

# 第6章 信号的运算和处理

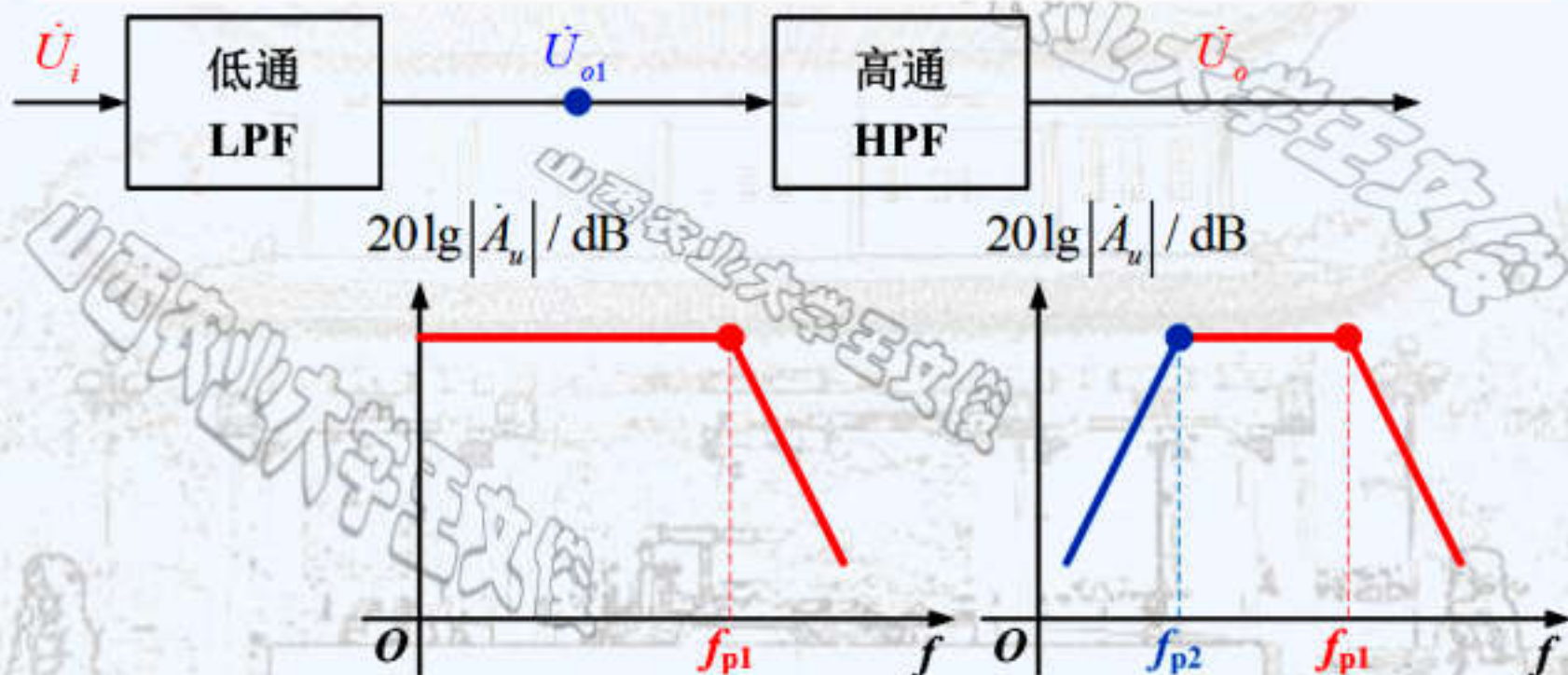
——王文俊

山西农业大学

# 三十、带通滤波器

## • 1、带通滤波器的构成方法

将低通滤波器和高通滤波器串联，就可得到带通滤波器。

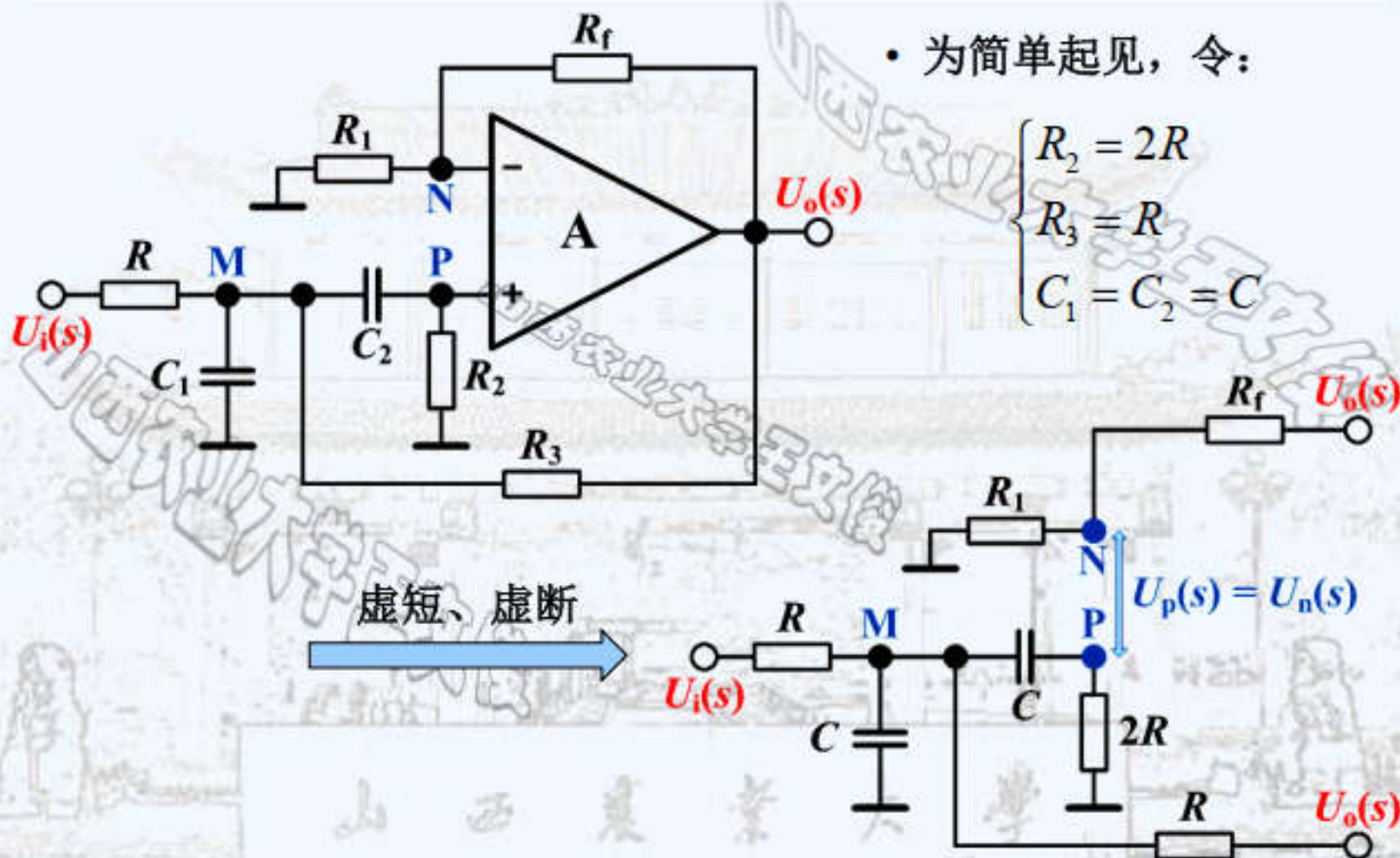


设低通截止频率  $f_{p1}$ ，高通截止频率  $f_{p2} (< f_{p1})$ ，则通频带为  $(f_{p1} - f_{p2})$ 。

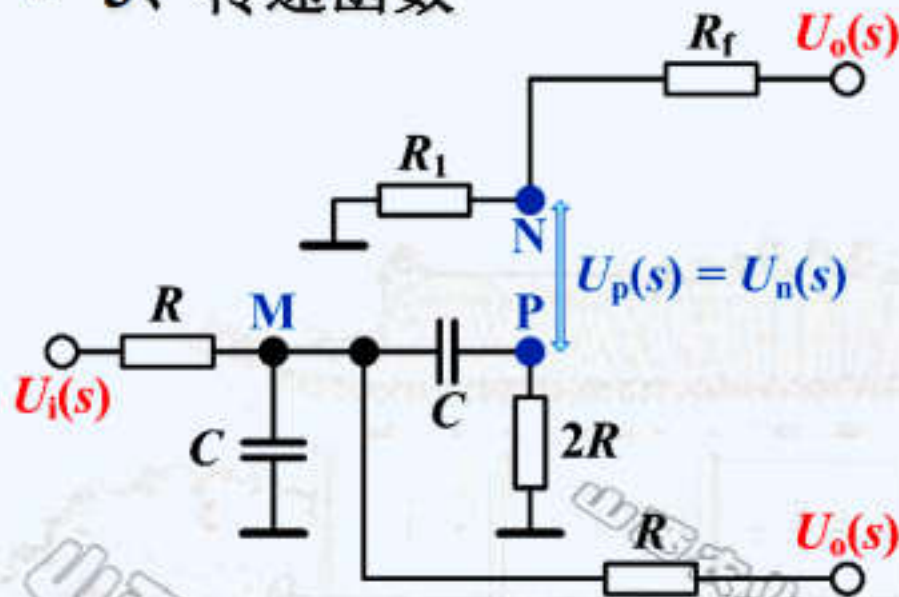


## • 2、压控电压源二阶带通滤波器

实用电路中，常用单个集成运放构成压控电压源二阶带通滤波电路。



### • 3、传递函数



• N 点电流方程:

$$\frac{0 - U_n(s)}{R_1} = \frac{U_n(s) - U_o(s)}{R_f}$$

• 整理得, N 点电位:

$$U_n(s) = \frac{R_1}{R_1 + R_f} U_o(s)$$

• 根据  $U_p(s) = U_n(s)$ , P 点电位:

$$U_p(s) = U_n(s) = \frac{R_1}{R_1 + R_f} U_o(s)$$

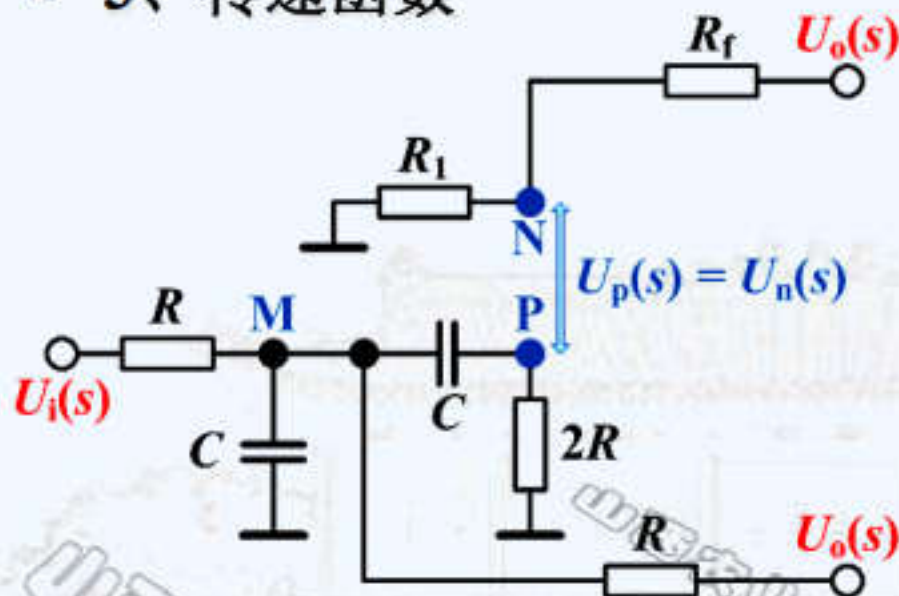
• 同相比例运算电路的比例系数:

$$A_{uf}(s) = \frac{U_o(s)}{U_p(s)} = \frac{R_1 + R_f}{R_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{R_1 + R_f}{R_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$



### • 3、传递函数



• N 点电位:

$$U_n(s) = \frac{1}{A_{uf}(s)} U_o(s)$$

• M 点电流方程:

$$\frac{U_i(s) - U_m(s)}{R} = \frac{U_m(s)}{\frac{1}{sC}} + \frac{U_m(s) - U_o(s)}{R} + \frac{U_m(s) - U_p(s)}{\frac{1}{sC}}$$

• P 点电流方程:  $\frac{U_m(s) - U_p(s)}{\frac{1}{sC}} = \frac{U_p(s) - 0}{2R}$

- 3、传递函数
- 联立得，P 点电位：

$$U_p(s) = \frac{sRCU_i(s) + sRCU_o(s)}{1 + 3sRC + (sRC)^2}$$

- 根据  $U_p(s) = U_n(s)$ ，可得：

$$\frac{1}{A_{uf}(s)} U_o(s) = \frac{sRCU_i(s) + sRCU_o(s)}{1 + 3sRC + (sRC)^2}$$

- 整理得，传递函数：

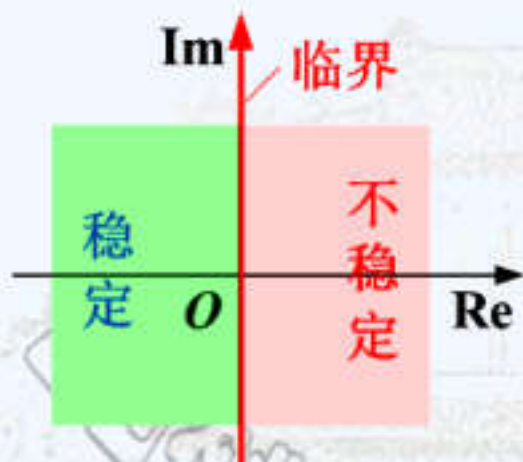
$$A_n(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{A_{uf}(s)sRC}{1 + (3 - A_{uf}(s))sRC + (sRC)^2}$$

分母中  $s$  的**最高**指数为 2，因此为二阶滤波器。



### • 3、传递函数

根据控制理论，传递函数的极点位于复数空间的左半平面（实部为负）时，电路才能稳定，不会产生自激振荡。



- 令传递函数的分母 = 0，求传递函数的极点。

$$1 + (3 - A_{uf}(s))sRC + (sRC)^2 = 0$$

- 令  $x = sRC$ ，可得一元二次方程：

$$x^2 + (3 - A_{uf}(s))x + 1 = 0$$

- 经计算可得，当一次项系数大于零时，电路能够稳定工作，即：

$$3 - A_{uf}(s) > 0 \quad \longrightarrow \quad A_{uf}(s) < 3$$

### • 3、传递函数

- 对传递函数分子分母同除以  $sRC$ ，有：

$$A_u(s) = A_{uf}(s) \frac{1}{(3 - A_{uf}(s)) + \frac{1}{sRC} + sRC}$$

- 分母中提出  $3 - A_{uf}(s)$ ，有：

$$A_u(s) = \frac{A_{uf}(s)}{3 - A_{uf}(s)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{3 - A_{uf}(s)} \left( \frac{1}{sRC} + sRC \right)}$$

山西农业大学



## • 4、电压放大倍数

- 将传递函数中的  $s$  替换为  $j\omega$ ，电压放大倍数：

$$\begin{aligned}\dot{A}_u &= \frac{\dot{A}_{uf}}{3 - \dot{A}_{uf}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{3 - \dot{A}_{uf}} \left( j\omega RC + \frac{1}{j\omega RC} \right)} \\ &= \frac{\dot{A}_{uf}}{3 - \dot{A}_{uf}} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{1}{3 - \dot{A}_{uf}} \left( \omega RC - \frac{1}{\omega RC} \right)}\end{aligned}$$

- 定义中心频率  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ ，则  $\omega RC = 2\pi f \frac{1}{2\pi f_0} = \frac{f}{f_0}$

- 4、电压放大倍数

- 电压放大倍数:

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{A}_{uf}}{3 - \dot{A}_{uf}} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{1}{3 - \dot{A}_{uf}} \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)}$$

- 令  $f = f_0$ ，得通带放大倍数:

$$\dot{A}_{up} = \frac{\dot{A}_{uf}}{3 - \dot{A}_{uf}}$$

- 因此，电压放大倍数:

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{up} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{1}{3 - \dot{A}_{uf}} \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)}$$



## • 5、品质因素 $Q$

品质因素  $Q$  是  $f=f_0$  时的电压放大倍数与比例系数  $|\dot{A}_{uf}|$  之比。

• 因此，电压放大倍数：

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{up} \frac{1}{1 + j \frac{1}{3 - \dot{A}_{uf}} \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)}$$

• 当  $f=f_0$  时，电压放大倍数：

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{up} = \frac{\dot{A}_{uf}}{3 - \dot{A}_{uf}}$$

• 因此， $Q$  的表达式为：

$$Q = \frac{|\dot{A}_u|_{f=f_0}}{|\dot{A}_{uf}|} = \frac{|\dot{A}_{up}|}{|\dot{A}_{uf}|} = \left| \frac{1}{3 - \dot{A}_{uf}} \right|$$

## • 6、幅频特性与关键参数

• 幅频特性:  $\left| \frac{\dot{A}_u}{\dot{A}_{up}} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{1}{3 - \dot{A}_{uf}} \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( Q \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \right)^2}}$

• 令分母等于 $\sqrt{2}$ ，解出通带截止频率：

$$\begin{cases} f_{p1} = \frac{f_0}{2} \left[ \sqrt{(3 - \dot{A}_{uf})^2 + 4} - (3 - \dot{A}_{uf}) \right] = \frac{f_0}{2} \left[ \sqrt{\left( \frac{1}{Q} \right)^2 + 4} - \frac{1}{Q} \right] \\ f_{p2} = \frac{f_0}{2} \left[ \sqrt{(3 - \dot{A}_{uf})^2 + 4} + (3 - \dot{A}_{uf}) \right] = \frac{f_0}{2} \left[ \sqrt{\left( \frac{1}{Q} \right)^2 + 4} + \frac{1}{Q} \right] \end{cases}$$

• 通频带宽度:  $f_{bw} = f_{p2} - f_{p1} = (3 - \dot{A}_{uf}) f_0 = \frac{f_0}{Q}$

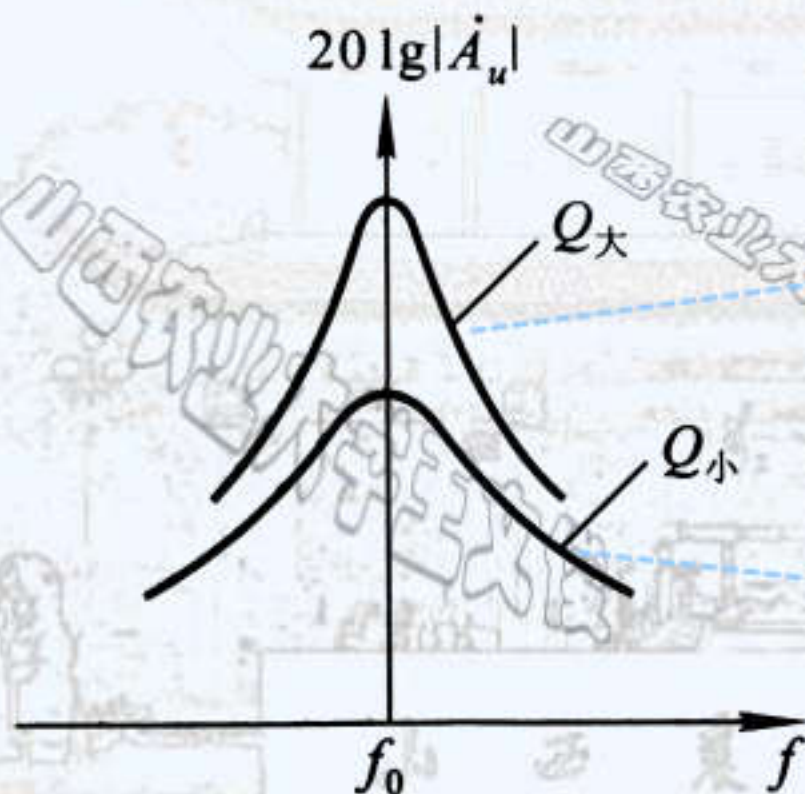


## • 6、幅频特性与关键参数

$$\frac{|\dot{A}_u|}{|\dot{A}_{up}|} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( Q \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \right)^2}}$$

$$|\dot{A}_{up}| = \left| \frac{\dot{A}_{uf}}{3 - \dot{A}_{uf}} \right| = Q |\dot{A}_{uf}| \quad f_{bw} = \frac{f_0}{Q}$$

$$Q = \left| \frac{1}{3 - \dot{A}_{uf}} \right|$$



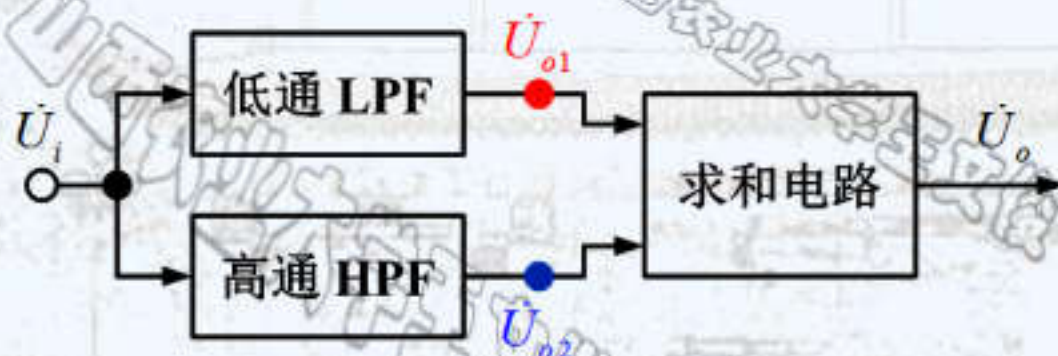
$Q$  值越大，通带放大倍数的数值越大，频带越窄，选频特性越好。

$Q$  值越小，通带放大倍数的数值越小，频带越宽，选频特性越差。

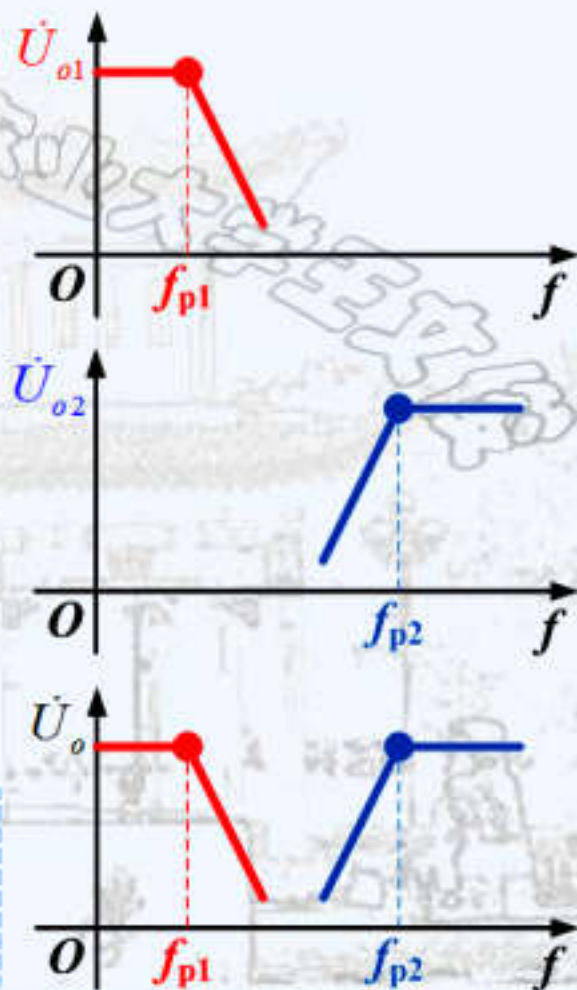
# 三十一、带阻滤波器

## • 1、带阻滤波器的构成方法

将输入电压同时作用于低通滤波器和高通滤波器，再将两个电路的输出电压求和，就可以得到带阻滤波器。



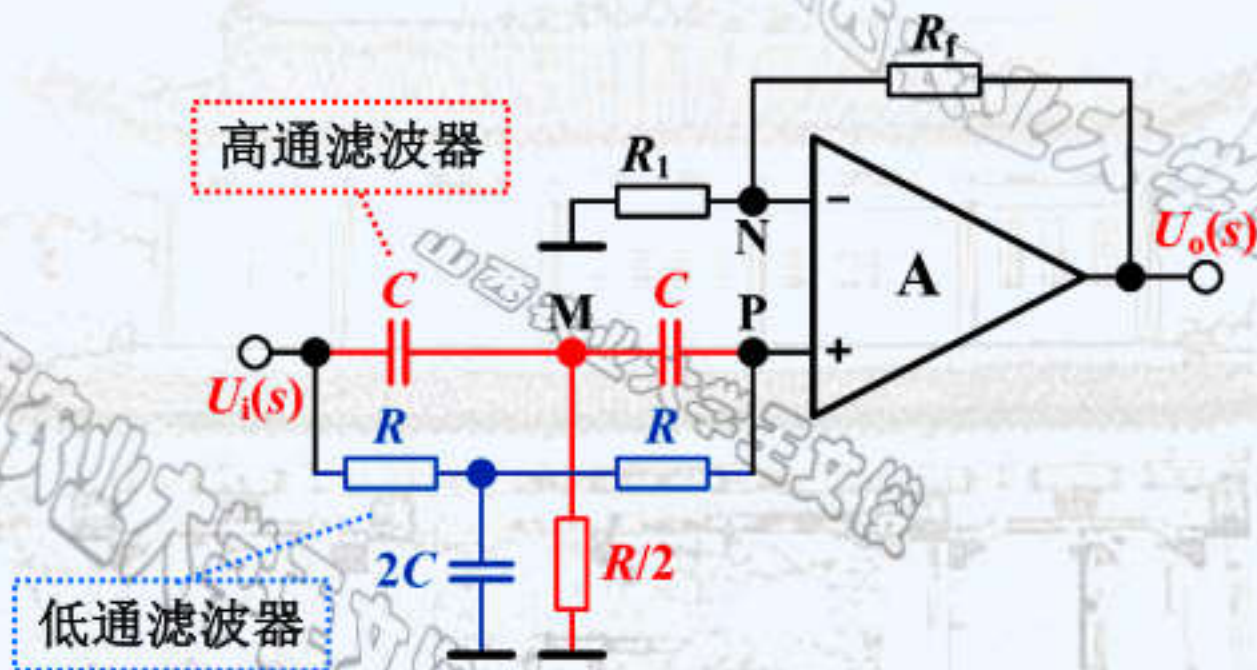
设低通截止频率  $f_{p1}$ ，高通截止频率  $f_{p2}$  ( $> f_{p1}$ )，则电路的阻带为  $(f_{p2} - f_{p1})$ 。





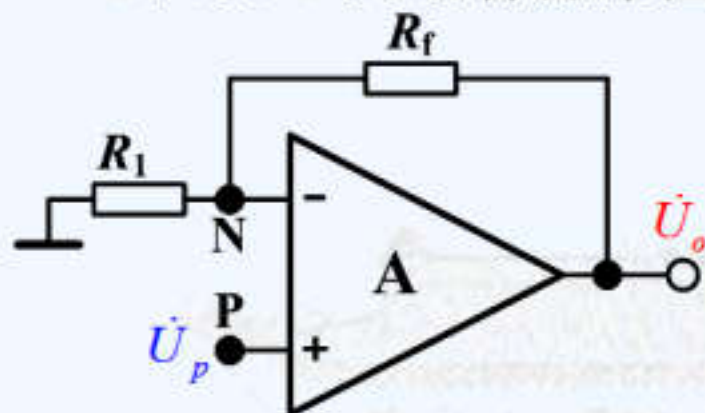
## • 2、双 T 网络有源带阻滤波电路

实用电路中常用无源 LPF 和 HPF 并联构成无源带阻滤波器，然后接同相比例运算电路，从而得到有源带阻滤波电路。



由于两个无源滤波电路均由三个元件构成英文字母 T，故称之为双 T 网络，所构成的滤波器被称为双 T 网络有源带阻滤波电路。

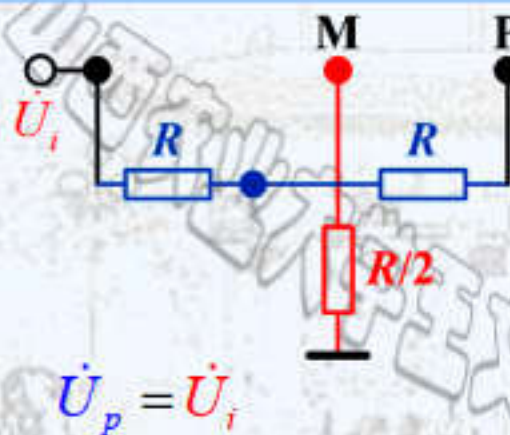
## • 2、双 T 网络有源带阻滤波电路



- 同相比例运算电路的比例系数，即电路的电压放大倍数：

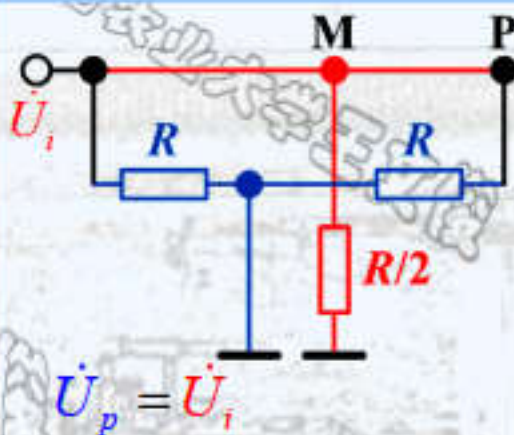
$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_p} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_n} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

$f \rightarrow 0$



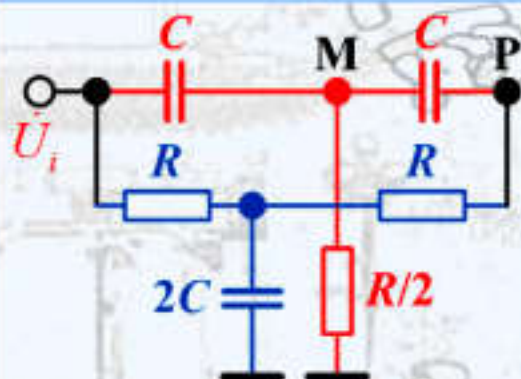
$$\dot{A}_{up} = \dot{A}_{uf} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

$f \rightarrow \infty$



$$\dot{A}_{up} = \dot{A}_{uf} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

$f$  为其他情况

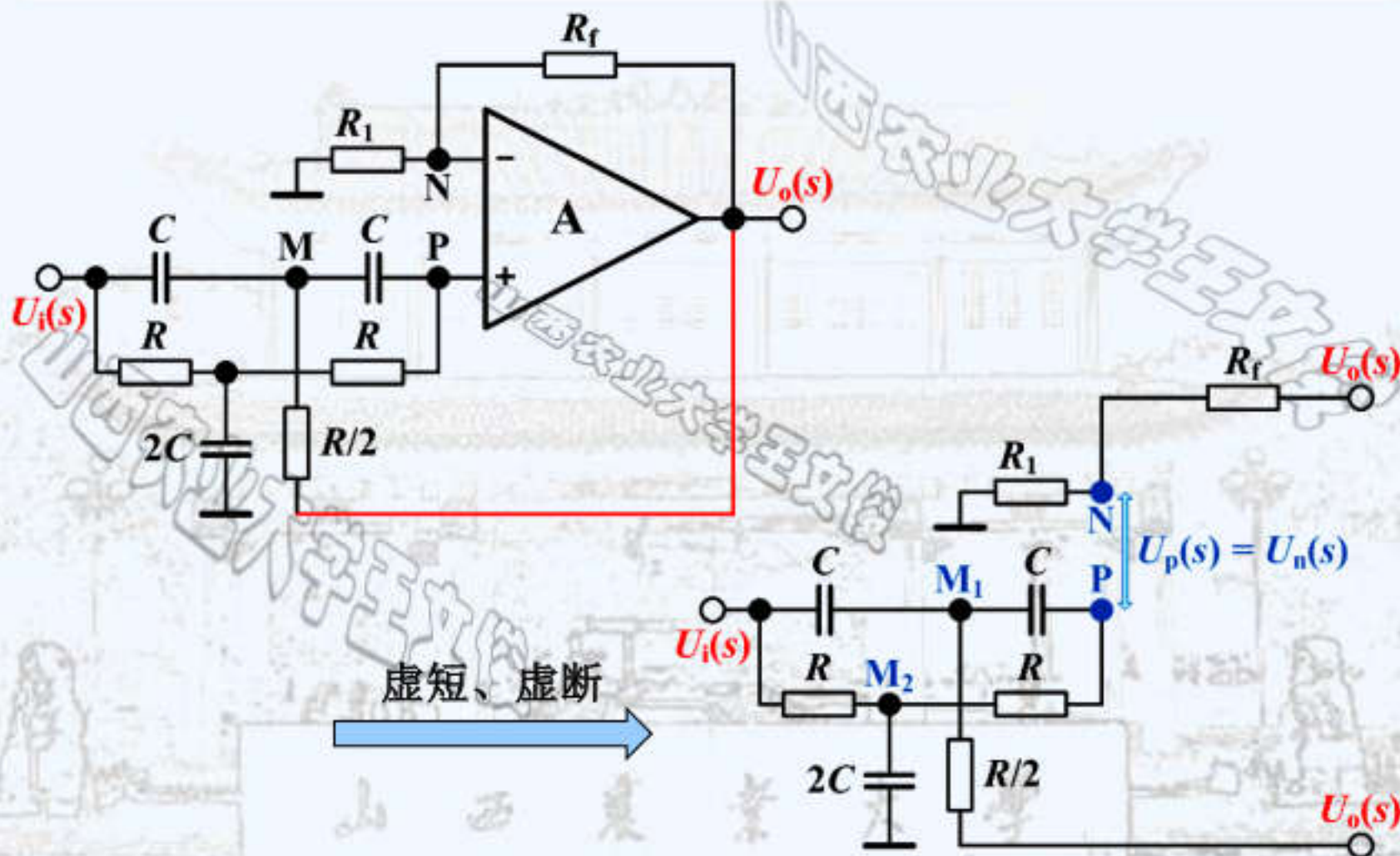


电压放大倍数会衰减并产生相移。

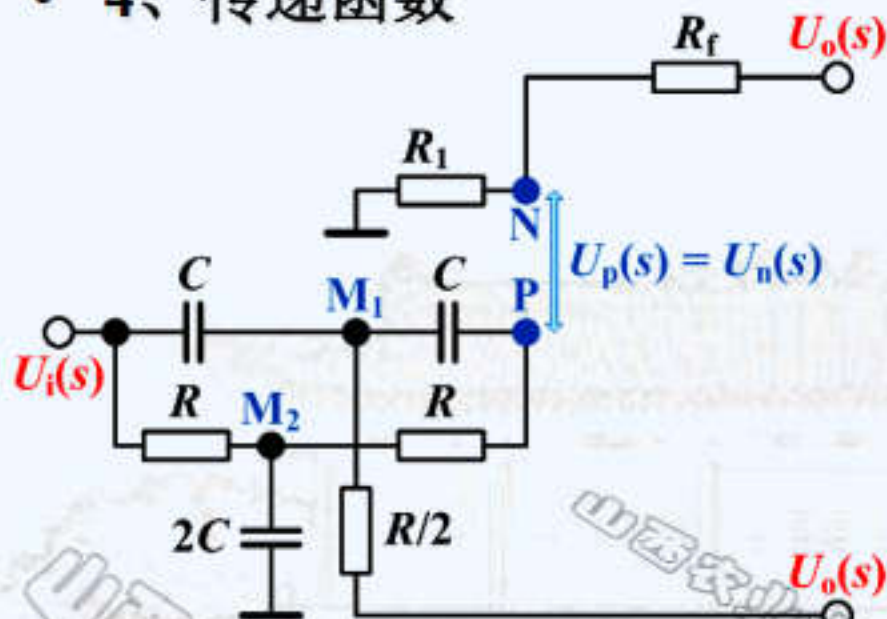


### 3、实用双 T 网络带阻滤波电路

在实际电路中，为改善滤波器的性能，常常引入一定的正反馈。



# 4、传递函数



• N 点电流方程:

$$\frac{0 - U_n(s)}{R_1} = \frac{U_n(s) - U_o(s)}{R_f}$$

• 整理得, N 点电位:

$$U_n(s) = \frac{R_1}{R_1 + R_f} U_o(s)$$

• 根据  $U_p(s) = U_n(s)$ , P 点电位:

$$U_p(s) = U_n(s) = \frac{R_1}{R_1 + R_f} U_o(s)$$

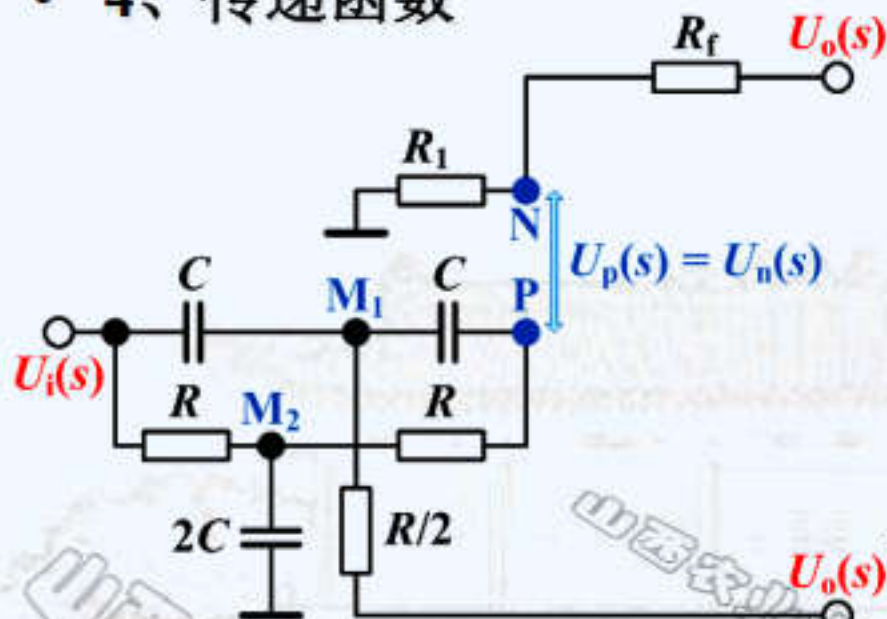
• 同相比例运算电路的比例系数:

$$A_{uf}(s) = \frac{U_o(s)}{U_p(s)} = \frac{R_1 + R_f}{R_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{R_1 + R_f}{R_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$



# 4、传递函数



• N 点电位:

$$U_n(s) = \frac{1}{A_{uf}(s)} U_o(s)$$

• P 点电流方程:

$$\frac{U_{m1}(s) - U_p(s)}{\frac{1}{sC}} = \frac{U_p(s) - U_{m2}(s)}{R}$$

•  $M_1$  点电流方程: 
$$\frac{U_i(s) - U_{m1}(s)}{\frac{1}{sC}} = \frac{U_{m1}(s) - U_o(s)}{\frac{R}{2}} + \frac{U_{m1}(s) - U_p(s)}{\frac{1}{sC}}$$

•  $M_2$  点电流方程: 
$$\frac{U_i(s) - U_{m2}(s)}{R} = \frac{U_{m2}(s)}{\frac{1}{s2C}} + \frac{U_{m2}(s) - U_p(s)}{R}$$

## • 4、传递函数

- 联立 P 点、 $M_1$  点、 $M_2$  点的电流方程，得 P 点电位：

$$U_p(s) = \frac{\left[(sRC)^2 + 1\right]U_i(s) + 2sRCU_o(s)}{1 + 4sRC + (sRC)^2}$$

- 根据  $U_p(s) = U_n(s)$ ，可得：

$$\frac{1}{A_{uf}(s)}U_o(s) = \frac{\left[(sRC)^2 + 1\right]U_i(s) + 2sRCU_o(s)}{1 + 4sRC + (sRC)^2}$$

- 整理得，传递函数：

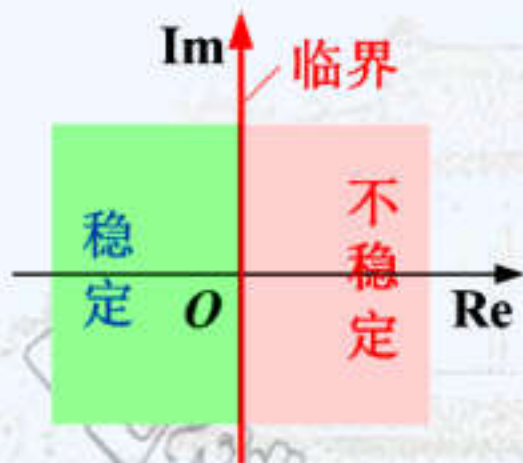
$$A_u(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = A_{uf}(s) \frac{1 + (sRC)^2}{1 + 2(2 - A_{uf}(s))sRC + (sRC)^2}$$

分母中  $s$  的**最高**指数为 2，因此为二阶滤波器。



## • 4、传递函数

根据控制理论，传递函数的极点位于复数空间的左半平面（实部为负）时，电路才能稳定，不会产生自激振荡。



- 令传递函数的分母 = 0，求传递函数的极点。

$$1 + 2(2 - A_{uf}(s))sRC + (sRC)^2 = 0$$

- 令  $x = sRC$ ，可得一元二次方程：

$$x^2 + 2(2 - A_{uf}(s))x + 1 = 0$$

- 经计算可得，当一次项系数大于零时，电路能够稳定工作，即：

$$2(2 - A_{uf}(s)) > 0 \quad \Rightarrow \quad A_{uf}(s) < 2$$

## • 4、传递函数

- 对传递函数分子分母同除以  $sRC$ ，有：

$$A_u(s) = A_{uf}(s) \frac{\frac{1}{sRC} + sRC}{2(2 - A_{uf}(s)) + \frac{1}{sRC} + sRC}$$

- 分子分母中除以  $2(2 - A_{uf}(s))$ ，有：

$$A_u(s) = A_{uf}(s) \frac{\frac{1}{2(2 - A_{uf}(s))} \left( \frac{1}{sRC} + sRC \right)}{1 + \frac{1}{2(2 - A_{uf}(s))} \left( \frac{1}{sRC} + sRC \right)}$$



## • 5、电压放大倍数

- 将传递函数中的  $s$  替换为  $j\omega$ ，电压放大倍数：

$$\begin{aligned}\dot{A}_u &= \dot{A}_{uf} \frac{\frac{1}{2(2 - \dot{A}_{uf})} \left( \frac{1}{j\omega RC} + j\omega RC \right)}{1 + \frac{1}{2(2 - \dot{A}_{uf})} \left( \frac{1}{j\omega RC} + j\omega RC \right)} \\ &= \dot{A}_{uf} \frac{j \frac{1}{2(2 - \dot{A}_{uf})} \left( \omega RC - \frac{1}{\omega RC} \right)}{1 + j \frac{1}{2(2 - \dot{A}_{uf})} \left( \omega RC - \frac{1}{\omega RC} \right)}\end{aligned}$$

- 定义中心频率  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ ，则  $\omega RC = 2\pi f \frac{1}{2\pi f_0} = \frac{f}{f_0}$

## • 5、电压放大倍数

• 电压放大倍数:  $\dot{A}_u = \dot{A}_{uf} \frac{j \frac{1}{2(2 - \dot{A}_{uf})} \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)}{1 + j \frac{1}{2(2 - \dot{A}_{uf})} \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)}$

• 令  $f=0$  或  $\infty$ , 得通带放大倍数:

$$\dot{A}_{up} = \dot{A}_{uf}$$

• 因此, 电压放大倍数:

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{up} \frac{j \frac{1}{2(2 - \dot{A}_{up})} \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)}{1 + j \frac{1}{2(2 - \dot{A}_{up})} \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)}$$



## • 6、品质因素 $Q$ 与幅频特性

定义：品质因素  $Q = \frac{1}{2|2 - \dot{A}_{up}|}$

• 电压放大倍数：  $\dot{A}_u = \dot{A}_{up} \frac{jQ \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)}{1 + jQ \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)}$

• 幅频特性：  $\left| \frac{\dot{A}_u}{\dot{A}_{up}} \right| = \frac{Q \left| \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \right|}{\sqrt{1 + \left( Q \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \right)^2}}$

- 6、品质因素  $Q$  与幅频特性

- 令  $\left| \frac{\dot{A}_u}{\dot{A}_{up}} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}}$ ，解出通带截止频率：

$$\begin{cases} f_{p1} = \frac{f_0}{2} \left[ \sqrt{\left( \frac{1}{Q} \right)^2 + 4} - \frac{1}{Q} \right] \\ f_{p2} = \frac{f_0}{2} \left[ \sqrt{\left( \frac{1}{Q} \right)^2 + 4} + \frac{1}{Q} \right] \end{cases}$$

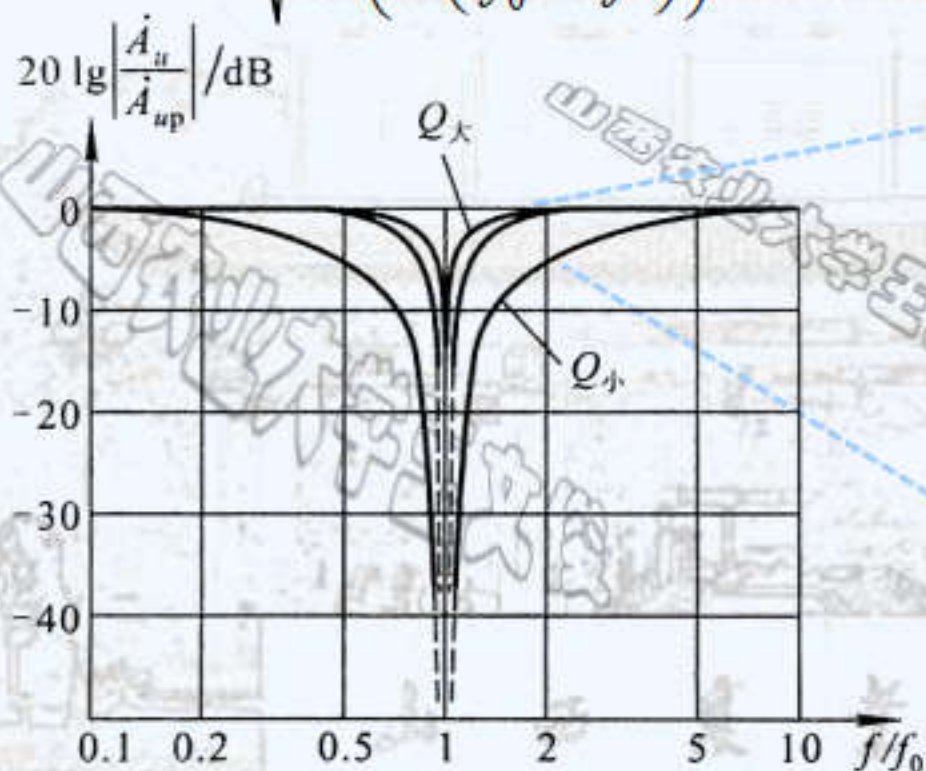
- 因此，带阻滤波器的阻带宽度为：

$$BW = f_{p2} - f_{p1} = \frac{f_0}{Q}$$



## • 6、品质因素 $Q$ 与幅频特性

$$\left| \frac{\dot{A}_u}{\dot{A}_{up}} \right| = \frac{\left| Q \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \right|}{\sqrt{1 + \left( Q \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \right)^2}} \quad \rightarrow \quad \left. \left| \frac{\dot{A}_u}{\dot{A}_{up}} \right| \right|_{f=f_0} = 0 \quad BW = \frac{f_0}{Q}$$



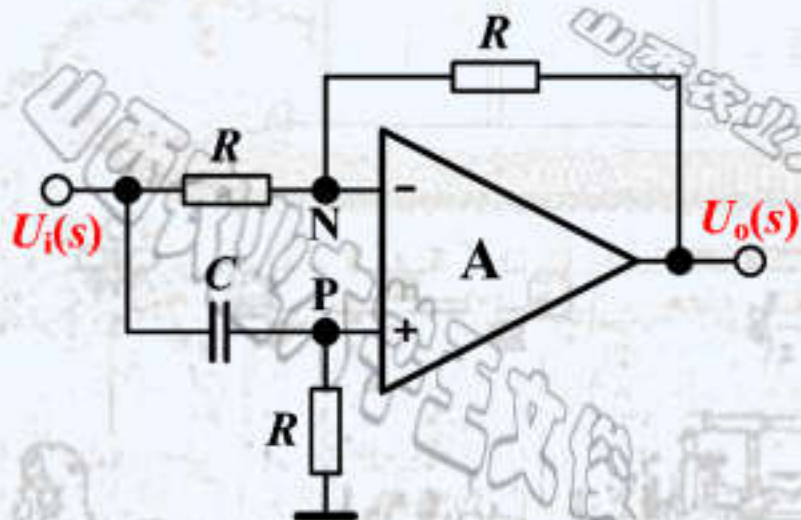
$Q$  值越大，阻带越窄。

$Q$  值越小，阻带越宽。

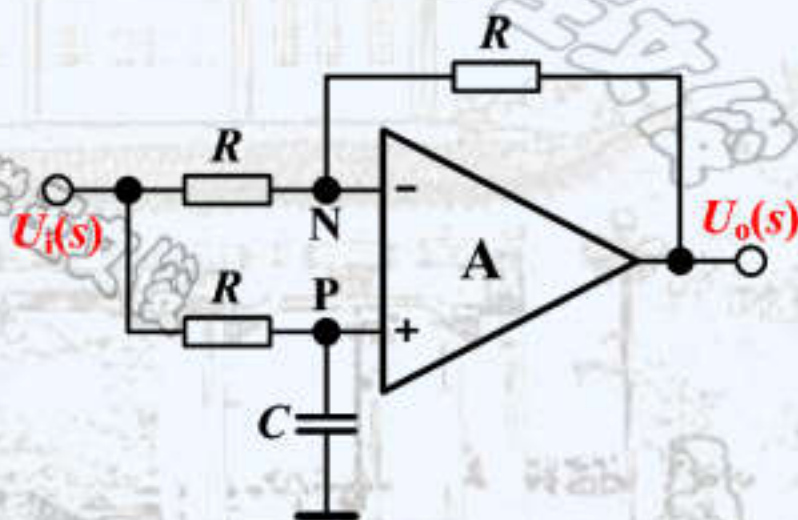
## 三十二、全通滤波器

### • 1、全通滤波器

全通滤波器对于频率从零到无穷大的信号具有相同的比例系数，但对于不同频率的信号将产生不同的相移。



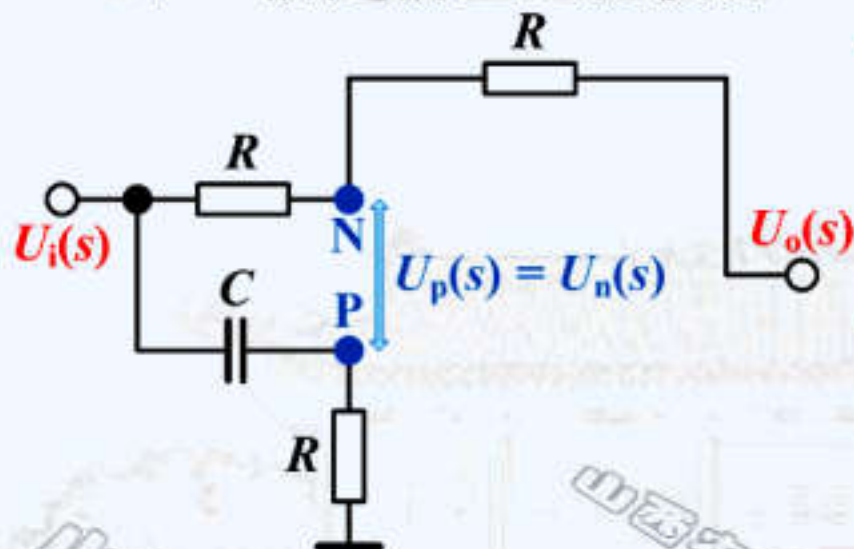
一阶超前全通滤波器



一阶滞后全通滤波器



## • 2、一阶超前全通滤波器



• N 点电流方程:

$$\frac{U_i(s) - U_n(s)}{R} = \frac{U_n(s) - U_o(s)}{R}$$

• N 点电位:

$$U_n(s) = \frac{U_i(s) + U_o(s)}{2}$$

• P 点电流方程:

$$\frac{U_i(s) - U_p(s)}{\frac{1}{sC}} = \frac{U_p(s)}{R}$$

• P 点电位:

$$U_p(s) = \frac{sRC}{1 + sRC} U_i(s)$$

• 根据  $U_p(s) = U_n(s)$ , 可得:

$$\frac{U_i(s) + U_o(s)}{2} = \frac{sRC}{1 + sRC} U_i(s)$$

• 整理得, 传递函数:

$$A_u(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = -\frac{1 - sRC}{1 + sRC}$$

## • 2、一阶超前全通滤波器

• 将传递函数中的  $s$  替换为  $j\omega$ ，电压放大倍数： $\dot{A}_u = -\frac{1-j\omega RC}{1+j\omega RC}$

• 定义特征频率  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ ，则  $\omega RC = 2\pi f \frac{1}{2\pi f_0} = \frac{f}{f_0}$

• 电压放大倍数：

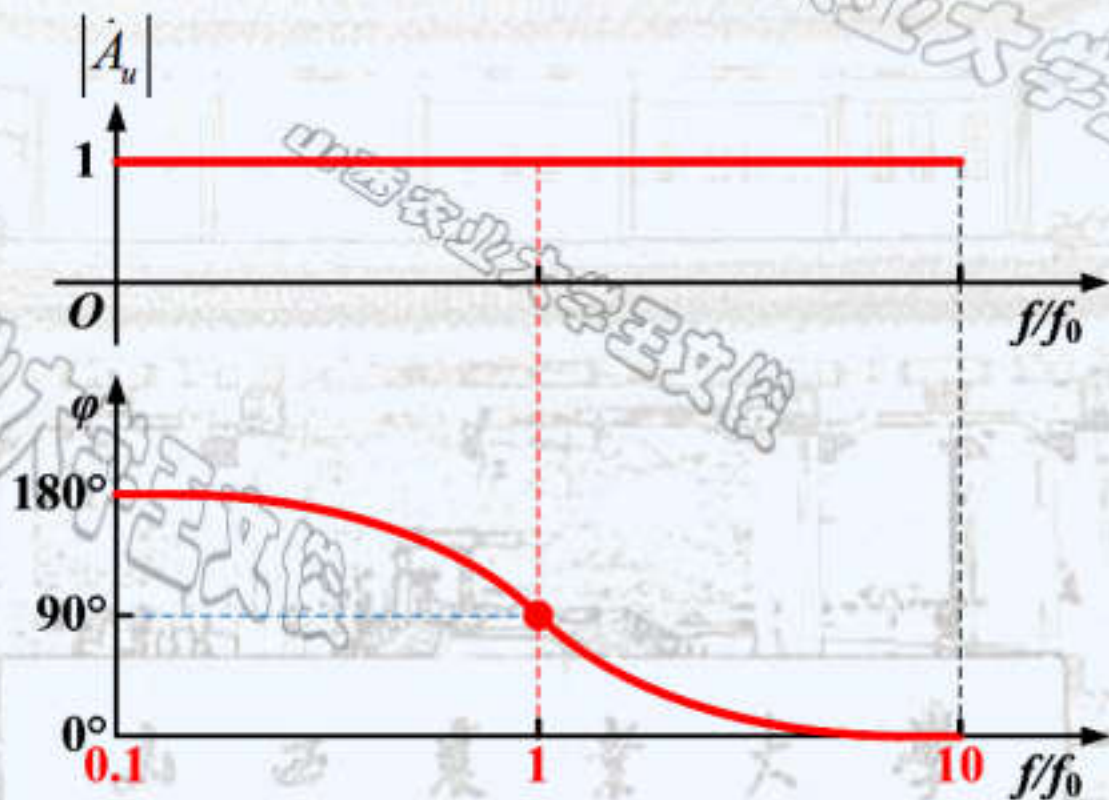
$$\dot{A}_u = -\frac{1-j\frac{f}{f_0}}{1+j\frac{f}{f_0}} = e^{j180^\circ} \cdot \frac{\sqrt{1+\left(\frac{f}{f_0}\right)^2} e^{j\left(-\arctan\frac{f}{f_0}\right)}}{\sqrt{1+\left(\frac{f}{f_0}\right)^2} e^{j\arctan\frac{f}{f_0}}} = 1 \cdot e^{j\left(180^\circ - 2\arctan\frac{f}{f_0}\right)}$$

• 幅值和相角的形式：
$$\begin{cases} |\dot{A}_u| = 1 \\ \varphi = 180^\circ - 2\arctan\frac{f}{f_0} \end{cases}$$

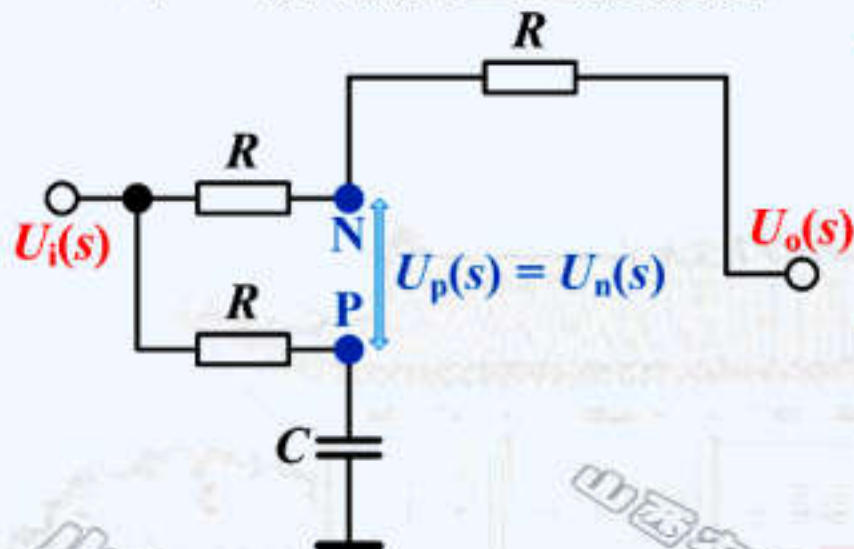


## • 2、一阶超前全通滤波器

$$\begin{cases} |\dot{A}_u| = 1 \\ \varphi = 180^\circ - 2 \arctan \frac{f}{f_0} \end{cases} \longrightarrow \varphi \approx \begin{cases} +180^\circ & f \ll f_0 \\ +90^\circ & f = f_0 \\ 0^\circ & f \gg f_0 \end{cases}$$



### • 3、一阶滞后全通滤波器



• N 点电流方程:

$$\frac{U_i(s) - U_n(s)}{R} = \frac{U_n(s) - U_o(s)}{R}$$

• N 点电位:

$$U_n(s) = \frac{U_i(s) + U_o(s)}{2}$$

• P 点电流方程:

$$\frac{U_i(s) - U_p(s)}{R} = \frac{U_p(s)}{\frac{1}{sC}}$$

• 根据  $U_p(s) = U_n(s)$ , 可得:

$$\frac{U_i(s) + U_o(s)}{2} = \frac{1}{1 + sRC} U_i(s)$$

• P 点电位:

$$U_p(s) = \frac{1}{1 + sRC} U_i(s)$$

• 整理得, 传递函数:

$$A_u(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1 - sRC}{1 + sRC}$$



### • 3、一阶滞后全通滤波器

• 将传递函数中的  $s$  替换为  $j\omega$ ，电压放大倍数： $\dot{A}_u = \frac{1 - j\omega RC}{1 + j\omega RC}$

• 定义特征频率  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ ，则  $\omega RC = 2\pi f \frac{1}{2\pi f_0} = \frac{f}{f_0}$

• 电压放大倍数：

$$\dot{A}_u = \frac{1 - j \frac{f}{f_0}}{1 + j \frac{f}{f_0}} = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} e^{j\left(-\arctan \frac{f}{f_0}\right)}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} e^{j\arctan \frac{f}{f_0}}} = 1 \cdot e^{j\left(-2\arctan \frac{f}{f_0}\right)}$$

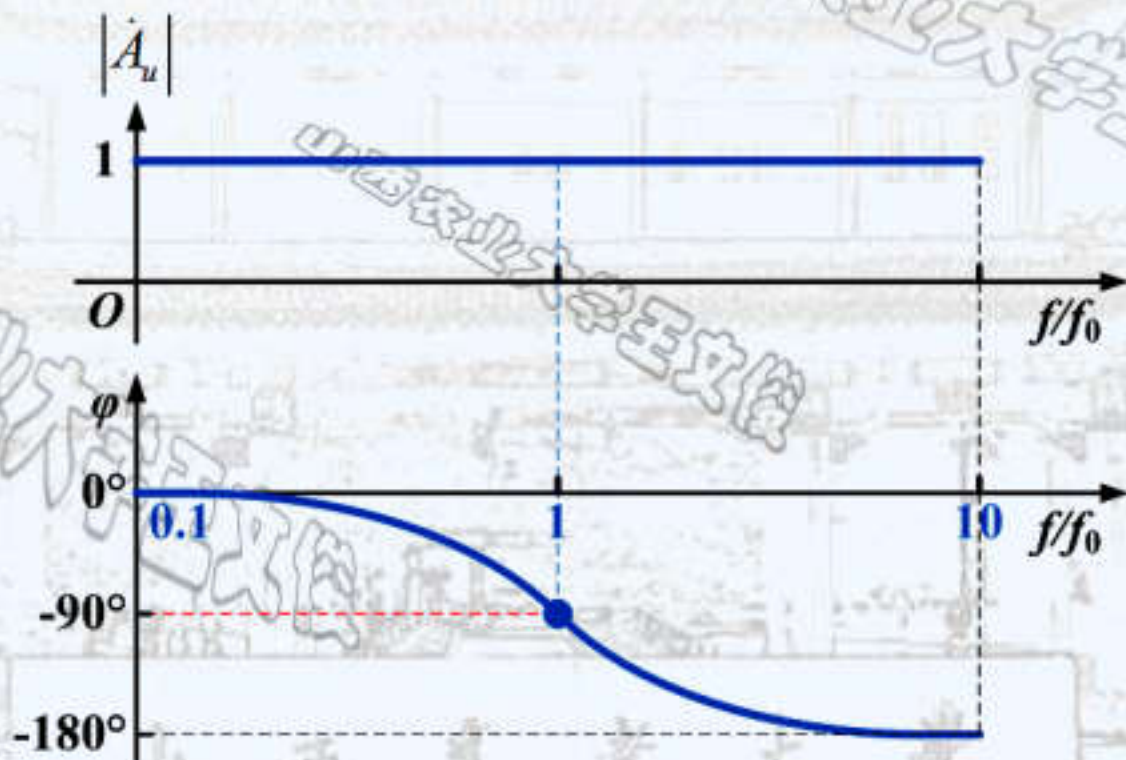
• 幅值和相角的形式： $\begin{cases} |\dot{A}_u| = 1 \\ \varphi = -2\arctan \frac{f}{f_0} \end{cases}$

### • 3、一阶滞后全通滤波器

$$\begin{cases} |\dot{A}_u| = 1 \\ \varphi = -2 \arctan \frac{f}{f_0} \end{cases}$$



$$\varphi \approx \begin{cases} 0^\circ & f \ll f_0 \\ -90^\circ & f = f_0 \\ -180^\circ & f \gg f_0 \end{cases}$$





## 三十三、电子信息系统预处理中所用放大电路

### • 1、概述

在电子信息系统中，通过传感器或其他途径所采集的信号往往很小，不能直接进行运算、滤波等处理，必须首先进行放大。

#### ① 仪表放大器

- 用于微弱电压信号的放大。

#### ② 电荷放大器

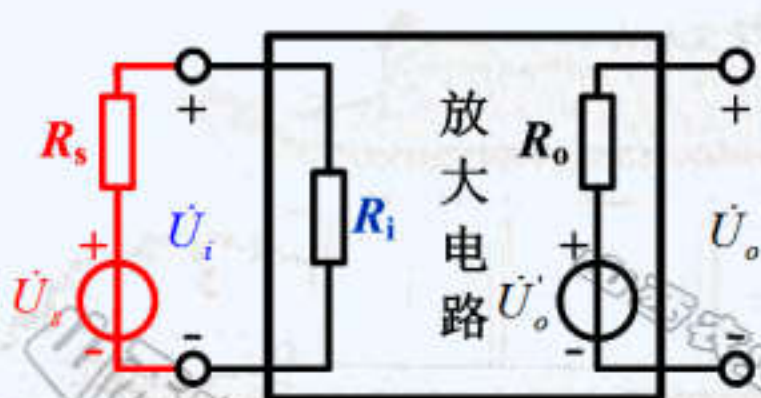
- 用于电容性传感器产生的微弱电荷量的放大。

#### ③ 隔离放大器

- 将电路的输入侧和输出侧在电气上完全隔离。

## • 2、仪表放大器的特点

在测量系统中，通常被测物理量均通过传感器转换为电信号，然后进行放大。因此，传感器的输出是放大电路的信号源。



• 电压放大倍数:  $\dot{A}_{us} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \dot{A}_u$

• 多数传感器的等效电阻  $R_s$  不是常量，它们随所测物理量的变化而变，放大器的放大能力将随信号大小而变。

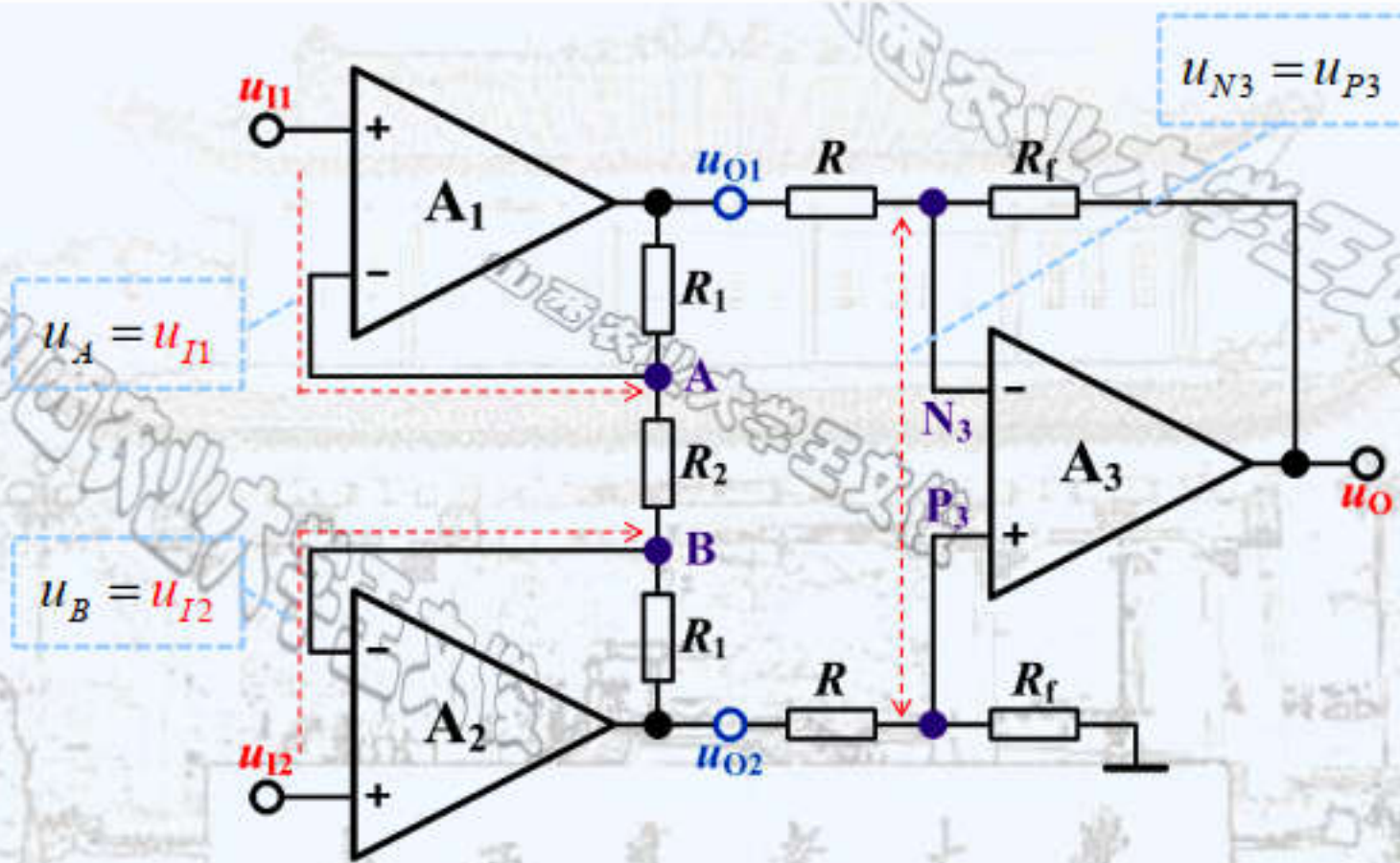
① 为保证对不同幅值信号具有稳定的放大倍数，要求放大器的输入电阻  $R_i \gg R_s$ 。 $R_i$  越大，因信号源内阻  $R_s$  变化引起的放大误差就越小。

② 从传感器获得的信号常为差模小信号，并含有较大的共模部分，其数值有时远大于差模信号。因此，除要求放大器具有足够大的差模放大倍数外，还应有较强的抑制共模信号的能力。



### • 3、仪表放大器的基本电路

集成仪表放大器的具体电路多种多样，但是很多电路都是在下图所示的基本电路的基础上演变而来的。



### 3、仪表放大器的基本电路

- 流过  $R_1$ 、 $R_2$  的电流相等，因此有：

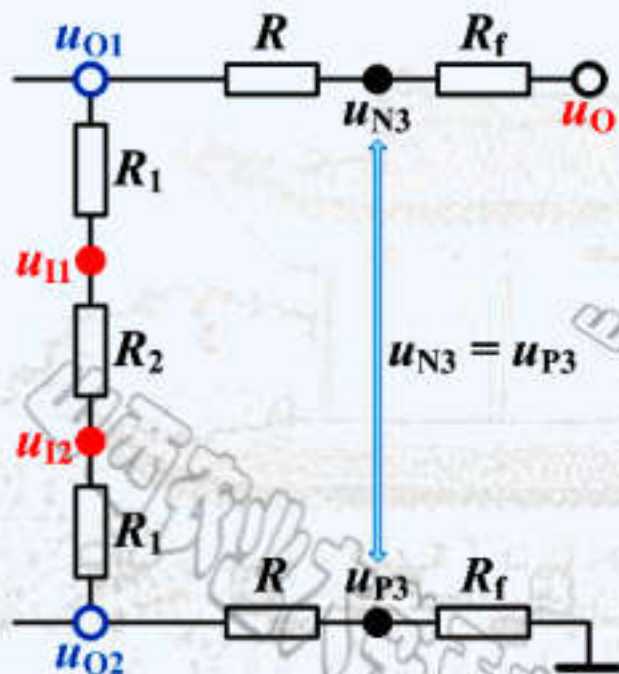
$$\frac{u_{O1} - u_{O2}}{2R_1 + R_2} = \frac{u_{I1} - u_{I2}}{R_2}$$

- 整理得： $u_{O1} - u_{O2} = \left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right)(u_{I1} - u_{I2})$

- $N_3$  点电流方程： $\frac{u_{O1} - u_{N3}}{R} = \frac{u_{N3} - u_O}{R_f}$

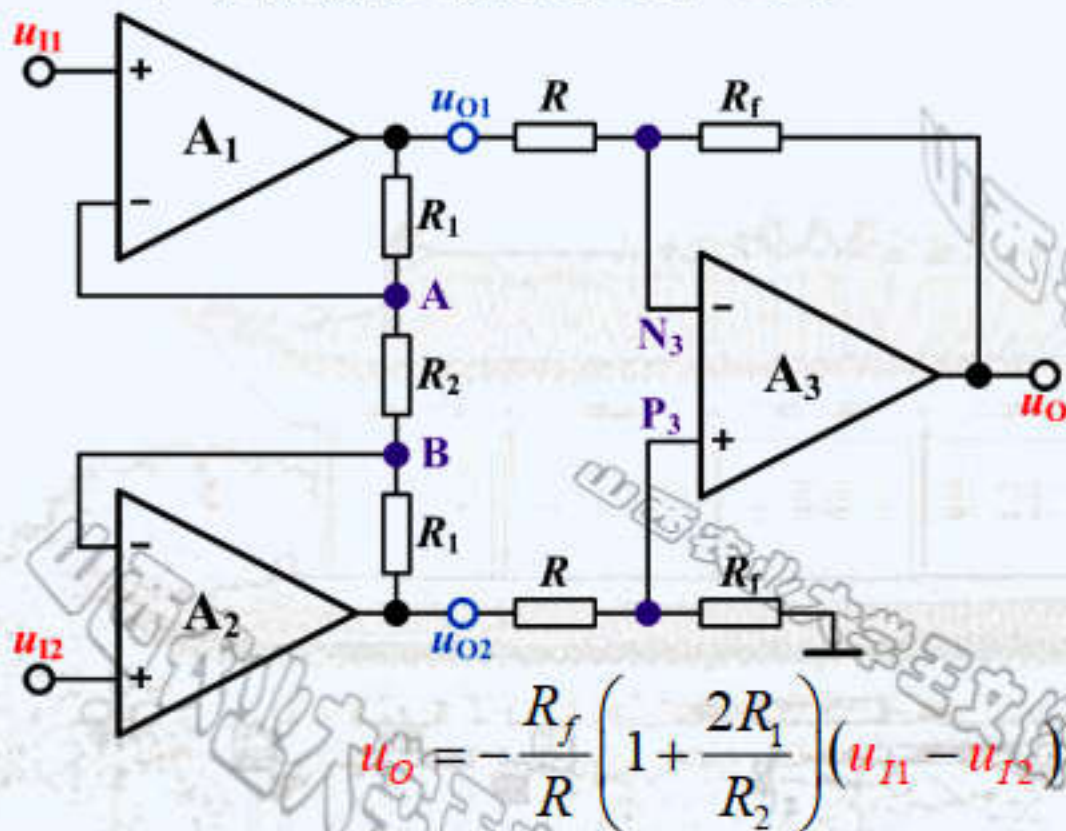
- $P_3$  点电流方程： $\frac{u_{O2} - u_{P3}}{R} = \frac{u_{P3}}{R_f}$

- 联立得，输出电压： $u_O = -\frac{R_f}{R}(u_{O1} - u_{O2}) = -\frac{R_f}{R}\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right)(u_{I1} - u_{I2})$





### 3、仪表放大器的基本电路



#### ① 输入电阻 $R_i$

输入电流为零，输入电阻近似无穷大。

#### ② 差模放大

当  $u_{Id} = u_{11} - u_{12}$  时，输出电压

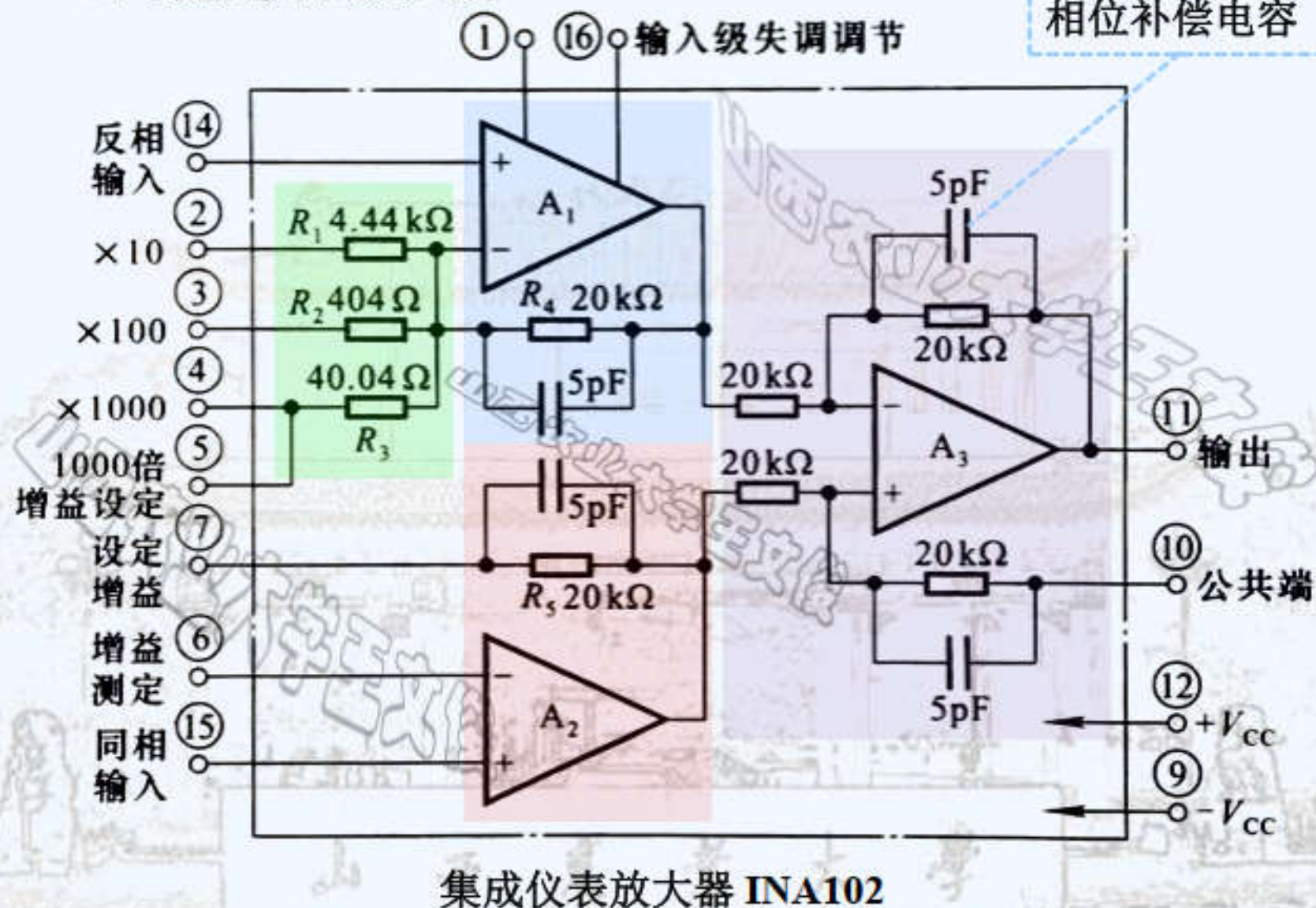
$$u_O = -\frac{R_f}{R} \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) u_{Id}$$

#### ③ 共模抑制

当  $u_{11} = u_{12} = u_{Ic}$  时，输出电压  $u_O = 0$

电路具有非常大的输入电阻，并能够放大差模信号，抑制共模信号。差模放大倍数的数值越大，共模抑制比越高。

# 4、集成仪表放大器

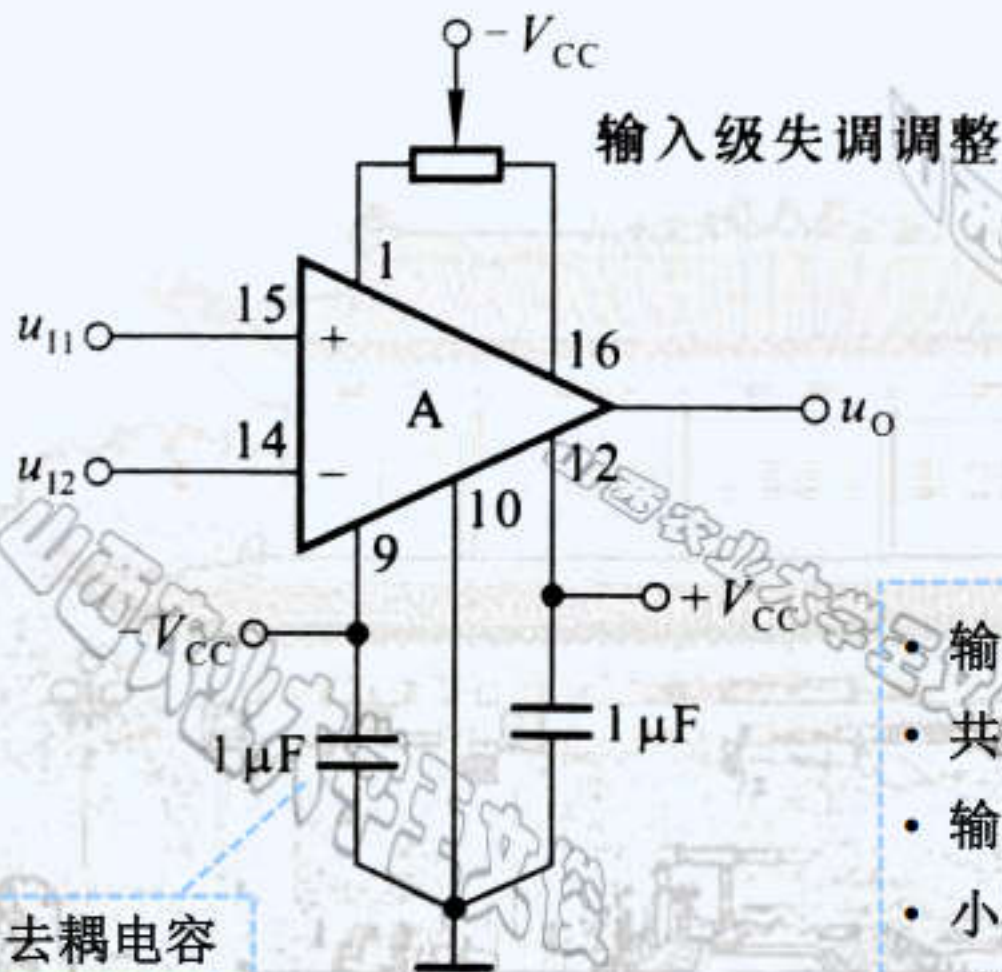




## • 4、集成仪表放大器

INA102 增益的设定

增益	引脚连接
1	6 和 7
10	2 和 6 和 7
100	3 和 6 和 7
1000	4 和 7, 5 和 6



INA102 外接电源和  
输入级失调调整引脚接法

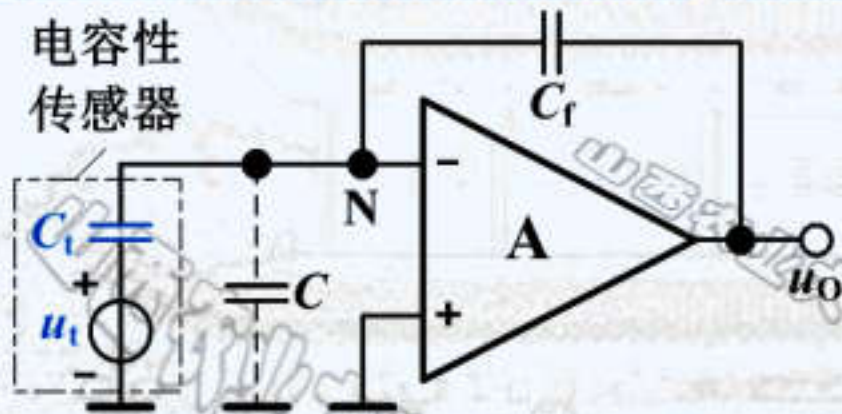
- 输入电阻可达  $10^4 \text{ M}\Omega$
- 共模抑制比为  $100 \text{ dB}$
- 输出电阻为  $0.1 \Omega$
- 小信号带宽为  $300 \text{ kHz}$
- 当电源电压为  $\pm 15 \text{ V}$  时，最大共模输入电压为  $\pm 12.5 \text{ V}$

## • 5、电荷放大器

某些传感器为电容性传感器，如压电式加速度传感器、压力传感器等。

这类传感器的阻抗非常高，呈容性，输出电压很微弱。

它们工作时，将产生正比于被测物理量的电荷量，且具有较好的线性度。



- 电容性传感器等效为因存储电荷而产生的电动势  $u_t$  与一个输出电容  $C_t$  串联。电容上的电量  $q$  与两者的关系为：

$$q = C_t u_t$$

- N 点电位:  $u_N = u_P = 0$ ，传感器对地杂散电容  $C$  上的电流为零，从而消除了因  $C$  产生的误差。

- N 点电流方程: 
$$\frac{u_t}{\frac{1}{j\omega C_t}} = \frac{-u_o}{\frac{1}{j\omega C_f}}$$

- 输出电压: 
$$u_o = -\frac{C_t}{C_f} u_t = -\frac{q}{C_f}$$



## • 5、电荷放大器

为减小传感器输出电缆的电容对放大电路的影响，一般常将电荷放大器装在传感器内。

为防止因  $C_f$  长时间充电导致集成运放饱和，常在  $C_f$  上并联电阻  $R_f$ 。

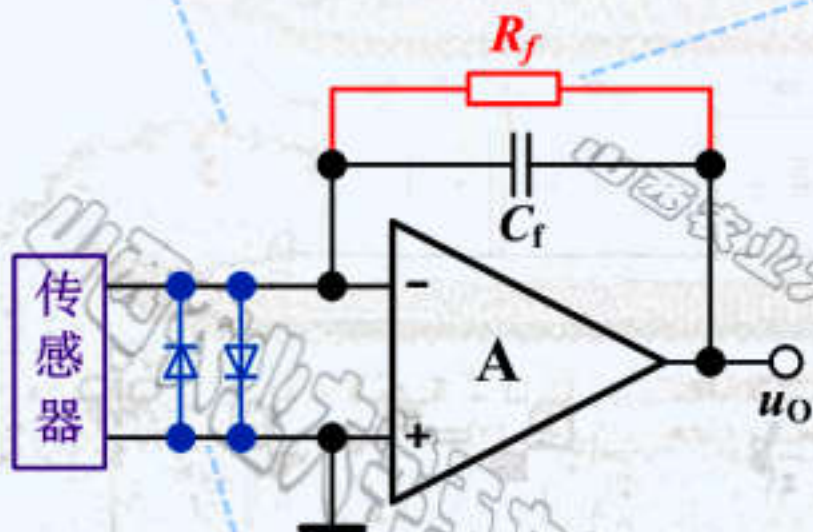
• 正常工作时，要求：

$$\frac{1}{\omega C_f} \ll R_f$$

• 传感器输出信号的频率  $f$  应满足：

$$f > \frac{1}{2\pi R_f C_f}$$

为防止传感器在过载时有较大的输出，在集成运放的输入端加保护二极管。



## • 6、隔离放大器

在远距离信号传输过程中，常因强干扰的引入使放大电路的输出有着很强的干扰背景，甚至将有用信号淹没，造成系统无法正常工作。

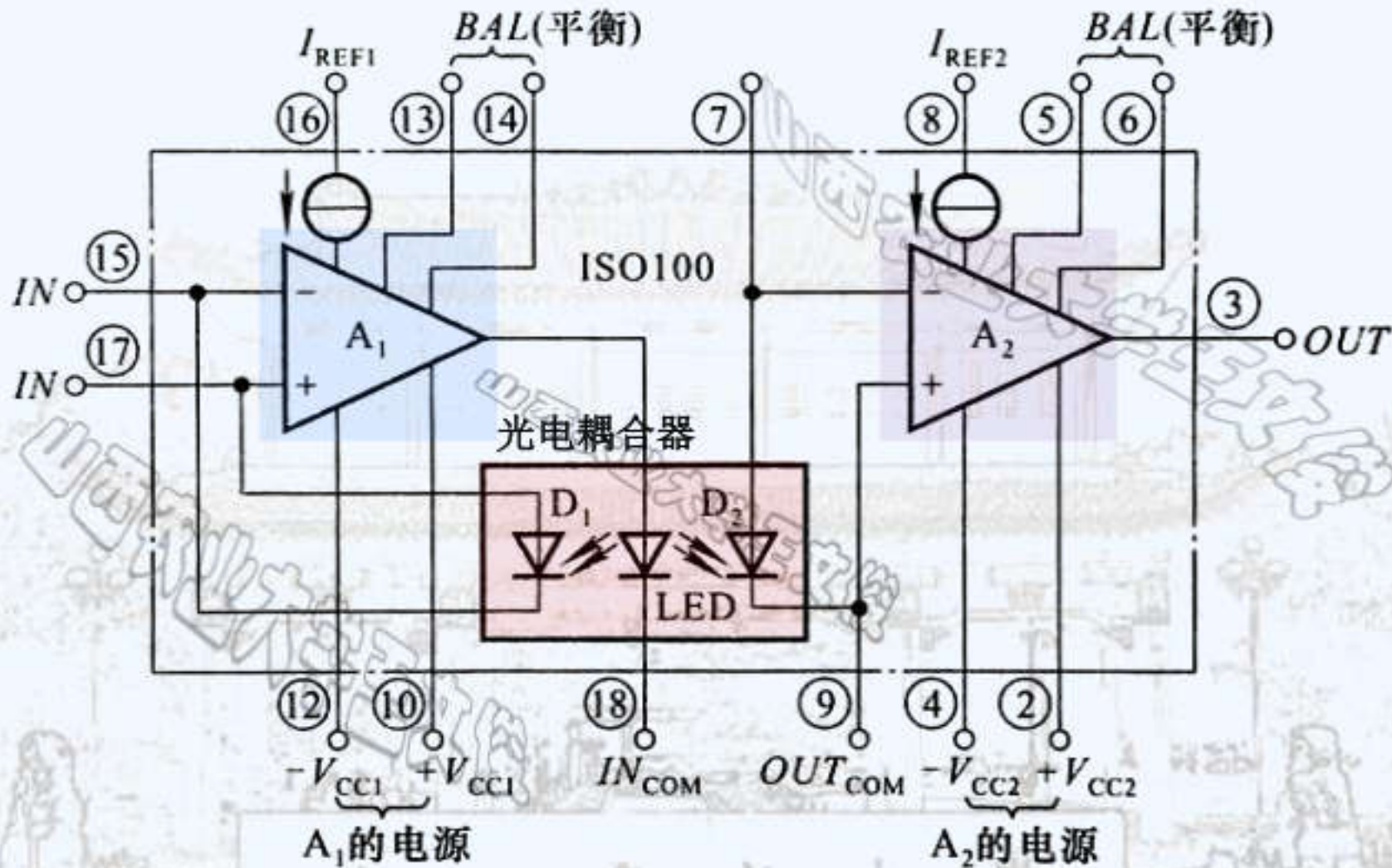
将电路的输入侧和输出侧在电气上完全隔离的放大电路，称为隔离放大器。

隔离放大器既可切断输入侧和输出侧电路间的直接联系，避免干扰混入输出信号，又可使有用信号畅通无阻。

目前集成隔离放大器有光电耦合式、变压器耦合式和电容耦合式三种。

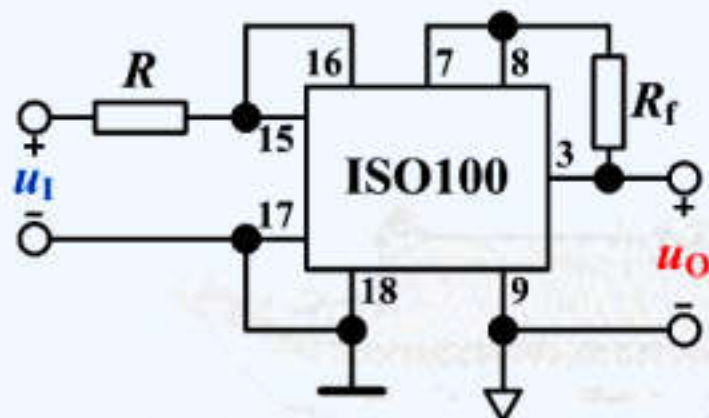


## • 6、隔离放大器

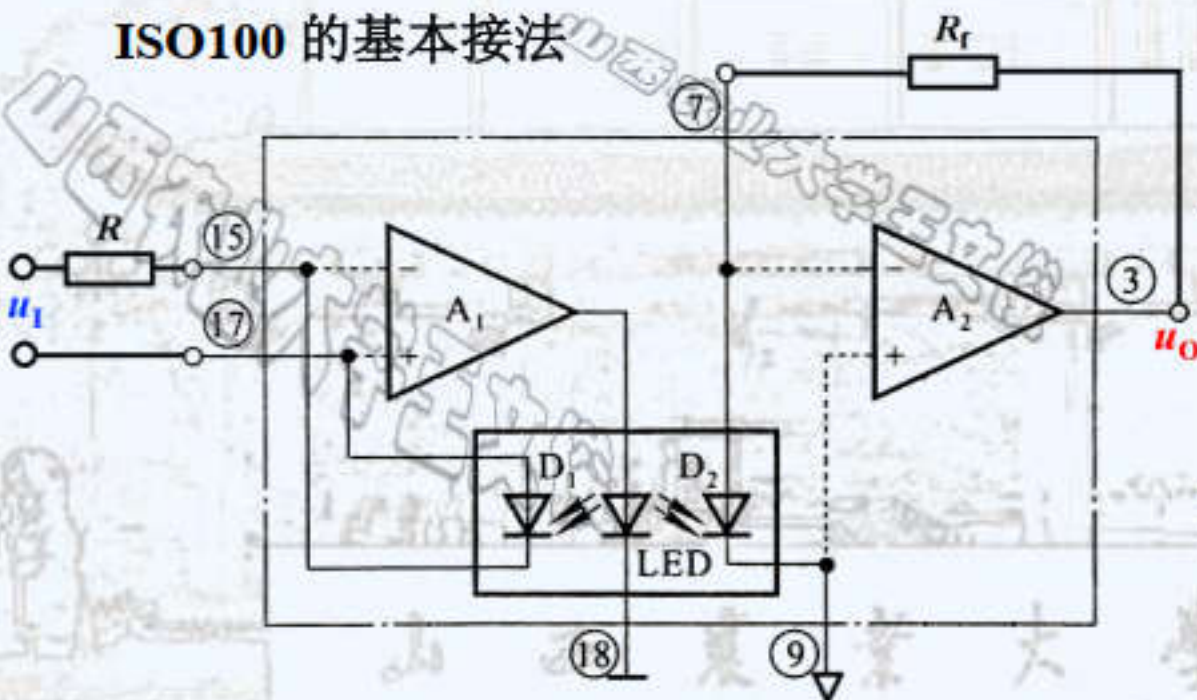


ISO100 光电耦合放大器

## • 6、隔离放大器



ISO100 的基本接法



•  $D_1$  管电流:

$$i_{D1} = \frac{u_I}{R}$$

•  $D_2$  管电流:

$$i_{D2} = \frac{u_O}{R_f}$$

• 若  $D_1$  和  $D_2$  所受光照相同, 有:

$$i_{D1} = i_{D2}$$

• 输出电压:

$$u_O = \frac{R_f}{R} u_I$$



## • 7、放大电路中的干扰和噪声

在微弱信号放大时，干扰和噪声的影响不可忽略。常用抗干扰能力和信号噪声比作为性能指标来衡量放大电路这方面的性能。

### ① 干扰的来源

- 较强的干扰常常来源于高压电网、电焊机、无线电发射装置（如电台、电视台等）以及雷电等；它们所产生的电磁波或尖峰脉冲通过电源线、磁耦合或传输线间的电容进入放大电路。

### ② 干扰的抑制

- 在可能的情况下应远离干扰源，必要时加金属罩屏蔽；
- 在电源接入电路之处加滤波环节，通常将一个  $10 \sim 30 \mu\text{F}$  的钽电容和一个  $0.01 \sim 0.1 \mu\text{F}$  独石电容并联接在电源接入处；
- 在已知干扰的频率范围的情况下，还可在电路中加入一个合适的有源滤波电路。

## • 7、放大电路中的干扰和噪声

### ③ 噪声的类型

- 在电子电路中，因电子无序的热运动而产生的噪声，称为热噪声；
- 因单位时间内通过 PN 结的载流子数目的随机变化而产生的噪声，称为弹性噪声。
- 热噪声和弹性噪声的功率频谱均为均匀的。
- 此外，还有一种频谱集中在低频段且与频率成反比的噪声，称为闪烁噪声或  $1/f$  噪声。

### ④ 噪声的来源

- 晶体管和场效应管均存在上述三种噪声；
- 电阻中仅存在热噪声和  $1/f$  噪声。

山西农业大学



## • 7、放大电路中的干扰和噪声

### ⑤ 噪声系数

- 设放大器的输入信号和输出信号的功率分别为  $P_{si}$  和  $P_{so}$ ，输入和输出的噪声功率为  $P_{ni}$  和  $P_{no}$ ，则噪声系数定义为：

$$N_f = \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}} \quad \text{或} \quad N_f(\text{dB}) = 10\lg N_f = 10\lg \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}}$$

- 因为  $P = U^2/R$ ，因此上式可改写为：

$$N_f(\text{dB}) = 10\lg \frac{(U_{si}/U_{ni})^2}{(U_{so}/U_{no})^2} = 20\lg \frac{U_{si}/U_{ni}}{U_{so}/U_{no}}$$

### ⑥ 噪声的抑制

- 为减小电阻产生的噪声，可选用金属膜电阻，避免用大阻值电阻；
- 为减小放大电路的噪声，可选用低噪声集成运放；
- 当已知信号频率范围时，可加有源滤波电路。