有源滤波电路设计总结

滤波器是一种能使有用信号通过而大幅抑制无用信号的电子装置。在电子电路中常用来进行信号处理、数据传输和抑制噪声等。在运算放大器广泛应用以前滤波电路主要采用无源电子元件一电阻、电容、电感连接而成，由于电感体积大而且笨重导致整个滤波器功能模块体积大而且笨重。本文介绍由集成运算放大器、电阻和电容设计有源滤波器，着重讲解低通、高通、带通滤波电路。

1. 一阶有源滤波电路

电路设计图如图 1 所示，通带电压增益 A0 等于同相比例放大电路的电压增益 Avf，即：A0=Avf=1+Rf / R1，而从对 RC 低通电路的分析可知 Vp(s)=Vi(s) / (1+sRC)，故可导出电路的传递函数为：A(s)=V0(s) / Vi(s)=Avf / (1+s / ωn)，式中 ωn=1 / (RC)，ωn 是特征角频率。令 s=jω 可得：

$$20\lg\left|\frac{A(j\omega)}{A_0}\right| = -10\lg\left(1+\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)$$

当 ω=ωn 时就是-3dB 截止频率，当 ω=10ωn 时衰减率是 20dB / 十倍频程，可见一阶滤波器的滤波效果还不够好，若要求滤波响应以更高的衰减率衰减，则需采用高阶次滤波。

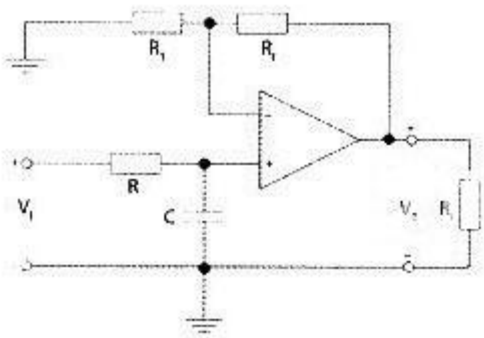

图1

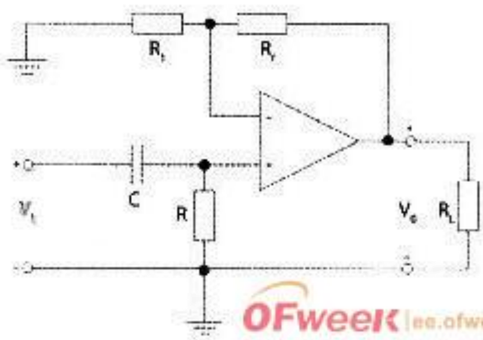

图2

在图 1 中将 R 和 C 交换位置即是一阶高通滤波电路，如图 2 所示，对应的幅频响应为

$$20\lg\left|\frac{A(j\omega)}{A_0}\right| = 20\lg\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\omega_n}{\omega}\right)^2}},$$

当ω=ωn 时就是-3dB 截止频率，当ω=ωn / 10 时衰减率是 20dB / 十倍频程。

2 二阶有源滤波电路

电路设计图如图 3 所示，如前所述，同相比例放大电路的电压增益就是低通滤波器的通带电压增益，即 A0=Avf=1+Rf / R1。

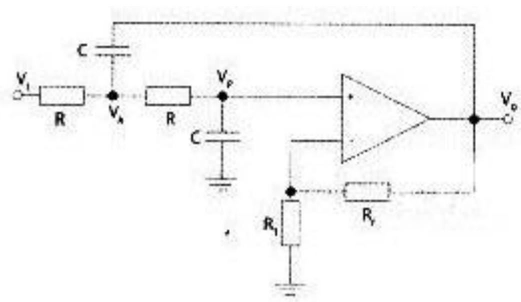

图3

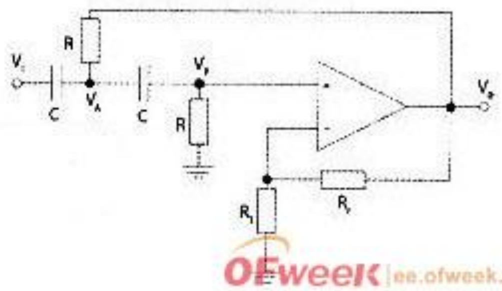

图4

运放的同相输入端电压关系为：

$$A_{VF}=V_0(s)/V_P(s) \qquad (1)$$

$V_P(S)$与$V_A(S)$的关系为：

$$V_P(s)/V_A(s)=1/(1+sRC) \qquad (2)$$

对结点A用KCL定律可得关系式：

$$\frac{V_i(s)-V_A(s)}{R}=(V_A(s)-V_0(s))*sC+\frac{V_A(s)-V_P(s)}{R} \qquad (3)$$

联立上述三个方程可得到计算电路的传递函数表达式：

$A(s)=V_0(s)/V_i(s)=\dfrac{A_{VF}}{1+(3-A_{VF})*sRC+(sRC)^2}$ ，令 $\omega_n=1/RC$，$Q=1/(3-A_{VF})$，（当AVF<3时电路稳定工作，否则自激振荡）可得：$A(s)=\dfrac{A_{VF}\omega_n^2}{s^2+\dfrac{\omega_n}{Q}s+\omega_n^2}$ ，幅频响应：

$20\lg\left|\dfrac{A(j\omega)}{A_{VF}}\right|=20\lg\dfrac{1}{\sqrt{[(\frac{\omega}{\omega_n})^2-1]^2+(\frac{\omega}{\omega_n Q})^2}}$ 。当 $\omega=0$ 时，$|A(j\omega)|=A_{VF}$；当 $\omega\to\infty$ 时，$|A(j\omega)|\to 0$，

很显然这是低通滤波电路的基本幅频特性。当 Q>0．707 时，幅频响应图像将出现峰值，当 Q≤0．707 时，幅频响应比较平坦。令 Q=0．707，当 ω／ωn=1 时，20lg|A(jω)／AVF|=3dB：当 ω／ωn=10 时，20lg|A(jω)／AVF|=-40dB。将二阶低通滤波特性与一阶低通滤波特性相比较，不难发现，二阶比一阶低通滤波电路的滤波效果要好很多。由此推断，若阶数越高，幅频响应特性曲线越接近理想状况。

若将图 3 中的 R 和 C 互换，就可得到二阶有源高通滤波电路，如图 4 所示。

由于二阶高通和低通电路在结构上存在对偶关系，它们的传递函数和幅频响应也存在对偶关系，用 1／(sRC)替换 sRC 可得二阶高通滤波电路的传递函数为：

$A(s)=\dfrac{A_{VF}}{1+(3-A_{VF})*\dfrac{1}{sRC}+(\dfrac{1}{sRC})^2}$ ，令 $\omega_n=1/RC$ ，Q=1/(3-A_{VF})，（当 A_{VF}<3时电路稳定工作，否则自激振荡）。则 $A(s)=\dfrac{A_{VF}s^2}{s^2+\dfrac{\omega_n}{Q}s+\omega_n^2}$ ，幅频响应：$20\lg\left|\dfrac{A(j\omega)}{A_{VF}}\right|=20\lg\dfrac{1}{\sqrt{[(\frac{\omega_n}{\omega})^2-1]^2+(\frac{\omega_n}{\omega Q})^2}}$。

3 二阶带通滤波电路

由理想滤波电路图可知，将低通与高通滤波电路相串联就可构成带通滤波电路，前提条件是低通滤波电路的截止频率大于高通滤波电路的截止频率。带通滤波电路如图 5 所示。

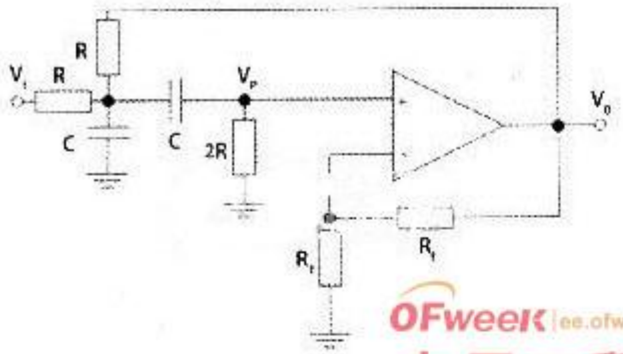

图5

通过以上类似计算可得带通滤波电路的传递函数为：

$A(s)=\dfrac{A_{VF}sRC}{1+(3-A_{VF})sRC+(sRC)^2}$ ；令 $A_0=A_{VF}/(3-A_{VF})$，$\omega_0=1/(RC)$，$Q=1/(3-A_{VF})$，那么 $A(s)=\dfrac{A_0\dfrac{s}{Q\omega_0}}{1+\dfrac{s}{Q\omega_0}+(\dfrac{s}{\omega_0})^2}$ ；令 $s=j\omega$，则

$$A(j\omega)=\frac{A_0\dfrac{j\omega}{Q\omega_0}}{1-(\dfrac{\omega}{\omega_0})^2+j\dfrac{\omega}{\omega_0 Q}}=\frac{A_0}{1+jQ(\dfrac{\omega}{\omega_0}-\dfrac{\omega_0}{\omega})} \qquad (4)$$

当 $\omega=\omega_0$ 时，$|A(j\omega)|_{max}=A_0=A_{VF}/(3-A_{VF})$，

这就是带通滤波电路的通带电压增益。

当式(4)的虚部绝对值为1时，有 $|A(j\omega)|=A_0/\sqrt{2}$ ，利用 $|Q(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_0}{\omega})|=1$ 取正根可计算带通滤波器的两个截止频率：

$0<\omega_L=(\sqrt{\frac{\omega_0^2}{Q^2}+4\omega_0^2}-\frac{\omega_0}{Q})/2<\omega_0$ ，

$\omega_H=(\sqrt{\frac{\omega_0^2}{Q^2}+4\omega_0^2}+\frac{\omega_0}{Q})/2>\omega_0>0$ ，故带通滤波电路的通带宽度

$\mathrm{BW}=(\omega_H-\omega_L)/(2\pi)=\omega_0/(2\pi Q)=f_0/Q$ ，其中f_0为中心频率。