

班号 学号 姓名 徐文浩 教师签字 于原始数据处

实验日期 2020.10.12 组号 5 预习成绩 总成绩

实验(七) 空气中声速的测量

一. 实验目的

1. 用极值法(驻波法)、相位比较法、波形移动法和时差法测量声速。
2. 观察声波的反射、吸收现象
3. 进一步熟悉示波器等仪器的使用

二. 实验原理

1. 超声波与压电陶瓷换能器

频率 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ 的机械振动的称为超声波。超声波的传播速

由于超声波具有波长短,易于定向发射, $20 \sim 60\text{kHz}$ 。在此频率范围内,采用压

电陶瓷换能器根据工作方式可分为纵向、径向与弯曲振动换能器。本实验采用纵向换能器。

2. 共振干涉法(驻波法)测量声速

假设在无限大空间中,仅有一个点声源 S_1 (发射换能器) 和一个接收平面 (接收换能器 S_2)。当声源发出声波后,此空间中仅有一个反射面 (S_2),且仅产生一次反射。

在上述假设条件下,发射波方程:

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

在 S_2 反射,产生半波损失,反射波方程:

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

其中 A_1, A_2 为声波的振幅, $\omega = 2\pi f$ 。入射波与反射波的叠加结果为:

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

根据声学理论:空气由于声振动而引起的超出静态大气压强的那部分压强称为声压 p ,且:

$$p = -\rho_0 v \frac{\partial y}{\partial x}$$

因此换能器表面声压为:

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

式中 ρ_0 为空气静态密度

由此可见,接收换能器表面声压的振幅随 $\cos(\frac{2\pi x}{\lambda})$ 呈周期性变化,相位随 $\frac{2\pi x}{\lambda}$ 呈周期性变化。 S_2 (接收器) 处的声压信号会由压电效应转为电信号,将其输入示波器,即可看到一组由声压信号产生的正弦波形。该正弦波形是 S_1 发出的原声 y_1 与 S_2 反射的声 y_2 的干涉驻波在 S_2 处的振动情况。

The "Pre-Lab" part must be written by hand! You can write it on a Pad. You cannot attend the class if you have not completed the preview part!

移动 S_2 位置,从示波器上会发现当 S_2 在某点处有最大值,根据波的干涉理论,相邻2个最大值之间的距离为半个波长,可以一边观察示波器,一边调整 S_2 的位置,当幅值由最大变为最小再到最大, S_2 移动的距离便是半个波长。

在连续多次测量相隔半波长 S_2 的位置变化及声速频率 f (由信号源信号获得)以后,可计算出声速。

3. 相位法测量原理

由前述可知入射波与反射波叠加,形成驻波

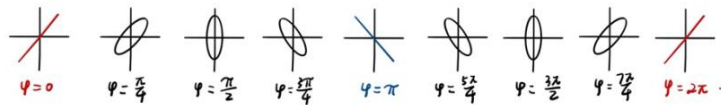
$$y = (A_1 - A_2) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \cos(\omega t) + (A_1 + A_2) \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \sin(\omega t)$$

相对于发射波束 可忽略

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

来说,在经过 Δx 距离后,接收到的余弦波与原来位置处的相位差为 $\varphi = \frac{2\pi \Delta x}{\lambda}$ 。因此可以通过示波器,用李萨如图法观测出声波长。

将发送与接收端信号分别输入到示波器的CH1与CH2通道,将示波器的工作模式设为X-Y模式,移动接收换能器 S_2 ,相位差也发生变化。即每发生一次这种斜率正负变化,对应接收换能器移动的距离为半波长。



4. 波形移动法

在示波器上同时显示CH1与CH2波形,然后移动接收换能器,会发现CH1波形固定不动,CH2跟着移动。在某瞬间,两个波形相位会发生重叠,再移动 S_2 直到再次重叠,两次重叠间 S_2 移动的距离即为一个波长。

5. 时差法测量原理

连续正弦脉冲调制后由发射换能器 S_1 发射至被测介质中,声波在介质中传播。经过时间 t 到达 L 距离处的接收换能器 S_2 。由运动定律:声波的速率可以由以下公式求出:

$$v = \frac{L}{t}$$

移动接收换能器 S_2 ,相应接收时间也随之变化。可利用距离和时间变化量计算出当前介质下的声速。

$$v = \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

实验现象观察与原始数据记录

波形移动法

t = [redacted] f = [redacted]

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X (mm)	[redacted]									

相位法

t = [redacted] f = [redacted] HZ

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X (mm)	[redacted]									

$\varphi = 0 \quad \varphi = \pi \quad \varphi = 0 \quad \dots$

驻波法

t = [redacted] f = [redacted] Hz

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X (mm)	[redacted]									

时差法

t = [redacted]

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X (mm)	[redacted]									
$\Delta t (\mu s)$	[redacted]									

固体

t = [redacted]

次数	1	2	3	4	5	6
材料	[redacted]					
$\lambda_i (cm)$	[redacted]					
$t_i (\mu s)$	[redacted]					

学生姓名	学号	日期
徐文浩	190110728	2020.10.12

教师签字	钟瑞 2020.10.12.
------	-------------------

四. 数据处理

4.1 空气中声速的测量数据处理

4.1.1 驻波法

驻波法测空气声速所得的实验原始数据汇总到表 4-1 中。

表 4-1 空气声速测量-驻波法原始数据汇总

t= [redacted] , f= [redacted] kHz

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X (mm)	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]

则：接收换能器相邻测量点的平均间隔为：

$$\Delta \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n [redacted]}{n-1} = [redacted] (mm)$$

由驻波法原理，测得超声波波长为：

$$\bar{\lambda} = 2 \Delta \bar{X} = [redacted] (mm)$$

故：声速的测量值为：

$$v = \bar{\lambda} \cdot f = [redacted] (m \cdot s^{-1})$$

在该温度 ([redacted] °C) 下：声速的理论值为：

$$v_0 = 331.45 \sqrt{1 + \frac{24.6}{273.15}} = [redacted] (m \cdot s^{-1})$$

相对误差：

$$E = \frac{v - v_0}{v_0} \times 100\% = 1.39\%$$

4.1.2 相位法

相位法测空气声速所得的实验原始数据汇总到表 4-2 中。

表 4-2 空气声速测量-相位法原始数据汇总

t= [redacted] °C, f= [redacted] kHz

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X (mm)	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]

则：接收换能器相邻测量点的平均间隔为：

$$\Delta \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n [redacted]}{n-1} = [redacted] (mm)$$

由相位法原理，测得超声波波长为：

$$\bar{\lambda} = 2 \Delta \bar{X} = [redacted] (mm)$$

故：声速的测量值为：

$$v = \bar{\lambda} \cdot f = [redacted] (m \cdot s^{-1})$$

在该温度 ([redacted] °C) 下：声速的理论值为：

$$v_0 = 331.45 \sqrt{1 + \frac{24.3}{273.15}} = [redacted] (m \cdot s^{-1})$$

相对误差:

$$E = \frac{v - v_0}{v_0} \times 100\% = \text{[redacted]} \%$$

4.1.3 波形移动法

波形移动法测空气声速所得的实验原始数据汇总到表 4-3 中。

表 4-3 空气声速测量-波形移动法原始数据汇总

t=[redacted] °C, f=[redacted] kHz

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X (mm)	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]

则：接收换能器相邻测量点的平均间隔为:

$$\Delta \bar{X} = \frac{\sum X_i}{10} = \text{[redacted]} (mm)$$

由波形移动法原理，测得超声波波长为:

$$\bar{\lambda} = \Delta \bar{X} = \text{[redacted]} (mm)$$

故：声速的测量值为:

$$v = \bar{\lambda} \cdot f = \text{[redacted]} (m \cdot s^{-1})$$

在该温度（24.3 °C）下：声速的理论值为:

$$v_0 = 331.45 \sqrt{1 + \frac{24.3}{273.15}} = \text{[redacted]} (m \cdot s^{-1})$$

相对误差:

$$E = \frac{v - v_0}{v_0} \times 100\% = 0.98\%$$

4.1.4 时差法

时差法测空气声速所得的实验原始数据汇总到表 4-4 中。

表 4-4 空气声速测量-时差法原始数据汇总

t=[redacted] °C

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X (mm)	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
Δ t(μs)	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]

则：接收换能器相邻测量点的平均时间间隔为:

$$\Delta \bar{t} = \frac{\sum \Delta t_i}{10} = \text{[redacted]} (\mu s)$$

每次移动接收换能器的长度:

$$\Delta X = 10.000(mm)$$

由时差法原理，得到声速的测量值为:

$$v = \frac{\Delta X}{\Delta \bar{t}} = \text{[redacted]} (m \cdot s^{-1})$$

在该温度 (24.5 °C) 下：声速的理论值为：

$$v_0 = 331.45 \sqrt{1 + \frac{24.2}{273.15}} = \textcolor{red}{343.4} (m \cdot s^{-1})$$

相对误差：

$$E = \frac{v - v_0}{v_0} \times 100\% = 0.40\%$$

4.2 固体中声速的测量数据处理

4.2.1 固体声速理论计算^[1]

固体中的理论声速可以由如下公式给出：

$$v = \sqrt{\frac{E_0}{\rho_0}} \cdot (1 - 11\alpha T)$$

其中 E_0, ρ_0 分别为 0K 温度下，固体的杨氏模量与密度。
 α 为固体的线胀系数， T 为绝对温度。

E_0, ρ_0 可以由如下公式推导而得：

$$E_T = E_0 \cdot (1 - 25\alpha T)$$
$$\rho_T = \frac{\rho_0}{1 + 3\alpha T}$$

4.2.2 数据处理与分析

时差法测固体声速所得的实验原始数据汇总到表 4-5 中。

表 4-5 固体声速测量-时差法原始数据汇总

t=24.5 °C

次数	1	2	3	4	5	6
材质	铝	铝	铝	有机玻璃	有机玻璃	有机玻璃
$l_i(cm)$	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
$t_i(\mu s)$	27.3	27.3	42.8	42.8	42.8	42.8

对于铝金属棒而言：

测得的声速为：

$$v = \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2)$$

其中，由时差法原理：

$$v_1 = \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1} = \textcolor{red}{343.4} (m \cdot s^{-1})$$

[1] 陈世涛, 徐志东. 金属材料中声速随温度变化规律的探讨[A]. 中国数学力学物理学高新技术交叉研究会. 数学·力学·物理学·高新技术研究进展——2006 (11) 卷——中国数学力学物理学高新技术交叉研究会第 11 届学术研讨会论文集[C]. 中国数学力学物理学高新技术交叉研究会:中国数学力学物理学高新技术交叉研究学会, 2006:3.

$$v_2 = \frac{l_3 - l_2}{t_3 - t_2} = 2.29 \times 10^3 (m \cdot s^{-1})$$

故有声速的测量值:

$$v = 2.28 \times 10^3 (m \cdot s^{-1})$$

声速理论值计算:

查找资料, 可得铝的线胀系数和在常温(300K)下的密度与杨氏模量。

$$\alpha = 23 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C}^{-1})$$

$$\rho = 2700 (kg \cdot m^{-3})$$

$$E = 70 \times 10^9 (Pa)$$

则:

$$\rho_0 = \rho \cdot (1 + 3\alpha T) = 2700 (kg \cdot m^{-3})$$

$$E_0 = \frac{E}{1 - 25\alpha T} = 80 \times 10^9 (Pa)$$

所以: 声速理论值为:

$$v_0 = \sqrt{\frac{E_0}{\rho_0}} \cdot (1 - 11\alpha T) = 3100 (m \cdot s^{-1})$$

相对误差:

$$E = \frac{|v - v_0|}{v_0} \times 100\% = 5.0\%$$

对于有机玻璃棒而言:

测得的声速为:

$$v' = \frac{1}{2} \cdot (v'_1 + v'_2)$$

其中, 由时差法原理:

$$v'_1 = \frac{l_5 - l_4}{t_5 - t_4} = 2.27 \times 10^3 (m \cdot s^{-1})$$

$$v'_2 = \frac{l_6 - l_5}{t_6 - t_5} = 2.29 \times 10^3 (m \cdot s^{-1})$$

故有声速的测量值:

$$v' = 2.28 \times 10^3 (m \cdot s^{-1})$$

声速理论值计算:

查找资料, 可得铝的线胀系数和在常温(300K)下的密度与杨氏模量。

$$\alpha = 23 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C}^{-1})$$

$$\rho = 1180 (kg \cdot m^{-3})$$

$$E = 30 \times 10^9 (Pa)$$

则:

$$\rho_0 = \rho \cdot (1 + 3\alpha T) = 1180 (kg \cdot m^{-3})$$

$$E_0 = \frac{E}{1 - 25\alpha T} = 30 \times 10^9 (Pa)$$

所以：声速理论值为：

$$v_0 = \frac{1.5 \times 10^3}{\sqrt{\rho_0}} (m \cdot s^{-1})$$

相对误差：

$$E = \frac{v - v_0}{v_0} \times 100\% = 44.3\%$$

五. 实验结论及现象分析

本实验使用了四种方法（驻波法、相位法、波形移动法、振幅法）测量了有机玻璃棒的超声波波速（声速）。四个实验测得的结果在误差范围内，与理论值较为接近。

在前3种方法中，驻波法和相位法的结果较为准确，而波形移动法的结果偏差较大。推测可能的原因是驻波法和相位法测量波形振幅法测量波长的误差较大，而波形移动法测量波长的误差较大。波形移动法的测量结果如图是否为直线”较为准确，而相位法的结果较为准确。

注意到，有机玻璃棒的声速与有机玻璃的声速较为接近，这可能与有机玻璃的声速与有机玻璃的声速较为接近有关。有机玻璃的声速与有机玻璃的声速较为接近，这可能与有机玻璃的声速与有机玻璃的声速较为接近有关。物体声速也可能与有机玻璃的声速较为接近，这可能与有机玻璃的声速与有机玻璃的声速较为接近有关。误差较大，计算的声速理论值也偏差较大。

因此查得的常数与实验所用材料较为接近，计算的声速与理论值也相近。

六. 讨论问题

1. 使用驻波法测声速时，为什么示波器上观察到的是正弦波而不是驻波？

答：因为示波器的输入阻抗与驻波法的输入阻抗不匹配，导致示波器上观察到的是正弦波而不是驻波。

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：因为相位比较法测量波长时，用直线作为 S2 移动距离的片段数据，可以更准确地测量波长。

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) 外界因素：实验过程中，外界因素如温度、湿度、气压等都会对声速的测量产生影响。
- (2) 接收器：接收器的灵敏度、频率响应等都会对声速的测量产生影响。
- (3) 波形移动法：波形移动法的测量结果偏差较大，这可能与有机玻璃的声速与有机玻璃的声速较为接近有关。