

基于动态路由优化与无线充电的配电网络 无人机评估方法

郑悦¹, 王勃²

(1. 国网天津市电力公司, 天津 300074; 2. 天津思极科技有限公司, 天津 300010)

摘要: 随着电力网络在灾难性事件后的重要性不断增加, 快速、精确评估电力网络的损伤变得至关重要。无人机因其空中灵活性和自主性, 成为电力网络评估的有效工具。提出一种基于无线充电与动态路由优化的配电网络无人机评估方法, 以提高评估效率并确保评估过程中无人机的持续运行。设计了一种结合多目标混合整数线性规划的优化模型, 以动态确定无人机的最优飞行路径和速度, 从而最大化数据收集效率并最小化评估所需时间。此外, 模型考虑了无人机在飞行过程中通过无线充电补充电力, 以确保其能够完成整个网络的评估任务。通过基于一个包含 77 个节点和 73 条线路的电力网络仿真实验, 验证了所提方法的有效性, 结果表明该方法能够显著提升电力网络评估的效率与准确性。

关键词: 配电网络; 无人机; 动态路由优化; 无线充电

A UAV-based evaluation approach for distribution networks integrating dynamic route optimization and wireless charging

ZHENG Yue¹, WANG Bo²

(1. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300074, China; 2. Tianjin Siji Technology Company, Tianjin 300010, China)

Abstract: As the importance of power networks increases in the aftermath of catastrophic events, rapid and accurate assessment of network damage has become critical. Unmanned aerial vehicles (UAVs), owing to their aerial flexibility and autonomy, have emerged as effective tools for power network inspection. This study proposes a UAV-based evaluation method for distribution networks that integrates wireless charging and dynamic route optimization to improve assessment efficiency and ensure continuous UAV operation. An optimization model is developed based on multi-objective mixed-integer linear programming (MILP) to dynamically determine the UAVs' optimal flight paths and speeds, thereby maximizing data collection efficiency while minimizing the time required for inspection. In addition, the model incorporates wireless energy replenishment during flight to ensure UAVs can complete the entire network evaluation. Simulation experiments conducted on a distribution network with 77 nodes and 73 lines validate the effectiveness of the proposed approach. The results demonstrate that the method significantly improves the efficiency and accuracy of power network damage assessment.

Keywords: distribution network; UAV; dynamic route optimization; wireless charging

0 引言

随着极端气候、自然灾害等突发性事件频发，电力基础设施面临前所未有的韧性挑战。配电网作为电力系统的重要组成部分，其运行状态直接关系到社会各领域的正常运转与应急恢复能力^[1-3]。在灾害发生或设备老化情况下，快速、准确地获取电网组件的运行状态，对电网运维与决策具有重要意义。传统人工巡检方式在大范围、高风险或复杂地形环境下效率低、响应慢，难以满足现代配电网对高频次、高精度巡检的需求。近年来，无人机（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）因其灵活性、自主性和低成本等优势，逐渐成为电力巡检的重要补充手段^[4-8]。然而，在覆盖范围广、电池续航受限以及任务调度复杂等因素影响下，如何提升无人机在配电网中执行评估任务的效率与持续性，仍是当前研究面临的核心难题之一。

针对无人机在电力网络评估中的调度优化问题，已有学者开展了大量研究。文献[9-10]以路径规划算法为核心来最小化巡检距离，提升任务效率；文献[11-12]引入多架无人机协同策略，设计混合遗传算法优化任务分配；文献[13-15]将强化学习、模糊控制等方法应用于无人机自主决策，提升局部环境适应性。但这些方法大多忽略了任务时间与节点优先级的差异性，未能充分结合电网结构特性进行评估资源的差异化分配。同时，现有研究普遍假设无人机在执行任务期间电量充足或任务可中断充电，未深入考虑无人机在任务连续执行中电力补给的实际需求。此外，部分工作将配电网简化为平面图，忽略了其树状结构对路径设计与任务调度造成的约束，难以适应实际工程应用中的复杂性与实时性要求。

为此，本文提出一种融合无线充电机制与动态路由优化的无人机电力网络评估方法。该方法通过构建考虑充电行为与任务优先级的混合整数线性规划（Mixed-Integer Linear Programming, MILP）模型，系统性地优化无人机的巡检路径、飞行速度及电量管理策略；同

时，设计基于配电网树状结构的初始解构造算法，提升模型收敛效率。进一步地，引入弹性导向线路优先级指标（Resilience-Oriented Line Prioritization, ROLP），实现对电力线路差异化的健康评估。

1 配电网无人机评估方法设计

为系统化展示所提方法的整体流程，本文设计了无人机网络损害评估框架，如图1所示。该框架以无人机为核心执行单元，通过动态计算线路优先级，优化飞行路径与速度，实时更新数据传输及健康状态，形成一个闭环的电力网络巡检与评估系统。

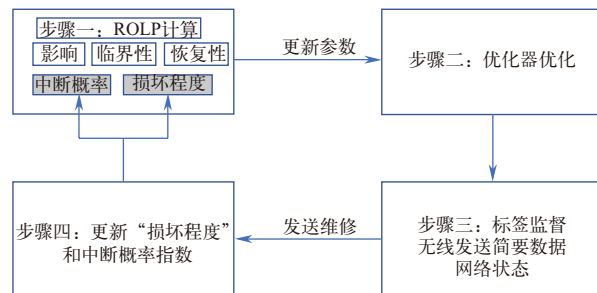


图1 无人机网络损害评估框架

Fig. 1 Framework for UAV-based power network damage assessment

1) 依据网络初始数据，计算电网各组成部分的线路优先级指标。根据每条电力线路的优先级指标值及其物理长度，推算完成评估所需的时间。对于存在较高损伤风险的线路，在巡检过程中应适当降低飞行速度，以实现更细致的检测。

2) 通过求解优化模型，确定无人机执行电力线路损伤评估任务的最优飞行路径、飞行速度及作业时间安排。

3) 无人机根据优化方案起飞并执行任务。在巡检过程中，通过标准化的工业无线通信技术，将小尺寸健康状态数据无线传输到控制中心。实时传输的简要数据可用于辅助网络状况分析，并在必要时迅速调度维修人员前往现场处理。完成任务后，无人机返回任意一个控制中心，上传详尽的巡检数据，同时进行电池充电。

4) 控制中心基于无人机上传的详尽数据, 识别电网中潜在的异常情况。

通过不断重复以上四个步骤, 能够持续动态评估电网整体健康状况。

在电网巡检过程中, 需要充分考虑不同电力线路在功能属性和物理特性上的差异, 合理安排评估优先级。对于损伤风险更高、在电网功能中具有关键作用的线路, 应优先安排细致巡检。为此, 本文提出基于弹性特性构建的线路优先级评估指标体系。

线路的评估主要从五个方面进行考量: ①根据当前健康状况, 预测线路在设定时间窗口内发生中断的可能性; ②结合历史运行数据, 估算线路的耐久性与累积损伤水平; ③分析线路中断对整个电力网络供能能力的影响程度, 其中主干馈线上的线路通常影响更大; ④评估线路故障后恢复至正常状态所需的时间, 恢复速度越快, 弹性越强; ⑤衡量线路的临界性, 即在发生故障后重新配置负荷、恢复供电的难易程度, 临界性越高, 线路的重要性越突出。

电力线路的临界性体现了在线路受损时, 电网通过替代路径重新分配负荷, 降低整体损失的能力。综合上述弹性因素, 基于电网特性, 提出了用于量化每条电力线路健康状况的线路优先级指标, 计算公式为

$$R_{\alpha}(L_{\alpha}, \varphi_{\alpha}, I_{\alpha}, tR_{\alpha}, C_{\alpha}) = \frac{1}{D} \left(\int_{t_0}^{t_s} I_{\alpha} \varphi_{\alpha} L_{\alpha} (1 - Q_{\alpha}(t)) dt + C_{\alpha} \varphi_{\alpha} L_{\alpha} (tE_{\alpha} - tS_{\alpha}) + \int_{t_s}^{t_R} I_{\alpha} \varphi_{\alpha} L_{\alpha} (1 - Q_{\alpha}(t)) dt \right) \quad (1)$$

式中, $R_{\alpha}(L_{\alpha}, \varphi_{\alpha}, I_{\alpha}, tR_{\alpha}, C_{\alpha})$ 为电力线路 α 的弹性导向优先级指标; L_{α} 为电力线路 α 的长度; φ_{α} 为电力线路 α 的估计损伤水平; I_{α} 为电力线路 α 中断对电网整体损耗的影响程度; tR_{α} 为电力线路 α 恢复至正常运行所需的时间; C_{α} 为电力线路 α 的临界性; D 为电网的总负荷需求; t_0 为线路中断发生的初始时刻; t_s 为电网在中断后完成优化调度以缓解影响的时间点; $Q_{\alpha}(t)$ 为 t 时刻线路 α 的累

积修复率函数。

电网中断后的系统性能变化过程如图2所示。

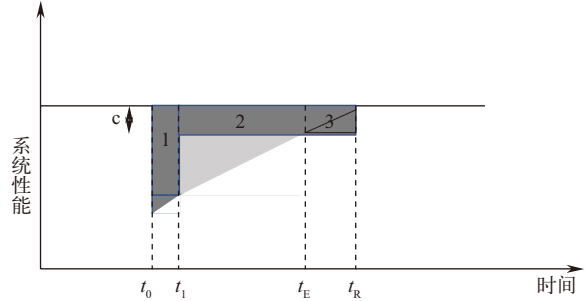


图2 系统弹性响应的时间分段表示

Fig. 2 Time-segmented system resilience response

在图2中, 中断发生于时间 t_0 , 随后电网进入修复与调整阶段。在时间 t_s , 通过调度优化初步缓解了中断造成的影响; 在时间 t_E , 受损组件部分恢复, 且具备一定功能, 但距离完全恢复仍需持续修复, 直至时间 t_R 。对应于式 (1), 分子部分由三项组成, 分别对应上述三个时间段内估算的网络损失总量。每条电力线路的ROLP指数通过尺度归一化处理, 形成单一的优先级指标。

2 配电网无人机评估的优化模型与算法设计

2.1 无人机巡检任务MILP建模方法

本文构建了一种MILP模型, 用于求解无人机在执行电力线路巡检任务中的最优飞行路径与飞行速度。在该模型中, 二元变量 $x_{\alpha\beta}$ 表示路径选择关系, 若无人机在弧 α 完成扫描后, 紧接着转向有向弧 β , 则 $x_{\alpha\beta}=1$; 否则为0。考虑到每条电力线具有不同的巡检优先级, 模型对每条弧线对应的无人机飞行速度 V_{α} 进行优化, 且满足非负性约束, 即 $V_{\alpha} \geq 0$ 。

模型的目标函数旨在最小化各电力线段实际扫描时间与其根据ROLP指数所设定的理想评估时间之间的偏差。值得注意的是, 无人机飞行速度的变化将直接影响其电池的充放电速率, 速率越大, 能耗越大。电池电量的变化计算式为

$$b_{\alpha} = \begin{cases} 1 - \tau_{\alpha} \theta_d d_s \\ b_{\beta} - \tau_{\alpha} \theta_d d_s \\ \min \{1, b_{\beta} - \tau_{\alpha} \theta_d + \tau_{\alpha} \theta_c \varphi(V)\} \end{cases} \quad (2)$$

式中, b_{α} 为无人机完成对弧 α 扫描后的电池电量; τ_{α} 为无人机在弧 α 上的飞行时间; θ_d 为单位时间内的电池放电速率; θ_c 为单位时间内的电池充电速率; $\varphi(V)$ 为充电效率函数, 反映飞行速度对充电效果的影响; b_{β} 为无人机在上一条弧 β 扫描后所剩余的电量。

在前两种情形下, 无人机从控制中心起飞或返回控制中心的过程中无须进行充电。若充电效率可近似表示为飞行速度的线性函数, 则项 $\tau_{\alpha} \theta_c \varphi(V)$ 可重写为 $\tau_{\alpha} \theta_c (B_0 + B_1 V_{\alpha}) = \tau_{\alpha} \theta_c B_0 + \tau_{\alpha} \theta_c B_1 V_{\alpha}$ 。由于该表达式为速度的线性函数, 因此可构造为线性约束, 从而确保整体优化问题可通过MILP模型进行求解。

该模型由目标函数构成。其核心目标是在限定的评估时间内, 高效完成整个电力网络的损伤评估任务。模型中引入变量 ρ_{α} , 用于衡量每条电力线实际评估时间与期望评估时间之间的偏差, 取值范围为0~1。若 $\rho_{\alpha}=0$, 表示对该线路的巡检时间完全符合预期; 反之, 数值越接近1, 说明偏离程度越大。为兼顾全局效率与局部极值控制, 本文将目标函数设定为平均偏差与最大偏差的凸组合, 旨在同时最小化整体偏差总量与单条线路的最严重偏差。目标函数为

$$\min \left\{ \begin{aligned} &\omega \sum_{\alpha \in \mathcal{P}} \frac{\rho_{\alpha}}{|\mathcal{P}|} + (1-\omega) \rho_{\max} \\ &\rho_{\alpha} \leq \rho_{\max}, \alpha \in \mathcal{P} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, ρ_{α} 为电力线路 α 实际评估时间与期望评估时间之间的偏差程度, 取值范围为0~1, 其数值越大, 表示偏差越严重; $\rho_{\max}$ 为所有线路中最大偏差的值, 用于刻画评估过程中最不符合预期的线路情况; ω 为目标函数中平均偏差与最大偏差之间的权重系数, 取值范围为0~1, 控制两者在优化目标中的相对重要性; $\mathcal{P}$ 为需评估的电力线路集合; $|\mathcal{P}|$ 为该集合中的线路总数, 用于对平均偏差项进行归一化处理。

$$\sum_{\alpha \in A} x_{\alpha\beta} = \sum_{\alpha \in A} x_{\beta\alpha}, \beta \in \mathcal{P} \quad (4)$$

$$\sum_{\beta \in \mathcal{P}} \sum_{\alpha \in A_{\beta}} x_{\alpha\beta} = 1 \quad (5)$$

式中, A 为电网中所有有向弧的集合; $\mathcal{P}$ 为允许充电的弧段集合。

式(4)用于约束无人机在进入某条电力线弧段后, 必须继续沿网络结构离开该弧段, 确保飞行路径的连贯性。而式(5)规定, 只有当两条弧段在方向上相连, 即弧段 α 的起点与弧段 β 的终点位于同一节点时, 无人机才允许在完成弧 β 的扫描后立即飞行至弧 α 。在此情形下, 二值参数 $x_{\alpha\beta}$ 取值为1, 表示两条弧段可以顺利衔接, 否则为0。

2.2 初始可行解生成算法设计

无人机控制中心设置在电网附近的特定位置。完成发射点的选定后, 无人机经由属于起始弧集合的路径从控制中心飞往电网中的指定节点, 执行巡检任务。在完成预定评估后, 无人机沿属于返回弧集合的路径飞回任意一个控制中心, 实现任务闭环。

在单次飞行任务中, 无人机仅沿同一方向对电弧进行一次性扫描。符合以下两类条件的分支可直接确定路径: 一是由仅具有度数为1或2的节点构成的分支; 二是未直接连接至控制中心的孤立分支。对于此类分支, 无人机需从与其连接的节点出发, 依次访问该分支内部的所有节点, 最终到达叶节点, 再沿原路径返回至起点。

基于电力网络的这一结构特性, 本文设计了算法, 用于生成一个初步可行解, 为后续的精确优化求解提供优质的初始点。算法流程如图3所示。

首先通过确定起始弧与返回弧来构建初步路径。由于电力网络整体为生成树结构, 因此对于任意弧对 α 与 β , 均存在一条连接路径。在确定起始弧至返回弧路径 $U_{\alpha\beta}$ 后, 将该路径中的所有弧段存储于列表 A^v , 随后再将树中其他分支逐步扩展加入列表。列表 A^v 中包含的有向弧用于初步确定无人机的飞行路线, 并计算路径选择变量 x 的取值。

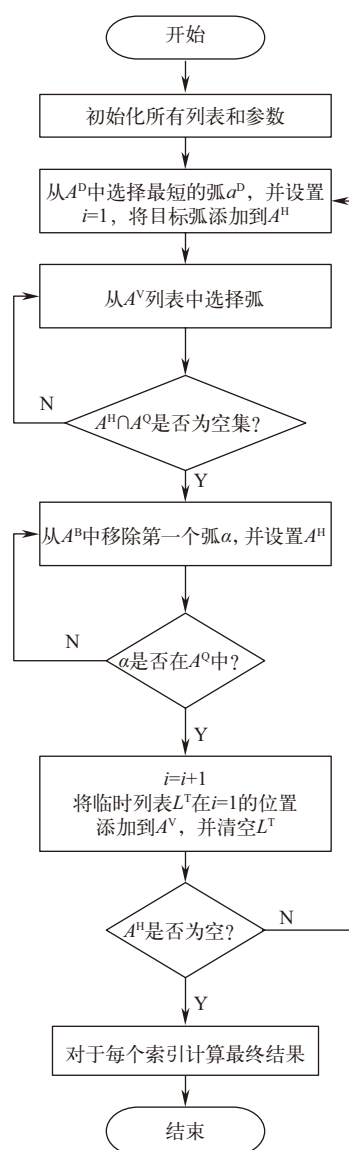


图3 初始可行解生成算法

Fig. 3 Initial feasible solution generation algorithm

A^V 为已访问的弧的列表； A^H 为需要访问的弧的列表； A^B 为待访问的弧的列表； L^T 为临时列表； i 为计数器； a^L 为最后通过的弧； A^Q 为可以在通过 a^L 后立即通过的弧的集合。

3 仿真结果分析

3.1 不同线路评估特性与速度调控分析

实验选取一个由77个节点和73条电力线路构成的电力网络作为测试案例，以验证所提优化模型的有效性及其求解方法的实际适用性。在该网络中，额外引入五个不属于原电网结构的潜在

无人机控制中心，作为任务执行过程中无人机的发射、回收和数据收集站点。在每轮操作中，无人机从当前控制中心出发，完成预定的网络评估任务后，可降落至任意一个控制中心。任务结束后，采集到的巡检数据被上传至控制中心数据库，并完成电池更换，以准备下一次飞行。

采集到的数据可用于动态修正每条电力线路的中断可能性与估计损伤程度，从而更新ROLP指数和相应评估时间。在优化目标函数中，假设最大偏差与平均偏差的权重相等，即设定权重系数 $\omega=0.5$ 。不同线路性能评估结果见下表。

表 不同线路性能评估结果

Tab. Performance evaluation results of different power lines

线路	一	二	三	四
长度 /m	1 049	145	205	800
预估时间 /s	213.3	33.1	57.6	762.6
ROLP 指数	4.92	4.38	3.56	1.49
评估时间 /s	155.1	33.1	57.6	554.6
评估时间偏差	0.27	0	0	0.27
平均速度 /(m/s)	6.76	4.38	7.12	2.88

实验结果显示，具备较高ROLP值且线路较长的电力线，其评估耗时往往超过长度较短的同类型线路。因此，在保证巡检质量的前提下，采用更高速度对这类线路进行评估，有助于节省整体任务时间。

以线路一为例，其ROLP指数为4.92，长度为1 049 m。由于该线路被判定为具有较强弹性，无人机以6.76 m/s的高速执行巡检，仅用155.1 s即完成任务，但仍与期望评估时间存在约27%的偏差。相较之下，线路二的长度显著较短，ROLP指数为4.38，无人机在期望时间范围内完成了检查任务。线路三位于死胡同式分支结构中，因此需被重复扫描一次，即无人机需飞至终点后再返回。尽管该线路长度仅为205 m，ROLP值为3.56，相对较低，但由于线长较短，仍能在规定的时间范围内完成评估任务。线路四展现了不同特性，其ROLP指数较低，仅为1.49，但长度较长。为满足该线路较低弹性对应

的高精度巡检需求，无人机需以较慢速度飞行，最终耗时约9 min完成评估。

3.2 总作业时间限制对评估偏差的影响分析

期望的评估时间限制对无人机巡检任务的执行效果具有显著影响。一方面，较短的总作业时间限制要求无人机更频繁地返回控制中心进行数据传输与电池更换，虽然带来了额外的停靠次数，但能够实现对高优先级、损伤程度严重线路的快速响应，有利于提升电网风险处置的及时性；另一方面，适当放宽作业时间限制，给予无人机更多时间在各条电力线路上进行深入巡检，有助于满足ROLP线路的高精度要求，从而提升全网评估的全面性与准确性。

在不同总作业时间约束条件下，目标函数值、最大评估偏差和平均评估偏差的变化趋势如图4所示。

由图4可以观察到，随着总作业时间从1.5 h逐步延长至3.5 h，三个指标均呈现出明显下降趋势，其中最大偏差降幅最为显著，表明随时间延长调度系统对极端劣化线路的适应能力增强。当作业时间为1.5 h时，所有评估需求无法在约束条件下完成，模型无可行解；当作业时间达到3.5 h时，无人机能够在所有线路上按预设时间完成巡检任务，偏差几乎趋近于零，系统调度效率达到最优状态。

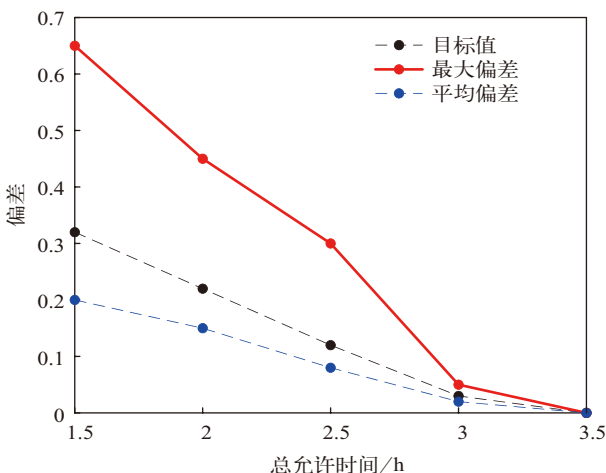


图4 不同作业时间设置下评估偏差变化

Fig. 4 Variation of evaluation deviations under different operation time settings

4 结束语

本文针对配电网中电力线路损伤评估效率不高、任务连续性差等问题，提出了一种基于动态路由优化与无线充电的无人机巡检方法。通过构建MILP模型，实现了对无人机飞行路径、飞行速度及电量变化的协同优化，有效提升了作业的智能化水平。同时，结合电网的树状结构特性，设计了启发式初始解生成算法，为模型提供优质初始点，显著提高了求解效率和稳定性。在77个节点、73条线路的典型电网实例中进行的仿真结果显示，所提方法在保证覆盖率和精度的前提下，显著降低了任务成本与时间开销。相比不具备无线充电能力的传统方案，任务完成时间从252 min缩短至150 min，提升效率达32%~40%。此外，当作业时间限制在3.5 h以上时，模型能够满足全部线路的期望评估时间，进一步验证了该方法的可行性和实用价值。

参考文献

- [1] 刘忠堂. 智能故障定位技术在输配电网中的应用[J]. 电子技术, 2025, 54(1): 326-327.
- [2] 刘春平. 配电网故障定位与诊断的现代技术及应用[J]. 大众标准化, 2024(17): 126-128.
- [3] 徐江泽. 基于大数据的配电网故障监测与诊断研究[J]. 电气技术与经济, 2024(8): 348-350.
- [4] 徐金琨, 刘天立, 孙磊, 等. 无人机多任务移动巡检作业平台设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2025(2): 42-47.
- [5] 韩鹏宇. 无人机技术在电力系统输电线路检测中的应用[J]. 信息记录材料, 2025, 26(4): 108-110.
- [6] 张琬婷. 输配电线路无人机自主飞行技术及其在复杂环境中的应用[J]. 自动化应用, 2025, 66(6): 121-124.
- [7] 张云. 基于无人机搭载红外相机的输电线路热监测技术研究[J]. 技术与市场, 2025, 32(3): 92-94, 99.
- [8] 刘晓林, 孙亚鑫, 朱子轩, 等. 基于事件触发的

高压输电线路巡检无人机故障检测[J]. 电工技术, 2025(5): 120-124.

[9] 于彦鹏, 余墨多, 汤奇荣, 等. 面向城市应急物资配送的多无人机协同路径规划算法[J]. 控制与决策, 2025, 40(4): 1098-1106.

[10] 李海旺, 王澳强, 张世龙, 等. 面向屋顶巡检任务的无人机覆盖路径规划算法[J/OL]. 计算机工程: 1-12[2025-04-29].

[11] 聂铭涛, 刘颖珂, 程海峰, 等. 多无人机协同路径规划计算资源分配方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(4): 147-154, 161.

[12] 王书勤, 黄茜. 多基地无人机协同巡逻中目标优化覆盖研究[J]. 计算机仿真, 2025, 42(3): 55-60.

[13] 王辰, 魏才盛, 殷泽阳, 等. 考虑信道资源约束的多无人机航迹与通信策略协同规划[J/OL]. 航空

学报: 1-16[2025-04-29].

[14] 梁晨蕾, 罗贺, 蒋儒浩, 等. 机巢充电情形下无人机电力巡检路径规划的强化遗传算法[J/OL]. 计算机工程与应用: 1-15[2025-04-29].

[15] 姚金言. 基于智能优化算法的无人机路径规划与轨迹跟踪控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.

作者简介

郑悦（1982—），男，硕士，高级工程师，主要研究方向为配网建设与运行、无人机管理等。

王勃（1991—），男，硕士，工程师，主要研究方向为信息通信、基础资源共享、电力新技术应用等。

（收稿日期：2025-05-03）