

声速的测量

【一】实验目的

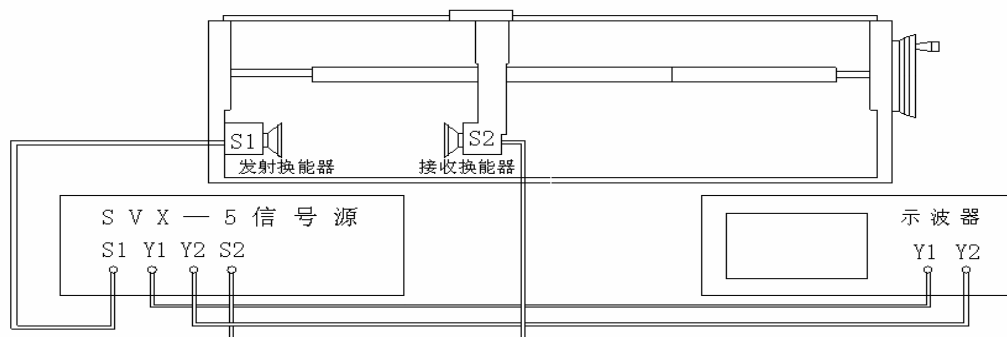
1. 学习测量超声波在媒质中的传播速度的方法。
2. 用共振干涉法、相位比较法和时差法测量声速，并加深对驻波、振动合成、波的干涉等理论知识的理解。
3. 通过实验了解作为传感器的压电陶瓷的功能并培养综合使用仪器的能力。

【二】实验原理

1. **声波** 声波是一种在弹性媒质中传播的机械波，它能在气体、液体、和固体中传播。但在各种媒质中传播的速度是不同的。频率介于 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ 的机械波振动在弹性介质中的传播就可形成声波。频率介于 $20\text{kHz} \sim 500\text{MHz}$ 的波称为超声波，在同一媒质中，超声波的传播速度就等于声波的传播速度。由于超声波具有波长短，易于定向发射和会聚等优点，因此在超声波段进行声速的测量比较方便。测量声速时可以利用声速与振动频率 f 和波长 λ 之间的关系（即 $v = \lambda f$ ）求出，也可以利用 $v = L/t$ 求出，其中 L 为声波传播的路程， t 为声波传播的时间。

声速测量的实验所采用的声波频率一般都在 $20\text{kHz} \sim 60\text{kHz}$ 之间。在此频率范围内，采用压电陶瓷换能器作为声波的发射器、接收器效果最佳。

2. **共振干涉（驻波）法测声速** 实验装置接线如图(1)所示，图中 S_1 和 S_2 为压电陶瓷超声换能器。由声源 S_1 发出平面简谐波沿 X 轴正方向传播，接收器 S_2 在接收超声波的同时还反射一部分超声波。这样，由 S_1 发出的超声波和由 S_2 反射的超声波在 S_1 和 S_2 之间形成干涉，出现驻波共振现象。



图（1）

设沿 X 轴正方向入射波方向的方程为

$$Y_1 = A \cos 2\pi(ft - \frac{x}{\lambda}) \quad (1)$$

沿 X 轴负方向反射波方程为

$$Y_2 = A \cos 2\pi(ft + \frac{x}{\lambda}) \quad (2)$$

在入射波和反射波相遇处产生干涉，在空间某点的合振动方程为

$$Y = Y_1 + Y_2 = (2A \cos 2\pi \frac{x}{\lambda}) \cos \omega t \quad (3)$$

$$\text{由(3)式可知，当： } 2\pi \frac{x}{\lambda} = (2k+1) \frac{\pi}{2} \quad k=0, 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

即 $x = (2k+1) \frac{\lambda}{4}$ $k=0, 1, 2, 3, \dots$ 时，这些点的振幅始终为零，即为波节。

$$\text{当： } 2\pi \frac{x}{\lambda} = k\pi \quad k=0, 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

即 $x = k \frac{\lambda}{2}$ $k=0, 1, 2, 3, \dots$ 时，这些点的振幅最大，等于 2A，即为波腹。

故知，相邻波腹（或波节）的距离为 $\lambda/2$ 。

由上式可知，当 S_1 和 S_2 之间的距离 L 恰好等于半波长的整数倍时，即

$$L = k \frac{\lambda}{2} \quad k=0, 1, 2, 3, \dots$$

形成驻波，示波器上可观察到较大幅度的信号，不满足条件时，观察到的信号幅度较小。移动 S_2 ，对某一特定波长，将相继出现一系列共振态，任意两个相邻的共振态之间， S_2 的位移为，

$$\Delta L = L_{k+1} - L_k = (k+1) \frac{\lambda}{2} - k \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

所以当 S_1 和 S_2 之间的距离 L 连续改变时，示波器上的信号幅度每一次周期性变化，相当于 S_1 和 S_2 之间的距离改变了 $\frac{\lambda}{2}$ 。此距离 $\frac{\lambda}{2}$ 可由游标卡尺测得，频率 f 由信号发生器读得，由 $v = \lambda \cdot f$ 即可求得声速。

3. 相位比较法 实验装置接线仍如图(1)所示，置示波器功能于 X-Y 方式。当 S_1 发出的平面超声波通过媒质到达接收器 S_2 时，在发射波和接受波之间产生位相差为：

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi \frac{L}{\lambda} = 2\pi f \frac{L}{v} \quad (7)$$

因此可以通过测量 $\Delta\varphi$ 来求得声速。

$\Delta\varphi$ 的测定亦可用相互垂直振动合成的李萨如图形来进行。设输入 X 方向的入射波振动方程为：

$$x = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \quad (8)$$

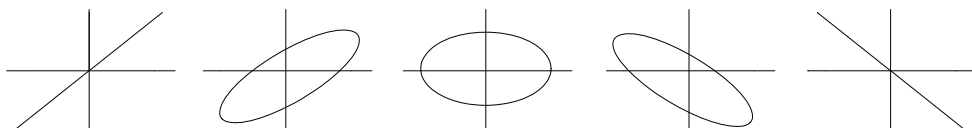
输入 Y 方向的是由 S_2 接收到的波动，其振动方程为：

$$y = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2) \quad (9)$$

上两式中： A_1 和 A_2 分别为 X、Y 方向振动的振幅； ω 为角频率； φ_1 和 φ_2 分别为 X、Y 方向振动的初位相，则合成振动的方程为

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (10)$$

此方程轨迹为椭圆，椭圆长、短轴和方位由相位差 $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 决定。当 $\Delta\varphi = 0$ 时，轨迹为处于第一和第三象限的一条直线。如图(2-a)所示； $\Delta\varphi = \pi$ 时，则轨迹为处于第二和第四象限的一条直线如图(2-e)所示。



a. $\Delta\varphi = 0$ b. $\Delta\varphi = \pi/4$ c. $\Delta\varphi = \pi/2$ d. $\Delta\varphi = 3\pi/4$ e. $\Delta\varphi = \pi$

图 (2)

改变 S_1 和 S_2 之间的距离 L ，相当于改变了发射波和接受波之间的相位差，荧光屏上的图形也随 L 不断变化。显然，当 S_1 、 S_2 之间距离改变半个波长，即 $\Delta L = \lambda/2$ ，则 $\Delta\varphi = \pi$ 。随着振动的位相差从 $0 \sim \pi$ 的变化，李萨如图形也随之由图 a 向图 e 变化。因此，每移动半个波长，就会重复出现斜率符号相反的直线，测得了波长 λ 和频率 f ，根据式 $V = \lambda f$ 可计算出室温下声音在媒质中传播的速度。

4. 时差法 设以脉冲调制信号激励发射换能器，产生的声波在介质中传播，经过 t 时间后，到达 L 距离处的接收换能器。所以可以用以下公式求出声波在介质中传播的速度。

$$\text{速度 } V = \text{距离 } L / \text{时间 } t$$

作为接收器的压电陶瓷换能器，当接收到来自发射换能器的波列的过程中，能量不断积聚，电压变化波形曲线振幅不断增大，当波列过后，接收换能器两极上的电荷运动呈阻尼振荡，电压变化波形曲线如图 (3) 所示。信号源显示了波列从发射换能器发射，经过 L 距离后到达接收换能器的时间 t 。

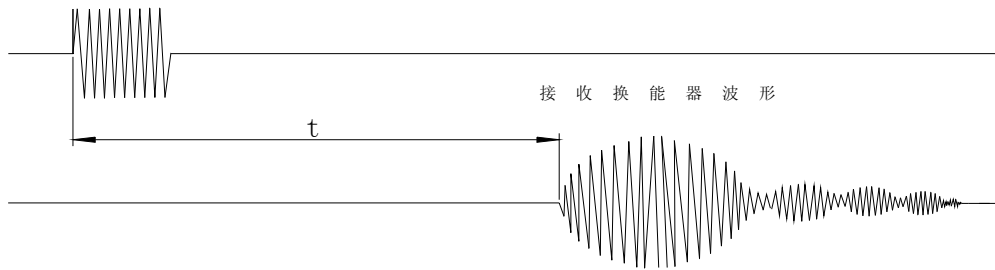


图 (3)

【三】实验内容及步骤:

1. 声速测试仪系统的连接与调试。

在接通市电后，信号源自动工作在连续波方式，选择介质的初始状态为空气，预热 30min。声速测试仪、信号源及双踪示波器之间的连接如图 (1)：

2. 测定压电陶瓷换能器系统的最佳工作

超声换能器工作状态的调节方法如下：各仪器都正常工作以后，首先调节声速测试仪信号源输出电压(6~10V)，调节信号频率（在 25~45kHz），观察频率调整时接收波的电压幅度变化，在某一频率点处（34.5~37.5kHz 之间）电压幅度最大，此频率即是压电换能器 S_1 、 S_2 相匹配的频率点，记录频率 f 。

3. 测量声波在空气中的传播速度

①共振干涉法（驻波法）测量波长

将测试方法设置到连续波方式。设定最佳工作频率，观察示波器，找到接收波形的最大值。然后，转动距离调节鼓轮，这时波形的幅度会发生变化（注意此时在示波器上可以观察到来自接收换能器的振动曲线波形发生位移），记录幅度为最大时的距离 L_i ，再向前或者向后（必须是一个方向）移动。当接收波形幅度由大变小，再由小变大，且达到最大时，记录此时的 L_{i+1} 。多次测定用逐差法处理数据，根据 $v = \lambda f$ 求出声速。

②相位比较法（李萨如图形）测量波长

将测试方法设置到连续波方式。在共振频率 f 下，开始时仍置示波器于双踪显示功能，观察发射和接收信号波形，转动距离调节鼓轮，置接收信号幅度达最大值时的位置。调节示波器 CH1、CH2 衰减灵敏度旋钮、信号源发射强度、接收增益，令两波形幅度几乎相等，观察两波形曲线间的关系。置示波器至 X-Y 功能方式，这时观察到的李萨如图形为一斜线，否则可微调调节鼓轮实施之，记录下此时的位置 L_i ，继续单向转动调节鼓轮，改变换能器间的距离，记下示波器直线由图 2- a 变为图 2-e 和由图 2-e 再变图 2- a 时，记录此时的距离 L_{i+1} 。多次测定用逐差法处理数据，求出声速。

③时差法测量声速

将测试方法设置到脉冲波方式，发射强度放置在“大”位置。将 S_1 和 S_2 之间的距离调到一

定距离 ($\geq 80\text{mm}$)。再调节接收增益,使示波器上显示的接收波信号幅度在 $300\sim 400\text{mV}$ 左右(峰一峰值),定时器工作在最佳状态。然后记录此时的距离和显示的时间值 L_i 、 t_i (时间由声速测试仪信号源时间显示窗口直接读出)。移动 S_2 ,同时调节接收增益使接收波信号幅度始终保持一致。

记录下这时的距离值和显示的时间值 L_{i+1} 、 t_{i+1} 。则声速 $V_i = (L_{i+1} - L_i) / (t_{i+1} - t_i)$ 。

4. 测量声波在液体(水)中的传播速度

① 选择用共振干涉法或相位比较法测量声波在液体(水)中的传播速度

一、当用共振干涉法、相位比较法测量液体(水)中的声速时,波数 K 的测量次数比内容 3 中的有所减少?(为什么)。

二、当使用媒质为液体测试声速时,必须把换能器完全浸没,但不能超过液面线,步骤相同。由于声波在液体中传播衰减较小,发射出的声波在很多因素影响下产生多次反射叠加,在接收器表面已经是多个回波的叠加(混响),在调节时,尽量减小发射强度,增大接收增益。

5. 用时差法测量固体棒中的纵波速度:

①测量时,更换发射及接收换能器,将测试方法设置到脉冲波方式,发射强度放置在“小”位置,接收增益调到最大。

②在固体中传播的声波是很复杂的,它包括纵波、横波、扭转波、表面波等,而且各种声速都与固体棒的形状有关。金属棒一般为各向异性结晶体,沿任何方向可有三种波传播,只有在特殊情况下为纵波。固体棒有塑料棒和金属棒。每种材料有三根样品。

③将固体棒放在收发换能器中间,将固体棒两端对准收发换能器发射面和接受面的中心。为了很好耦合,各接触面应涂耦合剂,只需两根样品,即可按照上面的方法算出声速:

$$V_i = (L_{i+1} - L_i) / (t_{i+1} - t_i)$$

【四】数据记录与处理:

①用共振干涉法(驻波法)测量声波在空气中的传播速度

| | | | | | | | | | | |
|---|-----|---|-----|---|-----|---|-----|---|------|----|
| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| L _i (mm) | | | | | | | | | | |
| 组合方式 | 6-1 | | 7-2 | | 8-3 | | 9-4 | | 10-5 | |
| L _m -L _n (mm) | | | | | | | | | | |
| 平均值 L _m -L _n (mm) | | | | | | | | | | |

②用相位比较法测量声波在空气中的传播速度表格同共振干涉法

③时差法测量声波在空气中的传播速度

| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------------------|---|---|---|---|---|---|
| $L_i(\text{mm})$ | | | | | | |
| $t_i(10^{-6}\text{s})$ | | | | | | |

④测量声波在液体中的传播速度表格自拟

⑤用时差法测量固体棒中的纵波速度

| i | 1 | 2 | 3 |
|----------------------------|-----|-----|-----|
| $L_i(\text{mm})$ | | | |
| $t_i(10^{-6}\text{s})$ | | | |
| 组合方式 | 3-1 | 2-1 | 3-2 |
| $L_m-L_n(\text{mm})$ | | | |
| $t_m-t_n(10^{-6}\text{s})$ | | | |
| $V_{mn}(\text{m/s})$ | | | |
| 平均值 $V_{mn}(\text{m/s})$ | | | |

【五】注意事项

- (1) 使用前应搞清楚各仪器的操作规程，并按操作规程使用。
- (2) 实验中移动 S_2 时要缓慢，并时刻注意示波器上图形的变化，不能因图形变化过度而使丝杆回转。
- (3) 实验中应使声波频率与压电陶瓷换能器的共振频率 f_0 一致，这时得到的电信号最强。压电陶瓷换能器作为接收器的灵敏度也最高。
- (4) 图形调整：由于接收距离的变化，造成接收信号的强度变化，出现李萨如图形偏离示波屏中心或图形不对称的情况时，可调节示波器输入衰减旋钮、X 轴或 Y 轴，使得图形变的更直观

附：声速测量值与公认值比较

- (1) 已知声速在标准大气压下与传播介质空气的温度关系为：

$$V=(331.45+0.59t)\text{m/s}$$

- (2) 液体中的声速（普通水）

| T, $^{\circ}\text{C}$ | C, m/s 1400+ | T, $^{\circ}\text{C}$ | C, m/s 1400+ | T, $^{\circ}\text{C}$ | C, m/s 1500+ |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
| 0 | 2.74 | 14 | 62.70 | 27 | 2.20 |
| 1 | 7.71 | 15 | 66.25 | 28 | 4.68 |
| 2 | 12.57 | 16 | 69.70 | 29 | 7.10 |
| 3 | 17.32 | 17 | 73.07 | 30 | 9.44 |
| 4 | 21.96 | 18 | 76.35 | 31 | 11.71 |
| 5 | 26.50 | 19 | 79.55 | 32 | 13.91 |
| 6 | 30.92 | 20 | 82.66 | 33 | 16.05 |
| 7 | 35.24 | 21 | 85.69 | 34 | 18.12 |
| 8 | 39.46 | 22 | 88.63 | 35 | 20.12 |
| 9 | 43.58 | 23 | 91.50 | 36 | 22.06 |
| 10 | 47.59 | 24 | 94.29 | 37 | 23.93 |
| 11 | 51.51 | 25 | 97.00 | 38 | 25.74 |
| 12 | 55.34 | 26 | 99.64 | 39 | 27.49 |
| 13 | 59.07 | | | 40 | 29.18 |

如果测量温度有小数部分，可用内插法进行处理

