

电商背景下的农村地区卡车 - 无人机协同配送的路径优化研究

董洁霜, 李乐颖

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年10月28日; 录用日期: 2025年11月12日; 发布日期: 2025年12月8日

摘要

在乡村振兴战略的持续推动下, 中国农村电子商务展现出强劲活力, 2025年1~7月农产品网络零售额同比增长7.4%, 农村网络零售额同比增长6.4%。尽管全国行政村快递服务覆盖率已高达95%, 但仍面临客户分布分散、路网条件薄弱、末端配送成本高等挑战。本文提出一种卡车 - 无人机协同配送模式, 以卡车作为主干运输工具与移动调度基站, 无人机负责末端小批量、高时效的灵活配送, 从而提升整体效率、降低运营成本, 并规避传统路网修缮与配送中心建设等重资产投入风险。针对农村电商物流的货物特征与配送难点, 构建以总成本最小为目标的混合整数规划模型, 并设计两阶段启发式算法进行求解: 第一阶段采用聚类方法对客户进行区域划分与任务预分配; 第二阶段融合遗传算法与贪心策略, 协同优化卡车路径与无人机任务序列, 同时引入变邻域搜索进行动态调整, 增强算法鲁棒性与求解质量。

关键词

农村物流, 卡车 - 无人机协同, 路径优化, 启发式算法

Path Optimization of Truck-Drone Collaborative Delivery in Rural Areas under E-Commerce Context

Jieshuang Dong, Leying Li

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

Received: October 28, 2025; accepted: November 12, 2025; published: December 8, 2025

Abstract

Under the continuous promotion of the rural revitalization strategy, China's rural e-commerce has

文章引用: 董洁霜, 李乐颖. 电商背景下的农村地区卡车-无人机协同配送的路径优化研究[J]. 电子商务评论, 2025, 14(12): 754-764. DOI: 10.12677/ec.2025.14123920

demonstrated strong vitality. From January to July 2025, the online retail sales of agricultural products increased by 7.4% year-on-year, while the rural online retail sales grew by 6.4%. Although the coverage rate of express delivery services in administrative villages nationwide has reached 95%, challenges such as scattered customer distribution, weak road network conditions, and high terminal delivery costs still exist. This paper proposes a truck-drone collaborative delivery model, where trucks serve as the main transportation tools and mobile dispatching base stations, while drones handle flexible small-batch, high-precision terminal deliveries. This approach enhances overall efficiency, reduces operational costs, and avoids the risks of heavy asset investments such as traditional road network repairs and distribution center construction. To address the cargo characteristics and delivery challenges in rural e-commerce logistics, a hybrid integer programming model with the objective of minimizing total cost is constructed, and a two-stage heuristic algorithm is designed for solving: the first stage uses clustering methods to divide customers into regions and pre-allocate tasks; the second stage integrates genetic algorithms and greedy strategies to collaboratively optimize truck routes and drone task sequences. At the same time, variable neighborhood search is introduced for dynamic adjustment, enhancing the algorithm's robustness and solution quality.

Keywords

Rural Logistics, Truck-Drone Collaboration, Path Optimization, Heuristic Algorithm

Copyright © 2025 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

在当前农村电商蓬勃发展的背景下,农村物流的高成本问题日益凸显。相关数据显示,2024年全国规模以上农产品加工企业营业收入已约18万亿元[1],这表明农村电商的发展潜力巨大,但落后的物流体系严重制约了其进一步发展。为加快发展农村物流,有效促进“农产品进城”和“工业品下乡”,助力乡村振兴,亟须对当前存在的问题予以探究解决[2]。目前农村地区的末端物流成本居高不下,相关数据显示,末端物流成本占农村地区配送总支出的30%至40%,且为城市配送成本的2至5倍[3]。农村地区经济社会发展还比较滞后,农村物流基础设施不完善、运力资源不足、信息化水平偏低、城乡一体化程度不高问题仍较为突出,严重制约了农村电商的进一步发展[4]。交通基础设施提质是农村物流效率提高的基础[5]。而对于通过修缮路网、拓宽道路等改善交通基础设施的方式来提升物流效率的方法来说,其投资规模大、建设周期长、维护成本高,且在地形复杂、人口稀疏的农村地区边际效益有限。近年来,兴起的无人机技术为解决农村物流配送难题提供了新思路。首先,卡车-无人机协同配送模式无需大规模改造现有路网,即可通过空中路径直接覆盖偏远地区。其次,无人机与货运车辆的联合配送模式,相较于单独使用无人机或货车既能充分发挥货运车辆大容量、长距离的优势,又能利用无人机高效解决近距离、零散的末端配送需求。通过无人机分担短途任务,有效减少了货运车辆的往返次数和行驶里程,从而在提升配送覆盖率和时效性的同时,显著节约了配送时间和运营成本[6]。

本文构建了考虑客户配送方式分型、货物重量约束与无人机续航约束的混合整数规划模型,明确区分卡车与无人机的服务范围,强化时空协同约束,并提出一种两阶段启发式求解框架:第一阶段通过K-Means聚类实现客户分群与任务预分配,压缩搜索空间;第二阶段设计混合遗传算法(HGA)嵌入变邻域搜索(VNS),在优化卡车路径的同时动态调整无人机任务序列,提升求解质量与算法鲁棒性。

2. 国内外研究综述

对于农村电子商务发展的研究来说 Yuxuan Hou (2024) [7]指出数字鸿沟和技能不足是阻碍农村电商发展的主要障碍, 并呼吁通过政府投资基础设施和提供技术培训来解决这些问题。Lingxuan Zhao (2024) [8]通过实证分析发现城市数字化转型能通过电子商务等中介作用促进乡村振兴, 且该效应在东部地区更为显著。潘悦(2024) [9]研究了基于江苏数据, 通过实证分析指出农村物流与电商已实现高质量协同, 并针对发展挑战提出建议。

就农村物流配送而言, 林晓伟(2024) [10]等人探讨了促使共同配送相关主体间达成全面合作的机制和建议, 为共配主体间达成的合作提供理论依据。王莉(2025) [11]等人基于农村客货邮融合发展背景, 研究了客运班车 - 电动车 - 无人机协同配送模式下山区农村寄递物流路径规划问题。Xiaojing Zhu (2023) [12]探讨了大数据在农村物流配送中的应用, 提出了基于物联网和云计算的智能农村物流配送模式。Luping Song (2025) [13]构建了农村物流末端配送到家自提混合模式的 LRP 模型, 并将蚁群算法与人工势场算法相结合, 提出了一种改进的势场蚁群算法, 实现了人工智能辅助下的物流末端配送效率优化。

在卡车 - 无人机协同配送的模型层面, 蒋丽(2024) [14]等人在考虑无人机载重及飞行范围的条件下, 建立了以卡车与无人机综合配送成本最小为目标建立混合整数规划模型。付朝晖(2025) [15]等人综合考虑山区道路通行状况、无人机能耗、容量、飞行速度、生鲜农产品新鲜度、卡车容量与速度等因素, 以总集货成本最小为目标, 构建卡车 - 无人机联合集货的路径规划模型。Xianlong Ge (2025) [16]等人针对如何合理分配有限的物流资源提高客户满意度, 提出了一种利用客户价值分类和模糊时间窗口管理的卡车 - 无人机协同路由多目标优化模型。

在卡车 - 无人机协同配送研究的算法层面, Zhang Zaifang (2025) [17]等人开发了一种改进的平衡优化器模拟退火(IEOSA)算法来最大限度地降低运输成本。Wenhao Peng (2025) [18]等人提出了一种基于深度强化学习的端到端算法, 能够高效求解考虑动态路况、时间窗与无人机协同的复杂车辆路径问题, 并在求解质量、效率和鲁棒性上均明显优于传统方法。Lingrui Hong (2025) [19]等人针对结合卡车与无人机的旅行商问题, 提出了以自适应大邻域搜索(ALNS)为主框架, 并嵌入融合变邻域下降与数学规划的两阶段局部搜索(2P-LS)的混合算法, 通过与 Gurobi 对比验证了其有效性。Shakoor Barzanjeh (2025) [20]等人开发了一种基于精确逻辑的 Benders 分解算法通过最早发布日期规则和动态规划算法来解决最小化总完工时间为目标的卡车 - 无人机配送问题。

综上, 现有关于农村电商物流配送模式的研究日益受到关注, 学者们已充分认识到农村物流的瓶颈问题, 并在协同配送模式探索、复杂约束建模以及先进算法应用方面取得了显著进展。为提升农村物流效率提供了重要的理论依据和实践参考。但多数研究模型较为通用, 未能紧密结合农村电商物流特有的场景, 如客户极度分散、道路网络稀疏、货物类型差异大等。其次, 在算法层面, 虽有研究引入了高性能算法, 但在解决农村大规模、多约束的协同路径问题时, 往往面临求解效率与稳定性不足的挑战, 缺乏对问题结构的有效利用以压缩搜索空间。

3. 模型构建

3.1. 问题描述与假设

本研究的问题为: 针对农村电商物流网络, 本研究聚焦于从县域中心仓到分散末端节点的配送优化问题。为应对单纯卡车配送效率低下的挑战, 本文探索引入无人机进行协同配送。无人机能够突破道路限制、快速投递小件电商包裹, 弥补卡车短板, 但其作业范围受电池续航约束。在此背景下, 研究卡车与无人机协同的路径规划与调度优化, 旨在综合提升配送效率、降低运营成本, 是解决农村电商末端配送难题的有效技术路径。

3.2. 价值驱动场景描述

3.2.1. 主要假设

- 1) 配送网络有一个配送中心 D_0 、多个客户点 $D = \{D_1, D_2, D_3, \dots, D_n\}$;
- 2) 卡车必须经过配送中心, 可以多次停靠不同配送点;
- 3) 无人机续航能力不受任何干扰;
- 4) 一架无人机一次可访问多个客户点, 配送完成后无人机必须返回至发射点;
- 5) 客户需求分为卡车可配送和仅无人机可配送;
- 6) 无人机到达客户点即为配送完成, 不考虑客户实际取货时间;
- 7) 无人机的飞行距离受电池容量限制, 每次执行任务必须在航程范围内返回卡车。

3.2.2. 变量定义

- 1) 基础变量见表 1。
- 2) 决策变量见表 2。

Table 1. Basic variable symbols and meanings

表 1. 基础变量符号及其含义

变量符号	变量含义
V	顾客需求点集合, $V = \{0, 1, \dots, n\}$; 包括配送中心(编号 0)以及 n 个客户点
C	客户集合点, $C = V \setminus \{0\}$
K	无人机的编号集合, $K = \{1, 2, \dots, m\}$
D	无人机服务的客户集合
Q^T	卡车的最大载重
Q^D	无人机的最大载重
T_{\max}^D	无人机的最大飞行时间
R_{\max}^D	无人机的最大飞行半径
d_{ij}	节点 i 到 j 的欧氏距离
t_{ij}^T	卡车从节点 i 行驶到 j 所需的时间
t_{ik}^D	卡车从节点 i 到 k 所需的飞行时间
c_{ij}^T	卡车单位距离运输成本
c_{ik}^D	无人机单位距离飞行成本
q_i	客户点的 i 货物重量
t_i^{due}	客户 i 的最迟服务时间
α	时间惩罚系数

Table 2. Decision variables and their meanings

表 2. 决策变量及其含义

变量符号	变量含义
$x_{ij}^T \in \{0, 1\}$	若卡车从 i 到 j 行驶, 则 $x_{ij}^T = 1$, 否则为 0;
$y_{ik}^D \in \{0, 1\}$	若无人机 k 为顾客点 i 服务, 则 $y_{ik}^D = 1$, 否则为 0
t_i	客户 i 实际被服务时间

续表

$z_i \in \{0,1\}$	客户 k 由卡车服务, 则 $z_{ik} = 1$, 否则为 0
	客户 i 的访问顺序
s_k	若无人机 k 的起始服务时间
l_k	若无人机 k 的任务持续时间

3.3. 目标函数和约束条件

$$\min Z = \sum_{i,j} c_{ij}^T d_{ij} x_{ij}^T + \sum_{i,k} c_{ik}^D d_{ij} y_{ik}^D + \alpha \sum_i \max(0, t_i - t_i^{due}) \quad (1)$$

$$\sum_j x_{ij}^T \leq 1, \forall i \in V \quad (2)$$

$$\sum_j x_{ij}^T = \sum_j x_{ij}^T, \forall i \in C \quad (3)$$

$$\sum_{i \in C} q_i^T \cdot \sum_{j \in V} x_{ij}^T \leq Q^T \quad (4)$$

$$u_i - u_j + n \cdot x_{ij}^T \leq n - 1, \forall i, j \in C, i \neq j \quad (5)$$

$$1 \leq u_i \leq n, \forall i \in C \quad (6)$$

$$\sum_{i \in C} q_i^D \cdot \sum_{j \in V} y_{ik}^D \leq Q^D \quad (7)$$

$$d_{ik}^D \cdot y_{ik} \leq R_{\max}^D, \forall y_{ik} = 1 \quad (8)$$

$$t_{\text{launch}}^D(i, k) + t_{\text{return}}^D(i, k) \leq T_{\max}^D \quad (9)$$

$$\sum_{i \in D} y_{ik}^D = \sum_{j \in D} y_{jk}^D, \forall k \in K \quad (10)$$

$$x_{ij}^T + y_{ik}^D = 1, \forall i \in V \quad (11)$$

$$t_i \leq t_i^{due}, \forall i \in C \quad (12)$$

$$t_j^T \geq t_k^T + t_{ij}^T + \max(t_{ik}^D + t_{kj}^D), \forall k \in K \quad (13)$$

式中: 式(1)表示目标函数为卡车运输成本、无人机飞行成本以及时间惩罚成本的和的最小值; 式(2)表示每个卡车停靠点最多只能访问一次; 式(3)表示卡车路径为封闭路径, 确保卡车路径连续, 卡车从配送中心出发并返回配送中心, 形成闭环; 式(4)表示卡车载重约束, 卡车运载货物总重量不得超过卡车最大载重; 式(5)和式(6)表示防止卡车子回路; 式(7)表示无人机载重约束; 式(8)表示无人机飞行距离约束, 无人机飞行距离不得超过无人机的最大飞行半径; 式(9)表示无人机飞行时间限制; 式(10)表示无人机任务闭合约束, 无人机从卡车停靠点释放后, 必须返回同一停靠点或指定集结点; 式(11)表示每个货物只能由一种方式配送; 式(12)表示客户服务的时间窗限制; 式(13)表示卡车与无人机的协同时间同步。

4. 算法设计

未解决具有混合路径约束和协同调度关系的“卡车-无人机协同配送问题(Truck-Drone Routing Problem, TDRP)”本文采用两阶段启发式算法框架, 结合聚类预分配、遗传算法和贪心调度策略, 有效提升计算效率和质量。

4.1. 算法框架

本研究算法分为两个阶段。第一阶段通过 K-Means 将客户根据地理位置和货物属性进行划分, 将目标区域划分为“卡车服务集合”和“无人机优先集合”并以卡车服务点作为聚类中心对无人机客户点集合进行聚类, 降低整体搜索空间。第二阶段使用遗传算法优化卡车路径, 并基于卡车路径构造贪心式无人机任务分配方案, 实现两者协同工作。算法框架如图 1 所示。

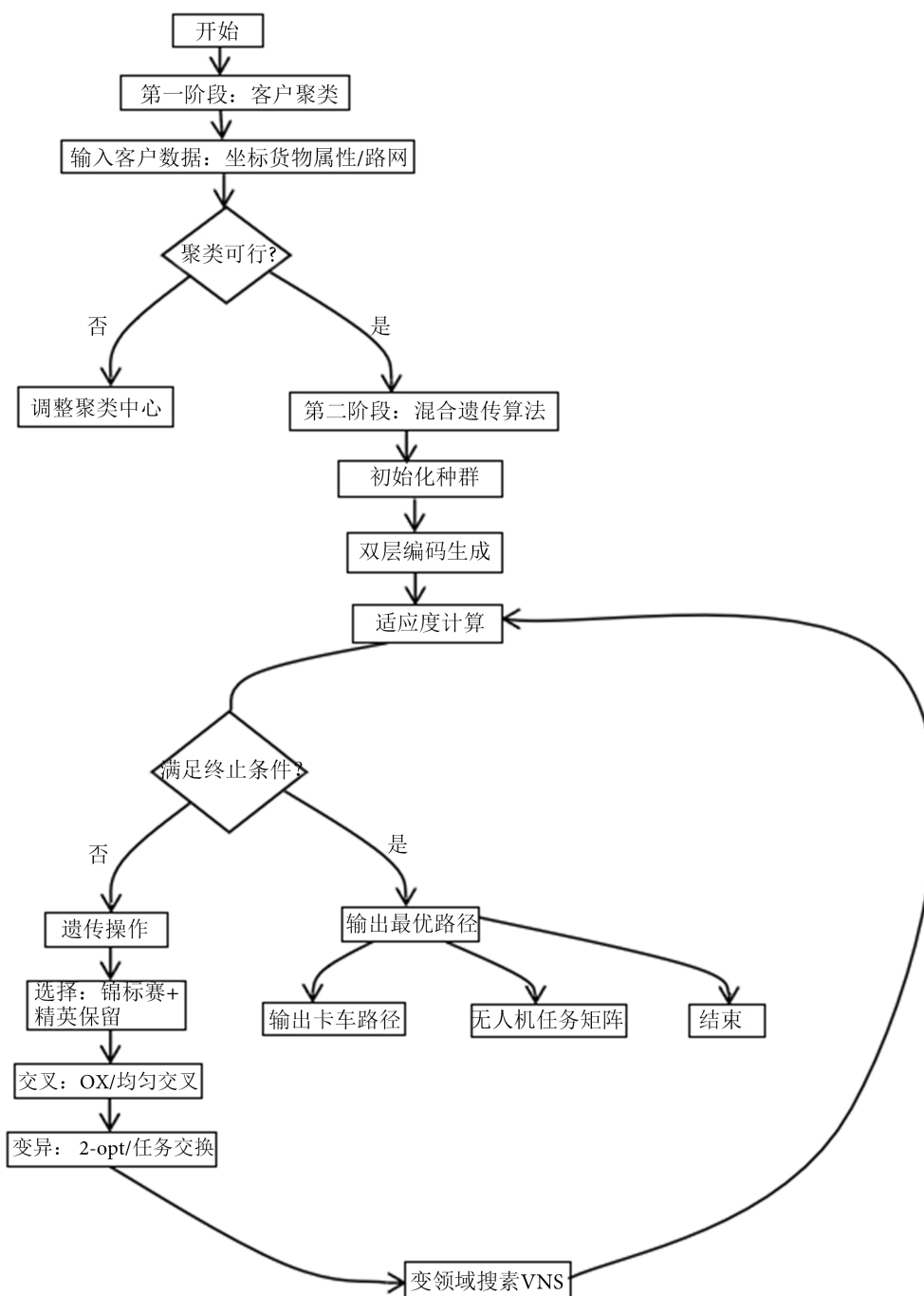


Figure 1. Algorithm process

图 1. 算法流程

4.2. 协同路径构造

4.2.1. 第一阶段 K-Means 聚类算法设计

农村电商物流配送的最大特点在于客户地理位置分布不均, 部分客户集中于主干公路周边, 部分位于交通不便、道路狭窄或海拔较高的偏远地区。同时, 货物类型呈现出显著差异: 工业品下行以小件、轻量为主, 农产品上行常为重货或大宗。在这样的背景下, 统一优化所有客户路径会导致问题规模指数膨胀, 并难以在考虑续航、载重和可达性等多重约束下得到高质量解。因此, 有必要在算法初始阶段对客户进行聚类, 本阶段算法对所有客户点进行聚类, 并确定聚类中心, 即卡车的配送点, 然后对同一聚类中的客户, 实现无人机到客户点的最大距离小于无人机最大飞行半径, 同时客户点需求不大于无人机最大载重。具体步骤为:

步骤 1: 初始化聚类中心。首先对所有配送客户点进行分类, 根据货物的重量及无人机配送的适应性标准将客户分为卡车服务集合和无 u_i 人机服务集合, 当货物重量大于 Q^D 无人机最大载重时强制划分到卡车服务集合。从所有卡车可服务的客户点集合随机选择一个客户点作为初始聚类中心, 即设聚类数 $K=1$, 初始聚类中心为 v_1 。

步骤 2: 客户点划分。对于每一个无人机客户点 $b_i \in D$, 计算其与当前所有聚类中心点 $v_T \in T$ 的欧式距离 D_{ij}

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

将无人机客户点 b_i 分配给其到聚类中心集合中距离最近的中心点 v_T 。

步骤 3: 更新聚类中心。对当前每一个子簇计算该簇内所有客户点的几何中心位置, 并在该类中重新选择距离该形心最近的卡车客户点作为新的聚类中心。如果新中心与旧中心相同(或者所有簇的中心都不变), 则进行有效性验证; 否则, 用新中心替换旧中心, 并回到步骤 2。

步骤 4: 有效性验证。先对每个无人机客户点 i , 计算其与簇中心 v_k 的欧式距离 D_{iv_k} , 若有距离 D_{iv_k} 大于无人机最大服务半径 R_{\max}^D 的则转至步骤 5, 若无则转至步骤 6。

步骤 5: 重新划分簇。将聚类中心数加一, 即 $K = K + 1$; 从未被选择的聚类中心的卡车客户点中, 随机选择新的卡车点加入聚类中心集合; 回到步骤 2。

步骤 6: 输出聚类结果。

4.2.2. 第二阶段遗传算法算法设计

本阶段在第一阶段聚类结果基础上, 采用改进的混合遗传算法(HGA)求解卡车 - 无人机协同配送路径问题, 算法融合遗传算法的全局搜索能力与变邻域搜索(VNS)的局部优化能力, 通过双层编码机制实现资源协同优化。

1) 编码与初始化

1、双层编码方案: 卡车路径层采用排列编码表示路径顺序, 染色体 $C_T = (0, v_1, v_2, \dots, v_m, 0)$, 其中 $v_i \in T$ (卡车簇客户), 首尾 0 表示仓库; 无人机任务层采用二进制矩阵 $M_D = [b_{ij}]_{n \times K}$, $b_{ij} = 1$ 表示无人机 j 服务客户 i ($i \in D$), 每列对应一架无人机的任务序列。

2、初始种群生成: 卡车路径采用节约算法(Clarke-Wright Savings)构建初始路径, 通过计算合并路径的节约值($s_{ij} = d_{i0} + d_{0j} - d_{ij}$), 优先合并节约值高的节点对, 在合并路径时实时计算载重, 若超限则跳过该合并。无人机分配对无人机簇客户, 随机选择满足 $\sum_{j=1}^K b_{ij} = 1 (\forall i \in D)$ 且 $\sum_{i \in D} w_i b_{ij} \leq Q_D$ 的分配方案。

2) 适应度函数: 综合考虑运输成本与时间惩罚, 定义适应度值 F :

$$F(C_T, M_D) = \frac{1}{Z + \alpha \sum_{i \in D} \max(0, t_i - t_i^{due})}$$

其中 $Z = \sum_{k=1}^m c_{v_k v_{k+1}}^T + \sum_{j=1}^K \sum_{i \in D} c_{ij}^D b_{ij}$, α 为时间惩罚系数, t_i 为实际服务时间。

3) 遗传操作设计

选择算子: 在遗传操作设计中, 选择算子采用锦标赛选择(Tournament Size = 3)保留优质个体, 同时引入精英保留策略(Elitism Rate = 10%), 交叉算子针对卡车层使用顺序交叉(OX)保留父代路径片段并补充剩余客户, 无人机层则采用均匀交叉以概率 $p_c = 0.9$ 交换父母代的列向量, 变异算子对卡车层执行 2-opt 局部优化随机选择两个节点反转路径, 无人机层则对变异个体(概率 $p_m = 0.1$)随机交换两行赋值。这一系列操作通过锦标赛选择确保种群多样性, 精英保留策略维持优秀个体, 顺序交叉和均匀交叉分别优化卡车路径和无人机任务分配, 2-opt 变异提升卡车路径局部最优性, 无人机层变异则增强任务分配的灵活性, 共同保证算法在搜索空间中的全局探索与局部开发能力。

4) 变邻域搜索增强(VNS)

在每代遗传操作后对最优个体执行变邻域搜索(VNS)以增强局部优化能力: 首先构建三种邻域结构—— N_1 对卡车路径相邻客户进行交换, N_2 将当前无人机任务重新分配至续航更短的无人机, N_3 合并两个相邻卡车停靠点以释放无人机服务能力; 采用循环搜索策略依次在 $N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_3$ 中寻找改进解, 若任一邻域操作获得更优解则立即返回 N_1 重启搜索过程, 通过动态切换邻域空间避免陷入局部最优。

5) 约束处理机制

在解码阶段, 针对卡车载重约束采用贪婪插入法进行客户点分配, 若当前路径载重超过卡车容量上限, 则优先移除边际收益(单位重量配送成本收益)最低的客户点, 并将其重新分配至无人机配送队列; 对于无人机续航约束, 通过动态调整服务序列中的客户点访问顺序, 确保单架无人机的任务总时间满足 $\sum t_{ij}^D \leq T_{\max}^D$ 的续航限制, 若无法满足则将该无人机的超时任务拆分为多个子任务并由不同无人机协同完成; 同时, 为满足时空协同约束, 强制要求卡车停靠点的停留时间 $\Delta t \geq \max_j(t_{ij}^D)$ 。

6) 终止条件

遗传算法应设置终止条件避免算法无休止运行下去, 本算法中满足以下任一条件即终止: 当最大迭代次数 $G_{\max} = 200$ 时; 当最优适应度值 τ 连续 20 代未提升时, 判定算法陷入局部最优或收敛, 提前终止; 适应度值的标准差 σ 小于阈值 $\sigma_{\min} = 0.01$ 时提前终止。

5. 算例分析

5.1. 实验参数设置

为验证本文提出的模型和两阶段启发式算法的有效性和可行性, 应用 python 软件, 借助 Solomon 的数据集生成随机算例进行仿真测试, 实验的运行环境为 Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @ 2.60GHz, 2592 Mhz, 实验参数设置见表 3, 此外本文设置单架无人机单位距离成本为 0.5 元, 一架无人机固定费用为 20 元, 无人机最大载重 10 kg, 最大飞行半径 15 km, 最大飞行时间 45 min, 派遣准备时间 3 min, 回收需 1 min, 无人机配取货需 1 min, 无人机飞行速度为 80 km/h。卡车单位距离成本 2 元/km, 一辆卡车的固定费用(折旧费)为 80 元, 卡车行驶速度为 50 km/h, 卡车最大载重 750 kg, 卡车 1 次配取货时间为 3 min。时间惩罚系数为 0.1。

Table 3. Parameter settings
表 3. 参数设置

参数	数值
种群规模	200
最大迭代次数	200
交叉概率	0.9
变异概率	0.1

Table 4. Algorithm results
表 4. 算法结果

算例信息		无人机与车辆协同配送				卡车单独配送		
算例编号	客户个数	卡车成本	无人机成本	时间惩罚成本	综合成本	卡车成本	时间惩罚成本	综合成本
RC101	100	1173.99	252.73	3038.76	4465.49	1464.29	9150.59	10614.88
RC102	100	1173.99	252.73	2942.18	4368.90	1464.29	8948.89	10413.18
RC103	100	1173.99	252.73	2883.28	4310.00	1464.29	8775.51	102239.80
R101	100	1065.80	352.42	2060.85	3479.06	1616.93	9773.59	11390.52
R102	100	1065.80	352.42	1819.63	3237.85	1616.93	9514.19	11131.12
R103	100	1065.80	352.42	1747.68	3165.89	1616.93	9302.19	10919.12
C201	100	946.74	290.71	10238.18	11475.63	1407.94	38919.61	40327.55
C202	100	946.74	290.71	9270.51	10507.96	1407.94	37241.49	38649.42
C203	100	946.74	290.71	7626.75	8864.20	1407.94	33886.27	35294.16

5.2. 算法求解及结果分析

Solomon 数据集中 R 类数据集的节点坐标较为分散，C 类数据集中，节点坐标有明显聚簇，RC 类数据集则混合了随机和聚簇的特点。R1、C1、RC1 类的节点时间窗间隔显著小于 R2、C2、RC2 类。在 C201、C202、C203 算例中，协同模式的优势最为巨大。因为客户点聚集，卡车可以停靠在少数几个中心点，无人机就能高效覆盖周边的大量客户，协同效应发挥到极致。

综合成本是衡量配送方案整体经济效益的核心指标。如表 4 所示在所有测试算例中，卡车 - 无人机协同配送模式的综合成本均远低于传统卡车单独配送模式。协同模式相比单独配送，综合成本平均降低了约 60.23%。在某些算例中，优势尤为惊人，例如在 C201 算例中，协同配送综合成本为 11475.63，而单独配送为 40327.55，成本降低了 71.54%；在 R101 算例中，成本降低了 69.45%。时间惩罚成本是两种模式差异最显著的指标，直接反映了配送方案的时效性。如表所示，协同模式的时间惩罚成本极低。如，在 RC101 中，时间惩罚从 9150.59 降至 3038.76 降低 66.8%；在 C201 中，从 38919.61 降至 10238.18 降低 73.7%。

根据算法求解结果分析显示，卡车 - 无人机协同配送模式能够显著降低时间惩罚成本，从而提高客户满意度，提高物流效率，同时在卡车成本方面，协同配送模式利用了无人机来协助降低总运输成本。

6. 结论

本研究针对“最后一公里”配送成本高、效率低的难题，构建了一种卡车与无人机协同配送的路径

优化模型, 并通过对一系列标准算例的仿真计算, 验证了所提出模型与算法的有效性。核心研究结论如下:

1) 协同配送模式在综合成本上具有绝对优势: 如计算结果所示, 在所有测试算例中, 卡车-无人机协同配送的综合成本均显著低于传统卡车单独配送。成本降低幅度巨大, 普遍节省了 50% 以上的综合成本。例如, 在 C201 算例中, 协同配送的综合成本为 11475.63, 而单独配送成本高达 40327.55, 成本降低了约 71.5%; 在 R101 算例中, 成本也从 11390.52 降至 3479.06, 降低约 69.5%。这充分证明了协同模式在经济上的巨大潜力和可行性。

2) 协同配送能极大提升时效性, 减少时间惩罚成本: 数据中最显著的差异体现在“时间惩罚成本”上。协同配送通过无人机进行并行、快速的末端送达, 极大地缩短了客户等待时间, 从而将时间惩罚成本降低了 65% 至 85%, RC101 从 9150.59 降至 3038.76; C201 从 38919.61 降至 10238.18。这表明该模式不仅能降低成本, 更能大幅提升客户服务水平与满意度, 为解决时效性要求高的配送场景提供了有效方案。

但是本文模型基于静态环境客户需求、位置、路况、天气在规划期内已知且不变, 并假设无人机性能不受任何干扰, 这种简化假设可能导致实验结果比实际结果乐观。基于以上分析, 未来的研究可以发展动态路径规划和随机规划模型, 考虑随机出现的客户订单、动态变化的交通状况和天气信息; 构建更真实的无人机能耗模型, 将风速、风向、气温和负重作为变量, 建立更精确的无人机能耗与飞行速度模型。

参考文献

- [1] 胡璐. 年收入约 18 万亿元! 乡村产业绘新貌[N]. 新华每日电讯, 2025-10-21(006).
- [2] 王硕, 王婷, 王永明. 农村电商物流发展问题与对策探析[J]. 时代经贸, 2025, 22(5): 39-42.
- [3] Lu, J., Liu, Y., Jiang, C. and Wu, W. (2025) Truck-Drone Joint Delivery Network for Rural Area: Optimization and Implications. *Transport Policy*, **163**, 273-284. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2025.01.016>
- [4] 蒋传义. 农村电商物流高质量发展的制约因素及其破解路径[J]. 中国航务周刊, 2025(15): 84-86.
- [5] 蒋永梅. 推进农村物流产业高质量发展路径思考[J]. 市场周刊, 2025, 38(19): 35-38.
- [6] 王超峰, 公维鑫. 基于农村快递需求分布特征的货运车辆与无人机并行配送优化研究[J]. 科技和产业, 2025, 25(7): 82-87.
- [7] Hou, Y. (2024) Research on the Current Development and Strategy of Rural E-Commerce in China's Digital Market-Oriented Economy. *Advances in Economics Management and Political Sciences*, **107**, 73-79.
- [8] Zhao, L.X. (2024) Urban Digital Transformation, E-Commerce and Rural Revitalization. *Advances in Economics Management and Political Sciences*, **118**, 48-58.
- [9] 潘悦. Analysis of the Synergistic Development of Rural Logistics and E-Commerce in Jiangsu under the Context of Digital Economy [C]//中国物流学会, 中国物流与采购联合会. 2024 年(第二十三次)中国物流学术年会论文集. 2024: 487-503.
- [10] 林晓伟, 谢舒芃. 数字虚拟组织视域下乡村物流共同配送模式的稳定性研究[J]. 兰州交通大学学报, 2024, 43(3): 136-147.
- [11] 王莉, 李琦, 周鲜成, 等. 客运班车-电动车-无人机协同配送模式下山区农村寄递物流路径规划[J/OL]. 系统科学与数学, 2025: 1-23. <https://link.cnki.net/urlid/11.2019.O1.20250318.1506.046>, 2025-04-07.
- [12] Zhu, X.J. (2023) The Exploration of the Optimization of Rural Logistics Distribution Mode in Big Data Environment. *The Frontiers of Society, Science and Technology*, **5**, 93-97.
- [13] Song, L. (2025) Research on Rural Logistics Terminal Distribution Efficiency Improvement in Rural Revitalization Strategy Assisted by Artificial Intelligence. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, **10**, 1-30. <https://doi.org/10.2478/amns-2025-0432>
- [14] 蒋丽, 王洪艳, 梁昌勇. 新零售背景下卡车与无人机协同的电商物流末端配送优化[J]. 系统管理学报, 2024, 33(6): 1461-1470.

- [15] 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.
- [16] Ge, X., Yin, Q., Moktadir, 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>
- [17] Zhang, Z., Li, Y., He, J., Chen, J. and Hong, H. (2025) Optimization Study on the Hybrid Scheduling of Truck-Drone Delivery System. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, **151**. <https://doi.org/10.1061/jtepbs.teeng-8741>
- [18] 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>
- [19] Hong, L., Zhou, L. and Baldacci, R. (2025) The Traveling Salesman Problem with Drone Based on Vehicle Mobile Parking for Customer Self-pickup. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **203**, Article ID: 104347. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104347>
- [20] Barzanjeh, S., Ahmadizar, F. and Arkat, J. (2025) Logic-Based Benders Decomposition Algorithm for Robust Parallel Drone Scheduling Problem Considering Uncertain Travel Times for Drones. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **193**, Article ID: 103877. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103877>