实验室检测
Laboratory Testing
第 3 卷 第 1 期　2025 年 1 月（半月刊）

超声波风速传感器的误差分析及应用

刘星辉，陈钰彤，梁　飞*，杨晓嘉，潘曰凯

（中国民用航空局第二研究所，成都　610041）

摘　要：目的　探讨超声波风速传感器在民航领域中的应用，通过对超声波风速传感器在测量过程中的误差进行系统分析，以提高超声波风速传感器的准确性与稳定性。**方法**　本文系统地分析了现有的校准方法，设计并实施了对四台不同的超声波风速传感器的实验，通过对比不同传感器在多种风速条件下的测量性能，评估其精度和可靠性。**结果**　实验结果揭示了在低、中、高风速区间内，各传感器存在的系统性误差，在低风速区间 2~5 m/s 时误差较大，可达 10%。**结论**　基于实验数据提出的优化校准方法提高了传感器的测量性能和可靠性，为民航气象监测提供了更加准确的风速数据支持。

关键词：超声波风速传感器；民航气象；校准技术；测量精度；航空安全

0　引　言

民航业作为全球经济的关键支柱，其航班安全与准点率直接关乎旅客的生命安全及航空公司的运营效益。其中，气象因素，特别是风速与风向，对航班的起降与飞行路径选择具有决定性影响。传统机械式风速仪因精度低、响应慢等局限性，已难以满足现代民航气象监测的高标准要求。在此背景下，超声波风速传感器凭借其高精度、快速响应且无机械磨损的优势，逐渐成为民航气象监测的首选工具。

然而，超声波风速传感器在实际应用中仍面临校准难题，尤其是在复杂的机场环境中，如何确保其测量数据的准确性和可靠性成为亟待解决的关键问题。随着航空安全标准的不断提升及对气象监测精度的日益严苛，超声波风速传感器在民航领域的应用得到了广泛关注与快速发展。它利用超声波在空气中的传播速度受风速影响的特性，能够实时提供高精度风速与风向数据，被广泛应用于机场与飞机的气象监测系统中 [1-2]。

机场气象观测系统是保障航空安全的重要环节，尤其在跑道与滑行道的风速监测中，准确的风速数据对于飞行起降的安全性至关重要 [3]。超声波风速传感器因高灵敏度与高精度，成为机场气象站的首选设备。此外，随着自动化气象观测系统(AWOS)的发展，超声波风速传感器已成为其重要组成部分，为空中交通管制员提供实时气象数据 [4-5]，助力飞行路径的动态调整。

本文通过系统分析超声波风速传感器的校准方法，设计并实施实验，评估不同传感器在多种风速条件下的测量性能，揭示其存在的系统性误差，并基于实验数据提出优化校准方法，提高超声波风速传感器的测量精度与长期稳定性，为民航气象监测提供更加准确的风速数据支持，进而提升航班的安全性与准点率，促进民航业的可持续发展。

1　材料与方法

1.1　实验设置

被测传感器本文以 WMT700 系列超声波风速传感器(VAISALA)为例进行风洞计量实验。风洞类型选用 WZ860070-E 直路开口风洞，该类型风洞的一端为开放式设计，能够引入外部空气流动并通过测试段排出。直路开口风洞适合进行高精度的风速测量，尤其在低湍流强度条件下表现出良好的稳定性。风洞及其配件参数指标如表 1 所示。

表 1　风洞参数指标

风洞参数	参数指标
工作段直径	600 mm
工作段长度	1000 mm
收缩比	1:6
风速范围	0.2~70 m/s
紊流度	＜ 0.5%，中心点＜ 0.1%
流速稳定性	≤ 0.5%
流速均匀性	≤ 1%
气流偏角	≤ 1°
风机电压	380 V AC/50 HZ
风机输出功率	90 kW
风洞尺寸	10900 mm×2000 mm×2500 mm(长宽高)

第一作者：刘星辉，助理研究员，研究方向为航空气象。
* **通信作者：**梁飞，硕士，研究员，研究方向为空管技术。E-mail: liangfei@caacsri.com

风洞配备精确的风速调节装置，通过调整风洞的风扇转速，可以在 0~30 m/s 的范围内生成稳定的气流，精度可达到 ±0.1 m/s。风速的调节采用计算机控制，能够实现连续、平滑的风速变化。实验室环境的温度维持在(20±1)°C，相对湿度控制在(50±5)%。

1.2 实验方法

为了深入评估超声波风速传感器在 0 m/s 至 30 m/s 风速范围内的性能，实验覆盖了从低风速到高风速的七个关键测试点，分别是 2、5、10、15、20、25 m/s 和 30 m/s，能够全面考察传感器在不同风速条件下的响应速度、准确性和稳定性。

在每个设定的风速测试点，利用专业的风洞设备或可控的自然风环境来产生并维持 2 分钟的稳定气流，以确保传感器有足够的时间适应当前风速并输出稳定的数据。在确认数据稳定后，立即记录包括风速读数、响应时间、信号强度等关键性能指标，为后续的数据分析提供详实的基础。为确保数据的准确性和可靠性，实验在每个风速测试点重复进行至少三次，以识别并排除偶然误差，并在不同时间段进行重复性测试，以评估传感器在不同环境条件(如温度、湿度变化)下的一致性和稳定性。这一措施有助于进一步验证传感器的长期可靠性。

最后，收集所有实验数据，并采用统计软件进行详细分析，包括计算平均值、标准差、变异系数等统计指标，以量化传感器的性能表现。通过对比不同风速点、不同实验次数以及不同时间段的数据，可以深入探究传感器的响应特性、稳定性及可能存在的误差来源，为后续的传感器优化及应用提供坚实的实验依据。

2 结果与分析

2.1 实验结果

具体实验结果如表 2 所示。

2.2 线性回归分析

采用线性回归模型，分析超声波风速传感器输出的风速值与标准风速计测量的风速值之间的关系。模型的基本形式为：

$$V_{sensor} = \alpha \cdot V_{s\tan dard} + \beta$$

其中，α 为回归斜率，β 为截距。

2.3 误差分析

根据表 2 测量结果，低风速区间(2.0 m/s 至 10.0 m/s)：在低风速下，各传感器的误差较为明显，部分传感器在低风速时倾向于测量偏低，误差相对较大。例如，传感器 B、C、D 在低风速下的测量值普遍低于标准值，误差达到了 10%，表明传感器在低风速条件下存在系统性偏差。中高风速区间(15.0 m/s 至 30.0 m/s)：随着风速的增大，四种传感器的误差逐渐减小，测量值逐渐趋于标准值，显示出更好的测量精度。传感器 A 在中高风速下的测量误差较小，保持在 1%-2% 左右，展现出较好的性能，而传感器 B、C、D 的误差较为波动。对于传感器 B、C、D，虽然整体误差在减小，但波动范围较大，需要在使用时注意其稳定性。在实际应用中，可以根据具体需求和风速范围选择合适的传感器进行组合使用，以提高整体测量精度和可靠性。同时定期对传感器进行校准和维护也是确保测量准确性的重要措施。

表 2 超声波风速传感器实验结果

	风速(m/s)		误差	
	标准值	测量值	示值误差	相对误差
传感器 A	2.0	2.1	0.1	5.00%
传感器 B	2.0	1.8	-0.2	10.00%
传感器 C	2.0	1.8	-0.2	10.00%
传感器 D	2.0	1.8	-0.2	10.00%
传感器 A	5.0	5.1	0.1	2.00%
传感器 B	5.0	4.9	-0.1	2.00%
传感器 C	5.0	5.1	0.1	2.00%
传感器 D	5.0	4.8	-0.2	4.00%
传感器 A	10.0	10.1	0.1	1.00%
传感器 B	10.0	10.0	0.0	0.00%
传感器 C	10.0	10.1	0.0	0.00%
传感器 D	10.0	10.0	0.0	0.00%
传感器 A	15.0	15.2	0.2	1.33%
传感器 B	15.0	15.0	0.0	0.00%
传感器 C	15.0	15.1	0.1	0.67%
传感器 D	15.0	15.0	0.0	0.00%
传感器 A	20.0	20.3	0.3	1.50%
传感器 B	20.0	20.1	0.1	0.50%
传感器 C	20.0	20.2	0.2	1.00%
传感器 D	20.0	20.1	0.1	0.50%
传感器 A	25.0	25.2	0.2	0.80%
传感器 B	25.0	25.1	0.1	0.40%
传感器 C	25.0	25.2	0.2	0.80%
传感器 D	25.0	25.1	0.1	0.40%
传感器 A	30.0	30.4	0.4	1.33%
传感器 B	30.0	30.1	0.1	0.33%
传感器 C	30.0	29.9	-0.1	0.33%
传感器 D	30.0	30.1	0.1	0.33%

系统误差是一种随着实验条件重复出现的固定偏差，在本次实验中，特别是在低风速区域，明显观察到部分传感器的输出偏低。这种现象可能是由于超声波风速传感器在低风速下灵敏度不足，或是受到环境因素(如湿度、温度等)的影响，导致传感器无法准确捕捉微弱的风速变化。传感器 B、C、D 在低于 10.0 m/s 的风速区间中表现出一致的负偏差，而传感器 A 在所有风速范围内的测量误差较为均匀，未表现出明显的系统误差。这表明传感器 A 的校准精度较高，性能较为稳定。对于

其他传感器，需要通过改进校准技术来减少低风速下的系统误差。针对传感器 B、C、D 在低风速下出现的系统误差，有必要通过改进校准技术来加以减少。这可能涉及对传感器的灵敏度进行调整，或者优化其环境适应性，以减少环境因素对测量结果的干扰。通过这些措施，有望提升传感器在低风速条件下的测量准确性，从而满足更广泛的应用需求。

3 讨论与结论

本文总结了超声波风速传感器的测量精度，并比较其与标准风速计的性能差异，进一步评估其在民航气象监测中的适用性。超声波风速传感器在民航领域的应用得到了广泛关注 6-8，因其能够提供精确、实时的风速数据，为机场运营和飞行安全提供了关键支持[9]。本文通过分析超声波风速传感器的工作原理及其在民航中的实际应用，探讨了其在机场气象监测中的优势和挑战。超声波风速传感器利用声波的传播时间差异来测量风速[10-11]，具有无机械磨损、精度高、响应快的特点，因此在现代航空气象系统中逐渐取代传统机械式传感器。

3.1 风速影响因素

超声波风速传感器利用声波传播时间的差异来测量风速，具有无机械磨损、响应速度快等优点，其测量精度也会受到多种因素的影响。

环境条件：声波传播速度会受到环境温度和湿度的显著影响。例如，在高湿度或大温差条件下，传感器可能产生系统性偏差；虽然气压对声速的影响相对较小，但在极端条件下仍可能引入一定误差。

风速范围：表 2 表明，超声波测风传感器低风速区间 2~5 m/s 存在系统性偏高误差，而在高风速范围内表现较为稳定。

传感器的布局和安装：安装位置的选择、安装角度以及周围障碍物的影响都会对测量结果产生干扰。传感器需远离高大的建筑物或其他干扰源，以减少气流湍流对测量的影响。

校准与维护：校准不当或长期未维护的传感器，其测量精度会逐渐降低。定期进行风洞测试和校准是确保精度的关键措施。

3.2 实验意义和改进建议

实验的核心意义在于为提升超声波风速传感器的测量性能和适应能力提供数据支持和技术依据；通过系统性实验识别不同风速区间及环境条件下的误差来源，为改进硬件设计和优化算法提供参考；实验数据可为传感器的校准标准和性能规范的制定提供依据，从而推动其在民航领域的标准化应用。

针对低风速区间的系统性偏差，开发更精准的补偿算法，减少温湿度变化对测量结果的影响；设计具备自动自检和自校准功能的传感器，以提高其长期运行的稳定性和可靠性；通过优化生产工艺或引入新材料，降低传感器的制造成本，以促进其在中小型机场的普及应用。

3.3 未来发展方向

结合超声波风速传感器与其他气象传感器（如激光测风仪、雷达等），实现多源数据融合，提高风速测量的精度和可靠性。开发更先进的风速测量技术，如结合声学与光学技术的混合型传感器，以进一步提高测量精度和环境适应性。开发基于人工智能的风速数据分析系统，实现实时异常检测与动态补偿，提高风速测量的智能化水平。探讨超声波风速传感器在极端环境（如极寒、高湿、强风）的应用可行性，并提出针对性改进措施。针对传感器的长期运行特性，开展老化测试和可靠性研究，探索延长使用寿命的技术方案。

超声波风速传感器作为现代民航气象监测的重要组成部分，其高精度、快速响应和无机械磨损等优势，使其在民航领域的应用前景十分广阔，但其测量精度在低风速和极端条件下仍存在一定局限性，需要通过优化算法、改进硬件设计以及定期校准等措施加以改进。未来，通过多传感器融合、智能化升级和新型传感技术的研发，超声波风速传感器的性能和适用性将进一步提升，为民航气象监测和飞行安全提供更有力的技术支持。

参考文献

[1] 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，2021，57(04)：96-98．

[2] 周洁，高航，刘金波，等．多经纬仪跟踪探空气球的空中风场反演方法[J]．激光与红外，2022，52(07)：1022-1031．

[3] 曾淑玲．三类航危天气预报技术及业务系统研究[D]．兰州：兰州大学，2012．

[4] 李肖雅，禹智斌，刘冬，等．大风背景下首都机场两条跑道低空风切变特征统计[J]．红外与激光工程，2021，50(12)：294-302．

[5] 郑越，张英华．AviMetAWOS系统中编发报软件的应用及实例分析[J]．科技视界，2016，(11)：240．

[6] BROWN FR, SMITH MG, POTTER J, *et al*.Parameter Development via In Situ Residual Stress Measurement and Post-deposition Analysis of Cold Spray CuNi Coatings [J].JTher Spray Tech，2020，29(08)：1-16．

[7] 韩晓东，机载毫米波测云雷达．江苏省，中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所，2019-04-01．

[8] 黄敏，卢会国，王保强，等．超声测风传感器测量结果不确定度分析 [J]．成都信息工程学院学报，2015，30(04)：361-365．

[9] 闵佳元．机场航空器地面交通流随机演化特性研究 [D]．哈尔滨：工哈尔滨工业大学，2018．

[10] 胡全辉．基于超声波的风速风向仪研究与设计 [D]．南京：南京信息工程大学，2019．

[11] 褚卫华，顾正华．风洞超声波风速风向三维测量装置设计与实现 [J]．自动化与仪器仪表，2023，(01)：36-41，47．