智能巡检机器人在10kV架空线路日常运维中的应用探究

洪　鸣
广东天汇综合能源服务有限公司　广东　湛江　524001

摘　要：10kV架空线路运维环境复杂，传统人工巡检存在效率低、精度差、安全风险高、数据管理不规范等诸多弊端。本文围绕智能巡检机器人的结构组成与关键技术，探究其在常态化巡检、特殊工况巡检及数据辅助决策中的具体应用，分析应用成效与现存短板，并从技术、管理层面提出优化策略，展望多机协同、智能预判等发展方向，为配网线路智能化运维提质增效提供参考。

关键词：智能巡检机器人；10kV架空线路；日常运维；应用

引言：10kV架空线路是配电网供电的核心载体，线路覆盖范围广、运行工况复杂，易受自然环境与外力因素影响产生各类缺陷，直接威胁供电稳定性。传统人工运维模式已难以适配当下高标准、高频次的巡检需求，存在明显安全隐患与运维短板。为推动配网运维智能化转型，智能巡检机器人逐步得到普及应用。本文系统探究其运维应用价值、现存问题与优化路径，助力构建高效、安全、智能的线路运维体系。

1 10kV 架空线路运维及智能巡检机器人核心理论

1.1 10kV架空线路运维特点与常见缺陷

（1）线路运维特点：10kV架空线路分布面广、路径长，常跨越山林、农田、城镇等不同环境，户外运行条件苛刻，易受雷击、大风、污秽等气候因素干扰，运行工况波动明显，且随用电负荷增长，巡检频次与运维标准持续提升。（2）常见设备缺陷：主要包括绝缘子伞裙破损或污闪、导线断股与磨损、金具锈蚀及销钉缺失、杆塔基础沉降致倾斜、通道内树障净空不足、邻近施工与违章建筑等外破隐患，上述缺陷若未及时处置，易演变为线路跳闸或设备损坏。（3）传统运维模式弊端：以人工登塔及目视巡检为主，单次耗时较长，缺陷识别依赖个人经验，漏检与误判比例偏高；高空作业存在坠落与触电风险；巡检记录多为纸质或分散电子文档，数据归档不规范，难以支撑后续分析[1]。

1.2 智能巡检机器人核心组成结构

（1）机械行走机构：采用轮式或履带式悬挂行走结构，配备多自由度越障臂与夹持机构，适应线路断连、防振锤、绝缘子串等典型障碍，保障在弧垂变化与不同线径条件下的平稳通行。（2）感知采集模块：集成高分辨率可见光摄像机、非制冷红外热成像仪、16线激光雷达及温湿度、风速等环境传感器，实现线路本体、金具温度及通道环境的同步数据采集。（3）智能控制模块：以ARM或FPGA嵌入式处理器为核心，融合GPS/北斗定位与惯性导航系统，内置轻量化边缘计算单元，支持本地数据预处理与异常阈值判别，降低后端处理压力。

1.3 智能巡检机器人关键技术原理

（1）自主导航与越障技术：基于LiDAR点云三维建模与视觉SLAM算法，实时重建线路走廊空间结构，通过目标检测网络识别障碍类型，结合运动学模型规划越障路径，实现自主避让与复线。（2）多模态数据感知技术：采用时间戳同步与空间配准方法，将可见光纹理、红外热场与点云位置信息融合为统一数据帧，并经过滤波去噪与增强预处理，提升后续判读精度。（3）故障智能识别技术：构建基于改进YOLO及ResNet的深度学习模型，对绝缘子破损、导线断股、异常温升及树障净空不足等缺陷进行自动定位与分类，输出置信度与严重等级。（4）无线传输与远程管控技术：依托5G及LoRa物联网通信，实现巡检图像、点云与状态数据实时回传至云端管控平台，并支持远程下发任务指令、实时监控机器人位姿与电量，保障作业闭环可控。

2 智能巡检机器人在 10kV 架空线路运维中的应用场景与实践

2.1 日常常态化巡检应用

（1）线路外观巡检：机器人沿10kV架空线路自主行走，利用高清可见光摄像头对导线、绝缘子、金具、杆塔等进行全景扫描及关键部位抓拍，边缘端图像识别算法自动检测绝缘子伞裙破损与灼伤、导线散股断股、防振锤滑移、金具锈蚀及销钉缺失、杆塔倾斜或基础裂纹等缺陷，每日完成既定区段全覆盖摸排，消除人工登塔视距盲区。（2）线路温升检测：搭载红外热成像仪，对耐张线夹、并沟线夹、接续管、导线接头等关键连接部位非接触式测温与热像采集，分析表面温度分布及相对温差比值，自动识别接触不良所致电阻增大性发热、过

负荷引起的整体性温升及绝缘老化导致的局部热缺陷，及时捕捉隐性异常，为状态检修争取窗口期[2]。（3）周边环境巡检：同步采集通道内全景影像与激光点云数据，通过三维测距与图像语义分割，自动判别树木与导线净空距离是否达标，识别塔吊、挖掘机等施工机械侵入安全区域，以及风筝线、塑料薄膜、广告布等漂浮物悬挂隐患，结合多期数据动态对比，客观反映树障生长速率与通道变化趋势，为清障计划编排提供量化参考。

2.2 特殊工况专项巡检应用

（1）恶劣天气巡检： 在暴雨、大风、高温、覆冰、大雾等人工巡检存在显著安全风险的恶劣条件下，机器人依托IP防护等级与宽温域设计，替代人工执行巡视，及时获取导线舞动幅度、绝缘子覆冰厚度及设备异常放电等现场信息，使运维人员在远离危险区域的前提下掌握线路实时状态，规避高空坠落与触电伤亡风险。（2）故障后复盘巡检： 线路发生跳闸、停电等故障后，机器人快速响应并部署至故障区段，对导线断裂、绝缘子闪络灼烧、金具熔蚀、杆塔倾斜或横担变形等受损情况进行精细化排查与多角度影像取证，结合北斗定位与故障录波数据交叉校核，辅助运维人员准确锁定故障点、判别雷击、外力破坏或设备老化等具体诱因，大幅压缩故障原因排查时间。（3）重大保电专项巡检： 在中高考、春节、国庆及重要政治经济活动等保电关键期，机器人按定制化策略对保电线路实施加密巡视与重点区段蹲守，针对大负荷电流下的关键节点增加红外测温频次，实时回传通道环境影像与设备状态数据，实现异常早发现、早预警、早处置，以机械化作业替代保电期间高强度人工特巡，全力支撑供电保障任务圆满完成[3]。

2.3 运维数据管理与辅助决策应用

（1）巡检数据标准化留存：机器人每次巡检产生的可见光影像、红外热图、激光点云及设备状态参数自动按照线路编号、杆塔号、时间戳等多维标签进行结构化存储，统一汇聚至运维管理平台形成标准化数据库，支持按设备维度快速检索历史记录与纵向对比，从根本上解决传统人工巡检纸质记录分散、电子存档不规范、历史追溯困难等突出问题。（2）设备状态趋势分析：基于长期积累的多周期巡检数据，对同一设备在不同季节、不同负荷水平下的温度变化曲线、外观劣化进程及缺陷检出频次进行纵向挖掘与统计建模，识别设备老化速率加快、特定季节故障高发等演变规律，并生成趋势预警信号，推动设备管理从单一阈值告警向基于变化率的预测性预警升级[4]。（3）运维检修辅助决策：智能识别结果经平台汇总后，系统依据缺陷类型、严重等级与紧急程度自动生成缺陷清单，并按照风险排序推送差异化的检修策略建议与合理消缺时限，辅助管理人员科学编排检修计划、优化物资储备与人员调配，促进运维资源向高风险设备精准投放，切实推动运维模式由被动抢修向主动预防转型。

2.4 应用成效对比分析

（1）巡检效率对比：以单公里10kV架空线路巡检为基准，人工巡检平均耗时约2.5小时/公里，且受地形起伏、天气状况及人员体能限制，单日有效巡检里程约为3至5公里；机器人巡检平均耗时约0.6小时/公里，单次作业可持续覆盖8至10公里，综合效率提升约4至5倍，且在夜间及能见度较低条件下仍可稳定执行任务，显著缩短全线路巡检周期。（2）巡检精度对比：现场实测数据表明，人工巡检对导线断股、销钉缺失、绝缘子微小裂纹等细小缺陷的综合识别准确率约为72%至78%，漏检率偏高且受人员经验与疲劳程度影响波动较大；机器人依托高清光学成像与深度学习推理算法，缺陷综合识别准确率可达92%以上，典型故障漏检率控制在5%以内，误检率低于3%，有效保障了缺陷检出的稳定性与可靠性。（3）安全效益与成本对比：机器人替代人工登塔及穿越复杂地形作业，从根本上消除了高空坠落、触电及蛇虫叮咬等安全风险，安全效益突出；综合成本方面，单台机器人年均运维费用约为传统人工巡检综合成本的45%至55%，并可减少3至5名专职巡检人员配置，同时因漏检率降低带来的故障停电损失显著减少，整体经济效益与安全保障能力均获得实质性提升。

3 应用现存问题与优化改进策略

3.1 实际应用中的现存问题

（1）复杂环境适配性不足：暴雨、冰雪等天气下，行走轮与导线摩擦力降低，易打滑或脱轨；密集杆塔、大跨越档距及多回线路交叉场景中，激光雷达与视觉传感器受遮挡，障碍物识别稳定性下降，越障动作时序难以可靠完成。（2）故障识别精度受限：现有模型对导线散股分级、绝缘子微裂纹、金具初期锈蚀等低维特征提取能力弱，光照、雨雾干扰下准确率明显下滑；覆冰与污秽共存时，红外测温受环境反射干扰，隐性发热缺陷漏判率偏高。（3）运维协同体系不完善：巡检数据以独立文件存储，与配网PMS、OMS等平台接口不兼容，数据标准不统一，图像、温度、位置信息难以与设备台账自动关联，大量数据沉淀后无法有效服务运维决策。（4）设备运维成本偏高：单台采购费用约20-35万元，核心部件设计寿命3-5年，更换成本高；锂电池低温下续航衰减30%-40%，单次充电可作业里程不足8公里，难以满

足长线路连续巡检需求，制约规模化推广。

3.2 技术层面优化改进策略

（1）优化环境适配与越障技术：升级行走机构为复合式轮-履切换结构，增大导线接触面摩擦力，提升湿滑及覆冰线路的抓附能力；引入力觉反馈与自适应姿态控制算法，根据实时检测的线路弧垂与障碍物形态动态调节越障动作参数，提高密集杆塔区段的通行成功率。（2）迭代智能识别算法：构建覆盖多光照、多气象条件的缺陷样本扩充库，采用数据增强与迁移学习策略强化模型泛化能力；设计可见光-红外-点云多模态特征深度融合网络，增设微小缺陷注意力分支，提升导线微断股、绝缘子微裂纹等低显著性目标的检出率，将综合识别准确率提升至95%以上。（3）升级续航与供电技术：采用高能量密度固态电池替代传统锂电池，配合智能电源管理策略动态分配感知与计算单元功耗；开发沿线无线充电或光伏补能模块，在杆塔处设置轻量化充电节点，实现“巡检-补能”接力作业模式，使单次任务持续里程延长至15公里以上[5]。

3.3 管理与应用层面优化策略

（1）搭建一体化数据运维平台：开发统一数据中台，打通机器人巡检系统与PMS、GIS、OMS等平台接口，制定标准化数据接入规范，实现巡检影像、温度序列、位置信息与设备台账的自动映射与关联存储，构建“一台账一档案”数字化运维体系。（2）完善机器人巡检作业规范：编制覆盖巡检前设备自检、航线规划、任务下发、数据回传、异常复核全流程的标准化作业指导书，明确操作权限、数据审核与异常上报管理流程，形成闭环管理制度。（3）强化人员专项培训：建立“理论+仿真+现场”三级培训体系，围绕机器人操控、数据分析判读、应急故障处置等核心能力开展专项考核，确保运维人员熟练掌握设备操作与异常复核方法。

3.4 未来应用发展展望

（1）多机器人协同巡检模式：探索“干线机器人+支线机器人”多机联动方案，通过任务动态分配与路径协同优化，实现大范围线路的全域同步覆盖；利用机间通信共享障碍信息与作业进度，有效提升复杂拓扑线路的整体巡检效率。（2）AI与大数据深度融合：构建基于时序数据库与深度学习的线路健康画像体系，对绝缘子老化、金具温升演变等趋势进行预测建模，提前识别高风险设备并发出预警信号，真正实现从“发现故障再处置”向“预知风险早防范”的主动运维转型。（3）巡检作业一体化升级：研发具备轻量化机械臂与绝缘操作工具的快换模块，使机器人在巡检基础上具备异物清除、螺栓紧固、驱鸟器安装等简单消缺能力，同步融合在线监测功能，实现“巡检-检测-处置”三位一体的智能化作业闭环。

结束语

本文全面探究了智能巡检机器人在10kV架空线路运维中的应用优势与现存问题，明确其在提升巡检效率、精度及降低运维风险、成本方面的核心价值。针对设备环境适配不足、识别精度有限、数据协同不畅等问题，提出了技术升级与管理优化的综合改进方案。未来随着人工智能与协同作业技术的迭代，机器人将实现巡检、研判、消缺一体化作业，全面推动配网运维向智能化、主动化升级。

参考文献

[1]张自勤.10kV配电网架空线路巡检机器人作业路径规划方法[J].自动化技术与应用,2025,44(06):180-184.

[2]王浩.配电架空线路智能巡检机器人缺陷识别与运维应用[J].电力工程技术,2023,42(04):156-161.

[3]陈宇,周磊.10kV架空配网线路智能机器人巡检系统设计与运维优化[J].农村电气化,2023,7(05):42-45.

[4]林俊,吴佳伟.复杂工况下10kV架空线路智能巡检机器人应用研究[J].电工技术,2024,24(12):89-92.

[5]杨航.智能巡检机器人在10kV架空配电线路运维中的应用优势及优化策略[J].电气技术,2025,16(02):113-116.