



无人机与卡车协同配送优化研究

胡觉亮^{1a}, 杨航^{1b}, 张田会², 韩曙光^{1a,3}

(1.浙江理工大学, a.理学院; b.经济管理学院, 杭州 310018; 2.北京机电工程研究所, 北京 100074;
3.阿尔伯塔大学计算机科学系, 埃德蒙顿 T6G 2E8, 加拿大)

摘要:近年来出现了将卡车作为单架无人机着陆和起飞平台的配送模式。为进一步研究该模式对物流配送的价值,建立了一辆卡车搭载多架无人机为客户进行配送,同时考虑无人机限载、电量及客户时间窗等因素,以总配送成本最低为目标的混合整数规划模型,设计了嵌入改进节约里程算法(C-W 算法)的人工蜂群算法,通过与 Lingo 计算小规模算例精确解对比验证算法的有效性,同时对模型参数进行了敏感度分析。研究表明:所建立的模型及设计的算法是有效的,可以为城市物流配送中无人机的应用提供指导。

关键词:无人机;卡车;协同;路径规划;人工蜂群算法

中图分类号: F572

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2020)10-0489-09

Research on cooperative distribution optimization of UAVs and Trucks

HU Jueliang^{1a}, YANG Hang^{1b}, ZHANG Tianhui², HAN Shuguang^{1a,3}

(1.a.School of Science; b.School of Economics and Management,
Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2.Beijing Electro-mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China;

3. Department of Computing Science, University of Alberta, Edmonton, Alberta T6G 2E8, Canada)

Abstract: In recent years, there has been a distribution model in which one truck is used as the landing and take-off platform for one unmanned aerial vehicle (UAV). To further study the value of this mode for logistics, a mixed integer programming model was established with the objective of the lowest total distribution cost. In this mode, one truck carries multiple UAVs for distribution, and the factors such as load limit and power of UAVs as well as customer time window were taken into account. Besides, an artificial bee colony algorithm embedded with improved mileage-saving (C-W) algorithm was designed. Compared with Lingo's results of solving small-scale examples, the effectiveness of the algorithm was proven, and the sensitivity of the parameters in the model was analyzed with some model parameters. The results show that the established model and the designed algorithm are both effective. They can provide some guidance for the application of UAVs in the urban logistics distribution.

Key words: UAV; truck; coordination; path planning; artificial bee colony algorithm

收稿日期: 2019-10-23 网络出版日期: 2020-01-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(11471286, 11971435); 浙江省自然科学基金项目(LQ17A010011)

作者简介: 胡觉亮(1958—), 男, 浙江杭州人, 教授, 主要从事运筹学理论与应用方面的研究。

通信作者: 韩曙光, E-mail: zist001@163.com

近几年,随着经济的快速发展,物流需求加快,物流市场不断扩大,物流总费用也在不断增加。2016年中国社会物流总额229.7万亿元,社会物流总费用11.1万亿元;2017年中国社会物流总额252.8万亿元,社会物流总费用12.1万亿元;2018年,中国社会物流总额为283.1万亿元,社会物流总费用13.3万亿元^[1]。物流订单的增加给物流配送行业带来极大的压力,人工快递投放的延误率较高,物流成本逐年升高,物流市场需要更加快捷、方便、现代化的物流配送,各大物流企业试运行物流无人机,加快了无人机在物流行业的应用。2017年3月京东在海南省试运营的第一个无人机配送站正式启用,成功实现首单配送,同年8月获得覆盖陕西省全省范围的无人机空域批文;2017年6月顺丰与赣州市南康区联合申报的物流无人机示范运行区获得正式审批;2017年8月顺丰无人机运营中心初步建成^[2]。

将卡车作为无人机发射降落的载体,把无人机运送到靠近客户的位置,使无人机能够在其飞行范围内为客户提供服务,这为物流配送提供了新模式。Murray等^[3]首次提出了“飞行伙伴旅行商问题”(The flying sidekick traveling salesman problem, FSTSP),即卡车携带无人机完成包裹的投递。在此基础上,Wang等^[4]通过建模分析推导出了卡车与无人机路径问题的最坏结果。Agatz等^[5]提出了几种解决无人机旅行商问题(Traveling salesman problem with drone, TSP-D)问题的启发式算法。并证明启发式最坏情况下的近似比。Ha等^[6]考虑了一种新的TSP-D变形,目标是将运营成本降到最低,考虑了车辆等待的时间成本。文献[3-6]主要研究卡车携带单架无人机进行配送相关问题,且假定无人机单次发射只能配送单个客户。Choi^[7]研究表明,在高需求密度的地区,无人机运输更加经济,但同时也增加了求解的难度。Dorling等^[8]主要研究了有限数量无人机配送问题,允许无人机多次往返仓库进行配送,并将其应用于模拟退火(Simulated annealing, SA)启发式算法中求解。文献[7-8]仅考虑了多无人机协同配送问题。Sergio等^[9]调查了与卡车无人机交付系统相关的时间和能量,并提出了一种优化算法,根据交付要求和每辆卡车的无人机数量,确定最佳发射地点和位置。该研究允许卡车携带多架无人机,但未给出相应的数学模型。Ham等^[10]研究了多车辆、多无人机协同配送,并且带有取送货及时间窗的问题,其中无人机与卡车均独立完成配送。Luo等^[11]考虑了卡车与无人机在空间

和时间上的协同约束,卡车在道路网络上行驶,无人机在道路以外的区域行驶,以访问道路网络以外的客户,允许无人机单次发射为多位客户进行配送。Boysen等^[12]等考虑了在给定卡车路径下的卡车携带多无人机配送问题,且无人机单次配送单个客户。

综上所述,对于卡车携带多架无人机配送,且无人机单次发射可配送多位客户的更一般性问题还缺乏相关研究。鉴于此,本文建立了一种考虑无人机限载、电量及客户时间窗等约束下的卡车携带多架无人机,且单次发射无人机可进行多次配送,以总配送成本最低为目标的混合整数规划模型,并设计了启发式算法进行求解及分析。将卡车与无人机协同配送问题模型进一步运用于算例分析加以验证,为相关企业提供理论依据及解决思路。

一、问题描述

无人机与卡车协同配送优化问题可以用图 $G=(V,A,C)$ 来定义。所有点集 V 由1个仓库 $\{0\}$, m 个潜在卡车临时停站点集合 $S=\{1,2,\dots,m\}$,以及 n 个客户点 $T=\{m+1,m+2,\dots,m+n\}$ 组成。边集合 A 中的每个弧 (i,j) 都有对应的成本 C_{ij} 。每个客户点 $t \in T$ 都有一个需求 d_t 。一辆携带有 K 架无人机的卡车从仓库出发,为所有的客户进行配送服务,完成所有配送后返回仓库。卡车可以在仓库及各个临时停站点之间行驶。卡车在临时停车点发射无人机,由于无人机有载重及电量限制,每次只能访问有限个客户,之后需要返回卡车进行充电或更换电池,并重新装载货物准备下一次配送。卡车在无人机配送完该停站点对应的客户并全部返回后,可以前往下一个临时停站点。卡车在临时停站点等待的时间、卡车与无人机配送路径的长短均会影响总配送成本。因此需要考虑如何选择合适的临时停车点,在该站点为哪些客户进行配送,以及如何有效使用有限无人机对多个客户点进行配送,使总的配送成本最低。无人机与卡车协同配送过程可用图1描述。对临时停站点使用数字1—5进行编号。由图1可见,1号、3号和5号临时停站点未被使用。卡车由仓库前往2号临时停站点,之后发射1号和2号无人机为附近客户点进行配送。无人机在完成配送后返回卡车,卡车搭载无人机前往4号临时停站点。完成所有客户点配送后,卡车搭载无人机返回仓库。

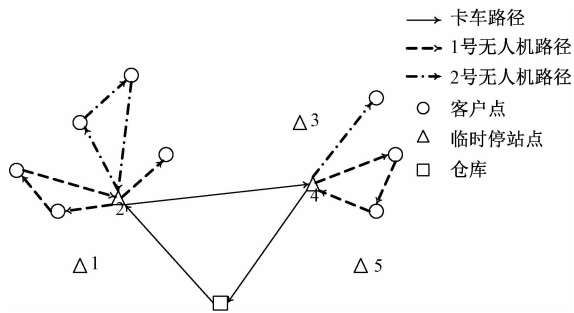


图1 无人机与卡车协同配送过程示意

二、无人机与卡车协同配送优化模型

(一) 假设条件

不失一般性,对问题进行了简化,假设条件如下:

- 卡车载重足够大,即一辆卡车即可满足所有客户点的需求;
- 不考虑无人机的起落、充电(或者更换电池)时间;
- 无人机型号相同,每次返回卡车后电量恢复至满电状态;
- 所有临时停站点位置及客户点的位置、时间窗、需求量已给出;
- 所有客户点到其最近临时停站点的距离均小于无人机最大航程的一半;
- 无人机成本与飞行时间成正比,与无人机行驶或悬停无关;
- 无人机在到达客户点且未在客户时间窗内在空中做悬停飞行;
- 无人机均在同一个临时停站点释放和收回,待所有无人机返回后卡车可前往下一个临时停站点;
- 不考虑卡车携带无人机的成本;
- 所有客户点的需求由且仅由一架无人机进行配送。

(二) 符号说明

1. 参数符号说明

- $S = \{1, 2, \dots, m\}$, 表示 m 个卡车停站点;
- $T = \{m+1, m+2, \dots, m+n\}$, 表示 n 个客户点;
- V , 表示所有点的集合 $V = S \cup T \cup \{0\} \cup \{0'\}$, $\{0\}$ 与 $\{0'\}$ 均表示同一仓库, 卡车从 0 点出发, 最后返回 $0'$ 点;
- $L = \{1, 2, \dots, l\}$, 表示无人机的数量;
- θ , 表示无人机单次发射可飞行的最大时间;
- q_t , 表示客户点 t 的需求量, $\forall t \in T$;

R , 表示无人机的最大载重量;

δ , 表示无人机在客户点的服务时间;

M , 表示一个无穷大的数;

e_i , 表示表示点 i 在卡车路径中的位置, $\forall i \in \{0\} \cup S$;

ϵ_{is} , 表示表示点 i 在由临时停站点 s 发射的无人机路径中的位置, $\forall i \in T, \forall s \in S$;

d_{ij} , 表示任意两点间旅行距离, $\forall i, j \in V$;

t_{ij} , 表示卡车在其路径上任意两点间的行驶时间, $\forall i, j \in \{0\} \cup S$;

t'_{ij} , 表示无人机在其飞行路径上任意两点间的飞行时间, $\forall i, j \in V$;

γ_{is} , 表示无人机从客户点 i 完成配送并返回发射点的时间;

C_1, C_2, C_3, C_4 , 分别表示卡车单位距离的成本、无人机单位时间飞行的成本、卡车在停站点的等待时间的单位成本、无人机航次使用成本。

α_i, β_i , 分别表示客户点 i 可以进行配送的最早时间及最晚时间, $i \in T$ 。

2. 决策变量符号说明

$x_{ij} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, \forall i, j \in \{0\} \cup S$, 如果卡车路径包含由临时停站点 i 到达临时停站点 j 的路径 (i, j) 则为 1, 否则为 0;

$y_{ijs}^l = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, \forall i, j \in \{0\} \cup S, \forall l \in L, \forall s \in S$, 从 s 停站点发射的无人机 l 路径经过 (i, j) 则为 1, 否则为 0;

$O_{ijs}^l = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, \forall i, j \in T, \forall s \in S, \forall l \in L$, 如果无人机 l 从客户点 i 返回 s 停站点并且前往客户点 j 则为 1, 否则为 0;

a_i 表示卡车到达停站点 i 的时间, $\forall i \in S \cup T$;

b_i 表示卡车离开停站点 i 的时间, $\forall i \in S \cup T$;

u_{ls} 表示由 s 站点起飞的无人机 l 完成配送返回卡车的时间, $\forall l \in L, \forall s \in S$;

w_{is}^l 表示由 s 站起飞的无人机 l 离开客户点 i 时的载重量, $\forall l \in L, \forall s \in S, \forall i \in T$;

τ_i 表示无人机或卡车在点 i 处的等待时间, $\forall i \in T \cup S$;

f_{isl} 表示由 s 站起飞的无人机 l 离开客户点 i 时的电量(剩余可飞行的时间), $\forall l \in L, \forall s \in S, \forall i \in T$;

f'_{isl} 表示由 s 站起飞的无人机 l 从客户点 i 返

回到停站点 s 时的电量(剩余可飞行的时间), $\forall l \in L, \forall s \in S, \forall i \in T$.

(三) 模型建立

1. 目标函数

$$\begin{aligned} \min C_1 \sum_{i \in \{0\} \cup S} \sum_{j \in \{0\} \cup S} d_{ij} \cdot x_{ij} + \\ C_2 \left(\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} y_{ijs}^l \cdot t_{ij} + \sum_{i \in T} \tau_i \right) + \\ C_3 \sum_{i \in \{0\} \cup S} \sum_{s \in S} (b_s - a_s) + C_4 \sum_{s \in S} \sum_{j \in T} \sum_{l \in L} y_{ijs}^l \end{aligned} \quad (1)$$

目标函数(1)为卡车携带无人机为所有客户点完成配送并返回仓库的总成本最小,包括卡车的行驶成本、无人机飞行以及在客户点悬停时间所用成本、卡车在停站点等待成本,以及无人机航次使用成本。

2. 约束

卡车的路径约束为:

$$\sum_{i \in S} x_{i0} = \sum_{i \in S} x_{0i} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{j \in \{0\} \cup S} x_{ji} = \sum_{j \in \{0\} \cup S} x_{ij}, \forall i \in \{0\} \cup S \quad (3)$$

约束(2)表示由一辆卡车完成任务,卡车从仓库出发并返回仓库;约束(3)表示卡车行驶的流量平衡。

无人机的路径约束为:

$$\sum_{s \in S} \sum_{i \in S \cup T} \sum_{l \in L} y_{ijs}^l = 1, \forall j \in T \quad (4)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{i \in S \cup T} \sum_{l \in L} y_{jis}^l = 1, \forall j \in T \quad (5)$$

$$\sum_{i \in S \cup T} y_{ijs}^l = \sum_{i \in S \cup T} y_{jis}^l, \quad \forall l \in L, \forall j \in S \cup T, \forall s \in S \quad (6)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{j \in T} y_{iji}^l \geq \sum_{h \in \{0\} \cup S} x_{ih}, \forall i \in S \quad (7)$$

$$M \cdot \sum_{i \in \{0\} \cup S} x_{is} \geq \sum_{l \in L} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} y_{ijs}^l, \forall s \in S \quad (8)$$

$$y_{i0s}^l = 0, \forall i \in V, \forall s \in S, \forall l \in L \quad (9)$$

$$y_{0is}^l = 0, \forall i \in V, \forall s \in S, \forall l \in L \quad (10)$$

约束(4)和(5)表示所有客户点均由一架且只有一架无人机进行配送;约束(6)表示无人机行驶路径的流量平衡;约束(7)和(8)表示无人机只能从卡车经过的停站点为客户进行配送;约束(9)表示无人机不能直接飞往仓库;约束(10)表示无人机不能直接从仓库发射到客户点。

去子环的约束为:

$$e_i - e_j + 1 \leq (m + 2)(1 - x_{ij}), \forall i, j \in S \quad (11)$$

$$1 \leq e_i \leq m + 2, \forall i \in S \quad (12)$$

$$\epsilon_{is} - \epsilon_{js} + 1 \leq (n + 2)(1 - y_{ijs}^l), \forall s \in S,$$

$$\forall l \in L, \forall i, j \in T \quad (13)$$

$$1 \leq \epsilon_{is} \leq n + 2, \forall i \in T, \forall s \in S \quad (14)$$

约束(11)和(12)为卡车路径消子环约束;约束(13)和(14)为无人机路径消子环约束。

无人机的载重约束为:

$$0 \leq w_{is}^l \leq R, \forall l \in L, \forall s \in S, \forall i \in T \quad (15)$$

$$w_{js}^l \leq w_{ss}^l - q_j \cdot y_{ijs}^l + R \cdot (1 - y_{ijs}^l), \quad \forall s \in S, \forall l \in L, \forall j \in T \quad (16)$$

$$w_{js}^l \geq w_{ss}^l - q_j \cdot y_{ijs}^l - R \cdot (1 - y_{ijs}^l), \quad \forall s \in S, \forall l \in L, \forall j \in T \quad (17)$$

$$w_{js}^l \leq w_{is}^l - q_j \cdot y_{ijs}^l + R \cdot (1 - y_{ijs}^l), \quad \forall s \in S, \forall l \in L, \forall i, j \in T \quad (18)$$

$$w_{js}^l \geq w_{is}^l - q_j \cdot y_{ijs}^l - R \cdot (1 - y_{ijs}^l), \quad \forall s \in S, \forall l \in L, \forall i, j \in T \quad (19)$$

约束(15)表示无人机的最大载重量为 R ;约束(16)和(17)追踪无人机从卡车发射,到达客户点 j 完成配送后的载重量;约束(18)和(19)追踪无人机从客户点 i 到达客户点 j 完成配送后的载重量。

无人机的里程(电量)约束为:

$$f_{ssl} = \theta, \forall s \in S, \forall l \in L \quad (20)$$

$$f_{jst} \leq f_{ssl} - t'_{sj} \cdot y_{ijs}^l + \theta \cdot (1 - y_{ijs}^l), \quad \forall s \in S, \forall j \in T, \forall l \in L \quad (21)$$

$$f_{jst} \geq f_{ssl} - t'_{sj} \cdot y_{ijs}^l - \theta \cdot (1 - y_{ijs}^l), \quad \forall s \in S, \forall j \in T, \forall l \in L \quad (22)$$

$$f_{jst} \leq f_{isl} - (t'_{ij} + \tau_j) \cdot y_{ijs}^l + \theta \cdot (1 - y_{ijs}^l), \quad \forall s \in S, \forall i, j \in T, \forall l \in L \quad (23)$$

$$f_{jst} \geq f_{isl} - (t'_{ij} + \tau_j) \cdot y_{ijs}^l - \theta \cdot (1 - y_{ijs}^l), \quad \forall s \in S, \forall i, j \in T, \forall l \in L \quad (24)$$

$$f'_{jst} \leq f_{jst} - t'_{js} \cdot y_{jss}^l + \theta \cdot (1 - y_{jss}^l), \quad \forall s \in S, \forall j \in T, \forall l \in L \quad (25)$$

$$f'_{jst} \geq f_{jst} - t'_{js} \cdot y_{jss}^l - \theta \cdot (1 - y_{jss}^l), \quad \forall s \in S, \forall j \in T, \forall l \in L \quad (26)$$

$$f'_{jst} \geq 0.1 \times \theta \cdot y_{jss}^l, \forall s \in S, \forall j \in T, \forall l \in L \quad (27)$$

约束(20)表示,无人机从任意停站点 s 发射时及再次从停站点 s 发射时的最大飞行时间(电量)为 θ ;约束(21)和(22)追踪无人机 l 从停站点 s 起飞到达第一个访问客户后的剩余可飞行的时间;约束(23)和(24)追踪无人机 l 从客户点 i 到达下一个客户点 j 后的剩余可飞行的时间;约束(25)和(26)追踪无人机 l 从客户点 i 返回到停站点 s 后的剩余可飞行的时间;约束(27)表示无人机完成配送任务返回到停站点 s 的卡车上时,至少剩余满电量的 10%。

无人机发射的可重复性约束为:

$$\sum_{j \in T} O_{ijs}^l \leq \sum_{l \in L} y_{iss}^l, \forall s \in S, \forall i, j \in T, \forall l \in L \quad (28)$$

$$\sum_{j \in T} O_{jis}^l \leq \sum_{l \in L} y_{iss}^l, \forall s \in S, \forall i, j \in T, \forall l \in L \quad (29)$$

$$L + \sum_{i \in T} \sum_{j \in T} \sum_{l \in L} O_{ijs}^l \geq \sum_{h \in T} \sum_{l \in L} y_{shs}^l, \forall s \in S \quad (30)$$

$$\sum_{i \in T} y_{sis}^l - \sum_{i \in T} \sum_{j \in T} O_{ijs}^l \leq 1, \forall s \in S, \forall i, j \in T, \forall l \in L \quad (31)$$

$$O_{iis}^l = 0, \forall i \in T, \forall s \in S, \forall l \in L \quad (32)$$

约束(28)表示如果一架无人机 l 从客户点 i 返回到停站点 s , 那么无人机 l 可以继续前往下一个客户点; 约束(29)表示, 如果一架重复使用的无人机 l 从停车点 s 发射前往客户点 i , 则这架无人机之前会从一个客户点 j 前往停站点 s ; 约束(30)表示从停车点 s 发射的无人机次数不能大于无人机的总数 L 与无人机重复使用的次数; 约束(31)表示对于同一架无人机, 重复使用的次数不能少于该架无人机从 s 起飞的总次数减去 1; 约束(32)表示重复派出的无人机不能访问同一个客户点。

卡车在临时停站点的时间约束为:

$$a_0 = 0, b_0 = 0 \quad (33)$$

$$a_s \geq b_h + t_{h,s} \cdot x_{hs} - M(1 - x_{hs}), \forall h, s \in \{0\} \cup S \quad (34)$$

$$u_{l,s} \geq a_s + \sum_{i \in \{s\} \cup T} \sum_{j \in \{s\} \cup T} t'_{ij} \cdot y_{ijs}^l, \forall l \in L, \forall s \in S \quad (35)$$

$$\tau_s \geq a_h - b_s - t_{sh} \cdot x_{sh} - M \cdot (1 - x_{sh}), \forall s, h \in S \quad (36)$$

$$\tau_s \leq a_h - b_s - t_{sh} \cdot x_{sh} + M \cdot (1 - x_{sh}), \forall s, h \in S \quad (37)$$

$$b_s \geq u_{l,s} + \tau_s, \forall s \in S, \forall l \in L \quad (38)$$

约束(33)表示卡车离开仓库的时刻为 0; 约束(34)表示卡车到达停站点 s 的时刻; 约束(35)表示无人机 l 完成配送并返回停站点 s 的时刻; 约束(36)和(37)表示卡车在无人机完成所有配送后在停站点 s 的等待时间; 约束(38)表示卡车离开停站点 s 的时刻。

无人机到达、离开客户点的时间约束为:

$$a_j \geq a_s + y_{sjs}^l \cdot t'_{sj} - M \cdot (1 - y_{sjs}^l), \forall j \in T, \forall s \in S, \forall l \in L \quad (39)$$

$$a_j \geq b_i + t'_{ij} \cdot y_{ijs}^l - M \cdot (1 - y_{ijs}^l), \forall i, j \in T,$$

$$\forall s \in S, \forall l \in L \quad (40)$$

$$\gamma_{is} \geq a_i + t'_{is} \cdot y_{iss}^l - M \cdot (1 - y_{iss}^l), \forall l \in L, \forall s \in S, \forall i \in T \quad (41)$$

$$a_j \geq \gamma_{is} + t'_{sj} \cdot O_{ijs}^l - M \cdot (1 - O_{ijs}^l), \forall s \in S, \forall i, j \in T, \forall l \in L \quad (42)$$

$$u_{l,s} \geq a_j + t'_{js} \cdot y_{jss}^l - M \cdot (1 - y_{jss}^l), \forall s \in S, \forall l \in L, \forall j \in T \quad (43)$$

$$\tau_i \geq a_j - a_i - t'_{ij} \cdot y_{ijs}^l - M \cdot (1 - y_{ijs}^l), \forall i, j \in T, \forall s \in S, \forall l \in L \quad (44)$$

$$\tau_i \leq a_j - a_i - t'_{ij} \cdot y_{ijs}^l + M \cdot (1 - y_{ijs}^l), \forall i, j \in T, \forall s \in S, \forall l \in L \quad (45)$$

$$b_i \geq a_i + \delta, \forall i \in T \quad (46)$$

约束(39)~(46)记录无人机在各点的时间。如果无人机经过路径 (i, j) , 则无人机在 i 点的等待时间为无人机到 j 点的时间减去无人机到达 i 点的时间与在路径 (i, j) 所使用的时间。

客户点的时间窗约束为:

$$\alpha_i \leq a_i \leq \beta_i, \forall i \in T \quad (47)$$

约束(47)表示各个客户点的时间窗。

0-1 变量的约束为:

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in \{0\} \cup S \quad (48)$$

$$y_{ijs}^l \in \{0, 1\}, \forall i, j \in V, \forall l \in L, \forall s \in S \quad (49)$$

$$O_{ijs}^l \in \{0, 1\}, \forall s \in S, \forall i, j \in T, \forall l \in L \quad (50)$$

通过 Lingo 编程, 对上述模型进行了求解。当算例规模为 3 个临时停站点、5 个客户时, 计算时间约为 45 s。当算例规模为 4 个临时停站点、10 个客户时, 计算时间长达 24 小时以上。而在实际问题中数据规模通常较大, 仅使用求解器难以满足实际需要, 因此使用启发式算法提高求解速度。由于无人机与卡车协同配送问题可以认为是属于两级路由问题的范畴, 陈久梅等^[13]已经验证其变邻域搜索人工蜂群(Artificial bee colony, ABC)算法在解决两级路由问题的有效性, 因此本文在其基础上, 结合本文问题, 改进了人工蜂群-节约里程算法(Artificial bee colony - the Clarke-Wright algorithm, ABC-CW), 对上述模型进行求解。

三、ABC-CW 算法设计

(一) 人工蜂群算法(ABC)简介

ABC 算法是通过模拟蜂群采蜜行为而提出的一种启发式算法。在该算法中, 人工蜂群由采蜜蜂、跟随蜂和侦查蜂三种不同职能的蜜蜂组成, 蜂群通

过搜索食物源、招募跟随蜂和放弃食物源的行为来寻找最优食物源。ABC算法的主要思想是:首先由引领蜂搜索食物源,并将各采蜜蜂搜索到的食物源与自身对应;接着由各采蜜蜂根据所对应食物源的优劣招募一定数量的跟随蜂前去该食物源采蜜,若某采蜜蜂根据所对应的食物源在若干次迭代后仍无改进,则该采蜜蜂放弃该食物源,转换成侦察蜂;侦察蜂开始寻找新的食物源,一旦搜索成功,就转换为采蜜蜂,并与该食物源对应。ABC算法的控制参数相对较少且易于实现,目前已经在多个领域得到应用。但是由于其进化方式和选择策略的影响,使算法收敛速度相对较慢,且易陷入局部最优解^[14]。

(二) 改进节约算法简介

1964年Clarke等^[15]提出了节约(The Clarke-Wright, C-W)算法,该算法可以解决简单的车辆路径问题,但原始算法中没有考虑限载、时间窗等约束。通过在原始C-W算法的基础上进行改进,加入载重、时间窗等约束,可以有效解决实际中的车辆路径问题。节约算法的基本策略,即按节约里程表从大到小的排序进行搜索,逐步将满足各种约束条件的客户点加入到行驶路径中,从而达到最终的节约路径的优化结果^[16]。

(三) 基于人工蜂群和改进节约算法的ABC-CW算法

通过ABC算法迭代改进接收解的同时,结合C-W算法,使算法的收敛速度加快,且不会影响ABC算法的随机性,从而更快找到近似最优解。该算法流程如图2所示,算法主要步骤如下:

步骤1:初始化参数,算法最大迭代次数 T_{\max} ,邻域搜索最大迭代次数,采蜜蜂数SN等。

步骤2:利用改进的C-W算法产生SN个初始解,分别计算其适应度,将初始解对应的适应度按照从小到大的顺序排列,将前SN/2个解设置为当前解。

步骤3:更新采蜜蜂的位置,采蜜蜂在每个食物源的领域范围内进行额定次数的搜索。

步骤4:跟随蜂搜索。当采蜜蜂完成搜索后,会记下蜜源相关信息招募跟随蜂,跟随蜂按照轮盘赌的策略选择蜜源,记录临时种群极值、全局最优解。

步骤5:采蜜蜂和侦察蜂转换。如果采蜜蜂经过规定搜索次数后仍然没有找到新蜜源,表示算法陷入局部最优解。此时,采蜜蜂转变为侦察蜂,继续步骤2中生成新的蜜源。找到新蜜源后侦察蜂又转变为采蜜蜂,重复此过程。

步骤6:到达最大迭代次数后结束计算,输出结果。

算法的思路为随机选取将会使用的临时停站点,并且将所有需要配送的客户随机分配给选出的临时停站点,通过改进C-W算法选出满足各种约束的解作为接收解。通过ABC算法进行迭代,当迭代次数为 T_{\max} 时输出结果。

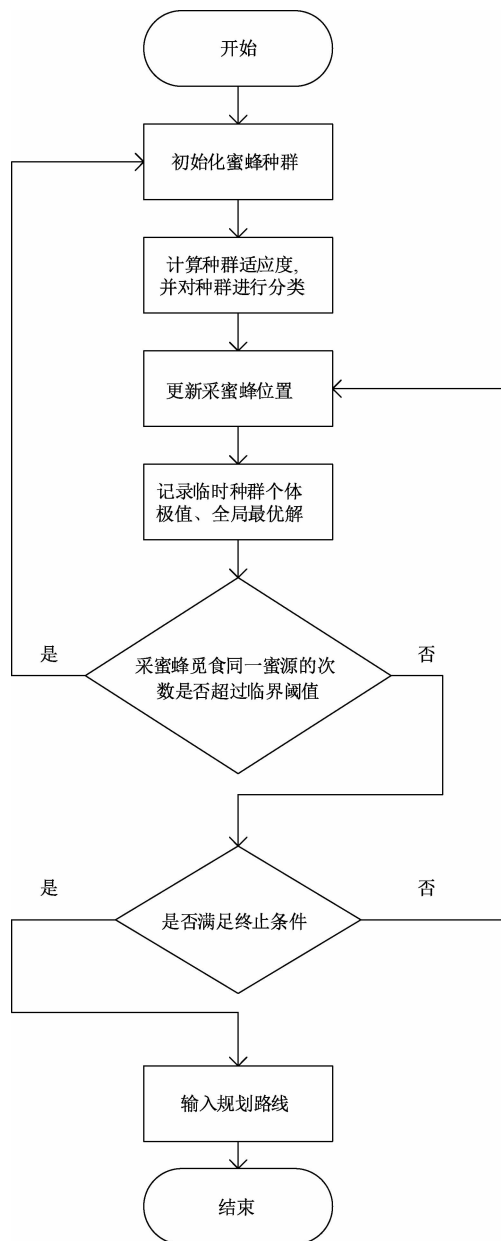


图2 ABC-CW算法流程

四、算例分析

(一) 算例描述

某快递公司使用车载无人机模式向某区域内的10位客户进行物流配送。为研究无人机单次发射可进行多次配送对总配送成本的影响,将所有客户的需求量设置为单位需求量,通过改变无人机的最

大载重量来表示无人机单次发射最多配送的客户数量,如最大载重量为 2,则表示无人机单次发射最多可为两位客户进行配送。考虑各个客户的时间窗,并将等待时间转化为等待成本。根据公司试运营无人机的实际情况对部分参数做出合理假设,给出了数据及参数如表 1 和表 2 所示。表中,编号 1、16 均表示仓库位置,1 为发车点,16 为卡车返回点;编号 2—11 表示客户点;编号 12—15 表示临时停站点。仓库、

临时停站点、客户之间的距离如表 1 所示,各客户的需求量及时间窗要求如表 2 所示,无人机单次启用成本(充电成本)为 0.1 元/次,卡车速度为 60 km/h,无人机速度设置为与卡车相同。卡车单位路程行驶成本为 1.5 元/km,无人机单位时间飞行成本为 0.5 元/min,卡车在临时停站点的等待费用为 0.2 元/min,无人机单次最大载重量为 2 个单位,卡车携带无人机数为 2 架,每个客户服务时间为 1 min。

表 1 仓库、临时停站点、客户点间距离矩阵

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	10	11	12	12	9	11	11	13	11	9	10	10	10	12	0
2	10	0	1	3	4	10	10	11	20	17	15	1	6	11	13	10
3	11	1	0	2	3	11	10	11	21	18	16	2	7	12	14	11
4	12	3	2	0	1	10	5	7	18	14	13	2	7	11	12	12
5	12	4	3	1	0	4	3	5	17	13	12	2	5	10	5	12
6	9	10	11	10	4	0	2	2	8	5	4	4	1	4	3	9
7	11	10	10	5	3	2	0	1	6	6	6	5	1	6	1	11
8	11	11	11	7	5	2	1	0	6	4	4	6	1	4	1	11
9	13	20	21	18	17	8	8	8	0	3	4	13	6	3	6	13
10	11	17	18	14	13	5	6	4	3	0	1	12	6	1	6	11
11	9	15	16	13	12	4	6	4	4	1	0	10	6	1	6	9
12	10	1	2	2	2	4	5	6	13	12	10	0	5	10	7	10
13	10	6	7	7	5	1	1	1	6	6	6	5	0	5	2	10
14	10	11	12	11	10	4	6	4	3	1	1	10	5	0	7	10
15	12	13	14	12	5	3	1	1	6	6	6	7	2	7	0	12
16	0	10	11	12	12	9	11	11	13	11	9	10	10	10	12	0

表 2 客户点特征及配送要求

编号	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
客户需求量	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
时间窗/min	[48,57]	[45,50]	[47,60]	[47,60]	[30,40]	[20,25]	[30,40]	[0,15]	[10,15]	[10,15]

注:时间窗以 0 为起始时刻,例如[45,50]表示客户允许送货的最早时间为 45 min,最晚为 50 min。

(二) 计算结果及分析

采用 Matlab 2016b 编写 ABC-CW 算法,运行的计算机参数配置为 Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @1.60 Hz。经多次试验,设置初始化参数的采蜜蜂数量 50,侦察蜂数量 50,最大遗传迭代次数为 30,加速系数最大值为 1,运算时间为 257.42 s。图 3 为卡车与无人机协同配送路径,表 3 为卡车及无人机到达各点的时刻。

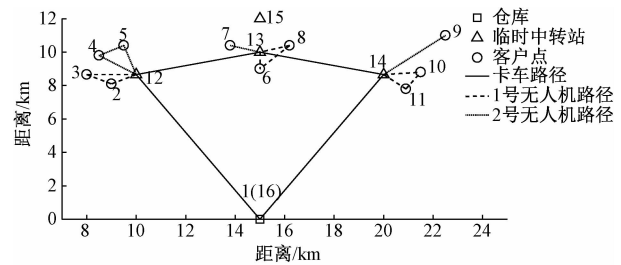


图 3 卡车与无人机协同配送路径

表 3 到达各点时刻表

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
到达时间	0	48	45	47	49	30	21	33	13	11	13	40	20	10	—	62
离开时间	0	49	47	48	50	31	22	34	14	12	14	52	35	15	—	62
等待时间	0	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	12	15	5	—	0

由图 3 可见,卡车由仓库出发,先后到达临时停站点 14、13、12,完成配送后返回仓库,其中 15 号临

时停站点未被选择。卡车到达 14 号临时停站点时,1 号无人机发射前往客户点 10,完成客户点 10 的配

送后,为11号客户进行配送,随后返回卡车;2号无人机发射前往客户9,完成配送后返回卡车,卡车前往临时停站点13。卡车在临时停站点14的等待时间为5 min。无人机在完成客户点3配送后,因与客户2的时间窗相差1 min,因此在客户点3停留1分钟后前往客户点2。在完成所有客户点的配送任务后,卡车携带无人机返回仓库,配送总成本为69.5元,其中卡车行驶成本为45.0元,无人机飞行成本为17.5元,无人机使用成本为0.6元,卡车在停站点等待时间为6.4元。

分析结果,卡车在到达临时停站点的时间为40 min,并没有立即发生无人机前往客户点进行配送,而是在43 min发射1号无人机为3号客户进行配送,减少了无人机在客户点的悬停时间,计算结果符合最低成本的目标。算例中部分客户时间窗较紧,如果按照传统卡车配送,或仅搭载一架无人机进行配送则出现无可行解的情况。

(三) 参数灵敏度分析

为验证模型的有效性 & 进行不同规模数据下的灵敏度分析,本文采用 Boysen 等^[12]生成数据的方式进行实验。为数据不失一般性,本文中参考该文献,参数 λ 设为0.5生成算例。不同规模算例测试结果对比见表4。根据表4,对于客户点在10个以内规模算例求解时,Lingo 10可以在有效时间内对模型进行求解,与ABC-CW计算结果相同,可见本文所建模型及设计算法具有正确性。当客户点多于10个时,Lingo运行时间超过12小时仍未能获得最优解,ABC-CW算法大大减少了计算时间,表明该算法的有效性。

表4 不同规模算例测试结果对比

编号	算例 (s-t)	Lingo 10		ABC-CW		误差
		运行时间/s	最优值/元	运行时间/s	最优值/元	
1	3-5	45.00	50.00	30.00	50.00	0.00
2	4-10	86412.00	213.70	257.42	69.50	0.00
3	4-20	—	—	352.59	720.84	—
4	5-40	—	—	641.35	1380.45	—
5	6-60	—	—	994.11	1614.72	—

注:算例采用“s-t”形式表达,其中s表示临时停站点的数量,t表示客户数量。

无人机单位路程成本对总配送成本的影响:同时考虑客户的时间窗,携带无人机数目对总成本的影响。取等待成本为0.2元/min,依然使用算例4-20的形式生成50组不同数据进行实验,结果如图4所示。

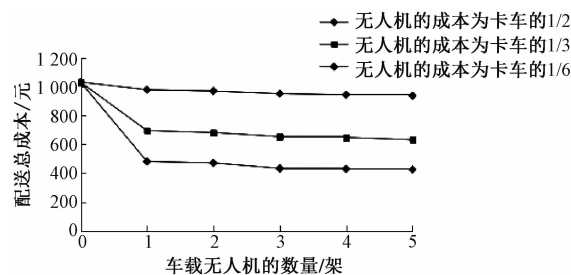


图4 无人机的成本对总配送成本的影响

从图4可以看出,当无人机成本为卡车成本的1/2时,是否携带无人机几乎没有对总成本产生影响。当无人机成本为卡车成本1/6时,卡车携带无人机配送可以大幅度降低总的配送成本。但无论无人机成本设置为多少,卡车使用无人机数对总成本的减少量均很小。因为本文模型中客户的时间窗为硬时间窗,且只考虑单车问题,随机产生的数据存在大量无可行解的情况。因此数据结果均为在可以满足纯卡车配送时间窗的情况下的可行解,不能很好体现多无人机的优势。

固定相关参数,改变等待成本,分别设置等待成本为0.1元/min和0.5元/min,使用算例4-20的形式生成50组不同数据进行实验,结果如图5所示。

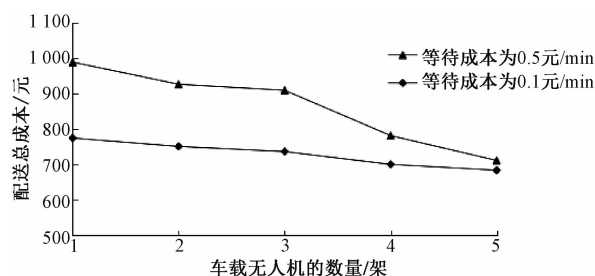


图5 等待成本对总配送成本的影响

从图5可知,当等待成本较高时,改变车载无人机数目对总成本的影响较大,当等待成本较低时,改变车载无人机数目对总成本影响较小。因此在城市拥堵、停车费用较高的路段,考虑使用多架无人机可以降低配送成本。

固定相关参数,设置无人机速度为卡车速度的2倍,无人机单位路程成本为卡车成本的1/3,卡车在临时停站点的等待成本为0.2元/min,通过计算不同规模的算例得到图6所示的结果。

从图6可以发现,通过改变不同规模的算例,结果与之前分析基本一致。在无人机单位路程行驶成本为卡车成本的1/3、卡车在临时停站点的等待成

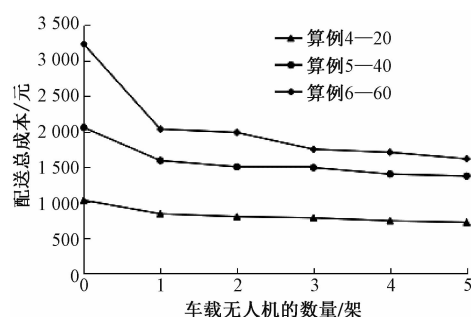


图6 不同算例计算结果

本为0.2元/min的情况下,使用无人机配送可以减少总配送成本。同时可以看出,在满足客户时间窗口且等待成本较低的情况下,无人机数目的增加对总成本影响不大。

五、结 语

本文研究了单架卡车搭载不同数量的无人机协同配送调度问题。在给出了问题的描述及其条件假设之后,建立了以总配送成本最低的混合整数规划模型,使用Lingo编程求解该问题的小规模算例。对于较大规模的算例,改进了ABC-CW算法。为了验证算法的有效性,在小规模算例的基础上,增加了多组不同规模的算例,并用ABC-CW算法进行求解。结果表明,ABC-CW算法可以在较短时间内有效解决较大规模的无人机与卡车协同配送调度问题。下一步研究将尝试改变问题中假设无人机只能在同一临时停站点发射并收回后,卡车再进入下一临时停站点的约束。使无人机在配送的过程中,卡车也可以前往下一个临时停站点或前往客户点进行配送,以便节约等待时间。也可以考虑使用软时间窗口,通过分析到达各个客户点的延误时间,结合客户满意度等因素,进一步分析卡车携带多无人机对总成本的影响。此外,在求解时,还可考虑使用神经网络的方法和元启发式算法等,以期进一步提高大规模数据的求解速度。

参考文献:

- [1] 中国产业信息网. 2018年中国物流行业发展现状及发展趋势分析[EB/OL]. (2018-04-08)[2019-10-01]. <http://www.chyxx.com/industry/201804/627420.html>.
- [2] 郑翔. 无人机物流发展的法律障碍和立法思考[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2018, 17(1):136-142.
- [3] 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.
- [4] Wang X, Poikonen S, Golden B. The vehicle routing problem with drones: Several worst-case results[J]. Optimization Letters, 2016, 11(4):679-697.
- [5] Agatz N A H, Bouman P C, Schmidt M E. Optimization approaches for the Traveling Salesman Problem with drone[J]. ERIM Report Series Research in Management, 2016: 1-40.
- [6] 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.
- [7] Choi Y. Optimization of multi-package drone deliveries considering battery capacity[C]// 96th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC: 2017: 1-16.
- [8] Dorling K, Heinrichs J, Messier G G, et al. Vehicle Routing Problems for drone delivery[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 47(1): 70-85.
- [9] Sergio M F, Timothy H, Troy W, 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.
- [10] Ham A M. Integrated scheduling of m-truck, m-drone, and m-depot constrained by time-window, drop-pickup, and m-visit using constraint programming[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 91:1-14.
- [11] Luo Z, Liu Z, Shi J. A Two-Echelon Cooperated Routing Problem for a ground vehicle and its carried unmanned aerial vehicle[J]. Sensors, 2017, 17(5): 1144-1161.
- [12] Boysen N, Briskorn D, Fedtke S, et al. Drone delivery from trucks: Drone scheduling for given truck routes[J]. Networks, 2018, 72(4):506-527.
- [13] 陈久梅,曾波. 两级定位—路径问题的路径重连变邻域搜索人工蜂群算法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(5):1228-1236.
- [14] Karaboga D, Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm. Journal of Global Optimization, 2007, 39(3): 459-471.
- [15] Clarke G, Wright J. Scheduling vehicles from a central depot to number of delivery points[J]. Operations Research, 1964, 12(4):12-18.
- [16] 崔宏志, 龚加安. 带时间窗车辆路径问题的改进节约算法[J]. 纯粹数学与应用数学, 2011, 27(5):688-693.

(责任编辑:陈丽琼)