

# 声速的测量

声波是一种在弹性媒质中传播的机械波，振动频率在 20-20000Hz 的声波称为可闻声波，频率低于 20Hz 的声波称为次声波，频率高于 20000Hz 的声波称为超声波。声波特性的测量如频率、波长、声速、声压衰减、相位等是声波检测技术中的重要内容。声速的测量方法可以分为两大类。一类是根据运动学理论  $v=L/t$ ，通过测量传播距离  $L$  和时间间隔  $t$  得到声速  $v$ ；另一类是根据波动理论  $v=f\lambda$ ，通过测量声波的频率  $f$  和波长  $\lambda$  得到声速  $v$ 。由于超声波具有波长短、能定向传播等特点，所以在超声波段进行声速测量是比较方便的，超声波的发射和接收一般通过电磁振动与机械振动的相互转换来实现，最常见的是利用压电效应和磁致伸缩效应。本实验就是测量超声波在空气中的传播速度，实验中使用的驻波法和相位比较法这两种测量方法。超声速的测量在声波定位、探伤、测距、液体流速、材料的杨氏模量等应用中具有重要的实用意义。

## 【实验目的】

- 1、学习测量超声波在空气中的传播速度的方法，理解驻波和振动合成理论；
- 2、学会用逐差法进行数据处理；
- 3、了解空气中传播速度与气体状态参量的关系；
- 4、了解压电换能器的功能和培养综合使用仪器的能力。

## 【实验仪器】

声速测量仪，示波器，信号发生器

## 【实验原理】

### 一、 声波在空气中的传播速度

在理想气体中声波的传播速度为

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

式中  $\gamma = C_p / C_v$  称为比热比，即气体定压比热容与定容比热容的比值， $\mu$  是气体的摩尔质量， $T$  是绝对温度， $R=8.31441\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  为普适气体常数。可见，声速与温度、比热比和摩尔质量有关，而后两个因素与气体成分有关。因此，测定声速可以推算出气体的一些参量。利用（1）式的函数关系还可以制成声速温度计。

在正常情况下，干燥空气成分按重量比为氮：氧：氩：二氧化碳 = 78.084:20.946:0.934:0.033，空气的平均摩尔质量  $\mu$  为  $28.964\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。在标准状态下，干

干燥空气中的声速为  $v_0=331.5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在室温为  $t^\circ\text{C}$  时，干燥空气的声速为

$$v = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{T}} \quad (2)$$

由于空气实际上并不是干燥的，总含有一些水蒸汽，经过对空气摩尔质量和比热比的修正，在温度为  $t^\circ\text{C}$ 、相对湿度为  $r$  的空气中，声速为

$$v = 331.5 \sqrt{\left(1 + \frac{t}{T_0}\right) \left(1 + 0.31 \frac{r P_s}{P}\right)} \quad (3)$$

式中  $T_0=273.15\text{K}$ 。 $P_s$  为  $t^\circ\text{C}$  时空气的饱和蒸汽压，可从饱和蒸汽压与温度的关系表中查出； $P$  为大气压，取  $P=1.013 \times 10^5\text{Pa}$  即可；相对湿度  $r$  可从干湿温度计上读出。由这些气体参量可以计算出声速。

## 二、测量声速的实验方法

声速  $v$ 、声源振动频率  $f$  和波长  $\lambda$  之间的关系为：

$$v = f\lambda \quad (4)$$

可见，只要测得声波的频率  $f$  和波长  $\lambda$ ，就可求得声速  $v$ 。其中声波频率  $f$  可通过频率计测得。本实验的主要任务是测量声波波长  $\lambda$ ，常用的方法有驻波法和相位法。

### 1、相位法

波是振动状态的传播，也可以说是相位的传播。在波的传播方向上的任何两点，如果其振动状态相同或者其相位差为  $2\pi$  的整数倍，这两点间的距离应等于波长的整数倍，即

$$l = n\lambda \quad (n \text{ 为一正整数}) \quad (5)$$

利用这个公式可精确测量波长。

若超声波发生器发出的声波是平面波，当接受器端面垂直于波的传播方向时，其端面上各点都具有相同的相位。沿传播方向移动接收器时，总可以找到一个位置使得接受到的信号与发射器的激励电信号同相。继续移动接受器，直到找到的信号再一次与发射器的激励电信号同相时，移过的这段距离就等于声波的波长。

需要说明的是，在实际操作中，用示波器测定电信号时，由于换能器振动的传递或放大电路的相移，接受器端面处的声波与声源并不同相，总是有一定的相位差。为了判断相位差并测量波长，可以利用双线示波器直接比较发射器的信号和接收器的信号，进而沿声波传播方向移动接收器寻找同相点来测量波长；也可以利用李萨如图形寻找同相或反相时椭圆退化成直线的点。

## 2、驻波法

按照波动理论，发生器发出的平面声波经介质到接收器，若接收面与发射面平行，声波在接收面处就会被垂直反射，于是平面声波在两端面间来回反射并叠加。当接收端面与发射头间的距离恰好等于半波长的整数倍时，叠加后的波就形成驻波。此时相邻两波节（或波腹）间的距离等于半个波长（即  $\lambda/2$ ）。当发生器的激励频率等于驻波系统的固有频率（本实验中压电陶瓷的固有频率）时，会产生驻波共振，波腹处的振幅达到最大值。

声波是一种纵波。由纵波的性质可以证明，驻波波节处的声压最大。当发生共振时，接收端面处为一波节，接收到的声压最大，转换成的电信号也最强。移动接收器到某个共振位置时，如果示波器上出现了最强的信号，继续移动接收器，再次出现最强的信号时，则两次共振位置之间的距离即为  $\lambda/2$ 。

### 【实验内容】

#### 1. 用驻波法测声速

(1) 按图 1 连接电路，将信号发生器的输出端与声速仪的输入端  $S_2$  相连，将声速仪的输入端  $S_1$  与示波器的 Y 端（或通道 CH<sub>1</sub>）相连使  $S_1$ ，让  $S_1$  和  $S_2$  靠近并留有适当的空隙，使两端面平行且与游标尺正交。

(2) 根据实验室给出的压电陶瓷换能器的振动频率  $f$ ，将信号发生器的输出频率调至  $f$  附近，缓慢移动  $S_2$ ，当在示波器上看到正弦波首次出现振幅较大处，固定  $S_2$ ，再仔细微调信号发生器的输出频率，使荧光屏上图形振幅达到最大，读出共振频率  $f$ 。

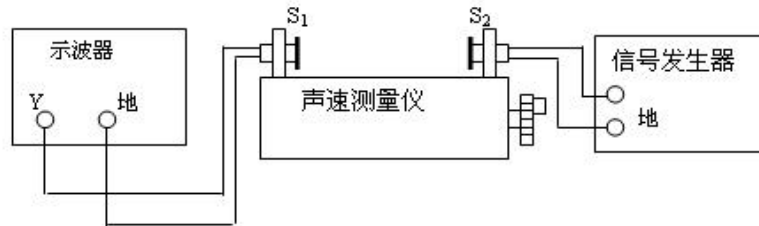


图 1 驻波法测声速实验装置图

(3) 在共振条件下，将  $S_2$  移近  $S_1$ ，再缓慢移开  $S_2$ ，当示波器上出现振幅最大时，记下  $S_2$  的位置  $x_0$ 。

(4) 由近及远移动  $S_2$ ，逐次记下各振幅最大时  $S_2$  的位置，连续测 20 个数据  $x_1$ 、 $x_2$ 、…  
 $x_{20}$ 。

(5) 用逐差法算出声波波长的平均值。

## 2. 用相位法测声速

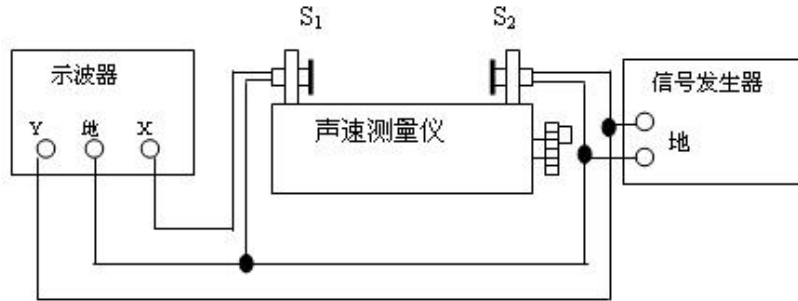


图2 相位法测声速实验装置图

(1) 按图2连接电路。

(2) 将示波器“秒/格”旋钮旋至X-Y档，信号发生器接示波器CH<sub>2</sub>通道，利用李萨如图形观察发射波与接收波的位相差，找出同相点。

(3) 在共振条件下，使S<sub>2</sub>靠近S<sub>1</sub>，然后慢慢移开S<sub>2</sub>，当示波器上出现45°倾斜线时，微调游标卡尺的微调螺丝，使图形稳定，记下S<sub>2</sub>的位置x'<sub>0</sub>。

(4) 继续缓慢移开S<sub>2</sub>，依次记下20个示波器上李萨如图形为直线时游标卡尺的读数x'<sub>1</sub>、x'<sub>2</sub>、x'<sub>3</sub>…x'<sub>20</sub>。

(5) 用逐差法算出声波波长的平均值。

### 【数据处理】

1、利用逐差法进行计算的数据表格要便于求相应位置的差值和计算；

2、根据逐差法处理数据，先算出10λ的平均值，再算出其标准偏差S<sub>10λ</sub>，按式

$$\Delta_{10\lambda} = \sqrt{(S_{10\lambda})^2 + (\sqrt{2}\Delta)^2} \quad (6)$$

求出Δ<sub>10λ</sub>，同时要考虑仪器的误差，如游标卡尺的读数误差；

3、由Δ<sub>10λ</sub>求出Δ<sub>λ</sub>，再由v=fλ推导出Δ<sub>v</sub>的表达式，Δ<sub>v</sub>取10Hz，最后给出v的完整结果。

4、将实验值与理论值比较，求出其相对不确定度。

### 【注意事项】

1. 实验前应了解压电换能器的谐振频率。

2. 实验过程中要保持激振电压不变。

## 【思考题】

1. 用逐差法处理数据的优点是什么？
2. 如何调节与判断测量系统是否处于共振状态？
3. 分析压电换能器的工作原理。
4. 为什么在共振状态下测定声速？

## 【附录】

### 声速测量仪

声速测量仪必须配上示波器和信号发生器才能完成测量声速的任务。声速测量仪示意图如图 3 所示。

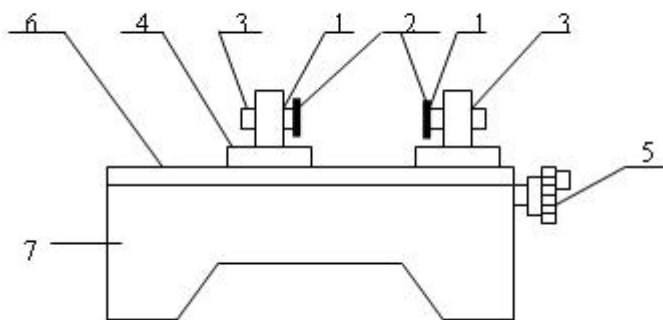


图 3 声速测量仪示意图

1. 压电换能器； 2. 增强片； 3. 变幅杆； 4. 可移动底座；
5. 刻度鼓轮； 6. 标尺； 7. 底座

声速测量仪是利用压电体的逆压电效应，即在信号发生器产生的交变电压下，使压电体产生机械振动，而在空气中激发出超声波。本仪器采用的是锆钛酸铅制成的压电陶瓷管或称压电换能器。将它粘接在合金制成的阶梯形变幅杆上，再将它们与信号发生器连接组成超声波发生器,如图 4 所示。当压电陶瓷处于一交变电场时，会发生周期性的伸长与缩短。当交变电场频率与压电陶瓷管的固有频率相同时，振幅最大。这个振动又被传递给变幅杆，使它

产生沿轴向的振动，于是变幅杆的端面在空气中激发出超声波。本仪器的压电陶瓷的振动频率在 40KHz 以上，相应的超声波波长约为几毫米。由于它的波长短，定向发射性能好，所以是比较理想的波源。

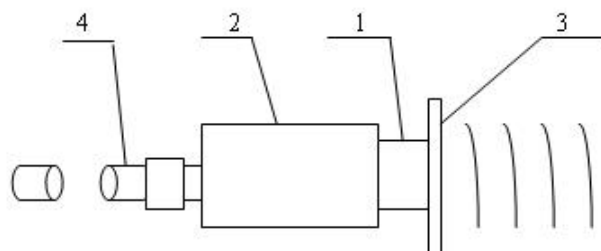


图 4 超声波发生器原理图

1.压电陶瓷管;2.变幅杆;3.增强片 4.缆线