



复旦大学电子工程系 陈光梦

# 第5章

# 反 馈



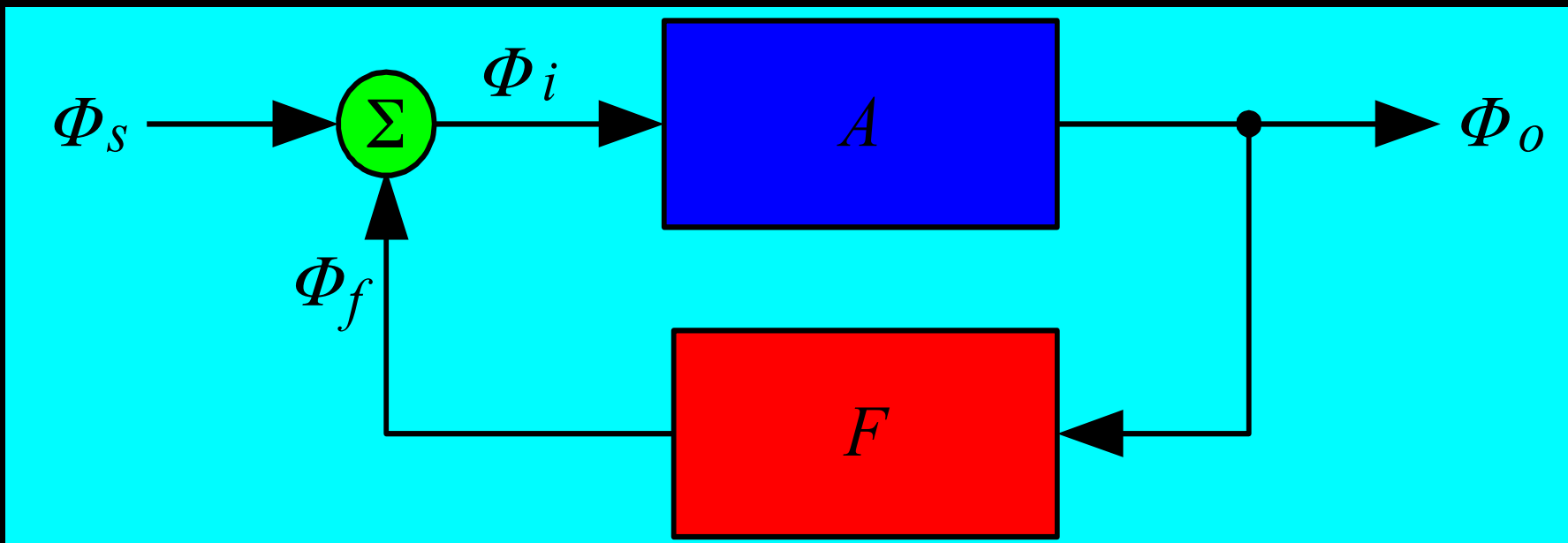
# 反馈的基本概念

反馈电路的基本结构

负反馈电路的组态

负反馈放大器的性能

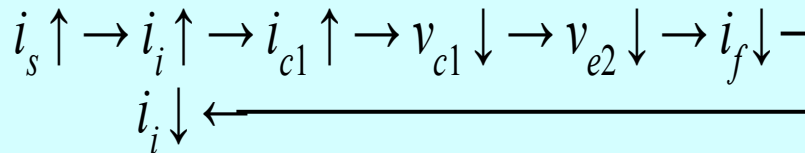
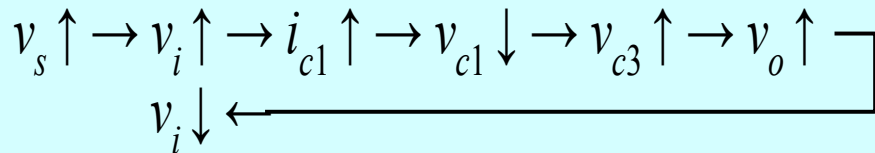
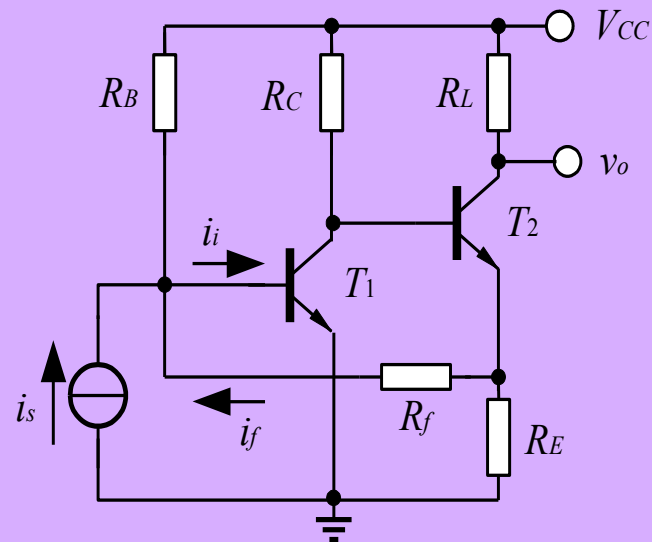
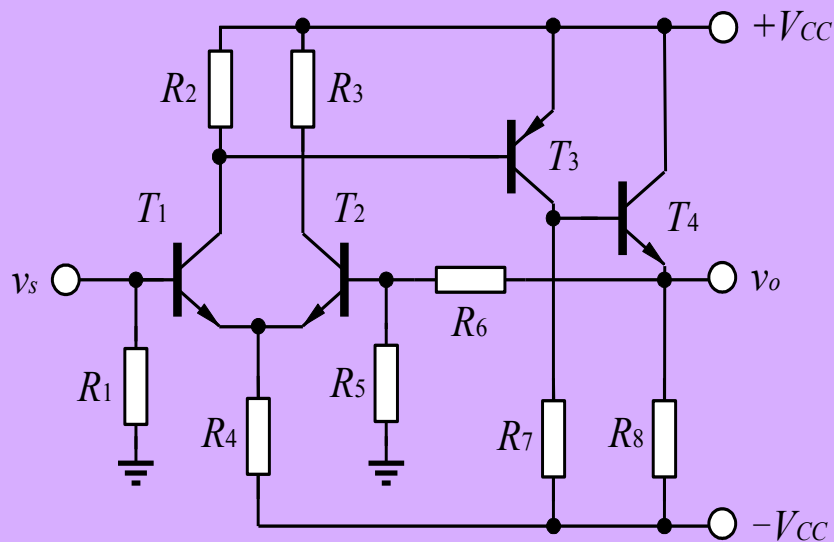
# 反馈电路的基本结构



正反馈：反馈信号与输入信号同相，反馈对输入起增强的作用

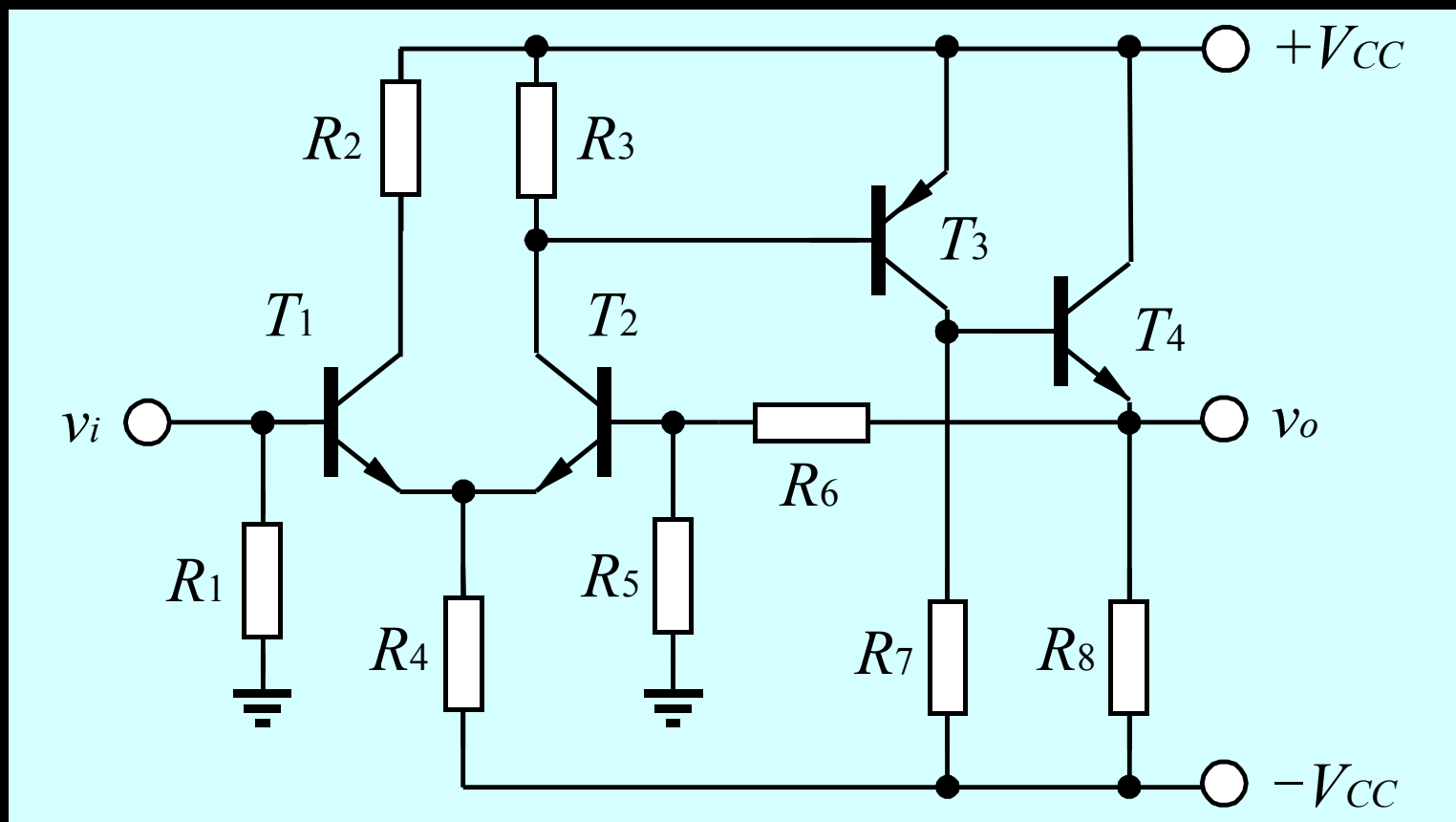
负反馈：反馈信号与输入信号反相，反馈将抵消部分输入信号

# 反馈极性的分析

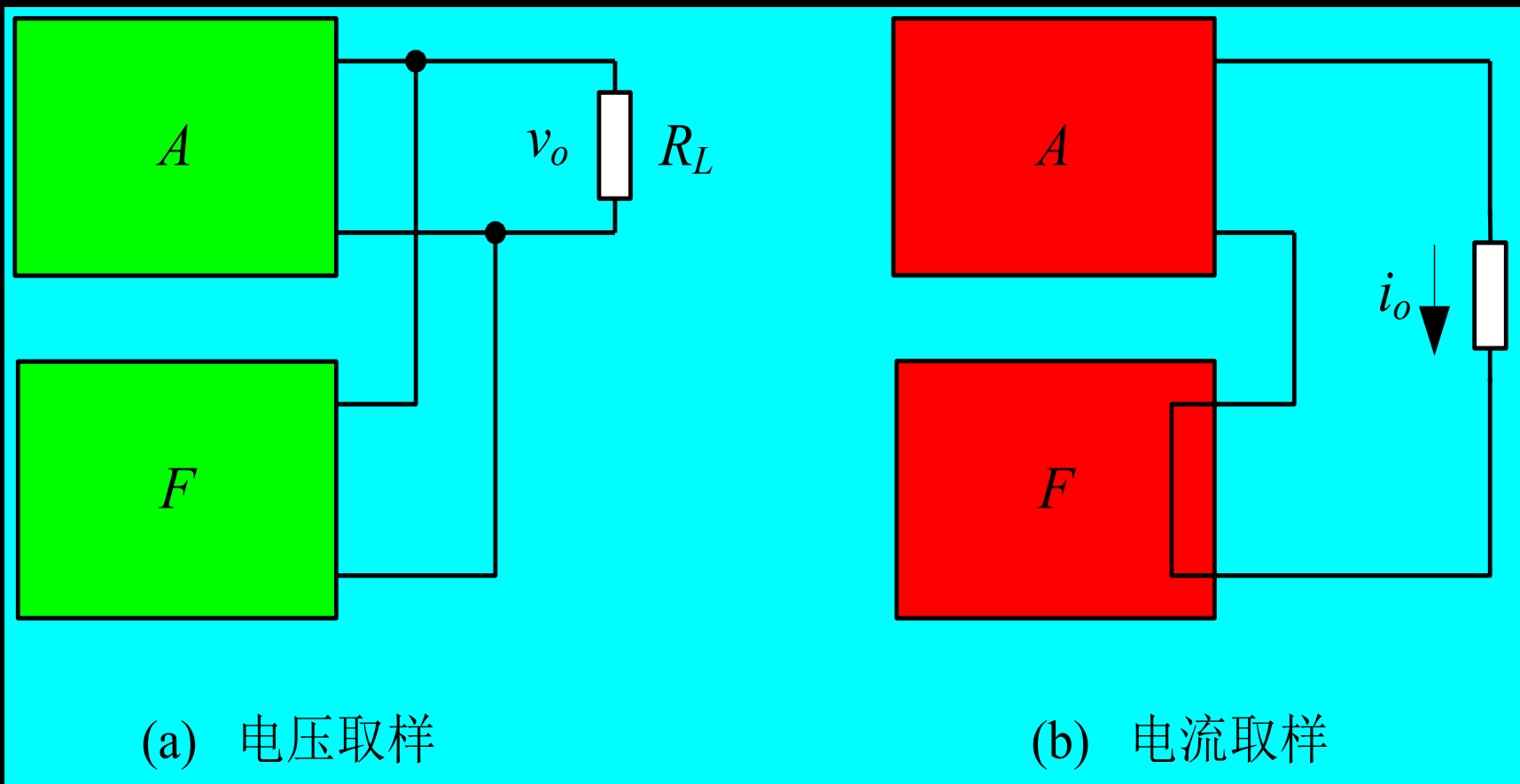


## 瞬时极性法

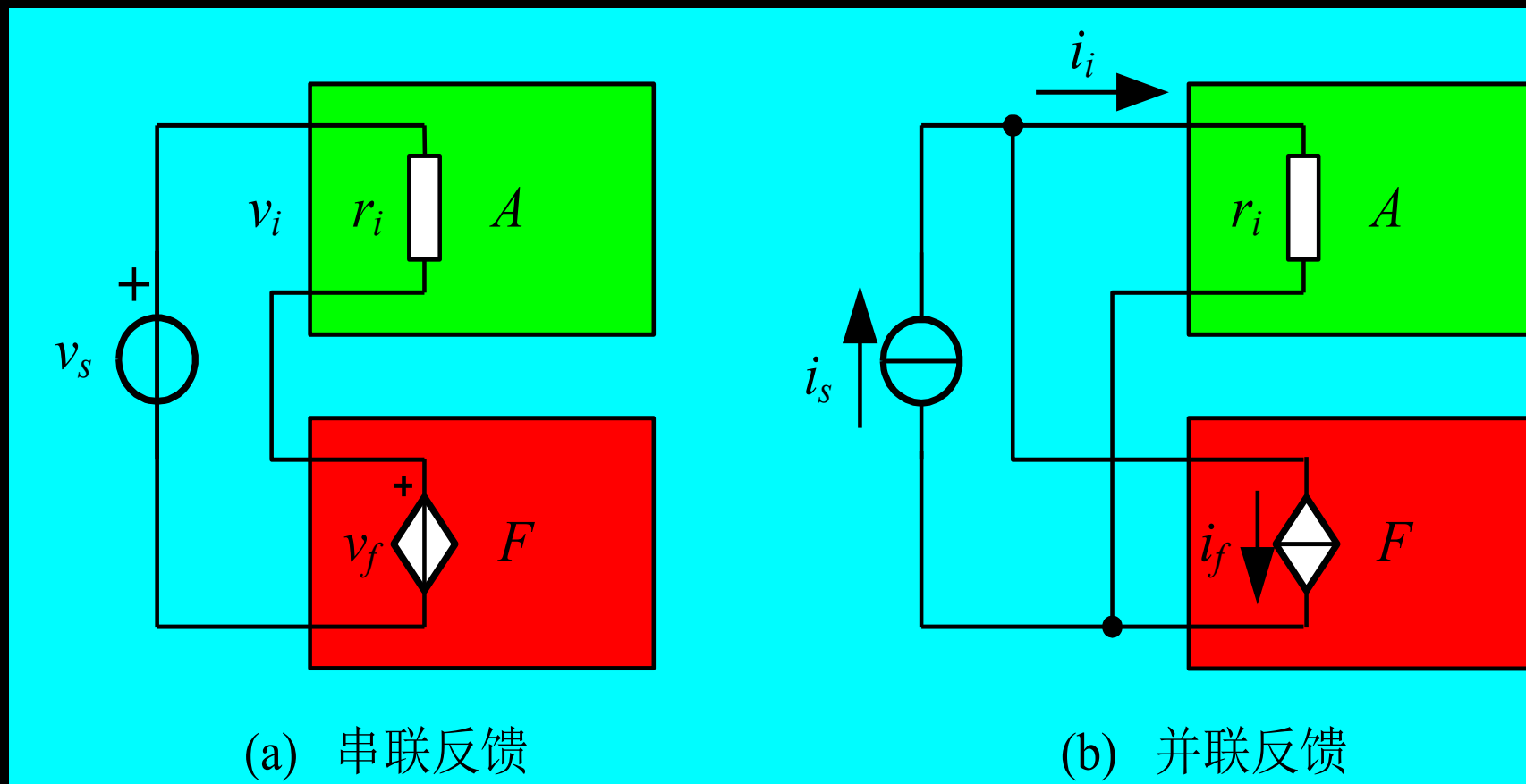
# 正反馈的实例



# 电压反馈与电流反馈

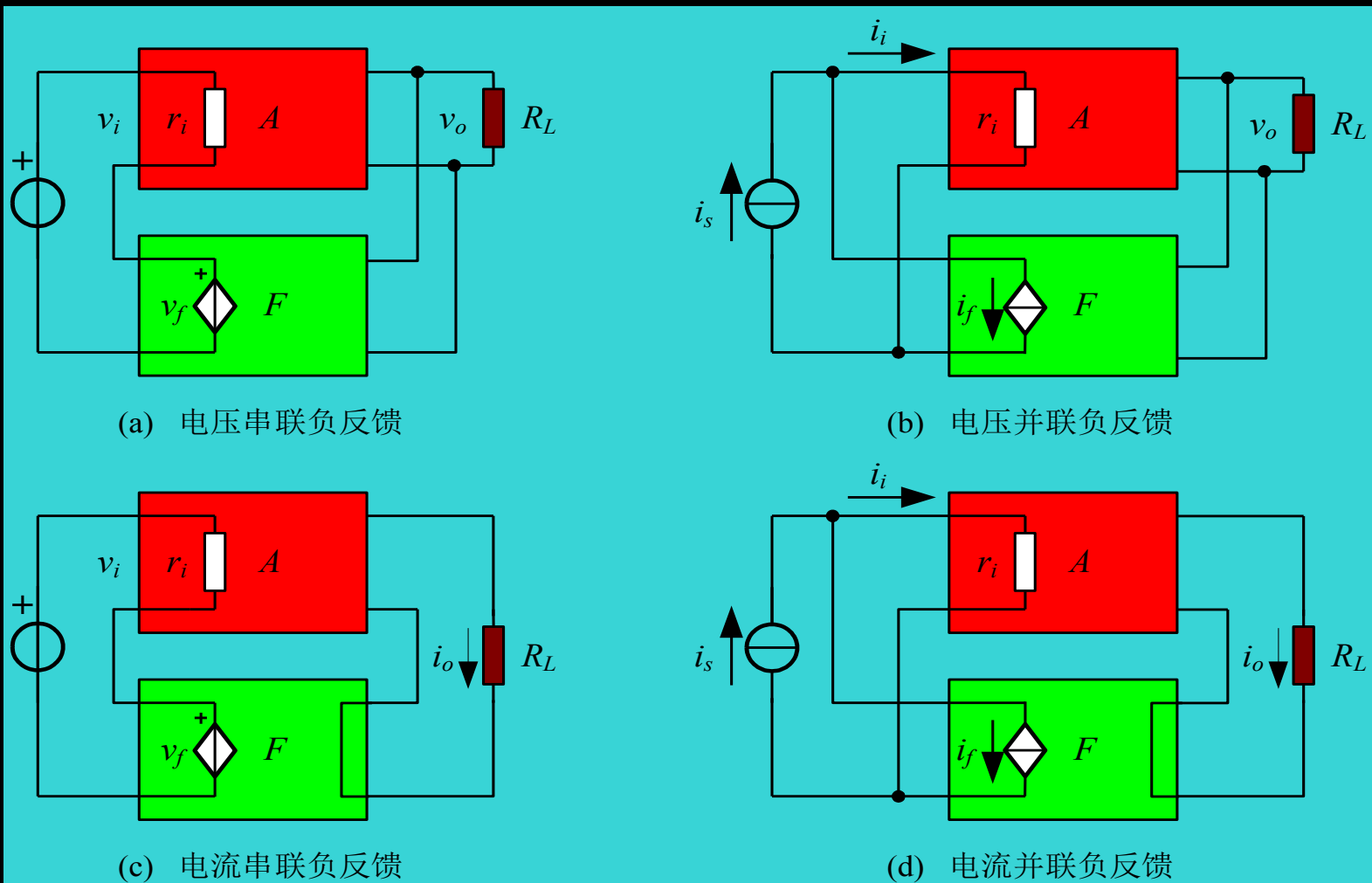


# 串联反馈与并联反馈





# 四种负反馈组态

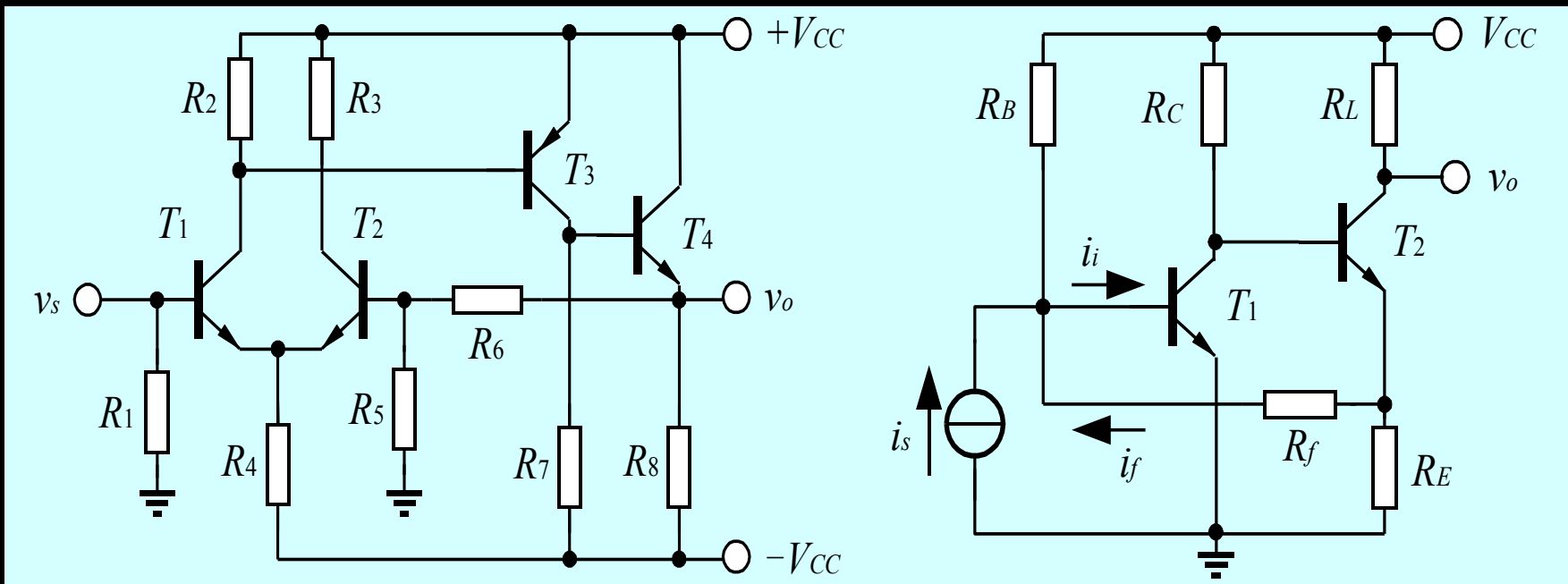




# 不同组态的信号特征

信号	组态形式			
	电压串联	电压并联	电流串联	电流并联
外部输入信号	电压	电流	电压	电流
输出信号	电压	电压	电流	电流
基本放大器 输入信号	电压	电流	电压	电流
反馈信号	电压	电流	电压	电流
基本放大器 传递函数	电压增益	跨阻	跨导	电流增益
反馈系数	电压比	跨导	跨阻	电流比

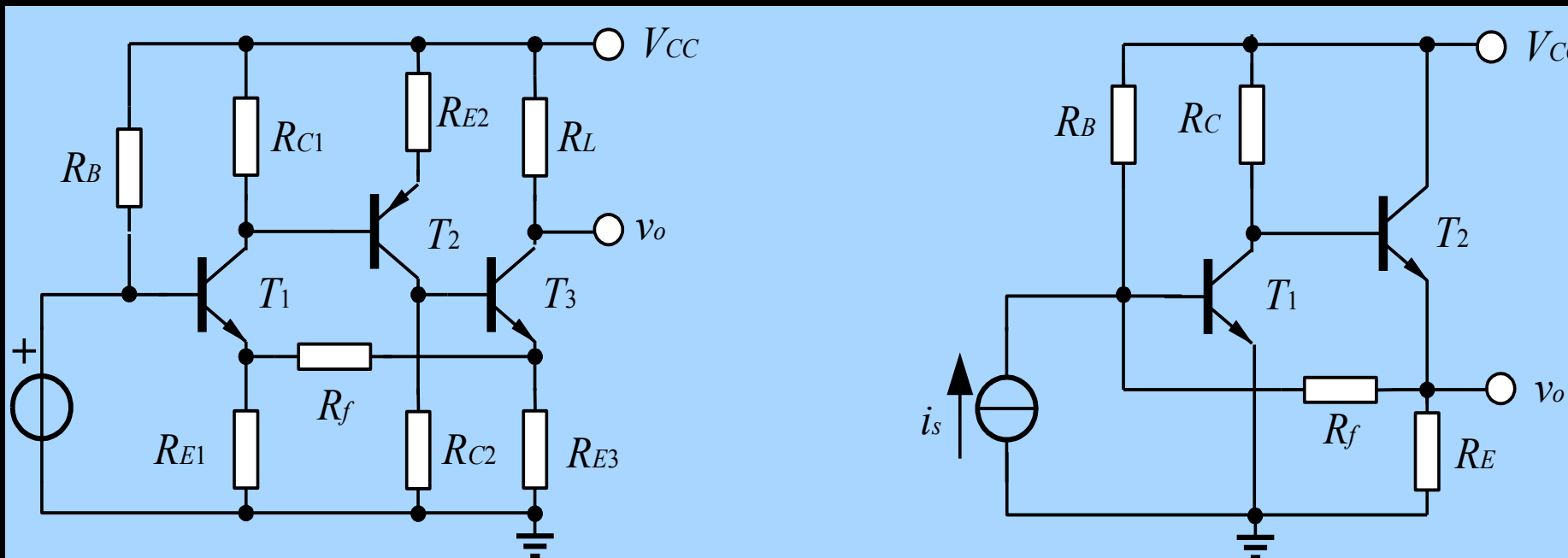
# 负反馈具体电路



电压串联负反馈  
负反馈

电流并联

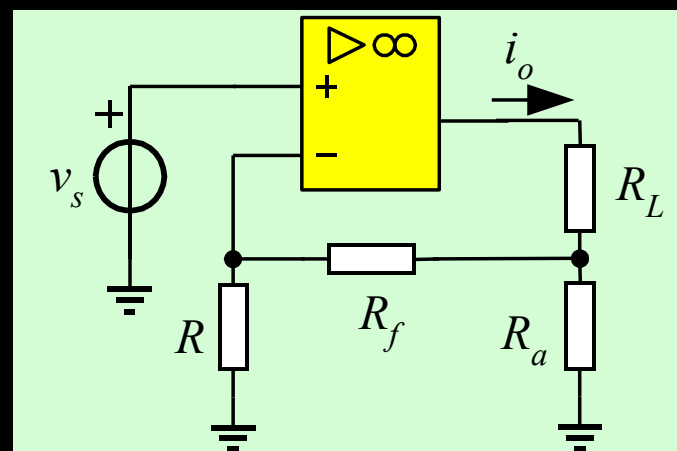
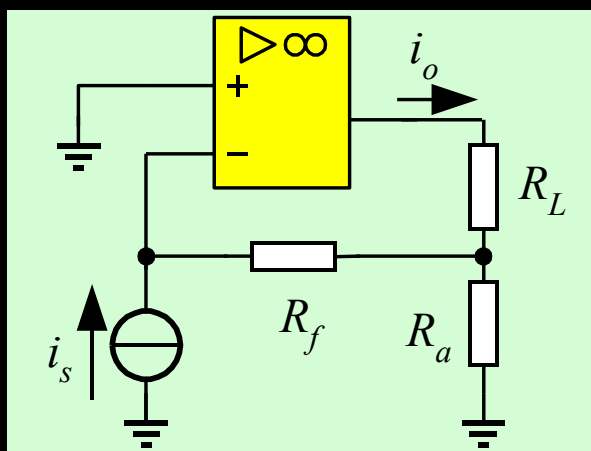
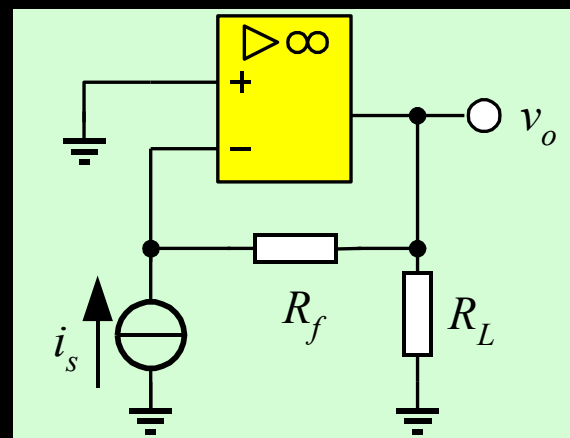
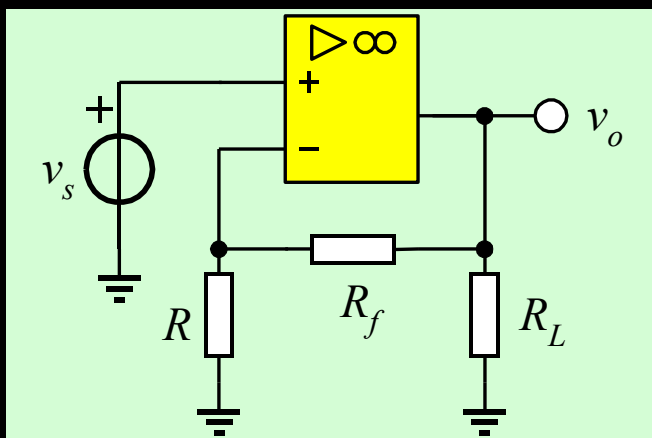
# 负反馈具体电路



电流串联负反馈  
负反馈

电压并联

# 集成运放构成的负反馈电路



# 负反馈放大器的性能

- 负反馈放大器的增益
- 负反馈放大器的增益稳定性
- 负反馈放大器的输入阻抗
- 负反馈放大器的输出阻抗
- 负反馈放大器的非线性失真

# 负反馈放大器的增益

开环增益： $A$

反馈深度： $1 + AF$

闭环增益： $A_f$

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

# 负反馈放大器的增益稳定性

闭环增益( $A_f$ ) = 开环增益( $A$ ) / 反馈深度( $1+AF$ )

开环增益的变化:

$$A = A + \Delta A$$

闭环增益的变化:

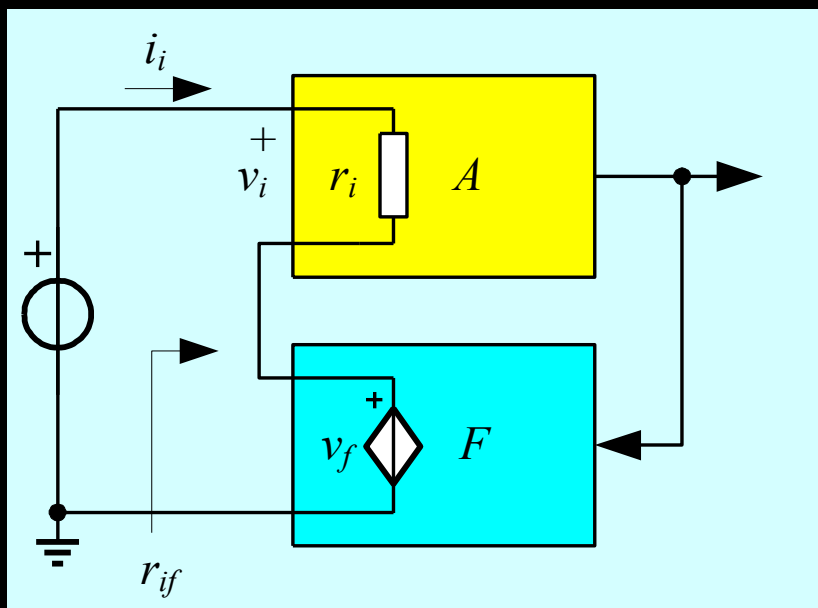
$$\Delta A_f = \frac{\partial A_f}{\partial A} \Delta A + \frac{\partial A_f}{\partial F} \Delta F$$

两者之间的关系:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta A_f}{A_f} &= \frac{\Delta A}{A_f \cdot (1 + AF)^2} \\ &= \frac{\Delta A}{A} \cdot \frac{1}{1 + AF} \end{aligned}$$

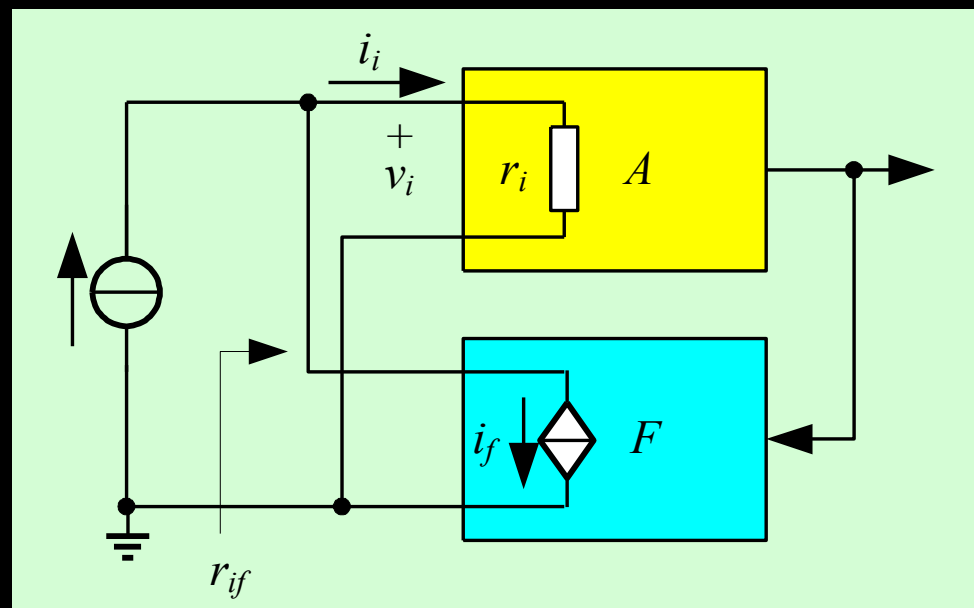


# 负反馈放大器的输入阻抗



$$r_{if} = r_i(1 + AF)$$

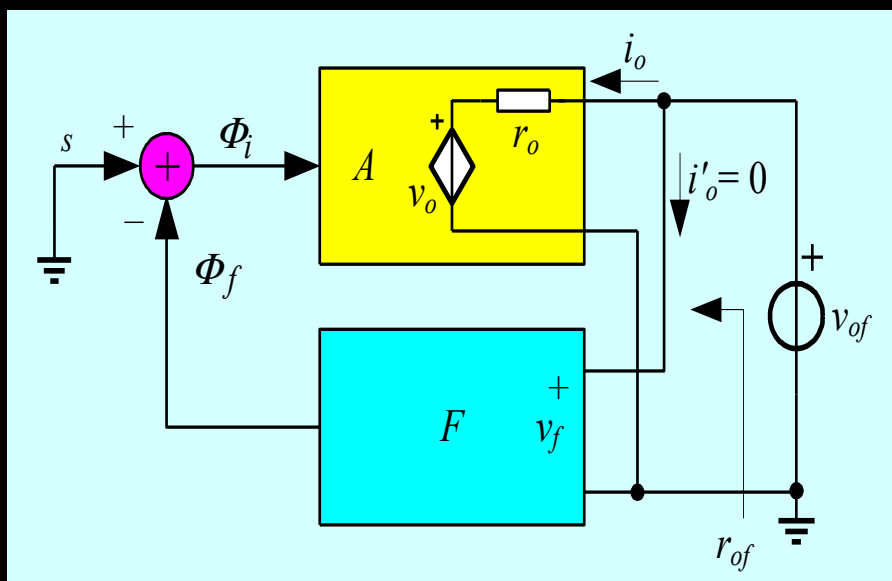
串联负反馈



$$r_{if} = \frac{r_i}{1 + AF}$$

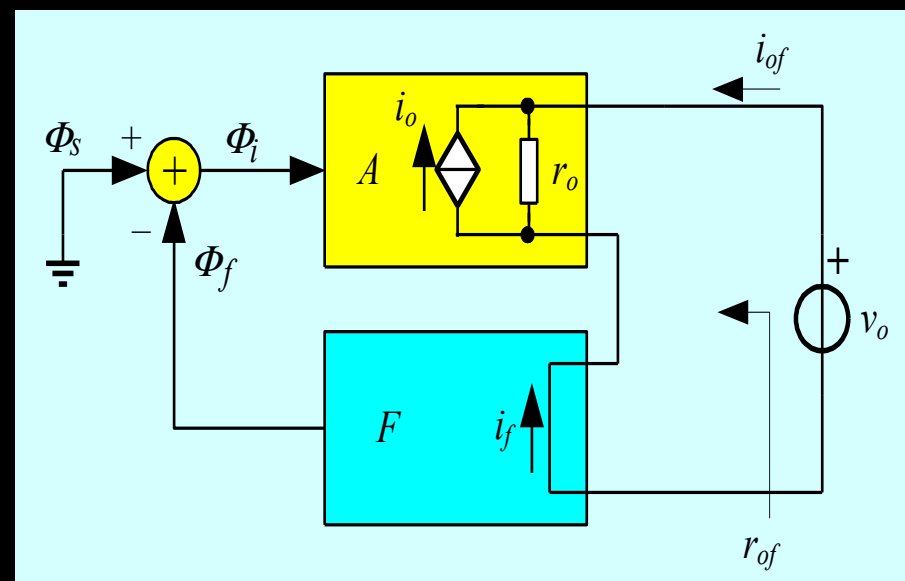
并联负反馈

# 负反馈放大器的输出电阻



$$r_{of} = \frac{r_o}{1 + AF}$$

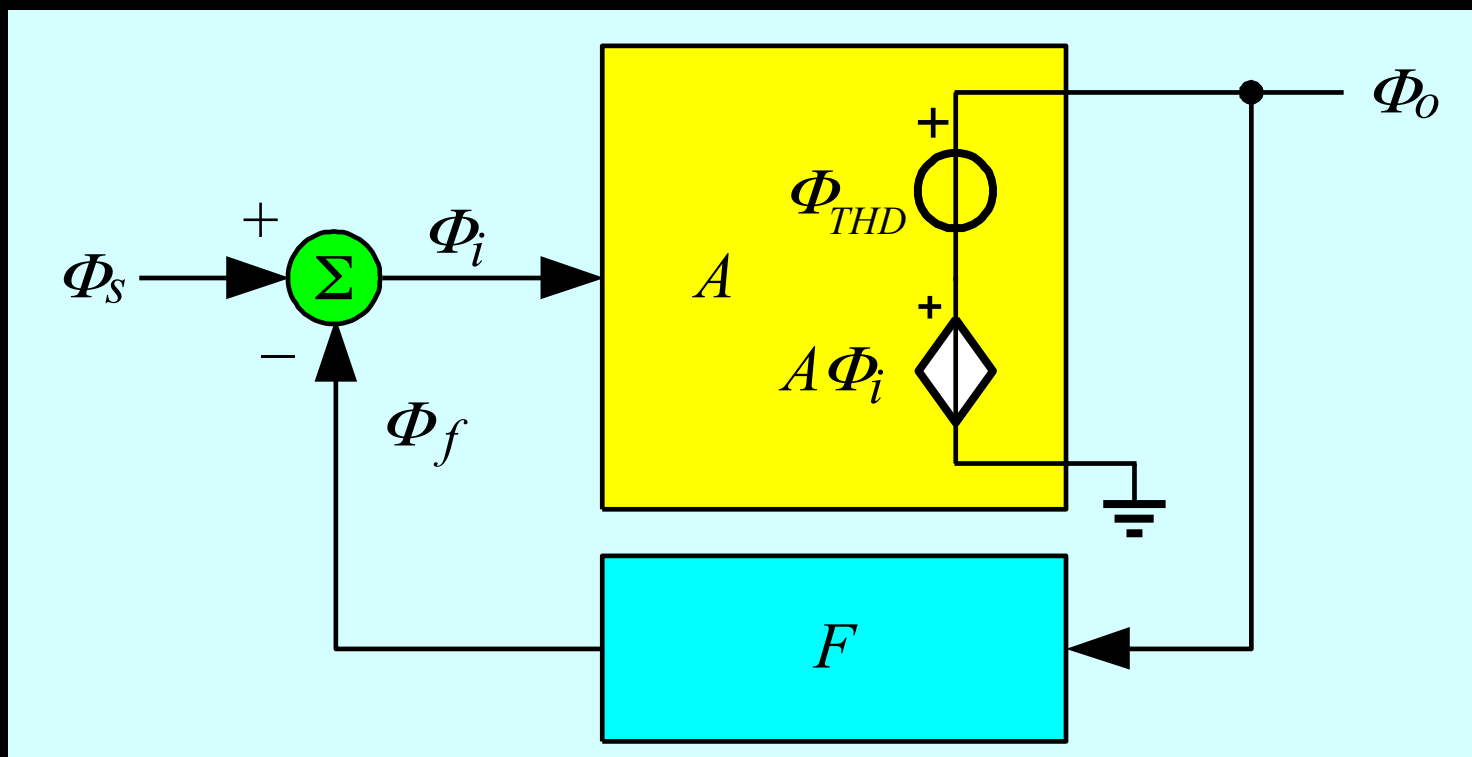
电压负反馈



$$r_{of} = r_o (1 + AF)$$

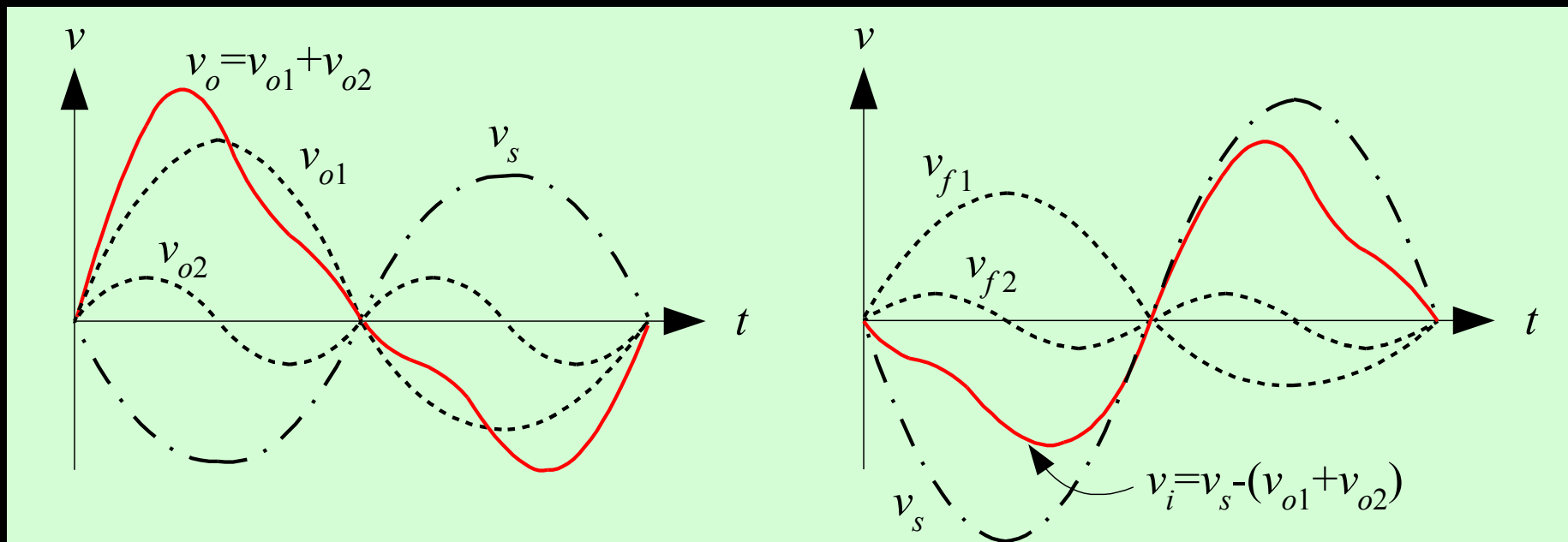
电流负反馈

# 负反馈放大器的非线性失真



$$\phi_o = \frac{A}{1 + AF} \phi_s + \frac{\phi_{THD}}{1 + AF}$$

# 负反馈改善非线性失真的原理



有失真的输出波形

叠加反馈信号后的输入波形

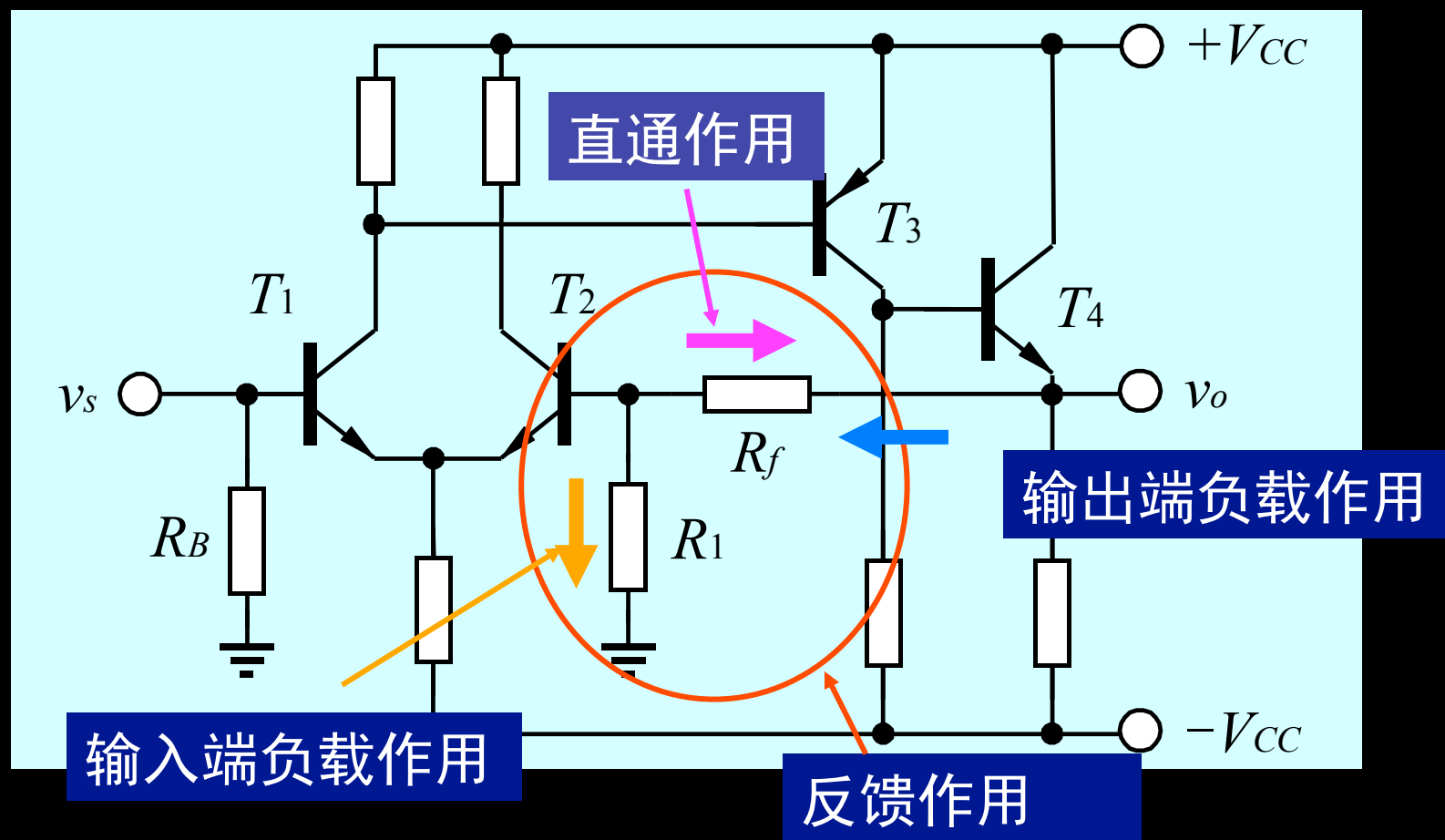
- 代价：
- 牺牲输出动态范围
  - 牺牲带宽

# 负反馈放大器的分析

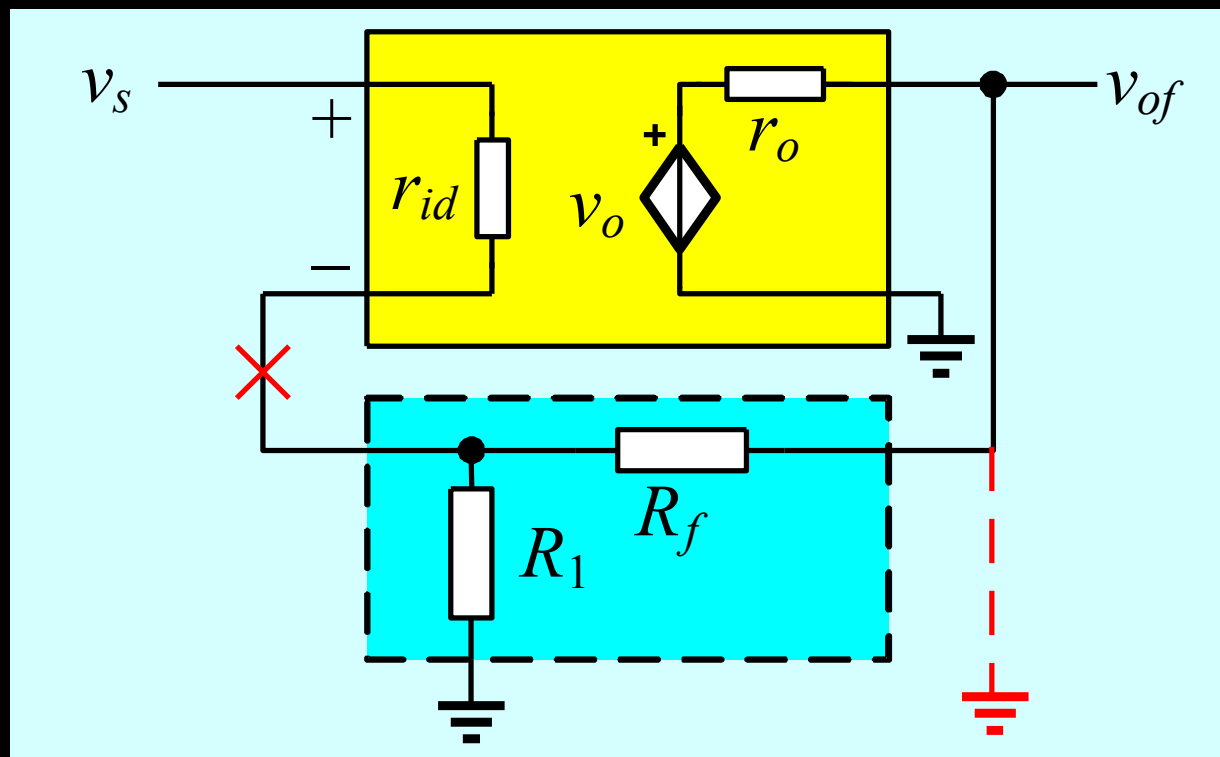
- 负反馈放大器的基本分析方法
- 深度负反馈放大器的近似计算

# 反馈网络的4种效应

## 电压串联负反馈放大器

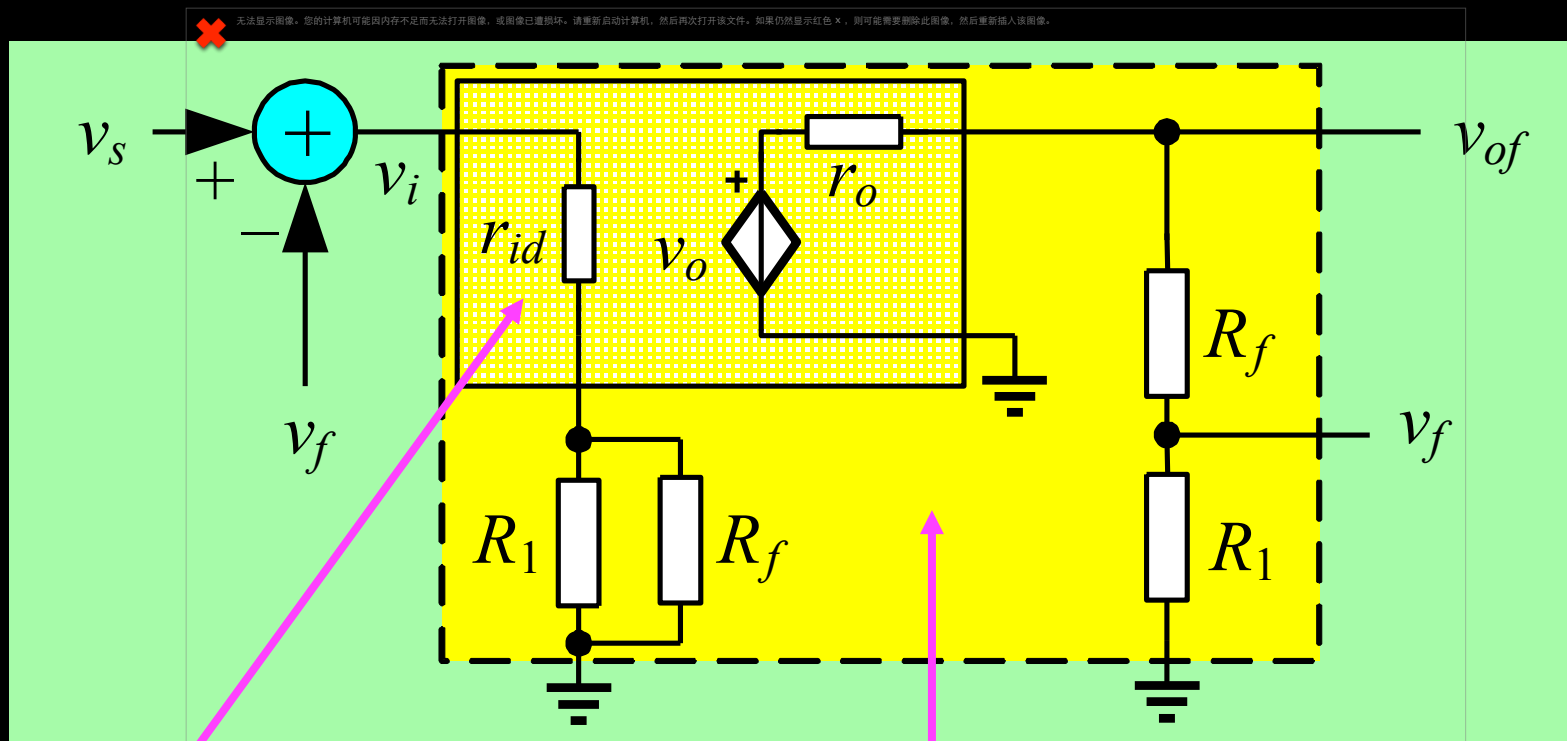


# 电压串联负反馈的反馈网络分离





# 反馈网络分离后的电压串联负反馈



原来的电压放大器

考虑反馈网络影响后的基本放大器

# 电压串联负反馈的例子

- 放大器的基本参数为：差分放大器的差模输入电阻  $r_{id}=10\text{K}$ ，射极跟随器的输出电阻  $r_{o3}=100$ ，三级放大器的电压增益  $A_{vo}=8000$ 。反馈网络的参数为  $R_1=1\text{k}$ ， $R_f=20\text{K}$ 。

考虑反馈网络影响后的基本放大器的开路电压增益：

$$A_v = A_{vo} \cdot \frac{r_{id}}{r_{id} + R_1 // R_f} \cdot \frac{R_1 + R_f}{r_{o3} + R_1 + R_f} = 8000 \times \frac{10}{10 + 1 // 20} \times \frac{1 + 20}{0.1 + 1 + 20} \approx 7270$$

考虑反馈网络影响后的基本放大器的输入电阻：

$$r_i = r_{id} + R_1 // R_f = 10 + 1 // 20 = 10.95\text{k}\Omega$$

考虑反馈网络影响后的基本放大器的输出电阻:



无法显示图像。您的计算机可能内存不足。

$$r_o = r_{o3} // (R_1 + R_f) = 0.1 // (1 + 20) = 99.53 \Omega$$

反馈深度:

$$1 + A_v F = 1 + A_v \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_f} = 1 + 7270 \times \frac{1}{1 + 20} \approx 347.2$$

闭环输入电阻:

$$r_{if} = (1 + A_v F) r_i = 347.2 \times 10.95 \approx 3802 \text{ k}\Omega$$

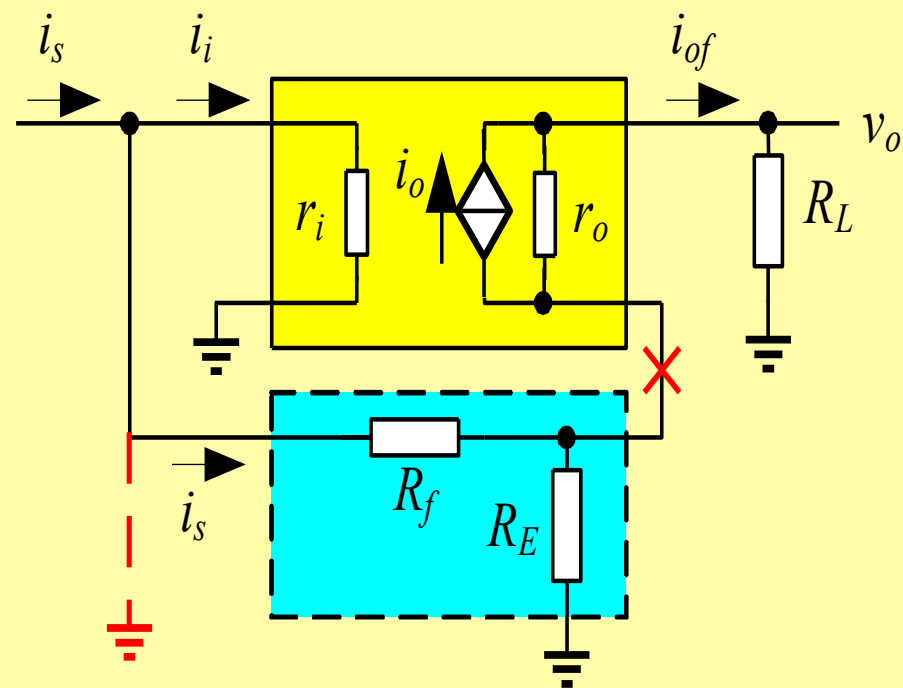
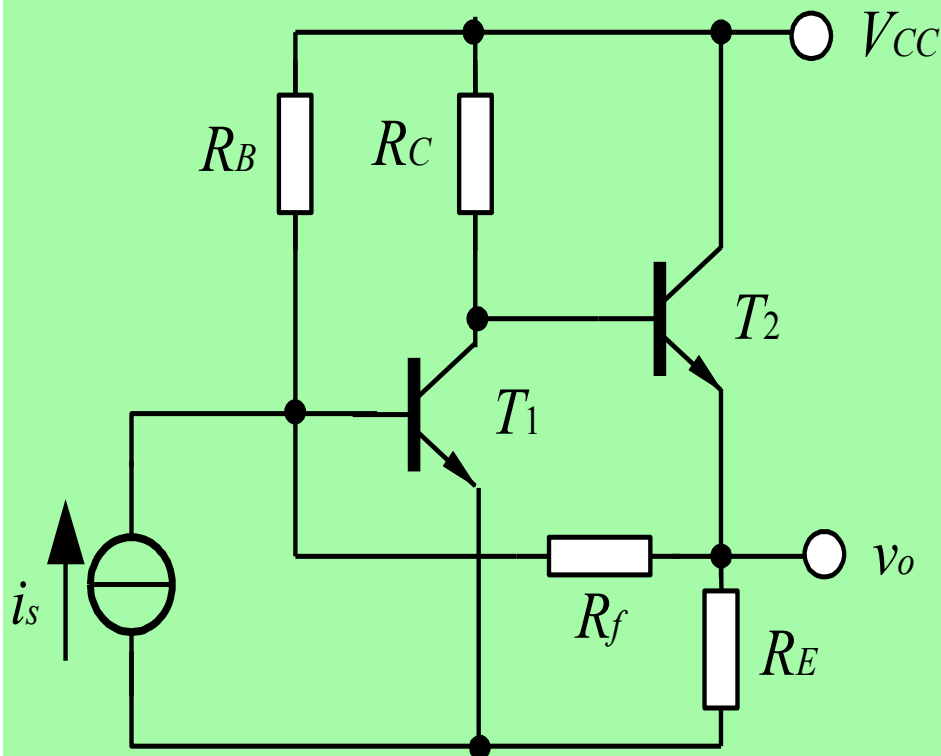
闭环输出电阻:

$$r_{of} = \frac{r_o}{1 + A_v F} = \frac{99.53}{347.2} \approx 0.2867 \Omega$$

闭环电压增益:

$$A_{vf} = \frac{A_v}{1 + A_v F} = \frac{7270}{347.2} \approx 20.94$$

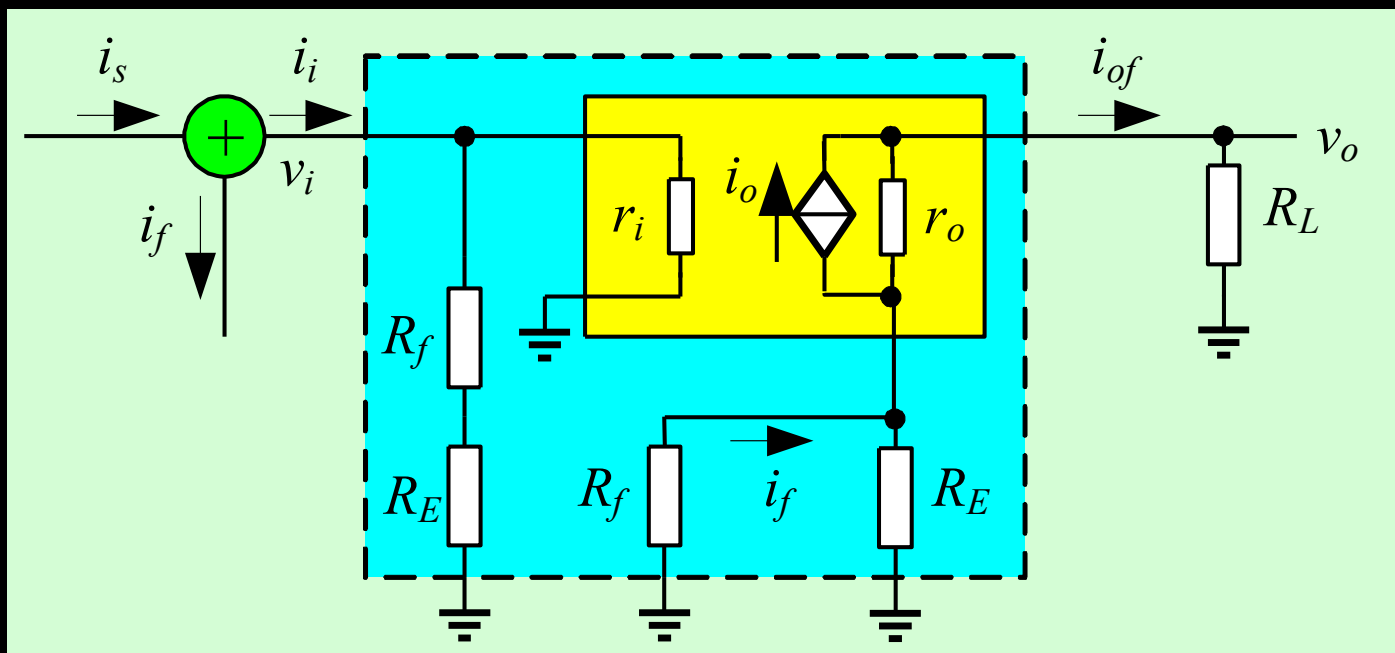
# 电流并联负反馈的反馈网络分离



电流负反馈放大器电路原理图  
反馈网络

电流负反馈放大器的

# 反馈网络分离后的电流并联负反馈



短路电流增益

反馈系数

# 负反馈放大器的分析方法

判断反馈放大器的反馈类型

分离负反馈网络

电压反馈，反馈网络取样点短路

电流反馈，反馈网络取样点开路

串联反馈，反馈网络的反馈点开路

并联反馈，反馈网络的反馈点短路

画出分离反馈网络后的基本放大器

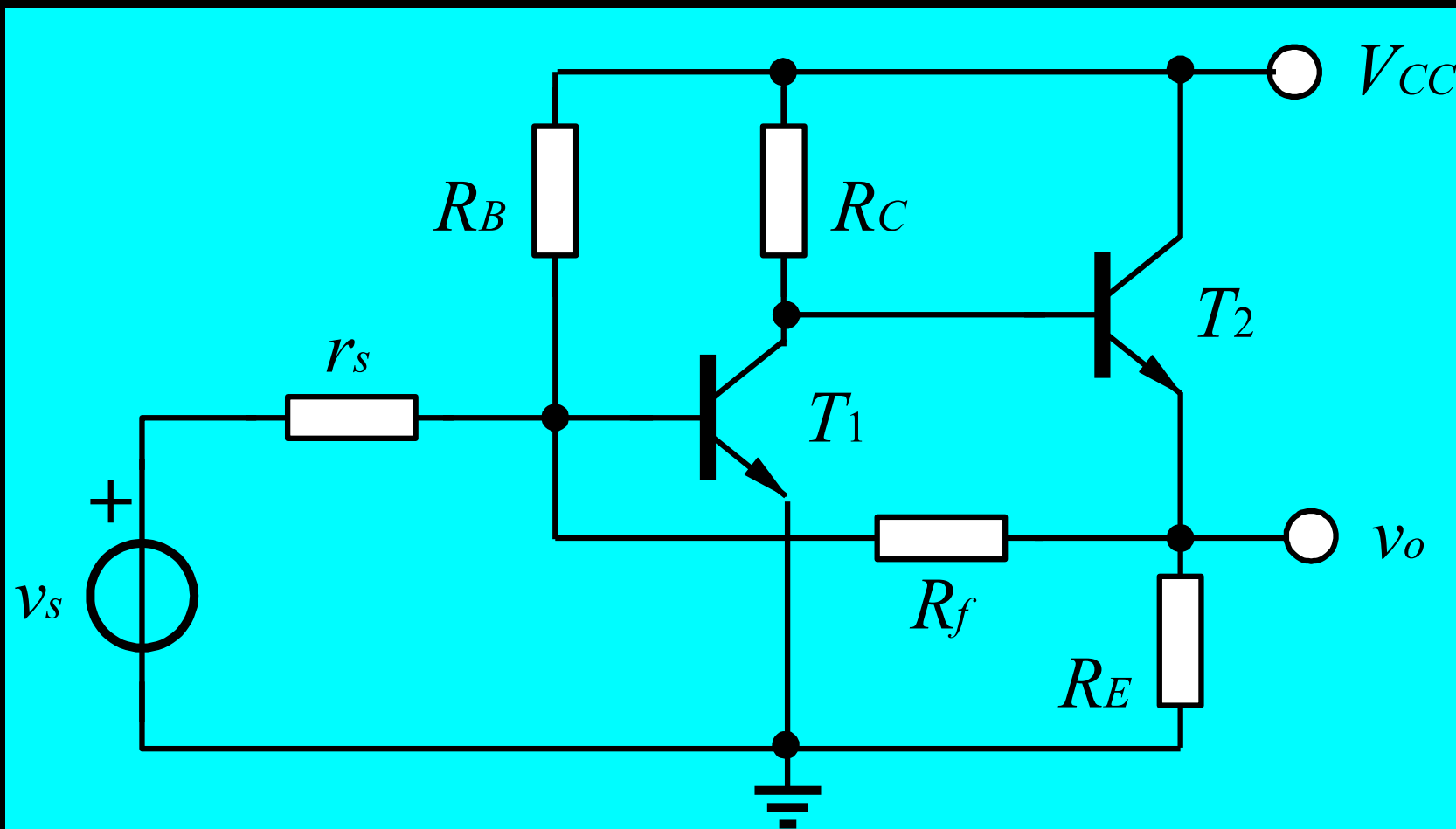
画出反馈信号，得到反馈系数

计算分离反馈网络后的基本放大器的增益和其它指标

计算反馈深度

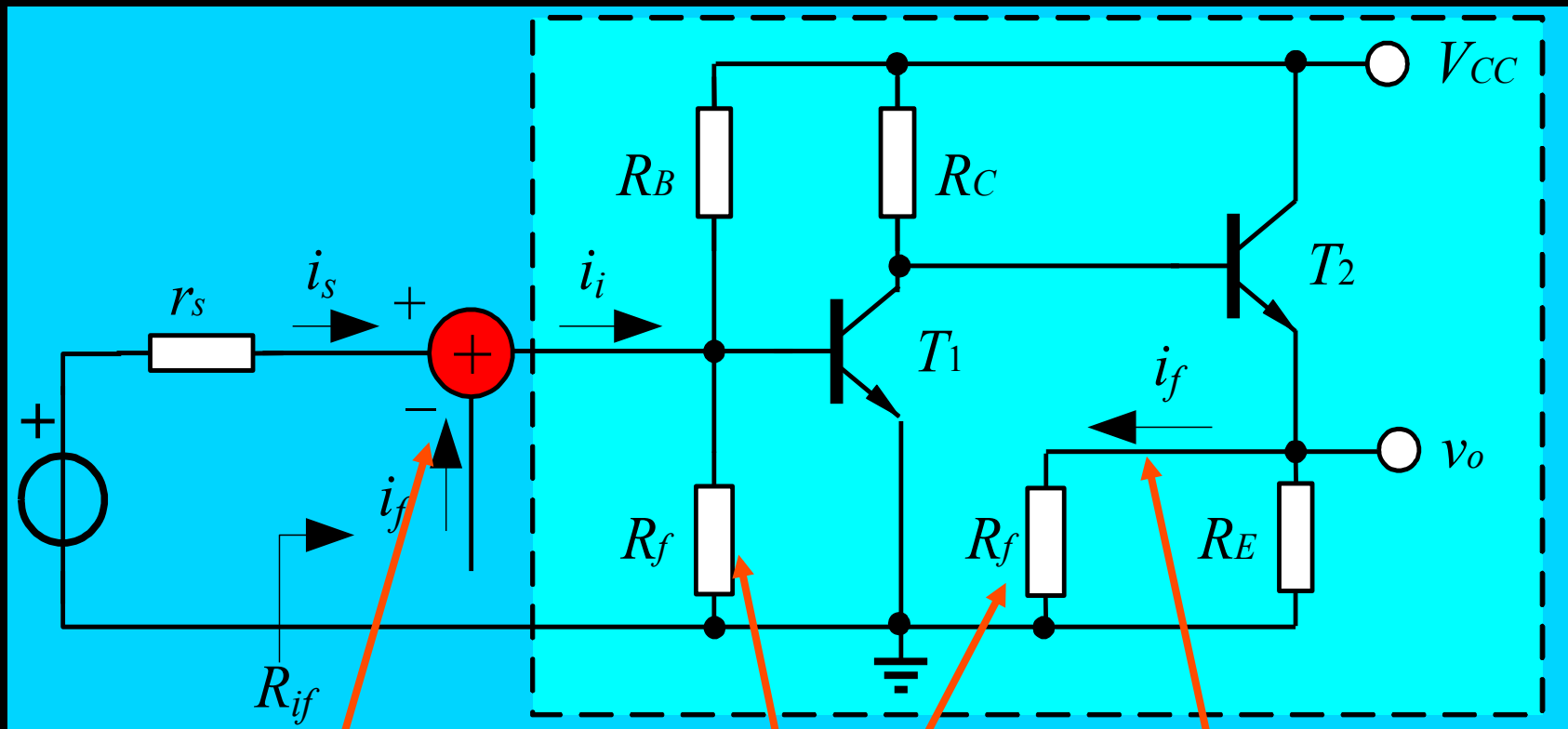
计算反馈放大器的各项性能指标

# 例：电压并联负反馈放大器





# 分离反馈网络后的基本放大器

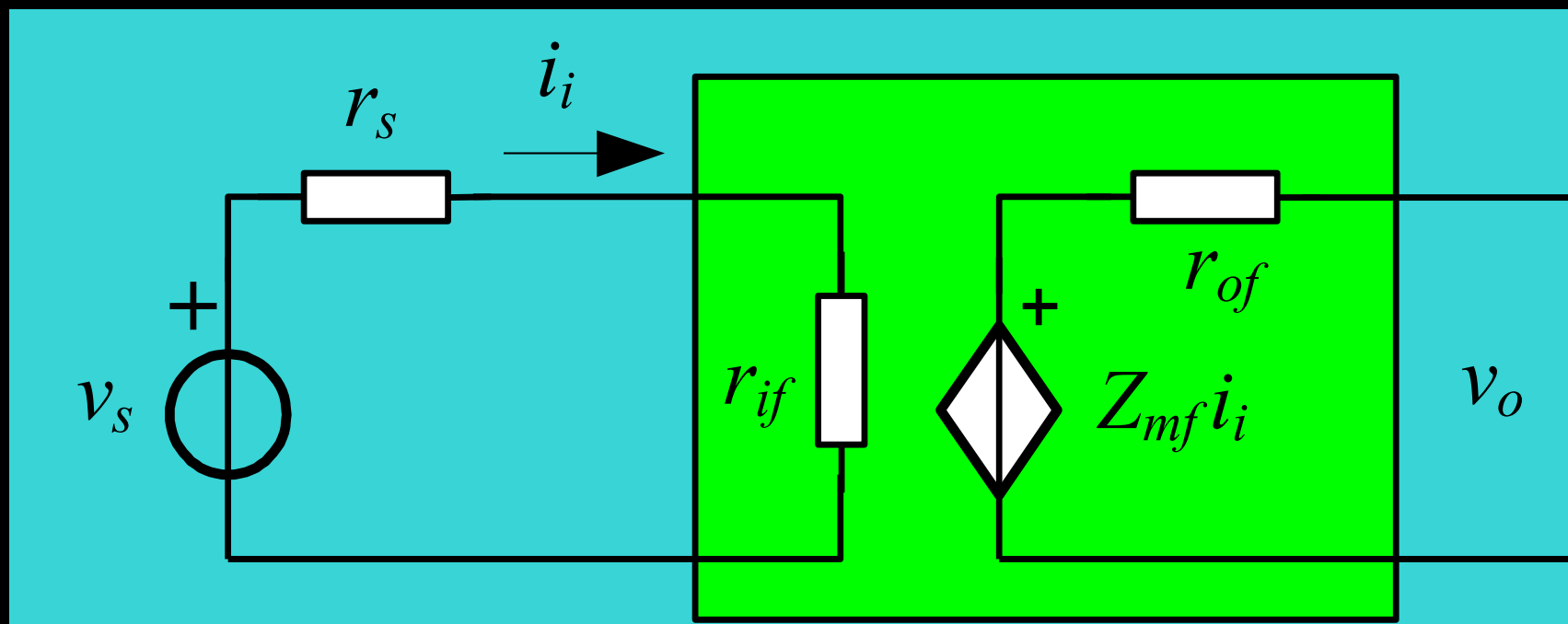


反馈信号叠加点

负反馈网络被拆成两部分

反馈信号

# 加入信号源的电压并联负反馈放大器



# 深度负反馈放大器的近似估算

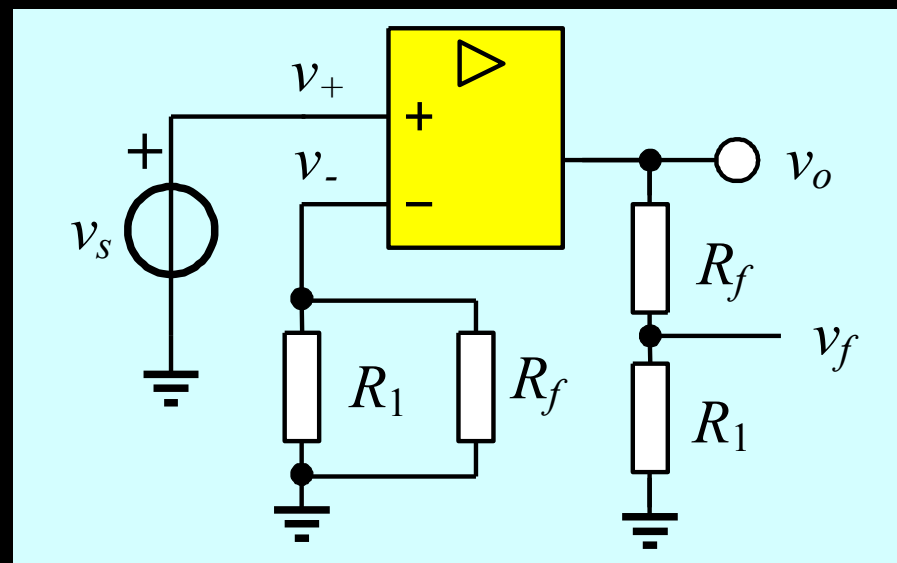
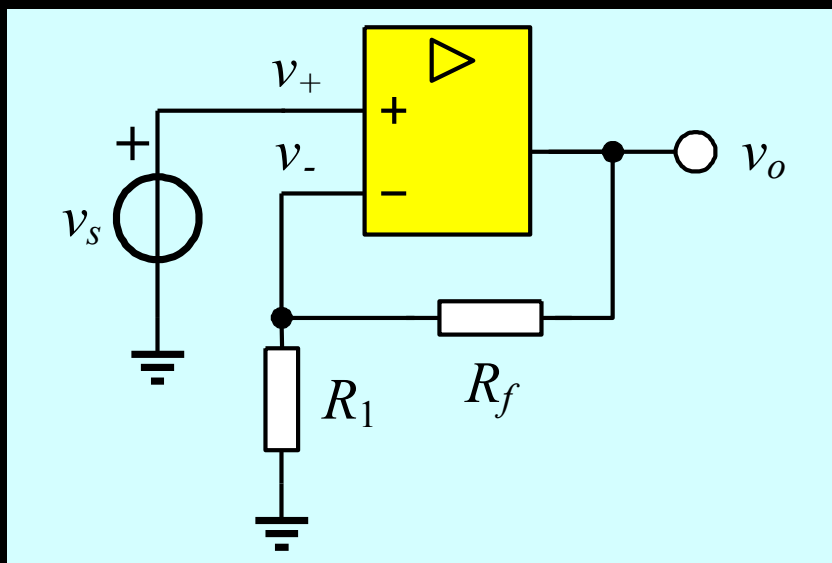
- 基本分析方法的缺点
  - 分离反馈网络（拆环）过程复杂
  - 基本放大器计算复杂，若要得到精确结果，还是要借助于计算机进行辅助分析
- 实际的负反馈放大器大多用集成运放构成，放大器具有很高的增益，构成所谓深度负反馈结构
- 需要研究深度负反馈放大器的近似估算方法

# 深度负反馈放大器的近似估算

- 深度负反馈状态:  $AF \gg 1$
- 反馈深度:  $1 + AF \approx AF$
- 负反馈放大器的闭环增益可以简化为:

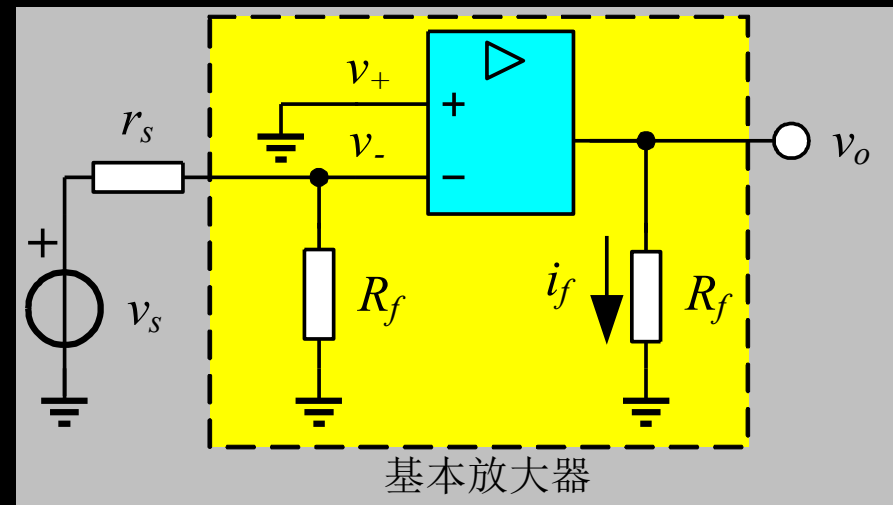
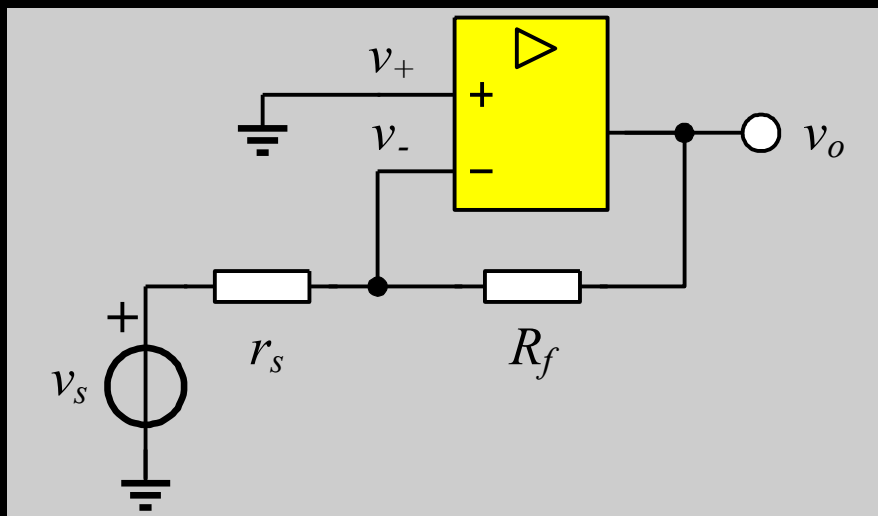
$$A_f = \frac{A}{1 + AF} \approx \frac{1}{F}$$

# 电压串联负反馈电路



放大器的闭环增益：
$$A_{vf} = \frac{1}{F} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

# 电压并联负反馈电路



闭环增益:  $Z_{mf} \approx \frac{1}{F} = -R_f$

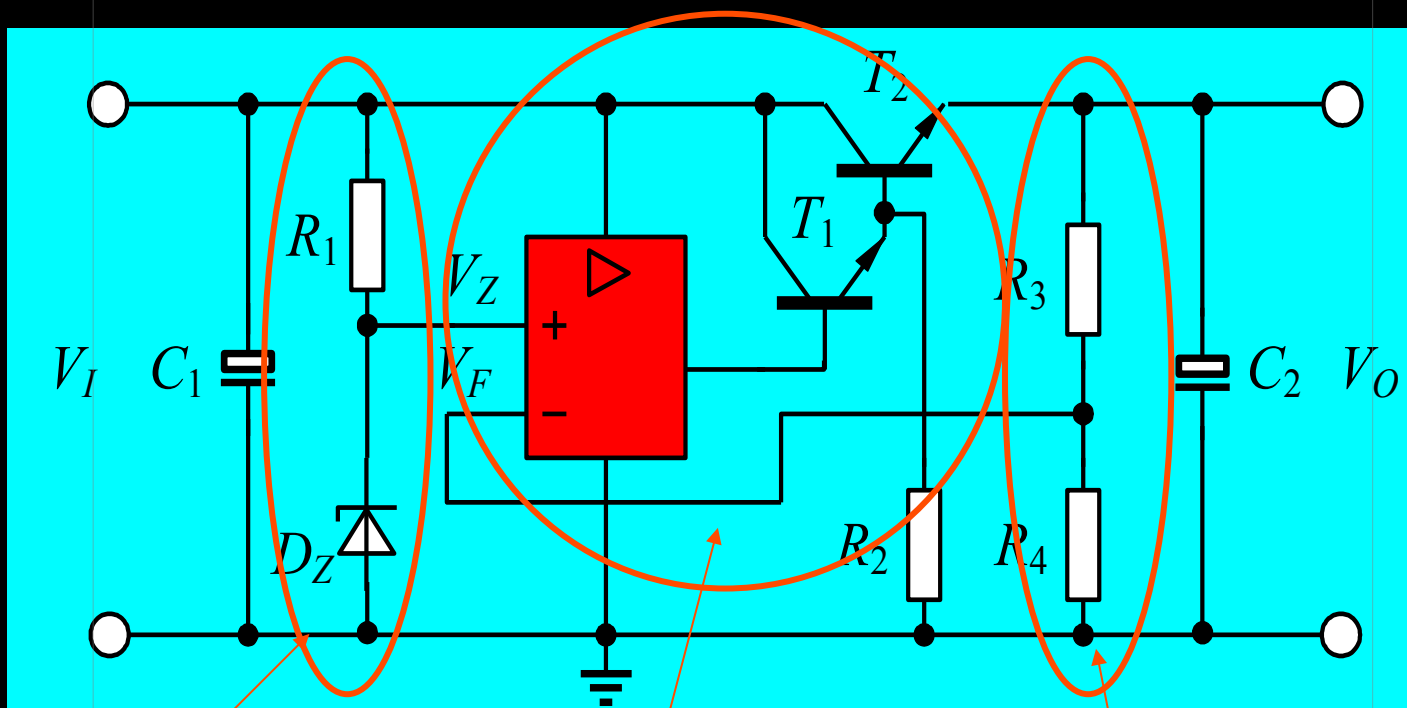
源电压增益:  $A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{1}{R_s + r_{if}} \cdot Z_{mf} \approx \frac{Z_{mf}}{R_s} = -\frac{R_f}{R_s}$

# 虚短路、虚开路

- 深度负反馈构成虚短路与虚开路
- 运用虚短路与虚开路概念，简化负反馈放大器增益的近似计算
- 近似估算的局限性：  
只能计算增益，不能计算输入和输出阻抗  
只有运放处于深度负反馈状态近似成立



# 负反馈电路的例子： 串联型线性稳压电源



基准输入

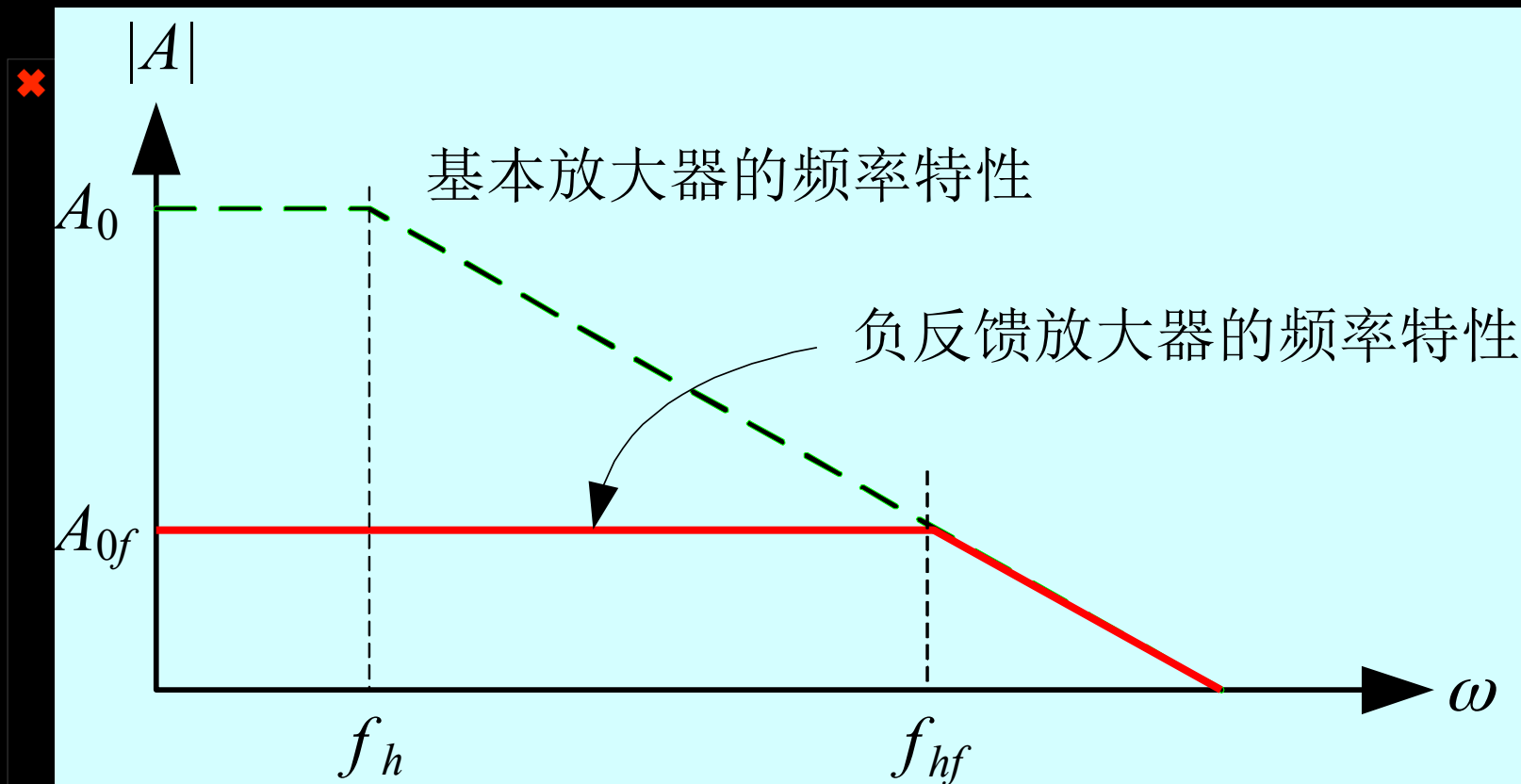
比较放大

电压取样

# 负反馈放大器的频率特性

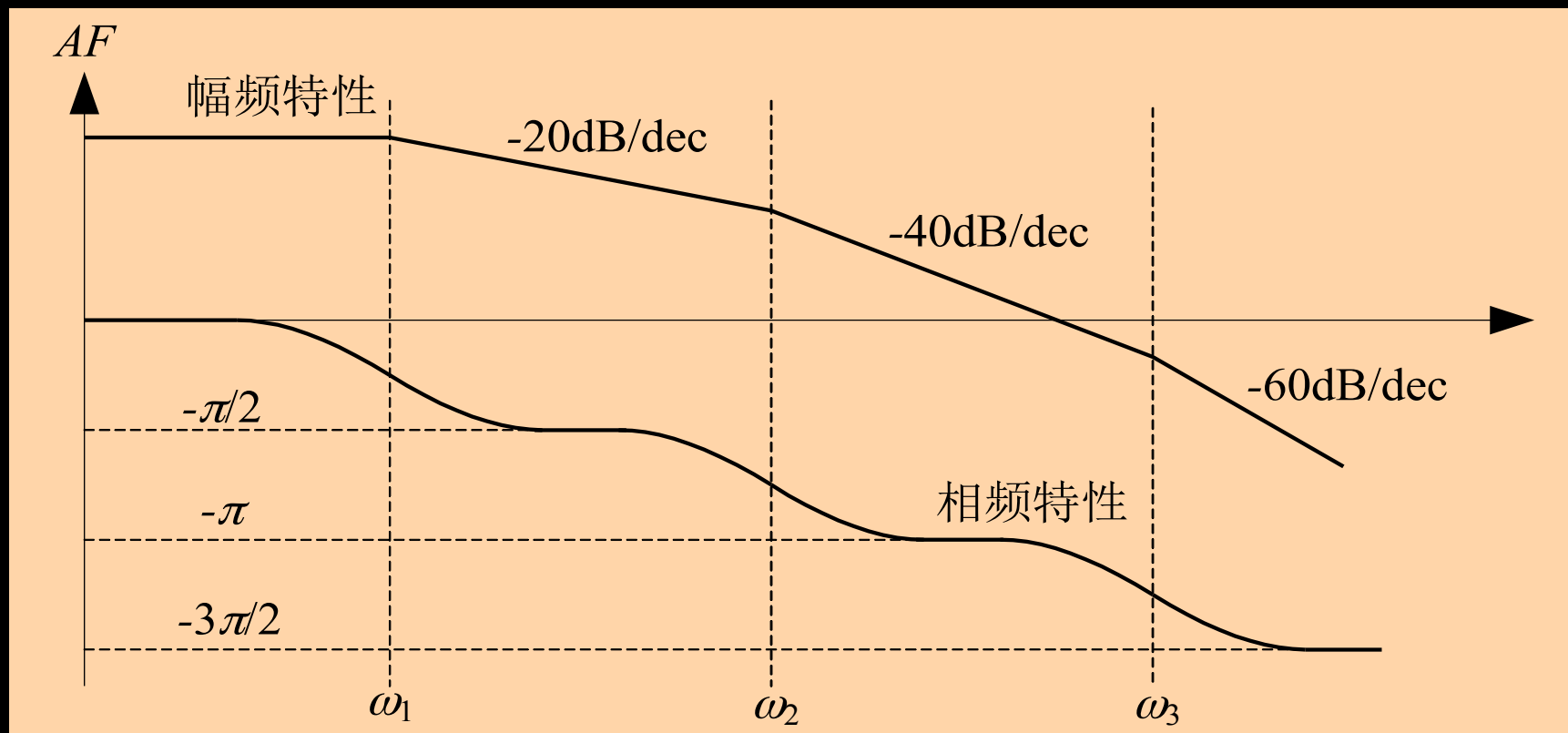
- 负反馈放大器对放大器通频带的影响
- 负反馈放大器的频率稳定性

# 负反馈对放大器通频带的影响



负反馈能够扩展放大器的通频带

# 负反馈放大器的频率稳定性



极点与频率特性的关系

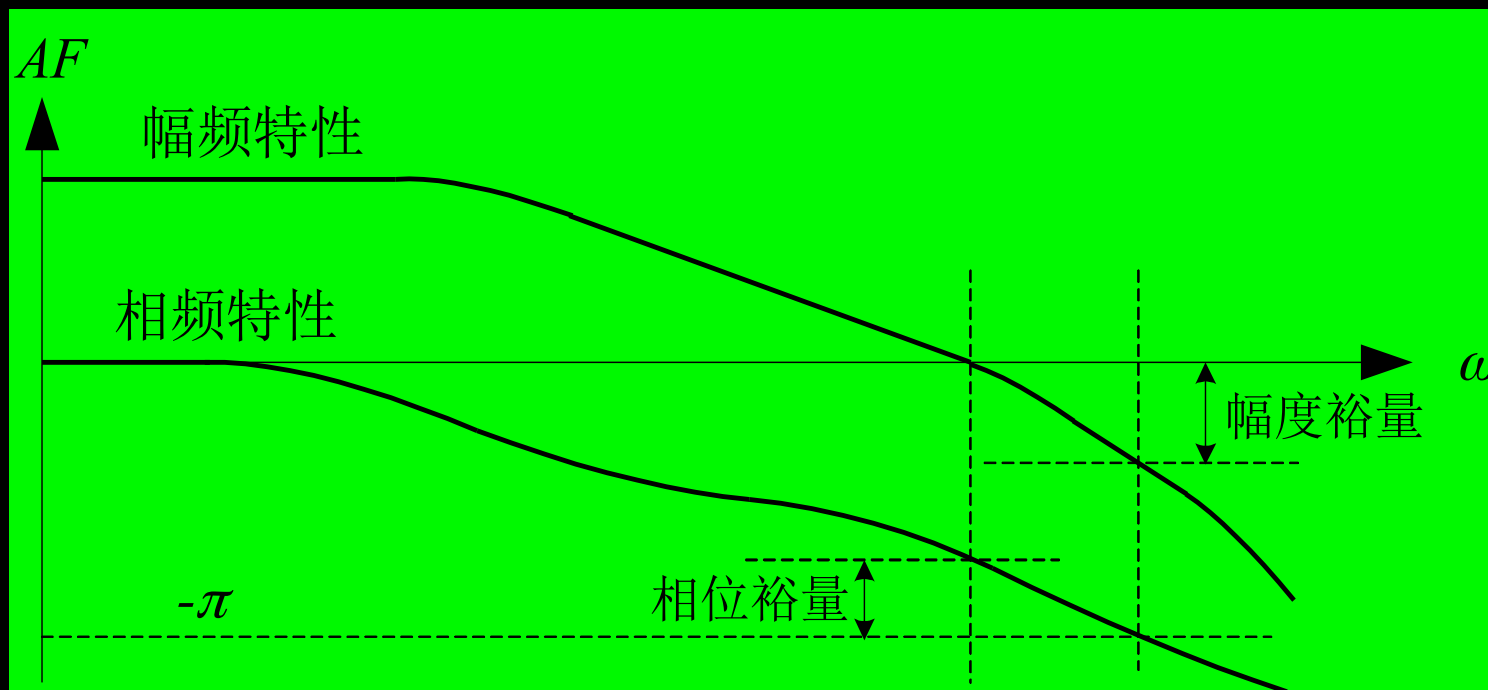
# 负反馈放大器的自激现象

- 放大器自激现象：当 $AF$ 的附加相移到达负180度，即其绝对相移到达负360度时，若同时有 $|AF| > 1$ ，反馈信号与输入信号同相，变成正反馈产生自激。
- 放大器产生自激的条件：

$$|AF| \geq 1; \quad \varphi(AF) = (2n+1)\pi, n = \pm 1, 2, \dots$$

# 稳定裕度—远离自激的尺度

稳定裕度分为增益裕度与相位裕度。

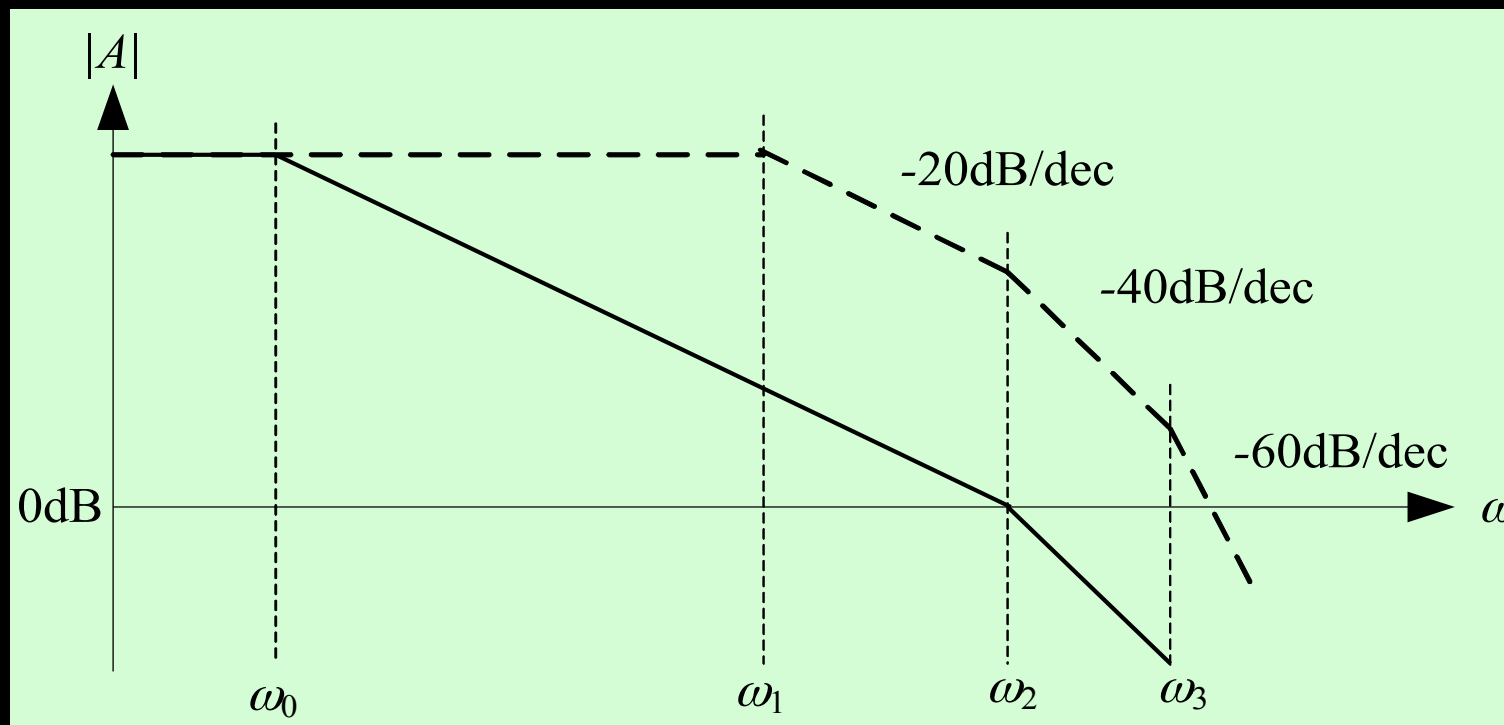


增益裕度： $\gamma_G(\text{dB}) = 0 - 20\log|AF|_{\varphi=180^\circ}$

相位裕度： $\gamma_\varphi = 180^\circ + \varphi(AF) |_{|AF|=1}$

# 防止负反馈放大器自激的方法

## ■ 频率补偿法：密勒电容



牺牲通频带的宽度来换取放大器的稳定性

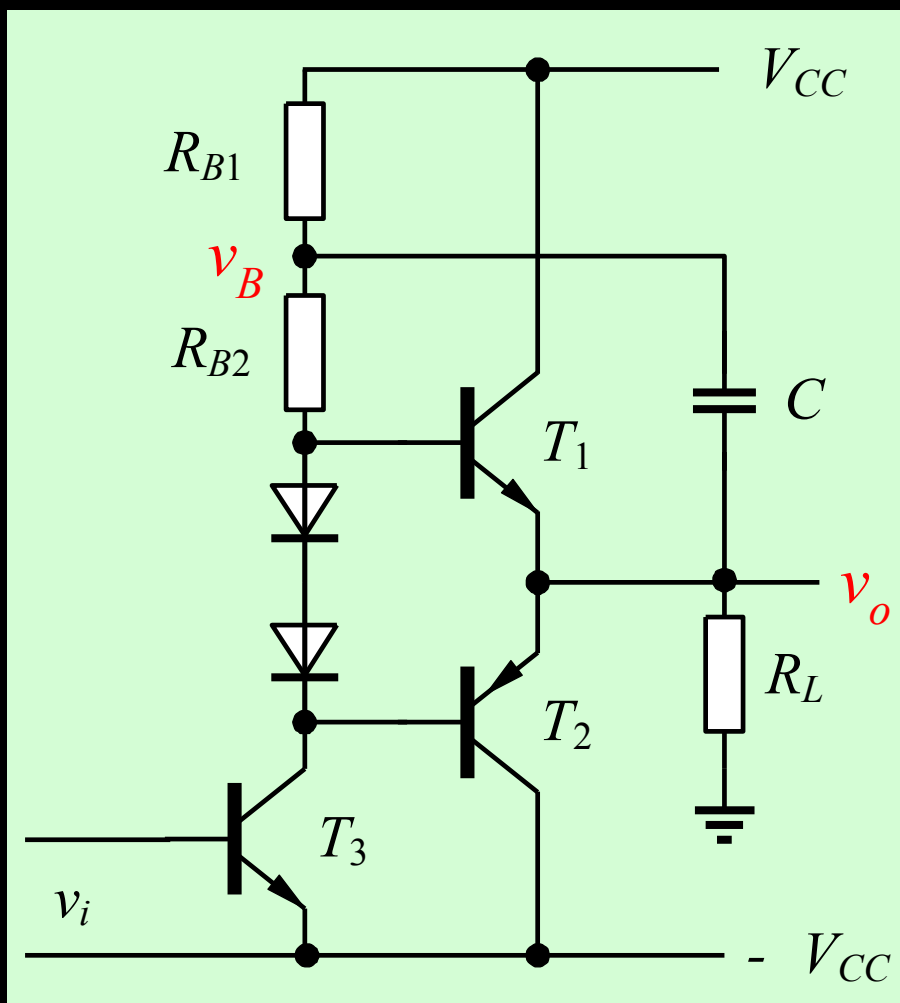
# 正反馈和反馈振荡器

- 正反馈

- 反馈振荡器



# 正反馈的应用：自举



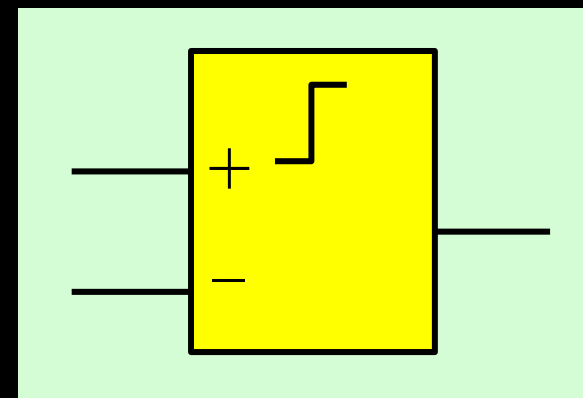
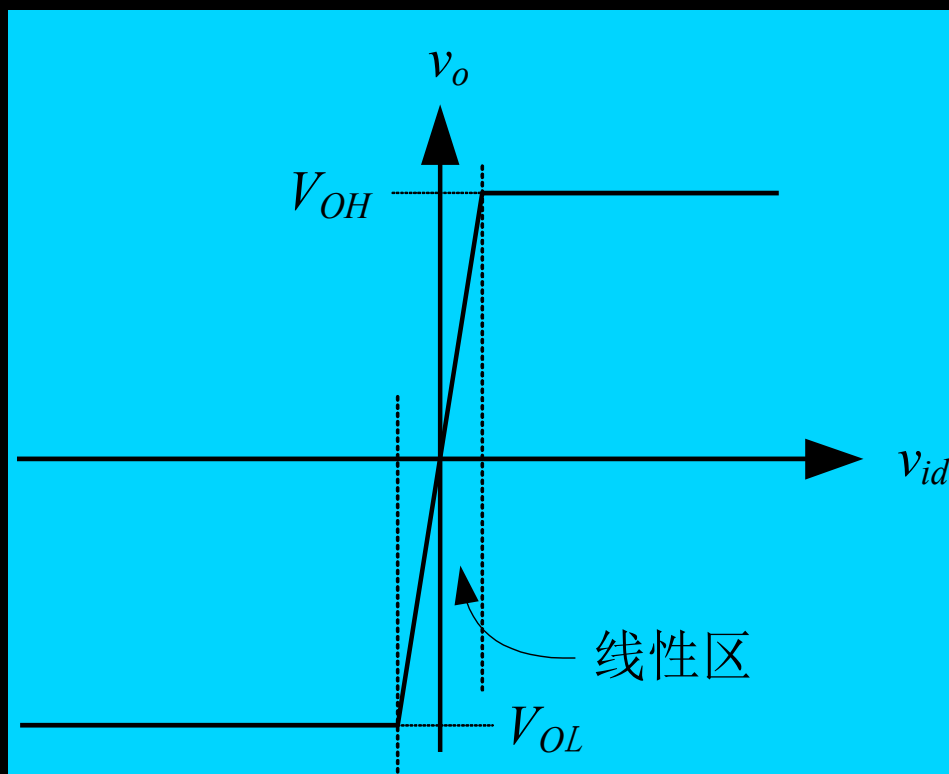
$$v_o \uparrow \rightarrow v_B \uparrow \rightarrow I_B \uparrow$$

流过  $R_{B2}$  的电流由电容  $C$  提供

输出电压不受电源电压限制

# 正反馈的应用：电压比较器

## ■ 电压比较器的传输特性



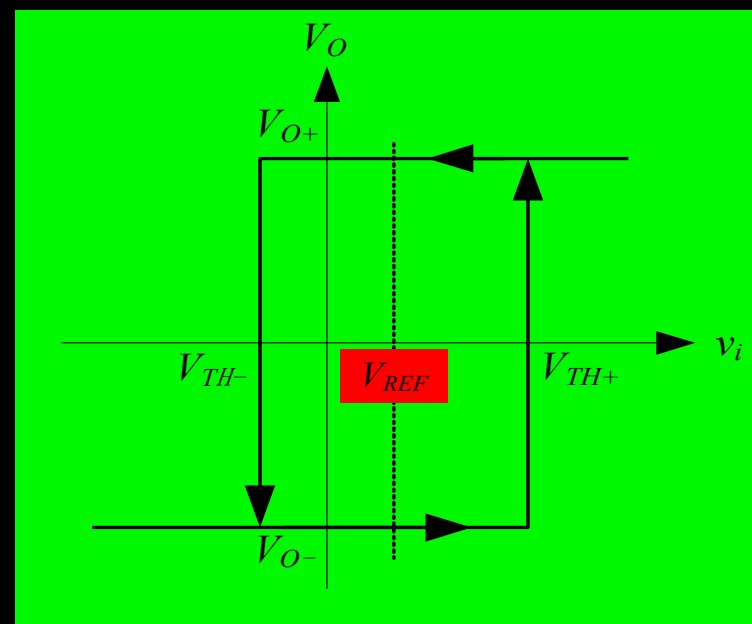
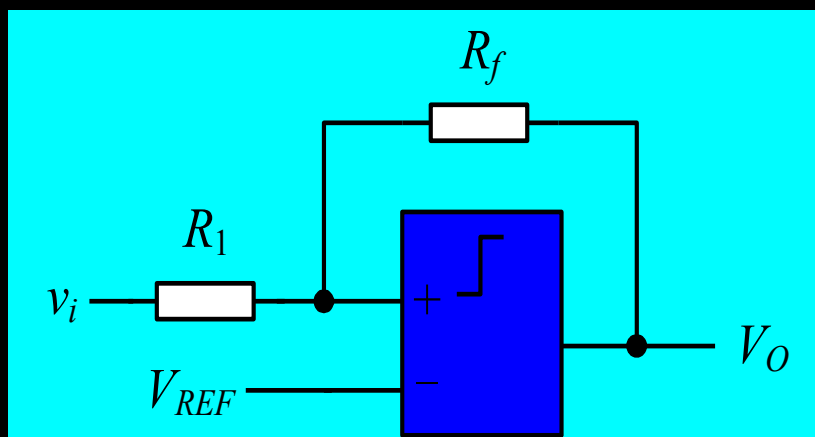
模拟比较器的电路符号

当  $v_1 > v_2$  时，输出  $v_o = V_{OH}$

当  $v_1 < v_2$  时，输出  $v_o = V_{OL}$

# 正反馈的应用：滞回比较器

滞回比较器原理图与电压传输特性

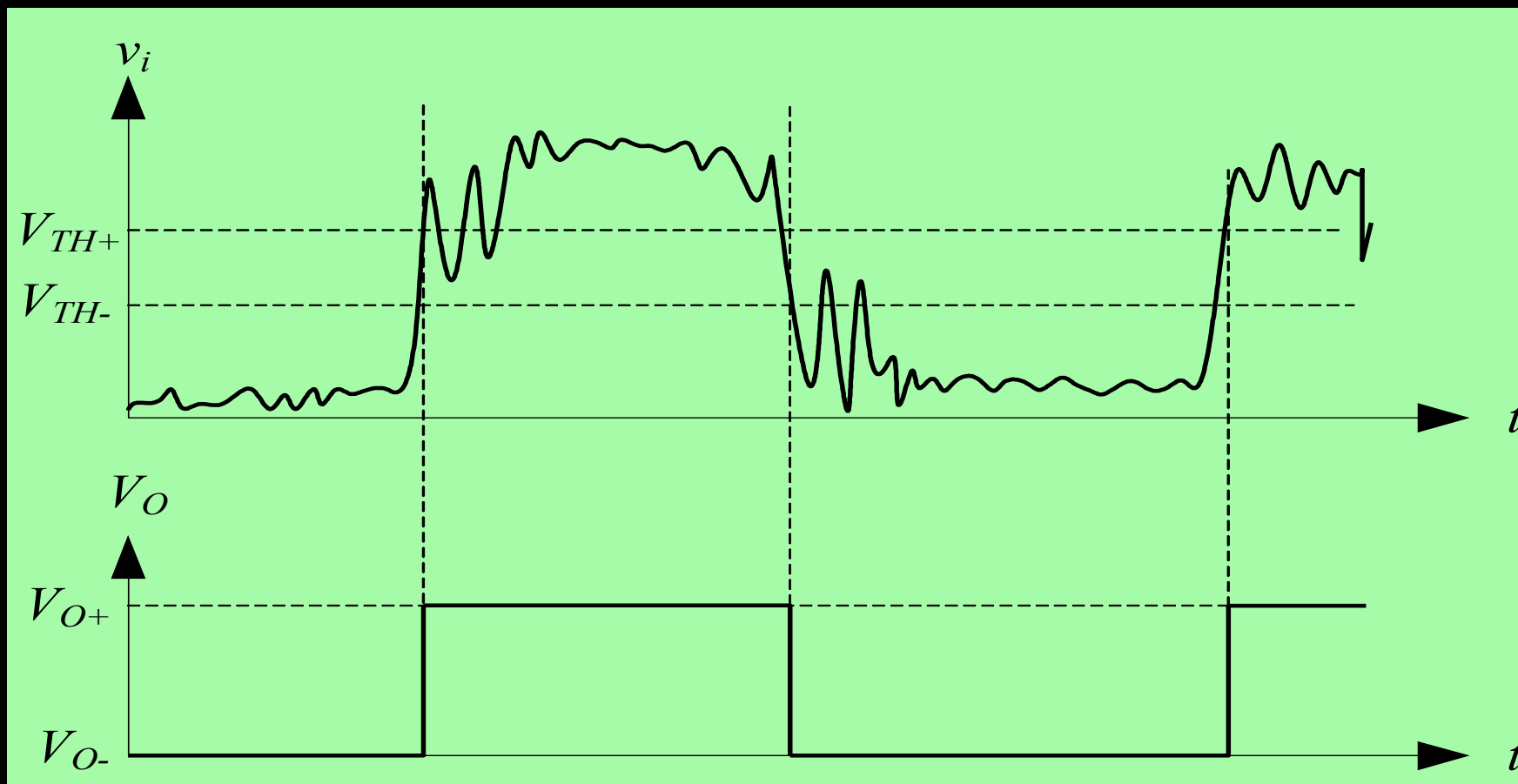


阈值电压：

$$V_{TH+} = \frac{R_1 + R_f}{R_f} V_{REF} - \frac{R_1}{R_f} V_{oL}$$

$$V_{TH-} = \frac{R_1 + R_f}{R_f} V_{REF} - \frac{R_1}{R_f} V_{oH}$$

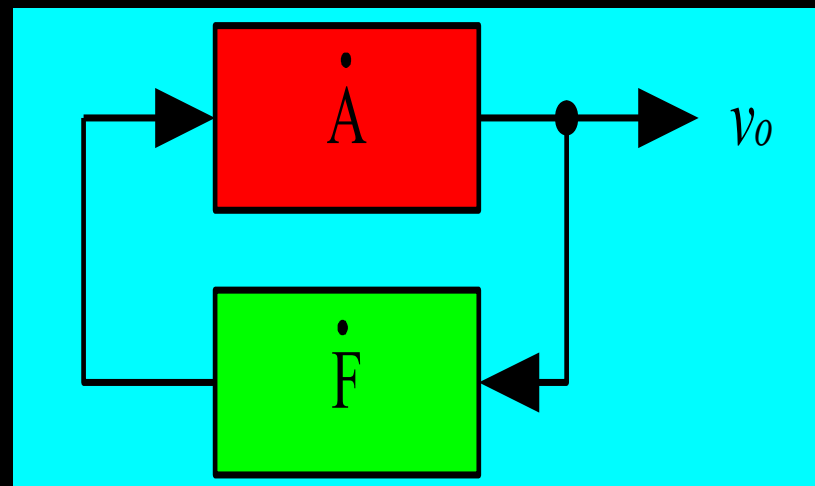
# 滞回比较器对输入信号整形



# 反馈振荡器

- 利用正反馈产生的自激振荡现象构成的振荡器称为反馈振荡器。

反馈振荡器的一般形式



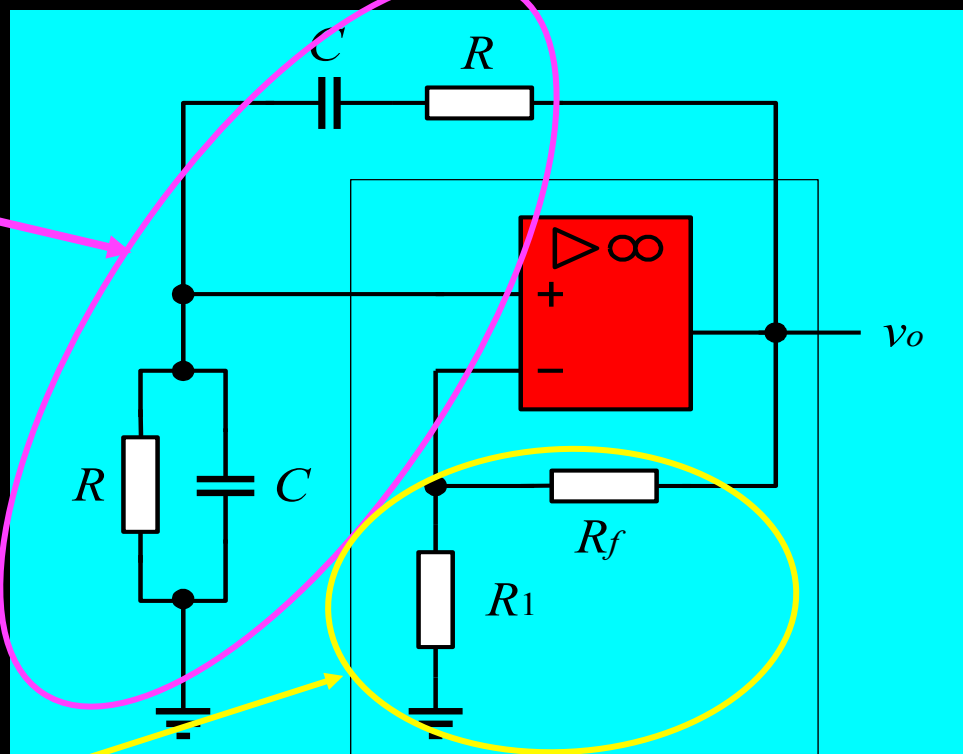
振幅平衡条件:  $A(j\omega)F(j\omega) = 1$

相位平衡条件:  $\varphi[A(j\omega)F(j\omega)] = 2n\pi, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

# 反馈振荡电路的例子

著名的 RC 振荡电路——文氏桥振荡电路

正反馈网络



负反馈网络

# 文氏振荡电路原理分析

负反馈放大器电压放大倍数： $A_v = \frac{v_o}{v_+} = 1 + \frac{R_3}{R_4}$

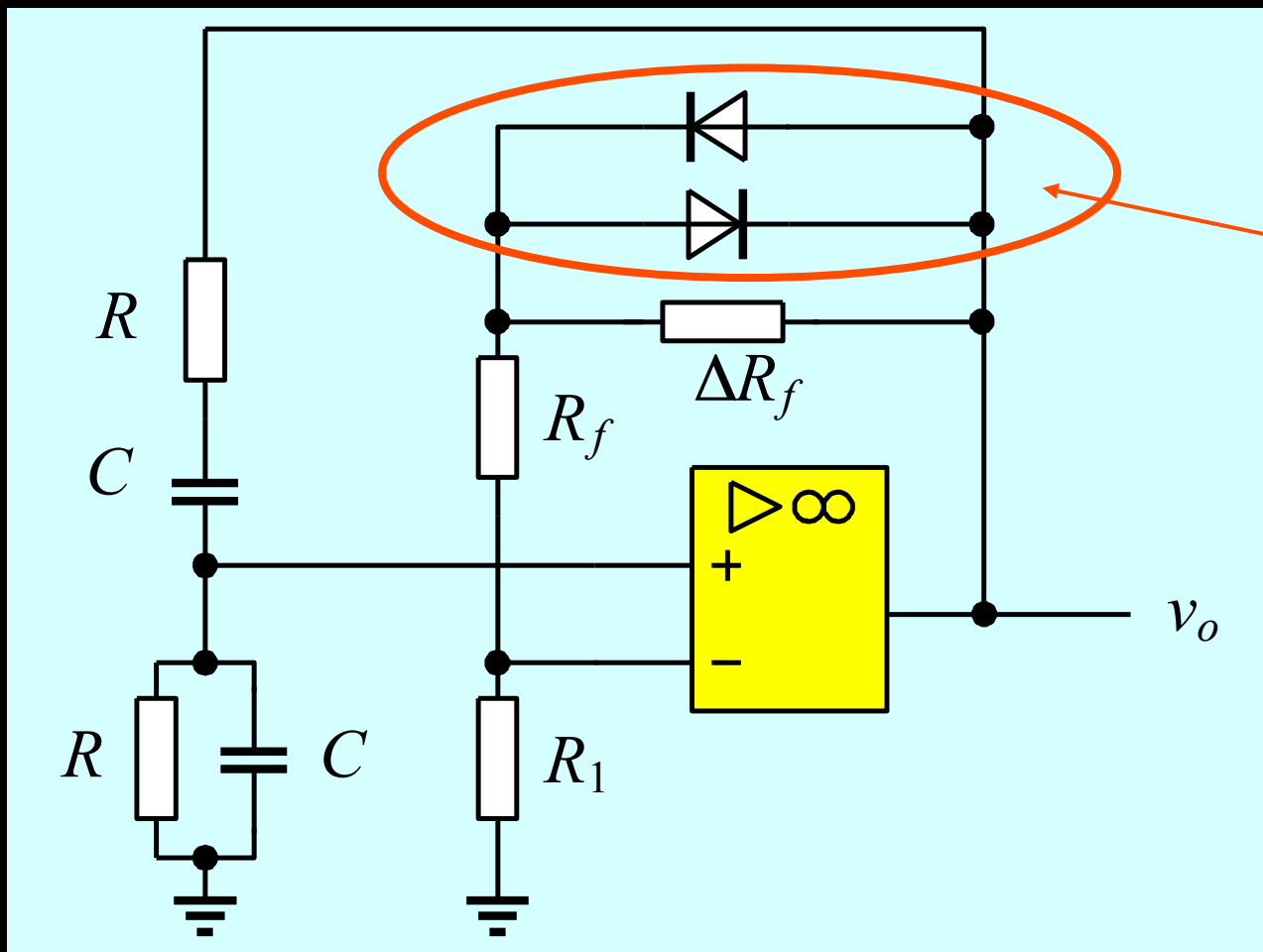
正反馈网络反馈系数： $F(j\omega) = \frac{v_+}{v_o} = \frac{1}{3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})}$

振荡器平衡的条件： $|A_v F(j\omega)| = 1$

$\Rightarrow$  负反馈放大器增益： $A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 3$

振荡角频率： $\omega_0 = \frac{1}{RC}$

# 实用的文氏桥振荡桥



增加稳幅  
环节，解  
决起振与  
平衡的矛  
盾

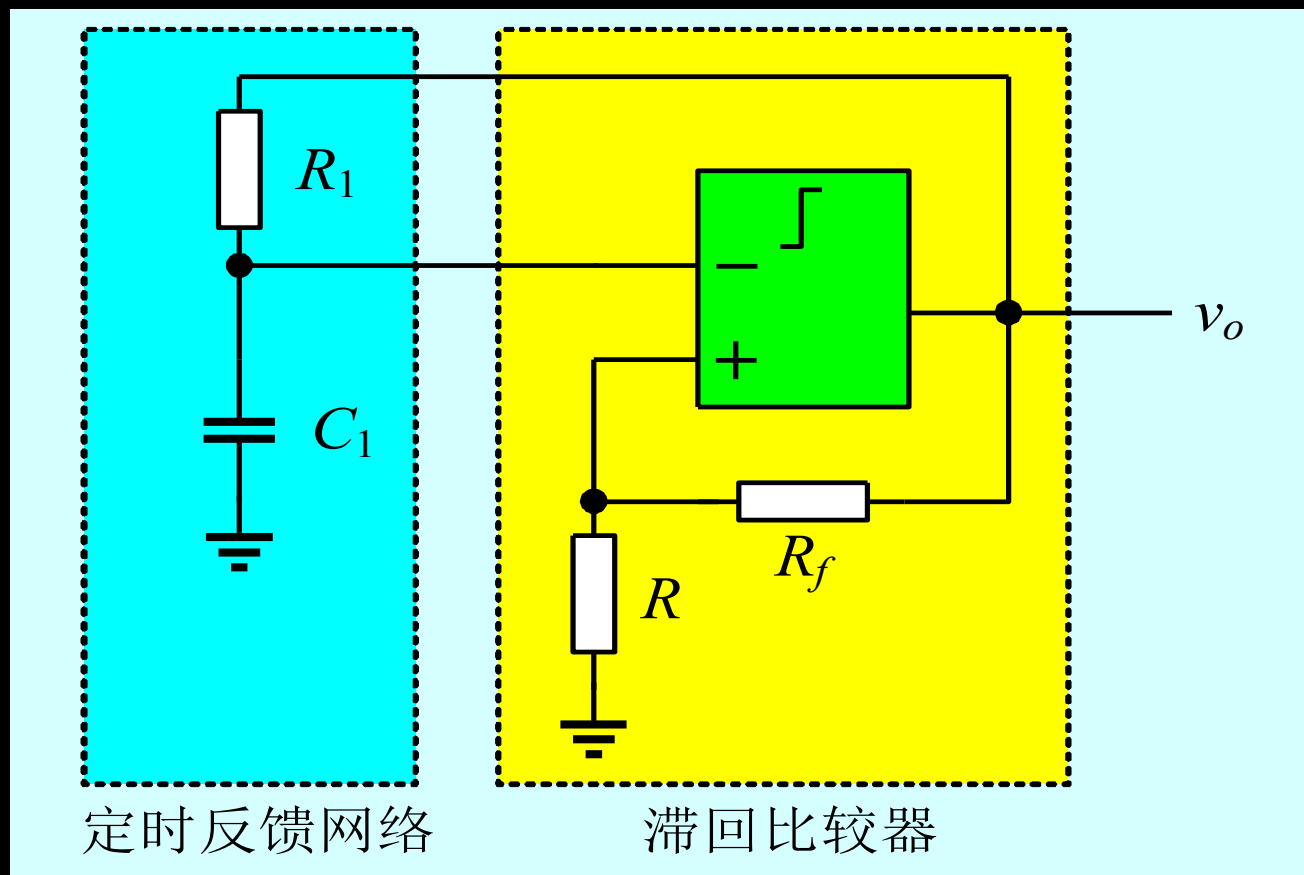
$$R_f + \Delta R_f > 2R_1$$

$$R_f < 2R_1$$

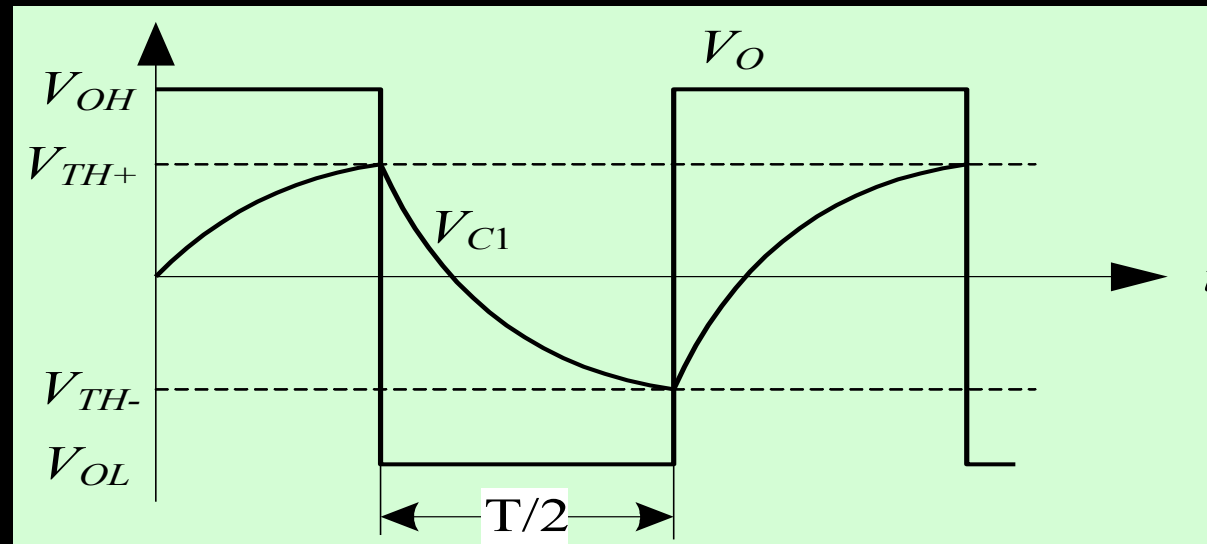


# 张弛振荡器

- 比较器 + 定时反馈网络



# 方波信号发生的波形



$$V_{TH+} = \frac{R}{R + R_f} V_{oH}$$

$$V_{TH-} = \frac{R}{R + R_f} V_{oL}$$

振荡器的振荡周期:  $T = 2R_1C_1 \ln\left(1 + \frac{2R}{R_f}\right)$



复旦大学电子工程系 陈光梦

# 第5章结束

