文章编号：1003-1421(2026)06-0038-14
引用格式：吴国秋，李楠楠，温馨. 城市低空物流网络多目标运行均衡优化研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(6)：38-51.
WU Guoqiu，LI Nannan，WEN Xin. Research on Multi-Objective Operation Equilibrium Optimization for Urban Low-Altitude Logistics Network[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(6)：38-51.

城市低空物流网络多目标运行均衡优化研究

吴国秋[1]，李楠楠[1]，温　馨[2]

(1.沈阳师范大学 国际商学院，辽宁 沈阳　110034；2.沈阳工业大学 管理学院，辽宁 沈阳　110870)

摘　要：为解决城市低空物流网络面对的外部动态需求和内部资源不均衡问题，构建了城市低空物流网络多目标运行均衡优化模型。该模型综合考虑飞行时间、能耗、风险和任务完成率多目标，并根据物流均衡理论从数量、结构、时间和空间四个维度研究多目标均衡问题。模型包含逻辑模型和数学模型：逻辑模型研究了运行逻辑并提出3种运行模式；数学模型以多目标优化为导向并采用改进A*算法进行仿真。仿真结果表明，所提改进A*算法在保持实时响应能力的同时，相较传统算法，能耗有效降低，运行风险得到有效控制，任务完成率提高。参数敏感性分析表明，改进的A*算法在各种参数配置下具有良好的鲁棒性和稳定性。总体而言，所构建的模型为城市低空物流网络运行均衡优化提供了有效方案，改进的多目标路径规划算法可提升系统效率，从而为相关研究与应用提供参考。

关键词：城市低空物流网络；多目标运行均衡模型；改进A*算法；物流均衡理论
中图分类号：U116；F562　　**文献标识码**：A　　DOI：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20251107008

Research on Multi-Objective Operation Equilibrium Optimization for Urban Low-Altitude Logistics Network

WU Guoqiu[1]，LI Nannan[1]，WEN Xin[2]

(1. College of International Business, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, Liaoning, China; 2. School of Management, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China)

Abstract: To solve the problems of external dynamic demand and uneven internal resources faced by the urban low-altitude logistics network, a multi-objective operation equilibrium optimization model for the urban low-altitude logistics network was constructed. The model comprehensively considered multiple objectives, including flight time, energy consumption, risk, and task completion rate, and based on the logistics equilibrium theory, it investigated the multi-objective equilibrium problem from four dimensions of quantity, structure, time, and space. The model comprised a logical model and a mathematical model: The logical model studied the operation logic and proposed three operation modes; the mathematical model was guided by multi-objective optimization and used the improved A* algorithm for simulation. The simulation results show that while maintaining the real-time response capability, compared with traditional algorithms, the proposed improved A* algorithm effectively

收稿日期：2025-11-07　　**修订日期**：2026-04-29
通信作者：李楠楠(1999—)，女，河南周口人，沈阳师范大学国际商学院硕士研究生。
基金项目：教育部人文社科规划基金项目(22YJA630095)；辽宁省科协科技创新智库项目(LNKX2025QN20)；辽宁省社会科学规划基金项目(L23BGL007)；沈阳市哲学社会科学规划项目(SY202504Y)

reduces energy consumption, effectively controls operation risk, and improves the task completion rate. Parameter sensitivity analysis shows that the improved A* algorithm has good robustness and stability under various parameter configurations. Overall, the constructed model provides an effective solution for the operation equilibrium optimization of the urban low-altitude logistics network, and the improved multi-objective path planning algorithm can improve system efficiency, thereby providing a reference for related research and applications.

Keywords: Urban Low-Altitude Logistics Network; Multi-Objective Operation Equilibrium Model; Improved A* Algorithm; Logistics Equilibrium Theory

0　引言

当前，低空经济正快速崛起成为推动经济高质量发展的新兴业态[1-2]。低空物流是低空经济的一个重要发展方向，能够减少物流中间环节、降低成本并缓解交通压力[3-4]。然而，城市低空物流网络运行于复杂的三维空域环境中，外部需求动态多变，使得客户对配送时效和安全性的要求不断提高[4-5]；而同时也易受无人机技术和基础设施等内部资源的制约，带来能耗和任务完成率等问题[6-7]。因此，如何平衡外部需求与内部资源约束，成为优化城市低空物流网络运行的关键[8-9]。

目前，有关城市低空物流网络运行的研究在理论和实践均有一定的探索，主要包括以下方面。①低空物流的应用现状。张明明等[10]、何寿奎[11]、李连成等[12]认为低空物流技术与基础设施支撑逐步增强，商业化模式初步形成，应用场景不断拓展，逐渐覆盖城市与偏远地区。周钰哲[13]、赵景龙[14]、李芷巍等[15]认为低空物流的创新应用带来了机遇和挑战，要充分发挥其经济与社会价值，必须在技术、应用场景和配套基础设施等方面实现协同推进。②低空物流网络方面。张纯等[16]构建了三维网络分析模型，实现可操作的路径规划与服务分区；刘佳雯等[17]提出低空与铁路的三维货运体系，实现　末端提升和网络协调。可见学者[18-19]认为高效且柔性的低空物流网络成为研究热点，通过优化无人机调度、航线规划能够提高物流网络运行效率。③物流网络优化算法方面。何珊珊等[20]、李金澄等[21]、王涵晴等[22]都使用遗传算法，针对不同物流场景进行算法设计，解决物流网络中的组合优化问题；张启钱等[23]、祝文杰等[24]认为随着外部需求多样化，经典算法虽然原理简单、易于实现，但难以应用于复杂环境，且现有研究在目标设定、基础设施配套与路径规划方面仍存在不足，需在多目标协同、算法可扩展性与基础设施协同优化上进一步突破。

通过文献研究发现，现有研究集中在城市低空物流的场景应用、低空物流网络结构及路径规划等方面。然而，城市低空物流网络在实践应用和理论研究2方面皆面临着外部需求动态多变和内部资源不足的双重压力[25-26]。目前，外部需求与内部资源能力之间的不匹配，已成为城市低空物流网络运行不均衡的主要诱因[17, 26]。具体而言，外部需求主要体现在客户对时间与风险的高要求[10-11]，而内部资源能力则直接影响系统能耗水平与任务完成率[11-12]。但是现有研究局限于单一目标优化，仅仅关注外部动态需求或者内部基础设施提升[27]。此外，如何搭建城市低空物流网络，以及在模型构建中，考虑低空物流网络多目标运行优化的还略显缺乏，尤其是通过合理的算法来提升城市低空物流网络运行效率的研究相对较少[24, 28]。因此，研究城市低空物流网络的多目标运行优化问题具有重要的理论和现实意义[29]。

综上，通过分析研究城市低空物流网络运行均衡的多目标优化模型，以飞行时间、能耗、风险和任务完成率为多目标，并设计了改进A*算法协同优化方法(以下简称“A*+GA”)，即初步改进A*，再与遗传算法相结合。最后在Python平台开展仿真实验分析，比较算法在不同规模场景下的飞行时间、能耗、风险和任务完成率，为城市低空物流网络运行均衡优化提供应用参考。

1　理论问题描述

1.1　低空物流网络

目前低空物流网络尚未形成由权威机构统一发布的标准化定义[6]，但学者已从网络化系统视角对其

核心内涵和构成要素进行了较为深入的阐述[15, 30]，低空物流网络定义为在真高1 000 m以下空域中，以无人机为核心，通过干线机场、支线枢纽与末端投送点构成的多层次协同体系，完成仓储—干线—支线—末端的空地一体化配送。

1.2　低空物流网络运行要素

结合上述对低空物流网络的界定，其运行要素包括如下。

（1）节点。在城市低空物流网络中，节点构成物流经济活动的基本与核心要素，主要表现为企业、仓库、码头或末端客户等多种实体。

（2）运行载体——无人机。城市低空物流网络中以无人机为运行载体，即主要使用无人机的技术方案，为实现实体物品从供应地向接收地的流通而进行的规划、实施和控制的过程。

（3）航路。城市低空物流运行的关键在于航路规划。航路是为运行载体(无人机)预设的三维通行通道，旨在保障飞行安全并提升配送效率，设计时需综合空域资源、飞行安全、运行效率与环境影响等因素。

（4）基础设施。城市低空物流网络的基础设施主要包括无人机所需要的起降场、充电/换电设施、通信基站、氢能补给站和气象监测站等。

运行要素是支撑城市低空物流网络的关键力量，实现城市低空物流网络高效运行的核心在于如何以稳定强大的内部资源应对外部环境的复杂多变。具体而言，外部需求主要体现在客户对时间与风险的高要求，主要受节点、航路等影响；而运行载体、基础设施等是内部资源的关键要素，其会影响能耗水平和任务完成率。

1.3　城市低空物流网络多目标运行均衡问题分析

1.3.1　城市低空物流网络应用场景分析

（1）城市交通领域场景[17]。利用无人机在城市交通领域搭建城市低空物流网络。从外部需求看，用户的时间敏感度极高；同时，城市环境复杂多变，必须严格管控飞行风险，确保公共安全与航路稳定。从内部资源看，提升能耗效率是商业化的关键，而保障高任务完成率则是服务可靠性的基石。

（2）无人机配送场景。企业应用端如丰鸟科技正积极打造无人机配送模式[31−32]。从外部需求来看，配送时效成为核心要素；同时，城市复杂环境下的飞行风险必须被严格管控。从内部资源来看，优化能耗管理是提升经济性与续航能力的关键，而保障高任务完成率则是衡量服务质量的重要指标[33]。

综上，通过应用场景的分析，所设计的低空物流网络主要是针对城市物流配送，以节点、运行载体、航路和基础设施为运行要素，旨在满足飞行时间、能耗、风险和任务完成率的多目标要求。

1.3.2　城市低空物流网络多目标关系

城市低空物流网络受外部需求动态多变和内部资源不足的双重压力，主要包括时间、能耗、风险与任务完成率[19, 34]。其中，外部需求主要来自空间分散且具有随机性的客户任务完成需求，突出表现为对飞行时间和风险的严格要求；内部资源主要由运行载体和基础设施2方面运行要素组成，主要影响能耗水平和任务完成率2个目标。因此，这是多目标关系问题，呈现出复杂的多维博弈特点：时间和能耗共同支撑着任务完成率的实现；而风险作为关键的安全约束，通过对航路选择的干预，与时间、能耗目标既存在权衡，也存在协同。基于这种既相互制约又内在关联的多目标关系[35−36]，在模型设计中采用了加权求和的方式，将4个目标转化为综合值最小化问题，旨在复杂的城市低空环境中寻求系统运行的最优均衡[37−38]。

1.3.3　城市低空物流网络运行均衡问题分析

城市低空物流网络运行要适应外部动态需求和内部资源的均衡发展，需要考虑满足不断变化的外部用户需求的同时，又具备能可靠运行的内部资源能力。主要基于物流均衡理论[39]，提出了城市低空物流网络的运行均衡内涵，即在满足4个多目标的同时，需在数量、结构、时间与空间上实现均衡[40−41]，从而支撑网络在动态外部需求与内部资源条件下的多目标运行均衡[37]。在数量上无人机每次出行的负载不能超过其载重上限；在结构上确保物流资源与客户需求相匹配；在时间上无人机配送必须满足客户的时间窗限制；在空间上则需实现整个物流网络内各类要素节点在层次结构上的均衡布局。城市低空物流网络的运行均衡问题本质上是外部需

求与内部资源能力之间的均衡，城市低空物流网络均衡问题如图1所示。

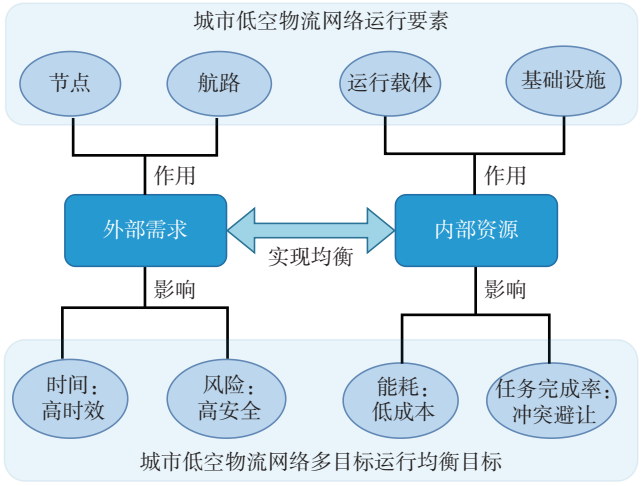

图1　城市低空物流网络均衡问题

Fig.1　Equilibrium problem of urban low-altitude logistics network

2　城市低空物流网络多目标运行均衡优化模型

2.1　逻辑模型

根据上述分析，构建城市低空物流网络运行逻辑模型，城市低空物流网络运行逻辑图如图2所示。城市低空物流网络运行要基于运行要素、多目标关系及均衡问题的内涵及关系，建立运行逻辑[4-5]。因此，无人机从基地出发，根据其能源储备情况进行以下运行模式选择，并最终返回基地完成任务。

（1）直接送达客户点。

（2）经充电或氢能补给后再配送。

（3）通过无人机编队完成多点配送并在持有点等待返回。

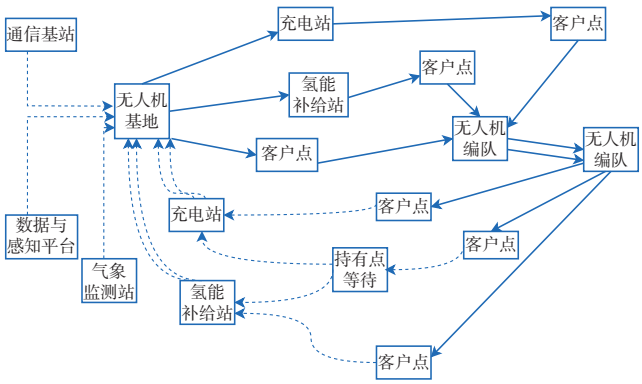

图2　城市低空物流网络运行逻辑图

Fig.2　Operation logic diagram of urban low-altitude logistics network

2.2　数学模型

2.2.1　模型问题描述

基于上述目标，采用加权多目标规划方法[42-43]，将时间、能耗、风险和任务完成率4类因素设计成目标函数，并促进在数量、结构、时间与空间维度的均衡运行。其中，无人机作为运输载体，需要在满足飞行安全、续航能力和节点服务能力等多重约束下，实现对所有配送任务的最优调度与航迹规划，以此提高运行效率[19，31]。

以某物流配送中心为研究对象，构建并求解城市低空物流网络的多目标运行均衡优化问题。研究区域内配送中心配备M架同质无人机，每日需向T个需求点提供配送服务。每架无人机装载后由配送中心起飞，基于自身能源状况选择配送模式，完成后返回所属配送中心并循环执行任务，以满足整体服务需求[44]。

针对所构建的城市低空物流网络多目标运行均衡模型，做以下建模假设。

（1）顾客的需求不能分割，且需在最晚送达时间之前被满足。

（2）无人机站容量足够大，可同时起降多架无人机以满足服务需求。

（3）每架无人机在完成配送任务后需返回其所属无人机站。

（4）无人机每次往返耗时不能超过其最大飞行时间。

2.2.2　模型符号说明

模型相关数学符号说明如表1所示。

2.2.3　多目标函数

多目标函数是时间成本、能耗成本、冲突风险成本和任务完成率目标的综合值最小化[45-46]。

（1）时间成本。

$$Z_1 = \sum_{k\in K}\sum_{t\in T}\sum_{(i,\ j)\in E} x_{ijkt}\frac{d_{ij}}{v_k} \tag{1}$$

公式(1)为无人机执行任务飞行时间成本，表示完成一次配送任务使用无人机所需要的时间，其主要包括无人机配送时间以及充电所需时间，与飞行距离成正比。

（2）能耗成本。

$$Z_2 = \sum_{k\in K}\sum_{t\in T}\sum_{(i,\ j)\in E} x_{ijkt}E_k d_{ij} \tag{2}$$

表1　数学符号说明

Tab.1　Description of mathematical symbols

集合	说明
N	节点集合，$N=\{1,\ 2,\ \cdots,\ N\}$
E	航路集合，$E=N\times N$
F	基础设施集合
K	无人机集合，$K=\{1,\ 2,\ \cdots,\ K\}$
T	配送任务集合，$T=\{1,\ 2,\ \cdots,\ T\}$
参数	**说明**
$(i,\ j)$	每条航路$(i,\ j)$对应可行的三维空中通道
W_k	无人机k的最大载质量，kg
D_k	无人机k的最大航程，km
v_k	无人机k的巡航速度，m/s
o_t	配送任务时，每项任务t的起点
d_t	配送任务时，每项任务t的终点
w_t	货物质量，kg
C_f	设施f的最大服务次数
$[a_t,\ b_t]$	任务t处的服务时间窗
d_{ij}	航路$(i,\ j)$的三维(直线)距离，km
E_k	无人机k单位距离能耗率，kW·h/km
ρ_{ij}	航路$(i,\ j)$的流量拥堵或(冲突)风险系数
$E_k^{\max}$	无人机k的最大能耗量等性能参数，kW·h
$\triangle\tau$	2架无人机先后进入同一航段必须保持的最小时间差，s
M	M为常数，一个足够大的正数
ε	极小正数参数，定义编队的时间同步阈值。只有两机进入时间差小于ε且处于同一空间，才视为编队，s
变量	**说明**
x_{ijkt}	若无人机k在航段$(i,\ j)$执行任务t，则$x_{ijkt}=1$，否则为0，其中$x_{ijkt}\in\{0,\ 1\}$
$Z_{ijkk't}$	若无人机k与k'在执行任务t时，于航段$(i,\ j)$形成编队，则为1，否则为0，其中$Z_{ijkk't}\in\{0,\ 1\}$
s_{ijkt}	无人机k执行任务t时，进入航段$(i,\ j)$的时刻
s_{jmkt}	无人机k执行任务t时，进入航段$(j,\ m)$的时刻
t_{ijk}	无人机k飞越航段$(i,\ j)$所需的飞行耗时
y_{ktf}	若无人机k在其任务路径中于基础设施f进行充电/换电，则$y_{ktf}=1$，其中$y_{ktf}\in\{0,\ 1\}$；否则$y_{ktf}=0$，无人机仅依靠初始能量$E_k^{\max}$完成任务
T_{ikt}	无人机k执行任务t时到达节点i的时刻，$T_{ikt}\geqslant 0$

公式(2)为能耗成本。

（3）风险成本。

$$Z_3=\sum_{k\in K}\sum_{t\in T}\sum_{(i,\ j)\in E}x_{ijkt}\rho_{ij} \tag{3}$$

公式(3)为冲突风险成本。

（4）任务完成率。令$\mathcal{T}$为所有配送任务的集合，$|\mathcal{T}|$为任务总数；对每个任务t，引入二元变量y_t，则任务完成率η，定义为所有任务中按时完成的比例。

$$y_t=\begin{cases}1 & \text{任务}t\text{在规定时间窗内成功完成}\\ 0 & \text{任务}t\text{在规定时间窗内没有完成}\end{cases} \tag{4}$$

$$\eta=\frac{1}{|T|}\sum_{t\in T}y_t \tag{5}$$

公式(5)为任务完成率。

综上，问题优化目标可设置为公式(6)。

$$\min Z=\omega_1Z_1+\omega_2Z_2+\omega_3Z_3-\omega_4\eta \tag{6}$$

其中，ω_1，ω_2，ω_3，ω_4分别为时间成本、能耗成本、冲突风险成本和任务完成率目标对应的权重系数。

2.2.4　约束条件

（1）均衡类约束条件。①数量均衡。城市低空物流网络的载重数量均衡[39]是无人机每次出行的负载不能超过其载重上限，如公式(7)所示来确保任何单次运送量不超过无人机载重。同理，如果一次以编队(多架无人机同时出动)的方式配送，则所有无人机的总运载量也不得超过其综合载重。

$$\sum_{(i,\ j)}x_{ijkt}w_t\leqslant W_k \tag{7}$$

②结构均衡。城市低空物流网络的结构均衡[39]约束确保物流资源与客户需求相匹配。设客户节点d_n的需求量为D_n，则规划的配送总量应满足需求。通常可设置约束如公式(8)所示，此结构约束保证配送量与需求量匹配，避免资源浪费或遗漏。

$$\sum_{(i,\ j)}x_{ijkt}d_n\leqslant D_n \tag{8}$$

③时间均衡。城市低空物流网络的时间均衡[39]是无人机配送必须满足客户的时间窗限制，要在时间点上达到一致且时长趋于平衡，即无人机提供货物供给的时间与顾客节点需要的时间匹配，且供给时间小于或等于需求时间。记供给时间为S，需求时间为T，如公式(9)所示。

$$S\leqslant T \tag{9}$$

④空间均衡。城市低空物流网络的空间均衡[39]可以通过判断整个物流网络内各类要素节点在层次结构上是否达到了均衡，即城市低空物流网络的空间内节点布局状态来判断，因而可以在网络结构内，找到空间均衡点，通过节点数量均衡来判断节点布局是否均衡。设a节点和b节点是区域物流网络内直线距离最远的点，距离为d，则空间内必有一点R，在空间上使网络达到均衡。设R到a点的距离为r_0，则R到b点的距离为$d-r_0$。则空间均衡的

条件要使得公式(10)成立。

$$G\frac{M_\alpha}{r_0}=G\frac{M_b}{\left(d-r_0\right)^2} \tag{10}$$

（2）基本约束条件。在结合城市低空物流网络问题和假设的前提下，作以下约束[47-48]。①任务分配。确保每项任务被唯一分配[47]，如公式(11)所示。

$$\sum_{k\in K}\sum_{(i,\ j)\in E}x_{ijkt}=1 \qquad \forall t\in T \tag{11}$$

公式(12)—(13)保证时间窗口约束。

$$a_t\leqslant T_{o_t kt} \tag{12}$$

$$T_{d_t kt}\leqslant b_t \tag{13}$$

②路径分配。确保h_{ij}路径连通：对每一无人机k与任务t，路径从起点出发、终点结束，如公式(14)所示。

$$\sum_{i:(i,\ h)\in E}x_{ihkt}=\sum_{j:(h,\ j)\in E}x_{hjkt}$$

$$\forall h\in N\neq\left\{o_t,\ d_t\right\},\ \forall k,\ t \tag{14}$$

③无人机限制。无人机载重限量、航程与电量需满足公式(15)—(17)的约束要求。

$$\sum_{(i,\ j)}x_{ijkt}d_{ij}\leqslant D_k \tag{15}$$

$$T_{ikt}+\frac{d_{ij}}{v_k}\leqslant T_{jkt} \tag{16}$$

$$\sum_{(i,\ j)}x_{ijkt}d_{ij}E_k\leqslant E_k^{\max}+\sum_f y_{ktf}E_f \tag{17}$$

需要注意的是，若补能变量$y_{ktf}=0$时，且路径变量x_{ijkt}满足起点到终点的连续性，此时$\sum_f y_{ktf}E_f=0$时，无人机仅依靠初始能量$E_k^{\max}$完成任务，模型即为直达模式；若$y_{ktf}=1$时，此时无人机k在其任务路径中于基础设施f进行充电/换电，此时$\sum_f y_{ktf}E_f=1$，无人机k的电量包络线发生跳变，支持长距离配送，体现了补能模式。

为确保时空一致性，当且仅当不同无人机k，k'同时选择航段$(i,\ j)$执行任务时，即$x_{xjkt}=1$且$x_{xjk't'}=1$，2架无人机进入该航段的时刻差必须满足安全间隔$\triangle\tau$。其中，M是一个足够大的正数。这允许了航路资源在时间维度上的动态复用，消除了静态容量限制的局限性，避免无人机同高度层冲突，如公式(18)所示。

$$\left|S_{ijkt}-S_{ijk't'}\right|\geqslant\triangle\tau-M(2-x_{_{ijkt}}-x_{ijk't'})$$

$$\forall(i,\ j)\in E,\ (k,\ t)\neq(k',\ t') \tag{18}$$

即当$x_{xjkt}=1$且$x_{xjk't'}=1$时，公式简化为$\left|s_{ijkt}-s_{ijk't'}\right|\geqslant\triangle\tau$。

该约束确保了当多架无人机复用同一航路$(i,\ j)$时，其时间间隔始终大于安全阈值，从而消除了静态容量限制导致的过度保守性。

同时保证进入下一段的时间一定晚于当前段的飞行结束时间，如公式(19)所示。

$$S_{jmkt}\geqslant S_{ijkt}+t_{ijk}-M(1-x_{ijkt}) \qquad \forall(i,\ j),\ (j,\ m)\in E \tag{19}$$

在进行高度分层时，公式(20)保证航路$(i,\ j)$高度层h_{ij}，并保证不同风险级航路分层管理。

$$H_{\min}\leqslant h_{ij}\leqslant H_{\max} \tag{20}$$

④基础设施服务能力。基础设施的服务负荷应在其承载范围内，相关约束如公式(21)所示。

$$\sum_{k\in K}\sum_{t\in T}y_{ktf}\leqslant C_f \qquad \forall f\in F \tag{21}$$

⑤无人机编队机制。只有当2架无人机k与k'在同一时段都选择了同一航段$(i,\ j)$时才能形成编队。该逻辑约束如公式(22)—(23)所示。

$$Z_{ijkk't}\leqslant x_{ijkt} \tag{22}$$

$$Z_{ijkk't}\leqslant x_{ijk't} \tag{23}$$

需要注意的是，当Z=1时，2架无人机的进入时刻S之差必须小于极小值ε，约束2机在同一航段的进入时刻偏差，以此达到空间同步的编队特征，如公式(24)所示。

$$\left|S_{ijkt}-S_{ijk't}\right|\leqslant\varepsilon \tag{24}$$

3　改进的A*算法及仿真分析

3.1　改进的A*算法

3.1.1　传统的A*算法

A*是一种基于代价评估的启发式图搜索算法[49]，常用于低空物流在栅格地图中搜索安全且高效的航迹[43, 50]，计算公式为

$$f(n)=g(n)+h(n) \tag{25}$$

其中，$g(n)$为起点到当前节点的实际代价；$h(n)$为当前节点到目标的启发式估计。传统的A*算法可找到从起点到终点的最短路径，但存在搜索范围大、效率低及对启发式依赖的问题。

3.1.2　改进的A*算法

为解决A*算法搜索范围大、效率下降问题，

通过初步改进A*算法[24, 50]，相比传统A*算法，在运行时间、搜索节点数、路径平滑度(转弯次数)等多个关键指标上均取得了显著提升，从而更适合城市复杂环境下的低空物流路径规划。

（1）初步改进A*算法。

$$f(n)=g(n)+\left(\sqrt{\left(x_g-x_n\right)^2+\left(y_g-y_n\right)^2+\left(z_g-z_n\right)^2}+\lambda\left|\overrightarrow{P_GP_S}\times\overrightarrow{P_GN}\right|\right)\cdot\alpha_n \tag{26}$$

首先，在$h(n)$中引入一个“方向惩罚项”，以改进并解决传统启发式算法忽视路径方向性问题。其次，进行动态权重优化来平衡搜索速度与精度：引入一个随当前节点到目标点距离变化而动态调整的权重系数λ，这项改进使算法在全局上大幅提高了搜索速度，在局部上保证了路径的最优性和平滑性[51]，但还存在启发式依赖的问题。

（2）引入遗传算法的A*算法。为解决启发式依赖的问题，引入了遗传算法，通过模拟个体信息交流和多样化搜索策略，不断逼近问题的最优解，具有并行搜索和多参数联合优化的优势，适用于高维、非线性及复杂约束的优化问题。因此，采用A*+GA方式，可避免设计和调整启发式函数的困难，尤其在复杂环境下比A*算法更稳健[52-53]。通过A*+GA算法相结合，改进的A*算法流程图如图3所示，该方法主要包括以下步骤。

①初始化种群：随机生成若干个初始解，每个个体表示一架无人机的初始航迹。

②适应度评估：对每个航迹个体进行适应度计算，衡量其飞行距离、安全性、路径平滑性及避障性能。

③终止条件判断：判断是否满足迭代终止条件(如达到最大代数或最优解稳定)。若满足，输出最优航迹，算法结束；否则进入下一阶段。

④遗传操作：选择、交叉、变异。

⑤A*算法优化：对新生成的个体调用改进的A*算法进行路径局部优化。

⑥迭代优化：重复执行步骤②—⑤，逐步提升种群整体性能，最终输出满足规划要求的无人机航迹集。

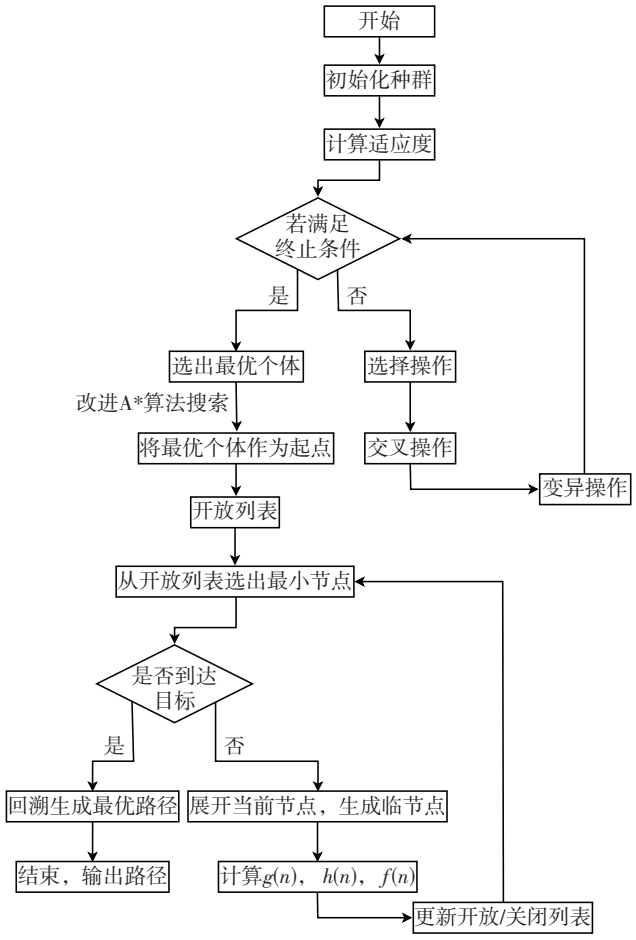

图3　改进的A*算法流程图

Fig.3　Flowchart of improved A* algorithm

3.2　仿真分析

结合仿真中的实际情况，做出以下假设[54-55]。

假设1：每个节点间通过航路连接，其属性包括：距离(以计算飞行时间)、能耗、风险和任务完成率。每条边的能耗与时间、距离成正比，风险为随机生成。

假设2：无人机最大载重5 kg，续航为100 km，巡航速度为10 m/s，能耗率为1.2 kW·h/km。

在仿真中，计算机为Windows10系统，软件为Python3.9。并分别从以下4点进行分析：①多目标权重系数的选取；②选取多种不同规模的地图进行对比分析；③选取多种不同规模的需求点进行对比分析；④参数敏感性研究[55]。

3.2.1　多目标函数权重系数的选取

在城市低空物流网络的多目标优化中，各目标权重会显著影响调度方案的优先级与整体均衡表现。为系统评估不同权重配置对算法性能的影响，围绕飞行时间、能耗、风险与任务完成率4项指标构建4组代表性权重方案，其系数由专家调查与层

次分析法综合确定[56]。实验中固定网络规模，构建包含1个配送中心与20个需求点的均匀随机场景；无人机性能与补能设施按照前述设定保持一致，并设置较宽松的时间窗，使完成率主要由路径规划策略决定。针对每组权重方案，采用A*+GA的混合策略独立运行10次，记录总飞行时间、总能耗、累积风险与任务完成率4项指标，并计算其均值与标准差。通过实验结果汇总，多目标函数权重系数的选取结果如表2所示。

由表2可见，在时间–能耗权衡方面，随着时间权重ω_1从第1组递减至第4组，总飞行时间呈上升趋势，而总能耗由608.4 kW·h降至552.1 kW·h，体现了典型的时间与能耗之间的折中关系。在风险控制上，尽管第2至第4组的风险权重ω_3相同，但由于任务序列改进与完成率目标的引入，第3组与第4组的累计风险分别降至7.3和6.6，说明多目标调度可有效规避高风险航段。就任务完成率而言，第1组最低(0.950)，第4组最高(0.984)，表明在引入可靠性权重后，遗传算法会优先选择更稳健的路径与任务序列。总之，应综合多目标表现选取合适的权重组合，其中第2组方案在多项指标间实现了较好的均衡表现。

3.2.2　不同规模的地图对比分析

为评估算法在不同区域复杂度下的可扩展性和稳定性，即算法的性能和路径调度效果变化，本实验选取了3种代表性地图规模：Ⅰ级(5 km×5 km)、Ⅱ级(10 km×10 km)和Ⅲ级(20 km×20 km)，对应需求点数量分别为20，50和100。使用第二组最优权重(ω_1，ω_2，ω_3，ω_4)=(0.5，0.3，0.2，0)，对比A*、固定序列多目标A*与A*+GA这3种调度算法在不同地图规模下的性能表现。

此外，每条航路按欧氏距离生成飞行时间、能耗与风险属性。接着，对每种地图分别执行。A*：仅最短飞行时间。固定序列多目标A*：固定天然序列，对时间、能耗、风险加权搜索。A+GA*：在多目标A*基础上，遗传算法优化需求点访问顺序。每种组合重复10次，记录各次结果并取均值。对平均总飞行时间、平均总能耗、平均累积风险和单次规划平均耗时进行汇总，不同地图规模下3种算法性能比较如表3所示。

表3表明，随着地图规模和需求点数量增加，3种算法的平均总飞行时间、能耗与累积风险呈线性上升趋势，说明路径成本与网络规模正相关。A*虽飞行时间最短，但能耗与风险最高；固定序列多目标A*在能耗与风险上有所改进，但因序列未优化，飞行时间略增；A*+GA综合表现最佳，保持较低平均飞行时间的同时，最大幅度降低了能耗与风险。单次规划耗时随规模微增但仍为亚秒

表2　多目标函数权重系数的选取结果

Tab.2　Selection results of weight coefficients for multi-objective functions

权重方案	平均总飞行时间/s	平均总能耗/(kW·h)	平均累积风险指标	任务完成率/%
第1组(0.7，0.2，0.1，0)	47.1	608.4	8.1	0.950
第2组(0.5，0.3，0.2，0)	49.8	570.2	7.4	0.970
第3组(0.4，0.3，0.2，0.1)	51.0	562.1	7.3	0.980
第4组(0.3，0.3，0.2，0.2)	53.7	552.1	6.6	0.984

表3　不同地图规模下3种算法性能比较

Tab.3　Performance comparison of three algorithms under different map scales

地图规模	算法	平均总飞行时间/s	平均总能耗/(kW·h)	平均累积风险指标	单次规划平均耗时/s
5 km×5 km，20个需求点	A*	23.2	309.3	4.7	0.014
	固定序列多目标A*	24.6	280.4	4.3	0.019
	A*+GA	24.1	267.8	3.7	0.146
10 km×10 km，50个需求点	A*	62.4	609.0	9.4	0.027
	固定序列多目标A*	66.0	580.2	8.7	0.039
	A*+GA	64.8	550.3	8.3	0.182
20 km×20 km，100个需求点	A*	131.2	1 460.6	21.9	0.027
	固定序列多目标A*	139.4	1 409.8	20.7	0.046
	A*+GA	136.2	1 360.7	18.6	0.246

级，表明该混合方法具备在线部署潜力。

3.2.3　不同规模的需求点对比分析

为了探究任务密度(需求点数量)对路径规划与调度性能的影响，即任务完成率和路径规划能力，评估A*+GA在不同工作负载下的稳定性与可行性，为实际运营中无人机编队规模与任务分配提供决策依据。仿真中，无人机参数依据假设2；选取固定地图10 km×10 km区域；需求点数量取{10，20，50，80}，分别模拟低、中、高及超高密度需求；权重选择第二组(ω_1，ω_2，ω_3，ω_4)=(0.5，0.3，0.2，0)。针对每个需求点数量，随机生成10次节点分布与航路权重，对每次实验都运行A*+GA算法，记录平均总飞行时间、平均总能耗、平均累积风险和任务完成率，不同需求点规模下对比如表4所示。

表4　不同需求点规模下对比

Tab.4　Comparison under different demand point scales

需求点数量T	平均总飞行时间/s	平均总能耗/(kW·h)	平均累积风险指标	任务完成率/%
10	23.6	304.2	4.6	0.97
20	51.6	570.6	7.2	0.96
50	133.1	1 455.1	17.2	0.95
80	214.3	2 304.2	26.4	0.91

表4表明，需求点数量增加时，总飞行时间近似线性增长，体现任务量增大对路径长度及任务串行化的影响；总能耗与飞行时间同步上升且增速略高(能耗与距离正相关)，源于高密度场景下路径重合与迂回产生的额外能耗；累积风险随任务量增多上升，但增幅低于能耗，表明算法在高密度场景下可有效规避高风险航段；任务完成率在需求点数量T≤50时高于95%，T=80时降至0.91%，提示任务密度超阈值后，路径拥堵或续航限制可能导致部分任务延误，完成率略有下降。

3.2.4　参数敏感性研究

(1) 关键参数敏感性分析。为了验证所提A*+GA算法在关键模型参数变化下的鲁棒性，从能耗率、风险系数分布范围和巡航速度3方面开展敏感性仿真实验，观察各项性能指标的响应规律。

①能耗率e敏感性。将单位距离能耗率e设置为{1.0，1.2，1.5}kW·h/km，其余参数保持不变：地图规模10 km×10 km，50个需求点；权重方案为第二组。接着对每一e值运行10次A*+GA算法，统计平均总飞行时间、总能耗和累积风险，不同能耗率对比如表5所示。

表5　不同能耗率对比

Tab.5　Comparison of different energy consumption rates

e/(kW·h/km)	平均总飞行时间/s	平均总能耗/(kW·h)	平均累积风险指标
1.0	60.1	509.2	7.2
1.2	62.7	576.9	7.7
1.5	64.6	732.3	5.8

由表5可知，随着e增大，总能耗呈线性上升；而为了优化综合代价，算法在e高时会略微选择更短或更低风险的路径，使得平均总飞行时间和平均累计风险反而有所下降。

②风险系数分布范围敏感性。将风险系数ρ在3个区间内均匀采样：低风险场景[0.05，0.3]，基准场景[0.1，0.5]，高风险场景[0.2，0.6]。其次，固定e=1.2 kW·h/km，v=10 m/s，对3种风险范围各运行10次，统计平均总飞行时间、总能耗和累积风险，不同风险系数分布范围对比如表6所示。

表6　不同风险系数分布范围对比

Tab.6　Comparison of different distribution ranges of risk coefficients

风险范围	平均总飞行时间/s	平均总能耗/(kW·h)	平均累积风险指标
[0.05，0.3]	64.9	552.9	6.7
[0.1，0.5]	63.7	550.8	8.4
[0.2，0.6]	61.9	546.9	9.6

通过表6可以看出，随着风险分布上移时，算法在保证完成率的前提下，会主动避开高风险航段，使得平均总飞行时间和平均总能耗略有下降，但累积风险不可避免地上升。

③巡航速度v敏感性。将巡航速度v为{8，10，12} m/s，其余参数保持基准值。此外，固定e=1.2 kW·h/km，风险区间[0.1，0.5]，对每个v值运行10次算法，记录统计平均总飞行时间、总能耗、累积风险和任务完成率，不同巡航速度对比如表7所示。

表7　不同巡航速度对比

Tab.7　Comparison of different cruise speeds

v/(m/s)	平均总飞行时间/s	平均总能耗/(kW·h)	平均累积风险指标	任务完成率/%
8	77.9	570.1	8.3	0.96
10	61.6	570.1	8.3	0.96
12	52.4	570.1	8.3	0.96

由表7可知，随着巡航速度v增加，平均总飞行时间明显下降，而能耗和风险因路径几何结构不变而保持近似稳定；任务完成率恒定于0.96，表明速度提升有助于提高时效，但对可靠性影响有限。

（2）结构化场景下的运营性能对比分析。为全面验证所提模型在复杂城市环境下的鲁棒性与决策效能，通过脱离单一的随机分布假设，并构建具有显著物理特征的实验场景进行对比分析。①基准随机型场景。将上述风险系数场景定义为基准随机型场景，作为实验的参照系，该场景下的风险系数在全网格范围内呈均匀随机分布。其目的在于验证改进A*算法在无先验地理信息干扰下的基础路径搜寻能力与收敛稳定性。②城市异质风险场景。该场景模拟了真实城市空间中人口密集区与规划航路的功能差异。通过设置中心城区为高风险区域、规划走廊为低风险区域，考察空间均衡约束对无人机路径抉择的引导作用。③流量拥塞风险场景。该场景引入了随流量动态变化的风险函数。当局部航路密度激增时风险随之上升，以此验证时刻决策变量S_{ijkt}触发的“持有点等待”机制在缓解空域时空冲突中的有效性。固定e=1.2 kW·h/km，v=10 m/s，$\triangle\tau$=5 s，对3种不同实验场景各运行10次，统计平均总飞行时间、总能耗和累积风险。通过对上述场景进行仿真，结构化风险场景下的性能指标对比如表8所示。

表8　结构化风险场景下的性能指标对比

Tab.8　Comparison of performance indicators under structured risk scenarios

实验场景	平均飞行时间/s	平均能耗/(kW·h)	走廊利用率/%	平均累积风险指标
基准随机场景	63.8	560.4	15.2	8.1
城市异质场景	68.5	585.2	78.4	4.2
流量拥塞场景	72.1	610.8	42.6	6.5

实验数据表明，在城市异质场景中，由于模型识别到走廊低代价属性，走廊利用率从15.2%提升至78.4%，虽然导致飞行时间微增，但累计风险降低了48.1%。在流量拥塞场景下，模型主动调节进入时刻S_{ijkt}以执行“错峰”配送，有效缓解了局部冲突。

（3）极端管制环境下任务连续性分析。设置禁飞区管制强度的敏感性分析，禁飞区管制场景旨在体现低空空域管理中的法规硬约束。通过在核心配送路段设置不可通行的多边形禁飞区域，检验模型通过路径重路由及补能决策维持任务连续性的弹性。固定e=1.2 kW·h/km，v=10 m/s，禁飞区占比按{10%，20%，30%}进行梯度采样，禁飞区风险值M设为一个足够大的正数，确保路径变量x_{ijkt}在该区域强行归零，并对每种禁飞区占比运行10次。针对低空管制约束，通过调节禁飞区的覆盖密度，测试了在极端环境下的运行稳定性，不同禁飞区密度下的任务完成率如表9所示。

表9　不同禁飞区密度下的任务完成率

Tab.9　Task completion rates under different no-fly zone densities

禁飞区占比/%	任务完成率/%	平均延迟时间/s	路径重路由次数/次
10	98.2	5.2	2
20	92.5	12.8	5
30	81.4	24.5	12

随着禁飞管制强度的增加，其解空间受到压缩，任务完成率呈非线性下降。当管制区域达到20%以上时，单纯的路径微调已无法满足需求，系统开始频繁调用补能决策变量y_{ktf}以支持远距离绕行，验证了多模式耦合决策在强管制环境下的生存能力。

3.2.5　结果分析

上述分析表明，所提模型及改进A*算法在能耗率、风险分布和巡航速度的多种取值下均能保持良好稳定性。能耗率上升时，算法会自动平衡路径选择以降低飞行时间和风险。风险分布上移时，通过避险策略，算法依旧保证总成本与可靠性的平衡。速度提升可显著优化配送时效性，而不增加能耗与风险。

此外，改进A*算法在保持实时性的同时，较传统A*算法能耗降低约7%~13%，并能确保高于95%的任务完成率，城市异质场景下，累计风险降低了48.1%。参数敏感性实验表明，A*+GA在能耗率、风险分布和巡航速度的多种取值下均能保持良好稳定性。

4　结束语

研究针对城市低空物流网络运行均衡问题，构建了多目标运行均衡优化模型，以飞行时间、能耗、风险和任务完成率为加权多目标函数，以物流均衡理论四要素为均衡约束条件，以运行逻辑及现实问题为基本约束条件，并利用改进A*算法进行了仿真。结果表明，该方法为建立运行均衡的城市

低空物流网络提供了支撑，能够助力低空物流效率提升。通过创新性地分析城市低空物流网络的运行均衡问题，为相关研究提供了理论和方法支持。此外，研究还可以继续完善，在落地应用中可使用其他改进A*算法进行优化提升实时性和鲁棒性，还可引入更多约束以贴合场景，例如应急低空救援和低空农业等。未来，还可在更大规模环境中验证模型，并探索低空与地面物流网络的协同优化应用。

参考文献：

[1] 张　军，陈　磊，高智杰，等. 低空无人机技术研究现状与展望[J]. 中国工程科学，2025，27(2)：73-85.
ZHANG Jun，CHEN Lei，GAO Zhijie，et al. Low-Altitude Unmanned Aerial Vehicle Technology：Current Status and Prospects[J]. Strategic Study of CAE，2025，27(2)：73-85.

[2] 张洪海，夷　珈，李　姗，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 Honghai，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.

[3] 范厚明，甘　兰，陈天磊，等. 时变路网及区域限时禁飞下车辆-无人机同时取送货路径问题[J]. 系统管理学报，2025，34(1)：50-67.
FAN Houming，GAN Lan，CHEN Tianlei，et al. Time-Dependent Electric Vehicle Routing Problem with Drones Considering Simultaneous Delivery and Pickup and No-Fly Zones[J]. Journal of Systems & Management，2025，34(1)：50-67.

[4] 刘正元，王清华. 无人机和车辆协同配送映射模式综述与展望[J]. 系统工程与电子技术，2023，45(3)：785-796.
LIU Zhengyuan，WANG Qinghua. Review and Prospect under the Mapping Mode of Coordinated Delivery of Drones and Vehicles[J]. Systems Engineering and Electronics，2023，45(3)：785-796.

[5] 许云鹏，谢雅琪，于　然，等. 感-通-物多目标融合应急无人机路径规划方法[J]. 通信学报，2024，45(4)：1-12.
XU Yunpeng，XIE Yaqi，YU Ran，et al. Integrated Perception-Communication-Logistics Multi-Objective Oriented Path Planning for Emergency UAVs[J]. Journal on Communications，2024，45(4)：1-12.

[6] 覃　睿. 再论低空经济：概念定义与构成解析[J]. 中国民航大学学报，2023，41(6)：59-64.
QIN Rui. Further Discussion on Low Altitude Economy：Concept Definition and Composition Analysis[J]. Journal of Civil Aviation University of China，2023，41(6)：59-64.

[7] 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.
FU Hui，CUI Yu，ZHAO Jiahong，et al. A Review of Research and Applications in Low-Altitude Logistics and Delivery Using Unmanned Aerial Vehicles[J]. Industrial Engineering Journal，2025，28(1)：9-21.

[8] AJAKWE S O，KIM D S. Facets of Security and Safety Problems and Paradigms for Smart Aerial Mobility and Intelligent Logistics[J]. IET Intelligent Transport Systems，2024，18(S1)：2827-2855.

[9] 王雅雪，陈彦如. 基于分支定价算法的众包车辆和无人机与卡车混合配送路径问题研究[J]. 运筹与管理，2025，34(4)：86-91.
WANG Yaxue，CHEN Yanru. Branch-and-Price Algorithm for Vehicle Routing Problem with Drones and Crowd-Shipping[J]. Operations Research and Management Science，2025，34(4)：86-91.

[10] 张明明，徐　政. 低空经济提振消费的内在机制与战略路径[J/OL]. 消费经济，1-12[2026-04-28]. https：//link. cnki. net/urlid/43. 1022. F. 20260121. 1633. 002.

[11] 何寿奎. 低空经济与绿色金融如何协同破解生态产品价值实现中的低效锁定[J/OL]. 当代经济管理，1-14[2026-04-28]. https：//link. cnki. net/urlid/13. 1356. F. 20251229. 1432. 002.

[12] 李连成，李名良. 论低空经济：内涵构成、动力特征与实践路径[J]. 北京交通大学学报(社会科学版)，2025，24(4)：98-106.
LI Liancheng，LI Mingliang. On the Low-Altitude Economy：Connotation Composition，Dynamic Characteristics，and Practical Paths[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition)，2025，24(4)：98-106.

[13] 周钰哲. 低空经济发展的理论逻辑、要素分析与实现路径[J]. 东南学术，2024(4)：87-97.
ZHOU Yuzhe. Low-Altitude Economy：Theoretical Logic，Development Elements and Path to Realization[J]. Southeast Academic Research，2024(4)：87-97.

[14] 赵景龙. 低空经济高质量发展：内涵特征、约束条件与突破路径[J]. 当代经济研究，2025(4)：27-42，F0003.

ZHAO Jinglong. High-Quality Development of Low-Altitude Economy: Connotation Characteristics, Constraints and Breakthrough Paths[J]. Contemporary Economic Research, 2025(4): 27-42, F0003.

[15] 李芏巍，李峻磊，甘盖凡，等. 低空飞行在航空物流领域的机遇和挑战[J]. 供应链管理，2024，5(8)：47-62.
LI Duwei, LI Junlei, GAN Gaifan, et al. Opportunities and Challenges of Low-Altitude Flights in Air Logistics[J]. Supply Chain Management, 2024, 5(8): 47-62.

[16] 张　纯，梁凯轩，陈梦珂，等. 基于无人机三维网络分析的城中村社区低空配送研究[J]. 西部人居环境学刊，2025，40(3)：41-48.
ZHANG Chun, LIANG Kaixuan, CHEN Mengke, et al. Research on UAV Delivery in the Urban Complex Community Based on 3D Network Analysis[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2025, 40(3): 41-48.

[17] 刘佳雯，王锣莹，沈　通，等. 国内外低空经济发展及其在铁路领域的应用场景研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(10)：30-43.
LIU Jiawen, WANG Liuying, SHEN Tong, et al. Low-Altitude Economy Development in China and Abroad and Its Application Scenarios in Railways[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(10): 30-43.

[18] 王成林，郑　颖，皇甫宜龙，等. 生鲜类物流配送网络选址-路径优化问题研究[J]. 数学的实践与认识，2020，50(10)：33-43.
WANG Chenglin, ZHENG Ying, HUANGFU Yilong, et al. Study on Optimization Problem for Location-Routing of Fresh Logistics Distribution Network[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2020, 50(10): 33-43.

[19] 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 Chunxiao, GUO Tong, LI Yumeng. Dual-Population Coevolutionary Optimization for Multi-Layer Urban Air Logistics Network[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(11): 287-306.

[20] 何珊珊，郭　彦，朱文海，等. 疫情下考虑均衡松弛库存的双目标应急物流网络优化研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(1)：16-22，29.
HE Shanshan, GUO Yan, ZHU Wenhai, et al. Study on the Bi-Objective Optimization of Emergency Logistics Network with Balanced Slack Inventory during Pandemic Period[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(1): 16-22, 29.

[21] 李金澄，任轶华，李季涛. 铁路货运站树枝形专用线取送作业计划自动编制研究[J]. 铁路物流，2025，43(7)：54-64.
LI Jincheng, REN Yihua, LI Jitao. Automatic Preparation of Pick-up and Delivery Operation Schedule for Tree-Shaped Special Railway Line of Freight Station[J]. Railway Logistics, 2025, 43(7): 54-64.

[22] 王涵晴，丁小东，霍静怡. 高铁快运柜运营网络布局方法及案例研究[J]. 铁道货运，2023，41(3)：48-52，58.
WANG Hanqing, DING Xiaodong, HUO Jingyi. Layout Method and Case Study of Operation Network for High Speed Railway Express Containers[J]. Railway Freight Transport, 2023, 41(3): 48-52, 58.

[23] 张启钱，许卫卫，张洪海，等. 复杂低空物流无人机路径规划[J]. 北京航空航天大学学报，2020，46(7)：1275-1286.
ZHANG Qiqian, XU Weiwei, ZHANG Honghai, et al. Path Planning for Logistics UAV in Complex Low-Altitude Airspace[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(7): 1275-1286.

[24] 祝文杰，李　维，王子炎. 改进A*算法的无人机城市低空物流路径规划[J]. 计算机工程与应用，2025，61(19)：302-310.
ZHU Wenjie, LI Wei, WANG Ziyan. Improved A* Algorithm for UAV Path Planning in Urban Low-Altitude Logistics[J]. Computer Engineering and Applications, 2025, 61(19): 302-310.

[25] 王大中，张达仁. 低空经济发展中科技创新与产业创新深度融合的内在逻辑、实现机制与政策支持[J]. 西安财经大学学报，2026，39(2)：84-98.
WANG Dazhong, ZHANG Daren. Internal Logic, Realization Mechanisms and Policy Support for the Deep Integration of Technological Innovation and Industrial Innovation in the Development of Low-Altitude Economy[J]. Journal of Xi'an University of Finance and Economics, 2026, 39(2): 84-98.

[26] 谢宝树，欧阳成，叶丽莎. 惠州发布低空经济应用场景供需清单[N]. 惠州日报，2025-09-15(1).

[27] 肖作鹏，张伟聪，李祎杨，等. 低空无人机配送的空地协同组织特征及挑战：以深圳市为例[J]. 资源科学，2025，47(8)：1663-1674.
XIAO Zuopeng, ZHANG Weicong, LI Yiyang, et al. Characteristics and Challenges of Air-Ground Coordination for Low-Altitude Drone Delivery: A Case Study of Shenzhen[J].

Resources Science，2025，47(8)：1663-1674.

[28] 廖小罕，徐晨晨，叶虎平，等. 无人机应用发展关键基础设施与低空公共航路网规划[J]. 中国科学院院刊，2022，37(7)：977-988.
LIAO Xiaohan，XU Chenchen，YE Huping，et al. Critical Infrastructures for Developing UAVs' Applications and Low-Altitude Public Air-Route Network Planning[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences，2022，37(7)：977-988.

[29] 陈　丹，汤　程，谢　宇，等. 面向城市低空物流配送的无人机实时航迹双层规划[J]. 航空学报，2025，46(16)：229-247.
CHEN Dan，TANG Cheng，XIE Yu，et al. Real Time Dual Layer Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles for Urban Low Altitude Logistics Distribution[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2025，46(16)：229-247.

[30] 刘长石，吴　张，寇　纲，等. 卡车-多无人机动态协同的配送路径优化研究[J]. 管理科学学报，2025，28(10)：160-173.
LIU Changshi，WU Zhang，KOU Gang，et al. Research on Dynamic Cooperative Distribution Route Planning of Truck-Multiple Drones[J]. Journal of Management Sciences in China，2025，28(10)：160-173.

[31] 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.
CHENG Jie，ZHENG Yuan，LI Chenglong，et al. Minimum Risk Path Planning Algorithm for Urban Very-Low-Level Logistics Scenarios[J]. Science Technology and Engineering，2023，23(2)：690-698.

[32] 杨继瑞，王　平. 成渝地区双城经济圈低空经济发展现状、挑战及路径抉择[J]. 西部论坛，2025，35(4)：98-109.
YANG Jirui，WANG Ping. Current Situation，Challenges，and Path Selection of Low-Altitude Economy Development in the Chengdu-Chongqing Economic Circle[J]. West Forum，2025，35(4)：98-109.

[33] 史　峰，龚云斌，黄燕婷，等. 税惠赋能低空经济高质量发展的实施路径研究：基于江西省282家低空经济重点企业的调查[J]. 税务研究，2025(5)：85-89.

[34] ZHENG B，ZHOU W J，MA X. Quantitative Study on UAV Operational Risk Based on Specific Operation Risk Assessment Model[J]. Quality and Reliability Engineering International，2025，41(5)：1689-1713.

[35] CHEN Z Y. Cooperative Networking and Information Processing System of Wireless Communication UAV under the Background of Intelligent Service[J]. Computational Intelligence，2024，40(3)：e12688.

[36] TANG H G，SU Y H，LI M T，et al. A Novel Structural-Shared Antenna for UAV Direction Retrodirective and Satellite-Integrated UAV Communication Applications[J]. Microwave and Optical Technology Letters，2025，67(8)：e70346.

[37] 肖　鹏，田润澜，李　赫，等. 基于改进蚁群算法的无人机通信侦察航迹规划[J]. 控制与决策，2025，40(11)：3239-3252.
XIAO Peng，TIAN Runlan，LI He，et al. UAV Communication Reconnaissance Path Planning Based on Improved Ant Colony Algorithm[J]. Control and Decision，2025，40(11)：3239-3252.

[38] 廖榆信，王　伟，滕卫明，等. 基于多目标约束的无人机光顺路径生成全局优化方法[J]. 浙江大学学报(工学版)，2025，59(7)：1481-1491.
LIAO Yuxin，WANG Wei，TENG Weiming，et al. Multi-Objective Constraint-Based Smooth Path Generation for UAVs Global Optimization Method[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science)，2025，59(7)：1481-1491.

[39] 吴国秋，徐　剑. 基于物流均衡理论的C2M模式服务制造物流体系均衡模型研究[J]. 工业工程与管理，2022，27(6)：118-125.
WU Guoqiu，XU Jian. Research on Equilibrium Model of C2M Mode Service Manufacturing Logistics System Based on Logistics Equilibrium Theory[J]. Industrial Engineering and Management，2022，27(6)：118-125.

[40] 徐　剑，吴国秋. 基于体系工程与物流均衡的C2M服务制造物流体系结构模型[J]. 运筹与管理，2020，29(8)：128-136.
XU Jian，WU Guoqiu. C2M Service Manufacturing Logistics System Structure Model Based on System of Systems Engineering and Logistics Equilibrium[J]. Operations Research and Management Science，2020，29(8)：128-136.

[41] 吴　国，秋徐剑. 物流体系均衡度及其测度模型研究[J]. 企业经济，2020，39(4)：70-76.

[42] SUN B F，NIE L D，WANG W，et al. Dynamic Identification of Logistics Critical Roads Based on BeiDou Trajectory Data[J]. IET Intelligent Transport Systems，2023，17(7)：1467-1481.

[43] 王　硕，李　洋，赵蕴龙，等. 无人机航迹规划算法综述[J/OL]. 哈尔滨工程大学学报，1-14[2026-04-28]. https：//

link. cnki. net/urlid/23. 1390. U. 20250616. 1544. 003.

[44] 蒋杰辉，盛　典. 考虑低碳政策和不确定需求的物流网络鲁棒优化[J]. 运筹与管理，2024，33(8)：79-85.
JIANG Jiehui，SHENG Dian. Robust Optimization of Logistics Network Considering Low-Carbon Policy and Uncertain Demand[J]. Operations Research and Management Science，2024，33(8)：79-85.

[45] GUO L N，LIU M M. Optimization of Low-Carbon Cold Chain Logistics Distribution Path for Agricultural Products Based on Two-Stage Algorithm[J]. Advanced Control for Applications，2024，6(4)：e176.

[46] 张　帅，刘思亮，张文宇. 电动车-无人机协同配送模式下带时间窗的车辆路径优化问题[J]. 中国管理科学，2025，33(4)：131-141.
ZHANG Shuai，LIU Siliang，ZHANG Wenyu. Vehicle Routing Problems with Time Windows under the Collaborative Delivery Mode of Electric Vehicle-Drone[J]. Chinese Journal of Management Science，2025，33(4)：131-141.

[47] 秦文龙，罗　贺，李晓多，等. 考虑多换电站的多无人机应急电力巡检路径规划方法[J]. 控制与决策，2025，40(8)：2391-2399.
QIN Wenlong，LUO He，LI Xiaoduo，et al. Multi-UAV Emergency Power Inspection Path Planning Method Considering Multiple Charging Stations[J]. Control and Decision，2025，40(8)：2391-2399.

[48] 张　彪，康　峰，许舒婷. 基于改进RRT与GA的多目标路径规划：以无人机林区巡检为例[J]. 北京林业大学学报，2025，47(4)：129-141.
ZHANG Biao，KANG Feng，XU Shuting. Multi-Objective Path Planning Based on Improved RRT and GA：Taking UAV Forest Inspection as an Example[J]. Journal of Beijing Forestry University，2025，47(4)：129-141.

[49] 杨明亮，李　宁. 改进A*算法的移动机器人路径规划[J]. 机械科学与技术，2022，41(5)：795-800.
YANG Mingliang，LI Ning. Study on Mobile Robot Path Planning Based on Improved A* Algorithm[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering，2022，41(5)：795-800.

[50] 王海瑶，安天洋. 基于改进A*算法融合DWA算法的机器人路径规划[J]. 电子制作，2023，31(21)：48-51.

[51] 杜茂康，罗　娟，李博文. 基于多车场的车载无人机协同配送路径优化[J]. 系统工程，2021，39(6)：90-98.
DU Maokang，LUO Juan，LI Bowen. Research on Cooperative Delivery Route Optimization of Vehicle-Carried Drones Based on Multi-Depot[J]. Systems Engineering，2021，39(6)：90-98.

[52] 王　宁，张悟移. 区域物流加权网络模型的构建及优化：以江浙沪地区为例[J]. 工程管理科技前沿，2025，44(4)：90-96.
WANG Ning，ZHANG Wuyi. Construction and Optimization of Regional Logistics Weighted Network Model：The Case of Jiangsu，Zhejiang and Shanghai Regions[J]. Frontiers of Science and Technology of Engineering Management，2025，44(4)：90-96.

[53] 刘　异，胡　焓，吴　江. 碳减排政策下冷链物流网络综合优化研究[J]. 管理工程学报，2025，39(6)：268-281.
LIU Yi，HU Han，WU Jiang. Research on Comprehensive Optimization of Cold Chain Logistics Network under Carbon Reduction Policies[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management，2025，39(6)：268-281.

[54] 卢福强，汪　夏，毕华玲，等. 基于改进野狗优化算法的无人机-骑手联合外卖配送路径优化[J]. 管理工程学报，2026，40(1)：262-273.
LU Fuqiang，WANG Xia，BI Hualing，et al. UAV-Rider Joint Takeout Delivery Routing Optimization Based on Improved Dingo Optimization Algorithm[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management，2026，40(1)：262-273.

[55] 刘全义，刘继豪，艾洪舟，等. 基于混合策略的复杂山区覆盖搜索方法[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2026，66(2)：233-240.
LIU Quanyi，LIU Jihao，AI Hongzhou，et al. Coverage Search Methods for Complex Mountainous Areas Using Hybrid Strategy[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology)，2026，66(2)：233-240.

[56] 洪英杰，高　岩，杨书生，等. 基于无人机数据和ADP算法的铁路线路多目标优化方法[J]. 铁道运输与经济，2025，47(4)：186-195，204.
HONG Yingjie，GAO Yan，YANG Shusheng，et al. Multi-Objective Optimization Approach for Railway Alignment Based on Unmanned Aerial Vehicle Data and Approximate Dynamic Programming Algorithm[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(4)：186-195，204.

(责任编辑　吴文娟)