

# 基于温湿度补偿的扬尘监测装置设计与试验

毛伦聪, 吕昊暾\*, 陈桂斌, 王宁, 晏诗影

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** 针对农田扬尘研究过程中现有扬尘监测装置易受环境温湿度影响, 发生零点漂移, 导致测量误差大的问题, 该研究设计了一种基于温湿度补偿的扬尘监测装置, 该装置包括温湿度传感器、质量传感器、数据采集系统等, 可实现农田扬尘在线实时监测。通过温湿度与零点漂移相关性试验对采集的4个扬尘监测装置零点漂移与温湿度数据分析, 温湿度与扬尘监测装置零点漂移具有显著相关性(皮尔逊系数的绝对值 $|p| > 0.5$ ), 且绝对湿度与零点漂移的相关性表现较相对湿度更加稳定, 提出了绝对湿度与扬尘监测装置零点漂移的线性函数, 函数的湿度系数与温度呈正相关。温度从40℃升至60℃, 通过温度与扬尘监测装置输出信号单因素试验表明, 零点漂移量是灵敏度变化量的65.7倍, 零点漂移是影响扬尘监测装置测量精度的关键因素。建立了基于温湿度的BP网络扬尘监测装置零点漂移补偿模型, 试验表明, 此模型较基于温湿度的二阶多项式补偿模型数据波动幅度降低了8.8%, 较基于温度的BP网络补偿模型降低了60.3%。对本文基于温湿度补偿的扬尘监测装置进行田间测量试验, 结果表明, 本文监测装置较无补偿扬尘监测装置的最终测量误差降低了57.5%, 测量结果波动幅度降低了34.2%, 有效降低了扬尘监测装置的测量误差。研究结果可为农田扬尘在线实时监测研究提供技术支撑。

**关键词:** 信号处理; 扬尘; 温湿度补偿; 零点漂移; 田间试验

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403217

中图分类号: S237

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-18-0023-09

毛伦聪, 吕昊暾, 陈桂斌, 等. 基于温湿度补偿的扬尘监测装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18): 23-31. doi:

10.11975/j.issn.1002-6819.202403217 <http://www.tcsae.org>

MAO Luncong, LYU Haotun, CHEN Guibin, et al. Design and experiment of a dust monitoring device based on temperature and humidity compensation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(18): 23-31. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403217 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

农田风蚀是造成土地退化和荒漠化的主要原因。在中国约有一半以上地区受到风蚀和土地沙漠化影响, 尤其在以旱作农田为主的北方更为严重<sup>[1-4]</sup>。扬尘主要成分为随风飘散的尘土颗粒, 其具有质量轻, 易飘散, 难收集等特点。在20世纪40年代, 国内外学者即对扬尘监测装置进行了深入研究, 其中竖直式集沙仪、楔形集沙仪、平口式集沙仪等, 在农田风蚀研究中应用较为广泛<sup>[5-6]</sup>。进入21世纪, 为实现扬尘监测更稳定、更高效的目标。学者们相继研制了沙尘采集效率更高的新型平口式集沙仪、分流对冲式集沙仪和分流对冲与多级扩容组合式集沙仪<sup>[7-9]</sup>。针对风沙分离器体积大、强风条件下风沙分离难等问题, CAI等<sup>[10]</sup>设计了一种双柱扰流式风沙分离器, 有效降低了排气口和落沙口的风速, 极大提升了集沙仪强风条件下的收集效率。为揭示不同类型集沙仪在野外的适应性, 刘箴言等<sup>[11]</sup>对NFOC (new flat opening collector), BSNE (big spring number eight),

MWC (modified Wilson and Cook) 3类集沙仪的野外集沙效率进行了对比研究。MENDEZ<sup>[12]</sup>设计了一款Mendezs Trap新型集沙仪, 经过试验表明其较BSNE集沙仪具有更高的收集效率。

近年来, 融合了现代传感器与物联网技术, 具有跨区域实时数据采集功能的扬尘监测设备被广泛研究。刘海洋等<sup>[13]</sup>利用GPRS技术建立了农田土壤风蚀监测系统, 可实现风沙、风速、温湿度等数据的同步采集、实时处理和远程监测。郭中领等<sup>[14-15]</sup>将质量传感器与旋风分离式集沙仪相结合设计出自动连续称重式集沙仪, 并利用物联网技术实现了集沙量的连续测量和远程监测。路战远等<sup>[16]</sup>将雨量桶的翻斗设计运用到集沙仪中, 有效解决了长期测量时, 集沙仪满载后无法继续测量的问题。QIAN<sup>[17]</sup>提出开发搭载各种测量传感器的全地形机器人平台, 通过机器人矩阵形式, 实现多空间和时间的环境数据采集。

然而, 尽管扬尘监测设备的研究取得了显著进展, 但扬尘监测设备长期置于户外环境, 环境温湿度波动剧烈, 引起设备核心组件——质量传感器的阻抗变化, 导致扬尘监测装置输出信号发生零点漂移, 使得测量结果的准确性受到严重影响<sup>[18-21]</sup>。传统的“零点跟踪法”, 低通滤波法等, 对此种持续性测量的低频漂移信号处理能力有限<sup>[22-24]</sup>。为此, 学者们提出使用样条插值、曲面拟合、非对称惠斯通电桥等方法补偿温度对质量传感器的影响<sup>[25-27]</sup>。WANG等<sup>[28]</sup>通过优化机械结构和建立质

收稿日期: 2024-03-30 修订日期: 2024-07-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1500402-02)

作者简介: 毛伦聪, 研究方向为智能农业装备与技术。

Email: S20223071382@cau.edu.cn

\*通信作者: 吕昊暾, 博士, 研究方向为智能农业装备与技术。

Email: lvhaotun@cau.edu.cn

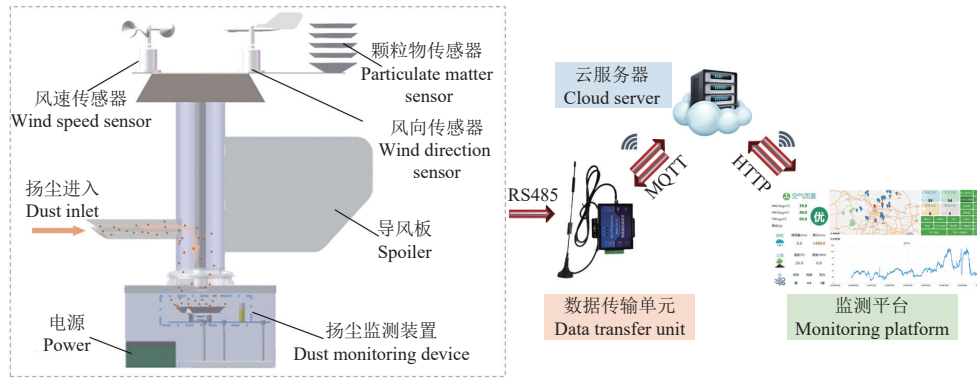
量传感器与温度的三次样条插值补偿模型, 实现降低风压和温度对集沙仪测量精度的影响。目前关于扬尘监测设备湿度的补偿研究相对较少。

上述研究为扬尘监测设备高精度, 智能化发展提供了良好的技术与设备支撑, 但并未较好地解决自动化扬尘监测设备实际应用中, 易受环境温湿度影响, 产生零点漂移, 导致测量数据不稳定、测量误差大等问题。针对上述问题, 本文提出融合现代传感器与物联网技术的基于温湿度补偿的扬尘监测装置, 拟利用无线通信和云服务器技术实现扬尘数据的远程实时采集, 并对温湿度与扬尘监测装置零点漂移的影响规律进行试验分析, 明

确温湿度变化对扬尘监测装置零点漂移的影响, 建立温湿度与扬尘监测装置零点漂移补偿模型。最后对本文基于温湿度补偿的扬尘监测装置进行田间监测试验, 验证测量效果。

## 1 扬尘监测装置设计

扬尘监测装置是农田扬尘监测系统<sup>[29]</sup> (如图 1) 中用于监测农田扬尘情况的关键设备, 可实时监测近地表 0.4 m 处累计扬尘质量并通过无线网络实时上传至农田扬尘系统监测平台。扬尘监测装置设计包含装置结构和数据采集系统两部分。



注: RS485 为 RS485 串行通信标准; MQTT 为消息队列遥测传输协议; HTTP 为超文本传输协议。

Note: RS485 is the RS485 serial communication standard; MQTT is the message queuing telemetry transport; HTTP is the hypertext transfer protocol.

图 1 农田扬尘监测系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of farmland dust monitoring system

### 1.1 装置结构

扬尘监测装置由质量传感器、温湿度传感器、三角座、秤盘、安装板等组成 (图 2a), 整个装置通过 3 根螺柱固定在扬尘监测系统内部, 并使秤盘位于扬尘监测系统落尘口正下方安装。扬尘监测系统落尘口直径为 148 mm, 选用开口直径为 194 mm, 底部直径  $d_2=155$  mm, 高  $h=20$  mm 的秤盘。秤盘通过三角座安装在质量传感器上, 三角座为内部镂空的等边三角形结构, 各角向上弯折并贴近秤盘侧边, 且弯折高度  $m$  满足式 (1), 以包裹固定秤盘防止秤盘发生横向位移。为保证三角座能满足相应尺寸要求, 三角座外接圆直径  $d$  应满足式 (2)。

$$m \geq \frac{1}{2}h \quad (1)$$

$$\frac{h}{\sin \alpha} \left( 1 + \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin \beta} \right) + d_2 \leq d \leq \frac{2h}{\sin \alpha} \left( 1 + \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin \beta} \right) + d_2 \quad (2)$$

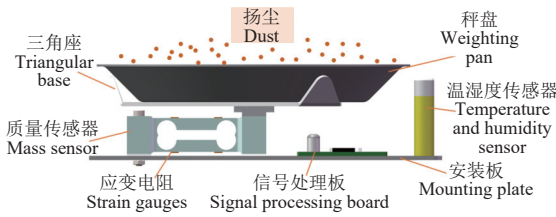
式中  $\alpha$  为三角座弯折角度, ( $^\circ$ );  $\beta$  为秤盘侧边倾斜角, ( $^\circ$ )。本文所采用的三角座弯折角为  $70^\circ$ , 秤盘侧边倾斜角为  $55^\circ$ , 由式 (2) 计算得  $183 \text{ mm} \leq d \leq 211 \text{ mm}$ , 选择三角座外接圆直径  $d=190 \text{ mm}$ , 如图 2b。秤盘、三角座对质量传感器的作用, 可简化为图 2c 所示的平行悬臂梁结构<sup>[30]</sup>。三角座与秤盘对质量传感器的作用可简化为集中载荷  $P$  在重心处对平行悬臂梁的作用。载荷  $P$  在

平面内任意位置对平行悬臂梁的作用可分解为作用在梁端点  $B$  的载荷  $P$  与对平行悬臂梁端部力矩  $M$ 。通过力学分析可得  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  处所受弯矩为

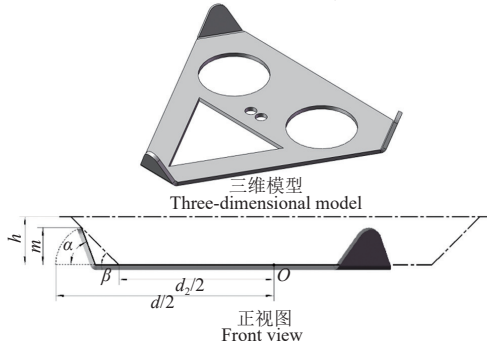
$$\begin{cases} M_A = -\frac{PL}{2} \cdot \frac{3K+1}{6K+1} - \frac{M}{2} \cdot \frac{5K-1}{(6K+1)(K+2)} \\ M_B = \frac{PL}{2} \cdot \frac{3K}{6K+1} + \frac{M}{2} \cdot \frac{13K+4}{(6K+1)(K+2)} \\ M_C = -\frac{PL}{2} \cdot \frac{3K}{6K+1} + \frac{M}{2} \cdot \frac{11K}{(6K+1)(K+2)} \\ M_D = \frac{PL}{2} \cdot \frac{3K+1}{6K+1} - \frac{M}{2} \cdot \frac{7K+3}{(6K+1)(K+2)} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $M_A$ 、 $M_B$ 、 $M_C$ 、 $M_D$  分别为平行梁  $AB$ 、 $DC$  在  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  处所受弯矩, N·m;  $K$  为平行梁  $AB$ 、 $DC$  与垂直梁  $BC$  的刚度比。由式 (3) 可知, 载荷重心偏离平行梁端点时形成的附加弯矩  $M$  会增大平行梁所受的最大弯矩, 同时对各端点形成大小不一的附加弯矩, 从而影响平行梁的应变。因此, 安装时应使秤盘、三角座的重心在质量传感器的端部, 以降低附加弯矩对传感器精度影响。经测量, 加载在质量传感器上的秤盘、三角座等元件质量之和为 138 g, 实际测量扬尘质量范围为  $0 \sim 10 \text{ g}$ , 为降低非线性误差对测量结果影响, 实际测量范围应设计在质量传感器量程的  $1/2$  附近。因此选用最大量程为 300 g 的质量传感器。温湿度传感器固定在安装板上且靠近质量传感器安装, 以尽可能反应质量传感器温湿度情况。

农田环境温度在 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间，故选用测量范围在 $-40\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温湿度传感器。

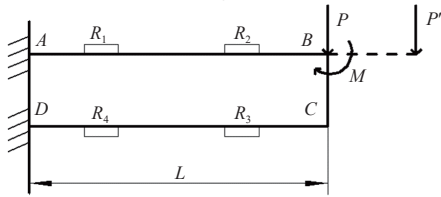


a. 扬尘监测装置结构  
a. Structure of dust monitoring device



注： $h$ 为秤盘高度，mm； $m$ 为三角座弯折高度，mm； $\alpha$ 为三角座弯折角度， $(^{\circ})$ ； $\beta$ 为秤盘侧边倾斜角， $(^{\circ})$ ； $d_2$ 为秤盘底部直径，mm； $d$ 为三角座外接圆直径，mm； $O$ 为三角座重心。  
Note:  $h$  is height of weighing pan, mm;  $m$  is bending height of triangular base, mm;  $\alpha$  is bending angle of triangular base,  $(^{\circ})$ ;  $\beta$  is inclination angle of weighing pan side,  $(^{\circ})$ ;  $d_2$  is diameter of weighing pan bottom, mm;  $d$  is diameter of circumscribed circle of triangular base, mm;  $O$  is gravity center of triangular base.

b. 三角座  
b. Triangular base



c. 扬尘监测装置简化力学模型  
c. Simplified mechanical modeling of the dust monitoring device

注： $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 为质量传感器应变电阻， $\Omega$ ； $P'$ 为质量传感器所受载荷，N； $P$ 为 $P'$ 平移至B点的等效载荷，N； $M$ 为 $P'$ 平移至B点的等效附加力矩，N·m； $L$ 为质量传感器等效悬臂梁长，m； $A$ 、 $D$ 为质量传感器简化为平行悬臂梁后的固定端点； $B$ 、 $C$ 为质量传感器简化为平行悬臂梁后悬臂端点。

Note:  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  are the mass sensor strain resistors,  $\Omega$ ;  $P'$  is the load applied to the mass sensor, N;  $P$  is the equivalent load of  $P'$  translated to point B, N;  $M$  is the equivalent additional moment of  $P'$  translated to point B, N·m;  $L$  is the length of the mass sensor equivalent cantilever beam, m;  $A$ ,  $D$  are the fixed endpoints behind the mass sensor simplified to a parallel cantilever beam;  $B$ ,  $C$  are the end of the cantilever after the mass sensor is simplified to the parallel cantilever beam.

图 2 扬尘监测装置

Fig.2 Dust monitoring device

## 1.2 数据采集系统设计

扬尘监测装置的数据采集系统需要具备质量传感器信号采集与解析、远程无线传输、数据存储和数据显示功能。质量传感器信号采集与解析由内置HX711芯片和STM32G0微处理器的信号处理板完成。HX711芯片将采集的质量传感器模拟电压信号转换为数字信号，并经128倍增益放大后输出给STM32G0微处理器。STM32G0微处理器对数字信号进行数据处理并转换为扬尘质量值。数据传输单元（data transfer unit, DTU）通过RS-485

和Modbus-RTU协议与信号处理板通讯，并将采集的扬尘质量值利用4G网络和MQTT协议远程上传至云服务器，存储在MySQL数据库中。数据显示功能由基于Node-RED平台搭建的智能农田扬尘监测平台完成。研究人员在计算机浏览器中输入监测平台的网页地址通过HTTP协议即可实现监测平台的访问和农田扬尘情况监测。扬尘监测装置设备参数如表1。

表 1 扬尘监测装置各设备参数

Table 1 Parameters for each device in the dust monitoring device

设备 Devices	参数 Parameters	牌型号 Models
质量传感器	量程：0~300 g， 灵敏度：1.0 mV·V <sup>-1</sup> ， 供电电压：5~15 V	大洋 DYX-306
信号处理板	供电电压：10~35 V， A/D 转换：HX711， RS485、Modbus-RTU 通信	自研
温湿度传感器	温度范围：-40~80 $^{\circ}\text{C}$ ， 温度精度： $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (25 $^{\circ}\text{C}$ )， 相对湿度范围：0~100%RH， 相对湿度精度： $\pm 3\%RH$ (60%、25 $^{\circ}\text{C}$ )， RS485、Modbus-RTU 通信	普锐森社温湿度传感器 (PE 探头)
数据传输单元	支持 4G 网络，支持 MQTT、TCP、HTTP 等 无线网络传输， 与传感器通信支持 RS485、Modbus-RTU	展联科技 ZL300
云服务器	RAM：4 G，ROM：40 G，CPU：2.5 GHz	阿里云

## 2 温湿度对扬尘监测装置零点漂移的影响

扬尘监测装置通过建立质量传感器加载扬尘时产生的输出电压信号与扬尘质量的数学模型，实现扬尘质量的测量。然而，环境温湿度变化、粘合剂等元件老化，会引起测量电路阻抗变化，导致质量传感器输出电压信号漂移<sup>[31-32]</sup>，造成扬尘监测装置产生零点漂移（负载质量不变时，扬尘监测装置受环境温湿度变化影响，产生的输出信号变化），测量误差增大。

### 2.1 湿度对扬尘监测装置零点漂移的影响

为探究环境湿度与扬尘监测装置零点漂移关系，2023年9月22日—10月2日在中国农业大学进行为期11 d的数据采集试验。为降低偶然因素对试验结果影响，连续采集4个安装在同一位置的扬尘监测装置的零点漂移( $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ )，由于本文测量的零点漂移为经模数转换后的数字信号，以数字信号的最低有效位作为零点漂移的单位，LSB)和环境温湿度。各装置均采取防尘措施，以避免落入的扬尘影响质量传感器零点信号输出。数据采集期间的温度 $T$ 变化范围为 $14.5\sim 33.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $H_R$ 变化范围为 $18.3\%\sim 86.6\%$ ，通过式(4)，近似计算得绝对湿度 $H_A$ 变化范围为 $4.5\sim 14.7\text{ g/m}^3$ 。

$$H_A = 10^{(8.10765 - (1750.286/(T+235)))} \times 0.01H_R \quad (4)$$

图3为 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ 、 $T$ 、 $H_A$ 、 $H_R$ 的皮尔逊相关系数 $p$ （皮尔逊系数的绝对值 $|p| < 0.4$ ：弱相关； $|p| > 0.4$ ：显著相关）。各装置与湿度的相关系数具有异向性，如 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_4$ 与 $H_R$ 、 $H_A$ 表现为负相关，而 $W_3$ 则为正相关。分析认为是由于质量传感器制造工艺差异造成上下应变片受湿度变化影响程度不同引起的。将 $W_1$ 、 $W_2$ 、

$W_3$ 、 $W_4$ 与温湿度的 $|p|$ 的均值作为温湿度与扬尘监测装置零点漂移的最终 $|p|$ ，温度、相对湿度、绝对湿度与扬尘监测装置零点漂移的 $|p|$ 分别为0.59、0.52、0.62。 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ 与 $H_R$ 、 $H_A$ 的 $|p|$ 的方差分别为0.123、0.031。 $H_A$ 、 $H_R$ 的 $|p|$ 均值较为接近，但 $H_A$ 的方差明显小于 $H_R$ 。因此，扬尘监测装置零点漂移与绝对湿度相关性表现更稳定，使用绝对湿度构建环境湿度与扬尘监测装置零点漂移关系模型更可靠。

$W_1$	$W_1$	0.27	0.36	0.95	-0.66	-0.61	-0.20
$W_2$	0.27	$W_2$	-0.52	0.37	0.52	-0.85	-0.97
$W_3$	0.36	-0.52	$W_3$	0.37	-0.67	0.42	0.64
$W_4$	0.95	0.37	0.37	$W_4$	-0.52	-0.59	-0.26
$T$	-0.66	0.52	-0.67	-0.52	$T$	-0.089	-0.55
$H_A$	-0.61	-0.85	0.42	-0.59	-0.089	$H_A$	0.87
$H_R$	-0.20	-0.97	0.64	-0.26	-0.55	0.87	$H_R$
	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$T$	$H_A$	$H_R$

注： $T$ 为环境温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $H_R$ 为相对湿度，RH%； $H_A$ 为绝对湿度， $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ； $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ 为4个扬尘监测装置的零点漂移（未加载时输出信号的变化），LSB（最低有效位）。

Note:  $T$  is temperature,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $H_R$  is relative humidity, RH%;  $H_A$  is absolute humidity,  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$  are zero drifts measured by the four dust monitoring devices respectively (changes of the output signal without loaded), LSB (least significant bit).

图3 温度、相对湿度、绝对湿度、扬尘监测装置零点漂移间的皮尔逊相关系数

Fig.3 Pearson correlation coefficients between Temperature, relative humidity, absolute humidity, and zero drift of the dust monitoring devices

分别取数据集中温度为18、21、24 $^{\circ}\text{C}$ （温度取值范围 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ）时各绝对湿度对应的平均零点漂移数据，并进行线性拟合，如图4。各温度下绝对湿度与扬尘监测装置零点漂移均具有明显线性相关性。 $W_3$ 受湿度影响变化最小，随湿度升高缓慢增加， $W_1$ 、 $W_4$ 受湿度影响变化较大，随湿度增加向负方向快速增大。绘制各拟合线性函数斜率 $k$ 随温度变化情况。各线性拟合函数的斜率随温度升高均正向变化，且具有一定线性变化趋势。 $W_3$ 的斜率 $k$ 随温度变化量最小， $W_4$ 的斜率 $k$ 变化最大。综上所述，扬尘监测装置的零点漂移 $W$ 与绝对湿度 $H_A$ 的响应关系可用式(5)近似表达：

$$W = \beta_T \cdot H_A + C \quad (5)$$

式中 $\beta_T$ 为湿度系数（与温度呈正相关）， $\text{LSB}\cdot\text{m}^3/\text{g}$ ； $C$ 为常数。

## 2.2 温度对扬尘监测装置零点漂移的影响

由图3知，温度与扬尘监测装置零点漂移具有显著相关性（皮尔逊系数的绝对值 $|p| > 0.5$ ）。为进一步研究温度对扬尘监测装置总体性能影响，使用图5所示试验设备对扬尘监测装置进行单因素温度变量试验，分别测量了40、50、60 $^{\circ}\text{C}$ 时，负载0~10g范围内的扬尘监测装置输出信号。为确保试验数据的可靠性，当加热箱达到目标温度并稳定后，采集连续5个输出信号值的均值

作为最终有效数据。各温度对应输出信号和负载质量线性拟合曲线，如图6。

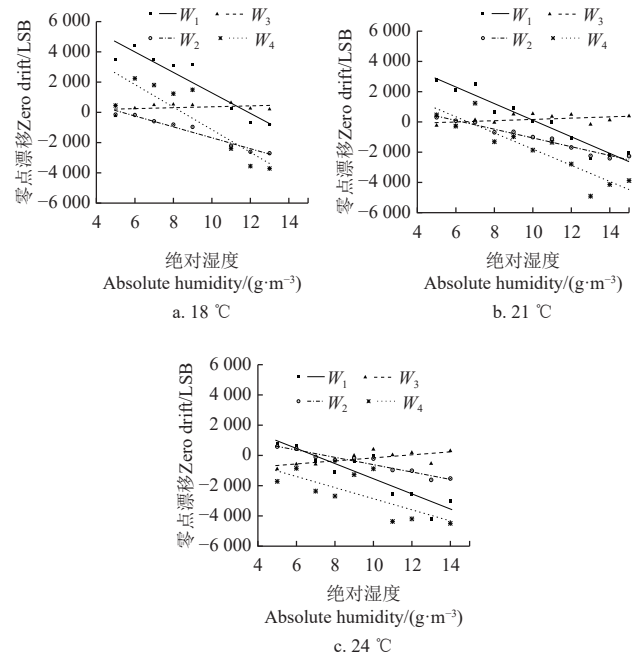


图4 绝对湿度与扬尘监测装置零点漂移的关系

Fig.4 Relationship between absolute humidity and zero drift of dust monitoring devices

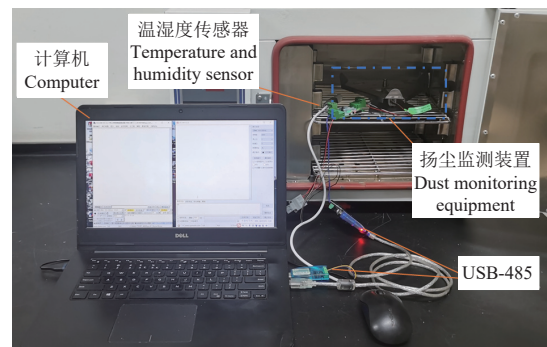
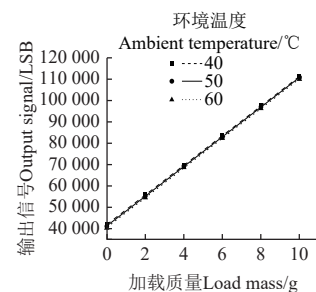


图5 温度对扬尘监测装置零点漂移影响的试验设备

Fig.5 Experimental device for the effect of temperature on the zero drift of the dust monitoring device



注：输出信号为扬尘监测装置中质量传感器输出电压信号经差分放大、A/D转换后输出的数字信号，LSB。

Note: Output signal is the digital signal output by differential amplification and A/D conversion of the mass sensor output voltage signal in the dust monitoring device, LSB.

图6 扬尘监测装置的输出信号与负载质量线性拟合结果

Fig.6 Linear fit result of output signal of dust monitoring device versus load mass

线性拟合曲线的灵敏度（加载单位质量时质量传感

器输出信号的变化量, LSB/g) 和零点 (未加载质量时质量传感器的输出信号值, LSB) 如表 2 所示。各温度条件下, 输出信号与负载质量均呈现出良好的线性关系。温度从 40 °C 升至 60 °C, 灵敏度变化量为 20.7 LSB/g, 而零点变化量为 1 360 LSB, 零点变化量是灵敏度变化量的 65.7 倍。当加载质量为 10 g 时灵敏度变化引起的测量误差为 0.03 g, 零点变化引起的测量误差为 0.20 g, 零点变化引起的测量误差是灵敏度的 6.7 倍。因此, 零点漂移是影响扬尘监测装置测量精度的关键因素。

表 2 扬尘监测装置输出信号与负载质量线性拟合方程  
Table 2 Equation for linear fitting of the output signal of dust monitoring device to load mass

温度 Temperature/ °C	表达式 Expression	灵敏度 Sensitivity/ (LSB·g <sup>-1</sup> )	零点 Zero point/LSB
40	y=6 946.2m+41 928	6 946.2	41 928
50	y=6 962.0m+41 268	6 962.0	41 268
60	y=6 966.9m+40 568	6 966.9	40 568

注:  $m$  为加载质量,  $g$ ;  $y$  为扬尘监测装置输出信号, LSB; 灵敏度为输出信号与负载质量拟合直线的斜率, LSB·g<sup>-1</sup>; 零点为输出信号与负载质量拟合直线的零点, LSB。  
Note:  $m$  is the loaded mass,  $g$ ;  $y$  is the output signal of the dust monitoring device, LSB; sensitivity is the slope of the line fitting the output signal to the load mass, LSB·g<sup>-1</sup>; zero point is the zero point of the line fitting the output signal to the load mass, LSB.

### 3 BP 网络非线性数学模型

#### 3.1 BP 网络及 L-M 训练算法

上述研究表明, 温度、绝对湿度与扬尘监测装置零点漂移具有显著相关性 ( $|p|>0.5$ )。误差反向传播神经网络 (back propagation, BP) 作为一种多层前馈神经网络模型, 凭借其独特的架构和学习算法, 在处理复杂非线性拟合问题时展现出明显优势。在玉米种植密度和施肥量模型优化、橡胶苗叶片磷含量高光谱预测中 BP 网络模型较多重线性回归、二次回归等模型均表现出明显优势<sup>[33-34]</sup>。BP 网络具有输入层、隐藏层和输出层 3 层网络结构, 输入层至隐藏层, 隐藏层至输出层分别采用 Sigmoid 和 Purelin 函数连接, 通过调整神经元数量与权重, 实现 BP 网络对复杂模型的精准拟合<sup>[35]</sup>。本文采用 BP 网络建立温湿度与扬尘监测装置零点漂移的非线性数学模型, 各项网络参数采用列文伯格-马夸尔特 (levenberg-marquardt, L-M) 算法训练得到, 其表达式如下:

$$h_0 = -(J^T \cdot J + \lambda \cdot I)^{-1} (J \cdot e(k)) \quad (6)$$

式中  $h_0$  为修正变化量,  $J$  为 jacobian 矩阵,  $I$  为单位矩阵,  $\lambda$  为阻尼系数,  $e(k)$  为迭代误差。L-M 算法常被认为是带阻尼的高斯牛顿法, 可通过  $\lambda$  的适当取值, 避免出现梯度下降法步长不合适造成的振荡不收敛、收敛慢和高斯牛顿法中  $J \cdot J^T$  出现奇异或病态问题。与梯度下降法采用的线性搜寻法不同, L-M 采用的是信赖域法, 其通过引入增益比  $\rho$ , 实现迭代步长的实时调整。当  $\rho$  接近 1 时, 认为模型可靠, 可增大信赖域半径, 使用更大的迭代步长。当  $\rho$  接近 0 时, 则认为模型与实际相差较大, 应减小信赖域半径, 重新计算迭代步长<sup>[36]</sup>。增益比  $\rho$  表达式如下:

$$\rho = \frac{F(x) - F(x + \Delta h)}{L(0) - L(\Delta h)} \quad (7)$$

式中  $L(0)$  为不引入步长时的预测值,  $L(\Delta h)$  为加入步长变化量  $\Delta h$  后的预测值,  $F(x)$  为输入为  $x$  时的实际值,  $F(x + \Delta h)$  为加入步长后输入  $x + \Delta h$  时的实际值。  $F(x) - F(x + \Delta h)$  表示加入步长后的实际增益,  $L(0) - L(\Delta h)$  为步长为  $\Delta h$  时的模型预测增益。

#### 3.2 BP 网络参数确定

本文使用 Matlab 中的 BP 网络拟合工具箱通过 L-M 算法进行参数训练。将温度、绝对湿度作为 2 个输入层神经元, 预测零点漂移作为输出层神经元。隐藏层的神经元数量是影响 BP 网络拟合模型准确性的重要因素。然而, 目前仍未有统一的确定隐藏层神经元数量的理想方式<sup>[37]</sup>。为获得最佳隐藏层神经元个数, 使用数据集对 2~13 个隐藏层神经元的 BP 网络进行训练并使用训练集对训练结果进行测试。考虑到模型的泛化能力, 训练集数据的范围和样本数均略小于测试集。训练集和测试集数据范围如表 3 所示。每个网络模型预测结果与训练集和测试集的决定系数  $R^2$ , 如图 7。

表 3 用于确定隐藏层神经元个数的数据集特征

Table 3 Features of dataset used to determine number of neurons in hidden layer

数据集 Data set	温度 Temperature/°C	绝对湿度 Absolute humidity/(g·m <sup>-3</sup> )	样本数 Number of samples
训练集	10~30	4~12	53 163
测试集	3.4~33.8	1.8~14.7	62 039

由图 7 知, 神经元个数在 1~2 之间时, BP 网络预测数据与训练集的  $R^2$  具有较大增长。在 2~11 时相关性保持稳定缓慢增长状态,  $R^2$  基本维持在 0.96, 在 11 个神经元之后, 出现过拟合现象,  $R^2$  呈现下降趋势。因此, 2~11 个神经元的 BP 网络对训练集数据的拟合能力较好, 性能较优。预测数据与测试集的  $R^2$  在 1~4 个神经元期间, 保持稳步增长, 并在第 4 个神经元时达到最大 0.955, 4 个神经元之后便呈现快速下降趋势。因此在隐藏层神经元个数为 1~4 时, BP 网络泛化能力较强, 预测效果较佳。结合预测数据集与训练集和测试集相关性分析, 本文中隐藏层神经元数量选择 4 个。本文采用的基于温湿度的 BP 网络零点漂移补偿模型结构, 如图 8 所示。

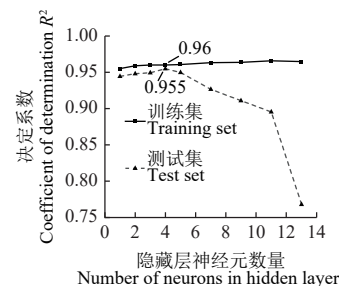


图 7 BP 网络模型预测结果与训练集和测试集的决定系数  
Fig.7 Coefficient of determination  $R^2$  between prediction results of each BP network model and training set and test set

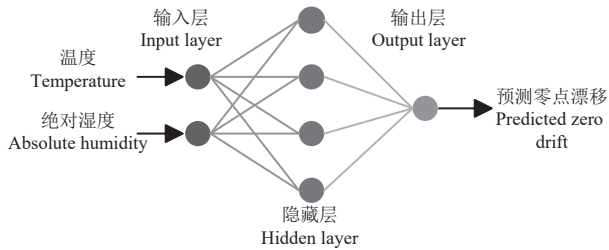


图8 基于温湿度的BP网络零点漂移补偿模型

Fig.8 Zero-drift compensation model of BP network based on temperature and humidity

## 4 结果与分析

### 4.1 补偿模型的有效性验证

为验证温湿度补偿模型的有效性，使用上述数据集作为训练集，使用相同方法采集的2023年10月21日—11月05日数据集作为测试集，验证其补偿效果。为探究本文基于温湿度的BP网络补偿模型（basing on temperature-humidity BP network compensation model, THBP）特性，同时计算基于温湿度的二阶多项式补偿模型（basing on temperature-humidity second-order polynomial compensation model, THPN）和基于温度的BP网络补偿模型（basing on temperature compensation model of BP network, TBP）<sup>[38]</sup>补偿后的零点漂移结果，如图9。

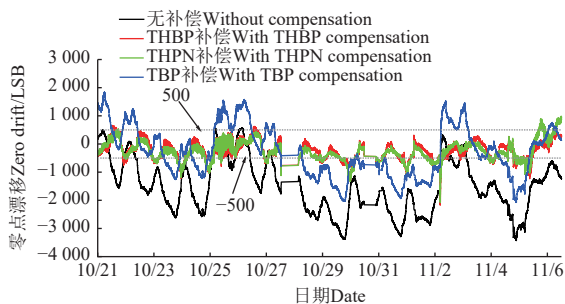


图9 有无补偿的零点漂移

Fig.9 Zero drift with or without compensation

为量化分析各方法补偿效果，引入均值 $\mu$ 、标准差

$\sigma$ 和 $3\sigma$ 原则，衡量各方法补偿效果。依据 $3\sigma$ 原则，误差值位于平均值的3个标准偏差之间的概率 $P$ 为0.997。因此，可将位于 $\mu \pm 3\sigma$ 范围内的数据视为扬尘监测装置的有效数据， $6\sigma$ 值作为扬尘监测装置数据波动幅度。各方法补偿后的零点漂移数据特性如表4所示。

表4 不同模型补偿的零点漂移数据特性

Table 4 Characteristics of zero-drift data compensated by different models

模型 Model	均值 Average $\mu$	标准差 Standard error $\sigma$	测量结果波动幅度 Fluctuation of the results
<i>W</i>	-1 474.49	943.3	5 659.8
TBP	-226.9	891.7	5 350.2
THPN	-200.6	408.8	2 452.8
THBP	-205.7	354.4	2 126.4

注：*W*为不使用补偿方法。

Note: *W* means without compensation method.

由图9可知，3种补偿模型均具有一定补偿效果，补偿后零点漂移都发生明显降低。但THBP和THPN补偿效果更稳定，补偿后漂移基本稳定在 $-500 \sim 500$  LSB之间，而TBP补偿效果较差，补偿能力有限。根据表4，同时对温湿度补偿的THBP和THPN较只对温度补偿的TBP，测量结果波动幅度分别降低了60.3%和54.2%，波动幅度大幅降低。

上述结果说明，温湿度同时补偿模型较传统只做温度补偿模型的测量精度大幅提高。THBP较THPN测量结果波动幅度降低了8.8%，标准差降低了13.3%，测量误差进一步减小。因此，本文基于温湿度的BP网络零点漂移补偿模型对降低扬尘监测装置零点漂移，提高测量精度具有一定优越性。

### 4.2 田间试验

为进一步验证本文基于温湿度补偿的扬尘监测装置实际应用的可行性。将本文基于温湿度补偿的扬尘监测装置安装到北京市密云区金沟村附近的农田扬尘监测点的农田扬尘监测系统中，如图10。从2023年12月29日—2024年1月7日实时采集连续10 d的扬尘质量，如图11。期间温度变化范围为 $-10.6 \sim 13.9$  °C，绝对湿度变化范围为 $1.6 \sim 4.1$  g/m<sup>3</sup>。

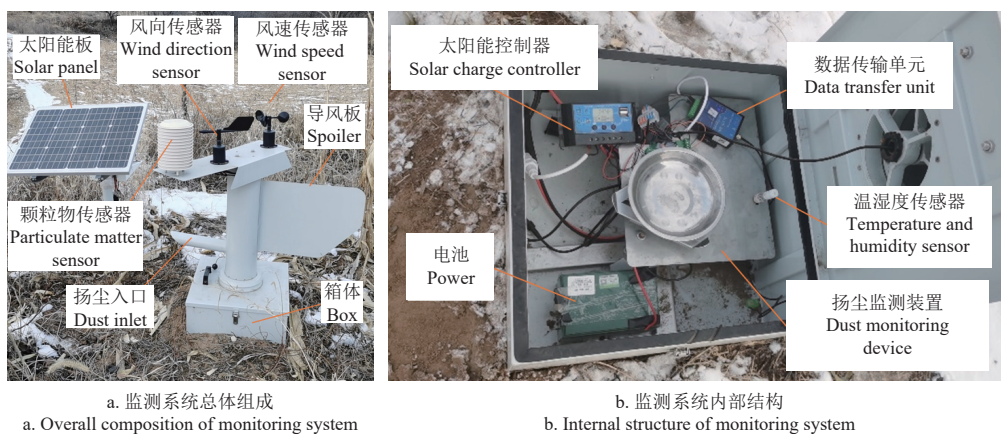


图10 农田扬尘监测系统

Fig.10 Farmland dust monitoring system

为便于比较本文基于温湿度补偿的扬尘监测装置

（本文装置）和无补偿算法的扬尘监测装置（无补偿装

置)之间的测量结果差异,以累计运行时间  $t_s$  为自变量,测量的扬尘质量为因变量,分别拟合 2 种扬尘监测装置的扬尘质量测量数据变化的二阶多项式曲线。无补偿装置的扬尘质量  $W_f$  和本文装置的扬尘质量  $W_r$  的拟合二阶多项式如式 (8)。

$$\begin{cases} W_f = (5.46449 \times 10^{-9} t_s^2 - 8.68728 \times 10^{-4} t_s + 122.8) / 7190.2 \\ W_r = (1.11244 \times 10^{-8} t_s^2 - 3.01 \times 10^{-3} t_s + 418.8) / 7190.2 \end{cases} \quad (8)$$

计算 2 个装置扬尘质量测量数据与各自拟合多项式的标准差  $S_{D_f}=0.193 \text{ g}$ ,  $S_{D_r}=0.127 \text{ g}$ 。以拟合多项式为基础的一个标准差的误差范围的数据作为有效观测数据,以衡量测量结果的波动情况,则两者的有效数据波动范围为  $W_f \pm S_{D_f}$ ,  $W_r \pm S_{D_r}$ , 见图 11。无补偿装置测量结果波动幅度为  $2S_{D_f}=0.386 \text{ g}$ , 本文装置测量结果波动幅度为  $2S_{D_r}=0.254 \text{ g}$ , 本文装置测量结果波动幅度较无补偿装置降低了 34.2%, 测量误差明显降低。由标准电子秤测量的最终扬尘质量为  $0.73 \text{ g}$ 。由于测量的质量数据一直处于随环境温湿度变化而波动的状态,采用最后时刻的读数作为最终监测质量会带来较大的误差。因此,本文以拟合二阶多项式计算的最后数据作为各自的最后测量值。经计算,2 个装置的最终扬尘质量测量值分别为  $W_r=0.837 \text{ g}$ ,  $W_f=0.478 \text{ g}$ 。本文装置的最终测量误差为  $0.107 \text{ g}$ , 无补偿装置的最终测量误差为  $0.252 \text{ g}$ 。本文装置的最终测量误差比无补偿装置降低了 57.5%。WANG 等<sup>[28]</sup>采用三次样条插值温度补偿等方法开发的智能扬尘监测系统较无补偿的传统扬尘监测系统整体的稳定性提高了 32.4%、精度提高了 38.4%,均略低于本文方法。因此,本文基于温湿度补偿的扬尘监测装置可有效降低温湿度对扬尘监测装置的影响,提高扬尘监测装置测量精度。

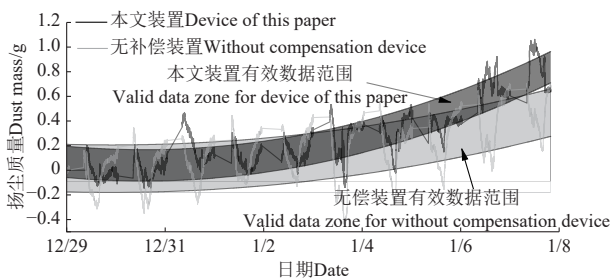


图 11 2023 年 12 月 29 日至 2024 年 1 月 7 日扬尘质量监测结果  
Fig.11 Dust mass monitoring results from December 29, 2023 to January 7, 2024

## 5 结 论

本文设计了一种基于温湿度补偿的扬尘监测装置。经过试验验证,此扬尘监测装置可有效降低扬尘监测装置受环境温湿度变化影响造成的扬尘质量测量误差,提高扬尘监测的数据可靠性,主要结论如下:

1) 通过扬尘监测装置零点漂移与温湿度相关性试验分析,明确了绝对湿度与扬尘监测装置零点漂移具有

显著相关性 ( $|p| > 0.5$ ),提出了绝对湿度与扬尘监测装置零点漂移的线性函数,且函数的湿度系数与温度呈正相关。

2) 依据单因素温度变量试验分析得出,温度从  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  升至  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ,零点变化量是灵敏度变化量的 65.7 倍。当加载质量为  $10 \text{ g}$  时,零点变化引起的测量误差是灵敏度的 6.7 倍。因此,零点漂移是影响扬尘监测装置测量精度的主要因素。

3) 依据模型补偿效果对比试验得出,采用基于湿度的 BP 网络零点漂移补偿模型分别较基于湿湿度的二阶多项式补偿模型和基于温度的 BP 网络补偿模型测量结果波动幅度分别降低了 8.8%, 60.3%。本文模型对减小扬尘监测装置零点漂移误差,提高测量精度具有一定优越性。

4) 对本文基于温湿度补偿的扬尘监测装置进行连续 10 d 田间测量试验,试验结果表明,最终测量误差和测量结果波动幅度较无补偿扬尘监测装置分别降低了 57.5% 和 34.2%,扬尘监测装置测量精度明显提高。

## 【参 考 文 献】

- [1] 王小伟, 王卫. 基于 CLM4.5 土壤风蚀模型的河北省土壤释尘量模拟[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 1-9, 303. WANG Xiaowei, WANG Wei. Simulation of dust emissions in Hebei Province based on CLM4.5 soil wind erosion model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(8): 1-9,303. (in Chinese with English abstract)
- [2] 苑依笑, 王仁德, 常春平, 等. 风蚀作用下农田土壤细颗粒的粒度损失特征及其对土壤性质影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 104-109, 119. WAN Yixiao, WANG Rende, CHANG Chunping, et al. Loss characteristics of fine particles by wind in farmland and its effect on soil properties[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2): 104-109,119. (in Chinese with English abstract)
- [3] 左忠, 潘占兵, 张安东, 等. 干旱风沙区农田防护林网空间风速与地表风蚀特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 135-141. ZUO Zhong, PAN Zhanbing, ZHANG Andong, et al. Spatial wind speed and surface wind erosion characteristics of farm-shelter forest network in arid sandy area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(2): 135-141. (in Chinese with English abstract)
- [4] 吴姗姗, 牛健植, 蔺星娜. 京郊延庆农田保护性耕作措施对土壤风蚀的影响[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(1): 57-67. WU Shanshan, NIU Jianzhi, LIN Xingna. Effects of conservation tillage measures on soil wind erosion in Yanqing, the suburb of Beijing[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(1): 57-67. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘海洋, 常佳丽, 陈智, 等. 全自动多通道农田无线集沙仪研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 53-60. LIU Haiyang, CHANG Jiali, CHEN Zhi, et al. Design of automatic multi-channel wireless agricultural sand sampler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,

- 2016, 47(6): 53-60. (in Chinese with English abstract)
- [6] 康永德, 杨兴华, 肖让, 等. 高精度集沙仪在土壤风蚀研究中的应用[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(1): 122-128.  
KANG Yongde, YANG Xinghua, XIAO Rang, et al. Application of high-resolution sand collector in soil wind erosion research[J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2020, 56(1): 122-128. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王仁德, 邹学勇, 赵婧妍. 北京市农田风蚀的野外观测研究[J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 400-406.  
WANG Rende, ZHOU Xueyong, ZHAO Jingyan. Field observation of farmland wind-erosion around Beijing[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(2): 400-406. (in Chinese with English abstract)
- [8] 商晓彬, 陈智, 宋涛, 等. 基于数值模拟和风洞试验的分流对冲式集沙仪结构优化设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 80-87.  
SHANG Xiaobin, CHEN Zhi, SONG Tao, et al. Optimization design of shunt-hedging sand sampler based on numerical simulation and wind tunnel experiment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(16): 80-87. (in Chinese with English abstract)
- [9] 宋涛, 陈智, 边炳传, 等. 分流对冲与多级扩容组合式自动集沙仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 134-141.  
SONG Tao, CHEN Zhi, BIAN Bingchuan, et al. Design and experiment of shunt-hedging and multi-stage expansion combined automatic sand sampler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 134-141. (in Chinese with English abstract)
- [10] CAI X, HAO B, LIU H, et al. The design and experimental study of a double-column scrambler wind-sand separator for sustainable soil wind erosion monitoring[J]. Sustainability, 2023, 15(20): 15090.
- [11] 刘箴言, 常春平, 郭中领, 等. 3类集沙仪野外测试对比[J]. 中国沙漠, 2020, 40(6): 33-42.  
LIU Zhenyan, CHANG Chunping, GUO Zhongling, et al. A comparative study on field test of sand collectors[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(6): 33-42. (in Chinese with English abstract)
- [12] MENDEZ M J. A new wind erosion sampler called "mendezs trap (MT)": Description and field performance test in a loamy sand soil[J]. Aeolian Research, 2022, 56: 100800.
- [13] 刘海洋, 陈智, 侯占峰, 等. 基于 GPRS 的土壤风蚀实时监测系统研制与测试[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 163-172.  
LIU Haiyang, CHEN Zhi, HOU Zhanfeng, et al. Development and test of real-time monitoring system for soil wind erosion based on GPRS network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(5): 163-172. (in Chinese with English abstract)
- [14] 郭中领, 常春平, 王仁德, 等. 一种自动连续称重式集沙仪: CN104931225B[P]. 2016-06-29.
- [15] 崔雅臻, 郭中领, 常春平, 等. 自动连续称重式集沙仪设计及野外应用[J]. 中国沙漠, 2018, 38(6): 1166-1174.  
CUI Yazhen, GUO Zhongling, CHANG Chunping, et al. A continuous-weighing sand trap: Design and field evaluations[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(6): 1166-1174. (in Chinese with English abstract)
- [16] 路战远, 侯智惠, 解云虎, 等. 一种可连续自动称重的集沙仪: CN215374155U[P]. 2021-12-31.
- [17] QIAN F, JEROLMACK D, LANCASTER N, et al. Ground robotic measurement of aeolian processes[J]. Aeolian research, 2017, 27: 1-11.
- [18] 王仁德, 李庆, 常春平, 等. 土壤风蚀野外测量技术研究进展[J]. 中国沙漠, 2019, 39(4): 113-128.  
WANG Rende, LI Qin, CHANG Chunping, et al. Review of field measurement technologies in soil wind erosion[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(4): 113-128. (in Chinese with English abstract)
- [19] STANO G, DI NISIO A, LANZOLLA A, et al. Additive manufacturing and characterization of a load cell with embedded strain gauges[J]. Precision Engineering, 2020, 62: 113-120.
- [20] CHEN G, WANG Q, LI H, et al. Monitoring of farmland dust during tillage and sowing operations and comparative analysis of cultivation modes in the suburban areas of Beijing[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 237: 105991.
- [21] KHALED K M, MAHMOUD G M. An investigation on the effect of humidity on the zero signal of a strain gauge measuring system[J]. Universitas Scientiarum, 2018, 23(1): 129-139.
- [22] PIETRZAK P. Fast filtration method for static automatic catch weighing instruments using a nonstationary filter[J]. Metrology and Measurement Systems, 2009, 14(4): 669-676.
- [23] CHEN G, WANG Q, LI H, et al. Research on the effect of conservation tillage mode on the suppression of near-surface dust in farmland[J]. Agriculture, 2022, 12(5): 703.
- [24] LIN H, SHAO G, LI Z, et al. Zero-drift error compensation method for electronic balance based on adaptive filter with autostep LMS[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 72: 1-10.
- [25] 贺红林, 许佳豪, 周战洪, 等. 压阻式压力传感器温度误差的插值补偿方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(12): 1-7.  
HE Honglin, XU Jiahao, ZHOU Zhanhong, et al. Research on interpolation compensation method for temperature error of piezo-resistive pressure sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(12): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李冀, 胡国清, 周永宏, 等. 一种压阻式压力传感器的温度补偿方法[J]. 仪表技术与传感器, 2018(6): 1-4, 10.  
LI Ji, HU Guoqing, ZHOU Yonghong, et al. Temperature compensation method for piezo-resistive pressure sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(6): 1-4, 10. (in Chinese with English abstract)
- [27] TIAN B, SHANG H, WANG W. Research on temperature zero drift of sic piezoresistive pressure sensor based on asymmetric Wheatstone bridge[J]. Silicon, 2022, 14(10): 5445-5451.
- [28] WANG L, LI C, LIN J, et al. Development of an intelligent wind erosion monitoring system[J]. Sensors, 2023, 23(23): 9389.
- [29] 王庆杰, 王文静, 宫少俊, 等. 一种农田扬尘自动监测装置: CN113418817A[P]. 2021-09-21.

- [30] 刘九卿. 平行梁型称重传感器的力学特性[J]. *衡器*, 2009, 38(6): 5-7.  
LIU Jiuqing. Mechanics characteristics of parallel beam load cell[J]. *Weighing Instrument*, 2009, 38(6): 5-7. (in Chinese with English abstract)
- [31] SANPONPUTE T, ARKSONNARONG N. Temperature and humidity dependence on stability of torque measuring devices[C]// International Measurement Confederation (IMEKO) 22nd TC3, 15th TC5 and 3rd TC22 International Conferences, Cape Town, Republic of South Africa, 2014.
- [32] SANTO Z M, BELAVIC D. The effects of humidity on the stability of LTCC pressure sensors[J]. *Metrology and Measurement Systems*, 2012, 19(1): 133-140.
- [33] 王福林, 董志贵, 吴志辉, 等. 基于 BP 神经网络的玉米种植密度和施肥量优化[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 92-99.  
WANG Fulin, DONG Zhigui, WU Zhihui, et al. Optimization of maize planting density and fertilizer application rate based on BP neural network[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(6): 92-99. (in Chinese with English abstract)
- [34] 郭澎涛, 苏艺, 茶正早, 等. 基于 BP 神经网络的橡胶苗叶片磷含量高光谱预测[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(S1): 177-183.  
GUO Pengtao, SU Yi, CHA Zhengzao, et al. Prediction of leaf phosphorus contents for rubber seedlings based on hyperspectral sensitive bands and back propagation artificial neural network[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(S1): 177-183. (in Chinese with English abstract)
- [35] LI J, CHENG J, SHI J, et al. Brief introduction of back propagation (BP) neural network algorithm and its improvement[C]// *Advances in Computer Science and Information Engineering: Volume 2*. Springer Berlin Heidelberg, 2012: 553-558.
- [36] WILAMOWSKI B M, YU H. Improved computation for levenberg-marquardt training[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2010, 21(6): 930-937.
- [37] LI Y, DONG W B, YANG Q X, et al. An automatic impedance matching method based on the feedforward-backpropagation neural network for a WPT system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 66(5): 3963-3972.
- [38] 刘贺, 李淮江. 基于 BP 神经网络的压力传感器温度补偿方法研究[J]. *传感技术学报*, 2020, 33(5): 688-692, 732.  
LIU He, LI Huaijiang. Research on temperature compensation method of pressure sensor based on BP neural network[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2020, 33(5): 688-692, 732. (in Chinese with English abstract)

## Design and experiment of a dust monitoring device based on temperature and humidity compensation

MAO Luncong, LYU Haotun<sup>\*</sup>, CHEN Guibin, WANG Ning, YAN Shiyang

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the dust mass measurement of the existing dust monitoring devices in the process of farmland dust monitoring was susceptible to the influence of ambient temperature and humidity, resulting in zero drift and a large measurement error, this study designed a dust monitoring device based on temperature and humidity compensation. The device included temperature and humidity sensors, mass sensor, data acquisition system, etc., which could realize cross-regional, remote, real-time online measurement of dust mass. The zero drift and temperature and humidity data of the four dust monitoring devices collected by the temperature and humidity correlation test showed that the temperature and humidity had a significant correlation with the zero drift of the dust monitoring device (the mean values of  $|p|$  were 0.59 and 0.62, respectively), and the correlation between zero drift of the dust monitoring device and absolute humidity was more stable than relative humidity performance, a linear expression of absolute humidity and zero drift of the dust monitoring device was provided, the humidity coefficient of the expression was positively correlated with temperature. When the temperature changed from 40 °C to 60 °C, the single-factor test of the temperature and the output signal of dust monitoring device showed that the zero drift was 65.7 times that of the sensitivity change, zero drift was a key factor affecting the measurement accuracy of dust monitoring device. A compensation model of the zero-point drift dust monitoring device of BP network based on temperature and humidity was established, the experimental results showed that the data fluctuation range of the proposed model was 8.8% lower than that of the basing on temperature-humidity second-order polynomial compensation model, and 60.3% lower than that of the basing on temperature compensation model of BP network. A field measurement experiment was conducted for the dust monitoring device based on temperature and humidity compensation of this paper. The results showed the device in this paper reduces the final measurement error by 57.5% and the fluctuation of measurement results by 34.2% compared to the uncompensated device, effectively reduced the measurement error of dust mass. The research results could provide technical support for the research on online real-time monitoring of farmland dust.

**Keywords:** signal processing; dust; temperature and humidity compensation; zero drift; field experiment