

了解概念

判断类型

决定受反馈影响的净输入是什么？

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

步骤1：找到反馈元件，明确反馈路径； 步骤2：做四项判断；

判断1：判断反馈元件采集到输出端的什么信号？→电压or电流

判断2：判断反馈造成输入信号的分压还是分流？→串联or并联

判断3：判断反馈造成了净输入的增大还是减小？→正or负反馈

判断4：判断反馈对直流成分或交流成分起作用？→直流or交流

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。

电压串联； 电流串联； 电压并联； 电流并联

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。

例1: 请判断该电路反馈类型

$R_{E1}=0 \rightarrow u_{be}=u_i$ , 不受  $u_o$  影响

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

∴ 反馈元件:  $R_f + R_{E1}$

电压串联交流负反馈

瞬时极性法标的是某一瞬间, 图中各点的电位极性

假设  $u_i > 0$

其他各点的电位则根据电压是反相放大还是同相跟随进行标注。

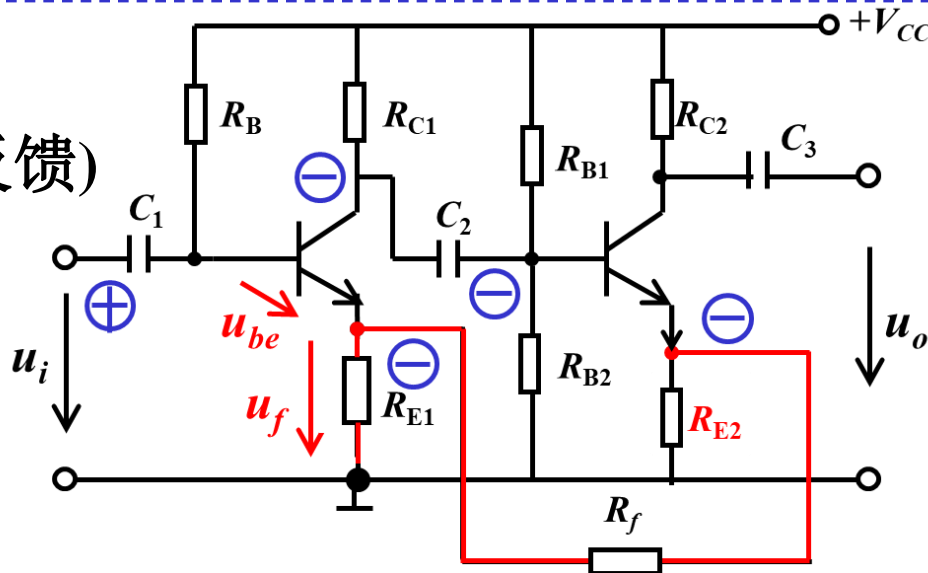
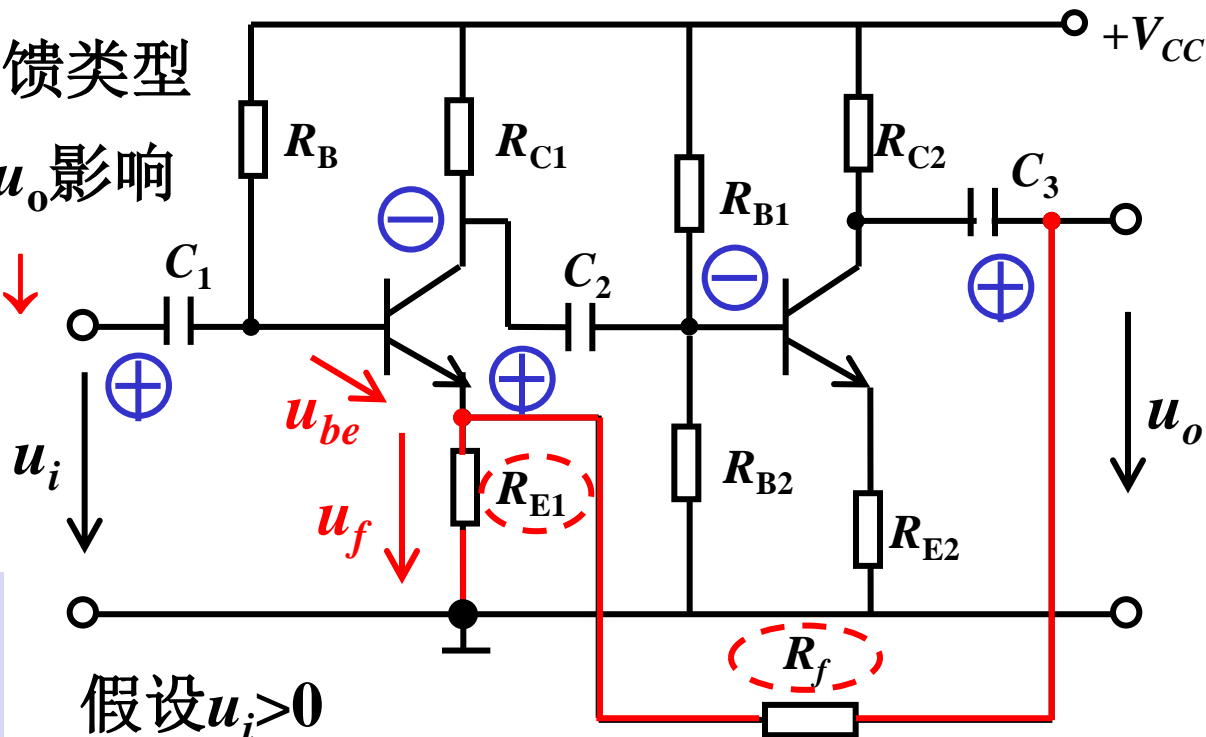
∴  $u_o$  和  $R_f$  接在不同极

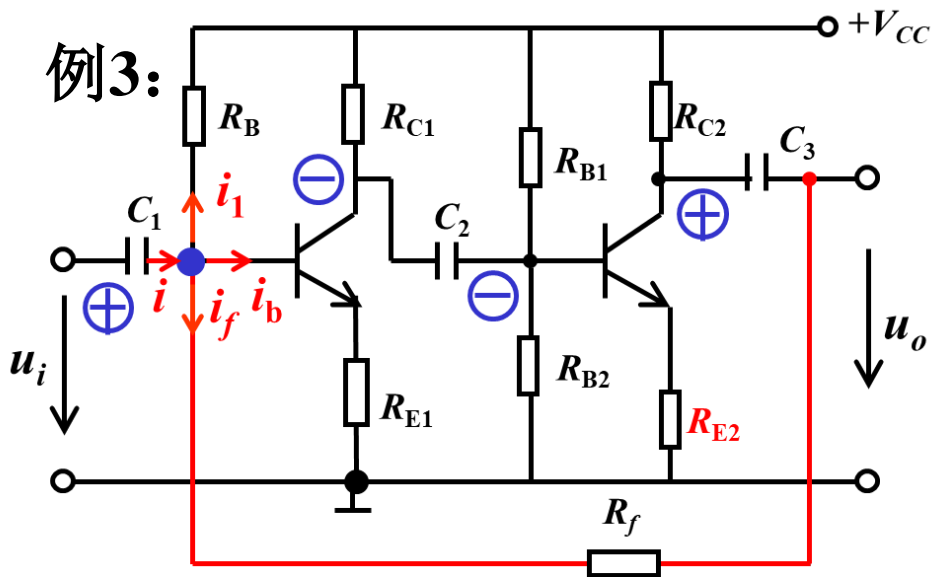
∴ 只能利用  $i_C \approx i_E$  采电流(电流反馈)

反馈元件:  $R_f$ 、 $R_{E1}$  和  $R_{E2}$

$$u_{be} = u_i - u_f \quad u_f < 0 \rightarrow u_{be} \uparrow$$

电流串联交直流正反馈





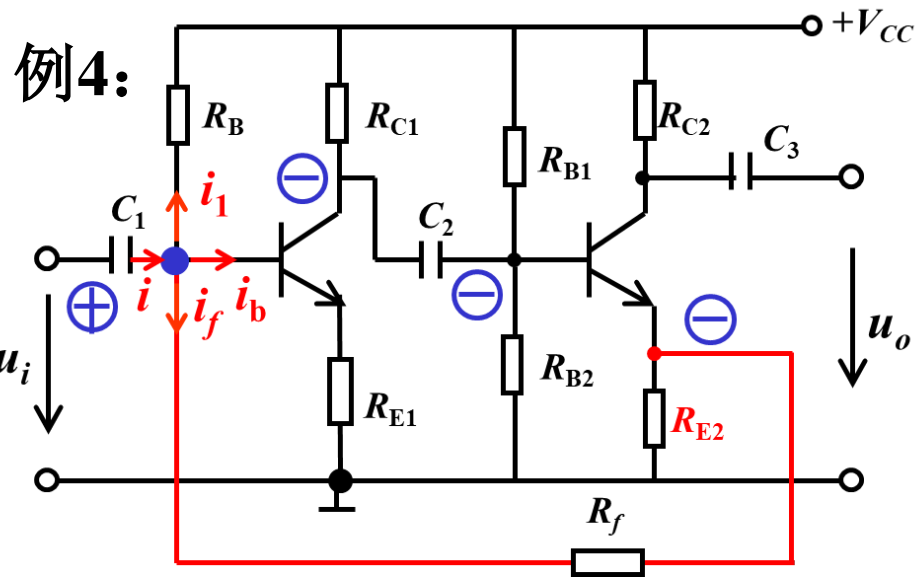
电压并联 交流正反馈

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

$i_b = i - i_1 - i_f$  假设  $u_i > 0 \rightarrow i = \frac{u_i}{r_i} > 0$  只要看  $i_f$  是大于还是小于零

注意: 标注的是电位极性, 所以要根据电位和电流关系判断  $i$  和  $i_f$

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



电流并联 交直流负反馈

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

注意: 不同电路图, 实现负反馈的组态是不同的。

作业: P245  
8-1 (a) (b)

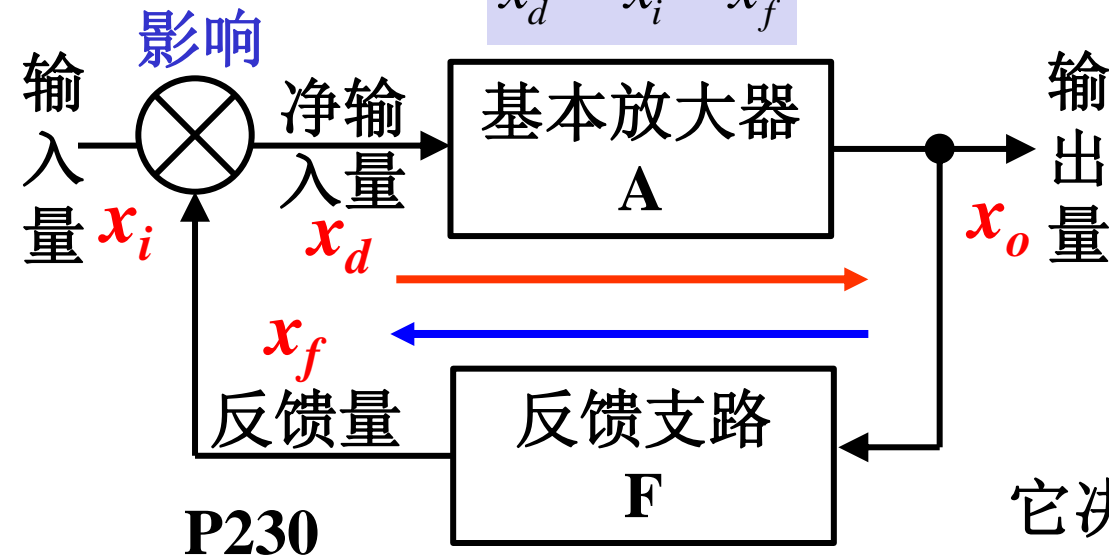


三、反馈的关系表达式 →  $A_f$ 、 $A$ 、 $F$ 的关系? →  $A_f = \frac{A}{1 + AF}$

无反馈的放大电路 ← 开环放大倍数  $A = \frac{x_o}{x_d}$  反馈系数  $F = \frac{x_f}{x_o}$  → 用输出/输入

包含了反馈支路的放大电路 ← 闭环放大倍数  $A_f = \frac{x_o}{x_i} = \frac{x_o}{x_d + x_f} = \frac{1}{x_d/x_o + x_f/x_o} = \frac{1}{\frac{1}{A} + F}$

$x_d = x_i - x_f$



∴  $A_f$ 、 $A$ 可正可负

∴ 讨论大小 →  $|A_f| = \frac{|A|}{|1 + AF|}$

$|1 + AF|$  称为反馈深度

它决定了 $|A_f|$ 与 $|A|$ 的大小关系

P230

∴  $x$ 可以是电压或电流 ∴  $A_f$ 、 $A$ 、 $F$ 均是广义放大倍数（增益）

1、 $|1 + AF| < 1 \rightarrow |A_f| > |A| \rightarrow$ 正反馈  $\rightarrow$ 不做要求

2、 $|1 + AF| > 1 \rightarrow |A_f| < |A| \rightarrow$ 负反馈

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

深度负反馈的定义：P237

$$x_d \approx 0$$

$$x_i \approx x_f$$

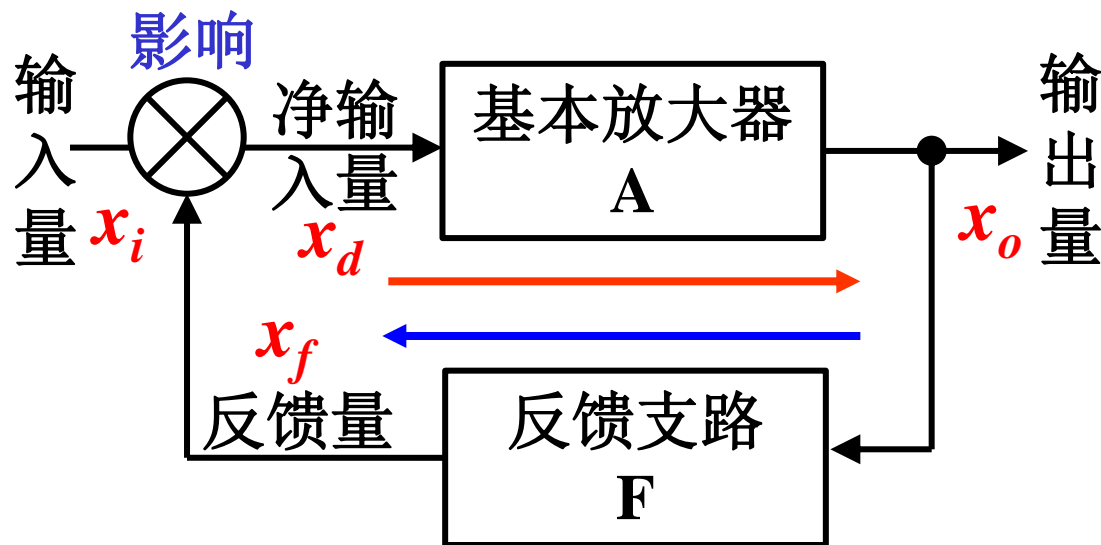
$$\frac{x_o}{x_i} \approx \frac{x_o}{x_f}$$

深度负反馈

快速估算

$A_f$ 只与反馈支路有关而与基本放大器无关

只需要在反馈路径中找 $x_f$ 和 $x_o$ 的关系即可



$\therefore$ 讨论大小  $\rightarrow |A_f| = \frac{|A|}{|1 + AF|}$

闭环放大倍数  $A_f = \frac{x_o}{x_i}$

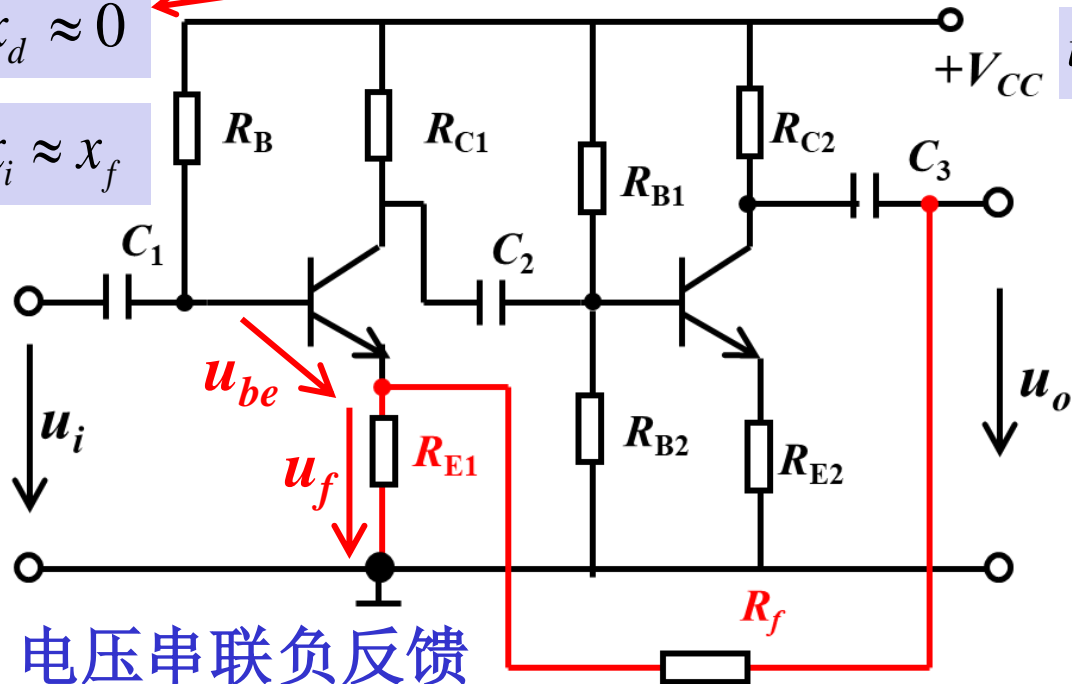
反馈系数  $F = \frac{x_f}{x_o}$

用输出/输入

假设达到深度负反馈，如何快速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

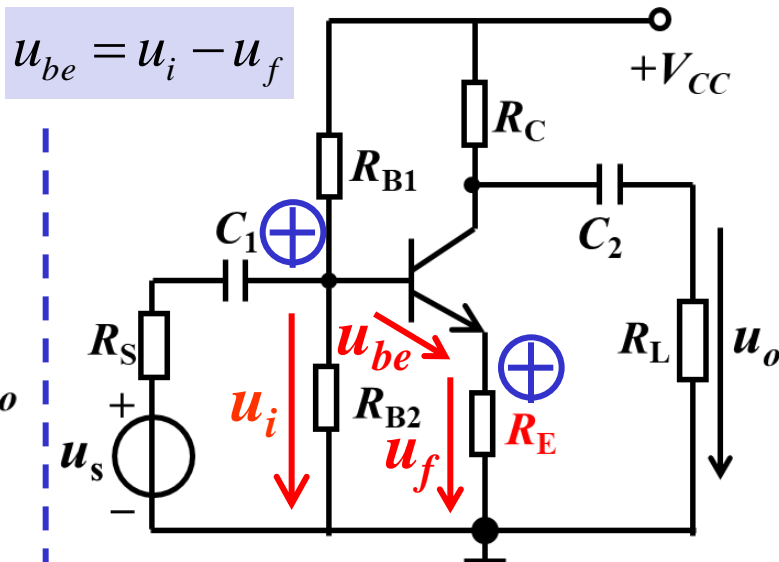
串联深度负反馈  $\rightarrow u_{be} \approx 0, u_i \approx u_f$

只看反馈支路即可  $\rightarrow R_f$  和  $R_{E1}$  是串联

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

$$u_f = \frac{R_{E1}}{R_{E1} + R_f} \times u_o$$

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



电流串联负反馈

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

$u_o$  与  $u_f$  无直接电压关系

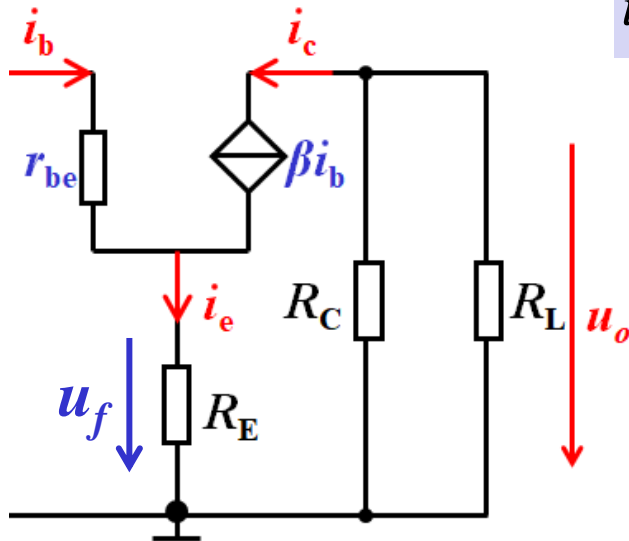
$u_o$  与  $i_c$  有关  $u_f$  与  $i_e$  有关

要在交流通路或微变等效电路中找到关系

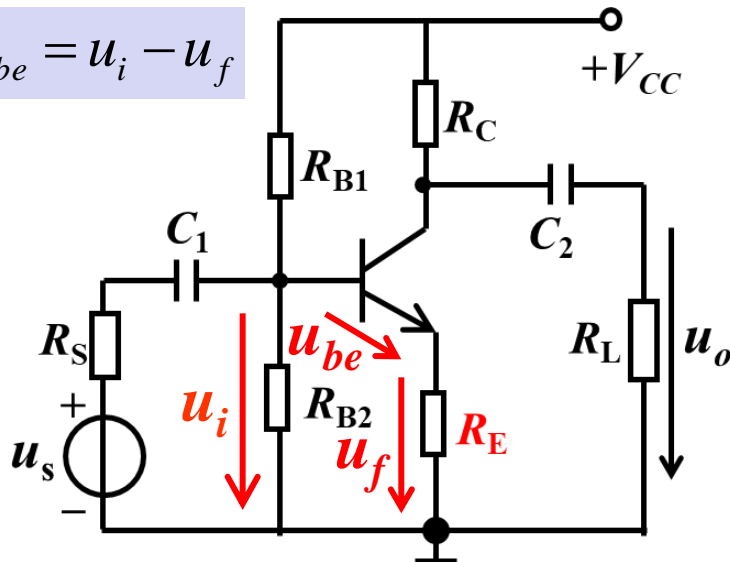
假设达到深度负反馈，如何快速估算闭环电压放大倍数 $A_{uf}$ ？

$$x_d \approx 0$$

$$x_i \approx x_f$$



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



电流串联负反馈

$$u_o = -i_c (R_C // R_L) \quad u_f = i_e R_E$$

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-i_c (R_C // R_L)}{i_b r_{be} + i_e R_E} = \frac{-\beta i_b (R_C // R_L)}{i_b r_{be} + (1 + \beta) i_b R_E}$$

$$\approx \frac{-\beta (R_C // R_L)}{(1 + \beta) R_E} \approx \frac{-(R_C // R_L)}{R_E}$$

$A_{uf}$ 与 $\beta$ 无关，非常稳定

和深度负反馈  
估算的 $A_{uf}$ 一致

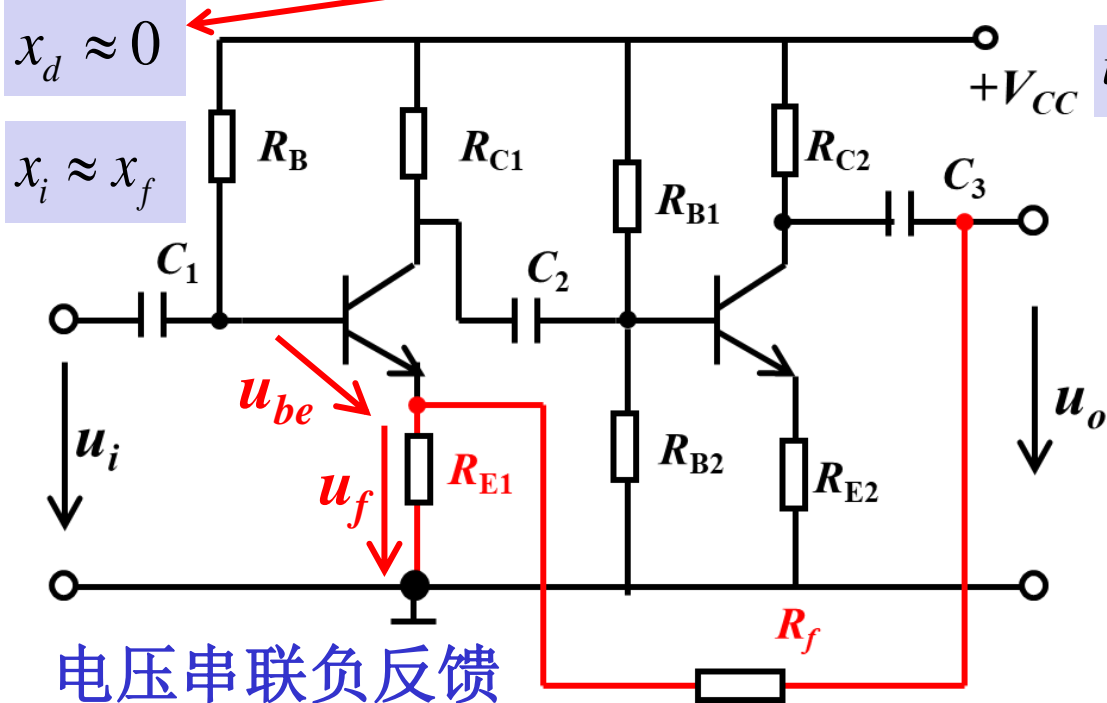
$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} \approx \frac{u_o}{u_f} \approx -\frac{i_c (R_C // R_L)}{i_e R_E}$$

$u_o$ 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

假设达到深度负反馈，如何快速估算闭环电压放大倍数 $A_{uf}$ ？



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

$$A_{uf} = \frac{R_{E1} + R_f}{R_{E1}} = 1 + \frac{R_f}{R_{E1}}$$

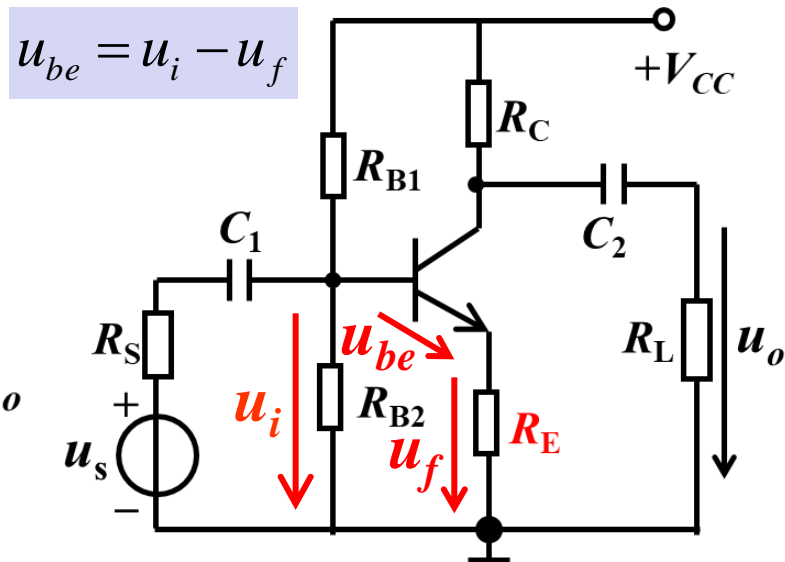
$$u_f = \frac{R_{E1}}{R_{E1} + R_f} \times u_o$$

分压公式

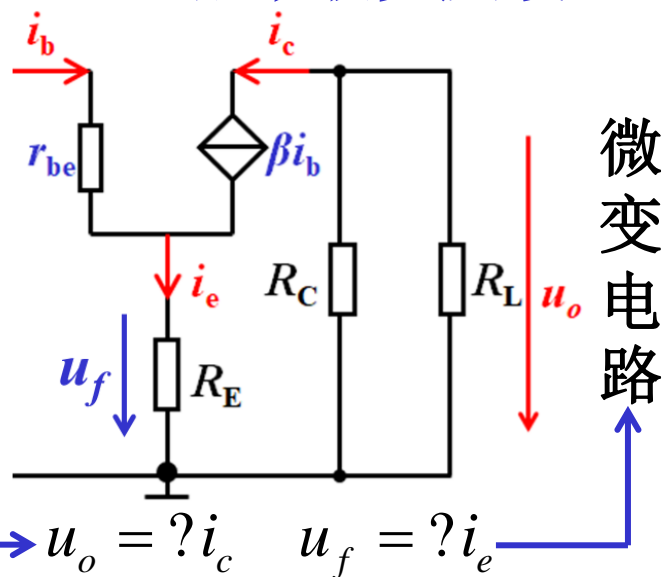
$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} \approx \frac{u_o}{u_f}$$

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





假设达到深度负反馈，如何快速估算闭环电压放大倍数 $A_{uf}$ ？

$$x_d \approx 0$$

思考：如果是并联深度负反馈？ $\rightarrow i_b \approx 0, i \approx i_f$

$$x_i \approx x_f$$

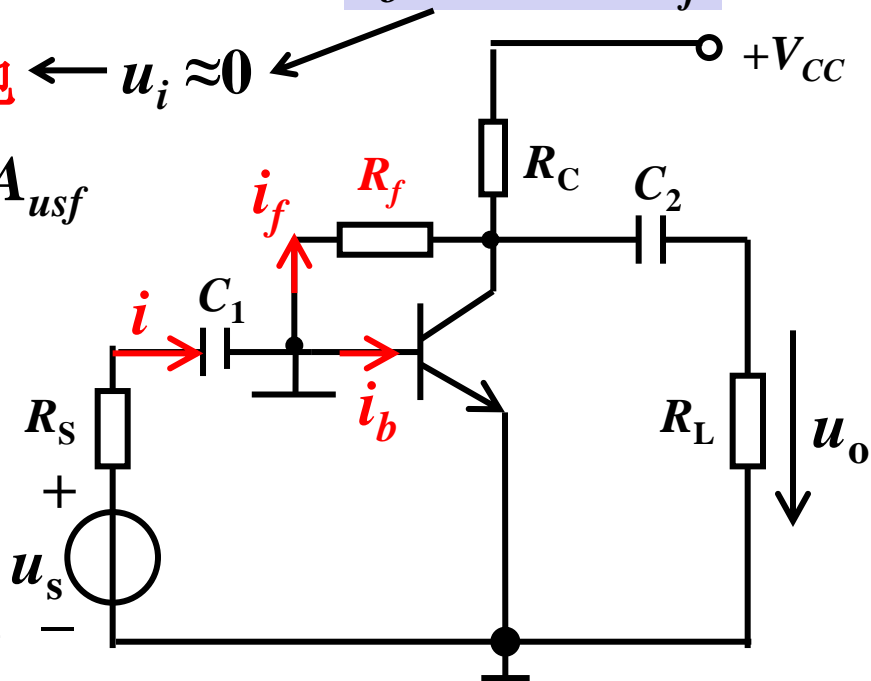
注意：无法估算 $A_{uf}$  虚地  $\leftarrow u_i \approx 0$

只能估算电源电压放大倍数 $A_{usf}$

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

$$i = \frac{u_s - 0}{R_s} \rightarrow u_s = iR_s \quad \because i \approx i_f$$

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



电流并联负反馈更加复杂，不做要求

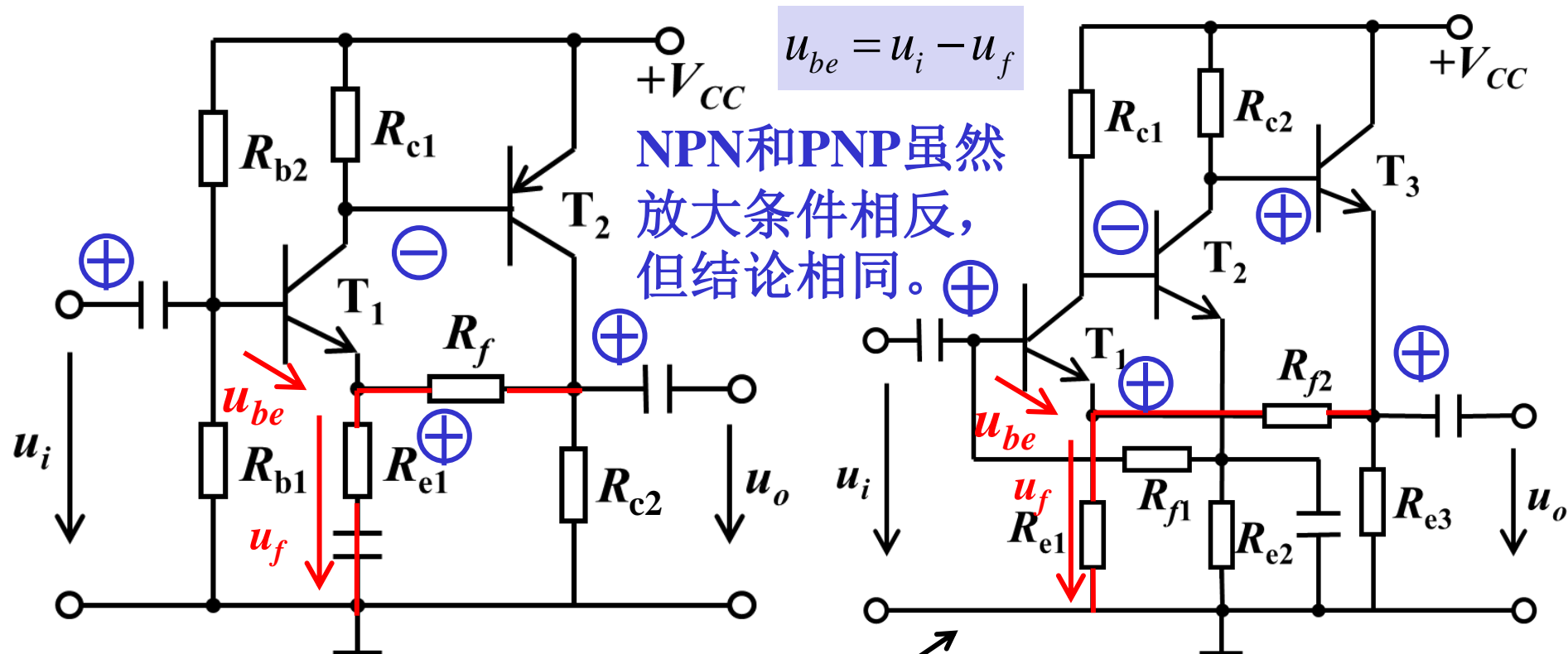
电压并联负反馈

重点掌握串联深度负反馈的 $A_{uf}$ 估算；并联深度负反馈不做要求

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

$\rightarrow A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} \approx \frac{u_o}{u_f}$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{电压负反馈} \\ \text{电流负反馈} \end{array} \right. \rightarrow \text{有直接的电压关系}$

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

电压串联负反馈

$R_{f1}$ 引入的是局部反馈

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

估算 $A_{uf}$ 要找全局交流反馈

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} \approx \frac{u_o}{u_f} = \frac{u_o}{\frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_f} u_o} = 1 + \frac{R_f}{R_{e1}}$$

分压公式:  $u_f = \frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_{f2}} u_o$

$$A_{uf} = \frac{R_{e1} + R_{f2}}{R_{e1}} = 1 + \frac{R_{f2}}{R_{e1}}$$

只需要在反馈路径中找 $u_f$ 和 $u_o$ 的关系即可

在深度负反馈条件下估算 $A_{uf}$

思考：反馈电阻有哪些？

$R_{E3}$ 、 $R_f$ 和 $R_{E1}$

$u_{be} = u_i - u_f$   $T_2$ 是PNP管

有 $R_{E1} \rightarrow u_{be}$ 减小( $u_f > 0$ )

电流串联负反馈

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

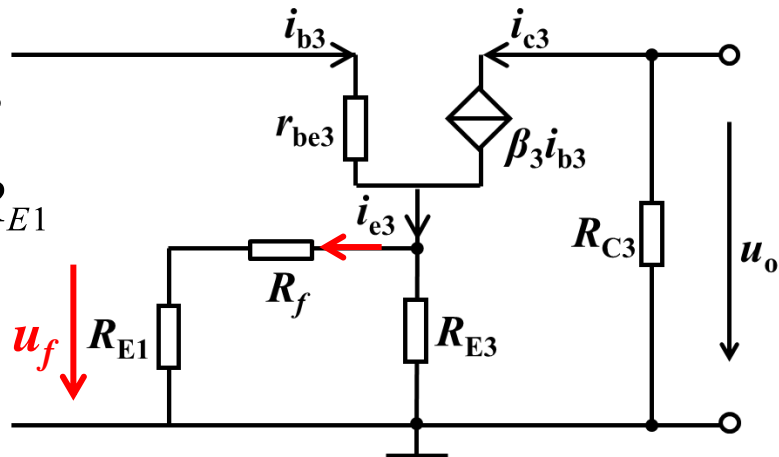
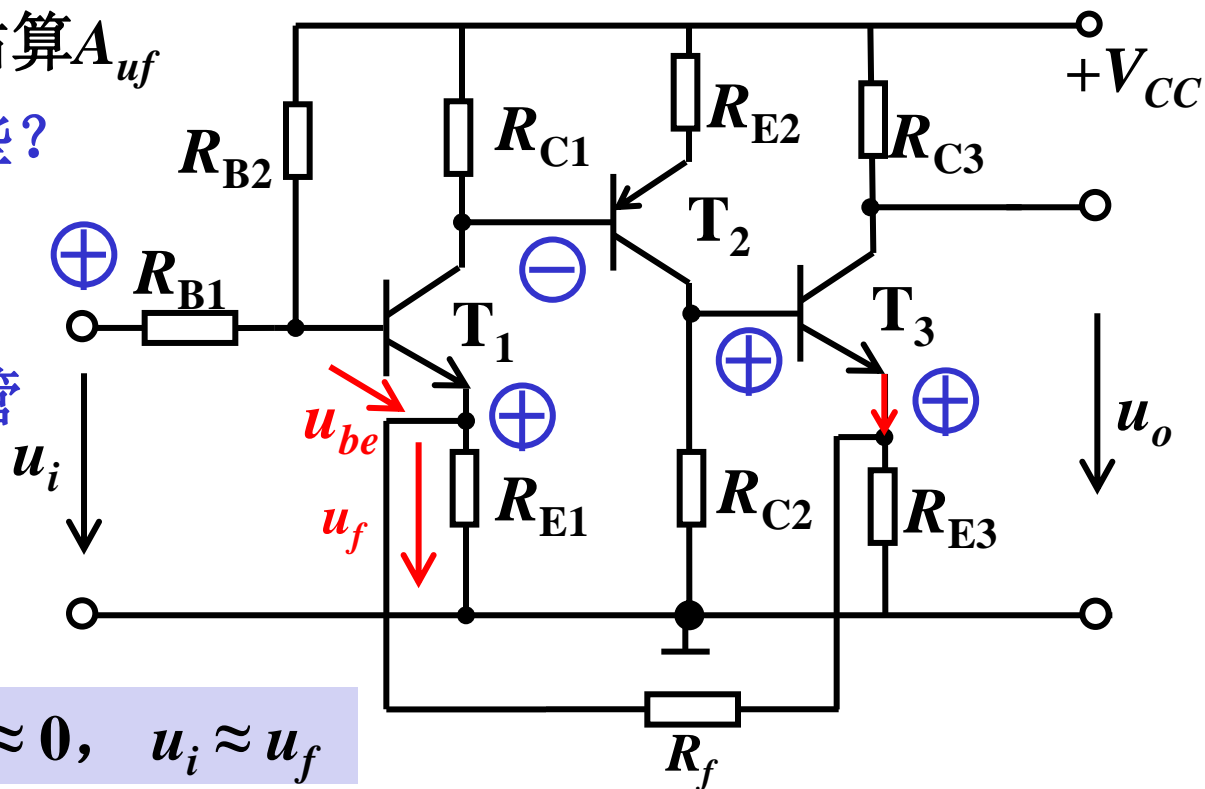
$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} \approx \frac{u_o}{u_f}$  注意： $u_o$ 和 $u_f$ 有电流关系  $\rightarrow u_o = ? i_{c3} \quad u_f = ? i_{e3}$

要在交流通路或微变等效电路中找到关系

$$u_o = -i_{c3} R_{C3} \quad u_f = \frac{R_{E3}}{R_{E3} + R_f + R_{E1}} i_{e3} \times R_{E1}$$

$$A_{uf} \approx \frac{-R_{C3} (R_{E3} + R_f + R_{E1})}{R_{E3} R_{E1}}$$

分流公式



了解概念

判断类型

估算 $A_{uf}$

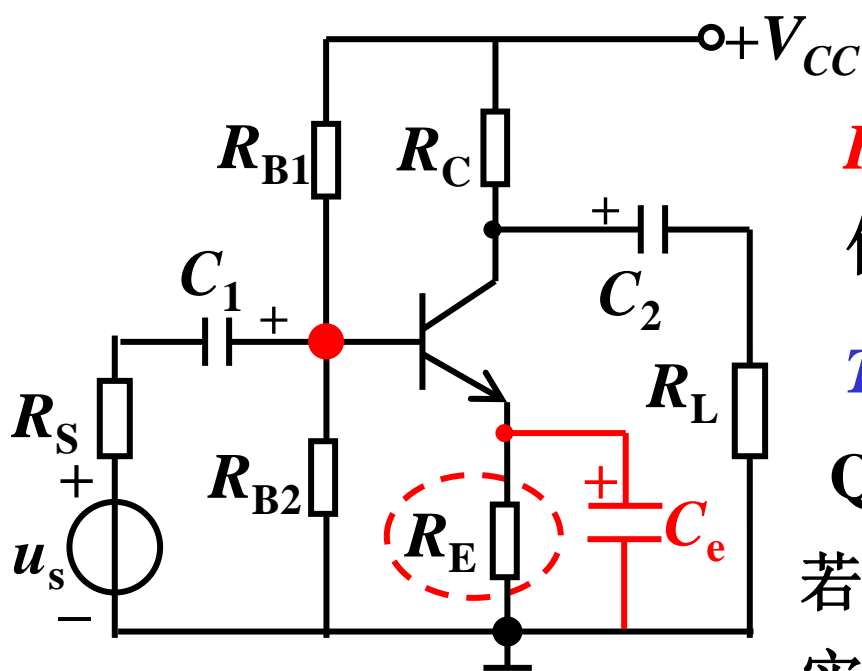
性能改善

## 四、负反馈对电路的改善 → 掌握定性结论，无须定量分析

注意：不同类型的负反馈对放大电路性能指标的改善是不同的

静态指标和动态指标 →  $A_u$ 、 $r_i$ 、 $r_o$  和通频带

稳定静态工作点 ← 直流负反馈      交流负反馈



$R_E$  引入电流串联直流负反馈

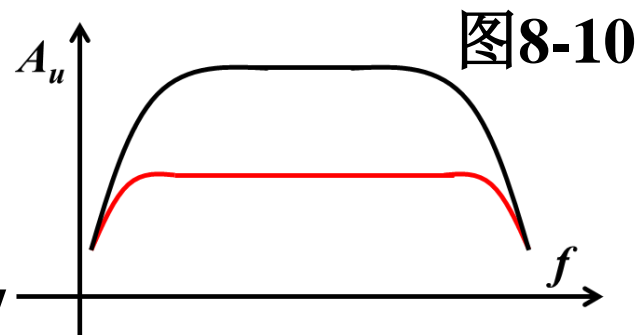
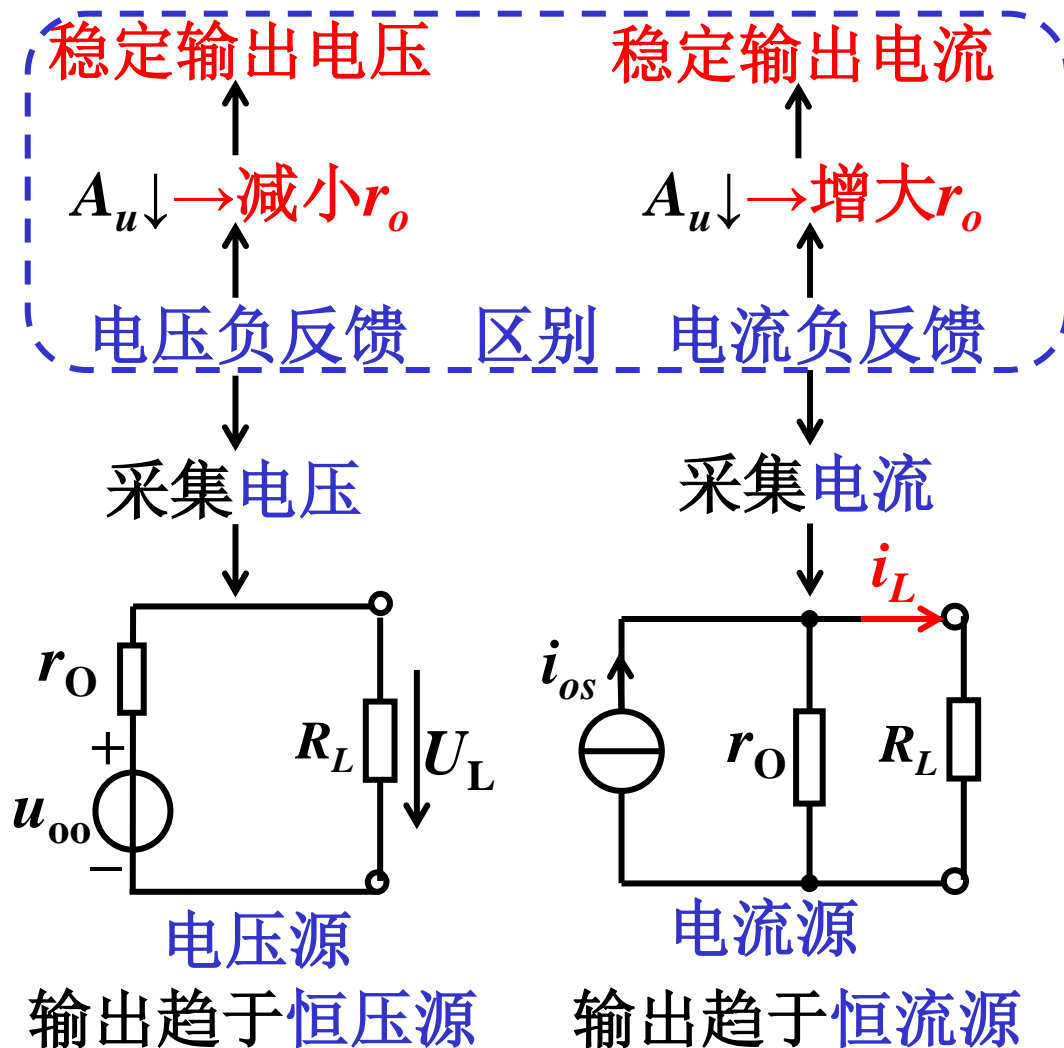
$R_E$  把输出电流变化返送回输入端，使输入电压减小，输入电流减小。

$T \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow I_E \uparrow \xrightarrow{R_E} V_E \uparrow \xrightarrow{V_B \text{ 固定}} U_{BE} \downarrow$   
 $Q \text{ 稳定} \leftarrow I_C \downarrow \leftarrow I_B \downarrow$

若无旁路电容则  $R_E$  对交流也有负反馈  
实验证明  $R_E$  使  $|A_u| \downarrow$ 、 $r_i \uparrow$  和  $f_{BW}$  的扩展

注意：不同的交流负反馈对放大电路动态指标的改善是不同的  
所有的交流负反馈都可以通过牺牲 $A_u$ 换取通频带的拓宽。P232

## 1、 $r_o$ 的变化取决于输出端的反馈类型



P237

## 2、 $r_i$ 的变化取决于输入端的反馈类型

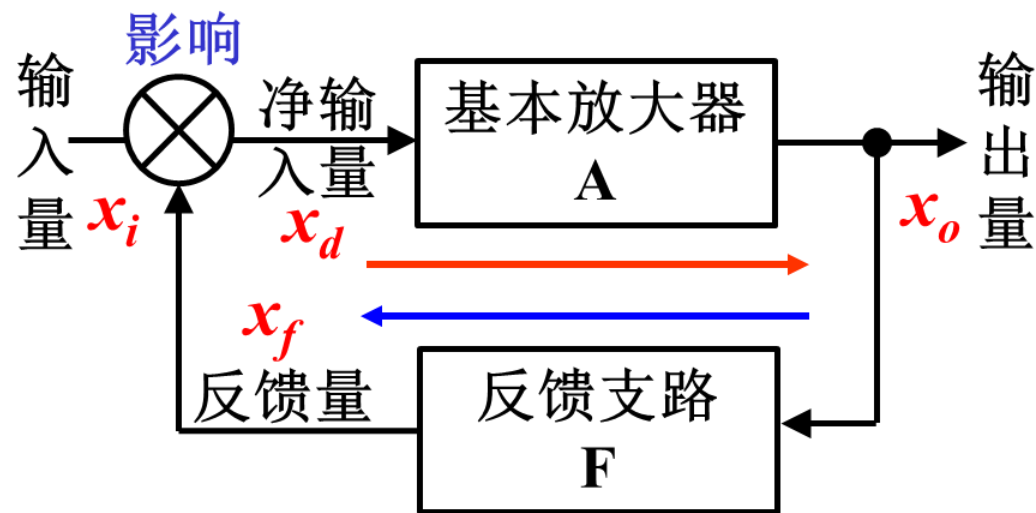
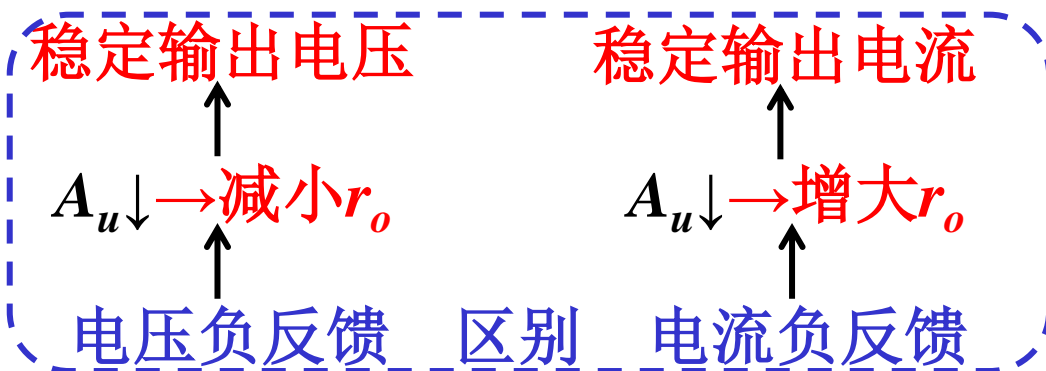
串联负反馈  $\rightarrow$  **增大 $r_i$**

并联负反馈  $\rightarrow$  **减小 $r_i$**

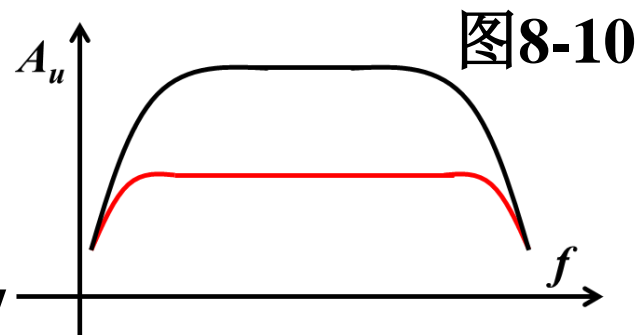
思考：为什么？

注意：不同的交流负反馈对放大电路动态指标的改善是不同的  
 所有的交流负反馈都可以通过牺牲 $A_u$ 换取通频带的拓宽。 P232

## 1、 $r_o$ 的变化取决于输出端的反馈类型



$r_{if}$ : 闭环输入电阻     $r_i$ : 开环输入电阻



P237

## 2、 $r_i$ 的变化取决于输入端的反馈类型

串联负反馈  $\rightarrow$  增大  $r_i$

$$r_{if} = \frac{u_i}{i_i} \quad r_i = \frac{u_d}{i_i} \quad \because u_d < u_i$$

$$\therefore r_{if} > r_i$$

并联负反馈  $\rightarrow$  减小  $r_i$

$$r_{if} = \frac{u_i}{i_i} \quad r_i = \frac{u_i}{i_d} \quad \because i_d < i_i$$

$$\therefore r_{if} < r_i$$

$A_u$  牺牲越多性能改善越好

四、负反馈对电路的改善——→掌握定性结论，无须定量分析

五、根据题目要求，按需引入合适负反馈——→电路设计题

先固定反馈电阻 $R_f$ 的一端 另一端只有一种选择会是负反馈

结论

P237

- ① 为了稳定静态工作点，应引入直流负反馈；  
而为了改善动态性能，应引入交流负反馈。
- ② 为了增大输入电阻 $r_i$ ，应引入串联负反馈；  
为了减小输入电阻 $r_i$ ，应引入并联负反馈；
- ③ 为了增大输出电阻 $r_o$ ，应引入电流负反馈；  
为了减小输出电阻 $r_o$ ，应引入电压负反馈；
- ④ 为了得到稳定的输出电流，应引入电流负反馈；  
为了得到稳定的输出电压，应引入电压负反馈；