

## 【航空管理与安全】

## 基于遗传算法对城市无人机起降场布局规划研究

钱 戈<sup>1</sup>, 郭 崑<sup>2</sup>, 许学吉<sup>2</sup>, 周洁敏<sup>2</sup>

(1. 中国东方航空江苏有限公司 运控分中心, 江苏 南京 211100;

2. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 211100)

**摘 要:**针对城市空中交通发展中无人机起降场布局规划的关键问题,提出了一种基于多目标优化的系统研究方法。首先,整合国内外起降场物理设计标准、典型无人机性能参数及城市空间特征,将起降场划分为枢纽、一般和临时三类,构建以全生命周期成本最小和需求覆盖率最大为核心的双目标规划模型。其次,采用遗传算法对起降场的成本和数量进行双目标规划求解,通过帕累托前沿分析揭示成本与覆盖率间的权衡关系。最后,通过具体算例验证了模型的有效性和适用性,同时对比了传统聚类及贪婪算法,并通过不同需求场景验证了模型的适应性。

**关键词:**无人机;起降场;布局规划;遗传算法;城市

**中图分类号:** V 351 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.issn.2097-4973.2025.06.006

近年来,无人机在物流配送、应急救援、公共服务领域展现出巨大潜力。无人机可在一定程度上缓解地面交通压力,促进城市立体交通的发展,而合理布局无人机起降场是发挥无人机城市空中交通效能的关键前提,直接影响无人机运行效率与安全,因此深化无人机起降场研究具有重要理论价值和现实意义。

在布局规划中往往有多个目标需要满足最优,如成本、效率等,多目标优化算法被用来在多个相互冲突的目标之间寻找平衡。遗传算法凭借其全局搜索能力和良好的收敛性,在处理离散型选址问题方面较为成熟,易于实现多目标优化,因此在设施选址中被广泛应用。张洪海等设计了人类学习优化算法(HLO)用于城市物流无人机起降点布局,其结果表明 HLO 在特定问题的求解精度与收敛速度上具有优势<sup>[1]</sup>;Chauhan 等开发了贪婪启发式和三阶段启发式(3SH)算法用于带容量约束的无人机设施选址,3SH 在保证解质量的同时能有效减少计算时间<sup>[2]</sup>;杨佳佟等提出了基于空间连续需求的最大覆盖模型选址方法<sup>[3]</sup>。李骁等研究了与非机动车协同配送的无人机起降点选址,设计遗传算法并引入关切系数平衡运输与建设成本<sup>[4]</sup>;钱欣悦将 K-means 聚类算法用于城区物流无人机起降场点布局优化,构建了多目标模型<sup>[5]</sup>;冯棣坤等提出基于覆盖偏移度及安全效用的规划方法,引入多约束条件提高布局安全性<sup>[6]</sup>;沈舟等则提出了一种可自动调整构型的高吞吐、模块化无人机起降场设计方案<sup>[7]</sup>。

然而,现有成本目标多侧重于运营成本<sup>[1-2]</sup>或覆盖效率<sup>[3]</sup>,未能整合不同类型起降点的差异性建设成本及其在全生命周期内的经济性影响<sup>[4-6]</sup>,难以实现真正的全局成本最优;而且多数布局模型未充分考虑起降点功能定位的差异(如枢纽、一般、临时),或仅聚焦单一类型<sup>[4-5]</sup>,未能系统建模探讨不同类型起降点

收稿日期:2025-06-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3014400)

第一作者简介:钱 戈(1991—),男,江苏常州人,工程师,硕士,主要从事空域规划管理、飞行数据监控管理研究。

E-mail:nuaaqiange@163.com

通信作者简介:周洁敏(1965—),女,江苏宜兴人,研究员,硕士,主要从事交通信息工程及电子技术研究。

E-mail:jieminzh@nuaa.edu.cn

在服务半径、建设标准、运营成本上的差异及其协同覆盖机制。

综上,针对现有多目标协同不足、类型差异忽略等问题,本研究提出一个多目标规划,整合物理标准、无人机性能与城市特征,将起降场划分为三类,构建以全生命周期成本最小化和需求覆盖率最大化为核心的双目标优化模型,并采用遗传算法进行高效求解,为低空基础设施规划提供综合实用的决策支持。

## 1 起降场布局规划相关要素分析

### 1.1 起降场物理设计标准分析

在进行 eVTOL(电动垂直起降飞行器)起降场规划时,需严格遵循物理设计标准以保障其安全高效运行。参考中国民用机场协会团体标准<sup>[8]</sup>《电动垂直起降航空器(eVTOL)起降场技术要求》、欧盟 EASA<sup>[9]</sup>与美国 FAA<sup>[10]</sup>相关标准,国内外在起降区域设计上存在差异:我国标准中 TLOF(接地和离地区)尺寸应满足内切圆直径不小于  $1.0D$ ( $D$ 为无人机全尺寸),坡度控制在  $0.5\% \sim 2\%$ ,表面为硬质实体,障碍物高度不超过  $2.5 \text{ cm}$ ;FATO(最终进近和起飞区)尺寸内切  $1.5D$ ,安全区边界距其不低于  $3.0 \text{ m}$ ,表面能抵抗旋翼下洗流。EASA 标准下 TLOF 尺寸内切  $0.83D$ ,FATO 内切  $1.5D$ ,安全区延伸  $3.0 \text{ m}$  或  $0.25D$ (取较大值)且允许非实体;FAA 标准规定 TLOF 为边长  $1D$  的矩形,坡度不超过  $2\%$ ,承载力达  $1.5$  倍最大起飞重量,FATO 为边长  $2D$  矩形,非实体区为边长  $3D$  矩形。

以亿航 EH216-S( $D=5.63 \text{ m}$ )为例,其 TLOF 为内切  $5.63 \text{ m}$  圆形区域,FATO 为内切  $8.45 \text{ m}$  圆形区域,道面工艺要求混凝土厚度不小于  $20 \text{ cm}$  并涂环氧树脂抗滑,临时草坪起降区需配备硬垫板及排水设施。净空条件参考 MH5013,进近面水平距离不少于  $1219 \text{ m}$ 、坡度不超过  $12.5\%$ (FAA 标准),亿航企业标准还要求安全区延伸  $5 \text{ m}$ 、净空区延伸  $10 \text{ m}$  并清除障碍物。

### 1.2 常见无人机性能分析

在大型无人机性能参数方面,以载人级无人机亿航 EH216-S、峰飞 V2000 为例,在重量与荷载上,EH216-S 最大起飞重量为  $650 \text{ kg}$ ,动荷载达  $1.2 \text{ t}$ ,依据亿航标准,其停机位需满足静荷载  $0.6 \text{ t}$ 、动荷载  $1.2 \text{ t}$  的要求。载人无人机起降方式多为垂直起降(VTOL),这类起降方式对场地尺寸要求较为严格,而复合翼机型如峰飞 V2000,则需一定的滑跑距离,其滑行宽度要求不小于  $2$  倍轮距。环境适应性方面,抗风能力依据亿航 AAV 标准应不小于  $12 \text{ m/s}$ ,同时无人机的电磁环境需尽量避免 GPS/北斗信号干扰,以确保飞行安全。除此之外,一些常见大型无人机的自身基本参数见表 1。

表 1 常见大型无人机关键性能参数

参数	机型			
	亿航 EH216-S	峰飞 V2000	零重力 ZG-ONE	物流无人机(示例)
最大航程/km	35	250	50	120(空载)
有效载荷/kg	220	1000	160	20(标准任务)
巡航速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	130	200	150	80
电池容量/( $\text{kW} \cdot \text{h}$ )	20	120	35	8
充电时间(快充)/h	2	4	1.5	0.5
起飞间隔(理论)	3 min/架次	5 min/架次	4 min/架次	2 min/架次

数据来源:亿航 AAV 企业标准(Q/EHE 005—2020);T/CCAATB 0062—2024 附录 A;物流无人机参数基于典型行业机型假设。

性能约束对规划的影响主要体现在以下几点。在尺寸匹配上,枢纽起降点需适配多种机型;动力荷载方面,混凝土道面要满足紧急着陆荷载,参考 T/CCAATB 标准,紧急着陆荷载要求达到  $2.5$  倍最大起飞重量(MTOW);能源配套上,充放电设施功率应不小于  $22 \text{ kW}$ (亿航标准),同时需配置防水电源及快速直

流充电机,以满足无人机的高效充电需求,确保其正常运行。

### 1.3 城市空中交通无人机起降场分析

在城市空中交通体系中,无人机起降场是确保无人机高效、有序运行的重要基础设施。根据功能定位、服务范围以及交通流量等多方面因素,本文将起降场分为枢纽起降场、一般起降场和临时起降场三类进行研究。

枢纽起降场是城市空中交通主要基地,多选址于城市核心区域(商业中心、交通枢纽),这些区域人口密集、物流活动频繁,无人机运输配送需求旺盛。需要配备完善设施(高精度导航系统、合理停机坪、高效调度中心等),以保障无人机群大规模起降、调度及货物转运。在服务范围上,枢纽起降场辐射范围广,可覆盖周边数千米至数十千米区域,汇聚并调度不同区域的物流运输需求。

与枢纽起降场相比,一般起降场服务半径较小,多布局于城市各功能分区(居民社区、中小型商业区、工业园区等局部区域)。需要配备符合常规起降需求的停机位、基础充电/加油装置及必备通信设备,可满足区域内日常小件物品配送、航空测量数据收集等平稳起降任务。此外,一般起降场布局密度高,能快速响应片区多样化即时需求,确保无人机短时间抵达任务地点并返航。

临时起降场具有高度灵活性与临时性,为应对特殊、突发状况而设立。在大型活动、应急救援、医疗援助等场景下,能迅速搭建,实施应急飞行任务。设施多为简易便携式,例如临时铺设机坪标线、小型充电设备等,可以快速建构与拆除,针对性满足特定时段、场景下的起降需求。

## 2 基于遗传算法的起降场布局规划模型

### 2.1 问题描述

城市无人机起降场布局规划需在满足无人机性能约束、运输需求覆盖及环境限制条件下,确定枢纽、一般及临时起降场的最优数量与位置,实现全生命周期成本最小化与需求覆盖率最大化。该问题可概括为多目标规划问题,需考虑无人机续航、载重等性能参数对起降场服务半径的限制,禁飞区、建设数量等约束条件,不同类型起降场建设成本与运营成本差异等。本研究通过构建双目标规划模型,采用遗传算法求解,为城市无人机起降场布局提供兼顾可行性与优化性的方案。

### 2.2 多目标规划模型

#### 2.2.1 目标函数

经济成本函数。在该模型中,成本包括无人机起降场建设成本和起降场运行成本,以经济成本  $C$  最小为优化目标,即

$$C_{\min} = \sum C_h x_i + \sum C_g y_j + \sum C_l z_k + \alpha \sum D_d \delta_d。$$

式中: $C_h$  为单个枢纽起降点建设成本, $C_g$  为单个一般起降点建设成本, $C_l$  为单个临时起降点建设成本,单位均为元; $x_i$  为是否在候选位置  $x_i$  建立枢纽起降点, $y_j$  为是否在候选位置  $y_j$  建立一般起降点, $z_k$  为是否在候选位置  $z_k$  建立临时起降点,0 为不建立、1 为建立; $\alpha$  为无人机单位距离运营成本系数, $D_d$  为需求点  $d$  的运输需求, $\delta_d$  表示需求点  $d$  是否被覆盖(覆盖为 1,不覆盖为 0)。

需求覆盖率函数。该模型中的需求覆盖率是指满足服务需求数,需求覆盖率  $S$  最高即为满足服务需求数最多,即  $S_{\max} = \sum D_d \delta_d$ 。

#### 2.2.2 约束条件

覆盖约束。起降场的建设要保证需求点的需求能够被任一起降场的服务半径覆盖,即

$$\sum x_i R_h(i, d) + \sum y_j R_g(j, d) + \sum z_k R_l(k, d) \geq \delta_d, \forall d。$$

式中: $R_h$  是枢纽起降点服务半径, $R_g$  是一般起降点服务半径, $R_l$  是临时起降点服务半径,单位均为 km; $R_{h,g,l}(i, d)$  表示枢纽起降点  $i$  是否覆盖需求点  $d$ ,由服务半径决定。

无人机航程约束。无人机从起降点到需求点的单次飞行距离在无人机的最大航程之内,即当  $x_i = 1$  时,  $\text{distance}(i, d) \leq L_{\max}$ 。式中:  $\text{distance}(i, d)$  为无人机从起降点到需求点的距离,  $L_{\max}$  为无人机的最大航程。

禁飞区约束。无人机起降过程及其执行任务过程中,不能经过禁飞区区域,即

$$\text{location}(i, j, k) \notin \text{No-fly Zone}。$$

式中:  $\text{location}(i, j, k)$  为无人机起降场的位置坐标,  $\text{No-fly Zone}$  为划定的禁飞区区域。

数量约束。每类起降点的数量不大于该类起降点的最大数量限制,即

$$\sum_i x_i \leq N_h^{\max}, \sum_j y_j \leq N_g^{\max}, \sum_k z_k \leq N_t^{\max}。$$

式中:  $N_h^{\max}$ 、 $N_g^{\max}$ 、 $N_t^{\max}$  分别为枢纽、一般、临时起降场的最大数量限制。

### 2.3 基于遗传算法的求解

遗传算法是通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法,通过遗传算法对多目标问题进行求解的具体操作步骤如下:

步骤 1: 编码,采用二进制编码,每个个体表示一种候选布局方案。

步骤 2: 初始化,随机生成随机种群,确保满足约束。

步骤 3: 适应度计算,根据目标函数和约束的违反程度计算适应度。

步骤 4: 选择、变异与交叉,使用锦标赛选择法筛选优质个体,通过两点交叉生成子代,按照概率反转基因位,增强结果多样性。

步骤 5: 非支配排序与拥挤度计算,对种群进行 pareto 前沿排序。

步骤 6: 迭代终止,达到最大迭代次数或者收敛阈值停止。

## 3 算例分析

### 3.1 场景设定

假设某城市有一个  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$  的正方形区域,该区域在直角坐标轴中为  $0 \text{ km} \leq x \leq 10 \text{ km}$ ,  $0 \text{ km} \leq y \leq 10 \text{ km}$  的一个坐标区域,在此区域进行无人机起降场布局规划,将区域划分为 100 个均匀的网格( $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ ),每个网格代表一个需求点,需求点的运输需求  $D_d$  ( $d=1, 2, 3, \dots, 100$ ) 服从正态分布  $N(\mu=3, \sigma=1)$ , 候选起降场的位置随机生成,假设在 100 个需求点内,有 20 个随机枢纽起降场候选位置,有 30 个随机一般起降场候选位置,有 50 个随机临时起降场候选位置,而且枢纽起降场不超过 5 个,一般起降场不超过 10 个,临时起降场不超过 15 个,在该城市中心区域( $4 \text{ km} \leq x \leq 6 \text{ km}$ ,  $4 \text{ km} \leq y \leq 6 \text{ km}$ ) 为禁飞区,禁止建设任何起降场。假设单个枢纽起降场的建设成本为  $1 \times 10^5$  元,一般起降场的建设成本为  $5 \times 10^4$  元,临时起降场的建设成本为  $2 \times 10^4$  元,无人机单位距离运营成本系数为 50 元/km,枢纽起降场、一般起降场和临时起降场的服务半径分别为 3 km、1.5 km、0.5 km,无人机的单次最大航程 35 km。

### 3.2 数学模型与求解

#### 3.2.1 数学模型

在上述实例参数下,该数学模型目标函数为

$$C_{\min} = \sum_{i=1}^{20} C_h x_i + \sum_{j=1}^{30} C_g y_j + \sum_{k=1}^{50} C_t z_k + \alpha \sum_{d=1}^{100} D_d \delta_d, \quad (1)$$

$$S_{\max} = \sum_{d=1}^{100} D_d \delta_d; \quad (2)$$

约束条件为

$$\sum_{i=1}^{20} x_i R_h(i, d) + \sum_{j=1}^{30} y_j R_g(j, d) + \sum_{k=1}^{50} z_k R_t(k, d) \geq \delta_d, \forall d \in [1, 100],$$

$$\max \text{distance}(i, d) \leq L_{\max}, x_i = 1,$$

$$\text{location}(i, j, k) \notin \{(x, y) | 4 \leq x \leq 6, 4 \leq y \leq 6\}, \sum_i x_i \leq 5, \sum_j y_j \leq 10, \sum_k z_k \leq 15.$$

### 3.2.2 模型求解

针对上述模型,采用遗传算法进行求解,求解核心过程如下。首先,采用二进制编码表示布局方案,构建长度为 100 位的染色体(前 20 位代表枢纽候选点启用状态,中间 30 位代表一般候选点,后 50 位代表临时候选点),并随机生成满足禁飞区约束和数量约束的初始种群(规模 100)。在预实验中观察到目标函数在 150~200 代内呈现收敛趋势,因此选择迭代次数为 200 及逆行计算。其次,使用公式(1)、(2)计算每个个体的目标函数值并进行归一化处理,接着根据遗传算法经典参数范围执行遗传操作<sup>[11]</sup>,使用锦标赛选择法筛选个体;进行两点交叉(概率 90%)生成子代;实施位翻转变异(概率 5%),变异后同样强制修复禁飞区约束。最后,对每代种群进行快速非支配排序划分 Pareto 前沿等级。

Pareto 前沿是多目标优化问题的核心,通过遗传算法,每次迭代保留当前最优 Pareto 解集,每一代种群通过非支配排序得到分层的前沿等级,由此绘制出 Pareto 图。图 1 展示了帕累托前沿的典型分布,横轴为总成本(单位:10<sup>6</sup> 元),纵轴为覆盖需求,随着总成本增加,覆盖需求逐步提升。在成本区间[3.0×10<sup>6</sup>, 3.2×10<sup>6</sup>],覆盖需求增长率最高(成本每增加 10<sup>6</sup> 元覆盖率增加约 8%),此区间为性价比最优解集区域。在此条件下的无人机起降场布局情况如图 2 所示。图 2 中小圆点代表需求点,显示了该城市的需求分布,5 个三角形为枢纽起降场,7 个方块为一般起降场,5 个大圆点为临时起降场,虚线框为禁飞区。由图 2 可以看出,枢纽起降场多位于城市边缘以扩大覆盖范围,一般起降场和临时起降场密集覆盖高需求区域。

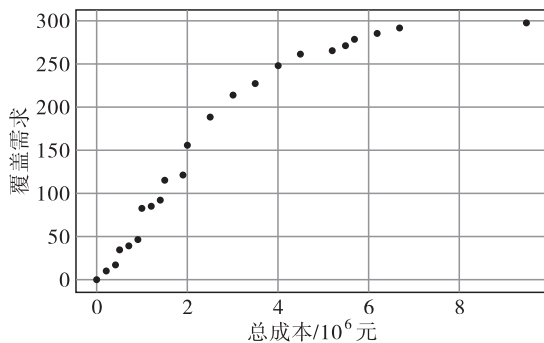


图 1 帕累托前沿的典型分布

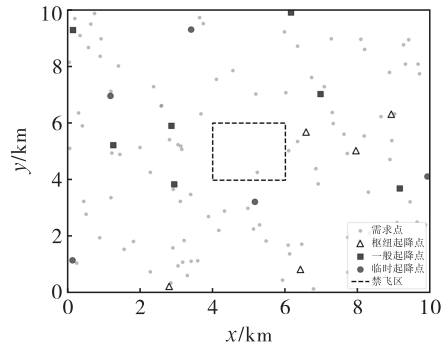


图 2 遗传算法下无人机起降场布局

### 3.3 模型验证

#### 3.3.1 对比试验

为验证本文遗传算法的优越性,选取贪婪算法、K-means 聚类算法与遗传算法进行对比,从覆盖能力、成本效率和计算能力 3 个方面进行评估。

贪婪算法通过把原问题分解为多个子问题,在每个子问题中选择最优解,从而得到整体最优解,本文贪婪算法采用逐步选择覆盖需求最大策略,计算每个候选点覆盖需求总和,依次选择覆盖需求最高的候选点,直至满足数量约束,对于需求未覆盖的点,按照优先级选择次优候选点补充。运算过程中参数的设置和遗传算法一致。利用贪婪算法计算得出,起降场建设总成本为 3.2×10<sup>6</sup> 元,覆盖需求占总需求的 78.7%,计算时间为 2.1 s,贪婪算法生成的无人机起降场布局如图 3 所示。

与遗传算法相比,贪婪算法的起降点集中在高需求区,低需求区存在显著的覆盖盲区,因为贪婪算法只关注当前最优选择,无法全局优化成本与平衡覆盖需求,所以高覆盖需求候选点集中在某一区域,其他区域覆盖不足。除此之外,贪婪算法仅仅生成单一最优解,无法提供多目标的权衡方案,很大程度上限制了决策的灵活性。

K-means 聚类算法是迭代求解的聚类分析算法,本文对需求点进行聚类,将 100 个需求点聚类为 30

个簇(对应起降点总数 5+10+15),以簇中心作为起降点位置,假设前 5 个簇为枢纽,中间 10 个为一般,后 15 个为临时,计算每个起降点的实际覆盖范围。

在参数设置上,K-means 初始化,最大迭代次数 300,在覆盖半径中忽略禁飞区的约束,其他和遗传算法的设置保持一致。最终计算得出,起降场建设总成本为  $3.5 \times 10^6$  元,覆盖需求占总需求的 65%,计算时间为 8.7 s,但是有 34 个起降点没有被覆盖,K-means 聚类算法生成的无人机起降场布局如图 4 所示。

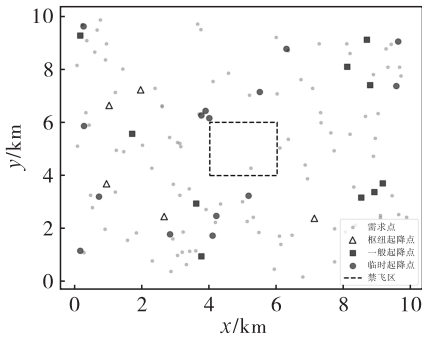


图 3 贪婪算法无人机起降场布局

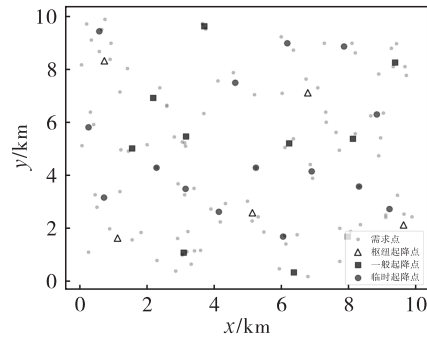


图 4 K-means 聚类下无人机起降场布局

与遗传算法相比,K-means 算法起降点分布均匀,但未能有效覆盖高需求区域(如中心禁飞区周边),因为K-means聚类倾向于均匀分布簇中心,导致高需求区域的覆盖不足,除此之外 K-means 聚类算法未考虑建设成本差异(枢纽>一般>临时),会导致总成本偏高,不适合在实际决策中使用。

将上述两种算法和遗传算法的数据结果进行对比分析,对比结果如表 2 所示。

表 2 算法性能对比

指标	遗传算法	贪婪算法	K-means
总成本/ $10^6$ 元	3.1	3.2	3.5
覆盖需求/%	89.2	78.7	65.0
计算时间/s	15.3	2.1	8.7
解集多样性	高(Pareto 前沿)	单一解	单一解
约束满足率/%	100	90	70

由表 2 可以看出,遗传算法有显著优势,在成本、覆盖率和解集多样性 3 个关键指标上,都明显优于其他算法。相比之下,贪婪算法虽然在速度上有着突出的表现,能够在短时间内快速生成初步方案,但由于其单目标优化的特性,无法有效处理多目标之间的冲突,在实际应用中可能会导致关键问题无法解决。而 K-means 算法在优化过程中忽略了成本和禁飞区等重要的约束条件,这使得在实际工程中生成的结果与实际场景应用偏差较大。

### 3.3.2 鲁棒性测试

为验证模型对需求波动和不同场景的适应性,设计了需求扰动实验和极端场景测试两类鲁棒性测试。

需求扰动实验。在原有实验基础上,对每个需求点的运输需求  $D_d$  加上 20% 随机扰动,一共生成 10 组扰动数据,对每组实验的成本和覆盖率的波动进行计算,其中覆盖率波动的计算公式为

$$\Delta_{cov} = \frac{|Coverage_{perturbed} - Coverage_{original}|}{Coverage_{original}} \quad (3)$$

表 3 展示了 10 组扰动实验的完整结果。

国际航空运输协会(IATA)在《机场服务手册》(Airport Services Manual, Doc 9137)第 9 部分“机场设施与服务可靠性”中建议,关键航空服务设施的覆盖率应保持相对稳定,其波动范围通常不应超过  $\pm 5\%$ ,以确保服务连续性和可靠性<sup>[12]</sup>。城市基础设施项目通常对成本超支高度敏感,世界银行在《基础设施风险管理指南》中指出,对于城市交通基础设施项目,5% 以内的成本波动常被视为可接受的经济风险阈值,超出

此范围可能对项目经济可行性产生显著影响<sup>[13]</sup>。

通过式(3)计算 10 组覆盖率的波动性,其中最大波动为扰动 7 的 7.62%,其次是扰动 3 的 5.94%,其余组别的波动均在 5%以内,整体 10 组实验的平均波动为 4.01%,在 5%以内,同时成本的波动幅度平均为 4.51%,也在 5%以内,由此可得该模型在需求波动下能够保证较好的稳定性。

表 3 扰动实验结果分析

实验组	覆盖率均值/%	覆盖率波动/%	总成本/(10 <sup>6</sup> 元)	成本波动/%	是否满足鲁棒性要求
原始值	89.2	0	3.10	0	—
扰动 1	85.3	4.37	3.25	4.84	是
扰动 2	87.1	2.35	3.18	2.58	是
扰动 3	83.9	5.94	3.31	6.77	否
扰动 4	88.5	0.78	3.14	1.29	是
扰动 5	84.7	5.04	3.29	6.13	否
扰动 6	86.2	3.36	3.22	3.87	是
扰动 7	82.4	7.62	3.35	8.06	否
扰动 8	87.8	1.57	3.20	3.23	是
扰动 9	85.6	4.04	3.27	5.48	否
扰动 10	86.5	3.03	3.22	3.87	是

极端场景测试。将上述场景进行修改,分别设置高需求集中和需求稀疏分布两个极端场景。其中,高需求集中场景中,80%的需求集中在城市西北区域;需求稀疏场景中需求点随机分布,但是每个点的需求值降低 50%。利用上述模型进行计算,得出模型在不同场景下能够保持较高稳定性,在集中高需求场景下,总成本为  $3.4 \times 10^6$  元,覆盖需求可达到 91.4%,模型根据需求动态调整起降点数量;在稀疏需求场景下,总成本为  $2.8 \times 10^6$  元,通过减少高成本设施保持区域较高的覆盖率,因此模型具有较好的适应性与稳定性。

#### 4 结论

本文针对城市无人机起降场布局规划问题,提出了一套系统性的多目标优化研究方法。构建了以全生命周期成本最小化与需求覆盖率最大化为核心的模型,采用遗传算法求解。结果表明,该模型能够有效平衡经济性与服务效率,在城市区域内实现枢纽、一般及临时起降场的最优数量配比,同时通过帕累托前沿揭示成本与覆盖需求之间的权衡关系。相较于贪婪算法与聚类算法,该方法在解集多样性、覆盖能力及约束满足度方面展现出显著优势。本研究为城市无人机基础设施规划提供了兼顾效率与可行性的理论框架,未来可进一步结合动态需求预测、多交通模式协同优化,共同推动低空经济高质量发展。

#### 参考文献:

- [1] 张洪海,冯棣坤,张晓玮,等.城市物流无人机起降点布局规划研究[J].交通运输系统工程与信息,2022,22(3):207-214.
- [2] CHAUHAN D,UNNIKRISHNAN A,FIGLIOZZI M. Maximum coverage capacitated facility location problem with range constrained drones [J]. Transportation research part C,2019,99:1-18.
- [3] 杨佳佟,李章萍.基于空间连续需求的城市无人机起降场最大覆盖模型选址[J].科学技术与工程,2025,25(11):4793-4800.
- [4] 李骁,梁士栋.考虑跨区域条件下与非机动车协同配送的无人机起降点选址研究[J].建模与仿真,2023,12(4):4031-4040.
- [5] 钱欣悦.城区物流无人机起降场点协同选址布局优化模型研究[D].南京:南京航空航天大学,2021.

- [6] 南京航空航天大学. 一种基于覆盖偏移度及安全效用的无人机起降点规划方法:202310581859. 5 [P]. 2023-09-01.
- [7] 沈舟,郑远,邹翔,等. 轻小型物流无人机起降场布局及起降策略设计[J]. 民航学报,2024,8(2):31-36.
- [8] 中国民用机场协会. 电动垂直起降航空器(eVTOL)起降场建设技术要求:T/CCAATB 000-2024 [S]. 2024.
- [9] European Union Aviation Safety Agency. Prototype technical design specifications for vertiports [S]. 2022.
- [10] Federal Aviation Administration. Engineering brief No. 105, vertiport design;FAA airport engineering division[S]. 2022.
- [11] GOLDBERG D E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning[M]. Reading: Addison-Wesley, 1989.
- [12] International Civil Aviation Organization. Airport services manual (Doc 9137) part 9: airport facility and service reliability[R]. Montreal:ICAO, 2023.
- [13] The World Bank. Governing infrastructure regulators in fragile environments: principles and implementation manual[R]. Washington, DC: World Bank Group, 2019.

## Research on urban unmanned aerial vehicle take-off and landing field layout planning based on genetic algorithm

QIAN Ge<sup>1</sup>, GUO Wei<sup>2</sup>, XU Xueji<sup>2</sup>, ZHOU Jiemin<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Branch Flight Control Center, China Eastern Airlines, Nanjing 211100, China;

2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** This paper addresses the key issues in the layout planning of unmanned aerial vehicle take-off and landing fields in urban air traffic development, and proposes a system research method based on multi-objective optimization. Firstly, by integrating domestic and international physical design standards for take-off and landing fields, typical performance parameters of unmanned aerial vehicle, and urban spatial characteristics, the take-off and landing points are classified into three categories: hubs, general and temporary. A dual-objective planning model centered on minimizing the total life cycle cost and maximizing the demand coverage rate is constructed. The genetic algorithm is used to solve the dual-objective planning of the cost and quantity of take-off and landing fields. Through Pareto frontier analysis, the trade-off relationship between cost and coverage rate is revealed. Moreover, specific examples are used to verify the validity and applicability of the model, and comparisons are made with traditional clustering and greedy algorithms. The adaptability of the model is also verified under different demand scenarios.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; take-off and landing field; layout planning; genetic algorithm; city

(责任编辑:唐立平)

**引用格式** 钱戈,郭巍,许学吉,等. 基于遗传算法对城市无人机起降场布局规划研究[J]. 山东航空学院学报,2025,42(6): 47-54.

QIAN G, GUO W, XU X J, et al. Research on urban unmanned aerial vehicle take-off and landing field layout planning based on genetic algorithm[J]. Journal of Shandong University of Aeronautics, 2025, 42(6): 47-54.