

全自动驻波法声速测量实验数据的处理方法研究*

石明吉 刘斌

(南阳理工学院电子与电气工程学院 河南 南阳 473004)

(收稿日期:2018-03-01)

摘要:针对传统声速测量实验装置存在的缺陷,人们逐渐研制和使用自动化、智能化的新型声速测量装置.新型声速测量装置得到的测量结果数据量更大,包含的信息也更丰富.用传统的 Origin 软件线性拟合法处理数据误差较大,不能满足实验需要,有必要探索声速测量数据处理的新方法.新型声速测量装置的实验误差主要来自能量损耗和次频共振形成的次峰的影响.根据驻波法声速测量数据的特点和能量衰减的规律对数据进行修正,将能量损耗的影响消除掉;为排除次峰的影响,考虑到声速测量数据中极值点的出现具有空间周期性,利用傅里叶变换处理数据得到待测信号的空间频谱图,确定了声波的波长并计算出声速.数据处理结果表明:由于消除了能量损耗的影响,排除了次峰干扰,使驻波法测量声速的相对误差从 1.66% 减小为 0.23%,比传统方法更适合于处理驻波法声速测量数据;此外,从另一个角度证明次频共振现象是形成次峰的重要原因.

关键词:声速测量仪 能量损耗 次峰 次频共振 傅里叶变换 空间周期性 空间频率

1 引言

声波是一种在弹性媒质中传播的纵波,随着超声学研究的迅速发展,声学检测在实际应用中已越来越广泛,对超声波传播速度的测量在超声波测距、无损检测、定位、测量气体温度瞬间变化等方面具有重大意义^[1].超声波具有波长短、可定向的优点,因此,常被用作测量声速^[2].目前,大学物理实验中的声速测量方法主要有两种:驻波法(也叫共振干涉法)和相位比较法^[3].不管是驻波法还是相位比较法,都是用眼睛观察示波器进行测量.测量的时候,为防止回程差的影响,不能回头,只能朝一个方向不断移动测量,不容易测准确;利用人眼观察、读数、移动,费时费力.为解决这个问题,人们不断地研制和使用智能化、全自动的新型声速测量仪^[4,5].新型声速测量仪不仅消除了回程差,实现了声波接收器位置移动的自动化,还实现了数据采集和存储的自动化,因此,实验效率大大提高,获得的数据量更大,包含的信息也更丰富.

超声波在介质中传播时,由于介质的吸收与散

射,能量将不断衰减.能量的衰减使得极大值点间隔改变,波长无法准确判定^[6];此外,由于信号源频率不纯^[7],次频共振导致次峰的形成^[8,9],次峰的干扰使得极值点偏离正常位置,无法用传统的 Origin 软件线性拟合法准确处理数据、计算出声速.因此,有必要探索一种新的、适合于处理新型装置测量数据的方法.本文根据能量衰减的特点对数据进行修正,消除能量损耗对测量结果的影响;利用傅里叶变换可以将一个信号分解为很多个不同频率、不同幅度的正弦信号的特点,用傅里叶变换处理数据,将不同频率的信号分开,消除次峰对测量结果的影响并加深对次峰现象的理解.

2 实验

利用全自动声速测量装置,采用驻波法进行了声速测量实验.全自动声速测量装置由实验室自己搭建,通过单片机和步进电机驱动器控制步进电机的转动,利用步进电机带动丝杠转动,从而实现声波接收器的运动.采用驻波法进行声速测量,利用有效值检测模块将声波接收器产生的高频交变电压信号

* 南阳理工学院省示范校建设专项研究项目“大学物理开放性实验教学方法与体系的研究与实践”,项目编号:SFX201718;南阳理工学院高等教育研究基金项目“应用型本科高校公共实践教学平台运行机制研究”,项目编号:2017-NGGJJJ-002

作者简介:石明吉(1974-),男,博士,副教授,从事大学物理实验教学和电子测量技术研究.

转化为直流电压信号.利用RS485采集卡采集数据并发给上位机,通过上位机完成绘图和数据存储.

实验时的温度为 $12.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.谐振频率为 40 kHz ,设定数据的采集周期为 300 ms ,数据点个数为 $8\ 000$.利用步进电机驱动器的细分功能,将步进电机的步距角设为 1.8° ,丝杆的导程为 4 mm ,因此步进电机每走一步,声波接收器移动 0.02 mm .声波发射器固定不动,声波接收器由近及远运动.测试开始前,发射器与接收器相距 0.35 mm ,测试过程中,二者逐渐远离.

3 数据原始记录

采用驻波法测量后,将自动声速测量仪生成的Excel数据用Origin软件画图,得到声波接收器电压变化与声波接收器位置的关系,如图1所示.

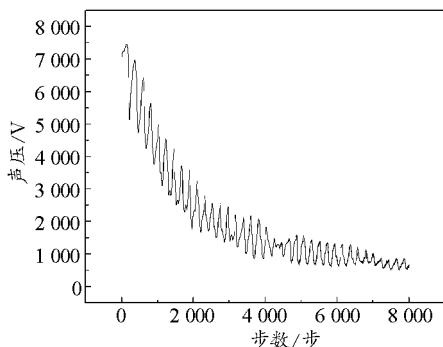


图1 声压与声波接收器位置关系

4 数据处理及分析

4.1 Origin软件线性拟合法数据处理

从图1可见,随着声波接收器和声波发射器逐渐远离,声压信号依次周期性地出现极大值—极小值—极大值……;极大值和极小值的数值逐渐变小;在相邻的极大值之间会出现“次极大”(也叫次峰)和“再次极大”(也叫再次峰).传统方法根据相邻极大值点间的距离为声波半波长,读出频率,计算得到波速.由于在步数为 $4\ 300$ 左右时,次峰已经接近主峰,对主峰峰位的确定影响大,因此,计算半波长的时候,步数为 $4\ 300$ 附近的主峰应该排除掉.为此,选择从第二个极大值起的 17 个极大值点,利用Origin软件的寻峰功能确定出这 17 个极大值点的位置为 $366,590,805,1\ 025,1\ 233,1\ 453,1\ 666,1\ 883,$

$2\ 097,2\ 314,2\ 524,2\ 735,2\ 957,3\ 174,3\ 385,3\ 601$ 和 $3\ 814$.将极大值点的序号作为横坐标,将各极大值点的位置作为纵坐标,作图并进行线性拟合,得到相邻极大值点间距为 $215.134\ 8$ 步,由于电机每走一步,声波接收器移动 0.02 mm ,所以 $\frac{\lambda}{2} = 215.134\ 8 \times 0.02\text{ mm}$ 可得 $\lambda = 8.605\text{ mm}$,由于频率为 40 kHz ,所以 $v = \lambda f = 344.22\text{ m/s}$.已知声速在标准大气压下与传播介质空气的温度关系为

$$v_s = 331.45 + 0.59t \quad (1)$$

将 $t = 12.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 代入式(1)后,得到该温度下的标准声速为 $v_s = 338.59\text{ m/s}$.绝对误差

$$\Delta v = |v - v_s| = 5.63\text{ m/s}$$

相对误差

$$E = \frac{|v - v_s|}{v_s} \times 100\% = 1.66\%$$

可见,采用全自动声速测量系统测试,利用Origin软件线性拟合处理数据,实验误差仍然比期望的要大.

4.2 傅里叶变换法数据处理

利用Origin软件线性拟合处理数据,造成误差较大的一个原因是次峰和再次峰对极大值点位置的影响,导致波长测量不准确.对次峰现象的解释,文献[8]、[9]、[10]认为次峰不是超声波在界面多次反射的结果,应该是由于超声波信号源频率不纯而产生次频共振现象.由于次频的存在,在声波发射器和声波接收器之间会同时存在多种不同频率的声波形成的驻波.每一种频率的声波形成的驻波都会出现周期性的极大值—极小值—极大值……,实验观察到的声压与声波接收器位置关系是不同频率的声波形成的驻波的总效果.这种周期性是空间周期性,与波的空间周期性类似.空间周期的倒数就是空间频率,进而想到可以用傅里叶变换来分析实验结果,以便将不同空间频率的信号分开,消除次频的影响.此外,根据数值模拟和实验结果可知,超声波在介质中传播时,由于介质的吸收与散射,能量将不断衰减,因此实验测得的信号幅度和信号变化幅度随着发射器和接收器之间距离的增大而逐渐变小.如果直接将信号进行傅里叶变换,信号幅度和信号变化

幅度的逐渐变化会对傅里叶变换的结果产生影响,导致较大的测量误差.因此,在进行傅里叶变换之前,要先对数据进行处理,消除信号幅度和信号变化幅度的逐渐变化,以减小对傅里叶变换的影响.

由于声波接收器的位置用步进电机的步数表示,因此,空间周期 Π 的单位也是步(step),所以,表示空间频率 F 的物理量的单位是每步,即 $\frac{1}{\text{step}}$.假设声波的波长为 λ ,步进电机每走一步声波接收器移动的距离为 K ,在驻波法测量声速时,由于波腹在声波的传播方向上出现的空间周期 Π 是对应半波长的步数,则有

$$\frac{\lambda}{2} = \Pi \cdot K = \frac{1}{F} \cdot K \quad (2)$$

根据图1,利用 Origin 软件的寻峰功能,将极大值点和极小值点都找出来,利用 Data Reader 读出每个极值点的横坐标和纵坐标,将所有极大值点和所有极小值点分别用 Origin 软件作图.由于声波在介质中传播时,声压和声强按照 e 指数规律进行衰减,利用 Origin 软件的 Analysis 中的 Fit Exponential Decay First Order 进行拟合,结果如图2和图3所示.

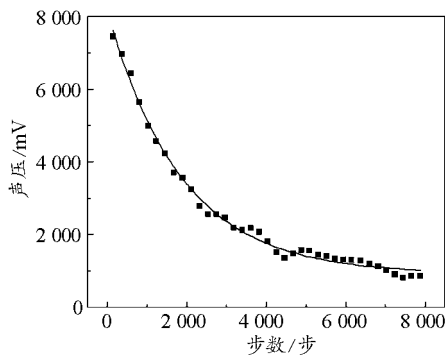


图2 极大值点及其拟合曲线

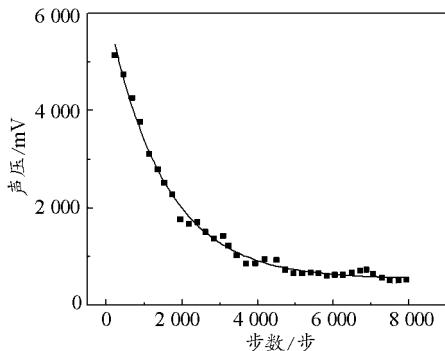


图3 极小值点及其拟合曲线

图2中,Origin 软件给出极大值点的拟合曲线为 $y_1 = 7204.77 e^{-\frac{x}{1865.70}} + 914.61$, 关联系数 $r = 0.99406$; 图3中,软件给出的极小值点的拟合曲线为 $y_2 = 5602.99 e^{-\frac{x}{185.78}} + 534.22$, 关联系数 $r = 0.99351$. 其中, x 代表 step number, y_1, y_2 代表 Voltage.

为了消除能量衰减所引起的图1中数据整体的幅度变化,利用 Origin 软件的 set column value 功能,将测量结果减去极小值点的拟合曲线在每一步处对应的函数值,将曲线底端拉平,结果如图4所示.再利用 Origin 软件的 set column value 功能,将底端拉平的数据除以 $(y_1 - y_2)$ 在每一步处的取值,将信号的幅度进行归一化处理,结果如图5所示.

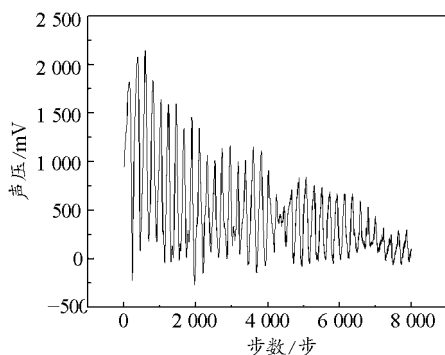


图4 数据底端拉平

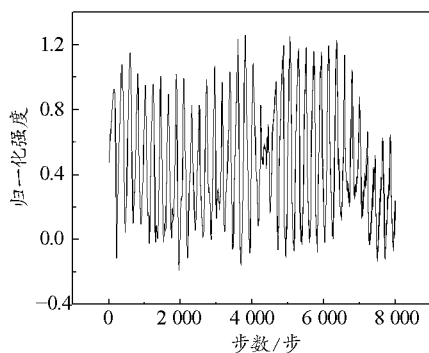


图5 数据幅度归一化

消除了能量衰减的影响后便可以直接进行傅里叶变换,以消除次频共振的影响.利用 Origin 软件的 FFT 功能对图5中的曲线进行快速傅里叶变换,结果如图6(a)所示.图6(a)中,除直流分量外,从曲线上可以观察到8个比较明显的峰,第3个峰的幅度最大,应该与40 kHz的基频信号对应.其他的峰应该对应其他频率的信号,这也说明信号具有多种频率成分.为精确读出第3个峰的中心峰位,采用

Origin 软件的(line+symbol)功能画图并将第3个峰所在部分进行放大,如图6(b)所示.由于最上面的两个点处于峰顶或太靠近峰顶,不容易准确找到中心峰位.因此,选择第3个数据点作为 a 点,从 a 点作水平线与曲线交于 b 点,读出 a, b 两点的横坐标(空间频率)分别为 $0.004\ 882\ 812\ 5(\text{step}^{-1})$ 和 $0.004\ 546\ 540\ 94(\text{step}^{-1})$, a, b 两点的平均空间频率为

$$\bar{F}_3 = 0.004\ 714\ 676\ 72(\text{step}^{-1})$$

代入式(2)得

$$\lambda = 8.484\ \text{mm}$$

因为

$$f = 40\ \text{kHz}$$

所以

$$v = 339.36\ \text{m/s}$$

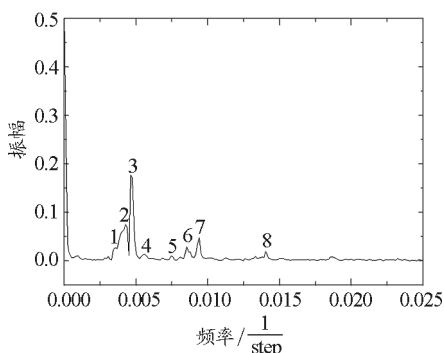
绝对误差

$$\Delta v = 0.77\ \text{m/s}$$

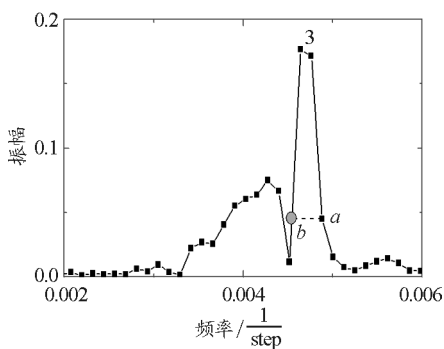
相对误差

$$E = 0.23\%$$

这个误差很小,说明消除能量损耗的影响后,利用傅里叶变换处理数据、正确读取峰位的数据处理方法是有效的、可行的.



(a) 空间频谱图



(b) 局部放大图

图6 快速傅里叶变换

理数据比单纯用 Origin 软件的线性拟合处理数据要准确,原因就是傅里叶变换将测量结果分解为若干单一的谐波分量,给出各谐波的幅度和相位信息,有利于消除次频的影响.去除了次频的影响也就去除了次峰对主峰的干扰,这也从另一个方面说明次频共振是次峰形成的重要原因.

5 结束语

全自动驻波法声速测量仪利用有效值检测模块实现了声压的数字化,消除了回程误差,声波接收器的运动、数据的采集、存储均实现了自动化,大大提高了数据采集的效率.利用 Origin 软件的线性拟合法和傅里叶变换法处理实验数据,从结果来看,傅里叶变换处理数据更为准确,因为它不仅消除了能量损耗的影响,而且将次频信号和主频信号分开,减小了次峰和再次峰对主峰峰位的影响.同时,也从另一个方面证实次峰是次频共振的结果.全自动声速测量仪和合适的数据处理方法对声速的测量、教学和研究方面具有重要意义,具有一定的推广价值.

参考文献

- 1 谢春香,张禹涛,黄笃之.非简谐波对声速测量的影响.湖南科技大学学报(自然科学版),2013,28(1):120~123
- 2 孙金林,王国余,胡方圆.数字化智能声速测量系统设计.传感器与微系统,2015,34(10):114~117转127
- 3 杨志云.驻波法与相位比较法测声速实验探讨.产业与科技论坛,2011,10(7):86~87
- 4 张绪德,李永涛,王秦君,等.智能声速测量仪.物理实验,2014,34(06):19~21
- 5 朱方玺,曹伟然.声速测量实验仪的改进.物理实验,2011,31(10):40~43
- 6 梁济仁,黄开连.驻波法测量声速.广西民族大学学报(自然科学版),2009,15(3):68~72
- 7 赵洁,邱菊,崔丽彬,等.声速测定实验中次极大现象的次频因素定量探讨.大学物理,2016,35(1):35~38
- 8 韩也.对空气声速测定实验的研究.大学物理实验,1999,12(4):20~22
- 9 邓小玖,宋勇,高峰,等.声速测量实验的研究及数值模拟.物理与工程,2006,16(2):24~25转32
- 10 谢莉莎,刘彩霞,肖苏,等.能量损耗对超声声速测量影响的进一步研究.大学物理实验,2005,18(3):1~3

对比可知,消除能量损耗并运用傅里叶变换处



利用手机相机功能验证微小形变

黄治海

(常州市第三中学 江苏 常州 213000)

(收稿日期:2018-05-22)

摘要:验证微小形变的传统演示实验,准备、操作较困难,演示效果直观性不强.利用手机同屏技术和手机相机功能来验证水平桌面微小形变的创新实验,能很好地解决上述问题,还能验证硬质桌面的微小形变,并且具有成本低、易操作等优点,因此,有较高的推广价值.

关键词:同屏技术 微小形变 创新实验

微小形变的演示实验可以直观地呈现出弹力的作用效果,为认识微小形变提供感性素材,可加深对弹力产生条件需要发生弹性形变的认识.肉眼一般无法直接观察到微小形变,实验上利用放大思想,将微小形变转化成肉眼能观察到的信号,传统方式有:液柱变化法,带细管的装满水的封闭玻璃扁瓶,

通过按压扁瓶不同部位,可发现细管中的液面上升或下降;激光反射法,当桌面在外力作用下发生形变时,激光笔发射出的激光通过平面镜两次反射,光点在接收屏的位置会发生明显移动.由于准备和操作较为困难,传统演示效果难达到直观、清晰地效果.笔者利用同屏技术和手机相机功能,能将水平桌面

Research on Processing Method of Experimental Data about a Full-automatic Measurement of Sound Velocity by Standing Wave Method

Shi Mingji Liu Bin

(School of Electronic and Electrical Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang, Henan 473004)

Abstract: Aiming at short comings of traditional sound velocity measuring instrument, people proposed and used new automatic and intelligent sound velocity measuring instrument. The new measurement result has a greater amount of data and more information. To process the data by traditional Origin software linear fitting method will lead to large error, so it is necessary to explore a new method for data processing. The experimental error mainly comes from the influence of the energy loss and the sub-maximum of the sub-frequency resonance. The influence of energy loss can be eliminated by modifying the data according to the characteristics of data and energy loss. In order to eliminate the influence of sub-maximum phenomenon, considering the occurrence of extreme points in the sound speed measurement data has spatial periodicity, we use Fourier transform to process the data to get the spatial spectrum of the signal, determine the wavelength of the acoustic wave and calculate the sound speed. The data processing results show that Fourier transform eliminates the interference and reduces the relative error from 1.66% and to 0.23%, which is more suitable for processing the measurement data of sound velocity. From another point of view, the sub-frequency resonance phenomenon is an important reason for the formation of sub-maximum phenomenon.

Key words: sound velocity measuring instrument; energy loss; sub-maximum phenomenon; sub-frequency resonance; fourier transform; space periodicity; spatial frequency