

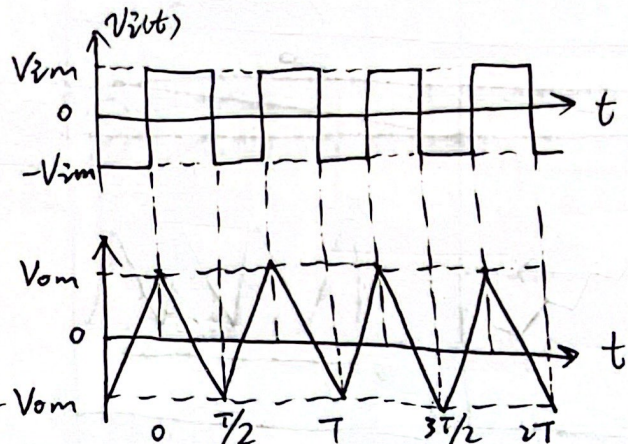
模电实验1.6 — 运算放大电路及其信号处理电路

选做+必做都完成了

一、运算放大器特性分析(瞬态分析)

1. 积分运算电路

输入信号为方波, 输出信号为三角波



当 $2\pi R_1 C \gg T$ 时, 方波信号的响应系数为:

$$V_o(t) = (V_o(0) - V_{om}) \cdot e^{-\frac{t}{R_1 C}} + V_{o_steady}(t)$$

参数确定:

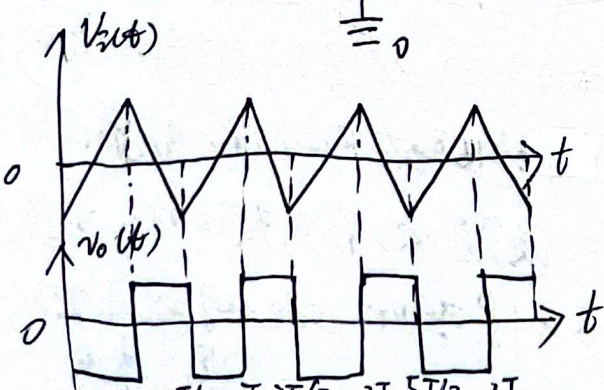
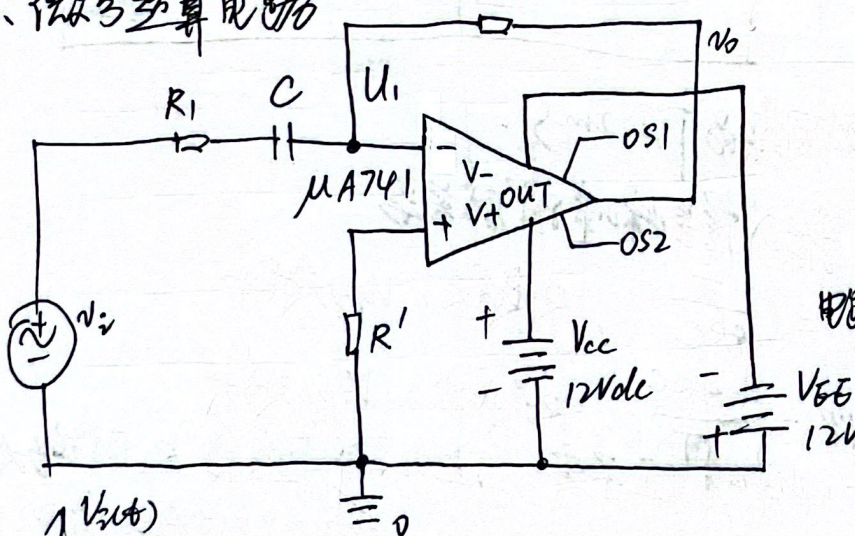
$$C = 0.22 \mu F$$

$$R' = 470 \Omega$$

$$\textcircled{1} R_1 = 100 k\Omega, R = 510 \Omega \text{ 或 } 110 \Omega$$

$$\textcircled{2} R = 510 \Omega, R_1 = 100 k\Omega, 10 k\Omega \text{ 或 } 1 G\Omega$$

2. 微分运算电路



输入信号为三角波

输出响应信号为矩形方波

输出表达式: $R_1 \rightarrow 0$ 时, 微分运算

$$V_o(t) = -RC \frac{dV_i(t)}{dt}$$

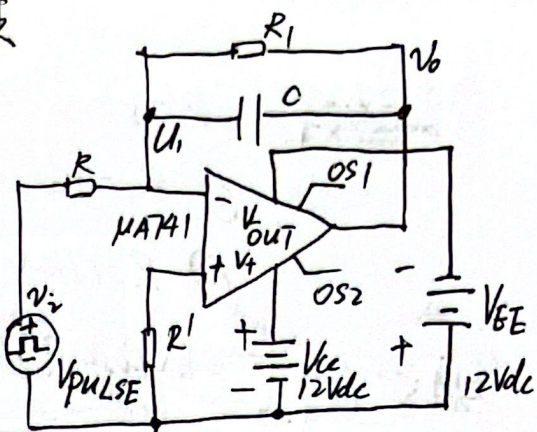
V_{im} 为输入三角波的信号峰值

V_{om} 为输出方波峰值

T 为输入三角波信号的周期

$$V_{om} = \frac{4RC}{T} V_{im}$$

$$V_{o_steady}(t) = \frac{16RC}{\pi T} V_{im} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \left(\frac{2\pi}{T} (2n-1) \cdot t \right)$$



$$V_i = -0.5V$$

$$V_2 = 0.5V$$

$$PW = 1ms, T_D = 0 \mu s$$

$$PER = 2ms, T_R = 0 \mu s$$

$$T_F = 0 \mu s$$

$$V_{om} = \frac{4R \cdot C}{T} V_{im} \geq 0$$

V_{im} 为输入方波的信号峰值

V_{om} 为输出的三角波的信号峰值

输出表达式: T 为方波信号周期

$$V_o(t) = V_o(0) e^{-\frac{t}{R_1 C}} - \frac{1}{RC} \int_0^t V_i(\tau) e^{-\frac{t-\tau}{R_1 C}} d\tau$$

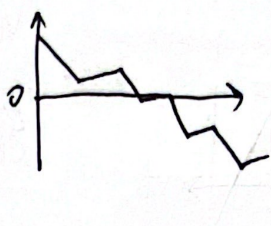
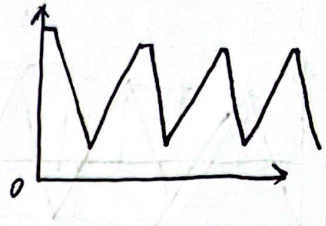
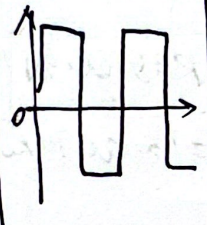
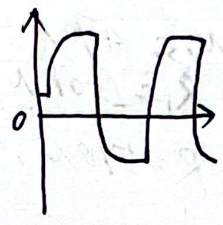
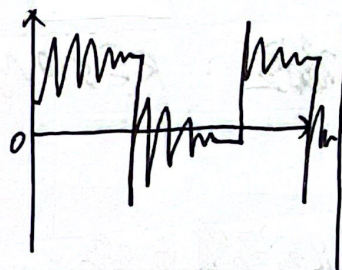
$$V_{o_steady}(t) = \frac{2T}{\pi RC} V_{im} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cos\left(\frac{2\pi}{T} (2n-1) t\right)$$

参数选择: $R=510\Omega$, $C=0.022\mu F$

① $R_1=560\Omega$, $R=11k\Omega$, $5.1k\Omega$

② $R=11k\Omega$, $R_1=560\Omega$ 或 $2k\Omega$ 或 0.001Ω

通过 Capture 的仿真后, 分析输出波形, 记录实验数据如下:

积分 运算 电路	$R_1(k\Omega)$	100	100	10	1000000
	$R(k\Omega)$	110	560	560	560
	$V_{opp}(V)$	20.41	4.87		
	输出波形				
微分 运算 电路	$R_1(k\Omega)$	560	560	2000	0.001
	$R(k\Omega)$	5.1	11	11	11
	$V_{opp}(V)$	1.01	2.16		
	输出波形				

观察实验数据得知: 输入信号的周期为 $T=2ms$.

1. 对输出稳态峰峰值 V_{opp} 与输入信号峰峰值的关系

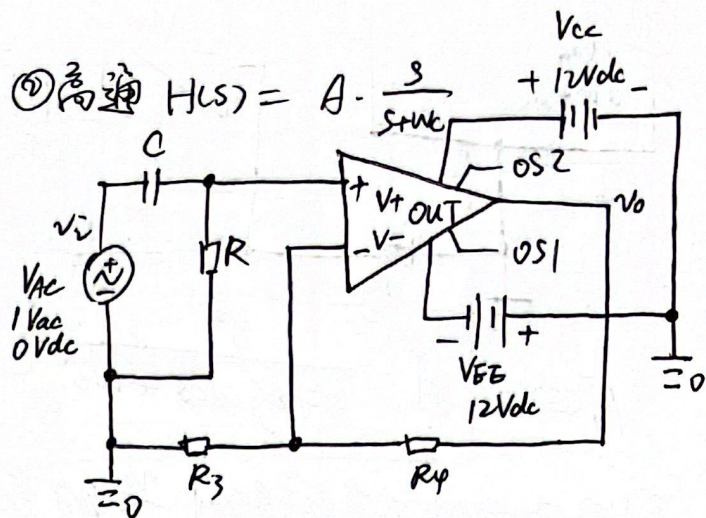
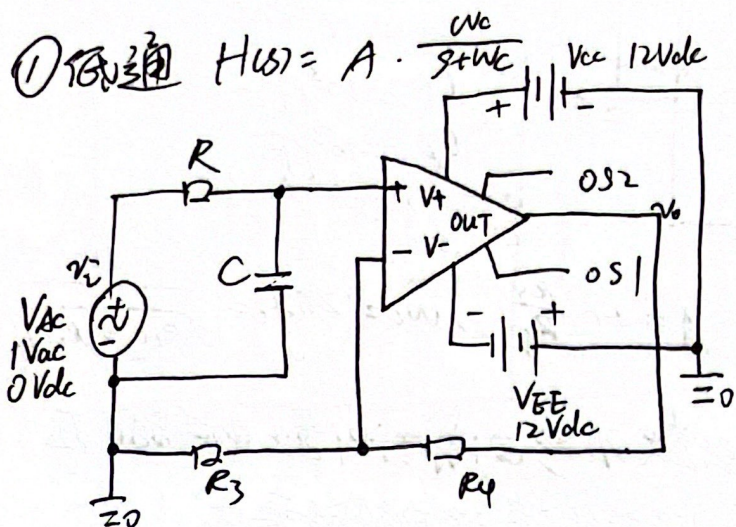
积分电路成立: $V_{opp}/V_{ipp} = \frac{T}{4RC}$, R 越大, V_{opp} 越大

微分电路成立: $V_{opp}/V_{ipp} = \frac{4RC}{T}$, R 越大, V_{opp} 越大

2. 输出波形在 R 一定的条件下, 峰峰值不变, 但波形随着 R 的增大实际电路的运算输出 $v_o(t)$ 越逼近其稳态响应 $v_{o_steady}(t)$, 观察到的输出波形的密集和光滑程度在随着 R 大小的改变而变化, 积分电路在 $R=10^6k\Omega$ 时输出的积分信号最接近理想情况, 这是由于表达式中 $e^{-\frac{t}{RC}}$ 的误差项, 在 R 越大时, 逼近稳态响应的过渡时间越小, 误差越小, 微分电路则是在 $R=560\Omega$ 时输出波形最接近理想情况。

二、有源滤波器的交流分析

1. 一阶有源滤波电路



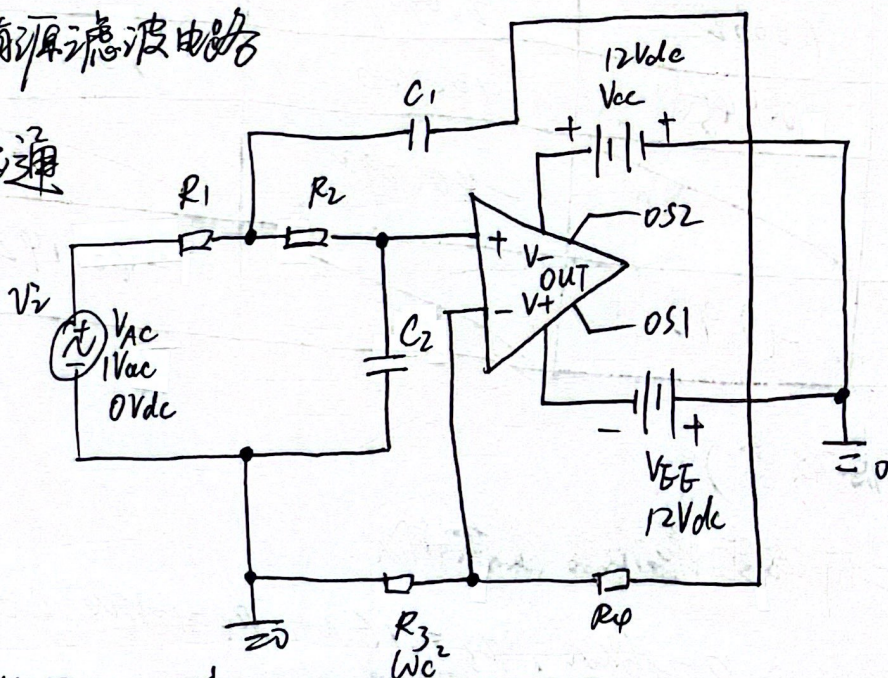
参数确定：低通 $R = 16k\Omega$, $C = 1000pF$, $R_3 = R_4 = 10k\Omega$

高通 $R = 16k\Omega$, $C = 1000pF$, $R_3 = 16k\Omega$, $R_4 = 10k\Omega$

系统增益 $A = 1 + \frac{R_4}{R_3}$, 特征角频率 $\omega_c = 2\pi f_c = \frac{1}{RC}$

2. 二阶有源滤波电路

① 低通

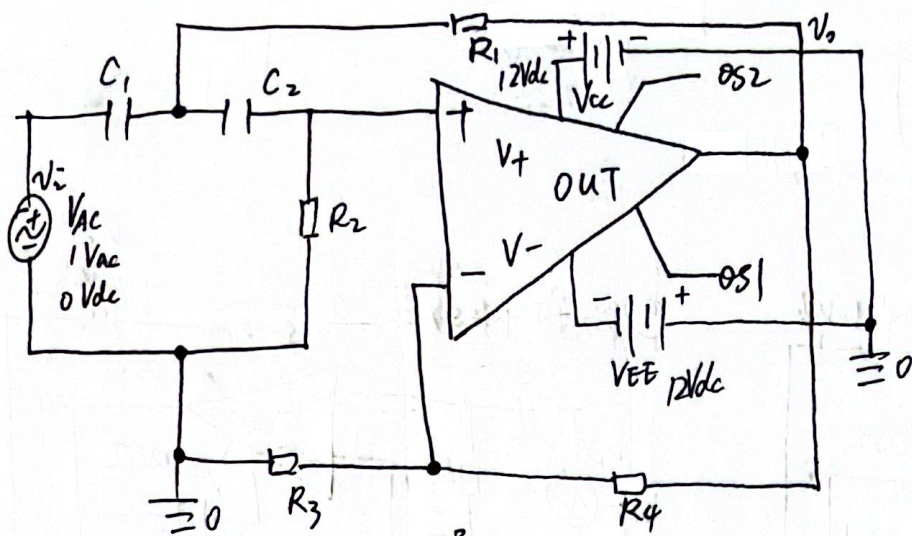


$R_1 = 11k\Omega$
 $R_2 = 20k\Omega$
 $R_3 = 10k\Omega$
 $R_4 = 10k\Omega$
 $C_1 = 1000pF$
 $C_2 = 1000pF$

$$H(s) = A \cdot \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\zeta\omega_c s + \omega_c^2}$$

$$A = 1 + \frac{R_4}{R_3}, \quad \omega_c = 2\pi f_c = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 \cdot R_2 C_2}}$$

② 高通



$$\begin{aligned} R_1 &= 11k\Omega \\ R_2 &= 22k\Omega \\ R_3 &= 16k\Omega \\ R_4 &= 10k\Omega \\ C_1 &= 10^3 pF \\ C_2 &= 10^3 pF \end{aligned}$$

$$H(s) = A \cdot \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_c s + \omega_c^2}, \quad A = 1 + \frac{R_4}{R_3}, \quad \omega_c = 2\pi f_c = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 \cdot R_2 C_2}}$$

利用 Capture 仿真后得到 $\frac{v_o}{v_i}$ 的频率函数波形曲线，测量出电路的电压增益 A ，-3dB 的截止频率 f_c ， $10f_c$ 频率处滤波电路的衰减。

实验数据记录于下表：

滤波器	一阶		二阶	
	低通	高通	低通	高通
增益 A	1.999	1.0062	2.0007	0.99197
截止频率 f_c (kHz)	9.827	10.045	10.226	10.162
10 f_c 处衰减 (dB)	-20.08	/	-40.298	/
0.1 f_c 处衰减 (dB)	/	-19.96	/	-40.142

选做实验 (5阶低通滤波器)

通过一个一阶低通与两个二阶低通滤波器级联构成。

电路图

一阶参数确定： $R = 16k\Omega$ ， $R_3 = 16k\Omega$ ， $R_4 = 10k\Omega$ ， $C = 1000pF$

第一个二阶参数确定： $R_1 = 33k\Omega$ ， $R_2 = 20k\Omega$ ， $C_1 = 2000pF$
 $C_2 = 180pF$ ， $R_3 = 16k\Omega$ ， $R_4 = 10k\Omega$

第二个二阶参数确定： $R_1 = 36k\Omega$ ， $R_2 = 13k\Omega$ ， $C_1 = 1000pF$
 $C_2 = 510pF$ ， $R_3 = 16k\Omega$ ， $R_4 = 10k\Omega$

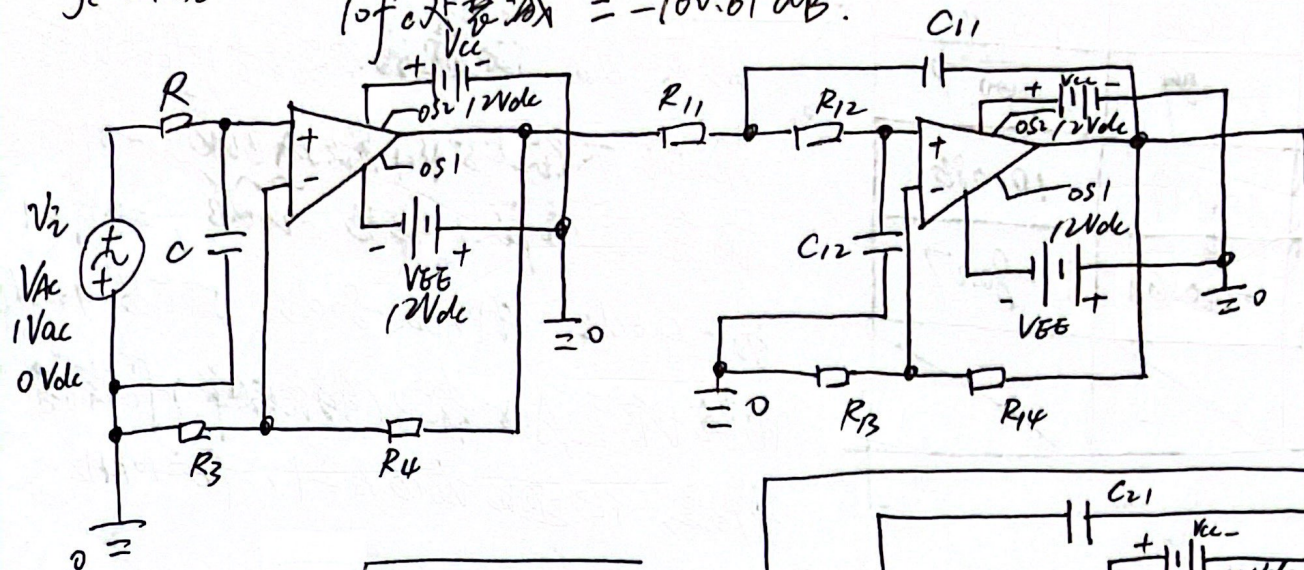
实验数据

五阶低通
 $f_c = 10\text{kHz}$

增益 $A = 1.0089$

截止频率 $f_c = 10.179\text{kHz}$

10f_c外衰减 = -100.61dB



$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{\{ + \sqrt{\{^2 + A - 1 - C_2/C_1} \}}}{\omega_c \cdot (C_2 + (1-A)C_1)} \\ R_2 &= \frac{\{ + \sqrt{\{^2 + A - 1 - C_2/C_1} \}}}{\omega_c C_2} \end{aligned} \right\}$$

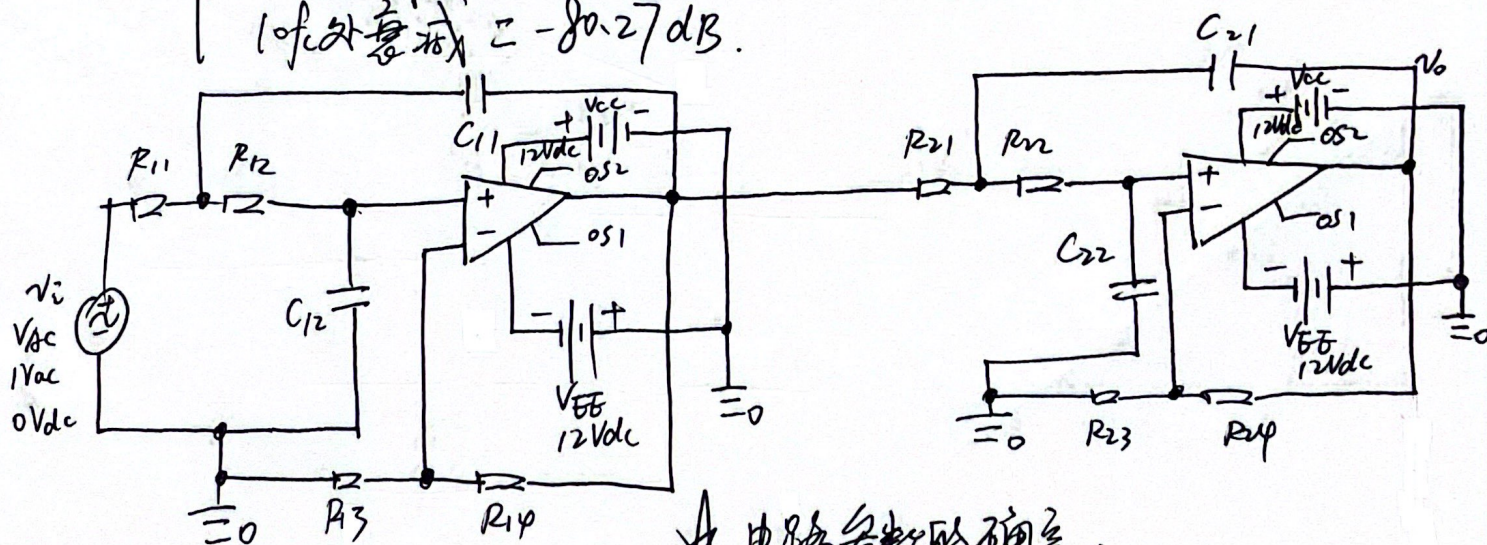
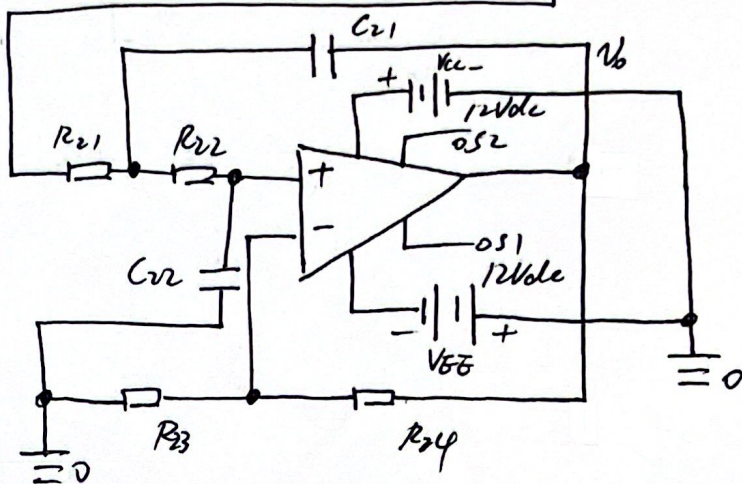
$$\omega_c = 2\pi f_c$$

4阶低通
 $f_c = 10\text{kHz}$

增益 $A = 1.0157$

截止频率 $f_c = 10.086\text{kHz}$ 由2个2阶低通级联构成。

10f_c外衰减 = -80.27dB



★ 电路参数的确定:

阻尼系数: $\xi_1 = \sin \frac{\pi}{8}$

$\xi_2 = \sin \frac{3\pi}{8}$

$C_2/C_{11} < \xi_1^2 + A - 1 = 0.14645$

$C_{22}/C_{21} < \xi_2^2 + A - 1 = 0.8536$

第1个2阶

$R_{11} = 26\text{k}\Omega, R_{12} = 17\text{k}\Omega, C_{11} = 2000\text{pF}$
 $R_{13} = 16\text{k}\Omega, R_{14} = 10\text{k}\Omega, C_{12} = 280\text{pF}$

第2个2阶

$R_{21} = 29\text{k}\Omega, R_{22} = 12\text{k}\Omega, C_{21} = 1000\text{pF}$
 $R_{23} = 16\text{k}\Omega, R_{24} = 10\text{k}\Omega, C_{22} = 700\text{pF}$

列成表格：

滤波器	五阶	四阶
	低通	低通
增益A	1.0089	1.0157
f_c (KHz)	10.179	10.086
10fc处衰减 (dB)	-100.61	-80.27

结论：发现滤波器阶数越高，其滤波性能越好，低通滤波器对10fc处的衰减dB大致上5阶数成正比，一阶低通的衰减(10fc处)dB为-20dB，二阶为-40dB，三阶为-60dB，四阶为-80dB，五阶为-100dB。电路增益A与截止(特征频率) f_c 保持恒定，低通的均为A=1， $f_c=10$ KHz。