班号 6 学号 [redacted] 姓名 赵骏腾 教师签字 钟瑞

实验日期 2020.9.7 组号 1 预习成绩 总成绩 10

数据记录、处理以及分析都非常好，对实验的理解非常透彻，数据处理部分注意细节，我在后面相应位置批注出来了。

实验（ 七 ） 空气中声速的测量

实验七 空气中声速的测量

钟瑞
2020.9.7.

一. 实验目的

1. 用驻波法、相位比较法、波形移动法和时差法测量声速
2. 通过对声波速度的测定，了解声波的特性
3. 进一步熟悉信号发生器、示波器等仪器的使用
4. 练习使用逐差法处理数据

二. 实验原理

1. 驻波法

将两个超声换能器沿同一轴线相对放置。当声波传播到接收端时，一部分会被反射且发生半波损失，与入射波形成驻波。

如果入射波沿 x 轴方向传播，则方程为

$$y_1 = A_1\cos(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})$$

由于换能器表面为金属，存在半波损失，则反射方程为

$$y_2 = A_2\cos(\omega t + \frac{2\pi x}{\lambda} + \pi)$$

则叠加可得结果为

$$y = y_1 + y_2 = (A_1 - A_2)\cos(\frac{2\pi x}{\lambda})\cos\omega t + (A_1 + A_2)\sin(\frac{2\pi x}{\lambda})\sin\omega t$$

考虑声压 $p = -\rho_0 v^2 \frac{\partial y}{\partial x}$ 得接收换能器表面声压为

$$p = \rho_0 \omega v[(A_1 - A_2)\sin(\frac{2\pi x}{\lambda})\cos\omega t - (A_1 + A_2)\cos(\frac{2\pi x}{\lambda})\sin(\omega t)]$$

式中 ρ_0 为空气的静态密度。

将声压转换为电信号后输入示波器，可以看到一组由声压信号产生的正弦波形。

移动接收器的位置，在示波器上可发现接收器在某些位置振幅最大。由波的干涉可知：

相邻两个振幅最大（或最小）位置相差 $\frac{\lambda}{2}$。

因此，缓慢移动接收器，多次测量相邻最大振幅的距离以求出 λ，再根据已知的声波频率可得

$$v = \lambda f$$

2. 相位法

由前述可知发射端与接收端的频率相同，相位差不一定相同。因此可将发射器和接收器信号合成为李萨如图形，当相位差为 0 或 π 时，图形为直线。移动接收器，统计相应两次图形为直线的移动距离以求得 λ，通过 $v = \lambda f$ 求出声速。

3. 波形移动法

将发射器和接收器的波形同时显示出来。移动接收器，发射器的波形不变，接收器波形会产生变化。在某个瞬间，两波形重叠，接着移动接收器，波形会再次重叠，两次重叠对应的接收器移动间距为一个波长λ。

4. 时差法测量

声波在介质中传播时，经t时间，到达距离为L的接收器。移动接收器，改变L，则t也随之发生变化，利时时间和距离变化量可测得声速为：$V=\frac{\Delta L}{\Delta t}$

三．数据处理

1） 空气中声速的理论值

在$t=24.1℃$时，声速的理论值可表示为：

$$v_0=331.45\sqrt{1+\frac{t}{273.15}}=345.8\ (m/s)$$

2） 驻波法测量

驻波法测得原始数据如下：

表 1 驻波法测空气中声速：温度$t=24.1℃$，频率$f=35.508KHz$

次数	0	1	2	3	4
x_i/mm	118.589	123.365	128.487	133.452	138.451
次数	5	6	7	8	9
x_i/mm	143.289	148.099	152.967	157.877	162.950

由逐差法可得

$$\overline{\Delta x}=\frac{\sum_{i=0}^{4}(x_{i+5}-x_i)}{25}=4.914\ (mm)$$

又知

$$\overline{\Delta x}=\frac{\lambda}{2}$$

故可知声波的波长为

$$\bar{\lambda}=2\overline{\Delta x}=9.827\ (mm)$$

由机械波波长于波速的关系可得

$$\bar{v} = \bar{\lambda} f = 348.9 \ (m/s)$$

测量间距的不确定度为

$$U_1 = S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n}(\frac{x_{i+5}-x_i}{5} - \overline{\Delta x})^2}{n(n-1)}} = 0.012 \ (mm)$$

速度的不确定度为

$$U = \sqrt{(\frac{\partial f}{\partial x})^2 \, {U_1}^2} = 0.9 \ (m/s)$$

故测量的速度为

$$v = \bar{v} \pm U = 348.9 \pm 0.9 \ (m/s)$$

$$E = \frac{U}{\bar{v}} = 0.25\%$$

$$P = 68.3\%$$

测量值与理论值的百分差为

$$E' = \frac{v - v_0}{v_0} \times 100\% = 0.9\%$$

3） 相位比较法

相位法测得原始数据如下：

温度$t = 24.1$℃，频率$f = 35.510 KHz$

次数	0	1	2	3	4
x_i/mm	171.550	176.317	181.140	186.169	191.090
次数	5	6	7	8	9
x_i/mm	195.817	200.870	205.734	210.663	215.483

由逐差法可得

$$\overline{\Delta x} = \frac{\sum_{i=0}^{4}(x_{i+5} - x_i)}{25} = 4.892 \ (mm)$$

又知

$$\overline{\Delta x} = \frac{\lambda}{2}$$

故可知声波的波长为

$$\bar{\lambda} = 2\overline{\Delta x} = 9.784 \ (mm)$$

由机械波波长于波速的关系可得

$$\bar{v} = \bar{\lambda} f = 347.4 \ (m/s)$$

测量间距的不确定度为

$$U_1 = S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n}(\frac{x_{i+5}-x_i}{5} - \overline{\Delta x})^2}{n(n-1)}} = 0.012 \ (mm)$$

速度的不确定度为

$$U=\sqrt{(\frac{\partial f}{\partial x})^2 {U_1}^2}=0.8\ (m/s)$$

故测量的速度为

$$v=\bar{v}\pm U=347.4\pm 0.8\ (m/s)$$

$$E=\frac{U}{\bar{v}}=0.24\%$$

$$P=68.3\%$$

测量值与理论值的百分差为

$$E'=\frac{v-v_0}{v_0}\times 100\%=0.5\%$$

4） 波形移动法

驻波法测得原始数据如下：

温度$t=24.1$℃，频率$f=35.511KHz$

次数	0	1	2	3	4
x_i/mm	117.498	127.275	137.023	146.850	156.658
次数	5	6	7	8	9
x_i/mm	166.414	176.220	185.951	195.793	205.738

由逐差法可得

$$\overline{\Delta x}=\frac{\sum_{i=0}^{4}(x_{i+5}-x_i)}{25}=9.792\ (mm)$$

又知

$$\overline{\Delta x}=\lambda$$

故可知声波的波长为

$$\bar{\lambda}=\overline{\Delta x}=9.792\ (mm)$$

由机械波波长于波速的关系可得

$$\bar{v}=\bar{\lambda}f=347.7\ (m/s)$$

测量间距的不确定度为

$$U_1=S_{\bar{x}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n}(\frac{x_{i+5}-x_i}{5}-\overline{\Delta x})^2}{n(n-1)}}=0.006\ (mm)$$

速度的不确定度为

$$U=\sqrt{(\frac{\partial f}{\partial x})^2 {U_1}^2}=0.21\ (m/s)$$

故测量的速度为

$$v=\bar{v}\pm U=347.4\pm 0.21\ (m/s)$$

$$E=\frac{U}{\bar{v}}=0.06\%$$

$$P=68.3\%$$

测量值与理论值的百分差为

$$E' = \frac{v - v_0}{v_0} \times 100\% = 0.5\%$$

5）时差法

在空气中时差法测得原始数据如下：

温度$t = 24.1℃$

次数	0	1	2	3	4
x_i/mm	110.000	120.000	130.000	140.000	150.000
$t_i/\mu s$	344	374	402	430	460
次数	5	6	7	8	9
x_i/mm	160.000	170.000	180.000	190.000	200.000
$t_i/\mu s$	488	518	548	578	606

由逐差法可得

$$\overline{\Delta x} = \frac{\sum_{i=0}^{4}(x_{i+5} - x_i)}{25} = 10.000 \ (mm)$$

既然是等间距改变位置，长度差10.000mm可以作为已知量，无需再用逐差法计算。

$$\overline{\Delta t} = \frac{\sum_{i=0}^{4}(t_{i+5} - t_i)}{25} = 29 \ (\mu s)$$

由速度的定义可得空气中声速为

$$\bar{v} = \frac{\overline{\Delta x}}{\overline{\Delta t}} = 343 \ (m/s)$$

测量间距的不确定度为

$$U_1 = S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n}(\frac{x_{i+5}-x_i}{5} - \overline{\Delta x})^2}{n(n-1)}} = 0.000 \ (mm)$$

测量时间的不确定度为

$$U_2 = S_{\bar{t}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n}(\frac{t_{i+5}-x_i}{5} - \overline{\Delta t})^2}{n(n-1)}} = 0.16 \ (\mu s)$$

速度的不确定度为

$$U = \sqrt{(\frac{\partial f}{\partial x})^2 {U_1}^2 + (\frac{\partial f}{\partial t})^2 {U_2}^2} = 2 \ (m/s)$$

故测量的速度为

$$v = \bar{v} \pm U = 343 \pm 2 \ (m/s)$$

$$E = \frac{U}{\bar{v}} = 0.6\%$$

$$P = 68.3\%$$

在固体中时差法测得原始数据如下：

温度$t = 24.1℃$

次数	1	2	3	4	5	6
材质	有机玻璃	有机玻璃	有机玻璃	铝	铝	铝

$l_i(cm)$	5	6	8	5	6	8
$t_i(\mu s)$	29.7	34.5	44.9	17.7	19.3	23.3

由速度的定义可得在有机玻璃中的声速为

$$v=\frac{\overline{\Delta x}}{\overline{\Delta t}}=\frac{l_3-l_1}{t_3-t_1}=1973.7\ (m/s)$$

测了三种不同长度，可以计算两种不同长度差的声速，然后取平均值，例如有机玻璃的可以这样计算：

$$\frac{\frac{6cm-5cm}{34.5\mu s-29.7\mu s}+\frac{8cm-6cm}{44.9\mu s-34.5\mu s}}{2}=2003.2\frac{m}{s}$$

在铝中的声速为

$$v=\frac{\overline{\Delta x}}{\overline{\Delta t}}=\frac{l_6-l_4}{t_6-t_4}=5357.1\ (m/s)$$

四．实验结论及现象分析

1．四种方法所测的空气中的声速都在$343m/s$~$349m/s$，与理论值$345.8m/s$偏差较小。

2．驻波法、相位法和波形移动法只能分析正弦波。相位法只需记录李萨如图型呈直线时的数据，人为判断产生的误差较小，波形移动法只需要判断接收波的波峰是否与发射波的波峰对齐，因此产生的误差与相位法相似。但是驻波法需要人为判断接收的波是否达到最大的振幅，含有的主观因素较大，因此产生的误差较大。

3．驻波法、相位法和波形移动法都大于理论声速，原因可能时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、空气不是理想气体，空气中存在水蒸气等。

4．时差法测得的空气中声速于理论值最接近，且时差法可以测量的不局限于正弦波。时差法还可以测量固体中的声速等。原因是时差法原理为速度的定义，因此不受波形和物态的影响，且时差法排除了非严格驻波场的误差，因此产生的误差较小。

5．实验所测得的有机玻璃和铝中的声速远大于空气中的声速，且铝中的声速也远大于有机玻璃中的声速。原因是声波在固体中传播的速度远大于气体。

五．讨论问题

1．驻波法测声速时，为什么示波器上观察到的是正弦波而不是驻波？

答：驻波的函数式为

$$y=\left(2A\sin\frac{2\pi}{\lambda}x\right)\sin\omega t$$

实验时发射换能器与接收换能器之间可近似看成驻波。但是示波器测量的是某一点的波形，显示的波形横轴为时间t。所以当测量的点确定时，即x确定为x_0时，$\left(2A\sin\frac{2\pi}{\lambda}x_0\right)$为一常数$c$，示波器上观察到的波形为

$$y=c\sin\omega t$$

因此在示波器上观察到的是正弦波。

2．用相位比较法测量波长时，为什么用直线而不用椭圆作为 S2 移动距离的片段数据？

答：在使用相位比较法时，当李萨如图形为直线人为观察更为直观，相较于椭圆，数据测量时产生的误差更小。

3．分析一下本实验中哪些因素可以引起测量误差。列出 3 条主要因素并说明原因。

答：1）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。由实验原理可得，在发射换能器与接收换能器之间真正的波形为

$$y=(A_1-A_2)\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\cos\omega t+(A_1+A_2)\sin\frac{2\pi x}{\lambda}\sin\omega t$$

实验中因为A_1、A_2近似相等，故可近似认为发射换能器与接收换能器之间为驻波。但是实

际测量时不能排除$(A_1-A_2)\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\cos\omega t$项的干扰。

2）示波器上判断测量的位置不准确引入人为的和仪器的误差。实验中驻波法需要判断波形极大值的位置、相位法需要判断李萨如图形是否为一条直线、波形移动法需要判断接收波的波峰是否与发射波的波峰重合，三组实验都存在人为判断的环节，因此在判断测量位置时存在主观因素导致的误差。其中驻波法的需要主观判断极值，误差远大于相位法和波形移动法。

3）调节超声波的谐振频率时出现误差。声速测量仪中的固有频率，会随着环境温度的升高而降低。因此在实验过程中，由仪器发热导致频率发生变化，产生误差。