

声速测量实验报告

姓名：熊逸飞

学号：PB24000048

学院：少年班学院

2025 年 6 月 13 日

指导老师：王中平

学校：中国科学技术大学

摘要

本实验通过使用压电陶瓷超声换能器，测定超声波在气体、液体和固体等不同介质中的传播速度。实验采用驻波法、相位法和时差法等多种方法进行声速测量，展示了非电量电测量的典型应用方法。实验结果与理论值相符较好，验证了声速测量的基本原理和方法。

关键词：声速；超声波；驻波法；相位法；时差法

1 引言

声音是人类最早研究的物理现象之一，其研究历程从伽利略对单弦振动的探索，到现代声学的多领域发展，体现了物理学与技术进步的紧密联系。声波作为一种能在各种物质介质(除真空外)中传播的机械波，其传播特性对理论和应用研究都具有重要意义。

可闻声波($20\text{ Hz} \sim 20\text{ kHz}$)和超声波($> 20\text{ kHz}$)在现代科技中有着广泛应用。特别是超声波因其波长短、易于定向发射等特点，广泛应用于水下通讯、医疗诊断、工业探伤等领域。声呐技术作为声波应用的重要实例，在海洋探测和国防建设中发挥着关键作用。

声速的测量有助于了解介质特性和状态变化，在无损检测、流体测速和定位等领域具有重要价值。本实验通过使用压电陶瓷超声换能器，测定超声波在气体、液体和固体等不同介质中的传播速度，展示了非电量电测量的典型应用方法。

2 实验目的

- 了解声波和超声波的概念及特点；
- 了解驻波的特点；
- 理解压电陶瓷换能器的工作原理及非电学量的电学测量技术；
- 学习用驻波法、相位法和时差法测量固液气三种介质中声速的方法；
- 学习其他测量声速的方法，如声波悬浮法，超声光栅等。^[1]

3 实验原理

3.1 声波在空气中的传播速度

声波在理想气体中的传播速度为：

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (3.1)$$

其中， v 为声速， γ 为气体的绝热指数， R 为普适气体常量， T 为热力学温度， M 为气体的摩尔质量。在 0°C ($p=101325 \text{ Pa}$) 的干燥空气中，声速 $v_0 \approx 331.45 \text{ m/s}$ 。

在摄氏温度 $t^{\circ}\text{C}$ 时，声速可用以下公式近似计算：

$$v = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} \quad (3.2)$$

若同时考虑空气中水蒸气的影响，校准后的声速公式为：

$$v = v_0 \sqrt{\left(1 + \frac{t}{273.15}\right) \left(1 + \frac{0.3192 p_w}{p}\right)} \quad (3.3)$$

其中， p_w 为水蒸气分压， p 为大气压。

3.2 利用声速与频率、波长的关系测量

声速 v 与波长 λ 和频率 f 的关系为：

$$v = \lambda \cdot f \quad (3.4)$$

通过测量声波的频率和波长，可以计算出声速。频率用低频信号发生器直接给出，波长则通过共振干涉法或相位比较法测量。

- 共振干涉法（驻波法）

通过在发射器与接收器间产生驻波，测量驻波的波长。驻波的波长与间距 L 和驻波模数 n 有关：

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (3.5)$$

通过测量多组相邻的产生驻波的间距，可以通过最小二乘法计算出波长。

- 相位比较法（相位法）

通过测量发射器和接收器之间的相位差，计算出声速。相位差与波长的关系为：

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{L}{\lambda} \quad (3.6)$$

其中， $\Delta\varphi$ 为相位差， L 为发射器和接收器之间的距离。每当相位差变化 π 时，示波器上的图形会重复出现斜率符号相反的直线，此时距离刚好变化半波长，因此可以通过最小二乘法计算出波长。

3.3 利用声波传播距离和传播时间计算声速

- 时差法

通过测量声波从发射器到接收器的传播时间，计算声速。声速与传播距离 L 和传播时间 t 的关系为：

$$v = \frac{L}{t} \quad (3.7)$$

通过精确测量传播时间，可以计算出声速。

4 实验装置

- 声速测量信号源 用于产生超声波信号。
- 声速测量仪 包括发射换能器、接收换能器，用于发射和接收超声波信号。
- 双踪示波器 用于观察发射和接收的超声波信号，测量相位差和时间差。
- 不同长度黄铜、玻璃棒
- 游标卡尺 用于测量介质棒的长度。

5 实验步骤

5.1 共振干涉法测量空气中声速

- 按照操作示意图连接好信号源、测试仪和示波器；
- 调节信号源频率至约 37 kHz，观察示波器上的幅度变化，取电压信号最大时为谐振频率 f ；
- 记录实验开始前的谐振频率 f 和温度 t ；
- 从距离发射换能器约 5 cm 处开始，由近及远缓慢移动接收换能器，观察示波器上出现的振幅最大信号位置 L_0 ；
- 重复上述步骤，记录 12 组 L_0 ，并使用最小二乘法拟合；
- 记录实验结束后的谐振频率 f 和温度 t ，并计算声速。

5.2 相位比较法测量水中声速

相位比较法实验步骤与共振干涉法类似，但需要将发射与接收换能器浸入水槽中（水深与刻度线齐平即可），并使用示波器垂直振动合成模式测量相位差。

5.3 时差法测量固体中声速

- 按照操作示意图连接好信号源、测试仪和示波器，注意信号源需要调整至脉冲波金属/非金属模式；
- 使用游标卡尺测量待测介质棒的长度 L ，并记录；
- 拔出发射换能器尾部连接插头，将待测介质棒一端旋入接收换能器，再将另一端旋入发射换能器；
- 连接发射换能器的连接插头，记录信号源的时间读数 t ；
- 换用不同长度、不同材质的介质棒，重复上述步骤，记录每组的长度 L 和时间 t 。

6 实验数据处理

6.1 共振干涉法测量空气中声速

实验前后测得谐振频率分别为 37058 Hz 与 37060 Hz, 计算平均频率为 37059 Hz; 测得温度分别为 25.6 °C 与 25.5 °C, 计算平均温度为 25.55 °C。

表 1 共振干涉法振幅最大信号位置

组别	1	2	3	4	5	6
L_0 / cm	0.832	1.190	1.656	2.126	2.598	3.074
组别	7	8	9	10	11	12
L_0 / cm	3.548	4.002	4.480	4.948	5.404	5.890

振幅最大信号位置 L_0 的测量结果如上表所示。根据共振干涉法的原理, 使用最小二乘法通过公式 $L_0 = kn + b$ 进行拟合, 其中 k 为半波长, b 为从非第一个驻波开始测量造成的偏移量。拟合曲线如下图所示:

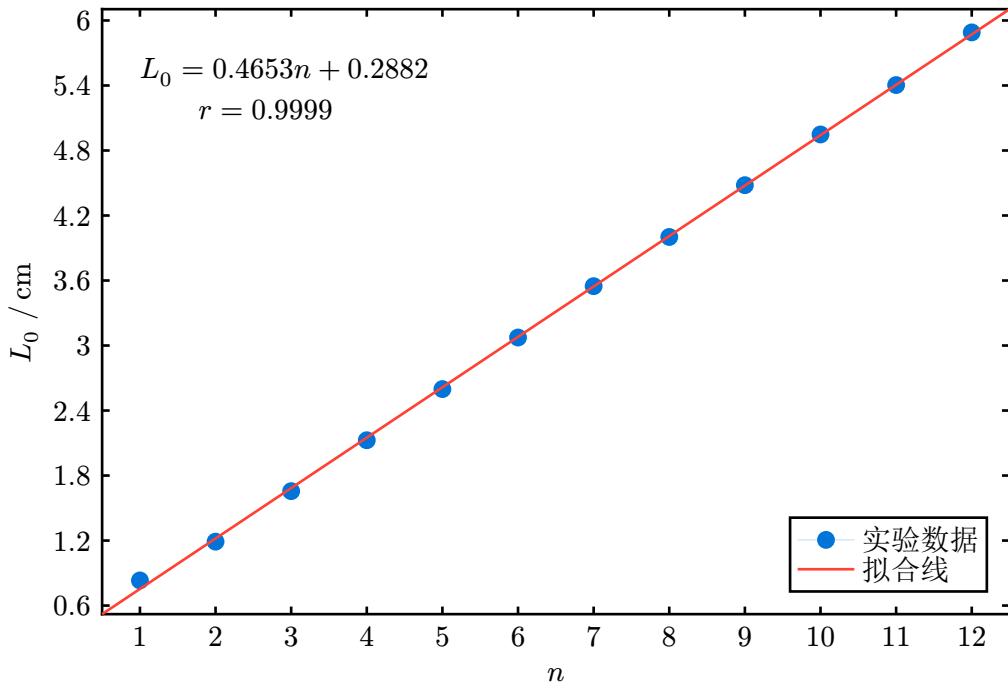


图 1 共振干涉法波长拟合

由拟合结果可计算出波长 λ 及其标准差为:

$$\begin{cases} \lambda = 2k = 0.9305 \text{ cm} \\ \sigma_\lambda = \lambda \sqrt{\frac{1/r^2 - 1}{N-2}} = 5.1 \times 10^{-3} \text{ cm} \end{cases} \quad (6.8)$$

将波长、频率代入式 (3.4) 可得声速及其不确定度:

$$\begin{cases} v = \lambda \cdot f = 0.9305 \text{ cm} \times 37059 \text{ Hz} = 344.8 \text{ m/s} \\ u_v = v \sqrt{\left(\frac{\sigma_\lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{u_f}{f}\right)^2} = 1.9 \text{ m/s} \\ \frac{u_v}{v} = 0.54\% \end{cases} \quad (6.9)$$

将当前温度代入式 (3.2) 可得理论声速:

$$v = 331.45 \text{ m/s} \times \sqrt{1 + 25.55/273.15} = 346.6 \text{ m/s} \quad (6.10)$$

误差约为 0.52%，说明实验结果与理论值相符较好。

6.2 相位比较法测量水中声速

实验前后测得谐振频率分别为 35730 Hz 与 35738 Hz，计算平均频率为 35734 Hz。

表 2 相位比较法半波长差值距离

组别	1	2	3	4	5	6	7	8
L_0 / cm	0.848	2.916	5.160	7.398	9.602	11.530	13.484	15.644

半波长差值距离 L_0 的测量结果如上表所示。根据相位比较法的原理，使用最小二乘法通过公式 $L_0 = kn + b$ 进行拟合，其中 k 为半波长。拟合曲线如下图所示：

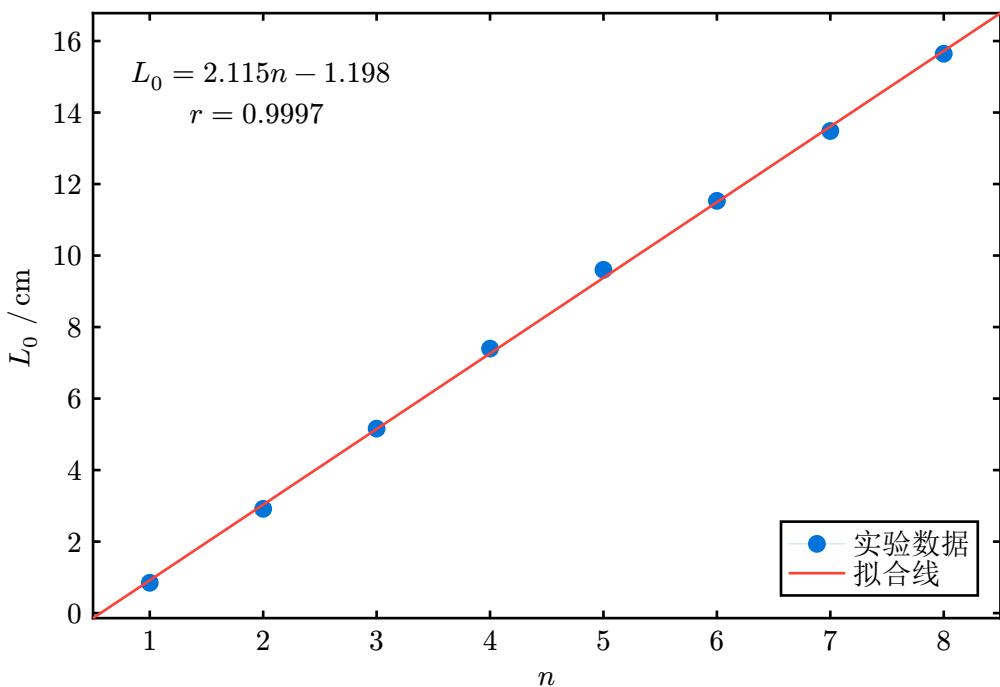


图 2 相位比较法波长拟合

由拟合结果可计算出波长 λ 及其标准差为：

$$\begin{cases} \lambda = 2k = 4.232 \text{ cm} \\ \sigma_\lambda = \lambda \sqrt{\frac{1/r^2 - 1}{N-2}} = 4.2 \times 10^{-2} \text{ cm} \end{cases} \quad (6.11)$$

将波长、频率代入式 (3.4) 可得声速及其不确定度：

$$\begin{cases} v = \lambda \cdot f = 4.232 \text{ cm} \times 35734 \text{ Hz} = 1512 \text{ m/s} \\ u_v = v \sqrt{\left(\frac{\sigma_\lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{u_f}{f}\right)^2} = 15 \text{ m/s} \\ \frac{u_v}{v} = 0.99\% \end{cases} \quad (6.12)$$

6.3 时差法测量固体中声速

实验中使用了不同长度和材质的介质棒，测量与计算结果如下表所示：

表 3 时差法测量固体中声速

组别	1	2	3	4
介质	黄铜		玻璃	
长度 / cm	24.688	20.745	26.003	21.984
时间 / μs	99	86	149	129
声速 / m/s	2494	2412	1745	1704

由表中数据可得，黄铜棒与金属棒中声速分别为2453 m/s与1725 m/s。通过对比可以看出，金属棒的声速明显高于非金属棒，这与材料的密度、弹性模量等因素有关。

7 思考与讨论

7.1 定性分析共振法测量时，声压振幅极大值随距离变长而减小的原因

在共振干涉法中，声波在空气中传播过程中不可避免会发生能量损耗，主要体现在：

- **空气吸收：**声波传播时，部分能量转化为热能被空气吸收，尤其是在高频声波传播中吸收更明显，导致声波振幅随传播距离衰减；
- **声波扩散：**实际声源发出的不是完全理想的平面波，而是近似球面波，传播过程中声能向外扩散，造成局部声压随距离衰减。

因此，在远离声源的区域，叠加形成的驻波的声压振幅极大值也随之减小。

7.2 声速测量中驻波法、相位法、时差法有何异同？

方法	驻波法	相位法	时差法
原理	利用驻波波节间距计算波长，结合频率求声速	比较发射与接收波的相位差变化测波长，结合频率求声速	直接测量声波传播时间与路径长度，计算声速
适用介质	主要用于气体、液体	主要用于液体	固体、液体、气体均适用
精度	中等，需要识别干涉极值点	高，需要示波器观察李萨如图形变化	高，适合短时间内高精度测量

7.3 各种气体中的声速是否相同，为什么？

不同气体中的声速一般不相同。

- 单原子气体如氦： $\gamma \approx 1.66$
- 双原子气体如氮、氧： $\gamma \approx 1.4$
- 多原子气体如二氧化碳： $\gamma \approx 1.3$

同时， M 也依赖于气体的分子结构和摩尔质量。因此在温度相同时，由式(3.1)可知，由于 γ 和 M 的差异导致不同气体中声速不同。

8 结论

本实验通过使用压电陶瓷超声换能器，采用驻波法、相位法和时差法等多种方法测量了超声波不同介质中的传播速度。实验结果分别得到了空气中声速为 $344.8(19)$ m/s，水中声速为 $1512(15)$ m/s，黄铜棒中声速为 $2453(41)$ m/s，玻璃棒中声速为 $1725(21)$ m/s。实验结果与理论值相符较好。

参考文献

- [1] 《声速测量实验讲义》. 2025 年.
- [2] 张增明, 大学物理实验, 第 1 版 本. 北京: 高等教育出版社, 2024.

附录

1. 液振频率 $f(\text{Hz})$	37058	37060	1824000048	能透飞
室温 $T(\text{°C})$	25.6	25.5		
$L_0(\text{cm})$	0.832	1.1 ⁹⁰ 1.656	2.126	2.598 3.074
	3.548	4.002	4.480	4.948 5.404
				5.890
2. 液振频率 $f(\text{Hz})$	35730	35738		
室温 $T(\text{°C})$				
$L_0(\text{cm})$	0.848	2.916	5.160	7.398 9.602
				11.530 13.484
				15.644
3. ① 薄铜片 1 L (cm)	24.686	24.690	24.688	
t (ms)	99			
② 铜锌 2 L	20.746	20.744	20.746	
t	86			
③ 铜片 1 L	26.004	26.004	26.002	
t	149			
④ 玻璃片 2 L	21.984	21.982	21.986	
t	129			

实验原始数据