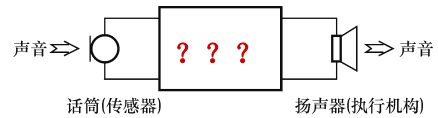


## 第5章 负反馈放大电路

- 5.1 反馈的基本概念与反馈的判别方法
- 5.2 负反馈放大电路的方框图
- 5.3 深度负反馈放大电路放大倍数的估算
- 5.4 负反馈对放大电路性能的影响
- 5.5 补修内容

### 小结

【知识点提醒】1) 反馈的判别；2) 深度负反馈的计算；3) 如何根据实际情况引反馈？



话筒(传感器) 扬声器(执行机构)

温度升高了，半导体元件参数变了！  
信号频率太宽了，放大倍数不一致了！

怎样保持放大电路还能正常稳定工作？保持不失真？

怎样提高放大电路的负载驱动能力？

怎样使放大电路容易被驱动？

怎样使输出电压稳定？或输出电流稳定？

引入负反馈！

你知道吗？

你想知道吗？

什么是负反馈？

负反馈能改善性能？改善哪些性能？

怎样引入负反馈？

### 5.1 反馈的基本概念与反馈的判别方法

#### 5.1.1 反馈的基本概念

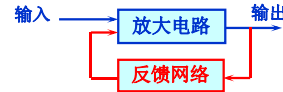
#### 5.1.2 反馈的类型及其判别

#### 5.1.1 反馈的基本概念

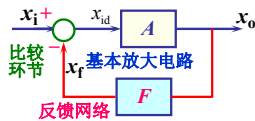
1. 反馈 — 将电路的输出量（电压或电流）的部分或全部，通过一定的元件，以一定的方式回送到输入回路并影响输入量（电压或电流）和输出量的过程。

#### 2. 信号的两种流向

正向传输：输入  $\Rightarrow$  输出 — 开环  
反向传输：输出  $\Rightarrow$  输入 — 闭环



### 3. 反馈放大电路的组成



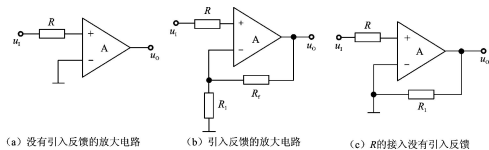
$x_i$  — 输入信号 ( $i_i$  或  $u_i$ )       $x_o$  — 输出信号 ( $i_o$  或  $u_o$ )  
 $x_{id}$  — 净输入信号 ( $i_{id}$  或  $u_{id}$ )       $x_f$  — 反馈信号 ( $i_f$  或  $u_f$ )

#### 5.1.2 反馈的类型及其判别

#### 1. 有无反馈的判断

有反馈 — 放大电路中存在反馈通路

例5-1 判断下列电路有无反馈



(a) 没有引入反馈的放大电路

(b) 引入反馈的放大电路

(c) R的接入没有引入反馈

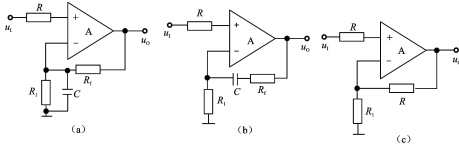
【问题思考】运放的两个净输入端是哪里？

2. 直流反馈和交流反馈的判断

**直流反馈** — 直流信号的反馈（在直流通道中存在的反馈）。

**交流反馈** — 交流信号的反馈（在交流通道中存在的反馈）。

例5-2 判断下列电路是否引入了反馈；引入的是直流反馈还是交流反馈？



3. 本级反馈与级间反馈的判断

**本级反馈** — 反馈信号取自本级输出，回送到本级的输入回路。

**级间反馈** — 反馈信号取自后一级输出，回送到前一级的输入回路。

**整体反馈** — 反馈信号取自最后一级输出，回送到最前一级的输入回路。

4. 反馈极性的判断

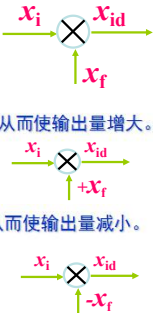
**正反馈和负反馈判别法：**  
**瞬时极性法**

**正反馈** — 反馈使净输入电量增加，从而使输出量增大。

$$x_{id} > x_i$$

**负反馈** — 反馈使净输入电量减小，从而使输出量减小。

$$x_{id} < x_i$$



4. 反馈极性的判断

**正反馈和负反馈**      **判别法：瞬时极性法**

**正反馈** — 反馈使净输入电量增加，从而使输出量增大。

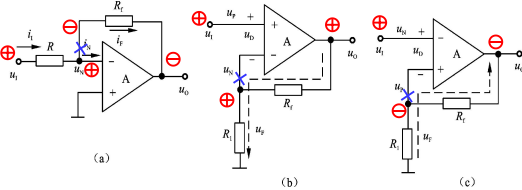
**负反馈** — 反馈使净输入电量减小，从而使输出量减小。

输入信号和反馈信号在输入端的同一点叠加，两者瞬时极性相同为正反馈，瞬时极性相反为负反馈。

输入信号和反馈信号在输入端的同一点叠加，两者瞬时极性相同为负反馈，瞬时极性相反为正反馈。

【知识点提醒】一定要会判断反馈极性！

例5-3 判断下图电路的反馈极性。



负反馈

负反馈

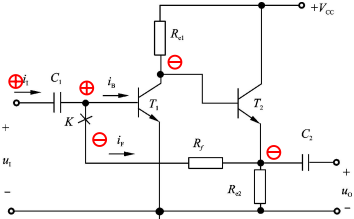
正反馈

输入信号和反馈信号接在同一输入端，瞬时极性相反。

输入信号和反馈信号接在不同输入端，瞬时极性相同。

输入信号和反馈信号接在不同输入端，瞬时极性相反。

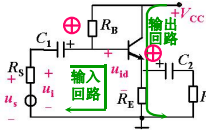
例5-4 判断下图电路的反馈极性。



负反馈

【问题引导】为什么集电极电位与基极电位相位相反？  
为什么发射极电位与基极电位相位相同？

**例A** 判断电路是否存在反馈。是正反馈还是负反馈？直反馈还是交流反馈？

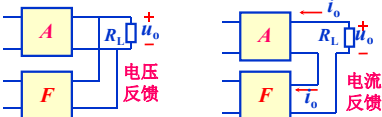


$R_E$  介于输入输出回路，有反馈。  
反馈信号从发射极接入输入端  
反馈使  $u_{id}$  减小，为负反馈。  
既有直流反馈，又有交流反馈。

**5. 电压反馈和电流反馈的判断**

**电压反馈** — 反馈信号取自输出电压的部分或全部。

**判别法：**使  $u_o = 0$  ( $R_L$  短路)，若反馈消失，则为电压反馈。



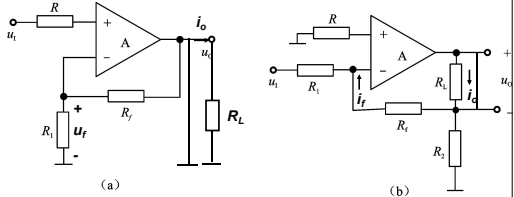
**电流反馈** — 反馈信号取自输出电流。

**判别法：**使  $i_o = 0$  ( $R_L$  开路)，若反馈消失则为电流反馈。  
或 令  $u_o = 0$ ，反馈仍然存在。

**输出短路法（负载短路法）：**

令  $u_o = 0$ ，若 { ① 反馈量 = 0，则为电压反馈  
② 反馈量  $\neq 0$ ，则为电流反馈

**例5-5** 判断下列电路引入的是电压反馈还是电流反馈？



用输出短路法：  $u_o = 0$  时反馈消失，故为电压反馈

用输出短路法：  $u_o = 0$  时反馈仍然存在，故为电流反馈

**6. 串联反馈和并联反馈的判断**

**串联反馈：**反馈信号与输入信号以电压相加减的形式在输入端出现。

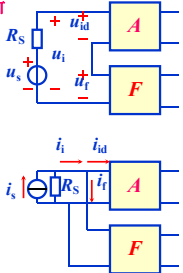
$u_{id} = u_i - u_f$   
(反馈信号为电压信号)

**特点：**信号源内阻越小，反馈效果越明显。

**并联反馈：**反馈信号与输入信号以电流相加减的形式在输入端出现。

$i_{id} = i_i - i_f$   
(反馈信号为电流信号)

**特点：**信号源内阻越大，反馈效果越明显。

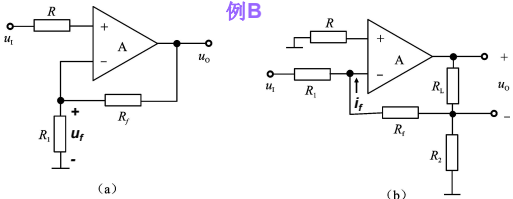


**串联反馈：**

反馈信号与原输入信号接在放大器的两个不同输入端

**并联反馈：**

反馈信号与原输入信号接在放大器的同一输入端



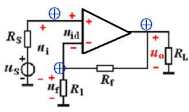
为串联反馈

为并联反馈

负反馈的4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

**例 C 电压串联负反馈** 一定要判断反馈组态！必考！



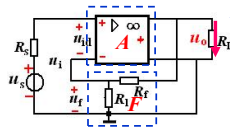
$u_i$  经  $R_f$  与  $R_1$  分压反馈到输入回路，故有反馈。

反馈使净输入电压  $u_{id}$  减小，为负反馈。

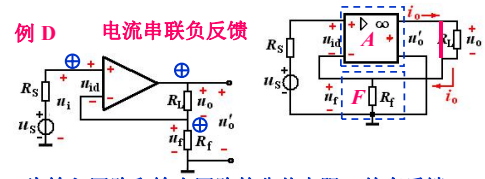
$R_L = 0$ ，无反馈，故为电压反馈。

$u_f = u_o R_1 / (R_1 + R_f)$  也说明是电压反馈。

$u_{id} = u_i - u_f$  故为串联反馈。



**例 D 电流串联负反馈**



$R_f$  为输入回路和输出回路的公共电阻，故有反馈。

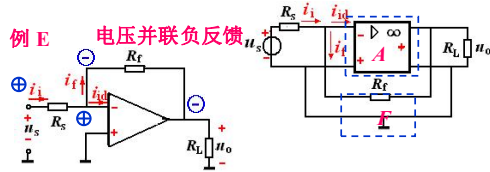
反馈使净输入电压  $u_{id}$  减小，为负反馈。

$R_L = 0$ ，反馈存在，故为电流反馈。

$u_f = i_o R_f$ ，也说明是电流反馈。

$u_{id} = u_i - u_f$  故为串联反馈。

**例 E 电压并联负反馈**



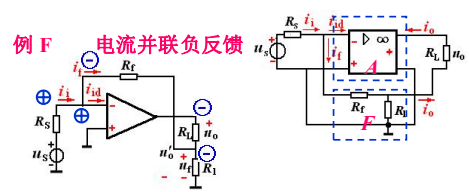
$R_f$  为输入回路和输出回路的公共电阻，故有反馈。

反馈使净输入电流  $i_{id}$  减小，为负反馈。

$R_L = 0$ ，无反馈，故为电压反馈。

$i_{id} = i_i - i_f$ ，故为并联反馈。

**例 F 电流并联负反馈**



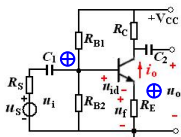
$R_f$  介于输入回路和输出回路，故有反馈。

反馈使净输入电流  $i_{id}$  减小，为负反馈。

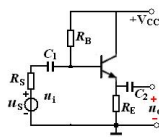
$R_L = 0$ ，反馈存在，故为电流反馈。

$i_{id} = i_i - i_f$ ，故为并联反馈。

**例 G 反馈类型的判断**



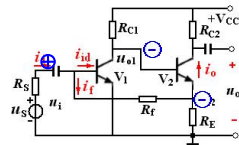
电流串联负反馈



电压串联负反馈

【问题引导】三极管放大电路的两个净输入端是指哪里？

**例 H**



$R_f$ —引入级间电流并联负反馈。

规律：

反馈信号与输入信号在不同节点为串联反馈，在同一个节点为并联反馈。

反馈取自输出端或输出分压端为电压反馈，反馈取自非输出端为电流反馈。

5.2 负反馈放大电路的方框图

5.2.1 负反馈放大电路的方框图及一般表达式

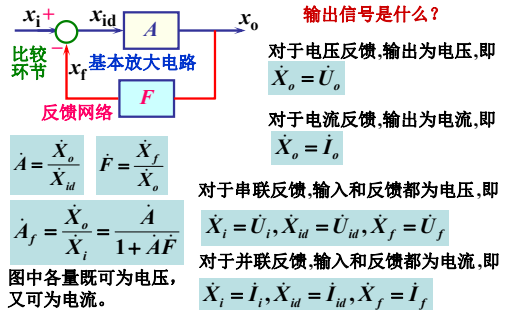
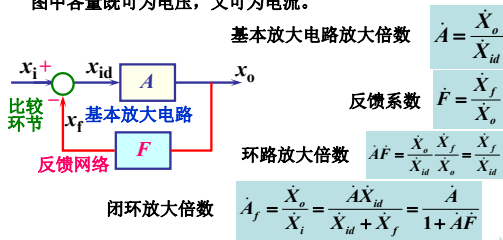
5.2.2 负反馈放大电路四种组态的方框图

在一个带反馈的放大电路中，放大电路本身和反馈网络是紧密相连、混为一体的。但是，为了突出反馈的作用，分析反馈对放大电路的影响，我们又希望把反馈放大电路分解为两部分：一是不带反馈的“基本放大电路”，二是“反馈网络”。所以能这样做，依据的是所谓“信号单方向作用的假定”。

5.2.1 负反馈放大电路的方框图及一般表达式

1. 负反馈放大电路的方框图

图中各量既可为电压，又可为电流。



输入信号是什么？反馈信号是什么？净输入信号是什么？

只有确定这些量具体为电压还是电流，才能套用这些公式！

2. 闭环增益的一般表达式

在上图中，输出量与输入量之比叫做反馈放大电路的“闭环增益”，即它和开环增益A有着本质的区别。

所以可得：

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

这就是反馈放大电路中闭环增益与开环增益的一般表达式。

3. 反馈深度

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

可得：  $\left| \frac{\dot{A}}{\dot{A}_f} \right| = |1 + \dot{A}\dot{F}|$

量  $|1 + \dot{A}\dot{F}|$  是开环增益与闭环增益幅值之比，它自然反映了反馈对放大电路的影响程度。我们把它叫做“反馈深度”。

1) 如果  $|1 + \dot{A}\dot{F}| > 1$  , 则  $\dot{A}_f < \dot{A}$  。这就是**负反馈**的情况, 因为它表示反馈的引入削弱了输入量的作用, 使闭环增益下降。

因为 
$$\dot{X}_{id} = \frac{\dot{X}_i}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

可见负反馈的作用是使真正加到放大电路输入端的净输入量减小到无反馈时的

$$\frac{1}{|1 + \dot{A}\dot{F}|} , \text{ 从而使闭环增益下降。}$$

2) 如果  $|1 + \dot{A}\dot{F}| < 1$  , 则  $\dot{A}_f > \dot{A}$  。这是**正反馈**的情况, 表明反馈的引入加强了输入量的作用, 使闭环增益加大。

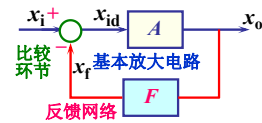
3) 当  $|1 + \dot{A}\dot{F}| = 0$  时, 闭环增益  $\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} \rightarrow \infty$  。这意味着即使没有输入量也仍然有输出量。这种工作状态叫做放大电路的“**自激**”。在自激时, 放大电路已失去正常的放大功能, 因而一般是必须加以消除的。但是, 有时又要对自激状态加以利用。

4) 当  $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$  时, 就变为  $\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \approx \frac{1}{\dot{F}}$  ,

说明此时反馈放大电路的闭环增益将只取决于反馈系数。因为反馈网络通常由无源元件组成, 这些元件性能非常稳定, 所以在这种情况下反馈放大电路的工作也将非常稳定, 不受除输入量以外的干扰因素的影响。因为  $\dot{A}\dot{F} \gg 1$  ,

$|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$  , 所以叫做“**深度反馈**”。

反馈深度讨论结论:



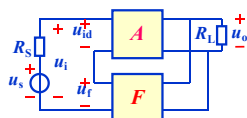
$$\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_{id}} \quad \dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

$$\text{反馈深度 } |1 + \dot{A}\dot{F}| \begin{cases} > 1, |\dot{A}_f| < |\dot{A}|, \text{负反馈} \\ < 1, |\dot{A}_f| > |\dot{A}|, \text{正反馈} \\ = 0, |\dot{A}_f| \rightarrow \infty, \text{自激振荡} \end{cases}$$

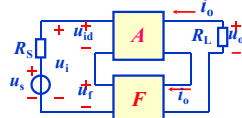
深度负反馈条件下闭环放大倍数的表达式

$$|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1 \text{ 时 } \dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$$

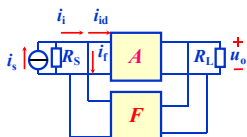
### 5.2.2 四种反馈组态的方框图



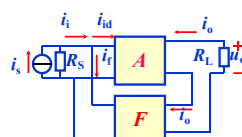
电压串联负反馈



电流串联负反馈



电压并联负反馈



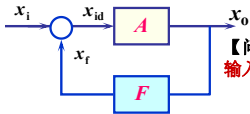
电流并联负反馈

### 5.3 深度负反馈放大电路放大倍数的估算

#### 5.3.1 深度负反馈的实质

#### 5.3.2 四种组态负反馈放大电路放大倍数分析

5.3.1 深度负反馈的实质



【问题思考】深度负反馈时，  
输入信号与反馈信号的关系？  
净输入量=？

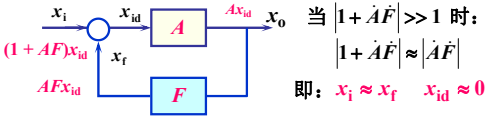
1. 深度负反馈的实质

当  $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$  时，  $\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \approx \frac{1}{\dot{F}}$

而  $\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$   $\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$

所以  $\dot{X}_i \approx \dot{X}_f$  或  $\dot{X}_{id} \approx 0$

2. 深度负反馈时集成运放电路的特点



当  $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$  时：  
 $|1 + \dot{A}\dot{F}| \approx |\dot{A}\dot{F}|$   
即：  $x_i \approx x_f$   $x_{id} \approx 0$

(1) 深度串联负反馈：

$$\begin{cases} u_i \approx u_f \\ u_{id} \approx 0 \end{cases} \quad \text{虚短}$$

深度负反馈时，  
输入信号 $\approx$ 反馈信号！  
净输入量 $\approx 0$ ！

(2) 深度并联负反馈：

$$\begin{cases} i_i \approx i_f \\ i_{id} \approx 0 \end{cases} \quad \text{虚断}$$

输入信号是什么？  
反馈信号是什么？  
净输入信号是什么？

3. 深度负反馈条件下放大倍数的计算方法

(1) 利用  $\dot{A}_f = \frac{1}{\dot{F}}$  求解 (先求F, 后求 $\dot{A}_p$ , 再求 $\dot{A}_{uf}$ )

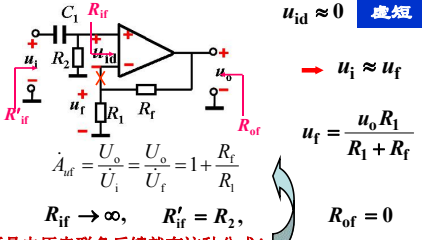
(2) 利用“虚短”与“虚断”的概念求解 $\dot{A}_f$ 及 $\dot{A}_{uf}$  (推荐方法)

5.3.2 深度负反馈放大倍数分析

(1) 电压串联负反馈

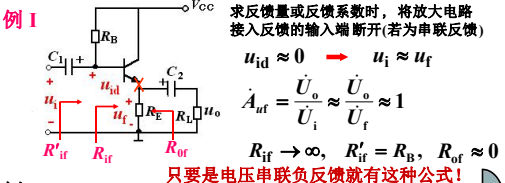
解：  
为电压串联负反馈

例 5.6 ( $C_1$ 视为短路)



只要是电压串联负反馈就有这种公式！

例 I



为什么？  
求反馈量或反馈系数时，将放大电路接入反馈的输入端断开(若为串联反馈)

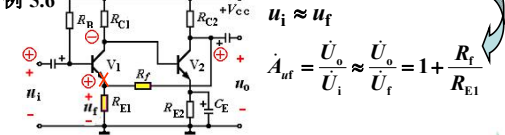
$$u_{id} \approx 0 \rightarrow u_i \approx u_f$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} \approx 1$$

$$R_{if} \rightarrow \infty, R'_{if} = R_B, R_{of} \approx 0$$

只要是电压串联负反馈就有这种公式！

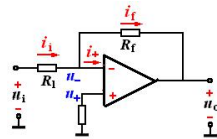
例 5.6



带有负反馈的放大电路，不要用微变等效电路法！

(2) 电压并联负反馈

例 J



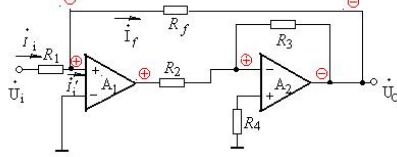
$$i_- \approx i_+ \approx 0 \quad \text{虚断} \rightarrow i_i \approx i_f$$

$$u_- \approx u_+ = 0 \quad \text{虚地}$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{-i_f R_f}{i_i R_1} = -\frac{R_f}{R_1}$$

运算放大器在线性应用时同时存在虚短和虚断

例 5-8

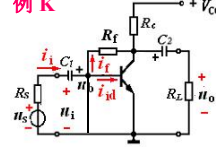


$$i_- \approx i_+ \approx 0 \quad \text{虚断} \quad i_1 \approx i_f$$

$$u_- \approx u_+ = 0 \quad \text{虚地} \quad u_o = -i_f R_f$$

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} \approx \frac{-i_f R_f}{i_1 R_1} = -\frac{R_f}{R_1}$$

例 K



为什么?

求反馈量或反馈系数时, 将放大电路接入反馈的输入端对地短路(若为并联反馈)

$$i_f = -\frac{u_o}{R_f}$$

$$u_o = -R_f i_f$$

由于  $i_i = i_f, i_{id} \rightarrow 0, R_s$  很大, 放大电路的输入电阻很小 (并联负反馈减小输入电阻)

可以认为  $u_s$  几乎全部降落在电阻  $R_s$  上.

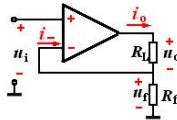
$$i_{id} \approx 0 \quad \text{虚断} \rightarrow i_i \approx i_f$$

$$u_s = R_s i_i = R_s i_f$$

$$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \approx -\frac{R_f}{R_s}$$

## (3) 电流串联负反馈

例 L



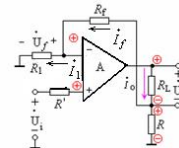
$$u_{id} \approx 0 \quad \text{虚短} \quad i_- \approx 0 \quad \text{虚断}$$

$$u_i \approx u_f \approx i_o R_f = \frac{u_o}{R_L} R_f$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R_L}{R_f}$$

## (3) 电流串联负反馈

例 5-7

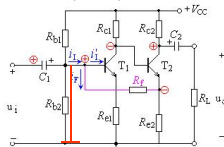


$$u_i \approx u_f \approx i_f R_1 = \frac{R}{R + R_f + R_1} \frac{u_o}{R_L} R_1$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{(R + R_f + R_1) R_L}{R R_1}$$

## (4) 电流并联负反馈

例 5-9(选讲)



$$i_i \approx i_f$$

$$i_i' \approx 0$$

虚断

$$u_o = -(R_{e2} // R_L) i_o = (R_{e2} // R_L) \frac{R_{e2} + R_f}{R_{e2}} i_f$$

$$u_i = ? (\text{与 } i_f \text{ 的关系?}) \quad \dot{A}_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = ?$$

对于并联负反馈, 输入是电流, 求的是  $A_{us}$ !

为什么?

求反馈量或反馈系数时, 将放大电路接入反馈的输入端对地短路(若为并联反馈)

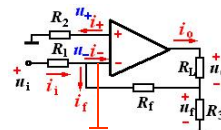
$$i_f = -\frac{R_{e2}}{R_{e2} + R_f} i_o$$

$$\dot{F} = \frac{i_f}{i_o} = -\frac{R_{e2}}{R_{e2} + R_f}$$

$$i_o = -\frac{R_{e2} + R_f}{R_{e2}} i_f$$

## (4) 电流并联负反馈

例 5-9



$$u_+ \approx u_- = 0 \quad \text{虚短}$$

$$i_i \approx i_f$$

虚断

求反馈量或反馈系数时, 将放大电路接入反馈的输入端对地短路(若为并联反馈)

$$i_f = -\frac{R_3}{R_3 + R_f} i_o$$

$$i_o = -\frac{R_3 + R_f}{R_3} i_f$$

$$u_o = R_L i_o = -R_L \frac{R_3 + R_f}{R_3} i_f$$

$$u_i = R_1 i_f$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-(R_3 + R_f)}{R_1 R_3} R_L$$



## 5.4 负反馈对放大电路性能的影响

### 5.4.1 提高闭环放大倍数的稳定性

### 5.4.2 改善输入和输出电阻

### 5.4.3 展宽放大电路的通频带

### 5.4.4 减小非线性失真与抑制环内干扰

### 5.4.5 放大电路引入负反馈的一般原则

### 5.4.1 提高闭环放大倍数的稳定性

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

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

$A_f$  的相对变化量

$A$  的相对变化量

$$\text{负反馈, } 1+AF > 1 \therefore \frac{dA_f}{A_f} < \frac{dA}{A}$$

放大倍数稳定性提高

**例 M**  $A=10^3$ , 负反馈使放大倍数稳定性提高 100 倍, 求  $F$ 、 $A_f$ 、 $A$  变化  $\pm 10\%$  时的  $A'_f$ , 以及  $dA_f/A_f$ 。

**解:** 1)  $1+AF=100$ , 则  $F=(100-1)/A=0.099$

$$2) A_f = \frac{A}{1+AF} = 10^3/100 = 10$$

$$3) \frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1+AF} \frac{dA}{A} = \frac{1}{100} (\pm 0.1) \approx \pm 0.1\%$$

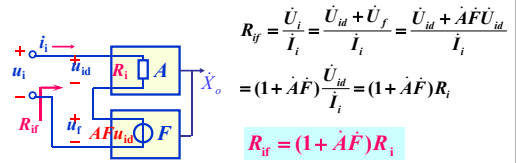
$$\text{此时的 } A'_f = A_f(1 + \frac{dA_f}{A_f}) = 10(1 \pm 0.1\%)$$

负反馈以牺牲放大倍数, 换取了放大倍数稳定性的提高。

### 5.4.2 改善输入电阻和输出电阻

#### 一、对输入电阻的影响

##### 1. 串联负反馈增大输入电阻

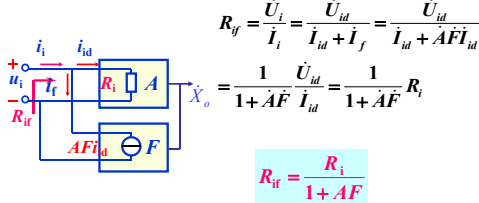


深度负反馈:  $R_{if} \rightarrow \infty$

【问题引导】串联负反馈增大输入电阻, 好还是不好? 为什么?

好! 减小了输入电压源的负担!

##### 2. 并联负反馈减小输入电阻



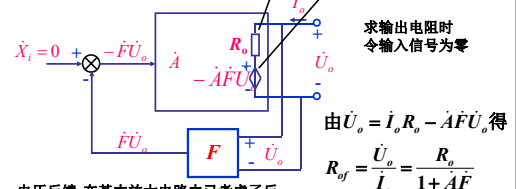
深度负反馈:  $R_{if} \rightarrow 0$

【问题引导】并联负反馈减小输入电阻, 好还是不好? 为什么?

好! 减小了输入电流源的负担!

#### 二、对输出电阻的影响

##### 1. 电压负反馈减小输出电阻



电压反馈: 在基本放大电路中已考虑了反馈网络的负载效应, 即反馈网络的输入电阻已包含在  $A$  和  $R_i$  中, 认为电压反馈的反馈网络不向放大器的输出端索取输入电流。

深度负反馈:  $R_{of} \rightarrow 0$

电压负反馈的放大电路输出为电压信号!



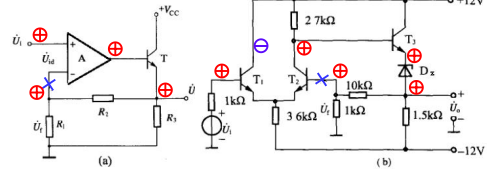
负反馈对噪声、干扰和温漂的影响

对外来噪声和干扰，负反馈 **无能为力**。

对**内部**噪声和干扰，由于引起非线性失真，而负反馈又能减小非线性失真，故负反馈对内部噪声、干扰有**抑制**作用。

负反馈对噪声、干扰和温漂的影响的原理与减少非线性失真的原理相同。

例 5-10 (1)反馈组态？(2)对输入、输出电阻的影响？(3)闭环增益、电压放大倍数？



(1)电压串联负反馈

(1)电压串联负反馈

(2)增加输入电阻  
减小输出电阻

(2)增加输入电阻  
减小输出电阻

(3)  $\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \dot{A}_f = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

(3)  $\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \dot{A}_f = 1 + \frac{10}{1} = 11$

【问题思考】差动放大电路的两个净输入端是？

#### 5.4.5 放大电路引入负反馈的一般原则

一、欲稳定某个量，则引该量的负反馈

稳定**直流**，引**直流**反馈； 稳定**交流**，引**交流**反馈；

稳定**输出电压**，引**电压**反馈； 稳定**输出电流**，引**电流**反馈。

稳定**静态工作点**，引**直流**反馈； 改善**动态性能**，引**交流**反馈；

二、根据对输入、输出电阻的要求选择反馈类型

欲**提高**输入电阻， 采用**串联**反馈；

欲**降低**输入电阻， 采用**并联**反馈；

【问题引导】如何根据实际要求引反馈？

要求**高内阻**输出，

采用**电流**反馈；

要求**低内阻**输出，

采用**电压**反馈。

三、为使反馈效果强，根据信号源及负载确定反馈类型

信号源为恒压源，

采用串联反馈；

信号源为恒流源，

采用并联反馈；

要求负载能力强，

采用电压反馈；

要求恒压源输出，

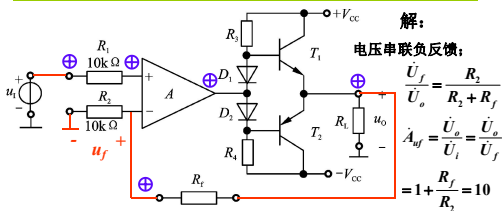
采用电压反馈。

要求恒流源输出，

采用电流反馈。

【问题引导】什么情况下引入什么反馈？  
如何构图？怎样连线？

例5-11 下图所示电路，1) 合理连线，接入信号源和反馈，使电路输入电阻增大，输出电阻减少；2) 若  $A_{uf} = 10$ ，则  $R_f$  应取多少？



解：

电压串联负反馈：

$$\frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{R_2}{R_2 + R_f}$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f}$$

$$= 1 + \frac{R_f}{R_2} = 10$$

$$R_f = 90k\Omega$$

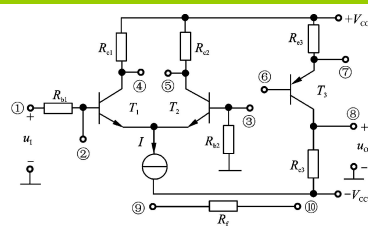
【思路】怎样接成电压反馈？

(令  $u_o = 0$ ，若反馈消失)

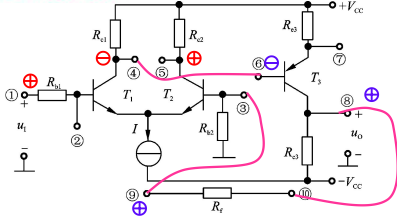
怎样接成负反馈？采用瞬时极性推法！

怎样接成串联反馈？反馈信号与输入信号接到不同输入端！

例5-12 为达到下列目的，分别说明应引入哪种组态的负反馈以及电路的连接。1) 减少放大电路从信号源索取的电流并增强带负载能力；2) 将输入电压转换成与之成稳定线性关系的输出电流；3) 将输入电流转换成与之成稳定线性关系的输出电流；4) 将输入电流转换成稳定的输出电压。

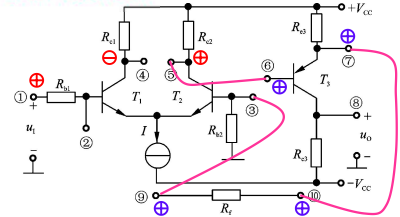


- 1) 减少放大电路从信号源索取的电流并增强带负载能力;  
**电压串联负反馈**



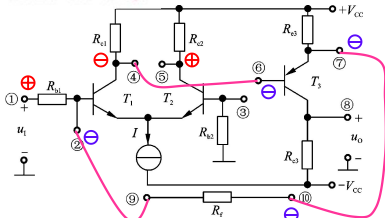
【思路】怎样接成电压反馈？（令  $u_o = 0$ ，若反馈消失）  
怎样接成串联反馈？反馈信号与输入信号接到不同输入端！  
怎样接成负反馈？采用瞬时极性倒推法！

- 2) 将输入电压转换成与之成稳定线性关系的输出电流;  
**电流串联负反馈**



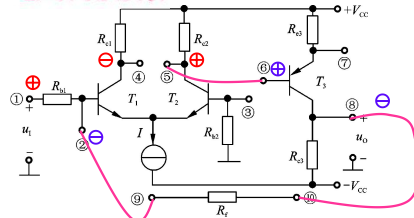
【思路】怎样接成电流反馈？（令  $u_o = 0$ ，若反馈仍然存在）  
怎样接成串联反馈？反馈信号与输入信号接到不同输入端！  
怎样接成负反馈？采用瞬时极性倒推法！

- 3) 将输入电流转换成与之成稳定线性关系的输出电流;  
**电流并联负反馈**



【思路】怎样接成电流反馈？（令  $u_o = 0$ ，若反馈仍然存在）  
怎样接成并联反馈？反馈信号与输入信号接到同一输入端！  
怎样接成负反馈？采用瞬时极性倒推法！

- 4) 将输入电流转换成稳定的输出电压。  
**电压并联负反馈**



【思路】怎样接成电压反馈？（令  $u_o = 0$ ，若反馈消失）  
怎样接成并联反馈？反馈信号与输入信号接到同一输入端！  
怎样接成负反馈？采用瞬时极性倒推法！

补充：负反馈放大电路的稳定性（消除自激振荡）

#### 一、自激振荡的现象

$$u_i = 0 \quad \boxed{A} \quad u_o \quad \text{自激振荡} \quad u_i \quad \boxed{A} \quad u_o \quad \text{自激振荡}$$

#### 二、产生自激振荡的条件和原因

1. 自激条件  $A_f = \frac{A}{1 + AF}$  当  $|1 + AF| = 0$

$$\begin{cases} |AF| = 1 & \text{— 幅度条件} \\ \varphi_{AF} = \varphi_A + \varphi_F = \pm(2n+1)\pi & \text{— 相位条件} \end{cases}$$

$$\varphi_A \text{ — } A \text{ 的附加相移} \quad \varphi_F \text{ — } F \text{ 的附加相移}$$

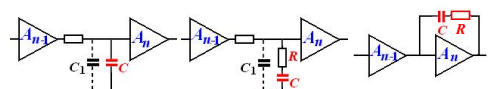
2. 自激的原因 附加相移  $\varphi_{AF}$  使负反馈  $\rightarrow$  正反馈

#### 3. 消除自激的方法 — 相位补偿（知识扩充）

在电路中加入  $C$ ，或  $R$ 、 $C$  元件进行相位补偿，改变电路的高频特性，从而破坏自激条件。

相位补偿形式  $\begin{cases} \text{滞后补偿} \\ \text{超前补偿} \end{cases}$   $\begin{cases} \text{电容滞后} \\ \text{RC 滞后} \end{cases}$   $\begin{cases} \text{超前补偿} \\ \text{米勒效应补偿} \end{cases}$

电容滞后补偿  $\quad RC$  滞后补偿  $\quad$  米勒效应补偿



本章小结

【本章知识点结构】

- (1) 反馈的判别——判；
- (2) 深度负反馈的计算——算；
- (3) 如何根据实际情况引反馈——引？

【本章要点】

一、反馈的判断方法

1. 有无反馈：主要看信号有无反向传输通路。

2. 正反馈和负反馈

采用瞬时极性法，看反馈是增强还是削弱净输入信号。

反馈信号与输入信号在 **同一点叠加** 极性**不同**为**负反馈**；  
极性**相同**为**正反馈**。

反馈信号与输入信号在 **不同点叠加**，与上述结论**相反**。

3. 交流负反馈的4种组态

电压串联，电压并联，电流串联，电流并联

电压和电流反馈：

规则：令  $u_o=0$ ，**反馈消失**则为**电压反馈**，  
**反馈存在**为**电流反馈**。

串联和并联反馈：

规则：

串联负反馈： $u_{id} = u_i - u_f$

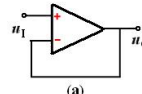
并联负反馈： $i_{id} = i_i - i_f$

规律：

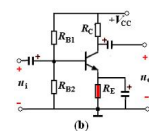
反馈信号与输入信号在**不同节点**为**串联反馈**；

反馈信号与输入信号在**同一个节点**为**并联反馈**。

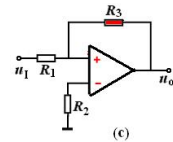
练习 1:



电压串联  
交、直流负反馈

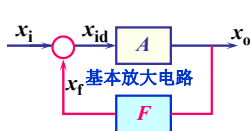


交流电流串联  
直流负反馈



正反馈

二、负反馈放大电路的方框图和基本关系



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

— 负反馈方程

$$|1 + \dot{A}F| \gg 1$$

— 深度负反馈

三、深度负反馈的实质

串联负反馈：  $\begin{cases} u_i \approx u_f \\ u_{id} \approx 0 \end{cases}$  虚短

并联负反馈：  $\begin{cases} i_i \approx i_f \\ i_{id} \approx 0 \end{cases}$  虚断

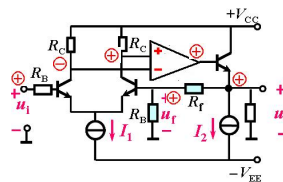
四、深度负反馈放大电路电压放大倍数的计算方法

(1) 利用  $\dot{A}_f = \frac{1}{F}$  求解 (先求  $F$ ，后求  $A_f$ ，再求  $A_{uf}$ )

(2) 利用“虚短”与“虚断”的概念求解  $A_f$  及  $A_{uf}$  (推荐方法)

## 练习 2:

## 电压串联负反馈



$$u_i \approx u_f$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = 1 + \frac{R}{R_B}$$

## 五、负反馈对放大电路性能的影响

1. 提高增益的稳定性
2. 减少失真和扩展通频带
3. 对输入电阻和输出电阻的影响

串联负反馈使输入电阻增大

并联负反馈使输入电阻减小

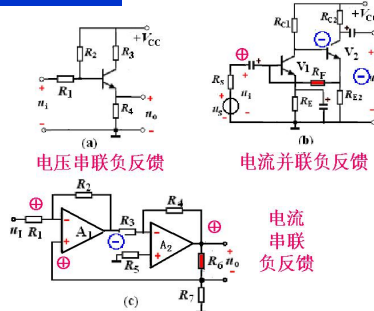
电压反馈使输出电阻减小 (稳定了输出电压)

电流反馈使输出电阻增大 (稳定了输出电流)

## 【本章基本要求】

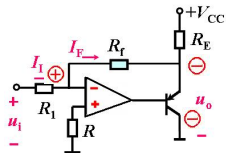
- ① 能够正确判断电路中是否引入反馈及反馈的性质；
- ② 熟练掌握反馈组态及其判别方法；
- ③ 熟练掌握深度负反馈条件下闭环电压放大倍数的计算；
- ④ 正确理解负反馈对放大电路性能的影响；
- ⑤ 能够根据实际要求合理在电路中引入反馈；
- ⑥ 简单了解自激振荡的条件；

## 课外练习 1:



## 课后练习 2:

## 电压并联负反馈



$$I_i \approx I_f = \frac{u_i}{R_1}$$

$$u_o = -I_f R_f = -\frac{u_i R_f}{R_1}$$

$$\dot{A}_{uf} = -\frac{R_f}{R_1}$$