

# 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

安喜才, 叶春明\*, 刘勤明

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2026年1月3日; 录用日期: 2026年1月13日; 发布日期: 2026年1月29日

## 摘要

随着低空经济(Low-Altitude Economy, LAE)的快速发展, 无人机配送作为低空经济的重要应用场景, 在电商即时物流领域展现出显著的时效与灵活性优势, 但单一空中或地面运输模式难以满足城市高频、规模化配送需求。为此, 本文围绕低空经济时代的空地协同即时配送问题, 系统梳理了空地协同物流的研究进展, 从低空经济特点与多模式协同运输理论出发, 构建面向高时效需求的空地协同配送分析框架。以深圳空地协同智慧物流运营中心为典型案例, 深入分析空地协同配送的组织特征与运行模式, 在此基础上提出涵盖空域层、地面层、协同调度层与服务反馈层的空地协同即时配送系统架构, 并从动态任务分配、多模协同路径规划及能源约束等方面探讨优化策略。研究分析表明, 空地协同配送模式能够有效提升配送效率与资源利用水平。最后, 本文分析了空地协同配送在技术、规划与制度层面面临的挑战, 并对未来研究方向进行了展望, 为低空经济背景下城市智能物流体系构建提供理论参考与实践启示。

## 关键词

低空经济, 空地协同, 无人机配送, 电商配送, 城市即时物流

## A Study on a New Air-Ground Coordinated Instant Delivery Model for E-Commerce Last-Mile Logistics in the Era of the Low-Altitude Economy

Xicai An, Chunming Ye\*, Qinming Liu

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

Received: January 3, 2026; accepted: January 13, 2026; published: January 29, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 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. DOI: 10.12677/ec.2026.151105

## Abstract

With the rapid development of the Low-Altitude Economy (LAE), drone delivery—a key application scenario within this sector—has demonstrated significant advantages in timeliness and flexibility for on-demand logistics. However, relying solely on aerial or ground transportation modes struggles to meet the high-frequency, large-scale delivery demands of urban environments. Therefore, this paper systematically reviews research progress in air-ground collaborative logistics, focusing on the challenges of timely delivery in the low-altitude economy era. Based on the characteristics of the low-altitude economy and multi-modal collaborative transport theory, it constructs an analytical framework for air-ground collaborative delivery tailored to high-efficiency demands. Using Shenzhen's Air-Ground Collaborative Smart Logistics Operations Center as a case study, it delves into the organizational characteristics and operational models of air-ground collaborative delivery. Based on this analysis, it proposes an air-ground collaborative instant delivery system architecture encompassing airspace, ground, collaborative dispatch, and service feedback layers. Optimization strategies are explored across dynamic task allocation, multi-modal collaborative route planning, and energy constraints. Research findings demonstrate that the air-ground collaborative delivery model effectively enhances delivery efficiency and resource utilization levels. Finally, this paper analyzes challenges in technology, planning, and institutional frameworks for air-ground collaborative delivery, while outlining future research directions. It provides theoretical references and practical insights for constructing urban intelligent logistics systems within the low-altitude economy context.

## Keywords

Low-Altitude Economy, Air-Ground Coordination, Drone Delivery, E-Commerce Delivery, Urban Instant Logistics

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

### 1.1. 研究背景

近年来,随着无人机技术、第五代移动通信(5G)、北斗卫星导航系统以及智能调度与感知技术的快速发展,低空空间正逐步由传统意义上“未被充分开发和系统利用”的空域资源,转变为具备显著经济价值和社会服务功能的新型生产要素。在此背景下,以低空飞行器运行、低空基础设施建设及其相关产业融合发展为核心内容的低空经济(Low-Altitude Economy, LAE)迅速兴起,成为全球范围内新一轮科技创新与产业升级的重要方向。

从国际视角看,美国、欧洲及部分亚洲国家已在无人机电子商务即时配送、城市空中交通(UAM)等领域开展了大量探索性实践,将低空空域作为提升城市运行效率和公共服务能力的重要载体。中国在政策引导、技术积累与应用场景拓展方面表现尤为突出。近年来,国家层面多次在发展规划与政策文件中强调低空经济的重要性,各级地方政府也将其视为培育新质生产力、推动区域经济高质量发展的关键抓手。截至2025年,已有数十个省、市相继出台低空经济专项规划或支持政策,围绕通航机场建设、无人机运行管理、低空应用场景拓展等方面展开系统布局,初步形成了以通航机场、无人机巢和临时起降点

为核心的多层级低空基础设施网络，为低空物流配送等应用奠定了良好的物理与制度基础。

在低空经济众多应用场景中，物流配送被认为是最具商业化潜力和社会效益的重点方向之一<sup>[1]</sup>。随着电子商务和本地生活服务的快速发展，城市物流需求呈现出高频次、小批量、强时效的显著特征，电子商务末端即时配送逐渐成为城市物流体系中的重要组成部分。然而，受制于城市道路资源有限、交通拥堵加剧以及配送半径不断扩展等因素，传统以地面车辆和骑手为主的配送模式在时效性、稳定性和服务覆盖范围等方面面临明显瓶颈，难以持续满足快速增长的即时配送需求。

在此背景下，将低空无人机引入城市物流体系，并与地面运输系统进行深度融合，构建空地协同的一体化配送模式，成为学术界与产业界共同关注的研究热点和发展方向。通过发挥无人机在跨区域快速直达运输方面的优势，并结合地面车辆在末端精细化配送中的灵活性，空地协同配送有望突破传统物流模式的时空约束，为城市即时配送提供新的技术路径和组织形态。

## 1.2. 研究意义

空地协同配送模式通过空中与地面运输方式的有机结合，在理论与实践层面均具有重要研究价值和现实意义。首先，从运行效率角度看，低空无人机能够在一定程度上绕开复杂的地面交通网络，实现点对点快速运输，显著缩短配送时间；通过与地面配送资源协同，可有效提升整体物流系统的响应速度和服务可靠性，特别适用于对时效要求较高的生鲜配送、医疗物资运输及应急物流等场景。

其次，从城市交通与空间治理角度看，空地协同配送有助于分担部分地面物流运输需求，缓解城市道路拥堵压力，优化城市交通结构。同时，低空配送的引入也推动了城市三维空间的立体化利用，为城市空间资源的高效配置和精细化管理提供了新的思路，有助于提升城市运行的整体韧性与可持续性。

然而，空地协同电子商务末端即时配送系统的构建并非简单地叠加无人机与地面配送方式，其运行过程涉及空域资源配置、配送任务分配、空中航迹规划与地面路径调度等多维要素的高度耦合。一方面，低空空域资源具有明显的稀缺性和安全约束特征，无人机飞行需在复杂的城市环境中兼顾安全性、合规性与运行效率；另一方面，地面交通状态具有显著的动态性与不确定性，空地系统之间的信息交互和协同调度难度较高，这对现有物流组织模式和优化方法提出了新的挑战。

因此，从系统视角出发，对空地协同配送的运行机制、组织模式与优化方法进行深入研究，具有重要的理论意义和实践价值。一方面，有助于丰富低空经济与智能物流交叉领域的研究体系，拓展传统物流与运输优化理论在三维空间和多模式协同场景下的应用；另一方面，也可为空地协同配送系统的规划设计、运营管理及政策制定提供科学依据，为低空经济时代城市物流体系的转型升级提供可行的实施路径。

基于上述背景与需求，本文围绕低空经济条件下的空地协同即时配送问题展开系统研究，旨在构建具有现实可行性和理论创新性的空地协同配送新模式，为推动低空物流的规模化应用与高质量发展提供支撑。

## 2. 文献综述

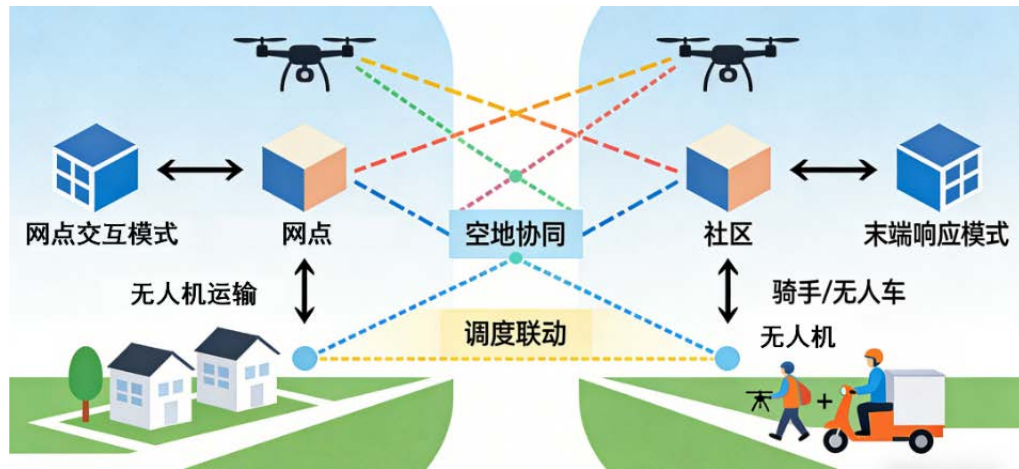
随着无人机技术在物流领域的逐步成熟，空地协同配送作为连接低空运输系统与地面物流网络的重要组织形式，已成为智能物流与低空经济交叉研究中的核心议题之一。现有研究从优化建模、调度控制以及城市级基础设施支撑等多个层面，对空地协同配送体系展开了较为系统的探索。总体来看，相关研究主要集中在以下三个方面。

### 2.1. 空地协同优化模型研究

空地协同配送的本质在于多运输方式的联合决策与协同优化。在运筹优化与物流工程领域，学者们

普遍将空地协同配送问题视为传统车辆路径问题(Vehicle Routing Problem, VRP)的拓展形式,通过引入无人机这一新型运输主体,构建多平台、多约束的联合优化模型。

早期研究多聚焦于“卡车-无人机协同配送”问题,即由地面车辆携带无人机至特定节点,无人机执行部分配送任务后再返回车辆或指定回收点。这类问题通常被建模为 Truck-and-Drone VRP (TDRP)或 Multi-Platform VRP,其核心在于同时优化地面车辆行驶路径与无人机飞行路径,以最小化总体配送时间或运营成本[2]。近年来,随着计算能力和建模方法的发展,相关模型逐步引入多无人机、多车辆、多配送中心等复杂结构,并考虑飞行时间、载重限制、起降约束及能耗约束等现实因素[3],如图1。



**Figure 1.** Schematic diagram of aerial-ground collaborative instant delivery  
**图 1.** 空地协同即时配送示意图

在算法求解方面,研究者根据问题规模与复杂度,采用了多种方法,包括混合整数线性规划(MILP)、动态规划、启发式与元启发式算法(如遗传算法、蚁群算法)以及近年来逐渐兴起的强化学习方法[4]。相关研究表明,相较于单一地面配送模式,合理的空地协同策略能够在配送时效和系统成本方面取得显著改进。

然而,现有优化模型多基于相对理想化的假设条件,例如静态需求、确定性飞行环境或有限规模场景,对城市级大规模即时配送系统中任务动态到达、交通状态变化以及多主体协同等复杂特征考虑不足。

## 2.2. 空域与地面资源协同调度研究

随着研究对象由“单车-单机协同”逐步扩展至城市级运行场景,空地协同配送问题开始从路径优化延伸至空域与地面资源的协同调度层面。在低空经济背景下,无人机配送不再是孤立运行的系统,其飞行轨迹、通信链路与地面交通状态之间存在高度耦合关系,如图2。

相关研究提出了面向低空环境的三维航迹规划与通信协同优化方法,通过构建三维空间网格或连续空域模型,实现无人机飞行路径、通信质量与安全约束的联合优化[5][6]。一些研究进一步将地面交通状态纳入调度决策中,通过实时感知地面车辆位置、道路拥堵程度以及配送节点负载情况,动态调整无人机起降点与任务执行顺序,以提升系统整体运行效率[7]。

从系统角度看,这类研究逐渐体现出从“单任务优化”向“系统协同控制”转变的趋势[8][9]。然而,现有研究多集中于技术层面的算法设计,对实际城市运行中空域管理规则、飞行许可约束以及多运营主体并存情况下的协同机制关注不足[10]-[12]。





Figure 2. Schematic diagram of airspace-ground collaborative scheduling  
图 2. 空域 - 地面协同调度原理图

2.3. 城市级空地数据基础设施研究

除优化模型与调度算法外，城市级空地协同配送的实现高度依赖于统一的数据基础设施与数字化支撑平台。近年来，随着数字孪生城市与智慧交通的发展，一些研究和实践开始探索将低空空域数据、无人机运行状态与地面交通信息进行融合，为空地协同配送提供全局感知与决策支持[13]。

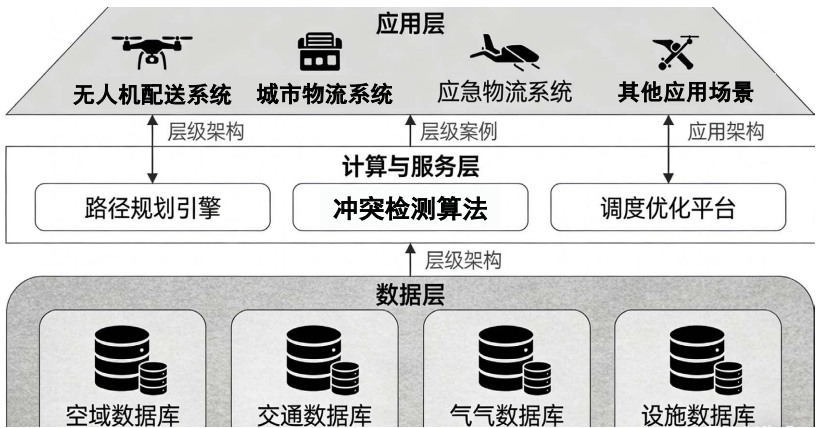


Figure 3. Framework diagram of the city-level air-ground collaborative data platform  
图 3. 城市级空地协同数据平台框架图

典型实践如“空中高德”等时空底座项目，通过构建覆盖低空空域与地面交通的多源数据平台，实现无人机飞行环境感知、动态路径规划与风险预警功能。这类平台通常整合了地图数据、空域限制信息、气象数据及实时交通状态，为无人机配送系统的安全运行与路径优化提供基础支撑，如图 3。

2.4. 研究评述与不足分析

综合现有研究可以发现，学术界与产业界已在空地协同配送的模型构建、算法设计及技术平台方面

取得了一定进展，为低空经济背景下的物流创新奠定了重要基础。然而，从城市级即时配送应用需求出发，仍存在以下不足：

- (1) 现有研究多侧重局部优化问题，缺乏面向城市尺度的系统化空地协同配送框架；
- (2) 对末端配送环节与地面物流系统深度联动的研究相对不足；
- (3) 空域管理约束与多主体协同运行机制尚未得到充分建模与分析。

因此，有必要在现有研究基础上，进一步从系统视角出发，构建面向低空经济时代的空地协同即时配送新模式，以弥补理论研究与实际应用之间的差距。

### 3. 空地协同配送新模式实践案例分析

#### 3.1. 深圳空地协同智慧物流运营中心案例

随着低空经济相关政策的持续推进和无人机应用场景的不断拓展，深圳在全国率先探索低空物流的规模化、体系化运行模式。2025 年 2 月，全国首个“空地协同”智慧物流运营中心在深圳市宝安区正式启用，标志着空地协同配送从试点示范阶段迈入以系统化运营和商业化落地为特征的新阶段。该运营中心以低空无人机与地面无人配送系统深度融合为核心，通过统一规划、集中调度和协同运行，实现了空中运输与地面配送在同一物流体系内的高效协作。

从功能布局上看，该智慧物流运营中心集成了无人机起降平台、无人车接驳区以及智能指挥调度中心等关键功能模块。其中，无人机起降平台承担跨区域、跨节点的空中运输任务，无人车接驳区负责与地面道路网络对接，完成末端配送任务，而智能指挥调度中心则通过实时数据采集与智能算法，对空地资源进行统一调配与动态管理。这种“同场融合、协同运行”的模式突破了传统物流系统中空中与地面运输相互割裂的运行方式，为空地协同配送的规模化应用提供了现实样本。

在具体运行机制上，该中心采用“无人机主干运输 + 无人车末端接驳”的协同配送方式。无人机主要负责物流枢纽之间或枢纽至片区节点的快速运输，充分发挥其不受地面交通拥堵影响、点对点直达的优势；无人车则在接收无人机投送货物后，利用地面道路网络完成社区、园区等末端配送任务。这种分工模式在保证配送时效的同时，有效降低了无人机在复杂城市环境中进行低空末端飞行所带来的安全与管理风险。

通过上述运行机制，深圳空地协同智慧物流运营中心逐步形成了以物流枢纽为核心、区域配送网格为支撑、末端服务节点为落点的“枢纽 - 网格 - 末端”三级配送体系。该体系不仅显著缩短了城市内部及跨区域物流配送时间，还在多场景测试中验证了其运行稳定性和经济可行性，为空地协同配送的商业化运营提供了可复制、可推广的实践经验。

#### 3.2. 深圳低空无人机配送的组织特征与模式分析

对低空无人机配送的组织模式进行了系统梳理，发现其空地协同配送已逐步演化出两类具有代表性的运行模式，即“网点互通模式”和“末端响应模式”。这两种模式在配送距离、组织方式和资源配置等方面存在明显差异，但共同构成了深圳低空物流体系的重要组成部分。

##### 3.2.1. 网点互通模式

“网点互通模式”主要面向跨区域、跨节点的中长距离配送需求，通常以城市或区域级物流枢纽为核心节点，通过低空无人机实现不同物流网点之间的快速互联。在该模式下，无人机承担主干运输功能，将货物在多个物流节点之间进行高频次转运，显著提升了物流网络的联通效率。

该模式强调低空无人机在物流网络中的“连接器”作用，其运行效果在很大程度上依赖于物流节点布局的合理性以及空域资源的可达性。通过减少对地面交通的依赖，网点互通模式有效提升了跨区配送

的时效性,适用于医药、生鲜及高价值商品的快速运输场景。

### 3.2.2. 末端响应模式

与网点互通模式不同,“末端响应模式”主要服务于短距离、高时效的即时配送需求,强调无人机与末端地面配送资源的快速协同。在该模式下,无人机通常负责将货物快速投送至社区、园区或临时投放点(如无人机空投柜),再由地面骑手或无人车完成“最后一公里”的配送任务。

该模式充分利用无人机在时间敏感场景中的优势,同时避免其直接进入人员密集区域进行复杂飞行,从而在效率与安全之间实现平衡。末端响应模式在即时零售、应急物资投送等场景中表现出较高的灵活性和适应性。

### 3.2.3. 组织特征综合分析

尽管上述两种空地协同配送模式在运行目标与组织方式上存在差异,但其共同特征主要体现在以下几个方面:一是空地资源的深度整合,通过统一调度平台实现空中与地面运输的协同运行;二是配送过程的高频实时响应,系统能够根据需求变化和运行状态动态调整配送策略;三是组织结构的模块化与可扩展性,为不同规模和场景下的应用提供了灵活适配空间。

上述实践经验表明,深圳在空地协同配送方面已初步形成较为成熟的运行范式,为构建面向低空经济时代的空地协同即时配送体系提供了重要的现实参考,也为后续模型构建与优化策略研究奠定了实践基础。

## 4. 空地协同即时配送新模式框架与优化策略

### 4.1. 空地协同即时配送新模式架构设计

在低空经济背景下,空地协同即时配送系统不再是单一运输方式的简单叠加,而是一个集成多类运输主体、多源信息与多层决策机制的复杂系统。为有效应对城市即时配送中需求动态性强、运行环境复杂以及空地资源高度耦合等特征,本文在综合既有实践经验与相关研究成果的基础上,提出一种面向高时效需求的空地协同即时配送系统架构。该架构通过分层设计的方式,将空中运输、地面配送、协同调度与服务反馈有机整合,形成具有清晰功能分工与协同机制的系统框架。

#### 4.1.1. 空域层:低空无人机集群与飞行管理系统

空域层是空地协同即时配送系统的空中执行单元,主要由低空无人机集群及其配套的智能飞行管理系统构成。该层的核心功能在于承担中长距离或跨区域的快速运输任务,并在满足安全与合规要求的前提下,实现无人机的高效运行。

在运行机制上,空域层通过飞行管理系统对无人机的起飞、航线选择、飞行高度及降落过程进行统一规划与动态控制。结合低空空域结构特征,无人机航线通常以三维航迹形式进行建模,并根据实时气象条件、空域限制和运行负载进行动态调整,从而提高空中运输的稳定性与安全性。

此外,空域层还需与地面系统保持高频信息交互,包括无人机位置、剩余电量、载重状态等关键运行参数,为协同调度层的决策提供基础数据支撑。

#### 4.1.2. 地面层:多类型配送资源与末端设施

地面层是空地协同配送系统中承担末端服务功能的重要组成部分,主要包括地面配送车辆、无人配送车以及多样化的末端配送设施,如无人机空投柜、社区智能货架和临时投放点等。

在该层中,地面配送资源主要负责短距离、高精度的配送任务,尤其是在社区、园区等人员密集区域,地面配送方式在灵活性和安全性方面具有不可替代的优势。通过与空域层形成分工协作关系,地面

层能够有效承接无人机完成的中继运输任务，实现“空中快速转运－地面精细配送”的协同模式。

地面层的运行状态，如道路拥堵情况、配送节点负载水平和末端服务能力，将直接影响整体配送效率，因此需要被实时感知并反馈至协同调度层。

#### 4.1.3. 协同调度层：空地资源的统一决策中枢

协同调度层是空地协同即时配送系统的核心控制单元，其主要功能是对空域层与地面层的资源进行统一调配与协同优化。该层通过整合来自无人机、地面车辆、交通系统及环境感知设备的多源数据，对配送任务进行实时分析和决策。

在调度机制上，协同调度层通常采用集中式或分布式决策结构，根据订单时效要求、资源可用性以及运行约束，确定任务由空中或地面方式执行，并动态生成或调整相应的配送路径。通过引入优化算法，该层能够在多目标约束条件下，平衡配送时效、运营成本与系统安全性。

#### 4.1.4. 服务与反馈层：需求驱动与系统自适应调节

服务与反馈层以用户需求为导向，是连接系统运行与服务体验的重要接口。该层通过实时采集用户订单信息、配送反馈以及环境感知数据，为系统运行提供动态修正依据。

在即时配送场景下，订单具有明显的随机性和突发性，服务与反馈层通过将实时需求变化快速传递至协同调度层，使系统能够及时调整任务分配和路径规划方案，从而增强系统的自适应能力与运行韧性。

### 4.2. 空地协同配送的调度与路径优化策略

在上述系统架构基础上，空地协同即时配送的关键在于如何通过合理的调度与路径规划策略，实现多资源、多约束条件下的高效协同运行。为此，本文从动态任务分配、多模协同路径规划以及能源与载重约束三个方面，构建空地协同配送的优化策略体系。

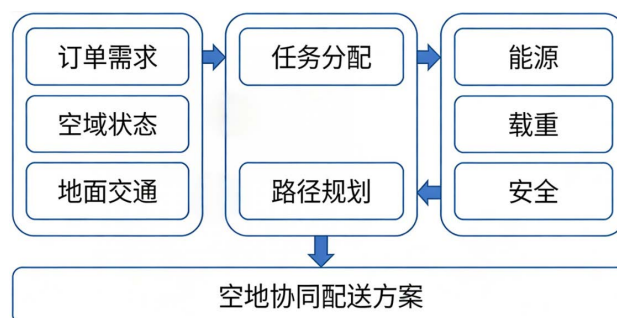
#### 4.2.1. 动态任务分配策略

动态任务分配是空地协同配送系统运行的首要决策问题。本文根据实时订单密度、配送时效要求、天气条件及地面交通状态，对配送任务进行空地方式选择。

具体而言，当订单具有高时效性且地面交通拥堵程度较高时，优先采用无人机执行空中运输任务；而在短距离或人员密集区域，则优先由地面配送资源完成末端服务。通过构建双层调度机制，系统可在宏观层面确定任务分配比例，在微观层面细化到具体执行主体，从而实现资源的高效利用。

#### 4.2.2. 多模协同路径规划策略

在完成任务分配后，需要对无人机与地面车辆的运行路径进行联合规划。本文采用基于图论的动态规划思想，对空中三维航迹与地面二维路径进行协同建模。



**Figure 4.** Schematic diagram of aerial-ground collaborative path planning principle  
**图 4.** 空地协同路径规划原理示意图



在空中路径规划中，通过构建低空航路网络或三维网格模型，结合实时空域约束进行航迹优化；在地面路径规划中，则综合考虑道路拓扑结构与交通状态信息，如图 4。通过在协同调度层引入联动约束，实现空地路径在时间与空间上的协调，从而最小化整体配送时间。

#### 4.2.3. 能源与载重约束下的优化策略

考虑到无人机在续航能力和载重方面存在显著限制，本文在任务分配与路径规划过程中要引入能源与载重约束模型。通过对无人机飞行能耗进行估算，将其作为关键约束条件纳入优化模型，从而避免因电量不足或超载导致的任务失败。

在此基础上，可采用改进的动态规划或混合整数规划方法，对任务执行顺序与路径选择进行联合优化，使配送任务与无人机资源之间实现合理匹配。

### 5. 面临的挑战与对策建议

尽管空地协同即时配送在低空经济背景下展现出显著的效率优势与应用潜力，但在实际推进过程中仍面临多维度、系统性的约束与挑战。这些问题不仅涉及技术层面的系统协同与安全保障，也与城市规划体系、制度环境及公共治理能力密切相关。若缺乏系统性应对策略，空地协同配送难以实现从示范应用向规模化、常态化运营的转变。

#### 5.1. 技术与系统协同挑战

##### 5.1.1. 空域资源协调不足与空地系统割裂

当前城市交通管理体系呈现明显的“空-地分治”特征：低空空域由民航或低空管理部门主导，强调飞行安全与审批合规；地面交通系统则由交通运输部门管理，关注道路通行效率与秩序维护。两套系统在数据标准、调度逻辑与管理目标上存在显著差异，导致无人机飞行计划与地面配送路径难以实现实时联动。例如，在高峰时段地面交通严重拥堵的情况下，空域系统往往无法即时调整无人机投放策略以进行协同补位，制约了空地协同配送整体效率的发挥。

##### 对策建议：

应从城市级层面构建空地资源共享与联合调度平台，实现以下功能：

- (1) 统一时空基准，建立涵盖低空航线、起降点、道路网络与末端节点的统一数字时空框架。
- (2) 跨系统数据融合，实时整合无人机飞行状态、空域限制、地面交通流量与订单需求信息。
- (3) 联合决策机制，通过多目标优化算法，对空地配送任务进行统一调度与动态重构。

##### 5.1.2. 信息安全与飞行安全风险

在复杂城市环境中，无人机配送面临多源安全风险：(1) 通信干扰：高楼密集区易造成信号遮挡或多径干扰；(2) 导航不稳定：GNSS 信号在城市峡谷环境下精度下降；(3) 系统攻击风险：无人机通信链路与调度系统可能面临网络攻击隐患。一旦出现通信中断或定位失效，不仅影响配送时效，还可能引发飞行安全事故，进而对公众安全和城市运行造成负面影响。

##### 对策建议：

应构建多层次的安全保障体系：

- (1) 技术层面，引入多源融合导航技术(GNSS + 惯性导航 + 视觉定位)，部署 5G/卫星通信双通道冗余机制，提高通信可靠性。
- (2) 系统层面，将地面感知设施(摄像头、雷达、V2X 节点)纳入低空飞行环境感知网络，建立飞行异常自动接管与应急返航机制。

(3) 管理层面，对关键飞行数据和调度指令实施加密传输与访问控制。

## 5.2. 规划与政策挑战

### 5.2.1. 空地协同设施规划体系不完善

当前城市规划体系仍以地面交通与传统物流设施为核心，低空配送相关基础设施(如无人机起降点、空投柜、无人车接驳区)多以“临时试点”形式存在，缺乏系统性规划支撑，主要表现为：(1) 起降点布局零散，难以形成网络化覆盖；(2) 末端设施选址与社区空间冲突，与既有物流园区、交通枢纽协同不足。这在一定程度上制约了空地协同配送的规模化扩展与运营稳定性。

#### 对策建议：

应推动空地协同物流设施纳入城市空间规划与综合交通体系：

(1) 规划层面，在城市总体规划和详细规划中明确低空物流设施功能分区，将起降点与交通枢纽、物流园区、社区服务设施协同布局。

(2) 技术标准层面，制定统一的起降点、空投柜建设标准与接口规范，推动模块化、可扩展设施建设模式。

(3) 空间协同层面，鼓励“立体交通”理念，将低空配送与地下、地面空间一体化设计。

### 5.2.2. 监管与制度体系尚待完善

低空经济仍处于快速发展阶段，相关法律法规和监管体系尚未完全成熟，主要体现在：(1) 无人机配送的飞行许可流程复杂、灵活性不足；(2) 空域使用权、数据权属与责任界定尚不清晰；(3) 缺乏针对大规模商业化配送的系统性监管框架。制度不确定性不仅增加企业运营成本，也可能引发安全与社会接受度问题。

#### 对策建议：

政府应在保障安全与鼓励创新之间寻求平衡：

(1) 制度设计，建立分级分类的低空飞行管理制度，对配送无人机实施差异化监管。明确空域使用、事故责任与数据治理规则。

(2) 监管方式，推动“沙盒监管”与试点示范区建设，为新模式提供制度缓冲空间。利用数字化监管平台实现全过程、可追溯监管。

(3) 协同治理，加强政府、企业与公众之间的沟通，提升社会认知与接受度。

总体而言，空地协同即时配送的发展不仅是技术问题，更是系统工程与治理问题。通过技术协同、空间规划与制度建设层面同步推进，才能为低空经济时代构建安全、高效、可持续的空地协同配送新模式奠定坚实基础。

## 6. 结论与展望

### 6.1. 研究结论

在低空经济和电子商务行业快速发展，传统配送模式弊端凸显的背景下，无人机低空配送具有巨大的市场潜力，以无人机为代表的低空运输方式在时效性、灵活性及跨越地面交通瓶颈等方面展现出独特优势，但其单一运行模式难以支撑城市级高频、规模化配送需求。空地协同即时配送作为电子商务末端即时配送的重要发展方向，正成为推动城市物流系统智能化升级的关键路径。

本文从理论分析、案例研究与系统设计多个层面论证了空地协同即时配送在电子商务末端即时配送场景的现实可行性与发展价值，为构建高效、智能、可持续的城市物流体系提供了新的研究视角。

## 6.2. 研究展望

尽管本文对空地协同电子商务末端即时配送场景的新模式进行了较为系统的探讨，但受限于研究深度与数据条件，仍有诸多问题值得在未来进一步深入研究与实践探索，主要包括以下几个方向：

### (1) 智能协同调度算法的深化研究

未来可进一步引入人工智能与强化学习等方法，构建面向不确定环境的自适应调度模型，实现空地资源在多时段、多场景下的动态协同优化，从而提升系统在复杂城市环境中的鲁棒性与运行效率。

### (2) 空地协同软硬件体系的标准化建设

随着空地协同配送规模的扩大，亟需推动无人机平台、地面接驳设施、起降点与调度系统之间的接口标准化与协议统一，为跨平台协同与产业生态构建奠定基础，降低系统集成与运营成本。

### (3) 多主体集成与仿真平台的构建

未来研究可结合真实城市交通与低空空域数据，开发空地协同物流仿真平台，对不同配送模式、调度策略及政策情景进行大规模模拟与性能评估，为规划决策与商业化推广提供量化支撑。

### (4) 社会接受度与政策协同研究的拓展

除技术与系统层面外，公众认知、社会接受度及治理机制同样是空地协同配送可持续发展的关键因素，未来可从社会调查、行为分析与政策评估等角度展开跨学科研究。

## 基金项目

国家社科基金后期资助项目(22FGLB109)。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] Malik, S., Khonji, M., Elbassioni, K., *et al.* (2025) Collaborative Last-Mile Delivery: A Multi-Platform Vehicle Routing Problem with Enroute Charging. arXiv: 2505. 23584.
- [3] 王飞, 徐浩凡, 王京硕. 面向多配送中心的地空协同配送路线优化[J/OL]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1-13. <https://zrb.bj.bj.scut.edu.cn/CN/10.12141/j.issn.1000-565X.250250>, 2026-01-26.
- [4] Guo, J., Zhou, Y., Burlion, L., Savkin, A.V. and Huang, C. (2025) Autonomous UAV Last-Mile Delivery in Urban Environments: A Survey on Deep Learning and Reinforcement Learning Solutions. *Control Engineering Practice*, **165**, Article 106491. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2025.106491>
- [5] 洪芳宇, 伍国华. 无人机物流配送问题与优化调度方法研究综述[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(3): 1-11.
- [6] Hu, M., Zhang, T., Wang, S., *et al.* (2025) Radio Map-Enabled 3D Trajectory and Communication Optimization for Low-Altitude Air-Ground Cooperation. arXiv: 2505. 06944.
- [7] Sreedhara, A.K., Padala, D., Mahesh, S., Cui, K., Li, M. and Koepl, H. (2024) Optimal Collaborative Transportation for Under-Capacitated Vehicle Routing Problems Using Aerial Drone Swarms. 2024 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Yokohama, 13-17 May 2024, 8401-8407. <https://doi.org/10.1109/icra57147.2024.10611698>
- [8] Imran, N.M., Mishra, S. and Won, M. (2021) Towards Fully Autonomous Drone-Based Last-Mile Delivery. arXiv: 2103. 04118.
- [9] 镇璐, 高佳静, 谭哲一. 多卡车与多无人机协同配送路径优化问题研究[J]. 管理科学学报, 2024, 27(7): 1-18.
- [10] 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.
- [11] Xu, J., Guan, C., Wang, Y., Zhuang, J. and Gan, W. (2025) A Systematic Review of Urban Air Mobility Development: eVTOL Drones' Technological Challenges and Low-Altitude Policies of Shenzhen. *Drones*, **9**, Article 842. <https://doi.org/10.3390/drones9120842>
- [12] 魏河川, 石建迈, 刘忠, 等. 面向最后一公里配送的无人机配送模式与路径规划综述[J]. 计算机系统应用, 2023, 32(9): 1-18.
- [13] 邓健, 张洪海, 张越覃, 等. 低空物流无人机分层协同关键技术研究进展[J/OL]. 工程科学学报, 1-18. <https://cje.ustb.edu.cn/cn/article/doi/10.13374/j.issn2095-9389.2025.08.18.001>, 2026-01-26.