

基于大数据分析技术智能化维护气象设备的应用研究

卢明媛

贵州空管分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2026年1月13日; 录用日期: 2026年2月17日; 发布日期: 2026年2月25日

摘要

气象设备的稳定运行对航空安全与效率至关重要, 而传统维护模式面临设备老化、人工经验依赖及多源数据整合不足等挑战。本研究提出基于Hadoop与Spark技术的智能化维护解决方案: 通过模块化传感器组网、边缘计算节点及Kafka消息队列实现数据高效采集与实时同步; 运用 3σ 准则、滑动窗口算法、插值法及NTP协议完成数据清洗与标准化; 从原始数据中提取设备健康指标及时序特征, 结合环境变量通过Spark MLlib训练LSTM故障预测模型; 最终通过动态预警阈值、工单智能生成及三维态势可视化实现维护决策优化。研究成果显著提升了维护效率与准确性, 未来可结合边缘计算与跨域数据融合技术进一步优化。

关键词

气象设备, 智能化维护, 大数据分析, 故障预测

Research on the Application of Intelligent Maintenance of Meteorological Equipment Based on Big Data Analytics Technology

Mingyuan Lu

Guizhou Air Traffic Control Branch, Guiyang Guizhou

Received: January 13, 2026; accepted: February 17, 2026; published: February 25, 2026

Abstract

The stable operation of meteorological equipment is crucial for aviation safety and efficiency, but

traditional maintenance models face challenges such as equipment aging, reliance on manual experience, and insufficient integration of multi-source data. This study proposes an intelligent maintenance solution based on Hadoop and Spark technologies: efficient data collection and real-time synchronization are achieved through modular sensor networking, edge computing nodes, and Kafka message queues; data cleaning and standardization are completed using the 3σ criterion, sliding window algorithm, interpolation method, and NTP protocol; equipment health indicators and time-series features are extracted from raw data, and an LSTM fault prediction model is trained via Spark MLlib in combination with environmental variables; finally, maintenance decision optimization is realized through dynamic early warning thresholds, intelligent work order generation, and 3D situation visualization. The research results significantly improve maintenance efficiency and accuracy, and future optimization can be further enhanced by integrating edge computing and cross-domain data fusion technologies.

Keywords

Meteorological Equipment, Intelligent Maintenance, Big Data Analysis, Fault Prediction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在现代航空运输体系中，气象条件对飞行安全和效率起着关键作用，气象设备作为获取气象信息的核心工具，其稳定运行至关重要。气象雷达、自动观测系统等设备提供的风速、能见度、跑道视程等数据，是飞行员起降决策的重要依据，同时对危险天气的探测预警也能降低事故率。

然而，传统的气象设备维护模式问题凸显。部分设备老化性能衰减，且维护过度依赖人工经验，易产生维护盲区。同时，多源数据整合能力不足，难以实现设备故障精准预测，常采用事后维修，影响航空运输安全与效率。

随着信息技术发展，大数据分析等新技术为空管系统气象设备维护带来新机遇。智能化维护可通过多源数据融合，构建设备健康评估体系，实现从被动维修到主动健康管理的转变。本研究聚焦于大数据分析技术在气象设备维护中的应用，旨在提升维护效率，保障航空安全。

2. 绪论

2.1. 研究背景与意义

在现代航空运输体系中，气象条件对飞行安全和效率的影响至关重要。气象雷达、自动观测系统等气象设备承担着实时采集风速、能见度、跑道视程等核心气象参数的重要任务。这些参数为飞机起降阶段的决策提供了关键的数据支撑。通过探测雷雨、低云、风切变等危险天气现象，提前预警规避飞行风险，降低因气象因素导致的事故率。

当前空管系统气象设备维护已形成定期检查与专项维护结合的机制。例如，贵阳机场通过年度维护计划对自动气象观测系统进行传感器更换、设备清洁校准及线路防水防虫检查，并建立应急预案以降低维护期间对运行的影响。但仍面临设备老化与技术依赖矛盾，部分气象设备，如大气透射仪、云高仪因长期服役导致性能衰减，而新型智能诊断工具的应用尚未普及，过度依赖人工经验易引发维护盲区。多源数据整合能力薄弱，气象设备运行参数、环境数据与航班动态尚未深度融合，难以通过机器学习精准

预测设备故障。

大数据分析技术的出现为空管系统气象设备维护提供了创新的解决方案。通过 Hadoop [1]与 Spark [2]技术的应用,可以实现多源数据的实时融合分析。这不仅能够提升维护效率,推动空管系统气象设备维护的数字化转型,还能够有效破解设备全生命周期管理过程中面临的瓶颈问题,为保障航空安全提供更加有力的支持。

2.2. 国内外研究现状

国内研发的“爱美翼”航空气象服务平台整合 BMA 算法与 AI 多因子融合技术,实现机场终端区雷暴大风识别预警,准确率提升 15%;“天衍”空天地一体化监测系统通过 AI 算法实现冰雹、雷暴的实时监测,命中率达 95%,支撑民航设备运行安全。国际方面,NASA 的 DASH 系统与欧洲空管局的多源数据融合技术,在气象设备监测与航路优化方面取得显著成效[3]。

近年来,工业设备预测性维护领域成果丰硕。潘忠义的工业物联网平台下的设备实时监测与智能维护技术研究,通过分层架构设计实现多源异构数据融合,结合边缘计算与 5G 技术保障数据实时传输。开发轻量化 LSTM 预测模型,支持设备故障提前 7 天预警,准确率达 92%。应用案例表明,该系统可将故障响应时间缩短至 15 分钟,维护成本降低 42% [4]。卢昊等基于多源融合数据的太原低空气象服务系统设计,以山西省太原市为例,设计面向低空基础设施选址、飞行任务规划、航路优化、风险评估等定制化、场景化服务的低空气象服务系统,初步满足低空飞行活动所需的三维立体、百米级、分钟级、准实时的气象服务需求[5]。

气象大数据在航空气象设备监测中已实现全链条渗透,但未来需结合边缘计算与跨域数据融合,提升预测覆盖度与响应速度。

3. 智能化维护气象设备理论基础

3.1. 空管气象设备维护需求特征

气象设备运行高度依赖传感器数据,如温度、湿度、风速、风向、气压等的实时性与准确性,需保障传感器采集频率与精度符合民航气象观测标准。否则,能见度传感器故障可能导致跑道视程数据异常,直接影响航班起降决策。其次,如数据采集器状态码、通信传输记录的运行日志需长期存储并支持回溯分析,以识别设备隐性故障模式。此外,气象设备需在极端天气下稳定运行,维护需重点关注防风防雨防凝冻的结构完整性、传感器抗腐蚀性以及电源系统可靠性。

3.2. 气象设备数据类型及其维护关联性(表 1)

Table 1. Data types and their maintenance correlation

表 1. 数据类型及其维护关联性

数据类型	维护关联性
传感器数据	包括温度、湿度、风速等实时测量值,需定期校准以保障数据精度。
运行日志	记录设备开关机状态、通信中断事件等,用于定位故障根源。
环境参数	安装位置的风压、温湿度等外部环境数据,用于评估设备损耗速率。
维护操作记录	包含历史维护时间、更换部件信息,支持预测性维护模型训练。

3.3. 核心维护需求

(1) 维护响应时效性。在气象设备运行过程中,一旦出现异常告警,需要快速完成初步诊断,实现实

时故障定位。这就要求维护人员能够快速获取设备的运行日志，并通过有效的分析方法判断故障原因，如确定是传感器失效还是通信中断等问题。同时，为了确保不同等级的故障能够得到及时有效的处理，需要建立分级响应机制。根据故障对航空安全和业务运行的影响程度，制定相应的响应标准。例如，雷达数据中断属于一级故障，这类故障会严重影响飞机的起降安全和空管指挥，因此必须在 2 小时内修复；而单个温湿度传感器漂移属于二级故障，对航空安全的影响相对较小，但也会影响气象数据的准确性，需要在 24 小时内完成校准或更换。

(2) 数据关联性分析。空管气象设备种类繁多，不同设备之间的数据往往存在一定的关联性。跨设备数据融合就是要关联气象雷达数据与自动观测站数据等，通过对这些数据的综合分析，如风切变所引发的设备联动故障。风切变是一种对飞行安全危害极大的气象现象，它会导致风速和风向在短时间内发生剧烈变化。当风切变发生时，气象雷达和自动观测站的相关数据都会出现异常。通过对这些数据的关联性分析，可以及时发现风切变的存在，并判断其对气象设备的影响，从而采取相应的措施，保障设备的正常运行和航空安全。

综上所述，空管气象设备维护需要以多源数据融合为基础，通过设计标准化、实时化的维护流程，实现从传统的被动维修模式向主动健康管理模式的转型。其中，核心需求主要体现在对维护响应时有效性的严格管控和对数据关联性的深入挖掘上。

4. 大数据分析技术在气象设备维护中的应用

大数据分析技术是指利用先进算法、工具及方法，对海量、高速、多样化(5V 特征：Volume 数据量大、Velocity 速度快、Variety 类型多、Value 价值密度低、Veracity 真实性高)的数据进行全流程处理，以提取有价值信息的技术体系。其核心目标是发现数据中的模式、趋势与关联性，支持决策优化与预测分析[6]。

4.1. 分布式存储技术(Hadoop)

Hadoop 采用数据分块存储(块大小设置为 128 MB)与 3 副本冗余机制，实现 PB 级多源异构数据可靠存储，涵盖传感器数据、运行日志等各类数据。基于 MapReduce 框架处理离线数据，如按季度对设备故障记录进行统计挖掘。安全层面，通过 Kerberos 身份认证与 ACL 访问控制，设置运维人员、分析师等不同权限组，满足民航数据安全要求。

4.2. 实时流处理技术(Spark)

基于 RDD 实现传感器数据流实时处理，Spark Streaming 采用 5 秒微批次窗口，满足故障秒级响应需求。网络安全方面，通过内存计算减少数据传输暴露时间，节点间通信采用 AES-256 加密，RDD 持久化数据加密存储，同时实时监控网络流量日志，识别异常访问行为。

4.3. 关键技术实现细节

4.3.1. Kafka Topic 设计

采用三级 Topic 架构：meteorological_raw_data 存储原始传感器数据，按设备类型分区(如风速传感器、温湿度传感器)；meteorological_cleaned_data 存储清洗后的数据；meteorological_alarm 存储故障告警信息。每个 Topic 设置 10 个分区，副本因子为 3，确保高可用。

4.3.2. Spark Streaming 时间窗口设置

采用滑动窗口机制，窗口长度设为 30 秒，滑动步长 5 秒，既保证数据覆盖度，又满足实时性要求。

通过窗口函数计算滑动周期内的传感器数据均值、方差等统计量，为故障判断提供依据。

4.3.3. LSTM 输入向量构成

输入向量维度为 32 维，包括：12 维设备状态参数(传感器测量值、电源电压等)、8 维时序特征(24 小时均值、突变频次等)、6 维环境变量(温湿度、盐雾浓度等)、3 维设备历史维护特征(上次维护间隔、故障次数等)、3 维运行时长特征(累计运行时间、连续运行时间等)。

4.4. 技术协同优势

4.4.1. 数据处理全链路互补

Hadoop 存储历史数据并支撑离线建模，Spark 处理实时数据流实现故障秒级预警，形成“离线建模 - 实时验证”闭环。例如，基于 Hadoop 存储的 1 年历史数据训练 LSTM 模型，Spark 利用该模型实时分析传感器数据并预警。

4.4.2. 安全能力协同增强

Hadoop 的多副本存储与 Spark 的实时检测构建立体安全架构，覆盖数据全生命周期。Hadoop 记录数据操作审计日志，Spark 实时监控访问行为，共同支撑等保 2.0 合规审计。

5. 智能化维护系统架构设计

5.1. 总体架构

系统采用数据采集层 - 分析层 - 应用层三级架构(图 1)。数据采集层通过多源传感器集成与边缘计算节点；分析层基于 Hadoop + Spark 完成数据处理与模型训练；应用层提供维护决策、可视化等服务。

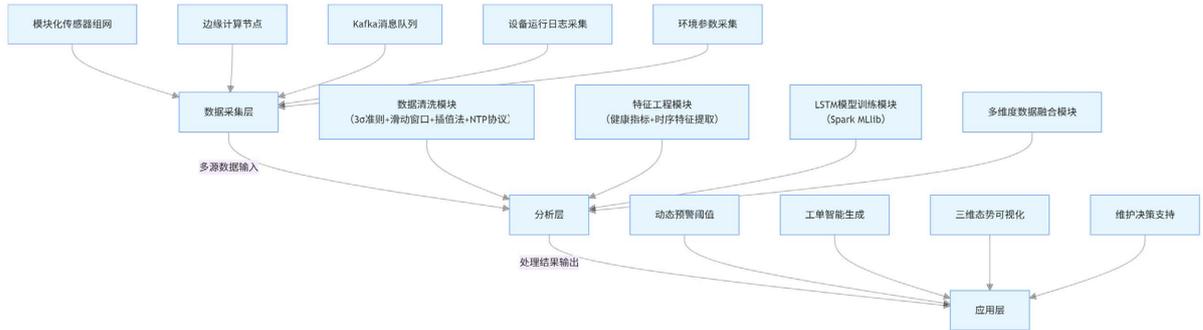


Figure 1. Overall system framework

图 1. 系统总体框架

5.2. 数据处理流程图(图 2)



Figure 2. Data processing flowchart

图 2. 数据处理流程图

5.3. 数据处理流程设计

5.3.1. 数据采集层

多源传感器采用模块化组网，风速传感器为超声波式，温湿度传感器为电容式。边缘计算节点缓存

最近 1 小时数据,按阈值规则过滤无效数据。通过 Kafka 实现数据同步,丢包率控制在 0.01%以内。数据清洗采用 3σ 准则识别异常值,结合滑动窗口算法(窗口大小设为 5 个采集周期),缺失数据采用线性插值补齐,NTP 协议校准时间戳,时间误差 ≤ 1 ms。

5.3.2. 分析层

特征工程提取设备健康指标与时序特征,基于 Spark MLlib 训练 LSTM 模型,模型迭代次数设为 100,批处理大小为 64。多维度数据融合将气象数据与设备运行日志关联,区分自然干扰与设备故障。

5.3.3. 应用层

动态预警阈值根据实时环境参数调整,如低温环境下适当降低风速传感器告警阈值。工单智能生成模块结合故障优先级与备件库存,自动分配维修人员。三维态势展示基于 GIS 地图,叠加设备健康状态、预警区域等信息。

6. 结论与展望

本研究借助 Hadoop 和 Spark 技术,为空管气象设备智能化维护提供了创新方案。通过模块化传感器组网、边缘计算节点、Kafka 消息队列实现高效数据采集与同步,优化了关键技术实现细节,从原始数据提取特征训练 LSTM 模型,结合动态预警阈值等功能提升维护效率与准确性。

然而,研究仍有提升空间。未来可结合边缘计算与跨域数据融合技术,提高预测覆盖度和响应速度,实现更精准的故障预警;加强与其他空管系统深度集成,促进全面信息共享与协同决策,保障航空安全;持续关注气象设备更新和技术发展带来的新需求与挑战,及时优化维护策略,推动空管气象设备维护迈向更高水平。

参考文献

- [1] 朱杰孝,马莉.航空气象使用 Hadoop 架构搭建大数据平台研究[J].民航科技,2019(6):3-5.
- [2] 蔡建坤.基于 Spark 大数据技术的 ADS-B 质量分析研究[J].民航科技,2020(2):4-6.
- [3] 陈晓颖,徐莎莎,蒋芷晴.航空气象预报关键技术攻关应用结硕果[EB/OL].2023-09-19.
https://www.cma.gov.cn/ztbd/2023zt/20230524/2023052403/202309/t20230927_5801938.html,2025-05-04.
- [4] 潘忠义.工业物联网平台下的设备实时监测与智能维护技术研究[J].电脑知识与技术,2025,21(10):98-100.
- [5] 卢昊.基于多源融合数据的太原低空气象服务系统设计[C]//中国气象学会.第一届城市气象服务学术交流会摘要集.太原:太原气象服务中心,2025:14.
- [6] 施万里,张余辉.基于大数据分析技术的智慧教育平台设计[J].现代电子技术,2020(9):5-8.