

# 控制与决策

Control and Decision

## 分时电价背景下电动车配送-充电/放电路径规划

刘长石, 李君宇, 易鲲翔, 范黎骏, 万城

引用本文:

刘长石, 李君宇, 易鲲翔, 等. 分时电价背景下电动车配送-充电/放电路径规划[J]. *控制与决策*, 2025, 40(3): 794-802.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0045>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [电动汽车时代的电网-交通网协同优化综述](#)

A survey of cooperative optimization of traffic-grid networks in the era of electric vehicles

*控制与决策*. 2021, 36(9): 2049-2062 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1736>

#### [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>

#### [基于指数趋近律的车载复合储能系统全局滑模控制](#)

Global sliding mode control of vehicle-mounted hybrid energy storage system based on exponential reaching law

*控制与决策*. 2021, 36(4): 885-892 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0478>

#### [基于预防维护的单机调度问题](#)

[Single-machine scheduling problem with preventative maintenance activities](#)

*控制与决策*. 2021, 36(2): 395-402 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0626>

#### [基于机床超低待机状态的流水车间能耗调度](#)

Energy consumption scheduling in flow shop based on ultra-low idle state of numerical control machine tools

*控制与决策*. 2021, 36(1): 143-151 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0433>

# 分时电价背景下电动车配送-充电/放电路径规划

刘长石<sup>1</sup>, 李君宇<sup>2</sup>, 易鲲鹏<sup>1†</sup>, 范黎骏<sup>3</sup>, 万城<sup>2</sup>

(1. 湖南工商大学工商管理学院, 长沙 410205; 2. 湖南工商大学智能工程与智能制造学院, 长沙 410205; 3. 东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110819)

**摘要:** 分时电价政策与车辆到电网 (V2G) 技术能够平衡电网负载、增强电网削峰填谷能力, 是物流业降本增利的新途径。为探讨分时电价政策与 V2G 技术对物流配送路径规划的影响, 综合考虑客户需求、电动车行驶速度、能耗以及充/放电策略等因素, 以总配送成本最小、放电利润最大为目标, 建立电动车配送-充电/放电路径规划的多目标混合整数规划模型, 并根据模型特性设计改进非支配排序遗传算法求解。采用多类型算例开展实验, 结果表明: 在较短时间内科学规划分时电价背景下的电动车配送-充电/放电路径, 不但能有效降低总配送成本、提高放电利润, 而且能助力电网平稳运行, 为广大电能用户营造良好的用电环境, 实现物流企业、电力公司与电能用户三方互利共赢。

**关键词:** 分时电价; 车辆到电网技术; 充/放电策略; 电动车路径问题; 多目标优化; 改进非支配排序遗传算法  
**中图分类号:** TP18; U492.22 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2024.0045

**引用格式:** 刘长石, 李君宇, 易鲲鹏, 等. 分时电价背景下电动车配送-充电/放电路径规划 [J]. 控制与决策, 2025, 40(3): 794-802.

## Electric vehicle routing with charging/discharging under time-of-use electricity prices

LIU Chang-shi<sup>1</sup>, LI Jun-yu<sup>2</sup>, YI Kun-xiang<sup>1†</sup>, FAN Li-jun<sup>3</sup>, WAN Cheng<sup>2</sup>

(1. School of Management, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China; 2. School of Intelligent Engineering and Intelligent Manufacturing, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China; 3. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** The integration of time-of-use (TOU) electricity pricing policies and vehicle-to-grid (V2G) technology offers a groundbreaking strategy for load balancing on power grids. To explore whether this strategy can optimize the logistics costs of the transport fleet and increase the profits of logistics operations, the study introduces a multi-objective mixed integer programming model that accounts for customer demand, electric vehicle (EV) travel speed, energy consumption, and charging/discharging strategies. An improved version of the non-dominated sorting genetic algorithm- II (NSGA- II) is developed to minimize the fleet's total distribution costs while maximizing profits from EV discharging. Numerical experiments on diverse instance types reveal that the proposed methodologies adeptly optimize travel paths within constrained timeframes. Results indicate marked reductions in fleet distribution costs and increased profits from discharging, while also supporting electric utilities in maintaining efficient grid operations. Ultimately, the strategy of integrating TOU electricity pricing and V2G technology fosters an optimized electricity usage framework that benefits logistics companies, power utilities, and consumers, creating a synergistic relationship across the sectors.

**Keywords:** time-of-use electricity prices; vehicle-to-grid technology; charging/discharging strategy; electric vehicle routing problem; multi-objective optimization; improved non-dominated sorting genetic algorithm- II

## 0 引言

电动车是物流业主运载工具之一<sup>[1]</sup>。大量电动车无序充电行为使得电网负载不稳定, 影响用电环境。

因此, 电力部门出台分时电价政策, 引导用户科学用电, 增强电网稳定性。车辆到电网 (V2G) 技术通过协调电动车与电网间的电能交换, 有效平衡电网负载。

收稿日期: 2024-01-09; 录用日期: 2024-07-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71972069); 国家社会科学基金项目 (23BGL011); 湖南省社会科学基金项目 (23JD037); 湖南省研究生科研创新项目 (CX20231162); 湖湘高层次人才聚集工程-冠纲 (2024RC4008).

†通信作者. E-mail: yikunxiang@hutb.edu.cn.

当电网负荷低时,电动车在充电站充电,存储电网过剩的部分电能,减少电能浪费;当电网负荷过高时,电动车采用V2G技术向电网放电,平衡电网负载,并获取一定的放电收益.分时电价背景下,物流企业如何科学规划电动车配送-充电/放电路径,实现物流企业、电力公司、电能用户的互利共赢,是一个值得深入研究的科学问题.

Conrad等<sup>[2]</sup>首次提出电动车路径问题(EVRP),随后,学者们研究了不同物流情景下的EVRP.吴廷映等<sup>[3]</sup>研究载重影响耗电率的EVRP;Fan等<sup>[4]</sup>研究了考虑充电站能源差异的EVRP;Basso等<sup>[5]</sup>通过机器学习预测EVRP中的电量消耗;Zhang等<sup>[6]</sup>考虑物流配送中的不确定影响因素,研究了带时间窗的模糊EVRP.以上文献能为研究EVRP提供理论参考,但均未考虑分时电价对EVRP的影响.

分时电价政策出台后,Huang等<sup>[7]</sup>基于分时电价构建一种电动车充电模型;Yang等<sup>[8]</sup>研究了分时电价下考虑多样充电方式的EVRP;Ham等<sup>[9]</sup>研究分时电价下带时间窗的EVRP,提出一种峰时充电规避策略;Ferro等<sup>[10]</sup>研究了基于分时电价的EVRP.以上文献可为求解分时电价背景下的EVRP提供借鉴.

V2G技术出现后,部分学者开始关注电动车充电/放电调度问题.Umetani等<sup>[11]</sup>设计了一种启发式算法优化电动车充电/放电调度问题.Liu等<sup>[12]</sup>提出一种基于V2G技术的电动车充电/放电路径优化算法.最近,学者们将V2G技术应用至物流配送中,以获得新利润.Narayanan等<sup>[13]</sup>构建了基于V2G技术与换电补能方式的EVRP模型;Abdulaal等<sup>[14]</sup>研究了包含V2G技术和电网到车辆技术的EVRP.这些文献可以为基于V2G技术的EVRP提供研究参考.

已有成果为深入研究EVRP奠定了良好基础,但仍存在以下可进一步拓展的研究缺口:1)已有文献通常设定电动车充电价格为一固定值,与实际情况不够吻合.例如江苏省发改委发布《关于进一步明确我省电动汽车充换电设施用电价格有关事项的通知》,鼓励电动车充换电设施运营商执行分时电价政策,引导电动车有序充电.2)已有成果主要考虑电动车完全充电与部分充电等充电策略,缺乏物流配送过程中电动车放电策略的研究.3)虽有Ferro等<sup>[10]</sup>研究基于分时电价的EVRP,Abdulaal等<sup>[14]</sup>研究基于V2G技术的EVRP,但鲜见将分时电价、V2G技术与EVRP有机结合的研究.因此,针对以上研究缺口,本文综合考虑分时电价、电动车能耗以及充电/放电策略等因素,以总配送成本最小、放电利润最大为目标,建立分时电价背景下电动车配送-充电/放

路径规划模型,并设计改进非支配排序遗传算法求解,以期能科学规划分时电价背景下的电动车配送-充电/放电路径,为物流企业提供降本增利的新途径,助力电网平稳运行,保障电能用户用电,实现物流企业、电力公司、电能用户的互利共赢.

## 1 问题描述

某物流企业采用电动车配送客户,运营区域内建有支持充电与V2G放电的充电站.节点坐标、需求量、电动车参数、分时电价等已知.电动车从物流中心出发时为满电状态,配送中可根据需要前往充电站进行充电/放电操作,完成配送后返回物流中心.

为明确本文适用范围,特提出如下假设:1)电动车为同一类型,每辆电动车最多启用配送一次.2)各客户需求量均小于电动车容量,能且仅能被一辆电动车服务一次.3)不同时段内,电动车在充电站的充电价格不同、放电收益不同.4)各充电站内充电桩数量与承载能力可实时满足电动车的充电/放电需求.各电动车到达充电站无需排队等待,即刻执行充电/放电操作,且每次在充电站仅能执行一种操作.5)为减小充电/放电带来的电池损耗,设定电动车采用部分充电策略,配送途中最多充电一次,放电一次.6)启用的电动车会产生固定使用成本、使用时间成本、充电成本、放电利润.决策问题:分时电价背景下,如何合理规划电动车配送-充电/放电路径,满足所有客户需求,并使得总配送成本最小且放电利润最大?

## 2 数学模型

### 2.1 符号与变量

1)集合.令 $L$ 为固定时间段长度,将全天划分为多个时间段, $H = \{H_0, H_1, H_2, \dots, H_R\}$ 为全天时间段集合.其中: $[H_{h-1}, H_h]$ 表示第 $h$ 个时间段; $P_c$ 为客户集合; $P_s$ 为充电站集合; $P$ 为全部节点集合, $P = P_c \cup P_s \cup 0$ ,0为物流中心; $K$ 为电动车集合.

2)参数. $Q$ 为电动车容量; $C$ 为电动车电池容量; $d_{ij}$ 为节点 $i, j$ 之间的距离; $R_i$ 为客户 $i$ 的需求量; $S_i$ 为客户 $i$ 的服务时间; $E_{ik}^a$ 为电动车 $k$ 到达节点 $i$ 时的电量; $E_{ik}^b$ 为电动车 $k$ 离开节点 $i$ 时的电量; $W_{ik}$ 为电动车 $k$ 到达节点 $i$ 时的载重; $G_{ik}^h$ 为 $h$ 时间段内电动车 $k$ 在充电站 $i$ 的充电量; $F_{ik}^h$ 为 $h$ 时间段内电动车 $k$ 在充电站 $i$ 的放电量; $w_{ijk}$ 为电动车 $k$ 在路段 $(i, j)$ 上行驶的载重; $v$ 为电动车速度; $T_{ijk}$ 为电动车 $k$ 在路段 $(i, j)$ 上行驶的时间; $e_{ijk}$ 为电动车 $k$ 在路段 $(i, j)$ 上行驶消耗的电量; $t_{ik}^a$ 为电动车 $k$ 到达节点 $i$ 的时间; $t_{ik}^b$ 为电动车 $k$ 离开节点 $i$ 的时间; $p_c$ 为充电功

率;  $p_f$  为放电功率;  $\varepsilon_{ik}^h$  为  $h$  时间段内电动车  $k$  在充电站  $i$  的充电时间;  $\delta_{ik}^h$  为  $h$  时间段内电动车  $k$  在充电站  $i$  的放电时间;  $g_h$  为电动车在  $h$  时段的单位充电成本;  $f_h$  为电动车在  $h$  时段的单位放电收益;  $\tau_k^i$  为电动车  $k$  在充电站  $i$  充电次数;  $\varsigma_k^i$  为电动车  $k$  在充电站  $i$  放电次数。

3) 决策变量.  $x_{ijk}$  为 0-1 变量, 当电动车  $k$  从节点  $i$  行驶至节点  $j$  时为 1, 否则为 0;  $y_{ik}$  为 0-1 变量, 当电动车  $k$  服务客户  $i$  时为 1, 否则为 0;  $X_{ik}^h$  为 0-1 变量, 当电动车  $k$  在  $h$  时段内在充电站  $i$  充电时为 1, 否则为 0;  $Y_{ik}^h$  为 0-1 变量, 当电动车  $k$  在  $h$  时段内在充电站  $i$  放电时为 1, 否则为 0。

## 2.2 配送成本分析

令  $\gamma_1$  为每辆电动车的固定使用成本, 所有电动车的固定使用成本为

$$c_1 = \gamma_1 \sum_{i=0} \sum_{j \in P_c} \sum_{k \in K} x_{ijk}. \quad (1)$$

电动车在配送过程中产生行驶时间、客户服务时间、充电时间、放电时间. 令  $\gamma_2$  为电动车使用的单位时间成本, 所有电动车的使用时间成本为

$$c_2 = \gamma_2 \left( \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} \sum_{k \in K} T_{ijk} x_{ijk} + \sum_{i \in P_c} \sum_{k \in K} S_i y_{ik} + \sum_{h \in H} \sum_{i \in P_s} \sum_{k \in K} \varepsilon_{ik}^h X_{ik}^h + \sum_{h \in H} \sum_{i \in P_s} \sum_{k \in K} \delta_{ik}^h Y_{ik}^h \right), \quad (2)$$

所有电动车充电的电能成本为

$$c_3 = \sum_{i \in P_s} \sum_{h \in H} \sum_{k \in K} g_h G_{ik}^h X_{ik}^h. \quad (3)$$

## 2.3 充电/放电价格与放电利润分析

### 2.3.1 充电/放电价格

根据文献 [15], 23:00 至次日 08:00 为谷时, 充电价格与放电收益较低; 08:00 至 09:00、13:00 至 17:00、22:00 至 23:00 为平时, 充电价格与放电收益适中; 09:00 至 13:00、17:00 至 22:00 为峰时, 充电价格与放电收益最高。

### 2.3.2 放电利润分析

配送过程中, 电动车  $k$  在时间段  $[H_{h-1}, H_h]$  内的放电示意图如图 1 所示。

根据图 1, 电动车  $k$  的放电收益为

$$E_k = \sum_{s \in P_s} \sum_{H_h \in H} F_{sk}^{H_h} f_{H_h} Y_{sk}^{H_h}, \quad \forall k \in K. \quad (4)$$

放电的电能成本包括电能购入成本与为放电而额外行驶的距离能耗成本两部分. 因此, 电动车  $k$  放电的电能成本为

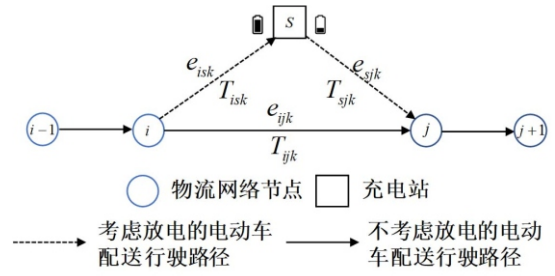


图1 配送路径中放电示意图

$$M_k = \sum_{s \in P_s} \sum_{H_h \in H} F_{sk}^{H_h} Y_{sk}^{H_h} (g_{H_h} X_{uk}^{H_h}) + \sum_{s \in P_s} \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} \sum_{H_h \in H} (e_{isk} x_{isk} + e_{sjk} x_{sjk} - e_{ijk}) (g_{H_h} X_{uk}^{H_h}) Y_{sk}^{H_h}, \quad \forall u \in P_s, H_l \in H, l < h, k \in K. \quad (5)$$

放电的时间成本包括放电等待时间成本与额外行驶时间成本. 电动车  $k$  放电的时间成本为

$$U_k = \gamma_2 \left( \sum_{s \in P_s} \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} \sum_{H_h \in H} Y_{sk}^{H_h} (T_{isk} x_{isk} + T_{sjk} x_{sjk} - T_{ijk}) + \sum_{s \in P_s} \sum_{H_h \in H} \delta_{sk}^{H_h} Y_{sk}^{H_h} \right), \quad \forall k \in K. \quad (6)$$

综上, 电动车  $k$  放电利润  $r_k$  为放电收益与电能成本、时间成本之差, 即

$$r_k = E_k - M_k - U_k, \quad \forall k \in K. \quad (7)$$

## 2.4 模型建立

构建电动车配送-充电/放电路径规划模型如下:

$$\min c_1 + c_2 + c_3; \quad (8)$$

$$\max \sum_{k \in K} r_k. \quad (9)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in P_c \cup P_s} x_{0ik} \leq 1, \quad \forall k \in K; \quad (10)$$

$$\sum_{i \in P_c \cup P_s} x_{0ik} = \sum_{j \in P_c \cup P_s} x_{j0k}, \quad \forall k \in K; \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} y_{ik} = 1, \quad \forall i \in P_c; \quad (12)$$

$$\sum_{i \in P} x_{ijk} = \sum_{l \in P} x_{jlk}, \quad \forall j \in P_c \cup P_s, k \in K; \quad (13)$$

$$\sum_{i \in P_c} R_i y_{ik} \leq Q, \quad \forall k \in K; \quad (14)$$

$$w_{ijk} = (W_{ik} - R_i) x_{ijk}, \quad \forall i \in P_c, j \in P, i \neq j, k \in K; \quad (15)$$

$$w_{ijk} = w_{jlk}, \quad \forall j \in P_s, i \in P, l \in P, k \in K; \quad (16)$$

$$E_{0k}^b = C, \forall k \in K; \quad (17)$$

$$E_{ik}^a = E_{ik}^b, \forall i \in P_c, k \in K; \quad (18)$$

$$E_{jk}^a \leq (E_{ik}^b - e_{ijk})x_{ijk} + C(1 - x_{ijk}), \\ \forall i \in P, j \in P, k \in K; \quad (19)$$

$$E_{ik}^a \geq 0, \forall i \in P, k \in K; \quad (20)$$

$$E_{ik}^b \geq \begin{cases} e_{ijk}x_{ijk} + e_{jlk}x_{jlk}, & i \in P_c \cup 0, \\ & j \in P_c, l \in P_s \cup 0, i \neq j, k \in K; \\ e_{ijk}x_{ijk}, & i \in P_c \cup P_s, j \in P_s \cup 0, \\ & k \in K; \end{cases} \quad (21)$$

$$\sum_{h \in H} G_{ik}^h X_{ik}^h \leq C - E_{ik}^a, \\ \forall i \in P_s, h \in H, k \in K; \quad (22)$$

$$E_{ik}^b = E_{ik}^a + \sum_{h \in H} G_{ik}^h X_{ik}^h - \sum_{h \in H} F_{ik}^h Y_{ik}^h, \\ \forall i \in P_s, k \in K; \quad (23)$$

$$T_{ijk} = \frac{d_{ij}x_{ijk}}{v}, \forall i \in P, j \in P, k \in K; \quad (24)$$

$$\varepsilon_{ik}^h = \frac{G_{ik}^h X_{ik}^h}{p_c}, \forall i \in P_s, h \in H, k \in K; \quad (25)$$

$$\delta_{ik}^h = \frac{F_{ik}^h Y_{ik}^h}{p_f}, \forall i \in P_s, h \in H, k \in K; \quad (26)$$

$$t_{ik}^b = t_{ik}^a + S_i y_{ik} + \sum_{h \in H} \varepsilon_{ik}^h X_{ik}^h + \sum_{h \in H} \delta_{ik}^h Y_{ik}^h, \\ \forall i \in P_c \cup P_s, k \in K; \quad (27)$$

$$t_{jk}^a = (t_{ik}^b + T_{ijk})x_{ijk}, \forall i \in P, j \in P, k \in K; \quad (28)$$

$$X_{ik}^h + Y_{ik}^h \leq 1, \forall i \in P_s, h \in H, k \in K; \quad (29)$$

$$\sum_{i \in P_s} \tau_k^i \leq 1, \forall k \in K; \quad (30)$$

$$\sum_{i \in P_s} \zeta_k^i \leq 1, \forall k \in K; \quad (31)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, y_{ik} \in \{0, 1\}, X_{ik}^h \in \{0, 1\}; \\ Y_{ik}^h \in \{0, 1\}, \forall i \in P, h \in H, k \in K. \quad (32)$$

目标函数 (8) 表示最小化总配送成本; 目标函数 (9) 表示最大化放电利润; 约束 (10) 限定每辆电动车最多启用一次; 约束 (11) 限定每辆电动车的起点与终点均为物流中心; 约束 (12) 限定每位客户能且仅能被一辆电动车服务一次; 约束 (13) 表示配送过程的流量守恒; 约束 (14) 限定电动车容量不超过额定载重; 约束 (15) 表示电动车配送某客户后的载重变化; 约束 (16) 表示电动车访问充电站前后载重

不变; 约束 (17) 限定电动车从物流中心出发时为满电状态; 约束 (18) 表示电动车服务客户时电量不变; 约束 (19) 为电动车到达各节点电量计算方式; 约束 (20) 限定电动车任意时刻电量非负; 约束 (21) 为电动车访问前后节点的电量约束条件; 约束 (22) 表示电动车采用部分充电策略; 约束 (23) 为电动车离开充电站时剩余电量计算方式; 约束 (24) 为电动车  $k$  在路段  $(i, j)$  中行驶时间的计算方法; 约束 (25) 为电动车某时间段内充电时间的计算方法; 约束 (26) 为电动车某时间段内放电时间的计算方法; 约束 (27) 为电动车离开某节点时间的计算方法; 约束 (28) 为电动车到达某节点的计算方式; 约束 (29) 限定电动车在任意时间段内访问充电站时只能进行充电与放电中一项操作; 约束 (30) 限定每辆电动车在途最多充电一次; 约束 (31) 限定每辆电动车在途最多放电一次; 约束 (32) 限定各决策变量取值范围。

### 2.5 电动车行驶的电量消耗计算

根据文献 [16] 的方法, 电动车  $k$  在路段  $(i, j)$  上行驶时的电量消耗量为

$$e_{ijk} = \frac{(\alpha_{ij}(N + w_{ijk})d_{ij} + \beta v^2 d_{ij}) + T_{ijk}A}{\eta}. \quad (33)$$

其中:  $\eta$  为电机转换效率;  $\alpha_{ij}$  为路段  $(i, j)$  的相关参数,  $\alpha_{ij} = a + g(\sin \theta_{ij} + C_r \cos \theta_{ij})$ ,  $a$  与  $g$  分别为电动车加速度与重力加速度,  $\theta_{ij}$  为路段  $(i, j)$  的坡度,  $C_r$  为轮胎滚动阻力系数;  $N$  为电动车自重;  $\beta$  为电动车相关参数,  $\beta = 0.5C_d M \rho$ ,  $C_d$  为牵引系数,  $M$  为迎风面积,  $\rho$  为空气密度;  $A$  为辅助系统设备的消耗功率。

## 3 改进非支配排序遗传算法设计

### 3.1 算法设计思路

求解多目标模型的策略主要有两种: 1) 利用权重化多目标为单目标进行求解; 2) 直接利用多目标优化算法求解. 考虑到本问题两目标相互矛盾的特性, 若将二者主观加权, 可能导致优化过程中降低电动车放电的可能性. 因此, 本文使用多目标优化算法求解. 带精英策略的非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 是求解多目标优化问题的经典启发式算法, 具有搜索效率高、可在一次运行过程中得出多个高质量解等优点, 但存在局部搜索能力弱、收敛性较差等缺陷<sup>[17]</sup>. 本文根据模型特性设计一种改进非支配排序遗传算法 (INSGA-II), 具体思路如下: 1) 为避免初始种群质量差导致收敛速度慢、初始种群质量过好导致早熟, 采用随机方法产生普通种群, 并采用启发式方法产生优质种群; 2) 为扩大搜索范围, 增加种群

多样性,设计多样邻域搜索方法;3)为降低充电成本、提高放电利润,设计一种成本与利润兼顾的充电/放电策略。

### 3.2 放电利润计算方法

step 1: 计算电动车  $k$  到达执行放电操作的充电站  $i$  的剩余电量  $E_{ik}^a$  与时间段  $h$ 。

step 2: 若电动车在后续配送途中充电,则计算电动车  $k$  离开充电站  $i$  后继续配送直至访问该充电站所需的电量  $NE_{ik}$ ; 否则计算电动车  $k$  离开充电站  $i$  后继续配送直至返回物流中心所需的电量  $NE_{ik}$ 。

step 3: 计算电动车  $k$  在充电站  $i$  的放电量  $DE_{ik}$ , 从时间段  $h$  开始,把  $DE_{ik}$  分解为时间段  $h$  以及之后多时段内的放电量  $\delta_{ik}^h, \delta_{ik}^{h+1}, \dots, \delta_{ik}^{h+n}$ 。

step 4: 根据式 (4) ~ (7) 计算得出放电利润  $r_k$ 。

### 3.3 成本与利润兼顾的充电/放电策略设计

step 1: 将路径按照时间段拆分成多段子路径。

step 2: 在每段子路径中以最小额外行驶距离为目标,选择最优充电站及访问顺序。

step 3: 根据各段路径最优充电站,设计不充不放、只充不放、只放不充、先充后放、先放后充等 5 种可能的充电/放电方案。选择总配送成本与放电利润之差最小的充电/放电方案。

### 3.4 染色体编解码

采用整数编码方式,染色体序列长度为所有客户数量,从左到右代表客户点的访问顺序。

根据电动车容量约束(式(14))、电量约束(式(17)~(21))与充电次数限制(式(30)),将染色体分解为多辆电动车的配送-充电路径。利用 3.3 节方法,构建充电/放电方案,生成电动车配送-充电/放电路径。

### 3.5 初始种群构建

1) 参考文献 [4] 的蚁群算法,生成多条优质染色体; 2) 采用客户编码随机排序方式生成其余染色体。

### 3.6 遗传操作

交叉操作: 1) 删除染色体中充电站编号,互换两条染色体中任意一条子路径,删除未交叉部分重复的客户编号; 2) 以增加路径长度最小为目标,将缺失的客户编号重新插入染色体中未交叉部分; 3) 将染色体中物流中心编号删除,仅保留客户编号。

变异操作: 1) 随机移除一段子路径; 2) 以增加路径长度最小为目标,将移除的客户编号重新插入。

### 3.7 多样邻域搜索方法

子代种群与父代种群融合后产生的临时种群中存在重复染色体。随机选用 Swap、Insert、Reverse 算

子<sup>[18-19]</sup>对重复的染色体进行邻域搜索。Swap 算子表示交换 2 个随机客户节点的位置; Insert 算子表示将某随机客户节点插入到另一随机客户节点的后面; Reverse 算子表示翻转两随机节点之间的子路段。

### 3.8 INSGA-II 具体步骤

step 1: 参数初始化。令 MaxGen 为最大迭代次数, gen 为当前迭代次数,  $N_p$  为种群规模,  $\psi$  为初始父代种群中优质染色体的比例。令  $gen = 1$ 。

step 2: 初始父代种群 Pt 构建。采用 3.5 节中的初始种群构建方案,生成  $\psi N_p$  条优质染色体、 $(1-\psi)N_p$  条普通染色体。

step 3: 解码与目标函数值计算。对每条染色体解码,计算每条路径的放电利润与总配送成本。

step 4: 快速非支配排序与拥挤度计算。计算当前种群中所有染色体所隶属的支配层与拥挤度值。

step 5: 遗传操作。采用二元锦标赛的选择方式,选择较优的染色体直接进入子代种群 Qt。采用文献 [20] 提出的方法,计算自适应交叉、变异概率。根据交叉、变异概率,利用 3.6 节中交叉与变异方法,对种群中未被选择的染色体进行操作,生成子代种群 Qt。

step 6: 父代、子代融合。将 Pt 与 Qt 融合,生成规模为  $2N_p$  的临时种群 Rt。删除 Rt 中的重复染色体,利用 3.7 节方法搜索重复染色体的邻域,直至种群规模恢复至  $2N_p$ 。计算 Rt 中所有染色体的目标函数值、支配层与拥挤度值,选择最优的  $N_p$  个染色体作为下一代遗传操作的父代种群 Pt。

step 7: 新父代种群遗传操作。对新生成的种群 Pt 执行 step 5 中的遗传操作,生成新子代种群 Qt。

step 8: 程序终止判断。若  $gen < MaxGen$ , 则  $gen = gen + 1$ , 转 step 6; 否则对当前子代种群 Qt 执行快速非支配排序,算法终止,输出第 1 支配层的染色体作为 Pareto 前沿解集,进行最优决策:选择成本与利润之差最小的解作为最优解。

## 4 算例实验

### 4.1 实验设置

本文选用 Schneider 算例<sup>[21]</sup>作为基础构建实验算例。算例客户分布分为 3 种类型: C1 与 C2 类型算例为集中分布; R1 与 R2 类型算例为随机分布; RC1 与 RC2 类型算例为混合分布。为符合本文测试要求,补充如下数据: 1) 为标准化配送流程,设定算例中各客户的服务时间均为 2 min; 2) 根据电动车标准,将各算例中的客户需求量增至原始数据的 4 倍。各算例均包含 100 个客户点、1 个物流中心、20 个充电站。

实验参数设置: 1) 设定司机最早工作时间为 08:00,记 08:00 为第 0 分钟。2) 设定  $L = 60$  min, 将

每天划分为 24 个时间段. 3) 参考文献 [15] 中的设置, 将全天充电价格 $g_h$ (单位: 元/千瓦时) 与放电收益 $f_h$ (单位: 元/千瓦时) 分为 3 种情况, 如表 1 所示. 4) 参考文献 [22] 与我国市场价格标准, 设置电动车参数与各项成本为  $N = 4500 \text{ kg}$ ,  $Q = 2500 \text{ kg}$ ,  $C = 115 \text{ kWh}$ ,  $M = 6.71 \text{ m}^2$ ,  $a = 0 \text{ m/s}^2$ ,  $v = 50 \text{ km/h}$ ,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ,  $\theta_{ij} = 0^\circ$ ,  $C_r = 0.01$ ,  $C_d = 0.7$ ,  $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $\eta = 0.9$ ,  $A = 2.2 \text{ kW}$ ,  $p_c = 120 \text{ kW}$ ,  $p_f = 60 \text{ kW}$ ,  $\gamma_1 = 150 \text{ 元/辆}$ ,  $\gamma_2 = 0.3 \text{ 元/min}$ . 5) 设置 INSGA-II 算法参数为  $\text{MaxGen} = 600$ ,  $\text{Np} =$

表1 不同时段充电价格与放电收益情况

电价时段	平时	峰时	谷时
时间	08:00~09:00 13:00~17:00 22:00~23:00	09:00~13:00 17:00~22:00	23:00~次日08:00
充电价格	1.887	2.235	0.665
放电收益	1.787	2.135	0.565

表2 多类型算例实验结果

IN	SC	FC	TC	CC	DE	DC	DT	SP	HV	RT
C101	766.89	450	316.89	0	181.35	57.79	27.29	96.27	53833.71	236.62
RC101	799.24	450	349.24	0	54.69	20.88	11.07	22.74	145665.40	260.14
R101	826.90	450	346.68	30.22	130.06	42.50	20.93	66.63	36297.60	270.47
C201	777.20	450	327.20	0	146.42	47.95	22.68	75.79	50878.29	249.94
RC201	799.63	450	349.63	0	32.89	10.77	5.35	16.77	169730.35	252.17
R201	848.95	450	356.73	42.21	120.90	38.15	17.63	65.12	35839.06	243.28
AVE	803.14	450	341.06	12.07	111.05	36.34	17.49	57.22	82040.74	252.10

由表 2 的实验结果可知: 1) 根据 SC、FC、TC 与 CC 的值可知, 电动车固定使用成本、使用时间成本与充电成本分别占总配送成本的 56.03%、42.47%、1.50%, 说明电动车固定使用成本与使用时间成本为配送成本的主要影响因素. 物流企业应科学规划电动车配送路径, 减少电动车使用数量, 缩短行驶时间. 2) 根据 DE、DC、DT 与 SP 的值可知, 放电成本平均为 53.83 元, 放电利润平均为 57.22 元, 二者分别占放电收益的 48.47% 与 51.53%. 说明电动车放电成本严重影响放电利润. 电动车放电成本由放电时间成本与电能成本组成, 二者分别占放电成本的 67.51% 与 32.49%. 物流企业应租用电池容量更大的电动车配送客户, 增加放电电量, 提高放电收益. 3) 根据 SC 与 SP 的值可知, 电动车放电利润为总配送成本的 7.12%, 说明电动车配送途中兼顾放电, 可以创造一定的放电利润, 该方式具有一定的应用潜力. 4) 根据 RT 的值可知, INSGA-II 平均运行时长为 252.10 s, 说明 INSGA-II 能够在较短时间内给出兼顾成本与利润的电动车配送-充电/放电路径方案,

100. 为保持种群中优质染色体与普通染色体的相对均衡性, 令  $\psi = 0.4$ .

INSGA-II 程序采用 Matlab R2022a 开发, 在 CPU 为 12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12500@3.00 GHz, RAM 16.0 GB 的微机上运行.

### 4.2 实验分析

#### 4.2.1 多类型算例的路径规划分析

采用多类型算例验证本文模型与算法的有效性, 实验结果如表 2 所示. 其中: IN 为算例名称, SC 为总配送成本 (单位: 元), FC 为电动车固定使用成本 (单位: 元), TC 为电动车使用时间成本 (单位: 元), CC 为电动车配送途中的充电成本 (单位: 元), DE 为电动车放电收益 (单位: 元), DC 为电动车放电的电能成本 (单位: 元), DT 为电动车放电的时间成本 (单位: 元), SP 为总放电利润 (单位: 元), HV 为 Pareto 前沿的超体积, RT 为程序运行时间 (单位: s), AVE 表示平均值.

具有可行性与合理性. 根据 HV 的值可知, INSGA-II 产生前沿解集的超体积平均为 82 040.74, 说明 INSGA-II 产生的前沿解集较为优秀, 具有良好的分布性与多样性.

算例 R101 的 Pareto 前沿分布如图 2 所示. 图 2 的 Pareto 前沿解集中, 除少数目标函数值较为极端的解外, 其余解分布集中, 说明 INSGA-II 具有较强的收敛性. 由图 2 中解的目标函数值可知, 放电利润随着总配送成本的增大而增大. 若选用单一目标的最优解作为最优解, 则会在另一目标上表现极差. 因此,

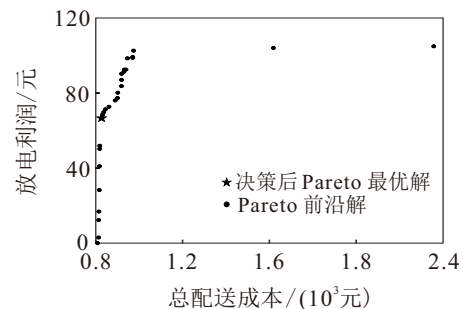


图2 算例 R101 的 Pareto 前沿分布

采用总配送成本与放电利润之差最小的解作为当前 Pareto 前沿解集的最优解,能够权衡两个目标间的矛盾.

#### 4.2.2 不同的充放电策略对比实验

为检验成本与利润兼顾的充电/放电策略的有效性与合理性,将该策略与配送优先的充电/放电策略

进行对比实验.配送优先的充电/放电策略定义为:电动车在配送过程中若电量不足,则前往充电站充电,且在后续配送过程中不放电;如果电动车完成配送任务后还有剩余电量,则前往充电站放电,再返回物流中心.各算例的实验结果如表3所示,其中DN为放电次数(单位:次),其余各符号含义同表2所述.

表3 不同充放电策略的实验结果

IN	成本与利润兼顾的充电/放电策略						配送优先的充电/放电策略					
	SC	SP	DE	DC	DT	DN	SC	SP	DE	DC	DT	DN
C103	770.44	91.39	174.46	56.14	26.93	3	796.08	-8.01	29.20	19.57	17.64	1
RC103	815.27	21.81	46.22	15.85	8.56	2	800.01	0	0	0	0	0
R103	831.78	53.52	101.03	32.27	15.24	2	849.66	0	0	0	0	0
C203	785.43	53.05	110.30	37.65	19.60	3	790.87	5.49	47.00	24.03	17.48	2
RC203	799.24	26.27	56.90	19.84	10.79	2	806.21	-11.27	15.45	13.28	13.44	2
R203	831.95	33.93	68.49	22.91	11.65	2	832.32	-10.64	6.00	8.03	8.61	1
AVE	805.69	46.66	92.90	30.78	15.46	2.33	812.53	-4.07	16.28	10.82	9.53	1

由表3的实验结果可知:1)根据SC、SP与DN的值可知,与配送优先充电/放电策略的EVRP相比,成本与利润兼顾的充电/放电策略的EVRP总配送成本低0.84%,平均多放电1.33次,放电利润增加50.73元.说明成本与利润兼顾的充电/放电策略明显优于配送优先的充电/放电策略,能够根据分时电价,选择放电收益较高的峰时放电,增加放电利润.2)根据SP、DE、DC与DT的值可知,在配送优先策略的EVRP中,大多数算例的放电利润均小于等于0.因为在基于配送优先的充电/放电策略中,电动车完成配送任务后,可供放电的电量较少,所处时段可能位于平时或谷时,导致整体放电收益较低.而且,电动车前往充电站放电的路程可能较远,需要较多的行驶时间与电能,导致放电成本高于放电收益,使得放电利润为负,

说明配送优先的充电/放电策略在部分情境下是不可行的.成本与利润兼顾的充电/放电策略能够综合考虑分时电价对放电成本与放电利润的影响,具有合理性与有效性.

#### 4.2.3 算法对比实验

本问题的两个目标具有矛盾特性,使用CPLEX等求解器求解效果不佳.因此,为验证INSGA-II的有效性,本文选用鲁棒性强、全局搜索能力强<sup>[23]</sup>的多目标蚁群优化算法(MOACO)以及经典多目标优化算法NSGA-II作为基准算法.设定MOACO参数与文献[23]设置一致,设定NSGA-II交叉概率为0.7,变异概率为0.05,其余参数与本文一致.多类型算例的对比实验结果如表4所示,表中符号含义同表2所述.

表4 不同算法的实验结果

IN	INSGA-II				NSGA-II				MOACO			
	SC	SP	HV	RT	SC	SP	HV	RT	SC	SP	HV	RT
C104	762.60	95.35	12185.95	221.53	765.81	99.44	3447.67	217.01	830.01	61.02	2305.07	209.26
RC104	793.37	43.11	158552.30	234.14	801.62	19.53	134134.78	228.93	835.88	16.16	1310.93	225.49
R104	825.39	53.85	33525.42	243.96	847.90	59.52	25794.55	231.57	972.26	24.22	3232.04	232.67
C204	779.98	70.77	19782.59	235.96	786.47	64.30	3932.47	219.66	845.47	16.62	26313.29	212.08
RC204	800.71	25.64	134420.64	232.71	800.36	24.68	104938.00	220.84	829.73	6.75	16307.53	236.83
R204	828.71	54.89	38693.08	233.60	833.54	44.95	33420.26	230.79	927.08	8.66	5423.87	231.04
AVE	798.46	57.27	66193.33	233.65	805.95	52.07	50944.62	224.80	873.41	22.24	9148.79	224.56

由表4实验结果可知:1)根据SC与SP的值可知,INSGA-II两个目标的优化结果均优于其余两种基准算法.说明本文设计的INSGA-II的改进策略能够提升NSGA-II求解问题的效率与质量,INSGA-II能够给出更优的电动车配送-充电/放电路径规划方案,具有合理性与有效性.2)根据RT与HV的值可

知,3种算法的计算时间较为相近,INSGA-II生成前沿解集的超体积最大,分别比NSGA-II与MOACO多29.93%与623.52%.说明本文引入的自适应交叉、变异概率改进机制能够有效增加解集的分布性与多样性,增加算法的搜索能力与种群的多样性;通过混合种群生成方式提升算法的收敛性,使生成的

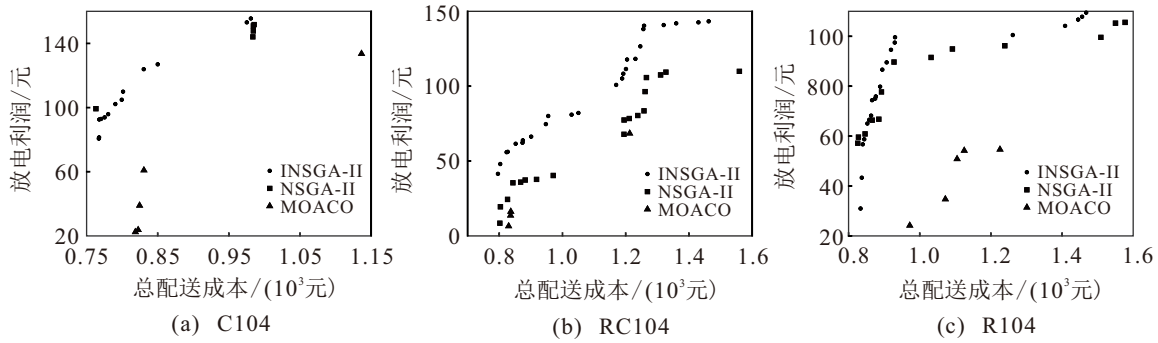


图3 不同算法求得算例 C104、RC104 与 R104 的 Pareto 前沿分布图

前沿更接近于全局 Pareto 前沿。

不同算法求得的 Pareto 前沿分布图如图 3 所示。

由图 3 可知:各算例前沿解集中的解方案数量 INSGA-II 最多,说明其能够高效搜索解空间,产生多样非支配解方案。INSGA-II 产生的大多数解方案较为均匀且分布范围广,提供了多种不同的解方案,说明本文提出的改进方案有效提高了 NSGA-II 的搜索效率,使其产生的前沿解集具有多样性与均衡性。

#### 4.2.4 电价敏感性分析

为探究分时电价情况对总配送成本与放电利润的影响,设置 3 种电价组合,即无分时电价、分时电

价、极端分时电价(日间放电需求加剧,放电收益远高于充电成本),如表 5 所示。采用算例 RC106 与 R106 进行实验,计算结果如表 6 所示。其中:CN 为充电次数(单位:次),MCP 为成本与利润之差(单位:元),其余符号含义同表 2 与表 3 所述。

表5 电价设置情况

电价情况	谷时充电价格	谷时放电收益	平时充电价格	平时放电收益	峰时充电价格	峰时放电收益
无分时电价	1.887	1.787	1.887	1.787	1.887	1.787
分时电价	0.665	0.565	1.887	1.787	2.235	2.135
极端分时电价	0.665	0.565	1.887	5.287	2.235	5.535

表6 电价敏感性分析实验结果

电价情况	RC106						R106					
	SC	SP	MCP	CC	CN	DN	SC	SP	MCP	CC	CN	DN
无分时电价	797.13	0	797.13	0	0	0	806.30	0	806.30	23.40	0	0
分时电价	814.87	29.29	785.58	13.87	1	1	838.38	63.80	774.58	36.05	2	1
极端分时电价	1359.85	962.39	397.46	457.54	3	3	1441.41	1194.91	246.50	534.84	3	3

由表 6 的实验结果可知:1) 根据 SC 与 SP 的值可知,无分时电价时,电动车配送成本最低,放电利润为 0,因为单位放电收益低于单位充电成本,电动车不放电,未产生与放电相关的成本;极端分时电价时,电动车配送成本最高,放电利润最高,因为日间电能价格存在巨大差价,电动车通过放电可以赚取高额放电利润,同时产生大量的放电时间成本,增加总配送成本。由 MCP 的值可知,着眼于总配送成本与放电利润之差,无分时电价的 EVRP 最高,分时电价的 EVRP 次之,极端分时电价下的 EVRP 最低,说明分时电价显著影响总配送成本与放电利润。2) 由 CC、CN 与 DN 的值可知,电动车充电次数、充电成本、放电次数均随着电能差价扩大而增加,说明在分时电价存在显著差异的情况下,可以选择在途中充电增加放电量,提升放电利润。因此,物流企业应根据分时电价政策合理规划电动车配送-充电/放电路径,在峰时前往充电站放电,在平时甚至谷时充电。

## 5 结论

本文研究分时电价背景下电动车配送-充电/放电路径规划,以总配送成本最小、放电利润最大为目标,构建电动车配送-充电/放电路径规划的双目标模型,设计 INSGA-II 求解。采用多类型算例开展实验,结果表明:1) 电动车固定使用成本与使用时间成本是总配送成本的主要影响因素。物流企业应合理规划电动车路径方案,尽可能减少电动车使用数量,缩短电动车使用时间。2) 电动车放电的电能成本与放电时间成本是影响放电利润的主要因素。物流企业应鼓励电动车配送前在谷时充电,配送途中尽量在峰时放电,降低电动车放电的电能成本,提高放电利润。

### 参考文献 (References)

[1] Schiffer M, Walther G. The electric location routing problem with time windows and partial recharging[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017,

- 260(3): 995-1013.
- [2] Conrad R G, Figliozzi M A. The recharging vehicle routing problem[C]. Proceedings of the 2011 Industrial Engineering Research Conference. Norcross, 2011: 111-118.
- [3] 吴廷映, 孙灏. 考虑载重影响耗电率的电动车车辆路径问题[J]. 控制与决策, 2023, 38(2): 483-491.  
(Wu T Y, Sun H. Electric vehicle routing problem with time window and linear weight-related discharging[J]. Control and Decision, 2023, 38(2): 483-491.)
- [4] Fan L J, Liu C S, Dai B, et al. Electric vehicle routing problem considering energy differences of charging stations[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 418: 138184.
- [5] Basso R, Kulcsár B, Sanchez-Diaz I. Electric vehicle routing problem with machine learning for energy prediction[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021, 145: 24-55.
- [6] Zhang S, Chen M Z, Zhang W Y, et al. Fuzzy optimization model for electric vehicle routing problem with time windows and recharging stations[J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 145: 113123.
- [7] Huang J, Wang X L, Shao C C, et al. An improved charging navigation strategy of electric vehicles via optimal time-of-use pricing[J]. *Electric Power Systems Research*, 2022, 210: 108077.
- [8] Yang H M, Yang S P, Xu Y, et al. Electric vehicle route optimization considering time-of-use electricity price by learnable partheno-genetic algorithm[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(2): 657-666.
- [9] Ham A, Park M J. Electric vehicle route optimization under time-of-use electricity pricing[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 37220-37228.
- [10] Ferro G, Paolucci M, Robba M. Optimal charging and routing of electric vehicles with power constraints and time-of-use energy prices[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 14436-14447.
- [11] Umetani S, Fukushima Y, Morita H. A linear programming based heuristic algorithm for charge and discharge scheduling of electric vehicles in a building energy management system[J]. *Omega*, 2017, 67: 115-122.
- [12] Liu P, Wang C Y, Hu J, et al. Joint route selection and charging discharging scheduling of EVs in V2G energy network[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(10): 10630-10641.
- [13] Narayanan A, Misra P, Ojha A, et al. Agent-based learning approach to electric vehicle routing problem with vehicle-to-grid supply and battery swapping[C]. Proceedings of the 6th Joint International Conference on Data Science & Management of Data (10th ACM IKDD CODS and 28th COMAD). Mumbai, 2023: 185-193.
- [14] Abdulaal A, Cintuglu M H, Asfour S, et al. Solving the multivariant EV routing problem incorporating V2G and G2V options[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2017, 3(1): 238-248.
- [15] Yang H M, Deng Y J, Qiu J, et al. Electric vehicle route selection and charging navigation strategy based on crowd sensing[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(5): 2214-2226.
- [16] Goeke D, Schneider M. Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 245(1): 81-99.
- [17] Yin N. Multiobjective optimization for vehicle routing optimization problem in low-carbon intelligent transportation[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(11): 13161-13170.
- [18] Xu Z F, Cai Y G. Variable neighborhood search for consistent vehicle routing problem[J]. *Expert Systems with Applications*, 2018, 113: 66-76.
- [19] 王伟权, 丁鼎, 曹淑艳. 混合变邻域搜索算法求解大规模电动车辆路径优化问题[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(4): 910-919.  
(Wang W Q, Ding D, Cao S Y. Hybrid variable neighborhood search algorithm for the multi-trip and heterogeneous-fleet electric vehicle routing problem[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(4): 910-919.)
- [20] 张敏, 韩晓龙. 多目标模糊机会约束规划的低碳多式联运路径优化[J]. 计算机应用, 2023, 43(2): 636-644.  
(Zhang M, Han X L. Low-carbon multimodal transportation path optimization based on multi-objective fuzzy chance-constrained programming[J]. Journal of Computer Applications, 2023, 43(2): 636-644.)
- [21] Schneider M, Stenger A, Goeke D. The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations[J]. *Transportation Science*, 2014, 48(4): 500-520.
- [22] Liu C S, Kou G, Zhou X C, et al. Time-dependent vehicle routing problem with time windows of city logistics with a congestion avoidance approach[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2020, 188: 104813.
- [23] Eaton J, Yang S X, Gongora M. Ant colony optimization for simulated dynamic multi-objective railway junction rescheduling[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(11): 2980-2992.

## 作者简介

刘长石 (1975-), 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为物流与供应链管理、数字经济, E-mail: [liuchangshi964@126.com](mailto:liuchangshi964@126.com);

李君宇 (2000-), 男, 硕士生, 主要研究方向为物流系统建模与优化、多目标优化, E-mail: [lijunyu0804@163.com](mailto:lijunyu0804@163.com);

易鲲鹏 (1990-), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为多态系统可靠性建模与优化、基于博弈论的系统保护与防御, E-mail: [yikunxiang@hutb.edu.cn](mailto:yikunxiang@hutb.edu.cn);

范黎骏 (1997-), 男, 博士生, 主要研究方向为复杂系统控制与最优化理论, E-mail: [lijun\\_fan0202@126.com](mailto:lijun_fan0202@126.com);

万城 (1998-), 男, 硕士生, 主要研究方向为智能优化算法、应急物流, E-mail: [wancheng1301470890@163.com](mailto:wancheng1301470890@163.com).