

# 考虑需求和航程的无人机物流网络规划方法

文昊林 梁新 陈童 李玉祺

海军工程大学管理工程与装备经济系 武汉 430033

(1920191110@nue.edu.cn)

**摘要** 针对无人机航程受限,难以执行远距离运输任务的问题,提出了一种基于遗传算法的分段中继式无人机物流网络规划方法。该方法综合考虑物流需求和无人机航程限制,以最小化建设和运营成本为目标,通过设计网络连通性、评价指标和迭代目标3个判断回路,实现了无人机物流网络结构的智能优化。算法中引入了4种算子,有效控制了中继节点的数量和位置,使规划方案逐步逼近全局最优解。基于智能体仿真模型的验证结果表明,该方法构建的无人机物流网络能够经济高效地满足物流需求,尤其适用于城市长距离运输及偏远山区的网络规划场景。该方法为无人机物流网络的绿色、高效运营提供了创新性的解决方案。

**关键词** 网络规划;无人机;低空经济;航程受限

**中图分类号** TP391.9

## UAV Logistics Network Planning Method Considering Demand and Range

WEN Haolin, LIANG Xin, CHEN Tong and LI Yuqi

Department of Management Engineering and Equipment Economics, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

**Abstract** To address the challenge of limited drone range in executing long-distance transportation tasks, a segmented relay-based drone logistics network planning method is proposed, utilizing a genetic algorithm. This method comprehensively considers logistics demand and drone range limitations, aiming to minimize construction and operational costs. By designing network connectivity judgment loops, evaluation index judgment loops, and iterative objective judgment loops, it achieves intelligent optimization of the drone logistics network structure. The algorithm incorporates four operators that effectively control the number and location of relay nodes, enabling the planning solution to progressively approach the global optimum. Through the construction of an agent-based simulation model, it is demonstrated that the drone logistics network generated by this method can economically and efficiently meet logistics demand, particularly suitable for long-distance urban transportation or logistics network planning in remote mountainous areas. This method provides an innovative solution for the green and efficient operation of drone logistics networks.

**Keywords** Network planning, Unmanned aerial vehicle, Low-altitude economy, Range-constrained

随着电子商务的迅猛发展和城市化进程的加速,居民对物流服务的需求呈现持续增长态势。然而,传统物流网络正面临交通拥堵、环境污染和运营成本上升等严峻挑战。为应对这些挑战,无人机物流逐渐成为未来物流行业的重要发展方向。相较于传统配送方式,无人机配送能够有效规避地面交通拥堵问题,大幅缩短配送时间,满足消费者对即时配送的需求。此外,其在配送速度、运营成本、运输效率、安全性和环境友好性等方面的综合优势,使其在医疗急救物资运输、山区海岛配送等特殊场景中更具应用潜力。然而,现阶段无人机物流在实际应用中仍面临诸多挑战,如航程半径受限,电池续航能力不足,有效载荷较小,以及充电站可用性不足等,这些因素显著增加了物流网络规划的复杂性。

针对上述挑战,相关研究逐渐开始关注无人机的航程限制这一关键问题,其可被看作充电网络或通信网络的规划问题。研究者提出了多种充电桩布局方法,根据无人机充电需求和地理信息智能选择充电桩位置,以实现高覆盖率和高充电效率。例如,Chour等<sup>[1]</sup>使用智能体仿真为无人机充电提

出了新的建模框架。Elsayed等<sup>[2]</sup>开发了一种集成的多目标充电基础设施覆盖优化模型,其结合了无人机操作与建筑围护结构的太阳能利用。Li等<sup>[3]</sup>通过双层模拟退火算法完成网络拓扑和交通流均衡分配的迭代过程。在充电站位置规划方面,Sathaye<sup>[4]</sup>,Cavadas<sup>[5]</sup>,Yi和Bauer<sup>[6]</sup>等的研究涉及充电站的位置选择,Yang等<sup>[7]</sup>建议采用电池交换站模式,Wang等<sup>[8]</sup>考虑电池充电对无人机车物流配送模型进行了研究。这些研究主要以电动汽车为主,但方法可以借鉴到无人机充电网络的规划中。在极端情况下(如灾区救援),无人机还可作为移动通信基站来构建通信网络<sup>[9]</sup>。如Wang等<sup>[10]</sup>构建了一个通用的无人机中继网络模型,提出了一种基于Q-learning的无人机部署算法,构建节点数最少的无人机中继网络,并利用等距节点控制算法构建动态中继路径。Lu等<sup>[11]</sup>针对海岛无人机配送中继站规划问题进行了研究,Qu等<sup>[12]</sup>使用聚类和整数规划方法提出了物流无人机城市低空轴辐式网络设计方法。尽管现有研究已取得重要进展,但同时考虑航程限制与物流需求协同优化的网络设

通信作者:李玉祺(2220222060@nue.edu.cn)

计问题研究仍显不足。

本文针对该问题,提出了一种分段中继式的网络规划方法,通过遗传算法自适应地调整中继节点的数量和位置,并构建了基于智能体的无人机物流网络优化验证模型,验证了方法的有效性和适用性,为解决无人机航程受限条件下的网络规划问题提供了新的技术路径。

## 1 问题描述与数学模型

在航程受限的无人机物流网络规划问题中,网络拓扑结构优化是首要任务。该问题具有以下典型特征:

- 1) 必须考虑物流需求的空间分布;
- 2) 须严格满足无人机的最大航程约束;
- 3) 要求实现网络全局连通性;
- 4) 追求建设和运营成本最小化。

图1为中继节点规划问题的示意图。其中,绿色节点代表供给节点,红色节点表示需求节点,淡蓝色节点为中继节点。由于部分需求节点与供给节点之间的直线距离超出了无人机单次飞行的最大航程,需通过优化中继节点的空间配置来实现分段运输,使每条航线的长度都不超过无人机航程,且确保物流网络的整体连通性。

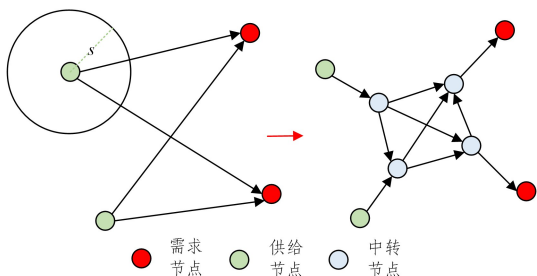


图1 中继节点规划问题的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the relay node planning problem

当需求和供给节点的距离超出无人机单航程限制时,需通过中继节点实现多跳运输。表1列出了问题的参数定义,包含符号及其含义。

表1 模型参数

Table 1 Model parameters

符号	单位	含义
$\alpha_i$	无	第 $i$ 个供给节点
$\beta_j$	无	第 $j$ 个需求节点
$\gamma_k$	无	第 $k$ 个中继节点
$m$	个	供给节点的数量
$n$	个	需求节点的数量
$o$	个	中继节点的数量
$[x_\theta, y_\theta]$	无	$\theta$ 节点的位置,可是供给点或需求点
$s$	km	网络中每段航线的距离限制
$L$	条	网络中航线的数量
$l_{i,j}$	km	网络中第 $i$ 个节点到第 $j$ 个节点的距离
$M$	无	物流需求矩阵
$M_{i,j}$	kg	需要由 $\alpha_i$ 供给节点运送到 $\beta_j$ 需求节点的货物量
$C_\gamma$	元	每个中继节点的建设和运营费用
$C_\delta$	元	每条航线的建设和运营费用
$C_\epsilon$	元	每千克货物每千米的运输费用
$C$	元	网络建设和运营的总成本

模型中做出如下假设:

1) 网络节点位置与物流需求分布:假设物流网络中存在  $m$  个供给节点和  $n$  个需求节点,其空间位置和物流需求如表2所列。

表2 供给节点和需求节点的参数信息

Table 2 Parameter information of supply node and demand node

需求节点	供给节点			
	$\alpha_1$ ( $x_{\alpha_1}, y_{\alpha_1}$ )	$\alpha_2$ ( $x_{\alpha_2}, y_{\alpha_2}$ )	...	$\alpha_m$ ( $x_{\alpha_m}, y_{\alpha_m}$ )
$\beta_1$ ( $x_{\beta_1}, y_{\beta_1}$ )	$M_{1,1}$	$M_{2,1}$	...	$M_{m,1}$
$\beta_2$ ( $x_{\beta_2}, y_{\beta_2}$ )	$M_{1,2}$	$M_{2,2}$	...	$M_{m,2}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\beta_n$ ( $x_{\beta_n}, y_{\beta_n}$ )	$M_{1,n}$	$M_{2,n}$	...	$M_{m,n}$

表2中,用  $\alpha_i$  和  $\beta_j$  分别代表第  $i$  个供给节点和第  $j$  个需求节点。供给节点  $\alpha_i$  的坐标为  $(x_{\alpha_i}, y_{\alpha_i})$ , 需求节点  $\beta_j$  的坐标为  $(x_{\beta_j}, y_{\beta_j})$ ,  $M_{i,j}$  代表需要由  $\alpha_i$  运送到  $\beta_j$  的货物量,整体的物流需求如下:

$$M = \begin{bmatrix} M_{1,1} & M_{2,1} & \dots & M_{m,1} \\ M_{1,2} & M_{2,2} & \dots & M_{m,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{1,n} & M_{2,n} & \dots & M_{m,n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2) 无人机性能约束:考虑无人机在满载情况下的最大续航能力,假设无人机挂载最大重量货物时的最大航程为  $s$  km。该参数由无人机性能决定,是网络规划的重要约束条件。

3) 成本构成:物流网络的总成本由3部分构成。(1) 中继节点建设成本:每个中转节点的建设费用为  $C_\gamma$  元(包括场地租赁、设备安装等固定成本);(2) 航线建设成本:每条航线的建设费用为  $C_\delta$  元(包括涵盖航线审批、导航设施等费用);(3) 运输运营成本:每千克货物每千米的运输费用为  $C_\epsilon$  元(包括能源消耗、维护等可变成本)。

4) 目标函数定义:无人机物流网络优化的目标为网络总成本  $C$  最低。总成本  $C$  可表示为:

$$C = C_\gamma \times o + C_\delta \times L + C_\epsilon \sum_{i \in [1, m], j \in [1, n]} l_{i,j} \quad (2)$$

## 2 规划方法

无人机低空物流网络设计的核心在于确定中继节点的最优位置,进而构建高效的运输路线。为此,采用基于遗传算法的智能优化方法,通过迭代调整中继节点的数量与空间分布,实现网络建设与运营成本的最小化。物流网络规划流程如图2所示,共分为3步。

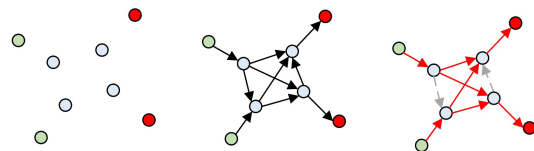


图2 物流网络规划方法

Fig. 2 Logistics network planning method

1) 基于遗传算法框架,设计中继节点优化方法(见图3)。该步骤是后续网络构建与路径优化的基础。

2) 根据确定的中继节点位置,遍历所有节点并连接航程限制范围内的节点对,形成初始网络拓扑结构(见图2(b))。

3) 在构建的网络中,计算所有供给节点至需求节点的最短路径(图2(c)中的红色线段),并标记实际使用的航线。未参与物流运输的冗余航线(图2(c)中的灰色线段)将被删除,以降低建设与运营成本。

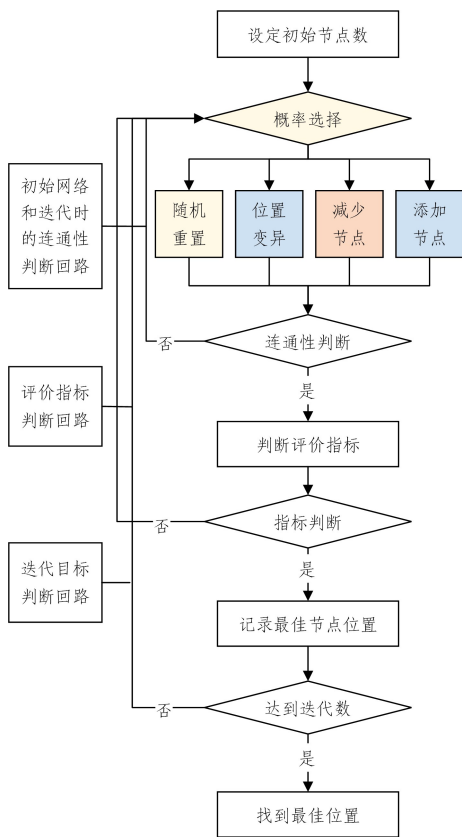


图3 中继节点优化方法

Fig. 3 Relay node optimization method

图3所示的算法通过4个算子、3个判断回路等关键设计实现了考虑航程限制的无人机物流网络规划目标,能够更好地避免规划结果陷入局部最优,自适应地调整中继节点的个数,并提高计算效率。

### 2.1 4个操作算子

设计4种算子以动态调整中继节点配置,每轮迭代根据概率参数选择操作。

1)全局重置算子:随机重置全部中继节点位置,避免陷入局部最优解。

2)单点变异算子:随机选择一个中继节点并调整其位置,通过局部搜索提升解的质量。

3)节点删减算子:随机移除一个冗余中继节点,降低网络建设成本。

4)节点增补算子:随机添加一个新节点,增强网络连通性(可能暂时增加成本)。

上述算子协同作用,使中继节点数量与位置自适应收敛至最优解。

### 2.2 3个判断回路

1)初始网络生成和迭代时的连通性判断回路:在生成初始网络及通过算子进行迭代时,网络可能处于非连通状态,无法满足物流网络的运作需求。该回路通过循环迭代自动调整中继节点的数量与位置,直至网络达到连通性要求。在此过程中,算法不计算网络评价指标,从而显著降低了计算开销。与传统方法相比,该连通性判断机制避免了冗余计算,提升了迭代效率,尤其在处理大规模网络时优势更为明显。

2)评价指标判断回路:当网络满足连通性条件后,规划方案进入评价指标判断回路。网络的评价指标为总建设与运营

成本 $C$ ,包括节点建设费用、航线运营费用(无人机采购、折旧和损耗费用)、物流运输费用(无人机能源消耗成本)。若网络评价指标更优,则更新最佳的中继节点数量和位置,并以此为基础进行后续迭代;否则,沿用历史最优解进入下一轮迭代。每次迭代通过随机选择算子进行操作。该机制通过动态保留最优解,避免算法陷入局部最优,同时随机算子增强了搜索的多样性。

3)迭代目标判断回路:当迭代次数达到预设阈值或网络规划目标满足要求时,算法终止,并输出记录的最佳中继节点配置方案。通过设置双重终止条件(次数与目标值),确保了算法的收敛性与实用性,避免了无效迭代。

3个判断回路相互嵌套,连通性判断回路通过后,仿真进入评价指标判断回路;若评价指标更优或迭代次数达标,则进一步触发迭代目标判断回路,最终输出较优的物流网络规划方案。这种分层判断结构能够平衡计算效率与解的质量,尤其在多目标优化场景下表现出稳定的收敛特性。

### 2.3 基于中继节点位置的运输方案规划方法

当中继节点的位置确定后,需要找到最优的运输方案。在网络中,使用最短路进行运输能够有效节省费用。算法中采用了Dijkstra算法来寻找供给点到需求点的最短路。当得到所有供给节点到需求节点的最短路之后,即可判断网络中的航线是否被使用。如果航线没有被使用,将会在网络中删除对应的航线,以节省网络的建设和运营费用。最后,基于优化后的物流网络结构,即可得到整个网络的建设和运营费用,具体可参照式(2)进行计算。

## 3 仿真模型

在Anylogic中使用智能体技术进行建模和仿真能有效提高模型的开发速度和系统模块化程度<sup>[13-14]</sup>,并验证本文的规划方法。

### 3.1 智能体设计

在仿真模型中设计了一种“节点”智能体,用于表示供给节点、需求节点和中转节点。将这3类节点看作一类智能体的原因在于:

1)计算网络参数时,算法能够更便捷地遍历各节点,对网络连通性进行判断,计算网络中需求节点到供给节点的最短路,并以此为基础计算网络的建设费用。这些操作在使用一种智能体时,能减少循环计算次数,且计算逻辑更简洁。

2)通过在“节点”智能体中设计“类型”参数表达网络节点的类型,此时仅需通过判断该参数的取值执行相关逻辑进行迭代即可。本智能体内部参数如表3所列。

表3 “节点”智能体参数

Table 3 “Node” agent parameters

符号	类型	说明
$x$	double	节点的横坐标
$y$	double	节点的纵坐标
$type$	string	节点的类型,取值可以为“供给”“需求”“中转”

### 3.2 迭代流程设计

在Anylogic模型的Main智能体中,利用状态图设计迭代流程。迭代流程参照了图3中基于遗传算法的节点优化方法,迭代流程设计如图4所示。

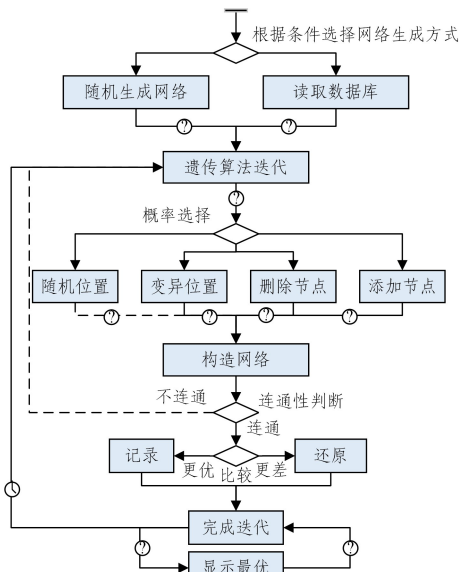


图 4 仿真迭代流程

Fig. 4 Simulation iteration process

为了使用实际数据对网络结构进行优化,仿真模型支持随机生成供给节点和需求节点,也支持从数据库读取这两类节点的信息。

在生成初始网络后,开始使用如图 2 所示的算法进行迭代。模型中每轮迭代时,将生成算子的选择概率参数。选择概率参数处于 $[0, 0.1)$ 时,算法将为网络添加新的中继节点,该节点的位置为随机生成;选择概率参数处于 $[0.1, 0.2)$ 时,将删除随机一个节点;选择概率参数处于 $[0.2, 0.95)$ 时,将把某一节点随机变到一个新的位置;选择概率参数处于 $[0.95, 1]$ 时,重置所有节点位置,将所有中继节点变更到新的随机位置上。

#### 4 算例验证

网络中假设有 5 个需求节点和 5 个供给节点。无人机航程限制为  $s=20\text{ km}$ ,假设节点的建设费用和运营费用为  $C_y=100$  元/个;航线建设和运营费用为  $C_s=50$  元/条;运输费用为  $C_e=1$  元/( $\text{km} \times \text{kg}$ )。网络中的供给节点和需求节点信息如表 4 所列。

表 4 节点参数表

Table 4 Parameter table of nodes

需求节点	供给节点					总计
	$\alpha_1$ (483.1, 168.878)	$\alpha_2$ (167.366, 345.954)	$\alpha_3$ (558.134, 194.16)	$\alpha_4$ (414.763, 230.699)	$\alpha_5$ (153.37, 513.047)	
$\beta_1$ (370.493, 598.353)	300	300	100	200	400	1300
$\beta_2$ (522.275, 65.244)	200	400	300	300	100	1300
$\beta_3$ (721.348, 550.181)	200	250	150	150	300	1050
$\beta_4$ (450.23, 383.936)	100	350	150	350	120	1070
$\beta_5$ (100.235, 88.34)	150	50	200	400	150	950
总计	950	1350	900	1400	1070	5670

在表 4 中,100 即表示 10 km。根据物流需求绘制物流流向如图 5 所示,其中绿色代表供给节点所在位置,红色代表需求节点所在位置。

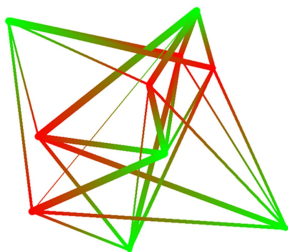


图 5 物流网络货物流向图

Fig. 5 Logistics network cargo flow diagram

优化实验设定为迭代 10000 次,得到的网络建设和运营总费用变化曲线如图 6 所示。

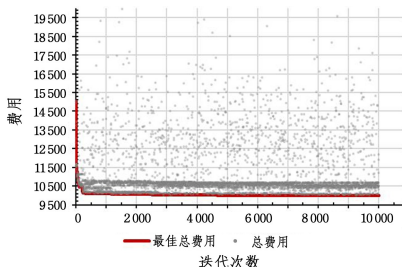


图 6 网络建设和运营总费用

Fig. 6 Total cost of network construction and operation

图 6 中,迭代 10000 次后,最终得到的网络建设和运营总费用为 9914.654 元。优化后的网络结构如图 7 所示。

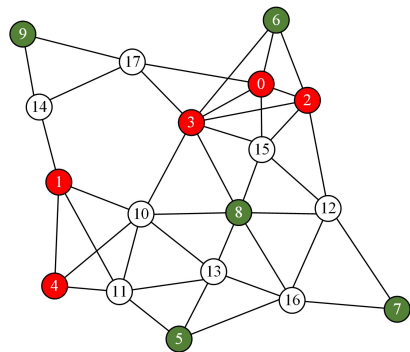


图 7 优化后的物流网络结构

Fig. 7 Structure of optimized logistics network

图 7 中,优化后物流网络结构中继节点的坐标如表 5 所列。

表 5 中继节点坐标位置

Table 5 Relay node coordinate positions

序号	横坐标	纵坐标
1	276.51	362.03
2	517.95	296.18
3	151.91	247.22
4	611.43	472.41
5	295.03	130.10
6	234.26	507.92
7	415.32	470.27

从图7可以发现,算法寻找到的中继网络位置是比较合理的。这体现在中继节点位置数量较少且使物流网络处于连通状态,恰好关联了需求节点和供给节点。这些较少的节点和运输路线使得整个网络成本更低,这也能在图6中得到证实。图6中,物流网络成本相较于初始生成网络的16000余元,建设和运营成本在优化后下降将近37.5%,说明了该算法能够有效地降低物流网络的建设和运营成本。通过观察图7发现,基于遗传算法的网络结构迭代优化,使每次迭代的新节点能够有效满足网络结构的连通性,使成本控制在最优成本的附近,保证了每次网络结构迭代的有效性,提高了最优物流网络结构的搜索效率。通过变更网络规模或者区域范围进行仿真优化实验,可发现本方法也能找到较优的网络规划方案,减少物流网络的建设成本。

**结束语** 本文考虑物流需求和无人机的航程限制,为无人机低空物流网络设计提供了一种规划方法,能够通过建设中继节点为无人机提供充电和换电服务,提高了无人机物流网络的可靠性和灵活性,并以较为经济的手段提高了无人机低空物流网络的效率和能力。该方法设计了4个操作算子和3个判断回路,能自适应地调整中继节点数量,提高网络的优化效率。通过仿真实验和数据分析,验证了算法在满足物流需求的同时也能够满足无人机的航程限制,说明了方法的可行性和有效性,为无人机物流网络设计方法提供了参考和借鉴。

本研究有望为城市货运、山区运输、海上运输等场景中的无人机低空物流网络的建设提供理论支撑,推动低空经济发展,提高城市物流的运输效率和服务质量,助力智慧城市的可持续发展。同时,本研究还可以为水下无人潜航器充电网络的规划提供参考,通过船舶或其他设施为无人潜航器进行充电,构建水下无人潜航器充电网络。

## 参考文献

- [1] CHOUR K, REDDINGER J P, DOTTERWEICH J, et al. An agent-based modeling framework for the multi-UAV rendezvous recharging problem[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2023, 166: 104442.
- [2] ELSAYED M, FODA A, MOHAMED M. Autonomous drone charging station planning through solar energy harnessing for zero-emission operations[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 86: 104122.
- [3] LI S, ZHANG H H, YI J, et al. A bi-level planning approach of logistics unmanned aerial vehicle route network[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 141.
- [4] SATHAYEN, KELLEY S. An approach for the optimal planning of electric vehicle infrastructure for highway corridors[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2013, 59: 15-33.
- [5] CAVADAS J, DE ALMEIDA CORREIA G H, GOUVEIA J. A MIP model for locating slow-charging stations for electric vehicles in urban areas accounting for driver tours[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 75: 188-201.
- [6] YI Z, BAUER H P. Optimization models for placement of an energy-aware electric vehicle charging infrastructure[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016, 91: 227-244.
- [7] YANG J, GUO F, ZHANG M. Optimal planning of swapping/charging station network with customer satisfaction[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 103: 174-197.
- [8] WANG L, OU J J. Vehicle-mounted drones logistics distribution model considering battery charging[J]. *Science Technology & Engineering*, 2024, 24(27): 11834-11841.
- [9] İLKER B, OZGUR K S, ŞAMIL T. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey[J]. *Ad Hoc Networks*, 2013, 11(3): 1254-1270.
- [10] WANG W T, WEI X L, JIA Y C, et al. UAV relay network deployment through the area with barriers[J]. *Ad Hoc Networks*, 2023, 149.
- [11] LU L L, HU Z H. Location-Routing Optimization for Island Drone Delivery Relay Stations[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2022, 62(3): 299-308.
- [12] QU X Y, YE B J, CHENG Y, et al. Research on the Construction Method of Urban Low-Altitude Hub-and-Spoke Network for Logistics Drones[J]. *Shandong Science*, 2023, 36(6): 86-95.
- [13] WEN H L, DI P, CHEN T. Design of Ship Mission Reliability Simulation System Based on Agent[J]. *Computer Science*, 2023, 50(S2): 808-814.
- [14] SHI Y, LIN Y, WANG S, et al. A simulation-optimization system for recycling logistics network of recyclable express packaging[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, 189: 109949.



**WEN Haolin**, born in 1995, doctoral student, experimenter. His main research interests include complex system modeling and simulation, and equipment integrated support.



**LI Yuqi**, born in 1993, Ph.D, lecturer. Her main research interests include system simulation and optimization decision.