

文章编号:1671-1637(2026)04-0079-11

考虑服务质量的轴辐式UAM网络构建模型

姜雨^{*1}, 龙颖¹, 薛清文², 原野¹, 袁黎³

(1. 南京航空航天大学民航学院, 江苏南京 210016; 2. 南京航空航天大学通用航空与飞行学院, 江苏溧阳 213300; 3. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098)

摘要:随着城市低空经济的快速发展,科学布局垂直起降设施并构建高效运行的城市空中交通(UAM)网络成为UAM发展的关键和核心。根据容量和功能差异将垂直起降设施分为起降场和起降点,构建了考虑容量限制的非严格多分配两级轴辐式UAM网络;以垂直起降设施建设成本和网络运输成本最小、总出行时间最小、平均服务质量惩罚分数最小为目标,构建了多目标优化模型;以第三代非支配遗传算法为主优化框架,嵌入了变邻域搜索算法协同优化垂直起降设施选址决策及网络连接方案;以北京市地面交通出行数据为例,预测UAM潜在出行需求并生成垂直起降设施候选点集,在此基础上验证模型有效性,并进行了参数灵敏度试验。研究结果表明:相比传统两级网络结构,两级轴辐式网络能够将总成本降低0.9%,将总出行时间降低12.1%,将单位需求出行时间平均缩短4.12 min,同时提供更优的服务质量;垂直起降设施建设数量对各目标函数值和网络拥挤度有显著影响,当建设3个起降场、8个起降点时,UAM网络可达到各目标函数间的较好平衡。由此,该模型能够在提高经济效益和运输效率的同时,提高UAM网络服务质量,从而为构建轴辐式UAM网络提供科学的规划决策支持。

关键词:航空运输;城市空中交通网络;轴辐式网络;多目标优化;低空交通;垂直起降设施;选址
中图分类号:U113 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.165

Hub-and-spoke UAM network design model considering service quality

JIANG Yu^{*1}, LONG Ying¹, XUE Qing-wen², YUAN Ye¹, YUAN Li³

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China;
2. College of General Aviation and Flight, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Liyang 213300, Jiangsu, China;
3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract: With the rapid development of the urban low-altitude economy, scientific layout of vertical take-off and landing (VTOL) facilities and the construction of an efficiently operated urban air mobility (UAM) network constitute the key and core of UAM development. Differentiating VTOL facilities by capacity and function into vertiports and vertistops, this study established a non-strict multi-allocation two-level hub-and-spoke UAM network that incorporates capacity constraints. A multi-objective optimization model was established with the objectives of minimizing VTOL facility construction cost and network transportation cost, minimizing total travel time, and minimizing the average service quality penalty score. The model was solved using a hybrid framework based on the

出版历程:2025-08-08 收稿,2025-12-22 修回,2026-01-22 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(52372298,52302517);江苏省自然科学基金项目(BK20230893)

*作者简介:姜雨(1975-),女,山东烟台人,教授,工学博士,E-mail:jiangyu07@nuaa.edu.cn。

引用格式:姜雨,龙颖,薛清文,等.考虑服务质量的轴辐式UAM网络构建模型[J].交通运输工程学报,2026,26(4):79-89.

Citation: JIANG Yu, LONG Ying, XUE Qing-wen, et al. Hub-and-spoke UAM network design model considering service quality [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(4): 79-89.

non-dominated sorting genetic algorithm III, enhanced by an embedded variable neighborhood search to co-optimize the location decisions for VTOL facilities and the network allocation scheme. Ground traffic travel data of Beijing was taken as a case study. UAM travel demand was predicted and a candidate VTOL facility set was generated. Based on this, model validity was verified and parameter sensitivity experiments were conducted. Research results show that, compared to traditional two-level network structures, the two-level hub-and-spoke network reduces total cost by 0.9%, reduces total travel time by 12.1%, shortens the average travel time per unit demand by 4.12 minutes, and delivers superior service quality. The number of VTOL facilities significantly affects objective function values and network congestion. An optimal trade-off among all objectives is achieved when deploying 3 vertiports and 8 vertistops. The proposed model thus enhances both economic benefits and transportation efficiency while improving UAM service quality, offering scientific decision support for the planning of hub-and-spoke UAM networks.

Keywords: air transportation; UAM network; hub-and-spoke network; multi-objective optimization; low-altitude traffic; vertiport; location decision

Publication history: Received 2025-08-08; Received in revised form 2025-12-22; Accepted 2026-01-22

Funding: National Natural Science Foundation of China (52372298, 52302517); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20230893)

* **Corresponding author:** JIANG Yu, professor, PhD, E-mail: jiangyu07@nuaa.edu.cn.

0 引 言

依托中国低空经济政策支持,以电动垂直起降(Electric Vertical Take-off and Landing, eVTOL)航空器为核心的城市空中交通(Urban Air Mobility, UAM)已纳入中国城市立体化发展的重点布局领域。作为其发展的关键,UAM网络构建涉及垂直起降设施选址与网络连接设计两方面,直接决定系统运行效率,对缓解地面交通拥堵和构建低碳出行体系具有重要意义。

垂直起降设施选址是一个多维决策问题,需统筹需求覆盖、运营约束与城市规划。空域限制^[1]、环境影响及社会经济条件构成选址基本约束。Guo等^[2]考虑土地和起降适宜性开发三维空间模型;Lee等^[3]提出包含适用度、法规和位置分析的三阶段框架。在此基础上,K-Means聚类被广泛用于识别需求热点^[4],迭代约束聚类^[5]和加权聚类算法^[6]则用于应对需求多样性。进一步地,选址被建模为优化问题,Wu等^[7]建立最小化总成本的混合整数线性规划模型;Jin等^[8]在预算不确定集下构建鲁棒优化模型;Jiang等^[9]提出兼顾需求覆盖、拥堵缓解与建设成本的多目标多阶段优化框架;李卓伦等^[10]考虑物流配送距离、用户需求分布等因素,并融合模糊C均值聚类与多目标多元宇宙优化算法,建立多目标无人机起降点选址模型;Song等^[11]量化了设施位置对网络

拓扑的影响,强调基于网络进行选址的重要性。因此,选址问题最终还须整合到网络连接设计中。

在网络连接设计方面,现有研究多将其建模为枢纽选址问题,考虑连通性^[12]、容量限制、续航里程、局部拥堵等因素。Willey等^[13]构建单分配p-Hub中位模型,引入子图同构增强网络结构性;Rath等^[14]通过线性化多项Logit模型,将多模式出行纳入优化框架;Kitthamkesorn等^[15]进一步考虑eVTOL航程限制,构建多分配不完全p-Hub模型,并基于eUnit模型研究出行选择与网络成本的相互作用。此外,Zhang等^[16]构建空地排队均衡模型以缓解拥堵;Gao等^[17]提出噪声感知优化方法,考虑需求和噪声污染两方面的公平性;Wei等^[18]设计具备中断应对能力的鲁棒网络,配置备用设施位置与容量。尽管研究成果丰富,但现有研究普遍忽视垂直起降设施的层级差异,尚未解决多层级UAM网络的枢纽协同问题。

多层级轴辐式网络作为航空及物流领域的经典范式^[19-21],通过枢纽分级形成层级化拓扑。相比传统单层网络,该网络包含至少两级枢纽,能有效适应eVTOL航程限制与城市多中心需求。尹浩东等^[22]将设施分为两级,分别构建选址及路径规划模型,验证两级轴辐式网络可降低建设成本。Guo等^[23]进一步构建考虑容量限制的三级p-Hub中位模型。然而,上述研究忽视了由需求差异导致的运输成本异

质性:高层级航线通常服务高需求区域,eVTOL 客座率高、单位运输成本低;低层级航线则反之。因此,现有模型尚未准确刻画多层次 UAM 网络的真实成本结构,制约其在复杂城市环境中的适用性。

此外,服务质量是衡量 UAM 系统竞争力的关键指标,直接影响乘客出行体验与 UAM 模式选择优势。作为多式联运系统,UAM 服务质量涵盖地面接驳便利性、换乘等待时间及行程可靠性等维度。当前研究多聚焦于成本与时间优化,尚未将 UAM 服务质量指标量化并纳入目标函数。相比之下,传统交通系统已将服务质量深度整合于系统设计:航空网络优化关注航班准点率与中转效率^[24],城市物流则强调准时送达与服务可靠性^[25]。作为面向公众的新型出行方式,UAM 亟需借鉴此类经验,将关键服务质量指标量化建模,实现运营效率与服务品质的协同提升。

综上所述,现有研究存在以下局限:其一,垂直起降设施选址决策与网络连接设计常被分开研究,忽视了二者的耦合效应;其二,UAM 网络层级缺乏差异化建设;其三,传统模型通常聚焦成本与时效目标,对 UAM 特有的服务质量要素量化不足。

为此,本文提出一种考虑服务质量的轴辐式 UAM 网络构建模型。将垂直起降设施及航线划分为两级,以最小化总成本、总出行时间及平均服务质量惩罚分数为目标,协同优化垂直起降设施选址决策及网络连接方案。设计嵌入变邻域搜索算法(Variable Neighborhood Search, VNS)的第三代非支配遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III, NSGA-III)求解模型,并基于北京市地面交通出行数据验证模型在大城市场景下的有效性。

1 问题描述

根据 2022 年民航局发布的《民用无人驾驶航空发展路线图 V1.0(征求意见稿)》^[26]及行业团体标准^[27-28],城市内空中交通宜采用由起降场和起降点构成的两级网络。受限于安全监管、eVTOL 续航里程及当前基础设施条件,UAM 发展早期难以实现全连接^[29],须基于需求与运营经济性评估航线建立的必要性。

为此,本文构建考虑容量限制的非严格多分配两级轴辐式 UAM 网络,如图 1 所示。起降场建设成本较高、容量较大且提供充电服务,彼此全连接以保障市中心服务效率;起降点建设成本较低、容量较小

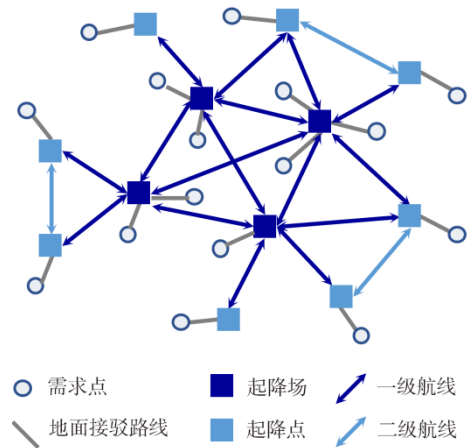


图 1 两级轴辐式 UAM 网络结构

Fig. 1 Two-level hub-and-spoke UAM network structure

且不具备充电功能,需至少连接一个起降场,并可与其他起降点直连,形成网络向郊区的延伸;需求点单分配至距离其最近的垂直起降设施,通过地面交通接驳。为反映运输成本异质性,定义起降场之间、起降场和起降点之间的航线为一级航线,起降点之间的航线为二级航线。一级航线服务于高需求区域,相比二级航线 eVTOL 客座率更高,单位距离运输成本更低。

在该网络结构下,起点或终点位于市中心的行程可直达,起点和终点均位于郊区的行程则可能经历 1 到 2 次中转,典型出行路径如图 2 所示。行程 p 所经过的垂直起降设施序列为 $S_p = \{s_0, s_1, \dots, s_e\}$ 。为降低中转频率、缩短地面接驳时间,还需将服务质量纳入优化目标,通过路径选择引导高效出行。

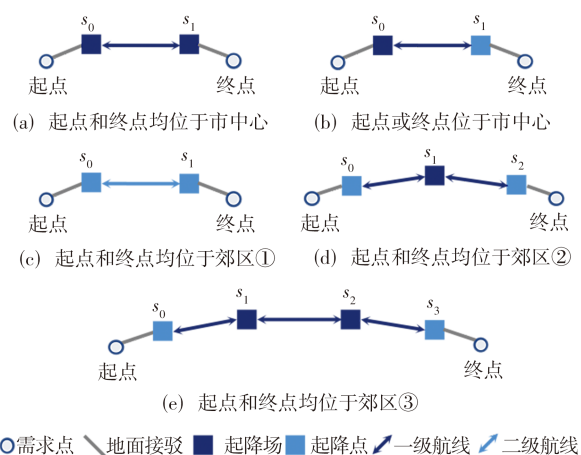


图 2 出行路径

Fig. 2 Travel paths

综上,本文综合考虑两级垂直起降设施选址与网络连接的相互作用,以总成本最小、总出行时间最小及平均服务质量最优为目标,构建两级轴辐式 UAM 网络。

2 模型建立

2.1 模型假设

- (1)起降场和起降点建设数量已知。
- (2)需求点单分配至最近垂直起降设施。
- (3)在满足 eVTOL 续航安全约束的前提下,任意 2 个起降场之间全连接,起降点至少与 1 个起降场连接,起降点之间允许直连。
- (4)UAM 行程可经过 1 或 2 个设施中转。
- (5)起降场和起降点具有不同容量限制。
- (6)eVTOL 最大续航里程为 200 km,平均飞行速度为 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2.2 目标函数

2.2.1 总成本最小化

本文考虑垂直起降设施选址及网络连接对 UAM 系统的影响,总成本 Z_1 包含垂直起降设施建设成本和网络运输成本,得到目标函数 1 如下

$$\min Z_1 = \sum_{k \in K} (F_1 y_{k,1} + F_2 y_{k,2}) + \sum_{p \in P} D_p \left(\sum_{m \in K} \sum_{n \in K, m \neq n} c_{m,n} g_{p,m} h_{p,n} \right) \quad (1)$$

式中: K 、 P 分别为候选垂直起降设施和 UAM 行程的集合; $y_{k,1}$ 为 0-1 决策变量,表示是否在候选点 k 处建立起降场; $y_{k,2}$ 为 0-1 决策变量,表示是否在候选点 k 处建立起降点; F_1 、 F_2 分别为起降场、起降点的建设成本; D_p 为行程 p 的 UAM 需求量; $c_{m,n}$ 为从垂直起降设施 m 到 n 的单位需求运输成本; $g_{p,m}$ 为 0-1 决策变量,表示距离行程 p 起点最近的设施是否为 m ; $h_{p,n}$ 为 0-1 决策变量,表示距离行程 p 终点最近的设施是否为 n 。

其中,行程 p 所经过的垂直起降设施序列 $S_p = \{s_0 = m, s_1, \dots, s_e = n\}$,因此单位需求运输成本 $c_{m,n}$ 等于其经过所有航线的单位需求运输成本之和,数学表达式如下

$$c_{m,n} = \sum_{q=0}^{e-1} H_{s(q),s(q+1)} \left[c_1 \beta_{s(q),s(q+1)} + c_2 \delta_{s(q),s(q+1)} \right] \quad (2)$$

$$H_{s(q),s(q+1)} = 2r \arcsin \left\{ \left[\sin \frac{a_{s(q)} - a_{s(q+1)}}{2} \right]^2 + \cos[a_{s(q)}] \cos[a_{s(q+1)}] \left[\sin \frac{o_{s(q)} - o_{s(q+1)}}{2} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (3)$$

式中: $H_{s(q),s(q+1)}$ 为设施 $s(q)$ 到设施 $s(q+1)$ 的大圆距离; c_1 、 c_2 分别为一级航线、二级航线的单位距离运输成本; $\beta_{s(q),s(q+1)}$ 为 0-1 决策变量,表示链路 $[s(q),s(q+1)]$ 是否为一级航线; $\delta_{s(q),s(q+1)}$ 为 0-1 决

策变量,表示链路 $[s(q),s(q+1)]$ 是否为二级航线; r 为地球半径,取 6 371 km; $o_{s(q)}$ 、 $a_{s(q)}$ 分别为设施 s_q 的经度和纬度。

2.2.2 总出行时间最小化

UAM 出行是一个多式联运过程,包括从出发地通过地面交通至首个垂直起降设施 m ,经至少一段飞行到达最后一个设施 n ,再通过地面交通抵达目的地。总出行时间 Z_2 包括空中飞行时间、在各设施的平均等待时间(含出入、排队、起降等)及 2 段地面接驳时间,得到目标函数 2 如下

$$\min Z_2 = \sum_{p \in P} D_p \left(\sum_{m \in K} \sum_{n \in K, m \neq n} t_{m,n} g_{p,m} h_{p,n} + \sum_{m \in K} t_{p,m} g_{p,m} + \sum_{n \in K} t_{p,n} h_{p,n} \right) \quad (4)$$

$$t_{m,n} = \frac{1}{v} \sum_{q=0}^{e-1} H_{s(q),s(q+1)} + \sum_{k \in K} z_{p,k} t_w \quad (5)$$

式中: $t_{m,n}$ 为从垂直起降设施 m 到设施 n 的总时间; $t_{p,m}$ 为行程 p 采用汽车方式从出发地到设施 m 所需时间; $t_{p,n}$ 为行程 p 采用汽车方式从设施 n 到目的地所需时间; v 为 eVTOL 飞行速度; $z_{p,k}$ 为 0-1 决策变量,表示行程 p 是否经过候选点 k ; t_w 为经过某一设施平均等待时间。

2.2.3 平均服务质量惩罚分数最小化

为提高 UAM 服务质量,增强出行便利性,本文设计最小化平均惩罚分数目标。当行程经历中转或地面接驳时间超过最大可接受时间时,触发服务质量惩罚机制,得到目标函数 3 如下

$$Z_3 = \min \left\{ \frac{\sum_{p \in P} D_p \left[\theta_1 \left(\sum_{k \in K} z_{p,k} - 2 \right) + \theta_2 x_p \right]}{\sum_{p \in P} D_p} \right\} \quad (6)$$

式中: Z_3 为平均服务质量惩罚分数; θ_1 为每次中转的惩罚系数; θ_2 为不满足地面接驳时间限制的惩罚系数; x_p 为 0-1 决策变量,表示行程 p 地面接驳时间是否超过最大可接受时间。

2.3 约束条件

垂直起降设施数量约束为

$$\sum_{k \in K} y_{k,1} = r_1 \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} y_{k,2} = r_2 \quad (8)$$

$$y_{k,1} + y_{k,2} \leq 1 \quad (9)$$

式中: r_1 为起降场建设数量; r_2 为起降点建设数量。

式(7)、(8)确定了起降场和起降点建设数量,式

(9)确保候选点 k 不同时建立起降场和起降点。

基本路线约束为

$$g_{p,m} \leq y_{m,1} + y_{m,2} \quad (10)$$

$$h_{p,n} \leq y_{n,1} + y_{n,2} \quad (11)$$

式(10)、(11)确保当且仅当 m 和 n 被选择建设垂直起降设施时,行程 p 才能选择其作为行程的首末站。

起点-终点分配约束为

$$\sum_{m \in K} g_{p,m} = 1 \quad (12)$$

$$\sum_{n \in K} h_{p,n} = 1 \quad (13)$$

式(12)、(13)表示行程 p 的起点和终点单分配至一个垂直起降设施。

基本航线约束为

$$\beta_{i,j} + \delta_{i,j} \leq 1 \quad \forall i, j \in K, i \neq j \quad (14)$$

$$\beta_{i,j} + \delta_{i,j} \leq y_{i,1} + y_{i,2} \quad (15)$$

$$\beta_{i,j} + \delta_{i,j} \leq y_{j,1} + y_{j,2} \quad (16)$$

式(14)确保任意两设施间不能同时建立一级航线和二级航线。式(15)、(16)确保当且仅当 i 和 j 被选择建设垂直起降设施时,航线 (i,j) 才可能存在。

航线级别约束为

$$\beta_{i,j} \leq 2 - y_{i,2} - y_{j,2} \quad (17)$$

$$\delta_{i,j} \leq 1 - y_{i,1} \quad (18)$$

$$\delta_{i,j} \leq 1 - y_{j,1} \quad (19)$$

式(17)表示当 i 和 j 同为起降点时,航线 (i,j) 不可为一级航线。式(18)、(19)表示当 i 或 j 中存在起降场时,航线 (i,j) 不可为二级航线。

基本续航安全约束为

$$H_{i,j} \leq H_m + M(1 - \beta_{i,j} - \delta_{i,j}) \quad (20)$$

式中: $H_{i,j}$ 为从点 i 到点 j 的大圆距离; H_m 为eVTOL最大续航里程; M 为一个足够大的数。

式(20)表示当所需飞行距离超过eVTOL最大续航里程时,垂直起降设施之间不允许连接。

二级航线续航安全约束为

$$H_{i,j} + H_{j,k} \beta_{j,k} \leq H_m + M(1 - \delta_{i,j}) \quad (21)$$

$$\forall i, j, k \in K, i \neq j \neq k, \beta_{j,k} = 1$$

由于起降点不具备充电设施,因此,需保证eVTOL完成二级航线飞行后,剩余续航里程能够支持其返回起降场充电。式(21)确保从起降点 i 到起降点 j 再到起降场 k 的总距离不超过eVTOL最大续航里程时, i 与 j 之间才可建立二级航线。

起降场之间连接约束为

$$\beta_{i,j} \geq y_{i,1} + y_{j,1} - 1 \quad H_{i,j} \leq H_m \quad (22)$$

式(22)表示在满足续航安全约束的前提下,起降场之间全部直连。

起降场与起降点之间连接约束为

$$\sum_{i \in K} \beta_{i,j} \geq y_{j,2} \quad (23)$$

式(23)表示在满足续航安全约束的前提下,每个起降点至少与一个起降场建立航线。

容量约束为

$$\sum_{p \in P} D_p z_{p,k} \leq D_1 y_{k,1} + D_2 y_{k,2} \quad (24)$$

式中: D_1 、 D_2 分别为起降场、起降点最大容量。

式(24)确保垂直起降设施服务的需求量不超过其最大容量。

地面接驳时间约束为

$$\sum_{m \in K} t_{p,m} g_{p,m} \leq T_m + Mx_p \quad (25)$$

$$\sum_{n \in K} t_{p,n} h_{p,n} \leq T_m + Mx_p \quad (26)$$

式中: T_m 为地面接驳最大可接受时间。

式(25)、(26)表示当行程 p 任意一段地面接驳时间超过最大可接受时间时, $x_p = 1$ 。

3 模型求解算法设计

UAM网络构建涉及垂直起降设施选址与网络连接设计2个子问题,在解空间探索过程中,每个选址决策可对应生成多种网络连接方案。传统多目标求解算法仅能建立单一映射关系的个体,易陷入局部最优解。而结合遗传算法与变邻域搜索算法的混合策略能有效求解多层轴辐式网络模型^[20-21]。为此,本文以NSGA-III为主优化框架,融合VNS的动态邻域结构特性,在保证选址方案广泛分布的同时,对网络连接进行局部优化。算法流程见图3。

3.1 染色体设计

本文采用一维数组和邻接矩阵分别设计选址染色体和网络连接染色体(图4)。如图4(b)所示,选址染色体长度代表垂直起降设施候选点集合中元素数量,基因位上的编码0表示不建立垂直起降设施,编码1表示建立垂直起降场,编码2表示建立垂直起降点。如图4(c)所示,网络连接染色体对应选址染色体中编码为1和2的基因之间连接情况,邻接矩阵中编码0表示不建立连接,编码1表示建立一级航线,编码2表示建立二级航线。

3.2 邻域结构

在NSGA-III中,每个个体首先生成选址方案,在此基础上生成网络连接方案。由于每种选址方案

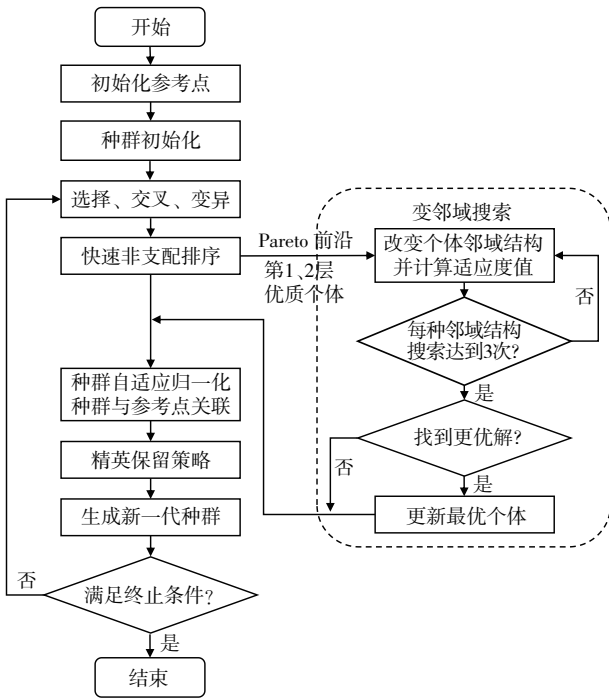


图3 算法流程

Fig. 3 Algorithm flow

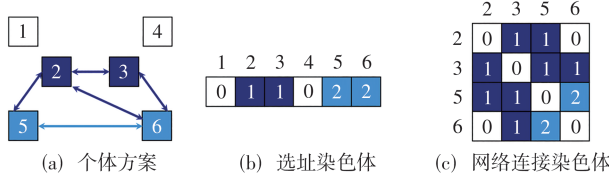


图4 染色体示例

Fig. 4 Chromosome example

可能对应多个可行连接结构,本文在环境选择阶段嵌入VNS搜索帕累托前沿第1、2层优质个体的更优邻域解,进行网络连接的局部优化。为避免VNS的引入破坏NSGA-III收敛性,本文设计当且仅当VNS生成的新解能够支配原解时,新解才会被接受并替换原解。

本文在VNS中设计3种邻域结构,如图5所示。邻域结构1表示随机选择一个起降场和一个起降点并交换其设施等级;邻域结构2表示将起降场及起降点之间一级航线重分配;邻域结构3表示将起降点之间二级航线重分配。

3.3 交叉变异操作

鉴于选址与网络连接染色体之间存在因果关系,本文仅对选址染色体进行交叉变异操作,每次操作之后网络连接染色体按照约束重新生成,避免增加修复步骤大面积破坏原染色体。

当满足交叉概率 P_c 时,随机选2个个体作为父代,混合其起降场位置及起降点位置,并从中重新选择不重复的 r_1 个起降场、 r_2 个未被该子代使用的起

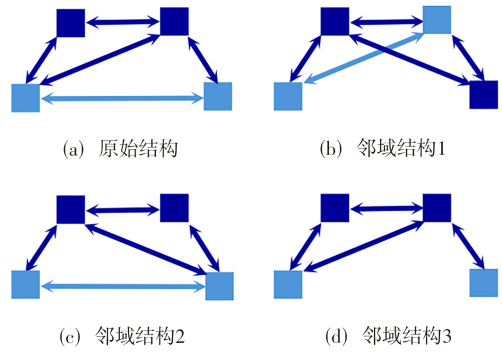


图5 邻域结构

Fig. 5 Neighborhood structures

降点。变异操作采用突变机制,当满足变异概率 P_m 时,触发某一基因位变异,并通过参数 η_m 调节变异步长。该机制在保证扰动方向随机性的同时,确保新选择的垂直起降设施始终位于有效候选点集之内。完成交叉变异后,依据模型约束重新生成网络连接染色体,最终得到结构完整的子代个体。若无法生成满足续航安全和容量限制的个体,则为其重新分配选址基因,直至可行。

3.4 决策方案选择

为辅助决策者从帕累托解集中选出最终方案,本文采用式(27)计算各方案归一化加权目标值,求解最优方案。决策者可根据偏好设定第 d 个目标权重 w_d ,直观地识别和选择最优解

$$\min Z_n = \sum_{d=1}^3 \frac{w_d Z_{d,n}}{Z_d^{\min}} \quad (27)$$

式中: Z_n 为个体 n 的归一化加权目标值; Z_d^{\min} 为帕累托解集中第 d 个目标的最小值; $Z_{d,n}$ 为个体 n 的第 d 个目标值。

4 案例分析

考虑到中国UAM发展处于起步阶段,尚未形成大量eVTOL出行需求数据,本文以北京市地面交通出行数据为例,包括北京市全市范围内2019年5月1日公交地铁(数据来源<https://www.doi.org/10.11878/db.202204.001857>)及2017年3月1日出租车上下车点数据(数据来源<https://www.doi.org/10.11878/db.202204.001861>),预测UAM出行需求并得到垂直起降设施候选点集,在此基础上进行试验。

4.1 参数设置

本文设计二级航线单位距离运输成本 $5元 \cdot (人次 \cdot km)^{-1}$,按照折扣因子0.6设置一级航线单位距离运输成本为 $3元 \cdot (人次 \cdot km)^{-1}$ [8];设计起降场建设成

本为 500 万元·个⁻¹,容量为 4 000 人次·h⁻¹,起降点建设成本为 50 万元·个⁻¹,容量为 1 000 人次·h⁻¹[22];惩罚系数 $\theta_1=10, \theta_2=20$;平均等待时间 $t_w=8 \text{ min}$,地面接驳最大可接受时间 $T_m=20 \text{ min}$ [8]。

使用 Python 3.12 编写代码,设置 NSGA-III 算法迭代次数为 100 次,插入 VNS 内循环迭代 3 次。经多次试验发现:当 $P_c=0.8, P_m=0.2$,种群大小为 50 时,算法展现出较好性能。输出帕累托解集后,采用式(27)进行方案比选,3 个目标权重分别设置为 0.3、0.4 和 0.3。

4.2 数据预处理

4.2.1 UAM 需求预测

构建条件 Logit 模型预测出租车、公交车和地铁出行转向选择 UAM 服务的概率,行程 b 选择交通方式 a 的标准条件概率 $P_{a,b}$ 如下

$$P_{a,b} = \frac{e^{\mu_1 \gamma_{a,b} + \mu_2 d_{a,b} + \mu_3 f_{a,b}}}{\sum_{a \in O} e^{\mu_1 \gamma_{a,b} + \mu_2 d_{a,b} + \mu_3 f_{a,b}}} \quad (28)$$

式中: μ_1, μ_2, μ_3 分别为时间、距离、成本系数; $\gamma_{a,b}, d_{a,b}, f_{a,b}$ 分别为行程 b 选择交通方式 a 的时间、距离、成本; O 为可选择出行方式的集合。

首先经过数据筛选与整合,获得北京市地面交通出行需求 5 402 454 人次。考虑到条件 Logit 模型需输入各行程在出租车、公交车、eVTOL 和地铁 4 种交通方式下的时间、距离和成本数据,本文基于百度地图 API 模拟各行程地面交通路线对数据集进行补充。

接着输入各行程在出租车、公交车和地铁 3 种交通模式下的出行数据及原始出行方式,模型参数拟合良好,预测数据集的时间、距离、成本系数如表 1。需指出,表 1 中距离变量的系数为正值,并非表明旅客偏好长距离,而是由于较长距离常作为低成本出行策略的副产品出现。在本数据集中,出行者对成本高度敏感——成本参数绝对值约为时间参数的 30 倍,反映出其愿意以时空增加为代价换取费用节省。此外,各解释变量间的相关性处于合理水平(方差膨胀因子为 $3.82 < 5.00$),未对参数估计造成显著干扰。

最后,将参数预测结果更新回条件 Logit 模型,输入各行程在出租车、公交车、eVTOL 和地铁 4 种交通方式下的出行数据进行 UAM 需求预测,得到 UAM 出行需求分布如图 6 所示。

4.2.2 垂直起降设施候选点筛选

为确定垂直起降设施候选点集,本文采用加权 K-Means 算法,识别潜在 eVTOL 出行需求点附近的候选点位置。由于 eVTOL 具有高时间价值特

表 1 时间、距离、成本系数预测结果

Table 1 Prediction results of time, distance, and cost coefficients

参数	取值	标准差	P 值	95% 置信区间
μ_1	-3.32×10^{-4}	1.90×10^{-5}	0.00	$[-3.55 \times 10^{-4}, -3.09 \times 10^{-4}]$
μ_2	2.32×10^{-5}	3.29×10^{-6}	0.00	$[1.70 \times 10^{-5}, 2.98 \times 10^{-5}]$
μ_3	-1.04×10^{-2}	5.37×10^{-4}	0.00	$[-1.14 \times 10^{-2}, -9.30 \times 10^{-3}]$

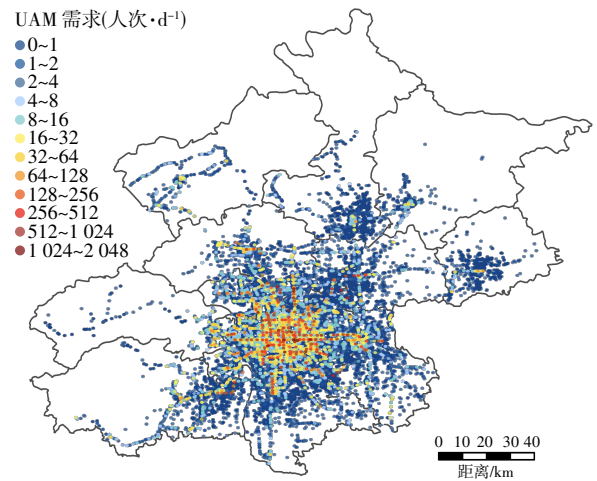


图 6 UAM 出行需求分布

Fig. 6 Distribution of UAM travel demand

点,其出行行为更接近出租车方式而非公共交通方式,因此本文基于北京市居民出行时间价值[6]为地面交通方式赋权,权重计算公式如下

$$\omega_a = \frac{V_{\text{taxi}}}{V_a} \quad (29)$$

式中: ω_a 为交通方式 a 的权重; V_{taxi} 为出租车的时间价值; V_a 为交通方式 a 的时间价值。

城市内垂直起降设施数量在 10~30 为宜[6],因此候选点数量至少为 30。将预测的 UAM 需求数据输入加权 K-Means 算法,设置 K 值范围从 30~120 依次聚类并基于平均轮廓系数法评价其聚类结果[6]。结果显示平均轮廓系数峰值为 0.682 时对应 K 值为 102,因此,获得 102 个垂直起降设施候选点,其分布如图 7 所示。

结合图 6,图 7 中 102 个候选点集中分布在朝阳区、丰台区等高需求区域,体现了候选点筛选策略对出行需求空间分布的响应,有利于提升核心区用户的出行便利性与系统整体服务效能。

4.3 结果分析

4.3.1 帕累托解的分布

本节展示起降场建设数量 $r_1=3$,起降点建设数

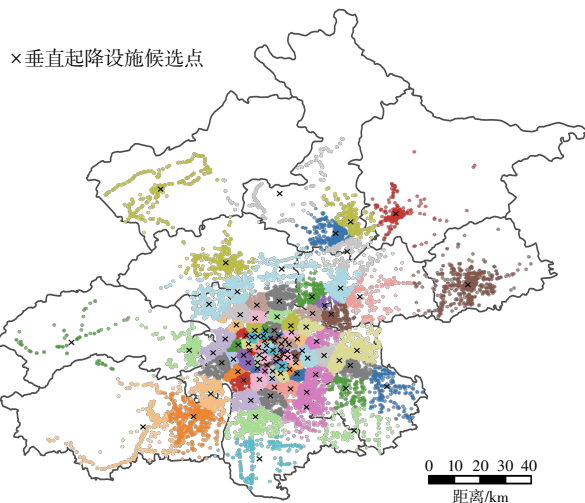


图7 垂直起降设施候选点分布

Fig. 7 Distribution of VTOL facilities candidate locations

量 $r_2 = 8$ 下的算法求解结果,如图8所示。

嵌入VNS的NSGA-III算法最终生成16个非支配解,具有较好的多样性。在大部分帕累托解中,较低的总成本对应较高的总出行时间和平均惩罚分数。这主要是由于减少二级航线、采用一级航线中转完成郊区远距离出行时,会在降低运输成本的同时增加飞行时间、降低UAM服务质量。因此,3个目标之间呈现明显的相关关系,合理调节式(27)中的权重 w_i 对决策结果至关重要。

4.3.2 模型对比

本文选出最佳垂直起降设施选址及网络连接方案如图9所示,建立3个起降场和8个起降点,集中分布在出行需求较高的朝阳区、丰台区等地。该轴辐式UAM网络在确保eVTOL续航及垂直起降设施容量安全的同时,有效降低网络运输成本及总出行时间,并提供令人满意的UAM服务质量。

为验证模型的有效性,建立传统p-Hub UAM网络构建模型,在 $r_1 = 3, r_2 = 8$ 下与本文模型求解方案对比。不同于本文模型假设(3)提出的两级轴辐

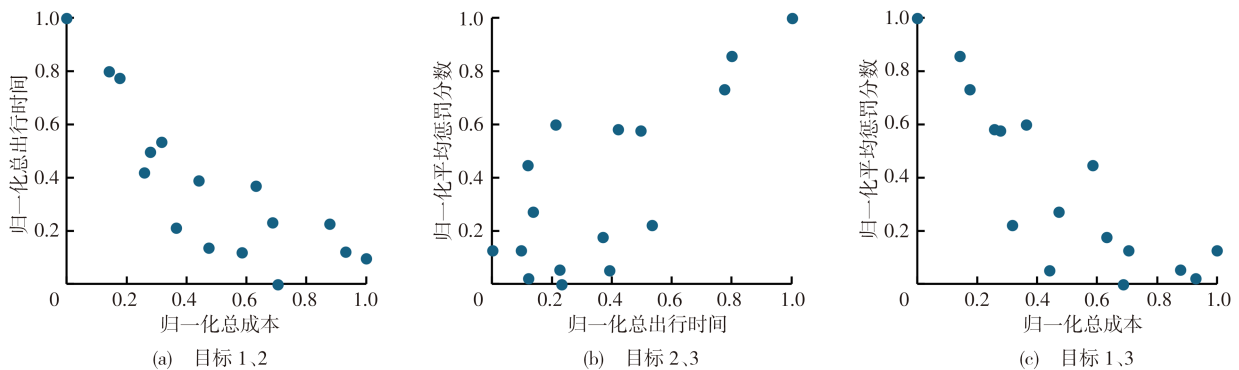


图8 帕累托前沿解的分布

Fig. 8 Distribution of Pareto front solutions

式网络层间及层内连接规则,传统模型在满足eVTOL续航安全约束的前提下,任意起降设施至少与一个其他设施连接,需求点单分配给距离其最近的起降设施。为了保证对比结果中关于总成本的优化得益于本文网络结构设计,而不是由两级设施建设成本及二级航线单位距离运行成本差异造成的,传统模型同样将垂直起降设施及航线分为两级计算成本。因此,可将传统模型视为存在垂直起降设施及航线级别差异的单层轴辐式网络,删除式(22)、(23),改为式(30),其余目标函数及约束与本文构建模型相同

$$H_{i,j} + H_{j,k}\beta_{j,k} \leq H_m + M(1 - \delta_{i,j}) \quad (30)$$

式(30)表示在满足续航安全约束的前提下,每个起降设施至少与一个其他设施建立航线。

2种模型求解最优方案对比结果见表2。

表2 两种模型最优方案目标值对比

Table 2 Comparison of objective values for optimal solutions of two models

模型	总成本/万元	总出行时间/ 10^2 h	平均惩罚分数
传统模型	2 187.98	442.237 6	9.76
本文模型	2 168.53	388.793 5	9.72

从求解结果来看,本文两级轴辐式UAM网络构建模型提供的最优解能够支配传统模型所得最优解,即3个目标均得到优化。本文模型能够降低总成本0.9%,降低总出行时间12.1%,平均缩短单位需求出行时间4.12 min,同时保证更优的服务质量。因此,模型假设(3)提出的层间及层内连接规则有效适用于UAM网络。

4.3.3 垂直起降设施数量灵敏度分析

分别考虑起降场数量及垂直起降设施总数对网络的影响。选择以下5个指标评价网络构建方案:网络运输成本、总出行时间、平均惩罚分数、平均中转次数、平均拥挤度。其中,平均拥挤度表示设施拥

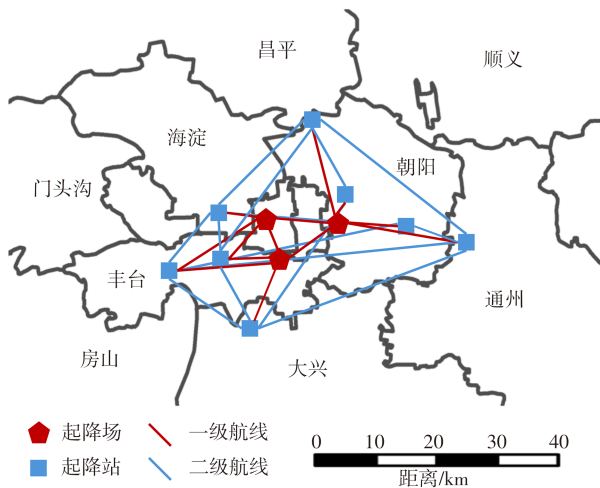


图9 UAM网络最优方案

Fig. 9 Optimal scheme of UAM network

拥挤度^[19]的平均值,设施 k 的拥挤度 φ_k 为

$$\varphi_k = \frac{\sum_{p \in P} D_p z_{p,k}}{D_1 y_{k,1} + D_2 y_{k,2} - \sum_{p \in P} D_p z_{p,k}} \quad (31)$$

首先固定垂直起降设施总数 $r_1 + r_2 = 10$, 改变 r_1 从 1~4 进行试验; 其次固定 $r_1 = 3$, 改变 r_2 从 7~12

进行试验。试验结果统计如表 3 所示。

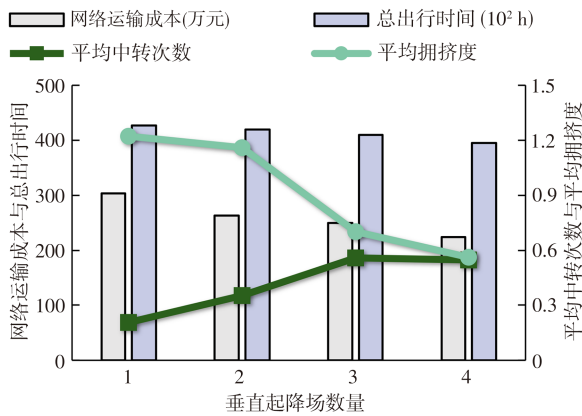
如图 10(a)所示,在固定垂直起降设施总数的情况下,随着网络中枢纽设施的增加,网络运输成本、总出行时间和平均拥挤度逐渐降低,这体现了轴辐式网络中建设枢纽设施的优势。值得注意的是当 $r_1 = 3$ 时,平均拥挤度急剧下降,这意味着 3 个枢纽能够较好地平衡该网络流量,保障网络的安全性和稳定性。然而由于轴辐式网络的固有结构,平均中转次数随着枢纽数量的增加而上升,这将影响 UAM 系统服务质量。

如图 10(b)所示,在 $r_1 = 3$ 的情况下,随着起降点建设数量的增加,总出行时间、平均中转次数和平均拥挤度均呈下降趋势,这意味着广泛布局起降点有助于提升 UAM 服务质量。然而,这种改善伴随着显著增加的垂直起降设施建设成本和网络运输成本。由于低需求区域的直连航线单位距离运输成本较高,过度扩展起降点会削弱轴辐式网络在规模经济方面的优势。尽管当 $r_2 = 12$ 时运输成本略有回落,但这是由于部分郊区行程实现了二级航线直飞,减少了中转需求,本质上是以更高建设成本换取边

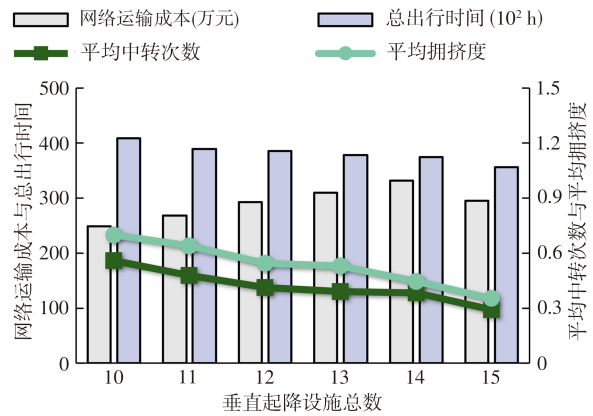
表 3 不同垂直起降设施数量下的方案对比

Table 3 Comparison of solutions under different numbers of VTOL facilities

r_1	r_2	网络运输成本/万元	总出行时间/ 10^2 h	平均惩罚分数	平均中转次数	平均拥挤度
1	9	304.017 6	426.515 6	6.858 30	0.206 633	1.222 356
2	8	263.556 9	419.870 7	8.730 50	0.354 592	1.160 539
3	7	249.192 7	409.251 5	10.168 57	0.558 673	0.699 592
4	6	224.219 3	394.603 4	12.507 50	0.545 918	0.561 554
3	8	268.526 5	388.793 5	9.724 90	0.477 000	0.639 834
3	9	293.009 1	385.102 0	8.411 00	0.410 700	0.545 482
3	10	309.701 4	378.471 9	9.469 90	0.390 300	0.529 980
3	11	331.791 0	375.004 7	8.840 20	0.382 700	0.445 388
3	12	295.345 6	356.323 4	8.758 50	0.290 800	0.352 296



(a) $r_1 + r_2 = 10, r_1 \in [1, 4]$ 下的方案对比



(b) $r_1 = 3, r_2 \in [7, 12]$ 下的方案对比

图 10 不同垂直起降设施数量下的方案对比

Fig. 10 Comparison of solutions under different numbers of VTOL facilities

际效益递减的服务提升。因此,在UAM网络构建初期,建设3个起降场、8个起降点是平衡经济可行性、运行效率与服务体验的较好决策。

5 结 语

(1)本文研究两级轴辐式网络结构应用于UAM系统的作用机制,以总成本最小、总出行时间最小、平均服务质量惩罚分数最小为目标,构建考虑容量限制的非严格多分配UAM网络多目标优化模型;采用结合VNS的NSGA-III算法进行求解,得到帕累托解集供决策者选择最优方案。

(2)通过对北京市的案例研究,本文所构建两级轴辐式UAM网络相比传统两级网络能够降低总成本0.9%,降低总出行时间12.1%,平均缩短单位需求出行时间4.12min,同时提供更优的服务质量。灵敏度分析结果表明,垂直起降设施建设数量是构建高效、优质UAM网络的关键影响因素,当建设3个起降场、8个起降点时,UAM系统可达到目标函数的较好平衡。

(3)由于UAM尚处发展初期,缺乏真实出行数据,本文用于预测UAM出行需求的离散选择模型虽已广泛应用于该领域,但难以表征实际需求的波动性。未来应在网络构建中考虑需求不确定性,以提高网络鲁棒性。此外,考虑更大规模城际eVTOL出行、多样化机队组成及政府补贴政策等方面的影响是下一阶段需深入研究的内容。

参 考 文 献:

Reference :

- [1] PINTO NETO E C, BAUM D M, DE ALMEIDA J R, et al. A trajectory evaluation platform for urban air mobility (UAM)[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(7): 9136-9145.
- [2] GUO C H, NIE J X, HANG X, et al. VTOL site location considering obstacle clearance during approach and departure [J]. Communications in Transportation Research, 2024, 4: 100118.
- [3] LEE S, CHO N. Optimal location of urban air mobility (UAM) vertiport using a three-stage geospatial analysis framework[J]. Future Transportation, 2025, 5(2): 5020058.
- [4] BULUSU V, ONAT E B, SENGUPTA R, et al. A traffic demand analysis method for urban air mobility [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(9): 6039-6047.
- [5] RAJENDRAN S, ZACK J. Insights on strategic air taxi network infrastructure locations using an iterative constrained clustering approach [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2019, 128 (C) : 470-505.
- [6] ZHAO Y, FENG T. Strategic integration of vertiport planning in multimodal transportation for urban air mobility: A case study in Beijing, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 467: 142988.
- [7] WU Z Q, ZHANG Y. Integrated network design and demand forecast for on-demand urban air mobility [J]. Engineering, 2021, 7(4): 473-487.
- [8] JIN Z Y, NG K K H, ZHANG C L. Robust optimisation for vertiport location problem considering travel mode choice behaviour in urban air mobility systems[J]. Journal of the Air Transport Research Society, 2024, 2: 100006.
- [9] JIANG Y, LI Z C, WANG Y S, et al. Vertiport location for eVTOL considering multidimensional demand of urban air mobility: An application in Beijing [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2025, 192: 104353.
- [10] 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.
- [11] SONG K H, LEE H J. Network topology-driven vertiport placement strategy: Integrating urban air mobility with the Seoul metropolitan railway system [J]. Applied Sciences, 2025, 15(7): 3965.
- [12] ZHANG W T, HWANG T. UAM vertiport network design considering connectivity[J]. Systems, 2025, 13(7): 607.
- [13] WILLEY L C, SALMON J L. A method for urban air mobility network design using hub location and subgraph isomorphism [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 125: 102997.
- [14] RATH S, CHOW J Y J. Air taxi skyport location problem with single-allocation choice-constrained elastic demand for airport access [J]. Journal of Air Transport Management, 2022, 105: 102294.
- [15] KITTHAMKESORN S, CHEN A. Maximum capture problem for urban air mobility network design [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2024, 187: 103569.
- [16] ZHANG H G, LIU Z Y, DONG Y, et al. A novel network equilibrium model integrating urban aerial mobility [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2024, 187: 104160.
- [17] GAO Z Y, YU Y, WEI Q S, et al. Noise-aware and equitable urban air traffic management: An optimization approach [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 165: 104740.
- [18] WEI Q S, GAO Z Y, CLARKE J P, et al. Risk-aware urban air mobility network design with overflow redundancy [J].

- Transportation Research Part B: Methodological, 2024, 185: 102967.
- [19] WANG Z J, ZHANG D Z, TAVASSZY L, et al. The hierarchical multimodal hub location problem for cross-border logistics networks considering multiple capacity levels, congestion and economies of scale[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2025, 196: 103972.
- [20] MA C X, SHI C W, YANG Y, et al. A VNS-NPGA approach to multi-objective optimization of hub-and-spoke logistics network [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2025, 12(2): 390-409.
- [21] 姜雨,林操,龙颖,等.考虑枢纽平衡的干支通多层航空运输网络优化模型[J].交通运输工程学报,2025,25(6): 186-199.
- JIANG Yu, LIN Cao, LONG Ying, et al. Optimization model of trunk-regional-general multilevel air transportation network considering hub balance [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(6): 186-199.
- [22] 尹浩东,沈燕,屈姝含,等.城市飞行汽车停机坪选址问题研究二:面向轴辐式网络的多目标优化方法[J].交通运输工程与信息学报,2025,23(3):88-102.
- YIN Hao-dong, SHEN Yan, QU Shu-han, et al. Locating urban flying car vertiports part II: A two-stage optimization for hub-and-spoke networks [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2025, 23(3): 88-102.
- [23] GUO Y Z, YAO J J, JIANG J, et al. Research of hierarchical vertiport location based on Lagrange relaxation[J]. Aerospace, 2025, 12(8): 672.
- [24] LI Q, WU L, GUAN X J, et al. Interplay of network topologies in aviation delay propagation: A complex network and machine learning analysis [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2024, 638: 129622.
- [25] YANG Q, WANG Z S, FENG K, et al. Investigating the crucial role of logistics service quality in customer satisfaction for fresh e-commerce: A mutually validating method based on SERVQUAL and service encounter theory [J]. Journal of Retailing and Consumer Services, 2024, 81: 103940.
- [26] 中国民用航空局.民用无人驾驶航空发展路线图V1.0(征求意见稿)[EB/OL].(2022-08-23)[2025-11-02].<http://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/202208/P020220822615871900321.pdf>.
- Civil Aviation Administration of China. Civilian unmanned aviation development roadmap V1.0 (draft for comments) [EB/OL]. (2022-08-23) [2025-11-02]. <http://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/202208/P020220822615871900321.pdf>.
- [27] 中国指挥与控制学会.低空无人驾驶航空器起降场地安全通用要求[EB/OL].(2025-09-25)[2025-11-02].<https://www.doc88.com/p-80620532448831.html>.
- Chinese Institute of Command and Control. General requirements for safety of unmanned aircraft take-off and landing sites in low altitude airspace [EB/OL]. (2025-09-25) [2025-11-02]. <https://www.doc88.com/p-80620532448831.html>.
- [28] 江苏省综合交通运输学会.低空起降场(点)布设指南[EB/OL].(2025-05-07)[2025-11-02].<http://www.jscts.org.cn/ueditor/php/upload/file/20250507/1746601053866823.pdf>.
- Jiangsu Provincial Comprehensive Transportation Association. Guidelines for the designation of low-altitude vertiport [EB/OL]. (2025-05-07) [2025-11-02]. <http://www.jscts.org.cn/ueditor/php/upload/file/20250507/1746601053866823.pdf>.
- [29] 陈林,缪志强,王祥科,等.自主飞行器技术及其在低空经济中的应用综述[J].机器人,2025,47(3):470-496.
- CHEN Lin, MIAO Zhi-qiang, WANG Xiang-ke, et al. Overview on autonomous aircraft technology and its application to low-altitude economy[J]. Robot, 2025, 47(3): 470-496.