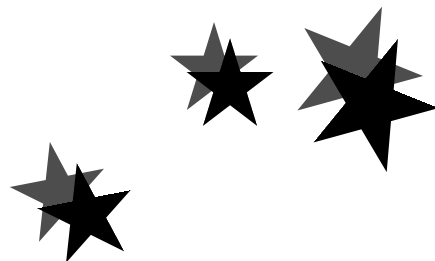




# 第八章 负反馈放大电路

北京邮电大学电子工程学院  
2011.2



• 退出 • 开始



# 第八章 负反馈放大电路



## 本章主要内容:

- 反馈的基本概念及正负反馈的判断方法
- 负反馈放大电路的四种基本组态
- 负反馈对放大电路性能的影响

## 本章重点:

- 掌握电压电流及串联并联负反馈的判断方法
- 理解负反馈对放大电路性能的影响
- 熟悉放大电路中引入负反馈的原则

# 第八章 负反馈放大电路



- §8-1 反馈的基本概念及正负反馈判断方法◇
- §8-2 负反馈放大电路的表示方法◇
- §8-3 交流负反馈放大电路的四种基本组态◇
- §8-4 负反馈对放大电路性能的影响◇

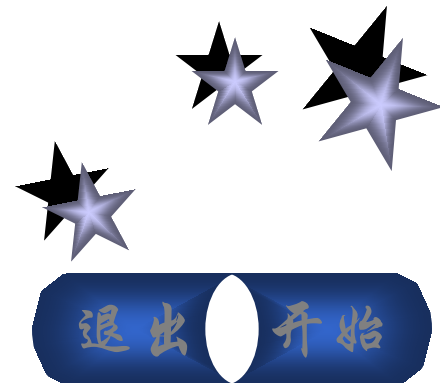
# 第八章 负反馈放大电路

---

## 8-1 反馈的基本概念及正负反馈 判断方法

电路与电子学基础

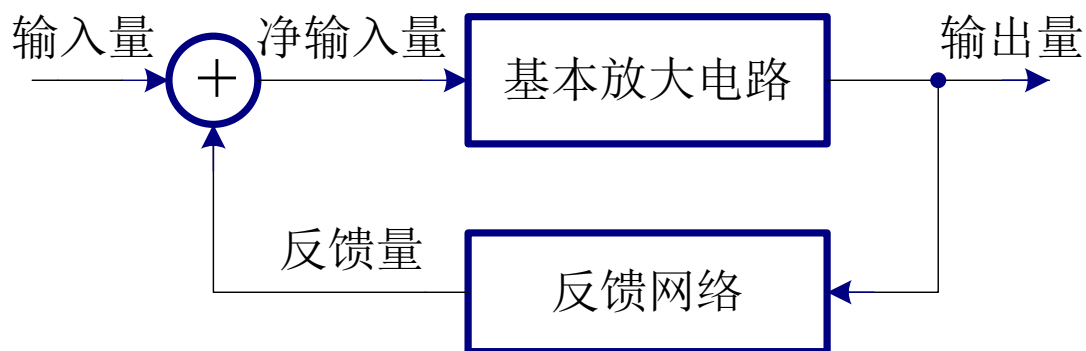
BUPT EE  
2011.2



# 基本概念



- **反馈**：将输出量(输出电压或输出电流)的一部分或全部通过一定的电路形式作用到输入端，构成输入输出系统的闭合回路，**用来影响输入量**(放大电路的输入电压或输入电流)的措施



- **净输入量**：基本放大电路的输入信号；大小由输入信号(输入量)与反馈信号(反馈量)共同决定



# 正负反馈判断方法

- 对于一个网络或者放大电路是否存在反馈，可用输出与输入间是否存在反馈通路以及反馈量是否影响输入信号的大小来进行判断
- **正反馈**：使放大电路**净输入量增大**的反馈
- **负反馈**：使放大电路**净输入量削弱**的反馈

对于分立元件电路，可以通过判断输入级放大管的净输入电压或者净输入电流因反馈的引入被增大还是被减小，来判断反馈的正负反馈方式。

## 正负反馈可使用瞬时极性判断法

规定电路输入信号在某一时刻对地的极性为正，逐级判断电路中各相关点电流的流向和电位的极性，从而得到输出信号的极性；

根据输出信号的极性**判断出反馈信号的极性**；若反馈信号使基本放大电路的净输入信号增大，则引入了正反馈；反之则引入了负反馈。



## 【例8-1】判断如图所示放大电路，引入了正反馈还是负反馈

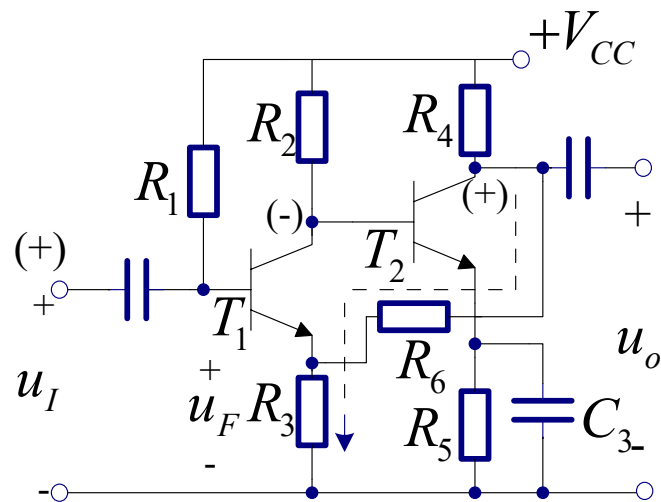
1. 设输入电压  $u_I$  的瞬时极性对地为“+”，  
则  $T_1$  管的基极电位对地为“+”；

2. 共射极电路的输出电压与输入电压反相，  
故  $T_1$  管的集电极电位对地为“-”，即  
 $T_2$  管的基极电位对地为“-”；

3. 第二级仍为共射极电路，故  $T_2$  管的集电极  
电位对地为“+”；

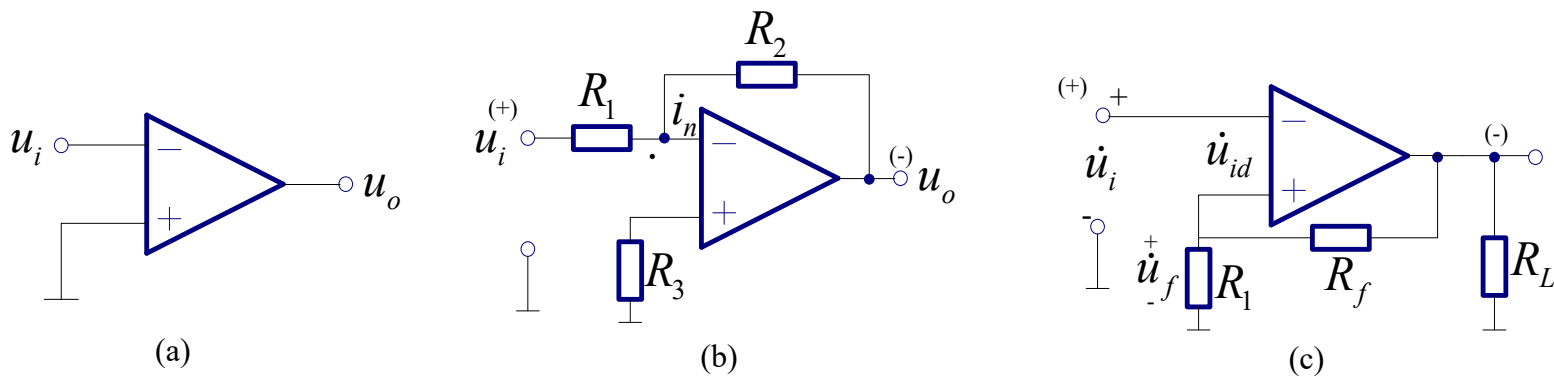
4.  $u_O$  作用于  $R_6$  和  $R_3$  回路，产生电流，如图中虚线所示，从而在  
 $R_3$  上得到反馈电压  $u_F$ ；根据  $u_O$  的极性得到  $u_F$  的极性为上“+”  
下“-”，如图中所标注；

5. 当  $u_I$  增大时，会引起  $u_O$  增大，进而引起  $u_F$  增大。 $u_F$  增大意味着  $T_1$  管  $b-e$  间电压减小，所以该两级放大电路引入了负反馈。





【例8-2】判断如图所示各放大电路是否存在反馈，并判断反馈的正负性。



(a) 所示电路中，集成运放的同相输入端、反相输入端与输出端均无通路，故电路中没有引入反馈。

(b) 输出端通过电阻  $R_2$  将反馈量回授给输入端，该电路中引入了反馈。

当输入电压增加(+)时，输出电压反相增加(-)，则流过电阻  $R_2$  的电流增大使得净输入量  $i_n$  减小，故该电路为**负反馈电路**

(c) 输出端通过电阻  $R_f$  将反馈量回授给输入端，该电路中引入了反馈。

当输入信号增大(+)时，输出信号反相增大(-)。

净输入量  $u_{id} = u_i - (-u_f) = u_i + u_f$  增加，故为**正反馈**



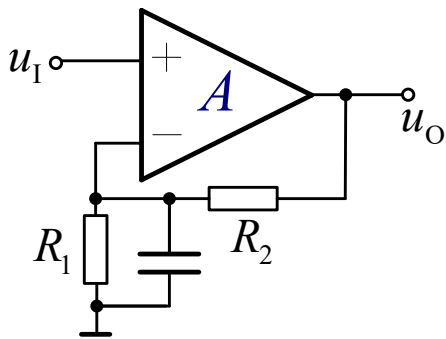


# 直流反馈与交流反馈的判断

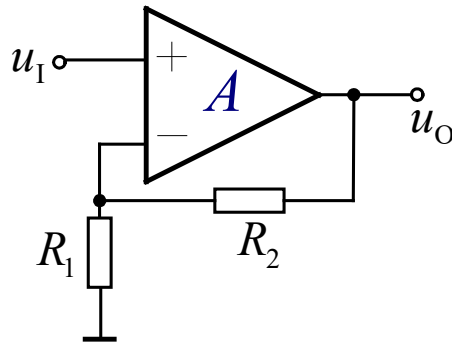
## 直流反馈与交流反馈的判断：

通过反馈存在于放大电路的直流通路之中还是交流通路之中，来判断电路引入的是直流反馈还是交流反馈。

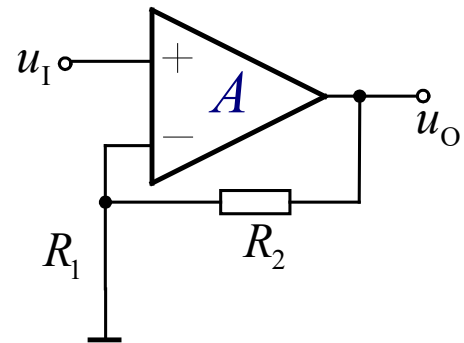
【例8-3】判断如图所示集成运放电路中是否存在交、直流反馈



(a)电路图



(b)直流通路



(c)交流通路

电容对交流信号视为短路，因而直流通路和交流通路分别如图(b)和(c)所示，  
可见，电路中只引入了直流反馈，而没有引入交流反馈。

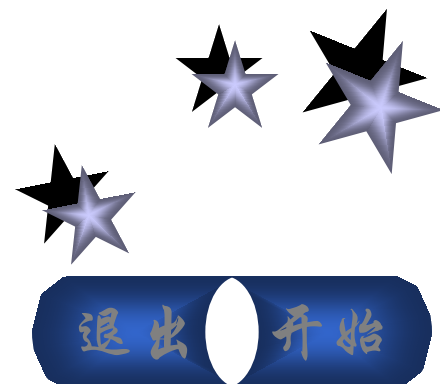
# 第八章 负反馈放大电路

---

## 8-2 负反馈放大电路的表示方法

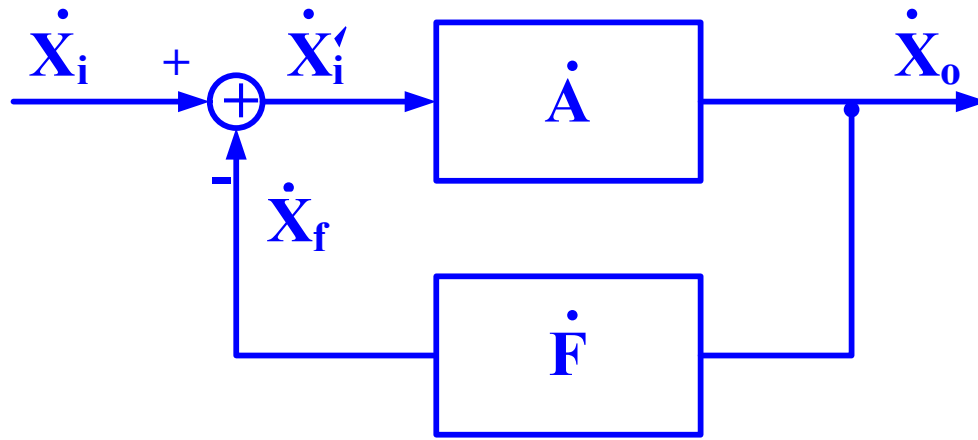
电路与电子学基础

BUPT EE  
2011.2





# 负反馈放大电路的表示方法



$\dot{X}_i$  —— 输入量       $\dot{X}_o$  —— 最终输出量

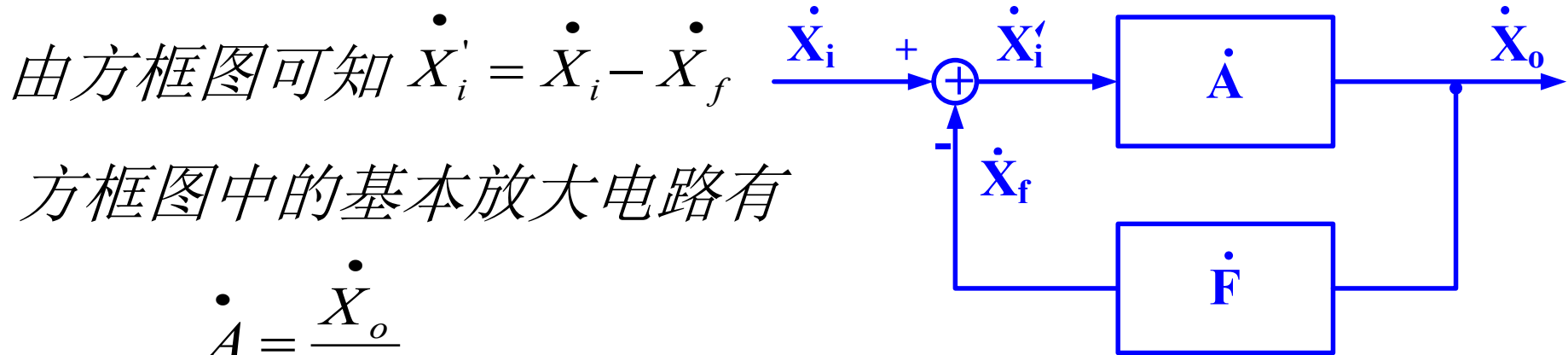
$\dot{X}_f$  —— 反馈量       $\dot{X}_i'$  —— 基本放大电路的净输入量

$\dot{A}$  —— 基本放大电路开环放大倍数

$\dot{F}$  —— 反馈电路反馈系数



# 负反馈放大电路的表示方法



$$\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i'}$$

方框图中的反馈电路有  $\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$

整个放大电路的放大倍数（闭环放大倍数）为：

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{\dot{A}\dot{F} + 1} \quad \text{其中} \quad \dot{A}\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_i'}$$



# 负反馈放大电路的表示方法

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{\dot{A}F + 1} \quad \text{只考虑幅值:} \quad |\dot{A}_f| = \frac{|\dot{A}|}{|\dot{A}F + 1|}$$

$$|1 + \dot{A}F| > 1 \quad \text{放大倍数下降、负反馈}$$

$$|1 + \dot{A}F| = 1 \quad |\dot{A}_f| = |\dot{A}| \quad \text{无反馈}$$

$$|1 + \dot{A}F| < 1 \quad |\dot{A}_f| > |\dot{A}| \quad \text{正反馈}$$

$$|1 + \dot{A}F| = 0 \quad \dot{A}F = -1 \quad |\dot{A}_f| \rightarrow \infty \quad \text{自激振荡}$$

$$|1 + \dot{A}F| \gg 1 \quad |\dot{A}F + 1| \approx |\dot{A}F| \quad |\dot{A}_f| \approx \frac{1}{|F|} \quad \text{深度负反馈}$$



# 深度负反馈

深度负反馈时:  $| \dot{A} \dot{F} + 1 | \gg 1 \quad | \dot{A}_f | \approx \frac{1}{| \dot{F} |}$

- 放大倍数几乎仅仅决定于反馈网络，而与基本放大电路无关。由于反馈网络常为无源网络，受环境温度的影响极小，因而放大倍数具有稳定性。
- 基本放大电路的放大能力愈强，即A的数值愈大，反馈愈深， $A_f$ 与 $1/F$ 的近似程度愈好
- 大多数负反馈放大电路，特别是用集成运放组成的负反馈放大电路，一般均满足 $1 + AF \gg 1$ 的条件，因而在近似分析中均可认为 $A_f \approx 1/F$ ，而不必求出A。

# 第八章 负反馈放大电路

---

## 8-3 交流负反馈放大电路的四种 基本组态

电路与电子学基础

BUPT EE  
2011.2

退出 开始



# 负反馈的四种类型及判断方法

从输出端看，反馈量是取自于输出电压（电压反馈），还是取自于输出电流（电流反馈）；即反馈的目的是稳定输出电压，还是稳定输出电流。

从输入端看，反馈量与输入量是以电压方式相叠加（串联负反馈），还是以电流方式相叠加（并联反馈）；即反馈的结果是减小净输入电压，还是减小净输入电流。

因此，交流负反馈有四种组态：

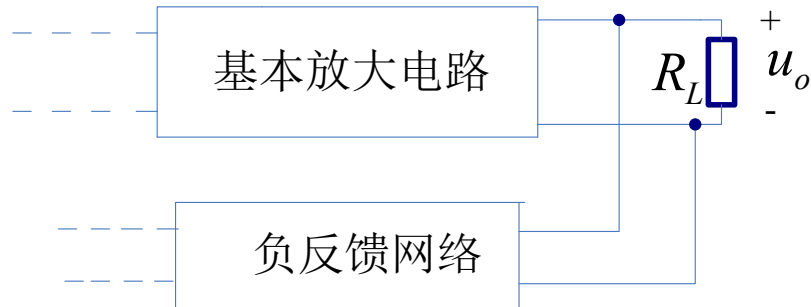
**负反馈的类型**

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

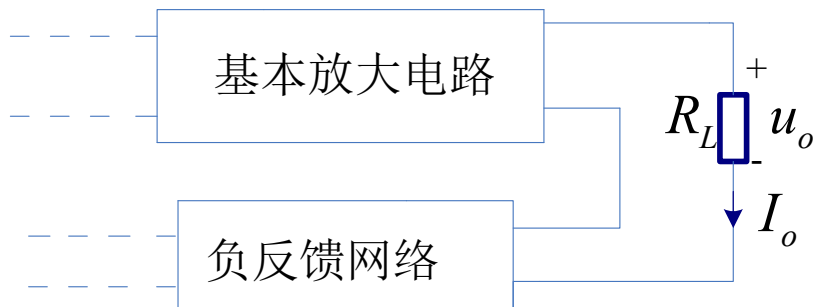




# 一、电压与电流负反馈电路



**当输出信号为电压 $u_o$ 时，反馈量取自输出电压，所以是电压负反馈。**



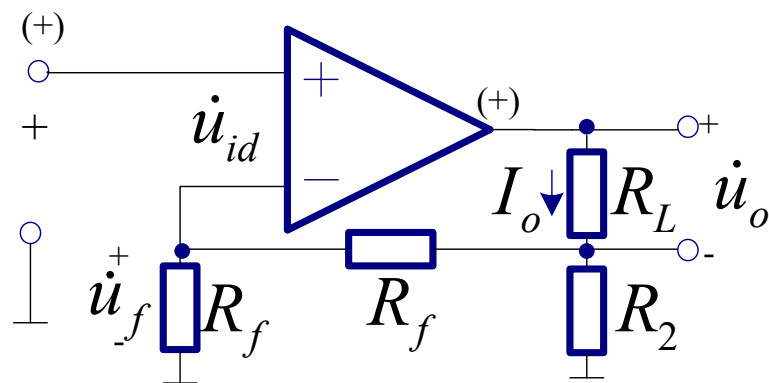
**反馈量取自流过负载的电流 $I_o$ ，所以为电流负反馈。**

**判断方法：** 假设将负载短路，若反馈量消失，则为电压反馈，否则为电流反馈

## 例8-4



试判断下图所示放大电路是电压还是电流反馈？

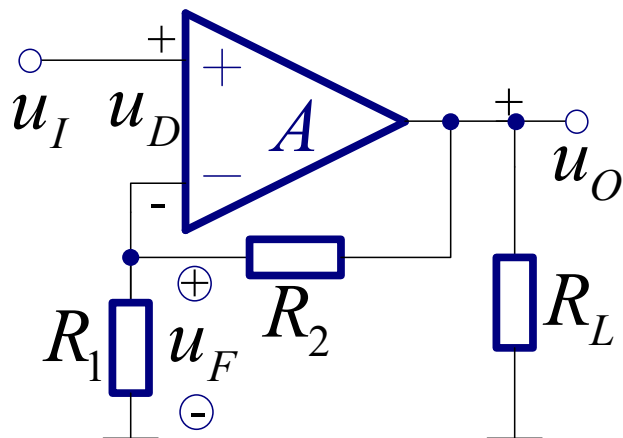


解：假设将负载短路，反馈量依然存在，因此为电流反馈电路。

# 例8-5



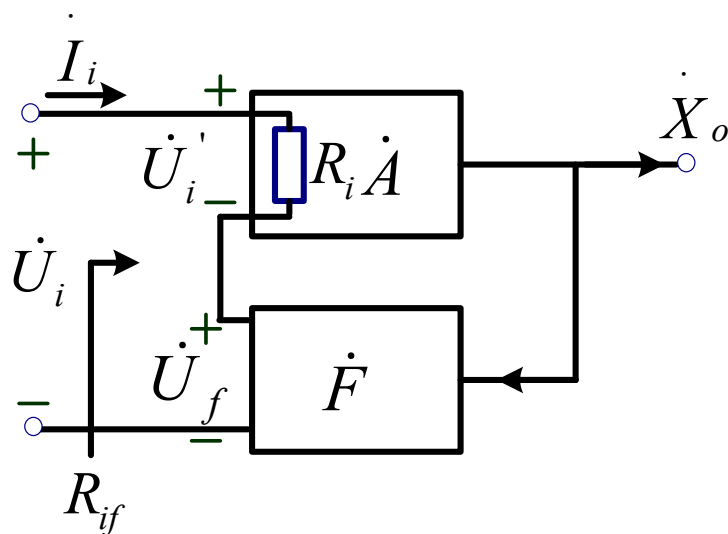
试判断下图电路是电压反馈还是电流反馈？



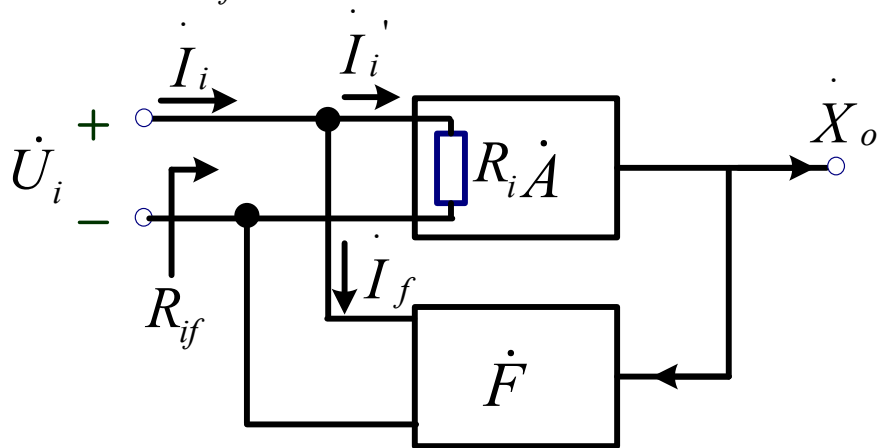
解：如果将负载短路，可以看出输出端接地，输出量为零，使得反馈量消失，因此是电压负反馈电路。



## 二、串联与并联负反馈电路



**串联反馈电路：**基本放大电路、信号源以及反馈电路三者之间的连接关系为串联



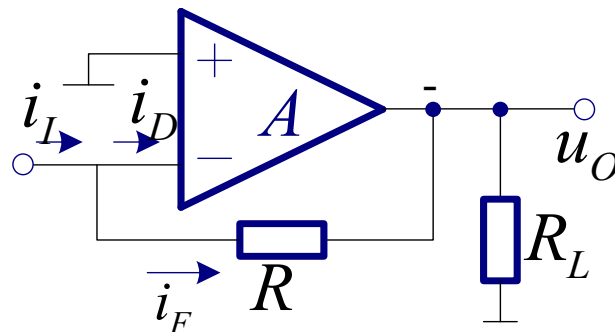
**并联反馈电路：**基本放大电路、信号源以及反馈电路三者之间的连接关系为并联

输入、反馈、净输入在同一节点上为并联反馈  
输入、反馈、净输入在同一回路中为串联反馈



# 例8-6

如图所示负反馈放大电路中，相关电位及电流的瞬时极性和电流方向如图中所标注。试判断该放大电路的反馈是：  
1.电压反馈还是电流反馈； 2.串联反馈还是并联反馈



**解：**

将放大电路的负载 $R_L$ 短路，反馈量消失——电压反馈

从输入端看放大电路、**信号源与反馈电路成并联关系**——  
并联负反馈

**结论：该电路为电压并联负反馈电路。**



## 例8-7 在下图所示的负反馈放大电路中，各支路电流的瞬时极性如图中所标注。判断反馈类型。

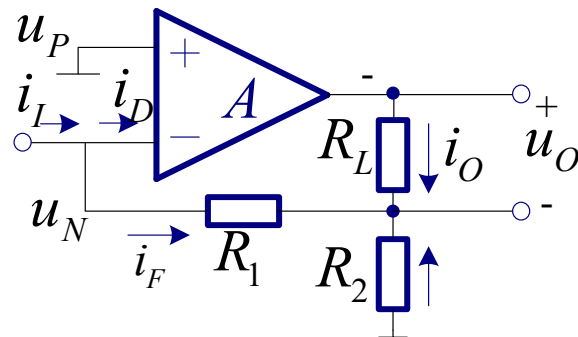
解：

如果将负载 $R_L$ 短路，反馈量存在，因此是电流负反馈电路。

电路的反馈电流大小为：

$$i_F = -\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot i_o$$

表明反馈信号取自输出电流 $i_o$ ，形成反馈电流 $i_F$ ，并将与输入电流 $i_i$ 求差后放大，所以从输入端看放大电路、反馈电路以及信号源三者间是一种并联关系，因而电路引入了**电流并联负反馈**。

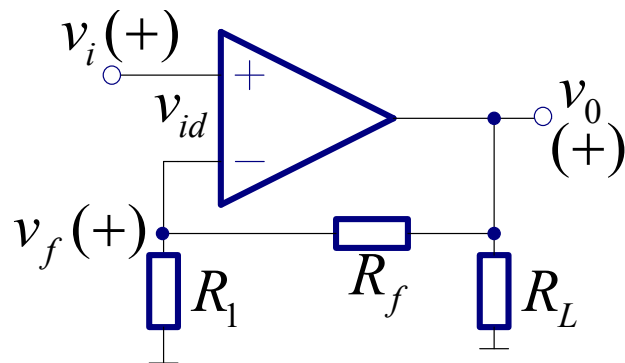




## 例8-8 试分析下图所示电路中引入的是正反馈还是负反馈，若为交流负反馈则说明反馈的组态。

解：

用瞬时极性法判断反馈极性，即令  $v_i$  极性为“+”，经运放后，进行同相放大， $v_o$  也为“+”，因此  $v_f$  也为“+”，于是净输入电压  $v_{id} = v_i - v_f$  比没有反馈时减小了，所以引入的是负反馈。



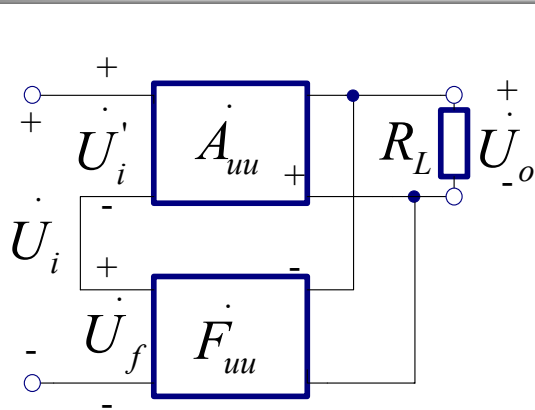
将放大电路的负载  $R_L$  短路，反馈量消失——电压反馈

在放大电路的输入端，反馈网络串联于输入回路中，反馈信号与输入信号以电压形式比较，因而是串联反馈。

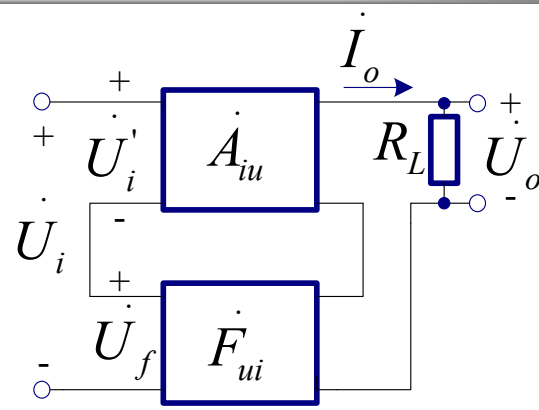
综上所述，图示电路是电压串联负反馈电路。



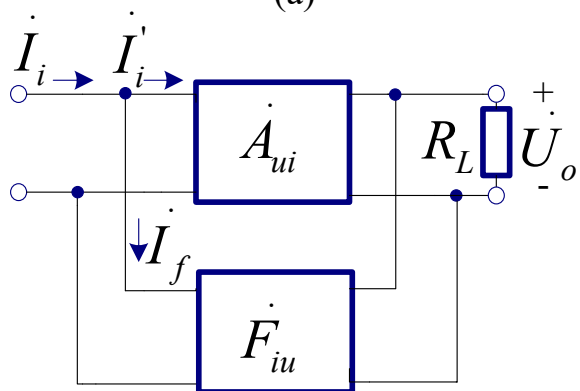
# 负反馈放大电路的四种基本组态



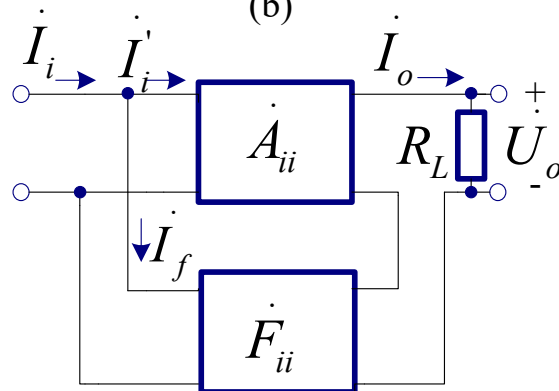
(a)



(b)



(c)



(d)

(a) 电压串联负反馈电路

(b) 电流串联负反馈电路

(c) 电压并联负反馈电路

(d) 电流并联负反馈电路



# 总结:



判断是电压反馈还是电流反馈, 从输出回路分析  
判断是串联反馈还是并联反馈, 从输入回路分析

反馈量取自电压时为电压反馈  
反馈量取自电流时为电流反馈。

## 虚拟短路法:

将负载短路, 若反馈量消失, 则为电压反馈, 否则为电流反馈。

并联反馈 (以电流形式出现, 适用于电流源)

串联反馈 (以电压形式出现, 适用于电压源)

# 第八章 负反馈放大电路

---

## 8-4 负反馈对放大电路性能的影响

电路与电子学基础

BUPT EE  
2011.2

退出 开始

# 主要内容

---



- 提高放大倍数的稳定性
- 改变输入电阻和输出电阻
- 展宽通频带
- 减小非线性失真
- 放大电路中引入负反馈的一般原则



# 1. 提高放大倍数的稳定性

在中频段, 无附加相移, 放大倍数、反馈系数是实数

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

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

闭环放大倍数的相对变化率 ( $dA_f/A_f$ ) 是开环放大倍数相对变化率 ( $dA/A$ ) 的  $(1+AF)$  分之一, 即闭环放大倍数更加稳定  
应该指出这种稳定性是以牺牲放大倍数获得的。



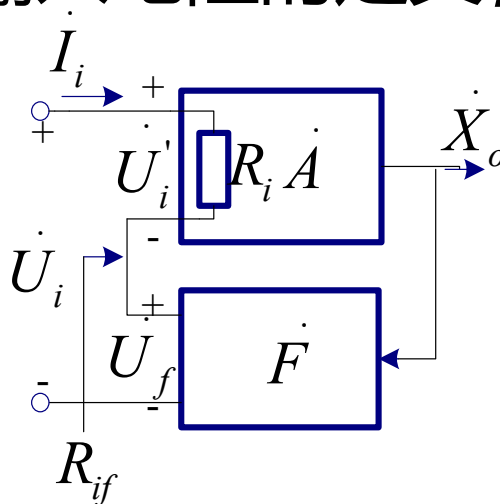
## 2.1 对输入电阻的影响

当电路为**串联负反馈**电路时，根据输入电阻的定义，基本放大电路的输入电阻为：

$$R_i = \frac{U_i'}{I_i}$$

整个电路的输入电阻为：

$$R_{if} = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i' + U_f}{I_i} = \frac{U_i' + AFU_i'}{I_i}$$



串联负反馈电路的方框图

因此串联负反馈电路输入电阻为  $R_{if} = (1 + AF)R_i$

表明引入串联负反馈，输入电阻增大到基本放大电路输入电阻的 $(1 + AF)$ 倍。



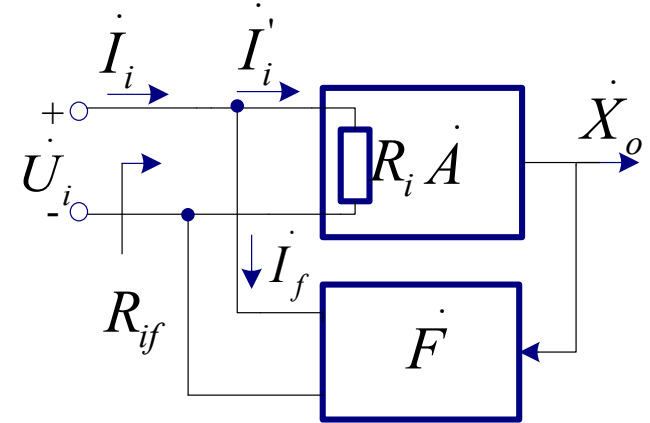
## 2.1 对输入电阻的影响

当电路为**并联负反馈**电路时，基本放大电路的输入电阻为：

$$R_i = \frac{U_i}{I'_i}$$

整个电路的输入电阻为：

$$R_{if} = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{I'_i + I_f} = \frac{U_i}{I'_i + AFI'_i}$$



并联负反馈电路的方块图

因此并联负反馈放大电路输入电阻为：
$$R_{if} = \frac{R_i}{1 + AF}$$

表明引入并联负反馈后，输入电阻减小为基本放大电路输入电阻的 $(1 + AF)$ 分之一。



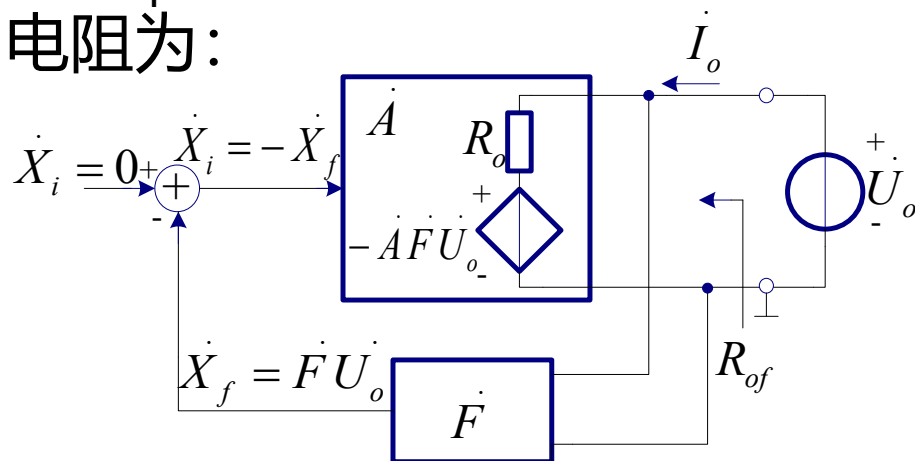
## 2.2 对输出电阻的影响

首先分析**电压负反馈**电路，令输入量  $X_i = 0$ ，在输出端加交流电压  $U_o$ ，产生电流  $I_o$ ，则电路的输出电阻为：

$$R_{of} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o}$$

$R_o$  中的电流  $I_o$  为：

$$I_o = \frac{U_o - (-AFU_o)}{R_o} = \frac{(1 + AF)U_o}{R_o}$$



电压负反馈电路的方块图

电压负反馈放大电路输出电阻式为：
$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + AF}$$

表明引入电压负反馈后输出电阻仅为其基本放大电路输出电阻的  $(1 + AF)$  分之一。



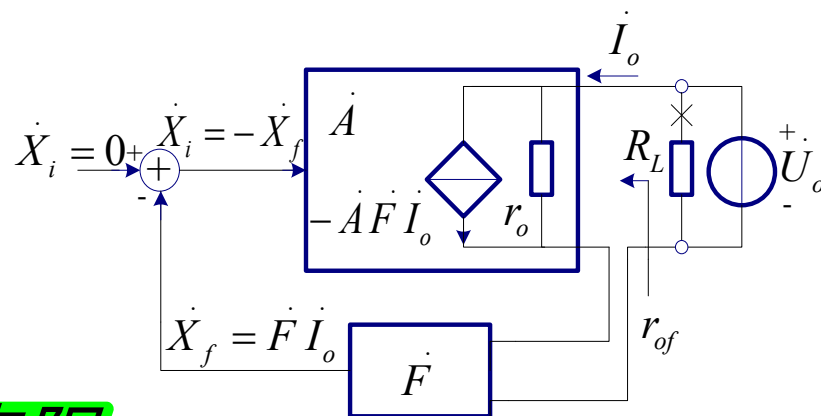
## 2.2 对输出电阻的影响

当电路为**电流负反馈**电路时,

同理可以证明电流负反馈闭环

输出电阻为  $R_{of} = (1 + AF)R_o$

**表明引入电流负反馈使得输出电阻增大到 $R_o$ 的 $(1 + AF)$ 倍。**



电流负反馈电路的方块图

电压负反馈时, 输出电阻小, 负载变化时, 负反馈放大电路的输出电压比较稳定, 具有恒压源特性。

电流负反馈时, 输出电阻大, 负载变化时, 负反馈电路的输出电流比较稳定, 具有恒流源特性。





## 输入电阻

串联负反馈提高输入电阻,  $r_{if} > r_i$ ,  
适用于输入信号为恒压源或近似恒压源的情况

并联负反馈降低输入电阻,  $r_{if} < r_i$ ,  
适用于输入信号为恒流源或近似恒流源的情况

## 输出电阻

电压负反馈降低输出电阻,  $r_{of} < r_o$ ,  
输出电压比较稳定, 具有恒压源特性

电流负反馈增加输出电阻,  $r_{of} > r_o$ ,  
输出电流比较稳定, 具有恒流源特性。



### 3.展宽通频带

由于引入负反馈后，各种原因引起的放大倍数的变化量都将减小，包括因信号频率变化而引起的放大倍数的变化，其效果是展宽了通频带；这是由闭环放大倍数的稳定性所决定的，比如原来放大倍数下降到3dB所对应的频率，由于引入负反馈后，此频率就不会下降到3dB了，从而使得通频带展宽。

**可以证明：引入负反馈后上限频率增大到基本放大电路的 $(1 + A_m F)$ 倍。下限频率降低到基本放大电路的 $(1 + A_m F)$ 分之一。**

一般情况下，由于 $f_H \gg f_L$ ，因此，基本放大电路及负反馈放大电路的通频带可近似表示为 $f_{bw} = f_H - f_L \approx f_H$   
引入负反馈使频带展宽到基本放大电路的 $(1 + AF)$ 倍

**注意：**通频带的展宽是以牺牲中频放大倍数为代价的。

# 4. 减小非线性失真

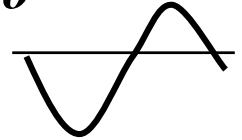


无负反馈

$u_i$



$u_o$

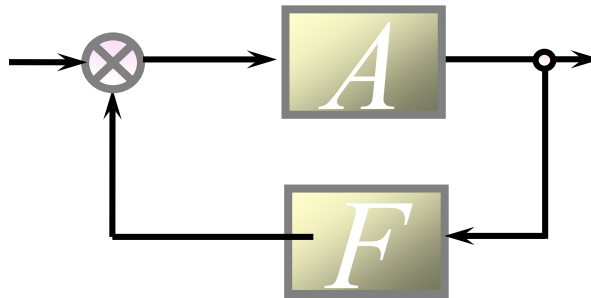


加入负反馈

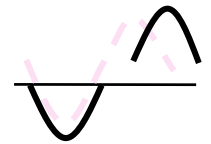
$u_i$

$u_d$

$u_f$



$u_o$



负反馈改善了波形失真



# 5.放大电路中引入负反馈的一般原则

(1) 稳定静态工作点，应引入直流负反馈；

改善电路的动态性能，应引入交流负反馈。

(2)根据信号源的性质决定引入串联负反馈或并联负反馈：

当信号源为恒压源或内阻较小的电压源时，为增大放大电路的输入电阻，以减小信号源的输出电流和内阻上的压降，应引入串联负反馈。

当信号源为恒流源或内阻很大的电流源时，为减小放大电路的输入电阻，使电路获得更大的输入电流，应引入并联负反馈。

(3)根据负载对放大电路输出量的要求，决定引入电压负反馈或电流负反馈：

当负载需要稳定的电压信号时，应引入电压负反馈；

当负载需要稳定的电流信号时，应引入电流负反馈。

(4)在需要进行信号变换时，选择合适的组态。

若将电流信号转换成电压信号，则应引入电压并联负反馈；

若将电压信号转换成电流信号，则应引入电流串联负反馈；

### 例8-9

为达到下列目的，分别说明应引入哪种组态的负反馈



- (1) 减小放大电路从信号源索取的电流并增强带负载能力
- (2) 将输入电流转换成与之成稳定线性关系的输出电流
- (3) 将输入电流转换成稳定的输出电压

**解：**

- (1) 电路需要增大输入电阻并减小输出电阻，故应引入电压串联负反馈。
- (2) 电路应引入电流并联负反馈。
- (3) 电路应引入电压并联负反馈。



补充:

要得到一个由电压控制的电流源, 应选\_\_\_\_\_反馈放大电路;

要得到一个有电流控制的电压源, 应选\_\_\_\_\_反馈放大电路;

如果信号源内阻很大, 为提高反馈效果, 应采用\_\_\_\_\_负反馈;

如果信号源内阻很小, 为提高反馈效果, 应采用\_\_\_\_\_负反馈