

文章编号: 1007-2934(2014)01-0088-04

声速测定实验不确定度、误差之比较研究

冯登勇, 王昆林

(云南楚雄师范学院, 云南 楚雄 675000)

摘 要: 对声速测定的两种实验方法, 进行了对比性实验。结合其误差分析、不确定度进行了比较性分析研究。

关 键 词: 声速测定; 比较研究; 误差分析; 不确定度

中图分类号: O 351

文献标志码: A

声波是一种在弹性媒质中传遍的机械波, 振动频率在 20~20 000 Hz 的声波称为可闻声波, 频率低于 20 Hz 的声波称为次声波, 频率高于 20 000 Hz 的声波称为超声波。声波的波长、频率、强度、传播速度等是声波的特性。对这些量的测量是声学技术的重要内容。如声速的测量在声波定位、探伤、测距中有着广泛的应用。具体测量声速的方法有多种, 而且对于声速测量有几种方法在实验室条件下已是十分稳定和成熟的, 但对各种测量方法结合测量仪器的精度, 从误差的分析与及不确定度的范围进行比较性研究是有一定意义的, 故笔者特选取实验室常用测量声速的两种方法——共鸣管驻波可闻声法和超声波振幅极值法进行实验比较研究。

1 实验原理

测量声速基本原理是利用声速与振动频率 f 和波长 λ 之间的关系即: $v = f\lambda$ 来进行的。

1.1 共鸣管驻波可闻声法

设有一从声源发出的一定频率的平面声波, 经过空气的传播, 到达其反射面。入射波即在反射面上垂直反射, 入射波与反射波相干涉形成驻波。反射面处为驻波的波节, 声波的波腹。改变反射面与声源之间的距离 L , 在一系列特定的距离上, 介质中出现稳定的共振现象, 此时 L 等于半波长的整数倍, 驻波的波腹达到最大。在移动接收器的过程中, 相邻两次到达共振所对应的接收面之间的

距离为半波长。因此保持频率 f 不变, 通过测量两次相邻的接收信号达到极大值时反射面之间的距离 $\lambda/2$, 就可以用 $v = \lambda f$ 计算声速。

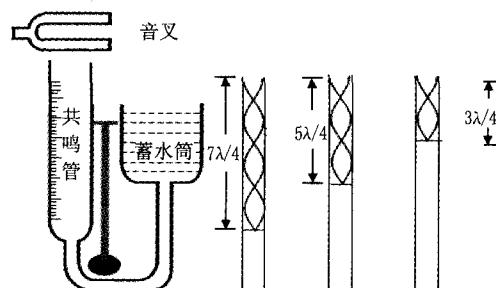


图1 驻波法测声速装置图

如图1所示, 共鸣管是一直立的刻有精度为 1.0 mm 的透明玻璃管。移动蓄水桶可以使管中的水位升降, 从而获得一定长度的空气柱。声波沿空气柱传播至水面发生反射, 入射波与反射波在空气柱中干涉, 调节空气柱的长度 L , 当其与波长 λ 满足

$$L_n(2n+1) \frac{\lambda}{4} (n=1, 2, \dots) \quad (1)$$

此时将形成管口为波腹、水面为波节的驻波, 声音最响, 即产生共鸣。

设相邻两次共鸣空气柱的长度差为 ΔL , 则

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

而

$$\lambda = 2\Delta L \quad (2)$$

若声波频率(即声源频率)固定为 f , 则由 $v = \lambda f$, 便可求出声波在空气中的传播速度 v

收稿日期: 2013-10-14

基金项目: 国家级特色物理专业项目资助(12467)

1.2 超声波振幅极值法

见图 2, 由信号发生器发出的电信号经换能发射器 S_2 转换为平面超声波经空气介质传到换能接收器 S_1 , 再由换能接收器转换为电信号通过示波器显示出来。按照波动理论若接收面与发射面平行, 声波在接收面处就会被垂直反射, 于是平面声波在两端面间来回反射并叠加。当接收端面与发射端面间的距离恰好等于半波长的整数倍时, 叠加后的波就形成驻波。此时相邻两波节(或波腹)间的距离等于半个波长即 $\lambda/2$ 。当发生器的激励频率等于驻波系统的固有频率, 会产生驻波共振, 波腹处的振幅达到最大值。

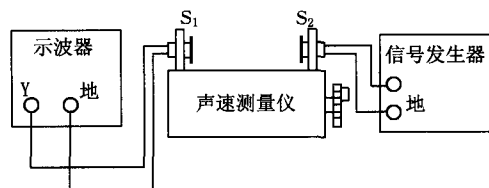


图 2 超声波振幅极值法测声速实验装置图

声波是一种纵波。由纵波的性质可知, 驻波波节处的声压最大。当发生共振时, 接收端面处为一波节, 接收到的声压最大, 转换成的电信号也最强。通过声速测量仪上涡轮蜗杆配合, 移动精度为 0.010 mm 的移动装置, 移动换能发射器 S_2 和换能接收器 S_1 之间的距离 x 到某个共振位置时, 如果示波器上出现了振幅最大的信号, 继续移动, 再次出现振幅最大的信号时, 则两次共振位置之间的距离为 $\lambda/2$ 。即

$$\Delta x = x_{n+1} - x_n = \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

$$\lambda = 2\Delta x \quad (4)$$

1.3 声速与温度之间的关系

声波在理想气体中的传播过程, 可以认为是绝热过程, 因此传播速度可以表示为:

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

式中常数 $R = 8.31\text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 对于空气 $\mu = 29\text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$, $\gamma = 1.40$, 而 $T = 273.15 + t\text{ }^\circ\text{C}$ 。

将 $T = (273.15 + t)$ 代入(t 为摄氏温度)得到计算声波在空气中的传播速度的理论公式为:

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{\gamma R (273.15 + t)}{\mu}} \\ &= \sqrt{\frac{273.15 \gamma R}{\mu}} \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} \quad (5) \\ &= v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} \end{aligned}$$

其中 $v_0 = (273.15 \gamma R / \mu)^{1/2} = 331.45\text{ m/s}$ 为空气介质在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时的声速。

则有:

$$v = 331.45 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} \quad (6)$$

一般取实验室环境温度 t 为空气介质的温度, 以(6)式所得到的声波在空气中的传播速度为近真值, 将实验值与近真值相比较从而确定其误差及不确定度。

上述两种测量声速的基本原理是一致的, 但由于仪器构成不同, 精度不同, 对实验结果的影响也有所不同。

2 实验过程

在同一实验环境下对声波在空气的传播速度, 分别用共鸣管驻波可闻声法和超声波振幅极值法进行测定, 得到结果后进行对比分析。

2.1 共鸣管驻波可闻声法实验数据及其处理

选定频率为 802 Hz 的共振音叉, 按图 1 组装好实验系统, 用小橡皮锤敲击音叉使其振动。改变共鸣管中空气柱的长度, 寻找 4 个共鸣位置。采用多次测量, 逐差方法处理数据。

表 1 共鸣管驻波可闻声法测声速实验数据表

$f = 802\text{ Hz}$ 室温: $t = 27.4\text{ }^\circ\text{C}$

项 目	共鸣管产生共鸣位置			
序 号	L_1/cm	L_2/cm	L_3/cm	L_4/cm
1	9.72	31.50	52.81	74.98
2	9.75	31.35	52.92	74.92
3	9.73	31.42	52.86	74.82
4	9.74	31.45	52.87	74.90
5	9.76	31.49	52.79	74.83
6	9.75	31.50	52.80	74.91
$\bar{L}$	9.742	31.45	52.84	74.89
$S(\bar{L})$	0.014 72	0.059 73	0.050 37	0.059 88

表中 $\bar{L}$ 为各共鸣位置平均值由 $\bar{L} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 L_i$ 计算得到

标准差 $S(\bar{L})$ 由 $S(\bar{L}) = \sqrt{\frac{\sum (L_i - \bar{L})^2}{6(6-1)}}$ 计算得到
波长计算:

$$\begin{aligned} \bar{\lambda} &= \frac{1}{2} [(\bar{L}_3 - \bar{L}_1) + (\bar{L}_4 - \bar{L}_2)] \\ &= \frac{1}{2} [(52.84 - 9.742) + (74.89 - 31.50)] \\ &= 43.24\text{ cm} \end{aligned}$$

声速:

$$V_{\text{共}} = f\lambda = 802 \times 43.24 \times 10^{-2} = 346.78/\text{ms}^{-2}$$

理论值:

$$V = 331.45 \sqrt{1 + \frac{27.4}{273.15}} = 347.68/\text{ms}^{-1}$$

以理论值为近真值进行比较,其相对误差:

$$E_{\text{共}} = (V - V_{\text{共}})/V\%100 = 0.26\%$$

不确定度评定

测定 L 时的不确定度:

不确定度 A 类评定

$$u_A(L_i) = S(\bar{L}_i)$$

不确定度 B 类评定

$$u_B(L) = \frac{0.10 \text{ cm}}{\sqrt{3}} = 0.0577 \text{ cm}$$

合成不确定度:

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

表2 测定 L 时不确定度数值表

$u_A(L_i)$	$u_B(L)$	$u(L_i)$	$u_A(L_i)$	$u_B(L)$	$u(L_i)$
0.01472	0.0577	0.0595	0.05037	0.0577	0.0766
0.05913	0.0577	0.0826	0.05988	0.0577	0.0832

测定波长 λ 时的不确定度:

$$\begin{aligned} u(\lambda) &= \sqrt{\sum \left(\frac{\partial \lambda}{\partial L_i} \right)^2 u^2(L_i)} \\ &= \sqrt{\frac{1}{4} u^2(L_1) + \frac{1}{4} u^2(L_2) + \frac{1}{4} u^2(L_3) + \frac{1}{4} u^2(L_4)} \\ &= \sqrt{\frac{1}{4} (0.0595^2 + 0.0826^2 + 0.0766^2 + 0.0832^2)} \\ &= 0.076 \end{aligned}$$

波长:

$$\lambda = \bar{\lambda} \pm u(\lambda) = (43.240 \pm 0.076) \times 10^{-2} (\text{m})$$

声速不确定度计算:

$$u(v) = \left[\frac{u(f)}{f} + \frac{u(\lambda)}{\lambda} \right] v$$

取频率的不确定度

$$u(f) = 0.5 \text{ Hz}$$

$$u(v) = \left[\frac{0.5}{802} + \frac{0.076}{43.24} \right] \times 346.78 = 0.83 \text{ ms}^{-1}$$

结果:

$$V_{\text{共}} = [V \pm u(v)] = [346.78 \pm 0.83] \text{ ms}^{-1}$$

$$E_{\text{共}} = 0.26\%$$

2.2 超声波振幅极值法实验数据及其处理

按图2组装好实验系统,选取信号发生器输出信号频率为40.10 KHZ(超声波范围)的正弦电信号。通过示波器观察到振幅最大值,结合声速

测量仪,确定其位置 x 。单次测量,用逐差方法处理数据。

表3 超声波振幅极值法测声速实验数据表

$f = 40.10 \text{ KHz}$ 室温: $t = 27.4^\circ \text{C}$

项目	数据/mm	分组逐差	项目	数据/mm	分组逐差
X_1	10.632	$X_5 - X_1$	X_5	26.761	$X_7 - X_3$
X_2	13.559	16.129	X_6	30.980	17.490
X_3	17.975	$X_6 - X_2$	X_7	35.465	$X_8 - X_4$
X_4	22.352	17.421	X_8	39.900	17.548

波长:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{2} &= \frac{1}{16} \times [(x_5 - x_1) + (x_6 - x_2) \\ &\quad + (x_7 - x_3) + (x_8 - x_4)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{1}{8} \times (16.129 + 17.421 + 17.490 + 17.548) \\ &= 8.574/\text{mm} \end{aligned}$$

声速:

$$\begin{aligned} V_{\text{超}} &= f\lambda = 40.10 \times 10^3 \times 8.574 \times 10^{-3} \\ &= 343.82/\text{ms}^{-1} \end{aligned}$$

理论值:

$$V = 331.45 \sqrt{1 + \frac{27.4}{273.15}} = 347.68 \text{ ms}^{-1}$$

相对误差:

$$E_{\text{超}} = V - V_{\text{超}} / V \%100 = 1.11\%$$

不确定度评定,测定最大振幅位置 X 时的不确定度:单次测量可不计不确定度 A 类评定

不确定度 B 类评定

$$u_B(x) = \frac{0.01 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0.0058 \text{ mm}$$

合成不确定度

$$u(x) = u_B(x)$$

测定波长 λ 时的不确定度:

$$\begin{aligned} u(\lambda) &= \sqrt{\sum \left(\frac{\partial \lambda}{\partial x} \right)^2 u^2(x)} \\ &= \sqrt{\frac{1}{64} \times 6 \times 0.0058^2} = 0.0018 \text{ mm} \end{aligned}$$

波长:

$$\lambda = \bar{\lambda} \pm u(\lambda) = (8.5740 \pm 0.0018) \times 10^{-3} \text{ m}$$

声速不确定度计算:

$$u(v) = \left[\frac{u(f)}{f} + \frac{u(\lambda)}{\lambda} \right] v$$

取频率的不确定度

$$u(f) = 0.5 \text{ Hz}$$

$$u(v) = \left[\frac{0.5}{40.10 \times 10^3} + \frac{0.0018}{8.574} \right] \times 0.076 \text{ ms}^{-1}$$

结果:

$$V_{\text{超}} = [V \pm u(v)] = [343.820 \pm 0.076] \text{ms}^{-1}$$

$$E_{\text{超}} = 1.11\%$$

3 对比分析研究

共鸣管驻波可闻声法,是通过人耳听声分辨出共振最大声强,结合精度为 1.0 mm 的共鸣管确定其共鸣位置 L 。仪器结构简单,直观明了。从误差的等分配原则来看,误差来源于人耳分辨声强和共鸣位置 L 的定位两个环节。

超声波振幅极值法是通过人眼观看示波器,分辨出振幅极大值,结合精度为 0.01 mm 的声速测量仪确定其振幅极值位置 x 。误差来源除了振幅极大值分辨、极值位置确定外,还有电信号与超声波相互转换的两个环节。特别是在示波器上分辨振幅极大值时,由于每次共振的振幅极大值的波峰高度是不同的,示波器荧光屏的定标精度不可能太高(约 3 mm),这就使得振幅极大值的分辨显得较粗糙,所以超声波振幅极值法测声速的误差要大于共鸣管驻波可闻声法测声速的误差,实验的结果正是如此。

$$V_{\text{共}} = [V \pm u(v)] = [346.78 \pm 0.83] \text{ms}^{-1}$$

$$E_{\text{共}} = 0.26\%$$

$$V_{\text{超}} = [V \pm u(v)] = [343.820 \pm 0.076] \text{ms}^{-1}$$

$$E_{\text{超}} = 1.11\%$$

$$E_{\text{超}} = 1.11\% > E_{\text{共}} = 0.26\%$$

从不确定度的范围来看,超声波振幅极值法的定位精度(0.01 mm),高于共鸣管驻波可闻声法定位精度(1.0 mm)2 个数量级,从而导致不确定度范围相差 1 个数量级。

$$\pm 0.076 \text{ms}^{-1} < \pm 0.83 \text{ms}^{-1}$$

由以上对比分析可知,在声速测定实验中两种实验方法由于实验仪器的构成不同,测量精度的不同,对其实验结果的误差、不确定度范围有直接的影响,而且因果、数量关系对应明确。这对于其它的普通物理实验,在其实验方法及实验仪器设计方面都有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 杨述武. 普通物理实验(力学、热学)[M]. 北京:高等教育出版社,2007.
- [2] 漆安慎,杜婵英. 普通物理学教程(力学)[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [3] 刘克哲,张承琚. 物理学[M]. 上卷. 北京:高等教育出版社,2005.
- [4] 陈洁,苏建新. 声速测量实验有关问题的研究[J]. 物理实验,2008,28(6):31-33.
- [5] 郑庆华. 声速测量实验的讨论[J]. 大学物理,2007,26(9):31-33.
- [6] 刘兴俊,王昆林. 超声波声速测定的三种实验方法比较研究[J]. 实验科学与技术,2011,9(2):184-187.
- [7] 黄贤群. 其于最小二乘法的声速测定实验数据处理及分析[J]. 大学物理实验,2012(2).

Comparative Study of Experimental Uncertainty, Error Determination

FENG Deng-yong, WANG Kun-lin

(Chuxiong Normal University, Yunnan Chuxiong 675000)

Abstract: This paper compares two experimental ways about the speed of sound, analyzes the error and uncertainty of the two experiments.

Key words: determination of the speed of sound; comparing study; error; uncertainty