

# 测定介质中的声速

张欣睿<sup>\*</sup>

北京大学化学与分子工程学院 学号：1600011783

**摘 要：**本实验使用声速测定仪等装置，分别通过极值法、相位法和测定气体参量再进行计算的方法，求得了测量环境下的空气中声速，并通过相位法测定了测量环境下的水中声速。

**关键词：**声速测定；相位法；极值法；气体参量法

---

<sup>\*</sup> e-mail: zhangxinrui16@pku.edu.cn; mobile number: 18801391162

## 1 实验数据及其分析、处理和结论

### 1.1 声速测定仪换能器的共振频率

实验首先调节了声速测定仪中两个换能器的平行性。将换能器拉开约 20 mm，改变输出信号的不同频率，对每个频率调节换能器间距，使探测到的驻波信号达到极大值。这一极大值达到最大值时的频率则为换能器的共振频率。

本次实验中测得换能器的共振频率为  $f_0 = 41.0 \text{ kHz}$ 。

### 1.2 使用极值法进行空气中声速测定及数据处理

读取当前测定环境的气温为  $18.5^\circ\text{C}$ 。取定合适距离，不断增大换能器间距，连续记下接收正弦波振幅极大值时的位置  $x_1$ 、 $x_2$ 、...、 $x_{10}$  和对应的峰峰电压  $u_1$ 、 $u_2$ 、...、 $u_{10}$ ，如表 1 所示。按照隔多项逐差法处理数据，逐差一同列在表中。

序号 $i$	1	2	3	4	5
换能器位置 $x_i$ (mm)	21.535	25.860	30.102	34.406	38.657
峰峰电压 $u_i$ (V)	4.56	4.16	3.80	3.40	3.00
序号 $i$	6	7	8	9	10
换能器位置 $x_i$ (mm)	43.121	47.180	51.433	55.540	59.596
峰峰电压 $u_i$ (V)	2.60	2.26	1.98	1.76	1.68
逐差序号 $i$	1	2	3	4	5
逐差 $\Delta x_i = \frac{1}{5}(x_{i+5} - x_i)$ (mm)	4.3172	4.2640	4.2662	4.2268	4.1878

表 1 正向极值法声速测定结果

由表中  $\Delta x_i$  数据得到其平均值和平均值的标准差：

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 \Delta x_i = 4.2520 \text{ (mm)} \quad \sigma_{\overline{\Delta x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\Delta x_i - \overline{\Delta x})^2}{5 \cdot (5-1)}} = 0.02 \text{ (mm)}$$

则声速测定值为：

$$v = \lambda \cdot f = 2\overline{\Delta x} \cdot f = 348.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

声速测定的不确定度：

$$\sigma_v = v \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\overline{\Delta x}}}{\overline{\Delta x}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2} = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

故正向测定声速的结果为  $v_+ = (349 \pm 2) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

再沿反方向旋转手轮，不断减小换能器间距，连续记下接收正弦波振幅极大值时的换能器位置和峰峰电压，如表 2 所示。

序号 $i$	1	2	3	4	5
换能器位置 $x_i$ (mm)	59.703	55.689	51.387	47.122	43.033
峰峰电压 $u_i$ (V)	1.66	1.72	1.87	2.28	2.54
序号 $i$	6	7	8	9	10
换能器位置 $x_i$ (mm)	38.599	34.451	30.100	25.817	21.491
峰峰电压 $u_i$ (V)	2.90	3.26	3.70	4.00	4.36
逐差序号 $i$	1	2	3	4	5
逐差 $\Delta x_i = \frac{1}{5}(x_i - x_{i+5})$ (mm)	4.2208	4.2476	4.2574	4.2610	4.3084

表 2 反向极值法声速测定结果

同理给出逐差的平均值和平均值的标准差：

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 \Delta x_i = 4.2590 \text{ (mm)} \quad \sigma_{\overline{\Delta x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\Delta x_i - \overline{\Delta x})^2}{5 \cdot (5-1)}} = 0.01 \text{ (mm)}$$

声速测定值为：

$$v = \lambda \cdot f = 2\overline{\Delta x} \cdot f = 349.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

声速测量的不确定度为：

$$\sigma_v = v \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\overline{\Delta x}}}{\overline{\Delta x}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2} = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

故反向测定声速的结果为  $v_- = (349 \pm 1) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

取二者的平均值为声速测定值， $v = (349 \pm 2) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (18.5 °C)。

**结论：**通过极值法对探测驻波的换能器检测到强度极值时的位置进行测量，利用逐差法处理正反两组测量数据，求得的逐差可作为半波长，结合频率可以求得声速。本实验测得 18.5 °C 下的声速为  $v = (349 \pm 2) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

### 1.3 使用相位法进行空气中声速测定及数据处理

读取当前测定环境的气温为 18.7 °C。将示波器更换为 X-Y 显示模式，显示屏出现稳定的李萨如图形。正向测量，取定换能器间距合适，不断增大换能器间

距，连续记录下李萨如图形为相同正斜率直线时换能器的位置坐标。测量结果如表 3 所示。

序号 $i$	1	2	3	4	5
换能器位置 $x_i$ (mm)	20.227	28.885	37.361	45.812	54.231
序号 $i$	6	7	8	9	10
换能器位置 $x_i$ (mm)	62.739	70.968	79.350	87.677	96.246

表 3 正向相位法声速测定结果

使用最小二乘法处理数据，做拟合直线，如图 1 所示。

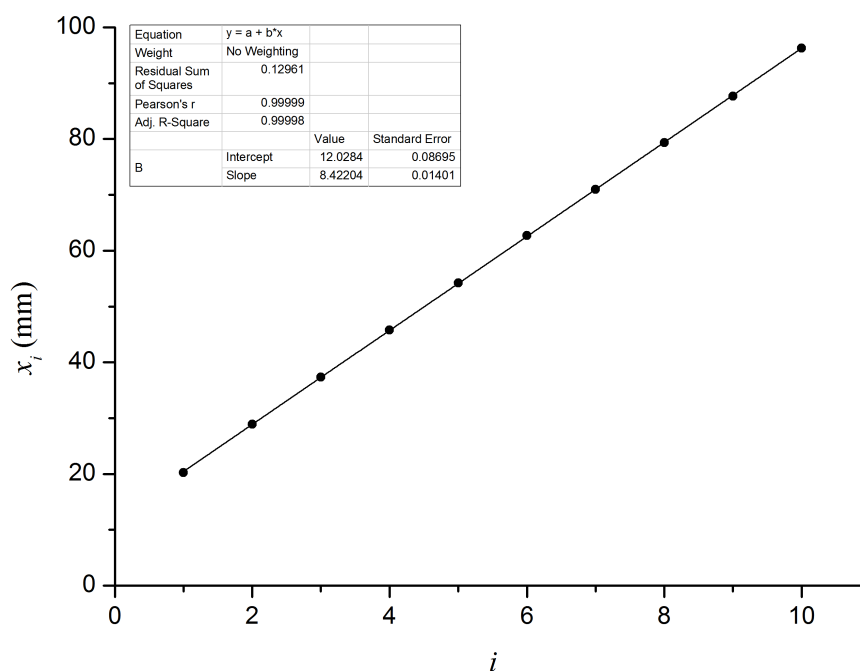


图 1 正向相位法测量的最小二乘拟合直线

拟合直线的斜率即波长， $\lambda = k = (8.42 \pm 0.01) \text{ mm}$ ，则声速

$$v = \lambda \cdot f = 8.42 \cdot 41.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

不确定度：

$$\sigma_v = v \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_\lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2} = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

故正向测定声速为  $v_+ = (345 \pm 1) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

反向测量，不断减小换能器间距，连续记录下李萨如图形为相同的正斜率直线时换能器的位置坐标，测量结果如表 4 所示。

序号 $i$	1	2	3	4	5
换能器位置 $x_i$ (mm)	96.153	87.666	79.237	70.961	62.619
序号 $i$	6	7	8	9	10
换能器位置 $x_i$ (mm)	54.252	45.690	37.347	28.828	20.190

表 4 反向相位法声速测定结果

同样使用最小二乘法作出拟合直线，如图 2 所示。

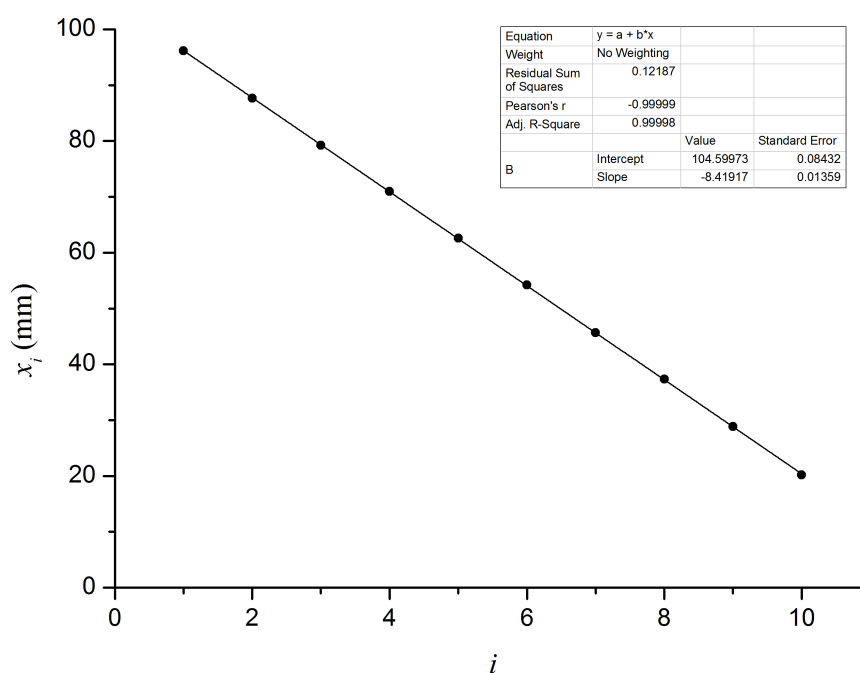


图 2 反向相位法测量的最小二乘拟合直线

测量结果斜率的负值为声波的波长。 $\lambda = -k = (8.42 \pm 0.01) \text{ mm}$ ，则声速：

$$v = \lambda \cdot f = 8.42 \cdot 41.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

不确定度：

$$\sigma_v = v \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_\lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2} = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

故反向测定声速为  $v_- = (345 \pm 1) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由正、反向测量，取二者平均值为声速测定值： $v = (345 \pm 1) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} (18.7^\circ \text{C})$ 。

**结论：**通过对不同刚性平面处声波和原始信号形成的李萨如图形的观察，可以用相位法测定空气中的声速。用最小二乘法处理数据，求得  $18.7^\circ \text{C}$  下的声速为  $v = (345 \pm 1) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

## 1.4 利用气体参量法计算空气中的声速

使用干湿球温度计、气压计等对温湿度、气压等进行测量,结果如表 5 所示。

室温 $\theta$ (°C)	19.0	饱和蒸气压 $p_s$ (Pa)	2196.9
湿球温度 $\theta'$ (°C)	13.2	水蒸气压 $p_w = Hp_s$ (Pa)	945
相对湿度 $H$	43 %	大气压 $p$ (mmHg)	766.35

表 5 相关气体参量的测量

根据空气声速的计算式 (含水蒸气修正), 计算声速为:

$$v = 331.45 \sqrt{\left(1 + \frac{\theta}{T_0}\right) \left(1 + \frac{0.3192 p_w}{p}\right)} (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) = 343.29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$\theta$ 、 $T_0$  按照摄氏温标约去, 这一商取三位有效数字 0.0696, 故  $\left(1 + \frac{\theta}{T_0}\right)$  项取五位有效数字。同理,  $\left(1 + \frac{0.3192 p_w}{p}\right)$  项取五位有效数字。故总运算结果取五位有效数字。

**结论:** 通过气体参量的相关测量, 可算出 19.0 °C 下声速  $v = 343.29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

## 1.5 探究峰峰值电压随距离的衰减

使用表 1、表 2 数据, 作出峰峰电压对换能器间距的图线, 如图 3 所示。

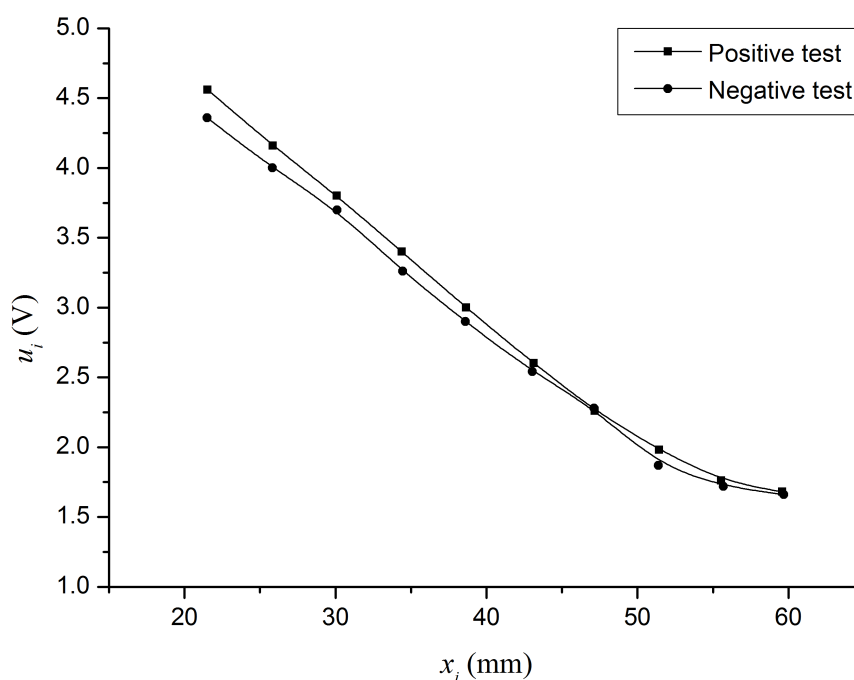


图 3 峰峰电压随换能器间距的衰减曲线

**结论：**从曲线可以看出，无论是在正向还是在反向的极值法实验中，峰峰电压随换能器间距的增大均会减小，在一定距离之内基本上呈线性衰减，超过一定距离衰减速率减慢。

### 1.6 用相位法测定水中声速

在水槽中注水，量得水温为  $18.2^{\circ}\text{C}$ 。在水中调节两换能器互相平行，且移动平行于主轴线。首先通过寻找最大极值的方法，确定换能器工作的谐振频率  $f_0 = 1.81\text{ MHz}$ 。调节换能器间距合适。更换示波器的显示模式为 X-Y 显示模式，观察由初始信号和换能器接收信号产生的李萨如图形，并连续记下李萨如图形为正斜率直线时移动换能器的位置坐标。同理对换能器移动方向的不同有两组测量结果，正向测量结果如表 6 所示、反向测量结果如表 7 所示。使用最小二乘法进行数据处理，对正、反向测量数据分别作出拟合直线，正向、反向测量结果的拟合图线分别如图 4、图 5 所示。

序号 $i$	1	2	3	4	5
换能器位置 $x_i$ (mm)	1.405	2.220	2.989	3.800	4.625
序号 $i$	6	7	8	9	10
换能器位置 $x_i$ (mm)	5.449	6.270	7.078	7.898	8.718

表 6 正向相位法的水中声速测定结果

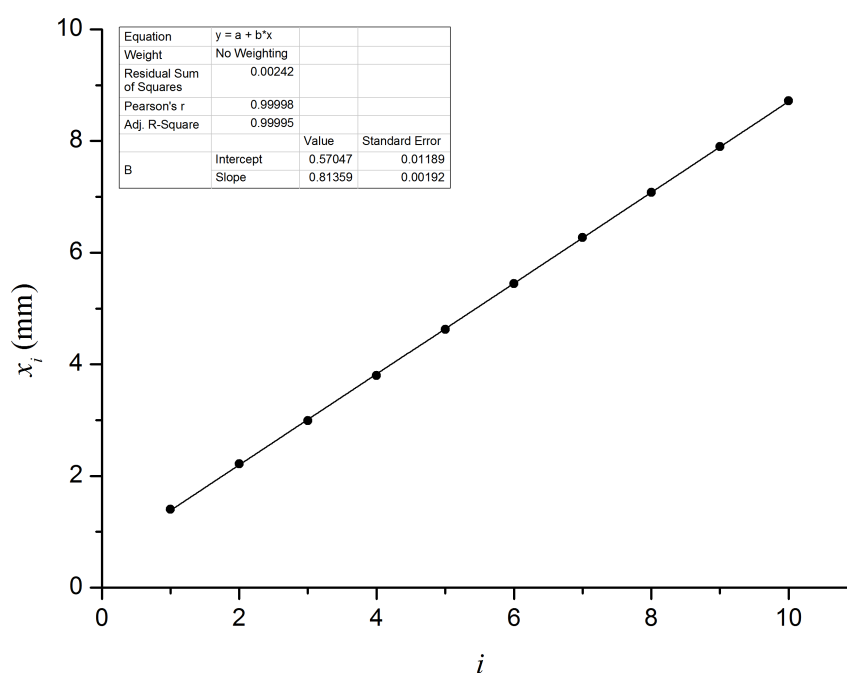


图 4 正向相位法测量水中声速的最小二乘拟合直线

序号 $i$	1	2	3	4	5
换能器位置 $x_i$ (mm)	8.790	7.933	7.120	6.295	5.461
序号 $i$	6	7	8	9	10
换能器位置 $x_i$ (mm)	4.638	3.821	3.012	2.222	1.400

表 7 反向相位法的水中声速测定结果

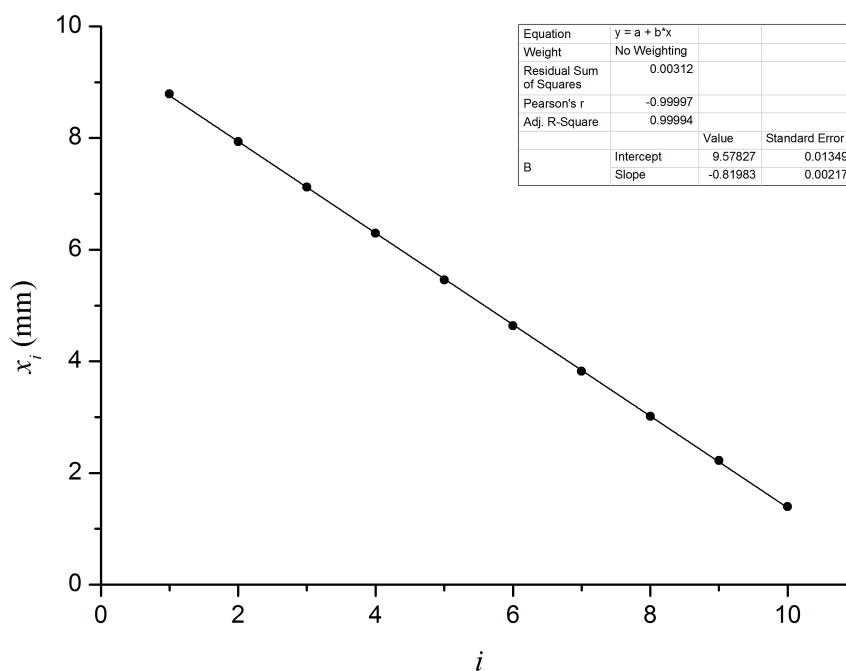


图 5 反向相位法测量水中声速的最小二乘拟合直线

对于正向测量,  $\lambda = k = (0.814 \pm 0.002) \text{ mm}$ , 声速为:

$$v = \lambda \cdot f = 1.47 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 1.47 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

不确定度为:

$$\sigma_v = v \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_\lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2} = 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

故正向测定结果为  $v_+ = (1.47 \pm 0.01) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对于反向测量,  $\lambda = -k = (0.820 \pm 0.002) \text{ mm}$ , 声速为:

$$v = \lambda \cdot f = 1.48 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 1.48 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

不确定度为:

$$\sigma_v = v \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_\lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2} = 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$



故反向测定结果为  $v_{-} = (1.48 \pm 0.01) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

取平均值，得到水中声速的测量结果  $v = (1.48 \pm 0.01) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} (18.2^{\circ}\text{C})$

结论：通过相位法也可以对水中声速进行测量，测量结果用最小二乘法进行处理，可以得到  $18.2^{\circ}\text{C}$  下的水中声速为  $v = (1.48 \pm 0.01) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

## 2 实验收获

本次实验使我理解了声速测量的相关方法，了解了声速测定仪、干湿球温度计、水银气压计等仪器装置的使用。

通过实验，我更进一步理解了预习题。例如水中声速测定的特殊考虑需要考虑共振频率的变化，水中的共振频率远高于空气，若在没有达到共振的条件下测量，测量效率会变低，发热也会变多，影响实验的测定；又例如共振频率的测定方法取最大极大值法、避免螺距差的目的可以通过同向旋转来达到等。

## 3 致谢

感谢李峰老师对实验仪器操作和实验过程的指导。