



中山大学

电路基础实验报告

完成人： 雷俊峰、李冬

学号： 19308069、19308072



一、实验目的

通过本次实验，达到以下目的：

1. RLC 串联电路的幅频特性与谐振现象：
 - 测定 R、L、C 串联谐振电路的频率特性曲线。
 - 观察串联谐振现象，了解电路参数对谐振特性的影响。
2. RC 电路频率特性的研究：
 - 研究 RC 电路的频率特性。
 - 初步了解文氏电路的应用，组成正弦波振荡器。

二、仪器设备

1. TPE-DG2L 电路分析实验箱，主要使用：
不同阻值电阻（ $1k\Omega$ 、 $510k\Omega$ 、滑动变阻器）、电线等
2. SIGLENT SDM3065X 数字万用表
3. SIGLENT SPD3303X 可编程线性直流电源
4. SIGLENT SDS5000X 双踪示波器
5. SIGLENT SDG-6000X-E 函数信号发生器



三、实验原理与内容

1. RLC 串联电路的幅频特性和谐振现象

(1) 实验目的

1. 测定 R 、 L 、 C 串联谐振电路的频率特性曲线。
2. 观察串联谐振现象，了解电路参数对谐振特性的影响。

(2) 实验内容及步骤

按图 10-1 连接线路，电源 U_S 为低频信号发生器。将电源的输出电压接示波器的 Y_A 插座，输出电流从 R 两端取出，接到示波器的 Y_B 插座以观察信号波形，取 $L = 0.1H$ 、 $C = 0.5\mu F$ 、 $R = 10\Omega$ ，电源的输出电压 $U_S = 3V$ 。

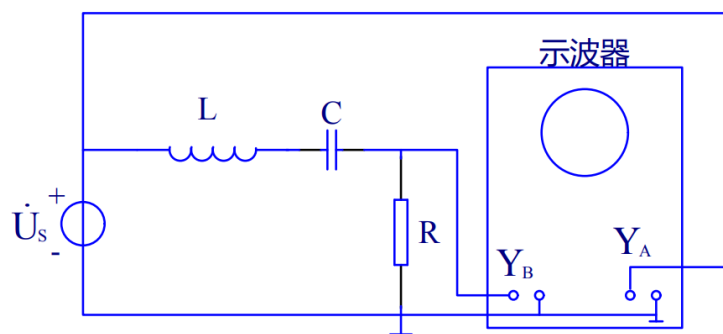


图 10.1

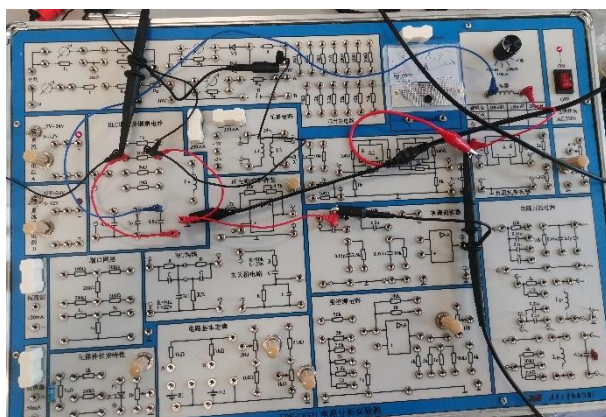


图 10.2 RLC 电路接线



1. 计算和测试电路的谐振频率

① $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, 用 L、C 之值代入式中算出 f_0 。

计算得到 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \approx 711.763\text{Hz}$

② 测试：用交流毫伏表接在 R 两端，观察 U_R 的大小，然后调整输入电源的频率，使电路达到串联谐振，当观察到 U_R 最大时电路即发生谐振，此时的频率即为 f_0 。

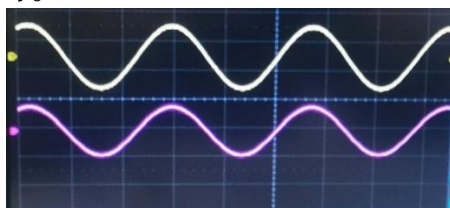


图 10.3 R、L、C 谐振波形

• 误差分析：

真实实验电路发生谐振时输入电源的频率大概为 $f'_0 = 724\text{Hz}$ 。推测可能是因为电路中电容、电感、电阻等元件参数与计算的标准值有误差导致的结果偏差，误差大小处于可接受范围内。

以下实验内容均按照真实谐振频率 $f'_0 = 724\text{Hz}$ 进行。

2. 测定电路的幅频特性

① 以 f_0 为中心，调整输入电源的频率从 100Hz~2000Hz，在 f_0 附近，应多取些测试点。用交流毫伏表测试每个测试点的 U_R 值，然后计算出电流 I 的值，记入表格 10-1 中。

$f(\text{Hz})$	100	300	500	700	710	720	724(f_0)
$U_R(\text{mV})$	9.2926	32.7871	83.667	283.916	292.019	295.82	297.471
$I(\text{mA})$	0.92926	3.27871	8.3667	28.3916	29.2019	29.582	29.7471

表 10.1 表 & 10.1-续

730	750	800	1000	1300	1600	2000
295.13	282.228	219.96	94.9671	52.3807	37.2138	27.3255
29.513	28.2228	21.996	9.49671	5.23807	3.72138	2.73255

• 计算：因为 $R = 10\Omega$, 所以 $I = \frac{U_R}{R} = 0.1U_R$ 。



② 保持 $U_S = 3V, L = 0.1H, C = 0.5\mu F$ ，改变 R ，使 $R = 100\Omega$ ，即改变了回路 Q 值，重复步骤①，记入表格 10-2 中。

$f(\text{Hz})$	100	300	500	700	710	720	724(f_0)
$U_R(\text{mV})$	91.9981	320.789	758.244	1547.052	1559.793	1565.419	1565.741
$I(\text{mA})$	9.19981	32.0789	75.8244	154.7052	155.9793	156.5419	156.5741

表 10.2

730	750	800	1000	1300	1600	2000
1564.254	1542.446	1409.502	838.681	500.207	362.138	268.41
156.4254	154.2446	140.9502	83.8681	50.0207	36.2138	26.841

表 10.2-续

• 计算：因为 $R = 100\Omega$ ，所以 $I = \frac{U_R}{R} = 0.01U_R$ 。

3. 测定电路的相频特性

①仍保持 $U_S = 3V, L = 0.1H, C = 0.5\mu F, R = 10\Omega$ 。以 f_0 为中心，调整输入电源的频率从 $100\text{Hz} \sim 2000\text{Hz}$ 。在 f_0 的两旁各选择几个测试点，从示波器上显示的电压、电流波形上测量出每个测试点电压与电流之间的相位差 $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ ，数据记入表 10.3。



图 10.4 通过光标测量相位差



$f(\text{Hz})$	100	300	500	700	710	720	724
$\Delta t \text{ (ms)}$	-2.46	-0.8	-0.46	-0.12	-0.07	-0.02	0
$T(\text{ms})$	10	3.3333333	2	1.4285714	1.4084507	1.3888889	1.38121547
$\Delta t/T$	-0.246	-0.24	-0.23	-0.084	-0.0497	-0.0144	0
$\Delta\varphi(^{\circ})$	-88.56	-86.4	-82.8	-30.24	-17.892	-5.184	0
$\Delta\varphi(\text{rad})$	- 1.545664	-1.507964	- 1.445133	-0.527788	-0.312274	-0.090478	0

表 10.3

730	750	800	1000	1300	1600	2000
0.025	0.12	0.205	0.225	0.18	0.15	0.122
1.369863	1.3333333	1.25	1	0.769230769	0.625	0.5
0.01825	0.09	0.164	0.225	0.234	0.24	0.244
6.57	32.4	59.04	81	84.24	86.4	87.84
0.1146681	0.5654867	1.0304424	1.4137167	1.470265362	1.5079645	1.5330972

表 10.3-续

• 测量数据与处理：

首先通过光标之间的时间差读出电源输入波形和电阻 R 上的输出波形时间差 Δt ，然后根据公式 $T = \frac{1}{f}$ 计算得出相应的波形周期。由于电容电阻对电路的影响仅仅是产生相移，所以电源输入和输出之间周期相同，即可根据 $\frac{\Delta t}{T}$ 得到相差值对周期的比值，从而换为以 $^{\circ}$ 为单位的 $\Delta\varphi$ ，进而换算为弧度值的相位差。



② 保持 $U_S = 3V, L = 0.1H, C = 0.5\mu F$ ，改变 R ，使 $R = 100\Omega$ ，即改变了回路 Q 值，重复步骤①，记入表格 10.4 中。

$f(\text{Hz})$	100	300	500	700	710	720	724
$\Delta t(\text{ms})$	-2.5	-0.78	-0.4	-0.05	-0.02	-0.005	0
$T(\text{ms})$	10	3.3333333	2	1.4285714	1.4084507	1.3888889	1.38121547
$\Delta t/T$	-0.25	-0.234	-0.2	-0.035	-0.0142	-0.0036	0
$\Delta\varphi(^{\circ})$	-90	-84.24	-72	-12.6	-5.112	-1.296	0
$\Delta\varphi(\text{rad})$	- 1.570796	-1.470265	- 1.256637	-0.219911	-0.089221	-0.022619	0

表 10.4

730	750	800	1000	1300	1600	2000
-0.005	0.06	0.11	0.185	0.17	0.14	0.114
1.369863	1.3333333	1.25	1	0.769230769	0.625	0.5
-0.00365	0.045	0.088	0.185	0.221	0.224	0.228
-1.314	16.2	31.68	66.6	79.56	80.64	82.08
- 0.022934	0.2827433	0.5529203	1.1623893	1.388583953	1.4074335	1.4325663

表 10.4-续

• 测量数据与处理：

同①。

(3) 实验分析及思考

1. 根据实验数据，坐标纸上绘出两条不同 Q 值下的幅频特性曲线和相频特性曲线，并作扼要分析。

①不同 Q 值下的幅频特性曲线

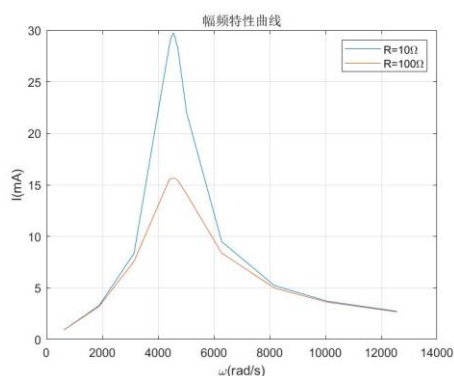


图 10.5 幅频特性曲线

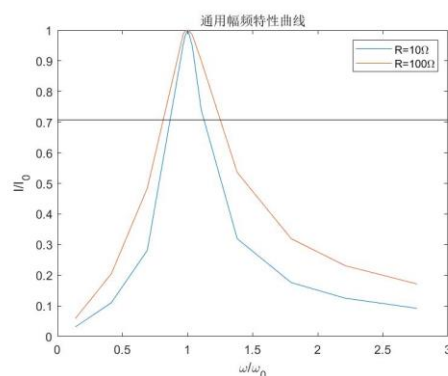


图 10.6 通用幅频特性曲线



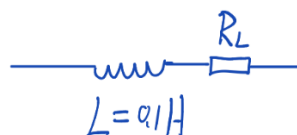
• 曲线分析:

(1) 由于 RLC 电路中总阻抗为 $Z = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})$ ，发生谐振时有公式 $\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$ ，此时电路呈现电阻性。理论上讲应该有 $U_R = U_S$ 和 $I = I_0 = \frac{U_S}{R}$ 。

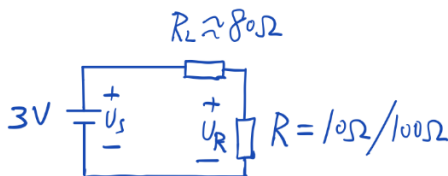
已知两次测量时电路中 $R_1 = 10\Omega$ 、 $R_2 = 100\Omega$ ，也即理论上两个曲线对应的 I_0 应该是 10 倍关系。但是从图 10.5 幅频特性曲线可以看出两个不同 Q 值时的电路仅有 2 倍的关系。

误差分析:

猜测数据误差是因为电感内部的电阻分压导致的误差。由于电路中的电感 L 不是理想电感，设电感的真是模型为理想电感串联一个内阻 R_L ：



画出谐振时分压电路图:



根据方程 $\frac{U}{10+R_L} = 2 \times \frac{U}{100+R_L}$ ，可以算出 $R_L \approx 80\Omega$ 。此时，对于两次测量（ $R_1 = 10\Omega$ 、 $R_2 = 100\Omega$ ）， $I_1 \approx 2I_2$ 。

(2) 由于改变电路中的 R 只改变 Q 值，根据 Q 的公式可以得到，然 Q 值越大，幅频特性曲线越尖锐。

观察以上幅频特性曲线和通用幅频特性曲线， $R=10\Omega$ 时 Q 值更大，曲线更尖锐。



(3) 在通用幅频特性曲线中作 $\frac{I}{I_0} = 0.707$ 直线与幅频特性曲线相交得到不同 Q 值下对应的通频带。

显然， Q 值越大，谐振时的通频带越窄，也即电路的选择性越好。

②不同 Q 值下的相频特性曲线

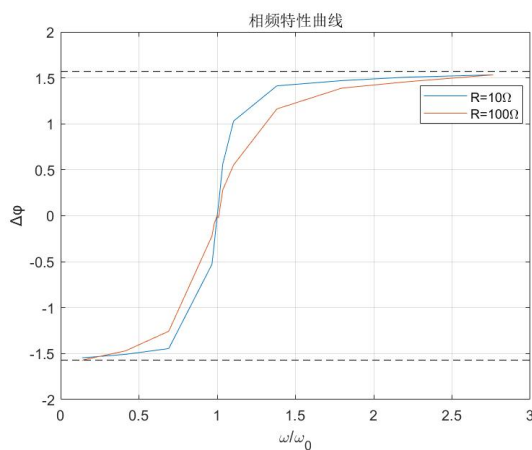


图 10.7 通用相频特性曲线

• 曲线分析：

据图可以看出，当电源输入频率从 0 变到 ω_0 时，电抗由 $-\infty$ 变到 0， ϕ 角从 $-\frac{\pi}{2}$ 变到 0，电路为容性；

当电源输入频率从 ω_0 增大到 ∞ 时，电抗由 0 增到 ∞ ， ϕ 角从 0 增到 $-\frac{\pi}{2}$ ，电路为感性。

根据测量数值画出的曲线符合理论分析。



2. 用哪些实验方法可以判断电路处于谐振状态？

①RLC 电路处于谐振时，由于 $\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$ 。此时复阻抗 Z 达最小，电路呈现电阻性，电流与输入电压同相；

②电感电压与电容电压数值相等，相位相反。此时电感电压(或电容电压)为电源电压的 Q 倍， Q 称为品质因数，即

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

在 L 和 C 为定值时， Q 值仅由回路电阻 R 的大小来决定。

③在激励电压有效值不变时，回路中的电流达最大值，即：

$$I = I_0 = \frac{U_s}{R}$$

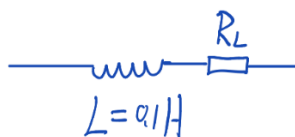
3. 实验中，当 R 、 L 、 C 串联电路发生谐振时，是否有 $U_c = U_L$ 及 $U_R = U_s$ ？若关系不成立，试分析其原因。

分析：根据表 10.1 和表 10.2 测量得到的数据可以看出，电源输入频率为 $f'_0 = 724\text{Hz}$ ，发生谐振时。 $U_c \neq U_L$ 、 $U_R \neq U_s$ ，并且有数值关系为：

- 当 $R=10\Omega$ 时 $U_{R0} = 0.1U_s$ ；
- 当 $R=100\Omega$ 时 $U_{R0} = 0.5U_s$ ；

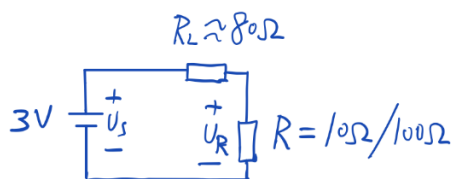
误差分析：

猜测数据误差是因为电感内部的电阻分压导致的误差。由于电路中的电感 L 不是理想电感，设电感的真是模型为理想电感串联一个内阻 R_L ：





根据之前分析幅频特性曲线时计算得到的 R_L 大约为 $80\ \Omega$ 左右，画出谐振时分压电路图：



根据欧姆定理可以估算得到：

- 当 $R=10\ \Omega$ 时 $U_{R0} \approx 0.1U_S$ ；
- 当 $R=100\ \Omega$ 时 $U_{R0} \approx 0.5U_S$ 。

检查表 10.1 和表 10.2 中数据得到：

- 当 $R=10\ \Omega$ 时 $U_{R0} = 0.297471V \approx 0.1U_S$ ；
- 当 $R=100\ \Omega$ 时 $U_{R0} = 1.565741 \approx 0.5U_S$ 。

猜测验证。

综上，是因为电感内部的电阻分压导致的谐振时电源电压没有全部加在电阻上，电路中电阻大于所测量的电阻。



2. RC 电路频率特性的研究

(1) 实验目的

1. 研究 RC 电路的频率特性。
2. 初步了解文氏电路的应用，组成正弦波振荡器。

(2) 实验原理

1. 文氏电路

文氏电路如图 11.1 所示。

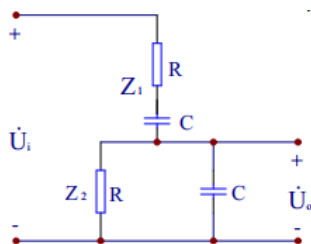


图 11.1 文氏电路

当 $\frac{1}{\omega C} \gg R$ 时，文氏电路可以等效为图 11.2 所示的低频等效电路， ω 愈低，

U_o 的幅度愈小，其相位愈超前于 U_i 。当 ω 趋近于 0 时， $|U_o|$ 趋近于 0， $\varphi_o - \varphi_i$ 接近 $+90^\circ$ 。

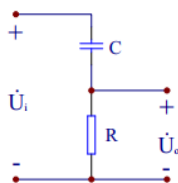


图 11.2 低频等效电路

当 $\frac{1}{\omega C} \ll R$ 时，文氏电路可以等效为图 11.3 所示的高频等效电路。 ω 愈高，

U_o 的幅度愈小，其相位愈滞后于 U_i 。当 ω 趋近于 ∞ 时， $|U_o|$ 趋近于 0， $\varphi_o - \varphi_i$ 接近 -90° 。当频率为某一中间值 f_o 时， U_o 不为 0，且 U_o 与 U_i 同相。

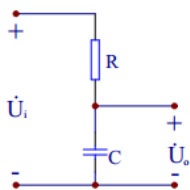


图 11.2 高频等效电路



我们把输出电压和输入电压的比称为网络函数，记作 $H(j\omega) = |H(j\omega)|/\varphi$ ，其中 $|H(j\omega)| = \frac{U_o}{U_i}$ ， $\varphi = \varphi_o - \varphi_i$ ， $|H(j\omega)|$ 和 φ 分别为电路的幅频特性和相频特性，它们的曲线见图 11.3。当频率 $f = f_o = \frac{1}{2\pi RC}$ 时， $|H(j\omega)|$ 有极大值， $\varphi = 0$ ，经过计算， $|H(j\omega)|$ 的最大值为 $1/3$ 。因此，这种电路具有选择频率的特点，它被广泛地用于 RC 振荡器的选频网络。

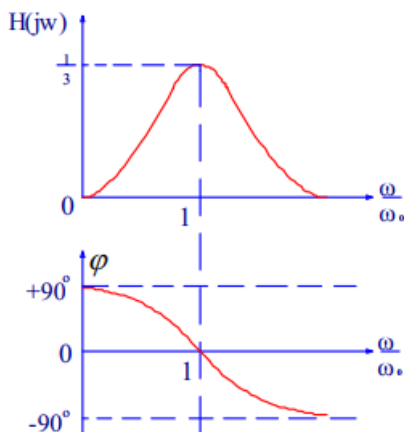


图 11.3 文氏电路的幅频特性和相频特性

2. 文氏电路 f_o 的测定

由前文可得， f_o 的测定可以转化为输入电压和输出电压的相位差得测定。

用示波器观察李萨育图形的方法定 f_o 。实验线路如图 11.4 所示，给定 U_i 为某一数值，改变电源频率，并逐渐改变 X, Y 轴增益，使荧光屏上出现一条直线，此时电源频率即为 f_o 。

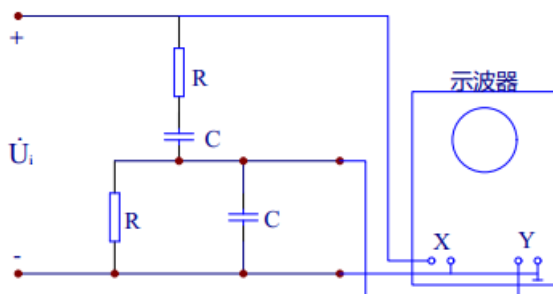


图 11.4 用示波器观察李萨育图形



3. 双 T 网络频率特性

图 11.5 所示，双 T 网络的频率特性正好与 RC 串并联电路相反。在 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 时， $\beta = 0$ ，输出电压为 0，因此可以用来滤去频率为 f_0 的谐波。 f_0 也称为该网络的“截止频率”。双 T 电路的幅频特性曲线见图 11.6。

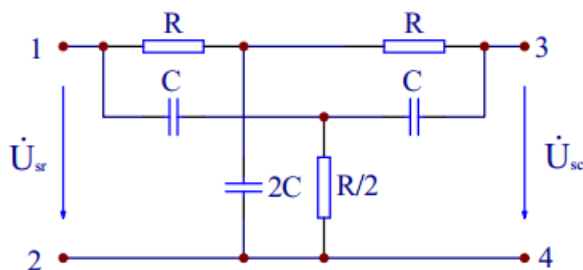


图 11.5

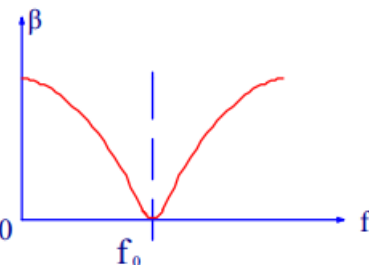
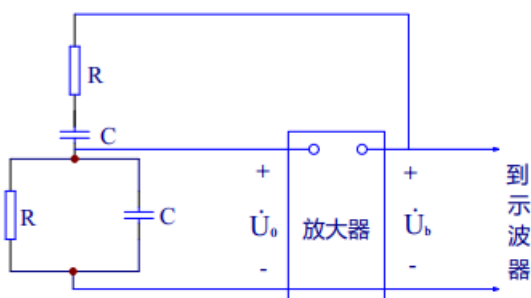


图 11.6

4. 利用文氏电路组成正弦波振荡器

图 11.7 是由文氏电路和运算放大器构成的正弦波振荡器示意图。



$$\dot{U}_b = K\dot{U}_0 \quad (K \text{ 为正实数})$$

图 11.7 正弦波振荡器示意图

在电路满足相位平衡条件(反馈信号与输入信号同相)，幅度平衡条件 $|AF| \geq 1$ (其中 A 为放大器放大倍数， F 为反馈网络的反馈系数)，而放大器的工作点又正常的情况下，即能产生正弦波振荡。



(3) 预习内容

1. 根据给定参数 $C=22n$ 和 $R=10k\Omega$ ，计算文氏电路的 f_o 及此频率时的 $|H(j\omega)|$ 及 φ 。

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 10k \times 22n} = 723.43$$

$$|H(j\omega)| = 1/3$$

2. 根据给定参数 $C=22n$ 和 $R=10k\Omega$ ，计算双 T 电路的 f_o 及此频率时的 $|H(j\omega)|$ 及 φ 。

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 10k \times 22n} = 723.43$$

$$|H(j\omega)| = 0$$

(4) 实验内容及步骤

1. 用示波器观察李萨育图形的方法测定文氏电路的 f_o ，如图 11.8 所示。再用频率计测 f_o ，并用毫伏表测 f_o 时的 U_i 、 U_o 。

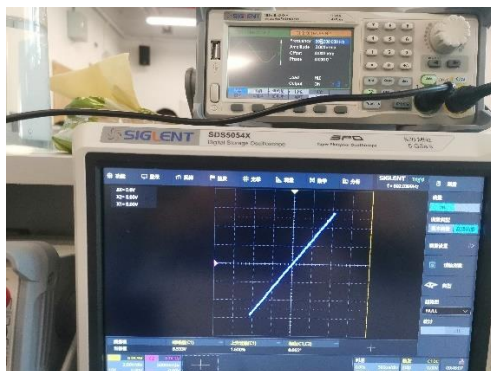


图 11.8 f_o 时的李萨育图形

实际测得 $f_o=692Hz$ ，与理论值 $723Hz$ 较为接近，此时 $U_i=3001.57mV$ ， $U_o=997.051mV$ 。 $|H(j\omega)| = \frac{U_o}{U_i} = \frac{997.051}{3001.57} = 0.3322$ ，与理论值 $1/3$ 接近，误差造成的原因可能和实验仪器本身的精度有关系。



2. 测试文氏电路的幅频特性 $|H(j\omega)|$ 及相频特性 φ 。如表 11.1 所示：

$f(\text{Hz})$	69	100	300	500	650	670	692
$ H(j\omega) $	0.093908	0.131509	0.278449	0.322907	0.331542	0.331992	0.332176
$\varphi(^{\circ})$	73.154	66.328	33.007	13.161	2.875	2.1345	0.065
$f(\text{Hz})$	700	730	800	1000	3000	5000	6900
$ H(j\omega) $	0.332136	0.332169	0.331261	0.323831	0.201177	0.134052	0.100424
$\varphi(^{\circ})$	-0.425	-1.563	-5.575	-13.629	-51.752	-65.408	-72.03

表 11.1

作出 $|H(j\omega)| \sim \frac{\omega}{\omega_0}$ 曲线如图 11.9 所示。

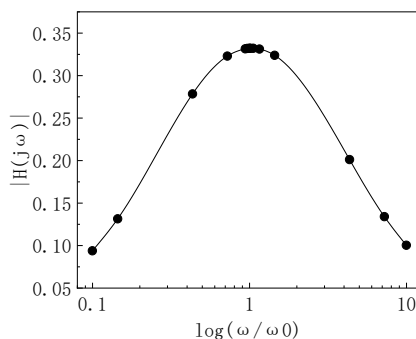


图 11.10 $|H(j\omega)| \sim \frac{\omega}{\omega_0}$ 曲线

作出 $\varphi \sim \frac{\omega}{\omega_0}$ 曲线如图 11.11 所示。

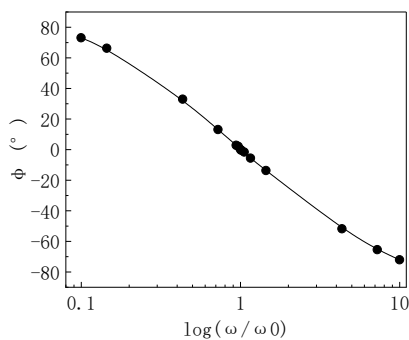


图 11.11 $\varphi \sim \frac{\omega}{\omega_0}$ 曲线



3. 利用文氏桥组成图 11.7 所示的正弦波振荡器。放大器的放大倍数 K 可以稍加调节。调节放大倍数 K ，使示波器上出现正弦波形，如图 11.12。用频率计测量此正弦波的频率。用交流毫伏表测量放大器输入、输出电压。

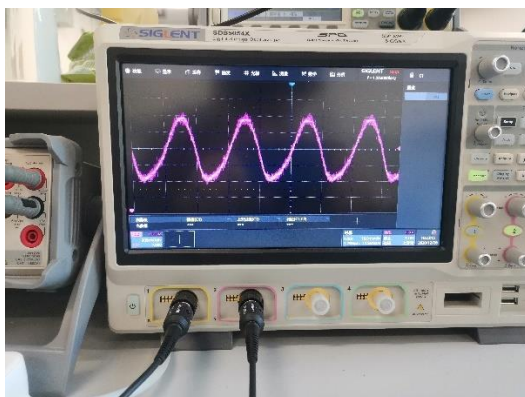


图 11.12

图中显示的正弦波频率为 1284Hz。

放大器输入、输出电压见表 11.2:

输入电压 (mV)	24.7203
输出电压 (mV)	294.416

表 11.2

4. 测双 T 网络的幅频特性 $|H(j\omega)|$ 及相频特性 φ 。

如表 11.3:

f (Hz)	71	100	300	500	650	700	712
$ H(j\omega) $	0.907312	0.850379	0.433473	0.176083	0.045421	0.009234	0.003563
$\varphi(^{\circ})$	21.893	29.968	63.645	78.095	83.742	87.532	0.028
f (Hz)	720	750	800	1000	3000	5000	7140
$ H(j\omega) $	0.006542	0.026264	0.059711	0.168567	0.691451	0.855228	0.918393
$\varphi(^{\circ})$	-89.213	-82.888	-84.44	-79.07	-43.874	-29.395	-21.522

表 11.3

理论计算得: $f_o = \frac{1}{2\pi RC} = 712$



作出 $|H(j\omega)| \sim \frac{\omega}{\omega_0}$ 曲线如图 11.13 所示。

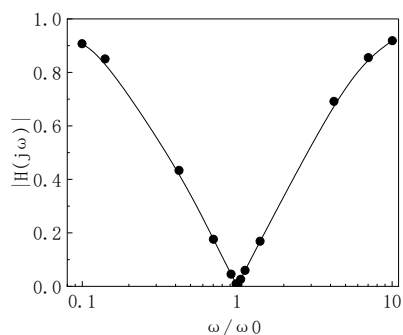


图 11.13 $|H(j\omega)| \sim \frac{\omega}{\omega_0}$ 曲线

作出 $\varphi \sim \frac{\omega}{\omega_0}$ 曲线如图 11.14 所示。

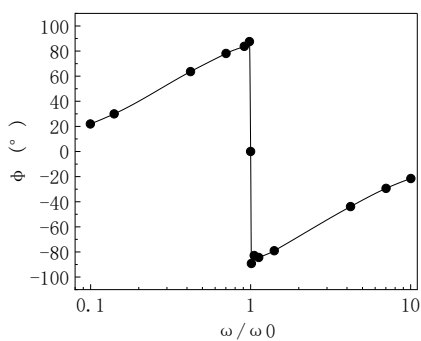


图 11.14 $\varphi \sim \frac{\omega}{\omega_0}$ 曲线

图像分析：通过图 11.14 可以看出，在 $\frac{\omega}{\omega_0} = 1$ 处相位差 φ 发生了突变，这是因为此时电路中信号的频率为截止频率。



(5) 实验分析及思考

1. 用半对数坐标纸画 $|H(j\omega)| \sim \frac{\omega}{\omega_0}$ 曲线和 $\varphi \sim \frac{\omega}{\omega_0}$ 曲线

见图 11.11、图 11.12、图 11.13 和图 11.14。

2. 说明由文氏桥组成得正弦波振荡器中，振荡频率与电路参数的关系。

文氏桥正弦波振荡电路中有公式：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

四、实验中的问题和体会

实验总结：

本次实验进行了探究 RLC 串联电路的幅频特性并测量数据与谐振现象的观察验证实验；通过文氏电路和双 T 网络电路等探究了 RC 电路的频率特性并测量数据进行了图像绘制。

通过实验对于 RLC 电路的幅频特性和相频特性有了更加深刻的认识。RLC 电路中，当输入信号为谐振频率时，输出信号幅度为最大值，整个幅频特性曲线呈现先上升后下降的趋势。并且随着品质因数 Q 的提升，曲线逐渐变得陡峭，对于频率的选择特性更好。并且当谐振时电容和电阻导致的相移相互抵消，输出信号和输入信号同相。

实验十一利用文氏电路实现了对电路谐振频率的测量，组成了正弦波振荡器。利用双 T 网络实现了带阻滤波器的效果。通过实验，加深了对于文氏电路和双 T 网络电路的理解。