

# 声速的测量

PB2100026 胡文悦 少年班学院 1 班

## 1 实验目的

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、有机玻璃棒、黄铜棒、游标卡尺等。

## 3 实验原理

声波在理想气体中的传播速度  $v$  满足： $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$ ，其中  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  为比热容比， $R$  为普适气体常量， $M$  为气体摩尔质量， $T$  为气体热力学温度。

在摄氏温度为  $t^\circ\text{C}$  时，声速  $v_t = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}}$ ，若同时考虑空气中水蒸气的影响，声速公式为  $v_t = 331.45 \sqrt{\left(1 + \frac{t}{273.15}\right) \left(1 + \frac{0.3192 p_w}{p}\right)} \text{ m/s}$ ，式中  $p_w$  为水蒸气的分压强， $p$  为大气压强。

声波各参量之间有  $V = \lambda \cdot f$ ，故可以通过测声波的波长和频率求声速。

### 3.1 共振干涉法原理

当声波接收器 S2 的接收表面直径较大时，会反射部分和声源同频率的声波。当 S1 和 S2 相互平行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，在示波器上能观察到这两个相干波在 S2 处合成振动的情况。在驻波场中，可以通过仪器观测声压间接反映位移变化。空气质点位移为波腹处声压最小、接收到信号最强；波节处声压最大。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  $\frac{\lambda}{2}$  的整数倍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，故  $n \frac{\lambda}{2} = \Delta L_{n-1} = |L_{n+1} - L_1|$ ， $\lambda_i = \Delta L_{i+2} = |L_{i+2} - L_i|$

### 3.2 相位比较法原理

在发射器（声源处）和接收器（刚性平面处）之间存在驻波与行波的叠加。由于接收器的反射面吸收入射声波能量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，可以通过比较声源处的声压的相位来测定声速。发射器和接收器之间的相位差可用李萨如图形观察。改变发射器和接收器之间的距离  $L$ ，就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。每移动半个周长会重复出现斜率符号相反的直线，可以测得波长  $\lambda$ 。根据  $v = \lambda \cdot f$  可计算声音传播的速度。

### 3.3 时差法（脉冲法）原理

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，用  $v = \frac{L}{t}$  求出声波在媒质中传播的速度。

## 4 实验步骤

### 1. 共振干涉法测声速

- (a) 连接调试好实验装置，测量谐振频率  $f$ ，确保发射器与接收器相距  $5cm$  以上，发射器与接收器较接近。
- (b) 单向地改变发射器位置，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。
- (c) 重复实验，测得 12 个位置的距离。
- (d) 关闭电源，整理仪器。

### 2. 相位比较法测声速

- (a) 连接调试好实验装置，测量谐振频率  $f$ ，确保发射器与接收器相距  $5cm$  以上，发射器与接收器较接近。
- (b) 单向地改变发射器位置，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。
- (c) 重复实验，测得 8 个位置的距离。
- (d) 关闭电源，整理仪器。

### 3. 时差法测声速

- (a) 分别测量三种规格的有机玻璃棒与黄铜棒的长度。
- (b) 调整实验装置，依次将有机玻璃棒与黄铜棒接入装置，记录信号源的时间读数。
- (c) 关闭电源，整理仪器。

## 5 测量记录

见附件：原始数据

## 6 数据处理与误差分析

### 6.1 共振干涉法

用最小二乘法拟合，得：

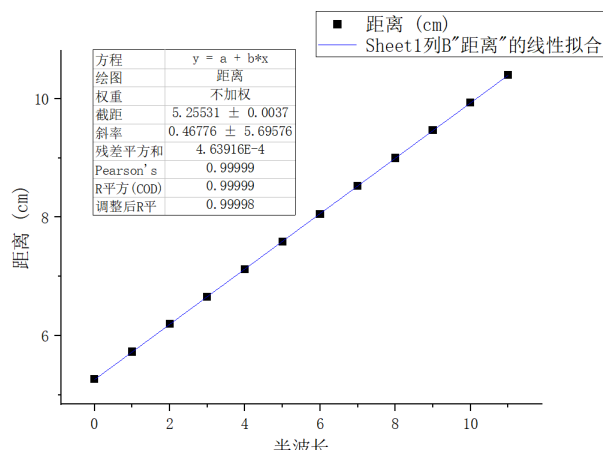


图 1: 共振干涉法拟合直线

直线方程为:  $s = 0.46776n + 5.25531$

故半波长  $\frac{\lambda}{2} = 0.46776\text{cm}$ , 得到波长  $\lambda = 0.936\text{cm}$

从而  $v = \lambda \cdot f = 347.8\text{m/s}$

对于不确定度, 取  $P = 0.95$

$$U_{v,0.95} = v \sqrt{\left(\frac{U_{\lambda,0.95}}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{U_{f,0.95}}{f}\right)^2}$$

$\lambda$  的单次测量值为:  $0.928\text{cm}, 0.928\text{cm}, 0.922\text{cm}, 0.932\text{cm}, 0.938\text{cm}, 0.944\text{cm}, 0.944\text{cm}, 0.942\text{cm}, 0.940\text{cm}, 0.930\text{cm}$ 。

故  $\sigma_{\lambda} = 0.0074\text{cm}$  游标卡尺  $\Delta_B = 0.02\text{mm}$

$$U_{\lambda,0.95} = \sqrt{\left(t_{0.95} \frac{\sigma_{\lambda}}{\sqrt{11}}\right)^2 + \left(k_{0.95} \frac{\Delta_B}{C}\right)^2} = \sqrt{\left(2.20 \times \frac{0.0074}{\sqrt{11}}\right)^2 + \left(1.645 \times \frac{0.0002}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0.0049\text{cm}$$

对于  $f$ , 仅有 B 类不确定度, 信号发射器的最大允差为  $\Delta = 0.001\text{Hz}$ , 人的估计误差为  $\Delta = 10\text{Hz}$  (当调节到十位时, 示波器上波形变化已不太明显), 故  $\Delta_B = \sqrt{\Delta^2 + \Delta^2} = 10\text{Hz}$ , 于是  $U_{f,0.95} = k_{0.95} \frac{\Delta_B}{\sqrt{3}} = 1.960 \times \frac{10}{\sqrt{3}} = 6.53\text{Hz}$

$$U_{v,0.95} = v \sqrt{\left(\frac{U_{\lambda,0.95}}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{U_{f,0.95}}{f}\right)^2} = 347.8 \times \sqrt{\left(\frac{0.0049}{0.936}\right)^2 + \left(\frac{6.53}{37155}\right)^2} = 1.82\text{m/s}$$

故最终结果为  $v = 347.8 \pm 1.82\text{m/s}$

根据空气中摄氏温标  $t^\circ\text{C}$  时的声速公式:  $v_t = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}}$ , 得此温度下的声速理论值为  $345.76\text{m/s}$

本实验的相对误差为  $\delta = \frac{|347.8 - 345.76|}{345.76} = 0.59\%$

误差的可能原因为:

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. 游标卡尺读数出现误差
3. 观察示波器寻找振幅最大值时, 由于声波的性质, 旋转把只能单向扭动, 导致当实验者判断最大值出现时位置并不恰好吻合

6.2 相位比较法

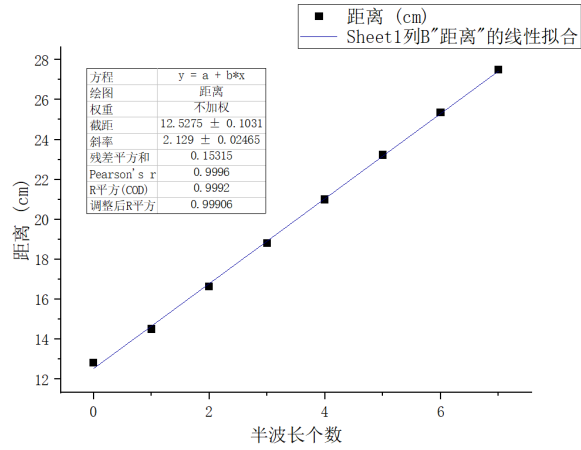


图 2: 相位比较法拟合直线

用最小二乘法拟合，直线方程为： $s = 2.129n + 12.5275$   
故半波长  $\frac{\lambda}{2} = 2.129cm$ ，得到波长  $\lambda = 4.258cm$   
谐振频率  $f = 37155.0Hz$   
故水中声速  $v = \lambda \cdot f = 1582.1m/s$   
误差分析查表可知，实验温度下纯水中声速的理论值为  $1494.2m/s$   
 $\delta = \frac{|1582.1-1494.2|}{1494.2} = 5.88\%$   
实验中，引起误差的因素有：

- 1. 实验用液体不是纯水
- 2. 游标卡尺读数出现误差
- 3. 观察示波器时确定直线不准确导致的误差

6.3 时差法（脉冲法）

对于玻璃，有：

距离 /cm	时间 /μs	速度 /(m/s)
16.844	114	1477.54
21.118	141	1497.73
25.154	154	1633.37

故速度平均值为  $v_{Glass} = \frac{1477.54+1497.73+1633.37}{3} = 1536.21m/s$   
对于黄铜，有：

距离 /cm	时间 /μs	速度 /(m/s)
15.832	58	2729.65
19.884	70	2840.57
23.764	80	2970.50

故速度平均值为  $v_{Cu} = \frac{2729.65+2840.57+2970.50}{3} = 2846.90m/s$

误差分析：

实验中，引起误差的因素有：

1. 实验使用的黄铜棒、有机玻璃棒不纯，且不同黄铜棒、有机玻璃棒所含杂质及杂质分布不同。影响误差和不确定度。
2. 游标卡尺读数出现误差
3. 测量时间的仪器精度不够，分度值为  $1\mu s$ ，产生  $10^3$  量级的误差。
4. 涂抹的凡士林量不同，影响最终测定值。

## 7 思考题

### 7.1 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

振幅的大小表示波动能量的大小，声压振幅的极大值减小是因为声波在传播过程中的能量损失。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。

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。

### 7.2 声速测量中驻波法、相位法、时差法有何异同？

不同点：

- (1) 波源上，驻波法、相位法用连续波，而时差法用脉冲波。
- (2) 测量仪器上，驻波法、相位法要用到示波器，而时差法没有用到。
- (3) 观察的物理量上，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) 波源上，驻波法、相位法用的都是连续波。
- (2) 测量仪器上，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) 原理上，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。

### 7.3 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，由理想气体中声速的计算式  $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$ ，理想气体中声速与气体的比热容比、摩尔质量有关，不同气体比热容比、摩尔质量不同。另外温度对声速也有影响，相同化学构成的气体在温度不同的情况下声速也会不相同。故各种气体中声速不一定相同。