

《基础物理实验》实验报告

实验名称 RLC电路的谐振与暂态过程 指导教师 李国强
姓 名 李果 学号 2022K8009906028 分班分组及座号 1-09-8 号 (例: 1-04-5号)
实验日期 2023 年 10 月 23 日 实验地点 教学楼709 调课/补课 ☐ 是 成绩评定

RLC电路的谐振与暂态过程

一、【实验目的】

- (1) 研究 RLC 电路的谐振现象;
- (2) 了解 RLC 串并联电路的相频特性和幅频特性, 并掌握其测量和表示方法;
- (3) 用数字存储示波器观察 RLC 串联电路的暂态过程, 理解阻尼振动规律。
- (4) 复习预科实验中示波器与信号发生器的使用, 学会熟练地使用有关仪器。

二、【实验器材】

标准自感器 (0.1H), 标准电容, 100Ω 标准电阻, ZX17-1型交直流电阻箱, 电感箱, 十进制电容箱, 函数发生器 (型号DG4062), 示波器 (型号MSO1104), 数字多用表, 导线等。

三、【实验原理】

1、串联谐振

如图1连接RLC串联电路:

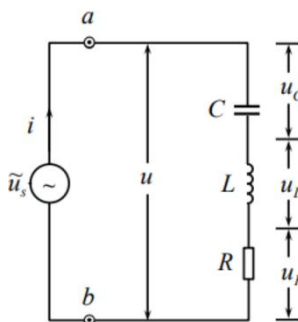


图1 RLC 串联电路

除了图中标注的物理量外, 记阻抗大小为 Z , 电压、电流、及其相位差分别为 u, i, ω , 则通过电磁学中关于交流电的相关知识, 可知对应的数据为:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \varphi = \arctan \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}, i = \frac{u}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

从公式中可以看出，电路中其他元件参量已经确定的情况下，上述数据的特性完全取决于频率。图2更清晰地显示了这一点：**RLC串联电路**中阻抗、相位差、电流与频率的对应关系。

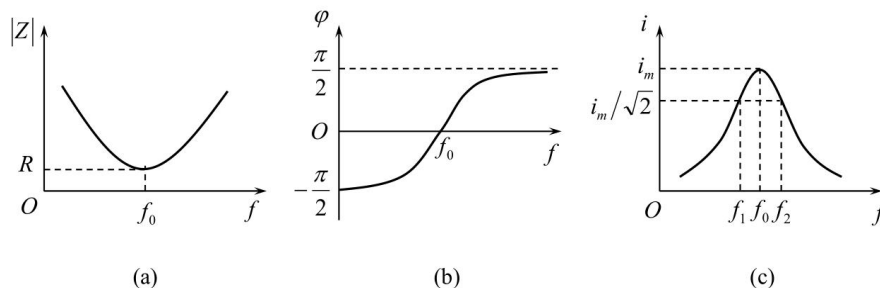


图2 RLC 串联电路的频率特性 (a) 阻抗特性；(b) 相频特性；(c) 幅频特性

由图上可以看出，存在一个特殊的、被称为谐振频率的 f_0 ，其主要特点为：外电压频率小于它时，电路显示出电容性（电流相位超前于电压），而在大于它时显示出电感性（电流相位落后于电压）。而在恰好等于它时，电流呈纯电阻性，阻抗达到极小值，此时有：
 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \varphi = 0$ ，且电流达到最大值，称其为串联谐振——本次实验的一大重点，就是测量谐振时的情况。

更多地，我们可以定义谐振电路的品质因数，它标志着谐振电路的性能优劣：

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R\omega_0 C} = \frac{u_L}{u} = \frac{u_C}{u} = \frac{f_0}{\Delta f}$$

它的意义可以总结为三：储耗能特性、电压分配特性、频率选择性（也即幅频曲线的峰尖锐程度）。

2、并联谐振

并联谐振的示意图如图3：

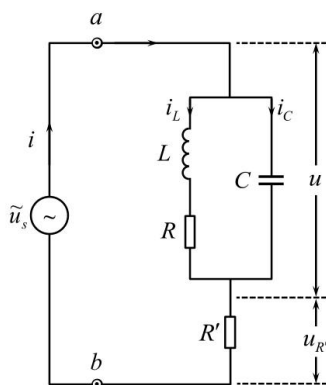


图3 RLC 并联电路

同样的，我们可以得到：

$$|Z_p| = \sqrt{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega CR)^2}}, \varphi = \arctan \frac{\omega L - \omega C(R^2 + \omega^2 L^2)}{R}, u = i|Z_p| = \frac{u_{R'}}{R'}|Z_p|$$

它们也同样是频率的函数。我们同样可以在电路呈纯电阻性时，求出并联谐振频率：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}}$$

——当外电压频率小于它时，电路呈电感性（电流相位落后于电压）；当外电压频率大于它时，电路呈电容性（电流相位超前于电压）；二者相等时阻抗达到最大值。下面的图4很清晰地显示了我们上面的论述：

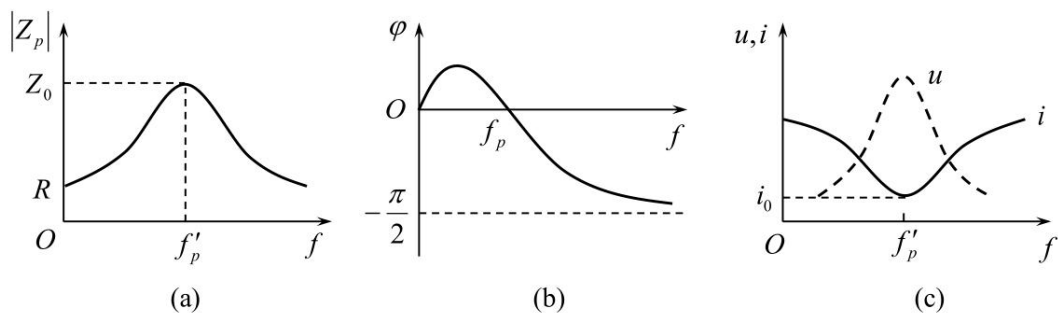


图4 RLC 并联电路的频率特性 (a) 阻抗特性；(b) 相频特性；(c) 幅频特性

我们同样可以定义并联谐振（也称电流谐振）的品质因数：

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R\omega_0 C} = \frac{f_p}{\Delta f} = \frac{i_C}{u} \approx \frac{i_L}{i}$$

上述式子中体现了并联电路中 Q 的三重含义：电路的储能本领、电路中电流的分配情况以及幅频曲线的峰尖锐程度。

3、RLC电路的暂态过程

暂态过程无论是从理论上还是应用上都很重要，本实验中关于其的实验电路如图5所示（实验中是利用信号发生器输出方波电压）：

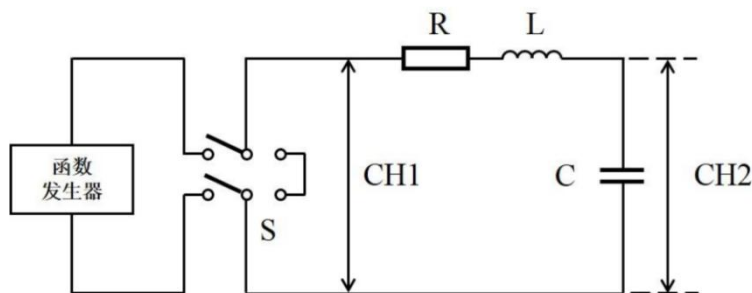


图5 RLC暂态过程实验电路

经过对与其对应的常微分方程

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0$$

的求解，并且根据初始条件 $t = 0, u_C = E, \frac{du_C}{dt} = 0$ ，与系数 $(R^2, \frac{4L}{C})$ 的相对大小关系，方程的解的性态会出现很不同的结果，可分为阻尼振动、临界阻尼、过阻尼三种情况（分别对应图6中的I, III, II）。

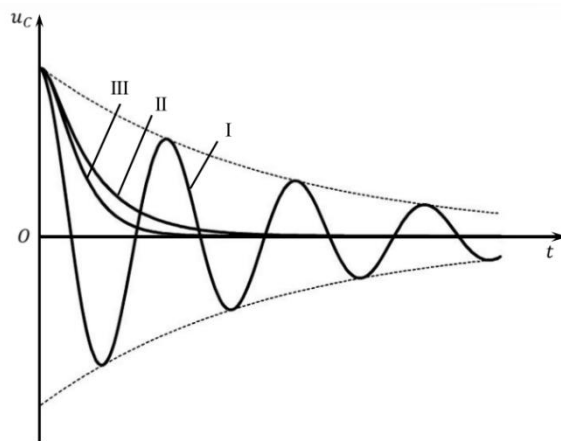


图 6 RLC 暂态过程中的三种阻尼曲线

其中值得一提的是：

(1) $R^2 \ll \frac{4L}{C}$ 时，此时振动衰减很缓慢，类似于 LC 电路自由振动

(2) $R^2 = \frac{4L}{C}$ 时，此时对应临界阻尼状态，其解为 $u_C = E \left(1 + \frac{t}{\tau}\right) e^{-t/\tau}$ ，其中 $\tau = \frac{2L}{R}$

而充、放电的不同只是体现于开关位置倒向的不同，因此，事实上充、放电并无本质上的区别，其过程非常类似，只是最后趋向的平衡位置不同。

四、【实验注意事项】

(1) 本实验所用的函数发生器与示波器都是接地的（在预科实验中我们观察全波整流的过程中已充分认识到这一点），而示波器测量的电压实际上是通道对地点的电压，所以要格外注意共地点的位置。

(2) 测量相位差时，因为示波器的显示值是一段时间内的平均值，所以每次改变信号频率或幅度后，要先关闭“统计功能”，再打开，等待一段时间然后读取数据，避免出现错误。

(3) 每次改变频率时，都要适当调节函数发生器的输出电压（由于函数发生器内阻的原因），使其保持最初设置的电压值。利用示波器读取的电压应为“幅度值”（峰峰值包含了一些高频噪音的成分）。

(4) 做实验时选取数据点应该分布均匀，后期绘制图像拟合的效果更好。

(5) 由于串联谐振时电容和电感上可能会出现高电压，为避免超过人体安全电压，应限制总电压峰峰值不超过 3.0V。

(6) 读取电压数据时，应利用示波器（尽管不能直接读出有效值），而不能为图省事利用数字万用表，因为前者测量精度远高于后者。

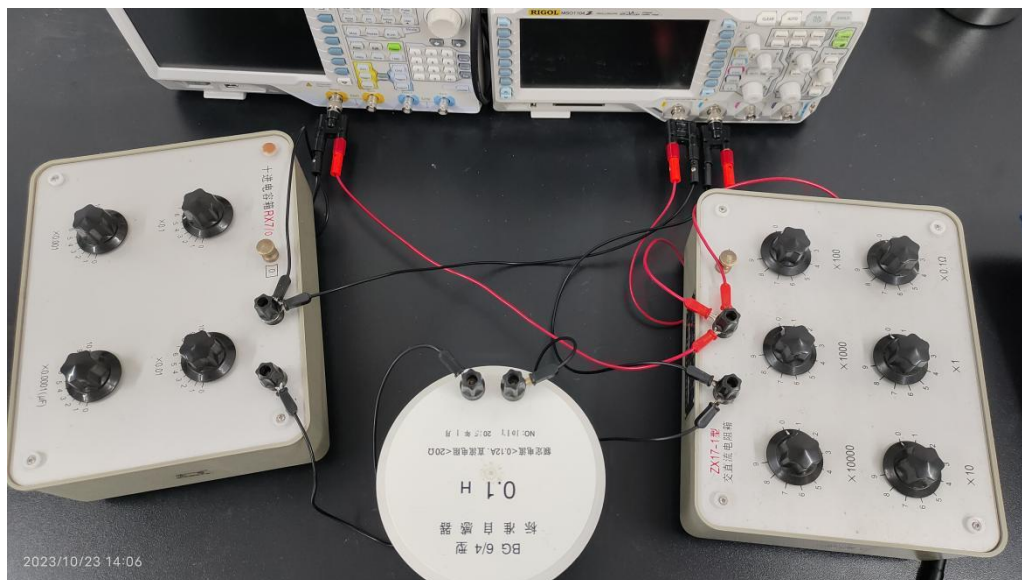
(7) 测量并联谐振时，只能用光标来测量时间差进而计算相位差。可以放大图像，并统一标准，把光标对准宽度中心点的位置，能最大限度地消除由于主观估计带来的误差。

五、【实验内容与数据分析处理】

1、测 RLC 串联电路的相频特性和幅频特性曲线

测量电路如上述图一所示，实验中我们取 $L = 0.1H$, $C = 0.05\mu F$, $R = 100\Omega$ ，并用示波器的CH1,CH2通道分别观测RLC串联电路的总电压 u 和电阻两端的电压 u_R 。

实际电路如下：



(1) 调串联电路谐振频率

改变函数发生器的输出频率，当观察到示波器两通道的曲线相位差为零时，此时频率为谐振频率 f_0 。更进一步地，我们利用万用表测量此时的 u , u_L , u_C ，并利用 $Q = \frac{u_L}{u} = \frac{u_C}{u}$ 计算Q值，并与理论值相比：

我的实验数据如下：

| 谐振频率 f_0 (KHz) | $f_{ideal} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (KHz) | $u(V)$ | $u_L(V)$ | $u_C(V)$ | $Q_{ideal} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$ | $Q_{real1} = \frac{u_L}{u} = \frac{u_C}{u}$ |
|---------------------|--|--------|----------|----------|---|---|
| 2.251 | 2.2508 | 0.712 | 8.16 | 8.10 | 14.14 | 11.38/11.46 |

f_0 的相对误差极小（0.008%），可见已经达到了极高的精度。

Q值与理论值相差得比较大（18.95%），但更多的原因可能是实验器材和实验设计本身的原因，从后面的实验数据和结果可以印证这一点。

(2) 测量相频特性曲线和幅频特性曲线

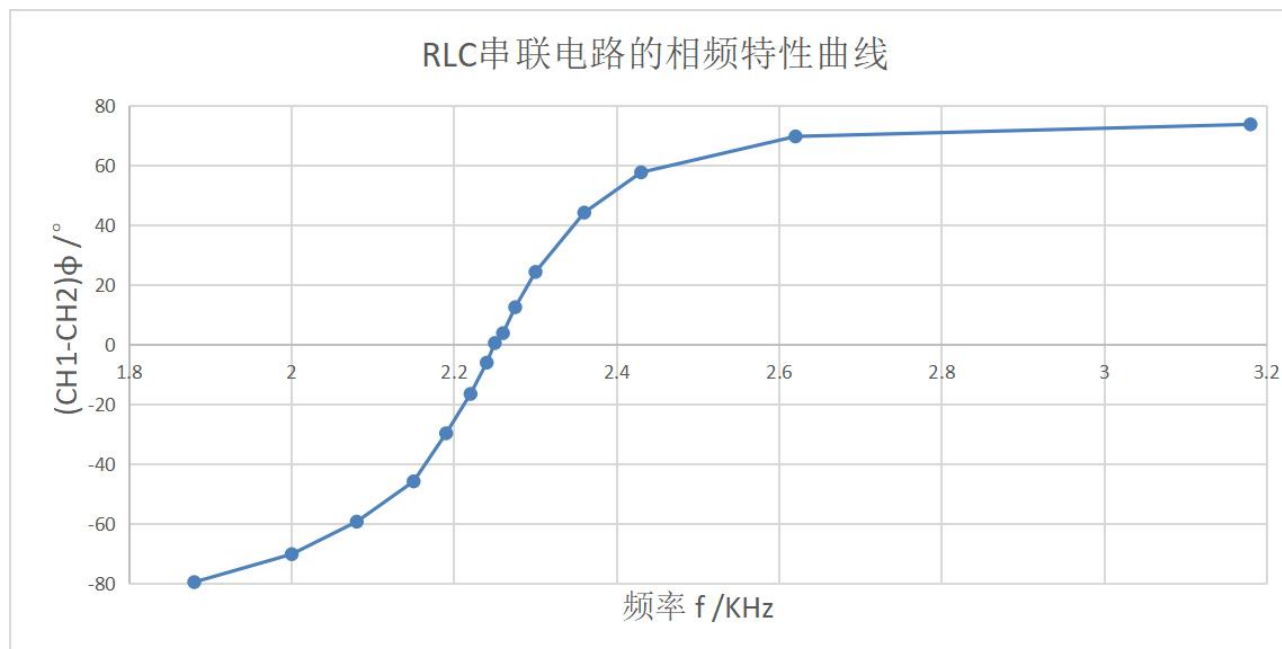
在这一实验中，我们需保持电压 $U_{Vpp} \equiv 2.00V$ ，用示波器测出电压和电流的相位差 $(CH1 - CH2)\varphi/\circ$ ，以及相应的 $u_R(V_{amp})/V$ 。我们选择频率 f_0/KHz 为1.88、2.00、2.08、2.15、2.19、2.22、2.24、2.25、2.26、2.275、2.30、2.36、2.43、2.62、3.18作为参考数值进行实验，并由此做出RLC串联电路的 $\varphi - f$ 曲线和 $i - f$ 曲线，并且计算出Q值。

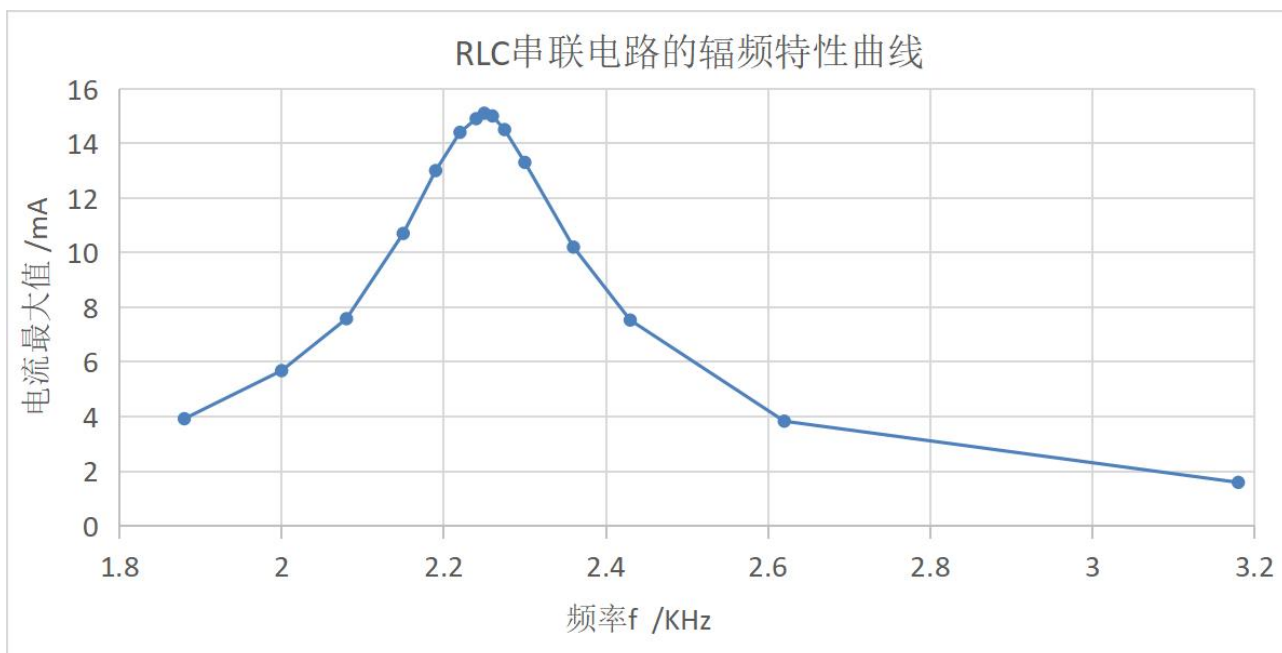
下面是我的实验串联电路测试数据：

| f_0/KHz | U_{Vpp}/V | $(CH1 - CH2)\varphi/^\circ$ | $u_R(V_{app})/mV$ | I_{max}/mA |
|-----------|-------------|-----------------------------|-------------------|--------------|
| 1.88 | 2.00 | -79.47 | 392 | 3.92 |
| 2.00 | 2.00 | -70.12 | 568 | 5.68 |
| 2.08 | 2.00 | -59.25 | 758 | 7.58 |
| 2.15 | 2.00 | -45.77 | 1070 | 10.70 |
| 2.19 | 2.00 | -29.68 | 1300 | 13.00 |
| 2.22 | 2.00 | -16.51 | 1440 | 14.40 |
| 2.24 | 2.00 | -6.041 | 1490 | 14.90 |
| 2.25 | 2.00 | 0.5188 | 1510 | 15.10 |
| 2.26 | 2.00 | 3.815 | 1500 | 15.00 |
| 2.275 | 2.00 | 12.49 | 1450 | 14.50 |
| 2.30 | 2.00 | 24.30 | 1330 | 13.30 |
| 2.36 | 2.00 | 44.15 | 1020 | 10.20 |
| 2.43 | 2.00 | 57.62 | 753 | 7.53 |
| 2.62 | 2.00 | 69.63 | 383 | 3.83 |
| 3.18 | 2.00 | 73.67 | 159 | 1.59 |

(3) 处理实验数据：

该表为原始数据记录表格，将该数据导入 Excel 中，利用 Excel 来处理数据。据此做出相频特性曲线和幅频特性曲线：

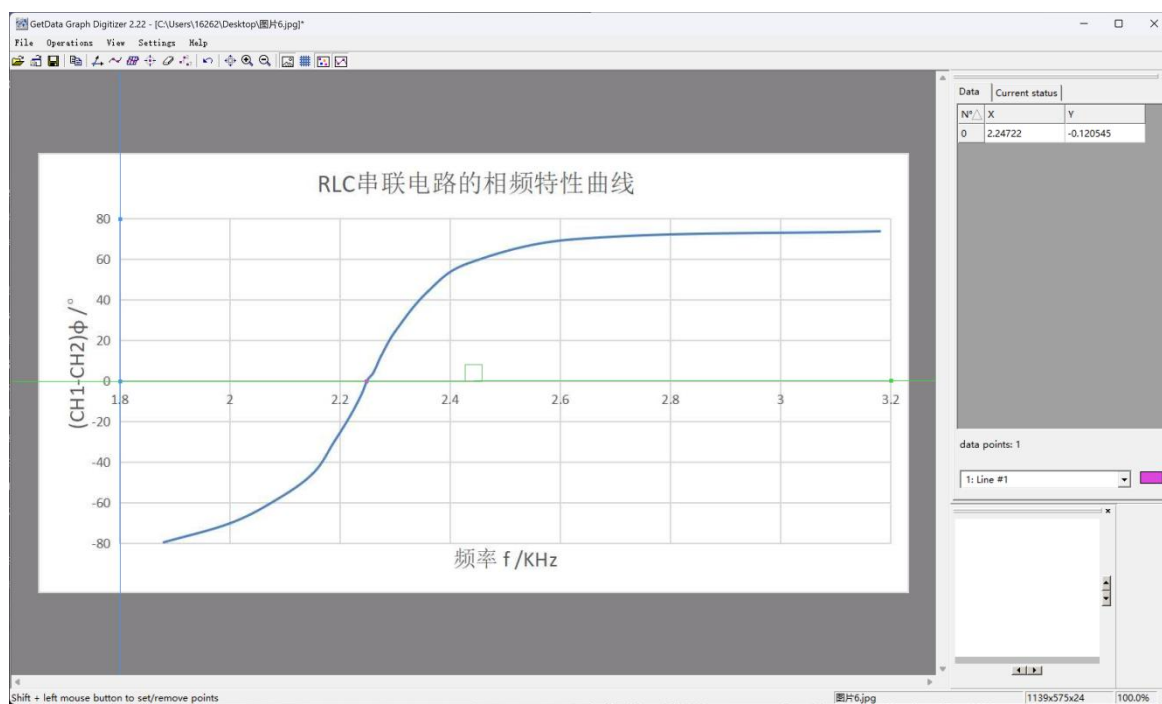




我们可以利用：

$$Q = \frac{2\pi f_0 L}{R} = \frac{f}{\Delta f}$$

求得Q值，为此，利用Get Data软件来处理相频特性曲线（将其导入Get Data并建立坐标系）：

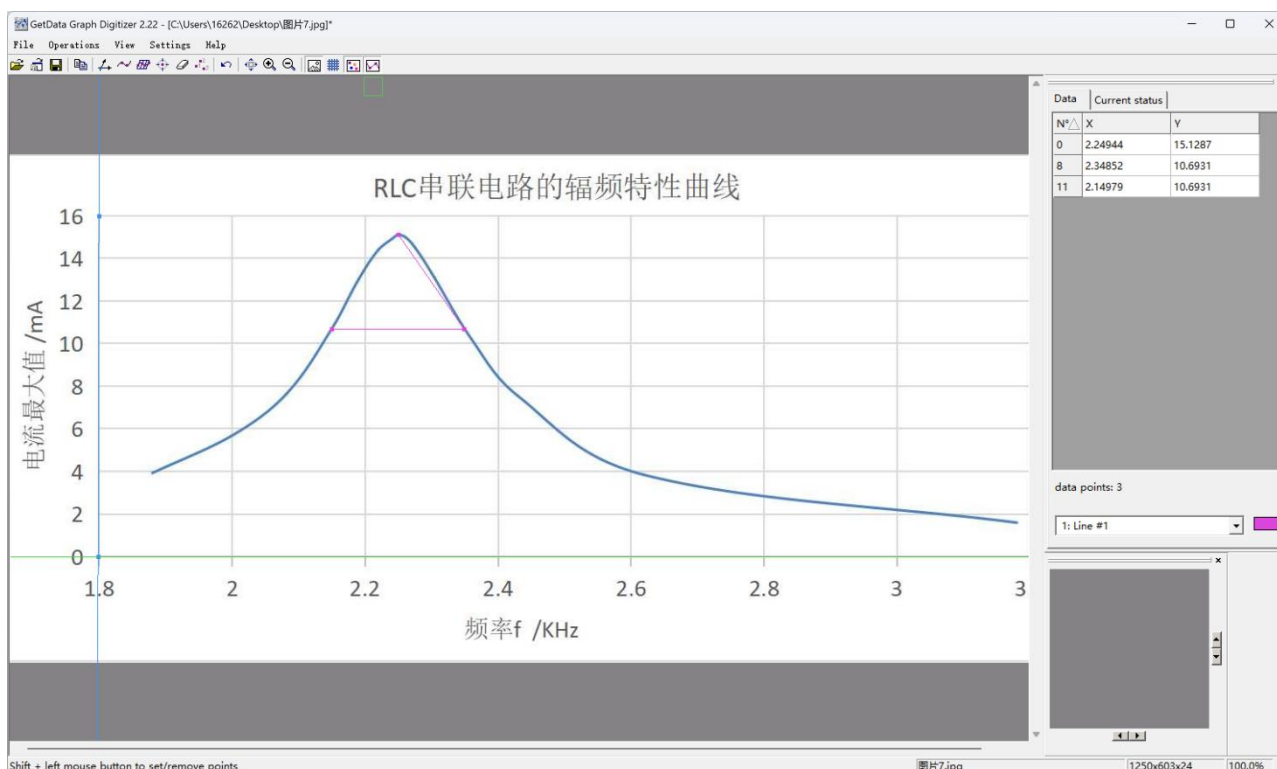


从而可得

$$Q_{real2} = \frac{2\pi f_0 L}{R} = 14.11$$

这个数据与上述直接用Q理论值（14.14）相差很小（0.21%）。

同样地处理幅频特性曲线：



可以得到 $i_{max} = 15.1287mA$ ，所以去找数据点为 $i_{max}/\sqrt{2} \approx 10.6931mA$ 的数据点（于上图右上角已经标注出来），于是可以得到：

$$Q_{real3} = \frac{f}{\Delta f} = \frac{2.24944}{2.34852 - 2.14979} \approx 11.319$$

这个数据与前面直接调至串联谐振下测得的Q值（11.38/11.46）相差很小（0.88%），说明该实验器材和实验电路下，测量的Q值范围大概为11.30-11.45。

2、测 RLC 并联电路的相频特性和幅频特性曲线

实验电路如上图图3所示，我们取 $L = 0.1H, C = 0.05\mu F, R = 5000\Omega$ ，利用示波器的CH1通道测量总电压，利用CH2测量电阻 R' 两端的电压，并用示波器的MATH功能相减，得到并联部分（电容和电感部分的电压 u ）

（1）调并联谐振频率：

同串联部分的操作一样，我们改变函数发生器的输出频率，观测并联部分的电压 u （CH1-CH2）与总电流（CH2）的幅度和相位的变化。找到谐振频率 f_p 。

理论上的并联电路谐振频率为

$$f_{pideal} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{L}\right)^2} \approx 2.250 \text{ KHz}$$

我的记录数据是 $f_p = 2.250KHz$ ，可见符合得很好。

(2) 测相频特性曲线和幅频特性曲线:

在这一实验中，我们需保持总电压 $u + u_{R'} \equiv 2.00V$ ，用示波器测出并联部分电压与总电流之间的相位差及其幅度值。我们选择频率：2.05、2.15、2.20、2.231、2.24、2.247、2.25、2.253、2.256、2.265、2.275、2.32、2.40、2.60作为参考数值进行实验，并由此做出RLC并联电路的 $\varphi - f$ 曲线、 $u - f$ 曲线和 $i - f$ 曲线，并且计算出Q值。注意，示波器并不能直接读出相位差，此时我们采用光标法记录同相位时间间隔，并利用下式计算：

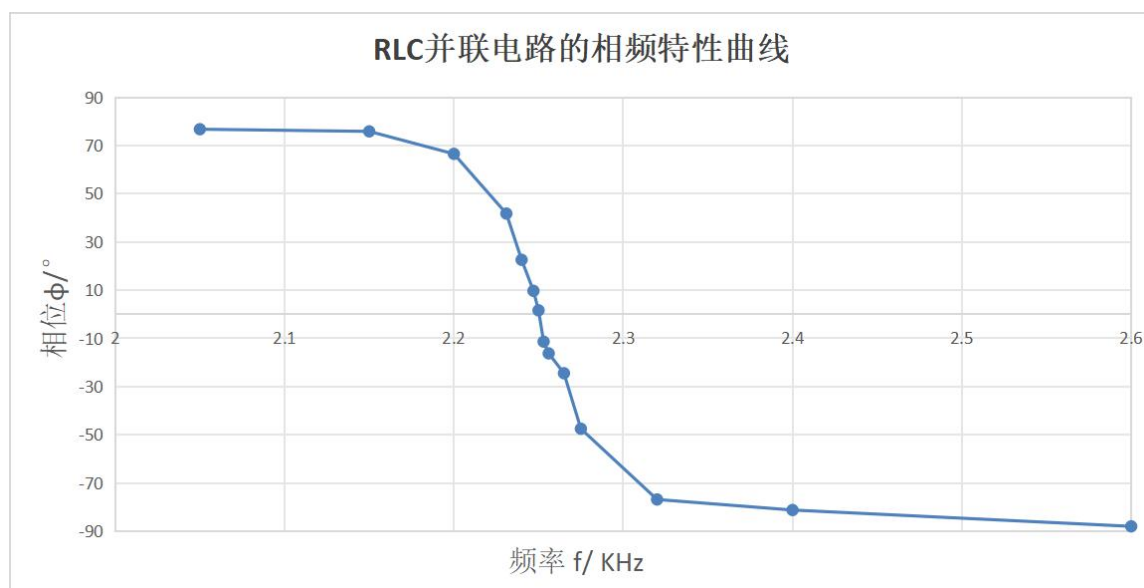
$$\varphi = \frac{f_0}{1/\Delta t} \times 360^\circ$$

下面是我的实验并联电路测试数据：

| f/KHz | U_{Vpp}/V | $\Delta t/\mu s$ | $\varphi/^\circ$ | $u(V_{amp})/$ $V(CH1 - CH2)$ | $u_{R'}(V_{amp})$ mV | $I_{max}/\mu A$ |
|---------|-------------|------------------|------------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------|
| 2.050 | 2.00 | 104 | 76.752 | 1.52 | 912 | 182.4 |
| 2.150 | 2.00 | 98 | 75.852 | 1.75 | 480 | 96.0 |
| 2.200 | 2.00 | 84 | 66.528 | 1.80 | 287 | 57.4 |
| 2.231 | 2.00 | 52 | 41.76432 | 1.82 | 136 | 27.2 |
| 2.240 | 2.00 | 28 | 22.5792 | 1.82 | 110 | 22.0 |
| 2.247 | 2.00 | 12 | 9.70704 | 1.79 | 98.7 | 19.74 |
| 2.250 | 2.00 | 2 | 1.62 | 1.81 | 111 | 22.2 |
| 2.253 | 2.00 | -14 | -11.35512 | 1.80 | 114 | 22.8 |
| 2.256 | 2.00 | -20 | -16.2432 | 1.79 | 117 | 23.4 |
| 2.265 | 2.00 | -30 | -24.462 | 1.78 | 137 | 27.4 |
| 2.275 | 2.00 | -58 | -47.502 | 1.76 | 178 | 35.6 |
| 2.320 | 2.00 | -92 | -76.8384 | 1.75 | 403 | 80.6 |
| 2.400 | 2.00 | -94 | -81.216 | 1.67 | 764 | 152.8 |
| 2.600 | 2.00 | -94 | -87.984 | 1.15 | 1350 | 270.0 |

(3) 将数据导入Excel，绘制相应图像，并用Get Data处理图像:

(相频特性曲线)





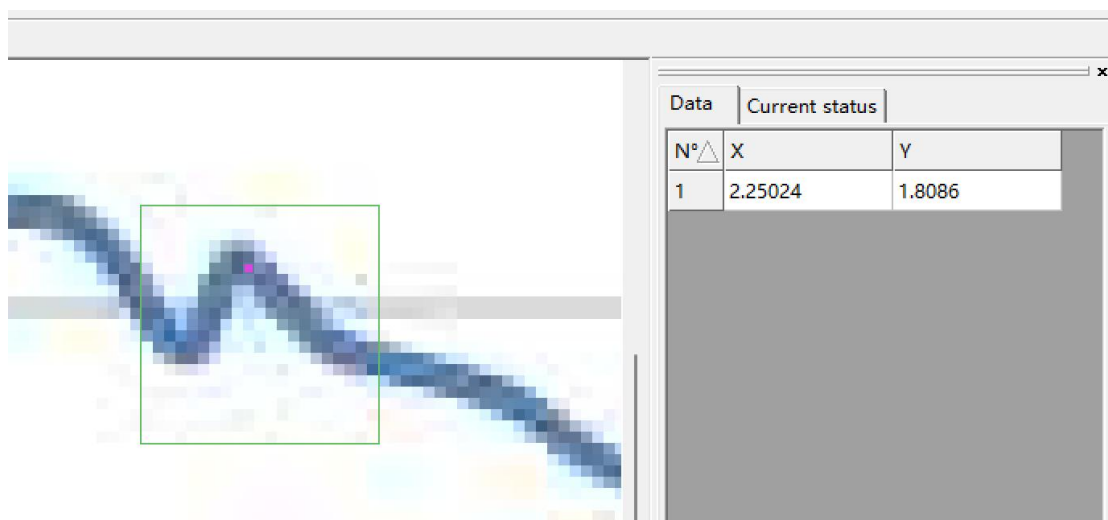
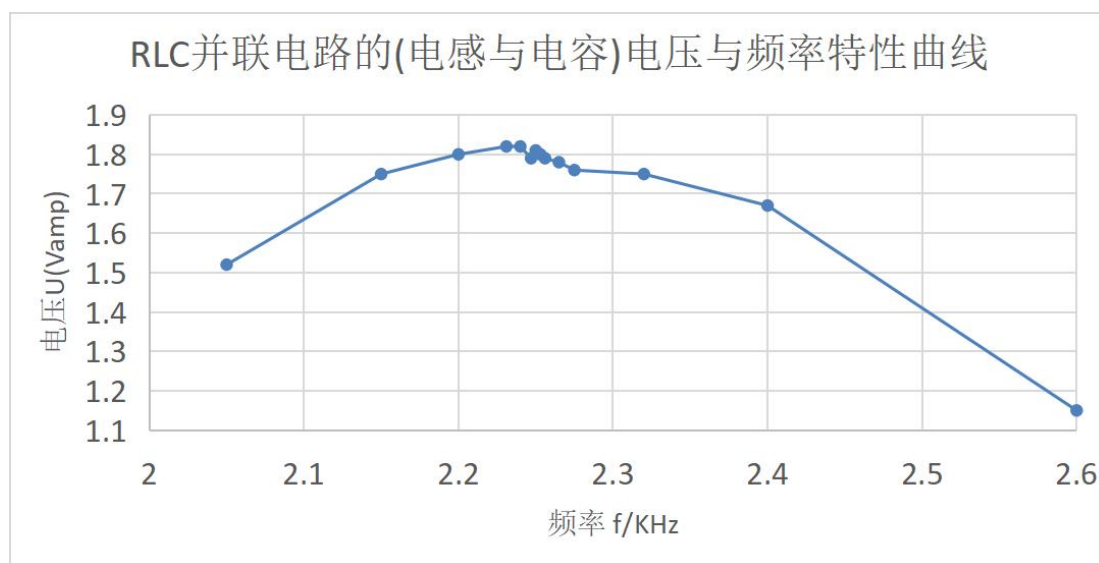
处理数据，可知：

$$Q_{real4} = \frac{2\pi f_0 L}{R} \approx 14.139$$

值得注意的是，上式中的 R 指的是电感支路的电阻，据老师提示，我们代入 $R = 100\Omega$ ，可得上述值。

可以得到两个幅频特性曲线图像：

（u-f特性曲线）

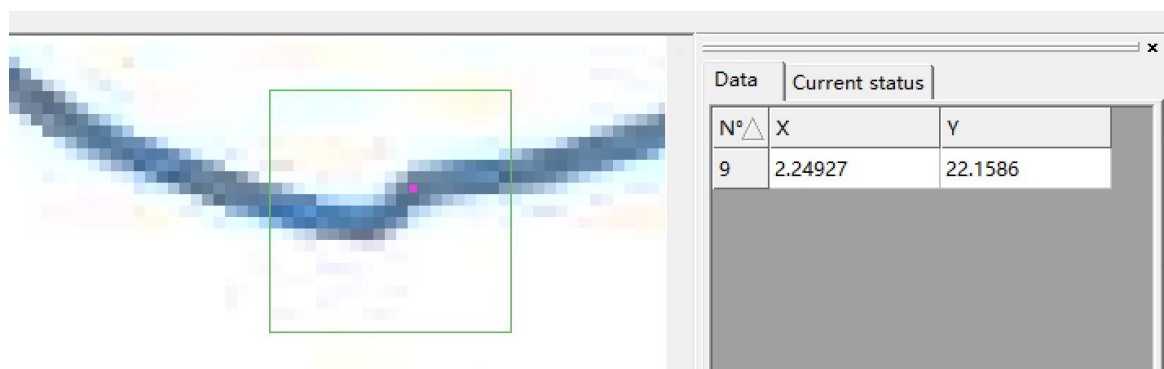
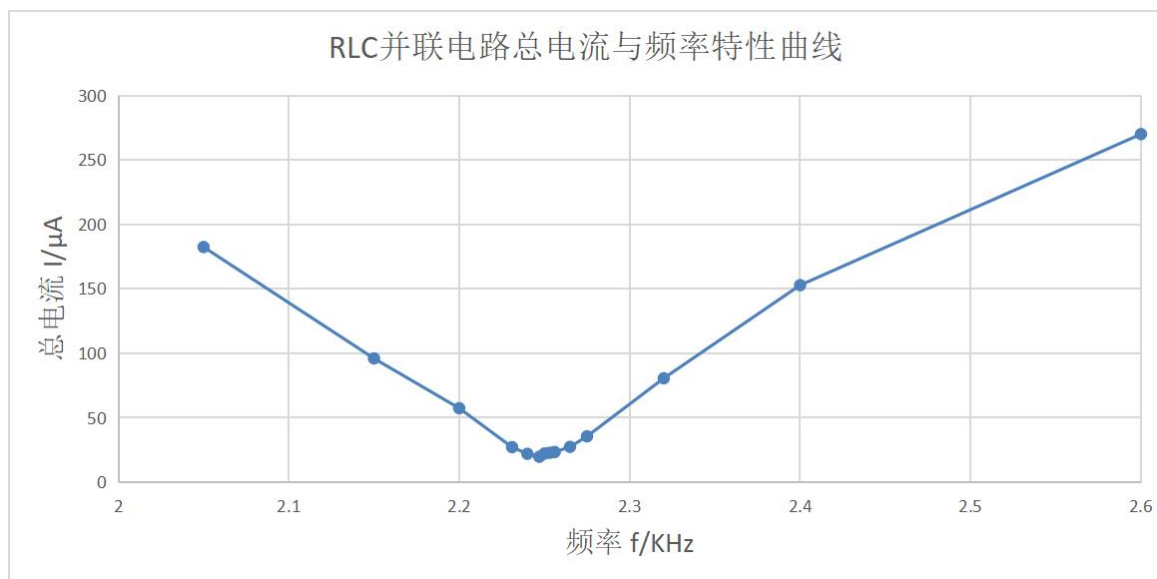


处理图像数据，得到

$$f_p = 2.25024 \text{ KHz}$$

再次较完美地验证了之前的记录数据。

(i-f特性曲线幅频特性曲线)

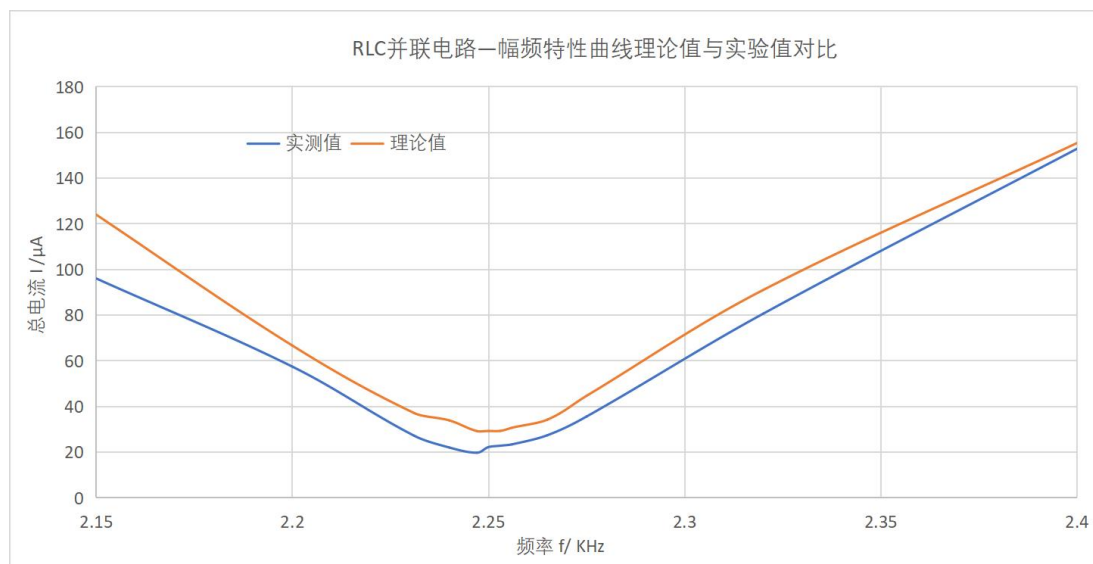


从而得到谐振频率：

$$f_p = 2.24927 \text{ KHz}$$

与之前的数据很为接近（相对误差为0.043%）。

并且我们做理论曲线（f=2.15-2.6KHz 频率段）与实测曲线，对比可见拟合效果还不错：



3、观测 RLC 串联电路的暂态过程

实验电路如上图图5，我们利用函数发生器产生方波代替“反复切换双掷开关”的操作，并将函数发生器的参数设置为：频率50 Hz，电压峰峰值2.0 V，偏移1 V，电感0.1 H，电容0.2 μ F。并利用示波器的CH1通道测量总电压，CH2通道测量电容两端的电压。

(1) $R = 0\Omega$ 时，测量 u_C 波形

此时明显有 $R^2 \ll 4L/C$ ，故得到衰减振动的图像：

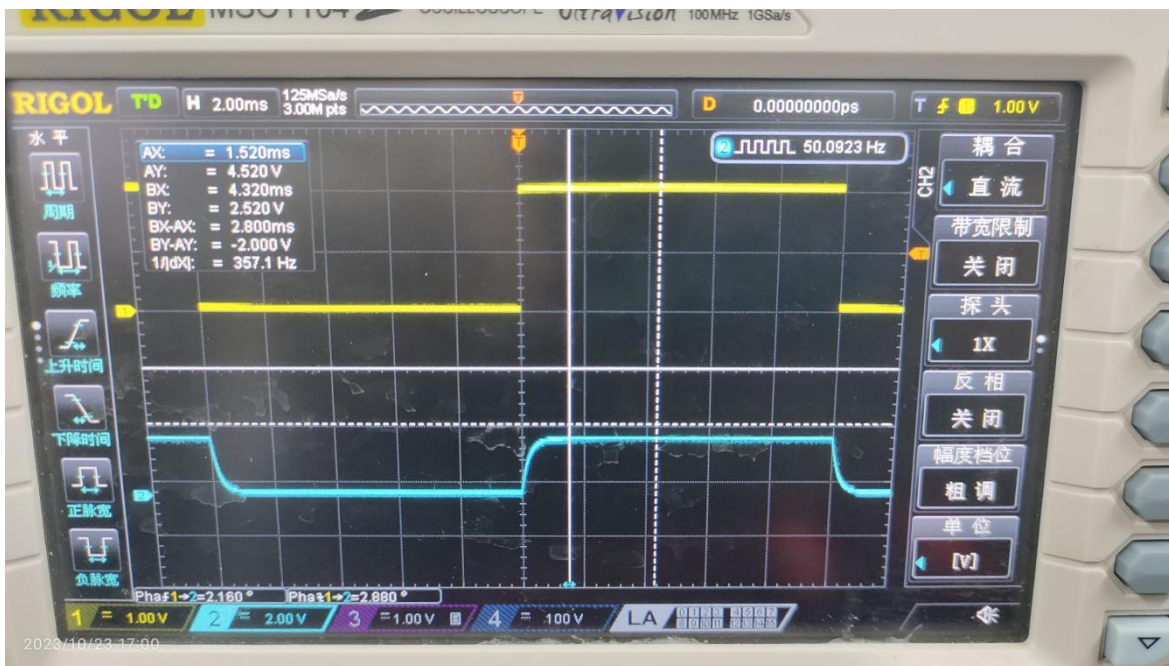


(2) 调节R测得临界电阻 R_C ，并与理论值比较

并且测得临界电阻为1410 Ω ，理论值为

$$R^2 = \frac{4L}{C} = 1414.2\Omega$$

可见测量是很精准的（相对误差为0.29%）



(3) 记录 $R = 2k\Omega, 20k\Omega$ 的 u_C 波形

(函数发生器的频率可分别选为250Hz, 20Hz) 此时均为过阻尼的情况, 且R更大的时候, 与函数发生器的方波更为接近。



六、【实验思考】

1、关于RLC串联谐振电路

(1) 曲线对比

我们从绘制的相频特性曲线可以看出，相位差随着频率的变化由负到正，在谐振频率附近变化率较大，而在接近 $\pm 90^\circ$ 时，变化率几乎为零，逐渐趋于平行 x 轴的直线。在实验误差允许范围内，与理论计算所得的图像一致。

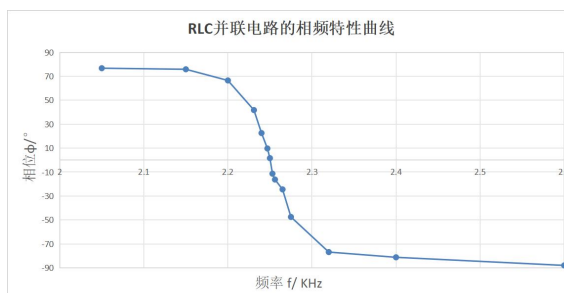
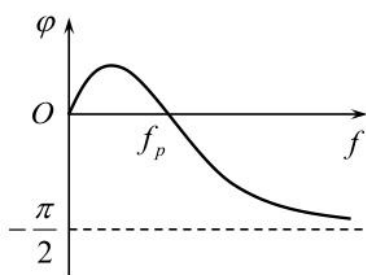
(2) 实验误差的产生原因：

一是读取相位差时，由于示波器波形的不稳定，导致其示数在较大的范围内波动，故存在由实验者估计带来的误差；二是进行图像拟合时，由于实验的数据点有限，数据采样点分布很不均衡，尤其是在高频段，这可能会导致拟合的图像不够精确。

2、关于RLC并联谐振电路

(1) 曲线对比

对比我们绘制的相频特性曲线和课本上的理论曲线，可以看出是有一定的差别的：



其主要原因是我们选取的频率范围基本在谐振频率附近，并未测量频率很小时的部分。其余部分在误差范围内符合的很好：随着频率的变化，相位差由正到负，在 90° 附近现出逐渐平行于 x 轴的趋势。

(2) 幅频特性曲线

电压先上升再下降，电流则刚好相反，且二者的极值点都对应一个相同的值（我们的测量数据分别是2.25024KHz和2.24927KHz），（该值虽然不严格等于谐振频率，但十分接近谐振频率，下文中直接用谐振频率一词表示该频率）并且除谐振频率附近的时候有波动外，整体光滑平稳，在实验误差允许范围内，符合理论预期。

(3) 各种误差的产生原因可能如下：

一是并联电路与串联电路最大的区别在于，不能直接从示波器的 CH1 或 CH2 的曲线中读取有关电压 u 的变化曲线，必须将这两个通道相减，而新生成的波形噪音极大，给读数造成很大的困难；

二是在并联电路读取相位差时，不能依靠系统自动计算，只能使用光标去测定，这会造成两个问题：

A、由于谐振频率附近的波形较“矮”，波形与时间轴相交的部分已经不能看成一个点，而是有一定微小长度的区域。但人工读数时光标只能固定到一个点，这必然导致随机误差。

B、与串联时不同，相位差还要通过公式去计算：信号发生器的频率 f 本身就有一定误差，我们测得的时间间隔 Δt 也有误差，两者的乘法运算则会导致更大的误差。

三是进行图像拟合时，由于实验的数据点有限，数据采样点分布很不均衡，在高频段和低频段的数据采集很稀少，这可能会导致拟合的图像不够精确。

3、关于RLC串联电路的暂态过程

(1) 实验总体评价

由于本实验是用信号发生器输出方波电压来实现模拟断开与闭合开关，因此只需取图像的某一周期即可。从高电位逐渐下降（下降是指趋势下降，实际过程可能有震荡）到某一平稳值可以认为是放电过程；从低电位逐渐增大（增大是指趋势增大，实际过程可能有震荡）到某一平稳值可以认为是充电过程。由上述分析，将实验测得的三个图像分别与理论计算的三个图像对比，在实验误差允许范围内符合的相当好。

(2) 可能造成误差的原因：

其一是仪器误差：由于示波器的显示精度问题，图像在临界电阻附近变化很小，在此附近调节 10 档位电阻对图像几乎没有任何影响。因此，这时实验者主观估计将会带来很大的误差，这一点在此前已经分析过了。

其二是理论本身造成的误差：临界电阻本质上是对应的二阶常系数微分方程的特征方程仅有一个根时所对应的电阻。这时，方程的解既无震荡形式，也不是单纯的指数衰减。讲义上不加证明的认为临界电阻时恰为衰减的最快的情况，但事实上这只是在绝大多数情况下成立，并不代表临界电阻时一定衰减最快，因此用“找下降最快但不是震荡形式的波形”这一方法并不能保证找到临界电阻。

4、其他方面

(1) 有关 Q 值与理论值偏差较大的思考：

在实验开始前，经过前期的预习，我知道 Q 的测量值大约会在 11-12 这个范围，很难达到理论值 14.14，这很显然不是测量时的随机误差所致，我认为主要原因有二：

A、可能是标准电感与电容箱所致：这些元件或多或少会有一些电阻分布，并不完全呈电感性或电容性。在实验中，未开启 output 按钮时我曾用数字万用表的电阻档测量过标准电感，确实有一定大小的电阻存在。

B、误差可能来源于示波器内阻：在课本上已经提示我们信号发生器存在一定内阻，在改变频率时，应调整输出电压大小，以保证外电路总电压的 V_{pp} 值维持在 2 (V) 不变。尤其在谐振频率附近，若不进行手动修正，示波器显示的 V_{pp} 几乎直接会降到 1.7-1.8(V) 左右。

但即便我在实验时一直保持该电压不变，也不能完全修正该部分所造成的影响。

(2) 有关示波器为什么要共地的思考：

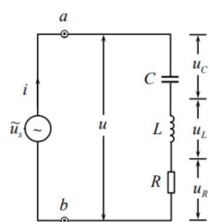


图1 RLC 串联电路

以串联谐振实验为例，如果示波器没有共地，如 CH1 的地端接在 a 处，CH2 的地端接在 b 处，那么 a、b 点都接地，电压为 0，则电感、电容、电阻三个元件上不会有电流流过，都被短路，将无法进行实验。其他的不共地情况也会导致类似的结果，必定有电路元件处在两个接地点之间没有电源的一侧，那么它将被短路。

(3) 有关并联电路中 f_p 与 $f_{p'}$ 的差别的思考：

考虑直接计算出结果进行比较，首先有

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{L}\right)^2}$$

下面求导计算 $f_{p'}$ ：

$$|Z_p| = \sqrt{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega CR)^2}}, \quad \left. \frac{d|Z_p|}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0=2\pi f_{p'}} = 0$$

从而知：

$$f_{p'} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-\frac{R^2}{L^2} + \frac{1}{LC} \sqrt{1 + \frac{2R^2 C}{L}}}$$

因此在 $\frac{2R^2 C}{L} = \frac{2}{Q^2} \rightarrow 0$ 时两者趋近于相同，即 $Q \gg 1$ 时。

(4) 有关有效值和幅值作图的一些思考：

老师多次提醒我们，示波器读数中的幅度值，要除以 $2\sqrt{2}$ 才是有效值，并由此计算相应的电流。但实际作图中，要么要求的是 I_{max} ，要么只需要定性出曲线形状，并由此确定谐振频率。

计算 Q 值时也许可能用到，但经过我实际计算，除与不除的误差很小（0.5% 左右，因为总体是抵消了的），故上述数据处理中不另作图像，且加以计算。

(5) 有关实验操作的思考：

A、本次的三个实验，务必要按照实验原理的电路图连接，虽然我本人操作时并没有出错，但实验时有其他同学未按照顺序连接，确实导致了无法测量的情况。至于为何会出现该现象，目前我还没有彻底理解，我在做完实验后也与老师和同学作了一些讨论，比较可能的原因是电容和标准电感并不是严格的纯电容或纯电感元件，其内部存在着多种附加阻抗分布，以及一些其他的相互耦合效应，整体的效果导致连接顺序会干扰实验。

B、在串联电路测量相位差时，需要使用示波器统计功能。这里的技巧是：每次测量最好重新开启统计的按钮，使示数尽快平稳，极大程度地缩短了实验时间。

(6) 有关实验数据记录与处理的思考：

A、测量并联谐振时，只能用光标来测量时间差进而计算相位差，但曲线与 x 轴交点有宽度，并且曲线有时会变得很平直，这时我们可以放大图像，并统一标准，把光标对准宽度中心点的位置，这样能够最大限度的消除由于主观估计带来的误差。

B、讲义上尤其强调不要读取峰峰值，而是读取幅度值，主要是因为峰峰值是未经过处理的信号，其中噪音成分含量过多。

(7) 有关实验理论方面的思考：

A、理论与实验相结合很重要，例如串联谐振实验，在找谐振频率时，最好直接在预先计算出的理论值附近找，而不是盲目乱试。同样，对于暂态电路寻找临界电阻也可以用类似的思想来节省实验时间。

B、有关如何实现讲义上所强调的“共地”，我对此的理解是，在实验中，我们连入两个频道信号的时候其实并没有真正的实现共地，但如果我们严格按照讲义上的操作要求，即按照红黑一致的连入，其实是与共地等价的。

C、此前在额外附加的有关 Q 值的讨论中提到过，在实际操作中，并联谐振确实不适合测量品质因数 Q，这可能也是本次实验没有用并联电路测量品质因数的原因之一。

5、数据总览和实验评价

汇总一下之前得到的数据：

（主要为谐振频率和Q值，串联电路和并联电路的数据分别展示）

| | f_{ideal}/KHz | f_{real}/KHz | Q_{ideal} | Q_{real} |
|-------------|-----------------|----------------|-------------|------------|
| RLC串联谐振电路数据 | 2.2508 | 2.25100 | 14.14 | 14.11 |
| | | 2.24722 | | 11.46 |
| | | 2.24944 | | 11.38 |
| | | | | 11.319 |
| RLC并联谐振电路数据 | 2.2500 | 2.25000 | 14.14 | 14.139 |
| | | 2.25024 | | |
| | | 2.24927 | | |

我们可以得到（具体的相对误差已在前文中算出）：

A、利用谐振频率测得的Q值，与理论值很接近，这也就是为什么我们实验中常用直接调节谐振频率，求电路Q值，简单精确。

B、处理RLC串联谐振电路和RLC并联谐振电路实验图像（使用Get Data软件确定数值）得到的Q值虽然与理论值相差较大，但彼此很接近，故可推断为主要是实验电路和器材本身的限制造成了与理论值的偏差。可以看见本次实验的精度较高，并且成功完成。

C、频率的测量，无论是直接调节还是通过图像拟合得到的实验数据，都很接近理论值，反应出此次实验的成功。

七、【实验感想】

在RLC电路谐振实验中我所领悟到的，除了前述的细节与关于本实验的细节思考外，还有一些更深刻的体会：

（1）实验前务必要预习，尤其是透彻理解实验理论与原理，原因有三：

A、如果只是照着书本上的操作步骤，那么实验本身就会变成很枯燥的体验，少了实验过程中探索未知，检验理论的体验感，同时也少了很多乐趣。

B、讲义上所指导的实验操作方法其实未必是最佳方法，透彻的理解理论可以在理论层面改进实验操作手法。

C、实际做实验时几乎可以说必然会遇到各种棘手问题，若不理解理论则很难做到灵活应对这些问题。以及做实验时，要格外留意会存在哪些带来误差的地方，并且反思这样的误差是否是可以采用别的方法，从而尽可能的减少影响。

（2）灵活使用计算机软件是处理实验数据必不可少的技能：

这次实验的绘图我是用 Excel 完成的，其优势是生成曲线迅速，不用代码就能对数据进行各种操作。为测量曲线的通频带宽度以及相应的频率，使用了 Get Data 软件，对于该实验的数据，确实操作起来非常简便。另外，为了撰写实验报告，我在WPS的word中插入了以CTeX为底层的Aurora公式编辑器，并设置了相应快捷键，提高了本次乃至以后所有实验报告撰写的效率。

（3）多请教老师对于快速掌握实验技巧很有帮助：

我本次实验的完成离不开李老师的帮助和指导——询问了很多关于操作和器材的细节与处理方式，次数之多让我惭愧。实际操作中遇到的很多问题都是讲义上未提到的，老师在实验刚开始特别提醒同学们注意的地方也只是可能出现的普遍问题。但每个人都有可能会在操作中遇到更特殊的问题，甚至有可能是仪器本身的问题，这时候及时请教老师是最好的选择，既能解决实验中的问题，还能在解决问题时加深对实验本身的理解。

（4）总结

正如荀子所言：“吾尝终日而思矣，不如须臾之所学也”。物理知识的“学习”也是如此，如果只是从书本上看，从课堂上听，而没有动手亲自“学”的话，终究对知识的理解和把握是有限的。物理本身就是一门以实验为基础的学科，理论与实验的结合很重要：在做实验时需要利用理论对实验过程与方法不断进行重新设计与思考；反过来做理论也要结合实验现象给出进一步的预测，二者可以说是一个相辅相成的关系。

本次实验对象还只是简单的谐振电路，但在我的动手过程中，依然有很多问题浮现出来。回想先贤们在理论不完善，仪器精度不高的时代，仍做出许多突破性的成果，这份智慧与努力确实很值得我们去学习。

总而言之，这次物理实验不仅让我对RLC谐振电路有了更深入的了解（它的不同电路特性等），更重要的是让我认识到学术研究的重要性和复杂性。我将继续努力学习和实践，将理论与实验结合起来，为将来的科学研究打下坚实的基础。

八、【附：原始数据记录表】

基础物理实验原始数据记录

实验名称 RLC 电路的谐振与暂态过程 地点 教学楼 709
 学生姓名 李景 学号 2022K8009906028 班分分组号 01-9-08 号 (例: 1-04-5 号)
 实验日期 2023 年 10 月 23 日 成绩评定 教师签字 2023/10/23

1. RLC 串联电路的相频特性和幅频特性曲线
 串联电路谐振频率 $f = \underline{2.251 \text{ KHz}}$ $U_L = 8.16 \text{ V}$ $U_C = 8.10 \text{ V}$ $U = 0.712 \text{ V}$

表 1: 串联电路测试数据

| f/KHz | U(Vpp)/V | (CH1-CH2) $\varphi/^\circ$ | $u_R(\text{Vamp})/\text{V}$ | $I_{\text{MAX}}/\text{mA}(\text{计算})$ |
|-------|----------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1.88 | 2.00 | -79.47 | 392 mV | 3.92 |
| 2.00 | 2.00 | -70.12 | 568 mV | 5.68 |
| 2.08 | 2.00 | -59.25 | 758 mV | 7.58 |
| 2.15 | 2.00 | -45.77 | 1.07 V | 10.70 |
| 2.19 | 2.00 | -29.68 | 1.30 V | 13.00 |
| 2.22 | 2.00 | -16.51 | 1.44 V | 14.40 |
| 2.24 | 2.00 | -6.041 | 1.49 V | 14.90 |
| 2.25 | 2.00 | -518.8 m | 1.51 V | 15.10 |
| 2.26 | 2.00 | 3.815 | 1.50 V | 15.00 |
| 2.275 | 2.00 | 12.49 | 1.45 V | 14.50 |
| 2.30 | 2.00 | 24.30 | 1.33 V | 13.30 |
| 2.36 | 2.00 | 44.15 | 1.02 V | 10.20 |
| 2.43 | 2.00 | 57.62 | 753 mV | 7.53 |
| 2.62 | 2.00 | 69.63 | 383 mV | 3.83 |
| 3.18 | 2.00 | 73.67 | 159 mV | 1.59 |

学生: _____ 助教: _____

2. RLC 并联电路的相频特性和幅频特性曲线
 并联电路谐振频率 $f = \underline{2.250 \text{ KHz}}$

表 2: 并联电路测试数据

| f/KHz | U(Vpp)/V | ΔU_{US} | $\varphi/^\circ$ | $u(\text{Vamp})/\text{V}(\text{CH1-CH2})$ | $u_R(\text{Vamp})/\text{mV}$ | I_{MAX}/mA |
|-------|----------|------------------------|------------------|---|------------------------------|----------------------------|
| 2.050 | 2.00 | 104 | | 1.52 V | 912 | |
| 2.150 | 2.00 | 98 | | 1.75 V | 480 | |
| 2.200 | 2.00 | 84 | | 1.80 V | 287 | |
| 2.231 | 2.00 | 52 | | 1.82 V | 136 | |
| 2.240 | 2.00 | 28 | | 1.82 V | 110 | |

2023/10/25 00:36

$V(\text{CH1-CH2})/\text{mV}$

| | | | | |
|-------|------|-----|--------|---------|
| 2.247 | 2.00 | 12 | 1.79 V | 98.7 mV |
| 2.250 | 2.00 | 2 | 1.81 V | 111 mV |
| 2.253 | 2.00 | -14 | 1.80 V | 114 mV |
| 2.256 | 2.00 | -20 | 1.79 V | 117 mV |
| 2.265 | 2.00 | -30 | 1.78 V | 137 mV |
| 2.275 | 2.00 | -58 | 1.76 V | 178 mV |
| 2.320 | 2.00 | -92 | 1.75 V | 403 mV |
| 2.400 | 2.00 | -94 | 1.67 V | 764 mV |
| 2.600 | 2.00 | -94 | 1.15 V | 1.35 V |

学生: _____ 助教: _____

2023/10/25 00:36