

实 验 报 告

评分：

管理 系 20 级

学号 PB20151804

姓名 袁雨

日期 2021 年 4 月 9 日

一、实验题目：声速的测量

- 二、实验目的：
1. 测量压电陶瓷换能器的谐振频率；
 2. 用驻波法测量气体中的声速；
 3. 用相位比较法测量固体中的声速。

三、实验装置：

SV5 型声速测量仪（如下图所示，主要部件包括信号源和声速测试仪（含水槽））、双踪示波器、游标卡尺等。



四、实验原理：

1. 声波在空气中的传播速度

①在理想气体中的传播速度： $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$ (γ : 气体的定压比热容和定容比热容之比, $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$; R:

普适气体常量; M: 气体的摩尔质量; T: 热力学温度)

②忽略空气中的水蒸气和其他夹杂物的影响, 在 0°C ($T=273.15\text{K}$, $p=101.3\text{kPa}$) 时干燥的理想气体的声速: $v_0 = \sqrt{\frac{\gamma RT_0}{M}} = 331.45\text{m/s}$; 在摄氏 $t^\circ\text{C}$ 时的声速 $v_t = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}}$ 。

2. 测量谐振频率 f

只有当换能器发射面 S1 和接收面 S2 保持平行时才有较好的接收效果; 为了得到较清晰的接收波形, 需要将外加的驱动信号频率调节到发射换能器 S1 谐振频率点 f 处, 才能较好地进行声能与电能的相互转换, 以提高测量精度, 得到较好的实验效果。

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. 声速测量的实验方法

利用声速与频率、波长的关系测量。

根据波动理论, 声波各参量之间的关系有: $v = \lambda f$ (v : 波速; λ : 波长; f : 频率)

在实验中, 可以通过测定声波的波长 λ 和频率 f 求声速。声速的频率 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 λ 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。

实 验 报 告

评分:

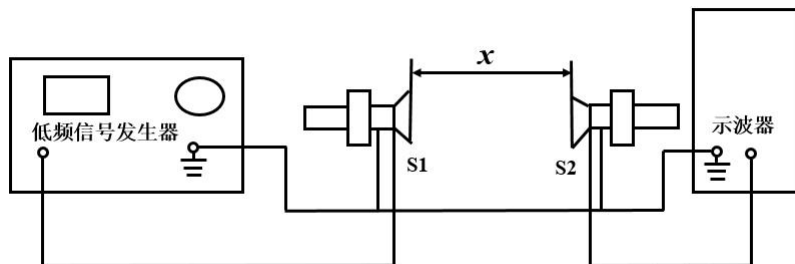
管理 系 20 级

学号 PB20151804

姓名 袁雨

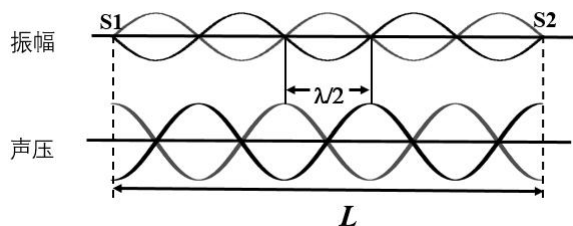
日期 2021 年 4 月 9 日

①共振干涉法（驻波假设下）测量空气中的波长和声速



实验装置原理如上图，S1、S2 为压电换能器，S1 为声波发射源，S2 为声波接收器，当 S2 的接受表面直径较大时，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和频率相同而发生相干叠加，当 S1 与 S2 相互平行时且接收器位置固定时，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时这两个相干波在 S2 处合成振动的情况。

在驻波场中，空气质点位移的图像是不能直接观察到的，而声压却可以通过仪器加以观测。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”，如下图所示，即声压的“波腹”，即此处位移为 0，接收到的声压信号最强。连续改变距离 L，示波器观察到，声压波幅将在最大值和最小值之间呈周期性变化，如下图所示。



$$\text{即 } x = \frac{n\pi}{k} - \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2k} = \frac{n\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2\pi} - \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \text{ 时, } \left| \cos \left(kx + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) \right| = 1, \text{ 振幅最大, 为波腹, 这时质}$$

点的振幅为分博振幅的两倍，相邻波腹的距离为 $\frac{\lambda}{2}$ ，所以有

$$n \frac{\lambda}{2} = \Delta L_{n-1} = |L_{n+1} - L_1|, \lambda_i = \Delta l_{i+2} = |l_{i+2} - l_i|。$$

②相位比较法测量水中的波长和声速

实际上，在发射器（声源处）和接收器（刚性平面处）之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，它对入射声波能量有吸收以及空气对声波的吸收作用，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。

实验报告

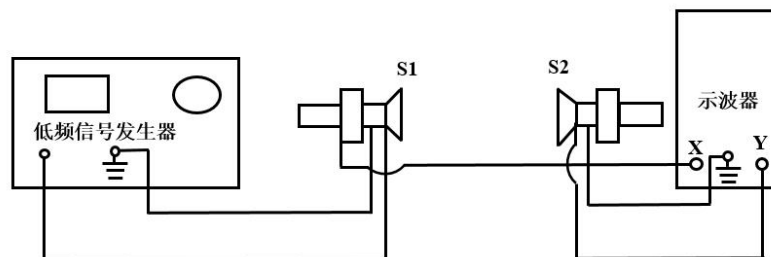
评分:

管理系 20 级

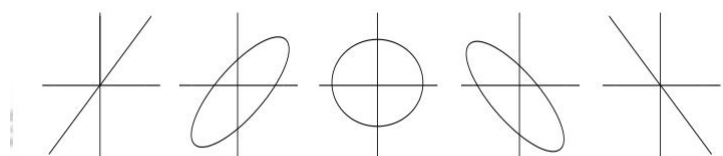
学号 PB20151804

姓名 袁雨

日期 2021 年 4 月 9 日



在储液槽中装入水至刻度线，将换能器置于储液槽中。实验装置接线如上图所示，置示波器功能于 X-Y 方式。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。当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受波之间的相位差，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 $\Delta L = \frac{\lambda}{2}$ ，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。如下图，随着振动的相位差从 $0 \sim \pi$ 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，这样就可以测得波长 λ ，根据式 $v = \lambda f$ ，即可计算出声音传播的速度。



(a) $\Delta \varphi = 0$ (b) $\Delta \varphi = \frac{\pi}{4}$ (c) $\Delta \varphi = \frac{\pi}{2}$ (d) $\Delta \varphi = \frac{3\pi}{4}$ (e) $\Delta \varphi = \pi$

对于多数空气声速测量装置，发射器频率一定时移动接收器位置，能看到接收器声压极大值信号周期性地出现，其位移平均周期为 $\frac{\lambda}{2}$ 。一次测量出一系列振幅极值点地位置 l_j （对应序号为 j），求出直线方程 $l_j = b_0 + b_i j$ 的斜率 b_i ，即可求出波长 λ ，进而求出声速。

五、测量记录:

1. 谐振频率 f : 38163Hz

2. 实验开始时室温: 干球温度计 22.1℃, 湿球温度计 22.5℃

实验结束时室温: 干球温度计 22.1℃, 湿球温度计 22.5℃

3. 共振干涉法测量空气中的波长和声速

测量序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
接收器 S1 与 S2 距 离 x/cm	7.800	8.230	8.716	9.150	9.620	10.070	10.528	11.010	11.440	11.890	12.324	12.786

实 验 报 告

评分:

管理 系 20 级

学号 PB20151804

姓名 袁雨

日期 2021 年 4 月 9 日

4. 相位比较法测量水中的波长和声速

测量序号	1	2	3	4	5	6	7
接收器 S1 与 S2 的 距离 l/cm	14.924	16.932	19.062	21.248	23.402	25.410	27.460

六、数据处理:

1. 谐振频率 f : 38163Hz

2. 室温 t :

$$\text{实验开始时室温 } t_1 = \frac{22.1 + 22.5}{2} ^\circ\text{C} = 22.3^\circ\text{C};$$

$$\text{实验结束时室温 } t_2 = \frac{22.1 + 22.5}{2} ^\circ\text{C} = 22.3^\circ\text{C};$$

$$\text{实验过程中平均室温 } t = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{22.3 + 22.3}{2} ^\circ\text{C} = 22.3^\circ\text{C};$$

$$\text{声速的理论值: } v_t = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} = 331.45 \text{ m/s} \times \sqrt{1 + \frac{22.3}{273.15}} = 344.7144 \text{ m/s}$$

3. 共振干涉法（驻波假设下）测量空气中的波长和声速

(1) 逐差法

① 计算 $\overline{\Delta x}$

$$\overline{\Delta x}_1 = \frac{x_7 - x_1}{6} = \frac{10.528 - 7.800}{6} \text{ cm} = 0.4547 \text{ cm}$$

$$\overline{\Delta x}_2 = \frac{x_8 - x_2}{6} = \frac{11.010 - 8.230}{6} \text{ cm} = 0.4633 \text{ cm}$$

$$\overline{\Delta x}_3 = \frac{x_9 - x_3}{6} = \frac{11.440 - 8.716}{6} \text{ cm} = 0.4540 \text{ cm}$$

$$\overline{\Delta x}_4 = \frac{x_{10} - x_4}{6} = \frac{11.890 - 9.150}{6} \text{ cm} = 0.4567 \text{ cm}$$

$$\overline{\Delta x}_5 = \frac{x_{11} - x_5}{6} = \frac{12.324 - 9.620}{6} \text{ cm} = 0.4507 \text{ cm}$$

$$\overline{\Delta x}_6 = \frac{x_{12} - x_6}{6} = \frac{12.786 - 10.070}{6} \text{ cm} = 0.4527 \text{ cm}$$

$$\overline{\Delta x} = \frac{\sum_{i=1}^6 x_i}{6} = \frac{0.4547 + 0.4633 + 0.4540 + 0.4567 + 0.4507 + 0.4527}{6} \text{ cm} = 0.4554 \text{ cm}$$

② 不确定度

样本标准差:

实 验 报 告

评分:

管理 系 20 级

学号 PB20151804

姓名 袁雨

日期 2021 年 4 月 9 日

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (\Delta x_i - \overline{\Delta x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0.0007^2 + 0.0079^2 + 0.0014^2 + 0.0013^2 + 0.0047^2 + 0.0027^2}{6-1}} \text{cm} = 0.0044 \text{cm}$$

A 类标准不确定度:

$$u_A = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0.0044}{\sqrt{6}} \text{cm} = 0.0018 \text{cm}$$

B 类标准不确定度:

$$u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{C} = \frac{0.02 \text{mm}}{\sqrt{3}} = 0.0115 \text{mm}$$

Δx 的展伸不确定度:

$$U_{0.95}(\Delta x) = \sqrt{(t_{0.95} u_A)^2 + (k_p \frac{\Delta_B}{C})^2} = \sqrt{(2.57 \times \frac{0.0018}{\sqrt{6}})^2 + (1.645 \times \frac{0.00002}{\sqrt{3}})^2} \text{cm} = 0.0046 \text{cm}, P = 0.95$$

③波长:

$$\lambda = 2\overline{\Delta x} = 2 \times 0.4554 \text{cm} = 0.9180 \text{cm}$$

波长 λ 的展伸不确定度:

$$U_{0.95}(\lambda) = 2U_{0.95}(\Delta x) = 0.0092 \text{cm}, P = 0.95$$

故波长最终测量结果的表达式为:

$$\lambda = (0.9180 \pm 0.0092) \text{cm}$$

④声速

$$v = \lambda f = 38163 \text{Hz} \times 0.009180 \text{m} = 350.3363 \text{m/s}$$

$$U_{0.95}(v) = U_{0.95}(f) \cdot \lambda + U_{0.95}(\lambda) \cdot f = 50 \text{Hz} \times 0.9180 \text{cm} + 0.0092 \text{cm} \times 38163 \text{Hz} = 3.9700 \text{m/s}, P = 0.95$$

故声速最终测量结果的表达式为:

$$v = (350.3363 \pm 3.9700) \text{m/s}$$

⑤相对误差

$$E_r = \frac{|v - v_t|}{v_t} \times 100\% = \frac{350.3363 \text{mm} - 344.7144 \text{mm}}{344.7144 \text{mm}} \times 100\% = 1.63\%$$

(2) 最小二乘法

①斜率

$$l_j = b_0 + b_1 j$$

实 验 报 告

评分:

管理 系 20 级

学号 PB20151804

姓名 袁雨

日期 2021 年 4 月 9 日

$$\overline{\Delta x} = \frac{\sum_{j=1}^{12} l_j}{12} = \frac{7.800 + 8.230 + 8.716 + 9.150 + 9.620 + 10.070 + 10.528 + 11.010 + 11.440 + 11.890 + 12.324 + 12.786}{12} \text{ cm}$$

$$\overline{j} = \frac{\sum_{i=1}^{12} j_i}{12} = 6.5$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{12} l_i j_i - 12 \times \overline{l} \overline{j}}{\sum_{i=1}^{12} j_i^2 - 12 \times \overline{j}^2} = \frac{868.160 - 12 \times 10.297 \times 6.5}{650 - 12 \times 6.5^2} = \frac{64.994}{143} = 0.4545 \text{ cm}$$

②波长 λ

$$\lambda = 2b = 0.9090 \text{ cm}$$

③声速 v

$$v = \lambda f = 0.009090 \times 38163 = 346.9017 \text{ m/s}$$

④相关系数 r

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{12} l_i j_i - 12 \times \overline{l} \overline{j}}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{12} j_i^2 - 12 \times (\overline{j})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^{12} l_i^2 - 12 \times (\overline{l})^2 \right]}} = \frac{868.160 - 12 \times 10.297 \times 6.5}{\sqrt{(650 - 12 \times 6.5^2)(1301.8807 - 12 \times 10.297^2)}} = \frac{64.994}{64.996} = 0.99997$$

⑤不确定度

斜率 b 的标准差

$$s_b = b \sqrt{\left(\frac{1}{r^2} - 1 \right) / (n - 2)} = 0.4545 \times \sqrt{\frac{0.00006}{10}} = 0.0011 \text{ cm}$$

斜率 b 的扩展不确定度

$$u_b = t_p s_b = 2.23 \times 0.0011 \text{ cm} = 0.002453 \text{ cm}, P=0.95$$

波长 λ 的扩展不确定度

$$u_\lambda = 2u_b = 0.004906 \text{ cm}, P=0.95$$

声速 v 的扩展不确定度

$$u_v = u_\lambda f + u_f \lambda = 0.004906 \times 38163 + 50 \times 0.9090 \text{ cm} = 2.3268 \text{ m/s}, P=0.95$$

故声速最终测量结果的表达式为:

$$v = (346.9017 \pm 2.3268) \text{ m/s}$$

实 验 报 告

评分:

管理系 20 级

学号 PB20151804

姓名 袁雨

日期 2021 年 4 月 9 日

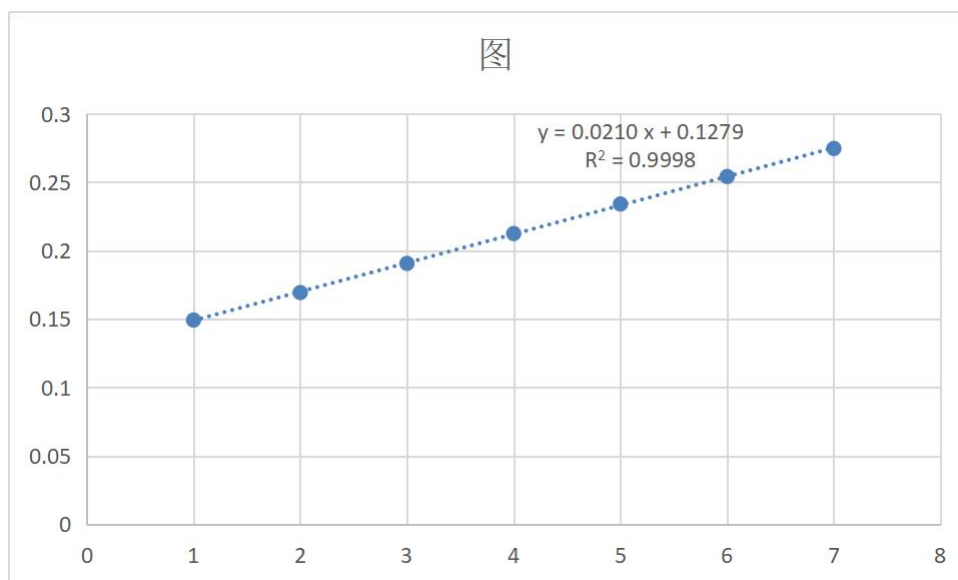
⑥相对误差

$$E_r = \frac{|v - v_t|}{v_t} \times 100\% = \frac{346.9017\text{mm} - 344.7144\text{mm}}{344.7144\text{mm}} \times 100\% = 0.63\%$$

4. 相位比较法测量水中的波长和声速

测量序号	1	2	3	4	5	6	7
接收器 S1 与 S2 的 距离 l/m	0.14924	0.16932	0.19062	0.21248	0.23402	0.25410	0.27460

用最小二乘法拟合作图:



可得解析式 $y = 0.0210x + 0.1279, R^2 = 0.9998$

$$\text{则 } \frac{\lambda}{2} = 0.0210\text{m}$$

$$\lambda = 0.0420\text{m}$$

$$\text{故声速 } v = \lambda f = 0.0420 \times 38163 = 1602.846\text{m/s}$$

七、误差分析:

1. 游标卡尺和低频信号发生器自身的不确定度带来的误差, 其中低频信号发生器的频率不稳定;
2. 测量仪器在正常使用过程中测量环境和仪器性能随机涨落的影响;
3. 人为读数, 无法保证读数时示波器上的波形振幅是最大的, 也无法保证读数时李萨如图形呈现的是绝对的直线。
4. 实际实验时, 空气中的水蒸气和其他杂物的影响不能忽略。
5. 测液体中实验开始时未估算好距离, 导致准备测量第八组数据时游标卡尺已移动到末端, 缺少了一组数据。

实 验 报 告

评分:

管理 系 20 级

学号 PB20151804

姓名 袁雨

日期 2021 年 4 月 9 日

八、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。

声波在介质中传播时, 因波束发散、吸收、反射、散射等原因, 使声能在传播中减少。而波的能量 $E = \frac{1}{2} k A^2$,

所以随着声波的不断向前传播, 能量逐渐减小, 振幅也逐渐减小。

2. 声速测量中驻波法、相位法、时差法有何异同?

(1) 异:

①实验原理: 驻波法和相位法是连续入射波和反射波频率相同发生相干叠加, 形成驻波与行波的叠加, 测出波长 λ 和频率 f , 利用 $v = \lambda f$ 来计算声速; 而时差法是脉冲波从发射换能器经时间 t 到达距离为 L 处

的接收换能器, 利用 $v = \frac{L}{t}$ 来计算声速;

②波源: 驻波法和相位法用的是连续波, 时差法用的是脉冲波;

③仪器: 驻波法和相位法用示波器观察波峰和波谷, 或者观察两个波的相位差, 游标卡尺读数位置不易确定。时差法只用记录信号源的时间读数和用游标卡尺测量长度 L , 较精确。

(2) 同:

①仪器: 都用到了低频信号发生器, 用来发送电信号。都用到了压电陶瓷换能器, 进行电压和声压的转换;

②驻波法和相位法的相同点: 驻波法和相位法都是连续入射波和反射波频率相同发生相干叠加, 形成驻波与行波的叠加, 测出波长 λ 和频率 f , 利用 $v = \lambda f$ 来计算声速; 都使用了连续波; 都使用了示波器等。

3. 各种气体中的声速是否相同, 为什么?

不相同。

①因为声波是机械波, 机械波的传播需要弹性媒质, 质元之间的弹性力使波得以传播, 质元的惯性使波以有限的速度传播。不同的气体就是不同的弹性媒质, 其物理性质 (如弹性、惯性等) 必然不同, 从而使声波在不同气体中的速度不同。

②在理想气体中的传播速度: $v = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}}$, 其中 $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ 为气体的定压比热容和定容比热容之比; M 为

气体的摩尔质量。不同气体的上述两个值不相等, 所以声速在其中不相同。