

RJ1100配电网带电作业机器人的应用探究

文/樊浩¹ 任勇² 王峰¹ 任建功¹ 郭超¹ 薛斐¹

1. 国网山西省电力有限公司太原供电公司; 2. 国网山西省电力有限公司

配电网带电作业机器人能减轻作业人员的劳动强度, 提高作业效率, 最大程度保障作业人员的安全。人机协同作业机器人具有体积小、操作安全可靠及操作灵活等特点, 在配电网带电作业中应用前景十分广阔。主要以RJ1100配电网带电作业机器人为例, 介绍了此款机器人系统架构与产品特点, 并对实际作业过程中遇到的问题进行了阐述。针对配电网带电作业机器人在常态化推广应用中可能遇到的问题, 结合国网山西省电力有限公司太原供电公司常态化开展机器人接火作业的实际情况, 从管理制度建设与技术层面突破两个方面给出了解决方案。

随着经济社会的不断发展, 对配电网供电可靠性的要求越来越高。传统配电网人工带电作业主要是依靠作业人员站在绝缘斗臂车上完成各种操作, 作业时面临强电磁场、高电压的威胁, 且作业时受空间局限、条件恶劣、精神高度紧张和劳动强度大的因素影响, 容易引发各种安全事故。利用配电网带电作业机器人工作, 不仅可以减轻作业人员劳动强度, 提高工作效率, 还可最大程度地保证作业人员的安全。

目前国产主流配电网带电作业机器人包括RJ1100单臂人机协同机器人、RJ1200双臂自主机器人和RJ1300双臂人机共融机器人三款, 可实现带电断、接引流线、加装接地环和更换跌落式避雷器等多种功能。根据现场实际调查研究, RJ1100单臂人机协同机器人在带电断、接引流线作业中效率最高。此款机器人可实现智能工具自动更换和关键环节自主操作, 体积小、操作灵活, 作业过程中, 机器人与作业人员相互配合, 作业人员不直接接触带电体, 由机器人完成危险、繁重的作业任务。因此, 在带电断、接引流线作业中应用此款机器人具有十分重要的意义。

带电作业机器人技术发展概况

1. 国外带电作业机器人技术概况

国外许多国家都较早开展了带电作业机器人的研究。日本是世界上最早进行带电作业机器人研究的国家之一。20世纪80年代, 日本九州电缆公司和安川机器人公司开始了带电作业机器人的研究。到目前为止, 日本带电作业机器人的研究已进入第三代(PhaseⅢ, 研究计划为1997—2006年)。截至1997年, 在日本九州地区已有85个带电作业机器人在现场实际应用。美国和加拿大20世纪80年代中期开始对机械臂进行研究, 80年代末期, 美国开始采用液压驱动机械臂的方式进行带电作业。西班牙1990年开始带电作业机械手的研究。

从国外带电作业机器人技术的发展历程来看, 配电网带电作业机器人可分为三代产品。

第一代主从控制式机器人。此款机器人末端安装机械臂, 通过操作等比例缩小的主手来控制机械臂完成作业任务。实际作业时通过带电作业专用车辆将操作者与机器人一起送到需作业的线路附近, 作业人员通过控制主手完成作业任务。

第二代半自主式机器人。此款机器人应用了激光测距和视觉定位技术，作业时操作人员仅需要在地面使用遥控终端操作机器人完成作业任务。

第三代全自主式机器人。此款机器人引入多传感器融合感知与场景重建、机器视/力觉伺服控制等最新技术手段，可以自主规划、决策并完成带电作业任务。

2. 国内带电作业机器人技术概况

国内对带电作业机器人的研究始于20世纪90年代。1999年，山东电力科学研究院与山东鲁能智能技术公司学习日本带电作业机器人的成果经验，先后研制了三代带电作业机器人样机，研制的样机采用手持终端控制机械手进行作业，控制性较弱。

21世纪初，哈尔滨工业大学自主研发出一款通过主手和键盘控制机械臂运动的六自由度机械臂，实现了主从控制，但因机械臂采用电动机控制，控制柜内接线复杂，机械臂末端未能承受较大负载，存在局限性。

2018年，国网天津电力公司与国电南瑞公司共同研发出一款单臂人机协同式配电网带电作业机器人（RJ1100），利用多源融合感知、视/力觉伺服运动控制、大数据行为矫正和高压环境电磁兼容等关键核心技术，完成了人机协同带电断、接引流线实际作业。

RJ1100配电网带电作业机器人简介

RJ1100配电网带电作业机器人以10 kV架空线路带电断、接引流线作业为目标，通过导引系统、路径规划及人机交互等核心技术，实现机器人与作业人员协同作业。作业人员做简单的辅助工作，带电作业机器人做危险（直接接触带电体）、劳动强度大的工作。

1. 系统架构

RJ1100型机器人由机械臂、末端作业工具组、通信及电气系统、智能感知系统、通用软件平台及控制系统、人机交互接口与地面监控系统等部分组成，如图1所示。

机械臂采用UR10机械臂，末端通过快换盘与工具连接，执行带电作业动作，完成带电作业流程。UR10机械臂的精度为 ± 0.03 mm，工作温度为0~50℃，载重为10 kg，工作半径为1 300 mm。



图1 RJ1100型机器人系统组成

末端作业工具组主要有剥线工具和接线工具（如图2、图3所示）。剥线工具导线截面积为95~240 mm²，剥皮平均速度为0.5 cm/min；续航时间为2 h。接线工具导线截面积为50~240 mm²，续航时间为2 h。

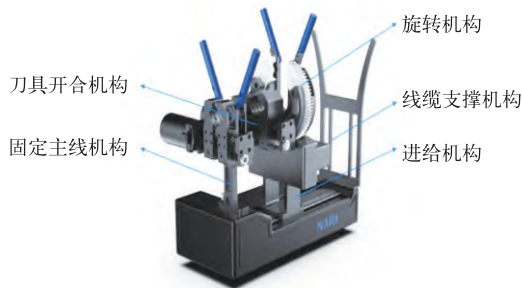


图2 剥线工具

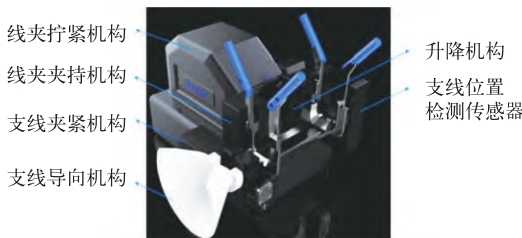


图3 接线工具

通信及电气系统由通信模块和电气系统组成。通信模块是机器人系统中央处理器与操作监控系统连接的桥梁，外部通过无线方式进行通信获取系统状态和视频信息，内部运动控制采用有线通信，机械臂控制系统与末端作业工具、人机交互接口及导引模块都采用无线通信。电气系统采用集成板卡进行底层控制，实现控制的高度集成。

智能感知系统包括导引定位系统、激光雷达和监控摄像头。系统采用激光雷达自动识别和定位技术,将定位坐标点发给机械臂控制系统,激光雷达综合定位精度高于1 cm。

通用软件平台和控制系统负责运动、安全及探测等数据的集中处理运算,控制系统应具备机器人动作决策与路径规划能力,避免机器人在运动过程中经过奇异点或与其他物体发生碰撞。

人机交互接口与地面监控系统配置了人机交互接口,用于实时监控和简单操作机器人,机器人状态信息和动作流程可以显示于人机交互界面。地面监控系统配备独立的电源、通信和监控系统,为工作负责人提供全面监控、远程操作和应急处置功能。对配电网带电作业机器人起到监视与控制的全局性作用。

2. 产品特点

RJ1100型机器人已突破激光雷达的三维点云建模技术、机械臂自主路径规划技术和末端作业工具的智能化技术等关键技术,具有以下特点。

1) 安全性。将作业人员直接接触带电体作业改为机器人作业,将体力消耗大、技能要求高和危险性大的操作转变为安全、简单的操作。有效保障了作业人员的人身安全。

2) 可靠性。机器人及末端作业工具组绝缘和电磁防护性能优良,能够确保10 kV带电环境下机器人作业的安全可靠性。

3) 适用性。机器人具备导引定位、路径规划和激光避障等核心技术,适用不同作业需求及复杂作业环境。

4) 通用性。机器人机械臂末端具有统一的机械和动力接口,只需要更换末端工具,即可完成其他功能作业。

应用现状

目前国网系统内共拥有RJ1100型单臂人机协同作业机器人27台。自2019年以来,机器人数量每年几乎以20%的速度递增。

山西公司目前拥有RJ1100型单臂人机协同作业机器人1台,机器人操作人员13人。自2020年11月机器人验收以来,已完成培训1 380人次,模拟作业1 912次,单相模拟作业平均剥皮时长6 min,平均

接线时长8 min。完成现场实际作业279次,已实现平行顺线路、平行横线路、三角顺线路、三角横线路和双回垂直线路五种典型线路的接火作业。机器人三相接火作业平均时长37 min,作业效率略高于常规绝缘手套法作业。

存在问题与解决对策

1. 存在问题

由于带电作业机器人技术含量高,实际操作、维护较为复杂,对作业人员的素质要求高,在实际使用过程中存在以下问题。

1) 作业时间长。机器人作业需要经历三维建模、路径规划、主线加紧、切断绝缘皮、穿引流线、套筒锁定、线夹解锁、拧断开始和拧断复位等步骤,初次操作者首次作业需要80 min以上时间,且任何一个步骤中都有可能存在不可预知故障,对作业人员专业素质与应急处置能力要求较高。初学者需要大量时间反复练习方可掌握作业技巧,一线作业现场存在作业人员宁愿用绝缘手套法作业也不愿多费精力学习使用机器人作业的情况。

2) 作业场地要求苛刻。RJ1100配电网带电作业机器人受机器人本身的高度以及末端工具工作原理限制,作业时需要在接火点下方预留2.5 m的半球形空间,且接火点线路无弯曲。特别是同杆架设线路与弓子线上接火类工作无法使用机器人完成。

3) 作业环境适应性较差。RJ1100配电网带电作业机器人使用锂电池供电,冬天容易电量降低过快。受系统内保护装置影响,在0℃以下环境中工作存在机械臂低温保护动作,会暂停工作。

2. 解决对策

对于RJ1100配电网带电作业机器人在推广使用过程中存在的作业时间长、作业场地要求苛刻、作业环境适应性较差及作业人员不愿多费精力学习使用机器人作业等问题,国网山西省电力有限公司太原供电公司(简称山西公司)以管理制度建设与技术层面突破两个方面为抓手,实现了机器人带电接火作业的常态化。

(1) 管理制度建设

为将机器人带电接火作业常态化,山西公司先后形成管理制度9项,规范管理流程3项,修订工作标准3项,审定技术标准3项。实现作业申请、现场

勘察、风险把控、机器人作业和质量验收五方面全流程闭环管控。

1) 完善绩效激励办法。针对机器人作业的特殊性，结合作业时长和作业的技术含量，将作业人员绩效工资向高技术含量工作倾斜。

2) 建立管理制度。为确保配电网带电作业机器人在现场工作中电网、设备、人身以及机器人的安全，保证机器人试点应用工作的顺利开展，先后制定了配电网带电作业机器人现场勘察制度、工作票制度、工作许可制度、工作监护制度、工作间断及转移制度、工作终结制度、现场安全措施和现场应急预案9项管理制度。

3) 规范管理流程。规范机器人接火作业申请流程、实施流程等，将所有接火类作业按照机器人作业现场勘察单进行填报，符合机器人作业条件的现场全部安排机器人作业。

4) 修订工作标准。修订机器人带电接火作业标准化作业指导书、现场勘察单及工作方案3项工作标准，对机器人作业质量及验收工作严格把控。

5) 审定技术标准。审定机器人带电作业导则、技术规范和作业规范3项技术标准，汇编机器人作业常见故障及处理手册，确保机器人作业顺利完成。

(2) 技术层面突破

针对机器人对作业场地要求苛刻和作业环境适应性较差等问题，山西公司主要从作业方式和硬件改造两方面进行突破。

1) 作业方式突破。因机器人接火作业需要满足两个硬性条件：一是接火点下方2.5 m半球形空间内遮挡；二是接火点线路无弯曲。针对符合条件的线路，全部采用机器人作业。针对高低压同杆架设线路，边相满足机器人作业极限空间，采用“机器人+绝缘手套法”作业，即边相采用机器人作业，中相采用绝缘手套法作业。针对高低压同杆架设线路，作业点无有效空间，采用“绝缘短杆+绝缘手套法”作业，即边相采用绝缘短杆法作业，中相采用绝缘手套法作业。针对同杆双三角线路，采用“机器人+绝缘短杆法”作业，即两边相采用机器人作业，中相采用绝缘短杆法作业。针对弓子线上接火类工作，采用“绝缘短杆+绝缘手套法”作业，即两边相采用绝缘短杆法作业，中相采用绝缘手套法作业。

RJ1100型机器人现场作业图如图4所示。

2) 硬件改造突破。针对锂电池掉电过快问题，山西公司一方面定期删除不必要的日志，减少机器人作业功率损耗；另一方面配备车载电源转换器，满足对操作终端进行实时随车充电的需求。针对机械臂低温保护动作问题，已完成低温电动机更换及系统软件的升级，使机器人作业环境温度由10~50℃扩充至-15~50℃，作业效率提升20%。



图4 RJ1100型机器人现场作业图

结束语

RJ1100配电网带电作业机器人是目前技术较为成熟的一代产品，针对其在使用过程中存在的作业时间长、作业场地要求苛刻、作业环境适应性较差和作业人员不愿多费精力学习使用机器人作业等一系列问题，山西公司结合自身的管理创新与技术创新，实现了机器人带电接火作业的常态化，为配电网带电作业机器人的推广和应用打下了坚实基础。EA

参考文献

- [1] 刘一涵，纪坤华，傅晓飞，等．配网带电作业机器人技术发展现状述评[J]．电力与能源，2019，40(4)：446-451，470．
- [2] 徐善军，任书楠，杜婧，等．协作机器人在高压带电作业中的应用研究[J]．制造业自动化，2021，43(9)：106-110．
- [3] 李天友，黄超艺，蔡俊宇，等．配电带电作业机器人的发展与展望[J]．供用电，2016，33(11)：43-48．