

声速测量

实验报告

卜一楠 PB22071444

PHYS1008A 教室:1322 座位号:6

2023 年 6 月 5 日

摘要

本实验主要训练使用示波器和声速测量仪来测量声速的实验方法。主要内容包括:

1. 利用共振干涉法（驻波假设下）测量声速。
2. 利用相位比较法（行波近似下）测量声速。
3. 利用时差法测量声速。
4. 实验数据处理与误差分析。

背景介绍

1. 性质：声波是一种能够在所有物质中（除真空外）传播的纵波。
2. 特点：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。
3. 实际应用：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。

目录

1 实验目的	2
2 实验原理	2
2.1 声速与频率波长的关系	2
2.2 共振干涉法（驻波假设下）法测声速	2
2.3 相位比较法（行波近似下）测量声速	2
2.4 利用声波传播距离和传播时间计算声速	3
3 实验器材	3
4 实验步骤	3
5 实验结果与分析	4
5.1 共振干涉法（驻波假设下）测量声速	4
5.2 相位比较法（行波近似下）	6
5.3 时差法测量固体中的声速	7
5.3.1 金属棒	7
5.3.2 有机玻璃棒	8
6 思考题	8
7 致谢	9
8 附录	9

1 实验目的

- (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。

2 实验原理

2.1 声速与频率波长的关系

根据波动理论，声波各参量之间的关系有：

$$v = \lambda f$$

其中， v 为波速， λ 为波长， f 为频率。因此，实验中可以通过测量声波的波长和频率求声速。

2.2 共振干涉法（驻波假设下）法测声速

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。故有：

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

2.3 相位比较法（行波近似下）测量声速

利用压电换能器，当 S1 发出的平面超声波通过媒质到达接收器 S2，发射端 S1 接示波器的 Y 输入端，接收器 S2 接至示波器的 X 输入端。发射器与接收器之间有相位差，可通过李萨如图形来观察。移动 S2，改变 S1 和 S2 之间的距离 L ，相当于改变了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。显然，当 S1、S2 之间距离改变半个波长 $\Delta L = \lambda/2$ ，则 $\Delta\varphi = \pi$ ，每当相位差改变 2π 时，示波器上的李萨如图形相应变化一个周期。

随着振动的相位差从 0 到 π 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 $\lambda/2$ ，就会重复出现斜率符号相反的直线，这样就可以测得波长 λ 。代入公式即可求得声速。

2.4 利用声波传播距离和传播时间计算声速

利用时差法，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，从信号源经过时间后，到达距离为处的接收换能器，那么可以用以下公式求出声波在媒质中传播的速度。

$$v = \frac{L}{t}$$

因此测量媒质长度 L 与传播时间 t ，代入公式即可求得声速。

3 实验器材

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

4 实验步骤

1. 调整仪器时系统处于最佳工作状态: 按照讲义的要求接好线，S1 接信号发生器，S2 接示波器 Y 轴，调节 S1、S2 使两端面相互平行，且与移动方向相垂直。
2. 测量谐振频率 f （谐振频率范围 $f = 34 \sim 38kHz$ ）: 在 S1 和 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，此频率即为压电换能器 S1、S2 的相匹配频率点，记下该谐振频率 f 。
3. 共振干涉法（驻波法）测量空气中的波长和声速:
 - (1) 当 S1 和 S2 相距 $5cm$ 以上时，转动鼓轮移动 S2，观察波的干涉现象，当示波器上出现振幅最大信号时，记下 S2 的位置 L_0 。
 - (2) 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。
 - (3) 用最小二乘法处理数据，计算波长和声速及其不确定度（ $P=0.95$ ）。
4. 记下室温 t ，计算理论值 v_t ，与测量值比较。
5. 相位比较法测量水中的波长和声速:
 - (1) 按照讲义的要求接好实验装置，并且调节示波器直到示波器上出现椭圆或斜直线的李萨如图形。
 - (2) 转动鼓轮移动 S2，观察图形，依次测出李萨如图形斜率正、负变化的直线出现时 S2 的位置 L_i ，共记录 8 个位置值。
 - (3) 作图法处理数据，计算水中的波长和声速。
6. 时差法测量有机玻璃棒和黄铜棒中的声速:
 - (1) 接好实验装置，将专用信号源上的“测试方法”调至“脉冲波”的位置，“声速传播媒质”按测试材质的不同，调至“非金属”或“金属”的位置。

- (2) 依次将固体棒接入装置，测量时间，记录信号源的时间读数。
- (3) 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. 关闭电源，整理仪器。

5 实验结果与分析

5.1 共振干涉法（驻波假设下）测量声速

谐振频率 $f = 37224Hz$ ，室温 $T = 24.1^{\circ}C$

编号	1	2	3	4	5	6
d(cm)	13.534	14.020	14.470	14.950	15.440	15.904
编号	7	8	9	10	11	12
d(cm)	16.400	16.850	17.310	17.804	18.296	18.610

对上表中的数据采用 origin 进行线性拟合后：记斜率为 k，则有：k=0.46917

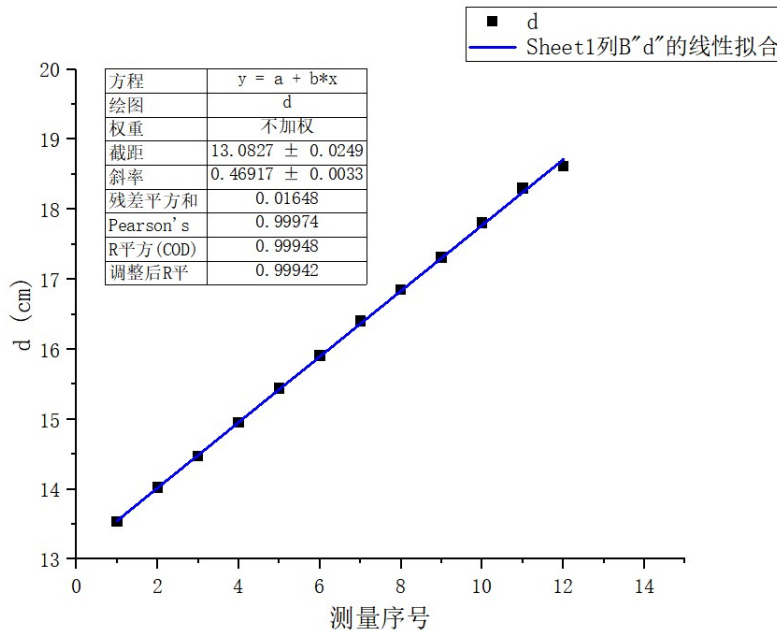


图 1: 线性拟合曲线

直线方程为： $y=0.46917x+13.0827$

由实验原理得，直线的斜率为半波长。于是有：

$$\lambda = 2 \times 0.46917cm = 0.93834cm$$

由此计算得声速：

$$v = \lambda f = 0.93834 \times 10^{-3} \times 37224m/s \approx 349.29m/s$$

对 λ 的单个测量值如下:

编号	1	2	3	4	5	6
$\lambda(cm)$	0.486	0.450	0.480	0.490	0.464	0.496
编号	7	8	9	10	11	
$\lambda(cm)$	0.450	0.460	0.494	0.492	0.314	

由 ORIGIN 拟合结果, $r^2 = 0.99948$

由公式, 波长 λ 标准差为:

$$\sigma_{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{1}{r^2} - 1\right) / (n - 2) \cdot m} \approx 0.00721cm$$

斜率的延伸不确定度为:

$$\begin{aligned} U_{k,0.95} &= t_P \cdot |k| \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{r^2} - 1\right) / (n - 2)} = 1.96 \times 0.46917 \times 0.00721cm \\ &= 0.0066305 cm, P = 0.95 \end{aligned}$$

截距 b 的延伸不确定度:

$$\begin{aligned} U_b &= U_{k,0.95} \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{12} n^2}{12}} \\ &= 0.048800cm, P = 0.95 \end{aligned}$$

波长为斜率的两倍:

$$\lambda = 2k = 0.93834cm,$$

因此, 波长 λ 的延伸不确定度为:

$$\begin{aligned} U_{\lambda,0.95} &= \sqrt{(2U_{k,0.95})^2} \\ &= 0.013261cm, P = 0.95 \end{aligned}$$

再计算频率的不确定度。谐振频率仅有 B 类不确定度。信号发射器的最大允差 $\Delta_{\text{仪}} = 0.001Hz$ 。由于当频率调节至十位时, 示波器上的波形变化已经不太明显, 因此有 $\Delta_{\text{估}} = 10Hz$ 。因此有:

$$\Delta_{B,f} = \sqrt{\Delta_{\text{仪}}^2 + \Delta_{\text{估}}^2} = \sqrt{10^2 + 0.001^2} \approx 10Hz$$

取 $k_{0.95} = 1.960$, 置信系数 $C = 3$, 则频率的不确定度为:

$$U_{f,0.95} = K_{0.95} \frac{\Delta_{B,f}}{C} = 1.96 \times \frac{10}{3} = 6.53Hz$$

由不确定度传递公式, 可计算波速的不确定度为:

$$\begin{aligned}U_{f,0.95} &= v \sqrt{\left(\frac{U_{\lambda,0.95}}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{U_{f,0.95}}{f}\right)^2} \\&= 349.29 \times \sqrt{\left(\frac{0.013261}{0.93834}\right)^2 + \left(\frac{6.53}{37224}\right)^2} \text{ m/s} \\&= 4.94 \text{ m/s}, P = 0.95\end{aligned}$$

因此，计算得声速的最终结果为：

$$v = (349.29 \pm 4.94) \text{ m/s}$$

误差分析

计算实验温度下空气中声速的理论值为：

$$v_t = v_0 \sqrt{\frac{t}{273.15} + 1} = 331.45 \sqrt{\frac{24.1}{273.15} + 1} \text{ m/s} = 345.76 \text{ m/s}$$

相对误差为：

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{|v - v_t|}{v_t} = \frac{|349.29 - 345.76|}{345.76} \\&= 0.010205.\end{aligned}$$

实验过程中引起误差的原因有：

1. 在观察示波器寻找振幅最大值时，由于滚轮只能单向扭动，这导致滚轮移动容易超过最大位置，导致对位置的测量误差较大。
2. 在观察示波器寻找振幅最大值时，电压到达最大值后变化幅度较小，难以判断电压是否到达最大值，从而导致对位置的测量误差较大。
3. 在调节谐振频率时，在调到十位以后的调节在示波器上电压的变化肉眼难以观察，引起估计误差较大，导致频率不确定度较大。
4. 空气中的水蒸气对声速也有一定影响。

5.2 相位比较法（行波近似下）

表 1: 相位比较法测量液体中的声速原始数据

实验组数 i	1	2	3	4	5	6	7	8
位置 L	12.440	14.720	16.910	19.118	21.380	23.704	26.000	28.276

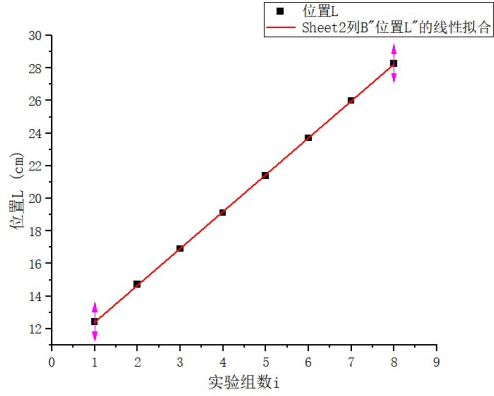


图 2: 拟合图像

	A	B
1	方程	$y = a + b*x$
2	绘图	位置L
3	权重	不加权
4	截距	10.1455 ± 0.04135
5	斜率	2.26067 ± 0.00819
6	残差平方和	0.0169
7	Pearson's r	0.99996
8	R平方 (COD)	0.99992
9	调整后R平方	0.99991

图 3: 拟合结果

根据图中最小二乘法的结果，拟合直线的表达式为： $L = 2.2607n + 10.1455$ 。且相关系数与 1 相近，与实验原理相符合。因此，水中声波的波长 $\lambda = 2 \times 2.2607 = 4.5214cm$

可计算得， $v_{水} = 1683.0m/s$

误差分析

实验过程中主要有以下因素引起误差：

- (1) 实验中使用的水不是纯水，其中混有少量杂质导致误差偏大；
- (2) 在使用游标卡尺的读数时，由于游标卡尺倾斜放置，导致目光难以正对读数，存在一定误差。
- (3) 观察李萨如图形的时候不能精确的定成直线时再读数，导致产生一定的误差。
- (4) 示波器仪器本身存在一定误差。

5.3 时差法测量固体中的声速

5.3.1 金属棒

表 2: 时差法测量黄铜棒中的声速原始数据

$t(\mu s)$	100	89	90	101
$l(cm)$	24.780	20.790	20.786	24.788

数据处理:

其中，第一组和第四组的金属棒规格相同。

$$v_1 = \frac{l_1 - l_2}{t_1 - t_2} = 3627.3m/s, v_2 = \frac{l_1 - l_3}{t_1 - t_3} = 3994m/s,$$

$$v_3 = \frac{l_4 - l_2}{t_4 - t_2} = 3331.7m/s, v_4 = \frac{l_4 - l_3}{t_4 - t_3} = 3638.3m/s,$$

$$\Rightarrow \bar{v}_{\text{Cu}} = \frac{1}{4}(v_1 + v_2 + v_3 + v_4) = 3647.8\text{m/s}$$

5.3.2 有机玻璃棒

表 3: 时差法测量有机玻璃棒中的声速原始数据

组别	1	2	3
$t(\mu\text{s})$	150	150	135
$l(\text{cm})$	26.000	26.002	21.976

数据处理:

其中, 第一组和第二组的有机玻璃棒规格相同。因此, 将第一组与第三组、第二组与第三组分别做差, 有:

$$v_1 = \frac{l_1 - l_3}{t_1 - t_3} = \frac{(26.000 - 21.976) \times 10^{-2}}{(150 - 135) \times 10^{-6}}\text{m/s} = 2682.7\text{m/s};$$

$$v_2 = \frac{l_2 - l_3}{t_2 - t_3} = \frac{(26.002 - 21.976) \times 10^{-2}}{(150 - 135) \times 10^{-6}}\text{m/s} = 2684.0\text{m/s}$$

$$\Rightarrow \bar{v}_{\text{glass}} = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) = 2683.4\text{m/s}$$

误差分析

在实验过程中有以下因素导致误差:

- (1) 用游标卡尺测量棒的长度时, 游标卡尺的读数有一定误差。
- (2) 实验用的黄铜棒、有机玻璃棒不纯, 且不同的黄铜棒、有机玻璃棒所含杂质以及杂质的分布也不相同, 会导致误差的产生。
- (3) 棒的长度种类较少, 所测得的数据偏少, 得到的结果偶然性与不确定性都较高。
- (4) 测量时间的仪器精度不够导致误差。
- (5) 不同棒与仪器咬合的程度不同, 存在一定误差。

6 思考题

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。

- (1) 声波在实际介质(实验中为干燥空气)中传播时, 由于扩散、吸收和散射等原因, 会随着离开声源的距离增加而逐渐减弱。又由于波动能量的大小表现为振幅的大小, 因此声波在传播过程中的能量损失就通过声压振幅的极大值随距离变长减小表现出来。

- (2) 本次实验使用的声波频率较高，根据声学知识，频率越高的声波在传播过程中更容易受空气影响，因此在本实验中传播路程增加时能量损失的现象更为明显。
- (3) 由于接收器的反射面不是理想的刚性平面，它对入射声波能量也有吸收。

2. 声速测量中驻波法、相位法、时差法有何异同？

不同点：

- (1) 记录数据方法不同：驻波法通过观察声压振幅达到最大值；相位法通过观察李萨如图形为直线时的周期变化；时差法直接观察信号发生器上的时间显示。
- (2) 原理不同：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。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。
- (3) 波的类型不同：驻波法、相位法用的是连续波，而时差法用的是脉冲波。
- (4) 使用的仪器不同：驻波法和相位法都要使用示波器，时差法不需要使用示波器。

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同。由理想气体中声速的计算式：

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

可知，理想气体中声速与气体的比热容比、摩尔质量有关，而这些参数是由气体的性质决定的。因此，不同气体的声速一般不同。

7 致谢

感谢中国科学技术大学物理实验教学中心和赵霞老师的指导！

8 附录

原始实验记录