

2020年秋季大学物理实验（5）-超速声速测量

专业班级：电气1908 学号：U201912072 姓名：柯依娃 日期：2020/10/28 实验台：19号 报告柜：J21 第十周星期三下午

实验名称:

超速声速测量

实验目的:

1. 了解超声换能器的工作原理和功能
2. 掌握用共振干涉法和相位比较法测量声速的原理
3. 学会数据分析和处理的基本方法

实验仪器材料

本实验中需要用到的仪器包括示波器、信号发生器、游标卡尺、换能器、声速测定仪、传动装置。

其中重要仪器声速测定仪的信息如下：

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，双踪示波器，干湿温度计，水银气压计等。

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 S1 固定在储液槽的左边，另一只接收超声波用的接收换能器S2 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。S1 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S2 把接收到的 超声波声压转换成电压信号，用示波器观察。

预备问题

1. 压电换能器是如何工作的？

压电换能器：压电式换能器是利用某些单晶材料的压电效应和某些多晶材料的电致伸缩效应来将电能与声能进行相互转换的器件。因其电声效率高、功率容量大以及结构和形状可以根据不同的应用分别进行设计，在功率超声领域应用广泛。

原理：主要利用了压电效应，压电效应的原理是，如果对压电材料施加压力，它便会产生电位差（称之为正压电效应），反之施加电压，则产生机械应力（称为逆压电效应）。如果压力是一种高频震动，则产生的就是[高频电流](#)。而高频电信号加在压电陶瓷上时，则产生高频声信号（机械震动），这就是我们平常所说的超声波信号。从而形成声光之间的转换

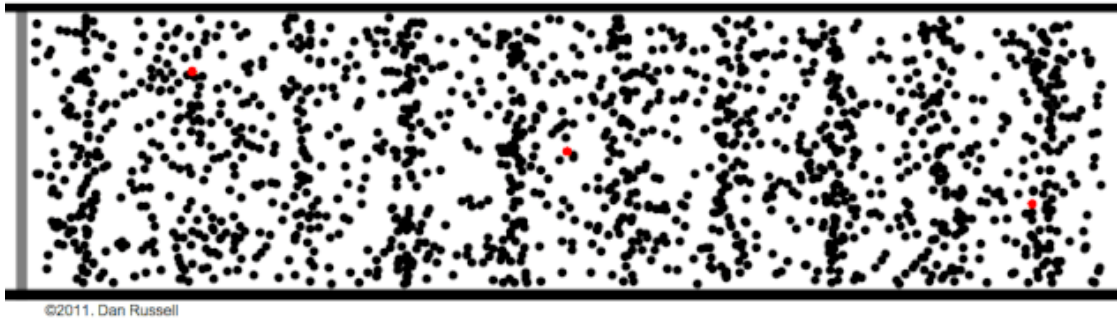
2. 声波在媒质中传播的速度与哪些因素有关？

从本质上说，声速是介质中微弱压强扰动的传播速度，可以计算得到

$$c = \sqrt{\frac{K_s}{\rho}}$$

其中 $K_s = \frac{dp}{\frac{d\rho}{\rho}}$ ，即体积弹性模量或刚度系数，dp、dρ分别为压强和密度的微小变化，ρ是密度

也就是说，声速和刚度系数的平方根成正比，和密度的平方根成反比。与介质压缩程度有关，与介值密度有关。



又可推得气体中有 $PV^\gamma = C$ 进而可得到

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}, \quad (17)$$

其中 γ 是绝热系数， T 是开尔文温度， μ 是摩尔质量

推导过程可见 <https://zhuanlan.zhihu.com/p/96007874>

也就是说，气体中的声速取决于温度，气体分子质量，气体分子结构。温度高，气体分子质量小，气体分子结构简单，声速就越快。

3. 何为共振干涉法和相位比较法？

共振比较法：

通过形成驻波，测算中间的波节数 k 和接收器与接收器之间的距离 l ，来确定波长 λ ，根据仪器已知频率 f 求得波速 u

其中，之所以可以满足所测波节数和声波波节数相同的原因是变换器之间都是线性变换（我最开始就是这里理解错了，我以为是线性的，但是实际上应该是差一个 $\frac{\pi}{2}$ （就是有个导数）），因为刚好差四分之一周期，压强和位移的相位关系差 $\pi/2$ ，也就是说在波节处压强最大，故可测

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 $\lambda/2$ 。

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 （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）却可以通过仪器观测。根据声学理论，声压 p 的驻波可表示为：

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

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。

哦哦这里就是为什么压感换能器能用的原理（

相位比较法：

相同声速相同频率时，通过李萨如图形稳定时的相位差 2π 时的 S_1S_2 距离差得到波长 λ ，从而得到声速 $u=f\lambda$

其中详细过程：

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

$$\phi = \omega t = 2\pi f l / v = 2\pi l / \lambda \quad (3.12-5)$$

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

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = (2\pi l_2 - 2\pi l_1) / \lambda = 2\pi, \text{ 即 } \Delta l = l_2 - l_1 = \lambda \quad (3.12-6)$$

时，相同的李萨如图形就会重复出现（如图 3.12-2 所示）。由此可以测定 λ ，算出声速

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

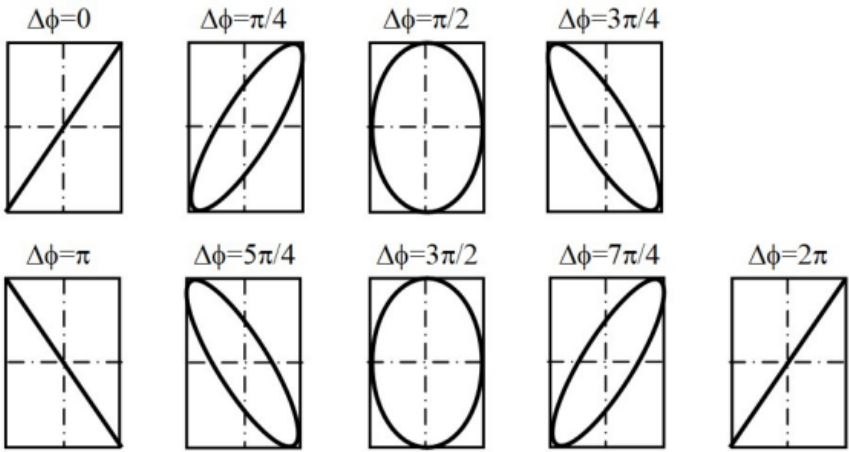


图 3.12-2 李萨如图

实验原理

共振比较法和相位比较法见预习问题3

时差法

较精确测量声速是用时差法。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，求出声波在介质中传播的速度。即相当于用较为常规的方法测试声速 $u=L/T$

同时可以将之与理想气体的声速对比，其声速的计算方式为

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

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

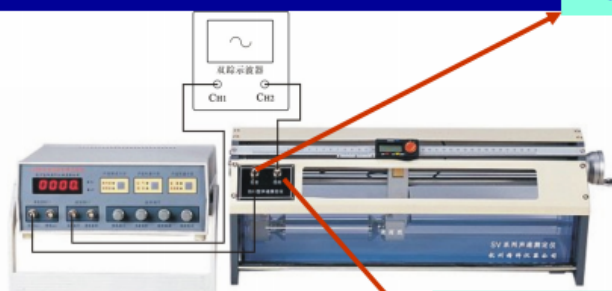
式中 p 为大气压； p_w 是水蒸汽的分压强，它等于温度为 t 时空气中水蒸汽的饱和蒸汽压 p_s (参见本实验后附录) 乘以当时的相对湿度 H ， H 可从干湿温度计上读出。

数据处理

谐振频率调节 (频率选择, 前期准备)

◆ 实验内容

1. 谐振频率的调节 (必做)



S1接口

信号源设置“连续波”方式
S₁接口接信号源“发射”
信号源“发射波形”接CH1
S₂接口接示波器CH2

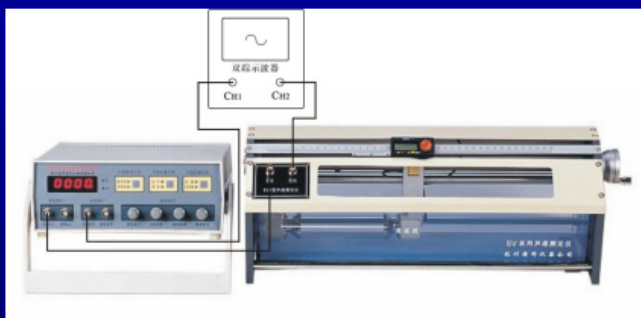
S2接口

- 检查线路，正确连线。
- 调节信号源上的“发射强度”旋钮，使其输出电压峰峰值 (V_{p-p}) 在1-2V左右(示波器模式置CH1)。改变频率使接收信号振幅达到最大(示波器模式置CH2)(34.5kHz~39.5kHz)。
- 改变S1、S2 距离，使示波器屏上正弦波振幅达到最大，再次调节正弦信号频率使之最大。记录此频率 f_0 ，测量中保持该频率不变。

用共振干涉法测量空气中的声速

◆ 实验内容

2.用共振干涉法测量空气中的声速（必做）



信号源设置“连续波”方式
 S_1 接口接信号源“发射”
信号源“发射波形”接CH1
 S_2 接口接示波器CH2

- 逐一记录相邻波腹位置值！
(缓慢远移接收器 S_2 ，每当接收信号最大时，记录一次接收换能器的位置, 示波器模式置CH2)
- 要求测量12组数据！
- 记录温度。

用相位比较法测量水中的声速

◆ 实验内容

3.用相位比较法测量水中的声速（必做）



信号源设置“连续波”方式
 S_1 接口接信号源“发射”
信号源“发射波形”接CH1
 S_2 接口接示波器CH2

- 逐一记录示波器屏上斜率为负、正的直线出现时 S_2 的对应位置 (缓慢远移接收换能器 S_2 ，每当图形由椭圆变为直线时, 包括正、负斜率两种情况，记录一次接收换能器位置, 示波器选择X-Y 方式)
- 要求测量12组数据。

空气中 $f=36.70\text{kHz}$

水中 $f=36.16\text{kHz}$

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
空气中共振法 (mm)	3.42	8.06	12.79	17.46	22.18	26.90	31.60	36.28	40.96	45.68	50.40	55.10
水中相位法 (mm)	5.58	26.34	47.92	63.00	90.02	111.88	133.34	152.46	170.96	193.00	214.64	236.90

室温：t= 22°

逐差法数据处理表格

	$\Delta L1$	$\Delta L2$	$\Delta L3$	$\Delta L4$	$\Delta L5$	$\Delta L6$	ΔL 平均值
空气	4.697	4.703	4.695	4.703	4.703	4.700	4.700
水	21.293	21.020	20.507	21.667	20.770	20.837	21.016

空气：

$$\lambda = 9.400mm$$

$$v = f\lambda = 344.98m/s$$

水：

$$\lambda = 42.032mm$$

$$v = f\lambda = 1519.9m/s$$

空气声速：

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

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT_0}{\mu} \left(1 + \frac{t}{T_0}\right)} = \sqrt{\frac{\gamma RT_0}{\mu}} \sqrt{\left(1 + \frac{t}{T_0}\right)} = v_0 \sqrt{\left(1 + \frac{t}{T_0}\right)} \quad (3.12-9)$$

式中 $\gamma = c_p / c_v$ 是气体的比热； $R=8.314J/(mol \cdot K)$ 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， $T_0 = 273.15K$ 。若把干燥空气看作是理想气体，在 $0^\circ C$ 时 $v_0 = 331.45m/s$ 。若再考

由之可以计算得到空气的理论值和不确定度

$$v = 344.54m/s$$

$$\Delta v = 0.44m/s$$

$$\frac{|v_{理} - v_{实}|}{v_{理}} * 100\% = 0.128\%$$

水中声速：

$$\lambda = \frac{2}{6} \sum_{n=1}^6 \frac{(x_{n+6} - x_n)}{6}$$

对每一个 x_i 其不确定度为 $0.02mm$ ，根据不确定度传递原理 λ 的标准不确定度为

$$\sqrt{6 * \frac{0.02^2}{18^2}} mm = 0.003mm$$

故水中声速的标准不确定度为（认为仪器频率误差为 $0.005Hz$ ）

$$\sqrt{0.003^2 * 36.16^2 + 0.005^2 * 43.032^2} m/s \approx 0.3m/s$$

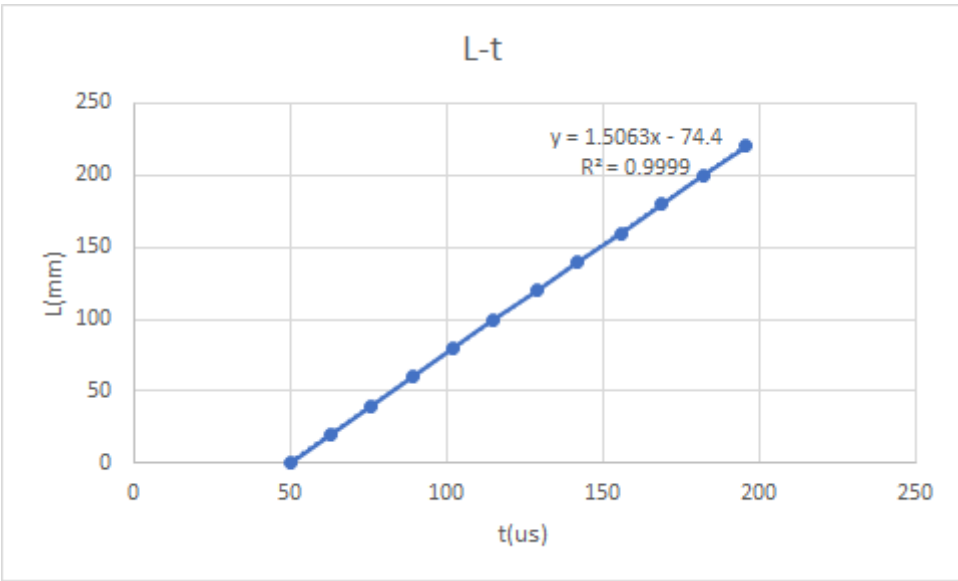
故水中声速 $v=1519.9\pm0.3\text{m/s}$

注意到这里我使用的是标准法计算不确定度，部分物理实验在逐差法中会将 ΔL 看成等精度多次测量计算A类和B类不确定度，会得到偏大的不确定度，故舍之按照最为苛刻（标准）的不确定度方法测量

时差法实验记录表格

每次移动S2 20.00mm，测得声速传播所需时间

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
L (mm)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220
t(us)	50	63	76	89	102	115	129	142	156	169	182	196



测得声速约为1506.3m/s

由于时差法中时间测量灵敏度较低，误差较大，故不相信它

拓展问题

1. 如果两个换能器不平行对实验有什么影响？

无法形成驻波

2. 实验中应如何确定换能器的共振频率？

找到相同电压下能使测得压强幅值最大的频率

即

检查线路，正确连线。
调节信号源上的“发射强度”旋钮，使其输出电压峰峰值（ V_{p-p} ）在1-2V左右（示波器模式置CH1）。改变频率使接收信号振幅达到最大（示波器模式置CH2）（34.5kHz~39.5kHz）。
改变S1、S2 距离，使示波器屏上正弦波振幅达到最大，再次调节正弦信号频率使之最大。记录此频率 f_0 ，测量中保持该频率不变。

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。

- 实验原理完全相同

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。

- 实验流程完全相同，计算出 v
- 进而通过 3.12-10 式得到空气的比热容/摩尔质量的值，故比热容和摩尔质量可以相互推导得到

4. 对固体媒质，用改变 S2 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。

改变频率，即改变了波长，当波长恰好为距离的整数倍时会产生极大值（注意是极大值不是最大值），记录这些频率和对应传播距离 L

$$\begin{aligned} f &= \frac{u}{\lambda} \\ \frac{L}{\lambda} &= k (k \in \mathbb{Z}) \\ \frac{L f}{u} &= k \\ u &= L \Delta f \end{aligned}$$

故同样，采用逐差法可以测得 u

plus，采用时差法也可以

以脉冲调制正弦信号输入到发射器，使其发出脉冲声波，经时间 t 后到达距离 L 处的接收器。接收器接收到脉冲信号后，能量逐渐积累，振幅逐渐加大，脉冲信号过后，接收器作衰减振荡。 t 可由测量仪自动测量。测出 L 后，即可由 $V = L/t$ 计算声速。

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。

同理，反过来，已知 u ， $L = u/\Delta f$ ，则通过逐差法可以测量得到厚度 L

plus，采用时差法也可以

以脉冲调制正弦信号输入到发射器，使其发出脉冲声波，经时间 t 后到达距离 L 处的接收器。接收器接收到脉冲信号后，能量逐渐积累，振幅逐渐加大，脉冲信号过后，接收器作衰减振荡。 t 可由测量仪自动测量，带入已知 V ，即可由 $L = Vt$ 计算厚度。

