

六、原始数据记录

1. 实验条件

项目	符号	数值	单位
实验名称	—	声速的测量	—
测量方法	—	驻波法、相位比较法	—
发射频率	f	36015	Hz
发射频率	f	36.015	kHz
室温	t	26.5	°C
标准声速	v_{true}	347.21	m/s
数显尺误差限	ΔL	0.005	mm
信号发生器误差限	Δf	0.0005	kHz

2. 波长原始数据记录

测量次数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
驻波法波长 λ_1/mm	10.00	9.34	9.66	9.80	9.70	9.60	10.02	9.84	9.74	9.72	9.742
相位法波长 λ_2/mm	9.94	9.90	9.74	9.96	9.94	9.84	10.00	9.98	9.90	9.92	9.912

七、数据处理

1. 基本公式

空气中声速测量值按下式计算：

$$v = \lambda f$$

其中， λ 为波长，单位换算为 m； f 为频率，单位为 Hz。

若只考虑温度影响，空气中声速理论值可按下式计算：

$$v_{\text{true}} = v_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

其中 $T = 273.15 + t$ ， $T_0 = 273.15\text{K}$ ， v_0 为 0°C 时空气中的声速。讲义也给出了测量值与理论值之间的相对误差公式。

相对误差计算式为：

$$E_v = \frac{|v_{\text{measured}} - v_{\text{true}}|}{v_{\text{true}}} \times 100$$

2. 平均波长计算

驻波法：

$$\bar{\lambda} * 1 = \frac{1}{10} \sum * i = 1^{10} \lambda_{1i} = 9.742, \text{mm} = 9.742 \times 10^{-3}, \text{m}$$

相位比较法：

$$\bar{\lambda} * 2 = \frac{1}{10} \sum * i = 1^{10} \lambda_{2i} = 9.912, \text{mm} = 9.912 \times 10^{-3}, \text{m}$$

3. 声速测量值计算

驻波法：

$$v_1 = \bar{\lambda}_1 f = 9.742 \times 10^{-3} \times 36015 = 350.858, \text{m/s}$$

相位比较法：

$$v_2 = \bar{\lambda}_2 f = 9.912 \times 10^{-3} \times 36015 = 356.981, \text{m/s}$$

两种方法的平均声速为：

$$\bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2} = 353.919, \text{m/s}$$

4. 声速结果与相对误差

方法	平均波长 $\bar{\lambda}/\text{mm}$	频率 f/Hz	声速测量值 $v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	标准声速 $v_{\text{true}}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	偏差 $v - v_{\text{true}}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	相对误差
驻波法	9.742	36015	350.858	347.21	3.648	1.051%
相位比较法	9.912	36015	356.981	347.21	9.771	2.814%
两法平均	9.827	36015	353.919	347.21	6.709	1.932%

由表可见，两种方法测得的声速均大于标准声速。其中驻波法相对误差为 1.051，相位比较法相对误差为 2.814。讲义特别指出相位比较法的相对误差要求小于 1，因此本组相位比较法结果偏差较大，应重点检查相位判定、换能器位置读数以及频率设定是否存在系统偏差。

5. 不确定度分析

频率的 B 类标准不确定度按讲义给出的信号发生器误差限估算：

$$u_B(f) = \frac{0.0005}{\sqrt{3}}, \text{kHz} \approx 0.0003, \text{kHz}$$

波长的 A 类标准不确定度采用：

$$u_A(\lambda) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}$$

波长的 B 类标准不确定度取：

$$u_B(\lambda) = \frac{0.005}{\sqrt{3}}, \text{mm} \approx 0.003, \text{mm}$$

讲义给出的声速相对标准不确定度传递公式为：

$$u_r(v) = \sqrt{\left(\frac{u(\lambda)}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{u(f)}{f}\right)^2}$$

并由 $u(v) = v \cdot u_r(v)$ 得到声速标准不确定度。

方法	s_λ/mm	$u_A(\lambda)/\text{mm}$	$u_B(\lambda)/\text{m}$	$u(\lambda)/\text{mm}$	$u_r(v)$	$u(v)/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	声速表达
驻波法	0.1965	0.0621	0.0029	0.0622	0.6386%	2.24	v_1 = (350.86 ± 2.24), m/s
相位比较法	0.0755	0.0239	0.0029	0.0241	0.2428%	0.87	v_2 = (356.98 ± 0.87), m/s

从不确定度看，相位比较法的波长数据离散程度小于驻波法，重复性较好；但它相对于标准声速的系统偏差更大，说明该方法的数据稳定性较好并不等价于准确度更高。

八、实验结果与讨论

（一）关于波长测量结果

驻波法测得的 10 组波长主要分布在 9.34 ~ 10.02,mm 之间，平均值为 9.742,mm。相位比较法测得的 10 组波长主要分布在 9.74 ~ 10.00,mm 之间，平均值为 9.912,mm。相位比较法的数据极差和标准差均小于驻波法，说明相位比较法在本组数据中重复性更好。

（二）关于声速测量值

由 $v = \lambda f$ 计算得到，驻波法声速为 350.858,m/s，相位比较法声速为 356.981,m/s，两法平均值为 353.919,m/s。与标准声速 347.21,m/s 相比，三者均偏大，说明实验中测得的波长或频率整体偏大，或标准声速对应的温度、湿度条件与实际实验环境存在差异。

（三）关于两种方法的比较

驻波法的相对误差为 1.051，接近 1；相位比较法的相对误差为 2.814，明显大于 1。这表明相位比较法虽然测量数据更集中，但可能存在系统性偏差，例如李萨如图形相位判定不准确、接收换能器位置读数存在回程误差、信号波形不稳定或频率设定与实际输出频率不完全一致。

（四）误差来源分析

本实验误差主要来自以下方面：

1. **位置读数误差：**接收换能器 S_2 的位置由数显尺读出，虽然数显尺精度较高，但调节过程中仍可能存在回程差、定位不准和读数波动。
2. **驻波峰值判断误差：**驻波法需要判断接收信号振幅最大或最小的位置，实际波形并非理想尖锐峰值，峰值附近的读数容易产生偏差。
3. **相位判断误差：**相位比较法依赖波形重合或李萨如图形判断同相位置，图形稳定性、示波器亮度、触发状态和人工判读都会影响测量结果。
4. **频率设定误差：**信号发生器存在有限分辨率和输出频率漂移，频率误差会通过 $v = \lambda f$ 直接传递到声速结果。
5. **环境条件影响：**空气中声速与温度、湿度有关。若实验时实际温度与记录温度不完全一致，或空气湿度未修正，则理论声速与实验条件下的真实声速会存在差别。

（五）实验结论

本实验利用驻波法和相位比较法测量了空气中的超声波波长，并结合发射频率 $f = 36015\text{Hz}$ 计算声速。驻波法测得：

$$v_1 = 350.858\text{m/s}, \quad E_1 = 1.051$$

相位比较法测得：

$$v_2 = 356.981\text{m/s}, \quad E_2 = 2.814$$

两种方法的平均声速为：

$$\bar{v} = 353.919\text{m/s}, \quad E = 1.932$$

实验结果表明，两种方法均能测得空气中声速的数量级，但本组数据整体高于标准声速。其中驻波法结果更接近标准值，相位比较法重复性较好但系统偏差较大，需进一步改进相位判定和换能器位置读数。