



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

§ 6.4 负反馈放大器的分析方法

lugh@ustc.edu.cn

2016年11月29日

1. 概述
2. 单环方框图分析方法
3. 深度负反馈放大器

1. 概述

■ 等效电路法

- 等效电路法是前几章一直采用的办法，画出交流小信号等效电路，从等效电路列出节点方程或回路方程，联立求解，分析电路的交流性能

■ 特点

- 方法具有普适性，处理单向化电路比较方便，也可以处理简单的单级负反馈放大器，但是处理复杂的多级负反馈放大器时分析过程较为复杂，且负反馈的物理含义较难反映

1. 概述

■ 方框图法

- 把一个负反馈放大器分解为基本放大器和反馈网络两个方框分别分析，每个方框只用一个传递函数表示该方框的输出量与输入量之间的关系

■ 特点

- 方便计算放大器的性能指标，能够定量地说明反馈对放大器的性能改善程度，对放大器工作稳定性的分析判断也很方便

2. 单环方框图分析方法

■ 前提条件

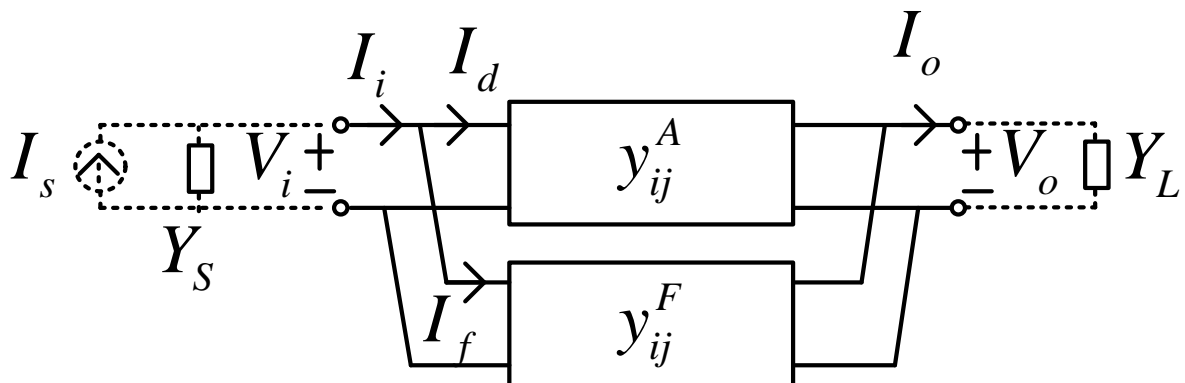
- 电路能够明显划分成基本放大器**A** 和反馈网络**F**，并要求它们分别具有独立的电路性能
- 信号只能单向传输，即在基本放大器和反馈网络中，信号只能按箭头单向传输

■ 基本假定

- 基本放大器**A**的正向传输远大于反馈网络**F**的正向传输
- 基本放大器**A**的反向传输远小于反馈网络**F**的反向传输

2. 单环方框图分析方法

■ 电压并联负反馈



$$\begin{cases} I_i = f(V_i, V_o) \\ I_o = f(V_i, V_o) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_i = y_{11}^T V_i + y_{12}^T V_o \\ -I_o = y_{21}^T V_i + y_{22}^T V_o \end{cases}$$

2. 单环方框图分析方法

$$\left. \begin{array}{l} y_{21}^A \gg y_{21}^F \\ y_{12}^A \ll y_{12}^F \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} A_r = \frac{-y_{21}^A}{y_{11}^T (y_{22}^T + Y_L)} \\ A_{rs} = \frac{-y_{21}^A}{(y_{11}^T + Y_s)(y_{22}^T + Y_L)}, \\ F_g = y_{12}^F \end{array} \right., \quad y_{ij}^T = y_{ij}^A + y_{ij}^F$$

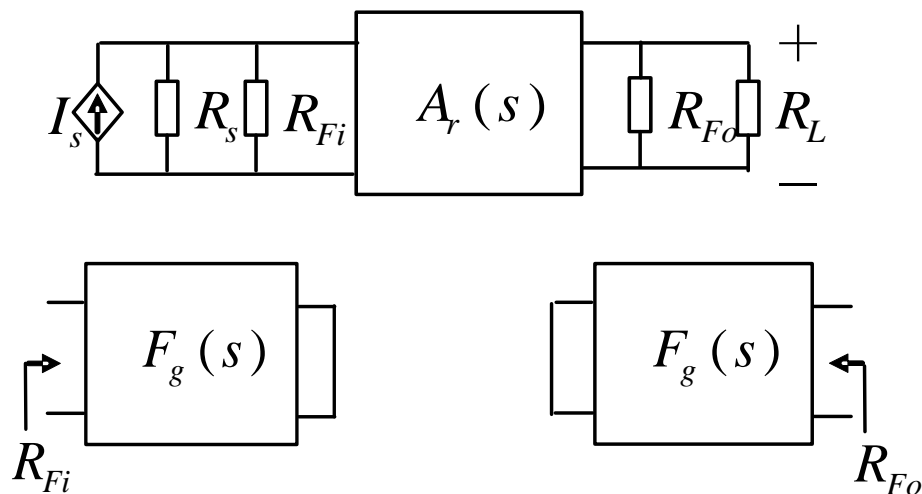
■ 说明

- 可以看到，开环增益 A_r 与 A_{rs} 不仅与基本放大器 A 有关，还与反馈网络 F 有关
- 在基本假定下，反馈函数只与 F 网络有关

2. 单环方框图分析方法

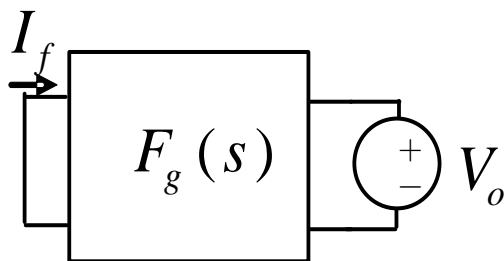
■ 方框图法分析步骤

- 第一步：划分A/F网络，判断反馈类型与极性
- 第二步：处理输入输出端口的环外电阻
- 第三步：绘制包含反馈网络的负载效应的基本放大器开环等效图，求其开环增益



2. 单环方框图分析方法

□ 第四步：求反馈函数

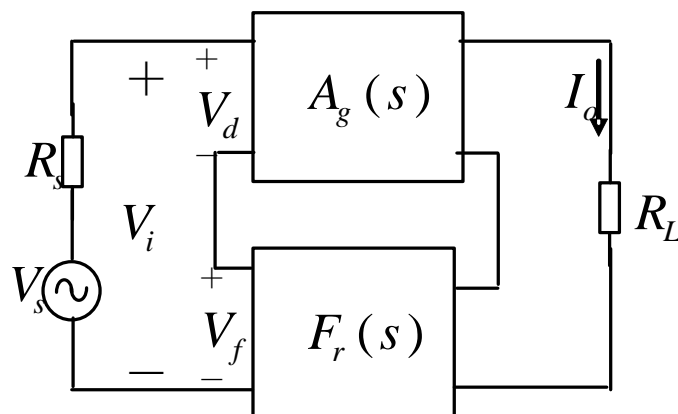


$$F_g(s) = \frac{I_f(s)}{V_o(s)}$$

- 第五步：求反馈深度
- 第六步：利用基本反馈方程式，求满足方程式的闭环增益，若有环外电阻，则需做相关调整
- 第七步：求不满足方程式的其他闭环性质

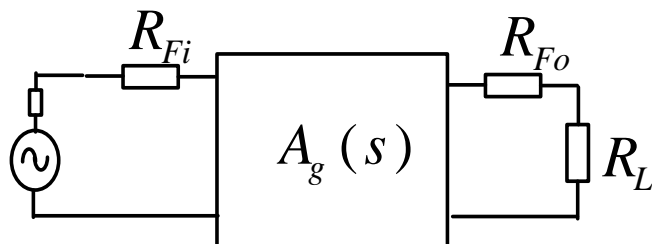
2. 单环方框图分析方法

■ 电流串联负反馈

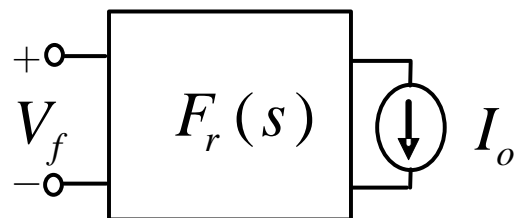
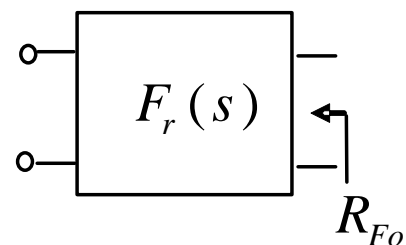
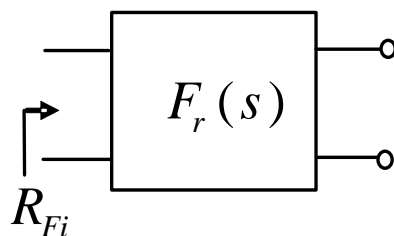


2. 单环方框图分析方法

■ 开环等效



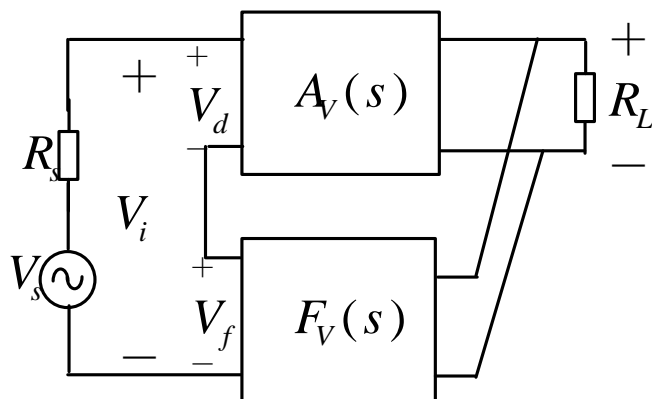
■ 反馈网络



$$F_r(s) = \frac{V_f(s)}{I_o(s)}$$

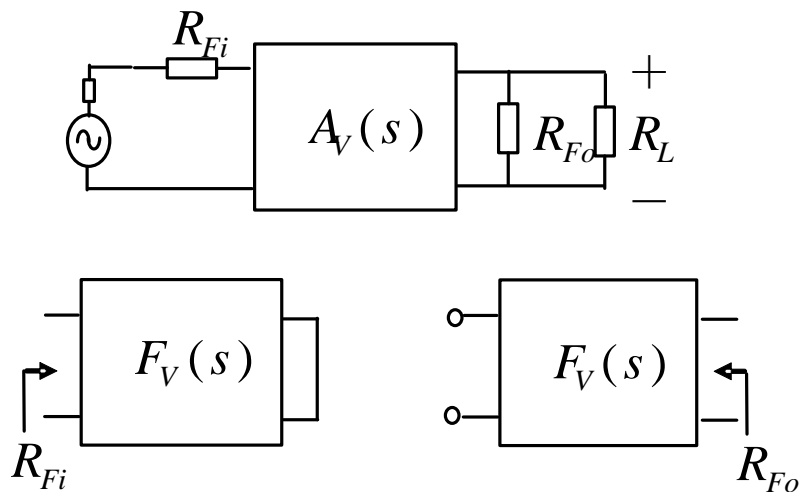
2. 单环方框图分析方法

■ 电压串联负反馈

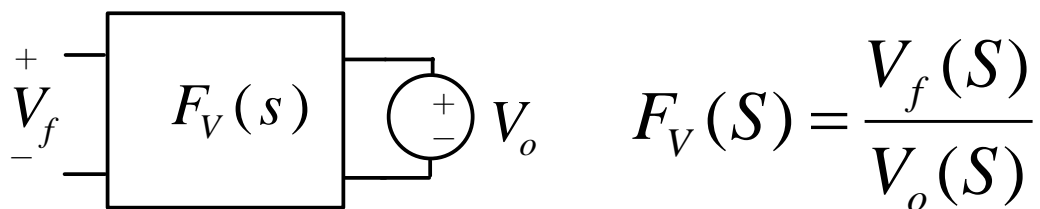


2. 单环方框图分析方法

■ 开环等效

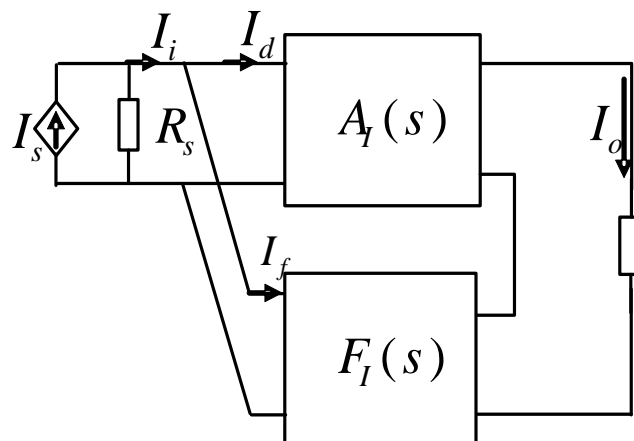


■ 反馈函数



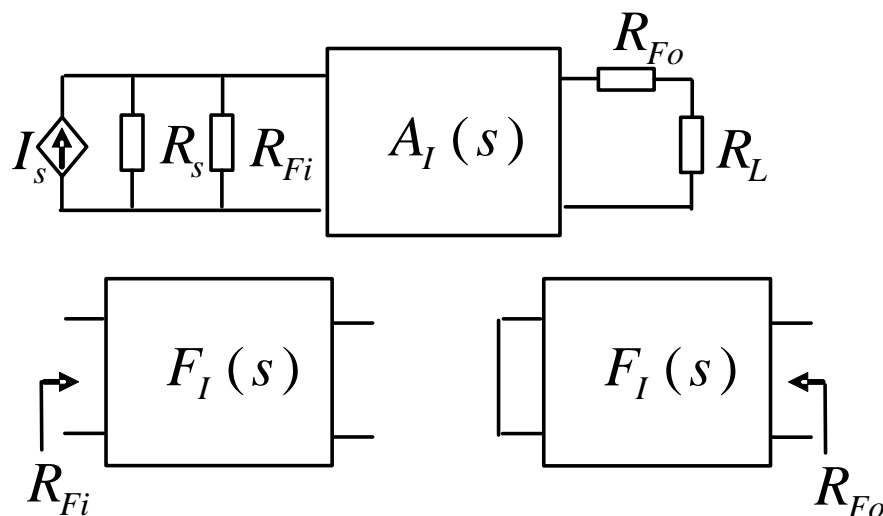
2. 单环方框图分析方法

■ 电流并联负反馈

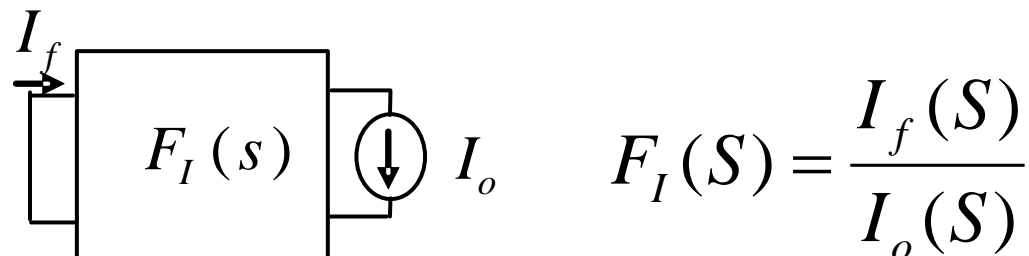


2. 单环方框图分析方法

■ 开环等效

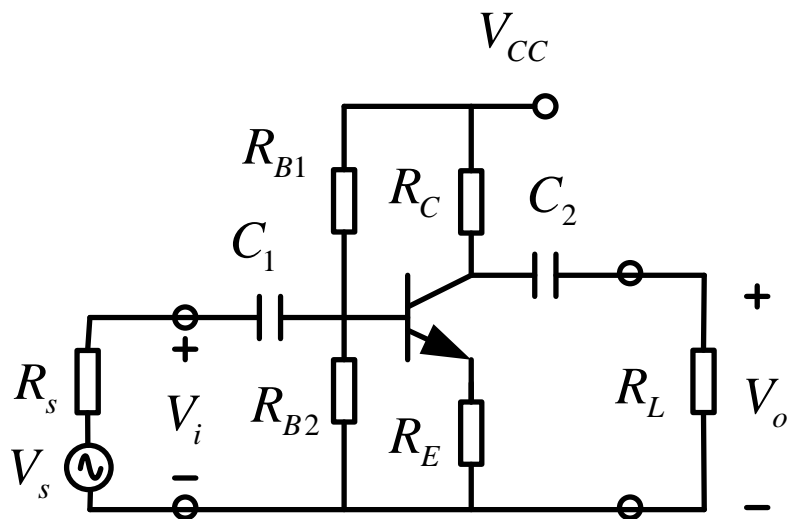


■ 反馈函数



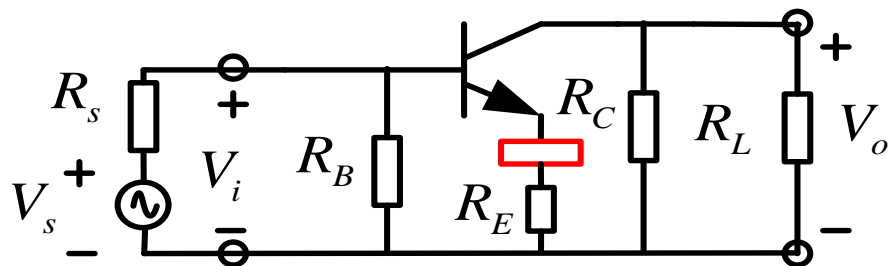
2. 单环方框图分析方法

■ 例：共发射放大器的方框图分析



2. 单环方框图分析方法

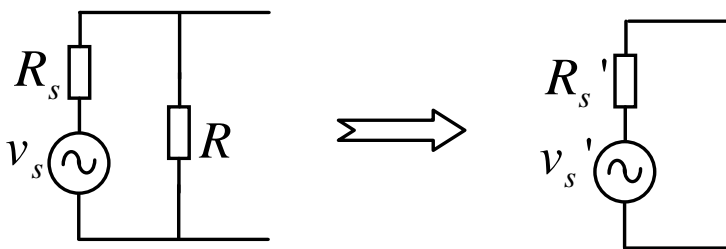
- 第一步：划分A/F网络，判断反馈类型



电流串联负反馈

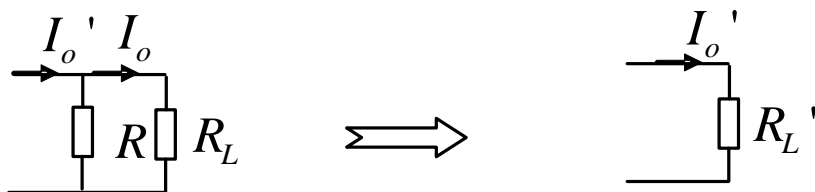
2. 单环方框图分析方法

■ 第二步：处理环路电阻



$$V_s' = V_s \cdot \frac{R_B}{R_B + R_s}$$

$$R_s' = R_B \parallel R_s$$

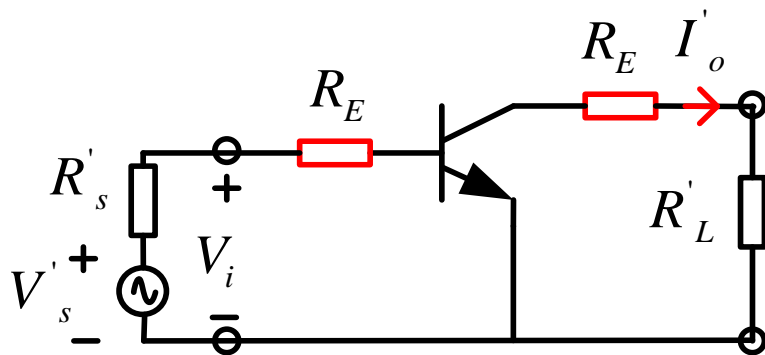


$$R_L' = R_C \parallel R_L$$

$$A_g' = \frac{I_o'}{V_i}, A_{gs}' = \frac{I_o'}{V_s'}$$

2. 单环方框图分析方法

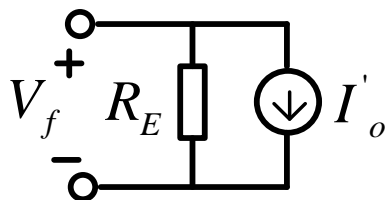
- 第三步：求反馈网络等效负载，求A网络开环性质



$$\left\{ \begin{array}{l} A'_g = \frac{-\beta i_b}{(R_E + h_{ie}) i_b} = \frac{-\beta}{R_E + h_{ie}} \\ A'_{gs} = \frac{-\beta}{R_E + h_{ie} + R'_s} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} R'_i = R_E + h_{ie} \\ R'_o = R_E + r'_c \end{array} \right.$$

2. 单环方框图分析方法

■ 第四步：求反馈网络的传递函数



$$F_r = -R_E$$

2. 单环方框图分析方法

■ 第五步：求反馈深度

$$\left\{ \begin{array}{l} D = 1 + A'_g F_r \\ D_s = 1 + A'_{gs} F_r \\ (D_s)_0 = 1 + A'_{gs} F_r \Big|_{R_L = 0} \end{array} \right.$$

2. 单环方框图分析方法

■ 第六步：求满足基本反馈方程式的闭环性质

$$\begin{cases} A'_{gf} = \frac{A'_g}{D} \\ A'_{gsf} = \frac{A'_{gs}}{D_s} \end{cases} \quad \begin{cases} R'_{if} = D \cdot R'_i \\ R'_{of} = (D_s)_o \cdot R'_o \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_{gf} = A'_{gf} \frac{R_C}{R_C + R_L} \\ A_{gsf} = A'_{gsf} \frac{R_C}{R_C + R_L} \frac{R_B}{R_B + R_s} \end{cases} \quad \begin{cases} R_{if} = R_B \parallel R'_{if} \\ R_{of} = R_C \parallel R'_{of} \end{cases}$$

2. 单环方框图分析方法

- 第七步：求不满足基本反馈方程式的其它闭环性质

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{Vf} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{I_o' R_L'}{V_i} = A_{gf}' R_L' = A_{gf} R_L \\ A_{Vsf} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{I_o' R_L'}{V_i} \frac{R_{if}}{R_{if} + R_s} = A_{Vf} \frac{R_{if}}{R_{if} + R_s} \\ A_{If} = \frac{I_o}{I_i} = \frac{I_o}{V_i} R_{if} = A_{gf} R_{if} \end{array} \right.$$

2. 单环方框图分析方法

■ 求高频特性

$$\begin{cases} \omega_h = \frac{\omega_\beta}{D} \left(1 + \frac{\beta r_e}{R_E + r_b} \right) \\ D = 1 + \omega_T C_c (R_E + R'_L) \end{cases} \Rightarrow \omega_{hf} = D \cdot \omega_h$$

↑
密勒因子

↑
中频反馈
深度

3. 深度负反馈放大器

■ 深度负反馈条件及其推论

$$A(s)F(s) \gg 1$$

$$\Rightarrow D \gg 1 \Rightarrow X_i \gg X_d \Rightarrow X_f \approx X_i$$

■ 闭环增益

$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s)F(s)} \approx \frac{A(s)}{A(s)F(s)} = \frac{1}{F(s)}$$

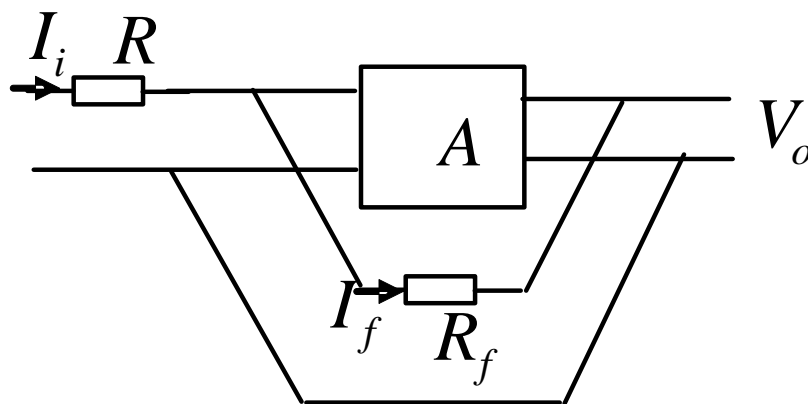
3. 深度负反馈放大器

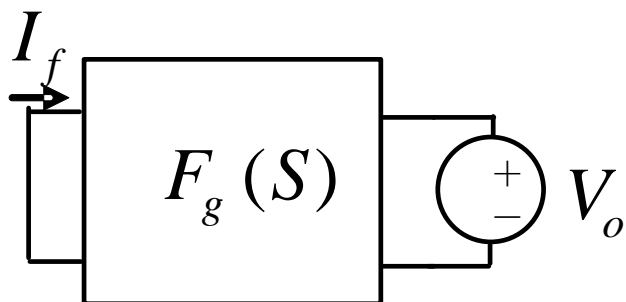
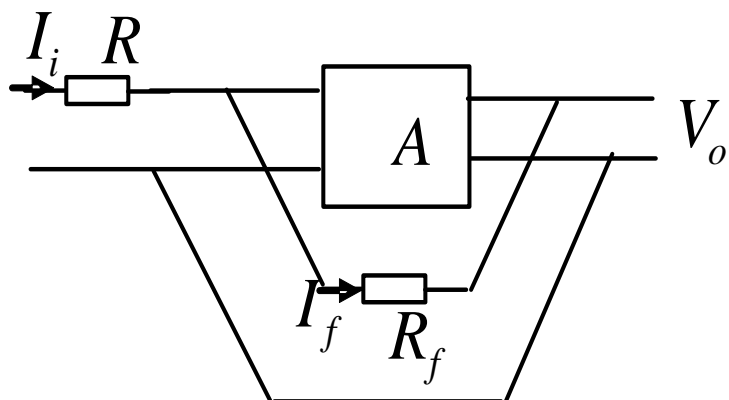
■ 说明

- 深度负反馈放大器，只需求反馈网络即可得到闭环放大器的增益，但由于没有主网络性质，放大器的很多其它性质无法求，只能求一部分性质

■ 例：求深度负反馈放大器的闭环性质

求深度负反馈放大器的闭环电压增益和输入阻抗

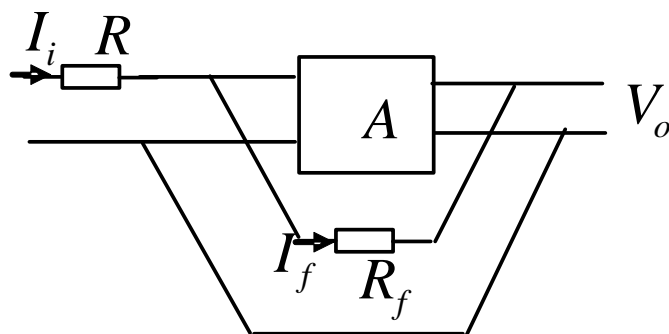




解：

$$F_g = \frac{I_f}{V_o} = -\frac{1}{R_f}$$

$$\Rightarrow A_{rf} = \frac{1}{F_g} = -R_f$$



$$V_i = I_i R + I_f R_f + V_o = I_i (R + R_f) + V_o$$

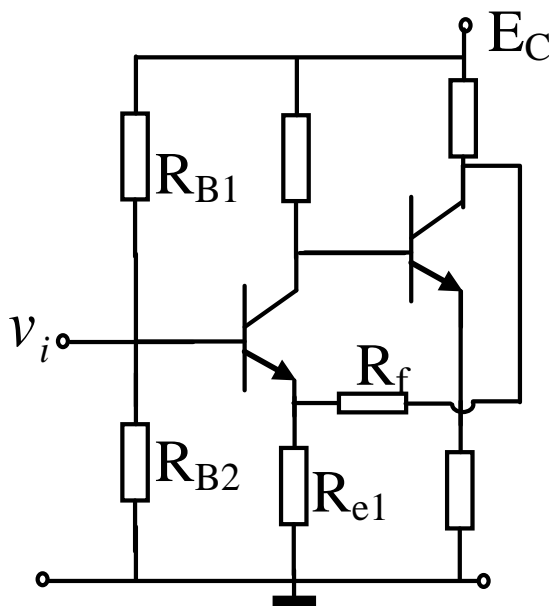
$$= \frac{V_o}{A_{vf}} \cdot (R + R_f) + V_o = V_o \left(-\frac{R + R_f}{R_f} + 1 \right) = -\frac{R}{R_f} V_o$$

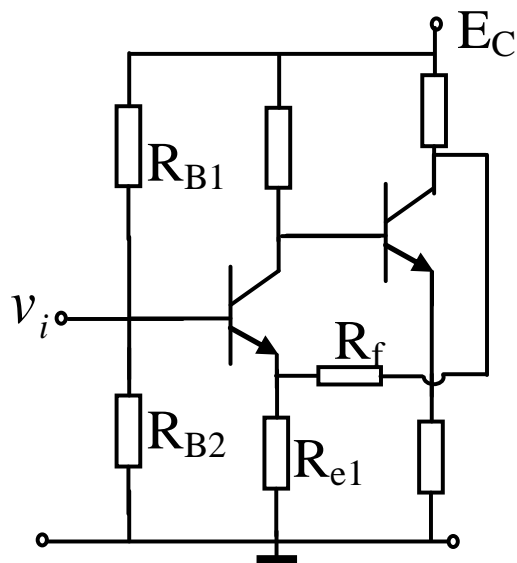
$$A_{vf} = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R}$$

$$R_{if} = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_i}{V_o} \cdot \frac{V_o}{I_i} = \frac{A_{vf}}{A_{vf}} = R$$

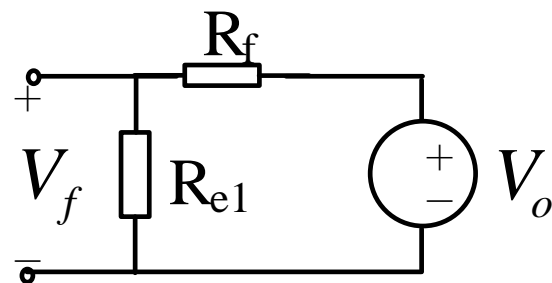
■ 例：求深度负反馈放大器的闭环性质

求深度负反馈放大器的闭环电压增益





解:



$$F_V = \frac{R_{e1}}{R_f + R_{e1}} \Rightarrow A_{Vf} = 1 + \frac{R_f}{R_{e1}}$$