

实验(七) 空气中声速的测量

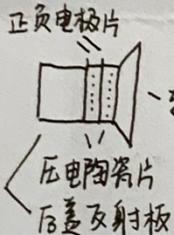
一. 实验目的

- ① 用振幅法(驻波法)、相位比较法、波形移动法和时差法测量声速;
- ② 观察声波的反射、吸收等现象 ③ 进一步熟悉示波器及仪器的使用.

二. 实验原理

① 超声波与压电陶瓷换能器

频率 20Hz - 20kHz 的机械振动在弹性介质中传播形成声波, 高于 20kHz 称超声波. 超声波的传播速度就是声速的传播速度, 超声波具有波长短, 易于定向发射的优点. 声速实验所采用在 20-60kHz, 采用压电陶瓷换能器作为收发器效果最佳. (图为纵向换能器)



② 共振干涉(驻波)法

设在无限声场中, 仅有一个点声源 S_1 和一个接收屏面 S_2 . 当点声源发出声波后, 在此声场中只有一个反射面, 且只产生一次反射. 此时发射波 $y_1 = A_1 \cos(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})$ 在 S_2 处反射. 由于半波损失, 反射波 $y_2 = A_2 \cos(\omega t + \frac{2\pi x}{\lambda} + \pi)$. A 为声源振幅. $\omega = 2\pi f$. 叠加结果为 $y = y_1 + y_2 = (A_1 - A_2) \cos(\frac{2\pi x}{\lambda}) \cos(\omega t) + (A_1 + A_2) \sin(\frac{2\pi x}{\lambda}) \sin(\omega t)$ 空气由于声扰动而引起空气质点的位移为声压 $p = -\rho_0 v^2 \frac{\partial y}{\partial x}$. 故 S_2 处表面声压为

$$p = \rho_0 \omega v [(A_1 - A_2) \sin(\frac{2\pi x}{\lambda}) \cos(\omega t) - (A_1 + A_2) \cos(\frac{2\pi x}{\lambda}) \sin(\omega t)]$$

ρ_0 为静态密度.

将 S_2 处电信号输入示波器, 便可看到一组由声压信号产生的正弦波. 由于 S_2 既接收又反射. 故接收和发射的声波在 S_1, S_2 间产生干涉, 形成驻波. 示波器上所视为这两个相干波在 S_2 处合成后的振动情况. 移动 S_2 位置, 可找到示波器图形振幅最大的 S_2 处, 由两相邻位置距离可知 $\lambda/2$. 多次读出 λ 及 f 后, 可计算声速.

③ 相位法

由②可知 $y = (A_1 - A_2) \cos(\frac{2\pi x}{\lambda}) \cos(\omega t) + (A_1 + A_2) \sin(\frac{2\pi x}{\lambda}) \sin(\omega t)$. 相对于发射波束 $y_1 = A_1 \cos(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})$ 而言, 在经 Δx 后, 接收到的正弦波与原来位置处相位差为 $\varphi = \frac{2\pi \Delta x}{\lambda}$. 可用示波器由李萨如图法观察测量声速. 将发射、接收端信号分别输入 CH1, CH2 通道.

三、数据处理

将示波器设为X-Y工作模式, 移动 S_2 , φ 变化, 李萨如图形也变化, 当 $\varphi=0$ 或 π 时, 图形为直线, 只是斜率正负不同, 每发生这样的变化一次, S_2 移动距离为半波长。

④ 波形移印法

将 CH1, CH2 波形同时显示出来, 移动 S_2 , 则 CH1 不动, CH2 移动, 两次 CH1, CH2 重叠间 S_2 所移动距离为一个波长。

⑤ 时差法

连续波经脉冲调制后由发射换能器发射至被测介质中, 声波在介质中传播, 经过后, 到达 L 处的 S_2 , 由 $v = \frac{\Delta L}{\Delta t}$ 所求声速。

三、数据处理

① 驻波法

$$\begin{aligned}\overline{\Delta x} &= \frac{\sum_{i=0}^4 (x_{i+5} - x_i)}{25} \\ &= \frac{(92.128 - 69.300) + (96.894 - 74.970) + (101.460 - 78.496) + (105.960 - 83.062) + (110.652 - 87.681)}{25} \text{ mm} \\ &= 4.543 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\overline{\lambda} = 2\overline{\Delta x} = 9.086 \text{ mm}$$

$$v = \overline{\lambda} f = 9.086 \text{ mm} \times 38.047 \times 10^3 \text{ Hz} = 345.700 \text{ m/s}$$

$$\text{理论值: } v_t = 331.45 \sqrt{1 + \frac{24.1}{273.15}} \text{ m/s} = 345.763 \text{ m/s}$$

$$\text{相对误差: } E = \frac{|v - v_t|}{v_t} \times 100\% = 0.02\%$$

② 相位比较法

$$\begin{aligned}\overline{\Delta x} &= \frac{\sum_{i=0}^4 (x_{i+5} - x_i)}{25} \\ &= \frac{(83.096 - 60.158) + (87.696 - 64.761) + (92.287 - 69.390) + (96.875 - 73.899) + (101.469 - 78.519)}{25} \text{ mm} \\ &= 4.588 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\bar{\lambda} = 2\overline{\Delta x} = 9.176\text{mm}$$

$$v = \bar{\lambda}f = 9.176\text{mm} \times 38.091 \times 10^3 \text{Hz} = 349.523\text{m/s}$$

理论值: $v_t = 331.45 \sqrt{1 + \frac{23.5}{273.15}} \text{m/s} = 345.414\text{m/s}$

相对误差: $E = \frac{|v - v_t|}{v_t} \times 100\% = 1.2\%$

③ 波形移动法

$$\begin{aligned} \overline{\Delta x} &= \frac{\sum_{i=0}^4 (x_{i+5} - x_i)}{25} \\ &= \frac{(96.810 - 50.879) + (87.579 - 41.692) + (78.438 - 32.481) + (69.274 - 23.289) + (60.096 - 14.905)}{25} \text{mm} \\ &= 9.158\text{mm} \end{aligned}$$

$$\bar{\lambda} = \overline{\Delta x} = 9.158\text{mm}$$

$$v = \bar{\lambda}f = 9.176\text{mm} \times 38.113 \times 10^3 \text{Hz} = 349.725\text{m/s}$$

理论值: $v_t = 331.45 \sqrt{1 + \frac{23.5}{273.15}} \text{m/s} = 345.414\text{m/s}$

相对误差: $E = \frac{|v - v_t|}{v_t} \times 100\% = 1.2\%$

④ 时差法

$$\overline{\Delta t} = \frac{\sum_{i=0}^4 (t_{i+5} - t_i)}{25} = \frac{(438 - 364) + (453 - 380) + (468 - 396) + (482 - 409) + (495 - 424)}{25} \mu\text{s} = 14.52 \mu\text{s}$$

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{5 \times 10^{-3} \text{m}}{14.52 \times 10^{-6} \text{s}} = 344.353\text{m/s}$$

理论值: $v_t = 331.45 \sqrt{1 + \frac{23.3}{273.15}} \text{m/s} = 345.297\text{m/s}$

相对误差: $E = \frac{|v - v_t|}{v_t} \times 100\% = 0.3\%$

⑤ 固体中声速

铝: $v_1 = \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1} = 4.38 \times 10^3 \text{m/s}$ $v_2 = \frac{l_3 - l_2}{t_3 - t_2} = 4.38 \times 10^3 \text{m/s}$ $\bar{v} = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) = 4.38 \times 10^3 \text{m/s}$

有机玻璃： $v_1 = \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1} = 2.40 \times 10^3 \text{ m/s}$ $v_2 = \frac{l_3 - l_2}{t_3 - t_2} = 1.86 \times 10^3 \text{ m/s}$ $\bar{v} = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) = 2.13 \times 10^3 \text{ m/s}$

四、实验结论及现象分析

用驻波法测得 24.1°C 下空气中声速为 345.763m/s，相对误差为 0.02%

用相位比较法测得 23.5°C 下空气中声速为 349.523m/s，相对误差为 1.2%

用波形移动法测得 23.5°C 下空气中声速为 345.414m/s，相对误差为 1.2%

用时差法测得 23.3°C 下空气中声速为 345.297m/s，相对误差为 0.3%

23.3°C 下固体铝中声速为 $4.38 \times 10^3 \text{ m/s}$ ，有机玻璃中声速为 $2.13 \times 10^3 \text{ m/s}$

五、讨论问题

① 使用驻波法测声速时，为什么示波器上观察到的是正弦波而不是驻波？

答：因为驻波是在 S1 和 S2 之间由发射波和反射波叠加而成，而示波器显示的是 S1 发射波和 S2 接收到的波，而不是 S1 和 S2 中间的波，因此为正弦波而不是驻波。

② 用相位比较法测量波长时，为什么用直线而不用椭圆作为 S2 移动距离的片段数据？

答：理论上也可以使用椭圆作为判断依据，但是椭圆形状难以通过肉眼判断相同，因此会存在较大的实验误差。

③ 分析一下本实验中哪些因素可以引起测量误差，列出 3 条主要因素并说明原因。

答：① 测量过程中读数误差；

② 驻波法中极大值判断不准确，极大值附近曲线变化不明显，因此会产生误差；

③ 时差法中受到噪声的干扰 S2 处声压信号起始位置读取不准确，会产生误差。

实验现象观察与原始数据记录

1. 驻波法

温度: $t = 24.1^\circ\text{C}$ $f = 38.047 \text{ kHz}$

次数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$x_i(\text{mm})$	69.300	74.970	78.496	83.062	87.681	92.138	96.894	101.460	105.960	110.652

2. 相位比较法

温度 $t = 23.5^\circ\text{C}$ $f = 38.091 \text{ kHz}$

次数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$x_i(\text{mm})$	60.158	64.761	69.390	73.899	78.519	83.096	87.696	92.287	96.875	101.469

3. 波干涉法

温度 $t = 23.5^\circ\text{C}$ $f = 38.113 \text{ kHz}$

次数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$x_i(\text{mm})$	96.810	87.579	78.438	69.274	60.096	50.879	41.692	32.481	23.289	14.905

4. 时差法

温度 $t = 23.3^\circ\text{C}$

次数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$x_i(\text{mm})$	120.000	125.000	130.000	135.000	140.000	145.000	150.000	155.000	160.000	165.000
$t_i(\mu\text{s})$	364	380	396	409	424	438	453	468	482	495

5. 固体

温度 $t = 23.3^\circ\text{C}$

次数	1	2	3	4	5	6
材质	铝	铝	铝	有机玻璃		
$d_i(\text{mm})$	50	100	150	50	100	150
$t_i(\mu\text{s})$	20.0	31.4	42.8	28.8	49.6	76.4

车速(m/s)

学生	姓名	学号	日期
签字			

教师	姓名
签字	