

实验 2.9 声速的测定

【实验综述】

超声波具有波长短、定向性强且无噪音等优点，所以实验室常用超声波来测量声速。测超声波传播速度对于在超声波测距、定位、探伤、液体流速、材料的弹性模量、气体温度的瞬间变化等实际应用方面都有十分重要的意义。

当声源在空气中振动时，一会儿压缩空气，使空气变得“稠密”；一会儿使空气膨胀，变得“稀疏”，形成一系列疏、密变化的波，将振动能量传出去。这种媒介质点的振动方向与波的传播方向一致的波称为“纵波”。声速是描述声波在媒质中传播的特性的一個基本物理量，它最简单的测量方法是直接从声波的振动的频率 f 和波长 λ 之间的关系测得。即实验时用结构相同的一对超声压电陶瓷换能器（发射器和接收器），用振幅法和相位法测定波长，由示波器直接读出频率 f 。

【实验目的】

1. 了解声波的特性，加深振动合成和波动干涉理论的理解。
2. 学会用相位差法和驻波法测定声波在空气中传播的速度。
3. 进一步掌握示波器和信号发生器的使用。

【实验原理】

1. 超声波传播速度

声波在理想气体中的传播可认为绝热过程，其传播速度为：

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}} \quad (2-9-1)$$

式中 μ 为气体摩尔质量， R 为摩尔气体常数（8.314J/mol K）， γ 为气体摩尔热容比， T 为气体的绝对温度(K)。在 0℃ 时，声速 $v_0 = 331.45 \text{ m/s}$ ，所以在 $t^\circ\text{C}$ 时，声速为：

$$v_t = 331.45 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} \quad (2-9-2)$$

声波在不同的介质中传播速度不同，最简单的方法直接测量声波的振动的频率 f 和波长 λ ，可得：

$$v = \lambda f \quad (2-9-3)$$

因为声波的振动的频率一般是仪器给定的，所以只要测得波长就能计算声速，常用的波长测量方法有驻波法（共振干涉法）和相位比较法两种。

2. 驻波法测定超声波波长

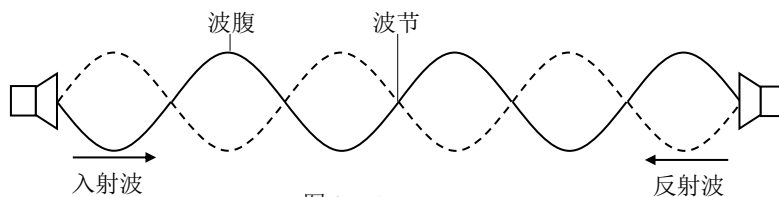


图 2-9-1

由于入射声波与反射声波相干叠加，两个换能器之间可形成如图 2-9-1 所示的共振驻波现象，即波幅达到极大。由纵波的性质可以证明，振动位移处于波节时，则声压处于波腹，即接收器端面振动位移为一波节时，接收到的声压最大，经接收器转换成的电信号也最强。

驻波共振的条件是发射面到接收面之间的距离 L 恰好等于半波长的整数倍，即：

$$L_n = n \frac{\lambda}{2} \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (2-9-4)$$

将接收端信号输入示波器就可看到最大的振幅，接收端每移动距离 ΔL 使示波器上再次观察到最大的振幅，其移动的距离由 (2-9-4) 式可知：

$$\Delta L = L_{n+1} - L_n = \frac{\lambda}{2} \quad (2-9-5)$$

将由 (2-9-5) 式获得的 λ 值代入 (2-9-3) 式就可计算出超声波波速。

3. 相位比较法测定超声波波长

波是振动状态的传播，也可以说是相位的传播。沿波传播方向上的任何两点，其振动状态相同，或者说其相位差为 2π 的整数倍时，两点间的距离应等于波长 λ 的整数倍，利用这个原理可测量声波波长。由于发射器发出的是近似于平面波的超声波，当接收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收到的信号与发射的信号同相。移过的这段距离必然等于超声波的波长 λ 。为了测定相位差，可以利用双踪示波器直接比较发射的信号和接收的信号。也可以利用李萨如图形寻找同相时椭圆退化为斜直线的点。图 2-9-2 为李萨如图形与位相差的关系。

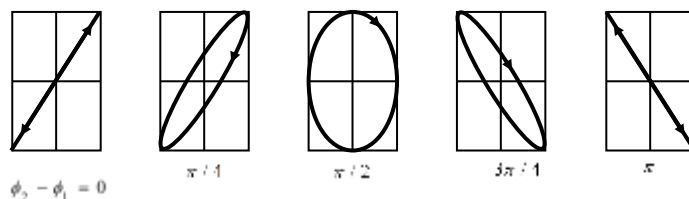


图 2-9-2

改变接收端和发射端距离，即改变了它们的位相差 $\Delta\varphi$ ，示波器上的李萨如图形就发生了变化。接收端移动的距离 ΔL 与相位有关。因此只要观察示波器上直线的斜率从正到负变化，就知道 $\Delta L = \frac{\lambda}{2}$ ，将它代入 (2-9-3) 式就可计算出超声波波速。

【实验装置】

实验系统装置如图 2-9-3 所示，实验系统连接图见图 2-9-4。

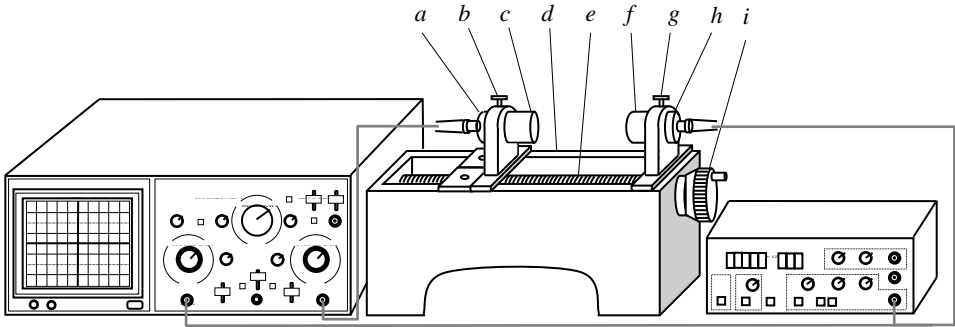


图 2-9-3

(a-接收器, b-可移动支架螺钉, c-压电陶瓷头, d-标尺, e-螺杆, f-压电陶瓷头, g-固定支架螺钉, h-发射器, i-读数鼓轮)

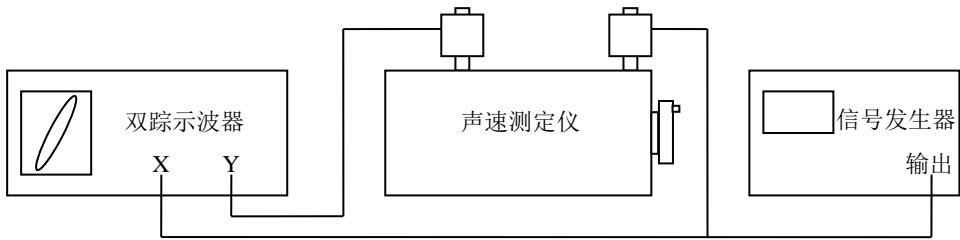


图 2-9-4

1. 声速测定仪

声速测定仪的构造如图 2-9-3 所示。超声波的发射端和接收端由两个压电换能器来实现电能与声能之间的可逆转换，其中一个固定作为发射端，另一个可以在有游标的标尺上移动作为接收端。发射端还连接在有频率显示的函数信号发生器上。并且发射端和接收端都接在示波器上，以便观察波形。

2. 压电陶瓷头

压电陶瓷超声换能器由二片压电陶瓷环片（由石英和锆钛酸铝等材料制成）和轻重两种金属组成。如图 2-9-5 所示。

头部轻金属（铝）与一片压电陶瓷片粘合，尾部重金属与另一片压电陶瓷片粘合，二片之间夹一铜箔做的圆环，作为引出电极。穿心螺钉将所有器件紧固成一体，但不与引出线接触，这样头尾轻重金属为一电极，铜箔片为另一电极，在压电陶瓷环片上的两个底面上加上正弦交流电压，它就按正弦规律产生振动而直接影响头部铝质轻金属，使头部轻金属发射声波。而尾部钢质金属较重，伸缩作用小，反射的声波也小。同样压电陶瓷片也可以使声压转化为电压的变化，用来作为超声波的接收器。

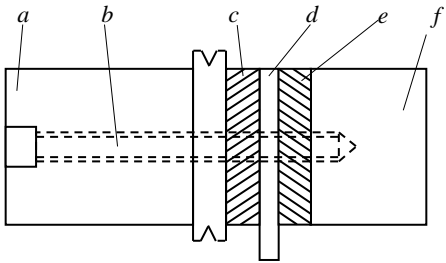


图 2-9-5

(a-尾部重金属, b-紧固螺钉, c、e-压电陶瓷环片, d-铜箔引线, f-头部轻金属)

【实验内容】

1. 系统调节

实验时,只有信号的频率与两个具有相同固有频率的换能器的频率一致时(即相匹配),才能较好地进行声能与电能的相互转换,同时只有发射端面与接收端面相平行时,才能有较好的接收效果。因此,这两项的调节是保证有良好实验状态的关键。其调节方法如下:将移动端换能器尽量靠近固定端换能器(几个毫米)。并调节两个端面呈平行,将接收端信号输入示波器 y 轴,在信号发生器上调节频率旋钮,选择谐振频率(约 40KHz),即发射端换能器的固有频率。有时往往发射端和接收端的换能器固有频率并不完全相同,因而在示波器上看到的不一定是最大振幅的正弦波,此时微微调节信号发生器的频率旋钮,直到示波器上出现振幅最大为止。这时,显示的频率数值才是实验时所需的谐振频率。

2. 驻波法测量声速

调节好超声换能器至最佳工作状态后,可将移动接收端在标尺上来回移动,观察干涉现象。缓慢移动接收端,使示波器上出现最大的振幅波形,从标尺上读得此时的位置读数 L_1 ,

继续同一方向移动接收端,逐次(连续的)读记相邻最大振幅的位置 L_i 。连续记录 8 个数

据,同时记下频率 f 。若显示频率有微小增或减,可读记起始频率 f_1 和结束测量时频率 f_2 ,

计算声速时用 $f = \frac{1}{2}(f_1 + f_2)$ 。

3. 相位差法测量声速

将发射端的信号输入示波器 x 轴,这样发射端与接收端的振动信号分别输入示波器的 x 轴、y 轴偏转板上,在屏幕上显示了合成后的李萨如图形。移动接收端就可以在示波器上看到一、三象限的直线,从标尺上读得此时的位置读数 L_1 。再继续移动接收端,测得在示波

器上看到二、四象限的直线,从标尺上读得此时的位置读数 L_2 ,同时记录下此时的 f 。连续记录 8 个数据。

4. 数据记录表

谐振频率	$f = (\quad) \text{KHz}$		环境温度	$t_{\text{干}} = \quad \text{℃}, t_{\text{湿}} = \quad \text{℃}$	
驻波法	接收端位置读数 (mm)		位相差法	接收端位置读数 (mm)	
1	L_1		0	L_1	
2	L_2		π	L_2	
3	L_3		2π	L_3	
4	L_4		3π	L_4	
5	L_5		4π	L_5	

6	L_6		5π	L_6	
7	L_7		6π	L_7	
8	L_8		7π	L_8	
$\bar{\lambda}$			$\bar{\lambda}$		
ν			ν		

【思考题】

1. 同频率两相互垂直的振动合成当位相差为 2π 的整数倍时，李萨如图形为一、三象限的直线，当位相差为 π 的奇数倍时是二、四象限的直线。试证明之。

2. 实验前为什么要调整测试系统的谐振频率？

3. 如果超声波发生器的频率 $\bar{f} = 40.00 \text{ KHz}$ ，不确定度 $u_f = 10 \text{ Hz}$ ，测 λ 时引起波长的不确定度为 $u_\lambda = 0.030 \text{ mm}$ ， $\bar{\lambda} = 8.560 \text{ mm}$ ，则实验中所测得的声速相对不确定度 $\frac{u_\nu}{\nu}$ 可达多少？