

面向配电抢修的无人机巡检与设备调度 AI协同优化策略

胡琦婧

(国网山西省电力公司夏县供电公司)

【摘要】配电网抢修的高时效性要求精准的故障定位与高效的资源调度,无人机巡检结合AI优化调度可以提升抢修效率。文章分析了巡检任务规划、飞行路径优化和多传感器数据采集与故障识别的方法,提出了改进的目标检测与时序预测算法。研究探讨了无人机巡检与设备调度的协同优化策略,提升了抢修决策的智能化水平。研究成果可以降低配电网抢修的响应时间,为构建智能化和高效化的配电抢修体系提供理论支撑与技术参考。

【关键词】无人机巡检;配电抢修;设备调度;人工智能;优化策略

中图分类号:TM75

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.153

AI Collaborative Optimization Strategy for UAV Inspection and Equipment Scheduling for Power Distribution and Emergency Repair

HU Qi-jing

(State Grid Shanxi Electric Power Co., Ltd., Xia County Power Supply Company)

【Abstract】The high timeliness of distribution network emergency repair requires accurate fault positioning and efficient resource scheduling. UAV inspection combined with AI optimized scheduling can improve the efficiency of emergency repair. This paper analyzes the methods of patrol mission planning, flight path optimization, multi-sensor data collection and fault identification, and proposes an improved target detection and timing prediction algorithm. The study discusses the collaborative optimization strategy of UAV inspection and equipment scheduling, and improves the intelligent level of emergency repair decision-making. The research results can reduce the response time of distribution network emergency repair, and provide theoretical support and technical reference for the construction of an intelligent and efficient distribution emergency repair system.

【Keywords】drone inspection; power distribution and emergency repair; equipment scheduling; artificial intelligence; optimization strategy

1 引言

传统巡检与调度模式存在故障发现滞后、资源配置低效、抢修响应缓慢等问题,而无人机巡检在配电网故障巡检与抢修辅助决策中可发挥重要作用。结合人工智能优化调度技术,可提高整体应急响应能力。通过构建无人机巡检与设备调度的智能协同优化模型,可有效提高抢修效率与资源利用率。

本文研究无人机巡检的技术架构,建立基于计算机视觉的智能巡检模型,提升故障识别能力;提出基于强化学习的智能调度方法,优化抢修任务分配合理性;探讨无人机巡检与设备调度的协同优化策略,提出基于实时巡检数据的动态调度机制。研究成果对构建高效和智能的配电抢修体系具有重要理论价值与应用价值。

2 配电抢修中的无人机巡检体系

2.1 无人机巡检技术架构与关键要素

传统人工巡检难以满足紧急故障处理的需求。无人机巡检凭借快速覆盖大范围配电线路的优势,可为抢修任务提供高精度决策支持。无人机巡检任务规划涉及对待巡检线路的优先级评估,根据设备重要性、故障发生概率和历史检修记录等信息计算各条线路的巡检权重^[1]。飞行路径优化需考虑地形环境、电磁干扰和风速风向等因素,以最优路径最小化巡检时间和能耗。无人机采用多传感器融合技术,对杆塔、导线和变压器等设备进行全方位扫描,获取高精度巡检数据。

2.2 无人机巡检数据的实时分析与故障定位

无人机巡检过程中,采集的多模态数据需通过

实时分析以实现高效的故障定位。首先无人机搭载的红外相机可检测温升异常,可见光相机则识别设备表面损伤等结构性问题^[2]。巡检数据借助5G或Wi-Fi 6网络传输至云端或边缘计算节点进行异常检测与分类。计算机视觉算法基于语义分割与目标检测结合的方法,实现多故障类型的精准识别。

此外,需将无人机巡检数据与电网数据采集与监视控制系统(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)数据进行融合,综合分析故障发生的可能性。SCADA系统提供的电压、电流和负荷等信息与无人机巡检图像数据形成互补,结合时序预测模型分析,提升故障定位精度。

3 配电抢修设备调度优化模型

3.1 设备调度的优化目标与约束条件

传统调度方式难以快速应对突发性故障;智能调度优化模型需明确优化目标,并考虑现实约束条件以保证调度方案的可行性和高效性^[3]。设备调度优化的核心目标为最小化抢修响应时间与设备调度成本,设定优化目标函数为:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

式(1)中: N 表示参与调度的设备总数, M 为待执行的抢修任务总数; C_{ij} 表示设备 i 分配至任务 j 的调度成本, x_{ij} 为设备与任务的匹配变量,取值为1表示设备 i 分配至任务 j ,否则为0。通过明确优化目标与约束条件,可保证抢修任务高效执行,提高设备调度合理性。

3.2 AI驱动的智能调度算法

智能调度算法借助AI技术优化设备分配,提升抢修任务响应速度。其中,强化学习方法基于历史数据与实时环境反馈动态调整调度策略,深度Q网络(DQN)通过状态—动作值函数(Q函数)学习最优调度方案:状态空间涵盖当前抢修任务分布、设备位置及可用性等关键信息,动作空间对应所有可能的设备调度方案,奖励函数设定为抢修时间与调度成本的加权和(通过权重平衡双目标优化需求)。DQN算法的时序差分更新公式如下:

$$Q(s,a) = Q(s,a) + \alpha[r + \gamma \max_{a'} Q(s',a') - Q(s,a)] \quad (2)$$

式(2)中: $Q(s,a)$ 表示状态 s 下执行动作 a 的Q值; α 为学习率; γ 为折扣因子; r 为即时奖励; s' 为下

一状态; a' 为最优动作。通过智能体不断迭代优化学习,调度决策可逐步优化,实现抢修任务分配的合理性提升。

遗传算法则通过模拟生物自然选择与变异机制优化设备调度方案:将调度方案编码为染色体,适应度函数设定为抢修时间与调度成本的综合优化指标,采用轮盘赌选择、单点交叉、随机变异等经典操作迭代优化调度策略。

AI驱动的智能调度算法可结合无人机巡检实时数据,动态调整设备调度方案,为配电网抢修提供精准的智能化决策支持。

4 无人机巡检与设备调度的协同优化策略

4.1 联合优化模型的构建

无人机巡检与设备调度存在紧密耦合关系:巡检数据直接影响设备调度决策的准确性,调度方案的优化程度则决定抢修任务的执行效率。若独立优化巡检路径与设备调度,难以实现全局最优,因此联合优化模型需统筹无人机巡检任务规划、调度任务分配及抢修资源协调,构建全局优化框架,实现巡检数据与抢修任务的动态联动。

无人机巡检的核心目标是精准获取故障信息,提升故障识别的准确性与时效性;设备调度的目标是优化抢修资源配置,缩短抢修时间。联合优化模型需整合两类任务,定义以“抢修响应时间最小化”与“设备调度成本最小化”为核心的多目标优化函数:

$$\min Z = \alpha T_{resp} + \beta C_{dispatch} \quad (3)$$

式(3)中: T_{resp} 表示抢修响应时间, $C_{dispatch}$ 表示设备调度成本, α 、 β 为权重系数,平衡时间成本与经济成本。其中,无人机巡检子模型基于巡检任务优先级(如故障高发区、重要线路优先)优化飞行路径,使无人机优先覆盖潜在故障区域,提升巡检效率;设备调度子模型依据巡检反馈的实时故障信息(如故障类型、位置、严重程度),动态调整设备派遣方案,实现抢修任务的快速响应。联合优化模型采用加权求和型多目标优化方法,在巡检效率与设备调度效率之间寻求全局最优解。

无人机获取巡检数据后,结合计算机视觉与深度学习技术分析故障类型及严重程度,生成高置信度的故障报告,实时传输至抢修任务调度系统,触发

动态调度优化,最终实现抢修任务的高效执行。

4.2 计算资源分配与实时调度机制

无人机巡检与设备调度涉及大规模数据处理及复杂优化计算,计算资源分配对任务执行效率至关重要^[4]。云计算和边缘计算协同工作,为实时调度提供计算支持。无人机终端主要完成巡检数据的初步处理,边缘计算节点进行深度学习推理、故障识别、巡检数据筛选,云端服务器进行全局优化计算,生成最优巡检与调度方案。计算资源分配涉及任务分解、数据流转、计算负载均衡。边缘计算节点负责低延迟任务,减少数据传输开销,提高故障识别时效性。云端服务器进行全局最优调度计算,结合历史巡检数据与当前故障信息,优化设备排遣方案。无人机巡检数据借助5G网络实时上传,边缘计算节点完成初步识别,筛选高置信度故障图像,减少数据传输压力,提高识别效率。实时调度机制结合无人机巡检数据与电网SCADA数据,动态调整抢修资源分配,保证设备合理调度。调度策略采用强化学习算法,智能体根据巡检数据和抢修任务状态实时决策设备调度方案,基于历史数据训练深度神经网络,提高调度效率。强化学习优化调度决策的核心在于动态调整调度策略,使得抢修任务执行时间最短,资源利用率最高^[5]。联合优化模型与实时调度机制协同工作,提高配电抢修的响应速度,降低设备调度成本,增强电网故障处理能力。

5 仿真实验与性能评估

5.1 仿真环境与试验参数设置

无人机巡检与设备调度协同优化策略的性能验证依赖于高精度仿真实验环境。实验平台包括无人机飞行控制系统、巡检数据处理系统、深度学习推理引擎、调度优化算法模块,以及云边端协同计算框架。实验数据来源于实际配电网巡检任务记录,包括历史故障分布、无人机巡检影像、电网SCADA监测数据以及抢修任务执行记录。实验环境配置有四旋翼无人机模拟器、带红外成像与可见光摄像头的巡检数据模拟模块,边缘计算服务器搭载NVIDIA Jetson AGX Xavier处理器,云计算服务器搭载Intel Xeon 32核CPU,GPU采用NVIDIA Tesla V100。仿真平台构建基于Gazebo无人机仿真环境,算法实现采用Python与TensorFlow,调度优化采用强化学习

与遗传算法融合模型。实验采用不同算法组合进行对比,分析优化策略对巡检效率、故障识别准确率、设备调度优化程度的影响。

5.2 结果分析与应用场景验证

仿真试验结果表明,无人机巡检与设备调度协同优化策略显著提升了抢修任务执行效率,缩短了抢修响应时间,提高了巡检数据的利用率。在100组实验任务中,优化策略比传统独立优化模式巡检时间缩短15.3%,故障识别准确率提升3.8%,设备调度响应时间缩短21.5%,整体抢修时间缩短17.9%。故障识别精度结果表明,基于YOLOv5与ResNet-50的目标检测模型可准确识别故障类别,结合SCADA数据进行异常分析提升了识别准确率。设备调度优化结果表明,强化学习与遗传算法融合模型相较于传统规则调度方法提升了设备调度效率,减少了资源分配不均问题。无人机巡检数据与SCADA系统数据融合后,设备调度优化策略可依据巡检数据调整抢修任务分配,提高了抢修任务的精准度。实验结果验证了联合优化策略在提升配电网抢修效率方面的价值,为智能化无人机巡检与设备调度协同优化提供了理论支撑与工程应用参考。

6 结语

综上,本研究通过优化无人机巡检任务规划与飞行路径,构建云边端协同计算框架,提升了巡检数据处理效率;同时结合SCADA数据优化抢修任务决策,增强了调度方案的实时适应能力,结果验证了协同优化策略的有效性,提高了抢修任务的响应速度。

参考文献

- [1] 俞敏锋,何玉明,钱瑀枫.配电变压器应急抢修通用型连接装置研制[J].农村电工,2024,32(11):35-36.
- [2] 曹德琰.操作杆式绝缘跳线在10kV配电架空线路带电抢修作业中的应用[J].科技与创新,2024(20):185-187+190.
- [3] 余志文,黎皓彬,陈志伟,等.基于图模型的配电系统抢修预案综合研判方法[J].微型电脑应用,2024,40(5):141-144.
- [4] 贾晓鹏.迎难而上 一展“锋”范——记国家电网有限公司工人先锋号国网林州市供电公司配电抢修一班[J].河南电力,2024(5):24-25.
- [5] 刘世杰.架空配电线路故障抢修优化策略[J].大众用电,2024,39(1):47-48.