

试论信息技术在气象防雷防灾中的运用

熊章侦松, 张晓凤

贵州省台江县气象局, 贵州 台江

收稿日期: 2025年8月1日; 录用日期: 2025年8月21日; 发布日期: 2025年9月5日

摘要

本文聚焦信息技术在气象防雷防灾领域的应用实践, 系统阐述物联网、大数据、人工智能、地理信息系统(GIS)、遥感(RS)及全球卫星导航系统(GNSS)等技术的具体运用路径。通过分析技术应用对雷电监测预警、风险评估、应急响应及公众防护的提升作用, 结合实际案例论证技术优势, 探讨当前面临的数据安全、标准统一、人才短缺等挑战, 并提出针对性对策。研究表明, 信息技术已实现防雷防灾从被动应对向主动防御的转变, 为构建智慧防雷体系提供了核心支撑。

关键词

信息技术, 气象防雷, 雷电预警, 风险评估, 应急响应

On the Application of Information Technology in Meteorological Lightning Protection and Disaster Prevention

Zhensong Xiongzhong, Xiaofeng Zhang

Taijiang County Meteorological Bureau, Guizhou Province, Taijiang Guizhou

Received: Aug. 1st, 2025; accepted: Aug. 21st, 2025; published: Sep. 5th, 2025

Abstract

This paper focuses on the practical applications of information technology in meteorological lightning protection and disaster prevention, systematically outlining the implementation pathways of technologies such as the Internet of Things (IoT), big data, artificial intelligence, Geographic Information Systems (GIS), Remote Sensing (RS), and Global Navigation Satellite System (GNSS). By

analyzing how these technologies enhance lightning monitoring and early warning systems, risk assessment, emergency response, and public protection, the study combines real-world case studies to demonstrate their advantages. It also examines current challenges, including data security, standardization issues, and talent shortages, proposing targeted solutions. The research reveals that information technology has transformed lightning protection from reactive measures to proactive defense strategies, providing core support for building a smart lightning protection framework.

Keywords

Information Technology, Meteorological Lightning Protection, Lightning Warning, Risk Assessment, Emergency Response

Copyright © 2025 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

雷电灾害作为全球最频发的自然灾害之一,其强大的电流冲击、高温灼烧、电磁辐射及雷电感应等特性,对电力系统、通信网络、建筑设施、航空航天及公众生命安全构成多维度威胁。中国气象局《中国雷电灾害防御发展报告(2023)》显示,我国年均发生雷电灾害超 1.2 万起,其中造成人员伤亡的灾害约占 15%,直接经济损失年均达 35 亿元,间接损失更是直接损失的 3~5 倍[1]。在气候变化背景下,近十年我国雷电活动频率较常年偏高 7.3%(来源:中国气象局,2023),极端强雷电事件发生概率增加,传统防雷防灾模式面临严峻挑战。传统防雷防灾主要依赖人工观测、经验判断及被动防护设施,存在三大局限:一是监测覆盖不足,山区、高原等地区监测站点稀疏,盲区占比达 35%以上;二是预警时效短,传统方法仅能提前 0.5~1 小时预警(根据中国气象局统计),难以满足重点行业防御需求;三是风险评估粗放,多依赖行政区域划分,未考虑精细化地理差异。随着信息技术的飞速发展,物联网的实时感知、大数据的深度挖掘、人工智能的智能决策、GIS 的空间分析等技术与气象防雷深度融合,推动防雷防灾模式向“监测智能化、预警精准化、评估精细化、响应协同化”转型。本文基于全国 30 个省(市、区)的技术应用实践,系统分析信息技术的应用路径与成效,为完善智慧防雷体系提供理论与实践参考。

2. 信息技术在气象防雷防灾中的核心应用

(一) 物联网技术构建智能监测网络

物联网技术通过“感知层-网络层-平台层”三级架构,实现气象环境与防雷设施的全要素监测。感知层部署多元化传感器:大气电场仪采用双极性平板设计,采样频率 1 Hz,电场强度测量范围 ± 50 kV/m,分辨率 1 V/m,可捕捉雷电发生前的电场极性反转现象;微气象站集成温湿度(精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 $\pm 2\%$ RH)、气压(± 0.1 hPa)、风速风向(± 0.3 m/s、 $\pm 3^\circ$)等传感器,构建 1 km $\times$ 1 km 网格的微气象监测网(王明、李娜,2023)。网络层采用“LoRa + NB-IoT”混合组网,LoRa 适用于山区远距离(5~10 km)数据传输,NB-IoT 适用于城市密集区域(覆盖半径 1~3 km),传输时延控制在 10 秒以内,年数据传输可靠性达 99.8%。在防雷装置监测中,智能终端实现全状态感知。智能接闪器内置罗氏线圈传感器,雷电流测量范围 1~200 kA,波形捕获率 100%,可记录电流峰值、陡度及极性;智能浪涌保护器(SPD)集成温度传感器(-40°C ~ 125°C)和漏电流传感器(0~100 mA),当温度超 85°C 或漏电流超 50 mA 时自动告警(王明、李娜,2023)[2]。某国

家级经开区部署的物联网监测系统, 接入 320 个监测点覆盖 120 栋建筑, 2023 年通过趋势分析提前 72 小时预测到 2 处接地网腐蚀隐患, 经检修后避免雷击跳闸事故, 减少停产损失约 800 万元。平台层采用边缘计算网关, 实现本地数据预处理, 异常数据过滤率达 95%, 云端平台支持百万级设备接入, 数据存储周期延长至 10 年(根据项目内部评估报告, 2023)。

(二) 大数据与 AI 提升预警精准度

大数据技术构建多源融合的数据资源池, 涵盖三类核心数据: 基础数据(30 年雷灾案例、1:5 万地理信息数据)、实时数据(卫星遥感、雷达回波、地面观测, 日均 50 TB)、业务数据(防雷装置检测报告、应急处置记录)。采用 Hadoop 分布式存储架构, 通过 Kafka 实现数据实时接入, Flink 进行流处理, 数据处理能力达每秒 10 万条记录。数据清洗采用“ 3σ 准则 + 专家经验”双重校验, 异常值剔除率从 15% 降至 2%, 数据完整性提升至 98%。人工智能算法构建三级预警模型: 潜势预报模型采用随机森林算法, 输入大气不稳定指数、水汽通量等 18 个特征变量, 提前 6~12 小时预测雷电发生概率, 2023 年全国平均准确率达 78%, 其中华东地区达 82%; 短时预警模型基于 CNN-LSTM 混合网络, 从雷达回波图像(分辨率 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$)中提取对流云顶高度、回波强度等特征, 结合时序变化预测 0~6 小时雷电落区, 准确率 82%; 临近预警模型采用光流法外推, 结合电场突变信号, 提前 0.5~2 小时发布警报, 准确率 88%, 空报率控制在 15% 以内(国家气象中心, 2023) [3]。某省级气象部门应用该模型后, 2023 年为农业部门发布预警 32 次, 指导小麦主产区提前关闭灌溉设备, 避免雷击导致的电路故障, 减少损失 3.2 亿元; 为电力部门提供输电线路雷击预警, 跳闸事故同比下降 37% (省级气象部门运行报告, 2023)。

(三) GIS 技术支撑风险评估与决策

GIS 技术通过空间建模实现雷电风险的精细化评估。评估模型包含四大指标体系: 致灾因子(年均雷电密度、雷电流幅值概率分布)、暴露度(人口密度、建筑物面积、设备价值)、脆弱性(建筑防雷等级、设备抗扰度)、防灾能力(防雷设施覆盖率、应急队伍响应时间)。采用层次分析法确定权重, 其中致灾因子权重 0.35、暴露度 0.25、脆弱性 0.2、防灾能力 0.2, 通过加权叠加生成 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 网格的风险等级图(分 5 级)。某地级市应用显示: 高风险区集中在山区迎风坡(占 12%)和城市商务区(占 8%), 山区因地形抬升导致对流旺盛, 年均雷电密度达 $80\text{ 次}/\text{km}^2\cdot\text{a}$, 商务区因高层建筑密集易引雷(Zhang & Wang, 2022) [4]。基于风险图, 该市将防雷工程投资向高风险区倾斜, 学校、医院等重点场所防雷设施达标率从 75% 提升至 98% (市级建设验收资料, 2023)。在应急决策中, GIS 平台集成雷电落区、交通管制、避难场所容量等动态数据, 采用 Dijkstra 算法规划救援路线。2022 年 7 月强雷电灾害中, 系统在 10 分钟内生成 3 条最优救援路径, 避开积水路段和雷电高发区, 使救援队伍平均抵达时间从 45 分钟缩短至 18 分钟, 成功转移被困群众 230 人(地市应急联动平台调度记录, 2022)。

(四) 遥感与 GNSS 拓展监测救援能力

遥感技术构建“空-天-地”立体观测网。天基层面, 风云四号 A 星闪电成像仪(LMI)覆盖东经 $45^\circ \sim 165^\circ$ 、北纬 $15^\circ \sim 65^\circ$, 空间分辨率 $8\text{ km} \times 8\text{ km}$, 时间分辨率 2 s, 可探测云闪和地闪, 2023 年数据产品在台风“杜苏芮”监测中提前 24 小时识别强对流系统(风云四号卫星产品说明书, 2023); 高分七号卫星立体测绘仪获取 0.5 米分辨率影像, 用于灾后建筑物损毁评估, 识别准确率达 90%。空基层面, 无人机搭载多光谱相机和激光雷达, 在灾害后 1 小时内完成 5 km^2 区域的航拍, 生成三维点云模型, 评估精度达 0.1 米, 某县 2023 年雷电灾害中通过无人机发现 12 处输电塔倾斜隐患(某县应急办无人机航拍记录, 2023)。

GNSS 技术提供高精度定位与授时支撑。北斗三号卫星导航系统为监测设备提供厘米级定位(水平精度 $1\text{ cm} + 1\text{ ppm}$, 垂直精度 $2\text{ cm} + 1\text{ ppm}$), 确保全国 2300 个雷电监测站的位置基准统一; 授时精度达 10 ns, 实现多源数据的时间同步(北斗系统用户手册, 2023)。在救援中, 北斗终端支持短报文通信(每次 140 汉

字), 在无公网覆盖区域实现“定位 + 通信”一体化, 2023 年四川山区雷电灾害中, 救援队伍通过北斗终端传递位置信息和灾情, 成功营救 3 名被困驴友, 缩短救援时间 3 小时。

3. 信息技术应用的显著优势

(一) 监测预警能力全面提升

立体监测网络使全国雷电监测盲区从 35% 降至 12%, 地闪定位误差 ≤ 500 米, 云闪监测覆盖率从 60% 提升至 90%。不同地形监测效能差异显著: 平原地区预警准确率 88%, 山区因地形遮挡降至 75%, 但较传统方法仍提升 30% (中国雷电监测系统年报, 2023)。重点行业应用成效突出: 国家电网应用雷电预警系统后, 2023 年输电线路雷击跳闸率同比下降 37%, 其中 500 kV 线路跳闸次数从 127 次减至 80 次 (国家电网运行报告, 2023); 民航系统通过提前 1 小时预警, 调整航班起降计划, 减少延误损失约 2.3 亿元 (民航系统运行数据估算, 2023)。

(二) 防雷装置可靠性增强

物联网监测实现防雷设施“状态检修”替代“定期检修”, 故障响应时间从 72 小时缩短至 1 小时, 维护成本降低 40%。智能防雷装置的自适应防护能力显著: 某数据中心采用智能 SPD, 雷击时 0.1 ms 内动作, 残压 ≤ 1.5 kV, 年设备损坏率从 3% 降至 0.2% (数据中心运维记录, 2023); 古建筑防雷改造中, 智能接闪器可记录每次接闪参数, 为文物保护提供数据支撑, 故宫博物院 2023 年通过系统记录 17 次接闪过程, 验证了防雷方案的有效性 (故宫安防系统年报, 2023)。

(三) 应急响应效率优化

多部门协同平台打破“信息孤岛”, 气象、应急、电力等 12 个部门实现数据实时共享, 信息传递时延从 30 分钟缩短至 10 分钟。GIS 指挥系统使救援资源调度效率提升 50%, 2023 年南方强雷电灾害中, 通过平台统筹 120 支救援队伍、300 台抢险设备, 实现“需求 - 资源”精准匹配; 受灾群众转移效率提升 40%, 提前转移 1.2 万人, 无一人因雷击伤亡 (南方灾害应急响应报告, 2023)。灾情评估时间从传统 3 天缩至 6 小时, 为保险理赔和灾后重建提供快速支撑。

(四) 科普效果显著提升

新媒体矩阵构建多元化科普渠道: “防雷科普”微信小程序集成预警查询、风险评估、模拟演练功能, 累计用户 520 万, 日均活跃 30 万; 抖音、快手平台的防雷短视频采用“动画 + 案例”形式, 单条最高播放量 5300 万次, 点赞量超 120 万; 在线直播课邀请专家讲解防雷知识, 累计观看 320 万人次。公众认知提升显著: 2023 年全国防雷知识问卷调查显示, 公众对“室内防雷措施”的知晓率从 2019 年的 45% 升至 72%, “户外避雷方法”知晓率从 38% 升至 65% (中国气象局宣传中心调研, 2023)。

4. 面临的挑战与应对策略

(一) 主要挑战

数据安全体系仍不完善: 敏感数据 (军事设施防雷参数、能源基地监测数据) 存贮传输时加密比例不充分, 会陷入非法抓取或泄露风险。2022 年某省雷电预知数据被恶意爬取事例显示, 该系统传输链路加密情况、访问许可控制状况以及异常追溯状况有缺失, 而且, 部门跨域的数据共享率较低, 重要数据总是“睡”在本单位, 变成“数据孤岛”, 极大地制约了智能模型联合操练和业务互动。

技术标准碎片化问题突出: 当前雷电监测系统中存在诸多通信协议及数据格式不统一现象, 各类设备厂商采用 12 种通信协议和 8 类数据结构 (中国气象局设备接入调研, 2023), 缺少统一的数据接口、事件定义和分类标准, 造成系统整合繁杂, 互相连接困难, 标准缺失变成制约雷电监测网络扩展和平台协作的主要瓶颈。

复合型人才严重短缺：同时具备气象知识和信息技术能力的“交叉型”人才占比不到 12% (全国气象部门人力资源年鉴, 2023), 基层局站多数人侧重于设备安装和维护, 缺少 AI 建模、数据分析以及预警系统优化方面的系统训练, 技术“能用却不好用”, 造成 AI 系统在实际业务中应用效果不佳、可信度不高。

建设成本高, 区域发展不均：雷电监测系统在部署之初, 投资大、运维成本高, 省级系统一般需要 2000 万元左右的建设经费, 中西部欠发达地区的财政压力大, 自身难以单独承担建设及后期维护费用, 造成雷电预警基础设施在地域间分布不均, 西部 12 省中接近四分之一的县尚未建成标准化雷电站, 防雷盲区难以消除(中国雷电监测建设普查, 2023)。

(二) 应对策略

构建全流程数据安全防护体系：制定《防雷数据安全规范》，对敏感数据实施红黄绿分级分类控制, 加强存储端 SM4 加密、传输端 SSL/TLS 加密, 建立“数据不动模型动”机制, 通过联邦学习、安全多方计算(SMPC)等技术, 在不暴露原始数据的情况下, 部门之间联合建模。引入防爬虫系统、访问日志审计、异常行为告警, 实现数据安全态势可监测、可追溯、可治理。

推进信息技术标准体系化发展：中国气象局牵头电力、通信等领域推进《气象防雷信息技术标准体系》的建立与优先统一：雷电定位数据交换格式(如 LDM 格式)、RESTful 风格的预警产品 API 接口标准、设备通信协议(推荐 MQTT/HTTPS)。雷电事件等级分类体系(设 1~5 级标准) + 搭建标准验证测试平台, 成为采购政府设备的门槛, 提升系统的兼容性、互操作性, 减少集成成本。

推行“教育 + 培训 + 工具赋能”人才策略：高校开设“雷电防护与智能监测”交叉专业[5], 扩充专业人才储备, 在职人员通过“基层技术提升计划”做到定期轮训, 涵盖数据处理、模型解读、系统调参等。部署 AutoML、AutoKeras、H2O.ai 平台, 支撑非算法人员可视化建模, 创建防雷知识图谱, 给予术语、指标、流程结构化支撑, 助力决策系统, 推行 AI 模型迁移、样本共享, 提升基层单位模型应用水平与本地化调整速率。

财政协同与区域共建机制的构建：借助中央财政专项资金, 给中西部地区设备购置予以不低于 60% 的补贴, 推行“平台即服务(PaaS)”以及“按需付费”, 由省级雷电平台统一创建, 市县则采用租用形式来使用, 从而缩减部署门槛及时间。地市级单位被鼓舞去探究“区域协同共建”的机制, 联合创建跨县的雷电监测中心, 做到设备共用、数据共享, 并且统一调度, 以此加强财政资源的利用效能和系统的总体防御水平。

5. 结论与展望

信息技术已成为推动气象防雷防灾现代化的核心驱动力, 通过物联网实现监测智能化、大数据与 AI 提升预警精准度、GIS 支撑科学决策、遥感与 GNSS 拓展监测维度, 构建了全链条技术支撑体系, 显著提升了雷电灾害防御能力。但数据安全、标准统一、人才短缺、成本约束等问题仍需通过机制创新与技术突破解决。未来, 技术应用将呈现三大趋势：一是多技术深度融合, 5G 实现监测设备毫秒级响应, 2024 年试点的智能电网防雷系统已实现 5G + 边缘计算的故障 0.5 秒定位；区块链技术保障数据共享可信, 某省试点实现防雷检测数据上链存证, 篡改难度提升 1000 倍(2024 年试点项目数据汇总)。二是智慧协同深化, 防雷系统与智慧城市融合, 实现雷击时自动切断户外电源、关闭景区入口、调整交通信号灯的联动控制, 2024 年杭州试点已实现 30 个场景的智能联动。三是精准服务拓展, 针对农业、文旅、新能源等行业开发定制化预警产品, 如光伏电站的雷击阴影预警、景区的户外活动风险提示, 服务精度提升至 1 km × 1 km (行业应用推进报告, 2024)。通过持续技术创新与政策支持, 我国气象防雷防灾能力将向“智慧化、精准化、协同化”迈进, 为应对气候变化背景下的雷电灾害挑战提供坚实保障, 护航经济社会高质量发展。

参考文献

- [1] 中国气象局. 中国雷电灾害防御发展报告(2023) [R]. 北京: 气象出版社, 2023.
- [2] 王明, 李娜. 物联网技术在智能防雷系统中的应用研究[J]. 气象科技, 2023, 51(2): 231-238.
- [3] 国家气象中心. QX/T 590-2023 人工智能雷电预警技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [4] Zhang, L. and Wang, H. (2022) Application of GIS in Lightning Disaster Risk Assessment. *Journal of Geographical Sciences*, **32**, 789-802.
- [5] 南京信息工程大学. 雷电防护与信息技术交叉学科建设方案[Z]. 2024.