

# 无人机协同配送下的物流履约综述

方菁怡

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2026年2月27日; 录用日期: 2026年3月19日; 发布日期: 2026年3月30日

## 摘要

随着无人机技术的成熟与商业化应用加速, 无人机与卡车协同配送凭借“空地结合”的灵活性, 弥补无人机在续航和载重上的短板, 成为解决“最后一公里”以及地面交通拥堵难题的重要方案。本文围绕无人机协同配送的核心模式展开综述, 梳理了并行配送、混合配送、卡车支持无人机、无人机支持卡车四类主流协同模式的功能定位, 分析多场景下卡车-无人机协同模式的应用模式。通过分析近年来卡车-无人机协同配送的主要研究成果, 本文总结了现有的研究方法和未来可能的发展趋势, 为学术界和物流业提供一定的理论依据和实践指导。

## 关键词

卡车-无人机协同配送, 最后一公里, 物流履约, 路径规划, 低空经济

# A Review of Logistics Fulfillment in Drone Collaborative Delivery

Jingyi Fang

School of Economics & Management, Tongji University, Shanghai

Received: February 27, 2026; accepted: March 19, 2026; published: March 30, 2026

## Abstract

With the maturation of drone technology and the acceleration of commercial applications, the collaborative delivery between drones and trucks, leveraging the flexibility of “air-ground integration,” compensates for the limitations of drones in endurance and load capacity, becoming a crucial solution to the “last mile” and ground traffic congestion challenges. This paper reviews the core models of drone collaborative delivery, outlining the functional positioning of four mainstream collaborative modes: parallel delivery, hybrid delivery, truck-supported drones, and drone-supported trucks. It analyzes the application patterns of truck-drone collaborative modes across multiple scenarios.

**By examining recent research achievements in truck-drone collaborative delivery, this paper summarizes existing research methods and potential future trends, providing theoretical foundations and practical guidance for both academia and the logistics industry.**

## Keywords

**Truck-Drone Collaborative Delivery, Last Mile Delivery, Logistics Fulfillment, Route Planning, Low-Altitude Economy**

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

随着消费升级和 O2O (Online to Offline)模式的普及,物流行业已从“规模驱动”转向“体验驱动”,但在物理空间和运营成本上遇到了明显的天花板。物流“最后一公里”的终端对象是顾客(消费者或受灾者),本质是物流服务链的末端配送,在这一环节往往面临需求、时效、资源、协调等多方面问题[1],成为当前物流配送领域的持续痛点和成本攀升点。此外,随着电商发展,即时性要求严苛、订单波动大、服务体验不均等变化,使得“最后一公里”难题成为重中之重。如何解决“最后一公里”的问题,近年来持续发力的“低空经济”给出了一套可行的解决方案。在业界和研究领域都广泛探讨以无人机为代表的低空运营服务能否解决“最后一公里”以及地面交通拥堵带来的难题。

物流履约是从客户下单到售后闭环的全流程服务体系,核心目标是在承诺时间内以合理成本将商品精准交付至客户手中,其关键环节包括订单承诺、库存配置、渠道选择、交付方式与售后履约,而无人机协同聚焦末端配送、支线补货、特殊场景应急履约三大核心场景,嵌入库存配置与交付方式的衔接环节,作为跨仓快速补货工具和最后一公里配送补充方案,与传统履约环节联动衔接,成为物流履约链条中提升履约效率的关键未来创新点。

近年来,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)技术的快速发展,使得无人机能够胜任物流配送的任务,同时减少最后一公里配送环节的高昂物流成本[2]。目前,无人机在物流领域包括同城配送、外卖、医药等,展现出较大潜力,世界各地的多家公司包括 DHL、FedEx、Google、UPS、美团和亚马逊已经将无人机应用于最后一公里的配送环节中[3]。无人机配送顺应消费习惯迭代、城市密度提升、技术驱动变革等变化,市场规模持续增长,美团无人机已完成超 60 万真实订单,深圳开通多条“天空之城”配送航线,京东在广东山区布局 200 个起降点,有效降低生鲜损耗率,充分验证了无人机物流的商业价值。政策层面上,国家空管委办公室已批准多个省份开展低空空域协同管理改革试点,政策的宽容性有所上升。据中国民航局预测,2025 年我国低空经济市场规模已达 1.5 万亿元,较上年实现大幅增长,无人机运营企业近 2 万家,eVTOL (electric Vertical Take-off and Landing, 电动垂直起降飞行器)年度订单总额超 300 亿元。

与传统地面运输配送相比,无人机的飞行不受道路网络拥堵和地理条件限制,这使得无人机能够在更多场景(如山区、灾区)快速收发快递包裹,此外,无人机飞行速度远快于地面车辆,如果应用在实际配送场景中可以提高投递效率,使即时配送成为可能。然而,无人机配送在应用中也存在如下弊端:1) 电池续航时间短,因此无法进行更长距离的配送;2) 有效载荷较低,因此无人机配送对货物的重量有较大限制;3) 容易受天气影响,大风等恶劣天气导致停运的可能性增大。如果无人机与地面

车辆(例如卡车)串联使用,则可以解决相对较短的行程和有限的容量问题,并且可以进一步增强无人机的效用[4][5]。

为了解当前无人机的应用范式,针对目前研究主要关注的应用场景和应用模式进行系统回顾,以“truck-drone”,“delivery”,“UAV”等关键词,在知网和 Web of Science 中进行文献搜集,总结当前无人机在终端配送模式下的应用和研究动态。

## 2. 无人机协同配送的主要模式

在无人机参与的最后一公里的配送系统中,一般包含配送载具、调度中心(仓库或实体商店)、顾客四类主体,顾客订单需求到达后,在调度中心中进行分拣和包装,由配送载具(卡车或无人机)进行送货,完成订单的履约。

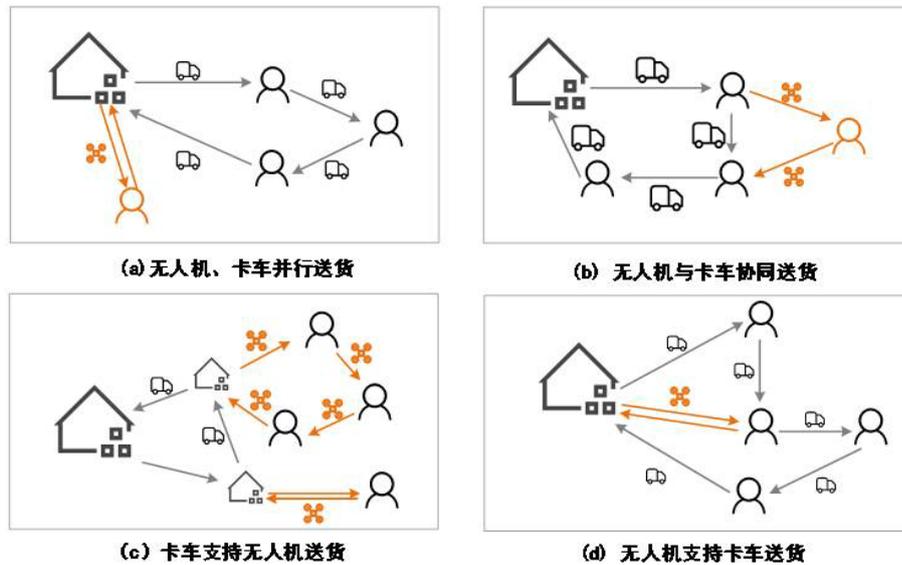


Figure 1. Truck-drone collaboration modes  
图 1. 卡车 - 无人机协同方式示意图

其中在配送环节,由于多种原因,例如订单动态到达、配送载具的限重、订单的时间窗要求等,导致配送载具出发时未能携带即将服务的顾客的订单内容物,需要配送载具返回调度中心装载顾客订单后,继续履约,此处返回调度中心的动作,称之为“补货”。由此在具体的配送环节中,进一步细化为“送货”和“补货”。在无人机参与时,可以考虑卡车和无人机在送货和补货上的角色分配,根据两者角色不同,分为四种协同模式见表 1,示意图见图 1。

Table 1. Role allocation and methods in truck-drone collaborative mode

表 1. 卡车 - 无人机协同模式下的角色分配和方式

	卡车		无人机		协同方式	示意图编号
	送货	补货	送货	补货		
并行配送	P		P		从调度中心出发分别服务顾客	(a)
混合配送	P		P		卡车搭载无人机的形式,分别服务顾客	(b)
卡车支持无人机配送			P	P	卡车承担充电站、平台的形式,无人机服务顾客	(c)
无人机支持卡车配送	P			P	无人机承担补货的角色,卡车服务顾客	(d)

## 2.1. 并行配送模式

并行配送模式通常用于客户密集分布在车库附近的情况，如城市中心的居民区等。卡车和无人机分别服务不同的客户，卡车服务订单货物重量较大、距离较远的顾客，无人机服务距离调度中心较近的顾客。在并行配送模式下，卡车和无人机在路径和时间上不涉及协同，只存在顾客的任务分配，在实际的执行过程中，均从履约中心出发前往顾客点进行履约[6]。

## 2.2. 混合配送模式

混合模式配送模式用于大型任务场景和分散客户的情况。卡车和无人机都作为送货服务载具，面向顾客进行服务，通常会由卡车搭载无人机，在邻近无人机的服务顾客点的位置进行无人机的放飞，这些位置通常是卡车服务的顾客点，此时可以由卡车和无人机同时进行履约，再由卡车在相同点位或者下一个卡车服务的顾客点位进行无人机回收。这一模式飞行伙伴旅行推销员问题(Flying Sidekick Traveling Salesman Problem, FSTSP)首先由 Murray 和 Chu [6]提出，描述了单无人机和单卡车场景的优化，其中一组客户必须由送货卡车或与送货卡车配合运行的无人机恰好服务一次，其目标是最大限度地减少游览完成时间。Agatz 等[7]提出带无人机的旅行商问题(Traveling Salesman Problem with Drones, TSP-D)，考虑无人机起飞和返回位置相同的情况下单无人机和单卡车的协同。

FSTSP 和 TSP-D 问题可以拓展至单卡车多无人机(mFSTSP)和多卡车多无人机(VRPD)的情况。Murray 和 Raj [8]将 FSTSP 问题中卡车使用的无人机数量由一个拓展到多个，为避免同一个时刻，多架无人机放飞和回收时的安全问题，作者将卡车上的操作排程问题(包括无人机的放飞和接收、服务顾客)和卡车-无人机混合车队的路由问题结合在一起，研究发现使用多架无人机配送可以显著减少配送时间，但随着无人机数量的增加，额外无人机带来的边际效益递减。Wang 和 Sheu [9]研究了无人机可以停靠在不同卡车上进行协助配送，他们提出了一个混合整数规划模型，并开发了一种分支定价算法解决综合调度问题。

## 2.3. 卡车支持无人机配送

该模式常用于地形受限或道路网络封闭的情况，此时，卡车会因为道路畅通性问题无法到达目标点位，无人机作为主要投递工具，受限于续航里程和载重限制，需要频繁往返在配送点和补货点之间，结合卡车的优点，将其作为充电、起降中转站，弥补无人机的续航和载重痛点。在此模式下，卡车会将无人机和包裹运送到客户点附近的某些地点，放飞无人机进行送货。Wu 等[10]提出的卡车无人机协同无接触包裹配送(CRP-T&D)模式中，卡车以长续航、大载重承担干线运输与物资补给，弥补无人机续航短、载重有限的短板；无人机受地面障碍影响小，灵活完成“最后一公里”送货，二者协同既降低疫情传播风险，又保障配送时效。付朝晖等[11]基于山区道路不畅通，部分区域卡车无法通行，导致生鲜农产品集货效率低下，提出卡车-无人机联合集货模式，利用无人机为卡车无法通行区域客户提供集货服务，保障生鲜农产品的新鲜度与质量。

## 2.4. 无人机支持卡车配送

### 2.4.1. 有中转仓的模式

在该种模式下，无人机往返在调度中心和中转站之间，将卡车后续将服务的顾客的订单内容物补充至离卡车较近的中转站，由卡车进行提取货物后，进行后续的顾客服务。Moshref-Javadi 等[12]研究了带转运点的车辆路径问题，其中无人机为转运点进行补货，通过转运点和选址和卡车路径的更新，无人机为转运点补货的模式在郊区和城市背景下的配送时间相较于只使用卡车进行配送分别减少 36%和 66%的配送时间。

### 2.4.2. 无人机着陆卡车进行补货

基于无人机的包裹递送的现有操作概念中的普遍假设是，每个包裹将通过一架无人机递送，并且包裹接收者将位于无人机可以着陆的位置附近或包裹可能被放下的位置通过绳子或类似的机制给他们。然而，所提出的绝大多数操作概念在城市中的人口密集区(如，高层建筑、人流聚集地等)将难以实现。出于现实技术和安全性考虑，无人机补货成为 DVRP 一种变体，无人机不直接接触顾客，在最后一公里配送中在仓库和地面车辆之间运输车辆即将配送交付的顾客包裹。尤其是，对于订单实时到达或者订单存在释放时间时，地面车辆无法在出发之前携带上本次服务所有顾客的包裹，若无无人机的补货，地面车辆需要多次返回仓库进行补货，这将极大的增加地面车辆的配送时间和配送成本。

无人机补货的情况，根据订单信息的到达时间划分，主要分为静态环境和动态环境。在静态环境下，由于订单存在释放时间，顾客需求存在时间窗需求，为减少车辆往返仓库的次数，采取无人机补货的形式补充后释放的货物。Dienstknecht 等[13]研究了卡车由于容量限制，在配送途中需要返回仓库或通过无人机补货的形式完成顾客订单的服务，在订单信息已知的情况下，如何安排卡车的配送路径以及无人机的补货计划使得交货成本最小。Pina-Pardo 等[14]研究了订单信息已知的情况下由于包裹未一次性准备完毕，有特定的释放时间时采取无人机补货的静态路由问题，在单卡车单无人机的设定下，无人机补给可以将交付过程的总持续时间缩短多达 20%。Pina-Pardo 等[15]扩展了 Pina-Pardo 等[14]研究的静态问题，考虑使用多辆卡车和补给无人机，其中新发布的订单可以由卡车通过仓库返回收集或由无人机在途中补给。作者开发了混合整数线性规划(MILP)公式，并提出了一种统一的数学方法，可以解决卡车和无人机以及仅卡车场景，并针对最多 100 名客户的实例得出了管理启示。Liu 等[16]考虑城市环境中高密度的配送环境下，卡车每日配送路径固定的情形，由于包裹达到区域配送中心的时间在一天中存在差异，需要在日中使用无人机进行补货。在多卡车多无人机的情形下，通过规划卡车在每个点位的离开时间，最大化运输包裹的收益。

在动态环境下，特别是同天送达的订单履约承诺下，顾客订单实时到达，且需要在特定时间内送达，为避免车辆抢占式回仓库补货[17]，采取无人机将新到达的顾客订单运送给配送途中的车辆，由车辆进行顾客订单的履约，在此环境下无人机承担补货角色的相关论文研究较少。Dayarian [18]首先创新性地提出采取无人机为运送车辆补给的协同形式，不同于无人机前往顾客所在地运送包裹的模式，送货卡车在某些区域进行送货，无人机可以动态的向卡车补充后续的订单，在完成对卡车的补货后，无人机必须直接返回仓库。在同天送达的零售背景下，以最大化运营服务期间服务的顾客数量为目标，建立整数规划模型，并提出启发式算法进行求解。此外，在实验部分，作者对比了几种不同的配送和补货策略。结果表明，无人机对卡车进行动态补货的策略可以显著提升服务水平。Pina-Pardo 等[19]研究同天送达场景下顾客订单实时动态到达，零售商必须实时确定是否接受订单以及如何调整配送途中卡车后续的配送计划和无人机的补货计划。以最大化服务顾客订单量，采取基于路线的马尔可夫决策过程和高效的在线策略，更新卡车配送路线，通过仓库调度无人机为卡车补货新到达的订单，以支持卡车后续的配送。

此外，在每种模式下，对于顾客订单、协同方式有更灵活的设定，例如，在顾客订单上，考虑订单中商品属性、种类和数量的差异，在协同方式，考虑固定点位或灵活点位的协同位置，在无人机服务上，考虑单个或是多个途径点等类型。

## 3. 无人机协同配送的系统架构

### 3.1. 优化问题模型

问题通常建立在某个固定区域内，有  $m$  个商店集合  $S = \{0, 1, \dots, m\}$ ， $n$  辆卡车， $k$  架无人机对区域内  $C = \{m, m+1, 2, \dots, m+c-1\}$  顾客集合进行服务，其中每个顾客订单的重量已知为  $w_i, i \in C$ ，为了便于标记，

设定  $N_0 = \{0, 1, \dots, m, \dots, m+c-1\}$  表示区域内卡车和无人机能够离开的点,  $N_+ = \{m, m+1, \dots, m+c-1, m+c, \dots, 2m-1\}$  表示区域内卡车和无人机能够到达的点, 从点  $i \in N_0$  到达  $j \in N_+$  的路程距离设定为  $\tau_{ij}$ , 卡车和无人机的速度分别为  $v_f, v_d$ 。

在模型构建上, 以最精简静态环境下的 TSP-D 作为基准, 此时  $m=1, n=1$  区别于以往的 TSP 的经典模型, 无人机协同配送需要考虑多方面的因素, 首先是无人机自身特性(载重量、续航)的限制, 其次是无人机和卡车在时空上的协同。

**无人机承载约束:** 无人机的单次配送能力受到最大载重限制。设无人机  $d$  在第  $j$  趟次是否携带顾客  $i \in C$  的货物为  $y_i^d$ , 顾客  $i \in C$  订单重量为  $w_i$ , 无人机的最大可承载重量为  $W$ , 则无人机单趟能够承载的重量需满足如下承载约束:

$$\sum_{i \in C} w_i y_i^d \leq W, \forall d \in D, \forall j \in T$$

**无人机续航与飞行距离约束:** 受电池容量限制, 无人机在一次任务中的飞行时间或飞行距离有限。若无人机从发射点  $i \in N_0$  起飞, 经顾客  $j \in C$  完成配送, 并在回收点  $k \in N_+$  降落, 则其飞行时间需满足, 其中  $T_d^{\max}$  为无人机  $d$  的最长飞行时间:

$$\frac{\tau_{ij}}{v_d} + \frac{\tau_{jk}}{v_d} + t^{\text{launch}} + t^{\text{retrieve}} \leq T_d^{\max}$$

**无人机和卡车的协同约束:** 在协同配送模式下, 无人机通常只能从卡车或商店节点起飞, 并在卡车或指定节点回收。为保证任务可执行性, 必须满足以下逻辑一致性条件: 每一次无人机起飞必须对应一次回收; 无人机的起飞节点与回收节点均必须在卡车可达路径上。在模型中, 无人机和卡车的地理位置协同通常通过路径一致性约束或二进制变量的流平衡约束实现, 时间协同通常使用卡车和无人机的到达、离开时间约束实现, 用于确保无人机任务在时空上是闭合的。

在**目标函数的设定**中, 现有文献的研究目标大多集中在最小化成本、最小化配送时间、最大化收益。最小化成本中主要包含路径成本和固定成本两方面, 包括无人机和卡车的全部路径成本, 固定成本包括运营人员的薪酬、卡车调度启动费、无人机维护费等一系列的设备运营维护费用。最小化配送时间的目标函数驱使下, 在满足客户需求的前提下, 最大程度缩短配送时长, 例如在实际配送场景中, 若能精准规划卡车和无人机的路线, 减少卡车在途时间, 便能更快完成所有配送任务, 提高配送效率。为使得企业运营收益最大化, 以提升配送服务的经济回报或服务价值为核心, 既包括最大化配送货物总价值、在接单收费场景下最大化营业时段内服务客户数量等直接收益导向, 也涉及减少客户投诉或违约赔偿、维护客户留存率、拓展潜在客户群体等间接收益关联, 适用于高峰时段配送、多需求点分散场景、市场化竞争下的收益优先型配送。而多目标优化作为当前卡车-无人机协同配送研究的主流趋势, 核心是同时兼顾成本、时间、收益等两类及以上目标, 通过设置权重系数或 Pareto 最优解方法协调不同目标间的冲突, 间接服务于核心目标的实现。

在卡车-无人机协同场景下为达成上述优化目标, 需要三方面决策协同发力:

- **任务分配决策:** 如果存在无人机和卡车混合配送的情形, 需要进行任务分配, 明确服务顾客的配送形式; 如果是卡车支持无人机配送或无人机支持卡车配送的形式, 需要明确每个临时停靠点、中转点所对应的服务客户范围。
- **路径规划决策:** 需同步优化卡车与无人机的行驶轨迹, 对于卡车, 要规划出最优的顾客访问位置顺序, 减少空载里程与无效绕行; 对于无人机, 则需精准确定起降点。
- **协同调度:** 需精确安排卡车和无人机的交互时间, 包括无人机从卡车起飞与返航汇合的时间节点、卡车在中转点的停靠等待时长、货物装卸与补给的时间衔接。

### 3.2. 多场景下卡车 - 无人机协同模式的演变

卡车 - 无人机协同配送并非单一固定的运作模式，其具体的决策逻辑与执行约束条件依赖于配送环境的时空特征与需求属性。在不同的应用场景下，模型的约束设定呈现出不同的差异化特征，例如，在顾客订单层面，需考虑商品的种类和数量差异、商品对运载工具的载重量与舱位的影响；在协同交互层面，需明确卡车与无人机的汇合形式是依托固定的基础设施还是随路径动态调整；在服务路径层面，则需定义无人机执行直达任务还是多途径点任务。

目前卡车无人机协同模式下，在时间维度的信息完整性以及空间维度的地理环境差异上研究广泛。

在决策前信息是否完整，分为离线和实时配送场景，目前大部分研究聚焦在离线场景，即在做出任务分配、路径规划与协同调度等决策时，是以所有顾客订单信息完全确定为前提的，决策过程中不会有新订单加入、订单取消或需求变更等情况发生，一旦决策方案形成便全程固定不变，后续不再进行动态调整。例如，电商平台在每日截单后，根据当天积累的所有末端配送订单，整合顾客的收货地址、货物规格、配送时间窗口等完整信息，通过算法一次性规划出卡车与无人机的任务分工、具体行驶与飞行路线以及两者的时间协同方案。而实时配送场景则更贴合实际动态的物流环境，决策需在订单信息不完全确定的情况下动态生成与调整，配送过程中会持续有新订单涌入，还可能出现订单修改、顾客临时更改收货时间、突发交通管制或无人机禁飞等不确定因素，这就要求决策系统具备实时响应能力，能够根据新增信息动态调整任务分配、优化路径规划以及更新协同调度方案，以确保配送服务的连续性与高效性。例如，在同天配送情况下(Same-Day Delivery, SDD)，零售商需要在接收订单后特定时长内交付顾客，因此每一天的服务开始前，零售商对需求信息未知，随着时间推移，订单动态到达，这对零售商的订单装配、物流配送能力提出了高要求[20]-[22]，此时，服务提供商的目标是通过动态重新分配和规划车辆路线来最大化总利润。

在空间维度上，顾客点和履约中心的地理位置分布上，城市与农村的差异化特征直接决定了卡车和无人机的优势发挥。针对城市场景，由于多为小区、写字楼等聚集区域，人口密集，客户分布集中，地面道路网络发达但交通拥堵频繁、存在禁飞区与限飞时段，任务分配需优先考虑无人机的载重限制与飞行合规，通常采用卡车为主、无人机为辅的模式，卡车负责核心区域的集中配送与无人机补给，无人机则聚焦于“最后 1 公里”的零散订单或拥堵路段的加急订单或者在支持卡车运输配送的场景，例如，在城市配送中，部分强时效性包裹因长途运输延误或未及时打包，通过无人机将这类晚到包裹从中途补给至行驶中的卡车，再由卡车完成终端配送[16]；路径规划方面，卡车需规避交通高峰期路段与限行区域，优化停靠顺序以减少停留时间，无人机则需精准避开高楼、电线等障碍物与禁飞区[23]；协同调度需紧密结合城市交通的动态变化，无人机的起飞、降落时间需与卡车配送计划精准匹配，同时预留短时间的弹性调整空间解决路径拥堵等时变因素[24]，使得调度计划更有鲁棒性。而农村场景则呈现出顾客分布分散、道路基础设施匮乏、无人机无明显禁飞限制的特征，更适合采用卡车支撑无人机送货的模式，卡车作为移动补给站与中转枢纽，停靠在村落集中区域或交通便利的路口作为临时点位，无人机则承担中短距离的零散配送任务，重点服务续航里程范围内偏远农户的需求，在路径规划上，卡车的访问顺序可按村落分布的地理聚类优化，优先覆盖道路条件较好的区域，减少行驶损耗，无人机的起降点选择更灵活，重点保障电池续航与信号稳定；协同调度方面，需重点协调卡车的补给时间与无人机的续航和充电服务措施占用的时间。

### 3.3. 求解算法

由于卡车 - 无人机协同配送模式，是在 TSP 问题和 VRP 问题上的变体，是一种 NP-hard 组合优化问题，此类问题多采取启发式求解、精确求解、机器学习等算法进行问题求解。但由于卡车 - 无人机协同

模式,涉及履约中心、卡车、无人机、顾客多主体的交互和协调,需要在模型中做出的多项决策,模型结构更为复杂,因此现有研究多采取启发式求解及机器学习等方式。

目前在信息确定的静态环境中,无人机协同配送的求解算法主要聚焦在启发式求解,小部分关注精确求解。例如,Zhou 等[25]在两阶段车辆路径问题与无人机配送结合的问题中,构建混合整数线性规划模型,采取分支定价算法求解,并使用禁忌搜索算法加速定价问题求解。Ge 等[26]根据顾客购买价值进行分类,实行差异化配送策略,构建多目标优化模型,采用了混合遗传算法-模拟退火(GA-SA)方法,融入动态调整策略和快速非支配排序算法,以提高计算效率。

在动态环境下,多采取强化学习、启发式等方式以获取求解速度较快、求解质量较高的路径方案。例如,Wang 等[27]为解决随机需求下卡车-无人机路径问题,考虑需求随机性,以最小化预期成本为目标,设计混合启发式算法,结合 TDS 补货策略构建动态规划递归关系计算成本,通过优化路线搜索逻辑适配需求动态显现特征,实现对多规模实例的有效求解。Peng 等[28]在受灾信息存在动态变化的情况下,构建马尔科夫博弈模型抽象动态问题,设计多智能体强化学习算法,实现成本与惩罚最小化。

#### 4. 文献评述和未来研究方向

无人机卡车协同运输成为物流运输中降本增效的方式,根据无人机和卡车协同的特点、订单到达的实时性等,众多学者开展了多方面的研究,快速弥补了这一新型物流模式的研究空白。根据前文的综述,可以总结出目前已有文献的研究内容和未来研究方向:

1) 关注现有渠道运营模式和卡车-无人机协同的结合,全渠道零售尤其是 BOSS 成为传统零售商的转型方式,尽管国内外学者在车辆路径和订单履约问题中,对多仓多品类的订单履约已有一定程度的研究,但是随着无人机技术发展,无人机和传统运力协同的新物流模式对全渠道下多仓多商品的履约问题和库存问题仍存在研究空间,如何平衡多品类产品的库存持有成本和订单的履约时效,确定无人机补货频次、补货量及库存共享范围目前仍存在研究空白。

2) 在卡车和无人机协同配送,尤其是无人机补货的应用场景下,现有文献研究主要集中于静态订单分配策略。虽然有部分研究涉及动态或半动态订单分配策略,但由于动态规划带来的维度灾难,学者们或采用仿真的方法进行研究,或采用不考虑多商店多品类的启发式分配策略,这迫切需要考虑订单动态到达的现实情形下,如何协同商店库存资源和配送资源在特定时间窗内完成订单交付。

3) 对无人机特征进一步细化,考虑在实际运作环境下,无人机飞行条件受天气等外界因素以及飞行速度受续航等内部因素的影响对路径规划鲁棒性的冲击。随着人工智能与大数据技术的发展,如何利用深度学习、强化学习等智能算法处理实时交通数据、动态订单需求以及突发环境干扰,实现调度方案的动态调整,如何构建动态调整机制,在突发约束下保障配送网络的稳定性与履约率。

4) 当前研究更关注具体应用场景下的路径规划和调度,低空经济迅猛发展的未来,需要站在更宏观的角度,时间、空间、高度多维度下的物流调度成为无人机空中物流不可避免的问题,如何在复杂的城市空域实现高密度无人机的安全调度是亟待解决的问题,例如,不同物流企业共享空域资源与无人机运力时,如何设计博弈模型平衡各方成本与收益,避免恶性竞争,是后续低空经济持续有序发展的保障。

#### 5. 总结

通过已有的文献以及小范围的成功应用案例,可见,在人口密集、交通拥堵的城市环境中,卡车-无人机协同配送模式展现出显著的降本增效优势,解决末端配送中“最后一公里”成本高、时效慢的痛点,此外,在应急物流与医疗配送、农村及偏远地区的物流服务上都发挥了该模式的速度快、可触及范围广的优势。未来的研究应当在借鉴国外先进理论和方法的基础上,结合中国市场的实际需求,探索卡

车 - 无人机协同配送模式更广泛的应用场景, 提升最后一公里物流效率和顾客服务体验。

## 参考文献

- [1] 张锦, 陈义友. 物流“最后一公里”问题研究综述[J]. 中国流通经济, 2015, 29(4): 23-32.
- [2] Moshref-Javadi, M. and Winkenbach, M. (2021) Applications and Research Avenues for Drone-Based Models in Logistics: A Classification and Review. *Expert Systems with Applications*, **177**, Article ID: 114854. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114854>
- [3] Chung, S.H., Sah, B. and Lee, J. (2020) Optimization for Drone and Drone-Truck Combined Operations: A Review of the State of the Art and Future Directions. *Computers & Operations Research*, **123**, Article ID: 105004. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105004>
- [4] 高娇娇, 郭秀萍. 考虑卡车无人机协同配送模式下的车辆路径问题研究[J]. 工业工程与管理, 2024, 29(3): 30-39.
- [5] 颜瑞, 陈立双, 朱晓宁, 等. 考虑区域限制的卡车搭载无人机车辆路径问题研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(5): 144-155.
- [6] Murray, C.C. and Chu, A.G. (2015) The Flying Sidekick Traveling Salesman Problem: Optimization of Drone-Assisted Parcel Delivery. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **54**, 86-109. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.005>
- [7] Agatz, N., Bouman, P. and Schmidt, M. (2018) Optimization Approaches for the Traveling Salesman Problem with Drone. *Transportation Science*, **52**, 965-981. <https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0791>
- [8] Murray, C.C. and Raj, R. (2020) The Multiple Flying Sidekicks Traveling Salesman Problem: Parcel Delivery with Multiple Drones. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **110**, 368-398. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.11.003>
- [9] Wang, Z. and Sheu, J. (2019) Vehicle Routing Problem with Drones. *Transportation Research Part B: Methodological*, **122**, 350-364. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.03.005>
- [10] Wu, G., Mao, N., Luo, Q., Xu, B., Shi, J. and Suganthan, P.N. (2022) Collaborative Truck-Drone Routing for Contactless Parcel Delivery during the Epidemic. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **23**, 25077-25091. <https://doi.org/10.1109/tits.2022.3181282>
- [11] 付朝晖, 李君宇, 刘长石. 山区生鲜物流卡车-无人机联合集货路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2025, 61(14): 332-342.
- [12] Moshref-Javadi, M., Van Cauwenberghe, K.P., McCunney, B.A. and Hemmati, A. (2023) Enabling Same-Day Delivery Using a Drone Resupply Model with Transshipment Points. *Computational Management Science*, **20**, Article No. 22. <https://doi.org/10.1007/s10287-023-00453-3>
- [13] Dienstknrecht, M., Boysen, N. and Briskorn, D. (2022) The Traveling Salesman Problem with Drone Resupply. *OR Spectrum*, **44**, 1045-1086. <https://doi.org/10.1007/s00291-022-00680-1>
- [14] Pina-Pardo, J.C., Silva, D.F. and Smith, A.E. (2021) The Traveling Salesman Problem with Release Dates and Drone Resupply. *Computers & Operations Research*, **129**, Article ID: 105170. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105170>
- [15] Pina-Pardo, J.C., Silva, D.F., Smith, A.E. and Gatica, R.A. (2024) Fleet Resupply by Drones for Last-Mile Delivery. *European Journal of Operational Research*, **316**, 168-182. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.01.045>
- [16] Liu, W., Liu, L. and Qi, X. (2024) Drone Resupply with Multiple Trucks and Drones for On-Time Delivery along Given Truck Routes. *European Journal of Operational Research*, **318**, 457-468. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.05.025>
- [17] Ulmer, M.W. and Streng, S. (2019) Same-day Delivery with Pickup Stations and Autonomous Vehicles. *Computers & Operations Research*, **108**, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.03.017>
- [18] Dayarian, I., Savelsbergh, M. and Clarke, J. (2020) Same-Day Delivery with Drone Resupply. *Transportation Science*, **54**, 229-249. <https://doi.org/10.1287/trsc.2019.0944>
- [19] Pina-Pardo, J.C., Silva, D.F., Smith, A.E. and Gatica, R.A. (2024) Dynamic Vehicle Routing Problem with Drone Resupply for Same-Day Delivery. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **162**, Article ID: 104611. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104611>
- [20] Ulmer, M.W. and Thomas, B.W. (2018) Same-Day Delivery with Heterogeneous Fleets of Drones and Vehicles. *Networks*, **72**, 475-505. <https://doi.org/10.1002/net.21855>
- [21] Gu, R., Liu, Y. and Poon, M. (2023) Dynamic Truck-Drone Routing Problem for Scheduled Deliveries and On-Demand Pickups with Time-Related Constraints. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **151**, Article ID: 104139. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104139>
- [22] Chen, X., Ulmer, M.W. and Thomas, B.W. (2022) Deep Q-Learning for Same-Day Delivery with Vehicles and Drones.

- 
- European Journal of Operational Research*, **298**, 939-952. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.06.021>
- [23] 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>
- [24] Wang, Y., Wang, Z., Hu, X., Xue, G. and Guan, X. (2022) Truck-Drone Hybrid Routing Problem with Time-Dependent Road Travel Time. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **144**, Article ID: 103901. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103901>
- [25] Zhou, H., Qin, H., Cheng, C. and Rousseau, L. (2023) An Exact Algorithm for the Two-Echelon Vehicle Routing Problem with Drones. *Transportation Research Part B: Methodological*, **168**, 124-150. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2023.01.002>
- [26] Ge, X., Yin, Q., Maktadir, M.A. and Ren, J. (2025) Multi-Objective Optimization of Truck-Drone Cooperative Routing Problem Based on Customer Classification and Fuzzy Time Windows. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **203**, Article ID: 104375. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104375>
- [27] Wang, F., Li, H. and Xiong, H. (2025) Truck-drone Routing Problem with Stochastic Demand. *European Journal of Operational Research*, **322**, 854-869. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.11.036>
- [28] Peng, W., Wang, D., Yin, Y. and Cheng, T.C.E. (2025) Multi-Agent Deep Reinforcement Learning-Based Truck-Drone Collaborative Routing with Dynamic Emergency Response. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **195**, Article ID: 103974. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.103974>