

# 控制与决策

Control and Decision

## 低碳视角下油电混合车队配送路径优化研究

巩亮, 郑世龙, 许得杰, 耿慧琳, 周健, 惠昌武

引用本文:

巩亮, 郑世龙, 许得杰, 等. 低碳视角下油电混合车队配送路径优化研究[J]. *控制与决策*, 2026, 41(5): 1338-1347.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.0435>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 混合碳政策下制造商低碳转型的技术选择策略

Technology selection in low carbon transition of the manufacturer under mixed carbon policy

控制与决策. 2021, 36(7): 1763-1770 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1536>

#### 基于参数自适应蚁群算法的高速列车行车调度优化

Optimization of high-speed train operation scheduling based on parameter adaptive improved ant colony algorithm

控制与决策. 2021, 36(7): 1581-1591 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0992>

#### 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FWADE-ELM的短时交通流预测方法

Short-term traffic flow forecasting based on hybrid FWADE-ELM

控制与决策. 2021, 36(4): 925-932 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1103>

#### 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>

# 低碳视角下油电混合车队配送路径优化研究

巩亮<sup>1,2†</sup>, 郑世龙<sup>1,2</sup>, 许得杰<sup>1,2</sup>, 耿慧琳<sup>1,2</sup>, 周健<sup>1,2</sup>, 惠昌武<sup>1,2</sup>

(1. 兰州交通大学 交通运输学院, 兰州 730070;

2. 兰州交通大学 高原铁路运输智慧管控铁路行业重点实验室, 兰州 730070)

**摘要:** 针对道路行驶速度随时间变化且软时间窗条件下的同时配集车辆路径优化问题, 以配送总成本最小化与客户满意度最大化为目标, 考虑车辆载重等约束条件, 构建时变交通下油车-电车混合车队货物配送路径优化模型. 根据模型特点设计考虑时空距离、基于 Pareto 非支配排序的多目标混合启发式算法, 将遗传算法与变邻域搜索算法结合, 增强算法的局部搜索能力. 以 Solomon 中 C101 类部分客户为例进行算例分析, 进行不同规模客户点对比分析和模拟数据与真实数据对比实验. 研究表明: 与多目标协同优化遗传算法等相比, 所提出的算法将总成本降低至 7 008.47 元, 降幅分别为 4.59%、5.46%、6.80%、10.77% 和 8.41%, 客户满意度提升至 0.841. 考虑不同情况下对参数进行灵敏度分析, 合理的配送重量可将配送总成本节约 69.28%、28.14% 和 38.61%; 合理的车辆载重量可将配送成本节约 31.2% 和 62.3%. 研究表明, 所构建的模型和所提出的算法能合理调配不同类型的车辆, 科学规划车辆路径, 降低物流配送总成本, 减少车辆碳排放, 提高企业经济效益.

**关键词:** 城市交通; 路径优化; 时变交通; 混合车队; 混合启发式算法; 多目标优化

中图分类号: U116

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.0435

引用格式: 巩亮, 郑世龙, 许得杰, 等. 低碳视角下油电混合车队配送路径优化研究 [J]. 控制与决策, 2026, 41(5): 1338-1347.

## Optimization of distribution paths for hybrid fuel-electric fleet under low-carbon perspective

GONG Liang<sup>1,2†</sup>, ZHENG Shi-long<sup>1,2</sup>, XU De-jie<sup>1,2</sup>, GENG Hui-lin<sup>1,2</sup>, ZHOU Jian<sup>1,2</sup>, HUI Chang-wu<sup>1,2</sup>

(1. School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Control and Management of Plateau Railway Transportation in the Railway Industry, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of simultaneous vehicle routing optimization under the condition of road driving speed varying with time and soft time window, with the goals of minimizing the total distribution cost and maximizing customer satisfaction, and considering constraints such as vehicle load constraints, a cargo distribution routing optimization model for oil-electric vehicle hybrid fleets under time-varying traffic is constructed. According to the characteristics of the model, a multi-objective hybrid heuristic algorithm considering spatio-temporal distance and based on Pareto non-dominated sorting is designed. The genetic algorithm is combined with the variable neighborhood search algorithm to enhance the local search ability of the algorithm. Taking some customers of type C101 in Solomon as examples for case analysis, comparative analysis of customer points of different scales and comparative experiments between simulated data and real data are carried out. The research results show that compared with algorithms such as the multi-objective collaborative optimization genetic algorithm, the algorithm proposed reduces the total cost to 7,008.47 yuan, with reductions of 4.59%, 5.46%, 6.80%, 10.77% and 8.41%, respectively, and the customer satisfaction rate increases to 0.841. Considering the sensitivity analysis of parameters under different circumstances, a reasonable distribution weight can save the total distribution cost by 69.28%, 28.14% and 38.61%, respectively. A reasonable

收稿日期: 2025-04-23; 录用日期: 2025-07-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72261025); 中国国家铁路集团有限公司重点研发计划项目 (N2023X007); 兰州交通大学-天津大学联合创新基金项目 (2021056).

责任编辑: 巩敦卫.

†通信作者. E-mail: gongliang@mail.lzjtu.cn.

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.

vehicle load capacity can save distribution costs by 31.2% and 62.3%, respectively. The research results show that the constructed model and proposed algorithm can rationally allocate different types of vehicles, scientifically plan vehicle routes, reduce the total cost of logistics distribution, decrease vehicle carbon emissions, and improve the economic benefits of enterprises.

**Keywords:** urban traffic; path optimization; time-varying traffic; mixed fleet; hybrid heuristic algorithm; multi-objective optimization

## 0 引言

随着居民消费结构升级与生鲜电商市场扩容, 冷链物流需求呈现显著增长态势. 然而, 行业面临双重矛盾: 其一, 冷链运输单位里程碳排放强度较普通货运高 30%, 与《“十四五”冷链物流发展规划》提出的绿色转型目标形成结构性冲突; 其二, 政策驱动的电动冷藏车渗透率提升, 受制于电池技术瓶颈与基础设施缺口, 导致 72.6% 的物流企业采用油车-电车混合车队作为过渡方案. 这种背景下, 构建经济性、时效性与环境效益相协同的多目标优化模型, 已成为突破冷链物流可持续发展瓶颈的关键方法.

关于生鲜配送路径优化问题, 吴暖等<sup>[1]</sup> 创新性界定“时间容忍度”概念, 构建了融合时间窗弹性的冷链物流多目标路径规划模型; 黄星星等<sup>[2]</sup> 系统性探究了碳限额交易与碳税双重政策框架下的生鲜农产品配送网络优化问题; 赵志学等<sup>[3]</sup> 综合考虑时变路网特性和产品新鲜度阈值限制, 实现了配送成本与货损率的协同优化; 王嘉宁等<sup>[4]</sup> 采用结合海洋捕食者算法与蚁群算法的混合算法, 研究了考虑充电策略的冷链物流配送路径优化问题.

考虑油电混合车队路径优化问题, 李英等<sup>[5]</sup> 对电动车与燃油车混合车队路径问题展开研究, 优化企业车队配置及调度方案; 李得成等<sup>[6]</sup> 创新性整合硬性时间窗约束与充电耦合效应, 提出了基于分支定价算法的混合整数规划模型; Sengupta 等<sup>[7]</sup> 基于休斯顿市实证数据, 结合 GREET 全生命周期评估模型, 为车队绿色转型提供了决策支持; 张得志等<sup>[8]</sup> 采用混合改进遗传-变邻域搜索算法, 研究了部分充电策略下多中心混合车队联合配送路径优化问题, 在降低配送成本和减少碳排放方面具有显著优势.

针对车辆行驶速度变化车辆路径问题, Sabar 等<sup>[9]</sup> 针对多时段道路状态差异, 构建了基于最小化总配送成本的动态车辆路径模型, 设计了一种参数自适应的进化算法, 通过动态调整策略提升时变路网下的求解效率; 张传琪等<sup>[10]</sup> 突破静态路网假设, 建立了融合多车型调度与动态拥堵效应的路径优化模型, 结合改进遗传算法设计了分层编码机制, 有效协调车辆载重约束与道路通行时变特性间的耦合关系; 姜广田<sup>[11]</sup> 等将车辆行驶速度划分为顺畅、正常和拥

堵 3 种状态, 并考虑道路坡度对速度的影响, 可以有效降低物流成本并减少碳排放.

综上所述, 目前国内外学者对生鲜配送、混合车队路径优化以及车辆行驶速度变化车辆路径问题分别做出了较多研究. 然而, 现有成果多局限于单一参数优化, 缺乏油电混合车队在时变路网中兼顾低碳排放、时间窗弹性以及生鲜腐坏约束的系统性优化. 因此, 本文考虑时变路网, 提出考虑碳排放和客户满意度的油车-电车混合车队冷链物流配送路径优化问题 (ECVRPTWMF), 引入碳排放成本和新鲜度约束, 通过成本最小化和客户满意度最大化双重目标优化框架设计, 构建混合整数规划模型, 设计一种改进的混合启发式算法进行求解, 旨在同步解决油电混合车队资源配置优化与低碳化配送路径决策的协同优化问题, 相关研究成果为物流企业优化车队配置和路径方案提供决策参考.

## 1 问题描述与模型建立

本文考虑多台相同型号的燃油车和电动车, 从单个配送中心出发, 行驶速度随时间连续变化, 依次访问每个客户点. 客户服务时间窗约束采用软时间窗约束<sup>[12]</sup>, 会产生一定的惩罚成本, 更符合实际配送场景. 电动车在配送过程中若电量低于 20%, 则需前往就近充电桩进行充电, 充电完成后继续进行服务.

### 1.1 模型假设及符号说明

1) 传统车辆续航里程较大, 可认为无续航里程限制, 在规划期内足够完成配送任务. 电动车续航里程有限, 剩余电量低于阈值 20% 时需要进行充电, 续航里程上限为 500 km.

2) 电动配送车辆执行运输任务时, 采用满电启动机制, 当剩余电量低于阈值时, 前往附近充电桩充至满电, 充电时间与电量线性相关, 不考虑充电桩排队时间<sup>[13]</sup>.

3) 车辆行驶速度不固定, 随时间变化.

4) 各客户点的需求量均小于车辆载重量, 且存在服务时间窗和最低新鲜度限制的要求.

5) 配送网络中仅包含一个配送中心, 燃油车、电动车等配送车辆的起点和终点均为该配送中心.

6) 客户服务时间窗为软时间窗, 其满意度受配

送车辆到达时刻的影响.

模型参数及变量如表1所示.

表1 模型参数及变量

参数符号	符号说明
$O$	配送中心起点
$C$	客户点集合
$E$	充电桩集合
$K$	车辆集合
$K_E$	电动车辆集合
$K_c$	燃油车辆集合
$Q_{\max}$	电池容量
$a_C$	燃油车辆固定成本
$a_E$	电动车辆固定成本
$b_C$	单位距离燃油成本
$b_E$	单位距离充电成本
$\theta$	运输途中货物的腐坏率
$c$	碳税价格
$\delta$	碳排放因子
$Satisf_i^k$	车辆 $k$ 服务客户 $i$ 的满意度
$t_{ik}^1$	车辆 $k$ 到达 $i$ 点时的时间
$t_{ik}^2$	车辆 $k$ 离开 $i$ 点时的时间
$Q_{ik}^1$	车辆 $k$ 到达 $i$ 点时的电量
$P$	车辆耗电量单位价格
$F_j$	车辆到达客户点 $j$ 时的生鲜新鲜度
$x_{ijk}$	0-1变量, 车辆 $k$ 由 $i$ 点到 $j$ 点, 取1
$y_{ik}$	0-1变量, 车辆 $k$ 在 $i$ 点充电, 取1
$y_i^k$	0-1变量, 客户 $i$ 由车辆 $k$ 服务, 取1

### 1.2 速度时间依赖函数的确定

实际中, 车辆行驶速度大多呈连续变化状态, 交通工程领域观测到的交通流具有连续性特征, 正如文献 [14] 中提出的车辆速度( $v$ )与时间( $t$ )之间的三角函数关系  $v(t) = \varphi \sin(\gamma t) + \delta$  所示, 其中  $\varphi, \gamma$  和  $\delta$  与道路路况有关. 本文提出基于三角函数叠加的连续速度场近似方法: 将全天候运行周期分解为  $n$  个特征时段, 建立分段连续三角函数方程组. 引入差值函数, 使速度-时间函数曲线更加平滑.

### 1.3 客户时间满意度

在考虑顾客时间窗约束时, 采用的是软时间窗设定: 在客户规定的时间窗内到达即视为满意; 若到达时间早于客户要求的时间, 则需等待至客户要求的开始时间, 同时将满意度的最大值设为 1、最小值设为 0, 并采用改进的降半哥西分布<sup>[15]</sup>, 设置客户敏感度系数为 0.00005, 即

$$Satisf_i^k = \begin{cases} 1, & t_{ik}^1 \leq e_i; \\ \frac{1}{1 + 0.00005 (t_i - U_i)^2}, & t_{ik}^1 > l_i. \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $Satisf_i^k$  为满意度,  $e_i, l_i$  为时间窗上、下限.

### 1.4 目标函数

以配送总成本最小化和客户满意度最大化<sup>[16]</sup> 为目标, 建立燃油车辆和电动车辆混合车队货物配送路径优化模型.

1) 配送总成本.

$$\min Z_1 = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7. \quad (2)$$

式 (2) 表示配送总成本最小, 由固定成本 ( $W_1$ )、充电成本 ( $W_2$ )、变动成本 ( $W_3$ )、时间窗惩罚成本 ( $W_4$ )、货损成本 ( $W_5$ )、碳排放成本 ( $W_6$ ) 和制冷成本 ( $W_7$ ) 构成.

2) 客户满意度.

$$\max Z_2 = \left\{ \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n Satisf_i^k y_i^k \right\}, \quad k \in M, i \in v. \quad (3)$$

① 固定成本.

配送车辆的固定使用成本包括车辆的购置费、折旧费用等, 这部分费用不受行驶时间和距离影响, 通常为固定值.

$$W_1 = \sum_{k \in K_c} \sum_{i \in C} x_{iok} a_C + \sum_{k \in K_E} \sum_{i \in C} x_{iok} a_E. \quad (4)$$

② 充电成本.

车辆在充电桩处的充电量与单位电量成本的乘积.

$$W_2 = \sum_{k \in K_E} \sum_{i \in E} Q_{cik} y_{ik} b_E. \quad (5)$$

③ 变动成本.

燃油车辆和电动车辆在运输过程产生的燃油与电量成本之和.

$$W_3 = \sum_{k \in K_c} \sum_{i \in C \cup O \cup E} \sum_{j \in C \cup O' \cup E} x_{ijk} d_{ij} q_{Cv} b_C + \sum_{k \in K_E} \sum_{i \in C \cup O \cup E} \sum_{j \in C \cup O' \cup E} x_{ijk} d_{ij} q_{Ev} b_E. \quad (6)$$

式 (6) 为客户  $i$  处产生的时间窗惩罚成本.

④ 时间窗惩罚成本.

当车辆到达客户点的时间未在客户可接受的时间窗内时, 将产生一定的时间窗惩罚成本.

$$S_i = \begin{cases} e(e_i - t_{ik}^1), & t_{ik}^1 \leq e_i; \\ 0, & e_i \leq t_{ik}^1 \leq l_i; \\ l(t_{ik}^1 - l_i), & l_i \leq t_{ik}^1. \end{cases} \quad (7)$$

$$W_4 = \sum_{k \in K} \sum_{i \in C} S_i. \quad (8)$$

式 (7) 为所有客户时间窗惩罚成本之和.

⑤ 货损成本.

运输、卸货与充电期间产生的货损成本, 即货物重量、运输时间与单位货损成本乘积之和.

$$W_5 = \sum_{k \in K} \sum_{i \in C \cup E \cup O} \sum_{j \in C \cup E \cup O', i \neq j} \theta w_j (t_{ij} + t_{si} + t_{cik}). \quad (9)$$

⑥ 碳排放成本.

碳税被视为一项可用于实施低碳策略的措施, 即碳排放成本等于碳排放量乘碳税价格. 采用“负载估计法”计算车辆油耗量, 即

$$F_j = \frac{12}{44} Q_j U_j O_j, \quad (10)$$

$$C_i^1 = \sum_j K_{i,j} \times F_j, \quad (11)$$

$$C_i^2 = E_i^e \times F^e, \quad (12)$$

$$C = \sum_i C_i = \sum_i (C_i^1 + C_i^2), \quad (13)$$

$$F_c = \delta C_i^1, \quad (14)$$

$$F_E = \delta C_i^2, \quad (15)$$

$$W_6 = c(F_c + F_E). \quad (16)$$

式(10)中:  $j$ 为各类化石燃料<sup>[17]</sup>(汽油、柴油及航空煤油等);  $F_j$ 为 $j$ 类化石燃料的碳排放因子;  $Q_j$ 为 $j$ 类化石燃料的低位发热量;  $U_j$ 为 $j$ 类化石燃料的单位热值含碳量;  $O_j$ 为 $j$ 类化石燃料的碳氧化率(%). 式(11)中:  $C_i^1$ 为第 $i$ 种交通方式消耗化石燃料产生的CO<sub>2</sub>排放量(t);  $K_{i,j}$ 为第 $i$ 种交通方式,  $j$ 类化石燃料的消耗量(t). 式(12)中:  $C_i^2$ 为第 $i$ 种交通方式电力消耗的间接CO<sub>2</sub>排放量(t);  $E_i^e$ 为第 $i$ 种交通方式的电力消耗量(MWh);  $F^e$ 为电网排放因子. 式(13)中:  $C$ 为中国交通运输业碳排放量(t);  $C_i$ 为第 $i$ 种交通方式的碳排放量(t). 式(14)、(15)中:  $F_c$ 为燃油车产生的碳排放总量;  $F_E$ 为电动车产生的碳排放总量;  $\delta$ 为碳排放因子, 单位为kgCO<sub>2</sub>/L. 式(16)为配送过程总碳排放成本, 即碳排放量与碳税价格的乘积.

⑦ 制冷成本.

制冷成本包含运输和装卸过程的耗电成本.

$$W_7 = P \left[ E_C \left( \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} \sum_{i \in N} t_{ijk} x_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in F} t_{ik}^{(c)} Z_{ik} \right) + E_0 \right]. \quad (17)$$

其中:  $E_C$ ,  $E_0$ 分别为运输、装卸过程中单位时间能耗(kWh),  $t_{ijk}$ 为车辆 $k$ 在道路 $(i, j)$ 上的行驶时间,  $t_{ik}^{(c)}$ 为车辆 $k$ 在充电站 $i$ 的充电时间.

1.5 约束条件

模型主要考虑车辆载重约束、节点访问约束、电量约束、时间约束、新鲜度约束这5部分.

1) 车辆载重约束.

每辆车的总载重不得超过其最大容量限制, 确保运输过程中货物重量不超负荷.

$$\sum_{i \in C \cup E \cup O} \sum_{j \in C \cup E \cup O'} x_{ijk} q_i \leq W_{\max}, \quad \forall k \in K. \quad (18)$$

2) 节点访问约束.

每个客户节点必须被访问且仅被访问一次, 确保所有需求点均被服务, 路径无遗漏或重复.

$$\sum_{i \in C \cup E \cup O} x_{ijk} = 1, \quad \forall j \in C, \forall k \in K; \quad (19)$$

$$\sum_{i \in C \cup E \cup O} x_{ijk} = \sum_{m \in C \cup E \cup O'} x_{jmk}, \quad \forall j \in C \cup E, \forall k \in K; \quad (20)$$

$$\sum_{j \in C} x_{ojk} = 1, \quad \forall k \in K; \quad (21)$$

$$\sum_{i \in C} x_{io'k} = 1, \quad \forall k \in K; \quad (22)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{j \in C} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad \forall k \in K, |S| \geq 2. \quad (23)$$

式(19)表示每个客户都被访问到一次; 式(20)表示节点流量守恒; 式(21)和(22)表示车辆从配送中心出发, 最终返回配送中心; 式(23)表示子回路消除约束.

3) 电量约束.

电动车辆需在电池耗尽前到达充电站或返回起点, 限制其最大续航里程.

$$Q_{ok} = Q_{\max}, \quad \forall k \in K; \quad (24)$$

$$Q_{jk}^1 = (Q_{jk}^2 - d_{ij} q_v - t_{ij} q_r) x_{ijk}, \quad \forall i \in C \cup E \cup O, \forall j \in C \cup E \cup O', \forall k \in K_E; \quad (25)$$

$$Q_{ik}^2 = [Q_{ik}^1 - (q_{Er} t_{ik}^2 - t_{ik}^2)] x_{ijk}, \quad \forall i \in C, \forall j \in C \cup E \cup O', \forall k \in K_E; \quad (26)$$

$$Q_{ik}^2 = Q_{\max} y_{ik}, \quad \forall i \in E, \forall k \in K_E; \quad (27)$$

$$Q_{ik}^1 \geq 0, \quad \forall i \in E \cup O', \forall k \in K_E; \quad (28)$$

$$Q_{ik}^1 > 0, \quad \forall i \in C; \quad (29)$$

$$Q_{cik} = (Q_{\max} - Q_{ik}^1) y_{ik}, \quad \forall i \in E, \forall k \in K_E; \quad (30)$$

$$Q_{cik} = 0, \quad \forall i \in E, \forall k \in K_E. \quad (31)$$

式(24)表示车辆 $k$ 从配送中心满电量出发; 式(25)表示车辆 $k$ 到达 $j$ 点的电量; 式(26)和(27)表示车辆 $k$ 离开 $i$ 点的电量; 式(28)和(29)表示车辆 $k$ 到达 $i$ 点的电量大于等于0; 式(30)表示车辆 $k$ 在充电桩 $i$ 的充电量; 式(31)表示车辆在客户处不充电.

## 4) 时间约束.

客户点需在指定时间窗内被服务, 或车辆行驶总时长不超过预设阈值.

$$t_{ik}^2 = t_{ik}^1 + t_{si}, \quad \forall i \in C, \forall k \in K; \quad (32)$$

$$t_{ik}^2 = t_{ik}^1 + t_{cik}, \quad \forall i \in E, \forall k \in K_E; \quad (33)$$

$$t_{jk}^1 = (t_{ik}^2 + t_{ij}) x_{ijk}, \quad \forall i \in C \cup E \cup O, \\ \forall j \in C \cup E \cup O', \forall k \in K; \quad (34)$$

$$t_{cik} = \frac{Q_{cik} y_{ik}}{u}, \quad \forall i \in E, \forall k \in K_E; \quad (35)$$

$$t_{ij} = \frac{d_{ij} x_{ijk}}{v}, \quad \forall i \in C \cup E \cup O, \\ \forall j \in C \cup E \cup O', \forall k \in K. \quad (36)$$

式(32)表示车辆 $k$ 离开客户 $i$ 的时间, 式(33)表示车辆 $k$ 离开充电桩 $i$ 的时间, 式(34)表示车辆 $k$ 到达 $j$ 点的时间, 式(35)表示车辆 $k$ 在 $i$ 点的充电时间, 式(36)表示车辆 $k$ 从 $i$ 点到 $j$ 点的行驶时间.

## 5) 新鲜度约束.

生鲜产品需在保质期内送达.

$$F_j > \omega, \quad \forall j \in C; \quad (37)$$

$$\omega = \exp(-\theta t). \quad (38)$$

式(37)和(38)表示最低新鲜度需求<sup>[18]</sup>.

## 2 算法设计

车辆路径问题是一种典型的 NP-hard 问题, 这意味着寻找最优解的计算复杂度随着问题规模的增加而急剧上升. 启发式算法在求解这类问题时具有明显的优越性. 遗传算法以其强大的搜索能力和高并行性而著称, 能够处理复杂的优化问题, 但它的收敛速度较慢, 且有陷入局部最优的风险, 无法确保找到全局最优解. 变邻域搜索算法通过系统地改变邻域结构增强局部搜索能力, 有助于跳出局部最优.

## 2.1 混合启发式算法设计

基于 Pareto 最优解的多目标混合变邻域搜索遗传算法旨在解决时变路网下单配送中心多车型车辆路径问题<sup>[19]</sup>. 综合遗传算法和变邻域搜索算法的优势, 先基于客户间的时空距离进行聚类以生成高质量初始种群, 使初始解更优, 这些初始解作为后续算法的输入; 接着进行适应度评估和 Pareto 非支配排序, 优先保留非支配等级高、拥挤度大的解, 确保优质解传递至下一代; 利用遗传算法的基本操作即选择、交叉、变异操作<sup>[20]</sup>, 并结合变邻域搜索算法强化局部搜索能力, 遗传算法产生的每一个解都会被变邻域搜索算法进一步改进, 同时优化双目标, 从而增强解的质量; 通过设计自适应邻域搜索次数策略平

衡算法搜索的广度和深度, 以及引入劣解接收准则跳出局部最优, 最终提升算法整体性能. 经多次迭代输出 Pareto 最优解集.

## 2.2 客户聚类

时空距离是对客户的时间距离和空间距离进行归一化处理后, 再通过加权平均得到的<sup>[21]</sup>. 客户点 $i$ 和客户点 $j$ 的时间窗分别为  $[ET_i, LT_i]$ 、 $[ET_j, LT_j]$ , 假设  $ET_i < ET_j$ , 设  $ET_i + t_i + t_{ij} = a$ ,  $LT_j + t_i + t_{ij} = b$ . 其中:  $t_i$  为车辆在节点 $i$ 的服务时间,  $t_{ij}$  为车辆从节点 $i$ 到 $j$ 的行驶时间. 那么  $[a, b]$  在 4 种情况下, 客户点的时间距离计算如下所示:

$$l_{ij}^T = \begin{cases} \delta_1(ET_j - b), & b < ET_j; \\ \delta_2(a - LT_j), & a > LT_j; \\ \delta_3(t_i + t_{ij}), & a \leq ET_j < b \text{ or } a < LT_j < b; \\ t_i + t_{ij}, & ET_j < a < b < LT_j. \end{cases} \quad (39)$$

客户点的空间距离即两点间的欧氏距离, 计算如下:

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \quad (40)$$

给客户点空间距离和时间距离赋予不同的权重, 得到时空距离的计算公式如下:

$$l_{ij}^{ST} = \alpha l_{ij} + \beta l_{ij}^T, \quad \alpha + \beta = 1. \quad (41)$$

## 2.3 初始解构造

根据客户的时空距离进行聚类, 把时空距离接近的客户划分为一类, 以此提升初始解的质量. 聚类方法如下:

$$\text{Min}G = \sum_{i=1}^u \sum_{\text{assigned to } i} l_{ij}^{ST}, \quad \forall i, j \in V_C. \quad (42)$$

其目的是使每个聚类簇中其他客户到该簇中心的时空距离之和 $G$ 最小, 其中 $u$ 为聚类簇的数量.

## 2.4 适应度函数

适应度函数值是目标函数值的倒数, 目标函数值越小, 对应的适应度值越大, 染色体被选中的概率也越高.

$$f(x) = \frac{1}{C(x)}, \quad (43)$$

其中 $C(x)$ 为染色体的目标函数值.

## 2.5 Pareto 非支配排序

在实际情况中, 配送总成本的降低可能会导致服务时间的延长, 从而降低客户满意度; 反之, 提高客户满意度可能需要增加额外的配送成本. 因此, 这两个目标之间存在一定的权衡和冲突. 为了同时处理这两个目标, 研究采用 Pareto 排序方法. 在这种排

序中, 一个解如果至少在一个目标上优于另一个解, 且在所有其他目标上都不劣于另一个解, 则称该解 Pareto 优于另一个解. 根据适应度进行 Pareto 最优排序, 最优个体的排序等级为 0, 次优排序等级为 1, 以此类推. Pareto 非支配排序过程包括初始化、非支配排序、分配等级、拥挤度计算等操作步骤.

## 2.6 选择操作

本研究采用融合选择策略优化种群进化过程: 首先基于适应度比例原则, 个体的被选概率与其适应度值正相关, 即优质解具有更高遗传机会, 该机制在维持种群多样性的同时促进优势基因传递; 随后执行精英保护操作, 将当代最优个体强制保留至子代, 通过定向替换最劣解有效防止优质基因丢失. 两种策略协同作用, 既通过概率筛选平衡了开发与探索的关系, 又借助精英机制确保算法收敛方向, 在稳定种群规模的前提下显著提升收敛效率.

## 2.7 交叉操作

采用多点交叉策略, 旨在通过父代染色体的多段重组生成高质量子代个体. 具体实现时, 从种群中随机选取两条父代染色体, 分别在每条染色体上随机生成多个交叉点. 以第 1 条父代染色体为例, 其交叉点之间的片段直接作为子代染色体的第 1 段; 子代的第 2 段则由另一条父代染色体中未被第 1 条染色体选中的客户点构成. 构造第 2 段时, 需从第 2 条父代染色体中剔除第 1 条染色体已选客户点, 保留剩余客户点的原始顺序, 并将其依次填充至子代染色体中. 这种策略既保留了父代的优质片段, 又通过动态调整客户点顺序增强种群多样性, 有效避免算法早熟收敛.

## 2.8 变异操作

变异操作通过引入随机扰动打破种群局部平衡, 提升全局搜索能力. 在单条染色体上, 随机选择两个不同基因位置, 并交换其位置, 从而生成新个体. 此外, 为增加变异多样性, 结合片段逆转、随机插入变异策略, 进一步扰动路径结构. 这种低概率、多类型的变异机制能够避免算法陷入局部最优, 同时维持种群演化方向的有效性.

## 2.9 局部搜索优化

局部搜索优化通过多邻域操作深度挖掘优质解, 显著提升算法寻优精度<sup>[22]</sup>. 同时优化双目标, 每  $N$  代对当前 Pareto 前沿解采用插入、交换、2-插入、2-opt 及 or-opt 等邻域结构协同搜索. 每种操作均以贪婪策略迭代优化, 仅保留更优解. 通过动态组合不同邻域结构, 算法能够高效平衡搜索广度和深度, 在复杂

路径规划问题中快速逼近全局最优解.

## 2.10 劣解接受准则

为进一步增强种群的扰动性、拓展搜索空间, 可参考模拟退火算法中解的接受规则, 按一定概率接纳较劣解. 这一做法能有效防止算法过早陷入局部最优, 增强其寻优能力, 同时也能保障种群的多样性<sup>[23]</sup>. 劣解的接收概率计算方法如下:

$$p = \begin{cases} 1, & C(x) \geq C(x'); \\ \exp\left(\frac{C(x) - C(x')}{T}\right), & C(x) < C(x'). \end{cases} \quad (44)$$

其中:  $C(x)$  为解  $x$  的目标函数值,  $C(x')$  为解  $x'$  的目标函数值,  $x'$  为  $x$  采用局部搜索策略更新后的解,  $T$  为系统的温度.

## 3 算例分析

### 3.1 算例背景

为验证算法有效性, 实验在同一环境中进行, 其中 CPU 主频为 2.4 GHz, 内存 16 G, 电脑操作系统为 Windows 11, 算法编程使用 Matlab R2021b, 采用 Solomon 数据集中 C101 算例作为仿真数据, 修改原始车辆数据, 其中: 0 为配送中心, 1~40 为客户点, 41~50 为充电桩, 配送中心坐标、各客户点坐标、充电桩坐标已知.

### 3.2 求解结果分析

#### 1) 小规模客户点算例结果分析.

为了验证改进遗传-变邻域搜索算法对于模型的可行性, 测试小规模客户点算例运行情况, 油车、电车最大车辆数之和设定为 12. 遗传算法交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.1, 最大迭代次数为 200. 得到油电混合车队路径结果如图 1 所示, 配送中心用蓝色方框表示, 充电桩用黑色方框表示, 燃油车辆 1~6 配送路径用红色线条表示, 电动车辆 7~12 配送路径用绿色线条表示.

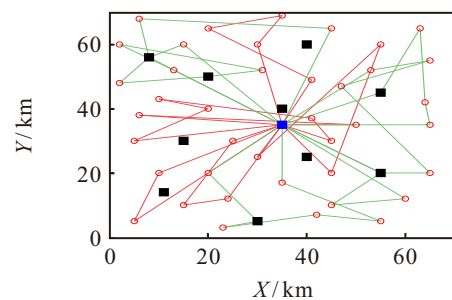


图1 初始参数设定下最优配送方案路径结果

Pareto 解集如图 2 所示, 可以得到多组 Pareto 均衡解. 本文优先考虑成本控制, 配送总成本为 7008.473 元, 其中固定成本、变动成本、货损成本、制冷成本占比较大, 分别占总成本的 25.7%、28.97%、13.48%、

25.07%, 客户满意度为 0.84122.

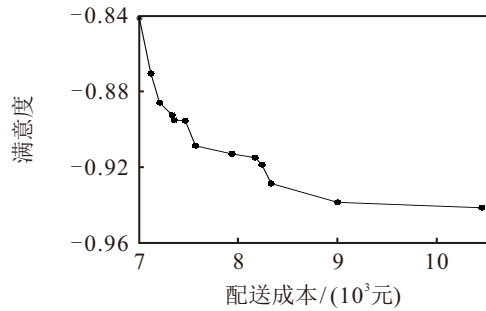


图2 Pareto 解集

## 2) 不同规模客户点对比分析.

为了验证本文算法求解不同规模客户点的有效性, 分别对 45、92、140 个客户点进行 10 次独立实验, 采用改进的混合启发式算法进行求解. 由于客户点数目不同, 随着客户点数目增加, 适当增加初试种群规模<sup>[24]</sup>.

配送成本与程序运行时间随着数据规模的增加而变大, 但依旧控制在合理范围内. 当客户规模为 45、92、140 时, 所有客户点均被服务, 验证了本文模型的有效性以及改进的混合启发式算法求解模型的可行性.

## 3) 模拟数据与真实数据对比分析.

本文以兰州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. 选取 50 个客户点, 将其位置信息以 1:10 的比

例全部转化为平面直角坐标系, 顾客点间的距离通过经纬度转换进行计算. 参考 Solomon 数据集中 r101、c101 算例对配送中心位置、充电桩位置、客户的需求量、时间窗、服务时间等进行合理假设. 利用百度地图 API 对该市车辆实时速度进行统计<sup>[25]</sup>, 选取 6 月某工作日的速度数据. 采用本文算法和其他启发式算法分别对其进行求解, 对比差异, 分析模型在真实场景中的适应性, 结果如下: 真实数据相较于模拟数据, 总成本更高、满意度略低. 真实客户时间窗更严格, 早晚高峰拥堵导致时间窗惩罚成本增加 8.32%; 且真实路网中客户点分布更分散, 充电桩稀疏使电动车绕路, 车辆绕行距离增加导致配送成本增加. 本文算法在真实数据中仍保持稳定性能, 求解质量优于其他对比算法, 算法能有效平衡成本和满意度, 验证了其在实际场景中的适应性.

## 3.3 灵敏度分析

### 1) 与其他算法对比.

为了验证本文算法的有效性, 将本文算法与多目标协同优化遗传算法<sup>[26]</sup>、多目标蚁群算法<sup>[27]</sup>、头脑风暴优化算法<sup>[16]</sup>、模拟退火算法等启发式算法和分支定价算法<sup>[6]</sup>进行比较. 使用相同的 Solomon 数据集 C101 类数据, 保持种群规模、迭代次数等参数一致. 各算法最优运行结果, 即总成本、收敛代数、满意度、计算时间和稳定性如表 2 所示.

表2 不同算法下配送结果

算法	总成本 / 元	收敛代数	满意度	计算时间 / s	稳定性
本文混合启发式算法	7008.47	152	0.841	320	0.021
多目标协同优化遗传算法	7345.62	210	0.824	380	0.035
多目标蚁群算法	7412.89	180	0.817	410	0.028
头脑风暴优化算法	7520.33	135	0.809	300	0.031
模拟退火算法	7854.33	230	0.791	450	0.038
分支定价算法	7652.18	—	0.812	1800	0.018

① 本文算法的总成本最低, 为 7008.47 元, 相较于其他算法有明显优势. 与多目标协同优化遗传算法、多目标蚁群算法、头脑风暴优化算法、模拟退火算法、分支定价算法相比, 本文算法将总成本降低至 7008.47 元, 降幅分别为 4.59%、5.46%、6.80%、10.77% 和 8.41%.

② 尽管本文算法的计算时间略长于头脑风暴优化算法, 但相较于多目标蚁群算法和模拟退火算法仍具有优势, 同时远低于分支定价算法. 这表明本文算法在保持高效性的同时, 也能够合理时间内找到高质量解.

### 2) 改变车队配置.

为了分析购置成本对配送结果的影响, 改变车队中电车与油车的比例, 得到如下结论:

① 当燃油汽车与电动车辆的比例为 1:1 时, 总成本最低. 在这一配置下, 其总成本、时间窗惩罚成本、碳排放成本, 与纯电动车队相比, 分别节约了 10.33%、37.35%、-55.24%; 与纯燃油车队相比, 分别节约了 36.04%、95.4%、44.05%.

② 当电车: 油车 = 1:1 时, 时间窗惩罚最低. 当燃油汽车比例逐渐增大时, 时间窗惩罚成本随之显著提高. 碳排放成本随燃油汽车比例增大而上升, 传

统燃油车占比与冷链运输碳排放强度呈显著正相关。

3) 改变配送中心位置。

分析不同配送中心位置对各部分成本的影响, 原配送中心坐标为 (35, 35), 改变横坐标后配送中心坐标为 (45, 35), 改变纵坐标后配送中心坐标为 (35, 45), 得到如下结论:

① 成本结构分析表明: 固定成本与变动成本在总成本构成中持续保持显著权重, 其峰值占比分别达到 25.68% 和 28.97%。

② 在改变配送中心位置的情况下, 总成本持续上升, 其中调整横坐标后总成本增加 6.07%, 调整纵坐标后增加 10.06%。就各成本构成而言, 时间窗惩罚成本的变动最为明显, 当配送中心位于远中心位置时, 与中心位置相比, 该成本分别增至原先的 197.81%、388.63%。

4) 改变货物配送重量。

为进一步分析配送重量对各部分成本的影响, 将原始算例中客户的需求量调整至基准值的 200%、300%, 将时间窗宽度也随之扩大 200%、300%, 得到如下结论:

① 货物运输总量扩大, 总成本也随之增加, 其中货损成本变化最为显著, 说明货损成本与货物运输重量具有较强的相关性。

② 单位重量所需配送成本随配送重量增加有所降低, 因此扩大客户需求是配送企业发展的原动力。

5) 同时改变电动车辆和燃油车辆最大载重量。

为了进一步分析不同载重量的电动车辆和燃油车辆对配送成本的影响, 将电动车辆和燃油车辆额定载荷阈值从基准值 100 kg 增大至 200 kg、300 kg、500 kg, 得到如下结论:

① 总成本随着车队最大载重量增大, 先大幅降低, 后缓慢增加。这说明随着车辆载重量变化, 车辆完成配送需投入的成本会先减少, 达到最低后再缓慢增加。车辆载重量为 200 kg 时总成本最低。

② 当车辆载重量由 200 kg 变大到 500 kg 时, 就各部分成本而言, 时间窗成本、货损成本变化最为显著, 充电成本变化较为显著, 变动成本、制冷成本变化较小。

3.4 消融实验

为了分析本文算法中每个组件的合理性, 本节增加消融实验加以验证。基础算法仅为遗传算法, 核心流程为: 随机生成初始解 → 选择、交叉、变异 → 迭代优化至收敛。依次增加时空聚类、变邻域搜索、Pareto 排序 3 个核心模块, 构建对照实验组。使用 Solomon C101 数据集, 重复 10 次实验, 结果如表 3 所示。

表3 消融实验结果对比

算法组件	总成本 / 元	变动成本 / 元	时间窗惩罚成本 / 元	满意度	收敛代数
基础算法	8254.31	2680.52	623.18	0.752	250
基础算法 + 时空聚类	7812.45	2410.36	512.75	0.789	220
基础算法 + 时空聚类 + 变邻域搜索	7543.21	2280.15	386.42	0.815	180
基础算法 + 时空聚类 + 变邻域搜索 + Pareto 排序	7235.68	2150.78	298.36	0.830	160
完整算法	7008.47	2030.01	176.07	0.841	152

综上可以得出结论: 时空聚类主要通过优化初始解, 减少初始路径迂回, 有效降低变动成本, 使初始解质量提升约 5.4%; 变邻域搜索通过局部调整客户顺序, 优化局部路径, 提升客户满意度, 对时间惩罚成本的优化最显著, 局部优化效率提升约 3.8%; Pareto 排序通过多目标平衡, 平衡成本与满意度, 避免单目标支配, 多目标平衡能力提升约 3.2%。全组件协同时, 各项指标改进幅度远大于单一组件叠加, 验证了组件间存在正向协同效应。若缺失任一组件, 则算法性能均明显下降, 验证了本文算法设计的合理性。

4 结 论

本研究聚焦时变交通路网与弹性时间窗耦合约

束下的同步取送货车辆路径优化问题, 以配送总成本最小化和客户满意度最大为目标, 构建时变交通下油电混合车队货物配送路径优化模型, 并对其进行求解, 得到以下主要结论:

1) 本文设计的混合启发式算法将变邻域搜索算法引入遗传算法, 改善了局部搜索能力, 提高了求解质量, 求得的结果具有较好的稳定性, 配送成本和客户满意度在有限资源下达到最佳平衡。

2) 与其他多目标算法相比, 本文算法可有效降低总成本, 验证了混合算法在跳出局部最优方面的有效性; 计算时间显著缩短, 表明算法能够在合理时间内找到高质量解; 标准差相比于其他算法仍具有优势, 表明解的质量稳定可靠。

3) 混合车队合理配置, 即燃油汽车与电动车辆

相等时, 配送成本最小. 合理的配送重量和车辆载重量可有效节约配送成本.

未来研究将考虑实时交通数据动态更新、电动汽车充电策略等因素, 使问题更贴近实际问题.

#### 参考文献 (References)

- [1] 吴暖, 代焕杰, 李季涛, 等. 考虑时间容忍度的冷链物流配送路径多目标优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(2): 275-284.  
(Wu N, Dai H J, Li J T, et al. Multi-objective optimization of cold chain logistics distribution path considering time tolerance[J]. Transportation Systems Engineering and Information, 2023, 23(2): 275-284.)
- [2] 黄星星, 胡坚堃, 黄有方. 碳税和碳限规则下生鲜农产品冷链配送路径优化[J]. 上海海事大学学报, 2018, 39(1): 74-79.  
(Huang X X, Hu J K, Huang Y F. Optimization of cold chain distribution route of fresh agriculture products under carbon tax and carbon cap regulations[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2018, 39(1): 74-79.)
- [3] 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[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(5): 218-225.  
(Zhao Z X, Li X M. Electric vehicle route optimization for fresh logistics distribution based on time-varying traffic congestion[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(5): 218-225.)
- [4] 王嘉宁, 初良勇. 考虑充电策略的冷链物流配送路径优化研究[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(17): 282-292.  
(Wang J N, Chu L Y. Route optimization of cold chain logistics and distribution paths for considering charging strategies[J]. Computer Engineering and Applications, 2024, 60(17): 282-292.)
- [5] 李英, 张鹏威, 吴一帆. 电动汽车/传统汽车混合车队车辆配置及路径优化模型[J]. 系统管理学报, 2020, 29(3): 522-531.  
(Li Y, Zhang P W, Wu Y F. Vehicle routing problem with mixed fleet of conventional and electric vehicles[J]. Journal of Systems & Management, 2020, 29(3): 522-531.)
- [6] 李得成, 陈彦如, 张宗成. 基于分支定价算法的电动车与燃油车混合车辆路径问题研究[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(4): 995-1009.  
(Li D C, Chen Y R, Zhang Z C. A branch-and-price algorithm for electric vehicle routing problem with time windows and mixed fleet[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2021, 41(4): 995-1009.)
- [7] Sengupta S, Cohan D S. Fuel cycle emissions and life cycle costs of alternative fuel vehicle policy options for the city of Houston municipal fleet[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 54: 160-171.
- [8] 张得志, 周少宇, 周理昆, 等. 部分充电策略下多中心混合车队联合配送路径优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(9): 3552-3562.  
(Zhang D Z, Zhou S Y, Zhou L K, et al. Multi-depot mixed fleet joint distribution routing optimization with partial recharging strategy[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(9): 3552-3562.)
- [9] Sabar N R, Bhaskar A, Chung E, et al. A self-adaptive evolutionary algorithm for dynamic vehicle routing problems with traffic congestion[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2019, 44: 1018-1027.
- [10] 张传琪, 张杨. 动态路网下多车型车辆路径问题研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2017, 15(2): 112-118.  
(Zhang C Q, Zhang Y. Study on vehicle route problem under dynamic road system[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2017, 15(2): 112-118.)
- [11] 姜广田, 纪皎月, 董佳伟. 绿色物流配送下的多车型动态车辆路径优化[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(7): 2362-2380.  
(Jiang G T, Ji J Y, Dong J W. Multi-vehicle dynamic vehicle routing optimization in green logistics distribution[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2024, 44(7): 2362-2380.)
- [12] Liao T Y, Hu T Y. An object-oriented evaluation framework for dynamic vehicle routing problems under real-time information[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(10): 12548-12558.
- [13] 宋丽英, 赵世超, 卞蹇, 等. 低碳视角下城乡区域混合车队生鲜配送路径问题研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(6): 250-261.  
(Song L Y, Zhao S C, Bian Q, et al. Study on the fresh delivery route of urban-rural mixed fleet from the perspective of low carbon[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(6): 250-261.)
- [14] 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.)
- [15] 范厚明, 张跃光, 田攀俊, 等. 时变路网下异型车辆动态配置与路径优化[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(2): 455-470.  
(Fan H M, Zhang Y G, Tian P J, et al. Dynamic vehicle routing problem of heterogeneous fleets with time-dependent networks[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2022, 42(2): 455-470.)
- [16] 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.  
(Zhou X C, Zheng Z L, Yang K, et al. Research on time-

- and-site dependent multi-objective green vehicle routing problem in urban logistics distribution[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(2): 413-422.)
- [17] 李宁海, 陈硕, 梁肖, 等. 我国交通运输业碳达峰时间预测[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2024, 24(1): 2-13. (Li N H, Chen S, Liang X, et al. Peak carbon dioxide emissions time forecast of China's transportation industry[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2024, 24(1): 2-13.)
- [18] 张得志, 乔馨, 肖博文, 等. 基于低碳与随机需求的多目标车辆路径优化[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(8): 2165-2174. (Zhang D Z, Qiao X, Xiao B W, et al. Multi-objective vehicle routing optimization based on low carbon perspective and random demand[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(8): 2165-2174.)
- [19] Kulkarni R V, Bhave P R. Integer programming formulations of vehicle routing problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 1985, 20(1): 58-67.
- [20] 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(22): 1161-1172.
- [21] 范厚明, 刘鹏程, 吴嘉鑫, 等. 集货需求随机的同时配集货 VRP 及混合变邻域搜索算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(10): 2646-2659. (Fan H M, Liu P C, Wu J X, et al. Hybrid genetic algorithm with variable neighborhood descent for the vehicle routing problem with simultaneous stochastic pickup and deterministic delivery[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2019, 39(10): 2646-2659.)
- [22] 侯登凯, 范厚明, 任晓雪. 时变路网下多中心混合车队联合配送车辆路径优化[J]. *大连海事大学学报*, 2022, 48(1): 11-22. (Hou D K, Fan H M, Ren X X. Vehicle routing optimization of multi-center hybrid fleet joint distribution under time-varying road network[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2022, 48(1): 11-22.)
- [23] Zhang Q H, Wang Z T, Huang M, et al. Heterogeneous multi-depot collaborative vehicle routing problem[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2022, 160: 1-20.
- [24] Wang W Q, Zhao J Y. Partial linear recharging strategy for the electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and recharging stations[J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 308(2): 929-948.
- [25] 初良勇, 王嘉宁, 丁静茹. 多中心半开放式城市物流异构电动车辆路径优化[J]. *计算机应用研究*, 2024, 41(12): 3587-3594. (Chu L Y, Wang J N, Ding J R. Vehicle route optimization of heterogeneous fleet electric for multicenter semi-open urban logistics[J]. *Application Research of Computers*, 2024, 41(12): 3587-3594.)
- [26] 凌帅, 杨娟, 孙鹏, 等. 多目标协同下的即时配送路径优化[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2024: 1-24. (Ling S, Yang J, Sun P, et al. The multi-objective instant delivery routing problem considering the labor rights and safety[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2024: 1-24.)
- [27] 刘长石, 陈慧璇, 吴张. 城市物流配送的混合车辆路径规划模型与优化算法[J]. *控制与决策*, 2023, 38(3): 759-768. (Liu C S, Chen H X, Wu Z. Programming model and optimization algorithm for the mixed fleet vehicle routing problem in urban logistics distribution[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(3): 759-768.)

## 作者简介

巩亮 (1980-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为运输组织现代化, E-mail: [gongliang@mail.lzjtu.cn](mailto:gongliang@mail.lzjtu.cn);

郑世龙 (2001-), 男, 硕士生, 主要研究方向为车辆路径优化, E-mail: [zslhappy123@163.com](mailto:zslhappy123@163.com);

许得杰 (1986-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为城市轨道交通运营理论, E-mail: [xudejie126@126.com](mailto:xudejie126@126.com);

耿慧琳 (2000-), 女, 硕士生, 主要研究方向为城市轨道交通应急管理, E-mail: [genghuilin20001123@163.com](mailto:genghuilin20001123@163.com);

周健 (2001-), 男, 硕士生, 主要研究方向为城市轨道交通列车运行图优化, E-mail: [zbq89227@163.com](mailto:zbq89227@163.com);

惠昌武 (1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为城市轨道交通运营安全管理, E-mail: [cwhui101@163.com](mailto:cwhui101@163.com).