

声速测量实验报告

少年班学院 小组1号 PB21000004 吴越 2022年4月2日

摘要

本次实验在于着重训练利用SV5声速测量仪来测量声速的实验操作方法。

- 利用共振干涉法（驻波假设下）测量声速。
- 利用相位比较法（行波近似下）测量声速。
- 利用时差法测量声速。
- 实验数据处理与误差分析。
- 拓展实验：用声呐测量声速。

背景介绍

- 简介：声波是一种能够在所有物质中（除真空外）传播的纵波。
- 作用：超声波具有波长短，易于定向发射等优点。在水下通讯、生物工程、超声波诊断、牙科和碎石诊疗等工业、农业、军事、医疗等方面具有非常多的应用。
- 意义：而通过媒质中声速的测定，可以了解媒质的特性或状态变化，在无损检测、探伤、流体测速、定位等声学检测中声速的测量尤为重要。

第一部分 实验方法

1.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

2.实验原理:

（一）利用声速与频率、波长的关系

根据波动理论，声波各参量之间的关系有

$$v = \lambda \cdot f$$

在实验中,可以通过测定声波的波长 λ 和频率 f 代入公式求声速。

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 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。

（1）共振干涉法（驻波假设下）

利用S1,S2两个压电换能器，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。连续改变距离L，在示波器上可观察到，声压波幅将在最大值和最小值之间呈周期性变化，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。故有：

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

记录距离的变化，即可求出波长。

（2）相位比较法（行波近似下）

利用压电换能器，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。发射器与接收器之间有相位差，可通过李萨如图形来观察。有：

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2}, \Delta \phi = \pi$$

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 $\frac{\lambda}{2}$ ，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 。

用以上方法求得 λ ，代入公式即可求得声速。

（二）利用声波传播距离和传播时间计算声速

利用时差法，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

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

因此测量媒质长度 L 与传播时间 t ，代入公式即可求得声速。

3.实验步骤

1. 按照讲义所介绍的方法，连接调试好实验装置。
2. 从频率最大位开始调节，每一位都要满足电压幅度最大，得到谐振频率。
3. 改变发射器位置，使其缓慢远离接收器，观察示波器，当声压从最大值减小的一瞬间，停止远离，记录此刻发射器的位置。直到测得12组位置数据。
4. 再次连接调试好实验装置，切换至观察李萨如图形。
5. 改变发射器位置，使其缓慢远离接收器，观察示波器，当李萨如图形为正负直线时，停止远离，记录此刻发射器的位置。直到测得8组位置数据。
6. 用游标卡尺测量不同规格的有机玻璃棒与黄铜棒的长度。
7. 调整实验装置，依次将固体棒接入装置，测量时间，记录信号源的时间读数。
8. 关闭电源，整理仪器。

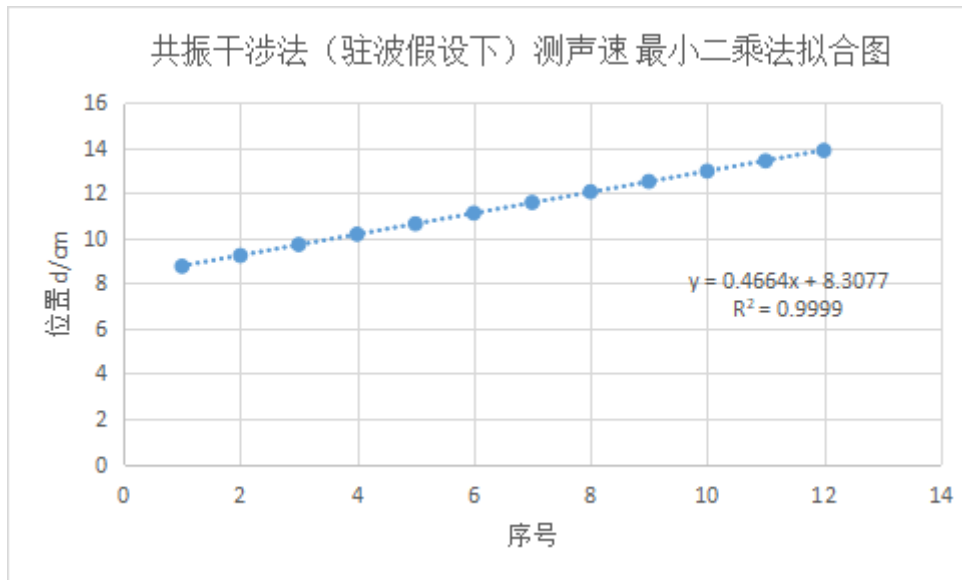
第二部分 结果和分析

1.共振干涉法（驻波假设下）测声速

谐振频率 $f: 37060.000Hz$ 室内温度 $T = 21.6^{\circ}C$

实验序号	1	2	3	4	5	6
d/cm	8.756	9.232	9.718	10.176	10.638	11.012
实验序号	7	8	9	10	11	12
d/cm	11.556	12.060	12.504	12.982	13.416	13.888

用最小二乘法拟合图像，得：



直线方程为： $y = 0.4664x + 8.3077$

由实验原理可知，该方程的斜率即为半波长，因此：

$$\lambda = 2k = 2 \times 0.4664 \approx 0.933cm$$

计算得声速：

$$v = \lambda \cdot f = 0.00933m \times 37060.000Hz \approx 345.8m/s$$

对 λ 的单次测量值如下:

序号	1	2	3	4	5	6
d/cm	0.952	0.972	0.916	0.924	0.948	0.942
序号	7	8	9	10	11	
d/cm	0.954	0.908	0.916	0.908	0.924	

波长 λ 标准差为:

$$\sigma_{\lambda} = \sqrt{\frac{(0.952 - 0.933)^2 + (0.972 - 0.933)^2 + \dots + (0.908 - 0.933)^2 + (0.924 - 0.933)^2}{6 - 1}} \approx 0.0205cm$$

或者直接由公式:

$$\sigma_{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{1}{r^2} - 1\right)/(n - 2) \cdot m} \approx 0.0205cm$$

而游标卡尺的最大允差为 $\Delta\lambda_{\text{仪}} = 0.02mm$, 估计误差约为 $\Delta\lambda_{\text{估}} = 0.01mm$

故 B 类不确定度:

$$\Delta\lambda_B = \sqrt{(\Delta\lambda_{\text{仪}})^2 + (\Delta\lambda_{\text{估}})^2} = \sqrt{(0.02)^2 + (0.01)^2}mm \approx 0.02mm$$

展伸不确定度为:

$$U_{\lambda 0.95} = \sqrt{\left(t_{0.95} \frac{\sigma_{\lambda}}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(K_p \frac{\Delta_B}{C}\right)^2} = \sqrt{\left(2.20 \times \frac{0.0205}{\sqrt{11}}\right)^2 + \left(1.96 \times \frac{0.002}{\sqrt{3}}\right)^2}cm \approx 0.0133cm, P = 0.95$$

谐振频率只有 B 类不确定度。信号发射器的最大允差 $\Delta f_{\text{仪}} = 0.001Hz$, 置信系数 $C = 3$, 由于实际操作中, 当调节至十位时, 示波器上的波形变化已不太明显, 因此取人的估计误差 $\Delta f_{\text{估}} = 10Hz$

频率 f 的不确定度:

$$\Delta_B = \sqrt{(\Delta f_{\text{仪}})^2 + (\Delta f_{\text{估}})^2} = \sqrt{(0.001)^2 + (10)^2}Hz \approx 10Hz$$

展伸不确定度为:

$$U_{f 0.95} = K_p \frac{\Delta_B}{C} = 1.96 \times \frac{10}{3}Hz \approx 6.53Hz, P = 0.95$$

由公式 $v = \lambda \cdot f$, 及误差传递公式: 得 λ 的展伸不确定度为:

$$\frac{U_{v 0.95}}{\bar{v}} = \sqrt{\left(\frac{U_{\lambda 0.95}}{\bar{\lambda}}\right)^2 + \left(\frac{U_{f 0.95}}{f}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.0133}{0.933}\right)^2 + \left(\frac{6.53}{37060.000}\right)^2} \approx 0.014, P = 0.95$$

得

$$U_{v 0.95} = \bar{v} \times 0.014 \approx 4.8m/s^2, P = 0.95$$

最终结果为:

$$v = \bar{v} \pm U_{v 0.68} = 345.8 \pm 4.8m/s, P = 0.95$$

误差分析:

计算实验温度下空气中声速的理论值为

$$v_t = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} = 331.5 \times \sqrt{1 + \frac{21.6}{273.15}} \text{ m/s} \approx 344.3 \text{ m/s}$$

因此本实验的相对误差为

$$\delta = \frac{|v - v_t|}{v_t} \times 100\% \approx 0.4\%$$

可见本实验的误差是比较小的。

分析可知在实验过程中有以下因素引起误差:

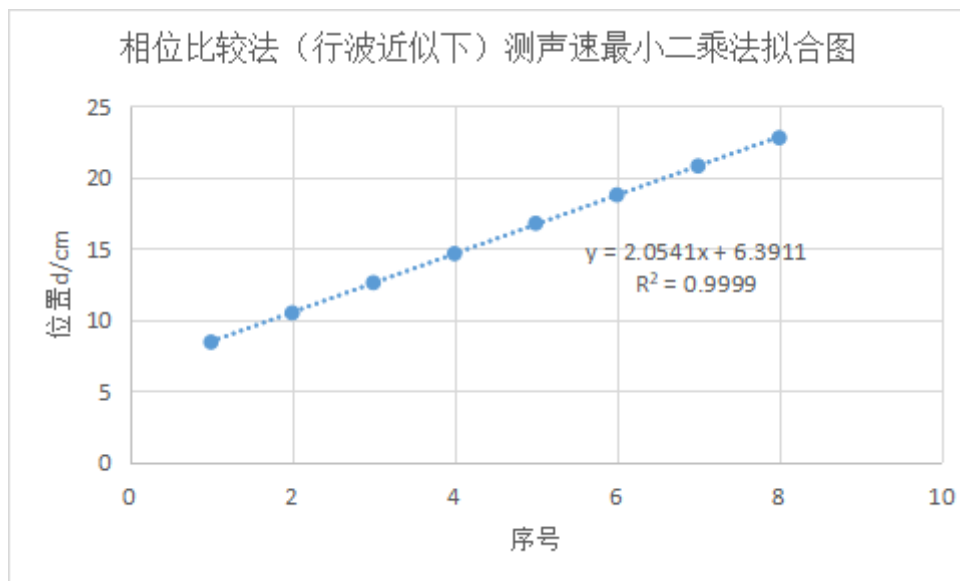
- (1) 在调节谐振频率时, 在调到十位以后的调节在示波器上电压的变化肉眼难以观察, 引起估计误差较大, 导致 频率不确定度较大。
- (2) 在使用游标卡尺的读数时, 由于游标卡尺倾斜放置, 导致目光难以正对读数, 存在一定误差。
- (3) 在观察示波器寻找振幅最大值时, 由于滚轮只能单向扭动, 这导致滚轮移动容易超过最大位置, 导致对位置的测量误差较大。
- (4) 在观察示波器寻找振幅最大值时, 电压到达最大值后变化幅度较小, 用肉眼难以判断电压是否到达最大值, 从而导致对位置的测量误差较大。
- (5) 空气中的水蒸气对声速也有一定影响, 没有考虑到水蒸气的效应。

2.相位比较法 (行波近似下)

谐振频率 $f: 37060.000 \text{ Hz}$ 室内温度 $T = 22.0^\circ \text{ C}$

实验序号	1	2	3	4	5	6	7	8
d/cm	8.410	10.460	12.580	14.618	16.746	18.742	20.770	22.750

用最小二乘法拟合图像, 得:



直线方程为: $y = 2.0541x + 6.3911$

由实验原理可知, 该方程的斜率即为半波长, 因此波长:

$$\lambda = 2k = 2 \times 2.0541 \approx 4.108\text{cm}$$

计算得水中声速：

$$v = \lambda \cdot f = 0.04108\text{m} \times 36600.000\text{Hz} \approx 1503.5\text{m/s}$$

查询资料知：在20°C时，纯水中的声速是1482.9m/s，因此结果较为接近。

误差分析：

在实验过程中主要有以下因素引起误差：

- (1) 实验用液体不是纯水，存在一些杂质，会导致所测得声速误差较大。
- (2) 在使用游标卡尺的读数时，由于游标卡尺倾斜放置，导致目光难以正对读数，存在一定误差。
- (3) 在观察示波器中的李萨如图形时，不能精确地确定形成直线，导致位置确定的误差。

3.时差法

1.无机玻璃棒：

实验序号	1	2	3
d/cm	16.634	20.510	26.080
$t/\mu\text{s}$	110	131	159

为避免导线传递电信号引起的时间误差，我们选择考虑增量计算以减小导线带来的影响：

实验序号	1,2	2,3	1,3
$\Delta d/\text{cm}$	3.876	5.570	9.446
$\Delta t/\mu\text{s}$	21	28	49
$v/(\text{m/s})$	1845.7	1989.3	1927.8

故计算得无机玻璃棒中声速：

$$\bar{v} = \frac{v_1 + v_2 + v_3}{3} = \frac{1845.7 + 1989.3 + 1927.8}{3} \text{m/s} \approx 1920.9\text{m/s}$$

2.金属铜棒：

实验序号	1	2
d/cm	20.786	24.776
$t/\mu\text{s}$	73	84

(备注：实验环境所限，只能找到两种长度不同的金属棒进行实验。因此得到的结果偶然性与不确定性都较高)

$$\Delta d = 3.990\text{cm}, \Delta t = 11\mu\text{s}$$

故计算得金属铜棒中声速：

$$\bar{v} = \frac{\Delta d}{\Delta t} \approx 3627.3\text{m/s}$$

误差分析:

在实验过程中有以下因素引起误差:

- (1) 用游标卡尺测量棒的长度时, 游标卡尺的读数有一定误差。
- (2) 实验用的黄铜棒、有机玻璃棒不纯, 且不同的黄铜棒、有机玻璃棒所含杂质以及杂质的分布也不相同, 会导致误差以及不确定度的产生。
- (3) 不同棒与仪器咬合的程度不同, 存在一定误差。
- (4) 棒的长度种类较少, 所测得的数据偏少, 得到的结果偶然性与不确定性都较高。

实验讨论:

通过声速测量实验, 我:

- (1) 了解了示波器, *SV5*声速测量仪的结构、作用和工作原理。
- (2) 掌握示波器的基本调节要求、方法和使用规范。
- (3) 实践了使用*SV5*声速测量仪测定声速的实验, 用三种方式测量了声速。
- (4) 懂得了分析基本误差的来源, 提出进行修正和改进的方法。
- (5) 提升了其他与试验相关的能力。

第三部分 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：声波在传播过程中的减弱现象与传播距离、声波频率和界面等因素有关。声波在介质（如空气，液体，固体）中传播时，由于接收器的反射面不是理想的刚性平面，声波在介质中扩散、被吸收，声波的能量会不断损耗。因此能量随着离开声源的距离增加而逐渐减弱。又由于波动能量的大小表现为振幅的大小，因此声波在传播过程中的能量损失就通过声压振幅的极大值随距离变长减小表现出来。

此外，针对本次实验，实验使用的声波频率较高，根据声学知识，频率越高的声波在传播过程中更容易受空气影响，因此在本实验中传播路程增加时能量损失的现象更为明显。

(2) 声速测量中驻波法、相位法、时差法有何异同？

答：

不同点：

(1) 原理：驻波法、相位法所利用的是发射波和返回波形成驻波，测出波长后乘以谐振频率来计算波速。时差法是利用匀速运动公式，测出传播距离与时间做比值得到声速。

(2) 波源：驻波法、相位法要将发射源调为连续波，而时差法要调整为脉冲波。

(3) 仪器：驻波法、相位法要用到示波器，而时差法没有用到。

(4) 操作方法：驻波法，相位法，时差法三者所用到的记录数据方法不相同。

驻波法是通过观察声压振幅达到最大值。

相位法是通过观察李萨如图形的周期性变化。

时差法是直接观察信号发生器上的时间显示。

相同点：

(1) 波源：驻波法、相位法用的都是连续波。

(2) 仪器：驻波法、相位法都要用示波器、游标卡尺和 SV5 型声速测量仪。都使用游标卡尺读数。

(3) 原理：都利用到了压电陶瓷的正/逆压电效应来进行实验。

(3) 各种气体中的声速是否相同，为什么？

答：不同气体中的声速一般不同。通过理想气体中声速的计算式

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

可知，理想气体中声速与气体的比热容比、摩尔质量有关，这是由气体的性质决定的。此外，由公式：

$$v_t = v_0 \sqrt{\left(1 + \frac{t}{273.15}\right) \left(1 + \frac{0.3192 p_w}{p}\right)}$$

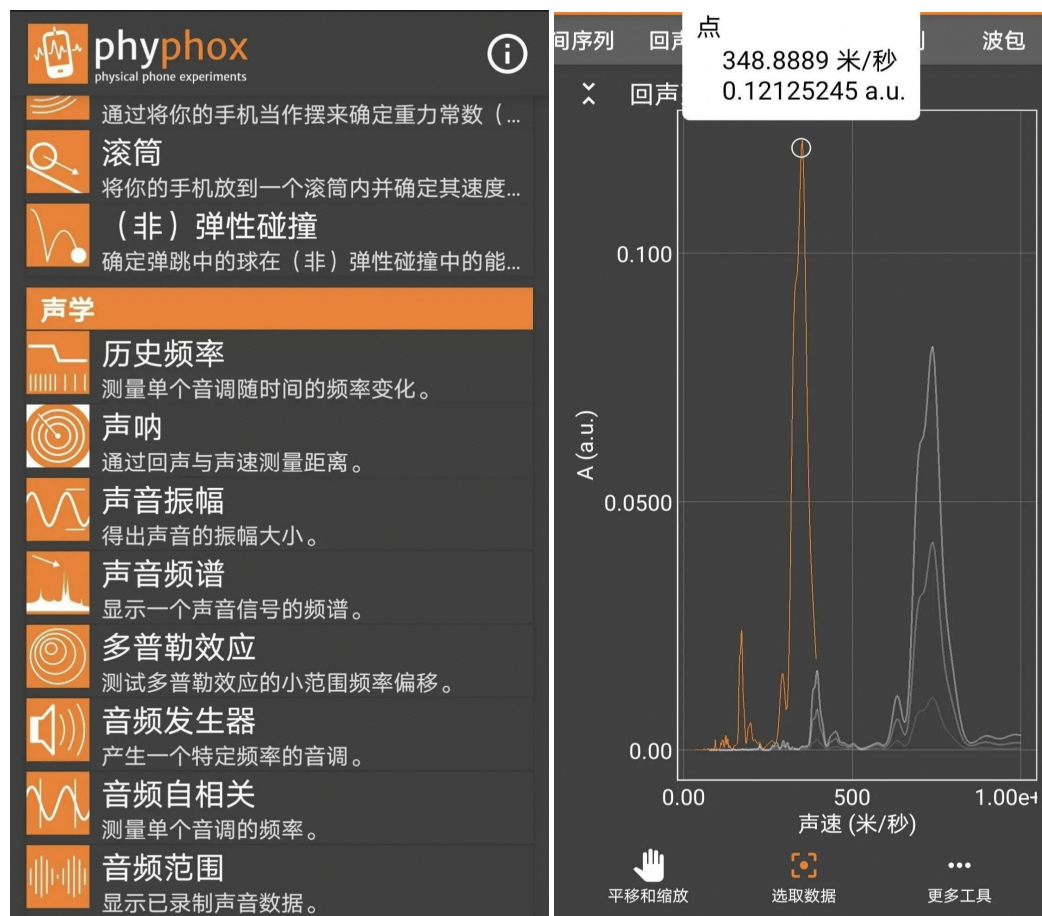
可知，温度，空气中水蒸气对声速也有影响，对相同化学式的气体，在温度不同的情况下，其中声速也会不相同。

因此不同气体中的声速一般不同。

*拓展实验

根据课堂讲义中的介绍，可以使用“手机物理工坊”中的“声呐”功能来测量声速

我们用纸做成一个圆筒，有直尺测量它的长度，输入到APP中，观察它所接收到的回声强度：



由图可知，观察回声强度的峰值，对应的坐标值即为声速测量值。

$$v \approx 348.9\text{m/s}$$

与我们的实验结果较为接近，可以判断实验结果是合理的。

因此，要学会灵活使用各种辅助实验的工具，不仅能提高我们做实验的效率，还能提高我们实验的精确性，熟练掌握各类工具是做实验的基本素养。