

# 探究如何利用谐振电路准确测量电容和电感

鲁 润

(永宁县第二中学 宁夏 银川 750100)

(收稿日期:2022-12-04)

**摘要:**当正弦波信号源的输出达到某一频率时,RLC 电路的电流达到最大值,即产生谐振现象.目前大多数实验主要是通过描绘 RLC 串并联电路的相频特性、幅频特性曲线来研究 RLC 电路的谐振现象,进一步测定谐振曲线、电路品质因数 Q 值等.那么,能不能利用 RLC 电路的谐振特性反过来测量电路中的电容和电感呢?为此,本文首先通过谐振电路理论推导出测量电容及电感的实验原理,然后进行大量的实验探究和数据分析,得出了准确测量电容和电感的条件.

**关键词:**RLC 谐振电路;谐振频率;电容;电感

在电感、电容和电阻三者串联或并联组成的简单电学振动系统中,当正弦波信号源的输出达到某一频率时,RLC 电路的电流达到最大值,即产生谐振现象.发生谐振现象时,电路中的电流、电压、阻抗、容抗、感抗等相关参数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电路.那么能不能利用谐振电路的这一特性测量电容和电感呢?笔者利用 RLC 电路谐振时电路参数之间关系,采用控制变量法,推导出测量电容和电感的理论基础;通过设计实验,多次测量探究,并对相关数据深入分析,发现利用 RLC 串联谐振电路测量电容和电感是切实可行的,但要想准确测量电容或电感是有条件的;最后还探究了电阻的改变对实验结果影响.

## 1 实验原理

### 1.1 利用 RLC 串联谐振电路测量电容和电感

在 RLC 串联电路中,若接入一个电压幅度一定,频率  $f$  连续可调的正弦交流信号源(图 1),则电路参数都将随着信号源频率的变化而变化.

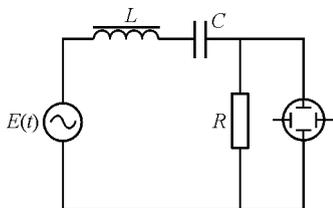


图 1 RLC 串联谐振电路

电路总阻抗

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

$$I = \frac{u_i}{Z} = \frac{u_i}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

在以上两个式子中,信号源角频率  $\omega = 2\pi f$ ,容抗  $X_C = \frac{1}{\omega C}$ ,感抗  $X_L = \omega L$ .各参数随  $f_0$  变化的趋势如图 2 所示.

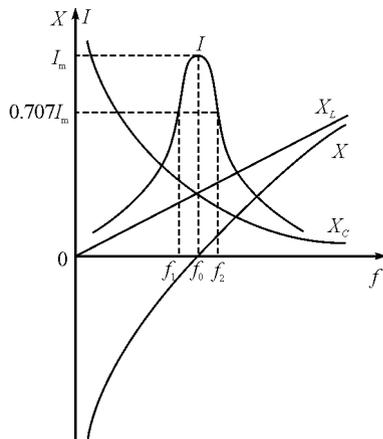


图 2 RLC 串联谐振电路  $I$  随  $\omega$  的变化曲线

在  $\omega$  很小时,电路总阻抗  $Z \rightarrow \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$ ;

在  $\omega$  很大时,电路总阻抗  $Z \rightarrow \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ ;

当  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ ,容抗与感抗互相抵消,电路总阻

抗  $Z = R$  为最小值,而此时回路电流则成为最大值

$I_{\max} = \frac{U_i}{R}$ , 这个现象即为谐振现象. 发生谐振时的频率  $f_0$  称为谐振频率, 此时的角频率  $\omega_0$  即为谐振角频率, 它们之间的关系为

$$\omega = \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

谐振时, 通常用品质因数  $Q$  来反映谐振电路的固有性质, 有

$$Q = \frac{Z_C}{R} = \frac{Z_L}{R} = \frac{U_C}{U_R} = \frac{U_L}{U_R}$$

$$Q = \frac{1}{\omega_0 RC} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

谐振时, 电流有极大值, 且  $I_{\max} = \frac{U}{R}$ . 当电源频率  $f$  偏离谐振频率  $f_0$  时, 电流就会减小. 偏离越大, 电流越小,  $I-f$  关系曲线如图 3 所示.

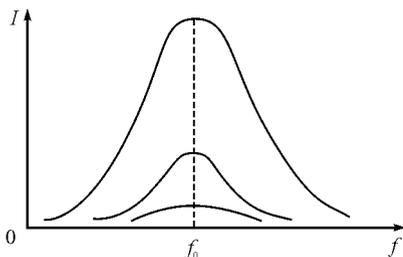


图 3  $I-f$  关系图

在谐振时,  $U_R = U_i$ ,  $U_L = U_C = QU_i$ , 所以电感和电容上的电压达到信号源电压的  $Q$  倍, 故串联谐振电路又称为电压谐振电路.

在  $RLC$  串联电路中, 当调节电源频率, 使其满足  $X_C = X_L$  时, 则电路中的电流和电源电压同相位, 电路的阻抗  $Z_0$  为最小,  $Z_0$  为谐振阻抗, 且  $Z_0 = R$ , 而电路中的电流为最大, 也就是  $R$  两端的电压最大, 所以调节信号发生器的输出频率与毫伏电压表上的读数变化趋势如图 4 所示.

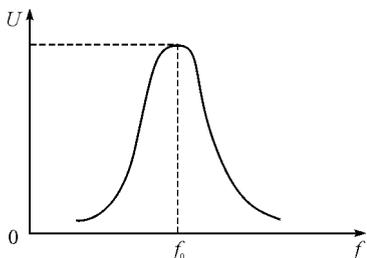


图 4 电压表读数变化趋势图

根据谐振特点, 当信号源端输出电压相同的情况下, 观察电阻  $R$  两端电压  $U$  是否达最大值来判断电路何时发生谐振<sup>[1]</sup>. 只要记下电路在最大电压  $U_R$  时对应的输出频率, 即为谐振频率  $f_0$ , 就可以计算出电感  $L$ , 因为此时谐振频率为

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

则线圈电感

$$L = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C}$$

所以在  $RLC$  串联电路中, 如果已知电容, 就可以求出电感.

反之, 已知电感, 就可以求出电容.

## 1.2 利用 $RLC$ 并联谐振电路测量电容和电感

并联谐振是指在电阻、电容、电感并联电路中, 出现电路端电压和总电流同相位的现象.

我们知道, 电路在并联谐振时的谐振频率为

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

一般情况下, 线圈的电阻远小于线圈感抗, 即  $R_L = X_L$ , 若忽略线圈电阻  $R_L$ , 则有

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

$$L = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C}$$

确定谐振频率后, 由公式即可计算出线圈电感  $L$  的大小, 反之, 若已知电感, 就可以求出电容. 在并联谐振电路中, 回路的总电流  $I$  为最小, 谐振回路的总阻抗为最大, 所以  $U$  的波形幅值为最大. 因此, 并联谐振也叫电流谐振.

综上  $RLC$  并联电路谐振的条件频率为  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  时, 利用  $RLC$  并联谐振电路的特性, 在电容已知的情况下, 就可以得到电感, 在电感已知的情况下, 就可以得到电容. 即

$$L = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C}$$

$$C = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L}$$

## 2 实验仪器与装置

实验装置如图5所示. YB2172型交流毫伏表, DH4503型RLC电路实验仪.

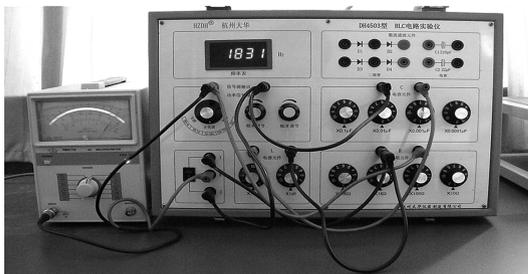


图5 实验装置图

## 3 实验方法

检查实验仪器,按照图6所示实验线路图连接线路. $L$ 和 $C$ 之值为实验仪器的标称值,根据电感和电容的选取,选择一个适当的 $R$ 值,本实验中 $R=30\ \Omega$ .当 $S$ 与“2”接通,调节 $U_S$ 的电压输出幅度,保证各种频率测量时的有效输出电压值都是 $1.0\ \text{V}$ .

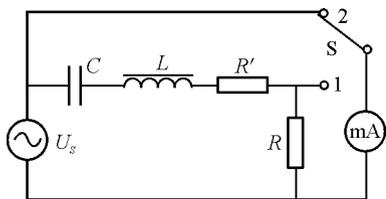


图6 实验线路图

### 3.1 利用谐振电路测量电感

(1) 当开关 $S$ 拨向“1”时,交流毫伏表测量的是电阻 $R$ 两端电压 $U_R$ .假定已知电容 $C$ ,保持信号源的输出幅度恒定为 $1.0\ \text{V}$ .

(2) 改变信号源频率,用交流毫伏表测出相应频率下 $U_R$ 的大小.

(3) 找出电阻 $R$ 两端电压 $U_R$ 最大值,对应的频率 $f_0$ 即为谐振频率<sup>[2]</sup>.

**注意:**因为信号源不是恒压源,它有固定的内阻,而外电路是随频率变化而变化的阻抗,因而信号源的输出幅度也必然随频率改变而变化.这就给测量 $U_R$ 的最大值带来了麻烦,必须反复多次调节输出电压 $U_S$ ,保证各种频率测量时的有效输出电压值都是 $1.0\ \text{V}$ ,以提高实验准确性.

(4) 改变电容 $C$ ,重复以上三步,进行多次实验.

(5) 将实验数据代入,计算可得电路中的电感.

### 3.2 利用谐振电路测量电容

(1) 当开关 $S$ 拨向“1”时,交流毫伏表测量的是电阻 $R$ 两端电压 $U_R$ .假定已知电感 $L$ ,改变信号发生器的频率,观察记录各次频率变化和交流毫伏表变化情况(幅频特性),确定 $U_R$ 的最大值以及此时的谐振频率 $f_0$ .

(2) 按照以上3.1(1)到3.1(3)实验操作方法,确定电容变化时,对应的谐振频率 $f_0$ .

(3) 将实验数据代入,计算可得电路中的电容.

### 3.3 电阻对电路的影响

(1) 调节实验仪器使 $U=1.0\ \text{V}$ , $C=0.04\ \mu\text{F}$ , $L=110\ \text{mH}$ ,改变信号发生器的输出频率 $f$ ,分别记录当电阻 $R=30\ \Omega$ 时和 $R=300\ \Omega$ 时的实验数据.

(2) 按照上述步骤,可再次调节实验仪器使 $U=1.0\ \text{V}$ , $R=30\ \Omega$ , $C=0.5\ \mu\text{F}$ , $L=10\ \text{mH}$ ,改变信号发生器的输出频率 $f$ ,分别记录当电阻 $R=30\ \Omega$ 时和 $R=5\ \text{k}\Omega$ 时的实验数据.

(3) 多次测量,对实验数据进行分析处理,得出结论.

## 4 实验数据及处理

### 4.1 利用串联谐振电路测量电感可行性研究

实验中 $U=1.0\ \text{V}$ , $R=30\ \Omega$ ,改变信号发生器的频率 $f$ ,其他实验数据见表1~4.

表1  $C=0.5\ \mu\text{F}$ 时实验数据

$f/\text{Hz}$	1 837	1 960	2 169	2 217	2 229	2 238	2 242	2 245
$U/\text{V}$	0.441	0.562	0.798	0.820	0.821	0.821	0.822	0.822
$f/\text{Hz}$	2 249	2 251	2 255	2 258	2 274	2 493	2 641	2 926
$U/\text{V}$	0.823	0.822	0.822	0.821	0.820	0.640	0.510	0.359

对表1数据进行处理:标准电感 $L=10\text{ mH}$ ,将数据代入,则有

$$L' = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C} = \frac{1}{(2\pi \times 2249)^2 \times 0.5 \times 10^{-6}} \text{ H} = 1.0016 \times 10^{-2} \text{ H}$$

实验相对误差

$$\epsilon = \left| \frac{L-L'}{L} \right| \times 100\% = \left| \frac{10 \times 10^{-3} - 1.0016 \times 10^{-2}}{10 \times 10^{-3}} \right| \times 100\% = 0.16\%$$

表2  $C=0.6\text{ }\mu\text{F}$  时实验数据

$f/\text{Hz}$	1 727	1 806	1 860	1 917	1 981	1 999	2 022	2 032
$U/\text{V}$	0.520	0.612	0.680	0.742	0.802	0.812	0.819	0.822
$f/\text{Hz}$	2 036	2 043	2 052	2 068	2 090	2 104	2 182	2 286
$U/\text{V}$	0.823	0.822	0.822	0.821	0.818	0.810	0.758	0.658

同理对表2数据处理,标准电感 $L=10\text{ mH}$ ,则有 实验相对误差

$$L' = 1.0184 \times 10^{-2} \text{ H} \quad \epsilon = 1.84\%$$

表3  $C=0.05\text{ }\mu\text{F}$  时实验数据

$f/\text{Hz}$	1 871	2 456	3 301	4 652	5 035	6 032	7 062	7 070
$U/\text{mV}$	18.5	30.7	41.8	78.0	96.2	202	760	761
$f/\text{Hz}$	7 074	7 082	7 088	7 097	7 111	7 123	7 238	7 525
$U/\text{mV}$	761	762	761	761	760	758	687	453

同理对表3数据处理,标准电感 $L=10\text{ mH}$ ,则有 实验相对误差

$$L' = 1.0101 \times 10^{-2} \text{ H} \quad \epsilon = 1.01\%$$

表4  $C=0.06\text{ }\mu\text{F}$  时实验数据

$f/\text{Hz}$	5 454	5 624	5 898	6 116	6 305	6 429	6 464	6 474
$U/\text{V}$	0.200	0.310	0.342	0.486	0.667	0.758	0.760	0.761
$f/\text{Hz}$	6 478	6 482	6 488	6 498	6 506	6 528	6 792	7 127
$U/\text{V}$	0.761	0.762	0.761	0.761	0.760	0.752	0.541	0.342

同理对表4数据处理,标准电感 $L=10\text{ mH}$ ,则有 串联谐振电路测量电感是切实可行且误差较小的。

$$L' = 1.0048 \times 10^{-2} \text{ H}$$

#### 4.2 利用谐振电路测量电容可行性研究

实验相对误差  $\epsilon = 0.48\%$

实验中 $U=1.0\text{ V}$ , $R=30\text{ }\Omega$ ,其他实验数据见表

由表1到表4数据分析、处理,可以看出:利用 $RLC$  5~8.

表5  $L=50\text{ mH}$  时实验数据

$f/\text{Hz}$	700	792	875	922	962	973	979	991
$U/\text{V}$	0.120	0.181	0.302	0.423	0.570	0.650	0.628	0.647
$f/\text{Hz}$	994	1 002	1 005	1 010	1 018	1 025	1 061	1 086
$U/\text{V}$	0.651	0.656	0.658	0.649	0.630	0.620	0.501	0.430

对表5数据处理:

标准电容 $C=0.5\text{ }\mu\text{F}$ ,将数据代入,则有

$$C' = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L} =$$

$$\frac{1}{(2\pi \times 100.5)^2 \times 50 \times 10^{-3}} F =$$

$$5.0158 \times 10^{-7} F$$

实验相对误差

$$\epsilon = \left| \frac{C - C'}{C} \right| \times 100\% =$$

$$\left| \frac{5 \times 10^{-7} - 5.0158 \times 10^{-7}}{5 \times 10^{-7}} \right| \times 100\% = 0.32\%$$

表6  $L=60$  mH 时实验数据

$f/\text{Hz}$	779	829	859	872	887	893	896	898
$U/\text{V}$	0.250	0.374	0.482	0.587	0.621	0.627	0.629	0.638
$f/\text{Hz}$	902	907	910	912	916	927	985	1 104
$U/\text{V}$	0.640	0.643	0.646	0.644	0.643	0.622	0.420	0.210

同理对表6数据处理,标准电容  $C=0.5 \mu\text{F}$ ,则有 实验相对误差

$$C' = 5.0981 \times 10^{-7} F$$

$$\epsilon = 1.96\%$$

表7  $L=1$  mH 时实验数据

$f/\text{Hz}$	1 235	2 593	3 712	4 671	5 499	6 445	6 768	6 932
$U/\text{mV}$	118	272	430	603	763	907	930	938
$f/\text{Hz}$	7 075	7 104	7 124	7 151	7 217	7 328	7 594	7 996
$U/\text{mV}$	939	938	940	939	939	923	920	890

同理对表7数据处理,标准电容  $C=0.5 \mu\text{F}$ ,则有 实验相对误差

$$C' = 4.9911 \times 10^{-7} F$$

$$\epsilon = 0.18\%$$

表8  $L=3$  mH 时实验数据

$f/\text{Hz}$	1 658	2 927	3 355	3 762	3 870	3 916	4 015	4 077
$U/\text{mV}$	187	476	650	822	857	865	880	883
$f/\text{Hz}$	4 092	4 109	4 127	4 140	4 220	4 261	4 385	4 655
$U/\text{mV}$	884	886	884	884	880	877	847	770

同理对表8数据处理,标准电容  $C=0.5 \mu\text{F}$ ,则有 联谐振电路测量电容是可行且误差较小的。

$$C' = 5.0009 \times 10^{-7} F$$

## 4.3 利用RLC串联谐振电路准确测量电感的研究

实验相对误差  $\epsilon = 0.018\%$ 实验时  $U=1.0 \text{ V}$ ,  $R=30 \Omega$ , 标准电感为  $110$ 

由表5到表8数据分析,可以看出:利用RLC串 mH,其他实验数据见表9。

表9 改变电容实验数据及处理

$C/\text{nF}$	1.0	2.0	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4
$f_0/\text{Hz}$	14 121	10 282	8 542	8 391	8 269	8 147	8 039
$L/\text{mH}$	127.031	119.799	115.717	116.051	115.766	115.646	115.280
$\sigma_L/\%$	15.48	8.91	5.20	5.50	5.24	5.12	4.80
$C/\text{nF}$	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0	5.0
$f_0/\text{Hz}$	7 910	7 801	7 688	7 591	7 512	7 421	6 686
$L/\text{mH}$	115.669	115.621	115.827	115.680	115.097	114.988	113.328
$\sigma_L/\%$	5.15	5.11	5.30	5.16	4.63	4.53	3.03

续表 9

$C/nF$	6.0	8.0	10	70	100	400
$f_0/Hz$	6 111	5 306	4 763	1 798	1 506	752
$L/mH$	113.048	112.464	111.655	111.934	111.683	111.982
$\sigma_L/\%$	2.77	2.24	1.50	1.76	1.53	1.80

说明: $\sigma_L$ 为实验相对误差.

通过表 9 实验数据分析,可以看出:利用  $RLC$  串联谐振电路准确测量电容,是有条件的.当电感一定,电容比较小时,测得电感相对误差比较大.经过多次实验,得出若电容  $C$  大于  $3.9 \times 10^{-9}$  F 时,利用 DH4503 型  $RLC$  电路实验仪能够较准确地测量

电感,可以将相对误差控制在 5% 以内.

综上所述,在电容已知的情况下,如果电容较大,可以利用  $RLC$  串联谐振电路较准确测量电感.

#### 4.4 利用 $RLC$ 串联谐振电路准确测量电容的研究

实验中  $U = 1.0$  V,  $R = 30$   $\Omega$ , 标准电容为 1.1  $\mu$ F, 其他实验数据见表 10.

表 10 改变电感实验数据及处理

$L/mH$	1	3	5	6	7	8	9	10	20	40
$f_0/Hz$	4 782	2 770	2 151	1 965	1 803	1 684	1 590	1 507	1 058	748
$C/\mu F$	1.107	1.100	1.094	1.093	1.113	1.116	1.113	1.115	1.131	1.131
$\sigma_C/\%$	0.64	0	0.55	0.64	1.18	1.45	1.18	1.36	2.82	2.82

说明:在使用的 DH4503 型  $RLC$  电路实验仪中,电感的变化范围是有限的.只能在 1 ~ 110 mH 之间变化,所以本实验所得出的结论可能具有局限性. $\sigma_C$ 为实验相对误差.

通过表 10 实验数据分析,可以得出:在实验的误差范围内,无论电感值是大是小,都可以利用

$RLC$  串联谐振电路较准确地测量出电路中的电容.

综上,在电感已知的情况下,可以利用该仪器较准确地测量电容,而不受电感值大小的影响.

#### 4.5 探究电路中电阻对实验的影响

(1) 实验中  $U = 1.0$  V,  $C = 0.04$   $\mu$ F,  $L = 110$  mH, 改变电阻,实验数据见表 11 和表 12.

表 11  $R = 30$   $\Omega$  时实验数据

$f/Hz$	1 569	1 879	2 125	2 241	2 331	2 351	2 384
$U/V$	0.200	0.338	0.563	0.734	0.850	0.864	0.870
$f/Hz$	2 388	2 397	2 413	2 430	2 448	2 763	3 034
$U/V$	0.870	0.873	0.870	0.868	0.867	0.520	0.349

表 12  $R = 300$   $\Omega$  时实验数据

$f/Hz$	1 890	2 173	2 207	2 225	2 292	2 303	2 365
$U/mV$	37	90	107	120	183	205	392
$f/Hz$	2 388	2 391	2 395	2 413	2 434	2 535	2 849
$U/mV$	418	420	421	385	325	150	50

对表 11 和表 12 数据进行对比分析,可以看出:改变电阻,在实验误差范围内,对实验结果基本没有影响.

(2) 实验中  $U = 1.0$  V,  $C = 0.5$   $\mu$ F,  $L = 10$  mH, 改变电阻,实验数据见表 13 和表 14.

表 13  $R = 30 \Omega$  时实验数据

$f/\text{Hz}$	1 837	1 960	2 169	2 217	2 229	2 238	2 242	2 245
$U/\text{V}$	0.441	0.562	0.798	0.820	0.821	0.821	0.822	0.822
$f/\text{Hz}$	2 249	2 251	2 255	2 258	2 274	2 493	2 641	2 926
$U/\text{V}$	0.823	0.822	0.822	0.821	0.820	0.640	0.510	0.359

表 14  $R = 5 \text{ k}\Omega$  时实验数据

$f/\text{Hz}$	665	893	1 079	1 273	1 454	1 985	2 757	3 892
$U/\text{V}$	0.985	0.990	0.994	0.987	0.998	0.999	0.999	0.998
$f/\text{Hz}$	4 201	5 258	6 249	7 731	8 524	9 456	10 309	12 301
$U/\text{V}$	0.998	0.998	0.998	0.989	0.987	0.983	0.981	0.980

从表 13 和表 14 可以看出,当电阻较大(实验中  $R=5 \text{ k}\Omega$ )时,调节信号发生器的频率  $f$ ,发现  $R$  两端的电压只在  $0.980 \sim 1.00 \text{ V}$  之间变化,变化幅度非常小,难以准确读数,这给确定  $RLC$  串联谐振电路的谐振频率  $f_0$  带来很大困难,所以在这种情况下,利用谐振电路是无法准确测量电感和电容的。

这种现象的本质原因分析:

(1) 由于实验采用通过改变输入信号的频率,观察电阻  $R$  上的最大输出电压,来获取谐振频率  $f_0$  的方法,如果电阻  $R$  比较大,就会造成谐振品质因数  $Q$  值太低,谐振强度不够,谐振频率附近电阻  $R$  两端电压变化不灵敏,所以电压的变化范围必定很小。

(2) 在串联谐振时由于电感与电容两端的电压降大小相等方向相反,在电路中他们的作用是彼此抵消的,所以外加电压相当于完全被电阻  $R$  所消耗,即  $U=U_R=IR$ ,显然此时电路中的电流值就只取决于电阻  $R$ ,而与电感  $L$  和电容  $C$  无关,也就是说无法进行测量。

综上所述,虽然理论上电阻的改变并不影响结果,但是为了提高测量的准确度,在实际测量过程中,建议应选取阻值较小的电阻进行实验。

## 5 讨论

通过多次实验探究,发现利用  $RLC$  串联谐振电路测量电容和电感是切实可行的,但要想准确测量电容或电感是有条件的。

(1) 在电容已知的情况下,当电感一定,电容比较小时,测得电感相对误差比较大.当电容  $C$  大于  $3.9 \times 10^{-9} \text{ F}$  时,利用 DH4503 型  $RLC$  电路实验仪能够较准确地测量电感,可以将相对误差控制在  $5\%$  以内。

(2) 在电感已知的情况下(电感量只能在  $1 \sim 110 \text{ mH}$  之间变化),可以利用  $RLC$  串联谐振电路较准确地测量电容,但应注意控制电阻  $R$  为较小值。

注意在本实验中笔者使用的是毫伏电压表判断电路何时发生谐振,所以必须保证在端电压输出相同的前提下比较测量值  $U_R$ ,至于我们能否在确定谐振频率时引入示波器?示波器是不是测量更为直观、准确?可以作为另一个设计性实验进行研究.实验过程中还应注意不能长时间持续实验,不然会造成谐振电路的  $LC$  总内阻发生变化、谐振频率不稳定、谐振品质因数低、电路损耗较大、一些特性不稳定等等<sup>[3]</sup>。

## 参考文献

- [1] 王玉清. 信号发生器输出幅度对  $RLC$  串联谐振电路特性的影响[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2022, 41(4): 108-111.
- [2] 白云, 秦羽泽, 解景舜, 等. 串联  $RLC$  谐振电路特性研究实验方案改进[J]. 物理与工程, 2022(4): 178-182.
- [3] 陈庭勋.  $RLC$  串联谐振电路实验误差的分析及改进[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2001, 20(2): 164-166.