

控制与决策

Control and Decision

考虑时变速度的多车场绿色车辆路径模型及优化算法

周鲜成, 吕阳, 贺彩虹, 刘长石, 杨堃

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1427>

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Frenet坐标系的自动驾驶轨迹规划与优化算法

Trajectory planning and optimization algorithm for automated driving based on Frenet coordinate system

控制与决策. 2021, 36(4): 815–824 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0748>

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>

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>

考虑时变速度的多车场绿色车辆路径模型及优化算法

周鲜成^{1,2}, 吕 阳^{1,2}, 贺彩虹^{3†}, 刘长石², 杨 堃³

(1. 湖南工商大学 大数据与互联网创新研究院, 长沙 410205; 2. 湖南工商大学 湖南省移动电子商务协同创新中心, 长沙 410205; 3. 湖南工商大学 会计学院, 长沙 410205)

摘 要: 针对多车场绿色车辆路径问题, 根据顾客的坐标位置, 采用 K -means 聚类方法将顾客分配给不同的车场; 考虑时变速度和实时载重对车辆油耗和碳排放的影响, 确定车辆油耗和碳排放的度量函数; 在此基础上, 以车辆油耗成本、碳排放成本、车辆使用成本、驾驶员工资以及时间窗惩罚成本之和最小化作为优化目标, 构建多车场绿色车辆路径模型, 并根据模型特点设计一种改进的蚁群算法进行求解. 算例仿真结果表明, 所构建的模型和提出的算法能合理调配不同车场的车辆, 科学规划车辆路径, 有效规避交通拥堵时间段, 降低物流配送总成本, 减少车辆油耗和碳排放, 促进物流配送企业的节能减排.

关键词: 多车场; 绿色车辆路径问题; 时变速度; 改进蚁群算法

中图分类号: N945; U491 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1427

引用格式: 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.

Multi-depot green vehicle routing model and its optimization algorithm with time-varying speed

ZHOU Xian-cheng^{1,2}, LV Yang^{1,2}, HE Cai-hong^{3†}, LIU Chang-shi², YANG Kun³

(1. Research Institute of Big Data and Internet Innovation, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China; 2. Mobile E-business Collaborative Innovation Center of Hunan Province, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China; 3. School of Accounting, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China)

Abstract: Aiming at the multi-depot green vehicle routing problem, considering the coordinate position of customers, the K -means clustering method is used to assign customers to different depots. In view of the influence of time-varying speed and real-time load on vehicle fuel consumption and carbon emission, the measurement function of vehicle fuel consumption and carbon emission is determined. On this basis, a multi-depot green vehicle routing model is established with the optimization objective of minimizing the sum of fuel consumption cost, carbon emission cost, use cost of vehicles, drivers' wages and time window penalty cost. Moreover, an improved ant colony algorithm is designed according to the characteristics of the model. The experimental results show that the model and algorithm can reasonably allocate vehicles in different depots, scientifically plan vehicle routes, effectively avoid periods of traffic congestion, lower the total distribution costs, reduce vehicle fuel consumption and carbon emissions, and promote energy conservation and emission reduction of logistics distribution enterprises.

Keywords: multi-depot; green vehicle routing problem; time-varying speed; improved ant colony algorithm

0 引言

随着全球气候变暖, 二氧化碳的排放已引起全世界的广泛关注. 我国政府在 2015 年气候变化巴黎大会上提出, 2030 年单位国内生产总值 CO₂ 排放比 2005 年将下降 60%~65%. 根据 2019 年 11 月国际能

源署发布的《来自燃料燃烧的二氧化碳排放: 概述》报告, 2017 年交通运输领域排放的 CO₂ 占全球总排放量的 1/4, 排放量达到了 82 亿吨, 其中公路运输占运输活动整个排放量的 3/4. 因此, 研究绿色物流运输具有非常重要的理论和现实意义.

收稿日期: 2020-10-16; 录用日期: 2020-12-03.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71972069); 湖南省高校物流系统优化与运作管理科技创新团队项目.

责任编辑: 唐加福.

†通讯作者. E-mail: hecaihong1991@163.com.

车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP)是由Dantzig和Ramser于1959年首次提出,随后出现了多种变型. Gillett等^[1]于1976年提出了多车场车辆路径问题(multi-depot VRP, MDVRP),随后许多学者针对MDVRP展开了研究. 以车辆行驶距离最小化作为优化目标,颜瑞等^[2-3]分别构建带二维装箱约束和三维装箱约束的MDVRP模型,设计了基于量子粒子群和引导式局部搜索的混合算法、基于局部搜索的混合遗传算法进行求解;叶勇等^[4]构建带容量和配送距离约束的MDVRP模型,提出了一种狼群算法. 以总成本最小化作为优化目标,王铁君等^[5]构建带容量和车辆数约束的MDVRP模型,采用粒子群算法进行求解;Ma等^[6]、葛显龙等^[7]、Li等^[8]构建带容量、时间窗和车辆数约束的MDVRP模型,分别提出了改进的蚁群算法、改进的遗传算法和基于复合邻域的离散萤火虫算法进行求解. 以车辆行驶距离和总成本最小化作为优化目标, Galindres-Guancha等^[9]构建带容量和车辆数约束的MDVRP模型,采用迭代局部搜索算法进行求解; Alinaghian等^[10]构建带容量和配送距离约束的MDVRP模型,提出了一种自适应大邻域搜索与变邻域搜索相结合的混合算法.

为适应绿色物流的发展, Erdoğan等^[11]于2012年提出了绿色VRP(green VRP, GVRP),这项研究引起了国内外学者的关注. 以油耗最小化作为优化目标,吴丽荣等^[11]和李顺勇等^[13]构建带容量约束的GVRP模型,分别采用两阶段算法和有效不等式进行求解. 以碳排放量最小化作为优化目标, Wang等^[14]构建带容量约束的VRP模型,采用禁忌搜索混合算法进行求解; Yu等^[15]、葛显龙等^[16]构建带容量、时间窗和车辆数约束的多车型VRP模型,分别采用改进的分枝定价算法和混合遗传算法进行求解. 李进等^[17]以油耗、碳排放和车辆租用的总成本最小化作为优化目标,构建带容量约束的VRP模型,提出了一种基于路径拆分的禁忌搜索算法;周鲜成等^[18]以车辆油耗和碳排放成本、使用时间成本和固定成本、等待成本与人力成本之和作为目标函数,构建带容量和时间窗约束的GVRP模型,提出了一种改进蚁群算法. Rauniar等^[19]以油耗成本和碳排放成本构成的总成本以及总行驶距离最小化作为优化目标,构建带容量约束的多目标VRP模型,提出了一种基于非支配排序的遗传算法. Zulvia等^[20]以燃料成本、车辆固定成本、折旧成本、变质成本之和与碳排放量最小化以及顾客满意度最大化作为优化目标,构建带容量和时间窗约束的多目标GVRP模型,提出了一种多目标

梯度进化算法.

关于多车场GVRP(multi-depot GVRP, MDGVRP)的研究目前还比较少. Jabir等^[21]以碳排放成本、车辆使用可变成本(含油耗成本)及固定成本之和最小化作为优化目标,构建带容量约束的MDVRP模型,提出了一种结合蚁群算法与变邻域搜索的混合算法. Li等^[22]以油耗和行驶距离最小化作为优化目标,构建带容量和车辆数约束的双目标MDVRP模型,提出了一种自适应局部搜索的混合遗传算法. Wang等^[23]以碳排放量和总成本最小化作为优化目标,构建带容量约束的双目标MDVRP模型,提出了一种3阶段方法. Zhang等^[24]以碳排放量、行驶时间和总成本最小化作为优化目标,构建带容量约束的多目标MDVRP模型,采用遗传算法进行求解. Li等^[25]以碳排放成本和行驶时间最小化以及收益最大化作为优化目标,构建带容量和车辆数约束的多目标MDVRP模型,提出了一种改进的蚁群优化算法.

综上所述,关于MDVRP的研究已经取得了一些成果,但也存在一定的局限性,主要体现在以下3个方面:1)目前GVRP的研究主要集中在单车场GVRP,而关于MDGVRP的研究还较少;2)已有研究大都假设配送车辆在行驶过程中以恒定速度行驶,较少考虑交通拥堵导致车辆以时变速度行驶对MDGVRP建模和优化的影响;3)已有MDVRP研究在考虑时变速度对路径规划的影响时,大都假设所有车辆在0时刻从物流配送中心出发,而为规避交通拥堵考虑车辆在不同时刻出发的研究成果则不多.

针对现有研究存在的不足,本文根据MDGVRP的特点以及城市交通路网的时变特性,首先根据顾客与车场的分布位置,确定顾客与车场的匹配关系;然后考虑时变速度和不同载重对车辆油耗和碳排放的影响,按不同时间段的速度和载重计算各路段的油耗成本和碳排放成本;在此基础上,以车辆油耗成本、碳排放成本、车辆使用成本、驾驶员工资成本以及时间窗惩罚成本之和作为目标函数,构建MDGVRP模型,并设计一种改进蚁群算法(improved ant colony algorithm, IACA)进行求解. 期望为物流企业实现低碳运输、降低能耗和环境污染提供理论参考与方法借鉴.

1 问题与模型

1.1 问题描述

考虑时变速度的MDGVRP描述如下:多个车场给客户配送货物,每个车场都具有一定数量的配送车辆,车场位置和车辆容量已知;客户的数量、位置、需

求量、时间窗以及服务时间已知; 车辆在不同时间段的行驶速度不同, 目标是通过最优车辆路径规划实现总成本最小化. 为便于分析和研究, 做出以下假设:

- 1) 配送车辆为同一车型, 从配送车场出发, 完成任务后返回原车场;
- 2) 客户的需求量均小于车辆容量;
- 3) 车辆行驶速度为时变速度;
- 4) 每个客户有且仅有一辆车为其服务;
- 5) 配送车辆只在行驶时间内产生油耗和碳排放;
- 6) 顾客的服务时间窗为软时间窗, 当配送车辆到达客户点的时间早于该客户点允许服务的最早时间或晚于该客户点允许服务的最晚时间时, 需支付一定的惩罚成本.

1.2 符号和变量

变量、集合以及决策变量的含义如下:

P : 客户集合, $P = \{1, 2, \dots, N\}$, 共 N 个客户;

D : 车场集合, $D = \{N + 1, N + 2, \dots, N + M\}$, 共 M 个车场;

A : 节点集合, $A = \{1, 2, \dots, N + M\}$, $A = D \cup P$;

E : 节点之间的道路集合, 即

$$E = \{(i, j) : i, j \in A, i \neq j\};$$

H_m : 车场 m 的车辆集合, $m \in D, h \in H_m, H_m$ 表示车场 m 的车辆数量;

K : 时间段 k 的集合, $k \in K$;

Q : 配送车辆的容量 (kg);

q_i : 客户 i 的需求量;

d_{ij} : 从节点 i 到节点 j 的距离;

$[ET_i, LT_i]$: 客户点 i 的服务时间窗;

v_f : 车辆在非拥堵时间段的行驶速度;

v_c : 车辆在拥堵时间段的行驶速度;

v_{ijk} : 车辆在时间段 k 内在道路 (i, j) 上的行驶速度;

t_{ijkh} : 车辆 h 在时间段 k 内在道路 (i, j) 上的行驶时间;

d_{ijkh} : 车辆 h 在时间段 k 内在道路 (i, j) 上的行驶距离;

T_{ih} : 车辆 h 到达节点 i 的时间;

l_{ih} : 车辆 h 离开节点 i 的时间;

st_{ih} : 车辆 h 为客户点 i 的服务时间;

wt_{ih} : 车辆 h 提前到达节点 i 的等待时间;

FC_{ijkh} : 车辆 h 在时间段 k 内在道路 (i, j) 上的油耗量 (L);

EC_{ijkh} : 车辆 h 在时间段 k 内在道路 (i, j) 上的碳

排放量 (kg);

μ : 车辆使用单位时间成本 (元/h);

ψ : 驾驶员单位时间工资成本 (元/h);

ξ : 车辆的固定发车费用 (元/辆);

P_e : 车辆早到单位时间惩罚费用 (元/min);

P_l : 车辆晚到单位时间惩罚费用 (元/min);

C_f : 单位油耗费用 (元/L);

C_e : 单位碳排放费用 (元/kg);

X_{ij}^{mh} : 0-1 变量, 当车场 m 中车辆 h 从节点 i 行驶到节点 j 时为 1, 否则为 0;

y_{ih}^m : 0-1 变量, 当车场 m 中车辆 h 为客户点 i 服务时为 1, 否则为 0;

z_{ijk}^{mh} : 0-1 变量, 当车场 m 中车辆 h 在时间段 k 内从节点 i 行驶到节点 j 时为 1, 否则为 0.

1.3 数学模型

以车辆油耗成本、碳排放成本、车辆使用成本、驾驶员工资以及时间窗惩罚成本之和作为目标函数, 构建 MDGVRP 模型, 如下式所示:

$$\min Z = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5. \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{j \in P} \sum_{h \in H_m} x_{ij}^{mh} \leq H_m, \quad \forall i \in D, m \in D; \quad (2)$$

$$\sum_{j \in P} x_{ij}^{mh} = \sum_{j \in P} x_{ji}^{mh} \leq 1, \quad \forall i \in D, m \in D, h \in H_m; \quad (3)$$

$$\sum_{m \in D} \sum_{h \in H_m} y_{ih}^m = 1, \quad \forall i \in P; \quad (4)$$

$$\sum_{i \in P} q_i y_{ih}^m \leq Q, \quad \forall m \in D, h \in H_m; \quad (5)$$

$$\sum_{j \in D} x_{ij}^{mh} = \sum_{j \in D} x_{ji}^{mh} = 0, \quad \forall i \in D, m \in D, h \in H_m; \quad (6)$$

$$d_{ijkh} \leq d_{ij} z_{ijk}^{mh}, \quad \forall i \in E, j \in E, k \in K, h \in H_m; \quad (7)$$

$$T_{ih} + st_{ih} \leq l_{ih}, \quad \forall i \in P, h \in H_m; \quad (8)$$

$$x_{ij}^{mh} \in \{0, 1\}, y_{ih}^m \in \{0, 1\}, z_{ijk}^{mh} \in \{0, 1\}. \quad (9)$$

其中

$$C_1 = \sum_{m \in D} \sum_{h \in H_m} \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} \sum_{k \in K} FC_{ijkh} C_f z_{ijk}^{mh};$$

$$C_2 = \sum_{m \in D} \sum_{h \in H_m} \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} \sum_{k \in K} EC_{ijkh} C_e z_{ijk}^{mh};$$

$$C_3 = \sum_{m \in D} \sum_{h \in H_m} \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} \sum_{k \in K} \mu t_{ijkh} z_{ijk}^{mh} +$$

$$\sum_{m \in D} \sum_{i \in P} \sum_{h \in H_m} \mu wt_{ih} y_{ih}^m +$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{m \in D} \sum_{i \in P} \sum_{h \in H_m} \mu \text{st}_{ih} y_{ih}^m + \\
& \sum_{m \in D} \sum_{h \in H_m} \sum_{i \in D} \sum_{j \in P} \xi x_{ij}^{mh}; \\
C_4 = & \sum_{m \in D} \sum_{h \in H_m} \sum_{I \in A} \sum_{j \in A} \sum_{k \in K} \psi t_{ijkh} z_{ijk}^{mh} + \\
& \sum_{m \in D} \sum_{i \in P} \sum_{h \in H_m} \psi \text{wt}_{ih} y_{ih}^m + \\
& \sum_{m \in D} \sum_{h \in H_m} \sum_{i \in P} \psi \text{st}_{ih} y_{ih}^m; \\
C_5 = & \begin{cases} P_e(\text{ET}_i - T_{ih}), & 0 < T_{ih} < \text{ET}_i; \\ 0, & \text{ET}_i \leq T_{ih} \leq \text{LT}_i; \\ P_l(T_{ih} - \text{LT}_i), & \text{LT}_i < T_{ih}. \end{cases}
\end{aligned}$$

式(1)表示配送总成本最小化。这里: C_1 表示车辆油耗成本; C_2 表示碳排放成本; C_3 表示车辆使用成本, 包括车辆行驶时间成本、车辆等待时间成本、车辆服务时间成本和固定发车费用; C_4 表示驾驶员工资成本; C_5 表示车辆早到或晚到的惩罚成本。式(2)表示各车场已使用车辆数不能超过该车场的车辆数; 式(3)表示车辆从车场出发, 配送完货物之后返回到原车场; 式(4)表示每个客户有且仅有一辆车为其服务; 式(5)为车辆容量约束; 式(6)表示车辆不能从车场到车场; 式(7)表示 d_{ijkh} 与 d_{ij} 之间的限制关系; 式(8)表示车辆到达客户时间、服务时间与离开时间之间的关系; 式(9)为决策变量的取值约束。

1.4 油耗和碳排放量计算

为使车辆油耗量的计算更加符合实际, 本文采用 Barth 等^[26]提出的综合模式排放模型 (comprehensive modal emission model, CMEM) 计算车辆油耗量。如果车辆 h 在时间段 k 内在道路 (i, j) 上的行驶距离为 d_{ijkh} , 则车辆油耗量的计算公式^[14]为

$$\begin{aligned}
\text{FC}_{ijkh} = & \partial_1 d_{ijkh} / v_{ijk} + \partial_2 d_{ijkh} v_{ijk}^2 + \\
& \partial_3 (w + f_{ijkh}) d_{ijkh}. \quad (10)
\end{aligned}$$

其中: ∂_1 为发动机模块系数, ∂_2 为速度模块系数, ∂_3 为载重模块系数, w 为车辆自重 (单位: kg), f_{ijkh} 为车辆 h 在时间段 k 内行驶在道路 (i, j) 上的载重量 (单位: kg)。

已有文献研究表明, 车辆的碳排放量与油耗量成正比, 车辆碳排放量的计算公式^[27]为

$$\text{EC}_{ijkh} = \text{FE} \times \text{FC}_{ijkh}, \quad (11)$$

其中 FE 为燃油排放参数, 通常认为 FE 是一个常数, 本文将 FE 取值为 2.621 kg/L^[27]。

1.5 车辆行驶时间计算

在交通拥堵情况下, 车辆的行驶速度为时变速度, 车辆在不同时间段的行驶速度不同, 为此采用路段划分^[20]方法计算车辆在各路段的行驶时间, 计算步骤如下:

1) 路段划分。对于车辆 h 在时间段 k 内将要行驶的路段 (i, j) 按某一预定距离 ϑ , 将路段 (i, j) 划分为 $R = \lceil d_{ij} / \vartheta \rceil$ 个子路段; 前 $R - 1$ 个子路段的距离都为 ϑ , 最后一个子路段的距离为 $d_{ij} - \vartheta \times (R - 1)$ 。

2) 前 $R - 1$ 个子路段的车辆行驶时间计算。首先将车辆 h 在时间段 k 内行驶到节点 i 的时间 t_{ikh} 设为驶入路段 (i, j) 的第 1 个子路段的开始时间; 然后判断 t_{ikh} 是否处于交通拥堵时间段内, 以确定车辆行驶速度并计算车辆行驶时间。如果 t_{ikh} 处于交通拥堵时段内, 则该车辆的行驶速度为 v_c , 其行驶时间为 ϑ / v_c , 到达第 1 个子路段终点的时间为 $t_{ikh}^1 = t_{ikh} + \vartheta / v_c$; 否则该车辆的行驶速度为 v_f , 其行驶时间为 ϑ / v_f , 到达第 1 个子路段终点的时间为 $t_{ikh}^1 = t_{ikh} + \vartheta / v_f$ 。中间各子路段的车辆行驶时间以此类推来计算。

3) 最后一个子路段的车辆行驶时间计算。到达第 $R - 1$ 个子路段终点的时间 t_{jkh}^{R-1} 即为最后一个子路段的出发时间, 并据此判断其是否处于交通拥堵时间段内。如果 t_{jkh}^{R-1} 处于交通拥堵时间段内, 则该车辆的行驶速度为 v_c , 其行驶时间为 $[d_{ij} - \vartheta \times (R - 1)] / v_c$, 到达路段 (i, j) 终点的时间为 $t_{jkh}^R = t_{jkh}^{R-1} + [d_{ij} - \vartheta \times (R - 1)] / v_c$; 否则该车辆的行驶速度为 v_f , 其行驶时间为 $[d_{ij} - \vartheta \times (R - 1)] / v_f$, 到达路段 (i, j) 终点的时间为 $t_{jkh}^R = t_{jkh}^{R-1} + [d_{ij} - \vartheta \times (R - 1)] / v_f$ 。

车辆在路段 (i, j) 的行驶时间为车辆在 R 个子路段的行驶时间之和。

2 改进蚁群算法设计

蚁群算法是一种具有系统性、自组织性、正反馈性、分布式计算等特征的群体智能算法。为了更好地求解考虑时变速度的多车场绿色车辆路径模型, 在文献[28]的基础上, 本文提出一种改进的蚁群算法。改进思路为: 1) 根据车辆在不同时间段行驶速度不同的特点, 在算法中嵌入考虑速度时变特性的路段划分方法以计算车辆行驶时间; 2) 针对基本蚁群算法容易陷入局部最优的不足, 设计结合确定性和随机选择的转移策略以扩大蚂蚁搜索范围并增加种群多样性。

2.1 状态转移概率的设置

状态转移概率是指蚂蚁在搜索路径时从一个客户点到另一个客户点的转移概率, 其计算公式为

$$j = \begin{cases} \arg \max [W_{ij}(\tau)]^\beta [\eta_{ij}(\tau)]^\gamma, \ell \leq p_i; \\ \text{随机选择 } j \notin \text{tabu}_c, \text{ otherwise.} \end{cases} \quad (12)$$

其中: tabu_c 为禁忌表, 记录蚂蚁 c 已访问过的节点; W_{ij} 表示信息素浓度; η_{ij} 表示能见度 ($\eta_{ij} = 1/d_{ij}$); β 、 γ 分别表示信息素浓度和能见度的相对重要性; ℓ 表示在 $(0, 1)$ 内取值的随机数; p_i 表示随着进化过程动态调整的选择概率, 且 $p_0 = 1$.

2.2 信息素更新策略

信息素更新策略是蚁群算法的关键步骤之一. 为了防止每条道路上的信息素发生更新过快或者更新过慢的情况, 采用全局更新的方式对信息素进行更新. 其信息素更新公式为

$$\Gamma_{ij}^{\text{new}} = \Gamma_{ij}^{\text{new}}(1 - \alpha) + \sum_c \Delta \Gamma_{ij}^c. \quad (13)$$

其中: α 为信息素挥发性, $0 \leq \alpha < 1$; $\Delta \Gamma_{ij}^c$ 为蚂蚁 c 在路段 (i, j) 上留下的单位长度轨迹信息素数量.

2.3 改进蚁群算法的求解步骤

1) 客户分配. 根据车场和客户的位置坐标, 通过 K -means 聚类方法对客户进行聚类, 将多车场 VRP 转化为单车场 VRP. 其基本思想是根据欧几里德距离计算车场与客户之间的距离矩阵, 然后按照就近原则将客户分派给就近的车场, 并构造初始路径, 从而对单车场 VRP 进行路径优化.

2) 初始化. 对算法中的变量和迭代的相关参数进行初始化设置, 设当前迭代次数 $N_c = 1$ 以及最大迭代次数为 $N_{c_{\max}}$.

3) 状态转移规则. 时刻 τ 蚂蚁 c 位于当前节点 i , 在候选节点列表中找出所有未走过的节点, 并按照式 (12) 选择蚂蚁的下一个访问节点 j .

4) 路段 (i, j) 行驶时间的计算.

4.1) 采用路径划分^[20]的方法计算车辆 h 在路段 (i, j) 的行驶时间.

4.2) 判断车场中的车辆 h 是否满足车辆容量约束, 如果满足, 则 $j \in \text{tabu}_c$; 否则返回起点.

4.3) 判断已搜索的蚂蚁数是否为 C , 若是则转 5); 否则转 3).

5) 当前迭代结果计算. 计算当前迭代的最优总成本, 与之前迭代得到的最优解进行比较, 若当前可行解更优, 则记录当前解为最优解.

6) 信息素更新. 按照式 (13) 对最优路径的组成路段进行全局信息素更新.

7) 终止条件. 如果 $N_c \leq N_{c_{\max}}$, $N_c = N_c + 1$, 则转 3); 否则循环结束, 输出算法记录的最优解.

3 算例仿真

3.1 实验设置

以 Solomon 测试数据库中的集中分布型算例 C201、C202, 随机分布型算例 R201、R202, 以及混合分布型算例 RC201、RC202 为基础, 增加两个位置坐标为 $(10, 30)$ 和 $(50, 75)$ 的车场, 构成本文的仿真算例, 新算例由 3 个车场和 100 个客户点组成. 3 个车场的服务时间为 960 min, 即 16 h; 车辆从车场出发的最早时间为 6:00 (设为零时刻), 回到车场的最晚时间为 22:00. 根据城市交通规律, 将 7:00~9:00 和下午 18:00~20:00 设定为交通拥堵时间段 (即早晚高峰时间段), 在此期间车辆以拥堵速度 v_c 行驶; 在非拥堵时间段, 车辆以正常速度 v_f 行驶; v_f 和 v_c 的取值分别为 60 km/h 和 20 km/h.

程序采用 Matlab R2019a 编程实现, 在 CPU 3.40 GHz、内存 8 G 的微机运行. 模型的参数取值如表 1 所示^[13,29], 算法的参数取值如表 2 所示^[18], 其中 C 为蚂蚁数.

表 1 模型参数

符号	参数值	符号	参数值	符号	参数值
μ	90	ψ	24	ξ	200
P_e	6	P_l	6	C_f	6.5
C_e	0.0528	Q	3000	w	6950
∂_1	1.4×10^{-3}	∂_2	4.35×10^{-7}	∂_3	1.04×10^{-8}

表 2 算法参数

符号	参数值	符号	参数值	符号	参数值
$N_{c_{\max}}$	400	C	30	W_{ij}	20
β	1	γ	3	α	0.2

3.2 算例仿真结果分析

3.2.1 车辆路径规划及配送时间分布

为验证所构建模型和所提出算法的有效性, 采用算例 RC201 进行测试, 程序的运行时间为 156.3 s. 程序的最优车辆路径规划方案如图 1 所示, 其中正方形表示车场.

算例 RC201 的最优行驶路径与时间分布如表 3 所示. 表 3 中: DN 表示车场序号, SN 表示车辆序号, VR 表示车辆行驶路径, VAT 表示车辆到达各个节点的时间.

由表 3 可知: 1) SN 显示, 3 个车场一共使用 8 辆配送车辆, 其中车场 101 使用 3 辆车, 车场 102 使用 2 辆车, 车场 103 使用 3 辆车. 2) VR 显示, 不同车辆配送的客户数量存在较大差异, 如车场 101 的 1 号车辆配送客户数量最多达到 21 个, 车场 101 中 3 号车配送客户

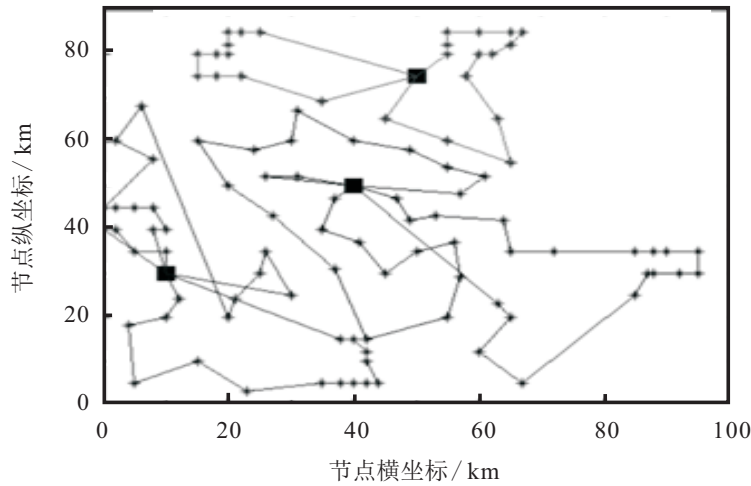


图1 算例RC201的最优车辆路径规划

表3 算例RC201的最优行驶路径与时间分布

DN	SN	VR	VAT
101	1	101-90-65-66-64-56-95-92-91-80-94-93-96-81-68-69-98-53-88-60-100-55-101	353-369-387-405-425-443-461-479-495-511-533-549-567-585-605-629-645-663-683-703-731-749-763.14
	2	101-67-62-50-34-31-29-27-26-28-30-32-33-89-76-51-85-63-84-101	242-278-296-314-338-352-364-380-396-410-424-435-451-489-509-529-549-563-587-614.02
	3	101-83-20-82-101	85-115-143-185-199.76
102	1	102-42-44-42-40-36-35-37-38-39-41-72-54-71-70-102	25-43-55-69-85-101-113-127-141-153-169-191-211-233-277-293.16
	2	102-61-2-6-7-46-4-45-5-3-1-8-102	246-268-304-318-332-348-360-372-386-398-412-434-469.36
103	1	103-13-15-16-17-47-14-103	645-663-679-691-707-719-733-748.81
	2	103-9-10-11-12-78-73-79-99-52-86-74-57-24-22-103	365-381-397-409-425-447-465-485-535-551-569-585-607-631-643-676.54
	3	103-87-59-97-75-58-77-25-23-21-48-18-19-49-103	351-369-385-403-427-499-471-495-509-521-533-545-561-573-609.72

数量最少只有3个.这主要是由于不同车场位置、交通拥堵状况、客户需求量和服务时间窗以及车辆容量等因素所致.3) VAT显示,车场101中2号车辆、车场102中2号车辆以及车场103中2号和3号车辆完全避开了早晚高峰拥堵时间段;车场101中1号车辆和车场103中1号车辆避开了早高峰拥堵时间段,只进入晚高峰拥堵时间段;车场101中3号车辆和车场102中1号车辆只进入早高峰拥堵时间段,避开了晚高峰拥堵时间段.这说明本文提出的方法能够合理规避交通拥堵时间段,提高车辆配送效率,有效降低配送总成本.

3.2.2 不同位置单车场和多车场的仿真结果分析

为比较单车场和多车场对不同优化目标的影响,采用不同位置的单车场(单车场101,单车场102,单车

场103)和多车场对各类算例进行仿真分析,仿真结果如表4所示.其中:TC表示总成本(单位:元),CC表示油耗和碳排放成本(单位:元),TT表示车辆总行驶时间(单位:min).

由表4可知:1)多车场的车辆配送成本比单车场低得多.在配送总成本方面,多车场车辆配送相比单车场101、单车场102以及单车场103车辆配送分别平均降低了19.89%、21.84%、20.01%的成本;在油耗和碳排放成本方面,多车场车辆配送也存在一定的优势,分别平均减少了5.70%、9.28%、7.83%的成本.这说明多车场车辆配送能够在一定程度上减少配送成本以及油耗和碳排放成本.2)多车场车辆总行驶时间比单车场少.多车场车辆配送相比单车场101、单车场102以及单车场103车辆配送,其行驶时间分别

表4 不同位置单车场和多车场的仿真结果比较

算例	单车场 101			单车场 102			单车场 103			多车场		
	TC	CC	TT	TC	CC	TT	TC	CC	TT	TC	CC	TT
C201	58 946	1 807	25 668	59 007	1 779	26 273	58 426	1 839	25 891	47 755	1 706	21 989
C202	49 334	1 798	21 983	53 287	1 876	23 784	51 069	1 882	22 553	45 034	1 649	20 068
R201	20 097	1 792	6 924	19 886	1 998.3	6 671.4	19 429	1 753	6 605.4	14 715	1 739	4 933
R202	18 511	1 770	6 512	18 881	1 968	6 481.4	18 300	1 798	6 331	13 736	1 731	4 835.4
RC201	20 682	1 684	7 301	20 850	1 712	7 235	20 487	1 896	7 100	14 674	1 551	5 333
RC202	19 437	1 788	6 908	19 754	1 727	7 008	19 591	1 716	6 895	13 898	1 656	5 245
平均值	31 168	1 773	12 549	31 944	1 843	12 909	31 217	1 814	12 563	24 969	1 672	10 401

平均减少了17.12%、19.43%、17.21%。比较总配送成本和总行驶时间发现,采用多车场配送成本更低,配送效率更高。

3.2.3 不同拥堵速度的仿真结果分析

在模型参数和约束条件不变的前提下,分别取拥

堵速度为15 km/h和10 km/h对各类算例进行仿真实验,并与拥堵速度为20 km/h的仿真结果进行比较,如表5所示。其中:TC表示总成本(单位:元),VMC表示车辆使用成本(单位:元),CC表示油耗和碳排放成本(单位:元)。

表5 不同拥堵速度的仿真结果比较

算例	20			15			10		
	TC	VMC	CC	TC	VMC	CC	TC	VMC	CC
C201	47 755	40 880	1 706	48 534	41 319	1 920	49 684	42 312	2 030
C202	45 034	39 829	1 649	46 477	40 560	1 778	47 657	40 890	1 980
R201	14 715	10 373	1 739	14 934	10 411	1 809	15 506	10 850	1 947
R202	13 736	10 188	1 731	13 955	10 352	1 813	15 113	11 310	1 924
RC201	14 674	10 943	1 551	14 852	10 981	1 690	14 962	11 057	1 740
RC202	13 898	10 775	1 656	14 121	10 835	1 799	14 578	11 159	1 906
平均值	24 969	20 498	1 672	25 479	20 743	1 802	26 250	21 263	1 921

由表5可知:随着拥堵速度下降,配送总成本、车辆使用成本以及油耗和碳排放成本都会随之增加,这说明各项成本与拥堵速度之间是反比关系。1)在配送总成本方面:拥堵时速从20 km/h降为15 km/h时,平均增加了2.04%;拥堵时速降为10 km/h时,平均增加了5.13%;在车辆使用成本方面,分别平均增加了1.20%和3.73%。2)在油耗和碳排放方面,分别平均增加了7.78%和14.89%。这说明交通拥堵状况会对车辆配送成本、油耗和碳排放产生影响,且随着交通拥堵程度的增加,车辆配送成本、油耗和碳排放均会有所增加。

3.2.4 不同优化目标的仿真结果分析

在其他条件不变的前提下,分别以车辆总行驶距离、车辆总行驶时间最小化作为优化目标进行仿真实验,并与以总配送成本最小化作为优化目标的仿真结果进行比较,如表6所示。其中:TC表示总成本(单

位:元),TD表示总行驶距离(单位:km),TT表示总行驶时间(单位:min)。

由表6可知:1)在配送总成本方面,本文构建的模型分别与以总行驶距离最小化、以总行驶时间最小化作为优化目标的模型相比,平均减少32.35%和19.08%;2)在车辆总行驶距离方面,以总行驶距离最小化作为优化目标求得的总行驶距离最短,分别比以总配送成本最小化、以总行驶时间最小化作为优化目标求得的总行驶距离平均减少15.59%和16.39%;3)在车辆总行驶时间方面,以总行驶时间最小化作为优化目标求得的总行驶时间最短,分别比以总配送成本最小化作为优化目标、以总行驶距离最小化作为优化目标求得的总行驶时间平均要减少3.05%和14.77%,这说明以总行驶距离或总行驶时间最小化作为优化目标,其配送总成本并不是最低,而本文构建的模型能有效降低配送总成本,更有利于提高物流企业的经济效益。

表6 不同优化目标的仿真结果比较

算例	以总配送成本最小为目标			以总行驶距离最小为目标			以总行驶时间最小为目标		
	TC	TD	TT	TC	TD	TT	TC	TD	TT
C201	47 755	787.5	21 989	79 662	656	25 130	62 249	740.3	21 200
C202	45 034	814	20 068	65 821	654.5	23 096	56 589	816.3	19 212
R201	14 715	827.4	4 933	20 393	702.7	5 522.8	17 352	796.8	4 889.8
R202	13 736	830.5	4 835.4	18 833	697.5	5 447.8	16 747	860.2	4 819.8
RC201	14 674	759.1	5 333	17 409	686.2	5 963	15 337	852	5 238
RC202	13 898	816.3	5 245	19 338	684.4	5 824	16 870	815.6	5 144
平均值	24 969	805.8	10 401	36 909	680.2	11 831	30 857	813.5	10 084

3.3 不同算法的仿真结果分析

为验证本文算法的有效性,将所提出的改进蚁群算法(IACA)分别应用于Cordeau等^[30]的MDVRP标准测试算例中的7个算例,并分别与文献[31]的新启发式算法(new heuristic, NH)以及文献[32]的协同进化算法(cooperative coevolutionary algorithm, CCA)进行比较分析,其优化目标均为总行驶距离最小化。其

中:文献[31]的仿真实验采用Fortran编程实现,并在SUN 4/370工作站上运行;文献[32]的仿真实验采用C++11编程实现,在装有两个2.50 GHz CPU、内存96 G的计算机上运行。仿真结果如表7所示。其中: M 表示车场数量, N 表示客户数量, Q 表示车辆容量(指单位重量),TD表示总行驶距离(单位:km),RT表示算法运行时间(单位:s)。

表7 不同算法的仿真结果比较

算例	M	N	Q	NH		CCA		IACA	
				TD	RT	TD	RT	TD	RT
p01	4	50	80	576.9	66	576.87	1	440.89	46.13
p02	4	50	160	474.6	72	473.87	0.5	446.56	42.53
p03	5	75	140	641.2	108	641.19	2.5	547.26	64.69
p04	2	100	100	1 012	132	1 007.4	189.7	705.41	93.9
p05	2	100	200	756.5	144	750.11	26.6	694.21	91.21
p06	3	100	100	879.1	126	876.5	77.3	668.32	89.99
p07	4	100	100	893.8	288	888.41	24.2	688.01	138.1
平均值				747.73	133.71	744.91	45.97	598.67	80.94

由表7可知:1)在车辆总行驶距离方面,IACA在所有算例中都能取得最优解。其中与NH相比较,IACA的最高减少比率为30.30%,最低减少比率为5.91%,平均减少比率为19.94%;与CCA相比较,IACA的最高减少比率为29.98%,最低减少比率为5.76%,平均减少比率为19.63%。这说明IACA与NH和CCA算法比较,能获得更好的优化结果。2)在算法运行时间方面,与NH相比,IACA的收敛速度要快得多,其运行时间最高减少比率为52.05%,最低减少比率为28.58%,平均减少比率为39.47%;与CCA相比,由于CCA的仿真运行环境远远优于IACA的运行环境,CCA的运行时间要短。总体而言,IACA具有较快的收敛速度,但由于3种算法的运行环境不一样,不

能简单比较。

4 结论

物流和交通运输已成为碳排放的主要来源之一,为了减少物流配送过程中车辆产生的能源消耗和碳排放量,本文针对时变路网条件下的多车场绿色车辆路径问题,采用K-means聚类方法将多车场问题转化为单车场问题,分析时变速度和实时载重与车辆油耗和碳排放之间的关系,构建以油耗成本、碳排放成本、车辆使用成本、驾驶员工资以及时间窗惩罚成本之和最小化作为优化目标的多车场绿色车辆路径模型,并设计了一种改进蚁群算法进行求解。实验结果表明,本文所构建的模型和所提出的算法在求解考虑时变速度的多车场绿色车辆路径问题时,能对车辆的出

发时刻和配送路径进行科学规划,有效降低车辆的油耗和碳排放以及物流配送总成本,实现了经济效益和环境效益的协同优化。

参考文献(References)

- [1] Gillett B E, Johnson J G. Multi-terminal vehicle-dispatch algorithm[J]. *Omega*, 1976, 4(6): 711-718.
- [2] 颜瑞, 张群, 胡睿. 考虑三维装箱约束的多车场车辆路径问题[J]. *管理工程学报*, 2016, 30(1): 108-116.
(Yan R, Zhang Q, Hu R. Multi-depots vehicle routing problem with three-dimensional loading constraints[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2016, 30(1): 108-116.)
- [3] 颜瑞, 朱晓宁, 张群, 等. 考虑二维装箱约束的多车场带时间窗的车辆路径问题模型及算法研究[J]. *中国管理科学*, 2017, 25(7): 67-77.
(Yan R, Zhu X N, Zhang Q, et al. Research of the model and algorithm for two-dimensional multi-depots capacitated vehicle routing problem with time window constrain[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25(7): 67-77.)
- [4] 叶勇, 张惠珍. 多配送中心车辆路径问题的狼群算法[J]. *计算机应用研究*, 2017, 34(9): 2590-2593.
(Ye Y, Zhang H Z. Wolf pack algorithm for multi-depot vehicle routing problem[J]. *Application Research of Computers*, 2017, 34(9): 2590-2593.)
- [5] 王铁君, 邬开俊. 多车场车辆路径问题的改进粒子群算法[J]. *计算机工程与应用*, 2013, 49(2): 5-8.
(Wang T J, Wu K J. Study on multi-depots vehicle routing problem based on improved particle swarm optimization[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(2): 5-8.)
- [6] Ma Y F, Han J, Kang K, et al. An improved ACO for the multi-depot vehicle routing problem with time windows[C]. *Proceedings of the 10th International Conference on Management Science and Engineering Management*. Singapore, 2017: 1181-1189.
- [7] 葛显龙, 邹登波. 供应链环境下带越库配送的多配送中心车辆路径问题[J]. *控制与决策*, 2018, 33(12): 2169-2176.
(Ge X L, Zou D B. Vehicle routing problem of multi-distribution centers with cross-docking in the supply chain[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(12): 2169-2176.)
- [8] Li J, Li T T, Yu Y G, et al. Discrete firefly algorithm with compound neighborhoods for asymmetric multi-depot vehicle routing problem in the maintenance of farm machinery[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 81: 105460.
- [9] Galindres-Guanca L F, Toro-Ocampo E M, Gallego-Rendón R A. Multi-objective MDVRP solution considering route balance and cost using the ILS metaheuristic[J]. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2018: 33-46.
- [10] Alinaghian M, Shokouhi N. Multi-depot multi-compartment vehicle routing problem, solved by a hybrid adaptive large neighborhood search[J]. *Omega*, 2018, 76: 85-99.
- [11] Erdoğan S, Miller-Hooks E. A green vehicle routing problem[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2012, 48(1): 100-114.
- [12] 吴丽荣, 胡祥培, 饶卫振. 考虑燃料消耗率的车辆路径问题模型与求解[J]. *系统工程学报*, 2013, 28(6): 804-811.
(Wu L R, Hu X P, Rao W Z. New capacity-vehicle-routing-problem model and algorithm for reducing fuel consumption[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2013, 28(6): 804-811.)
- [13] 李顺勇, 但斌, 葛显龙. 多通路网络下多车型低碳城市配送问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(11): 2973-2982.
(Li S Y, Dan B, Ge X L. Low-carbon heterogeneous vehicle routing problem under multi-graph network[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(11): 2973-2982.)
- [14] Wang J, Yao S, Sheng J C, et al. Minimizing total carbon emissions in an integrated machine scheduling and vehicle routing problem[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 229: 1004-1017.
- [15] Yu Y, Wang S H, Wang J W, et al. A branch-and-price algorithm for the heterogeneous fleet green vehicle routing problem with time windows[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2019, 122: 511-527.
- [16] 葛显龙, 谭柏川, 吴宁谦. 基于碳交易机制的带时间窗车辆路径问题与算法研究[J]. *管理工程学报*, 2018, 32(4): 141-148.
(Ge X L, Tan B C, Wu N Q. Research on vehicle routing problem and algorithm with time window based on carbon trading mechanism[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2018, 32(4): 141-148.)
- [17] 李进, 傅培华, 李修琳, 等. 低碳环境下的车辆路径问题及禁忌搜索算法研究[J]. *中国管理科学*, 2015, 23(10): 98-106.
(Li J, Fu P H, Li X L, et al. Study on vehicle routing problem and tabu search algorithm under low-carbon environment[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2015, 23(10): 98-106.)
- [18] 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.)
- [19] Rauniyar A, Nath R, Muhuri P K. Multi-factorial evolutionary algorithm based novel solution approach for multi-objective pollution-routing problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 130: 757-771.
- [20] Zulvia F E, Kuo R J, Nugroho D Y. A many-objective gradient evolution algorithm for solving a green vehicle routing problem with time windows and time dependency for perishable products[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 242: 118428.
- [21] Jabir E, Panicker V V, Sridharan R. Design and development of a hybrid ant colony-variable neighbourhood search algorithm for a multi-depot green vehicle routing problem[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 57: 422-457.
- [22] Li J, Wang R, Li T T, et al. Benefit analysis of shared depot resources for multi-depot vehicle routing problem with fuel consumption[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 59: 417-432.
- [23] Wang Y, Zhang S L, Assogba K, et al. Economic and environmental evaluations in the two-echelon collaborative multiple centers vehicle routing optimization[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 197: 443-461.
- [24] Zhang B, Li H, Li S G, et al. Sustainable multi-depot emergency facilities location-routing problem with uncertain information[J]. Applied Mathematics and Computation, 2018, 333: 506-520.
- [25] Li Y B, Soleimani H, Zohal M. An improved ant colony optimization algorithm for the multi-depot green vehicle routing problem with multiple objectives[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 227: 1161-1172.
- [26] Barth M, Younglove T, Scora G. Development of a heavy-duty diesel modal emissions and fuel consumption model[R]. Berkeley: California Partners for Advanced Transportation Technology, 2005.
- [27] Hoen K M R, Tan T, Fransoo J C, et al. Effect of carbon emission regulations on transport mode selection under stochastic demand[J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2014, 26(1/2): 170-195.
- [28] 李琳, 刘士新, 唐加福. 改进的蚁群算法求解带时间窗的车辆路径问题[J]. 控制与决策, 2010, 25(9): 1379-1383.
(Li L, Liu S X, Tang J F. Improved ant colony algorithm for solving vehicle routing problem with time windows[J]. Control and Decision, 2010, 25(9): 1379-1383.)
- [29] 李进, 张江华. 基于碳排放与速度优化的带时间窗车辆路径问题[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(12): 3063-3072.
(Li J, Zhang J H. Vehicle routing problem with time windows based on carbon emissions and speed optimization[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2014, 34(12): 3063-3072.)
- [30] Cordeau J F, Laporte G, Mercier A. A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows[J]. Journal of the Operational Research Society, 2001, 52(8): 928-936.
- [31] Chao I M, Golden B L, Wasil E. A new heuristic for the multi-depot vehicle routing problem that improves upon best-known solutions[J]. American Journal of Mathematical and Management Sciences, 1993, 13(3/4): 371-406.
- [32] de Oliveira F B, Enayatifar R, Sadaei H J, et al. A cooperative coevolutionary algorithm for the multi-depot vehicle routing problem[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 43: 117-130.

作者简介

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

吕阳(1996—), 男, 硕士生, 从事物流系统的建模与优化的研究, E-mail: 1007978434@qq.com;

贺彩虹(1965—), 女, 教授, 从事会计理论与实践、供应链管理等研究, E-mail: hecaihong1991@163.com;

刘长石(1975—), 男, 副教授, 博士, 从事物流管理、应急管理研究, E-mail: liuchangshi964@126.com;

杨堃(1989—), 女, 讲师, 硕士, 从事交通装备制造产业链、成本管理等研究, E-mail: myfft_89130@126.com.

(责任编辑: 李君玲)