

【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. 用相位差法和驻波法测定声波在空气中的传播速度。
3. 学习示波器和信号发生器的使用。

【实验原理】 (电学、光学画出原理图)

1. 超声波传播速度

声波在理想气体中的传播可认为是绝热过程, 传播速度为

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (M \text{ 为气体摩尔质量, } R \text{ 为摩尔气体常量, } \gamma \text{ 为气体比热容比, } T \text{ 为气体热力学温度})$$

在 0°C 时, $v_0 = 331.45 \text{ m/s}$, 所以在 t 温度时, 声速为 $v_t = 331.45 \cdot \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} \text{ m/s}$

声波在不同介质中传播速度不同, 最简单的直接测量声波的振动频率 f 和波长 λ , 可得

$$v = \lambda f \quad (1)$$

2. 驻波法测定超声波波长

由波动性质可得, 振动位移处于波节时, 则声压处于波腹, 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

$$\Delta L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (n = 1, 2, \dots)$$

将接收端信号输入示波器就可看到最大振幅, 接收端每移动 ΔL 距离, 使示波器再次观察到最大振幅, 得

$$\Delta L = \Delta L_{n+1} - \Delta L_n = \frac{\lambda}{2}, \text{ 将此式代入 (1) 就可求得超声波波速。}$$

3. 相位比较法测定超声波波长

相位差为 2π 或其整数倍时, 两点间的距离会等于波长 λ 的整数倍。

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接收到的信号与发射的信号同相。可用李萨如图形寻找点。

若改变接收端与发射端, 改变它们的相位差 $\Delta\phi$, 李萨如图形会相应改变, 接收端移动的距离 ΔL 与相位有关, 因此只观察示波器上直线斜率变化, 就可得相应 ΔL , 用以计算超声波波速。



$\phi_2 - \phi_1 = 0$



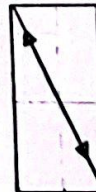
$\pi/4$



$\pi/2$



$3\pi/4$



π

【实验内容】（重点说明）

1. 系统调节

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，才能较准确的进行声能与电能的相互转化。

① 将移动端换能器靠近固定端换能器，并使两端面相平行，在信号发生器调节至谐振频率。

② 若示波器未显示最大振幅正弦波，可微微调节信号发生器的频率按钮，使波幅最大。

2. 驻波法测量声速

① 调节好超声换能器至最佳状态，将移动端接收端在标尺上来回移动观察干涉现象。

② 使示波器上出现最大振幅波形，读出此时位置读数 L_1 ，逐次记录相邻最大振幅的位置 L_2 ，记下频率 f ，若起始频率为 f_1 ，结束时频率为 f_2 ，则声速 $v = \lambda(f_2 - f_1)$ 。

③ 相位差测量声速

将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，在屏幕上合成为李萨如图形。

移动接收端，在标尺上读得位置读数 L_1 ，继续移动，测得在示波器上看到二、四象限的直线，从标尺上读得此时位置 L_2 。

④ 记录数据并分析

用逐差法求得 v ，用 $v = \lambda f$ 求出声速，因使用数字发射端，无须考虑长时工作带来的温度变化对电阻阻值的影响以至信号前后差异增大。

用 v 与 $v_{\text{表}}$ （该温度下声速理论值）进行比较并求得相对误差，若相对误差小于 5%，则实验结果可信且相对精确。

【实验器材及注意事项】

实验装置：① 声速测定仪

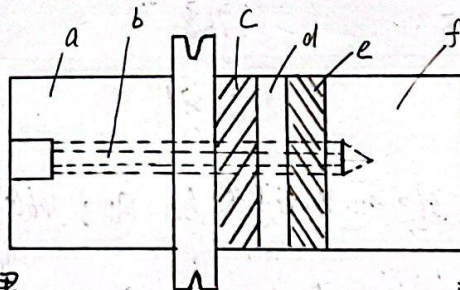
② 压电陶瓷头（部分见右图）

注意事项：① 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

② 读数时以旋转圈数读而不以标尺读，减少误差。

③ 偏心螺钉将所有器件紧固成一体，但不与引出线接触。



a: 尾部金属

b: 紧固螺钉

c, e: 压电陶瓷环片

d: 铜箔引线

f: 头部轻金属

【数据处理与结果】

总数据记录表如下

谐振频率	$f = 40.52 \text{ KHz}$		环境温度	$t_{\text{温}} = 20.0^\circ\text{C}$	
驻波法	接收端位置读数 / mm		相位差法	接收端位置读数 / mm	
1	\angle_1	0.942	0	\angle_1	31.932
2	\angle_2	5.790	π	\angle_2	36.198
3	\angle_3	10.100	2π	\angle_3	40.612
4	\angle_4	14.247	3π	\angle_4	44.913
5	\angle_5	18.882	4π	\angle_5	49.072
6	\angle_6	23.163	5π	\angle_6	53.429
7	\angle_7	27.289	6π	\angle_7	57.781
8	\angle_8	31.885	7π	\angle_8	62.033
$\bar{\lambda}$		8.768	$\bar{\lambda}$		8.583
v		355.3	v		347.8

$$\bar{\lambda}_2 = \frac{(\lambda_5 - \lambda_1) + (\lambda_6 - \lambda_2) + (\lambda_7 - \lambda_3) + (\lambda_8 - \lambda_4)}{4 \times 4}$$

$$\therefore \bar{\lambda}_1 = 8.768 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_2 = 8.583 \text{ mm}$$

$$\therefore t_{\text{温}} = 20.0^\circ\text{C}$$

$$\therefore v_t = 331.45 \cdot \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} \approx 343.4 \text{ m/s}$$

$$\therefore f = 40.52 \text{ KHz}$$

$$\therefore v_1 = \bar{\lambda}_1 f \approx 355.3 \text{ m/s}$$

$$\text{相对误差 } E_{\text{驻}} = \frac{1355.3 - 343.4}{343.4} \approx 3.5\%$$

$$v_2 = \bar{\lambda}_2 f \approx 347.8 \text{ m/s}$$

$$E_{\text{相}} = \frac{1347.8 - 343.4}{343.4} \approx 1.3\%$$

$$\therefore \Delta f = 0.01 \text{ mm}$$

$$\therefore \Delta B = 0.0006 \text{ mm}$$

$$U_A = \frac{S(x)}{n} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\therefore U_{A1} = 0.09 \text{ mm}$$

$$U_{A2} = 0.013 \text{ mm}$$

$$U_{B1} = 0.09 \text{ mm}$$

$$U_{B2} = 0.013 \text{ mm}$$

$$\therefore v_1 = 1355.3 \pm 3.7 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 1347.8 \pm 0.6 \text{ m/s}$$

由上可见,使用相位差法求声速可以获得更为准确的结果。

【误差分析】

1. 由于接触及压电陶瓷头性能等影响, 发射端和接收端间形成的波不是严格的驻波, 在一定范围内, 波形存在抖动, 因而无法准确判断波峰是否已处于最高点。
2. 在驻波法测定声波波长实验中, 随着发射端与接收端的远离, 波峰最高点逐渐下降, 因而无法较为准确的预估波峰最大值的到来。
3. 标尺测量时存在误差, 若测量数据时非单向移动, 则会产生齿纹间隙, 使读数精确度大幅下降; 另外, 设备的精度限制及人为读数时的估读误差, 也会对最终数据产生误差。
4. 空气并非理想气体, 特定温度标准声速速度的计算结果本身存在误差。
5. 波形图像示意曲线本身宽度较大, 在相位比较法测定超声波波长实验中, 难以判断李萨如图形恰好处于 $\phi_2 - \phi_1 = 0$ 即无相位差位置, 因而产生判断误差, 记录偏差数据。

【实验心得及思考题】

思考题 1:

$\therefore X, Y$ 处于谐振状态, 所以有共同的振动周期 $T \Rightarrow$

$$\omega_X = \omega_Y$$

不妨设

$$X = A_1 \cos(\omega t + \phi_1)$$

$$Y = A_2 \cos(\omega t + \phi_2)$$

$$\textcircled{1} \text{ 若 } \Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = 2k\pi \ (k \in \mathbb{Z})$$

则 $Y = \frac{A_2}{A_1} X$ \therefore 图像为一、三象限的直线。

$$\textcircled{2} \text{ 若 } \Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = (2k+1)\pi \ (k \in \mathbb{Z})$$

则 $Y = -\frac{A_2}{A_1} X$ \therefore 图像为二、四象限的直线。

思考题 2:

因为在谐振频率下可形成驻波, 较为稳定且可通过调节使接收端信号振幅最大, 用于测量声波的波长, 进而获得声速的大小。

测量声速仪器装置中有一换能器, 其有一固定频率 f , 只有当外加频率等于此频率时, 换能器才可获得最强电压信号, 且此时换能器灵敏度最高, 测得实验结果的误差最小。

思考题 3:

由实验室仪器可得 $\Delta_{\text{仪}} = 0.01 \text{ mm}$

$$\therefore \Delta_{B2} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \approx 0.006 \text{ mm}$$

$$\Delta_{A2} = 0.03 \text{ mm}$$

$$\therefore \Delta_{B2} = \sqrt{\Delta_{A2}^2 + \Delta_{B2}^2} \approx 0.03 \text{ mm}$$

$$\therefore V = \lambda f$$

$$V = \lambda f = 342.4 \text{ m/s}$$

$$\therefore \Delta V = 1.2 \text{ m/s}$$

$$\therefore \frac{\Delta V}{V} \approx 0.35\%$$

实验心得:

没想到声波的测量没有深奥的原理, 仅使用波的性质与理解, 就可测出 340 m/s 的熟悉数值。

还是点赞宁老师, 真的太热心, 对于计算时有效位数的保留都详尽的告诉了我们, 还透露相对误差在 5% 以内即是合格的实验。在实验操作过程, 也耐心地帮我复习示波器的使用 (可能型号不同, 使用略有差异, 没有 AUTO 键的辅助小白 emo 了)。

当然, 对于这次实验同样存在些许疑虑, 在驻波法的测量过程中, 为什么随着发射端与接收端的距离拉大, 最大波峰开始逐渐变低? 为什么实验前的谐振频率在实验后不再处于最佳状态, 照理应用数字发射端十分稳定, 不会有长时间工作带来的温度变化致使某些电阻阻值改变的情况, 望老师可以解答一下。