

浙江大学

物理实验报告

实验名称: 声速的测定

实验桌号: 2

指导教师: 张寒洁

班级: 计科 2404

姓名: 李宇晗

学号: 3240106155

实验日期: 2025 年 10 月 20 日 星期 二 上午

一、预习报告

1. 实验综述 (5 分)

本实验旨在利用声波干涉原理，通过驻波法和相位比较法（李萨如图形法）两种独立的物理途径，在空气中精确测定超声波的传播速度。实验核心装置包括信号发生器、压电陶瓷换能器（发射与接收）及双踪示波器。

实验现象：

- 驻波法：** 将示波器置于 Y-T 模式，沿轴向移动接收换能器时，可观测到接收信号的振幅呈现出稳定且周期性的极大值（波腹）与极小值（波节）交替分布的现象，这是典型的驻波干涉图样。
- 相位比较法：** 将示波器切换至 X-Y 模式，发射与接收信号合成李萨如图形。移动接收端时，该图形会发生规律性演变，如从一、三象限的斜直线，经椭圆、正圆，变为二、四象限的斜直线，循环往复，直观地反映了两信号间相位差的变化。

实验原理： 声波作为一种机械波，其传播速度 v 、频率 f 与波长 λ 满足波动学基本公式 $v = f \cdot \lambda$ 。驻波法依据的原理是：两列相干波反向传播叠加，空间中某些位置振动始终加强（波腹），某些位置始终减弱（波节），相邻两波腹（或波节）的间距恒为半个波长 $\frac{\lambda}{2}$ 。相位比较法则利用了行波相位与其传播距离的关系，当接收端移动一个波长 λ 的距离时，其相位会变化 2π ，李萨如图形也随之完成一个完整的变化周期。

实验方法： 首先正确连接仪器，调节信号发生器频率至换能器的谐振频率（约 40kHz），以获得最大且最稳定的接收信号。随后，分别采用两种方法进行测量：
1. **驻波法：** 单向移动接收端，记录连续多个波腹位置，利用逐差法计算出平均波长。
2. **相位比较法：** 单向移动接收端，记录李萨如图形多次呈现为同一状态（如正斜率直线）时的位置，同样用逐差法计算平均波长。最后，结合频率读数计算声速，并与考虑了室温的理论值进行比较，展开误差分析。

2. 实验重点 (3 分)

- 物理原理的深化理解：** 不仅要了解波的干涉和驻波的形成条件，更要深入理解李萨如图形的几何形态如何精确对应两个正交振动的相位差。
- 核心测量技能的掌握：** 熟练运用驻波法（观察振幅）和相位比较法（观察相位）这两种不同视角的方法测量波长，并掌握使用逐差法处理数据以有效减小随机误差。
- 精密仪器的规范操作：** 能够准确地寻找到系统谐振频率以优化信噪比，并熟练切换和使用示波器的 Y-T 时基扫描模式与 X-Y 扫描模式。
- 实验误差的系统性分析：** 能够识别实验中的主要误差来源，并理解如何通过规范操作（如单向移动）来有效规避空程差这类典型的系统误差。

3. 实验难点 (2 分)

- 系统谐振频率的精确寻找：** 换能器具有频率选择性，只有在谐振点附近才能最高效地进行声电能量转换。精确找到该频率点是保证信号稳定、清晰，从而进行精确测量的关键前提。
- 空程差的有效规避：** 移动接收端的丝杆传动机构存在机械间隙（回程误差），若来回调节读数，将引入显著的系统误差。因此，全程必须保持严格的单方向移动，这对操作的细心和耐心提出了较高要求。

3. 换能器共轴与平行性的调节：发射端面与接收端面必须保持严格平行且共轴，任何偏差都会导致驻波场形态不理想，甚至产生复杂的斜向反射，从而使波腹位置模糊，测量难度增大。

二、原始数据 (20 分)

声速测量 10.20 上午
3240106155 李宇航
 $f = 39.71 \text{ kHz}$ $t = 23.0^\circ\text{C}$

测点	接收端位置 (mm)	相位现移法	位置 (mm)
1	4.062	1	2.184
2	8.014	2	6.387
3	13.013	3	10.464
4	17.014	4	15.909
5	22.032	5	19.304
6	26.221	6	24.862
7	30.027	7	28.824
8	35.312	8	32.012
9	40.043	9	36.141
10	44.527	10	41.712
11	49.021	11	45.028
12	53.231	12	49.603

用尺量取

7m

三、结果与分析 (60 分)

1. 数据处理与结果 (30 分)

实验基本参数记录如下：

- 谐振频率 $f = 39.71 \text{ kHz} = 39710 \text{ Hz}$
- 环境温度 $t = 23.0^\circ\text{C}$

1.1 原始数据记录

序号 n	驻波法位置 x_n (mm)	序号 n	累积相位差	相位比较法位置 x'_n (mm)
1	4.062	1	0	2.184
2	8.014	2	π	6.387
3	13.013	3	2π	10.464
4	17.114	4	3π	15.909
5	22.032	5	4π	19.304
6	26.221	6	5π	24.862
7	30.027	7	6π	28.841
8	35.312	8	7π	32.012
9	40.043	9	8π	36.141
10	44.527	10	9π	41.712
11	49.021	11	10π	45.028
12	53.231	12	11π	49.603

1.2 数据处理方法与结果

1. 声速理论值计算

声速理论值公式:

$$v_{\text{理论}} = 331.45 * \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}}$$

代入 $t = 23.0$ °C, 得:

$$v_{\text{理论}} = 331.45 * \sqrt{1 + \frac{23.0}{273.15}} = 345.14 \text{ m/s}$$

2. 逐差法

相邻测量点间距为 $\frac{\lambda}{2}$ 。使用逐差法, $\lambda_i = \frac{x_{i+6} - x_i}{3}$ 。

• 驻波法:

$$\bar{\lambda}_{\text{驻波}} = 8.984 \text{ mm}$$

$$v_{\text{驻波}} = f * \bar{\lambda}_{\text{驻波}} = 39710 \text{ Hz} * 8.984 * 10^{-3} \text{ m} = 356.77 \text{ m/s}$$

• 相位比较法:

$$\bar{\lambda}_{\text{相位}} = 8.568 \text{ mm}$$

$$v_{\text{相位}} = f * \bar{\lambda}_{\text{相位}} = 39710 \text{ Hz} * 8.568 * 10^{-3} \text{ m} = 340.23 \text{ m/s}$$

3. 最小二乘法（线性回归）

将位置 x 作为序号 n 的线性函数 $x_n = k * n + b$, 其中斜率 $k = \frac{\lambda}{2}$ 。

• 驻波法: 对 (n, x_n) 数据进行线性拟合, 得斜率 $k = 4.471 \text{ mm}$ 。

$$\lambda = 2k = 8.942 \text{ mm}$$

$$v'_{\text{驻波}} = f * \lambda = 39710 * 8.942 * 10^{-3} = 355.06 \text{ m/s}$$

- 相位比较法：对 (n, x'_n) 数据进行线性拟合，得斜率 $k' = 4.316 \text{ mm}$ 。

$$\lambda' = 2k' = 8.632 \text{ mm}$$

$$v'_{\text{相位}} = f * \lambda' = 39710 * 8.632 * 10^{-3} = 342.75 \text{ m/s}$$

1.3 结果汇总

方法	波长 λ (mm)	声速 v (m/s)	相对误差 E_r
驻波法(逐差)	8.984	356.77	3.37%
相位法(逐差)	8.568	340.23	1.42%
驻波法(拟合)	8.942	355.06	2.87%
相位法(拟合)	8.632	342.75	0.69%

2. 误差分析 (20 分)

最小二乘法利用了所有数据点，结果更可靠，因此选用其结果进行不确定度分析。

1. 不确定度评定

- 频率 f : B 类不确定度。信号发生器频率不确定度通常取最后一位的半格，即 $u_{B(f)} = 10 \text{ Hz}$ 。
- 波长 λ :
 - A 类不确定度 $u_{A(\lambda)}$: 由最小二乘法拟合的标准差给出。
 - 驻波法: $u_{A(\lambda)} = 0.045 \text{ mm}$
 - 相位法: $u_{A(\lambda)} = 0.021 \text{ mm}$
 - B 类不确定度 $u_{B(\lambda)}$: 由标尺最小分度值（假设 0.002 mm ）决定， $u_{B(\lambda)} = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.001 \text{ mm}$ 。
 - 合成不确定度 $u(\lambda) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$:
 - 驻波法: $u(\lambda) = 0.045 \text{ mm}$
 - 相位法: $u(\lambda) = 0.021 \text{ mm}$

2. 声速不确定度合成

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

- 驻波法（拟合）：

$$u_v = 355.06 * \sqrt{\left(\frac{10}{39710}\right)^2 + \left(\frac{0.045}{8.942}\right)^2} = 1.8 \text{ m/s}$$

- 相位比较法（拟合）：

$$u_v = 342.75 * \sqrt{\left(\frac{10}{39710}\right)^2 + \left(\frac{0.021}{8.632}\right)^2} = 0.8 \text{ m/s}$$

3. 最终结果表达式

相位比较法结合最小二乘法拟合的结果相对误差最小，不确定度也最小，最为可信。故最终结果为：

$$v = (342.8 \pm 0.8) \text{ m/s}$$

4. 误差原因讨论

- ① **系统误差**: 仪器（标尺、频率源）的固有误差；理论公式未考虑湿度等因素。
- ② **随机误差**: 读数的主观判断误差是主要来源。驻波法的波腹峰值较平缓，判断难度大，导致其 A 类不确定度和相对误差均大于相位法。相位法通过判断斜率正负的突变点，定位更精确。
- ③ **操作误差**: 未能完全消除的空程差；两换能器未严格平行。

3. 实验探讨 (10 分)

本实验成功测定了空气中的声速，并对两种方法进行了比较。数据分析表明，相位比较法结合最小二乘法线性回归是本实验最优的数据处理策略，其结果 (342.75 m/s) 与理论值 (345.14 m/s) 的相对误差仅为 0.69%。实验的关键在于精确找到谐振频率以获得最佳信噪比，并在移动接收端时严格单向操作以规避空程差。

四、思考题 (10 分)

1. 实验前为什么要调整测试系统的谐振频率？

答：调整至谐振频率是为了实现 **能量转换效率最大化**。压电陶瓷换能器在谐振频率下，其机电耦合效应最强。这使得：

1. **发射效率最高**: 信号发生器输出的电能能够最大程度地转换为声能，产生最强的声波。
2. **接收灵敏度最高**: 接收端能将微弱的声压信号最有效地转换回电信号。

最终在示波器上得到振幅最大、信噪比最高的稳定信号，这对于准确判断波腹位置或李萨如图形的临界点至关重要，从而减小测量误差。

2. 为什么两个换能器距离增大，接收端的声压极大值会逐渐减小？

答：这主要是由以下三个因素造成的：

1. **声波的几何衰减**: 声波从发射端发出后，能量在空间中扩散，其波阵面面积随距离增大而增大。对于球面波，能量密度（声强）与距离的平方成反比，导致声压幅值随距离增大而减小。
 2. **介质吸收**: 声波在空气中传播时，一部分能量会因空气的粘滞性等原因转化为内能而被吸收，这种能量损失随传播距离的增加而累积，尤其对于高频超声波更为显著。
 3. **指向性与对准**: 超声换能器发射的声波具有一定的指向性（即能量集中在某一方向）。随着距离增大，声束会发散，且对两换能器的对准要求更高，任何微小的角度偏差都会导致接收端偏离声束中心，接收到的能量显著减少。
3. 如果超声波发生器的频率 $f = 40.00 \text{ kHz}$ ，不确定度 $u_f = 10 \text{ Hz}$ ，测声波波长时引起的不确定度为 $u_\lambda = 0.030 \text{ mm}$, $\bar{\lambda} = 8.560 \text{ mm}$ ，则实验中所测得的声速相对不确定度 $\frac{u_v}{v}$ 是多少？

答：根据不确定度合成公式，对于 $v = f * \lambda$ ，其相对不确定度为：

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

代入数据：

$$f = 40.00 \text{ kHz} = 40000 \text{ Hz}$$

；

$$u_f = 10 \text{ Hz}$$

$$\bar{\lambda} = 8.560 \text{ mm}$$

；

$$u_\lambda = 0.030 \text{ mm}$$

$$\frac{u_v}{v} = \sqrt{\left(\frac{10}{40000}\right)^2 + \left(\frac{0.030}{8.560}\right)^2}$$

$$\frac{u_v}{v} = \sqrt{(2.5 * 10^{-4})^2 + (3.504 * 10^{-3})^2}$$

$$\frac{u_v}{v} = \sqrt{6.25 * 10^{-8} + 1.228 * 10^{-5}}$$

$$\frac{u_v}{v} = \sqrt{1.234 * 10^{-5}} \approx 3.513 * 10^{-3}$$

因此，实验中所测得的声速相对不确定度 $\frac{u_v}{v}$ 约为 0.35%。