



模拟电路基础（下）

负反馈放大器

6.4 负反馈对放大器性能的改善

2



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

思考：负反馈减小了放大电路的增益为什么还要使用负反馈技术？

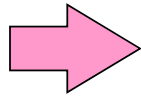
- 提高增益的稳定性
- 减小非线性失真
- 扩展频带
- 改变输入输出电阻



6.4 负反馈对放大器性能的改善

➤ 提高增益的稳定性

闭环时 $\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}F}$ 只考虑幅值有 $A_f = \frac{A}{1 + AF}$

对 A 求导得 $\frac{dA_f}{dA} = \frac{1}{(1 + AF)^2}$  $\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + AF} \cdot \frac{dA}{A}$

闭环增益相对变化量
比开环减小了 $1 + AF$

另一方面，在深度负反馈条件下 $\dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$

即闭环增益只取决于反馈网络。

当反馈网络由稳定的线性元件组成时，闭环增益将有很高的稳定性。

注意：负反馈的组态不同，稳定的增益不同 (A_{vf} 、 A_{rf} 、 A_{gf} 、 A_{if})

6.4 负反馈对放大器性能的改善

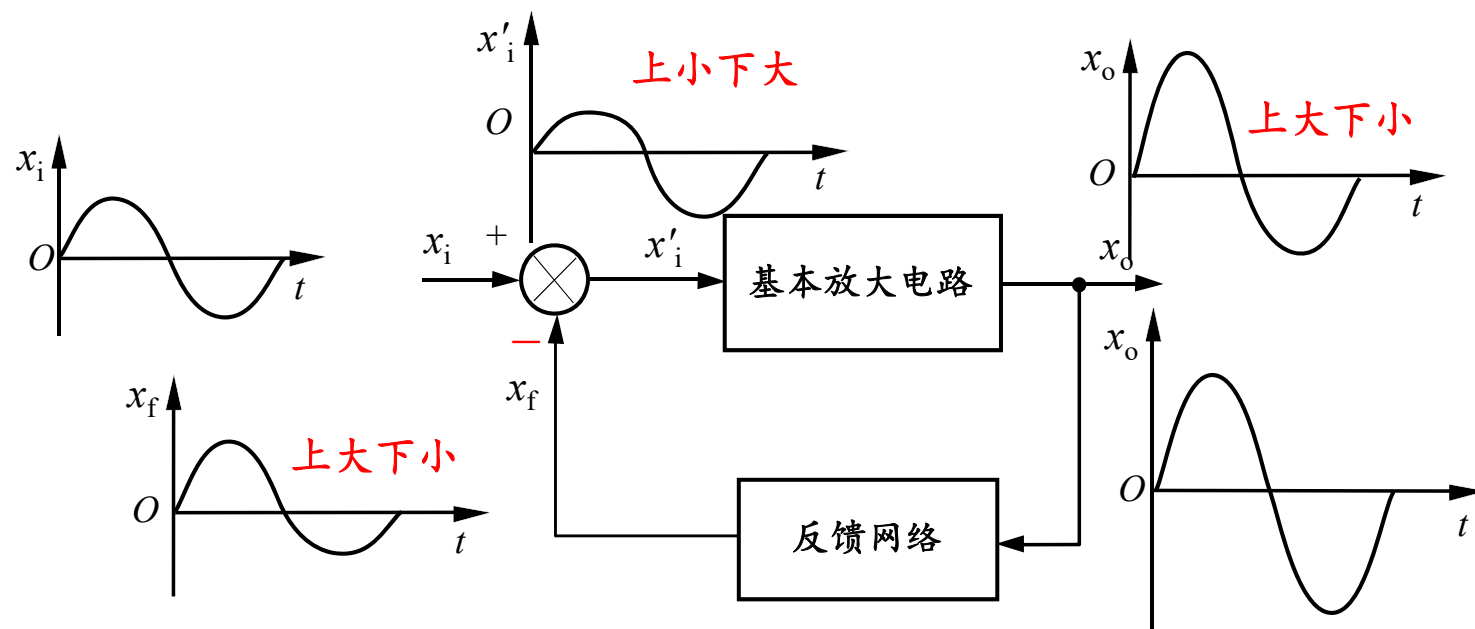
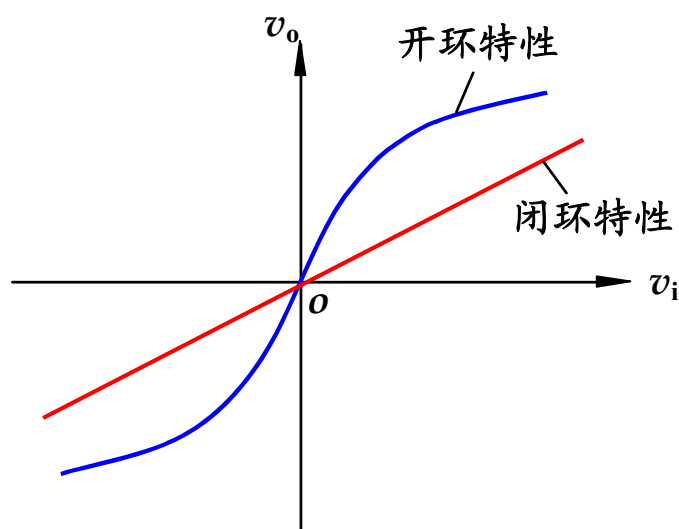
4



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 减小非线性失真

负反馈可减小反馈环内的非线性失真，对输入信号本身的失真无改善作用。



6.4 负反馈对放大器性能的改善

5



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 扩展频带

基本放大电路的高频响应 $\dot{A}_H = \frac{\dot{A}_M}{1 + j \frac{f}{f_H}}$ \dot{A}_M 为基本放大电路通带增益

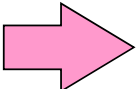
根据闭环增益表达式有 (设反馈网络为纯阻网络) $\dot{A}_{Hf} = \frac{\dot{A}_H}{1 + \dot{A}_H F} = \frac{\dot{A}_{Mf}}{1 + j \frac{f}{f_{Hf}}}$

其中 \dot{A}_{Mf} —— 闭环通带增益

$f_{Hf} = (1 + \dot{A}_M F) f_H$ —— 闭环上限频率 比开环时增加了

同理可得

$f_{Lf} = \frac{f_L}{1 + \dot{A}_M F}$ —— 闭环下限频率 比开环时减小了

$BW_f = f_{Hf} - f_{Lf} \approx f_{Hf}$  $BW_f = (1 + \dot{A}_M F) BW$

6.4 负反馈对放大器性能的改善

6



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

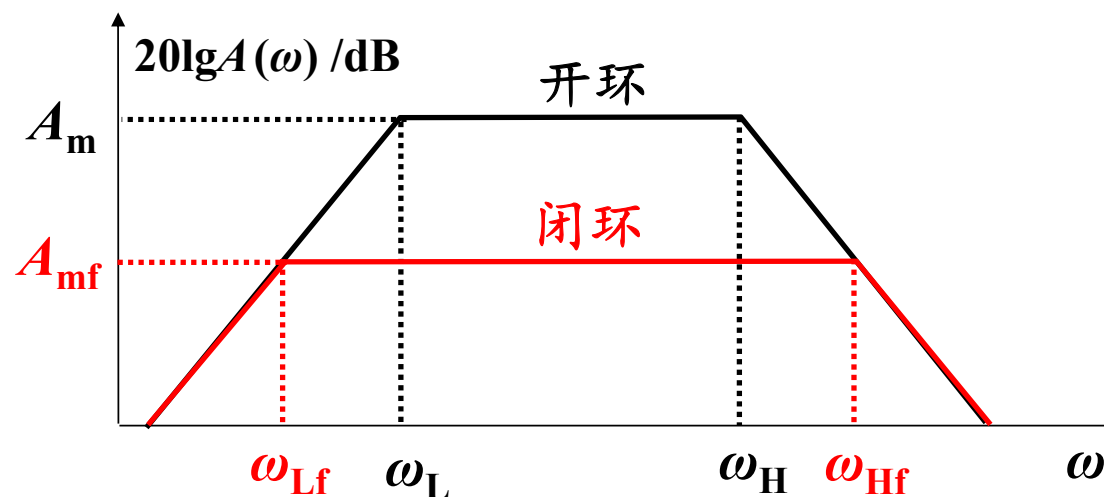
► 扩展频带

放大电路的增益-带宽积为常数

$$A_f f_{Hf} = \frac{A}{1 + AF} \times [(1 + AF) f_H] = Af_H$$

开环增益-带宽积

闭环增益-带宽积



负反馈展宽频带

6.4 负反馈对放大器性能的改善

7



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 对输入电阻的影响

串联负反馈

开环输入电阻 $R_i = v_{id}/i_i$

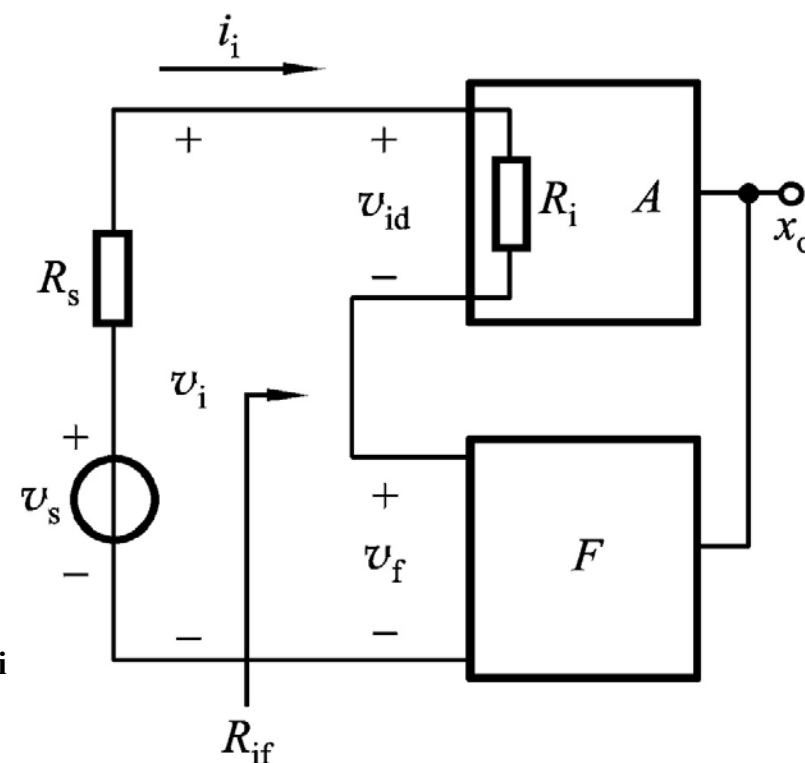
闭环输入电阻 $R_{if} = v_i/i_i$

因为 $v_f = F \cdot x_o$ $x_o = A \cdot v_{id}$

所以 $v_i = v_{id} + v_f = (1 + AF) v_{id}$

闭环输入电阻 $R_{if} = v_i/i_i = (1 + AF) \frac{v_{id}}{i_i} = (1 + AF) R_i$

引入串联负反馈后，输入电阻增加了。



6.4 负反馈对放大器性能的改善

8



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 对输入电阻的影响

并联负反馈

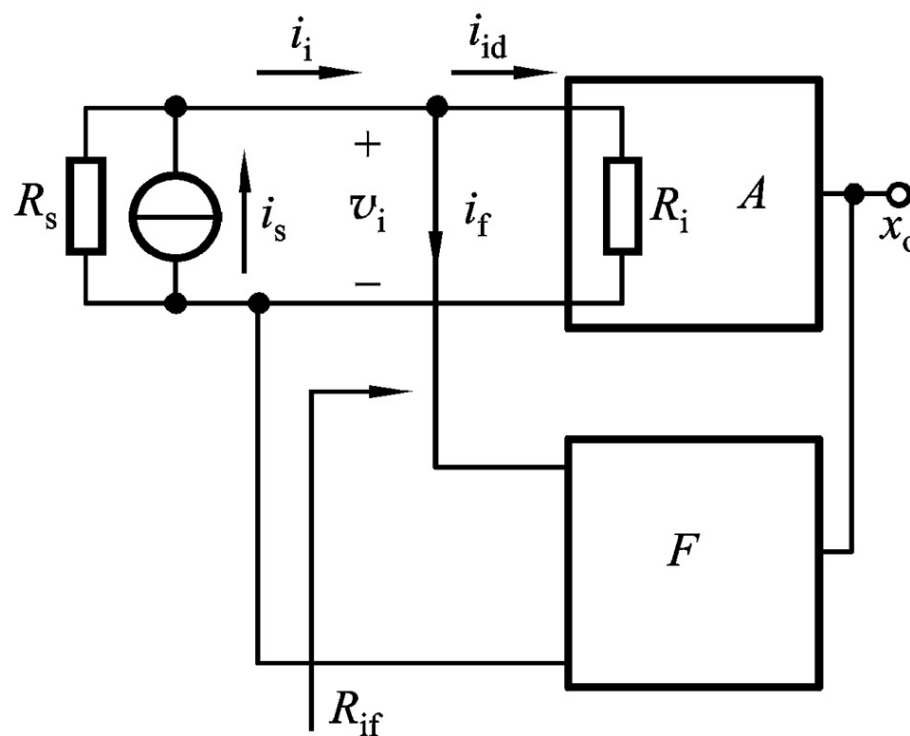
闭环输入电阻

$$R_{if} = \frac{v_i}{i_i} = \frac{v_i}{i_{id} + i_f} = \frac{i_{id} R_i}{i_{id} + i_{id} A F} = \frac{R_i}{1 + A F}$$

引入并联负反馈后，输入电阻减小了。

注意：反馈对输入电阻的影响仅限于环内，对环外不产生影响。

输入电阻的变化情况只取决于输入端的反馈方式



6.4 负反馈对放大器性能的改善

9



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

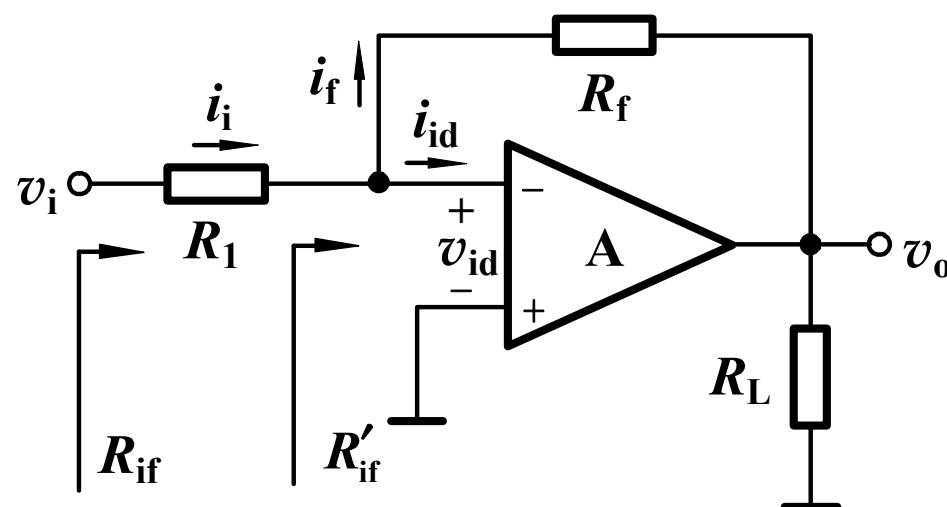
➤ 对输入电阻的影响

图中 R_1 不在环内

$$R'_{if} = \frac{R_i}{1 + AF}$$

但是 $R_{if} = R_1 + R'_{if}$

当 $R_1 \gg R'_{if}$ 时，反馈对 R_{if} 几乎没有影响。



并联负反馈电路



6.4 负反馈对放大器性能的改善

➤ 对输出电阻的影响

电压负反馈

闭环输出电阻 $R_{of} = \frac{v_t}{i_t}$

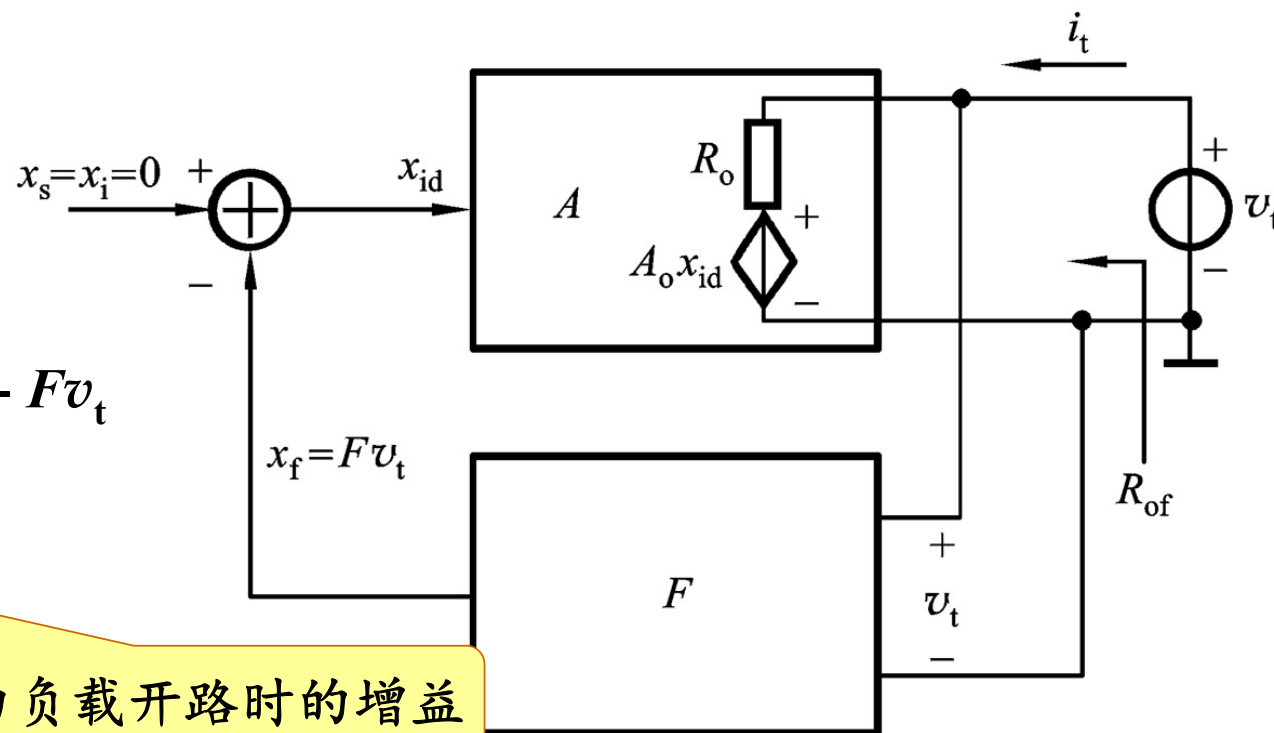
忽略反馈网络对 i_t 的分流

$$v_t = i_t R_o + A_o x_{id} \quad \text{而} \quad x_{id} = -x_f = -F v_t$$

所以 $v_t = i_t R_o - A_o F v_t$

➡ $R_{of} = \frac{v_t}{i_t} = \frac{R_o}{1 + A_o F}$

A_o 为负载开路时的增益



引入电压负反馈后，输出电阻减小了。

6.4 负反馈对放大器性能的改善

11



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 对输出电阻的影响

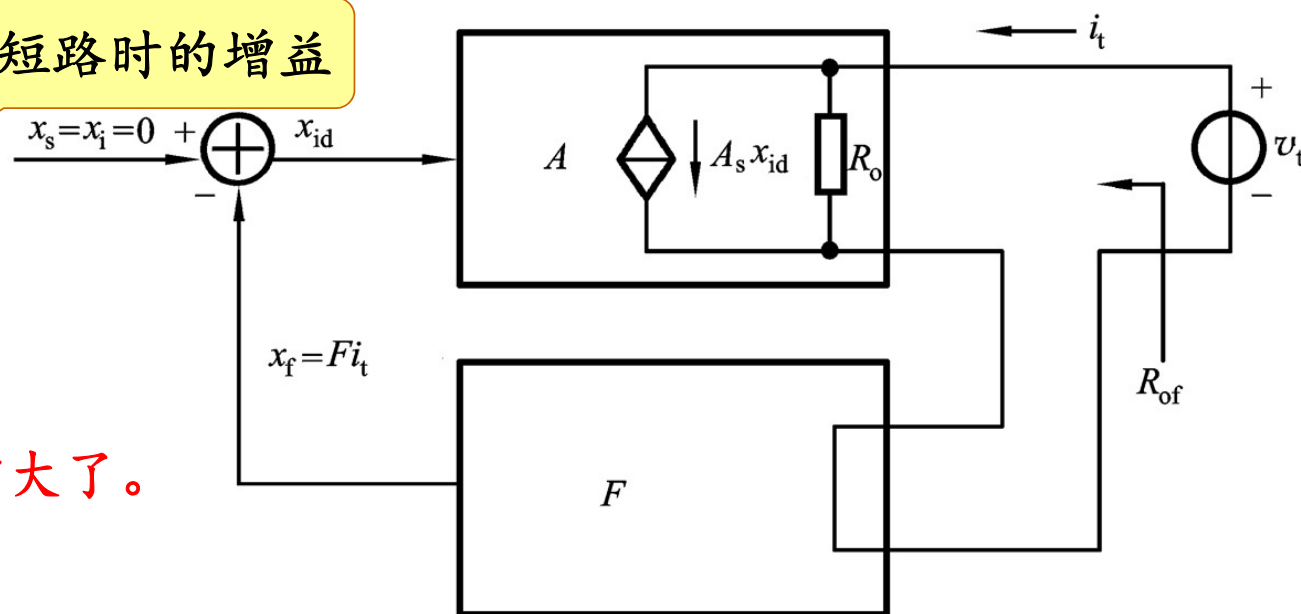
电流负反馈

闭环输出电阻

$$R_{of} = \frac{v_t}{i_t} = (1 + A_s F) R_o$$

引入电流负反馈后，输出电阻增大了。

A_s 为负载短路时的增益



注意：反馈对输出电阻的影响仅限于环内，对环外不产生影响。(例如Rc)

负反馈对输出电阻的影响取决于反馈放大电路在输出端的取样方式。

6.4 负反馈对放大器性能的改善

12



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 总结

- 提高增益的稳定性 $A_f = \frac{A}{1 + AF}$ $\dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$
- 减小非线性失真
- 扩展频带 $f_{Hf} = (1 + \dot{A}_M F) f_H$ $f_{Lf} = \frac{f_L}{1 + \dot{A}_M F}$ $BW_f = (1 + \dot{A}_M F) BW$
- 改变输入输出电阻
 - 串联负反馈 $R_{if} = (1 + AF) R_i$ 电压负反馈 $R_{of} = \frac{R_o}{1 + A_o F}$
 - 并联负反馈 $R_{if} = \frac{R_i}{1 + AF}$ 电流负反馈 $R_{of} = (1 + A_s F) R_o$



6.4 负反馈对放大器性能的改善

➤ 负反馈设计原则

- (1) 为了稳定静态工作点, 引入直流负反馈; 为了改善动态性能, 应引入交流反馈。
- (2) 为了稳定输出电压(即减小输出电阻, 增强带负载能力), 应引入电压负反馈。
- (3) 为了稳定输出电流(即增大输出电阻), 应引入电流负反馈。
- (4) 为了提高输入电阻(即减小放大电路从信号源索取的电流), 应引入串联负反馈。
- (5) 为了减小输入电阻, 应引入并联负反馈。

说明: 引入负反馈虽然可以改善电路的性能, 是以牺牲增益为代价的, 且仅对环内的性能产生影响。同时, 若处理不当, 则电路将产生自激振荡。



6.4 负反馈对放大器性能的改善

➤ 负反馈设计步骤

- 选定需要的反馈类型

信号源性质 对输出信号的要求

对输入、输出电阻的要求

对信号变换的要求 ($V-V$ 、 $V-I$ 、 $I-V$ 、 $I-I$)

- 确定反馈系数的大小

$$\text{深度负反馈时 } A_f \approx \frac{1}{F}$$

- 适当选择反馈网络中的电阻阻值

尽量减小反馈网络对基本放大电路的负载效应

6.4 负反馈对放大器性能的改善

15



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 负反馈设计步骤

设计一个带负反馈的光电隔离器的驱动电路。设 v_s 的变化范围为 $0\sim 5V$ ，内阻 $R_s=500\Omega$ 。要求LED的 $i_{o1}=10^{-3}v_s(A)$ 。已知运放的 $A_{v0}=10^4$ ， $R_i=5k\Omega$ ， $R_o=100\Omega$ 。

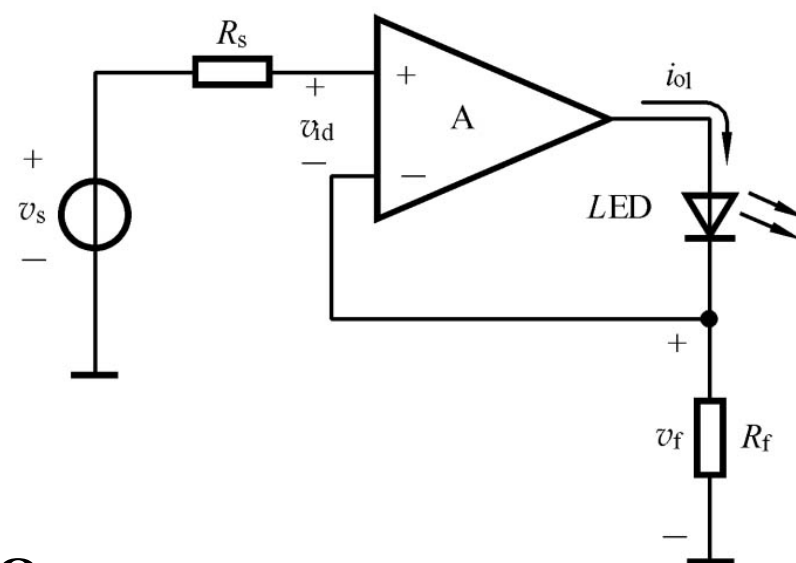
解：驱动电路需要将电压 v_s 转换为电流 i_{o1}

选用电流串联负反馈电路

$$\text{闭环增益 (导纳)} \quad A_{\text{gfs}} = \frac{i_{o1}}{v_s} = 10^{-3} \text{ A/V}$$

$$\text{深度负反馈时} \quad A_f \approx \frac{1}{F} \quad F_r = \frac{1}{A_{\text{gfs}}} = 1000\Omega = 1k\Omega$$

$$\text{又因为根据虚断有} \quad F_r = \frac{v_f}{i_{o1}} = R_f \quad \text{所以} \quad R_f = 1k\Omega$$



6.4 负反馈对放大器性能的改善

16



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 负反馈设计步骤

例：用集成运放设计一个负反馈放大器，输入信号为内阻 $R_s=2\text{k}\Omega$ 的电压源 v_s ，要求电路向 $50\ \Omega$ 的负载提供稳定的输出电压 $10v_s$ 。运放参数为 $A_{v0}=10^4$ ， $R_i=5\text{k}\Omega$ ， $R_o=100\ \Omega$ 。设计合适的反馈网络。

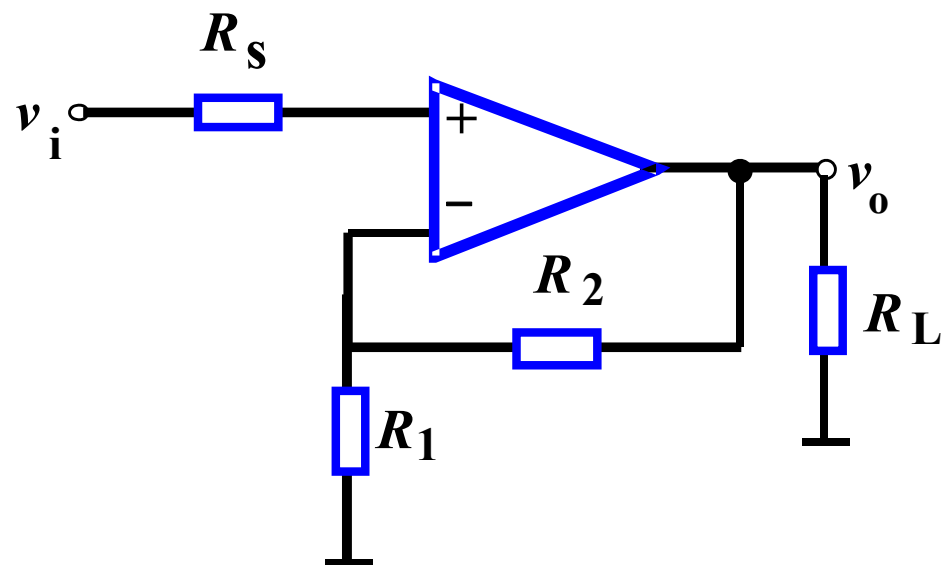
解：

选择反馈类型

电压源 \Rightarrow 引入串联负反馈

稳定电压 \Rightarrow 引入电压负反馈

计算反馈系数 $A_{vfs} \approx \frac{1}{F_v}$ $A_{vfs} = 10$ $\therefore F_v = 0.1$





6.4 负反馈对放大器性能的改善

► 负反馈设计步骤

例：用集成运放设计一个负反馈放大器，输入信号为内阻 $R_s=2k\Omega$ 的电压源 v_s ，要求电路向 50Ω 的负载提供稳定的输出电压 $10v_s$ 。运放参数为 $A_{v0}=10^4$ ， $R_i=5k\Omega$ ， $R_o=100\Omega$ 。设计合适的反馈网络。

解：

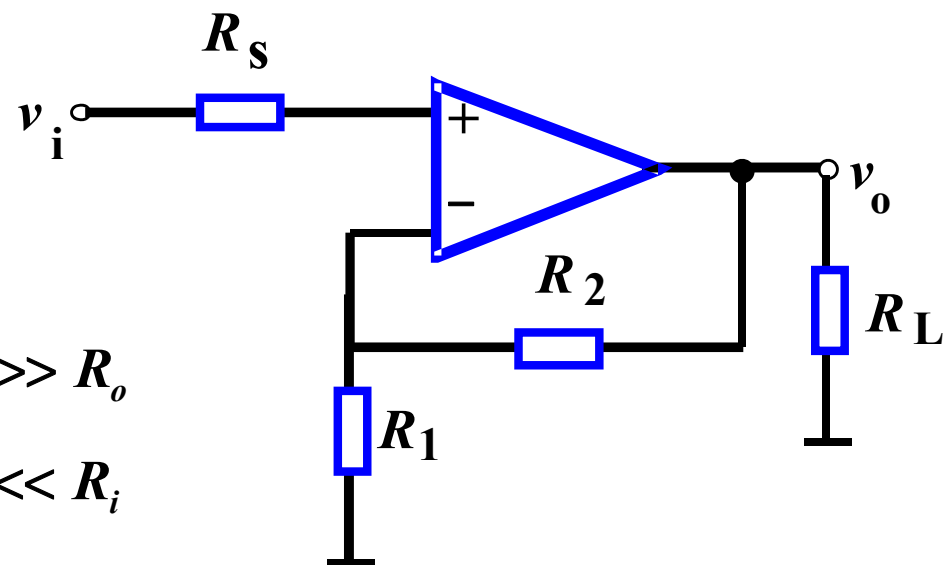
确定反馈网络阻值

$$F_v = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0.1 \quad \therefore R_2 / R_1 = 9$$

为减小反馈网络对输出电压的影响，要求 $R_1 + R_2 \gg R_o$

为减小反馈网络对输入电压的影响，要求 $R_1 // R_2 \ll R_i$

综合考虑，可取 $R_1 = 500\Omega$, $R_2 = 9R_1 = 4.5k\Omega$





6.5 方框图拆环分析方法

► 拆环分析方法步骤

基本思路：将闭环拆分为互不影响的（**无反馈作用**）基本放大器和反馈网络，分别求出基本放大器的性能和反馈网路的传输系数，然后根据反馈方程式分析电路性能。

拆环的具体方法：

(1) 求输入回路：

若为电压反馈：则令 $v_o=0$ ，即将输出端交流短路。

若为电流反馈：则令 $i_o=0$ ，即将输出端交流开路。

(2) 求输出回路：

若为并联反馈：则令 $v_i=0$ ，即将输入端交流短路。

若为串联反馈：则令 $i_i=0$ ，即将输入端交流开路。



6.5 方框图拆环分析方法

► 拆环分析方法步骤

口诀心法：

串并决定输出端；

串联要断开；

并联要到地；

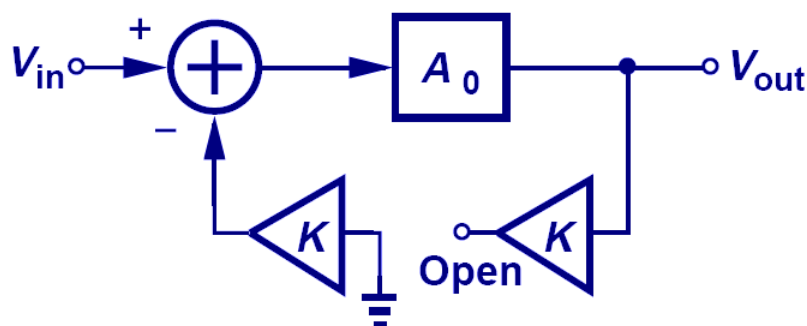
求反馈系数！

取样决定输入端；

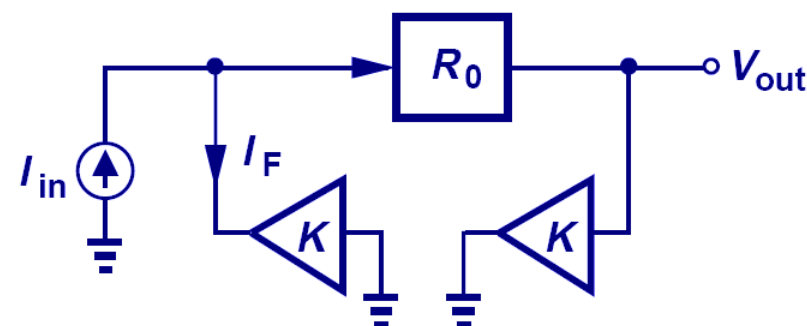
电压取样要到地；

电流取样要断开；

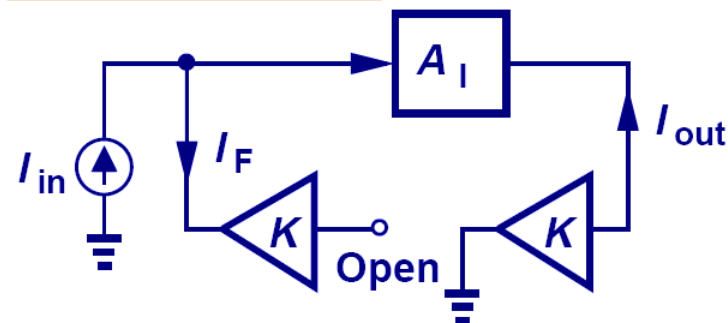
消除输出的影响



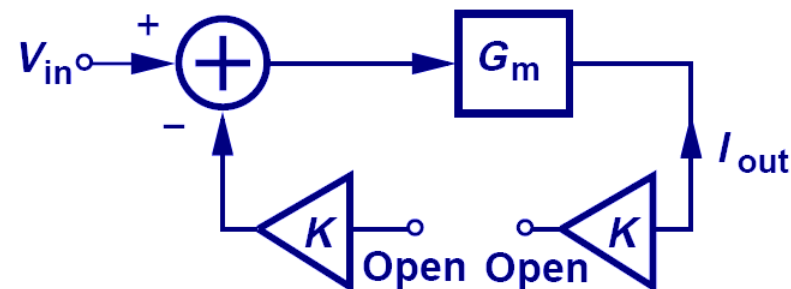
(a)



(b)



(c)



(d)

6.5 方框图拆环分析方法

20



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 拆环分析方法实例

口诀心法：

串并决定输出端；

串联要断开； ➡ 断开后为 R_F 与 R_{E1} 到地

并联要到地；

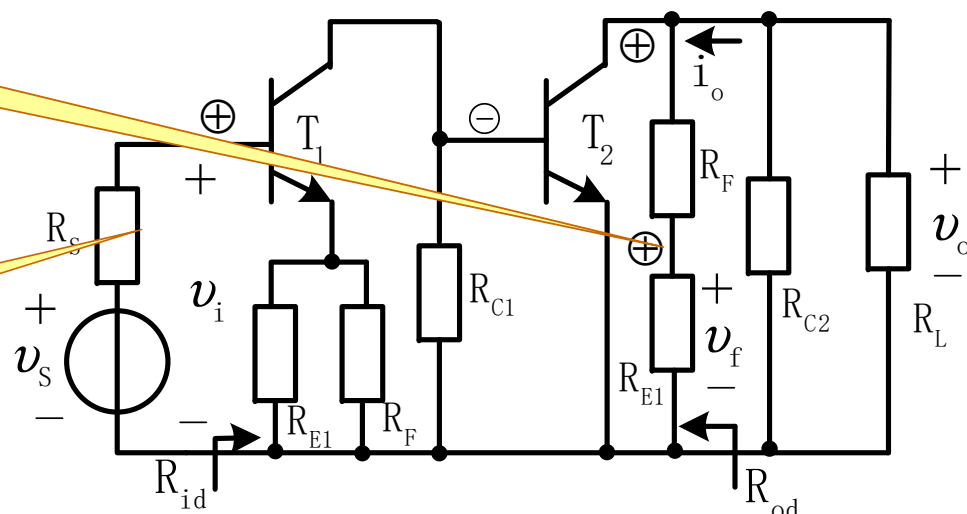
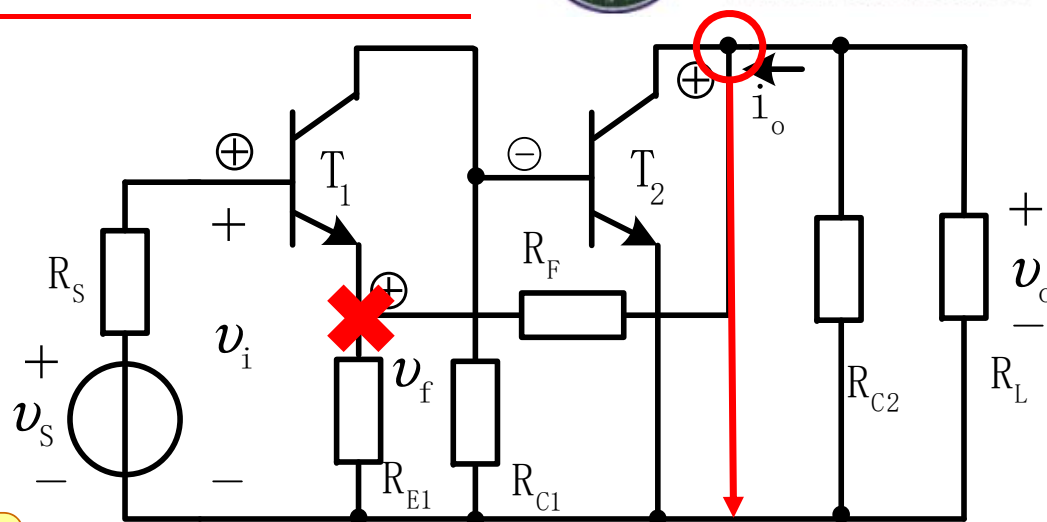
反馈系数一目了然

取样决定输入端；

电压取样要到地； ➡ R_F 另一端到地

电流取样要断开；

等效的基本放大器



6.5 方框图拆环分析方法

21



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 拆环分析方法实例

口诀心法：

串并决定输出端；

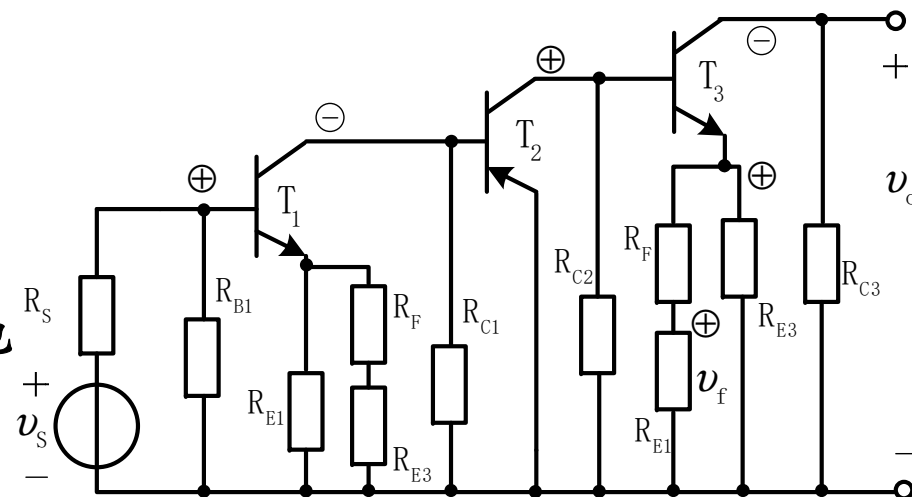
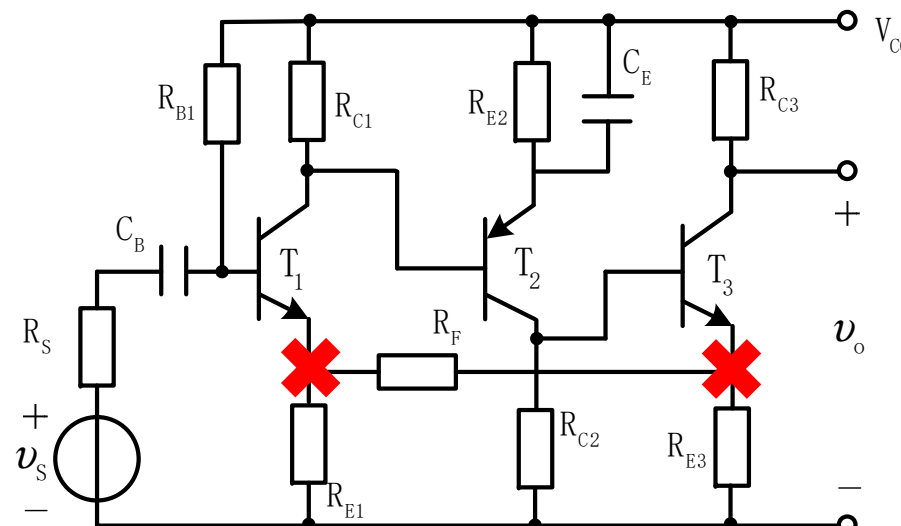
串联要断开； ➡ 断开后为 R_F 与 R_{E3} 到地

并联要到地；

取样决定输入端；

电压取样要到地；

电流取样要断开； ➡ 断开后为 R_F 与 R_{E3} 到地



6.5 方框图拆环分析方法

22



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 拆环分析方法实例

口诀心法：

串并出；

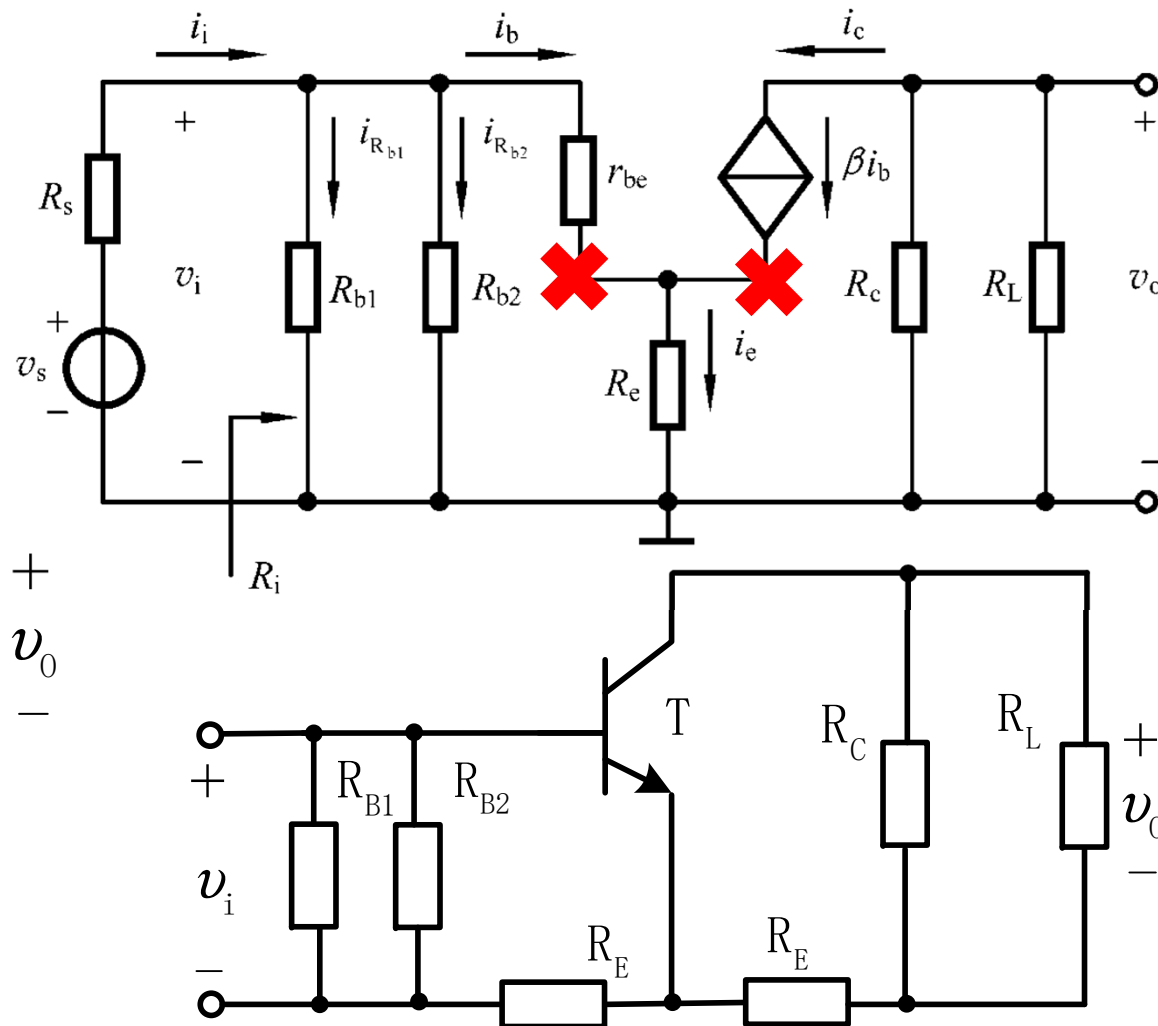
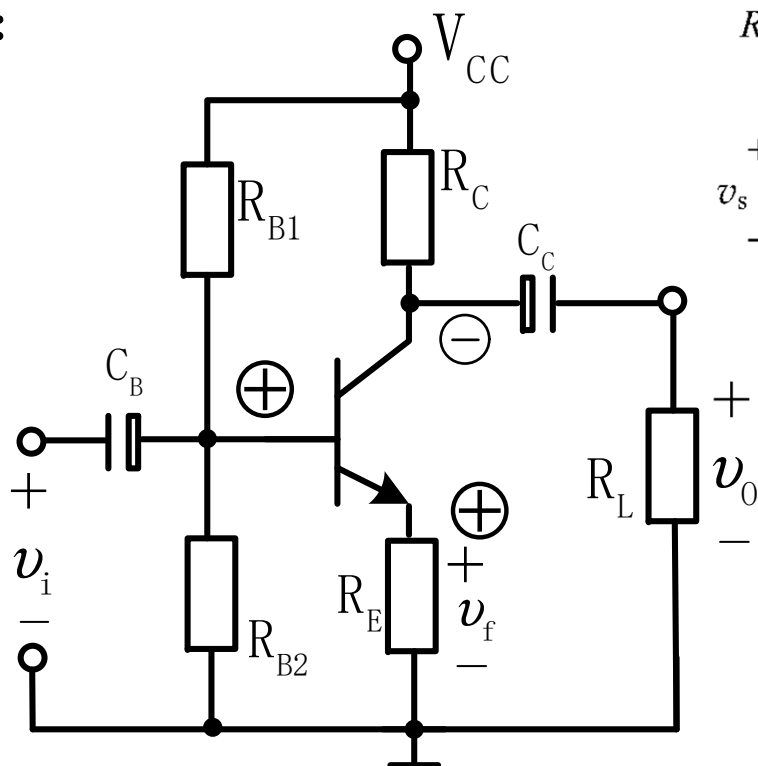
串断；

并地；

取样入；

压地；

流断；



6.5 方框图拆环分析方法

23



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 拆环分析方法实例

基础放大器增益 (电压串联 V/V)

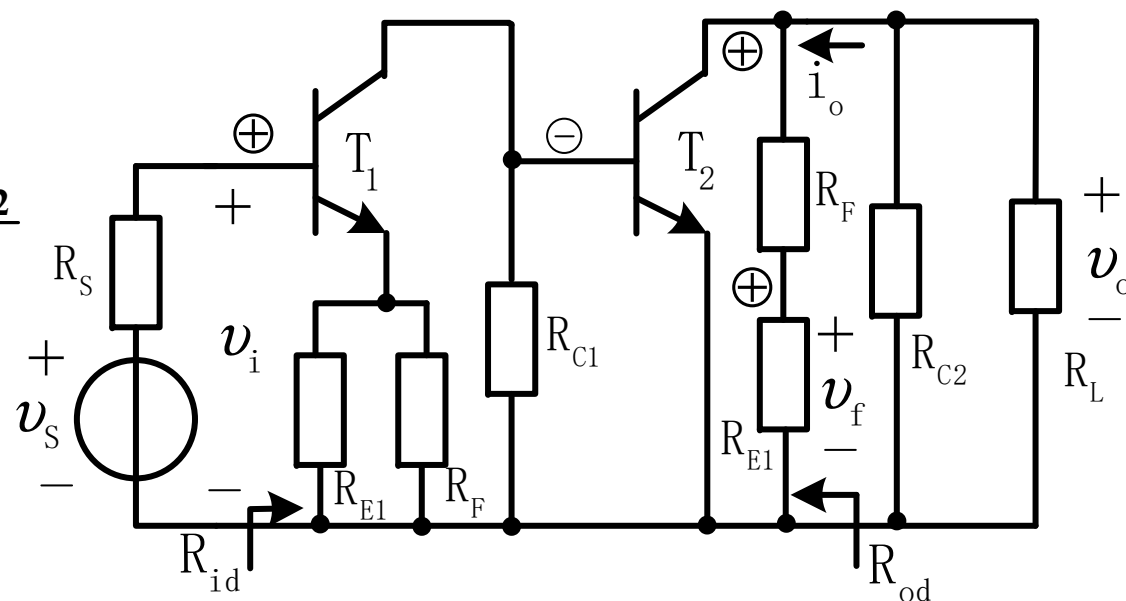
$$A_v = A_{v1} A_{v2} = \frac{-\beta_1 R'_{L1}}{r_{be1} + (1 + \beta_1) R'_{E1}} \times \frac{-\beta_2 R'_{L2}}{r_{be2}}$$

其中, $R'_{L1} = R_{c1} // r_{be2}$

基础放大器输入输出电阻

$$R_{id} = r_{be1} + (1 + \beta_1) R'_{E1} \quad R_{od} = (R_F + R_{E1}) // r_{ce2}$$

反馈系数 (V/V) $F_v = \frac{v_f}{v_o} = \frac{R_{E1}}{R_{E1} + R_F}$



是不是少了什么?



6.5 方框图拆环分析方法

► 拆环分析方法实例

负反馈电路性能指标

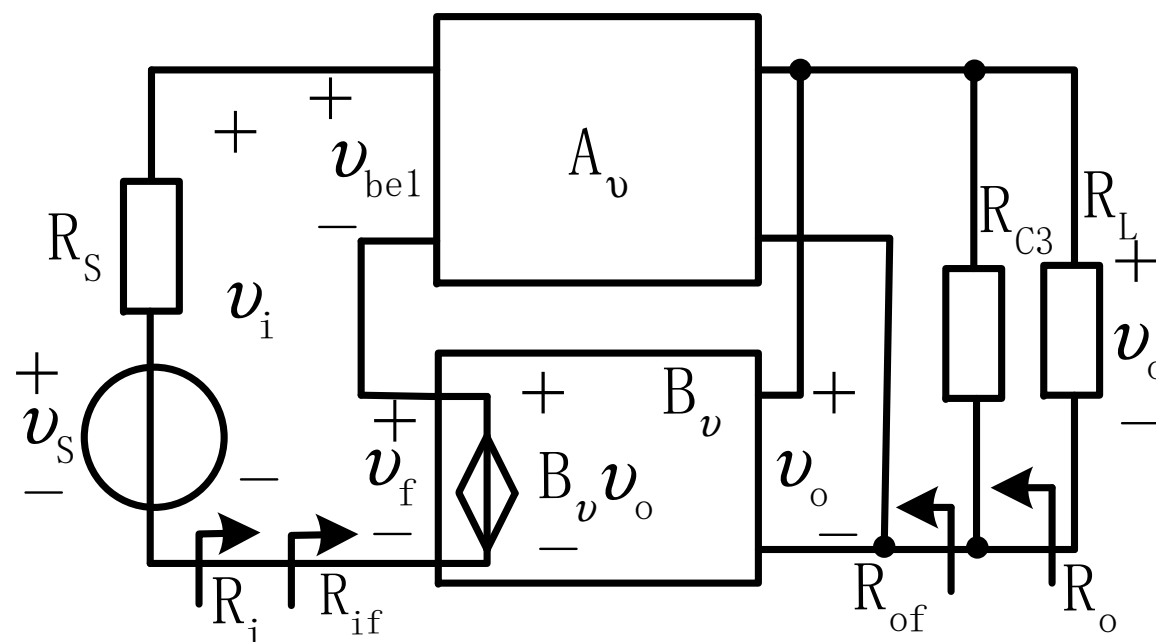
$$\text{电压增益 } A_{vf} = \frac{A_v}{1 + A_v F_v}$$

环内输入输出电阻

$$R_{if} = R_{id} (1 + A_v F_v) \quad R_{of} = \frac{R_{od}}{1 + A_{vso} F_v}$$

考虑环外的电阻，输入端无 R_B ，输出端有 R_{C3}

$$R_i = R_{if} \quad R_o = R_{of} // R_{c3}$$



注意：反馈类型（电压电流、串联并联）决定了基本放大器增益、反馈系数的量纲，不总是V-V。输入输出电阻的公式也不同。

6.5 方框图拆环分析方法

25



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 拆环分析方法实例

电流串联反馈

基础放大器互导增益 (I/V)

基础放大器输入输出电阻 (不加偏置)

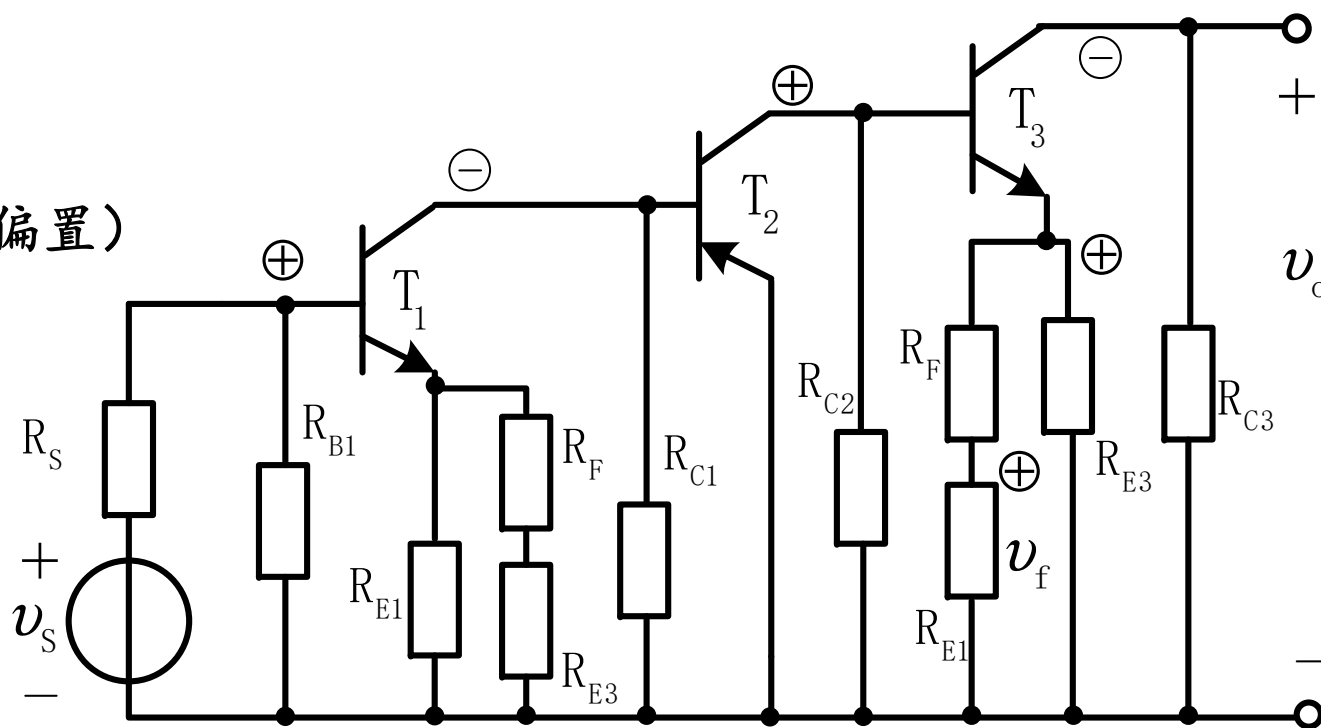
反馈系数 (V/I)

负反馈电路性能指标

互导增益 (I/V)

环内输入输出电阻 (输出增大)

考虑环外的电阻, 输入端 R_{B1} , 输出端 R_{C3}





6.5 方框图拆环分析方法

➤ 负反馈电路分析方法总结

- 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} 、 \dot{A}_f

- 方法：**
- (1) 小信号等效电路分析法
 - (2) 拆环分析法
 - (3) 若为深度负反馈，则计算更简单