

低空经济背景下无人机物流配送中心 选址分配问题

荆浩^a, 杨瑞^b

(沈阳航空航天大学 a. 经济与管理学院, b. 民用航空学院, 沈阳 110136)

摘要: 为探究低空城市末端配送场景下, 无人机配送中心选址分配的协同优化问题, 在综合考虑地理区域特征、无人机性能及配送时效的基础上, 以沈阳非禁飞区的20所高校为研究对象, 进行模拟仿真实验, 解决该问题背景下的选址分配问题。针对无人机物流配送的特点, 分析配送中心的选址分配问题, 考虑特定区域环境及无人机的特点, 以总成本最小为目标函数构建多约束条件的数学模型。通过手肘聚类方法确定配送中心的数量, 并结合模拟退火优化算法得到在总经济成本最小目标下的最优配送中心坐标及分配方案, 考虑配送中心的负载率与容量约束对配送中心位置的影响。使用Python对现实环境进行模拟仿真实验, 求出算法的最优解即最优选址分配方案。

关键词: 低空经济; 无人机物流配送; 选址分配问题; 手肘聚类法; 模拟退火优化算法

中图分类号: U8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1248.2026.04.007

The location-allocation problem of unmanned aerial vehicle logistics distribution centers under the background of low altitude economy

JING Hao^a, YANG Rui^b

(a. College of Economics and Management, b. College of Civil Aviation, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: To investigate the collaborative optimization problem of unmanned aerial vehicle (UAV) distribution center location-allocation in the context of low-altitude urban last-mile delivery, the simulation experiments were conducted on 20 universities within the no-fly zone-exempt areas of Shenyang, which comprehensively considered geographical regional characteristics, UAV performance attributes, and delivery time constraints to address the location-allocation problem within this specific operational context. The characteristics of unmanned aerial vehicle logistics distribution were examined and analyzed the location-allocation problem of distribution centers. Considering specific regional environments and the unique features of unmanned aerial vehicle, a multi-constraint mathematical model was constructed with the objective of minimizing total costs. The elbow clustering method was employed to determine the number of distribution centers, while a simulated annealing

收稿日期: 2025-05-12 修回日期: 2025-09-15 接受日期: 2025-09-17

基金项目: 辽宁省科技厅公益基金(项目编号: 2026JH4/10100041)。

作者简介: 荆浩(1978—), 男, 辽宁辽阳人, 教授, 博士, 主要研究方向为低空物流运营与优化, E-mail: Jing_16@163.com。

optimization algorithm was applied to derive optimal coordinates and allocation scheme under the goal of minimizing total economic costs. The influence of distribution center load rates and capacity constraints on location selection was also considered. Finally, a simulation experiment based on real-world conditions was conducted using Python to obtain the algorithm's optimal solution—namely, the best location-allocation scheme.

Key words: lowaltitude economy; unmanned aerial vehicle logistic distribution; location-allocation problem; elbow clustering method; simulated annealing optimization algorithm

低空经济是以低空空域为依托、以通用航空产业为主导,辐射带动效应强、产业链较长的综合经济形态^[1]。2024年,低空经济首次被写入政府工作报告,标志着其作为战略性新兴产业的重要性,政府也从多方面发力推动低空经济的高质量发展^[2]。低空经济+物流是目前商业应用最广泛的场景,即利用无人机完成货物的配送。在实际应用领域中,低空物流逐渐展现出其强大的潜力,并迅速成为一种新型的物流解决方案^[3]。与传统物流的运输模式相比,低空物流的优势更为突出,但同时也面临着许多新的挑战与机遇^[4]。低空物流的发展得到了国家和地方政府的高度重视和政策支持,与此同时,无人机成为了低空物流的主要运输工具^[5]。选址问题是无人机物流在低空经济发展中探索可持续发展的路径,对推动低空经济高质量发展具有重要意义^[6]。

现有研究中,Dukkanci等^[7]对无人机交付相关的基本设施选址问题进行了全面的文献调查,为选址问题在不同领域的研究中提供联系。Chen^[8]利用改进鲸鱼优化算法,提高了传统算法的全局搜索能力和收敛精度,有效计算最优配送中心位置。谢文茜^[9]针对无人机在城市物流环境下的配送中心选址分配问题,综合运用遗传算法和粒子群算法求出最优选址方案。Liu等^[10]聚焦冷链物流的选址-路径问题,强调了减少碳排放和绿色能源转型的意义。从低空经济发展整体态势来看,无人机配送产业应用前景广阔^[11],但以无人机为运输工具考虑配送中心选址的相关研究仍然不足。

1 模型建立

1.1 问题描述

无人机物流配送的一个关键点在于配送中心的选址与分配,这是有效开展场景示范的主要问题之一。本文以沈阳市非禁飞区的20所高校为需求点,通过走访得到某日20所高校顺丰快递的小件快递大致数量,以总经济成本为目标,在多条件约束下确定最优选址分配方案。

1.2 条件假设

为便于研究,本文条件假设如下:1)每个需求点仅由一个无人机物流配送中心负责配送,每个配送中心可以服务多个需求点;2)无人机运输途中速度均匀,不受自然天气的影响;3)仓库容纳的小件快递尺寸均匀;4)大件快递由电车或卡车配送,无人机仅配送小件快递;5)每架无人机仅负责配送一个需求点,每个需求点可由多架无人机服务。

1.3 构建函数

本文所建立的数学模型以经济总成本 C 最小为目标,其中包括配送中心成本 C_1 、无人机成本 C_2 两个部分。

$$\min C = C_1 + C_2 \quad (1)$$

$$C_1 = \sum_{j \in G} x_j (f + O) \quad (2)$$

式中: C 为配送中心的总费用; f 和 O 分别为建设费用和设备运行费用; i 和 j 分别为需求点和配送中心的序号,其中 $x_j=1$ 或 0 即代表是否是在 j 点处建设配送中心。

$$C_2 = \sum_{j \in G} \sum_{i \in D} \left\lceil \frac{[M_i/m]}{L/2d_{ji}} \right\rceil \cdot p + 2 \sum_{j \in G} \sum_{i \in D} \left\lceil \frac{[M_i/m] \cdot 2d_{ji}}{L} \right\rceil C_r \quad (3)$$

式中: C_2 为无人机的总费用, 包括完成运输所需要租赁的无人机费用及电池费用; M_i 为需求点 i 的需求量; m 为无人机最大载重质量; L 为无人机满载的最大航程; d_{ji} 为配送中心 j 与需求点 i 之间的距离; C_r 为无人机每小时的租赁成本; p 为无人机电池单价。式(3)共由两部分组成, 第一部分为无人机完成配送所需电池的总费用, 第二部分为为无人机完成配送的租赁费用。

1.4 约束条件

1) 每个需求点仅由一个配送中心服务。 $y_{ji}=1$ 或 0 代表配送中心 j 是否完成对需求点 i 的配送。

$$\sum_{j \in G} \sum_{i \in D} y_{ji} = 1 \quad (4)$$

式中: D 和 G 分别为需求点和配送中心的集合。

2) 无人机配送中心服务的需求点的货物量总和要不大于其配送中心的容量, 但要不小于配送中心的最低负载率 ω 下的最低负载量。

$$\omega \sum_{j \in G} V_j \leq \sum_{i \in D} x_i \cdot V_i \leq \sum_{j \in G} V_j \quad (5)$$

式中: V 表示该点的货物量。

3) 每架无人机承载货物进行运输时的往返航程距离要小于无人机的最大航程限制。

$$2 \sum_{j \in G} \sum_{i \in D} y_{ji} d_{ji} \leq L \quad (6)$$

4) 无人机每次配送所承载的货物质量必须不大于无人机最大载重量。

$$\sum_{j \in G} \sum_{i \in D} M_{ji} \leq m \quad (7)$$

5) 无人机每次完成配送后必须由服务的需求点返回到原配送中心, 不得回到其他配送中心。

$$\sum_{i \in D} y_{ij} = \sum_{i \in D} y_{ji} = 1 \quad (8)$$

6) 无人机在每次配送前的电量确保能完成该次往返航程的运输, E^k 为第 k 次飞行时无人机的电量。

$$\sum_{j \in G} \sum_{i \in D} (E_{ji}^k + E_{ij}^k) \leq E_0^k \quad (9)$$

7) 每个配送点的服务时间不得超过 2 h。

$$\max \sum_{j \in G} \sum_{i \in D} \frac{[M_i/m] \cdot 2d_{ji}}{v} \leq 2 \quad (10)$$

式中: v 为无人机飞行速度。

8) 配送中心不得与需求点重合, 其最小距离为 0.1 km。

$$\min \sum_{j \in G} \sum_{i \in D} d_{ji} \geq 0.1 \quad (11)$$

1.5 选址因素分析

针对城市场景下多无人机的物流配送任务分配问题^[12-13], 首先需考虑多重因素以确保配送中心布局的合理性。在本文的问题背景中, 以物流总成本最小为核心目标, 考虑无人机配送中心的容量及最低负载率的变化对最终选址结果的影响。容量约束会限制无人机配送中心的服务范围, 将出现短距离少频次或长距离多频次的运输情形^[14], 在保证总成本目标最小的同时, 不同的容量约束会得到不同的选址方案。配送中心最低负载率^[15]是物流行业中非常重要的运营约束条件, 对选址决策产生系统性的影响, 当最低负载率较低时, 物流中其他设备、人力成本会增加, 同时也会造成物流资源的浪费。针对这两个因素的约束函数如式(5)所示, 相关问题将在 3.3 节中给出具体分析, 从而讨论不同约束条件下对最终选址结果的影响。

2 算法设计

2.1 算法描述

聚类分析的目的是将数据分成若干个簇, 使得簇内数据点的相似度较高, 簇之间的数据点相似度较低。但在实际应用中, 如何确定最佳的聚类数量(簇的数量)是一个关键问题, 手

肘法是一种简单而有效的方法。故本文先通过手肘法确定配送中心的最佳数量。

模拟退火(simulated annealing, SA)算法是一种概率算法,用于在大搜索空间内寻找问题的近似最优解。该算法通过模拟物理中的退火过程,在搜索过程中引入随机性,避免陷入局部最优解,从而提高找到全局最优解的概率。

2.2 算法方案

2.2.1 手肘法确定聚类数量

手肘法是基于聚类的总平方和确定最佳聚类数量。由于本文数据是经纬度坐标,故使

$$d = 2R \arcsin \left[\sqrt{\sin^2\left(\frac{\Delta \text{lat}}{2}\right) + \cos(\text{lat1})\cos(\text{lat2})\sin^2\left(\frac{\Delta \text{lon}}{2}\right)} \right] \quad (13)$$

式中: k 为聚类的数量; C_s 为第 s 个簇; μ_s 为第 s 个簇的中心(经纬度坐标); x 为簇内的数据点(经纬度坐标); $\text{haversine}(x, \mu_s)$ 为数据点 x 和簇中心 μ_s 之间的球面距离; R 为球面半径(取6 371公里); Δlat 为任意两点之间的纬度差; Δlon 为任意两点之间的经度差。结合各高校经纬度坐标点与式(12)、(13)得到聚类数量 k 与WCSS的图像,手肘法求取 k 值,如图1所示,本文中 k 的取值为拐点4。

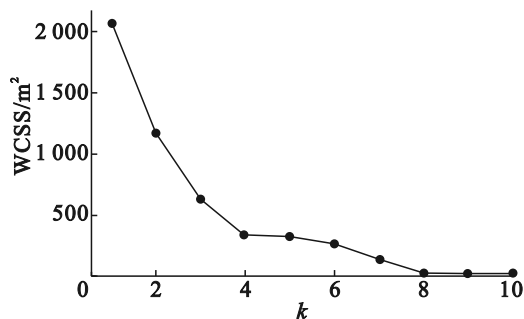


图1 手肘法求取 k 值

2.2.2 基于模拟退火的优化算法

SA算法通过逐渐降低温度控制搜索过程,能够在早期接受较差的解以避免陷入局部最优。该算法适用于解决本文的在多约束条件下选址分配的组合优化问题,具体实现步骤如下:

1)设置算法参数。初始温度设置为1 000并根据运行次数进行调整,确保多次运行具有

用Haversine公式来计算坐标间的球面距离。簇内平方和(within-cluster sum of squares, WCSS)及Haversine的计算公式分别如式(12)、(13)所示。利用Python绘制出聚类数量与WCSS的关系图像,在曲线中可以找到一个“肘点”,即在这个“肘点”后可明显发现曲线下降低速率放缓,而肘点对应的数量则是最终需要确定的最佳聚类数量。

$$\text{WCSS} = \sum_{s=1}^k \sum_{x \in C_s} [\text{haversine}(x, \mu_s)]^2 \quad (12)$$

不同的搜索范围;温度衰减系数 α 设置为0.99;最小温度设置为 10^{-8} ,当温度低于此值时停止迭代,最大迭代次数设置为2 000,以防止无限循环。

2)初始解 x_k 生成。在需求点内随机生成4个配送中心位置,并确保每个配送中心与所有需求点保持最小距离0.1 km,该操作最多尝试1 000次,同时计算初始解下的目标函数值 $f(x_k)$ 。

3)生成新解 x_{new} 。随机选择一个配送中心,对其坐标进行小范围扰动,如果扰动后的配送中心不满足约束,则尝试在附近重新生成,最多尝试10次,同时计算新解的目标函数值 $f(x_{\text{new}})$ 。

4)接受准则。根据Metropolis准则决定是否接受新解,接受概率如式(14)所示。

$$P = \exp\left(\frac{f(x_k) - f(x_{\text{new}})}{T_k}\right) \quad (14)$$

5)迭代结束。重复上述过程,直到温度小于最小温度或达到最大迭代次数。

3 算例分析

3.1 案例描述与参数设置

本文基于Python对非禁飞区的高校无人机配送中心选址分配问题进行仿真,通过百度

地图的坐标拾取器获得高校坐标,经走访获得各高校某日的顺丰小件快递收件数量,高校信

息数据如表 1 所示。

表 1 高校信息数据

序号	经度/(°)	纬度/(°)	快递量/件	序号	经度/(°)	纬度/(°)	快递量/件
1	123.421 913	41.930 841	100	11	123.452 347	41.774 347	480
2	123.393 411	41.932 636	1 300	12	123.522 459	41.749 330	1 360
3	123.489 738	41.962 089	3 600	13	123.500 306	41.734 094	1 940
4	123.413 146	41.932 102	2 350	14	123.578 261	41.832 387	3 420
5	123.424 947	41.925 672	1 050	15	123.411 052	41.689 361	460
6	123.422 375	41.914 407	2 850	16	123.395 991	41.678 885	1 030
7	123.415 043	41.894 656	900	17	123.240 550	41.753 346	990
8	123.465 599	41.830 000	750	18	123.255 149	41.742 422	1 660
9	123.436 655	41.782 261	770	19	123.424 827	41.771 164	5 500
10	123.511 703	41.754 783	310	20	123.488 406	41.772 855	810

通过查阅顺丰物流官网及走访其物流企业,最终选取型号为丰舟 90 无人机,其参数设置如表 2 所示。同时,理想化每小件快递质量平均为 1 kg,经询问该企业相关人员了解到,对于高校快递配送的情形适宜建造容积为 400 m³的配送中心,可容纳约 12 000 件的小件快递。为突出无人机的时效性,要求配送在 2 h 内完成。由于丰舟 90 无人机在市场中的租赁费用未公

开,故本文参考《2023 年中国物流无人机发展白皮书》中 20 kg 级无人机综合运营的租赁费用 3 500 元/h。综合第三方行业分析与车辆运输平均装载率,预测出顺丰配送中心在核心城市枢纽的最低负载率通常在 50%~60%,即最低阈值为 50%~60%,故本文中取 55% 为配送中心的最低负载率,文中在合理的最低负载率范围内,研究最低阈值变化对最终选址结果的影响。

表 2 丰舟 90 无人机参数设置

名称	数值	名称	数值
无人机配送中心建设成本/万元	10	无人机每小时租赁费用/元	3 500
无人机巡航速度/(km·h ⁻¹)	108	无人机电池单价/元	2 000
无人机最大载重质量/kg	20	无人机最大起飞质量/kg	88
满载最远航程/km	65	配送中心最低负载率/%	55

3.2 结果分析

基于上述实例背景和参数设置,结合算法得到的最优无人机配送中心选址分配结果如图 2 所示,SA 算法收敛曲线如图 3 所示。在图 3 中可观察到该优化算法在迭代 1 000 次后总成本趋于平稳,得到最小成本下的选址分配方案。

由手肘聚类法知本文案例背景下要选取 4

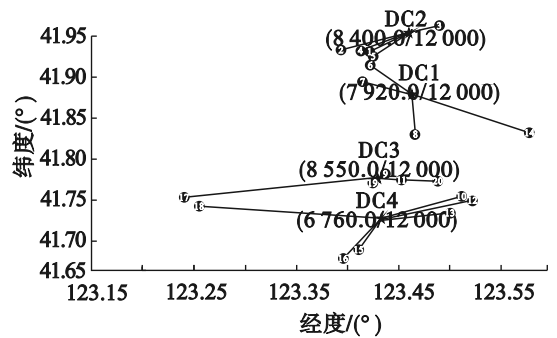
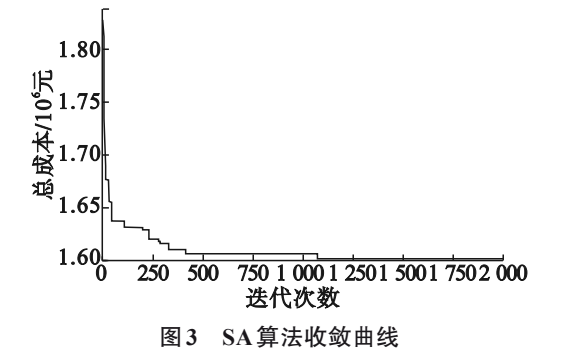
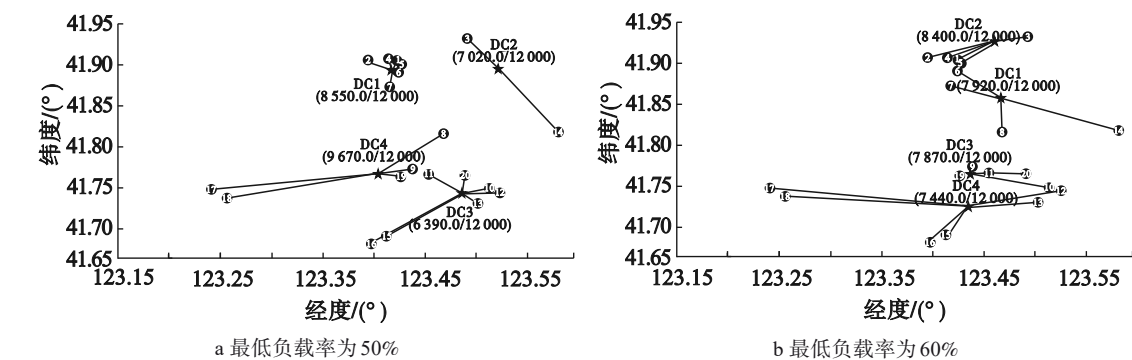


图 2 最优无人机配送中心选址分配结果



个无人机物流配送中心点,其坐标点分别为(123.466 691 36, 41.881 014 06)、(123.466 880 88, 41.952 787 18)、(123.433 129 08, 41.772 204 6)、



经计算,当配送中心最低负载率减小到50%时,最小总成本 C 为146.2万元,此时新的配送中心经纬度坐标分别为(123.416 024 93, 41.916 213 12)、(123.520 380 78, 41.919 396 69)、(123.485 575 77, 41.748 158 81)、(123.403 023 82, 41.775 476 94);当最低负载率增加到60%时,最小总成本 C 为161.2万元,该最低负载率下的配送中心经纬度坐标分别为(123.466 045 1,

(123.436 615 45, 41.740 479 16),经计算,该方案下的总成本 C 为160.1万元,其中配送中心成本 C_1 为40万元,无人机成本 C_2 为120.1万元。

3.3 参数约束分析

3.3.1 配送中心最低负载率约束

配送中心的最低负载率是评价仓库运作效率的一个重要指标,在本文问题背景下,保持其他参数均不变,对减小配送中心的最低负载率至50%、增大配送中心的最低负载率至60%,分别进行研究,不同最低负载率下的最终选址分配结果如图4所示。

41.879 844 63)、(123.460 121 65, 41.952 965 01)、(123.435 587 45, 41.769 925 05)、(123.435 255 97, 41.737 645 07)。

3.3.2 配送中心容量约束

当其他参数不变时,在满足配送中心容量大于其服务需求点的需求量之和且大于配送中心最低负载率的约束下,配送中心容量分别减少或增加至11 000件和13 000件。不同容量约束下最终选址分配结果如图5所示。

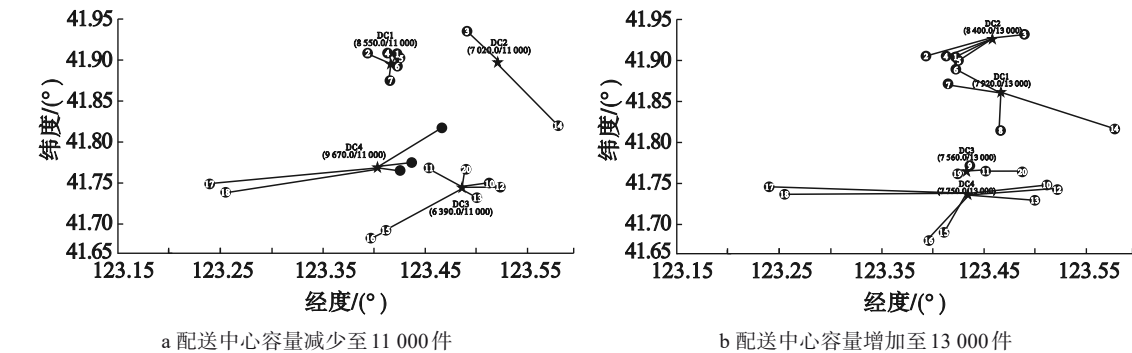


图 5 不同容量约束下最终选址分配结果

经计算,当配送中心容量减少至11 000件时的选址分配方案恰与容量为12 000件、配送中心最低负载率为50%时的方案一致。当配送中心容量增加至13 000件时,最小总成本 C 为160.9万元,此时新的配送中心的经纬度坐标分别为(123.466 290 53, 41.880 963 72)、(123.458 485 3, 41.955 120 23)、(123.433 317 27, 41.774 166 18)、(123.434 401 82, 41.740 998 6)。

由此,经对配送中心的容量约束与最低负载率约束的灵敏度分析发现,在不同情形下的最终选址结果会随着参数约束的改变而发生变化。因此,要根据实际情况进行更合理的选址布局。

4 结论

4.1 研究结论与研究局限

本文以经济总成本最小为目标,模拟了沈阳市20所高校的无人机配送中心选址分配过程,考虑多约束条件下的目标函数、构造数学模型,结合手肘聚类与模拟退火的优化算法对其进行求解。最后对配送中心的最低负载率和容量约束分别进行灵敏度分析,得到不同情况下最小成本的选址分配方案。但现有研究仍存在以下不足之处:首先,文中仅为每个无人机服务一个需求点的情形,未考虑服务多个需求点的复杂问题。其次,本文实验数据为随机单日数据,并未以月均数据进行模拟实验验证本文算法的可行性与有效性,在未来研究中将深入考虑更为复杂的因素。

4.2 实践启示与未来展望

基于上述研究内容,针对无人机配送中心选址问题从政府与企业两个层面提出如下建议:

1)政府层面:首先,政府可制定无人机配送等专项政策、为实施相关政策地区提供优惠补贴,促进区域的均衡发展。其次,为得到更合理、精准的无人机配送中心选址方案,政府

可公开人口密度、交通流量、飞行标准等公共数据。最后,对使用新能源无人机的企业可给予相关的税收减免,促进无人机配送模式的大规模普及。

2)企业层面:第一,物流企业应根据需求导向精准分析客户、订单密度的分布,确保无人机配送中心覆盖较多的需求点。第二,合理平衡物流成本与配送效率,避免因追求较低成本而导致客户满意度的降低。第三,由于无人机的特殊性,需考虑选址必须符合低空空域的管制要求。

作为低空经济的核心应用领域,低空物流聚焦于低空无人机物流配送场景,而物流配送中心的选址是现代物流配送系统中的一个关键问题。合理的配送中心布局能够优化物流网络的响应能力、全链条控制物流成本及提升物流网络的服务能力和时效性,无人机配送模式还能够减少传统燃油车排放,助力“双碳”战略,更好地响应国家可持续发展的号召。此外,构建无人机配送中心并将其融入到智慧城市基础建设中去,也需要综合考虑无人机运行限制和起降场特点,归纳选址影响因素。在政府与企业的协同下,共同推动无人机配送的规模化应用,促进我国低空物流的迅猛发展。

参考文献(References):

- [1] 张永康.低空经济视角下物流产业高质量发展策略研究[J].物流科技,2025,48(5):35-36.
- [2] 欧阳桃花.低空经济的技术创新与场景创新[J].人民论坛·学术前沿,2024(15):57-68.
- [3] 嵇海霞.低空物流:新质生产力推动下的物流行业变革[J].中国商论,2024,33(23):81-84.
- [4] 李芷巍,李峻磊.低空飞行在航空物流领域的机遇和挑战[J].空运商务,2024(12):19-22.
- [5] 梁狄,许芳,李雅琦,等.低空经济背景下城市区域轻型物流无人机技术发展策略研究[J].企业科技与发展,2025(2):1-7.
- [6] 贾荷婷.无人机物流在低空经济发展中的挑战和应对[J].中国航务周刊,2025(4):51-53.

- [7] Dukkanci O, Campbell J F, Kara B Y. Facility location decisions for drone delivery: a literature review [J]. *European Journal of Operational Research*, 2024, 316(2): 397–418.
- [8] Chen X J. Location strategy for logistics distribution centers utilizing improved whale optimization algorithm [J]. *Journal of Intelligent Systems*, 2024, 33: 20230299.
- [9] 谢文茜. 城市物流无人机配送中心选址-分配问题研究[J]. *物流工程与管理*, 2024, 46(6): 83–86.
- [10] Liu D C, Zhang Y X. Research on location and routing for cold chain logistics in health resorts considering carbon emissions [J]. *Sustainability*, 2024, 16(15): 6362.
- [11] 刘玉勉. 低空经济背景下无人机配送产业发展研究[J]. *中国物价*, 2025(1): 45–50.
- [12] 杨新涅, 张冰, 张召悦. 城市场景下多无人机物流配送任务分配研究[J]. *综合运输*, 2025, 47(1): 143–150.
- [13] 傅惠, 崔煜, 赵佳虹, 等. 低空无人机物流配送研究与应用综述[J]. *工业工程*, 2025, 28(1): 9–21.
- [14] Mei Z M, Chi X X, Chi R. Research on logistics distribution center location based on hybrid beetle antennae search and rain algorithm [J]. *Biomimetics*, 2022, 7(4): 194.
- [15] 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.
- (责任编辑: 刘划 英文审校: 曹依霏)