

# 声速的测量：实验报告

襦科材 PB20030874 20 级 14 系 707 组 1 号台

2021 年 6 月 17 日

## 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

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：

$$\nu = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (1)$$

式中  $\gamma$  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。由式（1）可见，气体的温度和性质是影响空气中声速的主要因素。如果忽略空气中的水蒸气和其他夹杂物的影响，在标准状态下干燥的理想空气中的声速为：

$$\nu = \sqrt{\frac{\gamma RT_0}{M}} = 331.45(m \cdot s^{-1})$$

若同时考虑温度和空气中水蒸气的影响，校准后声速公式为：

$$\nu = 331.45 \sqrt{\left(1 + \frac{t}{273.15}\right) \left(1 + \frac{0.3192 p_w}{p}\right)} (m \cdot s^{-1}) \quad (2)$$

式中  $p_w$  为水蒸气的分压强， $p$  为大气压强。而  $p_w = p_s H$ ，其中  $p_s$  为测量温度下空气中水蒸气的饱和蒸气压（可以从饱和蒸气压和温度的关系表中查出）， $H$  为相对湿度，可以从干湿温度计上读出。

### 声速测量的实验方法

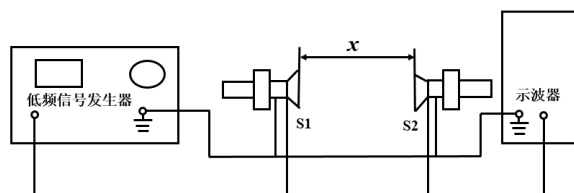
根据波动理论，在介质中传播的声波，波速、波长和频率之间的关系为：

$$\nu = \lambda * f \quad (3)$$

在实验中，可以通过测定声波的波长和频率求声速。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  $\lambda$  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。

### 1. 共振干涉法

实验装置原理如图，S1、S2 为压电换能器，S1 为声波发射源，S2 为声波接收器，当 S2 的接收表面直径较大时，将会反射部分和声源同频率的声波。入射波和反射波振动方向与频率相同而发生相干叠加，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。

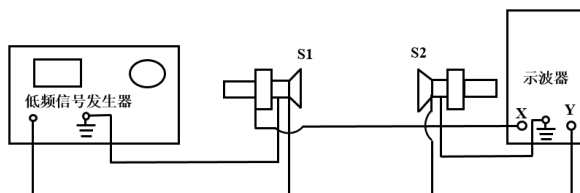


根据声学理论，在声场中空气质点位移为波腹的地方，声压最小；而空气质点位移为波节的地方，声压最大。由纵波的性质可以证明，当发生共振时，接收器 S2 反射端面位置近似为振幅的“波节”，此处位移为 0，接收到的声压信号最强。连续改变距离 L，示波器可观察到，声压波幅将在最大值和最小值之间呈周期性变化。

所以当 S1、S2 之间的距离变化量  $\Delta l$  为半波长  $\lambda/2$  的整数倍 n 时，出现稳定的驻波共振现象，声压最大，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。

### 2. 相位比较法

实际上，在发射器和接收器间存在的是驻波与行波的叠加。由于接收器的反射面不是理想的刚性平面，它对入射声波能量的吸收作用以及空气对声波的吸收作用促使声波振幅将随传播距离而衰减。所以，还可以通过比较声源处的声压的相位来测定声速。这称为相位比较法或行波法。



发射器与接收器之间有相位差，可通过李萨如图形来观察。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。

### 3. 时差法（脉冲法）

以上两种方法测量声速，是用示波器观察波峰和波谷，或者观察两个波的相位差，原理是正确的，但是读数位置不易确定。较精确测量声速是用声波时差法。它是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：

$$\nu = \frac{L}{t} \quad (4)$$

### 3 实验设备

SV5 型声速测量仪（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

### 4 实验步骤

#### 共振干涉法测量空气中的声波波长与声速

##### 测量谐振频率

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，即为谐振频率  $f$ 。

##### 开始测量

当 S1 和 S2 相距 5 cm 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  $L_0$ 。由近而远或由远而近改变接收器 S2 的位置，均可以观察到正弦波形发生周期性的变化，逐个记下振幅最大的波腹的位置共 12 个位置点。并用最小二乘法处理数据，计算波长和声速及其不确定度。

#### 相位比较法测量水中的波长和声速

在储液槽中装入水至刻度线，将换能器置于储液槽中，正确接线。令示波器置于“X-Y”垂直振动合成模式，此时可以看到示波器上出现椭圆或斜直线的李萨如图形。当 S1 和 S2 相距 5 cm 以上时，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。用作图法处理数据，计算水中的波长和声速。

#### 设计实验——用时差法测量有机玻璃棒和黄铜棒中的声速

正确接线，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。

分别测量三种不同长度的有机玻璃棒和黄铜棒，记录下录信号源的时间读数，此时显示的时间为从信号源发出脉冲信号到接收端接收所用的时间。测试棒的长度可用游标卡尺测量得到并记录长度  $L$ 。

使用作图法处理实验数据，计算出介质中的声速。

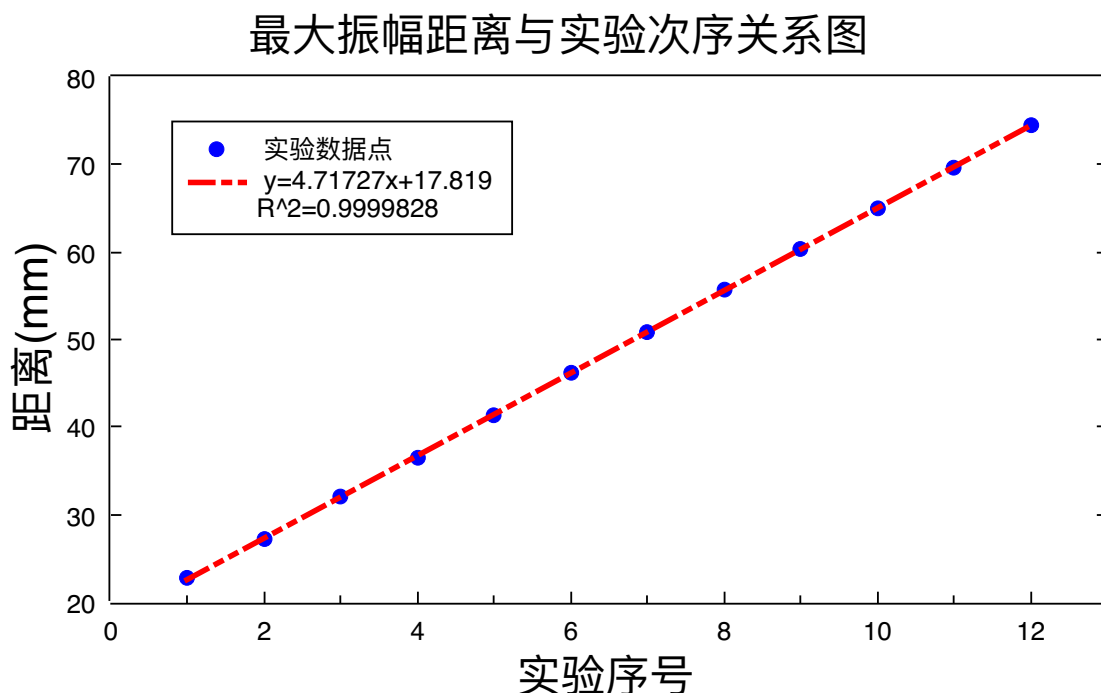
### 5 实验记录

实验数据附于报告最后

### 6 数据处理

共振干涉法

以声压波幅极大值出现的先后序号为 X 轴、 $L_1$  和  $L_2$  间隔距离为 Y 轴，作图，斜率即是空气中声波的半波长：



从图中可以看出，实验数据点基本分布在拟合直线左右，且相关系数  $R^2$  高达 0.9999828，表明实验数据相关性很强，可信度高。

斜率  $k$  的标准差：

$$\sigma_k = k \sqrt{\left(\frac{1}{R^2} - 1\right) / (n - 2)} = 4.71727 \sqrt{\left(\frac{1}{0.9999828} - 1\right) / (12 - 2)} = 0.0061866(mm)$$

斜率  $k$  展伸不确定度：

$$U_{0.95} = t_p \cdot \sigma_k = 2.23 \cdot 0.0061866 = 0.0137963(mm)$$

截距  $b$  标准差：

$$\sigma_b = \sqrt{x^2} \cdot \sigma_k = \sqrt{\frac{1^2 + 2^2 + 3^2 + 4^2 + 5^2 + 6^2 + 7^2 + 8^2 + 9^2 + 10^2 + 11^2 + 12^2}{12}} \cdot 0.0061866 = 0.045532$$

截距  $b$  展伸不确定度：

$$U_{0.95} = t_{0.95} \cdot \sigma_b = 2.23 \cdot 0.045532 = 0.1015382$$

根据波速、波长、频率计算公式计算得到：

$$v = 37062 \cdot 4.71727 \cdot 2/1000 = 349.663(m/s)$$

根据不确定度合成公式：

$$\left(\frac{U_v}{v}\right)^2 = \left(\frac{U_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{U_f}{f}\right)^2 \quad (5)$$

将频率不确定度记为 0，计算得到：

$$U_v = v * \sqrt{\left(\frac{U_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{U_f}{f}\right)^2} = 349.663 * \sqrt{\left(\frac{0.0137693}{4.71727}\right)^2 + \left(\frac{0}{37062}\right)^2} = 1.021(m/s)$$

最终结果：

$$v = 349.663 \pm 1.021(m/s) \quad (6)$$

根据校准后的声速公式 (2)，计算当前温度下的理论声速：

$$v = 331.45 \sqrt{\left(1 + \frac{25.4}{273.15}\right) * \left(1 + \frac{0.3192 * 3167.68 * 0.50}{101325}\right)} = 347.381(m/s)$$

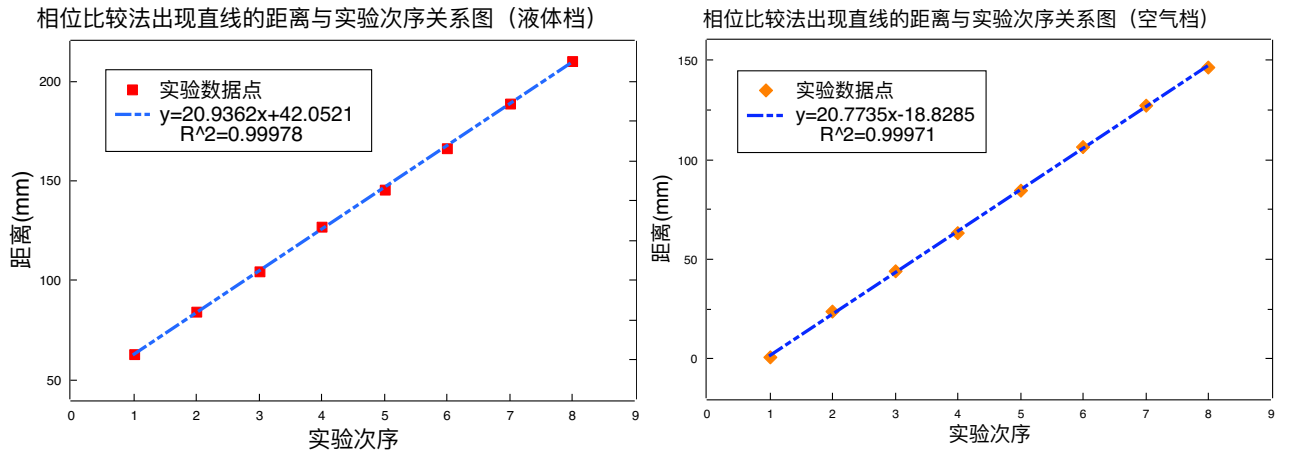
相对误差：

$$\varphi = \frac{349.663 - 347.381}{347.381} = 6.6 * 10^{-3}$$

从数据中可知，误差在实验设计允许的范围內。

### 相位比较法

以李萨茹图形出现斜率符号相反的直线的次序为 X 轴、对应的距离为 Y 轴，直线斜率即是声波的半波长：



从图中可以看出，实验数据点基本分布在拟合直线左右，且相关系数较大，表明实验数据线性相关程度较高，实验数据可信度较大。分别使用液体档位和空气档位计算声速如下：

$$v_{liquid/option} = 37062 * 20.9362 * 2/1000 = 1551.874(m/s)$$

$$v_{air/option} = 37062 * 20.7735 * 2/1000 = 1539.814(m/s)$$

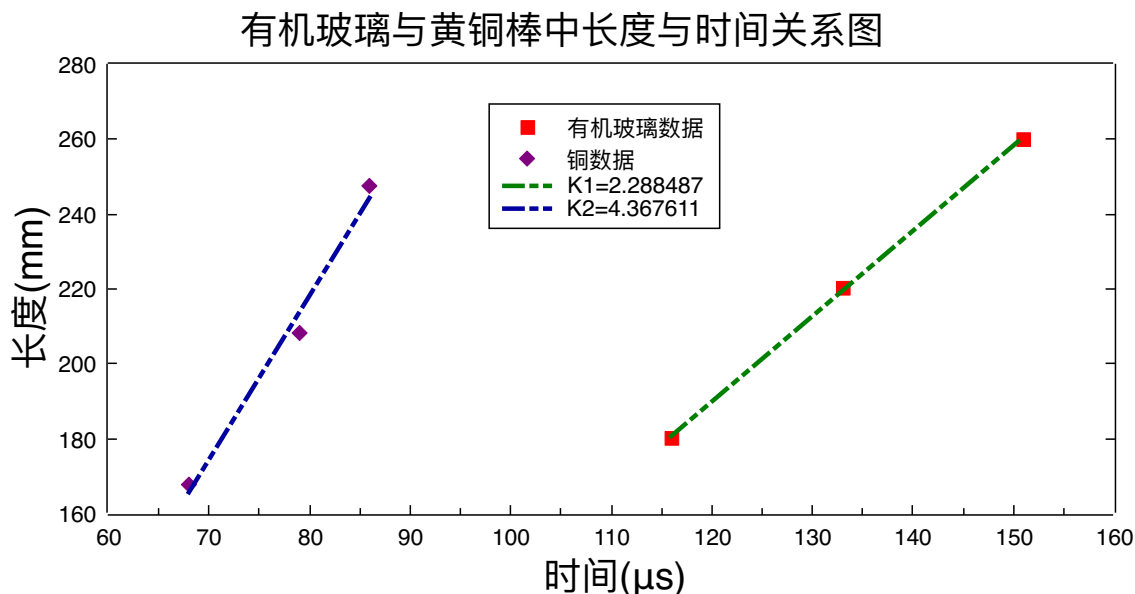
### 脉冲法

以时间为 X 轴、棒长度为 Y 轴作图，拟合直线斜率即是声速在对应介质中的值：

计算可得有机玻璃和黄铜中的声速如下：

$$v_{PMMA} = 2288.487(m/s)$$

$$v_{copper} = 4367.661(m/s)$$



## 7 误差分析

### 水中声速的测量

查询资料得知，在 20 度下的纯水中声速为 1482.9m/s，此后每温度升高一度，声速大概升高 4.6m/s。在实验条件 25.4 度下，计算可知声速应当是 1507m/s，与实验测量值 1551.874m/s 相差较大，原因分析如下：

第一，实验用水不是纯净水，而是含有一些杂质离子的自来水，振动能量可能在这些杂质周围传递较快，导致了测量值偏大的结果。

第二，实验时水不是完全静止的，在调节压电能量转换器时有所震荡，其中沿声波振动方向传递的水波会导致测量值偏大。

第三，由于声波能量在传递过程中会衰减，以致李萨茹图形中小短轴椭圆和直线随着实验的进行区别减小，导致实验人判断李萨茹图形是否是直线时有所延迟，波长偏大，测量值偏大。

此外，观察到使用空气档位和使用液体档位测量得到的声速差别较大。为什么相同的振动频率，在不同档位下测量到的声速不同？由于空气密度比水的密度小，可能是因为在液体档位下，实验仪器更灵敏，一些较为轻微的振动也计入，而空气档位下实验仪器较为迟钝，测量到的声速偏小。

### 黄铜棒中声速的测量

作出图像后观察到黄铜的实验数据点和拟合曲线偏差较大，可能是因为测量时未能将接口润滑剂涂抹均匀，也可能没有旋紧插头就读数。

## 8 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？

声波在传递过程中，能量不可避免的衰减导致振幅有所降低。

### 2. 声速测量中驻波法、相位法、时差法有何异同？

共振干涉法和相位比较法：都是利用声速与频率、波长的关系来测量声速，且给定频率。但共振法假设驻波干涉，通过两次振幅极值的位移差来获得波长值；相位比较法是通过比较波源与接收波的相位差来获得波长值。

脉冲法：时差法与以上两种方法不同，它不依赖于声波的形式，通过直接测量声波通过一段已知长度的介质所需的时间来计算声速，所以使用的是脉冲波。

### 3. 各种气体中的声速是否相同，为什么？

不同。首先，如果温度不同，显然会对气体中的声速造成影响；其次，由声速公式 (1) 可知，如果  $T$  相同、 $R$  相同，依然有定压比热容和定容比热容之比  $\gamma$  和摩尔质量  $M$  两个参数影响声速大小，而这两个参数由气体的固有性质决定。

## 参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 声速的测量：实验讲义. 2021.
- [2] 吴泳华、霍剑青、蒲其荣. 大学物理实验. 高等教育出版社, 2005.
- [3] 孙维民、李志杰. 大学物理实验教程. 科学出版社, 2018.