《基础物理实验》课程完整报告

学院： 物理学院　专业： 物理学　年级： 2024 级　地址： 陆佑堂

日期： 2025 年 10 月 31 日　　时间： 上午

室温： 25°C　　相对湿度：

实验人姓名（学号）： 周文斌 (　　)

参加人姓名（学号）： 焦润泽 (　　)

实验 G4 基于 Multisim 的 RLC 电路和电桥仿真实验

1　实验目的

(1) 学习 Multisim 电路仿真软件的使用方法。

(2) 利用 Multisim 软件，仿真 RLC 串联电路实验。

(3) 仿真直流非平衡电桥实验和交流电桥测电感、电容实验。

2　仪器用具

实验测控用计算机 (安装了 Multisim 和 LabVIEW 软件)。

3　实验原理

3.1　Multisim 电路仿真软件简介

Multisim 仿真软件是电子线路仿真软件，基于工业标准 SPICE 仿真，以获得最优化的设计。该软件的前身为加拿大 IIT (Interactive Image Technologies) 公司于 1988 年推出的 EWB (Electronics Work Bench) 套件，是一套用于电子线路设计和仿真的 EDA 软件。该套件可对模拟数字、模拟/数字混合电路进行仿真，具有很强的分析功能。2001 年，IIT 公司在推出 EWB6.0 时，将套件名称改为 Multisim，意为多功能仿真软件，即 Multisim2001。2005 年，美国 NI(National Instruments) 公司收购了 IIT 公司，将软件改名为 NI Multisim，随后相继推出多个版本。本实验将采用 NI Multisim14.0 版软件。

3.2　Multisim 电路仿真方法

以 Multisim14.0 为例说明电路仿真的方法。

3.2.1　启动 Multisim

Multisim14.0 主界面左上角的“元器件库和仿真控制工具栏”用于快速选择需要仿真的元器件，并控制程序的“运行”；页面右边的“仿真仪器工具栏”用于快速选择虚拟信号发生器、数字万用表、示波器、逻辑分析仪等仿真仪器。

Multisim14.0 软件项目管理器栏位于主界面左半部分，项目以树状的形式展示，适应层次电路的设计。Hierarchy 是对不同电路的分层显示，单击“新建”（New）按钮将生成新的电路设计工作区。Visibility 设置是否显示电路的各种参数标识，如元器件名字、值和集成电路的引脚名字等。Project View 显示同一电路的不同页。

3.2.2 建立仿真电路文件

方法 1：打开 Multisim14.0 时会自动打开空白电路文件 Design1；

方法 2：通过菜单中的“File>New>Design”实现；

方法 3：单击工具栏“New”按钮；

方法 4：按快捷键“Ctrl+N”。

若要关闭电路文件，则在项目管理器中，鼠标右键单击要关闭的文件名，选择 Close 则可。

3.2.3 防止元器件并连接电路

要放置的元器件存放在元器件数据库中，包含主元器件数据库（Master Database）、用户元器件数据库（User Database）和合作元器件数据库（Corporate Database）三种，后两种元件库是由用户创建，因此新安装的 Multisim 中这两个数据库是空的。

选取元器件时，可以通过四种方法实现：① 菜单栏“PlaceComponent”选项；②工具栏 Place—Component 按钮；③在电路图编辑工作区单击鼠标右键，弹出窗口放置元件；④快捷键“Ctrl+W”调出元器件数据库。任选一种方法，弹出元件选择窗口，供设计者操作，例如放置 +8 V 直流电源。用类似方法可放置并设定电阻、电容、电感等元器件。摆放完元件并连接好的电路如图 1所示。

注意：整个电路中，所有元件的名称必须是唯一的。如果同名，系统会认为是同一个元件。对任何一个元件的参数进行修改，所有同名元件的参数也会相应发生变化。

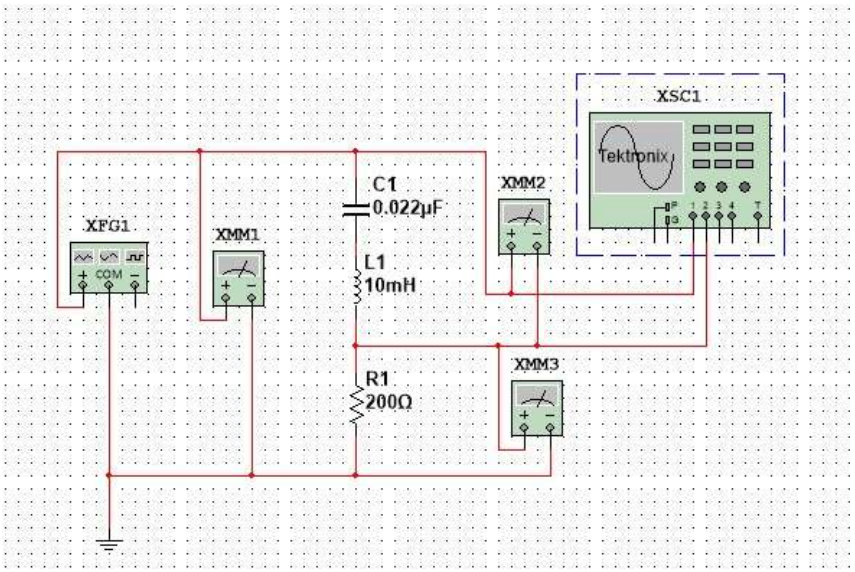


图 1: RLC 串联电路仿真

3.2.4 放置仿真仪器

从右侧的仿真仪器工具栏选取测量仪器，如双踪示波器（XSC）、信号发生器（XFG）、数字万用表 (XMM) 等，并连接好电路。

3.2.5 启动仿真

按下“启动仿真”按钮，电路开始工作，双击示波器图标，设定示波器纵坐标、横坐标、扫描时间等参数，就可观察到波形。若选择显示模式 Y/T 或 A/B，还可以观察李萨如图形。

3.2.6 保存文件

使用菜单栏的“File”项或工具栏的“保存”按钮可以把电路文件存盘，在存盘时可以选择是否保存仿真结果。

4 实验内容

4.1 学习 Multisim 电路仿真软件的使用方法

学习 Multisim 软件的使用方法，结合图 1所示 RLC 串联电路进行仿真，电路中电阻、电感和电容参数分别为 1000 Ω、4.7 mH、0.47 F，得到 RC、RL、RLC 串联电路的幅频特性曲线和相频特性曲线，并将仿真结果与实体实验结果进行对比。

4.2 利用 Multisim 软件仿真非平衡直流电桥

(1) 实验电路如图 2所示，采用半桥模式，R_2 和 R_4 的电阻可调。

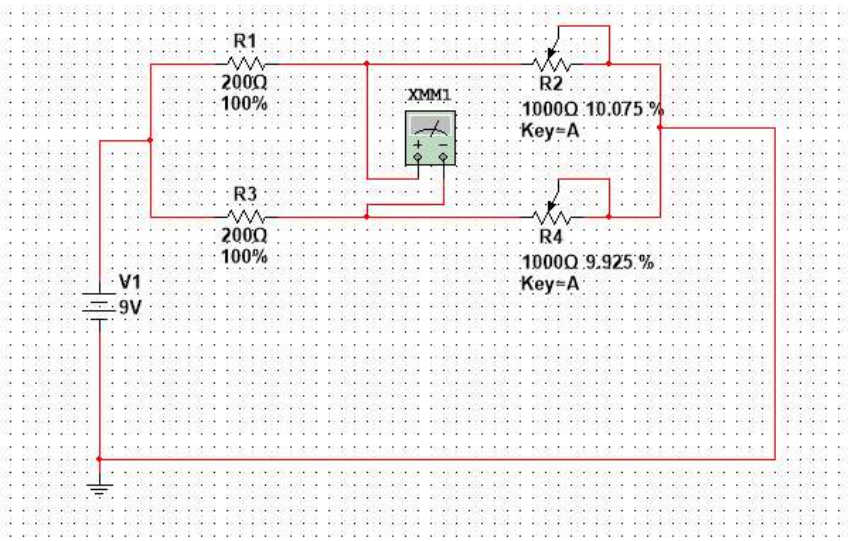


图 2: 非平衡直流电桥仿真电路

(2) 保持 R_1 和 R_3 电阻不变，反向调节电位器 R_2 和 R_4 的阻值 ΔR，即如果 R_2 的阻值增加 ΔR，则 R_4 的阻值相应地减少 ΔR，反之亦然。使 A 点和 B 点间的电压分别

为 40 mV、30 mV、20 mV、10 mV、0 mV，记录 ΔR 值。

(3) 将模拟结果与非平衡直流电桥的理论计算结果进行对比。

4.3 利用 Multisim 软件仿真交流电桥测电容

(1) 电路及参数如图 3所示，信号采用正弦波，频率为 10 kHz，峰值 $V_{pp} = 5V$。因为实际电容不是理想的电容器，在电路中会损耗能量，故其等效电路可看成是一个纯电容 C_1 和一个损耗电阻 R_1 的串联或并联电路，本实验将采用串联等效电路来处理。

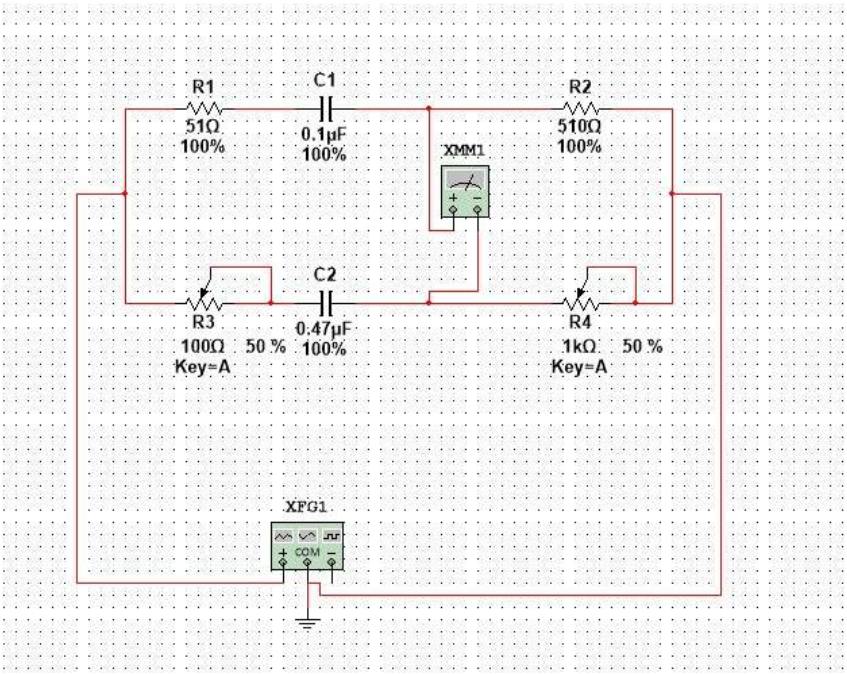


图 3: 交流电桥测电容仿真电路

(2) 调节电阻 R_3 和 R_4，使 A 点和 B 点电压差为最小值，小于 1 mV，则认为交流电桥平衡。电路仿真的情况下有可能将电压调节至零，实际测量时，由于干扰信号的影响，无法调节至零。

注意：实验过程中需要交替多次调节 R_3 和 R_4，才能得到 A 点和 B 点电压差的最小值。

(3) 为了减小测量误差，调整 C_x 和 $R-4$ 的位置重复实验，并记录相应的 R_3 和 R_4 值。通过如下公式可求得被测电容的内阻、电容和损耗分别为：

$$R_1 = \frac{R_2}{R_4} \cdot R_3$$

$$C_1 = \frac{R_4}{R_2} \cdot C_2$$

$$D = R_3 \cdot C_2 \cdot \omega = R_1 \cdot C_1 \cdot \omega$$

其中，$\omega = 2\pi f$ 为输出信号的角频率

4.4 利用 Multisim 软件仿真交流电桥测电感

(1) 电路及参数如图 4所示，信号采用正弦波，频率为 10kHz，峰值 $V_pp = 5V$。电感采用一个纯电感 $L-1$ 和一个损耗电阻 R_1 串联等效电路来处理。交替调节电阻 R_2 和 R_4 的值，使得 A,B 点之间电压差最小，约 1mV，则认为电桥平衡。

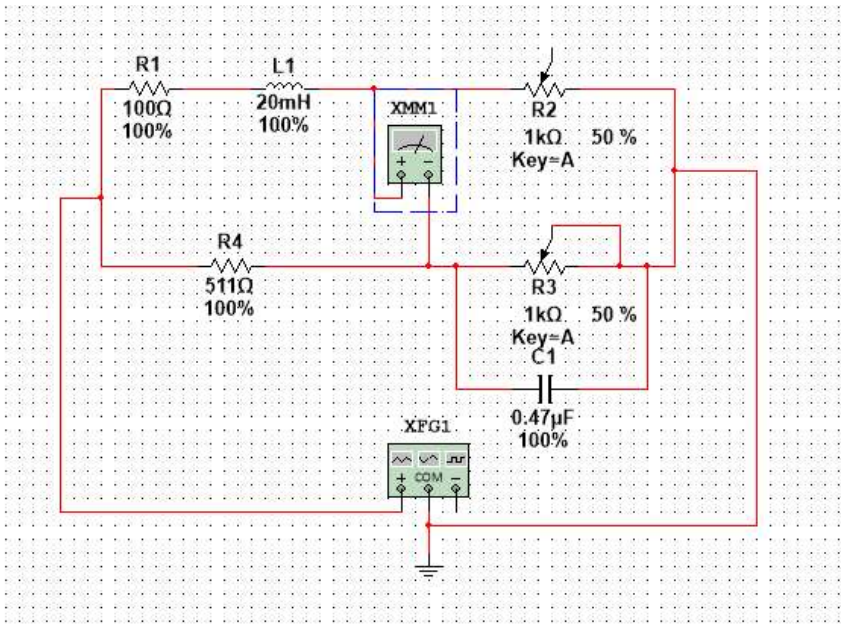


图 4: 交流电桥测电感仿真电路

(2) 调换 L_x 和 R_4、C_1 位置重复测量，并记录相应的 R_2 和 R_4 值。通过如下公式计算被测电感的内阻、电感和品质因数分别为：

$$R_1 = \frac{R_2}{R_4} \cdot R_3$$

$$L_1 = C_1 \cdot R_2 \cdot R_3$$

$$Q = \omega \cdot C_1 \cdot R_4$$

5 数据记录及处理

5.1 RC、RL、RLC 仿真及其对比

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta T}{T} \times 360^\circ$$

RC：由之前实验条件得 $R = 200\Omega \quad C_1 = 0.022\mu F \quad U_0 = 2V$

仿真:

装置图：

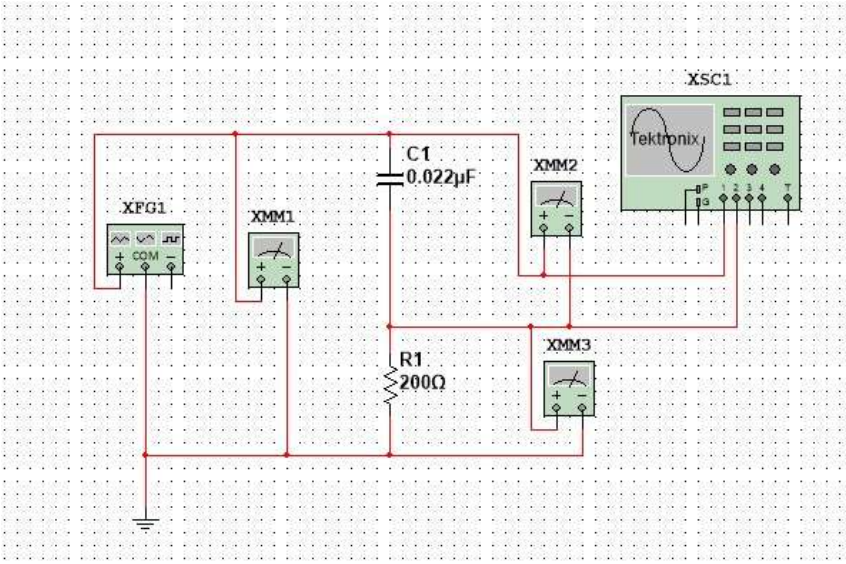


图 5: RC 电路

f/Hz	100	300	600	1,000	3,000	6,000
U_c/V	2	2	1.999	1.999	1.993	1.973
U_R/V	0.005546	0.016638	0.033272	0.055441	0.165813	0.328257
T/ms	10.02	3.29	1.674	1.015	0.334	0.164
ΔT/ms	2.32	0.845	0.406	0.244	0.078	0.038
$\Delta\phi$	83.353293	92.462006	87.311828	86.541872	84.071856	83.414634

f/Hz	10,000	30,000	60,000	100,000	300,000	600,000
U_c/V	1.927	1.537	1.03	0.678248	0.258614	0.119949
U_R/V	0.53444	1.279	1.714	1.881	1.985	1.996
T/ms	0.1002	0.0333	0.0168	0.01004	0.0033	0.001644
ΔT/ms	0.0206	0.0048	0.0016	0.00053	0.00005	0.00001
$\Delta\phi$	74.011976	51.891892	34.285714	19.003984	5.454545	2.189781

f/Hz	1,000,000	3,000,000	6,000,000	10,000,000
U_c/V	0.072052	0.024031	0.012016	0.00721
U_R/V	1.998	2	2	2
T/ms	0.00099	0.000335	0.000167	0.0001
ΔT/ms	0.000005	0.000001	0.0000001	0
$\Delta\phi$	1.818182	1.074627	0.215311	0

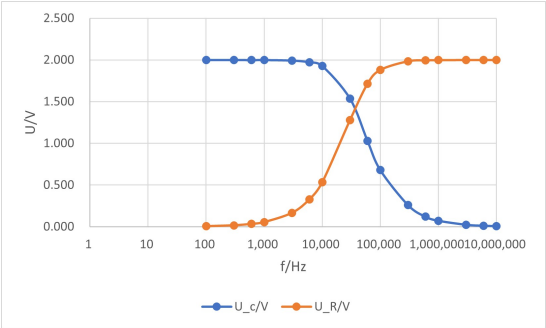


图 6: RC 幅频曲线

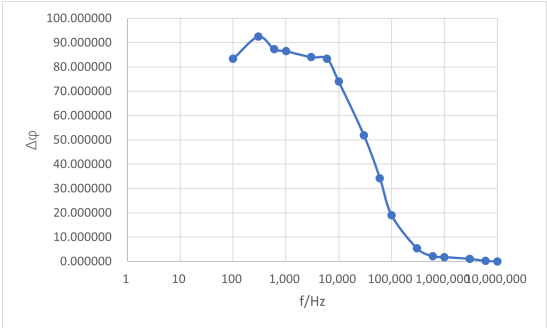


图 7: RC 相频曲线

真实实验:

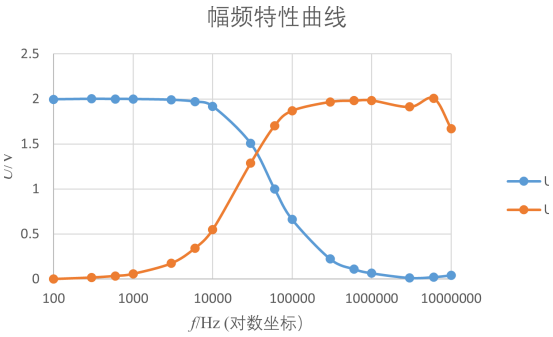


图 8

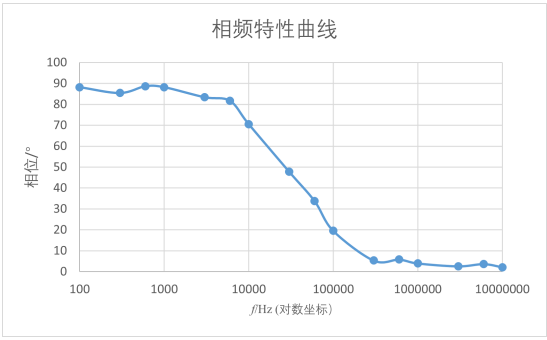


图 9

RL:

仿真：

装置图:

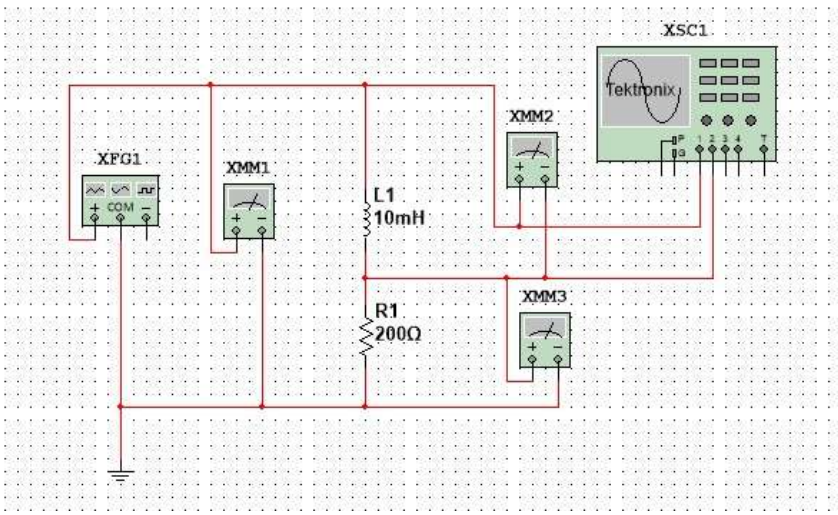


图 10: RL 电路

f/Hz	100	300	600	1,000	3,000	6,000
U_L/V	0.062993	0.188234	0.371556	0.601093	1.374	1.768
U_R/V	1.999	1.991	1.965	1.907	1.453	0.934796
T/ms	10.1	3.3	1.67	0.994	0.3325	0.165
ΔT/ms	0	-0.01	-0.012	-0.04	-0.038	-0.029
$\Delta\phi$	0	-1.0909091	-2.5868263	-14.4869215	-41.1428571	-63.2727273

f/Hz	10,000	30,000	60,000	100,000	300,000	600,000
U_L/V	1.906	1.989	1.997	1.999	2	2
U_R/V	0.604761	0.210317	0.105598	0.063415	0.021148	0.010574
T/ms	0.1	0.03355	0.0164	0.00996	0.0033	0.00162
ΔT/ms	-0.019	-0.0075	-0.0052	-0.0022	-0.00081	-0.00042
$\Delta\phi$	-68.4	-80.4769001	-114.1463415	-79.5180723	-88.3636364	-93.3333333

f/Hz	1,000,000	3,000,000	6,000,000	10,000,000
U_L/V	2	2	2	2
U_R/V	0.006345	0.002115	0.001058	0.0006345
T/ms	0.00099	0.000334	0.000167	0.0000994
ΔT/ms	-0.00025	0.000084	0.000043	0.0000264
$\Delta\phi$	-90.9090909	90.5389222	92.6946108	95.6136821

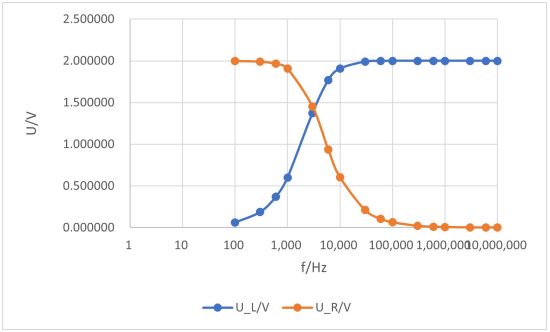


图 11: RL 幅频曲线

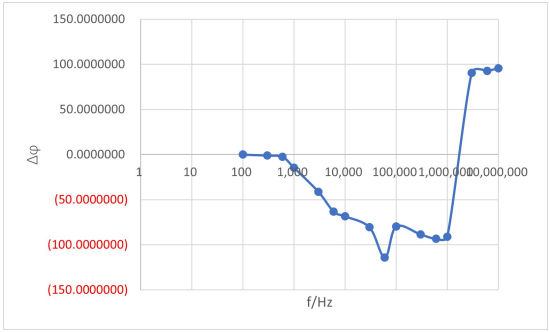


图 12: RL 相频曲线

真实实验：

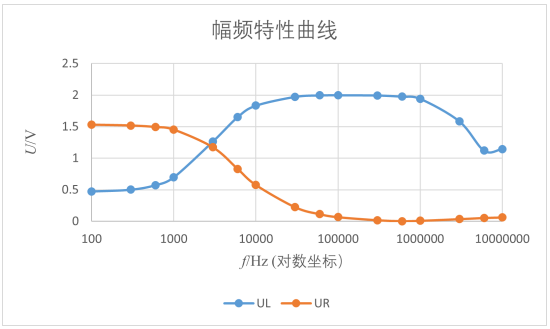


图 13

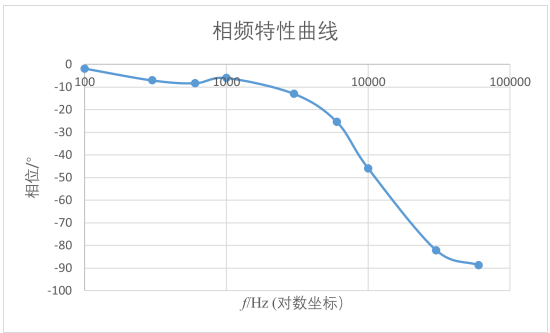


图 14

RLC

仿真:

f/Hz	100	300	600	1,000	3,000	6,000
U_R/V	0.005547	0.016651	0.033377	0.055929	0.17986	0.47186
T/ms	10.2	3.32	1.62	1	0.332	0.168
ΔT/ms	2.5	0.88	0.41	0.24	0.079	0.036
$\Delta\phi$	88.235294	95.421687	91.111111	86.4	85.662651	77.142857

f/Hz	10,000	30,000	60,000	100,000	300,000	600,000
U_R/V	1.827	0.240528	0.109053	0.064149	0.021175	0.010578
T/ms	0.1	0.0332	0.0165	0.00997	0.00336	0.00166
ΔT/ms	0.008	-0.0084	-0.0043	-0.0024	-0.00091	-0.00041
$\Delta\phi$	28.8	-91.084337	-93.818182	-86.65998	-97.5	-88.915663

f/Hz	1,000,000	3,000,000	6,000,000	10,000,000
U_R/V	0.006345	0.002115	0.001057	0.000635
T/ms	0.001	0.000336	0.000163	0.000101
ΔT/ms	-0.000231	-0.000087	-0.000042	-0.000028
$\Delta\phi$	-83.16	-93.214286	-92.760736	-101.630219

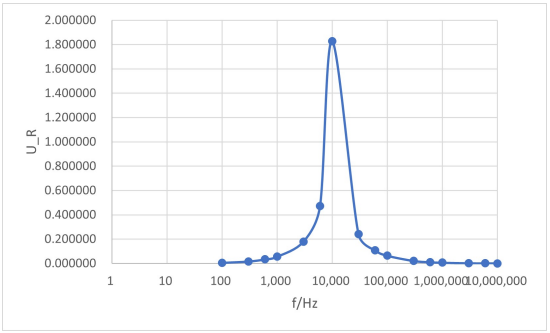


图 15: RLC 幅频曲线

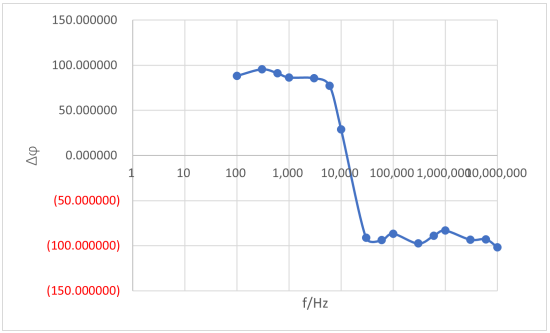


图 16: RLC 相频曲线

真实实验:

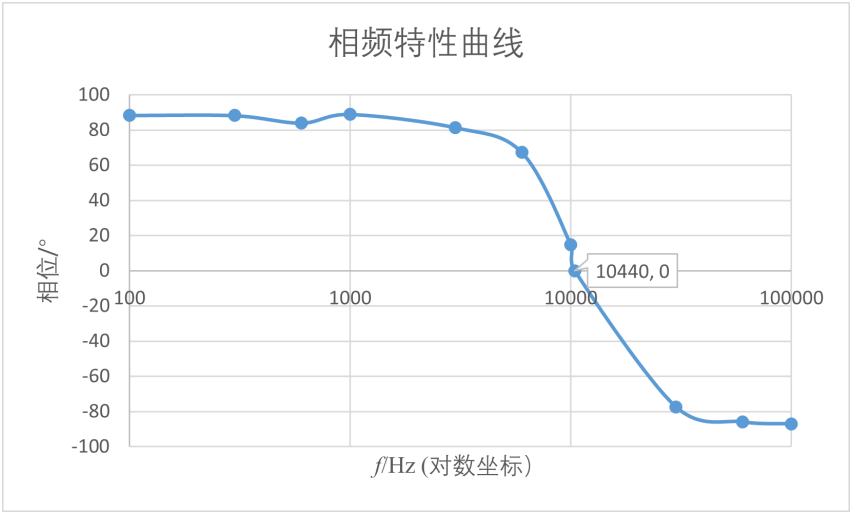


图 17

5.2 利用 Multisim 软件仿真非平衡直流电桥

装置图如图 2，操作过程部分记录如下：

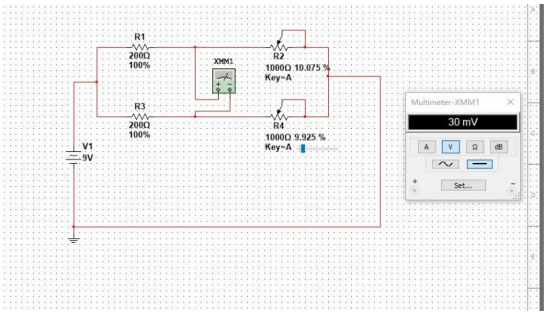


图 18

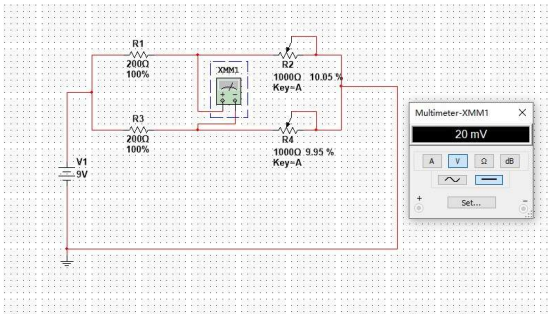


图 19

U_{AB}/mV	40	30	20	10	0
$\Delta R/\Omega$	1.0	0.75	0.5	0.25	0

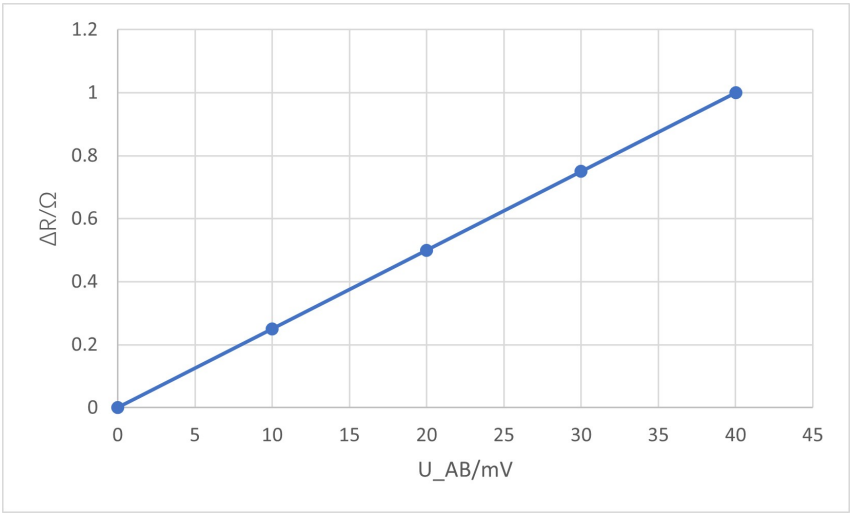


图 20

5.3 利用 Multisim 软件仿真交流电桥测电容

装置图如图 3

结果图:

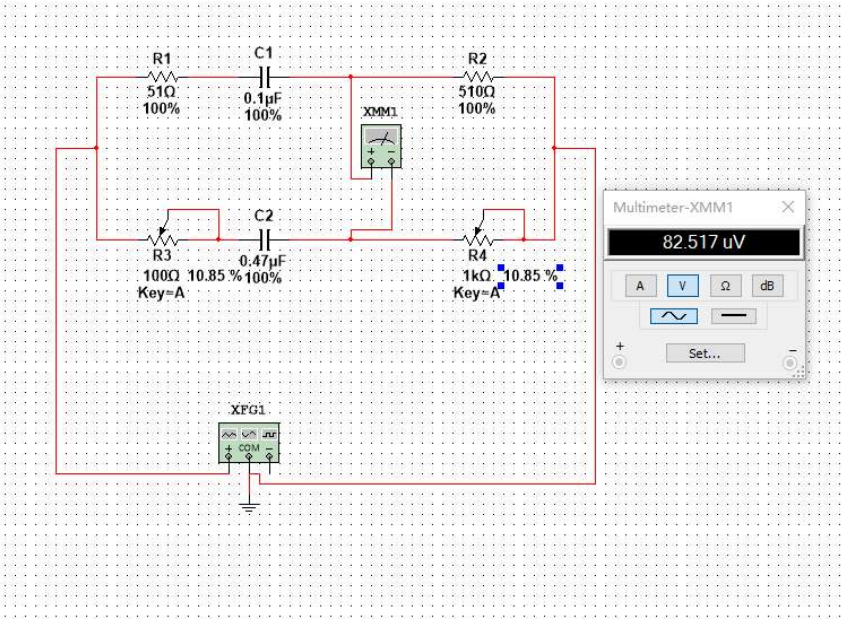


图 21

换臂后装置图:

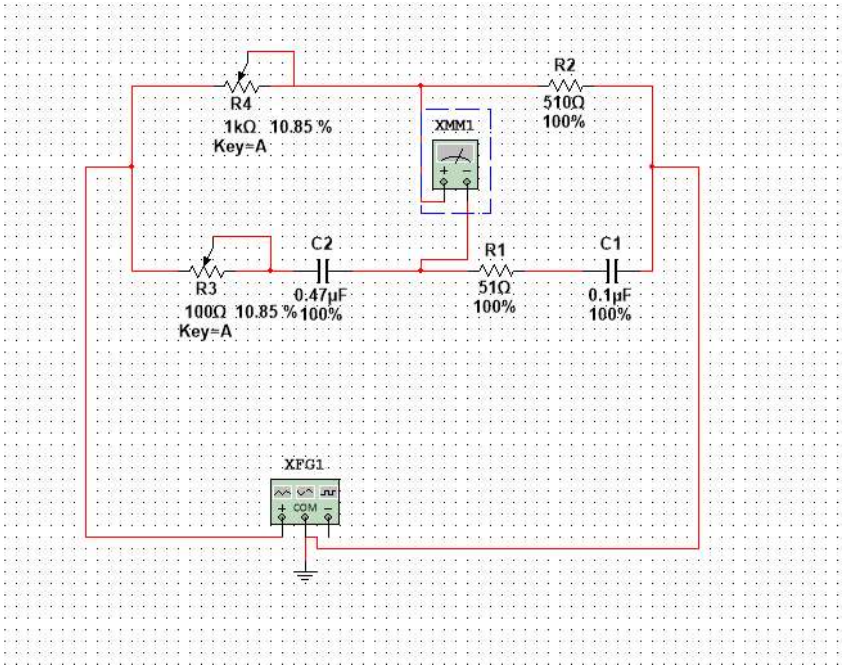


图 22

结果图:

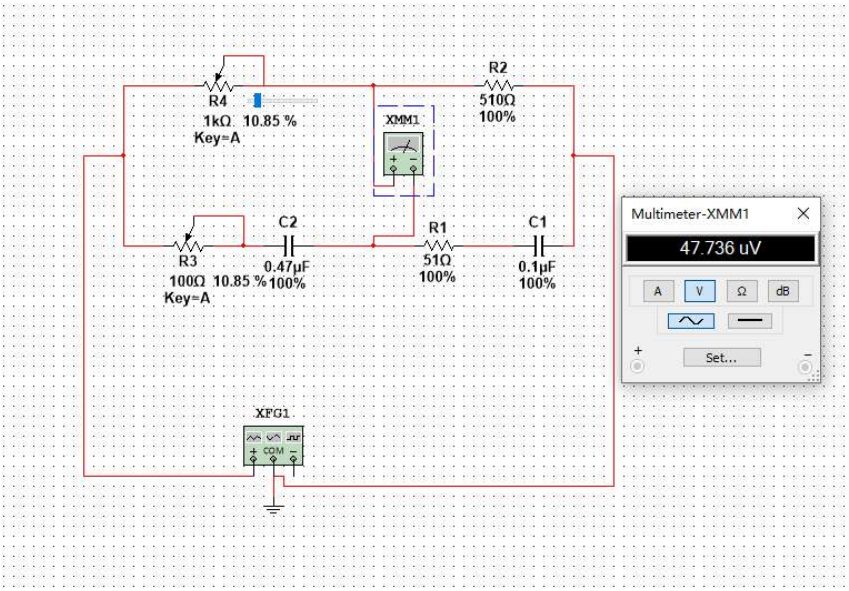


图 23

5.4 利用 Multisim 软件仿真交流电桥测电感

装置图如图 4

结果图:

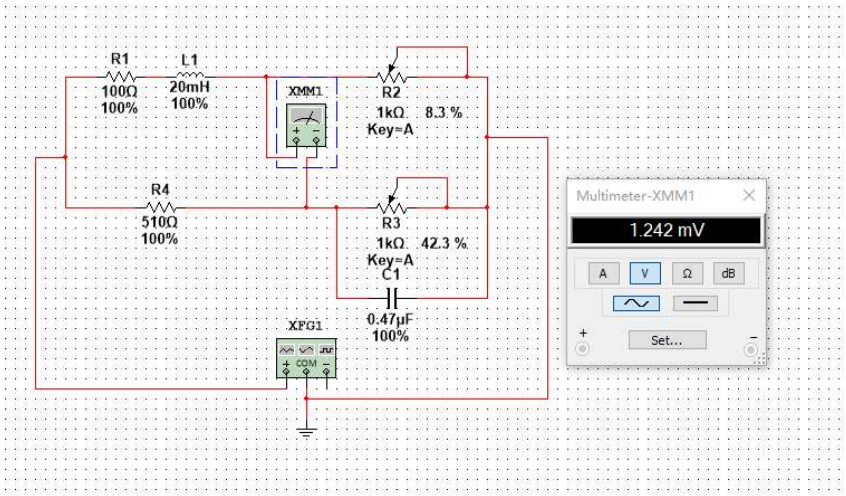


图 24

换臂后装置图:

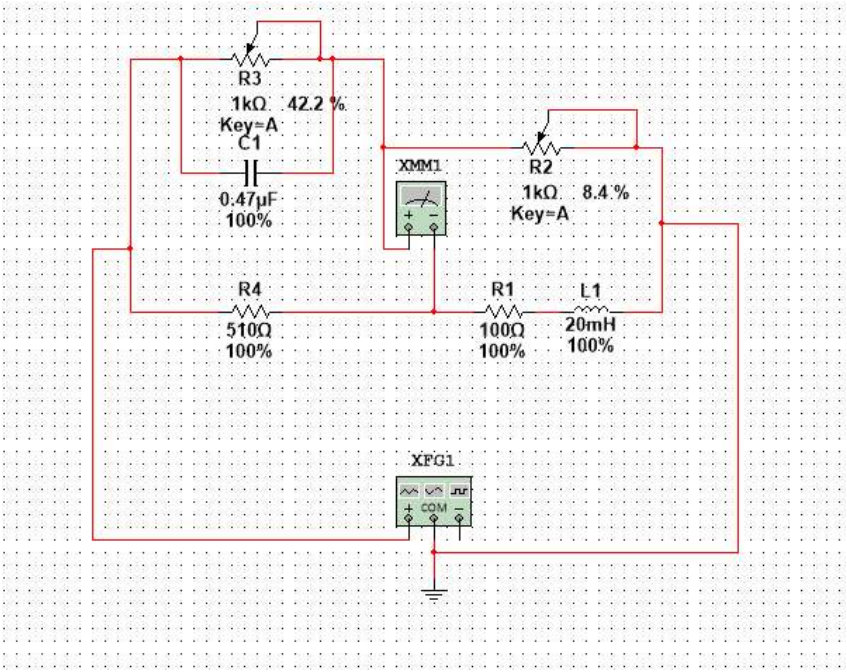


图 25

结果图:

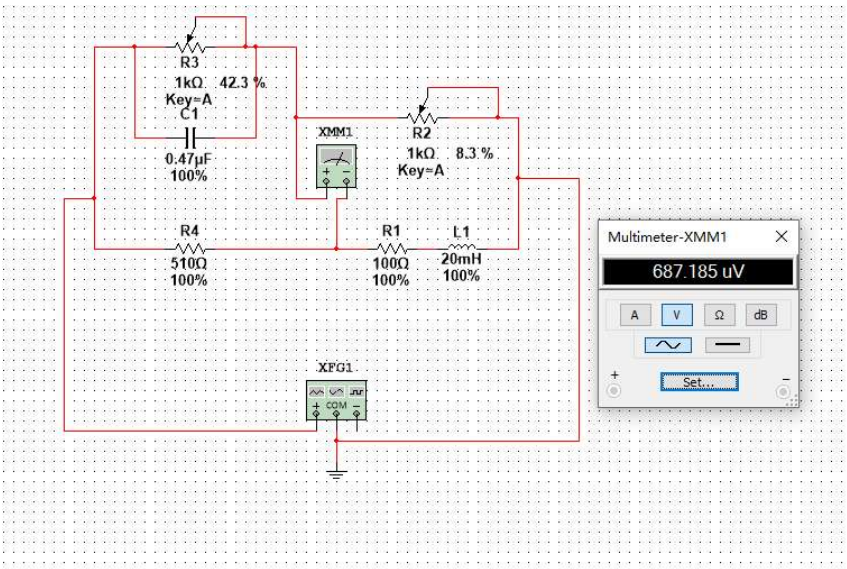


图 26

6 讨论与分析

6.1 RC、RL、RLC 仿真及其对比

RC: 仿真与实际对比，可发现曲线趋势和数值大致一致，故仿真与实验拟合较好，但会发现实际过程中高频时 U_R 异常，推测原因为实际中在高频段时 U_R 记录有误，在数值未完全稳定时记录，而相频在初始时 $300Hz$ 处相频曲线异常高，推测为记录有误，在数值未完全稳定时记录。

RL: 仿真与实验对比，发现幅频曲线趋势大致吻合，但在初始两曲线相交前 U_L 有电压，因为为实际电感含有内阻，在初始时即可分压，而在最后高频时异常，推测因为，频率过高，使电感无法及时充能慢慢趋向电阻性质。而在相频曲线中，仿真曲线在最后会突然回正，推测是由于电感充能后开始放能，而现实电感由于其阻值，还未放电，从而没有出现突变

RLC: 将仿真相频曲线与现实曲线对比可发现其趋势一致，并且突变点相近，说明现实实验与仿真结果吻合较好，而幅频曲线也在相频突变点附近出现极值，即电路出现共振，即仿真操作合理正确

6.2 利用 Multisim 软件仿真非平衡直流电桥

安装好装置后，运行，然后调节变阻器阻值，使其 U_AB 符合题目所给值，说明操作正确

6.3 利用 Multisim 软件仿真交流电桥测电容

安装好装置，调节两个变阻器，使毫伏表读数最小，即在平衡值附近，而换臂后发现平衡时变阻器所调阻值相近，说明测量合理，操作正确

6.4 利用 Multisim 软件仿真交流电桥测电感

安装好装置，调节两个变阻器，使毫伏表读数最小，即在平衡值附近，而换臂后发现平衡时变阻器所调阻值相近，说明测量合理，操作正确

7 思考题

(1) 除了 Multisim，还有什么电路仿真软件？请检索资料，列出 5 个以上软件的名称。

MATLAB/Simulink、LTspice 、PSpice、TINA、Proteus (ISIS)、Altium Designer、KiCad EDA...

(2) 推导直流电桥中 1/4 桥、半桥、全桥的输出电压与桥臂电阻之间的对应公式。

直流电桥由四个桥臂电阻 R_1, R_2, R_3, R_4 组成，电源电压为 U_s，输出电压 U_o

根据基尔霍夫定律，桥臂电流为：

$$I_1 = \frac{U_s}{R_1 + R_2}, \quad I_3 = \frac{U_s}{R_3 + R_4}$$

输出电压为 R_2 与 R_4 的电位差：

$$U_o = I_1 R_2 - I_3 R_4 = U_s \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = U_s \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

1/4 桥

假设仅 $R_1 = R+\Delta R$ 变化，其余桥臂 $R_2 = R_3 = R_4 = R$（初始平衡，$R_1R_4 = R_2R_3$）。代入基本公式：

$$U_o = U_s\frac{(R+\Delta R)R - R\cdot R}{(R+\Delta R+R)(R+R)} = U_s\frac{R\Delta R}{(2R+\Delta R)\cdot 2R}$$

因 $\Delta R \ll R$，忽略 $2R+\Delta R \approx 2R$，得：

$$U_o \approx U_s\frac{\Delta R}{4R} = \frac{U_s}{4}\cdot\frac{\Delta R}{R}$$

半桥（双臂工作）

情况 1：相邻臂变化（$R_1 = R+\Delta R$，$R_2 = R-\Delta R$，$R_3 = R_4 = R$）代入基本公式：

$$U_o = U_s\frac{(R+\Delta R)R - (R-\Delta R)R}{(R+\Delta R+R-\Delta R)(R+R)} = U_s\frac{2R\Delta R}{2R\cdot 2R} = U_s\frac{\Delta R}{2R}$$

情况 2：对臂变化（$R_1 = R+\Delta R$，$R_4 = R+\Delta R$，$R_2 = R_3 = R$）代入基本公式并忽略高阶小项 $(\Delta R)^2$：

$$U_o \approx U_s\frac{2R\Delta R}{4R^2} = U_s\frac{\Delta R}{2R}$$

综上，半桥输出公式为：

$$U_o \approx \frac{U_s}{2}\cdot\frac{\Delta R}{R}$$

全桥（四臂工作）

假设 $R_1 = R+\Delta R$，$R_2 = R-\Delta R$，$R_3 = R-\Delta R$，$R_4 = R+\Delta R$（相邻臂反变，对臂同变），代入基本公式：

$$U_o = U_s\frac{(R+\Delta R)(R+\Delta R) - (R-\Delta R)(R-\Delta R)}{(2R)(2R)} = U_s\frac{4R\Delta R}{4R^2} = U_s\cdot\frac{\Delta R}{R}$$

(3) 列举若干非平衡直流电桥的应用实例。

应变测量、电子秤/力传感器、温度测量、位移测量、气体成分检测、湿度测量...

(4) 交流电桥测电容、电感时，为什么要调换桥臂的位置重复测量？

为了减小或消除桥臂元件固有的系统误差，提高测量精度。

在交流电桥中，除了主要的电容/电感参数外，元件本身还存在损耗电阻或分布电容/电感等寄生参数。此外，连接导线间的互感等也会引入误差。通过调换桥臂位置，并重新调节电桥至平衡，可以得到两组平衡方程。

对这两组平衡方程进行联立求解，可以：

①消除已知标准元件的系统误差（如其自身的损耗）。

②消除引线阻抗、分布参数等因素带来的同相误差。

最终计算出的待测元件的参数值将比单次测量更加准确

参考文献

[1] 沈韩. 大学物理实验[M]. 北京: 科学出版社, 2024.

附录: 原始数据

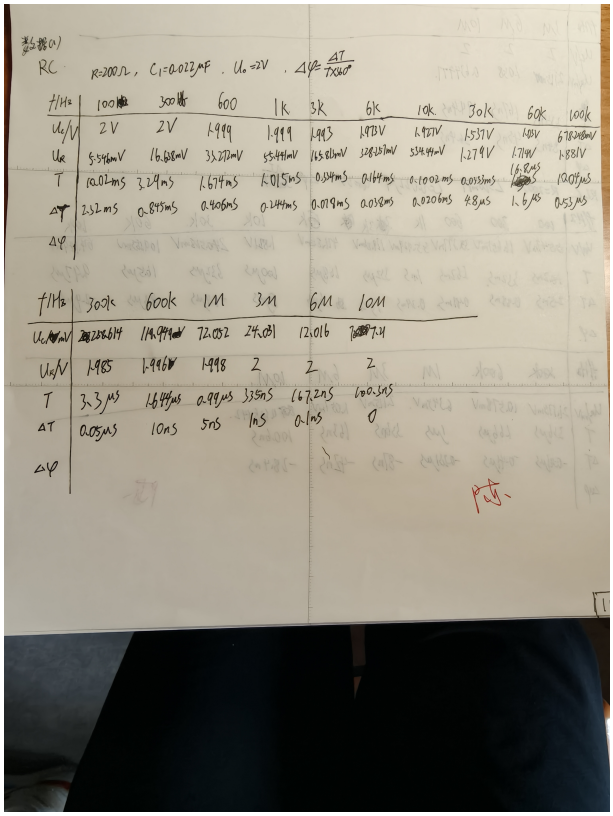


图 27

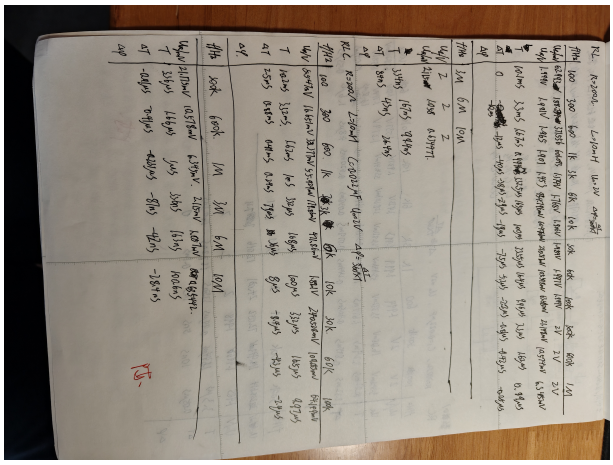


图 28

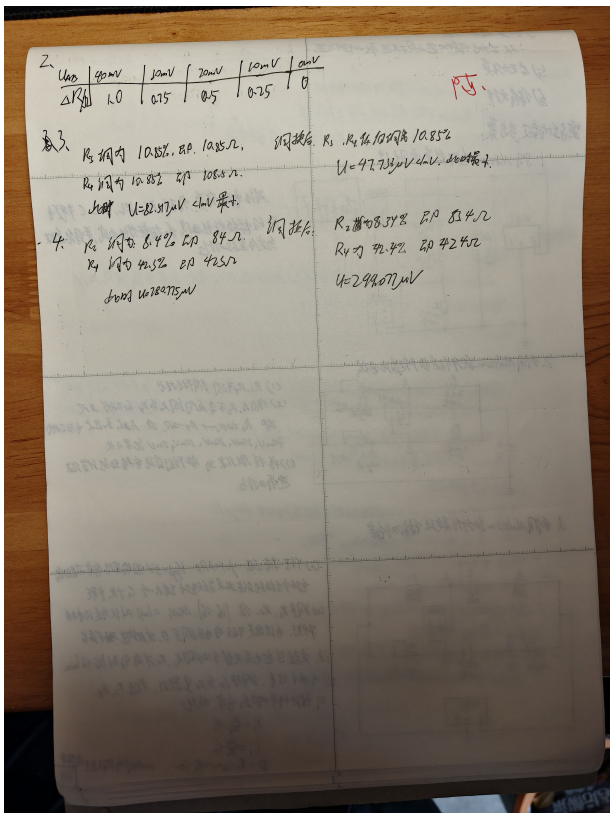


图 29