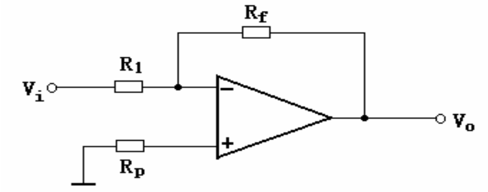
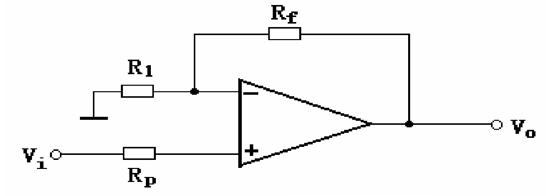
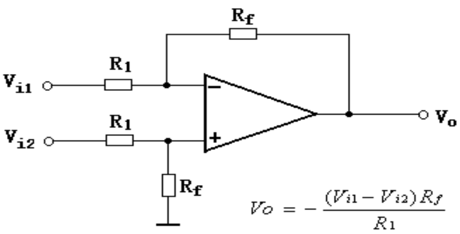
# 常用运放知识




反相输入放大器 $A_u = -\frac{R_f}{R_1}$



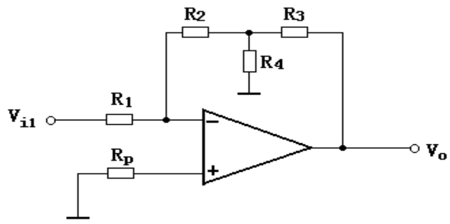

同相输入放大器 $A_u = 1+\frac{R_f}{R_1}$



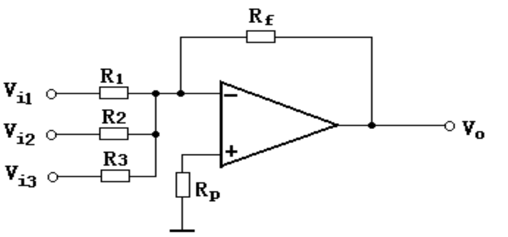

差动输入放大器

$V_o = -\frac{(V_{i1}-V_{i2})R_f}{R_1}$

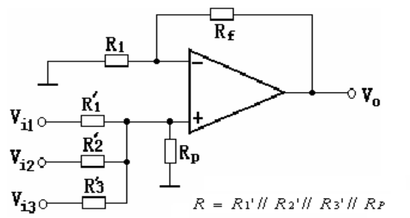
$A_u = -\frac{R_f}{R_1}$




其他电路计算 $V_o = -(R_2R_3+R_3R_4+R_2R_4)*\frac{V_i}{R_1R_4}$

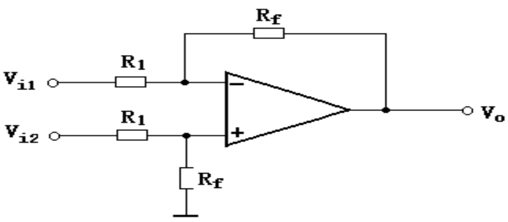



反相输入加法器 $V_o = -R_f*(\frac{V_{i1}}{R_1}+\frac{V_{i2}}{R_2}+\frac{V_{i3}}{R_3})$

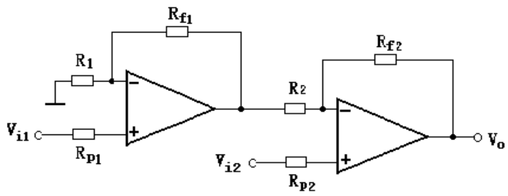



$R = R_1' // R_2' // R_3' // R_P$

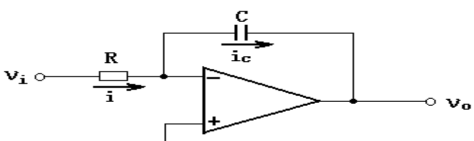
同相输入加法器 $V_o = (1+\frac{R_f}{R_1})*R*(\frac{V_{i1}}{R_1'}+\frac{V_{i2}}{R_2'}+\frac{V_{i3}}{R_3'})$




减法器1 $A_u = (V_{i2}-V_{i1})*\frac{R_f}{R_1}$

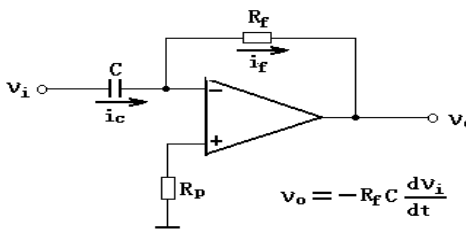



减法器2 $V_o = (1+\frac{R_{f2}}{R_1})*V_{i2}-(1+\frac{R_{f1}}{R_2})V_{i1}$



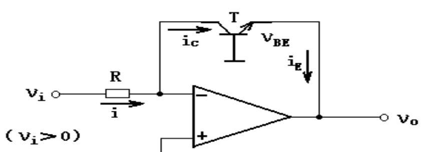

$v_o = -\frac{1}{RC}\int v_i dt$

积分器




$v_o = -R_f C\frac{dv_i}{dt}$

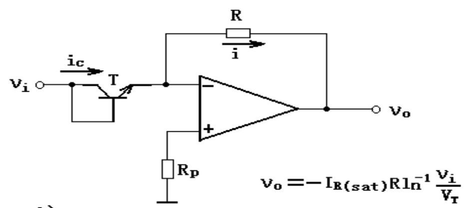
微分器




($v_i > 0$)

$v_o = -V_T \ln\frac{v_i}{I_{R(sat)}R}$

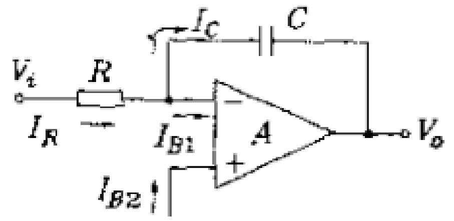
对数器




$v_o = -I_{R(sat)}R\ln^{-1}\frac{v_i}{V_T}$

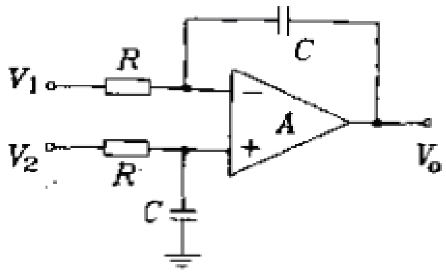
($v_i > 0$)

反对数器

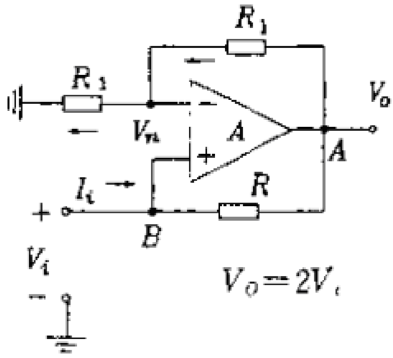



$$V_O=-\frac{1}{C}\int I_C\mathrm{d}t=-\frac{1}{RC}\int V_i(t)\mathrm{d}t$$

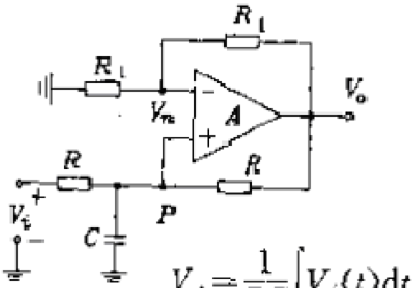
积分器




差动积分器

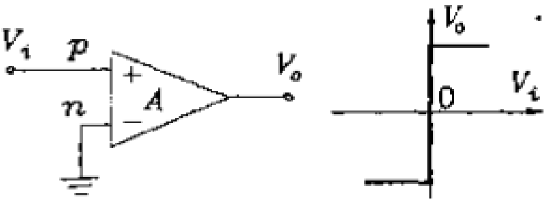



负阻变换电路 $I_i=\frac{V_i-V_O}{R}=-\frac{V_i}{R}$



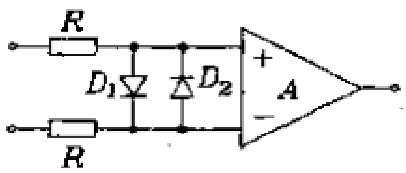

$$V_p=\frac{1}{RC}\int V_i(t)\mathrm{d}t$$

同相积分器 $V_O=2V_p=\frac{2}{RC}\int V_i(t)\mathrm{d}t$

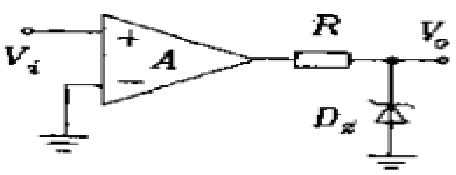



(a)电路图 (b)传输特性

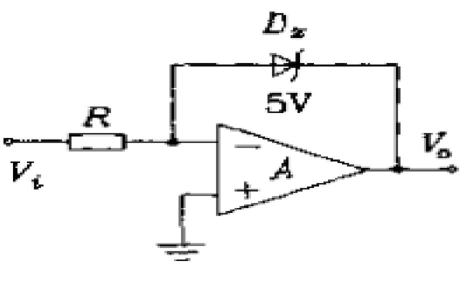
零越比较器




差模保护电路图

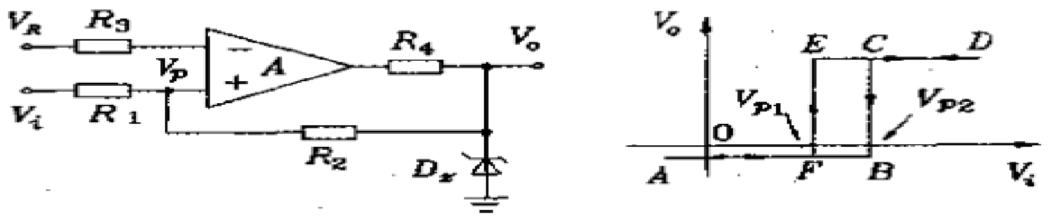



(a)输出限幅



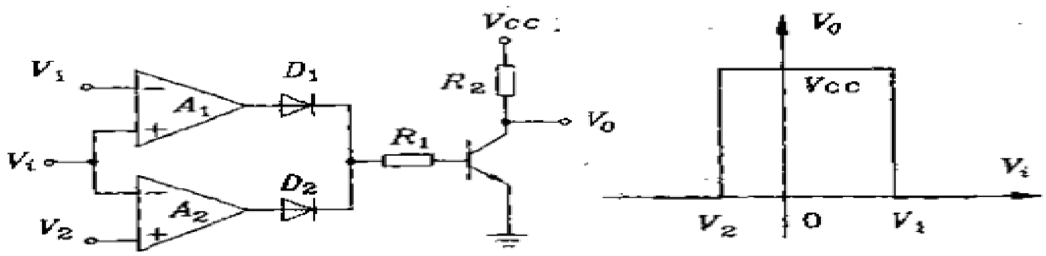

(b)反馈限幅

用稳压管限制输出电平



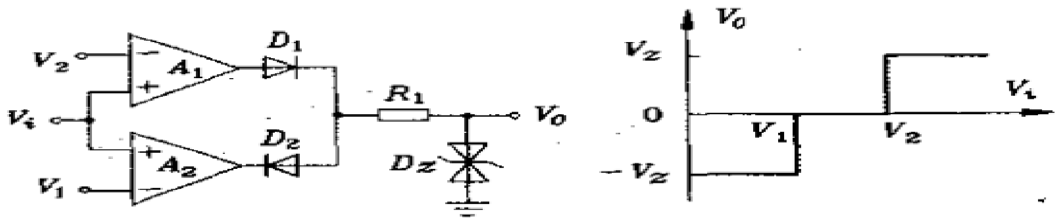

(a)电路图　　　(b)传输特性

迟滞比较器 2



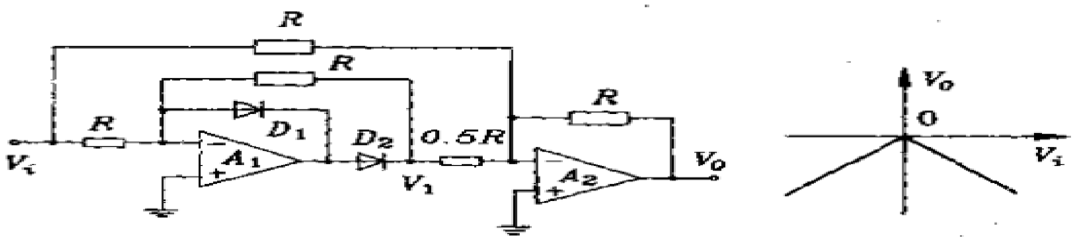

(a)电路图　　　(b)传输特性

窗口比较器



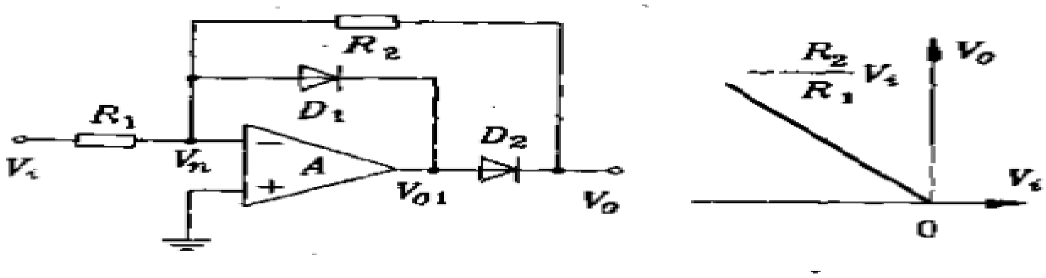

(a)电路图　　　(b)传输特性

三态比较器




(a)电路图　　　(b)传输特性

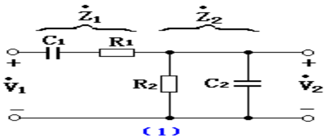
绝对值电路　　$V_O = -|V_i|$

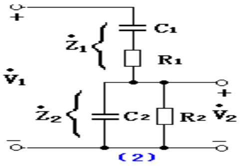



(a)电路图　　　(b)传输特性

精密检波器

# 振荡器电路




RC串并联网络

传输系数

$$\dot F = \frac{\dot V_2}{\dot V_1} = \frac{Z_2}{Z_1+Z_2} = \frac{\frac{R_2}{1+j\omega R_2C_2}}{R_1+\frac{1}{j\omega C_1}+\frac{R_2}{1+j\omega R_2C_2}}$$

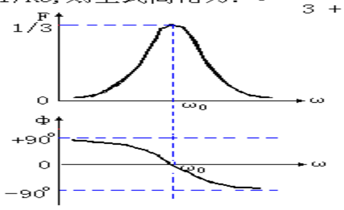
$$= \frac{1}{(1+\frac{R_1}{R_2}+\frac{C_2}{C_1})+j(\omega C_2R_1-\frac{1}{\omega C_1R_2})}$$

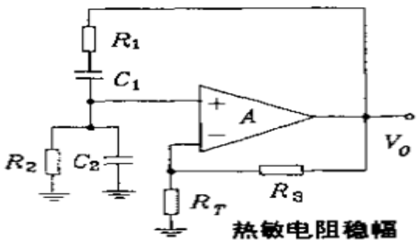
为调节方便，通常取$R_1=R_2=R$ ，$C_1=C_2=C$。令$\omega_0=1/RC$,则上式简化为：$\dot F = \frac{1}{3+j(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_0}{\omega})}$

其中，$F=\frac{1}{\sqrt{3^2+(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_0}{\omega})^2}}$

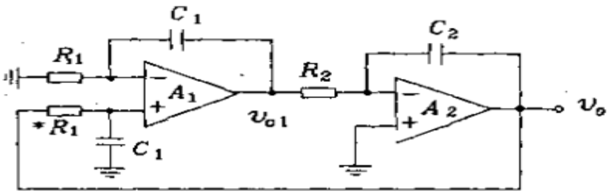
$$\varphi = -\tan^{-1}\left[\frac{(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_0}{\omega})}{3}\right]$$

幅频特性及相频特性为：



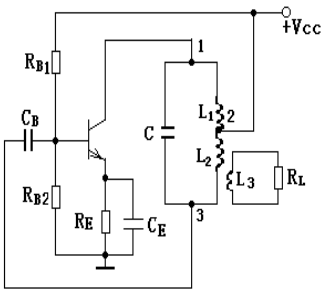




文氏桥振荡器

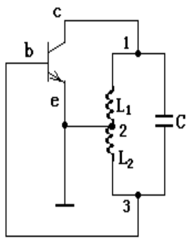



(b) 电路图

正交振荡器　$v_{o1} = a\cos\omega t$　$v_o = -b\sin\omega t$

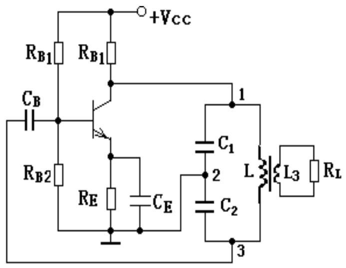



(1)电路

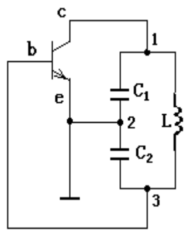



(2)交流通路

电感三端式LC振荡器

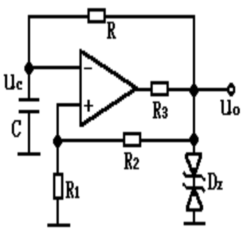


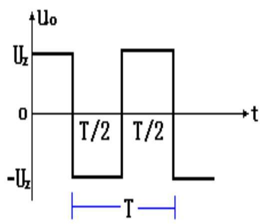

(1)电路



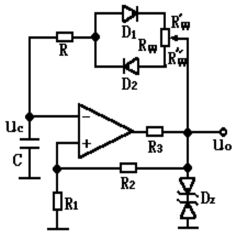

(2)交流通路

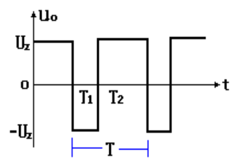
电容三端式LC振荡器



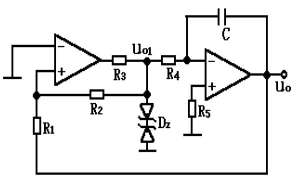

矩形波发生器　$T=2RC\ln(1+2R_1/R_2)$

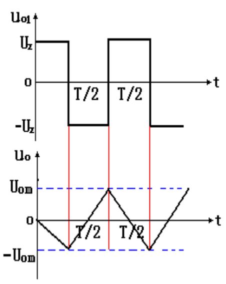


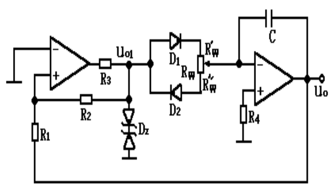

$T=(2R+R_w)C\ln(1+2R_1/R_2)$

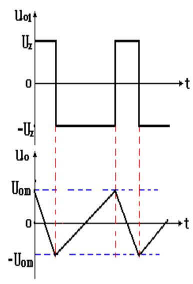
宽度可调矩形波发生器　$D=T_1/T=(R+R_w'')/(2R+R_w)$




三角波发生器　$U_{om}=R_1U_z/R_2$　$T=4R_1R_4C/R_2$




锯齿波发生器　$U_{om}=R_1U_z/R_2$　$T==2R_1R_wC/R_2$

# RC 有源滤波器

表 10.10.1 巴特沃兹多项式

| | |
|---|---|
| $n=1$ | $S+1$ |
| $n=2$ | $S^2+\sqrt{2}S+1$ |
| $n=3$ | $(S+1)(S^2+S+1)$ |
| $n=4$ | $(S^2+0.765S+1)(S^2+1.848S-1)$ |
| $n=5$ | $(S-1)(S^2+0.618S+1)(S^2+1.618S+1)$ |

表 10.10.2 切比雪夫多项式(1dB)

| | |
|---|---|
| $n=1$ | $S+1.965$ |
| $n=2$ | $S^2+1.098S+1.103$ |
| $n=3$ | $(S+0.494)(S^2+0.494S+0.994)$ |
| $n=4$ | $(S^2+0.279S+0.987)(S^2-0.674S-0.279)$ |
| $n=5$ | $(S-0.289)(S^2+0.179S+0.988)(S^2+0.468S+0.429)$ |

**1. 低通归一化传输函数：**

一阶： $H(S)=\dfrac{1}{S+1}$　　二阶：$H(S)=\dfrac{1}{S^2+S/Q+1}$（巴特沃兹：$Q=\dfrac{1}{\sqrt{2}}$）

2. 归一化低通 →去归一化变换（包括低通、高通、带通、带阻）

一阶低通：$$\frac{1}{S+1}\xrightarrow{S=s/\omega_0}\frac{\omega_0}{s+\omega_0}$$

二阶低通：$$\frac{1}{S^2+\frac{1}{Q}S+1}\xrightarrow{S=s/\omega_0}\frac{\omega_0{}^2}{s^2+\frac{\omega_0}{Q}s+\omega_0{}^2}$$

一阶高通：$$\frac{1}{S+1}\xrightarrow{S=\omega_0/s}\frac{s}{s+\omega_0}$$

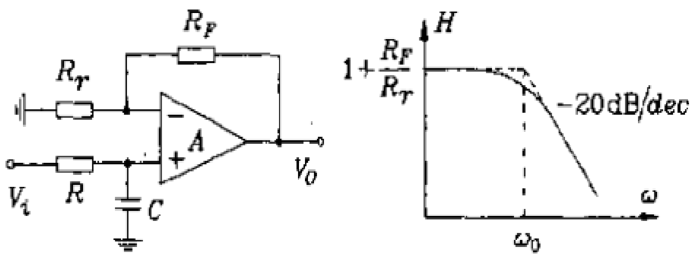
二阶高通：$$\frac{1}{S^2+\frac{1}{Q}S+1}\xrightarrow{S=\omega_0/s}\frac{s^2}{s^2+\frac{\omega_0}{Q}s+\omega_0{}^2}$$

带通：$\frac{1}{S+1} \xrightarrow{S=(Q/\omega_0)(s-\omega_0^2/s)} \frac{\frac{\omega_0}{Q}s}{s^2+\frac{\omega_0}{Q}s+\omega_0^2}$

带阻：$\frac{1}{S+1} \xrightarrow{S=\omega_0/Q/(s+\omega_0^2/s)} \frac{s^2+\omega_0^2}{s^2+\frac{\omega_0}{Q}s+\omega_0^2}$

## 3. 滤波器电路和传输函数

### 一阶低通：

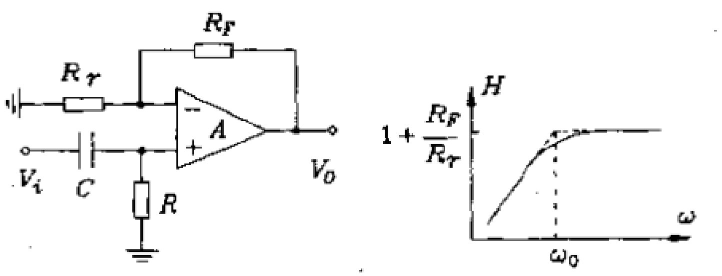



(a)电路图　　(b)特性曲线

$$H(s)=\frac{1/sC}{R+1/sC}(1+\frac{R_F}{Rr})=\frac{\omega_0}{s+\omega_0}(1+\frac{R_F}{Rr})$$

$$\omega_0=\frac{1}{RC}$$

### 一阶高通：




(a)电路图　　(b)特性曲线

$$H(s)=\frac{R}{R+1/sC}(1+\frac{R_F}{Rr})=\frac{s}{s+\omega_0}(1+\frac{R_F}{Rr})$$

$$\omega_0=\frac{1}{RC}$$

## 二阶滤波器的电路实现：

通用传输函数：$H(S)=\dfrac{b_2s^2+b_1s+b_0}{s^2+a_1s+a_0}$

## 压控通用电路：

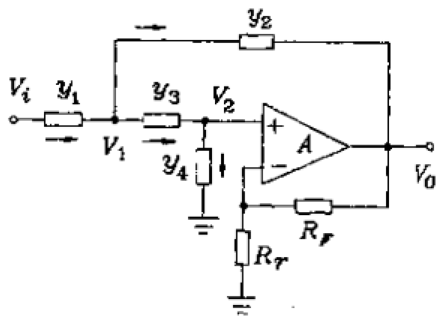
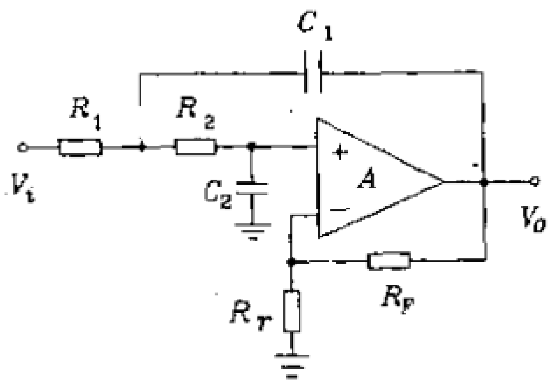



图 10.10.7 压控电压源二阶滤波器

## 二阶低通：

通用传输函数：$H(s)=\dfrac{H_0\omega_0^{\ 2}}{s^2+(\omega_0/Q)s+\omega_0^{\ 2}}$




$H(s)=\dfrac{A_F/(R_1R_2C_1C_2)}{s^2+s(\dfrac{1}{R_1C_1}+\dfrac{1}{R_2C_1}+\dfrac{1-A_F}{R_2C_2})+\dfrac{1}{R_2C_2R_1C_1}}$，与上式比较后得到：

$\omega_0^{\ 2}=\dfrac{1}{R_1R_2C_1C_2}$ $\quad H_0=A_F=1+\dfrac{R_F}{Rr}$ $\quad \dfrac{1}{Q}=\sqrt{\dfrac{R_2C_2}{R_1C_1}}+\sqrt{\dfrac{R_1C_2}{R_2C_1}}+(1-A_F)\sqrt{\dfrac{R_1C_1}{R_2C_2}}$

设计方法：令 $R_1=R_2=R$，$C_1=C_2=C$，则 $\omega_0=\dfrac{1}{RC}$ $\quad \dfrac{1}{Q}=3-A_F$ 或 $A_F=3-\dfrac{1}{Q}=1+\dfrac{R_F}{Rr}$

元件值求解（$f_0$，Q 值已知）

方法一：先固定 $C_1=C_2=C$ 为标称值，再根据 $\omega_0=\frac{1}{RC}$ 求出 R，

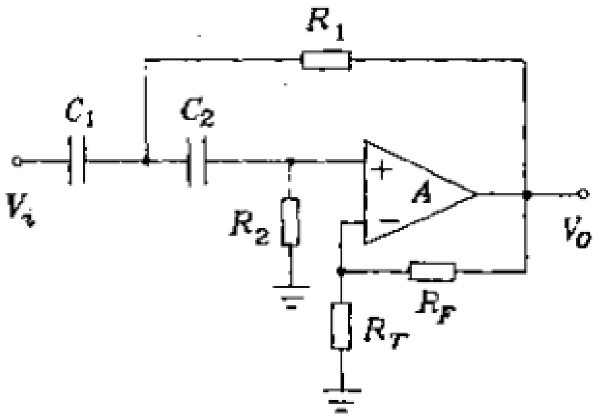
最后根据已知 Q 值，由 $A_F=3-\frac{1}{Q}=1+\frac{R_F}{Rr}$ 求出 $R_F/Rr$；

方法二：取 $H_0=A_F=1$，即运放接成电压跟随器的形式，取 $R_1=R_2=R$ 为标称值，

则 $\omega_0=\frac{1}{R\sqrt{C_1C_2}}$，$\frac{1}{Q}=2\sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$，得出电容的计算公式：$C_1=\frac{2Q}{\omega_0 R}$ $C_2=\frac{1}{2Q\omega_0 R}$

## 二阶高通：

通用传输函数：$H(s)=\frac{H_0s^2}{s^2+(\omega_0/Q)s+\omega_0^2}$




$$H(s)=\frac{A_Fs^2}{s^2+s(\frac{1}{R_2C_1}+\frac{1}{R_2C_2}+\frac{1-A_F}{R_1C_1})+\frac{1}{R_2C_2R_1C_1}}$$，与上式比较后得到：

$$\omega_0^2=\frac{1}{R_1R_2C_1C_2} \qquad H_0=A_F=1+\frac{R_F}{Rr} \qquad \frac{1}{Q}=\sqrt{\frac{R_1C_2}{R_2C_1}}+\sqrt{\frac{R_1C_1}{R_2C_2}}+(1-A_F)\sqrt{\frac{R_2C_2}{R_1C_1}}$$

设计方法：令 $R_1=R_2=R$，$C_1=C_2=C$，则

$$\omega_0=\frac{1}{RC} \qquad \frac{1}{Q}=3-A_F=2-\frac{R_F}{Rr} \quad 或 \quad A_F=3-\frac{1}{Q}=1+\frac{R_F}{Rr}$$

元件值求解（**f₀**，**Q** 值已知）

方法一：先固定 **$C_1$=$C_2$=C** 为标称值，再根据 $\omega_0=\frac{1}{RC}$ 求出 **R**，

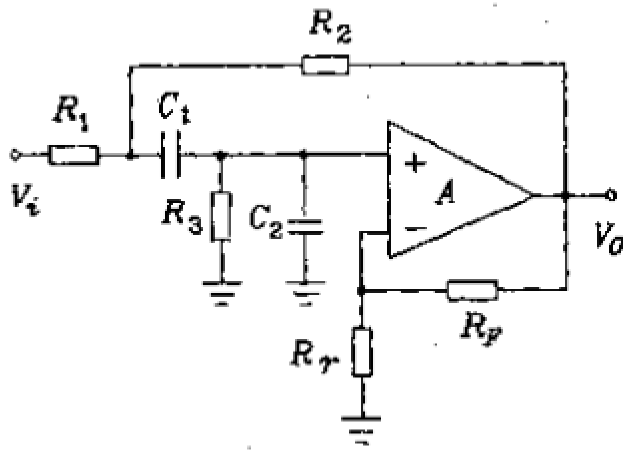
最后根据已知 **Q** 值，由 $\frac{1}{Q}=3-A_F=2-\frac{R_F}{Rr}$ 求出 **$R_F$/Rr**；

方法二：取 **$A_F$=1**，$H(\infty)=1$，即运放接成电压跟随器的形式，取 **$C_1$=$C_2$=C** 为标称值，

则 $\omega_0=\frac{1}{C\sqrt{R_1R_2}}$，$\frac{1}{Q}=2\sqrt{\frac{R_1}{R_2}}$，得出电阻的计算公式：$R_1=\frac{1}{2Q\omega_0 C}$ $R_2=\frac{2Q}{\omega_0 C}$

## 二阶带通：

**通用传输函数：** $H(s)=\frac{H_0(\omega_0/Q)s}{s^2+(\omega_0/Q)s+\omega_0{}^2}$




$$H(s)=\frac{sA_F/(R_1C_2)}{s^2+s(\frac{1}{R_1C_1}+\frac{1}{R_2C_1}+\frac{1}{R_3C_2}+\frac{1}{R_1C_2}+\frac{1-A_F}{R_2C_2})+\frac{1}{C_1C_2R_3}(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2})}$$

与上式比较后得到：

$$\omega_0{}^2=\frac{1}{C_1C_2R_3}(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}) \qquad H_0=H(\omega_0)=\frac{A_F}{1+\frac{R_1}{R_3}+\frac{C_2}{C_1}+\frac{R_1C_2}{R_2C_1}+\frac{R_1}{R_2}(1-A_F)}$$

$$\frac{1}{Q}=\sqrt{\frac{R_1R_2R_3}{R_1+R_2}}[+\sqrt{\frac{C_2}{C_1}}(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2})+\sqrt{\frac{C_1}{C_2}}(\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_1}+\frac{1-A_F}{R_2})]$$

设计方法：令 $R_1=R_2=R_3=R$，$C_1=C_2=C$，则

$$\omega_0=\frac{\sqrt{2}}{RC} \qquad H(\omega_0)=\frac{A_F}{5-A_F} \qquad \frac{1}{Q}=\frac{1}{\sqrt{2}}(5-A_F)$$

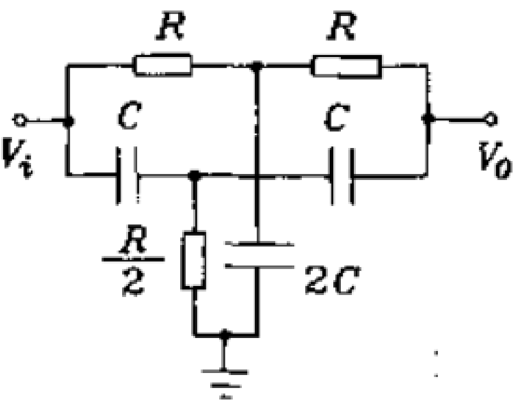
元件值求解（$f_0$，Q 值已知）：
先固定 $C_1=C_2=C$ 为标称值，通过以下公式求得其他元件：

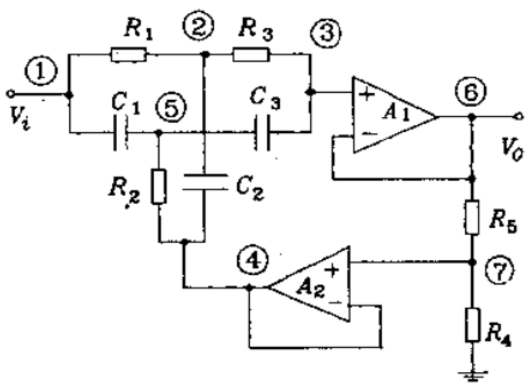
$$R=\frac{\sqrt{2}}{\omega_0 C}\ ,\quad A_F=5-\frac{\sqrt{2}}{Q}=1+\frac{R_F}{Rr}\ ,\quad \frac{R_F}{Rr}=4-\frac{\sqrt{2}}{Q}\ ,\quad H(\omega_0)=\frac{5Q}{\sqrt{2}}-1$$

* 该电路的 $H(\omega_0)$与 Q 值有关，不能独立设计，如果必要，在确定 Q 值之后，可嘉放大器或衰减器来调节 $H(\omega_0)$。

## 二阶带阻：（双 T 带阻）

通用传输函数：$H(s)=\dfrac{H_0(s^2+\omega_0{}^2)}{s^2+(\omega_0/Q)s+\omega_0{}^2}$




$$\omega_0=\frac{1}{RC} \qquad Q_0=\frac{1}{4}=0.25$$ ，若开环带宽为 $B_0$，

为了提高 Q 值，增加由运放 A1 和 A2 组成的正反馈电路。如右上图，

此时增益 $AF=\dfrac{R_4}{R_4+R_5}$，

（负反馈降低增益，展宽频带，闭环带宽为 $B=B_0$（1+AF）；
同理，加正反馈后，频带变窄，闭环带宽 $B=B_0$（$1-A_F$），AF < 1；）

带阻滤波器的 $Q=\dfrac{\omega_0}{B}$，加入正反馈后，带宽为：$\dfrac{\omega_0}{Q}=\dfrac{\omega_0}{Q_0}(1-AF)$，双 T 电路的 $Q_0=0.25$，所以加入正反馈后的 Q 为 $Q=\dfrac{1}{4(1-AF)}=\dfrac{R_4+R_5}{4R_4}$