

# 东南大学电工电子实验中心 实验报告

课程名称： 电路实验

## 第 8 次实验

实验名称： 黑箱电路元件判别及参数测试

院（系）： 自动化学院      专      业： 自动化

姓      名： 陈鲲龙      学      号： 08022311

实   验   室： 105      实验组别：

同组人员：       实验时间： 2023 年 12 月 26 日

评定成绩：       审阅教师：

## 一、实验目的

- (1) 运用欧姆定律和元件的阻抗特性解决实际问题。
- (2) 学会根据需求选择激励源的类型、设定频率的高低，简化测量过程、提高测量精度。
- (3) 尝试从分析任务要求着手，应用已经学习过的知识，寻找解决问题的方法；同时也希望拓宽视野，体验解决问题方法的多样性。学习体验“分析任务-调查研究-设计电路-构建平台-实验测试-总结分析”的科学研究方法。

## 二、实验原理

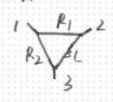
(1) 至少一个电阻条件下，枚举由 R、L、C 所有可能构成的“Y”型网络，分析每种可能网络各端口之间（1-2，2-3，1-3）的直流特性和交流特性（交流阻抗、幅度-频率，相位-频率）：

Y型	直流	交流特性
① RRL 	$1-2: R_{12} = R_1 + R_2$ $1-3: R_{13} = R_1 + r$ $2-3: R_{23} = R_2 + r$	$Z_{12} = R_1 + R_2$ $Z_{13} = R_1 + r + j\omega L$ $Z_{23} = R_2 + r + j\omega L$ $\omega \uparrow,  Z  \uparrow, \Delta \varphi \uparrow$ $\text{感性 } 0 < \varphi < 90^\circ$
② RRC 	$1-2: R_{12} = R_1 + R_2$ $1-3: R_{13} = \infty$ $2-3: R_{23} = \infty$	$Z_{12} = R_1 + R_2$ $Z_{13} = R_1 - j\frac{1}{\omega C}$ $Z_{23} = R_2 - j\frac{1}{\omega C}$ $\omega \uparrow,  Z  \downarrow, \Delta \varphi \downarrow$ $\text{容性 } \varphi < 0$ $ \varphi  < 90^\circ$
③ RLL 	$1-2: R_{12} = R + r_1$ $1-3: R_{13} = R + r_2$ $2-3: R_{23} = r_1 + r_2$	$Z_{12} = R + r_1 + j\omega L_1$ $Z_{13} = R + r_2 + j\omega L_2$ $Z_{23} = r_1 + j\omega L_1 + r_2 + j\omega L_2$ $\omega \uparrow,  Z  \uparrow, \Delta \varphi \uparrow,  \varphi  < 90^\circ$ $\omega \uparrow,  Z  \uparrow, \Delta \varphi = 90^\circ$ $\text{感性 } 0 < \varphi < 90^\circ$
④ RCC 	$1-2: R_{12} = \infty$ $1-3: R_{13} = \infty$ $2-3: R_{23} = \infty$	$Z_{12} = R - j\frac{1}{\omega C_1}$ $Z_{13} = R - j\frac{1}{\omega C_2}$ $Z_{23} = j\frac{1}{\omega C_1} - j\frac{1}{\omega C_2}$ $\omega \uparrow,  Z  \downarrow, \Delta \varphi \downarrow$ $\omega \uparrow,  Z  \downarrow, \text{感性 } 0 < \varphi < 90^\circ$
⑤ RLC 	$1-2: R_{12} = R + r$ $1-3: R_{13} = \infty$ $2-3: R_{23} = \infty$	$Z_{12} = R + r + j\omega L$ $Z_{13} = R - j\frac{1}{\omega C}$ $Z_{23} = r + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}$ $\omega \uparrow,  Z  \uparrow, \Delta \varphi \uparrow$ $\omega \uparrow,  Z  \downarrow, \Delta \varphi \downarrow$ $\omega \rightarrow 0 \text{ 或 } \infty,  Z  \rightarrow \infty$ $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ 时 }  Z _{\min} = r, \Delta \varphi = 0$ $\omega < \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ 感性 } 0 < \varphi < 90^\circ$ $\omega > \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ 容性 } \varphi < 0$

(2) 至少一个电阻条件下，枚举由 R、L、C 所有可能的“△”型网络，分析每种可能网络各端口之间（1-2，2-3，1-3）的直流特性和交流特性（交流阻抗、幅度-频率，相位-频率）；

**“△”型**

① RRL:



直流:

$$1-2: R_{12} = R_1 \parallel (R_2 + R_3)$$

$$1-3: R_{13} = R_2 \parallel (R_1 + R_3)$$

$$2-3: R_{23} = R_3 \parallel (R_1 + R_2)$$

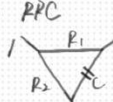
交流特性:

$$Z_{12} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 + R_3 j\omega L}} \quad \omega \uparrow, |Z| \rightarrow R_1, \phi \text{ 不变}$$

$$Z_{13} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1 + R_3 j\omega L}} \quad \omega \uparrow, |Z| \rightarrow R_2, \phi \text{ 不变}$$

$$Z_{23} = \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_1 + R_2 j\omega L}} \quad \omega \uparrow, |Z| \rightarrow R_3, \phi \text{ 不变}$$

② RPC:



直流:

$$1-2: R_{12} = R_1$$

$$1-3: R_{13} = R_2$$

$$2-3: R_{23} = R_1 + R_2$$

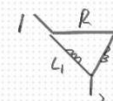
交流特性:

$$Z_{12} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 - j\omega C}} \quad \omega \uparrow, |Z| \rightarrow R_1 \parallel R_2, \phi \text{ 不变}$$

$$Z_{13} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1 - j\omega C}} \quad \omega \uparrow, |Z| \rightarrow R_1 \parallel R_2, \phi \text{ 不变}$$

$$Z_{23} = \frac{1}{\frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{-j\omega C}} \quad \omega \uparrow, |Z| \rightarrow \infty, \phi \rightarrow 0$$

③ RLL:



直流:

$$1-2: R_{12} = R \parallel (R_1 + R_2)$$

$$1-3: R_{13} = R_1 \parallel (R + R_2)$$

$$2-3: R_{23} = R_2 \parallel (R + R_1)$$

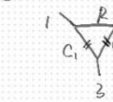
交流特性:

$$Z_{12} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1 j\omega L + R_2 j\omega L}} \quad \omega \uparrow, |Z| \rightarrow R, \phi \downarrow$$

$$Z_{13} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R + R_2 j\omega L}} \quad \omega \uparrow, |Z| \rightarrow \infty, \phi \downarrow$$

$$Z_{23} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R + R_1 j\omega L}} \quad \omega \uparrow, |Z| \rightarrow \infty, \phi \downarrow$$

④ RCC:



直流:

$$1-2: R_{12} = R$$

$$1-3: R_{13} = \infty$$

$$2-3: R_{23} = \infty$$

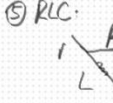
交流特性:

$$Z_{12} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{-j\omega C_1 - j\omega C_2}} \quad \omega \uparrow, |Z| \rightarrow 0, \phi \downarrow$$

$$Z_{13} = \frac{1}{\frac{1}{-j\omega C_1} + \frac{1}{R - j\omega C_2}} \quad \omega \uparrow, |Z| \rightarrow \infty, \phi \downarrow$$

$$Z_{23} = \frac{1}{\frac{1}{-j\omega C_2} + \frac{1}{R - j\omega C_1}} \quad \omega \uparrow, |Z| \rightarrow \infty, \phi \downarrow$$

⑤ RLC:



直流:

$$1-2: R_{12} = R$$

$$1-3: R_{13} = R$$

$$2-3: R_{23} = R + R$$

交流特性:

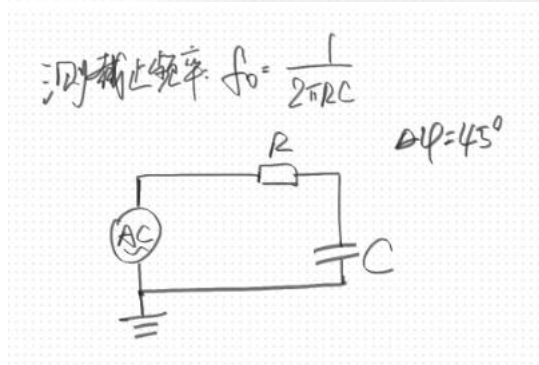
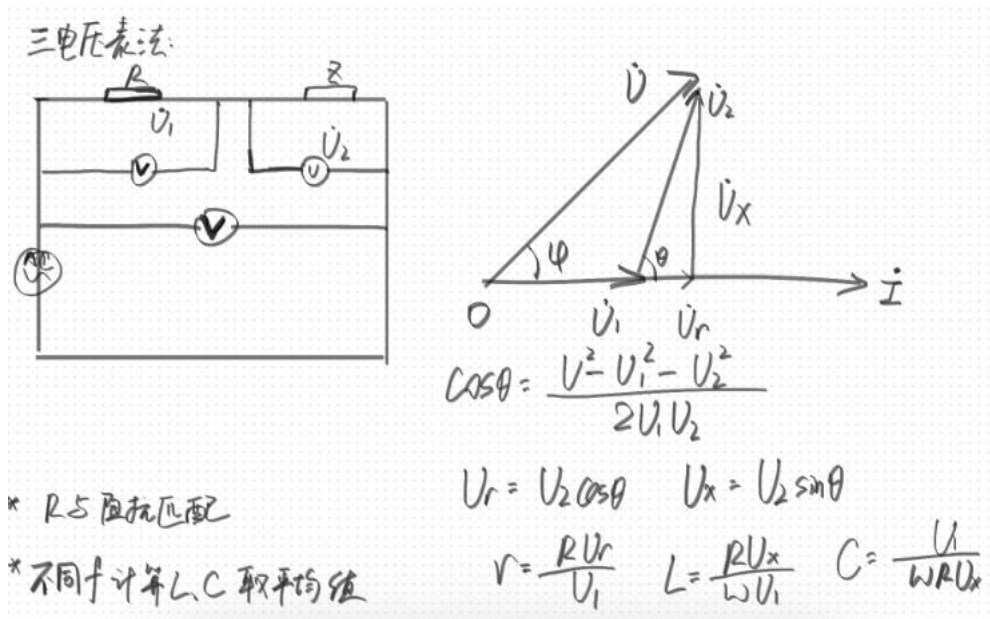
$$Z_{12} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R j\omega L - j\omega C}} \quad \omega \uparrow, |Z| \rightarrow R$$

$$Z_{13} = \frac{1}{\frac{1}{R j\omega L} + \frac{1}{R - j\omega C}} \quad \omega \uparrow, |Z| \rightarrow R$$

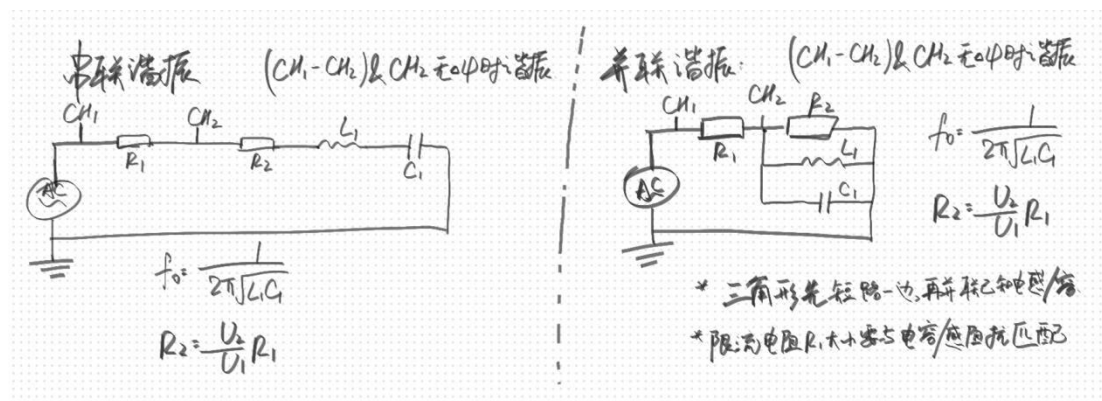
$$Z_{23} = \frac{1}{\frac{1}{-j\omega C} + \frac{1}{R + R j\omega L}} \quad \omega \uparrow, |Z| \rightarrow 0$$

$\omega < \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$\omega > \frac{1}{\sqrt{LC}}$
$\phi \downarrow$	$\phi_{min}$	$\phi \uparrow$
$\phi \uparrow$	$\phi_{max}$	$\phi \downarrow$
$\phi \uparrow$	$\phi_{max}$	$\phi \downarrow$

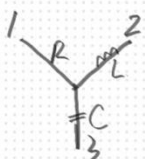
(3) 复习元件参数测量、三电压法测交流阻抗测量、电路频率响应实验的相关内容；



(4) 复习 RLC 串联谐振相关知识及串联判断测量方法；查找资料，了解 RLC 并联谐振相关知识及并联谐振判断测量方法。



(5) “Y”型连接, 假设三个元件分别为 RLC, 写出该电路中各元件性质的判断过程和元件参数计算过程;



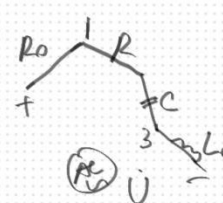
直流:  $R_{12} = R + r$   
 $R_{13} = \infty$   
 $R_{23} = \infty$

交流:  $Z_{12} = R + r + j\omega L$   
 $|Z| = \sqrt{(R+r)^2 + (\omega L)^2}$   
 $\varphi = \arctan\left(\frac{\omega L}{R+r}\right)$   
 $\omega = 0, Z = R + r$   
 $\omega \uparrow: |Z| \uparrow, \varphi \uparrow \text{ 且 } \varphi < 90^\circ$

$Z_{13} = R - j\frac{1}{\omega C}$   
 $|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$   
 $\varphi = \arctan\left(\frac{1}{\omega CR}\right)$   
 $\omega \uparrow, |Z| \downarrow, \varphi \downarrow$

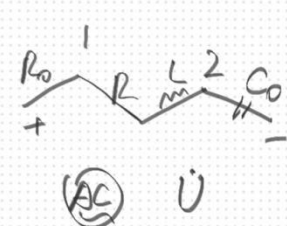
$Z_{23} = r + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}$   
 $\omega > \frac{1}{\sqrt{LC}}: |Z| \uparrow \rightarrow \infty, \text{感性}$   
 $\omega < \frac{1}{\sqrt{LC}}: \omega \rightarrow 0, |Z| \uparrow \rightarrow \infty, \text{容性}$

利用串联谐振测元件参数:



$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{CL_0}}$  已知  $L_0$  可求  $C$  值  
 谐振频率  $C = \frac{1}{L_0 4\pi^2 f_0^2}$

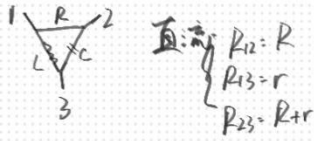
$\frac{R_0}{U_0} = \frac{R}{U_R}$  可求  $R$  值  
 $R = \frac{U_R R_0}{U_0}$



(AC)  $\dot{U}$   
 同理右边求  $C$



(6) “△”型连接, 假设三个元件分别为 RLC, 写出该电路中各元件性质的判断过程和各元件参数计算过程。



直接: 
$$\begin{cases} R_{12} = R \\ R_{13} = r \\ R_{23} = R+r \end{cases}$$

或: 流

$$Z_{12} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{r+j\omega L - j\frac{1}{\omega C}}}$$

$$\begin{cases} \omega \rightarrow \infty & Z=R \\ \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} & Z=0 \\ \omega < \frac{1}{\sqrt{LC}} & \omega \uparrow, |Z - \frac{1}{\omega C}| \downarrow, \varphi \downarrow \\ \omega > \frac{1}{\sqrt{LC}} & \omega \uparrow, |Z - \frac{1}{\omega C}| \uparrow, \varphi \uparrow \end{cases}$$

$$Z_{13} = \frac{1}{\frac{1}{r+j\omega L} + \frac{1}{R - j\frac{1}{\omega C}}}$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{R^2 C}{L - \frac{1}{\omega^2 C}}\right)$$

$$\begin{cases} 0 < \omega < \frac{1}{\sqrt{LC}} & \omega \uparrow, |\varphi| \uparrow \\ \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} & \varphi_{\max} \\ \omega > \frac{1}{\sqrt{LC}} & |\varphi| \downarrow \\ \omega \rightarrow \infty & Z_{13}=R \end{cases}$$

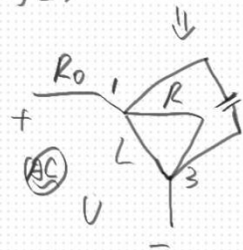
$$Z_{23} = \frac{1}{\frac{1}{-j\frac{1}{\omega C}} + \frac{1}{R+r+j\omega L}}$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{R^2}{\omega L^2 - \frac{1}{C}}\right)$$

$$\begin{cases} 0 < \omega < \frac{1}{\sqrt{LC}} & \omega \uparrow, \varphi \uparrow \\ \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} & \varphi_{\max} \\ \omega > \frac{1}{\sqrt{LC}} & \varphi \downarrow \\ \omega \rightarrow \infty & Z \rightarrow 0 \end{cases}$$

利用并联谐振测元件参数:

测 L, 先短路 23



再并联已知  $C_0$

$$\text{谐振时 } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}$$

$$\therefore L = \frac{1}{C_0 4\pi^2 f_0^2}$$

$$R = \frac{U_R I_0}{U_0}$$

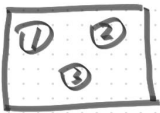
测 C 同理

先短路再并联已知  $L_0$

### 三、实验内容


1. 先测三个端口的静态电阻，以判断黑箱内拓扑结构及元件类型：

1. 万用表测电阻  
静态



① 24Ω ② 0.82Ω ③ 1.64Ω

发现电阻较小，无∞Ω，无≥50Ω的  
由预习报告中罗列的情况  
符合 RLL 三角形电路 →

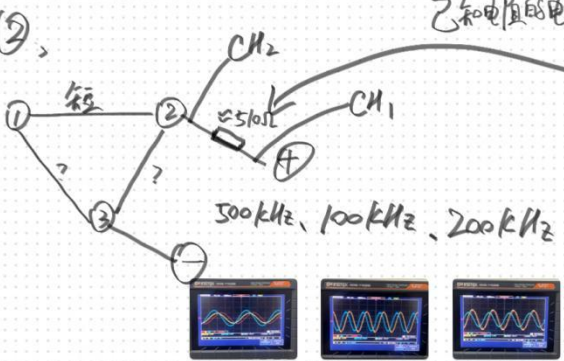

$$\begin{cases} R_{12} = R // (r_1 + r_2) < r_1 + r_2 \\ R_{13} = r_1 // (R + r_2) < r_1 \\ R_{23} = r_2 // (R + r_1) < r_2 \end{cases}$$

可以见到三个端口的电阻都很小，对比上文预习部分的枚举，发现只可能是三角形 RLL 如上图所示，否则都会出现至少大于 50 欧姆的电阻值或者是电容导致的断路电阻无穷大。

2. 再判断哪一路才是电阻：

2. 判断哪一路为 R?

短接①②，



已知电阻的电压

500kHz、100kHz、200kHz 时

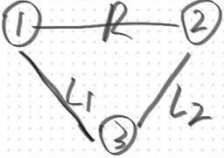
示波器 math (红色) 黑箱电压 (蓝色 CH2)

$(CH_1 - CH_2)$  与  $CH_2$

相位差都接近 90°

短接的①②边中是电阻

结论：

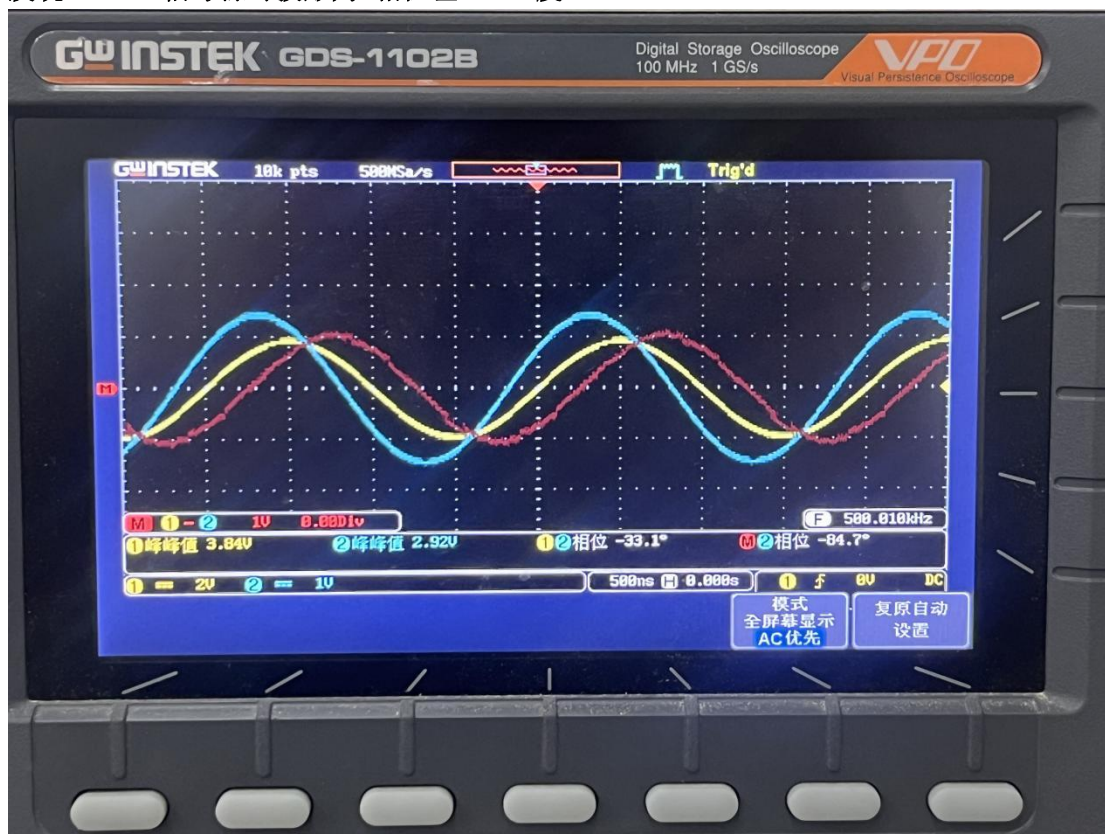


依次短路 1-2、1-3、2-3 端口，然后看黑箱电流、电压的相位差，电流的相位就是外界已知电阻的电压，它可以用示波器的 math 功能通道一减去通道二获得，如果发现黑箱电流电压相位差不管频率是多大始终为接近 90 度，那就说明此时被短接的那一路内元件是电阻。

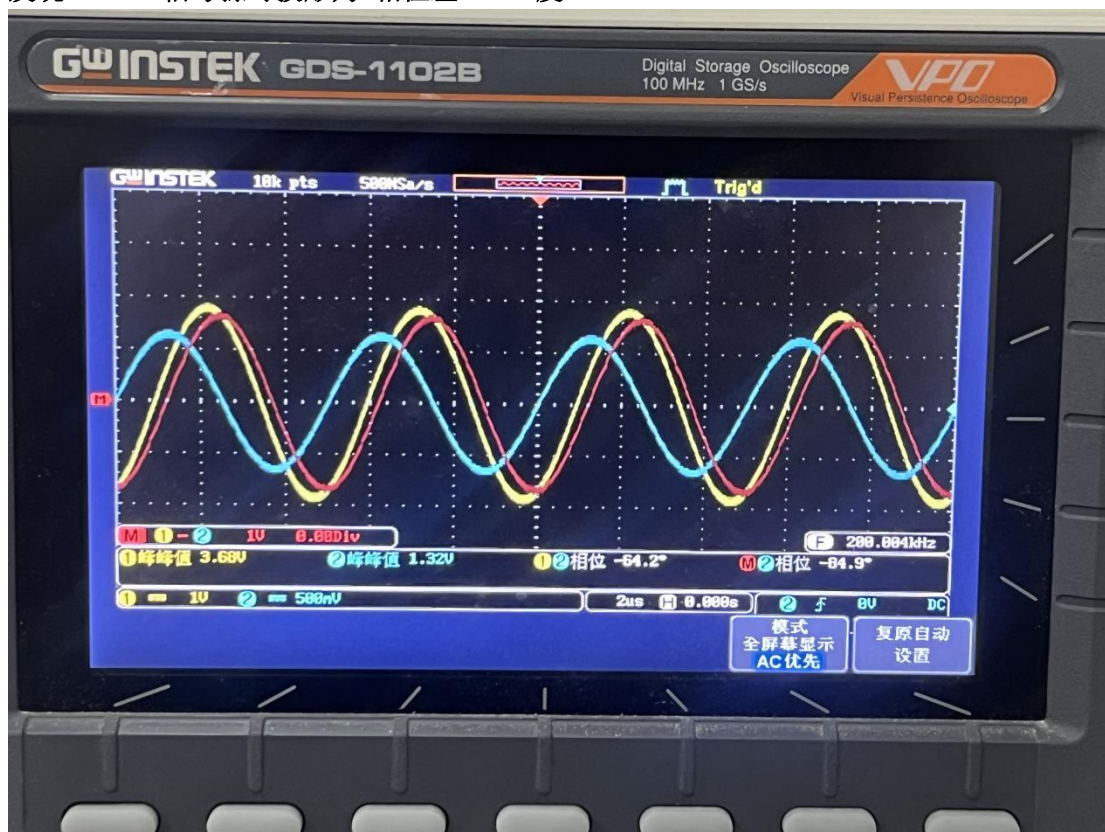


在我短接我黑箱 1、2 端口时：

发现 500kHz 信号源时波形为：相位差-84.7 度

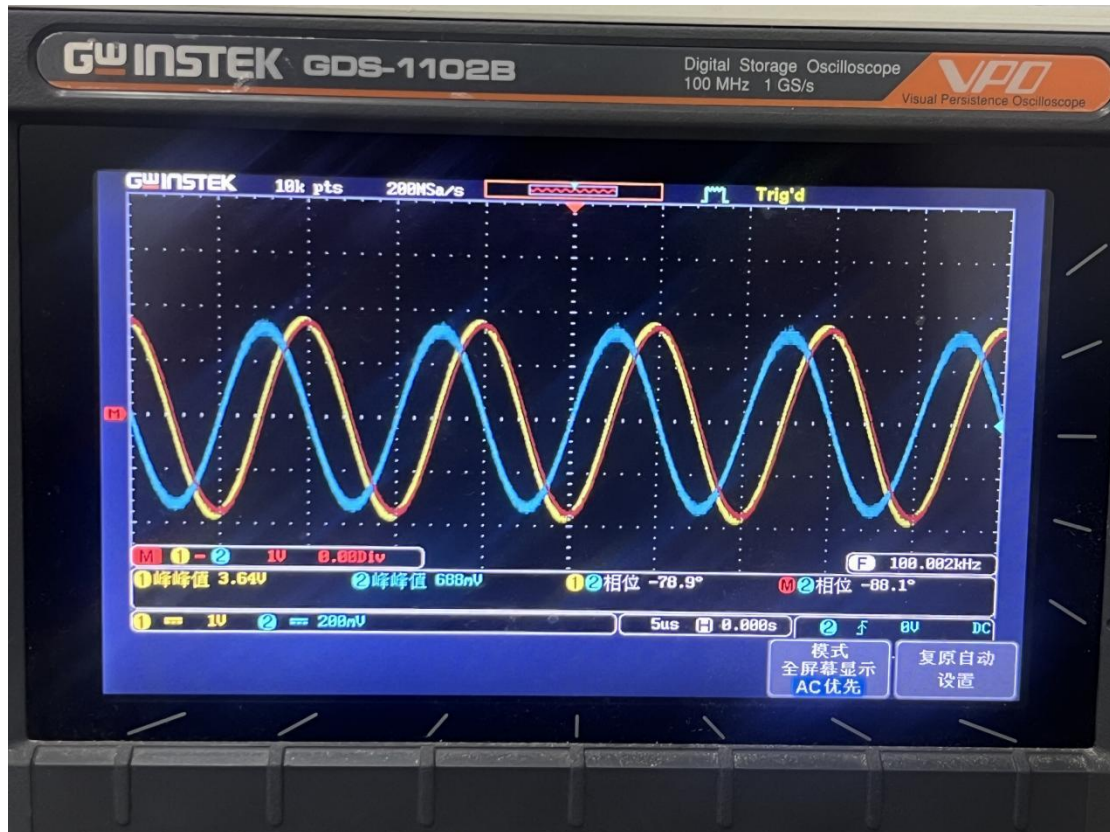


发现 200kHz 信号源时波形为：相位差-84.9 度

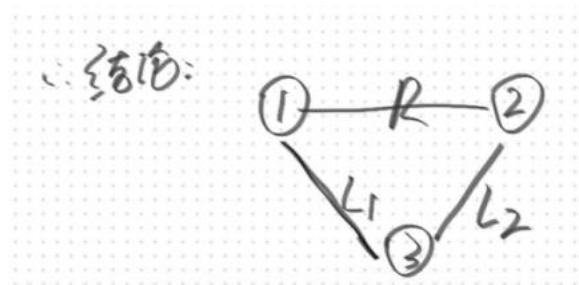




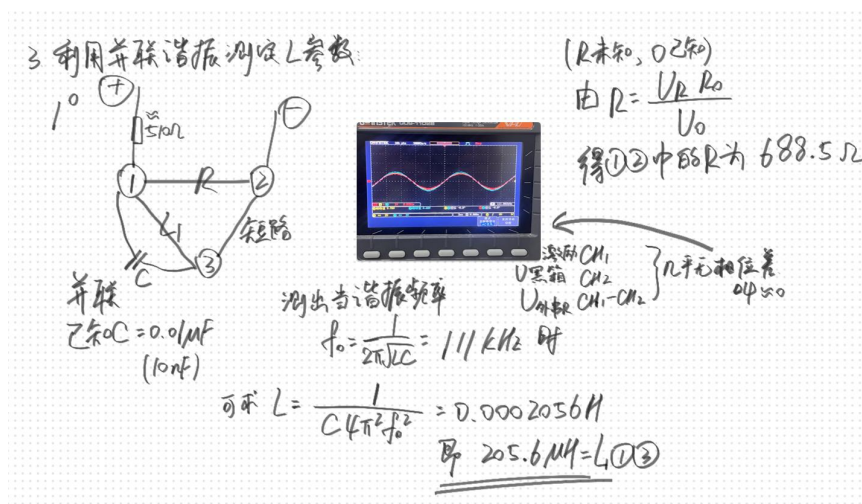
发现 100kHz 信号源时波形为:相位差-88.1 度



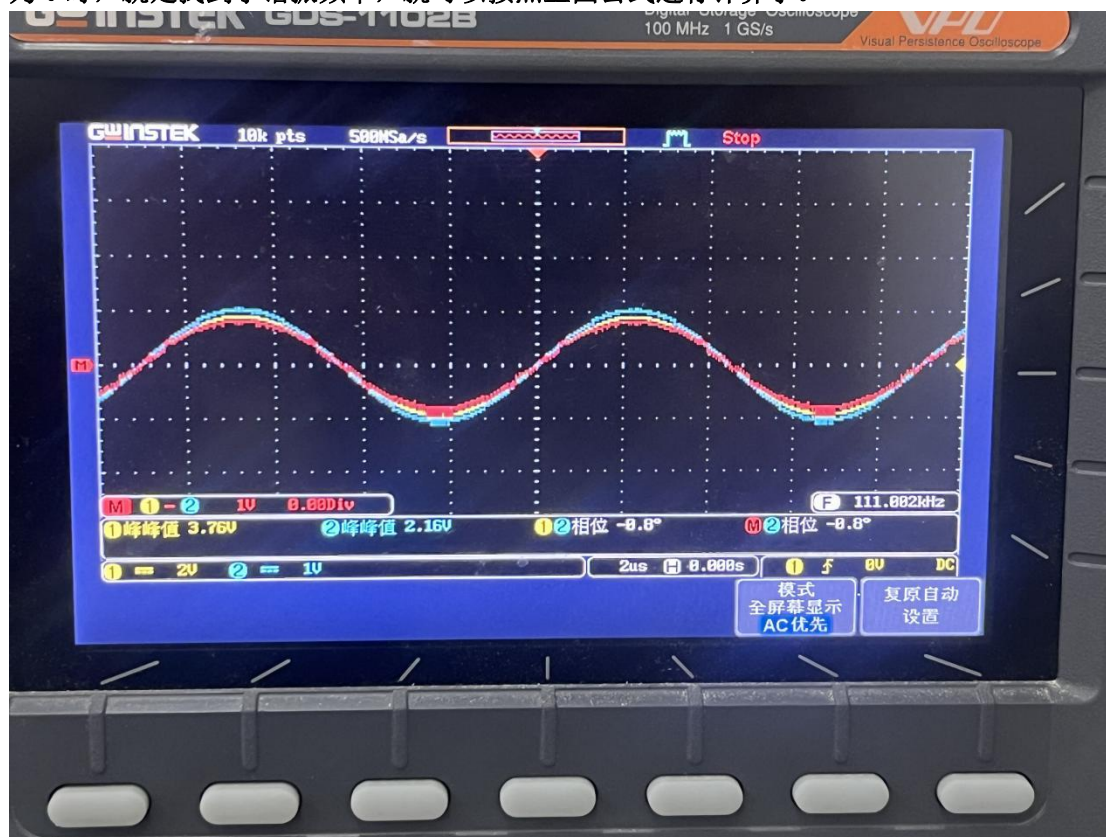
黑箱电流电压相位差均接近 90 度，此时我短路的是端口 1、2，所以结论是 1、2 端口之间的元件是电阻。如下图：



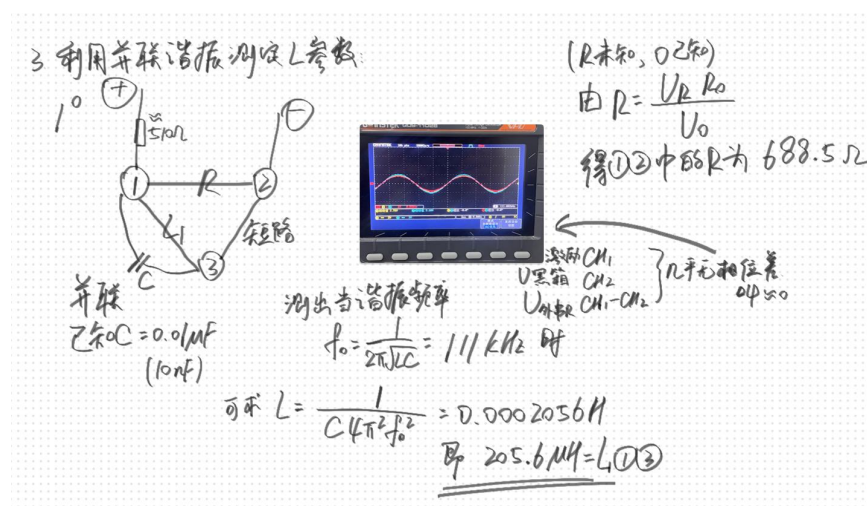
3. 利用并联谐振测量两个电感的参数，先测左边 1、3 端口之间的电感：



我短接 2、3 端口，然后在待测端口 1、2 上再并联一个已知电容大小为  $0.01\mu\text{F}$ ，这样并联谐振电路就完成了，然后调整频率，观察示波器上：通道一：激励电压、通道二：黑箱电压、通道一减通道二：外串已知电阻的电压（即黑箱电流波形），三个波形相位差几乎都为 0 时，就是找到了谐振频率，就可以按照上图公式进行计算了。

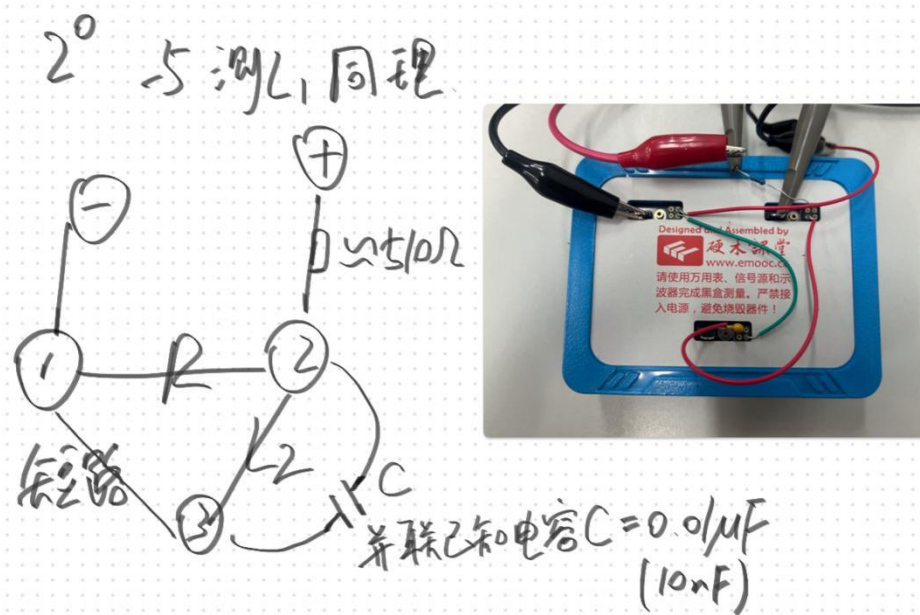


可以看到 111kHz 时，相位差  $-0.8^\circ$ ，几乎为 0，找到谐振频率，并用并联谐振的公式计算电感参数，此时由于谐振，电感电容阻抗相互抵消，两者并联的部分相当于短路，所以可以视作外串已知电阻和黑箱内待测电阻的串联，所以可以顺便用分压公式算出电阻的值，在下文测第二个电感时，还会算一遍电阻，两次取平均值减小误差。过程如下图：

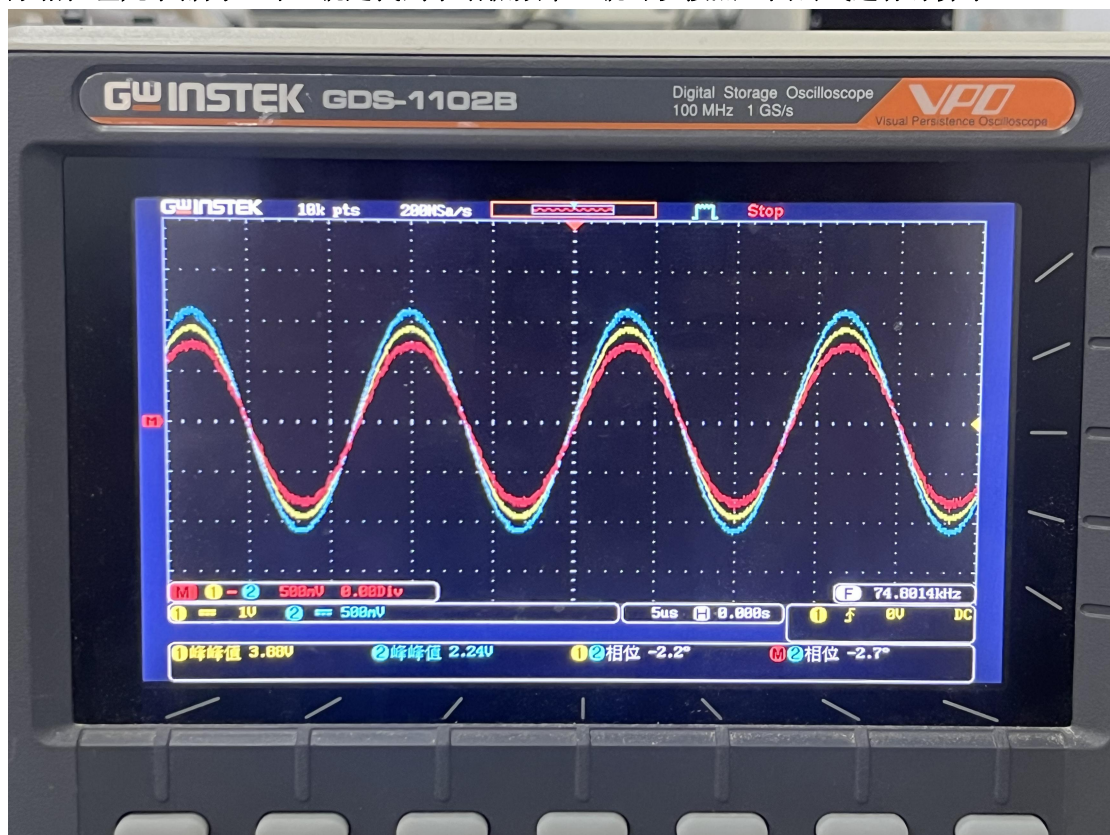




4. 还是利用并联谐振，再测右边 2、3 端口之间的电感：



与测左边电感同理，短接 1、3 端口，然后在待测端口 2、3 上再并联一个已知电容大小为  $0.01\mu\text{F}$ ，这样并联谐振电路就完成了，然后调整频率，观察示波器上：通道一：激励电压、通道二：黑箱电压、通道一减通道二：外串已知电阻的电压（即黑箱电流波形），三个波形相位差几乎都为 0 时，就是找到了谐振频率，就可以按照上图公式进行计算了。



激励 CH1  
U黑箱 CH2  
U外联 CH-CH2 } 几乎无相位差  
0.450

测出谐振频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 74.8 \text{ kHz}$$

可求  $L = \frac{1}{C4\pi^2 f_0^2} = 0.004527 \text{ H}$

即 452.7 μH = L<sub>2</sub>③

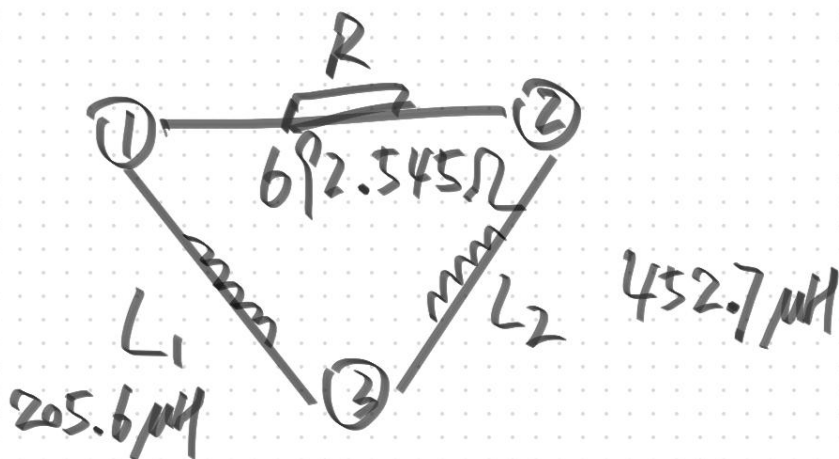


由  $R = \frac{U_R R_0}{U_0}$  得①②中的R为 696.59 Ω

(R未知, 0已知)

\*所以最终黑箱元件参数测量结论是:

结论:



#### 四、实验使用仪器设备（名称、型号、规格、编号、使用状况）

SDG1032X 信号源

SDG3055X-E 万用表

GDS1102B 示波器

Multisim 软件



## 五、实验总结

### （实验出现的问题及解决方法、思考题（如有）、收获体会等）

本次实验是黑箱实验，黑箱实验在操作时要注意的事项很多，主要原因就是对于未知的元件性质，在加信号源，等等其他操作时要注意保护电路，防止短路，如外串已知电阻的步骤时很重要的，其次在上信号源之前，万用表的静态测量也十分重要，它的结果能帮助排除、判断所有可能的情况，将判断范围缩小，也有利于帮我们知道如何保护电路。由于我拿到的黑箱是三角形 RLL 结构的，所以我对三角形连接电路学习到很多，在研究三角连接电路黑箱时，我们要灵活运用端口之间的短接，这样能帮我们减少未知量的影响，也能帮助我们识别端口之间的元件性质，比如本实验中的黑箱电流电压相位差判断哪两个端口之间是电阻元件；其次，又由于我这次拿到的黑箱中电感较多，所以我对寻找谐振频率的理解加深了，在找谐振频率时，我们可以从 1kHz 等适中的频率开始我们的寻找，过小过大的频率不仅误差大，而且波形很可能不稳定，那么示波器的测量也不会准确，还有要注意的要点就是电感频率越大，阻抗越大，但电感线圈之间可能有类似电容功能的存在，所以和理论推算不一样的就是频率太大时，电感的阻抗反而变小了，所以在该改变频率时，我们的跨度、步长要小一些，要避免超出正常范围的值。

## 六、参考资料（预习、实验中参考阅读的资料）

《电路基础》第 6 版