

一、低通滤波器的设计

低通滤波器的设计是已知 ω_o （ -3dB 截止频率）、 H_{0LP} （直流增益）、 Q （在 -3dB 截止频率时的电压放大倍数与通带放大倍数数值之比）三个参数来设计电路，可选的电路形式为压控电压源低通滤波器和无限增益多路反馈低通滤波器。下面分别介绍：

（零）一阶有源低通滤波器

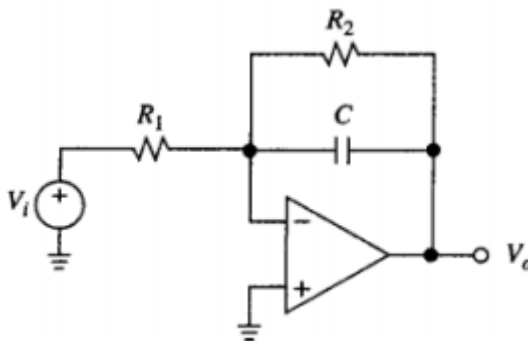


图 0 一阶有源低通滤波器原理图

$$\begin{cases} H_{0LP} = K = -\frac{R_2}{R_1} \\ \omega_o = \frac{1}{R_2 C} \end{cases}$$

【范例 0】设计一有源低通滤波电路，要求其截止频率 f_o 为 10kHz ， $H_{0LP}=10$ ， $f \gg f_o$ 处的衰减速率不低于 $20\text{dB}/10$ 频程，截止频率和增益等的误差要求在 $\pm 10\%$ 以内。

设计步骤：

- 首先选择电路形式，根据设计要求确定滤波器的阶数 n 。
 - 由衰减速率要求 $-20 \times n \text{dB}/10$ 倍频 $\geq 40\text{dB}/10$ 倍频程，算出 $n = 1$ 。
 - 根据题目要求，选择一阶有源低通有源滤波电路形式。
- 根据传输函数等的要求设计电路中相应元器件的具体数值。
 - 根据滤波器的特征频率 f_o 选取电容 C 和电阻 R 的值。

电容 C 的大小一般不超过 $1\mu\text{F}$ ，电阻 R 取值为 $\text{k}\Omega$ 数量级。表 1 给出截止频率 f_o 与电容值的选择参考对照表。

表 1 截止频率与所选电容的参考对照表

f_o	10~100Hz	0.1~1kHz	1~10kHz	10~100kHz
C	1~0.1 μF	0.1~0.01 μF	0.01~0.001 μF	1000~100pF

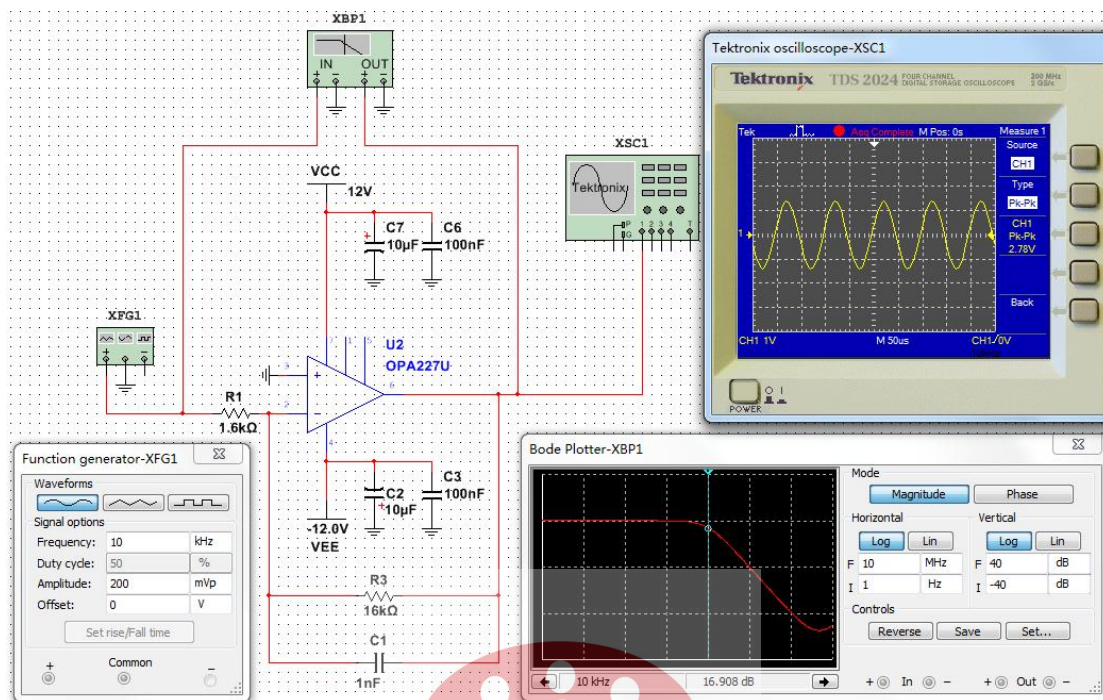
设电容 C 的取值为 1nF ，

$$R = \frac{1}{2\pi f_o C} = \frac{1}{2\pi \times 10 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-9}} = 15.915\text{k}\Omega$$

取标称值， $R = 16\text{k}\Omega$

(2) 根据 H_{0LP} 确定电阻 R_1 和 R_2 的值

则 $R_1 = 1.6k\Omega$



(一) 二阶压控电压源低通滤波器

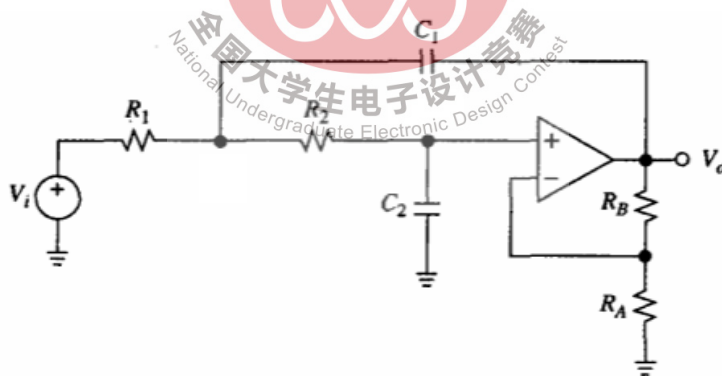


图 1 二阶压控电压源低通滤波器原理图

$$\left\{ \begin{array}{l} H_{0LP} = K = 1 + \frac{R_B}{R_A} \\ \omega_o = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}} \\ Q = \frac{1}{(1-K)\sqrt{R_1 C_1 / R_2 C_2} + \sqrt{R_1 C_2 / R_2 C_1} + \sqrt{R_2 C_2 / R_1 C_1}} \end{array} \right.$$

由上式可知，可通过先调整 R_1 来先调整 ω_o ，然后通过调整 K 来调整 Q 值。

对于巴特沃斯、切比雪夫、贝塞尔三种类型二阶 LPF 的 Q 值分别为 0.707、1、0.56。

1、等值元件 KRC 电路设计

令 $R_1 = R_2 = R$ 和 $C_1 = C_2 = C$ ，简化上述各式，则

$$\begin{cases} H_{0LP} = K = 1 + \frac{R_B}{R_A} \\ \omega_o = \frac{1}{RC} \\ Q = \frac{1}{3-K} \end{cases}$$

得出的设计方程为

$$\begin{cases} RC = \frac{1}{\omega_o} \\ K = 3 - \frac{1}{Q} \\ R_B = (K - 1)R_A \end{cases}$$

由上式可知， H_{0LP} 值依赖于 Q 值大小。为了将增益从现在的 A_{old} 降到另一个不同的值 A_{new} ，应用戴维南定理，用分压器 R_{1A} 和 R_{1B} 取代 R_1 ，同时确保 ω_o 不受替换的影响，需符合下式：

$$\begin{cases} A_{new} = A_{old} \frac{R_{1B}}{R_{1A} + R_{1B}} \\ R_{1A} \parallel R_{1B} = R_1 \end{cases}$$

电路连接如图 2 所示。

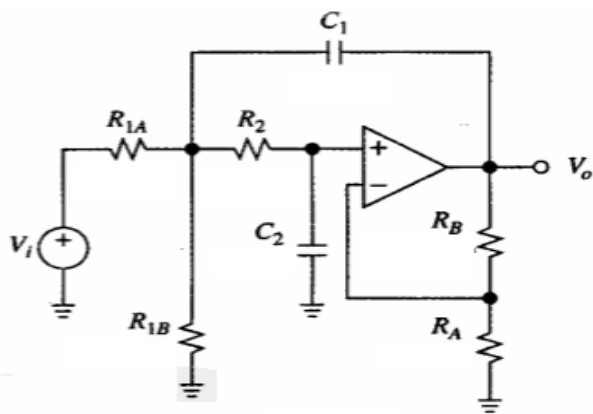


图 2 二阶压控电压源低通滤波器等值法原理图

2、参考运算放大器应用技术手册

(1) 选取 C_1

$$(2) R = \frac{1}{\omega_o C_1} = \frac{1}{2\pi f_o C_1}$$

(3) 电容扩展系数 $m = \frac{1}{4Q^2} + (H_{0LP} - 1)$

(4) $C_2 = mC_1$

(5) $R_1 = 2QR$

(6) $R_2 = \frac{R}{2Qm}$

(7) 选取 R_A ，则 $R_B = (H_{0LP} - 1) R_A$



【范例 1】设计一低通滤波电路，要求其截止频率 f_0 为 10kHz， $Q = 0.707$ ， $f \gg f_0$ 处的衰减速率不低于 40dB/10 频程，截止频率和增益等的误差要求在 $\pm 10\%$ 以内。
设计步骤：

- 首先选择电路形式，根据设计要求确定滤波器的阶数 n 。
 - 由衰减速率要求 $-20 \times n \text{ dB} / \text{十倍频程} \geq 40 \text{ dB} / \text{十倍频程}$ ，算出 $n = 2$ 。
 - 根据题目要求，选择二阶压控电压源低通有源滤波电路形式。
- 根据传输函数等的要求设计电路中相应元器件的具体数值。
 - 根据滤波器的特征频率 f_0 选取电容 C 和电阻 R 的值。

电容 C 的大小一般不超过 1 μF ，电阻 R 取值为 $k\Omega$ 数量级。表 1 给出截止频率 f_0 与电容值的选择参考对照表。

表 1 截止频率与所选电容的参考对照表

f_0	10~100Hz	0.1~1kHz	1~10kHz	10~100kHz
C	1~0.1 μF	0.1~0.01 μF	0.01~0.001 μF	1000~100pF

设电容 C 的取值为 1nF，

$$R = \frac{1}{2\pi f_0 C} = \frac{1}{2\pi \times 10 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-9}} = 15.915k\Omega$$

取标称值， $R = 16k\Omega$

- 根据 K 确定电阻 R_A 和 R_B 的值

$$K = 3 - \frac{1}{Q} = 3 - \frac{1}{0.707} = 1.5858$$

换算成对数为 $20\lg 1.5858 = 4.005\text{dB}$

取 $R_A = 1k\Omega$ ，则 $R_B = 585.8\Omega$ ，取标称值 590 Ω

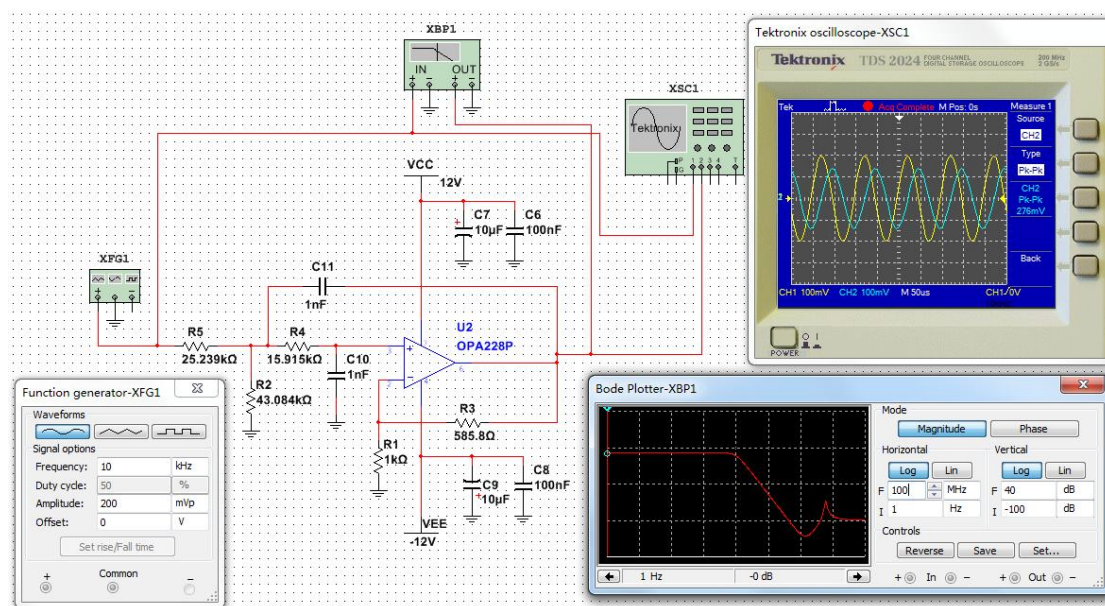
- 如果修改增益为 1，则

$$\begin{cases} 1 = 1.5858 \frac{R_{1B}}{R_{1A} + R_{1B}} \\ R_{1A} \parallel R_{1B} = 15.915k \end{cases}$$

计算可得

$$\begin{cases} R_{1A} = 25.239k \\ R_{1B} = 43.084k \end{cases}$$

- 如果有灵敏度的要求，再进一步根据灵敏度对元件参数值的误差和稳定性提出限制。



备注：二阶压控电压源低通滤波器存在高频馈通现象。



【范例 2】设计一低通滤波电路，要求其截止频率 f_0 为 10kHz， $Q = 0.707$ ，直流增益 $H_{0LP} = 10$ ， $f \gg f_0$ 处的衰减速率不低于 40dB/10 频程，截止频率和增益等的误差要求在 $\pm 10\%$ 以内。

1. 首先选择电路形式，根据设计要求确定滤波器的阶数 n 。

(1) 由衰减速率要求 $-20 \times n \text{ dB} / \text{十倍频程} \geq 40 \text{ dB} / \text{十倍频程}$ ，算出 $n = 2$ 。

(2) 根据题目要求，选择二阶压控电压源低通有源滤波电路形式。

2. 根据传输函数等的要求设计电路中相应元器件的具体数值。

(1) 根据滤波器的特征频率 f_0 选取电容 C 和电阻 R 的值。

电容 C 的大小一般不超过 1 μF ，电阻 R 取值为 $\text{k}\Omega$ 数量级。表 1 给出截止频率 f_0 与电容值的选择参考对照表。

表 2 截止频率与所选电容的参考对照表

f_0	10~100Hz	0.1~1kHz	1~10kHz	10~100kHz
C	1~0.1 μF	0.1~0.01 μF	0.01~0.001 μF	1000~100pF

(1) 选取 C_1 ，设电容 C_1 的取值为 1nF，则

$$R = \frac{1}{2\pi f_0 C} = \frac{1}{2\pi \times 10 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-9}} = 15.915 \text{ k}\Omega$$

(2) 电容扩展系数 $m = \frac{1}{4Q^2} + (H_{0LP} - 1) = \frac{1}{4 \times 0.707^2} + (10 - 1) = 9.5$

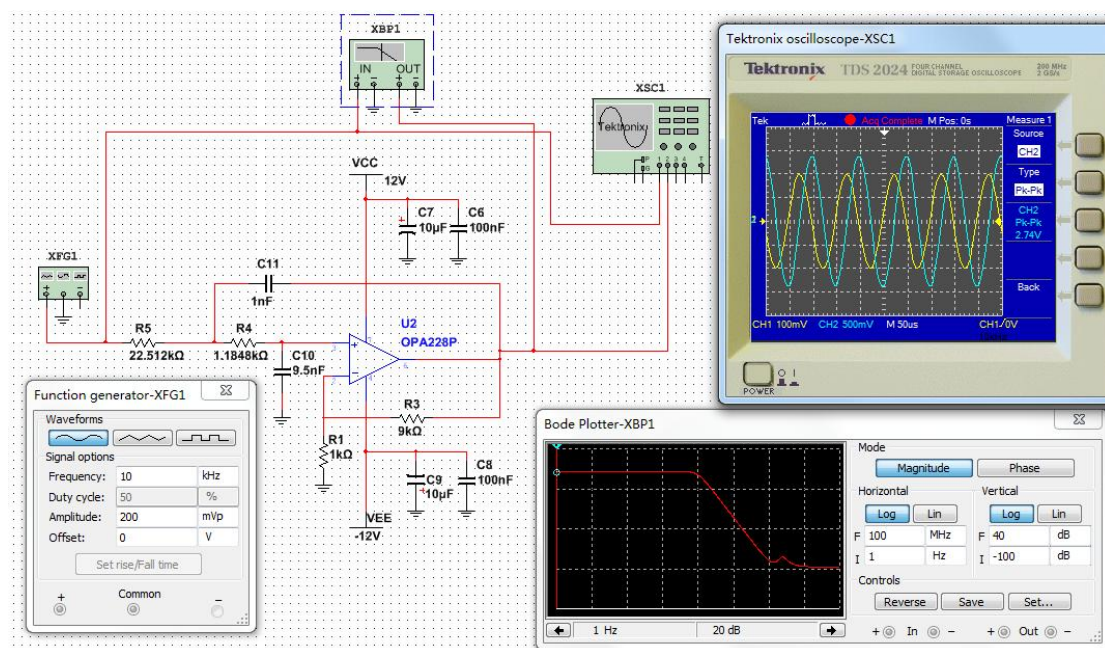
(3) $C_2 = mC_1 = 9.5 \text{ nF}$

(4) $R_1 = 2QR = 2 \times 0.707 \times 15.915 = 22.512 \text{ k}\Omega$

(5) $R_2 = \frac{R}{2Qm} = \frac{15.915}{2 \times 0.707 \times 9.5} = 1.1848 \text{ k}\Omega$

(6) 选取 $R_A = 1 \text{ k}\Omega$ ，则 $R_B = (H_{0LP} - 1) R_A = 9 \text{ k}\Omega$

3. 如果有灵敏度的要求，再进一步根据灵敏度对元件参数值的误差和稳定性提出限制。



（二）二阶无限增益多路反馈低通滤波器

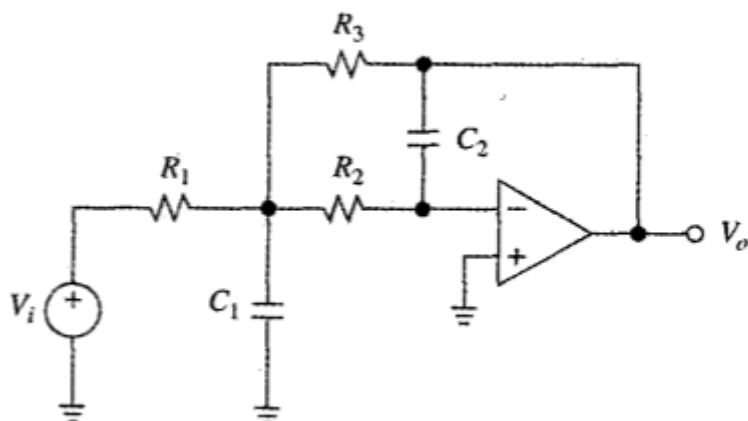


图 3 二阶无限增益多路反馈低通滤波器原理图

$$\left\{ \begin{array}{l} H_{0LP} = -\frac{R_3}{R_1} \\ \omega_o = \frac{1}{\sqrt{R_2 C_1 R_3 C_2}} \\ Q = \frac{\sqrt{C_1/C_2}}{\sqrt{R_2 R_3/R_1^2} + \sqrt{R_3/R_2} + \sqrt{R_2/R_3}} \end{array} \right.$$

由上式可知，可通过先调整 R_3 来先调整 ω_o ，然后通过调整 R_1 来调整 Q 值。

参考运算放大器应用技术手册

(1) 选取 C_2

$$(2) R = \frac{1}{\omega_o C_2} = \frac{1}{2\pi f_o C_2}$$

$$(3) C_1 = 4 \times Q^2 \times (H_{0LP} + 1) C_2$$

$$(5) R_1 = \frac{R}{2QH_{0LP}}$$

$$(6) R_2 = \frac{R}{2Q(H_{0LP} + 1)}$$

$$(7) R_3 = \frac{R}{2Q}$$

【范例 3】设计一低通滤波电路，要求其截止频率 f_0 为 10kHz， $Q = 0.707$ ，通带增益 $H=10$ ，

$f \gg f_0$ 处的衰减速率不低于 40dB/10 频段，截止频率和增益等的误差要求在 $\pm 10\%$ 以内。

1. 首先选择电路形式，根据设计要求确定滤波器的阶数 n 。

(1) 由衰减速率要求 $-20 \times n \text{ dB} / \text{十倍频} \geq 40 \text{ dB} / \text{十倍频}$ ，算出 $n = 2$ 。

(2) 根据题目要求，选择无限增益多路反馈低通有源滤波电路形式。

2. 根据传输函数等的要求设计电路中相应元器件的具体数值。

(1) 根据滤波器的特征频率 f_0 选取电容 C 和电阻 R 的值。

电容 C 的大小一般不超过 1 μF ，电阻 R 取值为 $k\Omega$ 数量级。表 1 给出截止频率 f_0 与电容值的选择参考对照表。

表 3 截止频率与所选电容的参考对照表

f_0	10~100Hz	0.1~1kHz	1~10kHz	10~100kHz
C	1~0.1 μF	0.1~0.01 μF	0.01~0.001 μF	1000~100pF

(1) 选取 C_2 ，设电容 C_2 的取值为 1nF，则

$$R = \frac{1}{2\pi f_0 C} = \frac{1}{2\pi \times 10 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-9}} = 15.915k\Omega$$

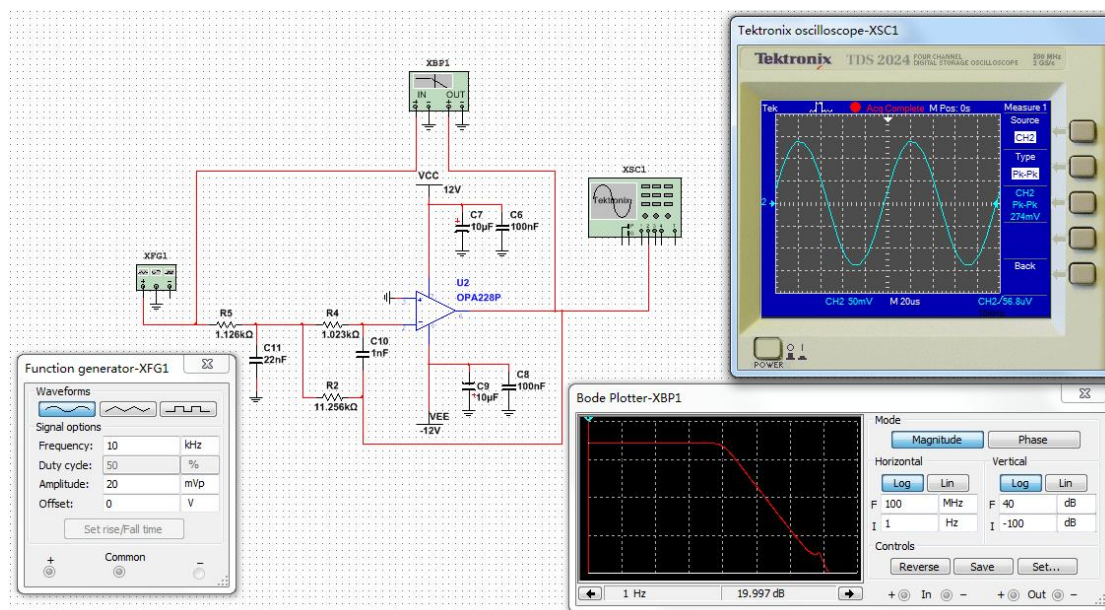
$$(2) C_1 = 4 \times Q^2 \times (H_{0LP} + 1) C_2 = 4 \times \frac{1}{2} \times 11 \times 1nF = 22nF$$

$$(3) R_1 = \frac{R}{2QH_{0LP}} = \frac{15.915}{2 \times 0.707 \times 10} = 1.126k\Omega$$

$$(4) R_2 = \frac{R}{2Q(H_{0LP} + 1)} = \frac{15.915}{2 \times 0.707 \times (10 + 1)} = 1.023k\Omega$$

$$(5) R_3 = \frac{R}{2Q} = \frac{15.915}{2 \times 0.707} = 11.256k\Omega$$

3. 如果有灵敏度的要求，再进一步根据灵敏度对元件参数值的误差和稳定性提出限制。



二、带通滤波器的设计

带通滤波器的设计是已知 ω_o （中心频率）、 H_{0BP} （谐振增益）、 Q （ $Q = \frac{f_0}{BP}$ ，

BP 为带通滤波器带宽）三个参数来设计电路，可选的电路形式为压控电压源带通滤波器和无限增益多路反馈带通滤波器。下面分别介绍：

（一）二阶压控电压源带通滤波器

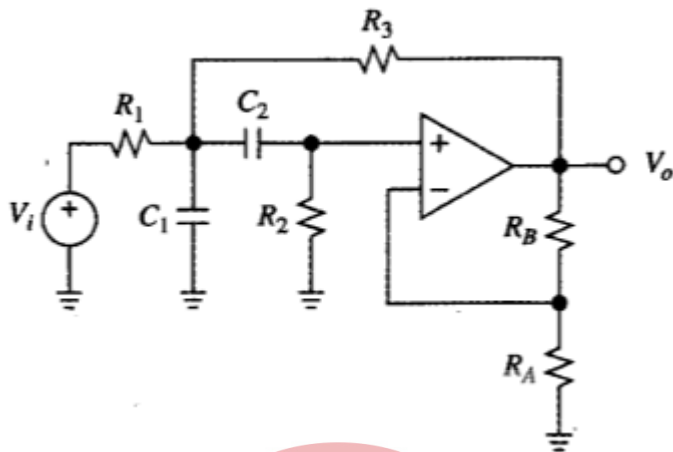


图 4 二阶压控电压源带通滤波器原理图

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_o = \frac{\sqrt{1 + R_1/R_3}}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}} \\ H_{0BP} = \frac{K}{1 + (1 - K) R_1/R_3 + (1 + C_1/C_2) R_1/R_2} \\ Q = \frac{\sqrt{1 + R_1/R_3}}{[1 + (1 - K) R_1/R_3] \sqrt{R_2 C_2/R_1 C_1} + \sqrt{R_1 C_2/R_2 C_1} + \sqrt{R_1 C_1/R_2 C_2}} \end{array} \right.$$

式中， $K = 1 + \frac{R_B}{R_A}$

由上式可知，可通过先调整 R_1 来先调整 ω_o ，然后通过调整 K 来调整 Q 值。

1、等值元件 KRC 电路设计

如果 $Q > \sqrt{2}/3$ ，令 $R_1 = R_2 = R_3 = R$ 和 $C_1 = C_2 = C$ ，简化上述各式，则

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_o = \frac{\sqrt{2}}{RC} \\ H_{0BP} = \frac{K}{4 - K} \\ Q = \frac{\sqrt{2}}{4 - K} \end{array} \right.$$

得出的设计方程为

$$\begin{cases} RC = \frac{\sqrt{2}}{\omega_o} \\ K = 4 - \sqrt{2}/Q \\ R_B = (K - 1)R_A \end{cases}$$

由上式可知， K 值依赖于 Q 值大小。

为了将增益从现在的 A_{old} 降到另一个不同的值 A_{new} ，应用戴维南定理，用分压器 R_{1A} 和 R_{1B}

取代 R_1 ，同时确保 ω_o 不受替换的影响，需符合下式：

$$\begin{cases} A_{new} = A_{old} \frac{R_{1B}}{R_{1A} + R_{1B}} \\ R_{1A} \parallel R_{1B} = R_1 \end{cases}$$

电路连接如图 5 所示。

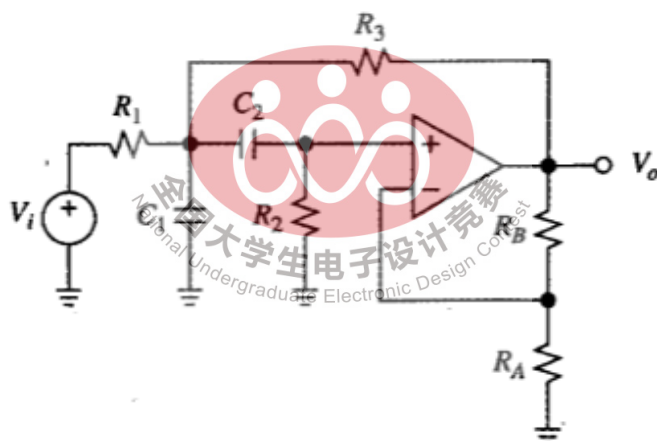


图 5 二阶压控电压源带通滤波器等值法原理图

2、自己推导的设计方法

假设 $R_1 / R_2 = r^2$ ， $R_1 / R_3 = \beta^2$ ， $C_1 = C_2 = C$ ，则

$$\begin{cases} \omega_o = \frac{\sqrt{1 + \beta^2}}{R_2 C \times r} \\ H_{0BP} = \frac{K}{1 + (1 - K)\beta^2 + 2 \times r^2} \\ Q = \frac{\sqrt{1 + \beta^2}}{[1 + (1 - K)\beta^2] \times \frac{1}{r} + 2 \times r} \end{cases}$$

令 $w_0 = \frac{1}{R_2 C}$ ，则

$$\begin{cases} 1 + \beta^2 = r^2 \\ H_{0BP} = \frac{K}{1 + (1 - K)\beta^2 + 2 \times r^2} \\ Q = \frac{\sqrt{1 + \beta^2}}{[1 + (1 - K)\beta^2] \times \frac{1}{r} + 2 \times r} \end{cases}$$

求解上述方程可得

$$\begin{cases} K = \frac{3Q + H_{0BP} - 1}{Q} \\ r^2 = \frac{3Q + H_{0BP} - 1}{H_{0BP}} \\ \beta^2 = \frac{3Q - 1}{H_{0BP}} \end{cases}$$

设计步骤为：

(1) 选取 C

$$(2) R_2 = \frac{1}{w_0 C} = \frac{1}{2\pi f_0 C}$$

$$(3) R_1 = r^2 R_2$$

$$(4) R_3 = \frac{R_1}{\beta^2} = \frac{r^2}{\beta^2} \times R_2$$

$$(5) \text{选取 } R_A, \text{ 则 } R_B = (K - 1) R_A$$



【范例 4】设计一带通滤波电路，要求其中心频率 f_0 为 10kHz，-3dB 带宽为 2kHz，谐振增益为 $H_{0BP} = 1$ ， $f \gg f_0$ 处的衰减速率不低于 40dB/10 频段，截止频率和增益等的误差要求在 $\pm 10\%$ 以内。

设计步骤：

1. 首先选择电路形式，根据设计要求确定滤波器的阶数 n 。

(1) 由衰减速率要求 $-20 \times n \text{ dB} / \text{十倍频} \geq 40 \text{ dB} / \text{十倍频}$ ，算出 $n = 2$ 。

(2) 根据题目要求，选择二阶压控电压源带通有源滤波电路形式。

2. 根据传输函数等的要求设计电路中相应元器件的具体数值。

(1) 根据滤波器的特征频率 f_0 选取电容 C 和电阻 R 的值。

电容 C 的大小一般不超过 1 μF ，电阻 R 取值为 $k\Omega$ 数量级。表 1 给出截止频率 f_0 与电容值的选择参考对照表。

表 1 截止频率与所选电容的参考对照表

f_0	10~100Hz	0.1~1kHz	1~10kHz	10~100kHz
C	1~0.1 μF	0.1~0.01 μF	0.01~0.001 μF	1000~100pF

设电容 C 的取值为 1nF，

$$R = \frac{\sqrt{2}}{2\pi f_0 C} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi \times 10 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-9}} = 22.508 k\Omega$$

(2) 根据 K 确定电阻 R_A 和 R_B 的值

$$K = 4 - \sqrt{2}/Q = 4 - \sqrt{2}/5 = 3.7172$$

取 $R_A = 1k\Omega$ ，则 $R_B = (K - 1)R_A = 2.7172k\Omega$

$$(3) H_{0BP} = \frac{K}{4 - K} = 13.144$$

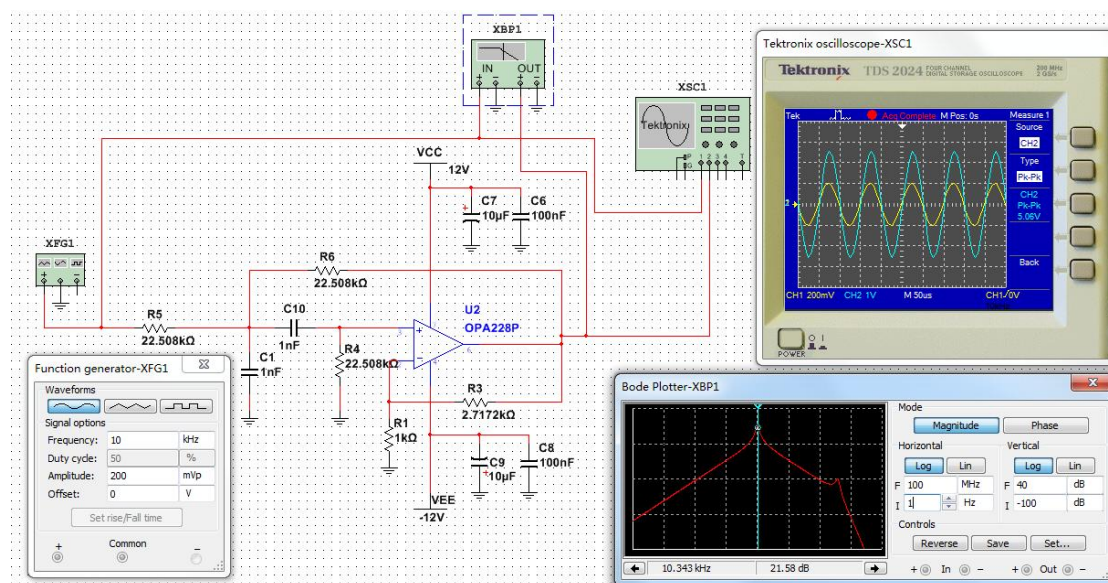
(4) 如果修改增益为 1，则

$$\begin{cases} 1 = 13.144 \times \frac{R_{1B}}{R_{1A} + R_{1B}} \\ R_{1A} \parallel R_{1B} = 22.508k \end{cases}$$

计算可得

$$\begin{cases} R_{1A} = 295.8452k \\ R_{1B} = 24.3614k \end{cases}$$

3. 如果有灵敏度的要求，再进一步根据灵敏度对元件参数值的误差和稳定性提出限制。



【范例 5】设计一带通滤波电路，要求其中心频率 f_0 为 10kHz，-3dB 带宽为 2kHz，谐振增益为 $H_{0BP} = 10$ ， $f \gg f_0$ 处的衰减速率不低于 40dB/10 频程，截止频率和增益等的误差要求在 $\pm 10\%$ 以内。

1. 首先选择电路形式，根据设计要求确定滤波器的阶数 n 。

(1) 由衰减速率要求 $-20 \times n \text{ dB} / \text{十倍频} \geq 40 \text{ dB} / \text{十倍频}$ ，算出 $n = 2$ 。

(2) 根据题目要求，选择二阶压控电压源带通有源滤波电路形式。

2. 根据传输函数等的要求设计电路中相应元器件的具体数值。

(1) 根据滤波器的特征频率 f_0 选取电容 C 和电阻 R 的值。

电容 C 的大小一般不超过 1 μF ，电阻 R 取值为 $k\Omega$ 数量级。表 1 给出截止频率 f_0 与电容值的选择参考对照表。

表 1 截止频率与所选电容的参考对照表

f_0	10~100Hz	0.1~1kHz	1~10kHz	10~100kHz
C	1~0.1 μF	0.1~0.01 μF	0.01~0.001 μF	1000~100pF

(1) 选取 C ，设电容 C 的取值为 1nF，则

$$R_2 = \frac{1}{2\pi f_0 C} = \frac{1}{2\pi \times 10 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-9}} = 15.915 k\Omega$$

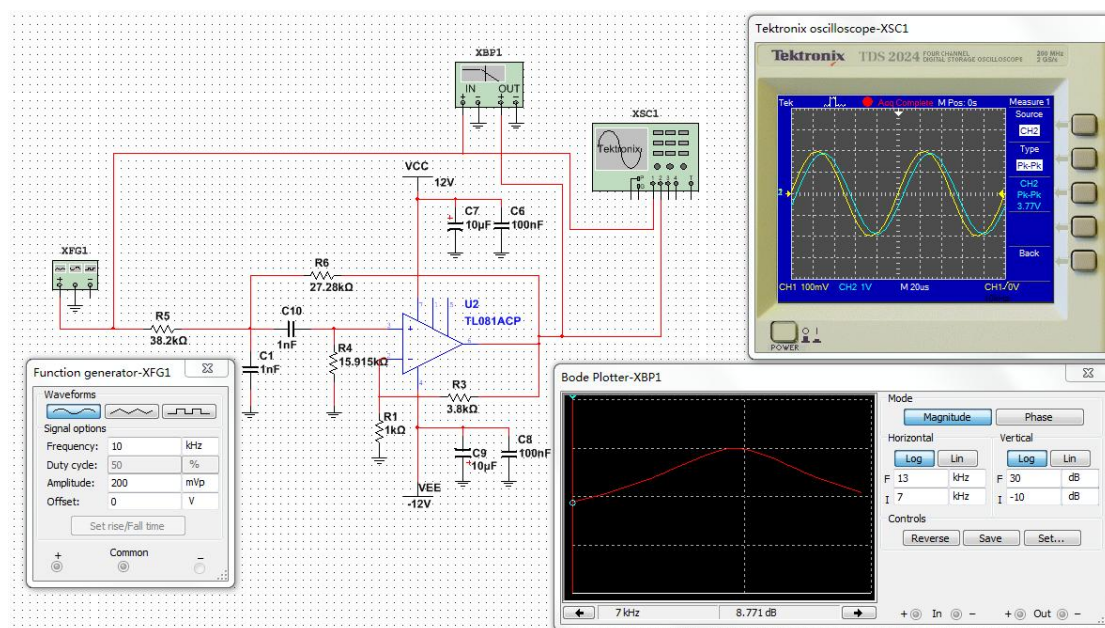
$$(2) \text{ 由 } \begin{cases} K = \frac{3Q + H_{0BP} - 1}{Q} \\ r^2 = \frac{3Q + H_{0BP} - 1}{H_{0BP}} \\ \beta^2 = \frac{3Q - 1}{H_{0BP}} \end{cases} \text{ 可得 } \begin{cases} K = \frac{3Q + H_{0BP} - 1}{Q} = \frac{3 \times 5 + 10 - 1}{5} = \frac{24}{5} \\ r^2 = \frac{3Q + H_{0BP} - 1}{H_{0BP}} = \frac{3 \times 5 + 10 - 1}{10} = \frac{12}{5} \\ \beta^2 = \frac{3Q - 1}{H_{0BP}} = \frac{3 \times 5 - 1}{10} = \frac{7}{5} \end{cases}$$

$$(3) R_1 = r^2 R_2 = 2.4 \times 15.915 = 38.196 k\Omega$$

$$(4) R_3 = \frac{R_1}{\beta^2} = \frac{r^2 R_2}{\beta^2} = \frac{12}{7} \times 15.915 = 27.28 k\Omega$$

$$(5) \text{ 选取 } R_A = 1 k\Omega, \text{ 则 } R_B = (K - 1) R_A = 3.8 k\Omega$$

3. 如果有灵敏度的要求，再进一步根据灵敏度对元件参数值的误差和稳定性提出限制。



（二）二阶无限增益多路反馈带通滤波器

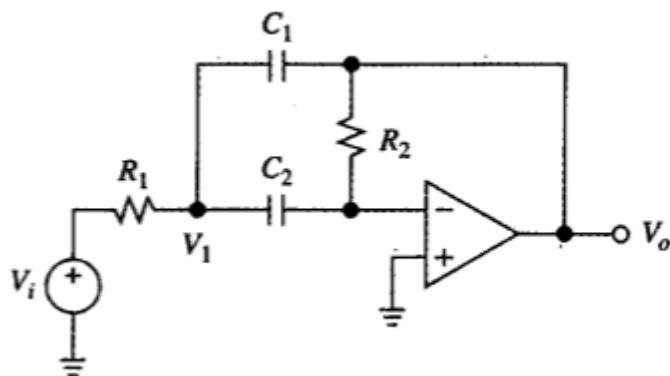


图 6 二阶无限增益多路反馈带通滤波器原理图

$$\begin{cases} \omega_o = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}} \\ Q = \frac{\sqrt{R_2/R_1}}{\sqrt{C_2/C_1} + \sqrt{C_1/C_2}} \\ H_{0BP} = \frac{-R_2/R_1}{1 + C_1/C_2} \end{cases}$$

习惯令 $C_1 = C_2 = C$ ，则

$$\begin{cases} \omega_o = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C}} \\ Q = 0.5\sqrt{R_2/R_1} \\ H_{0BP} = -2Q^2 \end{cases}$$



相应的设计方程为

$$R_1 = \frac{1}{2\omega_o Q C} = \frac{1}{2 \times 2\pi f_0 \times Q \times C}$$

$$R_2 = \frac{2Q}{\omega_o C} = \frac{2Q}{2\pi f_0 \times C}$$

为了将增益从现在的 A_{old} 降到另一个不同的值 A_{new} ，应用戴维南定理，用分压器 R_{1A} 和 R_{1B}

取代 R_1 ，同时确保 ω_o 不受替换的影响，需符合下式：

$$\begin{cases} A_{new} = A_{old} \frac{R_{1B}}{R_{1A} + R_{1B}} \\ R_{1A} \parallel R_{1B} = R_1 \end{cases}$$

解得方程

$$\begin{cases} R_{1A} = Q/H_{0BP}w_0C \\ R_{1B} = Q/(2Q^2 - H_{0BP})w_0C \end{cases}$$

电路连接如图 7 所示。

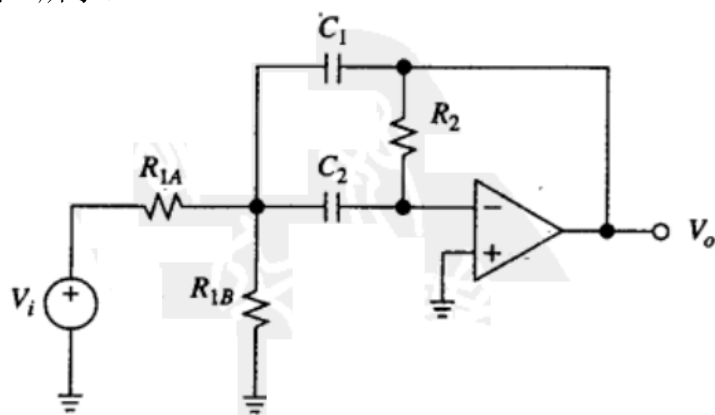


图 7 二阶无限增益多路反馈带通滤波器原理图

(1) 选取 C

$$(2) R_1 = \frac{1}{2w_0QC} = \frac{1}{2 \times 2\pi f_0 \times Q \times C}$$

$$(3) R_2 = \frac{2Q}{w_0C} = \frac{2Q}{2\pi f_0 \times C}$$

$$(4) \begin{cases} R_{1A} = Q/H_{0BP}w_0C \\ R_{1B} = Q/(2Q^2 - H_{0BP})w_0C \end{cases}$$



【范例 6】设计一带通滤波电路，要求其中心频率 f_0 为 10kHz，-3dB 带宽为 2kHz，通带增益 $H=10$ ， $f \gg f_0$ 处的衰减速率不低于 40dB/10 频程，截止频率和增益等的误差要求在 $\pm 10\%$ 以内。

1. 首先选择电路形式，根据设计要求确定滤波器的阶数 n 。

(1) 由衰减速率要求 $-20 \times n \text{ dB} / \text{十倍频} \geq 40 \text{ dB} / \text{十倍频}$ ，算出 $n = 2$ 。

(2) 根据题目要求，选择无限增益多路反馈带通有源滤波电路形式。

2. 根据传输函数等的要求设计电路中相应元器件的具体数值。

(1) 根据滤波器的特征频率 f_0 选取电容 C 和电阻 R 的值。

电容 C 的大小一般不超过 1 μF ，电阻 R 取值为 $k\Omega$ 数量级。表 1 给出截止频率 f_0 与电容值的选择参考对照表。

表 1 截止频率与所选电容的参考对照表

f_0	10~100Hz	0.1~1kHz	1~10kHz	10~100kHz
C	1~0.1 μF	0.1~0.01 μF	0.01~0.001 μF	1000~100pF

(1) 选取 C ，设电容 C 的取值为 1nF，则

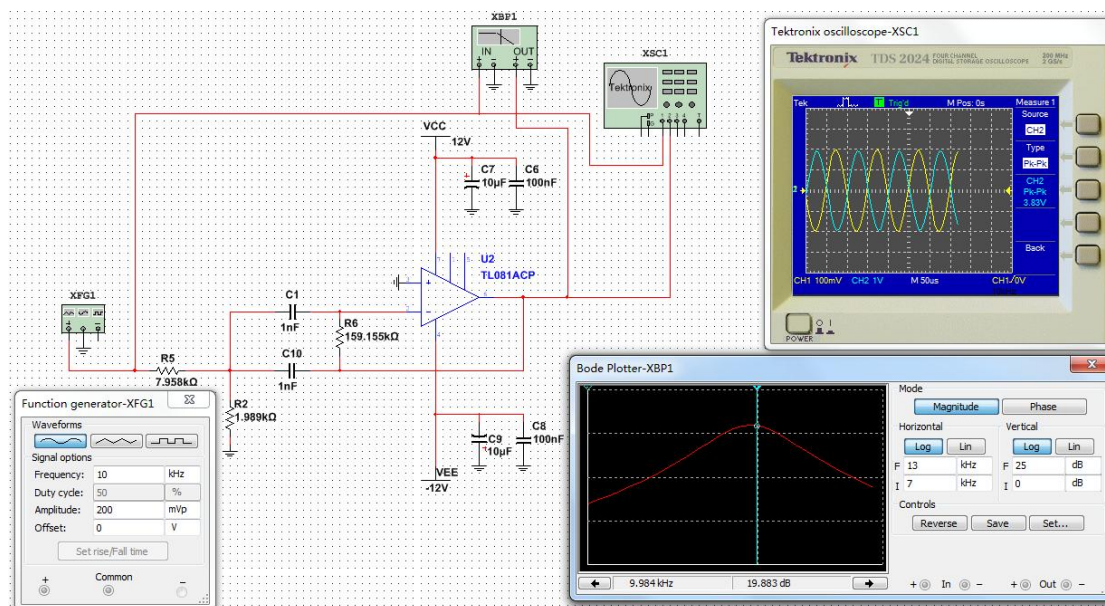
$$R_1 = \frac{1}{2\omega_0 Q C} = \frac{1}{2 \times 2\pi f_0 \times Q \times C} = \frac{1}{2\pi} \times 10^4$$

$$(2) R_2 = \frac{2Q}{\omega_0 C} = \frac{2Q}{2\pi f_0 \times C} = \frac{1}{2\pi} \times 10^6 = 159.155k\Omega$$

$$(3) R_{1A} = Q / H_{0BP} \omega_0 C = \frac{5}{10 \times 2\pi \times 10 \times 10^3 \times 10^{-9}} = 7.958k\Omega$$

$$(4) R_{1B} = Q / (2Q^2 - H_{0BP}) \omega_0 C = \frac{5}{(2 \times 5^2 - 10) \times 2\pi \times 10 \times 10^3 \times 10^{-9}} = 1.989k\Omega$$

3. 如果有灵敏度的要求，再进一步根据灵敏度对元件参数值的误差和稳定性提出限制。



三、全通滤波器的设计

全通滤波器（APF）输出电压幅值与输入电压幅值之比为常数(即不随频率变化而变化)，但它会改变输入信号的相位，又称为移相滤波器。

全通滤波器的设计是已知 f （被移相信号频率）、 φ （相移值）两个参数来设计电路，可选的电路形式为超前电路和滞后电路。下面分别介绍：

（一）超前电路

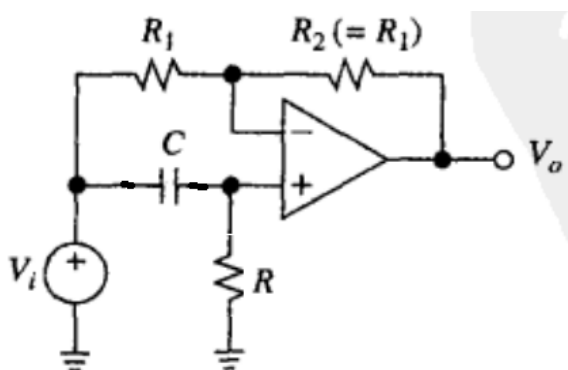


图 8 超前电路原理图

$$\begin{cases} \varphi = 180^\circ - 2\arctan \frac{f}{f_0} \\ f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \end{cases}$$

【范例 7】设计一全通滤波电路，完成对频率 f 为 10kHz 的信号超前移相 90° 度。

1. 首先选择电路形式。
2. 计算全通滤波器的特征频率 f_0

由 $\varphi = 180^\circ - 2\arctan \frac{f}{f_0}$ 可得

$$90^\circ = 180^\circ - 2\arctan \frac{10\text{kHz}}{f_0}, \text{ 故 } f_0 = 10\text{kHz}$$

3. 根据滤波器的特征频率 f_0 选取电容 C 和电阻 R 的值。

电容 C 的大小一般不超过 $1\mu\text{F}$ ，电阻 R 取值为 $\text{k}\Omega$ 数量级。表 1 给出截止频率 f_0 与电容值的选择参考对照表。

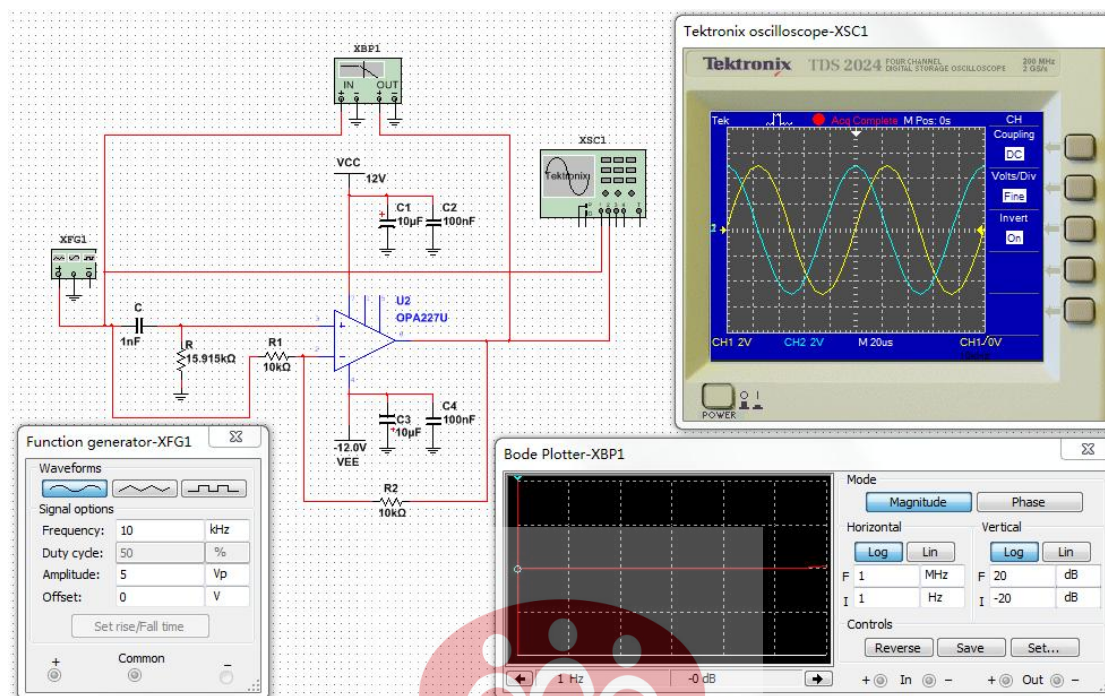
表 1 截止频率与所选电容的参考对照表

f_0	10~100Hz	0.1~1kHz	1~10kHz	10~100kHz
C	1~0.1 μF	0.1~0.01 μF	0.01~0.001 μF	1000~100pF

(1) 选取 C ，设电容 C 的取值为 1nF ，则

$$R = \frac{1}{2\pi f_0 \times C} = \frac{1}{2\pi \times 10 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-9}} = 15.915\text{k}\Omega$$

(2) 选取 $R_1 = R_2 = 10\text{k}\Omega$



(二) 滞后电路

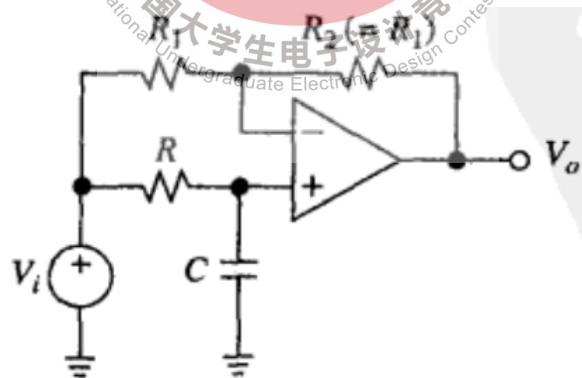


图 9 滞后电路原理图

$$\begin{cases} \varphi = 2\arctan \frac{f}{f_0} \\ f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \end{cases}$$

【范例 8】设计一全通滤波电路，完成对频率 f 为 10kHz 的信号滞后移相 90° 。

1. 首先选择电路形式。
2. 计算全通滤波器的特征频率 f_0

由 $\varphi = 2\arctan \frac{f}{f_0}$ 可得

$$90^\circ = 2\arctan \frac{10\text{kHz}}{f_0}, \text{ 故 } f_0 = 10\text{kHz}$$

3. 根据滤波器的特征频率 f_0 选取电容 C 和电阻 R 的值。

电容 C 的大小一般不超过 1 μ F，电阻 R 取值为 k Ω 数量级。表 1 给出截止频率 f_0 与电容值的选择参考对照表。

表 1 截止频率与所选电容的参考对照表

f_0	10~100Hz	0.1~1kHz	1~10kHz	10~100kHz
C	1~0.1 μ F	0.1~0.01 μ F	0.01~0.001 μ F	1000~100pF

(1) 选取 C，设电容 C 的取值为 1nF，则

$$R = \frac{1}{2\pi f_0 \times C} = \frac{1}{2\pi \times 10 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-9}} = 15.915\text{k}\Omega$$

(2) 选取 $R_1 = R_2 = 10\text{k}\Omega$

