

# 不同测风仪外场试验与分析研究

彭 坚<sup>1</sup>, 王小兰<sup>2\*</sup>, 马 丽<sup>3</sup>

(1. 新疆技术装备保障中心, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国气象局气象探测中心 & 中国气象局气象探测工程技术研究中心, 北京 100081; 3. 青岛镭测创芯科技有限公司, 青岛 266102)

**摘要:** **目的** 评估不同厂家测风仪的运行稳定性和数据准确性。**方法** 对新疆达坂城试验基地三家厂商共8套机械风和超声波测风仪的2023年11月至2024年3月外场试验分析。**结果** 数据获取率整体较高, 表明测风仪在运行稳定性方面表现良好。数据准确性方面, 风速测量整体误差较小, 但风向测量误差相对较大。此外设备管理和维护问题也影响了部分测风仪的精度。**结论** 本研究为气象观测领域的仪器选型提供了参考依据, 并强调了设备管理和维护的重要性。

**关键词:** 测风仪; 数据完整率; 相关性; 随机误差; 系统误差

## 0 引言

风是地面气象观测中的基本观测要素, 其精确测量对于气象预报、气候分析及风能资源评估具有重大意义。传统机械式测风仪虽历史悠久、应用广泛, 但机械磨损、环境适应性差及测量精度受限等问题日益成为制约因素<sup>[1]</sup>。随着科技的飞速发展, 超声波测风技术凭借其无接触、高精度、快响应及长寿命等优势, 可最大程度地减少由于仪器的机械特性造成的磨损问题, 更加适合极端情况下的风速风向测量, 已成为现在研究应用的热门<sup>[2,3]</sup>。

鉴于超声波测风仪在国外已有成熟应用, 国内还处于快速应用发展阶段<sup>[4-7]</sup>。本研究旨在通过试验, 系统评估不同厂商机械式与超声波测风仪在气象观测中的实际性能。在新疆达坂城试验外场, 组织安装了三家主流厂商的测风设备, 开展为期五个月(含冬季)的对比观测试验, 旨在为气象观测业务中的相关工作人员在仪器选择和升级方面提供重要参考, 推动气象观测技术不断迈向新的高度。

## 1 材料与方法

### 1.1 观测设备

达坂城试验基地共安装了三家厂商, 共计8套的机械式和超声波测风仪, 具体信息详见表1。试验以达坂城主站的一套新型站测风传感器(简称: 达坂城主站)为比对标准, 该传感器

已通过法定检定机构的检定, 具备有效计量检定证书。试验测风塔和业务测风塔之间的距离不超过20 m。

本研究所用观测数据从2023年11月1日至2024年3月31日共计5个月。在数据选择方面, 由于航天数据为每5 min获取一条, 而其他数据为每分钟获取一条。为确保数据的一致性和可比性, 以航天数据的时间戳为基准, 即每5 min获得一组10 min风速、10 min风向数据, 进行后续对比分析。

表1 达坂城试验设备信息

厂家	型号	数量	备注
航天	ZQZ-TSF	1	超声风
	ZQZ-TFR	1	机械风
华云	EL15	2	机械风, 塔上和风杆各一个
	HY-UWS01	2	超声风, 塔上和风杆各一个
聚恒	WS02	2	超声风
达坂城主站/(比对标准)	ZQZ-TF	1	机械风
合计		9	

### 1.2 研究方法

以达坂城主站测风仪作为标准仪器, 使用相应软件对标准仪器以及三家厂商的观测数据采集后进行对比分析。

#### 1.2.1 数据完整性

对来自不同数据源(包括其他厂家及标准站)的相同时间段的数据进行横向对比。

数据完整率(%) = 有效观测数据个数 / 观测时间段内应有

基金项目: 中国气象局探测中心2022观测试验项目, 业务用风传感器比对观测试验, 编号: SY2022034

第一作者: 彭坚, 高级工程师, 研究方向为综合气象观测。

\* 通信作者: 王小兰, 博士, 高级工程师, 研究方向为综合气象观测。E-mail: 10593018@qq.com

观测数据个数

其中, 观测时间段不含设备故障的维护维修时间, 当设备出现故障进行了维护维修时, 数据完整性统计分析将维护维修时间段剔除。

### 1.2.2 风向数据预处理

鉴于风向数据的周期性变化可能对分析结果产生干扰, 本研究在风向数据分析前进行了预处理。预处理流程包括:

(1) 计算风向偏差  $\Delta C_i$ , 公式为:

$$\Delta C_i = B_i - A_i$$

其中  $A_i$  为  $i$  时次的标准仪器数据,  $B_i$  为同一时次的测试数据。

(2) 对风向偏差进行校正, 使其值限定在  $-180^\circ$  至  $180^\circ$  之间。校正方法如下:

当  $\Delta C_i > 180^\circ$  时,  $\Delta C_i = B_i - A_i - 360^\circ$ 。且在进行相关性分析时, 采用  $B_i - 360^\circ$  与  $A_i$  进行计算。

当  $\Delta C_i < -180^\circ$  时,  $\Delta C_i = B_i - A_i + 360^\circ$ 。并在进行相关性分析时采用  $B_i + 360^\circ$  与  $A_i$  进行计算<sup>[8]</sup>。

### 1.2.3 风速风向相关性分析

皮尔逊相关系数  $r$  是衡量两个变量  $X$  和  $Y$  线性关系强度和方向的统计工具。在风速与风向的数据分析中同样具有显著意义。其值域为  $[-1, 1]$ , 其中 1 表示完全正线性相关, 0 表示无线性相关,  $-1$  表示完全负线性相关。

在进行相关性分析时, 根据风向偏差的校正结果, 采用相应的调整值进行计算, 以确保分析结果的准确性。

### 1.2.4 风速风向数据对比分析

对比分析风速风向数据时, 风速直接采用测量数据进行计算。风向数据, 先进行上述预处理步骤后, 再进行系统误差和均方根误差分析, 以确保数据的准确性和可比性<sup>[9]</sup>。

(1) 系统误差

系统误差由测量仪器或方法的固有缺陷造成, 具有规律性、可预测性。通常来源于仪器的设计、制造、校准或使用过程中的不当操作。本文采用各厂家设备采集的风向风速数据与标准仪器同一时间所采集数据的差值取平均值作为系统误差,  $n$  次对比观测的系统误差  $\bar{X}$  为:

$$\bar{X} = \frac{\sum(B_i - A_i)}{n}$$

(2) 均方根误差

均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 是衡量观测值与真实值之间差异的一种统计量, 能够反映测量的离散程度, 并对较大误差进行放大, 从而更准确地评估仪器的测量准确性。本研究中, 以待测设备作为观测值, 标准设备作为真实值, 利用 RMSE 评估待测设备与标准设备之间的偏差。RMSE 计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B_i - A_i)^2}{n}}$$

### 1.2.5 评估指标

根据自动气象站观测规范, 设定风速最大允许误差:  $\pm(0.5 \text{ m/s} + 0.03 V)$ ,  $V$  为实际风速, 此处取 0, 即风速最大允许误差为  $\pm 0.5 \text{ m/s}$ ; 风向最大允许误差:  $\pm 5^\circ$ <sup>[10]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 数据完整性

对三家厂商测风仪输出的数据完整性进行评估 (试验期间各测风仪应测量数据 43776 条)。数据完整率方面, 华云最高 (99.95%), 聚恒次之 (98.90%), 航天最低 (94.94%)。逐月分析三家厂商的数据完整率发现, 依然是华云的数据完整率最高, 各个月份都在 99.9% 以上; 其次是航天, 但航天在 2024 年 3 月存在较多的数据缺失, 其他月份数据完整率均在 98.5% 以上; 聚恒的数据完整率虽稍低, 但仍保持在 97% 以上。

### 2.2 风向频率对比分析

风向玫瑰图 (图 1) 显示, 试验期间达坂城主导风向为东南风和西北风, 其中东南风风速在 4~6 m/s 区间出现的频率最高, 西北风 2~4 m/s 频率稍高于其他风速区间。发现除聚恒的 2 号超声风设备在风向测量上出现明显的偏差之外, 其他设备与标准站的风向区间分布基本一致。

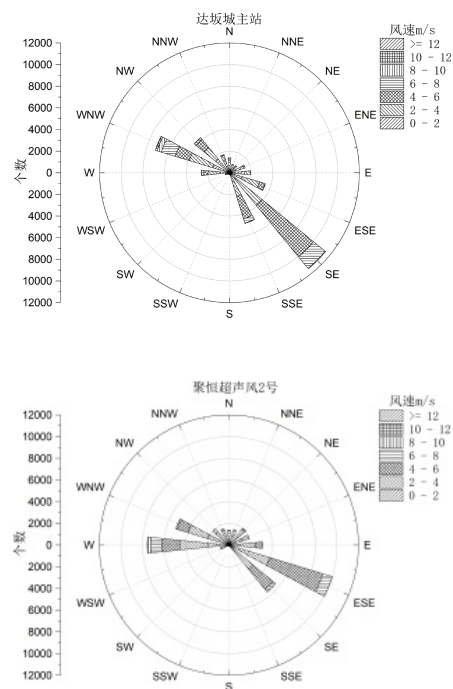


图 1 达坂城主站与聚恒 2 号超声风测风仪的风向玫瑰图

### 2.3 相关性分析

在风速测量方面, 聚恒超声风 1 号的相关性表现较差, 其

相关系数值  $r$  为 0.917, 而其他测风仪的相关系数均在 0.97 以上, 其中航天机械式测风仪表现最佳, 相关系数高达 0.992。在风向测量方面, 三家厂商的设备整体相关性均较好, 相关系数均在 0.97 以上。其中, 航天机械式测风仪的相关性最高达 0.996。

逐月分析也有类似变化趋势, 风速方面聚恒超声风 1 号的相关性持续较低, 尤其在 12 月份, 其相关系数  $r$  仅为 0.85。其他设备的  $r$  相关系数均较高, 均在 0.95 以上。风向方面整体相关性优于风速, 除华云风杆超声风 11 月相关系数稍低为 0.965 外, 其他月份的相关系数均在 0.98 以上。各厂家与达坂城主站的风速风向逐月皮尔逊相关系数如图 2 所示。

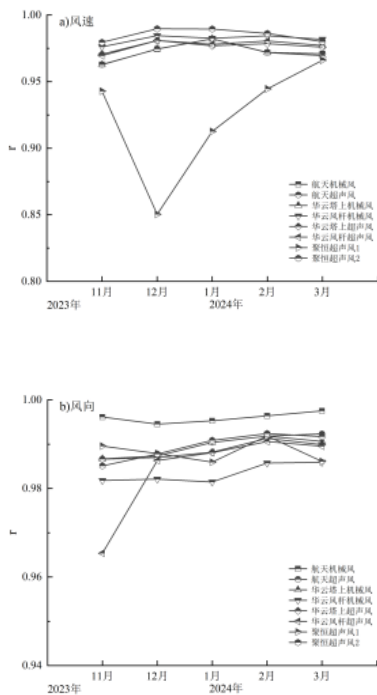


图 2 各厂家与达坂城主站的风速风向逐月皮尔逊相关系数

### 2.4 系统误差和均方根误差

对达坂城主站与各厂家测风设备的风速风向数据进行了系统误差和均方根误差计算, 结果见表 2。参考自动气象站观测规范, 规定风速最大允许误差限值设为  $\pm 0.5$  m/s。从风速系统误差方面分析, 三家厂商八套测风仪均在允许误差范围内, 其中华云塔上超声风系统误差最小, 仅为 0.006 m/s, 表现出极高的测量精度。进一步均方根误差进行分析, 航天机械风、华云塔上超声风以及聚恒超声风 2 号的三套测风仪的均方根误差小于 0.5 m/s, 表明这三款测风仪在风速测量上的误差相对较小, 结果更为稳定可靠。

在风向测量方面, 若以自动气象站观测规范中设定风向最大允许误差限值  $\pm 5^\circ$  为评估标准, 则仅航天机械风和聚恒超声风 1 号的系统误差满足该要求, 其他设备均超出允许误差范围。其中聚恒 2 号的系统误差更是达到  $-22.339^\circ$ , 显示出较大

的测量偏差。此外, 八套测风仪的 RMSE 均在  $8^\circ$  以上, 凸显了风向测量的挑战性。尽管如此, 航天机械风测风仪在风向测量方面仍表现出相对较小的误差, 其 RMSE 虽然高于  $5^\circ$ , 但相较于其他设备而言, 其测量结果的稳定性和准确性更为突出。

表 2 达坂城主站与各厂家的系统误差和均方根误差

厂家	类型	风速(m/s)		风向( $^\circ$ )	
		系统误差	均方根误差	系统误差	均方根误差
航天	机械风	0.142	0.318	-1.851	8.705
	超声风	0.155	0.529	-6.854	15.350
	塔上机械风	0.145	0.528	-6.813	15.527
华云	风杆机械风	0.328	0.523	-12.291	21.793
	塔上超声风	0.006	0.453	-8.345	16.743
	风杆超声风	-0.232	0.533	-15.529	26.503
聚恒	超声风 1 号	-0.301	0.894	-1.048	14.745
	超声风 2 号	-0.198	0.451	-22.339	27.034

进一步对达坂城主站与各厂家测风设备的数据进行逐月分析后发现(图 3), 风速系统误差(除聚恒超声风 1 号的 3 月之外)均能满足  $\pm 0.5$  m/s 为最大允许误差限值, 表明大部分设备在风速测量上的具有较高的可靠性。结合均方根误差进行综合分析发现航天机械风和华云塔上超声风测风仪的表现更为突出, 其各月份的均方根误差均能满足要求, 数据波动较小, 展现出更高的稳定性和可信度。相比之下, 聚恒超声风 1 号测风仪在风速测量方面表现欠佳, 其系统误差和均方根误差均为最大, 数据波动较大在一定程度上影响了测量结果的准确性。

风向误差方面, 同样未出现也类似于风速的月度变化趋势。除华云风杆超声风在 11 月出现显著偏大的误差之外, 其他设备各月之间的误差差异较小。值得注意的是, 航天机械风测风仪的系统误差整体保持在一个较低的水平, 且其均方根误差也普遍低于其他设备, 这表明该设备在不同月份均能保持较为稳定的测量性能。此外, 考虑到达坂城主站采用了与航天机械风同系列型号的设备, 这或许是导致误差相对较小的一个因素。对于华云风杆超声风 11 月系统误差达到  $-40.1^\circ$  分析发现, 较大误差主要集中于 11 月 21 日前, 此时系统误差接近  $-50^\circ$ 。经判断, 这可能是由于设备在安装时出现了定北偏差所导致的。在 11 月 21 日设备校正后, 系统误差降至  $-10^\circ$  左右。同样聚恒超声风 2 号设备也出现由于安装问题导致了较大的误差, 其各月系统误差稳定在  $21.9^\circ \sim 22.7^\circ$  之间。

此外对比了同一厂家同一型号不同安装位置的设备。发现华云风杆机械风的风向误差明显要大于华云塔上机械风。同样华云风杆超声风误差也略大于华云塔上超声风。这表明设备安装位置的不同对风向测量的精度确实存在影响, 且这种影响在机械风测风仪上可能更为显著。

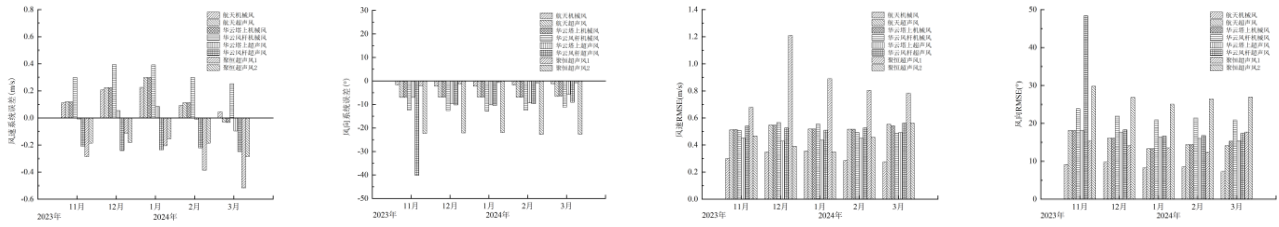


图3 各厂家测风仪的逐月系统误差和均方根误差

### 3 讨论与结论

(1) 试验期间数据完整率评估中, 华云表现最优, 聚恒次之, 航天相对较低。值得注意的是除航天3月之外, 其余时间各厂商的数据获取率均在97%以上, 证明了各厂家在数据获取能力的卓越表现。

(2) 除聚恒超声风2号的风向有明显偏差外, 其余厂商设备与标准设备风向一致性较高, 验证了设备在风向测量的整体可靠性。

(3) 相关性分析发现, 各厂商设备与标准设备在风速和风向测量上均表现出强正相关性。但聚恒超声风1号在风速测量方面的相关性表现相对较差, 尤其在12月份最为明显。

(4) 误差分析发现, 在风速测量方面, 航天机械风、华云塔上超声风和聚恒超声风2号测风仪表现突出, 误差小且稳定。但聚恒超声风1号表现欠佳。在风向测量方面, 航天机械风测风仪误差相对较小且稳定。但聚恒超声风2号和华云风杆超声风因安装问题导致了较大的风向误差。

(5) 综合分析聚恒的两套超声风分别在风速和风向上出现较大的误差。同时, 华云风杆超声风也存在设备安装问题。此外, 航天的设备在3月份数据获取率明显下降。因此, 三个厂家都需要加强对设备的管理和维护工作, 以提高测量精度和稳定性。

(6) 设备安装位置会影响风向测量精度, 对比华云的风杆与塔上测风仪发现, 机械风测风仪受位置影响更大, 超声风测风仪也有类似趋势。月度分析显示, 低温会增加机械测风仪的风速误差, 而对风向影响有限。未来研究需深入探究气温、湿度等环境因素对测量精度的影响。本研究通过深入分析不同厂家的测风仪性能, 不仅揭示了当前行业在风速和风向测量方面的

技术水平, 并强调了设备管理和维护对于提升测量精度的重要性。这些发现对于推动测风仪技术的进步、优化设备使用以及促进环境科学研究的发展具有重要意义。

### 参考文献

- [1] 刘华欣. 基于超声波传感器的风速风向测量研究[J]. 仪表技术与传感器, 2018, 55(12): 101-104.
- [2] 毛梓晨. 超声波风速风向测量系统的研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2023.
- [3] 马欣, 赵继超. 基于超声波的风速风向测量仪设计[J]. 现代制造技术与装备, 2021, (04): 96-98.
- [4] Kaimal JC, Gaynor JE. Another look at sonic thermometry [J]. Boundary-Layer Meteorol, 1991, 56(04): 401-410.
- [5] 宋文灿, 傅绍帅. 超声波风速风向测量装置的原理及应用[J]. 电子质量, 2016, (06): 49-52.
- [6] 王明明, 王建森, 黄鹏良. 超声波风速仪示值的测量不确定度评定[J]. 气象水文海洋仪器, 2019, 36(01): 1-3.
- [7] 林辉阳, 王珊珊, 杨庆波. 超声波测风仪对比观测试验研究[J]. 福建电脑, 2019, 35(06): 33-36.
- [8] 薛笋笋, 肖建辉, 刘青松, 等. EZC超声波测风仪和EL15-C风速风向传感器平行观测对比分析超声波测风仪外场试验数据分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2023, (02): 74-78.
- [9] 蔡彤, 柯莉萍, 徐文隆, 等. 超声波测风仪外场试验数据分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2021, 38(04): 23-25.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 自动气象站观测规范: GB/T 33703—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.