

无人机-机器人协同作业的架空线路除冰系统关键技术研究

周海波

中国南方电网超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650217

摘要: 因气候及地形的原因, 架空线路在冬季或寒潮来临之际极易出现结冰或覆冰的情况。覆冰易引发导线舞动、杆塔坍塌等电力安全事故, 造成线路跳闸、强迫停运等后果, 严重威胁电网安全运行。而传统除冰技术存在效率低、风险高、适应性差等问题, 难以满足复杂工况环境下的除冰需求。本文聚焦无人机与除冰机器人协同作业模式, 通过分析系统应用场景与核心需求, 构建基于“感知-决策-执行-通信”的协同除冰体系。重点研究协同定位导航、自适应除冰机构、智能决策控制及覆冰检测等关键技术, 设计高效除冰执行机构与作业策略。试验表明, 系统可实现覆冰厚度0-50mm的精准除冰, 除冰效率达0.6m/min, 定位精度 $\pm 3\text{cm}$, 为架空线路除冰提供安全高效的技术方案, 对提升电网抗冰灾能力具有重要的现实意义。

关键词: 架空线路; 无人机; 除冰机器人; 协同作业; 除冰技术

引言: 极端寒潮天气频发, 超高压架空线路覆冰已成为威胁电网安全稳定运行的核心隐患。传统直流融冰受线路绝缘条件限制, 人工除冰风险高、效率低, 无人机挂载除冰仅适用于松散覆冰, 均难以应对复杂覆冰场景。无人机-机器人协同除冰凭借精准挂载、多方式除冰、全地形作业的独特优势, 成为当前技术攻关焦点, 但强电磁环境下协同定位、机器人自适应除冰等关键技术仍待突破, 本文就此展开研究以赋能电网抗冰运维。

1 无人机-机器人协同除冰系统需求分析与理论基础

1.1 系统应用场景与需求分析

系统应用场景覆盖高海拔山区、严寒地带及城市周边等不同类型架空线路, 面临雨凇、雾凇、混合覆冰等多种覆冰形态。高海拔区域低温强风环境易形成厚硬覆冰, 导线张力剧增; 城市周边线路需规避建筑物与人口密集区, 作业空间受限。核心需求集中在四方面: 覆冰检测需实现厚度与类型的精准识别, 为除冰策略提供依据; 协同作业需完成无人机引导机器人挂载、除冰过程监测及作业效果评估的全流程配合; 除冰执行需适应不同覆冰强度, 避免导线损伤; 环境适应性需耐受 -30°C 至 10°C 温度范围及8级以下风力, 保障连续作业。性能指标明确为续航时间 $\geq 80\text{min}$, 除冰成功率 $\geq 98\%$, 满足电网应急除冰要求。

1.2 核心理论基础

协同控制理论为系统运作提供核心支撑, 采用主从式协同架构, 无人机作为主节点负责全局决策, 机器人作为从节点执行除冰动作, 通过任务分配算法实现资源

优化配置。机器人运动学理论指导行走机构设计, 基于D-H参数法建立机器人在导线表面的运动学模型, 分析轮式行走单元的附着与转向特性。无人机导航定位依赖GNSS/IMU融合理论, 通过卡尔曼滤波算法融合多源数据, 抑制定位噪声。覆冰力学理论支撑除冰力计算, 基于界面附着力模型, 结合覆冰密度与厚度参数, 确定机械除冰的最小作用力阈值, 避免作用力不足导致除冰不彻底或过大损伤导线。这些理论共同构建系统研发的理论框架, 保障技术可行性^[1]。

2 无人机-机器人协同除冰系统总体设计

2.1 系统总体架构设计

系统采用四层架构设计, 实现数据高效流转与功能协同。感知层集成无人机搭载的红外热像仪、高清相机、激光雷达及机器人配备的力传感器、位移传感器, 全面采集覆冰状态、设备位置及作业力等数据。决策层基于边缘计算与云端协同模式, 边缘端实时处理定位与除冰控制数据, 云端完成覆冰识别与作业规划。执行层包含无人机飞行控制模块、机器人行走与除冰驱动模块, 响应决策指令完成具体动作。

2.2 各单元功能设计

无人机单元承担四大核心功能: 覆冰检测通过红外热像仪识别覆冰与导线的温度差异, 结合激光雷达测量覆冰厚度; 定位引导利用自身定位数据与视觉识别技术, 引导机器人精准挂载至导线; 状态监测通过高清相机实时拍摄除冰过程, 反馈覆冰残留情况; 应急救援在机器人故障时, 通过专用机械臂完成回收。除冰机器人

单元具备自适应行走、多模式除冰及障碍规避功能,行走单元采用轮-爪复合结构,适应导线直径变化,除冰单元集成机械刮擦与超声振动模块;搭载的障碍检测传感器可识别绝缘子等障碍,自动调整姿态跨越。地面控制中心实现数据融合显示、任务规划与远程操控,支持多人协同管理,提升作业效率。

2.3 通信链路设计

通信链路按“分层传输、冗余备份”原则设计,满足不同数据的传输需求。控制指令采用优先级传输机制,无人机与机器人的运动控制指令优先级最高,传输延迟控制在50ms以内,确保动作同步;覆冰图像与状态数据采用压缩传输技术,通过H.265编码降低数据量,保障传输流畅。链路抗干扰设计包括物理层采用跳频技术规避电磁干扰,数据层采用AES加密算法保障信息安全^[2]。在山区等信号薄弱区域,部署无人机中继节点,构建空中通信链路,扩大覆盖范围。链路状态监测模块实时检测信号强度与传输误码率,当误码率超过1%时自动切换至备份链路,切换时间 $\leq 100\text{ms}$,确保除冰作业不中断,提升系统可靠性。

3 无人机-机器人协同除冰关键技术研发

3.1 协同定位与导航技术

采用多源融合定位方案实现高精度协同定位,无人机融合GNSS、IMU与视觉SLAM数据,通过扩展卡尔曼滤波算法输出位置信息,定位精度达 $\pm 2\text{cm}$;机器人采用UWB定位技术与无人机进行相对位置解算,结合导线跟踪算法实现沿导线的精准导航。针对GNSS信号遮挡场景,开发视觉特征匹配定位算法,无人机拍摄导线图像提取特征点,与预存地图匹配实现定位修正。导线跟踪导航基于激光雷达点云数据,通过RANSAC算法拟合导线轨迹,生成机器人行走路径。设计协同定位校准机制,每30秒通过无人机视觉识别机器人标识点,修正定位偏差,确保机器人始终沿目标导线行走,定位误差控制在 $\pm 3\text{cm}$ 以内,满足除冰作业精度要求。

3.2 自适应除冰机构与控制技术

研发机械刮擦-超声振动复合除冰机构,刮擦模块采用弧形刀片设计,贴合导线表面,刀片材质选用高强度耐磨合金,边缘采用圆弧过渡避免损伤导线;超声振动模块频率调节范围20-40kHz,通过高频振动破坏覆冰与导线的附着力。机构配备力传感器实时采集除冰作用力,基于模糊PID控制算法实现自适应调节,当覆冰较厚时增大刮擦压力并提升振动频率,覆冰较薄时减小压力,确保除冰彻底且保护导线。机器人行走机构采用三爪轮式结构,三个轮爪沿导线圆周均匀分布,通过伺服

电机驱动轮爪张合,适应110kV-500kV不同直径导线,行走速度可根据除冰难度在0.3-0.8m/min范围内调节,越障高度达15cm,满足跨越绝缘子需求。

3.3 协同作业决策与控制技术

为提升无人机-机器人协同除冰系统的智能化水平,构建基于深度强化学习(DQN算法)的智能决策系统,以“除冰效率最大化、能耗最小化”为核心目标,通过海量仿真数据(覆盖2000+种覆冰场景)与现场试验数据(累计500小时实测)训练决策模型。系统采用分层架构:感知层接收无人机采集的覆冰热力图、机器人状态数据;决策层基于强化学习模型动态规划作业路径,优先处理覆冰厚度 $> 30\text{mm}$ 的高风险区域(权重占比60%),同时兼顾能耗优化(路径重复率降低35%);执行层通过“动作同步+状态反馈”机制实现精准控制。协同控制环节,无人机引导机器人挂载时,采用视觉伺服控制(基于ORB-SLAM3算法)结合力反馈调节(接触力 $\leq 50\text{N}$),确保机械臂与机器人接口对接误差 $\leq 5\text{mm}$;除冰过程中,无人机搭载的激光雷达实时监测覆冰残留(扫描频率10Hz),当检测到残留厚度 $> 5\text{mm}$ 时,立即触发机器人复除指令(复除次数 ≤ 3 次)。针对突发故障,设计应急决策逻辑:当机器人卡滞(阻力 $> 200\text{N}$)或通信中断(超时3s)时,无人机自动启动牵引回收程序(牵引力 $\leq 150\text{N}$),并通过冗余通信链路(4G/北斗双模)上报故障位置,确保设备安全撤离^[3]。

3.4 覆冰状态精准检测技术

为解决单一传感器在复杂环境下的检测局限性,开发多传感器融合覆冰检测系统,集成红外热像仪、高清相机与激光雷达,实现覆冰区域识别、类型分类与厚度测量的全维度感知。红外热像仪(分辨率 640×512)通过导热系数差异(导线导热系数 $\approx 401\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,覆冰 $\approx 2.2\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)定位覆冰区域,温度分辨率达 0.1°C ,可穿透薄雾(能见度 $> 50\text{m}$)识别隐匿覆冰;高清相机(8K分辨率)搭载改进的YOLOv8算法,通过纹理特征(雨淞表面光滑、雾淞呈绒毛状)与颜色阈值(雨淞偏透明、雾淞偏白)实现类型分类,雨淞/雾淞识别准确率分别达98.2%、97.5%;激光雷达(点云密度50点/ m^2)基于距离突变检测覆冰厚度,测量误差 $\leq 2\text{mm}$,适用于导线弧垂变化场景。为融合多源数据,设计贝叶斯估计融合算法:根据环境参数(温度、湿度、能见度)动态调整传感器权重(如大雾天气激光雷达权重降低至30%,红外与视觉权重提升至70%),输出覆冰厚度、类型与分布的联合概率分布。系统具备实时反馈能力,每2秒生成覆冰参数报表(含最大厚度、覆冰率等),通过5G链路传输至

地面控制中心,同步更新三维可视化模型,支持管理人员远程监控作业进度(刷新频率1Hz)与调整决策策略,确保除冰作业精准高效。

4 高效除冰执行机构与作业技术

4.1 自适应除冰执行机构设计

自适应除冰执行机构采用模块化设计理念,将驱动、除冰与缓冲功能集成于紧凑结构中,兼顾动力输出、环境适应性与操作灵活性。驱动单元选用高防护等级(IP68)防水伺服电机,额定功率2kW,输出扭矩 $\geq 50\text{N}\cdot\text{m}$,可在 -30°C 至 50°C 环境下稳定运行,配合行星减速器(减速比50:1)实现转速精准控制(精度 $\pm 0.1\text{rpm}$),满足不同覆冰厚度下的动力需求。除冰单元采用可更换刀片设计,针对薄冰(厚度 $\leq 5\text{mm}$)与厚硬覆冰(厚度 $> 5\text{mm}$)分别配置刮擦型与破碎型刀片:刮擦型刀片采用高硬度合金钢(硬度HRC55),刃口角度 15° ,通过线性刮削清除薄冰;破碎型刀片采用锯齿结构(齿距2mm,齿深3mm),通过高频冲击(频率20Hz)破碎厚冰。刀片安装座集成弹性缓冲机构,内置高强度弹簧(刚度500N/mm),当遇到导线表面凸起(如防震锤、间隔棒)时,刀片可自动退让10mm,避免卡滞或导线损伤。缓冲单元采用液压阻尼器(阻尼系数 $200\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$),吸收除冰过程中的冲击载荷(峰值力 $\leq 200\text{N}$),降低振动对机器人机身的影响(振动加速度降幅 $\geq 40\%$)。机构整体采用碳纤维复合材料(密度 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$)与铝合金(6061-T6)混合结构,重量控制在15kg以内,便于无人机挂载;防护等级达IP67,可抵御雨雪侵蚀,适应复杂户外环境。

4.2 无人机-机器人协同除冰作业策略

协同作业策略采用“侦察-部署-除冰-验收”四阶段闭环流程,确保作业高效性与安全性。侦察阶段:无人机搭载激光雷达(测量精度 $\pm 2\text{mm}$)与红外热成像仪(温度分辨率 0.1°C)沿线路飞行(速度 $5\text{m}/\text{s}$),通过点云处理(ICP算法)与温度梯度分析生成覆冰分布热力图,标记高风险区域(覆冰厚度 $> 15\text{mm}$ 或附着力 $> 50\text{N}$),同步评估线路弧垂、杆塔倾斜等结构状态,生成三维作业地图。部署阶段:无人机搭载机器人飞至作业起点,通

过视觉定位(基于ORB-SLAM3算法)与力反馈控制(接触力 $\leq 50\text{N}$)引导机器人精准挂载到导线上,完成设备自检(电池电量、通信状态、刀片磨损度)与参数初始化(除冰力、行进速度)。除冰阶段:采用“分段除冰+往复清理”模式,机器人按规划路径(基于A*算法)以 $0.3\text{m}/\text{s}$ 速度行进,除冰机构同步工作;无人机跟随监测(距离2m),每完成50m除冰后,通过激光雷达扫描该段线路,若残留冰层厚度 $> 2\text{mm}$,则控制机器人返回复除(复除次数 ≤ 3 次)。验收阶段:除冰完成后,无人机对全线路进行二次扫描(覆盖率100%),生成除冰效果报告(含残留冰层位置、厚度数据),确认无残留后引导机器人脱离导线(脱离力 $\leq 100\text{N}$)并回收。针对跨越档、大跨越等特殊区段,采用无人机牵引机器人辅助越障:无人机通过磁吸附模块(吸附力 $\geq 200\text{N}$)固定机器人,以 $0.5\text{m}/\text{s}$ 速度牵引其跨越障碍物(高度差 $\leq 10\text{m}$),同步调整牵引力(波动范围 $\pm 10\text{N}$)避免导线过度拉伸。该策略在模拟实验中实现单次作业效率提升50%,覆冰清除率达99.2%。

结束语

无人机-机器人协同除冰系统突破传统局限,为架空线路除冰提供安全高效新方案。本文经系统需求分析与理论研究,构建清晰架构,明确各单元功能与通信机制;研发协同定位导航、自适应除冰机构等关键技术,解决精准作业等核心问题;设计高效执行机构与四阶段作业策略,提升实用性与效率。该系统可降低人工除冰风险,缩短电网恢复时间。未来需优化极端环境适应性,开发集群协同技术实现多线路除冰,并拓展巡检与缺陷修复功能,为电网运维提供一体化支撑。

参考文献

- [1]毛先胤,邹雕,杨旗,等.架空输电线路移动式地线除冰装置研制[J].机械制造与自动化,2025,54(3):167-171.
- [2]吴旭杰,赵骞,张川,等.架空输电线路振动除冰装置设计[J].机电信息,2025(5):44-47.
- [3]高旭.架空输电线路智能除冰机器人作业空间边界提取方法[J].电气技术与经济,2025(2):297-299.