

声速测量 实验报告

姓名：涂嫻 学号：PB22020603 班级：22级物理学院4班 日期：2023年5月4日

实验背景

声波是一种能够在所有物质中（除真空外）传播的纵波。人耳能感知频率从 20 Hz 到 20 kHz 的纵波振动，称为可闻声波；频率高于 20 kHz，称为超声波。超声波的传播速度，就是声波的传播速度。超声波具有波长短，易于定向发射等优点，因此在超声波段进行声速测量比较方便。

通过媒质中声速的测定，可以了解媒质的特性或状态变化，如声波定位、探伤、测距、测流体流速、测量弹性模量、测量气体或溶液的浓度、比重以及输油管中不同油品的分界面等等，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。

1.实验目的

用压电陶瓷超声换能器来测定超声波在气体、液体和固体中的传播速度。

具体目标为三个问题：测量压电陶瓷换能器的谐振频率；用驻波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。

2.实验仪器

SV5 型声速测量仪（如图 1）、双踪示波器、非金属（有机玻璃棒）、金属（黄铜棒）、游标卡尺等。



图 1 SV5 型声速测量仪

3.实验原理

一.空气中声波的传播速度

理想气体中：

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (\gamma \text{ 为热容比, } M \text{ 为摩尔质量})$$

忽略空气中的水蒸气和其他夹杂物的影响，在 $T_0 = 273.15 \text{ K}$, $p = 101.3 \text{ kPa}$ 时,干燥的理想空气的声速

$$v_0 = 331.45 \text{ m/s}$$

若同时考虑空气中水蒸气的影响，校准后声速为

$$v_T = 331.45 \sqrt{\left(1 + \frac{t}{273.15}\right) \left(1 + \frac{0.3192 p_w}{p}\right)} m/s$$

二.声速测量的实验方法

利用声速与频率、波长的关系测量声速

依据波动理论

$$v = \lambda \times f$$

其中 λ 为波长， f 为频率。

实验中,可以通过测定声波的波长和频率求声速。声波的频率 f 可由数字频率计测出，或由信号发生器直接给出，而声波的波长则常用共振干涉法（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）法测声速

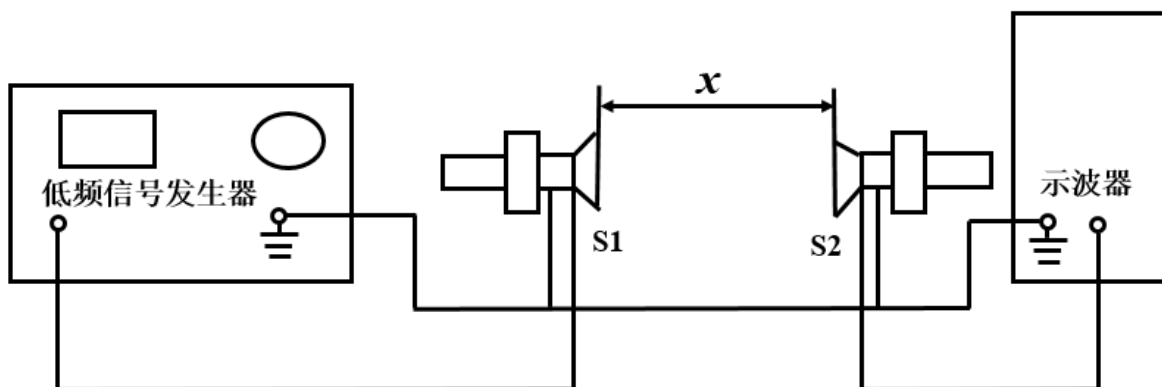


图2 驻波法测量声速实验装置

如图 2， S_1 、 S_2 为压电换能器， S_1 为声波发射源， S_2 为声波接收器， S_2 会反射部分和声源同频率的声波。当 S_1 和 S_2 相互平行时且接收器位置固定时， S_1 前进波和 S_2 反射波在 S_1 和 S_2 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 S_2 处合成振动的情况。

在驻波场中,声压可以通过仪器加以观测。声压就是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。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。当发生共振时，接收器 S_2 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，声压波幅将在最大值和最小值之间呈周期性变化。当 S_1 、 S_2 之间的距离变化量 L 为半波长 $\lambda/2$ 的整数倍 n 时，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

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

(2) 相位比较法测量声速

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，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。

波是振动状态的传播，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 2π 的整数倍，这两点间的距离即为波长的整数倍。

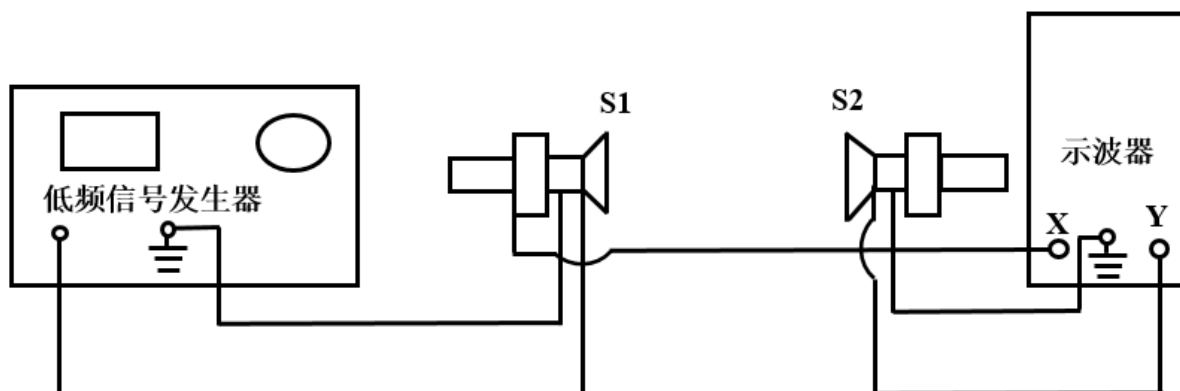


图3 相位比较法测量声速实验装置

如图 3，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，则 $\Delta L = \frac{\lambda}{2}$ ， $\Delta\varphi = \pi$ 。

总之，每移动半个波长，就会重复出现斜率符号相反的直线。

即可根据公式

$$v = \lambda \times f$$

求得声速。

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 λ ，后者为 $\lambda/2$ 。依次测量出一系列等相点或振幅极值点的位置 I_j （对应序号为 j ），求出直线方程的斜率 b_i ，即可求出波长 λ ，进而求出声速

$$I_j = b_0 + b_i j$$

利用声波传播距离和传播时间计算声速

时差法（脉冲法）

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，读数位置不易确定。较精确测量声速是用声波时差法。

它是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

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

4.实验步骤与注意事项

实验步骤

测量压电陶瓷换能器的谐振频率

(1) 接线

如图4，接线

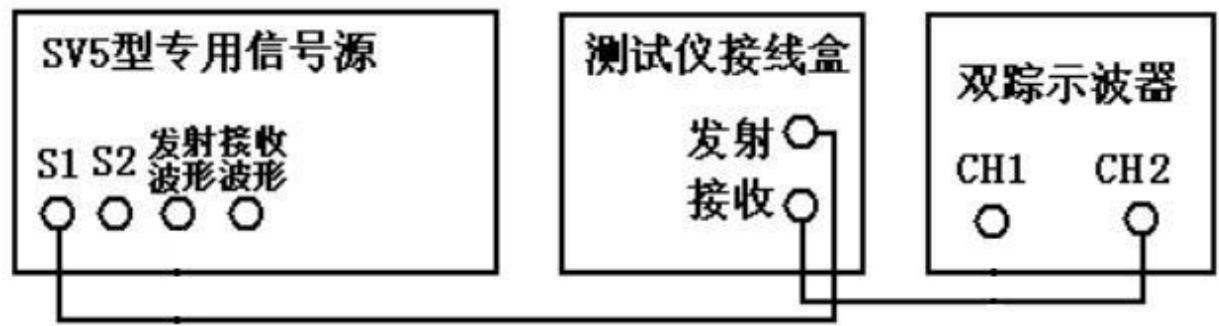


图4 谐振频率和共振干涉法测量连线图

(2) 测量谐振频率 f

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 。

共振干涉法（驻波法）测量空气中的波长和声速

- 1.当 S1 和 S2 相距 5 cm 以上时，转动鼓轮移动 S2，观察波的干涉现象
- 2.当示波器上出现振幅最大信号时，记下 S2 的位置 L_0 。
- 3.由近而远或由远而近改变接收器 S2 的位置，均可以观察到正弦波形发生周期性的变化，逐个记下振幅最大的波腹的位置共 12 个位置点
- 4.记录此时室温 t
- 5.处理数据

相位比较法测量水中的波长和声速

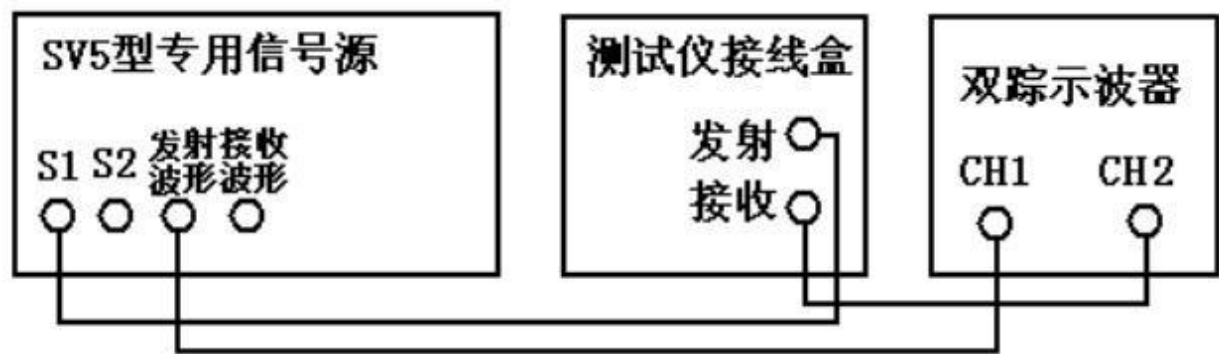


图5 相位法测量连线图

- 1.在储液槽中装入水至刻度线，将换能器置于储液槽中
- 2.如图5接线，S1 接信号发生器，并连接示波器 X 轴，S2 接示波器 Y 轴，令示波器置于“X-Y”垂直振动合成模式，此时可以看到示波器上出现椭圆或斜直线的李萨如图形。
- 3.当 S1 和 S2 相距 5 cm 以上时，转动鼓轮移动S2，观察图形，依次测出李萨如图形斜率正、负变化的直线出现时 S2 的位置 L_i ，共记录 8 个位置值。
- 4.处理数据，计算水中的波长和声速。

用时差法测量有机玻璃棒和黄铜棒中的声速

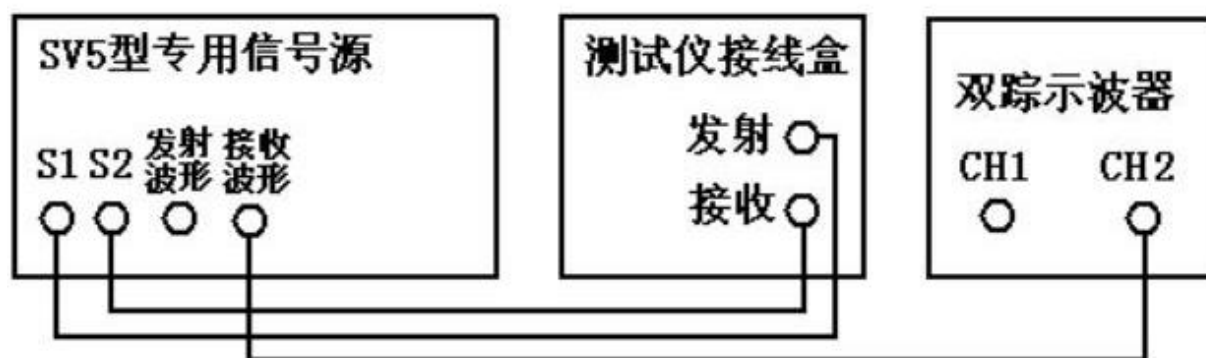


图6 时差法测量固体中声速连线图

- 1.按图6接好实验装置，将专用信号源上的“测试方法”调至“脉冲波”的位置，“声速传播媒质”按测试材质的不同，调至“非金属”或“金属”的位置。
- 2.利用多种长度的有机玻璃测试棒和黄铜测试棒。先将发射换能器尾部的连接插头拔出，将待测的测试棒一端面的小螺柱旋入接收换能器的中心螺孔内，再将另一端面的小螺柱也旋入能旋转的发射换能器上，使固体棒的两端面与两换能器的平面可靠、紧密接触。
- 3.把发射换能器尾部的连接插头插入接线盒的插座中，即可开始测量。
- 4.记录信号源的时间读数，单位为 μs ，此时显示的时间为从信号源发出脉冲信号到接收端接收所用的时间。
- 5.测试棒的长度用游标卡尺测量得到并记录长度 L 。

注意事项

- 1.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
- 2.旋紧待测棒时，应用力均匀，不可以用力过猛，以免损坏螺纹，拧紧程度要求两只换能器端面与被测棒两端紧密接触即可。调换测试棒时，要先拔出发射换能器尾部的连接插头，然后旋出发射换能器的一端，再旋出接收换能器的一端。
- 3.测量棒长时，应取与平行班接触的部位为端点。
- 4.由于棒两端存在螺旋部分，会导致测量误差，故选取材料相同而长度不同的两根棒测量，以减小误差。

5.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。

(1),声波本质上是球面波，随距离变长，处在测量区域即两块平行板间的能量密度显著降低，呈几何衰减，导致声压振幅随距离变长而显著减小。

(2),空气对声波有吸收作用，导致声波振幅随传播距离增大衰减。

2、声速测量中驻波法、相位法、时差法有何异同？

原理上：

驻波法和相位法：

同：都利用同频率的声波在空间中将振动状态进行传播，且波形周期性变化的性质，用示波器观察波形，根据波形周期与波长的关系确定波长，继而得到声速。

异：驻波法考虑前进波和反射波在往返反射，相互干涉叠加，发生共振，形成的“驻波”。所观察的是空间中声压振幅的传播。相邻两振幅最大值间距为波长的一半。

相位法利用行波性质，通过声源处的声压的相位来测定声速。所观察的是空间中波的相位的传播。相邻两斜率相反的直线图形的间距为波长的一半。

时差法：

不利用示波器观察波在空间中传播的具体性质，只利用基本运动公式，测定波从发出到被接收的平均传播速度。

3、各种气体中的声速是否相同，为什么？

不同

- (1) ,声音以波的形式传递,受空气的阻力衰减,故空气的密度不同将导致衰减程度不同，故传播速度不一样。
- (2) ,波的传播本质上是振动形式的传播，需要在空气中引起规律的扰动，而空气分子被扰动的难易程度与温度相关，温度越高扰动越容易，故声速应与气体的温度也相关。

5.数据记录

压电陶瓷换能器的谐振频率

f=37587.913Hz

共振干涉法（驻波法）测量空气中的波长和声速

数据类型/实验次数	一	二	三	四	五	六
振幅最大位置 L_i /mm	153.38	148.34	143.90	139.28	134.62	130.00
数据类型/实验次数	七	八	九	十	十一	十二
振幅最大位置 L_i /mm	125.28	120.42	115.70	111.10	106.86	102.12

表1：驻波法 振幅最大位置 原始数据表

室温 $t=25.2$ 摄氏度= 298.2K

相位比较法测量水中的波长和声速

数据类型/实验组数	一	二	三	四	五	六	七
$k>0$ 直线对应位置 L/mm	259.72	220.54	181.98	144.28	105.78	65.96	26.20
$k<0$ 直线对应位置 L/mm	240.60	201.86	163.34	123.74	87.02	46.28	5.32

表2：相位法 李萨如图形为直线对应位置 原始数据表

时差法测量有机玻璃棒和黄铜棒中的声速s

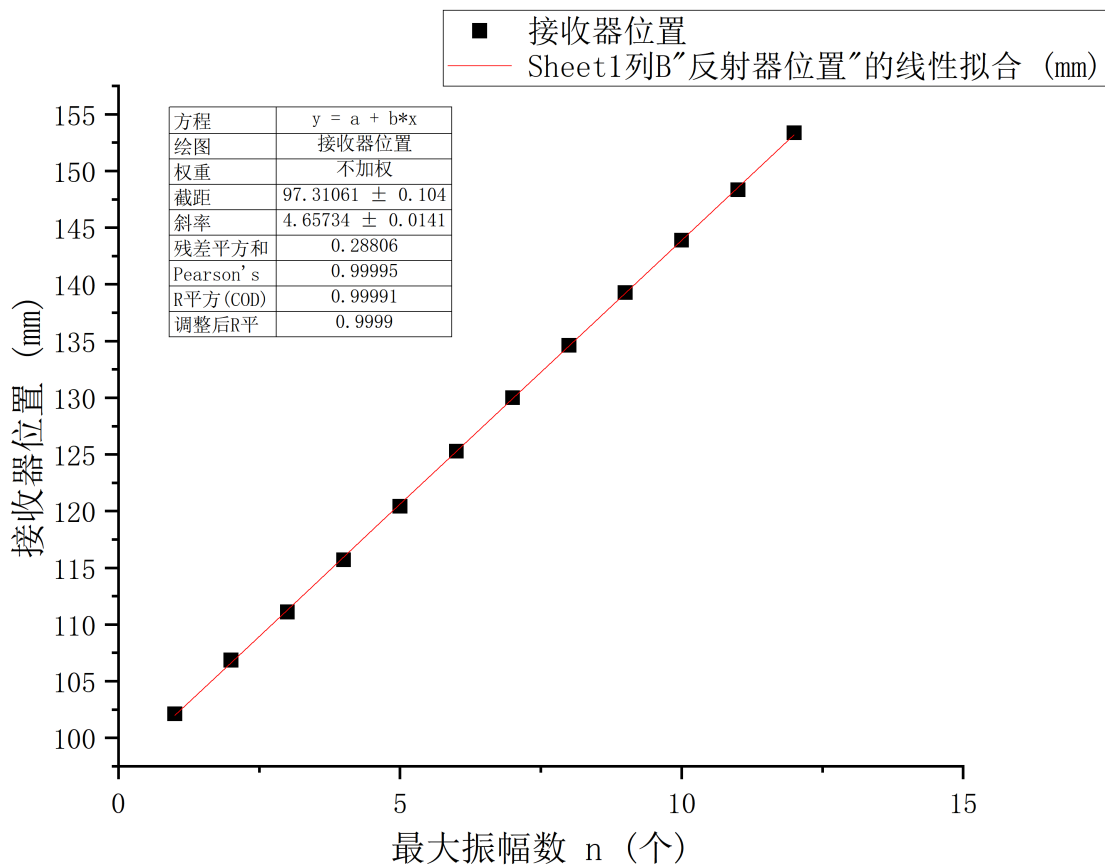
数据类型	长棒	短棒
黄铜棒长度L/mm	206.66	166.68
黄铜棒时差 $t/\mu s$	72	57
有机玻璃棒长度L/mm	260.20	218.52
有机玻璃棒时差 $t/\mu s$	152	132

表3：时差法 棒长 时差 原始数据表

分析与讨论

1.数据处理与误差分析

共振干涉法（驻波法）测量空气中的波长和声速



最小二乘法线性拟合

设函数关系 $L = kn + b$

斜率 $k = \frac{\overline{nL} - \bar{n} \cdot \bar{L}}{\overline{n^2} - \bar{n}^2} = 4.65734 \text{ mm}$

截距 $b = \bar{L} - k\bar{n} = 97.31061 \text{ mm}$

相关系数

$$r = \frac{\overline{nL} - \bar{n} \cdot \bar{L}}{\sqrt{(\overline{n^2} - \bar{n}^2)(\overline{L^2} - \bar{L}^2)}} = 0.9999$$

斜率标准差

$$s_k = k \sqrt{\left(\frac{1}{r^2} - 1\right) / (n - 2)} = 0.01419 \text{ mm}$$

斜率的扩展不确定度(P=0.95)

$$u_k = t_P s_m = 0.030934 \text{ mm}$$

截距标准差

$$s_b = \sqrt{\overline{x^2}} \cdot s_m = 0.10446 \text{ mm}$$

截距的扩展不确定度(P=0.95)

$$u_b = t_p s_b = 0.2277228 \text{ mm}$$

波长 λ

$$\lambda = 2k = 2 \times 4.65734 \text{ mm} = 9.31468 \text{ mm}$$

波长 λ 的展伸不确定度 (P=0.95)

$$\begin{aligned} U_{\lambda,P} &= \sqrt{\left(\frac{d\lambda}{dk} t_{0.95} U_k\right)^2} \\ &= \sqrt{(2U_{k,p})^2} \\ &= \sqrt{(2 \times 0.030934)^2} \text{ mm} \\ &= 6.186 \times 10^{-2} \text{ mm} \end{aligned}$$

谐振频率的不确定度

$$\Delta_{B,f} = 0.001 \text{ Hz}$$

声速 v

$$v = f \times \lambda = 350.11 \text{ m/s}$$

声速 v 的延伸不确定度(P=0.95)

$$\begin{aligned} U_{v,p} &= \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial \lambda} t_{0.95} U_{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial f} t_{0.95} U_f\right)^2} \\ &= \sqrt{(fU_{\lambda,p})^2 + (\lambda U_{f,p})^2} \\ &= 2.4 \text{ m/s} \end{aligned}$$

声速 v 最终结果

$$v = (350.1 \pm 2.4) \text{ m/s}$$

实验温度下，声速理论值 v_t

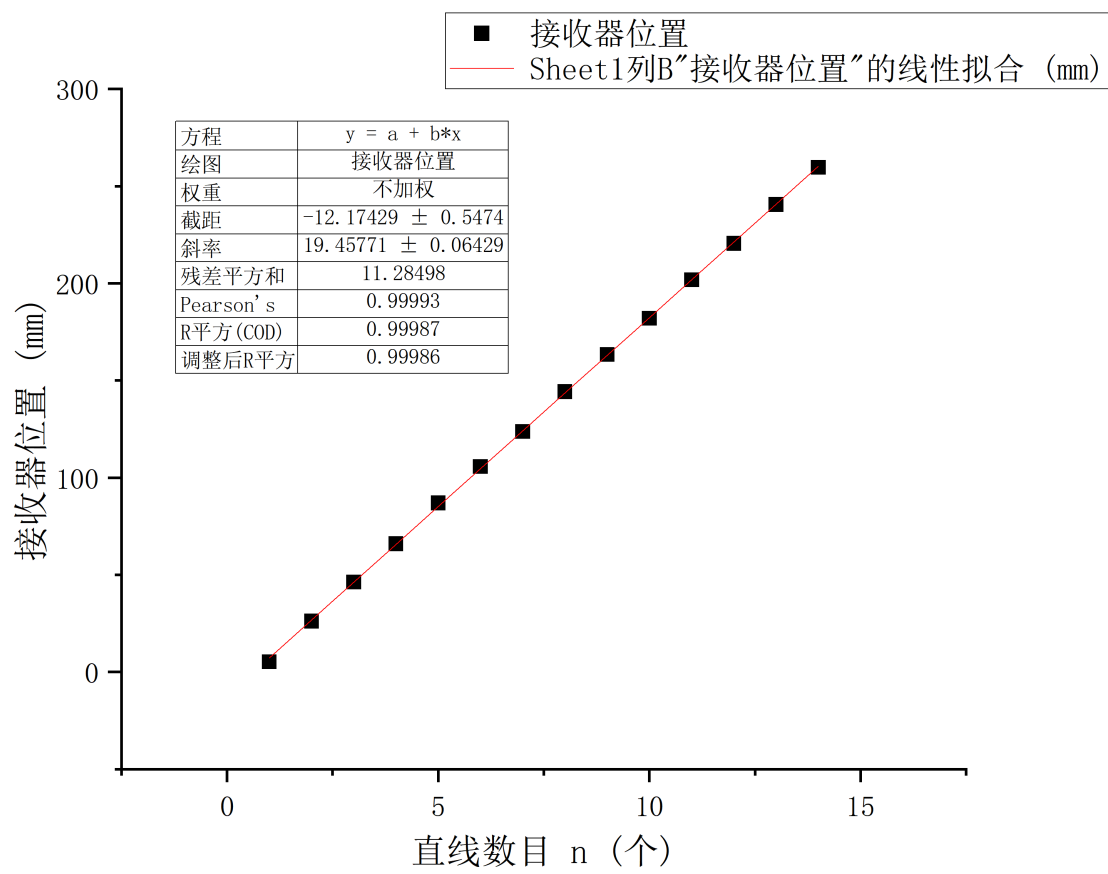
$$v_t = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} = 331.45 \sqrt{1 + \frac{25.2}{273.15}} \text{ m/s} = 346.4 \text{ m/s}$$

相对误差

$$\delta = \frac{|v - v_t|}{v_t} = \frac{(350.11 - 346.4)}{346.4} = 0.010707$$

$$\delta = 1.0707\%$$

相位比较法测量水中的波长和声速



波长λ

$$\lambda = 2 \times k = 2 \times 19.4577 \text{ mm} = 38.9154 \text{ mm}$$

声速v

$$v = f \times \lambda = 1467.75 \text{ m/s}$$

时差法测量有机玻璃棒和黄铜棒中的声速s

黄铜棒:

$$v = \frac{L_{\text{长}} - L_{\text{短}}}{t_{\text{长}} - t_{\text{短}}} = 2665.33 \text{ m/s}$$

有机玻璃棒:

$$v = \frac{L_{\text{长}} - L_{\text{短}}}{t_{\text{长}} - t_{\text{短}}} = 2084.00 \text{ m/s}$$

