

第三次仿真作业

刘泓尊 2018011446 自 81

一、根据附录补充知识设计正弦波发生器

1. 文氏电桥

根据相量形式的串并联分压关系，可得：

$$\frac{R // (-\frac{j}{\omega C})}{R // (-\frac{j}{\omega C}) + R - \frac{j}{\omega C}} \dot{U}_i = \dot{U}_o$$

化简得：

$$\dot{U}_o = \dot{U}_i \left[\frac{3(R\omega C)^2}{(R\omega C)^4 + 7(R\omega C)^2 + 1} + j \frac{(R\omega C)^3 - R\omega C}{(R\omega C)^4 + 7(R\omega C)^2 + 1} \right]$$

欲使输出电压 U_o 和输入电压 U_i 同相，应满足： $R\omega C = 1$ 即频率

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC} = 1591.55 Hz$$

此时，输出电压与输入电压的比值为：

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{3(R\omega C)^2}{(R\omega C)^4 + 7(R\omega C)^2 + 1} = \frac{1}{3}$$

下面用仿真电路进行验证，仿真电路如下：

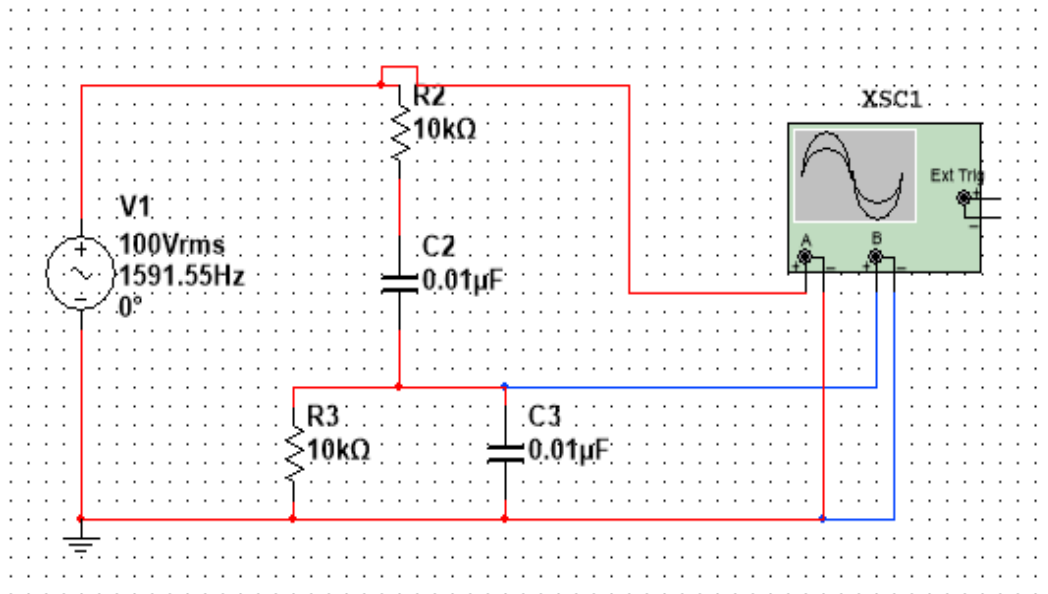


图 1: 文氏电桥仿真电路

示波器给出的波形如下：

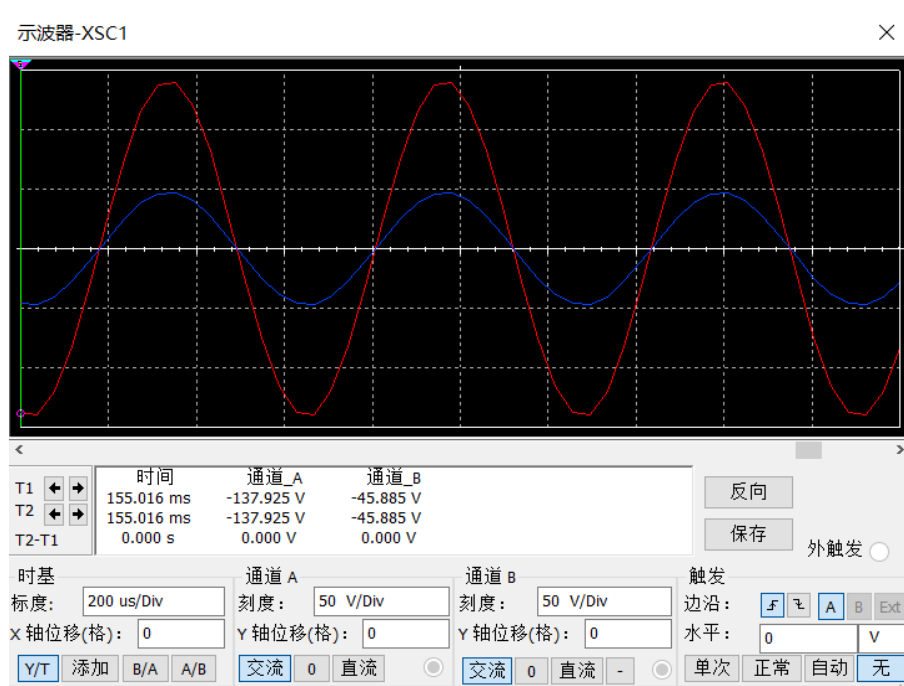


图 2: 文氏电桥仿真结果

从上图可见，输出电压与输入电压同相，并且输出电压为输入电压的

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{45.8}{137.9} = 0.332$$

实现了文氏电桥电路。

2. 同相比例放大器

由运算放大器性质，可得 $u_o = (1 + \frac{R_2}{R_1})u_i$ ，且满足同相关系。欲使电压放大倍数为 3，则 R_2 应取为 R_1 的 2 倍。

结合 $R_1//R_2 = R_3$ 可得 $R_1 = 15K\Omega, R_2 = 30K\Omega$

仿真电路图如下图所示：

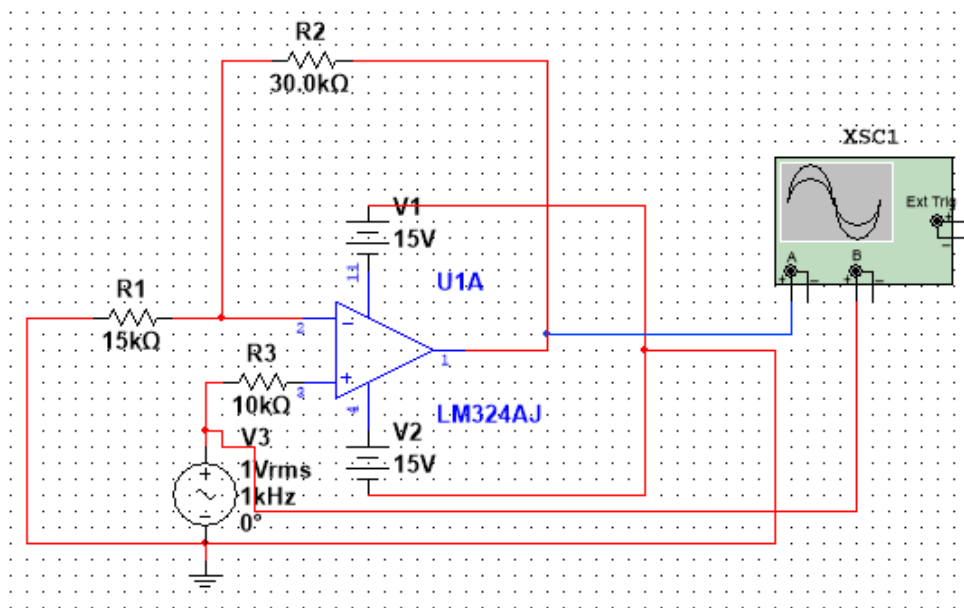


图 3: 同相比例放大器仿真电路

仿真结果如下图所示:

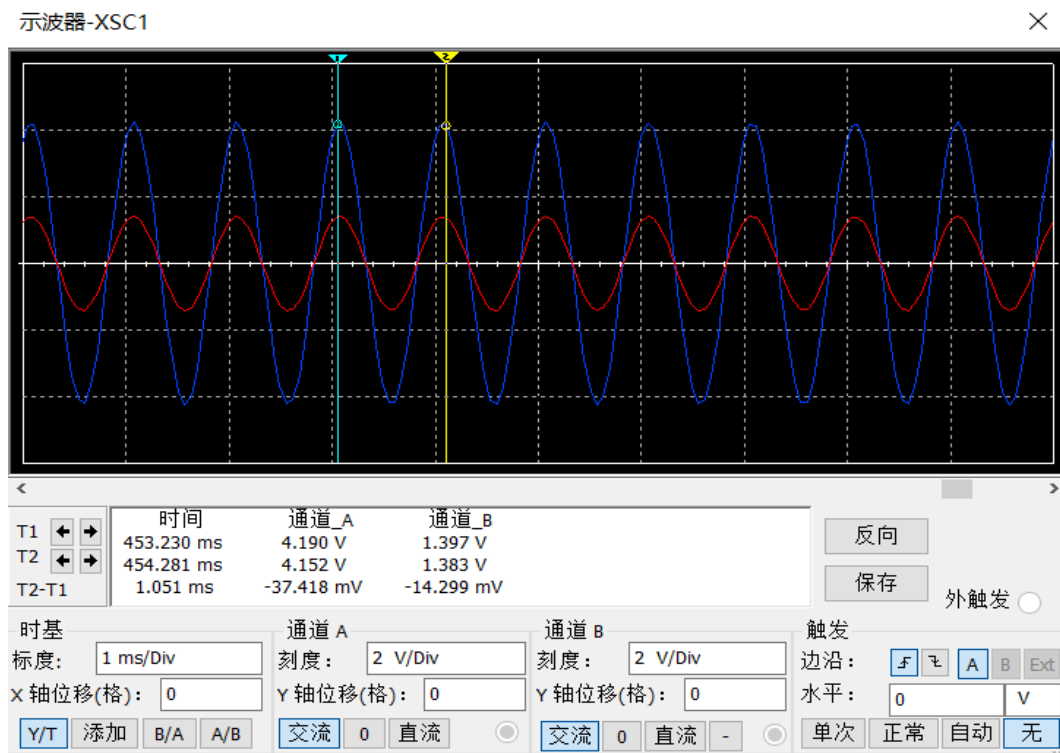


图 4: 同相比例放大器仿真结果

从上图可见, 当输入交流电压为 $\dot{U} = 1\text{V}$ 时 (满足运放工作在线性区), 输出电压与输入电压

同相，并且输出电压为输入电压的

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{4.19}{1.38} = 3.03$$

近似为 3 倍，实现了同相比例放大器。

3. 正弦波发生器

(1) 为什么第 2 部分需要设计放大倍数为 3 的同相比例放大器？

在上图所示电路中，A 点电压经过同相比例放大器放大为 B 点电压，设放大倍数为 A，即 $\dot{U}_A = \dot{A}\dot{U}_B$ 。B 点电压经过文氏电桥反馈到 A 点，即 $\dot{U}_B = \dot{F}\dot{U}_A$ 。对于某个频率的正弦波，电路应满足平衡条件 $AF = 1$ 。根据 1 中所得文氏电桥输入输出的关系得 $\dot{F} = 1/3$ ，得到 $\dot{A} = 3$ 。所以电压放大倍数应为 3。

(2) 仿真电路图如下图所示

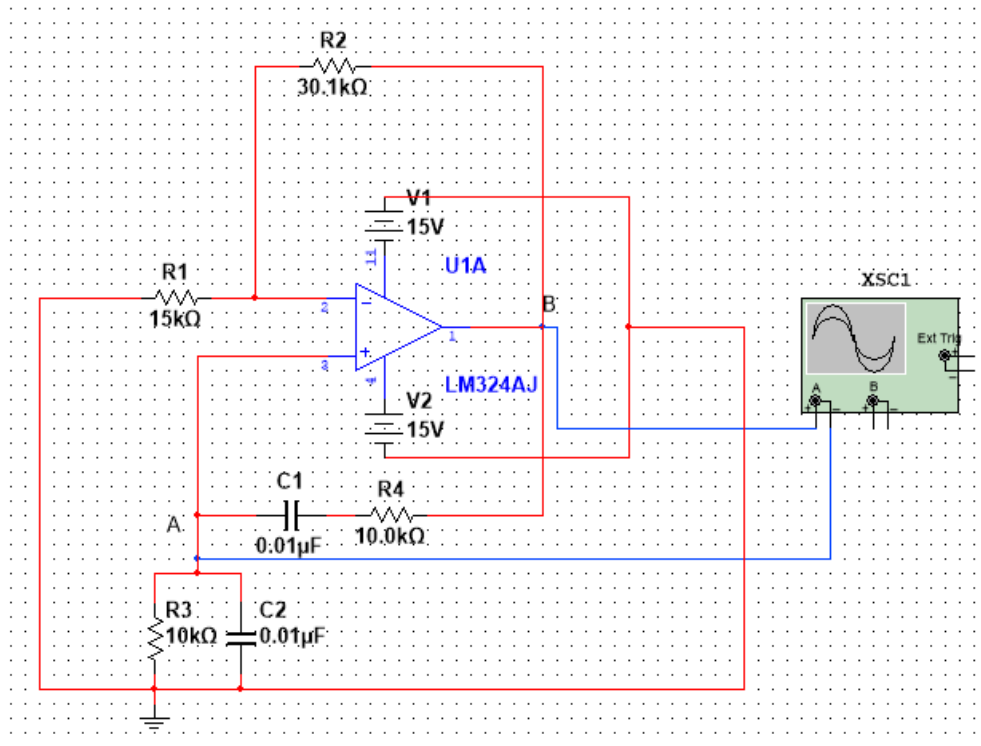


图 5: 正弦波发生器仿真电路

为了满足起振条件，图中将 R_2 略微增大至 $30.1k\Omega$ ，以得到失真比较小的正弦波。

(3) 示波器波形如下图所示，已用游标标明相邻两峰值的游标。

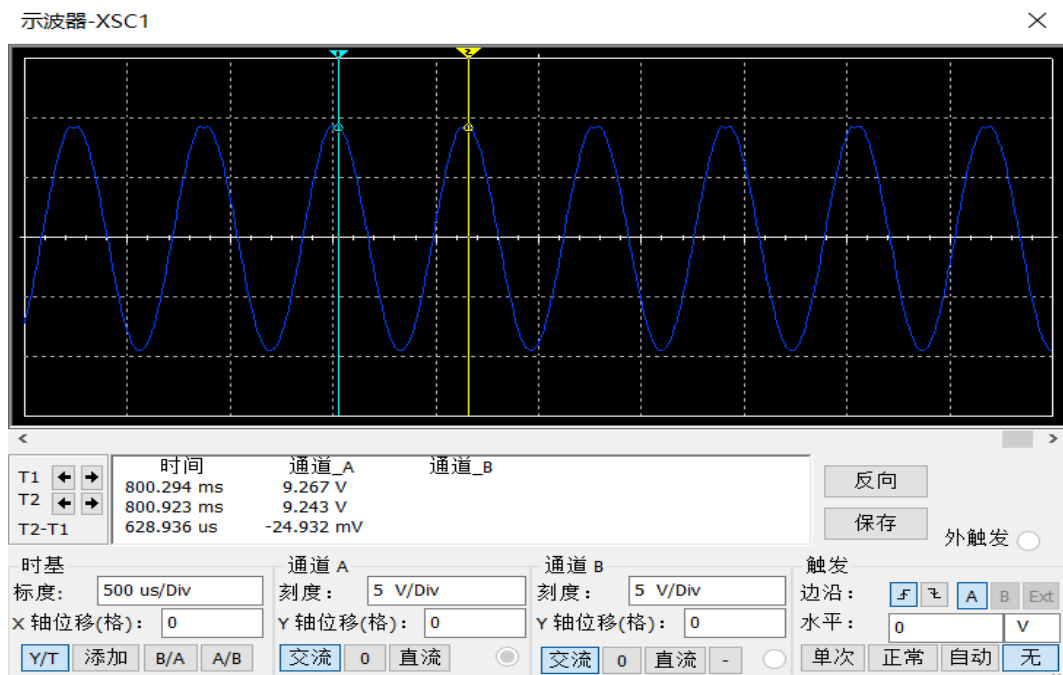


图 6: 正弦波发生器仿真结果

从图中可以看出，正弦波峰值 $U_m = 9.26V$ ，周期 $T = 629\mu s$ 。

(4) 2 倍频率正弦波

电路中文氏电桥只需满足 $R\omega C = 1$ 即可实现产生正弦波。因此，将 RC 乘积减小至 $1/2$ ，便可以使得产生的正弦波频率增大为 2 倍。仿真电路如下图所示：

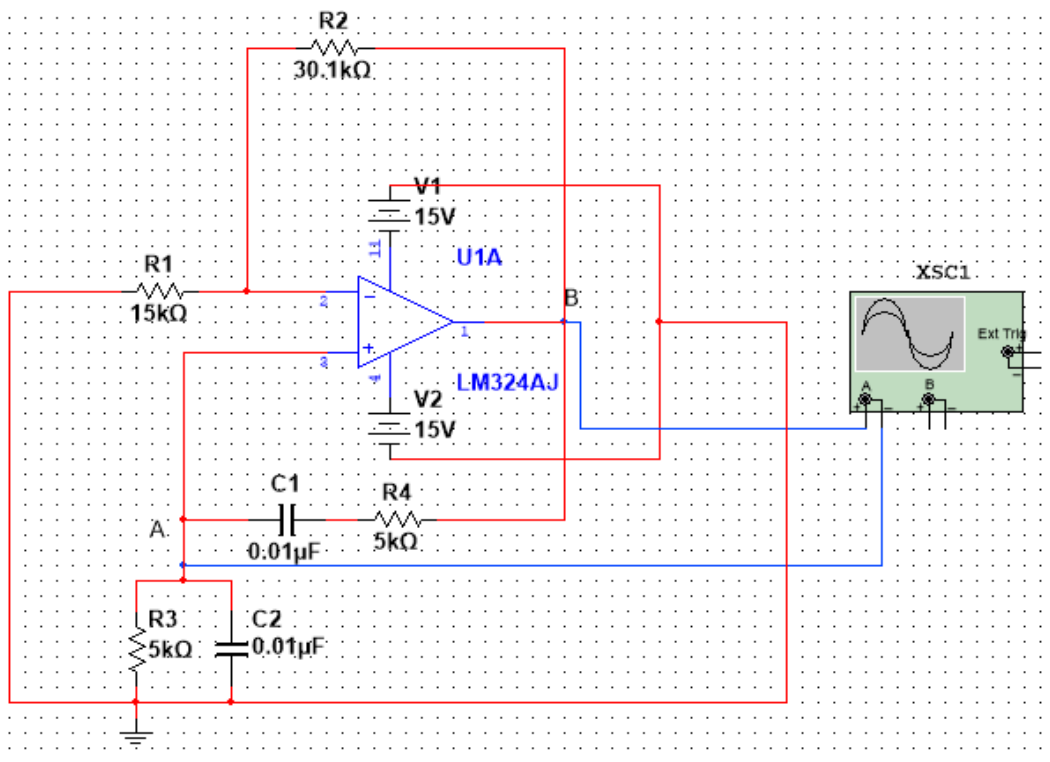


图 7: 2 倍频正弦波发生器仿真电路

仿真结果如下图所示:

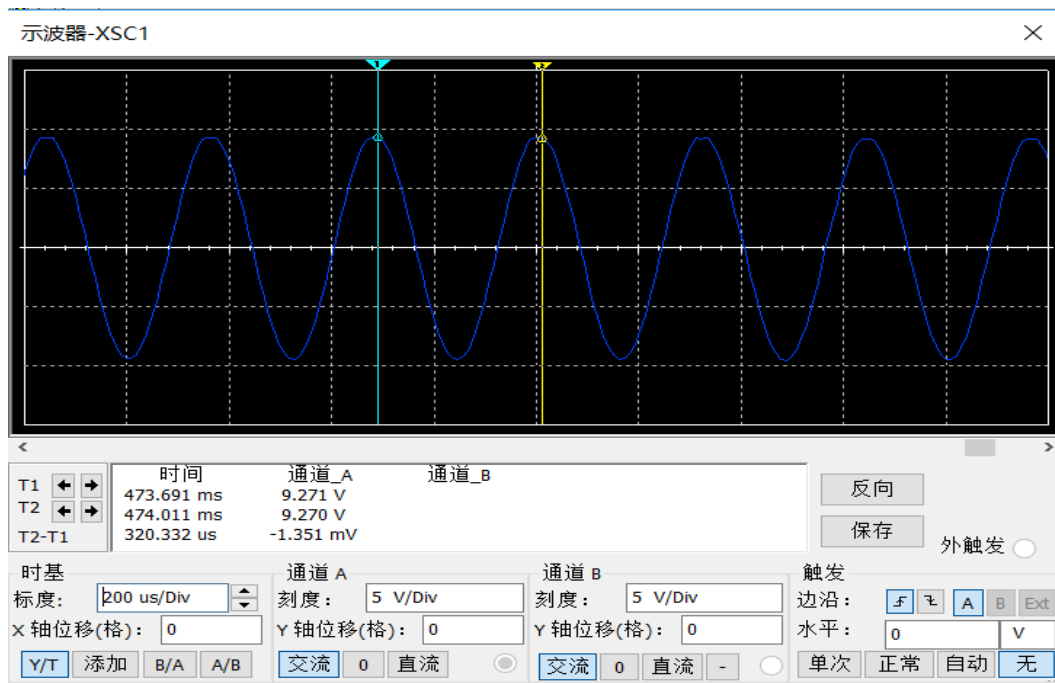


图 8: 正弦波发生器仿真结果

游标显示峰值 $U_m = 9.271V$, 周期 $T = 320.3\mu s$.

因此在误差范围内实现了 2 倍频率正弦波的产生。

二、电容倍增器

(1) 该电路可以实现电容倍增功能的原因：

结合运放的性质，可得：

$$I = j\omega C \dot{U}_c$$

$$\frac{\dot{U}}{R_1}(R_1 + R_2) = \dot{U}_c$$

计算可得，端口电压-电流关系为：

$$\dot{I} = j\omega \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) C \dot{U}$$

等效电容为：

$$C' = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) C$$

幅值关系为：

$$\left| \frac{\dot{I}}{\dot{U}} \right| = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \omega C$$

所以实现了电容倍增。

(2) 仿真电路如下图所示：

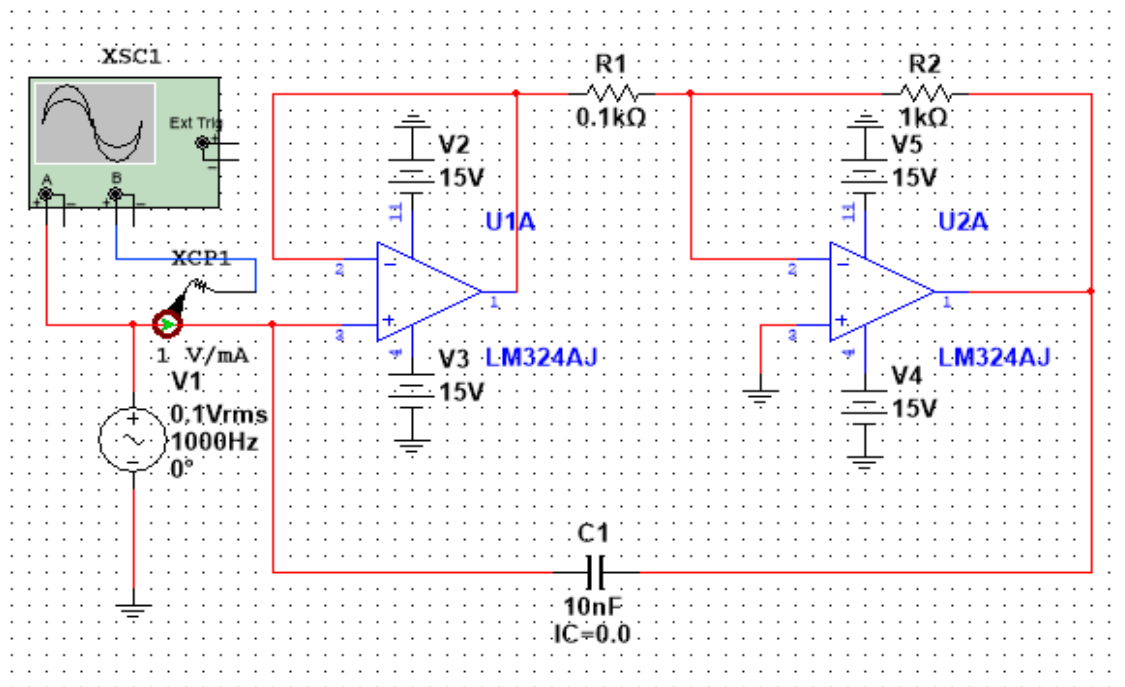


图 9: 电容倍增器仿真电路

由 (1) 计算结果，可得： $C = 10nF$, $f = 1kHz$ 时，要得到等效电感 $C = 0.11\mu F$, R_1, R_2 应满足：

$$\frac{R_2}{R_1} = 10$$

此时理论幅值比例约为

$$\left| \frac{\dot{I}}{\dot{U}} \right| = 0.0007$$

取 $R_1 = 0.1k\Omega$ $R_2 = 1k\Omega$ 进行电路仿真。

示波器显示的电压-电流波形如下图所示

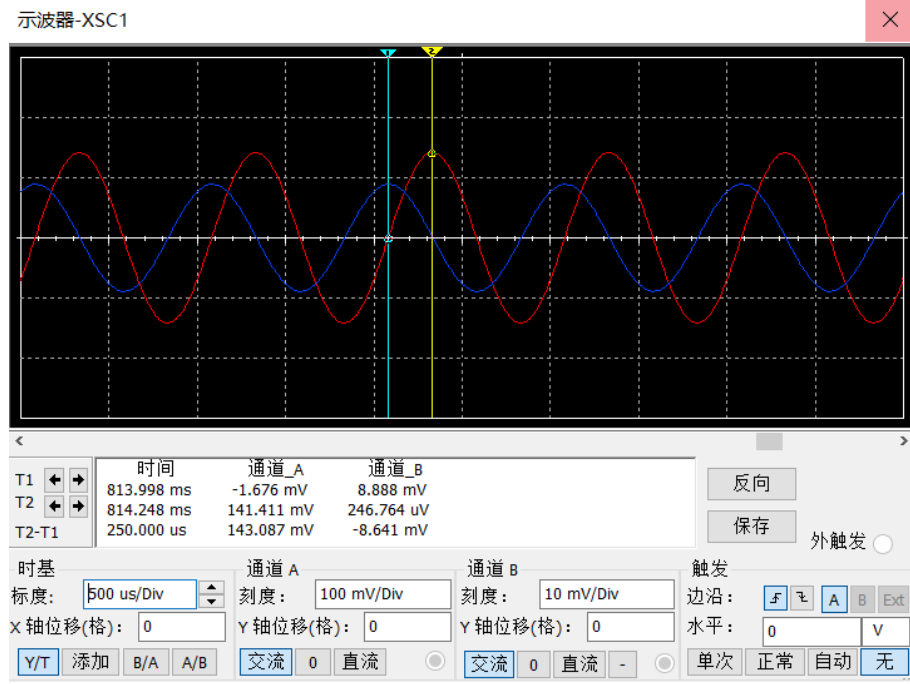


图 10: 电容倍增器仿真结果

从波形图中可以发现，端口电流相位领先电压 $\pi/2$ ，呈现“容性”。幅值比例为：

$$\left| \frac{\dot{I}}{\dot{U}} \right| = \frac{8.88 * 10^{-3}}{141} = 0.0006$$

仿真结果与理论计算值相近，电容倍增器的电压、相位均和理论值相近，电路达到设计要求，成功验证了电容倍增器。

进一步讨论电容倍增器正常工作的端口电压范围：

根据运算放大器的“虚断”，“虚短”特性，可得：

$$-\frac{R_2}{R_1} \dot{U} = \frac{\dot{U}_{o2}}{R_2}$$

即

$$|\dot{U}_{o1}| = |\dot{U}|, |\dot{U}_{o2}| = \left| \frac{R_2}{R_1} \dot{U} \right|$$

所以为了保证电容倍增器正常工作，应保证 $\dot{U}_{o1}, \dot{U}_{o2} < U_{sat}$ ，假设该运算放大器的 $U_{sat} = 13V$ 得到输入端口电压的幅值大致范围为：

$$|\dot{U}| < \frac{U_{ds}}{10} = 1.3V$$

经验证，仿真电路中输入端电压满足此条件。

三、虚拟电感

(1) 根据运放的“虚断”“虚短”特性及元件约束得：

$$\dot{U} - \dot{U}_{o1} = \dot{I}R - \dot{U}$$

$$\dot{U}_{o1} = 2\dot{U} - \dot{I}R$$

$$R\left(\frac{\dot{U}}{R} - \dot{I} - j\omega CR\dot{I}\right) = R\dot{I} - \dot{U}_{o2}$$

$$\dot{U}_{o2} = 2R\dot{I} + j\omega CR^2\dot{I} - \dot{U} = 2R\dot{I}$$

解得：

$$\dot{U} = j\omega CR^2\dot{I}$$

结果中纯虚数部分电压领先电流 $\frac{\pi}{2}$ ，表现为感性，且该电路等效电感为：

$$L = CR^2$$

幅值关系：

$$\left|\frac{\dot{U}}{\dot{I}}\right| = \omega CR^2$$

(说明：从图中可以看出，电路中间串联以及电路右侧并联的含运放的电路是“负电阻电路”。结合运放的性质，计算可得，该负电阻网络的等效电阻为-R。由于运放构成的负电阻电路需要将 R_1 端接地，而图中电路并不满足此条件，所以不能用负电阻-R 代替图中的含运放网络!)

(2) 仿真电路如下图所示

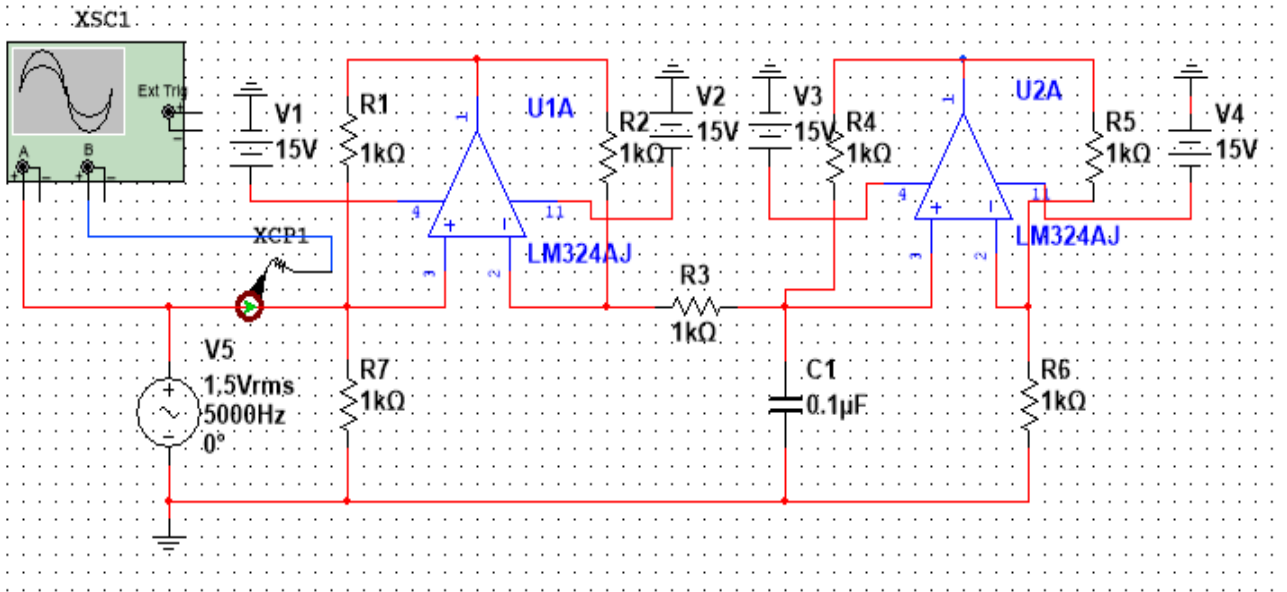


图 11: 模拟电感仿真电路

由 (1) 计算结果，可得

$$L = 0.1H \quad f = 5kHz$$

时, R, C 应满足 $R^2C = 0.1$
 此时理论幅值比例约为

$$\left| \frac{\dot{U}}{\dot{I}} \right| = 3140\Omega$$

取 $R = 1K\Omega$ $C = 0.1\mu F$ 进行电路仿真。示波器给出的端口电压电流波形如下图:

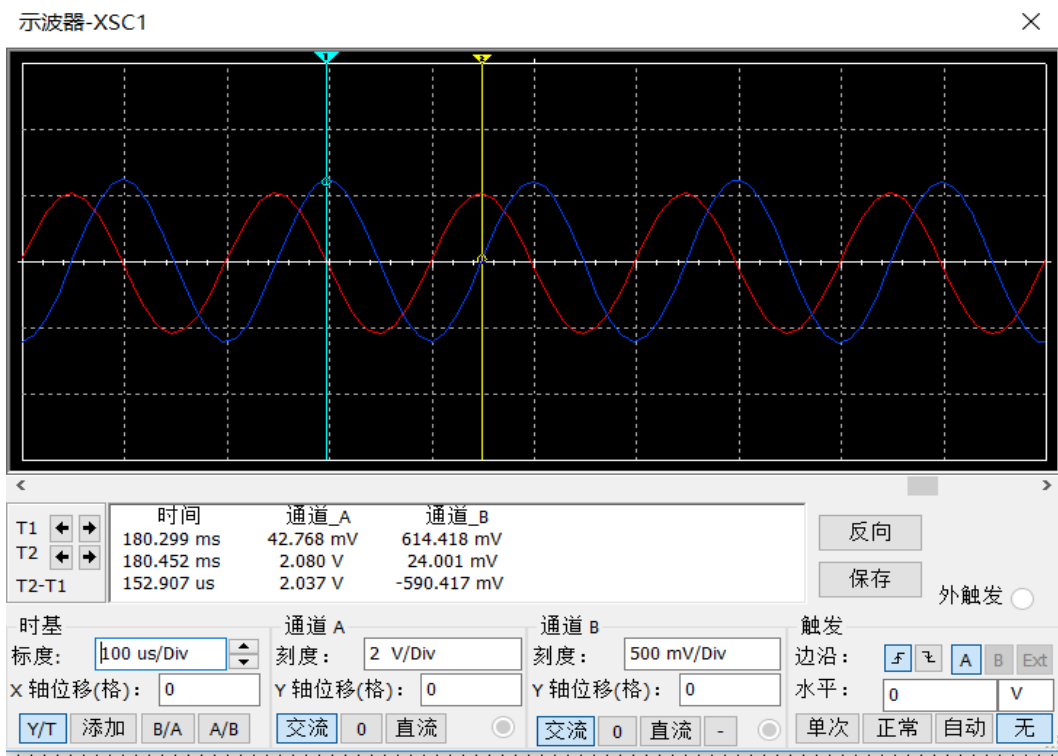


图 12: 模拟电感仿真结果

从图中可以看出, 电压电流的交流成分中, 电压相位领先电流 $\pi/2$, 呈现感性。
 幅值比例为:

$$\left| \frac{\dot{U}}{\dot{I}} \right| = \frac{2.08}{0.614 \times 10^{-3}} = 3387\Omega$$

仿真结果与理论计算值相近, 模拟电感的电压、相位均和理论值相近, 电路达到设计要求, 成功验证了模拟电感。

进一步讨论模拟电感正常工作的端口电压范围:

根据运算放大器的“虚断”, “虚短”特性, 可得:

$$|\dot{U}_{o1}| = |2\dot{U} - R\dot{I}| = \sqrt{4 + \frac{1}{(\omega CR)^2}} |\dot{U}| = 2.02 |\dot{U}|, |\dot{U}_{o2}| = 2R|\dot{I}| = 0.64 |\dot{U}|$$

所以为了保证电容倍增器正常工作, 应保证 $|\dot{U}_{o1}|, |\dot{U}_{o2}| < U_{sat}$, 假设该运算放大器的 $U_{sat} = 13V$ 得到输入端口电压的幅值大致范围为:

$$|\dot{U}| < 6.4V$$

经验证, 仿真电路中输入端电压满足此条件。