http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0288

多源数据驱动的城市低空出行公共航路网络双层规划方法

王炜文[1]，包杰[1,*]，陈方骁[1]，周君[1]，羊钊[2]

(1. 南京航空航天大学 民航学院，南京 211106；2. 南京航空航天大学 通用航空与飞行学院，溧阳 213300)

摘 要：城市低空出行是低空经济高质量发展的核心，也是形成低空赋能和经济辐射的重要纽带。因此，提出多源数据驱动的城市低空出行公共航路网络双层规划方法，构建航路网络规划与低空需求分配的互馈优化机制，提出面向低空出行的航段路阻函数标定方法，设计多目标模拟退火-遗传算法 (MOSA-GA) 混合进化搜索求解算法；以典型大都市为例，提取空域、建筑物、用地、人流及噪声分布等多源城市数据，对比验证所提双层规划方法。实验结果表明：所提 MOSA-GA 算法有效平衡了解集的分布广度和目标函数优度，显著提升了低空出行公共航路网络运行效率；求解结果可以在帕累托前沿得到多个相互非支配的最优解，多目标之间存在显著的制约关系，并对交通流量分配产生影响；通过敏感性实验发现，安全间隔和最短航段长度显著影响网络优化结果。研究成果有助于指导城市低空出行公共航路网络的部署，提升低空出行服务水平。

关 键 词：城市空中交通；低空公共航路网络；双层规划模型；交通分配；多目标优化

中图分类号：V355

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)11-4107-15

城市化进程的不断加剧，陆用资源日趋饱和，导致城市交通拥堵和交通安全问题日益严重，亟需开发城市空中可用空间，发展垂直式立体交通。《“十四五”通用航空发展专项规划》明确提出发展无人驾驶新型航空器，带动城市空中出行快速推进，构建未来城市综合交通系统。城市低空出行是指在城市低空空域内主要利用垂直起降或短距起降航空器及相关系统设施实现载人载货空中运输的活动[1]。城市低空出行是低空经济高质量发展的核心，也是形成低空赋能和经济辐射的重要纽带。推进城市低空出行对升级我国空域系统、打造空中出行-地面出行的一体化新型城市综合交通体系、缓解城市交通拥堵、建设交通强国具有重要意义[2]。

城市低空出行的高效和安全开展依托公共航路网络的规划和设计。低空出行公共航路规划是指在低空空域内，综合考虑低空地理属性约束、低空空域环境、航空器性能特性及用户出行需求等因素，为保障多航空器安全高效运行而划设公共空中通道[1-2]。近年来，国内外学者围绕低空出行的起降点选址优化、航路网络规划、交通需求分配等展开了一系列研究。在起降点选址优化方面，钱欣悦等[3]建立了基于遗传算法(genetic algorithm, GA)的规划模型，对末端配送物流无人机起降点进行选址；Rajendran 等[4]采用迭代约束聚类方法，通过预测出行需求确定潜在基础设施布局；Rath 等[5]将起降点选址建模为 p 枢纽中位数问题，分析了不同成本约束下的选址方案；Wu 等[6]建立了基于 p-中值枢纽-辐射网络的数学模型，结合地理信息系统(geographic information system, GIS)信息优化起降点布

收稿日期：2025-05-12；**录用日期**：2025-05-30；**网络出版时间**：2025-06-10 15:59
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20250610.1349.001
基金项目：国家重点研发计划 (2022YFB4300905)；国家自然科学基金 (52572356,52172328)；中央高校基本科研业务费 (NS2024042)
* **通信作者**. E-mail：jiebao@nuaa.edu.cn

引用格式：王炜文，包杰，陈方骁，等. 多源数据驱动的城市低空出行公共航路网络双层规划方法 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（11）：4107-4121. Wang W W，Bao J，Chen F X，et al. A bi-level programming method for urban low-altitude travel public air route network driven by multi-source data [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（11）：4107-4121（in Chinese）.

局。在航路网络规划方面，Wang等[7]通过对比分析枢纽辐射网络与传统航空网络的差异，建立了大都市圈城市空中交通网络优化模型；Li等[8]采用双层规划方法，结合多目标模拟退火（multi-objective simulated annealing, MOSA）算法，实现低空物流运输网络布局与流量分配的协同优化；Willey等[9]将子图同构方法与单分配p-中心选址问题相结合，构建了结构化航路网络。低空飞行需求的日益增长离不开高效的交通流量分配技术。唐志星等[10]考虑飞行任务效益和空域利用率，提出以最小化时间调整量为目标的空中交通流量分配模型；王兴隆等[11]基于复杂网络理论构建机场-航路-管制扇区相依网络模型，以网络总流量熵最小为目标，提出降低网络功能脆弱性的流量分配策略；张兆宁等[12]基于容流匹配，构建了机场群流量分配模型，通过多目标规划方法优化机场群内各机场的流量分配，减少航班延误，提高机场群容量利用率。

尽管面向低空出行的公共航路网络规划设计取得了一定进展，但现有研究仍存在以下4个方面不足：①现有低空出行公共航路网络规划大多聚焦网络拓扑结构、起降点选址的宏观规划与设计，侧重建设成本、区域可达性、可持续性等多重目标，缺乏对个体出行者的理性选择考量，忽略了面向用户均衡的交通网络配流，无法形成“网络供给”与“出行需求”的有效互馈机制，导致航路网络的鲁棒性不足；②现有研究大多基于用例数据或仿真数据进行网络优化模型的验证，对低空运行环境的刻画粒度不够精细，未考虑城市环境中实际的人流分布特征、建筑物高度特征与城市用地属性及无人机的坠地风险和噪声影响等，导致现有优化方案的适用性较差；③面向城市低空出行的低空航段路阻函数尚不清楚，无法明晰低空出行公共航路飞行时间与网络流量的相互影响关系，部分研究尝试沿用地面交通的路阻函数，忽略了地面载具与低空飞行器的运动特性差异，导致交通网络的配流方案无法适配低空出行用户的出行需求分布特征；④安全间隔、最短航段长度等网络结构参数对低空出行公共航路网络优化设计影响显著，其与低空网络结构及交通需求分配的关联机理仍需进一步探究。

鉴于此，本文提出多源数据驱动的城市低空出行公共航路网络双层规划方法，研究构建航路网络规划与低空需求分配的互馈优化机制，提出面向低空出行的航段路阻函数标定方法，设计混合进化搜索求解算法；在此基础上，面向典型大都市，提取空域、建筑物、用地、人流及噪声分布等多源城市数据，建立面向低空出行公共航路网络规划的多层风险态势图；基于提出的双层规划方法，对比算法性能，分析优化网络的拓扑特性与流量分布特征，结合敏感性实验，讨论安全间隔、最短航段长度对低空出行公共航路网络优化的作用机理。

1 模型构建

1.1 问题描述与假设

本文聚焦城市低空出行公共航路网络优化设计问题，主要涉及低空运营主管和个体用户两大利益相关方。低空运营主管单位通过设计低空出行公共航路网络，力求通行效率和服务水平最优；个体用户希望出行时间和费用最少，以期自身效用最大化。具体而言，运营决策者通过调整低空出行公共航路网络结构，结合路阻函数直接影响用户出行需求分配结果，如流量分配、路径选择等；对于用户而言，当网络结构确定时，依据用户均衡原则，用户基于效用最大化自适应路径选择，直至网络交通流量分配达到平衡状态，出行需求分配到低空出行公共航路网络中，形成的流量结果反作用于网络性能，如拥堵程度、出行成本等，进而触发低空出行公共航路网络结构调整。两者目标差异显著，且决策行为存在高度耦合影响，形成双层博弈关系。

低空出行公共航路网络设计和交通需求分配相互影响，增加了低空出行公共航路网络规划问题的复杂性。为有效刻画多主体之间的博弈关系，并降低整体模型的计算复杂度、提升求解效率，本文将低空出行公共航路网络设计建模为双层规划问题 (bi-level programming problem, BLPP)。上层问题聚焦低空出行公共航路网络的结构设计，以降低航路网络的非直线系数、网络长度和通行延误率为目标；将低空出行交通需求分配作为下层问题，以出行效用最大化为目标，通过交通流量在不同网络结构下的分配作为上下层的联系变量，以此形成城市低空出行公共航路网络的双层优化模型，如图1所示。

城市低空出行是面向未来的新型空中交通方式，尚未形成规模化落地应用，服务低空出行的公共航路网络设计相对复杂，影响因素繁多，包含出行交通需求的估算、无人驾驶航空器的性能特性、空域可用性及地面交通的换乘连通性等多个方面。故在低空出行公共航路网络优化建模时，做出如下前提假设：①仅考虑单一高度层的低空出行公共航路网络设计，未涉及多高度层的网络立体结构设计；②借鉴起降点选址研究中的空中出行需求转化方法[5]，为简化模型并降低计算复杂度，将地面出行

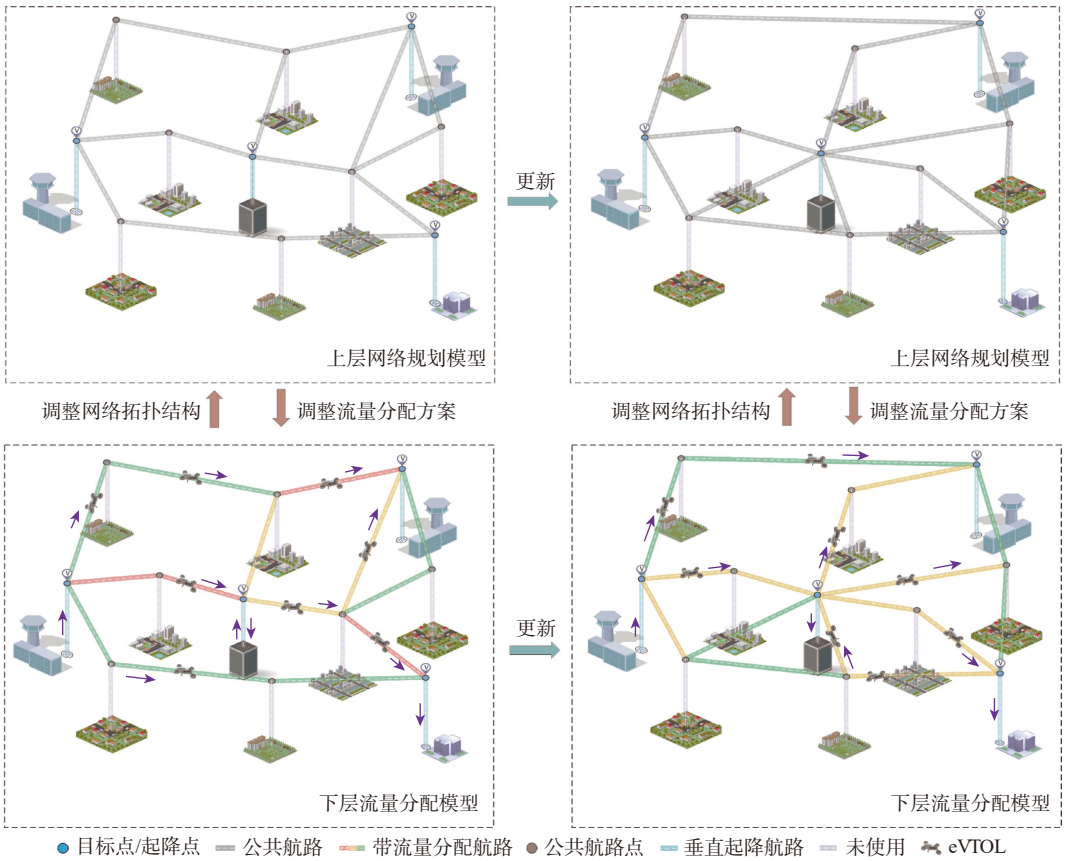


图 1　基于双层规划的低空出行公共航路网络规划示意图

Fig. 1　Schematic diagram of low-altitude travel public air route network planning based on bi-level programming

需求按固定比例转化为低空出行需求; ③低空航空器在公共航路网络中保持匀速飞行, 且保持固定的安全间隔; ④起降点上方空域无限制, 可自由接入低空出行公共航路网络; ⑤不考虑气象条件、通信条件等因素对低空飞行器产生的影响。

1.2　上层网络规划模型

从低空运营主体角度出发, 上层网络规划模型通过调整网络拓扑结构, 实现交通流量的重新分配, 实现通行效率最优。假设低空出行公共航路网络 $G=(N,E)$。其中, $N=\{1,2,\cdots,n\}$为候选航路点集合, 在低空出行公共航路网络规划中, 通过对空域进行栅格化处理, 并进行栅格单元的风险评估分析[13], 选取低于风险阈值的栅格单元中心作为候选航路点; $E=\{e_{ij}|x_{ij}=1, i,j\in N, i\neq j\}$, x_{ij} 为 0-1 决策变量, 用于表征点 i 和点 j 之间是否存在边 e_{ij}, 存在取 1, 不存在取 0, 因此, 上层网络规划模型中, 决策变量 x_{ij} 用于表征任意 2 个候选点之间是否存在航路连接。

在此基础上定义上层网络规划模型, 如式(1)和式(2a)～式(2h)所示。其中, 式(1)表示目标函数, 早期航路网络规划研究中, 常用流量熵、网络长度 L_G 和非直线系数 D_G[8]。

$$\min(C_G, D_G, L_G) \tag{1}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases} y_i = 1 \quad \forall i \in (R \cup S) & (2a)\\ y_i \leqslant \sum\limits_{i,j\in N} x_{ij} \leqslant 8y_i & (2b)\\ y_i \leqslant \sum\limits_{i,j\in N} x_{ji} \leqslant 8y_i & (2c)\\ y_i \leqslant \sum\limits_{j\in N} x_{ij}y_j \quad \forall i \in N & (2d)\\ \sum\limits_{i\in N} x_{ii} = 0 & (2e)\\ x_{ij}d_{ij} \leqslant d_{\max} = \sqrt{2}d \quad \forall i,j \in N & (2f)\\ y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in N & (2g)\\ x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \in N & (2h) \end{cases}$$

式中: C_G 为低空出行公共航路网络 G 的平均延误指数; y_i 为 0-1 决策变量, 表示点 i 是否被选入网络 G 中; d_{ij} 为候选航路点 i 与 j 之间的距离; $d_{\max}$ 为网络中航段长度的阈值; d 为离散化空域栅格单元长度; R 和 S 分别为起点集合和讫点集合。

考虑到流量熵在刻画网络流量分布均匀性时, 仅对流量集中的关键路径敏感, 导致网络较为脆弱, 因此, 本文选取网络平均延误指数 C_G 刻画网络流量分配的拥堵状况, 其计算方式为

$$C_G = \frac{1}{|E|}\sum_{e\in E}\frac{t_e}{t_e^0} \tag{3}$$

式中: $|E|$为网络中边的数量; t_e 和 t_e^0 分别为航段 e 的行程时间和畅通行程时间。

除此之外，还选取非直线系数 D_G 及网络长度 L_G 作为上层网络规划模型的优化目标函数。具体而言，D_G 表示低空出行公共航路网络 G 的非直线系数，用于刻画航路网络的几何效率和路径绕行程度，计算方式为

$$D_G = \frac{1}{|R||S|}\sum_{r\in R,s\in S}\frac{l_{rs}}{d_{rs}} \tag{4}$$

式中：$|R|$和$|S|$分别为起点和讫点的数量；l_{rs} 和 d_{rs} 分别为从起点 r 到讫点 s 的网络中最短路径距离和平面欧氏距离。

低空出行公共航路网络 G 的总长度 L_G 与占用的空域资源呈正相关：

$$L_G = \sum_{e\in E} d_e \tag{5}$$

式中：d_e 为边 e 的长度。

进一步地，式 (2a)～式 (2f) 表示上层低空出行公共航路网络规划设计需满足的约束条件。其中，约束（2a）为起讫点（origin-destination, OD）约束，用于确保起降点一定在路径中；约束（2b）和约束（2c）为节点度约束，确保当点 i 在网络中时，其出度和入度不为 0，点 i 不在网络中时，其出度和入度均为 0；约束（2d）确保选择的点相邻；约束（2e）确保不存在自环；约束（2f）确保存在连边的 2 个点距离不大于阈值；约束（2g）表示 y_i 为 0-1 决策变量，表示点 i 是否在网络 G 中。

1.3 下层流量分配模型

从低空出行用户角度出发，下层流量分配模型根据上层网络规划模型输出的网络拓扑结构，考虑用户路径选择行为，对用户出行需求进行交通流量分配，实现低空出行公共航路网络交通流量分配。在下层流量分配模型中，决策变量 x_e 为非负连续变量，表征边 e 上分配的交通流量。

下层流量分配模型表达式为

$$Z = \min\sum_{e\in E}\int_0^{x_e} t_e(x)\mathrm{d}x \tag{6}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases} q^{rs} = \sum_{k\in K_{rs}} f_k^{rs} & \forall r,s \quad (7a)\\ x_e = \sum_{r\in R}\sum_{s\in S}\sum_{k\in K_{rs}} f_k^{rs}\delta_{ek}^{rs} & e\in E \quad (7b)\\ x_e \geqslant 0 & e\in E \quad (7c)\\ f_k^{rs} \geqslant 0 & \forall r,s,k \quad (7d)\end{cases}$$

式中：$t_e(x)$ 为航段 e 的行程时间，其大小与边 e 的交通流量相关，采用路阻函数计算得出；K_{rs} 为低空出行公共航路网络 G 中连接起点 r 与讫点 s 的全部可行路径构成的集合；q^{rs} 为从起点 r 到讫点 s 的出行需求；f_k^{rs} 为分配在 OD 对（r,s）间第 k 条路径的流量；δ_{ek}^{rs} 为 0-1 指示变量，当且仅当边 e 位于 OD 对（r, s）的第 k 条路径时，其值为 1，否则为 0。

针对低空出行公共航路网络设计问题，目前尚缺乏成熟的经验路阻函数，本文在 1.4 节对其进行专门阐述。

式 (7a)～式 (7d) 为下层流量分配模型的约束条件。约束（7a）表征路径-路段流量守恒关系；约束（7b）表征多条路径流量与边 e 流量的映射关系，以确保边 e 的流量 x_e 等于所有 OD 对经过该边的路径流量总和；约束（7c）和约束（7d）为非负流量约束，确保网络各边流量和路径分配流量均满足非负条件。

1.4 低空出行公共航路航段路阻函数设计

路阻函数（也称为阻抗函数或成本函数）是交通网络分析中的核心工具，用于量化出行者在不同路径上的广义出行成本（如时间、距离、能耗、风险等），因此，路阻函数的设计直接影响用户路径选择的行为和下层低空交通需求分配的结果。现有研究和工程实际中，较为常用的路阻函数包括美国联邦公路局（Bureau of Public Roads, BPR）函数和 Davidson 函数。本文以 BPR 函数作为参考依据，建立基于航路时段流量的低空出行公共航路航段路阻函数模型，将航段路阻函数定义为

$$t_e = t_e^0\left[1+\alpha\left(\frac{q_e}{c_e}\right)^{\beta}\right] \tag{8}$$

式中：q_e 为交通流量；c_e 为路段交通承载能力；α 和 β 为阻滞系数，在地面路网中，其通常分别为 0.15 和 4。

考虑到地面出行和低空出行的特性不同，交通流的运行机理和影响因素存在差异，因此，需要进一步分析低空交通流特性，对阻尼参数进行标定。

在低空出行公共航路网络运行中，飞行器间需要保持一定的安全间距，与民航中采用的固定安全间隔不同，低空无人航空器可以悬停，速度随交通流量变化的调整反馈更为及时，其运动特性与地面车辆跟驰行为更为接近。故本文假设低空航空器之间的安全间距 l_{safe} 为制动距离 l_{brake} 的 $2n$ 倍（考虑对向冲突可能性），即 $l_{\text{safe}}=2nl_{\text{brake}}$，相应地，安全时距 t_{safe} 为制动时间 t_{brake} 的 $2n$ 倍，即 $t_{\text{safe}}=2nt_{\text{brake}}$。因此，在长度为 l_e 的航段 e 上，最大可容纳的低空飞行器数量为 l_e/l_{safe}，则在时间窗 T 内，航段 e 可以安全通过的流量 q_{safe} 为 T/t_{safe}。

根据航空器的物理运动特性可知，其制动距离 l_{brake} 与制动时间 t_{brake} 均与航空器平均飞行速度 v_e 和制动加速度 a 存在如下关系：

$$l_{\text{brake}} = \frac{v_e^2}{2a} = \frac{(at_{\text{brake}})^2}{2a} = \frac{at_{\text{brake}}^2}{2} \tag{9}$$

在航段上, 航空器并非总能以自由流速度飞行。当航段在时间窗内的流量超过一定阈值时, 航空器必须降低平均飞行速度以保证安全间隔, 该阈值表示在时间窗 T 内, 航空器平均飞行速度 v_e 为自由流速度 v_0 时, 航段所能承载的最大容量 $q^*_{\text{safe}}=T/t^*_{\text{safe}}$, 其中, t^*_{safe} 为航空器以自由流速度 v_0 运行时, 为满足安全要求所需保持的最小安全时间间隔(安全时距)。

因此, 当时段流量 q_e 小于或等于阈值 q^*_{safe} 时, 航段 e 处于自由流运行状态, 此时, 航空器通过该航段的平均时间 t_e 为 l_e/v_0; 而当 q_e 大于阈值 q^*_{safe} 时, 航空器通过航段平均时间 t_e 为 $2nq_el_e/(aT)$。

综上, 航段通过平均时间 t_e 计算公式可表示为

$$t_e=\begin{cases} l_e/v_0 & q_e\leqslant q^*_{\text{safe}} \\ 2nq_el_e/(aT) & q_e>q^*_{\text{safe}} \end{cases} \tag{10}$$

基于式(10), 通过数值模拟仿真进行 BPR 函数的参数标定。考虑不同的飞行性能参数对安全间隔的影响, 模型中的电动垂直起降飞行器(electric vertical take-off and landing, eVTOL)参数设置参考亿航智能 EH216-S 和 Archer Aviation 的 Midnight, 并综合城市空中交通运行条件、乘客出行舒适度等因素, 将 eVTOL 巡航速度和最大制动加速度分别设置为 45 m/s 和 10 m/s^2。自由流速度 v_0=45 m/s、制动加速度 a=10 m/s^2、时间窗 T=3 600 s 时的标定结果如表 1 所示。不难发现, 随着航段长度增加, 时间窗内航段饱和容量与自由流状态航段行程时间均呈现上升趋势, 阻滞系数在一定范围内呈小幅波动, 决定系数 R^2 整体维持在较高水平, 进一步验证了本文构建的航段路阻函数模型的合理性。此外, 低空出行公共航路网络的路阻函数中, α 和 β 取值分别为 0.25 和 5.13, 与地面交通阻尼系数相比, α 和 β 的值较大, 表明航路在拥堵时的通过时间增长更为显著, 且通过时间的增长对流量变化更加敏感。

表 1　参数标定结果

Table 1　Parameter calibration results

航段长度/m	时间窗内航段饱和容量/(架·h^{-1})	自由流状态航段行程时间/s	阻滞系数α	阻滞系数β	决定系数R^2
2 000	84.652	44.003	0.246	5.130	0.976
2 150	85.654	47.303	0.261	5.130	0.976
2 300	84.872	50.604	0.249	5.130	0.976
2 450	86.724	54.013	0.278	5.130	0.976
2 600	88.019	57.314	0.300	5.130	0.976
2 750	85.755	60.724	0.262	5.130	0.976
2 900	86.373	63.804	0.272	5.130	0.976

2　算法设计

面向低空出行公共航路网络设计的双层规划模型, 具体算法结构如图 2(a)所示。上层网络规划模型算法生成初始网络结构, 作为初始解传至下层流量分配模型; 下层流量分配模型基于接收到的网络结构, 考虑用户均衡特性, 进行用户出行分配, 形成低空出行公共航路网络配流方案, 并反馈给上层网络规划模型; 上层网络规划模型计算该配流方案下的各优化目标值, 如网络平均延误指数、非直线系数及网络长度, 并进行解的更新和迭代; 上下层模型不断互馈迭代, 最终达到均衡状态, 形成最优低空出行公共航路网络设计结果。

在上层网络规划模型中, 解的编码、更新和迭代可以通过多目标启发式算法实现, 如常用的 MOSA 算法和非支配排序遗传算法(nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)[8]。

在下层流量分配模型中, 研究主要参考道路交通流量分配的用户均衡理论[14], 通过 Frank-Wolfe 算法进行目标函数的线性化转换, 具体流程可以参考文献 [15]。研究针对上层网络规划模型改进求解算法设计, 提出了多目标模拟退火-遗传算法 (multi-objective simulated annealing-genetic algorithm, MOSA-GA), 考虑到 MOSA 解的多样性与全局搜索能力较为突出, 而 NSGA-II 在算法收敛性和解的筛选效率方面表现更优, 因此, 通过结合 2 种算法, 可以有效平衡解迭代过程的收敛性和多样性, 在保证搜索效率的同时, 提升跳出局部最优与规避过慢收敛的能力, 具体算法流程如图 2(b)所示, 其中, T_i 为 MOSA 第 i 次迭代的温度参数。

上层低空出行公共航路网络规划模型主要基于路径生成的机制, 具体步骤如下:

1) 生成解编码, 计算解编码映射的网络拓扑结构性指标, 包括非直线系数和网络长度, 并将生成的网络结构传递给下层流量分配模型。

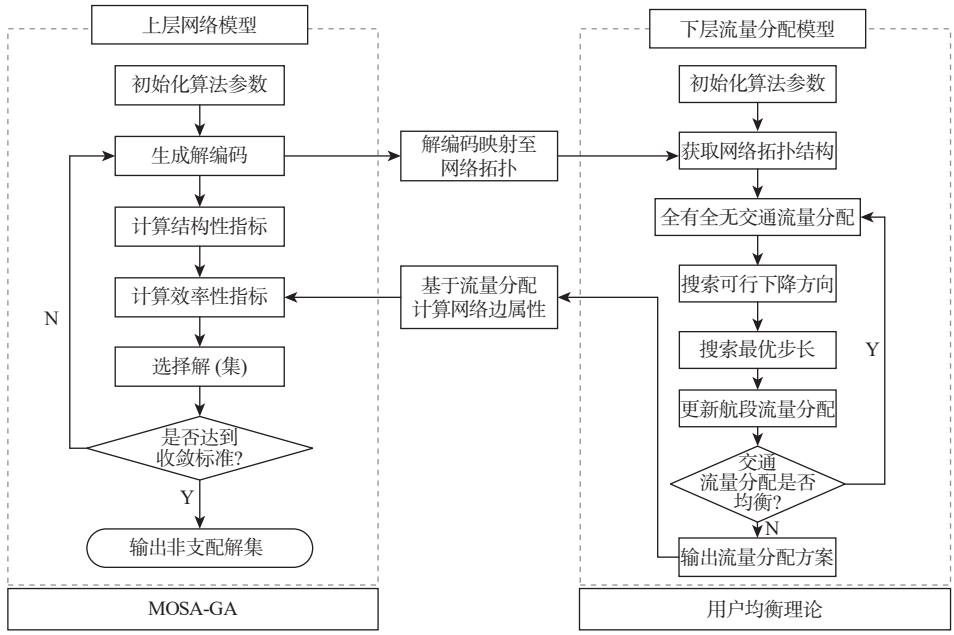
2) 下层网络获取解编码映射的网络结构, 基于用户均衡原理进行交通流量分配, 并输出网络配流方案, 反馈至上层网络规划模型用于计算网络效率性指标, 如延误指数。

3) 上层网络进一步优化调整网络结构, 重复上述步骤直至双层模型间的迭代过程收敛。

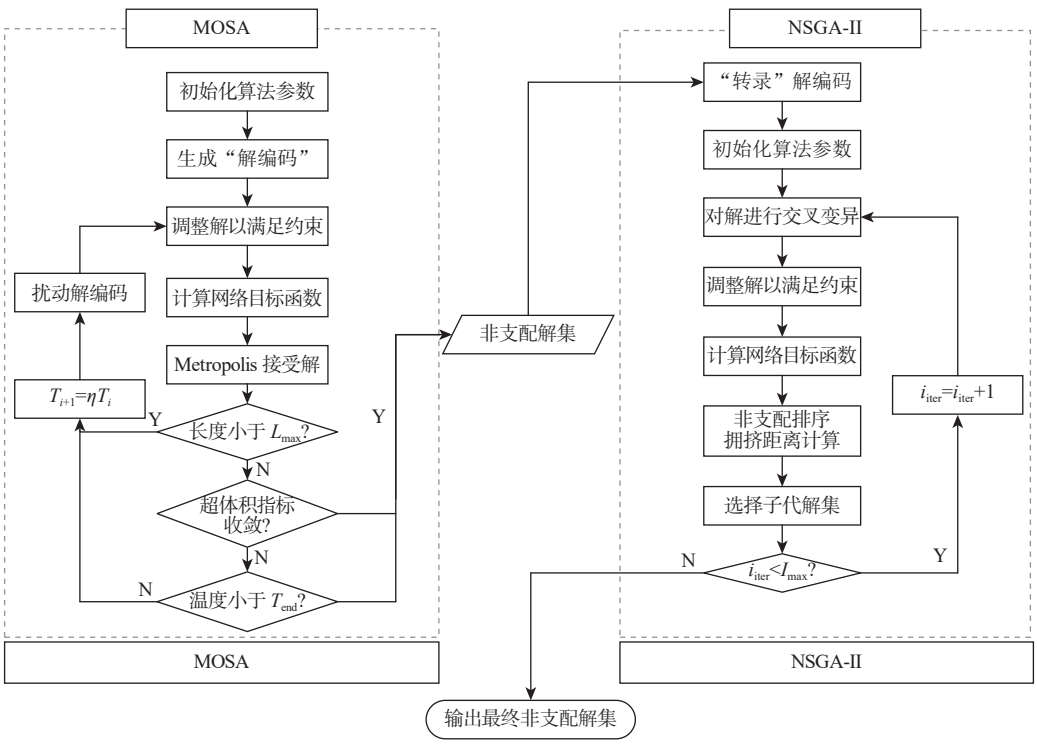
上述步骤中, 由于涉及 2 种算法交互, 结合低空出行公共航路网络规划问题的特点, 需要对算法的解编码问题进行专门设计, 其中, MOSA 编码流程具体如下:

1) 基于航路候选点集, 利用 K 最短路径(K shortest paths, KSP)算法[16]搜索 OD 间多条最优可行路径, 构建候选路径集合, 并以该集合作为候选解空间, 相较于传统基于最短路径的网络设计方法, KSP 算法可以提高候选解的多样性, 如图 3(a)所示, 其中, W_n 为候选航路点。

2) 采用二进制编码表示路径选择状态, 编码长



(a) 面向低空出行公共航路网络设计的双层规划模型框架



(b) MOSA-GA 算法设计流程框架

图 2 算法设计框架示意图

Fig. 2 Algorithm design framework diagram

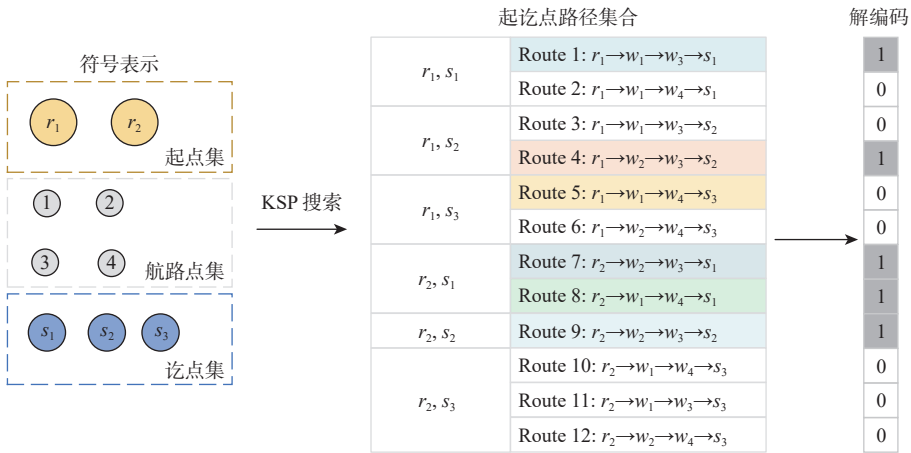
度等于候选路径集合大小，编码值为 1 表示对应路径被选入生成网络，值为 0 则表示未选入。

3）在初始解生成或扰动操作中，可能出现某个 OD 对无通路的情形。此时，需进行解的修复操作，如图 3(b)所示，可以从候选路径集中选取该 OD 对间的一条或多条路径，并将其编码值由 0 修改为 1，从而实现修复操作。

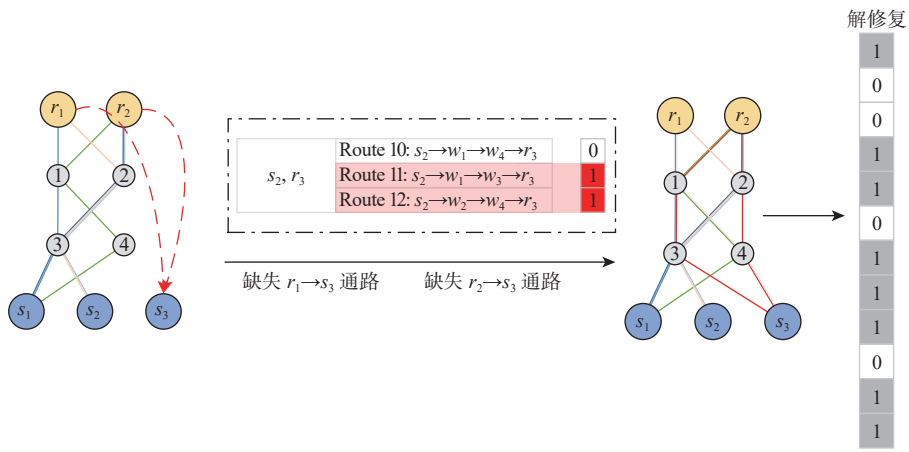
考虑到 MOSA 和 NSGA-II 在解编码设计的差异，进一步设计了两者之间的编码转录流程，通过编码转录，可以实现从基于路径的解编码到基于航段的解编码的转换，并确保解的一致性，在此基础上进行解的更新迭代，具体流程如下：

1）将 MOSA 输出的非支配解集进行转录，将候选路径解映射为航路点的连边关系，并进行二进制编码，从而实现解的转录操作，如图 4 所示。

2）对编码进行交叉和变异操作，生成新的候选解，并对新解进行检查，若违反约束条件，如存在 OD 对不连通，则同样需要进行解修复操作。



(a) 面向低空航路网络设计的 MOSA 编码方式



(b) MOSA 候选解修复机制

图 3　MOSA 编码与候选解修复示意图

Fig. 3　Schematic diagram of MOSA coding and candidate solution repair

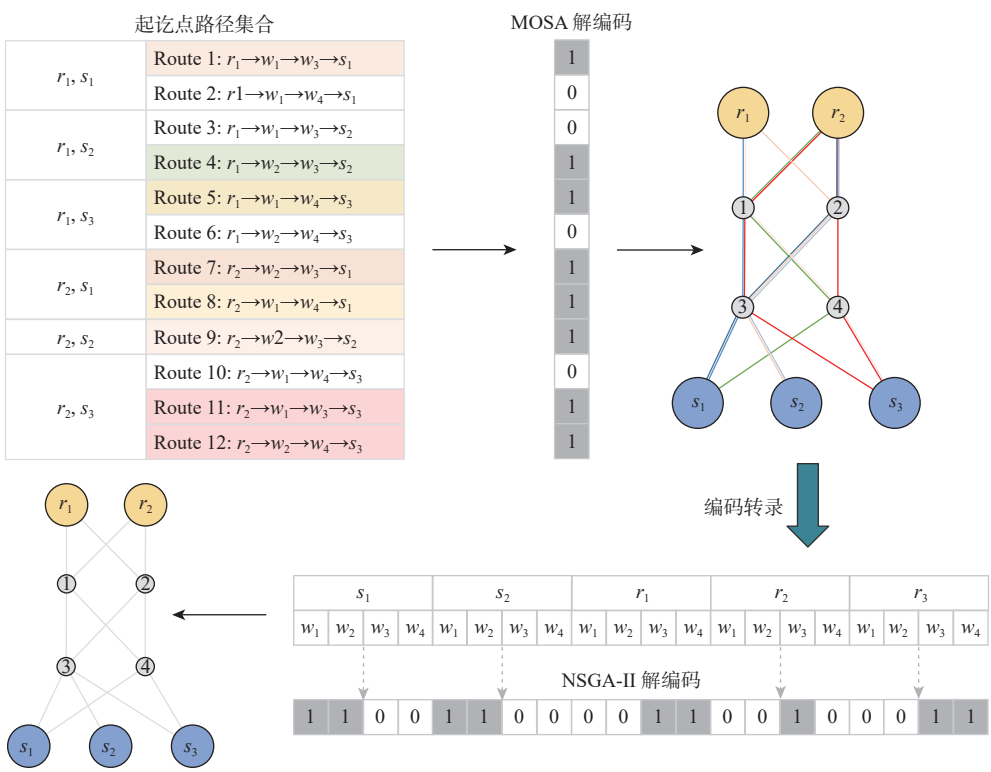
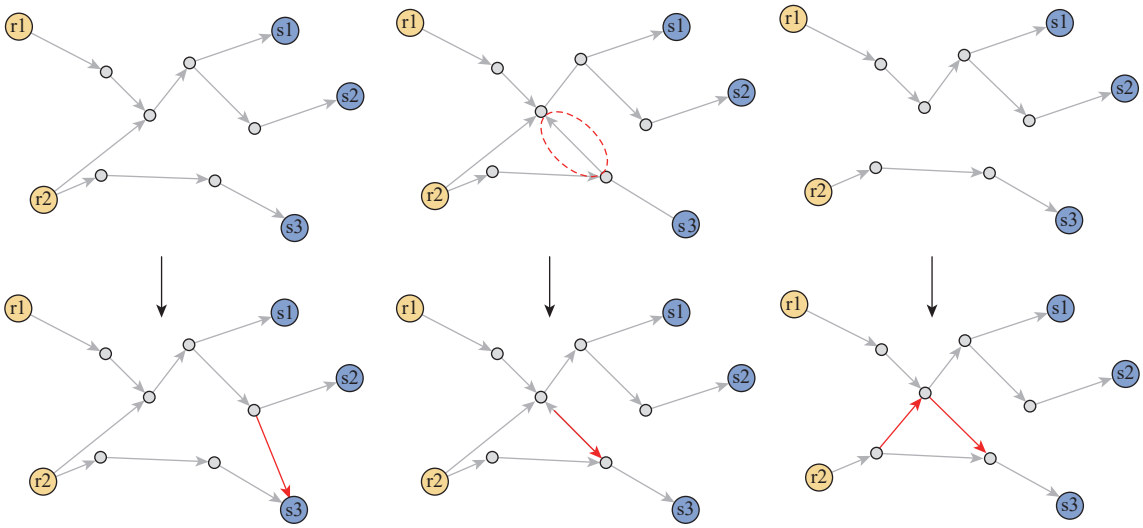


图 4　编码转录示意图

Fig. 4　Coding transcription schematic diagram

3) 随机选择一对未连通的OD对，对其进行修复操作，如图5所示。若在同一分量内，将网络视为无向图，在其关联路径中搜索可使该OD对连接的边，并将其作为有向边添加到网络中；若不在同一分量，分别提取起点和讫点所在分量的节点集合，检查是否存在可连接的跨分量边。



(a) 起讫点缺少通路，一个子图分量无向图，不存在可能边　(b) 起讫点缺少通路，一个子图分量无向图，存在可能边　(c) 起讫点缺少通路，多个子图分量

图5　NSGA-II拓扑修复机制示意图

Fig. 5　Schematic diagram of NSGA-II topology repair mechanism

4) 若存在可连接边，随机选择边加入网络中，并返回步骤2)继续执行，直至所有OD对连通。若不存在有效连接方案，则舍弃当前解。

算法的具体伪代码实现过程如下：

输入：①航路网输入：飞行器速度 v、制动加速度 a、安全间隔系数 n、时间窗 T、航路网络结构 G、OD集合 R 和 S；②MOSA参数输入：初始温度 T_0、温度下降率 η、马尔可夫链长度 $L_{\max}$、超体积收敛阈值 ε_1、超体积最大连续收敛次数 $t_{\max}$、强制结束温度 T_{end}；③NSGA-II参数输入：最大进化次数 $I_{\max}$、种群大小 N_{pop}、变异概率 p_{m}、交叉概率 p_{c}。

输出：非支配解集。

MOSA部分：

1. 初始化参数，随机生成初始解

2. while MOSA温度 $\geqslant T_{\text{end}}$ and 超体积连续收敛计数 $t_{\text{c}} \leqslant t_{\max}$ do

3. 扰动当前解生成新解

4. 对新解进行可行性检查与修复(详见MOSA编码步骤3))

5. 使用Frank-Wolfe算法进行用户均衡交通流量分配

6. 基于流量分配计算目标函数值

7. Metropolis准则接受新解

8. 计算超体积，判断是否收敛

9. return 初步非支配解集

NSGA-II部分：

10. 初始化参数，转录MOSA非支配解编码

11. while 迭代次数 $i_{\text{iter}} \leqslant I_{\max}$ do

12. 执行非支配排序，确定非支配解集

13. 选择前 N_{pop} 精英解，基于概率进行交叉变异操作生成新解

14. 对新解进行可行性检查(NSGA-II编码步骤2)～4))

15. 使用Frank-Wolfe算法进行用户均衡交通流量分配

16. 基于流量分配计算目标函数值

17. 更新算法参数

18. return 非支配解集

3　案例分析

3.1　多源数据采集与处理

城市低空出行公共航路网络规划需要结合传统用户出行信息、城市用地属性、建筑物高程分布及可用空域信息等进行起降点的选取和可用航路点的筛选，在此基础上，运用本文提出的双层规划模型进行低空出行公共航路网络的优化方案。鉴于此，选取纽约市作为实验案例，这是因为高质量的城市规划和交通数据可开源访问方便低空运行环境的风险评估和优化方案的应用性验证。本文涉及的多源数据来源、类型和用途如表2所示。

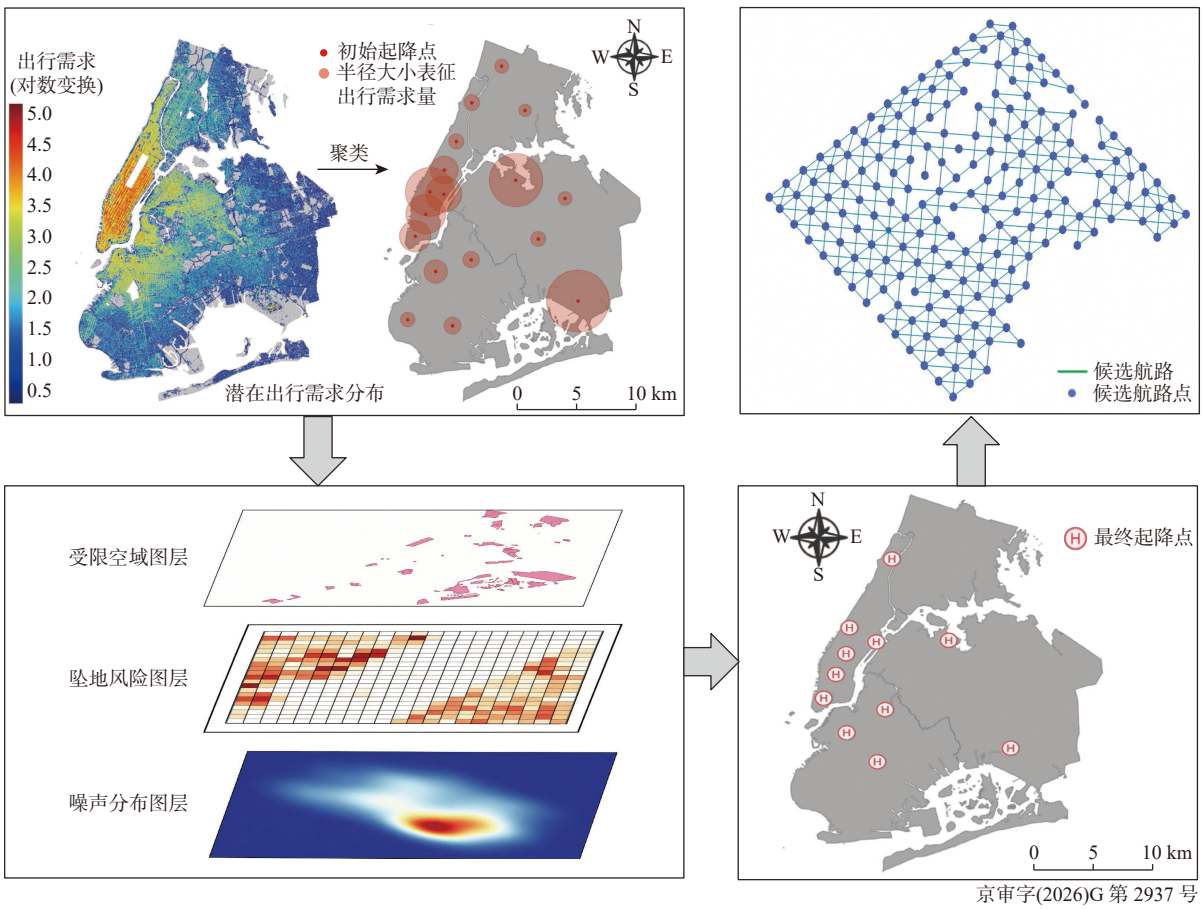
纽约市位于美国东北部，是美国人口最多的城市，同时也是世界最大的商业和金融中心。研究首

表 2　数据来源及用途

Table 2　Data sources and uses

数据类型	来源	用途
出租车出行记录	https://data.cityofnewyork.us/Transportation/2015-Yellow-Taxi-Trip-Data/2yzn-sicd/about_data	挖掘并刻画潜在低空出行需求分布
城市用地属性	https://data.cityofnewyork.us/City-Government/Primary-Land-Use-Tax-Lot-Output-PLUTO-/64uk-42ks/about_data	获取敏感空域分布及用地特征信息
建筑物高程分布	https://data.cityofnewyork.us/City-Government/3-D-Building-Model/tnru-abg2/about_data	获取建筑物高程分布及机场等重要设施位置
噪声投诉数据	https://data.cityofnewyork.us/Social-Services/Noise-Complaints-in-2017-/be8n-q3nj	刻画噪声敏感区域分布

先选取 2015 年 3 月市区范围的大规模出租车出行记录, 剔除出行距离小于 10 km、出行范围位于研究区域外、出行费用和速度异常的记录信息, 作为未来低空潜在出行需求, 具体需求分布如图 6 第 1 幅图左面所示。参考文献 [17] 的空间聚类方法, 识别出初始候选起降点位置(如图 6 第 1 幅图右面所示)。



京审字(2026)G 第 2937 号

图 6　多源数据驱动的垂直起降点选址和空域栅格化处理

Fig. 6　Multi-source data-driven vertiports location and airspace rasterization processing

在此基础上, 基于采集的城市用地特征和建筑物高程数据, 识别警务机构、消防设施、机场净空区等敏感区域, 构建敏感区域图层; 此外, 依据文献 [13] 提出的低空坠地风险评估方法和文献 [18] 提出的无人机噪声评估方法, 并基于采集的多源数据, 建立低空坠地风险态势图和噪声影响核密度分布图, 如图 6 第 2 幅图所示。

经过上述多源图层的进一步过滤, 最终选取面向城市低空出行公共航路网络运行的起降点选址方案, 如图 6 第 3 幅图所示, 图中, 起降点的大小与该位置的出行需求呈正相关。在此基础上, 结合起降点选址的分布范围, 选取西经 74.25°～73.75°、北纬 40.50°～41.00°作为低空出行公共航路网络的规划范围, 参考文献 [18] 的数字空域栅格化方法对研究范围进行空域栅格化处理, 选取 2 000 m 作为栅格单元大小, 结合低空坠地风险态势图和噪声核密度影响分布图, 过滤满足低空出行公共航路网络规划使用的栅格单元, 并将其栅格中心作为候选航路点, 如图 6 第 4 幅图所示。

3.2　算法参数设置与性能对比

在上述基础上, 使用本文提出的双层规划模型及 MOSA-GA 进行低空出行公共航路网络规划设计。算法的具体参数设置如表 3 所示。

研究选取反转世代距离(inverted generational

表3 算法参数设置

Table 3 Algorithm parameter settings

自由流速度/(m·s^{-1})	飞行器最大制动加速度/(m·s^{-2})	时间窗/s	MOSA初始温度/℃	MOSA结束温度/℃	马尔可夫链长度	MOSA超体积收敛阈值	Frank-Wolfe收敛阈值	NSGA-II最大进化次数	NSGA-II种群大小	NSGA-II变异概率	NSGA-II交叉概率
45	10	3 600	10	0.1	50	10^{-6}	10^{-4}	100	100	10^{-4}	1

distance, IGD)指标，通过计算每个在真实帕累托前沿面上的点(个体)到算法获取的个体集合之间的最小距离和，评估多目标算法的收敛性能和非支配解集的分布性能。

如图7所示，算法在初始迭代阶段IGD值较高，这与MOSA产生的初步非支配解集质量相关。随着迭代次数增加，IGD值整体呈现下降趋势，表明算法的收敛性能逐渐提升。

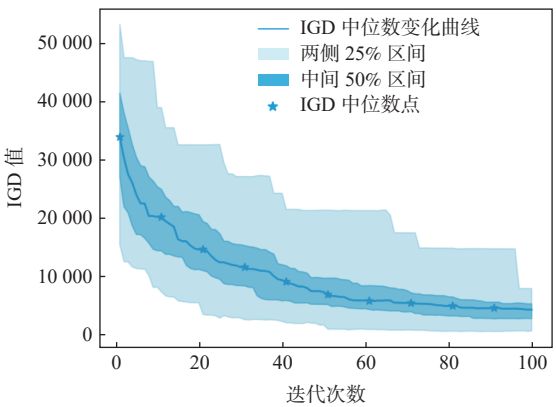


图7 IGD随迭代次数变化趋势及分布

Fig. 7 The variation trend and distribution of IGD with the number of iterations

同时，IGD值的分布区域在早期迭代阶段宽广，说明此阶段解较为离散，不确定性较高；在迭代后期，分布区间缩小，算法的解逐步稳定，IGD趋于收敛，说明算法表现出较好的稳定性和收敛性。

当上层网络规划模型采取不同启发式搜索算法时，求解性能具有显著差异，各算法的帕累托前沿面结果如图8所示。进一步地，结合图9不难发现，MOSA-GA和NSGA-II的解集在多个目标上的分布比MOSA更加均匀。在各目标函数表现方面，MOSA-GA在网络长度上峰值比NSGA-II高约20.0%，但在延误指数和出行时间总和上分别比NSGA-II降低约7.6%和14.3%；2种算法在非直线系数上表现相当。与MOSA相比，MOSA-GA在延误指数、非直线系数和出行时间总和的峰值接近，但解集分布更广，且在网络长度上峰值比MOSA峰值减小了约25%。

综上所述，MOSA-GA兼具MOSA在延误和出行时间控制上的优势及NSGA-II在网络长度优化方面的能力，实现了空域资源利用与出行效率的平衡，提升了解的实用性和可行性。

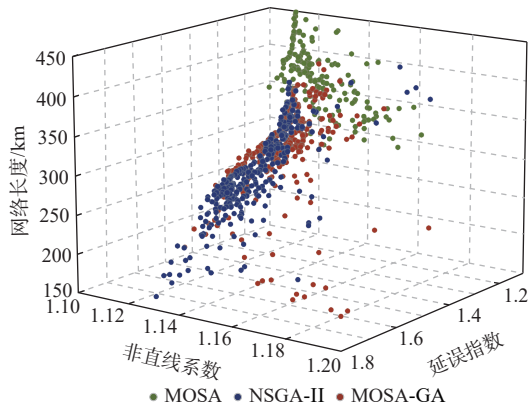


图8 3种算法前沿分布

Fig. 8 Front distribution of three algorithms

3.3 模型结果分析

图10分别呈现了低空出行公共航路网络双层规划的4类结果，分别对应最优延误指数网络(网络Ⅰ)、最优非直线系数网络(网络Ⅱ)、最优网络长度网络(网络Ⅲ)及最优出行时间总和网络(网络Ⅳ)。从图10中4类优化目标网络的流量分布特征可以看出，各网络在流量分配策略与结构布局方面存在显著差异：网络Ⅰ、网络Ⅱ和网络Ⅳ表现出较为均衡的流量分布，但部分航段利用效率较低，存在冗余路径；而网络Ⅲ的流量高度集中于少数主干航段，整体结构紧凑但冗余度较低，在高负荷下存在通行瓶颈。

多目标航路网络优化结果如表4所示。延误指数、非直线系数及出行时间总和最优的网络综合性能接近；而网络长度最优方案虽展现近45%的航路里程缩减优势，但核心航路交通负荷过大，导致出行时间激增，这表明网络时空效能与建设成本呈现显著权衡关系。

为进一步揭示城市低空出行公共航路网络拓扑特征与交通流负荷的关系，采用介数中心性指标对航路点和航段进行分析，结果如图11(a)所示。该指标通过量化节点(边)在最短路径中的出现频率，表征其在交通流传输中的枢纽作用。统计结果表明，流量主要集中于高介数中心性的航段边，表明这些航段作为城市低空交通网络的关键通道，承担着核心流量的传输功能。在此基础上，研究分析优化后的低空出行公共航路网络拓扑结构特性。

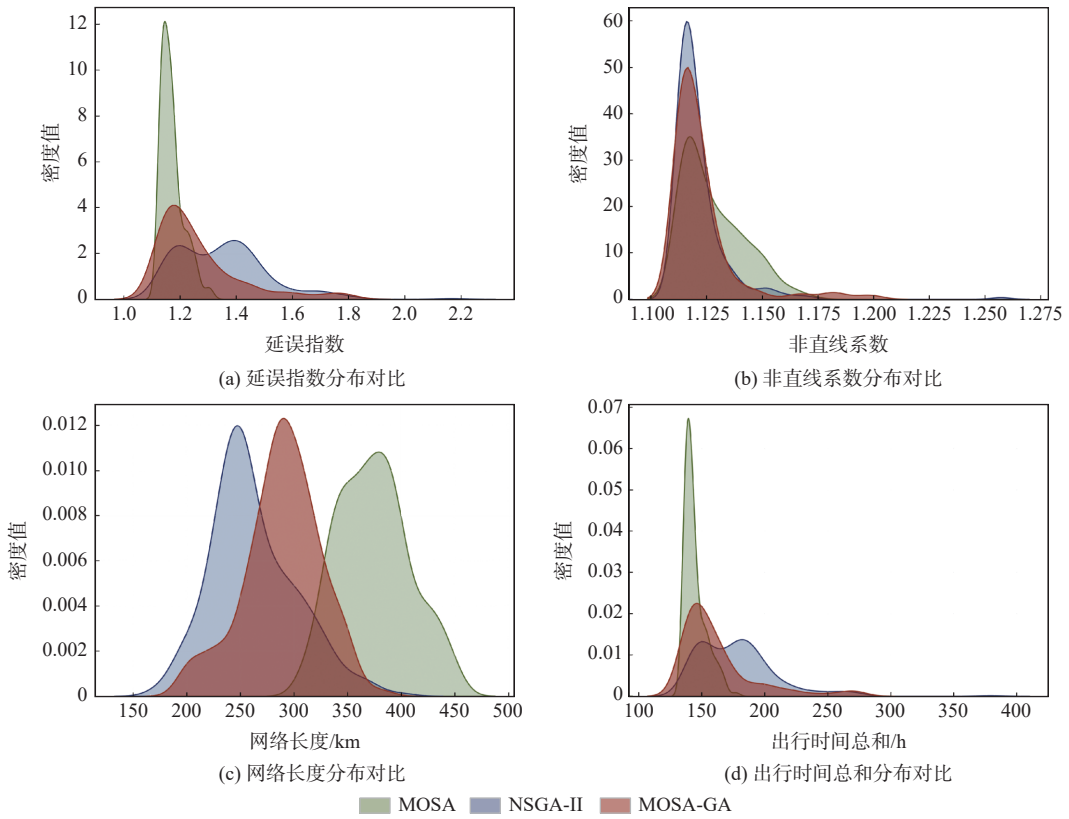


图 9　3 种算法目标函数分布

Fig. 9　Objective function distribution of three algorithms

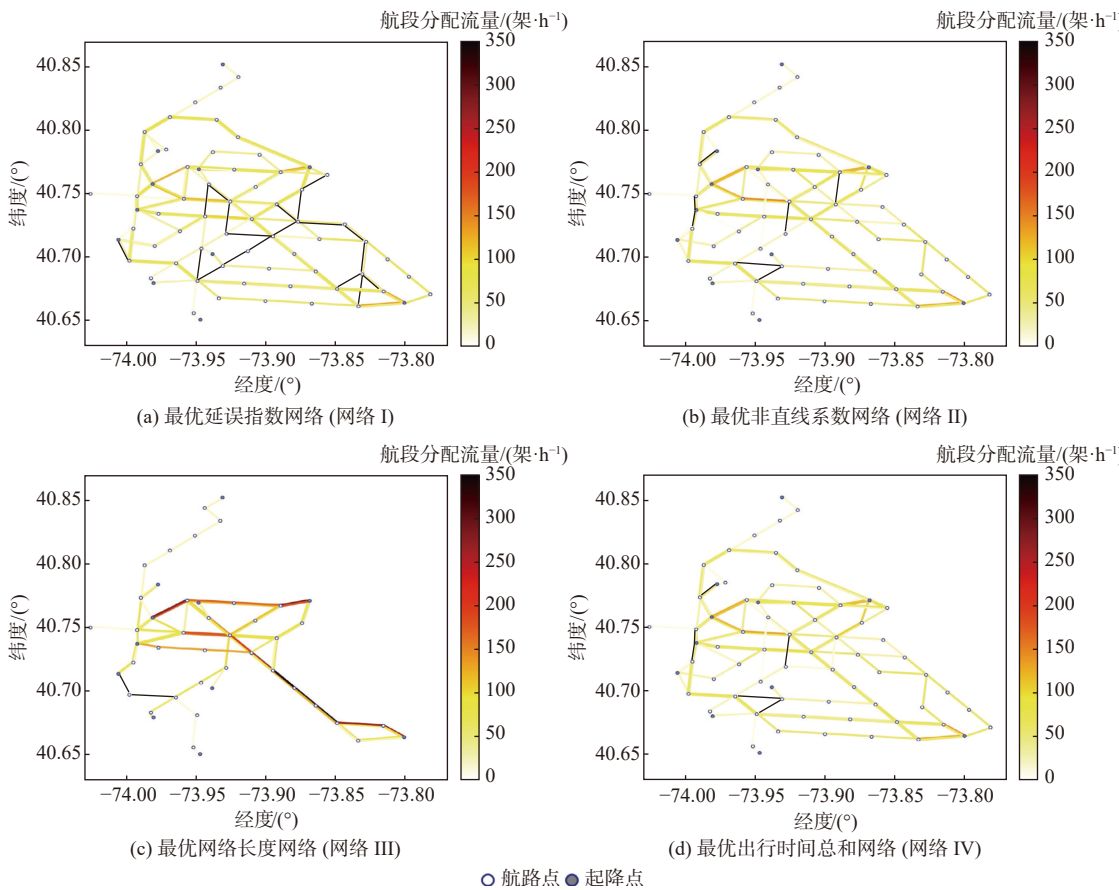


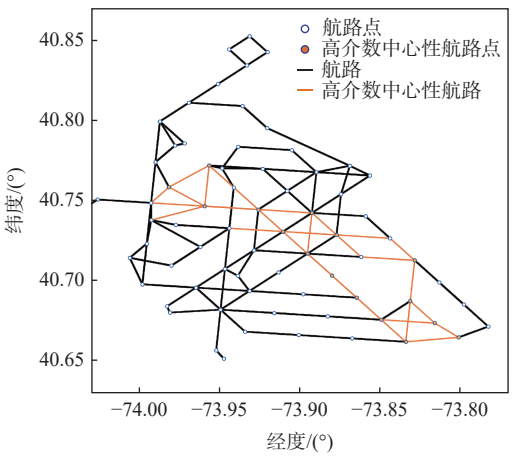
图 10　低空出行公共航路网络优化结果示意图

Fig. 10　Schematic diagram of low-altitude travel public air route network optimization results

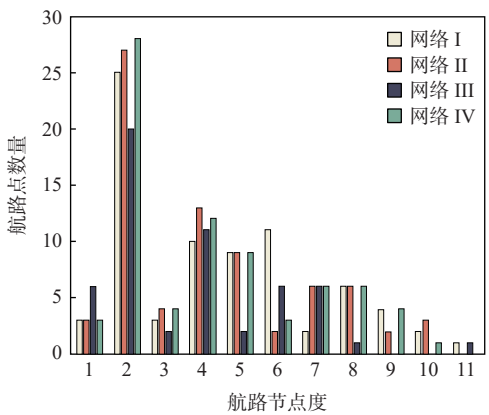
表 4 最优网络目标函数值

Table 4 Optimal network objective function value

网络/目标函数	延误指数	网络长度/km	非直线系数	出行时间总和/h
网络Ⅰ	1.111 77	384.8	1.121 26	136.49
网络Ⅱ	1.118 24	352.7	1.113 31	135.75
网络Ⅲ	1.808 09	195.4	1.200 54	264.32
网络Ⅳ	1.115 51	354.2	1.115 44	135.69



(a) 介数中心性高的节点及边分布



(b) 航路节点度分布

图 11 航路网络拓扑分析结果

Fig. 11 Air route network topology analysis result

节点度分布统计结果如图 11(b)所示，网络拓扑中以低度节点为主。核心区域存在高度值枢纽节点，其承担的交通流量显著高于普通节点，形成网络流量依赖的脆弱节点。

3.4 目标函数间相关性分析

进一步分析非支配解集的三维分布特征，结果表明，非支配解在目标空间中呈现凹形曲面分布特征，初步揭示了目标函数之间的权衡关系。为解析多目标优化中目标函数间的权衡机制，本节通过计算非支配解目标函数间的皮尔逊相关系数，揭示了目标函数之间的内在关联。

目标函数之间的分布关系如图 12 所示，通过将点投影到坐标面上，以呈现目标函数间的相互关系。具体而言，延误指数与非直线系数之间的皮尔逊相关系数为 0.68，呈显著正相关，表明非直线系数升高时，路径迂回程度增加，导致网络整体通行效率下降；延误指数与网络长度之间的皮尔逊相关系数为−0.92，呈强负相关性，表明网络规模的扩展通过增加 OD 间的可选路径，能够显著降低延误指数；非直线系数与网络长度之间的皮尔逊相关系数为−0.58，呈负相关性，表明网络长度变化较小时，非直线系数主要受局部路径结构的影响。

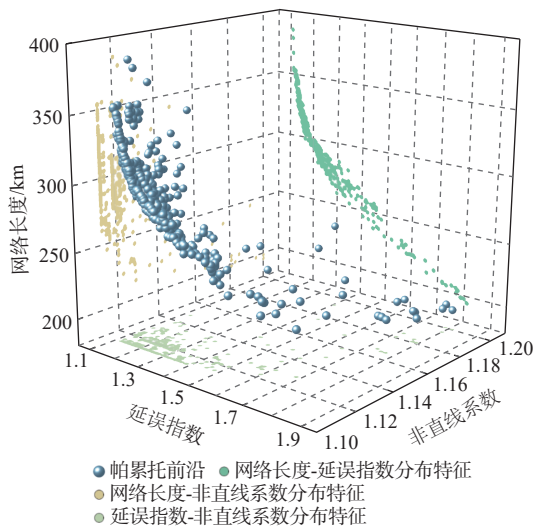


图 12 帕累托前沿分布

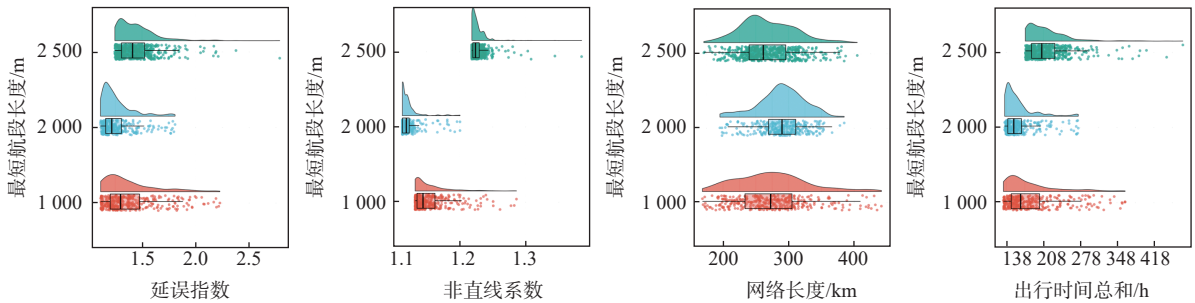
Fig. 12 Pareto frontier distribution

3.5 敏感性分析

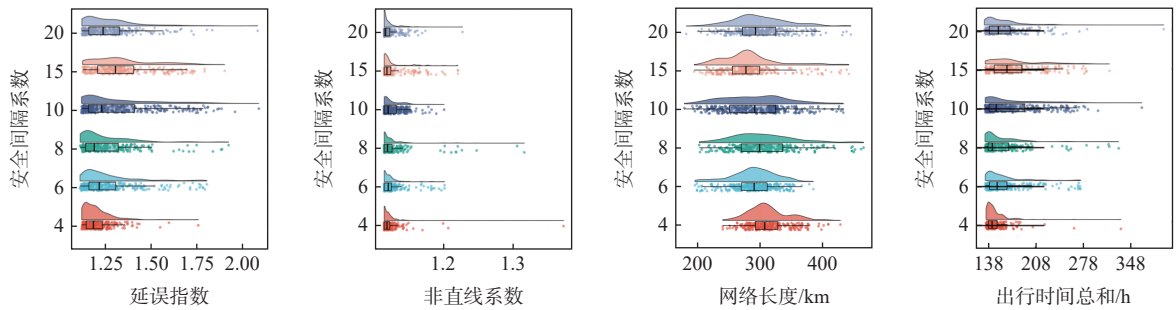
在飞行程序设计中，区域导航航段的最短距离是指 2 个航路点之间能够保证飞行安全和导航精度的最小距离。如果最短航段长度过短，可能导致航空器无法在短时间内完成必要的飞行姿态调整，从而降低航路网络的飞行安全性；若最短航段长度过长，则会增加不必要的飞行距离和时间，进而降低航路网络的整体飞行效率。

在实验设计中，考虑到最短航段长度(本文中即栅格单元长度)和安全间隔对目标函数值的影响较为显著，进行了 2 组敏感性实验分析。

第 1 组实验聚焦于最短航段长度的影响，设置了 3 种不同的最短航段长度(1 000 m、2 000 m 和 2 500 m)，对其在各项性能指标下的表现进行对比分析，结果如图 13(a)所示。不难看出，最短航段长度对延误指数、非直线系数、网络长度及出行时间总和目标函数均产生了显著影响。最短航段长度为 1 000 m 时，网络连接更密集，路径选择性多，但可能出现低效航段的比例增加，加剧了网络的延误；最短航段长度为 2 500 m 时，网络路径选择受限，主干航段流量集中，也加剧了通行延误和系统负荷。



(a) 目标函数随最短航段长度的变化



(b) 目标函数随安全间隔系数的变化

图 13　参数敏感性分析结果

Fig. 13　Parameter sensitivity analysis results

相比之下, 模型最短航段长度设置为 2 000 m 时, 延误指数和出行时间总和相对较低, 非直线系数处于合理范围, 显示出较优的通行效率和路径合理性。

第 2 组实验主要聚焦安全间隔参数 n 的影响, 对 6 组间隔标准 n=4,6,8,10,15,20 进行了对比实验, 以探究安全间隔对航路性能的影响。图 13(b)的结果表明, 随着安全间隔的增大, 延误指数呈上升趋势, 从 n=4 时的均值 1.2 增大到 n=15 时的 1.35, 表明增大安全间隔会降低网络通行能力。当安全间隔增加, 时间窗内的航段安全容量降低, 网络在某些区域采用更远的替代路径, 导致非直线系数上升, 整体分布更加离散。网络长度在区间内波动, 表明模型在安全约束下维持了合理的网络规模。出行时间总和与安全间隔呈正相关, 但增速较慢, 主要受航段容量限制的制约。

4　结　论

本文立足现有城市低空出行公共航路网络研究, 综合考虑航路网络规划和用户出行需求特性, 构建双层航路网络规划模型, 提出 MOSA-GA 求解算法, 并基于城市多源数据, 对面向城市居民低空出行的公共航路网络设计进行研究分析, 主要结论如下:

1) MOSA-GA 在双层网络规划模型求解中, 有效平衡了解集的分布广度与目标函数优度, 显著提升了航路网络运行效率。

2) 多目标函数之间存在显著的制约关系, 单一优化某一目标将导致其他目标性能下降, 并对下层流量分配模型中的用户出行时间总和产生影响。

3) 双层规划模型对最小航段长度与安全间隔参数表现出敏感性, 在优化过程中, 需合理设定相关参数, 以保证模型性能与航路网络的可行性。

4) 受出行需求分布和可用空域资源的约束, 优化后的网络呈现流量向主干航路聚集的特征, 导致部分航段利用效率相对较低。

低空出行尚处于探索和变革阶段, 运行规则和管控机制尚不清晰, 后续研究可拓展如下方面: ①鉴于低空出行服务对象对出行时间具有较高敏感性, 本文仅选取出租车数据作为低空出行的潜在需求, 而都市出行中, 地铁、公交等多种出行方式也占据重要地位, 未来研究需要对出行用户的出行行为进行更为全面和细致的刻画; ②联合城市低空出行公共航路网络与地面交通网络的规划设计, 形成考虑空地多式联乘的航路网络规划方案; ③随着低空经济的发展, 多网融合技术快速迭代, “通、导、监”一体化技术日益成熟, 低空通信质量及网络信号覆盖可以纳入低空出行公共航路网络规划设计的考量中, 提升低空出行公共航路网络规划方案的工程应用性。

参考文献 (References)

[1] 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 X H, Qu W Q, Xu C C, et al. A review of urban air mobility and its new infrastructure low-altitude public routes[J]. Acta Aero-

nautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(24): 1-29(in Chinese).

[2] 中国人民大学课题组. 中国低空经济城市发展指数 (LCDI) 2025(发布版)[EB/OL]. [2025-04-30]. http://keyan.ruc.edu.cn/docs/2025-03/ae9eb3d4bb36483fbf7489577e5ba097.blk.pdf.
Research Group of Renmin University of China. China low-altitude economy urban development index 2025 (release)[EB/OL]. [2025-04-30]. http://keyan.ruc.edu.cn/docs/2025-03/ae9eb3d4bb36483fbf7489577e5ba097.blk.pdf(in Chinese).

[3] 钱欣悦, 张洪海, 张芳, 等. 末端配送物流无人机起降点选址分配问题研究[J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2021, 45(4): 682-687.
Qian X Y, Zhang H H, Zhang F, et al. Research on location allocation of UAV landing points for terminal distribution logistics[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2021, 45(4): 682-687(in Chinese).

[4] 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: 470-505.

[5] 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.

[6] Wu Z Q, Zhang Y. Integrated network design and demand forecast for on-demand urban air mobility[J]. Engineering, 2021, 7(4): 473-487.

[7] Wang K, Li A Y, Qu X B. Urban aerial mobility: network structure, transportation benefits, and Sino-US comparison[J]. The Innovation, 2023, 4(2): 100393.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 唐志星, 黄山, 潘卫军. 灵活使用空域中的空中交通流量分配方法研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(12): 90-94.
Tang Z X, Huang S, Pan W J. Research on scheduling method for air traffic flow allocation in FUA[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(12): 90-94(in Chinese).

[11] 王兴隆, 齐雁楠, 潘维煌. 基于功能脆弱性的空中交通相依网络流量分配[J]. 航空学报, 2020, 41(4): 179-187.
Wang X L, Qi Y N, Pan W H. Flow allocation of air traffic interdependent network based on functional vulnerability[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(4): 179-187(in Chinese).

[12] 张兆宁, 王帝. 基于容流匹配的机场群流量分配策略研究[J]. 现代电子技术, 2019, 42(22): 113-116.
Zhang Z N, Wang D. Research on flow allocation strategy based on capacity matching for airport group[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(22): 113-116(in Chinese).

[13] 陈艺君, 余莎莎, 张学军. 城市低空场景下无人机运行对地风险量化评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(3): 806-815.
Chen Y J, Yu S S, Zhang X J. Ground risk quantitative assessment for UAV operations in urban low-altitude scenarios[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(3): 806-815(in Chinese).

[14] Wardrop J G, Whitehead J I. Correspondence. some theoretical aspects of road traffic research[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1952, 1(5): 767-768.

[15] Frank M, Wolfe P. An algorithm for quadratic programming [J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1956, 3(1-2): 95-110.

[16] Liu H P, Jin C Q, Yang B, et al. Finding top-k shortest paths with diversity[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2018, 30(3): 488-502.

[17] Lim E, Hwang H. The selection of vertiport location for on-demand mobility and its application to Seoul metro area[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2019, 20(1): 260-272.

[18] Wang Z, Delahaye D, Farges J L, et al. Route network design in low-altitude airspace for future urban air mobility operations: a case study of urban airspace of Singapore[C]//Proceedings of the International Conference on Research in Air Transportation. Tampa: International Conference on Research in Air Transportation, 2022.

A bi-level programming method for urban low-altitude travel public air route network driven by multi-source data

WANG Weiwen[1], BAO Jie[1,*], CHEN Fangxiao[1], ZHOU Jun[1], YANG Zhao[2]

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. College of General Aviation and Flight, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Liyang 213300, China)

Abstract: Urban low-altitude travel is the core of high-quality development in the low-altitude economy and an important link for enabling low-altitude empowerment and economic radiation. For urban low-altitude public flight routes, this study suggests a multi-source data-driven dual-layer planning approach that creates a feedback optimization mechanism between low-altitude demand allocation and flight route network planning. A road impedance function calibration method tailored for low-altitude travel is presented, and the multi-objective simulated annealing-genetic algorithm (MOSA-GA) hybrid evolutionary algorithm is designed for solution search. Finally, taking a typical metropolitan area as a case study, multi-source urban data such as airspace, buildings, land use, pedestrian flow, and noise distribution are extracted, and the proposed dual-layer planning method is validated through comparison. The experimental findings demonstrate that the MOSA-GA algorithm successfully strikes a compromise between the optimality of the goal functions and the diversity of the solution set, greatly enhancing the low-altitude route network's operational efficiency. The solution results yield multiple Pareto-optimal solutions that are mutually non-dominated, with significant trade-offs between multiple objectives, which impact traffic flow allocation. Additionally, sensitivity analysis reveals that safety intervals and minimum segment lengths significantly affect the network optimization outcomes. The research findings are expected to guide the deployment of urban low-altitude public flight route networks and improve the level of low-altitude travel services.

Keywords: urban air mobility; low-altitude public air route network; bi-level programming model; traffic assignment; multi-objective optimization

Received: 2025-05-12; **Accepted**: 2025-05-30; **Published Online**: 2025-06-10 15:59

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20250610.1349.001

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (2022YFB4300905); National Natural Science Foundation of China (52572356,52172328); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (NS2024042)

* **Corresponding author**. E-mail: jiebao@nuaa.edu.cn