

卡车-无人机联合配取货路径优化

柳国梁, 刘华琼*, 徐红艳

山东交通学院交通与物流工程学院, 山东 济南 250357

摘要:针对卡车-无人机联合配取货路径优化问题,考虑无人机最大载质量和续航能力,以配取货成本和配取货时间最小化为目标,构建单辆卡车携带多架无人机配取货模型,设计分阶段迭代优化算法,第 1 阶段采用阈值筛选法和 K -means++ 聚类算法对客户点进行聚类,确定卡车的配送点,第 2 阶段采用穷举法确定卡车配取货路径,第 3 阶段采用邻域搜索算法优化无人机配取货路径,计算并对比不同聚类中心数 K 下卡车-无人机联合配取货总时间和总成本,确定最佳配取货路径。算例结果表明: $K=3$ 时,卡车-无人机联合配取货总时间和总成本最小,与仅采用卡车配取货时相比,总时间和总成本分别减小 75.98%、12.34%。在优化区域内采用卡车-无人机联合配取货可降低配取货成本,提升物流末端配取货效率。

关键词:配取货路径;卡车;无人机;优化算法

中图分类号:U126;TP3;F252

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2024)04-0020-09

引用格式:柳国梁,刘华琼,徐红艳.卡车-无人机联合配取货路径优化[J].山东交通学院学报,2024,32(4):20-28.

LIU Guoliang, LIU Huaqiong, XU Hongyan. Truck-drone collaborative distribution and pickup route optimization[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(4): 20-28.

0 引言

无人机在快递运输和货物配送等方面的应用越来越广泛,无人机配送正成为物流领域解决“最后一公里”交付问题的热点方案之一^[1]。受无人机续航能力和载质量限制,卡车-无人机联合配送模式为无人机在末端配送应用中提供新的解决方案,在一定服务范围和客户数约束下能提高配送效率。

国内外学者对卡车-无人机联合配送下的路径问题展开研究。Murray 等^[2]、Agatz 等^[3]提出考虑无人机续航能力和载质量限制的卡车-无人机协同配送旅行商问题(traveling salesman problem with drone, TSP-D),建立的协同配送模型中每辆卡车搭载 1 架无人机进行配送,配送效率有待提高。Tu 等^[4]提出自适应大邻域搜索启发式方法,求解 1 辆卡车搭载多架无人机的旅行商问题(traveling salesman problem with multiple drone, TSP-mD)。Sweeney 等^[5]发现采用 TSP-mD 配送模式可更有效地控制成本。在卡车-无人机协同配送模式中,将卡车仅作为无人机的移动仓库和换电站时^[6-8],能充分利用无人机快速配送和成本低的优势,但无人机仅能配送体积小、质量小的物品,且无法独立完成大规模物流配送任务,因此应通过卡车协同配送大宗物资^[9-10]。Luo 等^[11]提出在卡车-无人机协同配送模式下的两级路径优化问题。Schermer 等^[12]采用可变邻域搜索算法解决卡车-无人机协同配送路径问题,允许无人机在不同地点起降,但未考虑无人机多点配送的情况。王新^[13]分析多无人机站点的无人机-卡车联合配送问题,但从无人机站点出发的无人机仅能进行单点配送。彭勇等^[14]考虑需求异质性问题,将客户分为 2 类,一类适用

收稿日期:2023-10-23

第一作者简介:柳国梁(1999—),男,山东滕州人,硕士研究生,主要研究方向为道路交通运输,E-mail:1975666841@qq.com。

***通信作者简介:**刘华琼(1979—),男,安徽巢湖人,教授,工学博士,主要研究方向为物流规划、物流优化、电商物流协同,E-mail:lhq5983442@163.com。

于卡车配送模式,另一类适用于无人机配送模式,但设计的无人机只能完成单点配送任务,如果要完成更多的配送任务,需购置大量无人机。

本文针对卡车-无人机联合配送模式下卡车路径和无人机路径优化问题,以最短时间和最小成本为目标,构建单辆卡车携带多架无人机配取货模型,采用 K -Means++ 聚类算法、穷举法及改进的邻域搜索算法分阶段求解,科学分配 2 种配送工具,规划合理的配取货路径,实现卡车与无人机协同配送、单架无人机配取多点包裹的配取货模式,以期降低配送成本,提高配送效率。

1 问题描述与模型构建

1.1 问题描述

在传统的物流配送模式中,仅采用卡车进行物流末端配送,卡车从配送中心出发,按规划线路为客户提供配件和取件服务,配货效率较低,物流成本较高^[15]。卡车-无人机联合配取货模式中卡车既参与配送(无人机无法配送的点和子区域的聚类中心点),同时搭载多架携带包裹的无人机从配送中心出发,将无人机在卡车配送点放飞进行配取货。

为简化卡车-无人机联合配取货路径优化问题,假设:1)采用 1 辆卡车和 m 架无人机完成配取货任务,配货和取货不区分优先级^[16-18];2)每位客户只提供 1 次配取货服务;3)受无人机续航能力和载质量限制^[19],每架无人机所带货物质量不超过额定载质量 Q ,回收无人机后按需求确定是否需更换电池;4)每个子区域可放飞多架无人机,无人机单次可投放或收取多个轻型包裹;5)无人机完成配送和取件后到指定卡车配送点等待卡车回收,放飞无人机后,根据规划线路卡车到下一配送区域配取货,计算卡车、无人机到达某一卡车配送点的时间差,选取时间差最小的卡车配送点作为无人机的回收点,为使卡车携带的无人机尽可能少,限制无人机的回收点与放飞点最多间隔 1 个卡车配送点。

1.2 数学模型构建

1.2.1 卡车-无人机配送点确定

采用阈值筛选算法,以货物质量为限制,货物质量大于无人机额定载质量的配送点为卡车配送点。采用 K -Means++ 聚类算法对所有客户点聚类,确定聚类中心数和聚类中心点。聚类中心点与大于无人机额定载质量的点均设为卡车配送点,其余客户点设为无人机配送点。

1.2.2 卡车行驶路径优化

卡车从配送中心出发,按指定顺序依次经过各卡车配送点配取货,完成任务后,返回配送中心,该过程为经典旅行商问题^[20]。构建卡车最短行驶距离目标函数为:

$$\min H_1 = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k X_{ij} d_{ij},$$

s. t.

$$\sum_{i=0}^k X_{ij} = 1, j \in \{0, 1, 2, \dots, k\}, i \neq j, \quad (1)$$

$$\sum_{j=0}^k X_{ij} = 1, i \in \{0, 1, 2, \dots, k\}, i \neq j, \quad (2)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\}, i, j \in \{0, 1, 2, \dots, k\}, i \neq j, \quad (3)$$

式中: H_1 为卡车行驶距离; k 为卡车配送点总数; X_{ij} 为约束卡车配送顺序的决策系数,卡车从出发点 i 行驶到目的地 j 时, $X_{ij} = 1$,否则, $X_{ij} = 0$; d_{ij} 为卡车配送点 i 到卡车配送点 j 的距离, $i, j = 0$ 表示配送中心(卡车出发点)。

式(1)约束配送点 j 有且仅有 1 个出发点 i ,式(2)约束每个出发点 i 有且仅有 1 个目的地 j ,式(3)约束 X_{ij} 仅能取 0 或 1。

1.2.3 无人机配取货路径优化

卡车到达聚类中心对应的卡车配送点后,放飞多架携带包裹的无人机,在 1 个无人机配送区域有多

架无人机同时配送,为客户提供服务^[21]。计算从某卡车配送点放飞的无人机完成所有配送任务所需最长时间,与放飞无人机后卡车到达无人机回收点并完成对应配取货任务的时间之差。选择时间差不大于 0 的点作为无人机回收点,确保卡车等待无人机的时间不会增大。如果设置无人机回收点在起点后的第 2 个卡车配送点仍无法满足时间差不大于 0 的条件,比较将回收点设在起点后的第 1、2 个卡车配送点的时间差的绝对值,选择绝对值最小的点作为回收点。单条无人机配送线路上可能有多个客户点,要求单条线路的总距离小于无人机最大满载航程 R ,建立模型时不考虑客户点是配货需求还是取货需求,只需保证配取货物总质量小于无人机最大载质量。

构建无人机配取货最短时间和最小成本目标函数为:

$$\begin{cases} \min H_2 = \min_{c \in C} [\sum_{m \in M} X_{cm} t_g + \max(h_{cm}/v_g + l_g \sum_{d \in F} y_{dc})] \\ \min H_3 = \min_{c \in C} [\sum_{m \in M} X_{cm} b_g + \max(F_g h_{cm}/v_g + W_g \sum_{d \in F} y_{dc})] \end{cases},$$

s. t.

$$\sum_{c \in C} X_{cm} = 1, \forall m \in M, \quad (4)$$

$$\sum_{c \in C} y_{dc} = 1, \forall d \in D, \quad (5)$$

$$\sum_{m \in M} X_{cm} \leq P, \forall c \in C, \quad (6)$$

$$\sum_{i \in U} z_{ijg} - \sum_{j \in U} z_{ijg} = 0, \forall g \in G, \quad (7)$$

$$h_{cm} \leq R, \forall c \in C, \forall m \in M, \quad (8)$$

$$\sum_{d \in D} (q_d + e_d) y_{dc} \leq Q, \forall g \in G, \quad (9)$$

式中: H_2 为配送区域 c 无人机配取货时间; C 为无人机配送区域集合; M 为无人机配送线路集合; X_{cm} 为约束无人机配送路线的系数,第 m 条配送路线属于配送区域 c 时, $X_{cm} = 1$,否则, $X_{cm} = 0$; t_g 为单架无人机派遣准备时间; h_{cm} 为配送区域 c 中第 m 条线路的总长度; v_g 为无人机飞行速度; l_g 为单架无人机 1 次装卸时间; F 为无人机配送线路上客户点集合; y_{dc} 为约束无人机配送点的系数,需求点 d 被配送区域 c 服务时, $y_{dc} = 1$,否则, $y_{dc} = 0$; H_3 为配送区域 c 中无人机配取货总成本; b_g 为单架无人机派遣准备成本; F_g 为无人机单位时间运输成本; W_g 为单架无人机装卸成本; P 为单个配送区域的最大无人机数; U 为所有节点的集合, $U = D \cup A$, D 为无人机配送点集合, A 为卡车配送点集合;第 g 架无人机从节点 i 飞往节点 j 时, $z_{ijg} = 1$,否则, $z_{ijg} = 0$; G 为无人机数集合; q_d 为客户点 d 的配送量; e_d 为客户点 d 的取货量。

式(4)约束每条配送线路只能分配给 1 个配送区域,式(5)约束每个客户点被服务 1 次,式(6)约束每个配送区域最多使用 P 架无人机,式(7)约束每架无人机从 1 个节点飞行到另 1 个节点,式(8)约束每架无人机的飞行距离不超过其最大航程,式(9)约束每架无人机所携带包裹质量不超过其最大载质量。

1.2.4 卡车-无人机联合配送目标函数

卡车-无人机联合配取货总成本包括快递员工资、卡车运输成本、卡车派遣准备成本、无人机派遣准备成本、无人机装卸货物成本、无人机运输成本^[22]。

卡车-无人机联合配取货总成本

$$H_4 = T_1 Q/t + b_g \sum_{c \in C} \sum_{m \in M} X_{cm} + B + (n - k) f + F_g \sum_{c \in C} \sum_{m \in M} h_{cm} + F H_1,$$

式中: Q 为快递员月薪, t 为快递员每天工作时间, T_1 为卡车从配送中心出发至回到配送中心所需时间, B 为单辆卡车的派遣准备成本, n 为客户点数, f 为无人机配送 1 个客户点的成本, F 为卡车单位时间运输成本。

卡车-无人机配取货总时间包括卡车行驶时间、放飞无人机时间、卡车配取货时间、回收无人机的时间,卡车-无人机配取货总时间

$$H_5 = H_1/v + t_g \sum_{c \in C} h_{cg} + kL + (n - k) t_r,$$

式中: v 为卡车行驶速度, h_{cg} 为配送区域 c 放飞的无人机数, L 为卡车装卸货物的时间, t_r 为回收单架无人机所需时间。

2 算法设计

2.1 卡车配取货路径优化算法

阈值筛选法是指通过设定阈值,将特征指标与该阈值比较后,确定该特征指标是否需保留的筛选方法。在卡车、无人机配送点选取过程中需根据无人机额定载质量筛选客户点,大于无人机额定载质量的客户点组成集合 A 作为卡车配送点集合。

采用 K -means++聚类算法,通过迭代更新聚类中心实现数据点与所属聚类中心间的平方距离最小,以实现聚类^[23]。聚类中心数 K 影响卡车-无人机联合配取货路径优化问题中的配送区域划分,若 K 过小,可能导致部分客户点距离聚类中心较远,超出无人机的航程;若 K 过大,可能形成较多聚类簇,浪费资源,降低服务效率、增大配送成本。本文以 $R/2$ 作为客户点与配送点间的最大允许直线往返距离。

因卡车配送点较少,采用Python中的穷举算法求解,即寻找从配送中心出发,途经卡车配送点后最终回到配送中心的最短路径。定义途经点的坐标和距离计算函数,生成所有可能的路径组合。计算路径上相邻点间的距离并逐步累加,获得总距离。若当前路径的总距离小于之前记录的最小距离,则更新最小距离和最优路径。最后输出最短路径和最短距离。在途经点较少的情况下,该方法有效,途经点较多时求解耗时较大。 K 影响卡车配送点的选择,卡车配取货最短路径和总成本随 K 的变化而变化。

2.2 无人机配取货路径优化算法

无人机-卡车联合配送路径优化是非确定性多项式问题,需采用优化算法求解。优化算法分为精确算法和启发式算法2种:精确算法注重寻找问题的最优解,包括分支定价法、割平面法、动态规划法等;启发式算法着眼于寻找令人满意的解决方案,包括遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法和邻域搜索算法等^[24]。精确算法更适合解决规模较小的问题,处理大规模问题时,其计算复杂度呈指数增大;启发式算法更适用解决大规模问题,且求解时间较短。无人机配取货线路规划问题规模较大,采用精确算法难以在合理时间内找到最优解,因此采用邻域搜索算法。优化无人机配取货线路的步骤共11步。

1) 计算每个聚类区域的客户需求货物总质量 m_i ,聚类区域所需无人机数

$$x = m_i / (Q - \alpha),$$

式中: α 为安全裕量,本文取 $\alpha = 1 \text{ kg}$ 。

2) 通过函数“getcontext().prec”设置数学精度,以适应所需精度水平;采用函数“random.seed”设置随机数生成器的种子,确保可复现随机性。

3) 采用函数“generate_initial_solution”生成初始解,客户点被随机分配到不同线路。

4) 采用函数“swap_customers”定义邻域结构,体现为交换2个客户点的位置。

5) 通过交换客户点的位置生成1组候选解,对每个候选解采用函数“calculate_total_distance”计算总距离,评估候选解。

6) 从候选解中选择下一个解,选择策略为贪婪选择,即选择距离更小的候选解^[17]。

7) 更新当前解,将选择的候选解作为当前解,继续下一轮迭代。

8) 定义算法终止条件为达到最大迭代次数,通过函数“num_iterations”控制迭代次数^[25]。

9) 算法终止时,输出最佳方案的路径详情及总距离。

10) 判断最优路径是否满足无人机的航程和载质量限制^[26],若超出无人机的最大航程或某条线路的货物总质量超出无人机的额定载质量,则调整随机种子,再次运行以上代码,直到输出的最优路径满足无人机航程和载质量限制。

11) 给定无人机起点1和终点1的坐标,为尽快回收无人机,卡车携带的无人机需尽可能少,无人机起点和终点间最多间隔1个卡车配送点。判断最佳路径中无人机配取货所需最长时间是否不大于卡车

从起点出发到离开终点的时间,若是,则起点 1 放飞的无人机的终点选在终点 1;若不是,则选在终点 1 后的终点 2,重复上述判断,若是,则起点 1 放飞无人机的终点选在终点 2;若不是,比较终点设置为终点 1 和终点 2 时,卡车与无人机时间差的绝对值,选择绝对值最小的点作为起点 1 放飞无人机的回收点。

3 算例分析

3.1 算例设置

从容量受限车辆路径问题库中选取包含 100 个客户点的算例 E-n101-k14 作为基础数据^[27]。将算例 E-n101-k14 中的货物需求乘 0.1,为模拟客户点货物需求质量大于无人机额定载质量的情况,客户点 49、69、86 这 3 个点的货物需求乘 0.1 后再乘 3,所得结果符合亚马逊快递包裹质量调查结果(90%~95% 的包裹质量不大于 2.27 kg)^[28],改进 E-n101-k14 后得到的客户位置及需求货物质量如表 1 所示。

表 1 客户位置及需求货物质量

客户点	坐标/km	货物质量/kg	客户点	坐标/km	货物质量/kg	客户点	坐标/km	货物质量/kg
1	(4.55,4.55)	0	29	(5.33,4.81)	1.6	57	(6.89,1.56)	0.6
2	(5.33,6.37)	1.0	30	(8.32,5.46)	0.9	58	(4.16,1.56)	0.7
3	(4.55,2.21)	0.7	31	(5.20,7.80)	2.1	59	(4.68,3.38)	1.8
4	(7.15,5.85)	1.3	32	(4.03,6.76)	2.7	60	(2.73,3.12)	2.8
5	(7.15,2.60)	1.9	33	(4.55,8.97)	2.3	61	(2.21,4.42)	0.3
6	(1.95,3.90)	2.6	34	(6.89,6.76)	1.1	62	(1.56,3.12)	1.3
7	(3.25,3.90)	0.3	35	(8.45,7.15)	1.4	63	(3.12,7.54)	1.9
8	(2.60,6.50)	0.5	36	(8.19,8.45)	0.8	64	(3.51,8.97)	1.0
9	(1.30,5.59)	0.9	37	(0.26,7.80)	0.5	65	(1.95,10.01)	0.9
10	(7.15,7.80)	1.6	38	(2.60,2.60)	0.8	66	(8.06,10.01)	2.0
11	(3.90,7.80)	1.6	39	(0.65,0.65)	1.6	67	(6.37,9.49)	2.5
12	(2.60,8.45)	1.2	40	(7.80,1.56)	3.1	68	(8.71,0.65)	2.5
13	(6.50,4.55)	1.9	41	(5.20,3.25)	0.9	69	(7.28,5.07)	10.8
14	(3.90,3.25)	2.3	42	(5.46,0.91)	0.5	70	(4.81,6.11)	0.6
15	(1.95,1.30)	2.0	43	(3.12,1.56)	0.5	71	(4.81,7.28)	0.5
16	(3.90,0.65)	0.8	44	(2.99,0.39)	0.7	72	(7.41,8.84)	1.5
17	(1.30,2.60)	1.9	45	(1.43,1.82)	1.8	73	(6.11,2.08)	2.5
18	(0.65,3.90)	0.2	46	(0.78,4.94)	1.6	74	(5.72,2.21)	0.9
19	(2.60,5.20)	1.2	47	(0.26,6.24)	0.1	75	(5.98,1.69)	0.8
20	(1.95,7.80)	1.7	48	(1.04,7.28)	2.7	76	(6.37,1.43)	1.8
21	(5.85,8.45)	0.9	49	(1.69,6.76)	10.8	77	(6.37,5.46)	1.3
22	(5.85,2.60)	1.1	50	(0.78,8.84)	3.0	78	(6.89,5.59)	1.4
23	(5.85,1.30)	1.8	51	(6.11,6.11)	1.3	79	(7.93,6.76)	0.3
24	(7.15,0.65)	2.9	52	(6.37,7.54)	1.0	80	(7.41,6.24)	2.3
25	(8.45,4.55)	0.3	53	(3.51,5.59)	0.9	81	(7.28,4.81)	0.6
26	(8.45,2.60)	0.6	54	(4.81,4.03)	1.4	82	(7.15,7.02)	2.6
27	(5.85,3.90)	1.7	55	(7.41,3.77)	1.8	83	(1.95,6.11)	1.6
28	(4.55,5.20)	1.6	56	(8.19,2.99)	0.2	84	(1.82,4.81)	1.1

表 1(续)

客户点	坐标/km	货物质量/kg	客户点	坐标/km	货物质量/kg	客户点	坐标/km	货物质量/kg
85	(1.43,4.03)	0.7	91	(4.03,8.71)	0.3	97	(2.86,3.51)	1.1
86	(2.08,2.86)	12.3	92	(1.95,2.47)	0.1	98	(3.25,2.73)	1.2
87	(0.52,2.34)	3.5	93	(2.86,2.86)	0.2	99	(2.47,2.73)	1.0
88	(3.64,2.34)	2.6	94	(2.34,3.12)	2.2	100	(2.60,3.38)	0.9
89	(3.38,6.76)	0.9	95	(3.38,3.51)	2.7	101	(2.34,2.34)	1.7
90	(3.38,4.55)	1.5	96	(3.25,3.12)	2.0			

算例 E-n101-k14 分布在长 70 km、宽 80 km 的长方形区域内,将横、纵坐标分别乘 0.13,得到分布在长 9.1 km、宽 10.4 km 的长方形区域算例,符合乡镇客户点分布范围现实情况。

京东 Y-3 多旋翼无人机最大载质量为 10 kg,续航时间为 40 min,最大航程为 20 km^[29]。本文设单架无人机的最大载质量为 10 kg,最大航程为 20 km,无人机规划线路最大距离为 20 km,派遣准备需 3 min,回收需 1 min,配取货需 1 min,派遣准备成本为 6 元,单位运输成本为 0.14 元/min,飞行速度为 70 km/h。卡车 1 次配取货需 3 min,派遣准备成本为 12 元/辆,单位运输成本为 0.55 元/min^[30],行驶速度为 60 km/h。

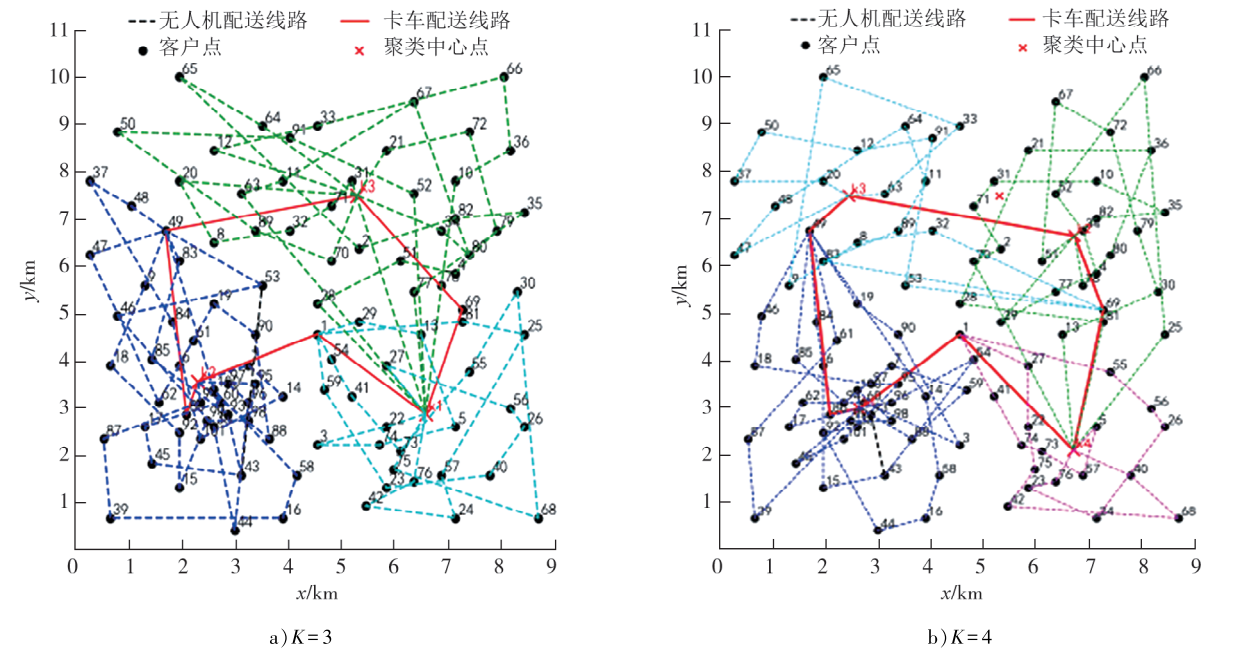
由于乡镇快递下行量远大于上行量,设置 10 个待取包裹需求点,为使待取包裹需求点分布相对分散,将编号为 5、15、25、35、45、55、65、75、85、95 的 10 个客户点作为待取包裹需求点。

3.2 算例求解结果

通过 Python 编写求解算法,运行环境为 Windows 10 操作系统,处理器为 Core(TM) i5-8265U CPU@1.60 GHz。

1 辆卡车携带需配送的货物及 10 架无人机从配送中心出发,无人机从卡车起飞完成配送后,再飞回卡车降落,跟随卡车到下一个停靠节点完成配送,最终卡车和无人机都回到配送中心。求解模型,得到不同 K 下各阶段最优解,将各阶段的最优解叠加得到卡车-无人机联合配取货总时间及总成本。

K=3,4,5,6 时,卡车-无人机协同配取货路径分别如图 1 所示,配取货分别需 1.597、1.708、1.800、1.646 h,配取货总成本分别为 199.216、212.837、215.620、200.336 元。只采用卡车配取货时共需 6.650 h,总成本为 227.273 元。采用卡车-无人机联合配取货后,配取货总时间及总成本明显减小。



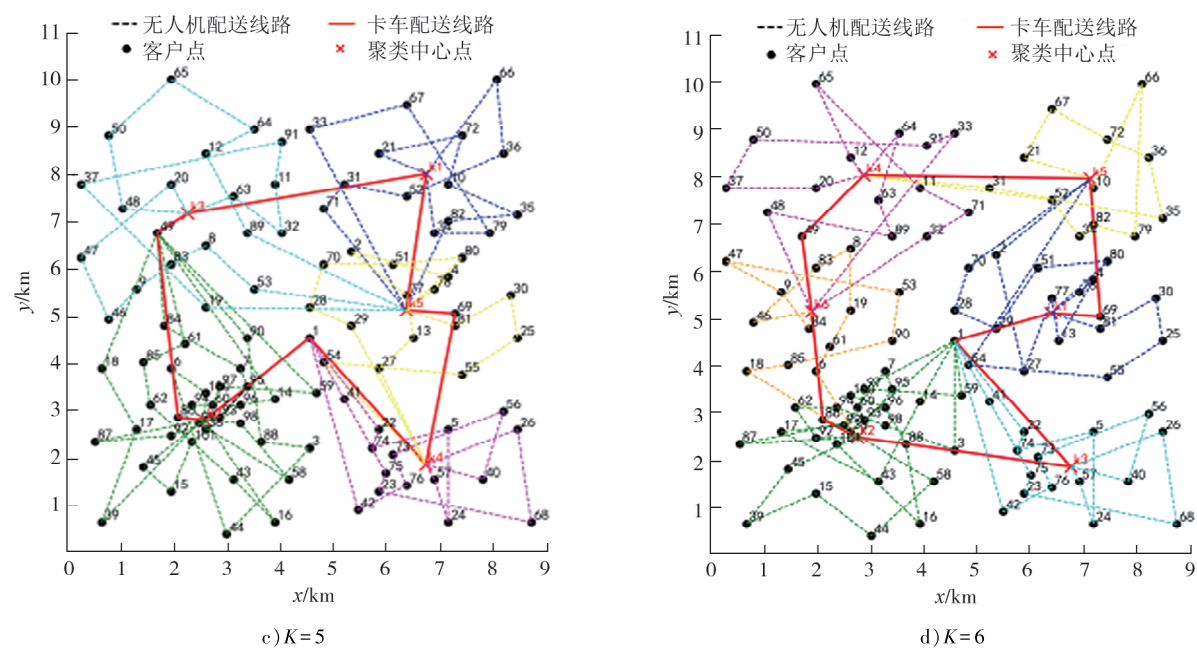


图 1 不同聚类中心数下卡车-无人机联合配送最优路径

$K=3$ (3 个聚类中心点编号分别为 K_1 、 K_2 、 K_3) 时, 卡车-无人机联合配取货总时间最短, 且配取货总成本最小, 与只采用卡车完成配取货相比, 总时间减小 75.98%, 总成本减小 12.34%, 卡车的最优配送路径为 $1 \rightarrow K_2 \rightarrow 86 \rightarrow 49 \rightarrow K_3 \rightarrow 69 \rightarrow K_1 \rightarrow 1$, 无人机的最优配送路径如表 2 所示。

表 2 无人机最优配送路径

无人机起点	无人机回收点	无人机线路编号	无人机配送路径	线路距离/km	货物总质量/kg
K_2	49(随机种子 114)	线路 1	$K_2 \rightarrow 88 \rightarrow 90 \rightarrow 19 \rightarrow 61 \rightarrow 6 \rightarrow 62 \rightarrow 47 \rightarrow 49$	11.73	9.6
		线路 2	$K_2 \rightarrow 60 \rightarrow 17 \rightarrow 45 \rightarrow 43 \rightarrow 93 \rightarrow 85 \rightarrow 83 \rightarrow 49$	10.76	9.5
		线路 3	$K_2 \rightarrow 95 \rightarrow 98 \rightarrow 99 \rightarrow 15 \rightarrow 92 \rightarrow 18 \rightarrow 9 \rightarrow 49$	9.33	8.1
		线路 4	$K_2 \rightarrow 94 \rightarrow 87 \rightarrow 39 \rightarrow 16 \rightarrow 58 \rightarrow 100 \rightarrow 49$	14.82	9.7
		线路 5	$K_2 \rightarrow 97 \rightarrow 96 \rightarrow 44 \rightarrow 38 \rightarrow 46 \rightarrow 53 \rightarrow 49$	13.92	7.1
		线路 6	$K_2 \rightarrow 7 \rightarrow 14 \rightarrow 101 \rightarrow 84 \rightarrow 37 \rightarrow 48 \rightarrow 49$	10.74	8.6
K_3	K_1 (随机种子 44)	线路 1	$K_3 \rightarrow 12 \rightarrow 33 \rightarrow 66 \rightarrow 36 \rightarrow 10 \rightarrow 78 \rightarrow K_1$	16.29	9.3
		线路 2	$K_3 \rightarrow 21 \rightarrow 72 \rightarrow 79 \rightarrow 4 \rightarrow 51 \rightarrow 28 \rightarrow K_1$	12.02	6.9
		线路 3	$K_3 \rightarrow 64 \rightarrow 65 \rightarrow 2 \rightarrow 82 \rightarrow 35 \rightarrow 77 \rightarrow K_1$	17.68	8.2
		线路 4	$K_3 \rightarrow 20 \rightarrow 8 \rightarrow 32 \rightarrow 71 \rightarrow 31 \rightarrow K_1$	12.98	7.5
		线路 5	$K_3 \rightarrow 70 \rightarrow 89 \rightarrow 50 \rightarrow 91 \rightarrow 52 \rightarrow K_1$	16.92	5.8
		线路 6	$K_3 \rightarrow 34 \rightarrow 80 \rightarrow 67 \rightarrow 11 \rightarrow 63 \rightarrow K_1$	15.53	9.4
K_1	1(随机种子 43)	线路 1	$K_1 \rightarrow 76 \rightarrow 42 \rightarrow 24 \rightarrow 57 \rightarrow 25 \rightarrow 81 \rightarrow 54 \rightarrow 1$	12.90	8.1
		线路 2	$K_1 \rightarrow 22 \rightarrow 3 \rightarrow 74 \rightarrow 5 \rightarrow 13 \rightarrow 29 \rightarrow 1$	8.87	8.1
		线路 3	$K_1 \rightarrow 75 \rightarrow 68 \rightarrow 30 \rightarrow 55 \rightarrow 73 \rightarrow 41 \rightarrow 1$	16.06	9.4
		线路 4	$K_1 \rightarrow 27 \rightarrow 56 \rightarrow 26 \rightarrow 40 \rightarrow 23 \rightarrow 59 \rightarrow 1$	11.01	9.2

以 $K=3$ 为例, 分析卡车-无人机联合配取货总时间和总成本的计算过程。快递员日薪与工作时间之比为快递员的时间成本, 假设快递员日薪为 260 元, 每天工作 10 h, 则快递员的时间成本为 26 元/h。在

卡车-无人机协同配取货模式中,所需时间包括:1)卡车行驶时间,即卡车行驶距离与行驶速度之比,为0.312 h;2)无人机派遣准备时间,快递员共放飞16次无人机,共需0.800 h;3)装卸卡车配取货时间,整条线路上有3处需卡车配送的货物,共需0.150 h;4)回收无人机时间,快递员需回收12次无人机,共需0.200 h;5)卡车在回收点等待无人机时间,为0.135 h。因此卡车-无人机协同配取货需1.597 h。

卡车-无人机协同配取货配取货总成本包括:1)快递员的工资成本,为快递员的时间成本(26元/h)与配取货总时间(1.597 h)之积,共需41.522元;2)无人机的派遣准备成本,为无人机派遣数(16次)与派遣成本(6元/次)之积,共需96.000元;3)卡车的派遣准备成本,为卡车数(1辆)与派遣成本(12元/辆)之积,共需12.000元;4)无人机的运输成本,为无人机的运输时间(281.526 min)与运输成本(0.14元/min)之积,共需39.414元;5)卡车的行驶成本,为卡车运输时间(18.69 min)与卡车运输成本(0.55元/min)之积,共需10.280元。因此卡车-无人机协同配取货总成本为199.216元。

4 结束语

本文针对卡车-无人机联合配取货路径优化问题,建立单辆卡车携带多架无人机的联合配取货模型,设计3阶段优化算法求解模型,计算不同聚类中心数下卡车-无人机联合配取货总时间和总成本,得到配取货总时间和总成本最小时的配送路径,与只采用卡车配取货模式相比,配取货总时间减小75.98%,总成本降低12.34%。卡车-无人机联合配取货模式在配送要求时效性强、质量较小的包裹时可有效降低配送成本,提升物流末端配取货效率。

构建问题模型时,未考虑卡车是否可搭载无人机、配送区域是否有禁飞区域等现实约束条件,未来需考虑实际场景因素、采用集成模型、扩大数据规模、改进算法,优化卡车-无人机联合配取货路径。

参考文献:

- [1] 徐佳慧. 基于城市场景的无人机配送任务规划研究[D]. 北京:北京交通大学,2021.
- [2] MURRAY C C, CHU G A. The flying sidekick traveling salesman problem: optimization of drone-assisted parcel delivery[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 54:86-109.
- [3] AGATZ N, BOUMAN P, SCHMIDT M. Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone[J]. *Transportation Science*, 2018, 52(4):2639-672.
- [4] TU P A, DAT N T, DUNG P Q, et al. Traveling salesman problem with multiple drones[C]//*Proceedings of the 9th International Symposium on Information and Communication Technology*. New York: Association for Computing Machinery, 2018:46-53.
- [5] SWEENEY D C, CAMPBELL J F, ZHANG J. Strategic design for delivery with trucks and drones[R]. State of Missouri, USA: Supply Chain Analytics Report SCMA-2017-0201, 2017.
- [6] 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.
- [7] OTHMAN M S B, SHURBEVSKI A, KARUNO Y, et al. Routing of carrier-vehicle systems with dedicated last-stretch delivery vehicle and fixed carrier route[J]. *Journal of Information Processing*, 2017, 25:655-666.
- [8] FERRANDEZ S M, HARBISON T, WEBER T, et al. Optimization of a truck-drone in tandem delivery network using k -means and genetic algorithm[J]. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2016, 9(2):374-388.
- [9] WANG D S, HU P, DU J X, et al. Routing and scheduling for hybrid truck-drone collaborative parcel delivery with independent and truck-carried drones[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(6):10483-10495.
- [10] SALAMA M, SRINIVAS S. Joint optimization of customer location clustering and drone-based routing for last-mile deliveries[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 114:620-642.
- [11] LUO Z H, LIU Z, SHI J M, et al. A two-echelon cooperated routing problem for a ground vehicle and its carried unmanned aerial vehicle[J]. *Sensors*, 2017, 17(5):1705-1144.
- [12] SCHERMER D, MOEINI M, WENDT O. A variable neighborhood search algorithm for solving the vehicle routing problem

- with drones[R]. Kaiserslautern, Germany: Technische Universität Kaiserslautern, 2018.
- [13] 王新. 车辆和无人机联合配送路径问题研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
- [14] 彭勇, 张永辉, 黎元钧. 考虑无人机辅助的卡车配送路径优化[J]. 工业工程与管理, 2023, 28(2): 31-39.
- [15] 张光亮. 考虑卡车搭载无人机的农村末端快递配送路径规划研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [16] 蒋丽, 王洪艳, 梁昌勇, 等. 农村地区卡车与无人机协同配送路径优化[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(14): 306-314.
- [17] 胡运霞. 卡车与无人机联合配送下物流调度的优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [18] 温廷新, 吕艳华. 考虑客户价值的卡车与无人机联合配送时变路径优化方法[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(10): 2984-2988.
- [19] 陈海妹. 基于“卡车+无人机”模式农村电商物流配送路径优化研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [20] 季金华, 刘亚君, 别一鸣, 等. 基于无人机与卡车协作的封控社区生活物资配送方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(5): 264-272.
- [21] 李婷玉. 多商户多车程同城物流配送车辆调度问题研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [22] 马佰钰, 李贺鑫, 马千里, 等. 碳排放约束下无人机-卡车联合配送问题研究[J]. 系统工程, 2024, 42(2): 60-69.
- [23] 冯如玉. 综合货损和搬运成本的拣货路径优化模型研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2019.
- [24] 彭勇, 张永辉, 黎元钧. 考虑无人机辅助的卡车配送路径优化[J]. 工业工程与管理, 2023, 28(2): 31-39.
- [25] 张展亮. 基于客户价值导向的药品配送路径优化研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2021.
- [26] 马业骥. 多无人车多无人机协同运输路径规划算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [27] 李佳慧, 姜志侠. 改进禁忌搜索算法求解 CVRP 问题[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2021, 44(2): 124-128.
- [28] MURRAY C C, CHU G A. The flying sidekick traveling salesman problem: optimization of drone-assisted parcel delivery [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 54: 86-109.
- [29] 鲁熙今. 卡车-无人机协同配送路径优化模型与算法[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- [30] 龙玉莹. 应急条件下货车-无人机协同运输优化调度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.

Truck-drone collaborative distribution and pickup route optimization

LIU Guoliang, LIU Huaqiong*, XU Hongyan

School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: Addressing the problem of truck-drone collaborative distribution and pickup route optimization, considers the maximum carrying capacity and endurance of drones to minimize distribution and pickup costs and time. A model is constructed for a single truck carrying multiple drones for distribution and pickup, and a phased iterative optimization algorithm is designed. In the first phase, threshold screening and the K -means++ clustering algorithm are used to cluster customer points and determine the delivery points for the truck. In the second phase, an exhaustive method is used to determine the truck's distribution and pickup route. In the third phase, a neighborhood search algorithm is employed to optimize the drones' distribution and pickup routes. The total time and cost for truck-drone collaborative distribution and pickup under different numbers of clustering centers K are calculated and compared to determine the optimal distribution and pickup route. The results show that when $K=3$, the total time and cost for truck-drone collaborative distribution and pickup are minimized. Compared to using only a truck for distribution and pickup, the total time is reduced by 75.98%, and the total cost is decreased by 12.34%. Employing truck-drone collaborative distribution and pickup in the optimized area can reduce distribution and pickup costs and improve last-mile distribution and pickup efficiency.

Keywords: distribution and pickup route; truck; drone; optimization algorithm

(责任编辑: 赵玉真)