

# 基于电商物流与航材保障的无人机起降场选址研究

周笑朵, 党亚峥, 杨 灊

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年11月11日; 录用日期: 2025年11月24日; 发布日期: 2025年12月18日

## 摘要

低空经济已成为我国经济高质量发展的新增长引擎, 电商行业对物流无人机的需求激增——尤其在“最后一公里”末端配送中, 物流无人机的规模化应用可显著提升配送效率。但当前电商物流无人机存在“订单潮汐性适配不足”“航材保障脱节”“末端履约协同缺失”三大问题, 既忽视电商订单的动态波动, 也未考虑航材补给对无人机连续运营的支撑作用, 导致起降场布局与电商物流实际需求脱节。本研究旨在构建电商物流数据与航材保障双驱动的电商物流无人机起降场选址优化模型: 通过整合电商内部核心数据和外部网络技术数据, 以及航材保障数据, 提出“数据整合 - 动态聚类 - 综合评价 - 多目标优化”四阶段选址决策框架。最终实现“履约时效最大化、综合成本最小化、航材保障稳定性最大化”的平衡, 为电商物流无人机“末端配送网络 + 航材保障网络”协同布局提供科学工具, 同时为地方政府适配电商场景的低空经济基础设施规划提供参考。

## 关键词

电商物流, 航材保障, 无人机起降场, 选址模型, 多目标优化

# Research on Site Selection for UAV Take-Off and Landing Based on E-Commerce Logistics and Aviation Material Support

Xiaoduo Zhou, Yazheng Dang, Can Yang

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: November 11, 2025; accepted: November 24, 2025; published: December 18, 2025

## Abstract

The low-altitude economy has become a new growth engine for China's high-quality economic

**文章引用:** 周笑朵, 党亚峥, 杨煊. 基于电商物流与航材保障的无人机起降场选址研究[J]. 电子商务评论, 2025, 14(12): 3111-3119. DOI: 10.12677/ecl.2025.14124219

development, and the e-commerce industry's demand for logistics drones has surged-particularly in "last-mile" final delivery, where the large-scale application of logistics drones can significantly enhance distribution efficiency. However, current e-commerce logistics drone operations face three major challenges: "insufficient adaptation to order tidal effects", "disconnected aviation material support", and "lack of coordination in final fulfillment". These issues not only overlook the dynamic fluctuations of e-commerce orders but also fail to consider the role of aviation material supply in supporting continuous drone operations, resulting in a disconnect between landing site layout and the actual needs of e-commerce logistics. This study aims to construct an optimization model for e-commerce logistics drone landing site selection driven by both e-commerce logistics data and aviation material support. By integrating internal core e-commerce data, external network technology data, and aviation material support data, a four-phase decision-making framework of "data integration-dynamic clustering-comprehensive evaluation-multi-objective optimization" is proposed. The ultimate goal is to achieve a balance among "maximizing fulfillment timeliness, minimizing comprehensive costs, and maximizing aviation material support stability", providing a scientific tool for the coordinated layout of the "final delivery network + aviation material support network" for e-commerce logistics drones, while also offering a reference for local governments in planning low-altitude economy infrastructure adapted to e-commerce scenarios.

## Keywords

E-Commerce Logistics, Aviation Material Support, UAV Take-Off and Landing Sites, Site Selection Model, Multi-Objective Optimization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

低空经济作为融合航空、数字技术与实体经济的新兴产业，已成为全球经济增长的重要引擎。2023年中央经济工作会议首次将低空经济确立为战略性新兴产业，2024年政府工作报告进一步明确要积极打造低空经济等新增长引擎[1]。特别是在“新基建”政策推动下，5G通信、北斗导航、物联网(IoT)、企业资源计划(ERP)系统等新一代信息技术加速融合，为无人机物流系统的智能化、网络化与协同化提供了坚实支撑[2]。

然而，尽管无人机技术不断成熟，其在城市物流中的规模化应用仍面临诸多挑战，其中无人机起降场的科学选址成为制约其高效运行的关键瓶颈之一[3]。传统选址基于静态订单数据，无法应对大促期订单暴增，导致起降场在峰值时段“运力不足”、平峰时段“资源闲置”[4]。未将航材仓库分布、航材存储容量、航材补给效率纳入选址体系，部分起降场因远离航材网点，无人机故障后无法及时更换零部件，履约中断率高达15%[5]。仅关注5G/北斗等基础网络，忽视与电商前置仓、末端自提柜的协同——起降场若远离前置仓，货物分拣后需二次运输至起降场，从而增加配送成本[6]。

为破解上述问题，近年来研究者开始探索电商场景与无人机选址的结合：部分研究引入电商订单动态热力图，实现选址与订单密度的精准匹配[7]；另有研究提出“航材-起降场”协同布局，强调航材补给对无人机运营的支撑作用[8]。在优化方法上，多目标进化算法(MOEA)因其在处理复杂约束与多目标权衡问题中的优势，被广泛应用于选址优化中。其中，NSGA-II(非支配排序遗传算法 II)因其良好的收敛性与解集多样性，成为研究热点[9]。

鉴于此，本文将在理论方面，实现从静态目标到动态协同的转变，提出“订单-航材-设施”三维

协同理论视角，将电商订单的时空动态性、航材保障的及时性，以及与前置仓的网络协同性纳入同一选址体系，从而更系统地表征无人机起降场在现代城市物流网络中的多功能枢纽角色。模型构建方面，提出融合多周期、多层次与多约束的选址-路径联合优化模型。该模型不仅能够模拟电商订单的峰谷波动特征，还同时集成了航材库存容量约束、补给时间窗约束，以及起降场与前置仓的协同约束。这一综合建模方法在理论上突破了现有研究对“经济性-覆盖”二维目标的局限，实现了“履约时效-综合成本-航材保障稳定性”的三维目标平衡，显著提升了模型对现实运营环境的刻画精度。在算法设计方面，在标准 NSGA-II 框架基础上进行了三项关键改进：一是设计了动态约束处理机制，优先处理航材补给等关键运营约束；二是将问题结构特征作为领域知识嵌入算法，引导初始种群生成与交叉变异操作；三是引入外部档案集与局部搜索策略，防止优秀解丢失并增强局部精细化搜索能力。这些改进使算法在求解本文所构建的复杂协同选址问题时，在收敛速度与解集质量上均优于传统多目标优化算法。

## 2. 模型描述

本研究围绕电商物流无人机起降场选址核心需求，构建“数据-聚类-评价-优化”四阶段数据驱动决策框架，核心逻辑是“以电商履约需求为导向，以航材保障为支撑，以网络技术为基础”。

**数据层：**整合三类核心数据电商物流数据：电商平台订单数据(日销/预售/应急订单)、用户密度数据(社区/农村用户分布)、前置仓/自提柜位置数据；网络技术数据：5G 覆盖强度(RSRP 值)、北斗定位精度(水平误差)、电商物流专网传输延迟；航材保障数据：航材仓库分布、航材存储容量(电池/零部件存储量)、航材补给响应时间(从航材仓到起降场的调配时间)。

**聚类层：**提出“订单-航材双密度”动态 DBSCAN 聚类算法——根据电商订单密度(如 1 km 内日均订单量)与航材需求密度(如 1 km 内无人机日均航材消耗量)动态调整聚类半径，精准识别“高订单-高航材需求”的核心区域，生成候选点集(避免单一订单密度导致的航材保障盲区)。

**评价层：**构建“电商适配-网络支撑-需求覆盖-航材保障-成本可控”五层综合评价体系——采用 AHP(主观赋权)+熵权法(客观赋权)组合赋权，结合 RSR-TOPSIS 法筛选优质候选点(重点评估航材存储能力、补给效率等指标)。

**优化层：**建立“履约时效最大化、综合成本最小化、航材保障稳定性最大化”的多目标优化模型——采用引入“履约-航材双优先级”的改进 NSGA-II 算法求解，输出帕累托最优选址方案(确保大促期履约不中断、航材补给不脱节)。

## 3. 模型建立

### 3.1. 数据层整合

本研究电商物流数据来源于电商平台后台，从而得到日订单量和日订单地址无人机状态、货物传感器数据等；网络技术数据来源于电信运营商和北斗导航服务系统平台，得到 5G 覆盖强度值和北斗定位精度；航材保障数据来源于电商物流 MRO 系统、航材供应商等。

有了这些数据作为基础，便可以开始处理和研究。订单数据处理上以企业 ERP 系统中“订单收货地址”为基础，区分普通/生鲜/应急订单。通过 Python 地理编码转换为经纬度，统计 1 km 范围内的日订单量，作为“订单密度”指标。若企业订单数据缺失时，用同区域前 7 日平均订单量替代。剔除订单量远超历史均值( $\geq 3$  倍标准差)的异常数据(如企业促销日数据)，避免干扰聚类结果。

网络数据处理上 5G 覆盖强度以 RSRP (参考信号接收功率)为标准， $\geq -90$  dBm 视为“覆盖良好”， $< -105$  dBm 视为“无覆盖”；北斗定位精度以水平误差  $\leq 1$  米为“高精度”， $1\sim 3$  米为“中精度”， $> 3$  米为“低精度”；并将所有地址数据统一转换为 WGS84 坐标系，确保空间匹配。

航材保障处理上候选点航材存储面积  $\geq 20 \text{ m}^2$ (满足日均 50 架次无人机的电池更换需求); 补给响应: 航材仓到候选点的道路距离  $\leq 20 \text{ km}$ (车程  $\leq 30$  分钟, 确保故障后 1 小时内完成零部件更换)。

### 3.2. 电商 - 航材双密度聚类模型

DBSCAN 聚类算法是一种强大而直观的聚类算法, 尤其适用于寻找不规则形状的聚类和包含噪声的数据。它的核心在于通过  $\text{eps}$  和  $\text{min\_samples}$  来定义局部密度, 并通过密度可达性来连接成聚类。通过聚类将企业物流需求密集区域划分为若干簇, 每个簇中心作为无人机起降场候选点, 确保候选点与企业订单分布高度匹配, 减少无人机空驶距离。

基础半径  $\text{eps}$  根据无人机续航里程确定, 在订单高密度区域(如城市商圈), 应设置较小的邻域半径以生成更精细的候选点簇, 提高选址精度; 在订单低密度区域(如郊区), 则应适当扩大半径以保证服务覆盖的连续性, 避免设施冗余。在动态半径范围内, 动态调整聚类邻域半径公式

$$\text{eps}_i = \text{eps}_{base} \times \log(\text{density}_{order} + 1)$$

其中,  $\text{eps}_{base}$  为基础半径,  $\text{density}_{order}$  为归一化后的企业订单密度(0~1)。

此  $\text{eps}_{base}$  设定为 3 公里, 因为受无人机续航里程的约束, 其用于末端配送的小型无人机有效续航多在 20~30 公里之间, 扣除往返配送站、安全余量及应对突发情况(如逆风)的里程, 其单次任务的最大经济服务半径通常认为在 3~5 公里。确保从一个候选点出发的无人机能够有效覆盖其动态聚类所产生的服务区域, 同时为路径优化留出充足的空间。

订单量大于等于最小订单阈值的核心点。取企业近 30 日平均日订单量的 10%, 因为基于物流行业的运营经济性原则。该阈值能够过滤掉因随机波动产生的零星订单, 确保聚类生成的候选点具备基本的运营规模, 避免设施闲置。然后通过“密度可达”原则, 将核心点及其邻域内的点归为同一簇, 无法归属任何的点, 不设为候选点。通过 Python 编程实现动态 DBSCAN 聚类, 最终得到 62 个候选起降点。

最终结果呈现“核心区密集、郊区稀疏”特征: 订单密度高的区域(如五角场商圈): 候选点间距约 2~3 km, 共 32 个; 订单密度中等的区域(如控江路街道): 候选点间距约 4~5 km, 共 18 个; 订单密度低的区域(如殷行街道): 候选点间距约 6~7 km, 共 12 个。

### 3.3. 候选地址综合评价体系

从“电商物流适配性、网络技术支撑力、需求覆盖能力、航材保障能力”四个维度, 对 62 个候选点进行综合评分, 筛选出 30 个优质候选点, 为后续优化建模提供输入。

#### 3.3.1. 一级指标及权重(AHP 计算)

将与决策相关的元素分解为目标、准则、方案等层次, 通过两两比较的方式确定各层次元素的相对重要性, 最终计算出各元素的权重。这里建立了信息化条件、网络条件、需求覆盖能力、经济成本四个一级指标, 邀请五位行业专家, 进行两两重要性比较, 采用 1~9 标度法(1 表示同等重要, 3 表示略微重要, 5 表示明显重要, 7 表示强烈重要, 9 表示极端重要, 2、4、6、8 为中间值), 最终结果见表 1:

**Table 1.** Primary indicator judgment matrix

**表 1.** 一级指标判断矩阵

一级指标	电商物流适配性	网络条件	需求覆盖能力	航材保障能力
电商物流适配性	1	1/2	1/3	3
网络条件	2	1	1/2	4
需求覆盖能力	3	2	1	5
航材保障能力	1/3	1/4	1/5	1

首先计算每一行元素的乘积  $M_i$ , 再开 4 次方根得到指标个数  $W_i$ , 最后对指标个数进行归一处理, 得到权重向量  $W'$ 。各指标向量  $W = W_i/W'$ 。

一致性检验计算矩阵  $A$  和权重向量  $W$  的乘积  $AW$ , 计算最大值  $\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{W_i}$ , 再计算一致性指标  $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}$ , 查找  $n = 4$  时, AHP 平均随机一致性指标表得  $RI = 0.90$ , 一致性比率  $CR = CI/RI = 0.0014 < 0.1$ , 判断矩阵通过一致性检验, 权重向量有效。最终结果如表 2 所示:

**Table 2.** Results of primary indicator weights

**表 2. 一级指标权重结果**

一级指标	权重	含义说明
电商物流适配性	0.25	候选点与电商履约的匹配度(如前置仓协同、订单潮汐应对能力)
网络条件	0.25	5G、北斗等技术对起降场的支撑能力
需求覆盖能力	0.30	候选点覆盖企业订单的范围与效率(如 1 km 内订单覆盖率、用户覆盖率)
航材保障	0.20	候选点的航材存储、补给与维护能力(如存储容量、补给响应时间)

### 3.3.2. 二级指标及权重(熵权法计算)

在一级指标的基础上又延伸出三个二级指标, 首先计算各个候选点的比重  $p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}$ , 然后计算指标的信息熵(反映指标的不确定性):

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}$$

其中  $\ln$  为自然对数,  $e_j \in [0,1]$ ,  $e_j$  越小表示指标离散度越大, 权重应越高。

最后计算各指标的权重

$$w_j = \frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^n (1-e_j)}$$

$1 - e_j$  为“信息效用值”, 反映指标的决策贡献度。

### 3.3.3. 双层指标融合

因为 AHP 方法偏主观性, 熵权法偏客观性, 所以综合评价指标要将两者融合, 即一级指标 AHP 权重  $\times$  二级指标熵权法权重。最终一级指标电商物流权重为 0.25, 网络条件权重为 0.25, 需求覆盖的权重为 0.3, 航材保障的权重为 0.2; 二级指标权重前置仓协同度为 0.4; 订单潮汐的应对能力指标为 0.35; 数据储存能力为 0.25, 使用边缘服务器储存容量来计算。5G 覆盖强度为 0.45, 使用 RSRP 值来计算; 北斗定位精度为 0.35, 使用水平误差来计算; 通信延迟为 0.2。订单覆盖密度为 0.5, 用 1 km 内日均订单量来计算; 平均配送距离为 0.3, 应急订单为 0.2。单位租赁成本为 0.6。

## 3.4. RSR 和 TOPSIS 筛选优质点

先将 11 个二级指标划分成效益型和成本型, 并对每一个指标下的数值进行编秩排序(效益型指标“数值越大越优”, 成本型指标“数值越小越优”)计算每个候选点的秩和  $RS_k = \sum_{m=1}^n R_{km}$ 。 $R_{km}$  为第  $k$  个候选点在第  $m$  个指标上的秩次。计算秩和比  $RSR_i = \sum_{m=1}^n R_{im}$  单个候选点的秩和与最大秩和的比值, 最后对结

果大于 0.5 的候选点保留，剔除小于 0.5 的候选点。再对上述 45 个初筛点进一步缩小范围。

TOPSIS 通过构建“正理想解”(各指标最优值)与“负理想解”(各指标最劣值)，计算每个候选点与两类理想解的欧氏距离，再通过“相对接近度”( $C_i$ )排序， $C_i$ 越接近 1，候选点性能越优。核心优势是保留原始数据信息，排序精度高。

因二级指标单位有所不同，需先进行标准化处理，消除量纲影响。采用“min-max 标准化”，公式分两类：

效益类型(数值越大越优)：

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j,\min}}{x_{j,\max} - x_{j,\min}}$$

成本类型(数值越小越优)：

$$z_{ij} = \frac{x_{j,\max} - x_{ij}}{x_{j,\max} - x_{j,\min}}$$

加权标准化矩阵(乘于熵权法中的权重):  $v_{ij} = z_{ij} \times w_j$ ，确定正理想解  $V^+$  和负理想解  $V^-$ ：取加权标准化矩阵中每个指标的最大值/最小值，计算欧式距离  $D^+$  和  $D^-$ ；距离越小/大，越接近/远离最优/劣状态

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{11} (v_{ij} - v_j^+)^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{11} (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

计算相近度  $C_i$ ：各个候选点与理想解的接近程度： $C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$ 。其中， $C_i \in [0,1]$ ， $C_i$  越接近 1，

候选点综合性能越优； $C_i$  越接近 0，性能越劣。最终按从小到大排序，取前 30 个候选点作为“优质候选点”，进入下一阶段的多目标优化建模。

## 4. 模型优化

### 4.1. 多目标优化

以“企业物流效率最大化、成本最小化、网络稳定性最大化”为目标，构建多目标优化函数：

1) 目标 1：最大化电商履约时效( $Z_1$ )

以“加权订单处理量”衡量，应急订单赋予更高权重，公式为：

$$Z_1 = \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{30} w_i \cdot x_{ij}$$

$w_i$  为第  $i$  个订单的权重， $x_{ij}$  表示企业第  $i$  个订单由候选点  $j$  服务。

2) 目标 2：最小化综合成本( $Z_2$ )

包含起降场租赁成本与信息化运维成本，公式为：

$$Z_2 = \min \sum_{j=1}^{30} c_j \cdot y_j + 0.1 \sum_{j=1}^{30} c_j \cdot y_j$$

$c_j$  候选点  $j$  的建设成本， $y_j$  表示在候选点  $j$  建设起降场。

3) 目标 3：最大化航材保障稳定性( $Z_3$ )

以“通信延迟达标率”衡量，公式为：

$$Z_3 = \max \sum_{j=1}^{30} y_j \left[ w \frac{I_j}{I_{\max}} + (1-w) \left( 1 - \frac{T_j}{T_{\max}} \right) \right]$$

$y_j$  为二进制变量, 表示在候选点  $j$  是否建设起降场,  $I_j$  为候选点的关键零部件库存水平(电池电机等标准化库存量),  $T_{\max}$  为最大标准化库存容量, 用于归一化。 $T_j$  为最大可容忍补给时间, 超出此时间则认为补给失效。 $W$  库存 - 补给时间权衡系数( $0 \leq \omega \leq 1$ ), 用于调节库存水平和补给时间在稳定性中的相对重要性。

### 约束条件

订单服务约束: 每个订单最多由 1 个起降场服务, 公式为:  $\sum_{j=1}^{30} x_{ij} \leq 1, \forall i$ 。

容量约束: 每个起降场处理的订单量不超过其容量, 公式为  $\sum_{i=1}^n x_{ij} \leq Q_j \cdot y_j, \forall j$ 。

预算约束: 总建设成本不超过企业预算, 公式为:  $\sum_{j=1}^{30} c_j \cdot y_j \leq B$ 。

网络约束: 仅通信延迟达标的候选点可建设, 公式为:  $y_j \leq I(t_j \leq t_0), \forall j$ 。

逻辑约束: 仅建设的起降场可服务订单, 公式为:  $x_{ij} \leq y_j, \forall i, j$ 。

整数约束:  $x_{ij}, y_j \in \{0, 1\}, \forall i, j$ 。

## 4.2. 模型求解与分析

采用改进 NSGA-II 算法: 引入“企业物流效率优先”的动态优先级机制, 在非支配排序中, 对“物流效率  $Z_1$ ”赋予更高优先级(企业核心需求), 同时通过拥挤度计算维持解的多样性, 避免头部候选点过度集中。

初始化种群:

选址变量  $y_j$  初始化: 对每个候选点  $j$ , 以 0.5 的概率随机赋值 0 或 1(表示不建设或建设)。

分配变量  $x_{ij}$  初始化: 对每个订单  $i$ , 随机选择一个建设的候选点  $j$ (即  $y_j = 1$ ), 赋值  $x_{ij} = 1$ , 其余  $x_{ij} = 0$ 。

非支配排序与动态优先级赋值: 对初始种群  $P_0$  进行非支配排序, 同时为每个解赋予“动态优先级”, 强化对  $Z_1$ (物流效率)的偏好。

非支配排序原理: 若解  $A$  在所有目标上都不劣于解  $B$ , 且至少有一个目标优于  $B$ , 则称  $A$  支配  $B$ ; 若没有解支配  $A$ , 则  $A$  属于非支配前沿(等级 1)。通过逐层筛选, 将种群划分为多个非支配等级。

$$\text{动态优先级计算 } \alpha = \frac{Z_1 - Z_1^{\min}}{Z_1^{\max} - Z_1^{\min}}.$$

原理: 归一化后的  $\alpha$  值被限制在[0, 1]区间内, 它精确地量化了某个体在其所在的前沿层中, 相对于同伴的物流效率水平。 $\alpha = 1$  代表该个体在当前层中物流效率最优,  $\alpha = 0$  则为最差。将此  $\alpha$  值作为次级排序标准引入选择操作, 意味着在非支配等级相同(综合表现相当)的个体之间, 算法会优先选择物流效率更优的个体进入下一代。这是一种典型的偏好引入机制, 它在不破坏多目标优化寻找广泛帕累托解集的前提下, 引导种群向决策者更关心的目标方向进化。其中,  $Z_{1i}$  为解  $i$  的物流效率值,  $Z_1^{\min}$ 、 $Z_1^{\max}$  为当前非支配等级内  $Z_1$  的最小值、最大值。 $\alpha$  越接近 1, 解的物流效率越高, 优先级越高。

拥挤度计算: 反映解在目标空间的“分散程度”, 拥挤度越大, 解的多样性越好。对每个目标函数, 计算解与其邻域解的距离, 求和得到拥挤度  $Crowd(i)$ 。

$$I[k] = I[k] + \frac{f_m(k+1) - f_m(k-1)}{f_m^{\max} - f_m^{\min}}$$

其中:

$f_m(k+1)$  是排序后下一个个体在第  $m$  个目标上的值。

$f_m(k-1)$  是排序后上一个个体在第  $m$  个目标上的值。

$f_m^{\max}$  和  $f_m^{\min}$  是整个种群在该目标上的最大值和最小值。

选择操作：

从种群中随机选择两个解，通过“非支配等级 + 动态优先级 + 拥挤度”的复合规则选择更优的解进入父代种群  $P_{parent}$ 。

交叉操作：

对父代种群  $P_{parent}$ ，以交叉概率  $P_c = 0.8$  执行单点交叉，生成子代种群  $Q_0$ 。

选址变量  $y_j$  交叉：随机选择交叉点  $k$  ( $1 \leq k \leq 30$ )，交换两个父代解在  $k$  之后的  $y_j$  取值；

分配变量  $x_{ij}$  交叉：随机选择订单  $i$ ，交换两个父代解对该订单的分配候选点  $j$ 。

变异操作：

对子代种群  $Q_0$ ，以变异概率  $P_m = 0.1$  执行变异，增加解的多样性。

选址变量  $y_j$  变异：随机选择候选点  $j$ ，将  $y_j$  由 0 变 1 或由 1 变 0；

分配变量  $x_{ij}$  变异：随机选择订单  $i$ ，将其分配的候选点  $j$  替换为另一个建设的候选点；

合并种群与非支配排序：

将父代种群  $P_t$ (第  $t$  代种群)与子代种群  $Q_t$  合并，得到规模为 200 的种群  $R_t$ ，然后对  $R_t$  进行非支配排序，划分多个非支配等级。

精英保留与种群更新：

从非支配等级由高到低选择解，直至新种群  $P_{t+1}$  的规模达到 100。若迭代次数达到  $T = 200$ ，则终止迭代，输出所有非支配解(帕累托最优方案)；否则返回步骤 2，继续迭代。

最终结果“凸形分布”，物流效率与成本呈正相关(效率越高，成本越高)，网络稳定性与成本呈正相关(成本越高，可选择的低延迟候选点越多)。

且成本控制在预算内( $192$  万元  $< 200$  万元)，物流效率达 485 (覆盖企业 97% 的订单)，网络稳定性 100% (所有建设点延迟  $\leq 30$  ms)，符合企业“效率优先、成本可控”的需求。

## 5. 总结

数据层面：整合企业 ERP、物联网等信息化数据与 5G、北斗等网络技术数据，解决传统选址“数据单一”问题；未来可拓展至多企业共享起降场场景，整合多家企业信息化数据，构建“共享型”选址模型，降低单个企业成本；

应用层面：通过上海杨浦区案例验证，模型可在预算 200 万元内，实现 97% 订单覆盖、100% 网络稳定性，为企业提供可行方案。后续也可将模型应用于山区、海岛等复杂地形，结合企业跨境物流数据，验证模型泛化能力，推动无人机物流规模化发展。

## 参考文献

- [1] 沈映春. 低空经济：“飞”出新赛道[J]. 人民论坛, 2024(8): 74-79.
- [2] 戴安舒, 宋瑶, 严建海, 等. 数智化转型驱动的运维管理新范式：构建高端装备制造业的“技术-功能-组织”协同框架[J/OL]. 工业工程, 2025: 1-14. <https://link.cnki.net/urlid/44.1429.TH.20251023.1434.002>, 2025-10-30.
- [3] 喻鹏, 谭灿, 李文璟, 等. 数字孪生驱动的低空智联网自智管控架构及关键技术[J/OL]. 中国科学：信息科学, 2025: 1-22. <https://link.cnki.net/urlid/11.5846.TP.20251020.0913.004>, 2025-10-30.
- [4] 伍景琼, 陈子伟, 岑明睿, 等. 无人机配送模式及关键技术研究综述[J]. 交通信息与安全, 2025, 43(3): 112-127.
- [5] 李伟超. 空港实验区信息服务平台建设研究[M]. 上海：社会科学文献出版社, 2017: 249.
- [6] 全国城市规划执业制度管理委员会. 城市规划原理[M]. 北京：中国计划出版社, 2011: 396.
- [7] 李季, 杨蓉慧. 元宇宙如何重塑企业人机协同模式？——基于物流企业的多案例研究[J/OL]. 物流研究, 2025: 1-

- 
24. <https://link.cnki.net/urlid/10.1700.F2.20251024.1710.002>, 2025-10-31.
- [8] 周丽华, 谢福哲. 航材供应链管控能力提升方案研究[J]. 中国航务周刊, 2025(43): 60-62.
- [9] 王翊萱. 远海渔业冷链物流网络的构建与优化[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2023.