

# 实验报告

评分:

2020 级 11 系 3 班

姓名 黄瑞轩

日期 2021 年 4 月 30 日

No PB20111686

**实验题目:** 声速的测量

**实验目的:** 用共振干涉法和相位比较法测量气体、液体中的声速; 用时差法测量固体中的声速。

**实验器材:** SV5 型声速测量仪、双踪示波器、有机玻璃棒、黄铜棒、游标卡尺。

**实验原理:** 声波是一种波, 其在理想气体中的传播速度  $v$  满足

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (1)$$

其中  $\gamma = C_p / C_v$  是比热容比、 $R$  为普适气体常量、 $M$  为气体的摩尔质量、 $T$  为气体的热力学温度。

STP 下干燥的理想空气中的声速为  $v_0 = 331.45 \text{ m/s}$ , 在摄氏温度  $t$  下声速的公式为

$$v_t = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} \quad (2)$$

声波参数 (波速  $v$ , 波长  $\lambda$ , 频率  $f$ ) 之间满足  $v = \lambda f$ , 因此可通过测定声波的波长和频率来求声速。声波的频率  $f$  等于声源的电激励信号频率, 由低频信号发生器上的频率直接给出。声波的波长可用 **共振干涉法** (驻波假设下) 和 **相位比较法** (行波近似下) 来测量。本实验用前者测量空气中的声速, 用后者测量液体 (水) 中的声速。

**谐振频率的测量原理:** 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  $f$ 。实际操作时从频率最大位开始调节, 每一位都要满足电压幅度最大, 依次调节到最小位, 结果即为谐振频率。

**注意:** 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。 □

**共振干涉法原理:** 实验装置如图 1, 当 S2 的接收表面直径较大时, 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与频率相同而发生相干叠加, 当 S1 和 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是这两个相干波在 S2 处合成振动的情况。

在驻波场中, 空气质点位移的图像不能直接观察到, 可以通过仪器观测声压 (空气中由于声扰动而引起的超出静态大气压强的那部分压强) 来间接反映位移变化。声场中空气质点位移为波腹的地方, 声压最小; 位移为波节的地方, 声压最大。如图 2 所示。当发生共振时, 接收器 S2 反射端面位置近似为振幅的波节, 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  $L$ , 示波器可观察到声压波幅在最大值和最小值之间呈周期性变化。当 S1、S2 之间的距离变化量  $\Delta L$  为半波长  $\lambda/2$  的整数倍时,  $\Delta L = n \cdot \lambda/2$ , 出现稳定的驻波共振现象, 声压最大, 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, 所以有  $\Delta L_{n-1} = |L_{n+1} - L_1|$ 、 $\lambda_i = \Delta L_{i+2} = |L_{i+2} - L_i|$ 。 □

**相位比较法原理：**波不仅传播振幅，也进行相位的传播，沿传播方向上的任意两点，如果其振动状态相同，则这两点同位相，或者说其位相差为  $2\pi$  的整数倍，这两点间的距离即为波长的整数倍。

实验装置接线如图 3 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收波之间的相位差，示波器上的图形也随  $L$  不断变化。当 S1、S2 之间距离改变半个波长  $\Delta L = \lambda/2$  时， $\Delta\varphi = \pi$ 。每当相位差改变  $2\pi$  时，示波器上的李萨如图形相应变化一个周期（如图 4，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  $\lambda$ ，根据式  $v = \lambda f$  即可计算出声音传播的速度。

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，既能看到接收器与发射器信号等相位现象周期性地出现，也能看到接收器声压极大值信号周期性地出现。前者的位移平均周期为  $\lambda$ ，后者为  $\lambda/2$ 。依次测量出一系列等相点或振幅极大值点的位置  $l_j$  (对应序号为  $j$ )，求出直线方程  $l = a + bj$  的斜率  $b$ ，即可求出波长  $\lambda$ ，进而求出声速。

本实验用**时差法**来测定固体（黄铜棒、有机玻璃棒）中的声速。不用以上两种方法是因为以上两种方法测量声速是用示波器观察波峰和波谷或者观察两个波的相位差，这样做读数位置不易确定。

**时差法原理：**实验装置如图 5，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  $v = L/t$  求出声波在媒质中传播的速度。由于不知道导线以及其他器材的声波路程（事实上也无法测量），本实验采用差值法，使用两根不同长度的相同材质的棒，分别测出所用时间，用  $v = \Delta L / \Delta t$  计算波速。

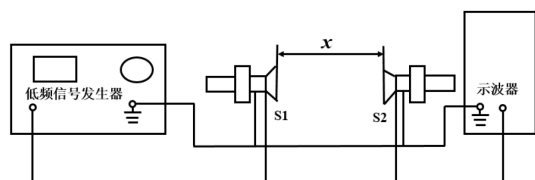


图 1 共振干涉法测量声速实验装置

(S1、S2 是压电换能器，S1 为声波发射器，S2 为接收器)

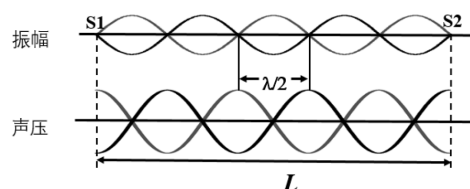


图 2 振幅、声压的变化与  $L$  之间的关系

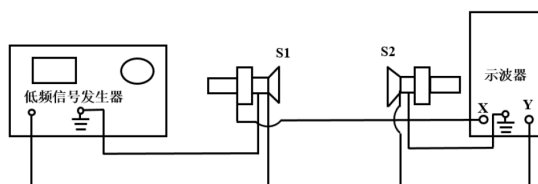


图 3 相位比较法测量声速实验装置

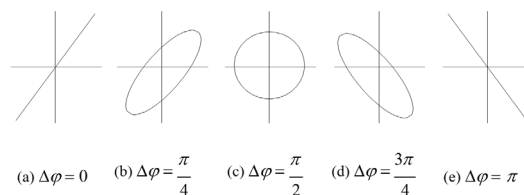


图 4 李萨如图形与两垂直运动的相位差

## 实验数据与分析

### 1、共振干涉法测量空气中波速

谐振频率：37037.000 Hz

实验温度：26.2℃ (299.35 K)

说明：以下测得的数据是游标卡尺的示数，实际上当游标卡尺示数为 0 时，S1 和 S2 之间的距离为 5cm，下面的示数用  $L'$  表示，实际距离用  $L$  表示。

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$L'/\text{mm}$	2.70	6.72	11.54	16.18	20.90	25.66	30.40	35.10	39.98	44.66	49.22	54.00	58.50	63.34	68.02
$L/\text{mm}$	52.7	56.72	61.54	66.18	70.9	75.66	80.4	85.1	89.98	94.66	99.22	104	108.5	113.34	118.02

表 1 共振干涉法测量空气中波速的数据

用 Origin 作出散点图，并用最小二乘法拟合得到拟合直线方程为  $L = 4.69j - 2.46$ ，由实验原理可知，该方程的斜率即为半波长，因此波长的测定值为 9.38 mm。拟合直线如图 5-1。

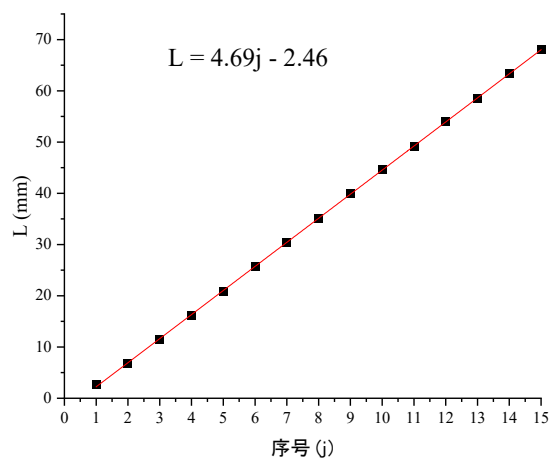


图 5-1

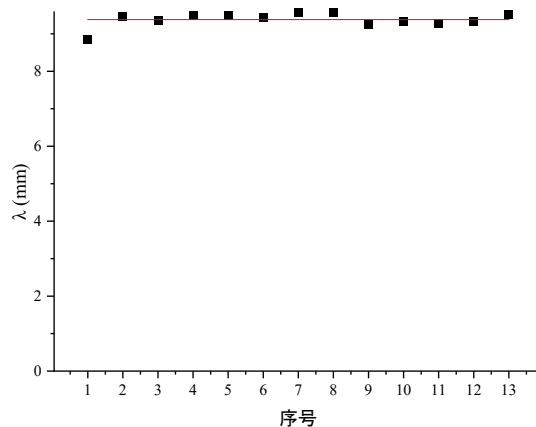


图 5-2

或者，根据公式  $\lambda_i = \Delta L_{i+2} = |L_{i+2} - L_i|$ ，计算得到各波长测量值如下表所示。

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\lambda/\text{mm}$	8.84	9.46	9.36	9.48	9.5	9.44	9.58	9.56	9.24	9.34	9.28	9.34	9.52

表 2 共振干涉法测量空气中波速数据计算得到的波长值

由 Origin 的最小二乘法，固定斜率为 0，以此来计算波长的观测值。计算得到波长值为 9.38 mm，拟合直线如图 5-2。

由  $v = \lambda f$ ，本实验的波长测量值为

$$v = 347.41 \text{ m/s} \quad (3)$$

不确定度分析:

**波长的不确定度:** 测量列的标准差为  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{13} (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}{13-1}} = 0.19\text{mm}$ , 故  $u_A = \frac{\sigma}{\sqrt{13}} = 0.05\text{mm}$ 。置信

概率为  $P=0.95$ , 由图可获得的波长测量数据为 13 个, 则取  $t_{0.95} = 2.18$ , 因此 A 类不确定度为

$$U_A = t_{0.95} u_A = 0.12\text{mm}。$$

仪器 (游标卡尺) 的最大允差  $\Delta_{\text{仪}} = 0.02\text{mm}$ , 置信系数  $C = \sqrt{3}$ , 估计误差  $\Delta_{\text{估}} = 0.01\text{mm}$ , 因此

$\Delta_B = \sqrt{\Delta_{\text{仪}}^2 + \Delta_{\text{估}}^2} = 0.02\text{mm}$ ; 取  $k_{0.95} = 1.645$ , 则  $U_B = k_{0.95} \cdot \frac{\Delta_B}{C} = 0.02\text{mm}$ 。因此波长的不确定度为

$$U_{\lambda,0.95} = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} = 0.12\text{mm}。$$

**频率的不确定度:** 谐振频率只有 B 类不确定度。信号发射器的最大允差  $\Delta_{\text{仪}} = 0.001\text{Hz}$ , 置信系数

$C=3$ , 人的估计误差  $\Delta_{\text{估}} = 10\text{Hz}$  (当调节至十位时, 示波器上的波形变化已不太明显), 因此

$\Delta_B = \sqrt{\Delta_{\text{仪}}^2 + \Delta_{\text{估}}^2} = 10\text{Hz}$ ; 取  $k_{0.95} = 1.960$ , 则  $U_B = k_{0.95} \cdot \frac{\Delta_B}{C} = 6.53\text{Hz}$ 。因此频率的不确定度为

$$U_{f,0.95} = U_B = 6.53\text{Hz}。$$

**波速的不确定度:** 由不确定度的传递公式,  $U_v = v \sqrt{\left(\frac{U_{\lambda}}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{U_f}{f}\right)^2} = 4.44\text{m/s}$ 。

因此本实验的最终结果应表示为

$$v = (347.41 \pm 4.44)\text{m/s}, P = 0.95 \quad (4)$$

误差分析:

由式(2)可计算实验温度下空气中声速的理论值为  $v_s = 346.98 \text{ m/s}$ , 因此本实验的相对误差为

$$\delta = \frac{|v - v_s|}{v_s} = 0.1\% \quad (5)$$

可见本实验的误差是比较小的, 在实验过程中有以下因素引起误差:

- (1) 在调节谐振频率时, 十位及以后的调节在示波器上显示不明显, 引起估计误差;
- (2) 游标卡尺的读数误差;
- (3) 在观察示波器寻找振幅最大值时, 由于齿轮的构造特点使得旋转把只能单向扭动, 这导致实验者观察到最大值出现时  $L$  事实上已经超过了, 这引起了误差。

2、相位比较法测量空气中波速

谐振频率：36268.000 Hz

实验温度：26.2℃（299.35 K）

说明：以下测得的数据是游标卡尺的示数，实际上当游标卡尺示数为 0 时，S1 和 S2 之间的距离为 5cm，下面的示数用  $L'$  表示，实际距离用  $L$  表示。

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta\varphi$	$\pi$	0	$\pi$	0	$\pi$	0	$\pi$	0	$\pi$
$L'/\text{mm}$	8.74	29.14	51.48	71.74	93.7	111.48	132.00	155.32	176.22
$L/\text{mm}$	58.74	79.14	101.48	121.74	143.7	161.48	182.00	205.32	226.22

表 3 相位比较法测量空气中波速的数据

用 Origin 作图得到  $L-j$  图像，拟合得到线性回归方程为  $L = 20.82j + 38.10(\text{mm})$ ，由于斜率等于波长的一半，因此波长的测量值为  $\lambda = 41.64\text{mm}$ 。

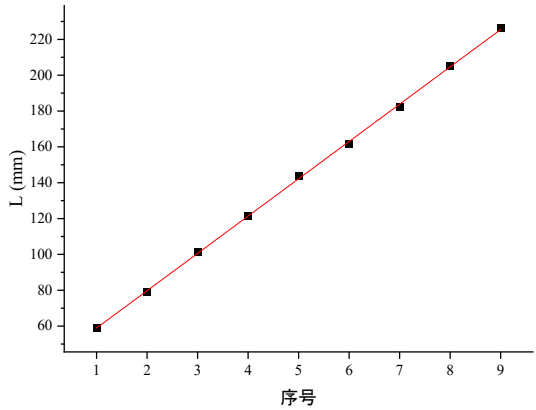


图 6 用 Origin 的线性拟合得到的图像

由  $v = \lambda f$ ，本实验的波长测量值为

$$v = 1510.20\text{m/s} \tag{6}$$

误差分析：

查表可知实验温度下纯水中声速的理论值为  $v_s = 1500.10 \text{ m/s}$ ，因此本实验的相对误差为

$$\delta = \frac{|v - v_s|}{v_s} = 0.6\% \tag{7}$$

可见本实验的误差是比较小的，在实验过程中有以下因素引起误差：

- (1) 实验用液体不是纯水，会导致误差以及不确定度的产生；
- (2) 游标卡尺的读数误差；
- (3) 在观察示波器时，人眼不能精确地确定直线，这也导致了误差。

3、利用声波传播距离和传播时间计算固体中的声速

实验温度：26.2℃（299.35 K）

测量黄铜棒中的声速：

序号	1	2	3
$L/\text{mm}$	218.64	178.54	258.60
$t/\mu\text{s}$	72	60	83

表 4 时差法测黄铜棒中声速的数据

由实验原理，我们无法测量导线以及 S1、S2 部分的长度，但是通过使用多种不同长度的黄铜棒，我们可以用差值来计算声速。实验室提供了三种长度的黄铜棒，因此产生三组数据。

无序序偶	(1,2)	(2,3)	(1,3)
$\Delta L/\text{mm}$	40.10	80.06	39.96
$\Delta t/\mu\text{s}$	12	23	11
$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3341.67	3480.87	3632.73

表 5 利用差值计算黄铜棒中声速

最终的测量值为

$$v = \frac{v_{(1,2)} + v_{(2,3)} + v_{(1,3)}}{3} = 3485.09 \text{ m/s} \quad (8)$$

测量有机玻璃棒中的声速：

注：实验环境所限，只能找到两种长度不同的有机玻璃棒进行实验。因此得到的结果偶然性和不确定性都较高。

序号	1	2
$L/\text{mm}$	231.00	271.78
$t/\mu\text{s}$	134	156

表 6 时差法测黄铜棒中声速的数据

经计算， $\Delta L = 40.78 \text{ mm}$ 、 $\Delta t = 22 \mu\text{s}$ ，因此最终的测量值为

$$v = \frac{\Delta L}{\Delta t} = 1853.64 \text{ m/s} \quad (9)$$

误差分析：

由于缺少实验温度下黄铜棒、有机玻璃棒中声速的可信值，因此无法计算相对误差。由于黄铜棒有三组数据，从三组数据的结果来看，实验结果稳定在平均值附近，因此可以估计黄铜棒中声速的最大相对误差大约为

$$\delta_{\text{黄铜}} = \frac{\max \Delta v}{v} = 4.3\% < 5\% \quad (10)$$

因此黄铜棒中声速测定实验的相对误差应当在可接受范围内，可认为成功地完成了测黄铜棒中声速的实验目的。而测有机玻璃棒中声速的实验由于只有两种长度的棒，因此只能得出一组数据，数据的偶然性较大，综合来说无法估算相对误差。

在实验过程中有以下因素引起误差：

- (1) 实验用的黄铜棒、有机玻璃棒不纯，而且不同的黄铜棒、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；
- (2) 游标卡尺的读数误差；
- (3) 在安放棒时，每次涂抹的凡士林的量具有随机性，因此对最终的测定值有一定的影响；
- (4) 测量时间的仪器精度不够，分度值为  $1 \mu\text{s}$ ，其误差体现在计算结果上就是  $10^3$  量级的误差。

## 思考题

### 一、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。

声波在实际介质（实验中为干燥空气）中传播时，由于扩散、吸收和散射等原因，会随着离开声源的距离增加而逐渐减弱。振幅的大小表示波动能量的大小，声波在传播过程中的能量损失就通过声压振幅的极大值减小表现出来。

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。由于接收器的反射面不是理想的刚性平面，它对入射声波能量也有吸收。实验使用的声波频率较高，频率越高的声波在传播过程中更容易受空气影响，因此在传播路程增加时能量损失的现象更为明显。

### 二、声速测量中驻波法、相位法、时差法有何异同？

不同点：

- （1）从波源方面说，驻波法、相位法用的是连续波，而时差法用的是脉冲波。
- （2）从测量仪器方面说，驻波法、相位法要用到示波器，而时差法没有用到。
- （3）从实验操作方面说，驻波法、相位法、时差法三者所用到的记录数据方法各不相同。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）从波源方面说，驻波法、相位法用的都是连续波。
- （2）从测量仪器方面说，驻波法、相位法都要用示波器、游标卡尺和 SV5 型声速测量仪。
- （3）从原理方面说，驻波法、相位法所利用的原理相同，均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。

### 三、各种气体中的声速是否相同，为什么？

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(1)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。其次，由于温度对声速也有影响，对相同化学构成的气体，在温度不同的情况下，其中声速也会不相同。