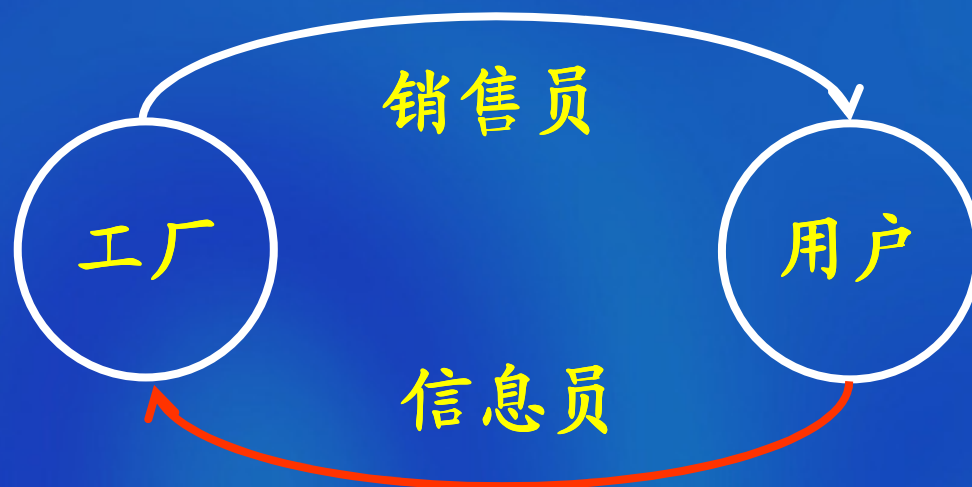


5 反馈和负反馈放大电路

5.1 反馈的基本概念及类型

实际问题举例



上页

下页

后退

5.1.1 反馈的基本概念

1. 什么是反馈

直流电流负反馈电路

反馈过程

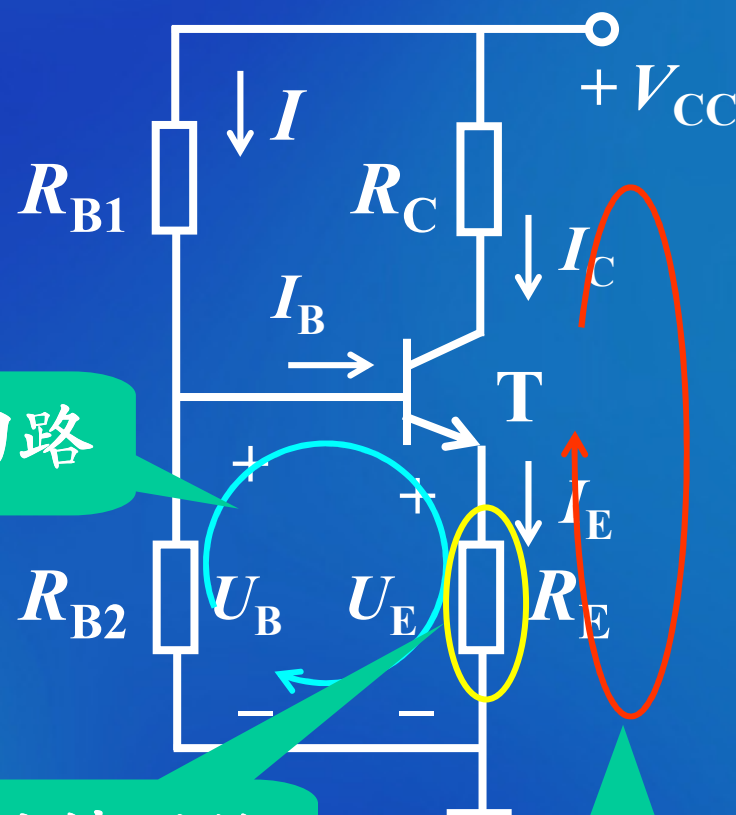
输出电流 I_{CQ} 发生变化

在 R_E 上产生压降 $U_{EQ} \approx I_{CQ} R_E$ 的变化

输入回路

反馈网络

输出回路



使放大元件的输入 U_{BE} 产生变化

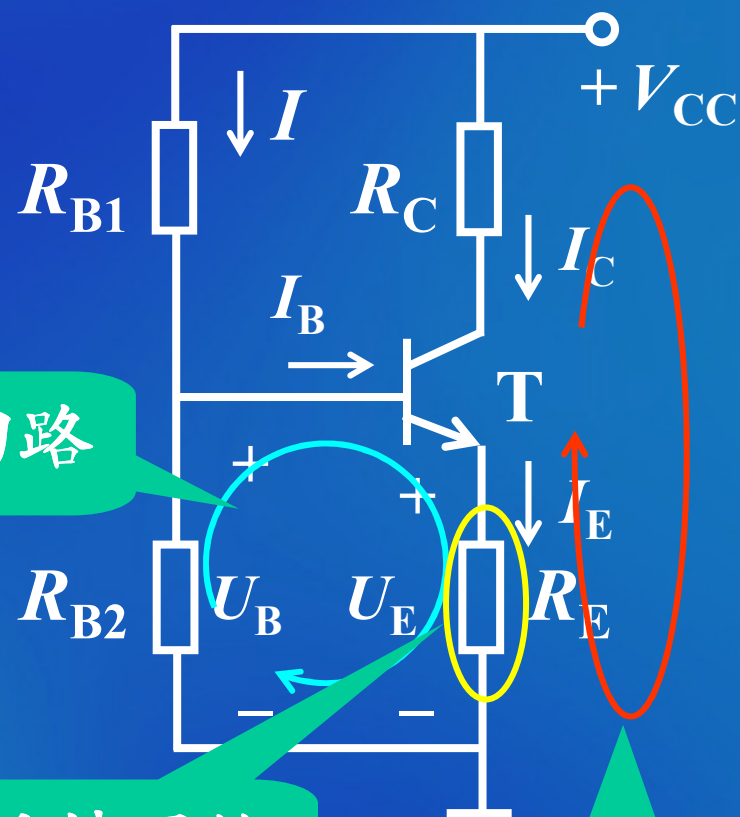
抑制输出电流 I_{CQ} 的变化

直流电流负反馈可以稳定输出电流 I_{CQ}

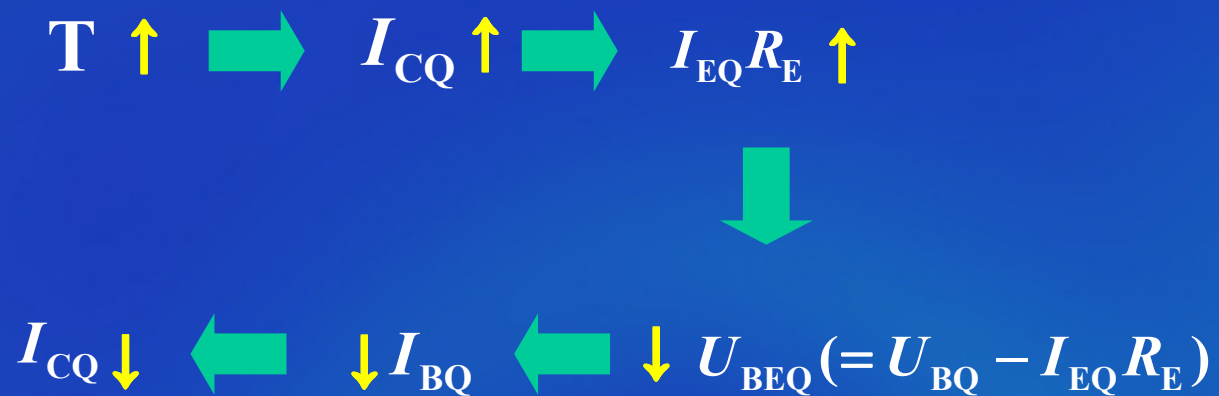
输入回路

反馈网络

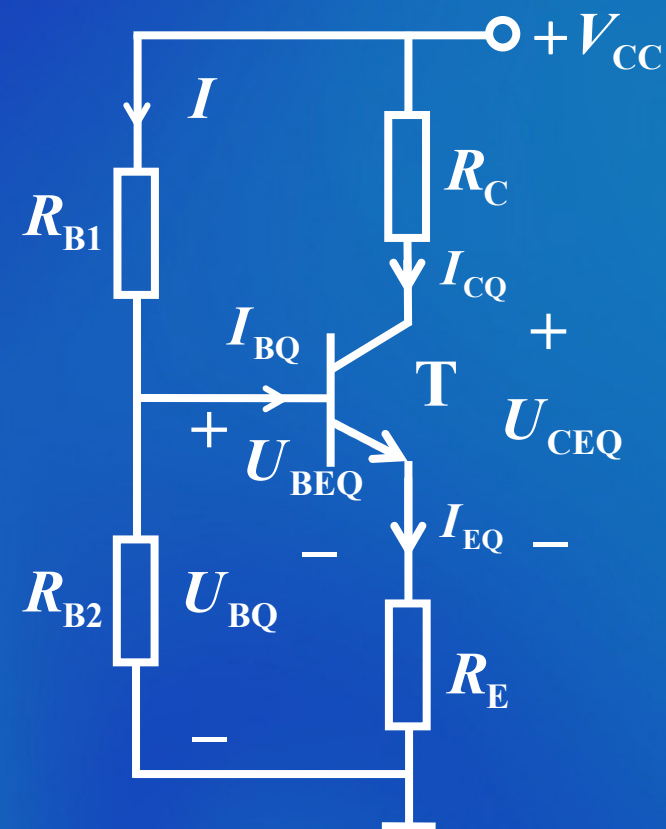
输出回路



总结：稳定 Q 点的机理



反馈的定义？？？



反馈的定义:

把放大电路的输出量（电压或电流）的一部分或全部，

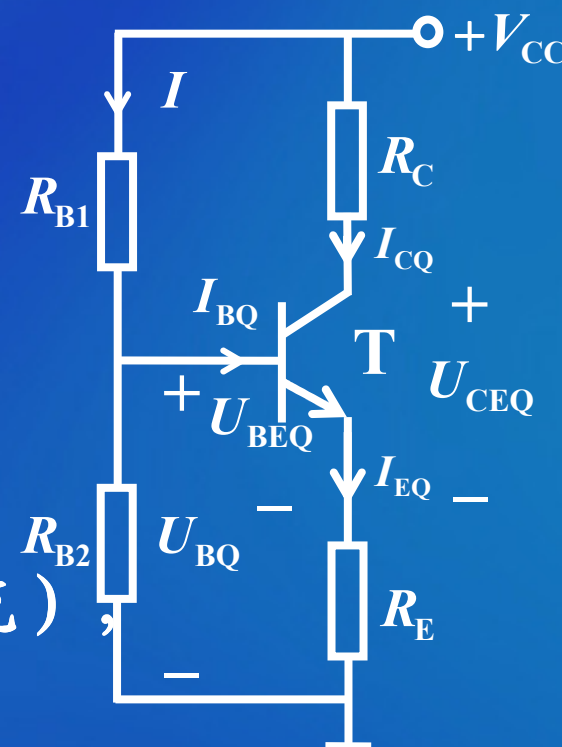
经过反馈网络，

返送到输入回路一个反馈量（电压或电流），

反馈量与原来的外加输入量进行比较，

得到一个净输入量加到某一放大器件的真正的输入端，

以影响放大电路性能。



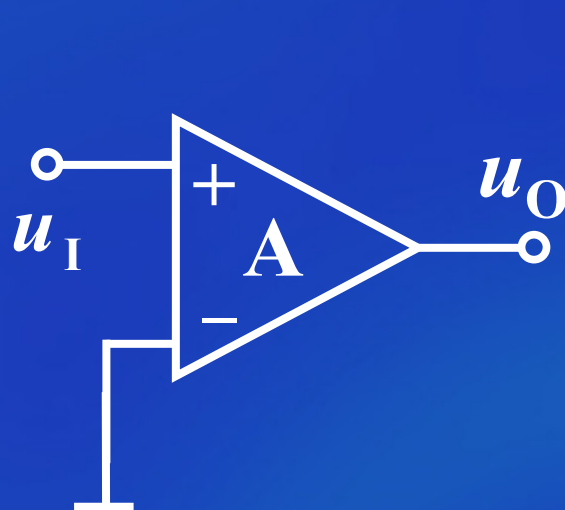
电路有无反馈？

判断准则： 是否存在反馈网络

观察电路的输出信号能否被返送回输入端，并且能够影响电路的净输入

放大元件:	输入端	输出端
双极型晶体管	B、E	C、E
单极型晶体管	G、S	D、S
双极型晶体管组成的 差分放大电路	B1、B2	C1、C2
运放电路	同相端 反相端	输出端

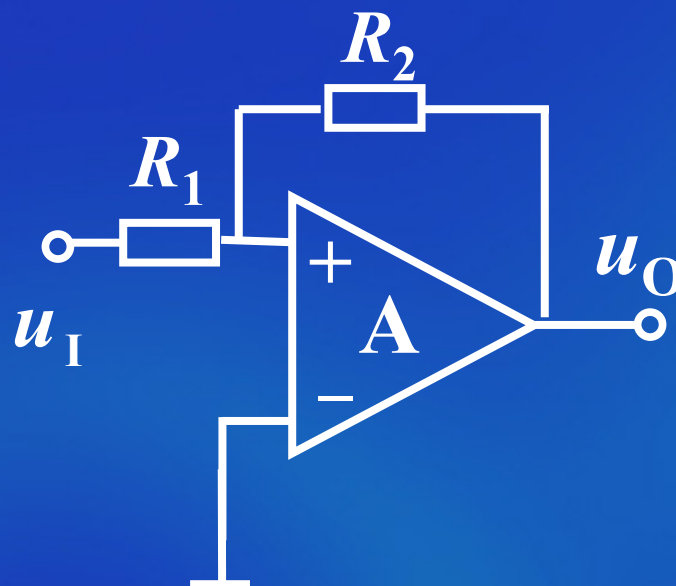
思考： 以下电路有无反馈？



(a)

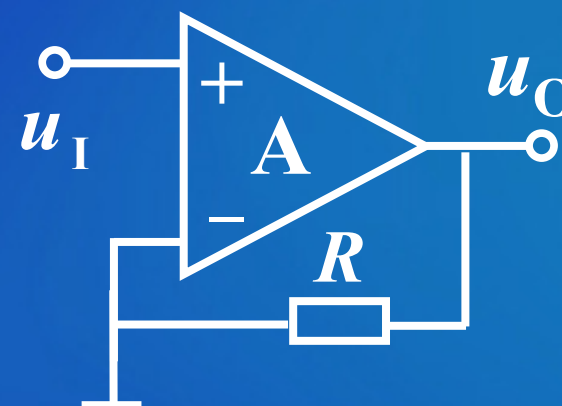
无

无反馈网络



(b)

有

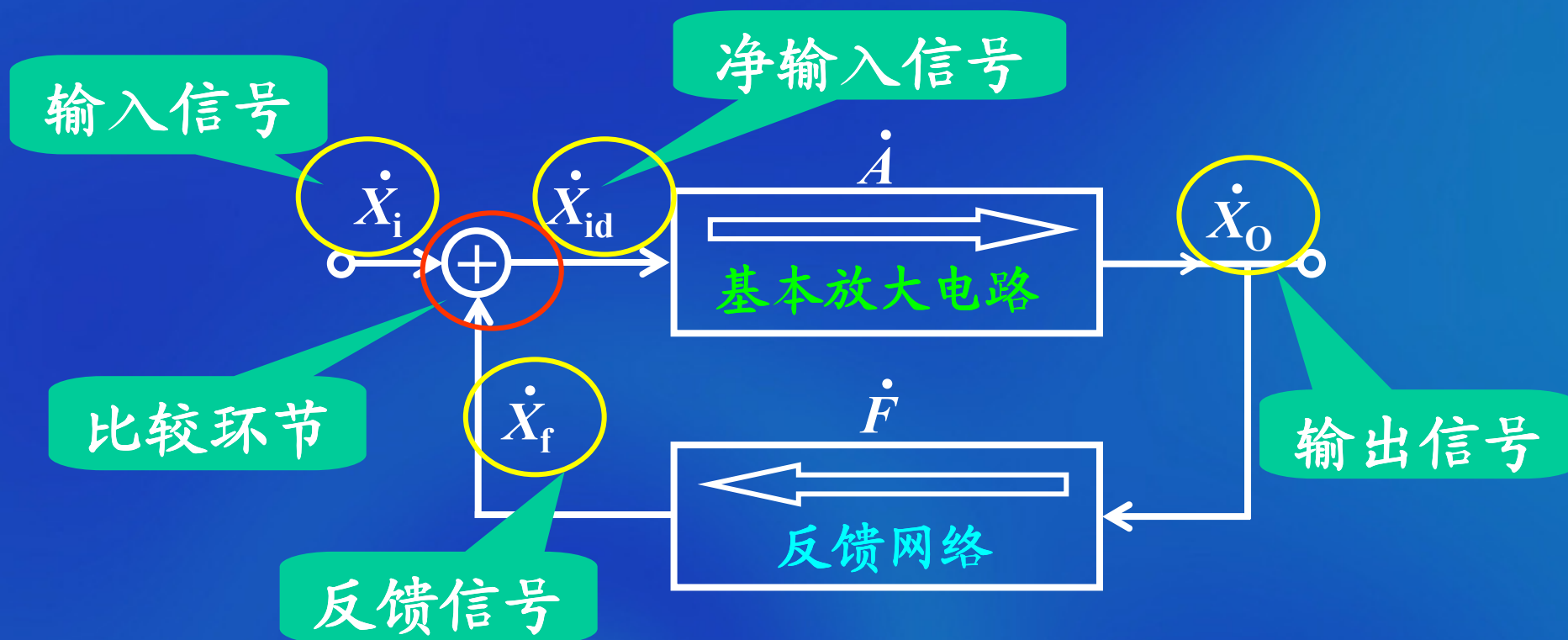


(c)

无

R为负载，输出不会影响输入

反馈电路方框图



图中 \dot{X} ——电压或电流信号

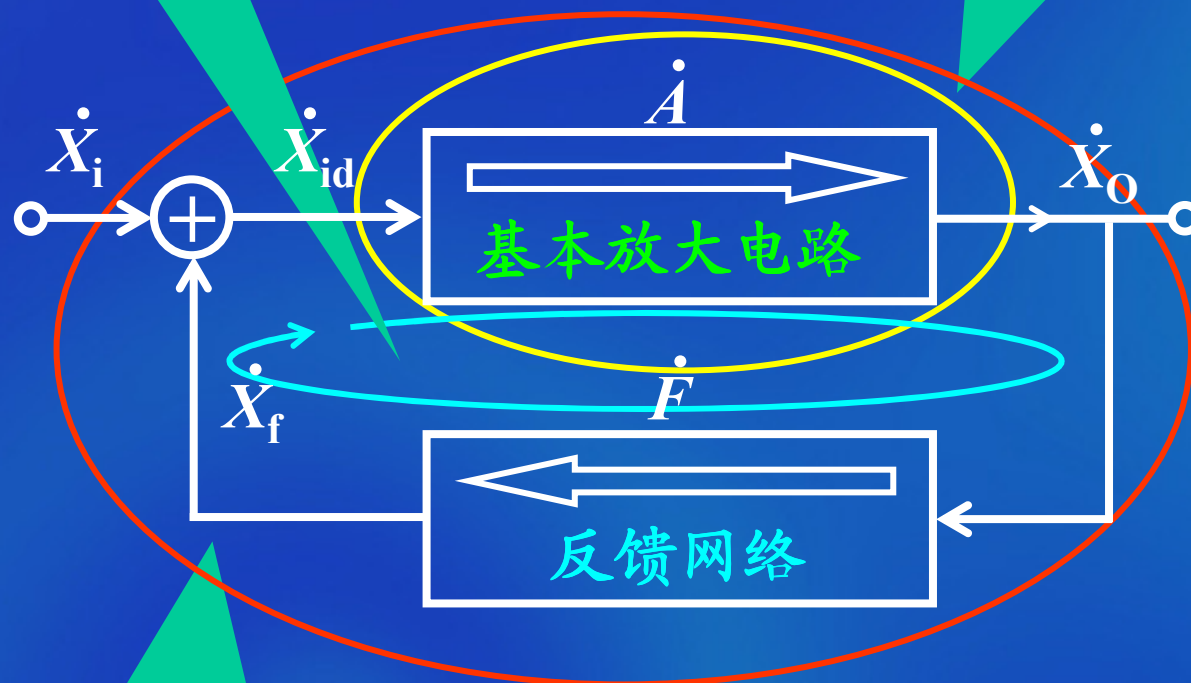
$$\dot{A} = \dot{X}_o / \dot{X}_{id}$$

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

$$\dot{X}_{id} = \dot{X}_i - \dot{X}_f$$

闭环环路

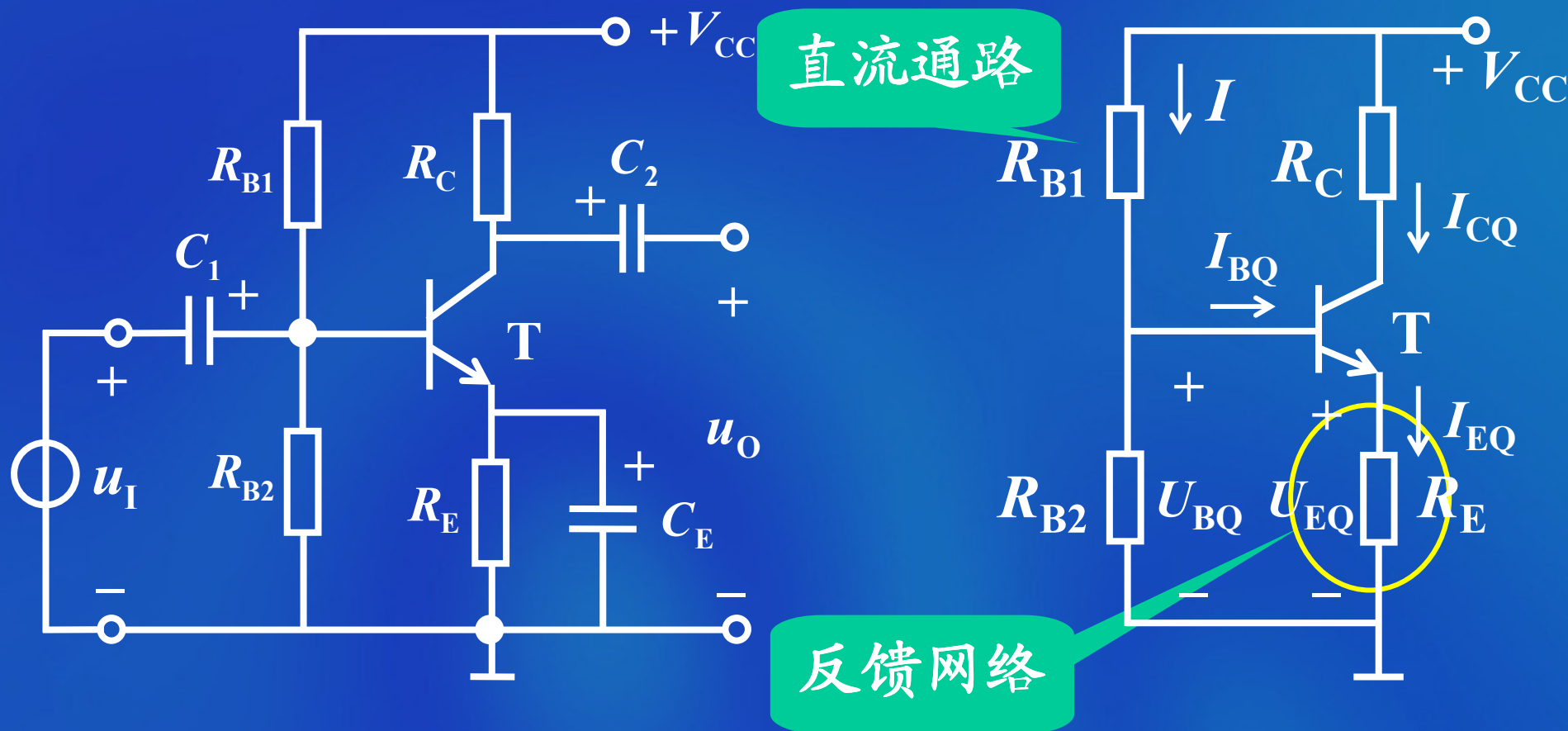
开环放大电路



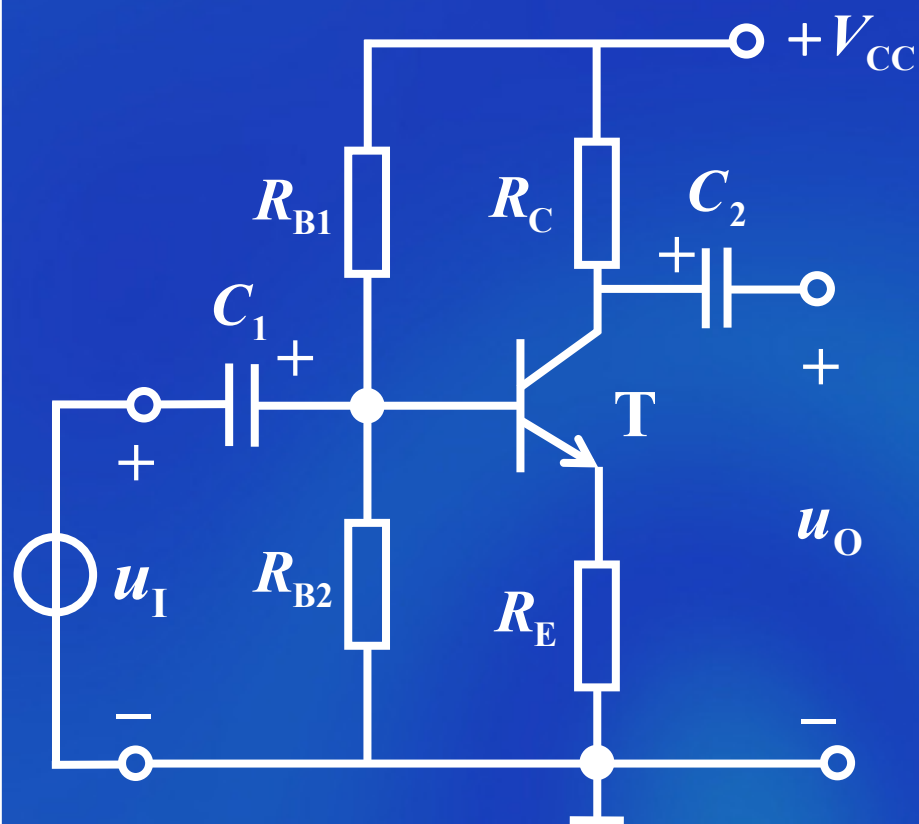
闭环放大电路

2. 交流反馈与直流反馈

(1) 直流反馈——反馈作用仅在直流通路中存在

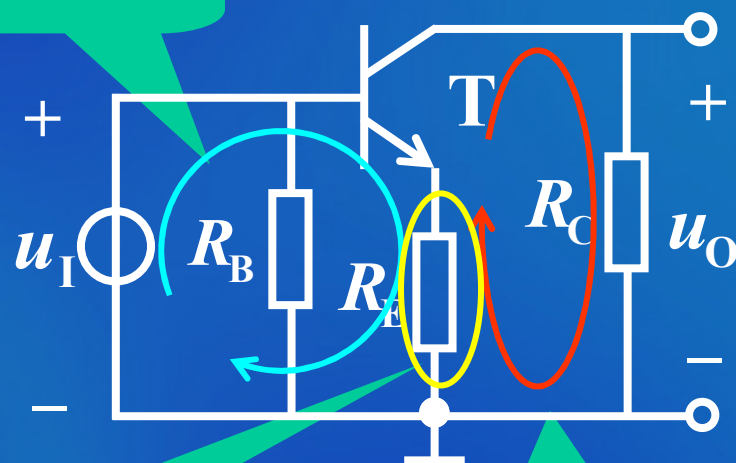


(2) 交流反馈——在交流通路中存在的反馈



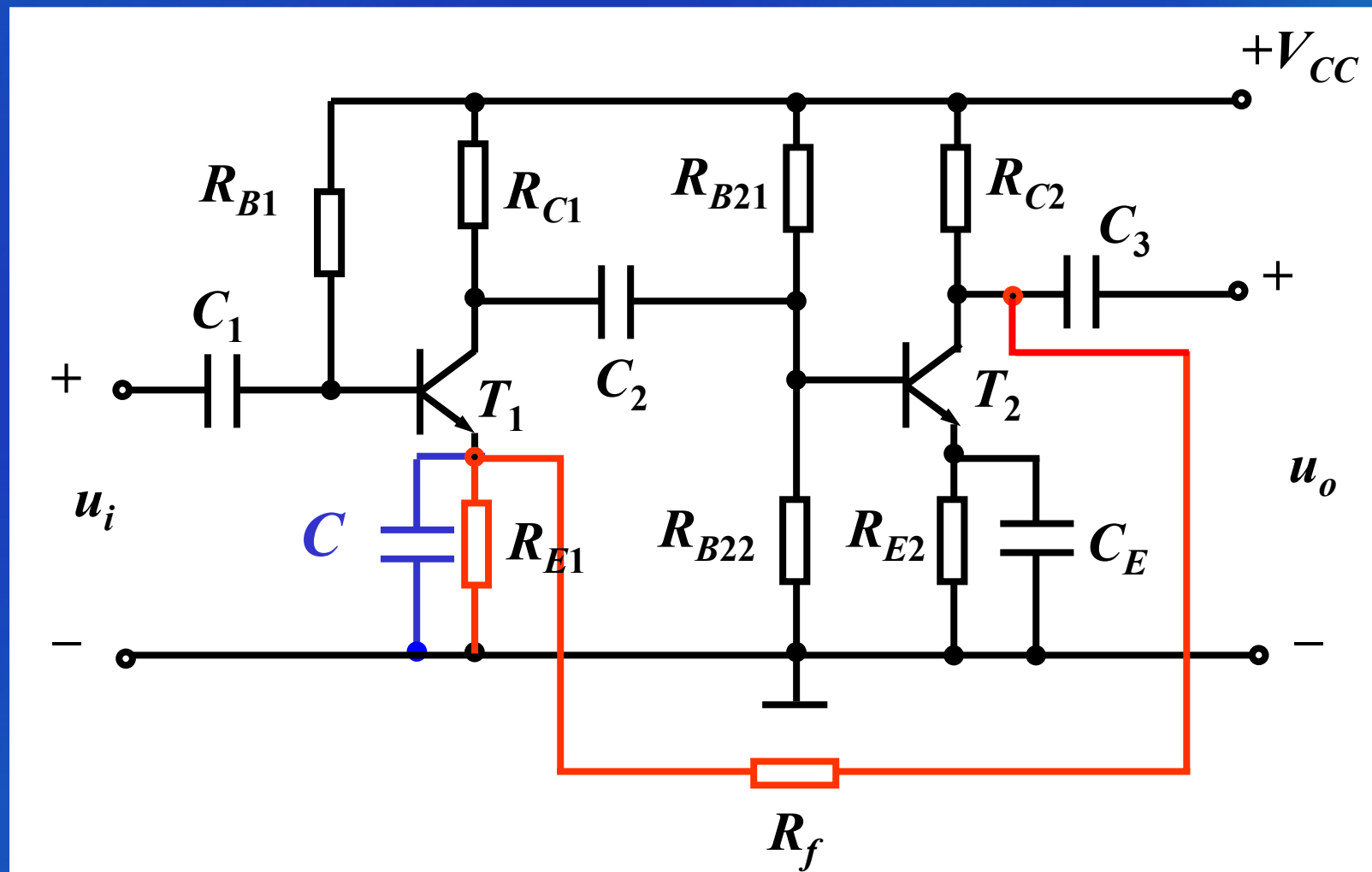
输入回路

交流通路



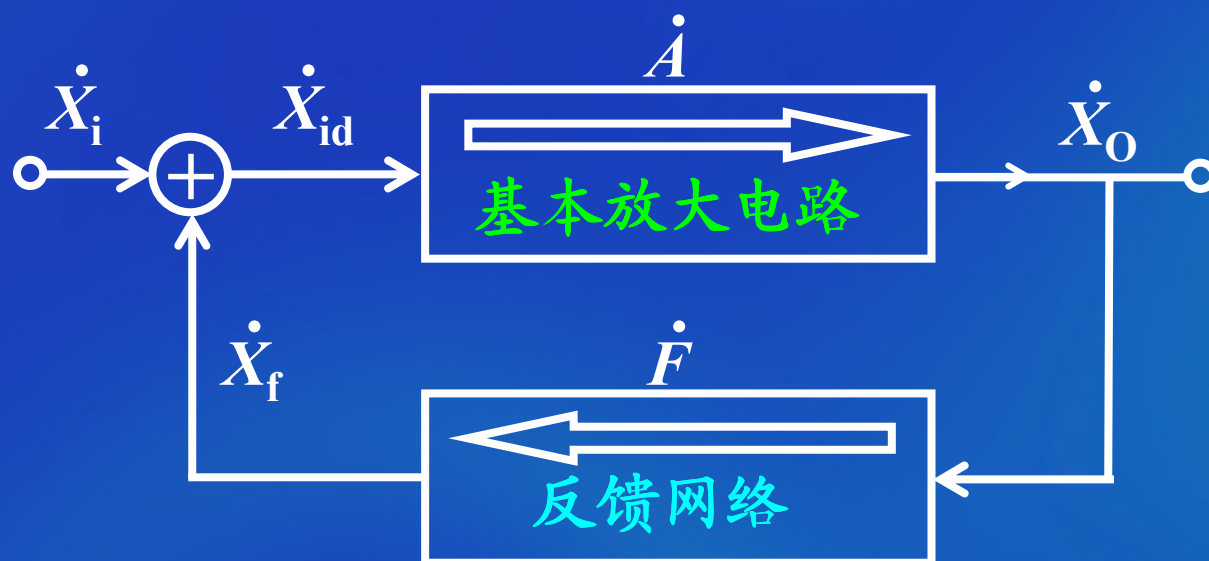
反馈网络

输出回路



增加旁路电容 C 后， R_f 只对直流起反馈作用。

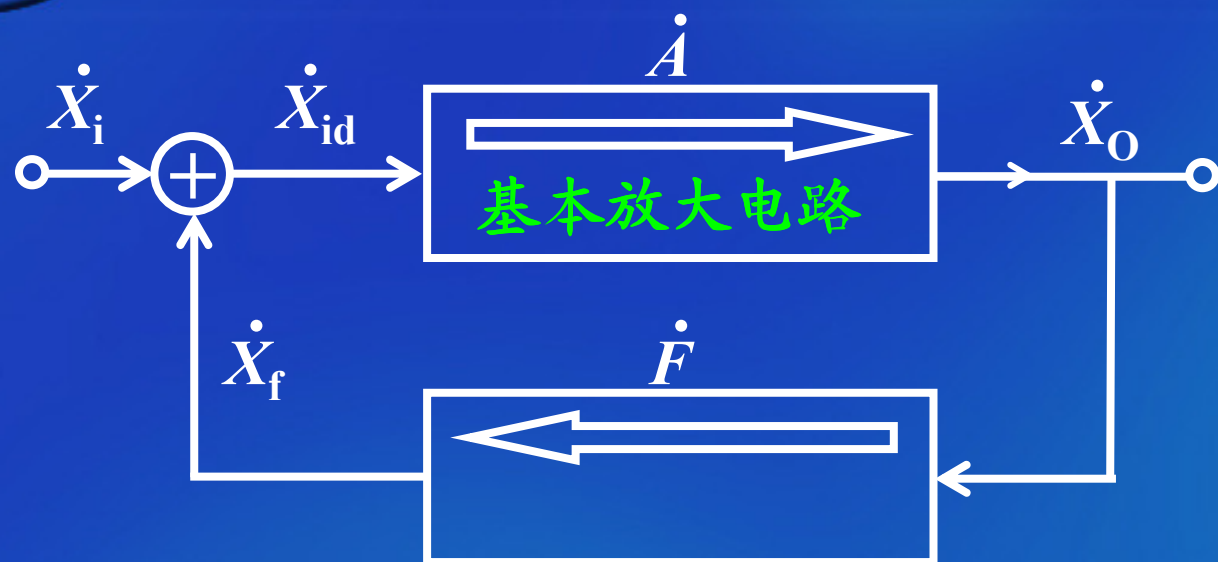
3. 正反馈与负反馈



(1) 正反馈——反馈信号加强输入信号的作用，使净输入信号大于原输入信号的反馈。

正反馈往往把放大器转变为振荡器

如音响的啸叫：话筒－放大器－喇叭－空间－话筒，
形成一个环路



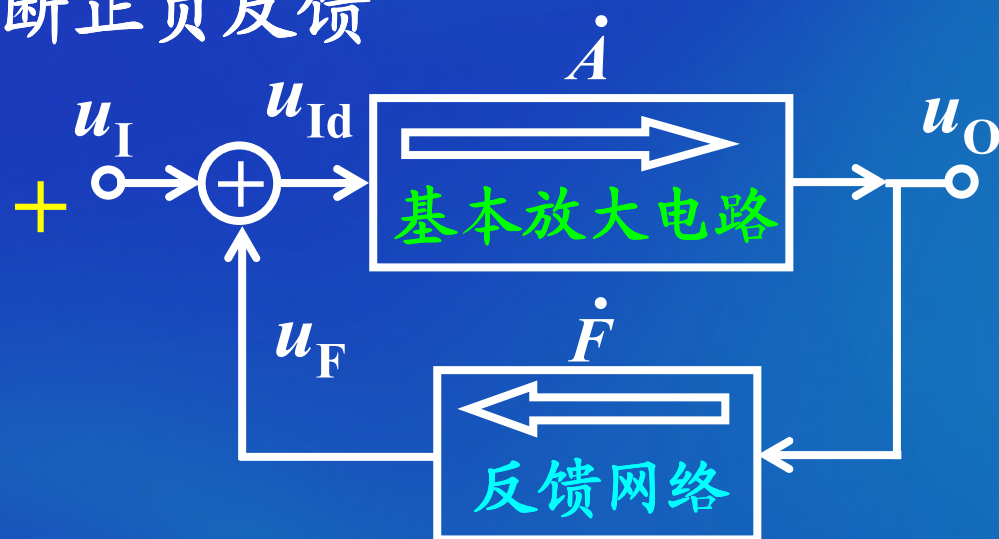
(2) 负反馈——反馈信号削弱输入信号的作用，使净输入信号小于原输入信号。

负反馈改善放大电路的性能

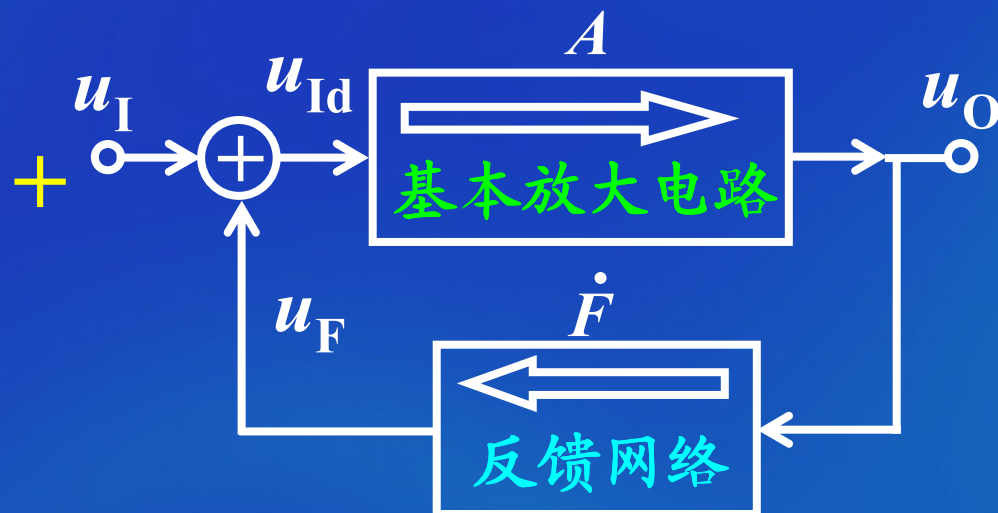
负反馈广泛应用于电子技术、自控等领域之中。

4. 瞬时极性法判断正负反馈

判断方法：



- 在输入端加入对地瞬时极性为正的电压 u_I 。
- 根据放大电路的工作原理，标出 u_O 、 u_F 的瞬时极性。
- 判断反馈信号是增强还是削弱输入信号。



d. 反馈信号削弱了输入信号 ($u_{Id} < u_I$) 为负反馈。

e. 反馈信号增强了输入信号 ($u_{Id} > u_I$) 则为正反馈。

例1 判断图示电路反馈的极性。

解：

假设 u_I 的瞬时极性为正。即

$$u_I > 0$$

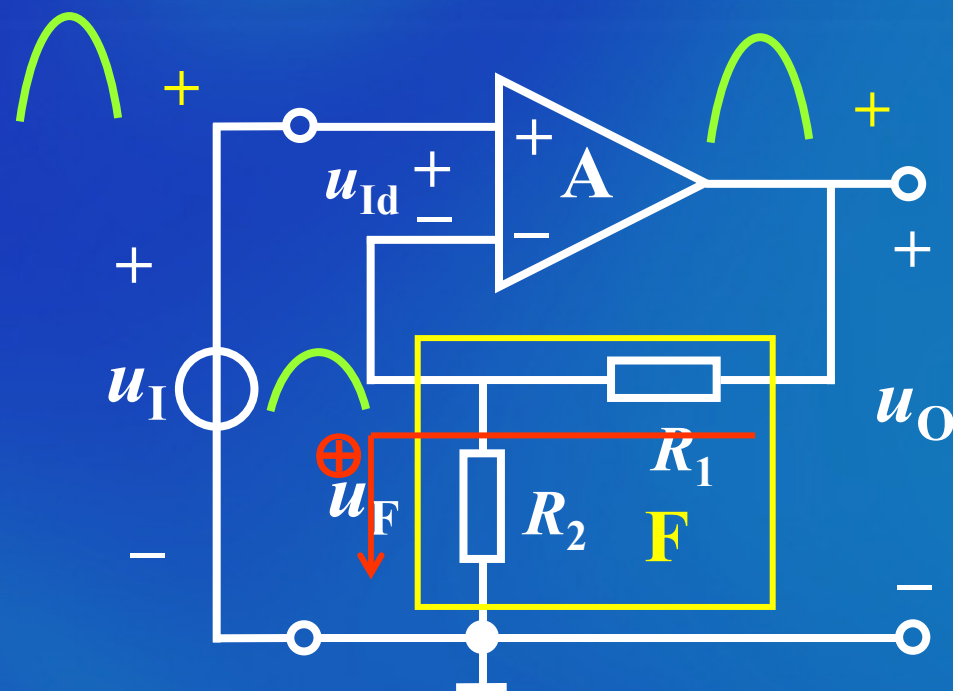
那么

$$u_O > 0$$

$$u_F > 0$$

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

净输入信号小于输入信号，所以为负反馈。



例2 判断图示电路反馈的极性。

解： 假设 $u_I > 0$

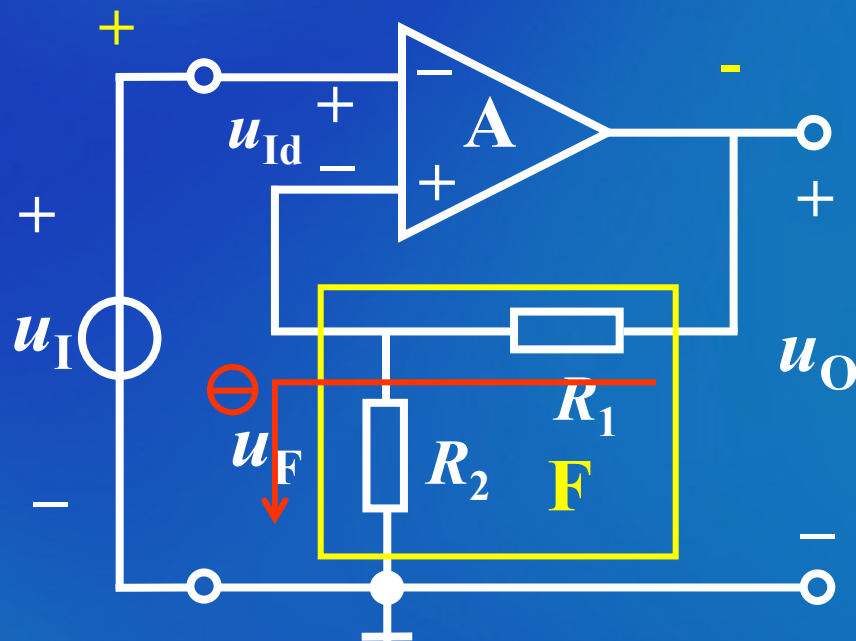
那么

$$u_O < 0$$

$$u_F < 0$$

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

净输入信号大于输入信号，所以为正反馈。

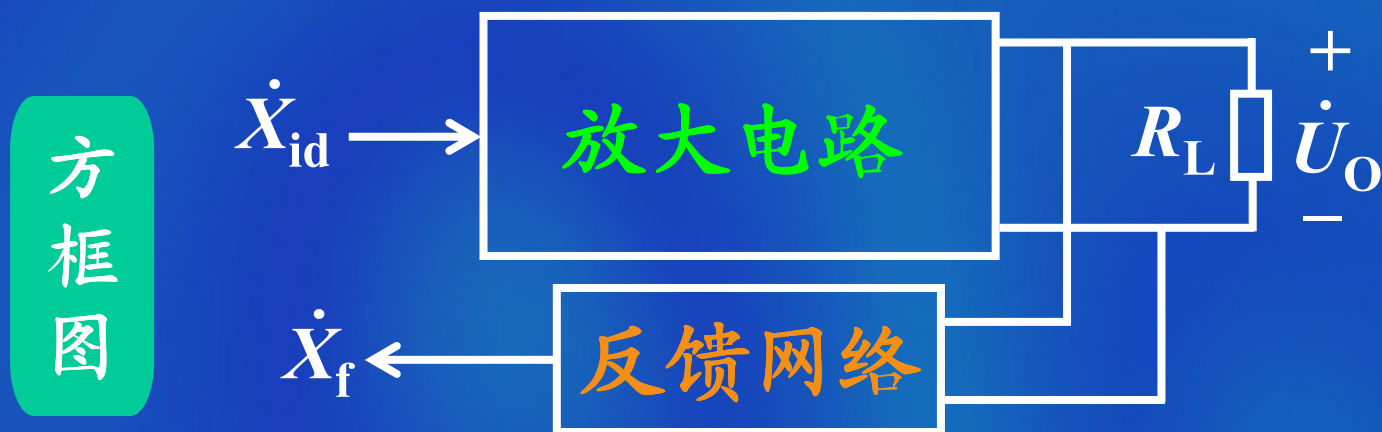


5.1.2 负反馈放大电路的四种基本类型

1. 电压反馈和电流反馈

a. 电压反馈

特点 { 反馈信号的来源输出电压
反馈信号与输出电压成正比

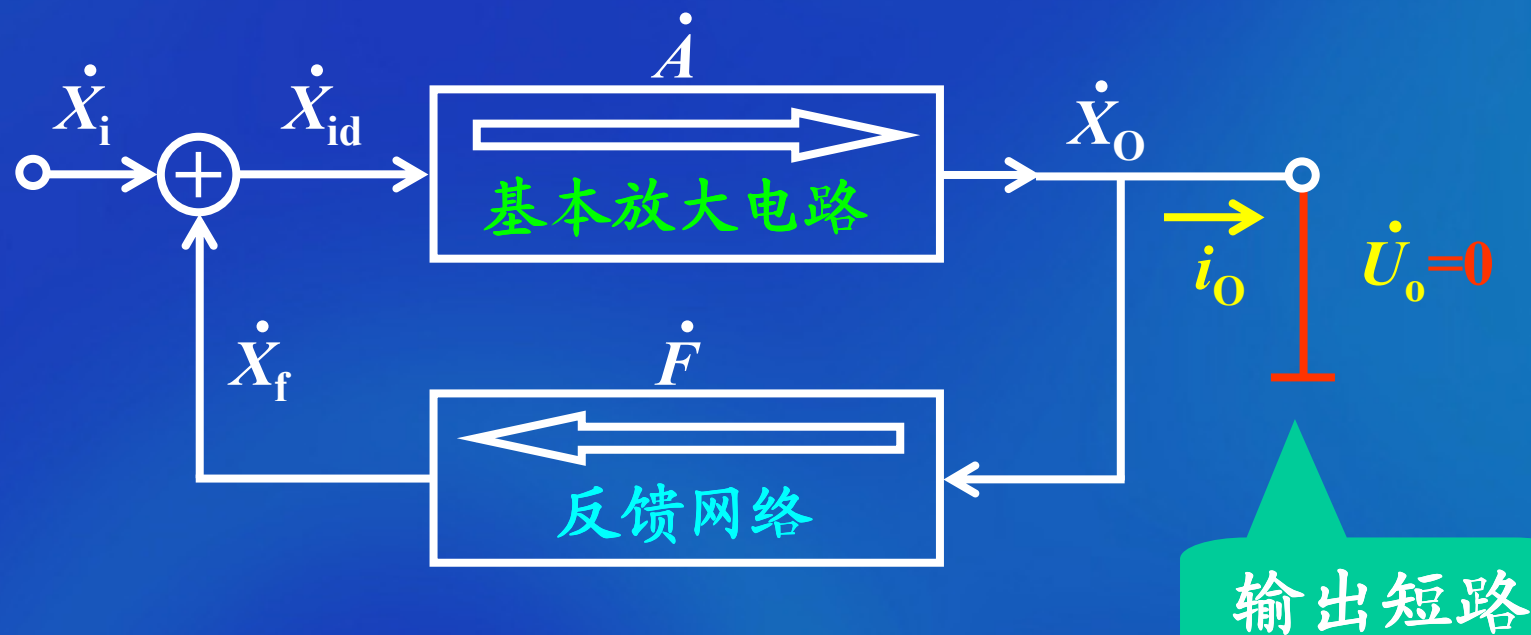


b. 电流反馈

特点 { 反馈信号的来源输出电流
反馈信号与输出电流成正比



c. 判断电压和电流反馈的方法



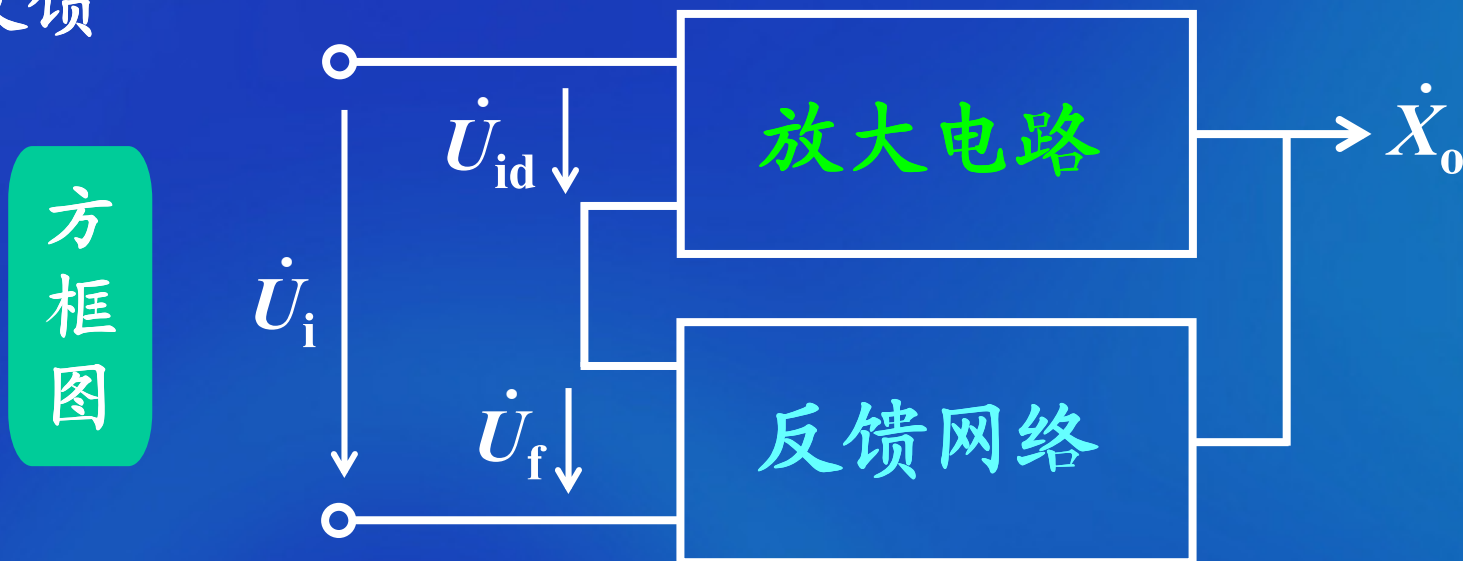
令输出电压为零 ($u_o=0$)

若反馈信号 $\dot{X}_f = \dot{F}\dot{U}_o = 0$, 则为电压反馈

若反馈信号 $\dot{X}_f = \dot{F}\dot{U}_o \neq 0$, 则为电流反馈

2. 串联反馈和并联反馈

a. 串联反馈



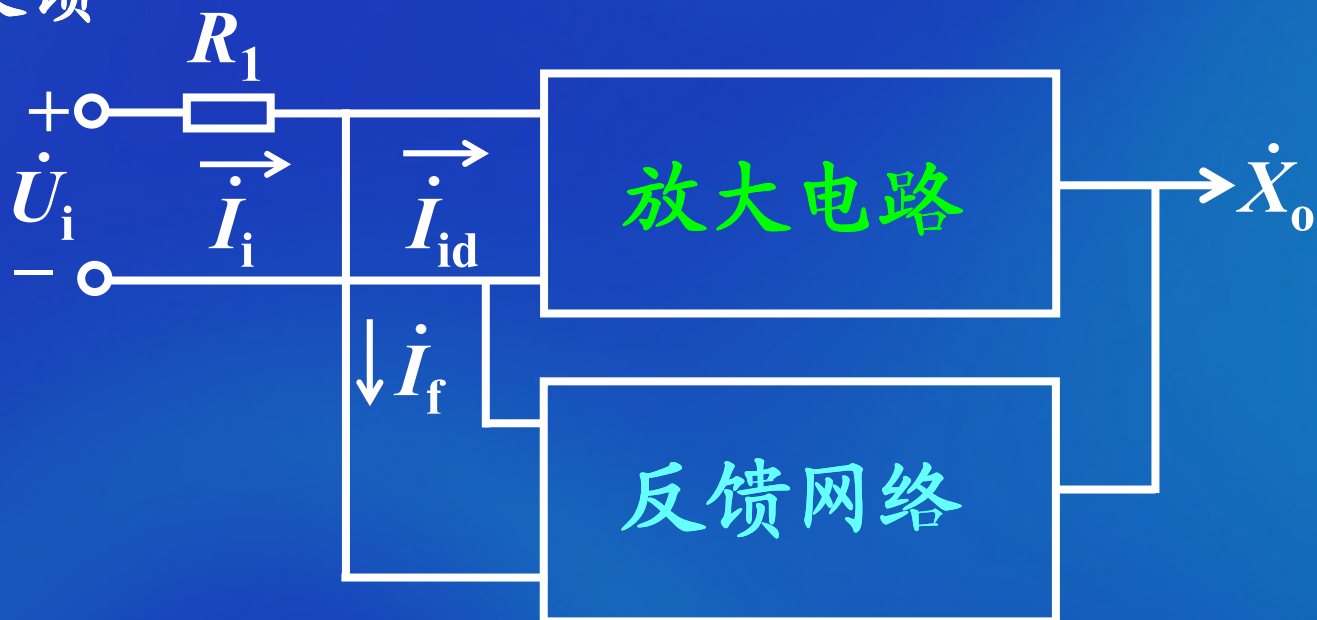
特点 {

- 反馈网络串联于输入回路
- 反馈信号为电压
- 反馈信号与输入电压串联

为什么用电压分析?

b. 并联反馈

方框图



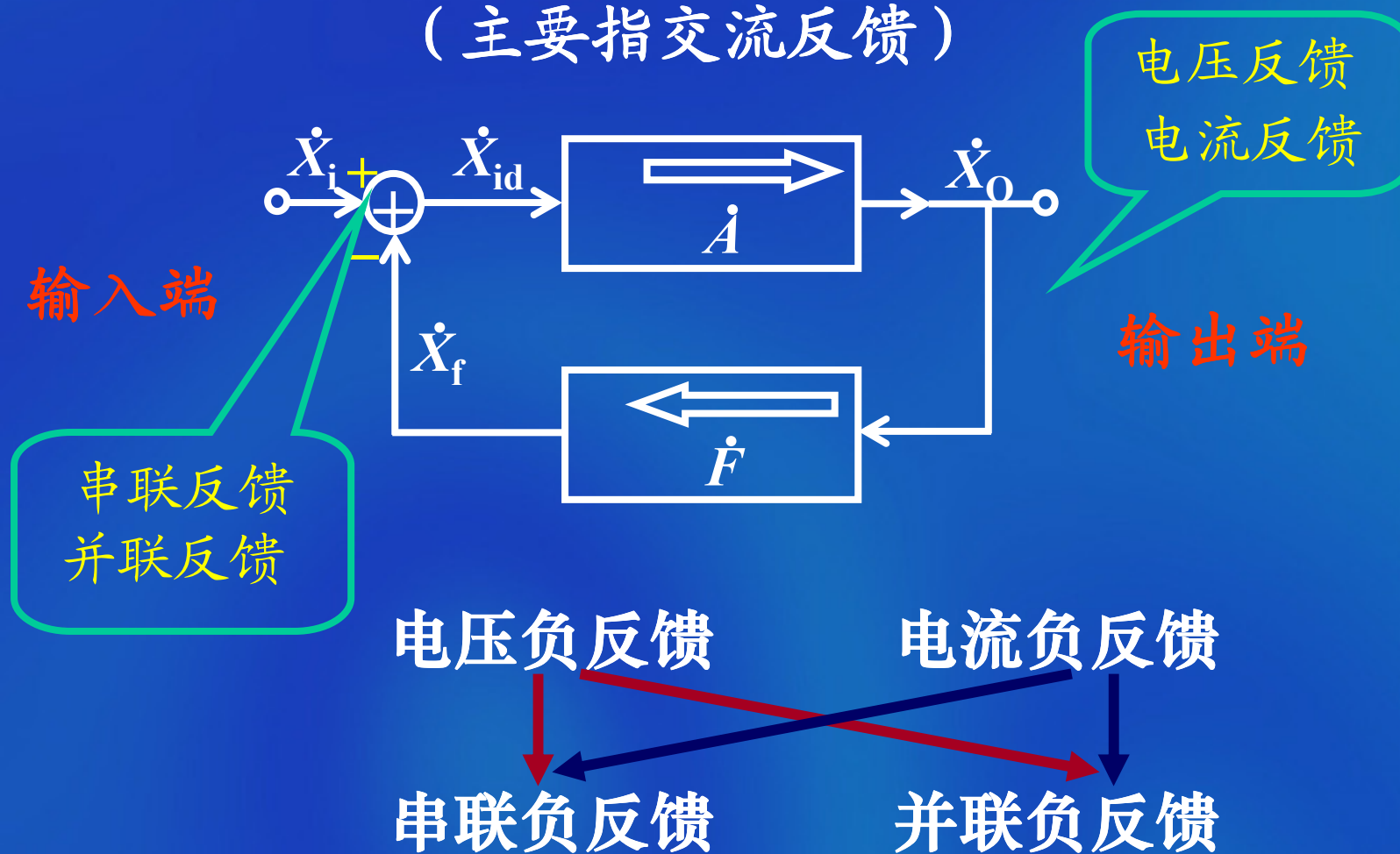
特点

反馈网络并联于输入回路
 反馈信号为电流
 反馈信号与输入电流并联

为什么用电流分析?

3. 负反馈放大电路的四种基本类型

(主要指交流反馈)

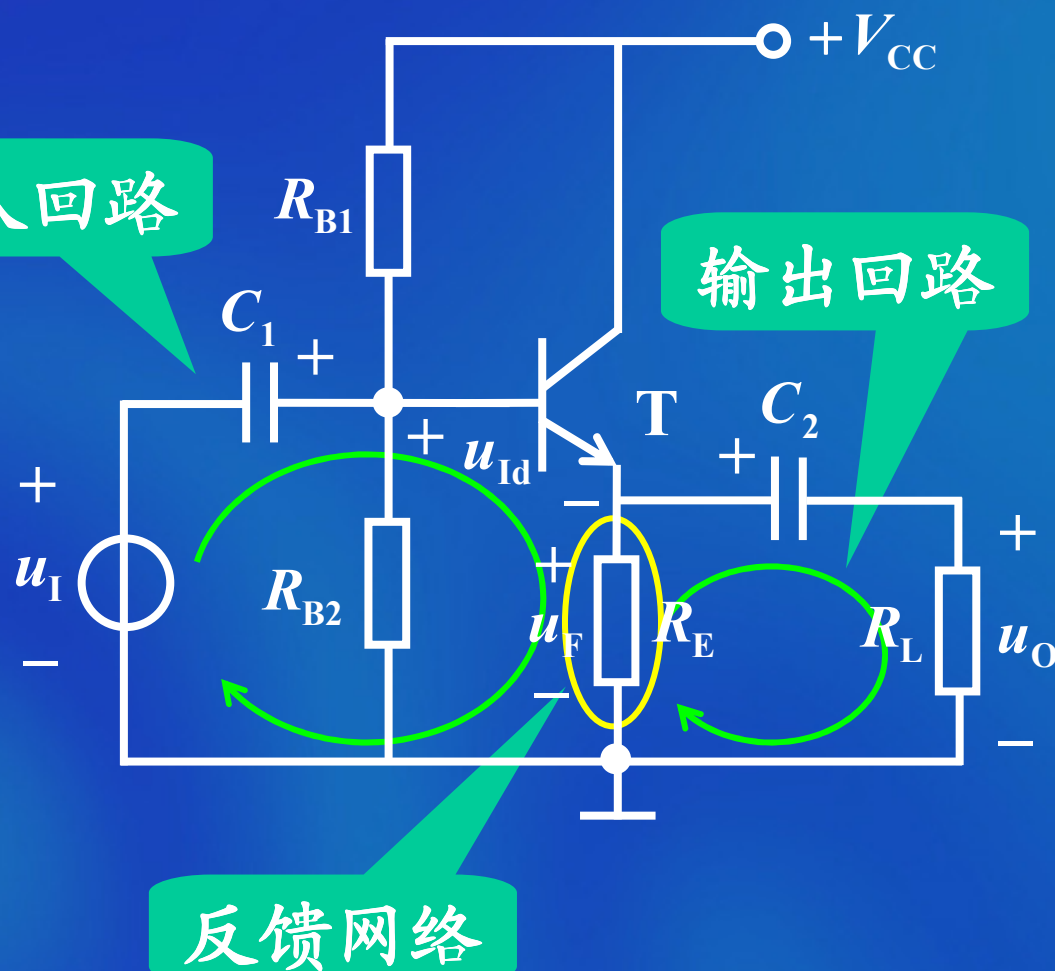


5.1.3 负反馈放大电路举例

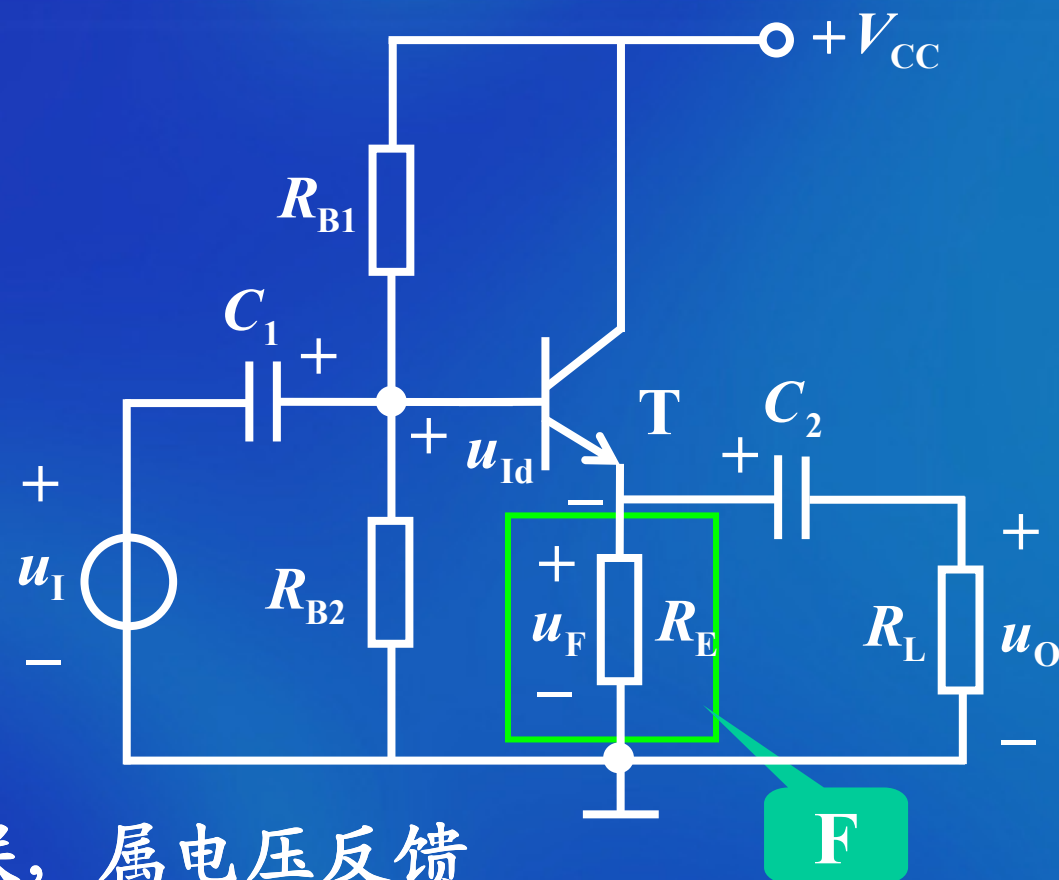
1. 电压串联负反馈

a. 判断反馈网络 **输入回路**

寻找输入与输出
回路的共有网络



b. 负反馈的组态判断



(a) 反馈网络F与 R_L 并联，属电压反馈

(b) 反馈电压 u_F 与输入电压 u_I 串联于电路的输入端，属串联反馈

c. 判断反馈极性

利用瞬时极性法

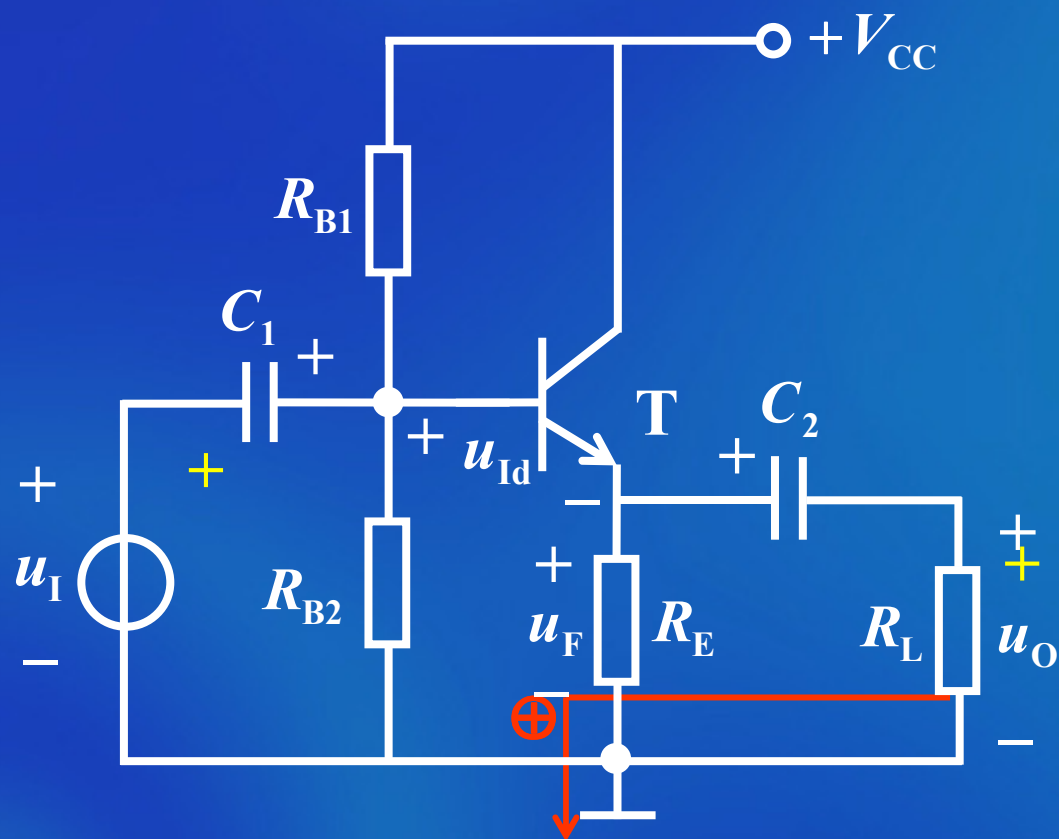
当 $u_I > 0$ 时

$u_O > 0$

$u_F > 0$

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

负反馈

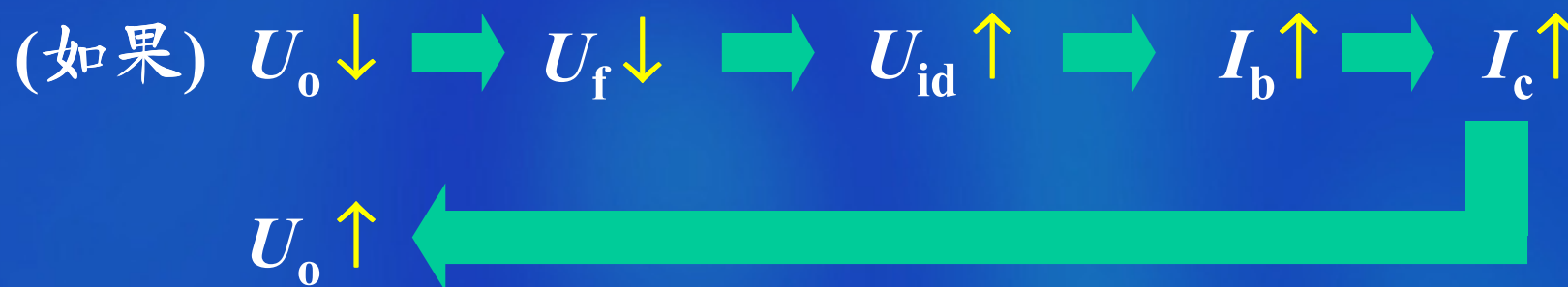
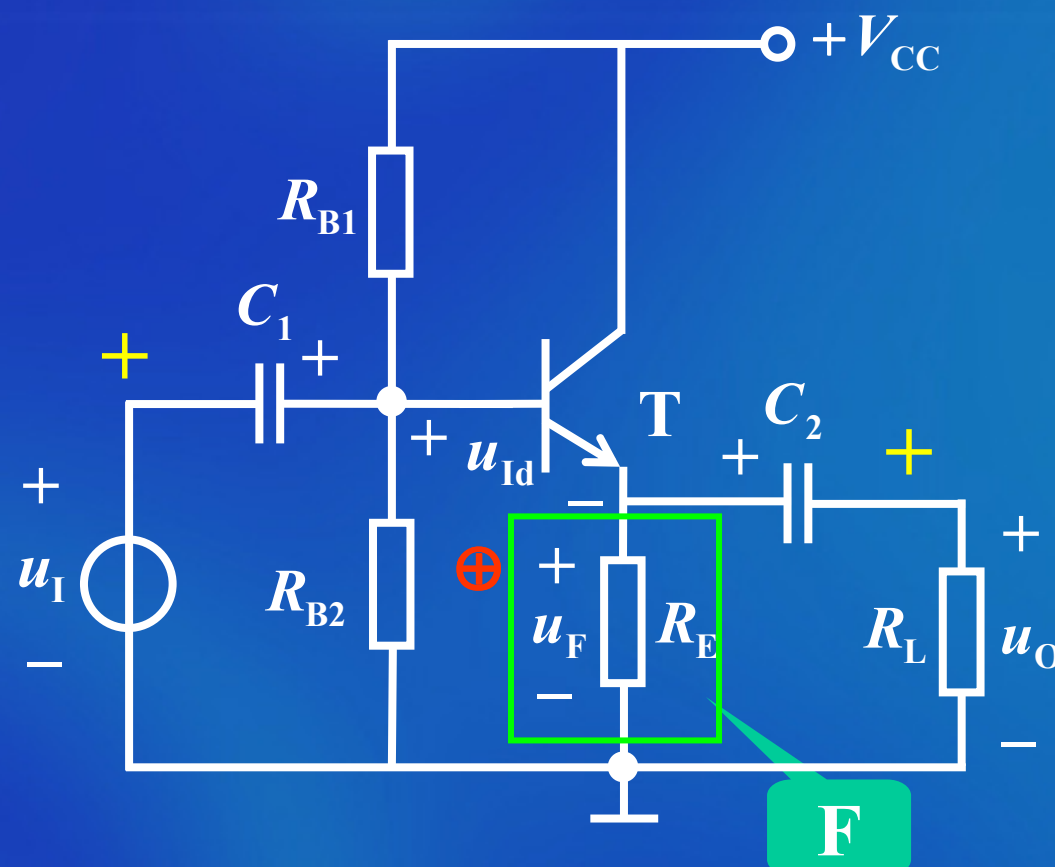


电压串联负反馈

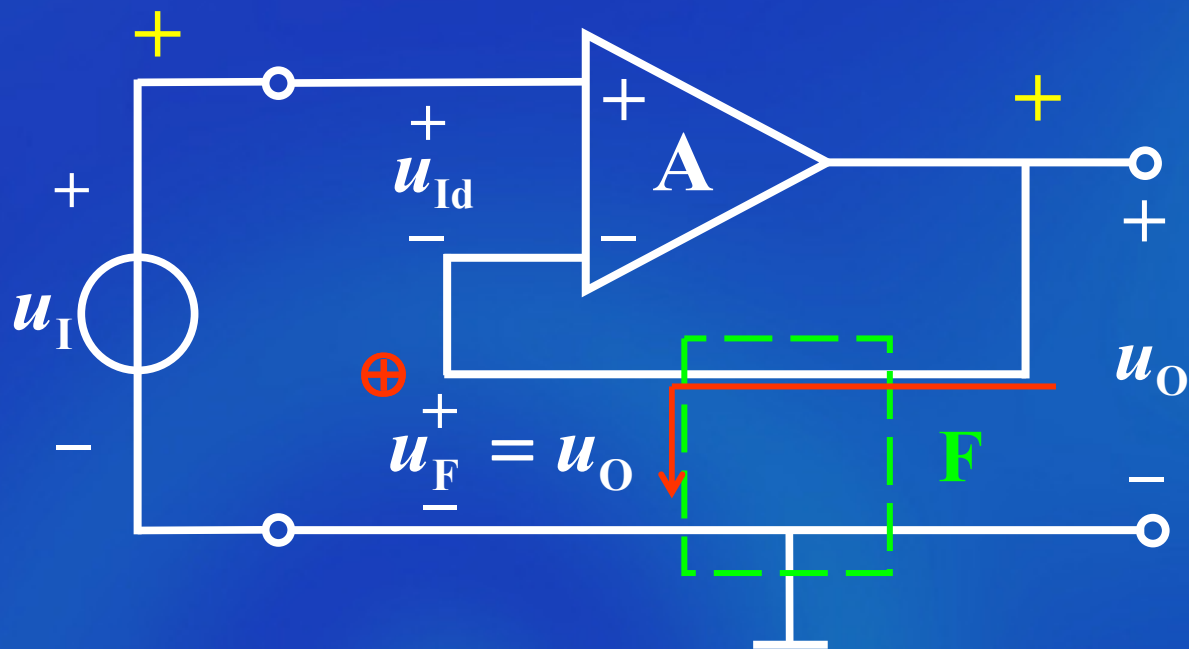
d. 电压负反馈的作用

能够稳定输出电压

稳定输出电压的原理



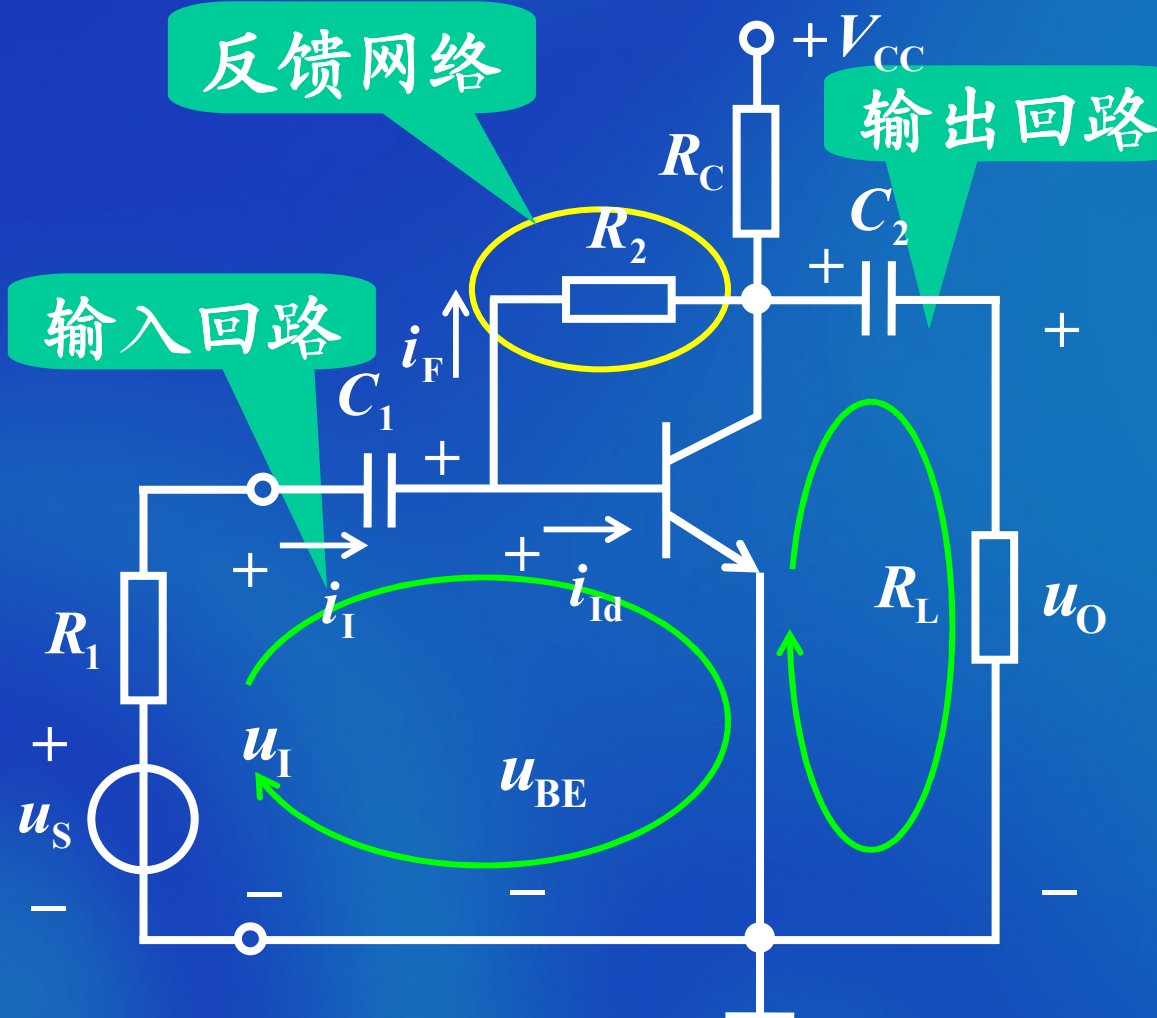
由运算放大器组成的电压跟随器电路



电压串联负反馈

2. 电压并联负反馈

a. 判断反馈网络

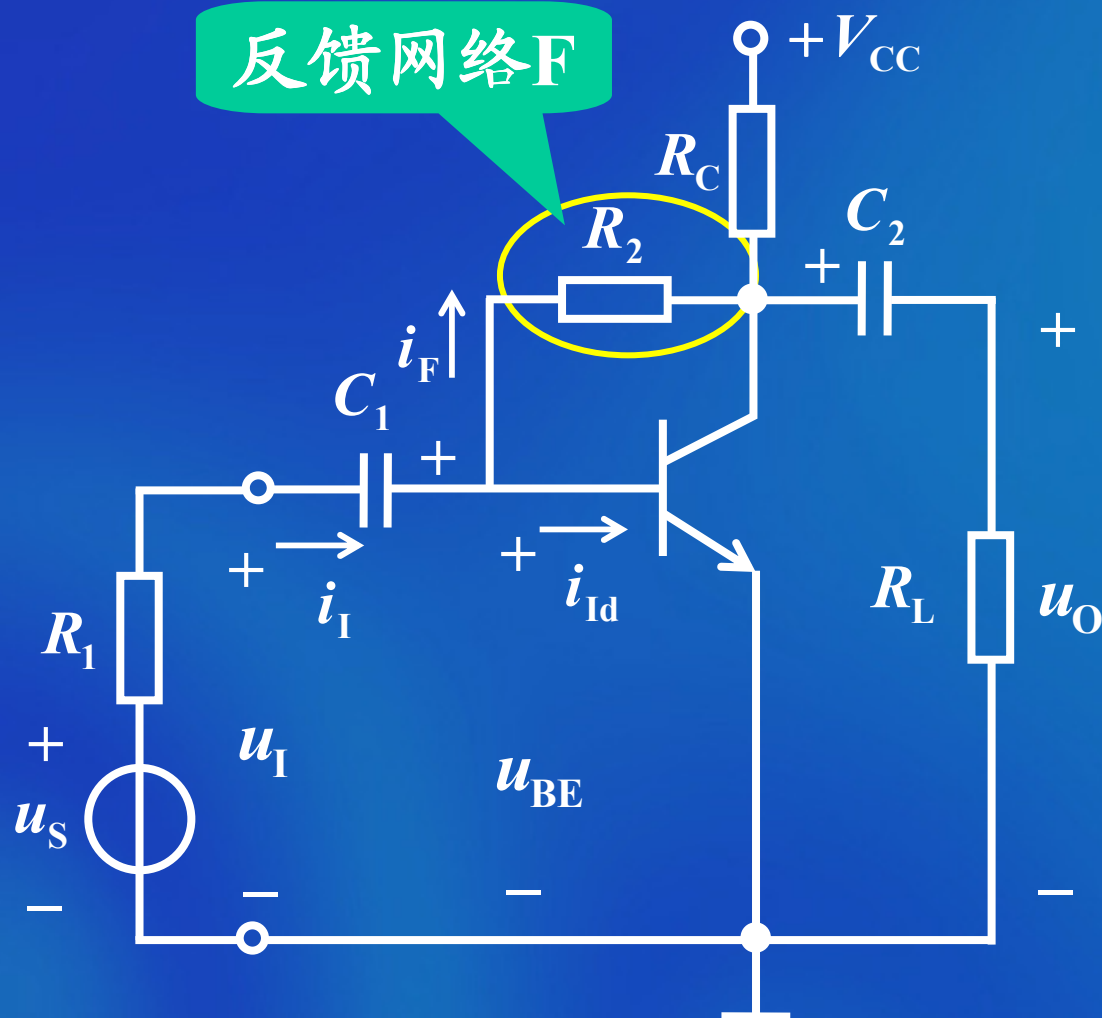


b. 负反馈的组态判断

(a) F与 R_L 并联于电路的输出端，属电压反馈

(b) 反馈电流 i_F 与输入电流 i_I 并联于基本电路的输入端，属并联反馈。

$$i_{Id} = i_I - i_F < i_I$$



c. 判断反馈极性

利用瞬时极性法

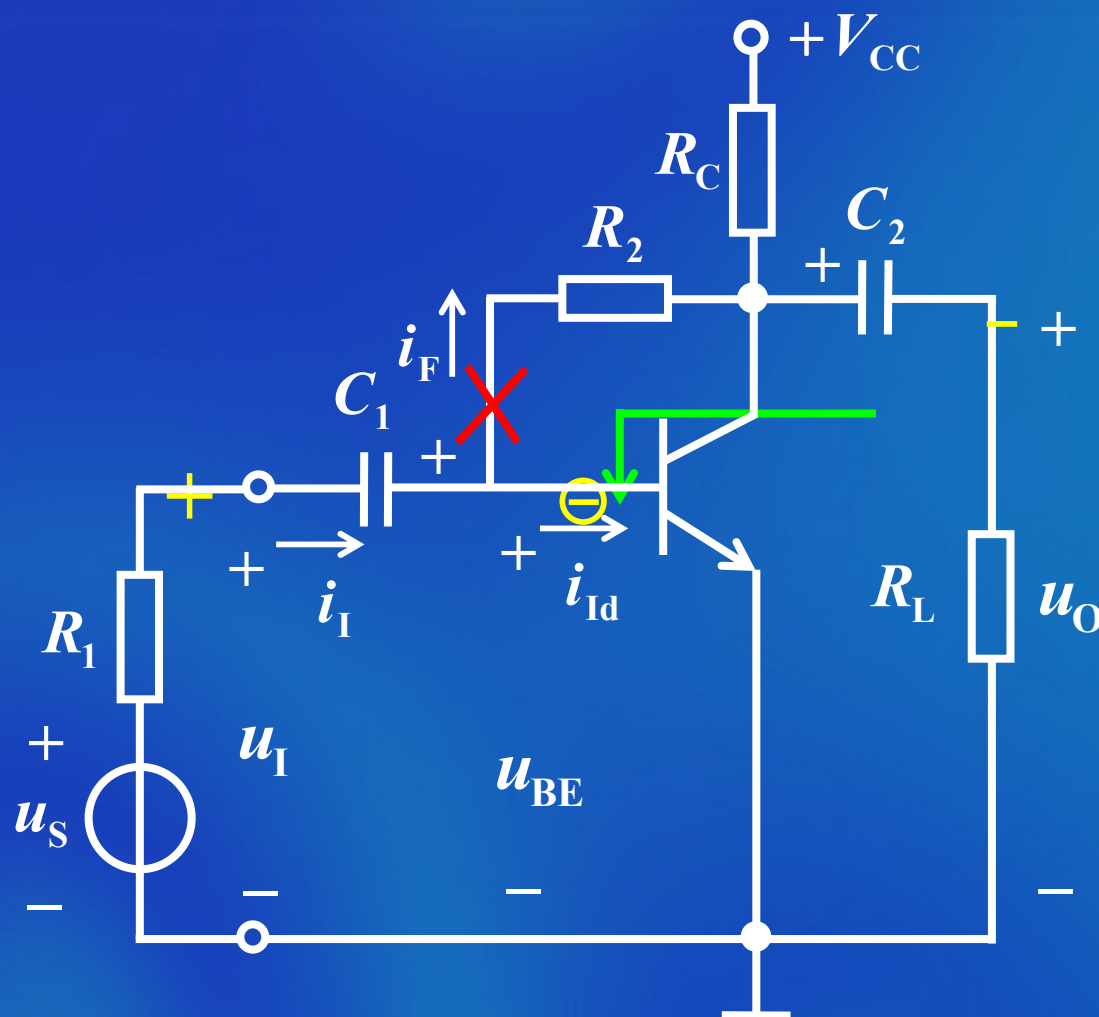
当 $u_I > 0$ 时

$u_O < 0$

反馈信号的
极性也为负

削弱了输入信号

负反馈

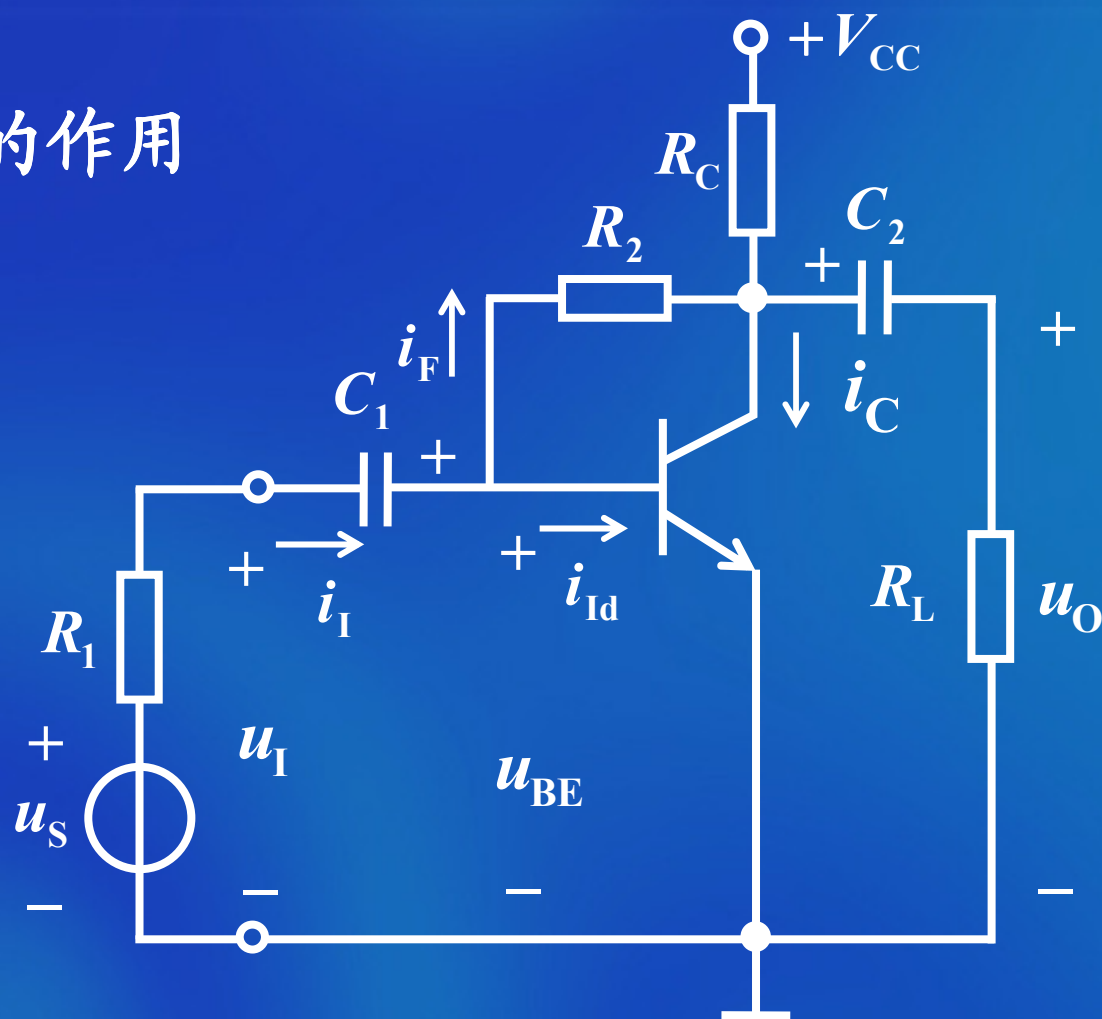


电压并联负反馈

d. 电压并联负反馈的作用

稳定输出电压

稳定输出电压的原理



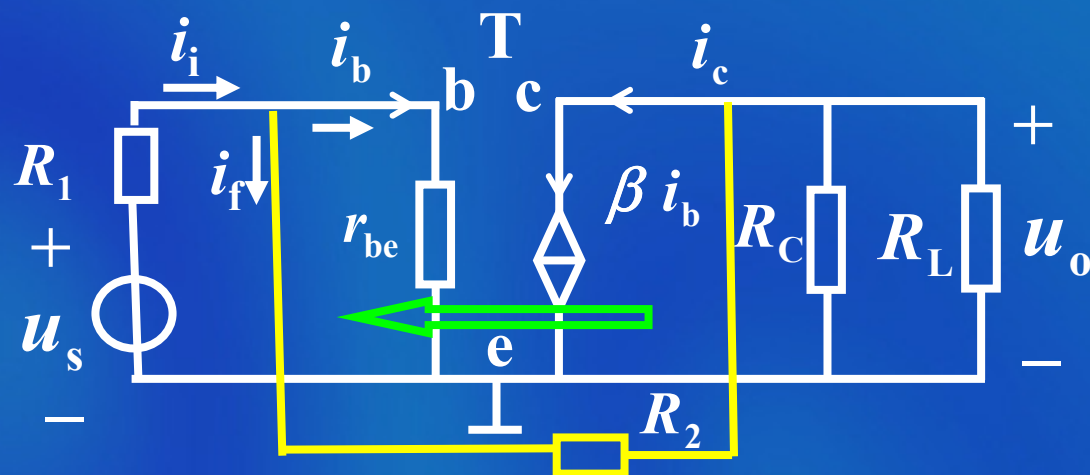
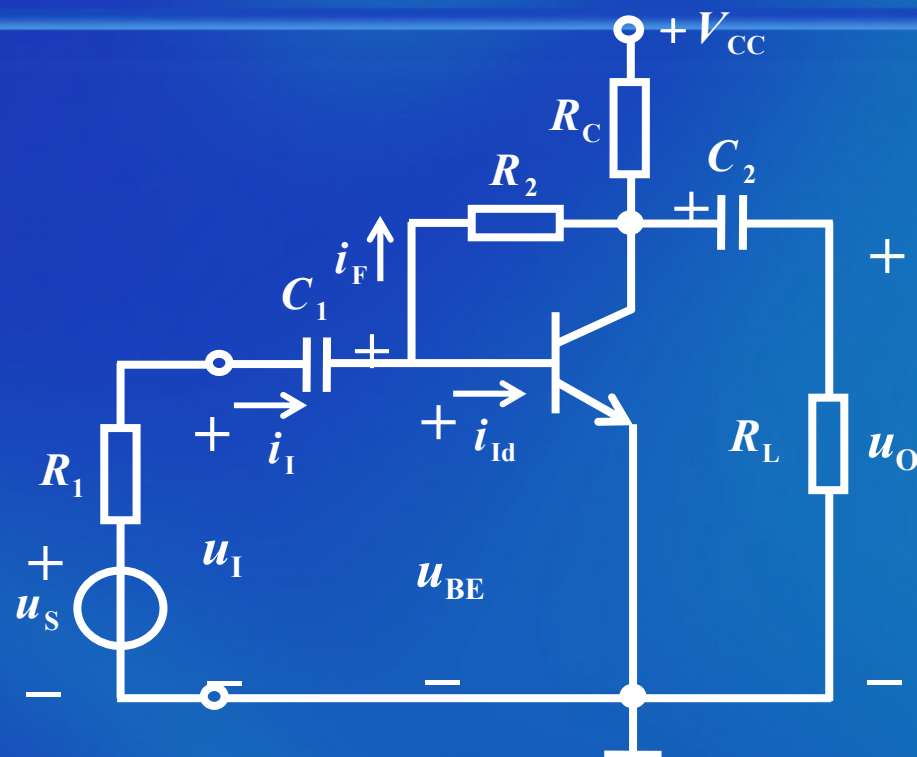
(如果) $U_o \downarrow \Rightarrow I_f \downarrow \Rightarrow I_{id}(=I_b) \uparrow \Rightarrow I_c \uparrow \Rightarrow U_o \uparrow$

e. 当电阻 $R_1=0$ 时

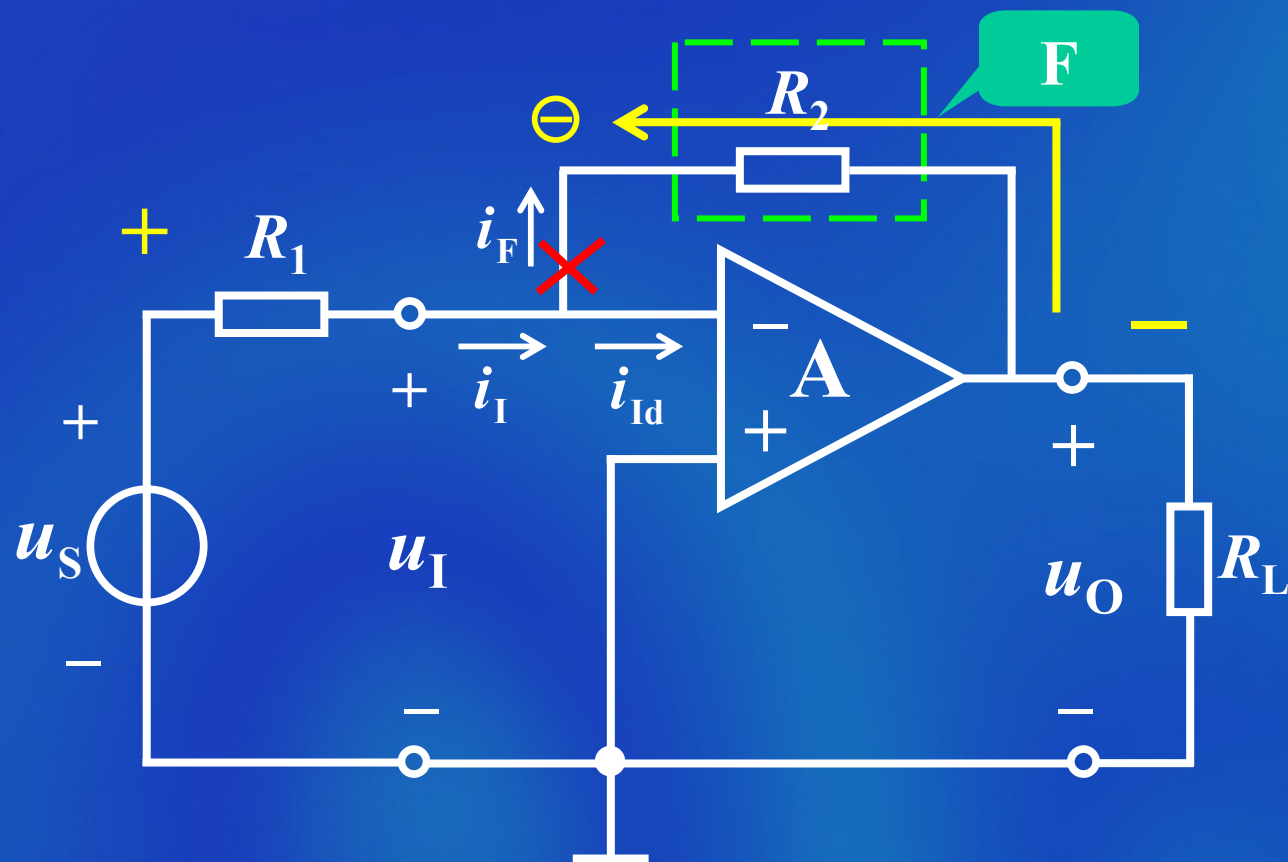
$$i_{id} = i_b = \frac{u_s}{r_{be}}$$

净输入电流的大小，
与反馈电流 i_f 无关。

电路无反馈作用

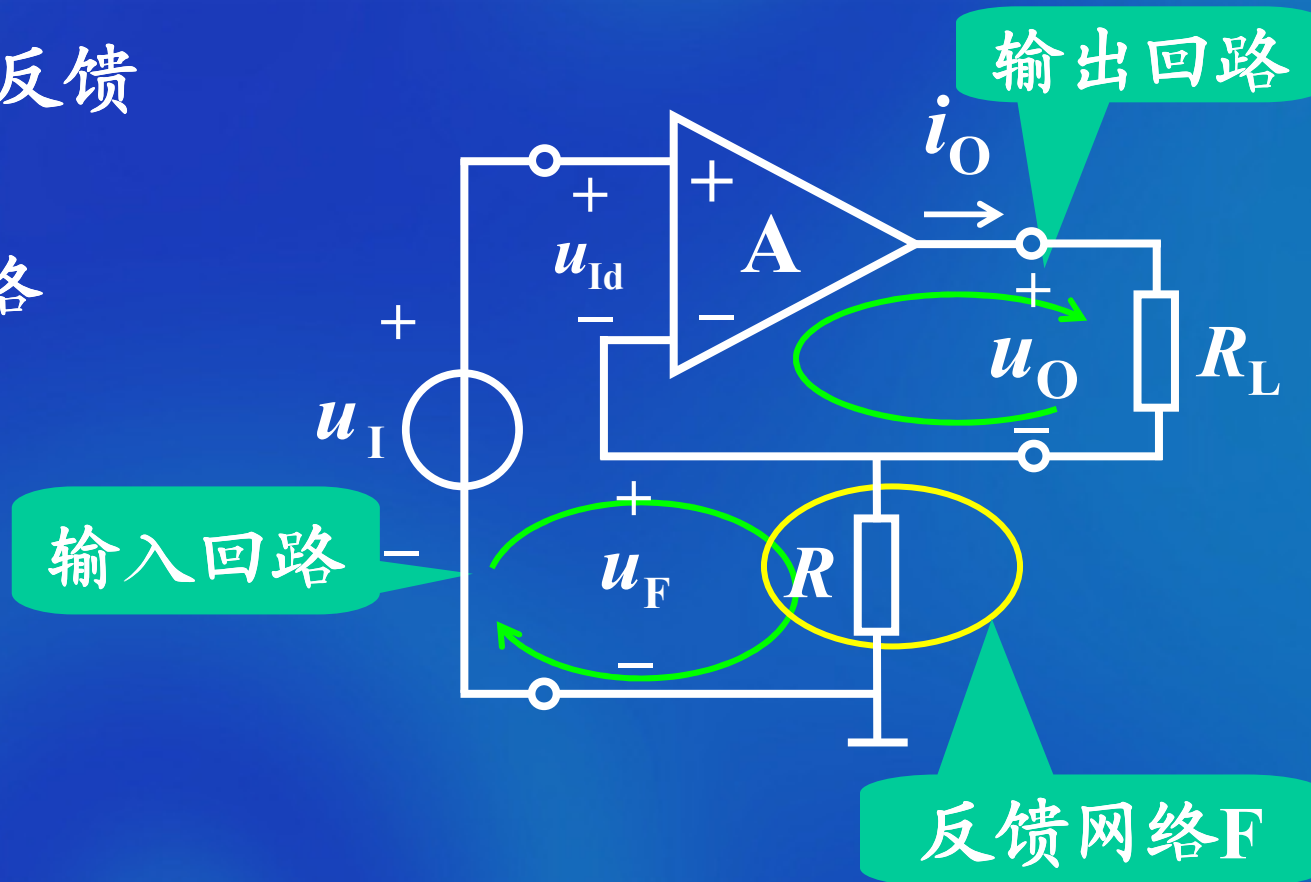


由运算放大器组成的电压并联负反馈电路

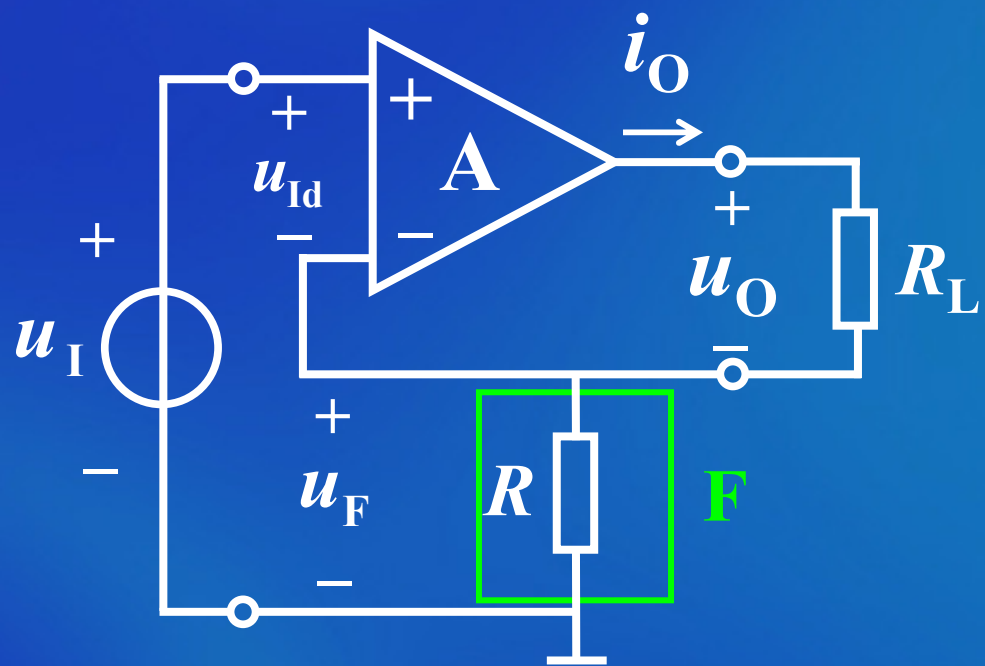


3. 电流串联负反馈

a. 判断反馈网络



b. 负反馈的组态判断



(a) 令 $u_O=0$, $u_F \neq 0$, 属电流反馈。

(b) u_F 与 u_I 串联作用于运放的输入回路, 属串联反馈。

c. 负反馈的判断

利用瞬时极性法

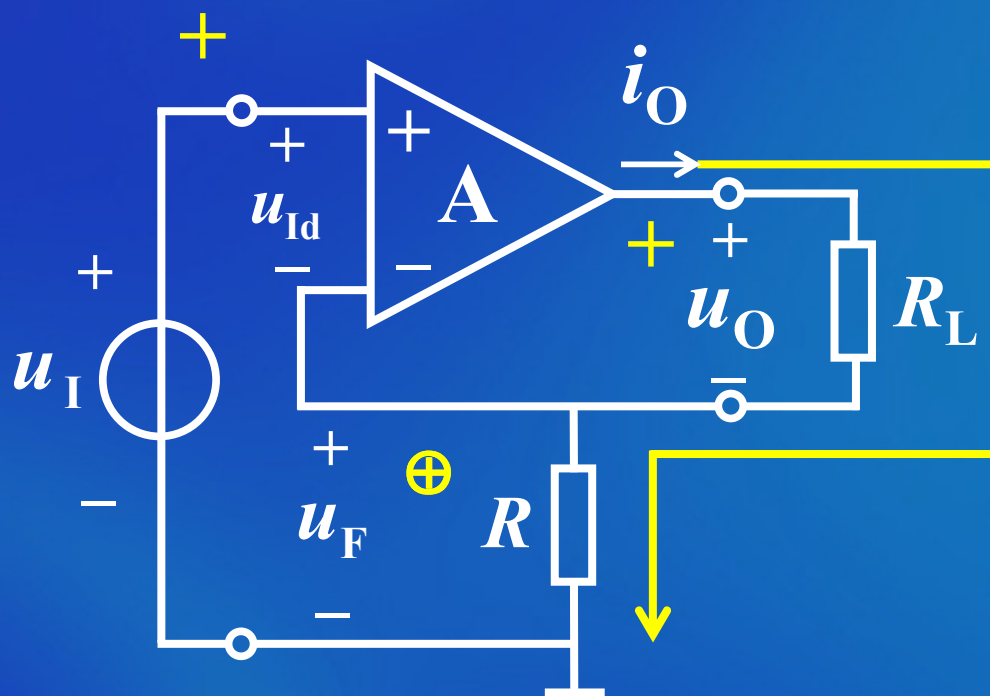
当 $u_I > 0$ 时

$$u_O > 0$$

$$u_F > 0$$

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

负反馈

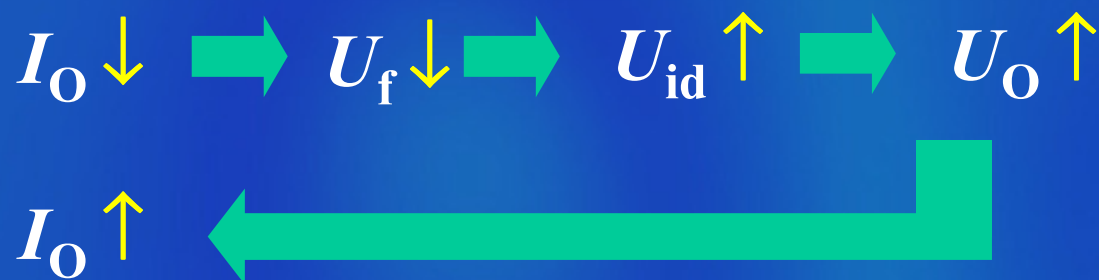
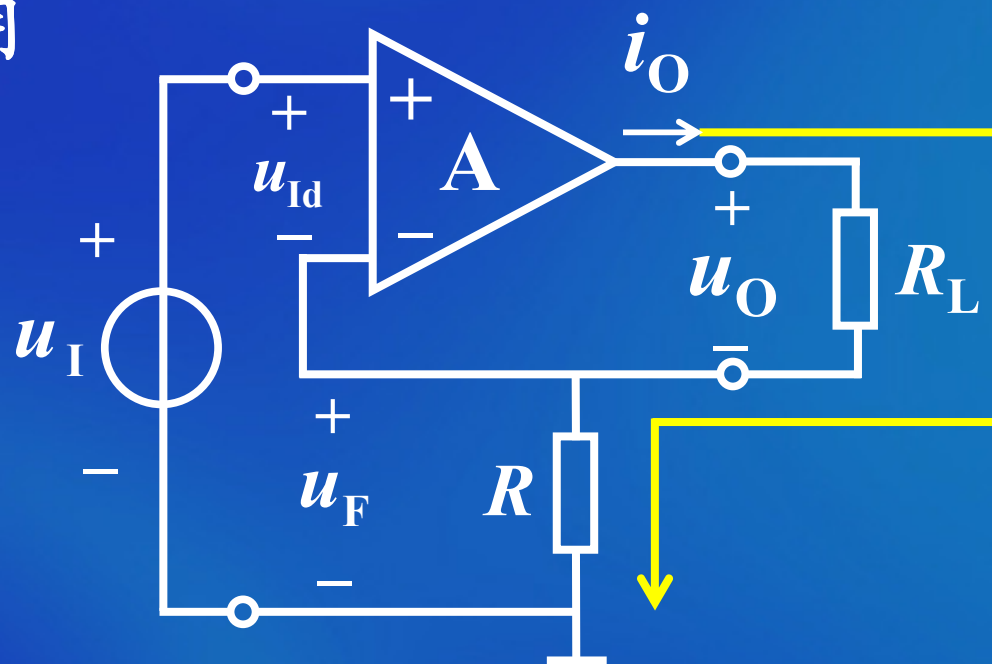


电流串联负反馈

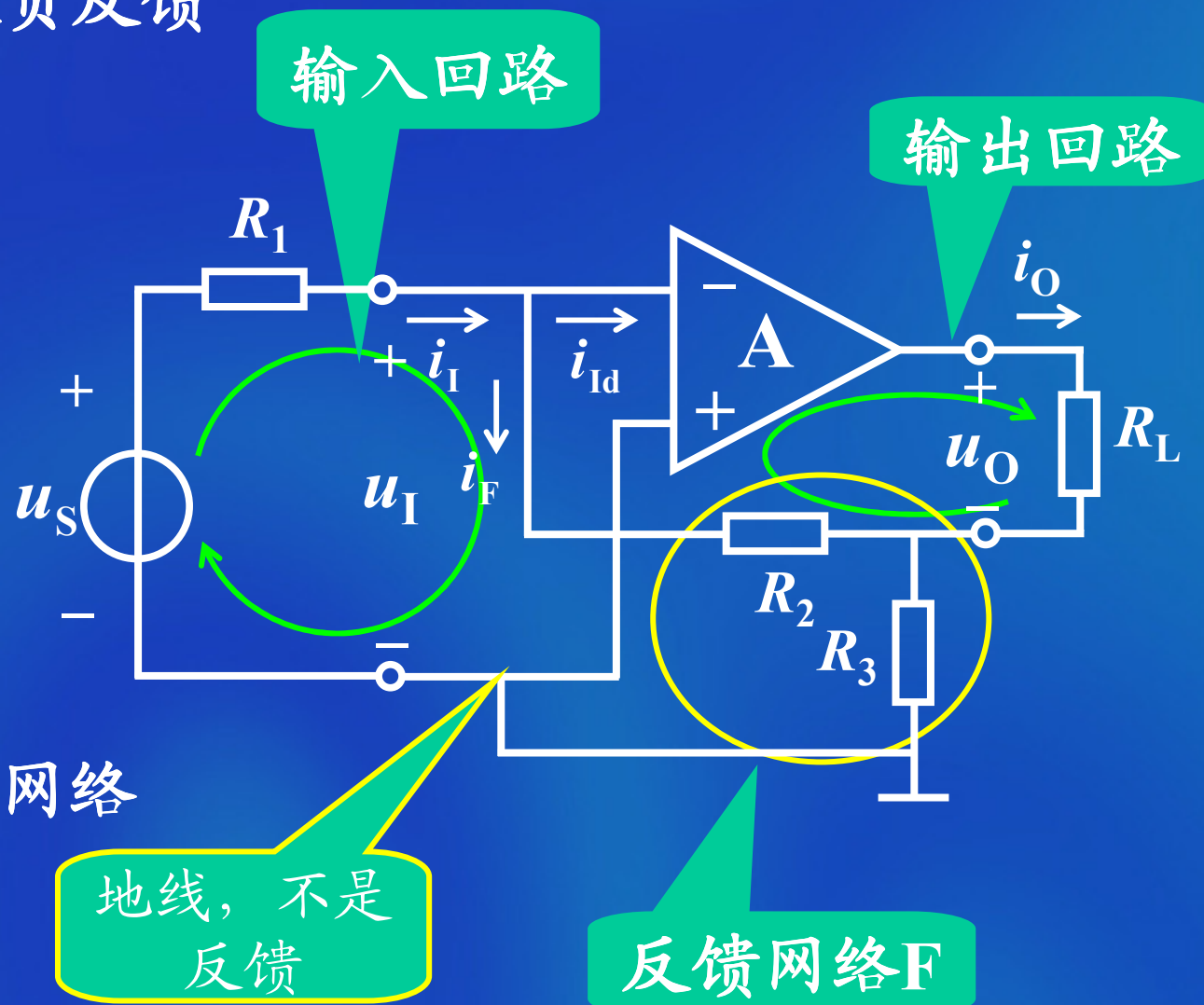
d. 电流串联负反馈的作用

稳定输出电流

稳定输出电流的机理

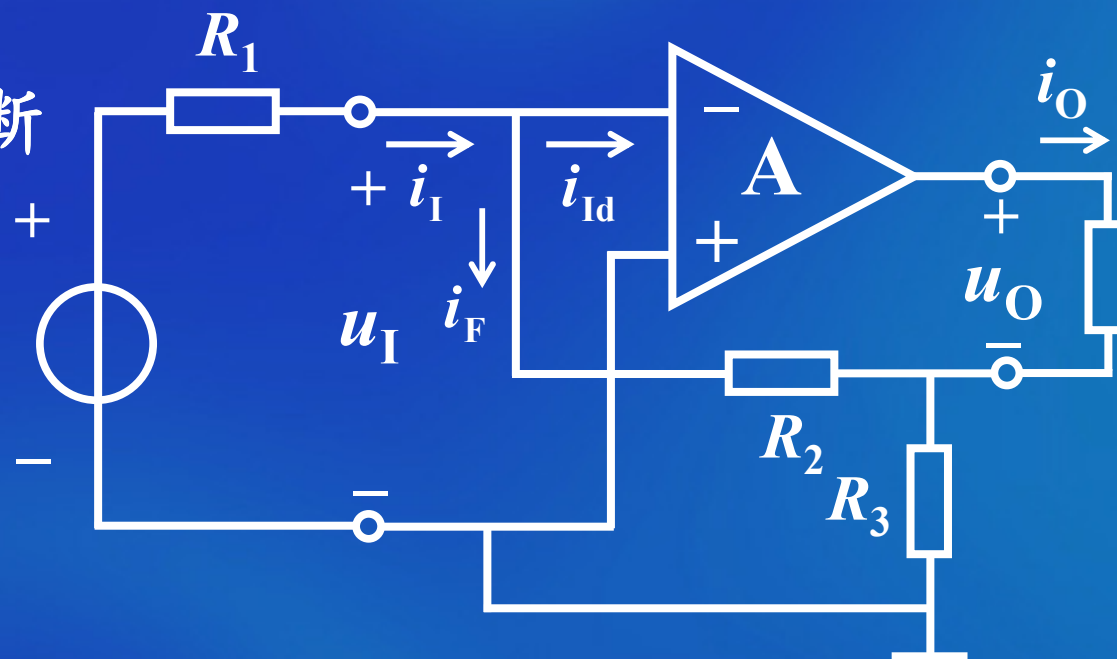


4. 电流并联负反馈



a. 判断反馈网络

b. 负反馈的组态判断



(a) 令 $u_O=0$, $i_F \neq 0$, 属电流反馈。

(b) i_F 与 i_I 并联作用于运放的输入回路, 属并联反馈。

c. 判断反馈极性

利用瞬时极性法

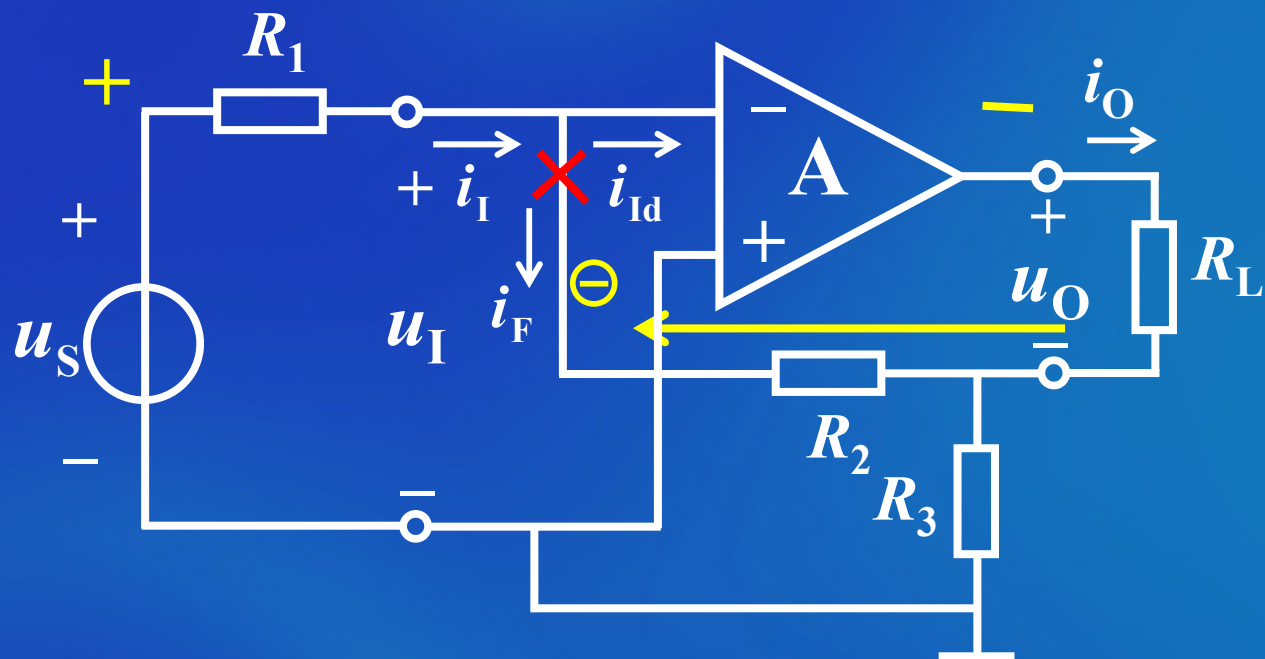
当 $u_I > 0$ 时

$u_O < 0$

反馈信号极性为负

削弱了输入信号

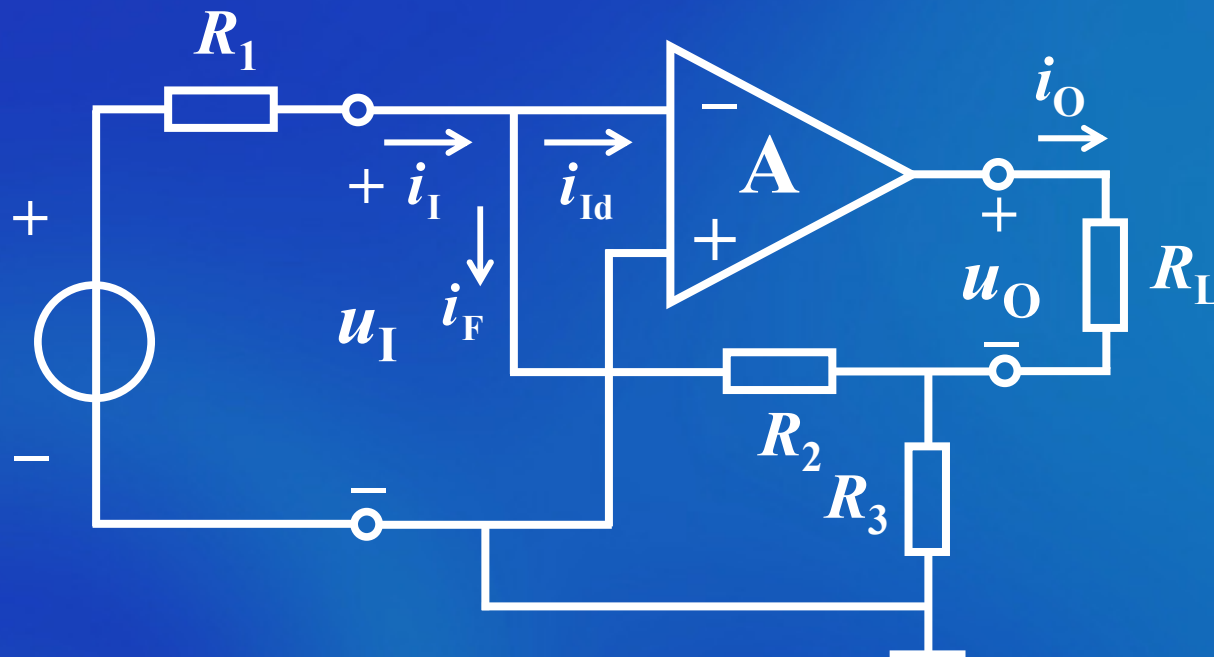
负反馈



电流并联负反馈

d. 电流并联负反馈的作用

稳定输出电流



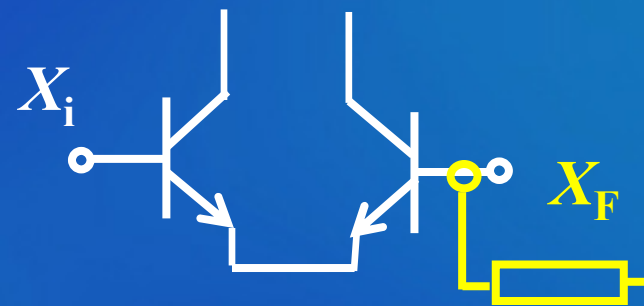
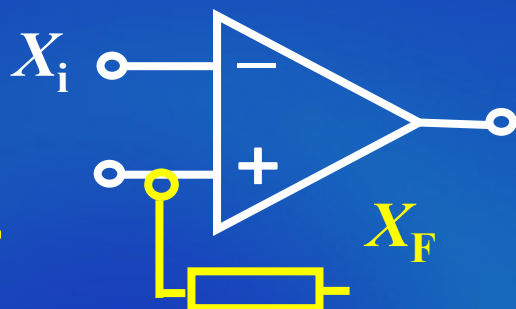
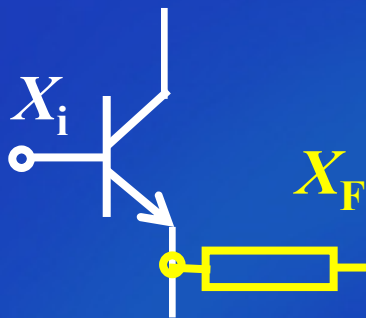
稳定输出电流的机理

$$I_O \downarrow \Rightarrow I_f \downarrow \Rightarrow I_{id} \uparrow \Rightarrow I_O \uparrow$$

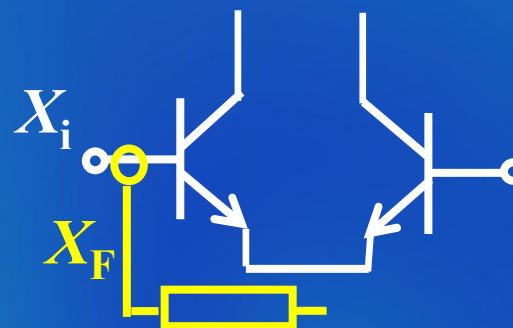
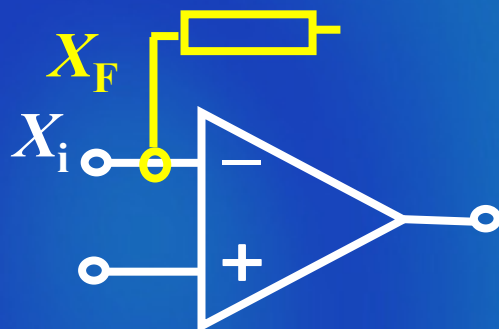
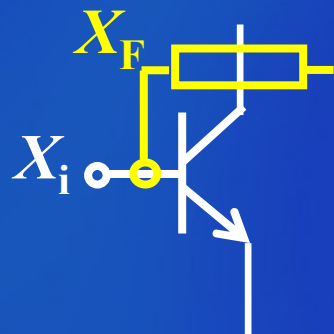
总 结

- 电压负反馈稳定输出电压
- 电流负反馈稳定输出电流

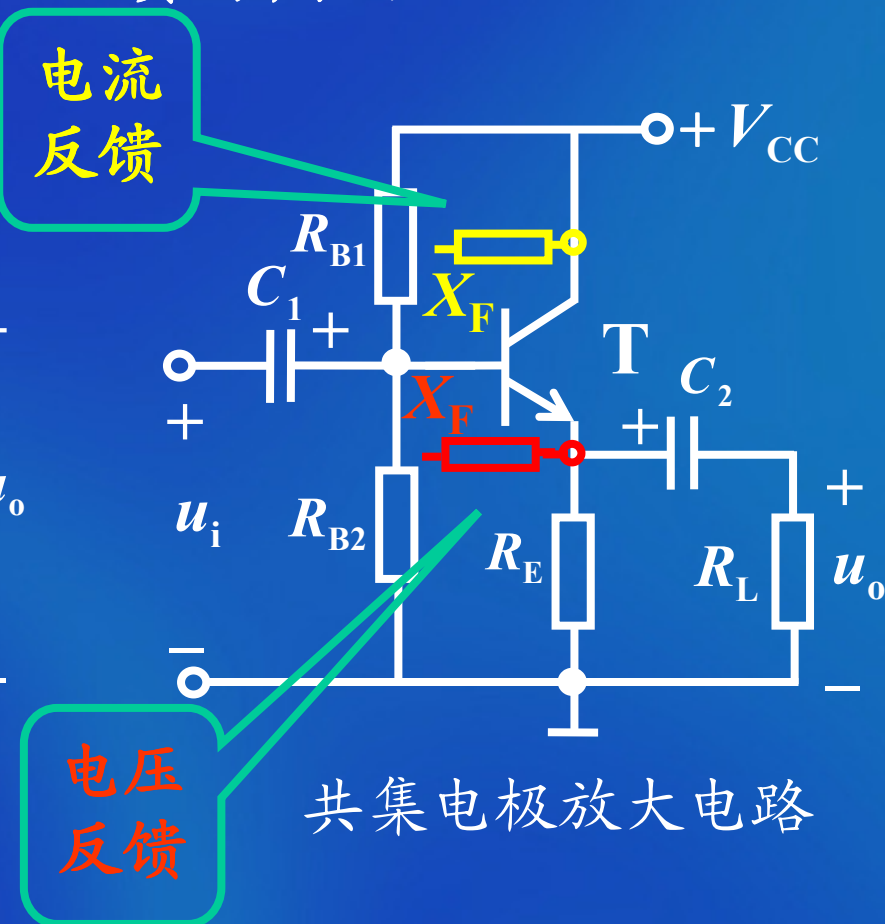
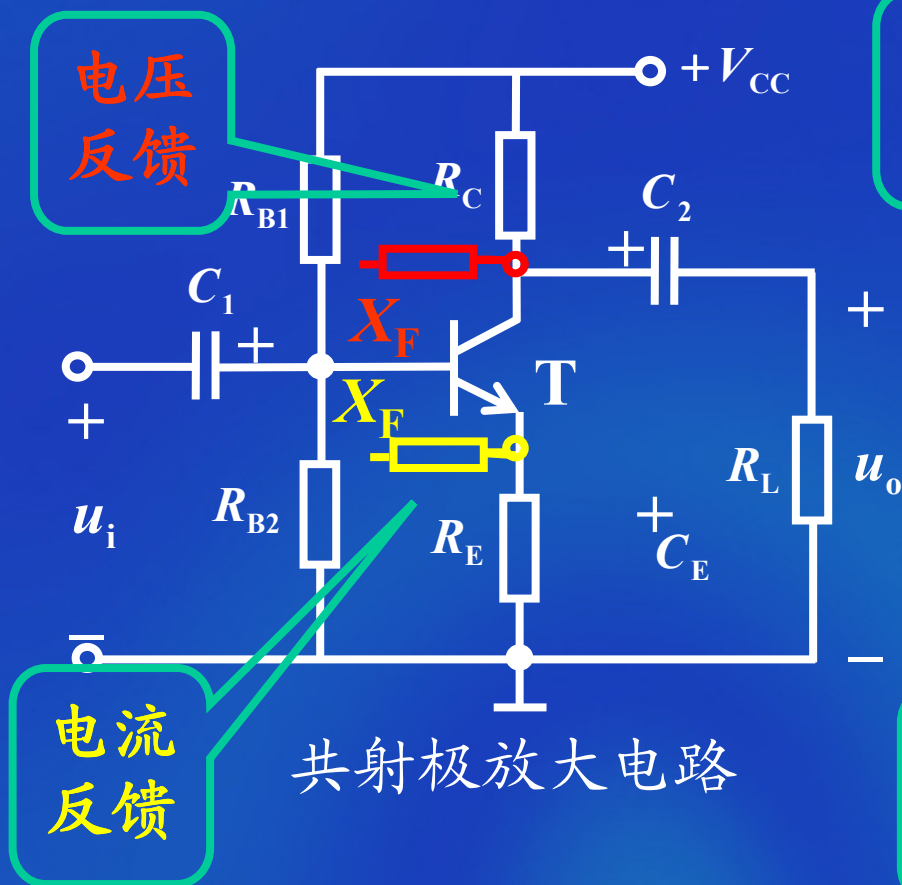
串联反馈



并联反馈



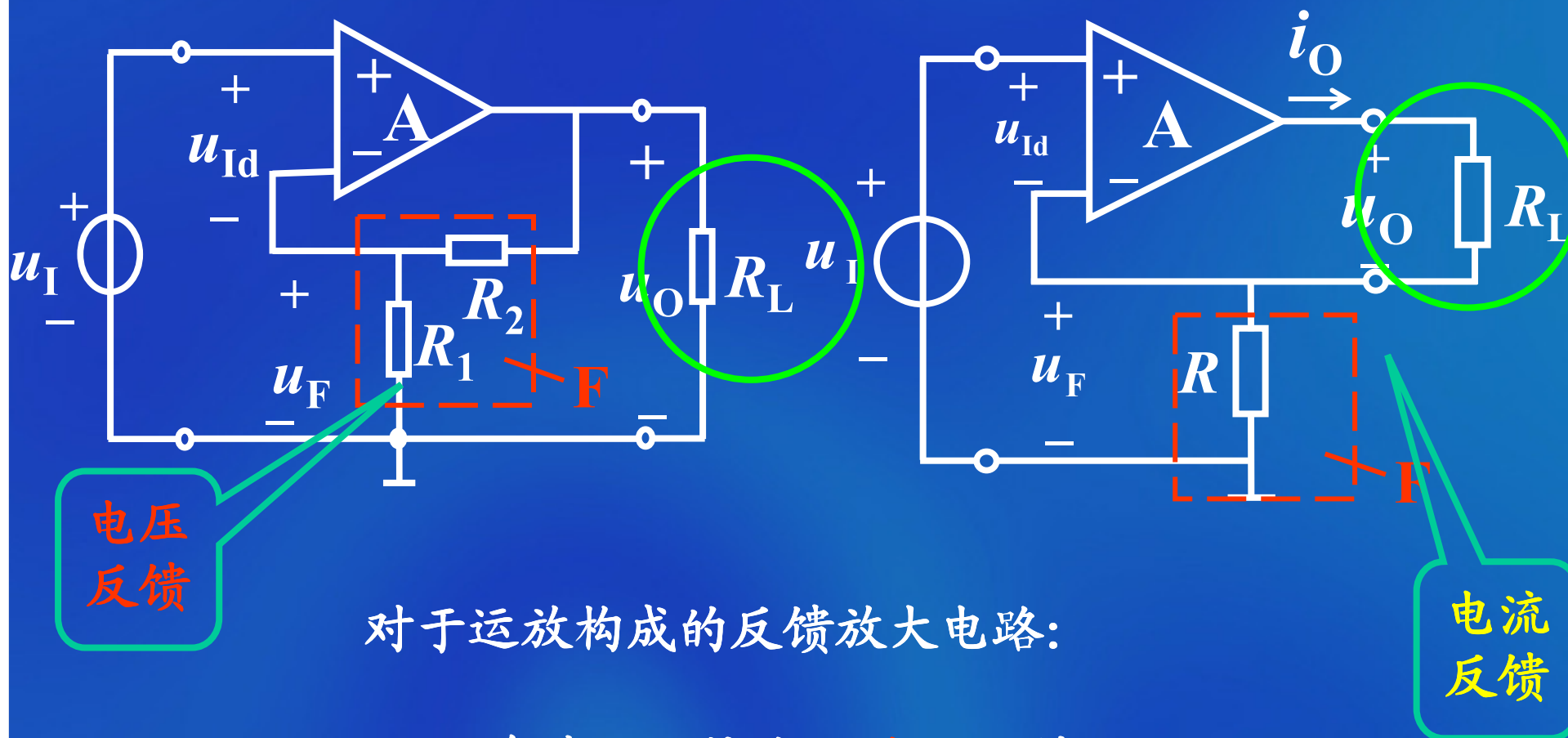
电压与电流反馈的判别:



与负载所在电极比较:

同极为“压”，异极为“流”

电压与电流反馈的判别:

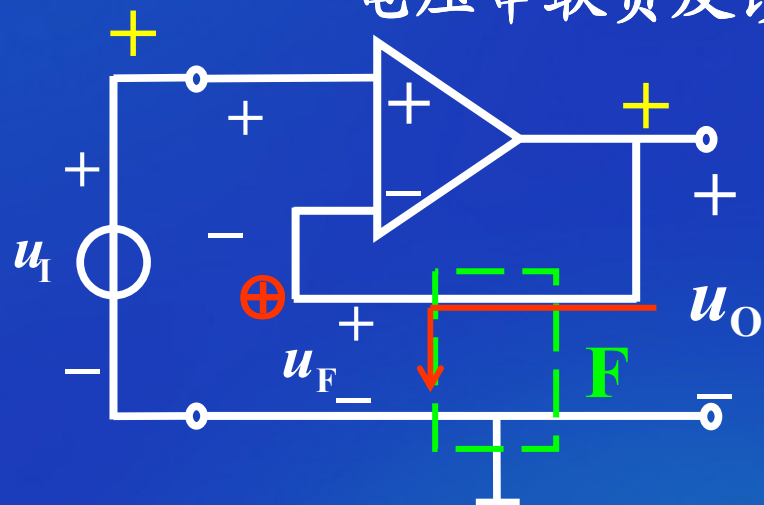


对于运放构成的反馈放大电路:

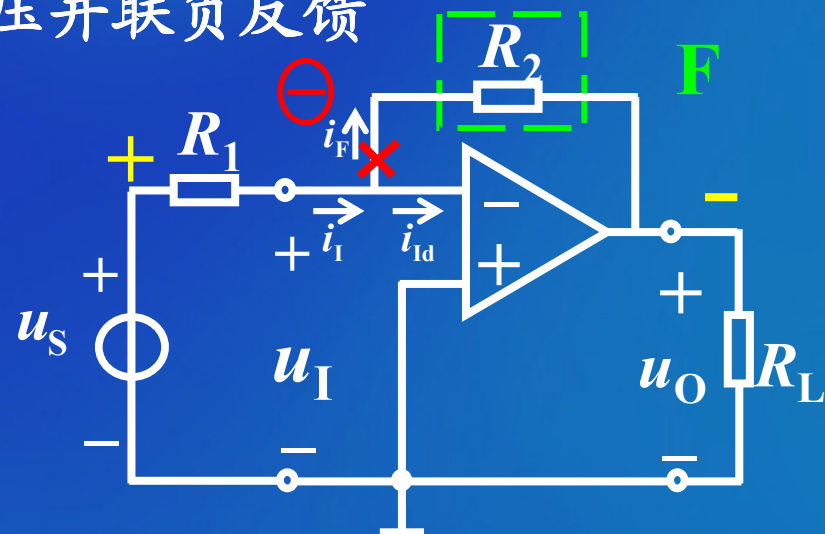
负载下端接地----电压反馈

负载下端接反馈网络----电流反馈

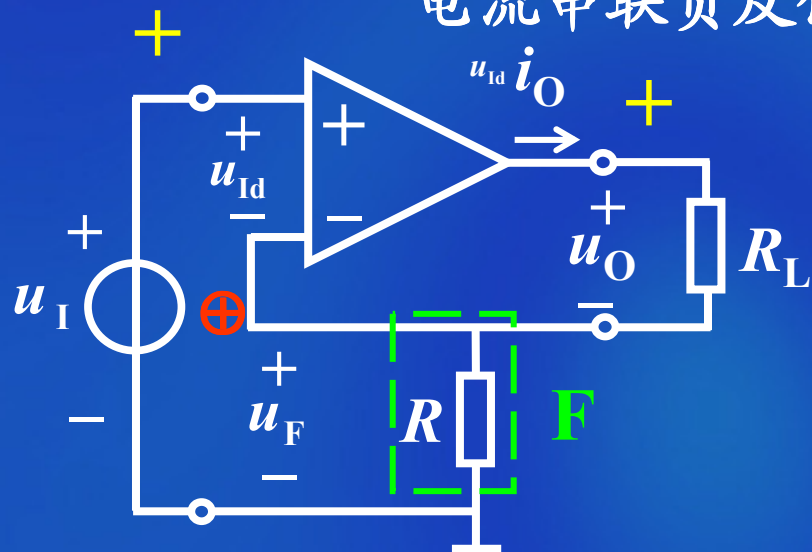
电压串联负反馈



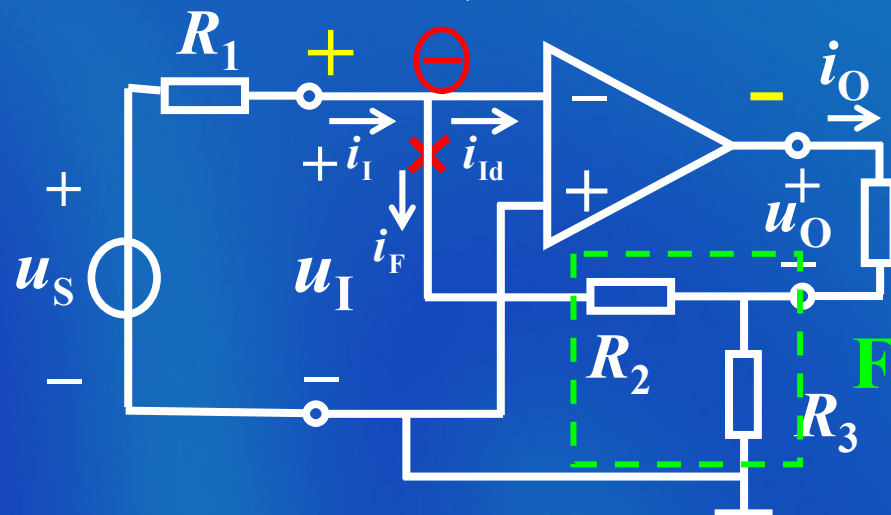
电压并联负反馈



电流串联负反馈



电流并联负反馈



反馈极性的判别方法

- 串联反馈——原极性与反馈极性
相同---负反馈 而 相反---正反馈

“串同并反”

- 并联反馈——原极性与反馈极性
相同---正反馈 而 相反---负反馈

非
负
即
正

5.1.4 负反馈放大电路的一般表达式

方框图

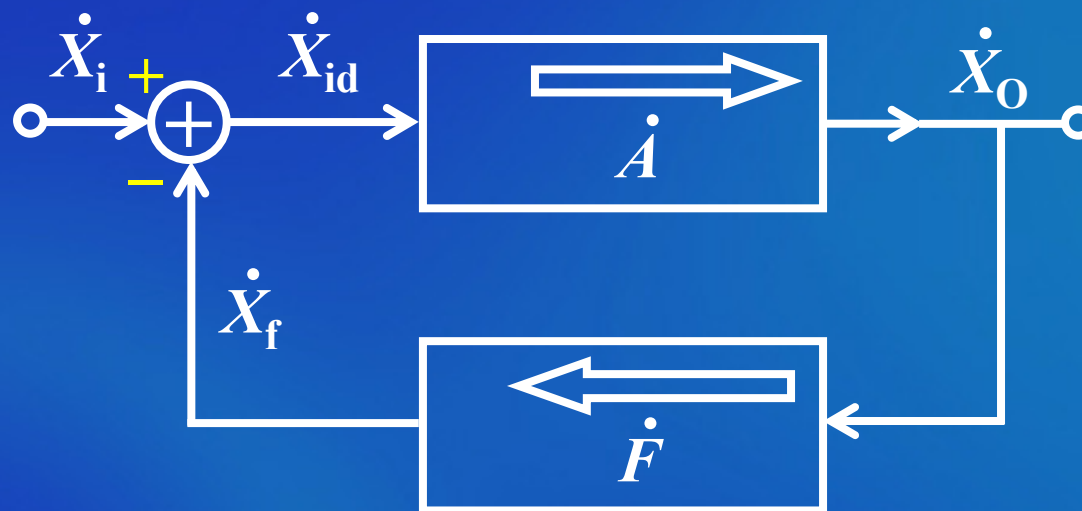
图中

开环增益 $\dot{A} = \dot{X}_0 / \dot{X}_{id}$

闭环增益 $\dot{A}_f = \dot{X}_0 / \dot{X}_i$

反馈系数 $\dot{F} = \dot{X}_f / \dot{X}_0$

净输入信号 $\dot{X}_{id} = \dot{X}_i - \dot{X}_f$



由以上各式得

$$\dot{X}_0 = \dot{A}(\dot{X}_i - \dot{X}_f)$$

将 $\dot{X}_f = \dot{F}\dot{X}_0$ 代入上式得

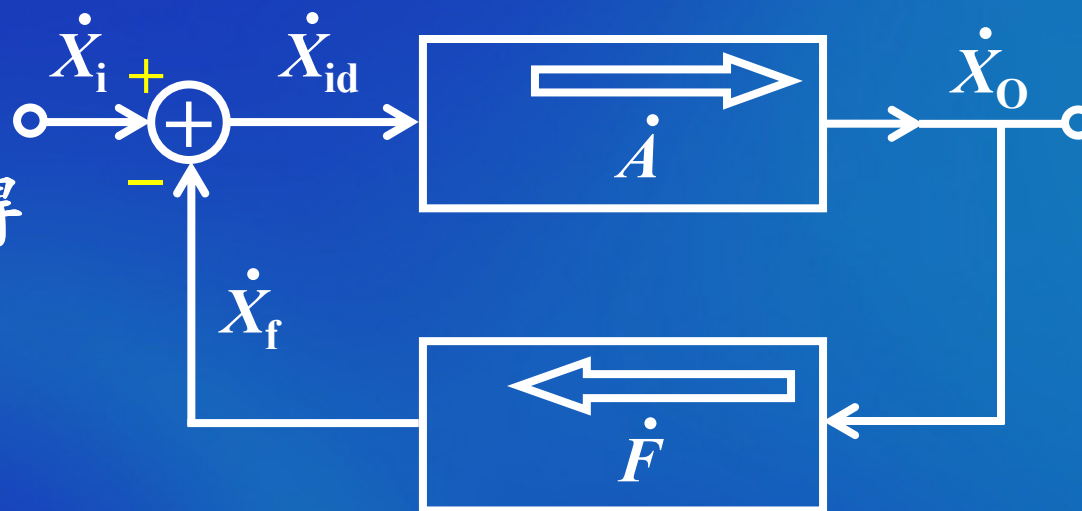
$$\dot{X}_0 = \dot{A}(\dot{X}_i - \dot{F}\dot{X}_0)$$

$$\dot{X}_0 = \frac{\dot{A}\dot{X}_i}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

闭环增益

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_0}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

$\dot{A}\dot{F}$ ——环路增益



环路增益 $\dot{A}\dot{F}$ 的意义

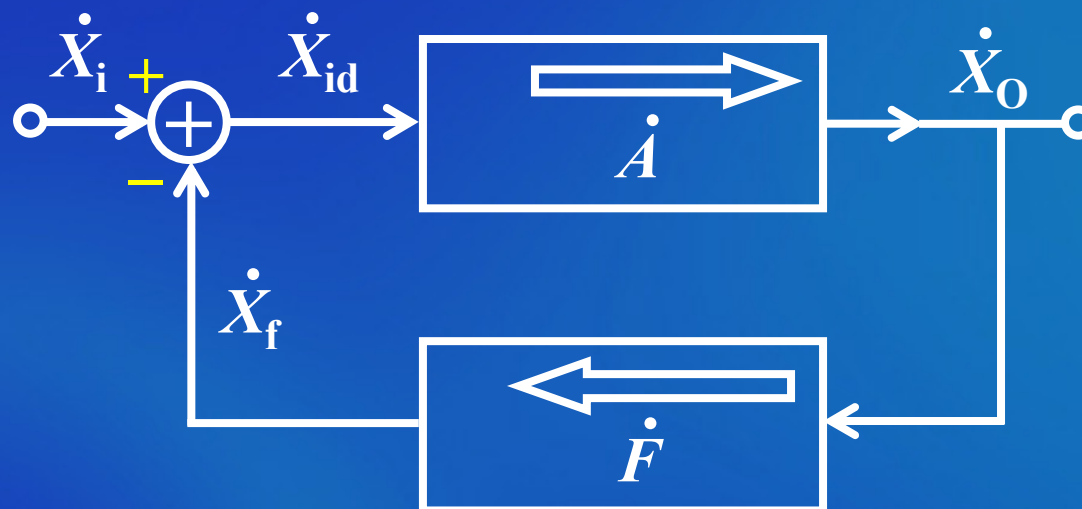
在图示电路中

$$\dot{X}_O = \dot{A} \dot{X}_{id}$$

所以

$$\dot{X}_f = \dot{F} \dot{X}_O = \dot{F} \dot{A} \dot{X}_{id}$$

即反馈信号是净输入信号的 $\dot{A}\dot{F}$ 倍



负反馈放大电路的放大倍数的一般表达式

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

即 闭环放大倍数下降到开环放大倍数的 $1/(1+AF)$

$D=1+AF$ 称为反馈深度

a. 放大倍数下降的原因

由于 $\dot{X}_{id} = \dot{X}_i - \dot{X}_f$

$$\dot{X}_f = F\dot{X}_o = FA\dot{X}_{id}$$

故
$$\dot{X}_{id} = \frac{\dot{X}_i}{1+AF}$$

即引入负反馈之后，电路的净输入信号降为原输入信号的 $1/(1+AF)$ 。

b. 对负反馈放大电路放大倍数的一般表达式讨论

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

(a) 当 $|1 + \dot{A}\dot{F}| > 1$ 时 $|\dot{A}_f| < |\dot{A}|$ 电路引入负反馈

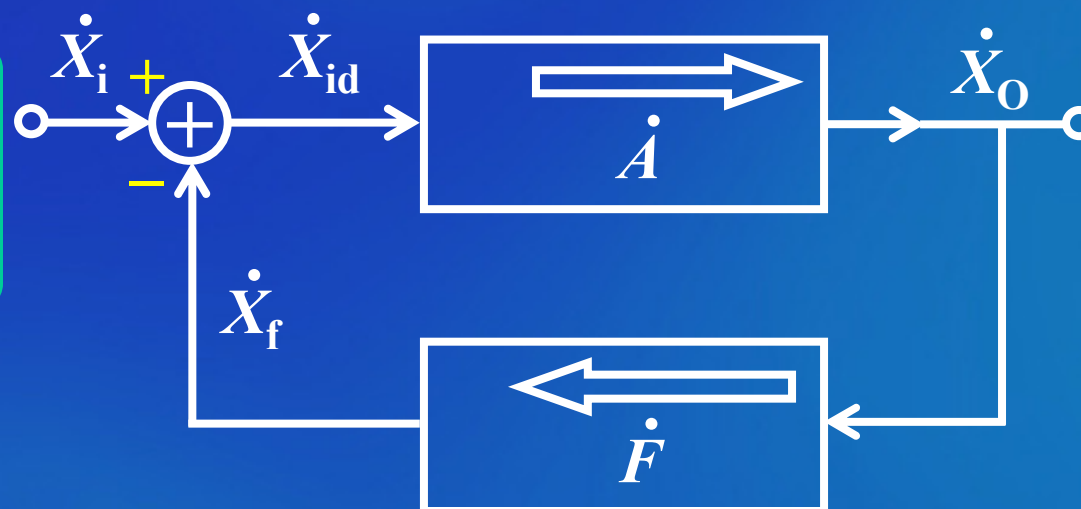
(b) 当 $|1 + \dot{A}\dot{F}| < 1$ 时 $|\dot{A}_f| > |\dot{A}|$ 电路引入正反馈

(c) 当 $|1 + \dot{A}\dot{F}| = 1$ 时 $|\dot{A}_f| = |\dot{A}|$ 电路没有反馈

(d) 当 $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$ 时 称为深反馈

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

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



此时

闭环放大倍数 \dot{A}_f 只取决于反馈系数 \dot{F}

主要特点 {

- a. 便于设计、分析和计算放大电路
- b. 提高了闭环放大倍数的稳定性

e. 当 $|1+\dot{A}\dot{F}|=0$ 时

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

上式成立的条件 $\begin{cases} X_i=0 \\ X_o \neq 0 \end{cases}$

即电路没有输入，但仍有一定的输出。

电路产生了自激振荡

思考题

1. 在深负反馈的条件下，由于闭环放大倍数 $A_f \approx 1/F$ ，与管子参数几乎无关，因此可以任意选用晶体管来组成放大级，管子的参数也就没有什么意义了。这种说法对吗？

5.2 负反馈对放大电路性能的影响

5.2.1 降低了放大倍数

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

5.2.2 稳定被取样的输出信号

电压反馈可以稳定输出电压

电流反馈可以稳定输出电流

5.2.3 提高放大倍数的稳定性

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

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

将 (2) / (1)
$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + AF} \frac{dA}{A}$$

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

5.2.4 扩展通频带

已知高频区电路开环放大倍数

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

式中

A_m 为中频区的开环放大倍数

f_H 为上限截止频率

设反馈系数为实数F（为方便）

引入负反馈后高频区闭环放大倍数为

$$\dot{A}_{\text{Hf}} = \frac{\dot{A}_{\text{H}}}{1 + \dot{A}_{\text{H}}F} \quad \text{将} \quad \dot{A}_{\text{H}} = \frac{A_{\text{m}}}{1 + \text{j} \frac{f}{f_{\text{H}}}} \quad \text{代入上式得}$$
$$\dot{A}_{\text{Hf}} = \frac{\frac{A_{\text{m}}}{1 + \text{j} \frac{f}{f_{\text{h}}}}}{1 + \frac{A_{\text{m}}}{1 + \text{j} \frac{f}{f_{\text{h}}}} F} = \frac{\frac{A_{\text{m}}}{1 + \text{j} \frac{f}{f_{\text{h}}}}}{1 + \text{j} \frac{f}{f_{\text{h}}(1 + A_{\text{m}}F)}} = \frac{A_{\text{mf}}}{1 + \text{j} \frac{f}{f_{\text{hf}}}}$$

$$\dot{A}_{\text{Hf}} = \frac{A_{\text{mf}}}{1 + \text{j} \frac{f}{f_{\text{Hf}}}}$$

式中

$$A_{\text{mf}} = \frac{A_{\text{m}}}{1 + A_{\text{m}}F}$$

$$f_{\text{Hf}} = f_{\text{H}}(1 + A_{\text{m}}F)$$

f_{Hf} 为引入负反馈后的电路上限截止频率

同理可证，引入负反馈后的电路下限截止频率

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

引入负反馈后电路的通频带

$$\begin{aligned} f_{bwf} &= f_{Hf} - f_{Lf} \\ &\approx f_{Hf} \\ &= (1 + A_m F) f_H \end{aligned}$$

由于开环电路的通频带

$$f_{bw} = f_h - f_L \approx f_h \quad \text{故} \quad f_{bwf} = (1 + A_m F) f_h \\ \approx (1 + A_m F) f_{bw}$$

增益带宽积

$$A_{mf} f_{bwf} = A_m f_{bw} = \text{常数}$$

（注：只适合一阶惯性环节的放大电路）

可见，放大电路扩展通频带是以牺牲放大倍数来换取的。

5.2.5 减小非线性失真

减小非线性失真原理

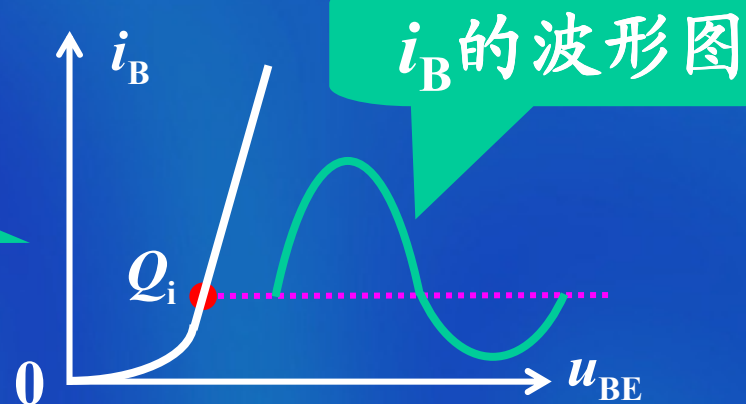
开环放大电路

输出信号

输入信号



非线性失真



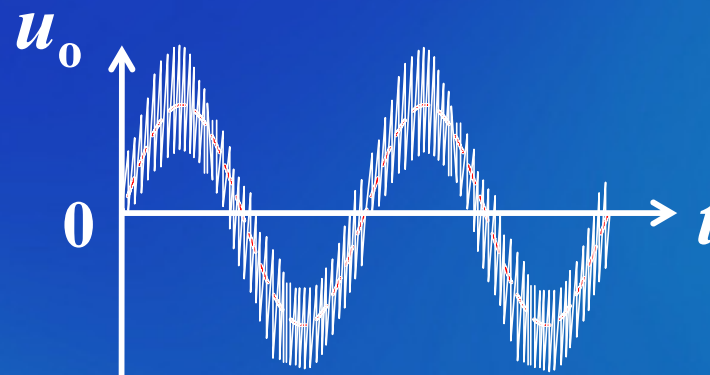
上页

下页

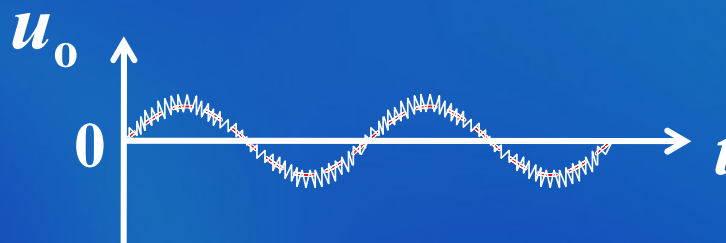
后退

5.2.6 抑制反馈环内的干扰和噪声

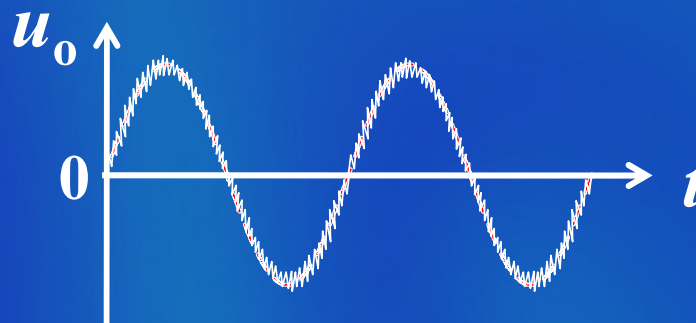
无反馈时信号与
噪声的输出波形



有反馈时信号与
噪声的输出波形



提高输入信号幅
度后的输出波形



5.2.7 对输入电阻和输出电阻的影响

1. 对输入电阻的影响

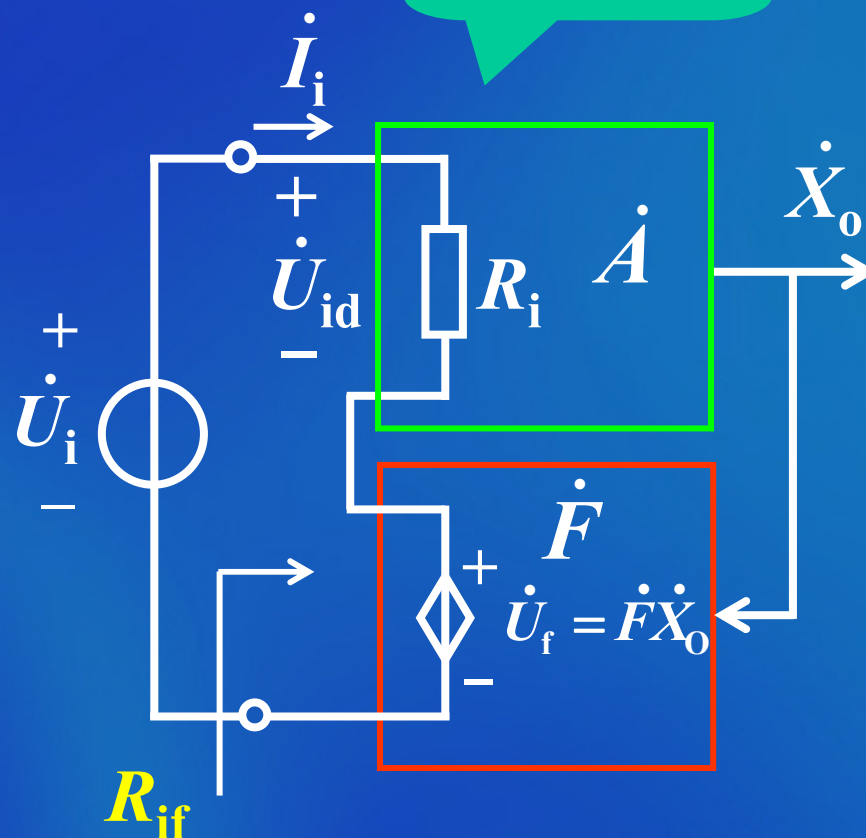
(1) 串联负反馈

基本放大电路的输入电阻

$$R_i = \frac{U_{id}}{I_i}$$

负反馈放大电路的输入电阻

$$R_{if} = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_{id} + U_f}{I_i}$$

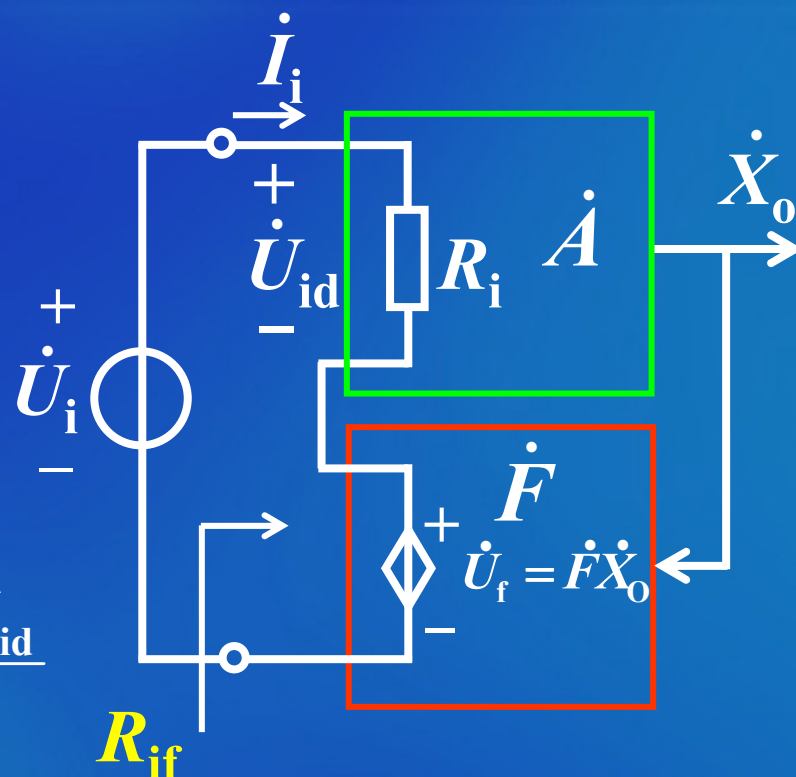


由于 $X_o = AU_{id}$

$$U_f = FX_o = AFU_{id}$$

故 输入电阻

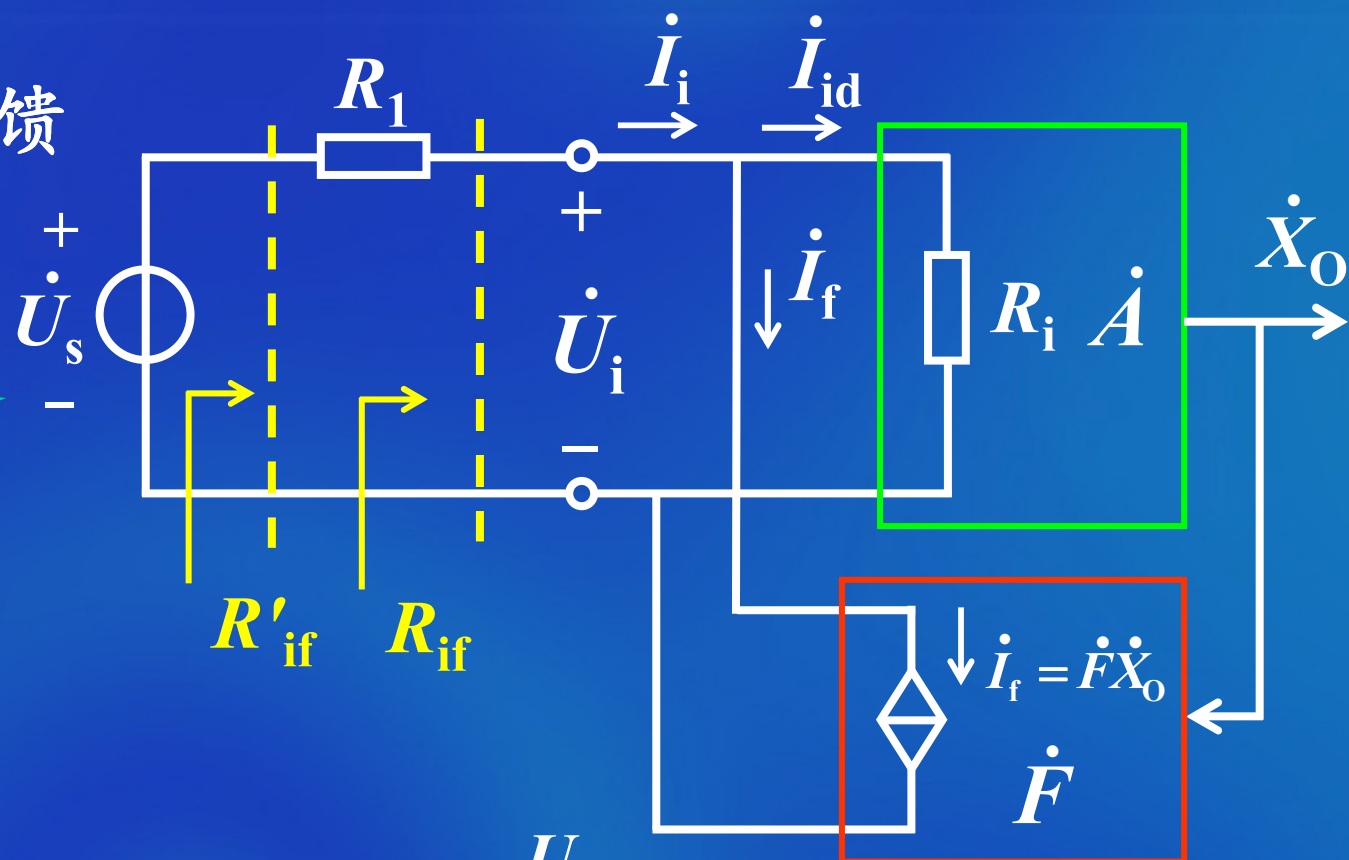
$$R_{if} = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_{id} + U_f}{I_i} = \frac{U_{id} + AFU_{id}}{I_i} = \frac{U_{id}(1 + AF)}{I_i} = (1 + AF)R_i$$



串联负反馈增大输入电阻

(2) 并联负反馈

方框图



基本放大电路的输入电阻 $R_i = \frac{U_i}{I_{id}}$

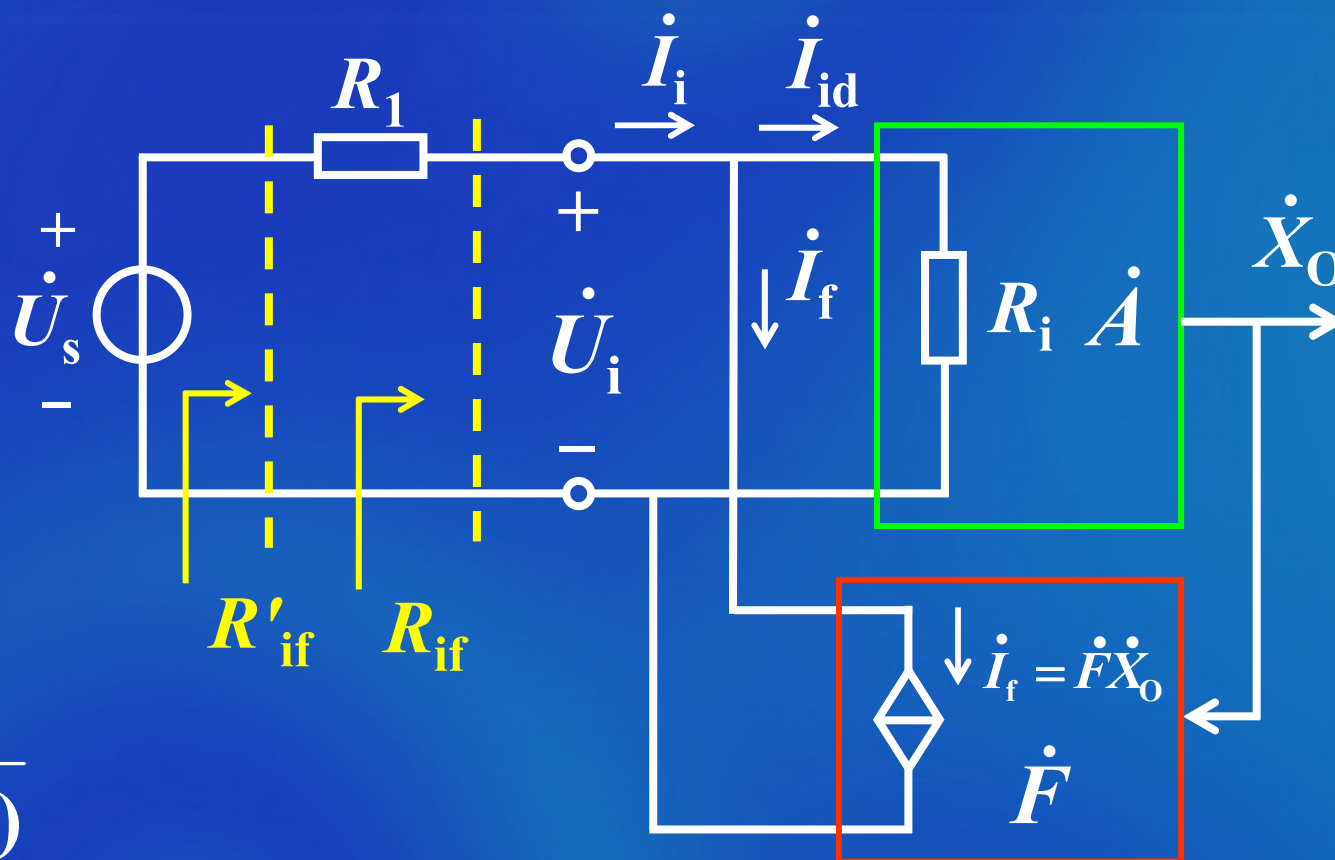
负反馈放大电路输入电阻 $R_{if} = \frac{U_i}{I_i}$

$$R_{if} = \frac{U_i}{I_{id} + I_f}$$

$$= \frac{U_i}{I_{id} + FAI_{id}}$$

$$= \frac{U_i}{I_{id}(1 + FA)}$$

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



并联负反馈使输入电阻减小

总 结

- 串联电路，电阻增大；
- 串联反馈，提高输入电阻，
- 和开环时相比，输入电阻提高 $1+AF$ 倍

- 并联电路，电阻减小；
- 并联反馈，降低输入电阻，
- 和开环时相比，输入电阻减小 $1/(1+AF)$ 倍

2. 对输出电阻的影响

(1) 电压负反馈

根据输出电阻的定义

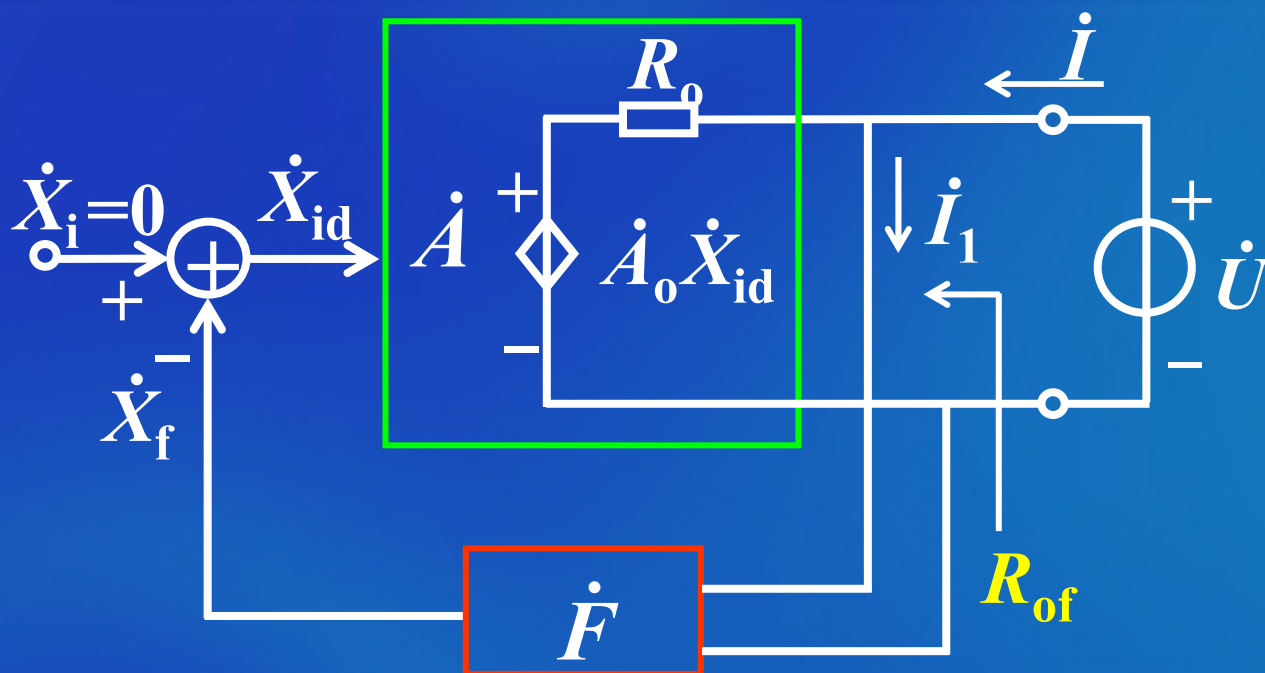
$$R_o = \frac{U}{I} \bigg|_{\substack{R_L = \infty \\ X_i = 0}}$$

画出求输出电阻的等效电路方框图

图中

$$\dot{A}_o = \left. \frac{\dot{U}_o}{\dot{X}_{id}} \right|_{R_L = \infty}$$

由图可知



$$U = IR_o + A_o X_{id} \quad X_{id} = X_i - X_f = -X_f \quad X_f = FX_o = FU$$

$$U = IR_o - A_o FU \quad \text{故输出电阻}$$

$$R_{of} = \frac{U}{I} = \frac{R_o}{1 + A_o F}$$

电压负反馈使
输出电阻减小

(2) 电流负反馈

求输出电阻的等效电路

图中

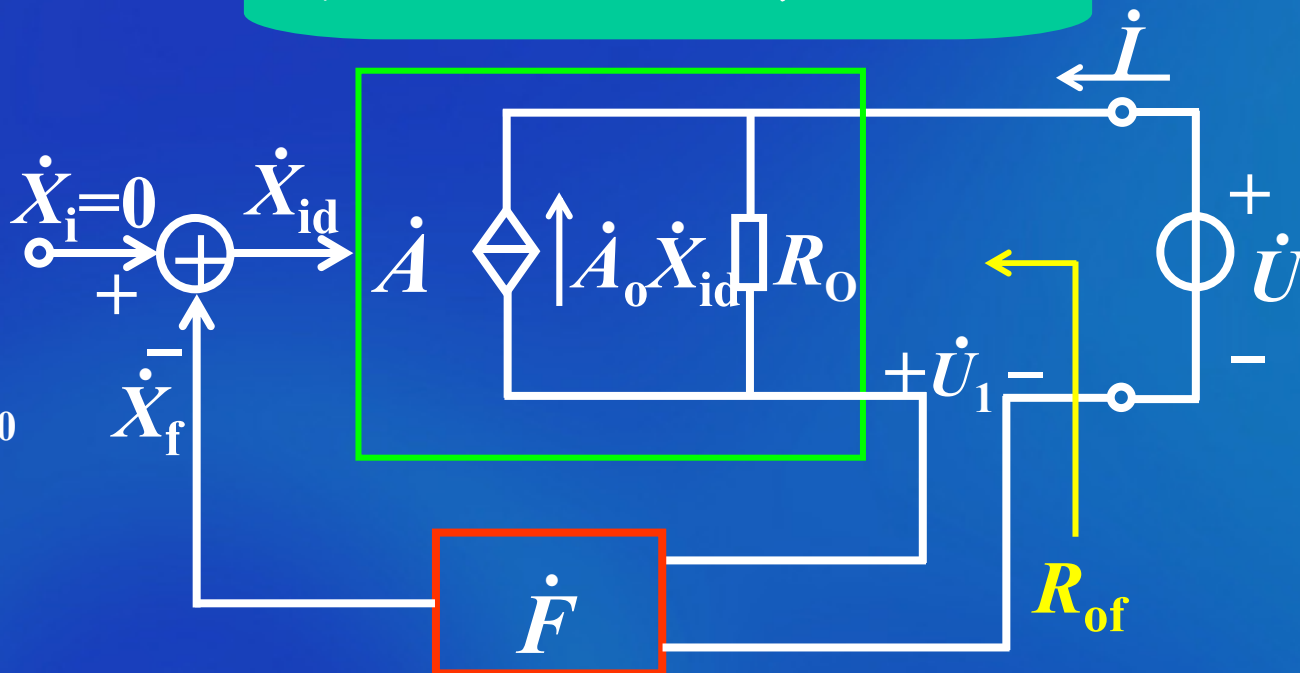
$$\dot{A}_o = \left. \frac{\dot{I}_o}{\dot{X}_{id}} \right|_{R_L=0}$$

推导过程略

则

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

电流负反馈使
输出电阻增大



总 结

- 电压反馈，稳定输出电压——恒压源；
- 恒压源，内阻小；
- 电压反馈减小输出电阻，
- 减小到基本放大电路输出电阻的 $1/(1+A_oF)$ 倍。
- 电流反馈，稳定输出电流——恒流源；
- 恒流源，内阻大；
- 电流反馈提高输出电阻，
- 提高到基本放大电路输出电阻的 $1+A_oF$ 倍。

负反馈对放大电路性能的影响

- 1 降低了放大倍数
 - 2 稳定被取样的输出信号
 - 3 提高放大倍数的稳定性
 - 4 扩展通频带
 - 5 减小非线性失真
 - 6 抑制反馈环内的干扰和噪声
 - 7 对输入电阻和输出电阻的影响
- 电压反馈可以稳定输出电压
- 电流反馈可以稳定输出电流
- $$A_f = \frac{A}{1 + AF} < A$$

5.2.6 正确引入反馈

注意：一定要保证引入的是负反馈

正确引入负反馈应考虑的两个主要问题：

a. 选择合适的负反馈放大电路的类型

对于电压放大器:

选择电压串联负反馈

对于电流放大器:

选择电流并联负反馈

对于电压—电流变换器:

选择电流串联负反馈

对于电流—电压变换器:

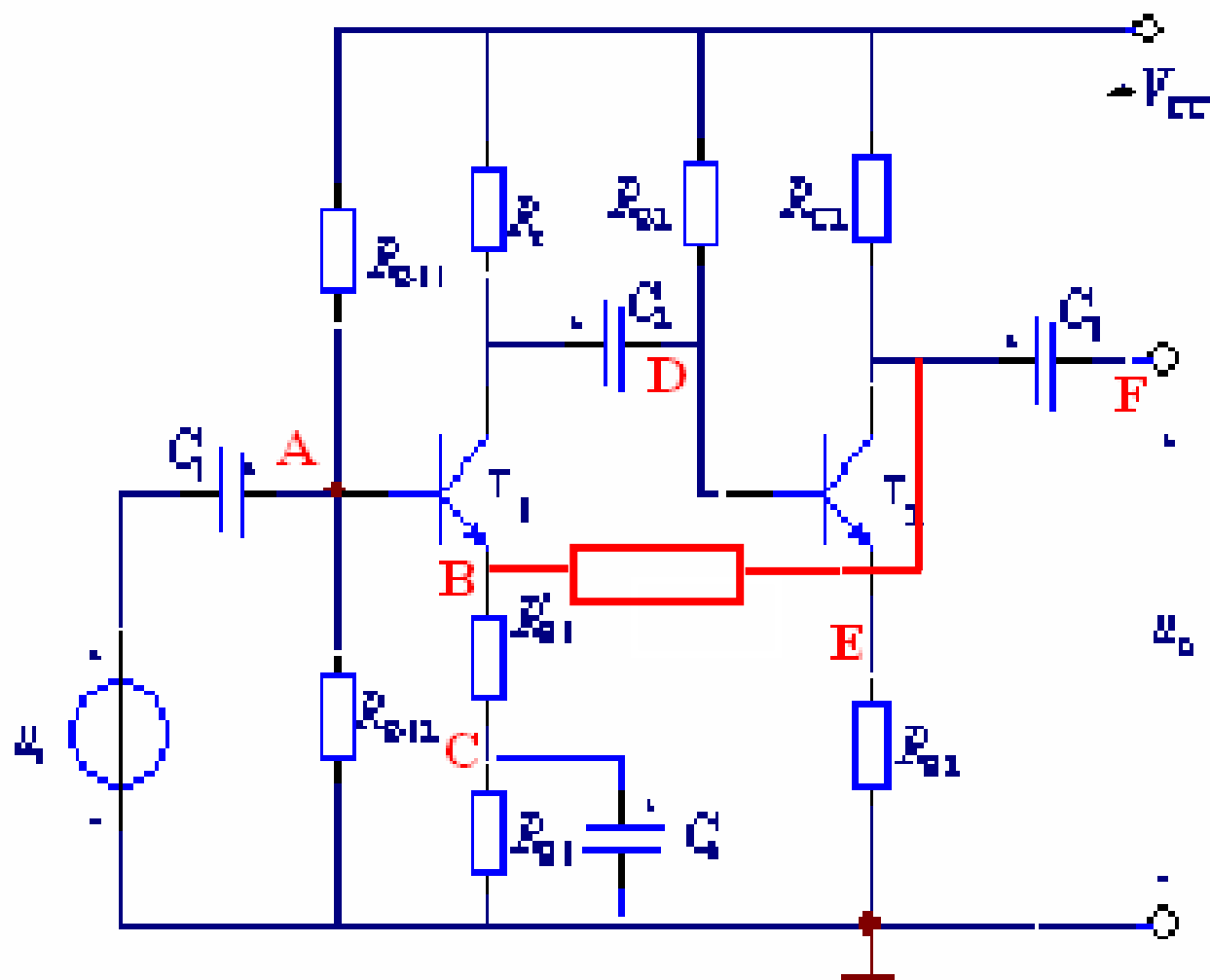
选择电压并联负反馈

b. 正确选用各元件参数

选择元件参数的依据:

反馈深度 $1+AF$

目前, 设计放大电路大多都选用集成运算放大器, 一旦运放选定后, A_u 、 R_o 、 R_i 即被确定, 剩下的工作就是估算反馈系数 F 。



(a)

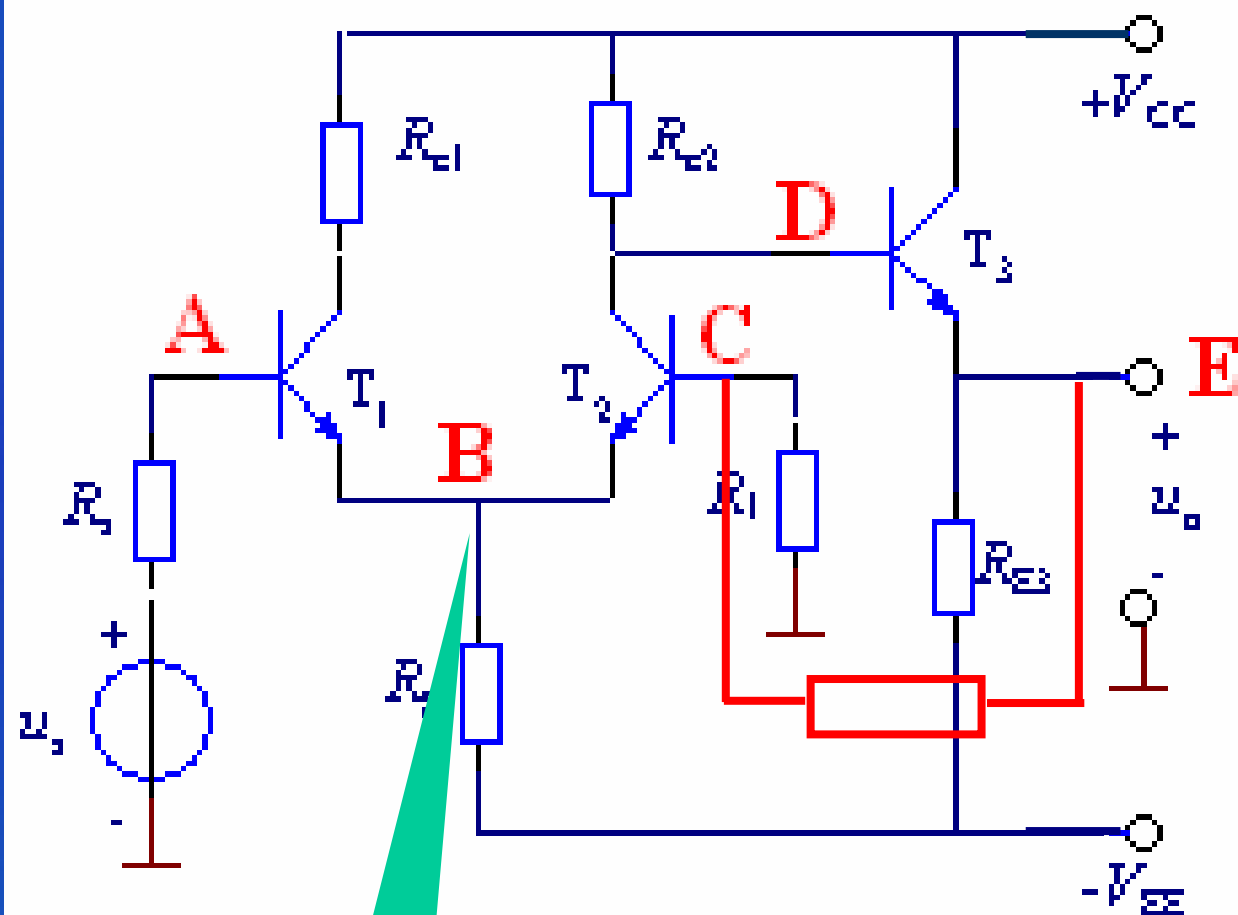
P185 题5.10

需要稳定
输出电压

反馈电阻应
该接在



F 与 B 之间



(b)

不能接

P185 题5.10

需要稳定
输出电压

反馈电阻
应该接在



E 与 C 之间

5.3 负反馈放大电路的分析及近似计算

负反馈放大电路的分析计算常用方法



- 等效电路法
- 分离法
- 近似计算法

a. 等效电路法：即微变等效电路法。

b. 分离法

分离法的基本思想:

(a) 分负反馈放大电路为基本放大电路和反馈网络两部分。

(b) 分别求出基本放大电路的 A 、 R_i 、 R_o 、 f_H 和 f_L 等指标及反馈网络的反馈系数 F 。

(c) 分别求出 A_f 、 R_{id} 、 R_{of} 、 f_{Hf} 和 f_{Lf} 等。

5.3.1 深度负反馈放大电路近似计算的一般方法

1. 采用近似计算的依据

放大电路满足深度负反馈的条件。

因为

- a. 多级放大电路的放大倍数一般比较大。
- b. 集成运算放大器的广泛应用。

使放大电路很容易满足深度负反馈的条件。

2. 近似计算的原理

在深度负反馈 ($AF \gg 1$) 的条件下 $\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \approx \frac{1}{\dot{F}}$

将 $\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$ $\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$ 代入上式得

$$\frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} \approx \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_f}$$

$$\dot{X}_f \approx \dot{X}_i$$

$$\dot{X}_{id} \approx 0$$

(1) 当电路引入串联负反馈时

$$\dot{U}_f \approx \dot{U}_i \quad \dot{U}_{id} \approx 0$$

(称为虚短)

(2) 当电路引入并联负反馈时

$$\dot{I}_f \approx \dot{I}_i \quad \dot{I}_{id} \approx 0$$

(称为虚断)

四种类型负反馈的表达式

电压串联

 (U_o, U)

$$\dot{A} \quad \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{id}}$$

$$\dot{F} \quad \dot{F}_u = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o}$$

$$\dot{A}_f \quad \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

电压并联

 (U_o, I)

$$\dot{A}_r = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_{id}}$$

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

$$\dot{A}_{rf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i}$$

电流串联

 (I_o, U)

$$\dot{A}_g = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_{id}}$$

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

$$\dot{A}_{gf} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i}$$

电流并联

 (I_o, I)

$$\dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_{id}}$$

$$\dot{F}_i = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o}$$

$$\dot{A}_{if} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$$

深反馈放大电路分析方法

一. 分析电路的反馈类型

二. 根据反馈类型分3步分析电路:

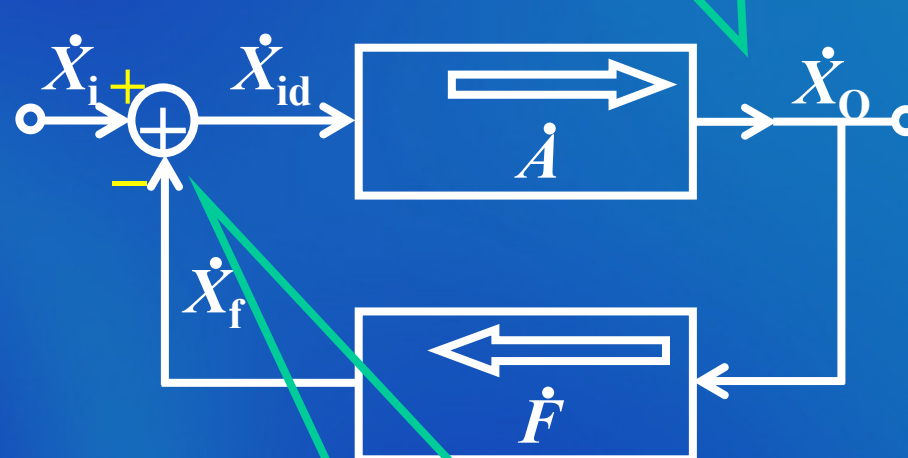
1. 求出反馈系数

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

2. 求出反馈增益

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

3. 求出电路的电压增益 $\dot{A}_{uf} = K\dot{A}_f$

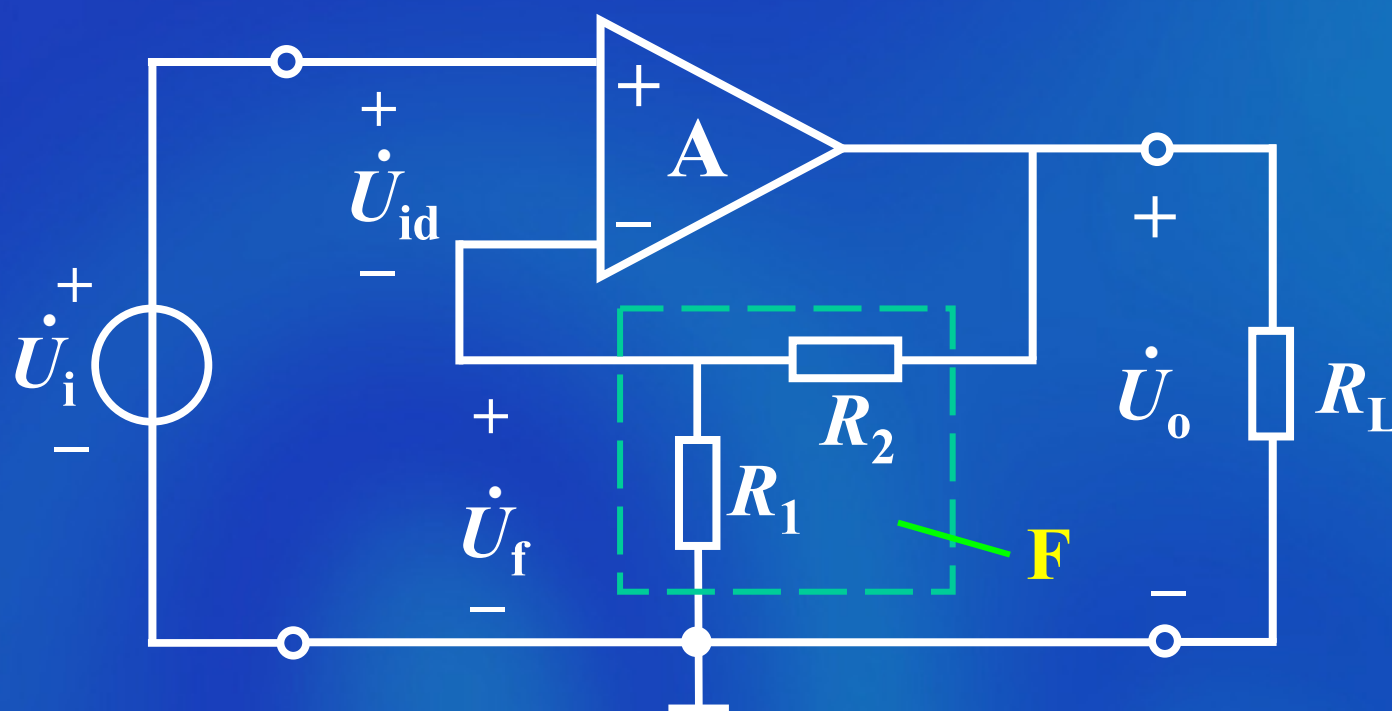


电压反馈-- U_o
电流反馈-- I_o

串联反馈-- $U_i U_f U_{id}$
并联反馈-- $I_i I_f I_{id}$

5.3.2 电压模运放组成的反馈电路

1. 电压串联负反馈（同相输入比例放大器）

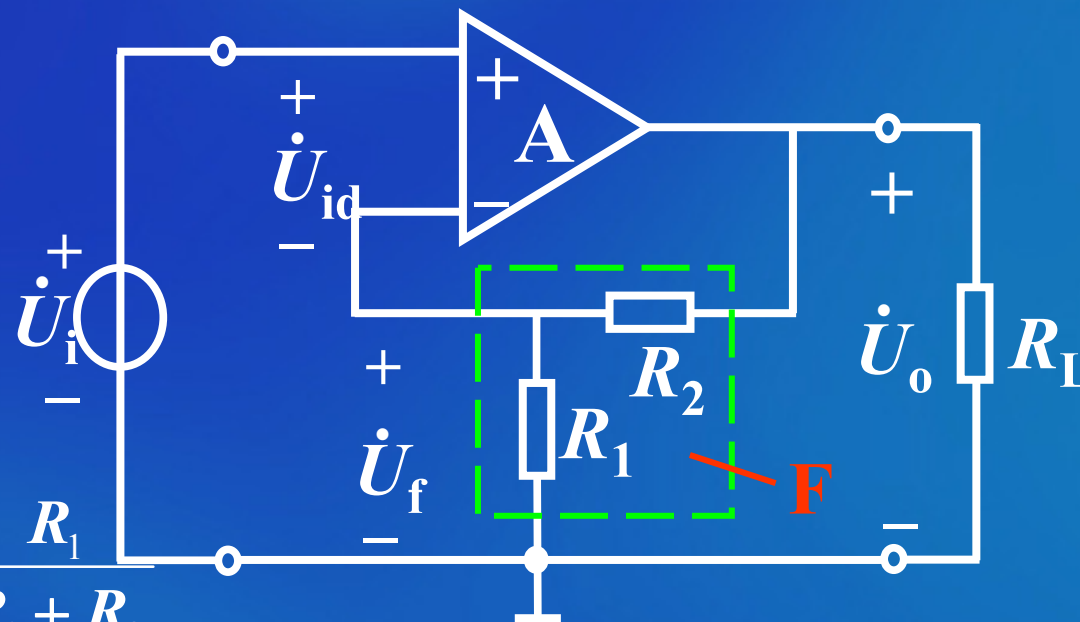


1. 电压串联负反馈



A. 反馈系数

$$F = \frac{U_f}{U_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_o = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



B. 反馈增益

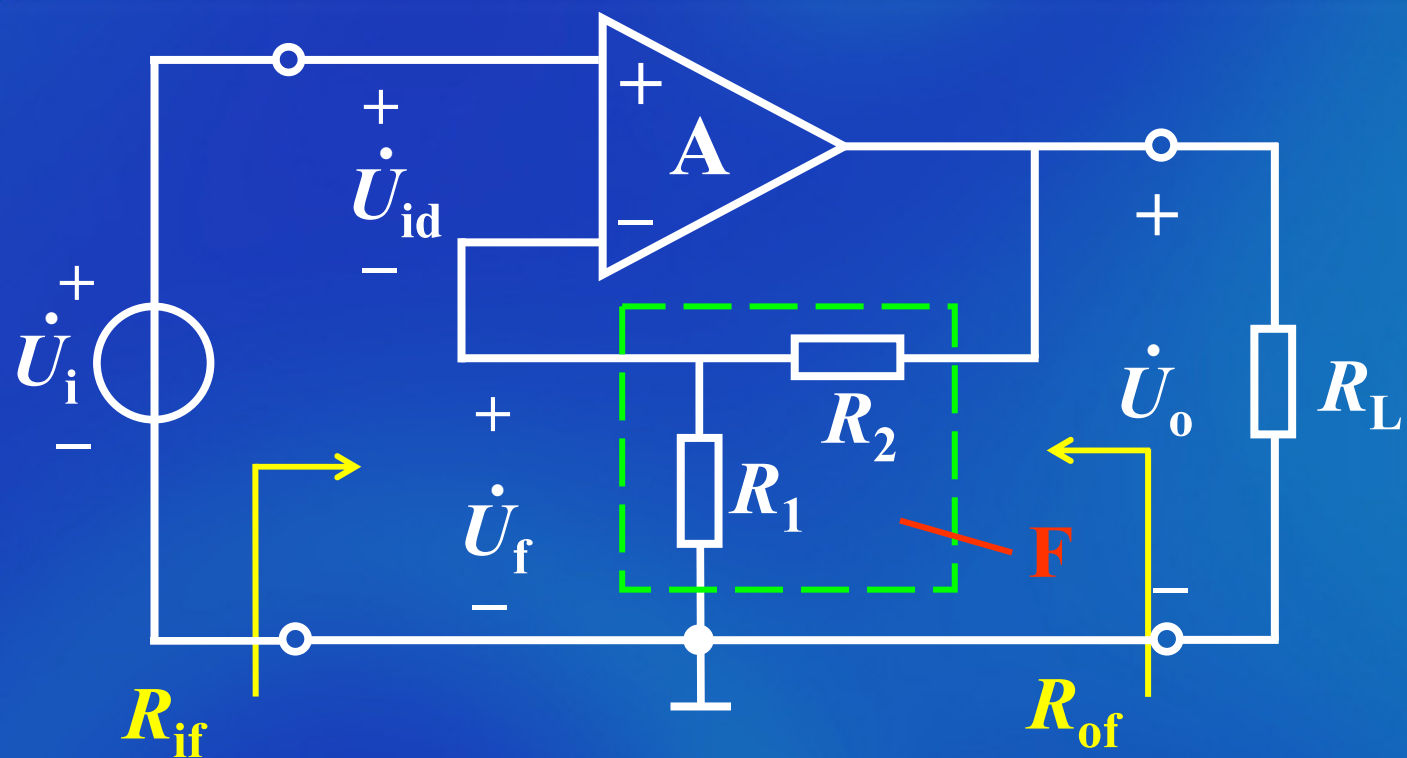
$$A_f = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{1}{F} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

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

C. 电压增益

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} = A_f = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

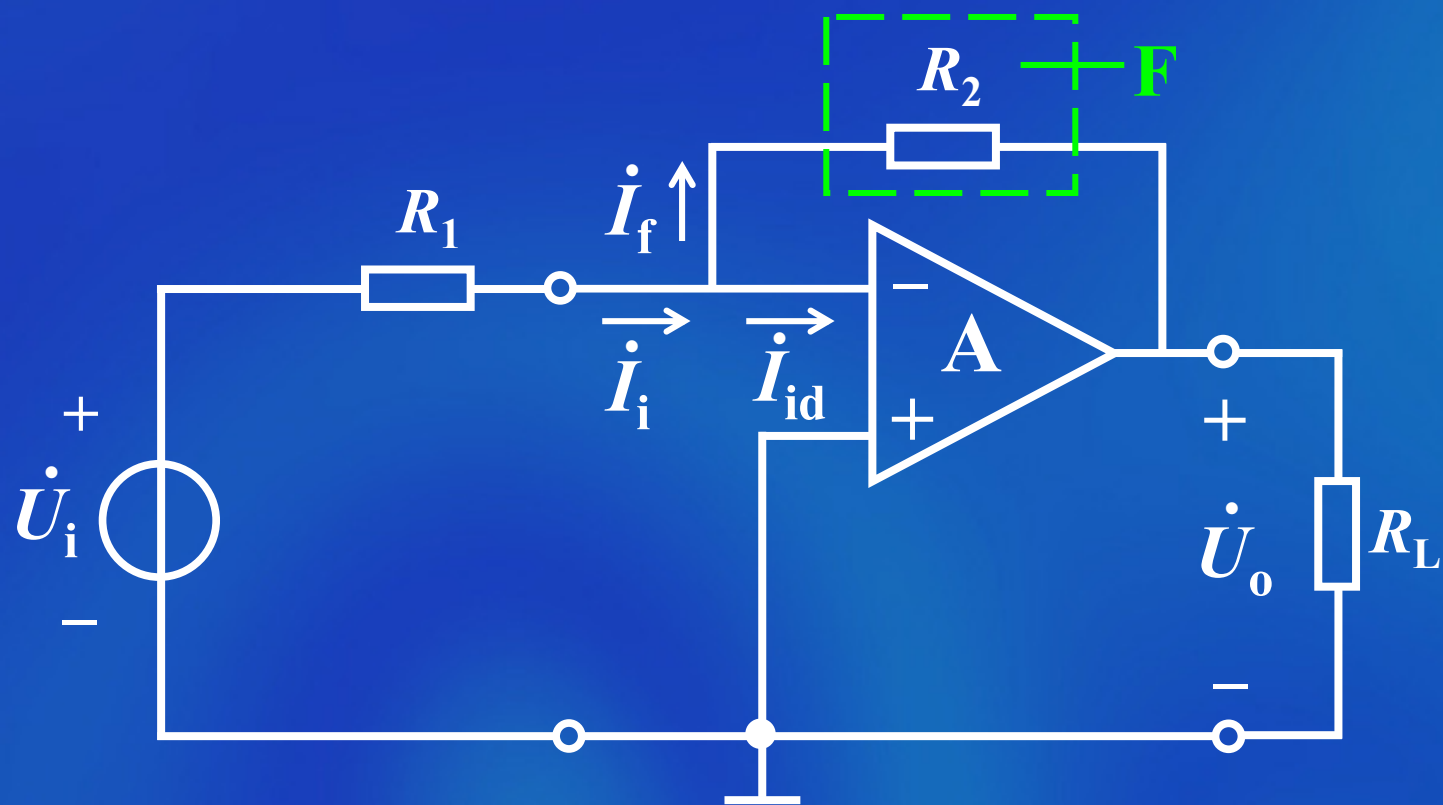
$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$$



闭环输入电阻 $R_{if} \approx \infty$

闭环输出电阻 $R_{of} \approx 0$

2. 电压并联负反馈（反相输入比例放大器）



2. 电压并联负反馈



A. 反馈系数

$$F = \frac{I_f}{U_o} = \frac{-\frac{U_o}{R_2}}{U_o} = -\frac{1}{R_2}$$

B. 反馈增益

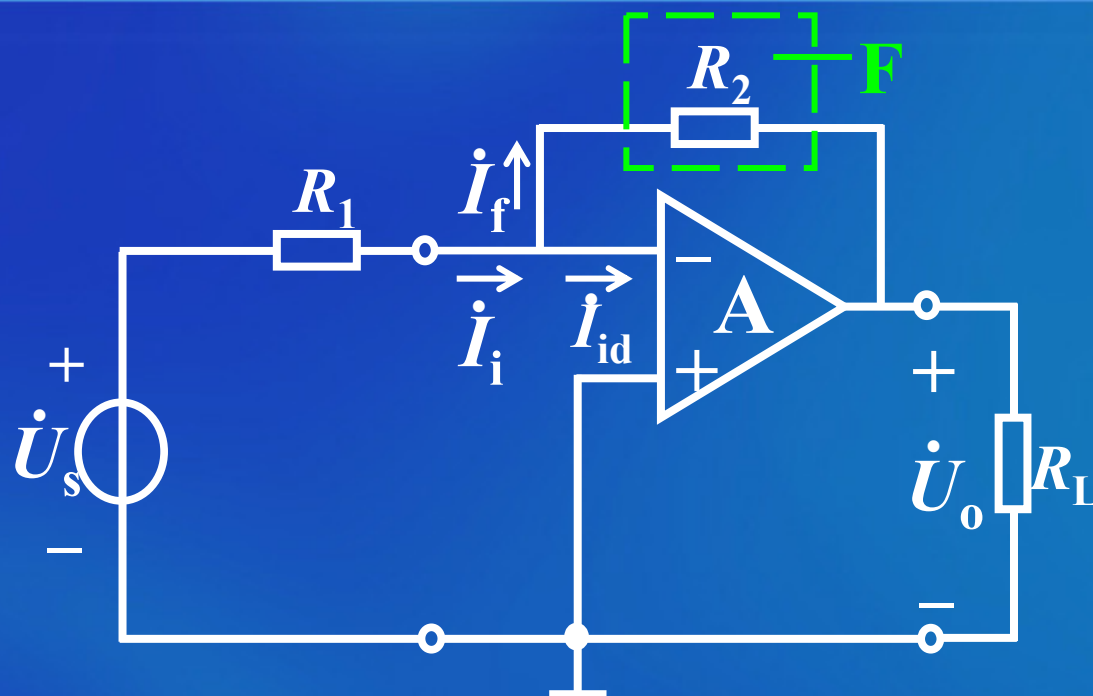
$$A_f = \frac{U_o}{I_i} \approx \frac{1}{F} = -R_2$$

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

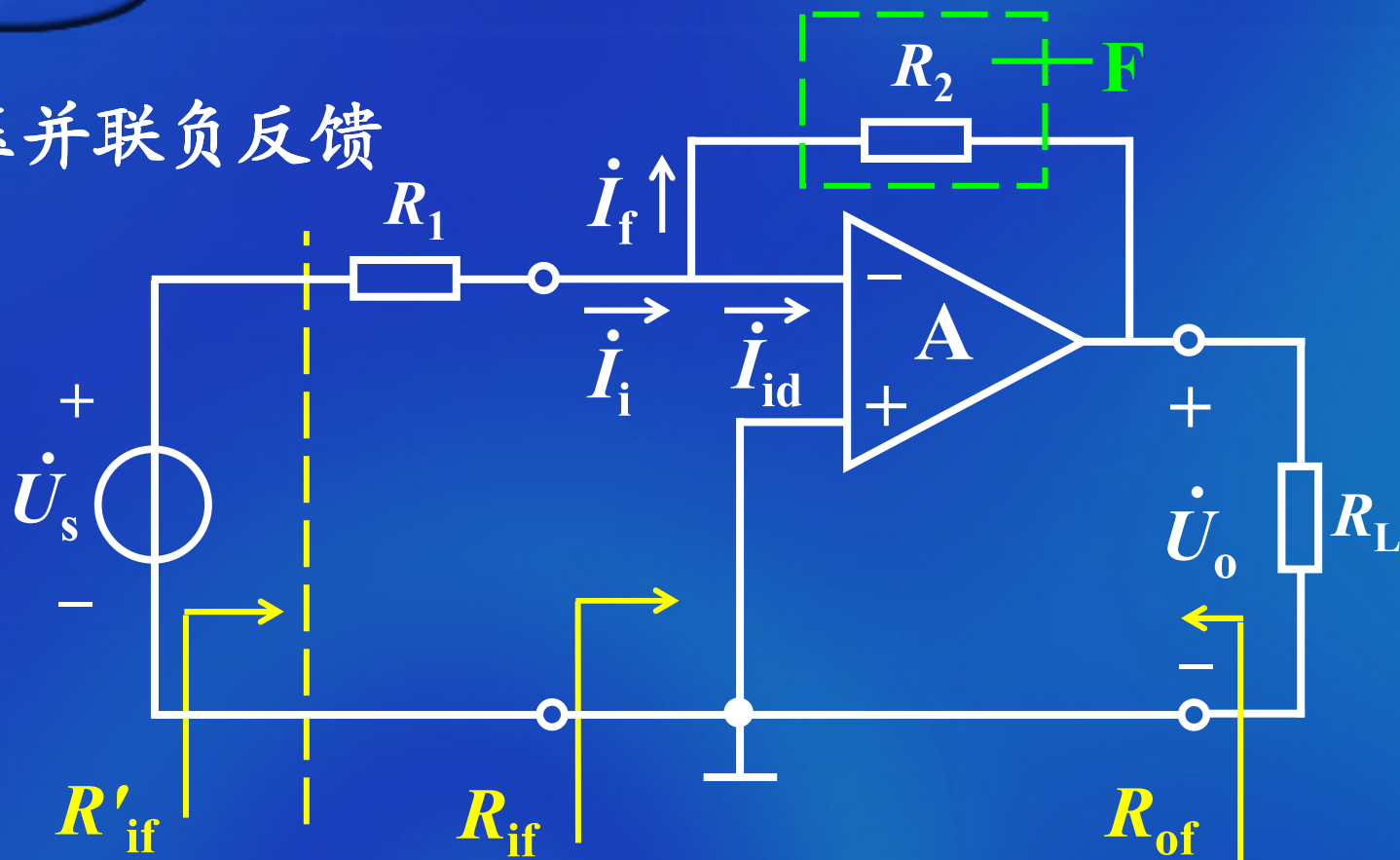
C. 电压增益

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_s} = \frac{U_o}{I_i R_1} = A_f \frac{1}{R_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

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



电压并联负反馈



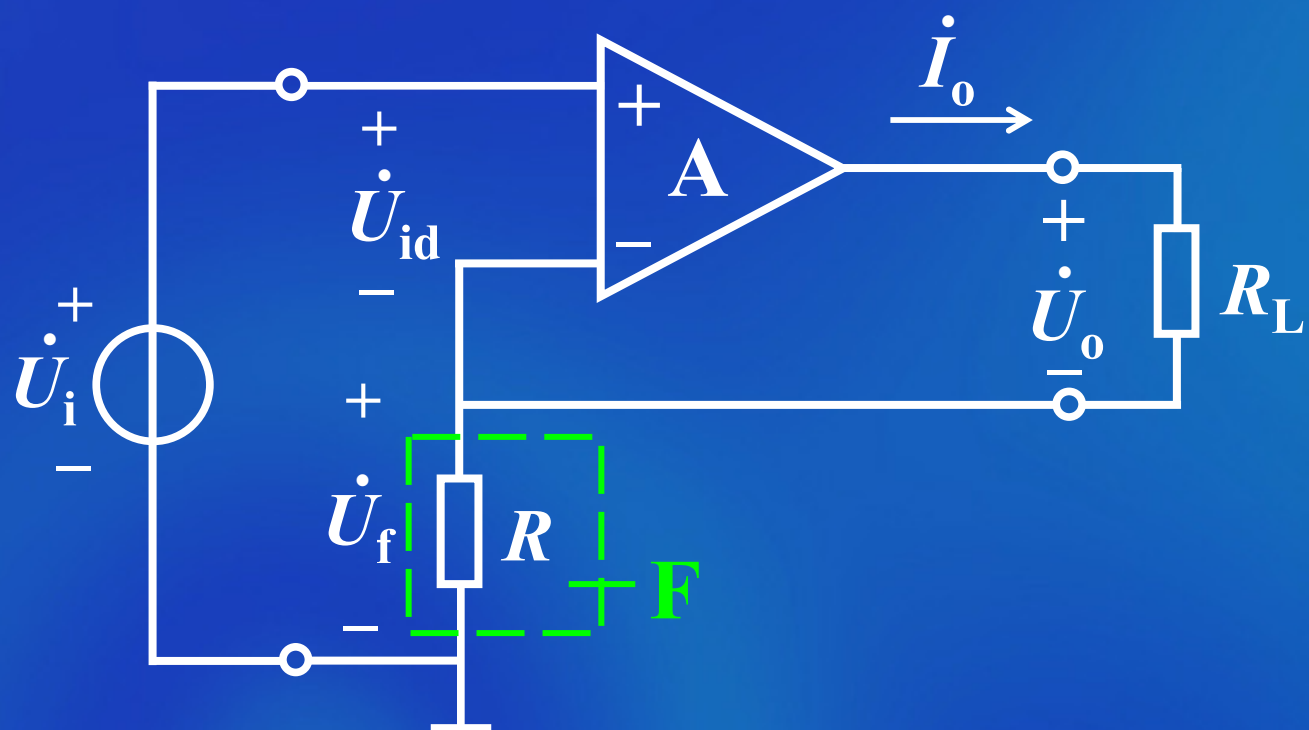
输入电阻 $R_{if} \approx 0$

$$R'_{if} = R_{if} + R_1 \approx R_1$$

输出电阻

$$R_{of} \approx 0$$

3. 电流串联负反馈→电压电流变换器



3. 电流串联负反馈



A. 反馈系数

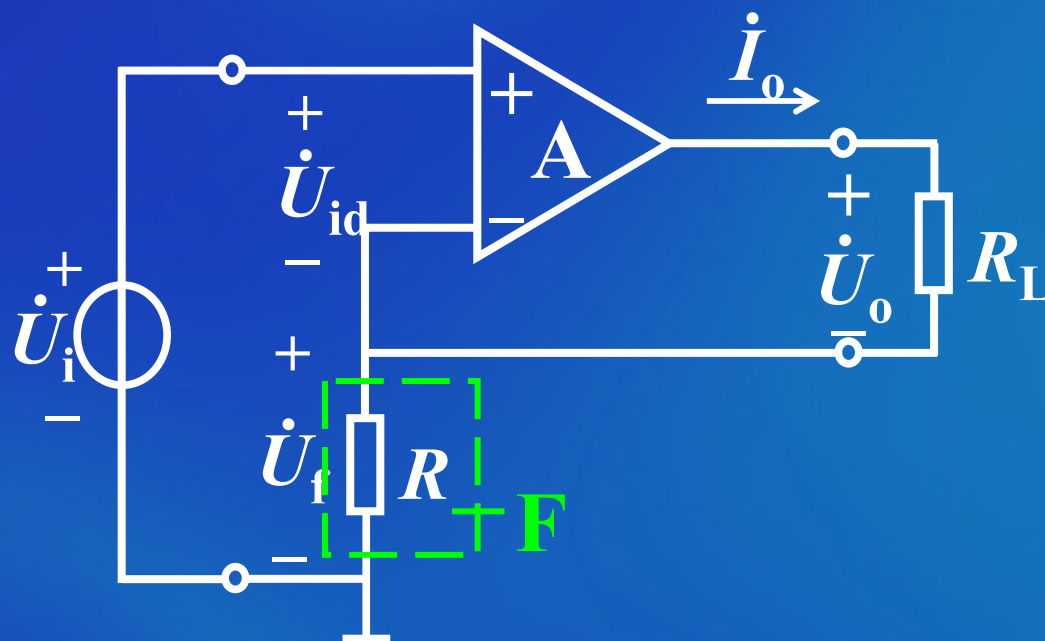
$$F = \frac{U_f}{I_o} = R$$

B. 反馈增益

$$A_f = \frac{I_o}{U_i} \approx \frac{1}{F} = \frac{1}{R}$$

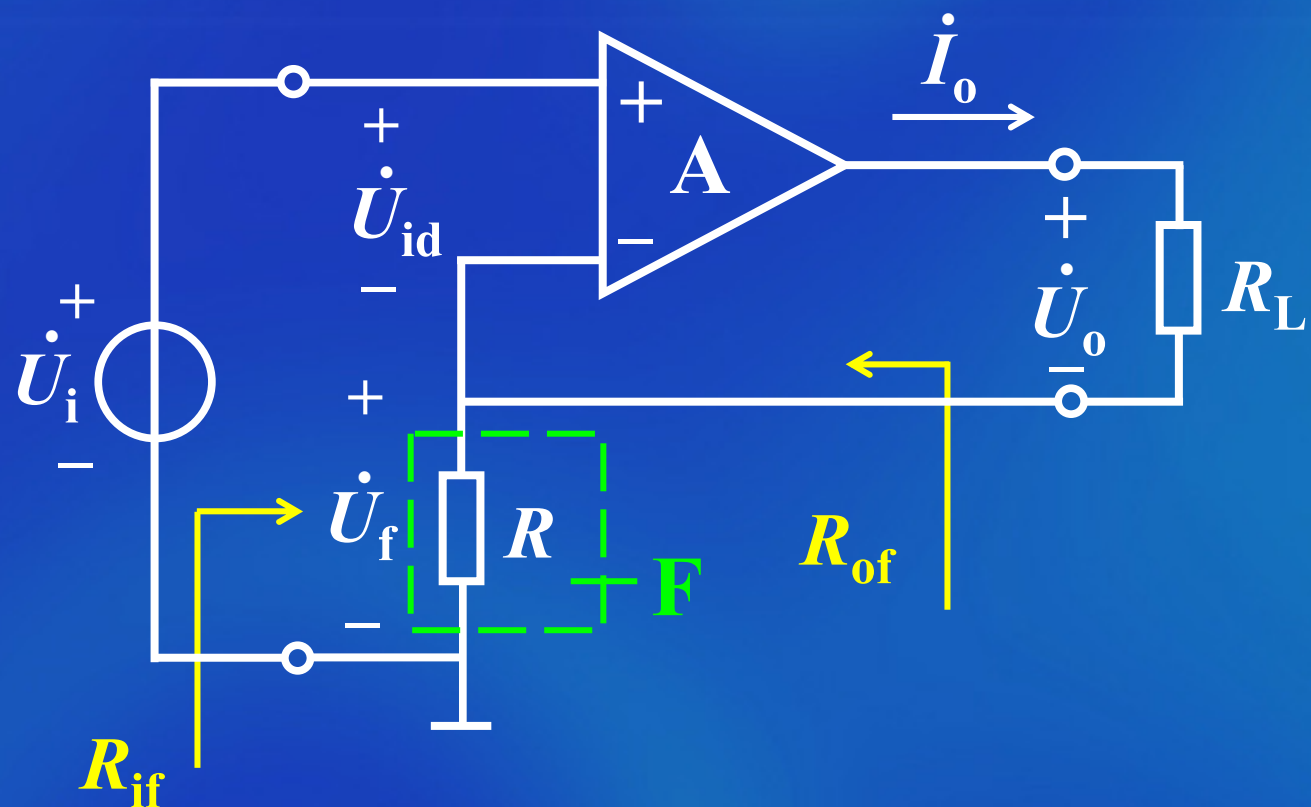
C. 电压增益

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{I_o R_L}{U_i} = A_f R_L = \frac{R_L}{R}$$



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

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

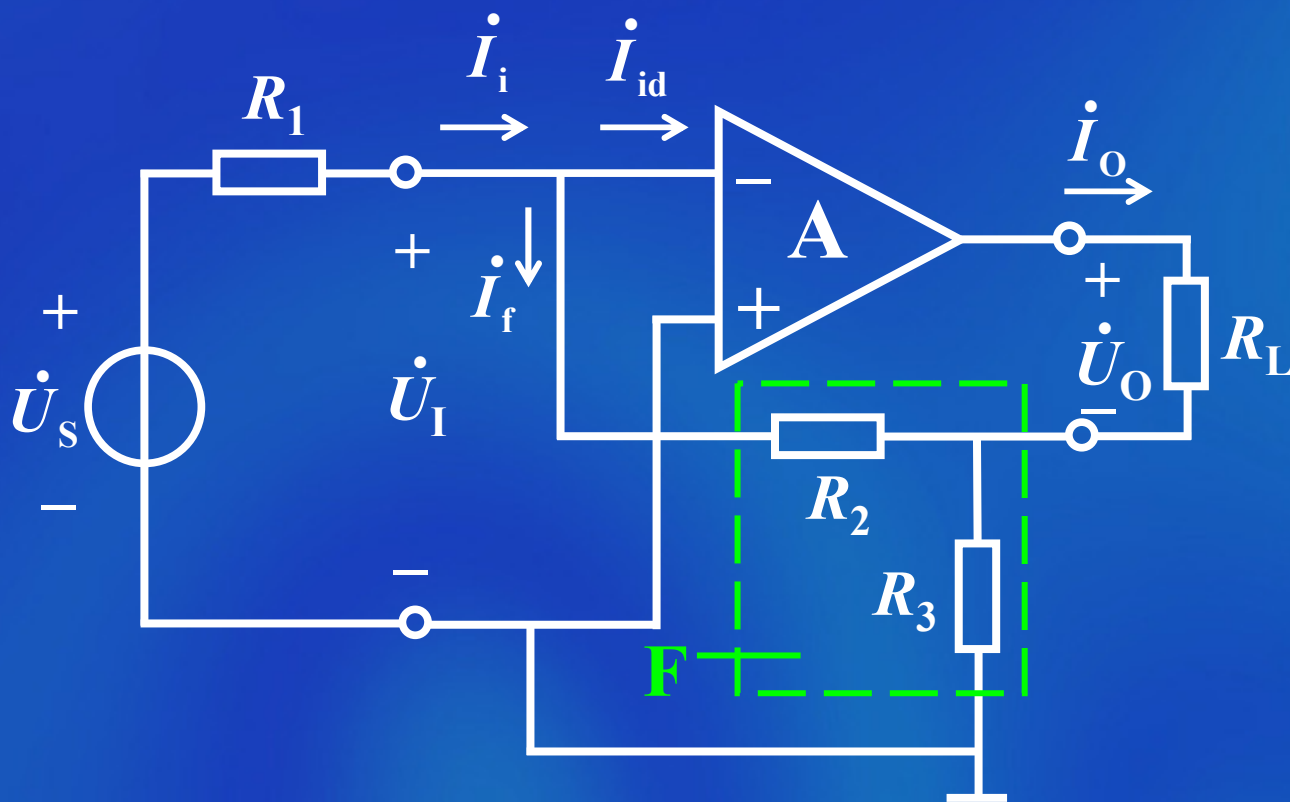


输入、输出电阻

$$R_{if} \approx \infty$$

$$R_{of} \approx \infty$$

4. 电流并联负反馈→电流放大器



4. 电流并联负反馈



A. 反馈系数

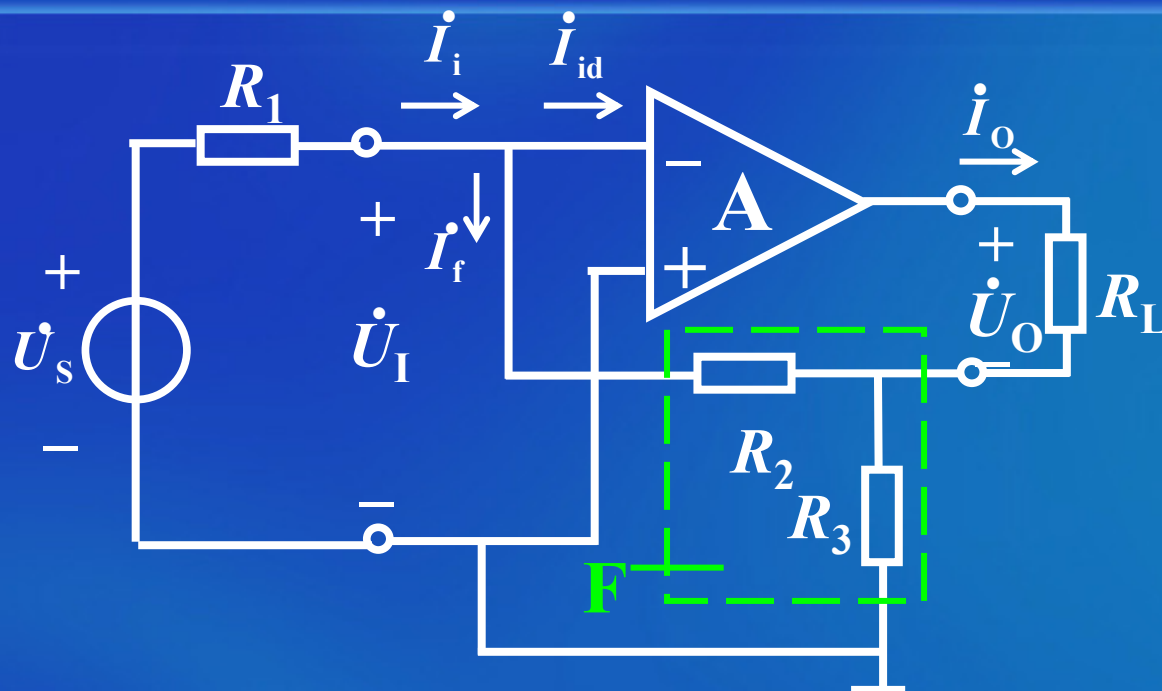
$$F = \frac{I_f}{I_o} = -\frac{R_3}{R_2 + R_3} I_o = -\frac{R_3}{R_2 + R_3}$$

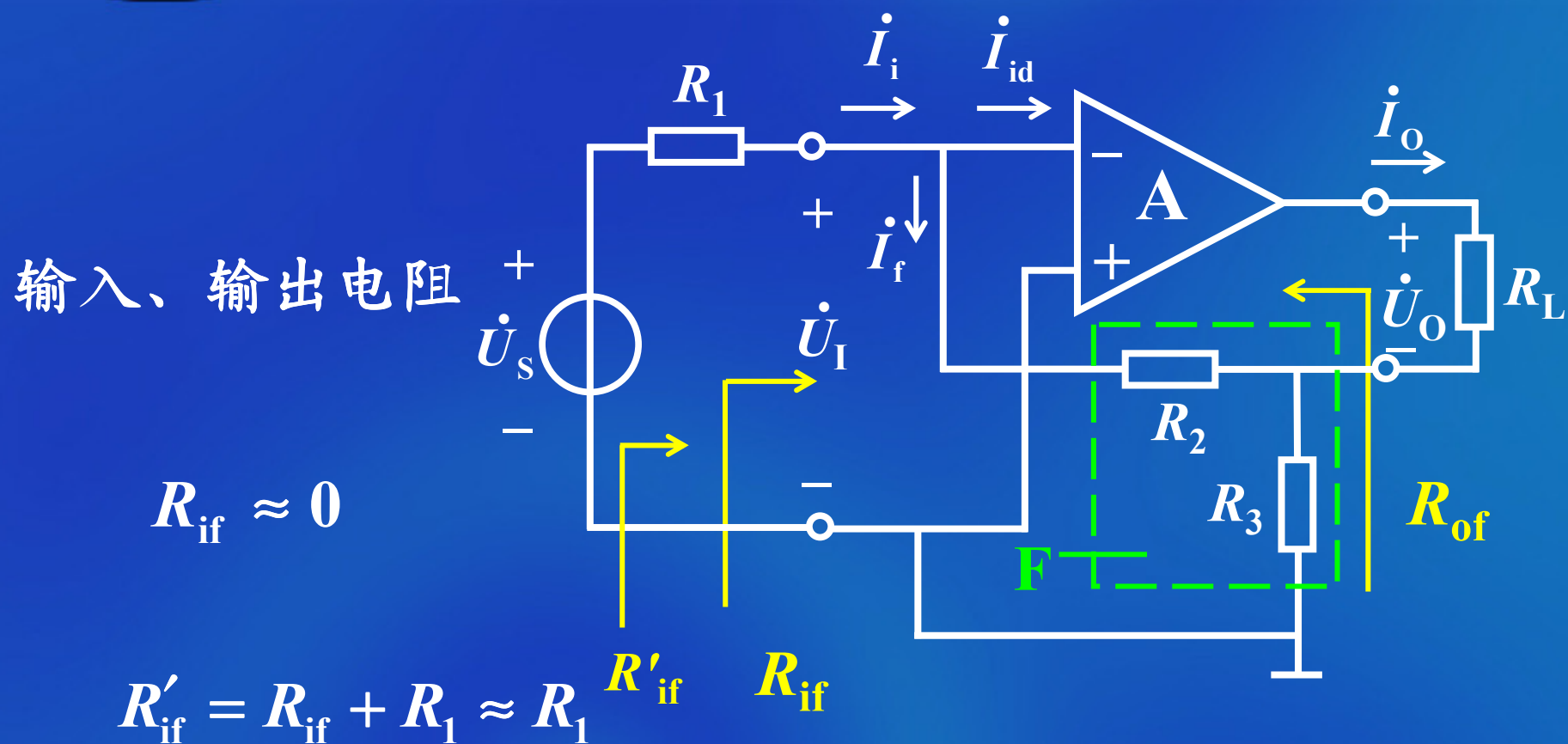
B. 反馈增益

$$A_f = \frac{I_o}{I_i} \approx \frac{1}{F} = -\frac{R_2 + R_3}{R_3} = -(1 + \frac{R_2}{R_3}) \quad \dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$$

C. 电压增益

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_s} = \frac{I_o R_1}{I_i R_1} = A_f \frac{R_L}{R_1} = -(1 + \frac{R_2}{R_3}) \cdot \frac{R_L}{R_1} \quad \dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$$





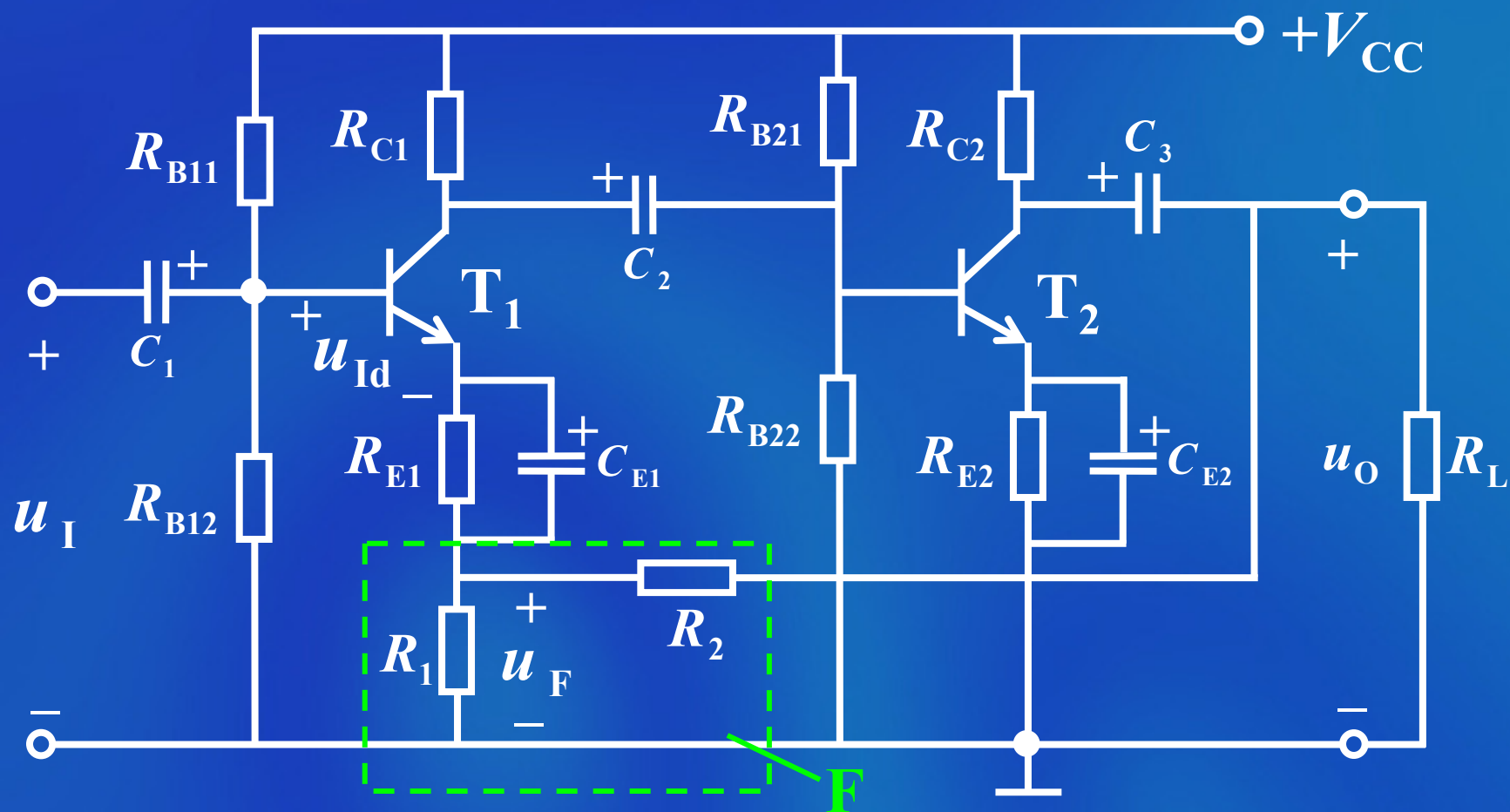
深反馈条件下的输入电阻和输出电阻分析:

反馈环
内深度
负反馈

$$\begin{aligned} \text{并联负反馈 } R_{if} &= \frac{R_i}{1 + AF} \approx 0 \\ \text{串联负反馈 } R_{if} &= (1 + AF)R_i \approx \infty \\ \text{电流负反馈 } R_{of} &= (1 + AF)R_o \approx \infty \\ \text{电压负反馈 } R_{of} &= \frac{R_o}{1 + AF} \approx 0 \end{aligned}$$

5.3.3 分立元件组成的反馈电路

1. 电压串联负反馈

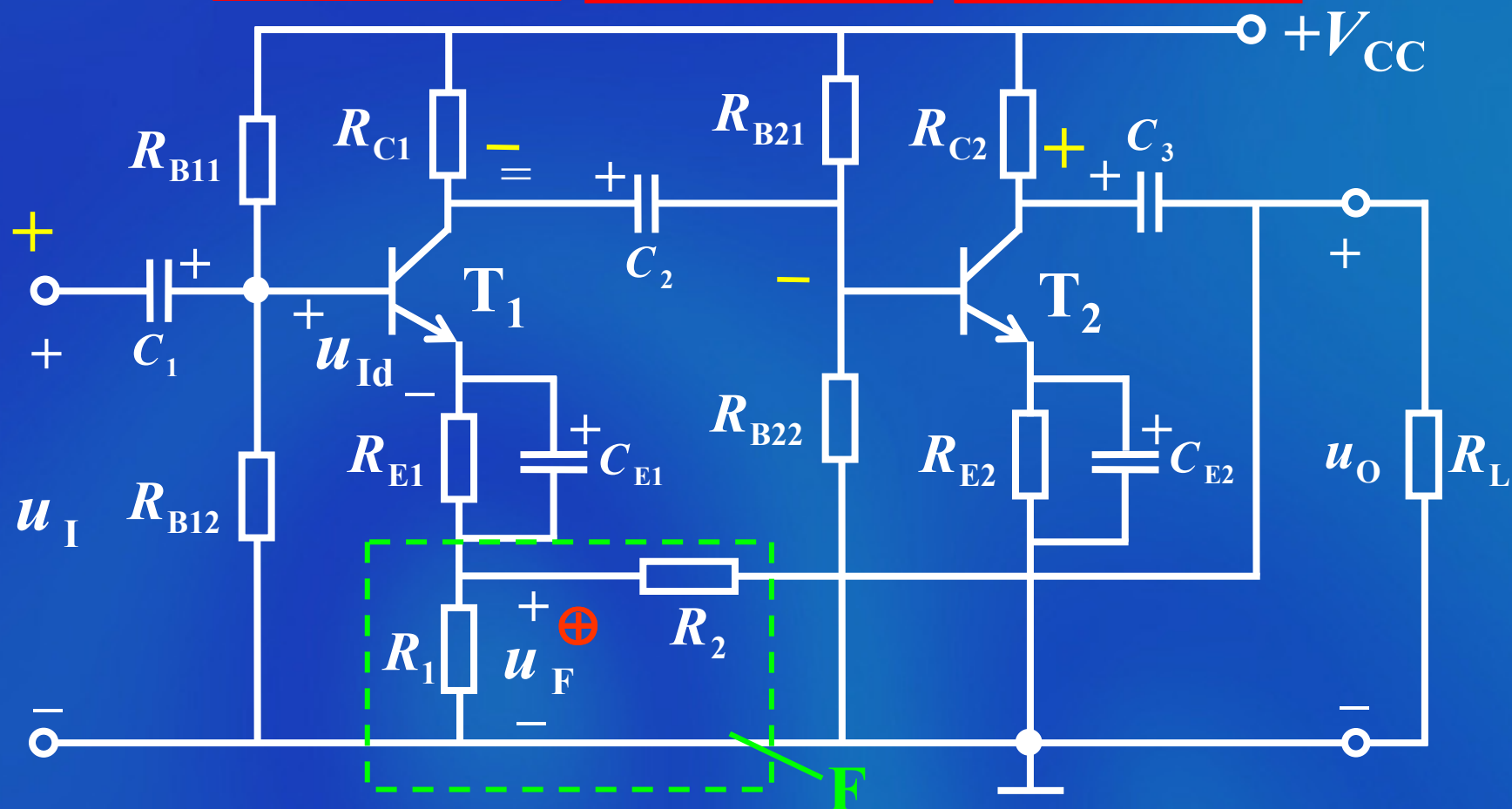


(1) 反馈的判断

电压反馈

串联反馈

负反馈



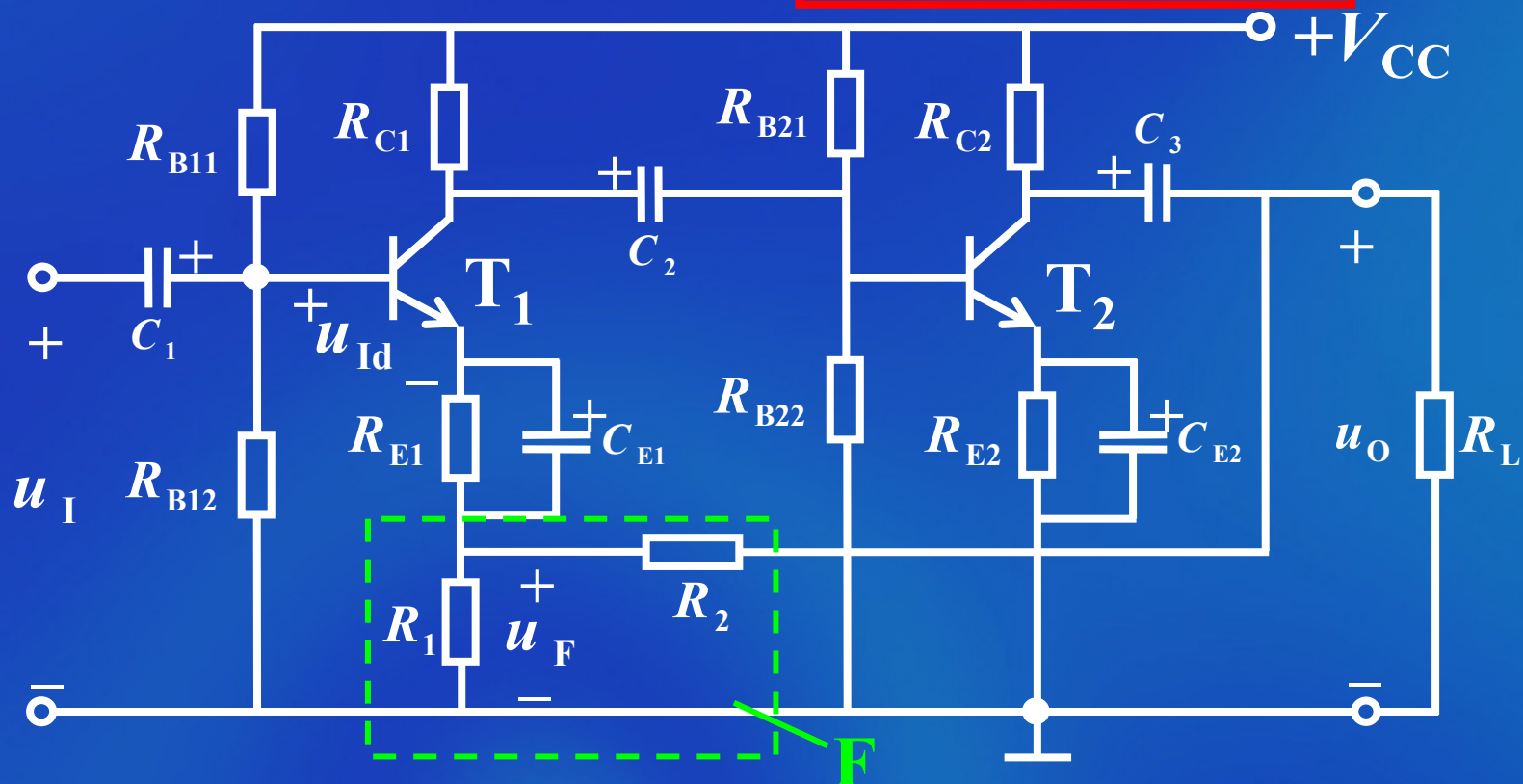
上页

下页

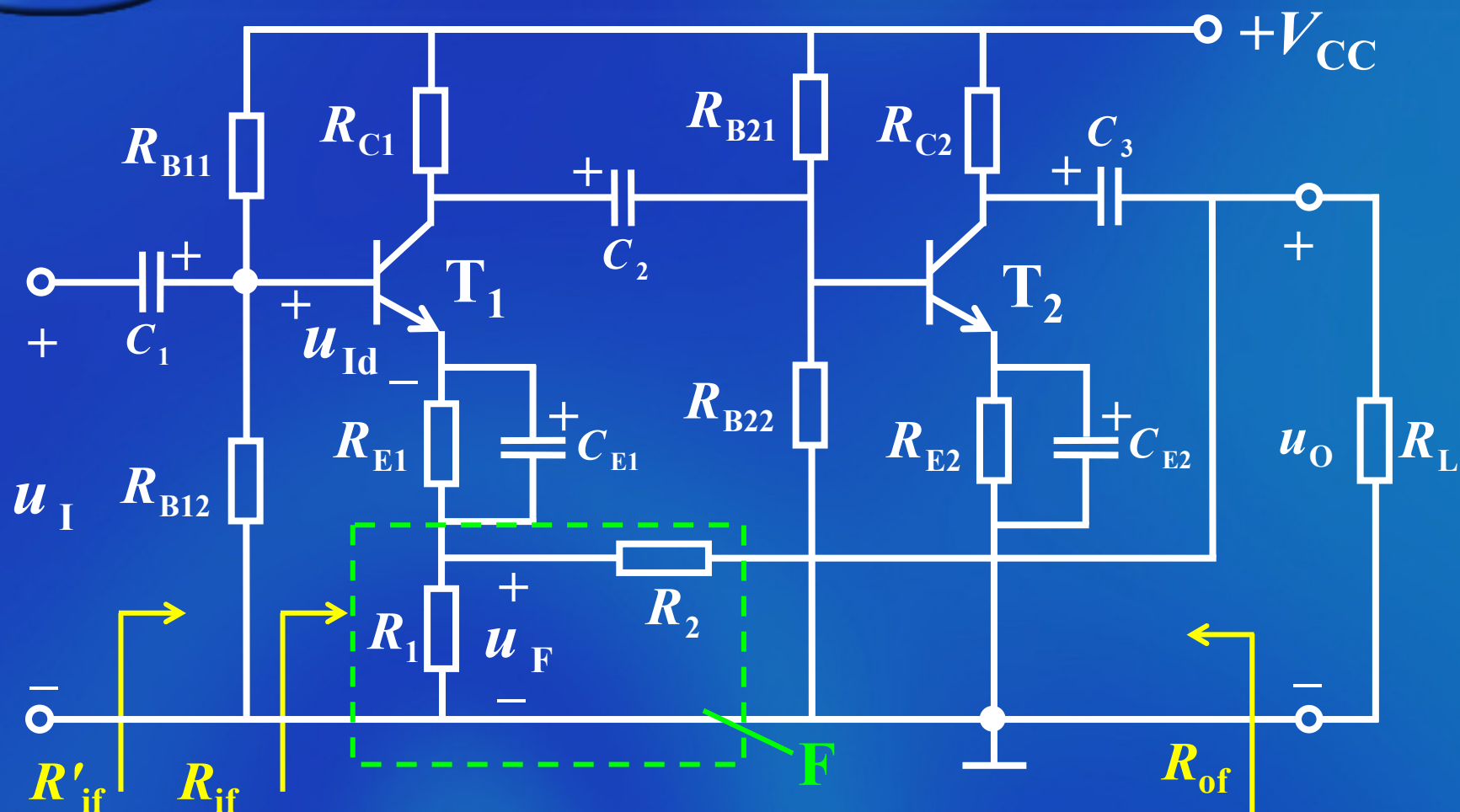
后退

(2) 闭环电压放大倍数

电压串联负反馈



$$\text{a). } F = \frac{U_f}{U_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{b). } A_f = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{1}{F} \quad \text{c). } A_{uf} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$



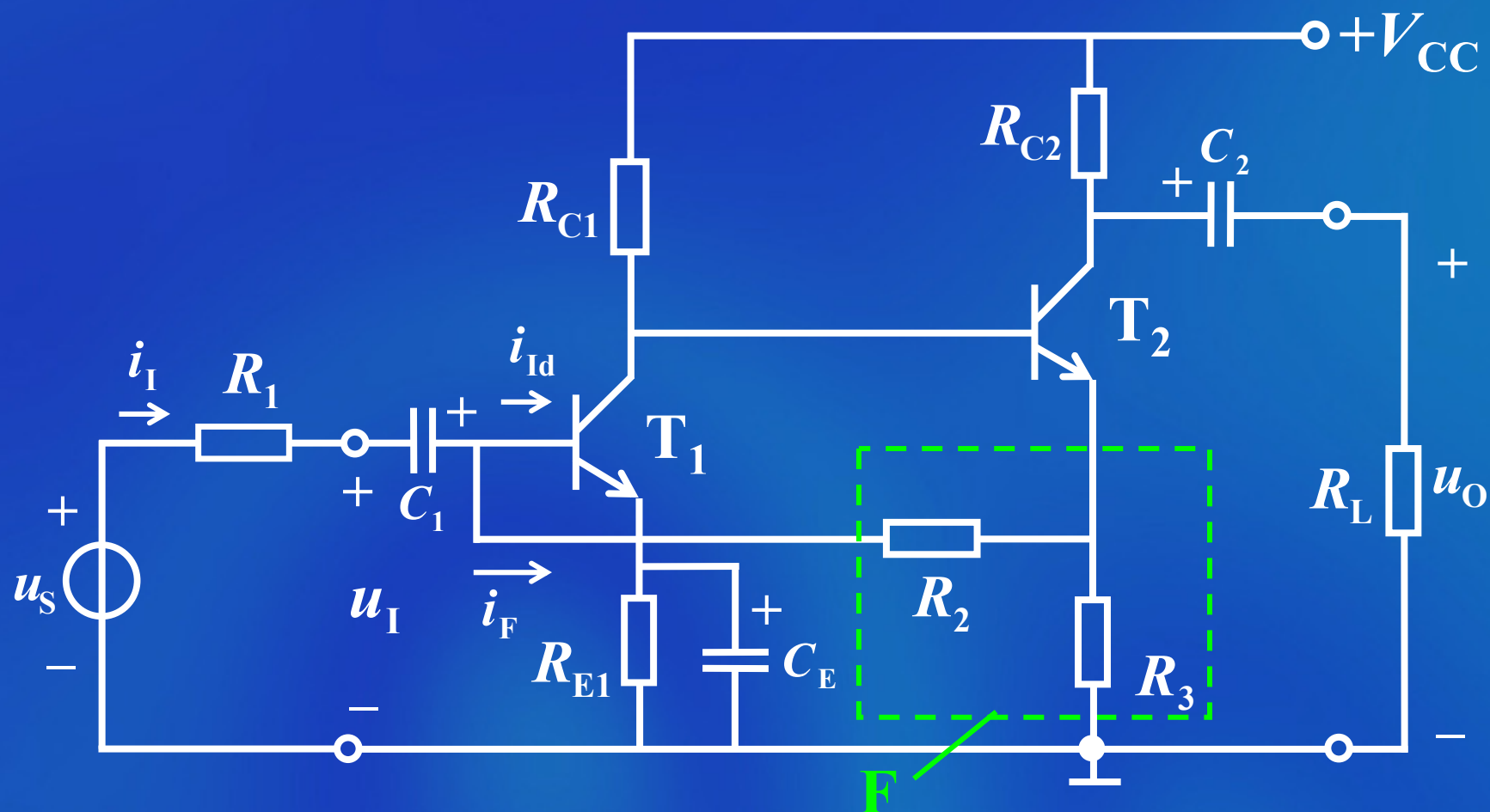
(3) 输入电阻

$$R_{if} \approx \infty \quad R'_{if} = R_{if} // R_B \approx R_{B1} // R_{B2}$$

(4) 输出电阻

$$R_{of} \approx 0$$

2. 电流并联负反馈

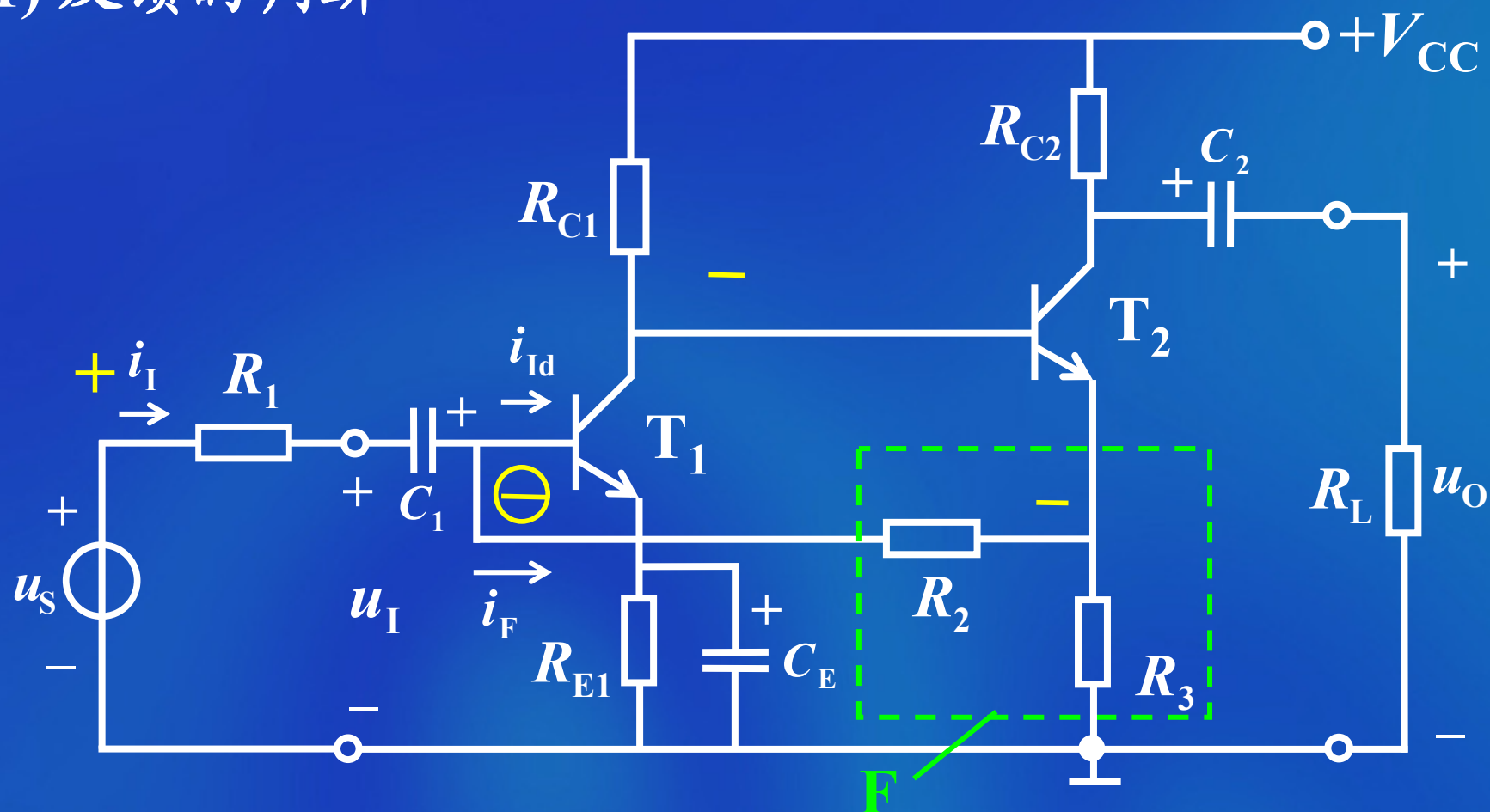


电流反馈

并联反馈

负反馈

(1) 反馈的判断

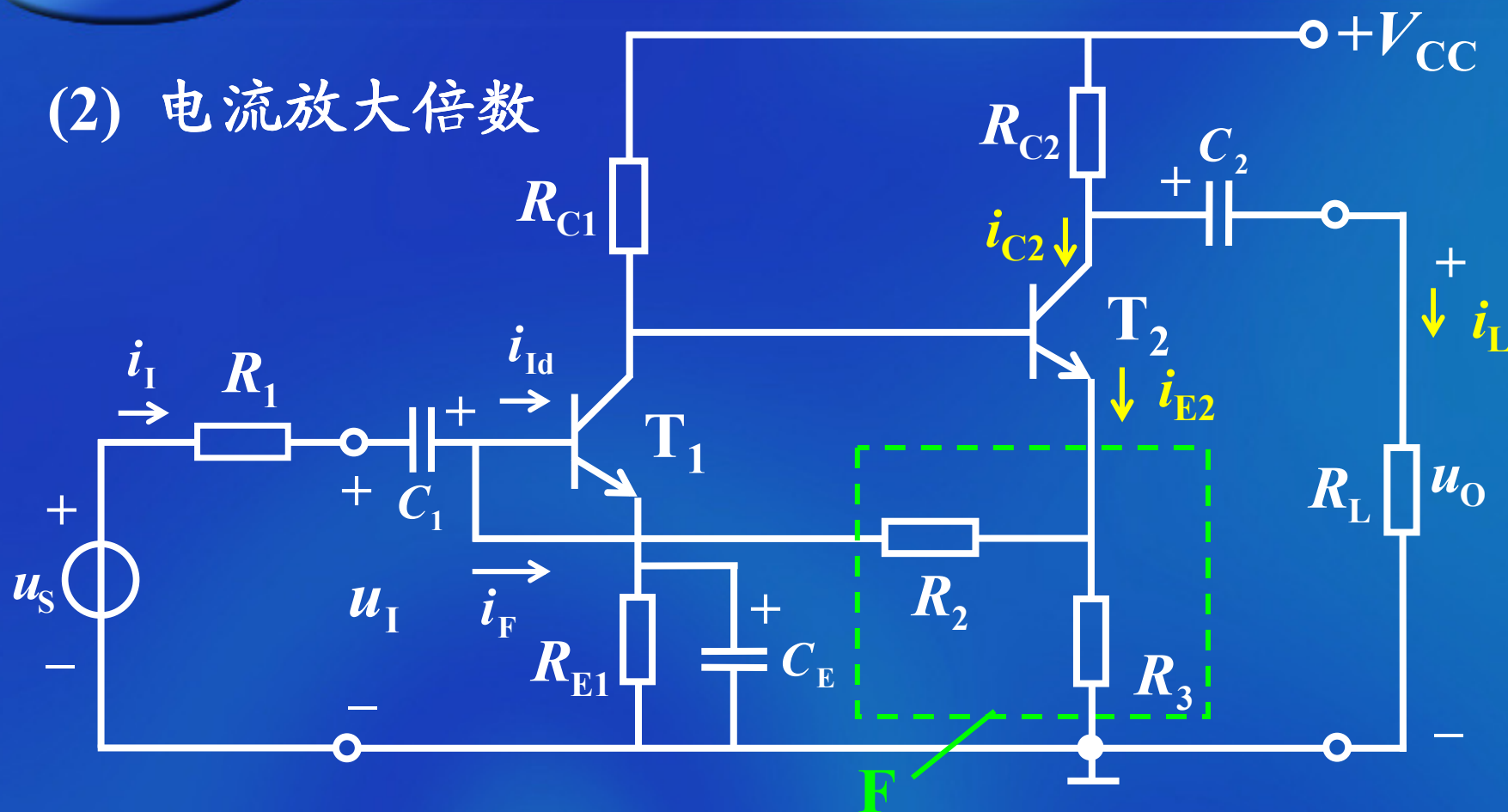


上页

下页

后退

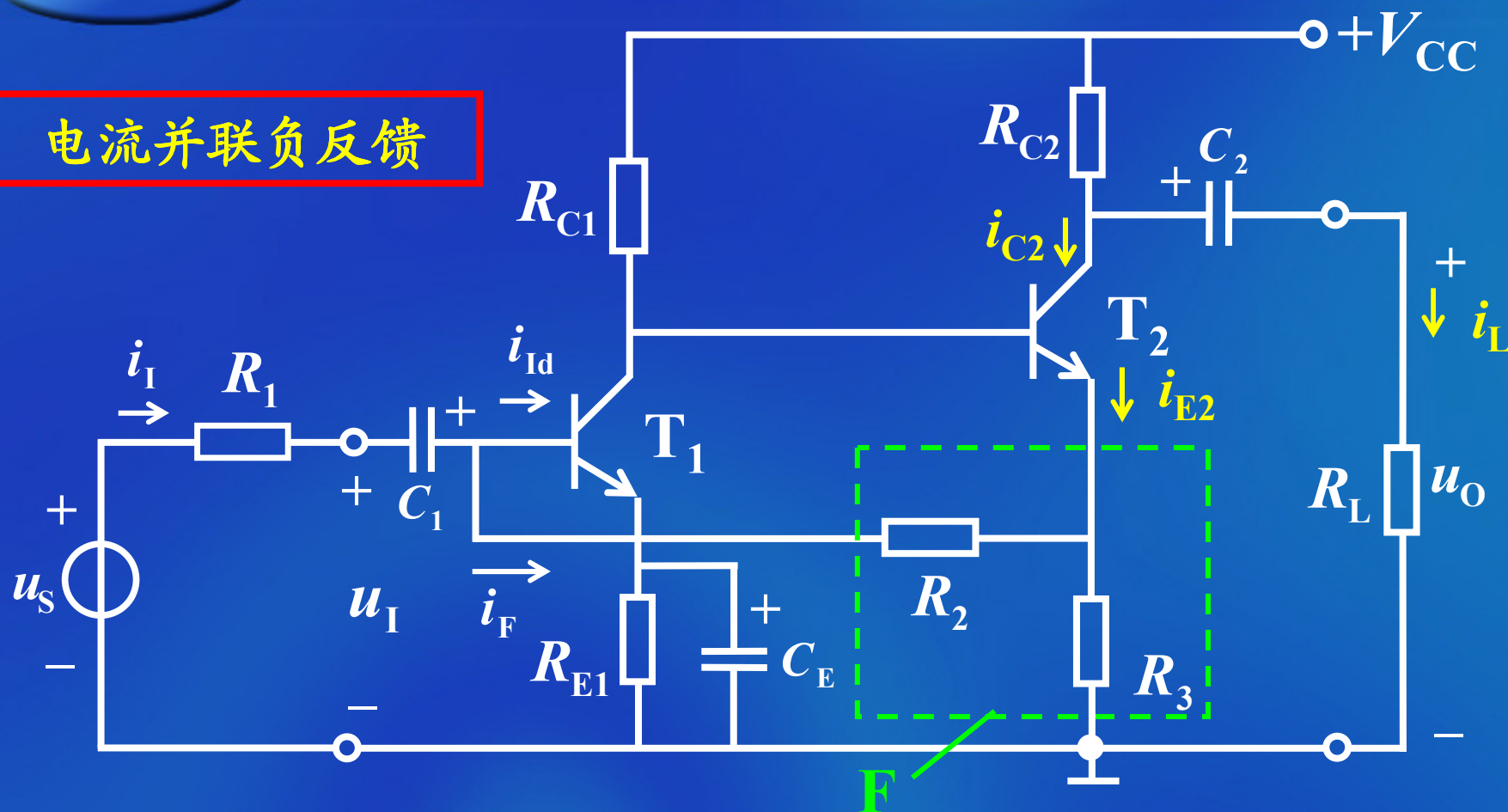
(2) 电流放大倍数



由于反馈电流 i_F 来自于输出级晶体管 T_2 集电极电流 i_{C2}

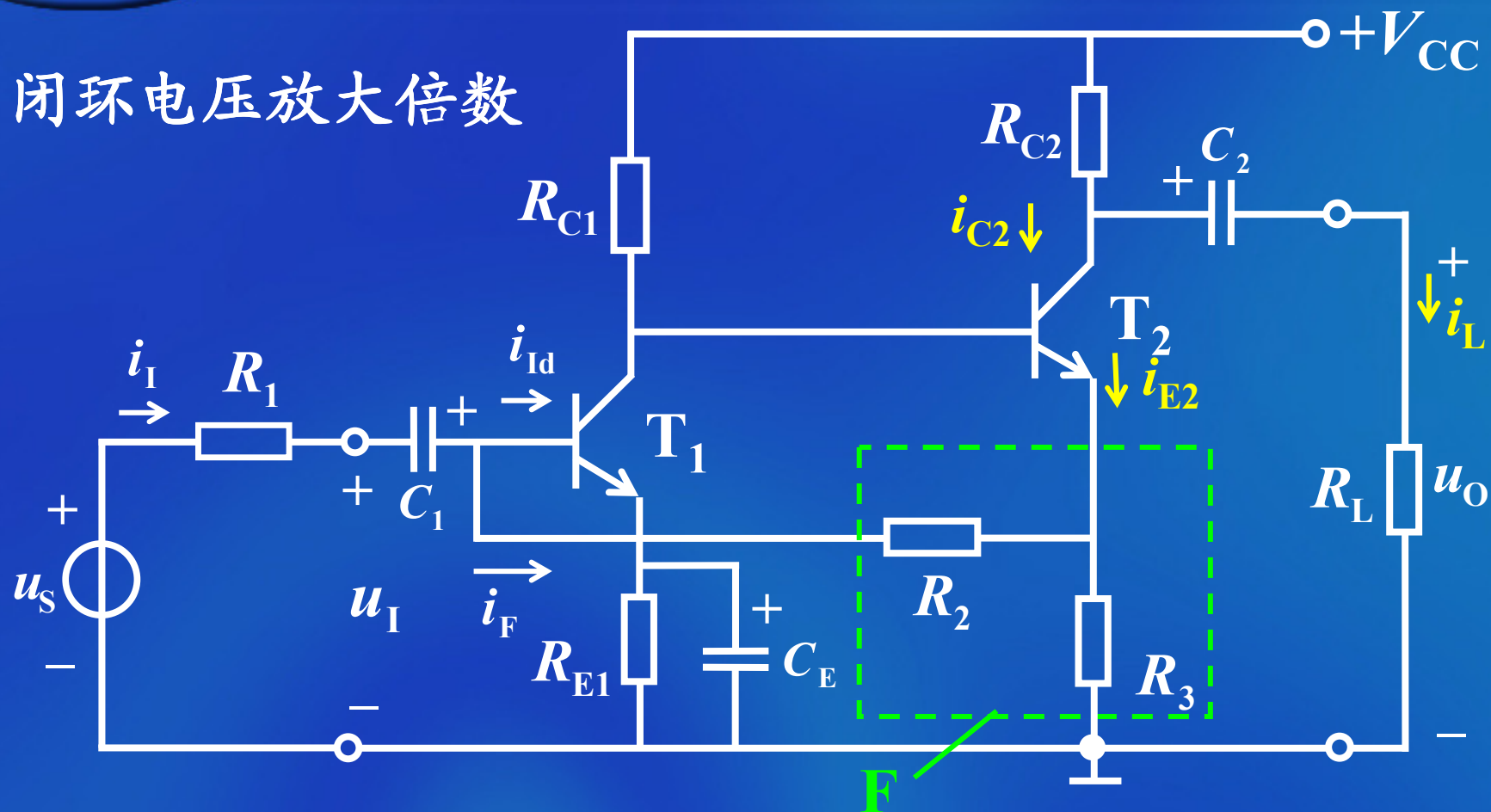
故 电路稳定的是 i_{C2} ，而不负载电流 i_L

电流并联负反馈



$$\text{a). } F = \frac{I_f}{I_{C2}} = -\frac{R_3}{R_2 + R_3} \quad \text{b). } A_f = \frac{I_{C2}}{I_i} \approx \frac{1}{F} = -\frac{R_2 + R_3}{R_3}$$

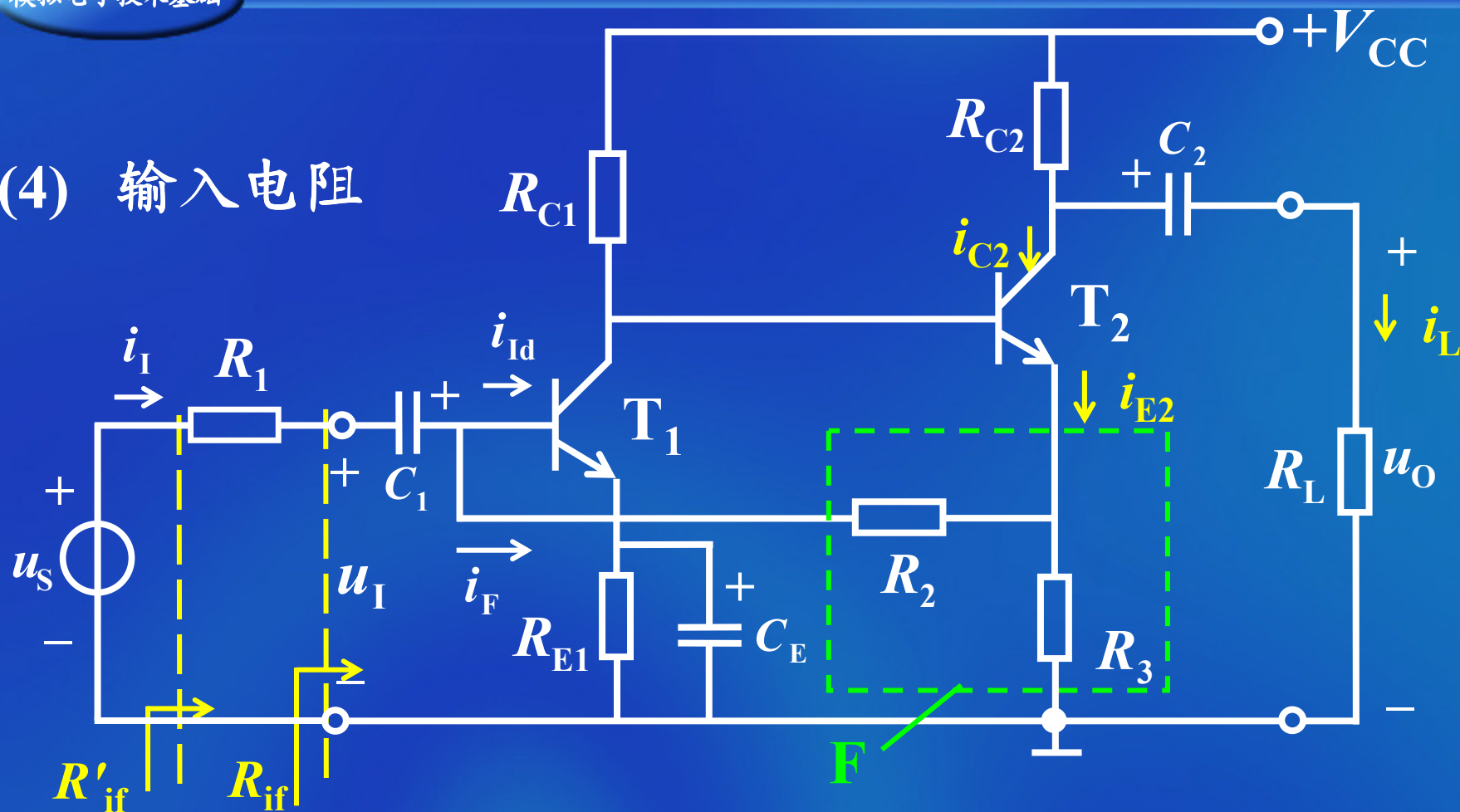
(3) 闭环电压放大倍数



c).

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-I_{c2} R'_L}{I_i R_1} = -A_f \frac{R'_L}{R_1} = \frac{(R_2 + R_3) R'_L}{R_3 R_1}$$

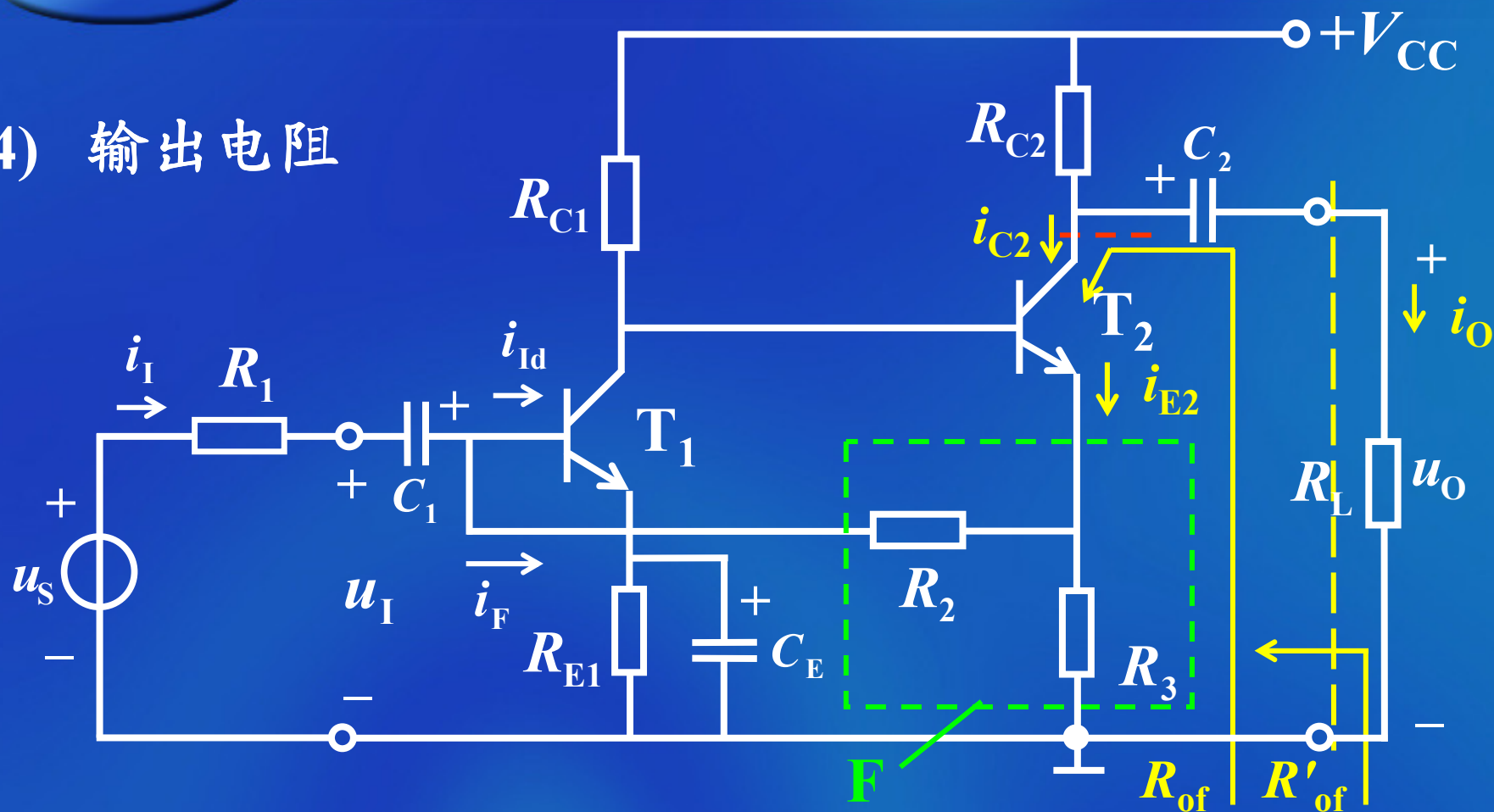
(4) 输入电阻



$$R_{if} \approx 0$$

$$R'_{if} = R_{if} + R_1 \approx R_1$$

(4) 输出电阻



从 T_2 集电极看进去的闭环输出电阻 $R_{of} \approx \infty$

从负载看进去的输出电阻

$$R'_{of} = R_{c2} // R_{of} \approx R_{c2}$$

5.4 负反馈放大电路的自激振荡及消除

5.4.1 负反馈放大电路的自激振荡条件

$$\dot{A}\dot{F} + 1 = 0$$

即

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

将上式写成

$$\left\{ \begin{array}{ll} AF = 1 & \text{幅度条件} \\ \Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F = (2n+1)\pi & \text{相位条件} \end{array} \right.$$

$$\begin{cases} AF = 1 & \text{幅度条件} \\ \Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F = (2n+1)\pi & \text{相位条件} \end{cases}$$

式中

$\Delta\varphi_A$ ——基本放大电路在高频或低频区内产生的附加相移

$\Delta\varphi_F$ ——反馈网络高频或低频区内产生的附加相移

对于负反馈电路

1. 在中频区，反馈信号与输入信号反相，即

$$\varphi_A + \varphi_F = 180^\circ$$

2. 高频或低频区，放大电路与反馈网络，因电路中的电容而产生附加相位移 $\Delta\varphi_A$ 、 $\Delta\varphi_F$

当 $\Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F = 180^\circ$ 时

反馈电压信号和输入电压信号同相

负反馈变为正反馈

(1) 这时如果 $AF \geq 1$, 产生自激振荡。

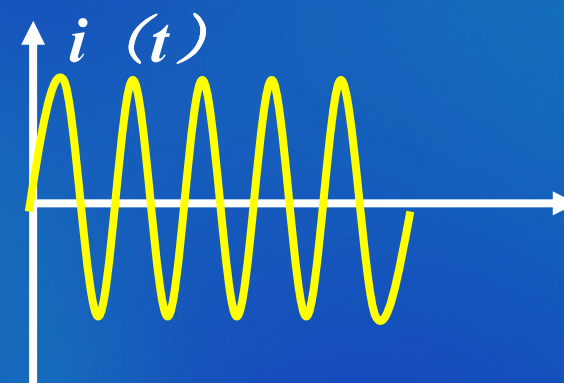
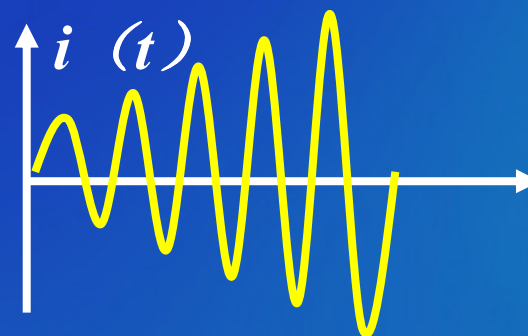
表现形式:

a. 输出信号越来越大。

b. 出现等幅振荡。

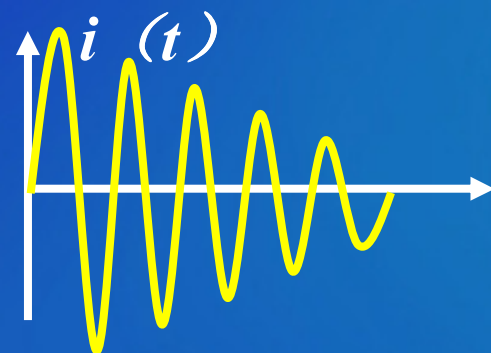
实际情况是:

即使无输入信号, 也有一定的信号输出。



产生自激的输入信号的来源:

- a. 放大电路内部元器件的热噪声电压
- b. 启动电源时的瞬间冲击电压



(2) 此时如果 $AF < 1$

输出信号在不断的减小, 不会产生自激振荡。

结论:

相位条件是产生自激振荡的必要条件

幅度条件产生自激振荡的充分的条件

5.4.2 负反馈放大电路的稳定性

a. 电路包含一或二个惯性环节时，附加相移最大不会超过 180° ；不会产生自激振荡。

b. 电路的级数愈多，附加相移 $|\Delta\varphi_A|$ 愈大，愈容易产生自激振荡。

c. 反馈系数 F 愈大，愈容易产生自激振荡。

1. 判断放大电路是否稳定的方法

(1) 找相位临界频率 f_c

即满足 $|\Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F|_{f=f_c} = 180^\circ$ 的频率点 f_c

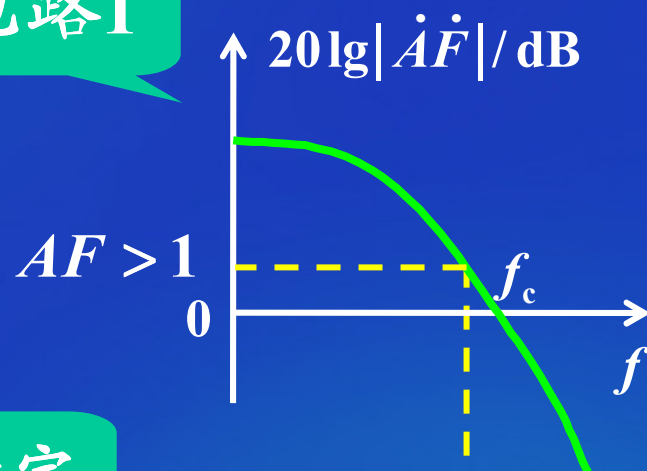
a. 如果 $AF|_{f=f_c} \geq 1$

电路不稳定

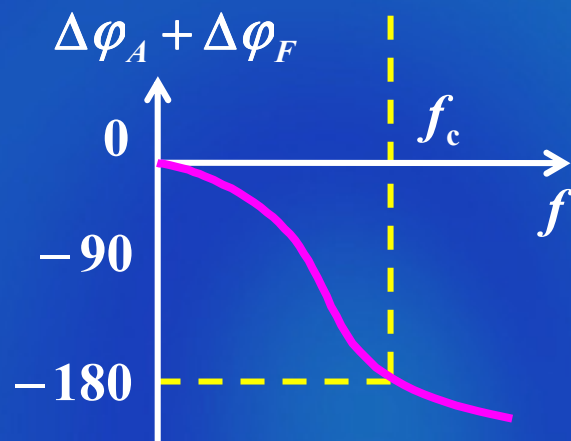
b. 如果 $AF|_{f=f_c} < 1$

电路稳定

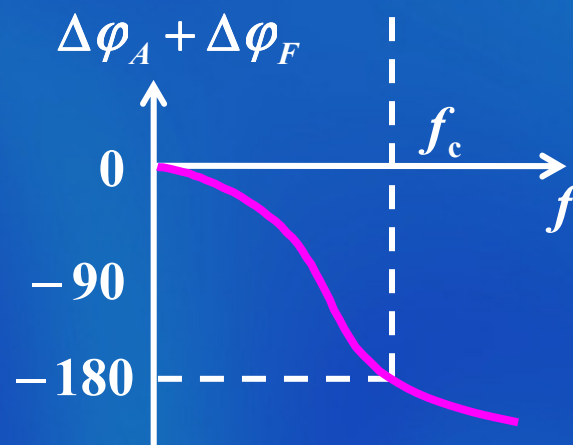
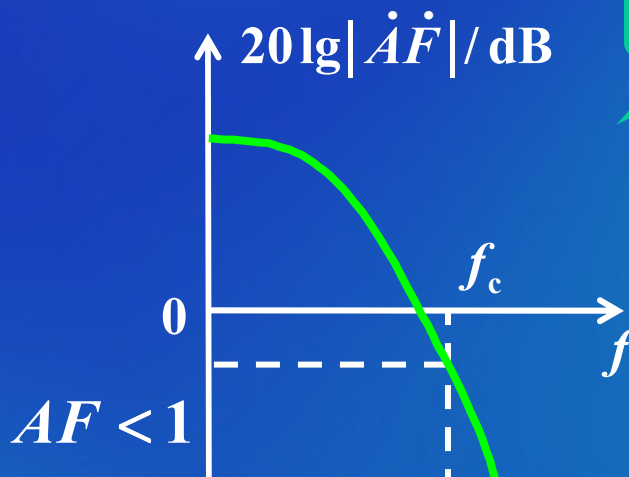
电路1



不稳定



电路2



稳定

(2) 找幅度条件临界频率 f_0

$$f_0 \text{ 满足 } |AF|_{f=f_0} = 1$$

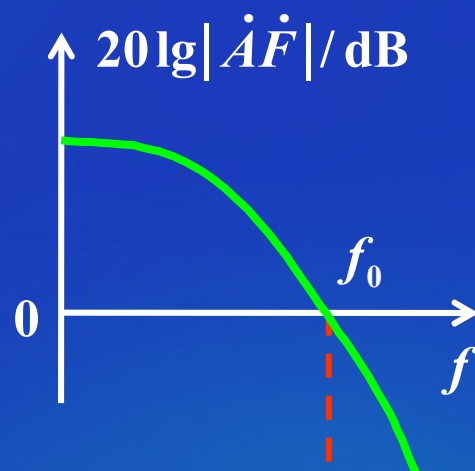
a. 如果 $|\Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F|_{f=f_0} < 180^\circ$

电路稳定

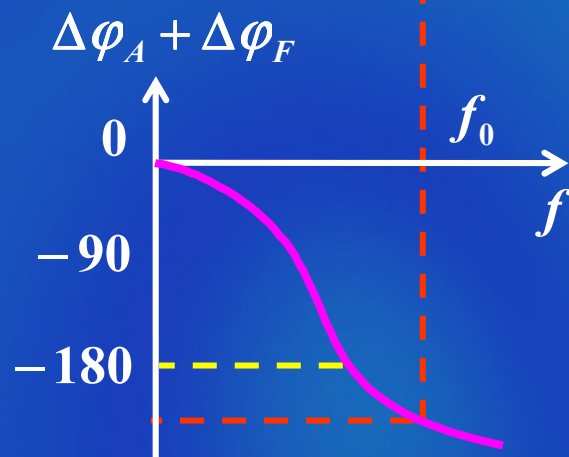
b. 如果 $|\Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F|_{f=f_0} > 180^\circ$

电路不稳定

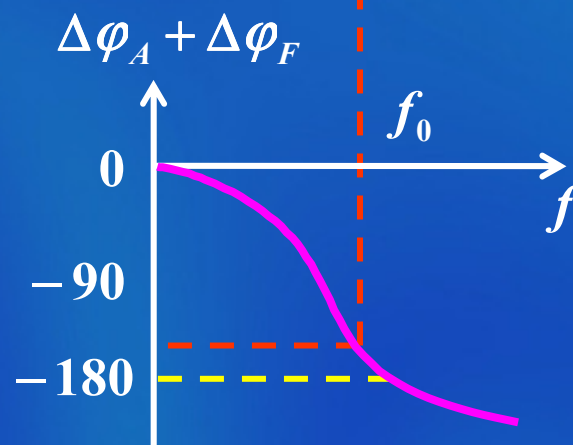
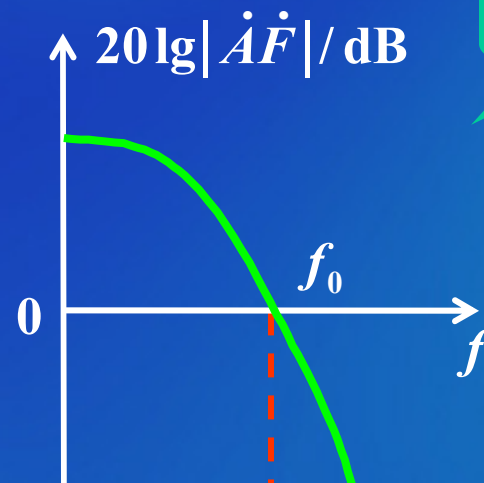
电路1



不稳定



电路2



稳定

上页

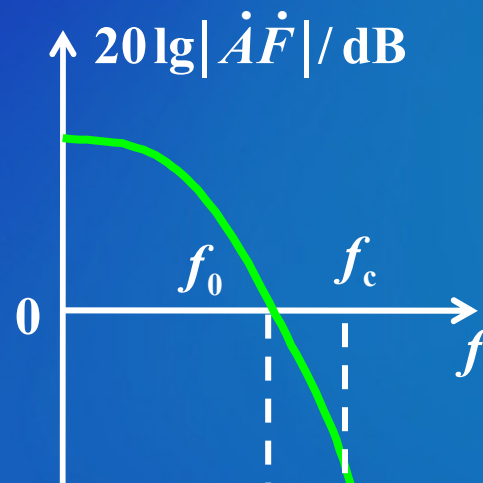
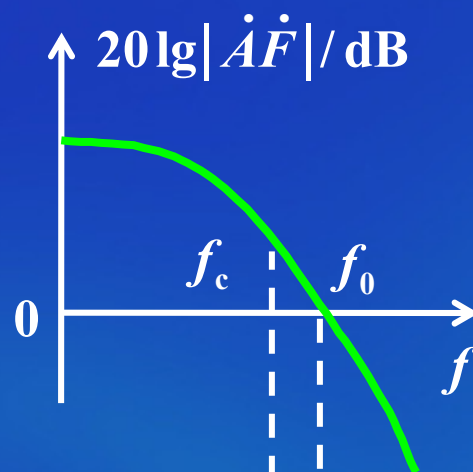
下页

后退

(3) 根据 f_c 和 f_0 的位置判断

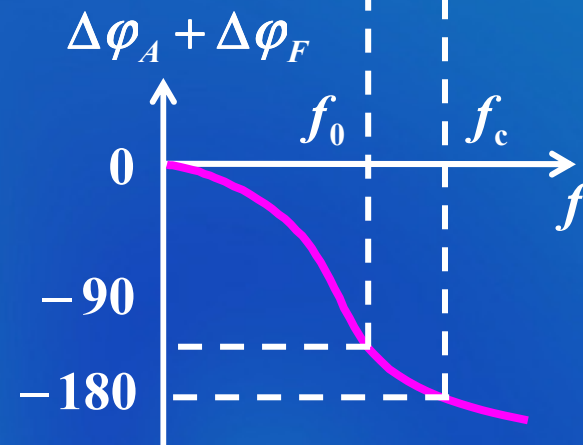
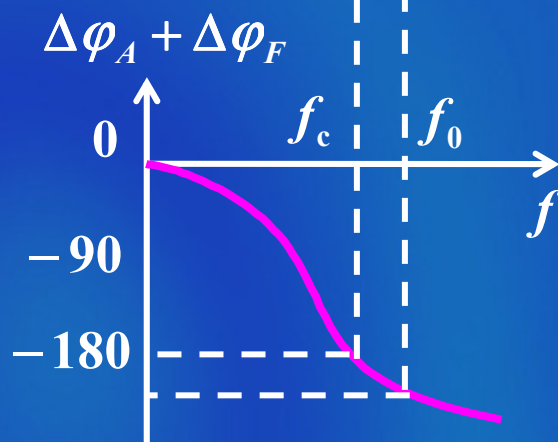
a. 当 $f_c < f_0$ 时

电路不稳定



b. 当 $f_c > f_0$ 时

电路稳定



2. 稳定裕度

(1) 幅度裕度 $G_m(\text{dB})$

要求

$$G_m = 20 \lg |AF| \Big|_{f=f_c} (\text{dB})$$

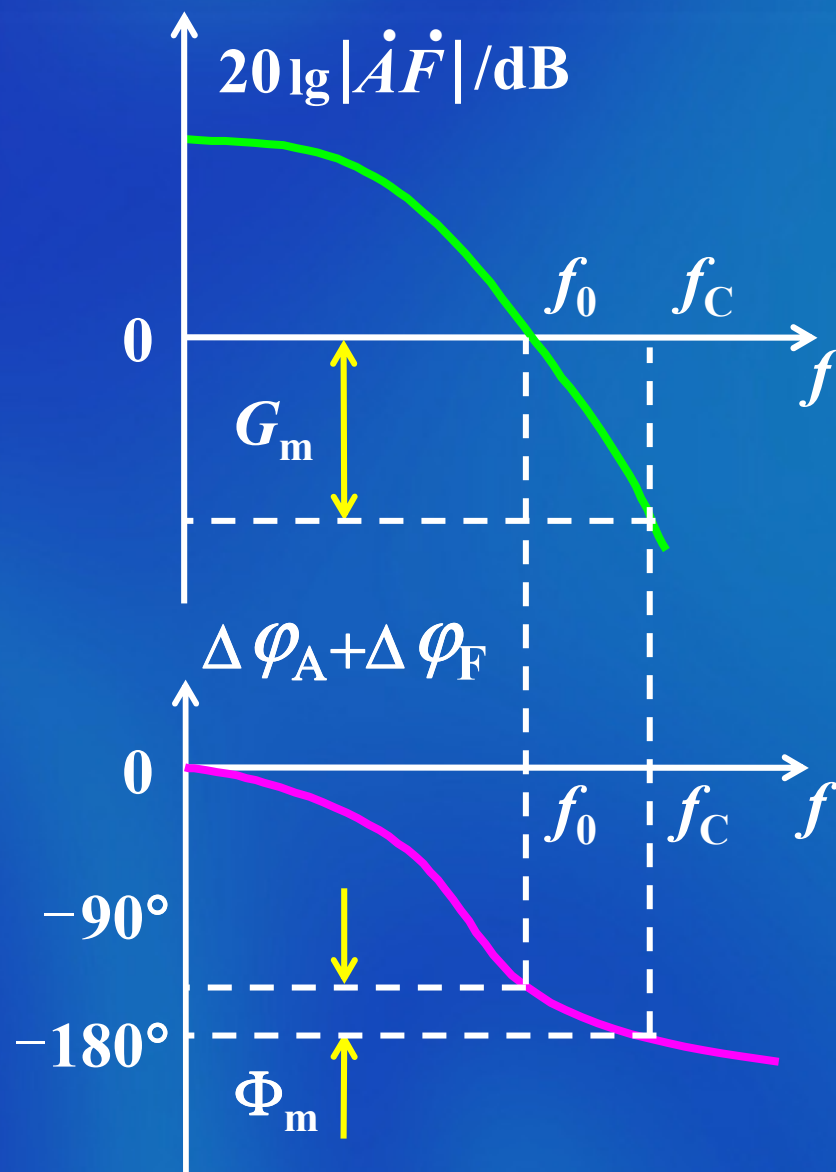
$$\leq -10(\text{dB})$$

(2) 相位裕度 Φ_m

要求

$$\Phi_m = 180^\circ - |\Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F|_{f=f_0}$$

$$> 45^\circ$$



5.4.3 消除自激振荡的方法——相位补偿

相位补偿的思想:

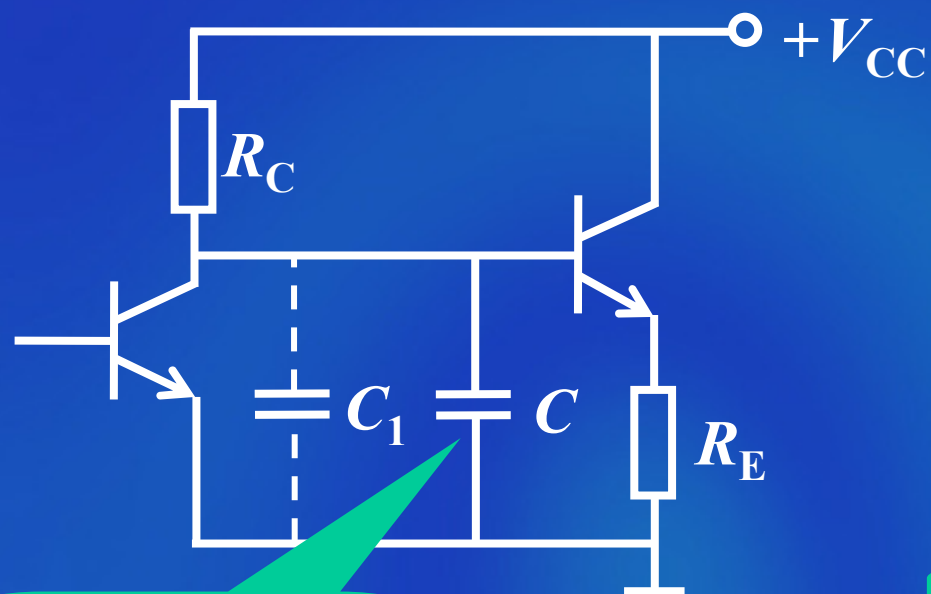
在放大电路中加入 RC 相位补偿网络, 使其具有足够的幅度裕度 G_m 和相位裕度 ϕ_m 。

相位补偿方法 { 滞后补偿
超前补偿

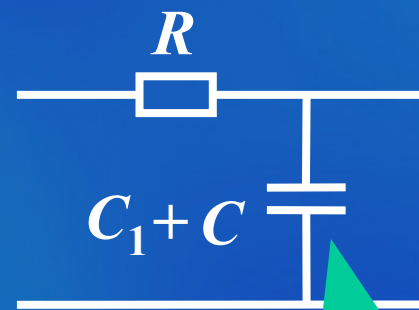
1. 滞后补偿

(1) 补偿方法

在多级放大电路中的上限截止频率最低的一级放大电路中加入 RC 网络。



补偿电容 C



补偿网络等效电路

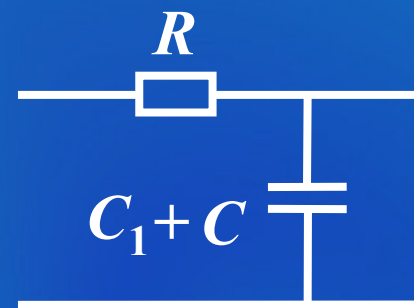
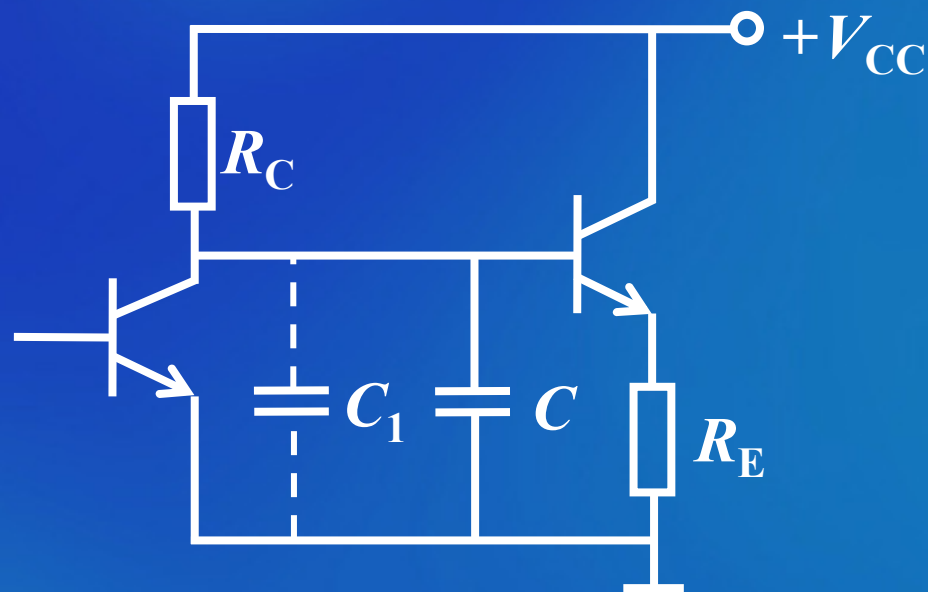
(2) 补偿前后, 该级电路的上限截止频率

补偿前

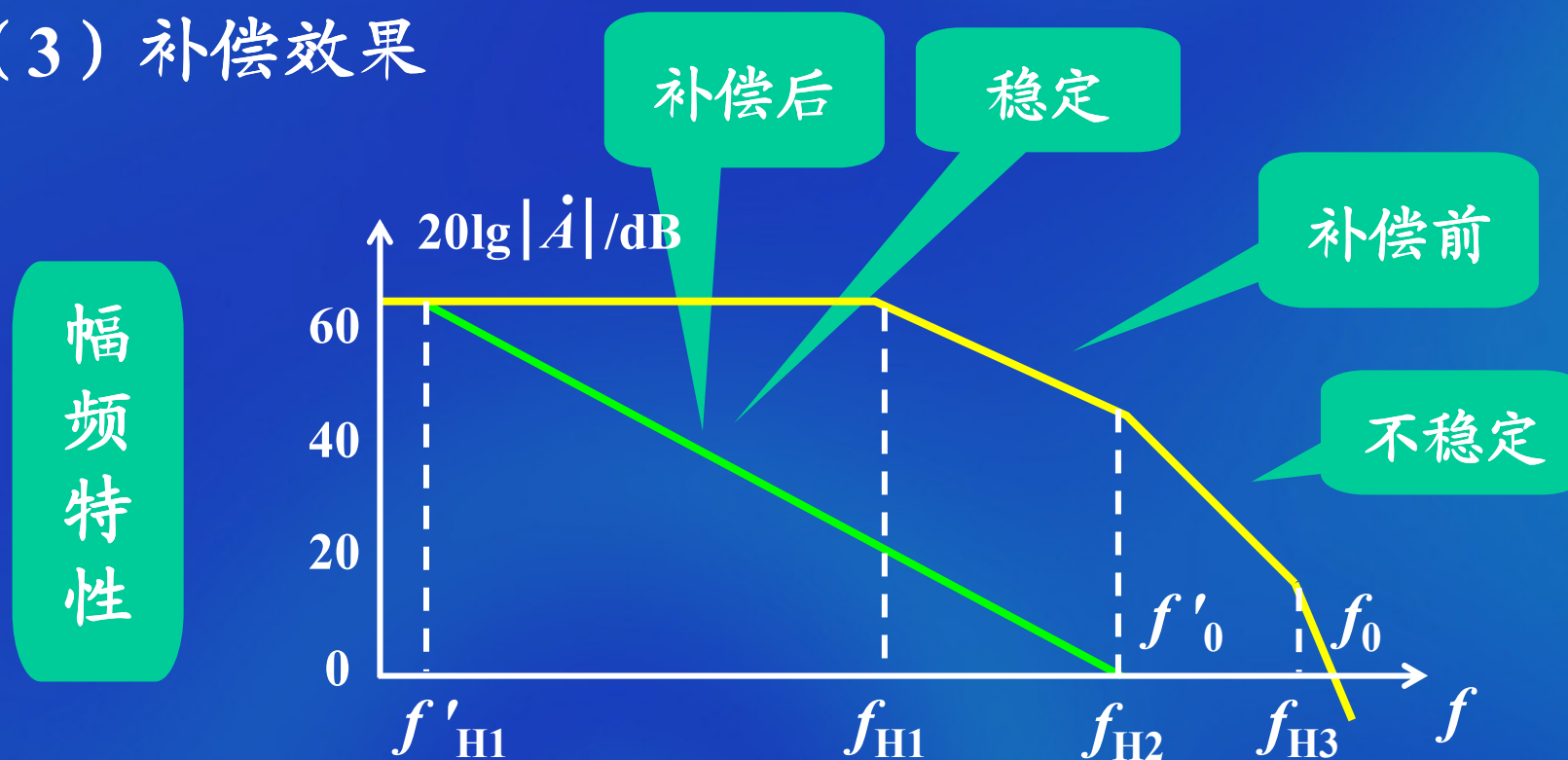
$$f_{H1} = \frac{1}{2\pi RC_1}$$

补偿后

$$f'_{H1} = \frac{1}{2\pi R(C_1 + C)}$$



(3) 补偿效果



由于电容的并入使滞后的附加相移更加滞后，所以称为滞后补偿。

2. 超前补偿

(1) 补偿方法

在反馈网络中加入补偿电容 C ，使 $\Delta\varphi_F > 0$ ，以补偿滞后附加相移 $\Delta\varphi_A$ ($\Delta\varphi_A < 0$)。使

$$|\Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F|_{f=f_0} < 180^\circ$$

(2) 补偿电路

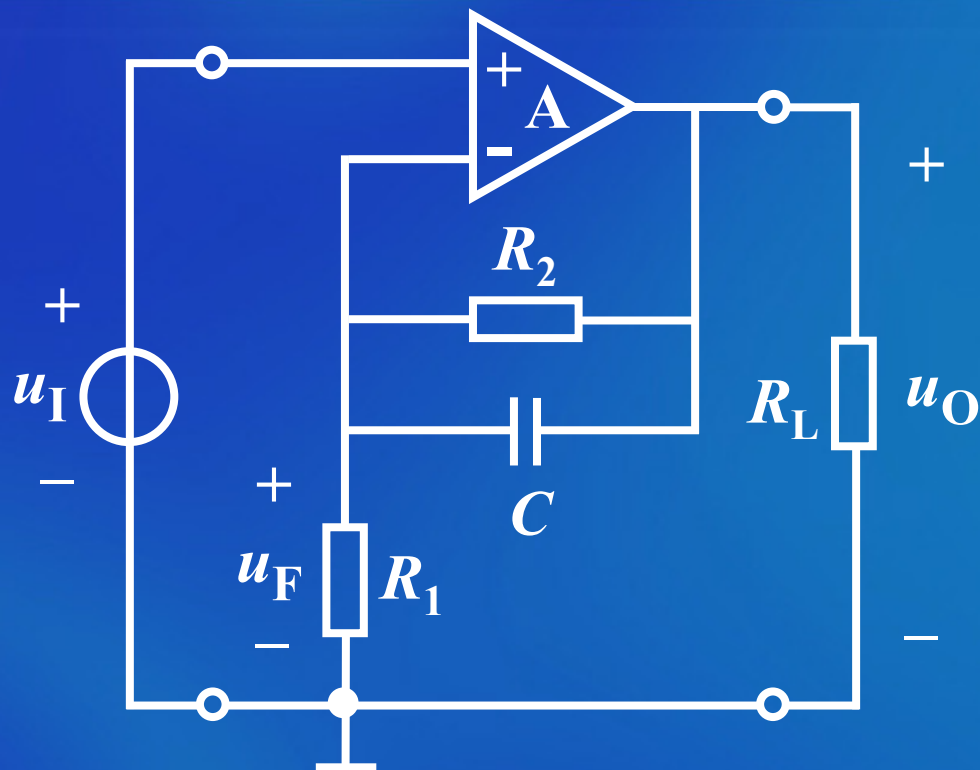
(3) 反馈系数

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}_f}{\dot{A}_0}$$

$$= \frac{R_1}{R_1 + \frac{R_2}{1 + j\omega CR_2}}$$

$$= \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1 + j\omega CR_2}{1 + j\omega C(R_1 // R_2)} = F_0 \frac{1 + j\frac{f}{f_2}}{1 + j\frac{f}{f_1}}$$

补偿电路



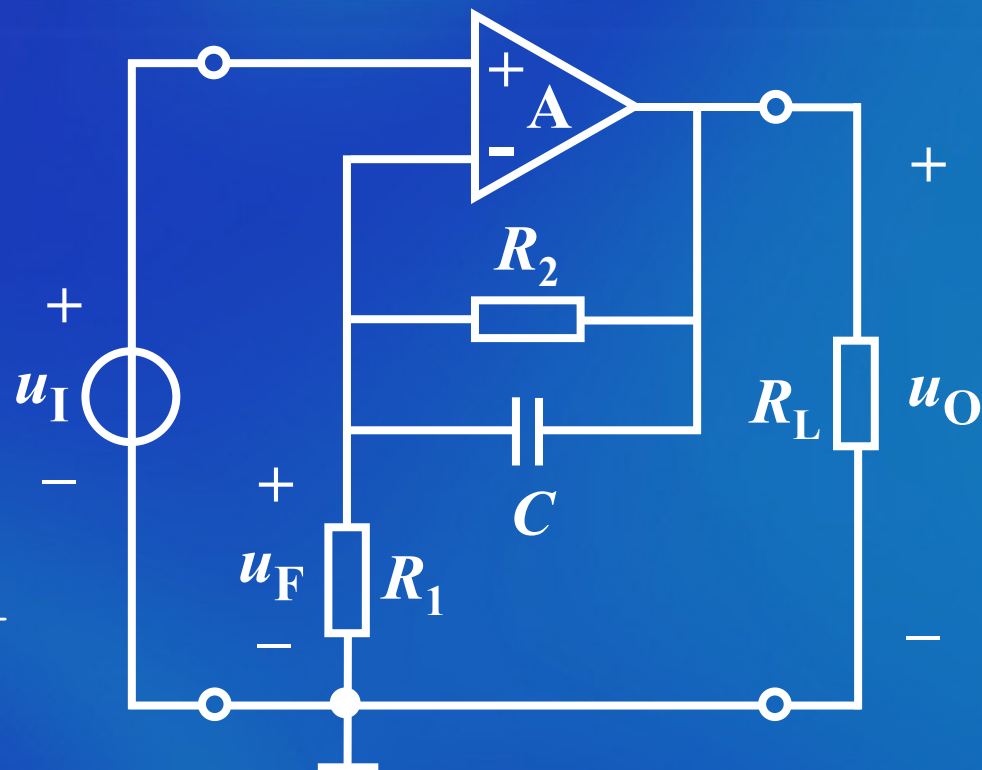
$$\dot{F} = F_0 \frac{1 + j \frac{f}{f_2}}{1 + j \frac{f}{f_1}}$$

式中 $F_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi C (R_1 // R_2)}$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi C R_2}$$

由于 $f_2 < f_1$



反馈放大电路具有超前附加相移