

基础物理实验

LCR 串联谐振电路



物理国家级实验教学示范中心（复旦大学）



欢迎大家修读本课程，请注意以下事项：

1. 课程有班级群，请注意加群，以便跟老师联系；
2. 本课程为必修课，若没通过，没有补考，只有重修；
3. 课程评分由平时成绩和期末成绩组成，请出席每一次实验课并提交报告，如特殊原因无法出席，请务必请假并联系老师申请补做；
4. 实验前认真预习并完成预习报告，没有预习报告，不允许做实验；
5. 诚实守信，不允许篡改、伪造或抄袭别人的数据，不允许带着别人的实验报告来实验室做实验，一经发现，该实验为 0 分。

LCR 串联谐振电路

在力学实验中介绍过弹簧的简谐振动、阻尼振动和强迫振动，阐述过共振现象的一些实际应用。同样，在电学实验中，由正弦电源与电感、电容和电阻组成的串联电路，也会产生简谐振动、阻尼振动和强迫振动。当正弦波电源输出频率达到某一频率时，电路的电流达到最大值，即产生谐振现象。谐振现象有许多应用，如电子技术中电磁波接收器常常用串联谐振电路作为调谐电路，接收某一频率的电磁波信号，收音机就是其中一例。在人类活动的空间中存在着各种不同频率的来自无线电发射机发射的电磁波，无线电接收器若要对某种频率信号进行选择接收，则必须采用电感和电容组成的 LC 回路来“守门”，一组 L 、 C 值组成的输入回路，只让一种频率的电磁波进入接收器的后继电路，而其它频率的电磁波都拒之“门外”。 LC 回路不但成了无线电发射和接收电路中不可缺少的部分，而且在其它电子技术领域中也得到了广泛的应用。

实验目的

1. 通过对 LCR 串联谐振电路的研究，测量电路的谐振曲线，了解电路品质因数 Q 的物理意义，掌握 LCR 串联谐振电路的特点及其测量方法。
2. 了解 LCR 串联谐振电路的特点，建立谐振频率及品质因数的理论模型，将实验结果与理论模型进行比较，检测模型正确与否，必要的话，对模型进行修正。

实验原理

图 1 为 LCR 串联谐振电路图，交流信号源在电路中所产生电流的大小，不仅决定于电路中的电阻 R ，而且还决定于电路中的电抗 $(2\pi fL - 1/2\pi fC)$ 。其中 $2\pi fL$ 是线圈 L 的感抗 Z_L ； $1/2\pi fC$ 是电容器 C 的容抗 Z_C 。根据交流电路的欧姆定律，此回路中的电流 I 与 LCR 串联谐振电路两端总电压 U_1 之间的关系为：

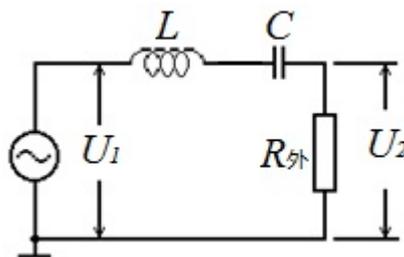


图 1 LCR 串联谐振电路图

$$I = \frac{U_1}{Z} = \frac{U_1}{\sqrt{(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC})^2 + R^2}} \quad (1)$$

式中， Z 为调谐回路的总阻抗， f 为交流信号的频率， L 表示电感， C 表示电容。总电压 U_1 与电流 I 的相位差 ϕ 为：

$$\phi = \arctg \left[\frac{2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}}{R} \right] \quad (2)$$

公式 (1)、(2) 中阻抗 Z 和相位差 ϕ ，都是信号频率 f 的函数。图 2、3、4 分别为 LCR 串联电路的阻抗、相位差、电流随频率的变化曲线，其中图 3 所示的 ϕ - f 曲线称为相频特性曲线。图 4 所示的 I - f 曲线称为幅频特性曲线（谐振曲线），它表示在 LCR 串联谐振电路两端总电压 U_1 保持不变的条件下 I 随 f 的变化曲线。

相频特性曲线和幅频特性曲线有时统称为频响特性曲线。由曲线图可以看出，存在一个特殊的频率 f_0 ，特点为：

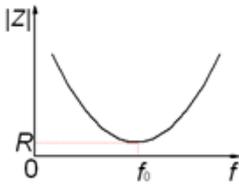


图 2 阻抗随频率的变化曲线

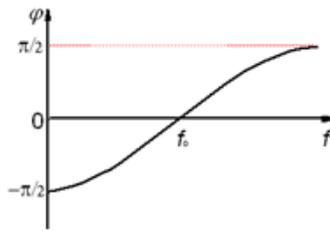


图 3 相频特性曲线

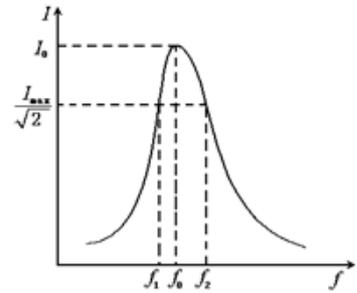


图 4 谐振曲线

- 1) 当 $f < f_0$ 时， $\varphi < 0$ ，电流的相位超前于电压，整个电路呈电容性，且随 f 降低， φ 趋近于 $-\pi/2$ ；而当 $f > f_0$ 时， $\varphi > 0$ ，电流的相位落后于电压，整个电路呈电感性，且随 f 升高， φ 趋近于 $\pi/2$ 。
- 2) 随 f 偏离 f_0 越远，阻抗越大，而电流越小。
- 3) 当：

$$2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC} = 0 \quad (3)$$

此时电路中总阻抗 Z 最小，电流 I 达到最大值，整个电路呈现电阻性，电流的大小只决定于回路中总电阻的大小。 LCR 串联电路的这种状态称为串联谐振，对应的信号频率 f_0 称为谐振频率，由式（3）可得：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

图 4 为 LCR 串联电路的谐振曲线，在正弦波的频率 f 达到 f_0 时，电路的电流达到最大值 I_0 。在谐振曲线上电流值为 $I_0/\sqrt{2}$ 的两个频率点 f_1 和 f_2 称为半功率点， $\Delta f = f_2 - f_1$ 的值称为谐振曲线的频带宽度。通常用 Q 值来表征电路选频性能的优劣，称为电路的品质因数。

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (5)$$

Q 值越大，即频带宽度越窄，谐振曲线就越尖锐，频率选择性越好。

Q 值的大小还反映了谐振时电路中储能与耗能之比。当电路处于谐振状态时：

$$Q = \frac{I^2 2\pi f_0 L}{I^2 R} = \frac{2\pi f_0 L}{R} \quad \text{或} \quad Q = \frac{1}{2\pi f_0 C R} \quad (6)$$

Q 值越大，谐振电路储存的能量与一个周期内电路损耗的能量的比值越大，该谐振电路的质量就越好。从式（6）也不难得到，在谐振时，电容 C 或电感 L 上的电压是总电压 U_1 的 Q 倍，即使总电压较小，谐振时电感和电容的电压也会很大，实验时需考虑元件在谐振情况下的耐压性能。

实验前应回答的问题

1. 建立物理模型：请画出图 1 电路图，写出电流 I 与总电压 U_1 之间的关系式、谐振频率的表达式。
2. 请画出图 4 谐振曲线图，写出表征电路选频性能的品质因数表达式。
3. 写出品质因数表征谐振时电路储能与耗能之比的表达式。若图 1 中 $C=1.00\mu\text{F}$ ， $L=10.0\text{mH}$ ， $R=50.0\Omega$ ，计算该电路的谐振频率和品质因数 Q 。

- 模型的修正：考虑电感的损耗电阻 R_L ，画出等效电路图，假设 $R_L=20.0\Omega$ ，电路的 Q 值为多少？
- 为什么 LCR 串联电路谐振曲线在谐振点两侧的曲线并不对称？

实验仪器

数字信号发生器，交流电压表，电阻箱，电容，电感，九孔板，导线。
(数字信号发生器、交流电压表请参考本实验网页提供的使用说明书)

实验内容

一、必做部分：

- 按照图 1 接线。 U_1 、 U_2 为交流电压表，数字信号发生器的端口固定阻抗为 50Ω ，图中的 $R_{外}$ 为外接的信号取样电阻。

合理设置数字信号发生器输出的正弦信号频率和幅度，电压表 U_1 、 U_2 量程，调节数字信号发生器频率使电路达到谐振状态，观察和记录实验现象以及谐振频率点 f_0' 、 U_1 和 U_2 的值。

改变频率时，为什么谐振回路的输入电压 U_1 会改变？为什么数字信号发生器的输出指示（峰-峰电压 V_{P-P} ）与电压表测量得到的 U_1 值有较大的差别？

请仔细观察频率改变时 U_1 和 U_2 的变化情况，看到什么样的现象时可以判断频率已调节至电路的实际谐振频率？为什么谐振时 U_1 和 U_2 不相等？

- 保持 U_1 不变，测量不同频率时的电压值 U_2 。

为什么要保持 U_1 不变？如何保持 U_1 不变？若要测得完整的谐振曲线，该如何设定数字信号发生器的频率调节范围？

- 作 $I\sim f$ 曲线，从曲线图中求半功率点频率 f_1 、 f_2 及谐振频率 f_0 。用公式 (5) 和 (6) 分别求 Q 值并进行比较。

二者是否相符？若不符，该如何修正你的物理模型？（考虑电感的损耗电阻 R_L ，可画出等效电路图，修正你的物理模型，重新计算 Q 值，再将此值与测出的 Q 值比较）。

提示：根据谐振时 U_1 与 U_2 的值，可求出损耗电阻 R_L 的大小。

- 改变信号源频率，记录在不同频率时 U_1 、 U_2 的值，作 $U_2/U_1\sim f$ 曲线，从曲线图中求半功率点频率 f_1 、 f_2 及谐振频率 f_0 。用公式 (5) 求 Q 值并与必做部分的结果进行比较。

二、选做部分：

改变外接电阻 $R_{外}$ 的大小，观测电路品质因数 Q 的变化。

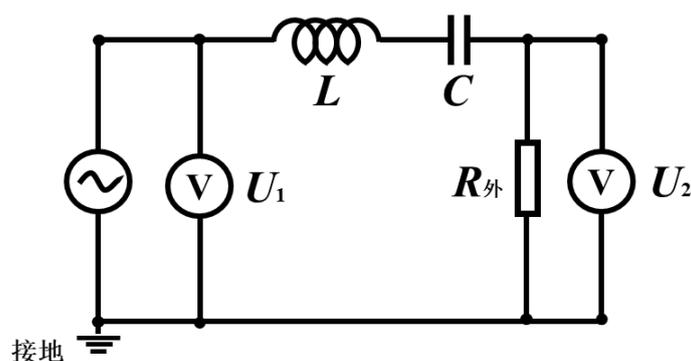
参考文献

- 沈元华，陆申龙，基础物理实验，高等教育出版社，2003，189-193。
- 贾起民，郑永令，陈暨耀，电磁学，高等教育出版社，2010，347-352
- 赵凯华，陈熙谋，电磁学（上册），人民教育出版社，1978，238-239。
- 陈秉乾，王稼军，电磁学，北京大学出版社，2003，288-294。
- 凌佩玲等编，普通物理实验，上海科学技术文献出版社，1989，216-222。
- 吕斯骅，段家祇，基础物理实验，北京大学出版社，2002，137-141。

LCR 串联谐振电路操作指南

连接电路：

电压表两个通道的黑色测试线与市电（220V）共地（接地），请勿将信号发生器和电压表的红黑测试线接反（电压表的地线和信号发生器的地线接在一起，九孔板上所有的接地点必须公共，接在同一个点上），以免造成短路。



电压表和信号发生器的测试线：

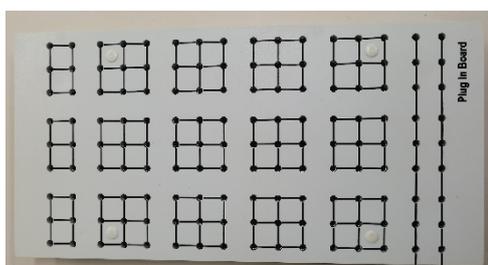


同轴电缆（BNC 接头）

红色香蕉插头测试线

黑色香蕉插头测试线（地线、接地）

九孔板及其内部金属模块：



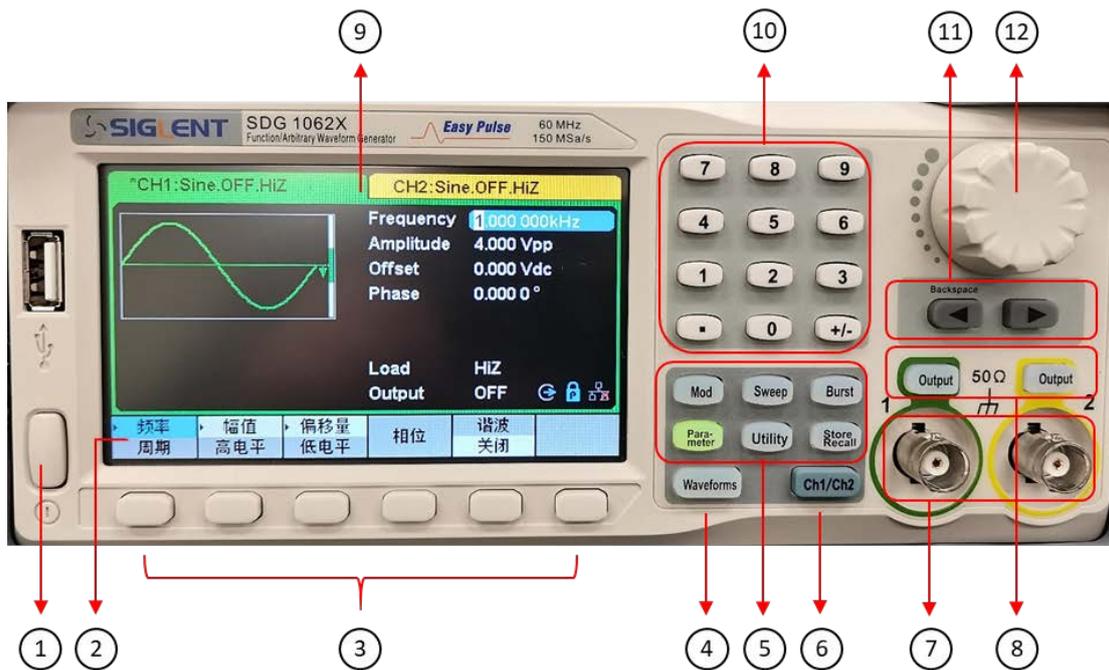
数字交流毫伏表：

- 电源开关位于后面板，开机进入自检状态，自检后预热 15 分钟可正常测试。
- 手动档 **MANUAL** / 自动档 **AUTO** 量程转换开关的设置：

开关弹起：量程处于手动状态，先选择最大量程“400V”，将输入信号由输入端口送入交流毫伏表，再逐步减小量程，使显示屏正确显示输入信号的电压值，数据显示在满量程的 10%~100% 为最佳。

开关按下：量程处于自动状态，此时所有的量程选择按键均不起作用。当显示电压超出满量程的 5% 时，自动跳到更大量程测试；当显示电压低于满量程的 8% 时，自动跳到更小量程测试。

函数/任意波形发生器：



1. 电源键
2. 菜单
3. 菜单软键：与上面的菜单一一对应，按下任意一软键激活对应的菜单。
4. 波形选择键
5. 模式/辅助功能键：本实验请勿操作，具体功能参考仪器说明书。
6. CH1/CH2 通道切换键：注意用户界面中显示（绿色 CH1，黄色 CH2）。
7. CH1/CH2 输出端
8. CH1/CH2 输出控制键：用于开启或关闭信号的输出。
9. 用户界面：可观察当前信号的类型和参数设置。
10. 数字键：用于输入用户界面中的各参数。
11. 方向键：在使用旋钮设置参数前，用于切换数值的位；使用数字键盘输入参数时，左方向键用于删除光标左边的数字。
12. 旋钮：在设置用户界面中的各参数时，增大（顺时针）或减小（逆时针）当前突出显示的数值。

