

示波器的原理和使用、声速测量 实验报告

软件 91 李金鹏

2019013254

18 号

第一部分 示波器的原理和使用

一. 实验目的

- (1) 了解示波器的基本构造及原理，掌握其使用方法并能够熟练操作
- (2) 学习电信号有关参数的基本概念及其测量

二. 示波器的原理

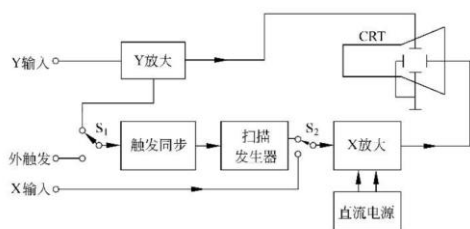


图1 示波器原理框图

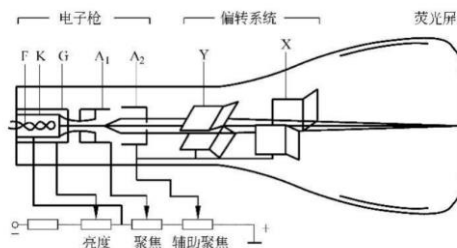


图2 示波管基本结构

示波器的原理结构图和基本图如上。

(1) 示波管（CRT）的基本结构

示波管的基本结构如图 2 所示。主要包括电子枪、偏转系统和荧光屏三部分，全部密封在玻璃外壳内，里面抽成高真空。

(2) 示波器显示波形原理

如果只在竖直偏转板上加一交变的正弦电压，则电子束在荧光屏上所形成的光斑将随电压的变化在竖直方向来回运动，如果电压频率较高，则看到的是一条竖直亮线，要能够显示波形，必须同时在水平偏转板上加一扫描电压，使电子束光斑沿水平方向拉开。这种扫描电压的特点是电压随时间线性增加到最大值，然后快速降低至最小值，此后再重复这一过程。这种扫描电压随时间变化的关系曲线形同“锯齿”，故称“锯齿波电压”。如果在竖直偏转板上（简称 Y 轴）加正弦电压，同时在水平偏转板上（简称 X 轴）加锯齿波电压，电子受竖直、水平两个方向的电场力的作用，电子的运动是两个相互垂直的运动的合成。当锯齿波电压与正弦电压的变化周期相等时，在荧光屏上将显示出完整周期的正弦电压波形。

(3) 同步触发

如果正弦波和锯齿波电压的周期稍有不同，屏上显示的波形将会移动。为了能够得到一定数量的完整周期波形，示波器上设有“TIME/DIV”（时间分度）调节旋钮，用来调节锯齿波电压的周期 T_x ，使之与被测信号的周期 T_y 成整数倍关系，从而在示波器屏幕上得到所需数目的完整波形。

(4) 利萨如图形

如果在示波器的 X 和 Y 输入端同时输入频率相同或成简单整数比的两个正弦波信号，则屏幕上的光斑 将呈现特殊形状的轨迹，这种轨迹图称为利萨如图形。

三. 实验仪器

示波器、函数发生器、自制多波形信号发生器。

四. 实验内容

1. 观测波形

自制多波形信号发生器可输出正弦波、方波、三角波和尖脉冲波四种波形的信号发生器，用示波器测出其正弦波、方波幅度、三角波、尖波的幅度、频率。

2. 观察并记录李萨如图形

①将函数信号发生器的 1、2 两路正弦信号输入到示波器两个输入端，调出 $f_x:f_y=1:1$ 、 $f_x:f_y=2:1$ （或其它）的李萨如图，调整两路信号的相位，观察并记录相位差为 0 ， $\pi/4$ ， $\pi/2$ ， $3\pi/4$ ， π 时的图。

②将自制信号源和函数信号发生器 1 路正弦波信号分别输入到示波器的两个输入端，调出频率比 $f_x:f_y=1:1$ 的李萨如图形，并由此确定自制信号源正弦波信号的频率。

五. 数据处理

1、自制信号源的波形观测与测量

	光标法 U_{pp}/V	分度法 U_{pp}/V	测量 $T/\mu s$
正弦波	5.92	6.08	620.0
方波	8.96	9.12	620.0
三角波	7.92	8.16	620.0
尖峰波	16.60	16.00	620.0

（以分度法数据为准）

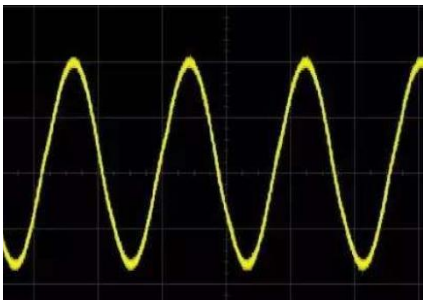
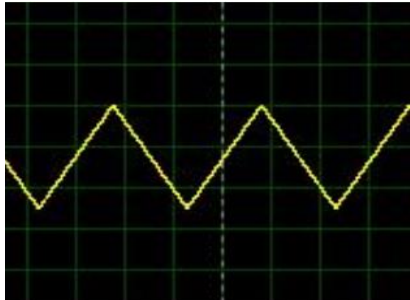
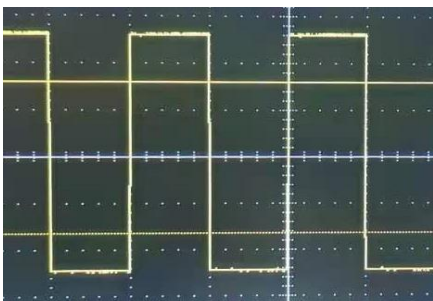
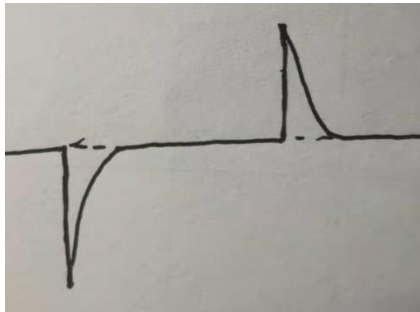
$$\text{正弦波的有效值 } U_{\text{有效}} = \frac{\sqrt{2}}{4} U_{PP} = \frac{\sqrt{2}}{4} \times 6.08V = 1.735V$$

$$\text{方波的有效值 } U_{\text{有效}} = \frac{1}{2} U_{PP} = \frac{1}{2} \times 9.12V = 4.56V$$

$$\text{三角波的有效值 } U_{\text{有效}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} U_{PP} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \times 8.16V = 2.356V$$

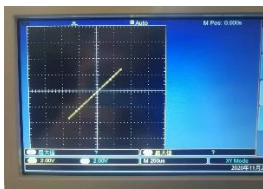
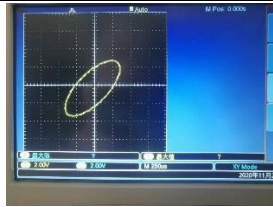
$$\text{自制波的频率 } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{620.0 \times 10^{-6}} = 1612.9\text{Hz}$$

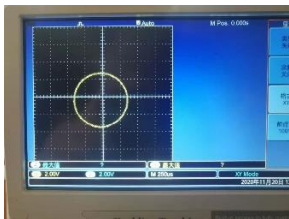
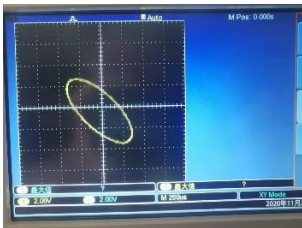
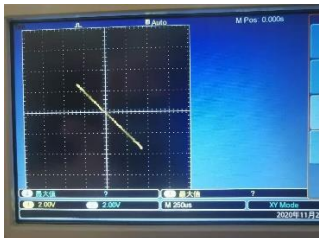
附：四种波的波形图

正弦波			三角波
方波			尖峰波

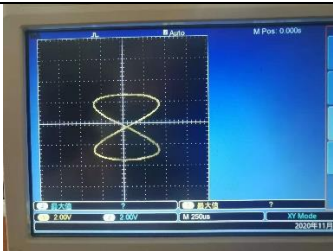
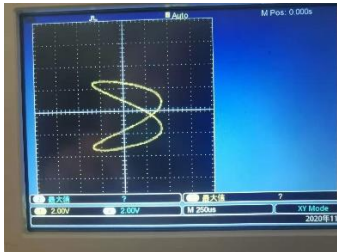
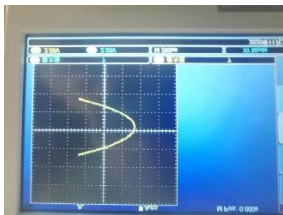
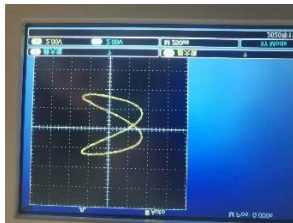
2、观察利萨如图

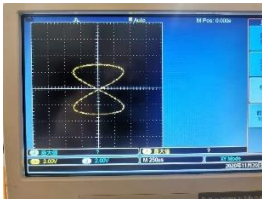
(1) $f_x:f_y=1:1$

	$f_x = 1.5\text{kHz}$	$f_y = 1.5\text{kHz}$
初相/度	$X = 0 ; y = 0$	$X = 45 ; y = 0$
相差/度	0	45
波形图		
初相/度	$X = 90 ; y = 0$	$X = 135 ; y = 0$
相差/度	90	135

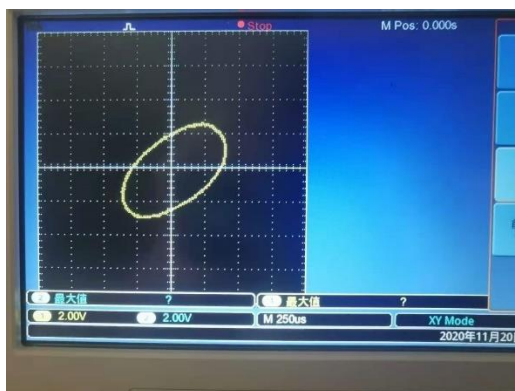
波形图		
初相/度	$X = 180 ; y = 0$	
相差/度	180	
波形图		

(1) $f_x:f_y=2:1$

	$f_x = 2.0\text{kHz}$	$f_y = 1.0\text{kHz}$
初相/度	$X = 0 ; y = 0$	$X = 45 ; y = 0$
相差/度	0	45
波形图		
初相/度	$X = 90 ; y = 0$	$X = 135 ; y = 0$
相差/度	90	135
波形图		
初相/度	$X = 180 ; y = 0$	

相差/度	180
波形图	

(3)测自制信号源频率，当 x-y 模式下波形基本稳定时（如下图），得出自制波频率为 1.6037kHz；与理论值1.6129kHz的偏差为 0.57%。



六. 思考题

(1) 如果图形不稳定，总是向左或向右移动，该如何调节？

答：图形不稳定的原因是 X 方向的锯齿波电压和加在 Y 方向上的电压周期稍有不同，应该进行同步触发调节。同步触发调节的方法有：直接按示波器上的 Autoset 按钮，让示波器自行调节或者调节触发功能区，手动选择扫描电压扫描开始时间。

(2) 获得稳定的利萨如图的必要条件是什么？

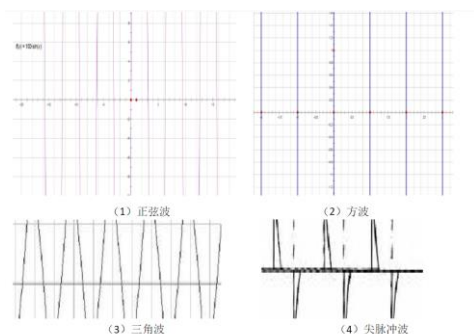
答：李萨如图的稳定条件是两信号输出频率之比可以写成 $\frac{M}{N}$ 的形式，其中 M 和 N 都是整数。

(3) 如果 Y 轴信号频率 f_y 比 X 轴信号频率 f_x 大很多，示波器上看到什么情形？相反 f_x 比 f_y 大很多呢？

答：Y 远大于 X：一条水平亮线；X 远大于 Y：一条竖直亮线。

(4) 若被测信号幅度太大（在不引起仪器损坏的前提下），则在屏上看到什么图形？

答：则在屏幕上将看到不完整的图形。如下图：



(5) 观察利萨如图形时，如果图形不稳定，而且是一个形状不断变化的椭圆，那么图形变化的快慢与两个信号频率之差有什么关系？

答：两者频率相差越大，图形变化越快。

第二部分 声速测量

一. 实验目的

- (1) 了解声波在空气中传播速度与气体状态参量的关系
- (2) 了解超声波产生和接收的原理，学习用相位法来测量空气中的声速。

二. 实验原理

1. 声波在空气中的传播速度

在理想气体中声波的传播速度为

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

其中 γ 是比热容比，即气体定压比热容与定容比热容的比值， M 是气体的摩尔质量， T 是绝对温度， $R=8.314\ 41\ \text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$

经过对空气平均摩尔质量 M_a 和比热容比 γ 的修正，在温度为 t ，相对湿度为 r 的空气中，声速为

$$v = 331.5 \sqrt{\left(1 + \frac{t}{T_0}\right) \left(1 + 0.31 \frac{rp_s}{p}\right)}$$

其中 p_s 为室温时空气的饱和蒸气压，可查表得出。 $p=1.013\times 10^5\text{Pa}$ 。用此公式可计算声速的理论值。

2. 测量声速的实验方法

声波的传播速度 v 与声波频率 f 及波长 λ 的关系为 $v=\lambda f$ ，其中声波频率可通过测

量声源的振动频率得出，波长可用相位法求出。

- 1) 超声波传感器的固有频率为 40kHz（相应的超声波波长约为几个毫米），在其附近微调外加电信号的频率，当接收传感器输出的电信号幅度达到最大时，可以判断两者达到共振，读出外加电信号频率，则得到声波频率 f 。
- 2) 在发射器的声波场中沿传播方向移动接收器时，总可以找到某点，在该点处接收到的信号与发射的信号同相，继续移动接收器，当再次同相时，就知道所移动的距离为一个波长 λ 的整数倍，即 $l=n\lambda$ 。实际操作中，采用连续移动的方法，每达到一次同相，就记下长度 l ，这时移动的路程是一个 λ 。

三. 实验仪器

声速测量仪、函数信号发生器、示波器。

四. 实验内容与步骤

- 1、**连接电路。**将函数信号发生器的输出端与超声波发生器的输入端 5 及示波器的通道 1 相连，将超声波接收器的输出端与示波器的通道 2 相连，函数信号发生器置于正弦输出，频率范围置于 40kHz 左右，输出幅度调到 10V 左右。
- 2、**观察信号。**用示波器观察加在声波发射器上的电信号和超声波接收器输出的信号。当接收器输出信号幅度最大时，记录下发射器的频率。
- 3、**用相位法测波长。**利用李萨如图形，当输入和输出信号同相或反向时，椭圆退化为左斜或右斜的直线，李萨如图形的灵敏度是非常高的，用此可以来判断同相点。在游标卡尺上连续移动接收器，记录下 20 个同相点对应的位移读数。
- 4、测量开始和结束时，先后记录室温 t_1 和 t_2 ，相对湿度 r_1 和 r_2 ，计算出声速的理论值，与实验测得的值相比较。

五、数据记录与处理、误差分析

1. 室温和湿度的记录

	室温 $t/^{\circ}\text{C}$	相对湿度 r
实验前	24.4	26.7%
实验后	24.9	24.6%

平均室温 $\bar{t} = 24.65^{\circ}\text{C}$

平均相对湿度 $\bar{r} = 25.65\%$

利用内插法可得：

$$p_s = [0.0298 + (0.0317 - 0.0298) \times 0.65] \times 10^5 = 0.031035 \times 10^5 \text{Pa}$$

发射器发射的超声波频率 $f = 40.592\text{kHz}$

2. 相位法测波长 (注: 表中 $\Delta x_i = x_{i+10} - x_i = 10\lambda$)

$i =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9 : 1	10
x_i/mm	9.09	17.95	26.53	35.28	43.98	52.42	61.04	69.71	78.34	87.14
x_{i+10}/mm	96.06	103.77	112.08	120.14	128.46	137.07	145.93	154.66	163.35	172.49
$\Delta x_i/\text{mm}$	86.97	85.82	85.55	84.86	84.48	84.65	84.89	84.95	85.01	85.35

(一) 逐差法

10 个 10λ 的平均值为 85.253mm, 则 $\bar{\lambda} = \underline{8.5253\text{mm}}$

λ 不确定度 Δ_λ 的计算: 10λ 的标准偏差 $s_{10\lambda}$, 按式

$$\Delta_\lambda = \frac{1}{10} \Delta_{10\lambda} = \frac{1}{10} \sqrt{(s_{10\lambda})^2 + (\sqrt{2} \Delta_{\text{仪}})^2}$$

其中的 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示仪器不确定度, 本实验中的读数尺是利用数显游标卡尺, 其

示值误差限为 0.03mm, 即 $\Delta_{\text{仪}} = 0.03\text{mm}$ 。

由表中数据, 得

$$S'_{10\lambda} = 0.728$$

$$S_{10\lambda} = \frac{2.26}{\sqrt{10}} S'_{10\lambda} = 0.856$$

$$\therefore \Delta\lambda = \frac{1}{10} \sqrt{(S_{10\lambda})^2 + \Delta^2} = \frac{1}{10} \sqrt{0.732736 + (\sqrt{2} \times 0.03)^2} = 0.086\text{mm}$$

$$\therefore \lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta\lambda = 8.525 \pm 0.086\text{mm}$$

由 $v = f\lambda$ 可得 $v = 40.592 \times 8.525 = 346.05\text{m/s}$

$$\therefore \Delta_v = v \sqrt{\left(\frac{\Delta_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_\lambda}{\lambda}\right)^2} = 346.05 \sqrt{\left(\frac{10}{40592}\right)^2 + \left(\frac{0.086}{8.525}\right)^2} = 1.20\text{m/s} \text{ (频率的不}$$

确定度 Δ_f 取 10Hz)

$$\therefore \text{由相位法测得的超声波声速 } v = 346.05 \pm 1.20\text{m/s}$$

（二）最小二乘法

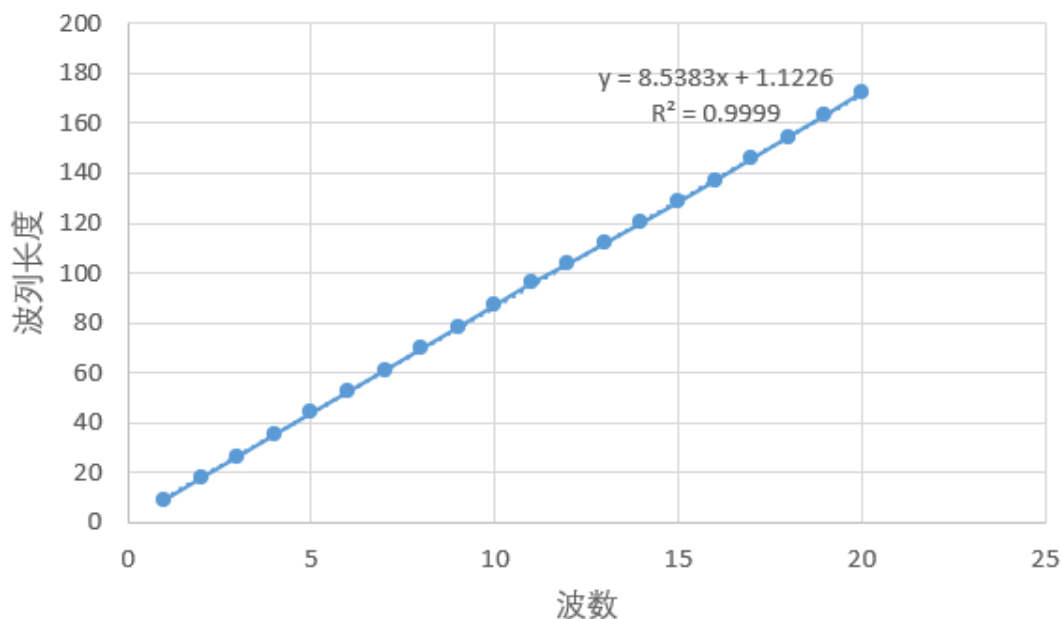
最小二乘拟合计算曲线斜率结果为

$$b = 8.5383$$

故波长为 8.5383mm

最小二乘得到的曲线为： $y = 8.5383x + 1.1226$

如下图所示：



其相关系数为 0.9999，十分接近 1，因此可以断定该方法测出的波长误差是十分小的。

其均方根误差（RMSE）为

$$S = \sqrt{\frac{\sum (y_i - (8.5383x_i + 1.1226))^2}{n}} = 0.443$$

为误差方差（反思：由于最小二乘结果里斜率代表的是波长，而纵坐标为波列长度，因此计算其均方根误差意义并不大，而相关系数 R 的意义就相对更大，如果把每一个波列误差除以其波数后，其结果也可以反映波长，相应计算均方根误差（RMSE）为

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\frac{y_i - (8.5383x_i + 1.1226)}{i})^2}{n}} = 0.136$$

)

$$\therefore \lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta\lambda = 8.538 \pm 0.136\text{mm}$$

由 $v = f\lambda$ 可得 $v = 40.592 \times 8.538 = 346.57\text{ m/s}$

$$\therefore \Delta_v = v \sqrt{\left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2} = 346.57 \sqrt{\left(\frac{10}{40592}\right)^2 + \left(\frac{0.136}{8.538}\right)^2} = 5.52\text{ m/s}$$

故 $v = 346.57 \pm 5.52\text{ m/s}$

声速的理论值 v_{theory} 的计算:

$$\begin{aligned} v_{\text{theory}} &= 331.5 \sqrt{\left(1 + \frac{t}{T_0}\right) \left(1 + \frac{0.31\text{rp}_s}{p}\right)} \\ &= 331.5 \sqrt{\left(1 + \frac{24.65}{273.15}\right) \left(1 + \frac{0.31 \times 25.65\% \times 0.031035 \times 10^5}{1.013 \times 10^5}\right)} \\ &= 346.56\text{ m/s} \end{aligned}$$

逐差法实验值与理论值的相对误差为:

$$\left| \frac{v - v_{\text{theory}}}{v_{\text{theory}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{346.05 - 346.56}{346.56} \right| \times 100\% = 0.147\%$$

最小二乘法实验值与理论值的相对误差为:

$$\left| \frac{v - v_{\text{theory}}}{v_{\text{theory}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{346.57 - 346.56}{346.56} \right| \times 100\% = 0.003\%$$

六、思考题

(1) 逐差法的优点是尽量利用了各测量量, 而又不减少结果的有效数字位数。如果在本实验的数据处理中采用逐项求差 (即 $x_{i+1} - x_i$), 那么中间的数据就互相消去, 从而浪费数据。隔项求差客观上是将非等精度测量的结果转变成“类等精度测量”的结果, 以便可以用求算术平均值的方法来减小偶然误差, 还可以减少仪器误差。

其他数据处理方法还有: 作图法, 最小二乘法。

作图法和逐差法相比, 有几个优点: 1) 逐差法要求两个相关的物理量中有一个作等间隔变化 (本实验里面是 λ), 而作图法不受这一限制。2) 采用图线法处理实验数据, 更容易发现“不良数据点”, 以便及时地修正或剔除, 减小实验误差。因此在一般情况下, 适用于逐差法的情况也适用于图线法, 但是适用于图

线法的情况不一定适用于逐差法。

但是作图法会在作图过程中引入附加误差，尤其在根据图线确定常数时，这种误差有时很明显。**最小二乘法**的原理也是直线拟合，并且这种方法避免了附加误差的产生。

(2) $\Delta_{\text{仪}}$ 前面为什么有一个 $\sqrt{2}$ ？

由于波长 λ 是用 $x_{\text{后}} - x_{\text{前}}$ 得到的，由于“前头”不是固定端，所以“前”和“后”

都会产生误差，两次的误差都是 $\pm 0.03\text{mm}$ ，所以就乘上 $\sqrt{2}$ 。

第三部分 研究型内容

1、用方波生成三角波：

实验电路图：

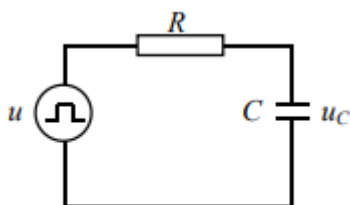
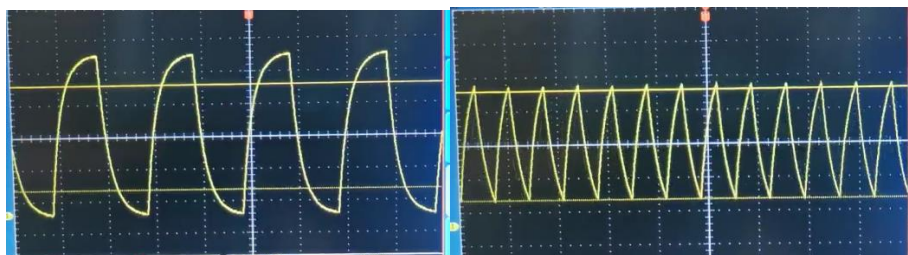
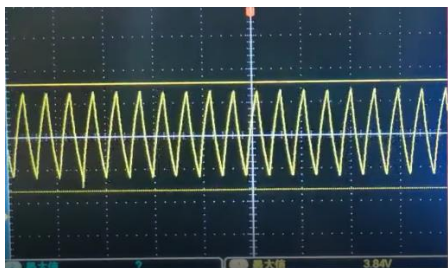


图 1 三角波产生电路

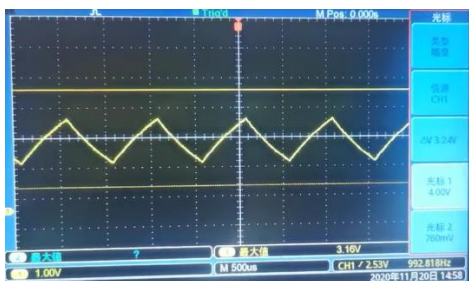
随着方波频率的增大或者电阻阻值的增大，示波器显示波形变化如下：

电阻不变，频率增大：





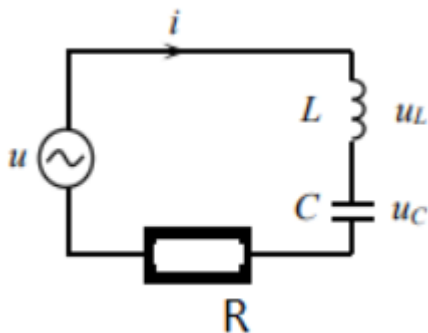
频率不变，电阻增大：



变化规律：随着频率或者电阻的增大，波形越来越接近三角波，且振幅也有相应下降。

2、用 LC 共振测电容、电感

实验电路：



调节频率，观察 R 两端电压波形，与输入波形的 X-Y 模式下的利萨如图，当二者相位相同

时，为一条斜率为正的直线，下图为观测图像：



此时，记录输入频率为 21.2kHz 即为该电路共振频率，再由 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 即可知电容求电感，知电感求电容。

第四部分 实验小结

在本次的探究实验中，我通过在原电路中加入电阻的方式，依据电路电阻电压与电流同相位的特点来检测电路电流与输入电压的相位关系，从而测得电路的共振频率。这种动脑筋思考的习惯要沿袭下去。

在用示波器观察自制信号源与函数发生器的输出信号的利萨如图像时，由于图像波动严重，这里我采用在理论值附近先粗调再微调，加上耐心细致，最终使得图像波动十分小。

由于测位移是一起十分敏感，稍有的扰动位移就会发生变化，而且示波器波形也会抖动，这里我采用的方法是，当示波器达到自己想要的波形时，用两只手夹住位移测量仪，读数完成后再松开手，由此得到的测量结果精度也十分高。

（原始数据表格见附页）

18号

一、示波器原理与使用

1. 观测波形

幅度有效值		幅度值	
波形	光标法 U_{pp} : $8.96V$ 分度法 U_{pp} : $9.12V$ 周期 T : $620.0\mu s$	波形	光标 $5.92V$ 分: $6.08V$ T : $620.0\mu s$

三角波		尖脉冲	
周期	频率	波形	频率
光标: $7.92V$ 分: $8.16V$ T : $620.0\mu s$		光标: $16.60V$ 分: $16.00V$ T : $620.0\mu s$	

2.

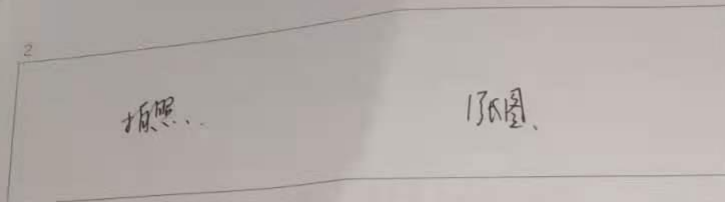
相差	$\Delta\varphi$ 0	$\pi/4$	
波形图	$f_x: 1.5kHz$ · $f_y: 1.5kHz$ $\varphi_x: 0^\circ$ $\varphi_y: 0^\circ$	$\varphi_x: 45^\circ$ $\varphi_y: 0^\circ$	
相差	$\pi/2$	$3\pi/4$	π
波形图	$\varphi_x: 90^\circ$ $\varphi_y: 0^\circ$	$\varphi_x: 135^\circ$ $\varphi_y: 0^\circ$	$\varphi_x: 180^\circ$ $\varphi_y: 0^\circ$

正弦图

$f_x: 2.0kHz$ · $f_y: 1.0kHz$

$\varphi_x = 0^\circ$ $\varphi_x = 45^\circ$ $\varphi_x = 90^\circ$ $\varphi_x = 135^\circ$ $\varphi_x = 180^\circ$
 $\varphi_y = 0^\circ$ $\varphi_y = 0^\circ$ $\varphi_y = 0^\circ$ $\varphi_y = 0^\circ$ $\varphi_y = 0^\circ$

正弦图



频率: 1.60370 kHz

二、声速测量

1. 室温和湿度的记录

	室温 $t/^{\circ}\text{C}$	相对湿度 r
实验前	24.4	26.7%
实验后	24.9	24.6%

2. 相位法测波长

超声波 $f = 40.59 \text{ kHz}$

$i =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_i / mm	9.09	17.95	26.53	35.28	43.98	52.42	61.04	69.71	78.34	87.14
x_{i+10} / mm	96.06	103.77	112.08	120.14	128.46	137.07	145.93	154.66	163.35	172.49

两手操作.

三、电路设计与测量

1. 从电容充放电到三角波

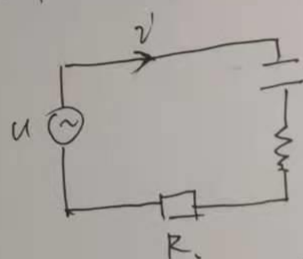
(1) 电阻 $10 \text{ k}\Omega$, 电容 0.1 MF 改变频率 $1 \text{ kHz} \rightarrow 7.5 \text{ kHz}$

波形图:

频率				
波形图 U_i / U_o	<p>随着频率 \uparrow, 越波形越来越接近三角波. (录像)</p> <p>但是幅值在逐渐变小</p>			
频率				

形图						
U/U_R						
频率						

4. 测电感电容.



$$C = 10.435 \text{ nF}$$

$$L = 5.6 \text{ mH}$$

$$\text{测得 } f = 21.2 \text{ kHz} \text{ (谐振)}$$

