

文章编号:1671-1637(2026)04-0050-18

## 城市低空物流无人机立体航路网络规划方法

李 珊<sup>1,2</sup>, 张洪海<sup>\*1</sup>, 李卓伦<sup>3,4</sup>

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 211106; 2. 新加坡国立大学 设计与工程学院, 新加坡 117575;  
3. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189; 4. 东南大学 江苏省城市智能交通重点实验室, 江苏 南京 211189)

**摘要:**为规范城市低空物流无人机规模化运行秩序,提出了城市低空物流无人机立体航路网络规划方法。基于城市低空分层空域结构,采用栅格法对城市低空进行离散化建模;结合“一网-双层-三节点”航路网络架构,构建了转运点选址模型与航路网络规划模型;搭建了基于自组织映射神经网络与多目标模拟退火的算法框架,优化转运点空间布局与网络拓扑结构。以南京某地区为例进行仿真试验,结果表明:当需求点数量一定时,由于转运层承担了货物的流转功能,转运网络的节点平均度大于配送网络;与遗传算法与灰狼优化算法相比,提出的多目标模拟退火算法可以更好地兼顾目标之间的关系,综合得分提升17%以上;随着需求点规模不断扩大,转运点数量呈现增长趋势,激活了更多可选航路节点,拓展了无人机航路选择维度;与单层网络相比,所构建航路网络的非直线系数减少14.09%,航路流量均值降低52.43%,可有效分散航路负载。所提方法可以实现用户需求密集场景下的航路网络规划,提升了物流无人机在复杂城市环境中的运行可行性。

**关键词:**低空交通;城市空中交通;低空航路;建模仿真;网络规划;物流无人机

**中图分类号:**U8 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.163

### Planning method for three-dimensional air route network of urban low-altitude logistics drones

LI Shan<sup>1,2</sup>, ZHANG Hong-hai<sup>\*1</sup>, LI Zhuo-lun<sup>3,4</sup>

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China;  
2. College of Design and Engineering, National University of Singapore, Singapore 117575, Singapore;  
3. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China; 4. Jiangsu Key Laboratory of Urban ITS, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China)

**Abstract:** To regulate the large-scale operational order of urban low-altitude logistics drones, a planning method for the three-dimensional air route network of urban low-altitude logistics drones was proposed. Based on the urban low-altitude layered airspace structure, the grid method was adopted for the discretization modeling of urban low-altitude airspace. Combined with the “one-network, two-layer, and three-node” route network architecture, a transfer node location model and a route network planning model were established. An algorithm framework based on a self-organizing map neural network and multi-objective simulated annealing was developed to optimize the spatial layout of transfer nodes and network topology. A simulation experiment was

出版历程:2025-08-28 收稿,2025-11-22 修回,2026-01-23 录用

基金项目:国家社会科学基金项目(22&ZD169);国家自然科学基金项目(U2133207);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX24\_0465)

作者简介:李 珊(1998-),女,河南林州人,工学博士研究生,E-mail:lishan0812@nuaa.edu.cn.

\* 通信作者:张洪海(1979-),男,山东菏泽人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:honghaizhang@nuaa.edu.cn.

引用格式:李 珊,张洪海,李卓伦.城市低空物流无人机立体航路网络规划方法[J].交通运输工程学报,2026,26(4):50-67.

Citation:LI Shan, ZHANG Hong-hai, LI Zhuo-lun. Planning method for three-dimensional air route network of urban low-altitude logistics drones[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(4): 50-67.

conducted in a certain area of Nanjing City. The results show that when the number of demand nodes is fixed, the average node degree of the transfer network is greater than that of the delivery network due to the cargo circulation function undertaken by the transfer layer. Compared with the genetic algorithm and grey wolf optimization algorithm, the proposed multi-objective simulated annealing algorithm can better balance the relationship among objectives, and the comprehensive score increases by over 17%. As the scale of demand nodes expands, the number of transfer nodes shows an increasing trend, which activates more optional route nodes and expands the dimension of drone route selection. Compared with the single-layer network, the proposed route network reduces the non-linear coefficient by 14.09% and the average route flow by 52.43%, which can effectively disperse route loads. The proposed method enables route network planning in scenarios with dense user demands and improves the operational feasibility of logistics drones in complex urban environments.

**Keywords:** low-altitude traffic; urban air mobility; low-altitude air route; modeling and simulation; network planning; logistics drone

**Publication history:** Received 2025-08-28; Received in revised form 2025-11-22; Accepted 2026-01-23

**Funding:** National Social Science Foundation of China (22&ZD169); National Natural Science Foundation of China (U2133207); Postgraduate Research & Practice Innovation Plan Program of Jiangsu Province (KYCX24\_0465)

\* **Corresponding author:** ZHANG Hong-hai, professor, PhD, E-mail: honghaizhang@nuaa.edu.cn.

## 0 引 言

电子商务的迅猛发展悄然改变了人们的购物习惯,消费者对即时配送服务的要求也随之提高。中国作为全球最大的快递市场之一,其快递业务量在 2021 年首次达到了千亿级别,2025 年这一数字飙升至 1 989.5 亿件,同比增长 13.6%,连续 12 年稳居世界首位。无人机凭借灵活性强、自由度高等优势,为物流配送产业带来了创新发展思路<sup>[1]</sup>。随着科技迭代升级与市场需求增长,无人机商业化应用不断拓展。据《2025 年民航行业发展统计公报》数据显示,截至 2025 年底,中国全行业注册无人机总量达 328.7 万架,比上年底增长 51%,行业整体需求呈现井喷趋势。然而,城市低空无人机的规模化运行也对空中交通管理提出了严峻挑战。无人机运输与地面运输相比,无人机的关键劣势在于其续航与载重能力有限,易受外界环境干扰<sup>[2]</sup>。城市空域复杂、楼宇密集,无人机形态各异、任务多样,有限的空域资源与激增的用户需求之间的矛盾制约了无人机物流产业发展<sup>[3]</sup>。当无人机处于自由空域时,此时受约束较小,无人机根据既定要求执行各自飞行任务,但随着运行规模扩大,因缺少航路约束与引导,空中飞行秩序趋于混乱,无人机之间极易产生冲突甚至发生碰撞事故<sup>[4]</sup>。面向未来城市空域复杂混

合飞行态势,自由空域已无法完全适应高密度物流无人机运行需求。因此,构建科学合理的城市低空物流无人机航路网络,成为保障无人机物流行业稳健发展的必然选择。

航路网络是实现低空交通运输的重要载体,为无人机飞行作业提供了三维运行空间,其规划过程本质上属于空域资源配置的战略规划范畴<sup>[5]</sup>,核心目标是将特定区域内的航路相互衔接,实现无人机在地面站点之间的高效位移。地面站点是无人机起飞降落、货物装卸、充电检修的关键点,其空间选址影响了航路网络整体布局架构。在物流配送领域,地面站点主要包括需求点与配送点,张悦乐等<sup>[6]</sup>面向动态配送需求,以选址与运行成本最低为目标建立了全覆盖选址模型,采用  $K$ -means 算法获取最佳配送中心布局。刘光才等<sup>[7]</sup>结合物流无人机飞行特征与禁飞空域约束,建立了一体化配送中心选址与任务分配模型,实现了设施布局与作业调度的协同优化。相较于地面站点选址的成熟研究,无人机航路网络规划需在地面站点布局的基础上,进一步考虑地理环境、空域限制等约束,兼顾多元用户需求、无人机性能等条件<sup>[8]</sup>,构建安全可靠、运行高效的低空航路网络。目前,无人机航路网络规划处于理论探索阶段,国内外学者围绕其空间结构设计、规划建模方法等领域开展了相关研究。基于多样化城市空

间布局, Mohamed Salleh 等<sup>[9]</sup>提出了适应性城市空域概念, 设计了矩阵节点型、建筑节点型与道路沿线型 3 类网络结构。随着无人机应用场景持续拓展, 低空公共航路概念应运而生, Xu 等<sup>[10]</sup>融合地面路网、地理要素与飞行测试等多元数据, 形成了一套城市四级公共航路网迭代方法, 通过计算人群暴露风险指数, 验证了分层级航路网能够有效降低运行风险。贾永楠<sup>[11]</sup>创新性地提出“八卦图”立体管道式航路网络结构, 将中央辐射与同心环线相融合, 采用空域垂直分层策略划分物流、应急层等网络。由于城市环境存在建筑物、电磁干扰等运行障碍, Zhang 等<sup>[12]</sup>将障碍物点集作为种子节点, 采用 Voronoi 图构建了无人机航路网络。上述研究侧重于从空间结构层面实现航路网络的基础连通, 但未考虑节点功能差异与需求分布特征, 导致航路布局与运输需求脱节。为此, 部分学者开展了航路网络优化建模研究, 将航路网络抽象为节点与边构成的图, 通过建立多目标、多约束航路网络规划模型, 得到最佳的航路网络拓扑连接关系。McFadyen 等<sup>[13]</sup>首次开展了无人机交通网络结构建模的探索研究, 按照“空域选择-节点搜索-网络生成”的总体思路确定了网络结构, 但该方法依赖于海量飞行数据, 导致其拓展应用难度较大。基于城市分层空域, Ye 等<sup>[14]</sup>通过构建低空风险热力图实现空域运行风险的量化评估, 然后以最小化航路长度与运行风险为目标, 采用 A\* 算法生成航路网络, 但该方法更侧重于单航路的局部优化, 缺乏对航路网络整体结构的系统化设计。He 等<sup>[15]</sup>结合高密度城市环境特征, 提出了基于拥堵代价的无人机航路网络规划方法, 可以有效平衡航路个体与网络系统利用效率, 但未考虑不同需求规模下的网络适应性。张春晓等<sup>[16]</sup>将无人机运行噪声作为关键约束条件, 围绕最小化经济成本与对地安全风险的双重目标, 构建了无人机多层物流网络多目标优化模型, 但该模型聚焦于物流网络整体结构设计, 未考虑不同高度层间的航路衔接机制。Li 等<sup>[17]</sup>设计了网络枢纽节点概念, 将其作为新增节点连接骨干航路网络, 但该网络仅聚焦于单个网络拓扑优化, 忽视了末端需求点之间的连接潜力。Li 等<sup>[18]</sup>考虑配送需求与网络拓扑的耦合影响, 提出了一种基于交通流分配的物流无人机末端航路网络规划方法, 但该方法应用于大规模区域时, 易因航路覆盖范围广、节点密度高导致航路交叉点数量激增, 影响航路网络整体运行安全。

综上, 现有研究围绕无人机航路网络规划取得

了一定进展, 但仍存在以下不足: 现有基于城市空间布局的航路网络规划多聚焦于宏观层面的结构设计, 未能充分考虑末端用户需求的分布特征, 无人机航路网络运行机制、作业流程等尚不明确, 难以有效支撑复杂城市环境下物流无人机的精细化管理; 面对城市场景中需求点数量庞大、空间分布离散的特征, 传统的单层航路网络结构虽然能够满足无人机物流的基础作业要求, 但由此显现的网络规模大、交叉口数量多等弊端, 易诱发飞行效率低、安全风险高等问题, 难以适配大规模无人机运行需求; 对于多层航路网络, 未充分考虑高度层之间的连接机制与航路衔接策略, 没有明确高度层切换的触发条件, 导致各高度层航路呈现碎片化分布特征, 难以发挥多层网络的立体通行优势, 增加实际应用与场景拓展难度。

鉴于此, 本文面向大规模、高频次的城市物流服务场景, 提出一种城市低空物流无人机立体航路网络规划方法。基于城市分层空域结构, 引入空中转运点概念, 通过搭建“一网-双层-三节点”的航路网络架构, 将货物运输中配送点出发到需求点接收的过程分解为跨区转运、末端配送两段式作业模式; 根据航路网络架构, 考虑需求分布、空间布局与无人机性能等因素, 进一步构建融合转运点选址与航路网络构建的两阶段规划模型, 该模型解决了网络层级之间碎片化分布问题, 更贴合大规模物流运输需求; 设计基于自组织映射神经网络聚类与多目标模拟退火的求解框架, 先通过聚类算法确定转运点空间布局与服务关系, 再通过多目标优化算法明确航路网络拓扑结构, 最终生成结构简洁、功能分层的立体航路网络, 为城市低空物流的规模化应用提供技术支撑。

## 1 城市低空环境表征

城市低空环境表征是航路网络规划的基础, 可以客观反映物流无人机三维运行空间特征, 为后续网络规划提供结构化、可量化的环境支撑。依据《中华人民共和国空域管理条例(征求意见稿)》, 低空空域主要处于非管制空域, 其范围通常在真高 300 m 以下。低空航路作为一种特殊的空域, 其结构受到城市空域结构影响。常见的空域结构包括自由空域、分层空域、扇形空域与管道空域, 通过研究空域结构对于城市空域安全、容量、噪声<sup>[19-20]</sup>的影响, 表明分层空域是目前最佳的城市空域结构。基于城市低空分层空域结构, 采用栅格法对低空空域进行离散化建模<sup>[21]</sup>, 如图 1 所示。城市低空空域内, 存在

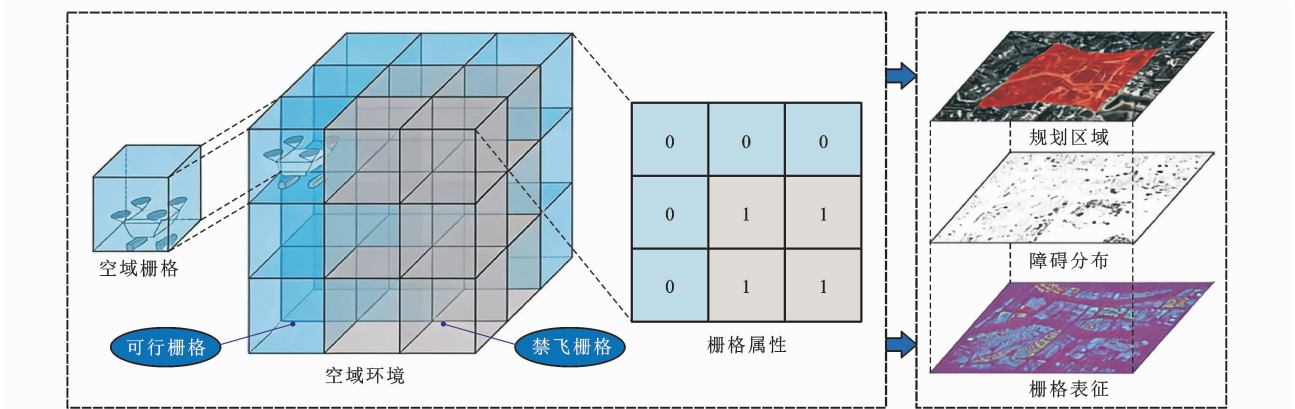


图 1 栅格法空域环境表征示意

Fig. 1 Schematic of airspace environment representation by grid method

建筑物、禁飞区等障碍物,威胁物流无人机正常运行,若无人机飞行高度为  $h$ ,障碍物高度为  $h_0$ ,飞跃障碍物的安全裕度为  $h_s$ ,则用二元变量  $g(i)$  将栅格  $i$  的属性表示为

$$g(i) = \begin{cases} 0 & h - h_0 > h_s \\ 1 & h - h_0 \leq h_s \end{cases} \quad (1)$$

当  $g(i)=0$  时,表示该栅格为可行栅格,物流无人机可以通行;当  $g(i)=1$  时,表示该栅格为禁飞栅格,物流无人机不可通行。

## 2 航路网络规划建模

### 2.1 问题描述

城市某区域内分布着若干物流配送点和用户需求点,每个配送点与至少一个需求点之间存在货物运输服务关系。区域内的所有货物运输任务均由物

流无人机来完成,物流无人机实行“统一调度”管理模式,即由一个集中的智能管理系统协调无人机飞行秩序。航路网络以系统性、层次性为设计核心,形成一个结构化的物流无人机配送体系。在地面交通领域,为提升交通可达性与运行效率,通过建造高架道路实现交通的有效分流,并将其与地面公路相结合,形成了地面与空中互联的立体交通模式,优化了整体交通网络的连通性。受此启发,可在物流无人机航路网络中引入空中转运点<sup>[17]</sup>,通过功能分层、节点联动的核心设计,将航路网络分解为转运层网络与配送层网络,实现空中转运点、地面配送点与需求点之间的高效连通,构成“一网-双层-三节点”的总体架构,如图 2 所示。

一网指的是整个物流无人机航路网络,覆盖从配送起点到需求终点的全过程。双层涵盖转运层网

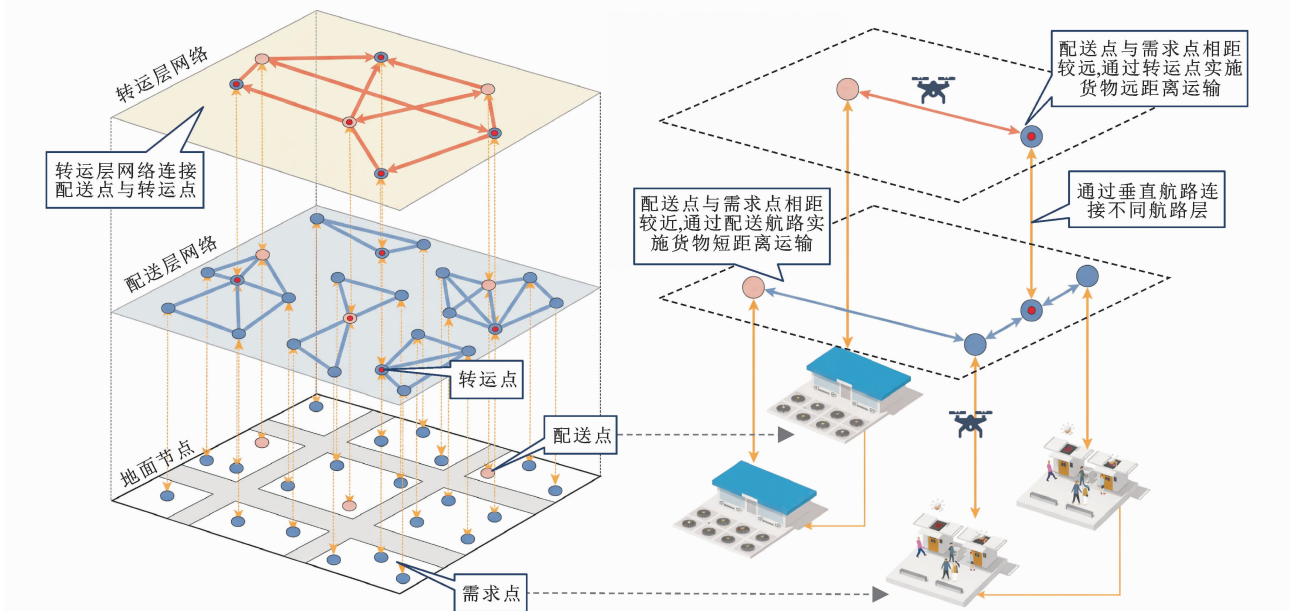


图 2 物流无人机立体航路网络整体架构

Fig. 2 Overall architecture of three-dimensional route network for logistics drone

络、配送层网络,前者部署于较高的飞行高度层,主要连接配送点与转运点,负责较大区域内的货物快速运输;后者位于较低的飞行高度层,主要连接需求点、转运点与配送点,聚焦在小区域内将货物从转运点或配送点精确送达目的地,2层网络通过转运点实现有效衔接。在配送层网络内,每个转运点与其周围的需求点或配送点形成一个单独的配送网络,根据配送网络的连接方式,货物存在2种运输方式:若配送网络中涵盖配送点,此时配送点与需求点相距较近,该网络中的需求点通过配送航路直接接收货物;若配送网络中没有配送点,则配送点与需求点相距较远,该网络中的需求点通过转运点接收其他网络中配送点的货物。三节点涵盖配送点、需求点与转运点,配送点负责货物的收集与存储;转运点属于空中节点,承担着货物中转与再分配的功能,依据地面节点空间布局特征,从节点中通过系统化选址得到;需求点是每个物流任务的终点,标志着物流服务的最终交付。

基于航路网络整体架构,考虑城市空间布局、配送需求分布、无人机性能等因素,提出融合空中转运点的物流无人机航路网络两阶段规划方法,第1阶段为转运点选址模型,第2阶段为航路网构建模型,通过明确转运点布局与航路网络拓扑结构,共同支撑形成稳定可靠的物流无人机立体航路网络。为了简化分析过程,提出以下假设条件。

假设1:配送点与需求点位置已知,且节点之间的服务关系与配送量均为已知信息。

假设2:配送点与需求点配备有物流无人机专用充电桩,能够为物流无人机提供能源补给。

假设3:物流无人机被视为质点,沿航路中心线飞行,其飞行航向即为速度方向。

假设4:物流无人机从配送点出发,在需求点执行完运输任务后返回初始配送点。

假设5:物流无人机为具有垂直起降能力的多旋翼无人机,具有一定的航程与载重限制。

假设6:所规划的城市区域内配备有完善的低空通信、导航、监视等设施设备。

## 2.2 转运点选址模型

转运点选址模型聚焦于转运点的空间布局优化,为航路网络构建提供基础支撑。基于栅格化城市低空空域,每个可行栅格为初始转运点潜在位置,设城市区域内的配送点集合为 $P$ ,其数量为 $N_P$ ,需求点集合为 $S$ ,其数量为 $N_S$ ,转运点潜在位置集合为 $T=P \cup S$ 。

### 2.2.1 目标函数

#### (1)转运点数量

转运点规模直接关系到航路网络运营成本与管理效率,其数量通常与空中交叉点数量呈正相关。以转运点数量最小为目标,可降低因航路交叉而产生的拥堵和冲突风险,提升整个航路网络的运行效率。对于转运点在城市低空空域中的可行栅格 $t(t \in T)$ ,定义二元变量 $x_t$ 表示其启用状态, $x_t=1$ 表示转运点 $t$ 被启用,反之 $x_t=0$ 。以最小化转运点数量 $N_T$ 为目标,表示为

$$\min N_T = \sum_{t \in T} x_t \quad (2)$$

#### (2)服务距离

服务距离定义为所有转运点到对应服务需求点的配送距离之和,反映了配送层网络的可达性。对于被启用的转运点 $t$ ,定义决策变量 $x_{ts}$ 表示其与需求点 $s(s \in S)$ 的服务关系, $x_{ts}=1$ 表示转运点 $t$ 服务需求点 $s$ ,反之 $x_{ts}=0$ ,进一步可知 $x_t$ 与 $x_{ts}$ 的关系为 $x_t = \max\{x_{ts}\}$ 。以配送层网络的服务距离 $D_s$ 最小为目标,表示为

$$\min D_s = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} d_{ts} x_{ts} \quad (3)$$

式中: $d_{ts}$ 为转运点 $t$ 与需求点 $s$ 之间的空间距离。

### 2.2.2 约束条件

#### (1)转运点数量约束

转运点的布局规划需兼顾服务覆盖与资源配置的平衡,避免因转运点数量不足而出现服务盲区,同时也要防止因转运点数量过多而导致资源分散。对于规划的城市区域,转运点数量通常不得超过需求点数量 $N_S$ ,表示为

$$N_T \leq N_S \quad (4)$$

#### (2)配送关系约束

转运点旨在为多个需求点提供高效、精准的配送服务,以实现资源的合理配置与最优利用。为确保配送服务的专一性,每个需求点仅由一个转运点提供服务,这种一对一的服务模式有助于简化物流配送管理过程,提升配送的准确性和响应速度,表示为

$$\sum_{t \in T} x_{ts} = 1 \quad (5)$$

#### (3)服务范围约束

为提升转运点的配送效率并确保配送服务的可达性,通过定义转运点服务范围明确界定转运点能够覆盖的需求点,表示为

$$d_{ts} x_{ts} \leq r_u \quad (6)$$

式中: $r_u$ 为转运点的服务半径。

#### (4) 转运点压力约束

转运点是货物流转的关键节点,由于转运点可以服务不止一个需求点,若其承担的配送任务过多,会导致超负荷运行。转运点压力定义为该点需要配送的需求点数量,需要大于服务压力下限  $N_{\min}$ ,小于服务压力上限  $N_{\max}$ ,表示为

$$N_{\min} \leq \sum_{s \in S} x_{ts} \leq N_{\max} \quad (7)$$

### 2.3 航路网构建模型

基于转运点选址模型所确定的转运点空间布局,航路网构建模型聚焦于转运层网络结构优化。根据转运点与需求点之间的服务关系,配送层网络采用 Li 等<sup>[18]</sup>的方法得到,适用于小范围的末端航路网络生成。两者共同形成满足用户需求的物流无人机双层航路网络。根据转运点与需求点间的服务关系,可将需求点划分为多个区域,每个区域由一个转运点提供跨区转运服务。将被选用的转运点集合定义为  $T_u$  ( $T_u \subset T$ ),此时转运层网络节点  $V_t = T_u \cup P$ ,转运航路为  $l_{ij}$  ( $i, j \in V_t, i \neq j$ )。

#### 2.3.1 目标函数

##### (1) 网络非直线系数

从配送点  $p$  ( $p \in P$ )到需求点  $s$  ( $s \in S$ )可能存在不止一条路径,其中最短的路径又称为特征路径。特征路径与两节点间空间直线距离的比值为非直线系数,其数值直接关系到航路便捷程度。网络非直线系数  $I_n$  定义为所有配送点与需求点间的非直线系数均值,以最小化其数值为目标,表示为

$$\min I_n = \frac{1}{N_p N_s} \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \frac{L_{ps}}{d_{ps}} \quad (8)$$

式中: $L_{ps}$ 为配送点  $p$  到需求点  $s$  的特征路径长度; $d_{ps}$ 为配送点  $p$  到需求点  $s$  的空间距离。

##### (2) 转运网络长度

航路网络在覆盖特定地理区域配送需求的前提下,其长度直接影响了航路网络管理的成本与压力。航路网络长度过大,可能导致运输时间延长、服务效率降低,同时航路网络结构复杂性也会增加,需要更多的资源和更精细的调度来确保航路网络稳定运行。定义决策变量  $k_{ij}$  表示转运航路的启用状态, $k_{ij} = 1$  表示航路  $l_{ij}$  被启用,反之  $k_{ij} = 0$ 。航路网络构建模型以转运网络长度  $D_n$  最小为目标,表示为

$$\min D_n = \frac{1}{2} \sum_{i \in V_t} \sum_{j \in V_t} d_{ij} k_{ij} \quad (9)$$

式中: $d_{ij}$ 为转运航路  $l_{ij}$  的长度。

#### 2.3.2 约束条件

##### (1) 无孤立点约束

转运层网络需要连接所有的配送点与转运点,形成一个完整且连通的运输网络,实现货物在各个节点之间的顺畅流转,从而保障整个物流系统的正常运行,表示为

$$\prod_{i \in V_t} \left( \sum_{j \in V_t} k_{ij} \right) \geq 1 \quad (10)$$

##### (2) 无人机航程约束

由于转运层与配送层垂直分离,物流无人机从配送点  $p$  前往需求点  $s$  的飞行航程包括水平航程与垂直航程,其总距离需满足无人机最大航程限制。当无人机剩余电量不足以支撑下一次飞行时,可在配送点或需求点进行充电后,继续执行配送任务。航程约束表示为

$$\frac{1}{2} \sum_{i \in V_t} \sum_{j \in V_t} l_{ijps} d_{ij} k_{ij} + \sum_{t \in T_u} d'_{ts} x_{ts} + 2h_t \leq d_t \quad (11)$$

式中: $l_{ijps}$ 为表示航路  $l_{ij}$  与特征路径  $L_{ps}$  隶属关系的二元变量, $l_{ijps} = 1$  表示航路  $l_{ij}$  在特征路径  $L_{ps}$  内,反之  $l_{ijps} = 0$ ;  $d'_{ts}$  为转运点  $t$  与需求点  $s$  间的航路距离; $h_t$  为转运层网络高度; $d_t$  为物流无人机满载续航里程。

##### (3) 航路介数约束

为保障所有启用的航路均为有效航路,需确保其至少属于一条从配送点到需求点的特征路径,有助于精简航路网络结构,减少其中的冗余航路,表示为

$$B_{l_{ij}} = \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} l_{ijps} k_{ij} > 0 \quad (12)$$

式中: $B_{l_{ij}}$ 为航路  $l_{ij}$  的介数。

## 3 求解算法设计

融合空中转运点的航路网络规划模型包含两阶段内容,第一阶段为双目标转运点选址模型,旨在布局转运点空间位置;第二阶段为双目标网络构建模型,旨在优化航路网络拓扑结构。本节将搭建基于自组织映射(Self-organizing Map, SOM)神经网络与多目标模拟退火(Multi-objective Simulated Annealing, MOSA)的算法框架求解上述模型,首先根据需求点与配送点分布特征,采用自组织映射SOM算法进行转运点选址,然后依据转运点空间布局与服务关系,采用结合航路网络优化策略的MOSA算法生成转运层航路网络,通过优化转运点选址布局与网络拓扑结构,得到满足用户需求的立体航路网络。

### 3.1 基于 SOM 的转运点选址

转运点选址模型旨在选择一组适宜的转运点以匹配与需求点间的服务关系, 可视为空间聚类问题。考虑到 SOM 具有无监督学习的灵活性, 能够在保留数据原有关系的前提下将高维数据映射到低维拓扑空间中<sup>[22]</sup>, 其由输入层与输出层 2 层结构组成,

输入层神经元接收待聚类的数据集, 输出层神经元则作为潜在聚类中心, 依据特定规则判断激活神经元, 得到与输入数据结构相匹配的簇分类。因此可采用该算法对规划区域内的地面节点群进行筛选, 从而获得满足模型约束与目标条件的转运点集。选址算法流程如图 3 所示, 具体步骤如下。

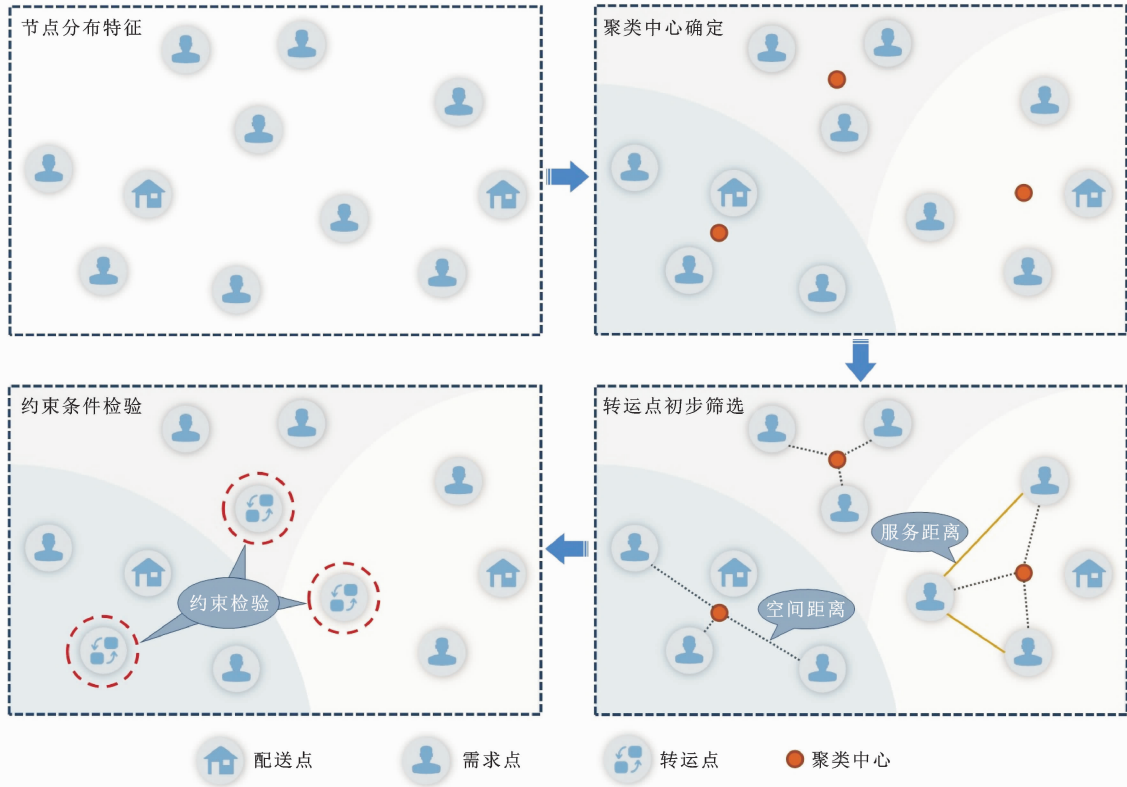


图 3 基于 SOM 的转运点选址流程

Fig. 3 Transfer node location process based on SOM

步骤 1: 初始化聚类。设置输入神经元为规划区域内的节点群, 激活神经元的判定依据为服务距离。考虑到所有节点不可能归为同一簇, 否则转运点设置失去意义, 而聚类数最多等同于节点数。为找寻满足最小化转运点数量与服务距离双重目标的转运点集, 将 SOM 模型输出层神经元取值范围设为  $[2, N_s + N_p]$ , 获取不同聚类数对应的聚类中心位置。

步骤 2: 转运点选址。基于聚类中心空间布局, 聚类簇内每个节点具备空间距离与服务距离两个属性, 其中空间距离是指聚类中心与该节点的欧式距离, 该值越小, 表明节点与聚类中心的空间关联越紧密; 服务距离则为该节点被选定为转运点时的服务距离, 根据式 (3) 得到。根据 2 个属性值, 任意 2 个节点  $t_i$  与  $t_j$  之间存在支配与非支配关系<sup>[23]</sup>,  $>$  与  $<$  分别为支配与被支配符号, 具体可划分为以下 3 种情况。

(1)  $t_i$  的空间距离小于  $t_j$  的空间距离, 且  $t_i$  的服务距离不大于  $t_j$  的服务距离, 则  $t_i$  支配  $t_j$ , 表示为  $t_i > t_j$ 。

(2)  $t_i$  的空间距离不小于  $t_j$  的空间距离, 且  $t_i$  的服务距离大于  $t_j$  的服务距离, 则  $t_j$  支配  $t_i$ , 表示为  $t_i < t_j$ 。

(3) 其他情况时,  $t_i$  与  $t_j$  间不存在支配关系, 表示为  $t_i = t_j$ 。

在筛选过程中, 对所有不被支配节点的空间距离与服务距离数值通过最小-最大归一化评分方法计算得分, 将分数最高的节点作为备选转运点。针对每一聚类数下的备选转运点选址结果, 依据模型设置的约束条件进行检验, 若其满足所有约束条件, 则保留该解作为可行解, 否则剔除该解。

步骤 3: 可行解排序。每个可行解对应一组转运点选址方案, 与步骤 2 类似, 任意 2 组选址方案之间存在支配与非支配关系, 根据选址方案之间的支

配关系,可以得到转运点选址模型的帕累托前沿。模型中各目标函数采用等权重设定,针对转运点数量与服务距离数值,采用最小-最大归一化评分方法对帕累托前沿中的所有解进行量化评估与排序,选取分数最高的解作为转运点选址模型的最终解。

### 3.2 基于 MOSA 的航路网构建

基于栅格化城市低空空域环境,界定了航路规划的可行栅格与禁飞栅格。根据转运点布局与服务关系,采用改进元胞自动机算法<sup>[24]</sup>生成转运点、配送点之间的最优避障航路,所有节点间的航路构成了网络规划的备选航路集合,即为航路库。由于转运点与需求点之间的服务关系已经明确,因此只需要根据既定的服务关系生成配送层网络。此时,

MOSA 算法的本质是在航路库中筛选一系列适宜的转运航路,明确转运点与配送点、转运点与转运点之间的连接关系,最终实现转运网络与配送网络的优化组网。算法的具体步骤如下。

步骤 1:航路编码。每个候选航路网络属于一个个体,个体长度与转运航路库一致,航路库中存储了每条航路的起讫点、航路点坐标、航路长度等信息,且每条航路存在与之对应的唯一编号作为数据检索地址。设航路库中的航路数量为  $N_r$ ,采用二进制策略对个体进行编码,即为  $G = \{g_1, \dots, g_i, \dots, g_{N_r}\}$ ,其中  $g_i$  为二元变量, $g_i = 1$  表明其对应的航路被启用,否则该航路未被启用。航路库与个体编码的对应关系如图 4 所示。

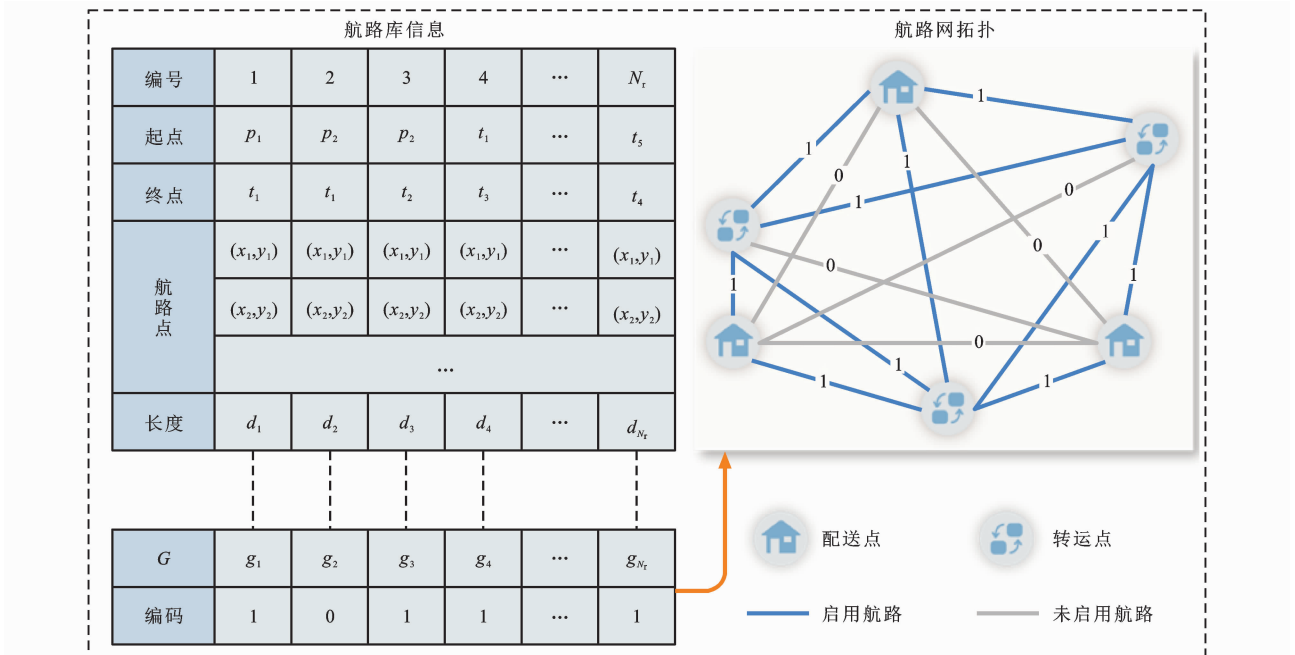


图 4 航路网络个体编码示意

Fig. 4 Schematic of individual coding for air route network

步骤 2:新解生成。设置退火的初始温度  $T_0$ 、迭代次数  $L_{max}$  等参数,随机生成一个初始可行个体作为当前解,计算转运网络长度、网络非直线系数两个目标函数值。参考遗传算法中的交叉和变异思想,对当前个体的基因进行随机扰动,在解空间中生成一个新的个体,如图 5 所示。随机扰动的具体操作为:为提高算法的全局寻优能力,对个体的基因片段进行自交操作,随机选择个体中长度相同且不重合的 2 个片段进行基因交换;为了保持个体多样性,防止陷入局部最优,按照既定的变异概率  $p_v$  随机确定变异基因,若  $g_i = 1$  处发生变异,则变异后航路状态值变为 0,反之亦然。新个体生成后,对其是否满足模型设置的约束条件进行检验,若新个体满足所

有约束要求,则继续进入下一步骤;若新个体不满足约束条件,则对当前个体重新进行随机扰动操作,直至得到符合全部约束条件的个体。

步骤 3:网络优化。计算新个体的转运网络长度、网络非直线系数 2 个目标函数值,传统 MOSA 算法将会直接依据 Metropolis 准则以特定概率接受新解<sup>[25]</sup>。根据式(12)的约束,进一步精简航路网络结构,具体操作为:在计算新解的目标函数值之前,先对新解的航路基因进行筛选处理,将未出现在任何节点间特征路径中的航路基因置为 0,即标记为未启用状态。随后,再计算调整后新解的目标函数值,根据新解  $G_{new}$  与旧解  $G_{old}$  在当前解集中的支配关系,通过 Metropolis 准则判断是否接受该新解,判断准则为

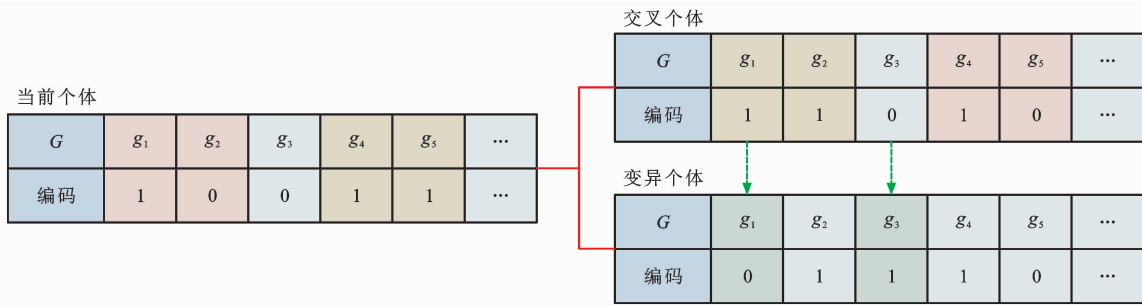


图 5 交叉与变异算子

Fig. 5 Crossover and mutation operators

(1) 当  $G_{new} > G_{old}$  时, 接受新解的概率为 1,  $G_{new}$  覆盖  $G_{old}$  成为新的当前解。

(2) 当  $G_{new}$  不受支配, 或者  $G_{new}$  在当前解集中支配解的数量大于  $G_{old}$  支配解的数量, 接受新解的概率为 1,  $G_{new}$  覆盖  $G_{old}$  成为新的当前解。

(3) 在其他情况时,  $G_{new}$  以概率  $p_a$  覆盖  $G_{old}$ ,  $p_a$  的数值与当前温度  $T_c$  相关, 表示为

$$p_a = \min\{1, \exp[-(I_{n_{new}} - I_{n_{old}} + D_{n_{new}} - D_{n_{old}})/T_c]\} \quad (13)$$

式中:  $I_{n_{new}}$  与  $D_{n_{new}}$  分别为新解的网络非直线系数与转运网络长度;  $I_{n_{old}}$  与  $D_{n_{old}}$  分别为旧解的网络非直线系数与转运网络长度。

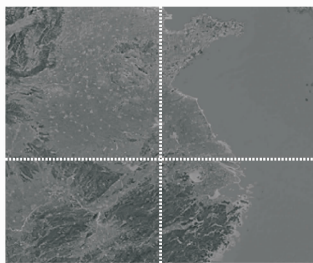
步骤 4: 排序选择。从初始温度  $T_0$  开始, 采用线性降温策略进行温度调整, 温度衰变系数为  $\lambda$ 。每个温度下, 算法执行固定的迭代次数  $L_{max}$ , 充分探索当前温度对应的解空间。迭代完成后, 按照降温策略更新温度值, 直至温度降低至预设的终止温度  $T_{end}$ , 此时退火操作终止。模型中各目标函数采用

等权重设定, 基于目标函数值的大小关系, 对所有解进行非支配排序, 从中筛选帕累托前沿。每个解对应一种转运层网络的拓扑连接关系, 采用 Min-max 归一化评分方法对帕累托前沿中的所有解进行量化评估与排序, 选取分数最高的解作为航路网构建模型的最终解。

## 4 仿真试验

### 4.1 场景设置

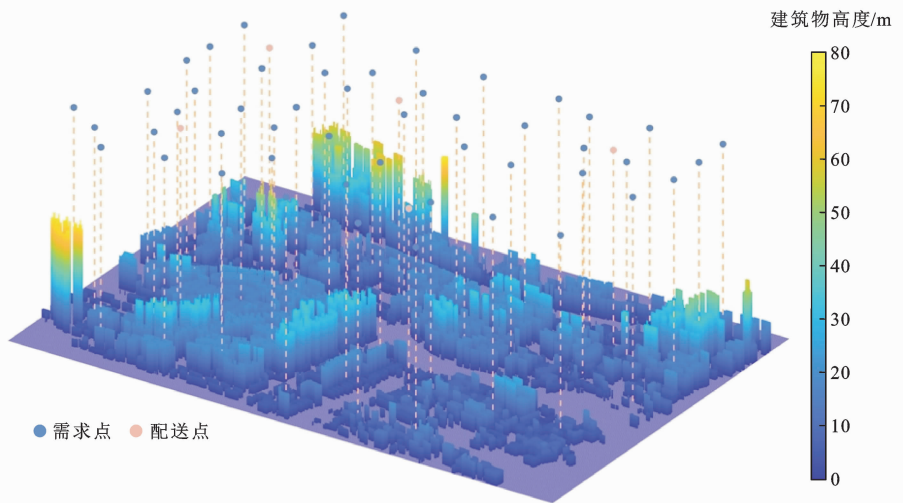
基于 OpenStreetMap 开源地理数据, 选取江苏南京某地区进行仿真试验, 地图精度为 5 m, 坐标系为 WGS-84, 仿真区域的长度约为 3.37 km, 宽度约为 2.23 km, 总占地面积约为 7.5 km<sup>2</sup>, 采用栅格法对空域环境进行离散化建模, 在水平面共划分出 673 × 446 个栅格, 仿真区域如图 6 所示。区域内共存在 55 个节点, 其中包括配送点 5 个、需求点 50 个, 需求点与配送点间的配送量为 50 ~ 100 kg 的随机值。仿真试验的相关参数如表 1 所示。



(a) 区位选址



(b) 研究区域



(c) 建筑物分布

图 6 仿真环境

Fig. 6 Simulation environment

表 1 仿真参数  
Table 1 Simulation parameters

| 参数                             | 取值 |
|--------------------------------|----|
| 无人机满载续航里程/km                   | 8  |
| 无人机空载续航里程/km                   | 10 |
| 无人机最大负载质量/kg                   | 30 |
| 无人机水平飞行速度/(m·s <sup>-1</sup> ) | 12 |
| 无人机垂直飞行速度/(m·s <sup>-1</sup> ) | 5  |
| 转运点服务半径/km                     | 1  |
| 转运点服务压力上限                      | 10 |
| 转运点服务压力下限                      | 1  |
| 配送层网络高度/m                      | 50 |
| 转运层网络高度/m                      | 80 |

4.2 试验结果

4.2.1 转运点选址

设置转运点数量的取值范围为[2, 55], 通过 SOM 算法得到的转运点数量与服务距离、转运点得分的关系见图 7, 可以看出: 当转运点规模较小时, 由于单个转运点需要承担更多的需求点运输任务, 服务范围随之扩大, 导致服务距离相应增加; 随着转运点规模的扩大, 单个转运点的服务压力逐渐降低, 其服务距离也呈现减小趋势。对解集经过约束检验后, 剔除不满足约束条件的解集, 确定可行的转运点数量取值范围为[6, 50]。当转运点数量小于 6 时, 存在转运点服务的需求点数量大于 10, 此时节点任务过于繁重, 容易引发运输效率低下。当转运点数量大于 50 时, 尽管服务压力得到有效缓解, 但存在转运点不对需求点进行服务的情况, 致使转运点资源无法得到充分利用。在所有可行解中, 得分最高

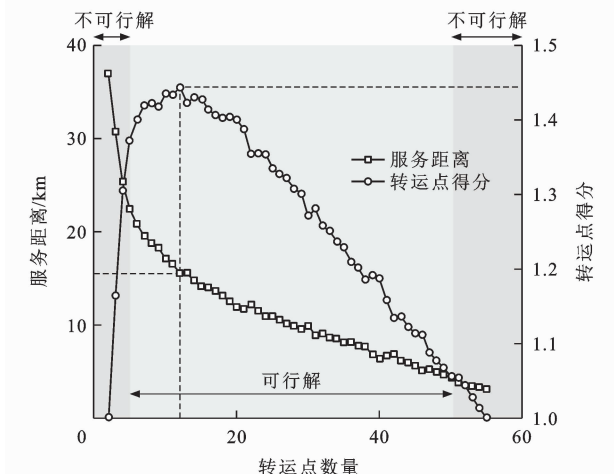


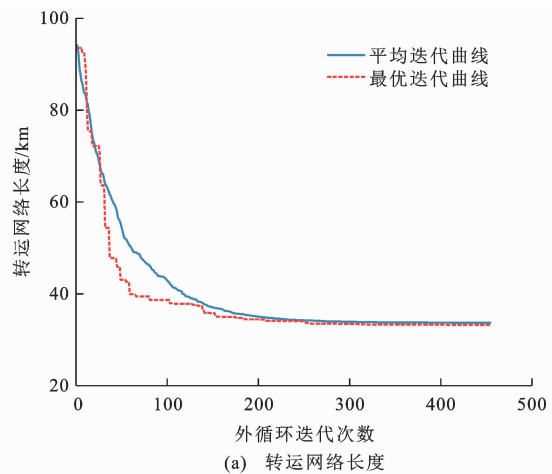
图 7 转运点初始选址服务距离与得分

Fig. 7 Service distance and score of transfer node initial location

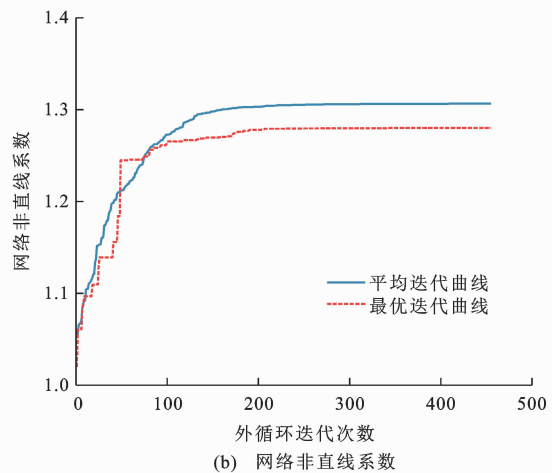
的转运点数量为 12, 服务距离为 13.51 km, 此时转运点最多服务 6 个需求点, 最少服务 2 个需求点, 其服务的需求点数量平均值为 3.58, 均处于预设的服务压力范围之内。

4.2.2 航路网构建

设置 MOSA 算法的初始温度为 100 °C, 终止温度为 0.001 °C, 温度衰变系数为 0.975, 内循环次数为 100, 经过 30 次重复试验, 得到 MOSA 算法的迭代曲线见图 8, 可以看出: 在前 100 代搜索过程中, 算法展现出较强的收敛能力, 在 100~250 代逐渐收敛并在 300 代后趋于稳定; 在 30 次重复试验中, 转运网络长度均值为 34.27 km, 网络非直线系数均值为 1.30; 转运网络长度最大值与最小值分别收敛在 35.02 km 与 33.24 km, 网络非直线系数最大值与最小值分别收敛在 1.33 与 1.28, 误差均控制在 5.5% 以内。



(a) 转运网络长度



(b) 网络非直线系数

图 8 算法迭代曲线

Fig. 8 Algorithm iteration curves

以综合性能最优的解为例进行分析, 得到集合大小为 17 的帕累托前沿见图 9, 可以看出: 网络非直线系数与转运网络长度呈负相关, 相关系数达到

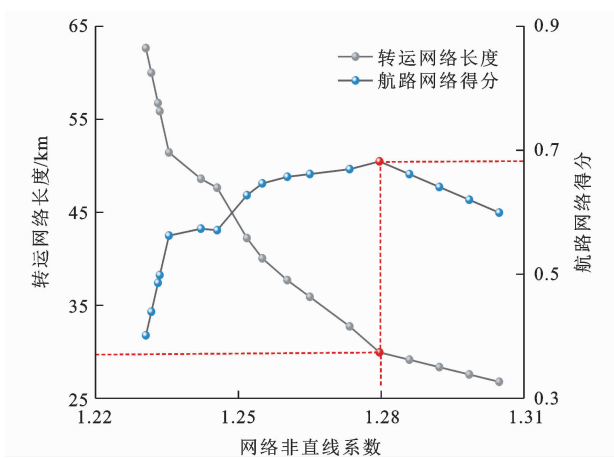


图9 转运网络长度与得分

Fig.9 Lenth and score of transfer network

-0.955;当网络长度较大时,表明被启用的航路数量较多,使得节点间有更大概率通过直达航路相连,直接推动网络非直线系数降低,进而让无人机飞行更贴近最短路径,飞行效率显著提高,但会导致低空空域资源的占用量相应增加;随着网络长度减小,被启用航路数量相应减少,导致网络非直线系数呈现上升趋势,致使无人机实际飞行路径与理论最短路

径间的偏差扩大,进而造成飞行效率降低,但此时低空空域资源占用量也会随之减少。因此,无人机效率提升与空域资源消耗呈正向关联,需要平衡二者之间的关系,实现空域资源的优化配置与无人机运输效能的系统提升。

基于转运点与需求点间的服务关系生成配送层网络,与得分最高的转运层网络共同构成最终的整体航路网络。图10为该航路网络的整体空间结构以及转运点与需求点间的服务关系,转运航路共启用39条,配送航路共启用90条,网络参数见表2。航路介数是指航路网络中任意2个节点间最短路中经过该条航路的总数,反映了航路在整个航路网络中的影响力,若航路介数过大,无人机通行量极可能增多,容易成为流量集中的瓶颈路段。通过分析帕累托前沿中的航路平均介数发现,航路平均介数与转运网络长度的相关系数为-0.936;当转运网络长度较小时,单条航路包含在多条最短路中,此时航路介数相对较高;随着转运网络长度增大,原有最短路径可能发生改变,新增航路提供了可替代的路径选择,使得原本依赖少数关键航路的最短路径出现了

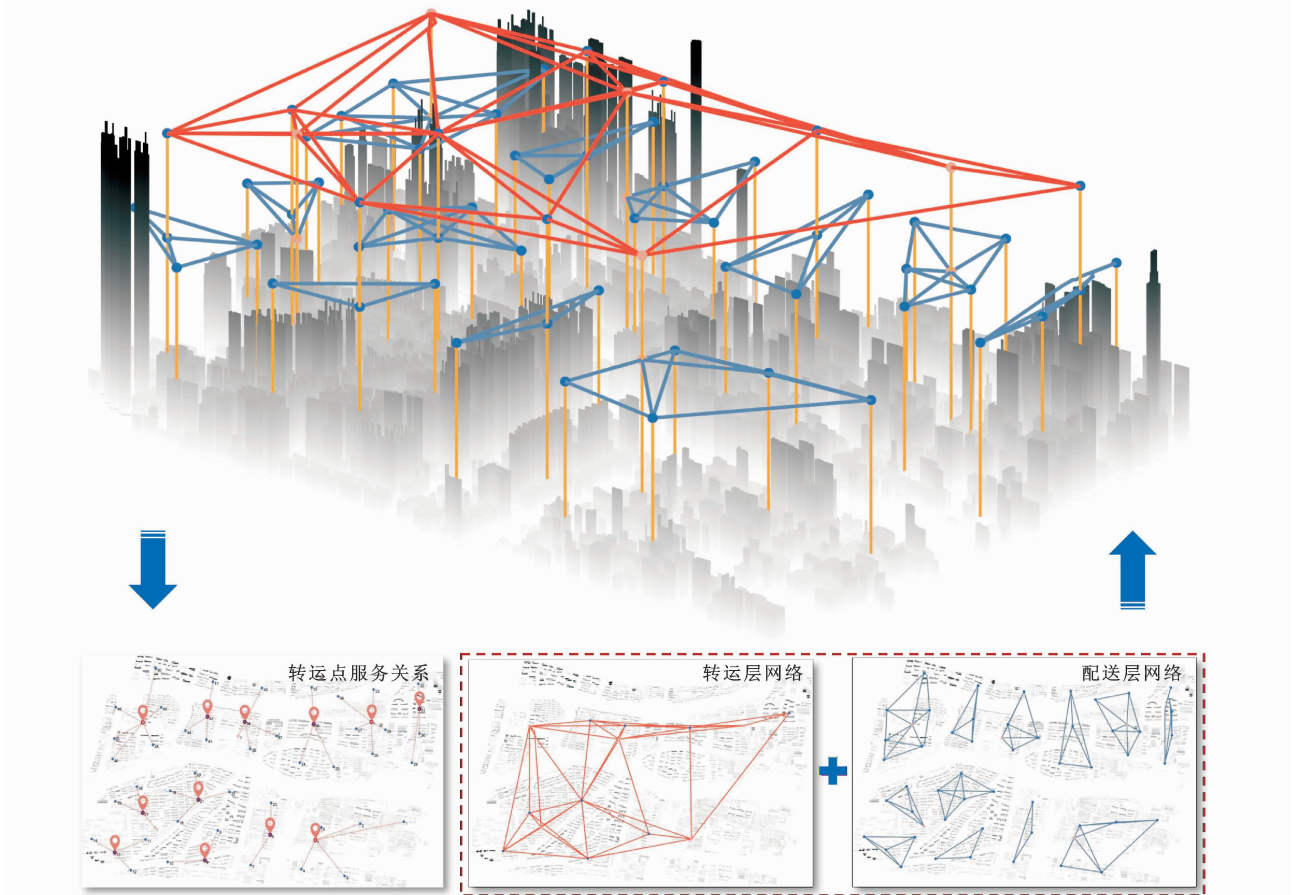


图10 航路网络结构示意图

Fig.10 Schematic of the route network structure

表 2 航路网络特征参数

Table 2 Characteristic parameters of the network

| 参数类别   | 参数名称      | 参数数值  |
|--------|-----------|-------|
| 航路网络长度 | 整体航路网络/km | 66.40 |
|        | 转运层网络/km  | 33.24 |
|        | 配送层网络/km  | 29.90 |
| 航路网络结构 | 网络非直线系数   | 1.28  |
|        | 航路平均介数    | 37.18 |
|        | 转运层节点平均度  | 5.57  |
|        | 配送层节点平均度  | 3.27  |

分流,航路介数随之减小。节点度表示节点连接的航路数量,是衡量节点连接能力的关键指标,节点度越高,则表明节点连通性越强。转运层的节点平均度大于配送层,这是由于转运层承担了货物的流转功能,转运点需要连接更多的航路实现货物的大范

围运输,配送层则以低连接度聚焦于末端网络,确保货物精准送达用户。

### 4.3 算法对比

为验证本文所采用 MOSA 算法的有效性,将其与遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、第 2 代非支配排序遗传算法 II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)、灰狼优化(Grey Wolf Optimization, GWO)算法进行对比分析。对比算法的种群规模设置为 50,迭代次数与本文算法保持一致。试验均在 11th Gen Intel (R) Core (TM) i7-11800H@2.30 GHz 处理器环境下进行,每种算法进行 30 次重复试验。为在相同维度下分析各算法求解能力,将得到的所有目标函数值与 MOSA 算法得到的目标函数值采用 Min-max 归一化评分方法计算得分,试验样本的分数分布情况见图 11。

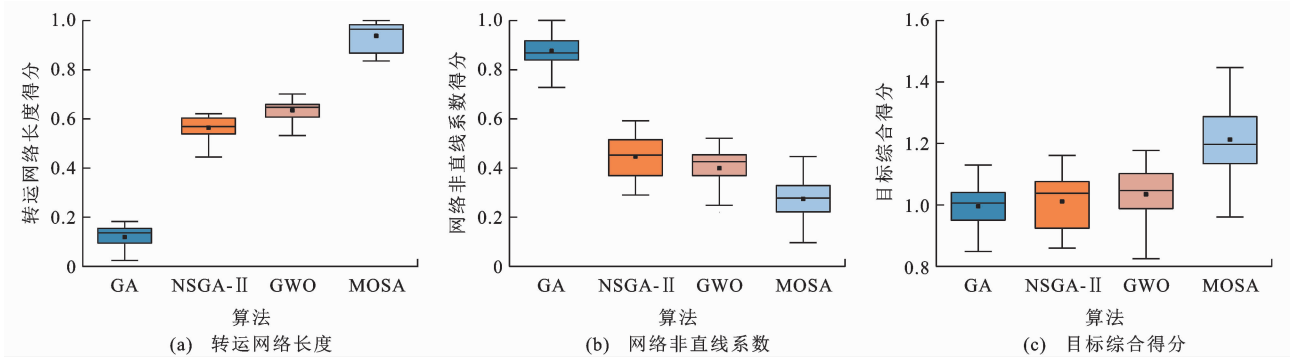


图 11 算法对比结果

Fig. 11 Algorithm comparison results

根据第 4.2 节可知,转运网络长度与网络非直线系数存在显著的负相关关系,因此算法的关键是在这 2 个目标之间取得平衡。对于转运网络长度, MOSA 得分的平均值为 0.94,相比 GA、NSGA-II 与 GWO 分别提升 0.82、0.38 与 0.31。虽然 MOSA 的网络非直线系数得分略低于其他算法,但其在大幅优化转运网络长度的同时,能够有效控制航路弯曲程度,避免因过度追求非直线系数缩短而导致航路长度陡升。经计算, MOSA 的综合得分均值为 1.21, GA、NSGA-II 与 GWO 的综合得分均值分别为 0.99、1.01 与 1.03,表明 MOSA 算法整体性能表现更优,能够更好地兼顾目标之间的关系。

### 4.4 规模分析

为分析节点规模对于航路网络的影响,在同一区域内将需求点数量设定为 9 组梯度递增的规模,即需求点数量从 10 逐步增加至 50,通过仿真得到不同节点规模下的航路网络,探究其结构与运行的

演变规律,航路网络规划结果见表 3,航路网络结构见图 12。

#### 4.4.1 航路网络拓扑

通过分析需求规模与转运点数量的关系,发现需求点数量、配送量与转运点数量的相关系数均高达 0.9,表明转运点数量与需求规模呈现显著正相关特征。随着需求点数量增加,启用的转运点数量在波动中整体呈现稳定增长趋势,航路网络拓扑结构趋于复杂,转运网络长度与配送网络长度同步提升。进一步分析航路平均介数与需求点数量的关系,二者之间呈现正相关关系。在需求点稀疏的小规模网络中,受节点数量限制,航路网络启用的航路总量处于较低水平,节点对之间的最短路径选择较少,有限的最短路径数量使得单条航路被最短路径覆盖的概率降低,导致整个网络的航路平均介数普遍偏低;随着需求点数量逐渐增加、节点密度提升,需要启用更多的航路以形成完善的连接,此时节点对之间的最短路径数量大幅增长,单条航路被最短

表3 不同需求规模下的航路网络规划结果

Table 3 Planning results of route networks under different demand scales

| 需求点数量    |         | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     |
|----------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 需求规模     | 配送量/kg  | 2 475  | 3 625  | 4 777  | 6 083  | 7 378  | 8 554  | 9 665  | 10 877 | 12 116 |
| 转运点      | 转运点数量   | 5      | 5      | 7      | 6      | 9      | 7      | 10     | 9      | 12     |
|          | 服务需求点均值 | 3.00   | 4.00   | 3.57   | 5.00   | 3.89   | 5.71   | 4.51   | 5.56   | 4.58   |
| 网络长度/kg  | 整体航路网络  | 23.10  | 25.97  | 31.39  | 32.69  | 43.57  | 46.00  | 54.15  | 57.57  | 66.40  |
|          | 转运层网络   | 6.40   | 12.68  | 15.74  | 20.82  | 20.29  | 29.52  | 26.70  | 34.06  | 33.24  |
|          | 配送层网络   | 15.64  | 11.99  | 14.04  | 10.04  | 21.11  | 14.12  | 24.75  | 20.58  | 29.90  |
| 航路介数     | 均值      | 8.82   | 13.34  | 20.10  | 21.48  | 23.05  | 25.70  | 32.70  | 34.25  | 37.18  |
|          | 标准差     | 6.64   | 13.61  | 20.95  | 27.63  | 23.72  | 33.71  | 34.22  | 40.15  | 39.69  |
| 节点度      | 均值      | 3.76   | 3.87   | 4.10   | 4.13   | 4.34   | 4.36   | 4.50   | 4.52   | 4.62   |
|          | 标准差     | 1.55   | 1.45   | 1.64   | 1.76   | 2.20   | 2.14   | 2.34   | 2.38   | 2.77   |
| 航路流量/veh | 均值      | 48.85  | 46.95  | 61.58  | 43.03  | 46.84  | 34.46  | 45.62  | 35.44  | 41.09  |
|          | 标准差     | 32.09  | 40.84  | 52.45  | 45.46  | 41.79  | 41.10  | 34.66  | 38.36  | 41.95  |
| 飞行时间/s   | 均值      | 159.52 | 161.50 | 170.99 | 164.41 | 151.73 | 148.18 | 157.36 | 158.43 | 155.05 |
|          | 标准差     | 70.10  | 73.13  | 77.11  | 72.31  | 59.85  | 58.58  | 65.04  | 65.89  | 62.54  |

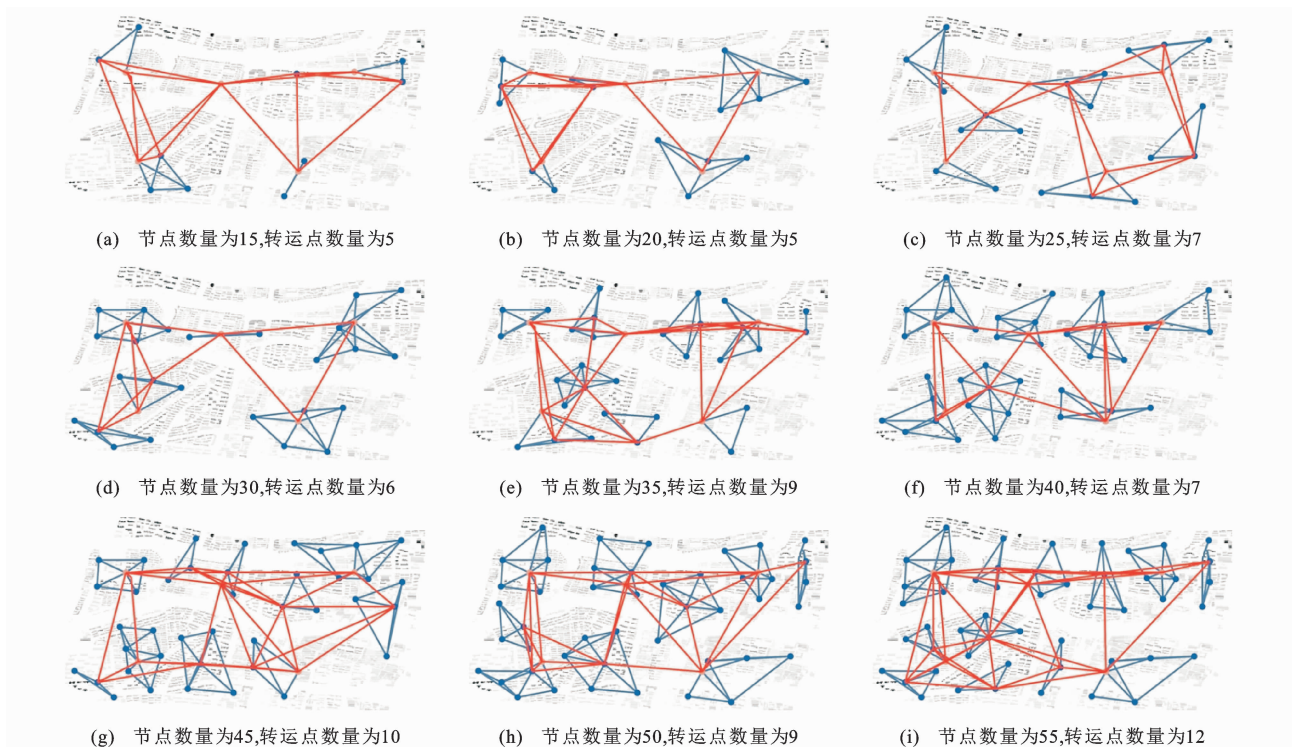


图12 不同需求规模下的航路网络结构

Fig. 12 Route network structures under different demand scales

路径覆盖的频率增大,推动航路平均介数呈现增长趋势。与此同时,随着航路网络规模扩大,内部航路的差异性逐渐凸显,部分航路因覆盖核心运输路径,介数水平持续提升,而边缘航路仅服务于局部区域,介数增长缓慢甚至维持稳定,此类差异化发展直接加剧了航路介数的分布不均衡度,航路介数标准差显著增大,反映出网络内不同航路在全局连接中的

重要性差异。

图13为节点度的空间分布特征,其中节点的尺寸与颜色直观表征了节点度的大小,节点尺寸越大、颜色越深,代表其节点度越高。与航路介数变化规律类似,节点度数值与需求点数量同样呈现正相关关系。从空间分布来看,航路网络中的配送点与转运点表现出更高的节点度水平。这是由于配送点需

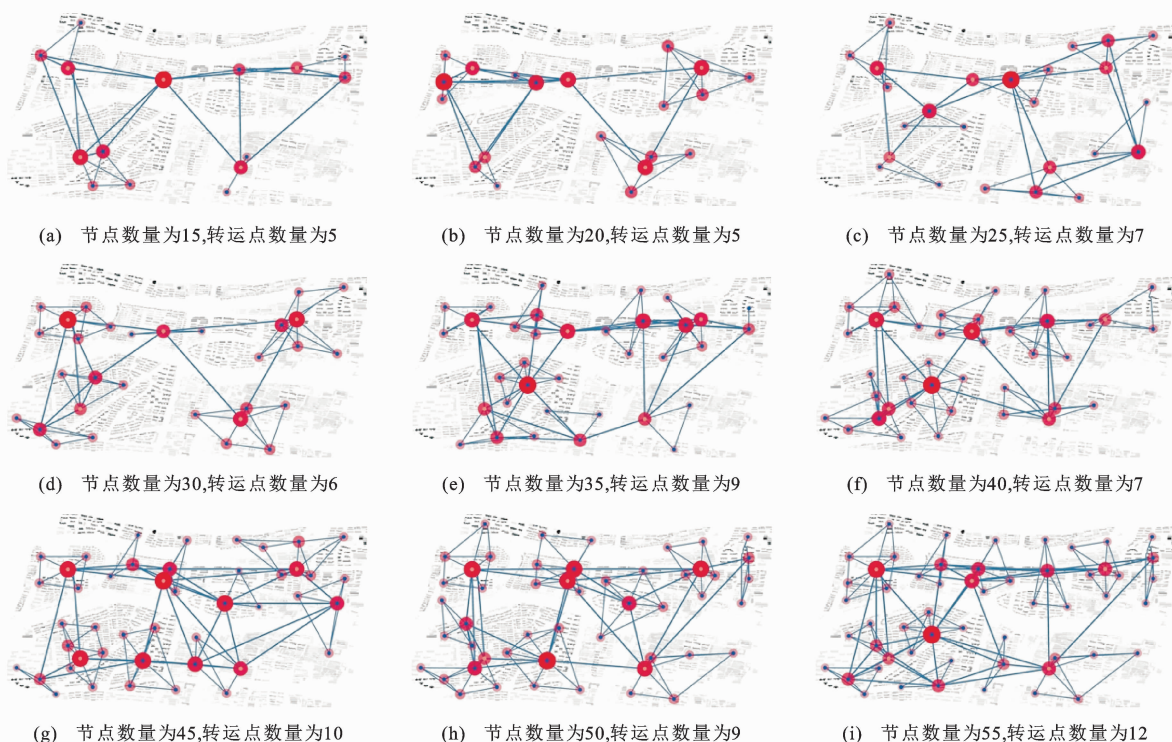


图13 不同需求规模下的节点度分布

Fig. 13 Node degree distribution under different demand scales

要衔接末端用户与转运层网络,转运点则承担跨区航路的节点衔接任务,二者均需要通过更多的航路连接实现网络的连通,因此其节点度水平明显高于普通节点。从数值演变来看,在需求点规模较小时,受节点总量与连接需求的双重约束,网络内节点连接的航路数量有限,直接导致节点度平均值处于较低区间。随着需求点规模逐步升高,节点间货物运输需求增多,为保障网络连通性与运转效率,节点间连接的航路数量增多,使得节点度平均值增大。受需求分布非均匀性影响,不同节点的连接需求分化加剧,关键节点的航路连接数量增幅高于边缘节点,导致节点度间的差异程度进一步提升,节点度标准差增大。

#### 4.4.2 航路网络运行

需求点规模是影响航路网络规模的关键因素,其变化会进一步引发航路流量分布情况。设置无人机在单次飞行中执行不超过3个需求点的配送任务,航路流量定义为完成全部需求点配送后经过航路的无人机架次。图14为不同需求规模下的航路流量分布特征,其中线段的粗细程度与颜色深浅表征了航路流量大小,线段越粗、颜色越深,则表示对应航路的流量越大。需求点规模与航路流量均值间的相关系数为 $-0.601$ ,呈现较强的负相关关系。在需求点数量较少时,节点间的空间连通性较弱,航路

网络规模相对有限,无人机可选择的飞行路径较为单一,导致部分航路在多条最短路径中被频繁复用,推高了单条航路的平均负载水平;随着需求点规模扩大,新增航路扩展了飞行路径的选择维度,原本集中于少数航路的负载压力被有效分散至更广泛的航路中,使得航路流量呈现下降趋势。此外,新增需求点改变了配送点与转运点间的服务关系,部分节点间的最短飞行路径被重构,使得无人机在空间上不再集中经过单一路径,而是在更大范围内分布飞行,进一步削弱了航路中心化特征,降低单条航路的流量占比。

图15为不同需求规模下的无人机飞行时间特征,飞行时间定义为无人机从配送点出发到达需求点的飞行时长,根据式(11)的无人机航程除以无人机速度得到。飞行时间与需求点数量呈现负相关性,其中飞行时间均值与需求点数量的相关系数为 $-0.476$ ,飞行时间标准差与需求点数量的相关系数为 $-0.644$ 。当需求点规模较小时,其空间分布呈现明显离散化特点,导致配送点与需求点间的平均距离增大,更长的单程飞行距离直接推高了无人机的整体飞行时间;此外,由于部分需求点可能紧邻配送点,另一部分需求点可能处于较远的分散位置,导致需求点与配送点间的距离差异显著,无人机飞行时间分布离散程度较高;随着需求点密集程度逐步提

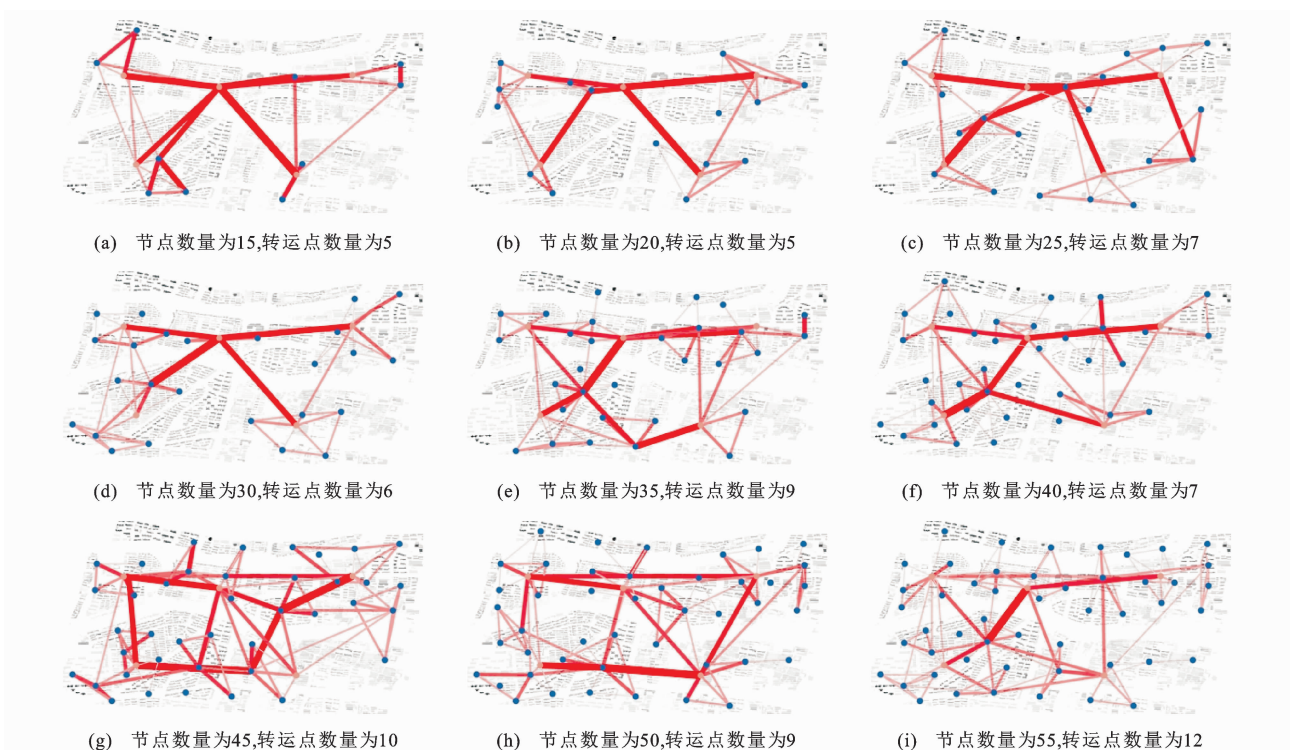


图 14 不同需求规模下的航路流量分布

Fig. 14 Route traffic distribution under different demand scales

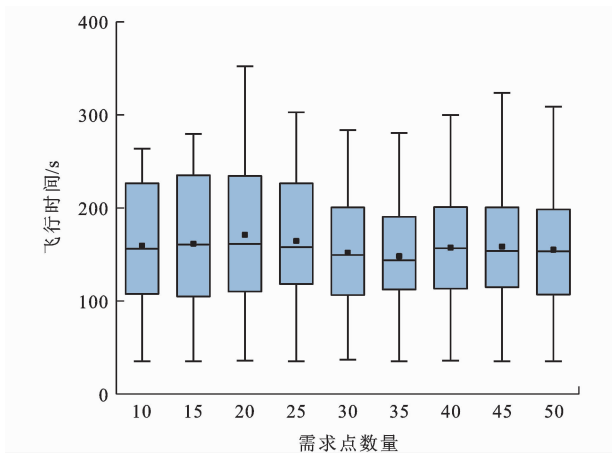


图 15 不同需求规模下的飞行时间

Fig. 15 Flight time under different demand scales

升,航路网络规模的扩展激活了更多了可选航路节点,进一步优化了节点间的最短路径连接,有助于减少平均飞行距离。节点密度的增加使得邻近需求点逐渐形成集群,各需求点与配送点间的距离差异缩小,使得无人机飞行时长波动范围降低。

#### 4.5 结构分析

在相同需求规模条件下,采用 Li 等<sup>[18]</sup>中的方法生成单层航路网络,与引入转运点的立体航路网络进行对比,分析不同航路网络结构在拓扑与运行层面上的差异。针对立体航路网络,通过本文方法生成转运层网络,而配送层网络存在 2 类模式:一类

为转运点与需求点直接相连的拓扑结构,即每个转运点仅与自身服务的需求点建立直达航路,称为双层直连模式<sup>[17]</sup>;一类为采用单层航路网络规划方法生成配送层网络,称为双层互连模式。针对需求点数量为 50 的运行场景,生成 3 种航路网络结构,仿真结果见表 4,航路网络结构见图 16。

表 4 不同结构下的航路网络规划结果

Table 4 Route network planning results under different structures

| 参数                       | 单层网络  | 双层直连   | 双层互连   |        |
|--------------------------|-------|--------|--------|--------|
| 网络长度/km                  | 38.77 | 46.68  | 66.40  |        |
| 网络非直线系数                  | 1.49  | 1.37   | 1.28   |        |
| 航路介数                     | 均值    | 69.61  | 57.59  | 37.18  |
|                          | 标准差   | 75.31  | 34.35  | 39.69  |
| 节点度                      | 均值    | 3.89   | 2.91   | 4.62   |
|                          | 标准差   | 0.89   | 3.52   | 2.77   |
| 航路流量/veh                 | 均值    | 86.38  | 74.19  | 41.09  |
|                          | 标准差   | 96.93  | 52.47  | 41.95  |
| 飞行时间/s                   | 均值    | 191.72 | 164.43 | 155.05 |
|                          | 标准差   | 86.36  | 68.52  | 62.54  |
| 任务累计里程/10 <sup>7</sup> m | 2.41  | 2.06   | 1.81   |        |

##### 4.5.1 航路网络拓扑

航路网络长度是反映网络规模与连接密度的关键指标,由于单层航路网络没有转运层,仅通过配送航路直接连接配送点与需求点,其网络规模

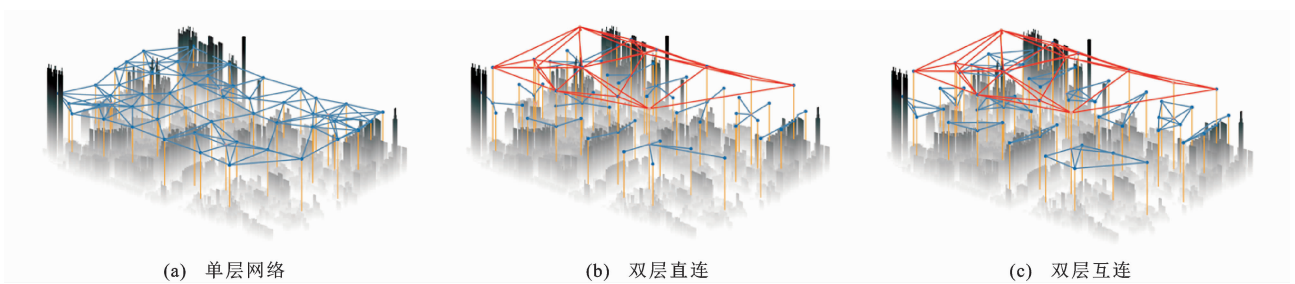


图 16 航路网络结构对比

Fig. 16 Comparison of route network structures

最小。3类航路网络的非直线系数与介数均值均呈现递减趋势,双层互连网络相比单层网络分别减少 14.09%与 46.59%。在单层网络中,所有运输需求均依赖于有限的配送航路,配送点需要通过长距离绕路实现需求点的覆盖,网络非直线系数升高,而各航路承担不可替代的连通功能导致航路介数升高;双层直连网络虽通过转运层航路进行缓冲,由于配送层网络中需求点连接不充分,当无人机单次飞行中对多个需求点进行货物配送时,需通过转运点得以到达不同需求点,转运航路承载大部分飞行流量;双层互连网络通过优化配送层网络的连接方式,节点间最短路径选择维度增加,缩短了节点间的配送路径距离,网络非直线系数与航路介数均值进一步减小。

航路网络的节点度分布见图 17,可以看出:在双层互连网络中,通过 12 个转运点实现配送点与需求点的连接,每个转运点所服务的需求点之间进一步通过算法优化形成连接关系,航路数量显著增加,直接推动节点度均值增大;由于双层直连网络采用转运点与需求点直接相连的模式,仅转运点需同时承担转运航路与配送航路的双重连接功能,而需求点仅与对应服务的转运点建立连接,导致需求点连接的航路数量极少,导致节点度均值降低,节点度分布差异增大;在单层网络中,因未对转运航路与配送航路进行功能划分,所有节点的功能定位无明显差异,航路连接主要依据整体优化目标布局,节点间的连接关系更为均衡,因此其节点度标准差在 3 类网络中最小。

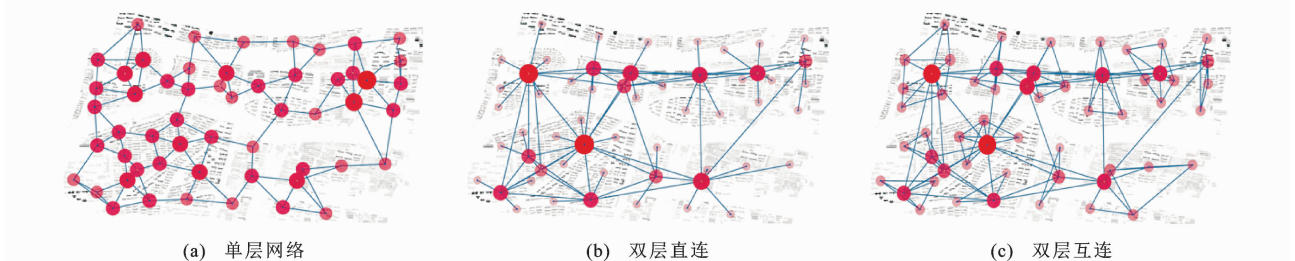


图 17 不同结构下的节点度分布

Fig. 17 Node degree distribution under different structures

#### 4.5.2 航路网络运行

航路网络的流量分布见图 18,可以看出:在完成相同体量配送任务的前提下,单层网络的航路流量均值高达 86.38 veh,标准差高达 96.93,表明网

络中存在部分航路拥堵、部分航路闲置的现象。这是由于单层网络航路数量较少,50 个需求点的配送任务集中于有限航路,导致部分航路的负载增加,引发整体流量分布差异性扩大。通过引入转运航路分

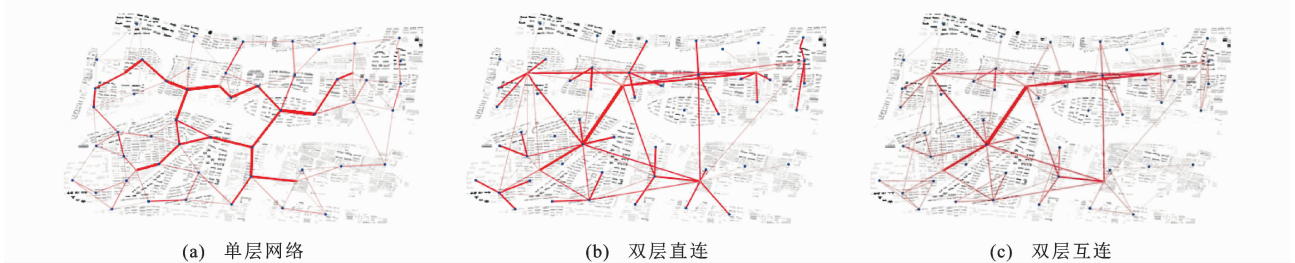


图 18 不同结构下的航路流量分布

Fig. 18 Route traffic flow distribution under different structures

流,双层网络的流量分布均衡性得到明显提升。与单层网络相比,双层直连与双层互连网络的航路流量均值分别降低了 14.11%与 52.43%。分流效果差异主要源于配送网络连接模式不同,双层直连网络中配送航路直接相连模式限制了航路可选择性,导致其航路流量分流能力有限,而双层互连网络可通过转运点将流量有效分散至配送层网络,更高的节点度进一步稀释了单条航路负载压力,使得流量分布最为均衡,航路利用效率更高。

飞行时间与网络非直线系数有关,非直线系数越小,意味着配送点与需求点之间的实际通行路径越接近直线距离,飞行时间也相应越短。由于双层互连网络的非直线系数最小,表明配送点与需求点间的空间连接效率最优,因此其飞行时间也相应最短。任务累计里程是无人机执行完所有配送任务的累计飞行距离,单层网络飞行时间长、流量集中,配送中无人机需要经过多个节点,导致任务累计里程较大。双层直连网络虽凭借直连航路设计,在飞行时长上较单层网络有所优化,但需求点间连通性较差,而双层互连网络依托更强的节点间连接性,避免了流量集中与路径迂回问题,其飞行时间和累计飞行里程优势显著。

## 5 结 语

(1)本文将地面立体交通理念迁移至低空物流领域,提出了城市低空物流无人机立体航路网络规划方法,通过分层级航路衔接与多功能节点协同,形成“一网-双层-三节点”的航路网络结构,实现了低空空域资源的高效化利用。以江苏南京某地区为研究案例,采用基于 SOM 与 MOSA 的算法框架求解,最终生成包含 12 个转运点、129 条航路的立体航路网络。经与 GA、NSGA-II 与 GWO 等算法的对比分析,本文 MOSA 算法能够有效平衡目标之间的关系,提升了复杂约束下低空航路网络的求解质量。

(2)通过分析需求规模对航路网络的影响发现,在航路网络结构层面,需求规模扩大推动转运点数量提升、网络拓扑趋于复杂,节点连接性与航路覆盖能力显著增强。在航路网络运行层面,需求规模的扩大通过有效拓展路径选择维度,打破了小规模需求下的路径约束瓶颈,实现了航路负载分散与飞行效率提升。进一步分析 3 类网络拓扑与运行特征发现,单层网络结构简单,适用于小规模、低密度无人机运行场景。虽然双层直连网络拓扑与运行性能表现良好,但其节点间连接能力有限,无法实现流量高效

分散。相比之下,本文构建的航路网络缓解了单层网络流量分布不均衡,弥补了双层直连网络连接能力不充足,在高密度需求下展示出更优的综合性能。

(3)本文提出的城市低空物流无人机立体航路网络规划方法,可以实现密集需求场景中的航路网络布局,但在超大城市场景应用、动态干扰应对与无人机调度方面的研究存在局限性,后续应从以下三方面深化研究:一是拓展超大规模城市场景适配性,依据城市空间布局、配送需求密度等,将超大规模城市划分为若干区块,探索区域分块与跨区协同的航路网络规划路径;二是强化动态场景适应能力,针对特殊气象、临时障碍等动态因素,研究动态场景下的航路网络动态规划与局部重构方法,结合无人机实时运行状态,在受干扰时调整航路网络拓扑结构与飞行流量分配情况;三是开展无人机协同调度研究,考虑到航路网络稳定运行与无人机高效调度密不可分,未来将结合配送需求时段差异、异质无人机性能特征与充电资源配置情况,在航路网络构建模型中融入无人机运输相关指标,实现网络结构与运输效能的协同优化,在此基础上进一步研究多无人机协同调度方法,探索续航失效场景下的无人机任务重分配策略与应急处置方案,提升无人机在复杂场景下的协同运输效能。

## 参 考 文 献 :

### References :

- [1] 李卓伦,陆建,王学瑞,等.城市物流无人机起降点与卡车停靠点协同选址方法[J].交通运输工程学报,2026,26(3):89-105.  
LI Zhuo-lun, LU Jian, WANG Xue-rui, et al. Collaborative location method for drone vertiport and truck parking point in urban logistics[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(3): 89-105.
- [2] 廖小罕,屈文秋,徐晨晨,等.城市空中交通及其新型基础设施低空公共航路研究综述[J].航空学报,2023,44(24):1-29.  
LIAO Xiao-han, QU Wen-qiu, XU Chen-chen, et al. A review of urban air mobility and its new infrastructure low-altitude public routes[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(24): 1-29.
- [3] 冯棣坤,张洪海,华明壮,等.面向城市低空物流的多层异质起降场点网络协同规划[J].交通运输工程学报,2026,26(2):110-124.  
FENG Di-kun, ZHANG Hong-hai, HUA Ming-zhuang, et al. Multi-layer heterogeneous take-off and landing site network collaborative planning for urban low-altitude logistics[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(2): 110-124.
- [4] YANG J, WANG Y J, HANG X, et al. A review on

- airspace design and risk assessment for urban air mobility[J]. IEEE Access, 2024, 12: 157599-157611.
- [5] 陈义友,张建平,邹 翔,等.民用无人机交通管理体系架构及关键技术[J].科学技术与工程,2021,21(31):13221-13237. CHEN Yi-you, ZHANG Jian-ping, ZOU Xiang, et al. System framework and key technologies of civil unmanned aircraft system traffic management[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(31): 13221-13237.
- [6] 张悦乐,胡 荣,魏鼎功,等.面向动态需求的无人物流配送中心选址研究[J/OL].华东交通大学学报,2025,https://doi.org/10.16749/j.cnki.jecjtu.20251106.007. ZHANG Yue-le, HU Rong, WEI Ding-gong, et al. Research on the location selection of UAV logistics distribution centers for dynamic demand[J/OL]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, https://doi.org/10.16749/j.cnki.jecjtu.20251106.007.
- [7] 刘光才,马寅松.城市物流无人机配送中心选址及任务分配研究[J].飞行力学,2023,41(3):88-94. LIU Guang-cai, MA Yin-song. Research on location and task allocation of urban logistics UAV distribution center[J]. Flight Dynamics, 2023, 41(3): 88-94.
- [8] 李诚龙,屈文秋,李彦冬,等.面向 eVTOL 航空器的城市空中运输管理综述[J].交通运输工程学报,2020,20(4):35-54. LI Cheng-long, QU Wen-qiu, LI Yan-dong, et al. Overview of traffic management of urban air mobility (UAM) with eVTOL aircraft[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(4): 35-54.
- [9] MOHAMED SALLEH M F B, CHI W C, WANG Z K, et al. Preliminary concept of adaptive urban airspace management for unmanned aircraft operations[C]//AIAA. 2018 AIAA Information Systems-AIAA Infotech @ Aerospace. Reston: AIAA, 2018: 1-12.
- [10] XU C C, LIAO X H, YE H P, et al. Iterative construction of low-altitude UAV air route network in urban areas: Case planning and assessment[J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(9): 1534-1552.
- [11] 贾永楠.低空空域无人系统交通管理方案初探[J].航空学报,2025,46(11):121-147. JIA Yong-nan. A scheme for unmanned aerial system traffic management in low-altitude airspace[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(11): 121-147.
- [12] ZHANG H H, TIAN T, FENG O G, et al. Research on public air route network planning of urban low-altitude logistics unmanned aerial vehicles[J]. Sustainability, 2023, 15(15): 12021.
- [13] MCFADYEN A, BRUGGEMANN T. Unmanned air traffic network design concepts[C]//IEEE. 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). New York: IEEE, 2017: 1-7.
- [14] YE M, ZHAO J C, GUAN Q L, et al. Research on eVTOL air route network planning based on improved A\* algorithm[J]. Sustainability, 2024, 16(2): 561.
- [15] HE X Y, LI L S, MO Y F, et al. A distributed route network planning method with congestion pricing for drone delivery services in cities[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 160: 104536.
- [16] 张春晓,郭 通,李宇萌.城市低空立体物流网络双种群协同优化方法[J].航空学报,2025,46(11):287-306. ZHANG Chun-xiao, GUO Tong, LI Yu-meng. Dual-population coevolutionary optimization for multi-layer urban air logistics network[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(11): 287-306.
- [17] LI Z L, LI S, LU J, et al. Air route network planning method of urban low-altitude logistics UAV with double-layer structure[J]. Drones, 2025, 9(3): 193.
- [18] 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: 108572.
- [19] SUNIL E, ELLERBROEK J, HOEKSTRA J M, et al. Three-dimensional conflict count models for unstructured and layered airspace designs[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 95: 295-319.
- [20] SUNIL E, ELLERBROEK J, HOEKSTRA J, et al. Analysis of airspace structure and capacity for decentralized separation using fast-time simulations[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2017, 40(1): 38-51.
- [21] 陈 丹,汤 程,谢 宇,等.面向城市低空物流配送的无人机实时航迹双层规划[J].航空学报,2025,46(16):229-247. CHEN Dan, TANG Cheng, XIE Yu, et al. Real time dual layer path planning of unmanned aerial vehicles for urban low altitude logistics distribution[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(16): 229-247.
- [22] KOHONEN T. The self-organizing map[J]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(9): 1464-1480.
- [23] VERMA S, PANT M, SNASEL V. A comprehensive review on NSGA-II for multi-objective combinatorial optimization problems[J]. IEEE Access, 2021, 9: 57757-57791.
- [24] 李 珊,张洪海,刘 峰.基于改进元胞自动机算法的物流无人机航路规划[J].华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(12):14-19. LI Shan, ZHANG Hong-hai, LIU Hao. Route planning for logistics unmanned aerial vehicle based on improved cellular automata algorithm[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(12): 14-19.
- [25] BOHACHEVSKY I O, JOHNSON M E, STEIN M L. Generalized simulated annealing for function optimization[J]. Technometrics, 1986, 28(3): 209-217.