

文章编号:1671-1637(2026)04-0144-23

基于NSGA-II算法的区级无人驾驶航空器起降点布局规划——以深圳市南山区为例

黄启翔^{1,2,3}, 江志彬^{*1,3}, 张虹², 李娅颖⁴

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 深城交科技集团股份有限公司, 广东深圳 518110; 3. 同济大学交通学院, 上海 201804; 4. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北武汉 430070)

摘要:针对高密度城区无人驾驶航空器起降点布局规划中覆盖效率、建设成本、空域风险与环境噪声等多目标协同难题,提出了一种融合上述多维目标的优化模型,并采用改进的非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行求解;以深圳市南山区为例,构建了涵盖客运、货运和城市治理3类功能的混合规划模型,算法设计上,提出了包含经纬度坐标、功能类型、规模等级等分层染色体编码方案,并采用动态约束处理机制协调空域安全、用地兼容性、噪声敏感性等复杂约束;针对货运起降点,引入了层级衔接规则以保障城市物流网络完整性。研究表明:算法生成的Pareto前沿解集可清晰地揭示各目标间的权衡关系;典型方案分析显示,客运导向型方案在核心商务区具有较高的服务覆盖效率,但同时伴随较高的空域管理压力;货运优化型方案在物流枢纽区域能显著提升物流效率,但噪声影响范围相应增加约25%;均衡方案在大学城等混合功能区域最具适用性;极简方案可为财政受限或生态敏感区提供可行路径;进一步参数分析表明,将一、二级货运枢纽间距从5 km压缩至4 km可使货运效率提升12%,但将增加18%的空域冲突风险,降噪围栏安装可使住宅区噪声降低4 dB而单点成本增加10万~20万元;最终提出差异化布局策略,科技园等商务区采用客运优先布局,妈湾港区等配置完整三级货运网络,深圳湾保护区周边限制为微型起降点。构建的多目标优化框架与改进求解算法可为高密度城区无人机起降点规划提供从建模、求解到方案比选完整、量化的决策支持工具。

关键词:低空经济;无人驾驶航空器;多目标优化;起降点布局规划;NSGA-II算法;噪声敏感性

中图分类号:U8 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.170

District-level layout planning of UAV takeoff and landing sites based on the NSGA-II algorithm: A case study of Nanshan District, Shenzhen

HUANG Qi-xiang^{1,2,3}, JIANG Zhi-bin^{*1,3}, ZHANG Hong², LI Ya-ying⁴

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shenzhen Urban Transport Planning Center Co., Ltd., Shenzhen 518110, Guangdong, China; 3. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 4. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

出版历程:2025-08-31 收稿, 2025-12-09 修回, 2026-01-23 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(52372332);深圳市科技计划(KCXST20221021111402005)

作者简介:黄启翔(1989-),男,山东菏泽人,博士研究生,E-mail:xianghonor@qq.com。

***通信作者:**江志彬(1980-),男,江西萍乡人,研究员,博士生导师,工学博士,E-mail:jzb@tongji.edu.cn。

引用格式:黄启翔,江志彬,张虹,等.基于NSGA-II算法的区级无人驾驶航空器起降点布局规划——以深圳市南山区为例[J].交通运输工程学报,2026,26(4):144-166.

Citation: HUANG Qi-xiang, JIANG Zhi-bin, ZHANG Hong, et al. District-level layout planning of UAV takeoff and landing sites based on the NSGA-II algorithm: A case study of Nanshan District, Shenzhen[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(4): 144-166.

Abstract: Aiming at the multi-objective coordination challenges in the layout planning of unmanned aerial vehicles (UAV) takeoff and landing sites in high-density urban areas, including coverage efficiency, construction cost, airspace risk, and environmental noise, an optimization model integrating the multi-dimensional objectives above was proposed. An improved non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) was adopted for the solution. Taking Nanshan District, Shenzhen as an example, a hybrid planning model covering three functions of passenger transport, freight, and urban governance was constructed. In the algorithm design, a hierarchical chromosome encoding scheme was proposed, including latitude and longitude coordinates, functional types, and scale levels. A dynamic constraint handling mechanism was applied to coordinate complex constraints such as airspace safety, land use compatibility, and noise sensitivity. Specifically, for freight takeoff and landing sites, a hierarchical connection rule was introduced to ensure the integrity of the urban logistics network. The analysis of typical schemes shows that, in core business districts, the passenger-oriented scheme has relatively high service coverage efficiency yet with higher airspace management pressure; freight optimization scheme can significantly improve logistics efficiency in logistics hubs, but the noise impact range rises by 25%; the balanced scheme is the most applicable in mixed-function areas like university towns; minimalist scheme provides feasible pathways for areas with budget constraints or ecological sensitivity. Meanwhile, further parameter analysis indicates that reducing the distance between first- and second-level freight hubs from 5 km to 4 km can improve freight efficiency by 12% but increase airspace conflict risks by 18%. The installation of noise barriers can reduce residential area noise by 4 dB yet with an additional cost of 100 000 - 200 000 RMB per site. A differentiated layout strategy is ultimately proposed: business districts such as the technology park adopt passenger-oriented layouts, and areas such as Mawan Port are equipped with a complete three-level freight network. The areas surrounding the Shenzhen Bay Nature Reserve are restricted to micro takeoff and landing sites. The multi-objective optimization framework and improved solution algorithm constructed in this paper provide a complete and quantifiable decision-support tool for the planning of UAV takeoff and landing sites in high-density urban areas, from modeling, solving, to scheme comparison.

Keywords: low-altitude economy; UAV; multi-objective optimization; layout planning of takeoff and landing site; NSGA-II algorithm; noise sensitivity

Publication history: Received 2025-08-31; Received in revised form 2025-12-09; Accepted 2026-01-23

Funding: National Natural Science Foundation of China (52372332); Shenzhen S&T Programme (KCXST20221021111402005)

* **Corresponding author:** JIANG Zhi-bin, research fellow, PhD, E-mail: jzb@tongji.edu.cn.

0 引言

无人驾驶航空器(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)在物流配送、应急响应、城市治理等领域的应用越来越广泛。当前,随着低空经济飞速发展和城市可建设用地资源日益减少,低空空域资源的高效利用和基础设施的科学布局面临着严峻的挑战,从城市综合立体空间来看,尤其是超一线大城市,建筑密度高,可供建设的起降场地有限,这对低空基础设施的高效布局提出了更高的要求。低空飞行的空域

冲突方面,商业航班、军用空域和低空飞行活动存在复杂的空域冲突,因此,在基础设施规划建设初期,对空域风险的评估和规划是不可缺少的首要任务。最主要的是城市居民对噪声污染的容忍度持续降低。以深圳市南山区为例,南山区作为深圳科技创新中心,具有人口密度集中、用地资源紧张、低空空域复杂等特点,亟需建立一套系统化的无人机起降点布局规划方法,以应对当前技术研究和实践应用的局限性。但是,从技术层面看,无人驾驶航空器起降点布局规划面临着三大核心难题:一是低空起降

设施类型的多样性,包括物流无人机起降场、eVTOL垂直起降场、城市治理无人机起降点等,不同设施在服务半径、空域需求和环境影响等方面存在显著差异,这也导致传统单一类型和单一目标的无人机起降点布局已不适应多样化发展需求;二是起降点布局优化目标的冲突性,例如,提高了起降设施的覆盖效率往往会增加基础设施的建设密度,同时,也会增加较大的建设成本,并加剧敏感区的噪声污染,这要求起降点布局规划能有效融合多目标需求,进而实现多目标协同优化;三是求解算法中约束条件的复杂性,对于目标函数的约束条件,除常规的建设需求、覆盖效率、地理空间限制外,还需考虑空域安全间隔、气象条件限制和电磁环境兼容等特殊约束,相关约束条件的确认需针对不同主管部门开展大量的调研调查和论证工作。因此,这些核心难点使得无人机起降点等低空基础设施规划成为一个典型的多目标、多约束、高维度的复杂优化问题。然而,现有的研究多聚焦于单一类型无人机或简化应用场景下的布局优化,未能充分考虑高密度城区中多类型起降点的协同配置问题,特别是缺乏对货运三级物流体系以及生态环境、居民需求、立体空间等城市公共服务需求的统筹规划。

近年来,国内外学者围绕无人机起降点布局规划问题,从布局模型、优化方法、应用场景及设施整合等维度开展了系统研究,呈现出从单一目标向多目标、从简化场景向真实城市环境演进的研究趋势。

(1)在布局模型方面,早期研究多聚焦于覆盖效率和成本控制等单目标或简单加权目标。例如,张明明^[1]提出了面向城市物流配送的无人机多层次起降站选址模型;杨佳佟等^[2]构建了空间连续需求下的最大覆盖模型;冯棣坤等^[3]针对城市物流场景,建立了末端配送起降点布局的双目标优化模型;Hu等^[4]针对应急救援场景,提出了直升机起降点的加权覆盖选址模型。这些研究推动了选址理论在低空领域的应用,但模型普遍采用整数规划或混合整数线性规划方法,局限于单目标优化或通过预设权重将多目标转化为单目标,缺乏真正意义上的多目标协同优化机制,难以刻画高密度城区中多个目标间固有的冲突与权衡关系。

(2)在优化算法方面,研究重点从传统运筹学方法向智能优化算法演进,以提升求解效率与适应性。钱欣悦等^[5]首次将遗传算法应用于末端配送无人机起降点选址问题,引入了种群进化机制;张春晓等^[6]为应对城市低空立体物流网络的复杂性,提出了双

种群协同优化方法;Wang等^[7]针对大规模动态路径问题,开发了基于深度强化学习的C-SPPO算法;Tang等^[8]则改进了粒子群算法以应对动态需求和风扰条件下的物流无人机路径规划。这些算法层面的改进显著提升了特定问题的求解能力,但大多仍服务于单目标优化框架,对高维多目标Pareto前沿的搜索能力与分布性保持不足,同时也缺乏对空域安全、用地兼容等复杂城市约束的系统性处理策略。

(3)在应用场景方面,研究呈现出精细化与场景化深化的趋势,针对特定功能需求展开。在医疗应急领域,翁振锋等^[9-10]分别从医院前瞻性规划和区域布局角度,探索了医疗无人机与eVTOL起降点的规划标准与分级体系。在物流领域,沈舟等^[11]专注于轻小型物流无人机起降场的布局与策略设计;覃睿等^[12-13]分别从功能区布局和选址模型角度完善了城区物流无人机起降场的规划方法。黄子翼^[14]进一步创新性地提出了基于eVTOL的城市垂直交通系统构建框架。在国际研究中,Fang等^[15]首次将农药喷洒直升机的起降点选址、调度路径与作业路径进行联合优化。吴迪等^[16]以远海岛屿海上常态巡航救助系统为对象,开展了“选址-配置-路径”联合优化研究,并采用嵌入模糊C均值聚类 and 模拟退火的非支配排序遗传算法第二代(Nondominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)集成算法,为复杂约束条件下多目标起降设施规划提供了方法借鉴。这些场景化研究深化了对特定功能需求的理解,但多局限于单一类型航空器或孤立场景,缺乏能够统筹客运、货运、公共服务等多类型任务需求,并在共享空域中解决运行冲突的跨场景通用性规划框架。

(4)在低空基础设施系统整合方面,近年来的研究开始关注低空设施与城市空间、既有交通系统的融合。党安荣等^[17]系统综述了低空基础设施规划的研究进展与未来方向;李翔等^[18]从城市更新视角评估了城市空中交通的影响并探讨了设施更新路径;黄哲等^[19]以雄安新区为例,探索了基于泛在智联基础设施的低空经济发展模式;樊一江等^[20]则从宏观政策层面提出了前瞻性布局低空基础设施体系的建议。这些研究具有重要的战略指导意义,但多侧重于宏观理念与政策建议,在微观操作层面缺乏可量化、可求解、能适应高密度城区严格空间约束的具体规划方法与工具。张洪海等^[21]系统综述了低空空域容量评估研究进展,指出低空空域分类、航路划设与起降设施布局共同影响低空交通系统容量,为将起降点布局纳入“空域—航路—节点”一体化优化框架

提供了重要参考。

综上所述,现有研究在“模型-算法-场景-系统”4个维度上虽取得了显著进展,但仍存在明显的局限与衔接缺口:在模型层面,多目标协同优化机制缺失;在算法层面,高维多目标搜索与复杂约束处理能力不足;在场景层面,多类型设施协同配置与空域冲突化解框架欠缺;在系统层面,宏观战略与微观可操作规划工具之间存在断层。特别是针对高密度城区这一极端约束环境,尚未形成一套能够同时回答数量配置、空间分布、功能与规模设置的集成化、可量化、多目标协同的规划方法体系。

为此,本文围绕“问题导向-模型构建-算法求解-实证验证-决策支持”的总体思路展开,融合模型、算法和应用等多维度创新,重点解决高密度城区环境下,在有限的城市空间资源、严格的空域约束和多元的建设需求等目标中寻找最优平衡点的问题。首先,建立了融合多维度约束与多元目标的城区无人机起降点布局优化模型,系统性整合了客运、货运、城市治理3类任务需求,并创新性地将货运三级物流网络衔接的运营逻辑作为硬性约束纳入模型,确保了规划方案的实际可操作性;其次,改进NSGA-II算法以适配高约束复杂城市空间优化问题,针对模型变量混合、约束交叉的特点,设计混合编码方案和动态约束处理机制,引入动态约束处理机制,嵌入面向运营逻辑的特定规则,有效提升算法在复杂解空间中的搜索效率与可行性解生成能力;最后,形成面向高密度超大城市核心城区的可落地规划方法,实证分析中,深度耦合城市国土空间规划、机场空域管制、噪声防治条例等具体规章,使得优化结果不再是单纯的理论输出,而是适应当地城市发展实际,且具备较强落地性和实施性的规划方案。本文研究成果可直接为政府部门提供一套从建模、求解到方案比选的完整技术路径和决策工具,对全国同类城区无人机起降点等低空基础设施布局规划和建设管理具有重大的参考价值和示范意义。

1 无人驾驶航空器起降点分类及布局要点

1.1 主要内涵和分类

根据中国民用航空局发布的《民用无人驾驶航空器系统安全管理规则》(CCAR-92)中的明确定义:无人驾驶航空器,是指机上没有驾驶员操作的航空器,也称无人机。《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》按照空机重量、起飞重量、飞行速度等性能指标,将无人驾

驶航空器分为大型、中型、小型、轻型、微型这5类。无人驾驶航空器起降点是指经过专门设计、划定、建设或批准,供无人驾驶航空器(无人机)进行起飞、降落、停放、充电/能源补给,并在此进行任务交接、数据上传下载、起降前检查等作业准备活动的固定场地或设施,是低空经济基础设施网络的核心节点。

无人机起降点的功能分类是布局规划的基础。国家层面标准尚未正式颁布,本文起降点分类、选址与建设标准主要参考《深圳市城市规划标准与准则》《民用无人驾驶航空器系统安全管理规则》以及《广州市低空垂直起降设施场址选择与建设技术指引(试行)》等具有前瞻性的地方规范与行业标准,以确保研究成果的先进性与可实施性。根据中国民用航空局《民用无人驾驶航空器运行安全管理规则》及相关行业标准,低空应用场景通常可划分为基本交通型(客运、货运)、生产作业型、消费娱乐型、公共服务型等类别。鉴于本文聚焦于高密度城区的固定基础设施布局规划,需选择具有稳定设施需求、明确运营模式且可纳入城市规划体系的场景类型。本文研究对象,即无人驾驶航空器起降点,也即低空垂直起降场,下文统称起降点。为此,采用三分类体系,具体如表1所示。

(1)客运型:对应基本交通型中的载客运输场景,服务对象为乘客,重点服务商务出行、通勤接驳等需求。

(2)货运型:对应基本交通型中的货物运输场景,服务对象为货物,重点服务物流配送、港口转运等需求。

(3)城市治理型:对应公共服务型场景,但进一步聚焦于与城市日常运行管理紧密相关的固定设施需求,包括应急救援、市政巡检、警务安防等。此类场景具有明确的政府主导性质、固定的服务半径和常态化的运营需求,与消费娱乐型等临时性、移动性场景有本质区别^[22]。

这一分类体系体现了以下考虑。

(1)规划可落地性:3类场景均有明确的设施建设标准、运营主体和可持续商业模式。

(2)数据可获得性:客运OD、货运量、应急设施分布等数据可从城市规划部门获取。

(3)模型可解性:避免将临时性、非固定设施纳入优化模型,确保模型聚焦于核心决策问题。其中,消费娱乐型场景(如无人机表演)通常使用临时起降点,生产作业型(如农业植保)主要发生在城市外围,均不适用于本研究的城区固定设施布局框架。

表1 面向高密度城区无人机起降点分类

Table 1 Classification system of UAVs takeoff and landing sites for high-density urban areas

分类维度	分类类别	核心特征与建模关联	典型应用场景
起降点功能用途	客运型	服务对象为乘客,安全性与舒适性要求最高,建设成本基准高,是覆盖效率目标的重点	交通枢纽、CBD
	货运型	服务对象为货物,强调运营效率与自动化。需满足物流层级衔接约束,分为一级、二级、三级枢纽	机场/港口、物流园区、配送站
	城市治理型	功能定制化,通常为封闭或半封闭运行。服务半径灵活,对噪声和空域风险敏感度中等	消防站、医院、市政设施
	综合型	同时具备上述2种及以上功能,通过规模等级变量实现功能复合,以提升单一站点的资源集约利用水平	城市综合功能区

1.2 重点需求分析

针对城市空间布局、产业基础、基础设施建设等基本情况,以深圳市南山区为例,分析起降点布局的特殊需求。南山区作为深圳乃至中国的经济科技强区,其起降点布局在遵循通用原则的基础上,需重点考量以下特殊需求^[23]。

(1)极端紧张的空间资源与高昂的地价。这也决定向空中要空间是必然选择,优先考虑屋顶起降点,充分挖掘政府物业、公共设施、商业楼宇、工业厂房的屋顶资源,布局评估需增加建筑结构承载力、电梯井道改造可行性、屋顶无障碍物空间等硬性指标,鼓励附属式、嵌入式建设,而非独立占地。

(2)高度复杂的空域环境。南山区毗邻宝安国际机场,绝对确保民航安全是布局的前提,所有起降点选址必须严格遵循机场净空保护要求和进离场程序。布局前需进行精细化的空域仿真分析,起降点高度、位置需与机场管制单位协同确定,很可能被限制在真高120 m以下的超低空甚至60 m以下运行,并需建立实时动态空域申请与释放机制。

(3)密集的噪声敏感点与高标准的环保要求。南山区高校、科研机构、高端住宅区密集,市民对噪声极其敏感,布局必须将噪声规避置于极高优先级。需建立更严格的噪声模型,优先在快速路、主干道、工业区、商业区上空规划航线,严格规避学校、医院、

居住区的核心区域上空。起降点本身也应尽量选址在非敏感建筑附近。

(4)鲜明的产业功能分区与差异化场景需求。布局需精准匹配不同区域的产业功能。前海、后海等重点规划客运型枢纽,连接机场、香港,服务高端商务出行;科技园、西丽湖国际科教城等布局高端商务客运点和精密仪器/样本冷链货运点,服务高科技企业;蛇口、妈湾港等重点建设货运型枢纽和中转站,发展港口物流的最后一公里空中配送;大小南山、西丽水库等可设置工业作业型起降点,服务于山林防火、水务巡检、应急救援等公共管理场景^[24]。

(5)强大的科技赋能与智慧城市基础。南山区作为科技高地,起降点应是新基建的标杆,具备高度智能化水平,布局规划需同步考虑5G/6G覆盖、边缘计算节点部署、高精度导航基站等数字基础设施的协同建设。推动实现起降点运行的无人化值守、自动化调度和智能化管理^[25]。

结合深圳实际情况,基于对南山区特殊需求的分析,进一步量化各类起降点的布局要求(详见表2),明确了不同类型起降点服务半径、典型选址和适配航空器,这些量化指标是后续构建优化模型需求点集合、效率衰减函数以及最大服务半径等关键参数的直接输入依据,实现了从定性需求分析到定量模型构建的衔接。

表2 布局需求

Table 2 Layout requirements

类型	子类	服务半径	典型选址	航空器匹配
客运型	枢纽站	10~15 km	交通枢纽、CBD	大型/中型eVTOL
	社区类	3~5 km	居住区中心	中型/小型eVTOL
货运型	一级枢纽	全市覆盖	机场/港口	大型货运无人机
	二级枢纽	片区覆盖	物流园区	中型货运无人机
	三级枢纽	最后一公里	配送站/屋顶	小型货运无人机
城市治理型	应急基站	5~8 km	消防站/医院	中型多功能机
	巡检节点	1~2 km	市政设施	轻型/微型无人机

本文中,南山区起降点布局需求被量化为空间化的服务需求量,客运需求点源于深圳市通勤人口热力图与核心商务区规划文件;货运需求点基于港口、物流园的货物吞吐量数据与电商配送热点区域;城市治理需求点则根据应急管理设施(消防站、医院)和关键市政设施的分布确定。所有需求数据均网格化处理,并赋予相应的权重。

需要说明的是,低空应用场景多样,包括基本交通、生产作业、消费娱乐、公共服务等多种类型。本文聚焦于需要建设固定起降设施、具有常态化运营需求、且与城市空间规划紧密相关的基本交通型(客运、货运)和公共服务型(城市治理)场景。因为,固定设施布局是城市规划的法定内容,需要系统的方法论支持,这些场景在南山区已有明确的需求和数据基础,最后避免将临时性、移动性场景纳入模型导致问题过度复杂化。

2 多目标优化布局模型

主要构建一个适用于高密度城区的无人机起降点多目标优化布局通用模型。模型参数具有可调节性,能适配不同城市区域。本节以深圳市南山区为例说明参数设置,具体数据与案例应用将在第4节详述。

2.1 模型参数、变量及集合

2.1.1 参数和变量

本文建立的模型需定义候选起降点、起降点类型、需求点及土地网格等变量集合,主要如下。

候选起降点集合 \mathcal{V} 为

$$\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, n-1, n\} \quad (1)$$

式中: n 为候选起降点数量。

起降点类型集合 \mathcal{T} 为

$$\mathcal{T} = \{p_p, p_{p1}, p_{p2}, p_{p3}, p_g\} \quad (2)$$

式中: p_p 为承担客运功能的无人机起降点; p_t 为承担货运功能的无人机起降点, p_{p1} 、 p_{p2} 、 p_{p3} 分别为一、二、三级货运枢纽起降点; p_g 为承担城市治理的无人机起降点。

起降点需求点集合 \mathcal{D} 为

$$\mathcal{D} = \mathcal{D}_{p_p} \cup \mathcal{D}_{p_t} \cup \mathcal{D}_{p_g} \quad (3)$$

式中: \mathcal{D}_{p_p} 为客运需求点集合,包含所有需要客运服务的需求点(如交通枢纽、CBD、居住区中心等); \mathcal{D}_{p_t} 为货运需求点集合,包含所有需要货运服务的需求点(如机场、港口、物流园区、配送站等); \mathcal{D}_{p_g} 为城市治理需求点集合,包含所有需要城市治理服务的需

求点(如消防站、医院、市政设施等)。

土地可用网格集合 \mathcal{Z} 是离散化的地理空间可行域,定义为

$$\mathcal{Z} = \{(l_{j,a}, l_{j,o}) \in \mathbb{R}^2 | j = 1, 2, 3, \dots, M\} \quad (4)$$

式中: M 为将研究区域(如本文深圳市南山区)离散化后,所有满足基本条件的网格单元的总个数; $l_{j,a}$ 为网格 j 所在的地理空间的经度; $l_{j,o}$ 为网格 j 所在的地理空间的纬度。

a_j 是以用地性质、海拔高度、坡度角度、噪声敏感及空域限制等构成的属性向量,具体形式为

$$a_j = (a_{j,z}, a_{j,e}, a_{j,s}, a_{j,n}, a_{j,a})^T \quad (5)$$

式中: $a_{j,z}$ 为网格 j 的用地性质编码,依据《深圳市城市规划标准与准则》取值,范围为 $\{1, 2, \dots, 17\}$,分别对应居住、商业、工业、交通设施、绿地等17类用地类型; $a_{j,e}$ 为网格 j 的海拔高度; $a_{j,s}$ 为网格 j 的地表坡度角度,取值范围为 $[0, 90^\circ]$; $a_{j,n}$ 为网格 j 的噪声敏感标志,依据《声环境质量标准》(GB 3096—2008)判定,取1表示该网格位于学校、医院、居住区等噪声敏感区域,取0表示非敏感区域; $a_{j,a}$ 为网格 j 的空域限制标志,依据机场净空保护规定判定,取1表示该网格位于机场净空保护区、军事禁区或生态保护红线内,取0表示无空域限制。

除上述变量集合外,模型所需的相关决策变量如下。

(1)选址变量 x_i

x_i 为是否建设起降点, $x_i \in \{0, 1\}$, $\forall i \in \mathcal{V}$, x_i 为1则表示建设,为0则表示不建设。

(2)类型指派变量 $y_{i,t}$

$y_{i,t}$ 为在位置 i 建设的起降点是否被指定为功能类型 t ,且 $y_{i,t} \in \{0, 1\}$, $t \in \mathcal{T}$, $i \in \mathcal{V}$,其生效的前提是 $x_i = 1$,对于一个被选中的起降点 i ($x_i = 1$),必须有且仅有一种功能类型被指派,即 $\sum_{t \in \mathcal{T}} y_{i,t} = 1$,如果该点未被选中,则所有 $y_{i,t}$ 必须为0。

(3)规模等级变量 z_i

z_i 表示候选位置 i 建设起降点的物理规模和基础设施等级,且 $z_i \in \{1, 2, 3\}$, $\forall i \in \mathcal{V}$,当 $z_i = 1$ 时为小型起降点, $z_i = 2$ 为中型起降点, $z_i = 3$ 为大型起降点。

(4)经纬度坐标变量 l_i

l_i 的定义为

$$l_i = (l_{i,a}, l_{i,o}) \quad (6)$$

式中: l_i 为候选起降点 i 精确地理位置; $l_{i,a}$ 为起降点 i

所处经度; $l_{i,0}$ 为起降点*i*所处纬度。

2.1.2 候选起降点集合生成机制

候选起降点集合 \mathcal{V} 的生成是多目标优化模型解空间的物理基础,其合理性直接决定规划方案的可行性与优越性。为避免主观偏差并确保空间覆盖的均衡性与政策合规性,本文采用“初筛-评估-优化”三级递进机制生成 \mathcal{V} 。

步骤1:基础空间网格初筛

以南山区为例,将全域(面积约187.5 km²)划分为500 m×500 m的规则正方形网格,得到初始空间位置集合 \mathcal{G}_0 ,共包含约750个网格中心点。该尺度兼顾了计算效率与选址精度,确保每个行政社区至少有2或3个候选点。

步骤2:多约束耦合可行性评估

为生成合理且可行的候选点集合,本研究建立了由地形、政策、用地与安全间距构成的四级硬约束评估体系。对任一初始网格点*g*,依次计算以下4类硬约束。

(1)地形可行性约束,即检查坡度与海拔是否满足建设要求,为

$$F_1(g) = \mathbb{I}(s(g) \leq 15^\circ \text{ 且 } e(g) \leq 50) \quad (7)$$

式中: $F_1(g)$ 为地形可行性标志; $s(g)$ 为坡度; $e(g)$ 为海拔; $\mathbb{I}[\cdot]$ 为指示函数,当括号内条件成立时取值为1,否则为0。

(2)政策合规性约束,即检查是否位于生态保护红线或机场净空保护区内,为

$$F_2(g) = \mathbb{I}(g \notin \Gamma_e \wedge g \notin \Gamma_a) \quad (8)$$

式中: $F_2(g)$ 为政策合规性标志; Γ_e 为生态保护红线区域集合; Γ_a 为机场净空保护核心区集合。

(3)用地兼容性约束,即检查用地性质是否允许建设起降点,为

$$F_3(g) = \mathbb{I}(z(g) \in \mathcal{U}) \quad (9)$$

式中: $F_3(g)$ 为用地兼容性标志; $z(g)$ 为网格点*g*的土地利用性质编码,依据《深圳市城市规划标准与准则》确定; $\mathcal{U} = \{S3, C1, C2, W1, G1, M1\}$ 为允许建设起降点的用地性质编码集合,分别对应交通场站用地、商业用地、商务用地、一类物流仓储用地、行政管理用地、一类工业用地。

(4)安全间距约束,即检查与敏感设施的最小距离是否满足要求,为

$$F_4(g) = \mathbb{I}\left(\min_{s \in \mathcal{S}_s} d(g, s) \geq 100\right) \quad (10)$$

式中: $F_4(g)$ 为安全间距标志; \mathcal{S}_s 为敏感设施点集

合,包括学校、医院、居住区核心等; $d(g, s)$ 为网格点*g*与敏感点*s*之间的欧氏距离。

仅当上述4类约束同时满足时,点*g*方可纳入后续优化候选集

$$F_1(g) \wedge F_2(g) \wedge F_3(g) \wedge F_4(g) = 1 \quad (11)$$

步骤3:基于现有设施的优化增强

为提高方案的可实施性,在可行候选点集 \mathcal{G}_1 的基础上,优先吸纳具备改造潜力的现有设施点。通过叠加南山区交通枢纽、公共建筑屋顶、物流配送站等图层,若某现有设施点*f*满足上述所有约束且其500 m范围内无 \mathcal{G}_1 中的点,则将*f*加入候选集。此步骤确保了规划方案能充分利用现状基础设施,降低建设成本。

通过上述流程,得到最终候选点集合 \mathcal{V} 是步骤2输出集 \mathcal{G}_1 与增强设施集 \mathcal{F}_e 的并集,候选起降点数量*n*以南山区为例,取152个

$$\mathcal{V} = \mathcal{G}_1 \cup \mathcal{F}_e = \{1, 2, \dots, n-1, n\} \quad (12)$$

2.2 模型建立的前提条件

传统的设施规划通常分为选址(确定点的数量与大概位置)与布局(精确优化点的空间关系)2个阶段。本文针对高密度城区空间资源极度紧张、约束高度耦合的特点,采用集成优化策略,将这2个阶段合并于一个统一的多目标优化框架中。模型通过决策变量 x_i (是否建设)、 $y_{i,t}$ (功能类型)、 z_i (规模等级)以及精确的经纬度坐标 l_i ,同步确定起降点的数量、空间位置、功能与规模,关注节点分工、空间组织与整体运行绩效的协同提升^[26]。下文所述的物理环境、规划政策与技术管理前提,即是该集成模型在选址与布局时共同遵循的硬性约束。

2.2.1 物理环境前提

(1)空域分层规则:模型建立和参数设定严格遵守低空飞行空域规划中规定的垂直分层结构,将空域划分为微型无人机适飞区域(真高不大于120 m)、轻型和小型无人机适飞区域(真高为120~300 m)、中型和大型无人机适飞区域(真高不小于300 m)等3个层次。

(2)声环境影响阈值:声环境评估完全依据《声环境质量标准》(GB 3096—2008)的限值要求,针对城市不同功能区,分别采用相应噪声阈值,其中,居民区执行昼间55 dB、夜间45 dB的标准;商业区采用昼间60 dB、夜间50 dB标准;学校和医院等敏感区则采用更严格的昼间50 dB、夜间40 dB标准。

(3)电磁环境兼容性:无人机系统的可靠通信与

导航依赖于洁净的电磁环境。模型遵循《民用轻小型无人机系统电磁兼容性要求与试验方法》(GB/T 38909—2020)的基本原则。在候选点生成阶段,通过地理信息系统空间分析,预先排除了已知强电磁干扰源(如高压输电走廊、广播电视发射塔、雷达站)核心影响范围内的网格。在约束条件中,通过用地兼容性约束,间接避免了在无线电监测站、天文台等电磁敏感设施周边布局起降点。需要说明的是,由于高密度城区电磁环境具有高度复杂性和时变性,且精确的电磁仿真数据难以在规划阶段全域获取,本文未将电磁影响作为显式的目标函数或约束条件纳入优化模型,而是将其作为前置筛选条件和后期工程设计问题处理。

2.2.2 规划政策前提

(1)用地兼容性:按照城市规划标准与准则相关规定,将全区土地划分为交通用地、工业用地、公共设施用地、商业服务业用地和生态用地等五大类,并按照要求进一步细分。其中,交通枢纽用地允许客运和治理型起降点建设,物流仓储用地允许各级货运起降点布局,生态保护用地则完全禁止任何建设活动。

(2)投资规模:参考低空经济基础设施建设资金安排,设定总投资限额,并对单点投资规模进行分级管控,其中,客运枢纽不超过3 500万元,货运一级枢纽不超过2 200万元。同时,考虑到重点区域土地溢价效应,对重点区域设置1.5倍土地成本系数。

2.2.3 技术管理前提

(1)无人性能参数:采纳大疆、丰翼等企业实测数据,重点参考《民用无人机系统安全性要求》等行业标准。其中,大型客运无人机要求航程不低于50 km、起降面积不少于400 m²,噪声控制在75~85 dB内;货运一级枢纽无人机要求航程不低于100 km;治理型微型无人机则限定航程不超过10 km、噪声低于60 dB。

(2)运营安全标准:按照民航局《特定类无人机运行适用规定》的要求,设置起降点最小水平间距约束,规定同类起降点间距不小于300 m,异类起降点间距不小于500 m。同时,要求所有起降点与宝安机场保持5 000 m以上的安全距离,应急响应型起降点必须在15 min内可达服务区域。典型无人驾驶航空器性能参数见表3。

表3 典型无人驾驶航空器性能参数

Table 3 Performance parameters of typical UAVs

航空器类型	机型/级别	航程/km	起降面积需求/m ²	噪声水平/(dB, @15 m)	参考标准/来源
客运eVTOL	大型/中型	≥50	≥400	75~85	《民用无人机系统安全性要求》
货运无人机	一级枢纽	≥100	200~300	75~80	丰翼科技实测数据
货运无人机	末端配送	10~20	50~100	65~70	大疆行业应用数据
治理无人机	中型多功能	15~30	100~150	65~75	《特定类无人机运行适用规定》
治理无人机	轻型/微型	≤10	≤50	≤60	大疆消费级机型数据

2.3 目标函数

无人驾驶航空器起降点布局是一个典型的多目标协同优化问题,任何单一目标的优化都可能以牺牲其他目标为代价。通过覆盖效率、建设成本、空域风险、噪声污染等目标,覆盖社会效益、经济效益、安全要求和环境影响的4个维度,共同构成一个完整的评价体系,通过多目标优化方法才能找到兼顾各方需求的最优均衡解。

2.3.1 覆盖效率最大化

覆盖效率目标主要确保全区无人机起降点网络能以最高效方式满足多元化空间需求,通过指数衰减模型量化服务效率随距离增加的衰减特性,针对客运、货运和治理3类设施,采用差异化的衰减系数,反映无人机起降点不同的服务半径。

需要指出的是,模型中设定的最大服务半径 R_i (如客运15 km,一级货运20 km)并非基于无人机的

理论最大航程。在实际城市运营中,飞行路径受到空域分层(如真高120 m以下)、航线规划、避开禁飞区与敏感点的多重限制,有效直线服务距离远小于航程。此外,过长的服务半径将导致飞行时间增加,降低站点周转效率与任务响应速度,在经济性和时效性上并非最优。因此,本文的服务半径参数是基于以深圳市南山区为例,采用的空域规划仿真、典型任务场景需求与运营效率权衡后设定的经济运营半径,这更符合城市低空物流与客运的实际运营逻辑。

此外,权重系数 ω_i 采用组合赋权法确定,以平衡主观偏好与客观数据^[27]。首先,基于层次分析法,构建判断矩阵确定主观权重;其次,利用熵权法对初步方案中各目标值的离散程度进行分析,确定客观权重;最后对主客观权重进行加权集成,得到最终权重。为评估权重设定的稳健性,尤其是层次分析法(Antalytic Hierarchy Process, AHP)带来的主观性影

响,后续将对主导性的客运权重 ω_p 进行敏感性测试。

距离衰减系数 β_i 设定参考了地理学中的“距离衰减定律”及其在交通服务领域的应用。其数学形式 $e^{-\beta d}$ 是模拟空间相互作用随距离增加而衰减的经典模型,参数 β_i 的取值参考了引力模型的相关研究^[28],并针对不同类型服务的时效敏感性进行了调整:客运服务对时间最敏感,故衰减最慢($\beta_p = 0.002$);城市治理任务(如应急响应)通常要求快速抵达,故衰减最快($\beta_g = 0.006$);货运服务介于两者之间,且根据其枢纽层级,对时效要求逐级增高,衰减随之加快。

覆盖效率函数 f_1 在经典最大覆盖模型基础上,引入多类型服务半径衰减与层级网络衔接约束,使其适用于多任务混合的无人机基础设施网络。函数表示为

$$\max f_1 = \sum_{t \in T} \omega_t \frac{\sum_{k \in D_t} \max_{j \in V} (x_j y_{j,t} \eta_{j,k,t})}{|D_t|} \quad (13)$$

$$\eta_{j,k,t} = e^{-\beta_i d_{j,k}} \mathbb{I}(d_{j,k} \leq R_t) \quad (14)$$

式中: ω_t 为类型 t 的权重系数,为体现客运优先原则, $\omega_p = 0.4$ (客运), $\omega_{n1} = 0.2$ (一级货运), $\omega_{n2} = 0.15$ (二级货运), $\omega_{n3} = 0.15$ (三级货运), $\omega_g = 0.1$ (城市治理); $\eta_{j,k,t}$ 为效率衰减函数; β_i 为类型 t 的距离衰减系数; $d_{j,k}$ 为点 j 到需求点 k 的欧氏距离; β_i 为距离衰减系数, $\beta_p = 0.002 \text{ km}^{-1}$ (客运), $\beta_{n1} = 0.003 \text{ km}^{-1}$ (一级货运), $\beta_{n2} = 0.004 \text{ km}^{-1}$ (二级货运), $\beta_{n3} = 0.005 \text{ km}^{-1}$ (三级货运), $\beta_g = 0.006 \text{ km}^{-1}$ (城市治理); R_t 为类型 t 的最大服务半径, $R_p = 15 \text{ km}$ (客运), $R_{n1} = 20 \text{ km}$ (一级货运), $R_{n2} = 10 \text{ km}$ (二级货运), $R_{n3} = 5 \text{ km}$ (三级货运), $R_g = 8 \text{ km}$ (城市治理); $\mathbb{I}(d_{j,k} \leq R_t)$ 为指示函数,当 $d_{j,k} > R_t$ 时, $\eta_{j,k,t} = 0$,无服务效率; D_t 为需要类型 t 服务的需求点集合。

目标函数采用分级加权覆盖模型,通过指数衰减函数 $e^{-\beta_i d_{j,k}}$ 模拟服务效率随距离衰减的特性,指示函数 $\mathbb{I}(d_{j,k} \leq R_t)$ 确保仅考虑有效服务范围内的需求点,权重系数 ω_t 则体现客运优先的规划原则,赋予客运服务更高的优先级。

2.3.2 建设成本最小化

建设成本目标则从经济可行性角度,优化总体资源配置,并通过全生命周期成本分析控制总投资规模,将建设成本分解为基准建设成本和区位土地成本两大组成部分,其中,基准成本根据不同设施类型和规模等级差异化设定,区位成本则引入空间溢

价系数,以反映南山区的地价梯度特征。

建设成本函数 f_2 表示为

$$\min f_2 = \sum_{i \in V} \sum_{t \in T} (x_i y_{i,t} c_{i,t}) \quad (15)$$

$$c_{i,t} = c_{b,t} + c_{l,i} \quad (16)$$

式中: $c_{i,t}$ 为在位置 i 建设类型 t 起降点的成本,包含基准建设成本和土地成本两部分; $c_{b,t}$ 为建设一个类型为 t 的起降点的基准或标准建设成本,它是一个与具体位置 i 无关的常量,代表在标准或典型地块上建设该类起降点的平均成本; $c_{l,i}$ 为考虑区位溢价,位置 i 的土地成本系数,仅与地理位置有关,与设施类型无关的变量。

建设成本目标函数采用线性成本模型,统筹考虑基准建设成本和区位土地成本,前海等核心区域通过 $c_{l,i}$ 体现土地溢价,确保投资效率。以前海核心区与一般建成区为例说明上述用地参数的相关关系,详见表4,表中数据为示例性计算, $c_{i,t} = c_{b,t} + c_{l,i}$,其中 $c_{b,t}$ 依据深圳市低空基础设施建安费用定额确定, $c_{l,i}$ 基于深圳发布的片区基准地价,前海、科技园等核心区域 $c_{l,i}$ 值较高,反映土地溢价。

表4 土地成本对比

Table 4 Comparison of land costs

设施类型	$c_{b,t}$ /万元	i (示例)	$c_{l,i}$ /万元	$c_{i,t}$ /万元
大型客运站	2 500	前海	1 500	4 000
一级货运站	1 800	科技园	1 000	2 800
二级中转站	1 200	蛇口	800	2 000
三级配送站	600	西丽	600	1 200
城市治理基站	800	生态区	300	1 100

2.3.3 空域风险最小化

空域风险目标主要基于空域安全原则,降低无人机运行时的冲突概率,通过采用高斯核函数,模拟空域冲突的辐射效应,函数创新性地引入规模权重因子,反映不同规模起降点的流量差异对空域风险的影响程度,大型枢纽站点的风险权重显著高于小型站点。将空间冲突理论首次作为核心优化目标纳入设施选址框架,突破了传统选址模型仅考虑成本与覆盖的局限。

空域风险最小化目标函数 f_3 的完整数学表达式为

$$\min f_3 = \sum_{i=1} \sum_{j=i+1} \Psi_{ij} \Phi_{ij} \quad (17)$$

式中: Ψ_{ij} 为空域冲突势能函数; Φ_{ij} 为规模权重交互函数。

则空域冲突势能函数可表示为

$$\Psi_{ij} = \eta_{ij} \mathbb{I}(d_{ij} < \rho_{i,t_j}) \quad (18)$$

距离计算公式 d_{ij} 表示为

$$d_{ij} = R \arccos \left[\sin(\lambda_i) \sin(\lambda_j) + \cos(\lambda_i) \cos(\lambda_j) \cos(|\theta_i - \theta_j|) \right] \quad (19)$$

式中: R 为地球半径,取值 6 371 km。

最小安全间距 ρ 取值如表 5 所示。

表 5 安全间距取值

Table 5 Safety spacing values

类型组合	$\rho_{t_i,t_j}/m$	依据标准
客运-客运	1 000	《民用无人机空中交通管理规则》
货运-货运	800	《民用无人机空中交通管理规则》
客运-货运	1 200	风险规避加强要求
治理-其他	500	应急响应特殊通道

冲突风险系数函数 η_{ij} 为

$$\eta_{ij} = \exp \left(-\frac{d_{ij}^2}{2\sigma^2} \right) \cdot \frac{A_{\min,t_i} A_{\min,t_j}}{A_{\max}^2} \quad (20)$$

式中: A_{\min,t_i} 和 A_{\min,t_j} 分别为 t_i 、 t_j 起降点的最小占地面积。

规模权重交互函数 Φ_{ij} 考虑不同规模设施间的风险差异,计算如下

$$\Phi_{ij} = \frac{\phi(z_i)\phi(z_j)\Gamma_{ij}}{\phi_{\max}^2} \quad (21)$$

流量权重函数为

$$\phi(z) = \begin{cases} 0.3 & z = 1(\text{小型}) \\ 0.7 & z = 2(\text{中型}) \\ 1.0 & z = 3(\text{大型}) \end{cases} \quad (22)$$

空域层级兼容性系数 Γ_{ij} 反映不同组合类型的风险等级差异如下

$$\Gamma_{ij} = \begin{cases} 0.2 & \text{同类型同规模} \\ 0.5 & \text{同类型不同规模} \\ 0.8 & \text{不同类型} \\ 1.0 & \text{客货混合} \end{cases} \quad (23)$$

2.3.4 噪声污染最小化

目标相主要采用线性衰减模型模拟噪声随距离的衰减规律,同时考虑不同机型噪声源强的差异,在模型建立过程中,客运无人机的噪声影响权重显著高于治理型无人机。将声传播模型首次作为核心优化目标纳入设施选址框架,突破传统选址模型仅考虑成本与覆盖的局限。

噪声污染最小化目标函数 f_4 的完整表达式为

$$\min f_4 = \sum_{i=1}^n \sum_{o=1}^n \Theta_{i,o} \quad (24)$$

起降点 i 对噪声敏感点 o 的噪声影响函数 $\Theta_{i,o}$ 可表示为

$$\Theta_{i,o} = x_i \eta_{i,o} S_o \Pi(d_{i,o} < D_{\max}) \quad (25)$$

式中: $\eta_{i,o}$ 为起降点 i 对敏感点 o 的噪声影响系数; S_o 为敏感点 o 的敏感度系数,其中,学校对应 2.0,医院对应 2.0,居住对应 1.5,商业对应 1.0; $d_{i,o}$ 为起降点 i 与敏感点 o 之间的欧氏距离; D_{\max} 为噪声最大影响距离,一般取值为 1 000 m。

则噪声影响系数函数可表示为

$$\eta_{i,o} = \frac{\eta_i \Gamma_{i,o}}{1 + \alpha d_{i,o}} \quad (26)$$

式中: η_i 为噪声源强,大型客运无人机($\eta_p = 85$ dB),大型货运无人机($\eta_h = 80$ dB),城市治理无人机($\eta_g = 60$ dB); α 为声传播衰减因子,一般取 0.002 m^{-1} ; $\Gamma_{i,o}$ 为量纲为 1 的地形遮蔽系数,一般取值为 $0.8 \sim 1.0$ 。

此外,敏感点 o 的敏感度系数 S_o 的设定主要依据中国《声环境质量标准》(GB 3096—2008)对不同声环境功能区的限值要求^[29]。该标准对康复疗养区、文教科研区等 0 类区执行最严格的昼间 50 dB 标准,对居住区等 1 类区执行 55 dB 标准,对商业区等 2 类区执行 60 dB 标准。本研究中的敏感度系数比值(2.0:1.5:1.0)与该标准中各类区域噪声限值的相对严格程度(50:55:60,即倒数关系近似为 1.2:1.1:1.0)呈正相关。

针对噪声的目标函数主要采用了符合噪声传播模型,通过线性衰减项 $1/(1 + \alpha d_{i,o})$ 模拟噪声随距离衰减的特性,考虑不同类型无人机噪声源强差异 η_i 和不同功能区域的噪声敏感程度 S_o ,距离约束项 $\Pi(d_{i,o} < D_{\max})$ 确保仅计算有效影响范围内的噪声影响,通过最小化 f_4 ,有效控制无人机运营对周边环境的噪声影响,提高社会接受度。

2.3.5 归一化处理

由于 4 个目标函数具有不同的量纲和数量级,因此需要对目标函数进行归一化处理,归一化数学表达式为

$$\hat{f}_k = \frac{f_k - f_k^{\min}}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (27)$$

式中: f_k^{\min} 为目标 k 的理想最小值; f_k^{\max} 为目标 k 的理想最大; \hat{f}_k 为归一化后的目标值,范围为 $[0, 1]$ 。

通过归一化处理后,将原目标函数向量 $F(x)$ 转化为 $\hat{F}(x)$

$$F(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x))^T \quad (28)$$

$$\hat{F}(x) = (\hat{f}_1(x), \hat{f}_2(x), \hat{f}_3(x), \hat{f}_4(x))^T \quad (29)$$

覆盖效率目标(最大化转为最小化)为

$$\hat{f}_1(x) = 1 - \frac{f_1(x) - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} \quad (30)$$

建设成本目标为

$$\hat{f}_2(x) = 1 - \frac{f_2(x) - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \quad (31)$$

空域风险目标为

$$\hat{f}_3(x) = 1 - \frac{f_3(x) - f_3^{\min}}{f_3^{\max} - f_3^{\min}} \quad (32)$$

噪声影响目标为

$$\hat{f}_4(x) = 1 - \frac{f_4(x) - f_4^{\min}}{f_4^{\max} - f_4^{\min}} \quad (33)$$

则原优化问题为 $\min\{-f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x)\}$, 通过归一化后转化为 $\min\{\hat{f}_1(x), \hat{f}_2(x), \hat{f}_3(x), \hat{f}_4(x)\}$

2.4 约束条件

2.4.1 类型唯一性约束

所有起降点均只被赋予一种功能类型,避免因功能混杂造成运营管理混乱。因为,在实际应用中,客运起降点、货运起降点和城市治理起降点在设备配置、运营流程和安全要求等方面存在明显差异,混合运营会大幅增加管理复杂度和安全风险。类型唯一性约束条件可表示为

$$\sum_{i \in T} y_{i,t} \leq 1 \quad \forall i \in V, \quad t \in T \quad (34)$$

2.4.2 物流层级衔接约束

在物流配送的网络结构中,缺少三级物流网络中的任何一个层级,都会导致物流链条断裂,影响整体运营效率^[30]。距离阈值主要根据无人机航程和运营效率确定,确保不同层级间距离在合理运营范围内

$$\sum_{j \in V} [x_j y_{j,t_{m+1}} \mathbb{I}(d_{ij} \leq \delta_m)] \geq x_i y_{i,t_m} \quad \forall i \in V, \quad m=1, 2 \quad (35)$$

2.4.3 空域隔离约束

民航局无人机运行安全管理规定,不同类型组合需不同的最小安全间距,大型客运无人机间需要最大间距,而小型治理无人机可适当减小间距^[31]

$$d_{i,j} \geq \rho_{i,t_j} - M(1 - x_i y_i) \quad \forall i, j \in V, \quad i \neq j \quad (36)$$

2.4.4 用地兼容性约束

起降点建设需符合城市规划用地性质要求,避免违规建设。不同类型设施对用地性质有特定要求,通过用地兼容性判断,保证方案的法律合规性和实施可行性

$$x_i y_i \leq \sum_{z \in Z} \mathbb{I}[z(i) \in A(t)] \quad (37)$$

2.4.5 预算约束

考虑不同类型起降点设施 x_i 具有差异化建设成本和不同区位的土地成本,防止方案过度投资,保证财政资源的合理配置

$$\sum_{i \in V} \sum_{t \in T} (x_i y_{i,t} c_{i,t}) \leq B \quad (38)$$

2.4.6 服务能力约束

约束通过限制服务流量 ψ_{ik} , 保证运营质量和安全水平,避免因超负荷运行导致的服务质量下降和安全风险增加

$$\sum_{k \in D} \psi_{ik} \leq \Gamma(z_i) \quad (39)$$

2.4.7 地理可行性约束

设置经纬度坐标 $(l_{i,a}, l_{i,o})$, 可行域考虑地形坡度、海拔高度、生态保护红线等因素,禁飞区包括机场净空区、军事禁区、自然保护区等敏感区域。约束通过地理信息系统分析,保证方案在实际环境中的可实施性

$$x_i \leq \mathbb{I}[(l_{i,a}, l_{i,o}) \in \Omega \setminus \Gamma] \quad (40)$$

式中: $\Omega \setminus \Gamma$ 为从可行域中剔除禁飞区后剩余的区域。对于每一个候选起降点 i , 其选址变量 x_i 的取值(0或1)受到地理可行性的限制。只有当该点的经纬度坐标 $(l_{i,a}|l_{i,o})$ 位于地理可行域与禁飞区的差集 $\Omega \setminus \Gamma$ 之内时,指示函数才取值为1,此时 x_i 可以取1(即允许建设);否则指示函数取值为0,约束要求 $x_i \leq 0$, 即 x_i 只能取0(即禁止建设)。

2.4.8 规模兼容约束

设施规模与功能类型应相匹配,避免规模与功能不协调问题。通过预设不同起降点规模-类型兼容集合 z_i , 保证设施布局设计的合理性

$$y_i^t \leq \mathbb{I}(z_i \in S^t) \quad (41)$$

2.4.9 需求覆盖约束

针对每个起降点 x_i 需求和每种服务类型,要求总服务效率达到最低阈值。通过设置合理覆盖标准,防止任一起降点出现服务盲区,保证基础设施的服务效能

$$\sum_{i \in V} x_i y_{i,t} \eta_{ik,t} \geq \theta_i \quad \forall k \in D_i, \quad t \in T \quad (42)$$

2.4.10 噪声限制约束

该约束是强制性约束,需确保规划方案在任何情况下都符合《声环境质量标准》(GB 3096—2008)的法定限值。按功能区类型 r 分别设置,其中学校、医院等敏感区域($r=1$)执行最严格限值(如昼间50 dB),商业区($r=2$)次之,工业区($r=3$)相对宽松

$$\sum_{i \in V} \left\{ x_i \left[\sum_{t \in T} y_{i,t} \eta_t \sum_{n \in N} \frac{\mathbb{I}(d_{i,n} \leq D_{\max}) \mathbb{I}(t(n) = r)}{1 + \alpha d_{i,n}} \right] \right\} \leq \Gamma_r \quad (43)$$

式中: $t(n)$ 为敏感点 n 所属的功能区类型; r 为功能区类型索引。

2.4.11 敏感点保护约束

对特定高敏感点 N_s 实施重点保护,采用更严格近距离控制标准。即便预测的整体噪声值达标,也在其周边划定一个禁止或严格限制建设起降点的缓冲带(D_c),避免产生不必要的邻避效应和社会纠纷,是方案具备社会可行性的重要保障

$$\sum_{i \in V} [x_i y_{i,t} \mathbb{I}(d_{i,n} < D_c)] \leq N_n^{\max} \quad \forall n \in N_s \quad (44)$$

3 改进NSGA-II算法实现过程

3.1 算法改进策略

标准NSGA-II算法在处理高维、多约束的复杂优化问题时,常面临解空间搜索效率低、可行解生成能力不足的挑战。为适配本文所构建的无人驾驶航空器起降点布局规划模型,本文从以下3个方面对标准算法进行了针对性改进。

(1)分层混合编码方案:传统编码方式难以同时表达起降点的空间位置、功能与规模等多重属性。本文设计了一种分层染色体编码(见第3.2节),将每个候选点的经纬度($l_{i,a}, l_{i,o}$)、功能类型 t_i 与规模等级 z_i 共同编码为一个基因单元,这种编码方式紧密贴合问题物理本质,避免了无效解的生成,显著提升了算法的搜索效率。

(2)动态约束处理机制:模型涉及的约束条件(如空域隔离、用地兼容、噪声限制等)数量繁多且耦合性强。改进算法在种群初始化与进化操作中,引入了动态可行性评估规则。对于违反硬约束(如空域隔离、生态红线)的个体,赋予极高的惩罚值或直接剔除;对于软约束,则采用自适应惩罚函数,引导种群向可行域方向进化。该机制有效协调了复杂约束,保证了最终方案的实际可操作性。

(3)面向运营逻辑的特定规则:针对货运网络必须具备层级衔接特性的运营需求,在交叉与变异算子中嵌入了“货运层级衔接规则”,该规则确保在生成新个体时,若包含一级货运枢纽,则在其服务半径内必须存在与之衔接的二级枢纽。这一改进将行业运营知识融入算法核心,避免了理论上最优但实践

中不可行的解,增强了方案的工程价值。

上述改进使得本算法在处理此类兼具空间属性、功能属性和复杂运营约束的城市设施布局问题时,相较于标准NSGA-II算法,在收敛速度、可行解比例与解集工程实用性方面均展现出明显优势。

3.2 改进算法实现步骤

本文采用该NSGA-II算法求解无人机起降点布局优化模型,模型具有高维、非线性、多约束的复杂特性,4个目标函数之间存在固有冲突,传统单目标优化方法无法同时处理这些相互竞争的目标^[32]。

第1步:种群初始化

定义染色体编码。设每个染色体 p 代表一个规划方案,由最多 M_{\max} 个起降点编码构成

$$p = \{(l_{1,a}, l_{1,o}, t_1, z_1), (l_{2,a}, l_{2,o}, t_2, z_2), \dots, (l_{K,a}, l_{K,o}, t_K, z_K)\} \quad (45)$$

式中: K 为方案中实际建设的起降点数量, $0 \leq K \leq M_{\max}$, $M_{\max} = 20$ 为最大起降点数; $(l_{j,a}|l_{j,o})$ 为第 j 个起降点的经度和纬度; t_j 为功能类型, $t_j \in T$ 。

种群初始化时,随机生成 $N_{\text{pop}} = 100$ 个染色体个体,并需满足空域隔离约束

$$\| (l_{i,a}, l_{i,o}) - (l_{j,a}, l_{j,o}) \| \geq \rho_{t_i t_j} \quad \forall i \neq j \quad (46)$$

式中: $\| \cdot \|$ 为欧氏距离。

第2步:适应度评估

计算每个个体的四目标向量。由于4个目标已归一化,且成本、风险、噪声目标均为最小化,覆盖效率为最大化,因此在适应度评估中统一转化为最大化方向

$$F(p) = (\hat{f}_1(p), -\hat{f}_2(p), -\hat{f}_3(p), -\hat{f}_4(p))^T \quad (47)$$

式中: $F(p)$ 为个体 p 的四维适应度向量; $\hat{f}_1(\cdot)$ 、 $\hat{f}_2(\cdot)$ 、 $\hat{f}_3(\cdot)$ 、 $\hat{f}_4(\cdot)$ 分别为归一化后的覆盖效率、建设成本、空域风险和噪声影响目标值,取负号将最小化目标转化为最大化方向,便于后续非支配排序。

第3步:非支配排序

定义支配关系,个体 p_a 支配个体 p_b (记作 $p_a < p_b$)当且仅当

$$\begin{cases} \forall k \in \{1, 2, 3, 4\} & F_k(p_a) \geq F_k(p_b) \\ \exists k & F_k(p_a) > F_k(p_b) \end{cases} \quad (48)$$

式中: $F_k(p)$ 为适应度向量 $F(p)$ 的第 k 个分量。

按支配关系对种群进行分层,得到非支配前沿 $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \mathcal{F}_3, \dots$,其中 \mathcal{F}_1 为第一前沿层(Pareto前沿),包含所有不被任何其他个体支配的个体,质量最高;

\mathcal{F}_2 为第二前沿层,依此类推,质量逐层下降。

第4步:拥挤度计算

为保持解集的分布性,计算同一前沿层内个体的拥挤度。对前沿层 \mathcal{F}_l 中的个体,按每个目标函数值排序后计算

$$C(p) = \sum_{k=1}^4 \frac{F_k(p_{\text{next}}) - F_k(p_{\text{prev}})}{F_k^{\text{max}} - F_k^{\text{min}}} \quad (49)$$

式中: $C(p)$ 为个体 p 的拥挤度; $p_{\text{next}}, p_{\text{prev}}$ 分别为同一前沿层中按第 k 个目标排序后 p 的相邻个体; $F_k^{\text{max}}, F_k^{\text{min}}$ 分别为当前前沿层中第 k 个目标的最大值和最小值。

第5步:选择操作

采用锦标赛选择机制,从当前种群中选择父代个体。选择规则为:随机选取 2 个个体 p_a 和 p_b ,优先选择非支配前沿等级更优的个体;若处于同一前沿层,则选择拥挤度更大的个体

$$S(p_a, p_b) = \begin{cases} p_a & r(p_a) < r(p_b) \\ p_b & r(p_b) < r(p_a) \\ p_a & r(p_a) = r(p_b) \text{ 且 } C(p_a) > C(p_b) \\ p_b & \text{其他} \end{cases} \quad (50)$$

式中: $r(p)$ 为个体 p 所在的前沿层编号 [\mathcal{F}_1 的 $r(p) = 1, \mathcal{F}_2$ 的 $r(p) = 2$,依此类推]。

第6步:遗传操作

对选出的父代个体进行交叉和变异操作,生成子代种群。

交叉操作采用模拟二进制交叉(Simulated Binary Crossover, SBX),交叉概率 $p_c = 0.9$,分布指数 $\eta_c = 15$

$$\beta = \begin{cases} (2u)^{1/(\eta_c+1)} & u \leq 0.5 \\ \left[\frac{1}{2(1-u)} \right]^{1/(\eta_c+1)} & \text{其他} \end{cases} \quad (51)$$

式中: u 为在 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的随机数; β 为交叉后代的分布因子。

变异操作采用多项式变异,变异概率 $p_m = 1/M_{\text{max}}$,分布指数 $\eta_m = 15$

$$\delta = \begin{cases} (2\varepsilon)^{1/(\eta_m+1)} & \varepsilon < 0.5 \\ 1 - [2(1-\varepsilon)]^{1/(\eta_m+1)} & \text{其他} \end{cases} \quad (52)$$

式中: ε 为在 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的随机数; δ 为变异后代的扰动因子。

第7步:环境选择

合并父代种群和子代种群,得到大小为 $2N_{\text{pop}}$ 的临时种群。对该临时种群进行非支配排序和拥挤度计算,优先选择前沿等级高的个体,同层内优先选择

拥挤度大的个体,保留前 N_{pop} 个个体作为下一代种群。

重复第 2 步至第 7 步,直至达到预设的最大迭代代数(本文设为 400 代),输出最终种群的 Pareto 前沿解集。

3.3 相关算法适用性对比

本文基于 NSGA-II 算法开展算法设计,同时与 MOEA/D(基于分解的多目标进化算法)以及 SPEA2(强度 Pareto 进化算法第二代)进行对比分析。NSGA-II 算法核心优势在于精英保留策略和拥挤度距离机制,能在保证收敛性的同时维持解集的良好分布性,特别适合处理 2~5 个目标的复杂问题^[33]。MOEA-D 在于分解机制,通过将多目标问题转化为一组单目标子问题,在低维目标空间中表现出极高的收敛效率。SPEA2 则凭借强度值计算和环境选择策略,在解集分布的均匀性和多样性保持方面表现优异(详见表 6)。

此外,通过与 NSGA-III 算法对比,对于中低维目标问题,NSGA-III 算法相对于 NSGA-II 算法的性能优势并不显著,有时甚至因参考点管理的开销而处于劣势,NSGA-III 算法的实现复杂度显著高于 NSGA-II 算法。对于本研究而言,引入 NSGA-III 算法意味着更高的实现成本和参数整定难度,而带来的潜在收益有限。因此,从算法实现和工程应用的角度看,NSGA-II 算法是更具性价比和可操作性的选择。

4 深圳市南山区数据及结果分析

4.1 方案对比分析

4.1.1 总体方案对比分析

本文所构建的覆盖效率、建设成本、空域风险与环境噪声多目标优化模型,求解结果是一个包含众多非支配解的 Pareto 最优解集。每一个解都代表了一种在 4 个目标之间无法进一步优化的权衡状态。为支持规划决策,需对解集进行进一步分析,以提取具有明确工程意义和决策价值的规划方案。本文依据解集在目标空间中的分布特征,并结合高密度城区典型决策偏好(如效率优先、成本控制、风险规避等),从 Pareto 前沿中识别并提取出 4 类具有显著差异的典型方案,分别对应于以下不同的决策侧重点(图 1)。

(1) 客运优先方案:该方案在设施数量配置上以客运设施为主导(8 个起降点均为客运站),在空间分布上密集覆盖人口高密度区域(如前海、科技

表 6 算法特性对比

Table 6 Comparison of algorithm characteristics

对比指标	NSGA-II	MOEA/D	SPEA2	NSGA-III
核心思想	非支配排序 + 拥挤度距离	权重分解 + 邻域协作	权重分解 + 邻域协作	基于参考点的非支配排序
Pareto前沿处理	直接寻找整个前沿	通过权重向量逼近前沿	通过权重向量逼近前沿	通过预设参考点维持多样性
最优解选择机制	基于 Pareto 等级和拥挤度	基于权重向量的标量化	基于强度值和 k 近邻	基于 Pareto 等级和参考点关联
参数敏感性	低(需调节种群大小)	较高(需设置权重向量和邻域)	中等(需设置档案大小和 k 值)	高(需精心设置参考点)
收敛速度	快(精英保留策略)	很快(局部搜索效率高)	中等(档案维护开销大)	中等(高维目标下较慢)
解集分布性	优(拥挤度距离保证分布)	良(依赖权重向量分布)	优(密度估计保持分布)	高维目标下极优
约束处理能力	强(约束支配原则)	中等(惩罚函数法)	强(约束违反度排序)	强(约束支配原则)
适用问题规模	大中型问题	中小型问题	大中型问题	大中型问题
目标数适应性	2~5 个目标	2~3 个目标	2~4 个目标	>3 个目标(高维优势)
算法稳定性	高	中等	较高	中等(对参考点敏感)
实现难度	中等	较复杂	较复杂	复杂
内存需求	中等	较低	较高	高(需存储参考点)
理论基础	Pareto 最优理论	标量化分解理论	Pareto 强度值理论	Pareto 最优与参考点理论

园等核心商务区),在功能构成上完全侧重客运服务。其核心决策偏好是最大化人口服务覆盖与出行便捷性,但为此在建设成本与空域风险目标上做出了显著妥协。

(2)货运优先方案:该方案在数量配置上构建了完整的三级物流网络(19 个点中货运站占 89.5%),在空间分布上紧密围绕港口、物流园区等货运枢纽(如蛇口港、妈湾港),在功能构成上以货运功能为主导。其核心决策偏好是保障城市物流网络的完整性与运营时效,但导致了噪声影响范围的显著扩大。

(3)均衡方案:该方案在数量、空间与功能 3 个维度上均采取了混合配置策略(12 个点包含 5 类功能),空间布局相对分散。其核心决策偏好是在 4 个目标间寻求最佳综合平衡,不追求任一目标的极致表现,但实现了整体效益最优。

(4)极简方案:该方案在数量配置上极度精简(仅 6 个点),在空间分布上优先利用现有基础设施

并严格避开生态敏感区,在功能构成上以末端配送与基础治理功能为主。其核心决策偏好是严格限制投资规模与环境影响,服务于预算受限或生态敏感区域。

综上所述,表 7 数据进一步量化了 4 类典型方案在设施数量、空间分布模式与功能构成比例上的系统性差异。分析表明,不同决策偏好直接决定了数量、空间和功能 3 个核心规划问题上的不同解答。例如,客运优先方案通过增加设施数量、聚焦核心区、专精客运功能来实现效率目标;而极简方案则通过严格控制数量、规避敏感区位、简化功能配置来实现成本与环境目标,如图 2 所示。这一对比清晰地表明,Pareto 解集本身并不直接给出单一的最优布局方案,而是提供了一个包含多种可能性的方案集合。最终的决策需基于具体的区域发展定位、预算约束与环境政策,从该集合中选取最适配的权衡方案。

表 7 不同方案计算结果对比

Table 7 Comparison of calculation results from different schemes

指标	客运优先方案	货运优先方案	均衡方案	极简方案
起降点数量	8	19	12	6
客运站数量	8(3 枢纽+5 社区)	2	5	2
货运站数量	0	17(2 个一级+5 个二级+10 个三级)	6(1 个一级+2 个二级+3 个三级)	3(3 个三级)
治理站数量	0	0	1	1
总投资成本/万元	32 000	28 500	35 200	15 800
人口覆盖率/%	95	78	88	65
物流提升实效/%	15	40	25	10
空域冲突风险指数	0.12	0.25	0.18	0.08
噪声超标点数量	3	7	4	1
投资回收期	4.3	3.8	4.8	6.2
应急响应时间/min	18	25	15	32

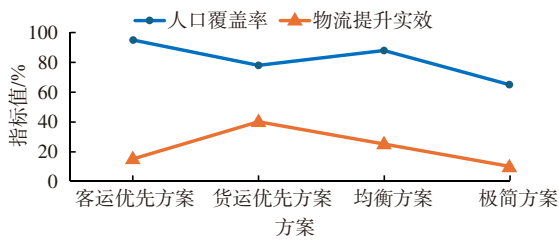


图1 客运和货运指标对比

Fig. 1 Comparison of passenger and freight indicators

4.1.2 典型方案分区适配性分析

Pareto解集提供的全局最优方案需结合各功能区特征进行二次适配。表8展示了4类典型方案在南山主要功能区的适用性评估,评估基于5项关键指标。

(1)用地兼容性匹配度:方案设施类型与片区主导用地性质的兼容程度。

(2)需求覆盖有效性:方案服务半径对片区核心

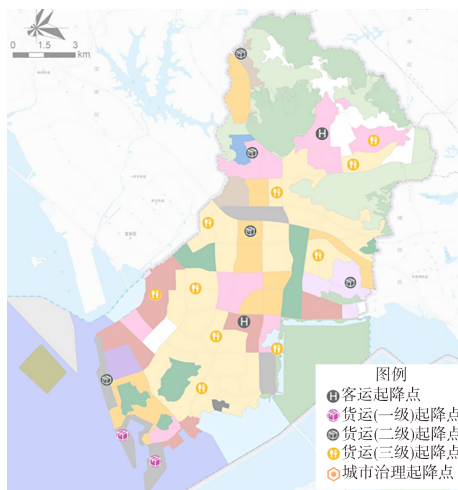
需求点的覆盖比例。

(3)环境约束符合度:方案噪声影响、空域冲突等与片区环境敏感性的匹配。

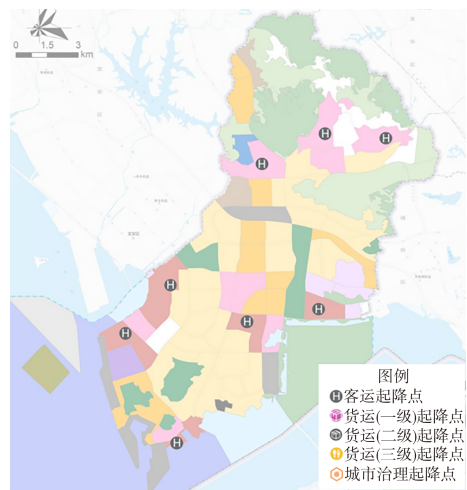
(4)经济效益合理性:方案投资规模与片区经济承载能力的适配性。

(5)运营可行性:方案设施规模与片区运营管理能力相匹配。

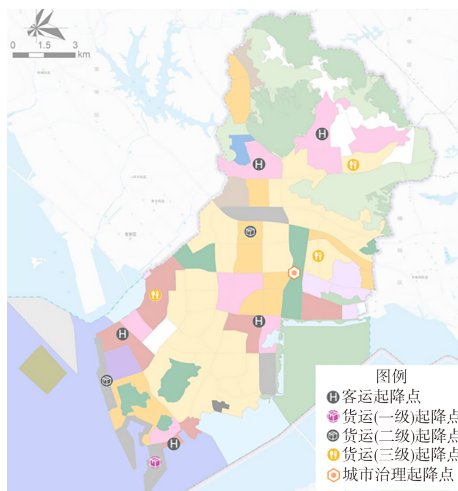
Pareto解集提供的全局最优方案需与南山区的功能分区特征相结合,才能形成可落地的规划方案。南山区内部各片区的功能定位、用地构成、环境敏感度差异显著,这决定了不同区域对四类典型方案的适配度不同。评估表明,不存在适用于全区所有片区的单一“最优方案”。差异化布局的本质在于,以Pareto解集提供的全局非支配方案集合为基础,根据片区特征选择适配的主导方案类型,并进行本地化参数的二次优化。



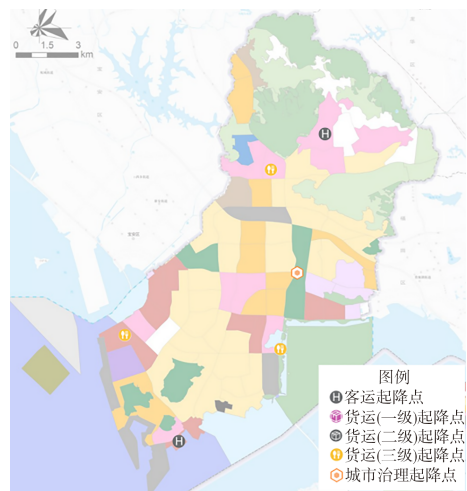
(a) 客运优先方案



(b) 货运优先方案



(c) 均衡方案



(d) 极简方案

图2 起降点布局规划

Fig. 2 Landing and takeoff site layout planning

表 8 典型方案分区适用性量化评估

Table 8 Quantitative assessment of applicability for typical solution zoning

功能区	评估指标	客运优先	货运优先	均衡方案	极简方案	片区特征
前海商务区	用地匹配度	95	30	85	25	商业用地主导,高强度开发
	需求覆盖率	98	45	92	40	高端商务出行需求集中
	噪声敏感度	65	40	80	90	办公为主,噪声容忍度中等
	综合适配度	92	35	88	45	
科技园	用地匹配度	90	60	95	30	研发用地,精密仪器敏感
	需求覆盖率	85	70	90	50	通勤+样本运输混合需求
	噪声敏感度	70	50	85	95	研发机构对噪声敏感
	综合适配度	85	58	92	52	
妈湾港区	用地匹配度	40	95	80	20	物流仓储用地主导
	需求覆盖率	35	98	75	30	大宗货物转运需求
	噪声敏感度	80	60	85	95	工业区,噪声容忍度高
	综合适配度	48	88	82	42	
深圳湾保护区	用地匹配度	10	10	30	95	生态保护用地
	需求覆盖率	15	15	40	85	生态监测、应急巡查需求
	噪声敏感度	95	95	90	98	生态敏感,噪声要求严
	综合适配度	12	13	48	94	

注:适配度基于各片区用地兼容性、需求类型强度、环境约束强度、投资承受力 4 项指标,通过专家打分与指标量化综合确定。

4.1.3 从全区方案到分区布局的落地路径

为实现差异化策略,本文提出“全局寻优-分区评估-二次适配”的三阶段落地路径。该路径将多目标优化模型生成的数学解,转化为可指导各片区详细规划的方案。

(1)阶段 1:全局 Pareto 解集生成

以全区为对象,运行改进的 NSGA-II 算法,获得包含众多非支配解的 Pareto 前沿。该前沿定义了四个目标间所有可能的权衡方案集合,即回答了在全区资源与约束下“可能怎么建”的问题。

(2)阶段 2:片区适配度评估与主导方案选择

针对每个功能分区 k (如前海、科技园等),建立片区特征向量 v_k

$$v_k = (u_k, d_k, n_k, b_k)^T \quad (53)$$

式中: u_k 为片区主导用地性质与不同类型起降点的兼容程度; d_k 为片区对不同功能起降点的需求强度分布; n_k 为片区对噪声污染的敏感程度; b_k 为片区可承担的低空基础设施建设投资规模。

将 v_k 与 4 类典型方案的特征向量进行匹配度计算,依据表 8 的结果,为每个片区选定一个主导方案类型 s_k^* 。

(3)阶段 3:基于主导方案的二次优化与参数本地化

此阶段将全局方案落地到具体片区,核心是引入片区特有的约束并调整参数。

决策空间聚焦:将优化范围从全区候选点集 \mathcal{V} 聚焦到该片区候选点子集 \mathcal{V}_k 。

约束本地化:在原有模型约束基础上,增加或强化片区级约束。例如:前海商务区增加标志性建筑上空禁飞约束、高端写字楼屋顶起降点准入约束。妈湾港区强化与港口作业区、疏港道路的衔接约束。深圳湾保护区增加生态缓冲区(如 500 m)内禁止建设约束、鸟类活动高峰期限飞约束。

参数调优:根据片区特征微调目标函数权重。例如,在前海片区将覆盖效率 f_1 的权重提升 10%,在深圳湾片区将噪声影响 f_4 的权重提升 20%。

方案生成:以选定的主导方案为初始解,在片区优化模型中运行算法(迭代次数可减少),快速得到该片区的细化布局方案。

通过以上路径,差异化策略不再是宏观建议,而成为一套可量化、可操作、可迭代的技术流程,确保了规划方案既具有全局最优性,又具备分区针对性。

4.2 Pareto 前沿解分析

Pareto 前沿数据是通过运行改进的 NSGA-II 多目标优化算法,在满足所有约束条件的前提下,对包含经纬度坐标、功能类型与规模等级的混合决策变量进行并行搜索与迭代进化后,所获得的非支配解集合,该集合中的每一个解均在覆盖效率、建设成本、空域风险与环境噪声 4 个目标之间达到了最优权衡状态,且无法在其中一个目标上进一步优化而不损害其他目标性能,从而完整刻画了高密度城区

无人机起降点布局规划中多重目标间固有的冲突关系与权衡空间。通过对前沿解分析(图3),可以发现。

(1)目标冲突性与解集的非支配性。覆盖效率、建设成本、空域风险与环境噪声4个优化目标之间存在固有的、不可调和的冲突。任何单一方案都无法在所有目标上同时达到最优,从而形成了一个由众多非支配解构成的 Pareto 前沿。

(2)Pareto 前沿呈现出一个从“高成本-高效率-高风险”到“低成本-低效率-低风险”的连续方案谱系。这证实了通过优化搜索,能够系统性地获得在不同决策偏好下的最优规划方案,而非零散的几个方案。

(3)Pareto 解集为决策者提供了一个方案菜单,使得在特定区域(如前海核心商务区、妈湾港区、深圳湾保护区)推行差异化的布局策略有了量化的、最优的规划方案作为选择基础。

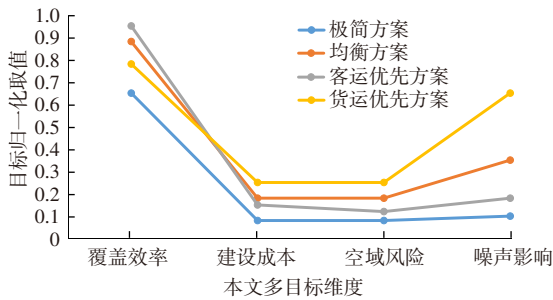


图3 方案 Pareto 前沿解

Fig. 3 Pareto front solutions for scheme

数据集(Hypervolume 指标随迭代的变化)的核心价值在于验证了改进 NSGA- II 算法求解本问题的有效性和可靠性。通过收敛曲线(图4),可以发现如下内容。

(1)算法有效收敛:改进 NSGA- II 算法在迭代过程中,Hypervolume 指标随迭代次数增加而快速上升并最终趋于稳定,表明算法能有效搜索解空间,并最终收敛到一个高质量、高多样性的 Pareto 解集。

(2)高效的搜索性能:收敛曲线在前300代左右即进入平台期,表明算法具备良好的搜索效率,能够在合理的迭代次数内找到问题的满意解集,这保证了模型在实践中的应用可行性。

(3)解的稳定性:算法在收敛后 Hypervolume (HV)指标保持稳定,没有出现剧烈波动,表明其运行是鲁棒的,所获得的 Pareto 前沿解集是可靠且可重复的。

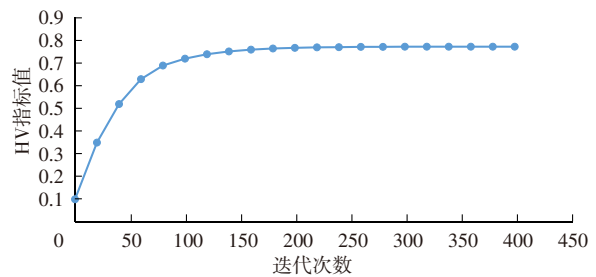


图4 收敛曲线

Fig. 4 Convergence curve

4.3 主要指标敏感性分析

4.3.1 投资预算敏感性

投资预算敏感性分析采用控制变量法(详见表9),在保持空域间距、噪声标准等其他参数恒定前提下,系统地调整总投资预算B,从2.52亿元到4.32亿元,以2000万元为间隔共10个水平,每次调整后重新运行NSGA- II 算法并记录均衡方案的覆盖率 f_1 变化。通过图5,可以发现,覆盖率随投资增加呈边际效益递减的二次函数增长趋势, $f_1(B) = 88.0 + 0.00077\Delta B - 2.1 \times 10^{-8}(\Delta B)^2$, $R^2 = 0.98$,当投资从3.52亿元增加至4.32亿元时,覆盖率从88.0%提升至91.1%,增幅仅为3.1%,而投资减少1亿元时覆盖率下降至81.2%,表明在当前技术条件下,3.3亿~3.8亿元为投资效益最高的最优区间,继续增加预算,边际效益显著降低。

表9 投资预算敏感性分析

Table 9 Sensitivity analysis of investment budget

预算变化/ 万元	绝对预算/ 万元	覆盖率/%	成本 变化率/%	边际效益 $\Delta f_1/\Delta B$
-10 000	25 200	81.2	-28.4	0.000 68
-8 000	27 200	82.5	-22.7	0.000 69
-6 000	29 200	83.8	-17.0	0.000 71
-4 000	31 200	85.1	-11.4	0.000 73
-2 000	33 200	86.4	-5.7	0.000 75
0	35 200	88.0	0.0	0.000 77
2 000	37 200	89.6	5.7	0.000 74
4 000	39 200	90.3	11.4	0.000 70
6 000	41 200	90.8	17.0	0.000 65
8 000	43 200	91.1	22.7	0.000 60

4.3.2 空域安全间距敏感性

空域安全间距敏感性分析主要通过保持预算、需求等参数不变,将不同类型无人机之间的最小安全间距 ρ 在基准值基础上以50 m为间隔进行±250 m的调整,并评估每次调整后均衡方案的冲突风险 f_3 和成本变化(详见表10)。分析发现,如图6,冲突风

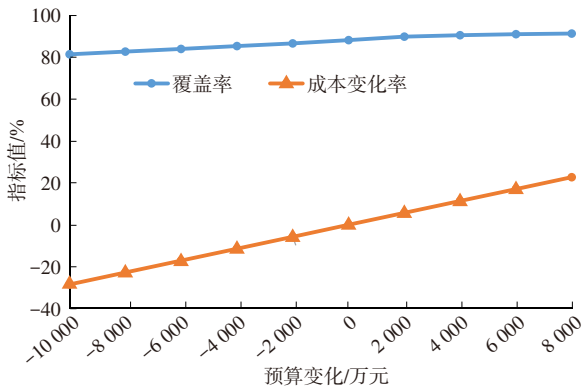


图 5 投资预算敏感性

Fig. 5 Sensitivity of investment budget

险随间距增大呈指数衰减规律, $f_3(\rho)=0.15 \exp[-0.013(\rho-\rho^0)]$, $R^2=0.96$, 间距每增加 50 m, 冲突风险降低约 13%, 但可用点位减少 6.5% 且成本相应增加 3%~5%, 当间距超过基准值 200 m 时, 风险降低的边际效益大幅减弱, 表明现行间距标准已处于安全性与经济性的较优平衡点, 过度收紧标准虽能提升安全度, 但会显著牺牲经济性。

表 10 空域安全间距敏感性分析

Table 10 Sensitivity analysis of airspace safety separation

间距变化/m	绝对间距/m	冲突风险	可用点位变化/%	成本变化/%
-200	-200	0.28	-25.3	12.5
-150	-150	0.24	-19.8	9.8
-100	-100	0.21	-14.2	7.1
-50	-50	0.18	-8.7	4.3
0	0	0.15	0.0	0.0
50	50	0.13	6.5	-3.2
100	100	0.11	12.9	-6.3
150	150	0.09	19.4	-9.5
200	200	0.08	25.8	-12.6
250	250	0.07	32.3	-15.8

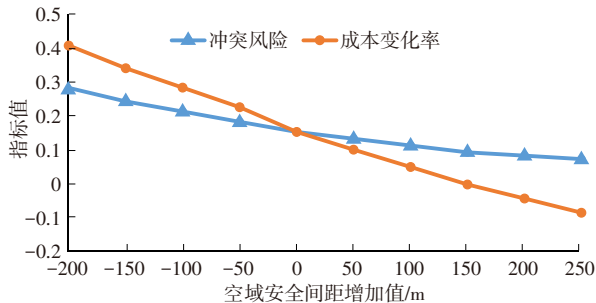


图 6 空域安全间距敏感性

Fig. 6 Sensitivity of airspace safety separation

4.3.3 噪声标准敏感性

噪声标准敏感性分析通过将噪声限值 Γ 在 48 dB 基准基础上以 1 dB 为间隔在 43~52 dB 范围内调整, 定量评估不同标准下均衡方案的噪声超标

点数量和环境合规性(详见表 11)。数据分析结果表明, 超标点数量随标准收紧呈 Logistic 函数增长, $N(\Gamma) = 15.2 / \{1 + \exp[0.32(\Gamma - 48)]\}$, $R^2=0.94$, 噪声标准每收紧 1 dB, 超标点数量平均增加约 25%, 成本相应提升 5%~7%, 当标准严于 47 dB 时, 成本急剧上升且方案可行性显著降低, 而标准放宽至 50 dB 以上时超标点数量减少有限, 如图 7 所示, 证明现行 48 dB 标准在环境效益与经济成本间取得了最佳平衡, 是最具可操作性的标准值。

表 11 噪声标准敏感性分析

Table 11 Sensitivity analysis of noise standards

噪声限值/dB	超标点数量	成本影响/%	可行性指数
43	12.8	22.1	0.48
44	10.3	16.8	0.62
45	8.9	13.5	0.70
46	7.9	11.5	0.75
47	6.5	7.2	0.82
48	5.4	0.0	0.88
49	4.1	-6.3	0.92
50	3.2	-8.7	0.95
51	2.3	-12.1	0.97
52	1.8	-15.3	0.98

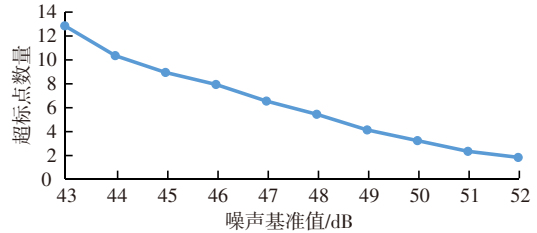


图 7 噪声基准值敏感性

Fig. 7 Sensitivity of noise standards

4.3.4 需求增长敏感性

需求增长敏感性分析通过模拟未来需求增长率 γ 从 -20% 到 25% 的变化(以 5% 为间隔共 10 个水平), 评估均衡方案的服务覆盖率 f_1 和需要新增的起降点数量(详见表 12)。结果表明, 覆盖率与需求增长呈负线性相关, $\Delta f_1 = -0.75\gamma$, $R^2=0.97$, 需求每增长 5%, 覆盖率下降约 3.5%, 需新增 1~2 个起降点(如图 8), 边际成本为 2 200~4 500 万元·点⁻¹, 当需求增长超过 20% 时, 现有网络架构难以有效维持服务水平, 覆盖率将降至 77.2% 以下, 表明当前方案对未来 10%~15% 的需求增长具有良好的适应性, 但超过 20% 的增长需进行网络扩容或架构优化。

4.3.5 技术演进敏感性

技术演进敏感性分析通过假设电池续航、降噪等技术指标改进率 β 从 -20% 到 +25% 变化

表 12 需求增长敏感性分析

Table 12 Sensitivity analysis demand growth

需求增长率/%	覆盖率/%	需要新增点数	边际成本/(万元·点 ⁻¹)
-20	92.5	-3	-1 800
-15	91.8	-2	-1 200
-10	90.9	-1	-600
-5	89.7	0	0
0	88.0	0	0
5	86.3	1	2 200
10	83.9	2	4 500
15	80.8	3	6 900
20	77.2	4	9 400
25	73.1	5	12 000

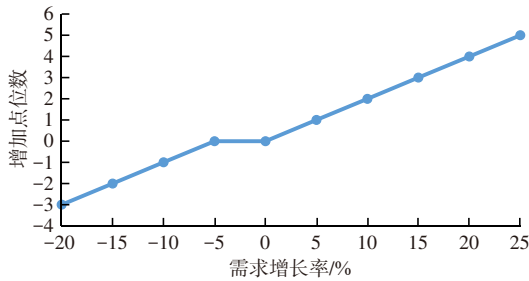


图 8 需求增长敏感性

Fig. 8 Sensitivity of demand growth

(以 5% 为间隔共 10 个水平), 评估技术进步对服务半径、成本和风险的综合影响(详见表 13)。结果表明服务半径改进与技术进步呈正线性关系

表 13 技术演进敏感性分析

Table 13 Sensitivity analysis technological evolution

技术改进/%	服务半径增加/%	成本变化/%	风险降低/%
-20	-16.2	8.4	12.7
-15	-12.1	6.3	9.5
-10	-8.1	4.2	6.3
-5	-4.0	2.1	3.1
0	0.0	0.0	0.0
5	4.2	-2.2	-3.2
10	8.5	-4.3	-6.5
15	12.9	-6.5	-9.8
20	17.4	-8.6	-13.2
25	22.0	-10.8	-16.7

表 14 客运权重敏感性分析结果

Table 14 Sensitivity analysis of passenger volume weight

客运权重设置	超指标体系	分布性指标	均衡方案客运站数量	均衡方案覆盖率
0.30	0.689±0.032	0.158±0.021	3.8±0.7	0.849±0.018
0.35	0.705±0.029	0.152±0.019	4.5±0.6	0.868±0.016
0.40(基准)	0.720±0.028	0.150±0.017	5.0±0.5	0.880±0.015
0.45	0.718±0.030	0.153±0.020	5.7±0.6	0.891±0.017
0.50	0.702±0.033	0.161±0.022	6.4±0.8	0.898±0.019

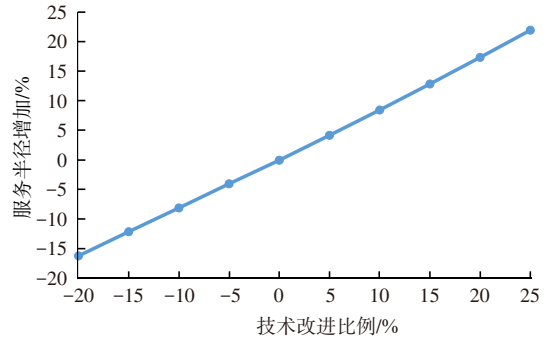


图 9 技术演进敏感性

Fig. 9 Sensitivity of technological evolution

($\Delta R = 0.85\beta, R^2=0.98$), 技术每改进 10%, 服务半径增加 8.5%(如图 9), 成本降低 4.3%, 空域风险降低 6.5%, 但当技术改进超过 20% 时, 成本下降幅度趋缓, 表明当前技术条件下, 电池续航提升 15%~20% 是最具性价比的技术发展目标, 可为规划方案带来显著性能提升而不需大幅增加投资。

4.3.6 客运权重敏感性

在覆盖效率最大化目标函数部分得出了客运、货运及城市治理类型起降点的权重系数, 为评估 AHP 带来的主观性影响, 固定其他权重比例, 令客运权重系数 ω_p 在区间 [0.30, 0.50] 内以步长 0.05 变化, 重新运行 NSGA-II 算法, 记录 Pareto 前沿的关键特征。详细计算结果如表 14 所示。

通过数据分析可以发现:

(1) 稳定性区间。当 $\omega_p \in [0.35, 0.45]$ 时, Hypervolume 指标波动小于 $\pm 2\%$, Spacing 指标波动小于 $\pm 3\%$, 表明 Pareto 前沿的整体质量与分布性对权重变化不敏感。

(2) 方案结构影响。客运站数量与覆盖率 f_1 随 ω_p 线性变化, 验证了权重对方案要素的直接调控作用。但即使在 $\omega_p = 0.30$ 时, 均衡方案覆盖率仍达 84.9%, 表明网络具有一定鲁棒性。

(3) 主观性风险可控。AHP 专家打分虽具主观性, 但其影响被客观的熵权法大幅中和 ($\beta = 0.6$)。敏感性测试表明, 即使主观权重发生 $\pm 25\%$ 的偏差 (对应 ω_p 约 ± 0.05), 最优方案集的核心性能 (HV) 仍

保持稳定。

4.4 不同算法效率对比分析

为确保算法性能比较的科学性与统计可靠性,本文采用如下检验流程:首先,对各算法 30 次独立运行得到的性能指标数据进行 Shapiro-Wilk 正态性检验;其次,对符合正态分布的数据采用配对 t 检验,对非正态分布数据采用 Wilcoxon 符号秩检验,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$;最后,对存在显著差异的指标计算效应量以评估差异的实际意义。所有算法均在相同的硬件环境与参数设置下运行,以保证比较的公平性。

4.4.1 收敛性与解集分布性

在衡量解集收敛质量的 Hypervolume 指标上,改进 NSGA-Ⅱ 算法显著优于 MOEA/D ($p=0.003$)和 SPEA2 ($p=0.012$),且效应量分别为 $d=1.21$ (大效应)和 $d=0.85$ (中等效应)。这表明本文引入的分层编码和动态约束处理机制有效提升了算法在高约束解空间中的搜索能力,使其获得的 Pareto 前沿更接近真实前沿。在衡量解集分布均匀性的 Spacing 指标上,NSGA-Ⅱ 算法同样显著优于 MOEA/D($p=0.017$),证明其拥挤度距离机制在本问题中能更有效地维持解的多样性,为决策者提供分布更广的方案选择。

4.4.2 中低维问题下的适用性权衡

尽管 NSGA-Ⅲ 算法专为高维多目标优化设计,但在本文的四目标问题上,其与 NSGA-Ⅱ 算法在 Hypervolume 指标上的差异未达到统计显著性($p=$

0.085)。这验证了在目标维度适中(通常为 2~5 个)时,NSGA-Ⅱ 算法的机制已足够有效。此外,NSGA-Ⅲ 算法对参考点设置敏感,实现与调参复杂度更高,且平均运行时间比 NSGA-Ⅱ 算法长约 10% ($p=0.031$)。因此,从性能相当但实现更简、效率更优的工程角度出发^[34],NSGA-Ⅱ 算法是更适配本研究问题的选择。

4.4.3 运行效率与约束处理能力的权衡

MOEA/D 在运行时间上具有显著优势(比 NSGA-Ⅱ 算法快约 10%, $p=0.024$),这源于其通过分解简化问题的计算策略。然而,这种效率提升伴随着解质量的显著下降(Hypervolume 和可行解比例均显著更低)。对于无人机起降点布局这类对方案质量与可行性要求极高的规划问题,保障解的质量和可行性优先级高于微小的计算时间节省。改进 NSGA-Ⅱ 算法在可行解比例上显著高于 MOEA/D($p=0.008$),突显了其动态约束处理机制在处理复杂空间与政策约束方面的有效性。

综合统计检验结果(表 15),改进的 NSGA-Ⅱ 算法在收敛性、解集分布性和复杂约束处理能力 3 个核心维度上,相较于 MOEA/D 和 SPEA2 均表现出统计显著且具有实际意义的优势。与更复杂的 NSGA-Ⅲ 算法相比,则在性能相当的前提下具备更好的鲁棒性与工程实用性。因此,本文的算法改进策略是有效且高效的,为其在后续案例求解中的应用提供了坚实依据。

表 15 不同算法结果对比

Table 15 Comparison of results from different algorithms

性能指标	NSGA-Ⅱ	MOEA/D	SPEA2	NSGA-Ⅲ	NSGA-Ⅱ 对比优势
超指标体系	0.72±0.03	0.68±0.04	0.70±0.05	0.71±0.04	NSGA-Ⅱ 显著优于 MOEA/D ($p=0.003$); NSGA-Ⅱ 显著优于 SPEA2 ($p=0.012$);NSGA-Ⅱ 与 NSGA-Ⅲ 差异不显著 ($p=0.085$)
分布性指标	0.15±0.02	0.21±0.03	0.18±0.04	0.16±0.03	NSGA-Ⅱ 显著优于 MOEA/D ($p=0.017$); NSGA-Ⅱ vs SPEA2 差异不显著 ($p=0.142$)
运行时间/s	218±15	195±18	253±20	240±22	MOEA/D 显著快于 NSGA-Ⅱ ($p=0.024$); MOEA/D 显著快于 SPEA2 ($p<0.001$)
可行解比例/%	92.3	85.7	88.9	90.5	NSGA-Ⅱ 显著高于 MOEA/D ($p=0.008$); NSGA-Ⅱ 与 SPEA2 差异边缘显著 ($p=0.049$)
解集多样性	0.85±0.04	0.78±0.05	0.82±0.06	0.83±0.05	拥挤度机制有效保持多样性
标准差(30 次运行)	±0.03	±0.04	±0.05	±0.04	最稳定,MOEA/D 对权重设置敏感导致波动较大
最优均衡方案	覆盖 88% 成本 3.52 亿	覆盖 86% 成本 3.8 亿	覆盖 87% 成本 3.7 亿	覆盖 87.5% 成本 3.65 亿	找到真正的最优权衡解
约束违反度	0.08	0.15	0.12	0.10	最严格遵守空域等约束
参数敏感性	低 (0.12)	高 (0.18)	中 (0.15)	中 (0.16)	最容易调参,MOEA/D 需精心设置权重向量
高维扩展性	优 (4 目标)	良 (3 目标内)	良 (4 目标)	优 (>4 目标)	MOEA/D 随目标数增加性能显著下降
综合推荐指数	优先推荐	良好	推荐	推荐	NSGA-Ⅱ 明显优于其他 3 种算法

5 结 语

(1)本文针对高密度城区无人驾驶航空器起降点布局规划中存在的多目标冲突(覆盖效率、建设成本、空域风险与环境噪声)^[35]、多类型设施协同(客运、货运、治理)与复杂空间约束等核心难题,基于系统优化思想,构建了一个四目标优化模型,模型创新性地将货运三级物流网络的运营逻辑作为硬约束纳入其中,确保了规划方案的实际可操作性。

(2)鉴于问题的多目标、高约束、非线性特性,选取了NSGA-II算法作为求解框架,改进的NSGA-II算法生成的Pareto前沿解集,系统地表征了在起降点数量、空间分布、功能与规模等多个决策维度上的可行方案集合,揭示了多目标间的权衡关系,为后续的方案比选与决策制定提供了科学依据。

(3)以深圳市南山区为案例的实证研究表明,改进的NSGA-II算法能有效生成分布良好的Pareto解集,清晰揭示了各目标间的权衡关系。明确客运优先、货运优先、均衡及极简4种典型布局方案,并通过敏感性分析,量化了关键参数对规划结果的影响。通过“全局寻优-分区评估-二次适配”的路径,将数学优化结果与南山区前海、科技园、妈湾、深圳湾等不同功能片区的具体需求与约束相结合,形成了从前海商务区“客运优先、枢纽强化”、妈湾港区“货运主导、网络衔接”到深圳湾保护区“极简配置、生态避让”的真正可实施的差异化布局策略。

(4)本文主要贡献在于:①揭示了高密度城区无人机基础设施规划中多目标冲突的本质,并建立了融合多维目标与复杂约束的优化模型,填补了多类型设施协同布局理论框架的空白;②引入多目标协同机制、嵌入空间安全与环境约束、融合多层次运营逻辑,形成了适用于低空基础设施的专用选址模型,并提出了改进的NSGA-II算法,提升了在复杂城市空间优化问题中的求解性能;③形成了一套面向高密度城区、可落地的规划方法,并通过案例验证了其有效性。研究成果可为城市规划部门提供从建模、求解到方案决策的完整技术路径。

(5)不足与展望:本文虽在模型与算法上取得一定进展,但仍存在若干可深化之处:首先,模型对无人机运行环境的假设仍较为理想,未来可开发考虑气象不确定性的鲁棒优化模型,以及探索构建城市尺度的电磁环境仿真模型,将电磁干扰强度作为量化指标纳入优化目标或约束体系。其次,需求预测基于静态数据,后续可引入深度学习技术,建立

动态需求预测模型,增强规划方案的适应性。再次,本研究为静态布局规划,与实时空管系统的结合是实际运营的关键,未来可探索基于实时空域状态的动态调度算法,实现起降点资源的自适应分配。最后,城市数字孪生技术可为起降点布局的全生命周期管理提供可视化与仿真平台,是未来的重要研究方向。

参 考 文 献 :

Reference :

- [1] 张明明.面向城市物流配送的无人机多层次起降站选址研究[D].广汉:中国民用航空飞行学院,2025.
ZHANG Ming-yue. Multi-level drone vertiport location planning for urban logistics distribution[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2025.
- [2] 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.
YANG Jia-tong, LI Zhang-ping. Optimization of location selection for maximum coverage of urban drone landing and takeoff sites based on spatially continuous demand[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(11): 4793-4800.
- [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] HU B, CHEN X Y, HAN S C. Helicopter takeoff and landing point location in cities for emergency services[J]. Applied Sciences, 2022, 12(19): 9570.
- [5] 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):682-687,693.
QIAN Xin-yue, ZHANG Hong-hai, ZHANG Fang, 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, 693.
- [6] 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.
- [7] WANG F, ZHANG H H, DU S, et al. C-SPPO: A deep reinforcement learning framework for large-scale dynamic logistics UAV routing problem[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2025, 38(5): 103229.
- [8] TANG G F, XIAO T Y, DU P F, et al. Improved PSO-

- based two-phase logistics UAV path planning under dynamic demand and wind conditions[J]. *Drones*, 2024, 8(8): 1-27.
- [9] 翁振锋,黄远湖.医院低空飞行器应用前瞻性规划探索:以香港中文大学(深圳)医院为例[J].*中国医院建筑与装备*,2025,26(7):60-65.
WENG Zhen-feng, HUANG Yuan-hu. Exploration on prospective planning of hospital low altitude aircraft application: A case study of Chinese University of Hong Kong (Shenzhen) hospital[J]. *Chinese Hospital Architecture & Equipment*, 2025, 26(7): 60-65.
- [10] 张弛.基于应用场景的浦东新区低空载人航空器起降点布局研究[J].*交通与运输*,2025,41(1):38-43.
ZHANG Chi. Layout of take-off and landing sites for low-altitude manned aircraft in Pudong new area based on application scenarios[J]. *Traffic & Transportation*, 2025, 41(1): 38-43.
- [11] 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.
SHEN Zhou, ZHENG Yuan, ZOU Xiang, et al. Light and small logistics unmanned aerial vehicle takeoff and landing port layout and takeoff/landing strategy design[J]. *Journal of Civil Aviation*, 2024, 8(2): 31-36.
- [12] 覃睿,赖雨馨.基于SLP的物流无人机垂直起降场功能区布局研究[J].*科学技术创新*,2024(13):225-228.
QIN Rui, LAI Yu-xin. Research on functional area layout of logistics UAV VTOL field based on SLP[J]. *Scientific and Technological Innovation Information*, 2024(13): 225-228.
- [13] 覃睿,杨智博.城区物流无人机起降场选址问题研究[J].*科学技术创新*,2024(15):50-54.
QIN Rui, YANG Zhi-bo. Research on the location of urban UAV logistics take-off and landing field[J]. *Scientific and Technological Innovation Information*, 2024(15): 50-54.
- [14] 黄子翼.基于eVTOL的城市垂直交通系统构建[J].*城市交通*,2024,22(4):95-105.
HUANG Zi-yi. Urban vertical travelling system based on eVTOL[J]. *Urban Transport of China*, 2024, 22(4): 95-105.
- [15] FANG S P, RU Y, HU C M, et al. Planning of takeoff/landing site location, dispatch route, and spraying route for a pesticide application helicopter[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 146: 126814.
- [16] 吴迪,朱玉玺,武文龙,等.基于远海岛屿的海上常态巡航救助系统选址-路径优化[J].*交通运输工程学报*,2025,25(6):200-218.
WU Di, ZHU Yu-xi, WU Wen-long, et al. Location-routing optimization for regular maritime cruise and emergency rescue system in remote islands[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2025, 25(6): 200-218.
- [17] 党安荣,张朝阳,王飞飞,等.低空基础设施规划研究进展与展望[J].*西部人居环境学刊*,2025,40(3):25-33.
DANG An-rong, ZHANG Chao-yang, WANG Fei-fei, et al. Progress and prospect of low-altitude infrastructure planning research[J]. *Journal of Human Settlements in West China*, 2025, 40(3): 25-33.
- [18] 李翔,甘惟,申程,等.低空经济视阈下城市空中交通的影响评估与设施更新[J].*规划师*,2025,41(3):33-41.
LI Xiang, GAN Wei, SHEN Cheng, et al. Impact assessment and infrastructural renewal of urban air mobility from the perspective of low-altitude economy[J]. *Planners*, 2025, 41(3): 33-41.
- [19] 黄哲,李善伟,王爱华.基于泛在智联基础设施的低空经济探索与展望:以河北雄安新区为例[J].*城市道桥与防洪*,2025(2):1-6.
HUANG Zhe, LI Shan-wei, WANG Ai-hua. Exploration and reflection on the low-altitude economy based on ubiquitous smart connectivity infrastructure: Taking Xiongan New Area in Hebei Province as an example[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2025(2): 1-6.
- [20] 樊一江,李卫波.前瞻性布局低空基础设施体系的相关建议[J].*中国经贸导刊*,2024(13):34-37.
FAN Yi-jiang, LI Wei-bo. Suggestions on forward-looking layout of low-altitude infrastructure system[J]. *China Economic & Trade Herald*, 2024(13): 34-37.
- [21] 张洪海,夷珈,李娜,等.低空空域容量评估研究综述[J].*交通运输工程学报*,2023,23(6):78-93.
ZHANG Hong-hai, YI Jia, LI Shan, et al. Review on research of low-altitude airspace capacity evaluation[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(6): 78-93.
- [22] 郑文娟,刘正航.垂直起降场地建设趋势及思路[J].*民航管理*,2025(6):17-21.
ZHENG Wen-juan, LIU Zheng-hang. Trends and approaches for vertiport construction[J]. *Civil Aviation Management*, 2025(6): 17-21.
- [23] 娄伟,钟佳珉.低空经济绿色发展问题研究:基于产业链与空间视角[J].*闽江学刊*,2025,17(6):138-146.
LOU Wei, ZHONG Jia-min. Research on green development in the low-altitude economy: An industrial chain and spatial perspective[J]. *Yuejiang Academic Journal*, 2025, 17(6): 138-146.
- [24] 张妙婵,李磊,孙中雷,等.载人eVTOL航空器TC取证适航要求现状及风险挑战[J].*航空工程进展*,2026,17(1):24-38,71.
ZHANG Miao-chan, LI Lei, SUN Zhong-lei, et al. Status of airworthiness requirements, risks and challenges for obtaining TC of person-carrying eVTOL aircraft[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2026, 17(1): 24-38, 71.
- [25] 杜智民,高超,陈泽鹏.智慧交通与低空经济协同发展的空间规划策略研究[J].*长安大学学报(社会科学版)*,2024,26(5):84-100.
DU Zhi-min, GAO Chao, CHEN Ze-peng. Study on spatial planning strategies for the coordinated development of smart transportation and low-altitude economy[J]. *Journal of Chang'an University (Social Science Edition)*, 2024, 26(5): 84-100.

- [26] 黄启翔,江志彬.港口群协同布局评估指标体系构建及深圳港实践探索[J].交通运输工程学报,2026(2):79-93.
HUANG Qi-xiang, JIANG Zhi-bin. Construction of evaluation index system for collaborative layout of port clusters and practical exploration in Shenzhen port[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026(2): 79-93.
- [27] 王彦开,姚玥希,张玉阳,等.末端物流设施的潜在可达性与观测可达性:以广州中心城区快递网点为例[J].地理科学进展,2024,43(6):1133-1144.
WANG Yan-kai, YAO Yue-xi, ZHANG Yu-yang, et al. Potential and observed accessibilities of terminal logistics facilities: A case study of express delivery outlets in the central urban area of Guangzhou City[J]. Progress in Geography, 2024, 43(6): 1133-1144.
- [28] 付义涵.应急物资“无人机+货车”联合配送研究[D].西安:长安大学,2023.
FU Yi-han. Research on “UAV+truck” joint distribution of emergency materials[D]. Xi'an: Changan University, 2023.
- [29] 环境保护部.声环境质量标准:GB 3096—2008[R].北京:中国环境科学出版社,2008.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Environmental quality standards for noise: GB 3096—2008[R]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008.
- [30] 于洋,魏尧,王靖云,等.低空物流关键技术发展及挑战[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2025,22(4):20-56.
YU Yang, WEI Yao, WANG Jing-yun, et al. Key technology development and challenges of low-altitude logistics[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2025, 22(4): 20-56.
- [31] 张子昂,张晓全.基于STPA和模糊贝叶斯网络的大型无人驾驶航空器运行风险分析[J].航空工程进展,2026,17(1):72-80,89.
ZHANG Zi-ang, ZHANG Xiao-quan. Operational risk analysis of large unmanned aerial vehicles based on STPA and fuzzy Bayesian networks[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2026, 17(1): 72-80, 89.
- [32] 郑夏,马良.一种多目标非线性优化的NSGA-II改进算法[J].微电子学与计算机,2020,37(7):47-53.
ZHENG Xia, MA Liang. An Improved NSGA-II algorithm for multi-objective nonlinear optimization[J]. Microelectronics & Computer, 2020, 37(7): 47-53.
- [33] 刘兆才,刘杰.基于改进NSGA-II的多目标无人机集群任务优化方法[J].指挥控制与仿真,2026,48(1):28-35.
LIU Zhao-cai, LIU Jie. Multi-objective task optimization for UAV swarm based on improved NSGA-II[J]. Command Control & Simulation, 2026, 48(1): 28-35.
- [34] 王猛,王道波,王博航,等.基于改进NSGA-II的多无人机三维空间协同航迹规划研究[J].机械与电子,2021,39(11):73-80.
WANG Meng, WANG Dao-bo, WANG Bo-hang, et al. Three-dimensional multi-UAV cooperative path planning based on an improved NSGA-II algorithm[J]. Machinery & Electronics, 2021, 39(11): 73-80.
- [35] 黄启翔,王东.低空经济规划编制特点与技术框架体系[J].城市交通,2025,23(2):29-38.
HUANG Qi-xiang, WANG Dong. Characteristics and technical framework system of low-altitude economic planning[J]. Urban Transport of China, 2025, 23(2): 29-38.