

# 声速的测量

PB20061372 朱云沁 2021/5/5

## 实验题目：

声速的测量

## 实验目的：

掌握用驻波法、相位比较法、时差法测量不同介质中声速的原理和实验方法；了解声学的研究背景；学习声波的基本知识、压电陶瓷转换器的原理等；熟练掌握示波器的使用。

## 实验原理：

忽略空气中水蒸气和其他夹杂物的影响，在 $101.3kPa$ ， $t^{\circ}C$ 时，干燥的理想空气的声速公式为

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

测量实验室温度，根据上式，即可求出空气声速的理论值。

根据波动理论，波速 $v$ ，波长 $\lambda$ ，频率 $f$ 之间满足如下关系

$$v = \lambda \cdot f$$

因此，测出 $\lambda$ 和 $f$ 即可计算得声速。在本实验中，声波的频率等于声源的电激励信号频率；声波的波长则可由驻波法或相位比较法得到，装置如图 1、图 2 所示，其中，S1、S2 为压电转换器。

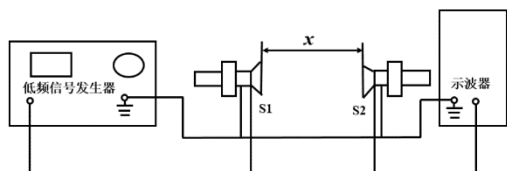


图 1：驻波法测量声速实验装置

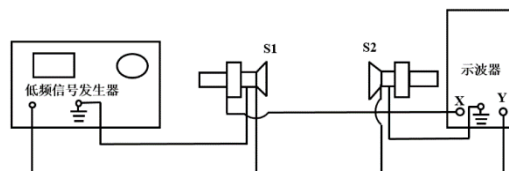


图 2：相位比较法测量声速实验装置

在驻波法中，S1 发出的平面超声波被 S2 反射，入射波与反射波相互干涉叠加，形成驻波，示波器观察到两个相干波在 S2 处合成振动的情况。连续改变距离 $L$ ，示波器显示的声压波幅将呈周期性变化，如图 3 所示。记声压波幅第 $i$ 次达到极大值时测得的 $L$ 为 $L_i$ ，根据波的合成理论，易证

$$L_{i+1} - L_i = \frac{\lambda}{2} \quad (*)$$

记录多组 $i$ 和 $L$ ，作出 $L - i$ 图象，利用最小二乘法进行线性拟合，所得直线斜率即为 $\frac{\lambda}{2}$ 。

在相位比较法中，通过示波器可以观察到行波在发射端与接收端存在相位差。连续改变距离 $L$ ，示波器显示的李萨如图形将呈周期性变化，如图 4 所示。记李萨如图形第 $i$ 次变为一三或二四象限的直线时测得的 $L$ 为 $L_i$ ，由波的传播可知 $(*)$ 式同样成立，作图求得 $\frac{\lambda}{2}$ 。

此外，还可用时差法测量声速，如图 5 所示。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，从发射源经过时间 $t$ 后，到达距离为 $L$ 处的接收换能器，有

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

实验时，为消除电信号传播等因素对 $t$ 的影响，应选定两组距离 $L_1$ 、 $L_2$ ，分别测得时差 $t_1$ 、 $t_2$ ，变形后的公式为

$$v = \frac{L_1 - L_2}{t_1 - t_2}$$

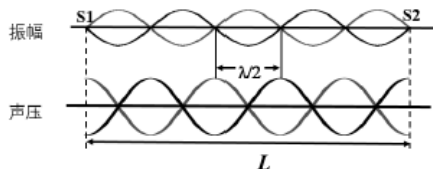


图 3：振幅、声压的变化与 $L$ 的关系

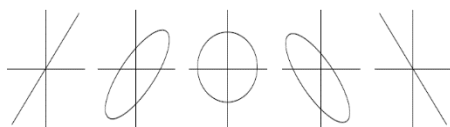


图 4：李萨如图形随两垂直运动的相位差的

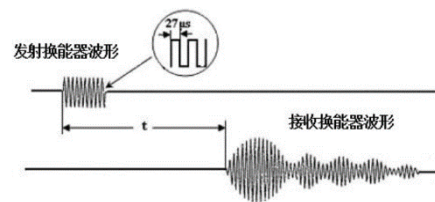


图 5：时差法测量声速的波形图

## 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。

## 实验步骤：

- 1、按照图 6 接线，调节 S1、S2 使两端面相互平行且与移动方向相垂直。
- 2、调节正弦信号频率，使得电压幅度达到最大，记下此时的谐振频率 $f$ 。记下室温 $t$ 。
- 3、驻波法测量空气中的波长和声速：转动鼓轮，由近而远移动 S2，使用示波器观察波的干涉现象，逐个记下振幅最大的波腹的位置 $L_i$ ，共12个位置点。
- 4、在储液槽中装入水至刻度线，将换能器置于储液槽中，按照图 7 接线。
- 5、相位比较法测量水中的波长和声速：转动鼓轮，由近而远移动 S2，使用示波器观察李萨如图形的变化，依次测出斜率正、负变化的直线出现时 S2 的位置 $L_i$ ，共8个位置点。
- 6、按照图 8 接线，将专用信号源调至脉冲波状态。
- 7、时差法测量有机玻璃棒和黄铜棒中的声速：调节专用信号源为“非金属”模式，分别安装好两根不同长度的有机玻璃棒，记录信号源的时间读数 $t_1$ 、 $t_2$ 。用游标卡尺量得相应测试棒的长度 $L_1$ 、 $L_2$ 。调节专用信号源为“金属”模式，使用黄铜棒进行同样操作。
- 8、整理仪器。处理数据。

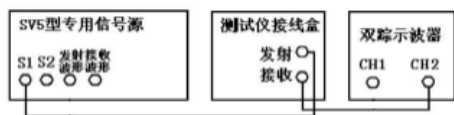


图 6：谐振频率和共振干涉法测量连线图

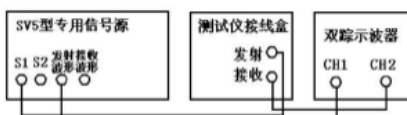


图 7：相位法测量连线图



图 8：时差法测量固体中声速连线图

实验数据：

谐振频率： $f = 37351.000\text{Hz}$ 。

实验温度： $t = 24.4^{\circ}\text{C}$ 。

序号 <i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>L/mm</i>	3.60	8.14	12.80	17.48	22.14	26.76	31.38	36.02	40.64	45.26	49.88	54.54

表 1：驻波法测量空气中波长和声速——原始数据

序号 <i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>L/mm</i>	22.02	42.66	63.48	85.30	103.80	120.92	139.30	161.22

表 2：相位比较法测量水中波长和声速——原始数据

媒质	<i>L</i> <sub>1</sub> / <i>mm</i>	<i>L</i> <sub>2</sub> / <i>mm</i>	<i>t</i> <sub>1</sub> / <i>μs</i>	<i>t</i> <sub>2</sub> / <i>μs</i>
有机玻璃棒	219.46	259.54	136	159
黄铜棒	207.82	246.44	69	81

表 3：时差法测量固体中声速——原始数据

数据处理：

1、驻波法测量空气中波长和声速

根据表 1 数据，做出*L* – *i*散点图并做线性拟合，结果如图 9 所示。

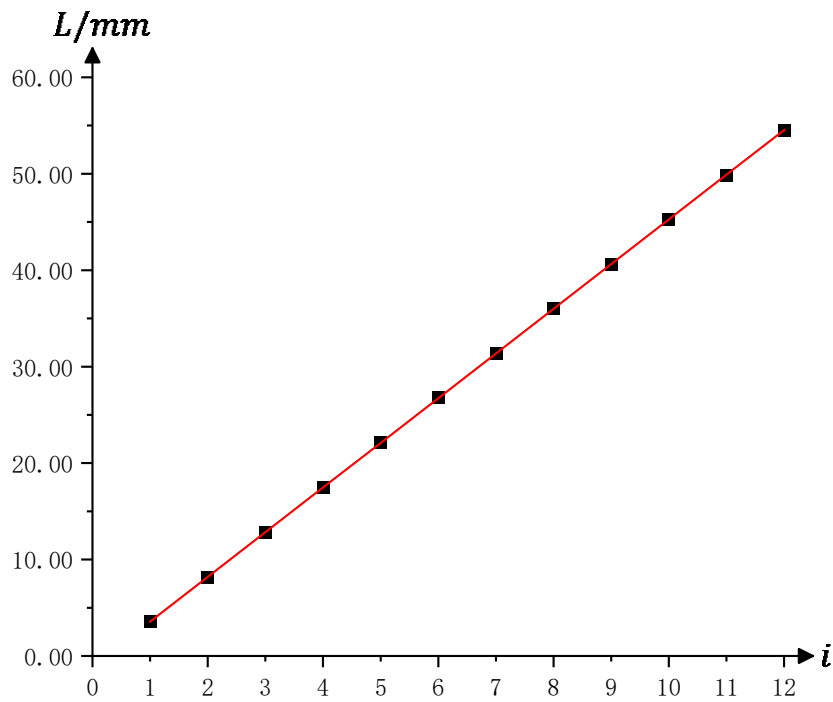


图 9：驻波法测量空气中波长和声速——*L* – *i*图象

使用最小二乘法计算，斜率 $\frac{\lambda}{2}$ 的平均值为

$$\frac{\bar{\lambda}}{2} = \frac{\overline{Li} - \bar{L} \cdot \bar{i}}{\overline{L^2} - \bar{L}^2} = 4.63385\text{mm}$$

相关系数为

$$r = \frac{\overline{Li} - \bar{L} \cdot \bar{i}}{\sqrt{(\overline{L^2} - \bar{L}^2)(\overline{i^2} - \bar{i}^2)}} = 0.99999$$

标准差为

$$s_{\frac{\lambda}{2}} = \sqrt{\frac{1}{r^2} - 1} \cdot \frac{\bar{\lambda}}{2} = 0.00254mm$$

若取声速测量仪所带游标卡尺的最大允差 $\Delta_{\mathcal{R}} = 0.05mm$ ，则 $\frac{\lambda}{2}$ 的展伸不确定度为

$$U_{\frac{\lambda}{2}} = \sqrt{(t_P s_{\frac{\lambda}{2}})^2 + \left(k_P \frac{\Delta_{\mathcal{R}}}{C}\right)^2} = \sqrt{(2.23 \times 0.00254)^2 + \left(1.645 \times \frac{0.05}{\sqrt{3}}\right)^2} mm = 0.0478mm, P = 0.95$$

故半波长的测量结果为

$$\frac{\bar{\lambda}}{2} = (4.63 \pm 0.05)mm, P = 0.95$$

又

$$\begin{aligned}\bar{\lambda} &= 2 \cdot \frac{\bar{\lambda}}{2} = 9.2677mm \\ U_{\lambda} &= 2 \cdot U_{\frac{\lambda}{2}} = 0.0956mm, P = 0.95\end{aligned}$$

故波长的测量结果为

$$\bar{\lambda} = (9.27 \pm 0.10)mm, P = 0.95$$

若取声速测量仪信号频率的最大允差 $\Delta_{\mathcal{F}} = 0.01Hz$ ，实验者估计最大频率点的最大允差

$\Delta_{\mathcal{F}} = 50Hz$ ，有 $\Delta_{\mathcal{F}} \ll \Delta_{\mathcal{F}}$ ，故 $\Delta_{Bf} = \Delta_{\mathcal{F}}$ ；假设测量误差服从均匀分布，则 $f$ 的B类标准不确定度为

$$u_{Bf} = \frac{\Delta_{\mathcal{F}}}{C} = \frac{50}{\sqrt{3}}Hz = 28.868Hz$$

$f$ 的展伸不确定度为

$$U_f = k_P u_{Bf} = 1.645 \times 28.868Hz = 47.487Hz, P = 0.95$$

故谐振频率的测量结果为

$$f = (37351 \pm 47)Hz, P = 0.95$$

由 $v = \lambda \cdot f$ ，有

$$\bar{v} = \bar{\lambda} \cdot \bar{f} = 9.2677 \times 10^{-3} \times 37351.000m/s = 346.158m/s$$

$$U_v = \bar{v} \sqrt{\left(\frac{U_{\lambda}}{\bar{\lambda}}\right)^2 + \left(\frac{U_f}{\bar{f}}\right)^2} = 346.158 \times \sqrt{\left(\frac{0.0956}{9.2677}\right)^2 + \left(\frac{47.487}{37351.000}\right)^2} m/s = 3.598m/s, P = 0.95$$

故空气中声速的测量结果为

$$v = (346.2 \pm 3.6)m/s, P = 0.95$$

空气中声速的理论值为

$$v_t = 331.45 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} m/s = 331.45 \times \sqrt{1 + \frac{24.4}{273.15}} m/s = 345.9m/s$$

测量值与理论值的相对误差为

$$\frac{\Delta v}{v_t} = \frac{346.2 - 345.9}{345.9} = 0.087\%$$

## 2、相位比较法测量水中波长和声速

根据表 2 数据，做出  $L - i$  散点图并做线性拟合，结果如图 10 所示。

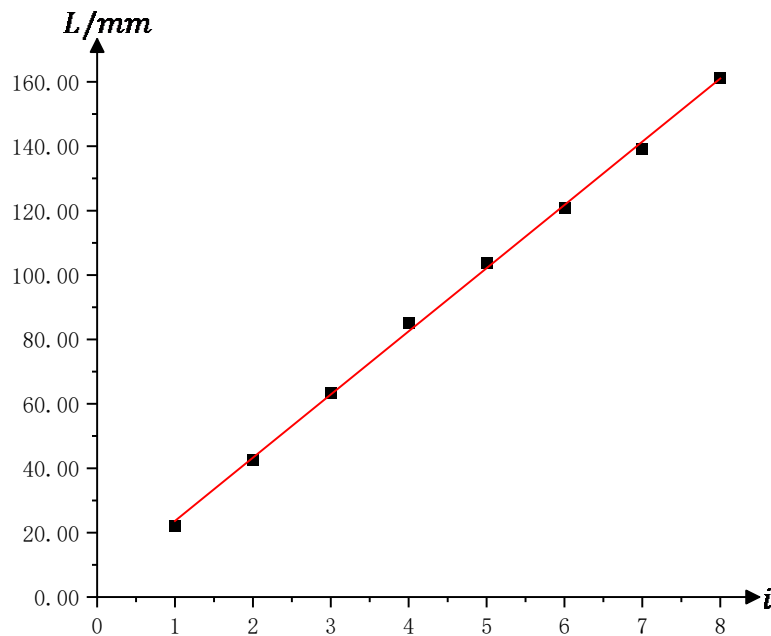


图 10: 相位比较法测量水中波长和声速—— $L - i$  图象

使用最小二乘法计算，图中直线的斜率为

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{\overline{Li} - \bar{L} \cdot \bar{i}}{\overline{L^2} - \bar{L}^2} = 19.624mm$$

故

$$\lambda = 2 \cdot \frac{\lambda}{2} = 2 \times 19.624mm = 39.248mm$$

又  $f = 37351.000Hz$ ，根据公式，有

$$v = \lambda \cdot f = 39.248 \times 10^{-3} \times 37351.000m/s = 1465.9m/s$$

## 3、时差法测量有机玻璃棒和黄铜棒中声速

将表 3 数据代入公式

$$v = \frac{L_1 - L_2}{t_1 - t_2}$$

计算得有机玻璃棒中声速

$$v_{玻} = \frac{219.46 - 259.54}{136 - 159} m/s = 1742.6m/s$$

黄铜棒中声速

$$v_{铜} = \frac{207.82 - 246.44}{69 - 81} m/s = 3218.3m/s$$

### 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。

答：声波在实际媒质中传播时，由于扩散、吸收和散射等衰减作用，单位面积上的声波能量随距离变长而不断减小，又因为声压振幅与声波能量呈正相关，所以声压振幅极大值随距离变长而减小。

- 2、声速测量中驻波法、相位法、时差法有何异同？

答：①驻波法、相位法均使用连续波作为波源，时差法则使用脉冲波。②驻波法利用驻波的相邻波腹间隔来测量，相位法利用行波相位差来测量，时差法利用脉冲波从发射到接受的时间差来测量。③驻波法、相位法均通过示波器观察波形，较为直观，但判断记录点时人为因素造成的误差过大；时差法测量时人为因素影响小，测量精度较高，因此应用广泛。

- 3、各种气体中的声速是否相同，为什么？

答：不同。气体在理想气体中的传播速度为

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

对于不同的两种气体 1、2，有

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sqrt{\frac{\gamma_1 RT}{M_1}}}{\sqrt{\frac{\gamma_2 RT}{M_2}}} = \sqrt{\frac{\gamma_1 M_2}{\gamma_2 M_1}}$$

式中， $\gamma$ 为气体定压比热容和定容比热容之比， $M$ 是气体摩尔质量。一般情况下，不同的气体， $\frac{\gamma}{M}$ 的值不同，因此声速也不同。