

物理实验报告



南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

学号: 12411415 姓名: 左嘉宇 日期: 2025/03/25 时间: 周二下午

1 实验名称: 声速测量

2 实验目的

了解压电换能器工作原理, 学习超声波的产生、发射和接收
分别使用驻波法和相位法测量波长和声速

3 实验仪器

信号发生器、示波器、超声声速测定仪

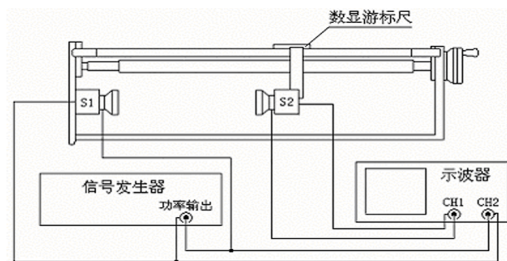


Figure 1: 实验装置

4 实验原理

本实验通过测出声波频率 f 和波长 λ , 利用公式 $v = f \cdot \lambda$, 计算得出在该实验环境下的声速。

4.1 计算实验环境 (26.1°C, 湿度 26.8%) 下的理论声速

声波在空气中的传播速度与声波的频率是无关的, 而只取决于空气本身的性质。声速的理论值可通过下式计算:

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

式中 γ 为空气定压比热容与定体比热容之比, R 为普适气体常量, μ 为气体的摩尔质量, T 为热力学温度。在 0°C 时, 声速 $v_0 = 331.45 \text{ m/s}$ 。显然在 $t^\circ\text{C}$ 时的声速应为:

$$v_t = v_0 \sqrt{\frac{T}{273.15}} = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} \quad (2)$$

4.2 计算声波频率

实验中超声波是由交流电信号产生的, 所以公式 $v = f \cdot \lambda$ 中声波的频率 f 就是交流电信号的频率, 由信号发生器中的频率显示可直接读出。

4.3 驻波法计算声波波长

如 Figure 1 所示，超声发射器 S_1 接收信号后发射平面超声波，部分被超声接收器 S_2 接收并转换为电信号输入示波器，部分反射回 S_1 。发射波与反射波在 S_1 和 S_2 之间叠加相干，形成驻波。

由物理学定义及相关数学公式推导，可得在两波相遇处，合成的声波为

$$x = (2A \cos 2\pi \frac{x}{\lambda}) \cos 2\pi ft$$

上式表明，当移动 S_2 ，使 S_1 与 S_2 之间的距离 l 为半波长的整数倍时，即 $l = n\frac{\lambda}{2}$ ($n = 1, 2, 3 \dots$) 示波器上可观察到信号幅度的极大值（或极小值）。相邻两极值点之间的距离为 $\frac{\lambda}{2}$ 。

4.4 相位法计算声波波长

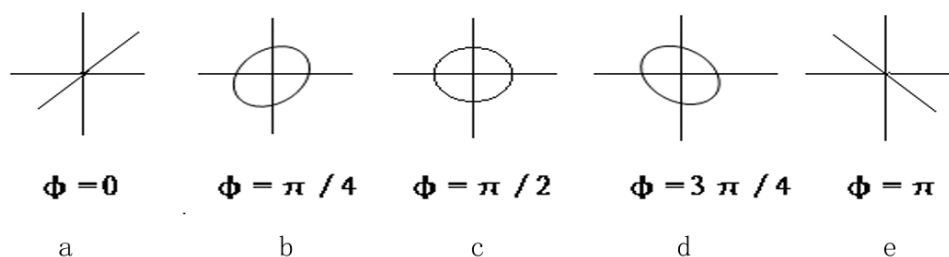


Figure 2: 同频率互相垂直的谐振动合成的李萨如图形

发射器 S_1 发出的超声波为平面波，在传播方向上，相位相同或相差 2π 的整数倍，对应的距离 l 为波长的整数倍，即 $l = n\lambda$ (n 为正整数) 为此，根据两个互相垂直的简谐振动的合成所得的李萨如图测定相位差。由于两端电信号频率相同，该图的形状由两信号的相位差 Φ 决定。对 Figure 2 所示的图形的观测，即可确定相位差，从而确定声波的波长。

5 实验内容

5.1 测量声速测定仪的共振频率

不断改变信号源所产生的频率，观察波形 2 峰值的变化。通过旋转鼓轮观察波形 2 的峰值，当旋转鼓轮前进或倒退，2 波形的最大峰值均减小，则此时为共振频率。

5.2 驻波法测声速

示波器采用 YT 模式，记录节点的位置，节点处振幅为零即声压最大，对应的振幅最大，通过旋转鼓轮观察波形 2 的峰值，当旋转鼓轮前进或倒退，2 波形的最大峰值均减小，则此目标为节点位置，记录此时的刻度，记为第一个节点，用同样的方法寻找下一个节点，直到第 12 个。

5.3 相位比较法测声速

示波器转换成 XY 模式，通过旋转鼓轮找直线图形，记录此时的刻度，依次记录 12 个相同形状的直线的位置。

6 数据记录

记录数据，输入 excel 制表计算

7 数据处理

材料固有频率Hz:	(单位cm)	驻波法 (半波长)	相邻差值	相位比较法 (全波长)	相邻差值
35510	X1	48.968	29.412	43.862	59.476
温度℃:	X2	53.829	29.671	53.77	59.31
26.1	X3	58.732	29.573	63.64	59.24
湿度%:	X4	63.783	29.779	73.57	59.155
26.80%	X5	68.688	29.542	83.37	59.027
	X6	73.43	30.35	93.42	58.992
标准声速:	X7	78.38		103.338	
346.9241241	X8	83.5		113.08	
	X9	88.305		122.88	
	X10	93.562		132.725	
	X11	98.23		142.397	
	X12	103.78		152.412	
			178.327		355.2
	测量波长		9.907055556		9.866667
	测量声速		351.7995428		350.3653
	误差百分比		1.405327086		0.99192

Figure 3: 实验数据

7.1 参考声速 (26.1°C, 湿度 26.8%)

$$v = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} = v_0 \sqrt{1 + \frac{26.1}{273.15}} \approx 347 \text{ m/s}$$

7.2 驻波法测声速

$$\lambda_1 = |(x_7 - x_1) + (x_8 - x_2) + (x_9 - x_3) + (x_{10} - x_4) + (x_{11} - x_5) + (x_{12} - x_6)| \div 6 \div 6 \times 2 \approx 9.91 \text{ mm}$$

$$v_1 = f \cdot \lambda_1 \approx 9.91 \times 35.51 \approx 351.80 \text{ m/s}$$

$$\varepsilon_1 = |v_1 - v| \div v = |351.8 - 347| \div 347 \times 100\% \approx 1.4\%$$

7.3 相位法测声速

$$\lambda_2 = |(x_7 - x_1) + (x_8 - x_2) + (x_9 - x_3) + (x_{10} - x_4) + (x_{11} - x_5) + (x_{12} - x_6)| \div 6 \div 6 \times 2 \approx 9.87 \text{ mm}$$

$$v_2 = f \cdot \lambda_2 \approx 9.87 \times 35.51 \approx 350.37 \text{ m/s}$$

$$\varepsilon_2 = |v_2 - v| \div v = |350.37 - 347| \div 347 \times 100\% \approx 0.99\%$$

7.4 (驻波法) 不确定度计算

A 类不确定度:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 \times 6}{2} = 29.721 \text{ mm}$$

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}{6 \times 5}} = \sqrt{\frac{0.550391}{30}} \approx 0.1354 \approx 0.14 \text{ mm}$$

B 类不确定度: $\Delta_{\text{仪}} = 0.005 \text{ mm}$ $\Delta_{\text{估}} = 0.001 \text{ mm}$

$$u_B = \sqrt{\Delta_{\text{估}}^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} / C = \frac{\sqrt{(0.005)^2 + (0.001)^2}}{\sqrt{3}} \approx 0.0029 \text{ mm}$$

不确定度的合成: ($P = 0.95$)

对于重复测量次数为 12, 则自由度为 $12 - 1 = 11$ 。根据分布表, 在 95% 置信水平下, 覆盖系数为 $t_{0.95} \approx 2.201$; B 类不确定度系数 $k_{0.95} = 1.96$

$$u_p = \sqrt{(t_{0.95} u_A)^2 + (k_{0.95} u_B)^2} = \sqrt{(2.201 \times 0.1354)^2 + (1.96 \times 0.0029)^2} \approx 0.30 \text{ mm}$$

谐振频率只有 B 类不确定度：频率的最小分度为 0.01 kHz，因此取 $\Delta = 0.005 \text{ kHz}$ 。那么，

$$u_B(f) = \frac{0.005}{\sqrt{3}} \approx 0.002887 \approx 0.0029 \text{ kHz} \Rightarrow u(f) = 1.96 \times 0.002887 \approx 0.00566 \approx 0.0057 \text{ kHz}$$

声速 v 的不确定度：

$$\frac{U_{0.95}(V)}{V_1} = \sqrt{\left(\frac{U_{0.95}(V_1)}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{U_{0.95}(f)}{f}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.30}{9.91}\right)^2 + \left(\frac{5.66}{3551.00}\right)^2} \approx 0.0303 \approx 0.030$$

$$U_{0.95}(V) = 0.0303 \times 347.4 \approx 10.52 \approx 11 \text{ m/s}, \quad P = 0.95$$

$$V = V_1 \pm U_{0.95}(V) = 347 \pm 11 \text{ m/s}, \quad P = 0.95$$

误差分析：

1. 实验环境湿度为湿度 26.8%，但计算理论声速时未考虑
2. 确定谐振频率时，肉眼可辨图像精度最低只能到 0.01kHz
3. 超声波多次反射，可能与原超声波叠加，造成误差
4. 观察示波器中的李萨如图形是，不能精确地形成直线，导致位置确定的误差

8 问题思考

Q1：固定两换能器的距离改变频率，以求声速，是否可行？

A1：理论可行——声速 v 满足 $v = \lambda \cdot f$ 。若换能器间距离 L 不变，通过改变频率 f ，可以寻找使声波在这段距离上形成稳定干涉或共振（如驻波）的条件，从而推算出波长 λ ，再由公式 $v = \lambda \cdot f$ 计算出声速 v 。

Q2：各种气体中的声速是否相同，为什么？

A2：基本公式：理想气体中，声速可近似：

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

其中 γ 是定压定容比热容之比， R 是气体常量， T 是热力学温度， M 是气体的摩尔质量。不同气体具有不同的分子量 M 和比热容比 γ ；即使在相同温度下，声速也会不同。故，不同气体中的声速并不相同，根本原因在于气体的分子量、比热容比等物性参数不同，导致其在各种气体中具有不同的声速。

9 实验结论

本实验通过实验仪器，通过驻波法和干涉法测定了实验环境（26.1°C，湿度 26.8%）下的声速，并计算出了理论声速。分别为：

$$\text{理论声速 } v = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} = v_0 \sqrt{1 + \frac{26.1}{273.15}} \approx 347 \text{ m/s}$$

$$\text{驻波法 } V = V_1 \pm U_{0.95}(V) = 347 \pm 11 \text{ m/s}, P = 0.95 \quad \text{误差百分比为 1.4\%}$$

$$\text{干涉法 } v_2 \approx 350.37 \text{ m/s} \quad \text{误差百分比为 0.99\%}$$