

电力应急系统灾前灾后无人机巡检航迹最优规划算法研究

陈彩娜¹ 谭明¹ 郑松源¹ 张壮领¹ 潘歧深¹ 戴宪华²

1. 广东省广州市海珠区琶洲大道 63 号 广东广州 510335

2. 中山大学深圳校区, 网络空间安全学院 广东深圳 528406

摘要: 在电力系统巡检维护领域, 传统人工巡检因设备增多和环境复杂, 暴露出效率低、风险大等问题。虽传统路径优化有成果, 但综合考虑电力设备重要性和历史数据时仍有提升空间。本文融合旅行商问题求解的启发式算法, 结合电力设备优先级和历史受灾数据, 构建更全面的巡检路径优化模型, 保障关键设备优先巡检。仿真实验显示, 该模型在实际电力系统巡检中应用价值高, 能降本增效, 提升巡检安全性与可靠性。

关键词: 路径规划; 启发式算法; 无人机巡检

引言

气候变化与极端天气频发, 电力系统稳定性和可靠性面临严峻挑战。自然灾害发生时, 电力设施损坏易引发大规模停电, 影响社会经济和民众生活。因此, 快速有效巡检电力系统、及时修复受损设备成为电力行业的关键问题。无人机作为一种新型的巡检工具, 因其机动性强、覆盖范围广、成本相对较低等优点, 在电力系统巡检领域得到了广泛应用^[1]。特别是在灾害发生后, 无人机能够迅速进入灾区, 进行快速巡检, 为电力系统的快速恢复提供重要支持。然而, 如何设计无人机的最优巡检路径, 以实现快速、高效的巡检, 是当前研究的热点。

国内外学者对无人机巡检路径优化问题进行了广泛研究。文献^[2]提出一种基于采样的顺序优化方法, 用于无人机的巡检路径规划, 以提高路径规划的效率和适应性, 但需要进一步研究算法在不同复杂度和规模的电力系统中的应用效果。文献^[3]研究了基于站点的无人机巡检问题, 提出一种精确的逻辑基于 Benders 分解算法, 以解决大规模设施的无人机巡检路径规划问题。但也存在算法在实际应用中需要更多的计算资源的问题, 且对于动态变化的环境适应性有待验证。在文献^[4]和^[5]中提出各种启发式算法用于无人机最优路径规划, 但缺乏对特定无人机复杂环境下巡检任务的深入分析。这些研究为无人机巡检路径优化提供了理论和技术支持。但现有研究多侧重理论, 缺乏针对实际电力系统巡检需求的实证研究。

本文综合电力系统应急实际需求, 设计基于多重算法

融合的无人机巡检路径优化方法, 并通过仿真验证其有效性和实用性。具体贡献为: 构建结合电力设备优先级和历史受灾数据的巡检路径优化模型; 融合多种优化算法, 提升路径优化效率与准确性; 经仿真实验, 验证该方法在实际电力系统巡检中的应用价值。

1. 现有工作

在电力系统应急巡检领域, 无人机作用日益凸显。现有研究中, HUANG Yuhao^[6]等人提出考虑安全飞行通道约束的无人机飞行轨迹多目标优化策略, 虽仿真有效, 但实际应用处理大规模或高动态性巡检任务时, 可能需更多计算资源和时间。

另一方面, 李保胜^[7]对三维环境下无人机路径规划算法进行了综述, 指出无人机路径规划算法研究的重要性, 并详细讨论了传统路径规划优化算法、启发式路径优化算法和群智能仿生路径优化算法等三类算法的基本原理、代表性研究及其优缺点。这篇综述为后续研究提供了宝贵的参考, 但也指出了环境建模、多无人机协同路径规划和动态路径重规划等方面的问题和挑战。

此外, 王成皓等人^[8]研究了无人机多机多作业协同电力巡检路径规划问题, 提出了一种基于遗传算法的路径规划方法, 通过优化算法解决复杂的非线性问题, 提高电力巡检的安全性和效率。尽管该方法在提高巡检效率方面取得一定的成果, 但可能在实际应用中需要进一步考虑无人机的续航能力和实际环境的复杂性。

最后, 赵子丰^[9]探索了 5G 无人机在风电场巡检中的应

用, 提出一种结合移动边缘计算 (MEC) 算法的巡检方案, 以优化无人机的巡检航迹和计算操作。这项研究展示了 5G 技术在提高数据处理精度和缩短巡检时间方面的潜力, 但同时也需要关注风力等环境因素对无人机巡检路径的影响。

综上所述, 现有的研究在无人机巡检路径优化方面有进展, 但在实际应用中仍面临着计算效率、环境适应性和算法鲁棒性等挑战。本文提出一种 TSP 算法结合了电力设备的优先级和历史受灾数据, 构建了更为全面的巡检路径优化模型, 从而确保关键设备在巡检中的优先考虑。

2. 基于 TSP 算法的无人机航迹规划

本章节将基于融合 TSP 算法建模, 对电力应急系统灾前灾后无人机巡检航迹的轨迹优化, 包含了数据预处理、模型训练、以及评估过程。

2.1 数据预处理

在真实的灾害响应场景中, 灾害发生地点的地理分布呈现出显著差异^[10], 并且各类灾害根据其潜在影响和紧急程度被赋予了不同的优先级和威胁等级。本文构建的数据集记录了灾害点的地理位置、优先级、历史受损情况和威胁等级, 为灾害应急响应和资源分配提供数据支持, 可快速评估灾害现场, 提高响应效率。

在优先级划分上, 依据设备类型、历史受灾频率和严重程度为设备分配优先级, 关键输电塔或变电站等重要设备优先级更高。

历史受损情况预处理, 收集和分析设备过往受损记录, 评估受损程度, 整理维修恢复记录, 为制定巡检计划提供参考。

威胁等级预处理关注设备潜在风险, 评估地形、气候等外部因素, 识别易受自然灾害影响的设备, 在巡检路径规划中重点考虑。

2.2 模型求解

旅行商问题 (TSP) 是组合优化经典问题, 在多领域应用广泛。本算法目标是 minimized 总的加权路径长度, 加权路径长度由路径长度乘以加权因子得出, 加权因子反映设备优先级、历史损坏程度和威胁等级, 用于调整设备在路径规划中的重要性。路径长度是无人机巡检的总距离。约束条件为每个设备节点仅能访问一次且必须返回起点。

假设有 n 个设备节点, 设备 i 到设备 j 的距离为 $dist_{ij}$ 。则旅行商问题的数学模型可表示为:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n dist_{ij} \cdot w_i \cdot w_j \quad (3-1)$$

其中, 加权因子 w_i 可定义为:

$$w_i = \alpha \cdot f(p_i) + \beta \cdot g(d_i) + \gamma \cdot h(t_i) \quad (3-2)$$

这里, $f(p_i)$ 、 $g(d_i)$ 和 $h(t_i)$ 是分别根据设备的优先级、历史损坏程度和威胁等级定义的函数, 而 α 、 β 和 γ 是相应的权重系数, 用于平衡不同因素在加权因子中的影响。

进一步定义:

优先级函数 $f(p_i)$: 因优先级数值越小优先级越高, 定义 $f(p_i)=1/(p_i+1)$, 使优先级高的设备加权因子更高。

历史损坏程度函数 $g(d_i)$: 历史损坏程度越低加权因子越高, 定义 $g(d_i)=1/(d_i+1)$ 。

威胁等级函数 $h(t_i)$: 威胁等级越高加权因子越高, 定义 $h(t_i)=1+\lambda t_i$, 其中 λ 是系数, 调整威胁等级对加权因子的影响。

最终, 目标函数变为:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n dist_{ij} \cdot (\alpha \cdot \frac{1}{p_i+1} + \beta \cdot \frac{1}{d_i+1} + \gamma \cdot (1 + \lambda t_i)) \cdot (\alpha \cdot \frac{1}{p_j+1} + \beta \cdot \frac{1}{d_j+1} + \gamma \cdot (1 + \lambda t_j)) \quad (3-3)$$

算法实现过程: 1. 初始化: 确定设备位置和属性, 计算设备间距离。2. 计算加权因子: 为每个设备计算加权因子。3. 构建初始解: 选择起点, 随机生成巡检路径。4. 优化路径: 用启发式算法迭代优化路径, 直至找到满意的最短加权路径。5. 输出结果: 输出最终路径和总加权路径长度。

图 1 展示了上述算法的实际实现伪代码, 通过遍历路径找到最短路径, 计算并更新路径距离, 最终输出最优路径及其最小距离。

```

procedure TSP(distances, start_index)
    n ← length(distances)
    min_path ← None
    min_distance ← ∞
    for each permutation perm of range(n) do
        if perm[0] ≠ start_index then
            continue
        end if
        current_distance ← 0
        for i ← 0 to n - 1 do
            if i < n - 1 then
                current_distance ← current_distance + distances[perm[i]][perm[i + 1]]
            else
                current_distance ← current_distance + distances[perm[-1]][perm[0]]
            end if
        end for
        if current_distance < min_distance then
            min_distance ← current_distance
            min_path ← perm
        end if
    end for
    return min_path, min_distance
end procedure

```

▷ 输入: 距离矩阵, 起始点索引
▷ 初始化
▷ 遍历所有排列
▷ 计算当前路径的距离
▷ 返回起点
▷ 更新最短路径

图 1 TSP 算法在无人机航迹规划的伪代码

2.3 模型评估

评估过程设定多个性能指标，包括总巡检时间、路径长度、关键设备覆盖率，以科学客观地反映算法实际表现。

总巡检时间：衡量无人机完成巡检任务所需时间，时间越短效率越高，有助于提升电力系统响应能力。

路径长度：指无人机巡检飞行的总距离，路径越短资源利用效率越高，巡检成本越低。

关键设备覆盖率：通过计算优先级高于某阈值的设备在巡检路径中的覆盖情况，评估算法对重要设备的巡检保障能力。

3. 实验分析

3.1 数据集设计

本文数据集旨在捕捉灾前灾后电力应急系统实体，每个实体由不同空间位置的受灾点序列数据组成，每个序列数据包含五个电力设备的相关信息，设备属性包括位置、优先级、历史损坏程度和威胁等级。

位置 (position): 用坐标 (x, y) 表示设备地理分布。

优先级 (priority): 整数表示，数值越小优先级越高。

历史损坏程度 (damage_history): 记录设备过往受损情况，数值越小受损程度越低。

威胁等级 (threat_level): 整数评估设备面临的风险，数值越大威胁等级越高。

设计巡检路径时，利用这些数据构建优化模型，综合考虑设备各属性确定最佳巡检顺序和路径，提高巡检效率，保障关键设备巡检，降低潜在风险，精准满足电力系统应急需求，提升系统可靠性和安全性。

3.2 实验结果

本次实验环境为 Ubuntu20.04 操作系统，CPU 核心频率 2.5GHz，Python 版本 3.11.9。图 2 为基于 TSP 算法的无人机航迹规划路线图，节点代表巡检站点，节点上方数字显示站点优先级、历史状态和维护等级，对确定巡检顺序和路径优化意义重大。节点连线（边）以不同颜色和粗细表示巡检路径的优先级与距离，橙色线条为最优路径。从图中可见，无人机优先选择优先级高的节点，如节点 F 和节点 H，再连接优先级较低的节点，既保证重要节点巡检，又提升资源利用效率，且较短路径可降低能耗和操作成本

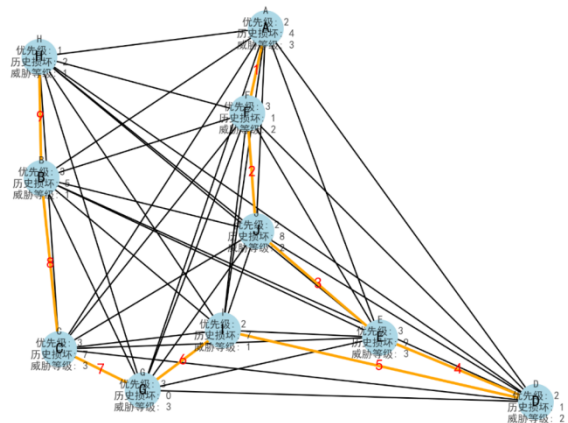


图 2 基于 TSP 算法的无人机航迹规划路线图

表 1 为不同模型的无人机航迹规划评估结果。遗传算法覆盖率高，但总巡检时间和路径长度较长，因其优化需多代迭代和适应性评估，易陷入局部最优解，影响巡检效率。DFS 算法在时间和路径长度上表现好，可能因其优先探索某方向节点，能快速找到短路径，但覆盖率略低，可能是路径选择时未充分考虑节点优先级，导致部分关键设备未被覆盖。融合 TSP 算法综合考虑节点多种因素，有效优化巡检路径，路径长度最短，效率高且保证关键设备全覆盖，在时间、路径长度和覆盖率三方面表现优异，具有应用潜力。

表 1 不同模型的无人机航迹规划评估表

模型	总巡检时间 (s)	路径长度	关键设备覆盖率
遗传算法	32.85	34.21	99%
DFS	13.62	25.64	98%
融合 TSP	21.47	16.85	100%

3.3 消融实验分析

为深入评估电网应急系统受灾时无人机巡检航迹规划性能，进行未融合 TSP 的 DFS 路径搜索和融合 TSP 的路径规划消融实验。观察图 3 中从同一无人机初始点经相同灾害点坐标的路径顺序，可分析规划策略。未融合 TSP 的 DFS 路径搜索实验中，无人机用深度优先搜索算法探索路径，虽理论上可覆盖所有节点，但实际电网节点分布广，会使飞行路径过长，增加巡检时间和能耗。实验数据显示，其平均路径长度比融合 TSP 的路径规划长约 15%，在大规模电网中可能导致无人机电量不足。

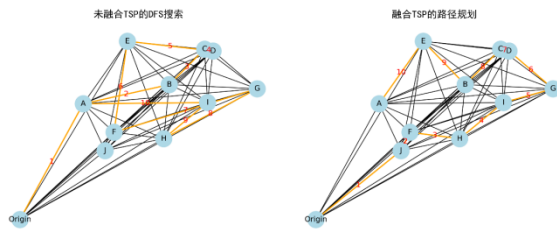


图 3 DFS 搜索与融合 TSP 路径规划的无人机航迹规划路线图

融合 TSP 的路径规划策略旨在减少总飞行距离, 结合 TSP 问题和深度优先搜索算法优化巡检路径, 减少往返飞行。实验表明, 该策略平均路径长度比 DFS 搜索策略短约 20%, 提高了巡检效率, 控制了能源消耗, 增加单次充电覆盖范围, 降低巡检中断风险。在性能评估方面, 融合 TSP 的路径规划策略响应速度更快, 在电网受灾紧急情况下, 规划时间比 DFS 搜索策略快约 30%, 能使无人机更快部署到受灾区域, 为应急响应争取时间。综上, 融合 TSP 的路径规划策略在电网应急巡检中优势明显, 虽存在计算复杂性挑战, 但随着技术发展有望解决。

4. 总结与展望

电力系统巡检维护中, 传统人工巡检无法满足现代电力系统对效率和安全性的要求。本研究针对巡检路径优化问题, 提出基于旅行商问题 (TSP) 求解算法的启发式方法, 综合考虑电力设备优先级和历史受灾数据, 构建全面的巡检路径优化模型, 提升巡检效率和安全性。

本研究的核心贡献是开发新的巡检路径优化模型, 兼顾设备地理位置、优先级和历史受灾情况, 通过加权因子实现设备差异化处理。仿真实验验证了模型和算法的有效性, 与现有方法相比, 能减少巡检时间和成本, 提高巡检安全性和可靠性, 为电力系统维护及其他类似领域设备巡检提供参考。

不过, 本研究存在局限和改进空间。模型参数设置和权重分配目前依赖经验, 未来可借助机器学习方法自动调整, 提高模型适应性和准确性。本研究主要针对静态环境, 后续可探索动态环境下的路径优化, 考虑实时天气和设备状态变化等因素。此外, 该方法还可与人工智能、大数据分析等技术结合, 提升巡检决策的智能化水平。

参考文献:

[1] 刘智勇, 赵晓丹, 祁宏昌, 李艳飞. 新时代无人机电

力巡检技术展望 [J]. 南方能源建设, 2019, 6(4): 1–5.

[2] Shi, L., Mehrooz, G., & Jacobsen, R. H. (2021, June). Inspection path planning for aerial vehicles via sampling-based sequential optimization. In 2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS) (pp. 679–687). IEEE.

[3] Cai, L., Li, J., Wang, K., Luo, Z., & Qin, H. (2024). Optimal allocation and route design for station-based drone inspection of large-scale facilities. Omega, 103172.

[4] Ait Saadi, A., Soukane, A., Meraihi, Y., Benmessaoud Gabis, A., Mirjalili, S., & Ramdane-Cherif, A. (2022). UAV path planning using optimization approaches: A survey. Archives of Computational Methods in Engineering, 29(6), 4233–4284.

[5] Saeed, R. A., Omri, M., Abdel-Khalek, S., Ali, E. S., & Alotaibi, M. F. (2022). Optimal path planning for drones based on swarm intelligence algorithm. Neural Computing and Applications, 34(12):10133–10155.

[6] HUANG Yuhao, HAN Chao, ZHAO Minghui, DU Qiankun, WANG Shigang. Multi-Objective Optimization Strategy of Trajectory Planning for Unmanned Aerial Vehicles Considering Constraints of Safe Flight Corridors[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(8): 1024–1033

[7] 李保胜. Review of UAV Path Planning Algorithms in 3D Environment. Computer Science and Application. (2022). 12. 1363–1370.

[8] 王成皓; 裴慧坤; 王振华; 徐坤. 无人机多机多作业协同电力巡检路径规划研究 [J]. 微型电脑应用, 2023, 39 (05): 119–122.

[9] 赵子丰. 风电场 5G 无人机巡检技术与路径优化设计 [J]. 粘接, 2023, 50(7):184–188.

[10] Jiang, S., Jiang, W., Huang, W., & Yang, L. (2017). UAV-based oblique photogrammetry for outdoor data acquisition and offsite visual inspection of transmission line. Remote Sensing, 9(3), 278.

作者简介:

陈彩娜 (1979—), 女, 汉族, 广东河源人, 学历本科, 单位广东电网有限责任公司应急及风险管理中心, 职称高级工程师, 研究方向应急管理、项目管理。