

Application and efficiency analysis of intelligent inspection in overhead contact line operation and maintenance

Zichao Bu

Guoneng Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Cangzhou, Hebei, 062350, China

Abstract

Intelligent inspection technology is profoundly transforming traditional maintenance modes for overhead contact systems. This paper systematically elaborates on the applications of unmanned aerial vehicles (UAVs), intelligent image recognition, and fault prediction and health management. It particularly analyzes their effectiveness across four key dimensions: fault discovery, plan scheduling, cost budgeting, and team operations. The research demonstrates that UAVs and intelligent image recognition enable real-time detection and precise localization of defects. Predictive maintenance models, fueled by multi-source data fusion, drive the shift of plan scheduling from “fixed cycles” to “dynamic windows.” Data-driven cost budgeting enhances the accuracy of resource allocation, while closed-loop work order management reshapes team operations from passive tasking to proactive intervention. Practice confirms that intelligent inspection, through systematic innovation in these four dimensions, establishes a data-driven, proactive maintenance regime, significantly improving the precision, efficiency, and safety of OCS maintenance.

Keywords

Intelligent Inspection Overhead Contact Network Maintenance; Unmanned Aerial Vehicle; Data-driven

智能巡检在接触网运维中的应用与效能分析

卜梓朝

国能朔黄铁路发展有限责任公司，中国·河北沧州062350

摘要

智能巡检技术正深刻变革传统接触网运维模式。本文系统阐述了无人机、智能图像识别及故障预测与健康管理的在接触网运维中的应用，并重点从故障发现、计划铺排、成本立项、班组作业四个维度剖析其应用效能。研究表明，无人机与智能图像识别技术实现了缺陷的实时捕捉与精准定位；基于多源数据融合的预测性维护模型，驱动计划安排从“固定周期”向“动态窗口”转变；数据驱动的成本预算提升了资源分配的精准性；闭环化工单管理则重塑了班组作业流程，使其从被动听令转向主动出击。实践表明，智能巡检通过在上述四个维度的系统性创新，构建了数据驱动的主动预防式运维体系，显著提升了接触网运维的精确性、效率与安全性。

关键词

接触网运维；智能巡检；无人机；数据驱动

1 引言

当前，接触网巡检主要依赖三种方式：一是利用6C综合检测车进行巡视，二是利用天窗时间由轨道车搭载接触网作业平台巡检，三是依靠人工进行地面巡视。然而，这些传统方式均存在一定局限性：6C检测车受运行计划与线路条件制约，检测周期较长，存在检测盲区，难以实现高频覆盖；轨道车平台巡检依赖天窗点，作业时间有限，灵活性不足；人工巡视则易受人员技能、体力及主观判断影响，存在视觉盲区，对高位部件、细小缺陷的识别能力有限，且效率较低，难以系统覆盖零部件状态、补偿装置、绝缘件以及支柱基础

等全方位设备状态。

在此背景下，智能巡检技术依托无人机、各类传感器与大数据分析，展现出显著优势。它能够高效、精准地实现全天候监测与预警，不仅大幅提升检测频率和覆盖范围，有效识别异物侵扰与潜在故障，更能克服高位环境作业风险，减少漏检误判。通过自动化、数据驱动的运维模式，智能巡检有力提升了接触网运维效率、安全性与可靠性，为实现运维管理全面智能化提供了关键支撑。

2 智能巡检在接触网运维中的应用模式

2.1 无人机系统

无人机在接触网运维中的应用通过搭载高分辨率光学相机、红外热像仪及激光雷达，实现导线磨损、金具松动和绝缘子表面裂纹等缺陷的多维识别。高倍率变焦镜头能够在

【作者简介】卜梓朝（1996-），男，中国山西定襄人，本科，助理工程师，从事铁路供电专业研究。

不停电条件下完成细部结构的高清成像，红外测温设备可对导线连接处的温升异常进行实时监测，从而为缺陷定位提供精确的数据支撑。

春播和秋收季节，铁路沿线经常出现大型农机跨越管段作业的情况，无人机可通过预设航线快速完成广域巡查，实时发现超高车辆、作业机械或堆放物对接触网、电力架空线安全距离的影响，辅助运维人员及时采取隔离或清理措施。夏季汛期或冬季冰雪环境下，飞行平台可在不受地形限制的情况下对易积水、滑坡及覆冰区段进行动态巡视，减少人工踏勘带来的安全风险。

接触网发生短路或接地故障时，通过故障测距装置无人机能够沿线路快速搜索故障源，通过图像识别与热成像判断受损部位的具体位置，显著缩短故障确认与抢修准备时间。在山区、桥梁及高墩等传统巡视难以覆盖的区段，无人机还可通过垂直起降与悬停技术实现定点观察，提升巡检的时效性与作业覆盖率，为运维体系提供高频次、低风险的动态检测手段。

在长线路或特殊地形区段的接触网维护里，无人机系统同样起到重要作用，其搭载高清光学以及红外摄像设备的无人机，能够对导线磨损、接触点烧损还有绝缘子表面裂纹迅速开展拍摄工作。并且在飞行期间它能完成局部温度的测量，方便及时找出过热或者异常放电点，减少人工到达难度大且作业风险高的作业环节。

2.2 智能图像识别与缺陷检测

在铁路接触网运维管理里借助无人机高速列车拍摄系统和固定监测摄像头，智能图像识别技术获取接触网各关键部位的高清图像，可针对导线磨损和接触线弧形偏移，悬挂装置松动还有绝缘子裂纹等异常状态展开自动化分析。经过卷积神经网络处理的图像数据，能够识别出微小裂纹锈蚀点以及局部变形以此降低人工巡检的盲区与误判风险。并且系统能够凭借多角度图像拼接以及深度特征提取，针对补偿装置、分相绝缘器、分段绝缘器还有各类线索出现的微小缺陷展开高精度检测，进而生成缺陷定位坐标给现场检修提供精准依据。

在具体应用环节，能够根据列车运行速度以及拍摄频率来构建接触网健康档案的连续时间序列，从而针对缺陷发展趋势展开动态分析。系统能够自动将历史影像进行比对，识别出加速度出现磨损加剧或者结构变形的情况，借此为局部加固决策或者更换决策给予数据支撑。此外，AI模型能够凭借颜色以及纹理特征提取来达成针对绝缘子表面污染或者局部烧蚀情况的分类评估，将温度传感信息融入其中以此对潜在失效风险加以判定。接触网运维借助智能图像识别与缺陷检测，正从传统人工巡检朝着数字化精细化以及可追溯管理方向逐步转型^[1]。

2.3 故障预测与健康评估

在铁路接触网日常运维里，提前识别线路故障以及对

健康状态开展动态监测是保障列车安全运行的关键要点，基于智能巡检能够对传感器采集的电流导线温度、接触线位置偏差振动以及电压等多维数据予以实时处理，通过搭建深度学习模型来识别潜在异常模式实现故障预测。并且通过训练后的神经网络模型可对导线局部过热或者摆动幅度异常情况快速判定，以达到有效预警潜在的磨损或松弛的风险。不仅如此，将气象信息、列车运行密度与历史运维数据相结合，能够构建多因素关联分析模型，如此一来在不同季节或列车高负荷运行的状况下，就可以对接触悬挂、支持装置、定位装置的疲劳状态展开动态评估。

在健康评估领域将结构状态监测技术与图像识别相融合，能够针对绝缘子裂纹以及接触网弧段磨耗展开定量分析。高分辨率影像由无人机巡检或者固定监测点进行采集，能够通过卷积神经网络开展处理达成对微小缺陷的自动标注并且生成健康评分。基于时间序列变化趋势的评分系统能够将正常磨损和潜在损伤区分开来，给运维人员提供具有针对性的检修建议。结合健康评估与故障预测的结果，能构建起覆盖全网的风险分布图，以此来引导资源调配以及检修优先级的确定，达成从被动响应的运维模式向主动预防运维模式的转变。

3 智能巡检在接触网运维中的效能

3.1 从“延迟响应”到“实时捕捉”：故障发现的精确化与高效化

智能巡检系统利用高分辨率成像与多源传感手段完成对接触网关键之处细微缺陷的捕捉，结合红外测温仪和高清视觉模块在不同光照条件下保持图像清晰度，能精确测定连接部位及导线的局部温升状况，由此识别因接触不良引发的潜在过热点。并且对导线表面磨耗，定位装置偏移以及支柱倾角激光扫描设备都能进行毫米级测量，自动生成三维几何模型以用来比对历史巡检数据^[2]。在算法对比进程里，系统可以把磨耗速率、金具松弛度这类动态参数提取出来，为生产技术部门给出实时预警的根据，并提前将风险位置锁定，让从缺陷发现直至检修部署的时间得以缩短。

3.2 从“固定周期”到“动态窗口”：计划铺排的逻辑转变

网络进行数据互补，实现从宏观线路到微观构件的多维度立体化检测。无人机平台负责大范围航线覆盖与高空俯拍，快速发现导线磨损、金具松动及异物侵限等外部缺陷；地面激光雷达则以毫米级精度获取接触线几何参数、支柱倾角及拉出值，为结构形态变化提供动态量化数据；车载红外热像在夜间或不停电情况下进行连续热分布扫描，识别接头发热、绝缘件击穿等早期隐患；在线传感器则实时记录电流、电压、温度和振动信息，捕捉异常趋势并输出预测模型。

在计划管理层面，系统通过融合上述多源数据，建立设备状态与环境因子的关联算法，将传统的“固定周期”检

修模式转化为基于风险和趋势预测的“动态窗口”策略。对于磨损加速或频繁温升的区段，系统可预测其临界时间并自动生成最佳维护时段，推荐在下次或下下次“天窗点”中优先纳入检修任务。所有缺陷数据经智能模型计算后按照安全风险等级自动排序，导线张力失衡、吊弦疲劳等高危隐患获得最高处置优先级，而轻微且变化缓慢的缺陷则可在资源充足时处理，从而实现维修资源的最优分配。

在维修执行环节，系统将各类任务与天窗点时间、地理位置、工种配置及物料需求进行联动分析，形成集成化“工作包”，通过一次封锁实现多项作业，减少机械与人员重复调度的时间消耗，提升单个天窗点的作业效率。多技术融合带来的实时数据共享与智能调度机制，使接触网运维能够实现全生命周期的精细化管理和高效化响应，为复杂线路环境下的持续稳定运行提供数据驱动的作业保障。

3.3 从“经验估算”到“数据预算”：成本立项的精准化变革

智能巡检系统在成本立项环节的应用，使预算编制从依赖经验推算转向基于实时数据的量化测算。系统通过对巡检数据的长期积累与趋势建模，可精准识别设备劣化速度及潜在缺陷分布，并据此生成分项需求清单。物料管理方面，平台能够统计全线各类缺陷所需更换部件的型号与数量，例如针对绝缘子、吊弦、定位器等关键构件，系统可自动汇总预计更换数量并关联采购批次，避免传统依靠人工估算导致的库存冗余或应急缺料现象。同时，借助历史数据的时序分析，可对未来一个或多个预算周期的物料消耗进行趋势预测，为年度计划和季度采购提供量化依据。

在人工与机械成本测算方面，智能巡检平台以作业工序和缺陷类别为基础，构建标准工时数据库，并通过任务清单与作业条件匹配，自动计算所需人工投入及机械台班。例如，更换某型号定位器所需的平均工时、机械配置和安全辅助人员均可在系统内调用，从而形成包含人工成本、设备使用费用及外包支出的综合预算模型。通过这种基于数据的成本拆解，可为外委施工项目报价和自有人员配置提供直接参考，减少因估算偏差带来的资金浪费。

在预算申报与审批阶段，系统能够自动生成设备健康分析报告和基于状态预测的维修方案，附带物料需求、人工成本及风险消减效果的图表化展示。预算文件不再仅为单一数字，而是包含故障概率曲线、维修优先等级及成本构成的多维数据包，管理部门可据此对资金使用的必要性与时效性

进行验证，提升预算立项的透明度和可审查性，确保资金投入与设备状态的实时匹配。

3.4 从“被动听令”到“主动出击”：检修班组作业的闭环化变革

智能巡检系统通过数据赋能，将班组作业从传统的被动响应转向主动干预，实现全流程闭环管理。系统依据巡检结果及预测模型生成智能维修工单，自动推送至班组移动端或工单管理平台。工单包含精确的作业位置（公里标、杆号）、缺陷影像、AI分析结论、维修标准及规范、所需工具和材料清单，以及安全注意事项，确保班组在出发前即可全面掌握现场情况，减少现场确认时间。

在现场作业环节，班组人员可通过移动终端访问设备历史维修记录、结构图纸及缺陷发展趋势，实现对故障的快速判断与精确处理。作业过程中，关键工序节点可通过数字化手段进行记录、确认与实时上传，使施工进度、作业质量及安全措施同步可视化。系统还可对异常操作进行提示或预警，进一步保障作业的规范化执行。

维修完成后，班组通过APP上传修复后影像资料及作业记录，系统或管理人员可远程完成电子验收、核对并销号。此机制形成了从“检测-分析-派单-维修-验收”的全程闭环，同时所有作业数据被系统储存，用于后续缺陷预测、AI模型训练和作业优化。闭环作业不仅提高了任务执行的准确性和响应速度，也将班组经验数字化沉淀，形成可追溯的知识库，为未来类似缺陷的识别与处理提供可靠依据，实现运维作业的动态优化与持续迭代。

4 结语

总而言之，在接触网运维中应用智能巡检，给实现运维流程的智能化与数据化给予了关键支撑，在具体实践中，通过强化运维人员技能与协同机制，提升智能指令执行的可行性，优化数据采集，智能巡检能够显著提高接触网维护的精确性和效率。

参考文献

- [1] 王双双.基于智能巡检的接触网维护策略优化[J].电气化铁道, 2024, 35(S01):81-85.
- [2] 付宝宝.基于人工智能技术的电气化铁路接触网检测研究[J].仪器仪表用户, 2025, 32(1):15-17.
- [3] 寇元召.接触网智能监测系统在城市轨道交通供电系统运维中的应用研究[J].工程建设与设计, 2024(14):86-88.