浙江大学

物 理 实 验 报 告

实验名称： 声速的测定

实验桌号： 10

指导教师： _____

班级： _____

姓名： _____

学号： _____ _____

实验日期： 2025 年 10 月 21 日　　**星期** 二 **下午**

（此处填实验选课系统内日期）

浙江大学物理实验教学中心

如有实验补做，补做日期：

情况说明：

一、预习报告（10 分）

（注：将已经写好的“物理实验预习报告”内容拷贝过来）

1. 实验综述（5 分）

（自述实验现象、实验原理和实验方法，包括必要的光路图、电路图、公式等。不超过 500 字。）
本实验旨在通过驻波法（共振干涉法）和相位比较法两种方式测定超声波在空气中的传播速度。
实验现象：

- 驻波法：当发射的声波与反射回来的声波发生干涉时，会形成稳定的驻波。在示波器上可以观测到，当接收器位于波腹位置时，接收到的信号振幅最大；当位于波节时，振幅最小。
- 相位法：将发射信号和接收信号分别输入示波器的 X 轴和 Y 轴，屏幕上会显示李萨如图形。随着接收器的移动，两个信号的相位差会发生改变，导致李萨如图形发生周期性变化（如从正斜率直线变为圆形，再变为负斜率直线）。

实验原理：声波是纵波，其在介质中的传播速度 v 与声源频率 f 和波长 λ 之间满足关系式：

$$v = \lambda f \tag{1}$$

实验的核心就是通过不同方法精确测量出超声波的波长 λ，同时从信号发生器读取频率 f，从而根据公式 (1) 计算出声速 v。

(1) 方法一：驻波法原理

声发射端发出的声波为入射波，其数学表达式为：

$$y_1 = A\cos(\omega t - kx) \tag{2}$$

此声波经反射面反射后形成反射波，表达式为：

$$y_2 = A\cos(\omega t + kx) \tag{3}$$

这两列波相遇后发生干涉，形成的合成波（驻波）的表达式为：

$$y = y_1 + y_2 = 2A\cos(kx)\cos(\omega t) \tag{4}$$

由公式 (4) 可知，合成波的振幅 $|2A\cos(kx)|$ 是随位置 x 变化的。

- 当 $x = \pm n\frac{\lambda}{2}$ $(n = 0, 1, 2, \dots)$ 时，振幅最大，此处称为波腹。
- 当 $x = \pm(2n+1)\frac{\lambda}{4}$ $(n = 0, 1, 2, \dots)$ 时，振幅最小，此处称为波节。

因此，相邻两个波腹（或波节）之间的距离恰好为半个波长。通过移动接收器，找到连续两个信号振幅最大（即波腹）的位置 L_n 和 L_{n+1}，它们之间的距离差即为半个波长：

$$\Delta L = L_{n+1} - L_n = \frac{\lambda}{2} \tag{5}$$

测量出多组 ΔL 后即可求得波长 λ 的平均值。

(2) 方法二：相位比较法原理

将发射端的信号 $x = A\cos(\omega t + \varphi_1)$ 输入示波器的 X 轴，接收端的信号 $y = B\cos(\omega t + \varphi_2)$ 输入 Y 轴。屏幕上将显示两个同频率、相互垂直的振动合成的李萨如图形。两个信号的相位差 $\Delta\varphi$ 与接收器和发射器之间的距离 l 存在以下关系：

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} l \tag{6}$$

李萨如图形的形状由相位差 $\Delta\varphi$ 决定。

- 当相位差 $\Delta\varphi = n\pi$ (n 为偶数) 时，图形为一、三象限的直线（同相）。
- 当相位差 $\Delta\varphi = n\pi$ (n 为奇数) 时，图形为二、四象限的直线（反相）。

当移动接收器，使李萨如图形从一、三象限的直线变为二、四象限的直线时，相位差改变了 π。根据公式 (6)，位置移动的距离 ΔL 与相位差变化量 $\Delta(\Delta\varphi) = \pi$ 的关系为 $\pi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta L$，可得：

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2} \tag{7}$$

通过测量多次李萨如图形斜率由正到负（或由负到正）变化时接收器移动的距离，即可根据公式 (7) 求得波长 λ。

实验方法：首先，连接信号发生器、声速测定仪和双踪示波器。然后调节信号发生器频率至换能器的谐振频率（约 40kHz），使示波器上接收信号的幅度最大。接着，分别采用上述两种方法进行测量，并根据公式 (1) 计算声速，最后与考虑了温度影响的声速理论值进行比较，分析误差。

2. 实验重点（3 分）

（简述本实验的学习重点，不超过 100 字。）

本实验的学习重点在于：

(1) 理解驻波干涉和波的相位两个核心物理概念。

(2) 掌握利用驻波法（公式 5）和相位比较法（公式 7）测量声波波长的原理和操作。

(3) 熟练使用双踪示波器和信号发生器，特别是示波器的双通道模式和 X-Y 模式的切换与观察。

(4) 学会通过多次测量和数据处理（如逐差法）来减小随机误差，提高测量精度。

3. 实验难点（2 分）

（简述本实验的实现难点，不超过 100 字。）

本实验的实现难点主要包括：

(1) 信号调节：需精确调节谐振频率以保证信号稳定，并调整好换能器端面平行度以获得清晰的驻波或李萨如图形。

(2) 操作精度：在移动接收器和读数时，必须保持单向转动，以消除手轮的空程误差。

(3) 环境干扰：需要减小环境噪声及高阶反射波对测量的干扰。

二、原始数据（20 分）

（将有老师签名的“自备数据记录草稿纸”的扫描或手机拍摄图粘贴在下方，完整保留姓名，学号，教师签字和日期。）

原始数据如图1所示。

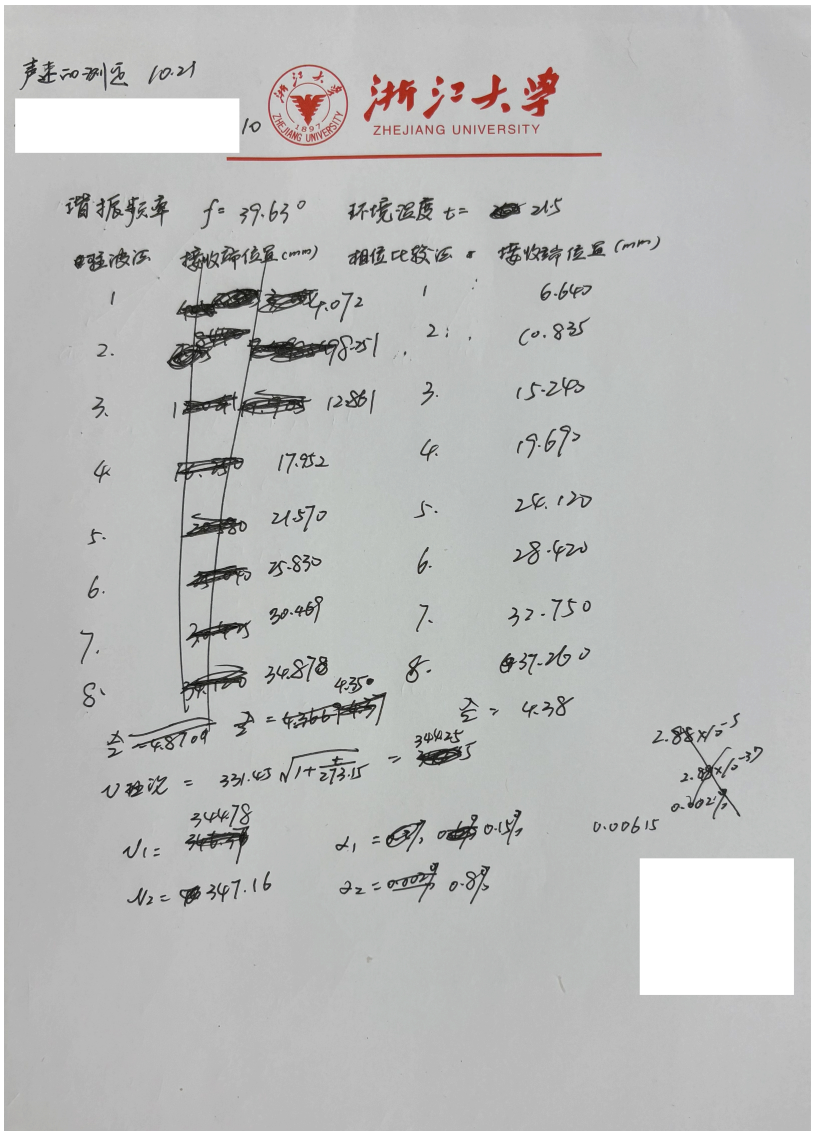


图 1: 原始数据记录

原始数据已转录整理至下表1中。

三、结果与分析（60 分）

1. 数据处理与结果（30 分）

（列出数据表格、选择适合的数据处理方法、写出测量或计算结果。）

下表记录了本次实验的设置参数，以及从“驻波法”和“相位比较法”两种方法测得的接收端位置数据。

表 1: 实验数据测量值

谐振频率 (f): $39.630kHz$		环境温度 (t): 21.5°C	
驻波法		相位比较法	
序号	接收端位置 (mm)	序号	接收端位置 (mm)
1	4.072	1	6.640
2	8.251	2	10.835
3	12.861	3	15.240
4	17.952	4	19.690
5	21.570	5	24.120
6	25.830	6	28.420
7	30.469	7	32.750
8	34.878	8	37.260

采用逐差法处理数据，以减小随机误差。对于 $2n = 8$ 组数据，半波长的计算公式为：

$$\frac{\overline{\lambda}}{2} = \frac{\sum_{i=n+1}^{2n} x_i - \sum_{i=1}^{n} x_i}{n^2} = \frac{\sum_{i=5}^{8} x_i - \sum_{i=1}^{4} x_i}{16} \tag{8}$$

1. 驻波法波长计算根据公式 (8)，计算得到半波长的平均值：

$$\overline{\frac{\lambda_1}{2}} \approx 4.35\,\text{mm}$$

波长平均值为 $\bar{\lambda}_1 = 2 \times 4.35 = 8.70\,\text{mm}$。

2. 相位比较法波长计算同理，对于相位比较法的数据，计算得到半波长的平均值：

$$\overline{\frac{\lambda_2}{2}} \approx 4.38\,\text{mm}$$

波长平均值为 $\bar{\lambda}_2 = 2 \times 4.38 = 8.76\,\text{mm}$。

(1) 声速计算结果

1. 驻波法声速

$$v_1 = \bar{\lambda}_1 \times f \approx 344.78\,\text{m/s}$$

2. 相位比较法声速

$$v_2 = \bar{\lambda}_2 \times f \approx 347.16\,\text{m/s}$$

2. 误差分析（20 分）

（运用测量误差、相对误差或不确定度等分析实验结果，写出完整的结果表达式，并分析误差原因。）

(1) 声速理论值

空气中声速的理论值 v_0 与摄氏温度 t 的关系式为：

$$v_t = v_0\sqrt{1+\frac{t}{273.15}}$$

其中 $v_0 = 331.45\,\mathrm{m/s}$ 是 0°C 时的声速。将 $t = 21.5$°C 代入，得：

$$v_t = 331.45 \times \sqrt{1+\frac{21.5}{273.15}} \approx 344.25\,\mathrm{m/s}$$

(2) 相对误差

1. 驻波法相对误差

$$E_1 = \frac{|v_1 - v_t|}{v_t} \times 100\% = \frac{|344.78 - 344.25|}{344.25} \times 100\% \approx 0.15\%$$

2. 相位比较法相对误差

$$E_2 = \frac{|v_2 - v_t|}{v_t} \times 100\% = \frac{|347.16 - 344.25|}{344.25} \times 100\% \approx 0.85\%$$

(3) 误差原因分析

(1) **系统误差：**

- 仪器误差：频率源的频率示值可能存在系统偏差；温度计读数不准导致理论值计算偏差。
- 空程误差：移动接收器时若未保持单向旋转，会导致读数产生系统性的偏大或偏小。

(2) **随机误差：**

- 读数误差：驻波法中判断波腹（振幅最大点）位置存在主观判断误差，相位法中判断李萨如图形恰好为直线时也有视觉误差。
- 环境干扰：空气流动、环境温度的微小波动会影响声速；周围的噪声可能干扰示波器上的信号，影响判断。
- 平行度问题：发射端与反射面未能严格平行，导致驻波场不理想，波腹位置模糊，增加了测量的随机性。

3. 实验探讨（10 分）

（对实验内容、现象和过程的小结，不超过 100 字。）

本实验成功运用驻波法与相位比较法测量了空气中的声速，测量结果与理论值符合得很好。误差分析表明，本次实验中驻波法的结果更为精确，其相对误差（0.15%）显著小于相位比较法（0.85%）。这说明本次测量中对波腹位置的判断较为准确。实验成功的关键在于精确调节谐振频率、保证换能器平行以及在读数过程中消除空程误差。

四、思考题（10 分）

（解答教材或讲义或老师布置的思考题，请先写题干，再作答。）

(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。试证之。

设两个相互垂直的同频率振动方程为：

$$x = A\cos(\omega t)$$
$$y = B\cos(\omega t + \Delta\varphi)$$

a. 当相位差 $\Delta\varphi = 2k\pi$（k 为整数）时，振动方程变为：

$$x = A\cos(\omega t)$$
$$y = B\cos(\omega t + 2k\pi) = B\cos(\omega t)$$

消去参数 t，可得轨迹方程：

$$y = \frac{B}{A}x$$

这是一个斜率为正（$B/A > 0$）、通过原点的直线方程。由于 x 在 $[-A, A]$ 范围内变化，y 在 $[-B, B]$ 范围内同步变化，因此轨迹是一条位于第一、三象限的直线。

b. 当相位差 $\Delta\varphi = (2k+1)\pi$（$k$ 为整数）时，振动方程变为：

$$x = A\cos(\omega t)$$
$$y = B\cos(\omega t + (2k+1)\pi) = -B\cos(\omega t)$$

消去参数 t，可得轨迹方程：

$$y = -\frac{B}{A}x$$

这是一个斜率为负（$-B/A < 0$）、通过原点的直线方程。轨迹是一条位于第二、四象限的直线。

证毕。

(2) 实验前为什么要调整测试系统的谐振频率？

在谐振频率下，示波器上观察到的波形最稳定、最清晰，便于在驻波法中准确判断波腹位置，或在相位法中观察到清晰的李萨如图形，从而提高测量精度。

(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 时引起波的不确定度为 $u_\lambda = 0.030\text{mm}$，$\bar{\lambda} = 8.560\text{mm}$，则实验中所测得的声速相对不确定度 u_v/v 可达多少？

根据不确定度合成公式 $v = \lambda f$：

$$\frac{u_v}{v} = \sqrt{\left(\frac{u_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{u_\lambda}{\lambda}\right)^2}$$

代入数据：

- $f = 40.00\,\text{kHz} = 40000\,\text{Hz}$
- $u_f = 10\,\text{Hz}$

- $\lambda = 8.560\,\mathrm{mm}$
- $u_\lambda = 0.030\,\mathrm{mm}$

计算相对不确定度分量：

$$\frac{u_f}{f} = \frac{10}{40000} = 2.5 \times 10^{-4}$$
$$\frac{u_\lambda}{\lambda} = \frac{0.030}{8.560} \approx 3.50 \times 10^{-3}$$

合成相对不确定度：

$$\begin{aligned}\frac{u_v}{v} &= \sqrt{(2.5 \times 10^{-4})^2 + (3.50 \times 10^{-3})^2} \\ &= \sqrt{6.25 \times 10^{-8} + 1.225 \times 10^{-5}} \\ &\approx \sqrt{1.231 \times 10^{-5}} \approx 3.51 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

所以，所测得的声速相对不确定度可达 0.35%。

注意事项：

1. 用 PDF 格式上传“实验报告”，文件名：学生姓名 + 学号 + 实验名称 + 周次。
2. “实验报告”必须递交在“学在浙大”本课程内对应实验项目的“作业”模块内。
3. “实验报告”成绩必须在“浙江大学物理实验教学中心网站”-“选课系统”内查询。
4. 教学评价必须在“浙江大学物理实验教学中心网站”-“选课系统”内进行，学生必须进行教学评价，才能看到实验报告成绩，教学评价须在本次实验结束后 3 天内进行。

浙江大学物理实验教学中心制