

面向山区物流的货车无人机协同配送系统设计

徐婷¹, 田太祺¹, 方俊浩¹, 马李京^{1,*}

1. 西华大学, 汽车与交通学院, 四川 宜宾, 644000

摘要: 针对山区乡村路网稀疏、住户分散及道路易中断导致的末端配送成本高、覆盖不足问题, 以西昌市安宁镇和攀枝花市盐边县金河村为对象, 设计干线货车集散与支线无人机穿透相结合的协同配送系统。系统将客户划分为主干道货车服务点和偏远无人机服务点, 支持无人机异地回收、快速换电及人车时间同步。以总运营成本最小为目标, 建立考虑货物负载当量、货车路径、无人机续航、客户服务和同步等待约束的路径规划模型, 并采用客户预处理、双层加权 K-means 聚类、BFS 路径筛选、A* 路径搜索和模拟退火相结合的混合算法求解。基于 61 个实测配送节点的仿真结果表明, 协同模式总成本为 671.25 元, 总配送时间为 12.18 h。按各方案仿真输出计算, 协同模式较传统货车模式成本降低 16.4%, 时间缩短 24.4%, 较固定仓储无人机模式成本降低 40.6%, 时间缩短 19.8%。协同模式完成全部 61 个节点服务, 并降低山区绕行、长距离返仓和同步等待损耗。

关键词: 山区物流; 货车-无人机协同配送; 客户分级; 双层聚类; 路径优化

Design of a Truck-UAV Collaborative Delivery System for Mountain Logistics

Ting Xu¹, Taiqi Tian¹, Junhao Fang¹, Lijing Ma^{1,*}

1. Department of Automobile and Transportation, Xihua University, Yibin, Sichuan, 644000, China

Abstract: To address high last-mile delivery costs and limited accessibility in mountainous rural areas, this study develops a truck-UAV collaborative system based on field surveys in Anning Town, Xichang, and Jinhe Village, Yanbian County, Panzhihua. Customers are divided into roadside truck-served nodes and remote UAV-served nodes. UAVs can be recovered at downstream truck stops and rapidly recharged or swapped, while truck and UAV schedules are synchronized. A cost-minimization routing model considering truck routing, payload-equivalent rules, UAV endurance, service assignment, and synchronization constraints is solved by a hybrid procedure combining customer preprocessing, two-layer weighted K-means clustering, BFS route screening, A* path search, and simulated annealing. Simulation with 61 measured delivery nodes yields a total cost of CNY 671.25 and a completion time of 12.18 h. Based on the simulation outputs of the three schemes, the collaborative mode reduces cost and time by 16.4% and 24.4% compared with truck-only delivery, and by 40.6% and 19.8% compared with fixed-warehouse UAV delivery. The collaborative mode serves all 61 nodes and reduces detours, long-distance return flights, and synchronization losses.

Keywords: Mountain logistics; Truck-UAV collaborative delivery; Customer classification; Two-layer clustering; Route optimization

货车-无人机协同配送通过货车负责干线运输、无人机承担支线配送, 实现地面路网与低空网络的优势互补, 已成为乡村末端物流的重要研究方向^[1]。已有农村场景研究表明, 货车与无人机联合配

送能够通过运力协同提升物流网络运行效率^[2]。针对乡村物流路径问题,有研究采用客户分区与路径优化方法进行任务组织^[3]。多货车与多无人机协同配送进一步体现了多运力联合优化的复杂性^[4]。对于超重、超远客户,已有研究从客户特征差异出发优化协同配送策略^[5]。山区道路受损会进一步增加协同路径规划的约束复杂度^[6]。面向农村山区的协同取送货研究也表明,道路可达性与客户分散程度是影响配送组织的重要因素^[7]。相关综述指出,场景差异会显著影响货车-无人机协同模式及求解策略的选择^[8]。因此,本文基于川西南典型山区实测数据,构建客户分级的货车-无人机协同配送系统,并对路径模型、求解算法及运行效果进行验证。

1 货车-无人机协同配送系统设计

1.1 数据获取与山区配送特征

实地调研包括地形勘测、物流体系走访和运输成本实测,选取攀枝花市盐边县桐子林镇金河村与西昌市安宁镇作为差异化样本。金河村与县城直线距离约9 km,但受江河和山体阻隔,机动车单程需行驶11.7 km。全域山地占比92%,758户居民分散在6条独立山谷,村组支路宽2.5~3 m,最大坡度15°,6—9月部分支路存在滑坡、落石导致的阶段性中断。村内无快递直营网点,村民单次往返县城取件燃油成本约20元,72%的受访者愿承担3~5元/件的上门配送费。安宁镇部分偏远村组距集散中心超过15 km,货车逐户配送空载率约42%。两地数据均表明,单一货车或单一无人机难以兼顾山区配送的成本、时效与覆盖需求。

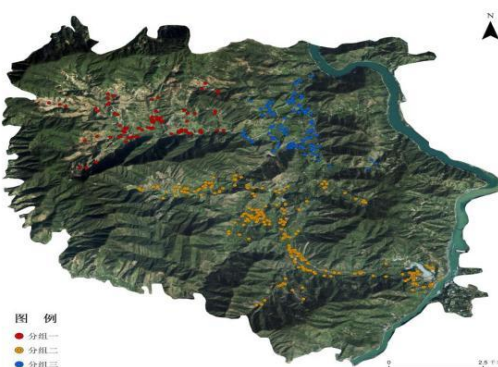


图1 金河村地形与配送节点分布

Fig. 1 Topography and delivery-node distribution of Jinhe Village

1.2 协同配送模式与三级运行体系

现有货车-无人机协同方式主要包括人车并行独立、纯移动枢纽、应急辅助和基础人车同步等典型形态^[8]。考虑众包参与的协同生产配送研究表明,外部运力会进一步改变任务分配与路径组织方式^[9]。当日达场景下的无人机补货研究则强调了移动补给与时效约束的重要性^[10]。结合山区场景看,独立起飞受固定仓储位置与无人机续航限制。纯移动枢纽会使主干道沿线客户也由无人机投递,增加无效飞行。应急辅助模式下无人机常态利用率偏低。基础同步模式要求无人机返回原起飞点,在山谷间距较大的场景中容易形成长距离折返。针对这些问题,本文保留货车的主干道配送能力,将无人机作为偏远节点的支线运力,并允许异地回收。

根据客户可达性将配送点划分为两类。主干道及集中居住点由货车直接服务,深山散户和道路中断区域由无人机服务。县域配送中心统一装载后,货车沿主干道行驶并作为移动补给平台,在预先勘测的临时停靠点完成无人机装载与放飞。无人机投递后可在货车后续停靠点异地回收,完成快速换电后继续执行任务,从而避免返回原起飞点产生的无效折返。系统运行分为仓库预处理、云端

调度和车载前沿作业三级。仓库按货车配送货物、无人机配送货物及任务簇进行分拣，云端生成初始路径并同步位置、电量和任务进度，车载端负责放飞、回收与补给。货车到达回收点后等待待返航无人机完成回收，再继续行驶，从而实现人车时间同步。

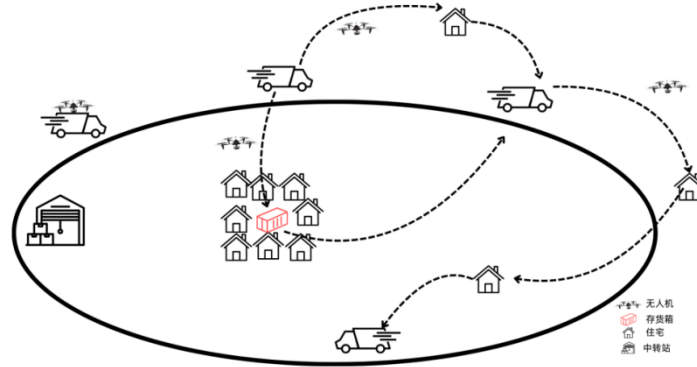


图2 货车-无人机协同配送模式

Fig. 2 Truck-UAV collaborative delivery mode

2 客户分级路径规划模型与求解算法

2.1 模型构建

将上述问题定义为客户分级无人机配送车辆路径问题（Vehicle Routing Problem with Delivery by Drone under Customer Rating, VRP-DR-CS）。设 C_1 为货车客户集合， C_2 为无人机客户集合， S 为可用临时停靠点集合， K 和 U 分别为货车与无人机集合。货车和无人机型号固定，无人机最大负载当量为4，最大单次航程为20 km。大、中、小件分别占4、2、1个负载当量，全部客户需求必须完成。总成本由人工成本、货车与无人机固定出动成本以及实际运输作业成本构成，优化目标为总运营成本最小。

模型采用以下边界条件。配送中心、客户点及候选停靠点坐标已知，候选停靠点满足无人机起降条件。主干道客户与偏远客户服务范围不交叉，货车仅在可通行主干道运行，无人机在合规低空空域按规划航线飞行。无人机回收并换电后可恢复续航。放飞、回收和投递均计入固定操作时间，货车在停靠点的同步等待计入系统成本。仿真周期内不考虑暴雨、大风等极端天气，所有客户需求须在单个配送周期内完成。上述设定用于突出山区道路可达性差异、货车路径连续性以及人车同步对路径组织的影响。

$$\min W = W_h + W_v^{fix} + W_u^{fix} + W_v^{op} + W_u^{op} \quad (1)$$

$$T_u = \frac{d}{v} + nT_1 + mT_2 + MT_3 \quad (2)$$

$$T_v = \frac{D}{V} + NT_4 + T_5, \quad T = \max(T_u, T_v) \quad (3)$$

式（1）中， W_h 表示人工成本， W_v^{fix} 和 W_u^{fix} 分别表示货车和无人机固定出动成本， W_v^{op} 和 W_u^{op} 分别表示货车和无人机实际运输作业成本。成本核算采用仿真输出的实际计费作业量，避免将系统完成时间直接等同于人工工时或运输计费时间。式（2）和式（3）中， T_u 、 T_v 和 T 分别表示无人机总作业时间、货车总作业时间和系统完成时间。 d 和 D 分别表示无人机与货车总里程， v 和 V 分别表示无人机与货车速度。 n 和 m 分别表示无人机放飞和回收次数， M 和 N 分别表示无人机与货车服务节点数量。 T_1

至 T_5 分别对应无人机放飞准备、无人机回收、无人机投递、货车配取货和货车等待时间。在此基础上设置客户服务、货车路径连续性、载重、时间同步、等待和无人机续航约束。

$$\sum_{k \in K} a_{ki} = 1 \quad \forall i \in C_1, \quad \sum_{u \in U} \sum_{s \in S} y_{usp} = 1 \quad \forall p \in C_2 \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j}^k = 1, \quad \sum_{i \in V} x_{i0}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij}^k = \sum_{j \in V} x_{ji}^k, \quad a_{ki} \leq \sum_{j \in V} x_{ji}^k \quad \forall i \in C_1, k \in K \quad (6)$$

$$Q_k \leq Q_{TR}^{max}, \quad q_{us} \leq Q_U^{max} z_{uso} \quad (7)$$

$$t_{uso} \geq T_{ks} + T_1, \quad T_{ks} \geq t_{usi} + T_2 + \frac{d_{us}}{v} \quad (8)$$

$$W_{ks} = T_{ks} - \max \left(T_{ks}, \max_{u \in U} (t_{usi} z_{usi}) \right) \quad (9)$$

$$d_{us} \leq D_U^{max} \quad (10)$$

式中, x_{ij}^k 表示货车 k 由节点 i 行驶至节点 j 的 0-1 变量。 a_{ki} 表示货车 k 服务客户 i 的 0-1 变量。 y_{usp} 表示无人机 u 从停靠点 s 服务客户 p 的 0-1 变量。 Q_k 和 q_{us} 分别表示货车总载荷与无人机起飞负载。 z_{uso} 和 z_{usi} 分别表示无人机在停靠点起飞与回收决策。 T_{ks} 和 T_{ks} 分别表示货车到达和离开停靠点时间。 W_{ks} 表示货车等待时间, d_{us} 表示无人机单次飞行里程。 Q_{TR}^{max} 、 Q_U^{max} 和 D_U^{max} 分别表示货车最大载荷、无人机最大负载当量和无人机最大单次航程。其余决策变量满足 0-1 或非负取值要求。

2.2 双层加权 K-means 混合求解算法

针对模型的 NP-hard 特性, 采用预处理、双层聚类、路径搜索和全局优化相结合的混合求解流程^[11]。首先, 将连片聚居客户合并为配送单元, 并依据货车额定载重采用第一层加权 K-means 划分货车服务片区。随后在各货车片区内利用广度优先搜索 (Breadth-First Search, BFS) 遍历可行主干道路段, 筛选货车初始访问路线。其次, 剔除货车可直接服务的节点, 对剩余偏远客户按货物重量和负载当量进行第二层聚类, 使每个任务簇满足单架无人机单次载荷约束。然后利用 A*搜索计算各无人机任务簇的最短飞行路径, 并遍历货车路线上的候选起降和回收点, 比较不同组合下的无人机新增飞行成本与货车等待成本。最后以总成本为评价函数, 通过模拟退火调整货车访问顺序及无人机起降、回收点组合, 直至目标值收敛, 得到货车路径、无人机航线与临时停靠点的一体化方案。

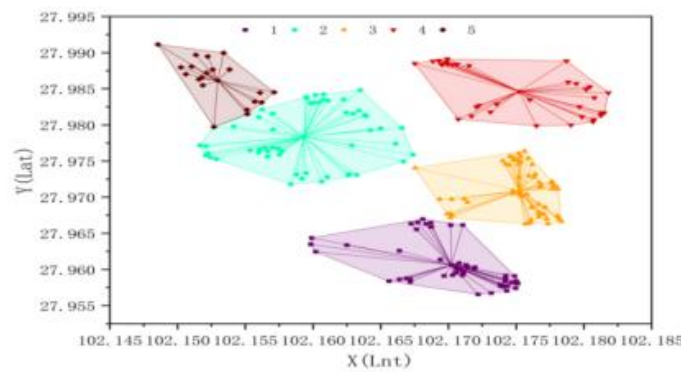


图 3 客户点聚类结果

Fig. 3 Customer-node clustering result

3 仿真实验与结果分析

3.1 仿真场景与参数

采用城市交通仿真软件（Simulation of Urban MObility, SUMO）复刻金河村 10 km×10 km 山地路网，导入实地采集的 61 个配送节点和货物当量数据。设置三种方案，分别为本文协同配送、传统货车逐户配送和固定仓储无人机配送。协同系统配置 2 辆货车，每辆固定搭载 4 架同型号物流无人机。固定仓储无人机方案投入 4 架无人机并行作业。无人机载重 10 kg，最大航程 20 km，速度 70 km/h，单次起飞准备 3 min，回收 1 min，投递 1 min，固定出动成本 6 元，飞行成本 0.14 元/min。货车速度 60 km/h，固定出动成本 12 元，单位时间运输成本 0.55 元/min。快递员成本按 26 元/h 计。三种方案使用同一 61 节点需求集作为仿真输入，覆盖能力作为独立指标评价。

3.2 仿真结果

表 1 三种配送模式仿真结果
Table 1 Simulation results of three delivery modes

配送模式	货车里程/km	无人机里程/km	时间/h	总成本/元
协同配送	584.83	481.45	12.18	671.25
传统货车	792.86	—	16.11	802.76
固定仓储无人机	—	2895.08	15.18	1130.67

注：—表示该方案不使用相应运力。

协同模式的货车里程和无人机飞行里程分别为 584.83 km 和 481.45 km，总配送时间为 12.18 h，总成本为 671.25 元。传统货车模式总配送时间为 16.11 h，总成本为 802.76 元。固定仓储无人机模式因存在大量长距离往返，飞行里程增至 2895.08 km，总配送时间为 15.18 h，总成本为 1130.67 元。按上述仿真输出计算，协同模式相较传统货车模式成本降低 16.4%，时间缩短 24.4%，相较固定仓储无人机模式成本降低 40.6%，时间缩短 19.8%。仿真场景共设置 61 个配送节点。协同模式完成全部节点服务。传统货车和固定仓储无人机分别受到道路可达性和续航能力限制，存在偏远节点不能稳定服务的情况。因此，成本与时间结果用于反映各方案在可行作业条件下的运行效率，覆盖能力作为独立指标评价。

3.3 协同效益来源分析

从路径结构看，协同配送并非简单叠加两类运力，而是通过客户分级缩短各自承担的低效率路段。与传统货车模式相比，协同模式货车行驶里程由 792.86 km 降至 584.83 km，减少约 26.2%，主要原因是深山散户和断路节点不再由车辆逐户绕行。与固定仓储无人机模式相比，无人机飞行里程由 2895.08 km 降至 481.45 km，减少约 83.4%，说明移动货车显著缩短了无人机从仓库到服务区的空中干线距离。异地回收进一步避免无人机返回原起飞点，使起飞点、服务点和回收点形成顺向任务链。时间方面，协同系统由货车主干道作业形成主要完成路径，无人机任务可与货车行驶并行执行。当无人机在后续停靠点完成回收时，等待成本被限制在局部停靠阶段。因此，协同模式同时减少货车绕行、无人机返仓和串行等待，是其在总成本与配送时效上优于两类单一模式的主要原因。

4 工程适用性、约束与优化方向

4.1 场景适用与经济边界

协同模式更适合高山峡谷、江河阻隔或村组支路通行能力较弱且具有一定订单规模的山区。主干道和集中居住点由货车批量服务，深山散户和阶段性断路节点由无人机补充。原始分析指出，单村日订单低于约 10 件时固定出动成本难以摊薄。仿真单件配送成本约 11 元，仍高于常规快递末端

补贴水平。实际运营宜结合芒果等农产品上行与生活物资下行形成双向货流,提高车辆与无人机装载利用率。

4.2 落地约束与拓展方向

系统落地受技术、调度和低空管理约束。模型假设无人机能够自主避障、异地回收和快速换电,但山区林木遮挡、起降面不规则,短期仍可能需要飞手辅助。低空物流规模化应用仍受场地、空域和运营条件约束^[12]。无人机路径规划还需兼顾山区环境下的航线可行性与安全性^[15]。当前算法基于静态订单及单一车型、机型,尚未纳入临时订单、应急需求和生鲜冷链损耗。后续可引入动态订单插入与多无人机协同取送货机制^[13]。针对应急场景,可进一步加入多目标资源调度机制^[14]。在此基础上,可将农产品上行与下乡配送统一建模。

5 结论

本文提出面向山区的货车-无人机协同配送系统,引入客户分级、异地回收与人车同步机制,并构建包含客户服务、货车路径连续性、载重、续航和时间同步约束的VRP-DR-CS模型。采用双层加权K-means、BFS、A*与模拟退火联合确定货车路径、无人机任务及临时停靠点。61个实测节点仿真表明,协同模式完成全部节点服务。按各方案仿真输出计算,协同模式较传统货车模式成本降低16.4%,时间缩短24.4%,较固定仓储无人机模式成本降低40.6%,时间缩短19.8%。研究结果可为复杂山区低空物流路径组织提供量化依据。

参考文献

- [1] Madani B, Ndiaye M. Hybrid truck-drone delivery systems: A systematic literature review[J]. IEEE Access, 2022, 10: 92854-92878.
- [2] Lu J, Liu Y, Jiang C, et al. Truck-drone joint delivery network for rural area: Optimization and implications[J]. Transport Policy, 2025, 163: 273-284.
- [3] 丁一凡. 基于货车与无人机联合配送的乡村物流路径优化研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2024.
- [4] 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.
- [5] 宋瑞, 边疆, 何世伟, 等. 考虑超重超远客户的卡车无人机协同配送研究[J]. 中国公路学报, 2024, 37(3): 395-406.
- [6] 韩晶, 刘艳秋. 考虑道路受损和公平性的卡车无人机协同配送路径优化研究[J]. 运筹与管理, 2025, 34(6): 55-62.
- [7] 冯晓春, 魏洪杰, 姚娜娜, 等. 农村山区物流基于卡车-无人机协同取送货作业优化研究[J/OL]. 系统工程学报, 2026: 1-23.
- [8] 唐立, 尹瑶琳, 蒲科先, 等. 场景驱动的卡车-无人机协同配送问题研究综述[J/OL]. 交通运输工程与信息学报, 2026: 1-24.
- [9] 祁玉青, 张伟. 考虑众包物流的卡车无人机协同生产配送多目标优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(10): 4463-4475.
- [10] 欧阳立君. 当日达模式下考虑无人机补货的卡车无人机协同配送研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2025.
- [11] 贺世红, 傅祥昕. 基于改进遗传—禁忌搜索算法的卡车—无人机协同配送选址路径研究[J]. 南宁师范大学学报(自然科学版), 2026, 43(1): 56-66.
- [12] 万静, 王光德. 低空物流发展的SWOT分析及路径研究[N]. 河南经济报, 2026-04-30(09).
- [13] 彭会萍, 张延慧, 贺羿萱. 考虑同时取送货的多无人机协同路径规划[J]. 兰州工业学院学报, 2026, 33(2): 95-100.
- [14] 伊振鹏, 郑满, 孙晓. 无人机-货车协同应急资源调度多目标优化研究[J]. 天津建设科技, 2026, 36(2): 1-4+9.
- [15] 廖勇, 马博涛. 面向低空经济的无人机配送路径规划综述[J]. 移动通信, 2026, 50(4): 34-47.

¹第1作者简介: 徐婷(2005-), 女, 西华大学本科在读, 研究方向: 交通运输。E-mail: 728876530@qq.com。

*通讯作者简介: 马李京(1990-), 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 交通信息工程及控制。E-mail: malijing@xhu.edu.cn。