

测定介质中的声速 实验报告

蔡丹杨

(北京大学化学与分子工程学院 1700011774)

1 数据分析、处理和结论

首先按照实验要求，调节两个换能器的平行性。随后，适当拉开两个换能器，调节信号发生器的振幅和频率，找到换能器的共振频率为 $f=41.224\text{ kHz}$ 。读取实验室室温为 $\theta = 21.6^\circ\text{C}$ 。

(1) 极值法测定空气中声速

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_i 和峰峰电压 $U_{pp,i}$ ；然后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 x'_i 和峰峰电压 $U'_{pp,i}$ 。分别用逐差法处理数据，结果如表 1、表 2 所示。

编号 y	1	2	3	4	5
正向位移 x_i/mm	13.202	17.898	22.690	26.878	31.003
$U_{pp,i}/\text{V}$	13.4	12.9	11.6	9.36	9.08
编号 y	6	7	8	9	10
正向位移 x_i/mm	35.232	39.570	43.821	48.170	52.298
$U_{pp,i}/\text{V}$	8.52	7.64	6.60	5.56	4.44
逐差序号	1	2	3	4	5
$1/5(x_{i+5} - x_i) = \Delta x_i/\text{mm}$	4.4060	4.3344	4.2262	4.2584	4.2590

表 1 正向极值法声速测定结果

编号 y	1	2	3	4	5
反向位移 x'_i/mm	14.122	18.360	22.421	26.537	30.868
$U'_{pp,i}/\text{V}$	14.4	13.1	11.6	9.52	9.20
编号 y	6	7	8	9	10
反向位移 x'_i/mm	35.301	39.410	43.992	48.241	52.654
$U'_{pp,i}/\text{V}$	8.56	7.12	6.28	5.00	4.64
逐差序号	1	2	3	4	5
$1/5(x'_{i+5} - x'_i) = \Delta x'_i/\text{mm}$	4.2358	4.2100	4.3142	4.3408	4.3572

表 2 反向极值法声速测定结果

对于正向极值法，算得 $\overline{\Delta x} = 1/5 \sum_{i=1}^5 \Delta x_i = 4.2968\text{mm}$, $\sigma_{\overline{\Delta x}} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^5 (\Delta x_i - \overline{\Delta x}))^2}{5 \cdot (5-1)}} \approx 0.033\text{mm}$ 。又仪器使用的手轮的允差为 $\pm 0.005\text{mm}$ ，故声速的测量结果及不确定度为

$$v_+ = 2\overline{\Delta x}f = 2 \times 0.0042968 \times 41224 \approx 354.36\text{m/s}$$

$$\sigma_{\Delta x} = \sqrt{\sigma_{\overline{\Delta x}}^2 + \left(\frac{1}{5} \left(5 \times \left(\frac{1}{5} \times 2e/\sqrt{3}\right)\right)\right)^2} = \sqrt{0.033^2 + 0.001^2} \approx 0.03\text{mm}$$

$$\sigma_{v_+} = v_+ \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\Delta x}}{\overline{\Delta x}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2} = 354.36 \sqrt{\left(\frac{0.03}{4.2968}\right)^2 + \left(\frac{1}{41224}\right)^2} \approx 3\text{m/s}$$

$$v_+ \pm \sigma_{v_+} = (354 \pm 3)\text{m/s}$$

对于反向极值法，算得 $\overline{\Delta x'} = 1/5 \sum_{i=1}^5 \Delta x'_i = 4.2916\text{mm}$, $\sigma_{\overline{\Delta x'}} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^5 (\Delta x'_i - \overline{\Delta x'}))^2}{5 \cdot (5-1)}} \approx 0.029\text{mm}$ 。又仪器使用的手轮的允差为 $\pm 0.005\text{mm}$ ，故声速的测量结果及不确定度为

$$v_- = 2\overline{\Delta x'}f = 2 \times 0.0042916 \times 41224 \approx 353.83\text{m/s}$$

$$\sigma_{\Delta x'} = \sqrt{\sigma_{\Delta x'}^2 + \left(\frac{1}{5} \left(5 \times \left(\frac{1}{5} \times 2e/\sqrt{3}\right)\right)\right)^2} = \sqrt{0.029^2 + 0.001^2} \approx 0.03\text{mm}$$

$$\sigma_{v_-} = v_- \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\Delta x'}}{\Delta x'}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2} = 353.83 \sqrt{\left(\frac{0.03}{4.2916}\right)^2 + \left(\frac{1}{41224}\right)^2} \approx 2\text{m/s}$$

$$v_- \pm \sigma_{v_-} = (354 \pm 2)\text{m/s}$$

取二者平均值，算得 $v = (v_+ + v_-)/2 = 354\text{m/s}$, $\sigma_v = 1/2 \sqrt{\sigma_{v_+}^2 + \sigma_{v_-}^2} = 2\text{m/s}$, $v \pm \sigma_v = (354 \pm 2)\text{m/s}$ 。

结论：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，求得的逐差作为半波长，结合频率可以求得声速。本实验测得声速为 $v \pm \sigma_v = (354 \pm 2)\text{m/s}$ 。

(2) 相位法测定空气中声速

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，不断增大换能器间隔，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；随后反向测量，不断减小换能器间距，连续记录下李萨如图形为相同正斜率直线时换能器的位置坐标。作最小二乘法拟合。结果分别如表 3、图 1 所示。

编号 y	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
正向位移 x_i/mm	8.456	18.621	26.312	35.057	43.700	51.984	60.352	68.878	77.202	85.627
反向位移 x'_i/mm	8.879	17.872	26.610	35.194	43.704	51.822	60.464	68.845	77.151	85.649

表 3 相位法声速测定结果

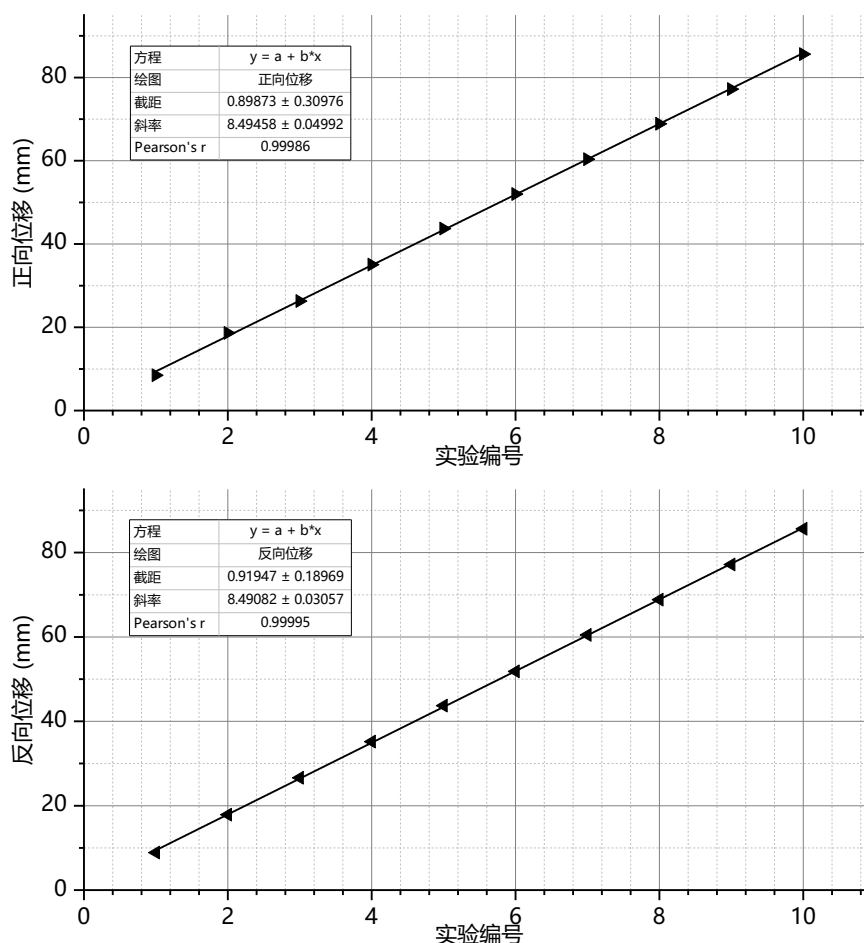


图 1 相位法测量的最小二乘拟合直线



拟合直线的斜率即为波长，故声速的测量结果分别为

$$v_+ = \lambda_+ f = 8.4946 \times 41.224 \text{m/s} \approx 350.18 \text{m/s}$$

$$v_- = \lambda_- f = 8.4908 \times 41.224 \text{m/s} \approx 350.02 \text{m/s}$$

$$\sigma_{\lambda_+} = \sqrt{\sigma_{k_+}^2 + \left(\frac{e}{\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{0.05^2 + \frac{0.005^2}{3}} \approx 0.05 \text{mm}$$

$$\sigma_{\lambda_-} = \sqrt{\sigma_{k_-}^2 + \left(\frac{e}{\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{0.05^2 + \frac{0.005^2}{3}} \approx 0.05 \text{mm}$$

$$\sigma_{v_+} = v_+ \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\lambda_+}}{\lambda_+}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2} \approx 2 \text{m/s}$$

$$\sigma_{v_-} = v_- \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\lambda_-}}{\lambda_-}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2} \approx 2 \text{m/s}$$

$$v_+ \pm \sigma_{v_+} = (350 \pm 2) \text{m/s}$$

$$v_- \pm \sigma_{v_-} = (350 \pm 2) \text{m/s}$$

取二者平均值，算得 $v = (v_+ + v_-)/2 = 354 \text{m/s}$, $\sigma_v = 1/2 \sqrt{\sigma_{v_+}^2 + \sigma_{v_-}^2} = 2 \text{m/s}$, $v \pm \sigma_v = (350 \pm 2) \text{m/s}$ 。

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。本实验用最小二乘法处理数据，测得声速为 $v \pm \sigma_v = (350 \pm 2) \text{m/s}$ 。

(3) 气体参量法计算空气中的声速

读取实验室室温为 $\theta = 21.6^\circ\text{C}$ ，气压计示数为 769.65mmHg，环境湿度为 32%。查询资料得本地加速度为 9.81621N/kg 。则：

$$p = \frac{g}{g_0} p_1 (1 - (0.000182 - \beta)t) = \frac{9.81621}{9.80665} (769.65 \times 133.3224) (1 - 0.000172 \times 21.6) \approx 102.33 \text{kPa}$$

$$p_w = \varphi p_s = 0.32 \times 2573.5 = 8.2 \times 10^2 \text{Pa}$$

$$v = 331.45 \sqrt{\left(1 + \frac{\theta}{T_0}\right) \left(1 + \frac{0.3192 p_w}{p}\right)} = 331.45 \sqrt{\left(1 + \frac{21.6}{273.15}\right) \left(1 + 0.3192 \times \frac{8.2 \times 10^2}{102.33 \times 10^3}\right)} \approx 344.75 \text{m/s}$$

虽然 θ/T_0 和 $0.3192 p_w/p$ 分别只有三位和两位有效数字，但由于分数约去后最后一位在万分位上，故加上 1 后取到 5 位有效数字，最终运算结果也取 5 位有效数字。

结论：通过气体参量的相关测量，可算出 21.6°C 下声速为 $v = 344.75 \text{m/s}$ 。

(4) 声光效应法测定水中声速

仔细调节光路使各元件尽可能共轴，调节换能器的信号频率至在墙壁上得到最清晰的干涉条纹，记录此时换能器的工作频率为 $f = 9.624 \text{MHz}$ 。用毫米坐标纸测量墙上的干涉条纹，结果如表 4 所示。

级数 k	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
坐标 x_i/mm	21.3	39.2	57.0	74.8	92.7	110.6	128.8	146.6	164.4
相对坐标 x_i'/mm	-71.4	-53.5	-35.7	-17.9	0	17.9	36.1	53.9	71.7

表 4 声光效应法测量结果

由于有奇数组数据，为进行逐差法处理弃用了 -4 级干涉条纹的数据。则 $\overline{\Delta x} = 1/16 \sum_{i=1}^4 x_i - x_{i-4} =$

17.92mm 。又测得墙壁到水槽后壁距离 $z = 436 \text{cm}$ ，由实验原理 $\frac{\overline{\Delta x}}{z} = \frac{\lambda_{He}}{\lambda}$ ($\lambda_{He} = 632.8 \text{nm}$)，得 $\lambda = \frac{z \lambda_{He}}{\overline{\Delta x}} =$

$4.36 \times 0.6328 / 17.92 = 0.1540 \text{mm}$ 。估计坐标纸的允差为 $\pm 0.1 \text{mm}$ ，钢卷尺的允差为 $\pm 0.5 \text{cm}$ ，则

$$\sigma_{\Delta x} = \sqrt{\left(\frac{e}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{e}{\sqrt{3}}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^4 (\Delta x_i - \overline{\Delta x})^2}{4 \cdot (4-1)}} = \sqrt{\frac{0.02}{3} + \frac{1}{12} \times 0.006719} \approx 0.09 \text{mm}$$

$$\sigma_{\lambda} = \lambda \sqrt{\left(\frac{\sigma_z}{z}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta x}}{\overline{\Delta x}}\right)^2} = 0.1540 \sqrt{\frac{1}{3} \left(\frac{0.5}{436}\right)^2 + \left(\frac{0.09}{17.92}\right)^2} \approx 0.0008 \text{mm}$$

$$v = \lambda f = 0.1540 \times 9.624 \times 10^3 \text{m/s} \approx 1482 \text{m/s}$$

$$\sigma_v = v \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\lambda}}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2} = 1482 \sqrt{\left(\frac{0.0008}{0.1540}\right)^2 + \left(\frac{0.001}{9.624}\right)^2} \approx 8 \text{m/s}$$

$$v \pm \sigma_v = (1482 \pm 8) \text{m/s}$$

结论：利用超声波在介质中传播使介质发生弹性应变产生的衍射现象，可以用类似研究光栅衍射的方法测量声速，本实验测得声速为 $v + \sigma_v = (1482 \pm 8)\text{m/s}$ ，与理论值 1480m/s 接近。

(5) 探究峰-峰值电压随距离的衰减

使用表 1、表 2 数据，可作峰-峰值电压与换能器间距关系曲线，如图 2 所示。

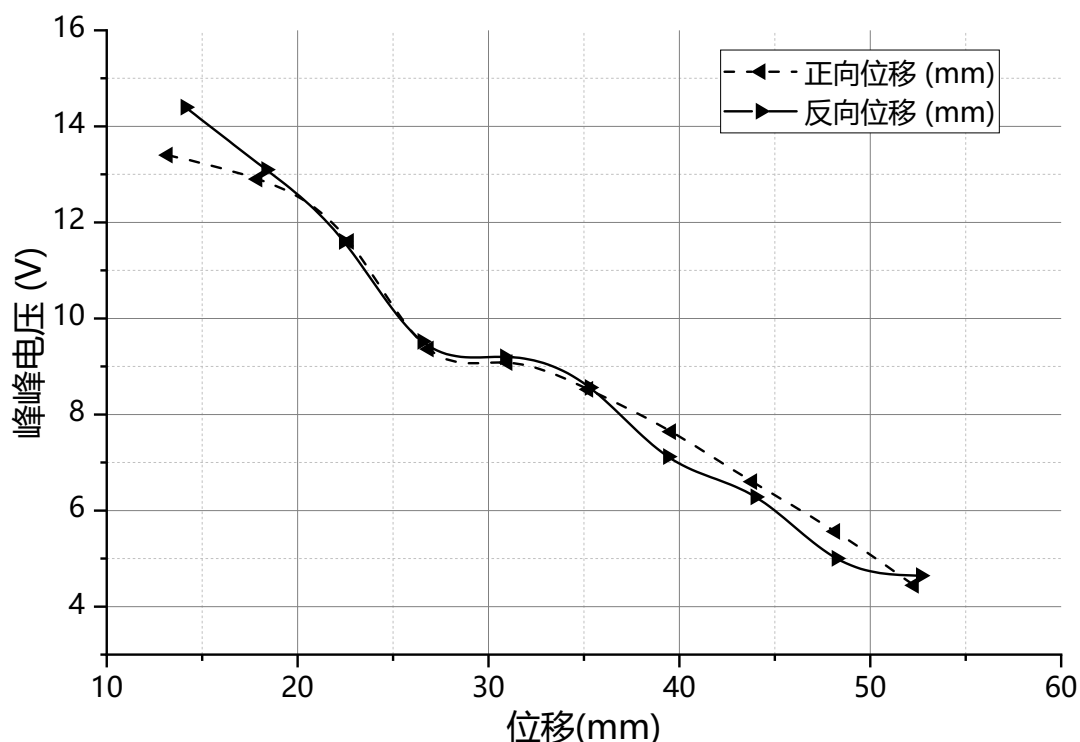


图 2 峰 - 峰值电压随换能器间距的衰减曲线

结论：从图中可以看到，峰-峰值电压随换能器间距的增大而减小，在一定距离之内基本上呈线性衰减，在远距离衰减速率减慢。这是因为此时测得的主要是行波部分，而驻波带来的峰-峰值电压起伏已经很小了。位移约 25mm 处有一“凹槽”，推测是该处仪器螺纹不均匀，造成测得位移与实际位移有系统误差导致。

2 收获与感想

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“水中声速测定的特殊考虑”。如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，等等。

感谢李峰老师对实验过程和理论知识的指导，以及孙思原同学在仪器测量过程中的帮助。