

一、预习报告

1. 实验综述

实验原理：

声波在不同介质中传播速度不同，最简单的方法是直接测量声波的振动频率 f 和波长 λ ，可得 $v = \lambda f$ 。声波频率一般是仪器给定的，所以只要测量波长即可计算。常采用驻波法（共振干涉法）和相位比较法。

（1）驻波法测量：发射器发出的一定频率的声波，经空气媒质传播，到达接收器，如果接收面和发射面平行，即入射波在接收面上垂直反射，则两列波发生叠加（干涉）形成驻波。发射端和接收端是波节，此时发射端和接收端之间的距离为 L 恰好等于半波长的整数倍： $L_n = n \frac{\lambda}{2}$

（ $n=1,2,\dots$ ）。移动接收器时，示波器上振幅从最大变为另外一个最大时说明接收器移动 $\frac{\lambda}{2}$ ，从而也可以测得 λ 。

（2）位相差法：沿波传播方向上任意两点其相位差为 2π 的整数倍时，两点之间的距离应该等于波长的整数倍。沿传播方向移动接收器时，总可以找到一个位置使得接收到的信号与发射的信号同向，移动的这段距离必然等于超声波的波长。可以使用双踪示波器直接比较发射的信号和接收的信号来测定相位差，也可以利用李萨如图形寻找同向时椭圆退化到斜直线的点。

实验方法：

首先进行系统调节，分别调节两个端面平行，微调信号发生器的频率，直到示波器上出现振幅最大，此时显示的频率数值是实验所需的谐振频率。

（1）驻波法：将移动接收端在标尺上来回移动，观察干涉现象。缓慢移动接收端使示波器上出现最大的振幅波形，读取标尺读数 L_1 ，继续同一方向移动接收端，逐次（连续的）读记相邻最大的振幅位置 L_i ，记录数据和频率。

（2）相位差法：发射端信号输入示波器X轴，发射端与接收端的振动信号分别输入示波器X轴、Y轴偏转板上，显示李萨如图形，移动接收端在示波器上看到一、三象限的直线，读取位置 L_1 ，再移动接收端，看到二、四象限直线，读取 L_2 ，记下频率。

实验现象：通过移动接收端可以看到波的振幅在发生变化，同时使用相位差法可以观察到李萨如图形的变化。

2. 实验重点

- (1) 了解声音的传播速度与波长、频率之间的关系，由此来计算声速。
- (2) 了解驻波的原理和使用驻波法测量声速的实验操作。
- (3) 学会调节声速测定仪，并使用相位差法以及李萨如图形来计算波长。

3. 实验难点

- (1) 实验过程中可能受到外界的声波干扰而不稳定。
- (2) 实验前要对仪器进行系统调节由此获得更好的实验效果。
- (3) 李萨如图形易受外界干扰，图形可能呈现椭圆、斜线或复杂形状，难以判断直线型。

二、原始数据

谐振频率 40.58 kHz		温度 $t_1 = 25.5^\circ\text{C}$ $t_2 = 25.1^\circ\text{C}$ $t_3 = 25.0^\circ\text{C}$	
驻波法	位置 /mm	相位差法	位置 /mm
1	77.560 77.560 45.423 97.090	1	51.806
2	80.060 88.102 46.835 101.290	2	59.115
3	82.145 40.140 105.245	3	68.059
4	84.550 109.650	4	76.698
5	86.365 114.053	5	84.993
6	88.410 118.140	6	93.230
7	90.640 122.300	7	101.595
8	92.972 126.637	8	110.290
9	95.600 130.830	9	119.285
10	97.120 135.345	10	128.213
11	100.423 139.760 143.970	11	137.312
12	102.000 101.856	12	144.989

三、结果与分析

1. 数据处理与结果

根据驻波法测量实验和相位比较法测量实验数据，可以列出如下数据表（表 1）。实验中的谐振频率为 40.58kHz，3 组温度为 25.5℃、25.1℃、25.0℃，平均温度为 25.2℃，因此理论

$$\text{速度为: } v_{\text{理论}} = 331.45 \sqrt{1 + \frac{25.2}{273.15}} = 346.4 \text{ m/s}$$

表 1 两种实验方法数据记录

驻波法	1	2	3	4	5	6
位置/mm	97.090	101.290	105.245	109.650	114.053	118.140
驻波法	7	8	9	10	11	12
位置/mm	122.300	126.637	130.830	135.345	139.760	143.970
相位差法	1	2	3	4	5	6
位置/mm	51.806	59.115	68.059	76.698	84.993	93.230
相位差法	7	8	9	10	11	12
位置/mm	101.595	110.290	119.285	128.213	137.312	144.989

(1) 驻波法: 对驻波法 12 组数据进行逐差法处理, 选取间隔 6 组的数据做差处理: $\lambda_i = \frac{x_{6+i} - x_i}{6}$,

处理后数据记录如下（表 2）

表 2 逐差法处理驻波法数据

i	1	2	3	4	5	6
λ_i/mm	8.403	8.449	8.528	8.565	8.569	8.610

计算可得: $\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^6 \lambda_i}{6} = 8.520 \text{ mm}$, 因此可以计算 $v_{\text{实验}} = f \cdot \bar{\lambda} = 345.7 \text{ m/s}$, 该方法下相对误差

$$\text{为 } E_1 = \frac{|v_{\text{实验}} - v_{\text{理论}}|}{v_{\text{理论}}} \times 100\% = 0.20\%$$

(2) 相位差法: 对相位差法 12 组数据逐差法处理, 选取间隔 6 组的数据做差处理: $\lambda_i = \frac{x_{6+i} - x_i}{6}$,

处理后数据记录如下（表 3）

表 2 逐差法处理驻波法数据

i	1	2	3	4	5	6
λ_i/mm	8.298	8.529	8.538	8.586	8.720	8.626

计算可得: $\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^6 \lambda_i}{6} = 8.550 \text{ mm}$, 因此可以计算 $v_{\text{实验}} = f \cdot \bar{\lambda} = 347.0 \text{ m/s}$, 该方法下相对误差

为 $E_2 = \frac{|v_{\text{实验}} - v_{\text{理论}}|}{v_{\text{理论}}} \times 100\% = 0.16\%$. 该方法的相对误差比驻波法较小, 测量结果更为精确。

(3) 再使用作图法分别分析两种方法, 以实验组数 (即依次所记录的波腹的标号) 为横坐标, 接收端的位置为纵坐标, 可做出两方法的线性拟合图形分别为 (图 1) (图 2)

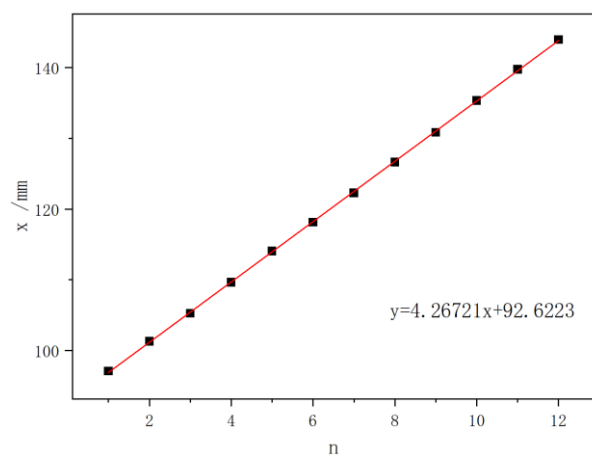


图 1 驻波法拟合曲线

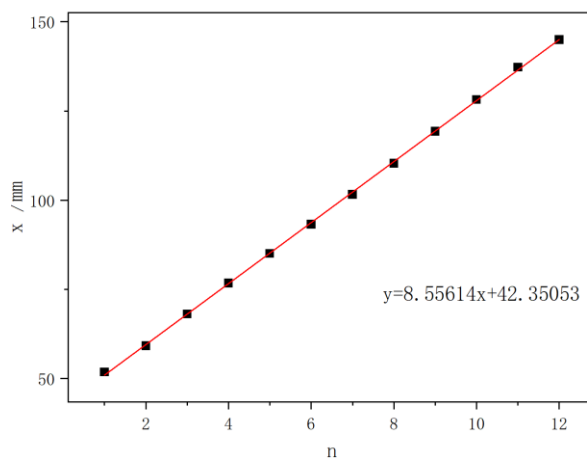


图 2 相位差法拟合曲线

依次可知斜率对应可算得波长, 驻波法 $\lambda_1 = 8.534 \text{ mm}$, 相位差法 $\lambda_2 = 8.556 \text{ mm}$

因此可以分别算出: $v_{\text{实验}1} = f \cdot \lambda_1 = 346.3 \text{ m/s}$, $E'_1 = \frac{|v_{\text{实验}1} - v_{\text{理论}}|}{v_{\text{理论}}} \times 100\% = 0.02\%$

$v_{\text{实验}2} = f \cdot \lambda_2 = 347.2 \text{ m/s}$, $E'_2 = \frac{|v_{\text{实验}2} - v_{\text{理论}}|}{v_{\text{理论}}} \times 100\% = 0.23\%$.

2. 误差分析

- 1) 实验中超声波的图像振幅始终处于波动中, 判断振幅达到最高处存在视觉误差。
- 2) 仪器的接收端和发射端之间的位置在移动过程中也存在位置读数上的误差。
- 3) 观察李萨如图形时, 图像不能保持绝对静止, 在运动中也会导致判断时的误差。
- 4) 随着接收端和发射端之间的间距增大, 声波存在衰减, 信号的幅度降低, 判断最大振幅时也存在误差。
- 5) 实验过程中环境温度也始终处于波动状态, 仅取 3 次温度平均值的计算方法与实际情况略有出入, 实验方法上存在误差。

3. 实验探讨

本次实验通过使用两种方法对声波的波长进行测定，再来计算声速大小。这让我对声波的叠加有了更深刻的认识，以及驻波的波腹和波节的概念也更加清晰。实验过程中将声信号转换为电信号再使用示波器进行图像化的展示，这让我感受到物理之间的关联。同时对示波器的运用也更加了解。

四、思考题

1、同频率两相互垂直的振动合成中，当相位差为 2π 的整数倍时，李萨如图形为一、三象限的直线，当相位差为 π 的奇数倍时是二、四象限的直线，试证明之。

答：设两个同频率相互垂直的波动方程为： $x = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$ ， $y = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$

(1) 当相位差为 $2k\pi$ (k 为整数) 时， $\varphi_2 = \varphi_1 + 2k\pi$ ，代入可知：

$y = A_2 \cos(\omega t + \varphi_1 + 2k\pi) = A_2 \cos(\omega t + \varphi_1)$ ，由此联立可知： $y = \frac{A_2}{A_1} x$ 。 $\frac{A_2}{A_1} > 0$ 可知此时为一、三象限的直线。

(2) 当相位差为 $(2k + 1)\pi$ (k 为整数) 时， $\varphi_2 = \varphi_1 + (2k + 1)\pi$ ，代入可知：

$y = A_2 \cos(\omega t + \varphi_1 + 2k\pi + \pi) = -A_2 \cos(\omega t + \varphi_1)$ ，由此联立可知： $y = -\frac{A_2}{A_1} x$ 。 $-\frac{A_2}{A_1} < 0$ 可知此时为二、四象限的直线。

2、实验前为什么要调整测试系统的谐振频率？

答：谐振频率是振幅达到最大时的频率，当实验中发生器的频率达到谐振频率时，换能器振动幅度最大，声波能量集中，接收信号清晰。可以通过声电转换在示波器上观察到最明显的振幅，便于后续实验中对振幅变化和李萨如图形的观察。

3、如果超声波发生器的频率 $\bar{f} = 40.00\text{kHz}$ ，不确定度 $u_f = 10\text{Hz}$ ，测 λ 时引起波长的不确定度为 $u_\lambda = 0.03\text{mm}$ ， $\bar{\lambda} = 8.560\text{mm}$ ，则实验中所测得的声速相对不确定度 u_v/v 可达多少？

答：根据相对不确定度计算公式 $\frac{u_v}{v} = \sqrt{\left(\frac{u_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{u_\lambda}{\lambda}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{10}{40000}\right)^2 + \left(\frac{0.03}{8.560}\right)^2} = 0.0035$ 。