文章编号:1005-2542(2022)03-0555-12

卡车-无人机联合取送货模式下物流优化

孟姗姗1, 郭秀萍1,2

(1.西南交通大学 经济管理学院,成都 610031; 2.北京邮电大学 经济管理学院,北京 100876)

【摘要】为有效协调正逆向物流,利用无人机成本低、受地面交通状况影响少的特点,在无人机电池能耗随载重变化、同时取送货情形下,提出卡车-无人机联合取送货模式,构建两阶段求解方法。第1阶段,提出"最大重量判断法"构造初始可行解,为货物指派拾取或配送车辆并确定需要卡车数量;第2阶段,采用基于节点特征的改进模拟退火算法优化卡车-无人机路径,最小化总成本。两阶段均采用Python编程实现。仿真结果表明,提出的卡车-无人机联合取送货模式较其他模式可有效减少物流成本。"最大重量判断法"可显著提高算法收敛速度和效果。

关键词:卡车-无人机联合取送货;基于载重的电池消耗;最大重量判断法

中图分类号:F 252

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn 1005-2542.2022.03.013

Logistics Optimization in Truck-Drone Joint Pick-Up and Delivery

MENG Shanshan¹, GUO Xiuping^{1, 2}

- (1.School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
 - 2.School of Economics and Management, Beijing University of Posts and Telecommunications,
 Beijing 100876, China)

[Abstract] To effectively coordinate forward and reverse logistics, taking advantage of the characteristics of low cost and less impact of ground traffic conditions of drones, a truck-drone joint pick-up and delivery model was built and a two-stage solution method was proposed, considering the payload-induced battery consumption and the simultaneous pick-up and delivery services. In the first stage, the "maximum weight judgment method" was proposed to construct the initial feasible solution, assign pickup or delivery vehicles for the goods, and determine the required number of trucks. In the second stage, an improved simulated annealing algorithm based on node characteristics was used to optimize the truck-drone path and minimize the total cost. The two stages were all implemented using Python programming. The simulation results show that the truck-drone joint pickup and delivery model can effectively reduce logistics cost compared with other modes. The "maximum weight judgment method" can significantly improve the convergence speed and effect of the algorithm.

Key words: truck-drone joint pick-up and delivery model; load-induced battery consumption; maximum weight judgment method

收稿日期:2021-05-24 修订日期:2021-08-11

基金项目:网络与交换技术国家重点实验室(北京邮电大学)开放课题(SKLNST-2021-2-01);服务科学与创新四川省重点实验室开放课题(KL2106)

作者简介:孟姗姗(1987-),女,博士生。研究方向为物流与供应链管理、调度优化、智能算法。

通信作者:郭秀萍(1977-),女,教授,博士生导师。E-mail: guoxiuping0029@sina.com

近年来,无人机以成本低、速度快、飞行路径接近直线等优势在物流领域得到迅速发展[1-2],亚马逊、谷歌、京东等多家企业都在尝试使用无人机提供更高效的服务。但因其续航里程和载荷能力有限,卡车-无人机联合配送问题得到广泛关注,Wang等[3-4]的研究也证明,卡车-无人机联合配送在最坏情况下的效率仍优于卡车单独配送。

Murray 等[5] 和 Agatz 等[6] 首先通过对经典旅 行商问题的扩展,并假设无人机每次飞行只携带一 个包裹,提出了飞行助手旅行商问题(Flying Sidekick Traveling Salesman Problem, FSTSP)、带 无人机的旅行商问题(Traveling Salesman Problem with Drone, TSP-D)。文献[7-9]中对 FSTSP 进行 了扩展,考虑多卡车-无人机协同配送,设计了求解 大规模问题的启发式方法: Marinelli 等[10]将 TSP-D扩展到在卡车路径任意位置发射和回收无人机, 并使用贪婪算法求解。但上述研究均假设无人机一 次飞行只服务一个客户点,而一次多点配送可以充 分发挥无人机优势,针对此问题,Pedro等[11]提出了 一种基于迭代的贪婪算法,优化无人机多点配送路 径。文献[12-13]中考虑每辆卡车配备多架无人机, 无人机一次服务多个客户,设计了灵活的启发式方 法。上述研究不考虑重量对无人机电池能耗和速度 的影响,虽然文献[14-15]中验证了无人机电池能耗 与重量的近似线性关系,并应用于无人机单独配送 问题;Jeong 等[16]考虑无人机能源消耗和限制飞行 区域的 FSTSP,提出两阶段构造和搜索方法等,但 均未考虑卡车-无人机联合、同时取送货的情况。因 此,本文提出"最大重量判断法"构造初始可行解,以 及基于节点特性的改进模拟退火算法(SA)进一步 优化总成本。

综上所述,本文针对实际配送中客户点同时取送货的双重需求,考虑不同载荷对电池能源消耗和路径选择的影响下,无人机一次可携带多个包裹时的卡车-无人机联合路径优化问题,提出卡车-无人机联合取送货模式,并设计两阶段优化方法。仿真结果表明,本文提出的模式和方法能有效降低总成本,且算法效率较高。

1 问题描述

卡车单独取送货模式如图 1 所示,卡车在载重约束下,携带一定量包裹从配送中心出发,依次完成同时取送货任务后返回配送中心。随着物流量的不断增大,卡车单独取送货面临交通和成本压力,难以高效完成任务。为此,本文提出一种卡车-无人机联

合取送货模式,以缩短卡车行驶距离,降低总成本,如图 2 所示,每辆卡车携带一架无人机和包裹从配送中心出发,按照预定路线,在客户点取送包裹,无人机可以携带一些小包裹,从卡车上起飞,同时完成一些取送任务,无人机只能在配送中心或客户点起飞或与卡车汇合,在返回卡车后进行电池更换,并可以再次发射,在完成所有取送任务后,一起返回配送中心。其中,需求(取货量或配送量)超出无人机载重的客户点称为"超重点",必须由卡车服务;剩余客户点称为"无人机可服务点"。

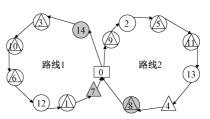


图 1 卡车单独取送货模式

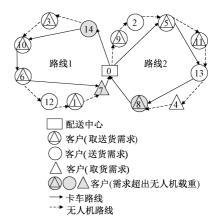


图 2 卡车-无人机联合取送货模式

同时,由于无人机轻量、速度快,质量对电池能耗,即续航里程影响较大,如图 3 所示,设无人机最大承载量为 3 kg,无人机先服务客户 3 时负荷减少(左图),而先服务客户 2 时负荷增加,消耗更多能量,甚至超出承载力(右图)。由于考虑路径方向性和无人机载重变化,增大了解空间和搜索难度。

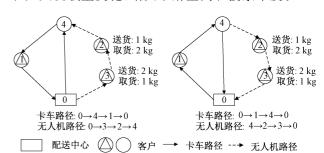


图 3 不同方向的卡车-无人机路径

Dorling 等[15]验证了无人机在悬停、水平飞行

和改变高度时,平均功率消耗大致相等。因此,考虑无人机恒定功率下,电池能耗与无人机重量正相关,本文扩展了 Liu 等[17]的能耗模型,引入参数 α 表示单位距离单位重量能耗率,用 w_s 表示无人机自身重量, w_{di} 为无人机d 离开点i 时的载重, d_{ij} 为 $i \sim j$ 的距离,则无人机d 经过弧(i,j) 的能量消耗表示为: $F_{dij} = \alpha(w_s + w_{di})d_{ij}$;用P 表示无人机功率,则无人机d 从点 $i \sim j$ 的飞行时间和速度分别为:

$$t_{dij} = \frac{F_{dij}}{P} = \frac{\alpha (w_s + w_{di}) d_{ij}}{P}$$
 (1)

$$v_{dij} = \frac{d_{ij}}{t_{dij}} = \frac{P}{\alpha (w_s + w_{di})}$$
 (2)

用 C_{df} 表示无人机每瓦时能量消耗成本,则无人机 d 经过弧(i,j) 的能耗成本为

$$C_{dij} = C_{df} \cdot \alpha(w_s + w_{di})d_{ij}$$

综上所述,本文假设:每辆卡车有相同的载重限制;无人机有电池能量和容量约束,电池能耗随无人机重量线性变化;每个客户由卡车或无人机一次服务完成,且取货与送货同时进行;无人机只能在客户点或配送中心与卡车同步汇合,考虑无人机能耗和安全性,卡车到达汇合点的时间不晚于无人机;一架无人机一次可取送多件包裹;无人机在卡车上更换电池后可继续取送货,且每次发射时电池满电;卡车速度恒定,无人机速度随载重变化;每段里程用欧式距离测量;不考虑客户点时间窗限制。

2 模型构建

模型中使用的符号:

N — 所有节点集合,配送中心表示为 o (出发点) 和 e (返回点),o \in N,e \in N

A — 所有弧的集合, $(i,j) \in A$, $i,j \in N$, $i \neq j$

C——客户点集合, $C = N \setminus \{o, e\} = \{1, 2, \dots, n\}$

 $N_o, N_e \longrightarrow$ 分别为路径的起点和终点集合,

 $N_o = \{o\} \ \bigcup \ C, N_e = \{e\} \ \bigcup \ C$

 f_{dk} — 无人机 d 子路径 k 的节点集合, f_{dk} = $\{d_{k0}, d_{k1}, \dots, d_{kp}\}, k \in KD$

K,D — 分别为使用的卡车和无人机集合,

 $K = \{t \mid t = 1, 2, \dots, m\}, D = \{d \mid d = 1, 2, \dots, m\}$

C_{vt} ——卡车每公里的里程成本

 C_t , C_d ——分别为卡车、无人机的单位使用成本

Q---卡车最大承载量

W,F ——分别为无人机最大承载量和电池最 大能量值(单位:Wh) w_{ii} — 为卡车 t 在点 i 停留期间,各状态(如发射前、回收后等) 载重的最大值

 t_{iij} , t_{dij} — 分别为卡车 t 及其无人机在弧 $(i, j) \in A(i \neq j)$ 的旅行时长

*tt*_i,*td*_i — 分别为卡车 *t* 及其无人机到达点 *i* 的时间

t_s ——单位客户点的服务时间,即客户点装卸 包裹时间

 x_{iij} — 当卡车 t 经过弧 $(i,j) \in A(i \neq j)$ 时为 1, 否则为 0

 y_{dij} — 当无人机 d 经过弧 $(i,j) \in A(i \neq j)$ 时为 1,否则为 0

 zt_i 一 当卡车 t 服务客户 i 时为 1,否则为 0

 zd_i —— 当无人机 d 服务客户 i 时为 1,否则为 0

 b_{dij} —— 当无人机 d 从点 i 发射,在点 j 返回时 为 1,否则为 0

 s_{di} —— 当无人机 d 从点 i 发射时为 1,否则为 0

 l_{di} —— 当无人机 d 在点 i 返回时为 1,否则为 0

 h_{td} — 当卡车 t 配备无人机 d 时为 1,否则为 0 u_{ti} , u_{di} — 分别表示点 i 在卡车 t 路径、无人机

d 子路径中的访问顺序, $u_{ti} \geqslant 0$, $u_{di} \geqslant 0$ M———足够大的正整数

建立如下数学模型:

目标函数

min
$$C_{vt} \sum_{t \in K} \sum_{(i,j) \in A} x_{tij} d_{ij} + \sum_{t \in K} \sum_{i \in K} C_{dvs} y_{dvs} + m(C_t + C_d)$$
 (3)

约束条件

$$\sum_{j \in C} x_{toj} = \sum_{i \in C} x_{tie} = 1, \quad t \in K$$
 (4)

$$b_{dij} \left(\sum_{v \in C} y_{div} - \sum_{s \in C} y_{dsj} \right) = 0$$

$$i, j \in N, \quad d \in D$$

$$(5)$$

$$\sum_{i \in N_o} x_{iij} = \sum_{k \in N_e} x_{ijk} = zt_j$$
 (6)

$$i \neq j$$
, $j \neq k$, $j \in C$, $t \in K$

$$\sum_{v \in fdb} y_{dvj} = \sum_{s \in fdb} y_{djs} = zd_j \tag{7}$$

$$j \in f_{dk} \setminus \{d_{ko}, d_{kp}\}, \quad k \in KD, \quad d \in D$$

$$\sum_{t \in K} zt_i + \sum_{d \in D} zd_i = 1, \quad i \in C$$
 (8)

$$\sum_{v \in f_{dk}} z d_v \geqslant 1 - M(1 - b_{dij}), \quad i, j \in f_{dk}$$
 (9)

 $v \neq i, \quad v \neq j, \quad k \in KD, \quad d \in D$

$$s_{di} \geqslant 1 - M \left(2 - \sum_{t \in K} \sum_{k \in C} x_{tik} - \sum_{v \in C} y_{div} \right)$$

$$i \in N_o, \quad d \in D$$

$$(10)$$

$$l_{di} \geqslant 1 - M \left(2 - \sum_{t \in K} \sum_{k \in C} x_{tki} - \sum_{v \in C} y_{dvi}\right)$$
 (11)

$$i \in N_e$$
, $d \in D$

$$b_{dij} \leqslant s_{di} \leqslant \sum_{v \in C} y_{div}, \quad i, j \in N, \quad d \in D \quad (12)$$

$$b_{dij} \leqslant l_{dj} \leqslant \sum_{v \in C} y_{dvj}, \quad i, j \in N, \quad d \in D$$
 (13)

$$h_{td}b_{dij}\geqslant 1-M(2-h_{td}\sum_{k\in C}x_{tik}-$$

$$h_{td} \sum_{v \in C} x_{tvj}$$
 (14)

$$i, j \in C, d \in D, t \in K$$

$$\sum_{d \in D} s_{di} \leqslant 1, \quad i \in N \tag{15}$$

$$\sum_{d \in D} l_{di} \leqslant 1, \quad i \in N \tag{16}$$

$$\sum_{v \in C} x_{tiv} \sum_{k \in C} x_{tkj} \sum_{d \in D} s_{di} \left(1 - \sum_{s} \sum_{d \in D} y_{dsj} \right) \sum_{s} s_{dj} = 0$$

$$(17)$$

$$i \in N_o$$
, $j \in N_e$, $t \in K$

$$u_{dj} \geqslant u_{di} - M(1 - b_{dij})$$

$$i, j \in N, \quad d \in D$$

$$(18)$$

$$u_{tj} \geqslant u_{ti} - M(1 - h_{td}b_{dij})$$

$$i, j \in N, \quad d \in D, \quad t \in K$$

$$(19)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{D}} y_{dij} \leqslant 1 - \sum_{i \in \mathcal{D}} x_{tij}, \quad (i,j) \in A$$
 (20)

$$0 \leqslant w_{ti} \leqslant Q \sum_{j \in N_c} x_{tij}, \quad t \in K, \quad i \in N_o \quad (21)$$

$$0 \leqslant w_{di} \leqslant W \sum_{j \in f_{dk}} y_{dij} \tag{22}$$

$$i \in f_{dk}, \quad k \in KD, \quad d \in D$$

$$\sum_{v \in f_{dk}} \sum_{s \in f_{dk}} F_{dvs} y_{dvs} \leqslant F \tag{23}$$

$$k \in KD$$
, $d \in D$

$$tt_{j} \geqslant tt_{i} + t_{iij} \cdot x_{iij} - M(1 - x_{iij}) + zt_{i}t_{s} \quad (24)$$
$$(i,j) \in A, \quad t \in K$$

$$td_{j} \geqslant td_{i} + t_{dij} \cdot y_{dij} -$$

$$M\left(1 - y_{dij} + \sum_{t \in K} x_{tij}\right) + zd_i t_s$$

$$(i,j) \in A, \quad d \in D$$

$$(25)$$

$$\sum_{i \in N_0} x_{iij} h_{id} t t_j \le l_{dj} t d_j + M (1 - l_{dj})$$
 (26)

$$j \in N_e$$
, $d \in D$

式(3)表示最小化总成本,其中, m 为卡车或无人机使用量,由优化结果确定;式(4)表示每辆卡车从配送中心出发并返回配送中心;式(5)保证每对无人机发射点和回收点流量守恒;式(6)为卡车线路节点的进出平衡约束;式(7)保证每个无人机服务点流量守恒;式(8)保证每个客户被卡车或无人机服务,且仅一次;式(9)表示每条无人机子路径至少服务一个客户;式(10)、(11)保证发射点和回收点为卡车经过点,且在该点分别有无人机离开和返回;式(12)、

(13)对式(10)、(11)进行补充,以明确变量间约束关系;式(14)确保无人机的每次发射和返回在所属同一卡车路径上;式(15)、(16)表示每个节点至多发射或回收一次无人机;式(17)表示卡车经过点 *i、j*,无人机从点 *i* 发射后,没有在点 *j* 返回,则不能在点 *j* 发射,以保证无人机子路径间的不交叉性;式(18)、(19)确保无人机发射回收顺序与卡车、无人机访问顺序一致;式(20)表示不允许卡车和无人机并行经过同一段弧;式(21)保证每辆卡车在各节点满足承载量约束;式(22)保证每条无人机子路径各节点上的载重不超出无人机最大承载量;式(23)为每架无人机每次飞行的能耗限制;式(24)、(25)分别为卡车和无人机到达每个节点的时间约束;式(26)保证卡车到达汇合点的时间不晚于无人机。

3 方法设计

由于问题的 NP-hard 性质,本文提出一种两阶段求解方法,获得近似最优解。第1阶段,运用"最大重量判断法"构造初始可行解,为卡车指派取送任务并确定卡车使用量;第2阶段,对模拟退火算法(SA)进行改进,以优化卡车-无人机路径,实现成本最小化。

针对卡车-无人机同时取送货问题特点,在优化无人机路径时,不仅要满足无人机承载量、电池能耗以及路径间不交叉等约束,还需考虑卡车在其各路径节点的载重情况,求解空间较小。为此,本文提出"最大重量判断法"构造初始解,以扩大第2阶段解空间,提高求解速度和质量。其次,在卡车、无人机、同时取送货等多重实际约束下,求解易陷入局部最优,因此,在第2阶段,使用模拟退火算法(SA),以一定概率接受次优解。同时,为使SA适合问题特性,结合节点类型,设计了3类11种邻域搜索算子,生成候选解;为节约总成本,在搜索中允许在同一节点(包括仓库)发射和回收无人机,并使用区域设定法和禁忌列表等加速策略,增加搜索可行性,减少搜索重复性,提高求解效率。

首先,针对每辆卡车 t, 定义如下概念:

- (1) 卡车点 i。卡车 t 路径中不参与无人机发射和回收的节点($i \in tp$)。
- (2) 无人机点 i。卡车 t 无人机服务的客户节点($i \in dt$)。
- (3) 组合点 i。卡车 t 路径中参与无人机发射或回收的节点,包括发射点(发射但不回收无人机, $i \in \text{spt}$)、回收点(回收但不发射无人机, $i \in \text{lpt}$)和混合点(同时发射和回收无人机, $i \in \text{slt} = \text{sst} \bigcup \text{sdt}$,

 $i \in \text{sst}$ 表示卡车在i 点发射无人机,并在原地收集; $i \in \text{sdt}$ 表示卡车在i 点回收无人机后,原地再次发射)。(1) 和(3) 合称为卡车路径点。

3.1 编码

采取自然数编码,卡车路径中,用 0 表示卡车 ID,总节点数 (1+n) 表示终点配送中心 ID,顾客集为 $\{1,2,\cdots,n\}$,如图 4 所示,从左向右,第 1 个 0 后的数字为第 1 辆卡车依次访问的客户点 ID;无人机路径中,起始数字表示卡车序号 $(1,2,\cdots,m)$,其后跟随的数字为该卡车(卡车 1)对应的无人机路径,包含组合点,如 13-3-10-11 为一个"无人机子路径",表示无人机从点 13 发射,服务客户 3、10 后,在点 11 返回。虚竖线":"为无人机子路径分隔符,以辅助说明。

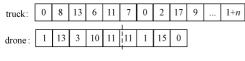


图 4 编码方式

3.2 第1阶段:构造初始解

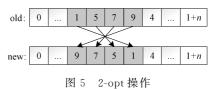
由于需要考虑车辆载重及各节点载荷变化,简单的贪婪算法或随机生成初始解的方式[1,17]需要进行多次载重可行性判断,增加搜索时间,故提出"最大重量判断法"(简称 MW 法)进行初始解构造,其优势在于保证后续卡车路径的可行性,扩大第2阶段解空间,提高后续搜索的收敛速度和质量。

初始解的构造包括卡车单独取送货路径构造和 无人机路径添加两部分。首先,采用 MW 法构造由 卡车完成全部取送货任务的完整路径,为卡车分配 任务,确定卡车使用量(步骤 1~3);然后,基于节点 特征,将部分卡车服务客户转化为无人机服务客户, 形成初始解(步骤 4)。

MW 法基本思路:使用最大重量对客户分组,将组内同时取送货旅行商问题(TSP-SPD)转化为一般旅行商问题(TSP)。对于每个客户i,定义 $\mu_i = p_i - d_i$ 表示客户i的净需求(其中, d_i 和 p_i 分别为客户i的配送量和取货量);定义 $\operatorname{cum}_i = \sum_{i=1}^{t=i} \mu_i$ 表示车辆经过客户i后的载重累积增量。假设卡车服务一组客户 $V \subseteq C$,从配送中心出发时的载重量为 w_n ,则

 $w_v + \max\{0, \operatorname{cum}_i\} \leq Q, \quad i = 1, 2, \cdots, |V|$ 是满足卡车载重约束的充要条件^[18]。 cum_i 最大值即该组客户中正 μ_i 之和,表示为: $u_v = \sum \mu_v^+$,则最大重量为 $w_v + u_v$ 。 MW 法构造初始解的基本步骤如下:

步骤 1 计算所有客户点的净需求量 μ_i ,总配送量 $w_c = \sum_{i \in C} d_i$ 及正净需求和 u_c ,进行最大重量判断,如果 $w_c + u_c \leq Q$,则一辆卡车即可满足全部需求,初始卡车路径的构建为传统 TSP,使用模拟退火算法(SA)优化,优化方式如图 5 所示,然后转步骤 4;否则,转步骤 2。



步骤 2 初始化客户总配送量 w = 0,正净需求和 u = 0,卡车路径列表 $r_i = [0]$,从配送中心出发,依次寻找最近的客户点 i,并更新 w,如果 $\mu_i > 0$,更新 u,如果 $w + u \leq Q$,则在 r_i 列表中添加客户点 i;否则,在 r_i 列表中添加 0,初始化 w、u 和 r_i ,启动另一条卡车路径。重复上述操作,至所有客户被添加,形成初始卡车路径。

步骤 3 使用模拟退火算法求解有最大重量约束的 TSP(TSP-MW),优化步骤 2 的初始解,每次搜索以最大重量 $w_v + u_v \leq Q$ (设该卡车服务一组客户 V) 为判断条件,若超出,则返回上一步继续搜索,搜索方式如图 6、7 所示,为同卡车、不同卡车路径节点 2-opt 交换。



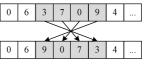
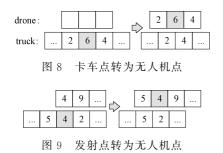


图 7 TSP-MW 异路 2-opt

步骤 4 针对每条卡车路线,通过将部分卡车路径点调整为无人机点,生成无人机路径,在满足无人机载重和能耗约束下,采取如下操作:

操作 1 将卡车点转为无人机点,如图 8 中的点 6,构造无人机子路径 2→6→4,无人机从点 2 出发,服务客户 6 后返回点 4,卡车直接从 2→4,同时计算成本节约量,如果节约量为正,则执行此操作,如下操作亦然。

操作 2 将发射点转为无人机点,如图 9 所示,如果点 4 的取送任务可由无人机完成,则将客户 4 调整为无人机点,点 4 左侧相邻点 5 为新发射点,无人机子路径为 5→4→9→,卡车直接从 5→2。



操作 3 将回收点转为无人机点,如图 10 所示,如果无人机在完成客户 5 的取送任务后可以继续服务客户 2,则将客户 2 调整为无人机点,点 2 右侧相邻点 4 为回收点,无人机子路径为 \rightarrow 5 \rightarrow 2 \rightarrow 4,卡车直接从 7 \rightarrow 4。



操作 4 将混合点转为无人机点,如图 11 所示,将两个子路径合并,形成路径 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow 3 \rightarrow ,卡车直接从 6 \rightarrow 2。

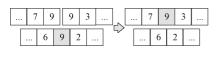


图 11 混合点转为无人机点

按照卡车访问顺序进行循环,每次循环,针对卡车访问点类型,进行判断和替换操作,直至不存在正成本节约,输出初始解。其中,无人机子路径载重判断依据为

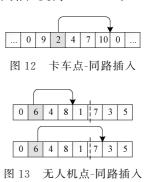
 $w_d + \max\{0, \operatorname{cum}_i\} \leqslant W, \quad i = 1, 2, \dots, |d|$ 设该无人机一次飞行服务一组客户 d。

3.3 第2阶段:优化初始解

为提升解的搜索效率和质量,对模拟退火算法(SA)进行改进,针对每辆卡车优化初始解。

(1) 多种邻域搜索操作。传统模拟退火算法对解空间的搜索能力较弱,使得算法整体运行时间过长。为此,参考 Liu 等[17]的研究,设计了同路插入、异路插入和两点交换 3 类方法对解邻域进行搜索,取最优结果为候选解,每次搜索均需进行无人机载重及能耗判断,若超出则返回上一步继续搜索。考虑问题的复杂性和无人机约束条件,针对节点类型采取不同策略,提高搜索效率。

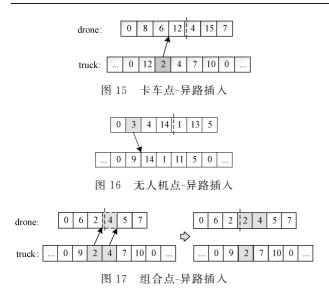
同路插入。针对同一卡车,在不改变客户服务 方式下,从该线路服务的客户中随机选择一个贪婪 插入成本最小的可行位置。包括卡车点同路插入、 无人机点同路插入和混合点同路插入 3 种。 图 12 为将卡车点贪婪插入所在卡车路径,此时被插入节点原来位置清空,后续节点位置前移;图 13 为将无人机点插入同卡车的无人机路径,可以插入该点所在无人机子路径,也可以插入其他无人机子路径,选择插入成本最小的位置,插入方法同上;组合点(此处不考虑混合点的情况)插入所在卡车路径,需要考虑路径方向的一致性,如果卡车路径中,发射点插入位置在原回收点之后,或回收点插入位置在原发射点之前,则对应无人机子路径倒向。如图 14 所示,回收点 9 的插入位置在原发射点 3 之前,该无人机子路径变为 9→7→3。





异路插入。针对同一卡车,在改变客户服务方 式下,从该线路服务的客户中随机选择一个贪婪插 入成本最小的可行位置,同样包含3种方式。如图 15 所示,为将卡车点插入同卡车的无人机路径中, 成为无人机点,或为该卡车点建立新的无人机子路 径,贪婪插入原无人机路径中,取成本较小的方式。 将无人机点插入所属卡车路径的情况如图 16 所示, 若选择点为该无人机子路径唯一服务点,则删除该 无人机子路径。图 17 为将发射点转化为无人机点, 即将插入成本最小的卡车路径点添加到原无人机子 路径端点(如点 2),成为新发射点,卡车路径中,原 发射点位置清空,新发射点位置不变。针对回收点 的操作同上;如果将混合点插入无人机路径,则与 3.2 节图 11 的操作相同,将在该混合点交汇的两个 无人机子路径合并为一条子路径,并在对应卡车路 径中删除该点。

两点交换。针对同一卡车,从该路线服务的客户中随机选择两个进行交换,采用5种方式,同时,在生成随机数时排除无人机点与"超重点"间交换,减少解的不可行性。图18为两卡车点交换,图19为卡车点与无人机点间交换,图20为无人机点间交



换的两种情况,即同无人机子路径内、不同子路径间 无人机点交换。图 21、22 所示为交换点中存在组合 点的情况,此时,对应无人机路径中的组合点也需要 交换,存在组合点与卡车路径点间同路交换和与无 人机点异路交换两种。

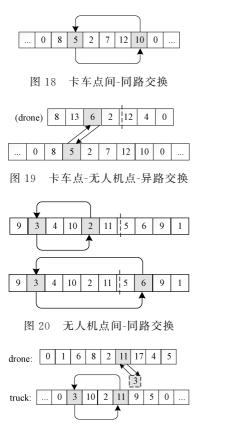


图 21 存在组合点-同路交换

(2)设计加速策略,提高优化效率。为避免不必要的搜索,针对问题特征设计了加速策略:区域设定法,即在不失解最优性前提下,提前排除部分不可行解,针对性缩小搜索空间,提高算法效率。包括3个方面:①在卡车点异路插入-创建新无人机子路

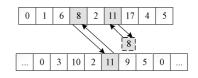


图 22 存在组合点-异路交换

径、组合点异路插入中,新发射点的选取范围,首先排除原发射点、混合点和被插入点(约束式(15)~(16)),新回收点的选取亦然,且两者形成的组合应满足与卡车相同的访问顺序(约束式(18)~(19));②由于无人机载重约束,在异路插入、涉及无人机点的交换中,被插入点/被交换点的选择范围应限定在被优化路线中无人机可服务点集合内;③交换操作中,随机选取被交换点时,首先排除无人机点与超重点的所有交换方式。此外,由于问题存在多重约束,为进一步提高搜索效率,使用禁忌列表节约计算时间:在SA内循环中(每一温度下)使用禁忌列表存储已经进行的操作,以避免重复性邻域搜索和判断,并在每次内循环结束后进行禁忌列表初始化。

以创建新无人机子路径的区域设定为例进行理论分析。设卡车 t 的路径节点数为 c (含首尾仓库),无人机子路径数量为 b (即原发射点与混合点之和),一次搜索中,如果不使用区域设定法,可形成 $(c-1^2)$ 种发射 - 回收组合,否则至多可形成 $(c-b-1)^2$ 种组合(未考虑与卡车行驶方向的一致性),两者之差为: $y=-b^2+2b(c-1)$ 。因为 $0 \le b \le c-1$,所以 y 在该区间单调递增,即当 c 一定时,随着无人机发射次数 b 和迭代次数的增加,计算量持续增加,在考虑方向性时,两者差距更大,同时,无效搜索的增加,会降低解的质量。

4 算例分析

以网站 http://www.bernabe.dorronsoro.es/vrp/上 CVRP 标准算例库中的 A-n32-k5、A-n44-k7、A-n55-k9、A-n69-k9 以及 A-n80-k10 等 5 个算例为基础,对数据集进行改进,分别命名为:M-n32、M-n44、M-n55、M-n69 和 M-n80。改进方法为:设定"超重点"比例为 $10\%(\xi=[n\times10\%])$,将其配送或取货量设定到(3,10),剩余客户的配送量为原来的 0.1,调整至(0,2.5),并为其中 90%的客户在(0,2.5)范围内随机添加取货量,单位均为 kg。同时,将各节点坐标乘以 0.1,单位为 km,以适应无人机载重和续航要求。

相关参数设置:无人机自身质量取 2 kg,最大 承载量取 3 kg,最大载荷下的续航距离取 10 km,电 池单位能耗率 $\alpha = 3$ Wh,则电池可提供的能量为 150 Wh,电池功率取 450 W;卡车最大承载量取 90 kg,里程成本为每 km 1.5 元,设卡车与无人机单位里程成本比 $\beta = 25^{[17]}$,则无人机的单位能耗成本 为 4 元/kWh;卡车和无人机的单位固定费用分别取 30 元和 3 元;卡车行驶速度取 40 km/h,单位客户 点服务时间为 3 min。

本文两阶段算法均由 Python 编程实现;运行环境为 Windows 10 操作系统,处理器为 Intel(R) Core(TM) i7-10750 H CPU @ 2.60 GHz。

4.1 优化结果分析

首先以算例 M-n44 为例,对第 1、2 阶段的优化结果进行比较。所需卡车量为 1,初始解如图 23 所示,卡车里程为 47.11 km,总成本为 105.93 元;最优解如图 24 所示,卡车里程为 33.99 km,总成本为 87.16 元,分别减少 27.85%和 17.72%,总运行时间为 22.14 s,证明了方法的有效性。

进一步,分别通过不同规模算例对设计的方法进行检测。第 1 阶段,初始温度分别取 100、100、100、100、110 和 110 $^{\circ}$,终止温度均为 1 $^{\circ}$,退火系数取 0.98,迭代次数均为 20;第 2 阶段,初始温度均取 100 $^{\circ}$,终止温度均为 1 $^{\circ}$,退火系数取 0.95,迭代次数均为 10。每个算例运算 10 次,取最优,结果如表 1 所示。

表 1 中: Tr/Dr 表示卡车(无人机)使用量; R_1 、 R_2 分别为第 1、2 阶段的卡车里程; C_1 、 C_2 为第 1、2 阶段的总成本; Δ_1 、 Δ_2 为两个阶段卡车里程和总成本改进率,T 为平均运行时间,所有运算均在 1 min内完成。 T_{ntl} 、 T_{nrs} 分别为不使用禁忌列表和区域设定法时的平均运算时间,本文方法的平均优化结果分别为:88.67、94.73、131.16、137.59 和 159.93,不使用禁忌列表时的优化结果与其基本一致,而未使用区域设定法时,平均优化结果分别为:89.23、96.76、133.58、143.07 和 163.37。可以看

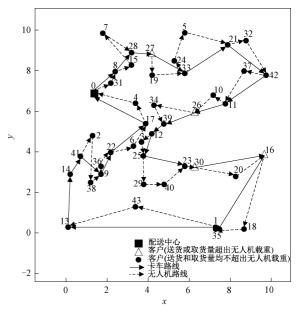


图 23 第 1 阶段初始解

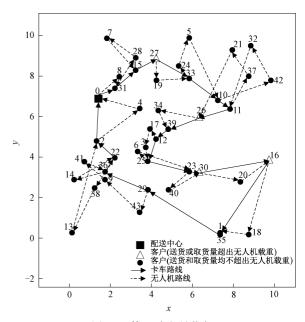


图 24 第 2 阶段最优解

出,两种方法均可以提高运算速度,同时,区域设定法对总成本也有一定优化,且加速效果更明显。

表 1 两阶段优化结果对比

算例	Tr/Dr	R_1/km	R_2/km	$\Delta_1/\%$	$C_1/$ 元	$C_2/$ 元	$\Delta_2/\%$	T/s	$T_{ m ntl}/{ m s}$	$T_{ m nrs}/{ m s}$
M-n32	1	36.00	32. 54	9. 61	88.64	83. 67	5. 61	9. 74	10.26	29.01
M-n44	1	47.11	33. 99	27. 85	105.93	87. 16	17. 72	22. 29	21.23	92.45
M-n55	2	51.79	37. 35	27. 88	145.84	125. 63	13.86	20. 64	22.31	73.50
M-n69	2	61.53	40. 22	34. 63	161.00	130. 32	19.06	27. 65	28.41	99.46
M-n80	2	66.80	52. 37	21.60	168.99	148. 10	12. 36	40. 64	42.36	160.24
均值				24. 31			13. 72			

同时,与卡车单独取送货方式比较,图 25 所示为总成本对比,经两阶段优化,总成本相比卡车单独取送货分别减少 17.00%、26.70%、18.29%、25.37%和

19.74%;图 26 所示为总时间对比,优化后的时间分别 减少 17.09%、16.01%、7.91%、20.04% 和11.99%。由于卡车承载力有限,多卡车-无人机同时

取送货下,随着客户规模的增大,卡车使用量阶段性增加,故时间呈波动变化,即当卡车使用量增加时,总时间因任务的多卡车分担而减少。多卡车模式下,总时间由耗时最长的路线决定,故同一卡车使用量下,总时间先减少后增加。图 27 所示为卡车里程对比,由于无人机的参与,联合模式下卡车里程减少近40%,且随着客户点的增加而增幅较缓。

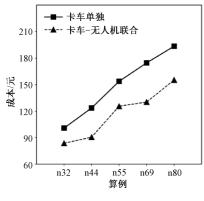


图 25 成本对比

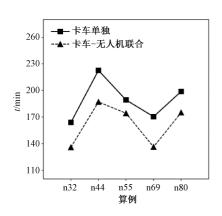


图 26 时间对比

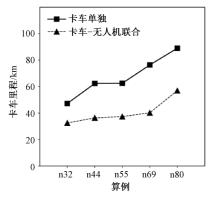


图 27 卡车里程对比

4.2 不同联合取送货模式比较

首先,与无人机具有单位容量(一次服务一个客户)时卡车-无人机联合取送货模式(简称"无人机单位容量模式")比较,以算例 M-n69 为例,图 28 所示为无人机单位容量模式,总成本为 140.97 元,卡车

里程为 47.11 km,无人机服务的客户量为 31;图 29 所示为本文模式,总成本为 130.32 元,卡车里程降至 40.22 km,无人机服务客户量达 41。显然,本文模式能够有效发挥无人机运力,节省总成本。

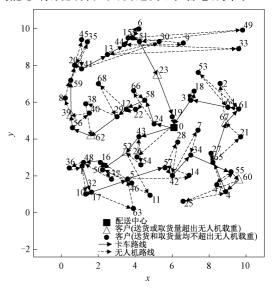


图 28 无人机单位容量模式

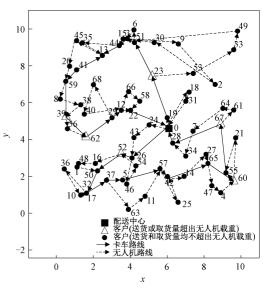


图 29 本文模式

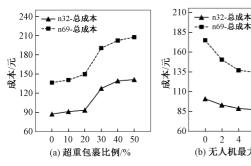
进一步,与无人机不参与取货时,卡车-无人机 联合配送模式比较。以算例 M-n32 为例,将取货量 pick 分别设定为 10 和 20。遵循同时取送、每个客 户只访问一次的原则,针对不同取货量,分别运算 10 次取最优,最优路径如表 2 所示。

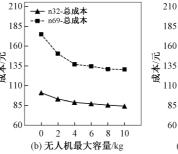
由表 2 可见: 当 pick=10 时,无人机不取货模式的总成本为 86.85 元,总时间为 134.71 min,卡车里程为 35.05 km,无人机服务量为 15;本文模式的总成本为 83.41 元,总时间为 125.00 min,卡车里程为 32.56 km,无人机服务量为 16。当 pick=20 时,无人机不取货模式的总成本为 102.57 元,总

	无人机不!	取货模式	本文模式		
	卡车路径	无人机路径	卡车路径	无人机路径	
pick=10	0→30→16→7→13→19→	30→12→26→16	0→30→16→7→13→19→17	16→12→26→7	
	$17 \rightarrow 2 \rightarrow 23 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 15 \rightarrow 10$	16→1→7	$\rightarrow 2 \rightarrow 23 \rightarrow 28 \rightarrow 18 \rightarrow 15 \rightarrow 10$	7 → 1 → 13	
	→ 25 → 29 → 14 → 24 → 32	7 → 21 → 31 → 13	→ 25 → 27 → 24 → 32	$13 \rightarrow 21 \rightarrow 31 \rightarrow 19$	
		2→3→6→23		17→6→3→2	
		23→28→4		23→4→28	
		4→11→8→18→22→9		28→11→8→18	
		25→5→29		18→9→22→29→15	
		24→27→20→32		$25 \rightarrow 5 \rightarrow 20 \rightarrow 14 \rightarrow 27$	
pick=20	$0 \rightarrow 30 \rightarrow 16 \rightarrow 7 \rightarrow 13 \rightarrow 21 \rightarrow$	$16 \rightarrow 12 \rightarrow 26 \rightarrow 7$	$0 \rightarrow 30 \rightarrow 16 \rightarrow 1 \rightarrow 21 \rightarrow 19 \rightarrow 17$	30→12→16	
	$19 \rightarrow 17 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 23 \rightarrow 4 \rightarrow 11$	7→1→13	$\rightarrow 3 \rightarrow 23 \rightarrow 28 \rightarrow 22 \rightarrow 15 \rightarrow 10$	16→7→1	
	$\rightarrow 8 \rightarrow 18 \rightarrow 9 \rightarrow 15 \rightarrow 29 \rightarrow 10$	21 → 31 → 19	$\rightarrow 25 \rightarrow 5 \rightarrow 24 \rightarrow 14 \rightarrow 32$	1→13→21	
	\rightarrow 25 \rightarrow 5 \rightarrow 20 \rightarrow 27 \rightarrow 24 \rightarrow 14	23→28→4		17→31→2→3	
	→ 6 → 32	9→22→15		23→4→28	
				28→11→8→18→22	

表 2 两种模式卡车-无人机最优路径

时间为 148.57 min,卡车里程为 46.06 km,无人机 配送量为 6;本文模式的总成本为 84.84 元,总时间 为 131.61 min,卡车里程为 33.27 km,无人机服务 量为 15,在成本、时间和卡车里程上分别减少 17.29%、11.42%和 27.77%。可见,无人机不取货 模式对取货量敏感,无人机参与取送程度不同,直接 影响总成本,本文提出的同时取送货模式,能够更有 效地利用无人机,实现成本和时间节约。





4.3 灵敏度分析

为识别关键参数的影响,参照文献[7,17]和前面的算例分析,选取超重点比例(ξ)、无人机最大容量(W)、无人机电池最大能量(F)和卡车-无人机单位里程成本比(β)4个参数,每个参数设置6个级别,基于算例 M-n32、M-n69,共生成48种场景进行测算,每个场景运行10次的平均结果如图30所示。由图30可以看出,较大规模算例对参数更敏感。

 $22 \rightarrow 9 \rightarrow 29 \rightarrow 15$ $24 \rightarrow 27 \rightarrow 20 \rightarrow 24$ $14 \rightarrow 6 \rightarrow 26 \rightarrow 32$

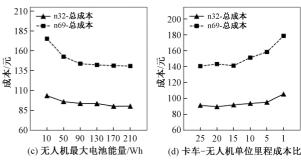


图 30 4 个参数对成本的影响

图 30(a)所示为超重点比例对成本的影响。可出看出,随着超重点比例的增加,无人机可取送包裹量减少,总成本增加,更接近卡车单独取送货模式。无人机最大容量变化对成本的影响如图 30(b)所示。随着无人机载荷能力的提高,成本下降,特别是当容量为紧约束时(W≤4kg),成本下降幅度最大。无人机电池能量对成本的影响如图 30(c)所示。随着电池能量的增加,成本呈先快后慢的下降趋势。图 30(d)说明,无人机的飞行成本直接影响总成本,当无人机能耗成本较高时,无人机使用率下降,成本增加,卡车-无人机联合取送货模式的成本优势基于无人机低成本特点。综上可知,在超重点较少,无人

机容量和电池能量较大,且里程成本较低时,性能最好,无人机优势更明显,总成本较低。

4.4 "最大重量判断法"对算法效率影响

以算例 M-n80 为例对本文提出的"最大重量判断法"算法效率进行测试。随机初始解的平均优化结果为 179.88 元,平均运行时间 60.65 s;而使用MW 法的平均优化结果为 159.93 元,平均运行时间 40.64 s,结果更优。

在图 31 中,左图为采用 MW 法进行卡车单独 取送货初始解构造,右图为随机初始解。由图 31 可 以看出,本文提出的 MW 法在迭代开始阶段便将卡 车里程优化到一个近似最优的位置,而随机初始解

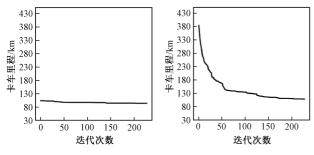


图 31 第 1 阶段卡车里程优化

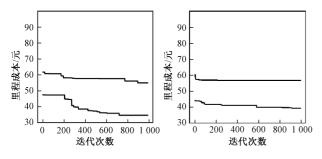


图 32 第 2 阶段里程成本优化

虽收敛较快,但距离 MW 法仍有差距。图 32 所示为第 2 阶段两条路径里程成本优化结果,MW 法避免了第 2 阶段卡车载重的多次判断,增大了无人机路径解空间,加快收敛速度,结果更优。而随机初始解,在第 2 阶段的每次搜索中,均需考虑卡车承载力限制,解搜索空间较小,优化效果不明显。可见,本文提出的 MW 法能有效提升解收敛效率和效果。同时,不使用 MW 法构造和始解时,第 2 阶段

同时,不使用 MW 法构造初始解时,第 2 阶段的每次搜索需要进行卡车各节点载重判断,基于动态规划思想,构造判断函数。如图 33 所示,针对每条卡车路线,建立状态集合 statel、state2,每个节点内由于取送货及发射或回收无人机,卡车载重存在多个中间状态,取最大载重存入 state1(不考虑到达该点时的初始载重),最终载重存入 state2,则卡车载重的判断条件为:max(state1)《Q。其中,state2用于节点间载重状态转移,前一点的最终载重为后一点的初始载重,用于计算 state1。

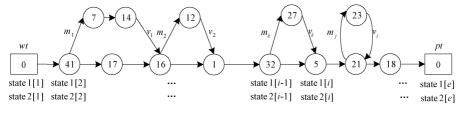


图 33 卡车载重计算示意图

设卡车路线 t 的总配送量为 wt,总取货量为 pt, m_j 和 v_j 分别为路线 t 无人机子路径 j 的总配送 和总取货量, $tj = \{j \mid j = 1, 2, \cdots, p\}$ 为路线 t 所有无人机子路径的集合;第 i 阶段(节点)的最终载重状态变量为 x_i , $f_i(x_i)$ 和 $f_i'(x_i)$ 分别为第 i 阶段的卡车最终载重和最大载重,t(i) , $i = 1, 2, \cdots$, e 为路线 t 第 i 阶段对应的节点。如果 t(i) 为组合点,则 m_k 、 v_k 分别为 t(i) 所在无人机子路径的总配送和总取货量;如果 t(i) 同时为两个无人机子路径的汇合点, m_k 和 v_k 对应于其中前一无人机子路径的总配送和总取货量,则初始最终载重状态为

$$f_1(x_1) = \begin{cases} wt, & t(0) \in \text{tp} \\ wt - m_1, & t(0) \in \text{spt} \\ wt - m_1 + v_1, & t(0) \in \text{sst} \end{cases}$$
 (29)

对应的初始最大载重为: $f_1'(x_1) = f_1(x_1)$, 则最终载重状态转移方程为 $(1 < i \le e)$

$$f_{i}(x_{i}) = \begin{cases} f_{i-1}(x_{i-1}) + \mu_{i}, & t(i) \in \text{tp} \\ f_{i-1}(x_{i-1}) + \mu_{i} - m_{k}, \\ t(i) \in \text{spt}, & k \in tj \end{cases}$$

$$f_{i-1}(x_{i-1}) + \mu_{i} + v_{k},$$

$$t(i) \in \text{lpt}, & k \in tj \end{cases}$$

$$f_{i-1}(x_{i-1}) + \mu_{i} - m_{k} + v_{k},$$

$$t(i) \in \text{sst}, & k \in tj \end{cases}$$

$$f_{i-1}(x_{i-1}) + \mu_{i} + v_{k} - m_{k+1},$$

$$t(i) \in \text{sdt}, & k \in tj \setminus \{p\}$$

对应的最大载重为 $(1 < i \le e)$ $f'_i(x_i) =$

$$\begin{cases} f_{i}(x_{i}), & t(i) \in \text{tp} \\ f_{i-1}(x_{i-1}) + \mu_{i}, & t(i) \in \text{spt} \\ \max\{f_{i-1}(x_{i-1}) + v_{k}, & f_{i}(x_{i})\}, \\ t(i) \in \text{lpt}, & k \in tj \\ f_{i}(x_{i}), & t(i) \in \text{sst} \\ \max\{f_{i-1}(x_{i-1}) + \mu_{i} + v_{k}, \\ f_{i-1}(x_{i-1}) + v_{k}\}, \\ t(i) \in \text{sdt}, & k \in tj \setminus \{p\} \end{cases}$$
(31)

5 结语

本文基于无人机轻量、成本低、受地面交通状况影响少的特点,针对正逆向物流优化问题,考虑同时取送、无人机电池能耗随载重变化、无人机一次飞行可取送多个包裹等因素,提出卡车-无人机联合取送货模式,构建两阶段求解方法:提出"最大重量判断法"构造初始可行解,为卡车指派取送货任务并确定卡车使用数量;采用基于节点特征的改进模拟退火算法进一步优化卡车-无人机路径,最小化总成本。仿真结果验证了两阶段算法的有效性,提出的卡车-无人机联合取送货模式较其他模式可有效减少总成本,"最大重量判断法"显著提高了算法收敛速度和效果,对实际情况中卡车-无人机联合取送货问题的解决有指导和借鉴意义。未来的研究将考虑取送货的时间窗因素,进一步优化总时间。

参考文献:

- [1] MOSHREF-JAVADI M, HEMMATI A, WINKENBACH M. A truck and drones model for last-mile delivery: A mathematical model and heuristic approach [J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 80: 290-318.
- [2] CHUNG S H, SAH B, LEE J. Optimization for drone and drone-truck combined operations: A review of the state of the art and future directions [J]. Computers and Operations Research, 2020, 123: 105004.
- [3] WANG X, POIKONEN S, GOLDEN B. The vehicle routing problem with drones: Several worst-case results[J]. Optimization Letters, 2017, 11(4): 679-697.
- [4] POIKONEN S, WANG X, GOLDEN B. The vehicle routing problem with drones: Extended models and connections [J]. Networks, 2017, 70(1): 34-43.
- [5] MURRAY C C, CHU A G. The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery[J]. Transportation Research Part C, 2015, 54: 86-109.
- [6] AGATZ N, BOUMAN P, SCHMIDT M. Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone [J]. Transportation Science, 2018, 52(4): 965-981.
- [7] SACRAMENTO D, PISINGER D, ROPKE S. An adaptive large neighborhood search metaheuristic for

- the vehicle routing problem with drones [J]. Transportation Research Part C, 2019, 102: 289-315
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] MARINELLI M, CAGGIANI L, OTTOMANELLI M, et al. En route truck-drone parcel delivery for optimal vehicle routing strategies[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2018, 12(4): 253-261.
- [11] PEDRO L, GONZALE Z R, CANCA D, et al.

 Truck-drone team logistics: A heuristic approach to multi-drop route planning [J]. Transportation Research Part C, 2020, 114(7): 657-680.
- [12] POIKONEN S, GOLDEN B. Multi-visit drone routing problem [J]. Computers and Operations Research, 2020, 113; 104802.
- [13] KITJACHAROENCHAI P, MIN B C, LEE S. Two echelon vehicle routing problem with drones in last mile delivery[J]. International Journal of Production Economics, 2020, 225; 107598.
- [14] TORABBEIGI M, LIM G J, KIM S J. Drone delivery scheduling optimization considering payload-induced battery consumption rates [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2020, 97: 471-487.
- [15] 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.
- [16] JEONG H Y, SONG B D, LEE S. Truck-drone hybrid delivery routing: Payload-energy dependency and no fly zones [J]. International Journal of Production Economics, 2019, 214: 220-233.
- [17] LIU Y, LIU Z, SHI J, et al. Two-echelon routing problem for parcel delivery by cooperated truck and drone[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(12): 7450-7465.
- [18] GENDREAU M, LAPORTE G, VIGO D. Heuristics for the traveling salesman problem with pickup and delivery [J]. Computers & Operations Research, 1999, 26: 699-714.