

基于非线性拟合的自动气象站风向传感器校准控制研究

张敏¹, 张剑², 张朝明¹, 冯亚¹, 金拴根¹

(1. 山西省大气探测技术保障中心, 太原 030002;

2. 忻州市气象局, 山西 忻州 034000)

摘要: 风向传感器是自动气象站的重要组成元件, 由于其运行数据存在的噪声与缺失问题导致测量误差增加, 因此设计基于非线性拟合的自动气象站风向传感器校准控制方法; 分析自动气象站风向传感器的组成结构和工作原理, 构建自动气象站等效模型; 采用循环采集的方式获取风向传感器的实时运行数据, 通过滤波、缺失补偿等步骤完成数据预处理; 以数据预处理结合为基础, 利用非线性拟合技术计算风向传感器误差, 通过装设风向传感器校准控制器, 完成风向传感器校准控制; 实验结果表明, 在 45 m/s 风速下所提方法的平均测量误差分别比实验对比方法低 1.27°、0.75°、0.42°, 误差变化率有所下降, 证明了该方法的自动气象站风向传感器校准控制效果好。

关键词: 非线性拟合; 自动气象站; 风向传感器; 校准控制; 循环采集; 数据滤波; 缺失补偿

Research on Calibration Control of Wind Direction Sensor in Automatic Weather Station Based on Nonlinear Fitting

ZHANG Min¹, ZHANG Jian², ZHANG Chaoming¹, FENG Ya¹, JIN Shuangen¹

(1. Shanxi Provincial Atmospheric Observation and Technical Support Center, Taiyuan 030002, China;

2. Xinzhou Meteorological Bureau, Xinzhou 034000, China)

Abstract: A wind direction sensor is an important component in automatic weather stations. Due to the noise and lack of its operation data, which leads to the increase of measurement error. Therefore, a calibration control method of the wind direction sensor in the automatic weather station based on nonlinear fitting is designed. Firstly, the structure and working principle of the wind direction sensor are analyzed, and the equivalent model of the direction sensor is constructed. Then, the real-time operation data of the wind direction sensor is obtained by means of cyclic collection, and the data preprocessing is completed through the filtering, missing compensation and other steps. Finally, based on the data preprocessing, the wind direction sensor error is calculated by using the nonlinear fitting technology, and the wind direction sensor calibration is completed by installing the wind direction sensor calibration controller. The experimental results show that the average measurement error of the proposed method at a wind speed of 45 m/s is 1.27°, 0.75°, and 0.42° lower than that of the experimental comparison method, and the error variety rate has decreased. It is verified that the proposed method has the good calibration and control effect for the wind direction sensor in the automatic weather station.

Keyword: nonlinear fitting; automatic weather station; wind direction sensor; calibration control; cyclic acquisition; data filtering; missing compensation

0 引言

自动气象站是在一个特定的区域内, 按需建立的一种可以将气象监测数据定期传送给中央站, 用于气象监测和预报的一种气象监测设备。自动气象站中包含气象传感器、全天候防护箱、通信模块等设备元件, 可用于监测多种气

象参数^[1]。自动气象站利用专用的数据采集通信线路与计算机相连, 将监测数据传送到气象数据库, 以此对于这些数据进行统计、分析和处理。风向传感器是自动气象站的重要组成设备, 是一种利用风向的箭头转动来探测、感知外界的风向, 并输出与风向有关的数据, 具有监测风向参

收稿日期: 2023-03-10; 修回日期: 2023-05-16。

基金项目: 山西省气象局面上科研项目(SXKMSTC20236316)。

作者简介: 张敏(1988-), 女, 山西忻州人, 硕士, 工程师, 主要从事气象计量检定方向的研究。

通信作者: 张剑(1992-), 女, 山西忻州人, 硕士, 工程师, 主要从事综合气象观测方向的研究。

引用格式: 张敏, 张剑, 张朝明, 等. 基于非线性拟合的自动气象站风向传感器校准控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(7): 313-319.

数的功能。它通常由风向传感器探头和传感器仪表两部分组成,探头通常由探头尺寸较小的方位基座和转动机构构成,以便于在各种不同环境下进行准确测量。根据传感器原理不同,常见的风向传感器包括机械式风向传感器、光电式风向传感器、电子式风向传感器,现阶段已经被广泛应用于气象监测、环境检测、航空、航海、农业生产等领域。

受到风向工作环境、内部元件磨损等因素的影响,自动气象站中的风向传感器会出现显著的监测误差,为了保证自动气象站的数据采集精度,提高数据监测质量与效率,需要对风向传感器进行校准处理。校准的目的是提高仪器、设备的监测精度,一般情况下,校准的质量决定测量工具或测量体系所显示的数值精度。现有的风向传感器校准方法有很多,例如文献 [2] 提出了一种基于牛顿迭代和椭球拟合的传感器校准方法,该方法分析了传感器的误差模型,然后提出牛顿迭代法校准加速度计和陀螺仪、椭球拟合法校准磁力计的方法设计校准设备,将该设置应用至传感器校准过程中,以此保证校准精准度。文献 [3] 提出了一种基于 PMAC 的传感器校准方法。该方法分析了倾角传感器动态校准装置的结构组成、工作原理,结合正弦运动原理和 PMAC (可编程多轴运动控制器, programmable multi-axis controller) 搭建了相关的校准装置,并对该装置的硬件与软件结构进行了设计,从而实现传感器校准。文献 [4] 提出了一种基于神经网络的传感器校准方法,该方法基于小波函数建立反向传播 (back propagation, BP) 神经网络模型,采用 Levenberg-Marquardt 算法进行网络参数更新,实现了气压传感器的非线性校准。但是将以上方法应用至风向传感器校准控制过程中并不能处理运行数据存在的噪声与缺失问题,导致传感器测量误差增加,实际应用效果并不好。

为了解决现有传感器校准方法存在的问题,以自动气象站为研究背景,将风向传感器为研究对象,利用非线性拟合技术设计一种新的校准控制方法。非线性拟合指的是利用变量代换,将代数问题转为线性问题再求解的过程。通过非线性拟合技术的应用实现对自动气象站风向传感器校准控制,以期能够提升传感器的测量精度。

1 自动气象站风向传感器校准控制方法

此次将 EL15-1C 型号的风向传感器作为研究对象,该型号传感器是杯式风速传感器的一种,主要是以风杯元件为传感元件,其感应器会随风转动,以此驱动风速计进行光电扫描,并将扫描结果输出为电脉冲讯号,已经在气象、环保、交通、国防等方面实现了广泛应用。EL15-1C 型风向传感器的结构形式为迷宫式,可有效抵抗风沙等恶劣环境对于测量精度的影响。

较为通用的自动气象站方向传感器校准控制的一般性方法步骤如下。

1) 找到一座标准的测风塔:寻找一座被广泛接受的、

被称为标准的测风塔,作为校准的参照。

2) 安装传感器:将需要校准的 EL15-1C 型风向传感器安装在测风塔上。

3) 移动传感器:根据测风塔的标准数据,移动传感器,找到其测量风向与标准数据相等的位置。

4) 标定传感器:将 EL15-1C 型风向传感器输出的数据与标准数据进行比较和校准,标定出传感器实际测量偏差,并将其存储到传感器内部或外部控制系统中。

5) 测试传感器:在校准过程之后,需要测试传感器在实际使用中是否正常,以确保它们能够准确地采集并输出风向数据。

EL15-1C 型风向传感器校准过程中由于其运行数据存在的噪声与缺失问题导致测量误差增加,所以本文通过分析 EL15-1C 型号风向传感器的工作原理,通过检查、纠正、调整等步骤,以消除传感器设备的测量偏差。

1.1 构建自动气象站风向传感器等效模型

EL15-2C 风向传感器是一种格雷码盘状风向传感器,从组成结构上看其包括低惯量风向标部件、内置风向码信号发生器外壳以及信号输出端口等。在风标旋转时,驱动格雷码盘的光电耦合器,然后由采集器将 7 比特的格雷编码信号转换成对应的角度值。自动气象站风向传感器的结构组成情况如图 1 所示。

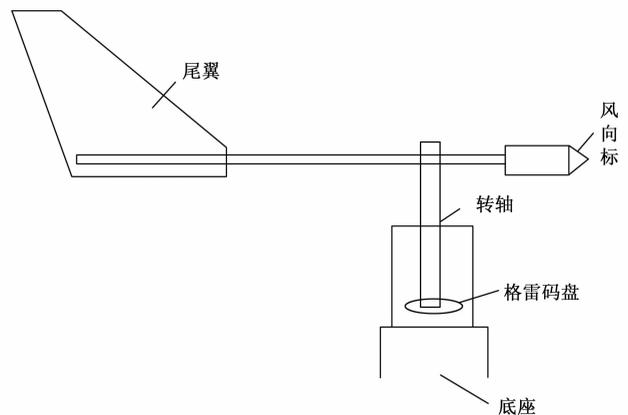


图 1 自动气象站风向传感器结构图

在风向测量时,将一个惯性较小的风向标元件作为传感元件,风向标元件会随着风而动,使 7 比特的格雷编码片在光电元件的间隙中旋转,从而产生与之相适应的格雷编码信号。该采集装置的 5 V 电压由线缆传输到感应器的上电路板,经过简单的电容滤波将其送入电源模块。上板的电阻主要功能是限制电流,各电阻器与两根红外线发射管串联。自动气象站风向传感器的上板电路工作原理如图 2 所示。

自动气象站风向传感器等效模型为:

$$\theta = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad (1)$$

式中, v_x 和 v_y 分别表示风速在水平和垂直方向上的分量,上

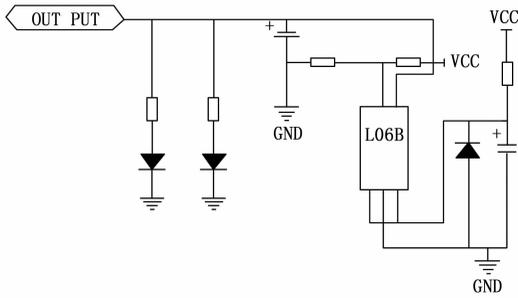


图 2 风向传感器上板电路工作原理图

述变量的计算公式如下:

$$\begin{cases} v_X = \kappa_{\text{sensitive}} \cdot \Delta V \cos\varphi \\ v_Y = \kappa_{\text{sensitive}} \cdot \Delta V \sin\varphi \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\kappa_{\text{sensitive}}$ 为风速敏感系数, ΔV 为风速梯度, φ 表示的是偏向角^[5]。按照上述方式完成自动气象站风向传感器等效模型的构建。

1.2 采集风向传感器实时数据

以构建的自动气象站风向传感器等效模型为基础, 采用循环采样的方式进行实时数据采集, 具体的采集流程如图 3 所示。

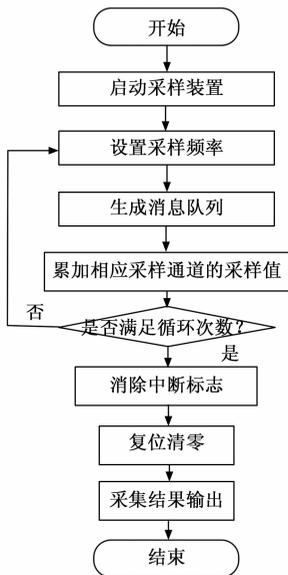


图 3 风向传感器实时数据循环采集流程图

在程序初始化后, 启动采样装置。先进行 A/D 周期取样, 将取样通道的取样值累积起来。当满足循环次数的情况下, 消除中断标志以及复位清零, 并将采样结果输出。在 16 次 A/D 取样时, 为了提高取样精度和采样过程的抗干扰性, 对各取样点进行了数字滤波处理。为了保证风向传感器实时运行数据的采集精度, 需要对初始采集的传感器运行数据进行预处理^[6]。风向传感器实时数据的预处理包括滤波、缺失补偿、归一化、冗余过滤、聚类步骤, 其中数字滤波的目的是降低风向传感器数据采集结果中的噪

声部分, 数字滤波的处理过程可以量化表示为:

$$X = \frac{\theta}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

式中, σ 和 μ 分别表示采样值的标准差和均值, 上述参数的计算公式如下:

$$\begin{cases} \sigma = \sqrt{\frac{1}{n_{\text{sensor}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{sensor}}} (x_i - \mu)^2} \\ \mu = \frac{1}{n_{\text{sensor}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{sensor}}} x_i \end{cases} \quad (4)$$

式中, x_i 表示采集到的第 i 个风向传感器运行数据, n_{sensor} 表示数据采集数量。将公式 (4) 的计算结果代入到公式 (3) 中, 即可完成风向传感器实时运行数据的滤波降噪处理。另外采集数据样本缺失补偿与归一化的处理过程可以表示为:

$$\begin{cases} x_{\text{defect}}(t) = \frac{x(t-1) + x(t+1)}{2} \\ x_{\text{normalization}} = \frac{f_{\text{max}}(X) - x}{f_{\text{max}}(X) - f_{\text{min}}(X)} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $x(t)$ 和 $x_{\text{defect}}(t)$ 分别表示缺失数据及其补偿处理结果, $x(t-1)$ 和 $x(t+1)$ 表示缺失数据的前后相邻数据, $f_{\text{max}}(\cdot)$ 和 $f_{\text{min}}(\cdot)$ 分别为 X 中最大值和最小值的求解函数^[7]。对 X 中的任意两个数据相似度进行度量, 度量结果用来评判数据之间的冗余度, 以此为数据聚类提供参考。数据间相似度的度量过程如下:

$$\lambda(x_i, x_j) = \frac{x_i \cdot x_j}{\|x_i\| \|x_j\|} \quad (6)$$

式中, x_j 表示风向传感器采样结果中的第 j 个数据样本。若公式 (6) 计算得出 $\lambda(x_i, x_j)$ 取值为 1, 则证明 x_i 和 x_j 为重复数据, 选择其中一个数据进行删除, 完成冗余数据的过滤。若计算得出 $\lambda(x_i, x_j)$ 的值不为 1, 则说明 x_i 和 x_j 互不为冗余数据, 无须执行过滤任务, 按照上述方式对采集样本中的所有数据进行相似度度量, 完成所有数据的冗余过滤处理^[8]。在完成冗余过滤处理后, 随机选择一个传感数据作为聚类中心, 利用公式 (6) 执行数据相似度度量工作, 若度量数据与聚类中心之间的相似度高于阈值 λ_0 , 则对其进行聚类处理^[9]。经过上述多个步骤, 完成风向传感器实时数据的采集与预处理工作, 其处理结果用 X' 表示。

1.3 利用非线性拟合技术的风向传感器误差计算

通过对风向传感器等效模型的分析, 确定传感器的基本工作原理, 以风向传感器实时数据的采集与预处理结果 X' 为基础, 分析风向传感器的输出电压信号与风向方位角之间的理想关系, 关系表达式如下:

$$\begin{cases} U_1 = \log_2 \frac{1 + \gamma \times \cos 2(\theta_0 + 60^\circ)}{1 - \gamma \times \cos 2(\theta_0 + 60^\circ)} \\ U_2 = \log_2 \frac{1 + \gamma \times \cos 2\theta_0}{1 - \gamma \times \cos 2\theta_0} \\ U_3 = \log_2 \frac{1 + \gamma \times \cos 2(\theta_0 + 120^\circ)}{1 - \gamma \times \cos 2(\theta_0 + 120^\circ)} \end{cases} \quad (7)$$

式中, γ 为风力强度, θ_0 为实际风向角度, 由于风向传感器中存在 3 条电路, 因此传感器会输出 3 路电压信号^[10]。以采集并处理完成的风向传感器运行数据为分析对象, 利用非线性拟合技术求解传感器的测量误差。图 4 为非线性拟合技术运行原理。

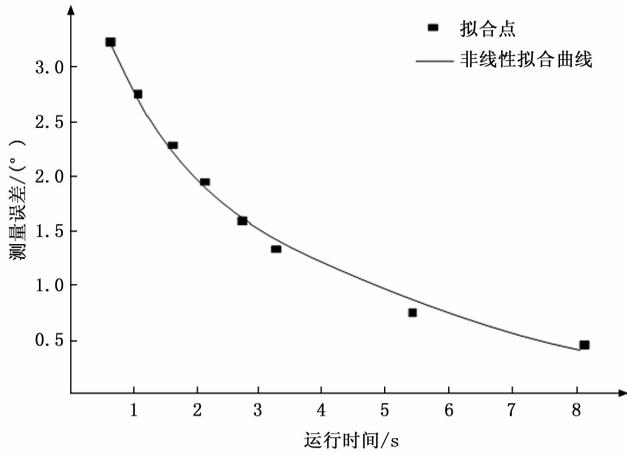


图 4 非线性拟合技术原理图

拟合是根据一个函数的几个离散函数值对几个未定的因子进行调节, 从而使其与已知的点集之间的差异达到最小^[11]。若此函数为线性, 则称为线性拟合, 反之则称为非线性拟合。在几何学上, 拟合是指在给定的空间内找出一个连续的曲面, 使其最接近于一个已知的形状, 但是参数未知^[12]。采用 S 参数反演方法对风向传感器实时运行数据进行了非线性拟合, 设定了超材料的初始参数, 然后用 Lsqcurvefit 函数来拟合风向传感器的实时运行数据。lsqcurvefit 函数表达式如下:

$$y_{\text{lsqcurvefit}} = \frac{x_{\text{max}}}{1 + \left(\frac{x_{\text{max}}}{x_i} - 1\right)e^{-\delta}} \quad (8)$$

式中, x_{max} 表示风向传感器的最大运行数据, δ 表示运行规律系数。在非线性拟合技术的支持下, 考虑输入输出噪声干扰和风向传感器内部干扰, 将风向传感器的实际输出结果表示为:

$$x_{\text{out}}(t) = y_{\text{lsqcurvefit}} + g_{\text{transmit}}(t)[x(t) + \beta_{\text{in}}] + \beta_{\text{out}} + g_{\beta}(t)\beta_{\text{sensor}}(t) \quad (9)$$

式中, $g_{\text{transmit}}(t)$ 和 $g_{\beta}(t)$ 分别表示风向传感器的正常信号和干扰信号的传递函数, β_{in} 、 β_{out} 和 $\beta_{\text{sensor}}(t)$ 分别对应的是输入端、输出端和传感器内部的信号干扰值, $x(t)$ 为传感器的实际输入数据^[13]。由于风向传感器处于实时运行的状态, 由此可以将动态测量误差看成由输入/输出动态误差和内部干扰误差两部分组成, 其中输入/输出动态误差的频域变化规律可以表示为:

$$\tau(t) = x_{\text{out}}(t)Ae^{-jf} \quad (10)$$

式中, A 表示传感器信号频域响应幅值, f 表示传感器的工作频率。根据风向传感器的实时数据采集与分析结果, 利

用公式 (11) 可以计算得出传感器的误差值为:

$$\epsilon_{\text{actual}} = x_{\text{out}} - x_{\text{set}} \quad (11)$$

式中, x_{set} 为设定的实际风向值^[14]。假设风向传感器的内部干扰误差始终为定值, 那么风向传感器误差可以表示为:

$$\epsilon = |\epsilon_{\text{actual}}| - |\beta_{\text{sensor}}(t)| \quad (12)$$

将相关数据代入到公式 (3) 中, 即可得出风向传感器误差的计算结果。

1.4 装设风向传感器校准控制器

采用恒定功率控制模式, 设计风向传感器校准控制器, 控制器内部工作电路如图 5 所示。

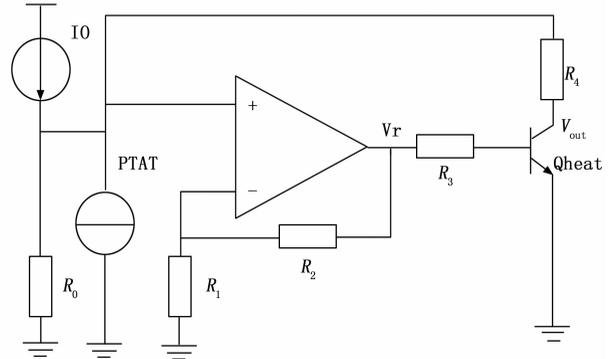


图 5 风向传感器校准控制器工作电路图

风向传感器校准控制器的工作原理和实现步骤具体如下。

步骤 1: 连接风向传感器和校准控制器, 并启动控制器。在此过程中需要确认风向传感器和校准控制器的接口类型和数量。比如常用的风向传感器接口类型包括模拟信号接口和数字信号接口, 需要根据风向传感器接口的类型和数量来选择合适的控制器。通过数据线将风向传感器的接口与校准控制器的接口相连接, 在检查数据线是插入正常后启动控制器。

步骤 2: 设定校准参数, 包括测量方式、采样频率、校准标准值等参数。其中测量方式包括机械式、电子式、激光式、雷达式等, 采样频率取值一般在 1~10 Hz 之间, 校准标准值根据国家标准或行业标准进行选择。

步骤 3: 确定风向传感器运行约束条件

恒功率空中模式是指外界系统对传感器芯片本身的工作功率保持恒定不变的工作模式, 校准控制器的应用下风向传感器的运行满足如下关系式:

$$\frac{\epsilon(U_{\text{in}} - U_{\text{out}})}{R_c} + I_0 = \epsilon \frac{U_{\text{out}}}{R_b} \quad (13)$$

式中, U_{in} 和 U_{out} 分别为风向传感器的输入电压和输出电压, R_c 和 R_b 分别为固态电阻值和控制电阻值。其中固态电阻用来保护控制器的运行安全, 控制电阻为校准控制对象的参数变化^[15]。当控制电阻变大时, 带隙电压源的输出经过反向放大, 利用电阻 R_b 对传感器总电阻进行补偿, 使其工作更加趋于恒定^[16]。

步骤 4: 控制器激活与优化

自动气象站风向传感器在静态校准时, 必须要有一个具有高精度的标准器, 才能完成测量。而在动态校准中, 校准控制器必须具有足够的动态激励信号, 才能使被校准控制器的被完全激活^[17]。因此需要在装设的校准控制器中加设一个激波管元件, 用来生成脉冲激励信号, 生成的矩形激励脉冲信号的表达式为:

$$\psi(t) = \begin{cases} A_{\text{pulse}}, & 0 \leq t \leq \omega \\ 0, & t > \omega \end{cases} \quad (14)$$

式中, A_{pulse} 和 ω 分别为矩形激励脉冲幅值和宽度。将脉冲激励元件嵌入到校准控制器中, 完成校准控制器的优化。将非线性拟合技术计算得出的误差值输入到装设的校准控制器中, 根据传感器的实际运行误差生成脉冲激励信号, 从而启动控制器^[18-20]。

步骤 5: 校准控制实现

根据标准风向和风向传感器输出的脉冲激励信号计算误差角度, 并将其转化为控制信号。将计算出的控制信号送至校准控制器, 控制其转动风向传感器指向标准风向。根据校准结果对风向传感器进行调整, 使其指向标准风向。根据校准结果判断校准是否完成, 检查是否达到标准要求。如果校准结果不符合标准要求, 需根据实际情况调整校准参数, 重新进行校准。在校准过程中需要记录传感器输出信号和控制信号值等数据, 以备后续分析和评估。值得注意的是在控制器的校准控制中, 需要根据传感器的运行状态对控制任务进行动态更新, 以此保证控制结果能够满足实际应用需求。

2 校准控制效果测试实验分析

设计基于非线性拟合的自动气象站风向传感器校准控制方法的目的是降低风向传感器的测量误差, 为了测试该方法是否达到预期效果, 设计校准控制效果测试实验。此次实验的基本原理是所设计的校准控制方法对风向传感器进行校准, 并将校准结果放置在多个环境中, 通过控制环境的真实风向, 获取风向的真实值。利用校准控制后的风向传感器对环境中的风向参数进行测量, 并与获取的真实值进行比对。根据两者之间的偏差, 以此检验自动气象站风向传感器的校准控制效果。

2.1 配置风向传感器运行环境

为了实现测试环境的精准控制, 此次风向传感器测试在风洞中进行, 风洞指的是人工产生和控制气流的工具, 能够最大程度地模拟环境气体的流动, 并可亮度气流对物体作用的管道状实验设备。实验使用的风洞直径为 0.32 m, 风洞中的气体以直流方式进行流动, 该风洞可以通过旋转用于固定传感器的底座来调整风洞内的风向。

2.2 选择风向传感器研究对象

实验选择 EL15-1C 型号的风向传感器作为研究对象, 该设备的几何尺寸为 319 mm × 225 mm, 抗风强度为 75 m/s, 测量范围区间为在 $[0^\circ, 360^\circ]$, 其中 0° 、 90° 、 180° 和

270° 分别对应的是北向、东向、南向和西向。为保证该类型风向传感器的正常运行, 要求实验环境温度控制在区间 $[-40^\circ\text{C}, 60^\circ\text{C}]$, 并将风洞中的风速控制在 75 m/s 以下, 将研究对象安装在风洞内部, 并与 5 V 直流电源相连。

2.3 生成风向传感任务

为避免实验中的偶然事件给实验结果产生的影响, 通过控制风洞运行参数生成多个风向传感任务, 实验分别从 15 m/s、30 m/s 和 45 m/s 三种风速环境下进行测试, 其中 15 m/s 风速环境下的部分传感任务的设置情况如表 1 所示。

表 1 风向传感任务表

传感任务编号	环境风速/(m/s)	实际风向	风向角/(°)
1	15	北偏东 30°	30
2	15	北偏西 45°	315
3	15	南偏东 20°	160
4	15	北偏西 25°	335
5	15	南偏东 19°	161
6	15	南偏西 12°	192
7	15	南偏西 36°	216
8	15	东	90
9	15	南	180

为保证实验结果的可信度设置 50 个传感任务, 以此综合检验该方法的应用效果。

2.4 调试校准控制器

优化设计的校准控制方法使用控制器作为执行设备, 因此需要将控制器装设到实验环境中, 并对其进行调试。图 6 表示的是校准控制器在风向传感器中的布设情况。

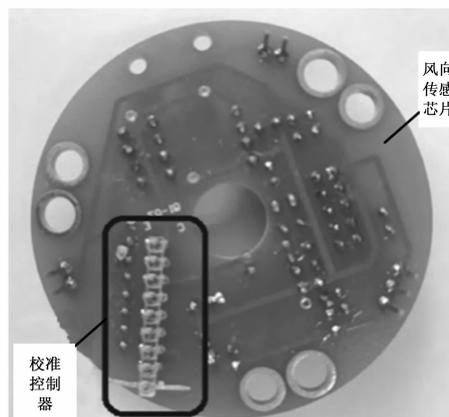


图 6 风向传感器校准控制器布设示意图

在校准控制设备中输入一个随机控制任务, 观察控制器输出信号以及风向传感器运行信号的变化情况, 并将输出结果与预期结果进行比对, 完成校准控制设备的调试。

2.5 实验过程

利用 JetBrains PhpStorm 工具将自动气象站风向传感器校准控制方法转换为程序代码, 并将其导入到调试成功的控制器中。采用人工调整的方式使风向传感器产生量测误

差,具体操作为:使用螺丝刀分解风向传感器,将风向传感器的初始值设置为 0.3,同时引入动态干扰,调整风洞运行参数实现对实验传感器的控制。利用无线网络连接风向传感器和主测计算机,保证传感器输出的实时传感结果能够直接输出给计算机,在 360°的风向角度范围内每隔 45°测量一次,获取风向传感器的初始值。同时启动控制器和校准控制程序,完成风向传感器的校准控制,并得出控制结果,如图 7 所示。

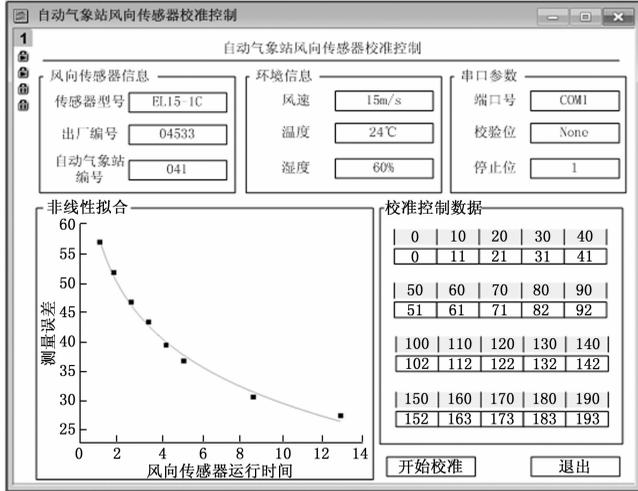


图 7 自动气象站风向传感器校准控制输出结果

采用多组实验取平均值的方式对风向传感器的校准控制效果进行测试,将校准后的风向传感器放置到风洞中,得出校准后输出的风向传感输出结果。为验证所设计方法在校准和控制效果方面的优势,分别设置基于牛顿迭代和椭球拟合的传感器校准方法、基于 PMAC 的传感器校准方法和基于神经网络的传感器校准方法作为实验对比方法,并按照上述流程完成对比方法的开发与运行,得出对应的实验结果。

2.6 设置传感器校准控制效果量化测试指标

此次实验分别从校准效果和控制效果两个方面进行测试,其中校准效果就是不同方法能否降低风向传感器的测量误差,提高传感器设备精度。而校准控制效果的测试内容是传感器高精度测量的维持效果。设置校准效果的量化测试指标为风向角校准误差,计算公式如下:

$$F = |\theta_{real} - \theta_{Sensing}| \quad (15)$$

式中, θ_{real} 和 $\theta_{Sensing}$ 分别表示的是环境风向角的真实值和风向传感器的输出值。另外风向传感器校准控制效果的测试指标设置为误差变化率,该指标的计算公式为:

$$\Delta \epsilon = \frac{|\epsilon(t_1) - \epsilon(t_2)|}{t_1 - t_2} \quad (16)$$

式中, $\epsilon(t_1)$ 和 $\epsilon(t_2)$ 分别表示的是校准控制任务完成后风向传感器在 t_1 和 t_2 时刻的测量误差值。最终计算得出风向角校准误差越小,说明该方法的校准效果越优,误差变化率越小,证明对应方法的校准控制效果越好。

2.7 实验结果与分析

选择 MATLAB 作为实验测试结果数据的处理软件,该工具将各个数学分支的运算法则归类为函数,在使用时可以直接调用它们,并给出具体的参数,保证实验结果的精确性。通过 MATLAB 软件,可以有效地提高试验数据的处理效率。

2.7.1 风向传感器校准效果测试结果

在 MATLAB 工具的支持下,通过相关数据的统计,得出风向传感器校准效果的测试结果,如表 2 所示。

表 2 传感器校准效果测试数据表

风速环境	传感任务编号	实际风向角/(°)	基于牛顿迭代和椭球拟合的传感器校准方法输出的风向角/(°)	基于 PMAC 的传感器校准方法输出的风向角/(°)	基于神经网络的传感器校准方法输出的风向角/(°)	基于非线性拟合的自动气象站风向传感器校准控制方法下输出的风向角/(°)
15 m/s	1	30	30.6	31.2	30.9	30.4
	2	315	316.3	315.9	315.7	315.2
	3	160	161.5	160.8	160.6	160.3
	4	335	335.9	335.7	335.5	335.1
30 m/s	1	30	31.2	30.8	30.6	30.2
	2	315	313.7	314.0	314.2	314.8
	3	160	161.5	160.8	160.6	160.1
	4	335	333.7	334.0	334.2	334.9
45 m/s	1	30	31.4	30.9	30.5	30.1
	2	315	313.5	313.8	314.1	314.7
	3	160	161.6	160.9	160.6	160.2
	4	335	333.5	334.1	334.4	334.7

将表 2 中的数据代入到公式 (15) 中,计算得出 15 m/s 风速环境下,基于牛顿迭代和椭球拟合的传感器校准方法、基于 PMAC 的传感器校准方法和基于神经网络的传感器校准方法的平均测量误差分别为 1.08°、0.9°和 0.68°,在 30 m/s 风速环境下基于牛顿迭代和椭球拟合的传感器校准方法、基于 PMAC 的传感器校准方法和基于神经网络的传感器校准方法的平均测量误差分别为 1.33°、0.9°和 0.7°,而在 45 m/s 风速环境下基于牛顿迭代和椭球拟合的传感器校准方法、基于 PMAC 的传感器校准方法和基于神经网络的传感器校准方法的平均测量误差分别为 1.5°、0.98°和 0.65°。在多个风速环境下,基于非线性拟合的自动气象站风向传感器校准控制方法的风向传感器平均测量误差分别为 0.25°、0.15°和 0.23°。

经过对比可知,在 15 m/s 风速下,基于非线性拟合的自动气象站风向传感器校准控制方法的平均测量误差分别比基于牛顿迭代和椭球拟合的传感器校准方法、基于 PMAC 的传感器校准方法和基于神经网络的传感器校准方法这三种方法低 0.83°、0.65°、0.43°;在 30 m/s 风速下,基于非线性拟合的自动气象站风向传感器校准控制方法的

平均测量误差分别比基于牛顿迭代和椭球拟合的传感器校准方法、基于PMAC的传感器校准方法和基于神经网络的传感器校准方法这三种方法低 1.18° 、 0.75° 、 0.55° ;在 45m/s 风速下,基于非线性拟合的自动气象站风向传感器校准控制方法的平均测量误差分别比基于牛顿迭代和椭球拟合的传感器校准方法、基于PMAC的传感器校准方法和基于神经网络的传感器校准方法这三种方法低 1.27° 、 0.75° 、 0.42° ,由此可见优化设计方法的风向角校准误差更小,说明该方法的风向传感器控制效果好。

2.7.2 风向传感器校准控制效果测试结果

收集校准控制方法处理后的风向传感器运行数据,通过公式(16)的计算得出校准控制效果的测试结果,如图8所示。

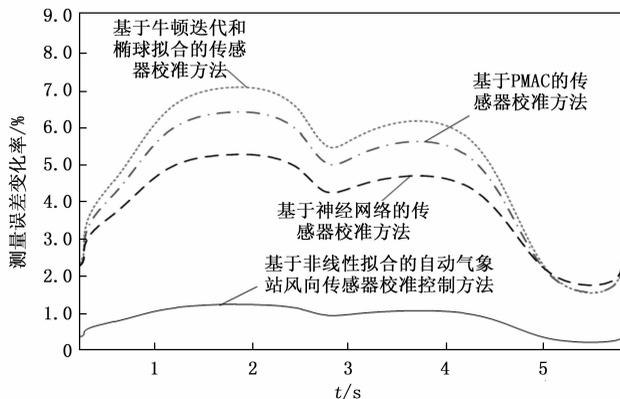


图8 风向传感器校准控制效果的测试结果

从图8中可以看出,基于牛顿迭代和椭球拟合的传感器校准方法的测量误差变化率在 $1.7\% \sim 6.8\%$ 之间变化,基于PMAC的传感器校准方法的测量误差变化率在 $1.7\% \sim 6.3\%$ 之间变化,基于神经网络的传感器校准方法的测量误差变化率在 $2.0\% \sim 5.2\%$ 之间变化,基于非线性拟合的自动气象站风向传感器校准控制方法的测量误差变化率在 $0.3\% \sim 1.2\%$ 之间变化。经过测试对比可知,与实验对比方法相比,所提方法的误差变化率更小,由此证明该方法在控制效果方面具有明显优势。

3 结束语

现代社会中各行业对自动化水平的要求越来越高,但是长期以来,气象测量部门对仪器的校准还处于手工校准的状态,这种校准方式过程复杂且耗时长,极易受到人为因素的影响,从而影响校准效果。利用非线性拟合技术,对自动气象站的校准控制方法进行了设计,并获得良好的校准、控制效果,在风向传感器校准领域有良好的应用前景。然而此次研究的校准控制方法主要针对的是EL15-1C型号风向传感器,将其应用到其他类型的风向传感器中可能存在不匹配的问题,为此需要今后的研究工作中需要对于该方法进行进一步的补充和优化。

参考文献:

- [1] 张东,陈斌.高稳定矿用风速风向传感器的研究[J].煤炭技术,2020,39(3):169-171.
- [2] 刘铁凡,肖文栋,吴健康,等.基于牛顿迭代和椭球拟合的磁力和惯性传感器校准方法[J].仪器仪表学报,2020,41(8):142-149.
- [3] 李娜娜,彭军.基于PMAC的倾角传感器动态校准装置[J].仪表技术与传感器,2020(11):40-43.
- [4] 贾克斌,王彦明,杨加春,等.基于神经网络的气压传感器非线性校正[J].北京工业大学学报,2021,47(1):40-49.
- [5] 牛昊东,施云波,王天,等.超声波相位比较法的风速风向传感器设计[J].哈尔滨理工大学学报,2021,26(1):122-129.
- [6] 单泽彪,鲁胜麟,刘小松,等.基于高阶累积量的阵列式超声波传感器风速风向测量[J].仪器仪表学报,2021,42(6):279-286.
- [7] 吴丽娜,宋媛,雷晓妹,等.自动气象站风向传感器校准方法探讨[J].气象水文海洋仪器,2021,38(4):68-70.
- [8] 张正,杨敏,邹超,等.自动气象站风向传感器校准结果不确定度评定[J].计量与测试技术,2020,47(8):105-106.
- [9] 汤勇,林建辉,钟文生,等.铁路风速传感器现场校准装置研究[J].机械制造与自动化,2020,49(3):179-182.
- [10] 王乐.风向风速传感器的原理及其检测研究[J].中国设备工程,2022(20):166-168.
- [11] 崔昊,郭锐,李兴强,等.基于非线性拟合的激光三角位移传感器标定方法[J].中国激光,2020,47(9):150-159.
- [12] 李冰,雷泮杰,陈超.基于椭圆拟合的双轴磁传感器标定方法[J].探测与控制学报,2020,42(3):20-23.
- [13] 锥苗君,裴东兴,黄子遥,等.地磁传感器的拟合集成校准[J].传感技术学报,2022,35(1):44-48.
- [14] 赵天,田润,易真翔,等.卡尔曼滤波算法在MEMS热式风速风向传感器中的应用[J].传感技术学报,2021,34(2):183-188.
- [15] 王志军,刘朋,谷向飞,等.基于曲线拟合的正交并联六维力传感器静态标定[J].机械设计与研究,2020,36(4):33-37.
- [16] 刘希林,梁振清,晏敏,等.EL15-1CH型加热风速传感器校准结果不确定度评定分析[J].气象研究与应用,2022,43(2):74-79.
- [17] 陈璐艳,陈昉,郑道淮,等.风向传感器校准装置对比试验与探讨[J].海峡科学,2020(7):23-25.
- [18] 李泽芳.基于S型皮托管的矿用自校准风速传感器设计[J].煤炭技术,2021,40(4):137-139.
- [19] 罗前刚.基于动态波形互相关算法的风速传感器的研究[J].工业仪表与自动化装置,2021(3):105-108.
- [20] 张占文.风传感器故障检测与诊断[J].气象水文海洋仪器,2020,37(1):91-93.