

无人机智能巡检系统在风电场线路运维中的应用研究

孔祥雪, 何维权, 贾秀明, 方川
华能营口热电有限责任公司, 辽宁 营口 115004
DOI: 10.61369/SSSD.2026080007

摘 要 : 以风能为代表的清洁能源产业快速发展, 风电场规模持续扩大, 风电场的运行维护逐步成为一个新的课题。风电场内部地形复杂, 通常位于偏远区域。传统的依靠人工巡检的方式, 巡检时间长, 风险高, 难以满足现代风电场线路运维精细化需求。无人机智能巡检系统融合无人机技术、5G 通信、人工智能等技术, 成为风电场线路运维的重要技术手段。本文结合风电场线路运维的实际需求, 分析传统运维模式的痛点, 阐述无人机智能巡检系统的整体设计与核心技术应用, 总结系统应用效果, 期望为无人机智能巡检系统在风电场线路运维中的进一步推广应用提供参考。

关 键 词 : 无人机; 智能巡检系统; 风电场; 线路运维; 人工智能

Research on the Application of UAV Intelligent Inspection System in Wind Farm Line Operation and Maintenance

Kong Xiangxue, He Weiquan, Jia Xiuming, Fang Chuan
Huaneng Yingkou Cogeneration Power Co., Ltd., Yingkou, Liaoning 115004

Abstract : With the rapid development of the clean energy industry represented by wind energy, the scale of wind farms continues to expand, and the operation and maintenance (O&M) of wind farms has gradually become a new research topic. Wind farms are usually located in remote areas with complex terrain inside. The traditional manual inspection method, characterized by long inspection time and high safety risks, is difficult to meet the refined O&M requirements of modern wind farm lines. The UAV intelligent inspection system, integrating UAV technology, 5G communication, artificial intelligence (AI) and other technologies, has become an important technical means for wind farm line O&M. Combined with the actual O&M needs of wind farm lines, this paper analyzes the pain points of the traditional O&M mode, elaborates on the overall design and core technology application of the UAV intelligent inspection system, and summarizes the system application effects. It is expected to provide reference for the further promotion and application of UAV intelligent inspection systems in wind farm line O&M.

Keywords : unmanned aerial vehicle (UAV); intelligent inspection system; wind farm; line operation and maintenance (O&M); artificial intelligence (AI)

引言

据国家能源局统计数据, 我国风电并网装机容量已突破6亿 kW, 多年稳居全球第一, 陆上风电场与海上风电场建设均进入快速发展阶段。风电场的集电线路、输电线路多分布在偏远山区、高海拔地区或沿海区域, 线路跨度大、杆塔分布分散, 长期处于大风、温差大、盐雾、沙尘等恶劣环境中。线路运维是风电场日常运营的核心工作之一。随着风电产业的智能化发展, 无人机智能巡检系统逐渐替代传统人工巡检模式, 成为风电场线路运维的主流技术。本文围绕无人机智能巡检系统在风电场线路运维中的应用展开研究, 探索提升风电场线路运维精细化、智能化水平的有效路径。

一、风电场线路运维的现状与痛点

全球风电产业扩张, 运维需求也随之呈爆发式增长。我国风电场处于偏远地区, 受自然地理环境因素的限制, 巡检难题也日益凸显。主要存在以下痛点:

第一, 巡检效率低, 耗时耗力。风电场线路分布范围广、地形复杂, 巡检人员需长途跋涉抵达作业点, 有些区域甚至无法通行车辆, 只能依靠巡检人员步行^[1]。单段2km的山地线路人工巡

检耗时可达10小时以上, 全场区巡检往往需要多名工作人员耗时数月, 巡检效率低。

第二, 作业安全风险高, 存在人身隐患。线路巡检的登高作业、高空检测等工作属于高危职业, 在大风、雨雪等恶劣天气下, 巡检人员的作业风险大幅提高。而且位于偏远地区, 巡检人员还容易面临野生动物袭击、迷路等潜在风险。

第三, 巡检精度低, 存在盲区漏检。人工巡检主要依靠工作人员观察, 使用设备进行检测, 但是一些绝缘子微小裂纹、导线

散股、电缆接头轻微过热等细微故障，巡检人员可能会忽视^[2]。而且，在山谷、树林等区域的线路杆塔，巡检人员检查时会存在盲区，容易出现漏检情况，埋下安全隐患。

第四，数据记录不规范，故障诊断滞后。人工巡检的记录是采用纸质台账或者手机拍照的形式，数据、位置标注不够精准，而且信息传递不及时。海量巡检数据依靠人工无法进行高效分析，只能在故障发生后进行追溯，很难在故障前做出提前预警和预测性维护^[3]。

第五，运维成本高，人力资源紧张。人工巡检方式需要有大量专业巡检人员和检修人员，人力成本占风电场运维总成本的比例较高^[4]。风电产业又在快速发展，专业运维人才紧缺，会进一步影响巡检工作的质量和效率。

二、无人机智能巡检系统的整体设计

针对风电场线路运维的实际需求，无人机智能巡检系统采用“终端层－通信层－应用层”的三层架构设计，各层级协同工作。

（一）终端层：无人机巡检平台与搭载设备

终端层是系统的数据采集核心，由无人机飞行平台和配套搭载设备组成。结合风电场线路运维的特点，无人机飞行平台优先选用四旋翼工业级无人机。四旋翼工业级无人机机动性强，操作灵活，抗风能力好，悬停稳定，适用于风电场的大风环境和复杂地形^[5]。

选型时需重点关注核心参数，要求其抗风等级不低于4级，续航时间不少于40分钟，载荷能力大于2.5kg，水平定位精度优于20cm，垂直定位精度不超过30cm，满足长距离线路巡检和多设备搭载的需求。目前大疆 M300 RTK 是风电场线路巡检的主流机型，其配备六向双目视觉避障、RTK 高精度定位功能，能有效提升飞行的安全性和定位的精准性。无人机搭载设备根据线路巡检的检测需求配置可见光高清相机、红外热像仪、激光雷达、特高频传感器等用于采集数据。

（二）通信层：数据传输与交互网络

通信层是系统的神经中枢，负责在无人机与地面站、云端平台之间传输数据，发送指令。通信层要求系统低时延、高稳定性、大带宽。风电场线路巡检的作业范围广，部分区域位于网络信号薄弱区，因此通信层采用“5G 专网＋数传／图传一体化模块”的双模通信方式。通信层需采用 AES256 加密技术对传输数据进行加密，防止数据泄露和篡改，保障风电场运维数据的安全性。

（三）应用层：地面站与云端智能管理平台

应用层是系统的数据分析和运维管理核心，由地面站和云端智能管理平台组成，需要具备巡检任务规划、飞行控制、数据处理、故障识别、预警推送和报告生成等功能^[6]。地面站为现场作业的控制中心，以台式服务器为硬件载体，配备高性能中央处理器和图形处理器，以可视化方式规划巡检路径、实时监控无人机飞行状态，并在有突发情况时，及时进行人工干预。运维人员通过地面站可设置巡检点、飞行高度、拍摄角度，也可在无人机飞行

过程中实时调整航线，处理障碍物等突发情况。

云端智能管理平台融合云计算、大数据、人工智能等技术，可自动对无人机回传的图像、温度、点云数据进行融合分析，识别线路缺陷并精准定位；同时建立缺陷数据库，记录缺陷类型、位置、发展趋势等信息，自动生成巡检报告并推送至运维人员的移动终端。平台还具备设备管理、巡检计划制定、运维工单派发等功能，全流程数字化管理风电场线路运维工作。

三、无人机智能巡检系统在风电场线路运维中的核心技术应用

（一）RRT 优化算法

风电场线路面临复杂地形和大风干扰，RRT 优化算法可结合无人机的续航能力和飞行速度，规划更短更合理的巡检路线。同时，根据不同杆塔的结构特点，自动设定对应的巡检点位和先后顺序，避免线路巡检盲区，为后续巡检作业奠定基础。

（二）人工势场法

人工势场法主要用来帮助无人机应对飞行中的突发障碍。该方法将巡检目标设为引力源，树木、山体、杆塔等障碍物设为斥力源。通过计算引力与斥力的合力，引导无人机实时调整飞行方向，避开突发障碍^[7]。再加上激光雷达和双目视觉传感器实时采集环境数据，可以快速更新障碍物序列并重新规划路径，让飞行过程更安全。

（三）多源数据融合技术

线路故障类型多样，单一的数据并不能反映设备的真实状态。多源数据融合技术会收集可见光图像、红外温度数据、激光雷达点云数据、特高频放电信号等多种数据。处理过程中，先通过小波包变换与经验模态分解过滤掉环境中的干扰信号，再把不同设备、不同时间收集到的信息对应起来，让各类数据能相互补充、印证，让后续识别故障时更有依据。

（四）深度学习故障识别技术

深度学习故障识别技术是分辨线路故障的关键，它基于 ResNet50 卷积神经网络和深度信念网络（DBN）构建模型，模型训练时会用到大量的线路正常和故障的样本数据。引入 Focal Loss 函数，模型对故障样本的分辨能力更强。实际巡检中，它能快速处理无人机回传的数据，快速分辨出绝缘子破损、导线断股等常见故障，还能精准找到故障所在位置，相关信息会及时传到云端平台，标注在电子地图上，方便运维人员快速查找。

（五）边缘计算技术

巡检过程中会产生海量图像、视频数据，边缘计算技术能在无人机或现场就近的节点对这些数据进行初步处理^[8]。比如压缩图像体积、去除画面中的干扰噪声、提取关键特征信息等，之后只把处理后的核心数据传到云端。这样可以减少数据传输的压力，让整体处理速度更快。

（六）5G 通信技术

5G 通信技术为整个系统的信息传递提供了有力支持。其通信速度快、时延低，能让边缘节点和云端平台之间的信息传递更顺

畅。无人机初步处理后的关键数据能及时回传到云端，云端的分析结果和控制指令也能快速下发到无人机或现场设备，保证整个巡检过程中的数据交互和指令传达及时，巡检工作有序推进^[9]。

四、无人机智能巡检系统在风电场线路运维中的实际应用效果

（一）巡检效率提升，突破时间和空间限制

无人机智能巡检系统使巡检工作实现线路的自动化巡查。以往人工巡检只能白天开展，而无人机白天黑夜均能正常作业，夜间也能精准捕捉线路发热情况。复杂地形和偏远地区原本需要巡检人员长途跋涉才能完成任务，现在无人机能快速覆盖，巡检的覆盖范围更广，效率有明显改善^[10]。例如，人工巡检2km山地线路耗时超10小时，无人机巡检同段线路仅需30分钟，全场区巡检效率提升80%以上，巡检周期从数月缩短至数天；

（二）故障识别精确，预警时间提前

系统融合多种数据，再结合人工智能算法，对线路故障判断更精准。系统能在故障处于萌芽状态时就发出预警，给运维人员留出充足的准备时间，有效减少故障恶化带来的损失。如广西六林冲风电场的系统故障识别准确率达99%，累计发现潜在故障隐患127处，预防性维护比例提升至85%。

（三）运维成本下降，实现降本增效

无人机智能巡检系统替代了大量的人工巡检工作，风电场相

关的人力成本随之减少。同时，巡检数据实现数字化管理，不需要再进行人工登记或者纸质台账记录，查询、统计都更方便，管理过程中的额外开支也相应减少，进一步降低管理成本。

（四）作业安全性增强，降低人身安全隐患

无人机智能巡检系统的应用，可使巡检人员不用再参与登高、野外徒步这类高危作业。对于偏远山区的风电场，巡检人员不用深入地形复杂的区域，不用遭遇野生动物袭击、迷路、坠落等风险。对于需要现场人员参与的设备调试、应急处置、地面配合等工作，系统还能远程关注作业情况，万一遇到突发状况，通过智能单兵系统，远方的技术专家能实时给出指导，协助开展救援，让整个运维工作的安全系数更高。

五、结论

风电产业的规模化和智能化发展，对风电场线路运维提出了更高的精细化和智能化要求。无人机智能巡检系统作为一种新型的运维技术手段，凭借效率高、精度高、安全性好、成本低等优势，成为风电场线路运维的必然趋势。未来，无人机智能巡检系统将在风电场线路运维中发挥更大的作用，助力风电场实现安全稳定运行和降本增效，推动我国风电产业向高质量、智能化方向发展。

参考文献

- [1] 兰春明, 梁静蕾, 郑贤烨. 风电场智能化改造实践与成效 [J]. 中国电力企业管理, 2025, (18): 59-61.
- [2] 张挺仑, 朱建成, 燕艳芬, 等. 基于无人机自主智能巡检的风电场数智化运维研究 [C]// 中国电子行业协会. 发电企业数智技术创新典型案例及论文集 (2025). 北流望江风电有限公司; 2025: 205-208.
- [3] 罗文延, 李林波, 赵赫, 等. 基于 AI 技术的无人机光伏巡检系统构建与优化 [J]. 光源与照明, 2025, (03): 172-174.
- [4] 韦忠宇. 基于人工智能的输电线路无人机巡检技术探讨 [J]. 电力设备管理, 2025, (06): 62-64.
- [5] 许灵军, 蔡庆宇, 王常玲, 等. 5G 智能风电巡检无人机方案研究及应用 [J]. 邮电设计技术, 2025, (02): 71-76.
- [6] 邹欣, 杨兆辉, 王浩志, 等. 无人机自动精细化巡检 [C]// 中国电子行业协会能源分会. 2024年(第二届)全国智能发电技术大会论文集. 国投广西新能源发展有限公司; 2024: 114-118.
- [7] 谈重磊, 梁辛征, 蔡斌, 等. 面向风电场线路运维的无人机智能巡检系统 [J]. 信息技术, 2024, (02): 108-113.
- [8] 张冬梅, 吉庆昌, 常硕. 风电场集电线路智能巡检方式初探 [J]. 内江科技, 2023, 44(09): 45-71.
- [9] 赵子丰. 风电场5G无人机巡检技术与路径优化设计 [J]. 粘接, 2023, 50(07): 184-188.
- [10] 蔡斌, 李甲煌, 谈重磊, 等. 风电场线路无人机巡检关键技术研究综述 [J]. 电工技术, 2022, (19): 88-90.