

doi: 10.19920/j.cnki.jmsc.2025.10.010

卡车-多无人机动态协同的配送路径优化研究^①

刘长石¹, 吴 张², 寇 纲^{3,4*}, 周鲜成³, 周渝峰⁵, 罗 亮¹

(1. 湖南工商大学工商管理学院, 长沙 410205; 2. 重庆大学经济与工商管理学院, 重庆 400044;
3. 湘江实验室, 长沙 410205; 4. 湖南工商大学数字媒体工程与人文学院, 长沙 410205;
5. 重庆工商大学管理科学与工程学院, 重庆 400067)

摘要: 随着技术的发展, 无人机在城市末端配送中展现出便捷、高效的配送优势。本研究探讨城市物流系统中的卡车-多无人机动态协同配送路径规划, 设定每辆卡车搭载多架无人机开展并行配送, 各无人机单次起飞可配送多个客户, 以最小化总配送成本为目标, 建立混合整数规划模型。根据问题与模型特征设计一种三阶段混合启发式算法进行求解。通过多类型算例实验验证了模型的正确性和算法的有效性。研究结果表明, 本研究模型和算法能够有效降低物流成本, 缩短货物送达客户时间, 提升配送效率, 为城市物流配送提供重要决策参考。

关键词: 卡车-多无人机; 动态协同; 路径规划; 混合启发式算法

中图分类号: F252; U116 文献标识码: A 文章编号: 1007-9807(2025)10-0160-14

0 引言

随着技术发展, 以无人机为代表的无人配送方式在城市末端配送、封控区域配送等场景架起空中物流通道, 展现出便捷、安全、高效的配送价值^[1]。作为智慧城市建设的重要组成部分, 无人机正逐渐成为物流“最后一公里”有效解决方案。它能够避开交通拥堵, 直接将包裹送达目的地, 显著缩短配送时间并降低物流成本。近年来, 美团、顺丰和亚马逊等企业纷纷将无人机应用于即时配送和电商物流等领域。随着应用场景的拓展, 无人机正成为现代城市物流系统中不可或缺的一环^[2]。

无人机路径规划已是研究热点之一。Dorling等^[3]考虑无人机最大飞行距离和载重等因素, 以总配送费用最小、总配送时间最短为目标构建无人机路径规划模型。Song等^[4]考虑无人机飞行时

间与载重等因素, 以无人机服务客户数量与总飞行距离的加权和最大为目标构建无人机路径规划模型。裴颂文等^[5]以总成本最小为目标构建无人机调度路径动态规划模型, 先将客户聚类, 再采用遗传算法求解。以上研究可为无人机配送路径规划提供借鉴。

无人机使用电池作为动力, 具有低碳环保优势, 但存在续航里程较短、容量小等缺陷, 难以独立完成距离较长的规模化物流任务。鉴于卡车具有载重量大与长距离运输等优势, Murray 和 Chu^[6]于2015年首次提出卡车-无人机协同配送模式, 设定一辆卡车搭载一架无人机, 以卡车或者无人机完成任务后返回物流中心的时间最短为目标, 构建卡车-无人机路径规划的FSTSP(flying sidekick traveling salesman problem)模型。随后, 基于TSP(traveling salesman problem)方法, 学者们从不同视角开展车辆-无人机协同配送路径

① 收稿日期: 2022-05-28; 修订日期: 2025-07-22。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(W2511077); 湖湘高层次人才聚集工程资助项目(2024RC4008; AC2024040911247631ff26); 国家社会科学基金资助项目(23BGL011); 湖南省社会科学基金资助项目(23JD037); 长沙市自然科学基金一般项目(kq2502045); 重庆市研究生科研创新项目(CYB25002)。

通讯作者: 寇 纲(1975—), 男, 吉林磐石人, 博士, 教授, 博士生导师。Email: kougang@swufe.edu.cn

优化研究. Mathew 等^[7]与 Carlsson 等^[8]分别以总运输成本最小、总配送时间最短为目标构建卡车-无人机协同配送路径优化的 TSP 模型. Agatz 等^[9]与 Ha 等^[10]以总成本最小为目标构建 TSPD (traveling salesman problem with drone) 模型. 颜瑞等^[11]以总配送时间最短为目标构建区域限制条件下的 TSPD 模型. Salama 等^[12]以最小化交付完成时间为目 标构建 TSPD 模型. 随着研究深入, 部分学者基于 VRP (vehicle routing problem) 方法优化卡车-无人机协同配送路径. Schermer 等^[13]以车辆返回物流中心的时间最短为目标构建卡车-无人机协同配送路径规划的 VRPD (vehicle routing problem with drones) 模型. Wang 等^[14]和 Kuo 等^[15]以总成本最小为目标构建 VRPD 模型. 以上文献大都设定每辆卡车仅搭载一架无人机开展配送, 无人机每次起飞仅配送一个客户, 效率相对较低.

随着技术进步, 卡车可以搭载多架无人机开展协同配送. 起初, 已有文献设定卡车搭载多架无人机、每架无人机单次飞行仅服务一个客户. Raj 和 Murray^[16]以总配送时间最短为目标构建 FSTSP 模型. Saleu 等^[17]以配送任务完成时间最小为目标构建 PDSMTSP (the parallel drone scheduling multiple traveling salesman problem). Chang 等^[18]和 Kang 等^[19]以总配送时间最小为目标, 分别构建卡车-多无人机协同配送路径规划的 TSP 与 HDTRP (heterogeneous drone-truck routing problem) 模型. Moshref-Javadi 等^[20]以所有客户的等待时间最小为目标, 构建卡车-多无人机协同配送路径规划的混合整数规划模型. Nguyen 等^[21]与 Heimfarth 等^[22]以总配送成本为目标, 分别构建卡车-多无人机协同配送路径规划的 PDSVRP (parallel drone scheduling vehicle routing problem) 与 MTR-RP (mixed truck and robot routing problem) 模型. 随着研究深入, 部分文献设定卡车搭载多架无人机、无人机单次飞行可服务多个客户. Gu 等^[23]、镇璐等^[24]以总成本最小为目标构建 VRPD 模型. Yin 等^[25]、Wang 等^[26]和 Kitjacharoenchai 等^[27]分别构建 TDDRPTW (truck-based drone delivery routing problem with time windows) 模型、VRPD 模型与混合整数规划模型. 郭兴海等^[28]以总成本最小为目标构建车辆-多无人机协同配送的路径规划模型. 以上文献可为卡车-

多无人机协同配送路径规划提供参考.

已有成果为深入研究卡车-无人机协同配送路径规划奠定良好基础, 但仍存如下可拓展的研究空间: 1) 已有文献大多设定每辆卡车搭载一架无人机开展配送、无人机每次起飞服务一个客户, 具有一定局限. 随着科技进步, 无人机容量与续航能力可单次起飞配送多个客户, 卡车可搭载多架无人机开展并行配送, 将有效提高配送效率; 2) 已有研究主要采用卡车停在某客户位置作为无人机货仓、无人机完成配送任务后返回原发射处与卡车汇合的静态协同模式, 部分文献采用无人机配送时卡车继续行驶、无人机完成任务后飞到卡车途径的后续某客户处与卡车汇合的动态协同模式. 而且已有文献大都仅使用某一种卡车-无人机协同模式, 鲜见同时采用多种协同模式的文献. 为求得最优路径规划, 应同时采用多种协同模式; 3) 已有文献通常假设无人机飞行距离仅与电池容量相关, 未考虑实时载重与飞行时间对电量消耗的影响. 虽然已有部分文献设定无人机单次起飞配送多个客户, 无人机完成任务后飞到卡车后续配送的某客户处与卡车汇合的动态协同模式, 但都没有综合考虑以上研究缺口. 因此, 本研究考虑自重、实时载重与飞行时间等因素对无人机飞行电量消耗的影响, 设定每辆卡车搭载多架无人机开展并行配送, 无人机单次飞行服务多个客户, 并采用多种卡车-无人机协同模式, 以总配送成本最小为目标构建卡车-多无人机动态协同配送的路径规划模型, 并设计三阶段混合启发式算法求解, 以期为卡车-无人机协同配送路径规划提供决策参考.

1 问题描述

某城市物流中心采用卡车-多无人机协同配送模式为客户提供服务, 客户坐标、需求量、服务时间、卡车速度、容量、无人机容量、电池容量与飞行速度已知. 无人机可从物流中心、或从卡车配送客户处起飞配送. 此时无人机电池为满电状态. 每辆卡车搭载多架无人机从物流中心出发, 同一辆卡车搭载的多架无人机可同时在某处起飞并行配送. 各客户能且仅能被一辆卡车或一架无人机配

送一次。完成任务后,卡车与无人机都返回物流中

心(图 1)。

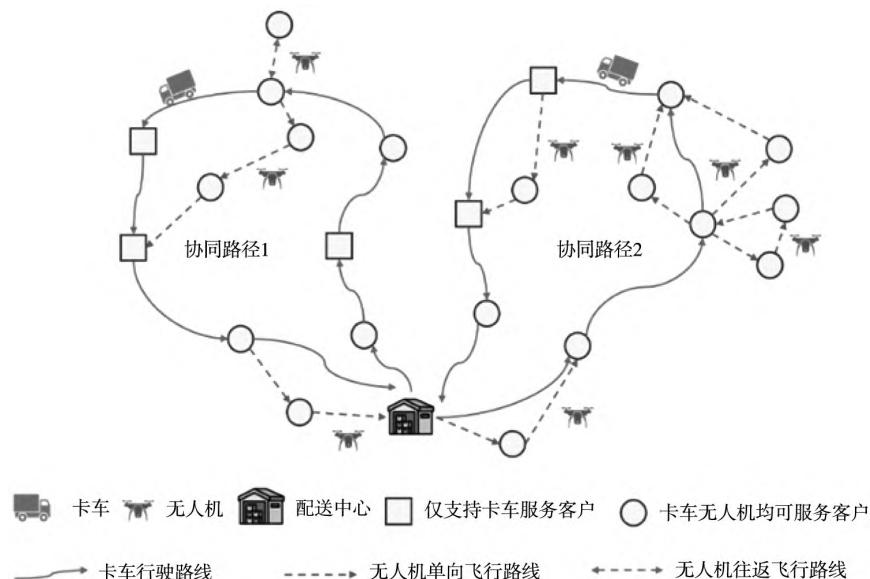


图 1 卡车 - 多无人机动态协同配送路径

Fig. 1 Truck-multiple drone dynamic collaborative delivery routes

为明确本研究适用范围 提出如下假设: 1) 卡车为同一类型, 无人机为同一型号, 各客户需求量小于卡车容量, 需求量大于无人机容量的客户由卡车配送, 其余客户可由卡车或无人机配送; 2) 无人机可重复使用多次, 无人机单次起飞可配送多个客户, 电量消耗受自重、实时载重与飞行时间等因素影响; 3) 卡车驶达某客户, 先配送该客户, 再根据需要决定是否在该客户处发射无人机开展配送; 4) 卡车可在无人机发射处等待无人机返回, 也可在发射某无人机之后继续行驶; 5) 无人机每次起飞完成配送任务后, 可返回位于原发射处的卡车, 或飞行到卡车后续配送的某客户处与卡车汇合, 或返回物流中心; 6) 无人机配送费用包括固定使用成本、飞行时间成本与服务时间成本, 卡车配送费用包括固定使用成本、行驶时间成本、服务时间成本、卡车 - 无人机协同时间成本。决策问题: 如何规划卡车 - 多无人机的动态协同配送路径, 满足所有客户需求, 并使总配送费用最小?

2 数学模型

2.1 符号与变量

2.1.1 集合

C_0 为需求量大于无人机载重的客户集合;

C_1 为需求量小于无人机载重的客户集合; C 为所有客户集合, $C = C_0 \cup C_1$; V 为物流系统内所有节点集合, $V = C \cup O$; O 为物流中心; K 为卡车集合; F 为无人机集合; R_k^c 为第 k 条路径上由卡车配送的客户(卡车停靠点)集合; R_k^f 为第 k 条路径上由无人机配送的客户集合, $R_k^c \cap R_k^f = \emptyset$; R_k 为第 k 条路径上的所有客户集合, $R_k = R_k^c \cup R_k^f$; M_{ikf} 为卡车 k 搭载的无人机 f 在卡车停靠点 i 处起飞配送的客户集合, $M_{ikf} \subseteq C_1$ 。

2.1.2 参数

1) 客户参数: u_i 为客户 i 的需求量; s_i 为客户 i 所需的服务时间。

2) 卡车参数: e 为卡车容量; v 为卡车行驶速度; d_{ij} 为从节点 i 到节点 j 的曼哈顿距离; T_{ijk} 为卡车 k 从节点 i 至节点 j 的行驶时间, $T_{ijk} = d_{ij}/v$; a_{ik} 为卡车 k 到达节点 i 的时间; b_{ik} 为卡车 k 离开节点 i 的时间; l_{ik} 为卡车 k 到达节点 i 的载重; l'_{ik} 为卡车 k 离开节点 i 的载重; ω 为卡车的固定使用成本; ξ 为卡车行驶的单位时间成本; λ 为卡车等待的单位时间成本; c_1 为所有卡车的配送成本。

3) 无人机参数: Q 为无人机电池容量; e' 为无人机容量; v' 为无人机飞行速度; d'_{ij} 为从节点 i 到节点 j 的直线距离; ψ 为无人机的固定使用成本; σ 为无人机飞行的单位时间成本; ∂ 为无人机服

务的单位时间成本; c_2 为所有无人机的配送成本.

4) 卡车-多无人机协同的参数: a_{ikf} 为卡车 k 搭载的无人机 f 到达节点 i 的时间; g_{ik} 为卡车 k 在节点 i 开始发射无人机的时间; g_{ikf} 为卡车 k 搭载的无人机 f 在节点 i 的发射时间; γ_{ikf} 为无人机 f 比卡车 k 晚到节点 i 情况下卡车 k 的等待时间; γ_{ik} 为卡车 k 与无人机 f 在节点 i 的协同时间; γ_{ik} 为卡车 k 在节点 i 与所有无人机的协同时间; b_{ikf} 为卡车 k 搭载的无人机 f 离开节点 i 的时间; T_{ijkf} 为卡车 k 搭载的无人机 f 从节点 i 至节点 j 的飞行时间; l_{ikf} 为卡车 k 搭载的无人机 f 到达节点 i 时的载重; l_{ikf}' 为卡车 k 搭载的无人机 f 离开节点 i 时的载重; $p_{l_{ikf}}$ 为卡车 k 搭载的无人机 f 离开节点 i 载重量为 l_{ikf}' 时飞行单位时间的耗电量; q_{ikf} 为卡车 k 搭载无人机 f 到达节点 i 时的剩余电量; q_{ikf}' 为卡车 k 搭载无人机 f 离开节点 i 时的剩余电量.

2.1.3 决策变量

y_k 为 0-1 变量, 卡车 k 被启用为 1, 否则为 0; z_{ik} 为 0-1 变量, 客户 i 由卡车 k 配送为 1, 否则为 0; x_{ijk} 为 0-1 变量, 卡车 k 从节点 i 行驶到节点 j 为 1, 否则为 0; y_{ikf} 为 0-1 变量, 卡车 k 搭载的无人机 f 被启用为 1, 否则为 0; z_{ikf} 为 0-1 变量, 客户 i 由卡车 k 搭载的无人机 f 配送为 1, 否则为 0; x_{ijkf} 为 0-1 变量, 卡车 k 搭载的无人机 f 从节点 i 飞行至节点 j 为 1, 否则为 0; n_{ikf} 为 0-1 变量, 卡车 k 搭载的无人机 f 完成任务后返回节点 i 为 1, 否则为 0.

2.2 卡车-多无人机动态协同配送路径规划模型

$$\text{Min } c_1 + c_2 \quad (1)$$

$$c_1 = \sum_{k \in K} y_k \omega + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} T_{ijk} x_{ijk} \xi + \sum_{i \in V} \sum_{k \in K} \lambda (s_i z_{ik} + \gamma_{ik}) \quad (2)$$

$$c_2 = \sum_{f \in F} y_f \psi + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} \sum_{f \in F} T_{ijkf} x_{ijkf} \sigma + \sum_{i \in C_1} \sum_{k \in K} \sum_{f \in F} s_i z_{ikf} \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} z_{ik} + \sum_{k \in K} \sum_{f \in F} z_{ikf} = 1, \forall i \in C \quad (4)$$

$$\sum_{i \in R_k} u_i z_{ik} + \sum_{j \in R_k} \sum_{f \in F} u_j z_{jkf} \leq e, \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in R_k^c} x_{0jk} = \sum_{i \in R_k^c} x_{i0k}, \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i \in R_k^c \cup 0} x_{ijk} = \sum_{l \in R_k^c \cup 0} x_{jlk}, \forall j \in R_k^c, k \in K \quad (7)$$

$$g_{ik} = a_{ik} + s_i, \forall i \in R_k^c \cup 0, k \in K \quad (8)$$

$$a_{jk} = g_{ik} + T_{ijk}, \forall i, j \in R_k^c \cup 0, k \in K \quad (9)$$

$$b_{ik} = g_{ik} + \gamma_{ik}, \forall i \in R_k^c \cup 0, k \in K \quad (10)$$

$$l_{ik} = l_{ik} - u_i - \sum_{f \in F} \sum_{j \in M_{ikf}} u_j, \forall i \in R_k^c, k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{j \in M_{ikf}} z_{jkf} u_j \leq e, \forall i \in R_k^c, k \in K, f \in F \quad (12)$$

$$q_{ikf} = Q, \forall i \in R_k^c, k \in K, f \in F \quad (13)$$

$$q_{jkf} = q_{ikf} - T_{ijk} x_{ijkf} p_{l_{ikf}}, \forall i \in C_1, \quad (14)$$

$$j \in C_1, k \in K, f \in F$$

$$q_{ikf}' = q_{ikf}, \forall i \in C_1, k \in K, f \in F \quad (15)$$

$$q_{ikf} \geq 0, \forall i \in R_k^c, k \in K, f \in F \quad (16)$$

$$\sum_{i \in R_k^c \cup 0} x_{ijkf} = \sum_{l \in R_k^c \cup 0} x_{jlkf}, \forall j \in R_k^c, k \in K, f \in F \quad (17)$$

$$g_{ikf} = \text{Max}(g_{ik}, a_{ikf}), \forall i \in R_k^c, k \in K, f \in F \quad (18)$$

$$b_{ikf} = a_{ikf} + s_i, \forall i \in R_k^c, k \in K, f \in F \quad (19)$$

$$a_{jkf} = b_{ikf} + T_{ijkf}, \forall i, j \in R_k^c, k \in K, f \in F \quad (20)$$

$$l_{ikf}' = l_{ikf} - u_i, \forall i \in R_k^c, k \in K, f \in F \quad (21)$$

$$b_{ikf}' = b_{ik} n_{ikf}, \forall i \in R_k^c, k \in K, f \in F \quad (22)$$

$$a_{jkf}' = b_{ikf}' + T_{ijk}, \forall i, j \in R_k^c, k \in K, f \in F \quad (23)$$

$$\gamma_{ikf} = \text{Max}(a_{ikf} - g_{ik}, 0), \forall i \in R_k^c, k \in K, f \in F \quad (24)$$

$$\gamma_{ikf}' = a_{ikf} n_{ikf}, \forall i \in R_k^c, k \in K, f \in F \quad (25)$$

$$\gamma_{ik} = \text{Min}(\gamma_{ikf}), \text{Max}(\gamma_{ikf}'), \forall i \in R_k^c, k \in K \quad (26)$$

$$y_k, y_f, z_{ik}, z_{ikf}, x_{ijk}, x_{ijkf}, n_{ikf} \in \{0, 1\} \quad (27)$$

式(1)为目标函数, 最小化总配送费用.

式(2)表示卡车配送成本包括固定使用成本、行驶时间成本、服务客户的时间成本、卡车-多无人机协同时间成本. 式(3)表示无人机配送成本包括固定使用成本、飞行时间成本与服务客户的时间成本. 式(4)表示各客户能且仅能被一辆卡车或一架无人机服务一次. 式(5)表示卡车容量限制. 式(6)保证各卡车从物流中心出发, 完成任务后返回物流中心. 式(7)表示卡车进出停靠点的流量守恒. 式(8)表示卡车在停靠点可以发射无人机的时间计算方法. 式(9)表示卡车在节点之间的时间计算方法. 式(10)表示卡车离开某节点的时间计算方法. 式(11)表示卡车到达某客户时

的载重、客户需求量、在该客户处采用无人机配送的所有客户需求量、卡车离开该客户时的载重之间的关系。式(12)保证无人机每次起飞配送的容量限制。式(13)表示无人机从卡车发射起飞时电池为满电状态。式(14)表示无人机在节点之间的飞行电量消耗计算方法。式(15)表示无人机离开客户时的电量计算方法。式(16)表示无人机完成任务后回到卡车停靠点时的剩余电量约束。式(17)表示无人机进出节点流量守恒。式(18)表示无人机在某节点发射的时间计算方法。式(19)表示无人机离开某节点的时间计算方法。式(20)表示无人机在节点之间的飞行时间计算方法。式(21)表示无人机在节点之间的载重计算方法。式(22)表示无人机跟随卡车离开某节点的时间计算方法。式(23)表示无人机跟随卡车到达下一点的时间计算方法。式(24)~式(26)表示卡车在某停靠点与其搭载的所有无人机协同的时间计算方法。式(27)表示变量取值限制。

2.3 无人机电量消耗计算

Dorling 等^[3]考虑自重和实时载重设计多旋翼无人机电量消耗模型,本研究采用该模型计算无人机电量消耗。卡车 k 搭载的无人机 f 离开节点 i 载重为 l_{ikf} 时飞行单位时间的耗电量 $p_{l_{ikf}}$ 为

$$p_{l_{ikf}} = (m_1 + l_{ikf})^{3/2} \sqrt{\frac{g^3}{2\rho\kappa\chi}} \quad (28)$$

其中 m_1 无人机自重($m_1 = 15 \text{ kg}$) g 为重力加速度($g = 9.8 \text{ m/s}^2$) ρ 为空气密度($\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$) κ 为无人机单个旋翼面积($\kappa = 0.25 \text{ m}^2$) χ 为旋翼数量($\chi = 6$)。

3 求解算法

3.1 设计思路

VRP 属于 NP-hard 问题,通常采用启发式算法求得满意解。卡车-多无人机动态协同配送路径规划比 VRP 更复杂,已有文献大都采取先构建卡车行驶路径、再优化无人机配送路线的策略求解^[27, 29]。因此,本研究设计一种三阶段混合启发式算法(three-stage hybrid heuristic algorithm, TH-HA)求解(图 2),思路如下:1) 第一阶段:客户聚类。设计改进 K-means 聚类算法确保各聚类簇的客户只由一辆卡车配送;2) 第二阶段:卡车初始路径规划。以行驶距离最短为目标求解各聚类簇的卡车初始路径;3) 第三阶段:自适应大规模邻域搜索(adaptive large neighborhood search, ALNS)算法设计。设计 ALNS 算法优化卡车-多无人机动态协同配送路径。

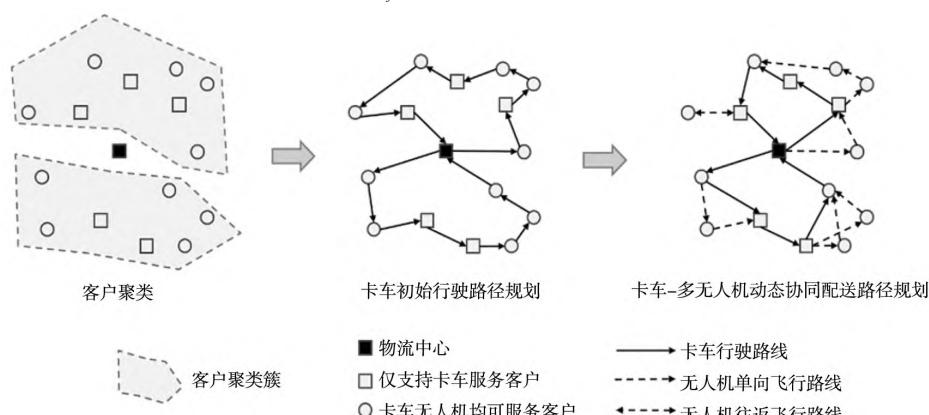


图 2 THHA 设计思路

Fig. 2 THHA design concept

3.2 THHA 算法设计

第一阶段:客户聚类。步骤如下:

步骤 1 令各聚类簇容量为卡车容量 e ,根据客户总需求量 $\text{Sum}(u_i)$ 确定聚类簇数量 CN , $CN = \lceil \text{Sum}(u_i) / e \rceil$, 设定阈值 ζ ;

步骤 2 随机选取 CN 个客户坐标作为各聚类簇的中心坐标;

步骤 3 根据式(5)将各客户分配至离其距离最小的聚类簇,否则将客户分配至离其距离次小的聚类簇。以此类推,直至分配完所有客户;

步骤4 计算各聚类簇的中心坐标, 如果本次各聚类簇与上次各聚类簇的中心坐标的差值小于 ζ , 输出聚类结果 $clusters$, 算法结束; 否则, 转步骤2.

第二阶段: 卡车初始行驶路径规划

精英蚁群算法能避免经典蚁群算法易陷入局部最优的缺陷^[30]. 因此, 以最短行驶距离为目标采用精英蚁群算法优化各聚类簇的卡车初始路径. 步骤如下:

步骤1 将物流中心0与当前聚类簇 $cluster_j$ 内的所有客户重新编码;

步骤2 初始化当前迭代次数 g 、最大迭代次数 G , 并将 H 只蚂蚁随机放置;

步骤3 根据概率转移公式^[30]构建每只蚂蚁的路线;

步骤4 将路线距离最小的蚂蚁标记为精英蚂蚁, 并更新当前迭代最优解;

步骤5 基于精英蚂蚁的路径更新信息素;

步骤6 判断算法是否满足结束规则, 若 $g \leq G$, 转至步骤3; 否则, 将最优解的客户序号还原为重新编码前的客户序号, 输出聚类簇 $cluster_j$ 的卡车初始路径 $Routes_j$.

第三阶段: ALNS 算法设计.

基于卡车初始路径, 设计 ALNS 算法优化各聚类簇的卡车-多无人机动态协同配送路径规划方案. 步骤如下:

步骤1 ALNS 初始化. 设置初始温度为 T_0 、当前温度为 T , $T = T_0$ 、当前温度下的最大迭代次数为 L 、温度衰减系数为 W , 令 $Maxiter$ 为算法最大迭代次数, $Iter$ 为当前迭代次数, $Iter = 1$.

步骤2 移除算子与修复算子设计. 根据算子得分, 采用轮盘赌法分别选择移除算子与修复

算子. 具体如下: 1) 移除算子设计. 设定移除比例系数 r , 将初始路径 $Routes_j$ 上的 m 个客户移除, m 为 $Routes_j$ 的客户数量乘以 r . 两种移除算子设计具体如下: ①随机移除算子. 从路径 $Routes_j$ 中随机移除 m 个属于无人机可配送集合 C_1 的客户; ②最差移除算子. 依次移除路径 $Routes_j$ 中对目标值影响最大的 m 个属于无人机可配送集合 C_1 的客户. 得到路径 $Routes_j'$; 2) 修复算子设计. 将移除的 m 个客户作为无人机待配送客户, 按照修复策略重新插入路径 $Routes_j'$ 中. 两种修复算子设计具体如下: ①贪婪修复算子. 记录客户插入 $Routes_j'$ 后影响目标值的增量, 选择增量最小的位置插入; ②随机修复算子. 在 $Routes_j'$ 中随机选择 m 个不超过无人机配送范围的位置插入客户, 按照贪婪原则将 m 个无人机配送客户分配至距离最近的卡车停靠点, 得到路径 $Routes_j''$.

步骤3 卡车-多无人机动态协同配送路径优化. 依次遍历 $Routes_j''$, 假设卡车 k 从上一节点驶达客户 i (停靠点), 卡车先配送客户 i , 再客户 i 处是否存在无人机配送任务:

1) 如果有配送任务($M_{ikf} \neq \emptyset$), 卡车 k 搭载的无人机将在停靠点 i 处起飞展开并行配送, 各无人机完成任务后, 可返回停靠点 i 与卡车 k 汇合, 或飞往卡车后续配送的某客户处与卡车汇合, 或直接返回物流中心. 卡车-多无人机动态协同配送模式可转换为带容量限制的半开放式多车场 VRP. 采用变邻域搜索算法(variable neighborhood search, VNS)求解该问题, 设计思路如图3(假设停靠点 i 处需要使用3架无人机开展并行配送, 其中 uav 表示无人机). VNS 设计框架如图4.

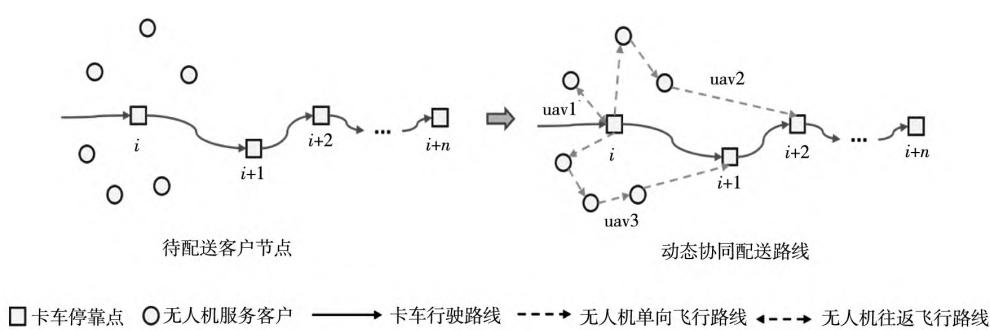


图3 卡车-多无人机动态协同配送模式
Fig. 3 Truck-multiple drone dynamic collaborative delivery model

2) 如果没有配送任务($M_{ikf} = \emptyset$) 检查是否存在无人机从停靠点 i 之前的节点发射起飞、完

成任务后飞行至停靠点 i 与卡车协同的情况. 若有 k 则卡车 k 在停靠点 i 处接收所有无人机后, 再驶向下一客户; 否则, 卡车直接驶向下一客户.

步骤 4 目标值计算. 根据式(1)至式(3)计算卡车-多无人机动态协同配送路线总费用.

步骤 5 方案接受准则设计. 采用基于模拟退火的判断准则更新算子组合加分, 设计 3 种加分准则 ($w_1 > w_2 > w_3$): 1) 当新解比全局最优解更优时, 加分 w_1 ; 2) 当新解差于全局最优解, 但好于初始解时, 加分 w_2 ; 3) 当新解差于初始解, 但被概率性接受时, 加分 w_3 .

步骤 6 自适应过程设计. 若当前温度 T 下 ALNS 的迭代次数小于阈值 L , 转至步骤 2; 否则根据各算子上一阶段得分情况 w_p 更新算子权重 s_p^{iter} . 使用过算子采用公式 $s_p^{iter} = (1-\beta) \cdot s_p^{iter-1} + \beta \cdot w_p / l_p^{iter-1}$ 更新权重. 其中, l_p^{iter-1} 为算子在上一阶段进行 L 次迭代中总共被选择次数, β 为控制权重变化的比例.

步骤 7 算法结束判断. 若 $Iter > MaxIter$, 输出最优目标函数值所对应的卡车-多无人机动态协同配送路径规划; 否则, $T = T \cdot W$, 转步骤 2.

4 算例分析

4.1 实验设置

目前没有关于卡车-多无人机协同配送的标

准算例库, 考虑到物流客户具有不同类型的坐标分布, 选用 Solomon 算例库中的 C 类型算例(客户坐标属于集中分布)、R 类型算例(客户坐标属于随机分布)、RC 类型算例(客户坐标为混合分布)作为本研究算例. 各算例都包含 1 个物流中心和 100 个客户. 还选用 CVRPLIB 算例库中的算例^② E-n76-k8(75 个客户)、M-n151-k12(150 个客户) 和 M-n200-k17(199 个客户) 等作为本研究算例. 以上算例的大部分客户需求量都大于无人机容量, 为符合测试要求, 将客户需求量缩小 50%.

算法参数设置如下: 1) 设定各卡车搭载 3 架无人机, 根据市面上微型货车与无人机参数, 设定 $e = 750 \text{ kg}$, $e' = 15 \text{ kg}$, $m_1 = 15 \text{ kg}$, $v = 50 \text{ km/h}$, $v' = 80 \text{ km/h}$, $Q = 1 \text{ kWh}$, $s_i = 60 \text{ s}$; 2) 设定 $\omega = 200 \text{ 元/辆}$, $\psi = 10 \text{ 元/架}$, $\xi = 2 \text{ 元/min}$, $\lambda = 0.5 \text{ 元/min}$, $\sigma = 0.4 \text{ 元/min}$, $\partial = 0.3 \text{ 元/min}$; 3) 设定 $\zeta = 0.1$, 蚁群算法参数设置如下^[30, 31]: $H = 30$, $\theta_1 = 1$, $\theta_2 = 3$, $rho = 0.2$, $\tau = 4$, $G = 100$; ALNS 算法参数设置如下^[32]: $Maxiter = 100$, $L = 20$, $w_1 = 33$, $w_2 = 13$, $w_3 = 9$, $r = 0.5$, $\beta = 0.1$.

THHA 采用 Matlab 2020a 编程, CPU 为第 11 代 Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 @ 2.40GHz 2.42 GHz, 内存容量为 16.0 GB, 操作系统为 64 位 Windows 11 中文版.

算法 1: 变邻域搜索算法

```

输入: 无人机在停靠点  $i$  处配送客户数量  $n$ 、 $maxIter$ 、 $iter$ 
输出: 无人机配送费用  $uavCost$  配送路线  $uavRoutes$ 
初始化:  $maxIter = n^2$ ,  $iter = 1$ ,  $uavCost = +\infty$ 
1 根据停靠点  $i$  处需要无人机配送的总需求量, 计算使用的无人机数量  $N_i^f$ 
2 初始化各无人机在停靠点  $i$  处的开始配送时间  $T_i^f$ 
3 将无人机待配送客户重新编号(1 ~  $n$ ) 构建随机序列作为初始解  $initSol$ 
4 While  $iter \leq maxIter$  do
5   根据式(12) 无人机容量约束、式(13) 至式(16) 飞行电量约束、式(17) 至式(23) 飞行时间约束 将解序列  $sol$  划分为多条从停靠点  $i$  出发并最终返回停靠点  $i$  的无人机配送路线  $tempRoutes$ 
6   For  $route \in tempRoutes$  do
7     If( 无人机服务完  $route$  上最后一个客户后的剩余电量 > 无人机飞行到卡车后续配送的最远停靠点  $j$  的所需电量 & 替换路线数量
        <  $N_i^f$  )
8       将  $route$  序列上最后的返回停靠点  $i$  替换为停靠点  $j$ 
9     计算当前无人机配送路线  $tempRoutes$  的总费用  $tempCost$ 
10    If(  $tempCost \leq uavCost$  )
11       $uavCost = tempCost$ 
12       $uavRoutes = tempRoutes$ 
13    end For
14     $iter = iter + 1$ 
15    按照概率选择交换、插入与反转方法构建邻域解  $newSol$ 
16 end While

```

^② 参考 <http://vrp.atd-lab.inf.puc-rio.br/index.php/en/>.

为检验模型效果, 松弛无人机容量约束(式(12))与飞行电量约束(式(16)). 即节点*i*处原本需要由车辆*k*搭载的所有无人机配送的客户集合 C_{ik} ($C_{ik} = \bigcup_{f \in F} M_{ikf}$) 在约束松弛之后可由无人机*f*单独完成. 而且, 无人机*f*完成任务后可飞行至卡车后续行驶的某节点与卡车汇合, 或返回物流中心. 因此, 无人机*f*从节点*i*处发射起飞、配送完客户集合 C_{ik} 并回到合适的位置的飞行时间成本与服务客户的时间成本之和为

$$T_{C_{ik}} = \sigma \left(\sum_{j \in C_{ik}} T_{ijk} x_{ijkf} + \sum_{j \in C_{ik}} \sum_{l \in C_{ik}} T_{jlk} x_{jlkf} + \sum_{l \in C_{ik}} \sum_{r \in V} T_{lrk} x_{lrkf} \right) + \partial \sum_{j \in C_{ik}} s_i \quad (29)$$

表1 多类型算例计算结果

Table 1 Calculation results for multiple types of instances

IN	TC	CTC	CC	UFC	CDN	UDN	CUN	UUN	RT
C101	2 028.25	1 291.20	22.32	218.53	54	46	2	5	12.54
R101	1 794.23	1 214.40	48.25	265.98	52	48	1	2	14.13
RC101	2 170.91	1 339.20	46.73	289.08	53	47	2	5	12.45
C201	2 092.11	1 339.20	27.80	228.91	54	46	2	5	12.44
R201	1 829.90	1 262.40	38.47	263.42	52	48	1	2	14.05
RC201	2 131.18	1 334.40	40.86	270.02	53	47	2	4	12.51
E-n76-k8	1 503.89	1 008.00	24.77	216.92	39	36	1	2	10.06
M-n151-k12	2 369.12	1 507.20	46.33	297.19	78	72	2	5	19.66
M-n200-k17	2 823.70	1 670.40	55.65	327.05	103	96	3	8	25.46
AVE	2 082.59	1 329.60	39.02	264.12	60	54	2	4	14.81

根据表1的结果得出: 1) 综合 TC 、 CTC 、 UFC 、 CDN 和 UDN 的值可知, 卡车行驶时间成本占总成本的 63.84%, 配送 52.63% 的客户; 无人机飞行时间成本占总成本的 12.68%, 配送 47.37% 的客户. 说明在无人机飞行速度比卡车行驶速度快的情况下, 无人机配送单个客户的成本远远低于卡车; 2) 由 UFC 和 CC 的值可知 C 类型算例的无人机飞行时间成本和卡车-无人机协同时间成本远远低于 R 与 RC 类型算例. 因为 C 类型算例的客户坐标为集中分布, 无人机配送距离较短. 说明客户分布是影响物流成本的重要因素之一; 3) 根据 RT 的值可知, THHA 求解小规模算例的时间约为 13 s, 计算较大规模算例不超过 30 s, 平均运行时间为 15 s. 说明 THHA 在较短时间内给出符合目标的卡车-多无人机动态协同路径规划方案, 具有可行性、科学性与合理性.

因此, 车辆*k*搭载的所有无人机的使用成本

$$为 F_k = \sum_{f \in F} y_f \psi + \sum_{i \in V} \sum_{f \in F} T_{C_{ik}} z_{ik}.$$

本研究模型下界为 $c_1 + \sum_{k \in K} F_k$.

4.2 实验分析

4.2.1 算法有效性分析

不同类型算例实验的结果如表 1 所示. 表 1 中, IN 为算例名称, TC 为总配送成本(单位: 元), CTC 为卡车行驶时间成本(单位: 元), CC 为卡车-无人机协同时间成本(单位: 元), UFC 为无人机飞行时间成本(单位: 元), CDN 为卡车配送客户数量, UDN 为无人机配送客户数量, CUN 为卡车使用数量, UUN 为无人机使用数量, RT 为程序运行时间(单位: s).

4.2.2 算法对比实验

为验证 THHA 的性能, 基于 Schermer 的方法设计混合变邻域/禁忌搜索算法(hybrid VNS/ tabu search algorithm, HVTSA) 求解本研究模型^[13]. HVTSA 先通过节约启发式算法构建车辆初始行驶路线, 再优化卡车-无人机协同配送路径. 设定 VNS 最大迭代次数为 400 代, 禁忌长度为 15, 卡车与无人机仅能在当前停靠点或者下一停靠点协同. 以 RC101 作为算例采用 THHA 求解模型下界, 并将该下界作为 Benchmark 与 THHA、HVTSA 进行对比实验, 计算结果如表 2 所示. 在表 2 中, N 表示求解次数, TT 表示总配送时间(单位: min) 其余符号含义同表 1.

根据表 2 的结果得出: 1) 由 TC 的值可知 THHA 求得的总成本均优于 HVTSA, 平均节约 13.35%; 而且 THHA 求得的解比较接近 Bench-

mark, 平均差距为 4.32%。说明 THHA 能有效降低卡车 - 多无人机协同配送成本; 2) 由 TT 的结果可知 THHA 每次求得的总配送时间明显优于 HVTSA, 平均节约 20.54%。值得注意的是, THHA 求得的解超越 Benchmark, 平均节约 4.02%; 3) THHA 每次的运行时间都显著优于 HVTSA, 平均节约 80.91%, 说明 THHA 能够快速、高效地优化卡车 - 多无人机动态协同配送路径。

图 5(a) 和图 5(b) 分别表示 THHA 与 HVTSA 最优的卡车 - 多无人机动态协同配送路径规划。从图 5 可知: 1) 图 5(a) 中两辆卡车配送的客户数量相当; 而图 5(b) 中一辆卡车仅配送 7 个客户, 另一辆卡车配送 48 个客户, 该路线上后续客

户的服务时间比较晚, 影响客户满意度。说明 THHA 能根据实际情况均衡分配各路线配送任务, 提升配送质量; 2) 图 5(a) 中卡车配送路径鲜有交叉与迂回; 无人机完成配送任务后, 可根据需要返回位于原发射处的卡车、或飞行到卡车配送的后续某一个客户处与原卡车汇合、或返回物流中心, 有效降低卡车 - 多无人机协同时间。图 5(b) 中的部分卡车配送路线出现交叉与迂回配送路线等不合理现象; 无人机完成配送任务后, 都返回位于原发射处的卡车、或返回卡车配送的下一个客户, 存在一定局限。说明 THHA 能合理规划卡车 - 多无人机动态协同配送路径, 具有合理性、科学性与有效性。

表 2 不同算法的计算结果
Table 2 Calculation results of different algorithms

N	Benchmark			THHA			HVTSA		
	TC	TT	RT	TC	TT	RT	TC	TT	RT
1	2 056.82	783.99	13.83	2 152.51	773.37	14.14	2 404.41	936.97	69.71
2	2 028.87	786.31	14.75	2 090.76	756.76	13.51	2 363.26	960.61	68.89
3	2 069.90	801.38	14.27	2 154.28	778.92	13.07	2 319.79	923.54	70.19
4	1 999.45	785.10	13.99	2 102.17	758.68	13.05	2 494.32	974.29	66.94
5	2 006.91	783.31	14.40	2 110.38	775.63	13.29	2 391.17	913.97	71.88
6	2 011.55	781.02	13.60	2 122.21	794.51	13.17	2 425.72	950.49	68.77
7	1 999.61	774.62	13.25	2 077.51	749.05	13.46	2 534.06	989.07	70.19
8	2 031.42	812.97	14.56	2 144.17	757.85	12.89	2 552.86	1 013.07	69.69
9	2 029.22	840.77	13.48	2 123.07	762.94	12.91	2 465.42	962.86	69.41
10	2 054.63	818.40	14.04	2 128.36	739.24	13.31	2 522.69	999.05	69.98
AVE	2 028.84	796.79	14.02	2 120.54	764.70	13.28	2 447.37	962.39	69.57

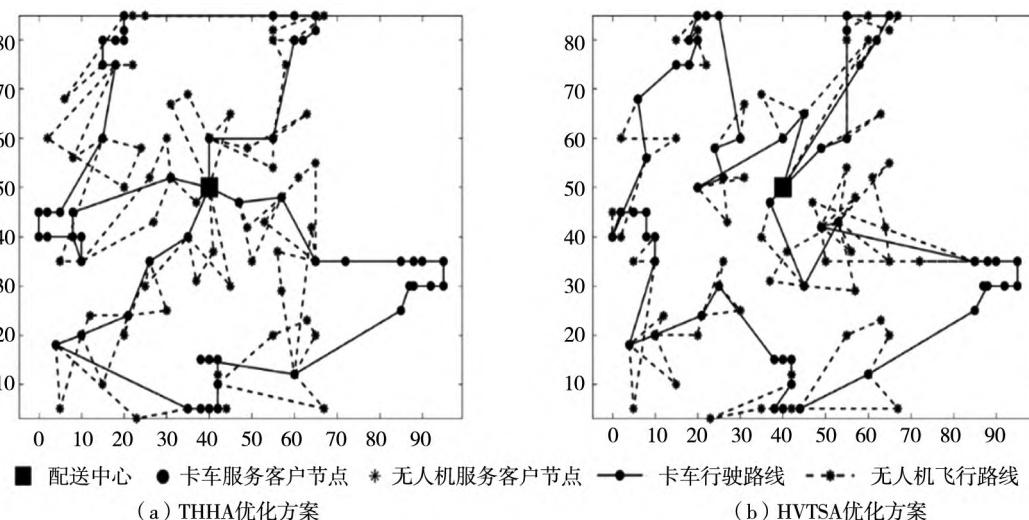


图 4 不同优化算法的优化方案
Fig. 4 Optimization plans of different algorithms

4.2.3 动态协同配送模式与静态协同配送模式的对比实验

将卡车-多无人机动态协同配送模式与静态协同配送模式^[33]进行对比实验,结果如表3所示。表3中,CTT表示卡车行驶时间(单位: min),UFT表示无人机飞行时间(单位: min),CT表示卡车-无人机协同时间(单位: min),其余符号含义同表1与表2所示。

由表3的结果可知: 1) 综合CT和CTT的值,可知动态协同配送模式下各算例的卡车-多无人机协同时间均显著优于静态协同配送模式,平均节约80.70%,而两种模式的卡车行驶时间相同。

说明动态协同配送模式能有效缩短卡车-无人机协同时间; 2) 由UFT的值可知,动态协同配送模式比静态协同配送模式的无人机飞行时间更长。因为动态协同配送模式下无人机完成配送任务后,可根据需要飞行到卡车后续配送的客户点与卡车协同,需要飞行较长距离,飞行时间更长; 3) 根据TC和TT值可知,动态协同配送模式的总配送成本和总配送时间均小于静态协同配送模式。因为静态协同模式下卡车需要在发射处等待所有无人机完成配送任务后返回,再一同前往下一停靠点,产生较大的卡车-无人机协同时间。说明动态协同配送模式优于静态协同配送模式。

表3 动态协同配送模式与静态协同配送模式的计算结果

Table 3 Calculation results of dynamic collaborative delivery model and static collaborative delivery model

IN	动态协同配送模式					静态协同配送模式				
	TC	TT	CTT	UFC	CT	TC	TT	CTT	UFC	CT
C101	1 884.41	710.33	592.80	436.24	63.53	1 915.59	884.77	592.80	252.50	237.97
R101	1 944.40	820.15	669.60	676.17	98.55	2 035.25	1 130.93	669.60	437.13	409.33
RC101	2 171.32	769.42	657.60	812.32	58.82	2 222.92	1 081.15	657.60	473.71	370.55
C201	1 995.23	716.01	636.00	528.57	26.01	2 080.31	991.31	636.00	328.32	301.31
R201	1 901.20	794.62	657.60	673.46	85.02	2 015.23	1 140.76	657.60	439.32	431.16
RC201	2 115.18	784.62	648.00	707.77	83.62	2 209.23	1 103.59	648.00	464.44	402.59
AVE	2 001.96	765.86	643.60	639.09	69.26	2 079.76	1 055.42	643.60	399.24	358.82

算例RC201的卡车-多无人机动态协同配送路径规划与静态协同配送路径规划分别如图6(a)和图6(b)所示。从图6可知: 1) 图6(a)中卡车在无人机配送过程中继续向下一个节点行驶,无人机每次完成任务后根据需要飞往卡车后续配送的最优客户处与卡车汇合。基于动态协同模式的卡车-多无人机协同路线规划比较复杂,具有一定难度,但有效缩短卡车-无人机的协同时间、

驶,无人机每次完成任务后根据需要飞往卡车后续配送的最优客户处与卡车汇合。基于动态协同模式的卡车-多无人机协同路线规划比较复杂,具有一定难度,但有效缩短卡车-无人机的协同时间、

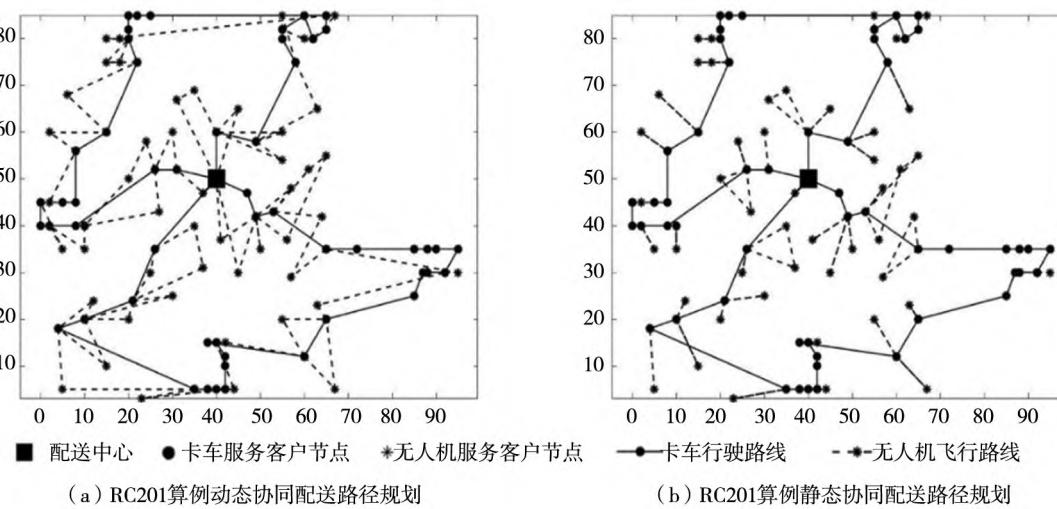


图5 卡车-多无人机动态协同模式与静态协同模式路径规划

Fig. 5 Route planning for truck-multiple drone dynamic collaborative model and static collaborative model

减少配送的时间成本; 2) 图 6(b) 中卡车需要在无人机发射处等待所有无人机返回, 无人机每次飞行完成任务后必须返回原发射处与卡车汇合, 当卡车发射的所有无人机都返回后, 卡车搭载无人机继续向下一个节点行驶。虽然基于静态协同模式的卡车-多无人机协同路线路径规划比较容易, 但显著延长卡车-无人机的协同时间、增加配送的时间成本; 3) 两种模式的卡车行驶路线一致, 说明动态协同配送模式下卡车不需要额外行驶距离与无人机协同具有科学性、合理性与可行性。

4.2.4 卡车-多无人机与卡车-单无人机的动态协同配送模式的对比实验

采用算例 RC101 将卡车-多无人机(每辆卡车搭载 3 架无人机)与卡车-单无人机的动态协同配送模式分别运行 10 次, 计算结果如表 4 所示。表 4 中, CTSR 表示两种配送模式关于卡车-无人机协同时间的节约比率, 其余符号的含义同表 1、表 2 所示。

表 4 卡车-多无人机与卡车-单无人机的动态协同配送模式的实验结果

Table 4 Experimental results of truck-multiple drone and truck-single drone dynamic collaborative delivery models

N	卡车-多无人机				卡车-单无人机				CTSR
	TC	TT	UFT	CT	TC	TT	UFT	CT	
1	2 138.73	788.89	701.45	71.09	2 180.48	921.73	656.54	203.93	65.14%
2	2 179.93	787.44	764.83	64.84	2 199.98	926.16	681.86	203.56	68.15%
3	2 145.42	790.22	749.96	89.22	2 181.02	942.16	686.06	241.16	63.00%
4	2 141.49	759.26	668.99	24.66	2 159.23	883.59	601.84	148.99	83.45%
5	2 188.54	790.02	748.67	50.62	2 221.12	927.02	674.62	187.62	73.02%
6	2 096.96	764.25	692.78	63.25	2 148.86	915.86	645.10	214.86	70.56%
7	2 126.27	757.28	717.90	46.68	2 163.00	945.69	602.11	235.09	80.14%
8	2 097.20	775.48	685.13	84.08	2 131.69	907.90	647.73	216.50	61.16%
9	2 113.47	776.99	681.33	66.39	2 132.60	885.78	615.98	175.18	62.10%
10	2 141.49	793.16	693.53	72.96	2 164.22	897.47	643.89	177.27	58.84%
AVE	2 136.95	778.30	710.46	63.38	2 168.22	915.34	645.57	200.42	68.38%

4.2.5 灵敏性分析

采用算例 RC101 分析无人机服务客户数量、无人机容量与电池容量等参数的灵敏性。

1) 无人机服务客户数量的灵敏性分析

令其他参数不变, 将移除客户比例系数 r 以 0.1 的步长在 [0.1 0.9] 的范围内变动, 探究卡车与无人机服务客户数量的变化对卡车-多无人机协同配送路径规划的影响。经过实验发现, 当 r 超过 0.7 时, 由于可供无人机协同的停靠点变得太少, 导致无人机无法在有限电池容量内完成配送任务。 r 值在 [0.1 0.7] 范围内的计算结果如表 7 所示。

由表 4 的结果可知: 1) 根据 TC 和 TT 的值得出, 卡车-多无人机动态协同配送模式每次运行求得的总成本和总配送时间均优于卡车-单无人机动态协同配送模式。说明卡车-多无人机动态协同配送模式能有效降低总配送成本、缩短配送时间、提高配送效率; 2) 由 UFT 的值可知, 与卡车-单无人机动态协同配送模式相比较, 卡车-多无人机动态协同配送模式的无人机飞行时间略高, 因为卡车-多无人机模式下的动态协同路线更多, 使得无人机飞行距离和飞行时间就更长; 3) 从 CT 和 $CTSR$ 的结果可知, 卡车-多无人机动态协同时间显著优于卡车-单无人机动态协同时间, 平均节约 68.38%。因为卡车-多无人机动态协同模式有更多的无人机开展并行配送, 能有效提高配送效率、降低卡车-无人机协同时间。说明卡车-多无人机动态协同配送模式要优于卡车-单无人机动态协同配送模式。

根据表 5 的结果可知: ①根据 r 、 TC 、 CTT 、 UFT 、 CUN 与 UUN 的值得出, 由于无人机相对于卡车具有飞行速度快优势, 随着 r 的值不断增大, 无人机服务客户数量与飞行时间不断增加, 总配送成本、配送时间、卡车行驶时间和卡车服务客户数量不断降低, 提升卡车-多无人机协同配送效率; ②根据 r 、 CUN 的 UUN 值可知, 当 $r \leq 0.2$ 时, 无人机配送客户数量太少, 每辆卡车只需要 1 架无人机开展配送就能完成任务, 导致卡车-多无人机配送模式难以发挥作用, 造成运力浪费; 当 $0.3 \leq r \leq 0.6$ 时, 每辆卡车需要 2 架无人机开展

协同配送; 当 $0.6 < r \leq 0.7$ 时, 每辆卡车需要 3 架无人机开展协同配送才能发挥最优效率. 因此, 应根据实际情况适当平衡无人机和卡车的配送任务, 提高卡车-无人机协同配送效率.

表 5 无人机服务客户数量变化的实验结果

Table 5 Experimental results of changes in number of customers served by drones

r	TC	TT	CTT	UFT	CSN	USN	CUN	UUN
0.1	2 224.45	952.67	837.60	143.02	90	10	2	2
0.2	2 201.20	919.93	808.80	228.05	81	19	2	2
0.3	2 176.61	862.11	763.20	355.40	71	29	2	4
0.4	2 165.05	855.35	710.40	514.71	62	38	2	4
0.5	2 160.61	835.52	686.40	610.58	53	47	2	4
0.6	2 126.11	780.29	638.40	768.44	44	56	2	4
0.7	2 102.30	713.72	604.80	868.87	34	66	2	6

2) 无人机容量与电池容量的灵敏性实验
令其他参数不变, 使无人机容量 e' 以 4 kg 的步长在 [10, 26] 的范围内变动. 为排除改变无人机容量而电池容量不变而导致无人机飞行距离不确定因素, 设置无人机电池容量与无人

机容量同比例更新(保证在不同容量限制下, 无人机满载时的最大配送范围相应变化). 实验结果如表 6 所示, 其中 e' 表示无人机容量(单位: kg), Q 表示相应的无人机电池容量(单位: kWh), 其余符号的含义同表 1 与表 2.

表 6 无人机容量灵敏性分析结果

Table 6 Sensitivity analysis results of drone capacity

e'	Q	TC	TT	CT	CSN	USN
10	0.760 7	2 215.16	872.03	85.23	62	38
14	0.950 4	2 200.96	850.02	74.42	58	42
18	1.153 7	2 113.40	787.47	92.27	52	48
22	1.369 6	2 072.50	783.15	107.75	49	51

根据表 6 的结果可知: 随着无人机容量与电池容量的不断增大, 总配送成本、总配送时间、卡车行驶时间、卡车服务客户数量呈现出不断减少的趋势. 说明无人机容量与电池容量增加后, 能够配送需求量更大的客户, 减少卡车配送任务, 总配送成本和总配送时间能够有所降低; 与此同时, 卡车-多无人机协同时间、无人机服务客户数量呈现出不断增加的趋势. 说明无人机容量与电池容量是影响卡车-多无人机协同配送任务分配重要因素, 实际中应根据客户的需求量大小, 合理选择相应的无人机配送, 降低总配送成本.

5 结束语

本文研究城市物流系统中的卡车-多无人机动态协同配送路径规划, 以总配送成本最小为目

标构建卡车-多无人机动态协同配送路径规划模型, 设计三阶段混合启发式算法求解, 仿真实验结果表明: 1) THHA 能综合考虑客户需求、坐标分布与城市路网等实际情况, 科学规划卡车-多无人机动态协同配送路径, 对位置偏远的客户、位于地面交通窘境的客户采用无人机并行配送, 有效减少卡车行驶距离, 降低物流成本, 缩短货物送达客户时间, 提高客户满意度, 能为城市物流配送提供决策参考; 2) 与卡车-多无人机静态协同配送模式比较, 卡车-多无人机动态协同配送模式能大幅度缩短物流配送时间, 减少车辆-多无人机协同时间, 并且卡车无须行驶额外的距离与无人机协同; 3) 无人机容量与电池容量是卡车-多无人机动态协同配送任务分配的重要影响因素, 当客户需求量普遍较大时、且无人机需要服务客户的较多时, 应采用大容量和大电池容量的无人机开展并行配送, 提高配送效率.

参考文献:

- [1] 谭荣辉, 徐晓林, 傅利平, 等. 城市管理的智能化转型: 研究框架与展望 [J]. 管理科学学报, 2021, 24(8): 48-57.

- Tan Ronghui , Xu Xiaolin , Fu Liping , et al. Intelligent transformation of urban management: Research framework and outlook [J]. *Journal of Management Sciences in China* , 2021 , 24(8) : 48 – 57. (in Chinese)
- [2] Madani B , Ndiaye M , Salhi S. Hybrid truck-drone delivery system with multi-visits and multi-launch and retrieval locations: Mathematical model and adaptive variable neighborhood search with neighborhood categorization [J]. *European Journal of Operational Research* , 2024 , 316(1) : 100 – 125.
- [3] Dorling K , Heinrichs J , Messier G G , et al. Vehicle routing problems for drone delivery [J]. *IEEE Transactions on Systems , Man , and Cybernetics: Systems* , 2016 , 47(1) : 70 – 85.
- [4] Song B D , Park K , Kim J. Persistent UAV delivery logistics: MILP formulation and efficient heuristic [J]. *Computers & Industrial Engineering* , 2018 , 120: 418 – 428.
- [5] 裴颂文 , 沈天马 , 宁 钟 , 等. KMG: 考虑逆向物流的无人机路径规划策略研究 [J]. *系统工程理论与实践* , 2019 , 39 (12) : 3111 – 3119.
- Pei Songwen , Shen Tianma , Ning Zhong , et al. KMG: Study on UAV path planning strategy by considering reverse logistics [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice* , 2019 , 39(12) : 3111 – 3119. (in Chinese)
- [6] Murray C C , Chu A G. The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* , 2015 , 54: 86 – 109.
- [7] Mathew N , Smith S L , Waslander S L. Planning paths for package delivery in heterogeneous multirobot teams [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* , 2015 , 12(4) : 1298 – 1308.
- [8] Carlsson J G , Song S. Coordinated logistics with a truck and a drone [J]. *Management Science* , 2018 , 64(9) : 4052 – 4069.
- [9] Agatz N , Bouman P , Schmidt M. Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone [J]. *Transportation Science* , 2018 , 52(4) : 965 – 981.
- [10] Ha Q M , Deville Y , Pham Q D , et al. On the min-cost traveling salesman problem with drone [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* , 2018 , 86: 597 – 621.
- [11] 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.
- Yan Rui , Chen Lishuang , Zhu Xiaoning , et al. Research on vehicle routing problem with truck and drone considering regional restriction [J]. *Chinese Journal of Management Science* , 2022 , 30(5) : 144 – 155. (in Chinese)
- [12] Salama M R , Srinivas S. Collaborative truck multi-drone routing and scheduling problem: Package delivery with flexible launch and recovery sites [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* , 2022 , 164: 102788.
- [13] Schermer D , Moeini M , Wendt O. A hybrid VNS/Tabu search algorithm for solving the vehicle routing problem with drones and en route operations [J]. *Computers & Operations Research* , 2019 , 109: 134 – 158.
- [14] Wang Y , Wang Z , Hu X , et al. Truck-drone hybrid routing problem with time-dependent road travel time [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* , 2022 , 144: 103901.
- [15] Kuo R J , Lu S H , Lai P Y , et al. Vehicle routing problem with drones considering time windows [J]. *Expert Systems with Applications* , 2022 , 191: 116264.
- [16] Raj R , Murray C. The multiple flying sidekicks traveling salesman problem with variable drone speeds [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* , 2020 , 120: 102813.
- [17] Saleu R G M , Deroussi L , Feillet D , et al. The parallel drone scheduling problem with multiple drones and vehicles [J]. *European Journal of Operational Research* , 2022 , 300(2) : 571 – 589.
- [18] Chang Y S , Lee H J. Optimal delivery routing with wider drone-delivery areas along a shorter truck-route [J]. *Expert Systems with Applications* , 2018 , 104: 307 – 317.
- [19] Kang M , Lee C. An Exact Algorithm for heterogeneous drone-truck routing problem [J]. *Transportation Science* , 2021 , 55 (5) : 1088 – 1112.
- [20] Moshref-Javadi M , Lee S , Winkenbach M. Design and evaluation of a multi-trip delivery model with truck and drones [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* , 2020 , 136: 101887.
- [21] Nguyen M A , Dang G T H , Hà M H , et al. The min-cost parallel drone scheduling vehicle routing problem [J]. *European Journal of Operational Research* , 2022 , 299(3) : 910 – 930.
- [22] Heimfarth A , Ostermeier M , Hübner A. A mixed truck and robot delivery approach for the daily supply of customers [J]. *European Journal of Operational Research* , 2022 , 303(1) : 401 – 421.
- [23] Gu R , Poon M , Luo Z , et al. A hierarchical solution evaluation method and a hybrid algorithm for the vehicle routing problem with drones and multiple visits [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* , 2022 , 141: 103733.
- [24] 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.
- Zhen Lu , Gao Jiajing , Tan Zheyi. Routing problem of multiple trucks and drones cooperative delivery [J]. Journal of Management Sciences in China , 2024 , 27(7) : 1 – 18. (in Chinese)
- [25] Yin Y , Li D , Wang D , et al. A branch-and-price-and-cut algorithm for the truck-based drone delivery routing problem with time windows [J]. European Journal of Operations Research , 2023 , 309: 1125 – 1144.
- [26] Wang Z , Sheu J B. Vehicle routing problem with drones [J]. Transportation Research Part B: Methodological , 2019 , 122: 350 – 364.
- [27] Kitjacharoenchai P , Ventresca M , Moshref-Javadi M , et al. Multiple traveling salesman problem with drones: Mathematical model and heuristic approach [J]. Computers & Industrial Engineering , 2019 , 129: 14 – 30.
- [28] 郭兴海 , 计明军 , 温都苏 , 等. “最后一公里”配送的分布式多无人机的任务分配和路径规划 [J]. 系统工程理论与实践 , 2021 , 41(4) : 946 – 961.
- Guo Xinghai , Ji Mingjun , Wen Dusu , et al. Task assignment and path planning for distributed multiple unmanned aerial vehicles in the “last mile” [J]. Systems Engineering—Theory & Practice , 2021 , 41(4) : 946 – 961. (in Chinese)
- [29] Murray C , Raj R. The multiple flying sidekicks traveling salesman problem: Parcel delivery with multiple drones [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies , 2020 , 110: 368 – 398.
- [30] Liu C , Kou G , Zhou X , et al. Time-dependent vehicle routing problem with time windows of city logistics with a congestion avoidance approach [J]. Knowledge-Based Systems , 2020 , 188: 104813.
- [31] 周鲜成 , 刘长石 , 周开军 , 等. 时间依赖型绿色车辆路径模型及改进蚁群算法 [J]. 管理科学学报 , 2019 , 22(5) : 57 – 68.
- Zhou Xiancheng , Liu Changshi , Zhou Kaijun , et al. Improved ant colony algorithm and modelling of time-dependent green vehicle routing problem [J]. Journal of Management Sciences in China , 2019 , 22(5) : 57 – 68. (in Chinese)
- [32] Ropke S , Pisinger D. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows [J]. Transportation science , 2006 , 40(4) : 455 – 472.
- [33] Roytvand G M , Rahmani D , Moshref-Javadi M. Data-driven robust optimization for a multi-trip truck-drone routing problem [J]. Expert Systems With Applications , 2024 , 241: 122485.

Research on dynamic cooperative distribution route planning of truck-multiple drones

LIU Chang-shi¹ , WU Zhang² , KOU Gang^{3,4*} , ZHOU Xian-cheng³ , ZHOU Yu-feng⁵ , LUO Liang¹

1. School of Business Administration , Hunan University of Technology and Business , Changsha 410205 , China;
2. School of Economics and Business Administration , Chongqing University , Chongqing 400044 , China;
3. Xiangjiang Laboratory , Changsha 410205 , China;
4. School of Digital Media Engineering and Humanities , Hunan University of Technology and Business , Changsha 410205 , China;
5. School of Management Science and Engineering , Chongqing University of Technology and Business , Chongqing 400067 , China

Abstract: With the development of technology , drones have demonstrated convenient and efficient delivery advantages in last-mile urban logistics. This study investigates the dynamic collaborative distribution route planning problem for truck-multiple drones in urban logistics systems. Each truck carries multiple drones for parallel deliveries , and each drone can serve multiple customers per flight. A mixed-integer programming model is developed with the objective of minimizing total delivery costs. A three-stage hybrid heuristic algorithm is designed to solve the problem based on the characteristics of the problem and the model. Through various experimental cases , the correctness of the model and the effectiveness of the algorithm are verified. The results show that the proposed model and algorithm can effectively reduce logistics costs , shorten delivery times , and improve delivery efficiency , providing valuable decision-making support for urban logistics distribution.

Key words: truck-multiple drones; dynamic coordination; routes planning; hybrid heuristic algorithm