

架空地线覆冰早期干预方法与边缘计算协同决策研究

鄂先忠 何桐波 颜世成 余文斌
超高压输电公司大理局 云南大理 671000

摘要: 针对架空地线覆冰严重影响输电安全的问题, 本研究提出一种基于边缘计算协同决策的早期干预方法。通过多源异构传感融合技术, 系统实时采集地线拉力、微气象与环境参数, 结合卡尔曼滤波算法实现覆冰风险的超早期诊断与动态预警。设计具备风光储互补供能的移动除冰机器人, 采用自适应振动除冰和击打除冰两种策略相结合, 依托边缘-云协同架构实现低延迟智能响应。实际应用表明, 该系统可显著提升覆冰处置效率, 降低运维成本, 为极端气象条件下输电线路的安全运行提供了一种创新性解决方案。

关键词: 架空地线覆冰; 边缘计算; 早期干预; 振动除冰; 击打除冰

引言

架空地线覆冰是严寒地区输电系统面临的重大安全隐患, 传统除冰方式存在响应滞后、能耗高、适应性差等问题。随着物联网与边缘计算技术的发展, 构建智能化、低功耗、高可靠的覆冰早期干预系统成为可能。本研究基于多源传感融合与边缘决策机制, 研制具备自主作业能力的除冰机器人系统, 实现从被动应对到主动预警的根本转变, 为提升电网抗冰灾能力提供关键技术支撑。

一、覆冰早期干预系统总体设计

本研究设计的覆冰早期干预系统采用“监测-决策-执行”一体化的协同架构, 构建了一个集智能感知、自主决策、精准执行为一体的完整解决方案。系统创新性地边缘计算与物联网技术深度融合, 通过分布式智能节点实现覆冰风险的实时感知与快速响应。除冰机器人作为系统的移动执行单元, 集成了高精度行走机构、自适应振动除冰模块、击打除冰模块、多源传感器阵列及4G通信模块, 具备自主导航与智能作业能力。充电站采用风光储互补的清洁能源方案, 通过高效光伏板和小型风力发电机收集可再生能源, 经由智能能源管理系统存储至高性能三元锂电池组, 为机器人提供持续稳定的能源保障。微气象监测模块采用高精度传感器, 实时采集线路周边的温湿度、风速、气压等关键环境参数, 为系统智能决策提供全面的数据支持。各功能模块通过可靠的无线通信技术实现互联互通, 重要数据在边缘侧进行实时处理与智能融合, 显著降低了云端通信负荷与决策延迟, 为覆冰的早期预警与主动干预提供了坚实的技术基础。

该系统的核心设计理念是“早期预警、主动干预、智能控制”, 通过多层次智能化手段实现覆冰的有效防治。机器人通过前端安装的高频振动装置和多源传感系统, 可在覆冰初期阶段执行精准除冰作业, 即时在覆冰较多时, 也可使用击打的方式进行除冰。当系统通过先进的数据融合算法识别出覆冰风险时, 机器人即刻从充电站自主出动, 沿地线平稳行走并启动自适应振动除冰程序。振动频率与振幅可根据实时监测的冰情数据通过智能控制算法动态调节, 实现最佳除冰效果。在整个作业过程中, 机器人持续监测地线拉力变化与周边气象条件, 采用闭环控制策略实时优化作业参数。系统还具备智能学习能力, 能够通过历史数据不断优化除冰策略, 提升作业效率。一旦监测数据恢复正常范围, 系统便自动终止作业并返回充电站待命。这种创新设计不仅大幅提升了除冰效率, 还有效解决了传统除冰方式响应滞后、能耗过高的问题, 为输电线路的安全稳定运行提供了全面保障。

二、边缘计算与智能决策模型

2.1 多源异构传感数据融合与智能感知模型

系统构建了基于边缘计算的多源数据融合框架, 通过部署在机器人及线路上的多种传感器, 形成立体化的监测网络。该框架采用改进的卡尔曼滤波算法, 对地线拉力、温湿度、风速、气压等多维度监测数据进行深度融合与优化处理, 显著提升了数据的可靠性与准确性。边缘计算节点具备强大的本地处理能力, 能够对原始监测数据进行实时预处理和特征提取, 有效减少了上传至云端的数据量, 提高了系统响应速度。系统还建立了完善的数据质量控制机制, 通过异常检测和数据校验算法,

确保监测数据的准确性和可靠性，为后续的智能决策提供高质量的数据输入。

系统创新性地建立了动态阈值判断模型，通过在边缘侧部署智能决策算法，实现了对覆冰风险的实时研判与预警。该模型综合考虑多种环境因素和设备状态参数，采用多变量综合分析的方法进行覆冰风险判断。当监测到特定环境条件时，边缘计算单元立即触发预警机制，并自主启动除冰机器人执行干预任务。这种基于边缘智能的实时决策机制，将传统依赖云端决策的响应时间大幅缩短，为早期干预赢得了宝贵的时间窗口。系统还具备自学习能力，能够通过历史运行数据不断优化判断阈值和决策规则，持续提升预警准确性和决策智能化水平。

2.2 智能控制策略与自适应调节机制

在智能控制策略方面，系统采用基于模糊PID的闭环控制算法，使除冰装置能够根据实时环境数据动态调整工作参数。该控制算法充分考虑系统非线性和时变特性，通过模糊推理实现对控制参数的在线整定和优化。振动电机通过高精度边缘控制器实现精确的频率与振幅调节，既保证了不同冰况下的除冰效果，又优化了能源使用效率。控制系统还具备较强的鲁棒性和适应性，能够根据风雪强度、冰层厚度等环境变量自动调整控制策略，满足复杂环境下的除冰需求，确保系统在各种工况下都能保持稳定的除冰性能。

系统还引入了先进的在线学习机制，通过持续收集作业数据不断优化控制参数，形成自我完善的智能除冰策略。边缘计算节点在执行过程中实时采集振动频率、除冰效果、能耗等关键指标，通过机器学习算法进行本地模型的增量更新与策略调优。这种自适应学习机制使系统能够不断积累运行经验，逐步提升除冰精度和效率。系统还建立了完善的知识库，存储各类典型工况下的最优控制参数，为后续的智能决策提供参考依据，展现出良好的系统进化能力和环境适应性。

2.3 边缘-云协同架构与智能运维平台

系统采用创新的边缘-云协同架构，实现了分布式智能与集中管理的有机结合。边缘侧专注于高频、实时的本地决策与控制任务，确保系统的快速响应能力；云端则承担大规模数据存储、深度分析和综合管理职能，为系统提供宏观决策支持。两者通过可靠的通信网络及轻量级通信协议实现高效协同，既保证了实时性，又扩展了系统的功能边界。系统还建立了完善的数据同步机制，确保边缘侧和云端数据的一致性，为后续的数据分析和决策优化提供完整的数据支撑。

云端平台提供全面的运维支持功能，包括设备状态监控、任务调度管理、智能报警推送及历史数据分析等模块。平台采用微服务架构，各个功能模块之间采用松耦合设计，便于系统的扩展和维护。运维人员可通过可视化Web界面实时掌握机器人工作状态、电池电量、环境数据等关键信息，并支持远程指令下发和参数调整。系统还提供完善的API接口，支持与现有运维系统的集成，实现了“边缘自主+云端统筹”的协同管理模式，既保障了系统的自治能力，又提供了集中监控的便利性，显著提升了系统的可维护性与操作便捷性。

三、系统实现与测试分析

3.1 硬件系统集成与关键器件选型

在硬件实现层面，除冰机器人采用模块化设计理念，主体结构采用不锈钢方管焊接框架，经过结构优化和有限元分析，实现了轻量化与高强度的平衡。行走机构选用大扭矩直流减速电机驱动聚氨酯轮组，配备编码器实现精准定位和速度控制，确保了在架空地线上的稳定移动能力。振动除冰装置核心采用直流无刷电机，配合特殊设计的振动头和防护层，在保证除冰效率的同时最大限度减少对地线的磨损。击打除冰装置采用直流无刷电机带动击打锤旋转，将地线上凝固的厚冰击碎，击打锤表面覆盖橡胶层，可有效预防击打对地线造成的危害。电气系统采用分布式架构，各个功能模块通过标准接口连接，便于维护和升级。

传感器系统采用冗余设计，集成高精度拉力传感器、温湿度传感器及多参数气象传感器，所有传感器封装于高防护等级的外壳内，具备优异的抗干扰与耐候性能。能源系统选用高性能三元锂电池组，采用智能电池管理系统，支持在低温环境下稳定运行。风光互补充电站采用优化设计，光伏板安装角度经过计算优化，风力发电机布局合理，显著提升了能源收集效率。整个硬件系统经过环境适应性测试，确保在恶劣气象条件下可靠运行。

3.2 软件系统开发与平台功能实现

软件系统采用分层架构设计，包括设备端嵌入式系统、边缘计算平台和云端管理系统三个层次。设备端固件基于实时操作系统开发，实现了多传感器数据采集、电机精确控制与通信协议栈，确保系统的实时性和可靠性。边缘计算节点部署轻量级算法模型，负责实时数据融合与智能决策，支持算法在线更新和参数远程配置。云端平台采用现代Web技术架构，提供RESTful API接口与实时数据可视化看板，支持多终端访问和移动办公。

该系统实现了全流程数字化管理，从数据采集、传输、存储到分析展示都进行了优化设计。运维管理平台提供完善的设备监控、任务调度、报警管理等功能，支持多种报警方式和通知渠道。系统还提供丰富的数据分析工具，包括历史数据查询、趋势分析、报表生成等功能，为运维决策提供数据支持。权限管理系统采用基于角色的访问控制模式，确保系统安全性和数据保密性。整个软件平台经过多次迭代优化，界面友好，操作简便，满足了日常运维的各种需求。

3.3 系统测试与性能验证分析

系统在模拟实验环境和实际运行线路进行了全面的测试验证。测试内容包括功能测试、性能测试、环境适应性测试和可靠性测试等多个方面。在功能测试中，验证了各个模块的基本功能和协同工作能力；在性能测试中，重点测试了除冰效率、能耗指标、响应时间等关键性能参数；在环境适应性测试中，检验了系统在不同温度、湿度、风速条件下的工作状态；在可靠性测试中，进行了长时间的连续运行测试，评估系统的稳定性和可靠性。

测试结果表明，系统在各种工况下都能保持稳定的工作性能。除冰作业效果达到设计要求，能够有效清除不同厚度的冰层；能源系统工作可靠，能够满足机器人的日常作业需求；控制系统响应迅速，能够根据环境变化及时调整工作参数；通信系统稳定可靠，数据传输完整准确。通过测试也发现了一些需要改进的问题，为系统的进一步优化提供了方向。总体而言，系统各项性能指标达到设计要求，具备实际应用的条件。

四、创新点与优势分析

本研究的创新性主要体现在以下几个方面：首先，提出了基于多源异构传感融合的超早期覆冰诊断技术，通过先进的数据融合算法，实现了对覆冰风险的精准识别和早期预警。该系统创新性地多种传感器数据有机结合，建立了完善的覆冰判断模型，解决了传统监测方法存在的准确性问题。其次，研发了自适应智能振动除冰技术，采用先进的控制算法，能够根据实时监测数据动态调整工作参数，实现了高效、低能耗的精准除冰。该技术不仅提高了除冰效率，还显著降低了能源消耗。第三，设计了风光储互补的分布式能源系统，创新性地解决了无市电供应地区的设备供电难题。该系统通过优

化能源管理策略，最大限度地利用了可再生能源，确保了设备的持续稳定运行。最后，采用了标准化模块集成与柔性适配架构，通过统一的接口标准和通信协议，实现了系统的快速部署和灵活扩展，大大提高了设备的通用性和可维护性。

与现有技术相比，本系统具有显著的优势：其早期干预机制可有效防止覆冰累积，从根本上降低了断线风险；边缘-云协同决策模式既保证了系统的实时响应能力，又实现了集中智能管理；智能能源系统通过优化设计大幅提升设备续航能力，特别适合偏远地区应用；模块化设计使系统具备良好的适应性和经济性，可根据实际需求灵活配置。系统还具备良好的扩展性，支持后续功能升级和技术迭代。综合来看，该系统不仅技术先进、性能可靠，更在实用性、经济性和可推广性方面表现出突出价值，为架空地线覆冰防治提供了完整的技术解决方案，具有广阔的应用前景和推广价值。

结语

本研究通过融合边缘计算与智能感知技术，构建了一套完整的架空地线覆冰早期干预系统，实现了覆冰风险的精准识别与高效处置。系统具备良好的环境适应性与可扩展性，可为高寒、山区等恶劣环境下的输电线路运维提供可靠保障。未来将进一步深化人工智能算法在覆冰预测与控制策略中的应用，推动输电线路防灾减灾技术向智能化、无人化方向发展。

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(03): 167-171.
- [2]毛先胤, 王开金, 杨旗, 等. 架空地线共振除冰安全性分析[J]. 机械, 2025, 52(05): 15-21.
- [3]高凯, 罗日成, 刘娟, 等. 一种输电线路架空地线带电直流融冰方法[J]. 电气技术, 2024, 25(11): 42-47.
- [4]毛先胤, 杨旗, 张义钊, 等. 架空地线共振除冰仿真分析[J]. 机械, 2024, 51(08): 18-24.
- [5]符晶华, 陈波. 覆冰荷载作用下腐蚀地线的动力特性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(07): 45-50.