

文章编号:1672-9331(2020)02-0054-07

应急物流中无人机配送线路优化

周爱莲, 蒋 利, 侯夏杰

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 在自然灾害发生时, 第一时间内将生命救援物资配送到各救灾点尤为重要。为优化自然灾害条件下的应急物资配送过程, 由卡车-无人机共同配送, 将该场景下的应急物资配送问题构造为带有无人机的多旅行商问题。在考虑卡车可达性的情况下, 以总配送时间最短为目标建立了混合整数规划模型, 并改进 FSTSP(Flying Sidekick Traveling Salesman Problem)算法求解此模型。仿真结果表明: 通过组合 K-means 聚类算法和改进的 FSTSP 算法, 可以有效解决考虑卡车可达性的多卡车多无人机的应急物资配送问题, 且与传统的卡车配送相比, 卡车-无人机配送具有潜在的优势。

关键词: 应急物流; 配送线路优化; 混合整数规划; FSTSP 算法; 卡车-无人机

中图分类号: X4; F252

文献标识码: A

Optimization of UAV distribution routes in emergency logistics

ZHOU Ai-lian, JIANG Li, HOU Xia-jie

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science
& Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: When natural disasters occur, it is of great importance to distribute life relief supplies to disaster relief sites as soon as possible. In order to optimize the emergency material distribution process under natural disaster conditions, truck-Unmanned Aerial Vehicle (UAV) was used for common distribution, which transferred the emergency material distribution problem under that condition to a multi-traveler problem with unmanned aerial vehicle. Considering the accessibility of the truck, a mixed integer programming model was established with target of the shortest total delivery time, and the FSTST (Flying Sidekick Traveling Salesman Problem) algorithm was improved to solve the model. The simulation result shows that considering the accessibility of truck, the problem of emergency material distribution with multi-truck and multi-unmanned aerial vehicle can be effectively solved through the combination of K-means clustering algorithm and improved FSTSP algorithm. And compared with traditional truck distribution, truck-UAV distribution has potential advantages.

Key words: emergency logistic; optimization of distribution route; mixed integer programming; FSTSP algorithm; truck-UAV

收稿日期: 2019-10-03

基金项目: 长沙理工大学青年教师成长计划项目(2019QJCZ004)

通讯作者: 周爱莲(1972-), 女, 安徽青阳人, 长沙理工大学副教授, 主要从事物流系统规划与管理方面的研究。E-mail: 980437661@qq.com

随着科学技术的不断进步,无人机的应用为物流领域打开新的大门。相较于单独的车辆运输,在交通瘫痪路段、城市拥堵区域等地面交通无法畅行时,无人机配送使得物资的配送时间更短,可有效地降低灾区人员伤亡及财产损失。为此,如何合理的选择无人机的配送路径,使之高效的执行应急物资配送任务是应急物流研究的重中之重。

目前,有关无人机配送的研究内容,大多数学者都是针对城市配送领域。2015 年 Murray 等^[1]首次提出卡车搭载无人机进行配送的理论,以总配送时间最短为目标建立混合整数规划模型,并设计 FSTSP 算法求解,结果表明:卡车-无人机配送所需的时间更短;Agatz 等^[2]将其构造为带有无人机的旅行商问题(Traveling Salesman Problem with Drone, TSP-D),并提出了一种基于局部搜索和动态规划的启发式算法用以解决该问题。此外,也有众多学者对无人机城市配送问题进行了研究^[3-9]。而在应急物流领域,无人机问题研究大多集中于信息获取、预警监控^[10-12]。

综上所述,尚未有学者将无人机引入应急物流配送领域中。为此,本研究针对灾害发生后的应急物资配送问题,构建以总配送时间最小为优化目标,考虑卡车可达性的混合整数规划模型,并改进 FSTSP 算法对模型进行求解。

1 问题描述

应急物流无人机配送线路优化问题属于应急物流配送线路优化的范畴,但又与传统应急物流车辆线路优化有很大区别,具体体现在以下几个方面:

1) 配送工具的区别。

即既可以使用卡车配送,又可以使用卡车上搭载的无人机进行配送,配送方式见图 1。

2) 优化目标的区别。

应急物流无人机配送线路的优化目标是无人机线路及卡车线路两者的总配送时间最短。在生成初始卡车最短配送路径之后,会不断地对卡车路径中的节点进行剔除和插入操作,最终形成最短卡车路径及最短无人机路径。

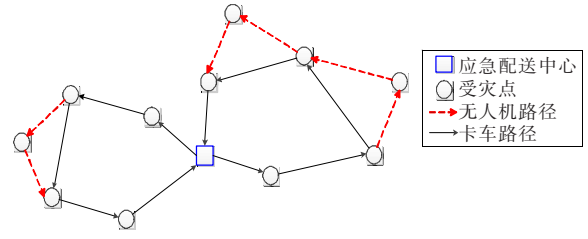


图 1 卡车-无人机共同配送

Fig. 1 Truck-UAV joint distribution

对本研究的应急物流无人机线路优化做以下假设:

- ① 无人机每次只能向一个受灾点配送物资。
- ② 暂不考虑不满足无人机配送要求且卡车又不可达的受灾点。
- ③ 无人机只能在受灾点、应急配送中心处被卡车发射、回收。
- ④ 每个受灾点的配送只能由一辆卡车或一架无人机完成。

2 模型构建

2.1 参数定义

本研究的模型推导自 Murray 等^[1]的 FSTSP 模型,具体参数定义如下所示:

m 为卡车数量; n 为受灾点数量; u_i 用于子回路消除; $C = \{1, 2, 3, 4, \dots, n\}$ 为受灾点; $C_o = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots, n\}$ 为起始节点+受灾点; $C_d = \{1, 2, 3, 4, \dots, n, 0\}$ 为终止节点+受灾点; $C_b = \{b_1, b_2, b_3, b_4, \dots, b_n\}$ 为卡车不可达点集合, $C_b \not\subseteq C$; $C_r = \{r_1, r_2, r_3, r_4, \dots, r_n\}$ 为可由无人机配送的受灾点, $C_r \subseteq C$; $\mathbb{I}_{C_o C_b}$ 为卡车可达点+起始点; $\mathbb{I}_{C_d C_b}$ 为卡车可达点+终点; $F = \{i, j, k\}$ 为无人机路径, i 为无人机发射点, j 为无人机配送点, k 为无人机回收点; $0_{(o)}$ 为起始点; $0_{(d)}$ 为终点; S_L 为无人机发射所需时间; S_R 为无人机回收所需时间; e 为无人机的续航时间; $\tau_{i,j}^T$ 为卡车从 i 到 j 点所需时间; $\tau_{i,j}^D$ 为无人机从 i 到 j 点所需时间; $x_{i,j}$ 为 0, 1 变量, 卡车路径; $y_{i,j,k}$ 为 0, 1 变量, 无人机路径; $Tt_{(j)}$ 为卡车到达 j 点的时间; $Dt_{(j)}$ 为无人机到达 j 点的时间。

2.2 线路优化模型

目标函数: $\text{Min } Tt_{(0)(d)}$ 。(1)

S. t. :

$$\sum_{\substack{i \in \mathbb{I}_{C_o C_b} \\ j \in \mathbb{I}_{C_d C_b} \\ i \neq j}} x_{i,j} + \sum_{\substack{i \in \mathbb{I}_{C_o C_b} \\ j \in C_d \\ i \neq j}} \sum_{\substack{k \in \mathbb{I}_{C_d C_b} \\ (i,j,k) \in F}} y_{i,j,k} = 1; \quad (2)$$

$$\sum_{j \in \mathbb{I}_{C_d C_b}} x_{0(a),j} = m; \quad (3)$$

$$\sum_{i \in \mathbb{I}_{C_o C_b}} x_{i,0(d)} = m; \quad (4)$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (n+2)(1-x_{i,j}), \quad \forall i \in C, j \in C_d, i \neq j; \quad (5)$$

$$\sum_{\substack{i \in \mathbb{I}_{C_o C_b} \\ i \neq j}} x_{i,j} = \sum_{\substack{k \in \mathbb{I}_{C_d C_b} \\ k \neq j}} x_{j,k}, \quad \forall j \in \mathbb{I}_{C_d C_b}; \quad (6)$$

$$\sum_{j \in C} \sum_{\substack{k \in \mathbb{I}_{C_d C_b} \\ (i,j,k) \in F}} y_{i,j,k} \leq 1, \quad \forall i \in \mathbb{I}_{C_o C_b}; \quad (7)$$

$$\sum_{\substack{i \in \mathbb{I}_{C_o C_b} \\ i \neq k}} \sum_{j \in C} y_{i,j,k} \leq 1, \quad \forall k \in \mathbb{I}_{C_d C_b}; \quad (8)$$

$$2y_{i,j,k} \leq \sum_{\substack{h \in \mathbb{I}_{C_o C_b} \\ h \neq i}} x_{h,i} + \sum_{\substack{l \in \mathbb{I}_{C_o C_b} \\ l \neq k}} x_{l,k},$$

$$\forall j \in C_d, \forall i \in \mathbb{I}_{C_o C_b}, \forall k \in \mathbb{I}_{C_d C_b}; \quad (9)$$

$$y_{o,j,k} \leq \sum_{\substack{h \in \mathbb{I}_{C_o C_b} \\ h \neq k}} x_{h,k}, \quad \forall j \in C_d, \forall k \in \mathbb{I}_{C_d C_b}; \quad (10)$$

$$\sum_{\substack{i \in \mathbb{I}_{C_o C_b} \\ i \neq j}} \sum_{\substack{k \in \mathbb{I}_{C_d C_b} \\ (i,j,k) \in F}} y_{i,j,k} \leq 1 - \sum_{\substack{a \in C_b \in \mathbb{I}_{C_d C_b} \\ a \neq j}} y_{j,a,b}, \quad \forall j \in C; \quad (11)$$

$$\sum_{\substack{i \in \mathbb{I}_{C_o C_b} \\ i \neq j}} \sum_{\substack{k \in \mathbb{I}_{C_d C_b} \\ (i,j,k) \in F}} y_{i,j,k} \leq 1 - \sum_{\substack{a \in \mathbb{I}_{C_o C_b} \\ a \neq j}} \sum_{\substack{b \in C \\ (a,b,j) \in F}} y_{a,b,j}, \quad \forall j \in C; \quad (12)$$

$$Dt_{(i)} \geq Tt_{(i)} - M(1 - \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in \mathbb{I}_{C_d C_b} \\ (i,j,k) \in F}} y_{i,j,k}), \quad \forall i \in \mathbb{I}_{C_o C_b}; \quad (13)$$

$$Dt_{(i)} \leq Tt_{(i)} + M(1 - \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in \mathbb{I}_{C_d C_b} \\ (i,j,k) \in F}} y_{i,j,k}), \quad \forall i \in \mathbb{I}_{C_o C_b}; \quad (14)$$

$$Dt_{(k)} \geq Tt_{(k)} - M(1 - \sum_{\substack{i \in \mathbb{I}_{C_o C_b} \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ (i,j,k) \in F}} y_{i,j,k}), \quad \forall k \in \mathbb{I}_{C_d C_b}; \quad (15)$$

$$Dt_{(k)} \leq Tt_{(k)} + M(1 - \sum_{\substack{i \in \mathbb{I}_{C_o C_b} \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ (i,j,k) \in F}} y_{i,j,k}), \quad \forall k \in \mathbb{I}_{C_d C_b}; \quad (16)$$

$$Tt_{(k)} \geq Tt_{(h)} + \tau_{h,k}^T + S_L(\sum_{\substack{l \in C \\ l \neq k}} \sum_{\substack{m \in \mathbb{I}_{C_d C_b} \\ (h,l,m) \in F}} y_{h,l,m}) + S_R(\sum_{\substack{i \in \mathbb{I}_{C_o C_b} \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ (i,j,k) \in F}} y_{i,j,k}) - M(1 - x_{h,k}), \quad \forall h \in \mathbb{I}_{C_o C_b}, k \in \mathbb{I}_{C_d C_b}; \quad (17)$$

$$Dt_{(j)} \geq Dt_{(i)} + \tau_{i,j}^D - M(1 - \sum_{\substack{k \in \mathbb{I}_{C_o C_b} \\ (i,j,k) \in F}} y_{i,j,k}), \quad \forall j \in C_R, i \in \mathbb{I}_{C_o C_b}; \quad (18)$$

$$Dt_{(k)} \geq Dt_{(j)} + \tau_{j,k}^D + S_R - M(1 - \sum_{\substack{i \in \mathbb{I}_{C_o C_b} \\ (i,j,k) \in F}} y_{i,j,k}), \quad \forall j \in C_R, k \in \mathbb{I}_{C_d C_b}; \quad (19)$$

$$Dt_{(k)} - (Dt_{(j)} - \tau_{i,j}^D) \leq e + M(1 - y_{i,j,k}), \quad \forall k \in \mathbb{I}_{C_d C_b}, j \in C, i \in \mathbb{I}_{C_o C_b}; \quad (20)$$

$$Tt_0 = 0; \quad (21)$$

$$Dt_0 = 0; \quad (22)$$

$$x_{i,j} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in \mathbb{I}_{C_o C_b}, \forall j \in C; \quad (23)$$

$$y_{i,j,k} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in \mathbb{I}_{C_o C_b}, \forall j \in C, \quad \forall k \in \mathbb{I}_{C_d C_b}; \quad (24)$$

$$Tt_{(i)} \geq 0, \quad \forall i \in \mathbb{I}_{C_o C_b} \cup \mathbb{I}_{C_d C_b}; \quad (25)$$

$$Dt_{(i)} \geq 0, \quad \forall i \in C_o \cup C \cup C_d; \quad (26)$$

$$1 \leq u_i \leq n+2, \quad \forall i \in \mathbb{I}_{C_d C_b}. \quad (27)$$

目标函数(1)表示卡车到达应急配送中心的总配送时间最小化,包括卡车行驶时间、无人机飞行时间、无人机发射及回收的准备时间、卡车等待时间。目标函数也等价于 $\min \{ \max \{ Tl_{0(d)}, Dl_{0(d)} \} \}$ 。式(2)确保每个受灾点都会被配送一次。式(3)、(4)确保卡车从应急配送中心出发,且最终返回应急配送中心。式(5)、(27)用于消除子回路。式(6)确保卡车配送至某个受灾点后,也必须从此受灾点离开。式(7)表示在每个受灾点处,卡车最多只能发射一架无人机。式(8)表示在每个受灾点,卡车最多只能回收一架无人机。式(9)表示若无人机从 i 受灾点发射, k 受灾点回收,那么卡车必须经过 i 和 k 两处受灾点。式(10)表示若无人机从应急配送中心发射,并在 k 受灾点处回收,卡车也必须到达 k 受灾点。式(11)表示当受灾点 j 有无人机在进行配送时,那么其它无人机不会从 j 受灾点处发射。式(12)表示当一架无

人机路径为从受灾点 i 前往受灾点 j 进行配送,再到受灾点 k 处被卡车回收,那么就不会有其它无人机最后在 j 节点处被回收。式(13)~(16)将卡车和无人机到达应急物流配送中心的时间调整为相同。式(17)表示当卡车到达 k 受灾点时,其消耗时间包括卡车到达 h 受灾点的总时间和卡车从 h 点到 k 点所耗费的配送时间。如果有无人机从 k 点发射,那么包括发射无人机的时间 S_L 。若有无人机在 k 受灾点被卡车回收,则还包括回收服务时间 S_R 。式(18)表示无人机从 i 受灾点发射,那么它到达 j 受灾点的时间包括 i 点到 j 点的配送时间。在此处无人机发射准备时间 S_L 不包括在内,因为式(13)、(14)已经迫使 $Tt_{(i)} = Dt_{(i)}$,且式(15)、(16)也将 S_L 并入到达 j 受灾点的总时间,这些约束使得 $Dt_{(0)} = 0$,即式(22)。式(19)表示如果无人机在 k 受灾点回收,则到达 k 受灾点的时间包含 j 点到 k 点的配送时间加上在 k 受灾点的回收服务时间。式(20)表示无人机的续航时间限制。在式(21)中, $Tt_{(0)} = 0$ 是为了满足卡车首次离开应急配送中心的情况。式(23)~(26)表示变量的类型以及参数范围。

3 模型求解

为了求解多车辆多无人机的 MTSP-D 问题,本研究设计了一种分步组合优化算法。首先利用 K-means 算法,将 MTSP-D 问题分解为 m 个相互独立的 TSP-D 问题,然后利用改进的 FSTSP 算法对上述 m 个 TSP-D 问题分别求解,求得每个 TSP-D 问题中的最短总配送时间。算法结构如图 2 所示。

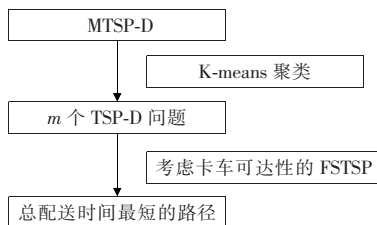


图 2 分步组合优化算法结构图

Fig. 2 Step configuration diagram of combinatorial optimization algorithm

3.1 K-means 算法

K-means 算法是经典的基于划分的聚类方

法,是十大经典数据挖掘算法之一^[13,14]。具体算法流程如图 3 所示。

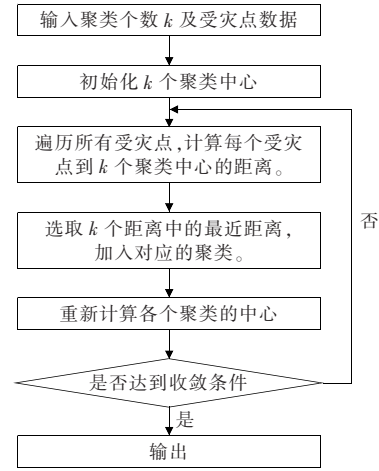


图 3 K-means 聚类算法流程图

Fig. 3 Flow chart of K-means clustering algorithm

3.2 改进的 FSTSP 启发式算法

FSTSP 启发式算法是 Murray 和 Chu 在 2015 年为解决 FSTSP 问题而设计的算法,本研究通过改进 FSTSP 启发式算法,使其适应考虑卡车可达性的应急物流场景。算法执行步骤如下:

Step 1 计算卡车可达的受灾点,产生配送时间最短的卡车路径解。

Step 2 计算使用无人机对卡车不可达点进行配送的时间。伪代码如下:

- 1) for all $(j \in C_b)$ do
- 2) $cost = \min\{\tau_{i,j}^D + \tau_{j,k}^D + S_L + S_R\}$
- 3) $Tt_{(i)} = Tt_{(i)} + S_L$
- 4) $Tt_{(k)} = Tt_{(k)} + cost$
- 5) $Tt_{(0_{(d)})} = Tt_{(0_{(d)})} + cost$
- 6) $i * = i$
- 7) $k * = k$
- 8) end for
- 9) return subroute $\{i, j, k\}, Tt_{(i)}, Tt_{(k)}, Tt_{(0_{(d)})}, i *, k *$

Step 3 计算从卡车路径中移除 $j(j \in C_r)$ 节点所节省的时间。

Step 4 计算将 $j(j \in C_r)$ 节点插入到卡车路径后所增长的时间。

Step 5 若节省时间大于增长时间,则储存当前路径,否则继续迭代。

Step 6 结束,输出最终卡车-无人机路径。

4 算例仿真及分析

某地发生自然灾害,15个受灾点第一时间进行生命救援类物资配送。出动卡车两辆、无人机两架将物资运往各受灾点。卡车畅行车速为40 km/h,在应急路况影响下,各路段实际车速为 $40\alpha_{i,j}$ km/h,无人机速度为56 km/h,无人机续航时间为40 min,无人机发射及回收所需的准备时间均为1 min,各坐标点之间的距离采用欧拉距离。各受灾点相关数据见表1,其中应急配送中心坐标点为(20,27),路况参数 $\alpha_{i,j}$ 数据如下所示。

表1 受灾点坐标

Table 1 Coordinates of disaster points

节点	坐标	节点	坐标
0	(20,27)	8	(29,35)
1	(20,15)	9	(15,22)
2	(13,16)	10	(21,36)
3	(14,10)	11	(23,37)
4	(17,23)	12	(27,38)
5	(28,30)	13	(18,19)
6	(25,42)	14	(21,30)
7	(17,14)	15	(25,27)

$$\alpha_{i,j} =$$

—	0.90	0.89	0.82	0.04	0.69	0.38	0.52	0.66	0.19	0.27	0.72	0.78	0.85	0.78	0.04
0.12	—	0.24	0.25	0.86	0.95	0.56	0.18	0.77	0.49	0.63	0.84	0.46	0.50	0.68	0.65
0.27	0.07	—	0.48	0.33	0.51	0.26	0.31	0.63	0.56	0.32	0.39	0.26	0.58	0.16	0.60
0.83	0.16	0.73	—	0.78	0.80	0.79	0.59	0.66	0.65	0.43	0.51	0.50	0.04	0.71	0.62
0.78	0.46	0.38	0.29	—	0.08	0.63	0.94	0.89	0.88	0.34	0.70	0.53	0.66	0.27	0.61
0.05	0.70	0.30	0.17	0.33	—	0.91	0.28	0.11	0.12	0.76	0.84	0.04	0.12	0.89	0.52
0.92	0.58	0.77	0.42	0.83	0.39	—	0.43	0.40	0.84	0.37	0.37	0.42	0.42	0.66	0.19
0.72	0.25	0.96	0.13	0.81	0.35	0.08	—	1.00	0.01	0.24	0.46	0.77	0.97	0.92	0.59
0.44	0.44	0.69	0.73	0.73	0.38	0.95	0.79	—	0.64	0.85	0.01	0.08	0.99	0.79	0.74
0.87	0.23	0.11	0.74	0.48	0.76	0.49	0.28	0.38	—	0.74	0.97	0.68	0.49	0.13	0.50
0.41	0.26	0.62	0.90	0.67	0.58	0.65	0.96	0.86	0.78	—	0.27	0.96	0.52	0.42	0.64
0.69	0.77	0.44	0.95	0.53	0.31	0.20	0.99	0.47	0.70	0.15	—	0.66	0.74	0.91	0.79
0.39	0.92	0.04	0.79	0.84	0.54	0.63	0.97	0.40	0.50	0.48	0.71	—	0.06	0.12	0.83
0.31	0.61	0.55	0.79	0.82	0.82	0.06	0.89	0.95	0.22	0.77	0.42	0.46	—	0.93	0.86
0.96	0.63	0.07	0.87	0.36	0.64	0.91	0.51	0.86	1.00	1.00	0.30	0.25	0.22	—	0.88
0.44	0.22	0.49	0.93	0.11	0.39	0.40	0.31	0.05	0.21	0.94	0.24	0.01	0.43	0.62	—

先通过 K-means 聚类,将上述受灾点分为两类,受灾点 1,2,3,4,7,9,13 为一类,受灾点 5,6,8,10,11,12,14,15 为一类。聚类结果见图 4。

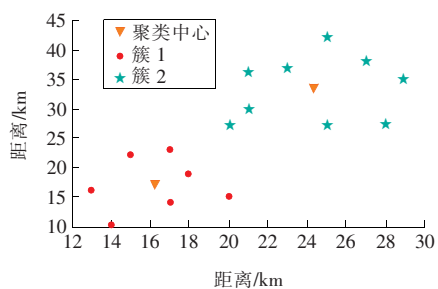


图4 聚类结果

Fig. 4 Clustering results

随机选取坐标点为卡车不可达点,在本算例中 4,6 号受灾点为卡车不可达点。通过 python 编程运行改进的 FSTSP 算法,可得相应的路径为:路径 1 的车辆路径为 0—13—1—7—2—9—0,无人机路径为 0—3—2,9—4—0,总配送时间为 57.97 min,其中配送时间 53.97 min,无人机发射及回收准备时间为 4 min;路径 2 的车辆路径为 0—10—11—8—5—15—14—0,无人机路径为 0—12—8,8—6—0,总配送时间为 59.02 min,其中配送时间 55.02 min,无人机发射及回收准备时间为 4 min。计算结果如表 2,3 所示。

表 2 车辆路径计算结果

Table 2 The results of vehicle routing calculation

路径 1	耗时/min	路径 2	耗时/min
S_L	1.00	S_L	1.00
0-13	12.37	0-10	13.58
13-1	6.71	10-11	3.35
1-7	4.74	11-8	9.49
7-2	6.71	S_R	1.00
S_R	1.00	S_L	1.00
2-9	9.49	8-5	7.65
S_L	1.00	5-15	6.36
9-0	10.61	15-14	7.50
S_R	1.00	14-0	4.74
		S_R	1.00

表 3 无人机路径计算结果

Table 3 The results of UAV routing calculation

路径 1	耗时/min	路径 2	耗时/min
S_L	1.00	S_L	1.00
0-3	23.68	0-12	17.84
3-2	8.88	12-8	9.72
S_R	1.00	S_R	1.00
S_L	1.00	S_L	1.00
9-4	5.04	8-6	9.14
4-0	6.89	6-0	18.33
S_R	1.00	S_R	1.00

为了进一步验证卡车-无人机在应急物流配送中的有效性,使用 20 组数据,通过配送时间的长短,对卡车、卡车-无人机、考虑可达性的卡车-无人机三者进行比较验证。结果见图 5。

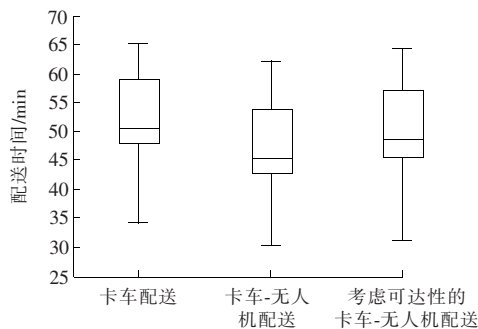


图 5 配送时间对比

Fig. 5 The comparison of distribution time

由图 5 分析可知:

1) 在 20 组数据中,使用卡车-无人机配送所需的时间低于使用卡车配送。

2) 在考虑卡车可达性的情况下,道路中断的恢复时间低于卡车行程时间的 10.12% 时,使用卡车配送与使用卡车-无人机配送所需的时间持平。

3) 由于考虑了卡车的可达性问题,无人机发射、回收点因此受到限制,配送时间也会相应地受到影响,但更符合应急环境下的实际情况。

5 结论

1) 通过对应急物流物资配送的研究,结合无人机配送优化的方法,围绕应急物流中考虑路况的无人机配送线路优化问题,设计了以卡车可达点、无人机续航时间、无人机飞行速度等为约束条件,以总配送时间最短为目标的无人机配送线路优化模型,使无人机进入应急物资配送领域,丰富了灾害应急管理。

2) 改进的 FSTSP 算法可以有效地优化应急物流中无人机配送线路问题,能够有效地将卡车不可达点分配给无人机进行配送,并求得最优解。

本研究所构建的模型暂未考虑车辆及无人机的载重约束、时间窗约束、受灾点的物资需求,且无人机的发射、回收点被限制于应急配送中心以及各受灾点,还未考虑在途卡车上发射、回收。后期研究的方向将是针对模型中的不足之处进行完善。

〔参考文献〕

- [1] 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.
- [2] Agatz N, Bouman P, Schmidt M. Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone[J]. Transportation Science, 2018, 52 (4): 965-981.
- [3] Kitjacharoenchai P, Ventresca M, Moshref J M, et al. Multiple traveling salesman problem with drones:

- mathematical model and heuristic approach[J]. Computers and Industrial Engineering, 2019, 129: 14-30.
- [4] Ponza A. Optimization of drone-assisted parcel delivery[D]. Padova: University of Padova, 2016: 2-10.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Wang Z, Sheu J. Vehicle routing problem with drones[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 122: 350-364.
- [8] 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.
- [9] 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 and Operations Research, 2019, 109: 134-158.
- [10] 雷添杰, 李长春, 何孝莹. 无人机航空遥感系统在灾害应急救援中的应用[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(1): 178-183.
- LEI Tian-jie, LI Chang-chun, HE Xiao-ying. Application of aerial remote sensing of pilotless aircraft to disaster emergency rescue[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(1): 178-183.
- [11] 韩文权, 任幼蓉, 赵少华. 无人机遥感在应对地质灾害中的主要应用[J]. 地理空间信息, 2011, 9(5): 6-8, 163.
- HAN Wen-quan, REN You-rong, ZHAO Shao-hua. Primary usages of UAV remote sensing in geological disaster monitoring and rescuing[J]. Geospatial Information, 2011, 9(5): 6-8, 163.
- [12] 李云, 徐伟, 吴玮. 灾害监测无人机技术应用与研究[J]. 灾害学, 2011, 26(1): 138-143.
- LI Yun, XU Wei, WU Wei. Application research on aviation remote sensing UAV for disaster monitoring[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(1): 138-143.
- [13] 孙吉贵, 刘杰, 赵连宇. 聚类算法研究[J]. 软件学报, 2008(1): 48-61.
- SUN Ji-gui, LIU Jie, ZHAO Lian-yu. Clustering algorithms research [J]. Journal of Software, 2008, 19(1): 48-61.
- [14] 王千, 王成, 冯振元, 等. K-means 聚类算法研究综述[J]. 电子设计工程, 2012, 20(7): 21-24.
- WANG Qian, WANG Cheng, FENG Zhen-yuan, et al. Review of K-means clustering algorithm[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(7): 21-24.