



厦 门 大 学

XIAMEN UNIVERSITY

ADD: FULFAN XIAMEN CABLE:0633 P.C:361005

实验十九 RLC串联谐振特性的研究

一. 实验目的

1. 观察交流电路串联谐振现象, 掌握测量谐振曲线的方法。
2. 研究RLC电路元件对串联电路谐振特性影响及电路品质因数Q值的测量。

二. 实验仪器

函数信号发生器, 双通道毫伏表, 电阻箱, 电容箱, 导线若干。

三. 实验原理

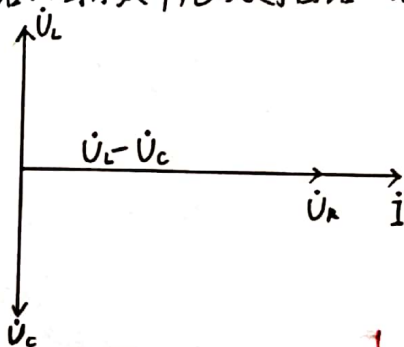
1. RLC串联电路

如图1所示, RLC串联电路由电阻器 R_0 、电感器 L 和电容器 C 与信号源 E 串联而成。 U_m 、 I_m 分别代表电压和电流 i 的幅值, ω 为信号源的角频率, $\omega = 2\pi f$, 回路总电阻 $R = R_0 + r_L + r_C$, 其中 r_L 为电感器 L 的损耗内阻, r_C 为电容器 C 的损耗内阻, 可以忽略。若接入正弦交流电压 $u = U_m \sin \omega t$, 则回路电流为 $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$, U_m 、 I_m 除以 $\sqrt{2}$, 即是电流和电压的有效值, 回路总阻抗 Z 表示为 $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$, 式(1); 回路电流有效值 I 表示为 $I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$, 式(2); 电流与信号源电压 U_m 相位差 φ 可表示为 $\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$, 式(3)。

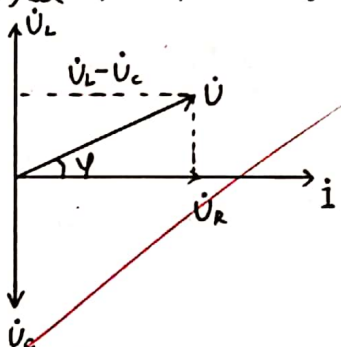
2. RLC串联电路

(1) 由式(1)、式(2)、式(3)可知, Z 、 I 、 φ 都随信号频率 f 而变化。在交流电路中的电感和电容的作用是相反, 具有互相抵消的作用。下面分别对三种情况进行讨论:

a. 如图(a)所示, 当 $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ 时, $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} = R$, 此时回路总阻抗最小, 电路呈纯电阻性, 此时回路电流有效值 I 有最大值 $I_{\max} = \frac{U}{R}$, I 与 U_m 相位差 $\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = 0$, $U_L = U_C$, 电流与电压同相, 这就是所谓回路谐振。此时对应的信号频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 称为谐振频率, 又称为回路固有频率, 它决定于回路元件参数 L 和 C , 而与 R 无关。

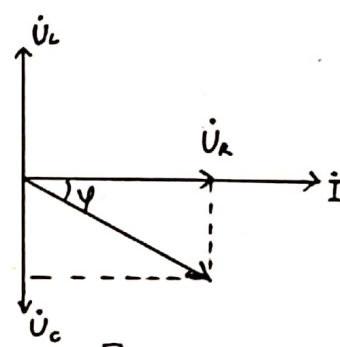


图(a)



图(b)

图2. RLC串联电路中电压电流矢量图



图(c)

b. 如图(b)所示, 当 $\omega L - \frac{1}{\omega C} > 0$ 时, 即 $U_L > U_C$ 时, $\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$ 是正值, 电压超前于电流, 电感的作用大于电容的作用, 电路呈电感性。

c. 如图(c)所示, 当 $\omega L - \frac{1}{\omega C} < 0$ 时, 即 $U_L < U_C$ 时, $\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$ 是负值, 电压落后于电流, 电容的作用大于电感的作用, 电路呈电容性。





(2) 选择不同 f, L, C 或 R 值, 可以实现不同 φ 相移, RLC 串联电路 φ 相频特性曲线如图 3 所示。当 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ 时, $\varphi = 0, \omega = \omega_0$, 电路处于谐振状态。当 $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ 时, $\varphi > 0$, U 超前 I , 回路呈电感性; 当 ω 很大时, φ 接近于 $\frac{\pi}{2}$; 当 $\omega L < \frac{1}{\omega C}$ 时, $\varphi < 0$, U 落后于 I , 回路呈电容性, 当 ω 很小时, φ 接近于 $-\frac{\pi}{2}$ 。

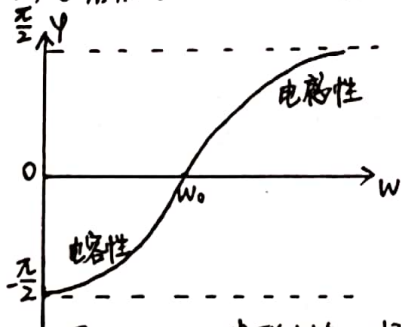


图 3 RLC 串联电路 φ 相频特性曲线

3. RLC 串联电路的谐振特性

RLC 串联电路的谐振特性, 常用电路中的电流与频率的关系即 $I-f$ 谐振曲线来描述。如图 4 所示, 谐振曲线的形状, 与 RLC 取值有关; 谐振曲线的形状, 常用“通频带宽度”来描述, “通频带宽度”规定为当电流 I 是最大值 I_m 的 $\frac{1}{\sqrt{2}} = 70.7\%$ (称为半功率点) 时的频率宽度 $\Delta f = f_2 - f_1$ 。

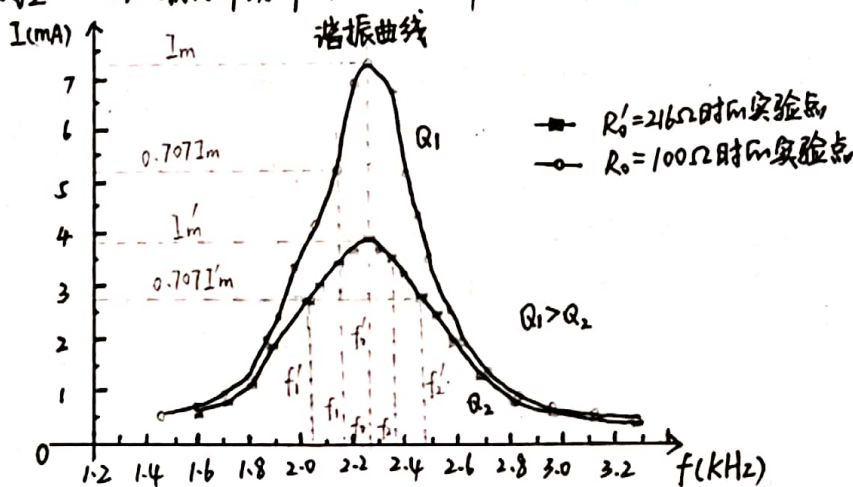


图 4 RLC 串联电路的谐振特性曲线

根据带宽的定义, 可求得带宽的两个边界频率 f_1, f_2 , 分别为 $f_1 = \frac{\sqrt{R^2 + \frac{4L}{C}} - R}{4\pi L}$; $f_2 = \frac{\sqrt{R^2 + \frac{4L}{C}} + R}{4\pi L}$, 因而 $\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{R}{2\pi L}$, $f_0 = \sqrt{f_1 f_2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 。

4. 回路品质因数 Q 值

Q 值的大小反映着谐振电路的特性, 称为回路品质因数。由于谐振曲线半功率点处曲线的频率最大, f_1, f_2 可以比较准确地确定, 因此由 f_1, f_2 确定的谐振频率 f_0 品质因数 Q 值都比较准确。由它们的关系, 可以求得 Q 值为 $Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{\sqrt{f_1 f_2}}{f_2 - f_1}$, Q 值的理论计算公式为 $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = 2\pi f_0 \frac{L}{R} = \frac{1}{2\pi f_0 R C}$ 。

可见 Q 值只与回路的电路元件参数相关。L 值越大, Q 值越高; R、C 越小, Q 值越高。回路的 Q 值越大, 谐振曲线尖锐。 U_R, U_L 和 U_C 均随频率 f 而变化, 当 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (即 $f = f_0$) 时, $U_L = U_C$, 即 $U_L = U_C = QU$; 当 $f < f_0$ 时,





厦 门 大 学

XIAMEN UNIVERSITY

ADD: FULFAN XIAMEN

CABLE: 0633 P.C: 361005

$U_L < U_C$, 当 $f > f_0$ 时, $U_L > U_C$, 说明低频信号主要降在电容 C 上, 而高频信号主要降在电感 L 上; 具体变化关系用幅特性曲线表示图 5 中。

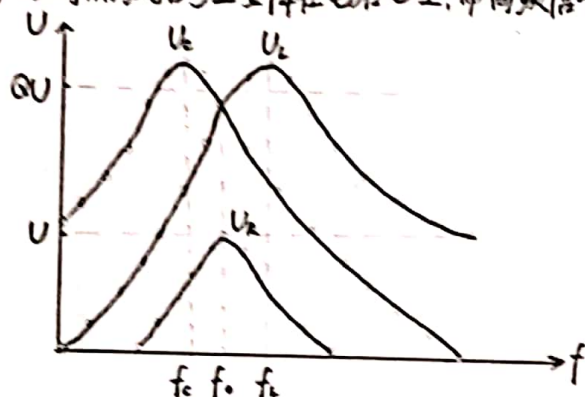


图 5 RLC 串联电路的幅频特性曲线

综上所述, 回路谐振时, U_L 有极大值, 且等于信号源电压值 U , 即 $U_{Lm} = U$, 同时 $U_L = U_C = QU$, 即谐振时, 电容或电感两端的电压是信号源电压的 Q 倍, 因此 RLC 串联谐振, 又称电压谐振, Q 值亦可定义为 $Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U}$ 。

四. 实验内容

根据图 6 连接电路, 用双通道毫伏表的一路毫伏表 mV_1 接在信号源的输出端, 监测信号源的电压, 毫伏表 mV_1 的“地”机壳与信号源的“地”接在一起, 双通道毫伏表的另一路毫伏表 mV_2 轮流用于测量电压 U_R , U_L , U_C 。测量 U_R 时, 毫伏表 mV_2 的“地”端与信号源的“地”端接在一起, 测量电压 U_L 或 U_C 时, 毫伏表 mV_2 注意选择适当的量程。

1. 测量 $I-f$ 谐振曲线

- (1) 选择电路元件参数, 选取 $L = 0.100H$, $C = 0.0500\mu F$, $R_0 = 100.0\Omega$, $U = 0.900V$; 这时回路的总电阻 $R = R_0 + r_L$ 。
- (2) 测量时, 用双通道毫伏表中的一路毫伏表 mV_2 测量电阻 R_0 两端的电压 U_R , 改变频率 f , 每间隔 $100Hz$ 测量一次 U_R ; 在谐振点附近, 电压变化较大, 数据点要取密些, 可以每间隔 $50Hz$ 测一次 U_R 。注意: 测量过程中, 要保持信号源电压 U 为恒定值, 即始终保持为 $0.900V$ 。
- (3) 改变电阻器电阻值, 使 $R' = 2R_0 + r_L$, 此时, 回路的总电阻 $R' = 2(R_0 + r_L) = 2R$, 其他电路元件参数不变, 重复以上实验步骤。

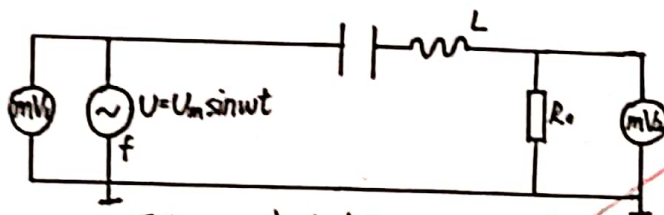


图 6 RLC 串联谐振电路实验连接线路图

2. 观测 RLC 电路的谐振现象

- (1) 将双通道毫伏表 mV_2 分别接到 R_0 , L , C 的两端, 连续调节信号源频率 f , 观察电压 U_R , U_L 和随频率 f 的变化情况。观察时, 要注意双通道毫伏表的 mV_2 量程, U_L 和 U_C 可能很大。
- (2) 分别测出电压 U_R , U_L 和 U_C 为最大值时所对应的信号频率 f_0 , f_L 和 f_C , 比较他们之间的大小关系。
- (3) 在谐振频率 f_0 处, 测量电感器 L 和电容器 C 两端的电压 U_L 和 U_C 。



扫描全能王 创建



厦 门 大 学

XIAMEN

UNIVERSITY

ADD: FULFAN XIAMEN

CABLE: 0633 P.C: 361005

五. 数据记录

见附录表1.2.3

六. 注意事项

1. 以电抗元件作负载, 信号源的输出电压会随频率而改变, 故在测量电压时, 每改变一次频率都要调节信号源电压 U , 以保持 U 为恒定值。
2. 使用双通道毫伏表时, 必须校准零点, 以保证读数准确; 测量时由于谐振点附近 U_R 、 U_L 、 U_C 变化较大, 一定要先换好适当的量程再进行测量。

七. 重新整理数据表格.

表. 测量 I - f 谐振曲线数据表

(-)

L = 0.100 H, $r_L = 20.0 \Omega$, C = 0.0500 μ F, U = 0.900 V				
项目	$R_0 = 100.0 \Omega$		$R_0' = 2R_0 + r_L = 220 \Omega$	
数值	$U_{R_0} (mV)$	$I = \frac{U_{R_0}}{R_0} (mA)$	$U_{R_0'} (mV)$	$I' = \frac{U_{R_0'}}{R_0'} (mA)$
f (kHz)				
1.4000	65.0		142	
1.5000	76.0		165	
1.6000	90.0		197	
1.7000	110 110		240	
1.8000	140		290	
1.9000	185		380	
2.0000	220 260		490	
2.0500	320		560	
2.1000	400		640	
2.1500	520		720	
2.2000	641		770	
2.2500	700		795	
2.3000	619		760	
2.3500	490		700	
2.4000	395		622	
2.4500	320		560	
2.5000	270		500	
2.6000	208		400	
2.7000	170 170		340	
2.8000	140		300	
2.9000	120		260	
3.0000	108		230	
3.1000	100		210	

11.29



扫描全能王 创建



厦 门 大 学

XIAMEN UNIVERSITY

ADD: FULFAN XIAMEN CABLE:0633 P.C:361005

七. 数据处理

测量 I-f 谐振曲线数据表

(-)

数值 项目 $f(\text{kHz})$	$L=0.100\text{H}, r_L=17\Omega, C=0.0500\mu\text{F}, U=0.900\text{V}$			
	$R_0=100.0\Omega$		$R_0'=2R_0+r_L=220.0\Omega$	
	$U_{R_0}(\text{mV})$	$I=\frac{U_{R_0}}{R_0}(\text{mA})$	$U_{R_0'}(\text{mV})$	$I'=\frac{U_{R_0'}}{R_0'}(\text{mA})$
1.4000	65.0	0.650	142	0.645
1.5000	76.0	0.760	165	0.750
1.6000	90.0	0.900	197	0.895
1.7000	110	1.10	240	1.09
1.8000	140	1.40	290	1.32
1.9000	185	1.85	380	1.73
2.0000	260	2.60	490	2.23
2.0500	320	3.20	560	2.55
2.1000	400	4.00	640	2.91
2.1500	520	5.20	720	3.27
2.2000	641	6.41	770	3.50
2.2500	700	7.00	795	3.61
2.3000	619	6.19	760	3.45
2.3500	490	4.90	700	3.18
2.4000	395	3.95	622	2.83
2.4500	320	3.20	560	2.55
2.5000	270	2.70	500	2.27
2.6000	208	2.08	400	1.82
2.7000	170	1.70	340	1.55
2.8000	140	1.40	300	1.36
2.9000	120	1.20	260	1.18
3.0000	108	1.08	230	1.05
3.1000	100	1.00	210	0.95

1=). 绘制谐振曲线

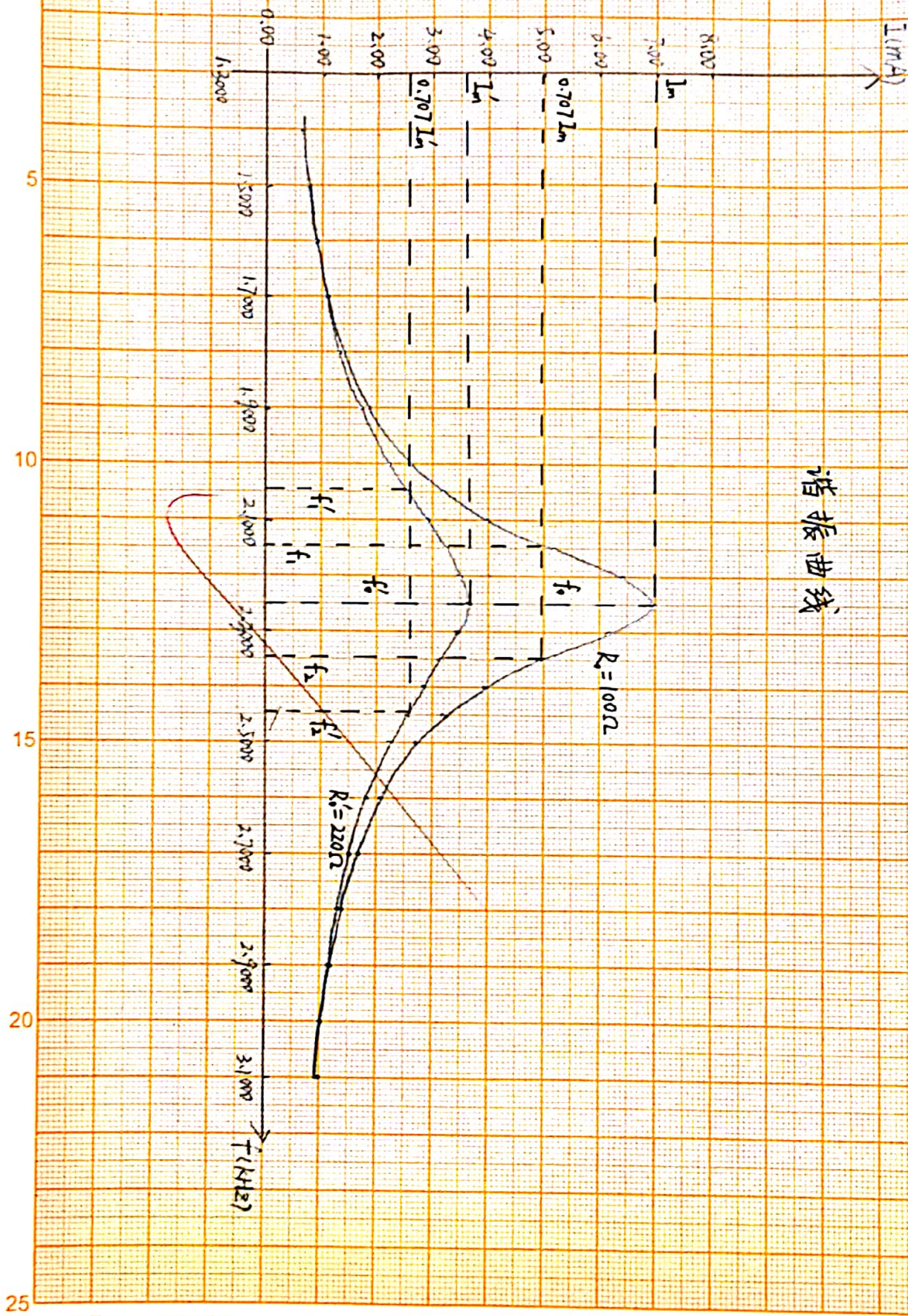
当 $R_0=100\Omega$ 时, $I=0.707I_m$ 时, $f_1=2.1480\text{kHz}, f_2=2.3410\text{kHz}$

当 $R_0'=220\Omega$ 时, $I=0.707I_m'$ 时, $f_1'=2.0460\text{kHz}, f_2'=2.4460\text{kHz}$



扫描全能王 创建

谐振曲线



货号 75 25x17公分

得力高控股有限公司

理论值: $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{240.0} \sqrt{\frac{0.100}{0.0500 \times 10^{-6}}} = 5.89$



扫描全能王 创建

(三)表3 谐振电路的通频带宽度 Δf 、谐振频率 f_0 、品质因数 Q 值

数值 / 项目 / 电路		通频带宽度 Δf				谐振频率 f_0			品质因数 Q 值	
		$f_1(\text{kHz})$	$f_2(\text{kHz})$	测量值 $\Delta f = f_2 - f_1$ (kHz)	理论值 $\Delta f = \frac{R}{2\pi L}$ (kHz)	曲线峰点 f_0 (kHz)	测量值 $f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$ (kHz)	理论值 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (kHz)	测量值 $Q = \frac{\sqrt{f_1 f_2}}{f_2 - f_1}$	理论值 $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$
$L = 0.100\text{H}$ $C = 0.0500\mu\text{F}$ $R_L = 20.0\Omega$	$R = (R_0 + R_L)$ $= 120.0\Omega$	2.1480	2.3410	0.1930	0.191	2.2500	2.2424	2.25	11.62	11.8
	$R = 2(R_0 + R_L)$ $= 240.0\Omega$	2.0460	2.4460	0.4000	0.382	2.2500	2.2371	2.25	5.593	5.89

注意有区别

$R=120.0\Omega$ 时, $f_1=2.1480\text{ kHz}$, $f_2=2.3410\text{ kHz}$

测量值 $\Delta f = f_2 - f_1 = 2.3410 - 2.1480 = 0.1930 \text{ kHz}$ 理论值 $\Delta f = \frac{R}{2\pi L} = \frac{120.0}{2\pi \times 0.100} \times 10^{-3} = 0.191 \text{ kHz}$

曲线峰点: $f_0 = 2.2500 \text{ kHz}$

测量值 $f_0 = \sqrt{f_1 f_2} = \sqrt{2.1480 \times 2.3410} = 2.2424 \text{ kHz}$

理论值: $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{0.100 \times 0.05 \times 10^{-6}}} = 2.25 \text{ kHz}$

测量值: $Q = \frac{\sqrt{f_1 f_2}}{f_2 - f_1} = \frac{\sqrt{2.1480 \times 2.3410}}{2.3410 - 2.1480} = 11.62$

理论值: $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{120.0} \sqrt{\frac{0.100}{2.0 \times 10^{-6}}} = 11.8$

$$E_1 = \left| \frac{\Delta f_{\text{测}} - \Delta f_{\text{理}}}{\Delta f_{\text{理}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{0.1930 - 0.191}{0.191} \right| \times 100\% = 1\%$$
$$E_2 = \left| \frac{f_{\text{测}} - f_{\text{理}}}{f_{\text{理}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{2.2424 - 2.25}{2.25} \right| \times 100\% = 0.4\%$$
$$E_3 = \left| \frac{Q_{21} - Q_{22}}{Q_{22}} \right| \times 100\% = \left| \frac{11.62 - 11.8}{11.8} \right| \times 100\% = 1.5\%$$

$R' = 240.0 \Omega$ 时, $f_1' = 2.0460 \text{ kHz}$, $f_2' = 2.4460 \text{ kHz}$

测量值 $\Delta f = f_2' - f_1' = 0.4000 \text{ kHz}$

理论值: $\Delta f = \frac{R}{2\pi L} = 0.382 \text{ kHz}$

曲线峰点: $f_0 = 2.2500 \text{ kHz}$

测量值: $f_0 = \sqrt{f_1 f_2} = 2.2371 \text{ kHz}$

理论值: $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 2.25 \text{ kHz}$

测量值: $Q = \frac{\sqrt{f_1' f_2'}}{f_2' - f_1'} = 5.593$

理论值: $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{240.0} \sqrt{\frac{0.100}{0.0500 \times 10^{-6}}} = 5.89$

$$E_4 = \left| \frac{\Delta f_{测} - \Delta f_{理}}{\Delta f_{理}} \right| \times 100\% = 5\%$$
$$E_s = \left| \frac{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}}{f_{\text{avg}}} \right| \times 100\% = 0.6\%$$
$$E_b = \left| \frac{Q_{\text{old}} - Q_{\text{new}}}{Q_{\text{old}}} \right| \times 100\% = 5\%$$




廈門大學

XIAMEN UNIVERSITY

ADD: FUJIAN XIAMEN CABLE: 0633 P.C: 361005

八. 思考题

1. 低频段时容抗大, 电容两端电压接近信号源电压。高频段时感抗大, 电感两端电压接近信号源电压。
2. RLC串联谐振电路发生谐振时, 电流与电压同相位, 电流达最大, 电容器和电感上的电压分别等于外加电压的Q倍, 所以串联谐振又称电压谐振。
3. 最大, 达到谐振时, 电压大小相等, 方向相反, 电路呈纯电阻性, 几乎分掉所有分压。
4. 谐振时, 还有电感丝电阻, R及电源内阻分压, 所以 U_{R_m} 小于信号源两端电压。
5. 谐振时 $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$, 所以可通过电感求电容或通过电容求电感。



扫描全能王 创建