

控制与决策

Control and Decision



城市物流配送中时间-位置依赖型多目标绿色车辆路径问题研究

周鲜成, 郑梓亮, 杨堃, 吕阳

引用本文:

周鲜成, 郑梓亮, 杨堃, 等. 城市物流配送中时间-位置依赖型多目标绿色车辆路径问题研究[J]. 控制与决策, 2025, 40(2): 413-422.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0128>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于粒子群算法的满载需求可拆分车辆路径规划

Split vehicle route planning with full load demand based on particle swarm optimization

控制与决策. 2021, 36(6): 1397-1406 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1323>

基于混合整数规划的智能网联车冲突区时序优化模型

Mixed integer programming model of scheduling for connected automated vehicles in a conflict zone

控制与决策. 2021, 36(3): 705-710 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0886>

现货市场补充作用下基于总量折扣的运输服务采购问题研究

Transportation service procurement based on total discount under complementary effect of spot market

控制与决策. 2021, 36(11): 2794-2802 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0274>

基于时空聚类求解带容积约束的选址-路径问题

Time-space cluster based location-routing problem with capacitate constraints

控制与决策. 2021, 36(10): 2504-2510 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0073>

考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题

Vehicle routing problem of refined oil secondary distribution considering unloading sequence constraints

控制与决策. 2020, 35(12): 2999-3005 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1756>

城市物流配送中时间-位置依赖型 多目标绿色车辆路径问题研究

周鲜成^{1,2}, 郑梓亮², 杨堃^{3†}, 吕阳¹

(1. 湖南工商大学 智能工程与智能制造学院, 长沙 410205; 2. 湖南工商大学 前沿交叉学院, 长沙 410205;
3. 湖南工商大学 国际商学院, 长沙 410205)

摘要: 为了推进城市物流配送领域的节能减排, 提出时间-位置依赖型多目标绿色车辆路径问题. 首先, 提出考虑不同情形交通拥堵状况下的车辆行驶时间计算方法, 综合考虑车辆行驶速度动态变化、实时载重等因素对油耗和碳排放的影响, 建立车辆油耗和碳排放测度模型; 然后, 分析车辆配送时刻与顾客满意度间的关系, 建立顾客满意度函数; 接着, 以车辆使用成本、油耗和碳排放成本的最小化以及顾客平均满意度最大化作为优化目标, 构建数学模型; 最后, 设计一种改进的头脑风暴优化算法进行求解. 实验结果表明, 所构建模型和所提出算法能够在物流配送的多个目标间取得平衡, 有效规避交通拥堵, 降低物流配送总成本, 减少油耗和碳排放, 提高顾客满意度.

关键词: 绿色车辆路径问题; 时间依赖型; 位置依赖型; 头脑风暴优化算法; 多目标优化

中图分类号: F252; U116

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0128

引用格式: 周鲜成, 郑梓亮, 杨堃, 等. 城市物流配送中时间-位置依赖型多目标绿色车辆路径问题研究[J]. 控制与决策, 2025, 40(2): 413-422.

Research on time-and-site dependent multi-objective green vehicle routing problem in urban logistics distribution

ZHOU Xian-cheng^{1,2}, ZHENG Zi-liang², YANG Kun^{3†}, LV Yang¹

(1. School of Intelligent Engineering and Intelligent Manufacturing, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China; 2. School of Advanced Interdisciplinary Studies, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China; 3. International Business School, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China)

Abstract: In order to promote energy saving and emission reduction in the field of urban logistics distribution, a time-and-site dependent multi-objective green vehicle routing problem is proposed. Firstly, a method for calculating vehicle travel time under different situations of traffic congestion is proposed. Secondly, the impacts of vehicle travel speed dynamic change, real-time load and other factors on fuel consumption and carbon emission are considered comprehensively to establish a vehicle fuel consumption and carbon emission measurement model. Then the relationship between vehicle delivery moments and customer satisfaction is analyzed and a customer satisfaction function is established. On this basis, a mathematical model is constructed by taking the minimization of the sum of the costs of vehicle use, fuel consumption and carbon emission, and the maximization of the average satisfaction of customers as the optimization objectives. Finally, an improved brainstorming optimization algorithm is designed. The experimental results show that the constructed model and the proposed algorithm can achieve balance between multiple objectives of logistics distribution, effectively avoid traffic congestion, reduce the total cost of logistics distribution, reduce fuel consumption and carbon emission, and improve customer satisfaction.

Keywords: green vehicle routing problem; time-dependent; site-dependent; brain storm optimization algorithm; multi-objective optimization

0 引言

为了推进城市物流配送的节能减排, 绿色车辆路径问题 (green vehicle routing problem, GVRP) 已成为

学术热点. 城市交通拥堵具有时间和空间位置特性, 体现在不同时间段和在不同区域路段的交通拥堵程度不同. 考虑交通拥堵的 GVRP 可分为时间依赖型

收稿日期: 2024-01-29; 录用日期: 2024-06-22.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (71972069); 湖南省高校科学研究重点项目 (21A0391); 湖南省高校物流系统优化与运作管理科技创新团队项目 (湘教通[2019]379号).

†通讯作者. E-mail: myfft_89130@126.com.

*本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

GVRP (time dependent GVRP, TDGVRP) 和位置依赖型 GVRP (site dependent GVRP, SDGVRP). TDGVRP、SDGVRP 分别考虑车辆行驶速度受早晚出行高峰和城市中心拥堵区域影响,在不同时间段和不同区域路段存在较大差异.这将直接影响车辆使用成本、油耗成本、碳排放成本和顾客满意度等优化目标,而这些目标有时又会相互冲突,如何在降低配送成本、减少油耗和碳排放、提高顾客满意度等多个目标间取得平衡是一个亟待解决的问题.因此,考虑交通拥堵时空特性的时间-位置依赖型多目标 GVRP (time-and-site dependent multi-objective GVRP, TSDMO-GVRP) 值得深入研究.

TDGVRP 的研究始于 2010 年^[1],已取得显著进展.针对 TDGVRP,采用 MEET 模型测度碳排放,周鲜成等^[2]提出了一种基于路段划分的行驶时间计算方法,以总成本最小化作为优化目标构建 TDGVRP 模型,设计了一种改进的蚁群算法;刘长石等^[3]构建了时变网络下生鲜电商配送的 TDGVRP 模型,提出了一种自适应改进蚁群算法;Fan 等^[4]针对时变路网下的车辆路径问题,构建了以总成本最小化为优化目标的 TDGVRP 模型,设计了一种嵌入可变邻域搜索的改进遗传算法.采用 CEME 模型测度油耗,Sousa 等^[5]以碳排放最小化作为优化目标,构建了多车型 TDGVRP 模型,提出了结合元启发式局部搜索、随机变量邻域下降过程的混合算法;肖智豪等^[6]针对冷链物流配送,建立了以总成本最小化为目标的 TDGVRP 模型,提出了一种混合自适应大邻域搜索算法;Wang 等^[7]考虑共享运输资源,以碳排放量和运作成本最小化作为优化目标,构建了多车场 TDGVRP 模型,采用节约算法和多目标粒子群算法进行优化.

随着城市交通拥堵的日益严重,SDGVRP 开始引起学界关注.针对 SDGVRP,考虑节点间具有多条路径可供选择,葛显龙等^[8]和李顺勇等^[9]建立了以油耗量最小化为优化目标的 SDGVRP 模型,分别采用改进遗传算法和双循环模拟退火算法进行求解;考虑道路拥堵程度不同,Jie 等^[10]将西安市城市路网的交通状况按照 5 个拥堵等级进行划分,构建了考虑随机因素的 SDGVRP 模型,提出了结合扫描算法和改进粒子群优化算法的混合算法;考虑城市交通拥堵区域,赵志学等^[11]以车辆管理使用费用和油耗碳排放成本最小化作为优化目标,建立了考虑交通拥堵区域的多车型 SDGVRP 模型,设计了一种融合模拟退火算法的混合差分进化算法.

关于多目标 GVRP (multi-objective GVRP, MOGVRP),其研究重点是优化目标如何设计以及如何使用多目标优化算法进行求解.邱金红等^[12]以燃油消耗量、惩罚成本和配送收益方差最小化作为优化目标,构建了 MOGVRP 模型,提出了 VNS-NSGAII 算法;Abdullahi 等^[13]以综合成本、碳排放量和事故风险成本最小化作为优化目标,构建了考虑容量和时间窗约束的 MOGVRP 模型,提出了一种随机贪婪搜索算法;Gong 等^[14]以车辆等待时间、油耗、配送距离最小化作为优化目标,构建了考虑同时取送货的 MOGVRP 模型,采用蜜蜂进化导向的 NSGA-II 算法进行求解;周鲜成等^[15]针对冷链物流配送,以车辆使用成本、货损成本、油耗和碳排放成本、惩罚成本最小化以及顾客满意度最大化作为优化目标,构建了 MOGVRP 模型,设计了基于 NSGA-II 和变邻域搜索的混合算法;Ghannadpour 等^[16]以油耗和车辆使用数最小化和顾客满意度最大化作为优化目标,建立了多车型 MOGVRP 模型,提出了一种基于遗传算法和局部搜索的混合启发式算法.

综上所述,已有成果为深入研究 TSDMOGVRP 奠定了良好基础,但是仍然存在如下不足:1) 目前考虑交通拥堵的研究主要集中在 TDGVRP,同时考虑交通拥堵的时间和空间位置特性的 GVRP 的研究很少;2) 综合考虑车辆使用成本、油耗成本、碳排放成本和顾客满意度等多个优化目标的研究较少,关于 TSDGVRP 多目标优化的研究比较缺乏;3) 针对 MOGVRP,大多采用 NSGA-II 算法及其改进算法,较少采用新的算法.基于现有研究的局限性,本文首先分析车辆行驶速度与车辆行驶时间之间的关系,以及动态速度、实时载重等因素对油耗和碳排放的影响,构建时间-位置依赖型油耗和碳排放测度模型;然后,以综合成本最小化和顾客平均满意度最大化作为优化目标,构建 TSDMOGVRP 模型,设计一种改进的头脑风暴算法 (improved brain storm optimization, IBSO) 进行求解;最后,以长沙市某物流企业为例验证所提出模型和所提出算法的有效性,旨在为城市物流配送企业的节能减排提供参考.

1 问题描述和模型建立

1.1 问题描述

TSDMOGVRP 描述如下:配送中心位置确定,使用同种车型车辆为多个顾客配送货物;顾客的数量、位置、需求量、时间窗、服务时长已知;车辆从配送中心出发,完成任务后返回原配送中心;车辆行驶速度随时间段和拥堵区域变化;目标是在满足各种约束

的条件下,通过优化路径规划,实现总配送成本最小化和顾客平均满意度最大化。

为了便于研究,做出如下假设:1)配送中心拥有容量相同的车辆且数量已知;2)顾客需求量均小于车辆容量;3)每个顾客只能由一辆车配送;4)顾客服务时间窗为软时间窗,其满意度受车辆到达时刻影响;5)受早晚高峰期等因素影响,车辆行驶速度随时间段变化;6)城市不同区域路段的拥堵程度不同,车辆行驶速度随不同区域路段变化;7)车辆在顾客点服务期间,发动机关闭,无油耗和碳排放。

1.2 模型参数和变量

模型参数和变量的符号及其含义如表1所示。

表1 参数和决策变量及其含义

符号	含义
0	作为起点的配送中心
$n+1$	作为终点的虚拟配送中心
N	配送网络顾客点集合 $N=\{1, 2, \dots, n\}$, 共 n 个顾客
N_1	顾客点和起点的集合, $N_1=N \cup \{0\}$
N_2	顾客点和终点的集合, $N_2=N \cup \{n+1\}$
K	配送中心可用车辆集合 $K=\{1, 2, \dots, K'\}$, 共 K' 辆配送车辆
Q	配送车辆的最大容量
Q_{ijk}	车辆 k 在路段 (i, j) 的载重
q_i	顾客 i 的需求量
d_{ijk}	车辆 k 在路段 (i, j) 的行驶距离
t_{ijk}	车辆 k 行驶完路段 (i, j) 全程的时间
H	配送时间段集合, $H=\{h_1, h_2, \dots, h_\alpha\}$
R	配送路段集合, $R=\{r_1, r_2, \dots, r_\beta\}$
$d_{ijk}^{r_\beta}$	车辆 k 在路段 (i, j) 的子路段 r_β 的行驶距离
$t_{ijk}^{r_\beta}$	车辆 k 在路段 (i, j) 的子路段 r_β 的行驶时间
$v_{ijk}^{h_\alpha r_\beta}$	车辆 k 在路段 (i, j) 的子路段 r_β 以及时间段 h_α 内的行驶速度
$d_{ijk}^{h_\alpha r_\beta}$	车辆 k 在路段 (i, j) 的子路段 r_β 以及时间段 h_α 内的行驶距离
$t_{ijk}^{h_\alpha r_\beta}$	车辆 k 在路段 (i, j) 的子路段 r_β 以及时间段 h_α 内的行驶时间, $t_{ijk}^{h_\alpha r_\beta} = d_{ijk}^{h_\alpha r_\beta} / v_{ijk}^{h_\alpha r_\beta}$
t_{ik}	车辆 k 到达节点 i 的时刻
t_{0k}	车辆 k 从配送中心出发的时刻
s_{ik}	车辆 k 为顾客 i 服务的时间
$[a_i, b_i]$	顾客 i 希望的理想服务时间窗
$[a'_i, b'_i]$	顾客 i 可接受的服务时间窗
$[E, L]$	配送中心的开放时间窗
F_{ijk}	车辆 k 在路段 (i, j) 行驶产生的油耗量(L)
C_{ijk}	车辆 k 在路段 (i, j) 行驶产生的碳排放量(kg)
Z_1	配送总成本
Z_2	顾客平均满意度
M_i	顾客 i 的满意度
ω	车辆的固定发车费用
μ	车辆单位时间使用成本
λ_f	车辆单位油耗成本
λ_c	车辆单位碳排放成本
x_{ijk}	0-1 变量, 当车辆 k 行驶在路段 (i, j) 时值为1; 否则为0

1.3 基于路段、时间段划分的车辆行驶时间计算

在 TSDMOGVRP 中车辆行驶速度具有时间-位置依赖性. 车辆行驶时, 可能部分在非拥堵区域内以

正常速度行驶, 部分在拥堵区域以拥堵速度行驶; 在上下班高峰, 车辆行驶速度降低. 因此, 行驶时间难以直接计算, 需要合理处理。

假设车辆 k 从点 i 出发的时刻为 $t_{ik} + s_{ik}$, 且 $t_{ik} + s_{ik}$ 在时间段 h_α 内, 时间段 h_α 的起始、终止时刻分别为 T_α 、 $T_{\alpha+1}$, 车辆 k 在子路段 r_β 的行驶距离为 $d_{ijk}^{r_\beta}$, 期间存在跨时间段和不跨时间段两种情况. 若 $d_{ijk}^{r_\beta} \leq (T_{\alpha+1} - t_{ik} - s_{ik}) \times v_{ijk}^{h_\alpha r_\beta}$, 则车辆 k 在子路段 r_β 行驶过程中无需跨时间段, 行驶时间 $t_{ijk}^{h_\alpha r_\beta} = d_{ijk}^{h_\alpha r_\beta} / v_{ijk}^{h_\alpha r_\beta}$; 若 $d_{ijk}^{r_\beta} > (T_{\alpha+1} - t_{ik} - s_{ik}) \times v_{ijk}^{h_\alpha r_\beta}$, 则车辆 k 在子路段 r_β 跨时间段行驶, 假设跨 L 个时间段, 则行驶时间 $t_{ijk}^{r_\beta} = (T_{\alpha+L} - t_{ik} - s_{ik}) + t_{ijk}^{h_{\alpha+L} r_\beta}$, 每个时间段内行驶的距离为 $d_{ijk}^{h_{\alpha+1} r_\beta}, d_{ijk}^{h_{\alpha+2} r_\beta}, \dots, d_{ijk}^{h_{\alpha+L} r_\beta}$, 在第 L 个时段的行驶时间 $t_{ijk}^{h_{\alpha+L} r_\beta} = d_{ijk}^{h_{\alpha+L} r_\beta} / v_{ijk}^{h_{\alpha+L} r_\beta}$. 则车辆 k 从顾客点 i 行驶至顾客点 j 的总行驶时间为 $t_{ijk} = \sum_{r_\beta \in R} t_{ijk}^{r_\beta}$.

1.4 顾客满意度计算

在城市物流配送中, 配送的时效性是影响顾客满意度的主要因素. 若车辆 k 在顾客 i 的理想服务时间窗 $[a_i, b_i]$ 内完成配送, 则 $M_i = 1$; 若车辆 k 未在顾客 i 的理想服务时间窗 $[a_i, b_i]$ 内完成配送, 但是在顾客 i 可接受的服务时间窗 $[a'_i, b'_i]$ 内完成配送, 则需要根据偏离 $[a_i, b_i]$ 的程度计算顾客满意度; 若车辆 k 不在顾客 i 可接受的服务时间窗 $[a'_i, b'_i]$ 完成配送, 则 $M_i = 0$. 顾客 i 的满意度 M_i 计算如下所示:

$$M_i = \begin{cases} 0, & t_{ik} \leq a'_i \text{ or } t_{ik} \geq b'_i; \\ \sqrt{\frac{t_{ik} - a'_i}{a_i - a'_i}}, & a'_i < t_{ik} < a_i; \\ 1, & a_i \leq t_{ik} \leq b_i; \\ \sqrt{\frac{b'_i - t_{ik}}{b'_i - b_i}}, & b_i < t_{ik} < b'_i; \end{cases} \quad \forall i \in N, k \in K. \quad (1)$$

1.5 油耗和碳排放计算

本文综合考虑车辆油耗受动态速度、实时载重等多方面因素影响, 车辆 k 从顾客点 i 行驶至顾客点 j 的过程中, 以速度 $v_{ijk}^{h_\alpha r_\beta}$ (m/s) 在时间段 h_α 且在子路段 r_β 行驶的油耗 $F_{ijk}^{h_\alpha r_\beta}$ (L) 如下所示:

$$F_{ijk}^{h_\alpha r_\beta} = \beta_1 d_{ijk}^{h_\alpha r_\beta} / v_{ijk}^{h_\alpha r_\beta} + \beta_2 d_{ijk}^{h_\alpha r_\beta} (v_{ijk}^{h_\alpha r_\beta})^2 + \beta_3 (W + Q_{ijk}) d_{ijk}^{h_\alpha r_\beta}. \quad (2)$$

其中: β_1 为发动机模块系数, β_2 为速度模块系数, β_3 为载重模块系数, W 为车辆自重 (kg). 车辆 k 在路段

(i, j)行驶产生的油耗计算如下所示:

$$F_{ijk} = \sum_{r_\beta \in R} \sum_{h_\alpha \in H} F_{ijk}^{h_\alpha r_\beta}, \forall i \in N_1, j \in N_2, \\ i \neq j, k \in K. \quad (3)$$

车辆的碳排放量与油耗量成正比,车辆 k 在路段(i, j)的碳排放量计算如下所示:

$$C_{ijk} = \eta \times F_{ijk}, \quad (4)$$

其中 η 为燃油排放因子,通常 η 为常数(kg/L),本文将 η 取值为2.621 kg/L^[17].

1.6 数学模型

考虑可用车辆数、容量和时间窗等约束条件,以车辆使用成本、油耗和碳排放成本和最小化以及顾客平均满意度最大化作为优化目标,构建TSDMOGVPR模型,如下所示:

$$\min Z_1 = C_1 + C_2 + C_3; \quad (5)$$

$$\max Z_2 = \sum_{i \in N} M_i / n, \quad (6)$$

$$C_1 = \omega \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{0jk} + \\ \mu \left(\sum_{k \in K} \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_2, i \neq j} t_{ijk} x_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} s_{ik} \right), \quad (7)$$

$$C_2 = \lambda_f \sum_{k \in K} \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_2, i \neq j} F_{ijk} x_{ijk}, \quad (8)$$

$$C_3 = \lambda_c \sum_{k \in K} \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_2, i \neq j} C_{ijk} x_{ijk}. \quad (9)$$

$$\text{s.t.} \sum_{k \in K} x_{0jk} \leq K', \forall j \in N; \quad (10)$$

$$\sum_{i \in N_1} \sum_{k \in K} x_{ijk} = \sum_{r \in N_2} \sum_{k \in K} x_{jrk} = 1, \\ \forall j \in N, i \neq j \neq r; \quad (11)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0jk} \leq 1, \forall k \in K; \quad (12)$$

$$\sum_{j \in N} q_j \cdot \left(\sum_{i \in N_1, j \in N, i \neq j} x_{ijk} \right) \leq Q, \forall k \in K; \quad (13)$$

$$\sum_{r_\alpha \in R} d_{ijk}^{r_\alpha} = d_{ijk}, \forall i \in N_1, j \in N_2, \\ i \neq j, k \in K; \quad (14)$$

$$\sum_{r_\alpha \in R} t_{ijk}^{r_\alpha} = t_{ijk}, \forall i \in N_1, j \in N_2, \\ i \neq j, k \in K; \quad (15)$$

$$\sum_{h_\beta \in H} d_{ijk}^{r_\alpha h_\beta} = d_{ijk}^{r_\alpha}, \forall i \in N_1, j \in N_2, \\ i \neq j, k \in K, r_\alpha \in R; \quad (16)$$

$$\sum_{h_\beta \in H} t_{ijk}^{r_\alpha h_\beta} = t_{ijk}^{r_\alpha}, \forall i \in N_1, j \in N_2, \\ i \neq j, k \in K, r_\alpha \in R; \quad (17)$$

$$t_{jk} = t_{0k} + t_{0jk}, \forall j \in N, k \in K; \quad (18)$$

$$t_{jk} = t_{ik} + s_{ik} + t_{ijk}, \forall i \in N, j \in N_2, \\ k \in K, i \neq j; \quad (19)$$

$$E \leq t_{0k} < t_{ik} \leq L, \forall i \in N_2, k \in K; \quad (20)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S, i \neq j} x_{ijk} \leq |S| - 1, \forall S \subset N, k \in K; \quad (21)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i \in N_1, j \in N_2, \\ k \in K, i \neq j. \quad (22)$$

其中:式(5)表示配送总成本最小化;式(6)表示顾客平均满意度最大化;式(7)为车辆使用成本 C_1 的计算,包括固定发车费用、车辆行驶时间成本、车辆服务时间成本;式(8)为油耗成本 C_2 的计算;式(9)为碳排放成本 C_3 的计算;式(10)表示实际参与配送的车辆数不得超过配送中心拥有的车辆总数;式(11)表示每个顾客有且仅有一辆车为其服务;式(12)表示每辆车最多使用一次且从配送中心出发;式(13)表示每条路径中所有顾客的需求量之和不得超过车辆容量;式(14)和(15)表示车辆 k 在路段(i, j)的总行驶距离和总行驶时间分别为车辆在各子路段行驶距离和行驶时间之和;式(16)和(17)表示车辆 k 在路段(i, j)中子路段 r_α 的行驶距离和行驶时间分别为车辆在各时间段行驶距离和行驶时间之和;式(18)为车辆 k 从配送中心出发的时刻与到达路径中第1个顾客 j 的时刻之间的关系;式(19)为车辆到达后一节点与到达前一节点间的时间关系;式(20)表示车辆 k 从配送中心的出发时刻、到达每个顾客点的时刻和返回配送中心的时刻均应在配送中心的开放时间窗内;式(21)为消除子回路;式(22)为决策变量的取值约束。

2 改进头脑风暴算法设计

头脑风暴优化算法(BSO)模拟人类头脑风暴,通过聚类迭代进行求解。BSO无特定初始解要求,全局搜索能力强但是易陷入局部最优。本文提出一种改进的头脑风暴优化算法(IBSO),该算法融合大规模邻域搜索、快速非支配排序和拥挤度比较。IBSO基于头脑风暴迭代个体,计算适应度值聚类,对聚类中心个体采用破坏-修复算子邻域搜索,其他个体采用“交叉”或“变异”算子搜索,然后进行快速非支配排序和拥挤度计算,保留前50%的个体为新父代种群。经多次迭代输出Pareto最优解集。

2.1 编码和解码

种群中每个个体代表一个可行解,所有个体采用正整数编码,长度等于顾客总数,其中每个位置的数

字对应一个顾客点.如服务5个顾客点的方案可编码为{4,1,2,5,3}.解码时,根据车辆容量和配送中心开放时间约束,转换为实际配送路线.若顾客点4、顾客点1、顾客点2的需求量之和满足容量和时间窗约束,而顾客点4、顾客点1、顾客点2、顾客点5需求量之和超过车辆容量或违反时间窗约束,则第1条路线为 $0 \rightarrow 4 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 0$,其中0为配送中心;若顾客点5、顾客点3需求满足容量和时间窗约束,则第2条路线为 $0 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 0$.因此,该个体代表的配送方案由两条路线组成:{0,4,1,2,0}和{0,5,3,0}.

2.2 适应度函数设计

在计算个体适应度时应同时考虑支配它的解、被它支配的解以及个体密度,第*i*个个体的适应度值计算如下所示:

$$W(i) = \sum_{j \in \text{NIND}, j \succ i} S(j), \quad (23)$$

$$S(j) = |\{y | y \in \text{NIND} \wedge j \succ y\}|, \quad (24)$$

$$D(i) = \frac{1}{\sigma_i^p + 2}, \quad (25)$$

$$F(i) = \frac{1}{W(i) + D(i)}. \quad (26)$$

其中:式(23)表示在一个种群中个体*i*原始适应度为所有支配该个体的个体*j*的强度值之和;式(24)表示个体*j*的强度值为受其支配的个体*y*的数量,当 $Z_1(y) > Z_1(j)$ 、 $Z_2(y) < Z_2(j)$ 时,个体*y*被个体*j*支配,即 $j \succ y$;式(25)定义个体密度,计算个体*i*在目标空间中到其他个体的标准化欧氏距离,按照升序排列后取第*p*个值为个体*i*的密度 σ_i^p ,这里 $p = \sqrt{\text{NIND}}$,NIND为种群中的个体数;式(26)中*F*(*i*)为当前个体适应度值的计算.

2.3 邻域搜索算子设计

本文设计3种破坏算子和2种修复算子,共组成6个破坏-修复算子对,对每个聚类中心执行自适应大邻域搜索操作.

2.3.1 破坏算子

1) 相关度最大破坏算子.其基本思想是首先随机选择一个顾客点放入被移除点集合*Ls*,然后根据 $\max\{\Omega(i, j)\}$ 选择与顾客点*i*相关性最大的 $N_r - 1$ 个顾客点放入被移除点集合*Ls*,其中 $\Omega(i, j)$ 为顾客点间的相关性,其表达式如下所示:

$$\Omega(i, j) = \varphi_1 d_{ij} + \varphi_2 (|a_i - a_j| + |b_i - b_j|) + \varphi_3 (|q_i - q_j|) + \varphi_4. \quad (27)$$

通常情况下, $\varphi_1 : \varphi_2 : \varphi_3 = 6 : 5 : 4$,若顾客*i*和顾客*j*在同一条路径上,则 $\varphi_4 = 1$;否则, $\varphi_4 = 0$.

2) 时间窗最远破坏算子.其基本思想是根据 $\max\{\Delta t_i\}$ 选择与车辆到达顾客点*i*的时刻 t_{ik} 与其希望服务时间窗相差最大的 N_r 个顾客放入被移除点集合*Ls*,其中 Δt_i 表达式如下所示:

$$\Delta t_i = \min\{|t_{ik} - a_i|, |t_{ik} - b_i|\}. \quad (28)$$

3) 随机破坏算子.其基本思想是在多条路径中随机选择 N_r 个顾客放入被移除点集合*Ls*.

破坏算子示意图如图1所示.采用上述3种破坏算子之一对个体{4,1,2,5,3}进行破坏操作,破坏后的个体为{4,2,3},顾客点1和顾客点5放入被移除点集合*Ls*中.

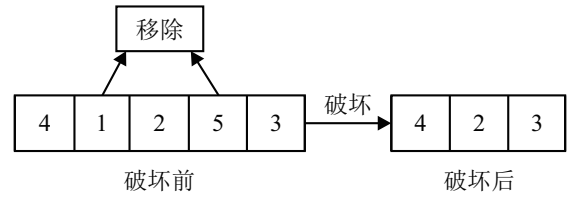


图1 破坏算子示意图

2.3.2 修复算子

1) 成本最小贪婪修复算子.其基本思想是将被移除点集合*Ls*中的顾客点依次插入至被破坏路径的每个位置,计算插入后配送总成本的增量,选择增量最小的点所对应的插入位置进行插入.重复上述操作直至*Ls*为空集.

2) 满意度最大贪婪修复算子.其基本思想是将被移除点集合*Ls*中的顾客点依次插入至被破坏路径的每个位置,计算插入后顾客满意度的增量,选择增量最大的点所对应的插入位置进行插入.重复上述操作直至*Ls*为空集.

修复算子示意图如图2所示.采用上述两种修复算子之一对破坏后的个体{4,2,3}进行修复操作.当移除点集合*Ls*中有顾客点1和顾客点5时,共有8种插入情形,计算最优插入位置.若将顾客点1插入,则将得到新个体,如{4,2,3,1};然后将顾客点5插入,共

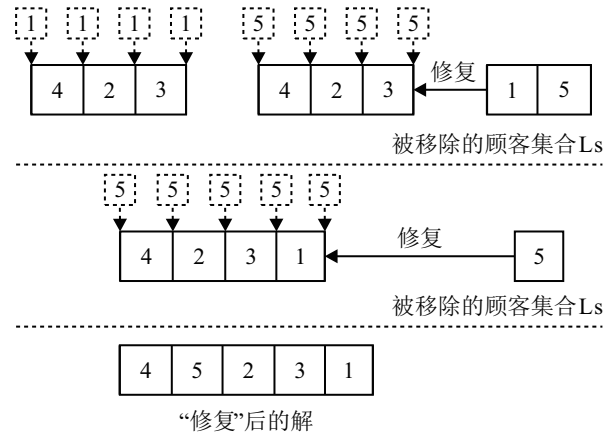


图2 修复算子示意图

有5种插入情形,再次计算最优插入位置,最后得到新个体,如{4,5,2,3,1}.

2.3.3 自适应评分

为了提升搜索最优解的效率,引入“破坏-修复”策略. 初始时,所有破坏-修复算子对均被赋予相同评分(1分);搜索过程中,基于轮盘赌规则选择算子对,其选择概率与评分成正比. 评分依据新解与原始解的比较结果而定: 1) 强支配: 新解在所有目标上优于原始解,当前算子对加4分; 2) 弱支配: 新解至少在一个目标上优于原始解,当前算子对加2分; 3) 互不支配: 新解和原始解各有优劣,当前算子对加1分; 4) 被支配: 新解在所有目标上均不如原始解,当前算子对加0分. 根据多次搜索的得分,按照下式更新算子对评分,以确保高效算子对在后续搜索中更可能被选中,从而提升搜索效果和效率:

$$\Psi = \begin{cases} \Psi, & u = 0; \\ (1 - \rho) \times \Psi + \rho \times (s/u), & u > 0. \end{cases} \quad (29)$$

其中: Ψ 为算子对评分, s 为累计得分, u 为累计使用次数, ρ 为评分更新系数.

2.4 算法流程

所提出算法步骤如下.

step 1: 初始化算法参数,产生初始种群. 种群规模大小设为NIND,迭代次数gen、聚类中心更新次数cgen均设为1,最大迭代次数设为genMAX;随机产生初始种群ZQ.

step 2: 聚类操作. 根据个体适应度值,用K-means聚类方法将个体分为 ϕ 类,并选择该类中适应度值最大的个体作为聚类中心.

step 3: 更新聚类中心. 对每个聚类中心执行自适应大邻域搜索操作.

step 4: 更新个体. 首先产生(0,1)之间的随机数 p ,并与给定的概率 p_1 进行比较($0 < p_1 < 1$). 若 $p < p_1$,则随机在个体数目大于2的两个聚类中选择除聚类中心外的两个个体进行交叉操作,产生两个新个体;若 $p \geq p_1$,则随机在个体数目大于2的一个聚类中选择除聚类中心外的一个个体进行变异操作,产生一个新个体. 从聚类中删除已选择的个体,计算聚类中剩余个体数目NP,若 $NP < \phi + 2$,则完成个体更新,得到子种群ZQ₁,转至step 5;否则,重复step 4.

step 5: 将ZQ和ZQ₁组合,得到种群ZQ₂,去除ZQ₂中重复个体并随机产生新个体补充.

step 6: 由式(5)和(6)计算ZQ₂中所有个体的双目标函数值,对其进行快速非支配排序,并根据个体的等级和拥挤距离,保留前50%的个体作为下一代

的父代种群ZQ;同时,gen + 1.

step 7: 若gen < genMAX,则转至step 2;否则,输出Pareto最优解集,并将个体解码为配送方案,算法结束.

3 实验分析

3.1 实验设置

以长沙市某物流配送企业的车辆调度和路径规划作为应用场景,对模型和算法的有效性进行分析. 该应用场景中顾客点的分布如图3所示. 配送中心经纬度为(113.040 6,28.167 068),服务时间窗口为8h(6:00~14:00). 顾客点共50个,其需求量、时间窗分布参照Solomon数据库的RC208算例. 顾客总需求量为1071个重量单位,假定1个重量单位为10kg,则总需求量为10710kg. 顾客理想时间窗为RC208算例前50个顾客点时间窗的一半,顾客可接受服务时间窗前后延长半小时,但是需要在配送中心的开放时间内. 设定城市中心坐标为(112.984 021,28.190 75),拥堵半径 $r_0 = 2$ km,拥堵时间段为7:30~8:30. 顾客点间距离通过经纬度转换和欧氏距离计算. 车辆行驶速度可通过百度地图API获取,在本应用场景中设定车辆在拥堵时间段行驶在拥堵路段的速度为10km/h,在拥堵时间段行驶在正常路段的速度为15km/h,在正常时间段行驶在拥堵路段的速度为20km/h,在正常时间段行驶在正常路段的速度为40km/h.

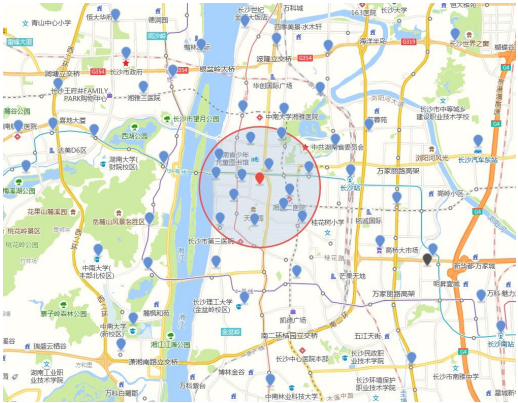


图3 顾客分布点

模型参数取值如表2所示. 其中: μ 、 ω 、 Q 、 W 、 λ_f 、 λ_c 的设置参考文献[18], $\beta_1 \sim \beta_3$ 的计算参考文献[17]. 算法参数设置如表3所示. 其中:NIND为种群大小,genMAX为最大迭代次数, ϕ 为聚类数目, p_1

表2 模型参数

符号	参数值	符号	参数值	符号	参数值
$\mu/(元/h)$	120	$\omega/(元/辆)$	220	$\lambda_f/(元/L)$	6.5
Q/kg	2 200	W/kg	2 500	$\lambda_c/(元/kg)$	0.052 8
β_1	1.27×10^{-3}	β_2	4.29×10^{-7}	β_3	1.18×10^{-8}

表3 算法参数

符号	参数值	符号	参数值	符号	参数值
NIND	50	genMAX	500	ϕ	5
p_1	0.5	N_r	10	ρ	0.6

为个体更新给定概率, N_r 为移除客户点的数目, ρ 为“破坏-修复”算子对评分更新系数。

采用Matlab编程,在Intel(R) Core(TM) i 58500@3.00 GHz的CPU、内存15.8 GB的台式电脑上运行,程序运行软件为Matlab R 2019 a。

3.2 运行结果分析

程序运行得到的Pareto最优解集如表4所示。由表4可知: 1) 通过IBSO算法求解得到的Pareto最优解集共有44个解,即企业可选择的配送方案有44种,需使用的车辆数均为5。2) 44个前沿点分布按照配送成本和顾客满意度从小到大排列,物流配送成本与顾客满意度间呈负相关关系。结果表明,物流配送企业在追求低成本时,需权衡顾客满意度的损失。3) 前沿点1配送成本最低,满意度也最低,对应的车辆使用成本、油耗成本、碳排放成本均为最低,其成本相比于前沿点44低了26.82%,满意度低了43.07%;前沿点44满意度最高(完全满足顾客理想时间窗需求),但是车辆使用成本、油耗成本、碳排放成本均为最高,导致其成本与前沿点1相比高了36.65%。

表4 TSDMOGVRP模型的Pareto最优解集

前沿点	Z_1	Z_2	C_1	C_2	C_3	NV
1	3 217.20	0.569 3	2 932.41	278.85	5.94	5
2	3 243.84	0.590 6	2 952.16	285.60	6.08	5
3	3 319.64	0.606 0	3 006.48	306.64	6.53	5
4	3 323.85	0.648 3	3 010.57	306.75	6.53	5
5	3 330.10	0.651 9	3 012.83	310.65	6.61	5
6	3 356.37	0.654 4	3 029.81	319.75	6.81	5
7	3 371.34	0.660 6	3 040.84	323.62	6.89	5
8	3 379.50	0.676 2	3 048.56	324.04	6.90	5
9	3 391.77	0.683 9	3 059.87	324.98	6.92	5
10	3 404.42	0.692 9	3 064.60	332.74	7.08	5
11	3 416.65	0.729 6	3 078.55	331.05	7.05	5
12	3 427.65	0.729 7	3 086.04	334.49	7.12	5
13	3 451.52	0.747 0	3 103.31	340.95	7.26	5
14	3 565.11	0.765 7	3 187.03	370.19	7.88	5
15	3 576.17	0.800 7	3 190.54	377.59	8.04	5
16	3 617.47	0.815 8	3 244.39	365.30	7.78	5
17	3 630.45	0.825 1	3 230.99	391.14	8.33	5
18	3 668.07	0.834 9	3 280.67	379.32	8.08	5
19	3 682.78	0.843 2	3 290.50	384.10	8.18	5
20	3 705.57	0.854 8	3 308.20	389.08	8.28	5
21	3 724.04	0.859 1	3 320.07	395.55	8.42	5
22	3 749.60	0.863 3	3 338.69	402.34	8.57	5
23	3 793.12	0.872 2	3 382.78	401.78	8.55	5
24	3 817.89	0.887 9	3 392.81	416.21	8.86	5
25	3 830.32	0.892 3	3 400.19	421.17	8.97	5
26	3 851.00	0.901 2	3 417.01	424.94	9.05	5
27	3 872.83	0.908 9	3 431.72	431.91	9.20	5

表4 (续)

前沿点	Z_1	Z_2	C_1	C_2	C_3	NV
28	3 881.33	0.911 2	3 441.46	430.71	9.17	5
29	3 884.51	0.921 2	3 444.78	430.56	9.17	5
30	3 939.61	0.925 7	3 490.85	439.40	9.36	5
31	3 953.91	0.931 0	3 497.58	446.82	9.51	5
32	3 966.84	0.935 5	3 509.56	447.75	9.53	5
33	4 007.87	0.937 2	3 537.33	460.73	9.81	5
34	4 012.72	0.944 3	3 547.47	455.54	9.70	5
35	4 041.44	0.947 5	3 567.50	464.06	9.88	5
36	4 054.56	0.953 0	3 581.84	462.87	9.85	5
37	4 076.88	0.959 4	3 603.68	463.33	9.86	5
38	4 134.35	0.966 4	3 691.47	433.65	9.23	5
39	4 162.36	0.973 8	3 710.80	442.15	9.41	5
40	4 198.65	0.980 6	3 732.39	456.54	9.72	5
41	4 235.67	0.990 1	3 757.43	468.27	9.97	5
42	4 308.60	0.994 3	3 846.18	452.78	9.64	5
43	4 315.33	0.995 5	3 856.58	449.19	9.56	5
44	4 396.71	1.000 0	3 858.73	526.77	11.22	5

图4为前沿点1对应的车辆行驶路线,其中 x 轴和 y 轴是由经纬度转换成的平面直角坐标系。从配送

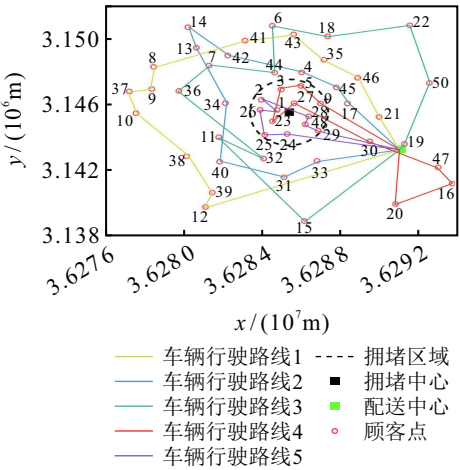


图4 前沿点1对应的行驶路线

表5 前沿点44对应的行驶路径和时间分布

VN	VR	AT
	0-34-14-13-7-24-	154.13-171.00-188.49-200.48-212.37-
1	48-49-22-9-37-4-	237.57-251.96-267.92-288.64-319.30-
0		331.04-354.41-374.81
	0-1-23-26-3-18-42-	177.19-194.00-206.89-220.62-237.18-255.11-
2	6-43-35-0	273.00-287.36-299.18-312.47-332.59
	0-19-33-16-28-5-	42.45-43-59.90-80.50-118.69-140.05-154.35-
3	45-40-10-25-32-0	185.50-203.30-224.05-236.69-257.31
	0-39-36-12-38-11-	164.94-180.00-199.62-220.40-235.24-248.27-
4	21-31-30-47-20-	293.71-316.99-334.34-350.10-364.77-
	50-0	386.11-402.55
	0-44-27-29-15-2-	231.52-250.00-267.11-285.40-304.33-345.10-
5	8-41-46-17-0	373.90-391.32-410.62-423.09-438.99

注: VN: 车辆序号; VR: 车辆行驶路径(“0”表示配送中心,其余数字表示顾客编号); AT的第1个数字表示车辆离开配送中心的时刻,中间的各数字表示车辆到达各顾客点的时刻,最后的数字表示车辆返回配送中心的时刻。

中心发出的5辆车只有2辆驶入城市交通拥堵区域,其余车辆均未驶入城市交通拥堵区域.表5为前沿点44对应的行驶路径和时间分布.由表5可知,1号车、2号车、4号车、5号车均避开了早高峰拥堵时间段,只有3号车进入了早高峰拥堵时间段,表明所构建模型能够较好地规避城市交通拥堵,提升配送效率.

3.3 不同拥堵状况的仿真结果分析

在顾客位置、时间窗、需求量等不变的情况下,探讨拥堵状况变化对配送成本和顾客满意度的影响.考虑拥堵时间段为0.5 h、1 h、1.5 h、2 h四种情况,以及

拥堵区域半径为1 km、2 km、3 km、4 km四种情况,不同拥堵情况将导致求解所得的Pareto最优解集中解的数目不同,因此,选取Pareto最优解集中成本最小、顾客满意度最低的解和成本最大、顾客满意度最高的解作为实验分析的参照点,仿真结果如表6和表7所示.仿真结果表明,拥堵时间延长或区域扩大均会导致车辆使用、油耗、碳排放成本增加,配送总成本上升,顾客满意度降低.这表明配送总成本与拥堵呈正相关,顾客满意度与拥堵呈负相关;拥堵时间延长对配送成本和顾客满意度的影响更为显著.

表6 不同拥堵时间段的配送成本和顾客满意度

拥堵时间段	C_1	C_2	C_3	Z_1	Z_2	NV	前沿点
7:45~8:15	2 812.91	239.01	5.09	3 057.01	0.577 1	5	前沿点 1
	3 934.06	494.41	10.53	4 438.99	1.000 0	5	前沿点 46
7:30~8:30	2 932.41	278.85	5.94	3 217.20	0.569 3	5	前沿点 1
	3 858.73	526.77	11.22	4 396.71	1.000 0	5	前沿点 44
7:15~8:45	2 984.82	291.11	6.20	3 282.12	0.539 0	5	前沿点 1
	3 942.23	596.46	12.87	4 551.56	1.000 0	5	前沿点 42
7:00~9:00	3 062.43	283.73	6.04	3 352.20	0.529 4	5	前沿点 1
	3 977.33	675.41	13.84	4 666.58	1.000 0	5	前沿点 43

表7 不同拥堵半径的配送成本和顾客满意度

r_0/km	C_1	C_2	C_3	Z_1	Z_2	NV	前沿点
1	2 828.94	261.81	5.57	3 096.33	0.573 2	5	前沿点 1
	3 862.79	422.57	8.99	4 294.36	1.000 0	5	前沿点 47
2	2 932.41	278.85	5.94	3 217.20	0.569 3	5	前沿点 1
	3 858.73	526.77	11.22	4 396.71	1.000 0	5	前沿点 44
3	2 972.94	281.07	6.00	3 260.01	0.553 7	5	前沿点 1
	3 949.12	508.38	10.82	4 468.32	1.000 0	5	前沿点 39
4	2 998.41	285.06	6.07	3 289.54	0.537 2	5	前沿点 1
	3 983.70	558.83	11.90	4 554.43	1.000 0	5	前沿点 40

3.4 与单目标TSDGVRP比较分析

为了验证TSDMOGVRP模型的有效性,采用单目标IBSO算法,分别以配送成本、碳排放和顾客满意度作为优化目标,优化结果如表8所示.以本文目标、配送成本最小化、碳排放最小化为优化目标时需要使用的车辆数均为5,而以顾客满意度最大化为优化目标时需要使用6辆车.以总配送成本最小化为目标时,配送成本较前沿点1低了1.30%,顾客满意度低了0.93%;以碳排放最小化为目标时,碳排放较前沿点1低了1.17%,但是配送成本增加了3.85%,顾客满意度低了2.14%;以顾客满意度最大化为目标时,与前

沿点44相比,虽然均能够获得满意度为1的配送方案,但是配送成本却增加了13.31%.对比发现,TSDMOGVRP模型及其求解算法在兼顾环境效益的同时,能够实现配送成本与顾客满意度的平衡.

表8 3种单目标TSDGVRP的求解结果

优化目标	C_1	C_2	C_3	Z_1	Z_2	NV
前沿点 1	2 932.41	278.85	5.94	3 217.20	0.569 3	5
前沿点 44	3 858.73	526.77	11.22	4 396.71	1.000 0	5
配送成本最小	2 885.61	281.22	5.99	3 172.82	0.564 0	5
碳排放最小	3 059.60	276.02	5.87	3 341.50	0.557 1	5
满意度最大	4 384.58	584.89	12.45	4 981.92	1.000 0	6

3.5 算法有效性分析

为了验证IBSO算法的有效性,将其与BSO算法和VNS-NSGAI算法进行对比分析,模型、算法参数同表2和表3,BSO、VNS-NSGAI算法的流程和参数分别同文献[19]和文献[12],选用本文应用场景进行仿真实验.通过仿真实验,比较3种算法在Pareto最优解集、最优配送总成本以及顾客满意度上的表现.图5为3种算法的Pareto最优解集.由图5可知,IBSO、BSO和VNS-NSGAI算法求得的Pareto最优解集中分别有44个、33个、37个解,IBSO算法在Pareto前沿面完全覆盖BSO和VNS-NSGAI.图6为3种算法总成本适应度曲线.由图6可知,IBSO算法优化得到的最优配送总成本比BSO、VNS-NSGAI分别减少了9.61%、12.62%.图7为3种算法顾客满意度适应度曲线.由图7可知:IBSO算法仅需不到50次迭代即可找到满意度为1的配送方案,而BSO和VNS-NSGAI需要分别超过190次和130次迭代.在求解时间上,IBSO算法平均运行时间虽然较长,约244 s,BSO算法约91 s, VNS-NSGAI算法约134 s,但是无论是解的

质量还是数量,其优化性能均明显优于BSO与VNS-NSGAI算法.

4 结论

本文以GVRP为研究基础,探讨了城市交通拥堵的时空特性对车辆行驶时间的影响,分析了动态速度和实时载重与油耗和碳排放间的关系,建立了车辆油耗和碳排放测度模型;在此基础上,以车辆使用成本、油耗和碳排放成本之和最小化以及顾客满意度最大化作为优化目标,构建了TSDMOGVRP模型,设计了一种改进的头脑风暴算法,并进行了仿真分析.研究结论如下:1)针对考虑交通拥堵时间和空间位置特性的绿色车辆路径问题,所构建模型和所提出算法能够在车辆使用成本、油耗和碳排放成本与顾客满意度间取得平衡;2)为了规避交通拥堵时间段,物流配送中心需要优化车辆出发时刻;3)物流配送总成本与顾客满意度间呈负相关,企业需要根据配送目标要求进行优化决策.基于本文存在的局限性,考虑实时交通信息和动态需求的绿色车辆路径问题将是未来进一步深入研究的方向.

参考文献(References)

- [1] Kuo Y. Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time-dependent vehicle routing problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 59(1): 157-165.
- [2] 周鲜成, 刘长石, 周开军, 等. 时间依赖型绿色车辆路径模型及改进蚁群算法[J]. 管理科学学报, 2019, 22(5): 57-68.
(Zhou X C, Liu C S, Zhou K J, et al. Improved ant colony algorithm and modelling of time-dependent green vehicle routing problem[J]. Journal of Management Sciences in China, 2019, 22(5): 57-68.)
- [3] 刘长石, 周鲜成, 盛虎宜, 等. 生鲜电商配送的TDVRPTW研究: 基于经济成本与环境成本兼顾的视角[J]. 控制与决策, 2020, 35(5): 1273-1280.
(Liu C S, Zhou X C, Sheng H Y, et al. TDVRPTW of fresh e-commerce distribution: Considering both economic cost and environmental cost[J]. Control and Decision, 2020, 35(5): 1273-1280.)
- [4] Fan H M, Zhang Y G, Tian P J, et al. Time-dependent multi-depot green vehicle routing problem with time windows considering temporal-spatial distance[J]. Computers & Operations Research, 2021, 129: 105211.
- [5] Sousa M M R, Frota Y, Ochi L S. Green vehicle routing and scheduling problem with split delivery[J]. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 2018, 69: 13-20.
- [6] 肖智豪, 胡志华, 朱琳. 求解冷链物流时间依赖型车辆

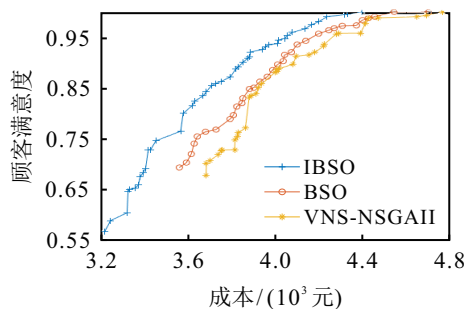


图5 3种算法的Pareto最优解集

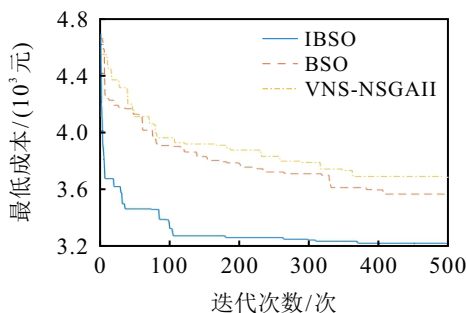


图6 3种算法总成本适应度曲线

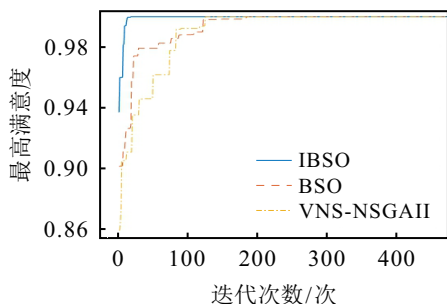


图7 3种算法顾客满意度适应度曲线

- 路径问题的混合自适应大邻域搜索算法[J]. 计算机应用, 2022, 42(9): 2926-2935.
- (Xiao Z H, Hu Z H, Zhu L. Hybrid adaptive large neighborhood search algorithm for solving time-dependent vehicle routing problem in cold chain logistics[J]. Journal of Computer Applications, 2022, 42(9): 2926-2935.)
- [7] Wang Y, Assogba K, Fan J X, et al. Multi-depot green vehicle routing problem with shared transportation resource: Integration of time-dependent speed and piecewise penalty cost[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 232: 12-29.
- [8] 葛显龙, 张慧. 城市实时交通路网车辆路径优化问题研究[J]. 工业工程与管理, 2018, 23(3): 140-149.
- (Ge X L, Zhang H. Study on the optimization of vehicle routing problem in urban real time traffic network[J]. Industrial Engineering and Management, 2018, 23(3): 140-149.)
- [9] 李顺勇, 但斌, 葛显龙. 多通路时变网络下低碳车辆路径优化模型与算法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(2): 454-468.
- (Li S Y, Dan B, Ge X L. Optimization model and algorithm of low carbon vehicle routing problem under multi-graph time-varying network[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(2): 454-468.)
- [10] Jie K W, Liu S Y, Sun X J. A hybrid algorithm for time-dependent vehicle routing problem with soft time windows and stochastic factors[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, 109: 104606.
- [11] 赵志学, 李夏苗, 周鲜成. 考虑拥堵区域的多车型绿色车辆路径问题优化[J]. 计算机应用, 2020, 40(3): 883-890.
- (Zhao Z X, Li X M, Zhou X C. Green vehicle routing problem optimization for multi-type vehicles considering traffic congestion areas[J]. Journal of Computer Applications, 2020, 40(3): 883-890.)
- [12] 邱金红, 孙靖, 仲兆满. 基于配送收益均衡的多目标绿色车辆路径优化算法[J]. 控制与决策, 2023, 38(2): 365-371.
- (Qiu J H, Sun J, Zhong Z M. A multi-objective green vehicle routing optimization algorithm based on delivery benefit balance[J]. Control and Decision, 2023, 38(2): 365-371.)
- [13] Abdullahi H, Reyes-Rubiano L, Ouelhadj D, et al. Modelling and multi-criteria analysis of the sustainability dimensions for the green vehicle routing problem[J]. European Journal of Operational Research, 2021, 292(1): 143-154.
- [14] Gong G L, Deng Q W, Gong X R, et al. A bee evolutionary algorithm for multiobjective vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 2571380.
- [15] 周鲜成, 蒋涛营, 贺彩虹, 等. 冷链物流配送的绿色车辆路径模型及其求解算法[J]. 中国管理科学, 2023, 31(12): 203-214.
- (Zhou X C, Jiang T Y, He C H, et al. Green vehicle routing model and its solution algorithm in cold-chain logistics distribution[J]. Chinese Journal of Management Science, 2023, 31(12): 203-214.)
- [16] Ghannadpour S F, Zarrabi A. Multi-objective heterogeneous vehicle routing and scheduling problem with energy minimizing[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2019, 44: 728-747.
- [17] Barth M, Younglove T, Scora G. Development of a heavy-duty diesel modal emissions and fuel consumption model[R]. UC Berkeley: California Partners for Advanced Transportation Technology, 2005.
- [18] 周鲜成, 吕阳, 贺彩虹, 等. 考虑时变速度的多车场绿色车辆路径模型及优化算法[J]. 控制与决策, 2022, 37(2): 473-482.
- (Zhou X C, Lv Y, He C H, et al. Multi-depot green vehicle routing model and its optimization algorithm with time-varying speed[J]. Control and Decision, 2022, 37(2): 473-482.)
- [19] 狄卫民, 杜慧莉, 张鹏阁. 考虑动态拥堵的多车型绿色车辆路径问题优化[J]. 计算机工程与设计, 2021, 42(9): 2614-2620.
- (Di W M, Du H L, Zhang P G. Optimization of multi-vehicle green vehicle routing problem considering dynamic congestion[J]. Computer Engineering and Design, 2021, 42(9): 2614-2620.)

作者简介

周鲜成(1965—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为物流与供应链管理、物流系统的建模与优化、智能信息处理, E-mail: zxc6501@126.com;

郑梓亮(1999—), 男, 硕士生, 主要研究方向为物流系统的建模与优化, E-mail: 979839525@qq.com;

杨堃(1989—), 女, 讲师, 博士生, 主要研究方向为物流系统的建模与优化、成本管理, E-mail: myfft_89130@126.com;

吕阳(1996—), 男, 硕士, 主要研究方向为物流系统的建模与优化, E-mail: 1007978434@qq.com.