



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

大学物理-基础实验 | 实验报告

姓名

学号

班级

日期

声速测量

1 实验背景

- 声波是一种能够在所有物质中 (除真空外) 传播的纵波。
- 应用: 频率高于 20 kHz, 称为超声波。超声波的传播速度, 就是声波的传播速度。超声波具有波长短, 易于定向发射等优点, 因此在超声波段进行声速测量比较方便。在水下通讯、生物工程、超声波诊断、牙科和碎石诊疗等工业、农业、军事、医疗等方面具有非常多的应用。
- 实验意义: 超声波在媒质中的传播速度与媒质的特性及状态等因素有关。因而通过媒质中声速的测定, 可以了解媒质的特性或状态变化, 如声波定位、探伤、测距、测流体流速、测量弹性模量、测量气体或溶液的浓度、比重以及输油管中不同油品的分界面等等, 在无损检测、探伤、流体测速、定位等声学检测中声速的测量尤为重要。

2 实验目的

本实验中带研究的问题有:

- (1) 测量压电陶瓷换能器的谐振频率;
- (2) 用驻波法和相位比较法测量气体、液体中的声速;
- (3) 用时差法测量固体中的声速。
- (4) 熟练实验数据处理: 最小二乘法拟合, 进行不确定度分析。

3 实验原理

声波在理想气体中的传播速度

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

式中 γ 是气体的定压比热容和定容比热容之比, R 是普适气体常量, M 是气体的摩尔质量, T 是热力学温度。在摄氏温度 $t^{\circ}\text{C}$ 时的声速 (其中 0°C 干燥理想空气声速 $v_0 = 331.45\text{m/s}$)

$$v_t = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.5}}$$

3.1 利用声速与频率、波长的关系测量

根据波动理论, 声波各参量之间的关系为

$$v = \lambda \cdot f$$

在实验中, 可以通过测定声波的波长 λ 和频率 f 求声速。声波的频率 f 等于声源的电激励信号频率, 该频率可由数字频率计测出, 或由低频信号发生器上的频率直接给出, 而声波的波长 λ 则常用共振干涉法 (驻波假设下) 和相位比较法 (行波近似下) 来测量。

共振干涉法 利用 S1, S2 两个压电换能器, S1 前进波和 S2 反射波在 S1 和 S2 之间往返反射, 相互干涉叠加, 发生共振, 形成“驻波”, 声场中将会形成稳定的强度分布, 在示波器上观察到的是这两个相干波在 S2 处合成振动的情况。根据声学理论, 在声场中空气质点位移为波腹的地方, 声压最小; 而空气质点位移为波节的地方, 声压最大。连续改变距离 L , 在示波器上可观察到, 声压波幅将在最大值和最小值之间呈周期性变化, 相邻两次声压波幅极大值所对应的距离的变化即为半波长。所以有:

$$\frac{1}{2}n\lambda = \Delta L_{n-1} = |L_{n+1} - L_1|, \lambda_i = \Delta L_{i+2} = |L_{i+2} - L_i|$$

记录距离的变化, 即可求出波长。

相位比较法 实际上, 在发射器 (声源处) 和接收器 (刚性平面处) 之间存在的是驻波与行波的叠加。当发射器与接收器之间有相位差, 可通过李萨如图形来观察, 改变发射波和接收波之间的相位差, 示波器上的图形也随 L 不断变化。当改变半个波长 $\Delta L = \frac{\lambda}{2}$ 时

$$\Delta\phi = \pi$$

随着振动的相位差从 $0 - \pi$ 的变化, 李萨如图形从斜率为正的直线变为椭圆, 再变到斜率为负的直线。因此, 每移动半个波长, 就会重复出现斜率符号相反的直线, 这样就可以测得波长。代入公式即可求得声速。

3.2 利用声波传播距离和传播时间计算声速: 时差法

将脉冲调制的电信号加到发射换能器上, 声波在媒质中传播, 从信号源经过时间 t 后, 到达距离为 L 处的接收换能器, 那么可以用以下公式求出声波在媒质中传播的速度。那么可以 $v = \frac{L}{t}$ 求出声波在媒质中传播的速度

4 实验仪器

SV5 型声速测量仪 (主要部件包括信号源和声速测试仪 (含水槽)), 双踪示波器, 非金属 (有机玻璃棒), 金属 (黄铜棒), 游标卡尺等。

5 实验步骤

1. 连接调试好实验装置。
2. 在发射面 S1 和接受面 S2 之间保持一定间距的情况下, 观察接收波的电压幅度变化, 调节正弦信号频率, 当在某一频率点处电压幅度最大时,
3. 由近而远或由远而近改变接收器 S2 的位置, 逐个记下振幅最大的波腹的位置共 12 个位置点
4. 再次连接调试好实验装置, 切换至”X-Y” 模式观察李萨如图形。
5. 改变发射器 S2 位置, 当李萨如图形为正负直线时, 记录此刻发射器的位置。测得 8 组位置数据。
6. 用游标卡尺测量不同规格的有机玻璃棒与黄铜棒的长度。
7. 重新连接实验装置, 依次将固体棒接入装置, 记录信号源的时间读数。
8. 关闭电源整理仪器, 处理实验数据。

6 测量记录

室温 28.5°C. 谐振频率 37146Hz.

序号	1	2	3	4	5	6
距离 d/cm	29.384	28.990	28.432	27.968	27.460	27.010
序号	1	2	3	4	5	6
距离 d/cm	26.550	26.076	25.604	25.120	24.634	24.306

表 1: 空气中声速测量

序号	1	2	3	4	5	6
距离 d/cm	23.564	21.366	19.186	16.834	14.628	13.030
序号	1	2	3	4	5	6
距离 d/cm	11.186	9.164	7.060	4.950	2.720	0.728

表 2: 水中声速测量

	玻璃		铜棒	
长度 l/cm	23.050	27.044	18.010	25.992
传播时间 t/us	133	153	56	84

表 3: 固体声速

7 数据处理与讨论

7.1 共振干涉法

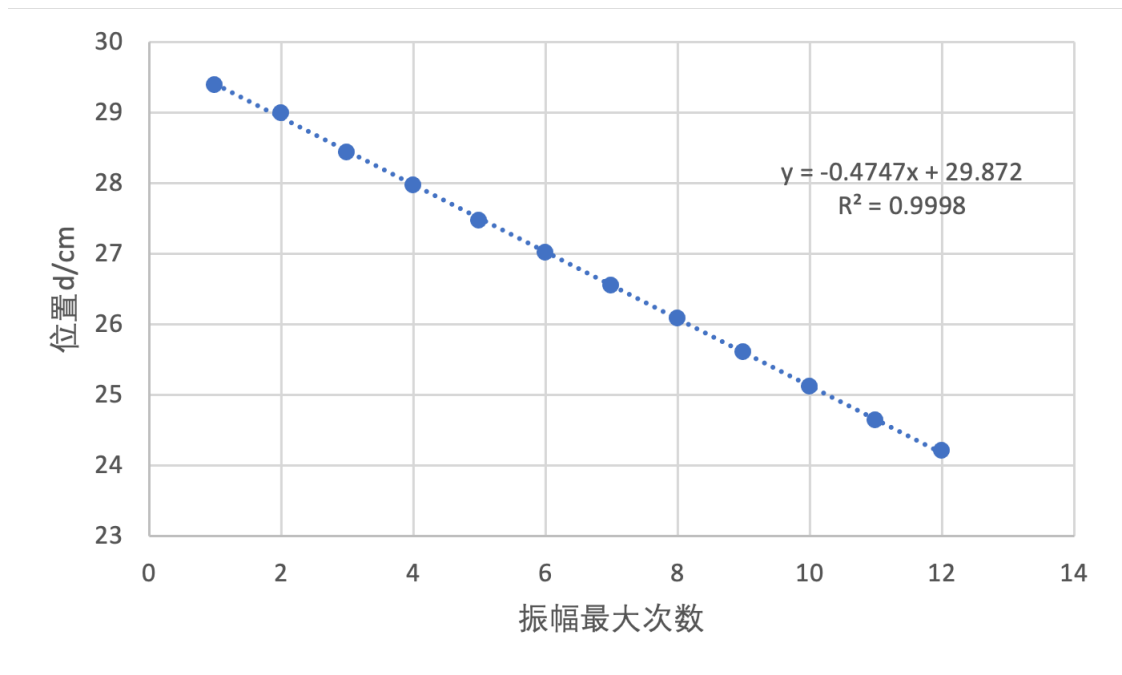


图 1: 空气中声速

直线的方程为

$$y = -0.4747x + 29.872$$

方程的斜率为半波长，解得

$$\lambda = 2 \times 0.4747 = 0.949\text{cm}$$

计算声速为

$$v = \lambda \cdot f = 0.949 \times 10^{-2} \times 37146 = 352.5\text{m/s}$$

由不确定度计算公式

$$\sigma_{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{1}{r^2} - 1\right) / (n - 2)} = 0.0051\text{ cm}$$

B 类不确定度为

$$\Delta_B = \sqrt{\Delta_{\text{仪}}^2 + \Delta_{\text{估}}^2} = \sqrt{0.02^2 + 0.01^2} = 0.02\text{mm}$$

查表得 $t_{0.95} = 2.20$, 游标卡尺均匀分布 C 取 $\sqrt{3}$ 。延伸不确定度为

$$U_\lambda = \sqrt{(t_{0.95} \frac{\sigma_\lambda}{\sqrt{n}})^2 + (K_p \frac{\Delta_B}{C})^2} = 0.003\text{cm}, P = 0.95$$

在频率变化较小时, 示波器振幅变化不明显, 取人的估计误差为 3Hz, 仪器误差为 0.001Hz, 正态分布 C 为 3。谐振频率的不确定度为

$$U_f = K_p \frac{\Delta_{Bf}}{C} = K_p \frac{\sqrt{\Delta_{\text{仪}}^2 + \Delta_{\text{估}}^2}}{C} = 1.97 \text{ Hz}, P = 0.95$$

由不确定度合成公式

$$\frac{U_v}{v} = \sqrt{(\frac{U_\lambda}{\lambda})^2 + (\frac{U_f}{f})^2} = 0.003, P = 0.95$$

声速 v 的延伸不确定度为

$$U_v = 352.5 \times 0.003 = 1.1\text{m/s}$$

故声速 v 为

$$v = (352.5 \pm 1.1) \text{ m/s}$$

误差分析

实验温度下声速的理论值 v_t

$$v_t = v_0 \sqrt{\frac{t}{t_0} + 1} = 331.45 \times \sqrt{\frac{28.5}{273.15} + 1} \text{ m/s} = 348.4 \text{ m/s}$$

实验测得声速相对误差为 1.0% 接近理论结果。

- (1) 寻找谐振频率时, 微调频率, 示波器上振幅变化不明显, 存在误差。
- (2) 由于齿轮只能单向扭动, 难以准确判断振幅的最大位置。

7.2 相位比较法

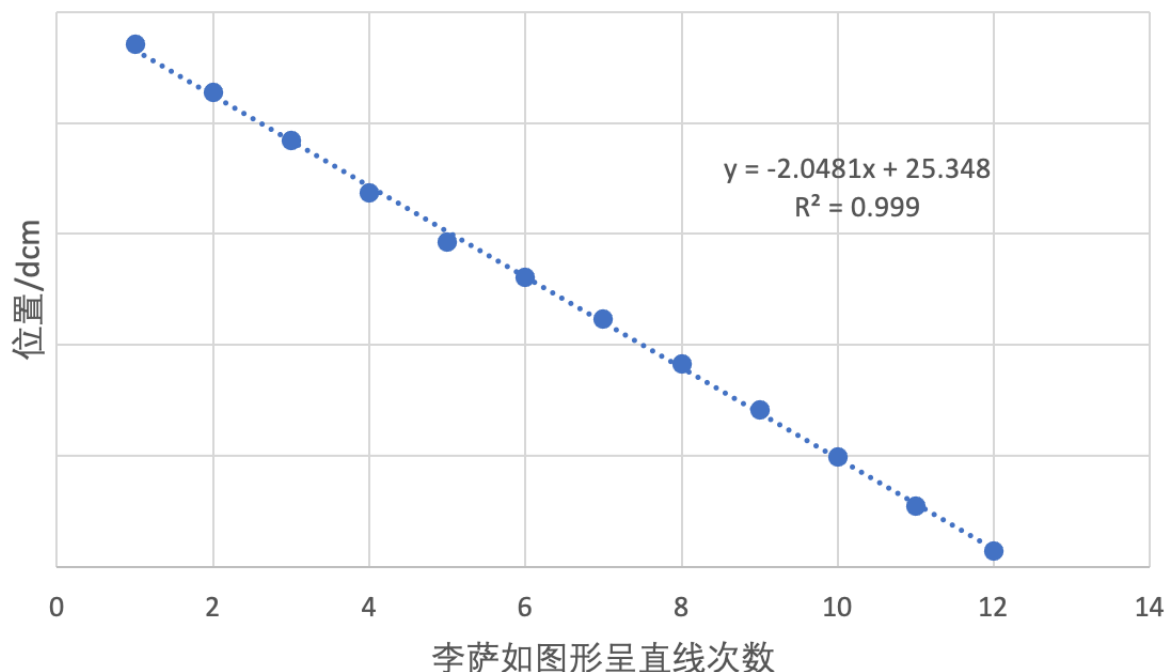


图 2: 水中中声速

直线的斜率为半波长，故

$$\lambda = 2 \times 2.048 = 4.096$$

水中的声速为

$$v = \lambda \cdot f = 4.096 \times 10^{-2} \times 37146 = 1521 \text{m/s}$$

讨论 实验过程中有两组数据 (序号 4,5), 与趋势有一定偏差, 因此多测了几组数据, 最终测的声速为 1521m/s。查得 28°C 时水中的声速为 1505m/s, 误差为 1%, 比较接近。

在实验过程中可能的误差

- (1) 实验中的水可能存在杂质, 与标准声速有一点偏差
- (2) 目测示波器中的李萨如图形无法准确判断呈直线, 存在人为误差。
- (3) 声波在水中衰减较小, 可能产生多次反射叠加, 使得不确定度变大。

注意: 为了避免齿轮空转, 滚轮只能单向扭动。

7.3 时差法

计算玻璃棒中的声速

$$v = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{27.044 - 23.050}{20} \times 10^4 = 1997 \text{m/s}$$

铜棒中的声速

$$v = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{25.992 - 18.010}{28} \times 10^4 = 3508 \text{ m/s}$$

实验中时间和材料有限，只测量了两根不同长度的铜棒和玻璃棒，数据偏少，存在一定误差，不确定度较高。

8 思考题

8.1 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

共振法测量声速用了声波反射形成驻波，共振管中的声波在传播过程中能量逐渐扩散，被接收器吸收，与空气中的粒子相互作用这些作用会导致声波的能量逐渐损失，距离越长，能量损失越多，因此振幅极大值减小。

并且，高频的声波传播过程中的衰减更快，实验中用的声波频率高，容易发生损耗。

8.2 声速测量中驻波法、相位法、时差法有何异同？

一、不同点：

(1) 原理：驻波法、相位法所利用的是发射波和返回波形成驻波，测出波长后乘以谐振频率来计算波速。驻波法和相位法需要使用示波器。时差法是利用匀速运动公式，测出传播距离与时间做比值得到声速。

(2) 波源：驻波法、相位法使用为连续波，而时差法为脉冲波

(4) 观察指标不同。驻波法是通过观察声压振幅达到最大值。相位法是通过观察李萨如图形呈直线确定周期。时差法是直接观察信号发生器上的时间显示。

二、相同点：

(1) 仪器相同：驻波法、相位法都要用示波器、声速测量仪。

(2) 原理：都利用了压电陶瓷的正/逆压电效应。

8.3 各种气体中的声速是否相同，为什么？

不同气体中的声速传播一般不同，由公式

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

可知理想气体的声速取决于 γ ($\gamma = \frac{c_p}{c_v}$) 和气体的摩尔质量 M ，不同气体的 M 和 γ 一般不同。并且，考虑气体温度，气体中水蒸气浓度等都会影响声速。