

航空气象多源异构数据存储管理平台的设计及应用

郭忠立

民航西南地区空中交通管理局气象中心, 四川 成都

收稿日期: 2026年3月26日; 录用日期: 2026年6月15日; 发布日期: 2026年6月25日

摘要

针对航空气象业务中多源异构探测数据类型复杂、增长迅速, 以及传统存储架构在可靠性、安全性和扩展性方面存在不足的问题, 设计并实现了一套航空气象多源异构数据存储管理平台。平台由数据接入、数据治理、分布式存储、安全防护和业务应用支撑等部分组成, 可实现多源气象探测设备和相关业务数据的统一接入、标准化处理、集中存储和安全管理。在数据接入方面, 平台支持多种通信协议和异构数据格式解析; 在数据治理方面, 构建了质量控制、时空对齐和多源融合处理流程; 在数据存储方面, 基于MinIO分布式对象存储架构, 结合纠删码和校验和机制提高数据可靠性; 在安全防护方面, 采用SM2算法和SSL/TLS机制实现数据传输与访问控制保护。以机场低能见度监测预警为应用场景, 利用葵花8号卫星资料、数值预报资料、气象局加密自动站资料以及双流机场和天府机场自动观测资料开展应用验证。结果表明: 该平台能够较好支撑多源气象数据的协同处理与应用调用, 在典型个例中可提前24 h给出起雾概率预测, 预测结果与实况基本一致。研究结果说明, 该平台可为航空气象智能化业务提供稳定的数据基础支撑。

关键词

航空气象, 多源异构数据, 数据治理, 分布式对象存储, 低能见度预警

Design and Application of an Aviation Meteorological Multi-Source Heterogeneous Data Storage and Management Platform

Zhongli Guo

Southwest Air Traffic Management Bureau CAAC, Chengdu Sichuan

Received: March 26, 2026; accepted: June 15, 2026; published: June 25, 2026

Abstract

To address the problems of complex data types, rapid growth of multi-source heterogeneous observation data, and the limitations of traditional storage architectures in reliability, security and scalability in aviation meteorological services, an aviation meteorological multi-source heterogeneous data storage and management platform was designed and implemented. The platform consists of data access, data governance, distributed storage, security protection and service application support modules, and realizes unified access, standardized processing, centralized storage and secure management of multi-source meteorological observation equipment and related business data. In terms of data access, the platform supports multiple communication protocols and heterogeneous data format parsing. In terms of data governance, a processing workflow including quality control, spatiotemporal alignment and multi-source data fusion was established. In terms of data storage, the platform is built on the MinIO distributed object storage architecture, and data reliability is improved by erasure coding and checksum mechanisms. In terms of security protection, the SM2 algorithm and SSL/TLS mechanism are adopted to protect data transmission and access control. Airport low-visibility monitoring and warning was selected as an application scenario. Himawari-8 satellite data, numerical weather prediction data, dense automatic weather station data from the meteorological bureau, and automatic observation data from Shuangliu Airport and Tianfu Airport were used for validation. The results show that the platform can effectively support collaborative processing and application use of multi-source meteorological data. In a typical case, the platform can provide fog probability prediction 24 h in advance, and the prediction is generally consistent with observations. The results indicate that the proposed platform can provide a stable data foundation for intelligent aviation meteorological services.

Keywords

Aviation Meteorology, Multi-Source Heterogeneous Data, Data Governance, Distributed Object Storage, Low-Visibility Warning

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

航空气象探测资料是开展危险天气监测预警、航路天气分析和机场运行保障的重要基础。随着航空气象观测体系持续完善,探测设备逐步覆盖地面、高空和区域尺度,数据来源已扩展至地面自动观测站、天气雷达、卫星遥感和数值预报产品等多种类型。与此同时,随着观测频次提高和设备部署密度增加,航空气象数据规模迅速增长,数据类型呈现明显的多源异构特征,给数据接入、治理、存储与共享调用带来了较大挑战[1][2]。

气象数据具有连续性强、时效性高和不可重复获取等特点,其存储管理水平直接影响业务运行的稳定性和数据利用效率。传统存储架构在面对海量异构气象数据时,容易在容量扩展、访问性能、统一管理和安全保障等方面暴露不足,难以满足当前航空气象业务发展需求[3]。尤其是在智能预报和智能识别逐步应用于航空气象业务的背景下,标准化、可调用、高质量的数据资源已成为支撑模型训练与业务落地的重要基础[4][5]。

近年来,围绕气象大数据存储管理、分布式架构和多源数据融合,相关研究已取得一定进展。但从

航空气象业务场景看,面向多类型探测设备的统一接入、分布式高可靠存储以及安全防护一体化设计仍需进一步加强。为此,本文面向航空气象业务需求,设计并实现一套多源异构数据存储管理平台,重点解决多源设备统一接入、数据标准化治理、分布式可靠存储和传输安全防护等问题;同时以机场低能见度监测预警为应用场景,验证平台对多源数据处理与业务应用的支撑能力[6][7]。

2. 平台总体设计

2.1. 平台架构

航空气象多源异构数据存储管理平台总体上由数据接入层、数据治理层、数据存储层、安全防护层和业务应用层组成。平台采用分层设计思路,以实现多源设备统一接入、数据标准化处理、分布式可靠存储以及业务应用支撑。对象存储接口采用 S3 兼容规范,以便与上层数据处理程序、可视化系统和模型训练流程进行衔接[8];底层采用 MinIO 分布式对象存储架构,以满足海量气象数据的扩展存储需求[9][10]。

与通用气象大数据平台相比,本平台针对航空气象业务做了三方面特殊设计。其一,在数据完备性保障方面,航空气象数据不可重复获取,平台在接入层引入本地缓存与断点续传机制,在通信异常时最大限度保留原始数据,存储层以纠删码保障节点故障下的数据可恢复性。其二,在时效性方面,机场 AWOS 数据更新频率达 1 分钟,平台采用流式接入与实时解析,保障数据从采集到入库的端到端延迟控制在秒级。其三,在设备适配方面,平台为风廓线雷达(ROBS 格式)、激光雷达(自定义二进制格式)、毫米波雷达、微波辐射计等开发了专用解析模块;安全防护层采用符合国密标准的 SM2 算法替代常规 RSA 算法,满足民航数据安全合规要求。

2.2. 数据接入层

数据接入层作为平台的数据入口,主要负责多源设备和业务数据的统一接入与协议适配。平台支持 HTTP、MQTT、FTP 等多种通信协议,能够对不同设备产生的异构格式数据进行解析、映射和规范化处理。接入对象包括自动气象观测系统、机场天气雷达、气象局天气雷达、风廓线雷达、激光雷达、毫米波雷达、微波辐射计、闪电定位仪、大气电场仪、加密自动站、卫星资料、数值预报资料以及站点运行环境监测数据等[11]。通过统一接入与本地缓存机制,平台可在通信异常情况下尽可能保证原始数据完整性[12]。

2.3. 数据治理层

数据治理层用于对接入后的数据进行质量控制、时空对齐和融合处理,以提高数据可用性和一致性。质量控制主要包括缺测检测、超界值判别、时间连续性检查以及基于物理约束的合理性检验;时空对齐主要包括不同时间分辨率数据向统一时间网格映射和不同空间参考下的数据配准;多源融合则根据不同探测资料特征进行联合处理,形成可供业务调用的标准化数据集[13][14]。此外,平台还记录数据源、设备标识和处理版本等元数据信息,以便后续数据追踪与管理。

2.4. 数据存储层

数据存储层承担海量数据的持久化存储和高可靠服务功能。平台基于 MinIO 分布式对象存储架构实现横向扩展,并通过增加节点提升容量和吞吐能力[15]。为提高可靠性,平台引入纠删码和校验和机制,对数据进行冗余保护和完整性校验。本文采用 4+2 纠删码配置,即 4 个数据块对应 2 个校验块,能够在部分节点发生故障时实现数据恢复,从而在保障可靠性的同时提高存储空间利用率[16][17]。

2.5. 安全防护层

针对航空气象业务对数据传输和访问安全的要求，平台构建了端到端安全防护机制。传输层采用 SSL/TLS 协议，避免数据明文传输；密钥体系采用 SM2 椭圆曲线公钥密码算法；同时结合访问控制策略实现不同业务模块和不同用户之间的权限隔离，以提高数据在传输和访问过程中的安全性[18][19]。

2.6. 业务应用层

业务应用层在标准化数据资源基础上，为航空气象业务提供服务支持。本文选取低能见度监测预警作为典型应用场景，通过调用平台治理后的卫星资料、地面观测资料和数值预报资料，开展低能见度识别模型训练与推理，并实现结果展示。该场景对数据时效性、完整性和多源协同能力要求较高，能够较好反映平台的业务适用性。

3. 多源异构数据治理方法

3.1. 数据采集与接入

数据采集模块负责实现多源设备数据的统一接入、解析和本地存储，是整个平台数据链路的起点。平台集成多类航空气象探测设备和外部资料产品，包括机场天气雷达、气象局天气雷达、风廓线雷达、激光雷达、毫米波雷达、微波辐射计、自动气象观测系统、加密自动站、模式预报产品和环境监测数据等。对于不同协议和格式的数据，平台采用适配式解析方法完成格式识别和结构转换，并在初步解析后进行本地缓存，以减小因通信异常导致的数据丢失风险。数据采集流程如图 1 所示。

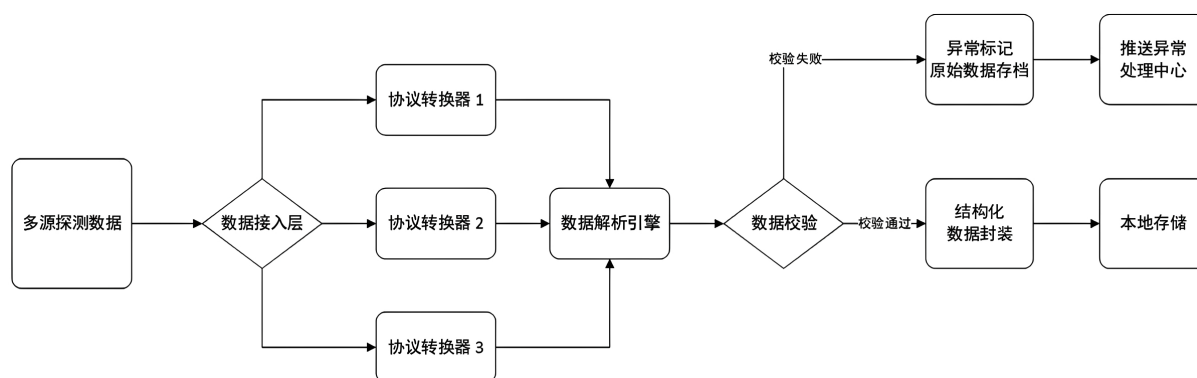


Figure 1. Data acquisition workflow

图 1. 数据采集流程

3.2. 质量控制与融合处理

数据治理过程主要包括基础质量控制、高级一致性校验、时空对齐和多源融合 4 个环节。

基础质量控制是对原始观测数据进行缺测、超界和异常波动检查，并结合时间连续性和设备状态信息开展动态质量控制。异常值检测采用基于滑动窗口的 Z-score 方法；超界值判别依据各要素气候极值范围进行(如温度 $[-40^{\circ}\text{C}, 50^{\circ}\text{C}]$ 、相对湿度 $[0\%, 100\%]$ 等)，超出即标记为无效；异常数据点以窗口内相邻有效值线性插值替换。

高级一致性校验是利用不同设备之间的同类观测信息进行一致性对比，并依据物理约束(如露点温度不高于气温、气压满足压高关系等)检验数据合理性。

时空对齐是将不同分辨率数据对齐到统一标准网格，包含时间对齐和空间对齐。数值预报资料(60 min

分辨率)采用线性插值。地面和机场观测数据(1 min 分辨率)采用 10 分钟滑动平均降频。卫星资料(10 min 分辨率)直接按时间戳匹配。站点数据与卫星像元的匹配采用反距离加权(IDW)方法,取站点周围 3×3 邻域像元加权平均。站点与数值预报网格的匹配采用双线性插值。

多源融合是根据不同资料的探测特征和业务需求,对垂直探测资料、地面观测资料和模式资料进行融合处理,形成云层结构、风场剖面和环境参数等综合产品[20]。对于同一物理量存在多数据源的情况,采用基于可信度的加权融合,使精度较高的数据源获得更大权重。数据处理流程如图 2 所示。

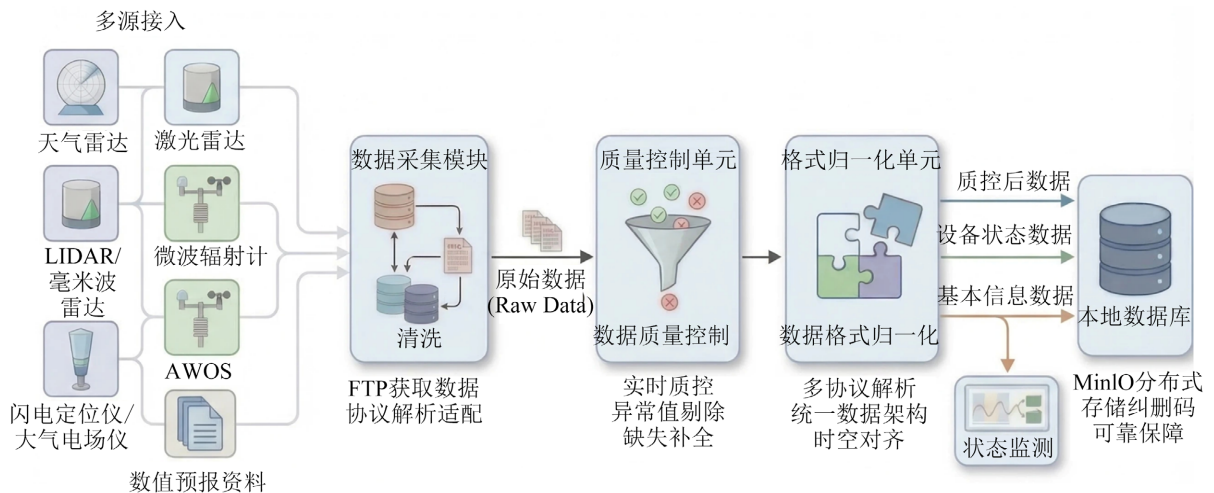


Figure 2. Data processing workflow

图 2. 数据处理流程

3.3. 分布式存储与安全机制

为满足航空气象业务中海量数据存储、访问和可靠服务需求,平台采用 MinIO 分布式对象存储方案。该方案支持基于节点扩展的容量和性能提升,具有较好的灵活性和工程部署可行性。在数据可靠性方面,平台通过纠删码和校验和机制实现对节点故障和数据误码的检测与恢复。在部署方式上,采用双机热备和物理隔离节点存储策略,以降低单点故障风险。

4. 应用验证: 机场低能见度监测预警

为验证平台的业务支撑能力,本文选取机场低能见度监测预警作为应用场景。低能见度天气是影响机场安全运行的重要天气现象之一,对航空起飞和降落阶段的安全和运行效率具有直接影响,同时对多源资料综合应用能力提出较高要求,因此适合用于检验平台的数据支撑效果。

4.1. 实验数据与预处理

实验数据包括葵花 8 号卫星资料、数值预报资料、气象局加密自动站资料以及双流机场和天府机场自动观测资料,均来源于平台完成质量控制、时空对齐和标准化封装后的统一数据集,并通过 S3 兼容接口调用。该方式减少了人工汇集和重复格式转换过程,有利于提高数据调用效率和样本构建一致性。

实验中,首先对各类资料按时间戳进行同步处理;随后,根据双流机场、天府机场及周边区域站点位置关系,将机场站点、自动站资料与卫星像元、模式网格进行空间匹配,提取与低能见度演变相关的环境特征;最后,利用机场实测能见度构建分类标签,形成模型训练、验证和测试样本。实验数据来源与样本构建流程如图 3 所示。

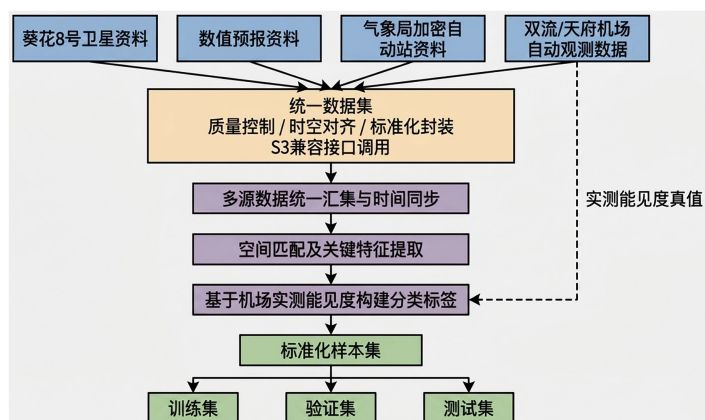


Figure 3. Workflow of experimental data sources and sample construction

图 3. 实验数据来源与样本构建流程

研究区域覆盖成都双流机场、天府机场及其周边区域。双流机场和天府机场自动观测资料用于样本标签构建与结果检验，气象局加密自动站资料用于补充区域近地层气象场信息。研究区域与自动观测站点分布如图 4 所示。图 4 中橙色不规则区域表示双流机场和天府机场终端区范围，蓝色区域为本文研究区域，其空间范围为 $103^{\circ}\text{E}\sim 107^{\circ}\text{E}$ 、 $29^{\circ}\text{N}\sim 32^{\circ}\text{N}$ 。

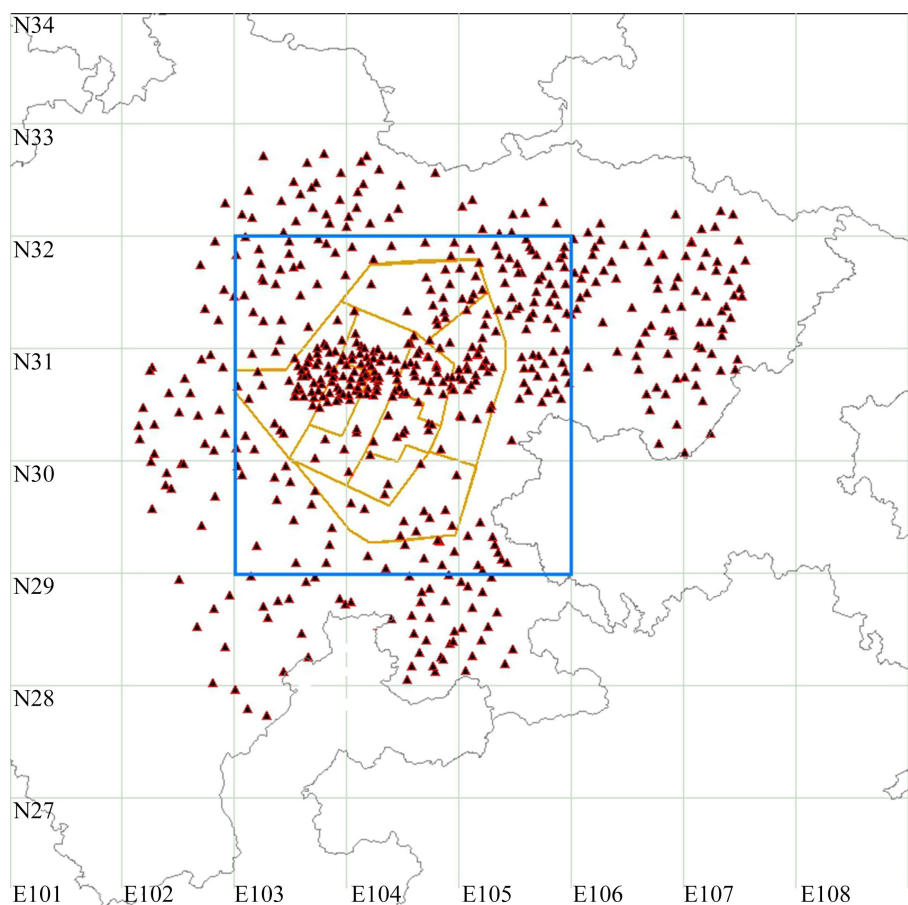


Figure 4. Study area and distribution of automatic observation stations

图 4. 研究区域与自动观测站点分布示意图

为便于说明数据构成,表1列出了本研究使用的主要数据源及其基本特征。可以看出,不同数据源在时间分辨率、空间分辨率及数据类型方面存在明显差异,体现了航空气象业务数据的多源异构特性。

Table 1. Experimental data sources and their characteristics

表 1. 实验数据源与特征说明

数据类型	数据来源	原始时间分辨率	处理对齐方法	对齐后基准频率	空间分辨率	主要变量
卫星遥感数据	葵花 8 号卫星 (H8)	10 min	时间戳直接匹配 (Snapshot)	10 min	像元级	反照率、亮温、云顶高度
数值预报资料	模式预报产品 (NWP)	60 min	线性插值 (Linear interpolation)	10 min	网格级	温度、湿度、风速等
地面观测数据	气象局加密自动站(AWS)	1 min	10 分钟滑动平均(Moving Avg)	10 min	站点级	温度、湿度、降水、风向风速等
机场观测数据	双流和天府机场自动气象观测系统(AWOS)	1 min	10 分钟滑动平均 (Moving Avg)	10 min	站点级	能见度、温湿度、风向风速、气压等

本文将能见度划分为 5 类: 0~200 m、200~500 m、500~1000 m、1000~5000 m 和 5000 m 以上,以反映不同能见度等级对航空运行的影响差异。基于平台构建的标准化样本,对 2023~2025 年冬季典型大雾过程前后 24 h 能见度资料进行统计,样本数量分布如图 5 所示。

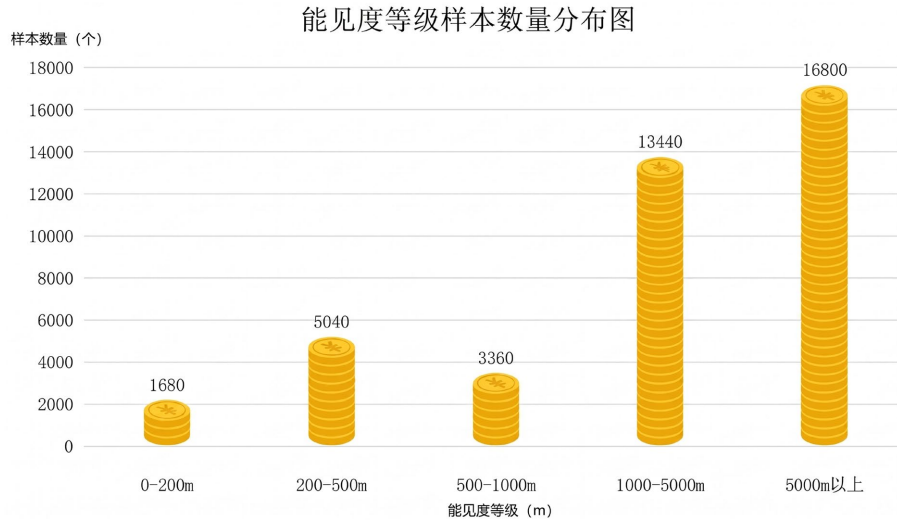


Figure 5. Distribution of sample numbers by visibility category

图 5. 能见度等级样本数量分布图

在预处理过程中,依据不同变量特征采用相应标准化方法,并完成缺失值处理、异常值识别和噪声抑制,以提高输入样本质量。依托本文平台,实验实现了从数据接入、质量控制、时空匹配到样本构建和标准化处理的完整流程。

4.2. 低能见度识别模型构建

在平台提供的标准化数据基础上,本文构建了低能见度识别模型。模型采用级联卷积神经网络结构,

以浓雾天气形势图、机场自动观测要素、加密自动站资料和数值预报特征作为联合输入，以未来 24 h 低能见度发生概率及等级作为输出，用于双流机场和天府机场的低能见度预测。模型训练与推理过程所需数据均可直接由平台调用，无需额外进行格式转换和人工整理。

4.3. 模型结构与超参数设置

模型采用多分支级联卷积神经网络(Multi-Branch Cascaded CNN)，由 4 个并行特征提取分支和 1 个融合分类模块构成。

分支 1 (天气形势图分支)：输入为 $64 \times 64 \times 64$ 单通道天气形势图(含 500 hPa 高度场、地面气压场等)，经 3 层二维卷积(卷积核依次为 $5 \times 5 \times 5$ 、 $3 \times 3 \times 3$ 、 $3 \times 3 \times 3$ ，通道数依次为 16、32、64)提取空间特征，各层后接 BatchNorm、ReLU 和 $2 \times 2 \times 2$ 最大池化。首层采用 $5 \times 5 \times 5$ 卷积核以捕捉较大尺度环流特征。

分支 2 (机场 AWOS 分支)：输入为过去 6 小时共 36 个时间步(10 min 间隔)的 8 要素时间序列(温度、露点、湿度、风速、风向、气压、能见度趋势、温度露点差)，经 3 层一维卷积(核大小 3，通道数 32、64、128)提取时序特征。

分支 3 (加密自动站分支)：输入为区域观测数据经空间插值后的 $5 \times 16 \times 165 \times 16 \times 16$ 网格(5 通道：温度、湿度、风速、风向、降水)，经 2 层二维卷积($3 \times 3 \times 3$ ，通道数 32、64)提取区域空间特征。

分支 4 (数值预报分支)：输入为未来 24 小时逐小时预报数据，维度 $24 \times 1224 \times 12$ (24 时次 \times 12 要素)，经 2 层一维卷积(核大小 3，通道数 32、64)提取预报趋势特征。

融合分类模块：将各分支输出经全局平均池化后拼接，依次通过 2 个全连接层(256、128 个神经元，ReLU 激活，Dropout 比率 0.5)，最终通过 Softmax 输出机场的起雾概率分布。主要超参数设置如表 2 所示。

Table 2. Model hyperparameter settings

表 2. 模型超参数设置

超参数	设定值	选择依据
损失函数	加权交叉熵	低能见度样本占比小，需赋予少数类更大权重
类别权重	[5.0, 4.0, 3.0, 1.5, 1.0]	60 min
优化器	Adam	自适应学习率，收敛稳定
初始学习率	1×10^{-3}	在 $\{5 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-3}, 5 \times 10^{-3}\}$ 中网格搜索确定
学习率衰减	余弦退火，最小 1×10^{-6}	训练后期平滑衰减利于收敛
Batch Size	64	兼顾显存与梯度估计稳定性
训练轮次	最大 150，早停耐心值 20	验证损失连续 20 epoch 未下降则停止
数据划分	训练 70%，验证 15%，测试 15%	按时间顺序划分，避免数据泄露

4.4. 预测结果分析

为检验平台的应用支撑效果，选取 2025 年 12 月 4 日资料作为输入，对 2025 年 12 月 5 日双流机场和天府机场的起雾概率进行预测。结果表明，模型能够给出研究区域内低能见度风险的空间分布结果，如图 6 所示。

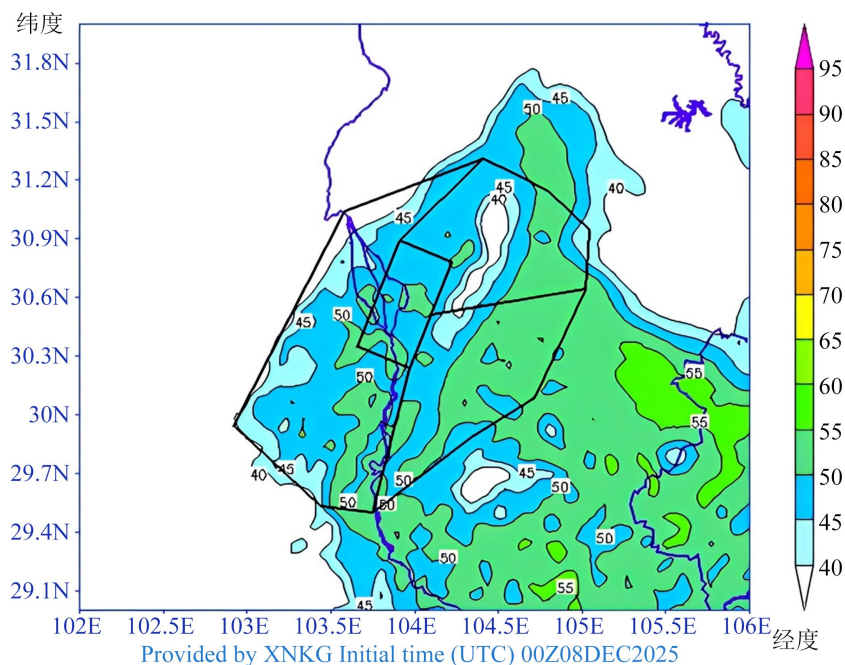


Figure 6. Fog probability map for tianfu airport and shuangliu airport on 5 December 2025
图 6. 2025 年 12 月 5 日天府机场和双流机场的起雾概率图

从图 6 可见，模型对机场周边低能见度高风险区域具有一定识别能力。结合实况观测分析，在该典型个例中，模型能够提前 24 h 给出起雾概率预测，且结果与实际观测基本一致。

从气象学角度看，该个例中模型的预测能力与多源数据对雾形成物理条件的有效表征密切相关。成都地区冬季大雾以辐射雾为主，其形成需近地层水汽充沛、晴空夜间辐射冷却强烈、地面风速小(一般低于 3 m/s)以及大尺度环流稳定等条件[21]。本文所用多源资料从不同侧面表征了上述条件：葵花 8 号卫星亮温和云顶高度可反映夜间云量分布，无云区域对应强辐射冷却条件；数值预报提供大尺度环流演变趋势(如高压脊控制下的静稳天气形势)，为起雾时间窗口判断提供背景信息；加密自动站资料捕捉区域温湿度和风场的空间分布，有助于识别水汽充沛且风速偏小的潜在起雾区域；AWOS 资料以高时间分辨率记录温度露点差(T-Td)的持续缩小趋势，这是雾形成前的重要前兆信号[22]。多分支网络结构使不同尺度、不同时间跨度的信息分别提取并在融合层交互，使模型得以隐式学习辐射雾形成的多尺度物理约束。

本文重点在于平台设计与业务支撑能力验证，应用部分主要通过典型低能见度个例验证平台对多源资料汇聚、治理与调用的可行性。模型定量评估及多个例统计检验将在后续研究中进一步开展。

5. 结论

本文面向航空气象业务中多源异构数据接入复杂、可靠存储需求高和安全防护要求强等问题，设计并实现了一套航空气象多源异构数据存储管理平台。平台集成了多源设备统一接入、数据质量控制、时空对齐、多源融合、分布式存储以及安全防护等功能，能够实现航空气象数据的集中管理与规范化组织。

基于 MinIO 分布式对象存储架构，平台结合纠删码和校验和机制，提高了海量数据存储的可靠性和故障恢复能力；基于 SM2 和 SSL/TLS 的安全机制，为数据传输和访问控制提供了保障。在低能见度监测预警应用验证中，平台能够支撑卫星资料、数值预报资料、加密自动站资料和机场自动观测资料的融合处理，为识别模型提供标准化输入数据；典型个例结果表明，基于该平台提供的数据集，模型可提前 24 h 给出起雾概率预测，且与实况基本一致。

当前研究仍存在以下不足：一是应用验证仅基于单一典型个例，尚未开展多个例统计检验和分等级定量评估(如准确率、召回率等)，难以全面反映模型的预报稳定性；二是训练样本以辐射雾为主，模型对平流雾、锋面雾等不同雾型的识别能力尚不明确；三是时空对齐中数值预报的线性插值和空间匹配中的反距离加权均为简化方法，未充分考虑气象要素的非线性变化特征和地形影响，可能引入一定误差；四是平台的数据吞吐量、查询响应时间等关键性能指标尚缺少系统性测试。

后续工作将从以下方面开展：1) 扩充验证样本，覆盖多年、多机场、多雾型的低能见度过程，开展模型性能的系统评估；2) 探索基于物理约束的非线性插值或深度学习超分辨率方法，改进数据融合精度；3) 面向强对流识别、风切变监测等更多航空气象应用场景进行平台适配与验证；4) 开展平台性能基准测试，推动平台与航空气象业务系统的深度集成。

基金项目

中国民航发展基金：成都天府国际机场气象安全能力研究(TM2018-21-1)。

参考文献

- [1] 肖文名, 何文春, 霍庆, 等. 气象大数据云平台设计与实现[J]. 应用气象学报, 2026, 37(1): 91-102.
- [2] 师春香, 潘昉, 谷军霞, 等. 多源气象数据融合合格点实况产品研制进展[J]. 气象学报, 2019, 77(4): 774-783.
- [3] 肖卫青, 薛蕾, 何文春, 等. 气象大数据云平台数据处理系统设计与实现[J]. 应用气象学报, 2025, 36(6): 744-758.
- [4] 刘念, 毛冬艳, 方萌, 等. 人工智能技术在气象卫星海洋遥感中的应用进展[J]. 气象科技进展, 2026, 16(1): 1-8.
- [5] Goodfellow, I., Bengio, Y. and Courville, A. (2016) Deep Learning. MIT Press.
- [6] Gultepe, I., Tardif, R., Michaelides, S.C., Cermak, J., Bott, A., Bendix, J., et al. (2007) Fog Research: A Review of Past Achievements and Future Perspectives. *Pure and Applied Geophysics*, **164**, 1121-1159. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0211-x>
- [7] 殷齐娥, 倪长健, 肖安. 基于机器学习的机场低能见度短临预报研究[J]. 高原气象, 2025, 44(3): 621-634.
- [8] Amazon Web Services (2024) Amazon Simple Storage Service (S3) API Reference. https://docs.amazonaws.cn/AmazonS3/latest/API/Type_API_Reference.html
- [9] 李文凯, 李福龙, 陶沙. Linux 开源存储实战: 从 MinIO 到企业级云存储[M]. 北京: 机械工业出版社, 2024.
- [10] 赵静静, 金慧峰, 李霄. 基于 MinIO 存储的综合实践管理平台开发[J]. 软件, 2022, 43(10): 55-59.
- [11] 刘志红. 内蒙古地区气象数据采集监控系统设计[J]. 无线互联科技, 2025, 22(4): 46-50.
- [12] WMO (2022) Guide to the Global Observing System. World Meteorological Organization.
- [13] WMO (2023) Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8). World Meteorological Organization.
- [14] 耿梓源, 刘雨轩, 苏昂, 等. 基于 CIM 平台的气象数据跨领域融合应用研究[J]. 高原山地气象研究, 2025, 45(Z2): 16-21.
- [15] 陈晴, 杨明, 肖云, 等. 云数据存储技术在气象数据存储中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(8): 124-127, 158.
- [16] Reed, I.S. and Solomon, G. (1960) Polynomial Codes over Certain Finite Fields. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, **8**, 300-304. <https://doi.org/10.1137/0108018>
- [17] Dimakis, A.G., Godfrey, P.B., Wu, Y., Wainwright, M.J. and Ramchandran, K. (2010) Network Coding for Distributed Storage Systems. *IEEE Transactions on Information Theory*, **56**, 4539-4551. <https://doi.org/10.1109/tit.2010.2054295>
- [18] 国家密码管理局. SM2 椭圆曲线公钥密码算法[Z/OL]. 2010-12-17. http://www.nca.gov.cn/sca/xxgk/2010-12/17/content_1002386.shtml, 2026-01-09.
- [19] 赵栋, 刘志红. 基于云计算的气象观测数据安全存储方法[J]. 长江信息通信, 2025, 38(7): 104-106+110.
- [20] 杭月荷, 姜学恭, 杨泽华, 等. 内蒙古通用航空气象预报技术架构与产品开发[J]. 应用气象学报, 2025, 36(4): 500-512.
- [21] 杨彬彬. 禄口机场大雾低能见度天气变化特征分析[J]. 现代盐化工, 2023, 50(2): 85-87.
- [22] 郑宸, 王璇, 王立婕, 等. 机场典型霾过程大气消光特性及能见度预测模型[J]. 环境工程, 2024, 42(3): 215-224.