

实验报告

课程名称: _____ 电路实验 IB _____

实验名称: _____ RLC 谐振电路及 RC 选频网络特性实验 _____

姓名: psp

实验日期: 2023 年 9 月 8 日 评分: _____

教师评语:

教师签字: _____

日 期: _____

一、实验目的

1. 通过实验进一步理解 R, L, C 的阻抗特性, 并且练习使用信号发生器和示波器。
2. 了解谐振现象, 加深对谐振电路特性的认识, 研究电路参数对串联谐振电路特性的影响。
3. 理解谐振电路的选频特性及应用, 掌握测试通用谐振曲线的方法。
4. 加深理解 RC 选频网络的选频特性, 测量 RC 网络的选频特性。

二、实验原理 (重点简述实验原理, 画出原理图)

1.4.1 RLC 串联谐振

1. 正弦交流电路中, 电感的感抗 $X_L = \omega L = 2\pi fL$, 空心电感线圈的电感在一定频率范围内可认为是线性电感, 当其电阻值 r 较小, 有 $r \ll X_L$ 时, 可以忽略其电阻的影响。电容器的容抗 $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$ 。当电源频率变化时, 感抗 X_L 和容抗 X_C 都是频率 f 的函数, 称之为频率特性 (或阻抗特性)。典型的电感元件和电容元件的阻抗特性如图 1-1。

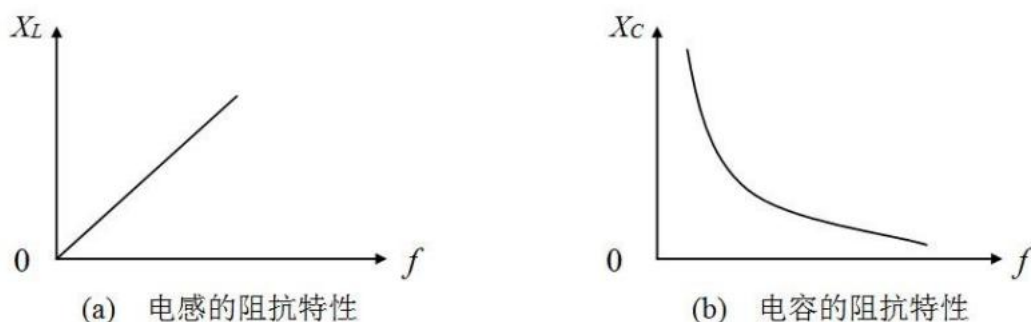


图 1-1 典型元件的频率特性曲线

2. 为了测量电感的感抗和电容的容抗, 可以测量电感和电容两端的电压有效值及流过它们的电流有效值。则感抗 $X_L = \frac{U_L}{I_L}$, 容抗 $X_C = \frac{U_C}{I_C}$ 。当电源频率较高时, 用普通的交流电流表测量电流会产生很大的误差, 为此可以用交流毫伏表进行间接测量得出电流值。在图 1-2 的电感和电容电路中串入一个阻值较准确的取样电阻 R_0 , 先用毫伏表测量取样电阻两端的电压值, 再换算成电流值。如果取样电阻取为 1Ω , 则毫伏表的读数即为电流的值, 这样小的电阻在本次实验中对电路的影响是可以忽略的。

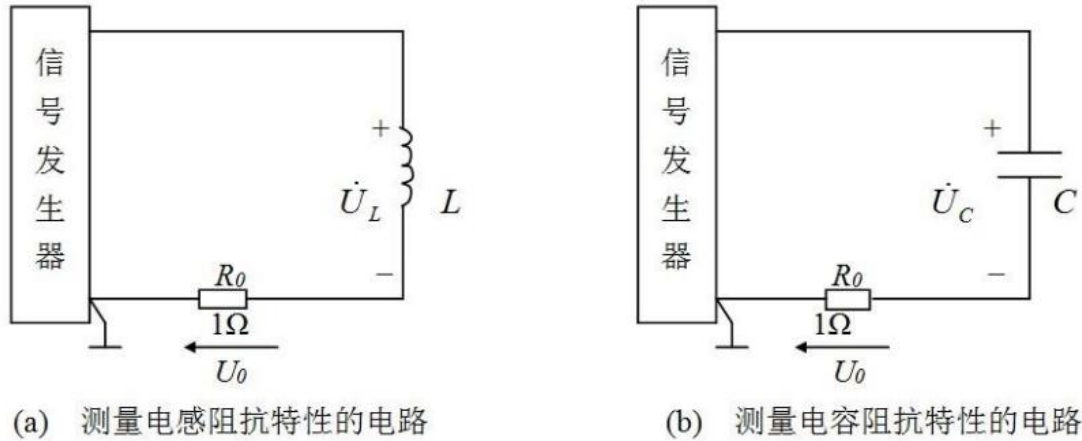


图 1-2 测量典型元件的电路图

在图 1-3 所示的 RLC 串联电路中，当外加角频率为 ω 的正弦电

压 U 时，电路中的电流为
$$\dot{i} = \frac{\dot{U}}{R' + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}$$
 式中 $R' = R + r$ ， r 为线圈电阻。当 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ 时，电路发生串联谐振，谐振频率为：

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

此式即为产生串联谐振的条件。可见，改变 L 、 C 或电源频率 f 都可以实现谐振。本次实验是通过改变外加电压的频率使电路达到谐振的。

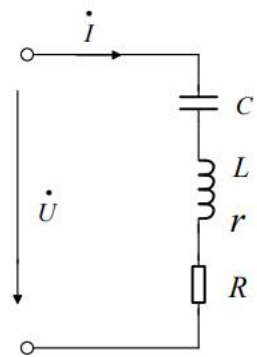


图 1-3 R、L、C 串联电路

串联谐振有以下特征：

1) 谐振时电路的阻抗最小，而且是纯电阻性的，即

$$Z_0 = R' + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \Big|_{\omega=\omega_0} = R'$$

此时谐振电流 I 与电压 U 同相位，且 $I_0 = U/R'$ 为最大值。本次实验就是依据这种特征来找谐振点的。

2) 谐振时有 $U_L = U_C$ ，电路的品质因数 Q 为

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\omega_0 L}{R'} = \frac{1}{\omega_0 C R'} = \frac{\sqrt{L/C}}{R'}$$

RLC 串联电路中的电流与外加电压角频率 ω 之间的关系称为电流的幅频特性，即

$$I(\omega) = \frac{U}{\sqrt{R'^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

为了便于比较，将上式中的电流及频率均以相对值 I/I_0 及 f/f_0 表示，则

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)^2}}$$

图 1-4 为 I/I_0 与 f/f_0 的关系曲线，又称通用串联谐振曲线。可见谐振时电流 I_0 的大小与 Q

值无关，而在其他频率下，Q 值越大，电流越小，串联谐振曲线的形状越尖，说明选择性越好。曲线中 $I/I_0=1/2$ 时，对应的频率 f_2 （上限频率）和 f_1 （下限频率）之间的宽度为通频带 Δf ， $\Delta f=f_2-f_1$ 。由图 1-4 可见，Q 值越大，通频带越窄，电路的选择性越好。电路的阻抗角 φ 与频率的关系称为相频特性，特性曲线如图 1-5 所示。

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

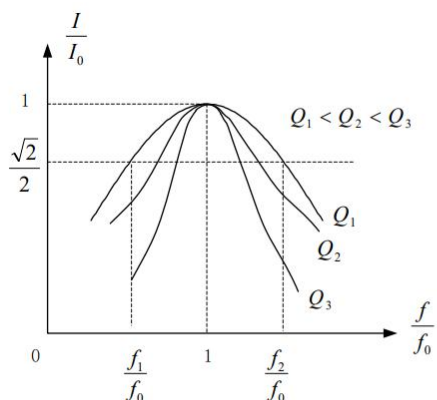


图 1-4 串联谐振曲线

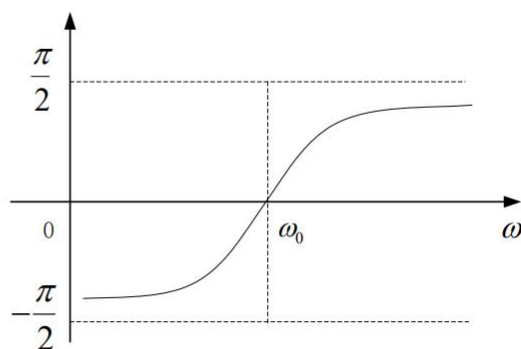


图 1-5 相频性曲线

1.4.2 RC 选频网络

如图 1-6 所示的 RC 串、并网络由 R_1C_1 串联及 R_2C_2 并联网络组成，一般取 $R_1=R_2=R$ ， $C_1=C_2=C$ 。该电路输入信号 U_i 的频率变化时，其输出信号幅度 U_0 随着频率的变化而变化。

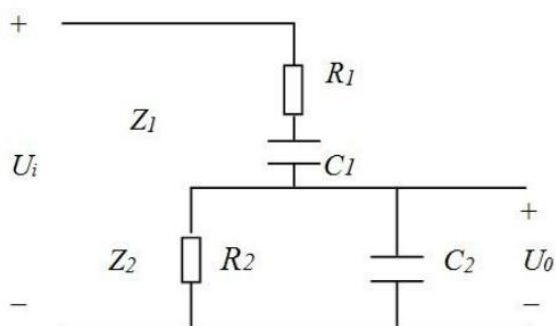


图 1-6 RC 选频网络

用 Z_1 表示串联网络的阻抗，用 Z_2 表示并联网络的阻抗，则有：
输出信号：

$$U_0 = U_i \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}$$

可以得到：

$$\frac{U_0}{U_i} = \frac{\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}} = \frac{1}{(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1}) + j(\omega C_2 R_1 - \frac{1}{\omega C_1 R_2})}$$

在实验中取 $R_1=R_2=R$, $C_1=C_2=C$, 则上式变为：

$$\frac{U_0}{U_i} = \frac{1}{3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})}$$

代入 $\omega_0 = \frac{1}{RC}$, 得到: $\frac{U_0}{U_i} = \frac{1}{3 + j(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})}$

若用电压传递系数 K 表示 U_0 的模值, 则:

$$K = \left| \frac{U_0}{U_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{3^2 + (\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})^2}}$$

对应于不同的频率 $f = \frac{\omega}{2\pi}$, 可以画出 RC 串、并网络的选频特性曲线, 如图 1-7 所示。

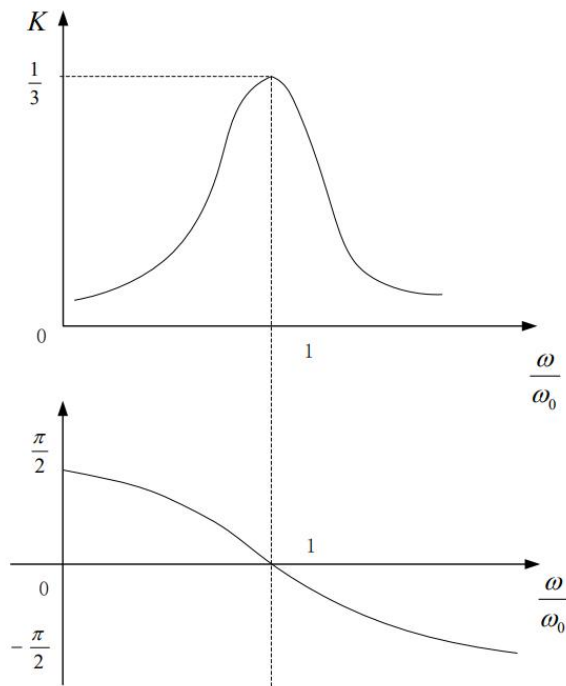


图 1-7 RC 选频网络的频率特性

可见, 当频率为 ω_0 时, 幅频特性有最大值 3^{-1} , 相频特性为 0。这正是称之为选频网络的原因所在。图 1-7 中, 当 $\omega > \omega_0$ ($\omega/\omega_0 > 1$) 时, 电路呈感性; 当 $\omega < \omega_0$ ($\omega/\omega_0 < 1$) 时, 电路呈容性;

当 $\omega = \omega_0$ ($\omega/\omega_0 = 1$) 时, $K = K_0 = 1/3$, 达到最大值, 所以 $f = f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 为谐振频率。

实验预习和实验过程原始数据记录

实验名称 RLC 谐振电路及 RC 选频网络特性实验 姓名: psp

实验日期与时间: 2023/9/7 登陆台号: 46

预习结果审核: _____ 原始数据审核: _____
(包括预习时, 计算的理论数据)

表 1-1 测量电阻阻抗特性实验数据

频率 $f(\text{kHz})$		0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	8.0	10	12
测量值	$U_R(\text{V})$	1.952	1.952	1.954	1.958	1.969	1.975	1.977	1.977
	$U_0(\text{mV})$	20.17	20.18	20.19	20.19	20.19	20.19	20.19	20.19
计算值	$I_R(\text{mA})$	20.17	20.18	20.19	20.19	20.19	20.19	20.19	20.19
	$R(\Omega)$	100	100	100	100	100	100	100	100

表 1-2 测量电感元件阻抗特性实验数据

频率 $f(\text{kHz})$		0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	8.0	10	12
测量值	$U_L(\text{V})$	1.892	1.948	1.973	1.985	1.998	2.004	2.006	2.007
	$U_0(\text{mV})$	79.2	49.9	28.56	15.12	6.29	3.97	3.202	2.675
计算值	$I_L(\text{mA})$	79.2	49.9	28.56	15.12	6.29	3.97	3.202	2.675
	$X_L(\Omega)$	23.89	39.04	69.08	131.3	317.6	504.8	626.5	750.3

表 1-3 测量电容元件阻抗特性实验数据

频率 $f(\text{kHz})$		0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	8.0	10	12
测量值	$U_C(\text{V})$	1.982	1.985	1.987	1.990	2.003	2.010	2.013	2.015
	$U_0(\text{mV})$	2.542	6.30	12.54	25.03	62.4	99.4	124.2	148.9
计算值	$I_C(\text{mA})$	2.542	6.30	12.54	25.03	62.4	99.4	124.2	148.9
	$X_C(\Omega)$	779.7	315.1	158.5	79.50	32.10	20.22	16.21	13.53

表 1-4 串联谐振实验数据表格 计算的 $f_0 = 10.7\text{kHz}$

$R = 51 \Omega$	$L = 10 \text{ mH}$	$C = 0.022 \mu\text{F}$
$U_R = 0.533 \text{ V}$	$U_L = 6.89 \text{ V}$	$U_C = 6.88 \text{ V}$
$f_0 = 10.7 \text{ kHz}$	$I_0 = U_R/R = 10.45 \text{ mA}$	$Q = 13.220$

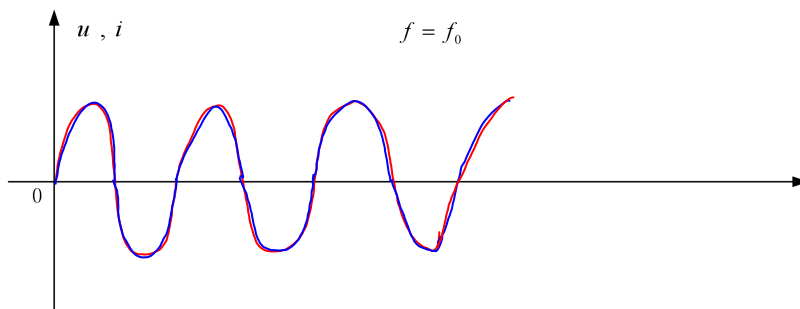
表 1-5 谐振曲线数据表格 (一) $U = 1$ (V)

$R=100\Omega, L=10\text{mH}, C=0.022\mu\text{F}, Q=6.742$													
$f(\text{kHz})$	6	7	8	9	10	10.5	$f_0=10.7$	11	12	13	14	15	16
$U(\text{mV})$	120	66	239	368	600	697	707	704	512	365	280	228	192
$I(\text{mA})$	0.12	0.66	2.39	3.68	6.00	6.97	7.07	7.04	5.12	3.65	2.80	2.28	1.92
I/I_0	0.01	0.06	0.23	0.35	0.57	0.67	0.68	0.67	0.49	0.35	0.27	0.22	0.18
f/f_0	0.56	0.65	0.75	0.84	0.93	0.98	1.0	1.03	1.12	1.21	1.31	1.4	1.5

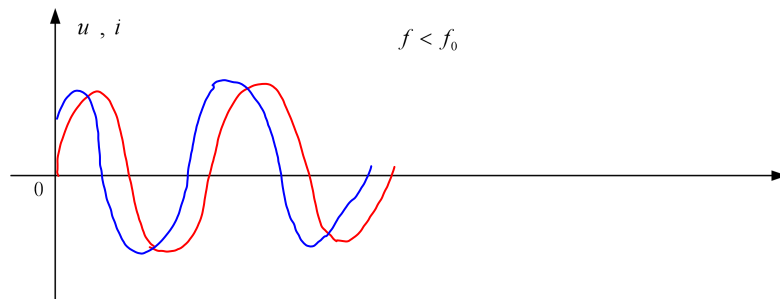
表 1-6 谐振曲线数据表格 (二) $U = \underline{\quad} / \underline{\quad}$ (V)

$R = 510\Omega$ 、 $L = 10\text{mH}$ 、 $C = 0.022\mu\text{F}$ $Q = 1.322$													
$f(\text{kHz})$	6	7	8	9	10	10.5	$f_0 = 10.7$	11	12	13	14	15	16
$U_R(\text{mV})$	514	632	751	854	917	931	933	932	904	849	786	724	667
$I(\text{mA})$	1.01	1.24	1.47	1.67	1.798	1.83	1.83	1.83	1.77	1.66	1.54	1.42	1.31
I/I_0	0.1	0.1 2	0.14	0.16	0.17	0.18	0.18	0.1 8	0.1 7	0.16	0.15	0.14	0.13
f/f_0	0.5 6	0.6 5	0.75	0.84	0.93	0.98	1.0	1.0 3	1.1 2	1.21	1.31	1.4	1.5

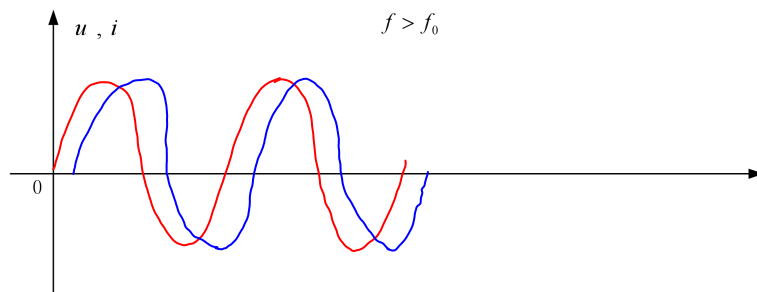
示波器观测 $R-L-C$ 串联谐振电路中电流和电压的相位关系, 记录 i 和 u 波形如下: (坐标纸绘图) (要求画出 2~3 个周期的波形, 标明: u , i , 周期值, 有效值或者峰值, 相位差)



峰值 1: 1.465V, 峰值 2: 1.58V; 相移 -0.21° ; 周期: 94.4us



峰值 1: 1.435V, 峰值 2: 1.565V; 相移 -11.25° ; 周期: 99.9us



峰值 1: 1.42V, 峰值 2: 1.58V; 相移 15.59° ; 周期: 83.4us

表 1-7 测量选频特性实验数据 (一) $U_i = \underline{\quad} / \underline{\quad}$ (V)

$f(\text{Hz})$	100	500	800	900	1000	1200	1500	1800	2000
----------------	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------

U_0 (mV)	95.3	296.0	327.8	330.7	331.7	329.5	320.1	307.1	297.6
$K=U_0/U_i$	0.0953	0.2960	0.3278	0.3307	0.3317	0.3295	0.3201	0.3071	0.2976

表 1-8 测量选频特性实验数据 (二) 计算的 $f_0 = 1061 \text{ Hz}$ 实测 $U_i = 0.997 \text{ (V)}$

f (Hz)	200	300	400	600	700	$f_0 = 1061$	1100	1300	1400	1600	1700
U_0 (mV)	174.9	232.2	270.9	312.0	322.0	331.5	331.1	326.9	323.7	316.0	311.7
$K=U_0/U_i$	0.1749	0.2322	0.2709	0.3120	0.3220	0.3315	0.3311	0.3269	0.3237	0.3160	0.3117

四、实验过程

(叙述具体实验过程的步骤和方法, 记录实验数据在原始数据表格, 如需要引用原始数据表格, 请标注出表头, 如“实验数据见表 1-1”)

1. 测量电阻的阻抗特性

连线, 按表 1-1 所示数据调节函数发生器输出正弦电压的频率 (从低到高), 使用交流毫伏表分别测量 U_R 、 U_0 , 计算出 I_R 的值记入表 1-1 中。注意每次改变信号源频率时, 应保证信号发生器输出正弦电压保持在 $2V_{rms}$ (函数发生器的信号设置为 $1V_{rms}$), 测试 I_R 是由测上面的电压 U_0 得到的, 正确选择量程。

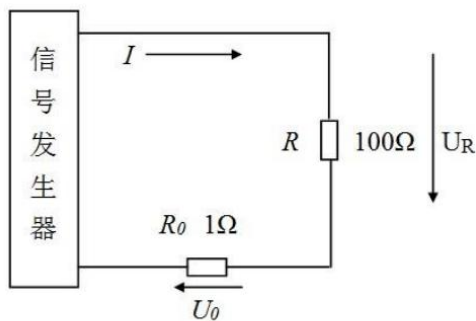


图 1-8 测量电阻阻抗特性的电路

2. 测量电感元件阻抗特性

调节信号发生器输出正弦电压为 $2V_{rms}$, 选取 L 为 10mH , R_0 仍取 1Ω 。按表 1-2 所示数据改变信号发生器的输出频率。分别测量 U_L , U_0 的值记入表 1-2 中, 并注意每次改变电源频率时应调节信号发生器的输出电压保持不变。然后, 根据 $I_L = U_0 / R_0$, $X_L = U_L / I_L$ 两式将计算结果填入表 1-2 中。

3. 测量电容阻抗特性

调节信号发生器输出正弦电压为 $2V_{rms}$, 选取 C 为 $1\mu\text{F}$, R_0 不变, 取 1Ω 。按表 1-3 所示数据改变信号发生器的输出频率。分别测量 U_C , U_0 的值记入表 1-3 中, 相应调节信号源输出电压保持在 $2V_{rms}$ 。再根据 $I_C = U_0 / R_0$, $X_C = U_C / I_C$ 两式将计算结果填入表 1-3 中。

4. 谐振电路

1. R 取 51Ω , L 取 10mH , C 取 $0.022\mu\text{F}$ (谐振频率为 10kHz 左右), 信号发生器的输出正弦电压保持在 1Vrms (用交流毫伏表监测)。用毫伏表测量电阻 R 上的电压, 因为 $U_R=RI$, 当 R 一定时, U_R 与 I 成正比, 电路谐振时的电流 I 最大, 电阻电压 U_R 也最大。细心调节输出电压的频率, 使 U_R 为最大, 电路即达到谐振 (调节前可先计算谐振频率作为参考), 测量电路中的电压 U_R 、 U_L 、 U_C , 并读取谐振频率 f_0 , 记入表 1-4 中, 同时记下元件参数 R 、 L 、 C 的实际数值

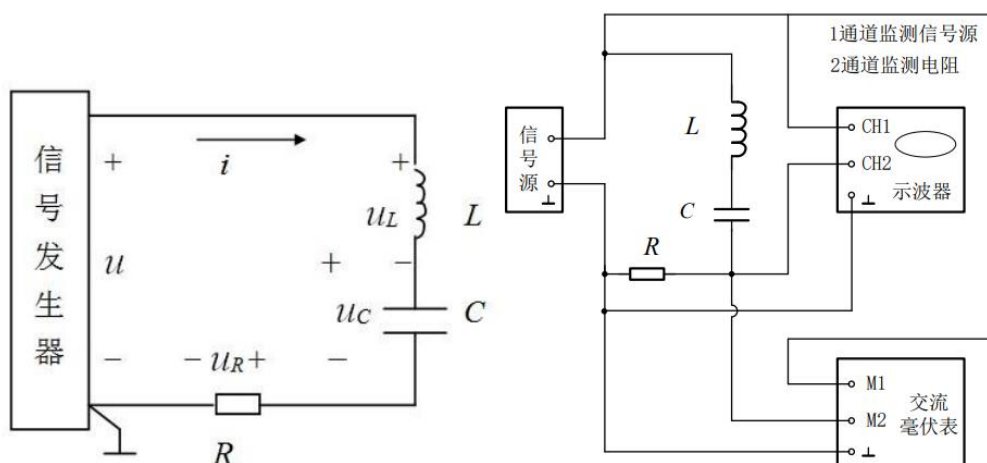


图 1-9 串联谐振实验线路

2. 实验线路同图 1-9, 使得信号发生器输出正弦电压 1Vrms , 在谐振频率两侧调节输出电压的频率 (每次改变频率后均应重新调整输出电压至 1Vrms), 电路中 R 为 100Ω , 分别测量各频率点的 U_R 值, 记录于表 1-5 中 (在谐振点附近要多测几组数据)。在将图 1-9 实验电路中的电阻 R 更换为 510Ω , 重复上述的测量过程, 记录于表 1-6 中。最后整理数据, 用坐标纸画出其谐振曲线。

3. 按图 1-10 接线, R 取 510Ω , 电路中 A 点的电位送入双踪示波器的 YA (CH1) 通道, 它显示出电路中总电压 u 的波形。将 B 点的电位送入双踪示波器的 YB (CH2) 通道, 它显示出电阻 R 上的波形, 此波形与电路中电流 i 的波形相似, 因此可以直接把它看作电流 i 的波形

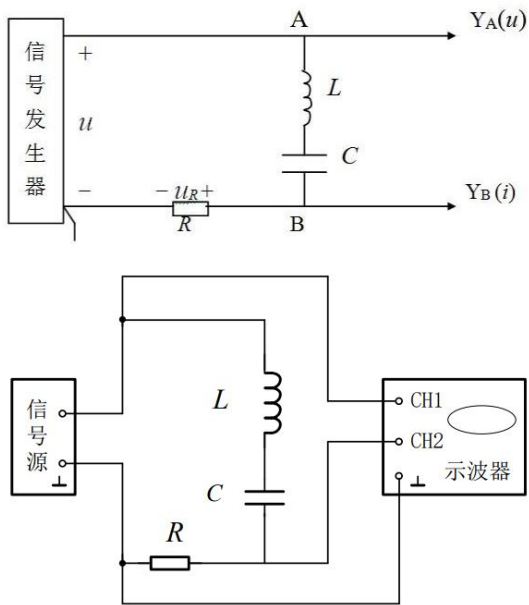


图 1-10 观测电流和电压间相位差实验线路图

5. RC 选频网络测试

将低频信号源接到网络的输入端 AD, 输出端 CD 接到毫伏表上。 R_1, R_2 取 $15k\Omega$, C_1, C_2 取 $0.01\mu F$ ($10nF$)

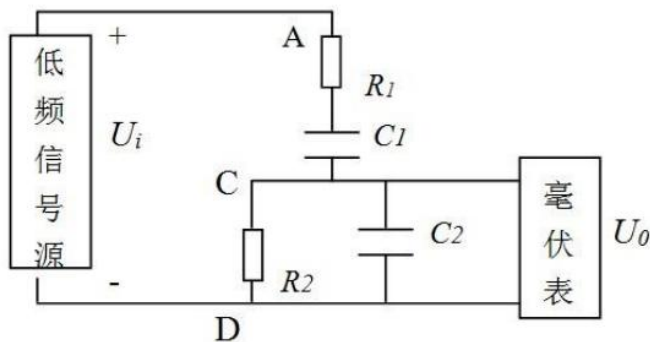


图 1-11 测量选频特性实验线路

保持信号源输出电压 $U_S = 1V_{rms}$ ($V_{set} = 0.5V_{rms}$), 改变信号频率 f , 用毫伏表测量相应频率点的输出电压 U_0 , 记录数据并填入表 1-7。根据电路参数计算出谐振频率 f_0 , 填入表中。自选频率 f , 测出其对应的电压 U_0 , 填入表 1-8 中。最后整理数据, 用坐标纸画出其幅频特性曲线。

五、实验数据分析

(按指导书中实验报告的要求用图表或曲线对实验数据进行分析 and 处理, 并对实验结果做出判断, 如需绘制曲线请在坐标纸中进行)

1、表 1-1, 1-2, 1-3 中的实验数据, 在坐标平面内绘制 $R=F(f)$, $X_L=F(f)$, $X_C=F(f)$ 阻抗特性曲线。纵坐标分别为 R , X_L , X_C , 横坐标为频率 f 。

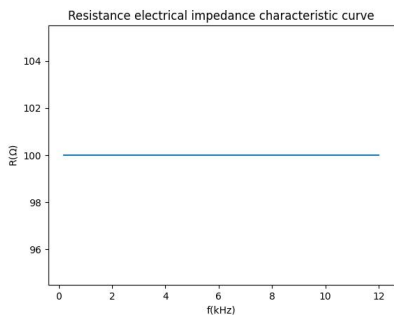


图 1 电阻阻抗特性曲线

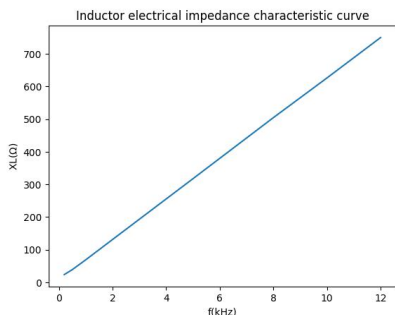


图 2 电感阻抗特性曲线

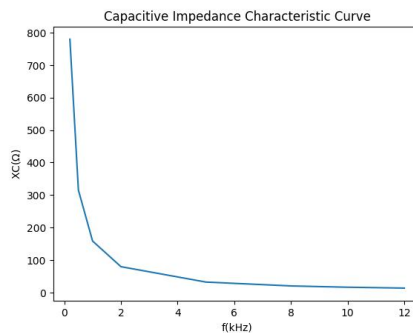
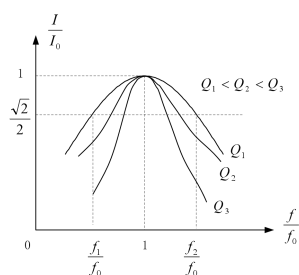


图 3 电容阻抗特性曲线

2、整理表 1-5 和 1-6 的数据，用坐标纸画出其谐振曲线。



示例图：

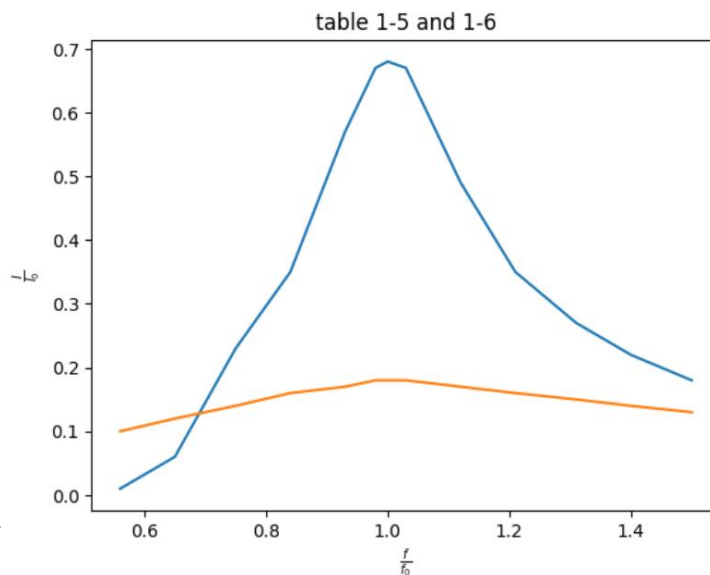


图 4 谐振曲线

3、调节频率 f 使之在 f_0 附近缓慢变化，由 i 和 u 波形的相位和幅度的变化，分析其变化原因。

答：当频率 $f=f_0$ 时，电路处于串联谐振状态，电流 I 最大，电路呈纯阻性， I 和 U 的相位一致；

当 $f < f_0$ 时，电流 I 幅值减小，由于容抗绝对值大于阻抗，电路呈容性，电流相位超前电压；

当 $f > f_0$ 时，电流 I 幅值减小，由于感抗绝对值大于容抗，电路呈感性，电压相位超前电流。

4、整理表 1-7 和 1-8 的数据，用坐标纸画出其幅频特性曲线。

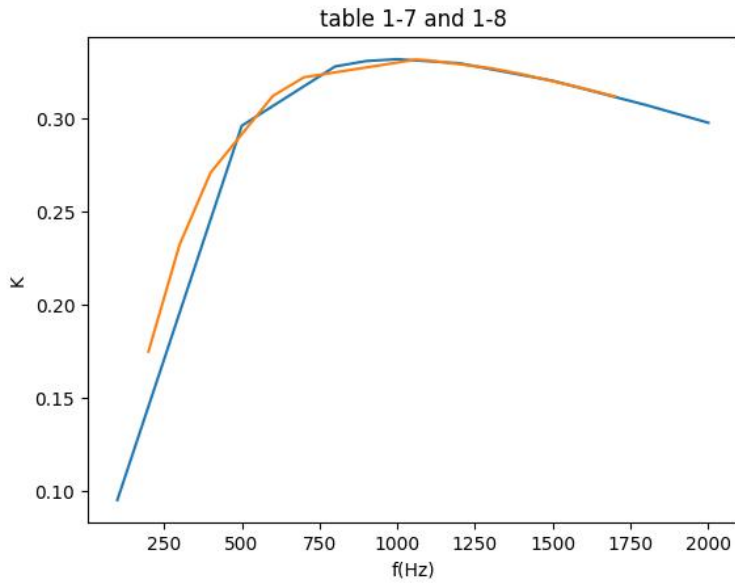


图 5 幅频特性曲线

六、问题思考

(回答指导书中的思考题)

1. 不完全一样，因为元件可能因老化等原因导致实际值变化；测量的过程中难免存在系统误差和偶然误差
2. 由表 1-5 和表 1-6 的数据，RLC 电路发生串联谐振时呈纯阻性，电流 I 有效值达到最大，并且电流和电压同相位
3. RC 选频网络中，电路输入信号的频率变化时，其输出信号幅度随着频率的变化而变化

七、实验体会与建议

好