



模拟电子技术基础

反馈放大电路与振荡电路

雷 飞

010-67392914

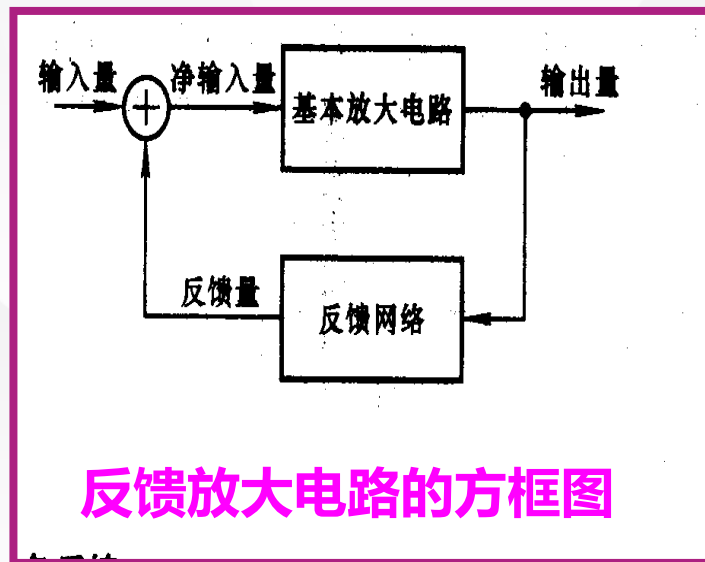
leifei@bjut.edu.cn

7.1 负反馈概述

一、反馈的基本概念

在电子设备中经常采用反馈的方法来改善电路的性能，以达到预定的指标。

放大电路中的**反馈**，是指将放大电路输出电量(输出电压或输出电流)的一部分或全部，通过一定的方式，反送回输入回路中。



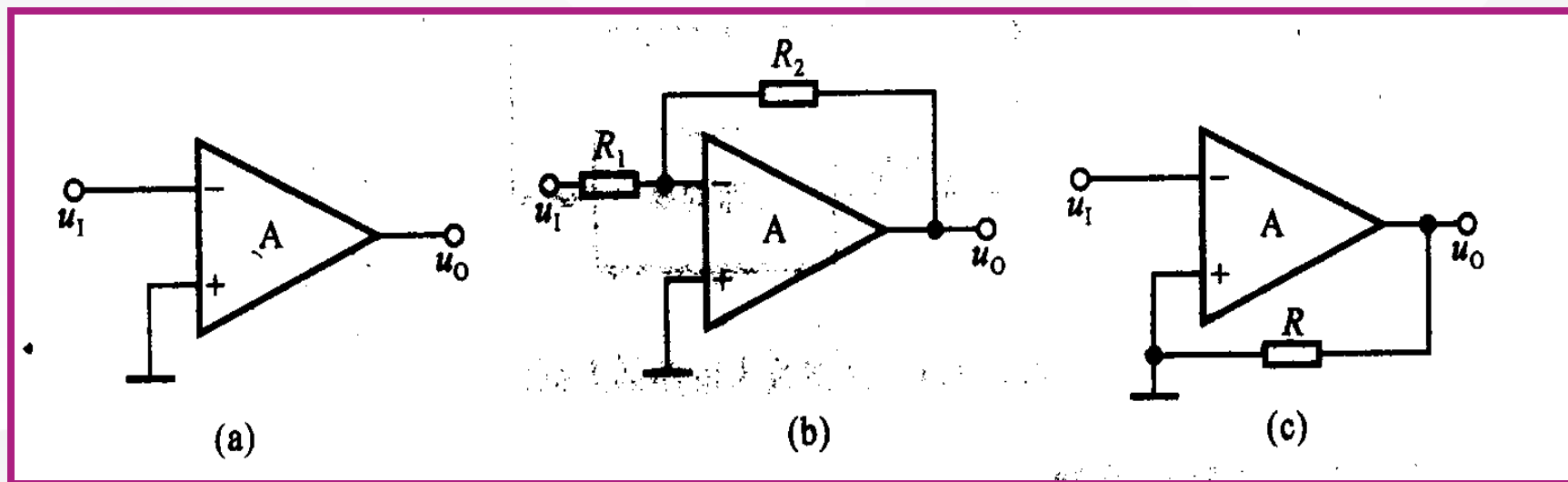
07 反馈放大电路与振荡电路

一、反馈的基本概念

1. 有无反馈的判断

是否有联系输入、输出回路的反馈通路；

是否影响放大电路的净输入。



(a)没引入反馈的放大电路 (b)引入反馈的放大电路 (c) R的接入没引入反馈

07 反馈放大电路与振荡电路

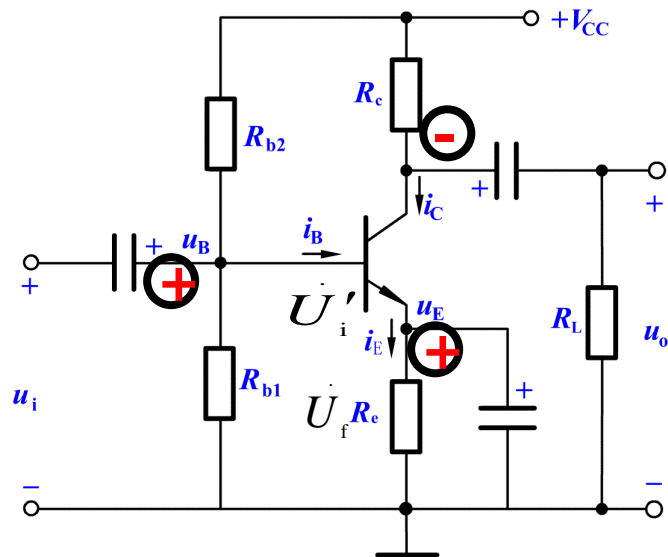
二、正反馈和负反馈

反馈信号增强了外加净输入信号，使放大电路的放大倍数提高 —— **正反馈**

反馈信号削弱了外加净输入信号，使放大电路的放大倍数降低 —— **负反馈**

$$\dot{U}'_i = \dot{U}_i - \dot{U}_f$$

负反馈
稳定静态工作点



➤ 07 反馈放大电路与振荡电路

反馈极性的判断方法：**瞬时极性法**。

先假定某一瞬间输入信号的极性，然后按信号的放大过程，逐级推出输出信号的瞬时极性，最后根据反馈回输入端的信号对原输入信号的作用，判断出反馈的极性。

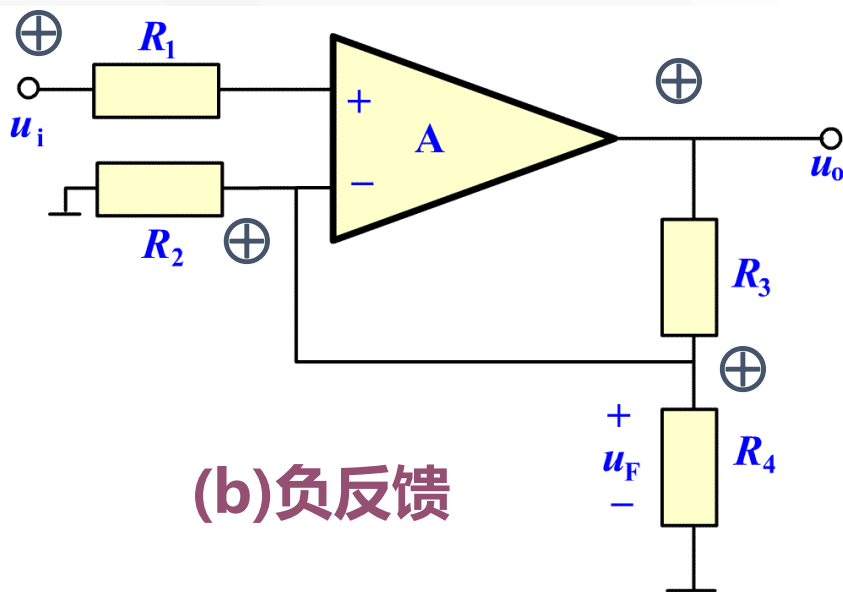
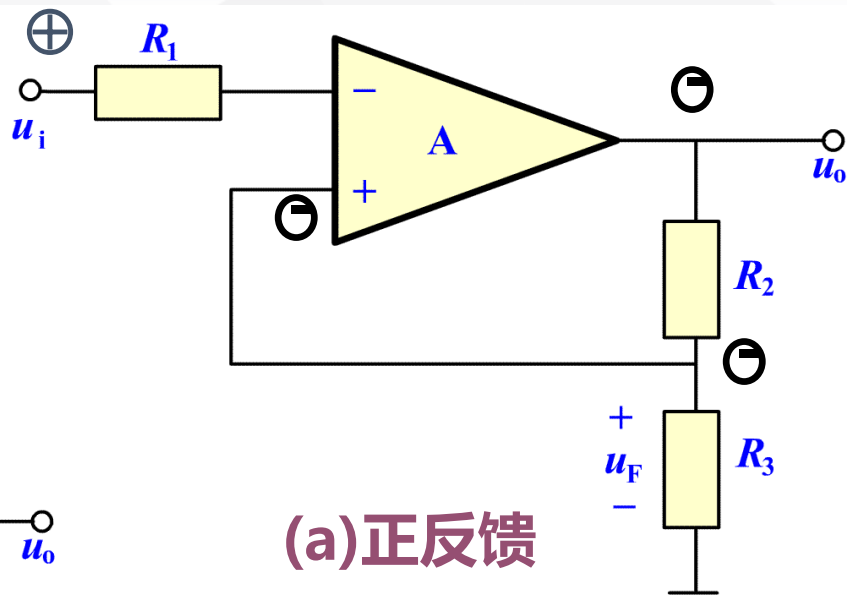
对分立元件而言，C与B极性相反，E与B极性相同。

对集成运放而言， u_o 与 u_N 极性相反， u_o 与 u_P 极性相同。

07 反馈放大电路与振荡电路

例：用瞬时极性法判断电路中的反馈极性。

因为**差模**输入电压等于**输入**电压与**反馈**电压之差，反馈增强了输入电压，所以为**正反馈**。

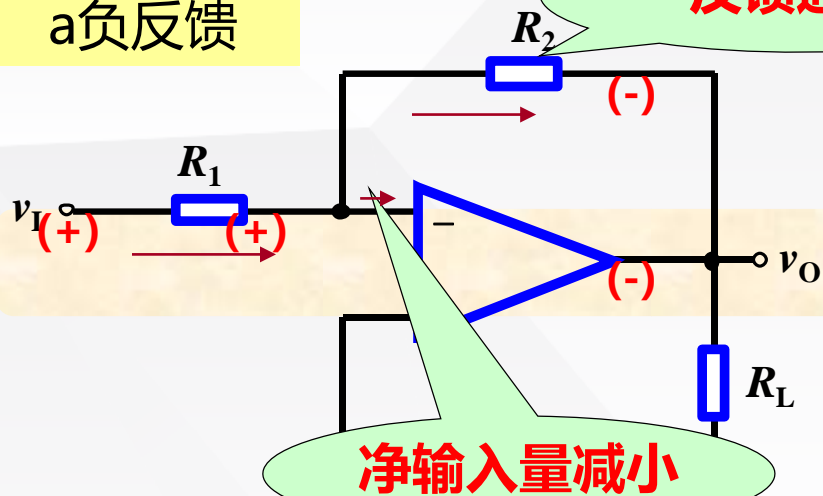


反馈信号削弱了输入信号，因此为**负反馈**。

07 反馈放大电路与振荡电路

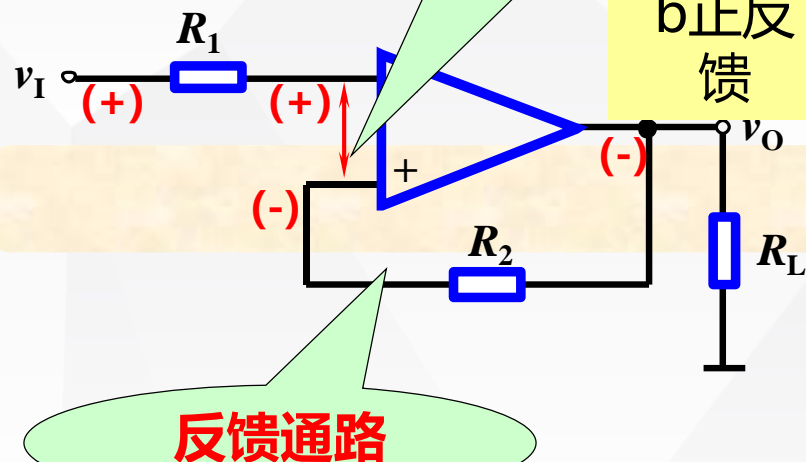
例

a 负反馈



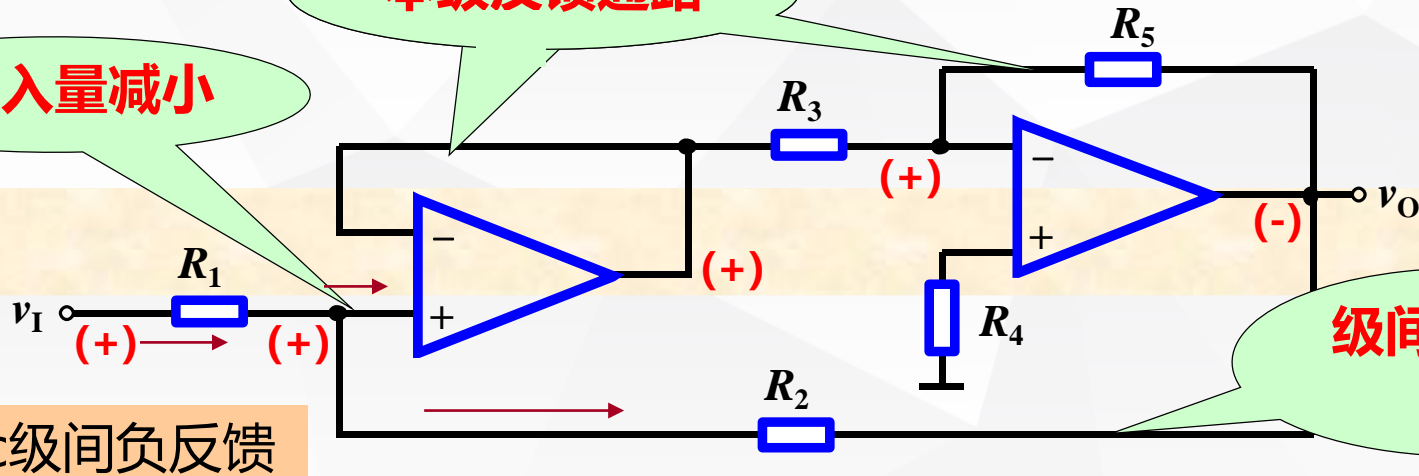
净输入量增加

b 正反馈



净输入量减小

本级反馈通路



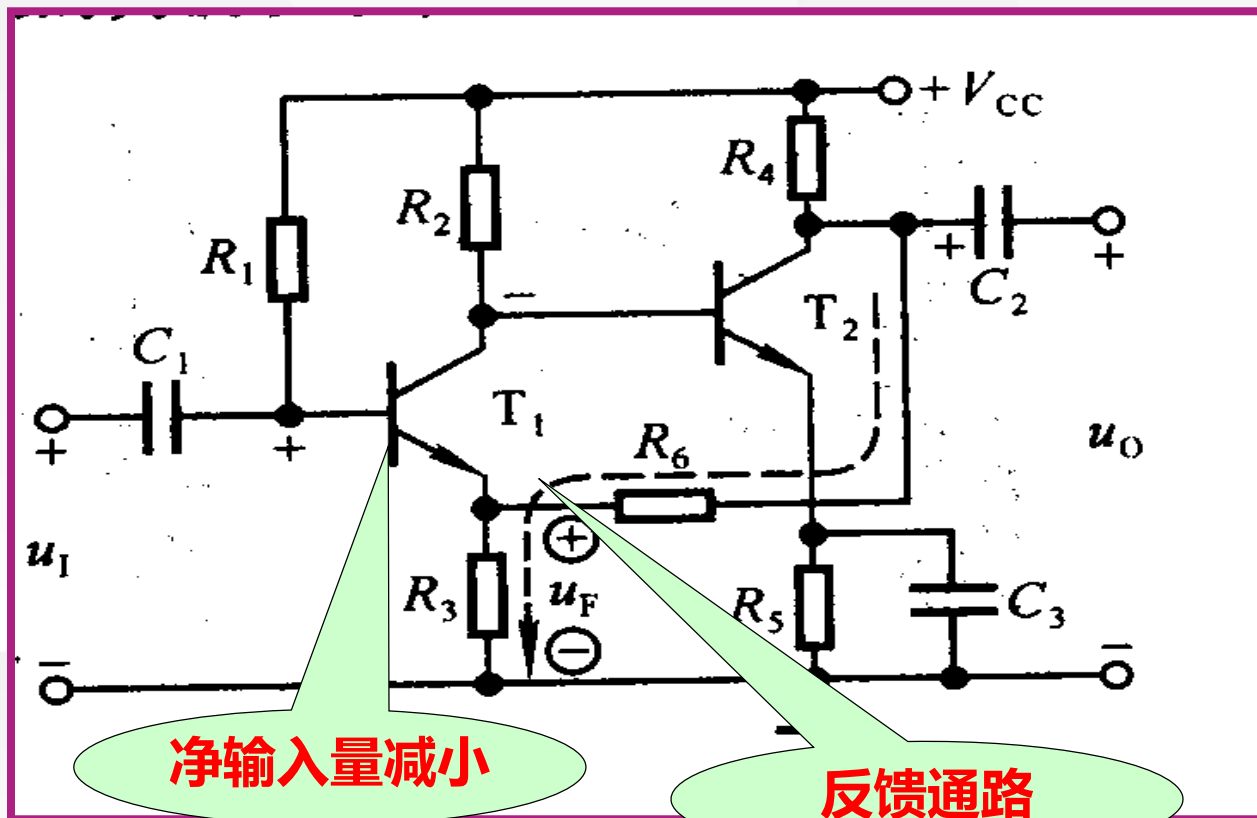
c 级间负反馈

级间反馈通路

07 反馈放大电路与振荡电路

分立元件电路反馈极性的判断

原则：对分立元件而言，C与B极性相反，E与B极性相同。

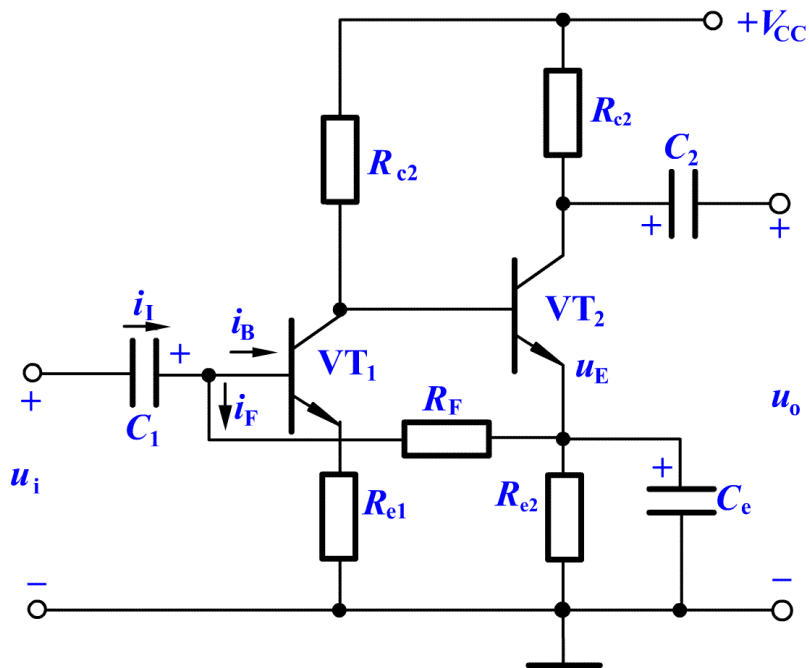


负反馈

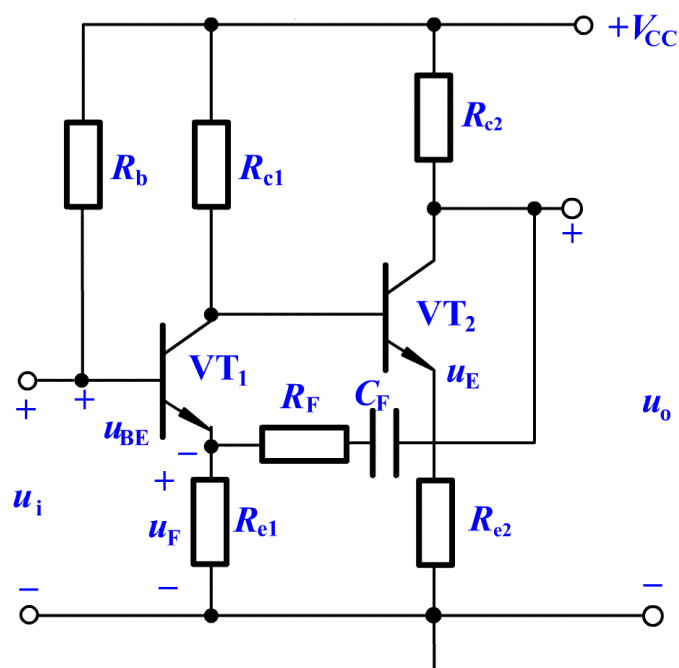
分立元件放大电路反馈极性的判断

07 反馈放大电路与振荡电路

三、直流反馈和交流反馈



(a) 直流负反馈



(b) 交流负反馈

直流负反馈：可稳定静态工作点。

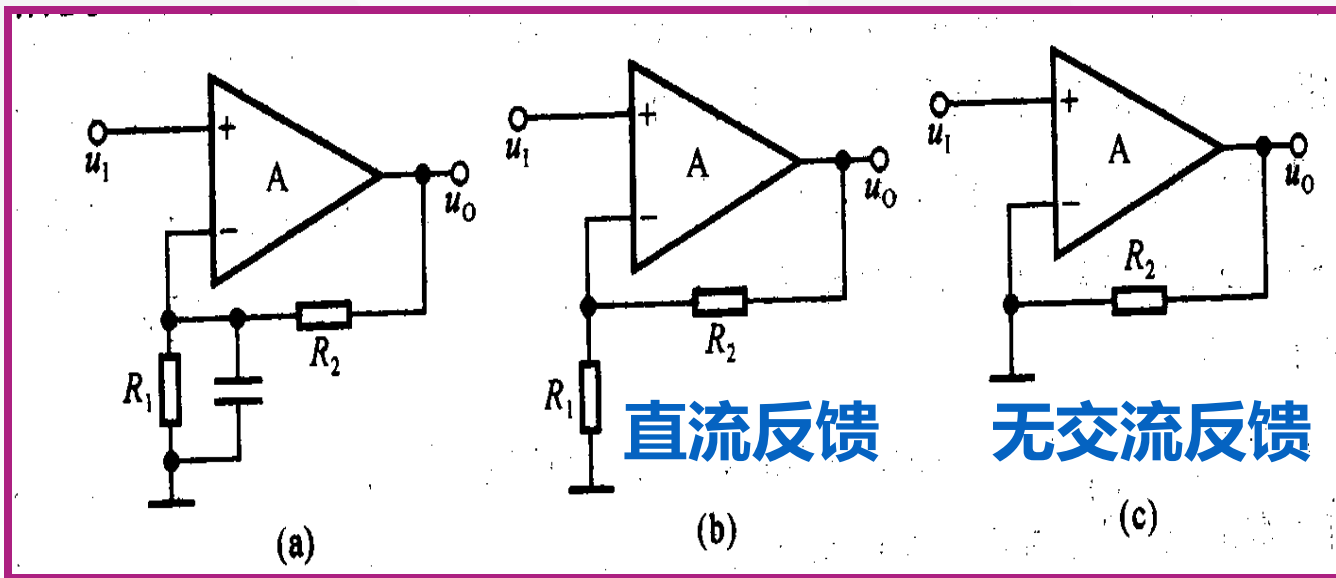
交流负反馈：反馈量只含有交流量。

用以改善放大电路的性能。

07 反馈放大电路与振荡电路

判断：直流负反馈： 反馈量只含有直流量。

交流负反馈： 反馈量只含有交流量。



直流反馈与交流反馈的判断 (一)

(a) 电路

(b) 直流通路

(c) 交流通路

四、负反馈放大电路的四种组态

(1) 从输出端看，反馈量是取自于输出电压，还是取自于输出电流。

反馈信号取自输出电压，则为**电压反馈**

反馈信号取自输出电流，则为**电流反馈**

(2) 从输入端看，反馈量与输入量是以电压方式相叠加，还是以电流方式相叠加。

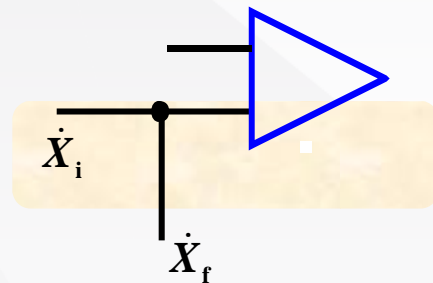
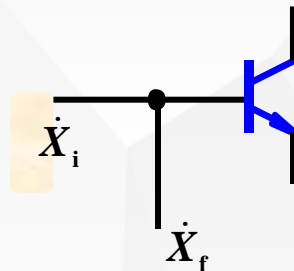
反馈量与输入量以电压形式求和，为**串联反馈**

反馈量与输入量以电流形式求和，为**并联反馈**

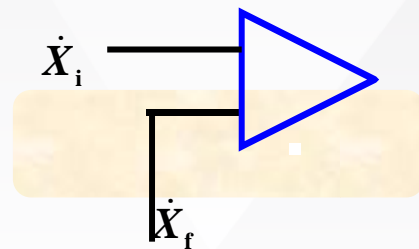
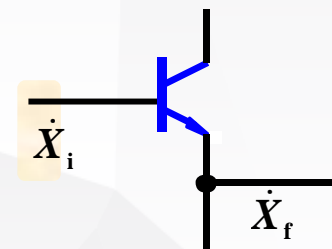
07 反馈放大电路与振荡电路

反馈组态的判断

并联：反馈量 \dot{X}_f 和 输入量 \dot{X}_i 接于同一输入端。



串联：反馈量 \dot{X}_f 和 输入量 \dot{X}_i 接于不同的输入端。

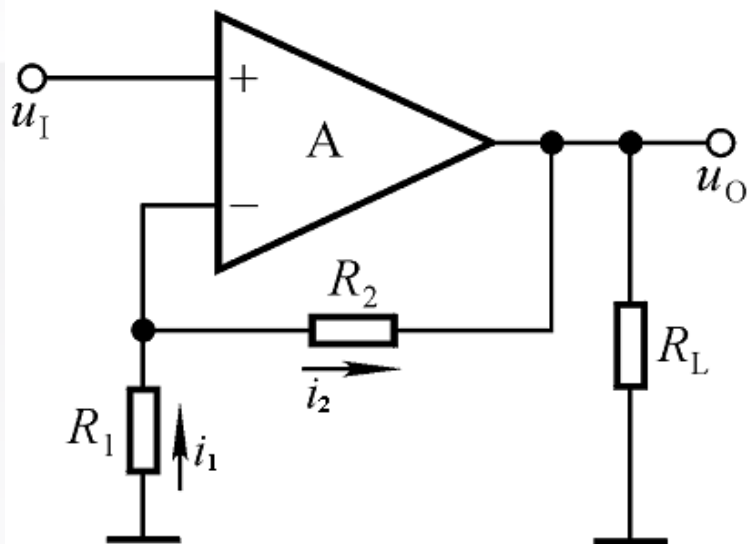


电压：将**负载**短路，反馈量为零。

电流：将**负载**短路，反馈量仍然存在。

07 反馈放大电路与振荡电路

1、同相输入比例运放

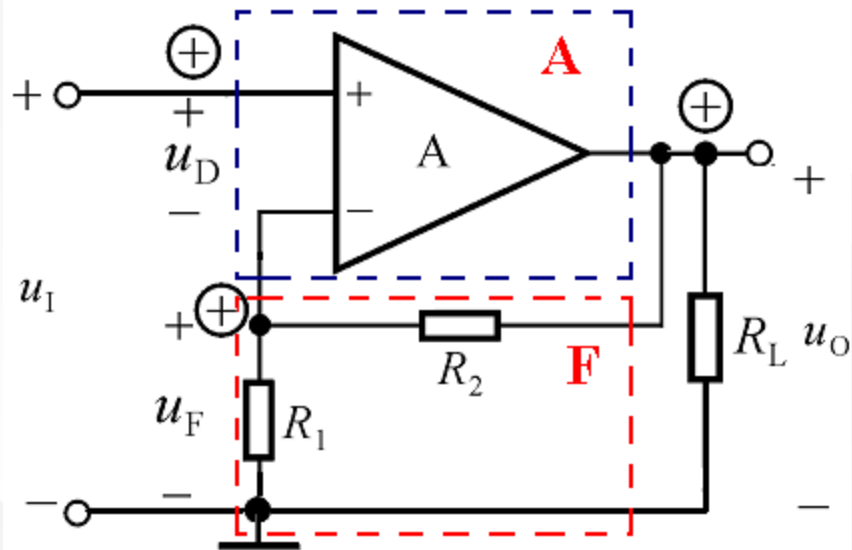


虚短: $u_N = u_P = u_I$

虚断: $i_1 = i_2$ 即: $\frac{0 - u_I}{R_1} = \frac{u_I - u_O}{R_2}$

所以: $u_O = (1 + \frac{R_2}{R_1})u_I$

电压串联负反馈



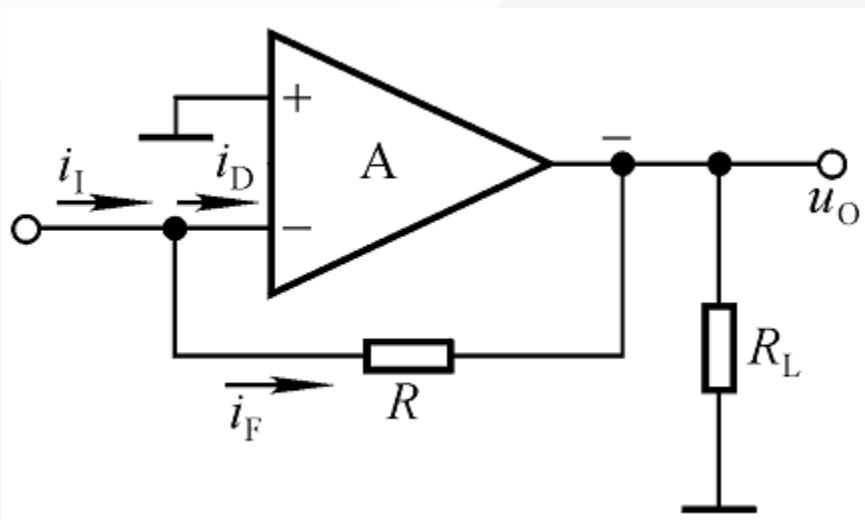
$$u_F = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_O \quad \text{——电压反馈}$$

$$u_I = u_D + u_F \quad \text{——串联反馈}$$

净输入电压减小——负反馈

07 反馈放大电路与振荡电路

2、I/V转换器

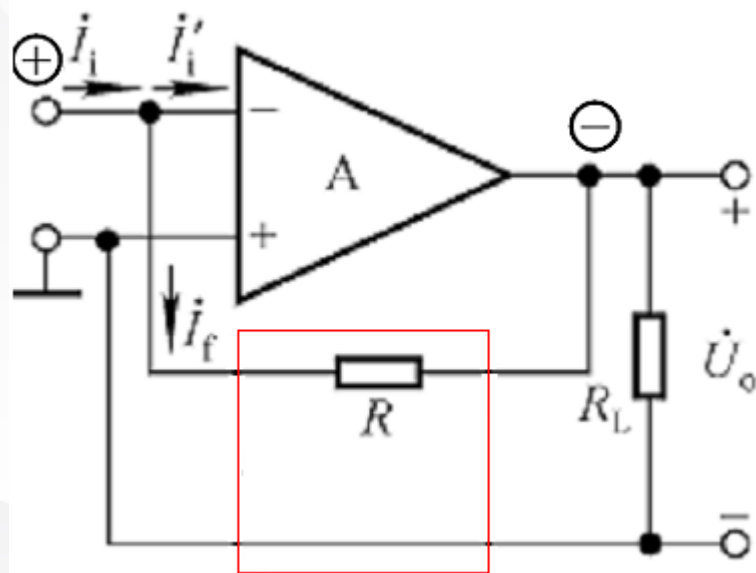


虚短: $u_N = u_P = 0$

虚断: $i_I = i_F$ 即: $i_I = \frac{0 - u_O}{R}$

所以: $u_O = -Ri_I$

电压并联负反馈



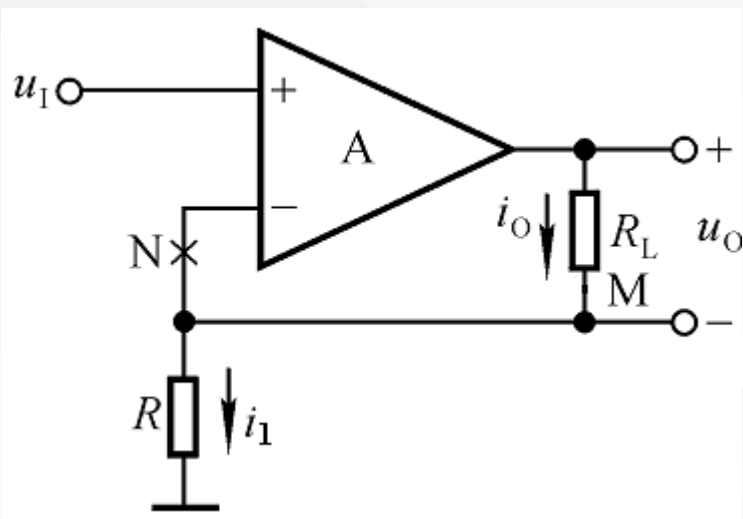
$$\dot{I}_f = -\frac{\dot{U}_O}{R} \quad \text{——电压反馈}$$

$$\dot{I}_i = \dot{I}_f + \dot{I}_i' \quad \text{——并联反馈}$$

净输入电流减小——负反馈

07 反馈放大电路与振荡电路

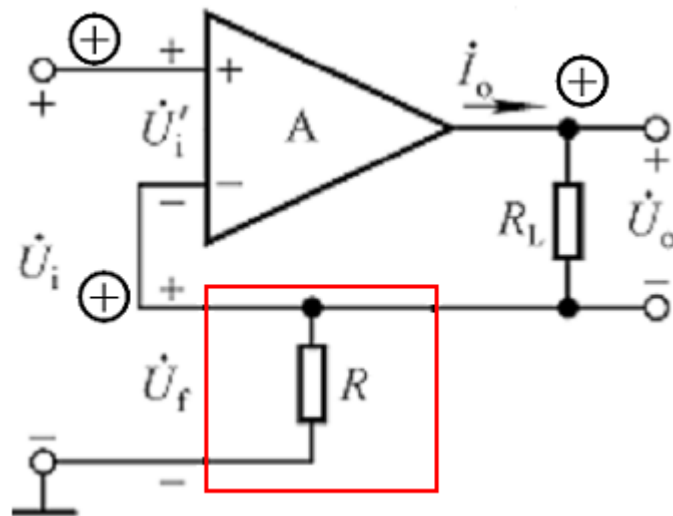
3、V/I转换器



虚短: $u_N = u_P = u_I$

虚断: $i_1 = i_O$ 即: $i_O = \frac{u_I}{R}$

电流串联负反馈



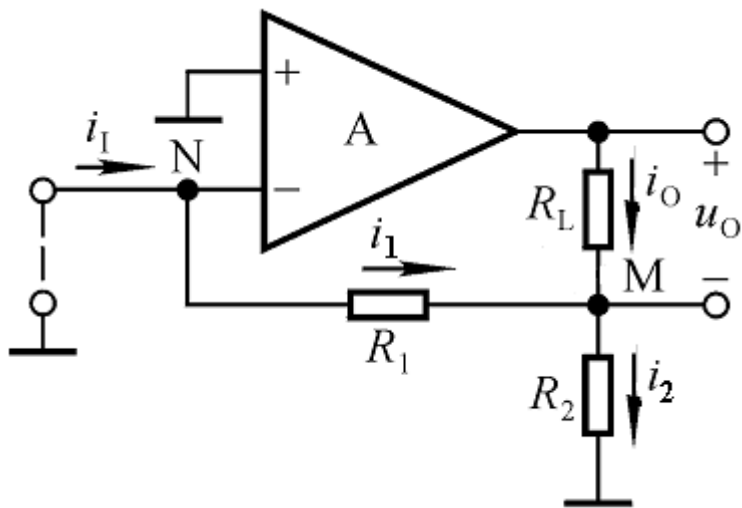
$\dot{U}_f = R\dot{I}_O$ —— 电流反馈

$u_I = u_D + u_F$ —— 串联反馈

净输入电压减小 —— 负反馈

07 反馈放大电路与振荡电路

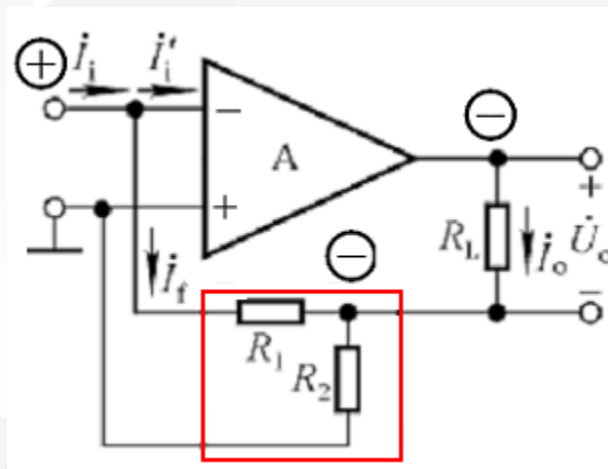
4、电流放大电路



$$u_M = -i_I R_1 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} i_o$$

$$i_o = -(1 + \frac{R_1}{R_2}) i_I$$

电流并联负反馈



$$i_f = -\frac{R_2}{R_1 + R_2} i_o \quad \text{—— 电流反馈}$$

$$i_i = i_f + i_i' \quad \text{—— 并联反馈}$$

净输入电流减小——负反馈

四种负反馈组态的放大倍数

电压串联负反馈电路

电压放大倍数 $\dot{A}_{uuf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$

电流串联负反馈电路

转移电导 $\dot{A}_{iuf} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i} (\text{S})$

电压并联负反馈电路

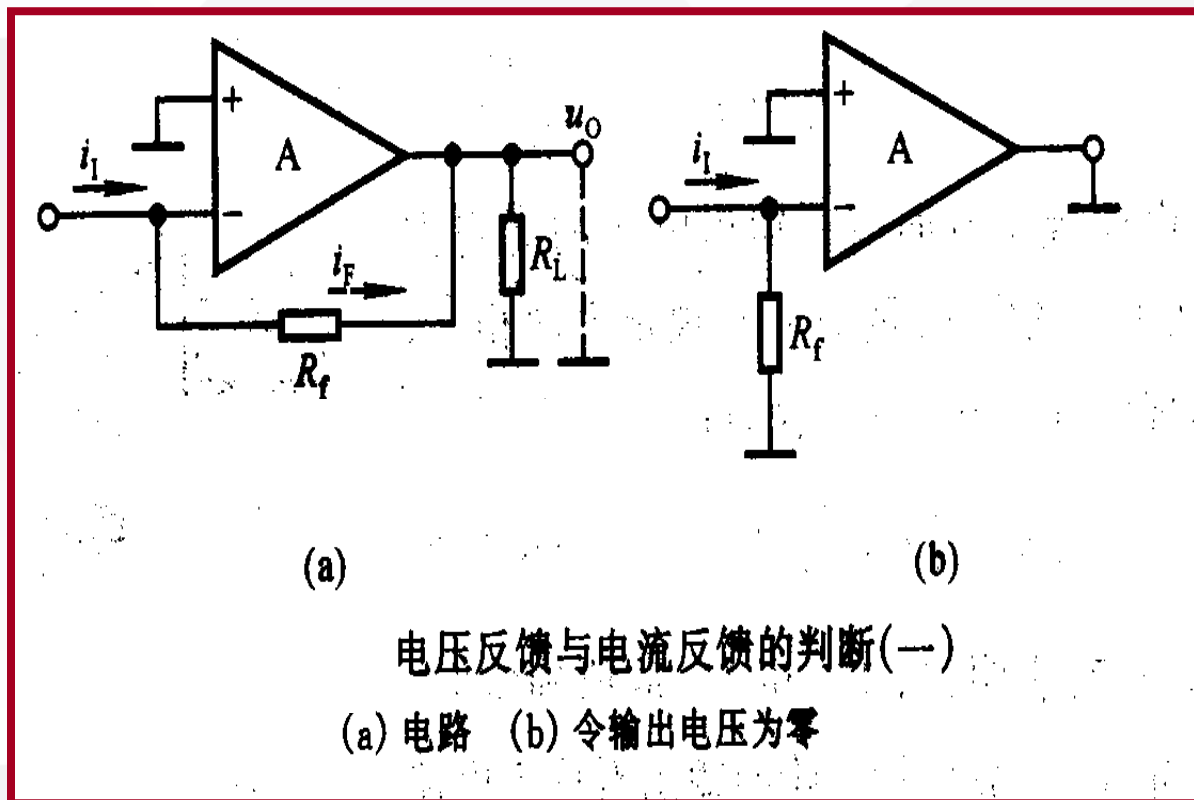
转移电阻 $\dot{A}_{uif} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} (\Omega)$

电流并联负反馈电路

电流放大倍数 $\dot{A}_{ii} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$

07 反馈放大电路与振荡电路

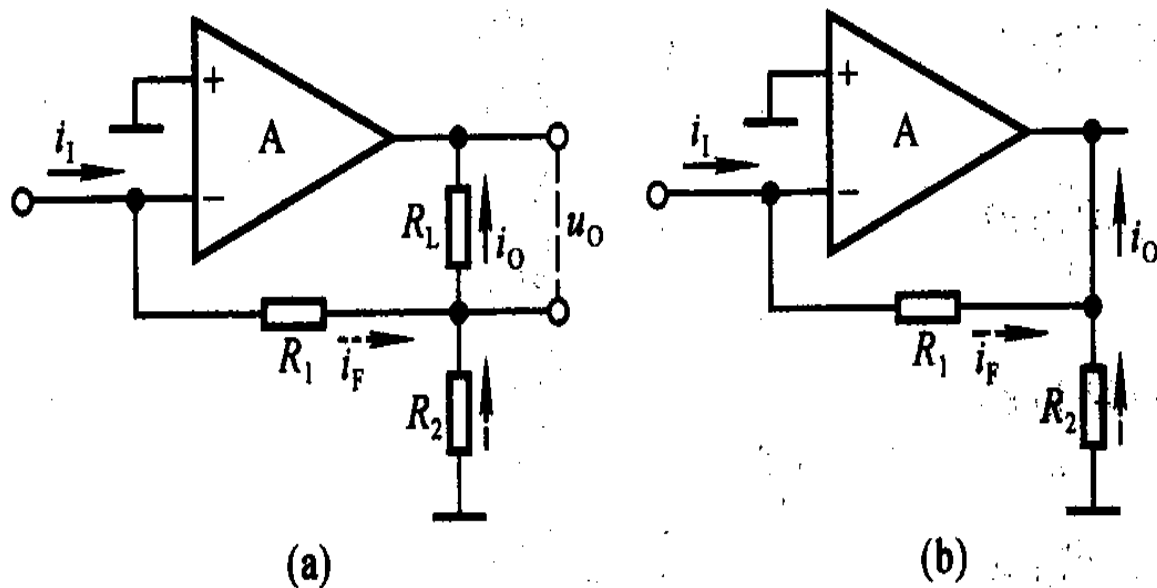
例



令输出电压为零，反馈电流不存在，所以是
电压负反馈

07 反馈放大电路与振荡电路

例



电压反馈与电流反馈的判断(二)

(a) 电路 (b) 令输出电压为零

令输出电压为零，反馈电流仍存在，所以是
电流负反馈

07 反馈放大电路与振荡电路

[例] 判断反馈的组态。

反馈通路：**T、 R_2 与 R_1**

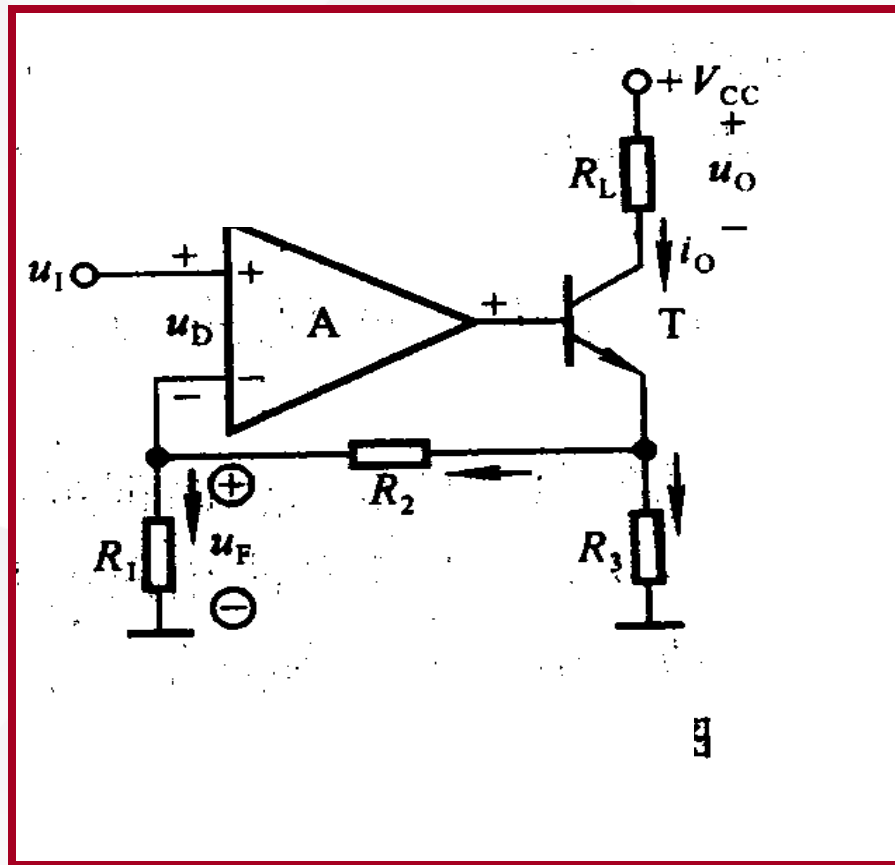
交、直流反馈

瞬时极性法判断：**负**反馈

输出端看：**电流**负反馈

输入端看：**串联**负反馈

电路引入交、直流电流串联负反馈



07 反馈放大电路与振荡电路

[例] 判断反馈的组态。

反馈通路： T_3 、 R_4 与 R_2

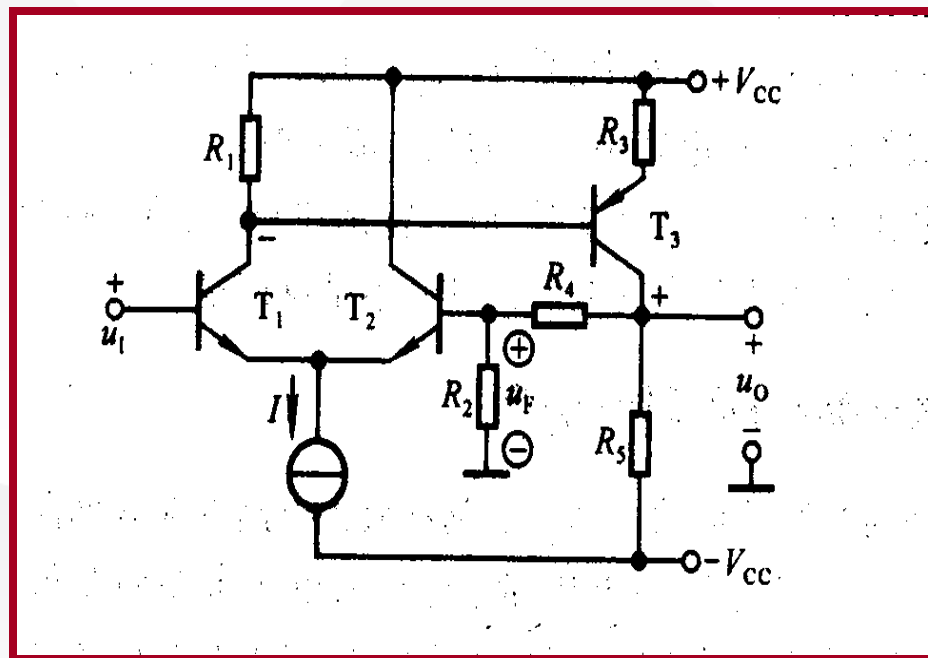
交、直流反馈

瞬时极性法判断：**负**反馈

输出端看：**电压**负反馈

输入端看：**串联**负反馈

电路引入交、直流电压串联负反馈



7.2 负反馈放大电路的分析

一、负反馈放大电路的基本放大电路

为了使信号的传递单向化，将反馈网络作为放大电路输入端和输出端的等效电阻。

等效原则

反馈网络等效到输入端

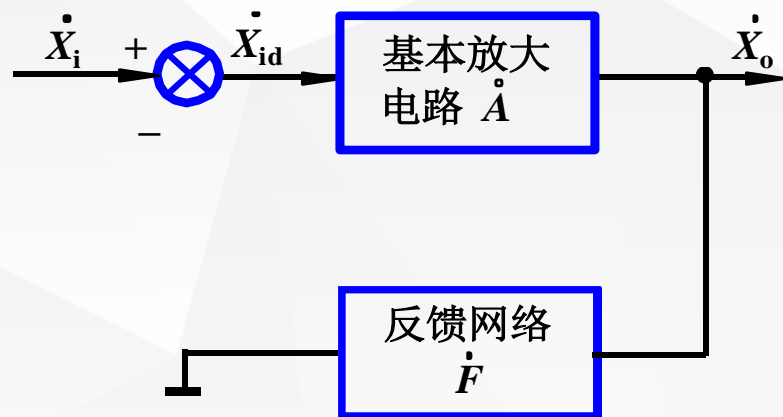
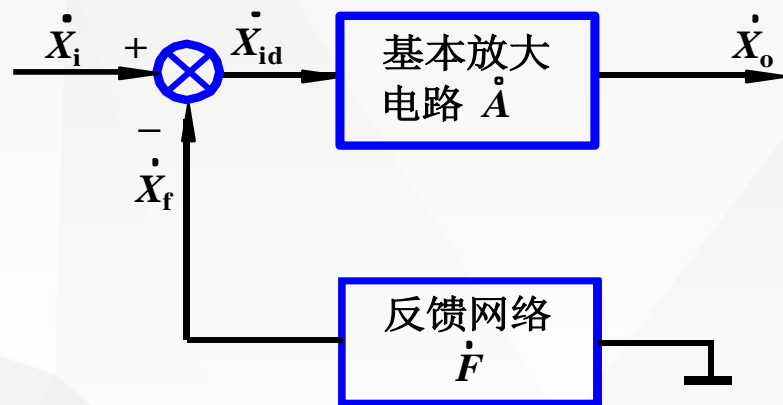
考虑到输入端的负载效应时，应令输出量为0。

(电压 - 短路：电流 - 开路)。

反馈网络等效到输出端

考虑到输出端的负载效应时，应令输入量为0。

(串联 - 断开：并联 - 短路)。

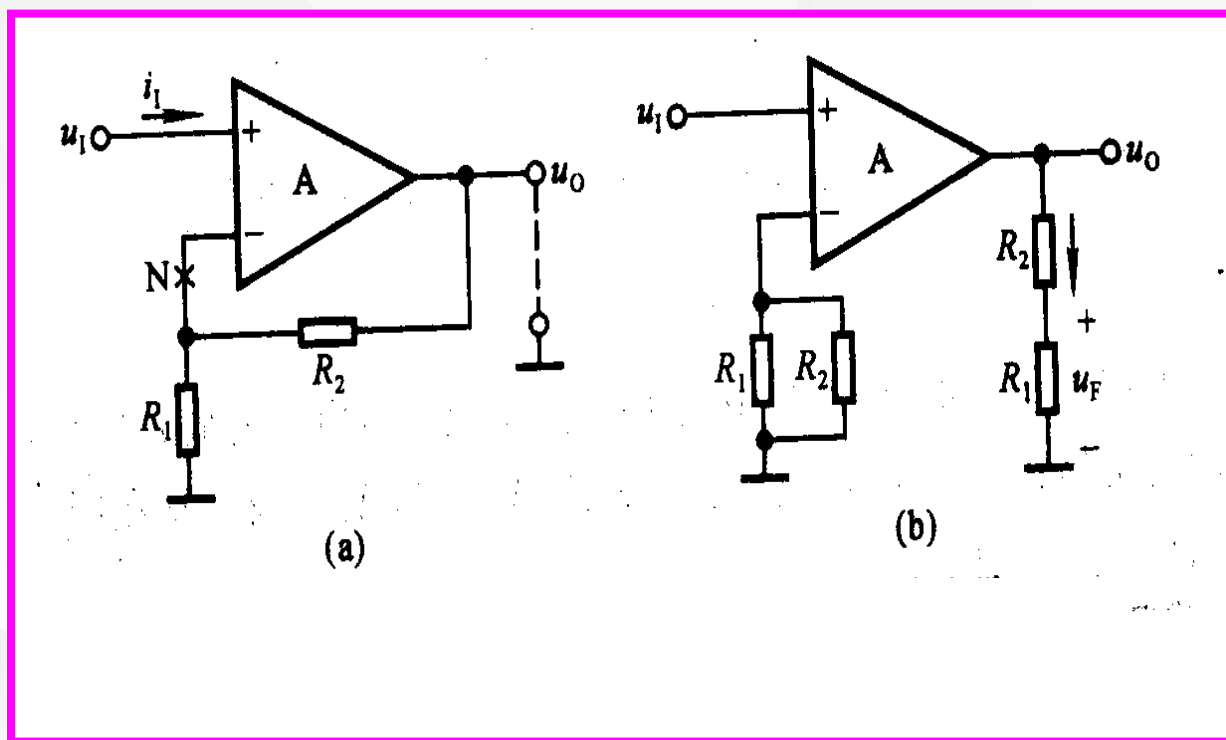


07 反馈放大电路与振荡电路

1. 电压串联负反馈

(电压 - 短路：电流 - 开路)

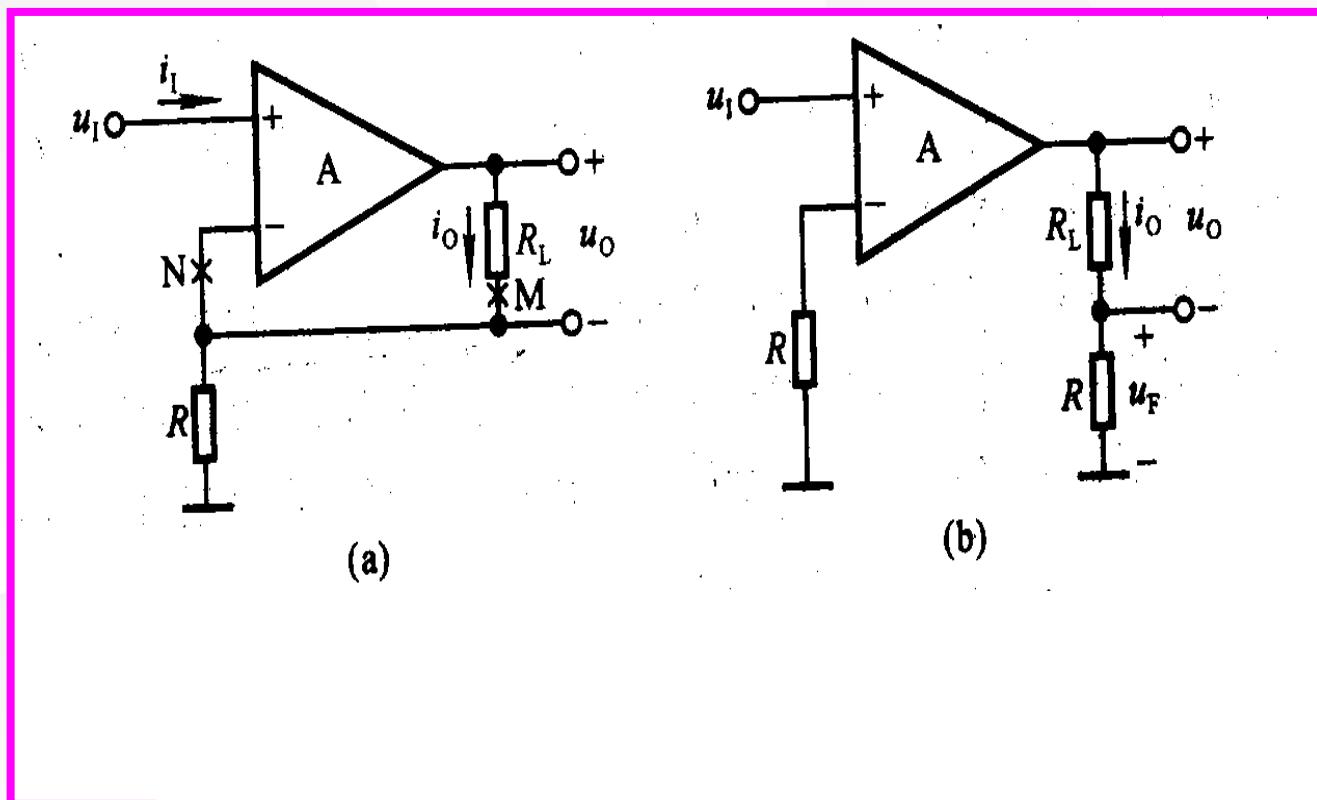
(串联 - 断开：并联 - 短路)



2. 电流串联负反馈

(电压 - 短路：电流 - 开路)

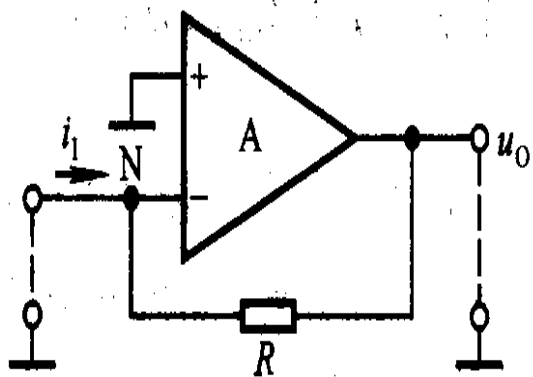
(串联 - 断开：并联 - 短路)



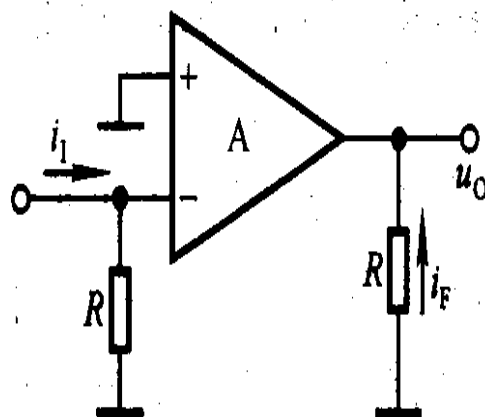
3. 电压并联负反馈

(电压 - 短路: 电流 - 开路)

(串联 - 断开: 并联 - 短路)



(a)



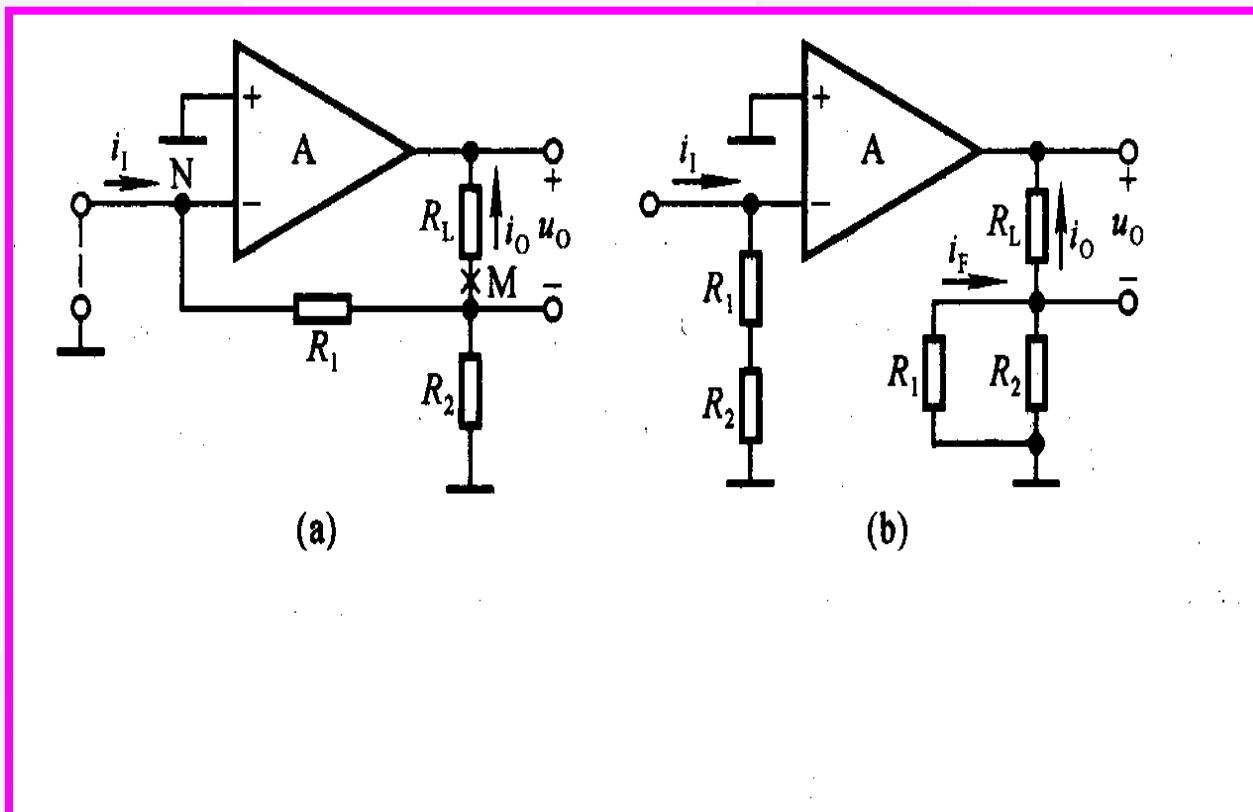
(b)

07 反馈放大电路与振荡电路

4. 电流并联负反馈

(电压 - 短路：电流 - 开路)

(串联 - 断开：并联 - 短路)



利用基本放大电路求电压放大倍数方法比较麻烦。

二、负反馈放大电路的方框图表示法

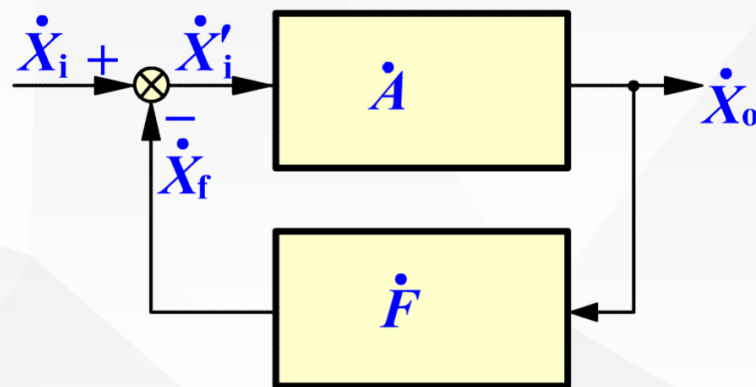
$\dot{X}_i, \dot{X}_o, \dot{X}_f$ 分别为输入信号、输出信号和反馈信号;

开环放大倍数 \dot{A} :

无反馈时放大网络的放大倍数;

因为: $\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i'}$ $\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$

$$\dot{X}_i' = \dot{X}_i - \dot{X}_f$$



反馈放大电路方框图

07 反馈放大电路与振荡电路

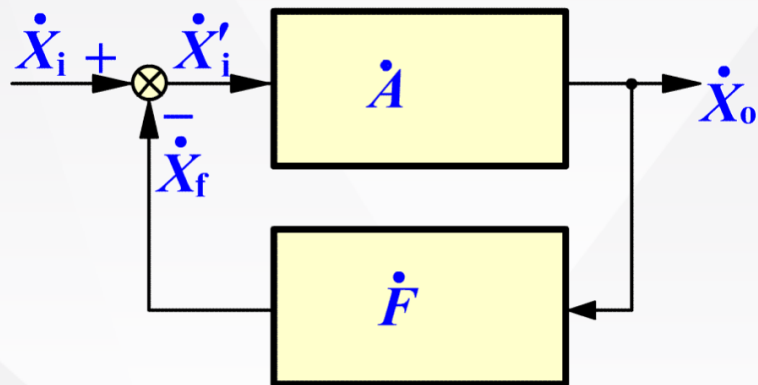
所以: $\dot{X}_o = \dot{A} \dot{X}_i' = \dot{A}(\dot{X}_i - \dot{X}_f) = \dot{A}(\dot{X}_i - \dot{F} \dot{X}_o)$

闭环放大倍数: \dot{A}_f :

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

反馈系数: \dot{F}

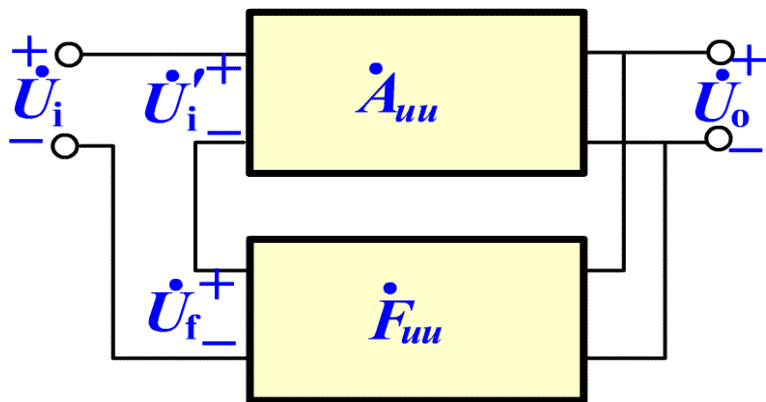
$$\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$$



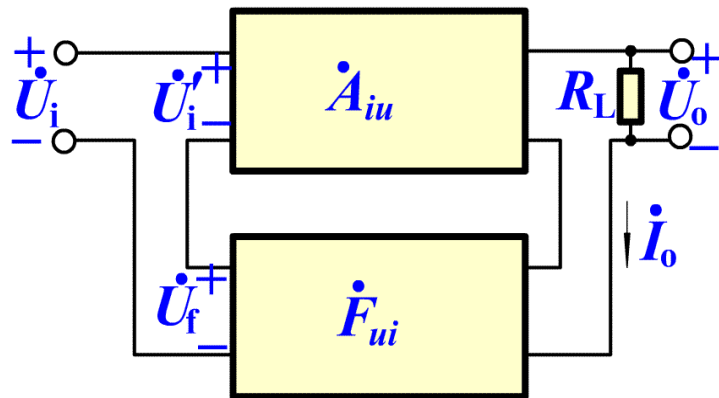
电路的环路放大倍数: $\dot{A} \dot{F}$

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

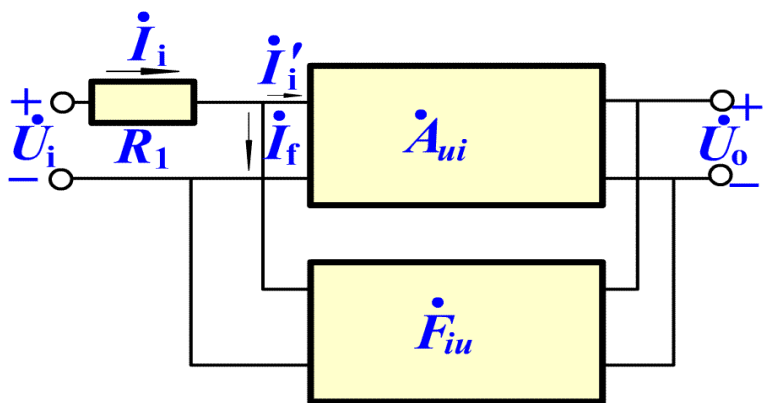
三、四种组态电路的方块图



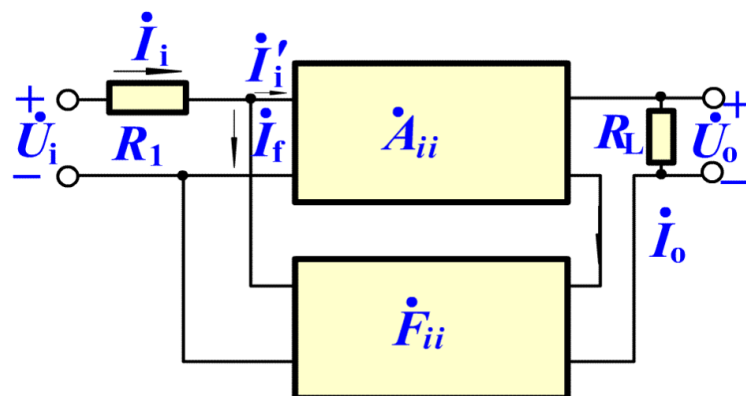
电压串联负反馈



电流串联负反馈



电压并联负反馈



电流并联负反馈

➤ 07 反馈放大电路与振荡电路

表 四种组态负反馈放大电路的比较

	输出信号	反馈信号	开环电路的放大倍数	反馈系数
电压串联式	\dot{U}_o	\dot{U}_f	电压放大倍数 $\dot{A}_{uu} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i'}$	$\dot{F}_{uu} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o}$
电压并联式	\dot{U}_o	\dot{I}_f	转移电阻 $\dot{A}_{ui} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i'} (\Omega)$	$\dot{F}_{iu} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o} (S)$
电流串联式	\dot{I}_o	\dot{U}_f	转移电导 $\dot{A}_{iu} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i'} (S)$	$\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o} (\Omega)$
电流并联式	\dot{I}_o	\dot{I}_f	电流放大倍数 $\dot{A}_{ii} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i'}$	$\dot{F}_{ii} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o}$

四、负反馈放大电路的一般表达式

闭环放大倍数：
$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

在中频段， \dot{A}_f 、 \dot{A} 和 \dot{F} 均为实数
$$A_f = \frac{A}{1 + AF}$$

若 $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$
$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \approx \frac{\dot{A}}{\dot{A}\dot{F}} = \frac{1}{\dot{F}}$$

——深度负反馈

结论：深度负反馈放大电路的放大倍数主要由反馈网络的反馈系数决定，能保持稳定。

若 $1 + \dot{A}\dot{F} = 0$ ， 则 $\dot{A}_f = \infty$ ——自激振荡

五、深度负反馈放大电路放大倍数的分析

放大电路的闭环电压放大倍数：
$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$$

深度负反馈放大电路的闭环电压放大倍数：

$$\dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$$

而 $F = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$ 所以 $\frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} \approx \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_f}$ 得 $\dot{X}_i \approx \dot{X}_f$

对于串联负反馈： $\dot{U}_i \approx \dot{U}_f$ 并联负反馈： $\dot{I}_i \approx \dot{I}_f$

结论：根据负反馈组态，选择适当的公式；再根据放大电路的实际情况，列出关系式后，直接估算闭环电压放大倍数。

07 反馈放大电路与振荡电路

[例] 估算深负反馈运放的闭环电压放大倍数。

解：

该电路为**电压并联负反馈**，
在深度负反馈条件下：

$$\dot{I}_i \approx \dot{I}_f$$

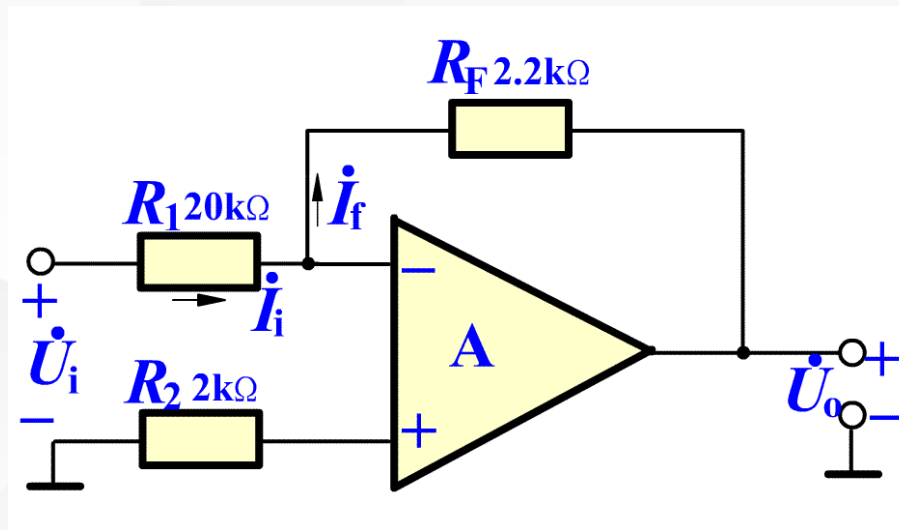
$$\dot{I}_i = \frac{\dot{U}_i}{R_1}, \quad \dot{I}_f = -\frac{\dot{U}_o}{R_F}$$

得

$$-\frac{\dot{U}_o}{R_F} = \frac{\dot{U}_i}{R_1}$$

则闭环电压放大倍数为：

$$\dot{A}_{uuf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx -\frac{R_F}{R_1} = -\frac{2.2}{20} = -0.11$$



07 反馈放大电路与振荡电路

[例]:

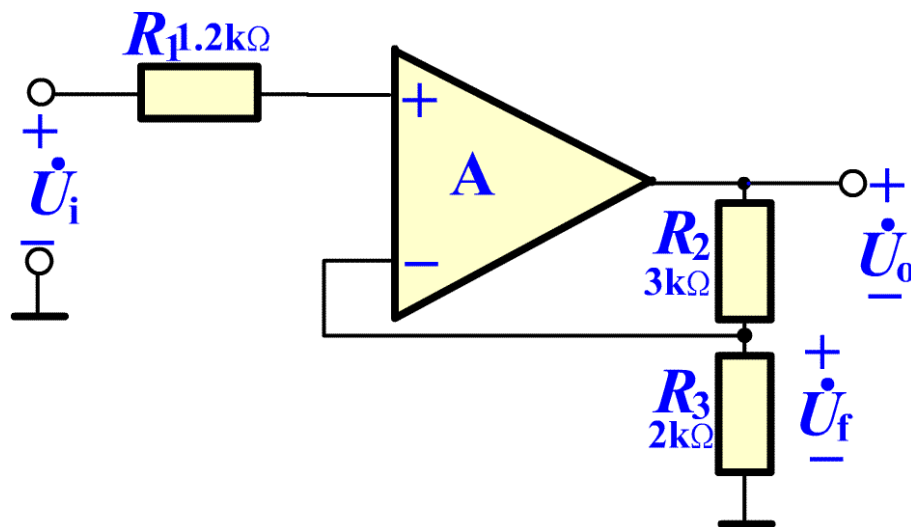
该电路为电压串联负反馈

$$\dot{U}_f = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \dot{U}_o$$

故
$$\dot{F}_{uu} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{R_3}{R_2 + R_3}$$

在深度负反馈条件下

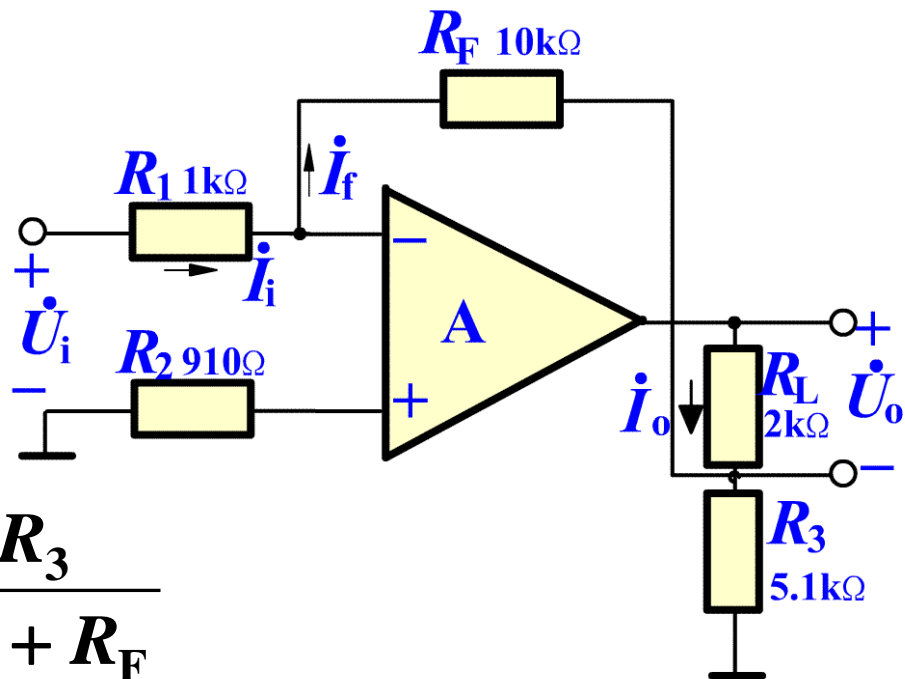
$$\dot{A}_{uuf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{uu}} = 1 + \frac{R_2}{R_3} = 1 + \frac{3}{2} = 2.5$$



07 反馈放大电路与振荡电路

[例]

该电路为电流并联负反馈，
在深度负反馈条件下：



$$I_i \approx I_f \quad I_i = \frac{\dot{U}_i}{R_1}$$

$$\dot{I}_f = -\frac{\dot{I}_o R_3}{R_3 + R_F} = -\frac{\dot{U}_o}{R_L} \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_F}$$

故：
$$-\frac{\dot{U}_o}{R_L} \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_F} \approx \frac{\dot{U}_i}{R_1}$$

闭环电压放大倍数为：

$$\dot{A}_{uuf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx -\frac{R_L (R_3 + R_F)}{R_1 R_3} = -\frac{2 \times (5.1 + 10)}{1 \times 5.1} = -5.9$$

07 反馈放大电路与振荡电路

[例] 如图7.2.8, 已知 $R_1 = 10\text{K}\Omega$, $R_2 = 100\text{K}\Omega$, $R_3 = 2\text{K}\Omega$, $R_L = 5\text{K}\Omega$ 。求解在深度负反馈条件下的 A_{uf} 。

解:

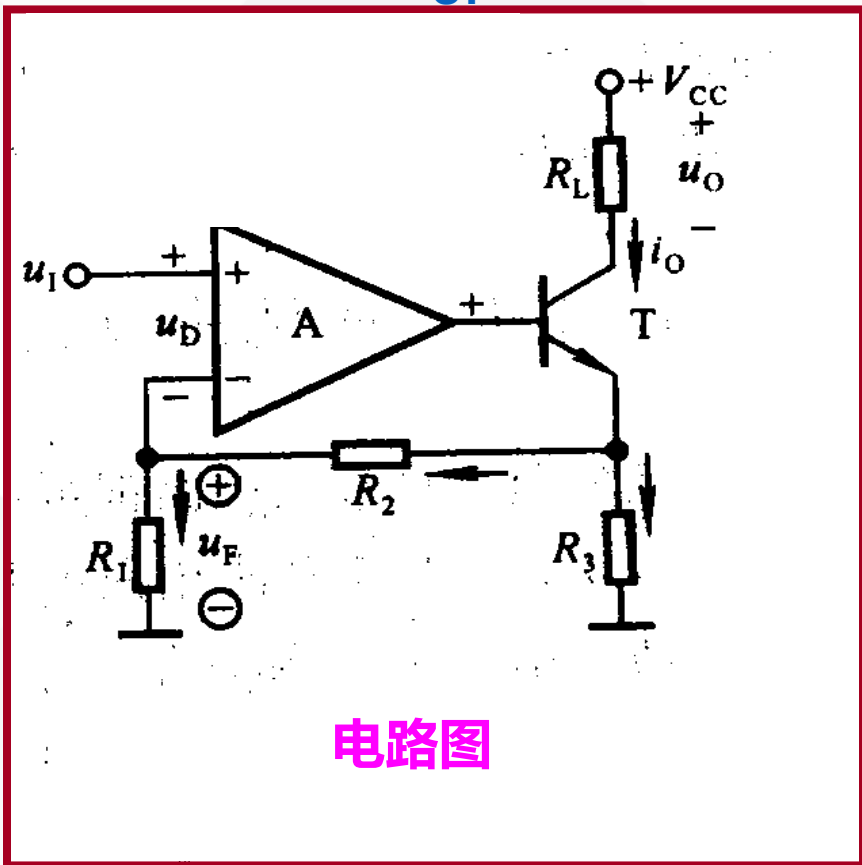
反馈通路: T 、 R_3 、 R_2 与 R_1
电路引入电流串联负反馈

$$\dot{I}_{R1} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot \dot{I}$$

$$\dot{U}_f = \dot{I}_{R1} R_1 = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot \dot{I}_0 R_1$$

$$\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_0} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{I}_0 R_L}{\dot{U}_f} \approx \frac{R_L}{\dot{F}_{ui}} = \frac{(R_1 + R_2 + R_3) R_L}{R_1 R_3} = 30$$



07 反馈放大电路与振荡电路

[例] 在图示电路中, 已知 $R_2 = 10\text{K}\Omega$, $R_4 = 100\text{K}\Omega$, 求解在深度负反馈条件下的 A_{UF}

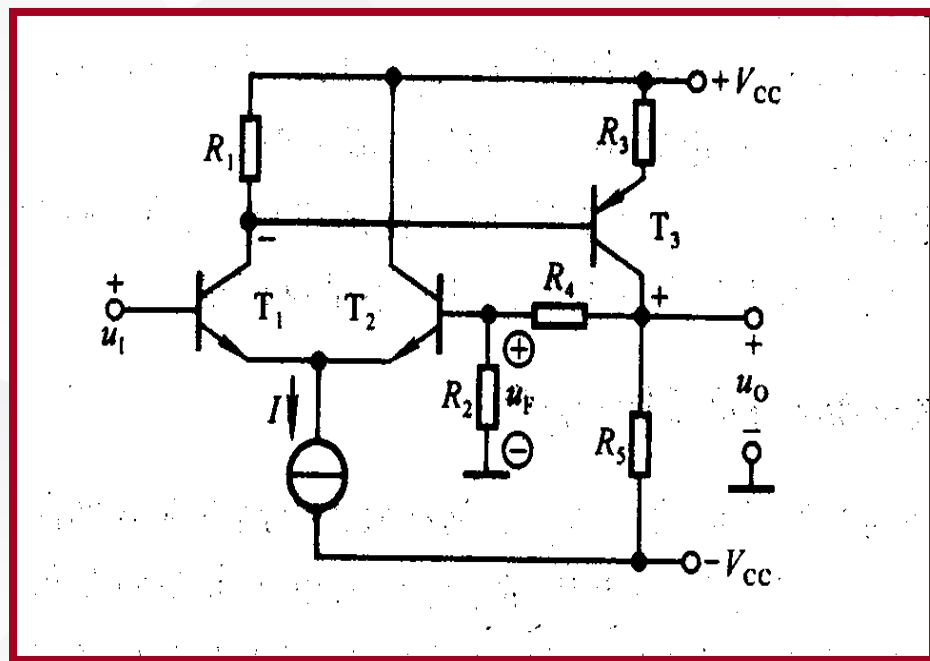
反馈通路: T_3 、 R_4 与 R_2

电路引入电压串联负反馈

$$\dot{F}_{uu} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_0} = \frac{R_2}{R_2 + R_4}$$

电压放大倍数

$$\dot{A}_{uuf} = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_i} \approx \frac{1}{\dot{F}_{uu}} = 1 + \frac{R_4}{R_2} = 11$$



7.3 负反馈对放大电路性能的影响

一、稳定放大倍数

引入负反馈后，在输入信号一定的情况下，当电路参数变化、电源电压波动或负载发生变化时，放大电路输出信号的波动减小，即放大倍数的稳定性提高。

放大倍数稳定性提高的程度与反馈深度有关。

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \quad \text{在中频范围内,} \quad A_f = \frac{A}{1 + AF}$$

放大倍数的相对变化量：

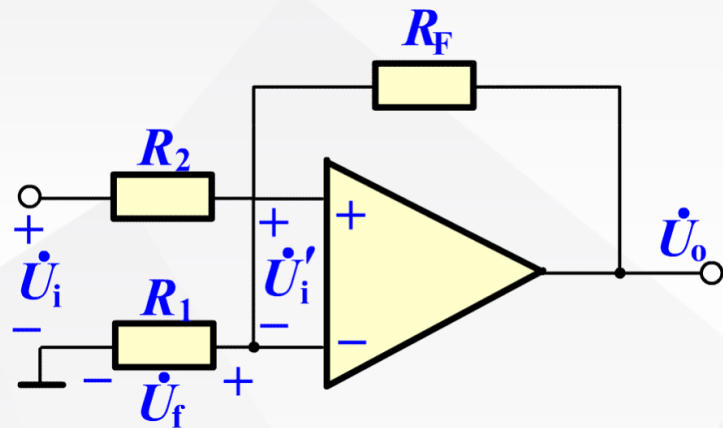
$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + AF} \times \frac{dA}{A}$$

结论：引入负反馈后，放大倍数的稳定性提高了 $(1 + AF)$ 倍。

07 反馈放大电路与振荡电路

例：在电压串联负反馈放大电路中， $\dot{A} = 10^5$ ， $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$

$$R_F = 18 \text{ k}\Omega$$



- ① 估算反馈系数 \dot{F} 和反馈深度 $(1 + \dot{A}\dot{F})$;
- ② 估算放大电路的闭环电压放大倍数 \dot{A}_f ;
- ③ 如果开环差模电压放大倍数 A 的相对变化量为 $\pm 10\%$ ，此时闭环电压放大倍数 A_f 的相对变化量等于多少？

解：① 反馈系数
$$\dot{F} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_F} = \frac{2}{2 + 18} = 0.1$$

反馈深度
$$1 + \dot{A}\dot{F} = 1 + 10^5 \times 0.1 \approx 10^4$$

➤ 07 反馈放大电路与振荡电路

② 闭环放大倍数

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \approx \frac{10^5}{10^4} = 10$$

③ A_f 的相对变化量

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + AF} \times \frac{dA}{A} = \frac{\pm 10\%}{10^4} = \pm 0.001\%$$

结论：当开环差模电压放大倍数变化 $\pm 10\%$ 时，电压放大倍数的相对变化量只有 $\pm 0.0001\%$ ，而稳定性提高了一万倍。

07 反馈放大电路与振荡电路

二、改变输入电阻和输出电阻

不同类型的负反馈，对输入电阻、输出电阻的影响不同。

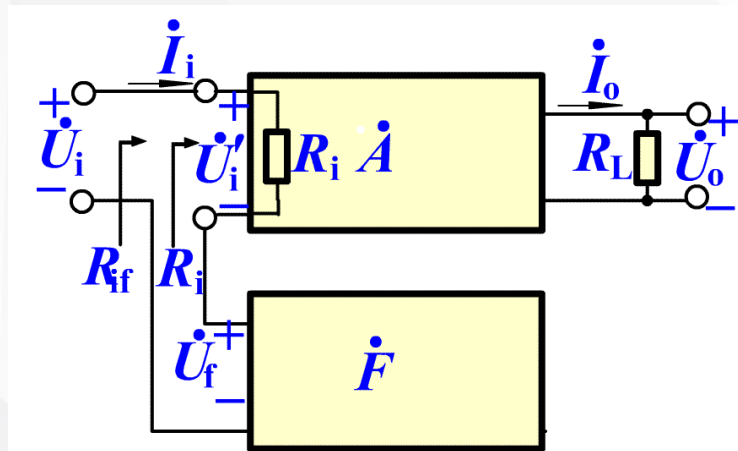
1. 对输入电阻的影响

1.1 串联负反馈增大输入电阻

$$R_i = \frac{\dot{U}'_i}{\dot{I}_i}$$

$$R_{if} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{U}'_i + \dot{U}_f}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{U}'_i + \dot{A}\dot{F}\dot{U}'_i}{\dot{I}_i}$$

得： $R_{if} = (1 + \dot{A}\dot{F})R_i$



结论：引入**串联负反馈**后，**输入电阻增大**为无反馈时的 $(1 + \dot{A}\dot{F})$ 倍。

07 反馈放大电路与振荡电路

1.2 并联负反馈减小输入电阻

$$\dot{I}'_i = \dot{I}_i - \dot{I}_f$$

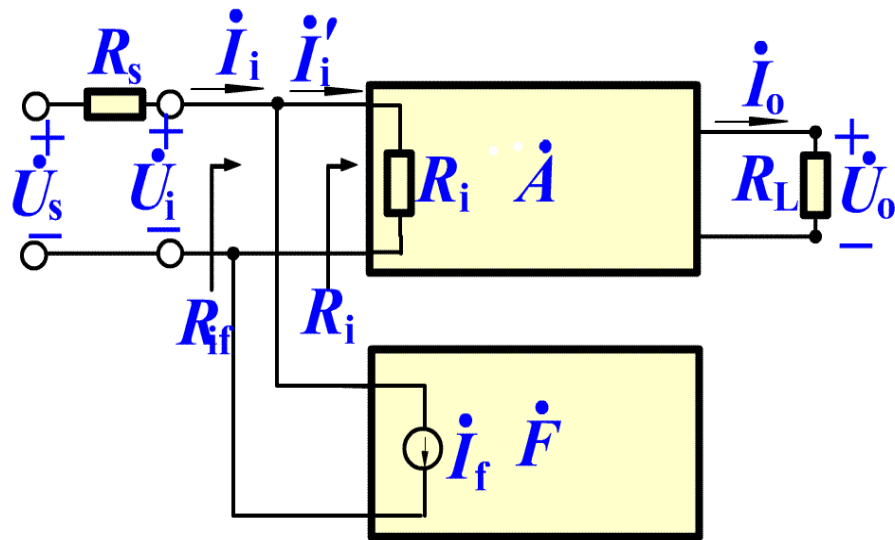
$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}'_i}$$

$$R_{if} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}'_i + \dot{I}_f}$$

$$= \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}'_i + \dot{A}\dot{F}\dot{I}'_i}$$

得：

$$R_{if} = \frac{R_i}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$



并联负反馈对 R_i 的影响

结论：引入**并联负反馈**后，**输入电阻减小**为无负反馈时的 $1/(1 + \dot{A}\dot{F})$ 。

07 反馈放大电路与振荡电路

2. 负反馈对输出电阻的影响

2.1 电压负反馈减小输出电阻

放大电路的输出电阻定义:

$$R_{of} = \left. \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \right|_{\dot{X}_i=0, R_L=\infty}$$

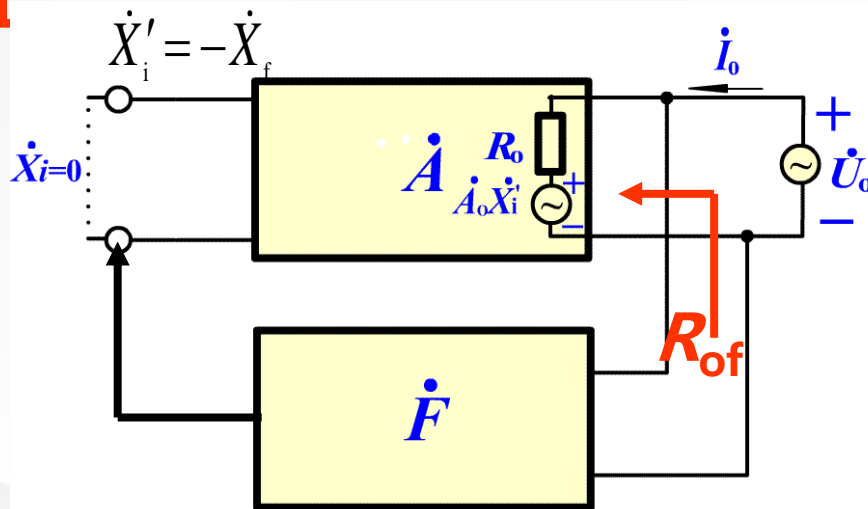
当 $\dot{X}_i = 0$ 时

$$\dot{X}'_i = \dot{X}_i - \dot{X}_f = -\dot{X}_f = -\dot{F}\dot{U}_o$$

$$\dot{U}_o = \dot{I}_o R + \dot{A} \dot{X}'_i = \dot{I}_o R_o - \dot{A} \dot{F} \dot{U}_o$$

得:
$$R_{of} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} = \frac{R_o}{1 + \dot{A} \dot{F}}$$

结论: 引入电压负反馈后, 放大电路的输出电阻减小到无反馈时的 $\frac{1}{(1 + \dot{A} \dot{F})}$ 。



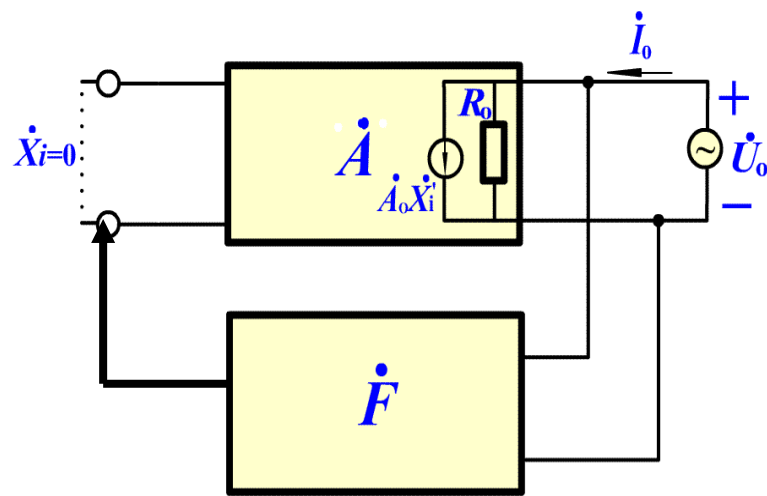
07 反馈放大电路与振荡电路

2.2 电流负反馈增大输出电阻

$$\begin{aligned}\dot{X}'_i &= \dot{X}_i - \dot{X}_f \\ &= -\dot{X}_f = -\dot{F}\dot{I}_o \\ \dot{I}_o &\approx \frac{\dot{U}_o}{R_o} + \dot{A}_o \dot{X}'_i = \frac{\dot{U}_o}{R_o} - \dot{A}_o \dot{F} \dot{I}_o\end{aligned}$$

$$R_{of} = (1 + \dot{A}_o \dot{F}) R_o$$

结论：引入**电流负反馈**后，放大电路的**输出电阻增大**到无反馈时的 $(1 + \dot{A}_o \dot{F})$ 倍。



综上所述

(1). 反馈信号与外加输入信号的求和方式只对放大电路的输入电阻有影响：串联负反馈使输入电阻增大；并联负反馈使输入电阻减小。

(2). 反馈信号在输出端的采样方式只对放大电路的输出电阻有影响：电压负反馈使输出电阻减小；电流负反馈使输出电阻增大。

(3). 串联负反馈只增大反馈环路内的输入电阻；电流负反馈只增大反馈环路内的输出电阻。

(4). 负反馈对输入电阻和输出电阻的影响程度，与反馈深度有关。

三、展宽频带

由于负反馈可以提高放大倍数的稳定性，因而对于频率不同而引起的放大倍数下降，也可以改善。

设无反馈时放大电路在中、高频段的放大倍数分别为 \dot{A}_m 和 \dot{A}_H ，上限频率为 f_H ；

$$\dot{A}_H = \frac{\dot{A}_m}{1 + j \frac{f}{f_H}}$$

引入反馈系数为 \dot{F} 的负反馈后，放大电路在中、高频段的放大倍数分别为 \dot{A}_{mf} 和 \dot{A}_{Hf} ，上限频率为 f_{Hf} 。

07 反馈放大电路与振荡电路

$$\dot{A}_{\text{Hf}} = \frac{\dot{A}_{\text{H}}}{1 + \dot{A}_{\text{H}}\dot{F}} = \frac{\frac{\dot{A}_{\text{m}}}{1 + \text{j}\frac{f}{f_{\text{H}}}}}{1 + \frac{\dot{A}_{\text{m}}}{1 + \text{j}\frac{f}{f_{\text{H}}}} \cdot \dot{F}} = \frac{\dot{A}_{\text{m}}}{1 + \dot{A}_{\text{m}}\dot{F} + \text{j}\frac{f}{f_{\text{H}}}}$$

$$= \frac{\frac{\dot{A}_{\text{m}}}{1 + \dot{A}_{\text{m}}\dot{F}}}{1 + \text{j}\frac{f}{(1 + \dot{A}_{\text{m}}\dot{F})f_{\text{H}}}} = \frac{\dot{A}_{\text{mf}}}{1 + \text{j}\frac{f}{f_{\text{Hf}}}}$$

所以: $\dot{A}_{\text{mf}} = \frac{\dot{A}_{\text{m}}}{1 + \dot{A}_{\text{m}}\dot{F}} \quad f_{\text{Hf}} = (1 + \dot{A}_{\text{m}}\dot{F})f_{\text{H}}$

➤ 07 反馈放大电路与振荡电路

可见，引入负反馈后，放大电路的中频放大倍数减小为无反馈时的 $1 / (1 + \dot{A}_m \dot{F})$ ；而**上限频率提高**到无反馈时的 $(1 + \dot{A}_m \dot{F})$ 倍。

同理，可推导出引入负反馈后，放大电路的**下限频率降低**为无反馈时的 $1 / (1 + \dot{A}_m \dot{F})$ 。

结论：引入负反馈后，放大电路的上限频率提高，下限频率降低，因而**通频带展宽**。

基本放大电路的**通频带**

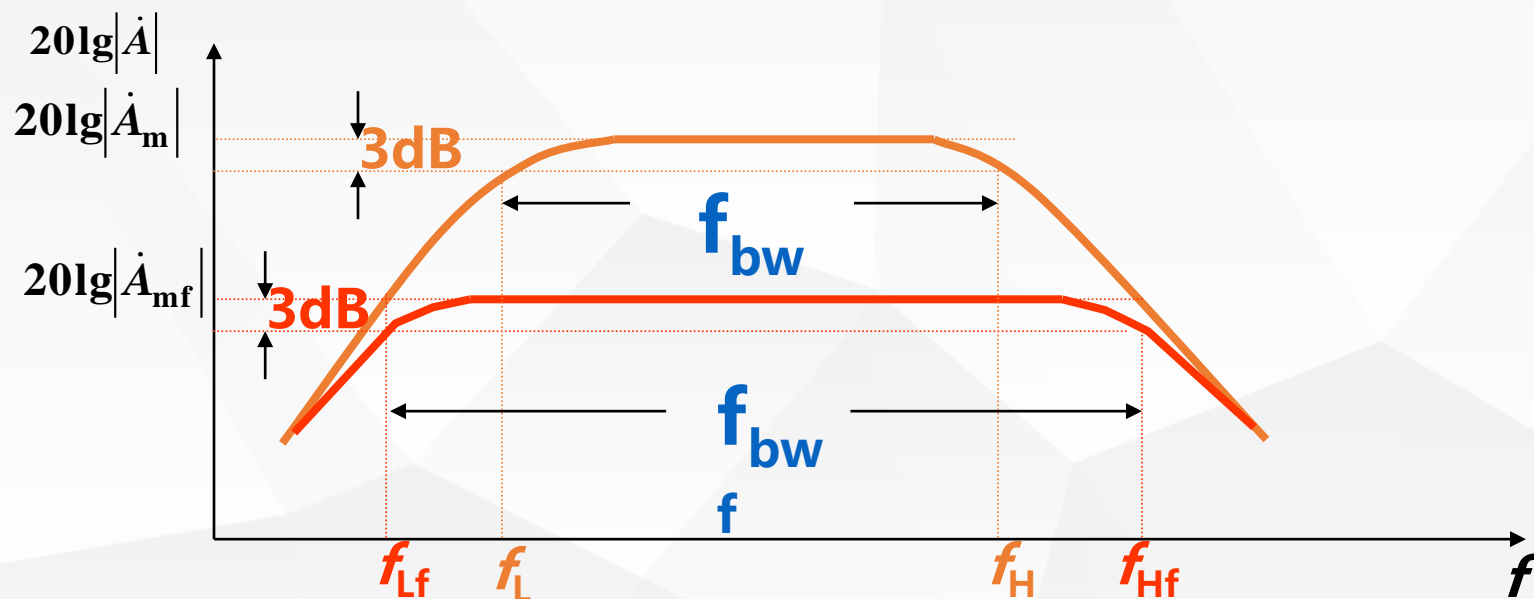
$$f_{bw} = f_H - f_L \approx f_H$$

反馈放大电路的**通频带**

$$f_{bwf} = f_{Hf} - f_{Lf} \approx f_{Hf}$$

07 反馈放大电路与振荡电路

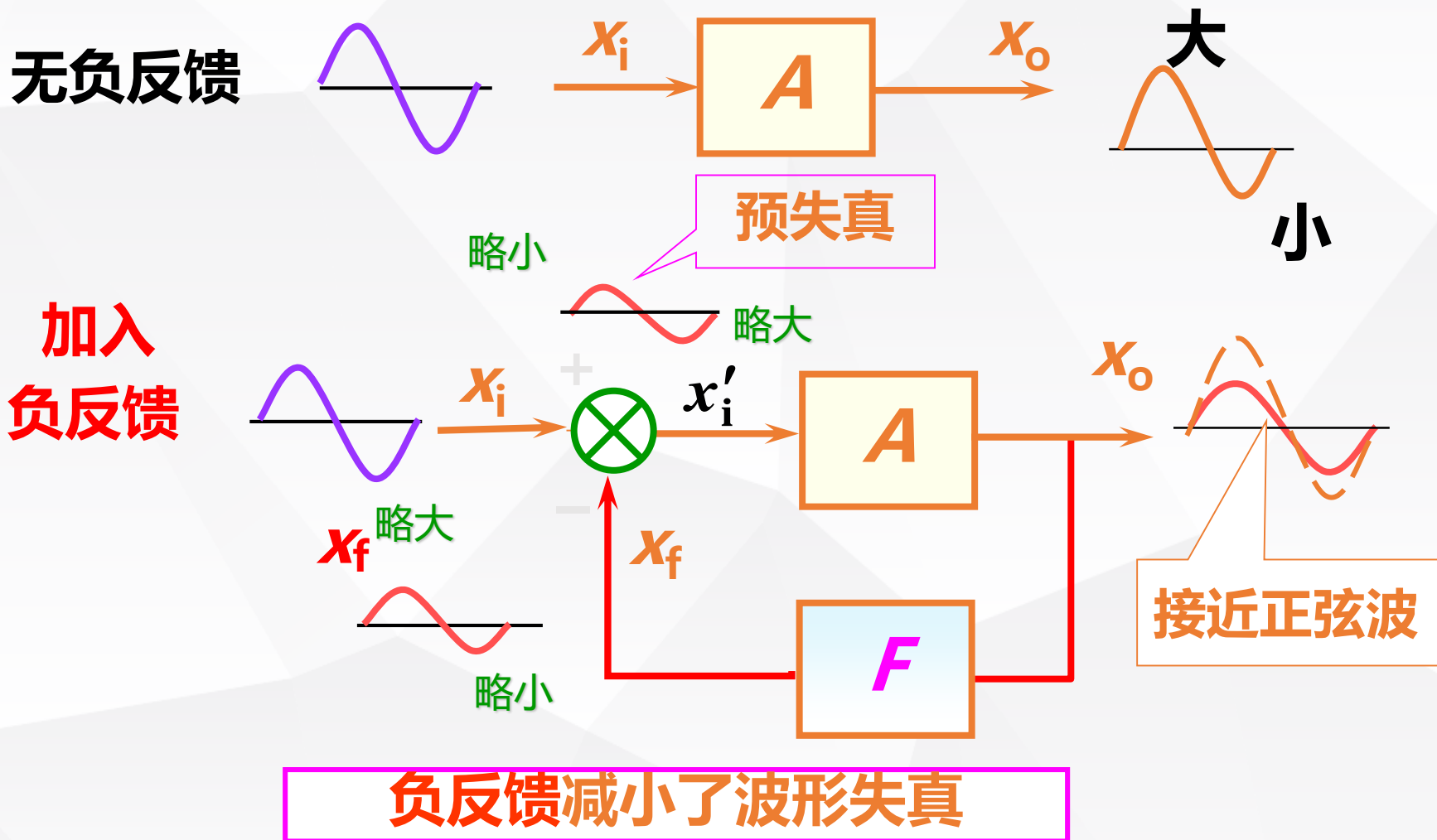
$$f_{\text{bwf}} \approx (1 + \dot{A}_m \dot{F}) f_{\text{bw}}$$



负反馈对通频带和放大倍数的影响

07 反馈放大电路与振荡电路

四、减小非线性失真和抑制干扰



同样道理，负反馈可抑制放大电路内部噪声。

五、放大电路中引入负反馈的一般原则

负反馈对放大电路性能方面的影响，均与反馈深度有关。
负反馈放大电路的分析以定性分析为主，定量分析为辅。

电路设计时，引入负反馈的一般原则

- (1) 为了稳定静态工作点，应引入直流负反馈；
为了改善电路的动态性能，应引入交流负反馈。
- (2) 根据负载对放大电路输出量的要求，即负载对其信号源的要求，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。

电路设计时，引入负反馈的一般原则

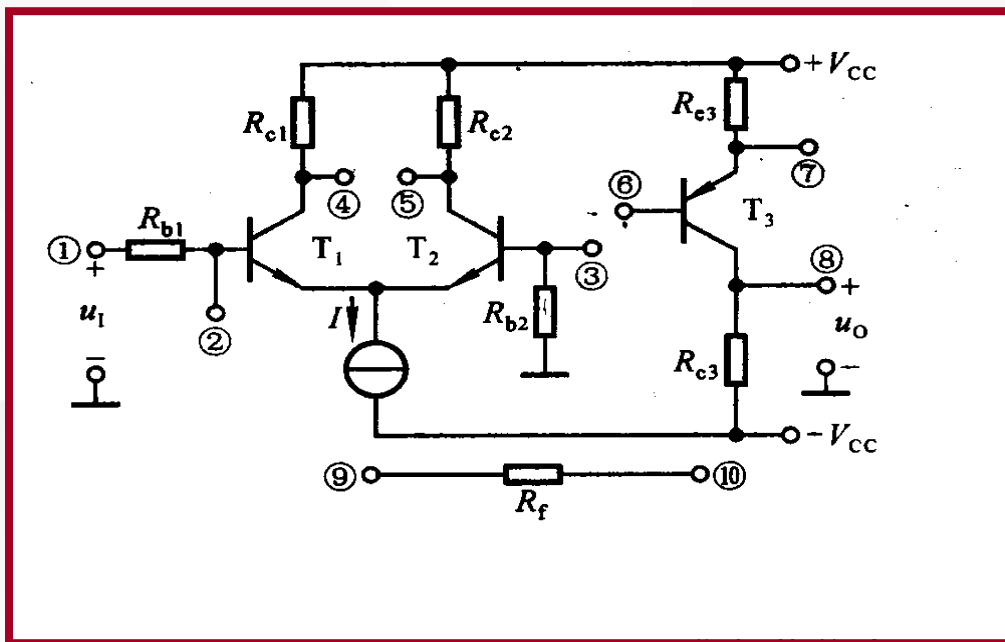
(3) 根据信号源的性质引入串联负反馈，或者并联负反馈。
当信号源为恒压源或内阻较小的电压源时，为增大放大电路的输入电阻，以减小信号源的输出电流和内阻上的压降，应引入**串联负反馈**。

当信号源为恒流源或内阻较大的电压源时，为减小电路的输入电阻，使电路获得更大的输入电流，应引入**并联负反馈**。

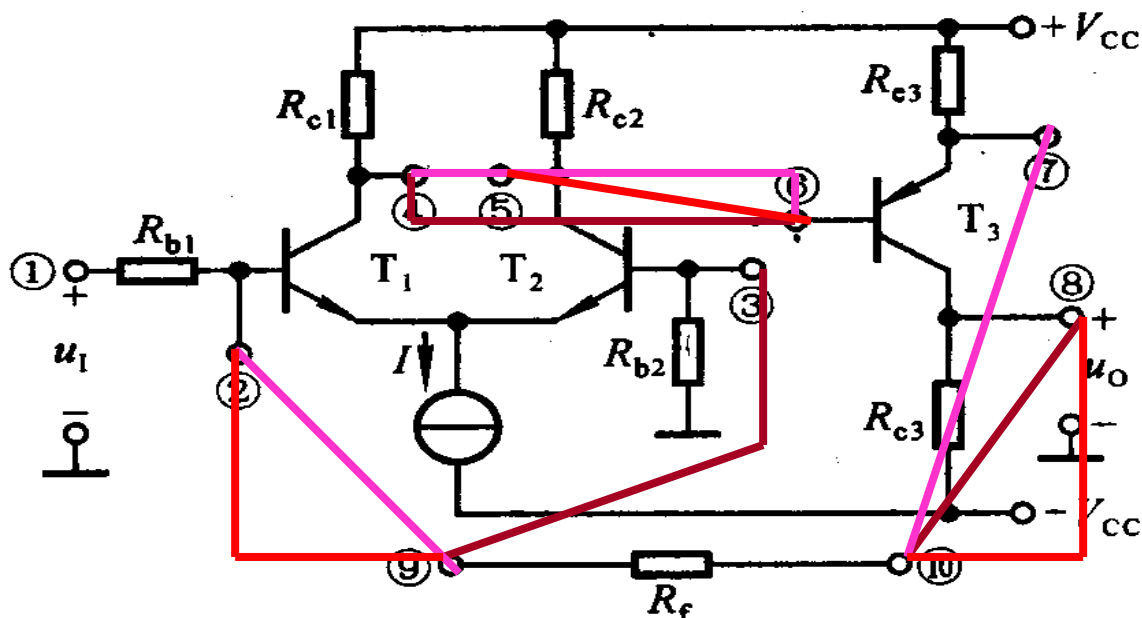
➤ 07 反馈放大电路与振荡电路

[例] 电路如图示，为了达到下列目的，分别说明应引入哪种组态的负反馈以及电路如何连接。

- (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 i_i 转换成与之成稳定线性关系的输出电流 i_o 。
- (3) 将输入电流 i_i 转换成稳定的输出电压 u_o 。



07 反馈放大电路与振荡电路



(1) 应引入电压串联负反馈。

电路中将④与⑥、③与⑨、⑧与⑩分别连接。

(2) 应引入电流并联负反馈。

电路中将④与⑥、⑦与⑩、②与⑨分别连接。

(3) 应引入电压并联负反馈。

电路中应将②与⑨、⑧与⑩、⑤与⑥分别连接。

7.4 负反馈放大电路的稳定性

对于多级放大电路，如果引入过深的负反馈，可能引起自激振荡。

一、负反馈放大电路自激振荡产生的原因和条件

1. 自激振荡产生的原因

放大电路的闭环放大倍数为：

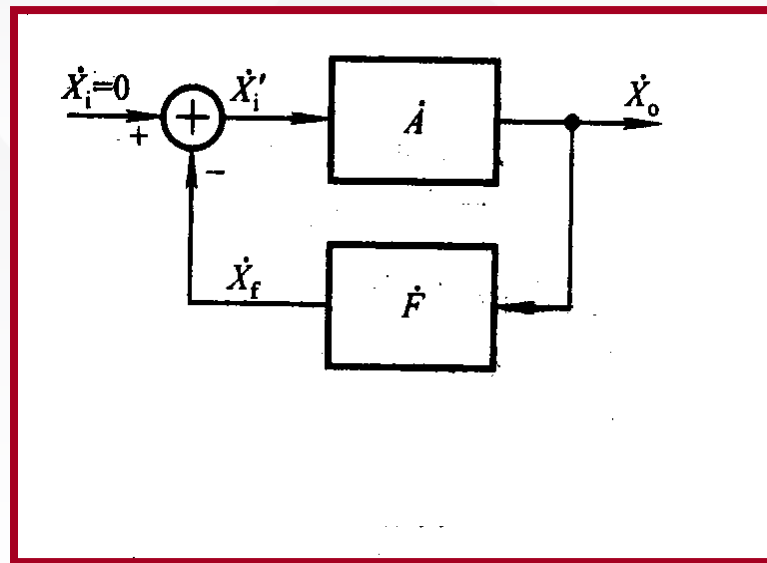
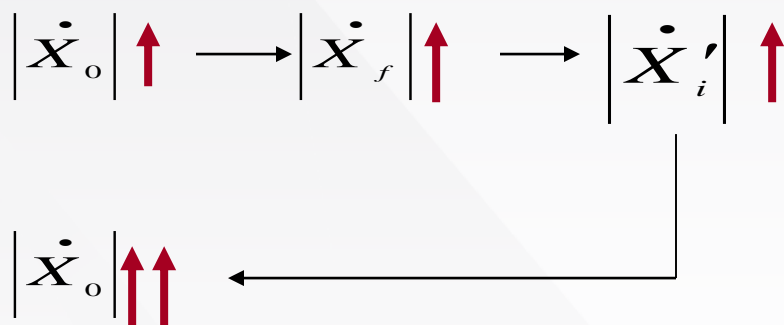
$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

在中频段， $|1 + \dot{A}\dot{F}| > 1$

在高、低频段，放大倍数 \dot{A} 和反馈系数 \dot{F} 的模和相角都随频率变化，使 $|1 + \dot{A}\dot{F}| < 1$ 。当 $1 + \dot{A}\dot{F} = 0$ $\dot{A}_f = \infty$ 时说明，此时放大电路没有输入信号，但仍有一定的输出信号，因此产生了自激振荡。

07 反馈放大电路与振荡电路

自激振荡过程如下：



2. 自激振荡的平衡条件

$$1 + \dot{A}\dot{F} = 0$$

即： $\dot{A}\dot{F} = -1$

$$|\dot{A}\dot{F}| = 1$$

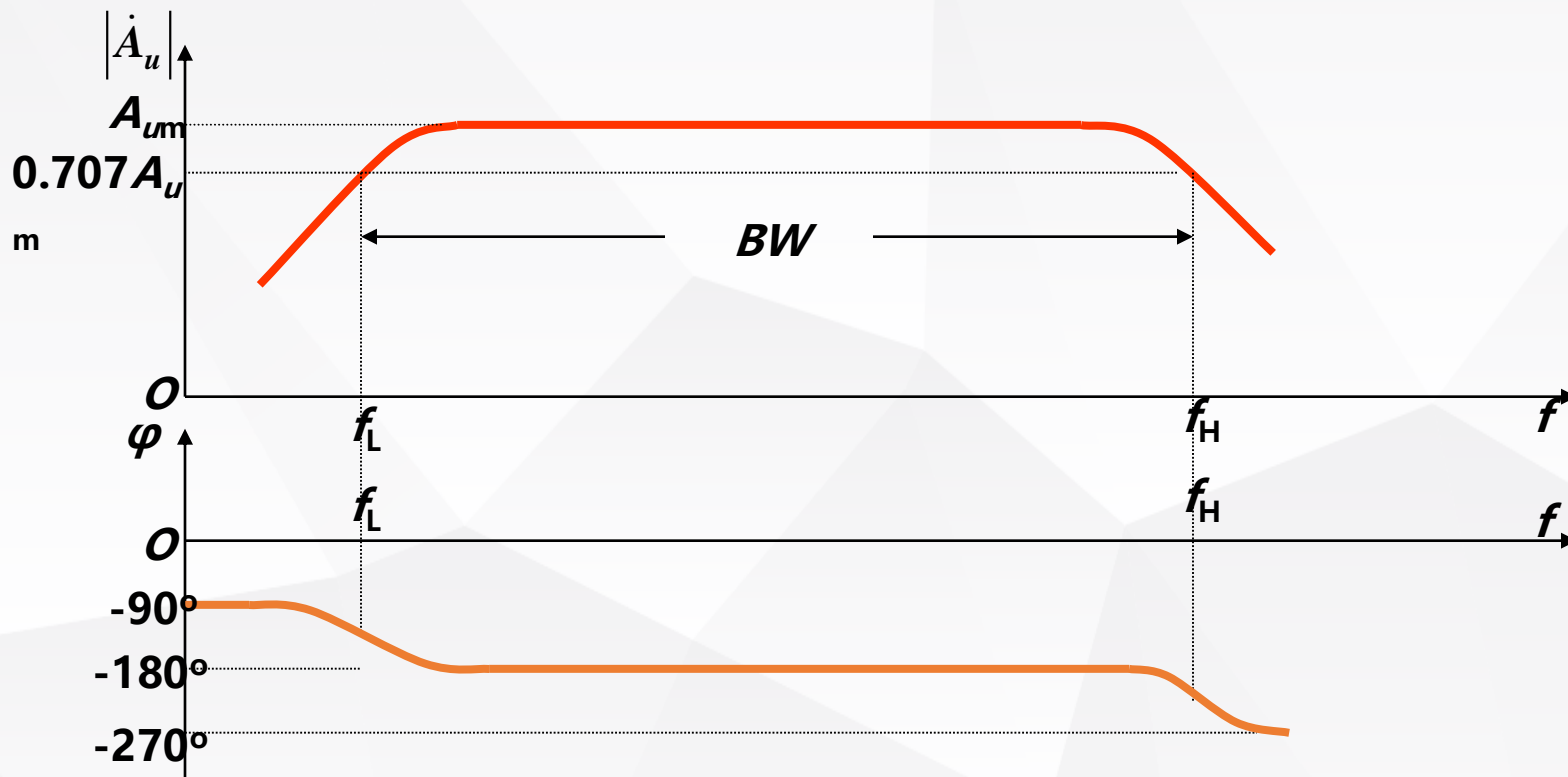
幅值条件

$$\arg \dot{A}\dot{F} = \pm(2n+1)\pi \quad (n=0,1,2,\dots)$$

相位条件

二、负反馈放大电路稳定性的定性分析

例：单管阻容耦合共射放大电路的频率响应



➤ 07 反馈放大电路与振荡电路

可见，在低、高频段，放大电路分别产生了 $0^\circ \sim +90^\circ$ 和 $0^\circ \sim -90^\circ$ 的附加相移。

两级放大电路将产生 $0^\circ \sim \pm 180^\circ$ 附加相移；三级放大电路将产生 $0^\circ \sim \pm 270^\circ$ 的附加相移。

对于多级放大电路，如果某个频率的信号产生的附加相移为 180° ，而反馈网络为纯电阻，则：

$$\arg \dot{A}\dot{F} = 180^\circ$$

满足自激振荡的相位条件，如果同时满足自激振荡的幅值条件，放大电路将产生自激振荡。

结论：

单级放大电路不会产生自激振荡；

两级放大电路当频率趋于无穷大或趋于零时，虽然满足相位条件，但不满足幅度条件，所以也不会产生自激振荡；

但三级放大电路，在深度负反馈条件下，对于某个频率的信号，既满足相位条件，也满足幅度条件，可以产生自激振荡。

三、负反馈放大电路稳定性的判断

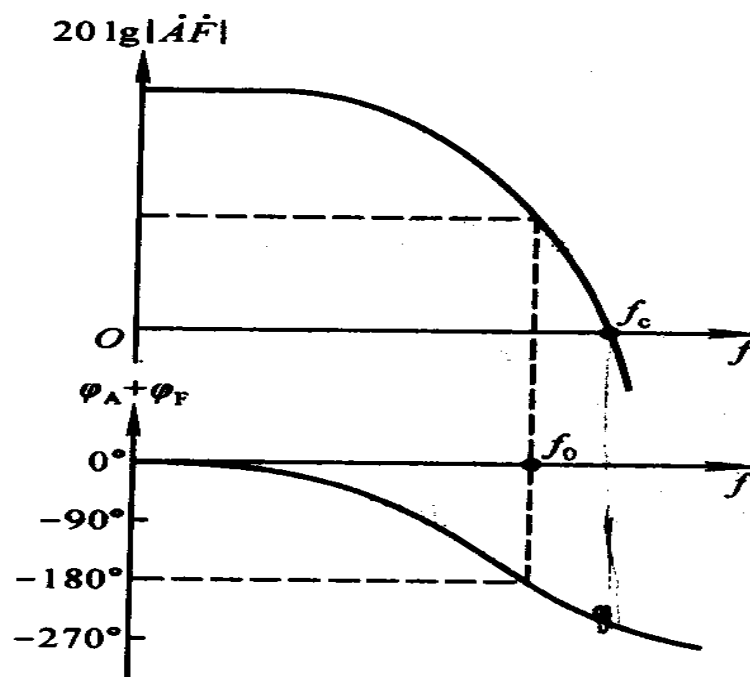
利用负反馈放大电路回路增益 $\dot{A}\dot{F}$ 的波特图，分析是否同时满足自激振荡的幅度和相位条件。

1. 判断方法

满足自激振荡的幅度
条件频率为 f_c

满足自激振荡的相位
条件频率为 f_0

因为存在 f_0 ，且 $f_0 < f_c$ ，则电路不稳定。



07 反馈放大电路与振荡电路

判断方法

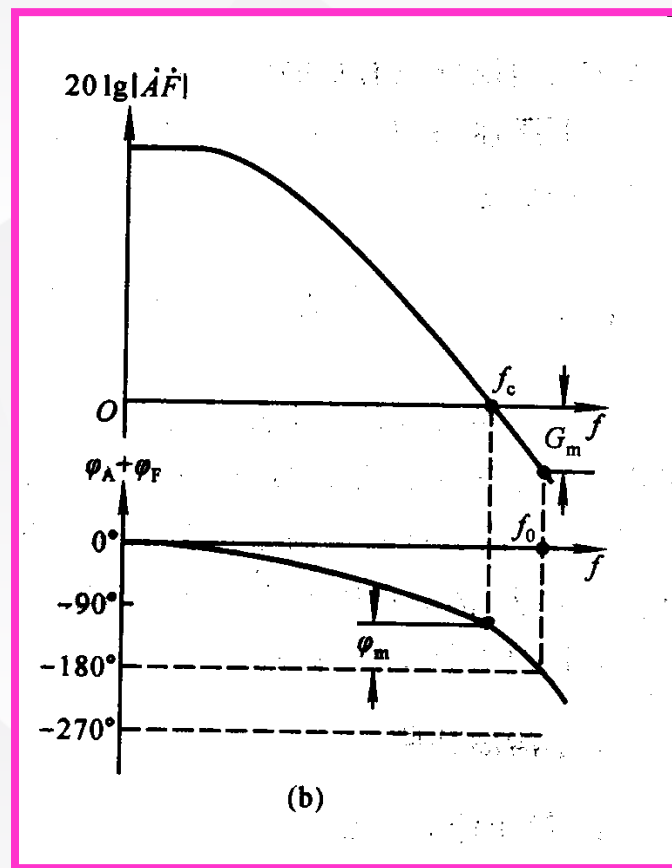
虽然存在 f_0 ，但 $f_0 > f_c$ ，
则电路稳定，不产生自激振荡。

判断方法小结如下：

(1) 若不存在 f_0 ，则电路稳定

(2) 若存在 f_0 ，且 $f_0 < f_c$ ，
则电路不稳定，必然产生自激振荡。

若存在 f_0 ，但 $f_0 > f_c$ ，则电路稳定，不产生自激振荡。



07 反馈放大电路与振荡电路

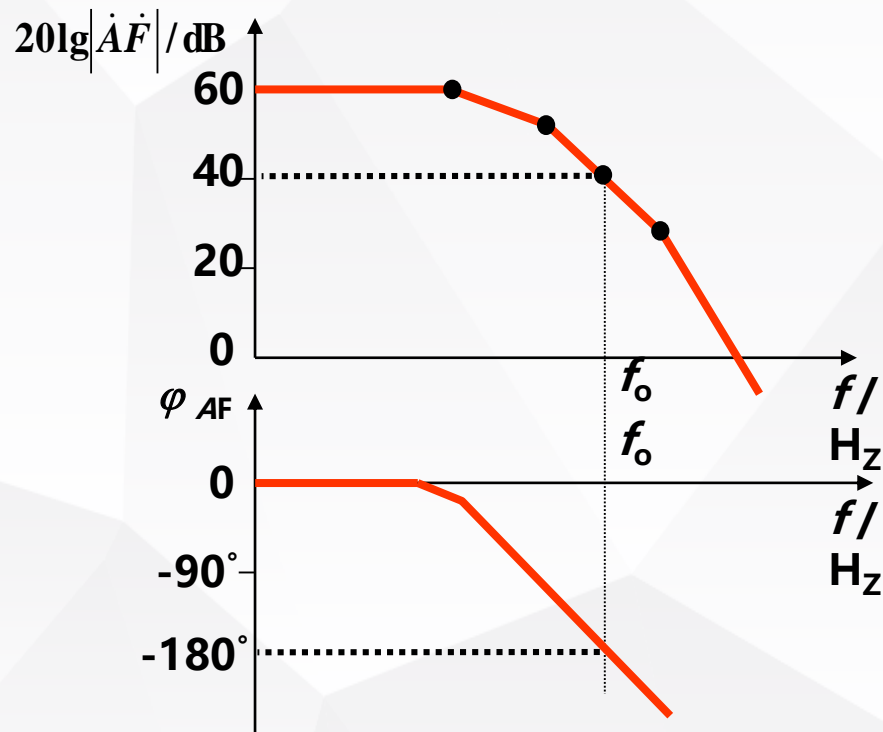
例1：某负反馈放大电路的 $\dot{A}\dot{F}$ 波特图为：

由波特图中的相频特性可见，当 $f = f_0$ 时，相位移 $\varphi_{AF} = -180^\circ$ ，满足相位条件；

此频率对应的对数幅频特性位于横坐标轴之上，即：

$$|\dot{A}\dot{F}| > 1$$

结论：当 $f = f_0$ 时，电路同时满足自激振荡的相位条件和幅度条件，将产生自激振荡。



(a)产生自激

07 反馈放大电路与振荡电路

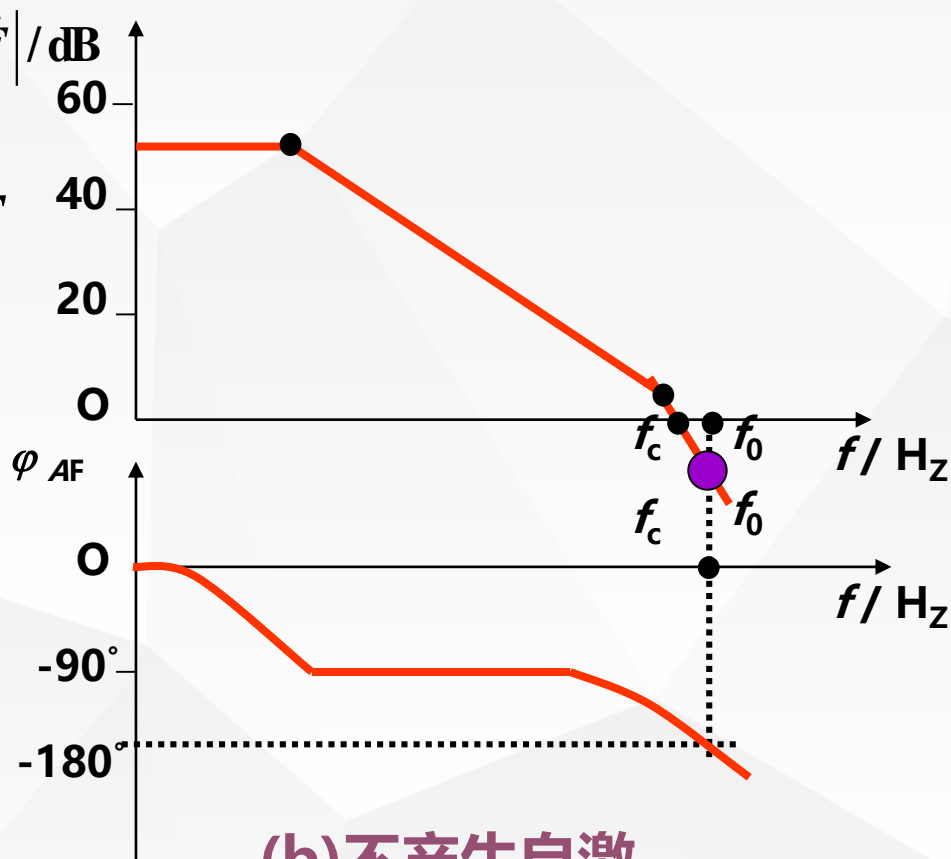
例2:

由负反馈放大电路 $\dot{A}\dot{F}$ 的波特图可见, 当 $f = f_0$, 相位移

$$\varphi_{AF} = -180^\circ$$

时

$$|\dot{A}\dot{F}| < 1$$



(b) 不产生自激

利用波特图来判断自激振荡

结论: 该负反馈放大电路不会产生自激振荡, 能够稳定工作。

2. 稳定裕度

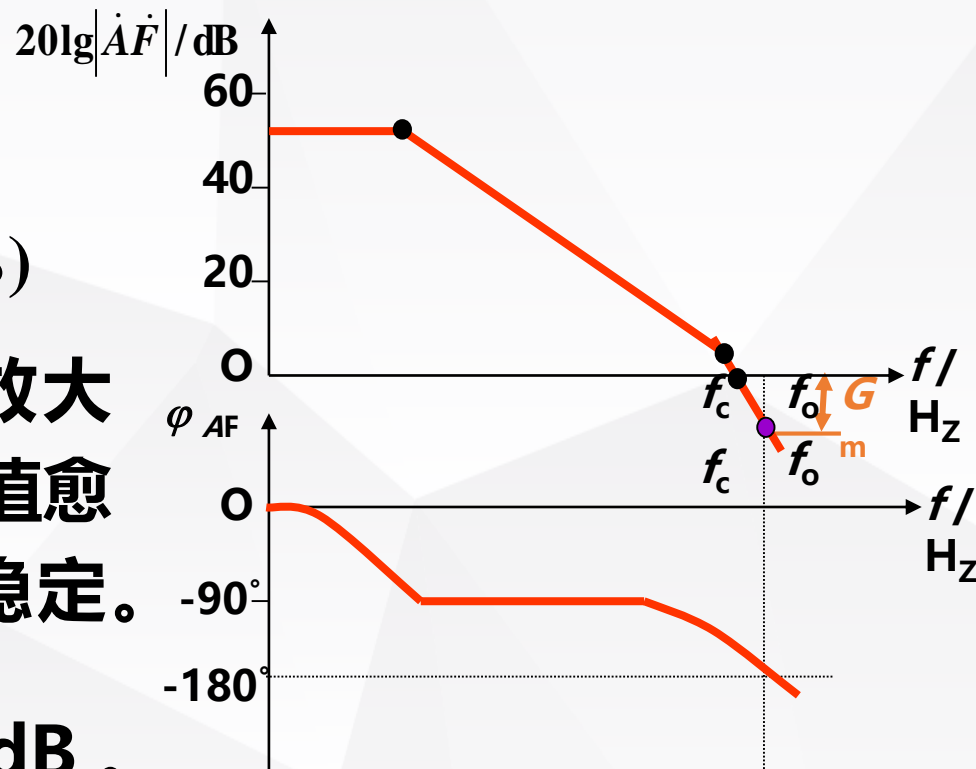
当环境温度、电路参数及电源电压等在一定范围内变化时，为保证放大电路也能满足稳定条件，要求放大电路要有一定的稳定裕度。

1. 幅值裕度 G_m

$$G_m = 20\lg|\dot{A}\dot{F}|_{f=f_0} \text{ (dB)}$$

对于稳定的负反馈放大电路， G_m 为负值。 G_m 值愈负，负反馈放大电路愈稳定。

一般要求 $G_m \leq -10 \text{ dB}$ 。



07 反馈放大电路与振荡电路

2. 相位裕度 Φ_m

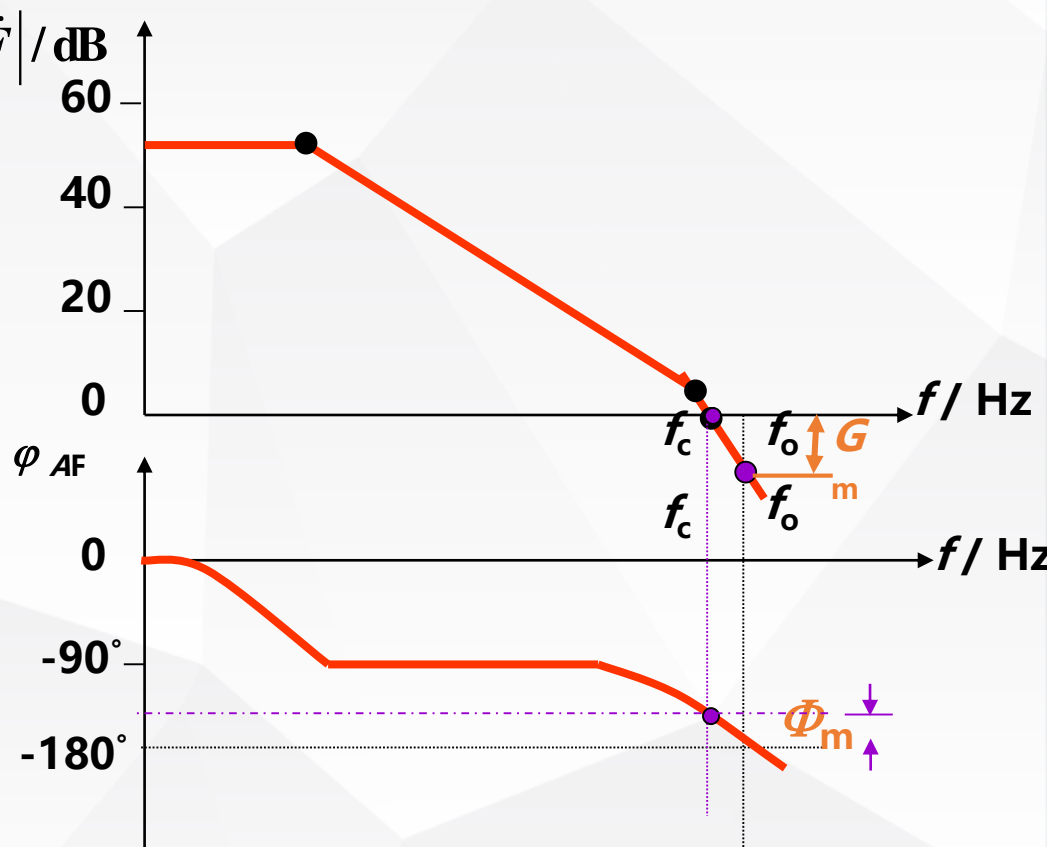
当 $f = f_c$ 时,

$$20\lg|\dot{A}\dot{F}| = 0$$

$$|\varphi_{AF}| < 180^\circ$$

负反馈放大电路稳定

$$\Phi_m = 180^\circ - |\varphi_{AF}|_{f=f_c}$$

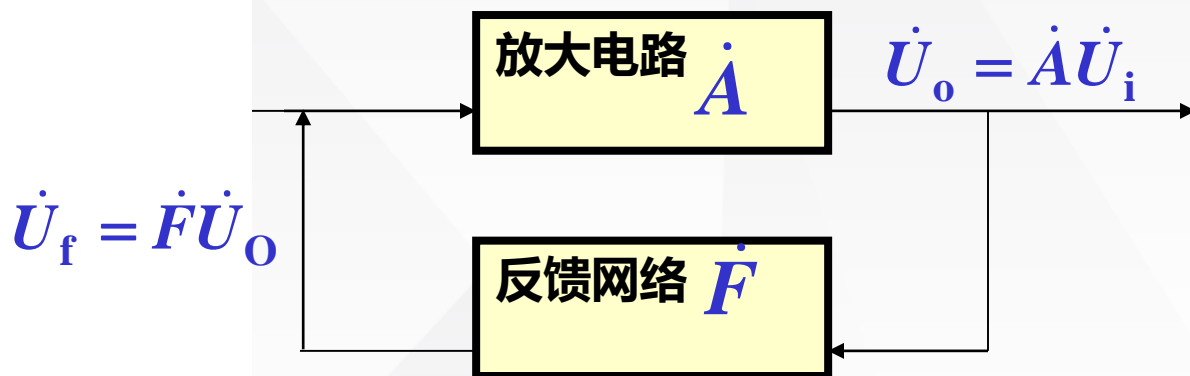


对于稳定的负反馈放大电路, Φ_m 为正值。 Φ_m 值愈大, 负反馈放大电路愈稳定。

一般要求 $\Phi_m \geq 45^\circ$

7.5 正弦波振荡电路

一、产生正弦波振荡的条件



如果反馈电压 u_f 与原输入信号 u_i 完全相等，则即使无外输入信号，放大电路输出端也有一个正弦波信号——**自激振荡**。(电路要引入正反馈)

➤ 07 反馈放大电路与振荡电路

由此知放大电路产生自激振荡的条件是：

$$\dot{U}_f = \dot{U}_i$$

即：
$$\dot{U}_f = \dot{F}\dot{U}_o = \dot{F}\dot{A}\dot{U}_i = \dot{U}_i$$

所以产生正弦波振荡的条件是： $\dot{A}\dot{F} = 1$

$$|\dot{A}\dot{F}| = 1 \quad \text{——幅度平衡条件}$$

$$\arg \dot{A}\dot{F} = \varphi_A + \varphi_F = \pm 2n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

——相位平衡条件

电路起振的条件： $|\dot{A}\dot{F}| > 1$

二、正弦波振荡电路的组成及分类

组成： 放大电路：集成运放

选频网络：确定电路的振荡频率

反馈网络：引入正反馈

稳幅环节：非线性环节，使输出信号幅值稳定

分类： RC正弦波振荡电路，频率较低，在1MHz以下。

LC正弦波振荡电路，频率较高，在1MHz以上。

石英晶体振荡电路，频率较高，振荡频率非常稳定。

➤ 07 反馈放大电路与振荡电路

三、判断电路能否产生正弦波振荡的方法和步骤

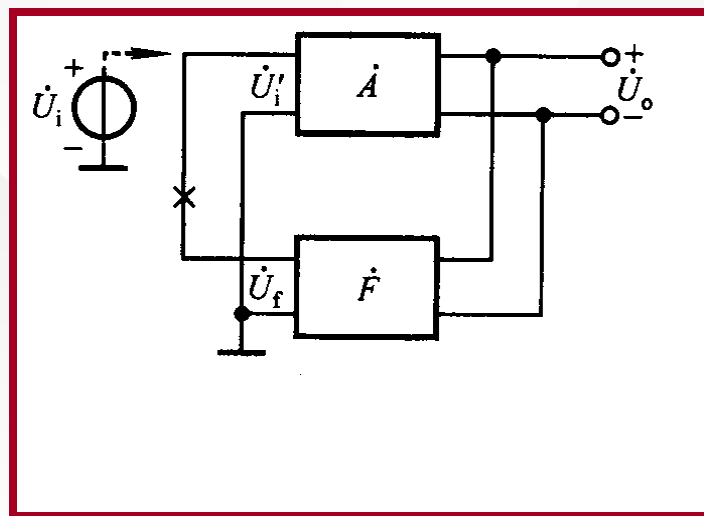
1. 检查电路是否具备正弦波振荡的组成部分；
2. 检查放大电路的静态工作点是否能保证放大电路正常工作；
3. 分析电路是否满足自激振荡的相位平衡条件

判断相位平衡条件的方法是：

瞬时极性法。

4. 判断是否满足振幅平衡条件。

5. 估算振荡频率和起振条件



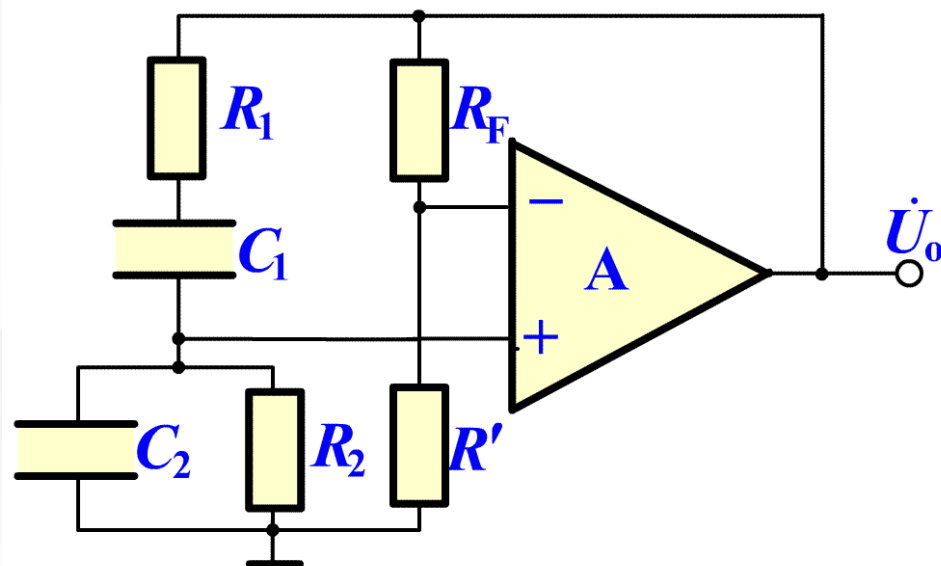
7.6 RC 正弦波振荡电路

RC串并联网络振荡电路也称RC桥式正弦波振荡电路或称文氏振荡电路

电路组成:

放大电路

—— 集成运放 A ;



选频与正反馈网络 —— R 、 C 串并联电路;

稳幅环节 —— R_F 与 R' 组成的负反馈电路。

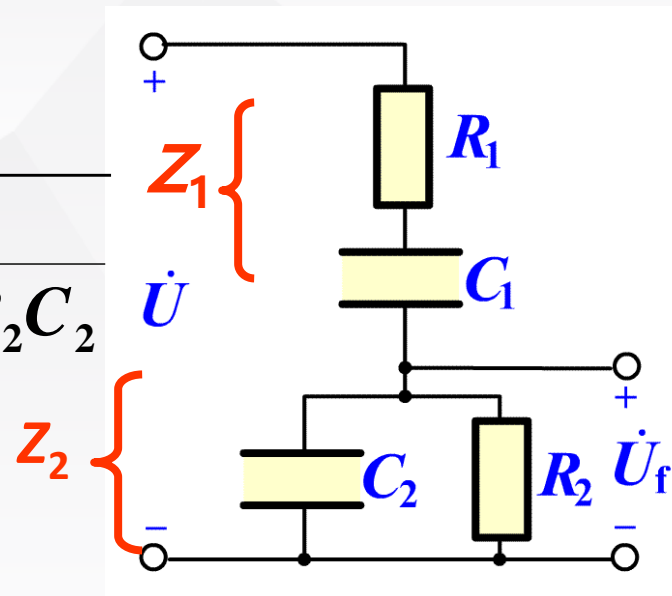
07 反馈放大电路与振荡电路

一、RC 串并联选频网络

$$\begin{aligned}\dot{F} &= \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{1 + j\omega R_2 C_2}} \\ &= \frac{1}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1}\right) + j\left(\omega R_1 C_2 - \frac{1}{\omega R_2 C_1}\right)}\end{aligned}$$

取 $R_1 = R_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$, 令 $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ 则:

$$\dot{F} = \frac{1}{3 + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$



07 反馈放大电路与振荡电路

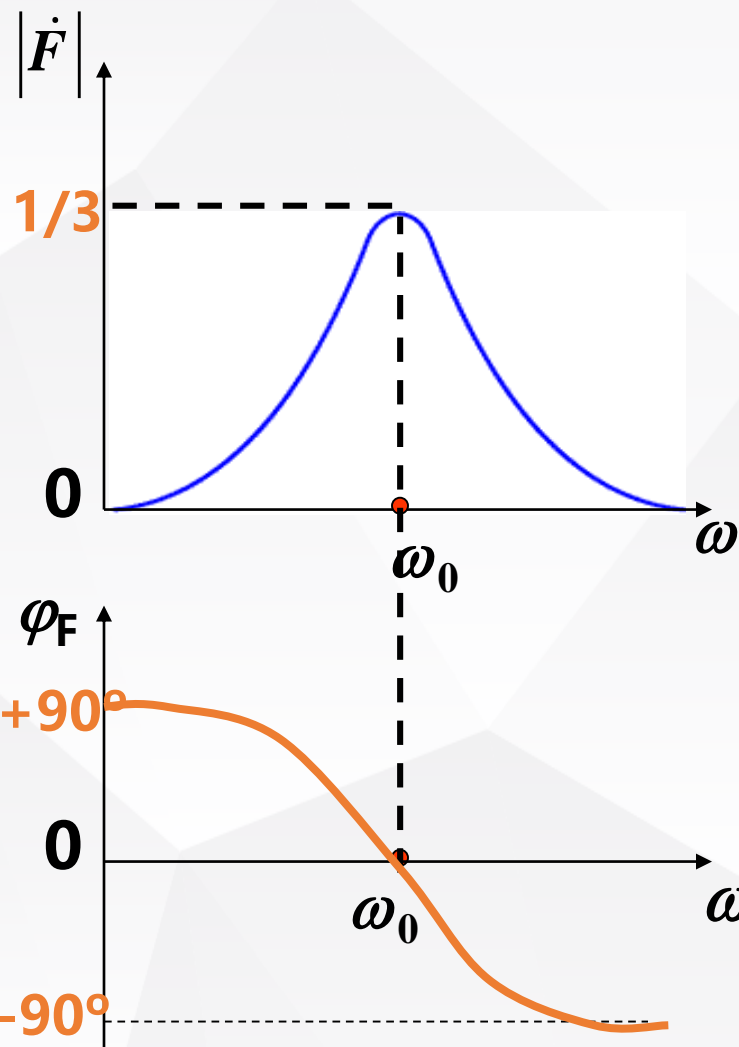
得 RC 串并联电路的幅频特性为：

$$|\dot{F}| = \frac{1}{\sqrt{3^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}$$

相频特性为：

$$\varphi_F = -\arctg \frac{\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}}{3}$$

当 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$ 时， $|\dot{F}| = \frac{1}{3}$ 最大， $\varphi_F = 0$ 。



二、振荡频率与起振条件

1. 振荡频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$

2. 起振条件

$f = f_0$ 时 $|\dot{F}| = \frac{1}{3}$ 由振荡条件知: $|\dot{A}\dot{F}| > 1$

所以起振条件为: $|\dot{A}| > 3$

同相比例运放的电压放大倍数为 $A_{uf} = 1 + \frac{R_F}{R'}$

即要求: $R_F > 2R'$

➤ 07 反馈放大电路与振荡电路

三、振荡电路中的负反馈(稳幅环节)

引入电压串联负反馈，可以提高放大倍数的稳定性，改善振荡电路的输出波形，提高带负载能力。

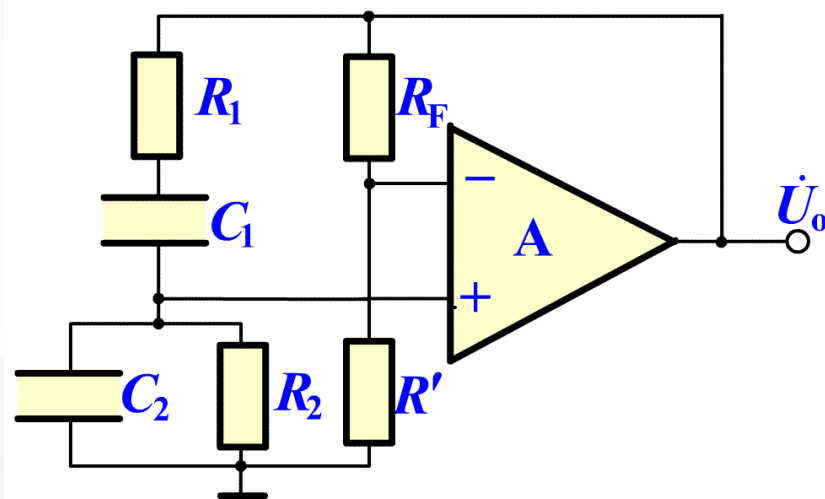
反馈系数
$$F = \frac{R'}{R_F + R'}$$

改变 R_F ，可改变反馈深度。
增加负反馈深度，并且满足

$$|\dot{A}| > 3$$

则电路可以起振，并产生比较稳定而失真较小的正弦波信号。

反馈电阻 R_F 采用负温度系数的热敏电阻，
 R' 采用正温度系数的热敏电阻，均可实现自动稳幅。

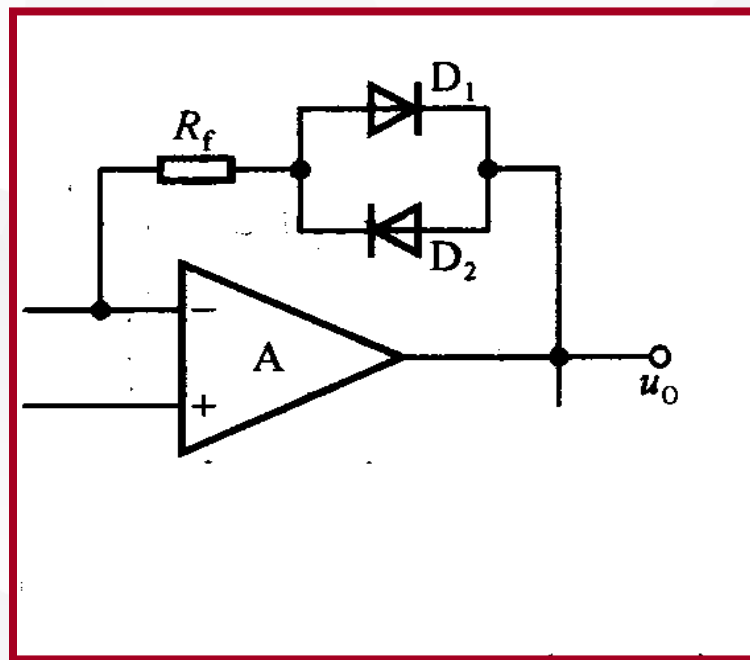


稳幅的其它措施

在 R_f 回路中串联二个并联的二极管

电流增大时，二极管动态电阻减小。电流减小时，动态电阻增大，加大非线性环节，从而使输出电压稳定。

$$\dot{A}_u = 1 + \frac{R_F + r_d}{R'}$$



四、振荡频率可调的RC桥式正弦波振荡电路

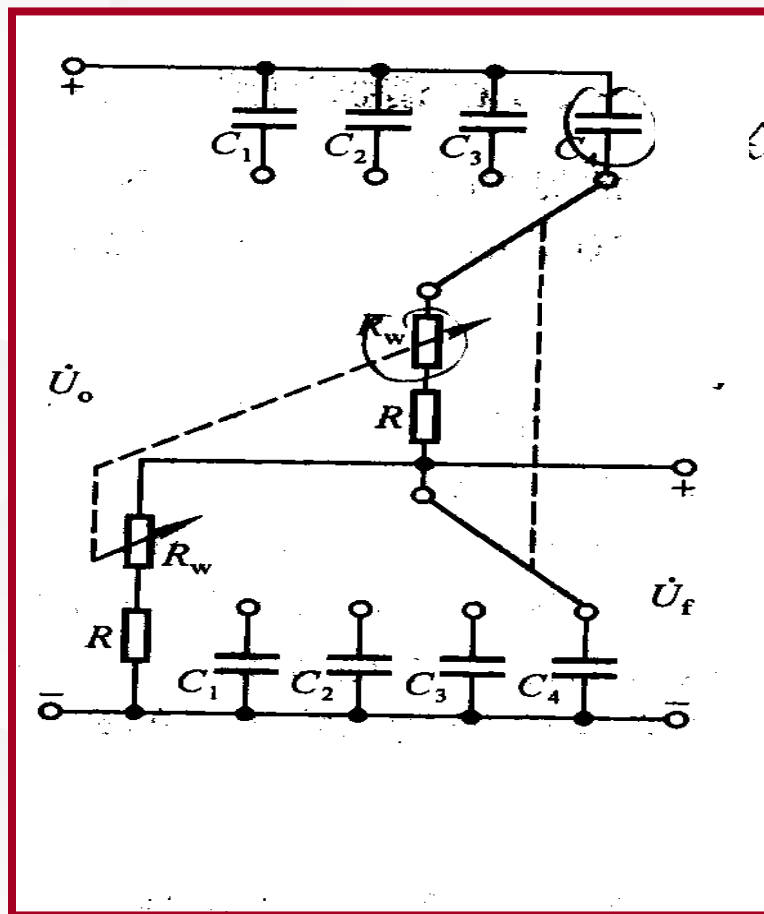
RC串、并联网络中，
如何调节频率？

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

用双层波段开关接不同电容，
作为振荡频率 f_0 的**粗调**；

用同轴电位器实现 f_0 的**微调**。

问题：如何提高频率？



7.7 电压比较器

1. 电压比较器将一个模拟量输入电压与一个参考电压进行比较，输出只有两种可能的状态：高电平或低电平。
2. 比较器中的集成运放一般工作在非线性区；处于开环状态或引入正反馈。
3. 分类：单限比较器、滞回比较器及窗口比较器。
4. 比较器是组成非正弦波发生电路的基本单元，在测量、控制、D/A和A/D转换电路中应用广泛。

一、电压比较器的传输特性

1. 电压比较器的输出电压与输入端的电压之间函数关系

$$u_o = f(u_i)$$

2. 阈值电压： U_T

当比较器的输出电压由一种状态跳变为另一种状态所对应的输入电压。

3. 电压传输特性的三要素

(1) 输出电压的高电平 U_{OH} 和低电平 U_{OL} 的数值。

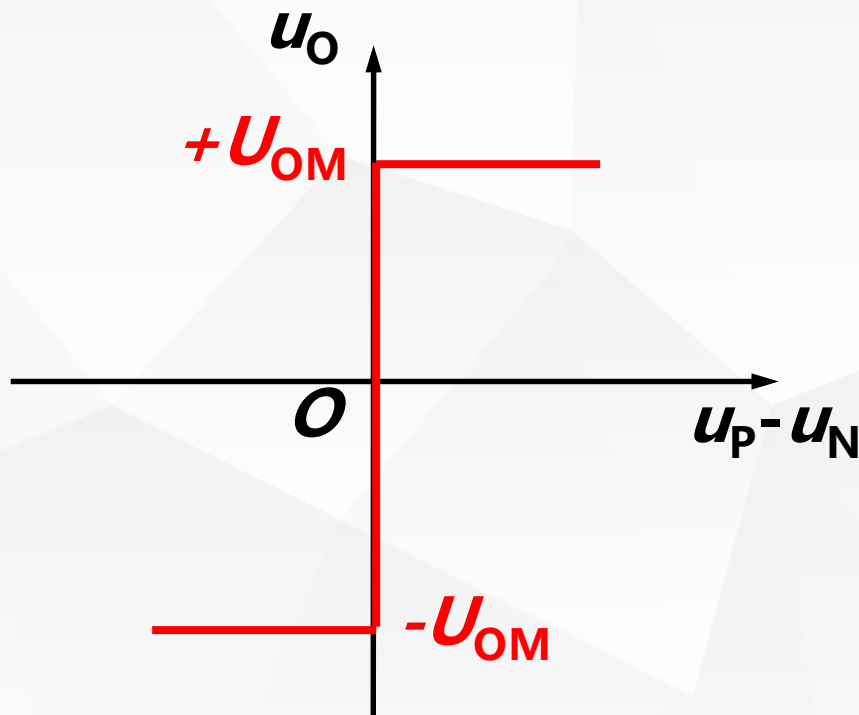
(2) 阈值电压的数值 U_T 。

(3) 当 u_i 变化且经过 U_T 时， u_o 跃变的方向。

二、理想运放的非线性工作区

在电压比较器中，集成运放不是工作在开环状态，就是工作在正反馈。

集成运放的电压传输特性



7.8 单限比较器

一、过零比较器

由于理想运放的开环差模增益为无穷大，所以

当 $u_i < 0$ 时， $u_o = +U_{OM}$;

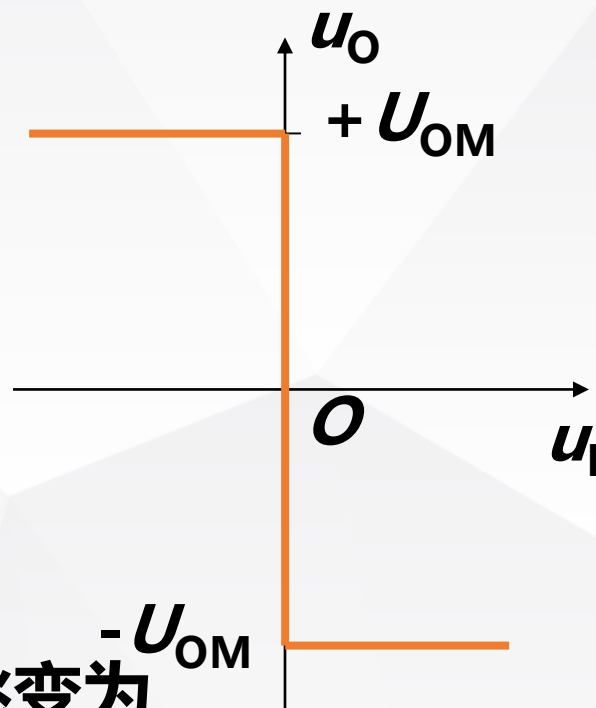
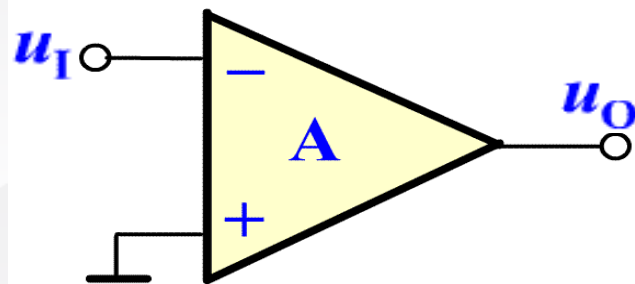
当 $u_i > 0$ 时， $u_o = -U_{OM}$

U_{OM} 为集成运放的最大输出电压。

过零比较器的**传输特性**为：

阈值电压：

当比较器的输出电压由一种状态跳变为另一种状态所对应的输入电压。



07 反馈放大电路与振荡电路

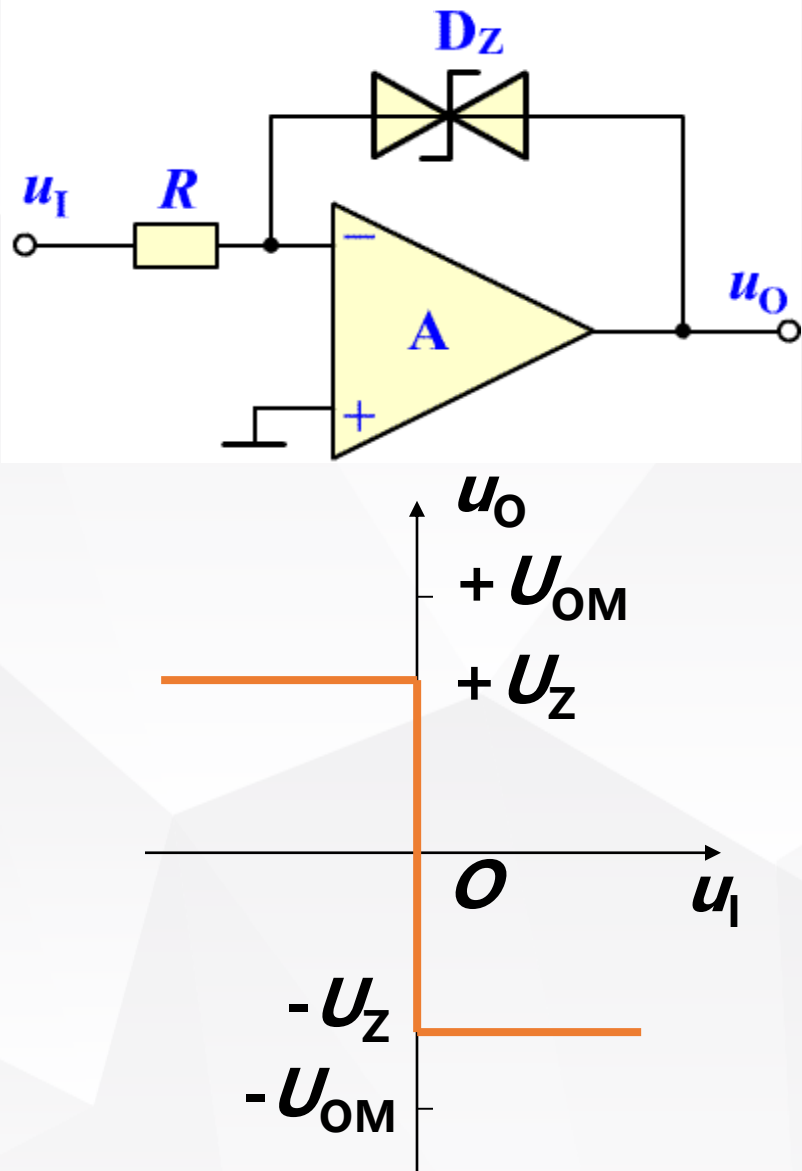
利用稳压管限幅的过零比较器

设任何一个稳压管被反向击穿时，两个稳压管两端总的的稳定电压为 $U_Z < U_{OM}$

当 $u_i < 0$ 时，不接稳压管时， $u_o = +U_{OM}$ ，接入稳压管后，左边的稳压管被反向击穿，集成运放的反向输入端“虚地”

$$, u_o = +U_Z ;$$

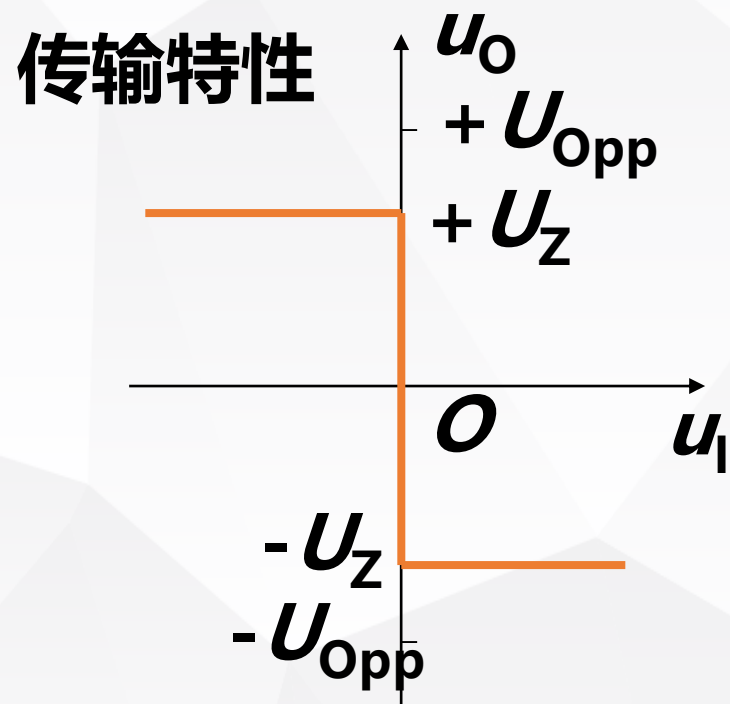
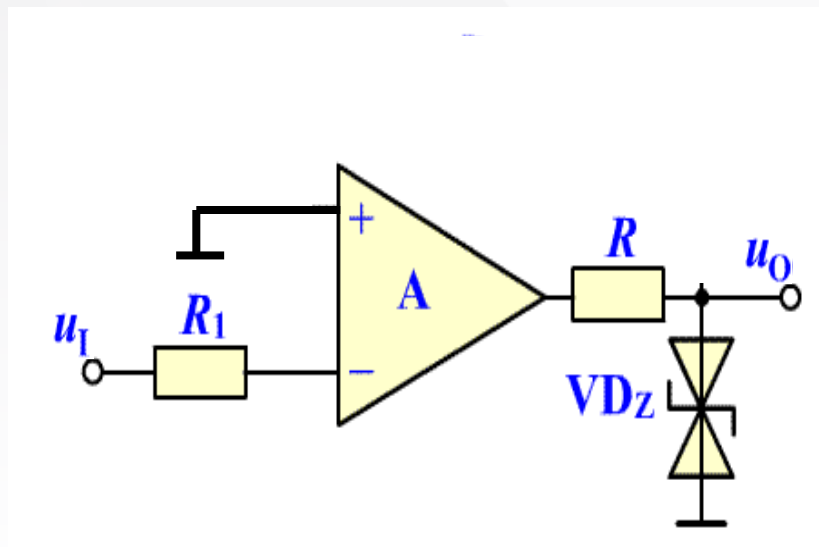
当 $u_i > 0$ 时，右边的稳压管被反向击穿， $u_o = -U_Z$ ；



07 反馈放大电路与振荡电路

利用稳压管限幅的过零比较器(二)

电路图

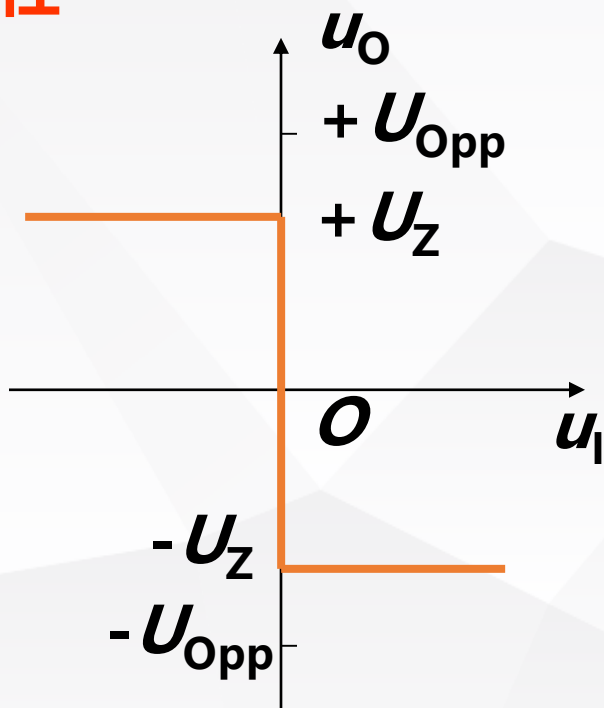


问题：如将输入信号加在 “+” 端，传输特性如何？

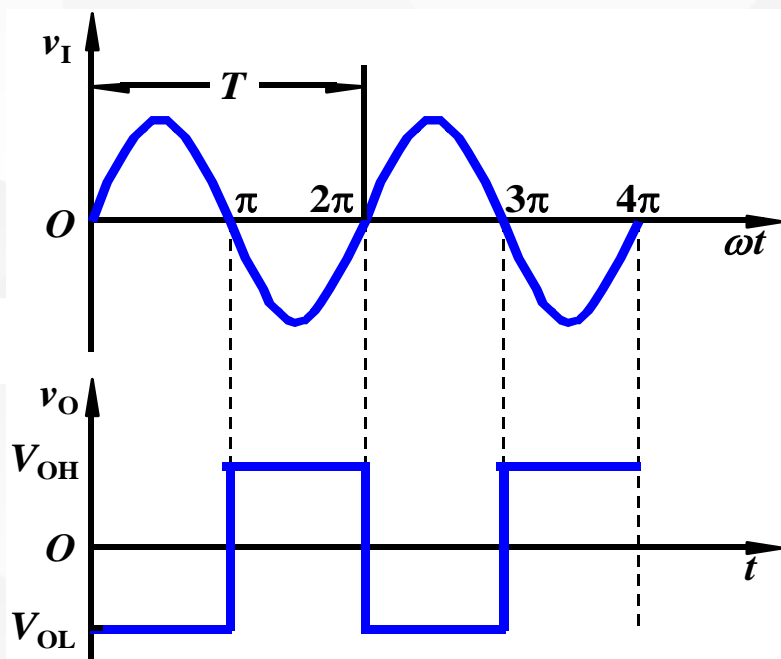
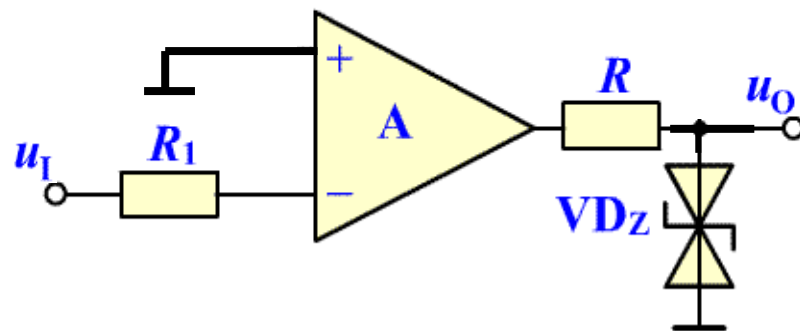
07 反馈放大电路与振荡电路

问题： 过零比较器如图所示，
输入为正负对称的正弦波时，
输出波形是怎样的？

传输特性



将正弦波变为矩形波



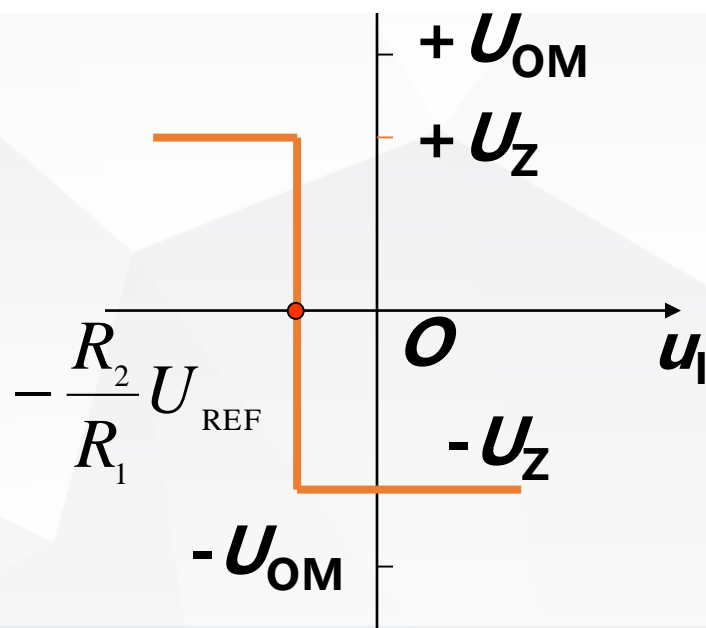
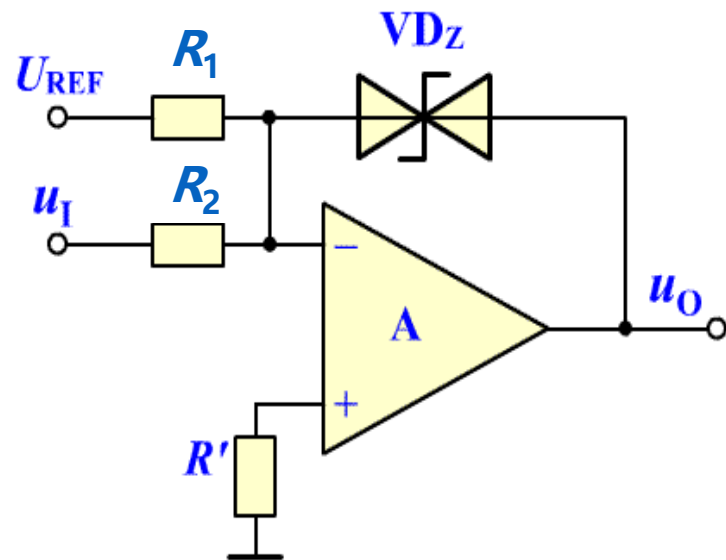
二、单限比较器

单限比较器有一个门限电平，当输入电压等于此门限电平时，输出端的状态立即发生跳变。

当输入电压 u_I 变化，使反相输入端的电位为零时，输出端的状态将发生跳变，门限电平为：

$$U_T = u_I = -\frac{R_2}{R_1} U_{REF}$$

过零比较器是门限电平为零的单限比较器。

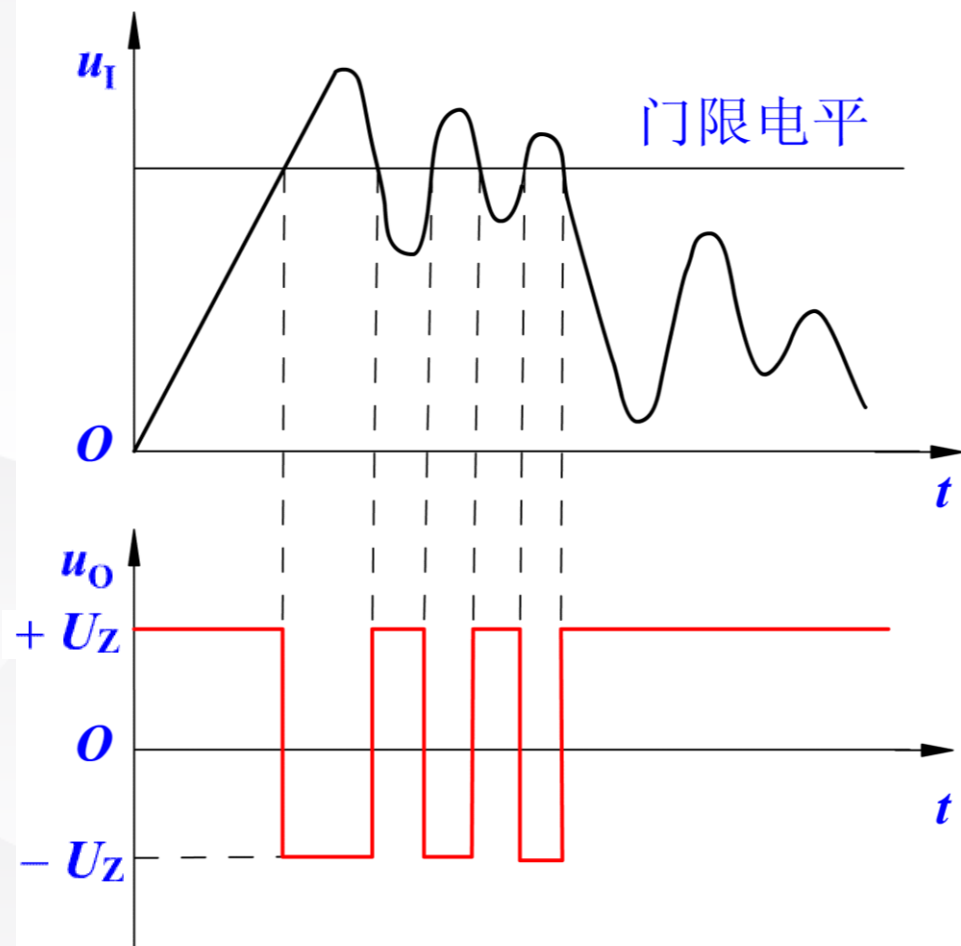


07 反馈放大电路与振荡电路

单限比较器的**作用**：检测输入的模拟信号是否达到某一给定电平。

缺点：抗干扰能力差。

解决办法：
采用具有**滞回**
传输特性的比较器。



存在干扰时单限比较器的 u_i 、 u_o 波形

07 反馈放大电路与振荡电路

三、滞回比较器

1. 从反相输入端输入的滞回比较器电路

计算阈值电压 U_T

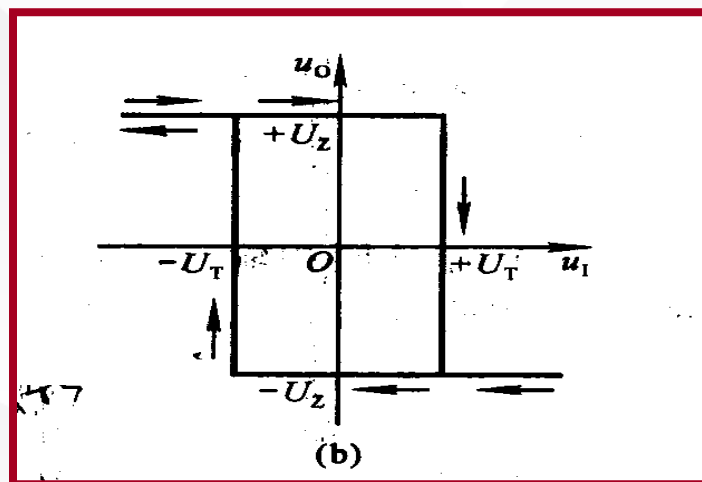
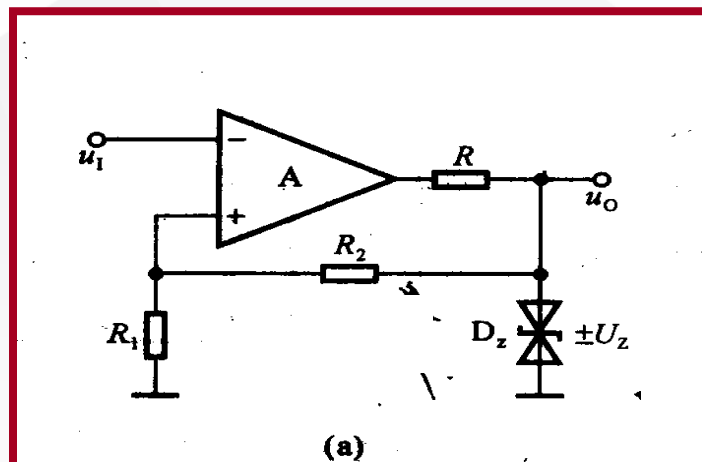
$$U_T = \pm \frac{R_1}{R_1 + R_2} \bullet U_Z$$

电压传输特性

u_o 从 $+U_Z$ 跃变到 $-U_Z$ 的
阈值电压为 $+U_T$

u_o 从 $-U_Z$ 跃变到 $+U_Z$ 的
阈值电压为 $-U_T$

u_i 在 $-U_T$ 与 $+U_T$ 之间增加或减小
, u_o 不发生变化



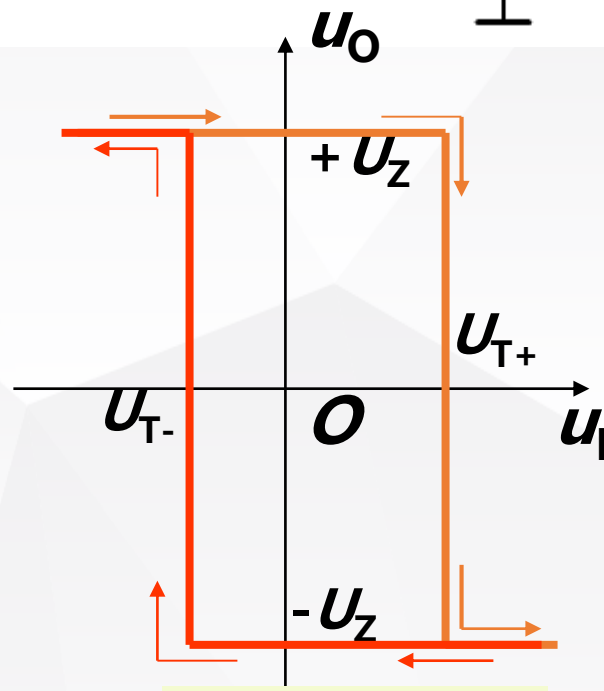
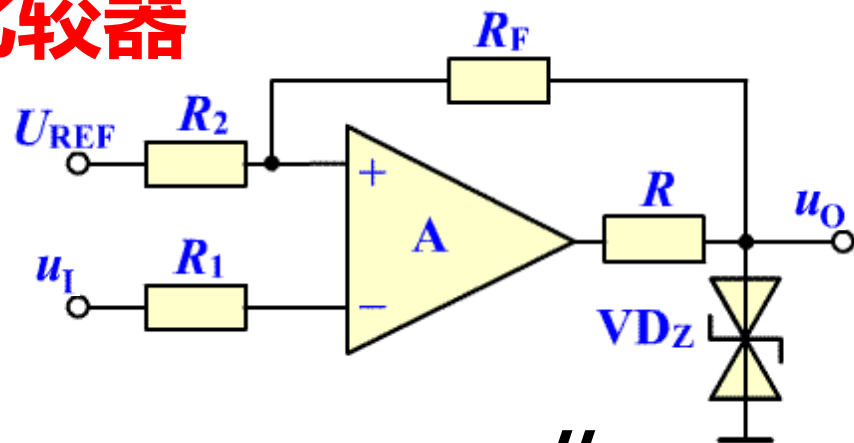
2. 加了参考电压的滞回比较器

U_{REF} 为参考电压；
 u_i 为输入电压；输出电压
 u_o 为 $+U_Z$ 或 $-U_Z$ 。

当 $u_p = u_n$ 时，输出电压
的状态发生跳变。

$$u_p = \frac{R_F}{R_2 + R_F} U_{\text{REF}} \pm \frac{R_2}{R_2 + R_F} u_Z$$

比较器有两个不同的门限电平，
故传输特性呈滞回形状。



滞回比较器

➤ 07 反馈放大电路与振荡电路

若 $u_o = +U_Z$, 当 u_i 逐渐增大时, 使 u_o 由 $+U_Z$ 跳变为 $-U_Z$ 所需的门限电平 U_{T+}

$$U_{T+} = \frac{R_F}{R_2 + R_F} U_{REF} + \frac{R_2}{R_2 + R_F} U_Z$$

若 $u_o = -U_Z$, 当 u_i 逐渐减小时, 使 u_o 由 $-U_Z$ 跳变为 $+U_Z$ 所需的门限电平 U_{T-}

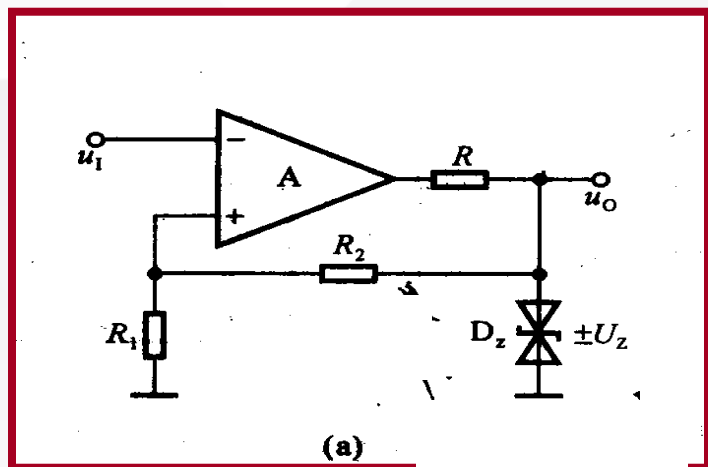
$$U_{T-} = \frac{R_F}{R_2 + R_F} U_{REF} - \frac{R_2}{R_2 + R_F} U_Z$$

回差(门限宽度) ΔU_T :

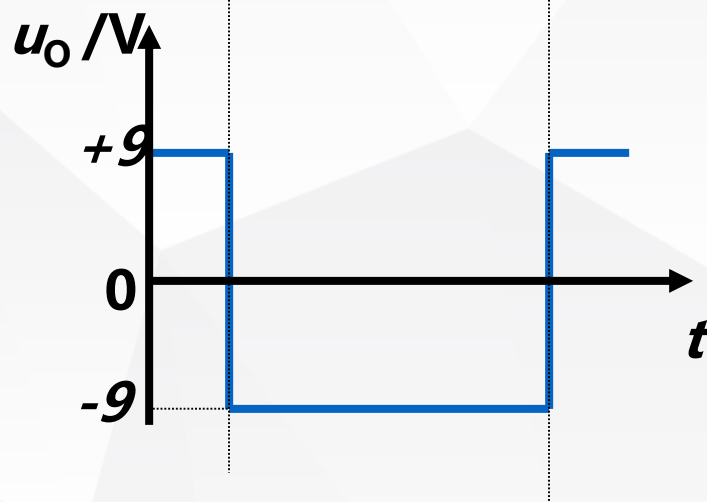
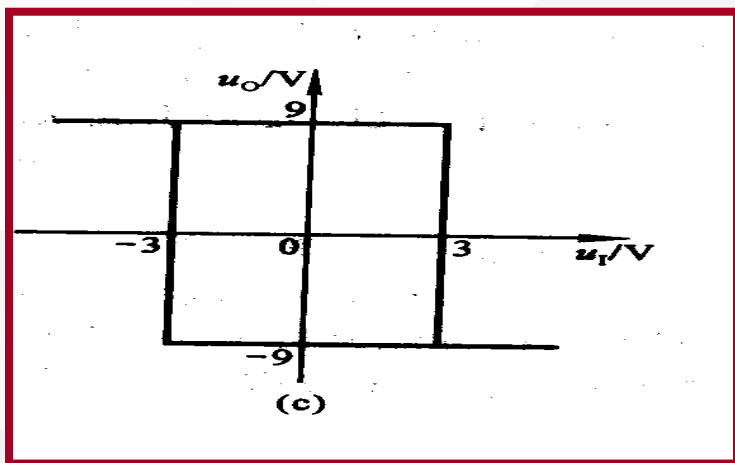
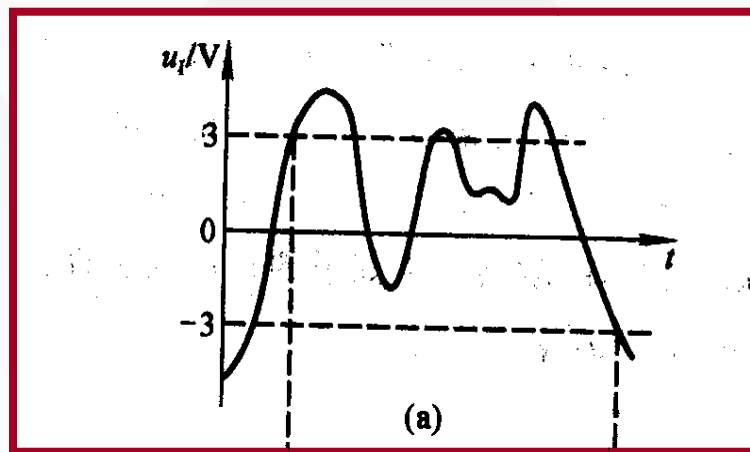
$$\Delta U_T = U_{T+} - U_{T-} = \frac{2R_2}{R_2 + R_F} U_Z$$

07 反馈放大电路与振荡电路

[例] 已知输入波形和电压传输特性，分析输出电压波形。



滞回比较器电路



波形图

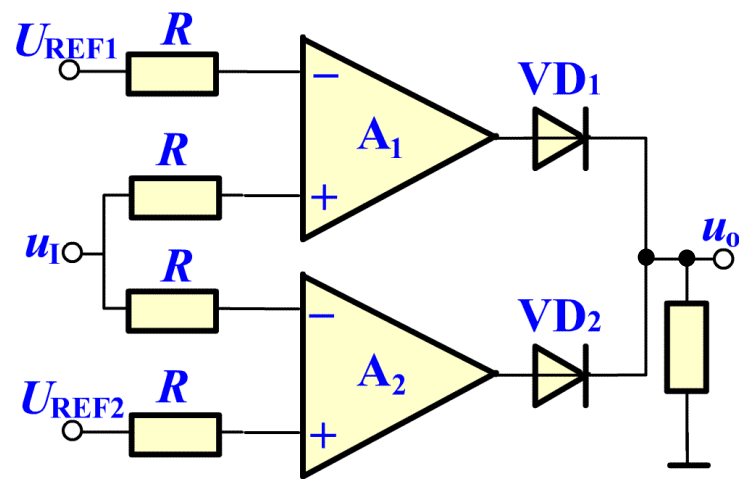
四、窗口比较器

前面的比较器在输入电压单一方向变化时，输出电压只跃变一次，因而不能检测出输入电压是否在二个电压之间。

参考电压 $U_{REF1} > U_{REF2}$

若 u_i 低于 U_{REF2} ，运放 A_1 输出低电平， A_2 输出高电平，二极管 VD_1 截止， VD_2 导通，输出电压 u_o 为高电平；

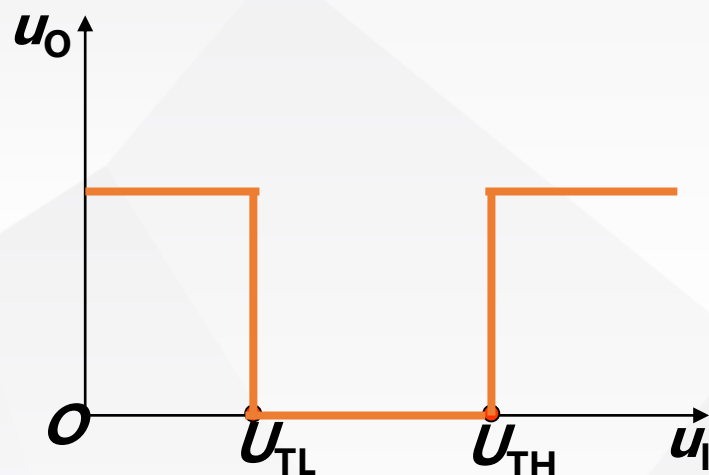
若 u_i 高于 U_{REF1} ，运放 A_1 输出高电平， A_2 输出低电平，二极管 VD_2 截止， VD_1 导通，输出电压 u_o 为高电平；



双限比较器(a)

07 反馈放大电路与振荡电路

当 u_i 高于 U_{REF2} 而低于 U_{REF1} 时，运放 A_1 、 A_2 均输出低电平，二极管 VD_1 、 VD_2 均截止，输出电压 u_o 为低电平



综上所述，双限比较器在输入信号 $u_i < U_{REF2}$ 或 $u_i > U_{REF1}$ 时，输出为高电平；而当 $U_{REF2} < u_i < U_{REF1}$ 时，输出为低电平

下门限电平 $U_{TL} = U_{REF2}$

上门限电平 $U_{TH} = U_{REF1}$