

实验20 有源滤波器设计P357



浙江大学电工电子教学中心
傅晓程

桌号请写在实验**地点**后

例如，**地点**：东3 - 2XX A1

本次实验**无需**验收

本次**需**提交实验报告



实验目的

1. 学习有源低通滤波器的分析和设计方法。
2. 了解有源低通滤波器的结构和元件参数对滤波器性能的影响。
3. 掌握有源低通滤波器的调试和幅频特性的测量方法。
4. 掌握有源低通滤波电路的EDA仿真方法。



实验任务

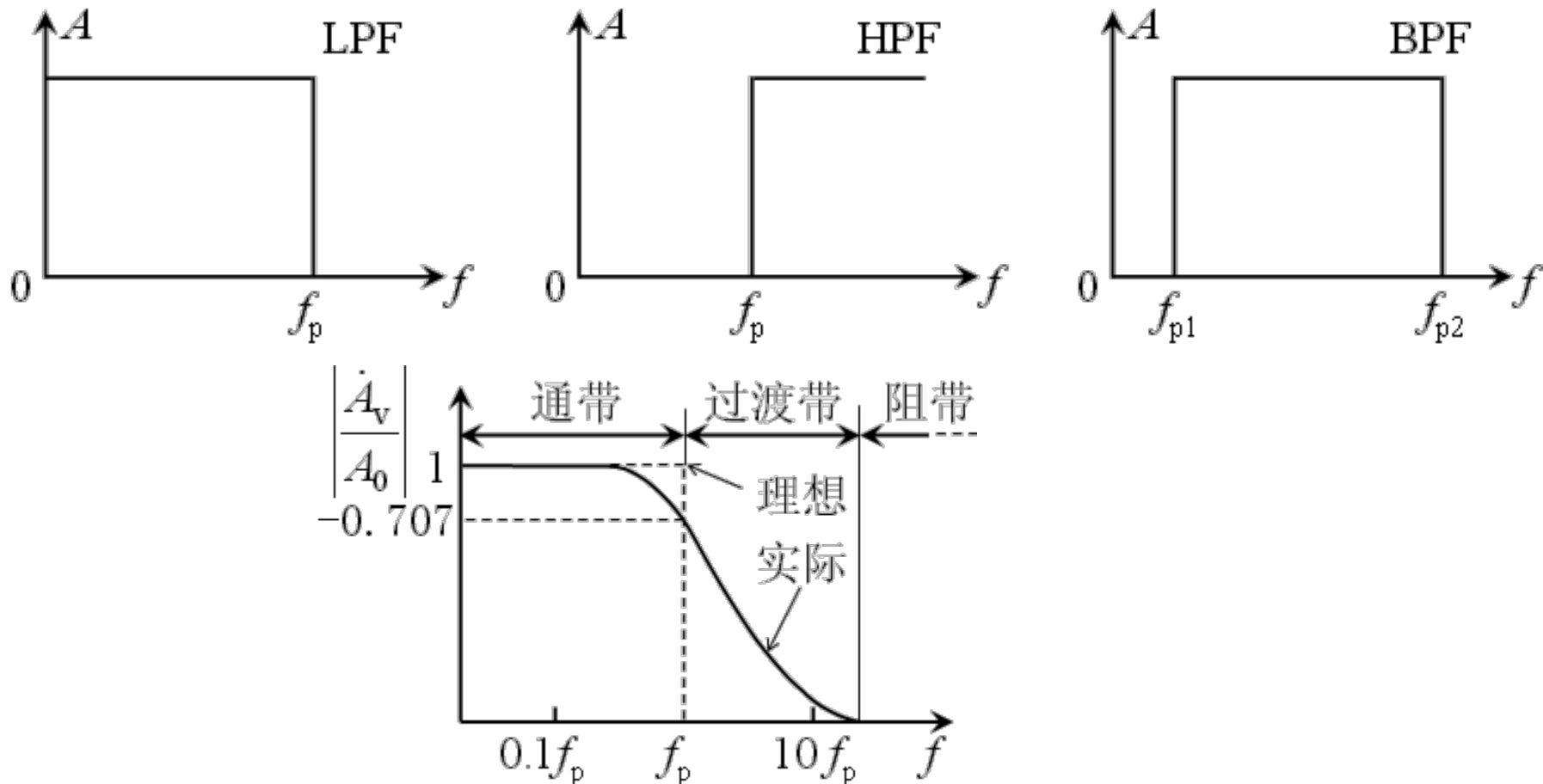
一、设计要求

- 1.设计一个二阶有源多重负反馈型低通滤波器，要求通带增益约 $A_0=10$ （或6），固有频率约 $f_c=1\text{KHz}$ ，计算其品质因数 Q 和截止频率 f_p 。
- 2.对设计的电路进行软件仿真，分析其参数指标，以及幅频特性和相频特性曲线。；
- 3.对步骤2设计所得的电路参数做适当调整，并重新设计和软件仿真，观察参数对品质因数 Q 和截止频率 f_p 的影响；
- 选做**4. 仿照步骤1/2/3，设计并仿真有源二阶简单低通滤波器、压控型二阶有源低通滤波器（指标自定义）。

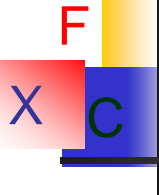
二、实验任务

- 1.组建所设计的滤波器电路，测试其静态参数。
- 2.用信号源分别产生不同频率的正弦波（幅值合适即可）输入到滤波器电路，用示波器观察并记录输入、输出波形，测量其**有效值**。
- 3.测试滤波器的通带增益、品质因数 Q 、通带截止频率和频率特性曲线(可在 $0.1f_p$ ， $0.5f_p$ ， $0.7f_p$ ， $1f_p$ ， $5f_p$ ， $10f_p$ 测量)，并与仿真结果进行对比。
- 4.改变电路参数，观察其对滤波器频率特性的影响。

滤波器的幅频特性



问题1：实际高通滤波器的输入信号可以无穷大吗？



滤波器（部分指标）

1、传递函数（频率响应特性函数） A_v
反映滤波器增益随频率的变化关系。

2、固有频率（谐振频率） f_c 、 ω_c $\omega = 2\pi f$
电路无损耗时的频率参数，其值由电路器件决定。

3、通带增益
 A_0 （针对LPF）、 A_∞ （针对HPF）、 A_r （针对BPF）；

4、截止频率（-3dB 频率） f_p 、 ω_p
增益下降到通带增益0.707倍时所对应的频率。（ $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ）

5、品质因数 Q
反映滤波器频率特性的一项重要指标，不同类型滤波器的定义不同。
（低通、高通滤波器中，定义为当 $f = f_c$ 时增益模与通带增益模之比；
带通滤波器，
$$\Delta f = f_{p2} - f_{p1} = \frac{f_c}{Q}$$
）

无源一阶低通滤波器

传递函数：
$$\dot{A}_v(j\omega) = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}}$$

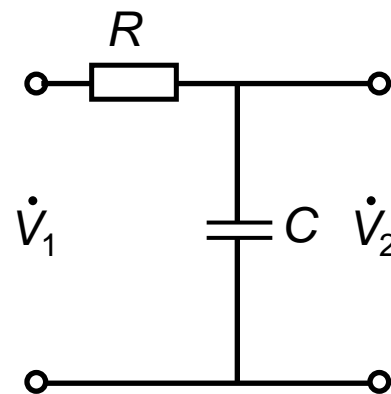
固有频率：
$$\omega_c = \frac{1}{RC}$$

通带增益： $A_0 = 1$
(指 $f = 0$ 时增益，此时电容 C 可视为开路)

截止频率：
$$\omega_p = \omega_c = \frac{1}{RC}$$

(由定义，当 $f = f_p$ 时， $|\dot{A}_v| = \frac{A_0}{\sqrt{2}}$)

品质因数：
$$Q = \frac{1}{\sqrt{2}}$$



选做：在本实验中心你做的哪些实验中涉及了低通滤波器形式？高通滤波器形式？带通滤波器形式？



传递函数：

$$\dot{A}_v(j\omega) = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}}$$

固有频率：

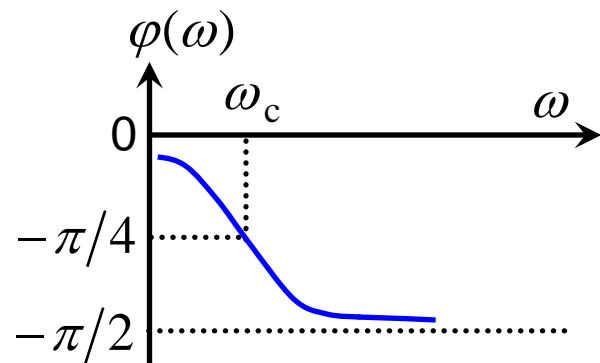
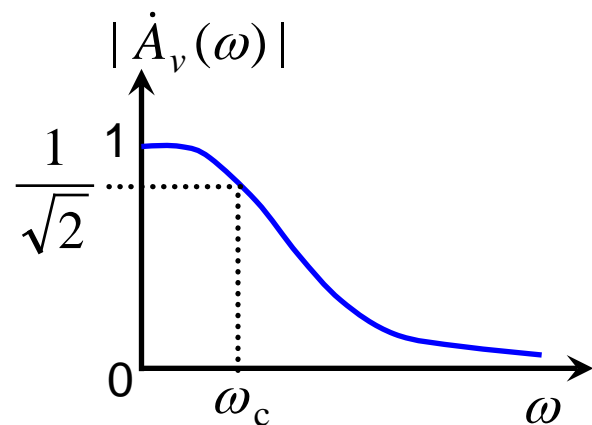
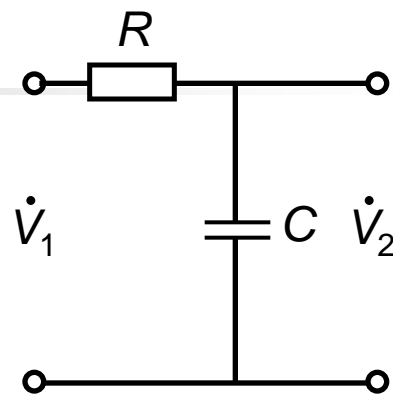
$$\omega_c = \frac{1}{RC}$$

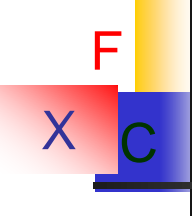
幅频：

$$|\dot{A}_v(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}}$$

相频：

$$\varphi(\omega) = -\operatorname{tg}^{-1}(\omega RC) = -\operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$$





有源一阶低通滤波器

$$\omega = 2\pi f$$

传递函数：

$$\dot{A}_v = \frac{A_0}{1 + j\frac{f}{f_c}}$$

固有频率：

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

通带增益：

$$A_0 = 1$$

截止频率：

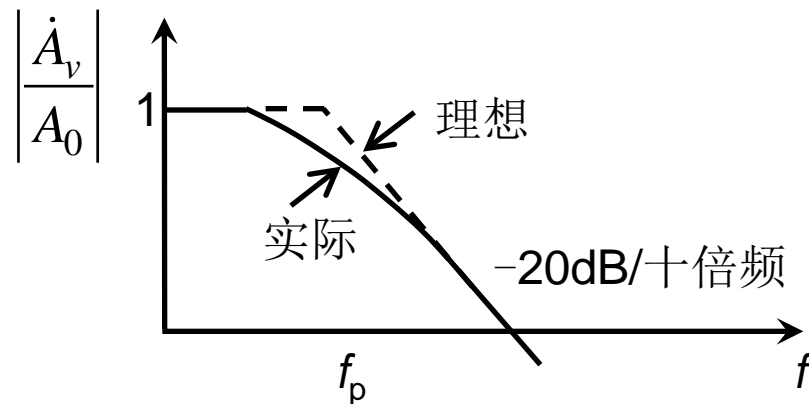
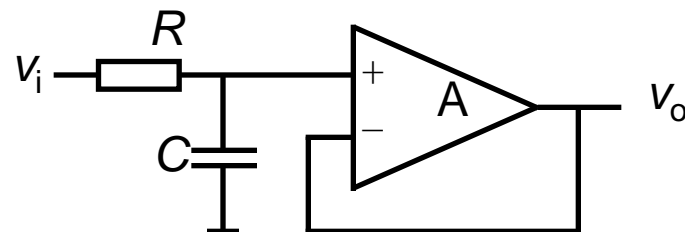
$$f_p = f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

品质因数：

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

幅频特性图（右）

（滤波效果不是很好）



有源二阶简单低通滤波器(P359)

右图所示有源二阶低通滤波器。(取 $R_1 = R_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$)

传递函数：
$$\dot{A}_v = \frac{A_0}{[1 - (\frac{f}{f_c})^2] + j3\frac{f}{f_c}}$$

固有频率：
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

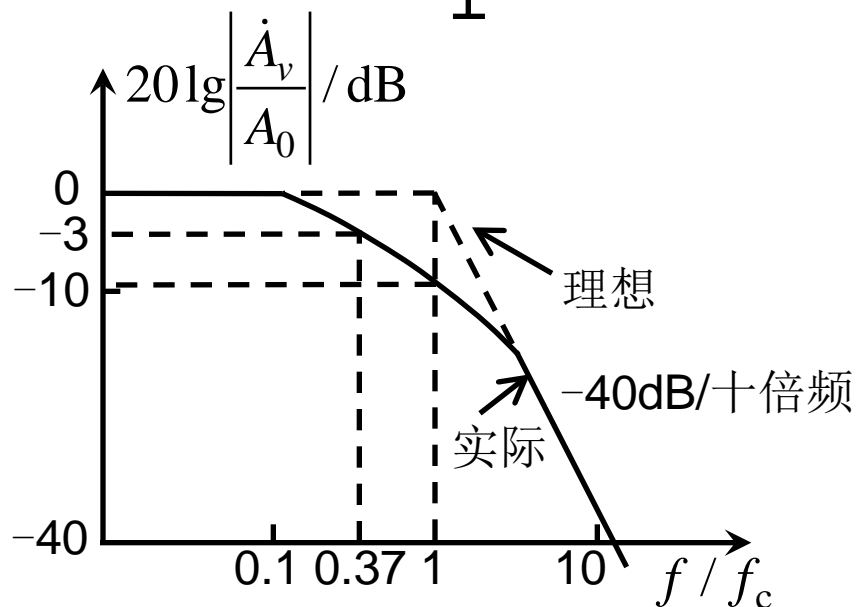
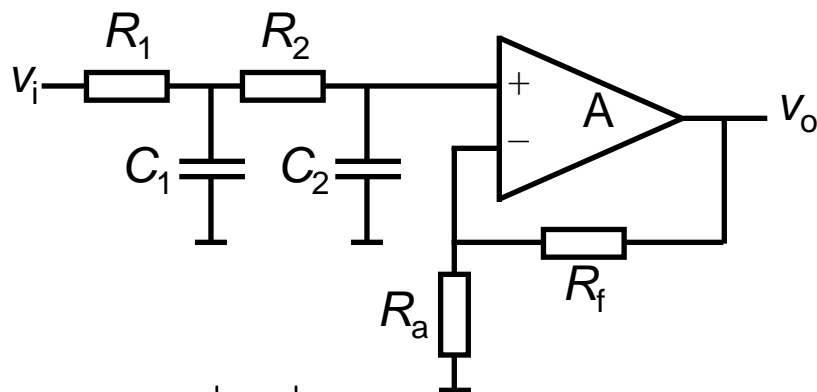
通带增益：
$$A_0 = 1 + \frac{R_f}{R_a}$$

截止频率：
$$f_p \approx 0.37 f_c = \frac{0.37}{2\pi RC}$$

(令分母为 $\sqrt{2}$)

品质因数：
$$\frac{1}{3}$$

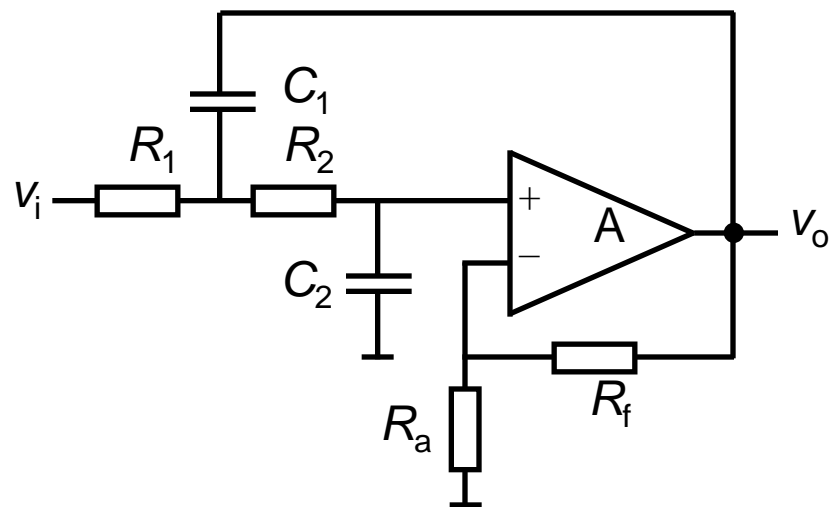
幅频特性图(右)滤波效果相对较好；
通带有衰减，阻带衰减慢。



有源二阶单一正反馈型低通滤波器 (Sallen-key) P360

(压控型)

(取 $R_1 = R_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$)



C_1 的反馈信号是正反馈，电路在 f_c 附近的增益不衰减（或提升）；

当频率远离 f_c 时，正反馈效果减弱。

选择合适的 Q 值，可以使电路的幅频特性接近理想情况；

缺陷：同时存在着正负反馈，容易产生自激振荡。可以产生正弦波吗？

了解：运算放大器为同相接法，滤波器的性能对运算放大器的性能依赖较小；最大最小电阻之比和最大最小电容之比比较小，便于实现。元件的取值对 f_c 和 Q 相互影响，滤波器比较难调节。

问题2：压控型滤波器通带增益 A_0 如果大于等于3会发生什么情况？

传递函数：
$$\dot{A}_v = \frac{A_0}{[1 - (\frac{f}{f_c})^2] + j(3 - A_0)\frac{f}{f_c}}$$

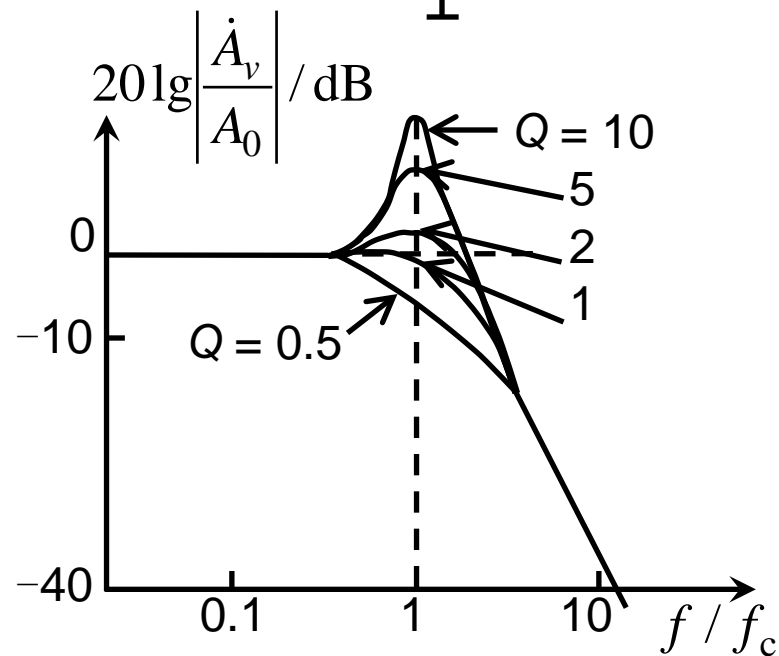
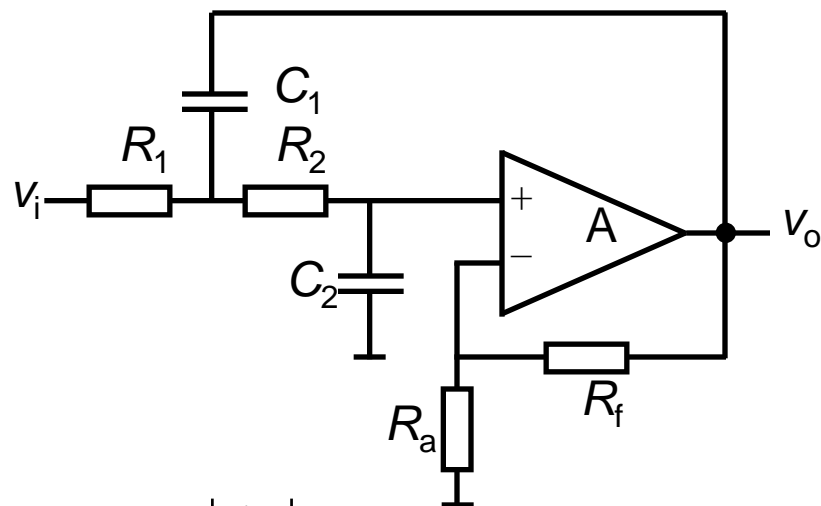
固有频率：
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

通带增益：
$$A_0 = 1 + \frac{R_f}{R_a}$$

截止频率：
$$f_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{1}{Q^2} + \sqrt{(2 - \frac{1}{Q^2})^2 + 4}}{2}} f_c$$

品质因数：
$$Q = \frac{1}{3 - A_0}$$

备注： $Q=0.70$ 时， $f_c=f_p$



幅频特性图（选择合适的 Q 值...）

有源二阶多重负反馈型低通滤波器 (MFB) P360

(该电路不会因 A_0 过大而产生自激振荡, 性能稳定)

传递函数:

$$\dot{A}_v = \frac{A_0}{[1 - (\frac{f}{f_c})^2] + j \frac{1}{Q} (\frac{f}{f_c})}$$

固有频率:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_2 R_f C_1 C_2}}$$

通带增益:

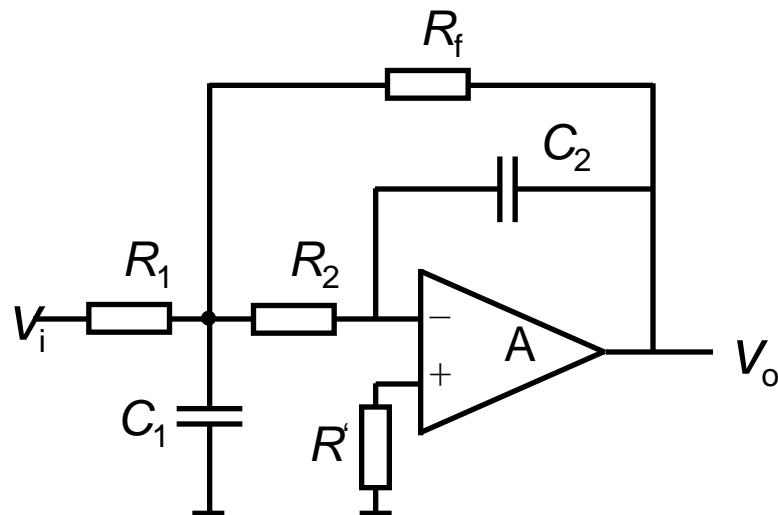
$$A_0 = -\frac{R_f}{R_1}$$

截止频率:

$$f_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{1}{Q^2} + \sqrt{(2 - \frac{1}{Q^2})^2 + 4}}{2}} f_c$$

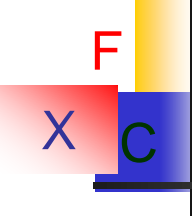
品质因数:

$$Q = (R_1 // R_2 // R_f) \sqrt{\frac{C_1}{R_2 R_f C_2}}$$



了解: 运算放大器为反相接法, 滤波器的性能对运算放大器的性能依赖要大; 受运算放大器开环增益的影响, Q 和 f 都不高; 最大最小电阻之比和最大最小电容之比比较高。

P363② 简述二阶有源多重负反馈型低通滤波器的优点和缺点。



有源二阶多重负反馈型低通滤波器的设计参考

首先选择电容，因为电容器的标称值系列比电阻的标称值系列少得多，故电容比电阻难配。根据实际经验，在 $|A_{vp}| = 1 \sim 10$ 范围内，可根据截止频率 f_p 按表初选电容值。另外，不同形式的低通滤波器，对 C_1 、 C_2 的大小关系有要求，对于本实验的二阶有源多重负反馈型低通滤波器(MFB)一般要求 $C_1 > C_2$ 。相对而言，电阻的选择比较简单，一般控制在 $k\Omega \sim M\Omega$ 数量级，最终取标称值相近的即可。

了解：在组建MFB滤波器电路时，一般要求运算放大器的增益带宽积大于100倍的 $f_p A_0$ ，转换速率（压摆率）应至少等于 $2\pi V_{P-P} f_p$ 定义为运放最大输出电压峰峰值）。--TI公司提供的参考。

$f_p(\text{Hz})$	$C_2(\mu\text{F})$	$f_p(\text{Hz})$	$C_2(\text{pF})$
$1 \sim 10$	$20 \sim 1$	$10^3 \sim 10^4$	$10^4 \sim 10^3$
$10 \sim 10^2$	$1 \sim 0.1$	$10^4 \sim 10^5$	$10^3 \sim 10^2$
$10^2 \sim 10^3$	$0.1 \sim 0.01$	$10^5 \sim 10^6$	$10^2 \sim 10$

设计例 1

设计二阶压控型低通滤波器 (Sallen-key) , 要求 :

$$f_c = 10^3 \text{ Hz} , Q = 0.7 .$$

初选 $C_1 = C_2 = C = 0.022\mu\text{F}$, 则 :

$$R_1 = R_2 = R = \frac{1}{2\pi f_c \cdot C} = 7.2\text{k}$$

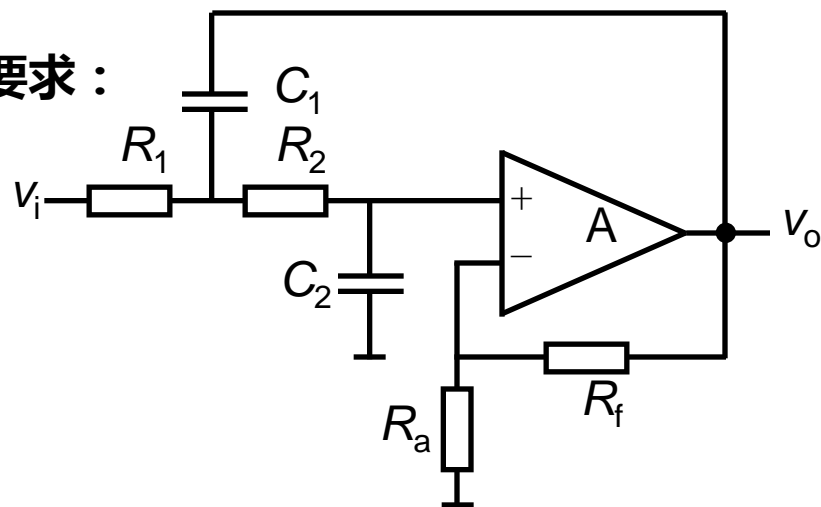
由 $Q = \frac{1}{3 - A_0} = 0.7$, 得 : $A_0 = 1.57$;

由 $A_0 = 1 + \frac{R_f}{R_a}$, 得 : $R_f = 0.57 R_a$;

? 由平衡条件 $R_a // R_f = 2R = 14.4\text{k}$, 得 : $R_f = 22\text{k}$, $R_a = 39\text{k}$ 。 (实际调试参照运放技术指标测试说明)

了解: 对于Sallen-key的运放选择: 当 $Q \leq 1$ 时, 运放GBP至少为 $100 f_p A_0$; 而高Q值的需要更高GBP的运放: 当 $Q > 1$ 时, 运放GBP至少为 $100 f_p A_0 Q^3$;

压摆率: $\text{SlewRate} > (2\pi V_{P-P} f_P)$ -- TI公司提供的参考。



设计例 2

设计二阶多重负反馈型低通滤波器，要求： $A_0 = 5$ ， $f_c = 100\text{Hz}$ 。

初选 $C_1 = 1\mu\text{F}$ ， $C_2 = 0.1\mu\text{F}$ ， $R_f = 10\text{k}\Omega$ 。

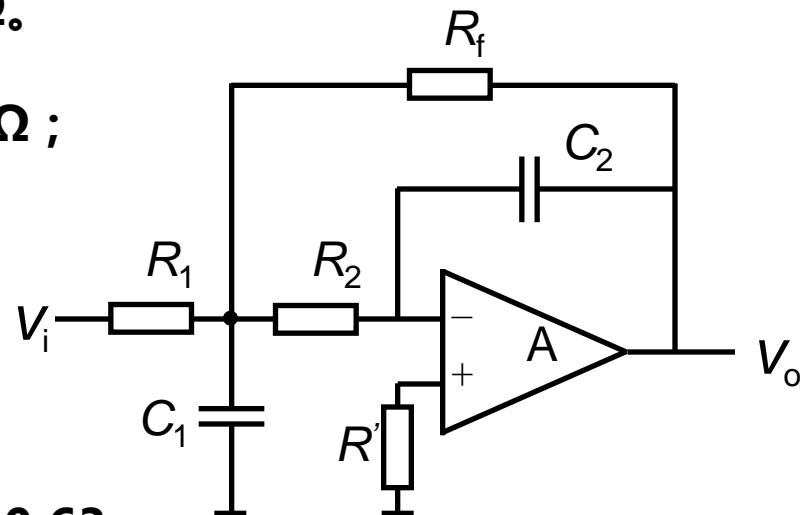
由 $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2 R_f C_1 C_2}}$ ，得： $R_2 = 2.5\text{k}\Omega$ ；

由 $A_0 = -\frac{R_f}{R_1}$ ，得： $R_1 = 2\text{k}\Omega$ ；

由 $Q = (R_1 // R_2 // R_f) \sqrt{\frac{C_1}{R_2 R_f C_2}}$ ，得： $Q = 0.63$ ；

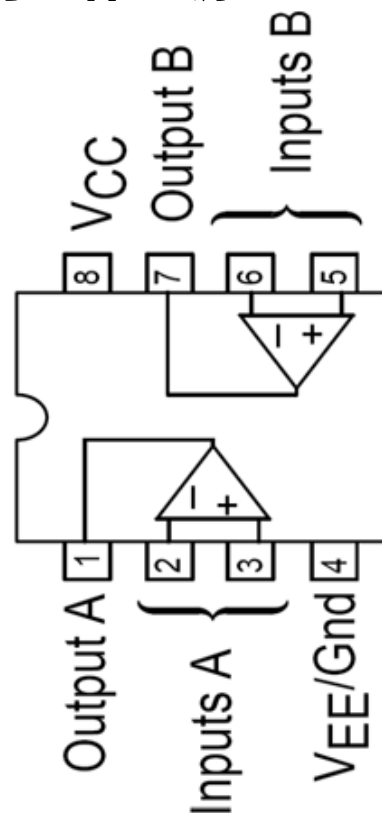
由 $f_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{1}{Q^2} + \sqrt{(2 - \frac{1}{Q^2})^2 + 4}}{2}} f_c$ ，得： $f_p = 88\text{Hz}$ 。

(若初选 $R_f = 5\text{k}\Omega$ ，则 $R_2 = 5\text{k}\Omega$ ， $R_1 = 1\text{k}\Omega$ ， $Q = 0.45$ ， $f_p = 55\text{Hz}$)

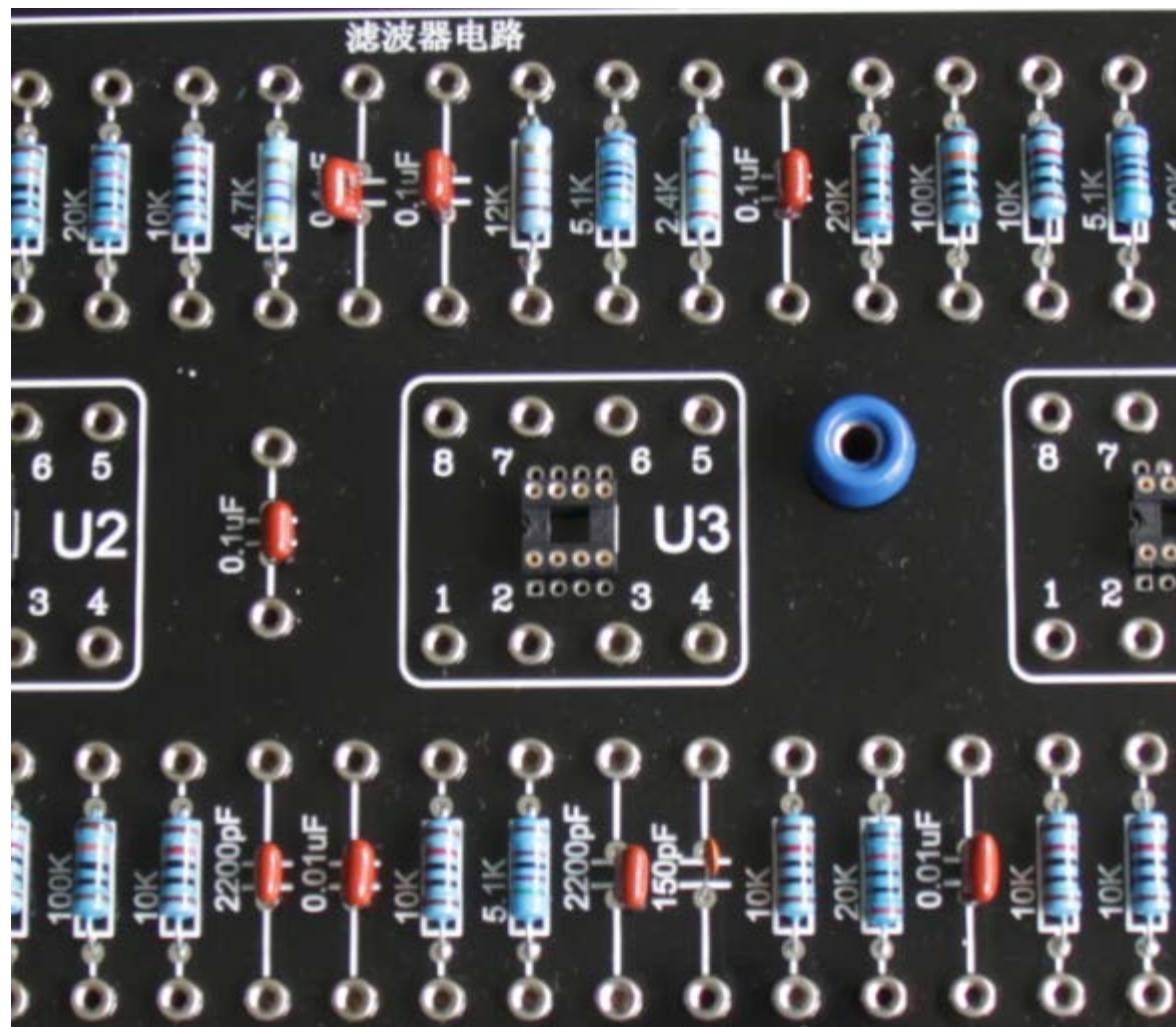


实验准备工作

- 1、在断电情况下，观察是否准确插入LM358。
- 2、用万用表测量实验箱上的+15V、-15V，或应用稳压电源调节+15V和-15V；以万用表测量示数为准。
- 3、检查万用表、示波器、函数发生器是否正常。
- 4、关闭实验箱直流电源，连接实验电路。**注意：**用导线将工作电源与+15V、-15V和COM2 (GND) 的连接方式。



滤波器实验模板





思考题

问题1：实际高通滤波器的输入信号可以无穷大吗？

问题2：压控型滤波器通带增益 A_0 如果大于等于3会发生什么情况？

问题3：试分析固有频率和截止频率的关系？是否能相同？

选做：在本实验中心你做的哪些实验中涉及了低通滤波器形式？高通滤波器形式？带通滤波器形式？

F

X

C

实验教程：思考与讨论

P363

- ① 分析滤波器的结构对滤波器性能的影响。
- ② 简述二阶有源多重负反馈型低通滤波器的优点和缺点。



课后作业

本次需提交实验报告，要求请参看实验教材的要求和课件要求，及请回答教材和课件中思考问题。

选做：请仿真本次“**选做**”的实验任务，且请把整个文件夹提交至FTP。

- 1、请提交做好的整个EDA文件夹的内容；请配上word文档说明。
- 2、提交时需压缩文件，压缩文件名的命名“座号_姓名.rar”。
- 3、提交的位置和截止时间：
“选做12 有源滤波器_下次上课前提交”

RLC 串联电路

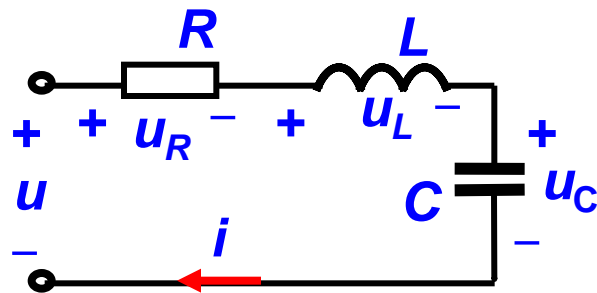
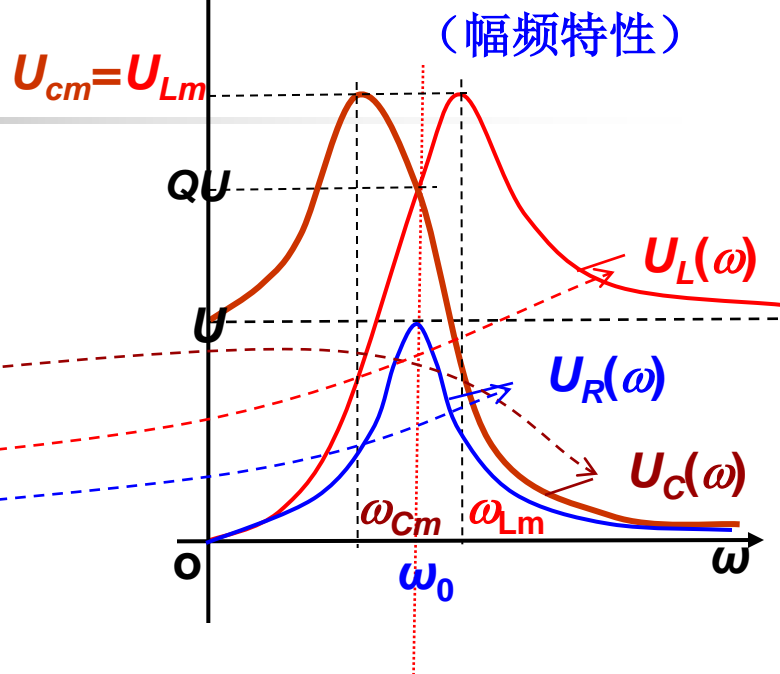
RLC 串联电路。
(又称 **RLC** 串联谐振电路，
RLC 低通滤波器、
RLC 高通滤波器
RLC 带通滤波器)

$$U_C(\omega) = I \times \frac{1}{\omega C} = \frac{U}{\omega C \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

$$U_L(\omega) = X_L I = X_L \cdot \frac{U}{|Z|} = \frac{\omega L \times U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

$$U_R(\omega) = R I(\omega) = R \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} = R + jX_L - jX_C = R + jX = |Z| \angle \varphi$$



有源滤波器LPF，反相型

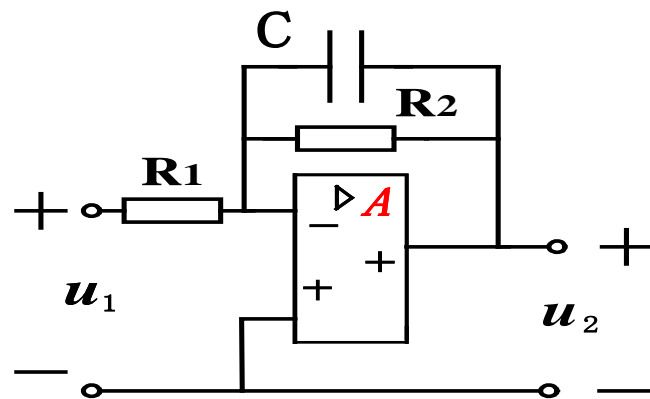
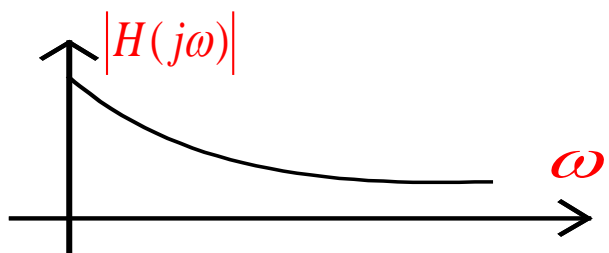
例：一阶、有源、低通滤波器(LPF，反相型)。

解：

$$\frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = H(j\omega) = - \frac{R_2 \frac{1}{j\omega C}}{R_1 + \frac{1}{j\omega C}}$$

$$H(j\omega) = - \frac{R_2}{R_1} \times \frac{1}{1 + j\omega R_2 C}$$

$$|H(j\omega)| = \frac{R_2}{R_1} \times \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega R_2 C)^2}}$$



高音衰减、方波转换三角波电路？

$$R_1 C \frac{du_2}{dt} + \frac{R_1}{R_2} u_2 + u_1 = 0$$

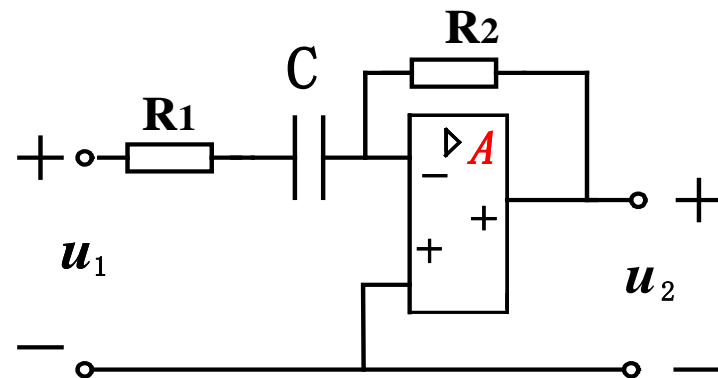
$$T_p \ll \tau; \quad u_2 \approx - \frac{u_1}{R_1 C} t$$

有源滤波器HPF，反相型

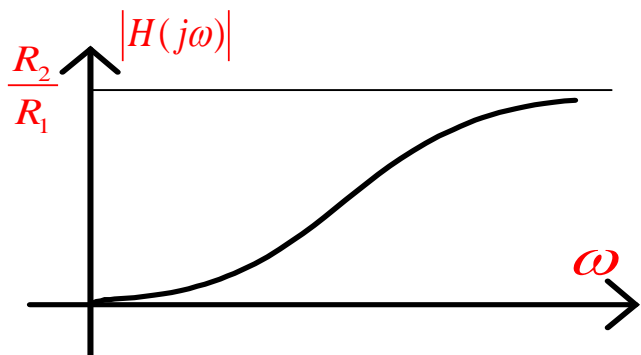
例：一阶、有源、高通滤波器(HPF，反相型)。

解：

$$H(j\omega) = -\frac{R_2}{R_1} \times \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega R_1 C}}$$



低音衰减、微分电路





下次实验

- 实验16 电压比较器应用电路设计P330