

智能巡检机器人在变电运维中的应用及成效

刘海韬

(国网湖北省电力有限公司黄冈供电公司变电运检分公司, 湖北 黄冈 438000)

摘要 运用智能巡检机器人完成变电运维工作, 能够提升运维效率、保障人员安全, 对于电力企业而言具有积极的作用。本文针对智能巡检机器人的核心技术要点进行分析, 探讨其在变电运维中的技术应用要点, 进一步指出应用智能巡检机器人进行变电运维所取得的效果, 以期为提高变电运维工作水平提供有益参考。

关键词 变电运维; 智能巡检机器人; 设备检测; 区域巡检

中图分类号: TP24; TM63

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.009

0 引言

电力负荷持续上升和电网规模不断扩大, 传统运维模式已无法满足新型电力系统对运维精度和效率的高要求。智能巡检机器人是推进电力数字化转型的关键设备, 融合机器人运动控制、多源感知、智能算法与网络通信等多项技术, 能在变电场景实现自主路径规划、全维度设备监测、缺陷智能识别和数据实时传输。深挖核心技术应用逻辑和运维效能提升机制, 对优化变电运维模式、巩固电网安全保障能力具有关键理论和实践意义。

1 智能巡检机器人的核心技术架构

1.1 自主导航与运动控制技术

自主导航技术支撑智能巡检机器人完成自主作业, 关键是精准定位和路径优化, 目前主流技术方案采用激光雷达与视觉融合导航架构, 用激光雷达采集环境三维点云数据, 依托视觉传感器采集的图像信息, 完成多源数据交叉校验。依托融合 SLAM (同步定位与地图构建) 算法, 机器人能实时生成变电站室内外环境地图, 实现自主定位和障碍物识别, 定位精度可达毫米级, 保证在设备密集、通道狭窄的变电场景中灵活避开障碍, 精准到达巡检点位。运动控制模块按照导航指令完成机器人的稳定移动, 给不同变电场景做差异化设计: 室内变电站大多选用全向移动底盘, 依靠 4 轮独立驱动完成任意方向平移和旋转, 适配室内狭小空间作业; 室外变电站采用轮式或履带式底盘装置, 履带式结构可强化雨雪、泥泞等复杂地形的通行能力, 轮式结构聚焦平坦区域的高效移动, 运动控制模块额外集成姿态感知和防抖技术, 保证移动期间传感器数据

采集的稳定性, 为后续数据处理输送高品质原始数据。

1.2 多传感器融合感知技术

多传感器融合是智能巡检机器人实现设备全状态监测的核心技术, 整合不同类型传感器的感知优势, 构建全维度设备状态感知网络, 核心传感器涵盖可见光高清摄像头、红外热成像仪、超声波传感器、特高频 (UHF) 传感器及环境传感器等, 各传感器功能互补形成协同监测合力。可见光高清摄像头整合高精度光学镜头和图像稳定模块, 能高清采集设备外观细节, 依托 OCR 文字识别算法完成仪表读数、设备标识等信息的自动提取, 读数误差率能控制在 0.5% 以内; 红外热成像仪靠红外辐射探测原理工作, 可实时捕捉设备温度分布特征, 通过温度场分析甄别接头过热、绝缘老化等热缺陷, 温度检测误差控制在 ± 0.1 °C 内; 超声波和特高频传感器的核心用途是局部放电检测, 抓取设备绝缘缺陷产生的超声波信号与特高频电磁信号, 对绝缘状态做早期预警; 环境传感器实时采集温湿度、风速、雨雪等环境参数, 为精准分析巡检数据提供环境校正依据^[1]。

1.3 AI 智能分析与决策技术

AI 智能分析是智能巡检机器人实现“自主识别、自主判断”的核心支撑, 借助深度学习算法智能处理多传感器采集的数据, 完成缺陷识别、状态评估和预警决策, 核心算法体系涉及目标检测算法、图像分割算法、模式识别算法和趋势预测算法等, 构建从数据处理到决策输出的完整技术通路。进行缺陷识别环节, 依托卷积神经网络 (CNN) 的目标检测算法可自动识别设备外观缺陷, 涉及绝缘子破损、设备锈蚀、渗漏油、

作者简介: 刘海韬 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 变电运维。

刀闸分合状态异常等，识别正确率达98%以上；构建设备正常状态的图像和数据模板库，采取图像比对与数据偏差分析算法，可快速排查异常状态并标记缺陷等级。从状态评估角度，合并设备实时监测数据与历史运维数据，采用机器学习算法构建设备健康状态评估模型，准确预判设备劣化走向。决策输出阶段，依托专家知识库搭建告警机制，按照缺陷等级自动生成多级告警信号，同步给出专属处置方案，为运维决策构建智能支持框架^[2]。

1.4 数据传输与协同管控技术

依托数据传输与协同管控技术，智能巡检机器人和运维管控平台实现实时联动。搭建“机器人端—边缘端—云端”三级数据处理与传输架构，机器人依靠边缘计算模块完成数据预处理，清理冗余数据、抓取关键特征，减少数据传输压力；依靠5G和工业以太网双模通信技术实现数据实时传输，5G技术依托高带宽、低延迟特性，保障高清图像、红外视频等大容量数据高速传输，毫秒级延迟可实现控制；工业以太网可保障室内封闭环境等5G信号弱的区域通信稳定。云端管控平台承担机器人远程调度、数据存储和集中分析任务，兼容多机器人协同作业调度，采用路径优化算法规避作业冲突；建立标准化数据存储和管理体系，实现巡检数据的追溯、分析功能；依托数字孪生技术构建设备3D模型，精准关联巡检数据和数字模型，实现设备状态可视化监控与异常根源追溯，构建“数据采集—传输—分析—决策—调度”闭环管控路径。

2 智能巡检机器人在变电运维中的技术应用

2.1 设备状态全维度监测场景

在设备状态监测场景下，智能巡检机器人借助多传感器融合技术，实现变电核心设备全维度、常态化监测，覆盖变压器、GIS设备、开关柜、绝缘子、互感器等核心设备，结合不同设备的结构特性和监测需求，机器人可自动调节巡检姿态与传感器参数，完成精准监测。变压器监测的核心对象是油温、油位、绕组温度及运行声纹，通过红外热成像仪监控温度分布，可见光摄像头判别油位刻度，超声波传感器采集设备运行声纹，依托AI算法分析变压器运行状态；针对GIS设备的监测侧重局部放电和气体泄漏，依靠特高频传感器和气体传感器捕捉异常信号，配合红外测温管控接头温度；开关柜监测整合外观检查、表计读数、局部放电检测等功能，依托舱体内部图像采集与数据分析，完成封闭环境设备状态的精准评估。与传统人工

监测比，机器人可7×24小时不间断监测，大幅强化监测的连续性和全面性。

2.2 高压高危区域巡检场景

高压高危区域是传统运维中的高风险场景，涉及高压设备区、高空设备区、电缆沟道等区域，人工巡检面临触电、高空坠落等安全风险。智能巡检机器人借技术适配实现这类场景的无人化巡检，从根源消除作业风险。在高压设备区，机器人搭载高压感应传感器和防碰撞预警模块，可在安全距离完成设备监测，用长焦镜头采集远距离高清图像，避免近距离接触高压设备；在高空设备区，能配合无人机巡检机器人开展高空设备监测，地面机器人与无人机依托数据协作达成无死角巡检；在电缆沟道等封闭狭窄空间，采用微型履带式机器人，装设红外热成像仪与气体传感器，完成沟道内电缆温度监测及有害气体检测，解决人工巡检触及不到的场景问题^[3]。

2.3 极端环境运维场景

极端天气环境（高温、严寒、雨雪、大风等）会大幅降低人工巡检的可行性和安全性，智能巡检机器人凭借环境适配设计和技术优化，可在极端环境稳定工作。在低温环境当中，机器人搭载低温启动模块和保温防护结构，保障电池性能与核心部件稳定运行；在高温环境中，运用散热优化设计及耐高温材料，防止部件过热出现损坏；遇雨雪天气时，凭借防水防尘设计（防护等级可达IP67以上）和防滑底盘，保障移动稳定性和传感器正常运转。在极端环境中，机器人能借助远程操控完成巡检任务，运维人员无需赴现场作业，既筑牢人员安全防线，又保证极端天气下电网运维工作不停摆，杜绝环境限制引发的巡检中断^[4]。

2.4 缺陷排查与应急处置场景

在缺陷排查和应急处置场景中，智能巡检机器人借助快速响应和精准定位能力，提速缺陷处理效率与应急响应节奏，运维平台收到告警信号或电网出现异常，能远程调派机器人到目标区域做精准复核，统筹多传感器采集数据，快速判定缺陷位置和严重程度。开展应急处置工作时，机器人可实时传输现场图像与监测数据，给运维人员远程研判送第一手资料；针对紧急缺陷，可对接现场应急设备实施初步处置，如紧急隔离故障区域、切断危险电源等；机器人能对缺陷处置后的设备状态做跟踪监测，保障处置成效，打造“缺陷发现—应急响应—处置跟踪”的闭环管控，大幅压缩应急处置时长。

3 智能巡检机器人在变电运维中的技术应用效果

智能巡检机器人凭借核心技术深挖运维场景价值,从安全保障、效率提升、质量优化、成本控制等方向,全面强化变电运维效能,促使运维模式从“经验驱动”切换为“技术驱动”。

3.1 提升运维安全防护水平

智能巡检机器人采用无人作业模式,从本质上降低运维人员在高压、高空、极端环境里的作业风险,防止触电、坠落、冻伤、中暑等安全事故出现。机器人能替代人工完成 90% 以上的高危场景巡检工作,大幅降低人员和高压设备的直接接触频次;通过 AI 智能识别技术提前排查设备缺陷,阻拦缺陷演变为安全事故,提升电网运行安全水平。通过机器人远程操作和协同管理模式,实现运维人员无需外出即可完成巡检作业,构建“人机分离”安全运维模式,大幅提高变电运维的安全防护等级。

3.2 提高运维作业效率

与传统人工巡检相比,智能巡检机器人作业效率实现了质的飞跃。在巡检速度方面,机器人移动速度恒定且可不间断作业,完成等同范围的巡检任务,所需时间仅为人工巡检的 1/3 左右。在巡检频率方面,能做到 7×24 小时不间断巡检,按设备健康状况调整巡检频次,高风险设备可开展高频次精准巡检,人工巡检受生理极限束缚,无法实现长期不间断作业。在数据处理效率方面,机器人借助 AI 算法完成巡检数据实时分析和缺陷自动识别,不用人工逐一核查数据,大幅缩减数据处理时长;依托数据自动上传和报告生成功能,实时输出巡检报告,省去人工记录和整理的繁杂流程,使运维作业的整体效率再上台阶^[5]。

3.3 优化运维数据质量与精准度

智能巡检机器人依托技术支持,攻克传统人工巡检数据分散、精度不够、主观偏差大等难题。多传感器融合技术保障数据采集的全面性,各传感器的高精度性能提升数据采集精度;AI 智能分析算法通过标准化流程实现缺陷识别,摆脱人工识别对经验的依赖,缩小漏检、误检占比;依托数据自动校准和环境校正技术,进一步强化数据的可靠性与可比性,标准化、高精度的巡检数据,为设备状态评估和趋势预测夯实可靠数据支撑,把运维决策从“经验判断”转变成“数据驱动”,提高变电运维精准度,巡检数据的数字存储与可追溯属性,为设备全生命周期管理构建完整的数据链路^[6]。

3.4 降低运维综合成本

长期采用智能巡检机器人进行巡检,能大幅削减变电运维的综合成本。在人力成本方面,机器人能替代大量人工巡检任务,减少运维人员的配置工作量,减少人员薪酬、培训等人力成本;在设备维护成本方面,依托早期缺陷预警和精准维护,省去设备缺陷升级带来的大修或更换成本,延长设备服役时长;在应急成本方面,应急快速响应和缺陷快速处置能力,可降低设备故障造成的停电损失,减少应急处置的人力与物资成本,机器人模块式设计和扩展潜力,使其可满足不同规模的变电站运维需求,杜绝重复投入,优化运维成本组成结构。

4 结束语

智能巡检机器人通过自主导航、多传感器融合、AI 智能分析等核心技术协同助力,为变电运维场景构建涵盖全面、精度达标、效率领先的智能管控体系,大幅提高运维安全标准、作业效率和数据质量,减少运维综合成本,为新型电力系统建设提供可靠的技术支撑。该应用助推变电运维模式完成数字化转型,还重塑了运维管理的核心逻辑,实现从“被动抢修”到“主动预警”、从“人工驱动”到“技术驱动”的本质性转变。技术持续更新迭代,应用场景逐步拓展,智能巡检机器人将在变电运维中承担更核心的角色。依托技术创新与模式优化,进一步提升机器人的自适应能力、协同能力和一体化运维能力,助力变电运维向全流程无人化、智能化发展,为电网安全、稳定、高效运行筑牢更可靠的防线,助推新型电力系统实现高质量发展。

参考文献:

- [1] 李建华,丁伟,张博.智能巡检机器人在变电站运维管理中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2021(09):153-154.
- [2] 黄涛.智能巡检机器人在变电站运维工作中的应用[J].光源与照明,2021(04):80-81.
- [3] 周启平,贾蕾,何伟,等.变电站智能巡检机器人导航算法改进[J].农村电气化,2021(04):5-8.
- [4] 杨清民,陈炜智,韦明.对于变电站智能巡检机器人的几点思考[J].电力设备管理,2021(03):37-39.
- [5] 陈晨,黄铮.智能巡检机器人在变电站日常运维及缺陷跟踪方面的应用[J].科技风,2018(18):3.
- [6] 赵宪中,颜恒生,侯梓浪,等.现代移动巡检系统的应用及分析[J].电工技术,2020(02):98-99.