

面向电力线路巡检的机巢协同电能优化方法

李方宇¹, 黄少坤¹, 方愿捷², 张伟亮²

(1. 国网巢湖市供电公司, 安徽 巢湖 238000; 2. 巢湖学院电子工程学院, 安徽 巢湖 238000)

摘要: 针对山区输电线路长距离巡检中无人机续航受限、机巢电能分配耦合的难题, 本文构建“机巢行驶-无人机充电-任务飞行”一体化能耗模型, 并首次将其转化为严格凸二次规划问题。通过辅助问题原理 (APP) 对跨区域耦合变量进行对偶分解, 设计低复杂度两级迭代算法, 实现机巢行驶路径与无人机充电策略的并行协同优化。在 25 座电塔的真实山区场景中, 实验结果表明: 所提方法在 100% 巡检覆盖率下, 可将系统总电能降低 12% 以上, 算法运行时间较主流方法缩短 35%, 同时提供“快速巡检”和“电池保护”两种可切换策略, 兼顾时效与电池寿命。研究为移动机巢与无人机的协同调度提供了理论依据和工程化实现途径。

关键词: 无人机巡检; 移动机巢; 电能优化; 辅助问题原理

Coordinated Energy Optimization of Mobile Nests for Power-Line Inspection

Fangyu Li¹, Shaokun Huang¹, Yuanjie Fang², Weiliang Zhang²

(1. State Grid Chaohu Electric Power Supply Company, Chaohu Anhui 238000, China;

2. School of Electrical Engineering, Chaohu University Chaohu Anhui 238000, China)

Abstract: To address the limited endurance of unmanned aerial vehicles and the coupled energy allocation among mobile nests during long-distance inspection of transmission lines in mountainous areas, this paper proposes an integrated energy model that simultaneously accounts for “nest movement, unmanned aerial vehicle charging, and mission flight.” For the first time, the model is reformulated as a strictly convex quadratic program. By applying the auxiliary problem principle to perform dual decomposition of the cross-regional coupling variables, a low-complexity two-level iterative algorithm is designed to jointly optimize the driving path of the mobile nest and the unmanned aerial vehicle charging strategy in parallel. Experiments on a real mountainous scenario with 25 transmission towers demonstrate that, under 100% inspection coverage, the proposed method reduces the total system energy by more than 12% and cuts the algorithmic runtime by 35% compared with state-of-the-art methods. Two switchable modes—“fast inspection” and “battery protection”—further balance timeliness and battery lifespan. The study provides both theoretical foundations and a practical implementation route for coordinated scheduling of mobile nests and unmanned aerial vehicles.

Keywords: unmanned aerial vehicle inspection; mobile nest; energy optimization; auxiliary problem principle

0 引言

随着我国电力基础设施的快速发展, 已经建成了世界上规模最大的输电网络。然而, 许多输电线路位于偏远山区或复杂地形区域, 传统的人工巡检方式面临着诸多挑战, 如危险性高、工作效率低、成本高昂等问题。在此背景下, 无人机巡检作为一种高效、安全的替代方案应运而生^[1]。无人机能够快速到达指定区域, 完成巡检任务并实时传输数据, 极大地提高了输电线路巡检的效率和准确性, 成为保障电力系统安全运行的重要手段之一^[2]。

然而, 无人机大多依赖机载电池供电, 其能量密度有限, 导致无人机连续工作时间较短^[3]。这在一定程度上限制了无人机在长距离、长时间巡检任务中的应用^[4]。为了克服无人机续航瓶颈, 一种常见思路是布设无人机机巢, 使其在任务间隙就近完成快速充电或电池更换, 从而延长有效作业时间^[5]。机巢可以为无人机提供自动充电、数据传输和存储等功能, 从而实现无人机的全天候工作^[6]。机巢的引入为无人机真正实现自主化和智能化巡检提供了可能, 但同时也带来了新的挑战, 如机巢的空间布局选址^[7]、无人机与机巢的协同控制^{[8][9]}等问题。

目前, 关于无人机机巢的研究还主要集中在固定机巢的设计与应用上^{[5][6][10]}。固定机巢虽然可以为无人机提供稳定的充电和数据传输支持, 但在输电线路巡检的实际场景中, 巡检任务通常是线性的, 且巡检线路较长。在这种情况下, 固定机巢的建设效果并不理想, 其覆盖范围有限, 难以满足长距离巡检任务的需求^[11]。相比之下, 移动机巢更具优势。将机巢安装在车辆上, 由车辆携带机巢和无人机协同工作, 不仅可以扩大无人机的作业范围, 还能根据任务需求灵活调整位置^{[12][13]}。这种机巢与无人机的协同工作模式, 为解决无人机能量受限问题提供了一种新的思路, 并且能够更好地适应输电线路巡检的实际需求^[14]。然而, 移动机巢本身携带的电能同样有限, 且机巢行驶与无人机作业之间存在能量耦合: 机巢行驶得越远, 留给无人机充电的能量就越少; 反之亦然。因此, 如何在机巢-无人机系统中统筹分配和调度电能, 成为决定整体巡检效率的关键瓶颈。

本文针对面向机巢协同应用场景的电能优化方法展开深入研究。通过分析无人机与机巢的协同工作机制, 基于辅助问题原理, 提出一种有效的电能优化策略, 以提高无人机在输电线路巡检中的工作

效率和续航能力。本文的研究不仅具有重要的理论意义，还对实际应用中的无人机巡检系统设计和优化具有重要的指导价值。通过优化无人机与机巢的协同工作模式，本文期望能够为电力巡检领域提供一种更加高效、可靠的解决方案，以推动无人机技术在电力巡检中的广泛应用。

1 问题描述及系统模型

如图 1 所示，本文考虑的是一类包含多个输电线路及塔杆的输电线路巡检任务，任务由一架无人机和一辆车载移动机巢共同完成，搭载移动机巢的车辆只能沿已有道路行驶。假设车辆和无人机均消耗电能，如何对电能进行优化分配，使得该无人机和对应的移动机巢能配合完成跨越更多塔杆的巡检任务。或者表述成：完成相同巡检任务的前提下，消耗的电量最少。

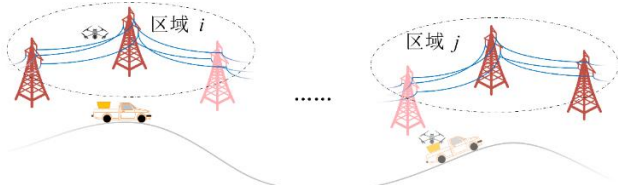


图 1 机巢协同线路巡检

首先，将机巢-无人机系统的电能调度建模为一个集中式优化问题，目标是在满足能量平衡与物理约束的前提下，最小化系统总电能消耗（含无人机飞行能耗、机巢行驶能耗及充电能耗）。假设机巢以恒定功率 P_c 进行恒流充电，并忽略涓流阶段，则无人机在第 i 个停靠点获得的补充电能满足 $E_{c,i} = \eta P_c \Delta t_i$ 。给定初始运行点，该问题可通过矩阵形式表述为如下凸二次规划问题：

$$\min_X \frac{1}{2} Y^T Y \quad (1)$$

式中， Y 和 X 分别是节点电能消耗和决策变量的可行性约束集合，并有

$$Y \in [Y_{\min}, Y_{\max}] \quad (2)$$

$[Y_{\min}, Y_{\max}]$ 是 Y 节点电能的允许变化范围， Y_{\min} 为无人机完成一次往返所需最小能量， Y_{\max} 为无人机电池额定容量。

这是一个提供全局最小值的严格凸约束二次规划问题。研究过程中，忽略不同高度的起降消耗区别，认为每次起降都消耗固定电能，并假设移动机巢在移动过程中是匀速行驶，电能消耗是平均、线性的。

2 问题分析与求解

为了有效解决该问题，将移动机巢整个路径分为 N 段，每段配合无人机组成一个电能消耗区，所有的塔杆和输电线路均落入一个电能消耗区内。显然，该条巡检线路上所有的塔杆和输电线路地位相同，因此可以视为一个去中心化的优化问题。对于这 N 个区域，分别有

$$\min_{X_i} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} Y_i^T Y_i \quad (3)$$

式中， $i=1,2,\dots,N$ ， Y_i 和 X_i 分别是对应于第 i 个区域的节点电能消耗和决策变量的可行性约束集合，并有

$$Y_i \in [Y_{i,\min}, Y_{i,\max}]$$

$Y_{i,\min}$ 为无人机完成第 i 次往返所需最小能量， $Y_{i,\max} \leq Y_{\max}$ 为无人机完成第 i 次往返需要的最大电能。需要注意的是，各个区域之间是存在耦合的，例如前一个区域电池剩余电能会影响后一个区域优化，因此有

$$Y_i = \gamma_{ii} Y_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N \gamma_{ij} Y_j \quad (4)$$

其中， γ_{ii} 和 γ_{ij} 代表权重。引入补充等式约束

$$\omega_{ij} = \gamma_{ij} Y_j$$

$$Z_i^T = Y_i^T \omega_{ij}$$

则可以得到矩阵形式

$$\min_{X_i} \sum_{i=1, \dots, N}^N \frac{1}{2} Z_i^T A_i Z_i \quad (5)$$

其中， $A_i = \begin{bmatrix} \gamma_{ii}^T \gamma_{ii} & \gamma_{ii}^T \mathbf{1}_N^T \\ \mathbf{1}_N \gamma_{ii} & \mathbf{1}_N \mathbf{1}_N^T \end{bmatrix}$ 。令 $e_{ii}^T = [\mathbf{0}_{X_i}^T \quad e_N^T]$ ， $e_{ij}^T = [-\gamma_{ij} \quad \mathbf{0}_N^T]$ ， $D_i = \text{diag}[\mathbf{1}_{X_i}^T \quad \mathbf{1}_N^T]$ ，则约束可以表示为 $Z_{i,\min}^T = [X_{i,\min}^T \quad -\infty_N^T]$ ， $Z_{i,\max}^T = [X_{i,\max}^T \quad +\infty_N^T]$ 。

$$e_{ii}^T Z_i + e_{ij}^T Z_j = 0$$

$$Y_{i,\min} \leq c_i^T Z_i \leq Y_{i,\max}$$

$$Z_{i,\min} \leq D_i Z_i \leq Z_{i,\max}$$

为了克服严格凸性的不足，建立如下两级迭代方程：

$$\min_{Z_i} ALF = \sum_{i=1}^N \left(ALF_i(Z_1, \dots, Z_N, \lambda_{12}, \dots, \lambda_{(N-1)N}) \right) \quad (6)$$

其中，

$$ALF_i = \frac{1}{2} Z_i^T A_i Z_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \lambda_{ij} (e_{ii}^T Z_i + e_{ij}^T Z_j) + \frac{c}{2} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N (e_{ii}^T Z_i + e_{ij}^T Z_j)^2 \quad (7)$$

并受约束于

$$Y_{i,\min} \leq c_i^T Z_i \leq Y_{i,\max}$$

$$Z_{i,\min} \leq D_i Z_i \leq Z_{i,\max}$$

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ij}^* + \rho (e_{ii}^T Z_i + e_{ij}^T Z_j)$$

由于区域耦合变量维度低，本文采用辅助问题原理(APP)对耦合项进行对偶分解，将原问题拆分为 N 个可并行求解的子问题。辅助问题原理的优势即是复杂的优化问题分解成多个子问题，进而协调优化各个子问题，实现决绝整个问题的目标。在协调各控制区对应子问题的同时解决整个问题。

在每个步骤中，APP 都最小化一个新的目标函数，该函数由以下部分组成：

(1) 辅助函数 $AF = \sum_{i=1}^N K_i(Z_i)$ 对于分解变量是

严格凸且可加的；

(2) 对其进行一阶线性化

$$LAF = \sum_{i=1}^N LA_i(Z_i, \dots, Z_N, \lambda_{12}, \dots, \lambda_{(N-1)N});$$

(3) 前一步 $AF = \sum_{i=1}^N K_i(Z_i)$ 的一阶导数。

新的辅助最小化问题根据

$$\min_{Z_i} \sum_{i=1}^N K_i(Z_i) + \sum_{i=1}^N \left\langle \varepsilon \left(ALF_i(Z_1, \dots, Z_N, \lambda_{12}, \dots, \lambda_{(N-1)N}) \right)' \Big|_{Z_i} Z_i, \lambda_{ij}^* - (K_i(Z_i))' \Big|_{Z_i}, Z_i \right\rangle \quad (8)$$

并受

$$Y_{i_{\min}} \leq c_i^T Z_i \leq Y_{i_{\max}}, Z_{i_{\min}} \leq D_i Z_i \leq Z_{i_{\max}}, i=1, \dots, N$$

约束，并有拉格朗日乘数因子

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ij}^* + \rho(e_{ii}^T Z_i + e_{ij}^T Z_j), i, j=1, \dots, N, i \neq j$$

其中， $\varepsilon \geq 0$ 是非负常数， $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 代表标量积。

选择辅助函数

$$AF = \sum_{i=1}^N K_i(Z_i) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} Z_i^T K_i Z_i \quad (9)$$

其中， K_i 是待确定的正定矩阵。得到如下两级优化

$$\min_{Z_i} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} Z_i^T K_i Z_i + k_i^T Z_i \quad (10)$$

其中，

$$\begin{aligned} k_i^T &= \varepsilon (Z_i^{*T} A_i + b_i^T) \\ &+ \varepsilon \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left\{ \left[\lambda_{ij}^* + c(e_{ii}^T Z_i^* + e_{ij}^T Z_j^*) \right] e_{ii}^T \right. \\ &+ \left. \left[\lambda_{ji}^* + c(e_{jj}^T Z_j^* + e_{ji}^T Z_i^*) \right] e_{ji}^T \right\} \\ &- Z_i^{*T} K_i \end{aligned} \quad (11)$$

并受

$$Y_{i_{\min}} \leq c_i^T Z_i \leq Y_{i_{\max}}, Z_{i_{\min}} \leq D_i Z_i \leq Z_{i_{\max}}, i=1, \dots, N$$

约束，并有

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ij}^* + \rho(e_{ii}^T Z_i + e_{ij}^T Z_j), i, j=1, \dots, N, i \neq j$$

这样，对于每个区域 i ，都有

$$\min_{Z_i} \frac{1}{2} Z_i^T K_i Z_i + k_i^T Z_i \quad (12)$$

受

$$Y_{i_{\min}} \leq c_i^T Z_i \leq Y_{i_{\max}}, Z_{i_{\min}} \leq D_i Z_i \leq Z_{i_{\max}}, i=1, \dots, N$$

约束，以及

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ij}^* + \rho(e_{ii}^T Z_i + e_{ij}^T Z_j), i, j=1, \dots, N, i \neq j \quad (13)$$

上述优化过程可以用表 1 进行简洁表述。为便于表述，假设优化步骤为 h 和 $h+1$ 。

表 1 算法过程

- | | |
|---|--|
| 1 | 初始化计步器 $h=0, Z_i=0, \lambda_{ij}=0, i, j=1, \dots, N$; |
| 2 | 选择非负常数 ε, c, ρ 并确定接受阈值 τ ; |
| 3 | $h=h+1$; |
| 4 | 根据(11)式评估 k_i^T ; |
| 5 | 求解最小化问题(12),得到 $Z_i(h)$; |
| 6 | 对于 $i, j=1, \dots, N$, 计算 $e_{ii}^T Z_i(h)$ 和 $e_{ij}^T Z_j(h)$; |
| 7 | 不同分区之间交换 $e_{ji}^T Z_i(h)$ 和 $e_{ij}^T Z_j(h)$; |
| 8 | 根据(13)计算 λ_{ij} ; |
| 9 | 检查本次迭代与上次迭代之间是否小于接受阈值 τ , 大于则返回步骤 3, 小于则结束计算。 |

3 案例分析

以某山区中某区域作为巡检目标进行实验，如图 2 所示。该区域内包含 25 座电塔以及它们之间的输电线路。该区域主要为山区，地形复杂、交通不便。由于不考虑高度差带来的误差，为了便于分析和运算，使用 UTM 地理坐标投影将其转化为二维坐标，如图 3 所示。载运移动机巢的车辆沿临近道路行驶，基于道路可达性及塔杆密度，采用 K-means 算法对地理坐标进行聚类（簇数 $K=6$ ），确保每个子区域内的塔杆可通过单次无人机起降覆盖。将整个巡检区域划分为 6 个子区域，如图 3 中点划线区域所示，分别包含 5 座、4 座、5 座、5 座、3 座和 3 座塔杆。

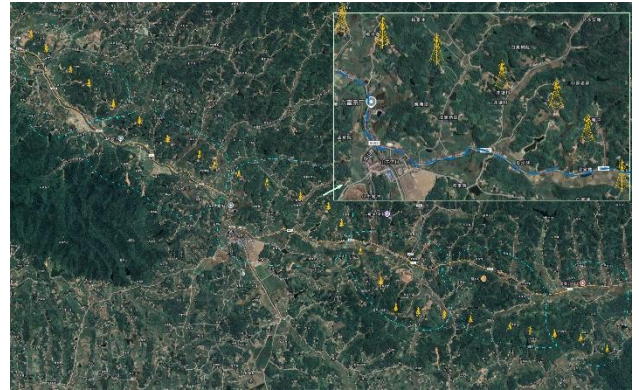


图 2 实验区域

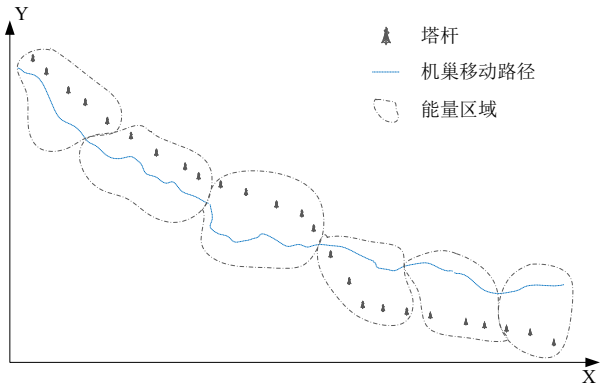


图3 待检塔杆分布情况与区域

利用本文提出的方法，在接受阈值不同的情况下 ($\tau=0.1$ 和 $\tau=0.05$)，生成快速巡检和电池保护两种巡检能量规划策略，对应的巡检路径如图 4 所示。快速策略通过增大机巢单次行驶里程换取更短时间停靠，导致无人机电量谷值更低；而“电池保护策略”以 8% 额外运行时间换取 13% 电能节约和 2 倍电池容量安全裕度，适配高价值设备巡检。

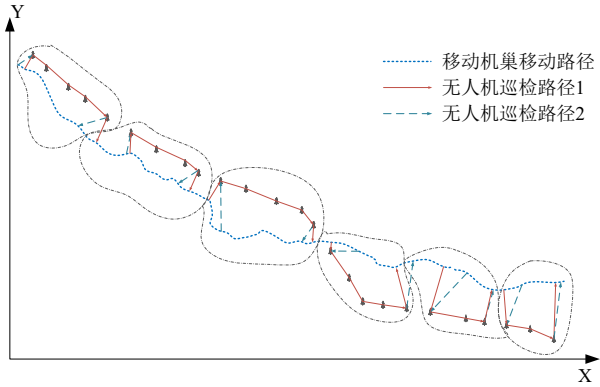


图4 无人机巡检路径

对应的无人机电池容量变化如图 5 和图 6 中蓝色虚线所示。为了说明本文方法的优势，利用顺序二次规划 (SQP) 算法作为基准，生成图 5 和图 6 所示的红色实线。可以看出，在相同的巡检任务下，SQP 策略的电池最低容量仅为 10% 左右，而本文方法可提升至 25% 左右，显著降低了过放风险。

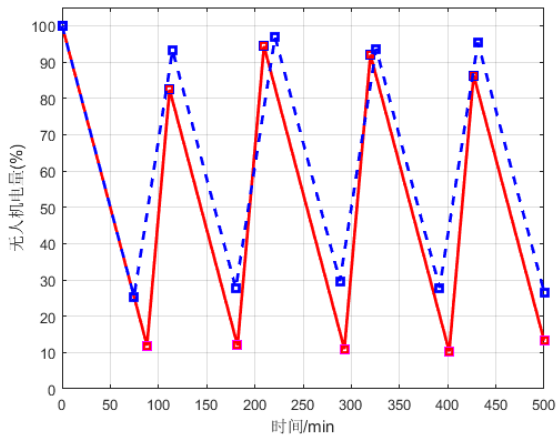


图5 无人机电池容量变化

为了进一步说明所提方法的优势，分四种不同

任务规模 (塔杆数 $N=15、20、25、30$) 运行了本文算法、SQP 算法和遗传算法 (GA)。四种情况的运算时间分别如图 6 所示，每种情况均依次为本文算法、SQP 算法和 GA 算法。可以看出，本文方法在四种情况下运算时间都是最短，平均比 SQP 缩短 35%，比 GA 缩短 52%。

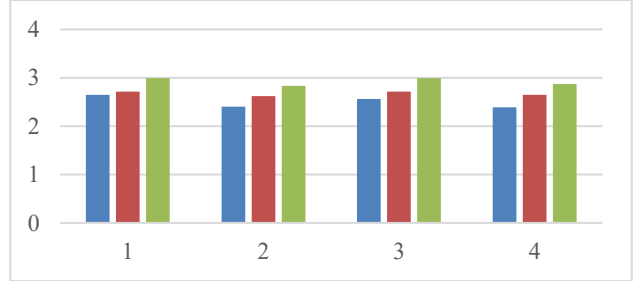


图6 不同算法下运算效率对比

综上所述，本文面向输电线路巡检场景，提出基于 APP 的低复杂度电能协同算法。案例结果表明，该方法在保证巡检覆盖率 100% 的前提下，可节约系统总电能 12% 以上，算法运行时间优于对比方法 35%，为山区长距离无人机巡检提供了可行的工程方案。

4 结论

本文提出的 APP-分解电能优化策略突破了固定机巢在长距离线性巡检中的覆盖瓶颈，验证了“以计算换能量”的可行性：通过少量机巢行驶里程的调整即可换取显著的电能节约与电池安全裕度提升。算法结构简洁、易于并行实现，可直接嵌入现有车载机巢控制系统。未来工作将引入风速、高程及动态电价等因素，进一步拓展模型在多机型、多机巢协同及灾后应急巡检中的适用性。

参考文献：

- [1] 焦嵩鸣,陈雨溪.改进 CBBA 算法的风电场无人机群巡检任务分配[J].太阳能学报,2024,45(10):554-565.
- [2] 麦俊佳.输电线路巡检无人机巢配置部署与作业调度优化研究[D].华南理工大学,2024.
- [3] Hu Hongwei, Fu Zifeng, Liu Zhuang. Research on collaborative inspection key technologies for multi-UAVs and multi-nests[J]. AIP Advances, 2024, 14(6): 065208.
- [4] 刘茂丰.巡检无人机的智能机巢设计[D].南京信息工程大学,2021.
- [5] 黄祥,吴媚,王海楠,等.基于改进 ALNS 的无人机固定机巢电力巡检路径规划[J/OL].交通运输工程与信息学报,1-18[2025-07-10].https://doi.org/10.19961/j.cnki.1672-4747.2025.03.038.
- [6] 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[2025-07-10].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.tp.20241209.1544.012.html.
- [7] 戴永东,黄政,高超,等.多目标优化最低代价无人机机巢选址方法研究[J].重庆大学学报,2023,46(06):136-144.
- [8] 高云飞,胡钰林,刘鸣柳,等.多无人机输电线路巡检联合轨迹设计方法[J].电子与信息学报,2024,46(05):1958-1967.
- [9] Huang Zheng, Wang Hongxing, Tang Yiming, et al. A two-

stage location-allocation optimization method for fixed UAV nests in power inspection considering node failure scenarios[J]. *Sensors*, 2025, 25(4): 1089.

- [10] 黄郑,王红星,杜彪,等.基于固定机巢的输变配无人机智能巡检方法[J].*汽车安全与节能学报*,2024,15(05):670-679.
- [11] 卢峭峰,陈昌岭,许周,等.一种输变电多无人机协同智能巡检机巢的设计[J].*光源与照明*,2022,(11):182-184.
- [12] 李晋,何勇,董丽梦,等.电力监测无人机与移动机巢协同路径规划方法研究[J].*制造业自动化*,2023,45(10):151-157.
- [13] 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,(02):42-47.
- [14] Dai Jin, Gao Yunfei, Cai Chao, et al. UAV-enabled inspection system with no-fly zones: DRL-based joint mobile nest scheduling and UAV trajectory design[J]. *IEEE Access*, 2025, 13: 10844-10856.