

有禁飞区的时间依赖型车辆与无人机协同配送路径优化

范厚明[†], 甘 兰, 张跃光, 白 雪

(大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 本文针对有禁飞区的时间依赖型车辆与无人机协同配送路径问题, 综合考虑分时段禁飞的无人机禁飞区域、车辆行驶速度连续变化、车辆及无人机能耗等因素, 以车辆派遣成本、车辆能耗成本、无人机能耗成本之和最小为目标建立优化模型. 根据问题特征, 设计遗传变邻域搜索算法对其进行求解. 针对遗传算法易早熟、局部搜索能力较差等缺陷, 将变邻域搜索算法与其结合以增强算法的局部搜索能力, 引入自适应邻域搜索次数以增强对种群的搜索深度, 采用精英保留策略不断改进最优解. 通过多组算例验证了算法的有效性, 并分析了配送模式、禁飞区数量、车辆行驶速度变化对配送方案的影响, 结果表明禁飞区及车辆速度等因素在很大程度上影响物流配送成本. 研究成果不仅丰富了车辆与无人机协同配送的场景, 拓展了VRP问题的研究, 也为物流企业制定配送方案提供了依据.

关键词: 禁飞区; 时间依赖型; 车辆与无人机协同配送; 遗传变邻域搜索算法

引用格式: 范厚明, 甘兰, 张跃光, 等. 有禁飞区的时间依赖型车辆与无人机协同配送路径优化. 控制理论与应用, 2024, 41(2): 321 – 330

DOI: 10.7641/CTA.2022.20249

Time-dependent vehicle routing problem with drones considering no-fly zones

FAN Hou-ming[†], GAN Lan, ZHANG Yue-guang, BAI Xue

(College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: The paper is about the time-dependent vehicle routing problem with drones considering no-fly zones. We take the factors such as the no-fly zones of drones, continuous change of vehicle speed, the energy consumption of vehicles and drones into account. To minimize the sum of vehicle fixed cost, energy consumption cost of vehicles and energy consumption cost of drones, an optimization model is presented to describe the problem. We combine variable neighborhood search algorithm with genetic algorithm to enhance the local search ability of the algorithm and address the defects of genetic algorithm such as premature maturity and poor local search ability. At the same time, the adaptive neighborhood search number is introduced to enhance the search depth of the population, and the elite retention strategy is used to continuously improve the optimal solution. The effectiveness of the algorithm is verified through multiple sets of arithmetic cases, and the effects of distribution mode, the number of no-fly zones, vehicle speed variation on the delivery scheme are analyzed. The results show that the factors such as time-varying no-fly zones and vehicle speed largely affect the delivery cost. The research results not only enrich the scenarios of cooperative delivery of vehicles and drones, expand the research of VRP problems, but also provide a basis for logistics enterprises to develop delivery plans.

Key words: no-fly zones; time-dependent; vehicle routing problem with drones; genetic algorithm and variable neighborhood search

Citation: FAN Houming, GAN Lan, ZHANG Yueguang, et al. Time-dependent vehicle routing problem with drones considering no-fly zones. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(2): 321 – 330

1 引言

无人机飞行速度快、不受道路条件限制等优势引起了物流企业经营者的广泛关注. 一些企业陆续针对无人机送货展开实验: 2013年亚马逊采用8桨遥控无人机在30分钟内实现了1.6公里范围内客户的配送.

2014年, DHL宣布将在德国实现无人机送货, 该公司的四旋翼无人机可载重1.2 kg, 飞行时长可达45分钟. 2020年2月13日, 顺丰公司在武汉疫情期间派出3架无人机, 执行了18架次(往返)物资运输投送任务. 这些企业的成功实践引起了学者们的广泛关注, 也使得无人

收稿日期: 2022-04-08; 录用日期: 2022-08-02.

[†]通信作者. E-mail: fhm468@163.com.

本文责任编辑: 孙长银.

国家社科基金应急管理建设研究专项项目(20VYJ024)资助.

Supported by the National Social Science Fund Emergency Management System Construction Research Project (20VYJ024).

机配送成为近年来的热点问题. 随着对无人机配送问题研究的深入, 人们发现无人机载重量小、飞行距离有限, 不可能在城市物流配送中完全取代运输车辆独立完成多个客户的配送任务, 而其与车辆协同配送会使两种运输工具优势互补, 能在很大程度上提高配送效率. 然而, 目前, 城市交通拥堵现象严重, 交通流的时空差异使得配送车辆的行驶速度不断变化, 对物流配送方案的制定产生较大影响. 同时, 现实中, 如机场、大型工厂、人群密集处等往往设有大小不同、分时段禁飞的无人机禁飞区域, 当禁飞区处于禁飞时段内时, 无人机经过此区域时需绕行通过, 该区域内的客户需由车辆进行服务. 因此, 本文针对有禁飞区的时间依赖型车辆与无人机协同配送路径优化问题展开研究, 具有重要的理论与现实意义.

针对时间依赖型车辆路径问题 (time-dependent vehicle routing problem, TDVRP) 的研究中, 李楠等^[1]针对多时间窗的车辆路径问题, 综合考虑交通拥堵情况, 以配送成本最小化为目标建立模型, 并设计混合离散灰狼算法进行求解. 段征宇等^[2]针对TDVRP问题, 以车辆数量最小化为目标建立模型, 设计改进蚁群算法进行求解. 范厚明等^[3]针对具模糊需求下时间依赖型车辆路径问题, 以配送距离最短为目标建立模型, 设计自适应大规模邻域搜索算法进行求解. Huang等^[4]针对具有路径柔性的TDVRP问题, 建立了确定和随机交通条件下的TDVRP-概率模型, 设计一种路线-路径近似方法进行求解. Kumar和Panneerselvam^[5]针对TDVRP问题, 以最小化总行驶距离及使用车辆总数最小化为目标建立模型, 并设计高效遗传算法进行求解. 针对时间依赖型电动车辆配送路径问题的研究中, Lu等^[6]考虑了充电决策、拥堵状况以及其他传统因素, 以配送总成本最小化为目标建立模型, 并设计变邻域搜索算法对模型进行求解. Wang等^[7]考虑不同时段电动车行驶速度不同, 以总行程最短为目标建立混合整数规划模型, 设计改进变邻域算法对其求解. 赵志学和李夏苗^[8]根据时变交通路网特点, 综合考虑客户对生鲜产品最低新鲜度约束、车辆载重约束和电动车电量约束, 以配送总成本最小为目标建立模型, 设计自适应蚁群算法进行求解.

针对车辆与无人机协同配送路径问题 (vehicle routing problem with drones, VRPD) 的研究中, Tamke和Buscher^[9]针对具有两个不同时间目标函数的VRPD问题, 提出一种新的混合整数线性规划 (mixed integer linear programming, MILP) 模型, 设计分支切割算法进行求解. Euchi和Sadok等^[10]提出了一个MILP模型并设计混合遗传算法对其求解. Gonzalez等^[11]针对VRPD, 综合考虑无人机电池续航因素, 以配送时间最小化为目标构建模型, 设计基于解的分解和重构迭代过程的迭代贪婪启发式算法, 对串联式车辆与无人机

协同配送路径问题进行求解. Schermer等^[12]在给定现有卡车路线的情况下寻求无人机的最优分配和调度, 以配送时间最小化为目标, 将VRPD描述为一个混合整数线性规划并引入几组有效不等式, 提出一种有效利用VRPD问题结构的数学方法. Mario^[13]等提出车辆和无人机不仅可在客户节点处进行对接, 还可在行驶路途中任意位置对接, 并设计启发式算法进行求解. Boysen等^[14]研究了卡车携带多无人机配送问题, 建立了混合整数规划模型, 设计启发式算法进行求解. Ham^[15]研究了带时间窗的多车辆多无人机协同配送问题, 以配送时间最小化为目标建立模型, 设计变量排序启发式算法求解. 针对带无人机禁飞区的VRPD问题, 朱晓宁等^[16]同时考虑道路限行和空域禁飞等因素, 以配送时间最小化为目标, 构建混合整数线性规划模型, 设计最短路算法和禁忌搜索算法相结合的混合算法对其求解. Jeong等^[17]考虑包裹重量对电池的影响及禁飞区绕行等因素, 以配送时间最小化为目标建立模型, 设计构造性和搜索性启发式算法对模型求解.

通过对以上文献的梳理可知, 现有TDVRP, VRPD的相关研究已取得一定的成果, 对本文研究具有重要指导意义, 但有关VRPD的研究中还存在以下不足: 1) 针对车辆与无人机协同配送路径问题, 现有研究多为车辆速度恒定, 未考虑高峰时段以及道路环境变化对车辆行驶速度的影响. 2) 关于考虑无人机禁飞区的车辆与无人机协同配送的研究, 大多只考虑全天禁飞且未考虑无人机绕行, 而现实中禁飞区往往设有不同的禁飞时段, 且在此时段内无人机可绕行通过. 3) 文献[17]虽然考虑了设有不同禁飞时段的禁飞区, 但其只考虑了绕行, 未考虑禁飞时段外无人机可为区域内客户点服务, 以及车辆速度变化对到达禁飞区时间的影响. 针对以上不足, 本文采用电动车辆与无人机协同配送模式, 考虑配送区域含有时间依赖型禁飞区域、车辆速度随时间连续变化及车辆和无人机能耗等因素, 以车辆派遣成本、车辆能耗成本以及无人机能耗成本之和最小为目标, 建立有禁飞区的时间依赖型车辆与无人机协同配送路径优化 (TDVRP with drones considering no-fly zones, TDVRPD-NFZ) 模型, 并结合遗传算法和变邻域搜索算法的优势, 设计遗传变邻域搜索算法求解.

2 问题描述及模型建立

2.1 问题描述

配送中心有若干配送电动车和无人机, 每辆车搭载一架无人机对客户点进行协同配送, 具体协同方式如下所述: 车辆在客户点 (配送中心) 处为其携带的无人机装载货物并放飞, 然后, 车辆继续前往下一客户点配送, 无人机对其他客户点配送后前往下一客户处

与车辆汇合, 其中, 无人机所服务客户点需求量均需满足其载重限制, 且无人机在每次配送后返回降落点时的剩余电量需满足其最低荷电状态限制. 若在配送过程中, 禁飞区在禁飞时段内, 则此区域内的客户只能由车辆进行配送, 否则可由车辆和无人机协同配送. 同时, 若无人机在对禁飞区外的客户点配送过程中经过在禁飞时段中的禁飞区, 则无人机需绕行通过. 完成所有配送任务后, 车辆和无人机返回配送中心. 如图1所示, 车辆1和无人机从配送中心出发, 车辆1对客

户1进行配送并在客户1处释放无人机, 无人机对客户2进行配送, 车辆1在客户3处回收无人机并为其装载货物进行不在禁飞时限内的禁飞区1中的客户4的配送, 车辆1在客户5处回收无人机进行后续配送. 由于客户18和客户19的连线经过处于禁飞时段内的禁飞区2, 因此, 车辆2对应的无人机需绕行, 车辆3到达禁飞区2时, 其不在禁飞时段内, 因此无人机可参与配送. 所有车辆和无人机完成配送任务后, 返回配送中心.

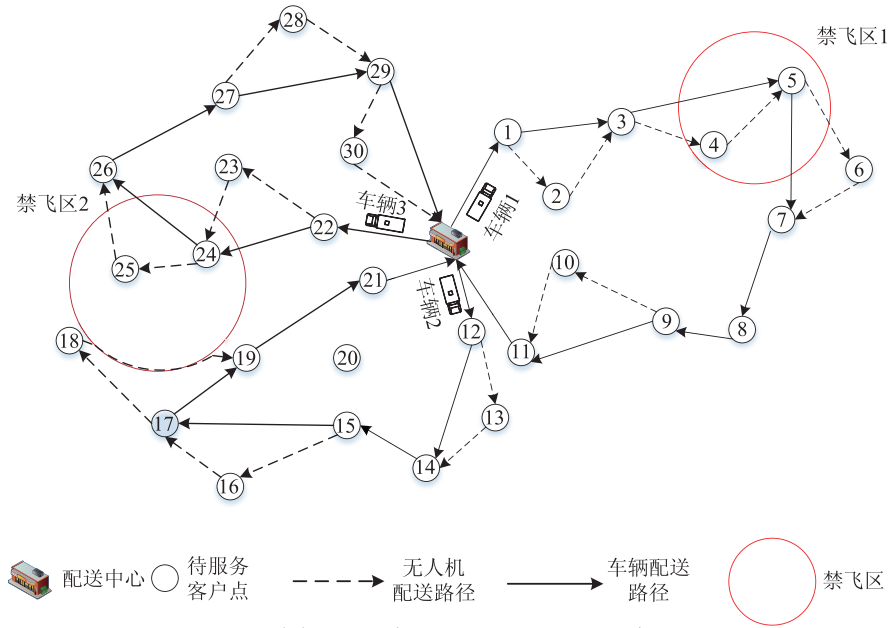


图 1 车辆与无人机协同配送路径优化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the optimization of vehicle routing problem with drones

基于以上分析和描述可知, 本文模型涉及的参数和变量符号说明如下:

1) 输入参数.

V : $V = \{0\} \cup V_c$ 为所有节点集合, 其中: 0 为配送中心, V_c 表示客户点集合;

H : 禁飞区集合, h 为任一禁飞区, $h \in H$;

$[T_h^s, T_h^f]$: 禁飞区 h 的禁飞时段;

l_{ij} : i, j 两点的欧氏距离, 单位 km;

l_{ij}^k : $l_{ij}^k = \omega l_{ij}$ 表示车辆从客户点 i 到客户点 j 的行驶距离, ω 为道路迂回系数;

l_{ij}^u : 无人机由节点 i 到节点 j 的飞行距离, 若经过在禁飞时限内的禁飞区 h , 则具体计算详见第 1.4 节所述; 否则 $l_{ij}^u = l_{ij}$;

K : K 为车辆集合, k 为任一车辆, $k \in K$;

u_k : 车辆 k 携带的无人机;

d_i : 客户点 i 的需求量;

Q_k : 车辆装载能力, 单位 kg;

Q_u : 无人机装载能力, 单位 kg;

B_k : 电动车的电池容量, 单位 kW·h;

B_u : 无人机的电池容量, 单位 kW·h;

ε : 配送过程中电动车和无人机电池允许的最低荷电状态;

v_u : 无人机的飞行速度, 单位 km/h;

t_u^1 : 无人机更换电池及货物装载时长, 单位 h;

t_u^2 : 无人机由客户点上升到飞行高度或由飞行高度下降到客户点所需时长, 单位 h;

c_1 : 单位车辆(含所配无人机)派遣成本, 单位元/辆;

c_2 : 每度电的价格, 单位元/(kW·h).

2) 中间变量.

e_{kij} : 车辆 k 由节点 i 行驶至节点 j 的耗电量, 单位 kW·h;

$e_{u_k ij}$: 无人机 u_k 由节点 i 行驶至节点 j 的耗电量(包括上升和下降时的耗电量), 单位 kW·h;

$e_{u_k i}^1$: 无人机 u_k 在节点 i 的盘旋耗电量, 单位 kW·h;

T_{ki}^a : 车辆 k 到达节点 i 的时刻;

T_{ki}^d : 车辆 k 离开节点 i 的时刻;

$T_{u_k i}^a$: 无人机 u_k 到达节点 i 的时刻;

$T_{u_k i}^d$: 无人机 u_k 离开节点 i 的时刻;

t_{kij} : 车辆在节点 i 和节点 j 之间的行驶时间, 单位h;

$t_{u_k i}^1$: 无人机 u_k 在节点 i 的盘旋时间, 单位h;

t_{si} : 车辆在客户点 i 所需服务时长, 单位h;

n_{ik} : 客户点 i 在车辆 k 路线中的位置($1 \leq n_{ik} \leq |V|$).

3) 决策变量.

x_{kij} : 表示车辆 k 是否由节点 i 到节点 j , 节点 i 与 j 为车辆 k 路线中相邻的两个节点, 是为1, 否为0;

$x_{u_k iwj}$: 表示无人机 u_k 是否在节点 i 离开车辆前往 w ($w \neq i$) 服务后在节点 j 返回到车辆 k , 是为1, 否为0, 其中, 无人机路径为 (i, w, j) , 当无人机发射和返回节点相同时, 无人机路径为 (i, w, i) ;

y_{kij} : 表示节点 i 是否在节点 j 之前被车辆 k 访问, 是为1, 否为0;

$z_{u_k ijh}$: 表示无人机从节点 i 到节点 j 是否经过在禁飞时段内的禁飞区 h , 是为1, 否为0;

$z_{u_k ih}$: 表示无人机 u_k 到达或离开节点 i 是否在其所在禁飞区 h 的禁飞时段内, 是为1, 否为0.

2.2 时间依赖函数

现有文献大多采用分段函数来描述车辆速度的变化, 而现实中车辆速度并非阶跃变化, 本文考虑速度随时间连续变化, 速度时变函数采用文献[18]中形式, 具体函数式如下:

$$v(t) = v_1 - a_1 \left(\frac{e^{-\frac{(t-t_1)^2}{b_1}}}{\sqrt{2\pi}} \right) - a_2 \left(\frac{e^{-\frac{(t-t_2)^2}{b_2}}}{\sqrt{2\pi}} \right) - a_3 \left(\frac{e^{-\frac{(t-t_3)^2}{b_3}}}{\sqrt{2\pi}} \right), \quad (1)$$

式中: v_1 为道路最大限速; $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ 为路况参数, 取值与道路状况有关; t_1, t_2, t_3 为车流高峰时刻.

车辆 k 在 T_{ki}^d 时刻从节点 i 离开, 到达节点 j 的时刻为 T_{kj}^a , 则有

$$l_{ij}^k = \int_{T_{ki}^d}^{T_{kj}^a} \left(v_1 - a_1 \left(\frac{e^{-\frac{(t-t_1)^2}{b_1}}}{\sqrt{2\pi}} \right) - a_2 \left(\frac{e^{-\frac{(t-t_2)^2}{b_2}}}{\sqrt{2\pi}} \right) - a_3 \left(\frac{e^{-\frac{(t-t_3)^2}{b_3}}}{\sqrt{2\pi}} \right) \right) dt. \quad (2)$$

已知(2)中的 T_{ki}^d 和 l_{ij}^k , 可求积分上限得到 T_{kj}^a , 则 k 在节点 i 和 j 之间行驶的时间 $t_{ij} = T_{kj}^a - T_{ki}^d$.

2.3 能耗函数

2.3.1 车辆能耗函数

车辆在配送过程中的所产生的能耗成本主要与车辆速度、电机状态和逆变器效率有关, 综合考虑以上因素, 本文采用文献[19]中提出的车辆能耗函数, 即车

辆 k 载重为 Q_{kij} 时从节点 i 行驶至节点 j 所消耗的能量如下式所示:

$$e_{kij} = \int_{T_{ki}^d}^{T_{kj}^a} \frac{((Q_{kij} + m)gf + \frac{C_D A v^2}{21.15} + \delta a_{ij}(Q_{kij} + m))v}{3600 \eta_T \eta_V \eta_m} dt. \quad (3)$$

式中: C_D 为空气动力阻力系数, g 为重力加速度, f 为滚动摩擦系数, A 为车辆迎风面积, δ 为车辆旋转质量转换系数, a_{ij} 为加速度, η_T 为传输系统效率, η_V 为逆变器效率, η_m 为电动机的效率.

2.3.2 无人机能耗函数

无人机在配送过程中的成本主要为电池的能量消耗, 无人机的飞行能耗与无人机的载重、飞行速度、螺旋桨性能相关. 当无人机 u_k 从节点 i 飞至需求量为 d_j 的节点 j 配送这一过程的飞行功率和能耗表达式如下式所示^[20]:

$$P_{u_k ij} = \frac{(W + d_j)v_u}{370 \eta \gamma} + e_0, \quad (4)$$

$$e_{u_k ij} = P_{u_k ij} \left(\frac{l_{ij}^u}{v_u} + 2t_u^2 \right), \quad (5)$$

式中: W 为无人机自重, v_u 为无人机速度, η 为螺旋桨动力传递效率, γ 为无人机飞行升阻比, e_0 为无人机电子元器件能耗.

当无人机 u_k 在节点 i 盘旋时, 设盘旋时间为 $t_{u_k i}^1$, 其功率和能耗计算如下式所示^[21]:

$$P_{u_k i}^1 = k(W + m)^{\frac{3}{2}}, \quad (6)$$

$$e_{u_k i}^1 = P_{u_k i}^1 t_{u_k i}^1, \quad (7)$$

式(6)中: k 为环境系数, m 为电池重量.

2.4 无人机绕行决策

图2总结了当无人机从 i 到 w 经过禁飞区 h 时不同情况的绕行决策. 当无人机从 i 到 w 经过禁飞区 h 且在禁飞时段外则按照图2(a)所示轨迹飞行, 若有客户点在禁飞区内且处于禁飞时段外时则按照图2(b)所示轨迹飞行. 当无人机从 i 到 w 经过禁飞区 h 且在禁飞区时段内则需按照图2(c)所示沿其边缘旋转绕行, 当存在客户点处于禁飞区内且处于禁飞时限内时, 如图2(d)所示, 无人机不能提供服务, 由车辆完成配送任务.

设圆心角为 θ_{ijh} , 无人机沿禁飞区 h 旋转路线长度为 l'_{ijh} , 两节点连线与禁飞区边缘两个交点之间的距离为 l''_{ij} , 无人机额外绕行距离为 l_{ijh} , 则无人机在两节点间的飞行距离 l_{ij}^u 如下式所示^[17]:

$$l_{ijh} = l'_{ijh} - l''_{ij} = \left(\frac{2\pi r_h}{360} \min(\theta_{ijh}, 360 - \theta_{ijh}) - l''_{ij} \right), \quad (8)$$

$$l_{ij}^u = l_{ij} + \sum_{h \in H} l_{ijh} z_{u_k i j h}. \quad (9)$$

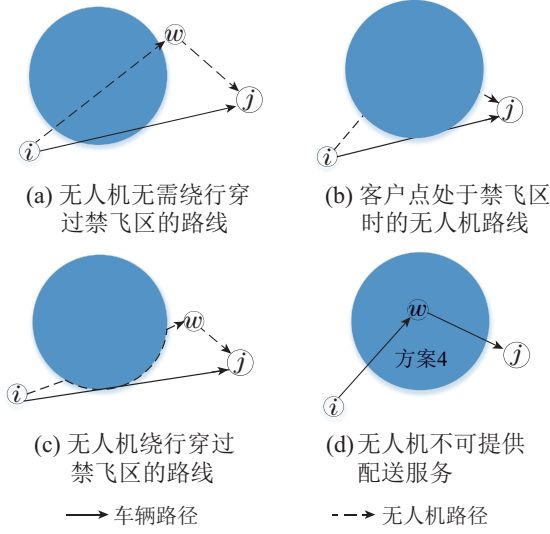


图2 无人机禁飞区决策示意图

Fig. 2 Schematic diagram of drone no fly zone decision

2.5 模型建立

2.5.1 模型假设

1) 车辆在行驶途中不能发射或回收无人机, 只能在客户节点或配送中心处发射或回收无人机. 2) 假设禁飞区形状均为规则圆形, 且禁飞区域间无重叠部分. 3) 无人机降落后放下货物即可起飞, 耗时短, 暂不考虑无人机在客户点的服务时间.

2.5.2 数学模型

目标函数为

$$C = \min c_1 \sum_{j \in V_c} \sum_{k \in K} x_{k0j} + c_2 \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} e_{kij} x_{kij} + c_2 \sum_{i \in V} \sum_{w \in V_c} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} (e_{u_k iw} + e_{u_k wj} + e_{u_k j}^1) x_{u_k iwj}, \quad (10)$$

s.t.

$$\sum_{i \in V} \sum_{k \in K} x_{k i w} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{u_k i w j} = 1, \quad \forall w \in V_c, \quad (11)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V_c} d_j x_{kij} + \sum_{i \in V} \sum_{w \in V_c} \sum_{j \in V} d_w x_{u_k iwj} \leq Q_k, \quad \forall k \in K, \quad (12)$$

$$\sum_{i \in V} x_{kij} = \sum_{i \in V} x_{kji} \leq 1, \quad \forall k \in K, \quad \forall j \in V_c, \quad (13)$$

$$\sum_{i \in V_c} x_{k0i} = \sum_{i \in V_c} x_{ki0} \leq 1, \quad \forall k \in K, \quad (14)$$

$$B_k - \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} e_{kij} x_{kij} \geq B_k \varepsilon, \quad \forall k \in K, \quad (15)$$

$$d_w x_{u_k iwj} \leq Q_u, \quad \forall i \in V, \quad \forall w \in V_c, \quad \forall j \in V, \quad \forall k \in K, \quad (16)$$

$$B_u - (e_{u_k iw} + e_{u_k wj} + e_{u_k j}^1) x_{u_k iwj} \geq B_u \varepsilon,$$

$$\forall i \in V, \quad \forall w \in V_c, \quad \forall j \in V, \quad \forall k \in K, \quad (17)$$

$$z_{u_k ih} + x_{u_k iwj} \leq 1, \quad \forall i \in V, \quad \forall w \in V_c, \quad \forall j \in V, \quad \forall k \in K, \quad \forall h \in H, \quad (18)$$

$$z_{u_k wh} + x_{u_k iwj} \leq 1, \quad \forall i \in V, \quad \forall w \in V_c, \quad \forall j \in V, \quad \forall k \in K, \quad \forall h \in H, \quad (19)$$

$$z_{u_k jh} + x_{u_k iwj} \leq 1, \quad \forall i \in V, \quad \forall w \in V_c, \quad \forall j \in V, \quad \forall k \in K, \quad \forall h \in H, \quad (20)$$

$$\sum_{m \in V} x_{kim} + \sum_{n \in V} x_{knj} \geq 2x_{u_k iwj}, \quad \forall k \in K, \quad \forall i \in V_c, \quad \forall j \in V, \quad \forall w \in V_c, \quad (21)$$

$$\sum_{m \in V} x_{kmj} \geq x_{u_k 0wj}, \quad \forall w \in V_c, \quad \forall j \in V_c, \quad \forall k \in K, \quad (22)$$

$$\sum_{w \in V_c} \sum_{j \in V} x_{u_k iwj} \leq 1, \quad i \in V, \quad k \in K, \quad (23)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{w \in V_c} x_{u_k iwj} \leq 1, \quad j \in V, \quad k \in K, \quad (24)$$

$$T_{ki}^d + t_{kij} - M(1 - x_{kij}) \leq T_{kj}^a, \quad \forall i \in V, \quad \forall j \in V, \quad \forall k \in K, \quad (25)$$

$$T_{ki}^d + t_{kij} + M(1 - x_{kij}) \geq T_{kj}^a, \quad \forall i \in V, \quad \forall j \in V, \quad \forall k \in K, \quad (26)$$

$$T_{u_k i}^d + 2t_u^2 + \frac{l_{iw}^u}{v_u} - M(1 - \sum_{j \in V} x_{u_k iwj}) \leq T_{u_k w}^a, \quad \forall i \in V, \quad \forall w \in V_c, \quad \forall k \in K, \quad (27)$$

$$T_{u_k i}^d + 2t_u^2 + \frac{l_{iw}^u}{v_u} + M(1 - \sum_{j \in V} x_{u_k iwj}) \geq T_{u_k w}^a, \quad \forall i \in V, \quad \forall w \in V_c, \quad \forall k \in K, \quad (28)$$

$$T_{u_k w}^a + t_u^2 + \frac{l_{wj}^u}{v_u} - M(1 - \sum_{i \in V} x_{u_k iwj}) \leq T_{u_k j}^a, \quad \forall w \in V_c, \quad \forall j \in V, \quad \forall k \in K, \quad (29)$$

$$T_{u_k w}^a + t_u^2 + \frac{l_{wj}^u}{v_u} + M(1 - \sum_{i \in V} x_{u_k iwj}) \geq T_{u_k j}^a, \quad \forall w \in V_c, \quad \forall j \in V, \quad \forall k \in K, \quad (30)$$

$$\max\{T_{ki}^a, T_{u_k i}^a\} + t_u^1 - M(1 - \sum_{w \in V_c} \sum_{j \in V} x_{u_k iwj}) \leq T_{u_k i}^d, \quad \forall i \in V, \quad \forall k \in K, \quad (31)$$

$$\max\{T_{ki}^a, T_{u_k i}^a\} + t_u^1 + M(1 - \sum_{w \in V_c} \sum_{j \in V} x_{u_k iwj}) \geq T_{u_k i}^d, \quad \forall i \in V, \quad \forall k \in K, \quad (32)$$

$$\max\{T_{ki}^a, T_{u_k i}^a\} + t_{si} + t_u^1 - M(1 - \sum_{w \in V_c} \sum_{j \in V} x_{u_k iwj}) \leq T_{ki}^d, \quad \forall i \in V, \quad \forall k \in K, \quad (33)$$

$$\max\{T_{ki}^a, T_{u_k i}^a\} + t_{si} + t_u^1 + M(1 - \sum_{w \in V_c} \sum_{j \in V} x_{u_k iwj}) \geq T_{ki}^d, \quad \forall i \in V, \quad \forall k \in K, \quad (34)$$

$$x_{kij} \leq y_{kij}, \quad \forall i \in V_c, \quad \forall j \in V_c, \quad \forall k \in K, \quad (35)$$

$$1 - (|V_c| + 1)y_{kij} \leq n_{ik} - n_{kj},$$

$$\forall k \in K, \forall i \in V_c, \forall j \in V_c, \quad (36)$$

$$-1 + (|V_c| + 1)(1 - y_{kij}) \geq n_{ik} - n_{jk},$$

$$\forall k \in K, \forall i \in V_c, \forall j \in V_c, \quad (37)$$

$$n_{lk} \geq n_{jk} - M(3 - \sum_{w \in V_c} x_{ukiwj} - \sum_{m \in V_c} \sum_{n \in V} x_{uklmn} - y_{kil}), \forall i \in V, \forall l \in V, k \in K, \quad (38)$$

其中: 目标函数式(10)为总成本的最小化, 总成本包括车辆派遣成本、车辆能耗成本和无人机能耗成本; 式(11)表示每个客户点只能由车辆或无人机服务一次; 式(12)表示每辆车及其携带的无人机所服务的客户点需求量之和小于车辆最大载重能力; 式(13)表示车辆在客户点进出平衡; 式(14)表示每辆车只有一条服务路径, 且车辆的起点、终点都在配送中心; 式(15)表示每辆车返回配送中心时剩余电量不低于其最低荷电状态; 式(16)表示无人机服务的客户点需求量不超过其最大载重量; 式(17)表示无人机在完成一次配送后所剩余电量不低于其最低荷电状态; 式(18)–(20)表示当无人机的起飞点、服务的客户点、回收点三者中任一点在处于禁飞时段的禁飞区内时, 则无人机不能进行配送; 式(21)–(22)表示若无人机从节点*i*发射, 服务客户*w*后在节点*j*被回收, 则车辆也需要经过*i*, *j*这两个节点; 式(23)–(24)表示无人机最多只能在同一客户点发射和回收一次; 式(25)–(26)表示节点间车辆出发时间和到达时间的关系, 限制了车辆子回路。式(27)–(30)表示起飞点、服务点、回收点3个节点间无人机出发时间和到达时间的关系; 式(31)–(32)表示无人机在起飞点的离开时间等于车辆和无人机汇合时刻加上货物装载及换电时长; 式(33)–(34)表示车辆在无人机起飞点的离开时间等于与无人机汇合时刻加上车辆对客户点的服务时间及为无人机装载货物时长; 式(35)表示决策变量 x_{kij} 和决策变量 y_{kij} 的关系, 该约束保证了决策变量 x_{kij} 和决策变量 y_{kij} 之间的强耦合; 式(36)–(37)表示节点*i*和节点*j*在车辆*k*路线中的位置 n_{ik} , n_{jk} 与决策变量 y_{kij} 的关系; 式(38)保证了无人机不会在行驶途中再次从车辆上发射。

3 算法设计与实现

TDVRPD-NFZ是VRP拓展问题, 属于NP-hard问题。本文设计遗传变邻域算法(genetic algorithm and variable neighborhood search, GAVNS), 在进行选择、交叉操作后进行邻域搜索, 将遗传算法交叉、变异等操作的全局搜索能力较强的优势和变邻域搜索算法多个邻域结构局部搜索能力较强的优势结合, 引入自适应邻域搜索次数策略, 在迭代前期设置较低邻域搜索次数, 在算法迭代后期增加搜索次数, 加快算法的寻优速度和提升解的质量。

3.1 初始解构造

初始解构造部分采取整数编码的方式生成初始车辆和无人机路径, 其中无人机路径为多层染色体编码, 第1层染色体为无人机起飞点, 第2层染色体为无人机服务点, 第3层染色体为无人机降落点。由于禁飞区为分时段禁飞, 无人机在不同时段可服务的客户点会随之变化。且无人机是否绕行, 绕行几个禁飞区及车辆速度变化均与实时时间有关, 因此本文采取以下方式生成初始解:

步骤 1 随机生成 popsize 条长度为 N (客户点数) 的染色体。以 10 个客户点为例, 随机排列生成的初始染色体如图 3(a) 所示, 对于初始种群中每条染色体执行算法 1 操作。

步骤 2 按照伪代码所示操作, 完成每条染色体的路径划分。如图 3(b) 所示, 假设客户点 5, 8, 10 在禁飞区内, 根据算法 1 判断得出客户点 4 可被车辆服务, 客户点 6 可被无人机服务, 则将配送中心 0 和客户点 4 分别插入无人机路径染色体的第 1, 3 层, 客户点 6 插入无人机路径染色体第 2 层, 同时将客户点 4 插入车辆路径; 根据算法 1 判断无人机由客户点 3 到达客户点 8 时其所在禁飞区在禁飞时段内, 因此, 将客户点 8 插入车辆路径; 按照算法 1 继续判断后续客户点, 当该车辆无法继续访问时(如客户点 2), 则车辆返回配送中心并重新派遣车辆。重复以上操作直至完成所有客户点访问。

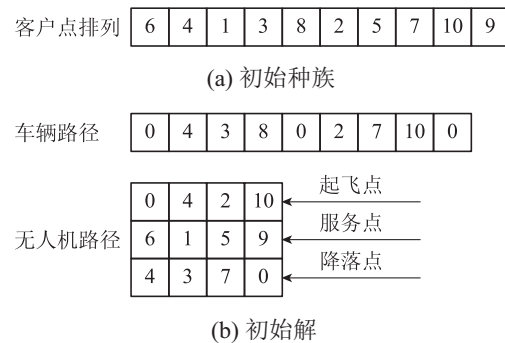


图 3 车辆和无人机路径划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of vehicle and drone path division

3.2 选择

采用轮盘赌法进行个体的选择, 适应度值越高的个体所占轮盘区域面积越大, 越容易被选中, 反之, 被选择的概率越低。染色体个体*i*的适应度值 f_i 的计算方法如式(39)所示。

$$f_i = \frac{1}{z_i}, \quad (39)$$

其中 z_i 为个体*i*的目标函数值。

3.3 交叉

本文采用顺序交叉的方法生成新的个体, 以子代*a*1的生成为例, 从父代*a*中随机选择两个交叉点位,

将两点位之间的个体作为子代 a_1 的第1段, 将父代 b 中除去 a 中所选两点位之间的个体后的剩余点位作为子代 a_1 的第2段, 同理生成子代 b_1 .

表1 初始解构造伪代码

Table 1 Pseudo-code of Initial solution

1	for $i = 1$: popsize
2	make Chrom $1_i(1) = 0$
3	$k = 1$
4	for $j = 1 : N$
5	Judge whether the customer point is within the no-fly zones
6	if the truck from $j - 1$ or 0 to $j + 1$, $q_k \leq Q_k, e_k \leq B_k(1 - \varepsilon)$
7	if the drone from $j - 1$ to j to $j + 1$, $q_u \leq Q_u, e_u \leq B_u(1 - \varepsilon)$ or $q_u \leq Q_u, e_u \leq B_u(1 - \varepsilon), T_{u,k,j}^d \leq T_h^s$ or $T_{u,k,j}^a \geq T_h^f$
8	Put $P_i(j)$ in the Chrom $2_{3i-1}, P_i(j-1)$ in the Chrom $2_{3i-2}, P_i(j+1)$ in the Chrom $2_{3i}, P_i(j+1)$ in the Chrom 1_i ;
9	$j = j + 2$;
10	end
11	else
12	if the truck from $j - 1$ or 0 to j , $q_k \leq Q_k, e_k \leq B_k(1 - \varepsilon)$
13	Put $P_i(j)$ in the Chrom 1_i ;
14	$j = j + 1$;
15	else
16	Put 0 in the Chrom 1_i ;
17	$k = k + 1$;
18	end
19	end
20	end
21	end

3.4 变邻域搜索

3.4.1 邻域结构

本文设计插入、交换、2-opt这3种邻域结构对交叉操作后的种群进行扰动, 各邻域结构具体操作如下:

1) 插入: 在染色体中随机选择两个客户点 i 和 j , 将客户点 i 插入到客户点 j 前面;

2) 交换: 随机选择两个客户点 i 和 j , 交换客户点 i 和 j 的位置;

3) 2-opt: 随机选择两个客户点 i 和 j , 逆转客户点 i 和 j 之间的客户点的位置.

3.4.2 自适应邻域搜索次数策略

本文通过设计自适应邻域搜索次数策略, 在算法不同时期设计不同的搜索次数以加快算法收敛速度、提高求解质量. 在算法迭代初期将每个邻域的搜索次数设置为1, 以加快种群的收敛速度, 随着迭代次数的增加, 种群收敛速度逐渐降低, 最优解连续未改

变的次数不断增加, 此时增加各邻域的搜索次数以增强算法的搜索能力, 避免及早陷入局部最优. 当算法迭代至中后期时, 最优解不再变动, 算法中的预设值Max_n能够在一定程度上节省算法运行时间, 避免陷入局部循环.

具体自适应搜索策略步骤如下:

1) 设置初始的各个邻域搜索次数count = 1, 最优解连续未改变的次数 $n = 0$;

2) 若某次迭代后最优解改变则count = 1; $n = 0$. 若最优解未改变则count = count + 1; $n = n + 1$;

3) 当最优解连续未改变的次数 n 达到预设值Max_n时, 跳出循环.

4 模型与算法验证

目前还没有TDVRPD-NFZ问题的算例, 改编Solomon算例集的R101和R102中的坐标和客户需求量得到本文算例, 将算例坐标缩小0.5~0.75倍, 客户需求量在 $[0.001t, 0.025t]$ 内随机生成, 禁飞区的圆心坐标及半径根据不同规模的客户点设定, 设置禁飞区1的禁飞时段为 $[10:00, 12:00]$, 禁飞区2的禁飞时段为 $[10:00, 18:00]$, 配送中心的工作时间窗为 $[8:00, 18:00]$, $B_u = 2 \text{ kW}\cdot\text{h}$, $B_k = 75 \text{ kW}\cdot\text{h}$, c_1 为300元/辆, c_2 为1元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$, ε 为0.2, Q_k 为1t, Q_u 为0.005t, v_u 为80 km/h. 经过反复测试, 设置种群大小NIND = 50~100, 最优解连续未改变次数Max_n = 50~100, 客户规模越大, 种群大小和最优解连续未改变次数越大. 编程软件为MATLAB R2018a, 操作系统为windows10, 电脑内存为8 G, CPU为Inteli7-7700 M, 主频3.60 GHz.

4.1 模型验证

由于本文速度为非线性变化导致部分约束为非线性且无法被线性化处理, 因此将速度设为恒定值40 km/h, 其他条件不变, 设计客户点规模为6, 8, 10的10个小规模算例分别用CPLEX和GAVNS算法求解以验证模型的正确性和算法求解本文问题的有效性. 求解结果如表2所示, 其中 C 表示最优解, T 表示最优解对应的配送时长, t 表示求解耗时, GAP表示GAVNS算法与CPLEX求解结果的偏差. 由表1可以看出, 本文算法针对小规模算例的求解结果均接近或等于CPLEX软件的求解结果, 平均误差仅为0.10%, 这说明本文算法具有较高的计算精度. 在求解时间上, 本文算法针对不同算例的求解时间均小于CPLEX的求解时间, 平均求解时间为8.1 s, 远小于CPLEX求解时长.

4.2 算法验证

为了验证本文遗传变邻域搜索算法求解TDVRPD-NFZ问题的有效性, 采用遗传算法(genetic algorithm, GA)、变邻域搜索算法(variable neighborhood se-

arch, VNS)、模拟退火算法(simulated annealing, SA) 3种算法对12个算例进行求解与本文设计的遗传变邻域搜索算法 (genetic algorithm and variable neighborhood search, GAVNS)求解结果对比分析, 对于每种算法设置当最优解连续Max_n代未改变时即判定其收敛, 则跳出循环, 并记录最终结果, 针对不同算例均采用上述算法运行10次, 收敛后所得到的平均值、最优值如表3所示, 其中Prxx-xx为算例-客户点数, Dev为本文的遗传变邻域搜索算法相较于其他算法的改进率, Avg为配送成本以及算法改进率的平均值, Best为配送成本的最优值. 由表3可知, 当客户规模较小时, 每种算法运行所得平均值、最优值相差较小, 与VNS的求解误差均在1%以内, 随着客户规模的增大, 本文GAVNS算法的优势逐渐增大, 与其他3种算法相比求解结果最多改进了28.56%, 相较于变邻域搜索算法平均改进8.81%, 相较于遗传算法平均改进6.69%, 相较于模拟退火算法平均改进15.64%, 这表明GAVNS算法的求解质量较高. 综合上述分析, 可验证本文设计

的遗传变邻域搜索算法求解车辆与无人机协同配送路径问题的有效性.

表 2 CPLEX软件与GAVNS算法结果对比

Table 2 Comparison between CPLEX software and GAVNS algorithm results

算例	CPLEX		GAVNS		
	C/元	t/s	C/元	t/s	GAP/%
A1-6	310.8	6.0	310.8	3.3	0.00
A2-6	309.5	4.2	309.5	3.9	0.00
A3-6	313.2	8.5	313.4	6.7	0.06
A4-6	310.8	5.4	311.1	3.9	0.09
A5-8	311.2	44.8	311.7	13.6	0.16
A6-8	311.7	34.3	311.9	10.6	0.06
A7-8	311	40.3	311.5	9.6	0.16
A8-10	312.5	322.0	313	10.3	0.16
A9-10	312.4	283.6	312.8	8.6	0.12
A10-10	315.9	237.6	316.6	10.8	0.22
Avg	311.9	98.7	312.2	8.1	0.10

表 3 多种算法求解不同规模客户的运行结果

Table 3 Operation results of various algorithms for customers of different sizes

算例	本文GAVNS		VNS		GA		SA		Dev/%		
	Avg	Best	Avg	Best	Avg	Best	Avg	Best	VNS	GA	SA
Pr01-20	326.5	322.9	325.5	322.2	324.4	320.6	328.2	327.4	0.22	0.72	-1.37
Pr02-30	679.1	670.2	677.7	668.7	682.9	678.8	687.8	685.9	0.22	-1.27	-2.29
Pr03-50	678.9	675.7	690.6	678.9	753.3	689.6	711.7	707.2	-0.47	-2.02	-4.45
Pr04-50	1376.5	1360.5	1387.5	1372.9	1646.9	1402.4	1720	1712.3	-0.9	-2.99	-20.54
Pr05-60	1388.9	1378	1618.6	1412.1	1642.5	1388.9	1739.8	1732.2	-2.41	-0.78	-20.45
Pr06-70	1049.1	1036.9	1061.4	1056.9	1164.6	1054.2	1168.2	1064.3	-1.89	-1.64	-2.57
Pr07-70	2092.3	1733	2242.6	2063.4	2331.2	2066.8	2513.3	2407.8	-16.01	-16.15	-28.02
Pr08-70	1367.6	1052.3	1498.5	1375.8	1558.9	1380.3	1696	1406.7	-23.51	-23.76	-25.19
Pr09-100	1537.5	1403.7	1754.2	1736.7	1816.9	1741.4	1780.7	1766.3	-19.17	-19.39	-20.53
Pr10-100	2766.1	2454.5	3065.2	2790.8	3121.4	2743.9	3563.9	3436	-12.05	-10.54	-28.56
Pr11-100	2007.9	1739.7	2167.4	2094.3	2077.9	1774.4	2420.9	2140.4	-16.93	-1.95	-18.72
Pr12-128	2223.7	2110.8	2534.7	2420.4	2525.1	2120.4	2699.4	2482.7	-12.79	-0.45	-14.98
Avg	1452.8	1328.2	1585.3	1499.4	1637.2	1446.8	1752.5	1655.8	-8.81	-6.69	-15.64

5 敏感性分析

5.1 不同配送模式的影响

通过将传统车辆配送与本文提出的车辆与无人机协同配送模式对比, 来验证车辆携带无人机对配送方案的影响, 设置了不同客户规模的算例并采用GAVNS算法求解, 算法运行10次所得结果如表4所示, 其中K为所用车辆数, C为最低配送成本, T为配送总时长, GAP%为两种配送模式下配送成本的偏差. 由表4可知, 不同配送模式下所得配送成本、所用车辆数和配送时长均存在较大差异, 车辆与无人机协同配送成本相较于传统车辆配送成本最多降低了47.88%, 平

均降低了27.63%, 所用车辆数最多减少了3辆, 配送时长最多减少了10.25 h. 以算例Pr08为例, 配送区域内设有两个禁飞区, 禁飞区1的圆心坐标为(6, 23), 半径为4 km, 禁飞时段为[10 : 00, 12 : 00], 禁飞区2的圆心坐标为(23, 7), 半径为5 km, 禁飞时段为[10 : 00, 18 : 00], 区域内包含70个客户点, 其配送成本为1341.2元, 相较于传统车辆配送模式下的最低配送成本减少了33.57%, 配送时长为13.68 h, 相较于传统车辆配送模式下的最低配送时长减少了7.92 h. 配送所用车辆数为4, 相较于传统车辆配送模式下的最小车辆数减少了2辆. 综合上述分析, 本文车辆与无人机协同配送

模式远优于传统车辆配送模式。

表 4 两种配送模式的求解结果

Table 4 Solution results of two delivery modes

算例	传统车辆配送			车辆和无人机协同配送			
	<i>C</i>	<i>T/h</i>	<i>K</i>	<i>C</i>	<i>T/h</i>	<i>K</i>	GAP/%
Pr01	326.7	3.3	1	322.9	2.9	1	-1.2
Pr02	979.7	10.3	3	670.2	5.7	2	-31.6
Pr03	994.5	12.6	3	675.7	7.5	2	-32.1
Pr04	1360.6	12.1	4	1360.5	12.1	4	-0.0
Pr05	1657.4	17.1	5	1378	12.1	4	-16.9
Pr06	1687.8	19.4	5	1036.9	12.5	3	-38.6
Pr07	2372.6	24.2	7	1733	15.4	5	-27.0
Pr08	2019.1	21.6	6	1052.3	13.1	3	-47.9
Pr09	2386.8	27.4	7	1403.7	18.1	4	-41.2
Pr10	3380.9	32.9	10	2454.5	23.9	7	-27.4
Pr11	2726.6	20.5	8	1739.7	19.6	5	-36.2
Pr12	3092.5	35.9	9	2110.8	25.7	6	-31.7
Avg	1888.7	19.4	5.7	1328.2	16.7	3.8	-27.6

5.2 车辆行驶速度的影响

为分析不同车辆行驶速度对车辆和无人机配送成本的影响, 选择部分算例分别计算车辆行驶速度为 40 km/h, 50 km/h, 60 km/h 下的配送成本, 表 5 为上述算例在不同车辆行驶速度下运行 10 次取最优值得到的配送成本, 以算例 Pr11 为例, 当车辆行驶速度为 40 km/h, 50 km/h, 60 km/h 时配送成本与本文最优配送成本偏差分别为 4.58%, 4.27%, 2.04%。由此可以看

出, 不同车辆行驶速度对配送成本产生较大影响, 速度过高或者过低, 偏差均会很大。因此, 本文在制定车辆和无人机协同配送方案时, 考虑时间依赖型速度更贴近现实。

表 5 不同速度下的配送成本

Table 5 Delivery cost under different speed of vehicle

速度	Pr02	Pr05	Pr08	Pr11
连续变化	670.2	1378	1052.3	1739.7
<i>v</i> = 40 km/h	660.5	1366.3	1368.9	1823.3
<i>v</i> = 50 km/h	658.8	1349.7	1368.1	1817.4
<i>v</i> = 60 km/h	653.7	1361.8	1322	1776.1

5.3 禁飞区数量对配送方案的影响

为了验证禁飞区数量对配送方案的影响, 针对下述算例对配送区域内不设置禁飞区、设置 1 个禁飞区、2 个禁飞区等情况, 分别采用 GAVNS 算法进行求解, 每种算法运行 10 次所得平均值如表 6 所示, 其中 *t* 为算法运行 10 次平均耗费时长, GAP 为与无禁飞区时求解结果的偏差。由表 6 可以看出, 无禁飞区时平均总配送时长及算法平均耗费时长总低于有禁飞区时, 且随着禁飞区数量增多配送时长和算法运行时长也不断增加。以算例 Pr06 为例, 配送区域内有一个或两个禁飞区时的配送时长相较于无禁飞区时分别增加了 1.79 h, 2.53 h, 配送成本分别增加了 332.6 元、343.3 元。综合上述分析, 多个无人机禁飞区的存在会对物流配送成本和配送时长产生影响, 物流企业在制定方案时需充分考虑这一因素。

表 6 不同禁飞区数量下的求解结果

Table 6 Solution results under different number of no-fly zones

算例	无禁飞区			一个禁飞区			两个禁飞区						
	<i>C</i>	<i>T/h</i>	<i>t/min</i>	<i>C</i>	GAP/%	<i>T/h</i>	GAP/%	<i>t/min</i>	<i>C</i>	GAP/%	<i>T/h</i>	GAP/%	<i>t/min</i>
Pr01	324.2	2.77	0.22	326.4	0.68	2.91	5.05	1.11	326.5	0.71	3.33	20.22	1.29
Pr02	670.3	5.54	0.58	673.4	0.47	5.95	7.28	2.61	679.2	1.33	6.31	13.79	5.35
Pr03	672.9	7.48	1.57	674.8	0.28	7.8	4.23	4.41	678.9	0.89	8.02	7.21	15.4
Pr04	1354.6	11.84	3.93	1367.8	0.97	12.25	3.46	10.66	1376.5	1.61	12.67	7.01	9.2
Pr05	1359.2	12.37	5.38	1363.2	0.29	12.4	0.24	13.93	1388.9	2.19	12.42	0.4	17.65
Pr06	705.7	10.48	2.88	1038.3	47.12	12.27	17.09	12.3	1049	48.64	13.01	24.08	29.6
Pr07	1713.9	15.71	6.01	2035.6	18.77	16.9	7.57	17.11	2092.3	22.07	17.48	11.26	23.65
Pr08	1042.8	12.11	4.18	1058.3	1.49	12.14	0.25	14.31	1367.6	31.15	13.5	11.47	25.35
Pr09	1391.5	16.83	6.67	1425.7	2.46	17.45	3.68	23.69	1537.6	10.49	18.78	11.58	41.43

6 结论

近几年, 无人机送货成为各学者的研究热点, 本文综合考虑车辆与无人机协同配送、禁飞区及速度时变等因素, 以总配送成本最小化为目标建立优化模型并设计遗传变邻域搜索算法进行求解, 通过不同客户规

模的算例对比验证了模型和算法的有效性, 得到以下结论: 1) 本文所建立的 TDVRPD-NFZ 模型是对车辆与无人机协同配送研究的进一步深化与拓展, 所求配送方案能够有效降低配送成本, 提高配送效率; 2) 本文设计的遗传变邻域搜索算法将遗传算法全局搜索

能力较强和变邻域搜索算法局部寻优效果较好有效结合,针对不同规模的算例,将遗传变邻域搜索算法与遗传算法、变邻域搜索算法、模拟退火算法对比,平均分别改进了6.69%, 8.81%, 15.64%,验证了本文算法求解车辆与无人机协同配送问题的有效性;3)本文对不同配送模式的分析表明车辆和无人机协同配送远优于传统车辆配送;对禁飞区数量的实验表明禁飞区的存在在很大程度上影响配送成本和时长;对车辆行驶速度的分析表明,不同速度下的配送成本差值较大。基于上述研究成果,本文得到以下管理启示:首先,车辆与无人机协同配送更利于企业降低配送成本,特别是需求量小的客户较多时采用车辆与无人机协同配送所带来的成本节约更明显;其次,电池在电动车成本中占有较大的比例,电池最低荷电状态的控制策略的制定要综合考虑如电池容量、循环次数等因素,以及其所带来的经济效益。

本文研究不仅丰富了车辆与无人机协同配送问题的理论研究,还为物流企业制定配送方案提供了依据,未来将考虑时间窗及电动车充电等因素,使问题更加贴近生产实际。

参考文献:

- [1] LI Nan, HU Rong, QIAN Bin, et al. Time-dependent vehicle routing problem with multiple time windows. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(6): 1 – 14.
(李楠, 胡蓉, 钱斌, 等. 时间依赖型多时间窗车辆路径问题研究. 系统仿真学报, 2021, 33(6): 1 – 14.)
- [2] DUAN Zhengyu, YANG Dongyuan, WANG Shang. Improved ant colony optimization algorithm for time-dependent vehicle routing problem. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(11): 1557 – 1563.
(段征宇, 杨东援, 王上. 时间依赖型车辆路径问题的一种改进蚁群算法. 控制理论与应用, 2010, 27(11): 1557 – 1563.)
- [3] FAN Houming, LI Dang, KONG Liang, et al. Optimization for time dependent vehicle routing problem with fuzzy demand. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(5): 13 – 23.
(范厚明, 李荡, 孔靓, 等. 模糊需求下时间依赖型车辆路径优化. 控制理论与应用, 2020, 37(5): 13 – 23.)
- [4] HUANG Y, ZHAO L, WOENSEL T V, et al. Time-dependent vehicle routing problem with path flexibility. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 95(1): 169 – 195.
- [5] KUMAR S N, PANNEERSELVAM R. Development of an efficient genetic algorithm for the time dependent vehicle routing problem with time windows. *American Journal of Operations Research*, 2016, 7(1): 1 – 25.
- [6] LU J, CHEN Y, HAO J K, et al. The time-dependent electric vehicle routing problem: Model and solution. *Expert Systems with Applications*, 2020, 161: 113593.
- [7] WANG L, GAO S A, WANG K, et al. Time-dependent electric vehicle routing problem with time windows and path flexibility. *Journal of Advanced Transportation*, 2020, 2020(3): 1 – 19.
- [8] ZHAO Zhixue, LI Xiamiao. Electric vehicle route optimization for fresh logistics distribution based on time-varying traffic congestion. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2020, 20(5): 218 – 225, 239.
(赵志学, 李夏苗. 时变交通下生鲜配送电动车辆路径优化方法. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(5): 218 – 225, 239.)
- [9] TAMKE F, BUSCHER U. A branch-and-cut algorithm for the vehicle routing problem with drones. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021, 144(4): 174 – 203.
- [10] EUCHI J, SADOK A. Hybrid genetic-sweep algorithm to solve the vehicle routing problem with drones. *Physical Communication*, 2021, 44: 101236.
- [11] GONZALEZR P L, CANCA D, ANDRADE-PINDE J L, et al. Truckdrone team logistics: A heuristic approach to multi-drop route planning. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 114(5): 657 – 680.
- [12] SCHERMER D, MOEINI M, WENDT O. A matheuristic for the vehicle routing problem with drones and its variants. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 106(9): 166 – 204.
- [13] MARIO M, LEONARDO C, MICHELE O, et al. En route truck-drone parcel delivery for optimal vehicle routing strategies. *IET Intelligent Transport Systems*, 2017, 12(4): 253 – 261.
- [14] BOYSEN N, BRISKORN D, FEDTKE S, et al. Drone delivery from trucks: Drone scheduling for given truck routes. *Networks*, 2018, 72(4): 506 – 527.
- [15] 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. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 91(6): 1 – 14.
- [16] YAN Rui, CHEN Lishuang, ZHU Xiaoning, et al. Research on vehicle routing problem with truck and drone considering regional restriction. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(5): 144 – 155.
(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. 中国管理科学, 2022, 30(5): 144 – 155.)
- [17] JEONG H Y, SONG B D, LEE S. Truck-drone hybrid delivery routing: Payload-energy dependency and no-fly zones. *International Journal of Production Economics*, 2019, 214(8): 220 – 233.
- [18] LI Feng, WEI Ying. Hybrid genetic algorithm for capacitated vehicle routing problem with stochastic travel time. *Journal of Systems & Management*, 2014, 23(6): 819 – 825, 831.
(李锋, 魏莹. 求解随机旅行时间的C-VRP问题的混合遗传算法. 系统管理学报, 2014, 23(6): 819 – 825, 831.)
- [19] LI L, LIU Q. Acceleration curve optimization for electric vehicle based on energy consumption and battery life. *Energy*, 2019, 169(2): 1039 – 1053.
- [20] REN Xinhui, WU Tong. Logistics unmanned aerial vehicles scheduling model considering energy consumption segmentation. *Computer Engineering and Applications*, 2022, 58(21): 301 – 308.
(任新惠, 武彤. 考虑能耗分段的物流无人机调度模型. 计算机工程与应用, 2022, 58(21): 301 – 308.)
- [21] CHENG C, ADULYASAK Y, ROUSSEAU L M. Drone routing with energy function: Formulation and exact algorithm. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020, 139(9): 364 – 387.

作者简介:

范厚明 教授, 博士生导师, 目前研究方向为交通运输系统规划设计、战略管理与系统规划, E-mail: fhm468@163.com;

甘兰 硕士研究生, 目前研究方向为交通运输规划与管理, E-mail: gl13061316673@163.com;

张跃光 硕士研究生, 目前研究方向为交通运输规划与管理, E-mail: zyg13130466920@163.com;

白雪 硕士研究生, 目前研究方向为交通运输规划与管理, E-mail: 107638768@139.com.