

# 变电站智能巡检机器人在电力运维中的应用探讨

曹连锋 武百亮

内蒙古电力(集团)有限责任公司阿拉善供电分公司 内蒙古 阿拉善盟 750300

**摘要:** 本文聚焦变电站智能巡检机器人,分析其系统架构、自主导航与异常识别等关键技术,探讨其在日常巡检、应急特巡及倒闸监护等场景的应用价值。针对当前存在的复杂环境适应性差、检测精度受限及数据互通障碍等问题,提出多模态感知融合、云边协同架构升级、5G 远程操控及多机协同等优化路径,旨在推动变电站运维向无人化、智能化转型。

**关键词:** 变电站运维; 智能巡检机器人; 自主导航; 多源传感融合

**引言:** 随着智能电网建设推进,传统人工巡检已难以满足变电站高效运维需求。智能巡检机器人凭借自主导航、多源感知等优势,成为替代人工高危作业的关键手段。本文深入剖析机器人系统架构与核心技术,探讨其在全天候巡检、应急响应等场景的应用现状,针对环境适应性、检测精度及系统集成等瓶颈提出优化策略,为构建数字化、无人化变电站运维体系提供理论支撑与实践参考。

## 1 变电站智能巡检机器人系统构成与关键技术

### 1.1 巡检机器人系统总体架构

变电站智能巡检机器人系统采用分层模块化的整体架构,全方位适配变电站封闭、高压、复杂的运维作业环境,整体分为终端执行层、网络传输层、平台管控层三大核心层级。终端执行层以巡检机器人本体为核心,集成行走机构、传感采集模块、动力供电模块与机载控制单元,是现场数据采集与作业执行的载体。网络传输层依托工业以太网、无线专网搭建稳定传输通道,实现机器人与后台系统的数据双向交互,保障巡检数据、设备状态、控制指令的实时传输。平台管控层为系统核心中枢,包含数据存储、智能分析、任务调度、远程管控、报表生成等功能模块,可统一规划巡检任务、处理海量巡检数据、预警设备故障。各层级协同联动,实现巡检作业自动化、数据处理智能化、运维管控数字化,全面替代传统人工巡检模式,提升变电站运维规范化与高效化水平。

### 1.2 自主移动与智能导航关键技术

自主移动与智能导航是变电站巡检机器人实现无人化作业的核心基础技术,可保障机器人在站内复杂场地稳定、精准完成自主行走与点位停靠。该技术融合激光

SLAM 建模、视觉导航、惯性导航与差分定位技术,先通过激光雷达扫描变电站全域环境,构建高精度三维电子地图,标注设备点位、行走路径、障碍物区域等关键信息。作业过程中,机器人依托实时环境感知数据匹配预建地图,动态修正自身定位偏差,实现厘米级精准定位<sup>[1]</sup>。针对站内电缆沟、设备构架、高低压分区等复杂地形,系统搭载智能避障算法,可实时识别静态设备障碍物与临时动态障碍物,自主规划最优绕行路径。同时配备姿态自适应调节机构,适配站内坡度、路面凹凸等工况,有效解决传统人工遥控作业效率低、路径不规范的问题,为全自动常态化巡检提供核心行走保障。

### 1.3 设备异常智能识别技术

设备异常智能识别技术依托人工智能与机器视觉算法,实现变电站设备故障的自动研判、精准识别与分级预警,是机器人智能化巡检的核心核心技术。该技术以深度学习算法为核心,基于海量变电站设备正常运行图像、故障样本数据集完成模型训练,构建适配不同设备、不同故障类型的识别模型。可智能识别设备发热超标、绝缘子破损、瓷瓶裂纹、设备锈蚀、异物搭接、仪表指针异常、指示灯故障等各类典型缺陷,同时结合传感数据阈值判定,实现温度异常、气体泄漏、局部放电超标等参数类异常的自动判别。系统具备自主学习迭代能力,可通过持续积累现场数据优化算法模型,提升复杂工况下的识别精度。相较于人工巡检主观判断的偏差,该技术可实现故障识别标准化、智能化、高效化,大幅降低漏检、误检概率,为变电站设备故障早发现、早处置提供技术支撑。

## 2 智能巡检机器人在变电站运维中的典型应用场景

### 2.1 日常例行巡检: 替代人工标准化作业

日常例行巡检是智能巡检机器人最核心、最常态化的应用场景,可全面替代人工完成变电站标准化、常态化巡检作业,筑牢电网设备安全运行基础。变电站日常巡检项目繁杂、频次固定,人工巡检存在作业耗时久、标准不统一、人为疏漏多、高危区域作业风险高等问题。机器人可按照预设巡检路线、时间节点、检测项目,全自动完成全站设备周期性巡检,严格遵循电力运维标准化流程,逐项采集设备运行数据、拍摄设备状态影像。巡检过程中,系统自动记录巡检轨迹、检测数据与设备状态,生成标准化巡检报表,无需人工干预即可完成全流程作业。针对常规设备状态偏差、轻微隐患可自动标记记录,对超标异常情况实时上传后台预警。通过机器人替代人工标准化作业,有效统一巡检标准、提升巡检效率、规避人工作业安全风险,实现变电站日常运维的规范化、无人化、精细化管理。

## 2.2 应急特巡:恶劣天气与突发事故下的快速响应

应急特巡场景聚焦恶劣天气与电网突发事故工况,依托巡检机器人的无人化作业优势,弥补人工应急巡检的短板,实现故障快速排查与状态研判。在暴雨、台风、暴雪、高温、雷电等恶劣天气下,变电站户外设备易发生故障,人工进场巡检存在极大安全隐患,且作业效率大幅下降。而智能巡检机器人可全天候待命,接收应急指令后快速抵达指定作业区域,开展全域专项巡检,重点排查设备覆冰、积水浸泡、外力损伤、线路跳闸关联设备缺陷等问题<sup>[2]</sup>。当变电站发生跳闸、设备异常等突发事故时,机器人可第一时间赶赴现场,快速采集设备运行状态、环境数据,传回高清现场影像,辅助运维人员远程研判故障点位、故障类型与影响范围,缩短应急处置响应时间,规避人工高危作业风险,大幅提升变电站应急运维处置的及时性与安全性。

## 2.3 倒闸操作的状态确认与过程监护

在变电站倒闸操作运维场景中,智能巡检机器人可承担设备状态确认与作业全过程监护工作,保障倒闸操作规范、安全、精准开展。倒闸操作是变电站核心高危作业,操作流程繁琐、状态核对要求严苛,传统人工核对、现场监护易出现视觉疲劳、判断失误、监护不到位等问题,易引发误操作事故。机器人可在倒闸操作前,精准核对断路器、隔离开关分合状态、接地装置工况、设备带电状态等关键信息,确认作业环境与设备状态满足操作条件。作业过程中,机器人全程实时视频监护,动态捕捉作业人员操作流程、设备状态变化,实时回传现场画面,监测是否存在违规操作、设备异常变位等问题。作业完成后,再次核验设备最终状态,形成全流程

监护记录,有效杜绝倒闸操作误判、漏判问题,保障倒闸操作全过程安全可控、合规有序。

## 3 变电站智能巡检机器人应用现存问题

### 3.1 复杂环境适应性不足

当前变电站智能巡检机器人在复杂、极端运维环境中的适配能力存在明显短板,难以完全满足全场景、全天候巡检作业需求。变电站户外场区环境复杂多变,高低温、雨雪、浓雾、强电磁干扰等工况频发,常规机器人的传感设备、行走机构、识别算法易受环境影响。在冬季低温、夏季高温环境下,机器人电池续航大幅衰减,传感设备检测精度出现偏差;雨雪、浓雾天气会遮挡镜头与雷达设备,导致导航定位偏移、图像采集模糊,无法精准识别设备状态<sup>[3]</sup>。同时,变电站设备密集、构架复杂,部分狭窄通道、高低落差区域机器人通行困难,强电磁环境会干扰设备信号传输,造成数据卡顿、传输异常。

### 3.2 检测准确率与可靠性存在瓶颈

现阶段智能巡检机器人的设备检测准确率与运行可靠性仍存在明显瓶颈,难以完全替代高精度人工精细化巡检作业。从检测精度来看,现有智能识别算法对常规设备缺陷识别效果较好,但对细微裂纹、轻微发热偏差、隐蔽性局部放电等微小隐患识别能力不足,同时复杂光照、设备遮挡、画面阴影等因素易引发误检、漏检问题。从运行可靠性来看,机器人长期在户外工况运行,易出现行走机构卡顿、传感器偏移、电池故障等硬件问题,导致巡检任务中断。另外,算法模型泛化能力有限,针对老旧设备、非标设备、特殊工况下的设备故障识别适配性较差,数据校验机制不完善,部分检测数据存在偏差。整体来看,机器人巡检稳定性、精准度尚未达到全覆盖高精度运维标准,仍需人工二次复核,制约了无人化运维的全面落地。

### 3.3 系统集成与数据互通障碍

变电站智能巡检机器人行业存在系统集成度低、数据互通不畅的突出问题,形成大量数据孤岛,影响运维数字化整体效能。目前市面上不同厂商的巡检机器人、监测设备、后台管控系统软硬件标准不统一,通信协议、数据格式、接口规范存在差异,导致机器人巡检系统难以与变电站 SCADA 系统、设备状态监测系统、电网运维管控平台深度对接。各系统独立运行、数据互不共享,巡检采集的设备状态数据、故障信息无法同步至主运维平台,需要人工二次录入整合,大幅降低运维效率。此外,部分老旧变电站现有运维系统兼容性差,新

增机器人系统后无法实现一体化集成,增加运维管理成本,阻碍变电站智能化运维体系的统一构建。

#### 4 智能巡检机器人技术优化与发展路径

##### 4.1 多模态感知融合增强

多模态感知融合增强是突破机器人检测精度短板、提升全场景适配能力的核心优化方向,可有效解决单一传感检测的局限性。该技术通过整合红外热成像、可见光视觉、超声波、毫米波雷达、气体传感、振动检测等多维度感知数据,构建多模态数据融合感知体系,实现设备状态全方位、高精度检测。通过算法对多源数据进行筛选、匹配、融合校验,弥补单一传感器在恶劣环境、复杂工况下的检测缺陷,规避光照、天气、设备遮挡带来的检测误差。同时优化感知硬件性能,升级高精度、抗干扰传感设备,提升微小故障、隐蔽性缺陷的捕捉能力。依托大数据训练融合识别模型,实现多维度数据联动研判故障类型、故障程度与故障位置,大幅降低误检、漏检概率,全面提升机器人巡检检测的精准度、稳定性与场景适配性,适配各类复杂变电站运维场景。

##### 4.2 云-边协同的智能计算架构升级

云-边协同智能计算架构升级是解决机器人算力不足、数据处理滞后、系统集成度低的关键发展路径,可实现巡检数据高效处理与智能分析。边缘端依托机器人机载终端、变电站本地边缘网关,完成实时数据采集、初步筛查、故障预判与本地指令执行,快速响应现场巡检需求,降低数据传输延迟。云端搭建大数据与人工智能算力平台,承接边缘端上传的海量巡检数据,开展深度数据分析、算法迭代优化、故障趋势研判、数据归档存储、全局任务调度等核心工作。通过云边算力分工、数据协同交互,既保障现场作业的实时性,又实现海量数据的深度挖掘利用。同时该架构可统一数据接口与传输标准,打通各运维系统数据壁垒,实现巡检数据与电网运维平台互联互通,提升变电站运维数字化、智能化、一体化管控水平。

##### 4.3.5 G+ 机器人远程精准操控

5G+ 机器人远程精准操控技术是依托新一代通信技术,提升机器人远程管控与应急作业能力的重要发展方向。5G 技术具备低延迟、高带宽、大容量、强稳定的传输优势,可彻底解决传统无线传输卡顿、延迟高、数据丢包等问题,支撑机器人高清视频、海量传感数据的实时双向传输。基于 5G 通信网络,运维人员可通过远程管

控平台,实现机器人超远距离精准操控,完成定点精细化巡检、故障特写拍摄、特殊点位重复检测等定制化作业<sup>[4]</sup>。在突发事故、极端恶劣天气等高危场景下,无需人员到场即可远程操控机器人完成全方位排查,精准掌握现场工况。同时 5G 网络可支持多设备并发通信,实现机器人与站内各类智能设备的联动协同,大幅提升远程运维、应急处置的精准度与效率,推动变电站巡检作业从自动化向远程智能化升级。

##### 4.4 多机器人群体智能与自主协同

多机器人群体智能与自主协同是变电站智能巡检机器人规模化、智能化应用的终极发展方向,可实现全站巡检作业高效统筹、协同作业。单一机器人作业覆盖范围、作业效率有限,难以满足大型枢纽变电站、复杂站的全域精细化运维需求。多机器人群体协同技术通过搭建集群管控调度系统,依托群体智能算法,实现多台巡检机器人的任务自主分配、路径智能规划、作业区域自主划分、数据实时共享。系统可根据变电站巡检需求,动态调度地面巡检机器人、空中巡检无人机等多类型设备,分工完成常规巡检、高空检测、应急排查等不同作业任务,实现场站全域无死角巡检。同时机器人之间可自主联动互补,规避作业路径冲突,协同排查复杂故障,大幅提升整体巡检效率与作业覆盖度,实现变电站巡检作业规模化、智能化、自主化升级。

#### 结束语

智能巡检机器人已成为变电站无人化运维的核心力量,显著提升了作业安全与效率。尽管当前在环境适应性与检测精度上仍存挑战,但随着多模态融合、5G 及云边协同技术的深化应用,其智能化水平将持续跃升。未来,机器人将向多机协同与全域感知演进,彻底打破数据孤岛,推动电网运维向全时智能、精准高效转型,筑牢能源互联网安全防线。

#### 参考文献

- [1] 吴嘉楠. 智能巡检机器人在变电站运维工作中的应用[J]. 模型世界, 2026(3): 219-221.
- [2] 郑程. 变电站运维中智能巡检机器人关键技术研究[J]. 石河子科技, 2025(5): 64-65.
- [3] 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(1):246-247.
- [4] 许帅,何相江. 变电站运维工作中智能巡检机器人的应用[J]. 模型世界, 2023(3): 19-21.