



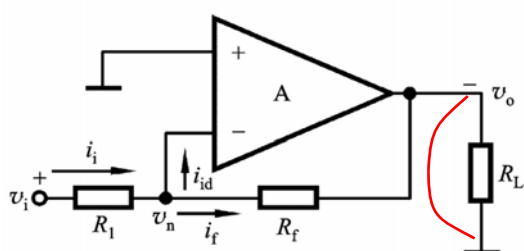
模拟电路基础（下）

负反馈放大器

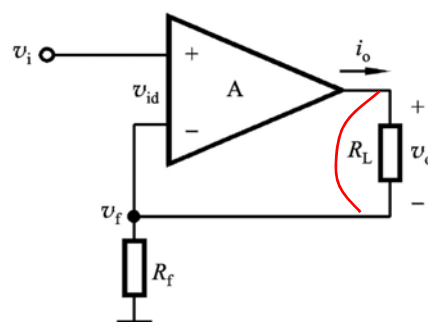
6.1 反馈的基本概念



➤ 电压反馈与电流反馈



负载短路，反馈信号消失，电压反馈
 R_f 的一端接在输出端，电压反馈



负载短路，反馈信号存在，电流反馈
 R_f 接在输出回路的某个节点，电流反馈

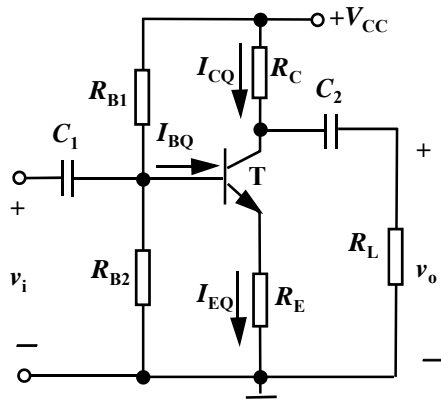
6.1 反馈的基本概念

3

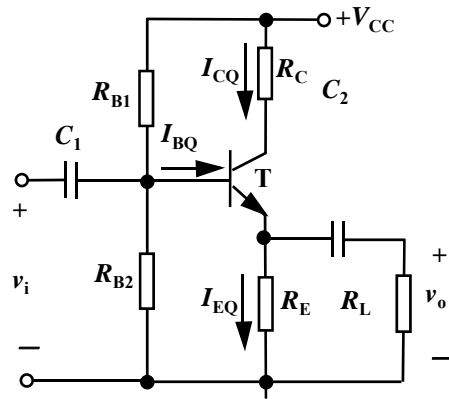


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 电压反馈与电流反馈



负载短路，反馈信号存在，电流反馈
 R_E 接在输出回路的某个节点，电流反馈



负载短路，反馈信号消失，电压反馈
 R_E 的一端接在输出端，电压反馈

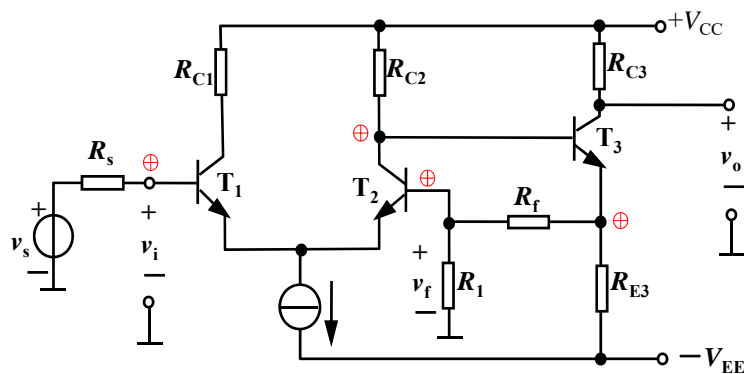
6.1 反馈的基本概念

4



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 电压反馈与电流反馈



负载短路，反馈信号存在，电流反馈
 R_f 接在输出回路的某个节点，电流反馈

6.1 反馈的基本概念

5



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 电压反馈与电流反馈

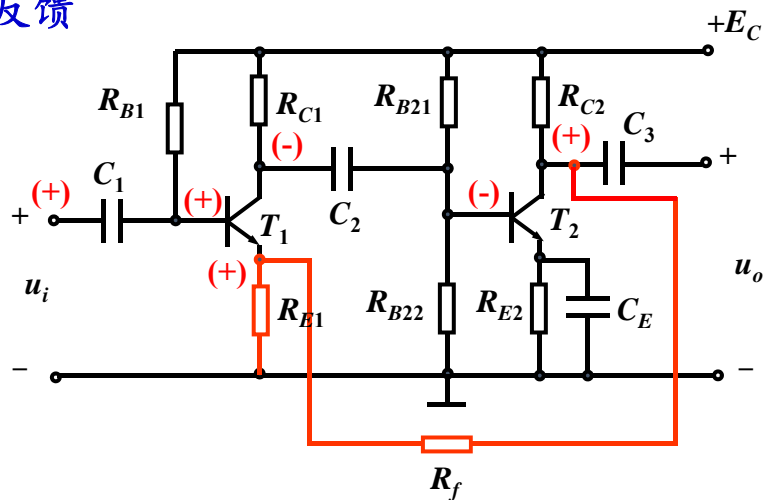
判断：

正负反馈？

电流电压反馈？

串联并联反馈？

交、直流反馈？



电压串联负反馈（交、直流反馈）

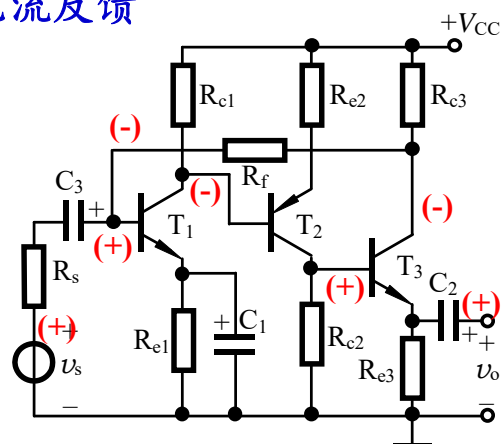
6.1 反馈的基本概念

6



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 电压反馈与电流反馈



电流并联负反馈，交、直流反馈 R_f

6.1 反馈的基本概念

7



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 反馈判断总结

- 有无反馈: 是否存在把输出回路和输入回路连接起来的支路(反馈回路)。
- 交流反馈与直流反馈: 反馈存在于直流或交流或交直流通路中。
- 正反馈与负反馈: 瞬时极性法。
- 串联与并联反馈: 反馈信号是否和输入信号接于放大电路同一端。
- 电压与电流反馈: 短路断路法、结构法。

6.2 负反馈的四种基本组态

8



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 基本组态概述

对负反馈四种基本组态的分析是理解负反馈对放大器性能影响的基础。

输入端: 反馈网络在放大电路输入端的连接分为串联和并联两种方式。

输出端: 反馈信号在输出端分为电压取样和电流取样两种方式。

由此可组成四种组态:

电压串联 电压并联 电流串联 电流并联

6.2 负反馈的四种基本组态

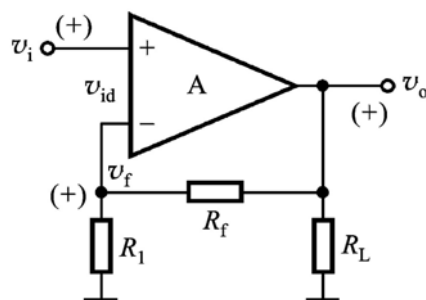
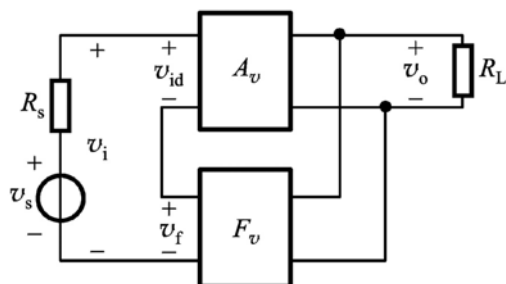
9



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 电压串联负反馈

判断：端点不同→串联，反馈信号为电压→输出短路，电压消失→电压反馈



特点：

- 输入以电压形式求和 (KVL) : $v_{id} = v_i - v_f$
- 稳定输出电压
- 电压控制的电压源 (VCVS)，电压/电压转换

6.2 负反馈的四种基本组态

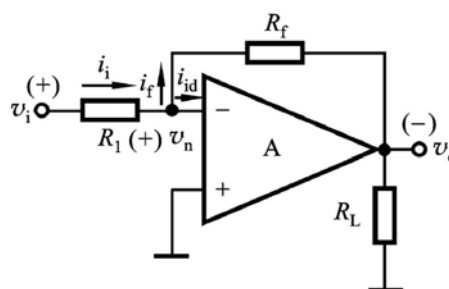
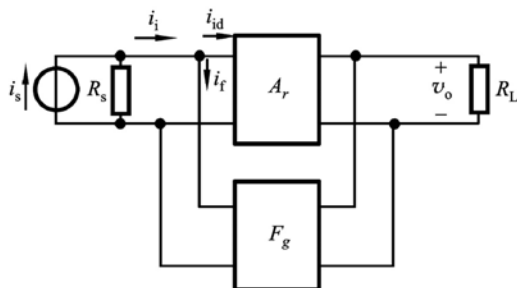
10



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 电压并联负反馈

判断：端点相同→并联，反馈信号为电流→输出短路，电流消失→电压反馈



特点：

- 输入以电流形式求和 (KCL) : $i_{id} = i_i - i_f$
- 稳定输出电压
- 电流控制的电压源 (CCVS)，电流/电压转换

6.2 负反馈的四种基本组态

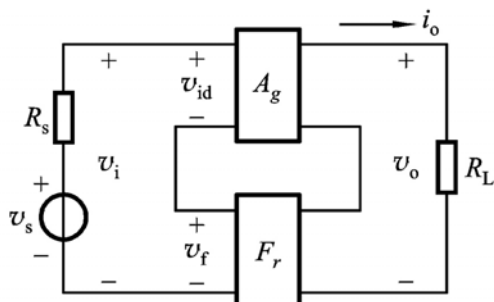
11



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

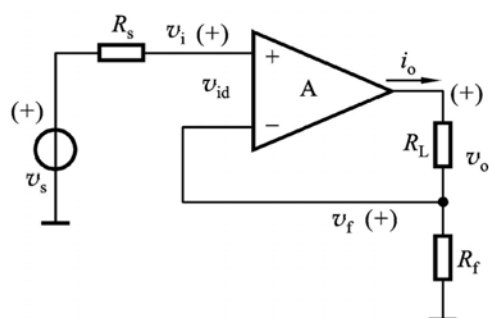
➤ 电流串联负反馈

判断：端点不同→串联，反馈信号为电压→输出短路，电压存在→电流反馈



特点

- 输入以电压形式求和 (KVL) : $v_{id} = v_i - v_f$
- 稳定输出电流
- 电压控制的电流源 (VCCS)，电压/电流转换



6.2 负反馈的四种基本组态

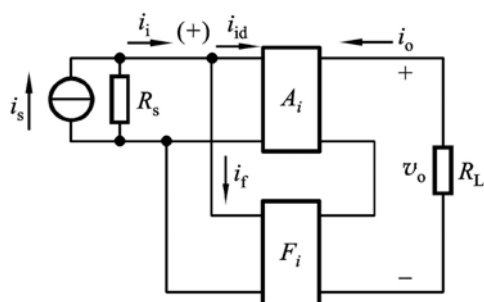
12



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

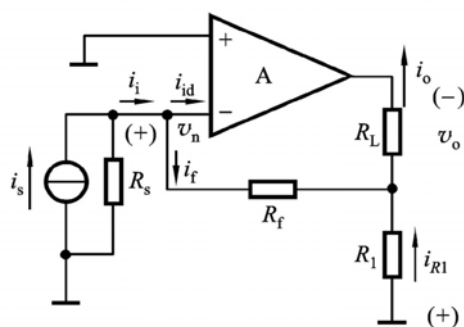
➤ 电流并联负反馈

判断：端点相同→并联，反馈信号为电流→输出短路，电流存在→电流反馈



特点：

- 输入以电流形式求和 (KCL) : $i_{id} = i_i - i_f$
- 稳定输出电流
- 电流控制的电流源 (CCCS)，电流/电流转换



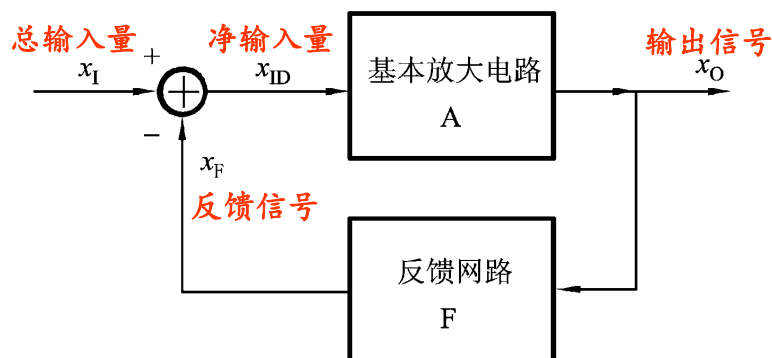
6.3 深度负反馈近似分析法

13



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

思考：如何分析负反馈放大电路？信号的方向？闭环增益怎么计算？



6.3 深度负反馈近似分析法

14

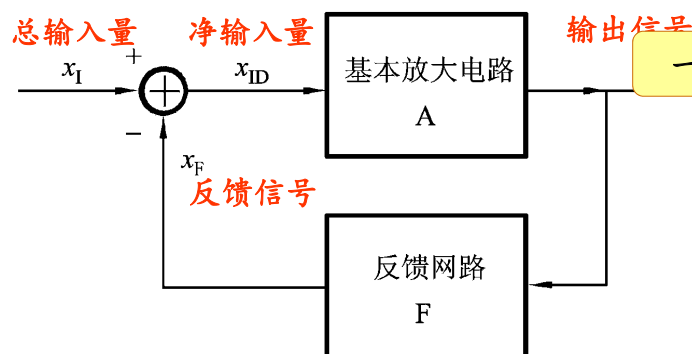


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 负反馈模型与单向化

基本放大器只具有正向传输特性而无反向传输特性；

反馈网络只具有反向传输特性而无正向传输特性。



一般表达式

$$\dot{A} = \frac{\dot{x}_o}{\dot{x}_{id}} \quad \text{开环增益}$$

$$\dot{B} = \dot{F} = \frac{\dot{x}_f}{\dot{x}_o} \quad \text{反馈系数}$$

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{x}_o}{\dot{x}_i} \quad \text{闭环增益}$$

$$= \frac{\dot{A}\dot{x}_{id}}{\dot{x}_{id} + \dot{A}\dot{F}\dot{x}_{id}} = \frac{\dot{A}\dot{x}_{id}}{\dot{x}_{id}(1 + \dot{A}\dot{F})}$$

$$= \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \quad \text{环路增益}$$

6.3 深度负反馈近似分析法

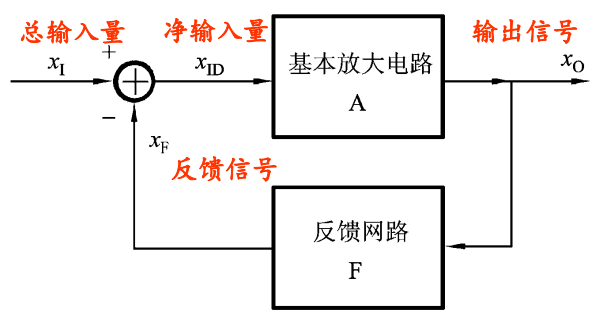
15



➤ 负反馈深度

闭环增益的一般表达式 $\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1+\dot{A}\dot{F}}$ ，其中 $1+\dot{A}\dot{F}$ 称为反馈深度。

- (1) $|1+\dot{A}\dot{F}| > 1$ 时， $|\dot{A}_f| < |\dot{A}|$ ，一般负反馈
- (2) $|1+\dot{A}\dot{F}| \gg 1$ 时，深度负反馈
- (3) $|1+\dot{A}\dot{F}| < 1$ 时， $|\dot{A}_f| > |\dot{A}|$ ，正反馈
- (4) $|1+\dot{A}\dot{F}| = 0$ 时， $|\dot{A}_f| \rightarrow \infty$ ，自激振荡



6.3 深度负反馈近似分析法

16



四种负反馈放大电路各参数的名称及定义

参数	组态	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
		(理想的电压放大器)	(理想的互阻放大器)	(理想的互导放大器)	(理想的电流放大器)
$\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i'}$	名称	开环电压增益	开环互阻增益	开环互导增益	开环电流增益
	定义	$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i'}$	$\dot{A}_r = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_i'} (\Omega)$	$\dot{A}_g = \frac{\dot{I}_o}{\dot{V}_i'} (s)$	$\dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i'}$
$\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$	名称	电压反馈系数	互导反馈系数	互阻反馈系数	电流反馈系数
	定义	$\dot{F}_v = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o}$	$\dot{F}_g = \frac{\dot{I}_f}{\dot{V}_o} (s)$	$\dot{F}_r = \frac{\dot{V}_f}{\dot{I}_o} (\Omega)$	$\dot{F}_i = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o}$
$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1+\dot{A}\dot{F}}$	名称	闭环电压增益	闭环互阻增益	闭环互导增益	闭环电流增益
	定义	$\dot{A}_{vf} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i'}$	$\dot{A}_{rf} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_i'} (\Omega)$	$\dot{A}_{gf} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{V}_i'} (s)$	$\dot{A}_{if} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i'}$

6.3 深度负反馈近似分析法

17



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 深度负反馈分析方法

由于 $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$ ，则 $\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \approx \frac{\dot{A}}{\dot{A}\dot{F}} = \frac{1}{\dot{F}}$ 即，闭环增益只与反馈网络有关

又因为 $\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$ $\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$ ，得 $\dot{X}_f \approx \dot{X}_i$ （也常写为 $x_f \approx x_i$ ）输入量近似等于反馈量

$\dot{X}_{id} = \dot{X}_i - \dot{X}_f \approx 0$ ($x_{id} \approx 0$) 净输入量近似等于零

由此可得深度负反馈条件下，基本放大电路“虚短、虚断”的概念

既然深度负反馈条件下，闭环增益只与反馈网络有关，那么是否意味着基本放大电路的增益A已经无关紧要了？

如何满足深度负反馈条件？

6.3 深度负反馈近似分析法

18



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 深度负反馈分析方法

深度负反馈条件下

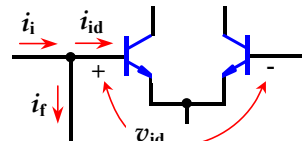
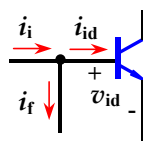
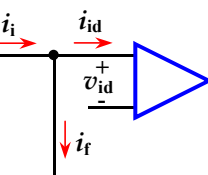
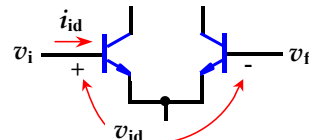
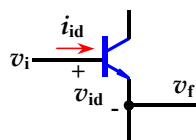
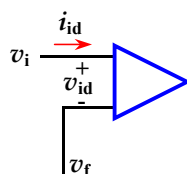
$$x_{id} = x_i - x_f \approx 0$$

串联负反馈，输入端电压求和

$$\begin{cases} v_{id} = v_i - v_f \approx 0 & \text{虚短} \\ i_{id} = \frac{v_{id}}{r_i} \approx 0 & \text{虚断} \end{cases}$$

并联负反馈，输入端电流求和

$$\begin{cases} i_{id} = i_i - i_f \approx 0 & \text{虚断} \\ v_{id} = i_{id} r_i \approx 0 & \text{虚短} \end{cases}$$



6.3 深度负反馈近似分析法

19



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 深度负反馈分析方法

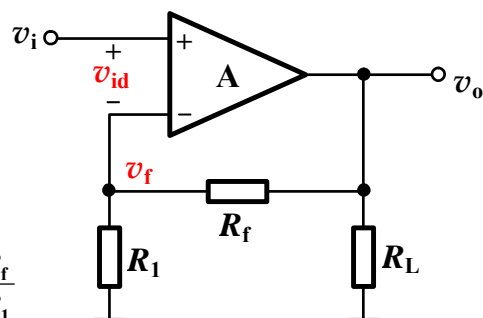
设电路满足深度负反馈条件，试写出该电路的闭环电压增益表达式。

解：电压串联负反馈

根据虚短、虚断

$$\text{反馈系数 } F_v = \frac{v_f}{v_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

$$\text{闭环增益 (就是闭环电压增益)} \quad A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} \approx \frac{1}{F_v} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$



6.3 深度负反馈近似分析法

20



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 深度负反馈分析方法

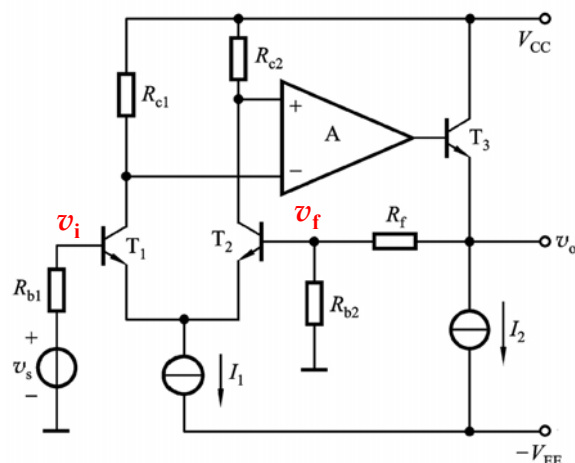
设电路满足深度负反馈条件，试写出该电路的闭环电压增益表达式。

解：电压串联负反馈

根据虚短、虚断

$$\text{反馈系数 } F_v = \frac{v_f}{v_o} = \frac{R_{b2}}{R_{b2} + R_f}$$

$$\text{闭环电压增益 } A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_f}{R_{b2}}$$



6.3 深度负反馈近似分析法

21



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 深度负反馈分析方法

设电路满足深度负反馈条件，试写出该电路的闭环增益和闭环电压增益表达式。

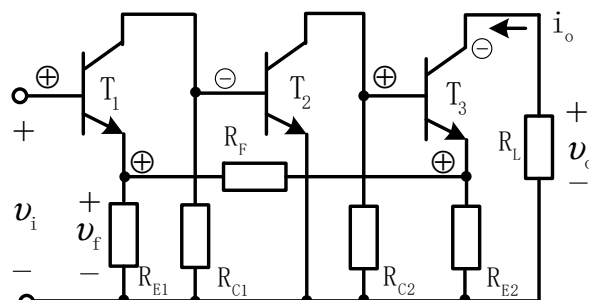
解：电流串联负反馈

闭环增益

$$A_{gf} = \frac{1}{F} = \frac{i_o}{v_f} = \frac{R_{E1} + R_{E2} + R_F}{R_{E1} R_{E2}}$$

根据虚短、虚断 $v_i = v_f$ $v_o = -i_o R_L$

$$\text{所以闭环电压增益 } A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-i_o R_L}{v_f} = -A_{gf} R_L = -\frac{R_{E1} + R_{E2} + R_F}{R_{E1} R_{E2}} R_L$$



6.3 深度负反馈近似分析法

22



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 深度负反馈分析方法

设电路满足深度负反馈条件，求大环反馈的闭环增益以及对信号源的闭环电压增益

解：电压并联负反馈

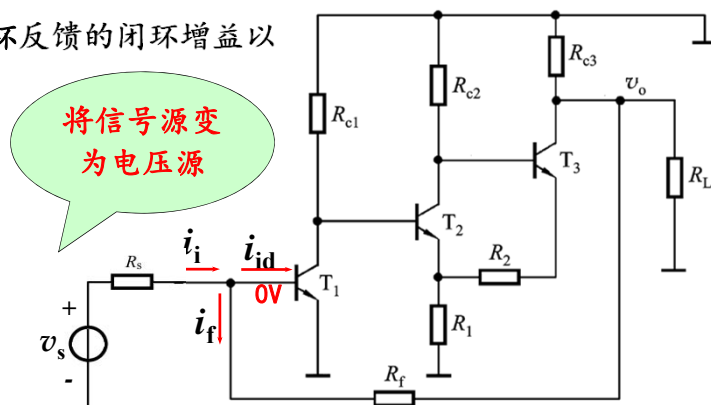
根据虚短、虚断

$$\begin{cases} i_f = i_i & v_e = v_b = 0 \\ v_o = -i_f R_f \end{cases}$$

$$\text{闭环增益 } A_{rf} = \frac{1}{F} = \frac{v_o}{i_f} = -R_f$$

$$v_s = i_i R_s$$

$$\text{所以闭环源电压增益 } A_{vsf} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{i_i R_s} = \frac{1}{R_s} A_{rf} = -\frac{R_f}{R_s}$$



6.3 深度负反馈近似分析法

23



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 深度负反馈分析方法

设电路满足深度负反馈条件，试写出该电路的闭环增益和闭环电压增益表达式。

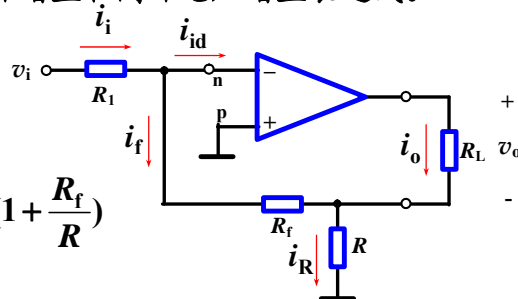
解：电流并联负反馈

根据虚短、虚断

$$\begin{cases} i_f = i_i & v_n = v_p = 0 \\ -i_f R_f = i_R R & \text{闭环增益} \\ i_R = i_f + i_o \end{cases} \quad A_{if} = \frac{i_o}{i_i} = -(1 + \frac{R_f}{R})$$

又因为 $v_i = i_i R_1$ $v_o = i_o R_L$

所以闭环电压增益 $A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o R_L}{i_i R_1} = -(1 + \frac{R_f}{R}) \frac{R_L}{R_1}$



6.3 深度负反馈近似分析法

24



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 深度负反馈分析方法总结

步骤：

- (1) 找出信号放大通路和反馈通路
- (2) 用瞬时极性法判断正、负反馈
- (3) 判断交、直流反馈
- (4) 判断反馈阻态
- (5) 标出输入量、输出量及反馈量
- (6) 估算深度负反馈条件下电路的 \dot{F} 、 \dot{A}_f

注意：根据反馈组态确定 \dot{F} 、 \dot{A}_f 的量纲，再转化为闭环电压增益等指标。