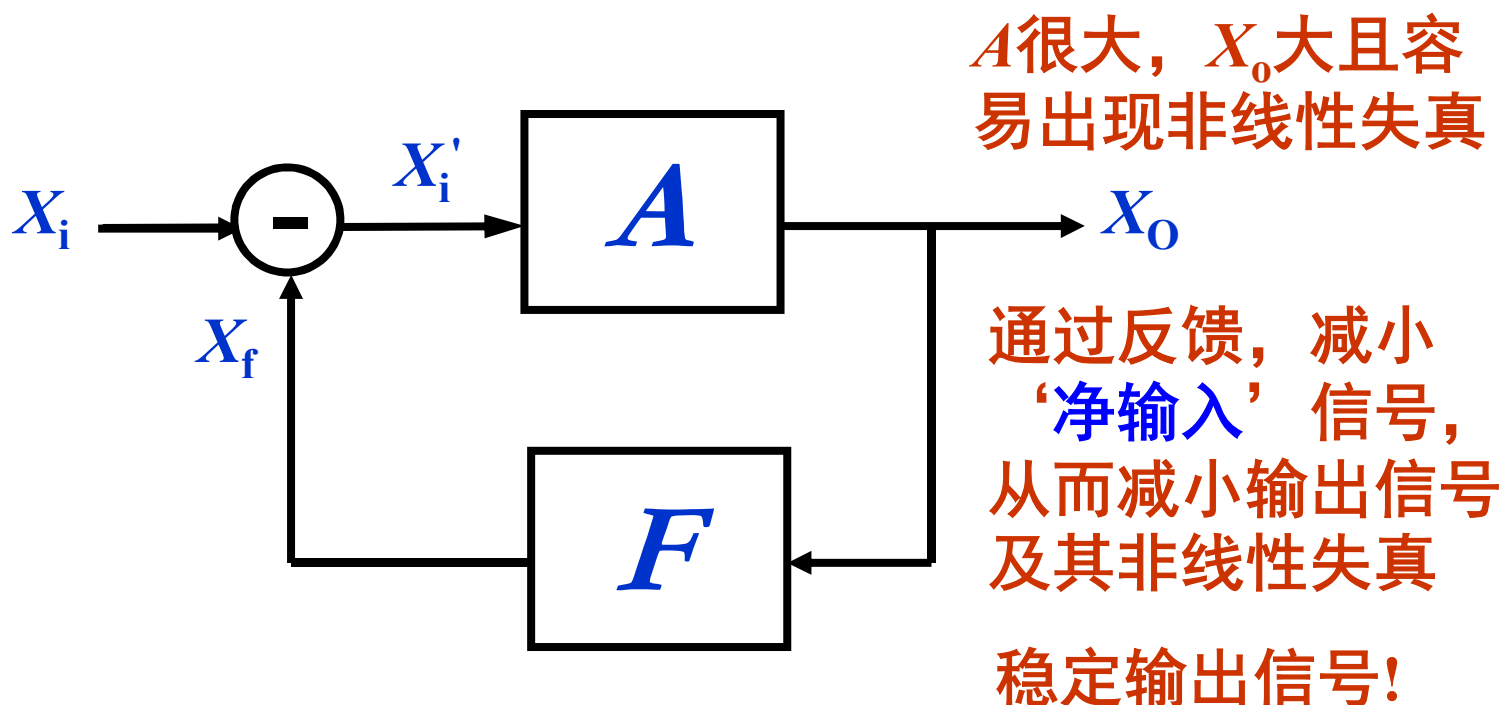




第六章 放大电路中的反馈

(Feedback of Amplifier)

历史：美国西部电力公司Harold Black 于1927年为改善长距离电话传输系统中放大器的失真而发明了反馈的方法。





第六章 放大电路中的反馈

(Feedback of Amplifier)

6.1 反馈的基本概念及判断方法

6.2 负反馈放大电路的四种基本组态

6.3 负反馈放大电路的表示方法

6.4 深度负反馈放大电路放大倍数的估算

6.5 负反馈对放大电路性能的影响

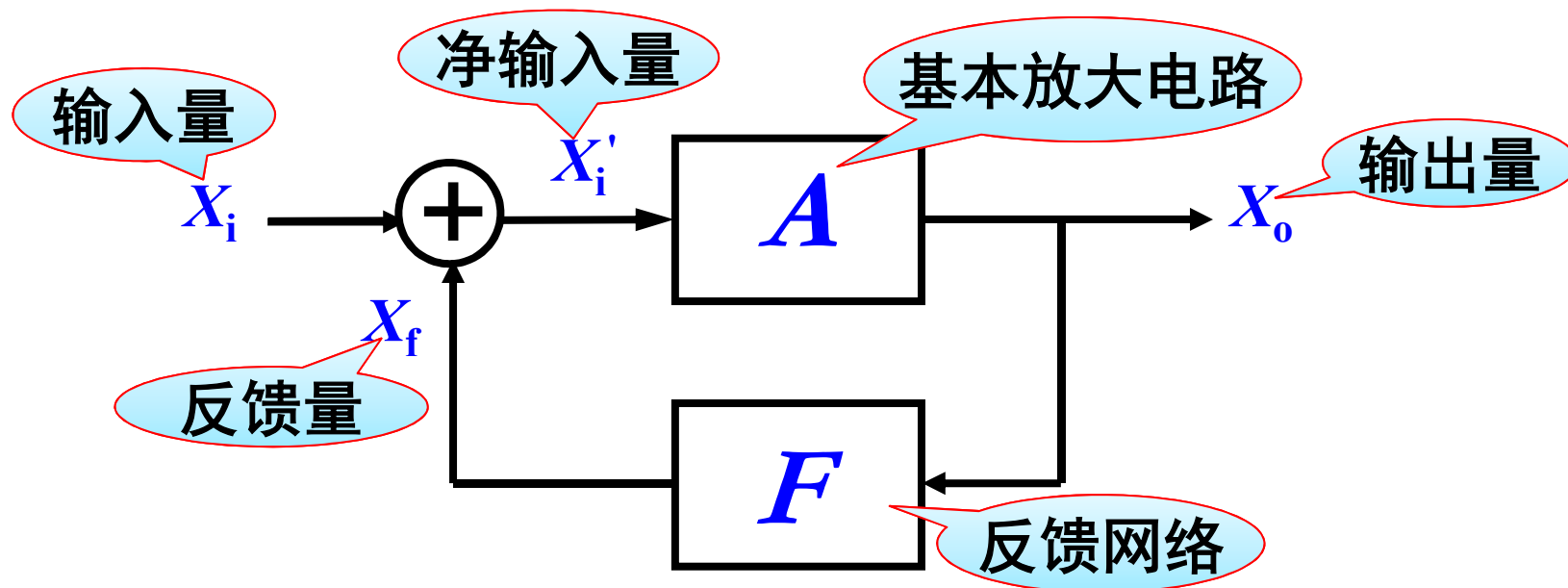
6.6 负反馈放大电路的稳定性



6.1 反馈的基本概念及判断方法

一、反馈的基本概念

1. 反馈：把输出量的一部分或全部通过一定的电路形式作用到输入回路，来影响输入量的措施。



注意：分析反馈放大电路时只考虑信号的单向传输，即 X_o 只由 X_i' 和 A 决定， X_f 只由 X_o 和 F 决定

2. 正反馈(Positive Feedback)、负反馈(Negative Feedback)

从反馈的效果来判断

a. 输入端

反馈的结果使净输入量减小--负反馈
增大--正反馈

$$X_i' = X_i - |X_f| \quad \text{即 } X_i' \downarrow \quad \text{负反馈}$$

$$X_i' = X_i + |X_f| \quad \text{即 } X_i' \uparrow \quad \text{正反馈}$$

b. 输出端

反馈的结果使输出量的变化增大--正反馈
减小--负反馈

$$\Delta X_o \uparrow \quad \text{正反馈}$$

$$\Delta X_o \downarrow \quad \text{负反馈}$$

瞬时极性法判断反馈的极性（正、负）

- 先从输入回路断开反馈网络（开环）
- 规定 X_i 的瞬时极性为‘+’（即相对于‘地’的瞬时变化量为正）
→ 逐级判断 X_o 极性 → 判断 X_f 极性
- 若 X_f 极性使： $X_i' = X_i - |X_f|$ 即使得 X_i' ↓ ——负反馈
 $X_i' = X_i + |X_f|$ 即使得 X_i' ↑ ——正反馈

3. 直流反馈(DC Feedback)、交流反馈(AC Feedback)

反馈量含有直流量，或者说反馈存在于直流通路，称为直流反馈；

反馈量含有交流量，或者说反馈存在于交流通路，称为交流反馈。

判断交流、直流反馈：主要分析反馈网络中电容的作用

4. 局部反馈、级间反馈

反馈只影响某一级放大电路，称为局部反馈

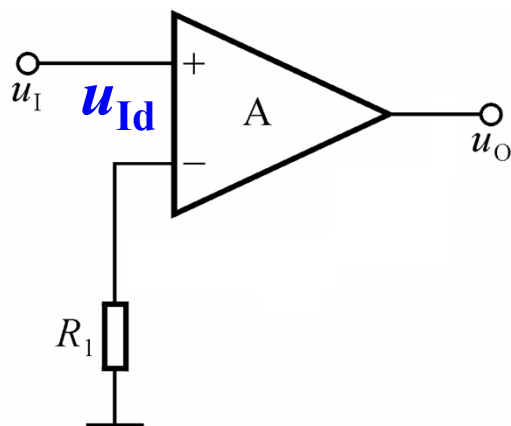
反馈影响两级或两级以上的放大电路，称为级间反馈

注意：将集成运放视为一级放大电路；

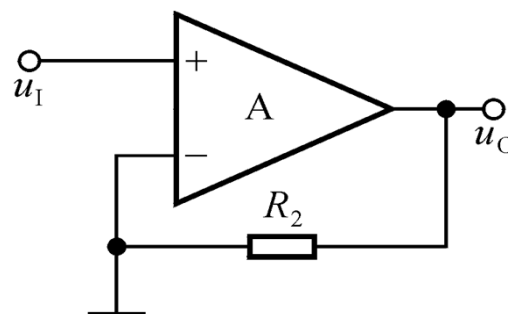
只有多级放大电路才可能存在级间反馈。

二、反馈的判断举例

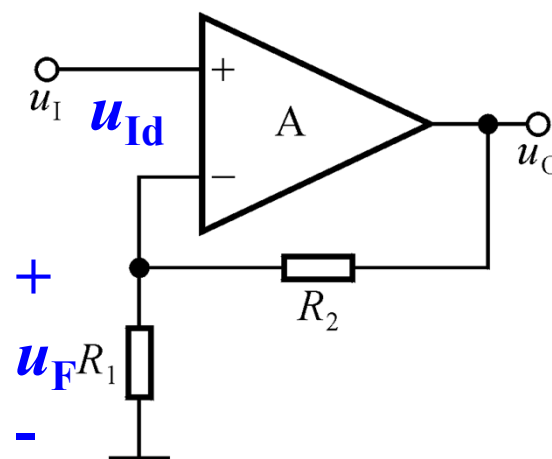
讨论1：判断反馈的有无



无反馈



$u_{Id} = u_I$
无反馈



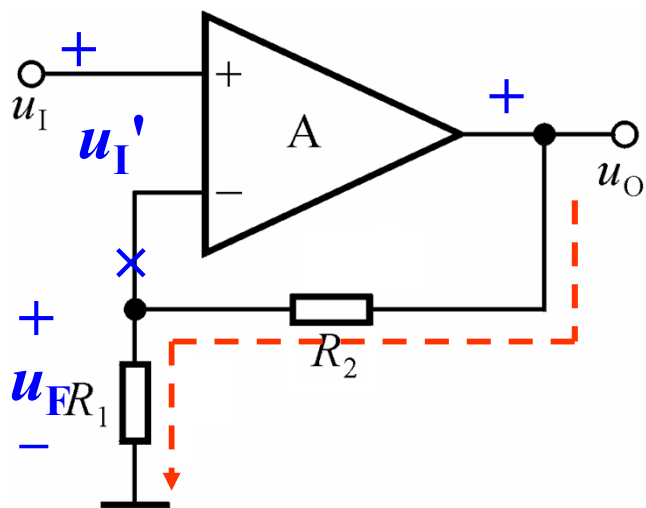
有反馈

反馈量 u_F 使净输入量 u_{Id} 发生变化

判断反馈的有无：

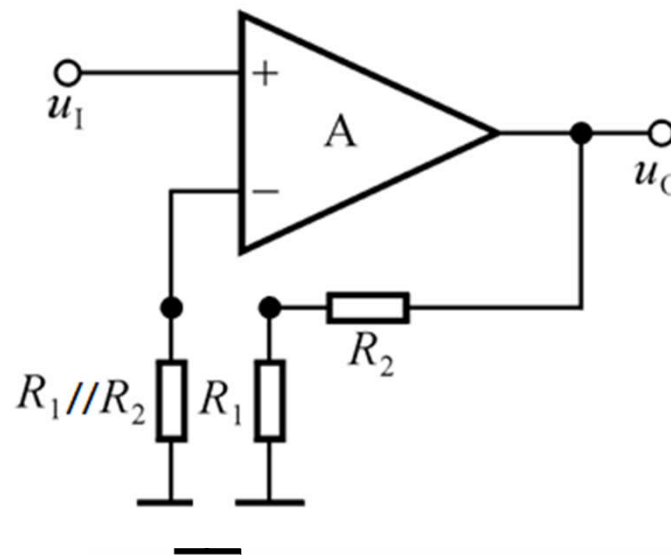
找输入与输出之间的联系，判断输出是否影响输入

讨论2：判断反馈的极性



$$u_I' = u_I - u_F \quad \text{负反馈}$$

反馈网络 R_1, R_2



$$u_I' = u_I - u_F = u_I + |u_F| \quad \text{正反馈}$$

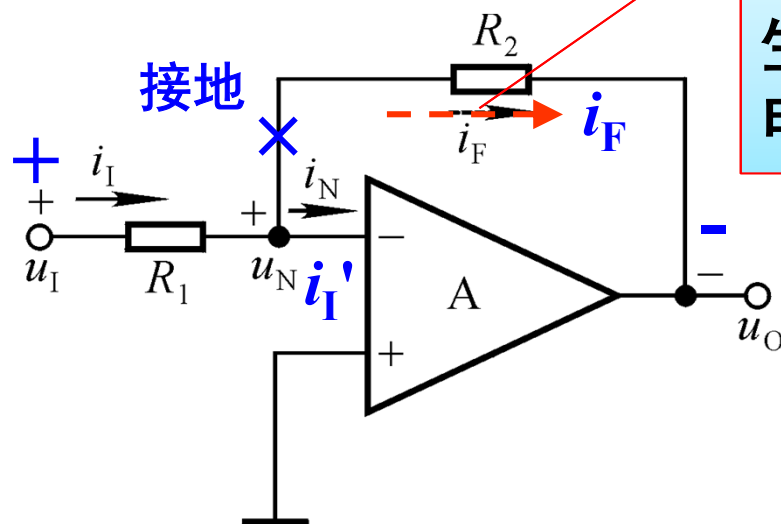
反馈网络 R_1, R_2

注意： 反馈量只决定于输出量，与输入量无关！

结论1： 对于单个集成运放，反馈引回到同相端为正反馈，引回到反相端为负反馈

二、反馈的判断举例

讨论2：判断反馈的极性



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

$$i_F = \frac{-u_O}{R_2}$$

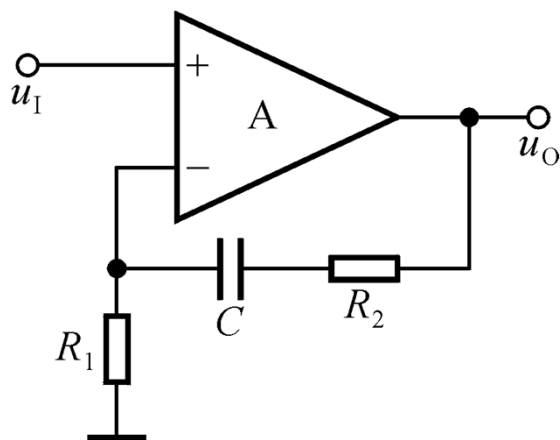
$$i_I' = i_I - i_F \quad \text{负反馈}$$

反馈网络为 R_2

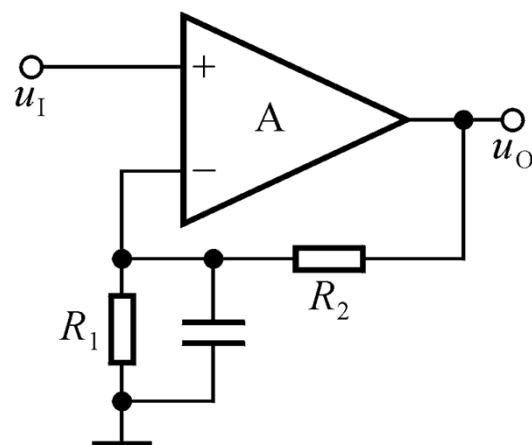
问题：若同相端与反相端互换，则反馈极性如何？

二、反馈的判断举例

讨论3：判断直流和交流反馈

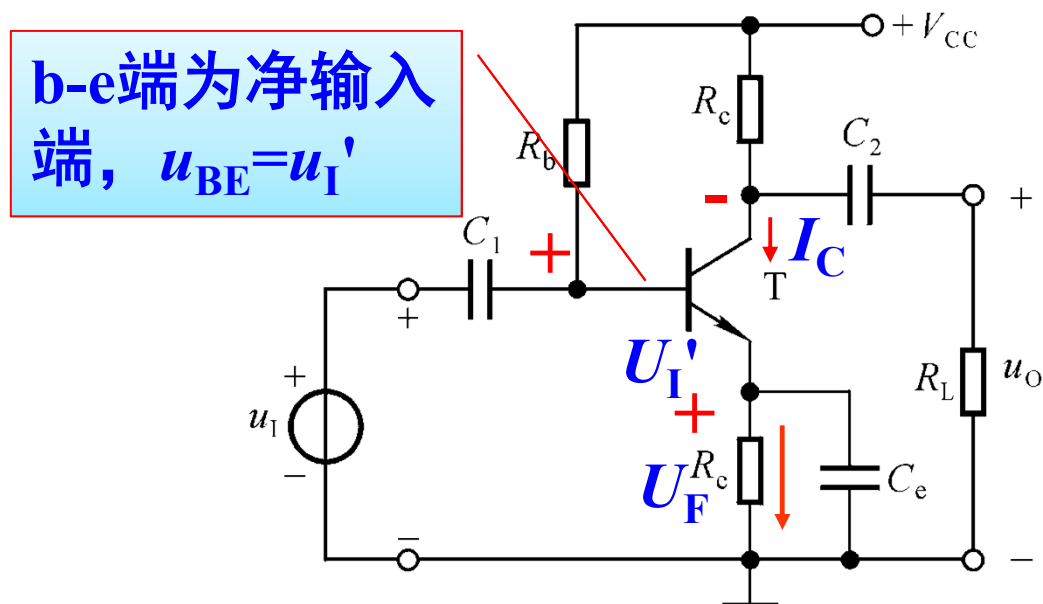


交流反馈



直流反馈

讨论4：判断有无反馈、反馈的极性、交流直流反馈

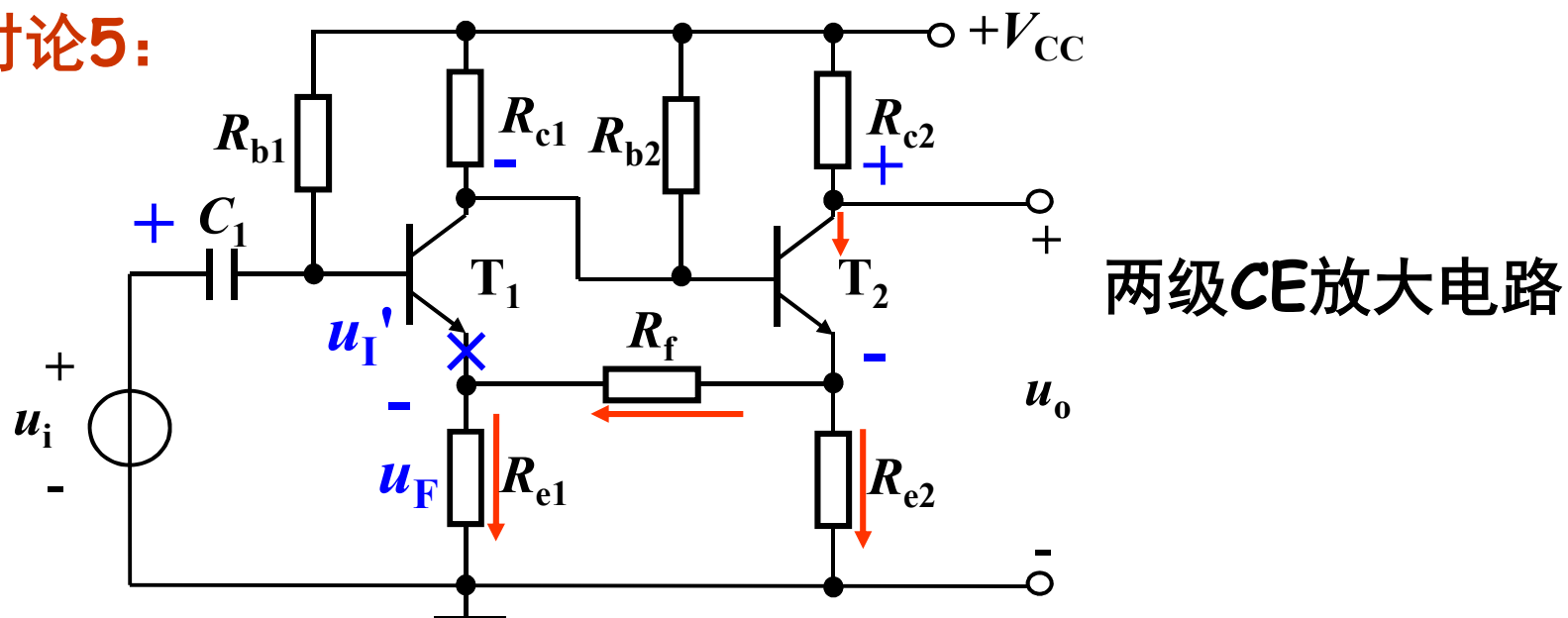


通过电阻 R_e 、 C_e 引入了直流反馈：
输出电流 I_C 变化将使 R_e 上的电压 (U_F)变化，
从而使净输入电压 (U_I')变化。

$$U_I' = U_I - U_F \quad \text{直流负反馈}$$

反馈网络为 R_e 、 C_e

讨论5:

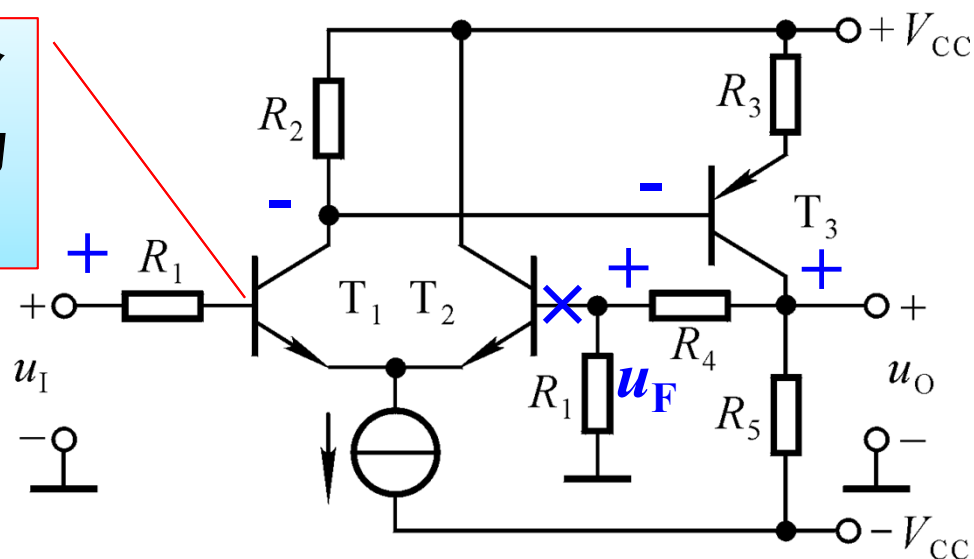


$$u_I' = u_B - u_F = u_B + |u_F| \quad \text{正反馈}$$

- R_f 、 R_{e1} 、 R_{e2} 引入了正反馈，交流和直流反馈，级间反馈
- R_{e1} 引入了负反馈，交流和直流反馈，局部反馈（影响第一级）
- R_{e2} 引入了负反馈，交流和直流反馈，局部反馈（影响第二级）

讨论6:

b_1-b_2 为净输入端， u_{Id} 为净输入量



双端输入单端输出的差分放大电路 + 共射放大电路

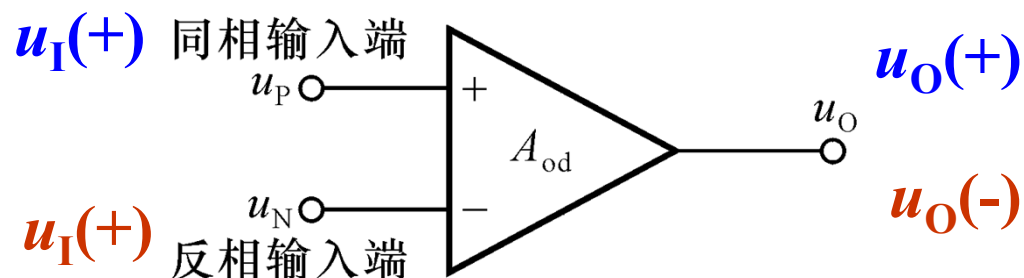
$$u_{Id} = u_{I1} - u_{I2} \approx u_I - u_F \quad \text{负反馈}$$

R_1 、 R_4 引入了交、直流级间负反馈

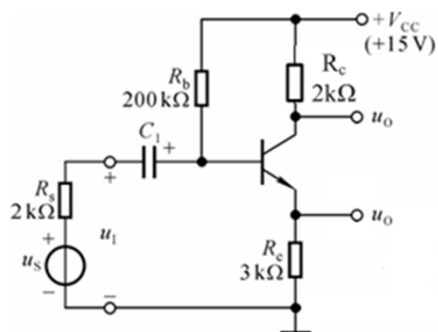
R_3 引入了交、直流局部负反馈

总结：由输入信号极性判断输出信号极性的方法

•集成运放



•单管放大电路



CE、CC: $b(+)$ \rightarrow $c(-)$, $e(+)$

CB: $e(+)$ \rightarrow $c(+)$

CS、CD: $g(+)$ \rightarrow $d(-)$, $s(+)$

CG: $s(+)$ \rightarrow $d(+)$

•互补电路

$u_i(+)$ \rightarrow $u_o(+)$

•差分放大电路

$b1(+)$ \rightarrow $c1(-)$, $c2(+)$



6.2 负反馈放大电路的四种基本组态

一、交流负反馈的特点

影响放大电路的动态性能：

- 稳定输出信号 负反馈： $X_i' = X_i - X_f$
 $X_o \uparrow \rightarrow X_f \uparrow \rightarrow X_i' \downarrow$
 $\rightarrow X_o \downarrow$
- 减小放大倍数 负反馈： $X_i' = X_i - X_f$
 $\rightarrow X_i' \downarrow \rightarrow X_o \downarrow \rightarrow A_f \downarrow$ (引入反馈后)

重点研究交流负反馈！



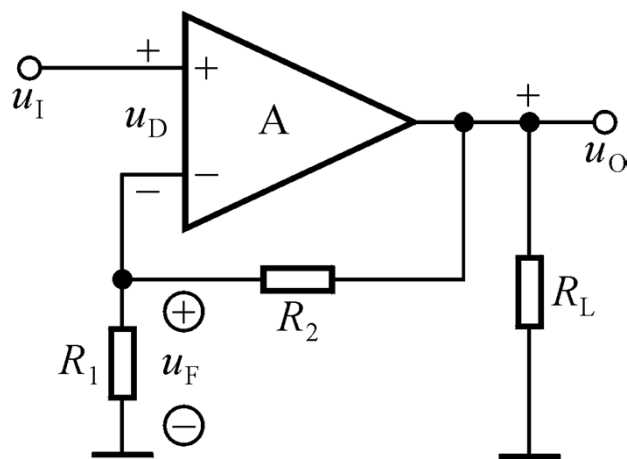
6.2 负反馈放大电路的四种基本组态

二、交流负反馈四种组态

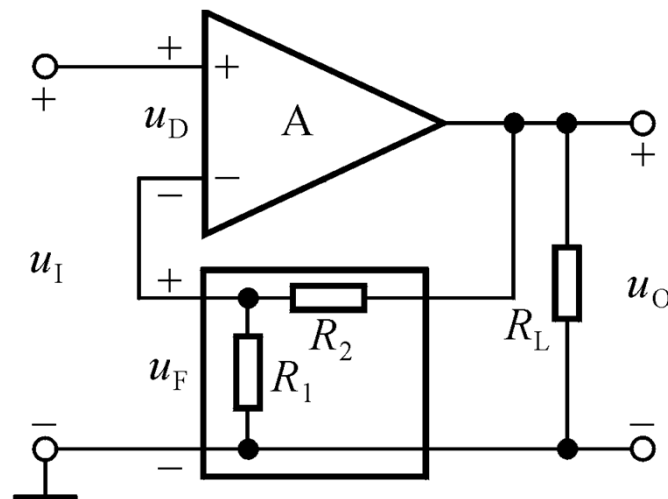
(1) 串联反馈、并联反馈（从输入端看）

X_i 与 X_f 以电压形式叠加——串联反馈，即 $u_I' = u_I - u_F$

X_i 与 X_f 以电流形式叠加——并联反馈，即 $i_I' = i_I - i_F$



串联反馈





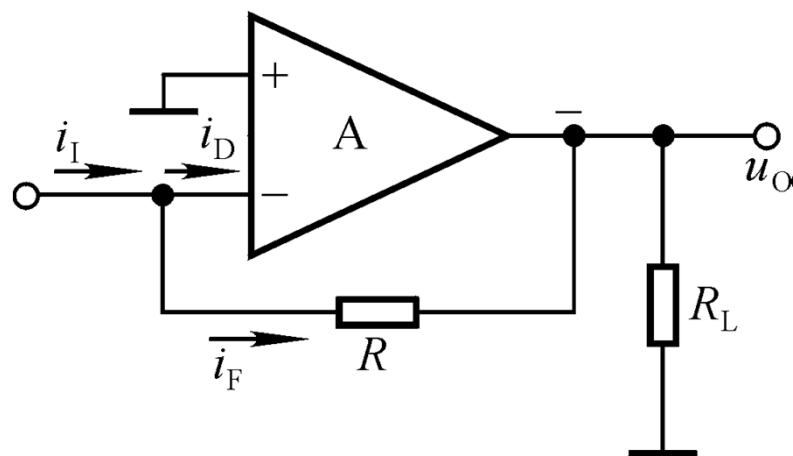
6.2 负反馈放大电路的四种基本组态

二、交流负反馈四种组态

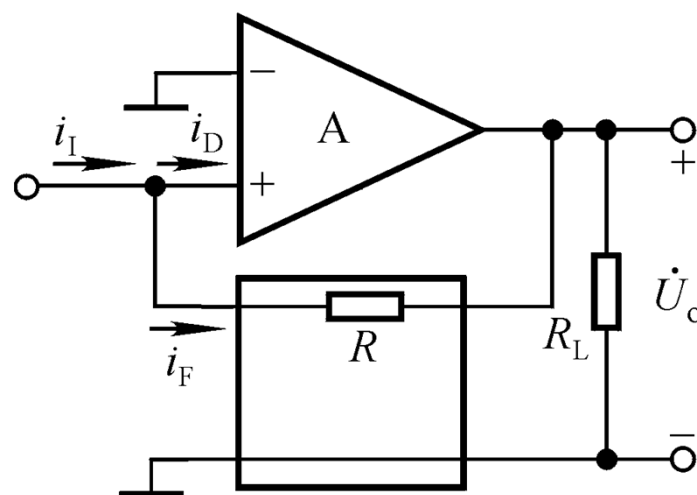
(1) 串联反馈、并联反馈（从输入端看）

X_i 与 X_f 以电压形式叠加——串联反馈，即 $u_I' = u_I - u_F$

X_i 与 X_f 以电流形式叠加——并联反馈，即 $i_I' = i_I - i_F$



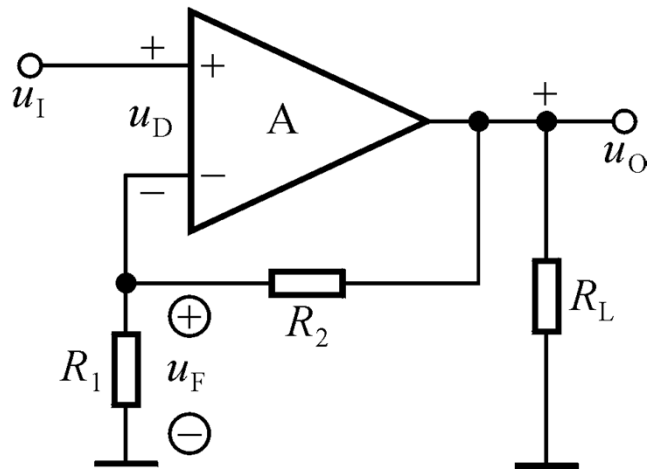
并联反馈



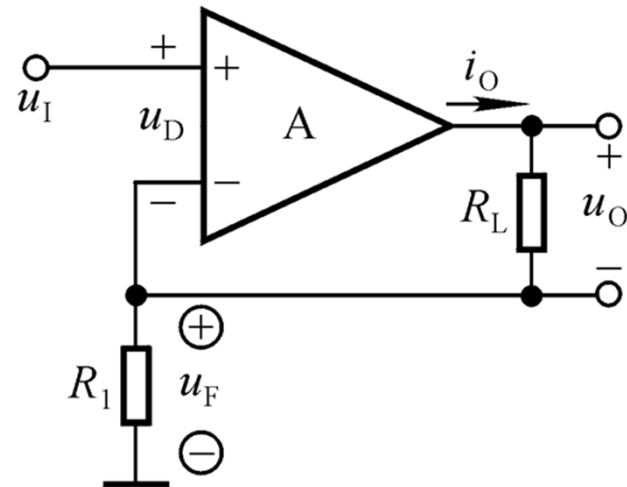
(2) 电压反馈、电流反馈（从输出端看）

X_f 取自 u_O ——电压反馈

X_f 取自 i_O ——电流反馈



$$u_F = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_O \quad \text{电压反馈}$$



$$u_F = i_O \cdot R_1 \quad \text{电流反馈}$$

交流负反馈的四种组态

电压串联

电压并联

电流串联

电流并联

三、交流负反馈四种组态的判断

1. 串联、并联反馈的判断

$$u_I = u_I' + u_F \quad \text{串联反馈}$$

$$i_I = i_I' + i_F \quad \text{并联反馈}$$

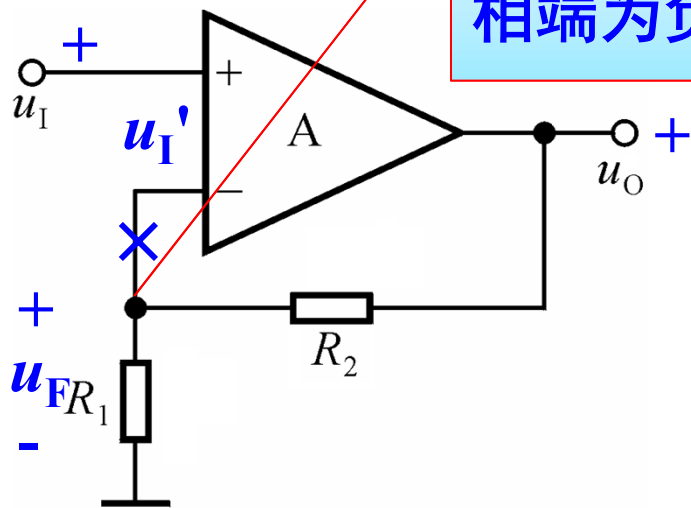
2. 电压、电流反馈的判断

令 $u_O = 0$ 由输出产生的 $X_f = 0$ 电压反馈

由输出产生的 $X_f \neq 0$ 电流反馈

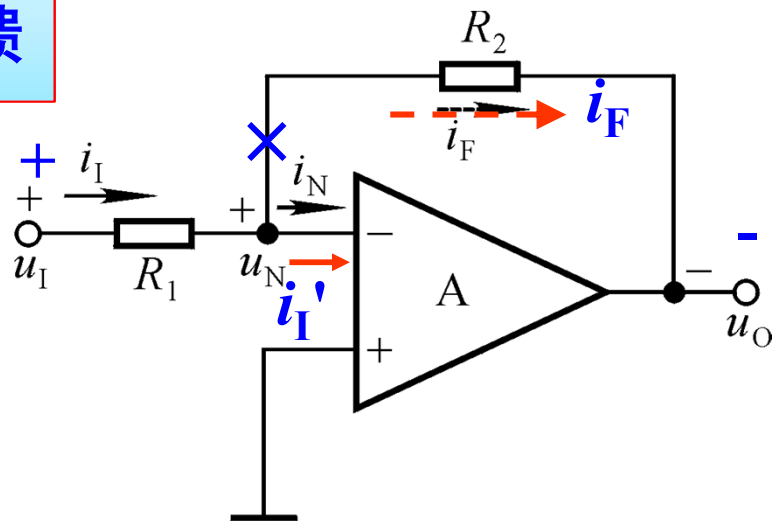
讨论1:

反馈引回到反相端为负反馈



$$u_I' = u_I - u_F \quad \text{串联负反馈}$$

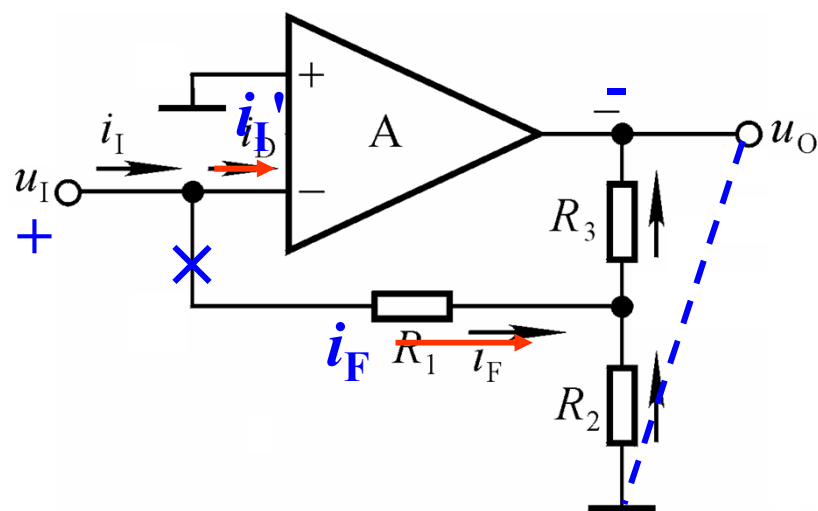
当 $u_O = 0$ 时, 电压负反馈
由输出产生的
的 $u_F = 0$



$$i_I' = i_I - i_F \quad \text{并联负反馈}$$

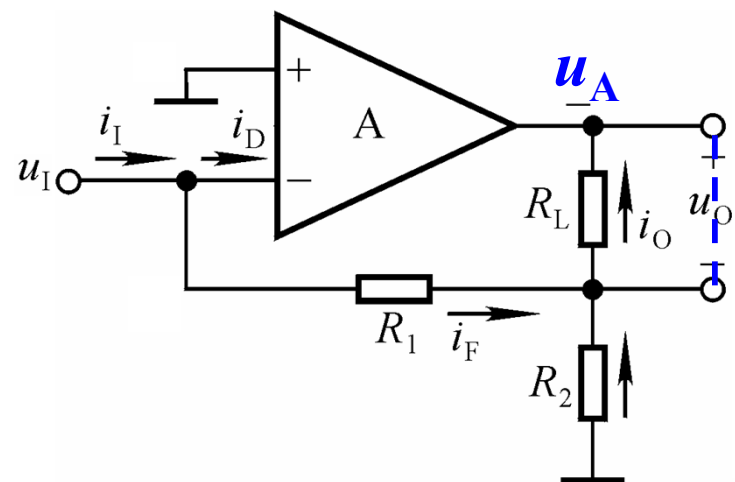
当 $u_O = 0$ 时, 电压负反馈
由输出产生的
的 $i_F = 0$

结论2: 反馈直接引回到信号输入端为并联反馈
反馈引回到另外一端为串联反馈



$$i_I' = i_I - i_F \quad \text{并联负反馈}$$

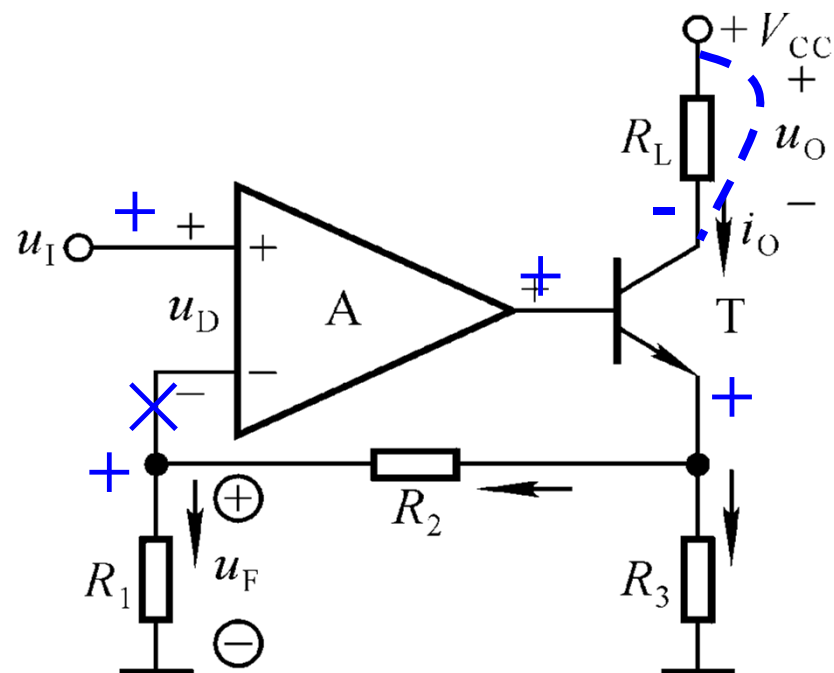
当 $u_O = 0$ 时, 电压负反馈
由输出产生的
的 $i_F = 0$



当 $u_O = 0$ 时 $u_A \neq 0$, 由
输出产生的 $i_F \neq 0$

电流并联负反馈

讨论2:



$$u_{Id} = u_I - u_F$$

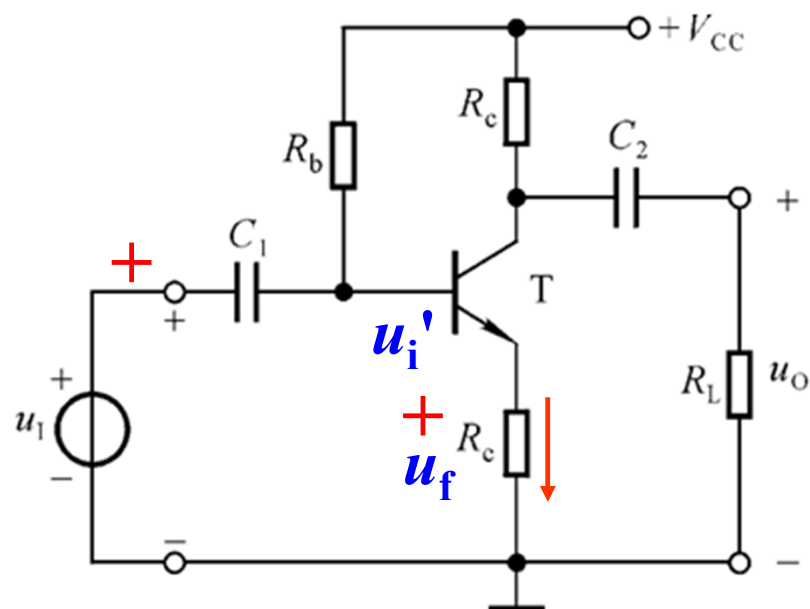
串联负反馈

当 $u_O = 0$ 时

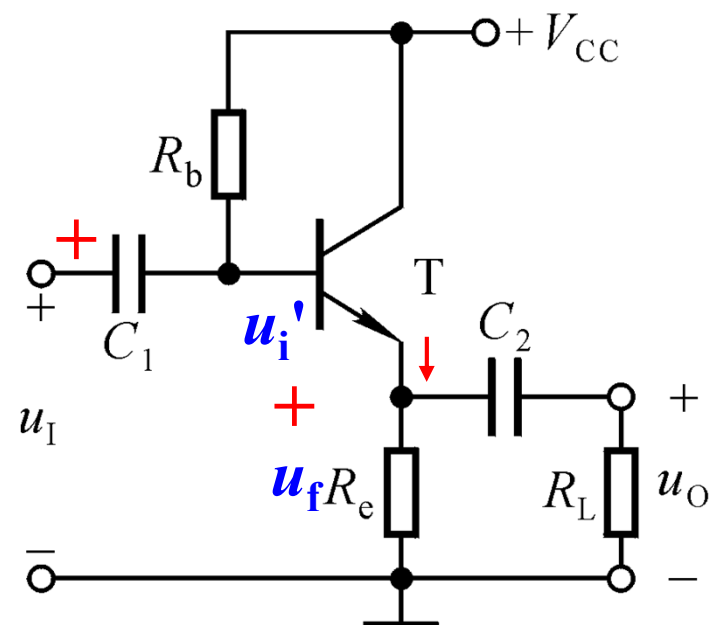
电流负反馈

$$i_C \neq 0, u_F \neq 0$$

讨论3：判断交流负反馈组态



通过电阻 R_e 引入了交直流负反馈
电流串联负反馈



电压串联负反馈