

淮南师范学院实验报告

学院： 电子工程学院 专业： 物理学 班级： 请输入

学号： 请输入 姓名： 请输入 日期： 请输入

一、实验名称：弦振动的研究

二、实验目的：

- (1) 掌握利用超声波驻波法和相位比较法测量空气中声速的基本原理与操作方法。
- (2) 学习使用信号发生器、示波器和超声声速测定仪测量频率与波长。
- (3) 通过重复测量、平均值和标准不确定度计算，分析两种测量方法的重复性与准确度。
- (4) 根据声速测量结果计算空气比热容比，并与理论值比较。

三、实验原理：

（一）声速测量的基本关系

机械波在均匀介质中的传播速度等于波长与频率的乘积：

$$v=\lambda f$$

式中， v 为声速， λ 为超声波波长， f 为超声波频率。因此，在测得频率和波长后即可计算空气中的声速。

（二）驻波法测量波长

发射换能器 S_1 发出的超声波在接收换能器 S_2 处反射，入射波与反射波叠加形成驻波。移动 S_2 时，示波器上接收信号的振幅随位置周期性变化。相邻两个波腹或相邻两个波节之间的距离为半波长：

$$L_{n+1}-L_n=\frac{\lambda}{2}$$

若取相隔若干个波腹位置进行逐差处理，可减小单次定位误差。原始记录采用已经换算后的各次波长数值。

（三）相位比较法测量波长

将发射端信号和接收端信号分别输入示波器的两个通道。移动接收换能器，当两信号的相位关系恢复到相同状态时，接收端移动的距离等于波长的整数倍。相邻两个同相位置之间满足：

$$L_{n+1}-L_n=\lambda$$

实验中可利用李萨如图形或双踪波形判断同相位置。

（四）空气中声速的理论值

若只考虑温度影响，空气中声速的理论值为：

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

其中， v_0 ， T_0 ， T 。本实验室温为 T ，理论计算值约为 v_0 ；实验参考数据给出的标准值为 v_{true} ，后续误差计算采用该标准值。

（五）空气比热容比

空气比热容比可由声速计算：

$$\gamma=\frac{c_p}{c_v}=\frac{Mv^2}{RT}$$

其中，空气摩尔质量 $M=28.96\times10^{-3}$ kg/mol，气体普适常量 $R=8.31$ J/(mol·K)。常温下空气比热容比的理论值取 $\gamma_{\text{true}}=1.402$ 。

四、主要仪器设备：超声声速测定仪、低频信号发生器、示波器、数显位移标尺。数显尺分辨率为 0.01 mm，误差限取 0.005 mm；信号发生器分辨率为 0.001 kHz，误差限取 0.0005 kHz。

五、实验步骤：

（一）工作频率的确定

- (1) 按实验装置图连接发射换能器、接收换能器、信号发生器和示波器。
- (2) 打开电源，调节发射端与接收端距离，使其大于 50 mm，实验开始时约保持在 100 mm。
- (3) 在 34~ 40 kHz 范围内调节频率，使接收信号振幅较大且稳定，记录工作频率。本次实验采用 $f=36015$ Hz。

（二）驻波法测量波长

- (1) 保持发射频率不变，缓慢、连续移动接收换能器 S_2 。
- (2) 依次寻找接收信号的振幅极大位置，读取位移标尺示值。
- (3) 根据相邻波腹间距为半波长的关系换算波长，重复测量十次。

（三）相位比较法测量波长

- (1) 将发射信号和接收信号分别接入示波器两个通道，调节为双踪显示或 X - Y 显示。
- (2) 连续移动接收换能器，依次寻找相位关系相同的位置。
- (3) 根据相邻同相位置间距等于一个波长的关系换算波长，重复测量十次。

六、原始数据记录：

实验条件：工作频率、室温和标准声速见原始数据记录；声速计算采用实测工作频率，室温与标准声速用于理论比较和误差分析。

表 1 驻波法波长原始记录

测量次数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
$\lambda\ 1/\text{mm}$	10.00	9.34	9.66	9.80	9.70	9.60	10.02	9.84	9.74	9.72	9.742

表 2 相位比较法波长原始记录

测量次数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
$\lambda\ 2/\text{mm}$	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：

（一）平均波长与声速计算

驻波法平均波长：

$$\bar{\lambda}_1=\frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10}\lambda_{1i}=9.742\text{ mm}$$

相位比较法平均波长：

$$\bar{\lambda}_2=\frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10}\lambda_{2i}=9.912\text{ mm}$$

驻波法测得的声速为：

$$v_1=\bar{\lambda}_1f=9.742\times10^{-3}\times36015=350.858\text{ m/s}$$

相位比较法测得的声速为：

$$v_2=\bar{\lambda}_2f=9.912\times10^{-3}\times36015=356.981\text{ m/s}$$

两种方法测量值的算术平均值为：

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

（二）相对误差

声速测量值与标准值之间的相对误差为：

$$E_v=\frac{|v_{\text{measured}}-v_{\text{true}}|}{v_{\text{true}}}\times100\%$$

方法	平均波长/mm	声速/(m/s)	标准值/(m/s)	绝对偏差/(m/s)	相对误差
驻波法	9.742	350.858	347.21	3.648	1.051%
相位比较法	9.912	356.981	347.21	9.771	2.814%
两法平均	9.827	353.919	347.21	6.709	1.932%

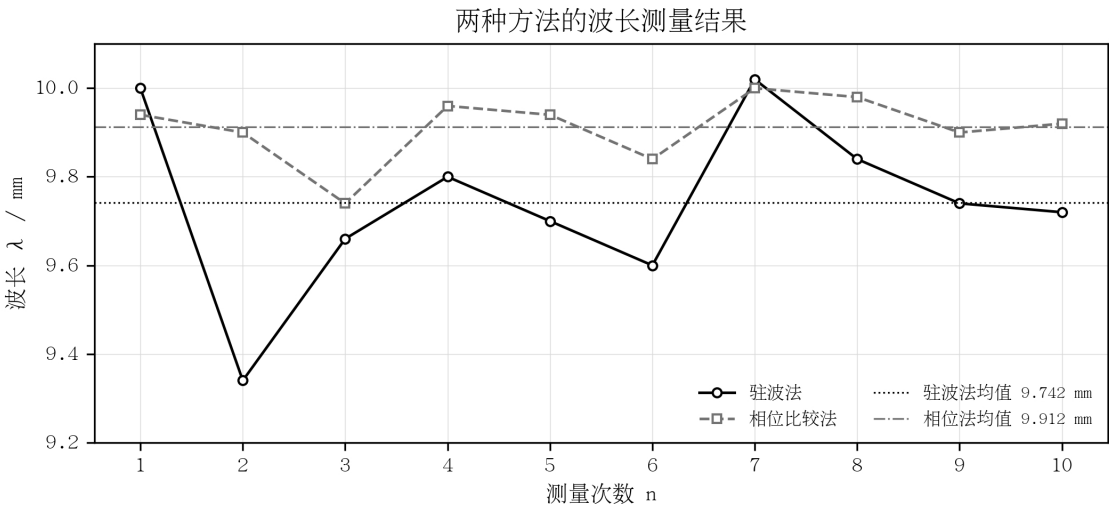


图 1 两种方法的波长测量结果

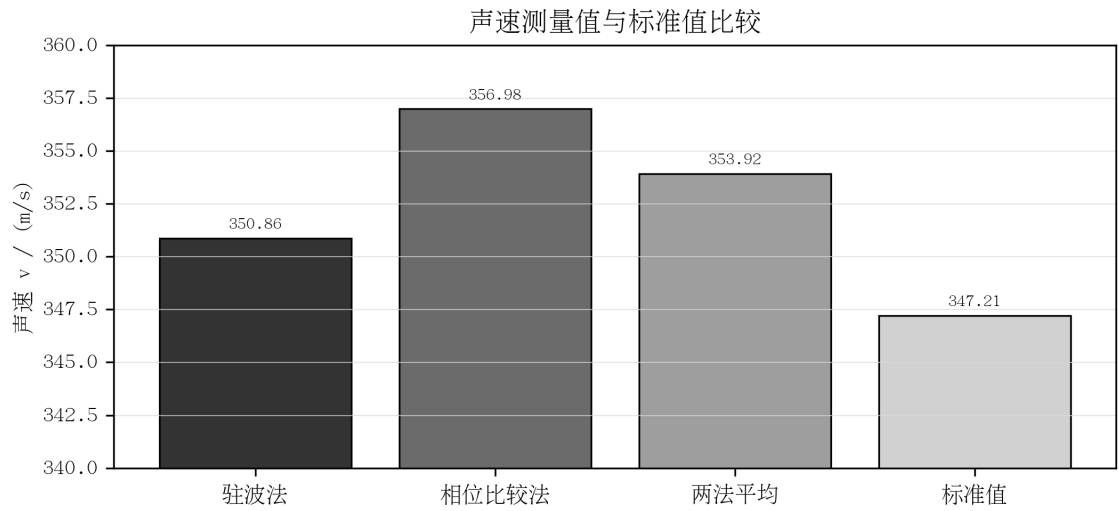


图 2 声速测量值与标准值比较

（三）标准不确定度计算

波长的 A 类标准不确定度采用平均值的标准不确定度：

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

波长的 B 类标准不确定度为：

$$u_B(\lambda)=\frac{0.005}{\sqrt{3}}=0.0029\text{ mm}$$

波长的合成标准不确定度为：

$$u(\lambda)=\sqrt{u_A^2(\lambda)+u_B^2(\lambda)}$$

本次频率只保留一个工作频率值，不能计算频率的 A 类不确定度。按仪器误差限估算：

$$u(f)=u_B(f)=\frac{0.0005}{\sqrt{3}}=0.000289\text{ kHz}=0.289\text{ Hz}$$

声速的相对标准不确定度为：

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

声速的标准不确定度为：

$$u(v)=v\,u_r(v)$$

方法	s λ /mm	uA (λ)/mm	u (λ)/mm	ur (v)	u (v)/(m/s)	规范表达
驻波法	0.1965	0.0621	0.0622	0.6386%	2.24	v1=(350.9±2.2) m/s
相位比较法	0.0755	0.0239	0.0241	0.2428%	0.87	v2=(357.0±0.9) m/s

（四）空气比热容比计算

实验温度对应的绝对温标为：

$$T=273.15+26.5=299.65\text{ K}$$

由 $\gamma=Mv^2/(RT)$ 得：

$$\gamma_1=\frac{28.96\times10^{-3}\times350.858^2}{8.31\times299.65}=1.432$$

$$\gamma_2=\frac{28.96\times10^{-3}\times356.981^2}{8.31\times299.65}=1.482$$

由于 $\gamma\propto v^2$ ，其相对标准不确定度为：

$$u_r(\gamma)=2u_r(v)$$

方法	γ	u (γ)	结果表达	与理论值1.402的相对误差
驻波法	1.432	0.018	$\gamma\,1=1.432\pm0.018$	2.12%
相位比较法	1.482	0.007	$\gamma\,2=1.482\pm0.007$	5.71%

八、实验结果与讨论：

（一）关于波长数据的重复性

驻波法的十次波长测量值分布在 9.34~ 10.02 mm，样本标准差为 0.1965 mm；相位比较法的数据分布在 9.74~ 10.00 mm，样本标准差为 0.0755 mm。图 1 表明，相位比较法数据点更集中，重复性优于驻波法。驻波法中第 2 次测量值 9.34 mm 明显低于其余数据，是驻波法离散程度较大的主要来源，但仍保留在原始记录中，不作主观删除。

（二）关于声速测量结果

驻波法测得 $v_1=350.858\text{ m/s}$ ，相对误差为 1.051%；相位比较法测得 $v_2=356.981\text{ m/s}$ ，相对误差为 2.814%。两种方法均得到正确的声速数量级，但结果均高于标准值。驻波法的测量值更接近标准值，相位比较法虽然重复性较好，却存在较明显的系统偏差。因此，较小的随机波动并不必然意味着更高的准确度。

（三）关于空气比热容比

由驻波法声速计算得到 $\gamma_1=1.432\pm0.018$ ，与理论值 1.402 的相对误差为 2.12%；由相位比较法得到 $\gamma_2=1.482\pm0.007$ ，相对误差为 5.71%。由于 γ 与 v^2 成正比，声速中的系统偏差在比热容比计算中被进一步放大，因此驻波法所得结果更接近理论值。

（四）误差来源分析

- (1) 驻波极值位置判断误差。驻波振幅极大值附近变化较缓，示波器波形存在抖动时，波腹位置不易精确确定，容易形成较大的随机定位误差。
- (2) 相位判定的系统偏差。相位比较法依赖双踪波形重合或李萨如图形判断同相位置。示波器通道相移、触发状态以及人工判读可能使各次结果高度集中但整体偏移。
- (3) 位移机构的回程差。若移动接收换能器时改变转动方向，手轮与丝杆间的回程差会导致位置读数偏移。因此测量应始终沿同一方向连续进行。
- (4) 换能器端面与标尺零点偏差。发射端和接收端的声学等效位置未必与机械端面或标尺示值完全一致，会对相位法测量形成系统影响。
- (5) 频率和环境条件变化。信号发生器实际输出频率可能与显示值存在微小差异；实验过程中温度、湿度和气流变化也会使实际声速偏离仅按温度计算的标准值。

（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，并依据 $v=\lambda f$ 计算声速。驻波法结果为 $v_1=(350.9\pm2.2)\text{ m/s}$ ，相位比较法结果为 $v_2=(357.0\pm0.9)\text{ m/s}$ 。两种方法均验证了波长、频率与波速之间的基本关系。综合相对误差与比热容比结果，驻波法准确度较高；相位比较法重复性较好，但存在需要进一步校正的系统偏差。