

# 第五章 模拟运算电路

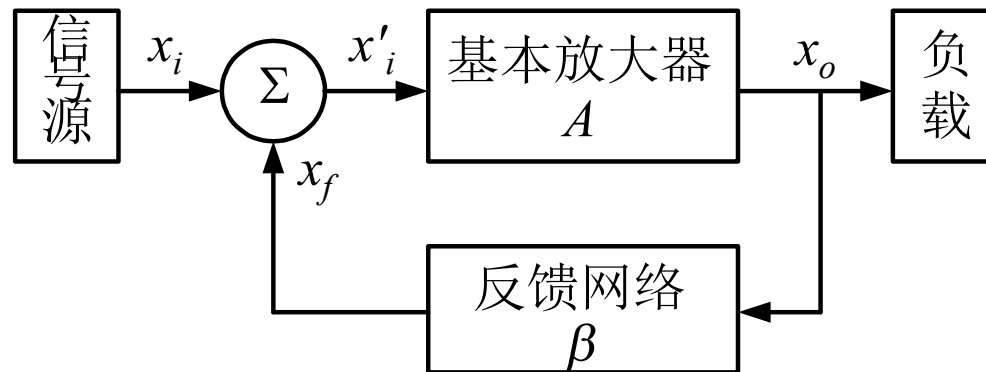
## 5.1 负反馈放大器

# 负反馈放大器

- 结构
- 特性
- 类型

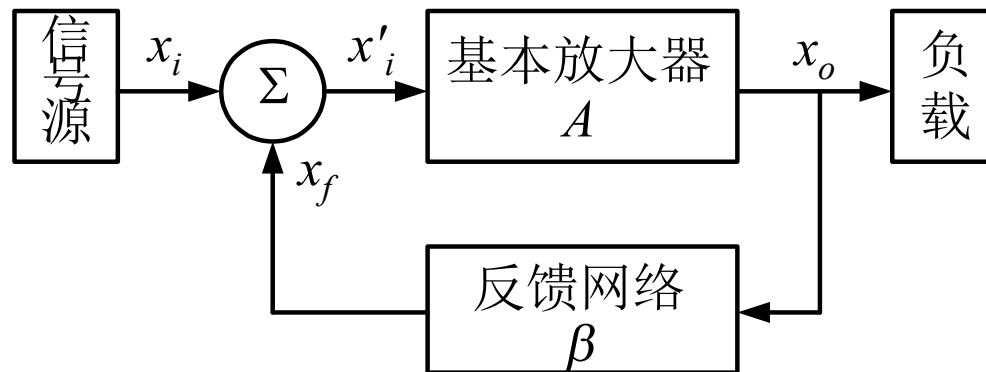
# 反馈放大器

- 放大器的反馈
  - 将放大器输出量的一部分或全部，通过一定的方式反馈到输入端
- 反馈放大器
  - 由基本放大器和反馈网络组成
  - 信号可能是电压，也可能是电流，用 $x$ 表示



# 反馈放大器结构

- 输入信号  $x_i$
- 反馈信号  $x_f$
- 净输入信号  $x'_i$



- 按照输入信号与反馈信号的叠加方式
  - 负反馈  $x'_i = x_i - x_f$
  - 正反馈  $x'_i = x_i + x_f$

# 反馈放大器特点

1. 反馈放大器中，基本放大器的输入，是原输入信号和反馈信号叠加后得到的净输入信号  $x'_i$
2. 输出信号在输出到负载的同时，还要取出部分或全部，回送到输入端
3. 引入反馈后，信号既有正向传输也有反向传输，电路形成闭合环路

假定：信号的正向传输只通过基本放大器，  
反馈信号的反向传输只通过反馈网络

# 反馈放大器增益

- 基本放大器的增益  
(开环增益)

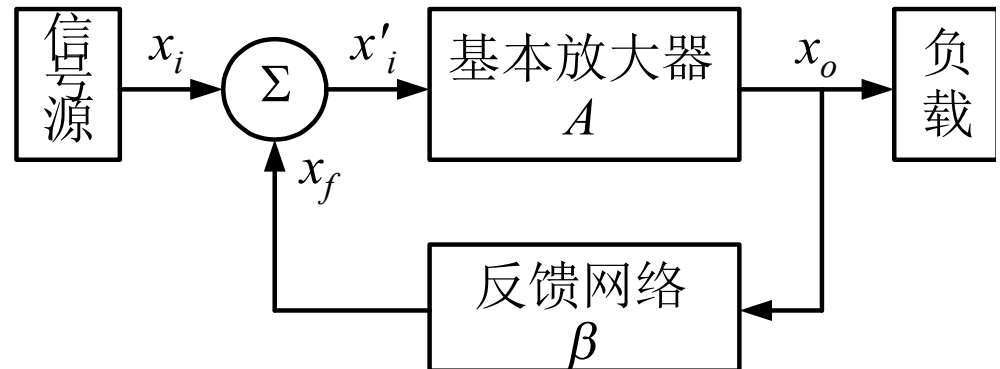
$$A = \frac{x_o}{x'_i}$$

- 反馈网络的反馈系数

$$\beta = \frac{x_f}{x_o}$$

- 反馈放大器的增益  
(闭环增益)

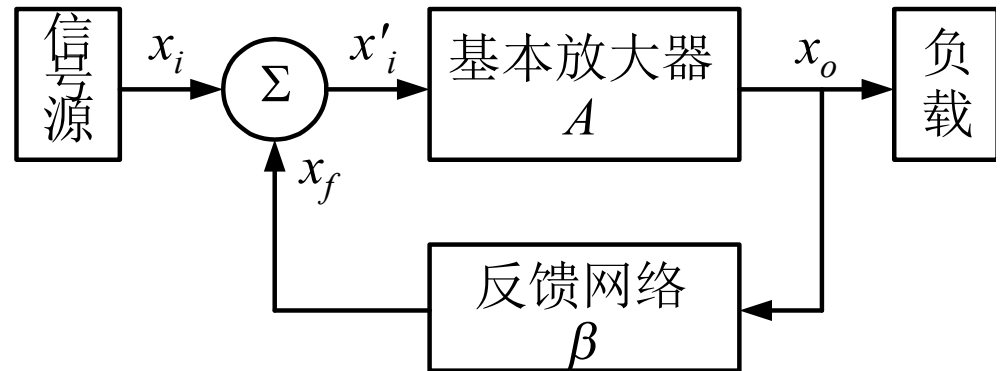
$$A_f = \frac{x_o}{x_i}$$



# 反馈放大器增益

- 开环增益

- 电压增益  $A_v = v_o / v_i'$
- 电流增益  $A_i = i_o / i_i'$
- 互阻增益  $A_z = v_o / i_i'$
- 互导增益  $A_y = i_o / v_i'$



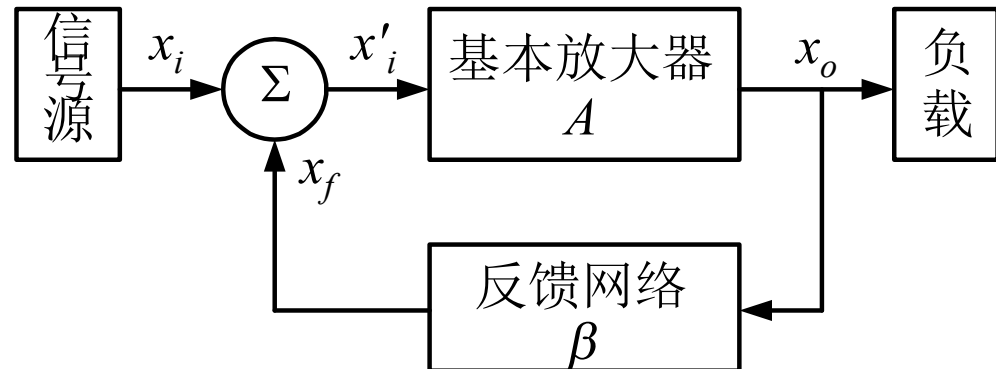
- 反馈系数

- 电压反馈系数  $\beta_v = v_f / v_o$
- 电流反馈系数  $\beta_i = i_f / i_o$
- 互阻反馈系数  $\beta_z = v_f / i_o$
- 互导反馈系数  $\beta_y = i_f / v_o$

# 反馈放大器增益

- 负反馈

$$x'_i = x_i - x_f$$



$$A_f = \frac{x_o}{x_i} = \frac{Ax'_i}{x'_i + x_f} = \frac{Ax'_i}{x'_i + \beta x_o} = \frac{Ax'_i}{x'_i + A\beta x'_i} = \frac{A}{1 + A\beta}$$

牺牲增益，换取其它优点



# 反馈放大器增益稳定性

- 假设开环增益变化  $A \rightarrow A + \Delta A$

- 闭环增益绝对变化量

$$\begin{aligned}\Delta A_f &= \frac{A + \Delta A}{1 + (A + \Delta A)\beta} - \frac{A}{1 + A\beta} \\ &= \frac{\Delta A}{[1 + (A + \Delta A)\beta](1 + A\beta)} \\ &= \frac{A\Delta A}{A[1 + (A + \Delta A)\beta](1 + A\beta)} \\ &= \frac{A_f \Delta A}{A[1 + (A + \Delta A)\beta]}\end{aligned}$$

- 闭环增益相对变化量

$$\begin{aligned}\frac{\Delta A_f}{A_f} &= \frac{1}{1 + (A + \Delta A)\beta} \cdot \frac{\Delta A}{A} \\ &\approx \frac{1}{1 + A\beta} \cdot \frac{\Delta A}{A}\end{aligned}$$

增益稳定性提高

# 反馈放大器增益稳定性

- 环路增益  $T = A\beta$

- 反馈深度  $F = 1 + T$

$$A_f = \frac{A}{1 + A\beta} = \frac{A}{F}$$

- 反馈深度越大，闭环增益越小

- 深度负反馈  $T \gg 1$

$$A_f = \frac{A}{1 + A\beta} \approx \frac{1}{\beta}$$

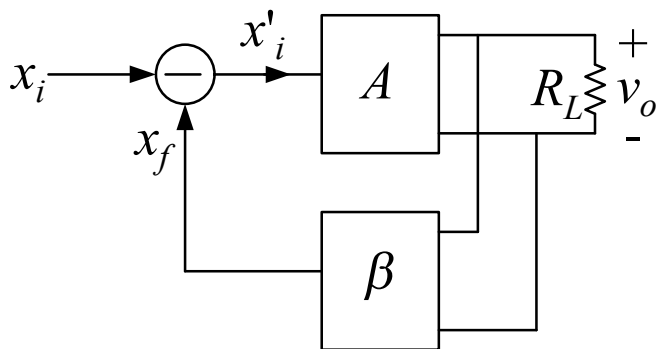
- 闭环增益与开环增益无关，只和反馈网络有关

# 电压反馈与电流反馈

- 按照反馈信号在输出端的取样方式

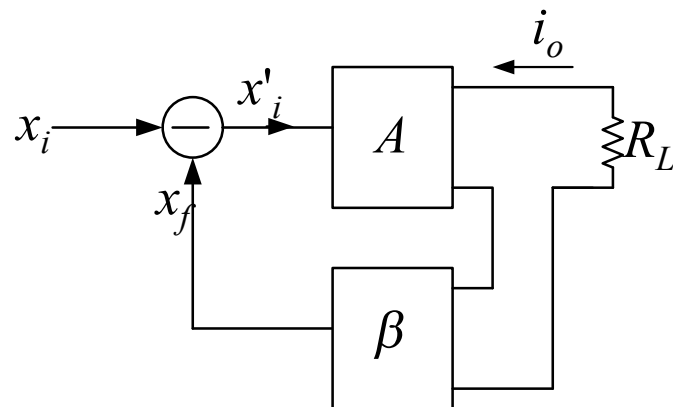
- 电压反馈

- 反馈网络与基本放大器并联,
- 反馈信号取自输出电压



- 电流反馈

- 反馈网络与基本放大器串联,
- 反馈信号取自输出电流

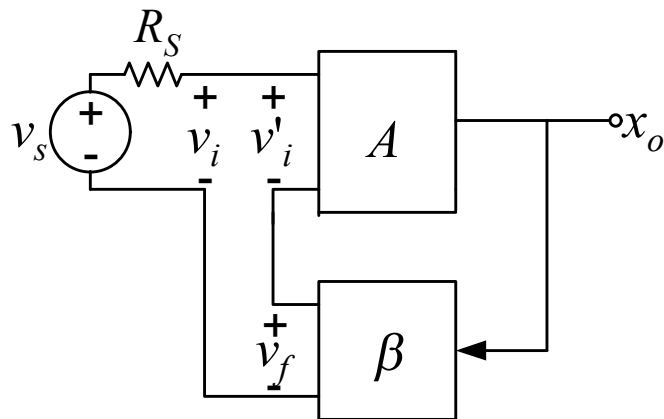


# 串联反馈与并联反馈

- 按照反馈信号在输入端的连接方式

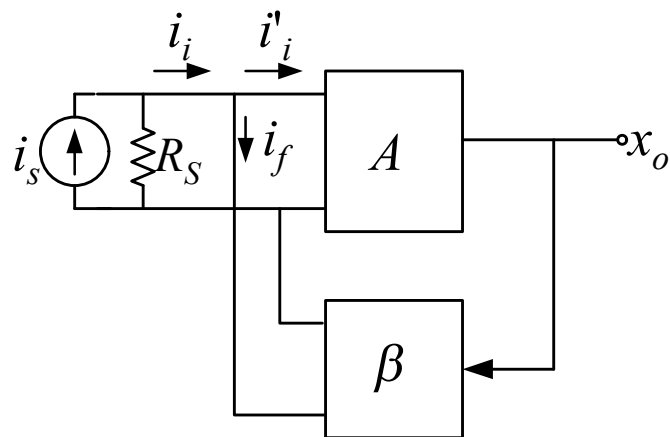
- 串联反馈

- 反馈网络与基本放大器串联,
- 反馈信号为电压形式



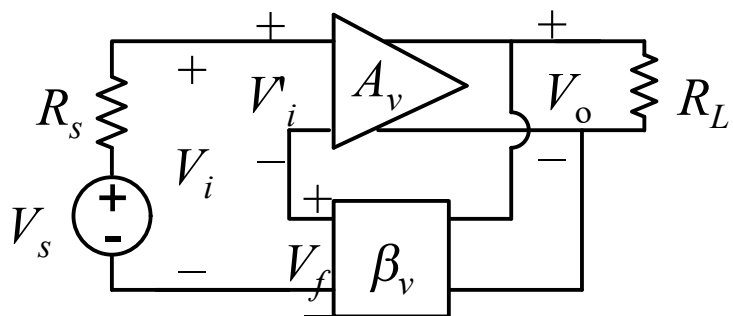
- 并联反馈

- 反馈网络与基本放大器并联
- 反馈信号为电流形式

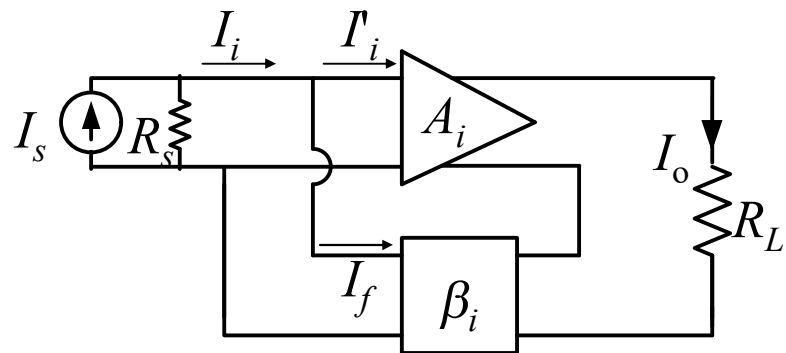


# 反馈放大器的类型

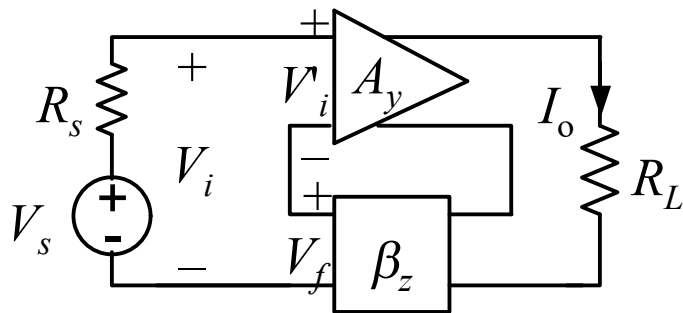
- “电压” “电流” —— 反馈信号在输出端的取样方式
- “串联” “并联” —— 反馈信号在输入端的连接方式



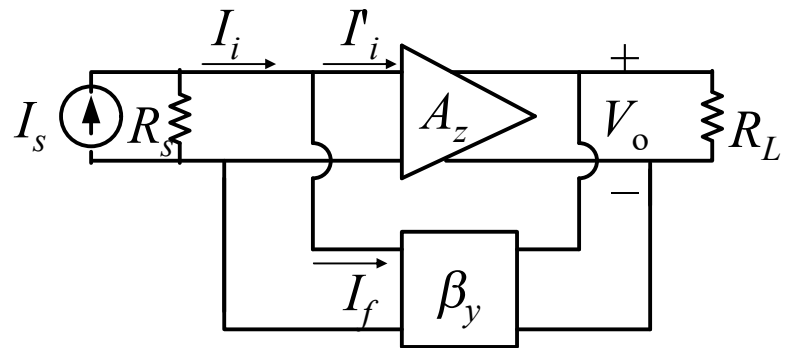
电压串联反馈



电流并联反馈



电流串联反馈

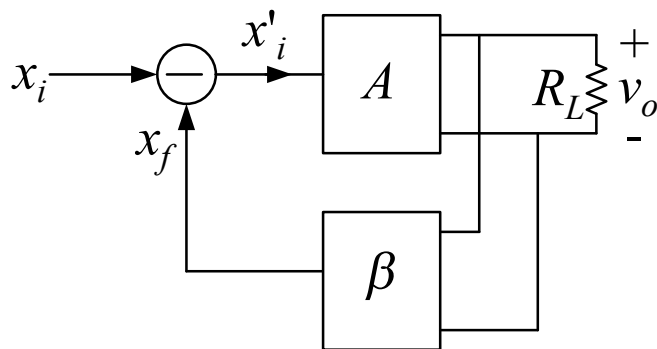


电压并联反馈

# 反馈放大器类型的判断

## 电压反馈与电流反馈：

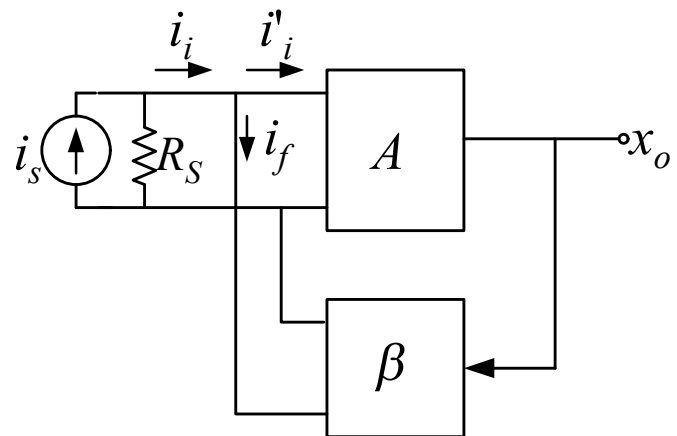
- 将负载或输出端短路
  - 短路后，反馈网络不能取样，为电压反馈
  - 短路后，反馈网络仍然能够取样，为电流反馈



电压反馈

## 串联反馈与并联反馈：

- 将信号源或输入端短路
  - 短路后，反馈信号不能加到基本放大器输入端，为并联反馈
  - 短路后，反馈网络仍然能加到基本放大器输入端，为串联反馈

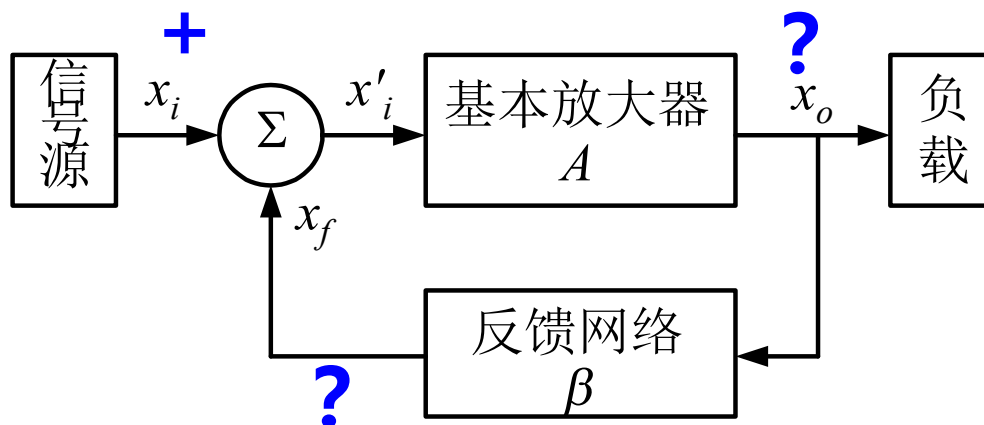


并联反馈

# 反馈放大器类型的判断

## 正反馈与负反馈：

- 采用瞬时极性法
  - 用正负号表示电路中各节点电压的瞬时极性（或用箭头表示各支路电流的瞬时流向）

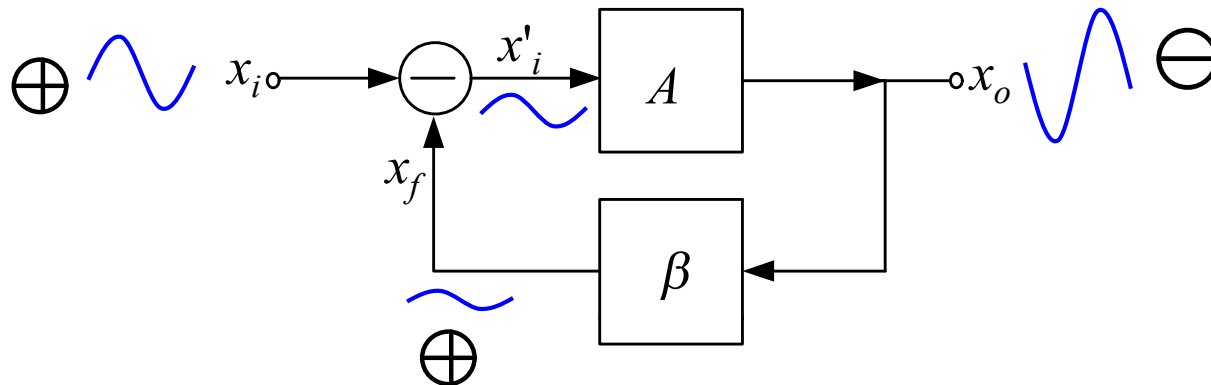


+ : 负反馈  
- : 正反馈

# 反馈放大器类型的判断

## 正反馈与负反馈：

- 采用瞬时极性法



为负反馈

放大电路必须完全避免出现正反馈



# 小结

- 反馈放大器的结构、类型
- 负反馈对放大器电路的增益、增益稳定性的影响