

智能巡检机器人在输变电设备运维中的应用与挑战

周峰

乌拉特后旗供电分公司 015500

DOI: 10.12238/ems.v7i5.13196

[摘要] 随着能源结构转型与新型电力系统建设的推进,电力行业对输变电设备运维的智能化需求日益迫切。传统人工巡检模式效率低、风险高、数据滞后,难以满足复杂电网场景需求。本文探讨智能巡检机器人在输变电设备运维中的应用,分析其技术原理、实践及挑战,旨在为电力行业智能化升级提供理论参考与实践路径,助力构建安全、高效、可持续的新型电力运维体系。

[关键词] 智能巡检机器人; 输变电设备; 电力系统运维; 人工智能; 物联网

一、引言

(一) 研究背景

随着能源转型与新型电力系统建设加速,电力行业正从传统管理向数字化、智能化转变。智能巡检机器人凭借自主性、精准性与全天候作业能力,成为关键突破口。政策上,《“十四五”现代能源体系规划》明确推进智能巡检与无人化运维。技术上,物联网、多模态感知与AI技术的成熟,推动机器人向“感知-分析-决策”一体化系统演进。截至2023年,我国电力巡检机器人市场规模突破50亿元,覆盖超80%的500kV及以上变电站,行业进入规模化应用与技术迭代阶段。

(二) 研究意义

智能巡检机器人通过高精度传感器与AI算法,实现设备状态的毫米级缺陷识别与毫秒级异常预警,提升巡检效率与准确性,支持7×24小时作业,增强电网韧性。作为“端边云”协同体系的核心节点,机器人实时采集数据,与数字孪生平台、PHM系统融合,构建“数据采集-特征提取-状态评估-决策优化”闭环链路,推动运维从“事后抢修”向“事前预防”转变,助力电力企业沉淀设备全生命周期数据资产,加速数字化转型。

二、智能巡检机器人的技术原理与系统架构

(一) 系统组成

1、硬件组成

智能巡检机器人的硬件系统由移动底盘、传感器阵列和通信模块三大核心组件构成。移动底盘根据场景需求灵活选择,轨道式底盘适用于固定路径,轮式和履带式底盘分别适应平坦与崎岖地形;动力系统以锂电池为主,部分场景引入光伏或无线充电技术^[3]。传感器阵列集成了多模态感知设备:红外热像仪精确定位设备过热缺陷,可见光摄像头结合OCR技术实现表计读数识别,超声与特高频传感器捕捉局部放电信号,激光雷达构建厘米级环境模型,声纹传感器采集设备异响频谱。通信模块采用5G CPE模块保障高清数据实时回传,结合边缘计算压缩时延,并通过LoRa+Wi-Fi 6双模设计确保强电磁干扰环境下的链路稳定性。

2、软件架构

智能巡检机器人的软件架构采用分层模块化设计,实现全流程闭环控制。导航算法层基于ROS框架,集成SLAM与动态路径规划算法,如改进型RRT-Connect算法显著提升路径规划效率与避障成功率。数据分析层通过边缘计算节点实时处理设备数据,并借助MQTT协议上传至云端PHM系统,完成历史数据比对与趋势预测。人机交互层采用React框架开发Web监控界面,支持任务调度、实时监控与报警管理,并融合移动端APP的AR功能,提供“虚实融合”的交互体验,便于运维人员查看巡检路径与设备状态。

(二) 核心技术

在自主导航方面,SLAM技术通过激光SLAM和视觉SLAM实现高精度环境地图构建与定位,激光SLAM定位精度达±2cm,视觉SLAM采用ORB-SLAM3算法适应无GPS环境,但易受光照影响;多模态融合技术结合激光、视觉与IMU数据,提升定位可靠性,如MultiSLAM系统在强光干扰下仍保持95%精度。

在多传感器融合领域,数据级融合采用卡尔曼滤波与粒子滤波算法对齐红外与可见光图像,实现设备温度与外观同步分析;特征级融合提取不同传感器的特征向量,并输入分类器联合决策;决策级融合基于DS证据理论或贝叶斯网络综合多传感器置信度输出最终诊断结果。

在AI算法应用方面,深度学习缺陷识别采用YOLOv7模型实现设备螺栓松动、锈蚀等缺陷的高精度检测(mAP@0.5达94.3%),并结合UNet网络进行图像分割,实现绝缘子裂纹的像素级精度检测(>98%);小样本学习技术基于FewShot Learning算法,仅需少量异常样本即可训练高精度分类模型,如变压器油渗漏检测。此外,异常检测模型通过LSTM网络分析设备温度时序数据,并结合自编码器构建设备正常运行状态基准,通过重构误差检测未知类型故障^[4]。

(三) 工作流程

智能巡检机器人的工作流程包括任务管理、数据采集、分析与反馈,形成高效闭环。运维人员通过云端平台下发任务后,机器人加载地图与设备参数库,启动自检程序,异常时报警并暂停任务。机器人通过LiDAR与视觉传感器更新环境地图,采用改进型A*算法规划路径,结合动态避障模块监测行进方向,遇障碍物时切换至局部路径规划。数据采集分为定点与移动检测:定点检测时,红外相机扫描设备表面,精度达±0.5℃;移动检测中,超声传感器捕获局放信号,同步录制可见光视频。采集的数据通过边缘云端协同分析,边缘计算节点运行轻量化AI模型,对紧急异常触发就地告警,原始数据上传云端,通过数字孪生模型识别设备性能退化趋势。系统自动生成巡检报告,包含缺陷位置截图、温度分布热力图及维修建议,并根据运维人员反馈动态更新AI模型参数,实现自优化。

三、智能巡检机器人在输变电场景的应用实践

(一) 典型应用场景

(1) 变电站巡检: 全维度设备状态感知

在变电站场景中,机器人承担核心设备的全天候监测任务,通过红外热像仪实时扫描变压器套管、断路器触头等关键部位,精准识别过热隐患,如吉林电力白城发电公司部署的优艾智合机器人检测到GIS设备接触不良温差达25℃,成功避免设备烧毁事故;同时,基于2000万像素可见光摄像头与OCR技术,自动读取油位计、压力表等表盘数据,准确率超99%,替代人工抄录并消除误读风险;此外,采用深度学习模型(如YOLOv7)对绝缘子表面图像进行像素级分割,识

别微米级裂纹。

(2) 输电线路巡检: 空天地一体化协同

针对输电线路分布广、环境复杂的特点, 智能巡检机器人通过无人机协同巡检构建立体巡检网络, 如南方电网广东电网公司构建“全国首个配网机巡自动巡检全覆盖省级电网”, 无人机识别导线覆冰厚度误差小于1mm, 并实时回传杆塔螺栓松动图像; 同时, 通过多光谱传感器分析覆冰反射特性, 结合气象数据预测覆冰增长趋势, 如青藏高原某变电站的优艾智合 ARIS 机器人提前12小时预警导线覆冰风险, 保障电网稳定运行; 此外, 利用声纹传感器捕捉螺栓松动产生的特定频率振动信号, 结合图像识别定位松动位置, 准确率超95%。

(3) 配电房巡检: 高精度局放检测与状态评估

在封闭式配电房中, 机器人主要解决局放检测与开关柜状态评估等痛点, 如甘肃银光化学工业集团热电厂的轨道式机器人通过超声与特高频复合传感器将局放检测效率提升3倍, 漏检率降低至5%以下; 同时, 融合红外热成像与振动传感器数据评估触头老化程度, 如佛山供电局通过AI调度员“小慧”实现开关柜寿命预测误差小于10%。这些实践充分展现了智能巡检机器人在输变电设备运维中的高效性与可靠性, 为电力行业智能化转型提供了有力支撑。

(二) 应用优势分析

(1) 效率提升: 突破人力与时间限制

机器人突破人力与时间限制, 实现7×24小时作业, 如东莞220千伏掌洲变电站的“吠云—灵动”轮足机器人通过自主越障技术, 巡检速度较人工提升250%, 单次任务耗时缩短70%; 同时, 一台机器人可替代3-5名巡检员, 如吉林电力白城发电公司部署的6台机器人年累计完成7000次巡检, 覆盖面积达15万平方米。

(2) 安全性增强: 规避高危环境风险

在安全性方面, 机器人有效规避高危环境风险, 替代人工进入核电站安全壳、高压开关场等区域, 耐受50℃高温与强辐射环境, 如中广核阳江核电站的机器人减少人员暴露风险90%以上; 此外, 机器人具备恶劣天气适应性, 履带式机器人可在积雪深度30cm的路面稳定行进, 无人机在8级强风下仍能保持巡检精度。

(3) 数据精准性: 多维度融合降低漏检率

在数据精准性方面, 机器人通过多传感器协同与AI算法优化显著降低漏检率, 如优艾智合机器人通过“四合一传感器”(光学、声学、气体、电磁) 实现多维数据融合, 使故障诊断准确率突破95%; 同时, 深度学习模型通过历史数据迭代优化, 如表计OCR识别准确率从初期85%提升至99%。

四、技术挑战与未来发展方向

(一) 当前面临的主要挑战

(1) 复杂环境适应性

智能巡检机器人在复杂环境适应性方面面临显著挑战。在极端天气条件下, 激光雷达在积雪覆盖场景下点云反射率下降, 如东北某变电站实测数据显示, 积雪厚度超过20cm时LiDAR定位误差增加300%, 视觉传感器也易受雨滴遮挡; 同时, 强风扰动对输电线路无人机巡检造成影响, 南方电网2023年测试数据显示, 风速超过12m/s时无人机稳定性骤降, 航拍图像模糊率超40%。此外, 非结构化地形限制问题突出, 变电站内临时堆放的设备、泥泞地面等场景导致轮式机器人卡滞率高达15%, 如某厂商实地测试结果显示, 机器人无法稳定通过复杂地形, 限制了其应用范围。

(2) 续航与能源管理

续航与能源管理是制约智能巡检机器人连续作业的核心

瓶颈。当前主流锂电池能量密度仅为250-300Wh/kg, 机器人连续作业时间普遍不足8小时, 如广东某配电房轨道式机器人需每日充电3次, 严重影响任务连续性; 同时, 无线充电桩部署成本高昂(单套约20万元), 且充电效率受距离限制, 超过10cm时效率低于80%, 难以满足大规模部署需求。这些问题导致机器人在实际应用中难以实现全天候高效作业。

(3) 多机协同问题

多机协同问题表现为任务分配优化与避障策略冲突。在多机器人系统中, 动态环境下易出现任务重叠或遗漏, 如某省级电网10台机器人协同测试中, 任务覆盖率仅78%, 且能耗增加25%; 同时, 集中式调度系统响应延迟导致机器人轨迹交叉, 某实验室模拟显示, 20台机器人密集作业时碰撞概率达12%, 严重影响了协同效率与安全性^[5]。

(二) 未来技术发展方向

(1) 高精度导航技术

未来智能巡检机器人的高精度导航技术将依托5G+北斗融合定位实现突破。通过北斗三号高精度服务(实时定位精度3cm)与5G基站差分定位融合, 机器人定位误差可大幅降低; 同时, 采用频段聚合技术(如28GHz+4.9GHz双频5G), 在变电站强电磁干扰区域实现99.9%通信可靠性, 显著提升了导航系统的抗干扰能力。

(2) 轻量化与能源革新

轻量化与能源革新是提升机器人性能的关键方向。通过碳纤维复合材料与3D打印技术, 机器人自重可降低30%; 此外, 无线充电技术突破(如磁共振耦合技术)实现50cm距离内效率>90%(中科院电工所2023年成果), 支持机器人“巡检即充电”, 进一步提升了能源管理效率。

(3) 数字孪生融合

数字孪生融合技术将推动智能巡检向预测性维护发展。通过将BIM(建筑信息模型)与设备运行数据融合, 构建高保真数字孪生体; 同时, 基于数字孪生的PHM系统通过蒙特卡洛仿真预测设备剩余寿命(误差<5%), 指导维修资源优化配置, 为电力设备运维提供了智能化决策支持。

结语

智能巡检机器人作为电力系统智能化转型的核心载体, 已从技术验证迈向规模化应用, 显著提升了输变电设备运维的效率与安全性。研究表明, 机器人通过多传感器融合、自主导航与AI算法, 实现了毫米级缺陷检测、全天候作业及高危环境替代, 故障发现率提升, 巡检效率提高。然而, 复杂环境适应性、多机协同效率及续航能力等问题仍制约其发展。未来, 需通过技术迭代、生态共建与场景深耕, 智能巡检机器人将成为新型电力系统的“智能卫士”, 助力“双碳”目标下电力行业的高质量发展。

[参考文献]

- [1] 张瑶桐. 智能巡检机器人在变电站运维工作中的应用[J]. 集成电路应用, 2024, 41(01): 246-247.
- [2] 沈贵军, 陈建凯, 李伟. 智能巡检机器人在变电站中的应用研究[J]. 智慧中国, 2023, (Z1): 59-61.
- [3] 刘乐. 智能巡检机器人在变电站运维管理中的应用[J]. 农村电气化, 2022, (09): 33-35+38.
- [4] 孙本鹤, 王广玲, 王波. 智能巡检机器人在变电站中的应用及研究[J]. 光源与照明, 2021, (02): 95-96.
- [5] 陈波. 智能巡检机器人系统功能构建及其在变电站中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2020, (15): 4-6.

作者简介: 周峰, 1985.04.22, 男, 内蒙古, 汉, 本科, 工程师, 乌拉特后旗供电分公司, 研究方向: 变电运行。