

第5章 负反馈放大电路

东北大学 机械电子工程研究所
赵海滨

2025/3/26

东北大学 机械工程与自动化学院

1



- 基本概念
- 正反馈和负反馈
- 电压反馈和电流反馈
- 串联反馈和并联反馈
- 负反馈放大电路的四种组态
 - 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
- 负反馈对放大电路的影响
- 深度负反馈放大电路的分析

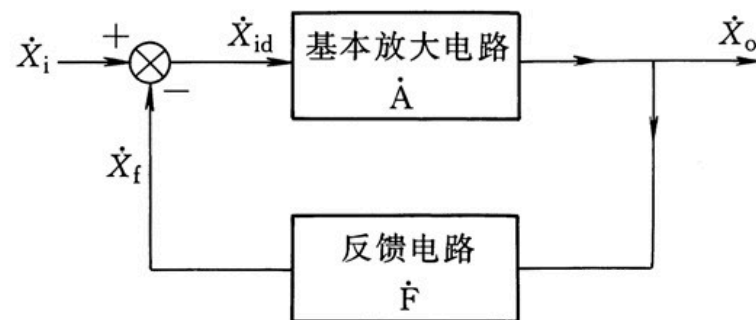


➤基本概念

- 反馈**：把输出信号的一部分或全部引回到输入回路，与输入信号作比较（相加或相减），然后用比较所得的偏差信号去控制输出信号。
- 不同类型的反馈具有不同的特点和规律，对放大器性能指标有不同的影响。
- 按反馈的极性分类
 - 正反馈：反馈信号增强输入信号（相加）。
 - 负反馈：反馈信号削弱输入信号（相减）。
- 按反馈信号交直流成份分类
 - 交流反馈：反馈回来的信号是交流量。影响电路的交流性能，交流负反馈的目的是为了改善放大器的性能指标。
 - 直流反馈：反馈信号是直流量。影响电路的直流性能，直流负反馈的目的是稳定静态工作点。



➤ 反馈放大电路的基本组成



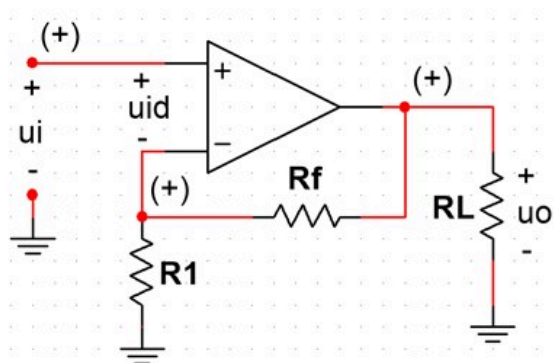
$$\dot{X}_{id} = \dot{X}_i - \dot{X}_f$$

输入信号 X_i ，比较环节，反馈信号 X_f ，输出信号 X_o

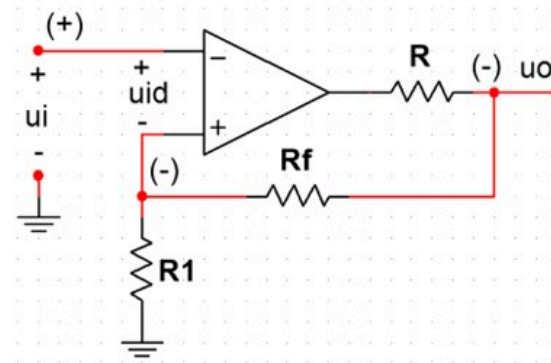


➤判断是正反馈还是负反馈，采用**瞬时极性法**

- 假设输入量的瞬时极性
- 根据电路输出量与输入量的相位关系，决定输出量和反馈量的瞬时极性。
- 根据反馈量与输入量的关系，判断是正反馈还是负反馈。
- 如果比较后，加强了输入信号则是正反馈；如果比较后，削弱了输入信号则是负反馈。



负反馈放大电路（电压串联负反馈）



正反馈放大电路

对于单个集成运放，反馈信号引到同相输入端，则为正反馈。

反馈信号引到反相输入端，则为负反馈。



➤按反馈信号与输出信号的关系分类

- 电压反馈：反馈信号取自输出电压并与之成正比，稳定输出电压。
- 电流反馈：反馈信号取自输出电流并与之成正比，稳定输出电流。
- 判定方法：输出端短接法。

➤按反馈信号与输入信号的关系分类

- 串联反馈：在输入回路中，输入信号、反馈信号和偏差信号串联连接，以电压形式相减。

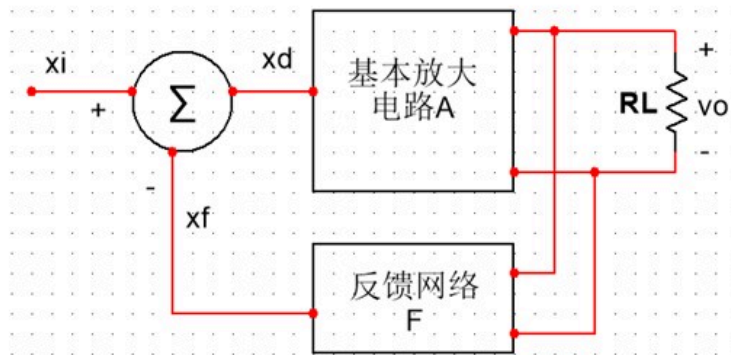
$$\dot{U}_i - \dot{U}_f = \dot{U}_{id}$$

- 并联反馈：在输入回路中，输入信号、反馈信号和偏差信号并联连接，以电流形式相减。

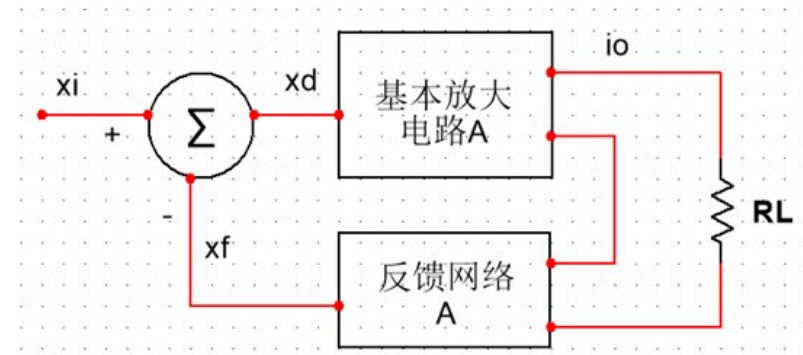
$$\dot{I}_i - \dot{I}_f = \dot{I}_{id}$$



➤电压反馈和电流反馈



电压反馈的原理图

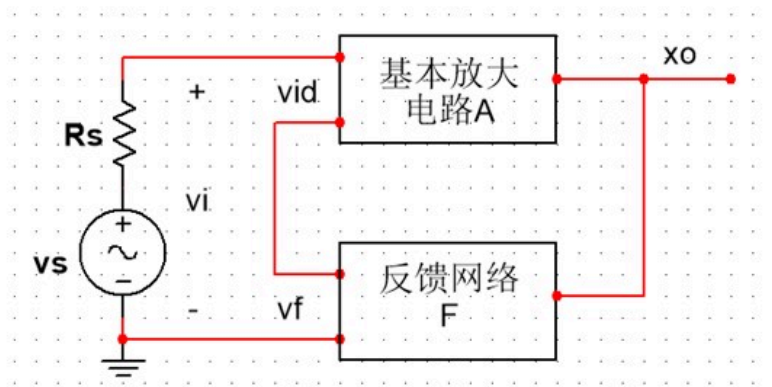


电流反馈的原理图

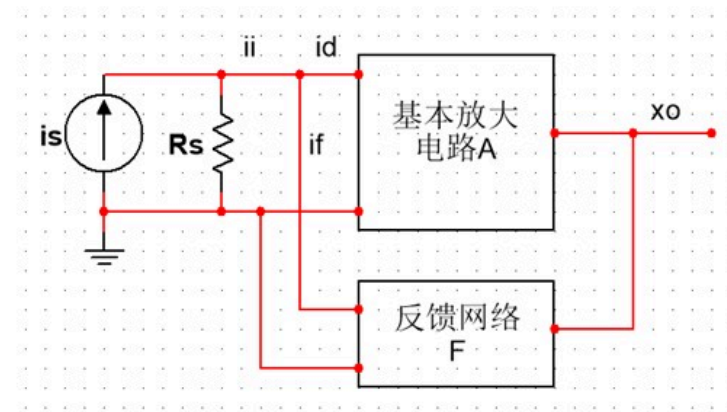
电压反馈和电流反馈的判断方法是“**输出端短接法**”，假设负载电阻短路，此时输出电压为零，然后看反馈信号是否存在。如果反馈信号不存在，反馈信号与输出电压成比例，是电压反馈；如果反馈信号存在，反馈信号与输出电流成比例，是电流反馈。



➤ 串联反馈和并联反馈



串联反馈的原理图



并联反馈的原理图

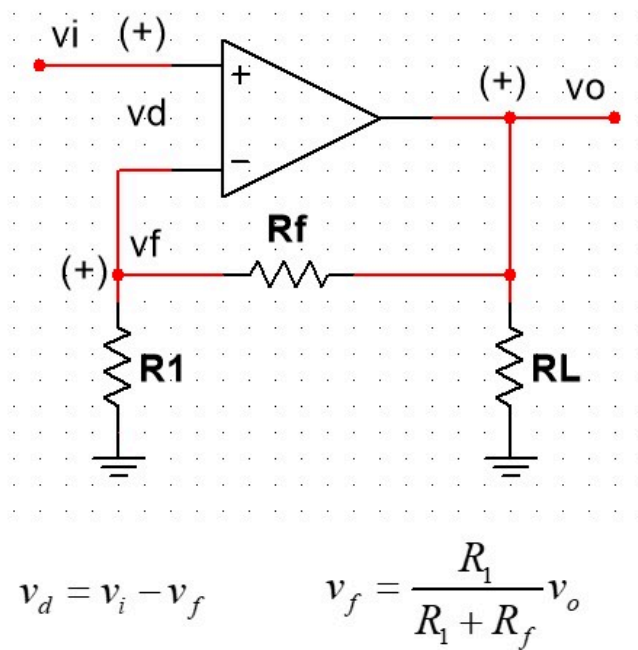
当反馈信号与输入信号分别接到基本放大电路的不同输入端时，采用的是串联反馈；

当反馈信号与输入信号接到基本放大电路的同一个输入端时，采用的是并联反馈。

串联负反馈的净输入量是电压，并联负反馈的净输入量是电流。



➤电压串联负反馈放大电路



通过瞬时极性法，判断是负反馈。

反馈信号和输入信号接在运放的不同输入端，因此是串联反馈。

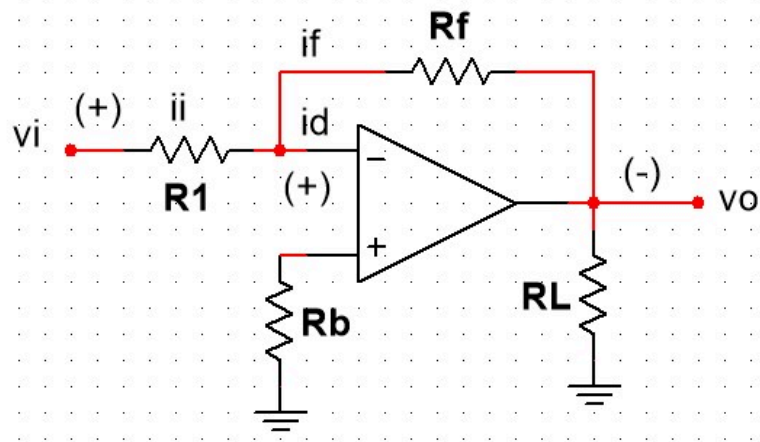
假设负载短路，则反馈信号不存在，因此该反馈是电压反馈。

反馈系数为 $F = \frac{v_f}{v_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_f}$

闭环增益 $A_{uf} = \frac{v_o}{v_i} \approx \frac{v_o}{v_f} = \frac{R_1 + R_f}{R_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$



➤电压并联负反馈放大电路



通过瞬时极性法，判断是负反馈。

反馈信号和输入信号接在运放的同一个输入端，因此是并联反馈。

假设负载短路，则反馈信号不存在，因此该反馈是电压反馈。

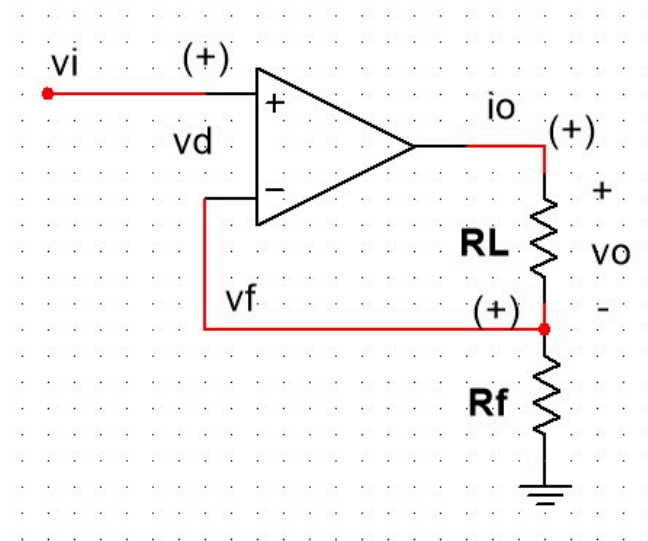
闭环增益

$$A_{uf} = \frac{v_o}{v_i} \approx \frac{v_o}{i_i R_1} \approx \frac{v_o}{i_f R_1} = -\frac{R_f}{R_1}$$

$$i_d = i_i - i_f \quad i_f = -\frac{v_o}{R_f}$$



► 电流串联负反馈放大电路



$$v_d = v_i - v_f \quad v_f = i_o R_f = \frac{v_o}{R_L} R_f$$

通过瞬时极性法，判断是负反馈。

反馈信号和输入信号接在运放的不同输入端，因此是串联反馈。

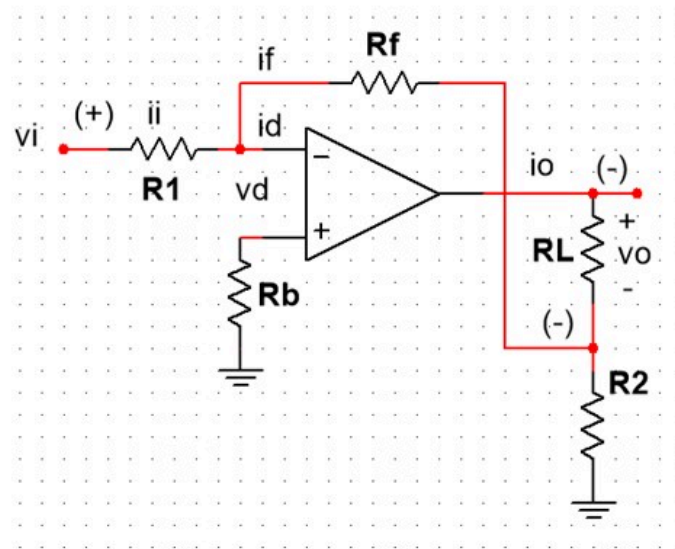
假设负载短路，则反馈信号仍存在，因此该反馈是电流反馈。

闭环增益

$$A_{uf} = \frac{v_o}{v_i} \approx \frac{v_o}{v_f} = \frac{v_o}{\frac{v_o}{R_L} R_f} = \frac{R_L}{R_f}$$



➤ 电流并联负反馈放大电路



$$i_d = i_i - i_f \quad i_f = -\frac{R_2}{R_2 + R_f} i_o = -\frac{R_2}{R_2 + R_f} \cdot \frac{v_o}{R_L}$$

并联分流

通过瞬时极性法，判断是负反馈。

反馈信号和输入信号接在运放的同一输入端，因此是并联反馈。

假设负载短路，则反馈信号仍存在，因此该反馈是电流反馈。

闭环增益

$$A_{uf} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{i_i R_1} \approx \frac{v_o}{i_f R_1} = \frac{v_o}{-\frac{R_2}{R_2 + R_f} \cdot \frac{v_o}{R_L} \cdot R_1} = -(1 + \frac{R_f}{R_2}) \cdot \frac{R_L}{R_1}$$



➤ 负反馈对放大电路性能的影响

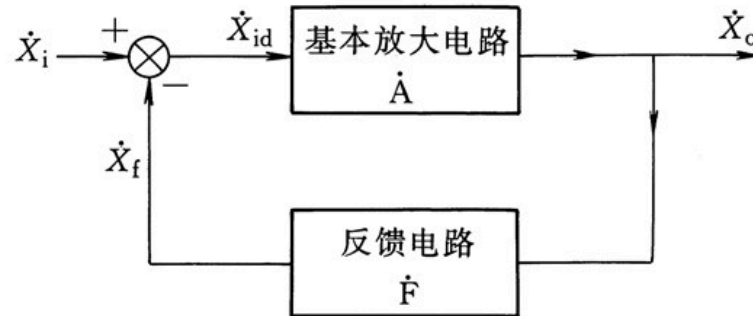
➤ 净输入量 $\dot{X}_{id} = \dot{X}_i - \dot{X}_f$

➤ 反馈系数 $\dot{X}_f = \dot{F}\dot{X}_o \rightarrow \dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$

➤ 开环放大倍数 $\dot{X}_o = \dot{A}\dot{X}_{id} \rightarrow \dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_{id}}$

➤ 闭环放大倍数 $\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_{id} + \dot{X}_f} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_{id} + \dot{A}\dot{F}\dot{X}_{id}} = \frac{\dot{A}\dot{X}_{id}}{(1 + \dot{A}\dot{F})\dot{X}_{id}} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$



在中频段，信号通过放大电路与反馈网络时不产生相移，均为实数，关系式为

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \rightarrow A_f = \frac{A}{1 + AF} \quad \text{反馈深度为 } 1 + AF$$



➤提高放大倍数的稳定性

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

- 如果 $1 + \dot{A}\dot{F} > 1$ ，则 $|\dot{A}_f| < |\dot{A}|$
- 闭环放大倍数小于开环放大倍数，负反馈。

- 如果 $1 + \dot{A}\dot{F} < 1$ ，则 $|\dot{A}_f| > |\dot{A}|$
- 闭环放大倍数大于开环放大倍数，正反馈。

- 如果 $1 + \dot{A}\dot{F} = 1$ ，则 $|\dot{A}_f| = |\dot{A}|$
- 无反馈。

- 如果 $1 + \dot{A}\dot{F} = 0$ ，则 $|\dot{A}_f| = \infty$
- 没有输入就有输出，放大倍数无穷大，自激。

$$A_f = \frac{A}{1 + AF} \quad \text{对} A \text{求导, 可以得到}$$

$$\frac{dA_f}{dA} = \frac{1}{1 + AF} - \frac{AF}{(1 + AF)^2} = \frac{1}{(1 + AF)^2} = \frac{1}{1 + AF} \frac{A_f}{A}$$

$$\frac{dA_f}{dA} = \frac{1}{1 + AF} \frac{A_f}{A} \rightarrow \frac{dA_f}{A_f} = \frac{\frac{dA}{A}}{1 + AF}$$

dA/A 开环放大倍数的相对不稳定程度
 dA_f/A_f 闭环放大倍数的相对不稳定程度

引入负反馈后，放大倍数下降了 $(1 + AF)$ 倍，
 但稳定度提高了 $(1 + AF)$ 倍，且 $(1 + AF)$ 越大，
 闭环放大倍数越稳定。



➤ **例题1**，设计放大倍数的不稳定程度 $\leq 0.1\%$ 的放大器，但是只有放大倍数的不稳定程度 $\leq 20\%$ 的放大器。

➤ 通过负反馈实现，多深的负反馈？ $0.1\% = \frac{20\%}{1+AF}$ $\frac{dA_f}{A_f} = \frac{\frac{dA}{A}}{1+AF}$ $A_f = \frac{A}{1+AF}$

➤ 反馈深度为 $1+AF = 200$

➤ 如果放大器的放大倍数为10000倍，则闭环放大倍数为 $A_f = \frac{10000}{200} = 50$

➤ 反馈深度为 $1+AF \geq 200$ ，均满足要求。

➤ 反馈系数为 $F = (200-1)/10000 \approx 0.02$



➤深度负反馈放大电路

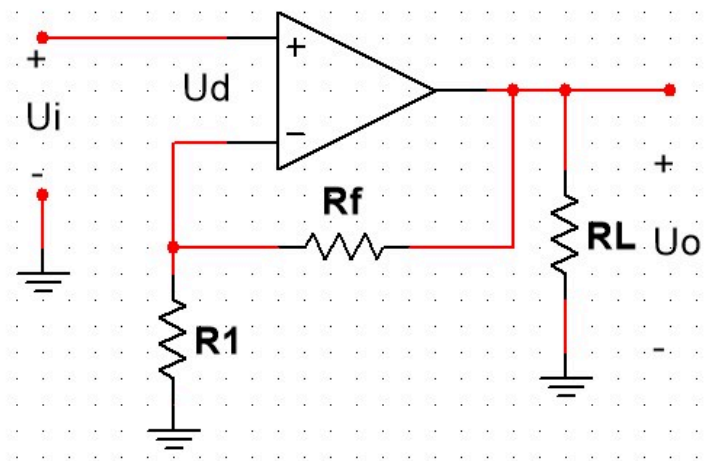
- 加入负反馈是集成运放工作在线性状态的必要条件。因为集成运放的放大倍数很大，加入负反馈后，通常为深度负反馈。
- 负反馈放大器闭环放大倍数的稳定性是比较高的。
- 当反馈深度 $1 + AF \gg 1$ ，即为深度负反馈。负反馈放大电路的放大倍数为

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

- 外加输入信号近似等于反馈信号，即 $X_i \approx X_f$
- 净输入信号近似为零，即 $X_{id} = X_i - X_f \approx 0$
- 反馈网络通常由电阻和电容等无源元件组成，比较稳定。



➤例题2, 电路的反馈类型为 (), $A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx$ ()。

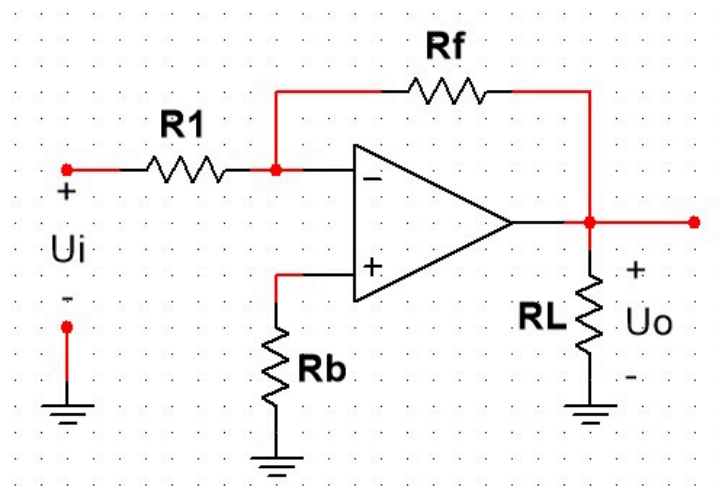


电压串联负反馈

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{U_o}{U_f} = \frac{R_1 + R_f}{R_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$



►例题3, 电路的反馈类型为 (), $A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx$ ()。

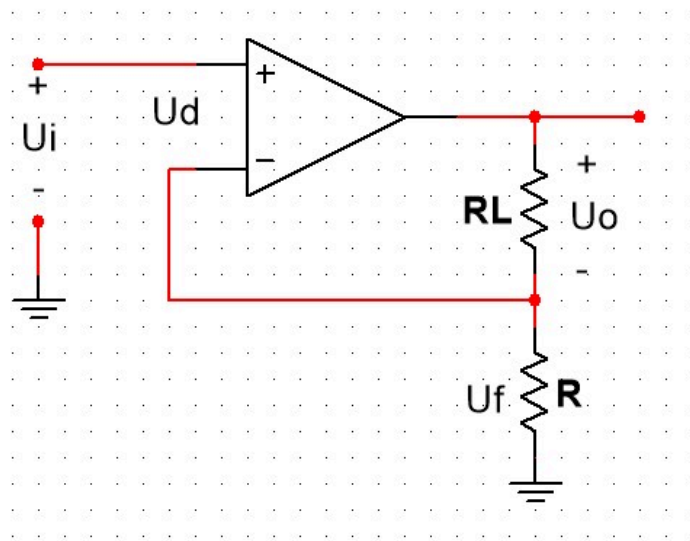


电压并联负反馈

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{-i_f R_f}{i_1 R_1} \approx -\frac{R_f}{R_1}$$



➤例题4, 电路的反馈类型为 (), $A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx$ () 。

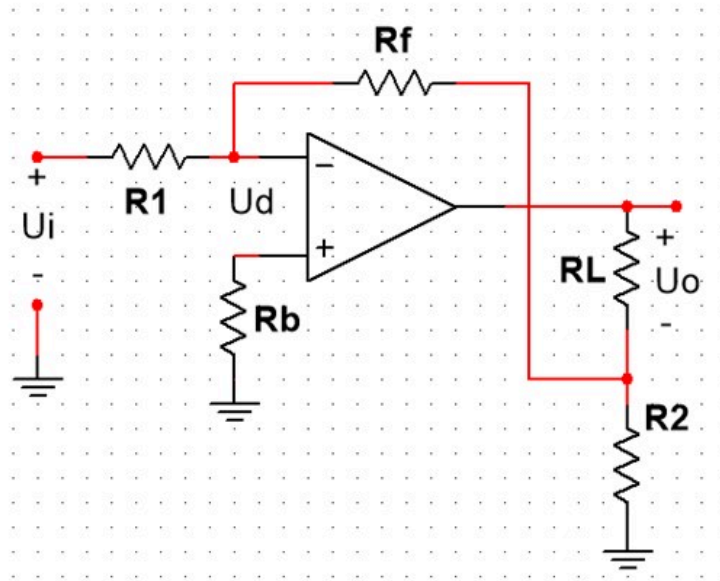


电流串联负反馈

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{U_o}{U_f} = \frac{R_L}{R}$$



►例题5, 电路的反馈类型为 (), $A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx$ ()。



电流并联负反馈

$$i_1 \approx i_f = -\frac{R_2}{R_2 + R_f} \cdot i_o$$

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{i_o R_L}{i_1 R_1} = \frac{i_o R_L}{-\frac{R_2}{R_2 + R_f} \cdot i_o \cdot R_1} = -(1 + \frac{R_f}{R_2}) \cdot \frac{R_L}{R_1}$$

$$A_{uf} = -(1 + \frac{R_f}{R_2}) \cdot \frac{R_L}{R_1}$$

2025/3/26

东北大学 机械工程与自动化学院

20



总结

➤例题5个。

➤对于负反馈放大电路，开环放大倍数为 \dot{A} ，反馈系数为 \dot{F} ，闭环放大倍数 $\dot{A}_f = ()$ 。

➤对于负反馈放大电路，在深度负反馈条件下，闭环放大倍数 $\dot{A}_f \approx ()$ 。

➤对于负反馈放大电路，反馈深度为 $()$ 。

➤深度负反馈的条件是 $()$ 。

➤某负反馈放大电路的开环放大倍数为100，反馈系数为0.03，则反馈深度为 $()$ ，闭环放大倍数为 $()$ 。

➤串联负反馈的净输入量是 $()$ ，并联负反馈的净输入量是 $()$ 。

$$\frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}, \quad \frac{1}{\dot{F}}, \quad 1 + \dot{A}\dot{F}, \quad 1 + \dot{A}\dot{F} \gg 1, \quad 4, \quad 25, \quad \text{电压, 电流}$$