DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413290

超声共振风速风向传感器共振态温度补偿方法*

曾祥豹[1,2],袁宇鹏[2],廖崧琳[2],王 露[2],余 华[1]
(1. 重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400000; 2. 中国电子科技集团公司第二十六研究所 重庆 400060)

摘 要:风能发电、航空航天、气象等重点行业对风速风向的高精度、高可靠检测具有迫切需求。与传统机械式、超声对射式、超声反射式风速风向传感器相比,提出的超声共振式风速风向传感解决方案具有体积小、精度高、无机械磨损的显著优势。针对复杂工况环境条件下超声共振式风速风向传感器的精度偏移难题,建立了超声共振式风速风向传感器的误差来源理论模型,开展了不同温度环境传感器测试实验,分析了相应传感器的输出性能,构建了工作环境温度与传感器共振频率点的关联关系,实现了不同环境条件下传感器基于共振点频率的温度补偿。搭建了传感器风洞试验系统,开展了不同温度条件下的传感器风洞试验,试验结果表明,提出的共振态温度补偿后的超声共振式风速风向传感器风速测量精度显著提升,补偿后在<15 m/s 的风速范围内风速测量精度时可达±0.3 m/s、在 15~50 m/s 风速范围内精度可到±2.3%。传感器测量精度随温度漂移显著降低,在环境温度 17.1℃时测量误差降低至 2.30%,环境温度 29.2℃时测量误差降低至 2.09%,与传统超声对射/反射式相比精度提升 40%以上。综上所述,该研究为风电场风机的发电效率提升、气象领域的要素测量精度提升等重点领域提供更有效的风速风向测量支撑。

关键词:风速风向传感器;共振态温度补偿;风速测量
中图分类号:TH765 **文献标识码**:文献标识码 A **国家标准学科分类代码**:460.40

A temperature compensation method for the ultrasound resonance wind speed and direction sensor in resonance state

Zeng Xiangbao[1,2], Yuan Yupeng[2], Liao Songlin[2], Wang Lu[2], Yu Hua[1]
(*1. College of Optoelectronic Engineering of Chongqing University Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems, Chongqing 400040, China; 2. The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China*)

Abstract: Wind power generation, aerospace, meteorology, and other key industries have an urgent need for high-precision and high-reliability detection of wind speed and direction. Compared with the traditional mechanical, ultrasonic convective, and ultrasonic reflective wind speed and direction sensors, the ultrasonic resonant wind speed and direction sensing solution in this article has significant advantages of small size, high accuracy, and no mechanical abrasion. To address the problem of accuracy shift of ultrasonic resonance wind speed and direction sensor under complicated operating conditions, the theoretical model of the error source for the ultrasonic resonance wind speed and direction sensor is formulated. Different temperature environment tests are carried out to analyze the performance of the sensors. The correlation relationship between the working environment temperature and the resonance frequency point of the sensors is constructed, which achieves the temperature compensation of the sensors based on the frequency of the resonance point under different environmental conditions. By establishing a sensor wind tunnel test system, the wind tunnel test of the sensors under different temperature conditions is carried out. Test results show that the wind speed measurement accuracy of the proposed ultrasonic resonance wind speed and direction sensor is significantly improved after the temperature compensation of the resonance state. After the compensation, the accuracy of wind speed can reach ±0.3 m/s in the wind speed range of less than 15 m/s, and ±2.3% in the wind

收稿日期:2024-09-18 Received Date: 2024-09-18
*基金项目:国家自然科学基金面上项目(62374022)、中央高校基本科研业务费国防专项(2024CDJGF-035)、重庆市技术创新与应用发展重大项目(CSTB2024TIADSTX0047)、新重庆青年创新人才项目(CSTB2024NSCQ-QCXMX0096)资助

speed range of 15~50 m/s. The sensor's measurement accuracy significantly decreases with temperature drift, reducing the measurement error to 2.30% at an ambient temperature of 17.1℃ and 2.09% at an ambient temperature of 29.2℃, improving the accuracy by more than 40% compared with the traditional ultrasonic convection/reflection type. In conclusion, it provides support for more effective wind speed and direction measurements for key areas such as improving the power generation efficiency of wind farm turbines and improving the accuracy of elemental measurements in the meteorological field.

Keywords: wind speed and direction sensor; resonant state temperature compensation; wind speed measurement

0 引 言

风是自然界中最常见的一种自然现象,由空气流动引起,风速与风向的精确测量对社会实际生产生活过程具有重要的意义。在气象、军事、舰船航行、航空航天、风能发电、铁路桥梁、城市与森林消防等领域,均需要对风速风向进行测量,以保障生产生活的顺利[1]。

目前风速风向传感器主要包括机械式、超声式、热线式、激光式和微机械式等,超声式风速风向传感器由于其灵敏度高、精度高、无启动风速的显著优势,已经逐渐替代传统机械式风速风向传感器成为主流技术。国内外对超声波式风速风向传感器研究起步早,从二维超声波测风的研究到三维超声波测风的研究,再到无人机的实际应用,实用技术上发展迅速,现阶段研究以超声对射/反射式风速风向传感器为目标,对射/反射式超声波风速风向传感器采用固定频率发射超声进行测量,其在测量过程中会存在以下问题:1)块材式超声波换能器是振动模式,长时间振动后,超声波换能器性能下降,中心频率偏移,导致接收信号发生衰减,当到达一定衰减或偏移后,信号会衰减至接收值以下,无法接收到信号,最终导致无法测量风速风向;2)在各种工作环境下长时间工作,超声波测风仪表面会出现磨损或杂物堆积,导致声程发生变化,风速计算与声程存在线性关系,导致风速测量偏大或偏小;3)为了满足户外防尘防水要求,采用全封闭结构,但超声波在不同温度下其速度会发生明显变化,计算过程中,风速计算与声速呈强相关性,不同温度下测量的风速风向结果出现明显偏差;4)超声对射/反射式风速风向传感器体积大,在寒冷环境下易发生结冰问题,下雨环境易产生积水问题,从而导致传感器失效。这些都是现阶段超声式风速风向传感器迫切需要解决的问题。

当前针对温度补偿有两种解决方法,第一种将采集的时间信号进行温度补偿,根据超声波在空气中的传播时间估算温度,但由于界面影响和时间采样问题,补偿效果不佳,另一种采用惠斯通电桥结合热敏电阻,即温度传感器方案,同样存在内外温差的问题,导致温度补偿不准确。超声共振式风速风向传感器基于超声共振的方式进行风速风向测量,共振频率和温度具有强相关性,因此,提出了采用共振态温度补偿的方式解决温度补偿不准确的问题。3 种补偿方法对比为:

1)时间估计法不增加额外器件,但加热情况下超声收发的固-气-固下界面温度不同导致接收时间不准确,不同温度下温度补偿差异大,常用于室内温场测量,极端环境不适用。

2)温度传感器测量通过直接测量温度进行补偿,可靠性好,但增加额外器件加热情况下,温度传感器在风传感器内部,内外温差导致补偿偏差大,常用于户外非加热情况下温度补偿,极端环境不适用。

3)共振态温度补偿不增加额外器件,共振频率和温度强相关,补偿线性度好、精度高,但需要进行初始共振频率校正,各类环境均适用。

1 超声共振式风传感器风速风向测量原理

超声共振式风速风向传感器是基于超声共振的原理进行风速风向测量,相比于超声对射/反射式风速风向传感器,具有体积小、精度高、长时间工作无漂移等特点,如图 1 所示。

图 1 超声波风速风向传感器

Fig. 1 Ultrasonic wind speed and direction sensor

超声共振式风速风向传感器工作原理如图 2 所示,它主要利用小型腔室内超声波的共振和时移来实现风速风向的测量,由于发射波束与风向垂直,两者叠加所形成的波束方向由风速与声速的比值决定。在常温常压下,短时间内假设空气的声速数值不变,则波束偏角与风速之间存在直接关系,风速小,则偏角小,风速大,则偏角大。

为了实现风速风向测量,根据测量模型,需要形成呈等边三角形排列的超声阵列,测量模型如图 3 所示,当风

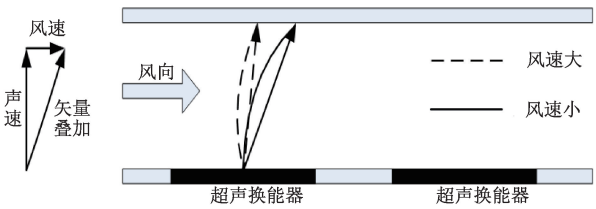

图 2　超声共振式风速风向传感器测风

Fig. 2　Wind measurement diagram of ultrasonic resonance wind speed and direction sensor

经过等边三角形的超声阵列,超声阵列发射的超声波会在风的作用下发生对应的时移或相移[2-6],分别计算三角形 3 个边的时移,通过解算即可得到风速风向。

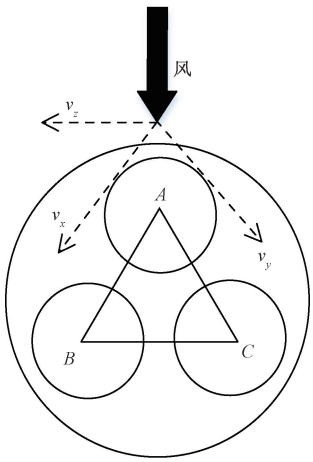

图 3　测风计算模型

Fig. 3　Wind measurement calculation model

以 A 为顶点,当风吹过时,会产生沿等边三角形的 3 个方向的风分量,风分量引起各个方向到达时间不同,通过时差法,进行相互之间的收发,各个方向分量的时间分别是,A 发 B 收,时间为 T_{AB},B 发 A 收,时间为 T_{BA},A 发 C 收,时间为 T_{AC},C 发 A 收,时间为 T_{CA},B 发 C 收,时间为 T_{BC},C 发 B 收,时间为 T_{CB},由于距离 L 固定,则此时:

$$T_{AB} + T_{\text{链路}AB} + T_{\text{延时}AB} = \frac{L}{c - v_x} \tag{1}$$

超声波速度可表达为:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \tag{2}$$

其中,γ 表示气体的定压比热 C_P 与定容比热 C_V 之比,R 表示摩尔气体常数,T 表示绝对温度,M 表示气体的分子量,由式(1) 和(2) 可计算出:

$$T_{AB} = \frac{L}{\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} - v_x} - T_{\text{链路}AB} - T_{\text{延时}AB} \tag{3}$$

同理可得:

$$T_{BA} = \frac{L}{\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} + v_x} - T_{\text{链路}BA} - T_{\text{延时}BA} \tag{4}$$

根据实际设计,在电路规划上保证了 $T_{\text{链路}AB} = T_{\text{链路}BA}$ 和 $T_{\text{延时}AB} = T_{\text{延时}BA}$,两者进行相减,去掉中间过程的影响,由式(3)和(4)可计算出:

$$\Delta t_x = T_{AB} - T_{BA} = \frac{L}{\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} - v_x} - \frac{L}{\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} + v_x} \tag{5}$$

同理可得:

$$\Delta t_y = T_{AC} - T_{CA} = \frac{L}{\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} - v_y} - \frac{L}{\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} + v_y} \tag{6}$$

$$\Delta t_z = T_{BC} - T_{CB} = \frac{L}{\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} - v_Z} - \frac{L}{\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} + v_Z} \tag{7}$$

利用定时器可以准确得到 Δt_x、Δt_y、Δt_z 的值,L 是超声波传播的声程为固定值,γ、R、M 也均为固定值,T 表示绝对温度为变量,则式(5) ~ (7) 可以计算出:

$$v_x = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M} + \left(\frac{L^2}{\Delta t_x{}^2}\right)} - \frac{L}{\Delta t_x} \tag{8}$$

$$v_y = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M} + \left(\frac{L^2}{\Delta t_y{}^2}\right)} - \frac{L}{\Delta t_y} \tag{9}$$

$$v_z = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M} + \left(\frac{L^2}{\Delta t_z{}^2}\right)} - \frac{L}{\Delta t_z} \tag{10}$$

根据三角关系,由式(8)和(9)可推算出风速 v 为:

$$v = \sqrt{\frac{\left(\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}+\left(\frac{L^2}{\Delta t_x{}^2}\right)} - \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}+\left(\frac{L^2}{\Delta t_y{}^2}\right)} + \frac{L}{\Delta t_y} - \frac{L}{\Delta t_x}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}+\left(\frac{L^2}{\Delta t_x{}^2}\right)} - \frac{L}{\Delta t_x} + \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}+\left(\frac{L^2}{\Delta t_y{}^2}\right)} - \frac{L}{\Delta t_y}\right)^2}{3}} \tag{11}$$

由式(10)和(11)可计算风向 φ:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}+\left(\frac{L^2}{\Delta t_z{}^2}\right)} - \frac{L}{\Delta t_z}}{\sqrt{\frac{\left(\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}+\left(\frac{L^2}{\Delta t_x{}^2}\right)} - \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}+\left(\frac{L^2}{\Delta t_y{}^2}\right)} + \frac{L}{\Delta t_y} - \frac{L}{\Delta t_x}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}+\left(\frac{L^2}{\Delta t_x{}^2}\right)} - \frac{L}{\Delta t_x} + \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}+\left(\frac{L^2}{\Delta t_y{}^2}\right)} - \frac{L}{\Delta t_y}\right)^2}{3}}} \right) \tag{12}$$

由式(11)和(12)可知,风速和风向的计算值均与温度 T 有相关性,实际工作中温度的准确性直接影响风速和风向的测量精度,风速风向计算由分量 v_x、v_y、v_z 得出,为便于计算,后续采用 v_x 进行讨论计算。

2 温度引起的测量误差分析

传统的风速风向传感器通常采用内置温度传感器的方式来测量温度进行补偿,为了满足户外防尘防水要求,设置的温度传感器完全密封在内部,测量的温度是风速风向传感器内部温度,但超声波传感器实际工作在外部环境中,内部温度相较外部温度有差异,导致温度补偿不准确,使得测量计算的风速风向值存在偏差。声共振风速风向传感器采用 C8051F 系列主控的内部温度传感器进行内部温度数据采集,精度为 0.1℃,外部温度使用温箱进行设置(温箱型号为 mc711,温箱精度为 0.1℃),在实际使用时存在加热状态和不加热状态两种,在不同温度下分别测试非加热状态和加热状态下超声共振式风速风向传感器内外部温度,温度对比数据如表 1 所示。

表 1 超声共振式风速风向传感器内外温度对比

Table 1 Comparison of internal and external temperatures of the ultrasonic resonance wind speed and direction sensor

(℃)

序号	内部温度(不加热/加热)	外部温度	偏差(不加热/加热)
1	38.4/38.4	30.3	8.1/8.1
2	21.3/59.2	10.2	11.1/49.0
3	15.7/43.1	0.6	15.1/43.5
4	2.3/29.1	−20.1	17.8/49.2
5	−13.2/10.1	−40.5	27.3/50.6

由表 1 可知,超声共振式风速风向传感器在加热状态下,内外温差约在 40~50℃,这是基于加热恒温控制的设计,在 38.4℃情况下温差为 8.1℃是由于加热启动温度设置为 25℃。在非加热状态下,随着温度的降低,超声共振式风速风向传感器内外温差逐渐增大,这是由于内部芯片在低温下具有更高的功率消耗,使内部温度高于实际环境温度。

超声波风速风向传感器应用于测风环境下,测风环境通常在户外,面临各类天气的考验,在常温环境下,超声波风速风向传感器内外温差相对较小,当在低温结冰情况下,需要进行加热才能使整个超声波风速风向传感器免受结冰的影响而正常工作,这也导致了传统的超声波风速风向传感器内外温差大,难以进行准确的温度补偿。

超声共振式风速风向传感器加热情况下工作时,当外部温度为−40℃,其内部温度为 10.1℃,内外温差大,若采用内置的温度传感器进行温度补偿,会导致实际计算中用于计算的声速取值差别大,造成计算出的风速和风向存在较大的偏差[7-10]。

对于空气而言,主要参数为温度影响,由声速经验公式可得:

$$c = 331.45 + 0.606 \times T \tag{13}$$

其中,T 为温度,在温度范围为−40℃~60℃范围内,声速的范围为 307.21~367.81 m/s,声速变化范围较大,需要在计算中进行补偿计算才能减小风速风向测量的误差。

由式(8)可知,式中 $\frac{L}{\Delta t_x}$ 的值在风速确定时为固定值,以风速 10 m/s 作为标准分析,这是由于风速越高误差越大,实际中风速大多小于 10 m/s,该取值具有代表性。风速 10 m/s 时,$\frac{L}{\Delta t_x}$ 值约为 315,即整体可表达为:

$$v_x = \sqrt{c^2 + 315^2} - 315 \tag{14}$$

以更易出现误差的低温环境下加热状态进行误差分析,在−40℃情况下,内部温度约为 10℃左右,在 10℃情况下,内部温度约为 60℃左右,为便于误差分析,将 10℃作为标准点,此时风速约为 337.5 m/s,在−40℃~60℃的范围内,声速对应范围为 307.21~367.81 m/s,将声速范围带入式(14),风速分量的标量值与温度影响下声速变化范围的对应变化趋势如图 4 所示。

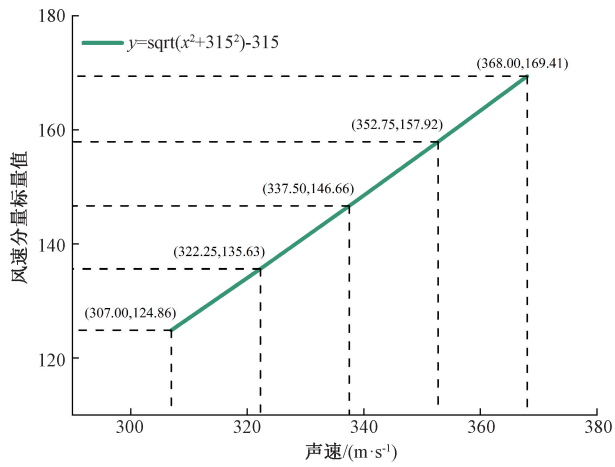

图 4 声速变化与风速分量标量值对比

Fig. 4 Speed of sound change vs. scalar value of wind speed component

由图 4 可知,在声速为 307 m/s 时,风速分量标量为 124.86;当声速为 368 m/s 时,风速分量标量为 169.41;常规状态为声速为 337.5 m/s 时,风速分量标量为

146.66,根据计算可知,在声速为 368 m/s(对应 60℃)时,其误差约为 15.5%,在声速为 307 m/s(对应-40℃)时,其误差约为 14.8%,由此可知,超声共振式风速风向传感器采用内部温度补偿存在较大的补偿误差,导致风速风向计算误差,难以实现风速风向的高精度测量。

3　共振态温度补偿方法

超声共振式风速风向传感器是基于超声共振的原理进行风速风向测量,其共振频率会跟随温度、共振腔高度、压强变化而变化,由于超声共振式风速风向传感器装配完成后高度基本不变,工作环境为常规自然环境,压强基本恒定,因此共振频率的主要影响因素为工作环境温度,因此,可以根据超声共振式风速风向传感器工作时的超声共振频率来对工作温度进行反向推导,得到实际的工作温度,实现共振态温度补偿。

当在极端环境下或某些特定环境下时,压强会发生一定的变化,实际环境中压强约 1 bar,超声波速度与压强关系是一个复杂的问题,通过仿真不同温度条件下和不同压强条件下超声波速度,如表 2 所示。

表 2　超声波在不同温度和压力下的传播速度

Table 2　Ultrasonic air propagation velocity at different temperatures and pressures

温度/℃	压力 1 (1 bar)	压力 2 (6 bar)	压力 3 (12 bar)	压力 4 (17 bar)
-8	324.69	322.09	319.06	316.64
0	330.67	328.35	325.68	323.55
10	337.95	335.95	333.66	331.85
20	345.01	343.29	341.34	339.82
40	358.57	357.32	355.93	354.88
50	365.09	364.03	362.88	362.02

由表 2 可知,在同一温度的不同压强下,1 bar 压强到 17 bar 压强下声速变化约为 8 m/s,该情况下声速变化不大,且根据超声共振的温度补偿原理,此时共振点偏移约 2.0%,因此压强的变化对于采用共振点温度补偿的实际影响较小。

3.1　共振态与共振频率的关系

超声共振式风速风向传感器是基于超声在平板内共振的方式进行风速风向的测量[11-13],由 2 个相对设置的平板构成超声波换能器的发射面和反射面,3 个超声波换能器排列在发射面组成等边三角形,由此构成最基本的超声平板共振模型。超声波换能器发射特定频率的连续波,发射波与反射波进行相互叠加,经过多次反复的反射叠加,在平板内形成稳定的驻波,引起超声的平板共振,其实质为空间内空气柱的共振,如图 5 所示。

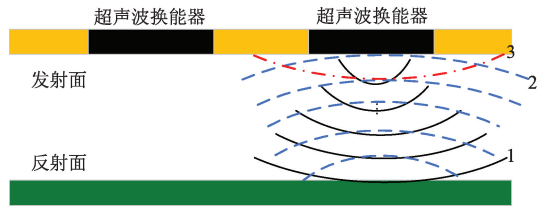

图 5　超声平板共振原理

Fig. 5　Principle of ultrasonic plate resonance

由图 5 可知,其中一个换能器发射连续的超声波信号,第 1 次发射的超声波到达反射面,经过反射形成第 2 次超声波信号,第 2 次超声波到达发射面再次反射,形成第 3 次超声波信号,循环往复,由于每次超声信号强度会发生衰减,最终经过多次反射超声信号完全衰减。通过反复的反射,发射波和前期反射波互相叠加,在某些特定状态下可以形成驻波,达到超声平板干涉的条件。若第 1 次发射声波表示为 e^{ikL}(设振幅为 1),经过来回的振幅衰减,振幅衰减为 $\delta(\delta<1)$,则接收换能器上的声压为:

$$Ae^{i\Phi}=\frac{e^{ikL}}{1-\delta e^{i\varphi}} \tag{15}$$

其中,$\varphi=2kL+\varphi r$,$k=2\pi f/c$,c 是声速,L 为间距,φ_r 为发射换能器和平板之间超声反射时的声压相位突变,对于气体而言,$\varphi_r=0$,则由式(15)可得:

$$A=\frac{1}{\sqrt{1-2\delta\cos\varphi+\delta 2}} \tag{16}$$

由式(16)可知,当发生共振时,振幅达到极大值,为了使系统达到振幅最大的共振点,可以通过改变 φ 中的 f 或者 L 来实现,根据实际应用,L 表示距离,距离需要保持不变,可以通过改变频率 f 的方式来实现共振。

3.2　共振态温度补偿实现方法

超声共振式风速风向传感器的共振频率主要随温度变化而变化,基于此原理可根据当前的共振频率推算出当前外部环境的温度,无需温度传感器,根据共振频率推算的温度值作为超声波声速计算的温度值,可以准确计算出实际测量时的超声波速度,用于风速风向的计算补偿。将超声共振式风速风向传感器 1 和超声共振式风速风向传感器 2 在型号为 mc711 的温箱内的不同温度下进行测试,温箱精度为 0.1℃,分辨率为 0.01℃,测试选择-50.00℃~60.00℃,每隔 10℃测试一个点,温箱内测试温度无法到达准确的测量点,在不同温度下记录其共振频率,如表 3 所示。根据表 3,绘制对应的曲线并进行拟合,共振频率与温度对应曲线如图 6 所示。

表 3 不同温度下共振频率测试情况

Table 3 Resonance frequency test at different temperatures

温度/℃	超声共振式风速风向传感器 1 共振频率/kHz	超声共振式风速风向传感器 2 共振频率/kHz
-49.92	30.3	31.0
-40.03	31.2	31.8
-29.97	32.1	32.5
-20.01	32.8	33.2
-10.02	33.6	34.1
-0.06	34.5	34.9
10.03	35.2	35.6
20.05	36.1	36.5
29.99	36.8	37.3
40.02	37.6	38.2
50.05	38.5	38.9
60.01	39.2	39.7

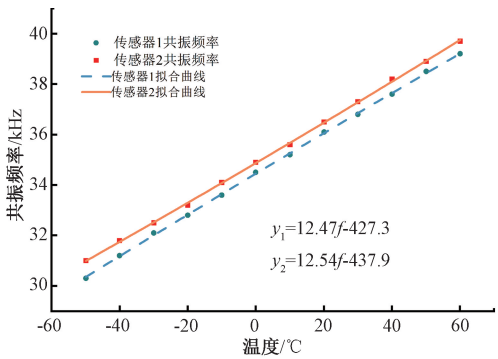

图 6 超声共振频率随温度变化

Fig. 6 Variation of ultrasonic resonance frequency with temperature

根据超声共振式风速风向传感器的共振频点变化随温度变化的拟合表达式可知,其斜率大小一致,不同之处在于在 y 轴方向进行了平移,根据图 6 分析可知,这是由于加工和装配等误差累积的原因,导致不同的超声共振式风速风向传感器在同一温度下具有不同的共振频率点。

为了验证不同的超声共振式风速风向传感器在同条件下的共振频率分布情况和不同温度下共振点随温度变化情况,选择 10 台不同的超声共振式风速风向传感器在 10℃、25℃和 40℃条件下进行共振频率点测试,这里选择多台同一加工高度的超声共振式风速风向传感器进行测试,不采用不同的共振腔加工高度,因为最终加工和装配后由于累积误差的原因,实际的共振腔高度并不是加工高度,选择多台同一加工高度的共振腔其最终的高度累积误差分布在加工误差附近,对实际应用更具有代表性。10℃、25℃和 40℃条件由温箱提供,温箱型号为 mc711,温箱精度为 0.1℃,温箱内测试温度无法到达准确的测量点,调整至接近的温度点进行测试,实际微调结果为 10.03℃、25.02℃和 40.03℃,为方便表述,这里取整为 10℃、25℃和 40℃。在 10℃、25℃和 40℃条件下超声共振式风速风向传感器共振点如表 4 所示。

表 4 不同超声共振式风速风向传感器在 10℃、25℃和 40℃时共振频率

Table 4 Resonance frequencies of different ultrasonic resonance wind speed and direction sensors at 10 ℃, 25 ℃ and 40 ℃ (kHz)

超声共振式风速风向传感器编号	10℃时共振频率	25℃时共振频率	40℃时共振频率
1	35.4	36.6	37.8
2	35.3	36.3	37.4
3	35.3	36.5	37.7
4	35.2	36.1	37.4
5	35.1	36.5	37.6
6	35.3	36.8	38.0
7	35.4	36.6	37.8
8	35.1	36.8	38.2
9	35.2	36.3	37.6
10	35.3	36.5	37.7

根据表 4 可知,在 10℃时,不同的超声共振式风速风向传感器存在不同的超声共振频率点,但其分布在一定范围内,说明加工误差和装配的误差引起的累积误差在一定误差范围内;在 25℃和 40℃时,共振频率升高,但其依旧分布在一定范围内,说明温度和共振频率具有相关性,对应曲线如图 7 所示。

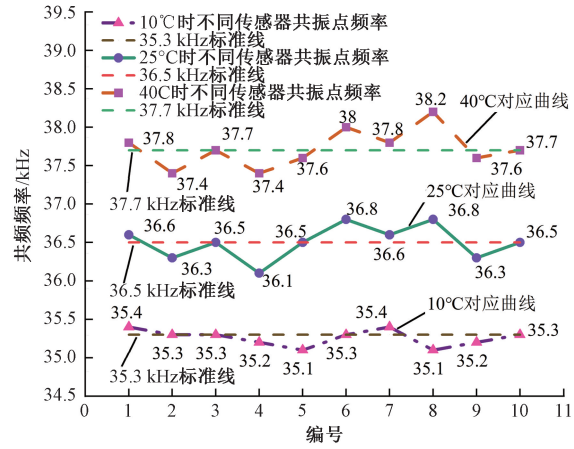

图 7 不同超声共振式风传感器在 10℃、25℃和 40℃共振频率对比

Fig. 7 Comparison of resonance frequencies of different ultrasonic resonance wind sensors at 10 ℃, 25 ℃ and 40 ℃

由图 7 可知,超声共振式风速风向传感器,在 10℃条件下共振频率分布在 35.1~35.4 kHz 之间,频率分布中心线为 35.3 kHz;在 25℃条件下共振频率分布在 36.1~36.8 kHz 之间,频率分布中心线为 36.5 kHz;在 40℃条件下共振频率分布在 37.4~38.2 kHz 之间,频率分布中心线为 37.7 kHz,不同的超声共振式风速风向传感器在不同温度下,其平均值随温度具有相关性变化。共振态温度补偿主要考虑超声共振式风速风向传感器的温度与共振频率的变化关系,在不同温度下频率差值如图 8 所示,频率变化 1 对应 25℃和 40℃的差值,频率变化 2 对应 10℃和 40℃的差值。

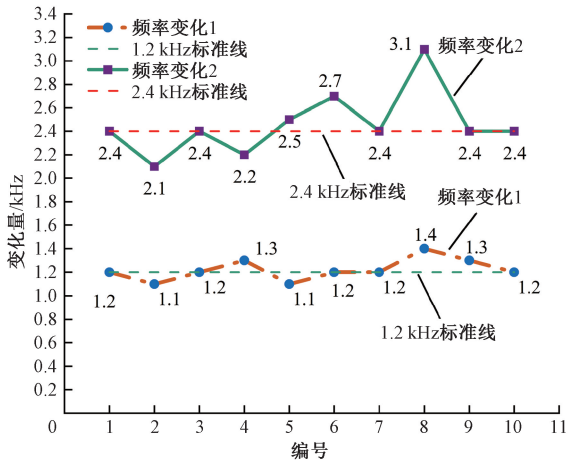

图 8　不同超声共振式风传感器偏差值

Fig. 8　Deviation values of different ultrasonic resonant wind sensors

由图 8 可知,频率变化 1 对应 25℃和 40℃的差值,对应差值分布 1.1~1.4 kHz,平均值为 1.2 kHz;频率变化 2 对应 10℃和 40℃的差值,对应差值分布 2.1~3.1 kHz,平均值为 2.4 kHz;根据对应变化可知,共振频率与温度变化的平均值为 0.08 kHz/℃,即温度每变化 1℃,对应频率变化约 0.08 kHz。不同的超声共振式风速风向传感器变化率基本相同,说明使用共振频率对温度进行补偿具有可行性,其补偿基本表达式可表示为:

$$f_{\text{共振频率}} = f_{\text{初始频率}} + 0.08 \times T \tag{17}$$

同时,根据图 6 测试情况可知,每一台超声共振式风速风向传感器由于加工、装配等问题导致不同的高度误差,不同的高度会产生不同的 $f_{\text{初始频率}}$,因此需要确定初始的共振频率,根据其表达式,在特定温度 T 下测试其共振频率,并记录当前工作的实际温度,即可计算出初始频率值 $f_{\text{初始频率}}$。

由式(13)和(17)可以求得补偿后声速为:

$$c = 331.45 + 7.575 \times (f_{\text{共振频率}} - f_{\text{初始频率}}) \tag{18}$$

式(18)建立了共振点 f 与声速 c 之间的关系,具有线性相关性,通过式(18)可以根据共振频率点计算出超声共振式风速风向传感器的实际工作温度,进一步可以计算出实际工作时的声速 c,在不使用温度传感器的情况下,有效实现了基于共振态的温度补偿[14-16]。

4　实验测试结果

对基于共振态温度补偿的超声共振式风速风向传感器进行测试,测试系统如图 9 所示,风洞系统包括了高精度风洞、高精度码盘、风速标准源、标定测试软件和专用夹具,其中,风洞型号为 RE-2000 的定制直流风洞,风速输出范围为 0~60 m/s;风速标准源为经过计量的 CEM 高精度差压计 DT8920,风速测量范围为 1.00~80.00 m/s,精度为 0.01 m/s。

图 9　风洞测试系统

Fig. 9　Wind tunnel test system

将采用共振态温度补偿的超声共振式风速风向传感器和未采用共振态温度补偿的超声共振式风速风向传感器进行实际测试,测试选取在同一位置的风洞,早上和下午分别进行,温度分别为 17.1℃和 29.2℃(温度计型号为 LE511,精度 0.1℃,分辨率 0.1℃),这是由于风洞本身偏大,无法在温箱内进行实验,这里依靠自然温度进行实验验证,分别对 0.00、3.50、10.00、20.00、34.00 和 50.00 m/s 进行测试,实际测试中风洞无法达到准确要求值,经过精细控制逼近要求值,测试数据如表 5 和表 6 所示[17-19]。

表 5　17.1℃情况下风速测试情况

Table 5　Wind speed test results at 17.1 ℃

风速/($m \cdot s^{-1}$)	未补偿/($m \cdot s^{-1}$)	共振态温度补偿/($m \cdot s^{-1}$)	误差对比(未补偿/自补偿)/%
0.00	0.05	0.02	—
3.42	3.56	3.49	4.09/2.04
9.96	10.48	9.77	5.22/1.91
20.12	19.17	20.55	4.72/2.14
34.07	35.81	33.43	5.11/1.88
49.91	52.43	51.06	5.05/2.30

表 6 29.2℃情况下风速测试情况

Table 6 Wind speed test results at 29.2 ℃

风速/($m \cdot s^{-1}$)	未补偿/($m \cdot s^{-1}$)	共振态温度补偿/($m \cdot s^{-1}$)	误差对比(未补偿/自补偿)/%
0.00	0.06	0.03	—
3.36	3.51	3.42	4.46/1.78
10.02	9.55	10.23	4.69/2.09
19.98	19.15	20.38	4.15/2.00
34.10	35.57	33.45	4.31/1.91
50.20	52.36	51.23	4.30/2.05

由表 5 和 6 绘制对应曲线,图中曲线展示测量值及对应每个测量值与标准值的偏差,17.1℃时风速测量情况与标准偏差情况如图 10 所示。

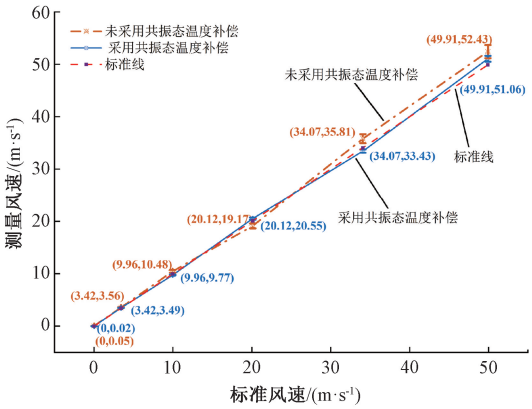

图 10 17.1℃时风速测量情况与标准偏差

Fig. 10 Wind speed measurement and standard deviation at 17.1℃

由图 10 可知,在 17.1℃时,随着风速的增大,采用共振态温度补偿和未采用共振态温度补偿的标准偏差均越来越大,但采用共振态温度补偿的最大偏差为 2.30%,未进行补偿的超声共振式风速风向传感器最大偏差为 5.22%,且采用共振态温度补偿的超声共振式风传感器在每个测试点的偏差情况均优于未采用共振态温度补偿的超声共振式风传感器。

29.2℃时风速测量情况与标准偏差情况如图 11 所示。

由图 11 可知,在 29.2℃时,随着风速的增大,采用共振态温度补偿和未采用共振态温度补偿的标准偏差均越来越大,采用共振态温度补偿的最大偏差为 2.09%,未进行补偿的超声共振式风速风向传感器最大偏差为 4.69%,且采用共振态温度补偿的超声共振式风传感器在每个测试点的偏差情况均优于未采用共振态温度补偿的超声共振式风传感器。

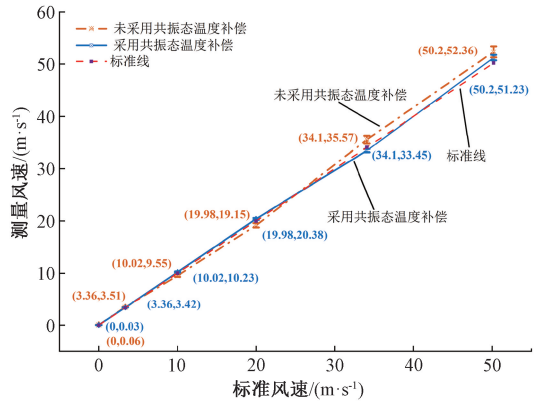

图 11 29.2℃时风速测量情况与标准偏差

Fig. 11 Wind speed measurement and standard deviation at 29.2 ℃

综上所述,未进行补偿的超声共振式风速风向传感器在 17.1℃误差为 5.22%,在 29.2℃是误差为 4.69%,这是由于传感器电路板内部温度约为 40℃,越接近该温度风速值误差越小。补偿后的超声共振式风速风向传感器在 17.1℃误差为 2.30%,在 29.2℃是误差为 2.09%,在不同温度下精度基本保持不变。实验表明,共振态温度自补偿可以有效提高风速风向测量精度,通过共振态温度补偿测量精度提高了约 3%,在不同温度下风速测量精度维持在±0.3%以内。

5 结 论

1)提出共振态温度补偿的方式,解决了超声共振式风速风向传感器工作时内外温度不一致导致温度补偿误差的问题,风速测量精度为±0.3 m/s(≤15 m/s)/±2.3%(15~50 m/s),优于传统超声波风速风向传感器±0.5 m/s(≤15 m/s)/±4%(15~50 m/s)的测量指标。相对于未经过共振态温度补偿的超声共振式风速风向传感器,经过共振态温度补偿的超声共振式风速风向传感器测量精度提高了约 3%,且风速测量一致性≤±0.3%,整体风速测量精度优于传统超声波风速风向传感器,共振态温度补偿可以有效提高风速风向测量精度和测量稳定性。

2)共振态温度补偿的方法对超声共振式风速风向传感器具有普遍适用性,在当前共振腔高度确定的情况下,温度与共振频率的变化率约为 0.08 kHz/℃。

3)每一台超声共振式风速风向传感器由于加工误差、装配误差等累积误差会导致不同的高度误差,从而产生了不同的初始频率,需要对初始频率进行计算和修正后,才可准确进行共振态温度补偿。

参考文献

[1] SHAN Z B, XIE SH J, LIU X S, et al. Arrayed ultrasonic wind speed and direction measurement based on the BNF-FLOC-MUSIC algorithm[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 379(2): 115908.

[2] LIU H ZH, WANG X Y, LIU CH B, et al. A high-accuracy ultrasonic gas flowmeter based on scandium-doped aluminum nitride piezoelectric micromachined ultrasonic transducers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 7510510.

[3] SHAN Z B, HAN M X, LIU X S, et al. Ultrasonic wind vector measurement based on quadratic correlation two-frequency phase method[J]. ISA Transactions, 2024, 2(1): 031235.

[4] LI X B, WANG X Y, ZUO X Y, et al. Wind speed and direction measurement method based on intelligent optimization algorithm[J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(2): 024901.

[5] 李浩琪,行鸿彦,王水璋, 等. 多反射式超声波测风模型及算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9):110-118.
LI H Q, XING H Y, WANG SH ZH, et al. Multi-reflection ultrasonic wind measuring model and algorithm research[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2023, 37(9): 110-118.

[6] 朱燕萍,王树臣,程朋飞, 等. 基于 DSP 的四声道超声气体流量测量技术研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(20):81-87.
ZHU Y P, WANG SH CH, CHENG P F, et al. Research on ultrasonic flow measurement technology of four-channel gas based on DSP[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(20): 81-87.

[7] AZORIN-MOLINA C, ASIN J, MCVICAR T R, et al. Evaluating anemometer drift: A statistical approach to correct biases in wind speed measurement[J]. Atmospheric Research, 2018, 203: 175-188.

[8] ZHAN X B, YANG Y L, LIANG J, et al. Temperature effects and compensation in ultrasonic concentration measurement of multicomponent mixture[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2016, 252(12): 146-153.

[9] 吕迎春,田建艳,陈燕, 等. 超声定位中测距角度引入误差的补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(7):28-37.
LYU Y CH, TIAN J Y, CHEN Y, et al. Compensation method of the error caused by ranging angle in ultrasonic positioning[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 28-37.

[10] 刘良明,王高,梁海坚, 等. 基于超声测温的多区节螺旋型波导特性研究[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(3):131-136.
LIU L M, WANG G, LIANG H J, et al. Study on the characteristics of multi-zone truncated spiral waveguide based on ultrasonic temperature measurement[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(3): 131-136.

[11] WU Q, YOU B, ZHANG X, et al. Investigation of an active focusing planar piezoelectric ultrasonic transducer[J]. Sensors, 2024, 24(13): 4082.

[12] HUANG L J, HUANG S B, SHEN CH, et al. Coustic resonances in non-hermitian open systems[J]. Nature Reviews Physics, 2024, 6(1): 11-27.

[13] 孙彦招,张涛,郑丹丹, 等. 气体超声流量计换能器附近回流影响声束研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4):53-60.
SUN Y ZH, ZHANG T, ZHENG D D, et al. Acoustic beam propagation characteristics in ultrasonic gas flowmeter caused by reflux near transducer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 53-60.

[14] JIANG J J, DANG W J, DUAN F J, et al. An accurate ultrasonic wind speed and direction measuring method by combining time-difference and phase-difference measurement using coded pulses combination[J]. Applied Acoustics, 2020, 159(1): 107093.

[15] LIU SH Y, LI ZH P, WU T, et al. Determining ultrasound arrival time by HHT and kurtosis in wind speed measurement[J]. Electronics, 2021, 10(1): 93.

[16] SHAN Z B, HAN M X, LIU X S. A dual-frequency phase difference method for wind speed and direction measurements based on second-order fractional low-order covariance[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2024, 21(7): 1001005.

[17] VATANKHAH E, MENG Y Q, LIU Z H, et al. Characterization of high intensity progressive ultrasound beams in air at 300 kHz[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2023, 153(5): 2878-2886.

[18] CHEN X, ZHAN W. Effect of transducer shadowing of ultrasonic anemometers on wind velocity measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(4): 4731-4738.

[19] LI X B, WANG X Y, ZUO X Y, et al. Wind speed and direction measurement method based on intelligent optimization algorithm[J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(2): 024901.

作者简介

曾祥豹,2014 年于吉林大学获得学士学位,2017 年于吉林大学获得硕士学位,现为重庆大学博士研究生。主要研究方向为声学传感器。

E-mail: xiangbaozeng@sina.com

Zeng Xiangbao received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Jilin University in 2014 and 2017, respectively. He is currently a Ph. D. candidate at Chongqing University. His research interest is acoustic sensors.

余华(通信作者),1996 年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2001 年于华中科技大学获得硕士学位,2006 年于华中科技大学获博士学位,现为重庆大学光电工程学院教授、博士生导师、国家重大项目首席科学家。主要研究方向为 MEMS 微能源与传感器、光电子芯片等。

E-mail: yuhua@cqu.edu.cn

Yu Hua (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Harbin Engineering University in 1996, and received his master and Ph. D. degrees both from Huazhong University of Science &Technology in 2001 and 2006, respectively. He is currently a full professor affiliated with the College of Opto-electronic Engineering at Chongqing University. He serves as the Chief Scientist of National Major Science and Technology Projects. His main research interests include MEMS sensors, power MEMS, and opto-electronics chip.