

# 示波器原理和使用、声速测量（完整报告）

刘泓尊 2018011446 计 84

## 一、实验目的

1. 了解示波器的基本结构及其工作原理，学习并掌握示波器的基本使用方法。
2. 学习电信号有关参数的基本概念及其测量。
3. 了解声波在空气中传播速度与气体状态参量的关系。
4. 了解超声波产生和接收的原理，学习用相位法测量空气中的声速。

## 二、实验原理

### 1. 示波器

传统的示波器为阴极射线示波器，一般包括示波管（又称阴极射线管 CRT）、竖直放大器（Y 轴放大）、水平放大器（X 轴放大）、扫描发生器、触发同步和直流电源等基本组成部分，具体结构如图 1。

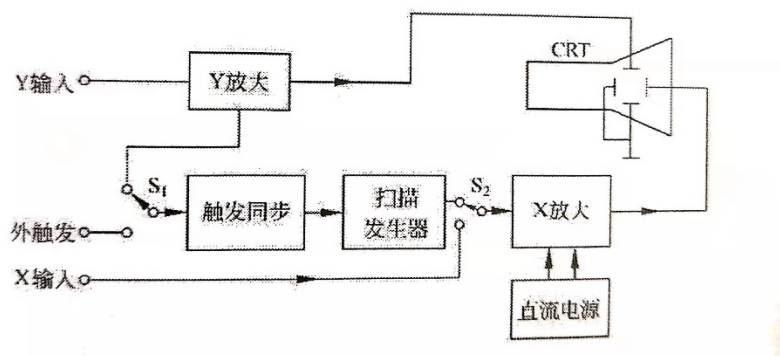


图 1 示波器原理框图

示波器的基本结构如图 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，内抽成高真空。

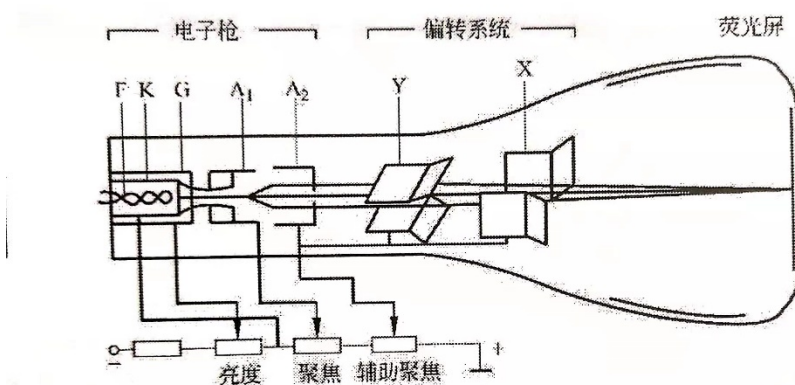


图 2 示波器基本结构

- a. 显示波形原理：如果在竖直偏转板上加正弦电压，同时在水平偏转板上加锯齿波电压，电子受到水平、竖直两个方向的电场力作用。如果两个电压的周期相同，则可以显示波形图。
- b. 同步：如果正弦波和锯齿波电压的周期略有不同，屏上出现的是一条移动着的不稳定图形。若锯齿波电压的周期  $T_x$  比正弦波电压周期  $T_y$  稍小，则波形会向

右移动；反之向左。原因是每次扫描开始时波形曲线上的起点不同所导致。示波器内装有扫描同步装置，在适当的调节后，可以让锯齿波电压的扫描起点自动跟着被测信号改变。

- c. 李萨如图形：如果在示波器的 X 和 Y 输入端同时输入频率相同或成最简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，成为“李萨如图形”。下图为若干不同频率比的李萨如图形，可以发现：水平切点数  $n_x$  与竖直切点数  $n_y$  之比等于 Y 和 X 输入的两正弦电压频率之比，即  $f_y:f_x = n_x:n_y$ 。有端点与假想边框相接时，一个端点应记为 1/2 个切点。如图 3。

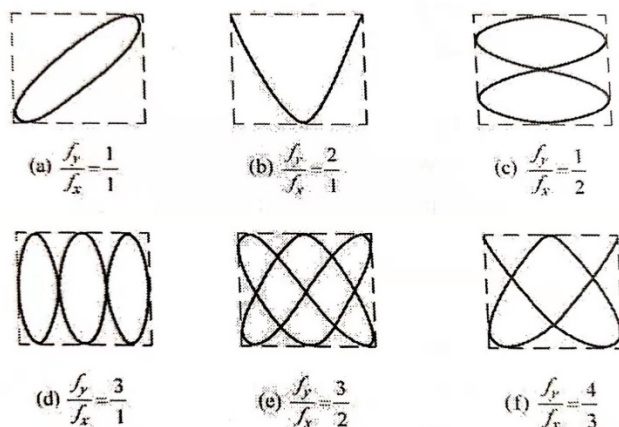


图 3 不同频率比时的李萨如图形

数字示波器：其主要工作原理为：被测信号输入→AD 转换器转换为数字信号→采样记录数据→程序处理→波形复现到液晶屏幕。

## 2. 声速测量

在理想气体中，声波的传播速度为：

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

在室温  $t$  下，干燥空气中的声速为：

$$v = v_0 \sqrt{1 + \frac{T}{T_0}}$$

由于空气中存在水蒸气，经过对空气平均摩尔质量和比热容比的修正，在温度  $T$ 、相对湿度  $r$ 、大气压为  $p$  的空气中，声速为：

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

相位法测量声速

声波的波速与声波频率之间的关系为  $v = f\lambda$

只要测量出声波的频率和波长就可以求出声速  $v$ 。其中频率由测量声源的振动频率得到，波长可以用相位法来测量。利用  $l = n\lambda$  可以准确测量波长。

利用超声波传感器可以产生或接收超声波，其外形结果如图所示。其中压电陶瓷片

是传感器的核心。锥形辐射喇叭使得发射和接收的超声波能量比较集中并有方向性。实验所用压电陶瓷的振荡频率为 40kHz，相应的超声波长为几毫米。可以使用相位法测量波长。

为判断相位差，可以利用双踪示波器直接比较发射器的信号和接收器的信号，同时沿传播方向移动接收器寻找同相点。也可以利用李萨如图形，在两个电信号同相或反相时椭圆退化为斜线来判断，其优点是斜线情况判断相位差最为敏锐。

### 三、实验仪器

1. Tektronix TBS1102B-EDU 数字示波器
2. Tektronix AFG1062 函数信号发生器
3. 自制多波形信号发生器
4. 数显式声速测量仪（包括声波发射器、超声波接收器、数显游标卡尺）
5. 干湿温度计

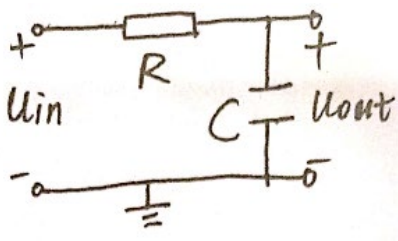
### 四、实验步骤

#### 1. 示波器的使用

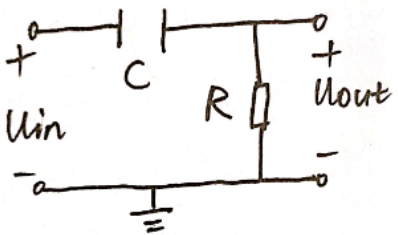
- (1) 观测波形：用示波器分别测出其输出的正弦波的幅度有效值、方波幅度值、三角波的周期及尖脉冲的频率。记录原始数据并绘制相应波形，计算测量结果。
- (2) 观测李萨如图形：调出  $f_x : f_y = 1:1$  和  $f_x : f_y = 2:1$  的李萨如图。并利用前者确定自制信号源的频率。
- (3) 研究方波与三角波、脉冲波之间的关系。

接线图如下图所示：

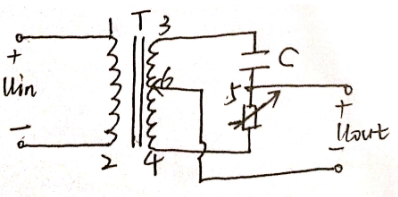
##### a. 电容器的充放电波形到三角波



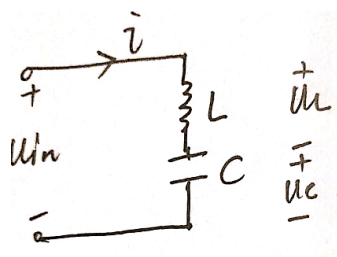
##### b. 尖脉冲产生原理研究



#### (4) 相位变化的观测



#### (5) 共振电路测电感、电容



## 2. 声速测量

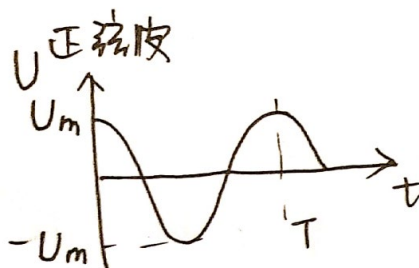
- (1) 连接电路。频率范围 置于 100kHz 档。
- (2) 将函数信号发生器的频率调至 40kHz 左右，然后细调频率，使得接收器输出信号最大。记下此频率为超声波频率。
- (3) 用相位法测波长，用李萨如图形找出同相点。每遇一个同相点，测一次接收器的位置  $x$ ，连续测 20 个数据，可用逐差法处理。
- (4) 在测量开始和结束时，先后记录室温  $t_1$  和  $t_2$ ，相对湿度  $r_1$  和  $r_2$ ，得到相应的饱和蒸气压值，并计算出声速理论值。

## 五、数据处理

### 1. 观测波形

	光标法 $U_{pp}/V$	周期 $T/\mu s$	计算 $U_{eff}/V$	频率 $f/kHz$
正弦波	2.66	900	0.94	1.111
方波	3.96	900	1.98	1.111
三角波	12.00	900	3.46	1.111
尖峰波	12.00	880	-----	1.136

#### a. 正弦波

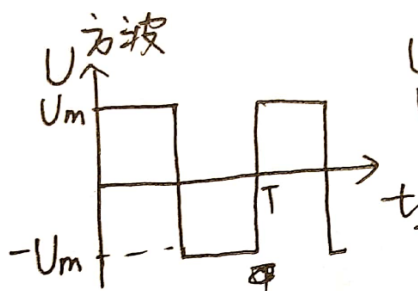


设  $U = U_m \sin \omega t$ ,  $U_m = \frac{1}{2}U_{pp}$ , 则有效值

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} = \sqrt{\frac{U_m^2}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_{pp}}{2\sqrt{2}} = 0.94V$$

$$f = \frac{1}{T} = 1.111kHz$$

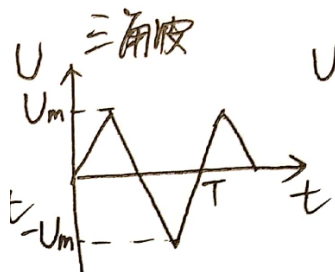
#### b. 方波



$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} = \frac{U_m^2}{T} = \int_0^T dt = U_m = \frac{U_{pp}}{2} = 1.98V$$

$$f = \frac{1}{T} = 1.111kHz$$

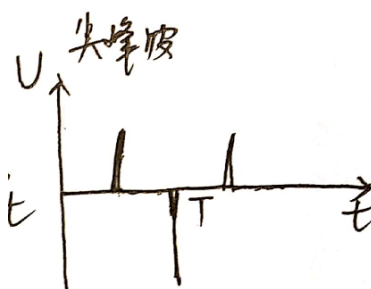
c. 三角波



$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \left( \int_0^{\frac{T}{4}} \left( \frac{4U_m}{T}t \right)^2 dt + \int_{\frac{T}{4}}^{\frac{3T}{4}} \left( -\frac{4U_m}{T}t + 2U_m \right)^2 dt + \int_{\frac{3T}{4}}^T \left( \frac{4U_m}{T}t - 4U_m \right)^2 dt \right)} = \frac{U_m}{\sqrt{3}} = 3.46V$$

$$f = \frac{1}{T} = 1.111kHz$$

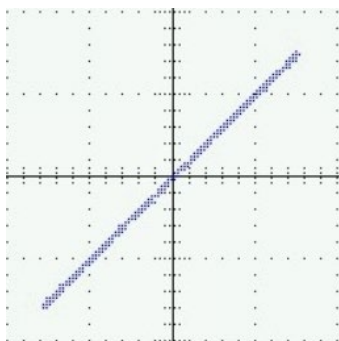
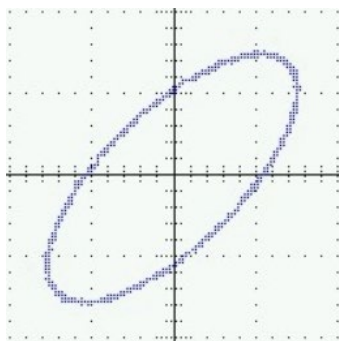
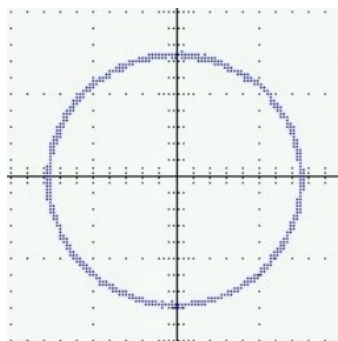
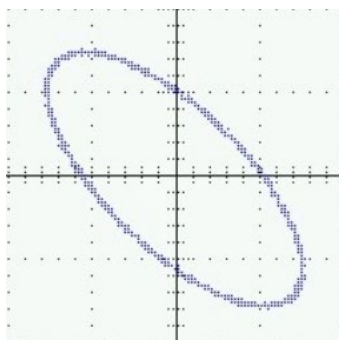
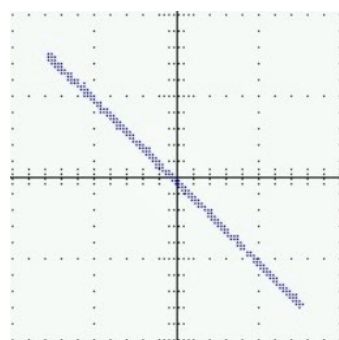
d. 尖峰波



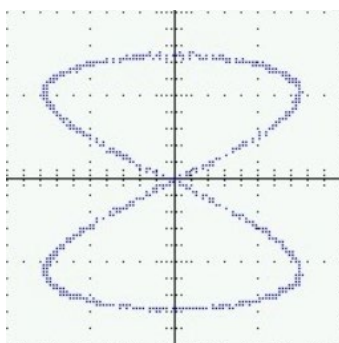
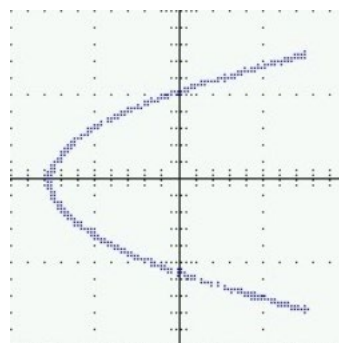
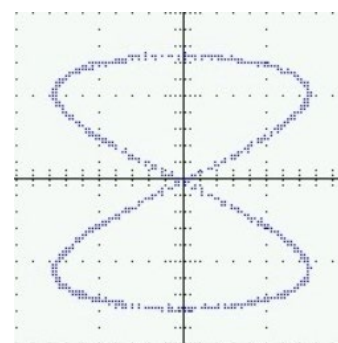
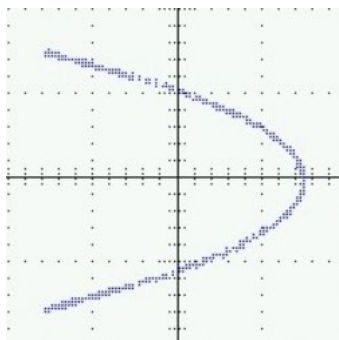
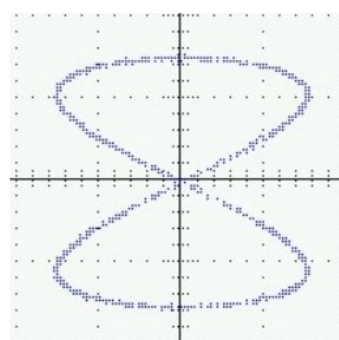
$$f = \frac{1}{T} = 1.136kHz$$

2. 观测李萨如图形

a.  $f_x = 5kHz$ ,  $f_y = 5kHz$   $f_x:f_y = 1:1$

 $\Delta\phi = 0^\circ$  $\Delta\phi = 45^\circ$  $\Delta\phi = 90^\circ$  $\Delta\phi = 135^\circ$  $\Delta\phi = 180^\circ$ 

b.  $f_x = 10\text{kHz}$   $f_y = 5\text{kHz}$   $f_x:f_y = 2:1$

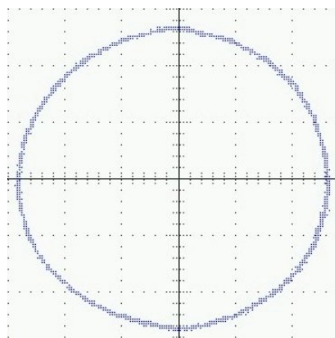
 $\Delta\phi = 0^\circ$  $\Delta\phi = 45^\circ$  $\Delta\phi = 90^\circ$  $\Delta\phi = 135^\circ$  $\Delta\phi = 180^\circ$ 

c. 测自制信号源的正弦波频率

将自制信号源和函数信号发生器 1 路正弦波信号接入示波器，调出  $f_x:f_y = 1:1$  的李萨如图形，其相位变化时的截图之一如下图所示。此时 1 路信号源频率为 1.110kHz。



因此，自制信号源正弦波频率为 **1.110kHz**，与步骤 1 中测量结果相近。



两路信号频率比为 1 时，相位差接近  $90^\circ$  的李萨如图形

### 3. 研究方波与三角波、尖脉冲之间的关系

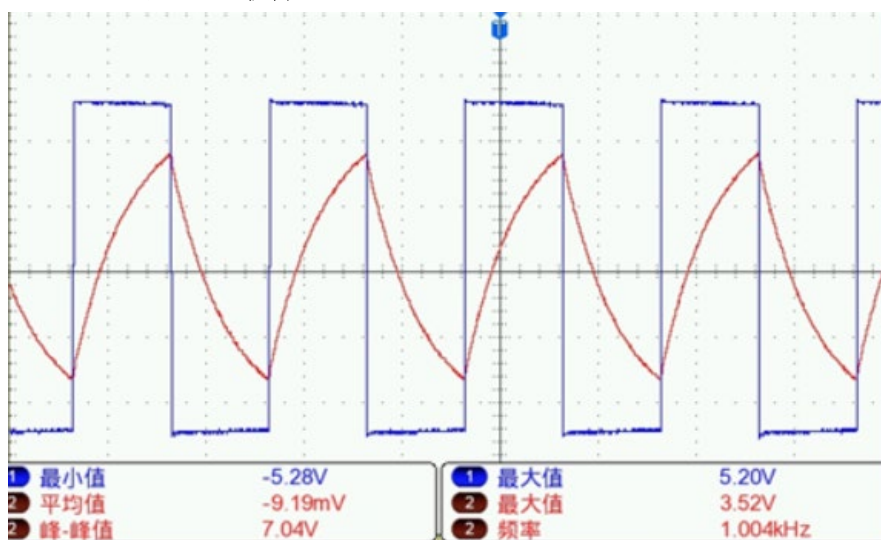
#### a. 从电容器的充放电到三角波 ( $C = 9.380 \times 10^{-9} \text{F}$ )

下列各图为 R, f 值不同时输入电压与输出电压的波形 (蓝色为输入, 红色为输出)。

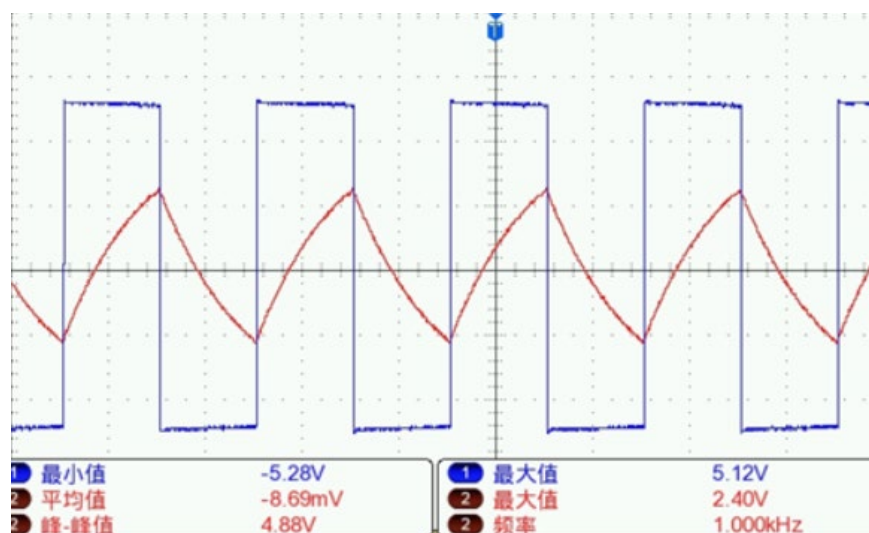
**规律与解释:**

1. f 不变时, 随着 R 的增加, 输出电压的幅值不断减小, 时间常数  $t = RC$  增大, 暂态过程逐渐增大;

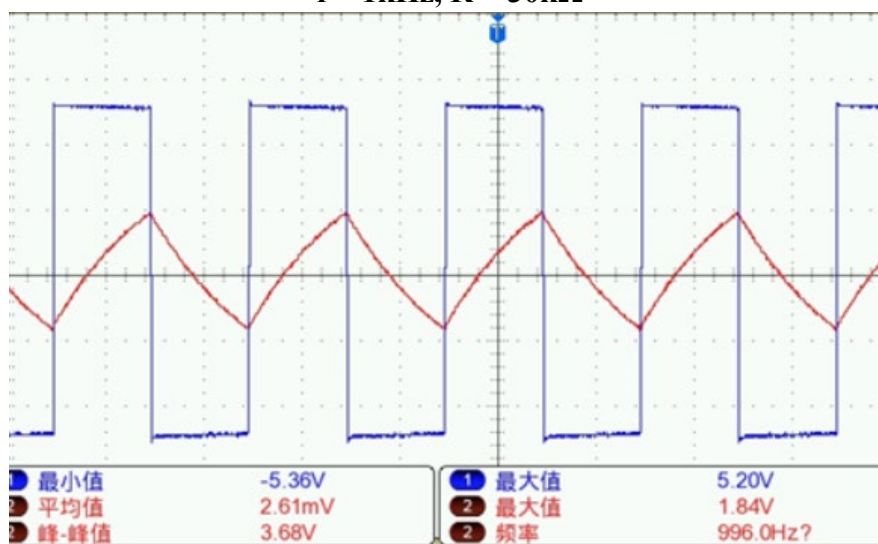
2. R 不变时, 随着 f 的增大, 电路接近稳态的程度越小, 因此暂态过程曲线越接近直线。实际上, 本电路实现了类似于“积分”的功能。



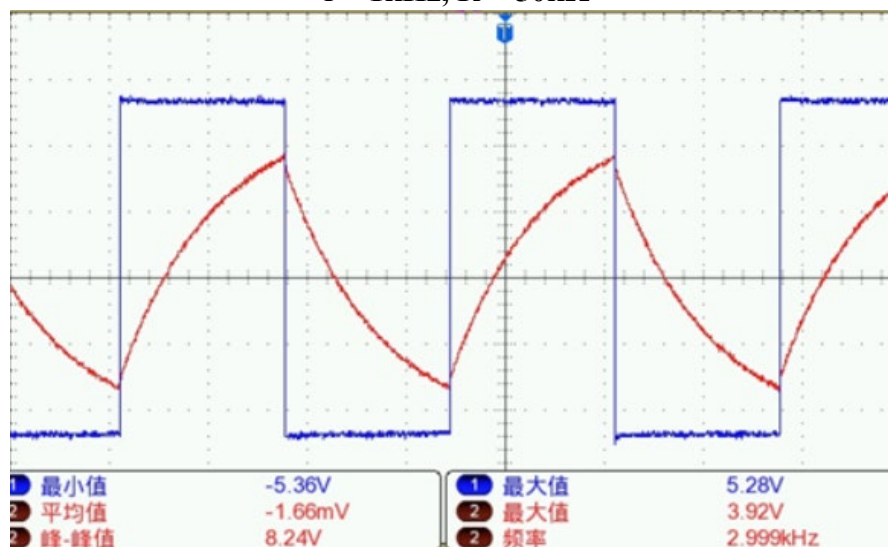
**f = 1kHz, R = 10kΩ**



$f = 1\text{kHz}$ ,  $R = 30\text{k}\Omega$

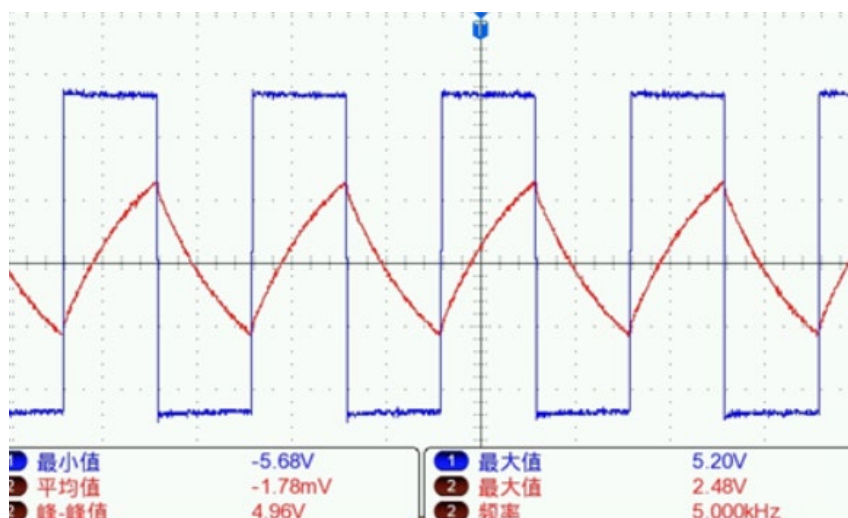


$f = 1\text{kHz}$ ,  $R = 50\text{k}\Omega$



$f = 3\text{kHz}$ ,  $R = 10\text{k}\Omega$





$$f = 5\text{kHz}, R = 10\text{k}\Omega$$

#### b. 尖脉冲产生原理的研究 ( $C = 9.380 \times 10^{-9}\text{F}$ )

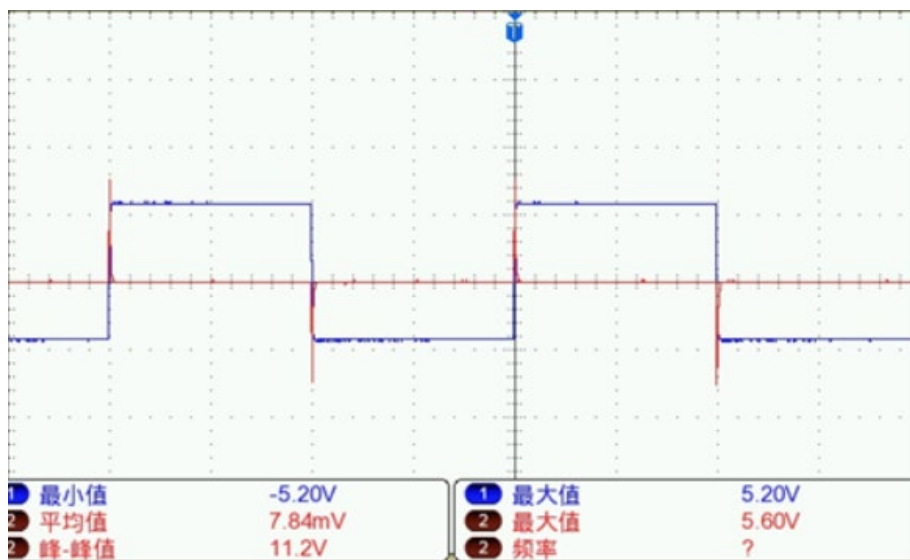
下列各图为  $R$ ,  $f$  值不同时输入电压与输出电压的波形 (蓝色为输入, 红色为输出)。

##### 规律与解释:

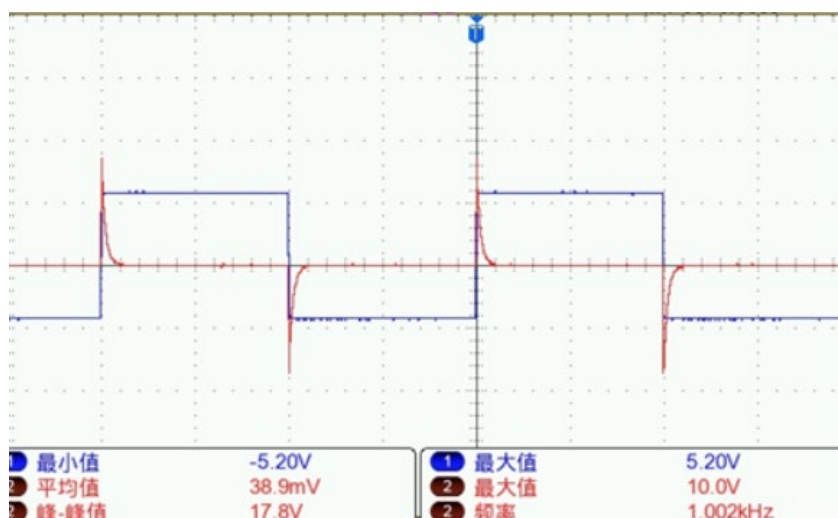
1.  $f$  不变时, 随着  $R$  的增加, 输出电压的幅值不断增大, 时间常数  $t = RC$  增大, 暂态过程逐渐延长, 使得“尖脉冲”下行图形越来越接近于指数衰减曲线;

2.  $R$  不变时, 随着  $f$  的增大, 电路达到稳态的程度相对越小, 暂态过程被“放大”, 因此暂态过程曲线越接近曲线。

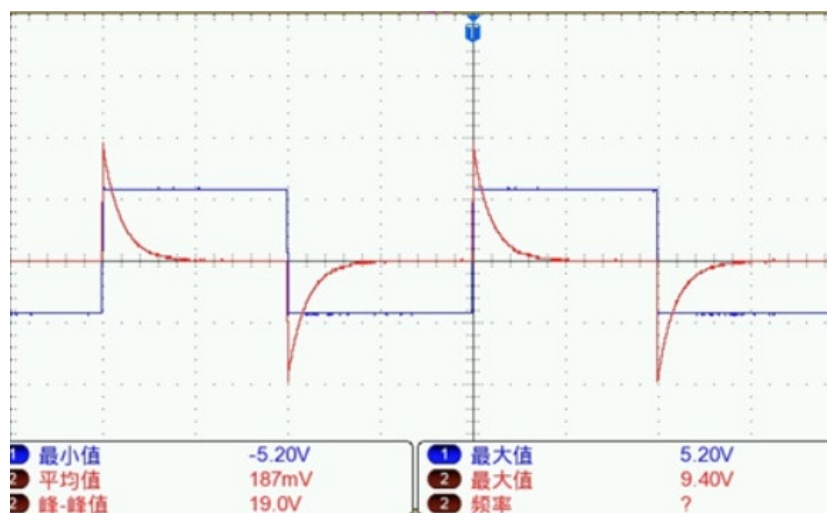
实际上, 本电路实现了类似于“求导”的功能。



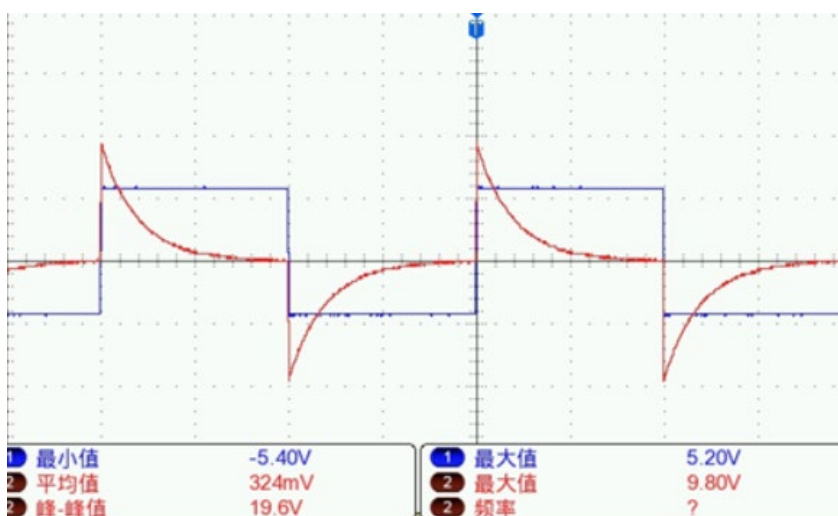
$$f = 1\text{kHz}, R = 200\Omega$$



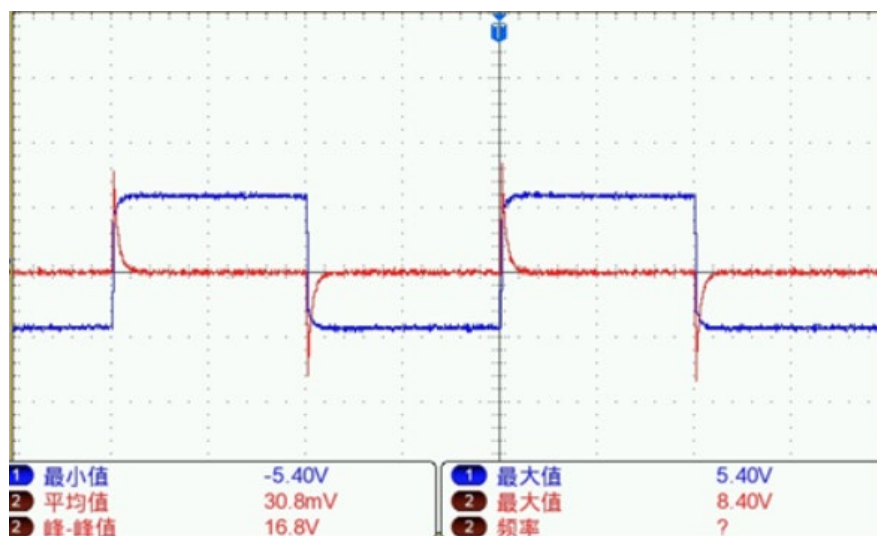
$f = 1\text{kHz}$ ,  $R = 1\text{k}\Omega$



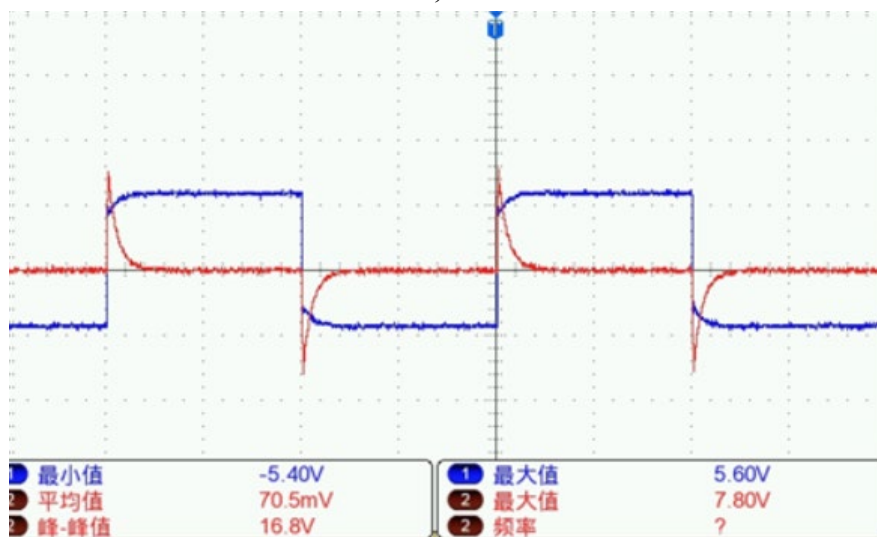
$f = 1\text{kHz}$ ,  $R = 5\text{k}\Omega$



$f = 1\text{kHz}$ ,  $R = 10\text{k}\Omega$



$f = 5\text{kHz}$ ,  $R = 200\Omega$

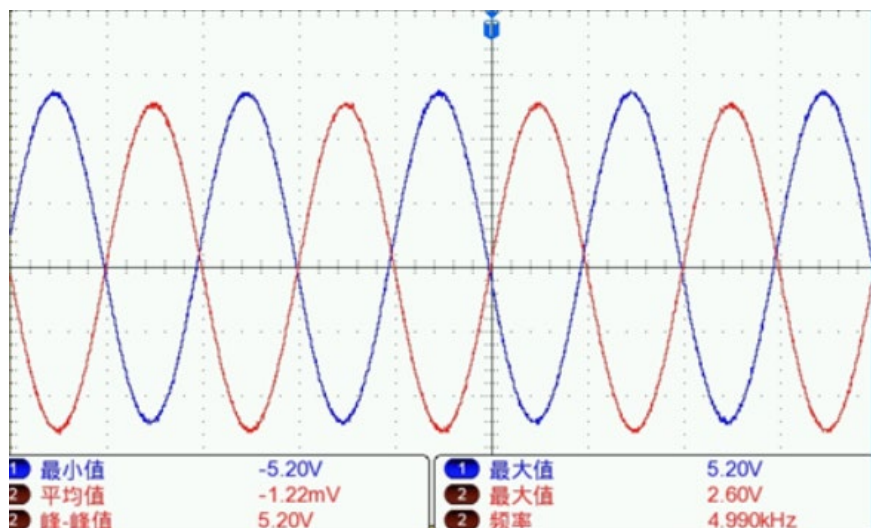


$f = 5\text{kHz}$ ,  $R = 200\Omega$

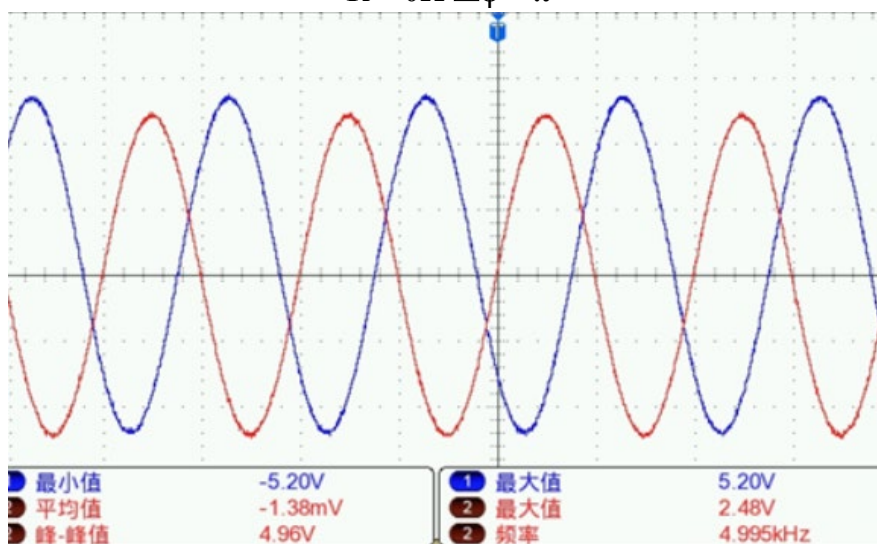
#### 4. 相位变化的观测 ( $C = 9.380 \times 10^{-9}\text{F}$ , $f = 5\text{kHz}$ )

下列各图为不同电阻  $R$  时输入输出波形，在每个图下方标注了观察所得的  $\Delta\phi$ 。可以看到， $\Delta\phi = 0$  时， $R = \infty$ ;  $\Delta\phi = \pi$  时， $R = 0$ ;

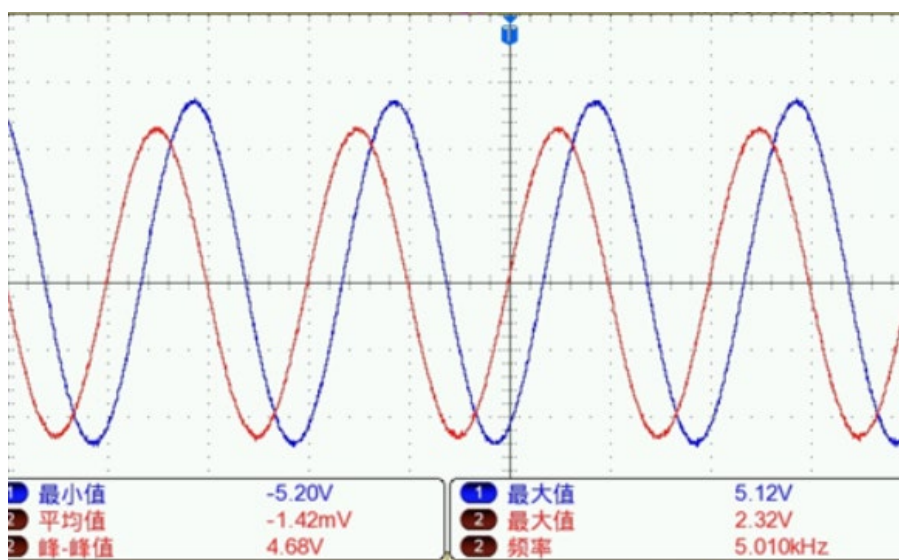
**解释：**因为  $R$  无穷时，电阻两端开路，则  $u_{34}$  等于  $u_{56}$ 。而  $R=0$  时，电阻短路， $U_R=0$ ，根据相量图得到， $u_{34}$  和  $u_{56}$  反相。



$$R = 0\Omega \quad \Delta\phi = \pi$$

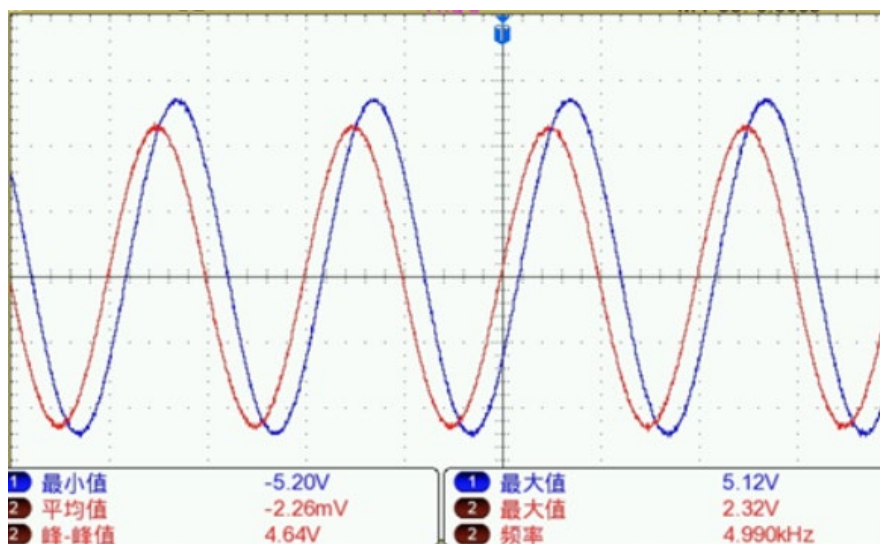


$$R = 1k\Omega \quad \Delta\phi = \pi/5$$

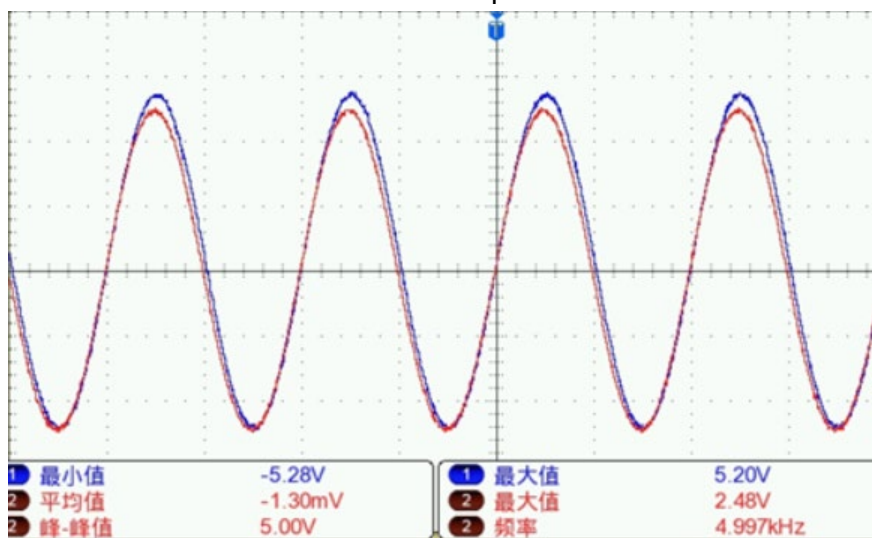


$$R = 5k\Omega \quad \Delta\phi = 2\pi/3$$





$$R = 10k\Omega \quad \Delta\phi = 5\pi/6$$



$$R = \infty \text{ (开路)} \quad \Delta\phi = 0$$

$\Delta\phi = 90^\circ$  时, 记录得到  $R = 3300\Omega$ 。根据

$$u_C = \frac{1}{C} \int I \cos \omega t dt = \frac{I}{\omega C} \sin \omega t = \frac{I}{\omega C} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$u_R = iR = IR \cos \omega t$$

得到相位差  $90^\circ$  时,

$$2\pi fCR = 1$$

$$f = \frac{1}{2\pi fC} = 9.65 \times 10^{-9} F$$

相对误差=2.8%，在误差允许范围内，与标称值相符。



## 5. 测声速

超声波频率  $f = 40.63 \text{ kHz}$

测前室温  $t_1 = 22.4^\circ\text{C}$       相对湿度  $r_1 = 21.7\%$

测后室温  $t_2 = 22.4^\circ\text{C}$       相对湿度  $r_2 = 21.7\%$

序号 i	$x_i/\text{mm}$	$x_{i+10}/\text{mm}$	$l_i = x_{i+10} - x_i/\text{mm}$
1	1.35	87.72	86.37
2	10.91	96.03	85.12
3	20.14	104.32	84.18
4	28.50	112.91	84.41
5	36.92	121.50	84.58
6	45.59	130.08	84.49
7	53.42	138.69	85.27
8	61.72	147.42	85.70
9	70.60	156.03	85.43
10	79.48	164.53	85.05

$$\overline{10\lambda} = \frac{\sum \Delta(x_{i+10} - x_i)}{10} = 85.06\text{mm}$$

$$\bar{\lambda} = \overline{10\lambda}/10 = 8.506\text{mm}$$

$$S_{10\lambda} = \sqrt{\frac{\sum (10\lambda_i - 10\bar{\lambda})^2}{n-1}} = 0.67$$

$$\Delta 10\bar{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{t_p(n-1)}{\sqrt{n}} S_{10\lambda}\right)^2 + (\sqrt{2}\Delta_B)^2} = 0.48\text{mm}$$

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta 10\bar{\lambda}}{10} = 0.048\text{mm}$$

故,

$$\lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta\lambda = (8.506 \pm 0.048)\text{mm}$$

由于  $v = f\lambda = 345.60\text{m/s}$ ,  $\Delta f = 10\text{Hz}$ , 故  $\ln v = \ln f + \ln \lambda$

$$\frac{\partial \ln v}{\partial f} = \frac{1}{f}, \quad \frac{\partial \ln v}{\partial \lambda} = \frac{1}{\lambda}$$

$$\frac{\Delta v}{v} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln v}{\partial f} \Delta f\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln v}{\partial \lambda} \Delta \lambda\right)^2} = 0.00565$$

$$\Delta v = 1.95\text{m/s}$$

故,

$$v = (345.60 \pm 1.95)\text{m/s}$$

下面将理论值与测量值进行比较:

理论值

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2} = 22.4^\circ\text{C}$$

$$r = \frac{r_1 + r_2}{2} = 21.7\%$$

$$v = 331.5 \sqrt{\left(1 + \frac{T}{T_0}\right) \left(1 + 0.31 \frac{rp_s}{p}\right)} = 344.82 \text{ m/s}$$

相对偏差

$$\alpha = \frac{345.60 - 344.82}{344.82} = 0.22\%$$

由比较可知，测量结果在误差允许范围内与理论值相符。

## 六、思考题

示波器：

1. 如果图形不稳定，总是向左或向右移动，该如何调节？  
如果波形不稳定，可以按下示波器右上角的 **Run/Stop** 按钮，相当于将某时刻的波形“截图”，得到固定的波形，进行测量；也可以调节 TRIG LEVEL 按钮直至波形稳定。
2. 如果 Y 轴信号频率  $f_y$  比 X 轴信号频率  $f_x$  大很多，示波器上将看到什么图形？反之呢？  
x 和 y 方向的频率比代表了一个李萨如周期内与图中某一条横纵直线的交点个数比，因此：  
如果  $f_y$  比  $f_x$  大很多，则示波器上的波形会十分密集，像高度为信号峰值的条带铺在屏幕上。  
如果  $f_y$  比  $f_x$  小很多，相当于取样周期十分大，则示波器上的波形应为一条平缓的接近直线的曲线。
3. 若被测信号幅度太大（在不引起仪器损坏的前提下），在屏上看到什么图形？  
会在屏上看到信号的一部分波形，超出屏幕的部分是无法看到的。
4. 观察李萨如图形时，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？  
频率差值越大，变化越快；差值越小，变化越慢。

声速测量：

1. 用逐差法处理数据的优点是什么？还有没有别的适合的处理数据的方法，能通过它测量得到  $\lambda$  值？  
逐差法的优点是可以充分利用所有有效数据，减少测量的随机误差。  
还可以通过直线拟合数据得到，拟合直线的斜率是  $\lambda$  的函数，可以通过计算斜率得到  $\lambda$ 。
2. 系数有根号 2，是为什么？  
设仪器误差为  $\Delta_B$ ，因为  $10\lambda$  的值按照  $10\lambda = x_{i+10} - x_i$  得到。这里包括了两个测量量  $x_i$  和  $x_{i+10}$ ，因此仪器的误差为

$$\Delta'_B = \sqrt{\Delta_{x_{i+10}}^2 - \Delta_{x_i}^2} = \sqrt{\Delta_B^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{2}\Delta_B$$

## 七、实验小结

本次实验测量任务较多，但我的测量过程较为顺利。注意在声速测量一节中，移动测量端应注意缓慢移动。我也有不足之处，我没有及时记下“相位变化”一节中对应于每个  $R$  的相位差，但所幸我截图保存了原始波形，及时补充了相位差，没有受到更多影响。今后，我应恪守实验原则，实时记录实验测得的每个数据。十分感谢助教老师的及时指正与耐心指导！