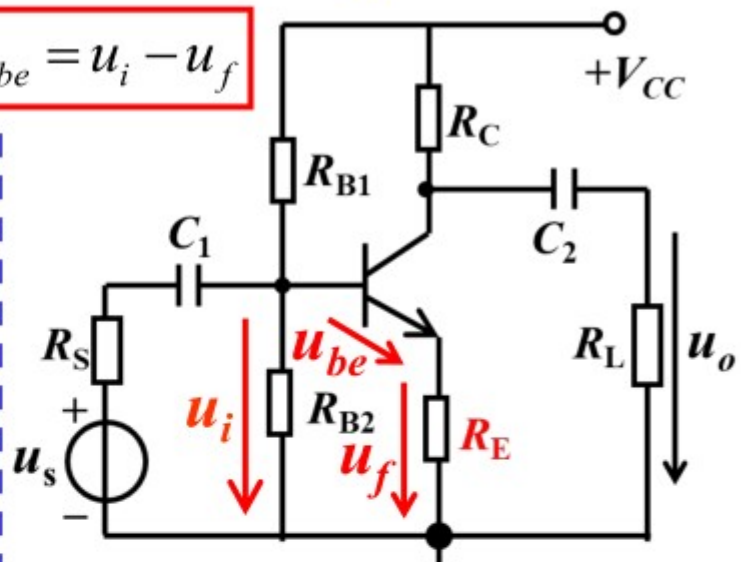
$u_{be} \approx 0, u_i \approx u_f$

$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} \approx \frac{u_o}{u_f} = \frac{R_{E1} + R_f}{R_{E1}} = 1 + \frac{R_f}{R_{E1}}$  与  $\beta$  无关 很稳定

只看反馈支路可认为  $R_f$  和  $R_{E1}$  是串联

注意：  $R_{E1}$  绝不可以为0；而  $R_f$  可以为0。  $u_o = u_f$   $u_o \approx u_i$

$u_{be} = u_i - u_f$



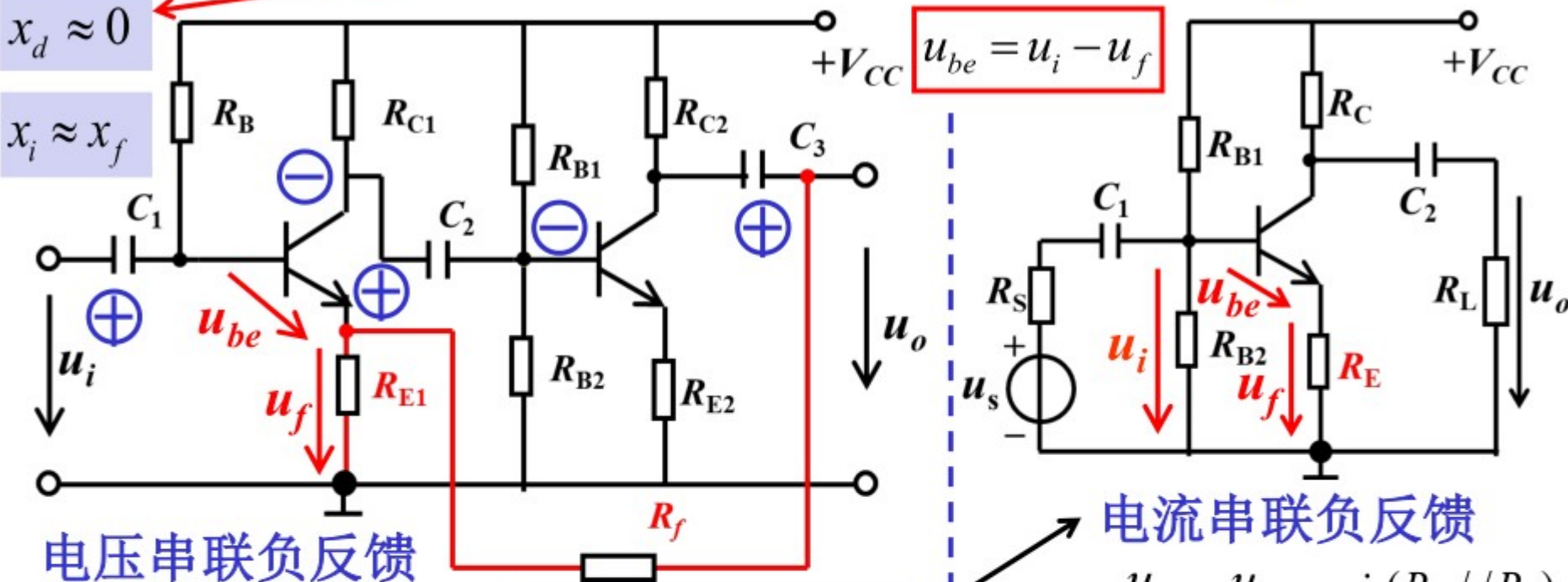
电流串联负反馈

$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} \approx \frac{u_o}{u_f} \approx -\frac{i_c(R_C // R_L)}{i_e R_E}$

$u_o$  与  $u_f$  无直接电压关系  
 $u_o$  与  $i_c$  有关  $u_f$  与  $i_e$  有关  
 要在交流通路或微变等效电路找关系 (看表)



例题：要求在深度负反馈下估算闭环电压放大倍数  $A_{uf}$



电压串联负反馈

串联深度负反馈  $\rightarrow u_{be} \approx 0, u_i \approx u_f$

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} \approx \frac{u_o}{u_f} = \frac{R_{E1} + R_f}{R_{E1}} = 1 + \frac{R_f}{R_{E1}}$$

与  $\beta$  无关  
很稳定

总结：两图均是串联负反馈

$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} \approx \frac{u_o}{u_f}$    
 { 电压负反馈  $\rightarrow$  电压关系  
 { 电流负反馈  $\rightarrow$  电流关系

电流串联负反馈

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} \approx \frac{u_o}{u_f} \approx -\frac{i_c(R_C // R_L)}{i_e R_E}$$

$$\because i_c \approx i_e \therefore A_{uf} \approx -\frac{R_C // R_L}{R_E}$$

与根据微变等效电路写出的公式非常接近  
 $A_{uf}$  与  $\beta$  无关，很稳定

# 四、深度负反馈下的估算 $x_d \approx 0$ $x_i \approx x_f$ 电压并联负反馈

串联深度负反馈  $\rightarrow u_{be} \approx 0, u_i \approx u_f$

并联深度负反馈(难)  $\rightarrow i_b \approx 0, i \approx i_f$

当  $i_b \approx 0$  时, 可近似认为  $u_i \approx 0$  虚地

估算电源电压放大倍数

$A_{usf} = \frac{u_o}{u_s}$   $\rightarrow$  写出  $u_o$  与  $i_f$  的表达式  
 $\rightarrow$  写出  $u_s$  与  $i$  的表达式

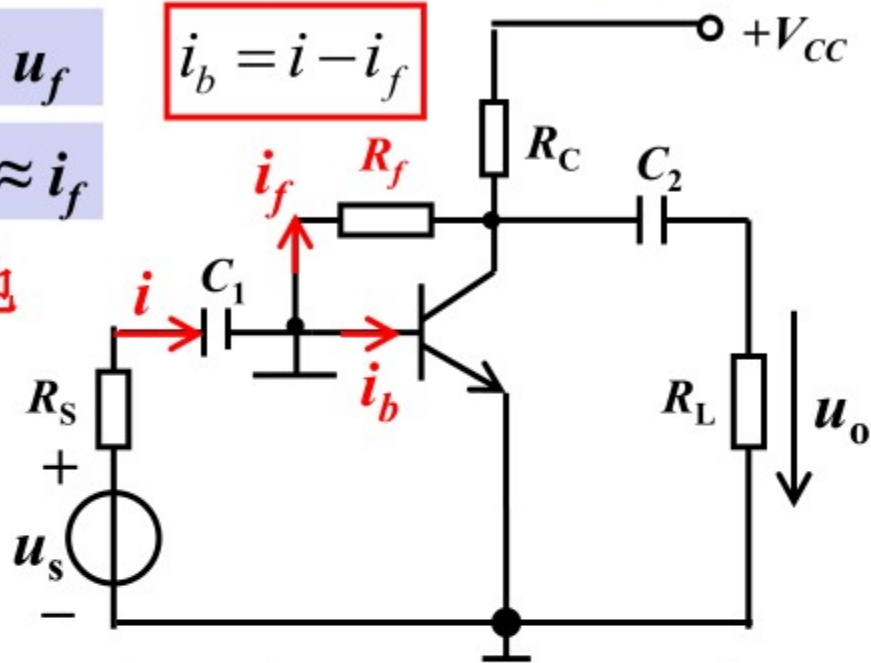
$$\frac{u_s - 0}{R_s} = \frac{0 - u_o}{R_f} \rightarrow A_{usf} = \frac{u_o}{u_s} = -\frac{R_f}{R_s}$$

$\because i_b \approx 0 \therefore u_i \approx 0 \rightarrow$  计算  $A_{usf} = \frac{u_o}{u_s}$

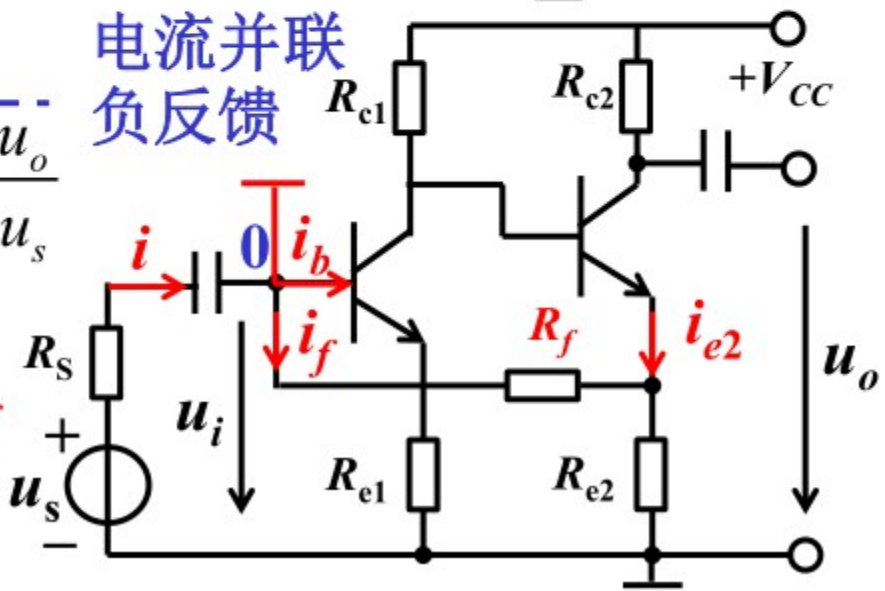
$$u_s = iR_s \quad u_o = -i_{c2}R_{c2} \approx -i_{e2}R_{c2}$$

分流公式  $i_f = -\frac{R_{e2}}{R_f + R_{e2}} \times i_{e2}$  写出  $u_o$  与  $i_f$  的表达式

并联深度负反馈的估算不做要求



电流并联负反馈



# 第三章 负反馈放大电路

## 四、深度负反馈下的估算

净输入信号=0  $\rightarrow$  输入信号 $\approx$ 反馈信号

问题：输入形式是电压还是电流？ $\rightarrow$ 看输入和 $R_f$ 的关系

1、串联深度负反馈  $\rightarrow u_{be}=0 \quad u_i \approx u_f$

重点掌握串联深度负反馈的估算

$$u_{be} = u_i - u_f$$

电压负反馈  $\rightarrow$  分压公式

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} \approx \frac{u_o}{u_f}$$

电流负反馈

写出 $u_o$ 与 $i_c$ 有关的表达式  
写出 $u_f$ 与 $i_e$ 有关的表达式  
最后利用 $i_c \approx i_e$ 得到答案

$$i_b = i - i_f$$

2、并联深度负反馈  $\rightarrow i_b=0 \quad i \approx i_f \rightarrow \because i_b \approx 0 \therefore u_i = 0$

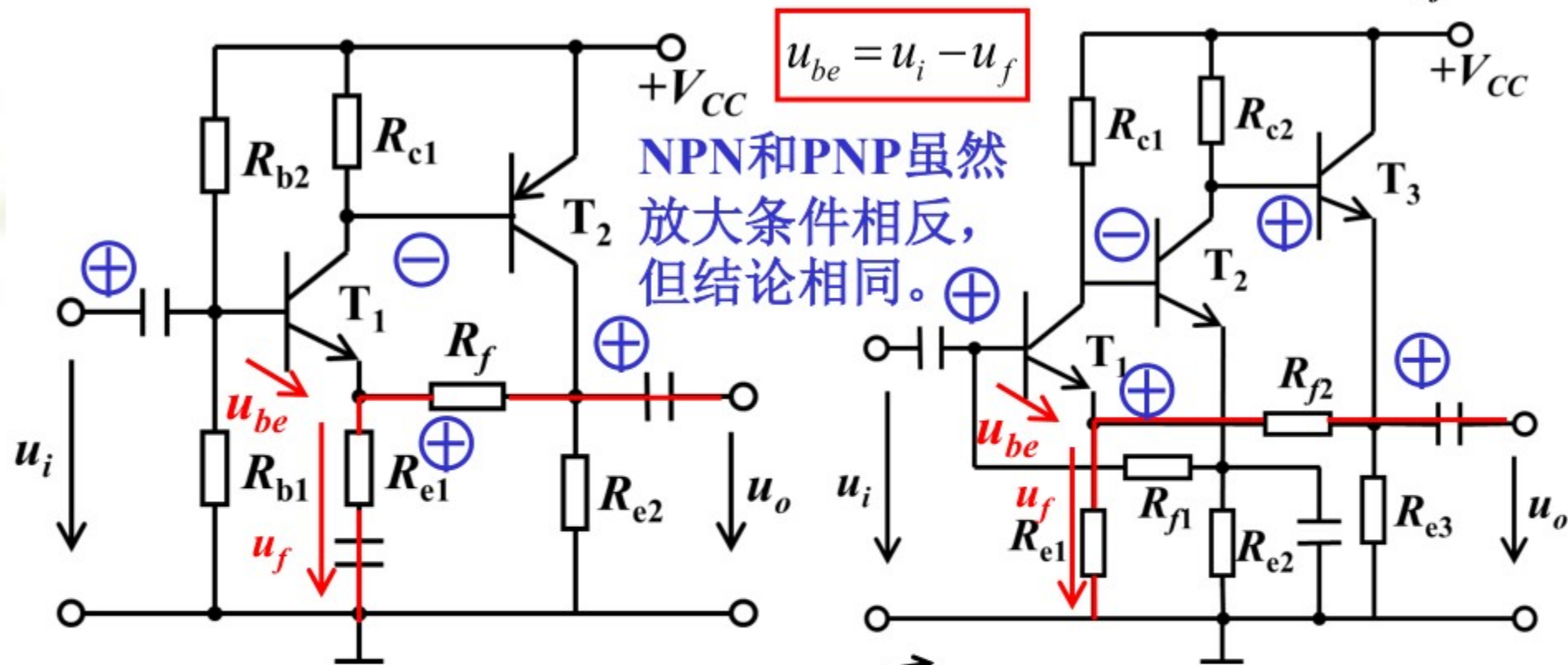
$$A_{usf} = \frac{u_o}{u_s}$$

写出 $u_o$ 与 $i_f$ 的表达式  
写出 $u_s$ 与 $i$ 的表达式

并联深度负反馈的估算不做要求



作业：8-3 (a) (b) 在深度负反馈条件下估算电压放大倍数  $A_{uf}$



电压串联交流负反馈

串联深度负反馈  $\rightarrow u_{be} \approx 0, u_i \approx u_f$

$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} \approx \frac{u_o}{u_f}$  只需要在反馈路径中  
找  $u_f$  和  $u_o$  的关系即可

估算  $A_{uf}$  要找总输出  $u_o$  和  
 $u_i$  之间的全局交流反馈

$R_{f1}$  只是局部反馈  
 $R_{f2}$  才是全局反馈





## 8.1 反馈的基本概念与分类

### 8.1.1 反馈的基本概念

### 8.1.2 反馈的判断

## 8.2 负反馈对放大电路性能的影响