

低空经济时代电商末端物流的配送路径优化

宣晓东, 申 彦

江苏大学管理学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2026年6月4日; 录用日期: 2026年6月18日; 发布日期: 2026年7月28日

摘 要

在低空经济快速崛起、电商物流配送向智能化、无人化升级的背景下, 无人机作为低空物流的核心载体, 其路径规划的合理性直接影响电商末端配送的效率、成本与安全性, 更是推动低空经济与电子商务深度融合的关键技术支撑。本文针对电商末端物流配送场景下的三维无人机路径规划问题, 以飞行距离、高度变化、安全和平滑性为核心约束条件, 构建多目标成本函数并设计改进淘金优化算法(IGRO)用于寻找最优配送路径。通过仿真实验验证IGRO相较于原淘金优化算法, 路径规划总成本平均减少40.1%。且相较于其他对比算法, 不仅具备最优的路径规划效果, 还拥有最快的收敛速度, 充分证明本文构建的路径规划模型与改进算法的有效性和实用性, 助力打通低空经济背景下电商末端配送最后一公里瓶颈。

关键词

电商配送, 低空经济, 无人机物流, 路径优化, 淘金优化算法

Delivery Route Optimization for E-Commerce Last-Mile Logistics in the Era of Low-Altitude Economy

Xiaodong Xuan, Yan Shen

School of Management, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Received: June 4, 2026; accepted: June 18, 2026; published: July 28, 2026

Abstract

Against the backdrop of the rapid rise of the low-altitude economy and the upgrading of e-commerce logistics distribution towards intelligence and unmanned operation, drones, as the core carrier of low-altitude logistics, their reasonable path planning directly determines the efficiency, cost and safety of e-commerce terminal distribution, and is also a key technical support for promoting

the in-depth integration of the low-altitude economy and e-commerce. Aiming at the 3D UAV path planning problem in the scenario of e-commerce terminal logistics distribution, this paper takes flight distance, flight altitude, flight safety and smoothness as the core constraints, constructs a multi-objective cost function and designs an Improved Gold Rush Optimization algorithm (IGRO) to find the optimal distribution path. Simulation experiments verify that compared with the original Gold Rush Optimization (GRO) algorithm, the total path planning cost of the IGRO algorithm is reduced by an average of 40.1%. Moreover, compared with other comparative algorithms, it not only has the optimal path planning effect, but also has the fastest convergence speed, which fully proves the effectiveness and practicality of the path planning model and improved algorithm constructed in this paper, helping to break through the bottleneck of the last mile in e-commerce terminal distribution under the background of the low-altitude economy.

Keywords

E-Commerce Delivery, Low-Altitude Economy, UAV Logistics, Path Optimization, Gold Rush Optimizer

Copyright © 2026 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

随着我国低空经济发展规划落地实施、空域管理机制持续完善, 无人机配送作为一种创新的物流方式, 已经逐渐受到电商行业的关注[1]。从国际视角看, 美国、欧洲国家也在无人机电子商务即时配送领域开展了大量探索性实践[2]; 同时国内企业也相继开始应用, 如阿里巴巴、京东已经在城市和农村地区对无人配送进行了测试, 美团也正在研究基于无人机配送外卖[3]等。尤其在低空经济与电子商务深度融合的背景下, 无人机配送模式凭借其空域通行效率高、避开地面交通堵塞、地形适应性强、运营成本低、灵活度高的核心优势, 不仅有助于解决城市物流末端配送和偏远物流进村最后一公里难题[4], 还能加速电商末端配送向智能化、无人化与便捷化转型, 更能推动低空经济产业化落地、促进电商产业与低空经济协同高质量发展。

在无人机逐渐成为电商末端物流即时配送的新兴载体的同时, 相关学者也纷纷尝试在技术层面上研究如何为无人机规划出满足配送场景需求的三维路径。早期相关研究往往满足于二维平面中寻求几何距离最短路径, 却忽略了飞行过程中面临着高度复杂的空中环境, 包括建筑物、障碍物等潜在威胁[5]。无人机开展电商末端配送作业时除了需要考虑与配送时效、运营成本直接关联的飞行距离因素外, 还必须同时满足高度变化约束、转角平滑性要求与防碰撞安全准则, 否则将严重影响订单配送时效与运行安全, 从而无法满足电商用户对末端配送的精准化、高效化需求。对此, 国内外学者正致力于改进与设计各类智能优化算法以求解这种高维、多约束的复杂路径优化问题。Jeong 等[6]结合无人机禁飞区限制, 采用中心性策略与局部搜索算法实现路径规划的场景化适配。程洁等[7]面向城市超低空物流场景, 提出考虑动态障碍物的最小风险路径规划算法。苏子美等[8]聚焦于破解三维路线方案单一难题, 通过融合基于集的粒子群与综合学习粒子群并改进速度更新公式, 显著增强最优解的多样性。杜云等[9]则采用分层规划思路, 先基于改进粒子群算法完成无人机航线初步规划, 再结合高斯伪谱法对航线进行二次优化与重规划, 从而在多目标侦察任务中实现航线规划的快速性、精确性与最优性协同。梁海军等[10]融合蜘蛛蜂优化算法的狩猎与筑巢行为以及差分进化算法的差分变异和交叉机制, 提升算法的全局搜索与局部开发能力。

陆俊良等[11]提出基于多策略改进的秘书鸟算法,通过随机惯性权重策略、鲸鱼算法包围者策略与凸透镜成像反向学习策略,改善算法的收敛精度与稳定性。上述研究通过对智能优化算法进行关键改进,在满足适配无人机配送场景下的三维路径规划约束条件同时,实现收敛时间缩短与局部最优规避的双重目标,为后续研究提供了重要参考。

基于以上文献研究,本文针对电商末端物流无人机三维路径规划的实际需求,在标准淘金优化算法[12]框架基础上,提出一种多策略改进淘金优化算法(Improved Gold Rush Optimizer, IGRO),该算法综合考虑飞行距离、高度变化、安全避障、转角平滑多重约束,引入多项核心改进策略,旨在提升初始解质量、平衡算法全局探索与局部开发能力,并加速收敛进程。

2. 问题描述和模型建立

本文综合考虑无人机飞行距离、高度变化、转角平滑和安全约束构建多目标无人机三维路径规划模型,定义适应度函数 $C(X_i)$ 由 C_1 至 C_4 组成,分别对应距离、高度、平滑和安全代价,如下式(1)至(10)所示。

$$C(X_i) = \sum_{n=1}^4 \omega_n C_n(X_i) \quad (1)$$

$$C_1(X_i) = \sum_{j=1}^{n-1} L_{ij} \quad (2)$$

$$L_{ij} = \sqrt{(x_{i,j+1} - x_{ij})^2 + (y_{i,j+1} - y_{ij})^2 + (z_{i,j+1} - z_{ij})^2} \quad (3)$$

$$C_2(X_i) = \sum_{j=1}^n H_{ij} \quad (4)$$

$$H_{ij} = \begin{cases} \left| h_{ij} - \frac{h_{\max} + h_{\min}}{2} \right|, & \text{if } h_{\min} \leq h_{ij} \leq h_{\max} \\ \infty, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$C_3(X_i) = a_1 \sum_{j=1}^{n-2} \phi_{ij} + a_2 \sum_{j=1}^{n-1} |\theta_{ij} - \theta_{i,j+1}| \quad (6)$$

$$\Phi_{ij} = \arccos \left(\frac{\overline{P_{ij} P_{i,j+1}} \cdot \overline{P_{i,j+1} P_{i,j+2}}}{\|P_{ij} P_{i,j+1}\| \cdot \|P_{i,j+1} P_{i,j+2}\|} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (7)$$

$$\theta_{ij} = \arcsin \left(\frac{z_{i,j+1} - z_{ij}}{L_{ij}} \right) \quad (8)$$

$$C_4(X_i) = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{o=1}^O S_m \quad (9)$$

$$S_m = \begin{cases} 0, & \text{if } d > D + R + s \\ (D + R + s) - d, & \text{if } D + R < d \leq D + R + s \\ \infty, & \text{if } d \leq D + R \end{cases} \quad (10)$$

其中,决策变量 X_i 表示无人机第 i 条飞行路径,由若干个路径点组成。 C_n 和 ω_n 分别表示第 n 项成本函数和其权重系数。点 $P_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ 表示无人机第 i 条飞行路径中第 j 个路径点位置,任意2个路径点间距离 L_{ij} 为第 j 个路径段距离,无人机第 i 条飞行路径 X_i 通过多个飞行段连接来表示。 h_{ij} 表示无人机在任意

路径点处相对于地面的飞行高度, $h_{\min}$ 和 $h_{\max}$ 分别为无人机的飞行高度上下限值, H_{ij} 为当前路径段的高度成本。水平转向角 ϕ_{ij} 和俯仰角 θ_{ij} 表示无人机飞行姿态转向的影响, a_1 和 a_2 分别是水平转弯和俯仰角的惩罚系数, 任意路径段 $\overline{P_{ij}P_{i,j+1}}$ 的欧几里得度量值表示为 $\|\overline{P_{ij}P_{i,j+1}}\|$ 。障碍物抽象成半径为 R 的圆柱体, d 为任意路径段 $\overline{P_{ij}P_{i,j+1}}$ 与障碍物投影中心的垂直距离, 无人机直径为 D , 飞行警戒距离为 s , 任意路径段与第 m 个障碍物的避障成本为 S_m 。

3. 算法设计

淘金优化算法(Gold Rush Optimization, GRO)模拟金矿开采过程中矿工的迁移、采矿、协作行为, 具有原理简单、参数少、寻优能力强等优势, 但在求解高维、多约束的无人机三维路径规划问题时, 存在初始解质量低、搜索策略固定、易陷入局部最优等问题。本文在标准 GRO 算法基础上[12], 设计一种多策略改进的淘金优化算法(IGRO), 用于求解电商末端物流场景下无人机三维最优路径规划问题, 并通过仿真实验验证算法的有效性与优越性。

3.1. 基于 RRT 的种群初始化

针对 GRO 随机初始化在复杂约束下易产生大量不可行解, 进而导致收敛缓慢或早熟收敛的问题, 本研究采用基于快速扩展随机树(RRT)的种群初始化方法, 利用 RRT 算法均匀采样、定向扩展及碰撞检测机制, 为每架无人机生成满足地形、飞行动力学及避障约束的初始可行路径, 既避免无效解对算法效率的损耗, 又使初始种群在解空间中分布更为均匀, 为后续的全局搜索奠定良好基础。

3.2. 基于选择概率的动态更新机制

由于原 GRO 在迁移、采矿、矿工协作三个阶段采用固定的选择概率, 这样难以在迭代全过程自适应调整搜索重心, 易出现迭代前期探索不足或迭代后期开发不充分的问题。因此本文设计一种针对 GRO 选择概率的动态更新机制, 通过引入指数衰减函数使迁移阶段的概率随迭代进程衰减, 而采矿与矿工协作阶段的概率相应增加, 实现算法全局探索与局部开发能力的动态平衡, 模型如式(11)至(13)所示。其中, $P_m(t)$ 、 $P_d(t)$ 、 $P_c(t)$ 分别为迭代次数为 t 时迁移、采矿、矿工协作阶段的选择概率, t 为归一化后的迭代次数, 取值范围为[0, 1]。

$$P_m(t) = 0.5 \times (1 - t) \quad (11)$$

$$P_d(t) = 0.3 + 0.2t \quad (12)$$

$$P_c(t) = 1 - P_m(t) - P_d(t) \quad (13)$$

3.3. 融合全局信息和动态衰减的矿工协作策略

原 GRO 在矿工协作阶段仅依赖两个随机个体的局部信息, 未能充分利用群体中的全局最优信息, 导致算法收敛速度较慢且易陷入局部最优。本文在矿工协作阶段引入全局最优个体 g_{best} 位置信息, 同时引入线性动态衰减系数 α , 用来动态调控全局最优信息与局部个体差异对搜索方向更新的贡献权重, 如式(14)至(16)所示。在迭代初期, 较大的 α 值强化全局最优个体的导向作用, 驱动种群快速向潜在最优区域靠近; 随着迭代进行, α 值递减, 个体间的差异信息逐渐主导搜索过程, 从而在提升收敛速度的同时有效抑制早熟收敛现象, 增强算法逃离局部最优的能力。

$$\alpha = \alpha_{\max} - t(\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \quad (14)$$

$$\vec{D}_3 = \vec{X}_{g_2}(t) - \vec{X}_{g_1}(t) + \alpha \vec{X}_{g_{best}}(t) - \vec{X}_i(t) \quad (15)$$

$$\overline{X_{new_i}}(t+1)=\bar{X}_i(t)+\bar{r}_i\bar{D}_3$$

(16)

4. 算例仿真

为验证本文所设计的 IGRO 算法的有效性与优越性，设计对比实验与参数敏感性分析实验。本文将 IGRO 和 GRO、灰熊算法(GWO)、遗传算法(GA)进行对比实验，迭代次数均为 1000，路径点个数为 20，RRT 步长为 20，飞行警戒距离为 10 m，最大水平转弯角和俯仰角均为 45 度，惩罚因子为 10¹⁰。各算法经过初步调优后种群规模均为 100，非线性收敛因子的参数为 0.5，交叉概率为 0.6，变异概率为 0.01；GRO 和 IGRO 的 sigmaInitial 为 2，sigmaFinal 为 1/2000。各随机路径对应的起点和终点位置坐标如下表 1 所示。

Table 1. Coordinates of the UAV path
表 1. 无人机路径坐标

	路径 1	路径 2	路径 3	路径 4	路径 5
起点	(400, 600, 100)	(200, 500, 120)	(200, 150, 50)	(400, 100, 110)	(350, 700, 100)
终点	(250, 100, 120)	(700, 200, 100)	(800, 600, 100)	(300, 800, 120)	(650, 350, 200)

4.1. 算法性能对比分析

在无人机路径规划、车辆路径问题(VRP)、旅行商问题(TSP)等组合优化领域，以最优解或改进算法解为基准的相对 Gap 指标是通用评估方法，因此本研究引入 Gap 值量化分析 IGRO 算法的性能提升效果。设 C_{IGRO} 为待评估算法解，基准解 C_{ref} 为各对比算法的适应度值，Gap = (C_{ref} - C_{IGRO})/C_{IGRO}*100%。Gap1~3 中的基准解 C_{ref} 分别为 C_{GRO}、C_{GA}、C_{GWO}。Gap 值越大表明 IGRO 与各对比算法的性能差距越大。下表 2 为 IGRO 与其他对比算法的适应度值对比结果，图 1 为各算法求解路径 1 的无人机路径优化迭代收敛曲线，直观反映不同算法的收敛速度与寻优能力。

Table 2. Fitness value comparison by algorithm and path
表 2. 不同路径各算法适应度值对比

	CIGRO	CGRO	CGA	CGWO	Gap1	Gap2	Gap3
路径 1	1467	2149	2301	2257	46.5%	56.8%	53.8%
路径 2	2074	2904	4125	2903	40.1%	49.7%	39.9%
路径 3	1479	1806	1491	2449	22.0%	0.7%	65.5%
路径 4	1418	1582	2950	1600	11.6%	51.9%	12.9%
路径 5	994	1792	2796	1984	80.2%	64.4%	99.6%
平均 Gap	-	-	-	-	40.1%	44.7%	54.3%

综合下图 1 与表 2 的实验结果分析，IGRO 展现出最快的收敛速度与最优的最终适应度值，其寻优效率与求解质量均优于对比算法，充分验证了本文所设计的三项核心改进策略的有效性与协同性。具体而言，基于 RRT 的种群初始化策略为算法提供了高质量的初始可行解，有效减少无效迭代，为快速收敛奠定基础。而选择概率动态更新机制在迭代前期增强了全局探索的随机性与种群多样性，有效避免早熟收敛；在迭代后期强化局部开发能力，提升解的精度。最后引入全局最优信息引导的协作策略，充分挖掘群体全局信息的导向作用，显著提升了算法对全局最优解的趋近能力。上述改进策略使得 IGRO 能在全局搜索和局部开发之间实现动态平衡，快速发现并收敛至最优解。

从生成的路径轨迹特征进一步分析,如图 2~4 所示。对比其他算法的路径轨迹, IGRO 所规划的路径转折平缓, 高度变化连续且平缓, 能避开最多的障碍物, 这表明其在平滑性、安全性、配送时效和经济性上实现了更优的多目标平衡, 更适配电商末端物流无人机的实际飞行需求。

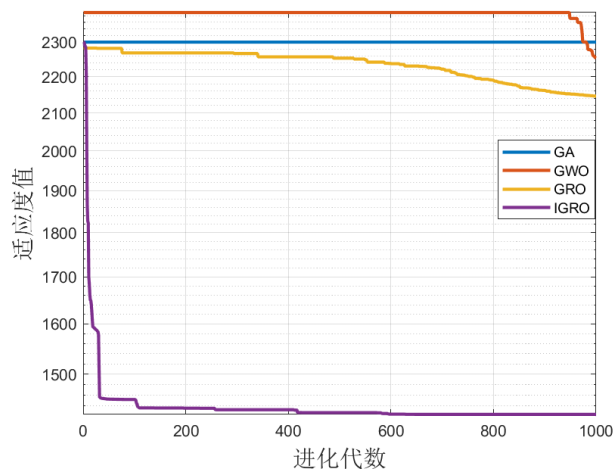


Figure 1. Convergence curves of different algorithms for UAV Path optimization in Path 1

图 1. 路径 1 的无人机路径优化各算法迭代图

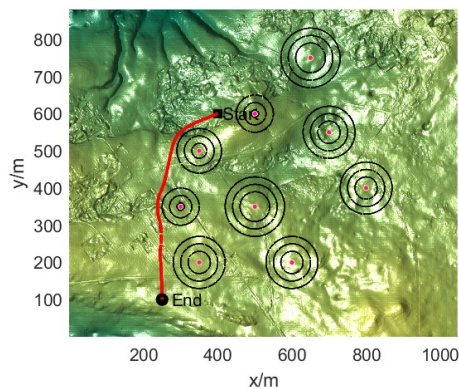


Figure 2. Path plot of IGRO for Path 1

图 2. 路径 1 的 IGRO 路径平面图

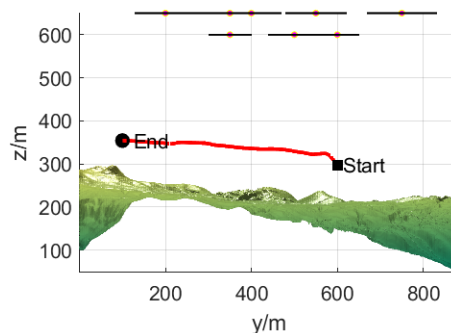


Figure 3. Side view of Path 1 trajectory generated by IGRO

图 3. 路径 1 的 IGRO 路径轨迹侧视图

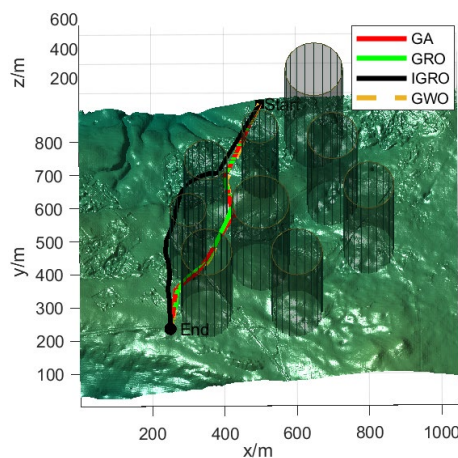


Figure 4. Path comparison of different algorithms
图 4. 不同算法路径对比图

4.2. 参数敏感性分析

为确定适配电商末端物流场景的最优参数取值，下文采用控制变量法设计对照实验，分别研究路径点数量、飞行安全警戒距离对各项子代价及总航程代价的影响规律，为无人机路径规划的参数设置提供量化依据。

4.2.1. 路径点数量分析

路径点数量直接影响无人机路径规划结果的精细度与最终航迹的综合性能，是平衡飞行距离、高度稳定性、转角平滑性、避障安全性的关键参数。本文以路径 1 为实验场景，控制其他参数不变，仅改变路径点数量，分析不同路径点数量对各项子代价及总航程代价的影响，实验结果如下表 3 和图 5 所示。

Table 3. Numerical table of the effect of waypoint number on cost function
表 3. 路径点数量对代价函数的影响数值表

路径点数	飞行距离/m	高度代价	平滑代价	安全代价	总航程代价
10	779.50	717.17	47.63	31.92	1576.22
15	750.21	729.87	21.40	13.55	1515.02
20	701.32	754.14	7.30	4.61	1467.37
25	764.40	824.44	5.28	4.13	1598.25
30	764.19	863.17	5.91	4.41	1637.68
35	770.03	906.65	8.06	3.95	1688.69
40	775.07	967.89	9.45	4.27	1756.68

由表 3 和图 5 可知，路径点增至 20 时，飞行距离显著下降约 10.0%，路径更贴近直线；点数超 20 后，距离回升，过多路径点易引发路径弯折。高度代价随点数增加单调上升，因垂直调整频次与幅度累积，提升能耗且破坏垂直平稳性。转角平滑代价先骤降后微升，适度增加点数可让转向更平滑，利于货物配送，点数过密则致平滑代价小幅上升。安全代价快速下降后趋于饱和，点数过少避障能力不足，25 个时稳定在 3.95~4.41，避障能力达极限。总航程代价先降后升，10~20 个节点时最低，多目标实现最优平衡；20 个后因高度代价增长及距离、平滑代价回升，总代价攀升。综上，本实验中 20 个路径点为最优

选择, 兼顾距离、平滑性与安全性, 适配电商末端物流配送需求。

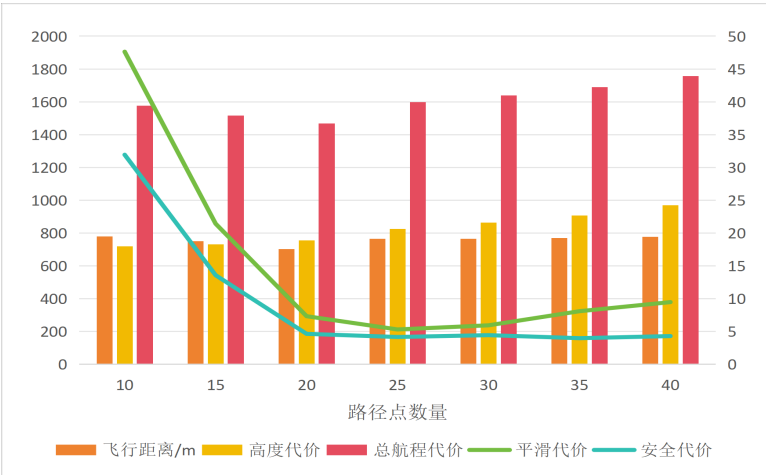


Figure 5. Trend of the effect of waypoint number on cost function
图 5. 路径点数量对代价函数的影响趋势图

4.2.2. 飞行警戒距离大小分析

飞行警戒距离 s 是安全代价核心参数, 通过改变可行航迹空间间接影响总航程代价。以路径 1 为对象, 保持其他参数不变, 调整 s 做对照实验, 结果如表 4、图 6 所示。随 s 增大, 飞行距离代价持续上升, 增幅 42.4%, 30 m 后增幅加剧, 因安全缓冲空间扩大, 绕障路径增加。高度代价波动不超 1.3%, s 对垂直方向影响极小。平滑代价先小幅下降后攀升, 适度增大 s 可优化航迹平滑度, s 过大则致转向频繁、平滑性下降。安全代价近乎线性激增, 是总代价上升的核心因素。总航程代价先降后升, s 过小致航迹曲折, 过大则多代价同步攀升。综上, s 为 10 m 是本仿真场景最优选择, 可兼顾低空运行安全与配送距离、航迹稳定性。

Table 4. Numerical table of the effect of flight alert distance on cost function
表 4. 飞行警戒距离对代价函数的影响数值表

飞行警戒距离/m	飞行距离/m	高度代价	平滑代价	安全代价	总航程代价
5	684.05	754.32	23.5	0.37	1484.02
10	701.32	754.14	7.3	4.61	1467.37
15	763.95	754.85	6.23	31.33	1503.87
20	766.85	754.9	9.59	75.28	1528.75
25	780.77	763.69	21.86	114.3	1618.93
30	814.01	761.22	45.74	213.71	1706.75
35	974.3	761.4	72.68	301.06	1977.22

5. 结论

本文针对低空经济背景下电商末端物流无人机三维路径规划的实际需求, 综合考虑飞行距离、高度变化、转角平滑、安全避障四重核心约束, 构建多目标代价函数, 在标准淘金优化算法基础上设计包含基于 RRT 的种群初始化、选择概率动态更新、融合全局信息与动态衰减机制的协作策略的改进淘金优化

算法(IGRO), 实现无人机三维最优配送路径的求解。通过设计对比实验与参数敏感性分析实验, 验证了算法的有效性、优越性及关键参数的影响规律, 主要研究结论如下:

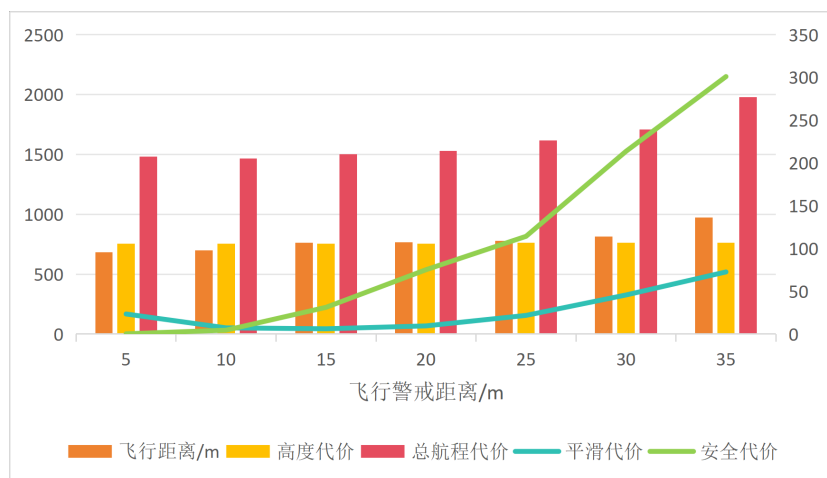


Figure 6. Trend of the effect of flight alert distance on cost function

图 6. 飞行警戒距离对代价函数的影响趋势图

1) IGRO 的求解性能显著优于标准 GRO、GA、GWO 等对比算法, 与标准 GRO 相比, 路径规划总成本平均降低 40.1%, 且具备更快的收敛速度与更优的航迹特征, 所规划的路径在配送距离、稳定性与安全性之间实现了更优平衡。

2) 路径点数量对无人机路径规划代价存在显著影响, 其与总航程代价呈先降后升的趋势, 本文实验条件下 20 个路径点为最优取值, 此时总航程代价最低, 且兼顾飞行距离、高度稳定性、转角平滑性与安全性的多目标需求。实验发现路径点过少会导致路径粗糙、避障能力弱, 过多则会引发高度代价与平滑代价大幅上升。

3) 飞行警戒距离作为水平方向的安全约束, 对各代价函数的影响具有显著差异性, 其与安全代价、飞行距离、平滑代价近似呈正相关, 与高度代价几乎无关, 与总航程代价呈先降后升的趋势, 本实验条件下飞行警戒距离最优取值为 10 m, 可实现电商末端配送时效与安全性的最优平衡。

参考文献

- [1] 谭冬梅. 无人机配送在电商物流中的应用前景与挑战[J]. 中国储运, 2025(2): 116-117.
- [2] 安喜才, 叶春明, 刘勤明. 低空经济时代的空地协同电子商务末端即时配送新模式研究[J]. 电子商务评论, 2026, 15(1): 862-872.
- [3] 左大发, 朱德龙, 朱娜娜. 低空经济下车辆与无人机协同配送路径优化研究综述[J]. 包装工程, 2025, 46(19): 298-310.
- [4] 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.
- [5] 齐福强, 陈姝宁, 朱峰. 基于 CiteSpace 的无人机运行安全研究热点与趋势[J]. 科学观察, 2026, 21(1): 67-80.
- [6] Jeong, H.Y., Song, B.D. and Lee, S. (2019) Truck-Drone Hybrid Delivery Routing: Payload-Energy Dependency and No-Fly Zones. *International Journal of Production Economics*, 214, 220-233. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.010>
- [7] 程洁, 郑远, 李诚龙, 等. 面向城市超低空物流场景的最小风险路径规划算法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(2): 690-698.
- [8] 苏子美, 董红斌. 面向无人机路径规划的多目标粒子群优化算法[J]. 应用科技, 2021, 48(3): 12-20, 26.
- [9] 杜云, 贾慧敏, 邵士凯, 等. 面向多目标侦察任务的无人机航线规划[J]. 控制与决策, 2021, 36(5): 1191-1198.

- [10] 梁海军, 沈小波, 胡文海, 等. 基于改进 GRO 优化算法求解无人机三维路径规划[J]. 计算机技术与发展, 2026, 36(3): 147-153
- [11] 陆俊良, 陈明霞, 严一蹕, 等. 基于多策略改进秘书鸟算法的无人机路径规划[J/OL]. 计算机工程与科学: 1-12. <https://link.cnki.net/urlid/43.1258.TP.20250618.1726.002>, 2026-03-24.
- [12] Zolfi, K. (2023) Gold Rush Optimizer: A New Population-Based Metaheuristic Algorithm. *Operations Research and Decisions*, **33**, 113-150. <https://doi.org/10.37190/ord230108>