

实验 3.12 超声声速的测量讲义

声波是一种机械波，它可以在气态、液态、固态物质中传播，它会引起物质的光学、电磁、力学、化学性质以及人类生理、心理等性质的变化。人耳能听到的声波称为可闻声波，频率在 20Hz~20kHz 之间，频率低于 20Hz 的声波称为次声波，频率高于 20kHz 则称为超声波。超声波在媒质中传播时，声速、声衰减和声阻抗都和媒质的特性及状态有关，通过测量这些声学量可以探知媒质的特性和状态变化。这些声学量的测量方法就是超声无损检测的实验基础。由于媒质中的声速与媒质的许多非声学特性都有直接或间接的关系，所以通过声速的测量可以求出固体媒质的弹性模量，进行气体成分分析，测定液体的比重，液体的成分及溶液浓度等。利用媒质的温度、压强、流速与声速的关系则可以探测这些状态参量的变化。媒质中的声速是应用最广而且测量精度也较高的声学量。测量声速依据的原理可以是 $v = l/t$ (l 表示声音传播的距离， t 表示通过这段距离的时间)，也可以是 $v = f\lambda$ (f 为声波的频率， λ 为声波的波长)。本实验采用的共振干涉法和相位比较法均属于后者。

一、预备问题

1. 压电换能器是如何工作的？
2. 声波在媒质中传播的速度与哪些因素有关？
3. 何为共振干涉法和相位比较法？

二、引言

1. 超声波的发射和接收

超声波的发射和接收都需要用换能器，换能器的作用是将其其它形式的能量转换成超声波的能量（发射换能器），或将超声波的能量转换为其它可以检测的能量（接收换能器）。最常使用的是压电换能器。压电晶体（如石英）或压电陶瓷（如钛酸钡、锆钛酸铅）这类压电材料受到应力 T 的作用会在材料内产生电场 E ，且满足 $E = \sigma \cdot T$ (σ 为压电常数)，这就是压电效应。压电效应是法国人居里兄弟 1880 年在研究热电现象和晶体对称性的时候发现的。压电换能器接收超声波信号使之转换为电信号，从而将机械能转换为电能，利用的就是压电效应原理。当超声波频率与系统固有（共振）频率一致时所产生的电信号最强。压电材料还具有逆压电效应，压电材料在电场 E 的作用下产生伸缩形变 S ，且满足 $S = d \cdot E$ (d 为伸缩常数)，在交变电场的作用下会产生周期性的收缩和伸长，当外加电场的频率和压电体固有频率相同时振幅最大。发射换能器利用逆压电效应就可以将电能转换成超声振动能，在周围媒质中激发超声波。

2. 声速的测量

声波在媒质中传播的速度决定于媒质的密度、弹性模量等性质。声波在液体和固体中的传播速度一般大于在气体中的传播速度。声速也和媒质的压强、温度等状态有关，因为温度变化一般比压强大，所以温度对声速的影响也比较大。若频率已知，测出波长即可根据波长、频率和声速三者的关系 $v = f\lambda$ 求出波速。

(1) 共振干涉法测声速

如图 3.12-1 所示， S_1 、 S_2 都是压电换能器，两者相互平行。由低频信号发生器输出的频率为 f 的正弦电信号激励超声波发射器 S_1 发射出沿 x 方向传播的近似平面超声波，经超声波接收器 S_2 反射后，在两端面间来回传播并叠加而形成驻波（严格地说还有行波的成份）。在驻波场中， x 处空气质点的位移 y 可表示为

$$y = \frac{a \sin[k(l-x)]}{\sin kl} \cos \omega t \quad (3.12-1)$$

式中 a 为声波的振幅, $\omega(=2\pi f)$ 为声波的角频率, $k(=2\pi/\lambda = \omega/v)$ 为波数, λ 为声波的波长, l 为 S_1 与 S_2 间的距离。对于某一确定的 l , 在驻波场中满足 $|\sin[k(l-x)]|=1$ 的那些地方, 位移达到最大而形成波腹; 而在满足 $|\sin[k(l-x)]|=0$ 的那些地方, 位移为零而成为波节。两相邻波腹或波节之间的距离均为 $\lambda/2$ 。

在驻波场中, 空气质点位移 y 的图像不能被直接观测, 而声压 p 却可以通过仪器观测。声压 p 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, 声压 p 的驻波可以表示为

$$p = -\rho_0 v^2 \frac{\partial y}{\partial x} = \rho_0 \omega v a \frac{\sin[k(l-x) + \pi/2]}{\sin kl} \cos \omega t \quad (3.12-2)$$

其中 ρ_0 为空气的静密度。同样在驻波场中会形成声压的波腹和波节, 两相邻波腹或波节之间的距离也为 $\lambda/2$, 所不同的是空气质点位移总是最大的地方却是声压的波节, 而空气质点总是静止的地方却是声压的波腹。

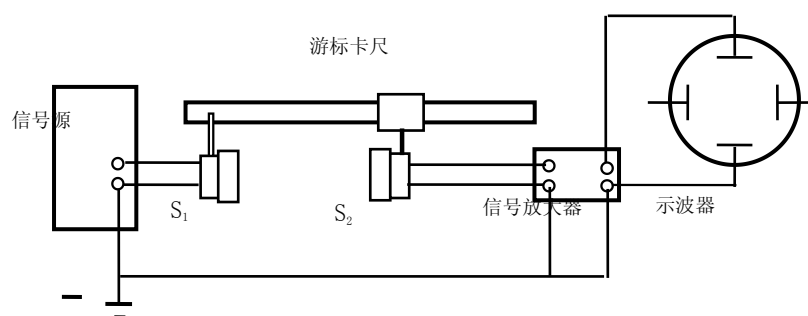


图 3.12-1 共振干涉法测声速

若将接收到的超声波声压信号转换成电信号再输入示波器, 当发射频率固定时, 移动 S_2 , 改变两者的相对距离就能在一系列特定的距离 (为声波半波长的整数倍) 上建立驻波共振态, 从示波器上可以观察到信号振幅周期性地呈现最大值, 相邻最大值之间的距离为

$$\Delta l = \lambda/2 \quad (3.12-3)$$

$$\text{则} \quad v = f\lambda = 2f\Delta l \quad (3.12-4)$$

实际测量中为了提高测量精度, 可以连续多次测量并用逐差法处理数据。

(2) 相位比较法测声速

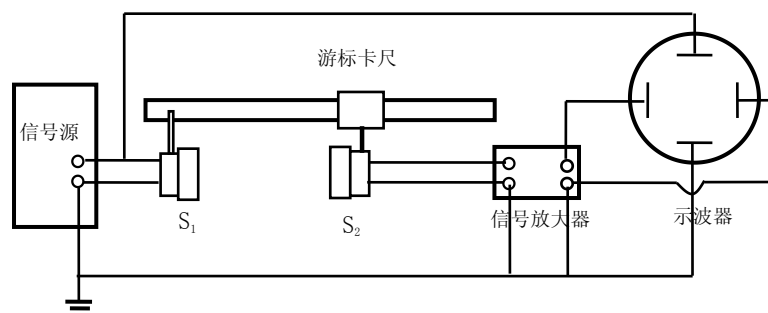


图 3.12-2 相位比较法测声速

声波是振动状态的传播，在声波传播方向上任何一点和波源之间都存在位相差。若设位相差为 ϕ ，声波频率为 f ，波速 v 和传播距离 l 之间的关系为

$$\phi = \omega t = \frac{2\pi fl}{v} = \frac{2\pi l}{\lambda} \quad (3.12-5)$$

如图 3.12-2 所示，将 S_1 和 S_2 的正弦电压信号分别输入示波器的 X 信道和 Y 信道，在示波器上可以观察到两个相互垂直的同频率简谐振动合成的李萨如图形。改变 S_1 、 S_2 之间的距离时位相差发生变化，椭圆的特性也随之变化。每当位相差的变化满足

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{2\pi l_2}{\lambda} - \frac{2\pi l_1}{\lambda} = 2\pi, \text{ 即}$$

$$\Delta l = l_2 - l_1 = \lambda \quad (3.12-6)$$

时，相同的李萨如图形就会重复出现（如图 3.12-3 所示）。由此可以测定 λ ，算出声速

$$v = f\lambda = f\Delta l \quad (3.12-7)$$

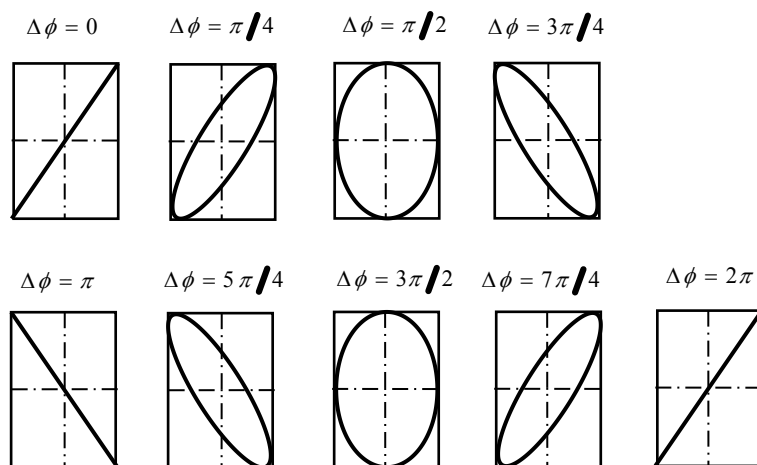


图 3.12-3 李萨如图

(3) 时差法测量原理

以上二种方法测声速，都是用示波器观察波谷和波峰，或观察二个波间的相位差，原理是正确，但存在读数误差，较精确测量声速是用时声波差法，时差法在工程中得到了广泛的应用。它是将经脉冲调制的电信号加到发射换能器上，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。

$$V = L/T$$

(3.12-8)

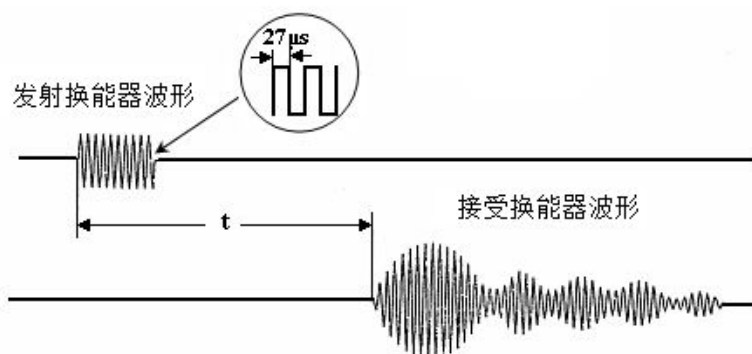


图3.12-4 用时差法测量声速的波形图

3. 理想气体中的声速

声波在理想气体中的传播可以认为是绝热的，声速可表示为

$$v = \sqrt{\frac{\gamma R T_0}{\mu} \left(1 + \frac{t}{T_0}\right)} = \sqrt{\frac{\gamma R T_0}{\mu}} \sqrt{\left(1 + \frac{t}{T_0}\right)} = v_0 \sqrt{\left(1 + \frac{t}{T_0}\right)} \quad (3.12-9)$$

式中 $\gamma = c_p / c_v$ 是气体的比热； $R = 8.314 \text{ J} / (\text{mol} \cdot \text{K})$ 是摩尔气体常数； μ 是气体的摩尔质量； t 是气体的摄氏温度， $T_0 = 273.15 \text{ K}$ 。

若把干燥空气看作是理想气体，在 0°C 时 $v_0 = 331.45 \text{ m/s}$ 。若再考虑大气压和空气中水蒸汽的影响，则声速为

$$v = \sqrt{\frac{\gamma R T_0}{\mu} \left(1 + \frac{t}{T_0}\right) \left(1 + \frac{0.3192 p_w}{p}\right)} \quad (3.12-10)$$

式中 p 为大气压； p_w 是水蒸汽的分压强，它等于温度为 t 时空气中水蒸汽的饱和蒸汽压 p_s (参见本实验后附录) 乘以当时的相对湿度 H ， H 可从干湿温度计上读出。

三、仪器设备

【实验仪器】

SV4 型声速测定仪及 SV5 型声速测定专用信号源 (它们构成的组合仪可用于测量空气和液体介质的声速，其外形结构见下图 3.12-5，双踪示波器，干湿温度计，水银气压计等。



图 3.12-5 SV4 型声速测定仪及 SV5 型声速测定专用信号源

SV4 型声速测定仪主要由储液槽、传动机构、数显标尺、压电换能器等组成。作为发射超声波用的换能器 S_1 固定在储液槽的左边，另一只接收超声波用的接收换能器 S_2 装在可移动滑块上，通过传动机构进行位移，并由数显表头显示位移的距离。

S_1 发射换能器超声波的正弦电压信号由 SV5 声速测定专用信号源供给，换能器 S_2 把接收到的超声波声压转换成电压信号，用示波器观察。

四、实验程序

一、调整系统达到最佳发射和接受状态。

当激励正弦电信号与换能器固有频率基本一致时能较为有效地实现电能和声能的相互转换。调节方法如下：

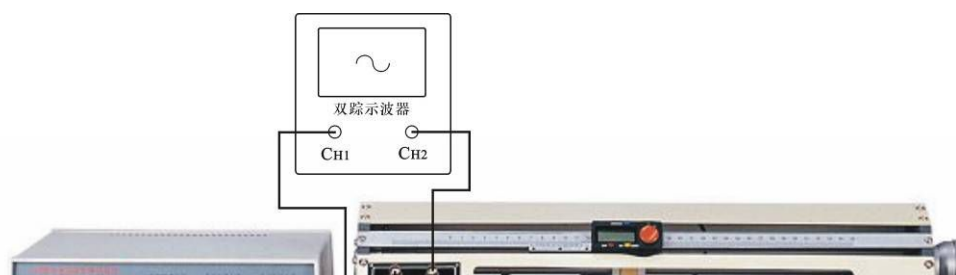


图 3.12-6 共振法、相位法测量声速线路连接

1. 参考图 3.12-6 连接线路，将专用信号源的“发射波形”端接至示波器，调节示波器，能清楚地观察到同步的正弦波信号；

2. 调节专用信号源上的“发射强度”旋钮，使其输出电压在 $2V_{P-P}$ 左右，然后将换能器的接收信号接至示波器，选择适当的示波器偏转因数，调整信号频率 (34.5kHz ~ 39.5kHz)，频率由专用信号源频率显示窗口直接读出，观察接收波的电压幅度变化，在某一频率点处（因不同的换能器或介质而异）电压幅度最大，此频率即是压电换能器 S_1 、 S_2 相匹配频率点，记录此频率 f_i 。

3. 改变 S_1 、 S_2 的距离，使示波器的正弦波振幅最大，再次调节正弦信号频率，直至示波器显示的正弦波振幅达到最大值。共测 5 次取平均频率 f ，测量中保持该频率不变。

二、用共振干涉法测量空气中的声速

按图 3.12-6 接线，在专用信号源上将测试方法设置到“连续波”方式，将专用信号源上“声速传播介质”置于“空气”位置。转动距离调节鼓轮移动 S_2 观察信号幅值随距离周期变化的现象。选择某个振幅最大值作为测量起点，由数显尺上直接读出或在机械刻度上读出并记录下此时的位置，然后向着同方向再缓慢移动 S_2 ，逐一记下各振幅极大的位置，记录 12 组数据。用逐差法处理数据。

$$\text{由 (3.12-3) 式有} \quad \Delta l_1 = \frac{1}{6}(l_7 - l_1) = \frac{\lambda}{2}$$

$$\dots\dots\dots$$

$$\Delta l_6 = \frac{1}{6}(l_{12} - l_6) = \frac{\lambda}{2}$$

$$\text{所以} \quad \overline{\Delta l} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \Delta l_i = \frac{\lambda}{2}$$

$$v = 2\overline{\Delta l}f \quad (3.12-11)$$

三、用相位比较法测量水中的声速

按图 3.12-6 方式接线，小心将金属测试架从储液槽中取出，然后向储液槽注入液体，直至“液面线”处，但不要超过液面线。在专用信号源上将“测试方法”设置到“连续波”方式，将专用信号源上“声速传播介质”置于“液体”位置。按前面实验内容一的方法，确

定最佳工作频率。发射波接到双踪示波器的“CH1”，接收波接到“CH2”，打到“X-Y”显示方式，适当调节示波器，出现李萨如图形。转动距离调节鼓轮，移动S₂并观察示波器上李萨如图形的变化。选择图形为某一方向的斜线时的位置作为测量的起点，向同一个方向移动S₂，依次记下示波器屏上斜率负、正变化的直线出现的对应位置l₁，l₂，…l₁₂。共记录12组数据。单次波长 $\lambda_i = 2 \bullet |l_i - l_{i-1}|$ 。多次测定用逐差法处理数据，即可得到波长 λ 。

同样用逐差法处理数据求出水中的声速

$$v = 2\Delta l f \quad (3.12-12)$$

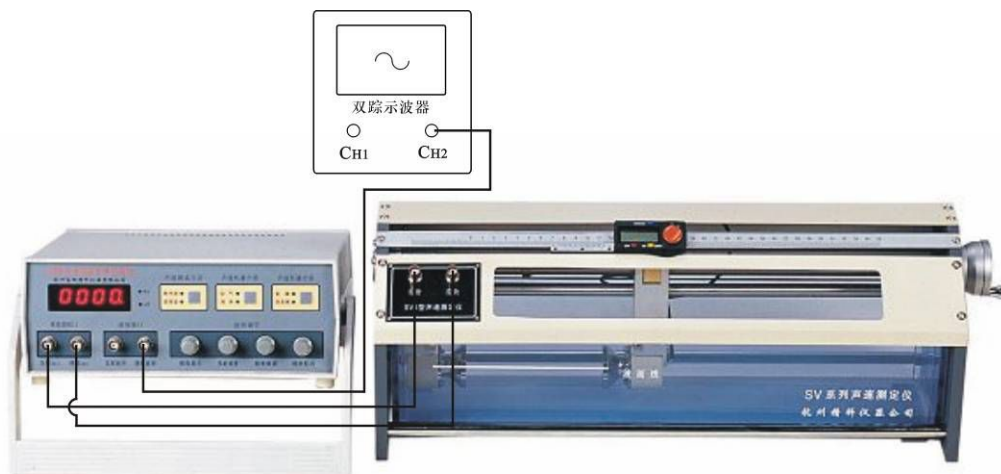


图 3.12-7 时差法测量声速线路连接

四、时差法测量声速（选做）

a) 按图 3.12-7 连接线路，测量空气声速时，将专用信号源上“声速传播介质”置于“空气”位置，测量液体声速时，置于“液体”位置。将测试方法设置到“脉冲波”方式。

b) 将S₁和S₂之间的距离调到一定距离（≥50mm）。开启数显表头电源，并置0，再调节接收增益，使示波器上显示的接收波信号幅度在300~400mV左右（峰-峰值），以使计时器工作在最佳状态。然后记录此时的距离值和显示的时间值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S₂，记录下这时的距离值和显示的时间值l_{i+1}、t_{i+1}共测12组数据。

$$V = (l_{i+1} - l_i) / (t_{i+1} - t_i) \quad (3.12-13)$$

需要说明的是，由于声波的衰减，移动换能器使测量距离变大（这时时间也变大）时，如果测量时间值出现跳变，则应顺时针方向微调“接收放大”旋钮，以补偿信号的衰减；反之测量距离变小时，如果测量时间值出现跳变，则应逆时针方向微调“接收放大”旋钮，以使计时器能正确计时。

五、记录传播介质温度t（°C）。

五、数据处理

1、用逐差法处理数据，按（3.12-11）式计算声速。记录测量时的室温t，由（3.12-9）式或（3.12-10）式计算该温度时空气中的声速，与实验中测得的空气中的声速比较，计算

$$\Delta v = |v_{\text{理}} - v_{\text{实}}| \quad \text{及} \quad \frac{|v_{\text{理}} - v_{\text{实}}|}{v_{\text{理}}} \times 100\%。$$

2、用逐差法处理数据，按（3.12-12）式计算水中的声速 v ，估算其不确定度并给出完整的结果表述。

六、拓展问题

1. 如果两个换能器不平行对实验有什么影响？
2. 实验中应如何确定换能器的共振频率？
3. 试用本实验的仪器设备测量空气的比热和摩尔质量，写出实验原理、步骤和数据处理的方法。
4. 对固体媒质，用改变 S_2 的位置来改变传播距离求出波长再计算声速的方法往往不可行。试在传播距离不能改变的条件下，设计一种利用本实验提供的设备测量声速的方法。
5. 工程中常需要在无损的条件下精确测量某些部件的厚度。若已知部件的材料，在上一问题的基础上设计一种超声测厚的方法。

参考资料

1. 程守洙, 江之永. 《普通物理学 3》 高等教育出版社 1998
2. 熊永红 主编 《大学物理实验》 华中科技大学出版社 2004
3. 同济大学声学研究室. 《超声工业测量技术》 上海人民出版社 1977
4. 胡建恺, 张谦林. 《超声检测原理和方法》 中国科学技术大学出版社 1993
5. 马大猷等. 《声学手册》 科学出版社 1983
6. 许肖梅 《声学基础》 科学出版社 2003

附 录

冰(0℃以下)、水的饱和蒸汽 p_s (单位: Pa)与温度的关系										
温度 / ℃	0.1	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
—10.0	260.8	238.6	218.1	199.3	182.0	166.1	151.4	138.0	125.6	114.3
—0.0	610.7	562.6	517.8	476.4	438.0	402.4	369.4	338.9	310.8	284.8
0.0	610.7	656.6	705.5	757.7	813.1	872.2	934.9	1001.7	1072.6	1117.8
10.0	1227.8	1312.4	1402.3	1497.3	1598.1	1704.9	1817.9	1937.3	2063.6	2196.9
20.0	2337.8	2486.6	2643.5	2809.1	2983.6	3167.6	3361.3	3565.3	3780.0	4005.4
30.0	4243.3	4493.0	4755.3	5030.9	5320.1	5623.7	5942.2	6276.2	6626.3	6993.2
40.0	7377.4	7779.9	8201.1	8641.8	9102.9	9584.8	10088.6	10615.0	11164.9	11739.0
50.0	12338.3	12963.7	13616.1	14296.4	15005.6	15744.0	16514.6	17315.9	18150.5	19019.8
60.0	19923.7	20865.0	21842.2	22859.5	23915.4	25013.9	26153.8	27337.8	28567.0	29842.9
70.0	31165.4	32538.7	33962.5	35438.4	36969.0	38552.8	40195.1	41895.2	43656.4	45478.9
80.0	47364.1	49314.6	51331.1	53419.6	55578.1	57807.2	60112.4	62492.2	64952.0	67490.4
90.0	70111.6	72818.0	75609.8	78490.9	81462.6	84527.7	87687.5	90944.5	94301.6	97761.3
100.0	10132.5	10497.3								

数显表头的使用方法及维护

声速测定仪数显表头使用方法：

1. inch / mm 按钮为英制/公制转换用，测量声速时用“mm”
2. “OFF”“ON”按钮为数显表头电源开关
3. “ZERO”按钮为表头数字回零用。
4. 数显表头在标尺范围内，接收换能器处于任意位置都可设置“0”位。摇动丝杆，接收换能器移动的距离为数显表头显示的数字。
5. 数显表头右下方有“▼”处打开为更换表头内扣式电池处。
6. 使用时严禁将数显表头淋湿，如表头不慎受潮不能正常显示，可用电风吹干（用电吹风低温档，温度不超过 60℃）或把标尺卸下在太阳光下晒干驱潮即可恢复功能）。
7. 数显表头与数显杆尺的配合极其精密，应避免剧烈的撞击和重压。
8. 仪器使用完毕后，应关掉数显表头的电源，以免无谓消耗钮扣电池。
9. 当数显表头的电池能量使用完时，应及时更换新电池。但在数显表暂时不能使用的情况下，可以直接用游标卡尺进行读数，不会影响测量结果!!!