

带电作业机器人在复杂环境下的作业能力研究

张德军 代述伟

攀枝花供电公司 四川攀枝花 617000

摘要:近年来,随着国家能源工业的迅速发展,电网的容量不断增大,其安全可靠地运行已经成为关系国家和人民生活的一个重大问题。然而,在强风、雨雪、夜间或地形限制等复杂变化的环境中,手工操作的有效性受到限制,且与工人的人身安全密切相关。近几年,由于智能化设备的发展,带电作业机器人已成为工业领域的研究重点。本项目旨在通过自动化和智能化手段减少人员操作的危险性,提高电力系统的运行可靠性和运行效率,特别适合于复杂环境和高安全性要求的工作环境。为此,深入研究复杂条件下带荷机器人的操作性能,对于促进我国电网智能化转型,保障电网安全、可靠地运行,有着重要的理论和现实意义。

关键词:带电作业机器人;复杂环境;作业能力

带电作业机器人是一种集机械、控制、感知和智能判断于一身的特殊工作设备,它可以在不断电的条件下完成线路维修和设备维修等多种功能。据国家电网公布,2022年末,全国500千伏及以上输电线路里程突破200万km,连续稳居全球第一。同时,快速城镇化和极端气候事件频繁发生,使得电力系统运行管理变得更加复杂。根据相关数据,在2021年我国电力系统中,由于极端气候造成的事故性断电事故占35%左右,如山区、林区等人工无法迅速反应的地区。在此大环境下,推进以机械方式代替手工操作已经是业界的共识。

一、复杂环境下机器人关键核心技术分析

(一) 强电磁干扰环境下的智能感知技术

强电磁干扰环境是带电作业机器人面临的一项严峻挑战,其外部电压高达几十万伏,形成强电场、脉冲磁场,对机器人传感器采集到的微弱信号造成严重干扰甚至掩盖,造成“失真”甚至“失明”。因此,研究具有抗电磁干扰素力的智能传感技术,是保证机器人可靠工作的前提。其核心是利用多源异质感知信息融合技术和先进的信号处理算法,提高感知系统的鲁棒性和准确性。从硬件角度看,需要对机器人传感系统进行全方位的电磁屏蔽设计。例如,在激光雷达(LiDAR)、相机等信号传输线路上,采用高磁导率铍铜合金作为屏蔽层,通过金属密闭外壳隔离关键电子元器件,使外界场强衰减大于40dB。同时,感知方案优先选择自身抗干扰能力较强的传感器,如定位和测距采用基于飞行时间的激光雷达,而不是对电场敏感的超声。在状态辨识方面,采用ITO导电薄膜作为防电晕透镜,有效地抑制了电晕放电光晕对影像品质的影响。

在软件 and 数据处理层次上,处理过程涉及到复杂的信号净化和融合运算。在小波变换的基础上,对传感器采集到的信号进行实时滤波处理,可以有效地将具有特定频率特性的信号分离出来,从而实现信号的分离。系统进入多源数据融合阶段,对净化后的点云数据和视觉影像进行空时配准,并将其输入到预训练好的深度学习模型(如FuseNet)中。该模型通过对大量带电环境样本数据的学习,实现对受部分干扰或遮挡目标(如导向线、螺栓、均压环等)的精确识别,并输出准确的三维坐标、位姿和相对距离。本项目拟从采集数据、滤波到融合识别整个过程不超过100毫秒,满足高压环境下高效率、高安全性的要求。最终实现强电磁干扰条件下的亚厘米级定位精度和99%以上目标辨识精度,为后续精确作业提供可靠感知保障^[1]。

(二) 非结构化环境中的精准操控技术

非结构环境下带电作业机器人的精确操作能力是其核心挑战,直接影响作业安全可靠。不同于固定生产线的工业机器人,野外用电环境中存在多种不确定性因素,如强电磁干扰、光照变化、风力干扰、空间障碍等,需要在感知、决策、执行等多个环节进行有效控制。精确控制的实现有赖于多源感知和自适应控制相结合的技术体系。该系统的工作流程从对环境的高精度感知和建模开始。机器人利用激光雷达(LiDAR)和深度相机获取的点云数据,实时构建作业区域的高精度3D地图。例如,16线或更高规格激光雷达,可以对导线、绝缘子、金具等关键零部件进行毫米级点云建模。同时,通过对光照变化具有鲁棒性的算法,实现对待拔插销等工作点的精确识别。

在控制层次上,该机器人采用了一种自适应的方法,该方法采用了阻抗控制和视觉伺服相结合的方法。当机械手靠近带电导线时,利用六维力/力矩传感器对机械手末端接触力进行实时检测。基于视觉定位和力反馈的方法,对机器人的运动轨迹进行动态调节。如,在拔插销工作过程中,当力传感器检测到轴向阻力异常增加时,控制算法立即判断可能出现卡滞现象,并由机械臂执行一次小幅度回撤后再转动的自适应运动,避免零件损坏。为了进一步消除风致振动和电磁力引起的低频晃动,机器人通常采用轻量化复合材料臂体,并将高频减振算法引入到控制环路中。基于惯性测量单元(IMU)实时监测臂体振动频率和幅值,驱动关节电机对其进行反向补偿,使其定位精度达到 $\pm 1\text{ mm}$,满足大部分配电网带电作业的精度要求。公开测试结果表明,该机器人在7级风干扰下,已完成了电位传递、导线搭接等典型作业,作业成功率达98.5%以上,显示出了良好的控制能力^[2]。

(三) 高可靠性系统集成与安全保障技术

在复杂电磁、风雨和空间受限等复杂环境中,带电作业机器人的高可靠综合性能和多级主动安全保障技术是关键。这一技术体系首先表现为硬件级的冗余容错设计。机器人控制单元一般为双核或者多核异构结构(如ARM+FPGA),当主处理器受到强烈的电磁干扰时,“看门狗”电路可以在毫秒级的时间内检测到异常,并触发后备处理器无缝接管控制,保证指令流不中断。动力系统采用双冗余伺服驱动方式,当一台电动机发生故障时,后备电动机能快速对输出进行补偿,防止机械手失稳或掉线。在感知和决策层次上,采用多传感器融合技术,实现实时状态监控和预警。具体工作流程为:安装在机械臂关节的光纤惯性测量单元(IMU)采集1000 Hz的位姿数据,利用激光雷达点云与双目视觉数据构建厘米级的工作环境三维模型,实现对作业环境的精确建模。在此基础上,利用自适应卡尔曼滤波算法对传感器数据进行融合解算,得到机械手末端执行器的六维位姿信息,并对其进行实时处理。该系统预设安全阈值边界,如剥线过程中,当视觉系统检测到器械滑移偏离预定位置3 mm以上,或者力传感器检测到异常阻力(超出设定值20%),则5毫秒内判定为“异常接触”,并立即终止当前操作并启动反向伺服制动,将机械手送至安全位置。采用多物理场模拟方法,对机器人本体进行主动绝缘保护。本项目拟采用有限元方法(FEA)对工作场景下的电场进行准确计算,并对机械臂进行绝缘包覆,达到100 kV/m(按照GB/T16927.1高压测试标准)。在潮湿环境中,在绝缘表面安装微环境传感器,实时监测漏电流、湿度和表面积污情况,当漏电流达到10 mA安全阈值时,系

统会自动发出警报,并给出撤离方案。从硬件冗余-智能感知-绝缘保护三个层次,为机器人和操作人员提供多层安全保障,具有较高的可靠性和适应性^[3]。

二、带电作业机器人提升作业效能的系统化实施策略

(一) 智能决策与自主作业增强

在复杂环境中,带电作业机器人面临电磁干扰、非结构地形和动态障碍等多重挑战,其作业性能提升高度依赖于机器人智能决策和自主操作能力的突破。当前技术前沿由“遥操作”向“自主协同”发展,其核心是构建多源感知、实时决策和精确控制的闭环系统。在系统实现时,首先需要部署具有较强鲁棒性的传感模块。该机器人搭载了双眼视觉摄像机,激光雷达,紫外电晕探测器,毫米波雷达等多传感器信息融合系统,实现了对机器人的智能化控制。激光雷达生成工作点云图,视觉摄像机实现目标识别和定位,紫外线传感器精确识别绝缘子破断和导线放电位置。最后,利用卡尔曼滤波和深度学习网络对多源异构数据进行融合处理,形成具有语义信息的三维场景重建模型,为决策提供情景感知依据。接着,自动寻优算法开始运行。以真实时间点的云图作为输入,基于改进的A*算法和RRT算法,在避障约束、机械臂运动学约束和安全间距等约束条件下,实现无碰撞、低能耗的机器人运动轨迹在线求解。在规划过程中,算法需要不断地执行碰撞检测,通常采用分层包围盒(BVH)技术对规划轨迹进行快速检测,以保证规划轨迹的可实现性。

决策支持引擎是决策的核心,内嵌专家知识库和强化学习策略。面对诸如“导线绝缘层剥离”这样的复杂任务,发动机将其分解成力控跟踪、精密定位和旋转切削等一系列子动作。精密作业时,末端执行机构集成高精度六维力/力矩传感器,实时反馈机械臂的受力信息,并根据自适应阻抗控制算法,动态调整机械臂的位姿和输出力,达到拧紧螺母等高精度螺栓扭矩控制的目的,误差小于 $\pm 2\%$,大大提高了人工操作精度。采用基于ROS的分布式架构,通过发布/订阅话题交互,保证系统响应的实时性和可靠性。研究表明,采用该智能决策系统,完成典型线路引导任务时,单次任务完成率超过90%,比纯人工作业缩短40%左右,大大降低了人工作强度和安全风险(如表1所示)。

(二) 模块化平台与工具系统集成

复杂环境下带电作业机器人的性能提升依赖于其模块化平台和工具系统的深度融合。该策略的核心是通过标准化的、可互换的硬件模块和统一的软件接口,使机器人能根据任务要求迅速适应不同的功能终端,以适应

表1 带电作业机器人核心系统性能表

核心模块	关键技术	性能数据
多源感知融合	多传感器（激光雷达等）+卡尔曼滤波+深度学习	构建三维语义场景模型
运动轨迹规划	改进A/RRT算法+BVH碰撞检测	实现无碰撞低能耗轨迹在线求解
智能决策控制	ROS架构+自适应阻抗控制	螺栓扭矩误差 $< \pm 2\%$ ，任务完成率 $> 90\%$ ，效率超人工40%

多变的野外工作环境。在硬件方面，机器人采用机械和电气接口，满足IEC标准和国家电网标准（如Q/GDW系列）。机械接口一般是一种具有自动锁定和位置反馈功能的快速更换装置，它的公头与机器人的机械臂末端相结合，母头与各种工具模块（如钢丝剥断器、断线剪、接地钳安装器）相连接。该快换装置内置有射频识别（Radio Frequency Identification, RFID）芯片，在安装刀具模块后，机器人控制器可以自动读出刀具的型号、编号、标定参数和安全使用范围。所述电接口用于提供功率传输和信号传输，如为液压工具组件提供电源，或者将点云数据传送给激光雷达组件。

在软硬件层次上，采用统一的“工具管理系统”来实现系统的集成。该系统内置工具库，预先存储了所有已认证工具的运动参数、运动限制和操作规则。当机器人对所安装的刀具进行识别时，控制软件会自动启动相应的驱动和控制算法。例如，在安装导线剥皮装置时，系统需要精确的转矩控制方式和转角阈值；更换双目视觉摄像头后，启动视觉伺服程序，对目标进行识别和定位。工具切换时间不超过90秒，大大缩短了工作中断时间。另外，该集成系统还对运行数据进行了闭环管理。每一种刀具的使用次数、受力情况和作业结果（如切削深度等）都会被记录下来，并上传到云运维平台。分析历史数据可以预测刀具的使用寿命，优化工艺参数，反过来指导刀具设计。该模式在提高单次作业效率的同时，还能在系统层次上提升系统的柔性、可靠性和可维护性，为持续提高复杂环境下的作业性能打下坚实的基础^[5]。

（三）工程应用与产业化推进

开展带电作业机器人的工程化应用和产业化推广，是实现其技术价值向生产力转化的关键。目前，该类机器人正逐步从实验室原型走向实际运行，其产业化进程高度依赖于技术和场景的深度融合和标准体系的建立。根据国家电网公司《配网带电作业机器人技术导则》的要求，制定了一套严格的现场部署方案。在实际应用之前，需要基于激光点云和可见光影像的融合建模技术，

实现目标塔线的高精度三维实景再现，从而构建数字孪生工作环境。然后，操作者通过仿真程序，规划出最优路径和隔离斗臂车的精确停靠位置，并向控制柜下达指令。在作业过程中，机器人通过双目视觉和激光雷达融合传感系统，实现对金属丝及绝缘层剥离的毫米级识别和定位，并通过机械手末端专用工具（如抓钳、剪刀、剥皮机）完成精密作业。以10 kV配线导线搭接作业为例，机器人需按顺序依次完成“精确定位—抓取导线—剥离绝缘层—安装线夹—紧固螺栓”，在复杂光照、微风晃动和电磁干扰等环境下，保证作业精度和稳定性。

工业化推进的关键是要形成标准化的、可批量生产的解决方案。这涉及到机器人本体、操作器、控制系统和维护平台等多个环节的协同工作。目前，国网智能技术有限公司研发的“创享”系列机器人，已实现了臂展半径、工作精度、绝缘水平等关键参数的标准化配置，满足不同电压等级（10 kV、35 kV）及工作任务（断线、更换避雷器、清除异物）的要求。据《国家电网有限公司2020社会责任报告》显示，该公司已在全国范围内推广使用超过1000台带电作业机器人，代替人工作业超过10000台，有效提升了供电可靠性，促进了我国智能装备制造产业的发展。在未来的发展中，通过对技术可靠性的不断优化、生产成本的不断优化和完善的培训和服务体系的建立，使带电操作机器人成为新一代电力能源工业生产中不可缺少的生产力工具^[6]。

结束语

综上所述，开展带电作业机器人在复杂环境下的作业能力研究对于提高我国电力系统运行管理的智慧与应对能力，以及确保电力供应安全，促进能源产业高品质发展，都有着重大的实际应用价值。随着人工智能、多传感器融合及智能调控等方面的不断创新，带电作业机器人将逐渐走向自主与适应的高度，在极端天气、特殊地形以及高危环境中发挥更大作用，为无人化运行及新型能源体系的建设奠定基础。

参考文献

- [1] 张富荣, 番禺, 沈忠亮, 等. 基于一致性交叉的带电作业机器人目标定位[J]. 计算机仿真, 2025, 42 (02): 472-476+508.
- [2] 张爽, 甘依依, 刘超. 安全卫士: 带电作业机器人[J]. 工友, 2025, (02): 44-45.
- [3] 钟加勇, 程晓, 胡伟楠, 等. 高压柜带电作业机器人操作力矩精细化控制[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33 (05): 152-161.