

《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 _____
姓 名 李 果 学号 2022K8009906028 分班分组及座号 1-09- 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】

标准电感, 标准电容, 100Ω 标准电阻, 电阻箱, 电感箱, 电容箱, 函数发生器, 示波器, 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:

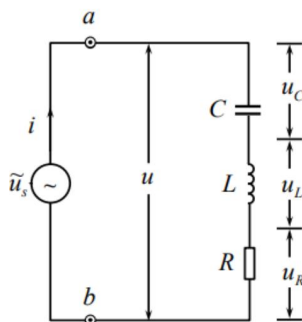


图 1 RLC 串联电路

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。**

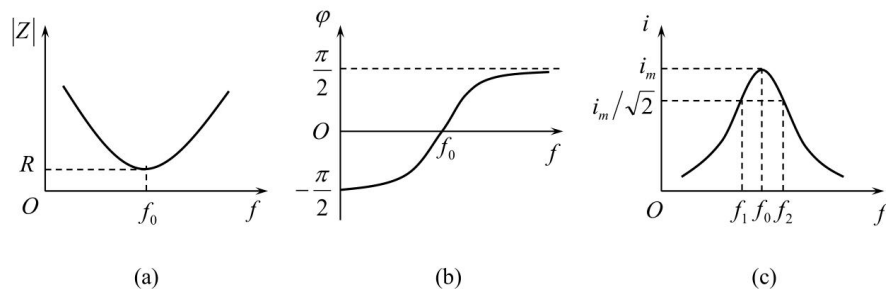


图2 RLC 串联电路的频率特性 (a) 阻抗特性; (b) 相频特性; (c) 幅频特性

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：

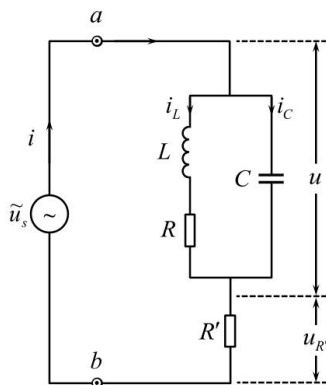


图3 RLC 并联电路

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（发生谐振），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：

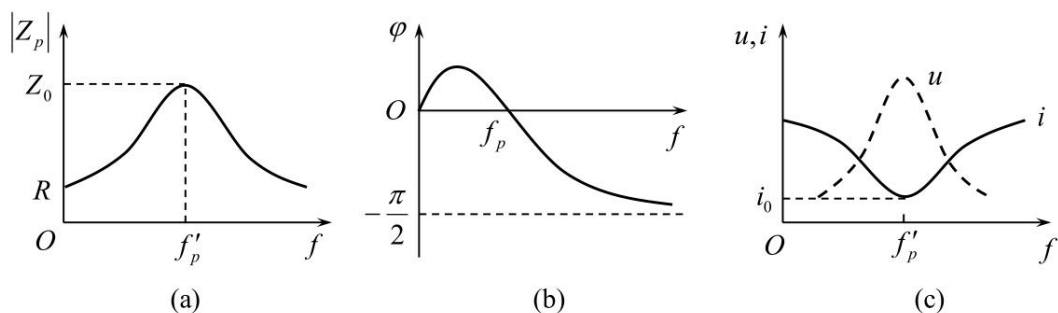


图4 RLC 并联电路的频率特性 (a) 阻抗特性；(b) 相频特性；(c) 幅频特性

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）：

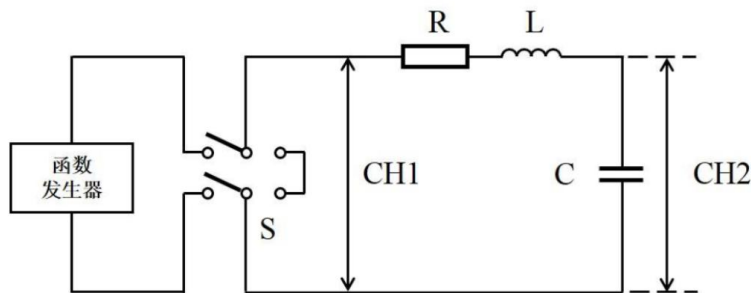


图5 RLC暂态过程实验电路

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）。

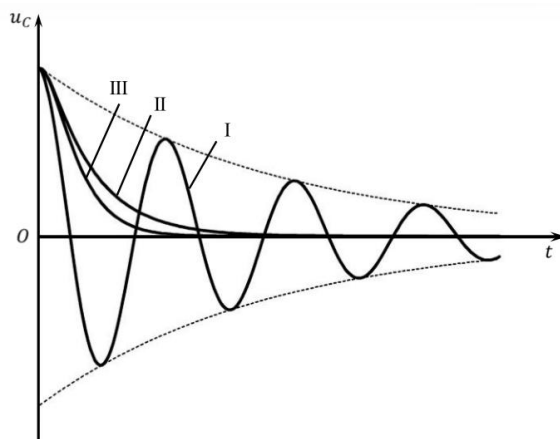


图 6 RLC 暂态过程中的三种阻尼曲线

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，等待一段时间后然后读取数据，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
- 2、测 RLC 并联电路的相频特性和幅频特性曲线
- 3、观测 RLC 串联电路的暂态过程