

空气-液体介质的声速测量

(SV4 型声速测定仪)

实 验 讲 义

杭州精科仪器有限公司

空气、液体介质的声速测量

声波是一种在弹性媒质中传播的机械波，频率低于20Hz的声波称为次声波；频率在20Hz~20kHz的声波可以被人听到，称为可闻声波；频率在20kHz以上的声波称为超声波。

超声波在媒质中的传播速度与媒质的特性及状态因素有关。因而通过媒质中声速的测定，可以了解媒质的特性或状态变化。例如，测量氯气（气体）、蔗糖（溶液）的浓度、氯丁橡胶乳液的比重以及输油管中不同油品的分界面，等等，这些问题都可以通过测定这些物质中的声速来解决。可见，声速测定在工业生产上具有一定的实用意义。同时，通过液体中声速的测量，了解水下声纳技术应用的基本概念。

【实验目的】

1. 了解压电换能器的功能，加深对驻波及振动合成等理论知识的理解。
2. 学习用共振干涉法、相位比较法和时差法测定超声波的传播速度。
3. 通过用时差法对不同介质的测量，了解声纳技术的原理及其重要的实用意义。

【实验原理】

在波动过程中波速 V 、波长 λ 和频率 f 之间存在着下列关系： $V = f \cdot \lambda$ ，实验中可通过测定声波的波长 λ 和频率 f 来求得声速 V 。常用的方法有共振干涉法与相位比较法。

声波传播的距离 L 与传播的时间 t 存在下列关系： $L = V \cdot t$ ，只要测出 L 和 t 就可测出声波传播的速度 V ，这就是时差法测量声速的原理。

1. 共振干涉法（驻波法）测量声速的原理：

当二束幅度相同，方向相反的声波相交时，产生干涉现象，出现驻波。对于波束1： $F_1 = A \cdot \cos(\omega t - 2\pi \cdot X/\lambda)$ 、波束2： $F_2 = A \cdot \cos(\omega t + 2\pi \cdot X/\lambda)$ ，当它们相交时，叠加后的波形成波束3： $F_3 = 2A \cdot \cos(2\pi \cdot X/\lambda) \cdot \cos \omega t$ ，这里 ω 为声波的角频率， t 为经过的时间， X 为经过的距离。由此可见，叠加后的声波幅度，随距离按 $\cos(2\pi \cdot X/\lambda)$ 变化。如图1所示。压电陶瓷换能器 S_1 作为声波发射器，它由信号源供给频率为数千周的交流电信号，由逆压电效应发出一平面超声波；而换能器 S_2 则作为声波的接收器，正压电效应将接收到的声压转换成电信号，该信号输入示波器，我们在示波器上可看到一组由

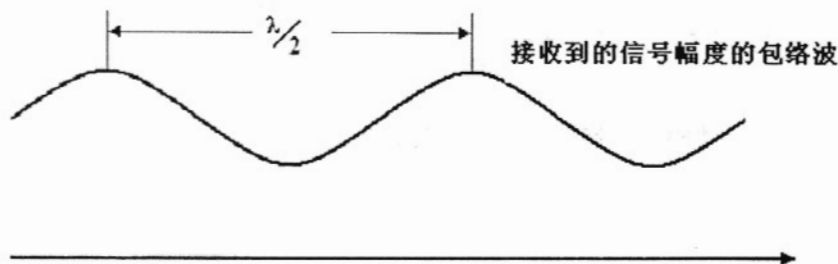


图1 发射换能器与接收换能器之间的距离

声压信号产生的正弦波形。声源 S_1 发出的声波，经介质传播到 S_2 ，在接收声波信号的同时反射部分声波信号，如果接收面（ S_2 ）与发射面（ S_1 ）严格平行，入射波即在接收面

上垂直反射，入射波与发射波相干涉形成驻波。我们在示波器上观察到的实际上是这两个相干波合成后在声波接收器 S_2 处的振动情况。移动 S_2 位置（即改变 S_1 与 S_2 之间的距离），你从示波器显示上会发现当 S_2 在某些位置时振幅有最小值或最大值。根据波的干涉理论可以知道：任何二相邻的振幅最大值的位置之间（或二相邻的振幅最小值的位置之间）的距离均为 $\lambda/2$ 。为测量声波的波长，可以在一边观察示波器上声压振幅值的同时，缓慢的改变 S_1 和 S_2 之间的距离。示波器上就可以看到声振动幅值不断地由最大变到最小再变到最大，二相邻的振幅最大之间 S_2 移动过的距离亦为 $\lambda/2$ 。超声换能器 S_2 至 S_1 之间的距离的改变可通过转动螺杆的鼓轮来实现，而超声波的频率又可由声波测试仪信号源频率显示窗口直接读出。在连续多次测量相隔半波长的 S_2 的位置变化及声波频率 f 以后，我们可运用测量数据计算出声速，用逐差法处理测量的数据。

2. 相位法测量原理：

声源 S_1 发出声波后，在其周围形成声场，声场在介质中任一点的振动相位是随时间而变化的。但它和声源的振动相位差 $\Delta\Phi$ 不随时间变化。

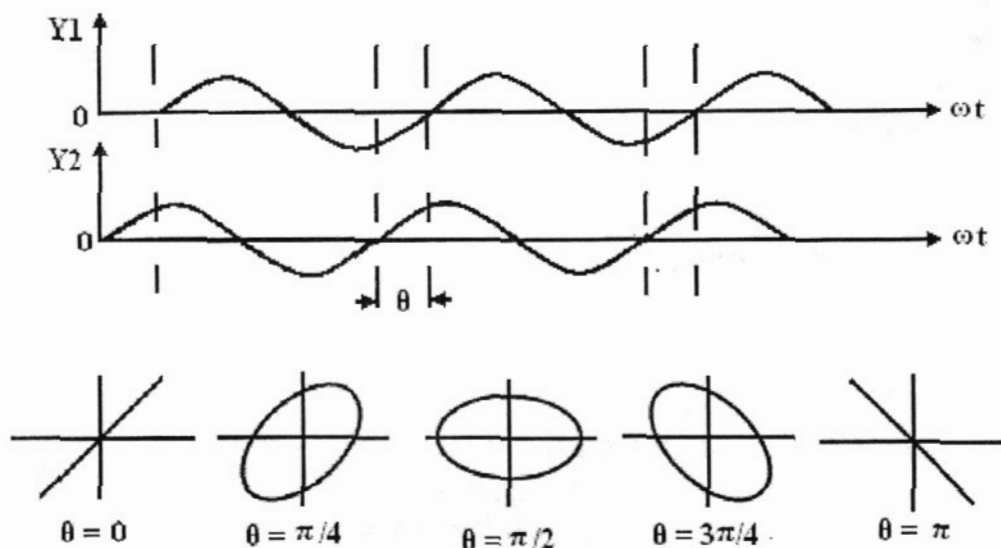


图2 接收信号与发射信号形成李萨如图

设声源方程为：

$$F_1 = F_{01} \cdot \cos \omega t$$

距声源 X 处 S_2 接收到的振动为：

$$F_2 = F_{02} \cdot \cos \omega(t - \frac{X}{Y})$$

两处振动的相位差：

$$\Delta\Phi = \omega \frac{X}{Y}$$

当把 S_1 和 S_2 的信号分别输入到示波器 X 轴和 Y 轴，那么当 $X = n \cdot \lambda$ 即 $\Delta\Phi = 2n\pi$ 时，合振动为一斜率为正的直线，当 $X = (2n+1)\lambda/2$ ，即 $\Delta\Phi = (2n+1)\pi$ 时，合振动为一斜率为负的直线，当 X 为其它值时，合成振动为椭圆（如图 2）。

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。速度 $V = L/t$ 。

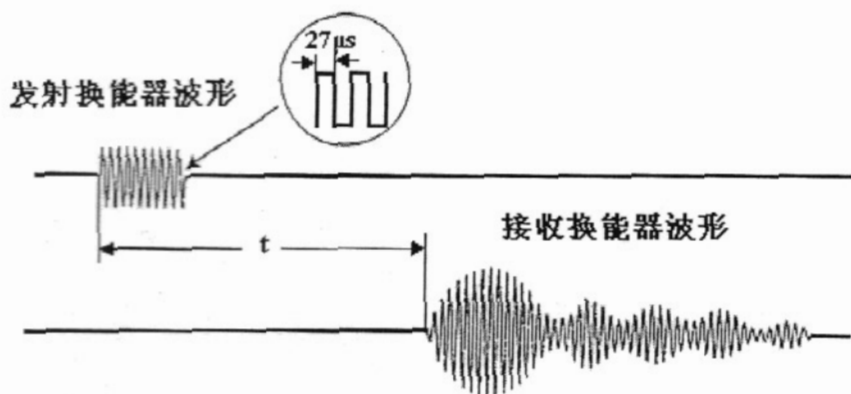


图3 用时差法测量声速的波形图

【实验仪器】

实验仪器采用杭州精科仪器有限公司生产的SV4型声速测定仪及SV5型声速测定专用信号源各一台。其外形结构见图4。SV4型声速测量组合仪适用于空气、液体介质声速测定使用；

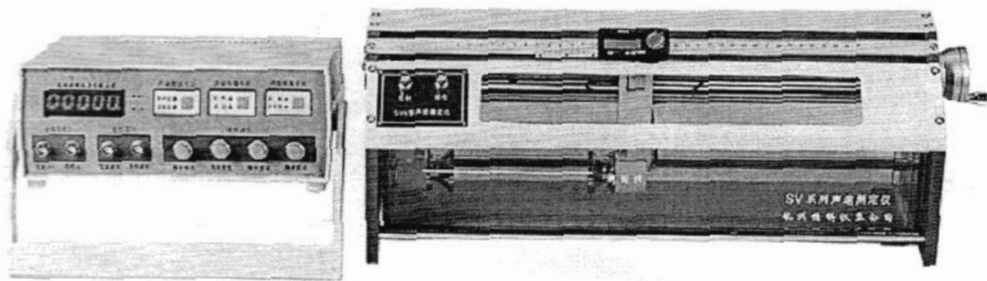


图4 SV4型声速测定仪实物照片

组合仪主要由储液槽、传动机构、数显标尺、压电换能器等组成。压电换能器供测量气体和液体声速用。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；时差法测量时则还要接到专用信号源进行时间测量，测得的时间值具有保持功能。

【实验内容】

一. 声速测量系统的连接

声速测量时：专用信号源、SV4型声速测定仪、示波器之间，连接方法见图 5—1、—2。

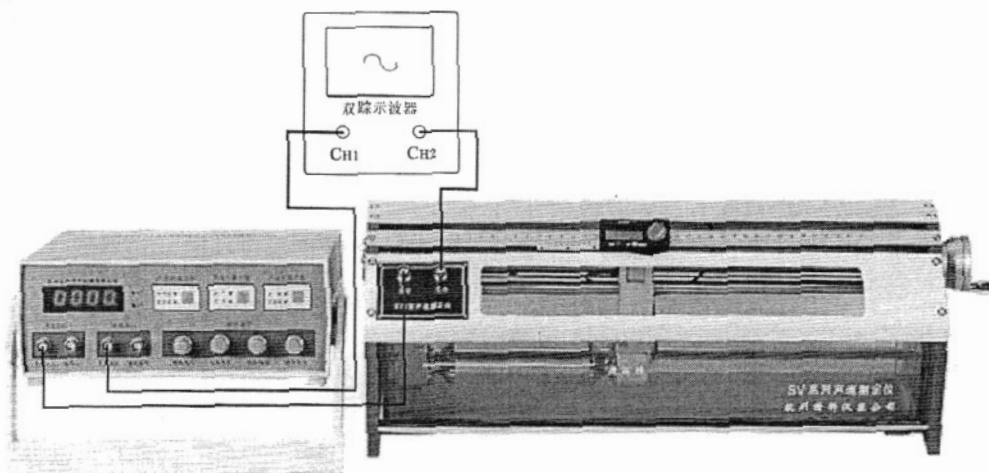


图 5—1 共振法、相位法测量声速线路连接

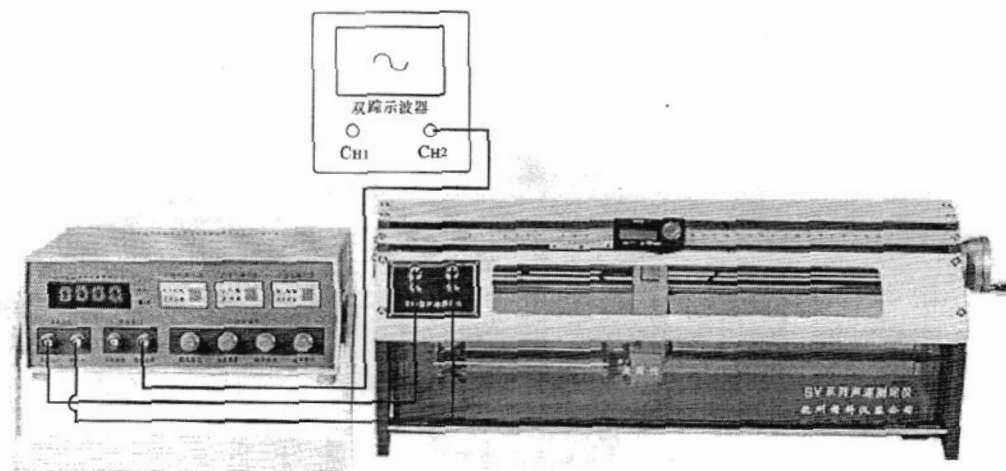


图 5—2 时差法测量声速线路连接

二. 谐振频率的调节

根据测量要求初步调节好示波器。将专用信号源输出的正弦信号频率调节到换能器的谐振频率，以使换能器发射出较强的超声波，能较地进行声能与电能的相互转换，以得到较好的实验效果，方法如下：

1. 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. 专用信号源的上“发射强度”旋钮, 使其输出电压在 $20V_{p-p}$ 左右, 然后将换能器的接收信号接至示波器, 调整信号频率 ($25kHz \sim 45kHz$), 观察接收波的电压幅度变化, 在某一频率点处 ($34.5kHz \sim 39.5kHz$ 之间, 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 。

三. 共振干涉法、相位法、时差法测量声速的步骤:

1. 共振干涉法(驻波法)测量波长:

在专用信号源上将测试方法设置到“连续波”方式。按前面实验内容二的方法, 确定最佳工作频率。观察示波器, 找到接收波形的最大值, 记录幅度为最大时的距离, 由数显尺上直接读出或在机械刻度上读出; 记下 S_2 位置 X_0 。然后, 向着同方向转动距离调节鼓轮, 这时波形的幅度会发生变化(同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相移), 逐个记下振幅最大的 $X_1, X_2, \dots, X_9$ 共 10 个点, 单次测量的波长 $\lambda_i = 2 \cdot |X_i - X_{i-1}|$ 。用逐差法处理这十个数据, 即可得到波长 λ 。

2. 相位比较法(李萨如图法)测量波长:

在专用信号源上将测试方法设置到“连续波”方式。确定最佳工作频率, 单踪示波器接收波接到“Y”, 发射波接到“EXT”外触发端; 双踪示波器接收波接到“CH1”, 发射波接到“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, 观察波形为一定角度的斜线, 记下 S_2 的位置 X_0 , 再向前或者向后(必须是一个方向)移动距离, 使观察到的波形又回到前面所说的特定角度的斜线, 这时来自接收换能器 S_2 的振动波形发生了 2π 相移。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 $X_1, X_2, \dots, X_9$ 。单次波长 $\lambda_i = 2 \cdot |X_i - X_{i-1}|$ 。多次测定用逐差法处理数据, 即可得到波长 λ 。

3. 干涉法、相位法的声速计算:

已知波长 λ 和平均频率 f (频率由声速测试仪信号源频率显示窗口直接读出), 则声速

$$V = f \cdot \lambda$$

由于声速还与介质温度有关, 故请记下介质温度 t ($^{\circ}C$)。

4. 时差法测量声速:

(1) 空气介质:

a) 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。将测试方法设置到“脉冲波”方式。

b) 将 S_1 和 S_2 之间的距离调到一定距离 ($\geq 50mm$)。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 $300 \sim 400mV$ 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-1} 、 t_{i-1} (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 , 记录下这时的距离值和显示的时间

值 L_i 、 t_i 。则声速 $V_i = (L_i - L_{i-1}) / (t_i - t_{i-1})$ 。

c) 记录传播介质温度 t ($^{\circ}\text{C}$)。

d) 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。

(2) 液体介质:

a) 当使用液体为介质测试声速时, 先小心将金属测试架从储液槽中取出, 取出时应用手指稍稍抵住储液槽, 再向上取出金属测试架。然后向储液槽注入液体, 直至“液面线”处, 但不要超过液面线。注意: 在注入液体时, 不能将液体淋在数显表头上, 然后将金属测试架装回储液槽。

b) 专用信号源上“声速传播介质”置于“液体”位置, 换能器的连接线接至测试架上的“液体”专用插座上, 即可进行测试, 步骤与 1 相同。记下介质温度 $t^{\circ}\text{C}$ 。

【数据处理】

1. 自拟表格记录所有的实验数据, 表格要便于用逐差法求相应位置的差值和计算 λ 。
2. 以空气介质为例, 计算出共振干涉法和相位法测得的波长平均值 λ , 及其标准偏差 S_λ , 同时考虑仪器的示值读数误差为 0.01mm 。经计算可得波长的测量结果 $\lambda = \lambda \pm \Delta\lambda$ 。

3. 按理论值公式 $V_s = V_0 \cdot \sqrt{\frac{T}{T_0}}$, 算出理论值 V_s 。

式中 $V_0 \approx 331.45\text{m/s}$ 为 $T_0 = 273.15\text{K}$ 时的声速, $T = (t + 273.15)\text{K}$ 。

4. 计算出通过二种方法测量的 V 以及 ΔV 值, 其中 $\Delta V = V - V_s$ 。

将实验结果与理论值比较, 计算百分比误差。分析误差产生的原因。可写为在室温为 $\quad^{\circ}\text{C}$ 时, 用共振干涉法 (相位法) 测得超声波在空气中的传播速度为

$$V = \quad \pm \quad \text{m/s}, \quad \delta = \frac{\Delta V}{V_s} = \quad \%$$

【思考题】

1. 声速测量中共振干涉法、相位法、时差法有何异同?
2. 为什么要在谐振频率条件下进行声速测量? 如何调节和判断测量系统是否处于谐振状态?
3. 为什么发射换能器的发射面与接收换能器的接收面要保持互相平行?
4. 声音在不同介质中传播有何区别? 声速为什么会不同?

【附录一】

超声波的发射与接收—压电换能器

压电陶瓷超声换能器能实现声压和电压之间的转换。压电换能器做波源具有平面性、单色性好以及方向性强的特点。同时，由于频率在超声范围内，一般的音频对它没有干扰。频率提高，波长 λ 就短，在不长的距离中可测到许多个 λ ，取其平均值， λ 的测定就比较准确。这些都可使实验的精度大大提高。压电换能器的结构示意图见图6。压电换能器由压电陶瓷片和轻、重两种金属组成。压电陶瓷片（如钛酸钡，锆钛酸铅等）

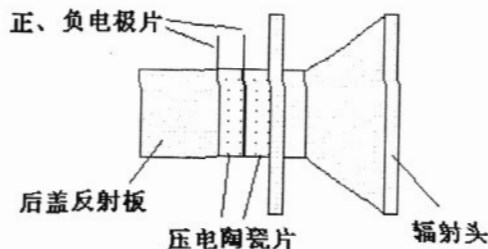


图6 压电换能器结构

是由一种多晶结构的压电材料做成，在一定的温度下经极化处理后，具有压电效应。在简单情况下，压电材料受到与极化方向一致的应力 T 时，在极化方向上产生一定的电场强度 E ，它们之间有一简单的线性关系 $E = g \cdot T$ ；反之，当与极化方向一致的外加电压 U 加在压电材料上时，材料的伸缩形变 S 与电压 U 也有线性关系 $S = dU$ 。比例常数 g 、 d 称为压电常数，与材料性质有关。由于 E 、 T 、 S 、 U 之间具有简单的线性关系，因此我们可以将正弦交流电信号转变成压电材料纵向长度的伸缩，成为声波的声源，同样也可以使声压变化转变为电压的变化，用来接收声信号。在压电陶瓷片的头尾两端胶粘两块金属，组成夹心形振子。头部用轻金属做成喇叭型，尾部用重金属做成柱型，中部为压电陶瓷圆环，紧固螺钉穿过环中心。这种结构增大了幅射面积，增强了振子与介质的耦合作用，由于振子是以纵向长度的伸缩直接影响头部轻金属作同样的纵向长度伸缩（对尾部重金属作用小），这样所发射的波方向性强，平面性好。

压电换能器谐振频率 $35 \pm 3\text{kHz}$ ，功率不小于 10W 。

【附录二】

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，可用电吹风吹干（用电吹风低温档，温度不超过 60°C ）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!!!

【附录三】

不同介质声速传播测量参数 (供参考)

一. 空气介质(标准大气压下):

$$V = (331.45 + 0.61t) \text{ m/s}$$

二. 液体介质:

- | | |
|---------|----------|
| 1. 淡水 | 1480 m/s |
| 2. 甘油 | 1920 m/s |
| 3. 变压器油 | 1425 m/s |
| 4. 蓖麻油 | 1540 m/s |

SV4 型声速测量组合仪装箱清单

型号规格	单位	数量	备注
SV4 型声速测定仪	台	1	
SV5 型专用信号源	台	1	
电源导线	根	1	
两头 Q9 座导线	根	3	L=1m
实验讲义 (说明书)	本	1	

装箱人 5

装箱日期 2014年 4月