

学号: 11910104 姓名: 王奕童 日期: 2020 年 05 月 15 日 星期 五

## 声速的测量

### 一.实验目的

1. 了解声速测量的基本原理;
2. 了解压电换能器的工作原理;
3. 学习超声波的产生、发射和接收方法;
4. 学习使用驻波法和相位法计算声速等。

### 二.实验仪器

信号发生器、示波器、超声声速测定仪等

### 三. 实验原理

阅读讲义, 清楚以下问题, 简要概括实验原理。

## 1. 声速测量的两类方法及各自原理。

声速测量方法有两类：

①测量声波传播距离  $L$  和时间间隔  $t$ ，即可根据  $v = \frac{L}{t}$  计算出声速  $v$ ；

②测量出声波的频率  $f$  和波长  $\lambda$ ，利用关系式

$$v = f \cdot \lambda \quad (1)$$

来计算声速  $v$ 。本实验采用第二种方法测量。

虽然公式(1)给出的声速等于频率与波长的乘积，但是声波在空气中的传播速度与声波的频率是无关的，而只取决于空气本身的性质。声速的理论值由下式决定：

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}} \quad (2)$$

式中  $\gamma$  为空气定压比热容与定体比热容之比， $R$  为普适气体常量， $\mu$  为气体的摩尔质量， $T$  为热力学温度。在  $0^\circ\text{C}$  时，声速  $v_0 = 331.45\text{m/s}$ 。显然在  $t^\circ\text{C}$  时的声速应为：

$$v_t = v_0 \sqrt{\frac{T}{273.15}} = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} \quad (3)$$

如果测到了声速，由 (2) 式还可求出空气的比热容比。实验中超声波是由交流电信号产生的，所以 (1) 式中声波的频率  $f$  就是交流电信号的频率，由信号发生器中的频率显示可直接读出。因此，本实验的主要任务就是测量声波的波长。

测量声波波长方法有驻波法、相位法两种。

### 1. 驻波法

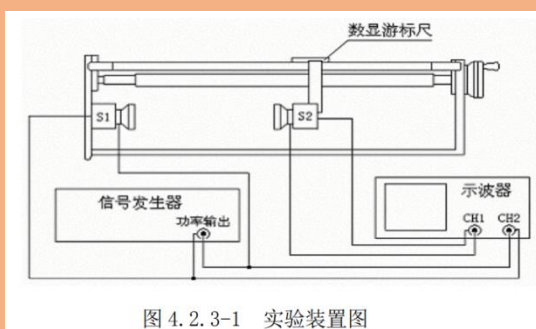


图 4.2.3-1 实验装置图

实验装置如图 4.2.3-1 所示，超声发射器  $S_1$  作为超声波源。信号发生器发出的信号接入  $S_1$  后， $S_1$  即发射出一平面超声波。超声波接收器  $S_2$  接收一部分超声波转换成电信号后，输入示波器进行观察，同时反射一部分超声波。这样，由  $S_1$  发出的超声波和由  $S_2$  反射的超声波在  $S_1$ 、 $S_2$  之间叠加相干而出现驻波。

设声源在  $x$  坐标轴原点，由声源发出的平面简谐波沿  $x$  轴正向传播，为入射波，经一个理想平面反射后沿  $x$  轴负方向传播，为反射波。

入射波方程为：
$$x_1 = A \cos 2\pi \left( t - \frac{x}{v} \right)$$

反射波方程为：
$$x_2 = A \cos 2\pi \left( t + \frac{x}{v} \right)$$

在两波相遇处，合成的声波为：
$$x = \left( 2A \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \right) \cos 2\pi ft$$

上式表明，两波合成的结果是驻波。在两波相遇处各点都在作同频率的振动，而各点的振

幅  $\left( 2A \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \right)$  是位置  $x$  的余弦函数。

对应于  $\left| \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \right| = 1$ ，即  $x = \pm K \frac{\lambda}{2} (K = 0, 1, 2, \dots)$  处，振幅最大为  $2A$ ，称为波腹；对应于

$\left| \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \right| = 0$ ，即  $x = \pm (2K + 1) \frac{\lambda}{4} (K = 0, 1, 2, \dots)$  处，振幅最小为  $0$ ，称为波节。其余各点

的振幅在  $0$  和最大值之间，两相邻波腹（或波节）间的距离均为  $\frac{\lambda}{2}$ 。

当移动  $S_2$ ，使  $S_1$  与  $S_2$  之间的距离  $l$  为半波长的整数倍时，即

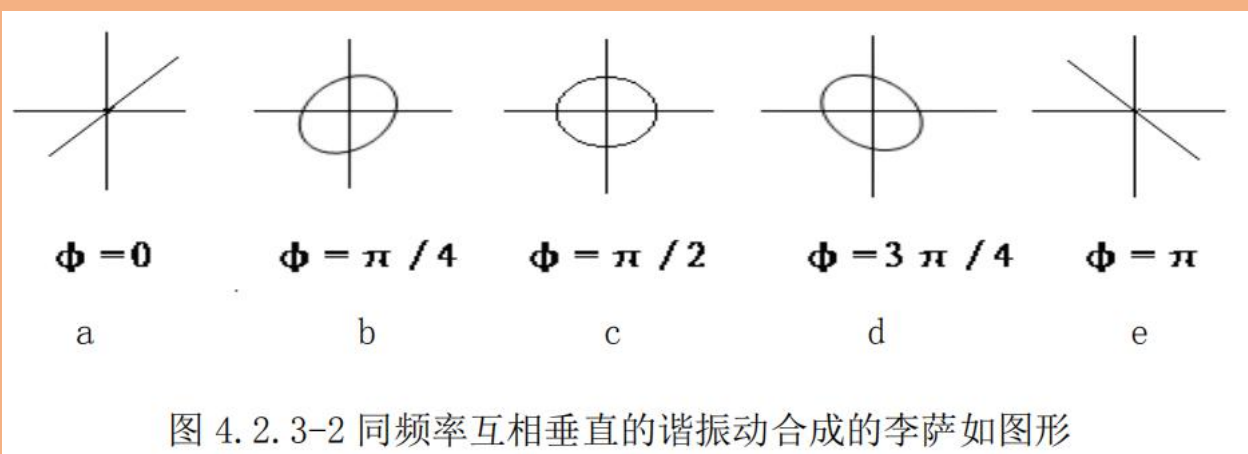
$$l = n \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

示波器上可观察到信号幅度的极大值（或极小值）。相邻两极值点之间的距离为  $\frac{\lambda}{2}$ 。

## 2. 相位比较法

从发射器  $S_1$  发出的超声波近似于平面波，沿着此波传播方向上，相位相同或相位差为  $2\pi$  的整数倍的任意两点位置之间的距离  $l$  等于波长的整数倍，即  $l = n\lambda$  ( $n$  为正整数)。当接收器端面垂直于波的传播方向时，其端面上各点都具有相同的相位。沿传播方向移动接收器  $S_2$  时，总可找到一个位置使得接收到的信号与激励信号即函数信号发生器发出的信号同相。继续移动  $S_2$ ，直到接收到的信号再一次和激励信号同相时，移过的这段距离必然等于超声波的波长。

相位差可根据两个互相垂直的简谐振动的合成所得到的李萨如图来测定。将信号发生器发出的信号接入示波器的通道 1 (CH1) 输入端，将  $S_2$  接收到的电信号接到示波器的通道 2 (CH2) 输入端，并使两路信号叠加一起，由于两端电信号频率相同，因而叠加合成如下图的李萨如图形，图的形状由两信号的相位差  $\phi$  决定。假如初始时图形如图 4.2.3-2 (a)， $S_2$  移动距离为半波长  $\frac{\lambda}{2}$  时，图形变化为图 4.2.3-2 (e)； $S_2$  移动距离为  $\lambda$  时，图形变回图 4.2.3-2 (a)，所以通过对李萨如图形的观测，就能确定声波的波长。



## 四、实验内容、数据记录及数据处理

a. 实验室当前温度:  $t = 25^{\circ}\text{C}$

b. 计算声速的参考值:

$$v_t = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = 331.45 \sqrt{\left(1 + \frac{t}{273.15}\right)} \text{m/s} = 346.29 \text{m/s}$$

### 1. 驻波法 (读数参考按游标卡尺的读数方式)

谐振频率  $f_1 = 35000 \text{Hz}$

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
	48.20mm	53.10mm	58.00mm	62.96mm	67.86mm	72.60mm
	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$
	77.46mm	82.50mm	87.16mm	92.00mm	96.80mm	101.50mm
$\Delta x$	$x_7 - x_1$	$x_8 - x_2$	$x_9 - x_3$	$x_{10} - x_4$	$x_{11} - x_5$	$x_{12} - x_6$
4.852mm	29.26mm	29.40mm	29.16mm	29.04mm	28.94mm	28.90mm

$$\begin{aligned} \Delta x &= \frac{\sum_{i=1}^6 (x_{i+6} - x_i)}{6 \cdot 6} \\ &= \frac{29.26 + 29.40 + 29.16 + 29.04 + 28.94 + 28.90}{36} \text{mm} \\ &= 4.852 \text{mm} \end{aligned}$$

$$\lambda_1 = 2\Delta x = 2 \times 4.852 \text{mm} = 9.704 \text{mm}$$

$$v_1 = f_1 \cdot \lambda_1 = 35000 \text{Hz} \times 9.704 \text{mm} = 339.64 \text{m/s}$$

相对误差计算:

$$\text{相对误差 } \delta_1 = \frac{|v_1 - v_t|}{v_t} \times 100\% = \frac{|339.64 \text{m/s} - 346.29 \text{m/s}|}{346.29 \text{m/s}} \times 100\% = 1.920\%$$

得到用驻波法的测量值  $v_1$  与参考值  $v_t$  的相对误差  $\delta_1 = 1.920\%$

## 2. 相位法：

谐振频率  $f_2 =$  34600 Hz

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
	48.92mm	53.88mm	58.80mm	63.70mm	68.60mm	73.46mm
	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$
	78.30mm	83.26mm	88.18mm	93.10mm	98.00mm	102.90mm
$\Delta x$	$x_7 - x_1$	$x_8 - x_2$	$x_9 - x_3$	$x_{10} - x_4$	$x_{11} - x_5$	$x_{12} - x_6$
4.899mm	29.38mm	29.38mm	29.38mm	29.40mm	29.40mm	29.44mm

$$\begin{aligned}\Delta x &= \frac{\sum_{i=1}^6 (x_{i+6} - x_i)}{6 \cdot 6} \\ &= \frac{29.38 + 29.38 + 29.38 + 29.40 + 29.40 + 29.44}{36} \text{ mm} \\ &= 4.899 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\lambda_2 = 2\Delta x = 2 \times 4.899 \text{ mm} = 9.798 \text{ mm}$$

$$v_2 = f_2 \cdot \lambda_2 = 34600 \text{ Hz} \times 9.798 \text{ mm} = 339.01 \text{ m/s}$$

## 相对误差计算：

$$\text{相对误差 } \delta_2 = \frac{|v_2 - v_t|}{v_2} \times 100\% = \frac{|339.01 \text{ m/s} - 346.29 \text{ m/s}|}{346.29 \text{ m/s}} \times 100\% = 2.102\%$$

得到用相位法的测量值  $v_1$  与参考值  $v_t$  的相对误差  $\delta_2 = 2.102\%$

## 五、实验误差分析

## 定性分析本实验误差来源及改进措施

### 误差来源：

- ①发射器发出的声波在发射端面 and 接收端面之间多次反射，以致在发射换能器与接收换能器之间有可能不是严格的驻波场；
- ②发射器发出的声波在传播过程中存在能量损耗，声能密度不断减小，会导致观察到示波器上声压极大值的幅度随换能器之间的距离的增大呈几何衰减，为球面波的特征；
- ③在实验中用接收换能器做反射面也会使测量误差增大，主要是因为换能器的形状和大小会使其成为声场中的散射体，从而在空间激起散射波，影响入射波和反射波的叠加；
- ④调节超声波的谐振频率时出现误差。实验中可能容易混淆谐振与共振干涉，从而会给实验中确定谐振频率带来一定困难；
- ⑤示波器上判断极大值的位置也会受到人为和仪器误差的影响。

### 改进措施：

- ①压电换能器的反射面与接收面距离为  $1 \sim 115 \text{ m}$  时开始测量，这样传播到接收换能器反射面的声波已经为标准的简谐平面波，从而经反射叠加形成标准驻波，这样测得的  $\frac{\lambda}{2}$  为常数，与测量位置无关，从而达到减小测量误差的目的；
- ②可更换大功率换能器和电子滤波放大电路，以减小能量损耗对实验结果的影响；
- ③反射面改为用硬质材料做成，并且增大尺寸，从而反射效率提高，提高实验的精确度；
- ④在实验确定谐振频率时可尝试寻找同时在谐振频率和共振干涉状态下的电压信号的最大值，以确定更为精确的谐振频率，减小实验误差。

## 六、实验结论

简要概括实验内容及结果。

①实验内容：本次实验使用了信号发生器、示波器、超声声速测定仪等实验仪器，先后通过驻波法和相位法对 25℃ 下的空气的声速进行了测量。

②实验结果：本实验使用驻波法测得 25℃ 下声速为  $v_1 = 339.64 \text{ m/s}$ ，与参考值  $v_t = 346.29 \text{ m/s}$  的相对误差  $\delta_1 = 1.920\%$ ；本实验使用相位法测得 25℃ 下声速为  $v_1 = 339.01 \text{ m/s}$ ，与参考值  $v_t = 346.29 \text{ m/s}$  的相对误差  $\delta_2 = 2.102\%$

通过本次实验，了解了声速测量的基本原理和压电换能器的工作原理，学习了超声波的产生、发射和接收方法，掌握了使用驻波法和相位法计算声速的实验方法，学习了逐差法的数据处理方法。

## 七、思考题



1、 固定两换能器的距离改变频率，以求声速，是否可行？

答：不行。在本实验中，信号发生器所用的频率  $f_0$  为本系统的谐振频率，可以使示波器上信号幅度最大，得到更加精确的实验结果。但如果固定两换能器之间的距离而改变频率，变化的频率不能和超声波接收器  $S_2$  产生谐振，示波器上不能显示稳定的波形，不能显示稳定的频率。因此固定两换能器的距离改变频率，以求声速不是一种可行的实验方法。

2、 各种气体中的声速是否相同，为什么？

答：不相同。根据实验原理，声速的理论值  $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}$ ，其中  $\gamma$  为气体定压比热容与定

体比热容之比， $R$  为普适气体常量， $\mu$  为气体的摩尔质量， $T$  为热力学温度。

在同一温度下，不同的气体可能有不同的摩尔质量  $M$  和气体定压比热容与定体比热容之比  $\gamma$ ，故各种气体在同一温度下的声速不一定相同；

对于同一气体，不同热力学温度下的声速理论计算值也会随着  $T$  的变化而变化，声波的传播速度也会有所不同。