

## 6.3 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。

## 6.3.1 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

$(U_o, U)$

电压并联

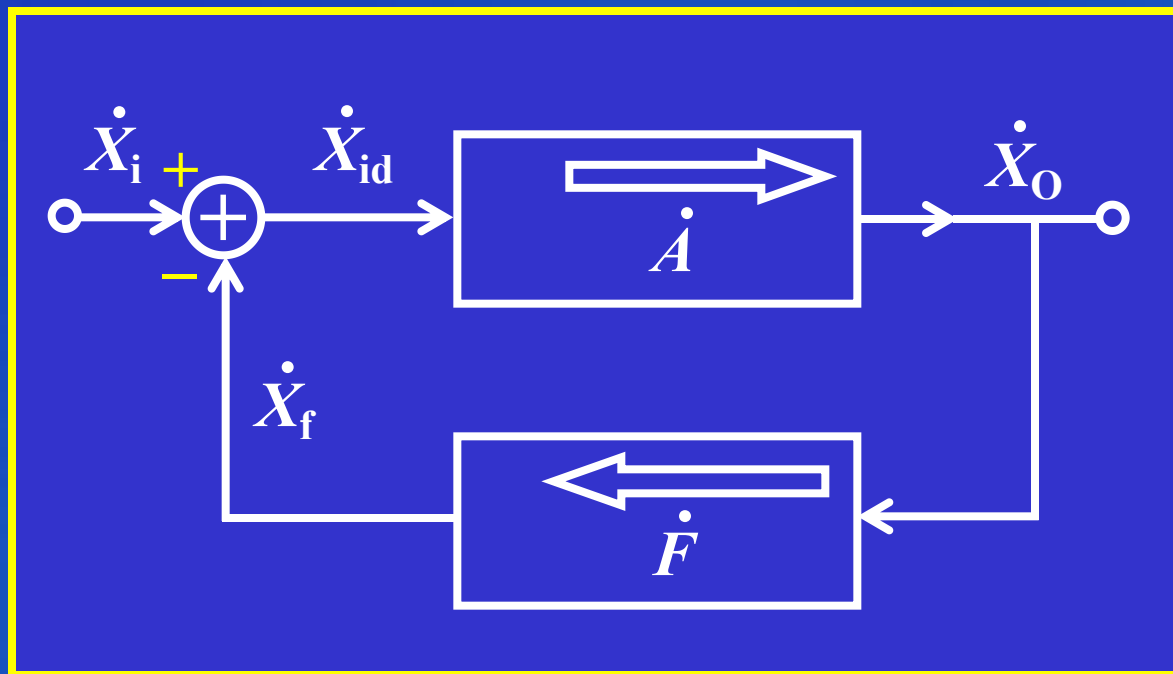
$(U_o, I)$

电流串联

$(I_o, U)$

电流并联

$(I_o, I)$



$\dot{X}$ ——电压或电流

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

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

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

# 四种类型负反馈的表达式

电压串联

( $U_o$ ,  $U$ )

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

电压并联

( $U_o$ ,  $I$ )

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

电流串联

( $I_o$ ,  $U$ )

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

电流并联

( $I_o$ ,  $I$ )

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

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

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

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

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

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

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

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

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

# 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

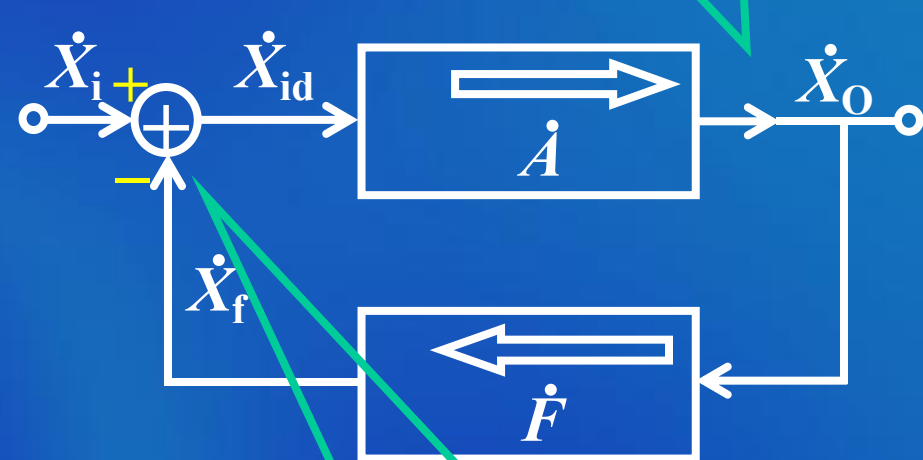
$$\dot{F} = -\frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_0}$$

### 2. 求出反馈增益

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

### 3. 求出电路的电压增益

$$\dot{A}_{uf} = K \dot{A}_f$$

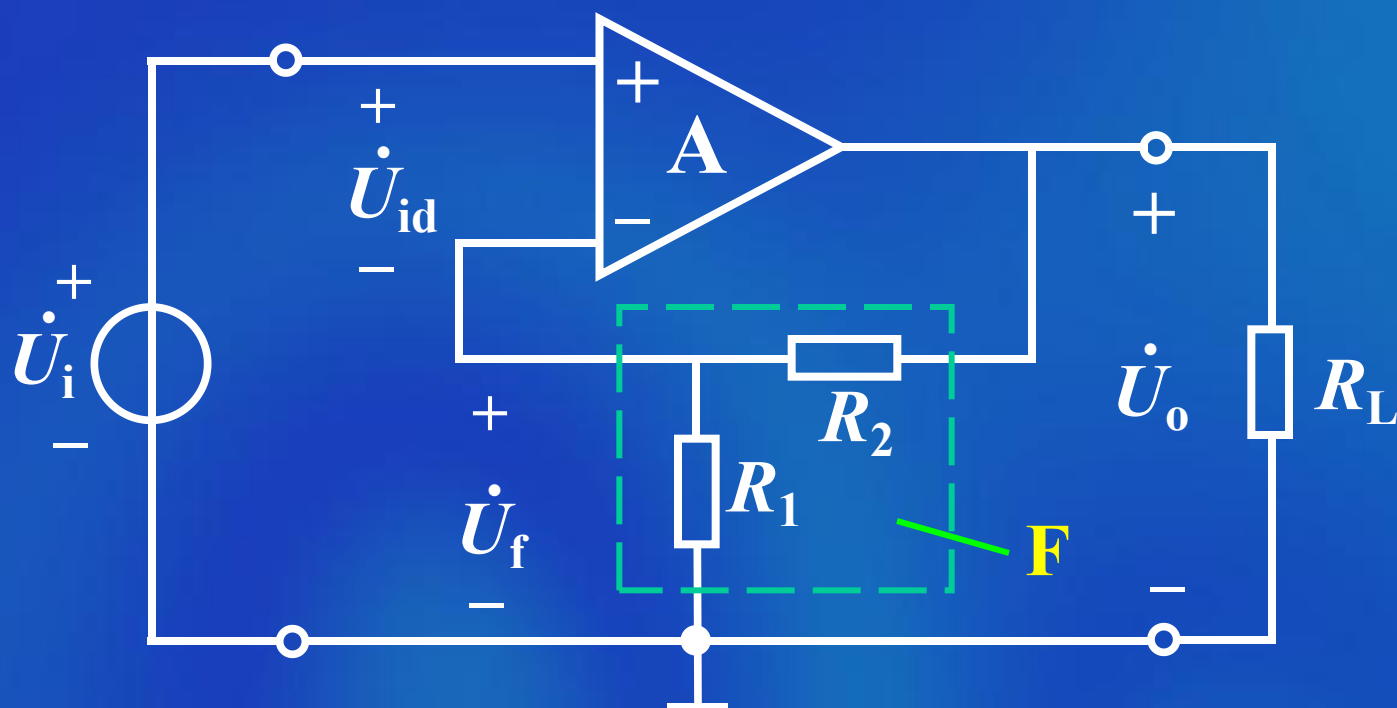


电压反馈-- $U_o$   
电流反馈-- $I_o$

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

## 6.3.2 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）



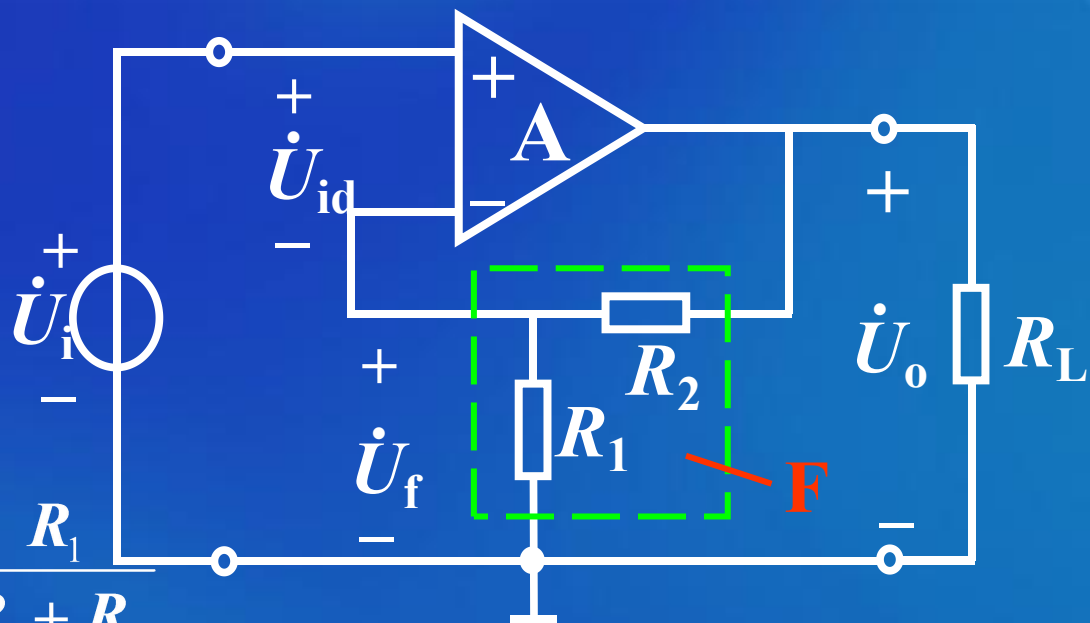


# 1. 电压串联负反馈



A. 反馈系数

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



B. 反馈增益

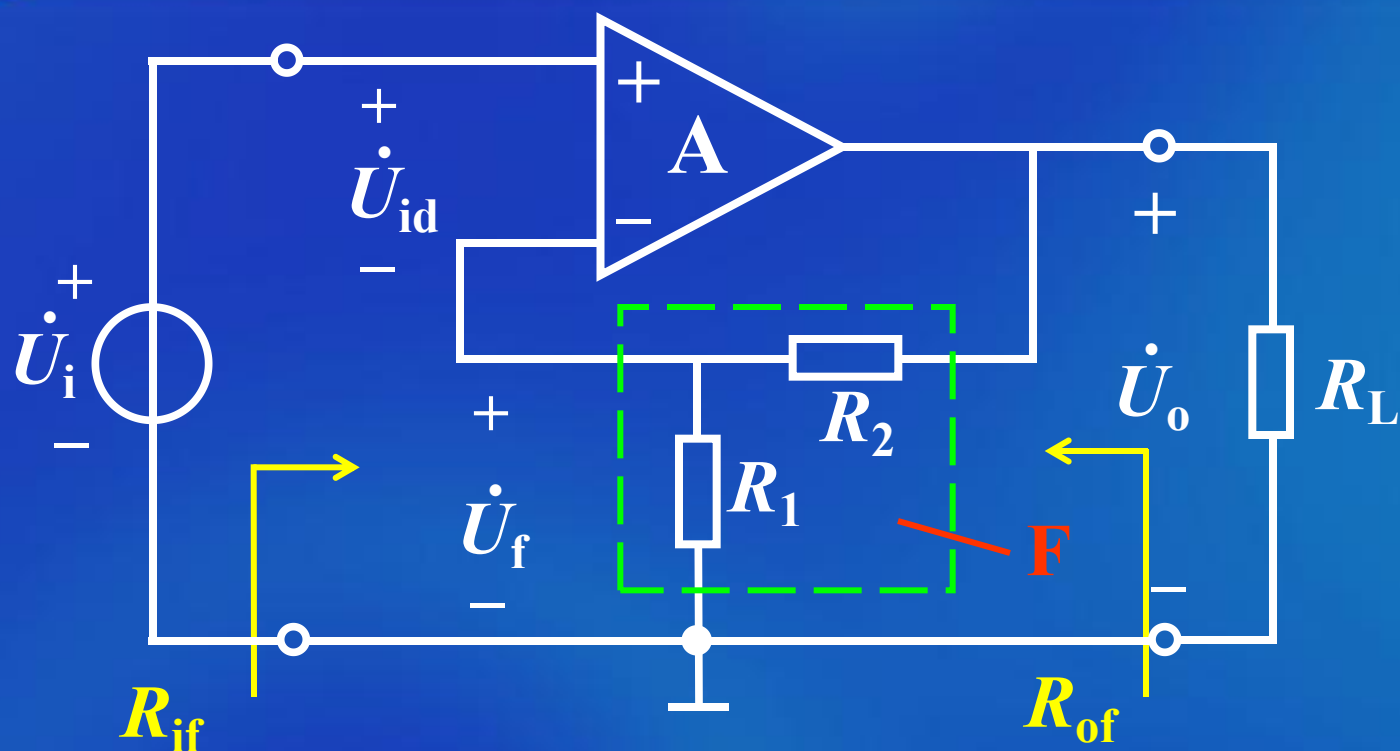
$$A_f = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{1}{F} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

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

C. 电压增益

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

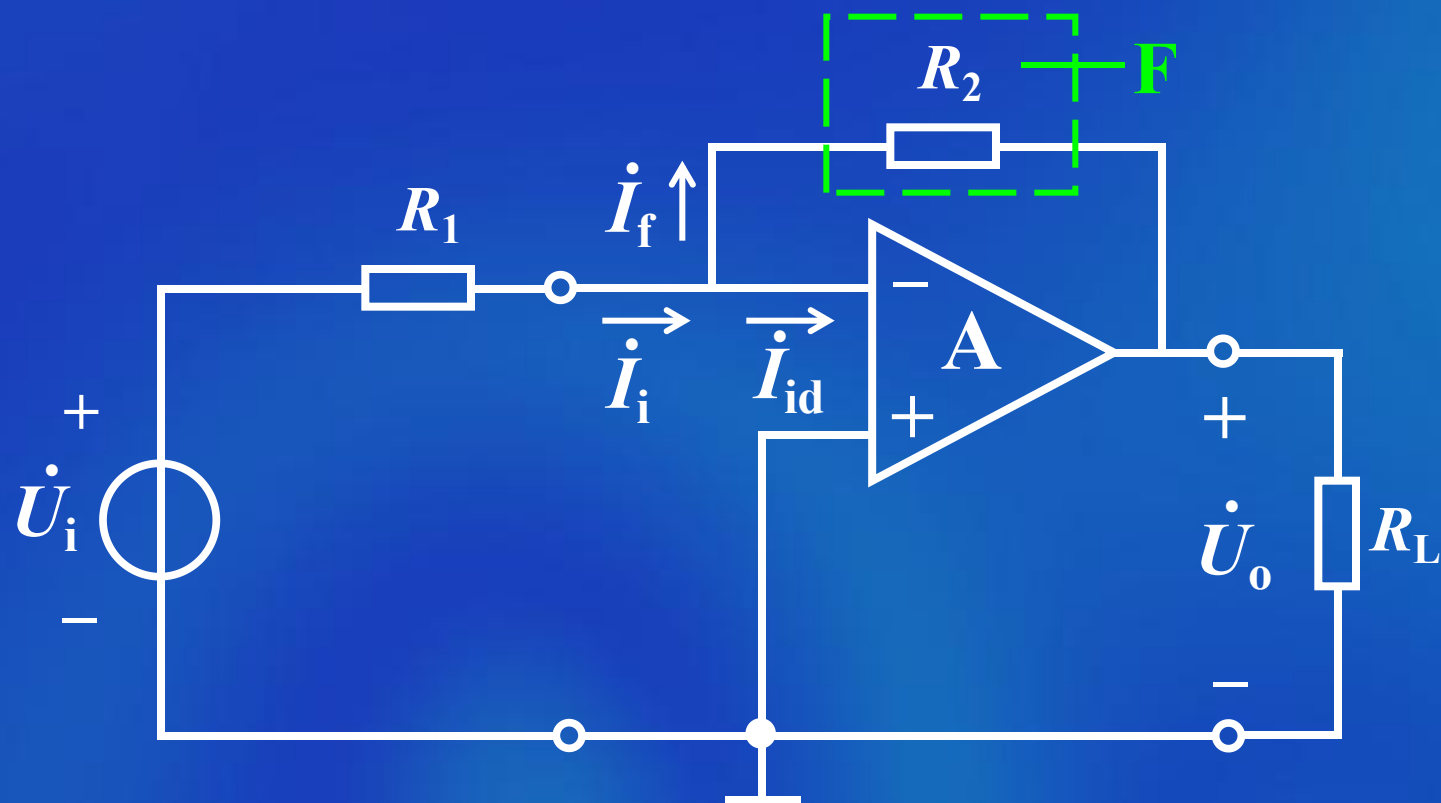
$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$$



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

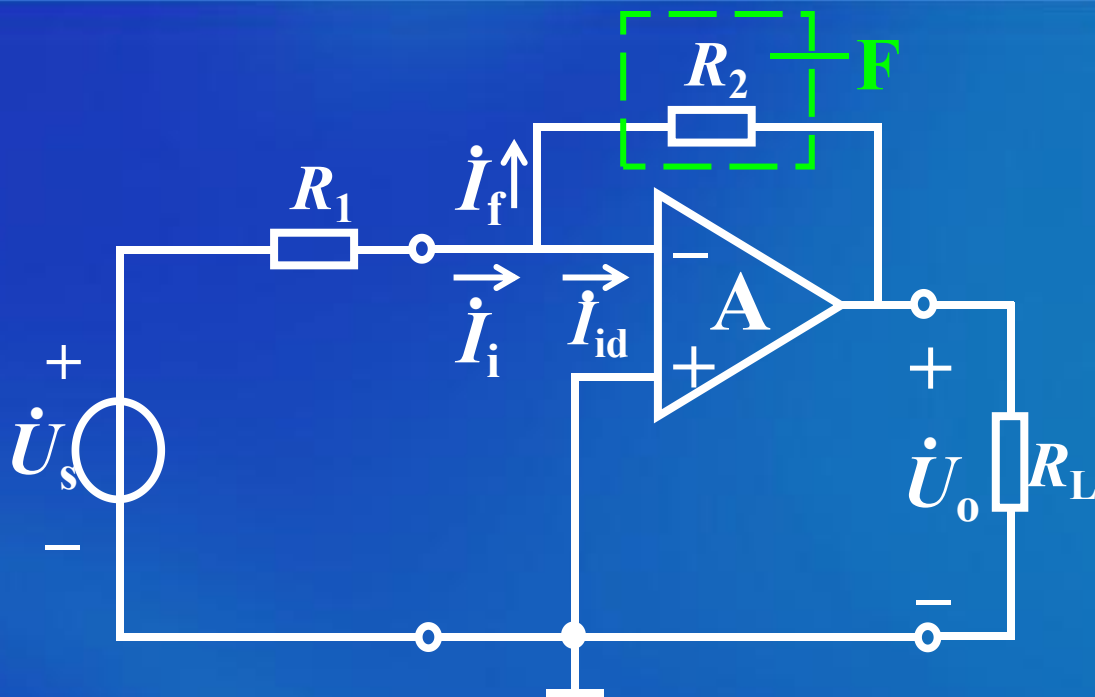
$$A_f = \frac{U_o}{I_i} \approx \frac{1}{F} = -R_2$$

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

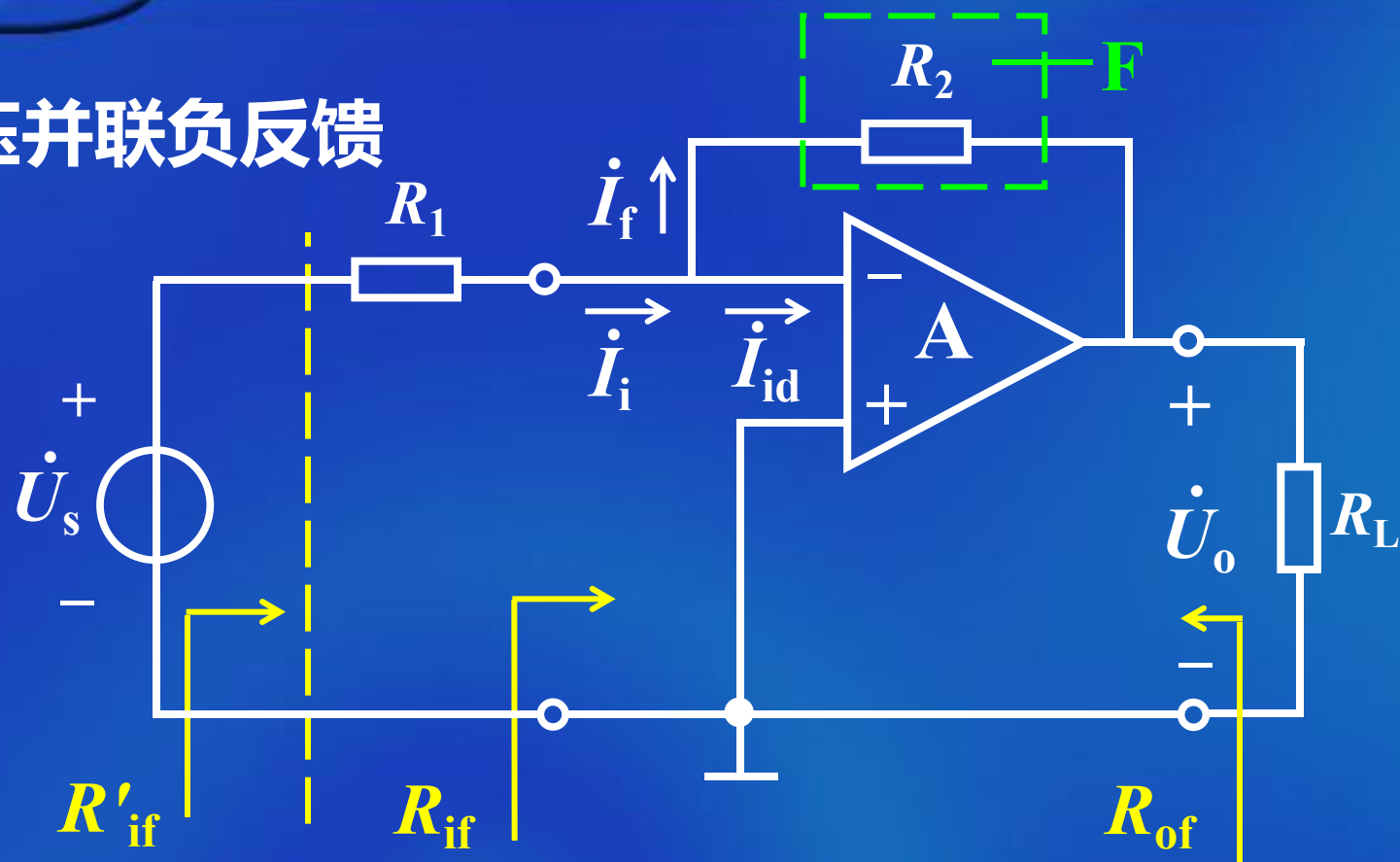
C. 电压增益

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

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



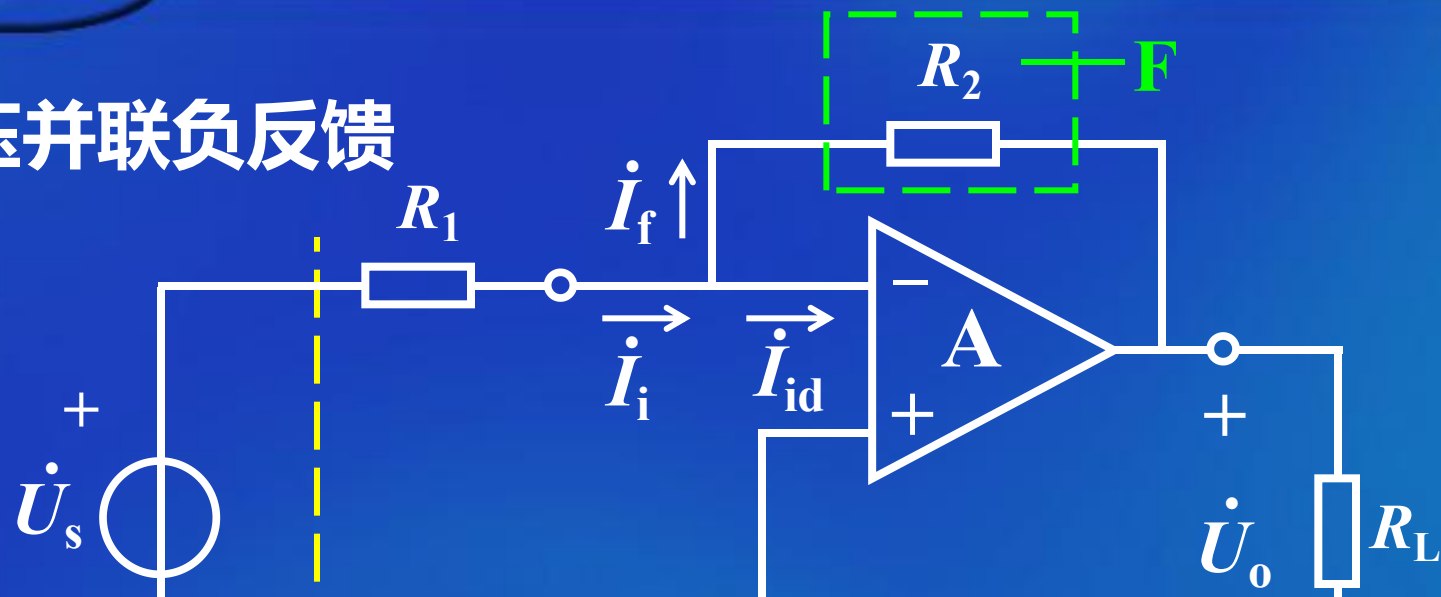
# 电压并联负反馈



输入电阻

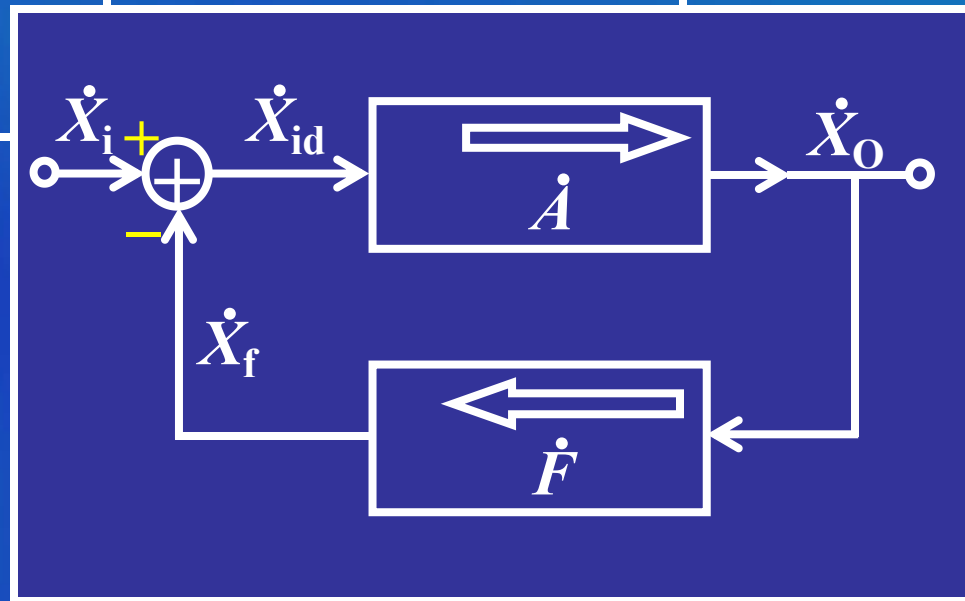
输出电阻

# 电压并联负反馈

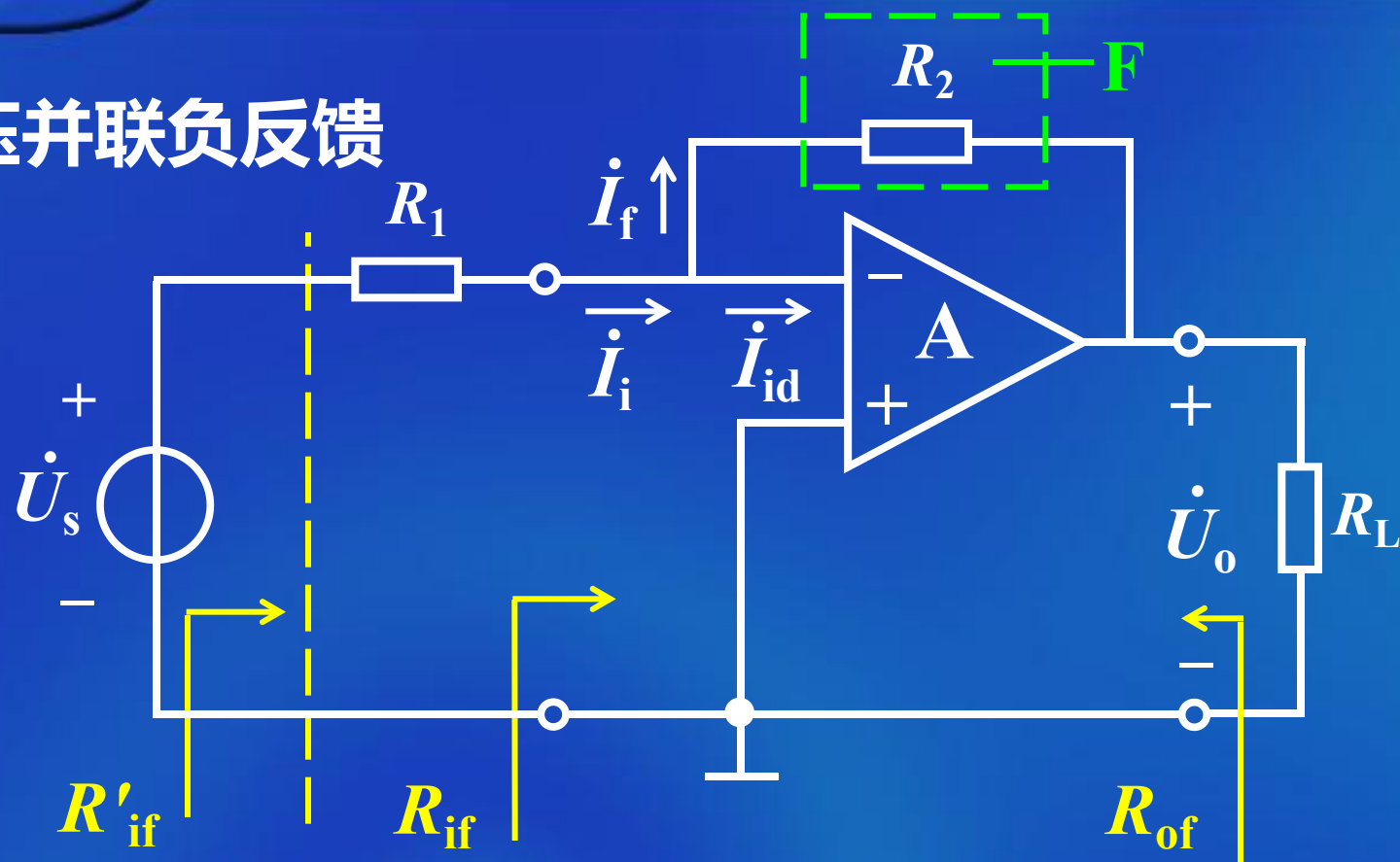


输入电阻  $R_{if} \approx 0$

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



# 电压并联负反馈



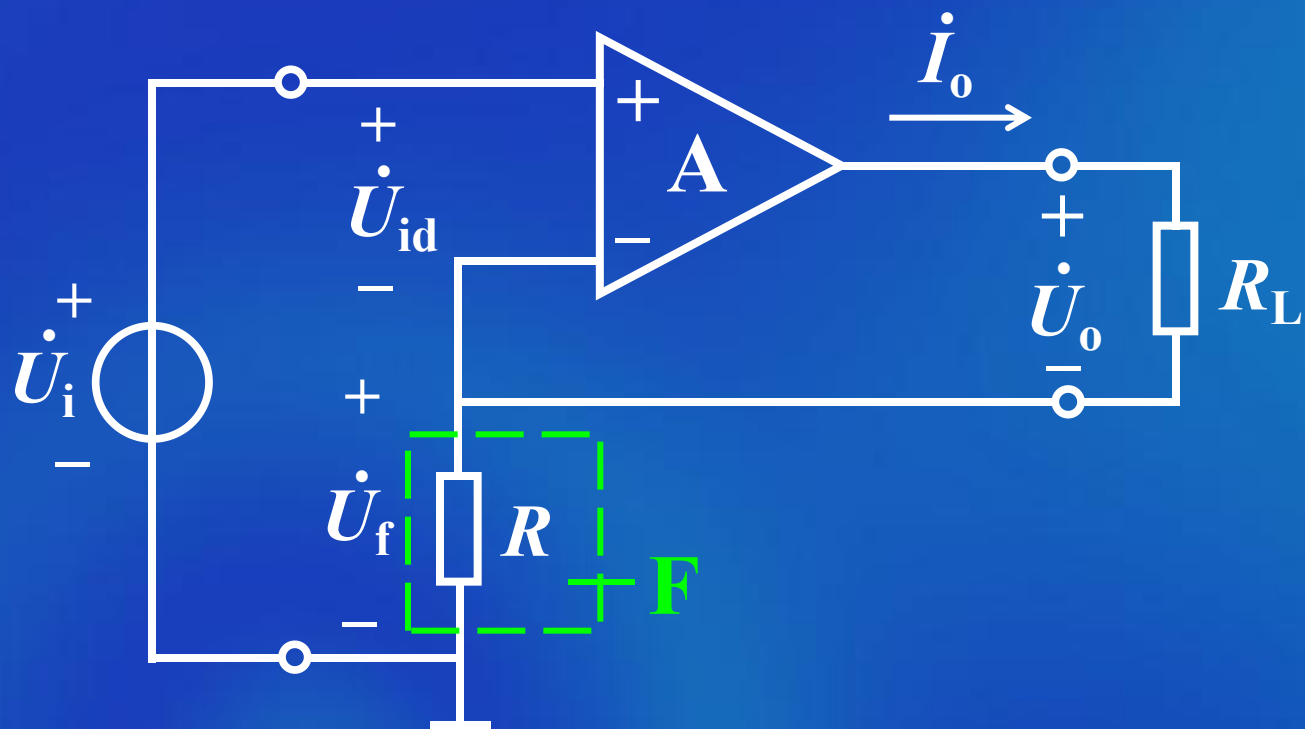
输入电阻  $R_{if} \approx 0$

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

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

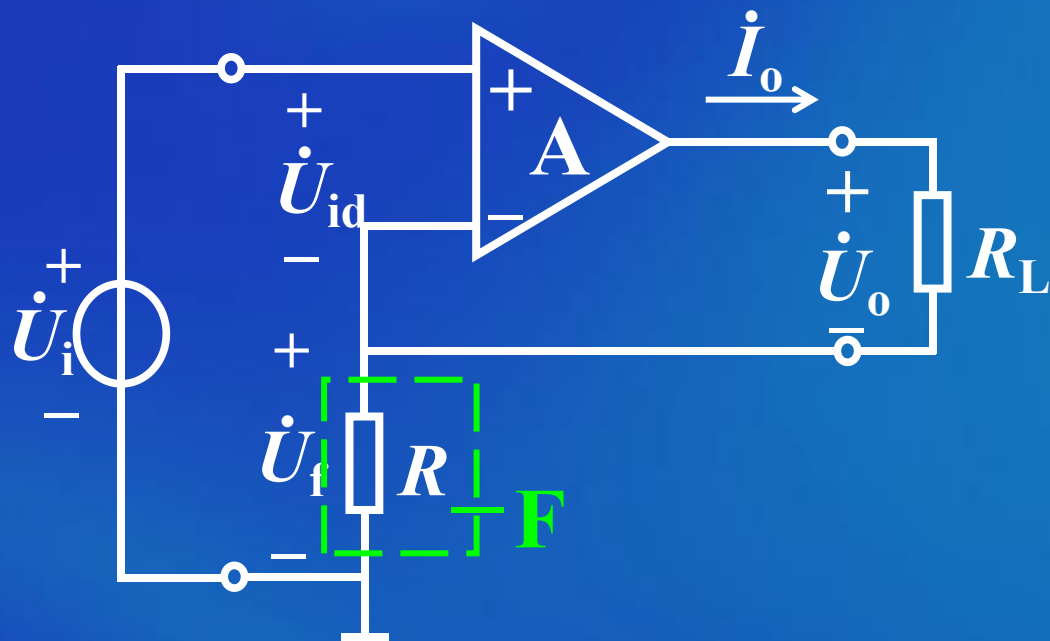
$$F = \frac{U_f}{I_o} = R$$

B. 反馈增益

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

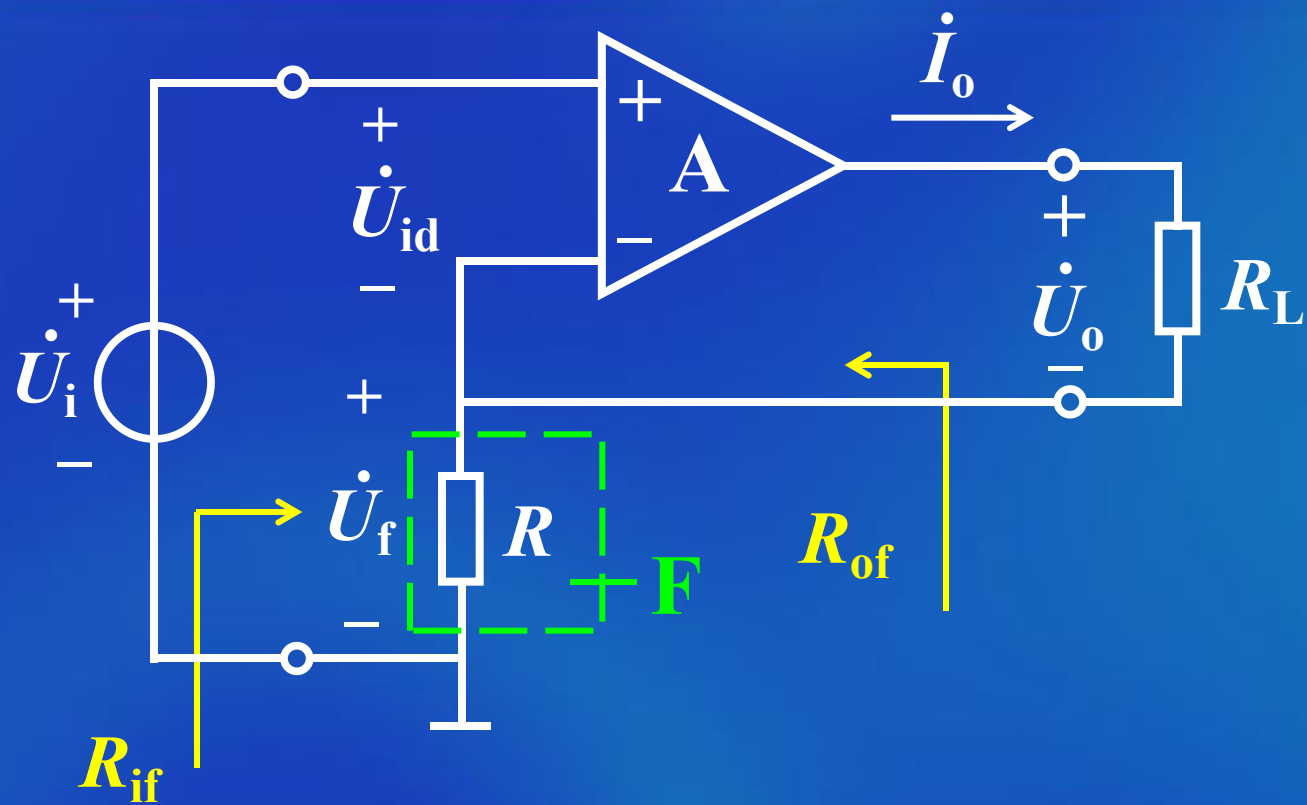
C. 电压增益

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



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

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

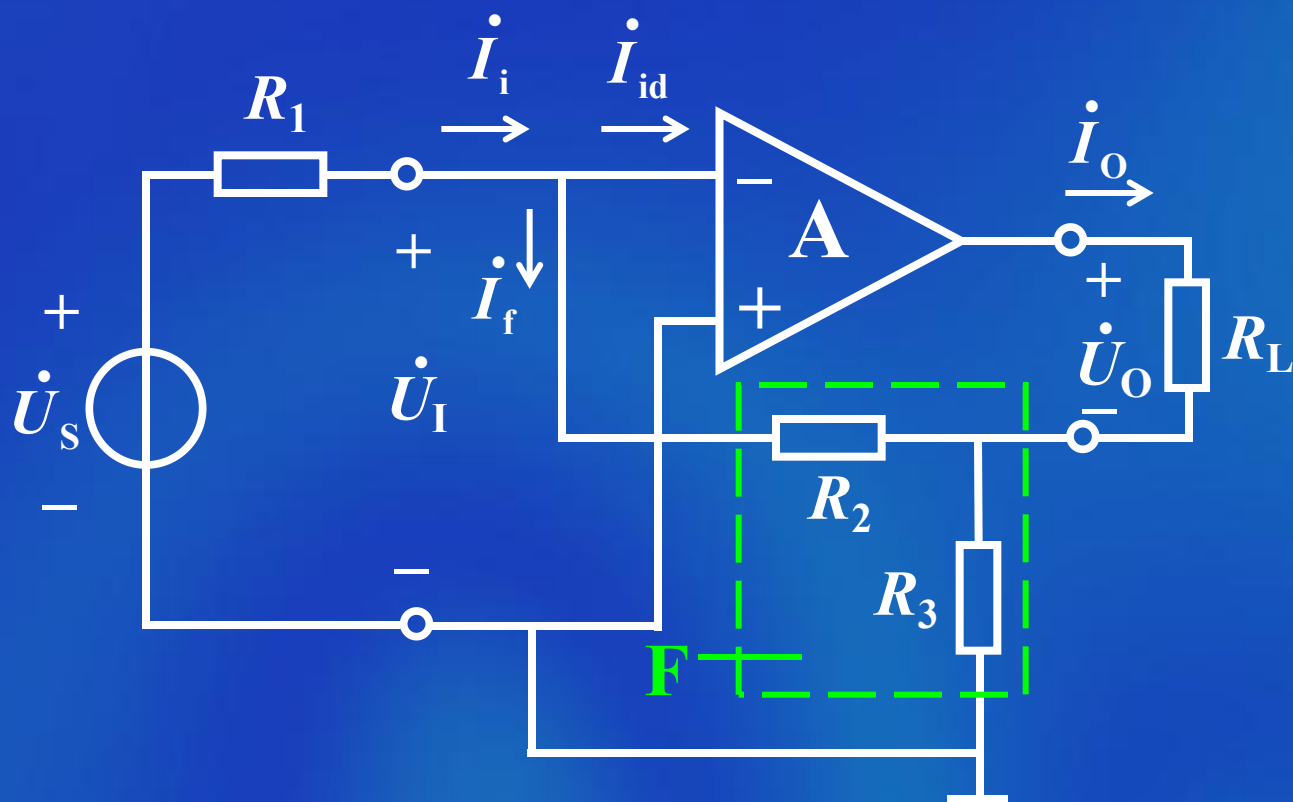


## 输入与输出电阻

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

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

## 4. 电流并联负反馈→电流放大器



## 4. 电流并联负反馈

$I_o$

$I$

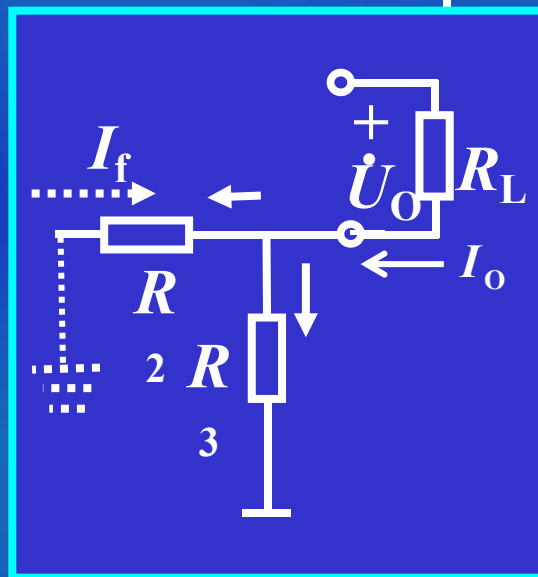
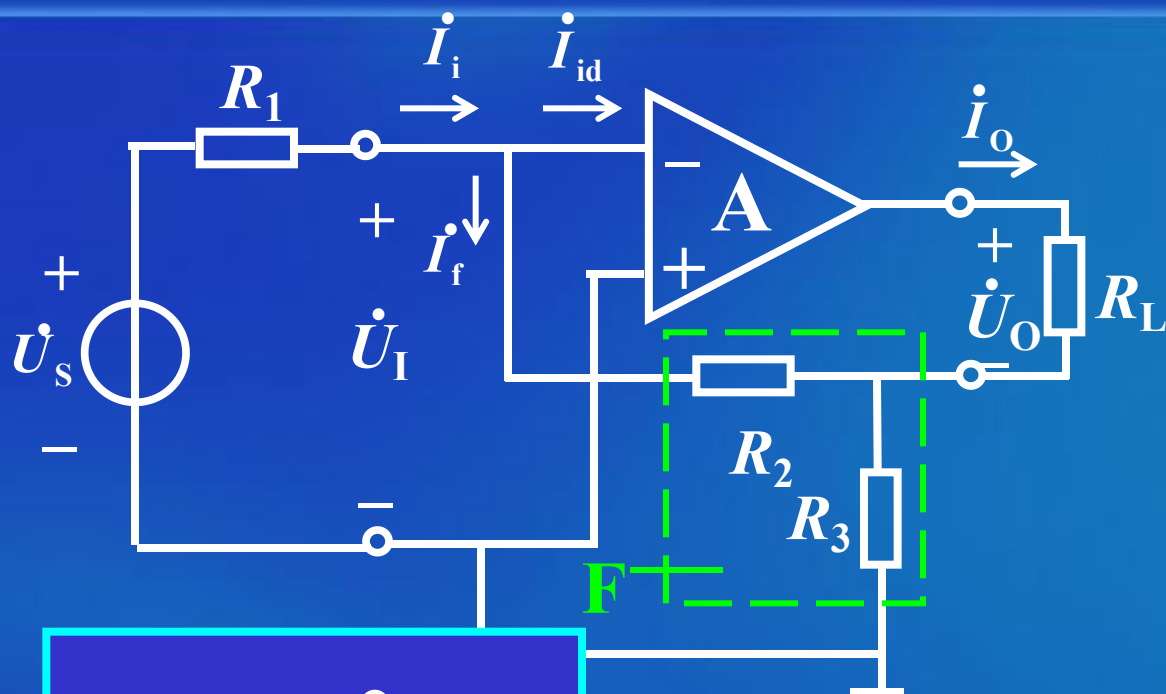
A. 反馈系数

$$F = \frac{I_f}{I_o}$$

$$= -\frac{R_3}{R_2 + R_3} = -\frac{R_3}{R_2 + R_3}$$

B. 反馈增益

C. 电压增益



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

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

## 4. 电流并联负反馈

$I_o$

$I$

### A. 反馈系数

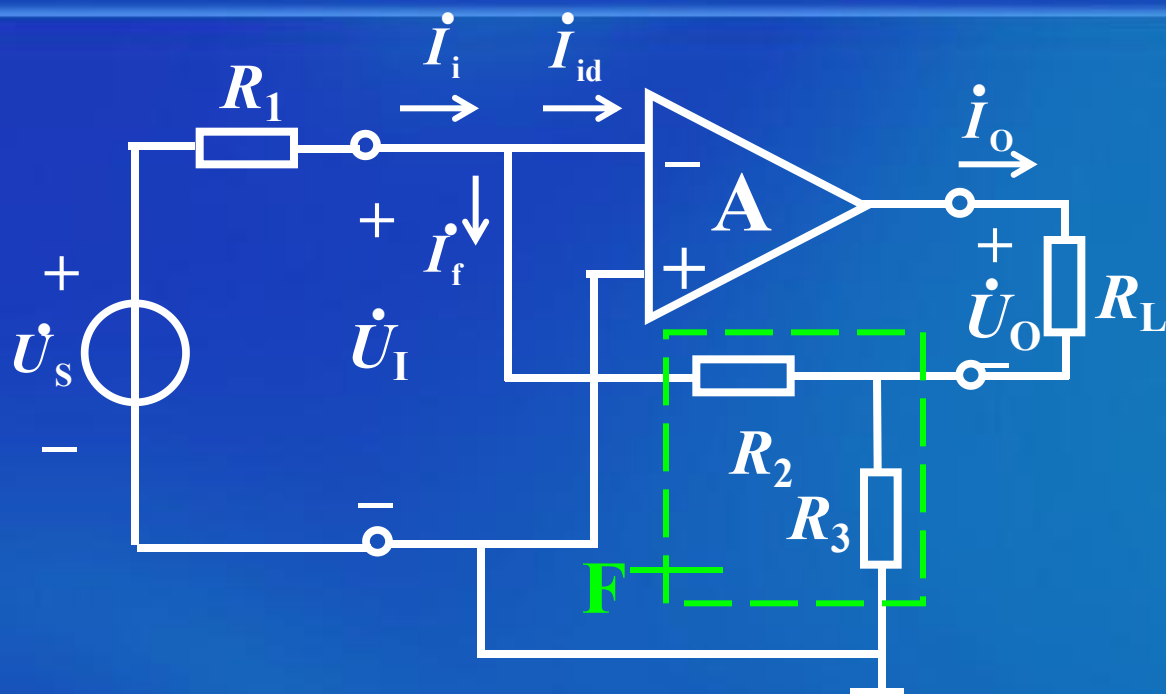
$$F = \frac{I_f}{I_o} = -\frac{R_3}{R_2 + R_3} I_o = -\frac{R_3}{R_2 + R_3}$$

### B. 反馈增益

$$A_f = \frac{I_o}{I_i} \approx \frac{1}{F} = -\frac{R_2 + R_3}{R_3} = -(1 + \frac{R_2}{R_3})$$

### C. 电压增益

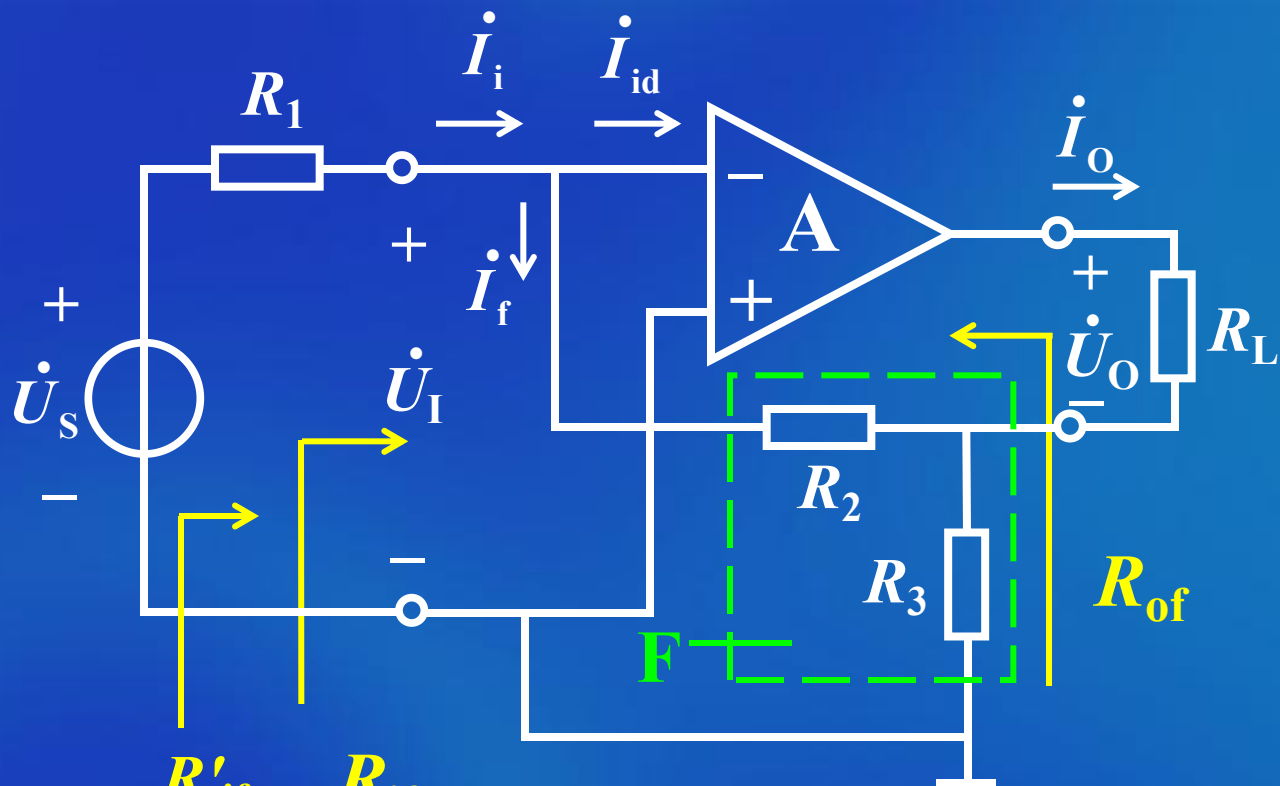
$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_s} = \frac{I_o R_L}{I_i R_1} = A_f \frac{R_L}{R_1} = -(1 + \frac{R_2}{R_3}) \cdot \frac{R_L}{R_1}$$



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

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

# 输入、输出电阻



$$R_{if} \approx 0$$

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

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

# 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

并联负反馈  $R_{if} = \frac{R_i}{1 + AF} \approx 0$

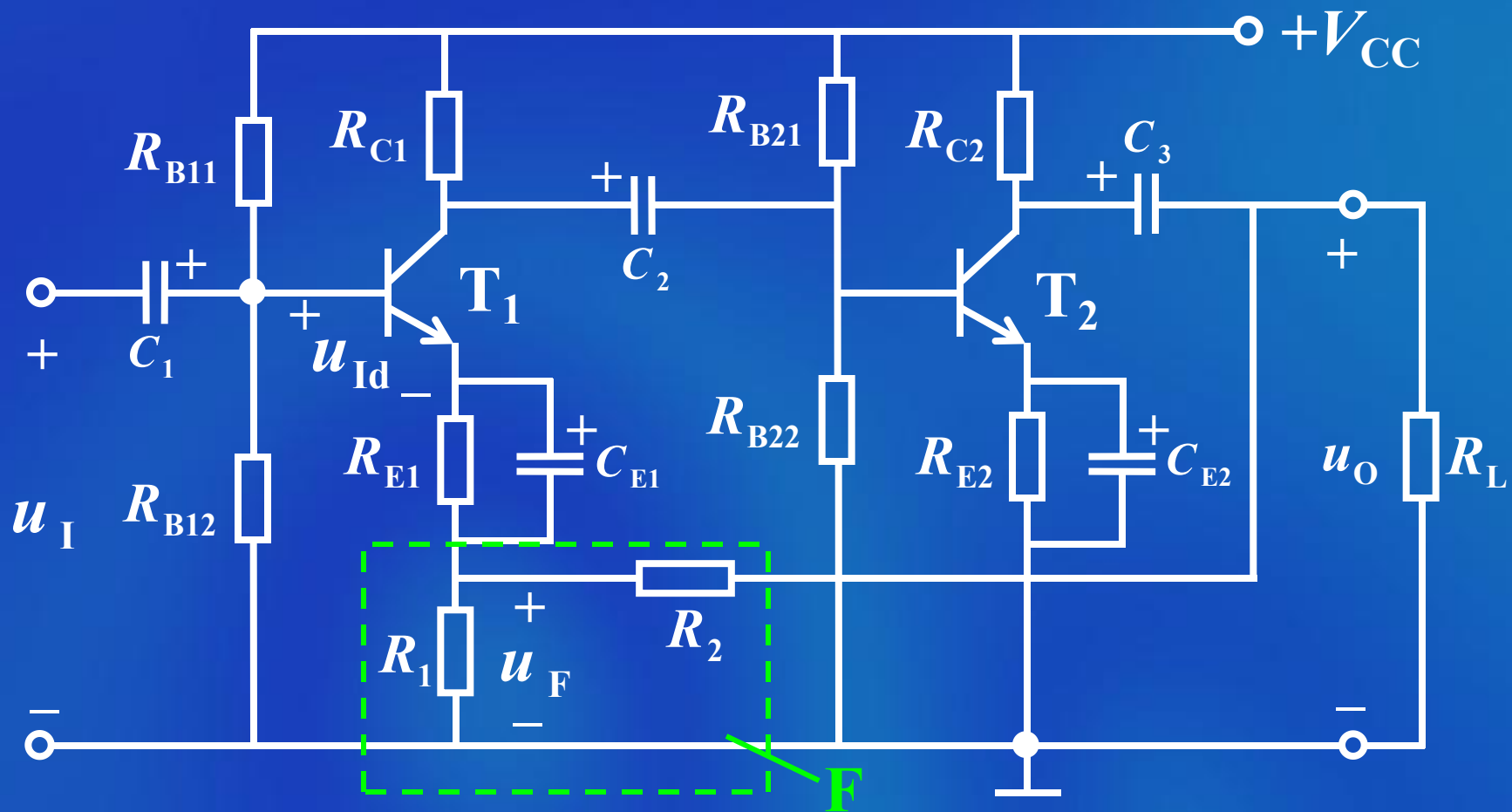
串联负反馈  $R_{if} = (1 + AF)R_i \approx \infty$

电流负反馈  $R_{of} = (1 + AF)R_o \approx \infty$

电压负反馈  $R_{of} = \frac{R_o}{1 + AF} \approx 0$

## 6.3.3 分立元件组成的反馈电路

### 1. 反馈



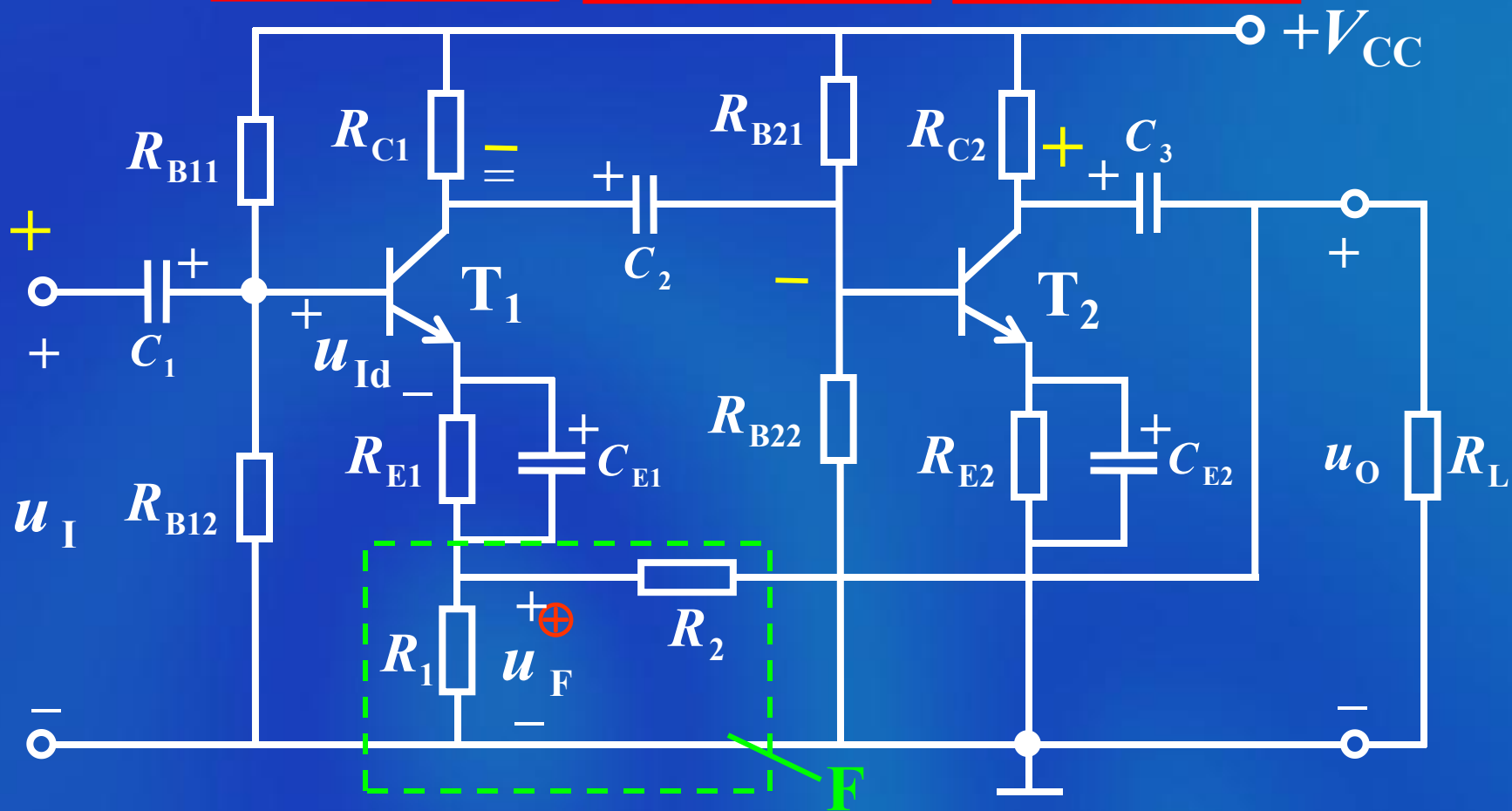


# (1) 反馈的判断

电压反馈

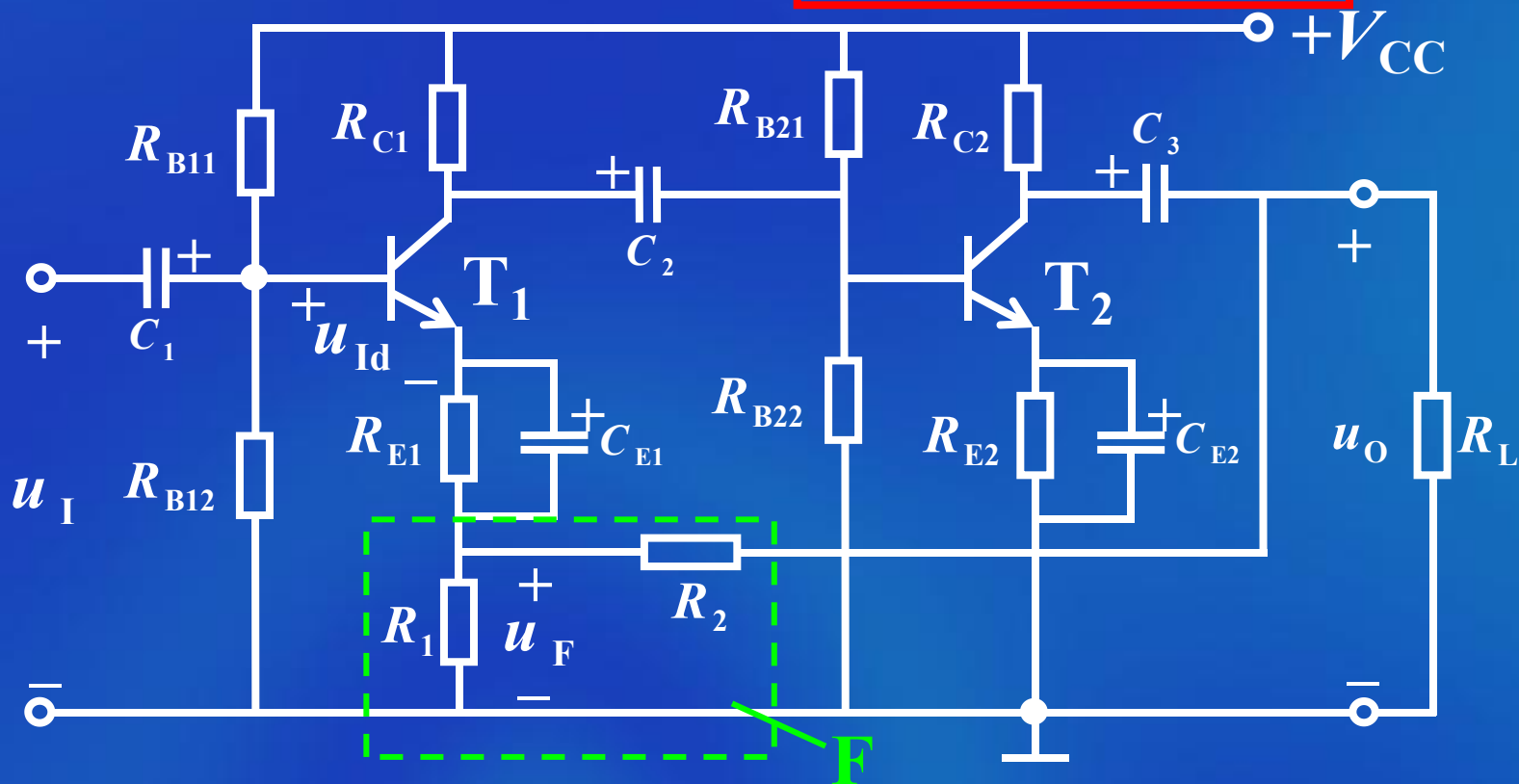
串联反馈

负反馈

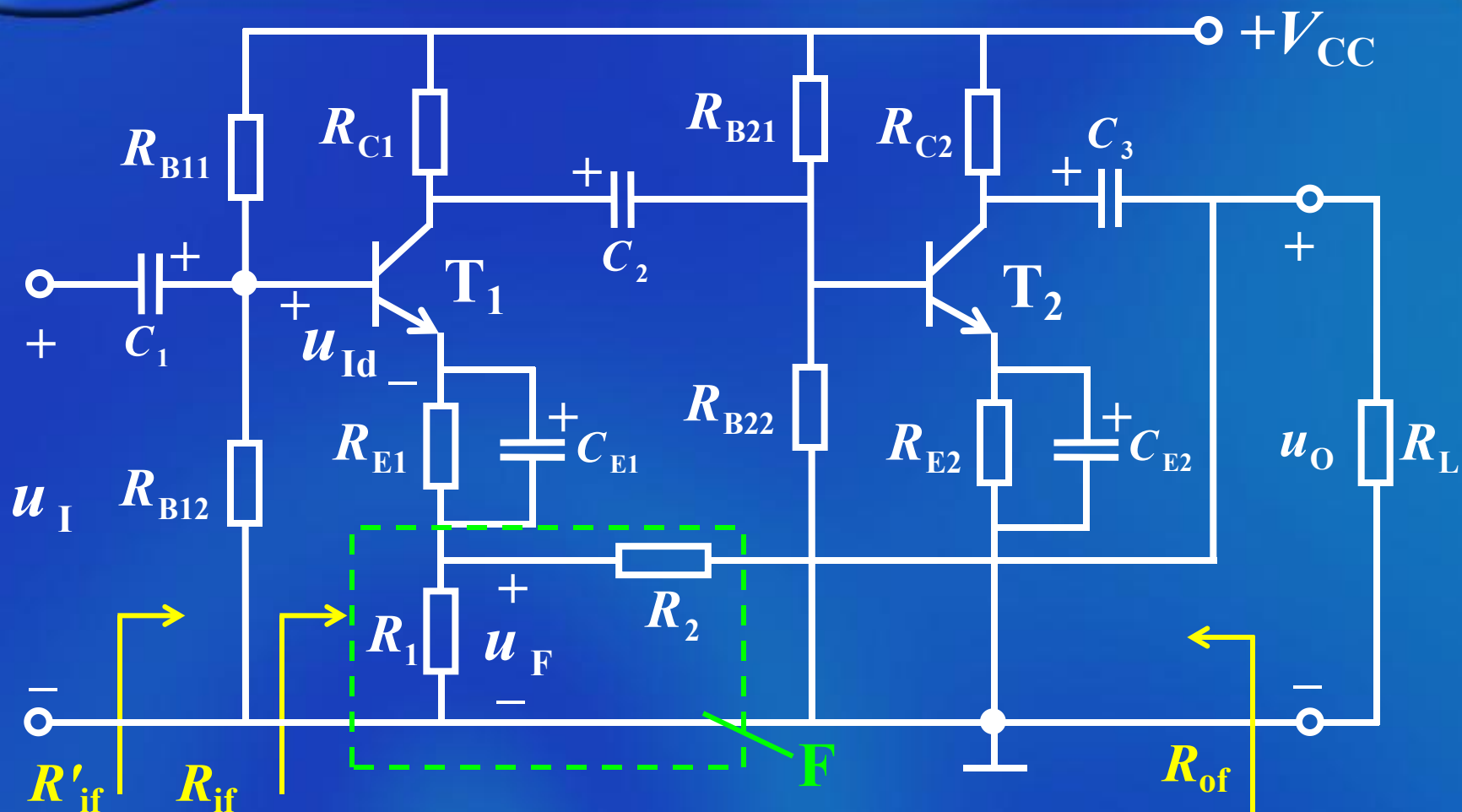


## 电压串联负反馈

## (2) 闭环电压放大倍数



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



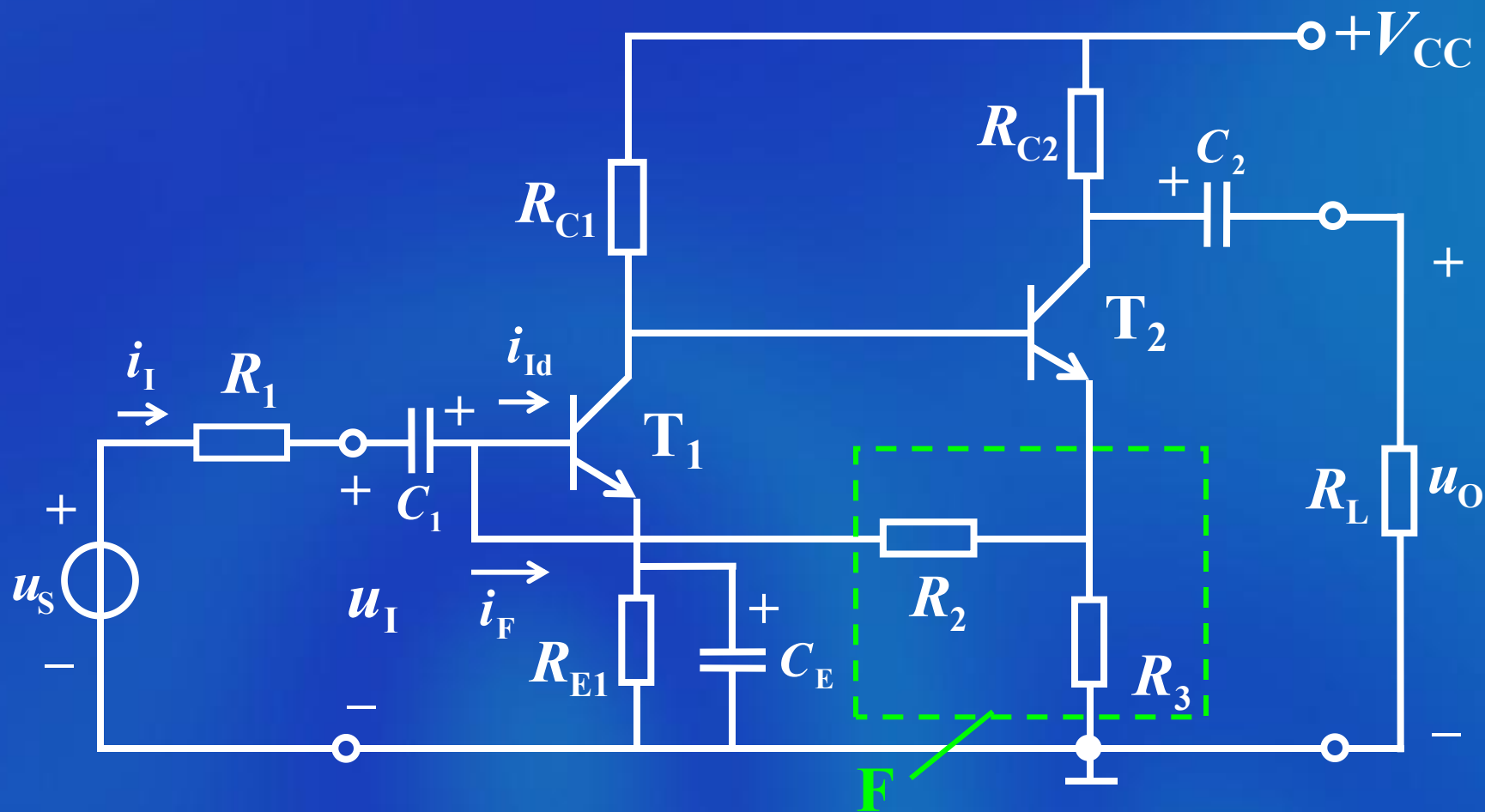
### (3) 输入电阻

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

### (4) 输出电阻

$$R_{of} \approx 0$$

## 2. 反馈

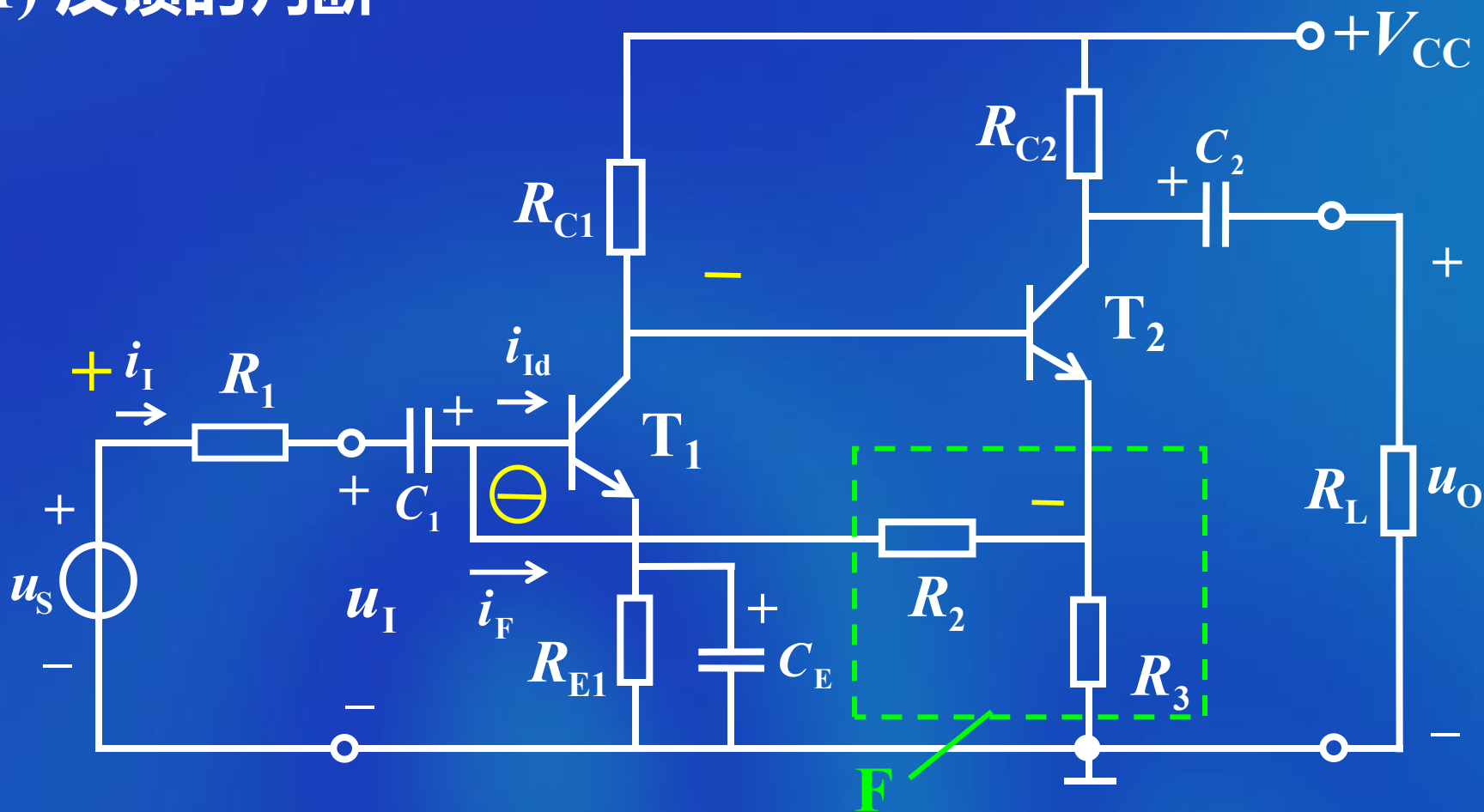


电流反馈

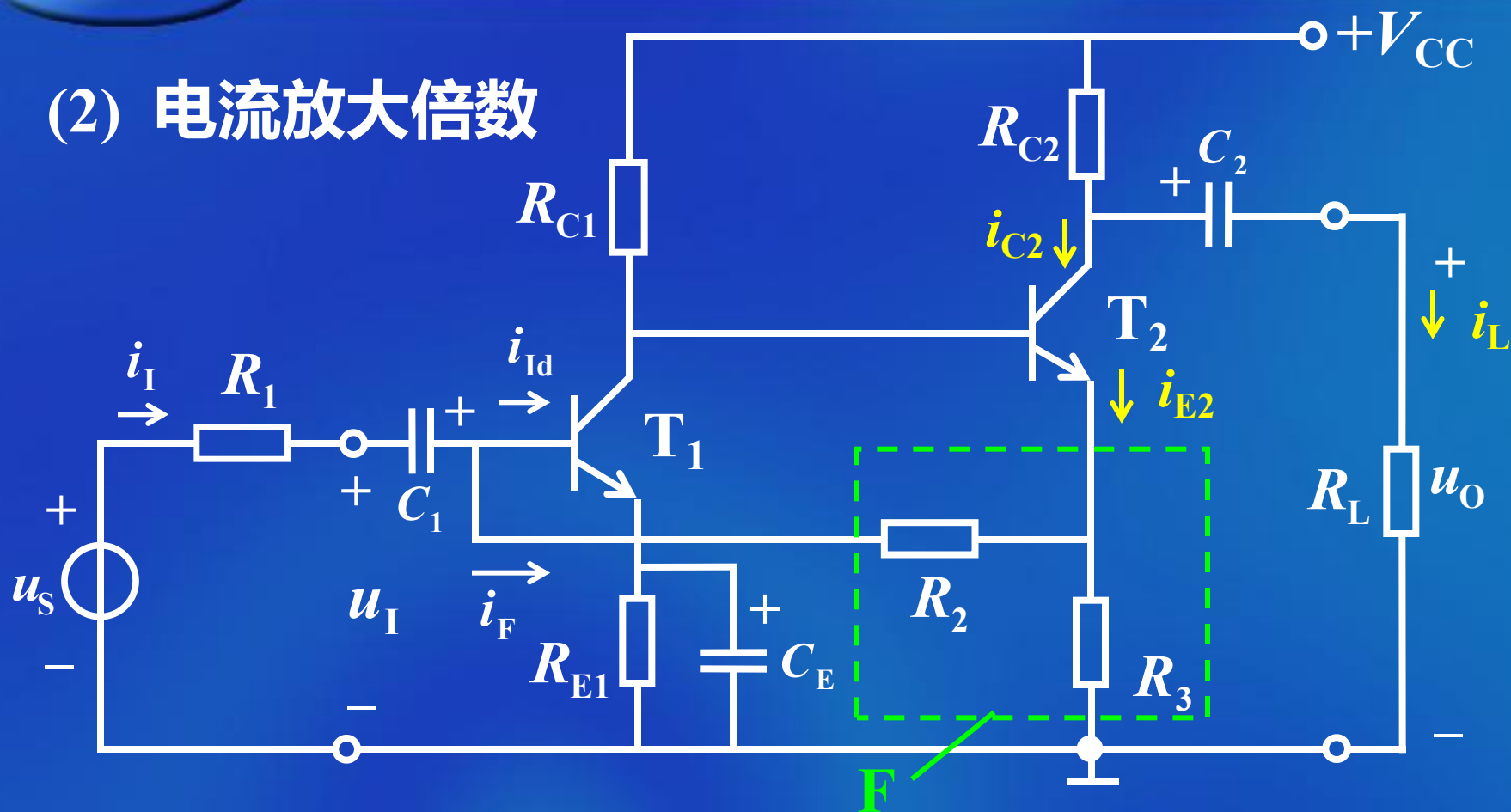
并联反馈

负反馈

# (1) 反馈的判断



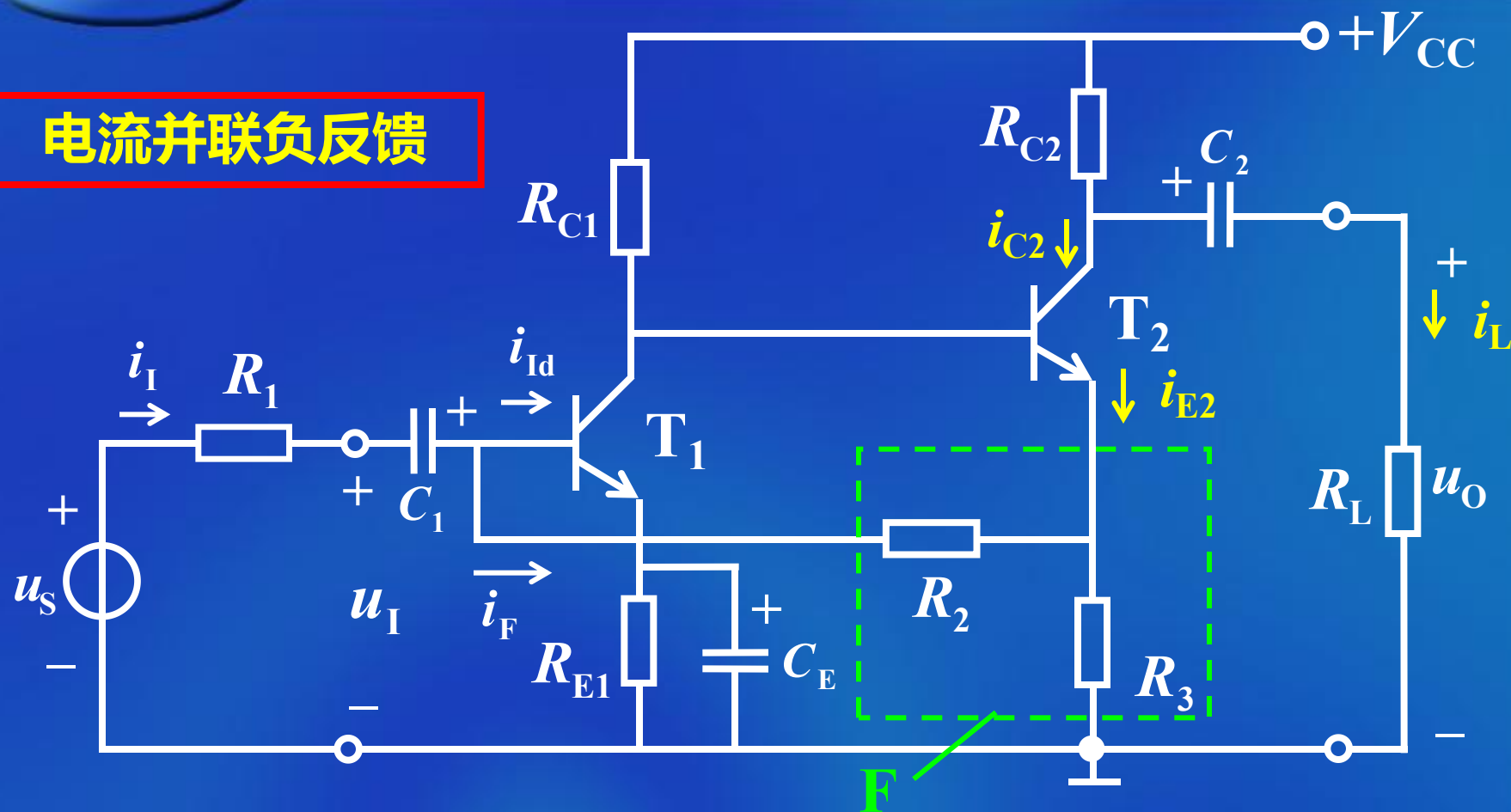
## (2) 电流放大倍数



由于反馈电流  $i_F$  来自于输出级晶体管  $T_2$  集电极电流  $i_{C2}$

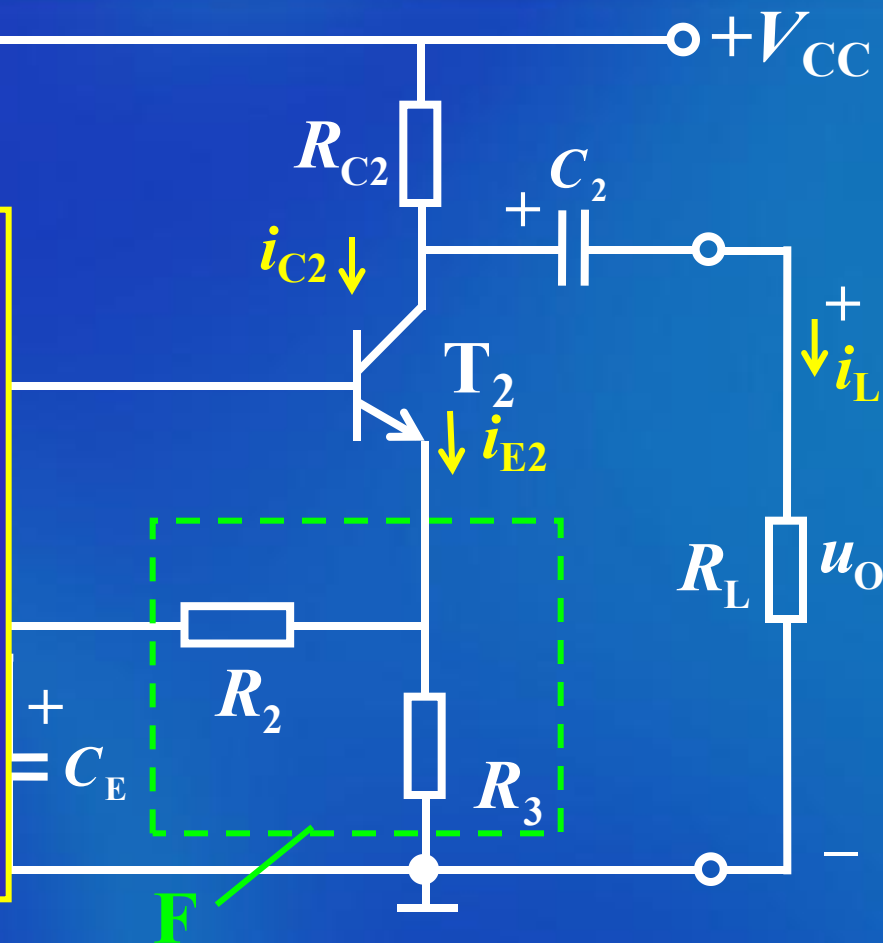
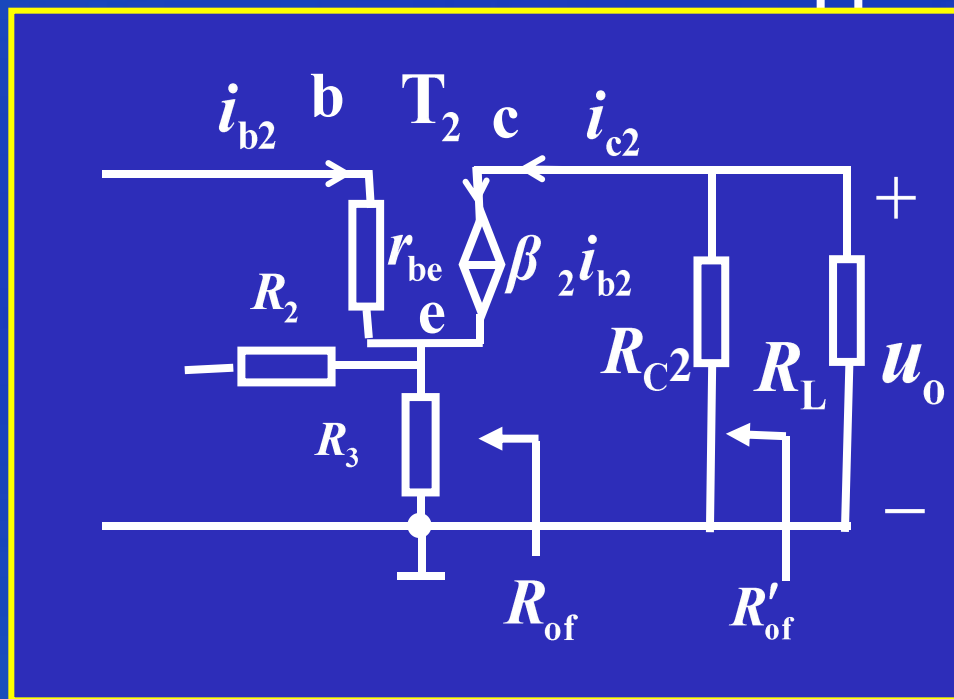
故 电路稳定的是  $i_{C2}$  , 而不负载电流  $i_L$

# 电流并联负反馈



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

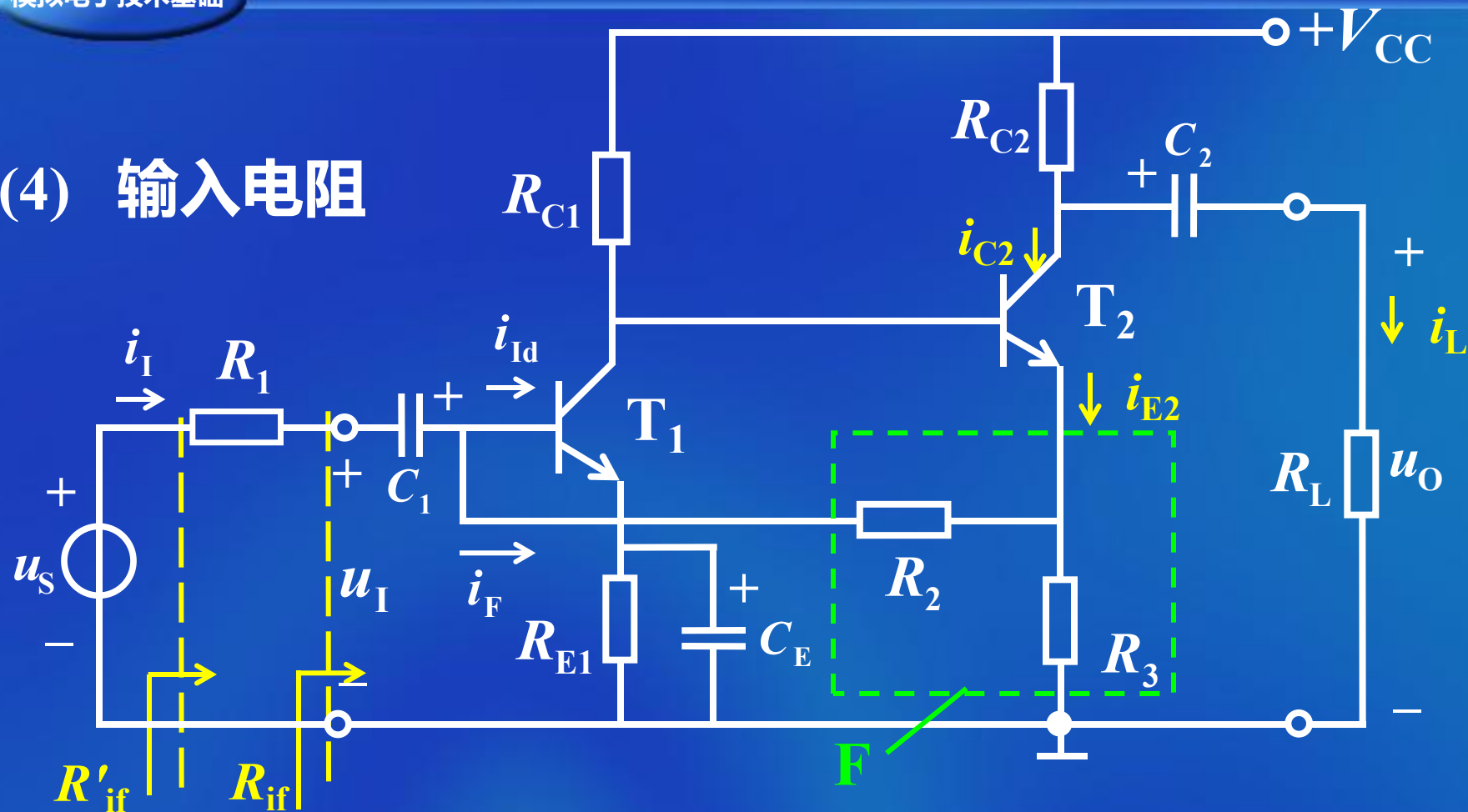
### (3) 闭环电压放大倍数



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



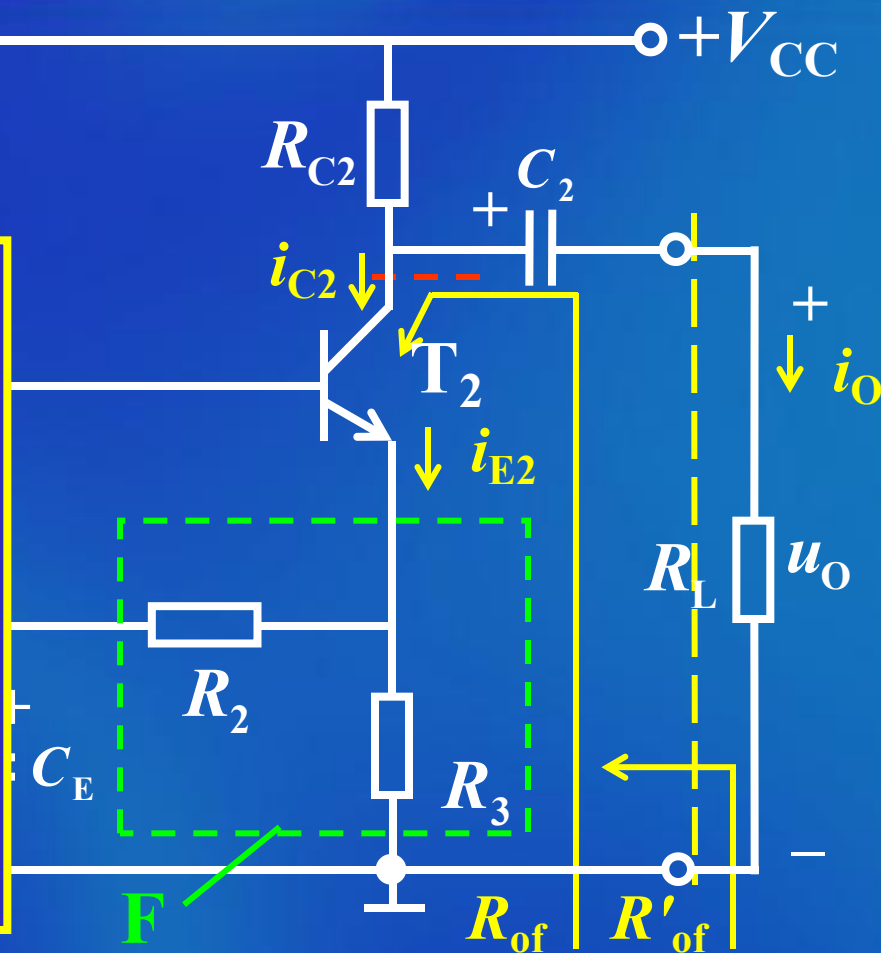
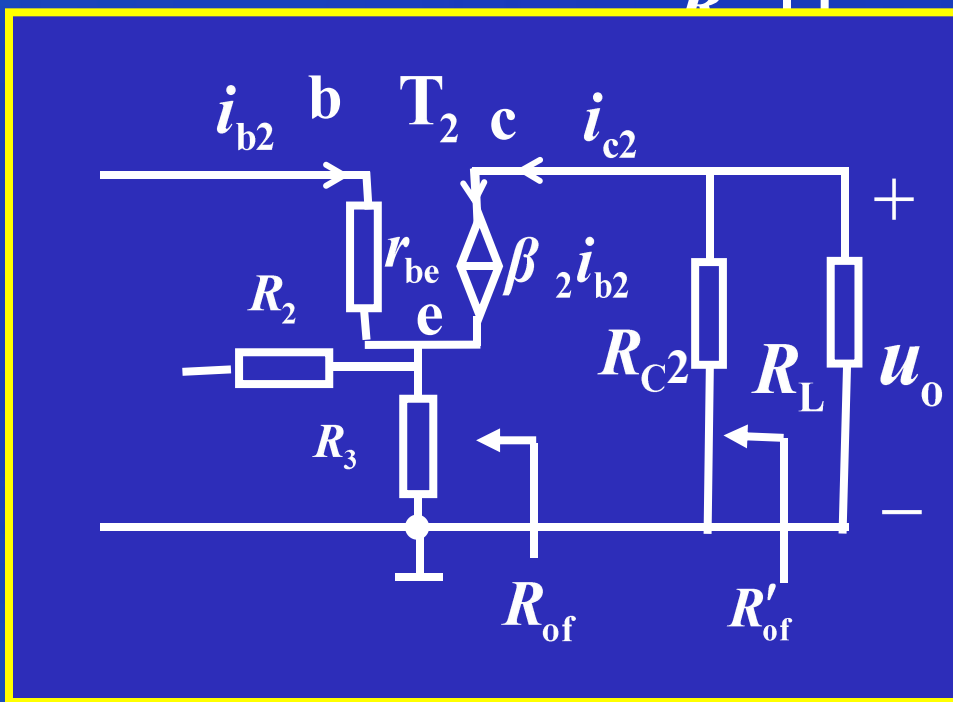
# (4) 输入电阻



$$R_{if} \approx 0$$

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

# (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

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