

# 时变路网下同时配集货车-无人车协同配送 路径问题

范厚明, 宋彬彬, 王 琪, 任晓雪

(大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 针对时变路网下同时配集货车-无人车协同配送路径问题, 综合考虑配送区域路网交通信息、客户同时配集货需求、客户软时间窗、电池荷电状态等因素, 以派遣成本、能耗成本以及时间窗惩罚成本之和最小为目标建立模型。设计了混合遗传变邻域搜索算法, 采用轮盘赌选择策略, 引入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。通过多组算例求解验证了模型的正确性和算法的有效性, 并对不同车辆-无人车协同配送方式、不同车辆行驶速度以及车辆和无人车电池的不同最低荷电状态组合等场景的变化进行了敏感性分析。结果表明, 车辆在停靠点不等待无人车的协同配送方式能够有效降低配送成本; 考虑车辆速度时变可以更好地适应不同路况, 能够有效降低配送成本并提高配送效率; 车辆和无人车的最低荷电状态越低, 配送成本越小, 这一结果对未来研发更高性能电池具有重要意义。

**关键词:** 时变路网; 同时配集货; 车辆-无人车; 混合遗传变邻域搜索算法

中图分类号: U492

文献标志码: A

## Van-unmanned Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-up Under Time-dependent Road Networks

FAN Houming, SONG Binbin, WANG Qi, REN Xiaoxue  
(College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** Aiming at the van-unmanned vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up under time-dependent road network, a model is formulated to minimize the sum of dispatching costs, energy consumption cost and time windows penalty cost by comprehensively considering factors such as the delivery

area road network traffic information, customer demand for simultaneous delivery and pick-up, customer soft time windows and battery state of charge. A hybrid genetic variable neighborhood search algorithm is designed. The algorithm uses a roulette selection strategy. The strategy of adaptive neighborhood search is introduced, and different search times are designed in different periods of the algorithm to accelerate the convergence speed of the algorithm and improve the solution quality. By solving multiple sets of instances, the correctness of the model and the effectiveness of the algorithm are verified. Sensitivity analysis is carried out on the changes of scenarios such as the cooperative distribution mode of different van-unmanned vehicles, the driving speed of different vans, and the combination of different minimum battery states of charge of vans and unmanned vehicles. The results show that the cooperative distribution mode of van not waiting for unmanned vehicles can effectively reduce the delivery cost; considering the time-varying speed of vans can better adapt to different road conditions, which can effectively reduce the delivery cost and improve the distribution efficiency; the lower the minimum state of charge of vans and unmanned vehicles, the smaller the delivery cost, which is of great significance for the future development of higher-performance batteries.

**Keywords:** time-dependent road network; simultaneous delivery and pick-up; van-unmanned vehicle; hybrid genetic variable neighborhood search algorithm

随着物流业的发展, 快递业务量急剧增长。快速增长的业务量给物流业带来巨大挑战, 探索高效的末端配送模式已成为研究热点。无人车自主完成配送的特点为解决“最后一公里”配送问题提供了一

收稿日期: 2023-08-28

基金项目: 国家社会科学基金(23FGLA010)

第一作者: 范厚明, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通运输规划与管理、物流系统优化。

E-mail: fhm468@163.com



论  
文  
拓  
展  
介  
绍

种可行方案。许多物流企业已开始进行测试。然而,无人车在配送中仍存在不足,如行驶速度慢、载重能力小等,无法独立完成大批量、长距离的配送任务,采用车辆与无人车的协同配送模式则能有效克服单独使用无人车配送的不足。

车辆-无人车协同配送问题是近年来的研究热点。Chen等<sup>[1]</sup>、Boysen等<sup>[2]</sup>、Simoni等<sup>[3]</sup>研究了车辆-无人车协同配送路径问题,分别设计了自适应大邻域搜索算法、多起点局部搜索算法、自适应局部搜索算法进行求解,研究结果验证了无人车参与配送的有效性。Yu等<sup>[4]</sup>、Liu等<sup>[5]</sup>研究了车辆-无人车2级路径问题,分别设计了自适应大邻域搜索算法及混合遗传算法和粒子群优化算法进行求解。Heimfarth等<sup>[6]</sup>针对车辆和无人车路径问题,考虑无人车的灵活配送,设计了变邻域搜索算法进行求解。Alfandari等<sup>[7]</sup>以最小化延迟交货客户数量为目标构建模型,设计了分支定界和割平面相结合的方法进行求解。Chirala等<sup>[8]</sup>考虑了操作员与无人车交互过程中的成本,构建了多目标模型,设计变邻域搜索算法进行求解。Chen等<sup>[9]</sup>研究了无人车与无人机相结合的路径问题,设计了混合蚁群算法和遗传算法进行求解。Jennings等<sup>[10]</sup>考虑美国法规对无人车配送的限制,构建了一种非线性规划模型并设计了蚁群算法进行求解。在车辆-无人车协同配送过程中,车辆速度具有时间依赖特征。针对时变路网下车辆路径问题,Fan等<sup>[11]</sup>研究了时间依赖型绿色车辆路径问题,设计了考虑时空距离的混合遗传变邻域搜索算法进行求解。Khanchezharrin等<sup>[12]</sup>、Gmira等<sup>[13]</sup>考虑交通状况对车辆行驶速度的影响,建立优化模型,采用禁忌搜索算法进行求解。Basso等<sup>[14]</sup>考虑交通状况等不确定因素对电动车行驶速度的影响,以能耗最小化为目标建立优化模型,并设计贝叶斯机器学习算法进行求解。

末端配送过程中会经常遇到客户不仅有配送需求,还有寄件、退货需求等,即同时配集货需求。针对同时配集货的车辆路径问题,范厚明等<sup>[15]</sup>研究了多中心开放式同时配集货需求可拆分车辆路径问题,设计了混合遗传算法进行求解,通过多组算例对比验证了模型和算法的有效性。Homstra等<sup>[16]</sup>研究了考虑搬运成本的同时配集货车辆路径问题,并提出了自适应大邻域搜索元启发式算法进行求解。Yu等<sup>[17]</sup>研究了考虑雇佣临时司机的同时配集货车辆路径问题,以车辆的行驶成本和支付给临时司机的总补偿为目标构建数学模型,采用模拟退火算法进行求解。Zhou等<sup>[18]</sup>研究了带时间窗和同时取送的2级车辆路径问题,设计了禁忌搜索算法进行求解。

梳理文献可知,有关车辆-无人车协同配送的研究中存在以下不足:①现有研究均采取车辆在停靠点等待无人车完成配送再将其进行回收的协同方式,未考虑现实中停靠点仅允许临时停车,不能长时间等待的情况;②在车辆-无人车协同配送过程中,忽略了配送区域路网道路交通流的变化对车辆行驶速度的影响;③现有研究忽视了无人车返回停靠点后,可继续装货为客户提供多行程配送服务问题。综上,考虑配送区域路网交通信息、客户同时配集货需求、客户软时间窗等因素影响,以派遣成本、能耗成本以及时间窗惩罚成本之和最小为目标建立模型,对时变路网下同时配集货车辆-无人车协同配送路径优化问题(VURPSPD-TDN)展开研究。

## 1 问题描述与模型建立

### 1.1 问题描述

VURPSPD-TDN包括无人车路径、车辆释放和回收无人车路径3个优化过程。车辆搭载多辆无人车及货物在配送中心工作时间内从配送中心满电出发,根据客户需求在停靠点释放无人车并卸下货物后,无须等待无人车完成配集货任务,可直接前往下一个停靠点,直到最后一个停靠点。之后,车辆按新的路线到停靠点回收完成配集货任务后并返回停靠点的无人车,最后返回最近的配送中心。停靠点能够存储货物,无人车在该停靠点为客户提供多行程的同时配集货服务,完成任务后被车辆回收。VURPSPD-TDN如图1所示。

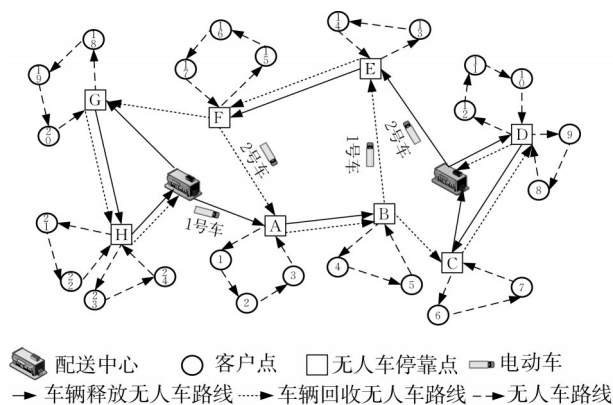


图1 VURPSPD-TDN示意

Fig.1 Schematic diagram of VURPSPD-TDN

1号车搭载若干辆无人车从配送中心出发,在停靠点A释放无人车后,前往停靠点B继续释放无人车。在各停靠点释放的无人车负责对末端客户点的

服务,如在停靠点A释放的无人车分别服务客户1、2、3。之后,车辆前往停靠点E、F、G、H回收无人车。车辆完成任务后,返回就近的配送中心。模型涉及的参数和变量符号说明如表1所示。

表1 模型涉及的符号及含义

Tab.1 Symbols of the model and their meanings

项目	符号	含义
集合与参数	$V$	$V = V_0 \cup V_1 \cup V_2$ 为所有节点集合,其中 $V_0$ 为配送中心集合, $V_1$ 为停靠点集合, $V_2$ 为客户点集合
	$K_e$	电动车集合, $k_e$ 为任一电动车, $k_e \in K_e$
	$K_u$	无人车集合, $k_u$ 为任一无人车, $k_u \in K_u$
	$R_{k_u}$	$k_u$ 的行程集合, $r_{k_u}$ 为无人车 $k_u$ 的任一行程, $r_{k_u} \in R_{k_u}$
	$Q_e$	电动车装载能力
	$\mu_{\max}$	电动车搭载的最大无人车数量
	$Q_u$	无人车装载能力
	$m_u$	无人车自重
	$B_e$	电动车电池容量
	$B_u$	无人车电池容量
	$v_u$	无人车行驶速度
	$\epsilon$	配送过程中电动车和无人车电池允许的最低荷电状态
	$E_u$	无人车单位距离的耗电量
	$t_1$	车辆在停靠点释放或回收的时间
	$t_2$	单位货物服务时间
	$[T_s, T_f]$	配送中心工作时间窗
	$c_1$	单位车辆(不含所配无人车)派遣成本
	$c_2$	单位无人车派遣成本
	$c_3$	电价
	$c_4$	无人车早于 $T_{i,s}$ 到达的单位时间惩罚成本
$c_5$	无人车晚于 $T_{i,f}$ 到达的单位时间惩罚成本	
$M$	非常大的正数	
输入变量	$[T_{i,s}, T_{i,f}]$	客户 $i$ 的服务时间窗
	$d_i$	客户点 $i$ 的配货量
	$p_i$	客户点 $i$ 的集货量
	$l_{ij}$	$i, j$ 2点之间的距离
	$E_{k_e,ij}$	$k_e$ 由节点 $i$ 行驶至节点 $j$ 的耗电量
中间变量	$Q_{k_e,ij}$	$k_e$ 由节点 $i$ 行驶到节点 $j$ 的载重量
	$Q_{r_{k_u},ij}$	$k_u$ 在第 $r_{k_u}$ 个行程由节点 $i$ 行驶到节点 $j$ 的载重量
	$t_{k_e,ij}$	$k_e$ 在节点 $i$ 和节点 $j$ 之间的行驶时间
	$T_{k_e,i}^{a+}(T_{k_e,i}^{a-})$	$k_e$ 到达节点 $i$ , 开始释放(回收)无人车的时刻
	$T_{k_e,i}^{d+}(T_{k_e,i}^{d-})$	$k_e$ 完成释放(回收)无人车任务, 离开节点 $i$ 的时刻
	$T_{r_{k_u},i}^a$	$k_u$ 在第 $r_{k_u}$ 个行程到达节点 $i$ 的时刻
	$T_{r_{k_u},i}^d$	$k_u$ 在第 $r_{k_u}$ 个行程离开节点 $i$ 的时刻
决策变量	$x_{k_e,ij}$	$k_e$ 由节点 $i$ 到节点 $j$ , 是为1, 否为0。 $\forall i, j \in V_0 \cup V_1$
	$x_{r_{k_u},ij}$	$k_u$ 在第 $r_{k_u}$ 个行程由节点 $i$ 到节点 $j$ , 是为1, 否为0。 $\forall i, j \in V_1 \cup V_2$
	$x_{k_e,k_u,i}^+$	$k_u$ 在节点 $i$ 被 $k_e$ 释放, 是为1, 否为0。 $\forall i \in V_1$
	$x_{k_e,k_u,i}^-$	$k_u$ 在节点 $i$ 被 $k_e$ 回收, 是为1, 否为0。 $\forall i \in V_1$
	$x_{k_e,i}^-$	节点 $i$ 为 $k_e$ 由释放到回收的第1个停靠点, 是为1, 否为0。 $\forall i \in V_1$
$y_{r_{k_u},i}$	节点 $i$ 被 $k_u$ 在第 $r_{k_u}$ 个行程服务, 是为1, 否为0。 $\forall i \in V_2$	

1.2 时间依赖函数

考虑在城市道路上行驶的车辆速度随时间的连续变化特征, 确定车辆速度时变函数为<sup>[19]</sup>

$$a_3 \left( \frac{e^{-\frac{(t-t_3)^2}{b_3}}}{\sqrt{2\pi}} \right) \tag{1}$$

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

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。车辆行驶速度时间依赖函数如图2所示。

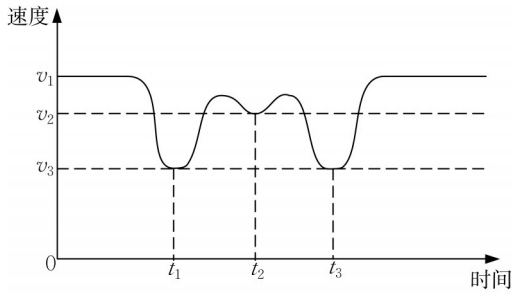


图2 车辆行驶速度时间依赖函数

Fig.2 Vehicle travel speed time dependence function

车辆  $k_e$  在  $T_{k_e i}^{d+/-}$  时刻从节点  $i$  离开, 到达节点  $j$  的时刻为  $T_{k_e j}^{a+/-}$ , 则有

$$l_{ij} = \int_{T_{k_e i}^{d+/-}}^{T_{k_e j}^{a+/-}} v(t) dt \quad (2)$$

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

### 1.3 电动车能耗函数

采用文献[20]中提出的车辆能耗函数, 即自重  $m_{k_e}$  电动车  $k_e$  载重量为  $Q_{k_e ij}$  时从节点  $i$  行驶至  $j$  的能耗为  $E_{k_e ij} =$

无人车约束为:

$$\sum_{i \in V_1 \cup V_2} x_{r_{k_u ij}} = \sum_{i \in V_1 \cup V_2} x_{r_{k_u ji}} \leq 1, \quad \forall k_u \in K_u, \forall j \in V_2, \forall r_{k_u} \in R_{k_u} \quad (8)$$

$$\sum_{k_u \in K_u} \sum_{r_{k_u} \in R_{k_u}} \sum_{i \in V_1 \cup V_2} x_{r_{k_u ij}} = 1, \quad \forall j \in V_2 \quad (9)$$

$$Q_{r_{k_u ij}} \geq \sum_{j \in V_2} d_j y_{r_{k_u j}} - M(1 - x_{r_{k_u ij}}), \quad \forall k_u \in K_u, \forall r_{k_u} \in R_{k_u}, \forall i \in V_1, \forall j \in V_2 \quad (10)$$

$$Q_{r_{k_u ij}} \leq \sum_{j \in V_2} d_j y_{r_{k_u j}} + M(1 - x_{r_{k_u ij}}), \quad \forall k_u \in K_u, \forall r_{k_u} \in R_{k_u}, \forall i \in V_1, \forall j \in V_2 \quad (11)$$

$$Q_{r_{k_u ih}} \geq Q_{r_{k_u ij}} + p_j - d_j - M(1 - x_{r_{k_u ij}}), \quad \forall k_u \in K_u, \forall r_{k_u} \in R_{k_u}, \forall i, h \in V_1 \cup V_2, \forall j \in V_2 \quad (12)$$

$$Q_{r_{k_u ih}} \leq Q_{r_{k_u ij}} + p_j - d_j + M(1 - x_{r_{k_u ij}}), \quad \forall k_u \in K_u, \forall r_{k_u} \in R_{k_u}, \forall i, h \in V_1 \cup V_2, \forall j \in V_2 \quad (13)$$

$$Q_{r_{k_u ij}} \leq Q_u, \quad \forall i, j \in V_1 \cup V_2, \forall r_{k_u} \in R_{k_u}, \forall k_u \in K_u \quad (14)$$

$$B_u - \sum_{i \in V_1 \cup V_2} \sum_{j \in V_1 \cup V_2} E_u l_{ij} x_{r_{k_u ij}} \geq B_u \varepsilon, \quad \forall k_u \in K_u, \forall r_{k_u} \in R_{k_u} \quad (15)$$

$$T_{r_{k_e i}}^d \geq T_{k_e i}^a + t_1 - M(1 - x_{k_e k_u i}^+), \quad \forall k_e \in K_e, \forall k_u \in K_u, \forall i \in V_1 \quad (16)$$

$$T_{r_{k_e i}}^d \leq T_{k_e i}^a + t_1 + M(1 - x_{k_e k_u i}^+), \quad \forall k_e \in K_e, \forall k_u \in K_u, \forall i \in V_1 \quad (17)$$

$$T_{r_{k_u i}}^d \geq T_{r_{k_u i}}^a + t_2 d_i - M(1 - x_{r_{k_u ij}}), \quad \forall r_{k_u} \in R_{k_u}, \forall k_u \in K_u, \forall i \in V_2, \forall j \in V_1 \cup V_2 \quad (18)$$

$$T_{r_{k_u i}}^d \leq T_{r_{k_u i}}^a + t_2 d_i + M(1 - x_{r_{k_u ij}}), \quad \forall r_{k_u} \in R_{k_u}, \forall k_u \in K_u, \forall i \in V_2, \forall j \in V_1 \cup V_2 \quad (19)$$

$$T_{r_{k_u j}}^a \geq T_{r_{k_u i}}^d + \frac{l_{ij}}{v_u} - M(1 - x_{r_{k_u ij}}), \quad \forall k_u \in K_u, \forall r_{k_u} \in R_{k_u}, \forall i \in V_1 \cup V_2, \forall j \in V_1 \cup V_2 \quad (20)$$

$$T_{r_{k_u j}}^a \leq T_{r_{k_u i}}^d + \frac{l_{ij}}{v_u} + M(1 - x_{r_{k_u ij}}), \quad \forall k_u \in K_u, \forall r_{k_u} \in R_{k_u}, \forall i \in V_1 \cup V_2, \forall j \in V_1 \cup V_2 \quad (21)$$

$$T_{(r+1)k_i}^d \geq T_{r_{k_i i}}^a + \sum_{i \in V_2} t_2 p_i y_{r_{k_i i}} + \sum_{j \in V_2} t_2 d_j y_{(r+1)k_i} - M(1 - x_{(r+1)k_i j}), \quad \forall k_u \in K_u, \forall r_{k_u} \in R_{k_u}, \forall i \in V_1, \forall j \in V_2 \quad (22)$$

$$\int_{T_{k_e i}^{d+/-}}^{T_{k_e j}^{a+/-}} \left( (Q_{k_e ij} + m_{k_e}) g f + \frac{C_D A v^2}{21.15} + \delta a_{ij} (Q_{k_e ij} + m_{k_e}) \right) v \quad (3)$$

式中:  $C_D$  为空气动力阻力系数;  $g$  为重力加速度;  $f$  为滚动摩擦因数;  $A$  为车辆迎风面积;  $\delta$  为车辆旋转质量转换系数;  $a_{ij}$  为加速度;  $\eta_T$  为传输系统效率;  $\eta_v$  为逆变器效率;  $\eta_m$  为电动机效率。

### 1.4 模型建立

派遣成本为

$$C_d = c_1 \sum_{k_e \in K_e} \sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_1} x_{k_e ij} + c_2 \sum_{k_e \in K_e} \sum_{i \in V_1} \sum_{j \in V_2} x_{r_{k_e ij}} \quad (4)$$

能耗成本为

$$C_e = c_3 \sum_{k_e \in K_e} \sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_0 \cup V_1} E_{k_e ij} x_{k_e ij} + c_3 \sum_{k_u \in K_u} \sum_{r_{k_u} \in R_{k_u}} \sum_{i \in V_1} \sum_{j \in V_2} E_u l_{ij} x_{r_{k_u ij}} \quad (5)$$

时间窗惩罚成本为

$$C_p = c_4 \sum_{k_u \in K_u} \sum_{r_{k_u} \in R_{k_u}} \sum_{i \in V_1} \sum_{j \in V_2} \max\{T_{j,s} - T_{r_{k_u j}}^a, 0\} x_{r_{k_u ij}} + c_5 \sum_{k_u \in K_u} \sum_{r_{k_u} \in R_{k_u}} \sum_{i \in V_1} \sum_{j \in V_2} \max\{T_{r_{k_u j}}^a - T_{j,t}, 0\} x_{r_{k_u ij}} \quad (6)$$

目标函数为

$$\min C = C_d + C_e + C_p \quad (7)$$



$$T_{(r+1)k_i}^d \leq T_{r_k}^a + \sum_{i \in V_2} t_2 p_i y_{r_k i} + \sum_{j \in V_2} t_2 d_j y_{(r+1)k_i} + M(1 - x_{(r+1)k_i j}), \forall k_u \in K_u, \forall r_{k_u} \in R_{k_u}, \forall i \in V_1, \forall j \in V_2 \quad (23)$$

$$\sum_{i \in V_1} \sum_{k_u \in K_u} x_{k_u k_u i}^+ = \sum_{i \in V_1} \sum_{k_u \in K_u} x_{k_u k_u i}^-, \forall k_e \in K_e \quad (24)$$

车辆约束为:

$$\sum_{j \in V_0 \cup V_1} x_{k_e j} = \sum_{j \in V_0 \cup V_1} x_{k_e j i} \leq 1, \forall k_e \in K_e, \forall i \in V_1 \quad (25)$$

$$\sum_{k_e \in K_e} \sum_{i \in V_0 \cup V_1} x_{k_e i} = 2, \forall j \in V_1 \quad (26)$$

$$\sum_{k_u \in K_u} \sum_{i \in V_1} m_u x_{k_u k_u i}^+ + \sum_{k_u \in K_u} \sum_{r_{k_u} \in R_{k_u}} \sum_{i \in V_1} \sum_{j \in V_2} Q_{r_{k_u} i j} x_{k_u k_u i}^+ - M(1 - x_{k_u i h}) \leq Q_e, \forall k_e \in K_e, \forall h \in V_1 \quad (27)$$

$$\sum_{k_u \in K_u} \sum_{i \in V_1} m_u x_{k_u k_u i}^+ + \sum_{k_u \in K_u} \sum_{r_{k_u} \in R_{k_u}} \sum_{i \in V_1} \sum_{j \in V_2} Q_{r_{k_u} i j} x_{k_u k_u i}^+ + M(1 - x_{k_u i h}) \geq Q_e, \forall k_e \in K_e, \forall h \in V_1 \quad (28)$$

$$\sum_{k_u \in K_u} \sum_{i \in V_1} m_u x_{k_u k_u i}^- + \sum_{k_u \in K_u} \sum_{r_{k_u} \in R_{k_u}} \sum_{i \in V_1} \sum_{j \in V_2} Q_{r_{k_u} i j} x_{k_u k_u i}^- - M(1 - x_{k_u i h}) \leq Q_e, \forall k_e \in K_e, \forall h \in V_1 \quad (29)$$

$$\sum_{k_u \in K_u} \sum_{i \in V_1} m_u x_{k_u k_u i}^- + \sum_{k_u \in K_u} \sum_{r_{k_u} \in R_{k_u}} \sum_{i \in V_1} \sum_{j \in V_2} Q_{r_{k_u} i j} x_{k_u k_u i}^- + M(1 - x_{k_u i h}) \geq Q_e, \forall k_e \in K_e, \forall h \in V_1 \quad (30)$$

$$\sum_{i \in V_1} \sum_{k_u \in K_u} x_{k_u k_u i}^+ \leq \mu_{\max}, \forall k_e \in K_e \quad (31)$$

$$\sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_1} x_{k_e i j} = \sum_{j \in V_1} \sum_{h \in V_0} x_{k_e j h} \leq 1, \forall k_e \in K_e \quad (32)$$

$$B_e - \sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_0 \cup V_1} E_{k_e i j} x_{k_e i j} \geq B_e \varepsilon, \forall k_e \in K_e \quad (33)$$

$$T_{k_e j}^{a+} \geq T_{k_e i}^{d+} + t_{k_e j} - M(1 - x_{k_e i j}), \forall k_e \in K_e, \forall i \in V_0 \cup V_1, \forall j \in V_0 \cup V_1 \quad (34)$$

$$T_{k_e j}^{a+} \leq T_{k_e i}^{d+} + t_{k_e j} + M(1 - x_{k_e i j}), \forall k_e \in K_e, \forall i \in V_0 \cup V_1, \forall j \in V_0 \cup V_1 \quad (35)$$

$$T_{k_e j}^{a-} \geq T_{k_e i}^{d-} + t_{k_e j} - M(1 - x_{k_e i j}), \forall k_e \in K_e, \forall i \in V_0 \cup V_1, \forall j \in V_0 \cup V_1 \quad (36)$$

$$T_{k_e j}^{a-} \leq T_{k_e i}^{d-} + t_{k_e j} + M(1 - x_{k_e i j}), \forall k_e \in K_e, \forall i \in V_0 \cup V_1, \forall j \in V_0 \cup V_1 \quad (37)$$

$$\min(T_{k_e j}^{a-}) \geq \max(T_{k_e i}^{d+}) + t_{k_e j} - M(1 - x_{k_e j}^-), \forall k_e \in K_e, \forall i, j \in V_1 \quad (38)$$

$$\min(T_{k_e j}^{a-}) \leq \max(T_{k_e i}^{d+}) + t_{k_e j} + M(1 - x_{k_e j}^-), \forall k_e \in K_e, \forall i, j \in V_1 \quad (39)$$

$$T_{k_e i}^{d+} \geq T_{k_e i}^{a+} + t_1 - M(1 - x_{k_e k_u i}^+), \forall k_e \in K_e, \forall k_u \in K_u, \forall i \in V_1 \quad (40)$$

$$T_{k_e i}^{d+} \leq T_{k_e i}^{a+} + t_1 + M(1 - x_{k_e k_u i}^+), \forall k_e \in K_e, \forall k_u \in K_u, \forall i \in V_1 \quad (41)$$

$$T_{k_e i}^{d-} \geq \max(T_{r_{k_u} i}^a) + t_1 - M(1 - x_{k_e k_u i}^-), \forall k_e \in K_e, \forall k_u \in K_u, \forall r_{k_u} \in R_{k_u}, \forall i \in V_1 \quad (42)$$

$$T_{k_e i}^{d-} \leq \max(T_{r_{k_u} i}^a) + t_1 + M(1 - x_{k_e k_u i}^-), \forall k_e \in K_e, \forall k_u \in K_u, \forall r_{k_u} \in R_{k_u}, \forall i \in V_1 \quad (43)$$

$$T_{k_e i}^{d+} \geq T_s, T_{k_e i}^{a-} \leq T_i, \forall k_e \in K_e, \forall i \in V_0 \quad (44)$$

$$x_{k_e k_u i}^+ \geq x_{k_e i j}, \forall k_e \in K_e, \forall k_u \in K_u, \forall i, j \in V_1 \quad (45)$$

$$y_{r_{k_u} j} \leq x_{k_e k_u i}^+, \forall k_e \in K_e, \forall r_{k_u} \in R_{k_u}, \forall k_u \in K_u, \forall i \in V_1, \forall j \in V_2 \quad (46)$$

$$x_{k_e k_u i}^+ + x_{k_e k_u i}^- \leq \sum_{j \in V_1} x_{k_e i j}, \forall k_e \in K_e, \forall k_u \in K_u, \forall i \in V_0 \cup V_1 \quad (47)$$

$$x_{k_e j}^- \leq \sum_{i \in V_1} x_{k_e i j}, \forall k_e \in K_e, \forall j \in V_1 \quad (48)$$

$$x_{k_e i j}, x_{r_{k_u} i j}, x_{k_e k_u i}^+, x_{k_e k_u i}^-, x_{k_e i}, y_{r_{k_u} i} \in \{0, 1\} \quad (49)$$

式(7)为目标函数,表示车辆派遣成本、无人车派遣成本、车辆能耗成本、无人车能耗成本以及时间窗惩罚成本的总成本最小化;式(8)表示无人车进出平衡;式(9)表示客户被无人车访问1次;式(10)、(11)表示无人车离开停靠点时的载重量;式(12)、(13)表示无人车在行驶过程中的载重量;式(14)表示无人车的载重量始终不能超过最大载重量;式

(15)表示无人车返回停靠点时剩余电量不低于其最低荷电状态;式(16)、(17)计算无人车离开停靠点的时刻;式(18)、(19)计算无人车离开客户点的时刻;式(20)、(21)计算无人车到达节点的时刻;式(22)、(23)计算无人车在下一个行程离开停靠点的时刻;式(24)表示每个停靠点释放的无人车总数等于车辆在该停靠点回收的无人车数量;式(25)表示每辆车

最多使用 1 次;式(26)表示停靠点  $i$  被电动车访问 2 次;式(27)~(28)、(29)~(30)表示车辆在释放和回收无人车过程中的载重量不超过车辆的最大载重量;式(31)表示释放无人车过程的无人车总数不超过车辆所能搭载的最大无人车数;式(32)表示保证每辆车从所有配送中心只派遣 1 次;式(33)表示每辆车返回配送中心时剩余电量不低于最低荷电状态;式(34)~(35)、(36)~(37)计算车辆到达停靠点释放和回收无人车的时刻;式(38)、(39)表示开始回收无人车时第 1 个停靠点的到达时刻;式(40)~(41)、(42)~(43)表示释放和回收无人车时离开停靠点的时刻;式(44)表示配送中心的工作时间窗;式(45)~(48)表示决策变量之间的关系;式(49)表示决策变量的属性。

## 2 算法实现

VURPSPD-TDN 属于 NP-hard 问题,因此提出混合遗传变邻域搜索算法(HGAVNS)。

### 2.1 初始解构造

初始解构造分为无人车及车辆路径 2 个阶段。

#### 2.1.1 第一阶段

(1)以图 3 为例,某配送区域有 2 个停靠点(101、102)和 18 个客户点(编号 1~18)。图 3a 为停靠点聚类客户点,以就近原则将客户点 1~10 聚类到停靠点 101,客户点 11~18 聚类到停靠点 102。

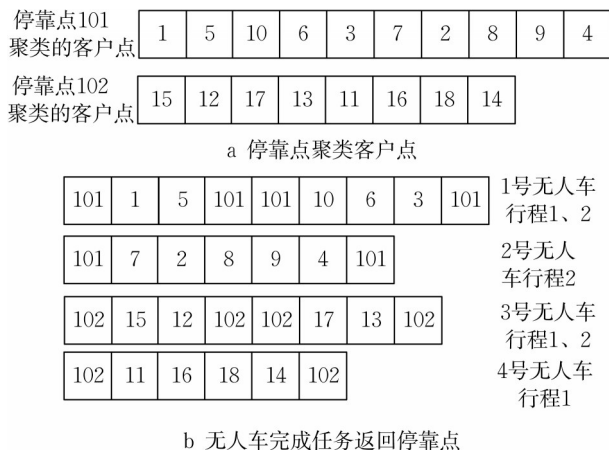


图 3 无人车路径划分示意

Fig.3 Schematic diagram of robot path segmentation

(2)派遣 1 辆无人车,从染色体的第 1 个客户开始,依次检验无人车载重量及电量(假设无人车满载出发)能否为当前客户提供服务。当对下一个客户进行检验并判断无人车服务访问客户点的需求是否

超过最大约束、电池荷电状态,若满足以上约束,将该客户插入到无人车路径。当无人车载重量不能满足要求时,返回临时停靠点补货后再出发,作为无人车的下一个行程,直到无人车电池的荷电状态不能满足要求时,新派无人车为后续客户提供服务,以此类推直到所有客户检验完成。所有无人车完成任务后返回停靠点,完成染色体的划分,如图 3b 所示。

#### 2.1.2 第二阶段

(1)随机生成 Pop\_size 条长度为  $V_1$  的染色体,如图 4a 所示。



图 4 车辆路径划分示意

Fig.4 Schematic diagram of vehicle path segmentation

(2)派遣 1 辆电动车从虚拟配送中心 0 出发到停靠点释放无人车,由在停靠点释放无人车染色体的第 1 个停靠点开始,依次检验电动车的载重量、可搭载的无人车数量以及电池电量能否在当前停靠点释放无人车为客户提供服务。当对下一个停靠点进行检验发现不能满足要求时,新派电动车到该停靠点释放无人车为客户提供服务,并在满足检验要求的最后一个停靠点后和不能满足检验要求的停靠点前插入虚拟配送中心 0,以此类推直到最后一个停靠点检验完成。对已完成无人车释放的停靠点进行存储,以便电动车回收无人车。为了避免电动车原路返回,将已完成无人车释放的停靠点进行随机排列,生成的初始染色体如图 4b 所示。

(3)从完成(2)后产生的路径的最后一个停靠点出发,由在停靠点回收无人车染色体中的第 1 个停靠点开始,依次检验电动车的载重量、可搭载的无人车数以及电池的电量(回收无人车初始时电动车空载出发)能否回收该停靠点的无人车以及货物。当对下一个停靠点进行检验发现不能满足要求时,再从下一条(2)产生的染色体到该停靠点回收无人车以及集货量。当释放完无人车的所有电动车都已完成无人车

回收,但在停靠点还有无人车及货物未被回收时,则新派电动车到该停靠点回收无人车以及货物,以此类推直到最后一个停靠点检验完成。最后,在整条染色体首部及最后一个停靠点后插入虚拟配送中心0,完成该条染色体的划分。重复上述过程,完成染色体的划分,划分后的染色体如图4c、d所示。

(4)选择距离电动车服务的第1个停靠点最近的配送中心作为车辆出发的配送中心,同时在电动车返回各配送中心数量平衡的基础上选择距离服务的最后一个停靠点最近的配送中心作为电动车返回

的配送中心。完成路径划分后,生成2辆车的路径,如图4c、d所示。

## 2.2 选择与交叉

### 2.2.1 选择

采用轮盘赌法进行选择,染色体 $a$ 的适应度值 $f_a$ 计算式为

$$f_a = 1/Z_a \quad (50)$$

式中, $Z_a$ 为个体 $a$ 的目标函数值。

### 2.2.2 交叉

采用顺序交叉方法生成新个体,如图5所示。

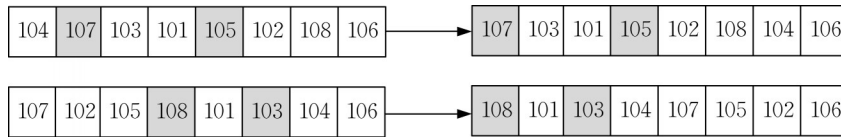


图5 交叉操作示意

Fig.5 Schematic diagram of crossover operations

## 2.3 变邻域搜索

### 2.3.1 邻域结构

设计插入、交换、2-opt 3种邻域结构进行扰动,具体操作如下:

(1)插入。在染色体中随机选择2个停靠点 $i$ 和

$j$ ,将停靠点 $i$ 插入到 $j$ 前面,如图6a所示。

(2)交换。随机选择2个停靠点 $i$ 和 $j$ ,交换停靠点 $i$ 和 $j$ 的位置,如图6b所示。

(3)2-opt。随机选择2个停靠点 $i$ 和 $j$ ,逆转停靠点 $i$ 和 $j$ 的位置,如图6c所示。

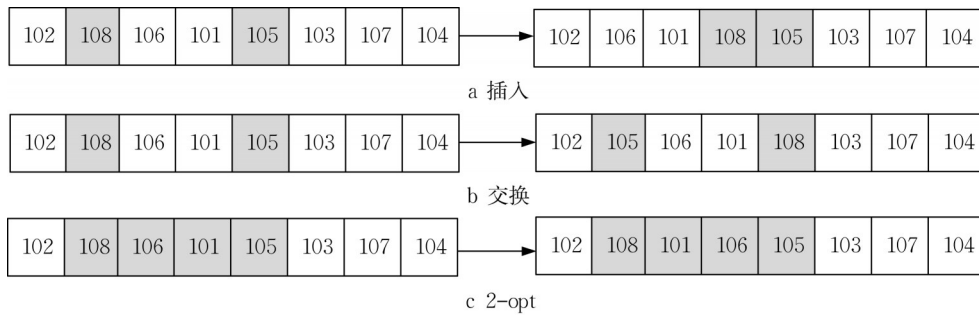


图6 邻域结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of neighborhood structure

### 2.3.2 自适应邻域搜索次数策略

设计自适应邻域搜索次数策略,在算法的不同阶段采用不同的搜索次数。具体步骤如下:

(1)设置初始邻域搜索次数 $count=1$ ,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 $MAX\_gen$ 时,跳出循环。

## 2.4 HGAVNS算法伪代码

HGAVNS的伪代码如图7所示。

## 3 算例分析

对VRPTW标准算例进行修改,客户配货需求量为 $[1.0, 20.0]$ 、集货需求量为 $[0, 20.0]$ 、客户时间窗在 $[09:00, 18:00]$ 范围内随机生成,设置无人车临时停靠点坐标,配送中心的工作时间窗为 $[08:00, 22:00]$ , $c_1$ 为250元·辆 $^{-1}$ , $c_2$ 为50元·辆 $^{-1}$ , $c_3$ 为0.7元·(km·h) $^{-1}$ , $c_4$ 为3元·h $^{-1}$ , $c_5$ 为5元·h $^{-1}$ , $\epsilon$ 为20%, $Q_e$ 为1200 kg, $Q_u$ 为20 kg, $v_u$ 为10 km·h $^{-1}$ 。编程软件为Matlab R2018b。算法参数设为:种群规模 $NIND=100$ ,最优值连续不改变的次数 $MAX\_gen=50\sim$

HGAVNS	
Input:	
	Pop_size: 种群规模;
	MAX_gen: 最大迭代次数;
	$N_k = \{N_1, N_2, \dots, N_l\}$ : 邻域结构 $N_l$ 是第 $l$ 个邻域结构;
	$S_n$ : 自适应邻域搜索次数;
1	初始化种群 $P(t)$
2	gen=0
3	While gen < MAX_gen
4	计算 $P(t)$ 中每个个体的目标函数(Objv( $t$ ));
5	使用轮盘赌选择策略从 $P(t)$ 中选择新种群 $P(t+1)$ ;
6	使用顺序交叉法;
7	for $i = 1$ : Pop_size
8	for $l = 1$ : $l_{max}$
9	找出最好的邻域结构 $P'_l(t+1)$
10	if Objv( $P'_l(t+1)$ ) < Objv( $P_l(t+1)$ )
11	$P_l(t+1) = P'_l(t+1)$ ;
12	$l = l + 1$ ;
13	else
14	iter = iter + 1;
15	end
16	until iter > $S_n$ ;
17	$l = l + 1$ ;
18	end
19	end
20	gen = gen + 1;
21	end
Output:	
	输出最优解

图 7 HGAVNS 伪代码

Fig. 7 Pseudo-code of HGAVNS

200。算例分析结果为算法运行 10 次的平均结果。表 2~4 中,  $N$  为客户数量,  $S$  为停靠点数量,  $C$  为配送成本,  $t$  为程序运行时间,  $T$  为最优解中车辆平均配送时长,  $K$  为最优解中使用车辆的数量,  $C_{avg}$  为配送成本的平均值,  $C_{best}$  为配送成本的最优值,  $e$  为本文算法求得结果与其他结果的偏差。

### 3.1 模型验证

为了验证本文数学模型的正确性, 设计 16 组小规模算例, 将电动车速度设为恒定  $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , 其他条件均不改变, 求解结果如表 2 所示。模型求解器 CPLEX 最长运行时间为 10 800 s。其中, 算例 10-1 为有 10 个客户点的第 1 个算例。

由表 2 可知, 客户数不超过 18 时, CPLEX 能在规定时间内求得最优解, 且本文算法与 CPLEX 最小偏差为 0.18%, 最大偏差为 1.67%; 当客户数超过 20 时, CPLEX 不能在规定时间内求得最优解, 且随着客户数的增加求解结果越差, 说明在求解大规模

表 2 CPLEX 与 HGAVNS 运行结果对比

Tab. 2 Comparison of operation results between CPLEX and HGAVNS

算例	$N$	$S$	CPLEX		HGAVNS		$e_c/\%$
			$C/\text{元}$	$t/\text{s}$	$C/\text{元}$	$t/\text{s}$	
10-1	10	2	369.33	1.58	369.98	5.57	0.18
10-2	10	2	377.05	1.53	377.89	5.61	0.22
12-1	12	2	371.11	19.24	373.32	5.64	0.59
12-2	12	2	378.64	22.21	380.62	5.68	0.52
14-1	14	3	429.81	244.37	431.55	5.94	0.40
14-2	14	3	443.58	248.69	447.37	5.79	0.85
16-1	16	3	452.37	1 810.58	456.90	6.73	0.99
16-2	16	3	450.26	1 635.64	457.26	6.34	1.53
18-1	18	3	457.99	3 622.08	465.75	7.36	1.67
18-2	18	3	460.03	3,725.18	466.12	6.97	1.31
20-1	20	3	468.72	10 800+	473.87	7.15	1.09
20-2	20	3	466.25	10 800+	465.13	6.81	-0.24
22-1	22	3	461.36	10 800+	459.17	6.52	-0.48
22-2	22	3	467.54	10 800+	464.86	6.78	-0.58
24-1	24	3	478.11	10 800+	473.01	7.26	-1.08
24-2	24	3	480.22	10 800+	473.34	7.73	-1.45

注:  $e_c = ((C_{HGAVNS} - C_{CPLEX}) / C_{HGAVNS}) \times 100\%$ 。

算例时 HGAVNS 更具优势。

### 3.2 算法验证

采用 HGAVNS、变邻域搜索算法(VNS)、遗传算法(GA)、模拟退火算法(SA)等分别求解 12 组不同规模的算例, 结果如表 3 所示。算例 50-1 为有 50 个客户点的第 1 个算例, 加粗值为求得算例的最优满意解。

由表 3 可知, HGAVNS、VNS、GA、SA 运行 10 次求得 12 组算例的配送成本平均解中, HGAVNS 相较于 VNS、GA、SA 平均偏差分别为 4.80%、4.74%、3.75%。随着客户规模的增大, 偏差也随之变大。HGAVNS 相较于 VNS 偏差最大为 9.93%, 相较于 GA 偏差最大为 9.33%, 相较于 SA 偏差最大为 7.17%。上述分析表明, 本文算法求解质量高, 验证了求解车辆与无人车协同配送问题的有效性。

### 3.3 敏感性分析

#### 3.3.1 车辆-无人车不同协同方式的影响

为了验证车辆-无人车协同配送方式(Case1)对配送成本的影响, 与现有研究中车辆在停靠点等待无人车完成配送的协同配送方式(Case2)进行对比, 求解结果如表 4 所示。从表 4 可以看出, Case1 相较于 Case2 平均成本相差 24.55%, 车辆平均配送时间相差 -15.95%。Case1 的平均配送成本低于 Case2, 主要是由于 Case1 采取车辆在停靠点不等待无人车的协同方式缩短了总配送时长, 导致完成配送任务的车辆数减少, 即车辆派遣成本减少。可见, 本文所提的协同配



表3 多种算法求解不同规模客户的运行结果

Tab.3 Operation results of algorithms for different customer sizes

算例	S	N	HGAVNS			VNS			GA			SA			$e_c/\%$		
			$C_{avg}/\text{元}$	$C_{best}/\text{元}$	$t/s$	$C_{avg}/\text{元}$	$C_{best}/\text{元}$	$t/s$	$C_{avg}/\text{元}$	$C_{best}/\text{元}$	$t/s$	$C_{avg}/\text{元}$	$C_{best}/\text{元}$	$t/s$	VNS	GA	SA
50-1	5	50	1061.2	1046.0	198.8	1079.0	1067.7	56.0	1083.4	1064.8	103.6	1095.5	1065.2	146.9	1.65	2.05	3.13
50-2	5	50	1002.9	982.9	136.3	1014.8	997.1	37.5	1015.6	1006.5	70.3	1023.2	1007.4	138.1	1.17	1.25	1.98
50-3	5	50	803.6	781.6	205.5	813.9	804.6	57.2	816.1	806.9	106.1	820.2	813.4	179.4	1.27	1.53	2.02
100-1	10	100	2223.1	2192.9	427.5	2283.0	2248.6	118.3	2284.7	2266.5	215.2	2259.0	2236.9	247.1	2.62	2.70	1.59
100-2	10	100	2033.0	2007.4	419.0	2095.6	2064.8	116.7	2093.8	2057.0	209.0	2061.5	2038.9	243.5	2.99	2.90	1.38
100-3	10	100	2059.6	2031.0	441.0	2144.1	2100.2	120.3	2138.6	2128.2	219.5	2146.2	2132.7	252.9	3.94	3.69	4.04
200-1	15	200	3927.0	3892.9	1340.9	4240.7	4094.7	435.4	4207.9	4139.1	803.5	4201.5	4119.5	538.2	7.40	6.68	6.53
200-2	15	200	3444.9	3379.7	1247.6	3669.0	3572.0	406.2	3667.9	3592.7	725.0	3575.0	3513.8	489.1	6.11	6.08	3.64
200-3	15	200	3812.2	3717.3	1329.0	4065.7	4001.5	427.0	4045.3	3998.7	832.1	3972.5	3889.2	446.8	6.24	5.76	4.04
300-1	20	300	5401.5	5247.4	2732.6	5996.7	5946.0	849.7	5957.4	5933.3	1652.1	5818.5	5704.4	1066.7	9.93	9.33	7.17
300-2	20	300	5412.4	5333.1	2157.9	5728.2	5569.6	789.2	5774.9	5684.1	1295.5	5622.4	5558.3	950.0	5.51	6.28	3.74
300-3	20	300	5352.0	5305.4	2573.8	5870.4	5633.5	826.1	5855.4	5812.8	1552.1	5676.2	5565.0	1064.4	8.83	8.60	5.71
均值			3044.5	2993.1	1100.8	3250.1	3175.0	353.3	3245.1	3207.6	648.7	3189.3	3137.1	480.3	4.80	4.74	3.75

注:  $e_c = ((C_{avg, VNS/GA/SA} - C_{avg, HGAVNS}) / C_{avg, VNS/GA/SA}) \times 100\%$ 。

送方式更合理,并能够有效提高配送效率、降低配送成本,给物流企业在制订车辆和无人车协同配送方案方面提供了建议。表5给出了本文协同配送方式下算例100-1最优解的配送方案。

表4 不同协同配送方式的运行结果

Tab.4 Operation results of different cooperative distribution modes

算例	Case1				Case2				$e_c/\%$	$e_T/\%$
	$C_{avg}/\text{元}$	$C_{best}/\text{元}$	$T/h$	$K$	$C_{avg}/\text{元}$	$C_{best}/\text{元}$	$T/h$	$K$		
50-1	1061.22	1045.95	8.28	1.00	1439.17	1427.74	6.38	2.00	26.26	-29.78
50-2	1002.86	982.87	7.93	1.00	1316.63	1306.09	6.75	2.00	23.83	-17.48
50-3	803.63	781.55	8.96	1.00	1196.68	1176.87	6.36	2.00	32.85	-40.88
100-1	2223.14	2192.88	8.56	2.00	2995.49	2973.01	9.21	4.00	25.78	7.06
100-2	2032.95	2007.39	9.63	2.00	2860.06	2832.34	7.19	5.00	28.92	-33.94
100-3	2059.59	2031.04	9.31	2.00	2729.53	2699.81	8.41	5.00	24.54	-10.70
200-1	3927.00	3892.89	9.34	4.00	4980.29	4946.01	9.03	8.00	21.15	-3.43
200-2	3444.87	3379.73	9.92	4.00	4627.48	4546.87	8.61	7.00	25.56	-15.22
200-3	3812.17	3717.31	10.46	5.00	4774.05	4670.19	9.98	8.00	20.15	-4.81
300-1	5401.52	5247.36	10.86	9.00	6208.54	6059.36	9.53	11.00	13.00	-13.96
300-2	5412.39	5333.11	9.86	8.00	7504.25	7440.12	9.35	14.00	27.88	-5.46
300-3	5352.04	5305.42	11.38	8.00	7105.34	6982.66	9.27	13.00	24.68	-22.76
均值	3044.45	2993.13	9.54	3.92	3978.13	3921.76	8.34	6.75	24.55	-15.95

注: 501,502为配送中心,101~110为停靠点;加粗值为算例最优满意解;  $e_c = ((C_{avg, Case2} - C_{avg, Case1}) / C_{avg, Case2}) \times 100\%$ ,  $e_T = ((T_{Case2} - T_{Case1}) / T_{Case2}) \times 100\%$ 。

### 3.3.2 车辆以及无人车最低荷电状态的影响

为了验证不同最低荷电状态对配送成本的影响,选择算例50-1、100-1、200-1和300-1,并针对每个算例设置了不同的最低荷电状态进行求解。HGAVNS求解结果如表6所示。其中,Case1~9为不同车辆与无人车最低荷电状态组合,Case5为本文设置车辆与无人车的最低荷电状态。

从表6可以看出,不同最低荷电状态下的配送成本差异较大。以算例300-1为例,当车辆和无人车的最低荷电状态均为15%时,配送成本最低,平均成本相较于最低荷电状态下降了2.13%,每辆车的平均配送时间减少了0.18h。当车辆最低荷电

状态为25%、无人车最低荷电状态为20%时,配送成本最高,相较于最低荷电状态下增加2.78%,配送时长增加了0.7h。综合考虑配送成本和电池消耗,将车辆和无人车的最低荷电状态设置为20%更加合理且符合长远利益。

### 3.3.3 车辆行驶速度的影响

为了验证电动车行驶速度的不同设置对配送方案的影响,以算例100-1和算例200-1为例,设置Case1~6的6种不同情况。Case1为本文所设置的电动车行驶速度,Case2为在本文电动车最大行驶速度基础上增大5 km·h<sup>-1</sup>,Case3为在本文电动车最大行驶速度基础上减小5 km·h<sup>-1</sup>,Case1~3下电动车行

表 5 协同配送方式下算例 100-1 的配送方案

Tab.5 Distribution scheme for example 100-1 under cooperative distribution mode

电动车	电动车路径
1	501→105→101→109→110→108→106→101→102→105→108→106→502
2	502→107→102→104→103→104→107→110→109→103→501
停靠点	无人车路径
101	101→11→75→8→9→6→4→3→101; 101→2→1→7→5→10→101
102	102→36→38→31→34→39→102; 102→32→33→37→35→102
103	103→99→94→95→97→92→103; 103→98→96→93→100→103
104	104→14→17→18→19→16→104; 104→12→13→15→104
105	105→89→87→82→84→83→86→90→105; 105→88→85→91→105
106	106→77→70→73→76→78→71→106; 106→80→81→79→106
107	107→22→30→24→21→20→23→27→26→107; 107→25→29→28→107
108	108→69→68→61→63→67→72→108; 108→64→66→74→62→65→108
109	109→48→50→41→47→109; 109→51→45→43→46→109; 109→44→40→49→52→42→109
110	110→56→57→60→55→110; 110→53→54→59→58→110

注: 加粗数字表示电动车回收无人车访问的第 1 个停靠点。

表 6 不同荷电状态下 HGAVNS 求解结果

Tab.6 Solving results of HGAVNS under different states of charge

算例	最低荷电状态		50-1			100-1			200-1			300-1		
	车 辆/%	无人 车/%	C/元	T/h	$e_c$ /%	C/元	T/h	$e_c$ /%	C/元	T/h	$e_c$ /%	C/元	T/h	$e_c$ /%
Case1	15	15	1 057.83	8.72	-0.32	2 200.59	8.58	-1.03	3 844.94	9.27	-2.09	5 286.53	11.68	-2.13
Case2	15	20	1 060.81	8.16	-0.04	2 230.22	8.61	0.32	3 889.56	9.47	-0.95	5 314.23	11.14	-1.62
Case3	15	25	1 063.13	8.78	0.18	2 210.86	8.32	-0.56	3 894.84	9.46	-0.82	5 346.45	10.83	-1.02
Case4	20	15	1 061.39	8.07	0.02	2 214.86	8.67	-0.37	3 914.40	9.28	-0.32	5 418.80	10.34	0.32
Case5	20	20	1 061.22	8.28		2 223.14	8.56		3 927.00	9.34		5 401.52	10.86	
Case6	20	25	1 066.47	8.58	0.49	2 226.80	8.76	0.16	3 919.27	9.71	-0.20	5 463.16	11.25	1.14
Case7	25	15	1 058.81	8.81	-0.23	2 228.47	8.35	0.24	3 981.32	9.50	1.38	5 527.30	11.37	2.33
Case8	25	20	1 066.10	8.58	0.46	2 217.28	8.52	-0.26	3 991.87	9.43	1.65	5 551.81	11.56	2.78
Case9	25	25	1 070.42	8.71	0.86	2 247.01	8.39	1.06	4 001.10	9.06	1.89	5 528.16	11.33	2.35

注:  $e_c = ((C_{Case_i} - C_{Case_5}) / C_{Case_5}) \times 100\%$ 。

驶速度具有时间依赖性; Case4~6 下将电动车速度设为恒定, 分别为 40、50 和 60  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。以上 2 组算例的 6 种不同情况运行结果如图 8、9 所示。

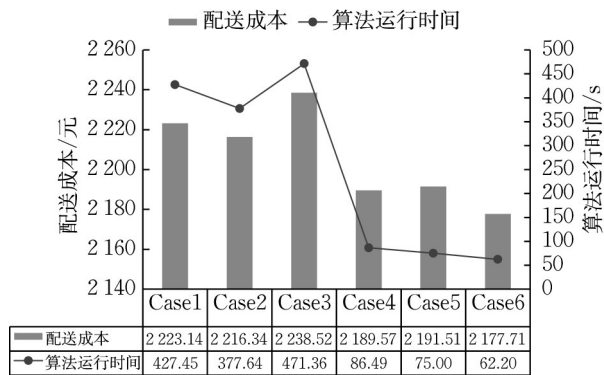


图 8 算例 100-1 不同情况运行结果

Fig.8 Operation results of example 100-1 under different scenarios

由图 8、9 可知, 速度恒定相比速度时变, 配送成本会产生较大偏差。对于算法运行时间而言, 算例 100-1 和算例 200-1 速度恒定时的运行时间远低于速度时变时的运行时间。可以看出, 速度时变增加

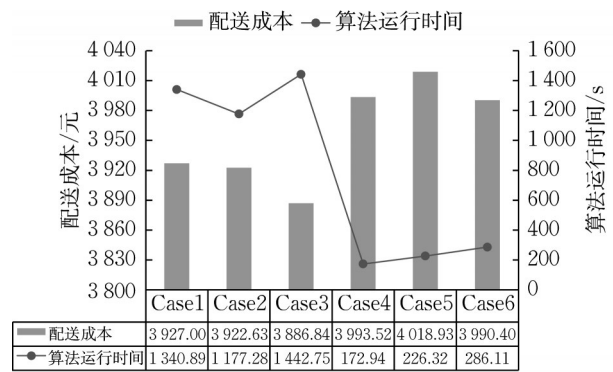


图 9 算例 200-1 不同情况运行结果

Fig.9 Operation results of example 200-1 under different scenarios

了问题的复杂性。因此, 在制定车辆和无人车协同配送方案时, 考虑速度时变更具有现实意义。

## 4 结论

(1) 构建的模型考虑同时配集货、客户软时间窗、车辆行驶速度时变以及车辆、无人车的最低荷电

状态等因素,虽然增加了问题的求解难度,但是更符合现实。

(2)设计的混合遗传变邻域搜索算法引入自适应邻域循环次数,采用3种邻域结构,将遗传算法全局搜索能力和变邻域搜索算法局部寻优有效结合。混合遗传变邻域搜索算法与遗传算法、变邻域搜索算法、模拟退火算法对比结果验证了算法的有效性。

(3)对于车辆-无人车协同配送方式敏感性,车辆-无人车协同配送方式能够有效减少使用车辆数,降低配送成本。

(4)对于车辆-无人车最低荷电状态敏感性,车辆-无人车荷电状态均为15%时,配送成本最小。在现实配送中,电动车以及无人车的最低荷电状态设置为20%最为合适。

(5)对于车辆行驶速度敏感性,同一组算例时车辆行驶速度恒定与速度时变相比存在较大偏差,从而影响配送计划的制定。

#### 作者贡献声明:

范厚明:论文构思、写作和修改,基金获取。

宋彬彬:论文构思、写作和修改,实验验证。

王琪:论文修改,图表制作。

任晓雪:论文修改,图表制作。

#### 参考文献:

- [1] CHEN C, DEMIR E, HUANG Y. An adaptive large neighborhood search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and delivery robots[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 294(3):1164.
- [2] BOYSEN N, SCHWERDFEGGER S, WEIDNGER F. Scheduling last-mile deliveries with truck-based autonomous robots [J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 271(3): 1085.
- [3] SIMONI M D, KUTANOGLUB E, CLAUDELA C G. Optimization and analysis of a robot-assisted last mile delivery system [J]. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 142:102049.
- [4] YU S, PUCHINGER J, SUN S. Van-based robot hybrid pickup and delivery routing problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 298(3): 894.
- [5] LIU D, DENG Z, MAO X, *et al.* Two-echelon vehicle-routing problem: optimization of autonomous delivery vehicle-assisted E-grocery distribution[J]. *IEEE Access*, 2020, 8:108705.
- [6] HEIMFARTH A, OSTERMEIER M, HUBNER A. A mixed truck and robot delivery approach for the daily supply of customers [J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 303(1):401.
- [7] ALFANDARI L, LJUBIC I, SILVA M D. A tailored Benders decomposition approach for last-mile delivery with autonomous robots [J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 299(2):510.
- [8] CHIRALA V S, SUNDAR K, VENKATACHALAM S, *et al.* Heuristics for multi-vehicle routing problem considering human-robot interactions[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(5):3228.
- [9] CHEN Y, CHEN M, CHEN Z, *et al.* Delivery path planning of heterogeneous robot system under road network constraints[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2021, 92(4):107197.
- [10] JENNINGS D, FIGLIOZZI M. Study of sidewalk autonomous delivery robots and their potential impacts on freight efficiency and travel [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2019, 2673(6):317.
- [11] FAN H, ZHANF Y, TIAN P. *et al.* Time-dependent multi-depot green vehicle routing problem with time windows considering temporal-spatial distance [J]. *Computers & Operations Research*, 2021, 129(5):105211.
- [12] KHANCHEHZARRIN S, SHAHMIZAD M, MAHDAVI I, *et al.* A model for the time dependent vehicle routing problem with time windows under traffic conditions with intelligent travel times [J]. *RAIRO: Operations Research*, 2021, 55(4):2203.
- [13] GMIRA M, GENDREAU M, LODI A, *et al.* Tabu search for the time-dependent vehicle routing problem with time windows on a road network [J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 288(1):129.
- [14] BASSO R, KULCSAR B, SANCHEZ-DIAZ L. Electric vehicle routing problem with machine learning for energy prediction[J]. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2021, 145:24.
- [15] 范厚明,张轩,任晓雪,等.多中心开放且需求可拆分的VRPSDP问题优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(6):1521.
- [16] FAN Honming, ZHANG Xuan, REN Xiaoxue, *et al.* Optimization of multi-depot open split delivery vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up [J]. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2021, 41(6): 1521.
- [17] HORNSTRA R P, SILVA A, ROODBERGEN K J, *et al.* The vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery and handling costs [J]. *Computers & Operations Research*, 2020, 115:104858.
- [18] YU V F, ALOINA G, JODIAWAN P, *et al.* The vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery and occasional drivers[J]. *Expert Systems with Application*, 2023, 214:119118.
- [19] ZHOU H, QIN H, ZHANG Z, *et al.* Two-echelon vehicle routing problem with time windows and simultaneous pickup and delivery[J]. *Soft Computing*, 2022, 26(7):3345.
- [20] 李锋,魏莹.求解随机旅行时间的C-VRP问题的混合遗传算法[J]. *系统管理学报*, 2014, 23(6):819.
- [21] LI Feng, WEI Ying. Hybrid genetic algorithm for capacitated vehicle routing problem with stochastic travel time [J]. *Journal of Systems & Management*, 2014, 23(6):819.
- [22] LI L, LIU Q. Acceleration curve optimization for electric vehicle based on energy consumption and battery life [J]. *Energy*, 2019, 169:1039.