# 六 RLC电路的谐振与暂态过程

**【警告：注意高电压危险！】**

在串联谐振时，如果设置不当，电感和电容两端将出现有危险的高电压（超过36V）。为避免发生危险，请实验者务必做到：

（1）函数发生器输出总电压峰峰值不要超过3V。

（2）连接电路前，不要让函数发生器输出电压。电路连接好后，不要用手或身体其它部位触碰金属部分，尤其是电感或电容的两端。这是做电学实验的基本要求。

**【实验简介】**

同时具有电感和电容两类元件的电路，在一定条件下会发生谐振现象。谐振时电路的阻抗、电压与电流以及它们之间的相位差、电路与外界之间的能量交换等均处于某种特殊状态，因而在实际中有着重要的应用，如在放大器、振荡器、滤波器电路中常用作选频等。本实验的第一部分，将通过RLC电路的相频特性、幅频特性的测量，着重研究LC电路的谐振现象。

在阶跃电压作用下，RLC串联电路由一个平衡态跳变到另一个平衡态，这一转变过程称为暂态过程。在此期间电路中的电流及电容、电感上的电压呈现出规律性的变化，称为暂态特性。RLC电路的暂态特性在实际工作中十分重要，例如在脉冲电路中经常遇到元件的开关特性和电容充放电的问题；在电子技术中常利用暂态特性来改善波形或者产生特定波形。但是在某些情况，暂态特性也会造成危害，例如在接通、切断电源的瞬间，暂态特性会引起电路中电流、电压过大，造成电器设备和元器件的损坏，这是需要防止的。本实验的第二部分是要观察和分析RLC串联电路暂态过程中电压及电流的变化规律。

**【实验目的】**

1. 研究RLC电路的谐振现象。

2. 了解RLC电路的相频特性和幅频特性。

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。

**【实验仪器与用具】**

标准电感，标准电容，100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。

**【实验原理】**

**1．串联谐振**

RLC串联电路如图1所示。其总阻抗、电压与电流之间的相位差、电流分别为

 （1）

 （2）

 （3）

式中为角频率（为频率），，，都是的函数，当电路中其它元件参量取确定值的情况下，它们的特性完全取决于频率。



图1 RLC串联电路

图2（a）、（b）、（c）分别为RLC串联电路的阻抗、相位差、电流随频率的变化曲线。其中图2（b）曲线称为相频特性曲线；图2（c）曲线称为幅频特性曲线，它表示在总电压保持不变的条件下随的变化曲线。相频特性曲线和幅频特性曲线有时统称为频率响应特性曲线。



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

由曲线图可以看出，存在一个特殊的频率，特点为：

（1）当时，，电流的相位超前于电压，整个电路呈电容性，且随降低，趋近于；而当时，，电流的相位落后于电压，整个电路呈电感性，且随升高，趋近于。

（2）随偏离越远，阻抗越大，而电流越小。

（3）当，即

 或  （4）

时，，电压与电流同相位，整个电路呈纯电阻性，总阻抗达到极小值，而总电流达到极大值。这种特殊的状态称为串联谐振，此时角频率（或频率）称为谐振角频率（或谐振频率）。在处，曲线有明显尖锐的峰显示其谐振状态，因此，有时称它为谐振曲线。谐振时，有

， 

而

， 

令

 或  （5）

称为谐振电路的品质因数，简称值。它是由电路的固有特性决定的，是标志和衡量谐振电路性能优劣的重要的参量。值标志着：

（1）储耗能特性：值越大，相对[储能的]耗能越小，储能效率越高（可以证明值等于LC元件总储能与每周期内耗能之比的倍）。

（2）电压分配特性：谐振时，电感、电容上的电压均为总电压的倍，因此有时称串联谐振为电压谐振。利用电压谐振，在某些传感器、信息接收中，可显著提高灵敏度或效率，但在某些应用场合，它对系统与人员却具有一定不安全性，故而在设计与操作中应予以注意。

（3）频率选择性：设，为谐振峰两侧处对应频率[如图2（c）所示]，则称为通频带宽度，简称带宽。不难证明

 （6）

显然，值越大，带宽越窄，峰越尖锐，频率选择性越好。值对于放大器、滤波器的选频特性的影响甚大，因而在有关电路设计中是一个很重要的参量。

**2．并联谐振**



图3 RLC并联电路

如图3所示电路，其总阻抗、电压与电流之间的相位差、电压（或电流）分别为

 （7）

 （8）

 （9）

显然，它们都是频率的函数。当=0时，电流和电压同相位，整个电路呈纯电阻性，即发生谐振。由式（8）求得并联谐振的角频率（或并联谐振频率）为

 （10）

式中，，。可见，并联谐振频率与稍有不同，当时，，。

图4（a）、（b）、（c）分别为RLC并联电路的阻抗、相位差、电流或电压随频率的变化曲线。由（b）图曲线可见，在谐振频率两侧，当时，，电流的相位落后于电压，整个电路呈电感性；当时，，电流的相位超前于电压，整个电路呈电容性。显然，在谐振频率两边区域，并联电路的电抗特性与串联电路时截然相反。由（a）图曲线和（c）图曲线可见，在处（注意：与谐振频率稍有不同）总阻抗达到极大值，总电流达到极小值，而在两侧，随偏离越远，阻抗越小，电流越大。不言而喻，这种特性，与串联电路时完全相反。（c）图曲线为在总电流保持不变的条件下，电感（或电容）两端电压随频率的变化曲线。



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

与串联谐振类似，可用品质因数，即

 ， ，  （11）

标志并联谐振电路的性能优劣，其意义也类同。不过，此时，谐振支路中的电流为总电流的倍。因此，有时称并联谐振为电流谐振。

**3. RLC电路的暂态过程**

S

1

2

R

C

E

L

电路如图5。先观察放电过程，即开关S先合向“1”使电容充电至E，然后把S倒向“2”，电容就在闭合的RLC电路中放电。电路方程为

图5 RLC暂态电路

又将代入得

（12）

根据初始条件解方程。方程的解分为3种情况：

① 属于阻尼较小的情况。引入阻尼系数后，对应于。此时方程(12)的解为

（13）

其中时间常量为

（14）

衰减振动的角频率为

（15）

随时间变化的规律如图6中曲线I所示，即阻尼振动状态。此时振动的振幅呈指数衰减。的大小决定了振幅衰减的快慢，越小，振幅衰减越迅速。

图6 RLC暂态过程中的三种阻尼曲线

如果，通常是R很小的情况，振幅的衰减很缓慢，从式（15）可知

（16）

此时近似为LC电路地自由振动， 为R=0时LC回路的固有频率。衰减振动的周期

（17）

② ，即阻尼系数。对应于过阻尼状态，其解为

（18）

式中：

（18）式所表示的的关系曲线见图6中的曲线II，它是以缓慢的方式逐渐回零。可以证明，若L和C固定，随电阻R的增长，衰减到零的过程更加缓慢。

③ ，即阻尼系数。对应于临界阻尼状态，其解为

（19）

其中。它是从过阻尼到阻尼振动过渡的分界点，的关系见图6中的曲线III。

对于充电过程，即开关S先在位置“2”，待电容放电完毕，再把S倒向“1”，电源E将对电容充电，于是电路方程变为

（20）

初始条件为。方程解为

（21）

（22）

（23）

可见，充电过程和放电过程十分类似，只是最后趋向的平衡位置不同。

**【实验内容】**

本实验中，电压波形的相位差使用示波器进行测量，因此要利用一个标准电阻，将电流波形的测量转换为电阻上电压波形的测量。而交流电压大小的确定，可以利用示波器测量其波形的峰峰值。测量前请先了解示波器的输入阻抗。

本实验中所用的函数发生器、示波器都是接地的（已通过其电源插头与大地连通）。示波器实际上测量的是通道中心线对地的电压，因此利用示波器测量某元件上的电压时，需要留意电路中共地点的位置。

**1．测RLC串联电路的相频特性和幅频特性曲线**

测量电路如图1所示。取=0.1 H，=0.05 F，=100 ，用示波器CH1、CH2通道分别观测RLC串联电路的总电压和电阻两端电压。（注意两个通道的输入线的地端在b点共地。）注意限制总电压峰峰值不超过3.0 V（或有效值不超过1.0 V），**防止串联谐振时产生有危险的高电压。**

（1）调谐振，改变函数发生器的输出频率，找到谐振频率。在谐振时，用数字多用表测量，，。利用式（5）计算值。

（2）测相频特性曲线和幅频特性曲线：在总电压=2.0 V保持不变的条件下，用示波器（在双踪显示下）测出电压、电流间相位差，以及相应的。信号频率在大约1.50 ~ 3.30 kHz范围内，选择相位差约0°，15°，30°，45°，60°，72°，80°所对应的频率进行测量。参考频率（单位kHz）：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RLC串联电路的曲线和曲线。利用式（6）估算出值。分析讨论以上结果。

测量相位差的两种方法：（a）利用示波器左侧MENU按键，右侧面板上的“Measure”按键和相应的按键选取“相位”来测量相位差。打开显示屏右侧 “统计功能”，读取相位差的平均值“Avg”即可。注意：等待一会（大于10秒），让平均值稳定后再读数。当改变信号频率或幅度后，要先关闭“统计功能”，再打开，然后读取数据。（b）利用光标（示波器面板上“Cursor”按键）功能来读取同相位点时间间隔（对应示波器上显示）。然后利用关系式：可计算出相位差。

当改变频率而不改变函数发生器的输出电压时，外电路总电压会变小，尤其在谐振频率附近。这是由于函数发生器有50 内阻，而外部阻抗在谐振点附近时会明显减小。可通过适当增大函数发生器输出电压来保持总电压=2.0 V。

用示波器读取电压时，可读取“幅度值”或者“顶端值”，不要读取“峰峰值”，因为“峰峰值”包含了高频噪音的成分，系统误差大。

**2．测RLC并联电路的相频特性和幅频特性曲线。**

测量电路如图3所示，取=0.1 H，=0.05 F，=5 k（电阻是为监测总电流而串入的）。为观测电感与电容并联部分的电压和相位，用CH1测量总电压，用CH2测量两端电压，（注意共地点在b点），两通道测量电压值相减CH1-CH2就是并联部分的电压。可通过示波器面板上的“MATH”键实现两通道波形相减。

（1）调谐振。改变函数发生器的输出频率，观测并联部分的电压（CH1-CH2）与总电流（CH2）的幅度和相位的变化。找到谐振频率。

（2）测相频特性曲线和幅频特性曲线：固定总电压（）的峰峰值2.0 V保持不变，测量并联部分电压（CH1-CH2）与总电流（CH2）的相位差以及二者的幅度值。可用光标（Cursor）功能读取电压值。频率范围大约在1.70 ~ 2.80 kHz。参考频率（单位kHz）：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RLC并联电路的曲线和、曲线。

**3. 观测RLC串联电路的暂态过程。**

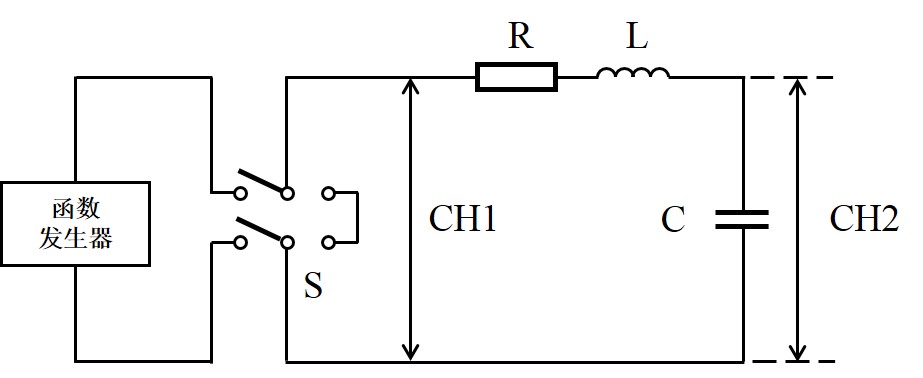
实验电路如图7所示。由函数发生器产生方波。为便于观察，要求将方波的低电平调整与示波器的扫描基线一致。由低电平到高电平相当于充电，由高电平到低电平相当于放电。函数发生器各参数可设为：频率50 Hz，电压峰峰值=2.0 V，偏移1V。示波器CH1通道用来测量总电压，CH2用来测量电容两端电压，注意两个通道必须共地。实验中L=0.1 H，C=0.2 μF。

图7 RLC暂态过程实验电路

1. R=0 Ω，测量波形。
2. 调节R测得临界电阻，并与理论值比较。
3. 记录R=2 KΩ，20 KΩ的波形。函数发生器频率可分别选为250 Hz （R=2 KΩ），和20 Hz（R=20 KΩ）。

**【参考文献】**

[1] 吕斯骅，段家忯，张朝晖。新编基础物理实验（第二版），北京：高等教育出版社，2013。