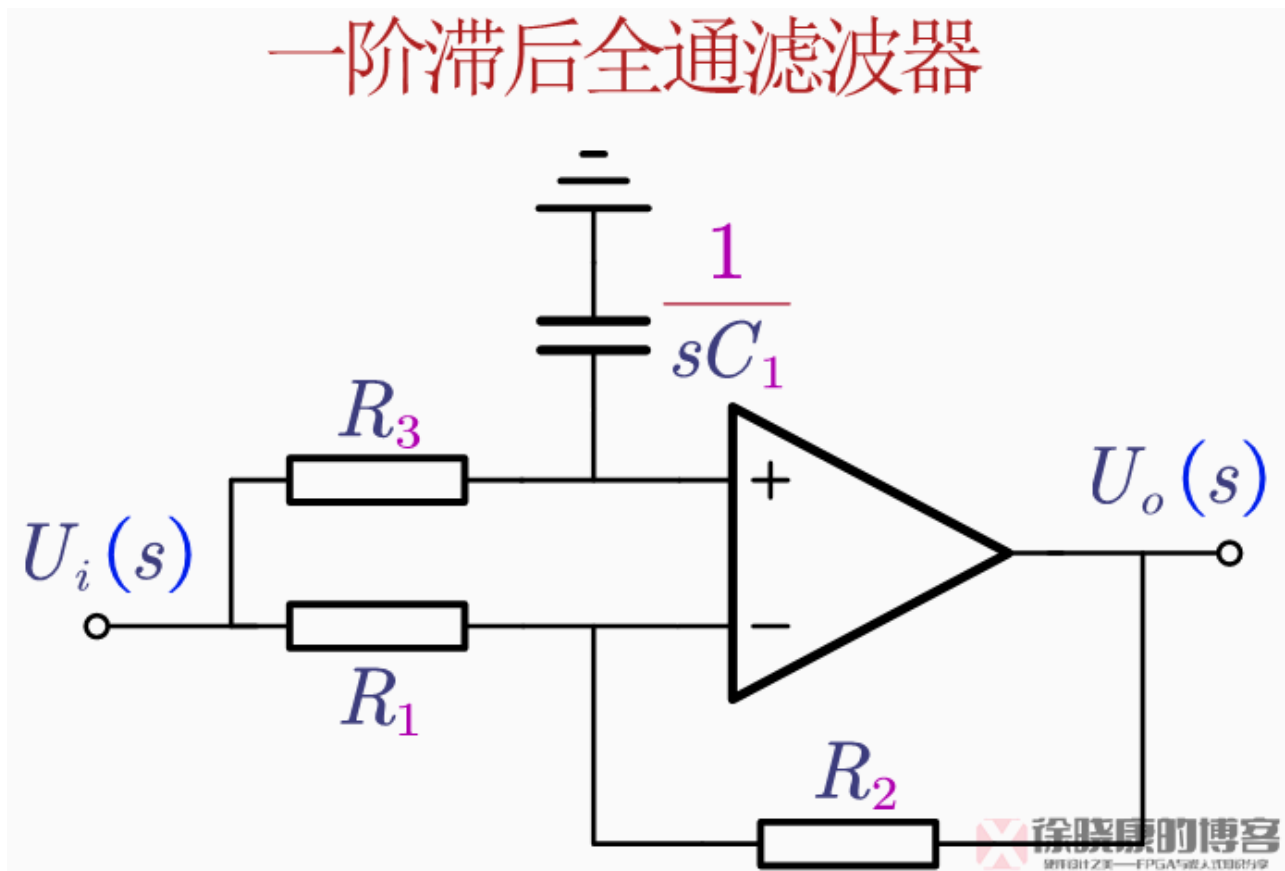


1.1 一阶滞后全通滤波器

电路图如下图所示：



设运放正输入的电压为 $X(s)$ ，有：

$$\begin{cases} \frac{U_i(s) - X(s)}{R_3} = \frac{X(s)}{\frac{1}{sC_1}} \\ \frac{U_i(s) - X(s)}{R_1} = \frac{X(s) - U_o(s)}{R_2} \end{cases}$$

$$\Rightarrow H(s) = \frac{\frac{R_2}{R_1} - sR_3C_1}{1 + sR_3C_1}$$

对于全通滤波器, R_1 与 R_2 必须相等, 有:

$$H(s) = \frac{1 - R_3 C_1 s}{1 + R_3 C_1 s}$$

幅频特性:

$$A(\omega) = \frac{\sqrt{1 + (R_3 C_1 \omega)^2}}{\sqrt{1 + (R_3 C_1 \omega)^2}} = 1$$

相频特性: 相角 = 分子相角 - 分母相角。

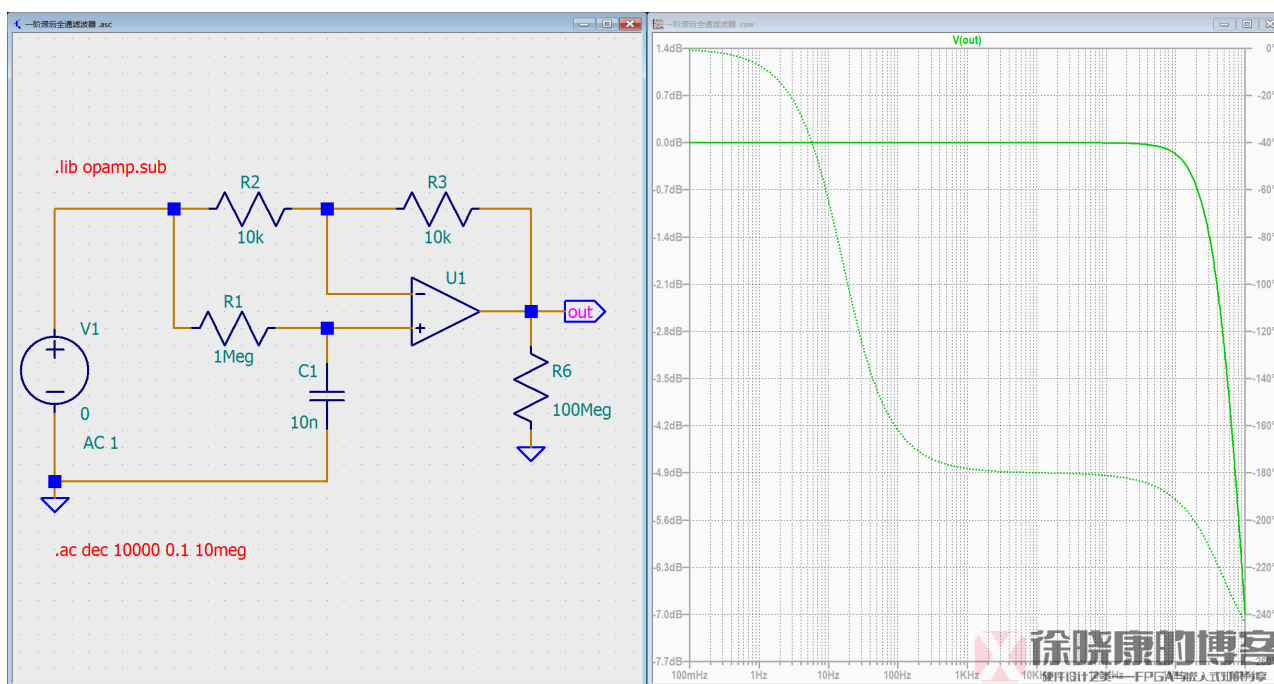
$$\varphi(\omega) = \arctan\left(\frac{-R_3 C_1 \omega}{1}\right) - \arctan\left(\frac{R_3 C_1 \omega}{1}\right)$$



又 $\arctan(R_3 C_1)$ 的值在 $0 \sim 90^\circ$ 之间, 所以相角在 $-180^\circ \sim 0^\circ$ 之间, 为滞后。

一阶滞后全通LTspice仿真电路与Bode图如下图所示。注意通带内相位从 0° 向 -180° 变化。

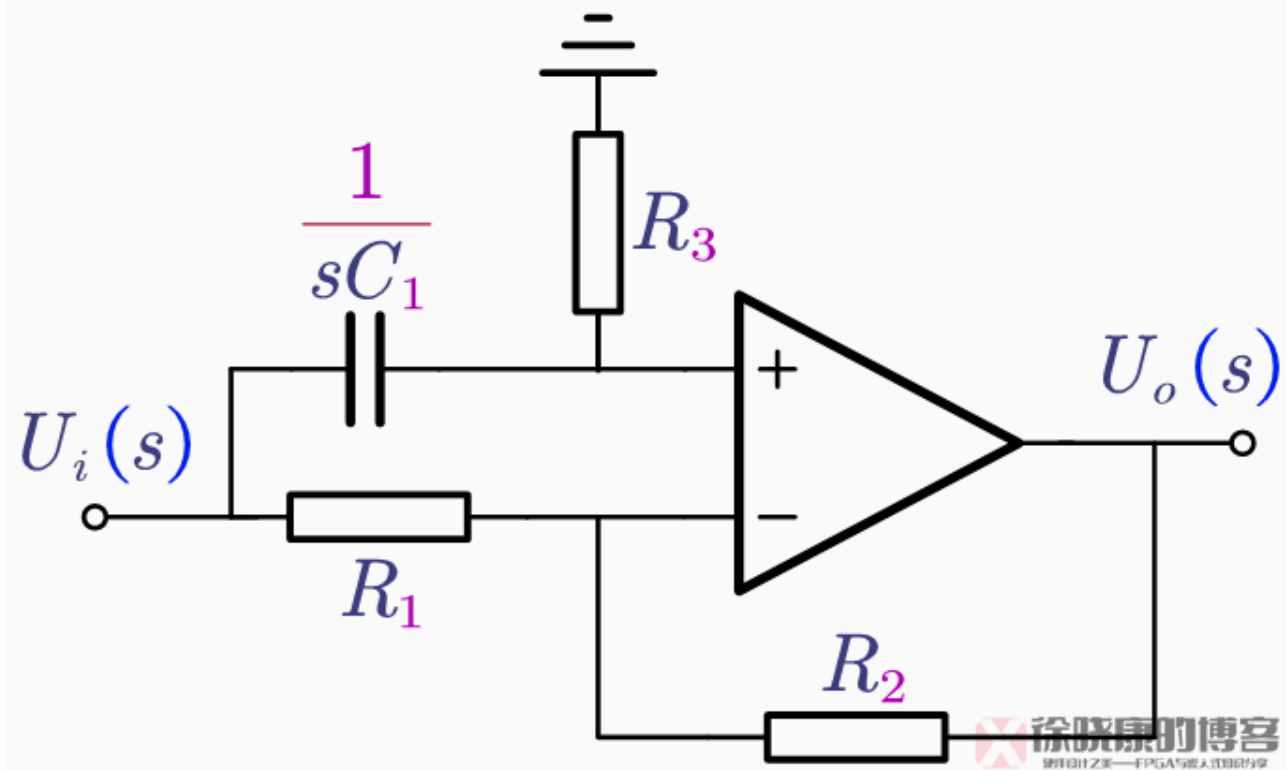
注意，实际电路容值的选择一般在100pF~100nF之间，这时电容介质一般为C0G或X7R，有着比较好的温度特性。电阻值最大不要超过1MΩ，不然可能接近运放的输入电阻，使得运放的虚断特性不再成立。



1.2 一阶超前全通滤波器

电路图如下图所示：

一阶超前全通滤波器



设运放正输入的电压为 $X(s)$ ，有：

$$\begin{cases} \frac{U_i(s) - X(s)}{\frac{1}{sC_1}} = \frac{X(s)}{R_3} \\ \frac{U_i(s) - X(s)}{R_1} = \frac{X(s) - U_o(s)}{R_2} \end{cases}$$

$$\Rightarrow H(s) = \frac{-\frac{R_2}{R_1} + sR_3C_1}{1 + sR_3C_1}$$

同样有 $R_1 = R_2$ ，则

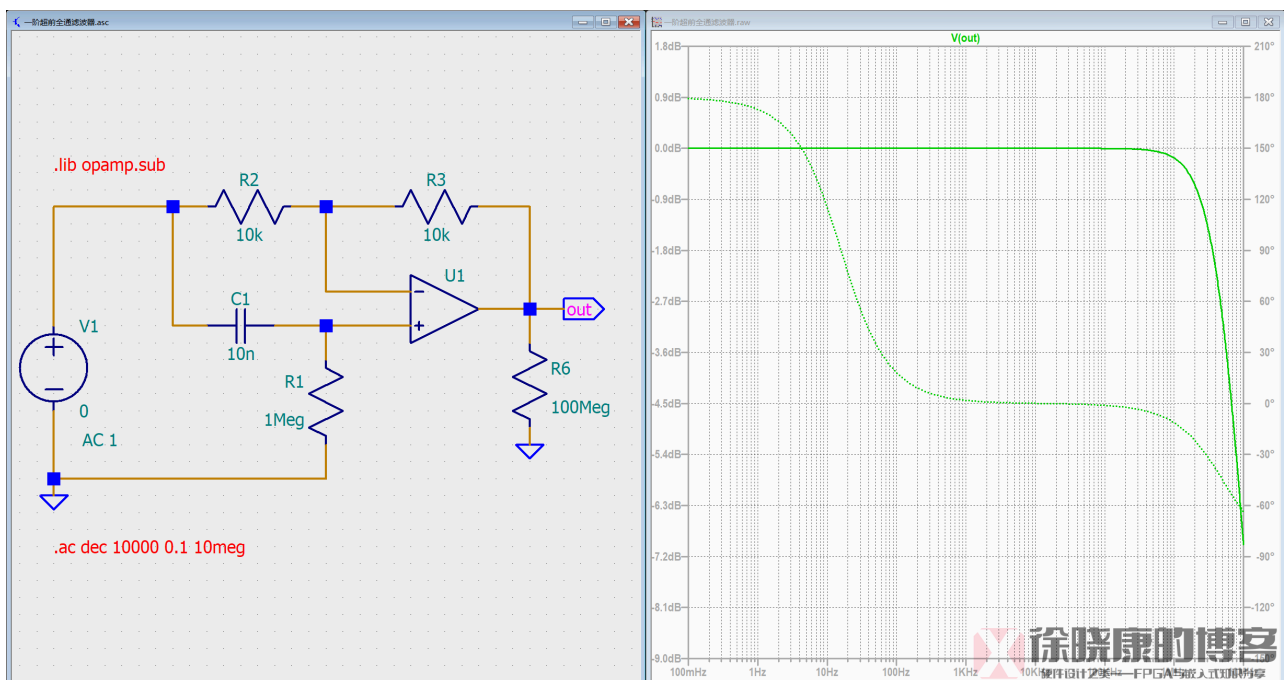
$$H(s) = \frac{-1 + sR_3C_1}{1 + sR_3C_1}$$

相频特性：

$$\varphi(\omega) = 180 + \arctan\left(\frac{R_3C_1\omega}{-1}\right) - \arctan\left(\frac{R_3C_1\omega}{1}\right)$$

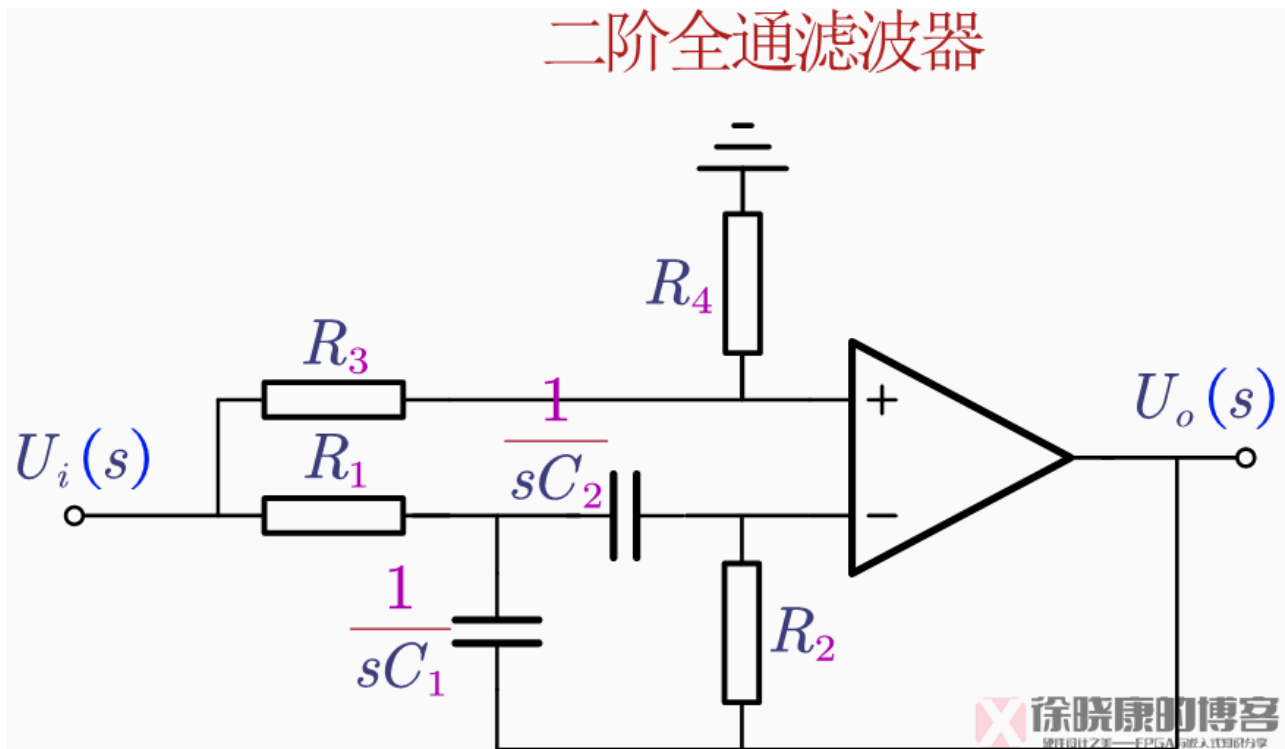
又 $\arctan(R_3C_1\omega)$ 的值在 $0 \sim 90^\circ$ 之间，所以相角在 $0 \sim 180^\circ$ 之间，为超前。

一阶超前全通滤波器LTspice仿真电路图与Bode图如下图所示。注意通带内相位从 180° 向 0° 变化。



二. 二阶全通滤波器

二阶全通滤波器电路如下图所示。



设运放正输入电压为 $X(s)$, R_1 与 C_1 连接点电压为 $Y(s)$, 有:

$$\begin{cases} \frac{U_i(s) - X(s)}{R_3} = \frac{X(s)}{R_4} \\ \frac{Y(s) - X(s)}{\frac{1}{sC_2}} = \frac{X(s) - U_o(s)}{R_2} \\ \frac{U_i(s) - Y(s)}{R_1} = \frac{Y(s) - X(s)}{\frac{1}{sC_2}} + \frac{Y(s) - U_o(s)}{\frac{1}{sC_1}} \end{cases}$$

$$\text{最上式} \Rightarrow X(s) = \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_i(s) = k U_i(s), \text{ 其中 } k$$

$$\text{中间式} \Rightarrow Y(s) = \frac{k(1 + R_2 C_2 s) U_i(s) - U_o(s)}{R_2 C_2 s}$$

$$\text{最下式} \Rightarrow Y(s) = \frac{U_i(s)(1 + s R_1 C_2 k) + s R_1 C_1 U_o(s)}{1 + s R_1 C_1 + s R_1 C_2}$$

有:

$$\frac{k(1 + R_2 C_2 s) U_i(s) - U_o(s)}{R_2 C_2 s} = \frac{U_i(s)(1 + s R_1 C_2 k) + s R_1 C_1 U_o(s)}{1 + s R_1 C_1 + s R_1 C_2}$$

$$U_o(s) \left(\frac{s R_1 C_1}{1 + s R_1 C_1 + s R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2 s} \right) = U_i(s)$$

$$\Rightarrow H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{\frac{1+sR_1C_2k}{1+sR_1C_1+sR_1C_2} - k\frac{1+R_2C_2s}{R_2C_2s}}{\frac{sR_1C_1}{1+sR_1C_1+sR_1C_2} + \frac{1}{R_2C_2s}}$$

最终的通用传递函数为：

$$\Rightarrow H(s) = k \frac{1 + (R_1C_1 + R_1C_2 + \frac{k-1}{k}R_2C_2)s +}{1 + (R_1C_1 + R_1C_2)s + R_1R_2}$$

因为是全通滤波器，有：

$$R_1C_1 + R_1C_2 + \frac{k-1}{k}R_2C_2 = -R_1C_1 - R_1C_2$$

$$\Rightarrow 2R_1C_1 + 2R_1C_2 = \frac{1-k}{k}R_2C_2$$

一般来说，两个电容会选择相同容值的即 $C_1 = C_2$ ，有：

$$4R_1 = \frac{1-k}{k} R_2 \Rightarrow R_2 = \frac{4k}{1-k} R_1$$

则实际电路传递函数为：

$$H(s) = k \frac{1 - j2R_1C_1\omega + \frac{4k}{1-k} R_1^2 C_1^2 s^2}{1 + j2R_1C_1\omega + \frac{4k}{1-k} R_1^2 C_1^2 s^2}$$

$$H(j\omega) = k \frac{1 - \frac{4k}{1-k} R_1^2 C_1^2 \omega^2 - j2R_1C_1\omega}{1 - \frac{4k}{1-k} R_1^2 C_1^2 \omega^2 + j2R_1C_1\omega}$$

幅频特性：

$$A(\omega) = k$$

因为 $k = \frac{R_4}{R_3+R_4}$ ，所以信号经过此二阶全通滤波器会被衰减，但衰减与频率无关。

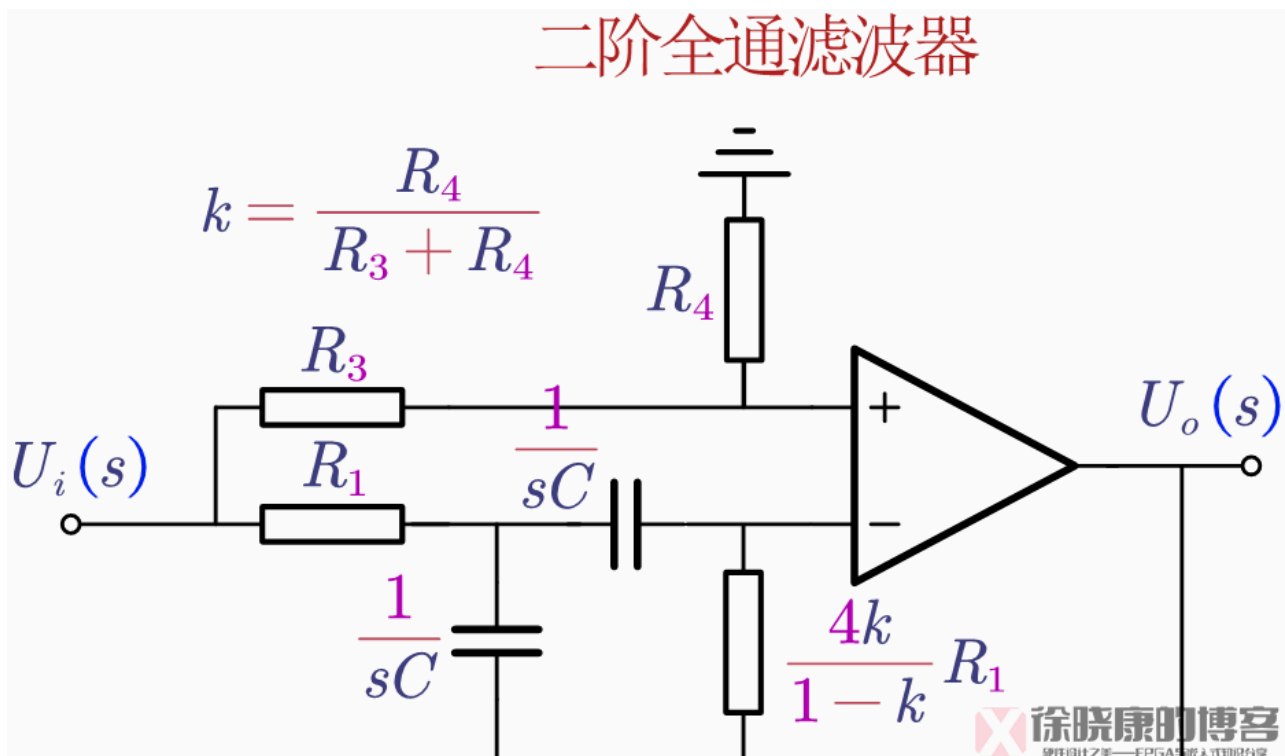
相频特性：

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} -2\arctan\left(\frac{2R_1C_1\omega}{1-\frac{4k}{1-k}R_1^2C_1^2\omega^2}\right) & 1 - \frac{4k}{1-k}F \\ -180 & 1 - \frac{4k}{1-k}F \end{cases}$$

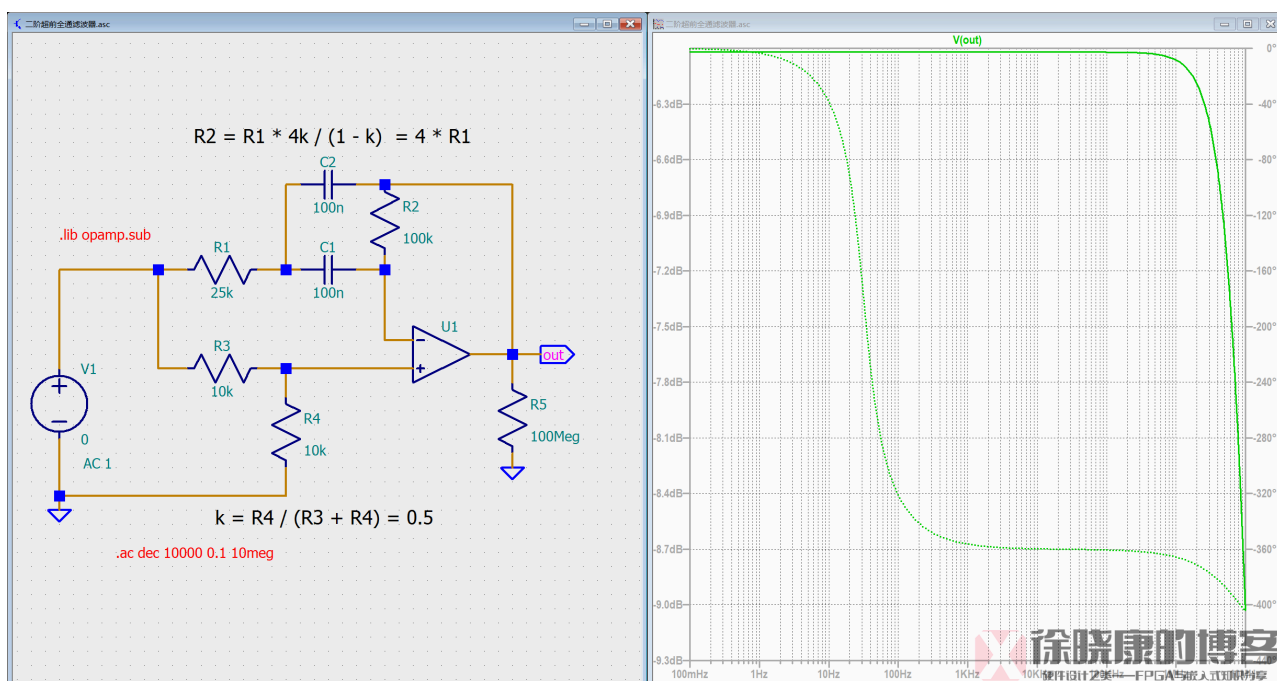
ω 从 $0 \rightarrow \infty$ 的过程中, $\varphi(\omega)$ 从 $0 \rightarrow -180$ (等同于 $+180$)

可见相位在低频段是滞后, 高频段是超前。

将相应限制条件加入电路, 得最终的二阶全通滤波器电路如下图所示。



LTspice仿真电路与Bode图如下:



可见，通带幅值为-6dB，对应幅值衰减为原来的1/2。相位从0°向-360°变化，注意-180°~ -360°相当于+180°~ 0°。

设计时，注意电容的取值，以100pF ~ 100nF为最佳；电阻取值不要超过1MΩ。

三. 仿真工程分享

OneDrive - Personal > LTspicePrj > LTspice仿真——滤波器 > 全通滤波器				
名称	状态	修改日期	类型	大小
一阶滞后全通滤波器.asc	✓	2022/10/15 12:22	LTspice Schematic	2 KB
一阶超前全通滤波器.asc	✓	2022/10/15 12:21	LTspice Schematic	2 KB
二阶全通滤波器.asc	✓	2022/10/16 10:13	LTspice Schematic	2 KB