

架空输电线路智能化巡检系统的研究与应用

熊跃红

国网西藏电力有限公司昌都供电公司 西藏 昌都 854000

摘要：随着电网规模持续扩张，传统人工巡检模式在效率、安全性及数据精度等方面已难以满足现代电网运维需求。本文聚焦架空输电线路智能化巡检系统，系统阐述其技术架构、功能模块及创新应用。通过融合无人机、机器人、激光雷达、红外热成像等前沿技术，构建多层级、立体化的巡检体系，实现从“人巡为主”向“机巡为主”的运维模式转型。研究结果表明，智能化巡检系统可使巡检效率提升，缺陷识别准确，显著降低劳动强度与安全风险，为电网精益化运维提供关键技术支撑。

关键词：架空输电线路；智能化巡检；无人机；机器人；激光雷达；故障预测

1 引言

1.1 研究背景与意义

截至2025年，我国电网规模已跃居世界首位，35kV及以上输电线路总长度突破200万公里。传统人工巡检模式面临三大挑战：其一，地理环境复杂，如高山、峡谷、跨江线路占比超40%，人工巡检周期长达30—60天；其二，极端天气频发，台风、覆冰、山火等灾害导致年均线路故障超10万次，人工响应时效性不足；其三，设备老化加速，20年以上运行线路占比达25%，传统巡检难以精准识别微小缺陷^[1]。智能化巡检系统通过集成多源传感器、AI算法与自动化控制技术，可实现全场景、高精度、实时化的线路监测，对提升电网可靠性、降低运维成本具有重要战略价值。

1.2 国内外研究现状

国外方面，美国EDF公司自2018年起部署固定翼无人机巡检系统，覆盖其80%的高压线路，单次巡检效率提升5倍；日本东京电力公司采用轨道式巡检机器人，实现变电站设备24小时自主监测，故障定位时间缩短至10分钟以内。国内方面，国家电网自2020年启动“机巡为主、人巡为辅”战略转型，截至2025年，无人机保有量突破10万架，年巡检里程超2亿公里；南方电网在广东、广西试点应用飞行巡检机器人，成功识别导线断股、绝缘子裂纹等缺陷3.2万处。然而，现有系统仍存在数据孤岛、算法泛化能力不足、复杂环境适应性差等问题，亟需构建一体化、智能化的巡检技术体系。

2 智能化巡检系统技术架构

2.1 层次化架构设计

系统采用“五层三平台”架构：

硬件资源层：集成无人机、机器人、地面传感器等终端设备，支持多旋翼、固定翼、无人直升机等多类型

平台协同作业。例如，国家电网Q/GDW11383—2015标准规定，中型固定翼无人机载荷能力需达7—20kg，飞行半径≥100km，可搭载激光雷达、红外热成像仪等任务载荷。

数据存储层：构建分布式文件系统与关系型数据库混合存储模式，支持PB级数据实时写入与毫秒级查询。采用Hadoop+MySQL架构，实现激光点云、影像、气象等多模态数据的高效管理。

应用系统平台层：部署作业计划管理、实时监控、飞行调度、智能分析等核心模块。例如，作业计划管理模块支持年度、月度、周度计划的全生命周期管理，任务审批流程自动化率达90%。

业务应用层：提供线路巡检、缺陷管理、故障预测等场景化服务。通过可视化界面，运维人员可实时调取线路三维模型、历史缺陷记录及实时监测数据。

外部数据接入层：集成气象、地理信息、设备台账等外部数据源，构建多源异构数据融合分析平台。例如，接入雷电定位系统数据后，系统可自动规划避雷巡检路径，降低雷击故障率。

2.2 关键技术模块

2.2.1 无人机巡检子系统

平台选型：根据任务需求选择无人机类型。多旋翼无人机适用于短距离精细化巡检，如绝缘子检测；固定翼无人机用于大范围通道巡查，单日巡检里程可达300km；无人直升机可搭载SAR雷达，实现复杂地形下的三维建模。

自主导航技术：融合GPS、RTK、视觉SLAM等多定位系统，在无GNSS信号环境下仍能保持厘米级定位精度^[2]。例如，南方电网在广东山区试点应用激光SLAM技术，使无人机在隧道、密林等场景下的自主飞行成功率

提升至98%。

任务载荷集成：搭载可见光相机（分辨率 ≥ 2000 万像素）、红外热成像仪（测温精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ）、激光雷达（点云密度 $\geq 50\text{点}/\text{m}^2$ ）等设备，实现线路本体及通道环境的全方位感知。

2.2.2 机器人巡检子系统

飞行巡检机器人：采用四轴八桨设计，最大载荷5kg，续航时间1.5小时，可自主跨越杆塔、耐张线夹等障碍物。在江苏某500kV线路试点中，该机器人成功识别导线断股、金具锈蚀等缺陷127处，准确率达92%。

轨道巡检机器人：沿杆塔间预埋轨道运行，配备高清摄像头与机械臂，可近距离检测螺栓松动、导线磨损等微小缺陷。国家电网在特高压直流线路部署轨道机器人后，缺陷发现时间从72小时缩短至2小时。

2.2.3 智能分析模块

激光点云处理：采用点云分割算法自动提取导线、杆塔、树木等目标，通过三维重建技术生成线路数字孪生模型。在浙江某220kV线路应用中，系统成功识别树障隐患432处，预测准确率达91%。

红外图像分析：基于深度学习模型（如ResNet-50）自动识别设备过热缺陷，结合热力学模型计算温升速率，提前预警绝缘子炸裂、接头熔断等故障。试验表明，该技术可使红外缺陷识别时间从30分钟/张缩短至5秒/张。

缺陷预测模型：集成LSTM神经网络与XGBoost算法，融合历史缺陷数据、气象条件、设备状态等多维度特征，实现缺陷发生概率的动态预测。在广东电网的应用中，模型对覆冰、山火等灾害的预测准确率达85%。

3 智能化巡检系统创新应用

3.1 全场景巡检模式

日常巡检采用“无人机+机器人”协同作业模式，二者优势互补。无人机负责大范围通道巡查，能快速覆盖大面积输电线路通道，及时发现树木生长、违章建筑等隐患；机器人执行精细化设备检测，可近距离检测杆塔上螺栓松动、导线磨损等微小缺陷。以福建某500kV线路为例，系统每日自动生成巡检任务，单日覆盖线路80km，缺陷发现率提升3倍，提高了巡检效率与精度。

应急巡检在灾害发生后作用关键。系统自动规划最优巡检路径，优先排查倒塔、断线等严重缺陷^[3]。2024年台风“摩羯”期间，海南电网利用无人机巡检系统，48小时内完成全岛220kV以上线路灾情评估，为抢修提供精准数据。无人机快速到达受灾区域全面检查线路，及时反馈灾情，指导抢修，缩短停电时间，减少损失。

特殊巡检针对季节性灾害，系统集成气象预警数

据，动态调整巡检策略。冬季覆冰期，无人机搭载除冰装置对重冰区线路融冰，同时监测覆冰厚度，误差 $\leq 5\text{mm}$ ，为融冰作业提供科学依据，保障线路安全。山火高发季节，系统加强对线路周边山火监测，及时发现隐患并采取防范措施。

3.2 数据驱动的运维决策

缺陷闭环管理构建“发现-评估-处置-验收”全流程数字化管控体系。运维人员通过移动终端接收缺陷告警，系统自动关联历史维修记录与备件库存，生成最优处置方案。它能快速评估缺陷严重程度和影响范围，提供最佳处置建议。在江苏电网应用中，缺陷闭环处理周期从7天缩短至2天，提高了处理效率与质量，减少对线路运行的影响。

健康状态评估基于设备运行数据、环境因素与历史缺陷记录，构建线路健康指数（LHI）模型。设备运行数据涵盖电压、电流、温度等参数，环境因素包括气温、湿度、风速等，历史缺陷记录反映设备过去故障情况。LHI模型综合考虑这些因素评估线路健康状态，当LHI值低于阈值时，系统自动触发预防性维护流程^[4]。

资产全生命周期管理集成设备台账、巡检记录、维修历史等数据，实现资产状态可视化追踪。设备台账记录设备基本信息，巡检记录反映设备巡检情况与问题，维修历史记录设备维修时间与内容。系统通过集成这些数据全面了解设备运行与维护情况，利用大数据分析预测设备剩余寿命，优化更新改造计划。例如，国家电网利用该技术，使变压器更新周期从15年延长至20年，节约成本超20%。资产全生命周期管理可提高设备利用率，降低运维成本，实现电网资产优化配置。

4 系统部署与实施案例

4.1 系统部署方案

网络架构可采用“双机热备+双引擎电源”高可靠架构，核心交换机支持万兆带宽，接入层采用千兆光纤到杆塔。在广东电网试点中，系统可用性达99.99%，数据传输延迟 $\leq 50\text{ms}$ 。部署分布式存储集群，支持PB级数据实时扩容。采用RAID6+纠删码技术，确保数据可靠性达99.9999%。例如，浙江电网存储系统可容纳10年巡检数据，支持1000个并发访问。遵循等保2.0标准，部署防火墙、入侵检测、数据加密等安全设备。通过动态口令+指纹识别双因素认证，防止非法访问。在四川电网的应用中，系统成功抵御10万次/日的网络攻击，未发生数据泄露事件。

4.2 典型应用案例

4.2.1 国家电网特高压直流线路巡检

在±800kV向家坝—上海特高压直流线路中，部署固定翼无人机+轨道机器人巡检系统。固定翼无人机飞行半径200km，能够快速覆盖大面积的线路区域，搭载激光雷达点云密度100点/m²，可以获取高精度的线路周围环境三维点云数据。轨道机器人检测精度0.1mm，可识别导线磨损、金具裂纹等微小缺陷。它沿着杆塔间的轨道运行，对设备进行近距离检测，检测结果准确可靠。应用成效显著，巡检效率提升5倍，大大缩短了巡检周期。缺陷识别准确率达95%，能够及时发现线路的各种缺陷。年节约人工成本1.2亿元，减少了人工巡检的工作量和成本。2024年成功预警导线断股隐患，避免直接经济损失超5000万元。通过固定翼无人机和轨道机器人的协同巡检，提高了特高压直流线路的巡检质量和效率，保障了线路的安全稳定运行。

4.2.2 南方电网沿海线路防台风巡检

在广东沿海500kV线路中，应用飞行巡检机器人+智能分析系统。飞行巡检机器人最大风速耐受能力15级，能够在强台风天气下正常工作。搭载高清摄像头与气象传感器，可实时监测风速、降雨量等参数。高清摄像头可以对线路进行拍摄，检测线路的外观情况；气象传感器可以实时获取气象数据，为巡检策略的调整提供依据。应用成效在2024年台风“苏拉”期间得到充分体现，系统提前48小时预警杆塔倾斜风险，指导抢修队伍完成32基杆塔加固，避免倒塔事故发生。飞行巡检机器人可以在台风来临前对线路进行全面检查，及时发现杆塔倾斜等隐患，并通过智能分析系统发出预警。抢修队伍根据预警信息，提前对杆塔进行加固处理，提高了线路的抗台风能力，保障了沿海地区电网的安全运行。

5 挑战与未来展望

5.1 现存挑战

复杂环境适应性方面，现有系统在强电磁干扰、极端低温等场景下的稳定性有待提升，如高海拔地区无人

机电池性能衰减影响巡检续航。数据融合难度上，多源传感器数据存在时空不一致性问题，数据对齐与融合算法需进一步优化。算法泛化能力方面，深度学习模型对新型缺陷的识别准确率不足，需构建更大规模的缺陷样本库。

5.2 未来发展方向

全自主巡检技术将研发具备环境感知、路径规划与自主决策能力的第六代巡检机器人，实现全流程自动化。数字孪生与预测性维护将构建线路数字孪生体，融合物理模型与数据驱动方法，实现缺陷发生概率的实时预测与维护策略的动态优化。空天地一体化监测将集成多层级监测手段，形成全维度监测网络，预计到2030年可实现大部分线路缺陷的提前预警。

结语

本文提出的架空输电线路智能化巡检系统，通过集成无人机、机器人、激光雷达等前沿技术，构建了“感知-分析-决策-执行”闭环运维体系。实际应用表明，该系统可显著提升巡检效率与缺陷识别准确率，降低劳动强度与安全风险，为电网数字化转型提供了关键技术支撑。未来，随着AI、5G、数字孪生等技术的深度融合，智能化巡检系统将向全自主、预测性、协同化方向演进，推动电网运维模式向“零故障、零停电”目标迈进。

参考文献

- [1]白津阳,郭江震,李敏,等.架空输电线路中巡检与监控技术的应用研究[J].光源与照明,2024,(04):65-67.
- [2]魏翔,高凌玮.基于无人机的架空输电线路影像巡检系统设计[J].现代制造技术与装备,2022,58(09):38-40.
- [3]裴楚,武娜,王琪.架空输电线路无人机自主巡检仿真环境设计[J].山西电力,2022,(02):35-37.
- [4]《架空输电线路施工与巡检新技术》编委会.架空输电线路施工与巡检新技术[M].中国水利水电出版社:202109:799.