

10kV 配网不停电作业机器人的关键技术优化 与现场应用效能研究

丁辉, 王嘉楠, 任建新

国网伊犁供电公司, 新疆 伊犁 835000

DOI:10.61369/EPTSM.2026010029

摘 要 : 随着社会对供电可靠性要求的不断提升, 10kV 配电网不停电作业成为保障持续供电、提升服务质量的关键技术手段。10kV 配电网不停电作业担当起维持持续供电、提升服务质量的重任。传统人工带电作业面临安全隐患大、工作负荷重、对人员技能依赖明显等局限。聚焦于 10kV 配网不停电作业机器人展开研究, 首先全面呈现其研发与应用的重要意义; 全面解析并探究其在机械结构、感知与控制、绝缘与安全等关键核心技术方面的优化走向与成效; 采用构建评定体系, 对其现场应用综合效能展开全面深入探究。关键技术优化在显著提升机器人作业能力、安全性与智能化水平上起到聚焦推动作用, 而以科学的效能评估保障其规模化推广与迭代升级顺利开展, 对配网运维转型达成自动化、智能化具有积极价值。

关 键 词 : 10kV 配电网; 不停电作业; 机器人; 关键技术; 应用效能

Research on Key Technology Optimization and Field Application Efficiency of 10kV Distribution Network Live - line Operation Robot

Ding Hui, Wang Jianan, Ren Jianxin

State Grid Yili Power Supply Company, Yili, Xinjiang 835000

Abstract : With the continuous improvement of social requirements for power supply reliability, 10kV distribution network live – line operation has become a core technical means to ensure continuous power supply and improve service quality. Traditional manual live – line operation has such limitations as prominent potential safety hazards, heavy workload and high dependence on personnel's technical skills. This paper focuses on the research of 10kV distribution network live – line operation robot. Firstly, it expounds the important significance of its research and development as well as application; secondly, it deeply analyzes and explores the optimization directions and practical effects of the robot in core key technical fields such as mechanical structure, perception and control, insulation and safety; finally, it carries out a comprehensive and in – depth analysis on its comprehensive field application efficiency by constructing a scientific evaluation system. The research shows that the optimization of key technologies plays a core role in significantly improving the operation capability, safety performance and intelligence level of the robot, and the efficiency evaluation based on scientific methods can provide strong support for the large – scale promotion and iterative upgrading of the robot, which has important practical value for realizing the transformation of distribution network operation and maintenance towards automation and intelligence.

Keywords : 10kV distribution network; live – line operation; robot; key technology; application efficiency

引言

10kV 配电网直接面向终端用户, 其运行可靠性直接保障经济社会活动的有序开展。借助不停电作业模式处理配网缺陷, 完成检修与改造, 是减少用户停电、强化供电可靠性的最有效途径之一。以往人工开展的带电作业需要作业人员直接或间接接触带电体, 面临高压触电、高空坠落、电弧灼伤等极易发生的安全风险, 且受环境、人员体力与心理素质的影响十分明显。伴随机器人技术与人工智能在时代浪潮中的迅猛进展, 结合行业发展趋势, 研发替代人工作业的特种机器人成为必然结果。10kV 配网不停电作业机器人通过综合运用机械、传感、控制、绝缘等技术, 期望达成复杂环境下半自主、自主精细化作业, 从内在本质保障人员安全、增进作业效率与档次。该类机器人已经从概念验证进入实地试点阶段, 但在技术成熟度、环境适应性及作业经济性方面要在既定方面深入推进。因此, 全面梳理其核心技术的优化途径, 并全面考量其现场应用效能, 对于推动技术升级、推广行业应用具有关键意义。本文围绕意义、技术优化与应用效果三个维度展开分析。

一、10kV 配网不停电作业机器人的重要意义

（一）保障作业人员生命安全与职业健康

不停电作业本质可归结为高压带电环境施工，机器人凭借优势替代人工进入高压危险区域，能够从预防潜在伤害到杜绝触电、高空坠落等直接人身伤害，同时避免长期电磁环境暴露给人员健康带来潜在危害^[1]。这是技术进步的显著标志，更是“以人为本”安全理念的深刻实践，反映了电力行业安全生产方向的关键变革。

（二）提升供电可靠性与社会经济效益

机器人作业受天气、光线及人员疲劳等因素干扰少，扩充作业时间窗口，甚至在极端环境下进行应急抢修，从而大幅压减计划停电的小时数与故障停电的时长。供电可靠性的提升直接降低了社会经济整体及企业运营中因停电造成的损失，实现了电力营商环境的长期优化，带来了显著的社会及经济效益。

（三）推动配电网运维智能化转型升级

作为电力机器人诸多细分里的关键分支，不停电作业机器人作为关键装备，对构建智能巡检体系意义重大。其应用将衍生海量现场作业数据，带动运维模式从“以人为核心”转变到“人机协同”甚至“机器主导”，为数字孪生电网、状态检修等高阶应用提供现场感知与执行终端，是电网智能化发展的核心支撑。

二、10kV 配网不停电作业机器人的关键技术优化

（一）机械结构与作业机构优化

机械装置本体构成了机器人的物理躯干与执行根基，其优化设计将高运动灵活度、高负载能力与高作业稳定性三项性能整合为核心目标。为达成这一目标，现代设计领域首先聚焦于材料与结构创新，普遍采用碳纤维复合材料、高强度铝合金等轻量化材料，融入拓扑优化、仿生学等设计途径，对机器人的桁架式主体或多关节臂式结构开展力学层面的重新构建。该设计方案旨在确保机械本体在复杂电磁场或恶劣环境中具备足够绝缘强度与机械强度的同时，最大程度地削减自身重量，从而为实现运动提效、续航拉长和负载扩充的实际意义打下基础。

作业能力鲜明呈现于末端执行器的性能上，这要求在深入调研基础上进行高度专业化与精细化设计。针对电力运维中的具体任务而言，如导电路路的精准地剥离切割、线路夹的可靠地装配、螺帽的标准地拧紧等，需围绕功能专一、接口统一的标准开发一系列模块化末端工具。存有力位混合传感与自适应协调能力的电动断线钳，能自动且迅速地根据不同线径搭配切割参数；结合视觉引导与精细力控技术的接线夹安装工具，可实现穿刺深度与紧固力矩的绝对精准状态。这种具备精细操作与模块组合功能的设计理念，精细化、模块化的设计理念直接推动整体任务成功率上升，同时提升单一作业动作精度，使机器人通过完成高要求

标准作业流程实现自身发展。

动力传动系统与关节机构的先进设计为保障作业过程平稳精准提供内在支撑。运用高功率密度水准的伺服电机、精密型的减速器及低背隙传动链条，构建可实现目标的高效动力传输途径，引入基于力/力矩传感器的柔顺控制机构或被动柔顺元件于关节处，使机械臂在接触作业时能够自主或非自主地吸收冲击、缓冲振动。这种刚柔并济的设计，造成在接触环境的不明确性面前机器人末端，既能维持足够的操作刚性以达成作业目标，又能稳妥防止因刚性碰撞导致的设备受损及操作出错，促成了从快速空间定位到精细力控作业全程的流畅、稳定且高度可靠。

（二）感知系统与智能控制优化

感知与控制系统充当机器人的核心单元，履行着对环境进行理解以及执行相应行动的关键功能，其多传感器融合机制协同工作达成信息互补与增强的目标。例如高分辨率双目视觉系统可获取丰富的纹理与颜色数据，与激光雷达精准的深度数据相融合，共同构建出细腻的三维环境模型，并完成对导线、绝缘子等特定对象的识别与分类。红外热像仪的采用拓宽了系统的感知频谱，使其能够有效检测设备异常温升点，为状态监测拓宽了不可见的温度范围。力与力矩传感器赋予了机械臂切实的触觉反馈功用，抓取或者操作期间实时觉察接触力，实现柔性化控制和自适应调配，避免对脆弱部件造成损伤。

在控制策略层面，系统依赖于先进的机械臂轨迹规划算法。这些算法全面考虑机械臂运动学约束、环境障碍物分布和任务时序要求，针对非结构化野外与复杂工业场景特点生成平稳、高效又安全的运动线路，具备精准识别与智能分析特性的机器视觉与人工智能技术深度嵌入提升了系统的认知与决策水平。运用深度学习模型针对海量图像数据实施训练，该深度学习训练后的系统不仅能实现高精度的目标定位与姿态估计，还能对设备状态做智能识别与诊断系统，并对导线的不规则晃动、部分遮挡或光照强度的改变等普遍干扰因素体现出较高级别的适应性及鲁棒性。

在宏观层面，描绘的演进路径揭示了自主化水平的逐步递增。初期系统中遥控主从操作占比较大，依靠操作员的即时判定。随着感知精度及控制可靠性的提升，该系统可过渡到半自主模式，即在人工监控下完成局部自主作业，如自主追踪导线或开展标准化紧固动作。根本目标是实现全自主作业能力，系统能够独立完成环境感知、任务规划、动态决策与精准执行的一系列全流程。在无需人工干预的情况下顺应多变的工作条件，从行业需求出发，显著提升作业效率与安全性，这一过程同步聚合着传感器技术、算法优化与工程实践的共同进步。

（三）高压绝缘与安全防护优化

在带电的环境里运行的机器人，其设计与制造一定要把绝缘与安全置于核心地位。这首先借助材料与结构层面的多重功能保障得以体现：需要专门研发拥有高电阻率、抵抗电弧烧蚀以及耐受环境老化的复合绝缘材料，用于全面构建机器人的整体机械结

构、运动关节以及末端执行器。此类材料除了要达到基础的电气绝缘强度要求，采用精良的机械设计，保证部件彼此之间形成充分且合理的爬电间距，防止在湿润、脏污等复杂工况下出现沿面闪络。针对高压电场环境，有必要进行全面的电磁场分析与屏蔽设计。例如在关键部位安装定制化的金属屏蔽罩和均压环，以均衡电位分布，有效抑制电晕放电的产生，并将特定区域电场强度控制在安全限值以内，杜绝对机器人自带的电子系统引起干扰或引发绝缘击穿。

主动的安全管理策略一样不可或缺。系统针对特定情况采用多层次电气隔离方案，涵盖在动力传输、信号通讯及传感器供电回路中大量运用光耦、隔离变压器等元件，以电路途径阻隔危险电势的传导。建立可靠的多点接地及等电位联结系统，实现机器人电位稳定的效果，并能安全导走作业中有概率产生的感应电荷或残留电荷。各项举措联合构建了一套纵深防御体系，为达成防御目标将电击风险降至最低水平。

为保障长久稳定运转的可靠性，机器人必须集成不可或缺的智能化的自检与健康管理系统。该系统与内置的传感器网络相结合，持续检测关键部位的绝缘电阻具体数值、局部放电详细信号、结构细微振动以及温度精确变化等各类参数，采用领先的故障诊断算法。本系统马上评估自身的绝缘状态与机械完整性，对材料性能劣化、部件松动或屏蔽失效等潜在故障进行早期预警。只要检测到任何超出安全阈值的异常，系统将迅速启动分级保护机制，如自主停止运转、切断非必要电源或开启应急处理流程，在风险转化为事故之前展开有效管控，保证设备与现场人员的绝对安稳。

三、10kV 配网不停电作业机器人现场应用效能研究

（一）作业效率与质量评估

现场进行的实际应用操作效能首先体现在作业效率与质量的显著提升上。为实现科学评估，需要建立一套精准量化的指标体系。基于记录“单次作业平均耗时”衡量设备从定位、路径规划到任务全部完成的整体效率，并与常规人工操作模式执行相同工作的时间做对比探究。引入“一次成功率”和“重复操作率”等指标，用以极为精准地展现作业流程的流畅与可靠。在作业质量方面，实施对机器人执行具体工艺效果的精细化评定，包括检测线夹压接后的紧密度均匀性、测量导线表面有无划痕或损伤及潜在损伤隐患，凭借专业工具把各项参数与既有的人工操作准则开展比对，以判定其能否达到甚至超过人工工艺水平。

效能测评不是恒定的一次性事项，而是一个动态流转的、持续迭代优化的过程。基于长期操作积攒的庞大数据，深入挖掘数据开展关联分析，依据关联分析的结果辨认出影响作业效率与工艺质量的关键变量。此类变量大概包含任务本身的复杂度，以及与设备整体状态相关的自身参数变化，为获取数据支持而量化分

析这些因素与核心效能指标的相关性，能够让后续机器人控制算法迭代、传感器配置优化以及适应性操作策略制定在明确的数据支持下有清晰方向，推动技术实现螺旋式上升。

（二）安全性与可靠性分析

安全性能是对现场作业效能的评估中至关重要的核心维度。面对复杂多变的实际应用环境，安全状况的评估工作需凭借详实的数据开展。通过对绝缘监测系统安全防护模块的实时报警记录进行重点收集与分析，结合多方面数据评估其在强电磁干扰、风雨等恶劣气象环境下安全表现与稳定性。这牵涉到设备自身的安全保障，更是保障整个作业现场人员和电网设施安全的核心要点。

可靠性在衡量系统稳定持续发挥效能方面起到关键作用。结合评估的具体情况，这一维度的评估要靠长期运行数据支撑，具体包括统计累计作业时间内、设计寿命周期内的平均无故障间隔时间、性能衰减曲线，考虑计划与非计划停机时长后得出系统整体可用率。在此基础上，着重剖析运行阶段中产生的典型故障情形，探究其形成的根本缘由与技术道理，将直接有利于设计与预防性维护策略的协同优化，从而极大增强整个系统的鲁棒性与现场可维护性，确保长期运行的效益。

（三）经济性与适用性综合评价

推广价值的最终确立，根本依赖于对其经济性与适用性深入、全面地解析。经济性评估需以全生命周期成本作为考量维度，不仅要全面核算机器人系统的初期研发与购置投入，以及之后的维护、升级、能耗、配件更换等日常运维成本。还需进一步将其与传统人工或半机械化作业模式所涉及的总成本进行细致对比。保障作业的费用由直接的人力、车辆、工器具费用构成，还应包含保障作业安全不可或缺的额外防护投入、长期针对人员技能培训的费用，因规划性或突发性故障停电造成的潜在经济损失。通过这种综合对比，才能精确衡量机器人应用达成的长期经济效益与投资回报周期。

适用性研究把重点放在评估机器人技术的应用广度与深度上。探究其针对不同典型作业场景的技术适应水平，例如从架构简单的直线杆塔，而至承受复杂力学作用的转角杆塔，再到受周边建筑影响、空间受限且电磁环境紊乱的城市核心区廊道。此外，还需全面剖析其对多种典型作业任务的覆盖程度，包括相对标准化的接引流线、实施避雷器更换作业，以及结合线路环境特点极具挑战性的异物带电清除等复杂任务。把经济性与适用性两个维度结合进行综合评价结论，将为电网企业在制定设备采购策略、规划区域化部署模式以及优化新型作业规程诸多工作中，提供兼具科学性、客观性且可实际操作的决策依据。

四、总结

用于10kV配网的不停电作业机器人是保障电网安全、提升

供电可靠性与推动智能化运维的革命性技术装备。本文系统论述了其对于促进转型、提升效益以及保障安全的重要意义；研究了在机械结构、感知控制、绝缘安全等关键技术不断升级的方向与内涵要点，说明技术发展核心围绕智能化、模块化和高可靠性展开；结合作业效率质量、安全可靠程度、经济适用价值三个维度建立现场应用效能研究框架。技术优化与对应用效能的评估相辅

相成，技术的发展直接促进应用效能的提升，而全面的效能研究又推动技术的迭代方向。在未来，人工智能、新材料等技术必然进一步融合，10kV 配网不停电作业机器人将不断迈向更智能、更灵活、更普及，为构建坚强智能电网成为坚强后盾提供不可或缺的自动化力量。

参考文献

[1] 高俊岭, 陈荣群, 张磊. 基于供电的配网不停电作业新技术应用 [J]. 电子技术与软件工程, 2023(1): 104-110.

[2] 唐瑞伟, 栗薇, 张震, 等. 基于大数据分析的 10kV 配网停电作业时长预测优化研究 [J]. 贵州电力技术, 2019, 022(001): 27-34.

[3] 金鸣. 配网带电作业中电缆不停电技术的应用研究 [J]. 大市场, 2021, 000(005): P.33-33.

[4] 刘雨晨. 基于 10kV 旁路不停电作业技术在配网实践应用的研究 [J]. 科技创新导报, 2017, 14(1): 2. DOI: 10.

[5] 柳瀚钦. 10kV 配网不停电作业技术发展与应用研究 [J]. 电子乐园, 2019(25): 1.

[6] 陈雄华. 10kV 配电网不停电作业技术的应用 [J]. 科学与信息化, 2022(11): 40-42.