

基于变频快速傅里叶变换的变温声速测量研究

王才林¹ 邵明珍¹ 徐婷婷¹ 王克东¹ 刘丽莎² 赵小清³

¹ 南方科技大学理学院物理系, 广东 深圳 518055;

² 南方科技大学人文社会科学学院语言中心, 广东 深圳 518055;

³ 西川西测科技有限公司, 四川 成都 610200)

摘要 本文利用自主研发的可闻声波研究综合实验平台, 基于变频快速傅里叶变换(FFT)对常温和变温条件下的声速测量进行研究, 并将测量结果与传统固定频率测量声速的方法进行对比。结果表明: 常温下该方法与传统固定频率测量声速的方法所得结果误差均小于 1.0%, 但传统方法测量结果误差随固定频率的增大而波动, 而基于变频 FFT 测量方法的测量结果误差随着发射器与接收器之间距离的增大而减小, 两种测量方法所得结果与理论值符合较好, 表明基于该平台的测量结果精度较高, 设备运行稳定可靠; 变温条件下声速随着温度的升高而线性增大, 所得结果与理论值符合较好, 最大误差为 2.1%, 进一步验证了基于变频 FFT 测量方法的可靠性和便利性, 为后续基于该平台测量不同压强和不同介质等条件下声速提供了良好支撑。

关键词 定频变距; 定距变频; 快速傅里叶变换; Audition 软件; 变温声速测量

VARIABLE-TEMPERATURE SOUND SPEED MEASUREMENT BASED ON FAST FOURIER TRANSFORM INDUCED BY VARIABLE FREQUENCY

WANG Cailin¹ SHAO Mingzhen¹ XU Tingting¹ WANG Kedong¹ LIU Lisha² ZHAO Xiaoqing³

¹ Department of Physics, College of Science, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055;

² Center for Language Education, School of Humanities and Social Sciences, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055;

³ Sichuan Xice Technology Co., Ltd, Chengdu, Sichuan 610200)

Abstract Using a self-developed audible sound wave research comprehensive experimental platform, sound velocity measurements under normal and variable temperature conditions were studied based on the variable frequency Fast Fourier Transform (FFT). The measurement results were compared with the traditional method of measuring sound velocity at a fixed frequency. The results showed that the error of this method and the traditional method of measuring sound velocity at a fixed frequency was less than 1.00% at normal temperature. However, the error of the traditional method fluctuated with the increase of the fixed frequency. The error of the measurement method based on variable frequency FFT decreased with the increase of the distance between the transmitter and receiver. The results obtained by both measurement methods were in good agreement with the theoretical values, indicating that the measurement results based on this platform had high accuracy and the equipment operated stably and reliably. Under variable temperature conditions, the sound velocity increased linearly with the increase of temperature. The obtained results were in good agreement with the theoretical values, with a maximum error of 2.09%. This further verified the reliability and convenience of the measurement method

收稿日期: 2025-03-06

基金项目: 南方科技大学 2024 年度教学质量与教学改革工程项目(No. SJZLGC202450)。

通信作者: 王才林, wangcl@sustech.edu.cn。

引文格式: 王才林, 邵明珍, 徐婷婷, 等. 基于变频快速傅里叶变换的变温声速测量研究[J]. 物理与工程, 2025, 35(5): 322-328.

Cite this article: WANG C L, SHAO M Z, XU T T, et al. Variable-temperature sound speed measurement based on fast Fourier transform induced by variable frequency[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(5): 322-328. (in Chinese)

based on variable frequency FFT, providing good support for subsequent measurements of sound velocity under different pressures and different media conditions based on this platform.

Key words fixed frequency variable distance; fixed distance variable frequency; fast Fourier transform; Audition software; variable sound speed measurement

通过对声速的测量可以获取传播介质的特性及相关的状态信息,它在声波定位、探伤、测距、测液体流速、测材料弹性模量、测量气体温度、测量气体压强等方面具有重要意义^[1]。

大学物理实验教学中常利用超声波换能器实现声波的产生和接收,并基于驻波法和相位比较法来测量空气中的声速^[2],由于实验中精确测量超声换能器的固有频率存在一定的误差,会影响测量结果的准确性,丛晓燕^[3]等人利用超声波换能器对声速进行研究,统计显示驻波法和相位比较法测量结果的误差波动较大,为了改善声速测量的准确性和便捷性,相关教师和学生做了较多尝试。薛啸天^[4]等尝试基于声悬浮的现象,测量悬浮物之间的距离得到共振波长,进而计算声速;吴鲁杰^[5]等、姚星星^[6]等基于共鸣法原理利用Phyphox软件对声速测量实验进行改进;闫志涛^[7]等基于超声波近完全相消相干条件测定其声波波长,进而计算声速;彭刚^[8]等人以Arduino和Labview为基础搭建声速测量装置,实现自动化测量;何雨航^[9]等基于相位比较法测量具有固定长度的有机玻璃圆管对低频信号的响应,进而测量声速。但以上实验设备尚处于探索阶段,不便于广泛推广使用。

根据教育部《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2023年版)^[10]和“101计划”的可拓展、分层次的培养要求,笔者联合合作单位共同开发了一套“可闻声波研究综合实验平台”,该平台采用低频可调频率(0~6000Hz)作为声源,不仅可以满足常规的驻波法和相位比较法测量声速的需求,而且能够实现利用快速傅里叶变换(FFT)进行变频条件下常温及变温声速的测量,为声速测量提供了新的选择,该设备稳定成熟,可推广性强。

本文基于该平台研究了传统方法常温声速的测量和基于FFT的变频条件下常温声速及变温(30~60℃)声速的测量,研究表明,实验测量声速结果精度高,仪器稳定性强,FFT测量方法便捷可行。通过本实验的成功尝试,为后续测量不同压强、不同介质等条件下声速测量提供了有力支撑。

1 实验设备

“可闻声波研究综合实验平台”实物图主体如图1所示,基于此平台的变频声速测量实验原理如图2所示,变频信号源产生0~6000Hz的连续可调正弦信号,通过发射器产生对应频率的声波,接收器将接收到的声波信号转换为电信号,利用采集卡采集信号后送入显示器显示。



图1 可闻声波研究综合实验平台主体实物图

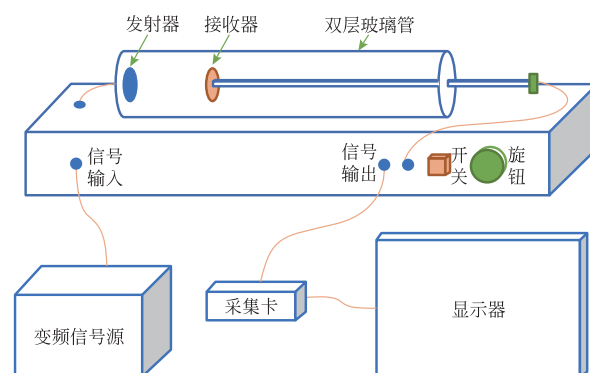


图2 变频声速测量实验原理图

2 实验原理

在弹性媒质中,由20Hz到20000Hz范围内声音振动所激起的纵波称为声波。在0℃时,声波在空气中的传播速度 $v_0 = 331.45\text{m/s}$,在 $t^\circ\text{C}$ 时,声波在空气中的传播速度^[2]为

$$v_t = v_0 \sqrt{\frac{T}{273.15}} = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}}$$

本文实验环境温度 $t = 23.1^\circ\text{C}$,根据上述公式

计算可得,该温度下理论声速 $v_t = 345.18\text{m/s}$ 。

实验室中常采用驻波法和相位比较法测量声波频率 f 和波长 λ 后,根据声速公式 $v = f \cdot \lambda$ 计算得出声速^[11]。本文基于驻波法原理进行测量。

2.1 驻波法原理

一个内表面光滑,两端封闭的刚性管,一端固定放置发射器,由变频信号源驱动,向管内发射单一频率的入射声波,设入射波为

$$y_1 = A \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right) \quad (1)$$

在封闭端是理想的刚性平面的条件下,声波全部反射,则反射波为

$$y_2 = A \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}x\right) \quad (2)$$

于是式(1)和式(2)联立可得,在刚性管内合成的声波为

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 \\ &= A \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right) + A \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}x\right) \\ &= \left[2A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)\right] \cos\omega t \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)表明,上述两波合成的结果是驻波,在两波相遇处各点都在做同频率的振动,而各点的振幅 $\left[2A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)\right]$ 是位置 x 的余弦函数。对应

于 $\left|\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)\right| = 1$ 的各点振幅最大,称为波腹;对

应于 $\left|\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)\right| = 0$ 的各点静止不动,称为波节。

要使 $\left|\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)\right| = 1$, 应有 $2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm n\pi$, ($n=0, 1,$

$2, 3, \dots$), 即 $x = \pm n \frac{\lambda}{2}$ ($n=1, 2, 3, \dots$) 处就是波腹的

位置。可见两相邻波腹间的距离为 $\frac{\lambda}{2}$ (即半波长)。

要使 $\left|\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)\right| = 0$, 应有 $2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm (2n+1) \frac{\pi}{2}$,

($n=0, 1, 2, 3, \dots$), 即 $x = \pm (2n+1) \frac{\lambda}{4}$ ($n=1, 2, 3, \dots$)

处就是波节的位置,可见波节与波节之间的距离也是半波长 $\frac{\lambda}{2}$ 。

根据上述驻波原理,为测量便利,实验中采用测量波腹的位置,可有两种实现方法。

(1) 定频变距法:固定入射波频率 f , 不断移动接收器,测量出相邻波腹出现的位置 x_1, x_2 , 则

$\lambda = 2(x_2 - x_1)$, 根据 $v = f \cdot \lambda$ 即可得到声速。

(2) 定距变频法:固定接收器位置 x , 不断改变入射波频率 f , 测量出相邻波腹出现时的频率

f_1, f_2 , 根据 $x = \pm n \frac{\lambda}{2}$ ($n=1, 2, 3, \dots$) 可知, 对应

频率 $f_1, x = n \frac{\lambda_1}{2}$, 即: $\lambda_1 = \frac{2x}{n}$; 对应频率 $f_2, x =$

$(n+1) \frac{\lambda_2}{2}$, 即: $\lambda_2 = \frac{2x}{n+1}$, 因此

$$v = f_1 \cdot \lambda_1 = f_1 \cdot \frac{2x}{n} \Rightarrow nv = f_1 \cdot 2x \quad (4)$$

$$v = f_2 \cdot \lambda_2 = f_2 \cdot \frac{2x}{n+1} \Rightarrow (n+1)v = f_2 \cdot 2x \quad (5)$$

将式(5)减式(4), 可得

$$v = (f_2 - f_1) \cdot 2x = \Delta f \cdot 2x \quad (6)$$

根据式(6)可知, 测量出固定距离下相邻波腹出现时的频率差 Δf 即可得到声速。

3 实验步骤及数据分析

本文分别采用以上 2 种方法测量常温下空气中的声速并利用定距变频法测量了声速与温度的变化关系, 测量步骤及结果如下。

3.1 定频变距法

为了测量的准确性, 本实验分别测量固定频率为 3000Hz、3250Hz、3500Hz、3750Hz、4000Hz、4250Hz 情况下的波腹位置 x 随波腹个数 n 的关系, 结果如图 3 所示。图中每条拟合线的斜率即为该频率下对应半波长的值, 拟合结果如表 1 所示。根据公式 $v = f \cdot \lambda$, 并与声速理论值 $v_t = 345.18\text{m/s}$ 对比, 计算相对误差 $|\eta|$ (%), 所得结果如表 1 所示。

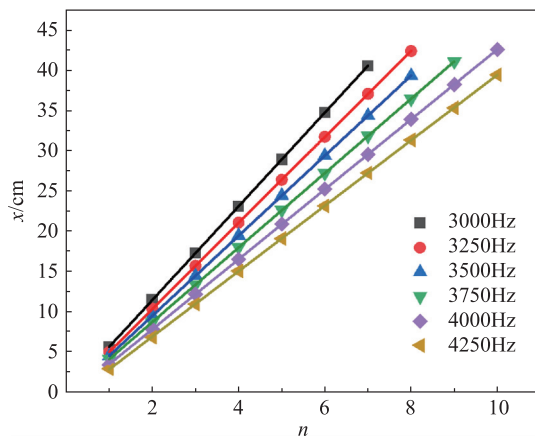


图 3 定频变距法波腹位置 x 随波腹个数 n 的关系

表 1 定频变距法测量声速结果

f/Hz	3000.00	3250.00	3500.00	3750.00	4000.00	4250.00
$\lambda/2/\text{cm}$	5.82	5.34	4.97	4.62	4.35	4.07
$v/(\text{m/s})$	349.20	347.10	347.90	346.50	348.00	345.95
$ \eta /\%$	1.2	0.56	0.79	0.38	0.81	0.22

结果显示该方法测量声速精度较高,结果可靠,相对误差虽然具有一定的波动性,但总体小于1%。

3.2 定距变频法

根据图 2 的测量原理图连接仪器,固定接收器的位置 x ,连续调节变频信号源,利用配套的 Audition 音频处理软件采集声波时域信号,如图 4 所示,将时域信号经过 FFT 处理后得到频域信号,如图 5 所示,通过频域信号即可得到每次波腹所对应的频率。为了得到更加准确的频率值,可将 FFT 处理后的数据导出后再进行二次处理,如图 6 所示,图中箭头所指位置即为对应波腹的频率。

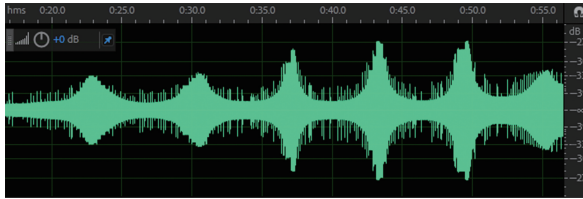


图 4 Audition 软件采集的时域信号

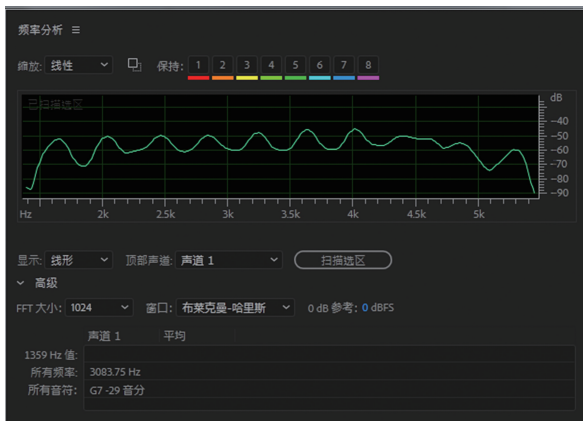


图 5 时域信号经 FFT 后的频域信号

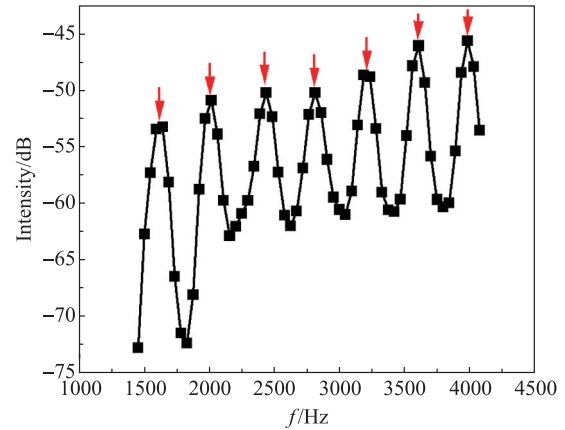


图 6 频域信号二次处理

为了测量的准确性和可靠性,本实验分别采集固定接收器位置 x 为 30.00cm、32.50cm、35.00cm、37.50cm、40.00cm、42.50cm 情况下的音频信号,所得频率 f 随波腹的个数 n 的关系如图 7 所示,图中每条拟合线的斜率即为该固定距离下的频率差 Δf ,拟合结果如表 2 所示,根据公式 $v = \Delta f \cdot$

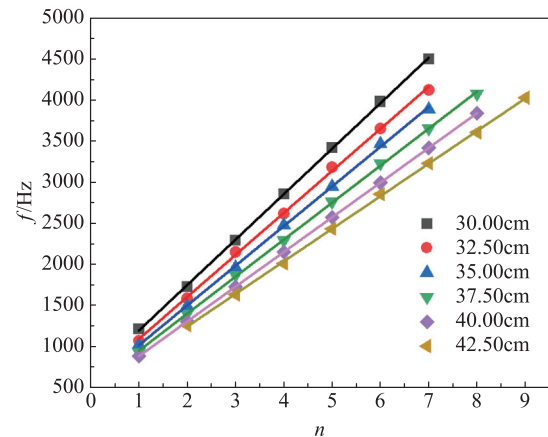
图 7 定距变频法测量频率 f 随波腹个数 n 的关系

表 2 定距变频法测量声速结果

x/cm	30.00	32.50	35.00	37.50	40.00	42.50
$\Delta f/\text{Hz}$	552.43	510.61	482.21	449.71	421.86	396.07
$v/(\text{m/s})$	331.46	331.90	337.55	337.28	337.49	336.66
$ \eta /\%$	4.0	3.8	2.2	2.3	2.2	2.5

$2x$ 计算,并与声速理论值 $v_t = 345.18\text{m/s}$ 对比,计算相对误差 $|\eta|(\%)$,所得结果如表 2 所示。结果显示该方法误差在 $2\% \sim 4\%$ 。仔细观察实验仪器发现,固定接受器的游标卡尺读数与实际间距之间相差约 1.00cm 。经过修正后,重新计算结果如表 3 所示。结果显示,该方法测量声速误差均小于 1% ,且随着接收器位置的增大而逐步减小。

以上测量结果显示:基于传统的定频变距法和 FFT 的定距变频法测量室温下空气的声速结果误差均小于 1.0% ,表明两种方法测量声速的结果可靠,实验设备运行稳定。基于此,考虑到测量的便捷性和对空气的低扰动性,本文采用定距变频法研究变温条件下空气中声速的变化。

3.3 变温声速测量

基于定距变频法测量声速的原理,测量了发射装置与接收装置间隔为 40.00cm 时的声速大小随温度的变化关系,如图 8 所示(为了分辨清晰,将 $35 \sim 60^\circ\text{C}$ 的每条线频率基数分别增加了 $200\text{Hz}, 400\text{Hz}, 600\text{Hz}, 800\text{Hz}, 1000\text{Hz}, 1200\text{Hz}$)。从图 8 中可以看出每个温度条件下频率变化均具有良好的线性关系,符合定距变频法测量声速的原理,结果可靠。但是不同温度条件下拟合线的斜率几乎一致,为了更清晰的对比,将不同温度下拟合直线的斜率及所得声速等结果呈现在表 4 中,并将声速随温度的变化与理论值对比呈现在图 9 中。从表 4 中可以看出在 $30 \sim 60^\circ\text{C}$ 之间声速随温度的升高而增大,最大误差为 2.1% 。从图 9 中可以看出,测量值和理论值在所测温区内均为线性,但测量值随着温度的升高偏离理论值的幅度越来越大,这主要是因为发射器和接收器在高

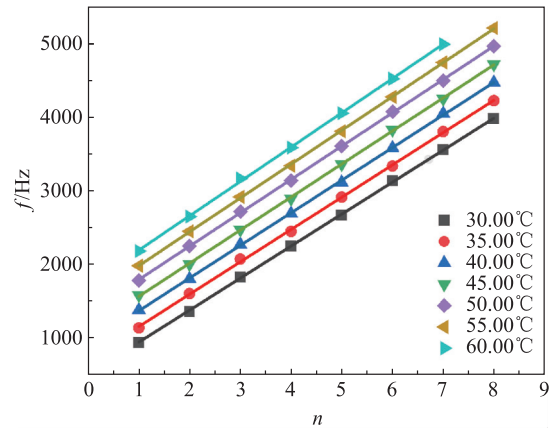


图 8 基于定距变频法测量频率随温度的变化特性

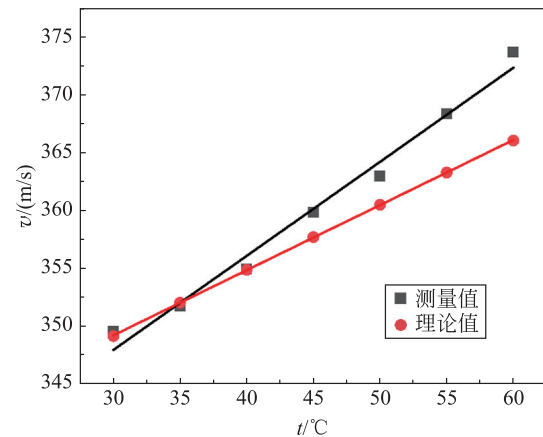


图 9 变温声速的测量值与理论值对比

温下响应性能有所下降导致,但最终结果满足实验设计要求。

4 与传统实验仪器对比分析

实验室中常用的声速测量原理为前述的定频

表 3 定距变频法测量声速修正后结果

x/cm	31.00	33.50	36.00	38.50	41.00	43.50
$\Delta f/\text{Hz}$	552.43	510.61	482.21	449.71	421.86	396.07
$v/(\text{m/s})$	342.51	342.11	347.19	346.28	345.93	344.58
$ \eta /\%$	0.77	0.89	0.58	0.31	0.22	0.17

表 4 基于定距变频法测量频率随温度的变化结果

$t/^\circ\text{C}$	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00	55.00	60.00
$\Delta f/\text{Hz}$	436.94	439.68	443.68	449.80	453.71	460.43	467.11
$v_{\text{测}}/(\text{m/s})$	349.55	351.74	354.94	359.84	362.97	368.34	373.69
$v_{\text{理}}/(\text{m/s})$	349.18	352.05	354.89	357.71	360.51	363.29	366.05
$ \eta /\%$	0.11	0.08	0.01	0.59	0.68	1.4	2.1

变距法,实验仪器示意图如图 10 所示^[2],S1 和 S2 为超声换能器,实验中需要准确找到超声换能器的本征频率,在该固定频率下开展室温声速的测量,为了进行对比,使用该传统装置测量了室温下($t=24.0^{\circ}\text{C}$, $v=345.70\text{m/s}$)的实验数据,结果如图 11 所示。

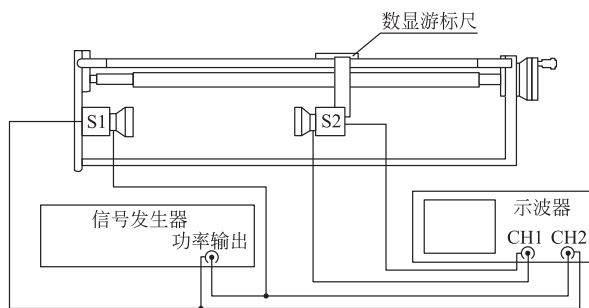


图 10 传统声速测量仪器示意图

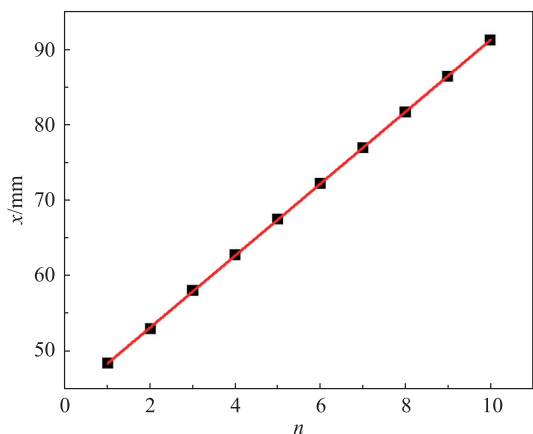


图 11 波腹位置 x 随波腹个数 n 的关系

通过图 11 可知,拟合数据斜率为 4.765mm ,即为相邻波峰之间的距离 $\frac{\lambda}{2}$,测得本实验超声换能器本征频率为 36.88MHz ,根据声速计算公式可知, $v = \lambda \cdot f = 351.466\text{m/s}$,相对误差为 1.7% 。

本文中研制的实验装置同样在室温时,对不同频率条件下的声速进行了系统测量(注:每一种频率条件下均满足定频变距法),结果显示在 4250Hz 情况下测得声速相对误差为 0.22% ,表明本设备不仅能够提供多频率条件下声速的测量,而且在选择合适频率条件下采用定频变距法可以较大幅度地减小实验误差。此外,本实验装置还可以采用定距变频法测量声速,本文采用该方法所测数据显示最小误差为 0.17% ,为实验室中全

面了解声速测量提供强有力支撑。截至目前为止,尚未见基于该方法测量声速的成熟可推广的实验设备。

在满足室温条件下测量声速的基本要求上,打破传统实验仪器功能单一的限制,本实验装置提供了变温($20\sim 60^{\circ}\text{C}$)条件下声速测量的环境,可以满足不同程度学生对实验探索的需求。从数据采集方式来看,本实验装置提供了示波器和电脑采集两种方式,可以更方便地借助专业声学软件对数据进行精密分析,强化学生的数字素养。

5 结语

本文基于驻波法原理,利用自主研发的可闻声波研究综合实验平台,采用传统的定频变距法和基于 FFT 的定距变频法分别测量了室温下空气的声速,并利用定距变频法测量了声速随温度的变化关系。结果显示:两种方法的测量误差均小于 1.0% ,定频变距法测量结果误差随着固定频率 f 的增大而波动,定距变频法测量结果误差随着发射器与接收器之间距离 x 的增大而减小。两种方法测量所得声速与理论值高度符合,表明该实验设备运行稳定,测量结果可靠。利用定距变频法测量声速随温度的变化关系的结果还表明,在测量温区内空气中的声速随着温度的升高而线性增加,测量误差随着温度升高而增大,但最大误差仅为 2.1% ,说明结果可信度高。通过与传统声速测量仪器进行横向比较可知,传统实验仪器功能单一,只能采用单一固定频率测量室温下的声速;而本文中研制的实验平台能够提供单频、变频及变温等多自由度的声速测量,满足了新形势下分层教学的需求。

本实验仪器属于综合性声速测量平台,定距变频法的应用,为后续研究不同压强和不同介质条件下声速的测量提供了良好方案支撑。

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[J].湖南科技大学学报,2013,28(1):120-123.
XIE C X, ZHANG Y T, HUANG D Z. Discuss on anharmonic phenomenon in experiment of sound speed measurement[J]. 2013, 28(1):120-123. (in Chinese)
- [2] 何佳清,霍剑青,陈信,等.大学物理基础与综合性实验

- [M]. 北京:高等教育出版社,2018:116-120.
- HE J Q, HUO J Q, CHEN J, et al. Fundamentals and Comprehensive Experiments of University Physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2018: 116-120. (in Chinese)
- [3] 丛晓燕, 吕刚, 曹学成. 声速测定实验的教学实践研究[J]. 大学物理实验, 2020, 33(5):39-41.
- CONG X Y, LYU G, CAO X C. The Teaching Practice Research of Sound Velocity Measurement Experiment [J]. Physical Experiment of College, 2020, 33(5): 39-41. (in Chinese)
- [4] 薛啸天, 宋文搞, 崔渔维, 等. 超声波声速测量实验的拓展[J]. 大学物理实验, 2021, 34(2):30-32.
- XUE X T, SONG W G, CUI Y W, et al. The Expansion of Ultrasonic Sound Velocity Measurement Experiment [J]. Physical Experiment of College, 2021, 34(2): 30-32. (in Chinese)
- [5] 吴鲁杰, 赵志强. 基于 Phyphox 软件的物理实验创新设计[J]. 物理教师, 2024, 45(5):61-63.
- WU L J, ZHAO Z Q. Innovative Design of Physics Experiments Based on Phyphox Software [J]. Physics Teacher, 2024, 45(5):61-63. (in Chinese)
- [6] 姚星星, 郑远. 基于手机传感器 Phyphox 的声速测量方法研究[J]. 大学物理实验, 2023, 36(3):74-77.
- YAO X X, ZHENG Y. Research on Sound Velocity Measurement Method Based on Mobile Phone Sensor Phyphox [J]. Physical Experiment of College, 2023, 36(3):74-77. (in Chinese)
- [7] 闫志涛, 敬天慧, 谭覃, 等. 基于超声波近完全相消相干测量声速[J]. 大学物理, 2022, 41(7):54-57.
- YAN Z T, JING T H, TAN Q, et al. Measurement of sound speed based on nearly complete destructive interference of ultrasound [J]. College Physics, 2022, 41(7):54-57. (in Chinese)
- [8] 彭刚, 许林, 彭朝阳, 等. 相位比较法测量空气中声速实验的改进研究[J]. 物理通报, 2024, 6:109-113.
- PENG G, XU L, PENG C Y, et al. Research on Improving the Experiment of Measuring Sound Velocity in Air Using Phase Comparison Method [J]. Physics Bulletin, 2024, 6: 109-113. (in Chinese)
- [9] 何雨航, 王吉有, 王狮, 等. 变频定距法测量声速[J]. 物理实验, 2012, 32(9):36-38.
- HE Y H, WANG J Y, WANG C, et al. Measuring sound speed by changing sound frequency in a fixed distance [J]. Physics Experimentation, 2012, 32(9):36-38. (in Chinese)
- [10] 教育部高等学校大学物理课程教学指导会. 理工科类大学物理课程教学基本要求、理工科类大学物理实验课程教学基本要求[M]. 北京:高等教育出版社, 2023: 17-21.
- Teaching and Guidance Committee of Higher Education School for University Physics Courses. The basic requirements for teaching physics courses in science and engineering universities, and basic requirements for teaching physics experiment courses in science and engineering universities [M]. Beijing: Higher Education Press, 2023: 17-21. (in Chinese)
- [11] 石明吉, 罗鹏晖, 刘斌, 等. 驻波法与相位比较法声速测量实验的对比研究[J]. 物理通报, 2018, 9:89-92.
- SHI M J, LUO P H, LIU B, et al. Comparative Study on Sound Speed Measurement Experiment Based on Standing Wave Method and Phase Comparison Method [J]. Physics Bulletin, 2018, 9:89-92. (in Chinese)