

模拟电子技术基础

仿真报告

(2020 - 2021 学年度 春季学期)

实验名称 第三次仿真作业

姓名	刘祖炎
学号	2019010485
院系	自动化系
教师	叶朝辉
时间	2021 年 5 月

目录

1	实验目的	1
2	仿真题 3-1	1
2.1	理论分析	1
2.2	测量滤波器的幅频和相频特性，观察不同 Q 值对幅频特性的影响	2
2.3	测量输入信号为 $1kHz$ 方波时滤波器的输出信号波形	3
2.4	分析滤波器稳定工作条件，并观察不稳定工作的现象	5
3	仿真题 3-2	7
3.1	设计思路	7
3.2	实用微分电路	8
3.3	全波精密整流电路	9
3.4	RC 滤波电路	9
3.5	实际测量结果	10
4	仿真题 3-3	12
4.1	理论分析及设计思路	12
4.2	平方电路	12
4.3	低通滤波电路	13
4.4	开方电路	14
4.5	实际测量结果	15
5	仿真中遇到的问题及解决方法	15
6	收获与体会	16

1. 实验目的

- 熟悉负反馈放大电路的应用；
- 理解运算电路的设计方法；
- 理解 VCVS 二阶滤波电路的特性和稳定工作条件；
- 理解信号发生及转换电路的应用及分析。

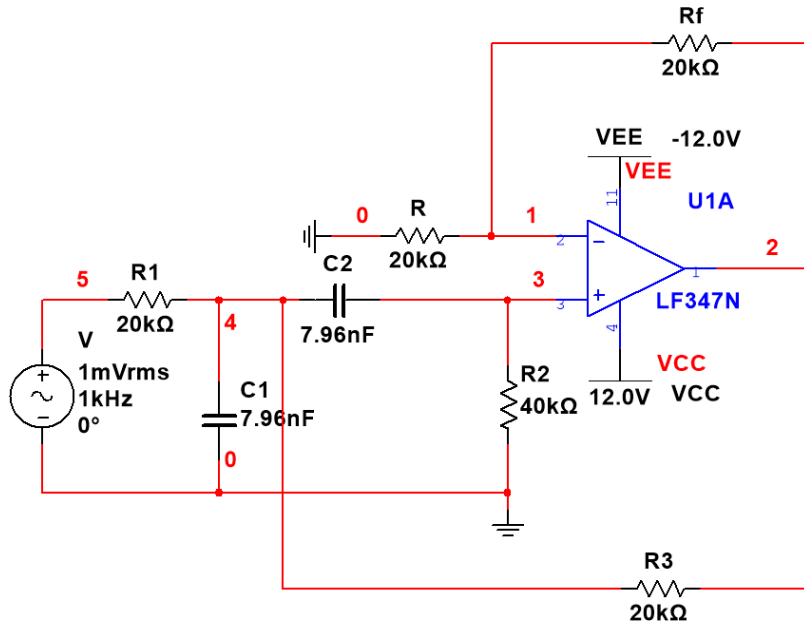
2. 仿真题 3-1

利用运放设计一个中心频率为 $1kHz$ 的 VCVS 二阶带通滤波器，并完成相应任务。

2.1 理论分析

设计一个 VCVS 二阶带通滤波器如图1所示。

图 1: VCVS 二阶带通滤波器仿真电路图



相关理论计算为：

设 U_p 为同相比值运算电路的输入， U_o 为系统输出，则电路的闭环放大倍数：

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_p} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

当 $C_1 = C_2 = C, R_1 = R, R_2 = 2R, R_3 = R$ 时，令中心频率：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

计算可得电压放大倍数的表达式：

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{A}_{uf}}{3 - \dot{A}_{uf}} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{1}{3 - \dot{A}_{uf}} \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)} \quad (1)$$

可取参考电阻 $R = 20k\Omega$ ，中心频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = 1kHz$$

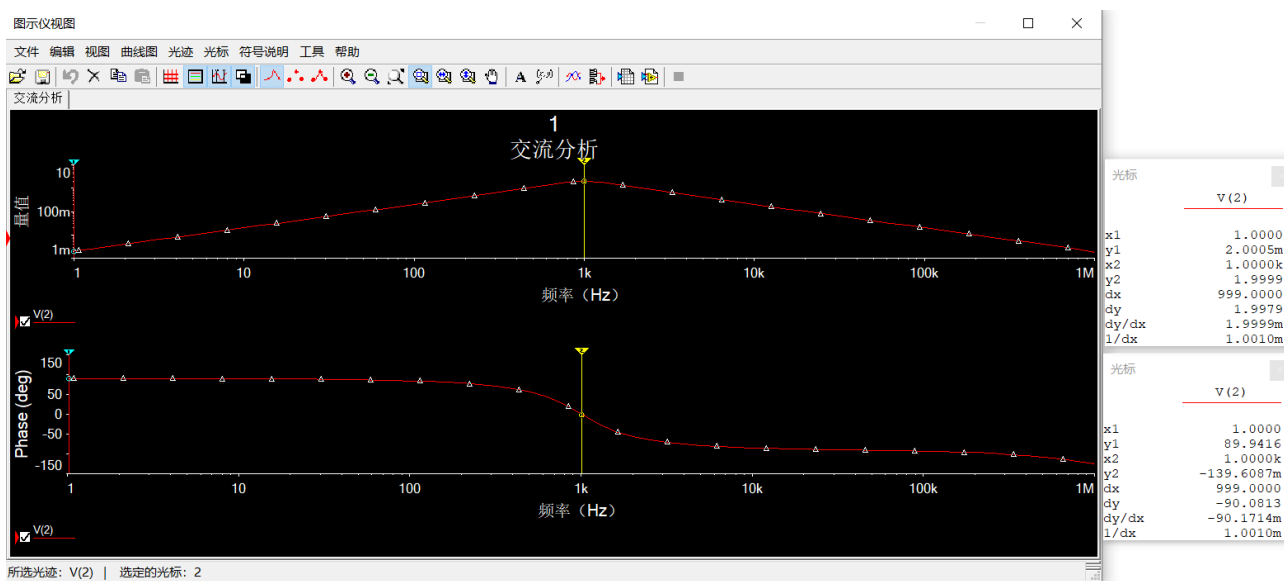
因此，解得电容 C 的取值为 $C = 7.96nF$ 。

按照上述分析及关系式即可完成电路参数的选取。

2.2 测量滤波器的幅频和相频特性，观察不同 Q 值对幅频特性的影响

令 $R_f = 20k\Omega$ ，则此时 $|A_{uf}| = 1 + \frac{20k}{20k} = 2$ 。利用 Multisim 的交流分析功能，可得二阶带通滤波器的幅频特性及相频特性如图2所示。

图 2: VCVS 二阶带通滤波器幅频特性、相频特性曲线



由测量结果可知，当 $f = 1kHz$ 时，放大倍数 $|A_{uf}| = 1.9999 \approx 2$ ，相移 $\phi = -0.1396^\circ \approx 0$ 。

理论分析可知，根据式1， $f = f_0$ 时， $|\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}|$ 最小，电压放大倍数 $|A_u| =$ 最大，且此时相移为 0，理论分析与仿真结果相同。

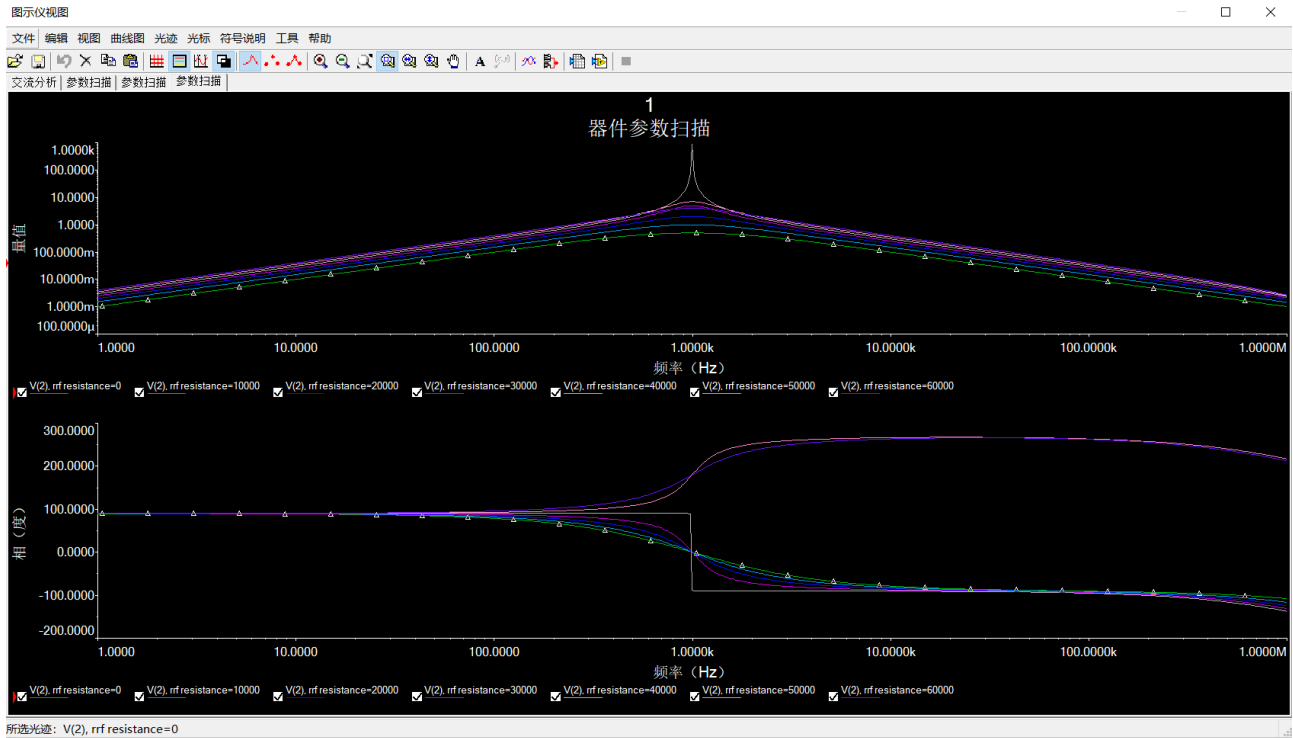
品质因数 Q 的表达式为：

$$Q = \left| \frac{1}{3 - A_{uf}} \right| = \left| \frac{1}{2 - \frac{R_f}{R}} \right|$$

因此，通过改变电阻 R_f 的值即可改变品质因数 Q 的值，从而观察不同 Q 值对幅频特性的影响。对 R_f 的阻值进行参数扫描，所得结果如图3所示。

(下图中， R_f 的取值分别为 0Ω 、 $10k\Omega$ 、 $20k\Omega$ 、 $30k\Omega$ 、 $40k\Omega$ 、 $50k\Omega$ 、 $60k\Omega$ ，对应的 Q 值分别为 0.5、0.67、1、2、 $+\infty$ 、2、1)。

图 3: 观察不同品质因数 Q 对幅频特性、相频特性的影响



观察上述仿真结果可知，当 $R_f < 40k\Omega$ 时， $|A_{uf}| < 3$ ，随着 R_f 阻值增大，品质因数 Q 增大，此时幅频特性曲线在中心处的尖锐程度增大，相频特性曲线在中心频率处陡峭程度增大，表示电路的选频特性变好。当 $R_f = 40k\Omega$ 时， $|A_{uf}| = 3$ ， $Q = +\infty$ ，此时幅频特性曲线在中心处产生尖峰，相频特性曲线出现阶跃现象，容易引起自激振荡。当 $R_f > 40k\Omega$ 时，随着 R_f 阻值增大，品质因数 Q 减小，幅频特性曲线在中心频率处尖锐程度减小，与 $R_f < 40k\Omega$ 时趋势相似，相频特性曲线与 $R_f < 40k\Omega$ 时不同，相移随频率增大而增大。

2.3 测量输入信号为 $1kHz$ 方波时滤波器的输出信号波形

输入频率 $f = 1kHz$ ，幅值 $u_o = 1V$ 的方波信号，调节 $R_f = 20k\Omega$ ，此时 $A_{uf} = 2$ ， $Q = 1$ ，仿真电路图如图4所示，测量得输出信号如图5所示。

图 4: 方波输入仿真电路图

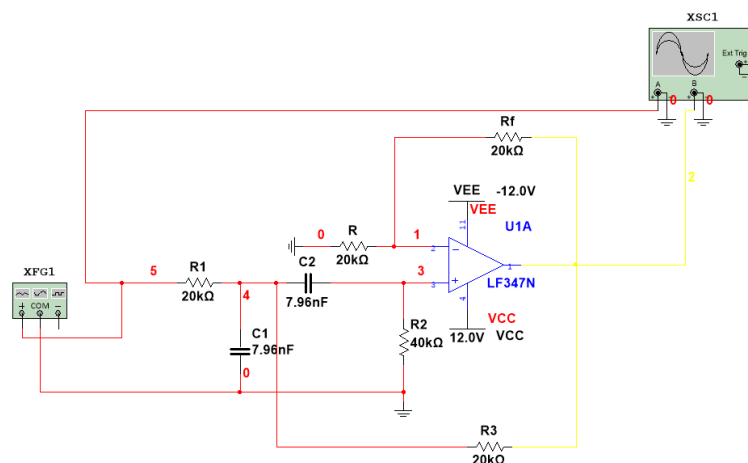
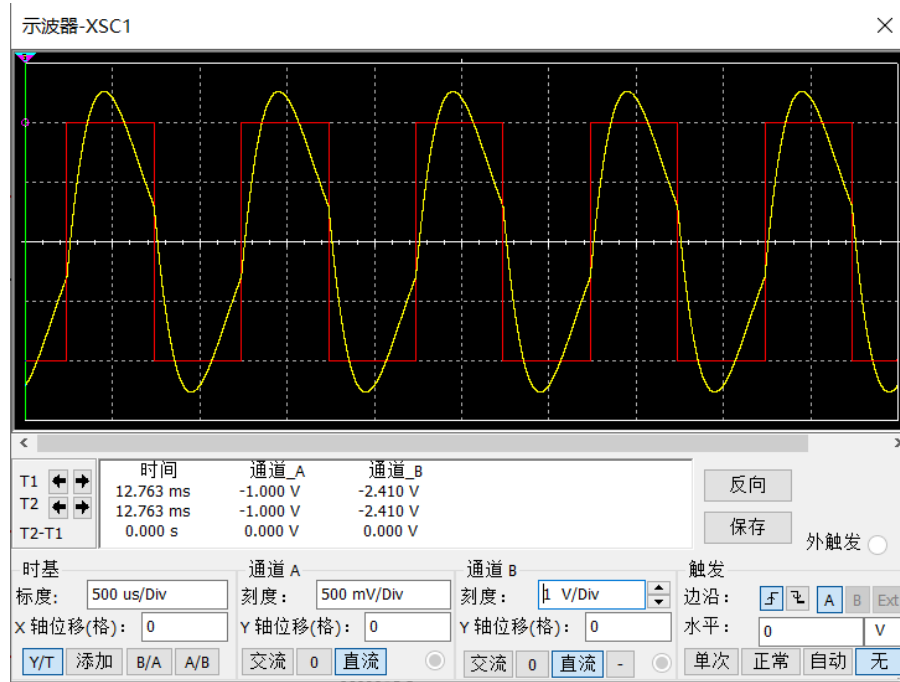


图 5: 输入方波波形图 ($Q = 1$)



观察到滤波器输出 $f = 1kHz$ 的正弦波，但存在一定程度的失真。这是由于，根据傅里叶级数展开，方波信号可以表示为：

$$f(t) = \frac{4E}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(2k-1)\omega t}{2k-1}$$

当滤波电路选频特性不够好时，除频率 $f = 1kHz$ 的基波外，其余高次谐波的衰减并不明显，与基波叠加导致产生失真。

分别调节 $R_f = 10k\Omega$ ($Q = 0.67$)、 $R_f = 30k\Omega$ ($Q = 2$) 进行测量，仿真波形分别如图6、7所示。

图 6: 输入方波波形图 ($Q = 0.67$)

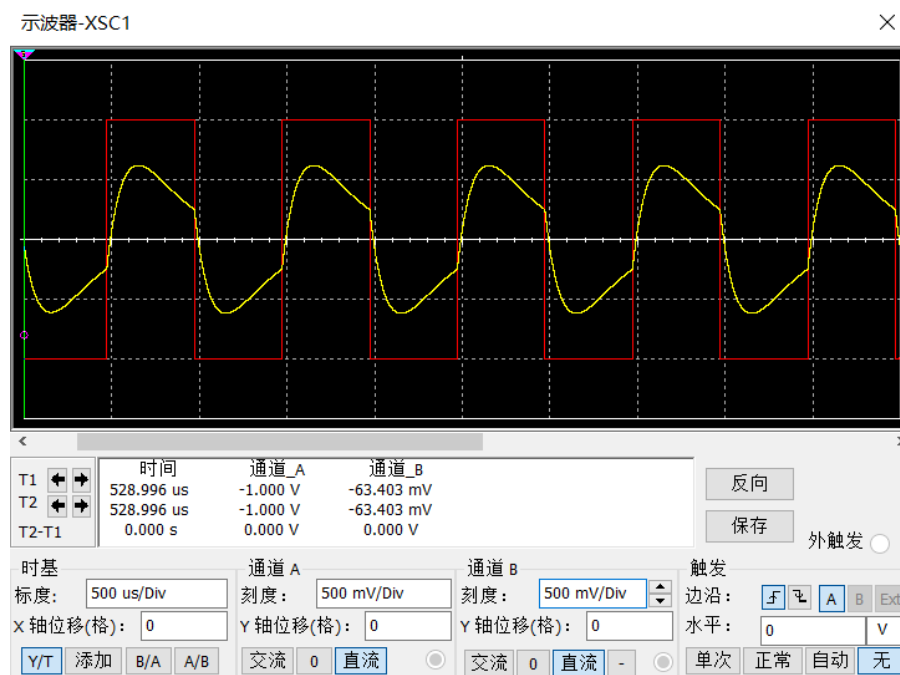
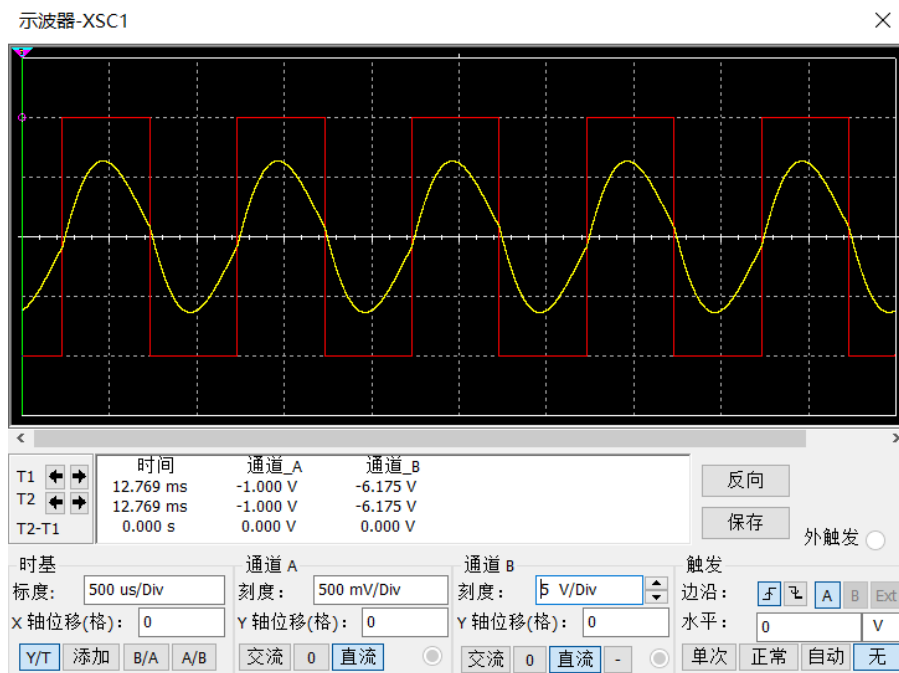


图 7: 输入方波波形图 ($Q = 2$)



明显可以观察出，当 Q 减小时，输出波形失真程度增大，当 Q 增大时，输出波形失真程度减小。

2.4 分析滤波器稳定工作条件，并观察不稳定工作的现象

首先分析滤波器稳定工作条件，根据式1，可得 VCVS 二阶带通滤波器的传递函数：

$$A_u(s) = A_{uf} \frac{\frac{s}{\omega_0}}{1 + (3 - A_{uf}) \frac{s}{\omega_0} + (\frac{s}{\omega_0})^2}$$

根据信号与系统知识，稳定系统的传递函数极点应处于左半平面，即分母 $1 + (3 - A_{uf}) \frac{s}{\omega_0} + (\frac{s}{\omega_0})^2 = 0$ 的根均小于 0，由韦达定理，可知：

$$\begin{cases} p_1 + p_2 = (A_{uf} - 3)\omega_0 < 0 \\ p_1 p_2 = \omega_0^2 > 0 \end{cases} \quad (2)$$

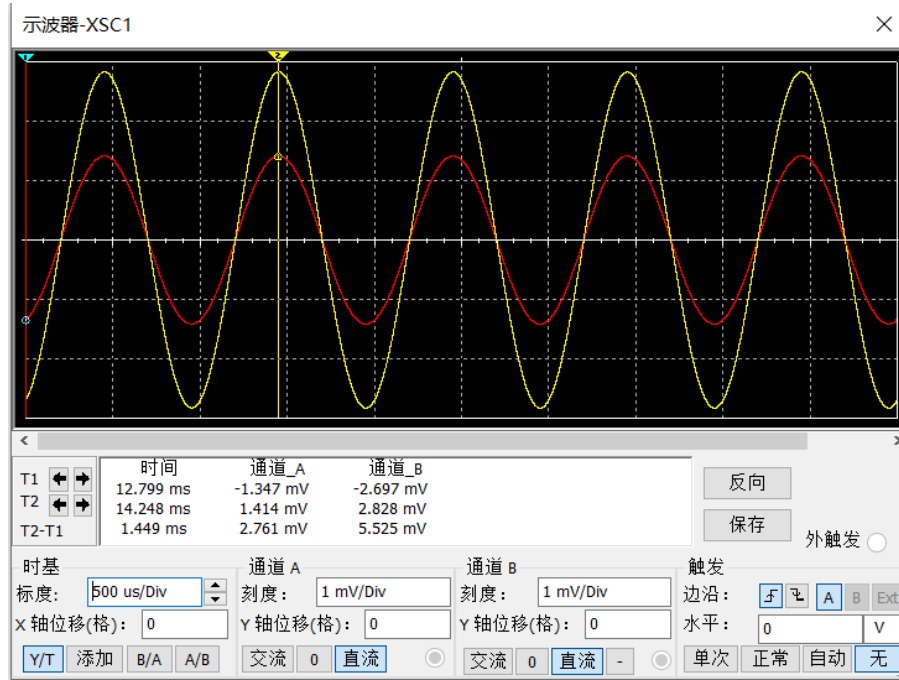
解得：

$$A_{uf} = 1 + \frac{R_f}{R} < 3$$

即 $R_f < 2R = 40k\Omega$ 。

调节 $R_f = 20k\Omega$ ，此时 $A_{uf} = 2$ ，滤波器稳定工作，示波器波形如图8所示。

图 8: 稳定状态波形图 $A_{uf} = 2$



根据示波器示数，可得：

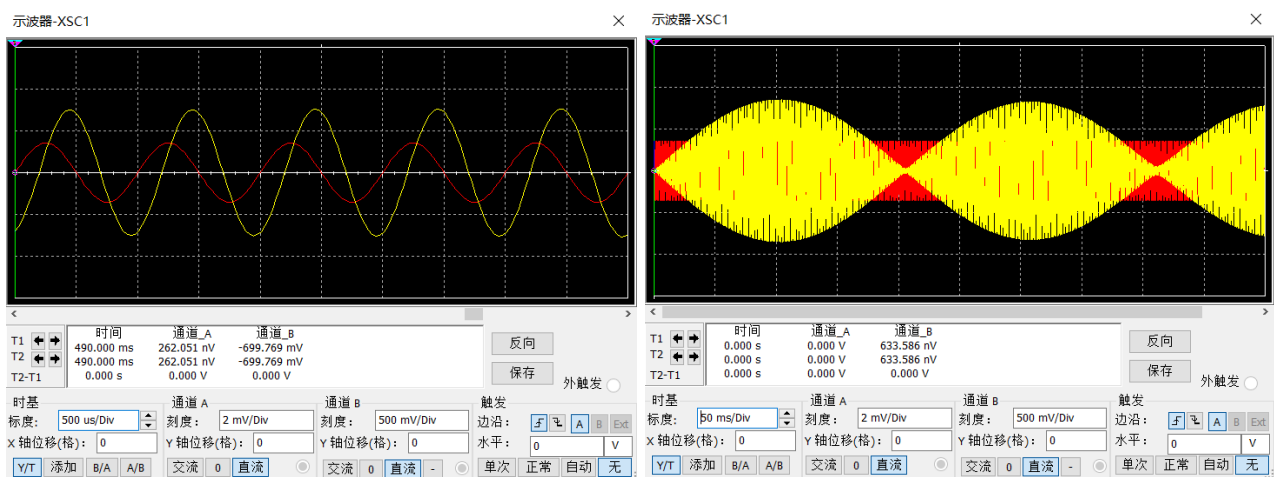
$$A_{uf} = \frac{2.828mV}{1.414mV} = 2$$

与理论分析相同。

调节 $R_f = 40k\Omega$ ，此时， $A_{uf} = 3$ ，滤波器处于临界状态，示波器波形如图9、10所示。

图 9: 临界状态波形图 $A_{uf} = 3$ (局部波形)

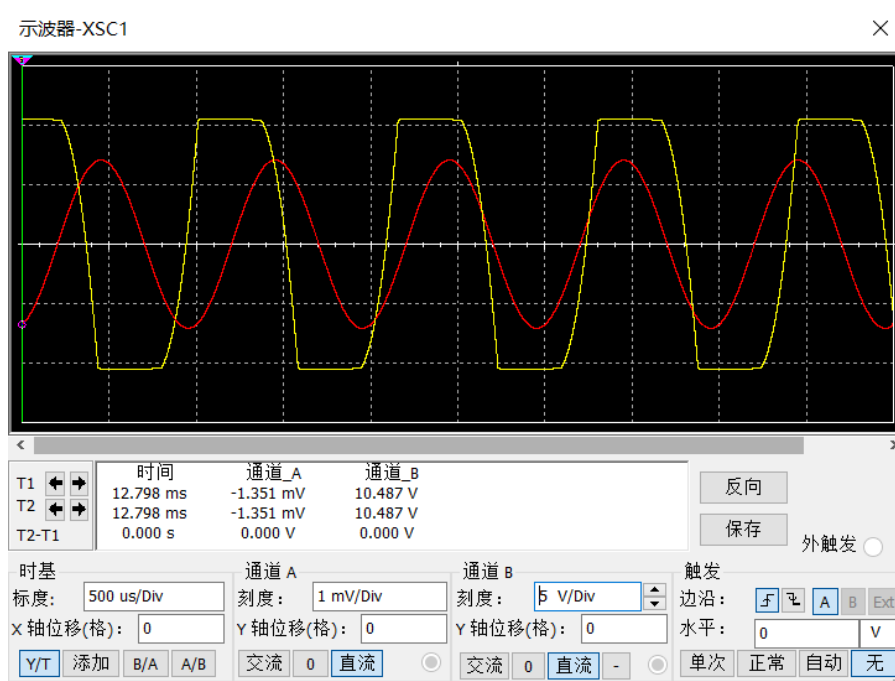
图 10: 临界状态波形图 $A_{uf} = 3$ (整体波形)



观察到输出信号产生相移，且根据整体波形，幅值在不断变化。

调节 $R_f = 60k\Omega$ ，此时 $A_{uf} = 4 > 3$ ，滤波器处于不稳定状态，示波器如图11所示。

图 11: 不稳定状态波形图 $A_{uf} = 4$ (局部波形)



观察到输出信号明显失真，输出幅值接近运放的饱和电压，输出波形相移不稳定，不断发生变化，电路处于不稳定状态。

3. 仿真题 3-2

设计一个电路，将电容的容值转换为与其成正比的直流电压值，并实际测量多个电容值进行验证。

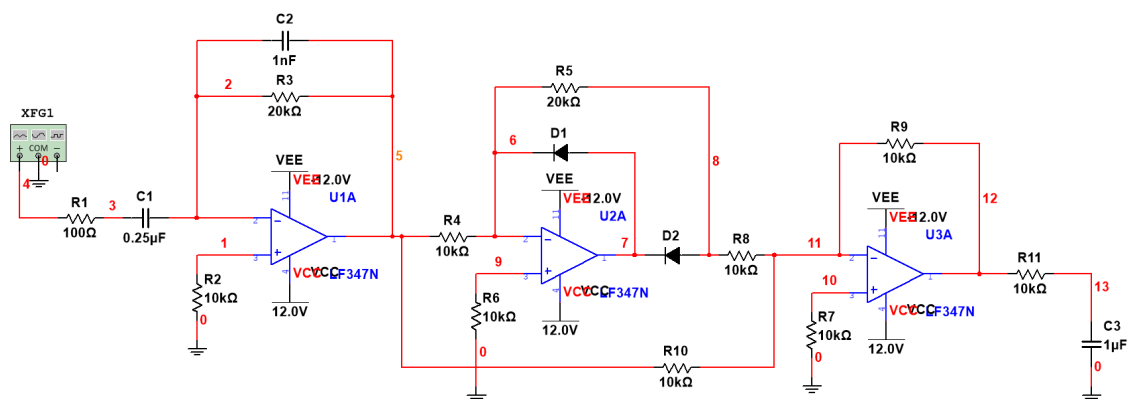
3.1 设计思路

电容—电压转换电路由实用微分电路、全波精密整流电路、 RC 滤波电路三个模块组成。

其中，实用微分电路将信号源输入的三角波信号转换为幅值与电容值成正比的方波信号，全波精密整流电路将方波信号整流为直流信号， RC 滤波电路滤去直流信号中的尖峰脉冲。

整体电路图如图12所示。

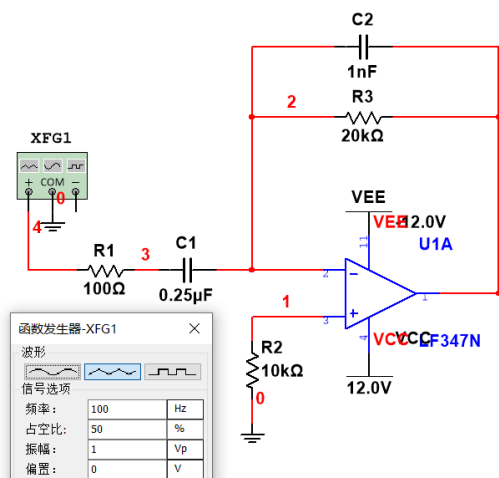
图 12: 电容—电压转换电路仿真电路图



3.2 实用微分电路

实用微分电路采用《模拟电子技术基础》第五版第 287 页图 6.1.19 所示电路，电路图如图13所示。

图 13: 实用微分电路仿真电路图



不妨设待测量的电容为 $0.1\mu F$ 量级，取输入端小阻值电阻大小为 100Ω 以限制输入电流，在 R_3 上并联小电容 $C_2 = 1nF$ ，起相位补偿作用，提高电路的稳定性。

根据虚短、虚断原则， $u_P = u_N = 0$ ，电容两端电压 $u_C = u_I$ ，因而 $i_R = i_C = C \frac{du_I}{dt}$ ，输出电压 $u_{o1} = -i_R R = -RC \frac{du_I}{dt}$ ，输出电压与输入电压的变化率成比例。

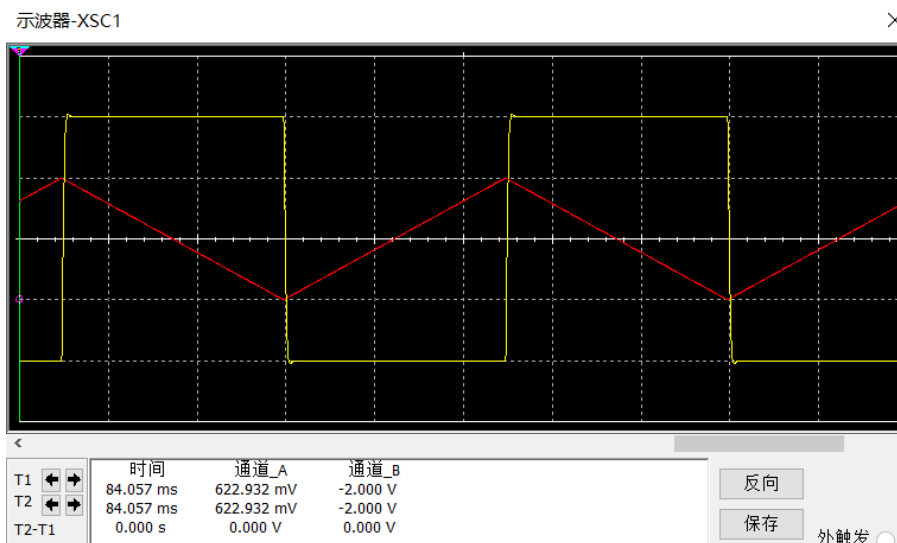
函数信号发生器输入幅值 $u_i = 1V$ ，频率 $f = 100Hz$ 的三角波信号，不妨设输出电压 u_{o1} 约为 $1V$ 量级，估算可知电阻 R_3 应取 $10k\Omega$ 量级，不妨取为 $R_3 = 20k\Omega$ 。

根据微分运算电路的原理，信号输出为方波，当待测量电容 $C_1 = 0.25\mu F$ 时，幅值为：

$$|u_{o1}| = RC \frac{du_i}{dt} = 8 \times 10^4 \times 0.25 \times 10^{-6} F \times 20k\Omega = 2.0V$$

对输入、输出波形的仿真测量结果如图14所示，测量得输出信号幅值 $u_{o1} = 1.000V$ ，与理论分析相符，电路输出正常。

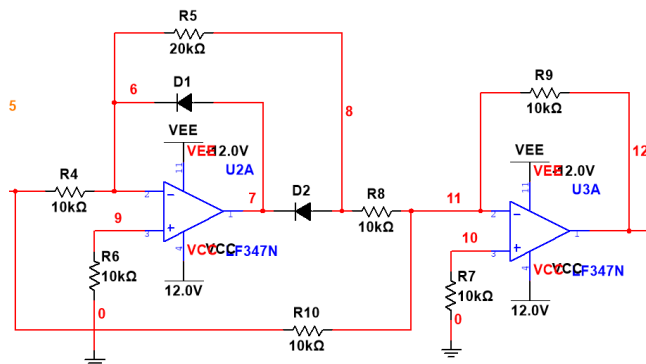
图 14: 实用微分电路输入输出波形图



3.3 全波精密整流电路

全波精密整流电路采用《模拟电子技术基础》第五版第 383 页图 7.4.6 所示电路，电路图如图15所示。

图 15: 全波精密整流电路仿真电路图

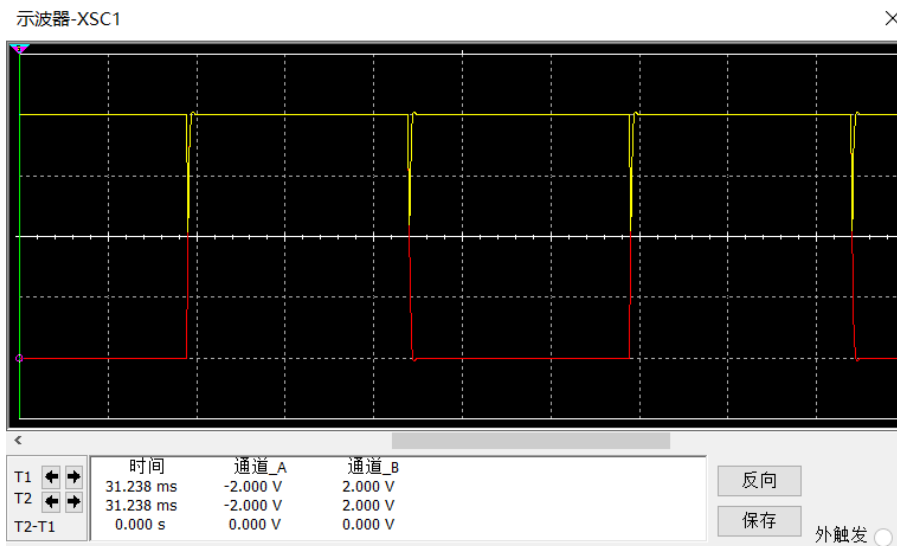


全波精密整流电路将方波信号整流为直流信号。在半波整流电路的波形基础上，观察可知当 $u_I > 0$ 时， $u_o = -Ku_I (K > 0)$ ，当 $u_I < 0$ 时， $u_o = 0$ 。利用反相求和电路将 $-Ku_I$ 与 u_I 负半周波形相加，即可实现全波整流。其输入电压和输出电压的关系为 $u_o = |u_I|$ 。

全波精密整流电路的参数选取较为简单，按照电阻 R 之间的阻值关系，设 $R_4 = 10k\Omega$ ，依次选定其他电阻阻值即可。

对输入、输出波形的仿真测量结果如图16所示，测量得输出信号幅值为 $u_{o2} = 2.000V$ ，满足直流信号波形，电路输出符合预期。

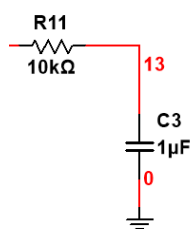
图 16: 全波精密整流电路输入输出波形图



3.4 RC 滤波电路

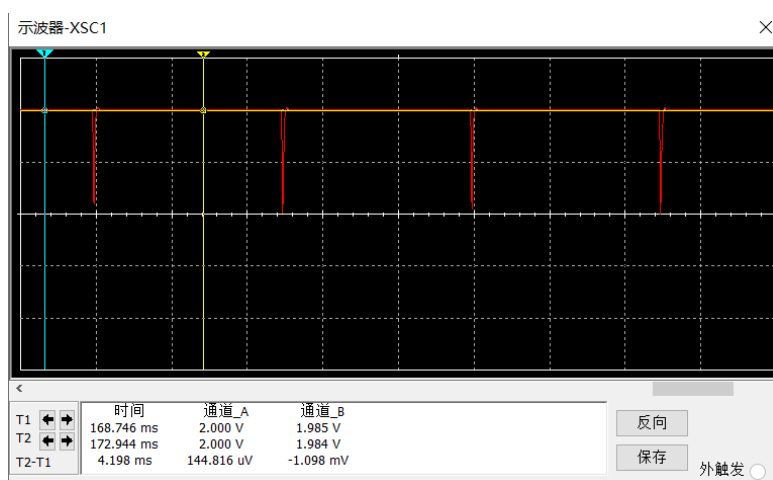
RC 滤波电路原理较为简单，电路图如图17所示。

图 17: RC 滤波电路仿真电路图



在微分电路电容充放电的瞬间，会产生尖峰脉冲，导致直流信号不够理想，存在尖峰脉冲。因此，采用 RC 滤波电路滤去高频成分，使直流波形更加理想。根据数电、模电实验经验，取 $R = 10k\Omega$ ， $C = 1\mu F$ 。输入、输出波形如图18所示，可以看到该电路模块成功实现了滤波作用。

图 18: RC 滤波电路输入输出波形图



3.5 实际测量结果

利用万用表测量 8 组输出电压有效值，测量结果如图19、20、21、22、23、24、25、26所示。

图 19: $C = 0.01\mu F$

图 20: $C = 0.05\mu F$

图 21: $C = 0.08\mu F$

图 22: $C = 0.1\mu F$

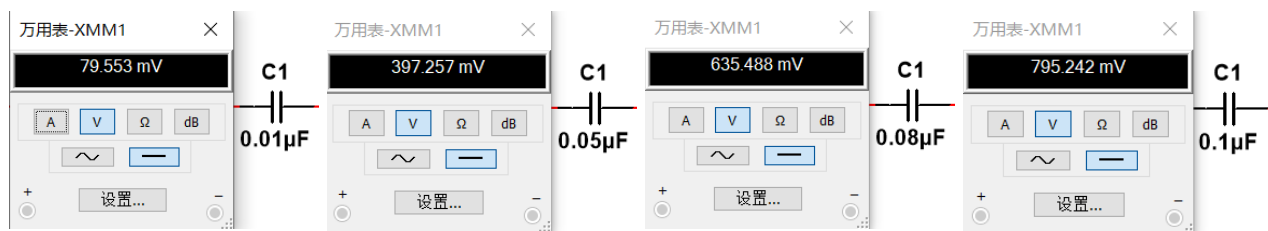
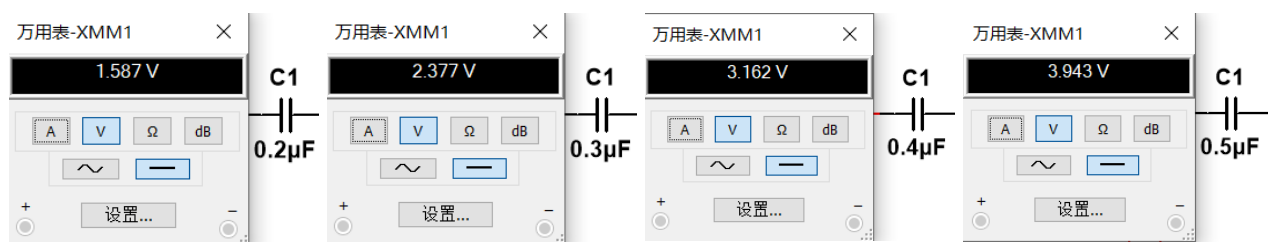


图 23: $C = 0.2\mu F$

图 24: $C = 0.3\mu F$

图 25: $C = 0.4\mu F$

图 26: $C = 0.5\mu F$



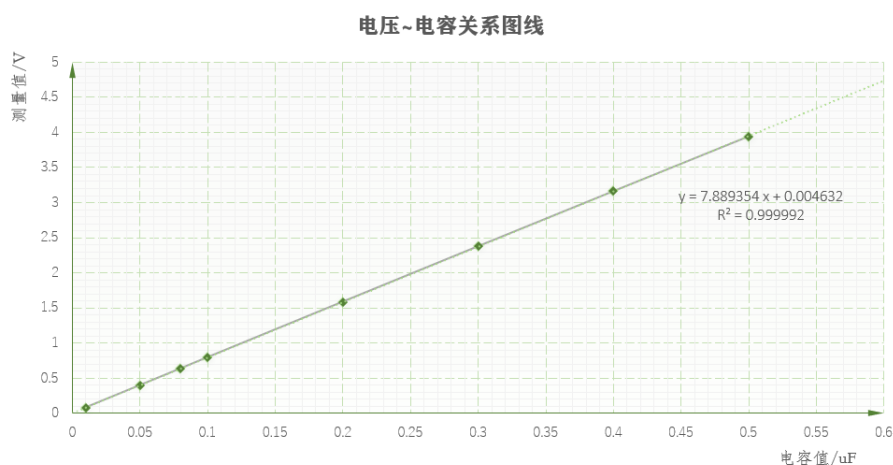
整理上述测量数据如表1所示。

表 1: 电容—电压测量电路测量结果

电容值	$0.01\mu F$	$0.05\mu F$	$0.08\mu F$	$0.1\mu F$	$0.2\mu F$	$0.3\mu F$	$0.4\mu F$	$0.5\mu F$
理论值 /V	0.080	0.400	0.640	0.800	1.600	2.400	3.200	4.000
测量值 /V	0.080	0.397	0.635	0.795	1.587	2.377	2.377	3.943
相对误差	0.50%	0.75%	0.78%	0.63%	0.81%	0.96%	1.19%	1.43%

对测量数据利用 Excel 软件进行直线拟合，所得结果如图27所示。

图 27: 电容—电压关系图线



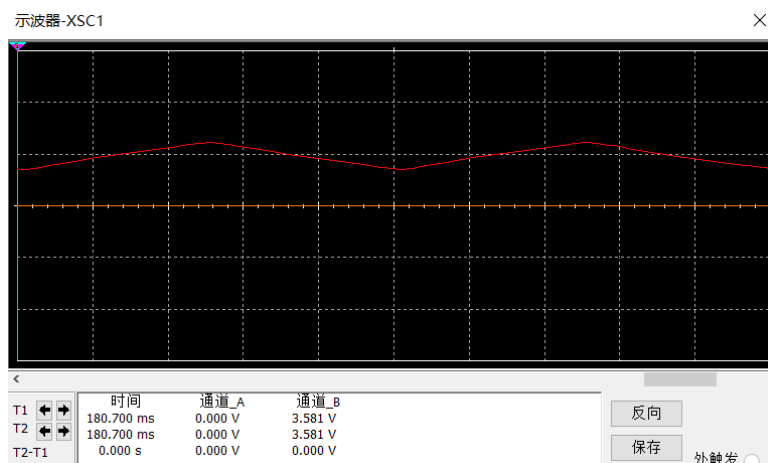
拟合直线为 $y = 7.8893x + 0.0046$ ，可以认为满足正比例关系，相关系数 $R^2 = 0.999992$ ，表明线性相关性强，测量结果符合要求。

观察到随着电容值增大，测量精度下降，这是由于当 $\tau = RC$ 增大时，充放电时间增大，脉冲宽度变宽，使得测得直流值小于理论值。

观察到当取 $C = 1nF$ 时，电路仍能正常工作，这表明该电路对小电容的测量精度较高。当取 $C = 2\mu F$ 时，测得波形如图28所示，输出波形的直流性质不够理想，表明已经超出了电路量程。

通过改变 RC 微分电路的电阻、电容取值，可以改变该电路的量程。

图 28: 大容量电容测试



4. 仿真题 3-3

利用运放和模拟乘法器设计一个正弦波有效值测量电路。

4.1 理论分析及设计思路

设输入有效值为 A ，频率为 ω 的正弦波信号：

$$f(t) = \sqrt{2}A \sin(\omega t)$$

使用乘法器将原信号平方：

$$y_1(t) = f^2(t) = 2A^2 \sin^2 \omega t = A^2(1 - \cos(2\omega t))$$

使用低通滤波器滤除高频分量：

$$y_2(t) = A^2$$

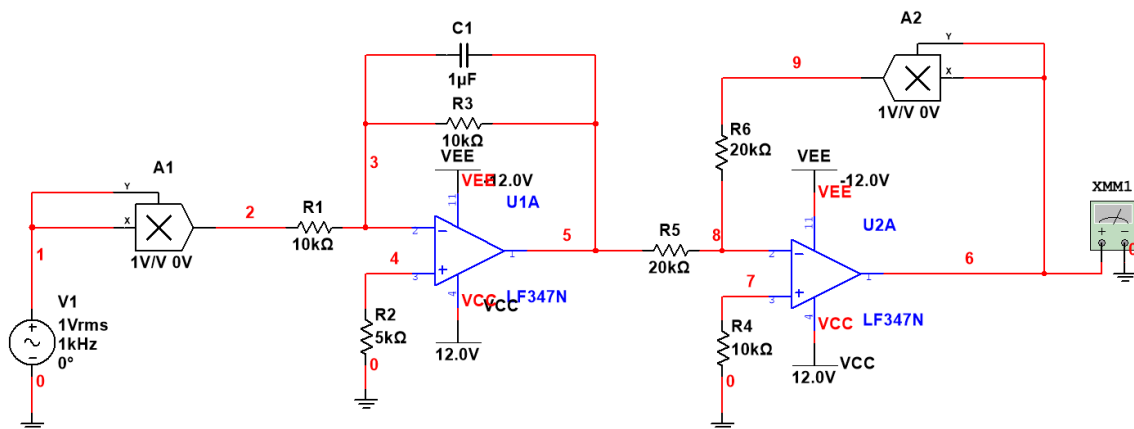
使用乘法器和运算放大器搭建开方电路：

$$y(t) = A$$

由此即得正弦信号的有效值。

根据该设计思路，实际搭建电路如图29所示。

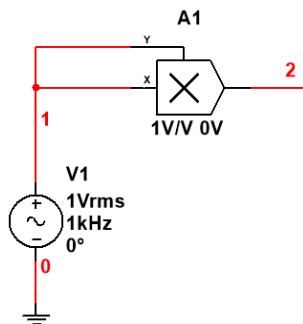
图 29: 正弦波有效值测量电路仿真电路图



4.2 平方电路

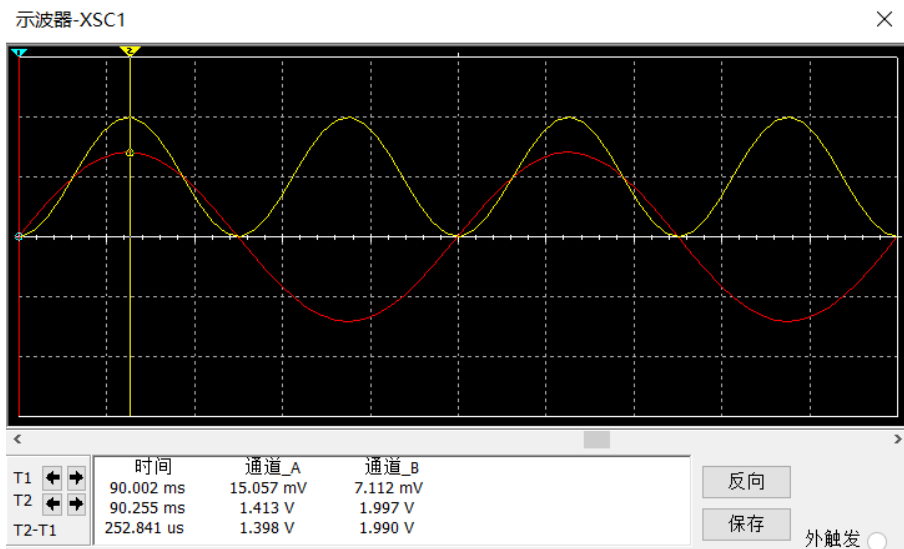
平方电路设计图如30所示，其原理较为简单，利用乘法器即可实现。

图 30: 平方电路仿真电路图



输入有效值为 1V 的正弦波信号，电路输入、输出波形如图31所示，输入信号 $u_i = 1.413V \approx \sqrt{2}V$ ，输出信号 $u_o = 1.997V \approx 2V$ ，电路正确实现平方运算。

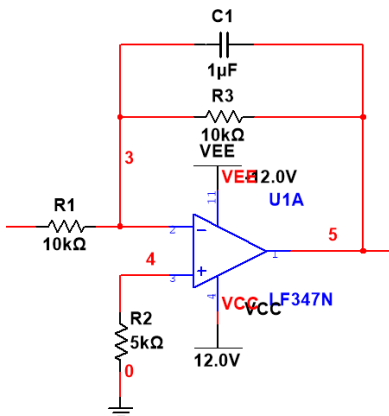
图 31: 平方电路仿真波形图



4.3 低通滤波电路

低通滤波电路设计图如32所示，其采用《模拟电子技术基础》第五版第 310 页图 6.3.11 反相输入一阶低通滤波电路实现。

图 32: 低通滤波电路仿真电路图



电路的传递函数：

$$\dot{A}_u(s) = -\frac{R_3 // \frac{1}{sC_1}}{R_1} = -\frac{R_3}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + sR_3C_1}$$

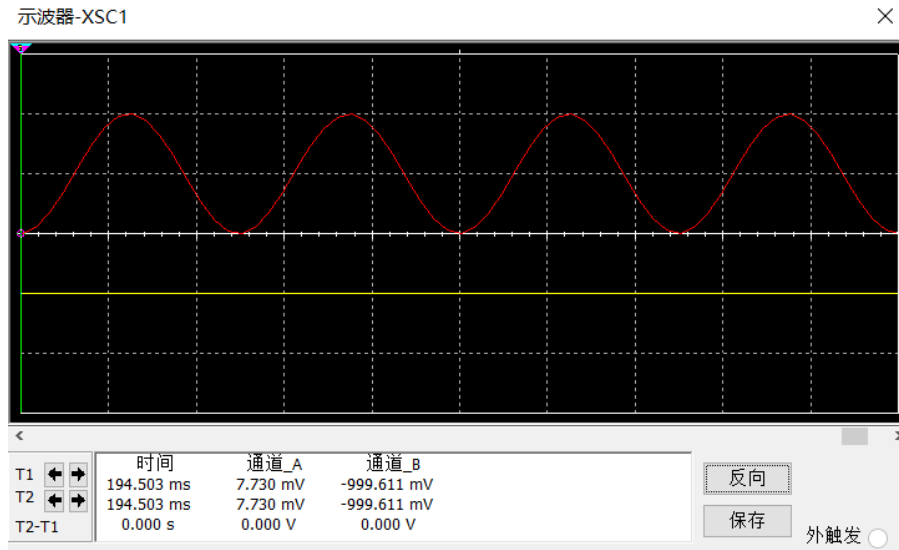
令 $f_0 = \frac{1}{2\pi R_3 C_1}$ ，则 $f_p = f_0$ ，选取 $C_1 = 1\mu F$, $R_3 = 10k\Omega$ ，可得

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_3 C_1} = 15.91Hz$$

电路高频部分增益很小，低频部分被保留，实现低通滤波。

电路输入、输出波形如图33所示，输出直流信号，其大小为 $999.611mV \approx 1V$ ，高频信号被滤去，符合预期。

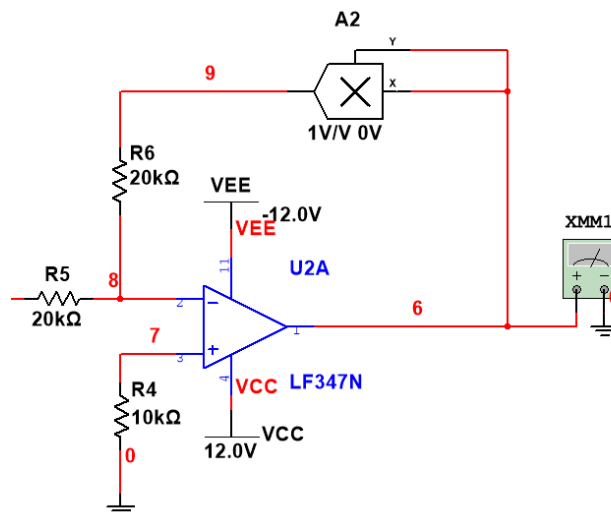
图 33: 低通滤波电路仿真波形图



4.4 开方电路

开方电路设计图如34所示。

图 34: 开方电路仿真电路图

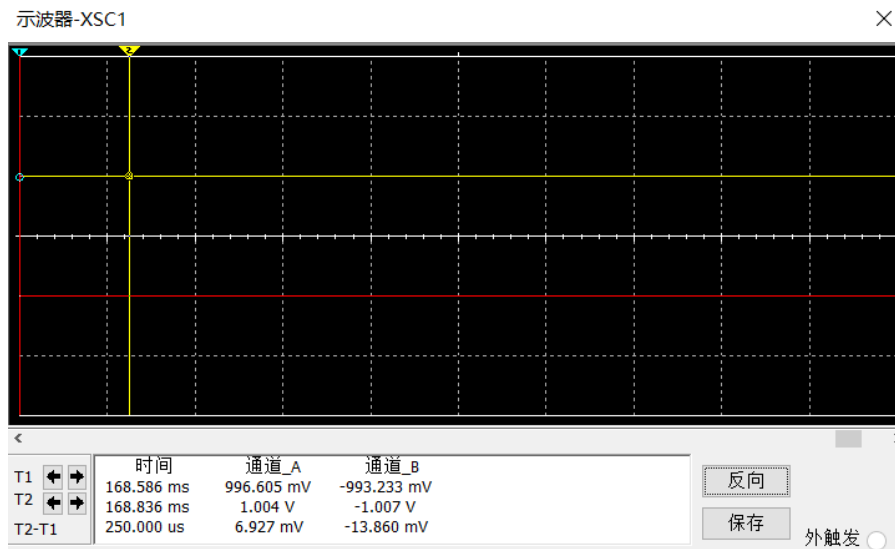


开方电路满足的关系式：

$$u_o = \sqrt{-\frac{R_6 u_1}{k R_5}} = \sqrt{\frac{20k}{20k} \times A^2} = A$$

电路输入、输出波形如图35所示。明显可以看出，波形符合预期。

图 35: 开方电路仿真波形图



4.5 实际测量结果

以有效值为 1V、频率 $f = 1kHz$ 的正弦波信号为例进行测量，测量万用表示数如图36所示。

图 36: 整体电路仿真波形图



测量有效值 $A' = 999.995mV$ ，理论值 1.000V，可见测量准确度极高。

其余正弦波形测量方式类似，在此处不再赘述，因此，该电路设计正确，参数选择合理，工作正常。

5. 仿真中遇到的问题及解决方法

由于在开始仿真前进行了充分的思考，因此总体而言，本次仿真较为顺利，主要遇到了以下几个方面的问题。

- 思路分析与模块选取

由于此次仿真大多为设计题，因此选取正确、简洁、准确的设计思路解决问题是成功完成此次仿真的关键所在。在仿真题 3-2 中，我花费了一定的时间思考如何将电容容值转换为电压信号。我联想到上学期数电实验考核中采用的微分电路对电容容值进行转换，因此最终选定了采用三角波信号与微分电路配合产生方波信号，并联想到课上所学，借用书中精密全波整流电路将方波信号转换为直流信

号，最后考虑到直流信号不够理想，采用简单 RC 滤波电路对信号进行处理，最终得到了较好的直流波形。

- 参数选取

本次仿真参数选取虽然较上一次仿真简单不少，但仍然需要慎重考虑。本次仿真参数选取采取理论分析与过往经验结合的方式，取得了较好的效果。对于可以通过理论分析计算的参数优先通过理论分析计算，理论分析较复杂的参数尽量采用估算的方法简化，无法进行理论分析的参数可直接利用经验进行选取或根据电路实际工作情况进行调整，最终取得了较快较好的效果。

6. 收获与体会

本次仿真第一题在理解了 VCVS 二阶带通滤波器的原理后较为简单，基本为按部就班的操作；第二题的关键在于采取正确的电路模块；第三题关键在于对从正弦信号转换为有效值的过程进行分析。因此，本次仿真难度不大，但有较多收获。概括而言，可分为以下几点。

- 对所学电路模块有了更深了解

在仿真题一中，通过对二阶带通滤波器进行深入的理论分析，并通过仿真探究其不同情况下的性质，笔者对平时学习了解不够深入的带通滤波器有了深入的探究。在仿真题二、仿真题三中，通过分析、运用包括实用微分电路、全波精密整流电路、滤波电路、低通滤波器、开方平方运算电路等电路模块，进一步巩固了所学知识。

- 对电路信号处理、运算作用有了更多认识

通过设计电容—电压转换电路以及正弦波有效值测量电路，笔者实践了运用电路进行信号处理与运算的流程，对模拟电路能够实现的功能以及其实现方法有了切身的认识。

- 对电路的设计、参数选择、调试过程有了更多体会

通过设计电路、调试电路，笔者进一步提高了调试电路的能力。在各个模块相对分立的前提下，运用分模块调试的方式对调试过程有较大的帮助。

- 熟悉了 Multisim 的操作

本次仿真运用了交流分析等此前未曾使用的 Multisim 功能，对 Multisim 的软件特性有了更多了解。

最后，感谢助教的辛苦付出！