

# 控制与决策

Control and Decision

## 城市物流配送的混合车辆路径规划模型与优化算法

刘长石, 陈慧璇, 吴张

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1450>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 考虑载重影响耗电率的电动车车辆路径问题

Electric vehicle routing problem with time window and linear weight-related discharging

*控制与决策*. 2023, 38(2): 483–491 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1050>

##### 基于配送收益均衡的多目标绿色车辆路径优化算法

A multi-objective green vehicle routing optimization algorithm based on delivery benefit balance

*控制与决策*. 2023, 38(2): 365–371 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0669>

##### 集货需求可拆分的多越库中心库门分配及车辆路径协同优化

Multi-depot vehicle routing problem with split pickup and cross-dock door assignment collaborative optimization

*控制与决策*. 2023, 38(2): 501–509 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0298>

##### 考虑时变速度的多车场绿色车辆路径模型及优化算法

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

*控制与决策*. 2022, 37(2): 473–482 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1427>

##### 面向冷链物流配送路径优化的知识型蚁群算法

Knowledge based ant colony algorithm for cold chain logistics distribution path optimization

*控制与决策*. 2022, 37(3): 545–554 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0160>

# 城市物流配送的混合车辆路径规划模型与优化算法

刘长石<sup>1,2†</sup>, 陈慧璇<sup>1</sup>, 吴 张<sup>1</sup>

- (1. 湖南工商大学 工商管理学院, 长沙 410205;  
2. 湖南省高等学校物流系统优化与运作管理科技创新团队, 长沙 410205)

**摘要:** 针对城市部分区域限行、物流系统中燃油车与电动车同时并存的实际情况, 综合考虑客户需求量、服务时间、电动车行驶里程、已有充电设施、部分充电策略、燃油车油耗与碳排放等因素, 以车辆使用固定成本、驾驶员工资、电动车的充电成本、燃油车的油耗与碳排放成本之和最小为目标构建混合车辆路径规划模型. 根据模型特征设计一种改进蚁群算法求解, 并采用多类型算例进行实验. 实验结果表明, 所提方法能在非常短的时间内给出符合决策者目标的混合车辆路径规划方案, 有效降低总配送成本, 减少燃油车油耗与碳排放, 具有合理性、可行性与有效性.

**关键词:** 城市物流配送; 区域限行; 混合车辆; 车辆路径问题; 部分充电策略; 改进蚁群算法

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1450

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 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.

## Programming model and optimization algorithm for the mixed fleet vehicle routing problem in urban logistics distribution

LIU Chang-shi<sup>1,2†</sup>, CHEN Hui-xuan<sup>1</sup>, WU Zhang<sup>1</sup>

- (1. College of Business and Administration, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China;  
2. Science Technology Innovation Team on Logistics System Optimization and Operation Management of Hunan Provincial Universities, Changsha 410205, China)

**Abstract:** Aiming at the actual situation of regional restrictions in some urban areas and the coexistence of fuel vehicles and electric vehicles in the logistics system, a programming model of the mixed fleet vehicle routing problem (MFVRP) is formulated by comprehensively considering the factors, such as customer demand, service time, electric vehicles range, existing charging facilities, partial charging strategy, vehicle fuel consumption and carbon emissions. The goal of the MFVRP model is to minimize the sum of fixed cost of vehicles, driver salary, charging cost of electric vehicles, cost of fuel consumption and carbon emissions. An improved ant colony algorithm is designed to solve the problem according to the characteristics of the MFVRP model. The experiments are carried out with multiple types of instances. The experimental results show that the proposed methods can provide a satisfactory MFVRP solution that meets the goal of decision makers in very short time, effectively reduce the total distribution cost, reduce fuel consumption and carbon emissions. The proposed approaches are reasonable, feasible and effective.

**Keywords:** urban logistics distribution; regional restrictions; mixed fleet; vehicle routing problem; partial charging strategy; improved ant colony algorithm

## 0 引言

城市是商业活动的主要场所, 是物流配送的主要区域. 如今, 交通拥堵已成为城市路网常态, 越来越多的城市采取部分区域限行措施, 电动车等新能源汽车

逐渐应用于城市配送. 电动车存在续航能力不足、充电时间长及配套设施不完善等限制, 在未来较长的一段时间内, 电动车和燃油车将同时并存于城市物流系统内. 因此, 研究电动车和燃油车混合的车辆路径规

收稿日期: 2021-08-18; 录用日期: 2022-01-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71991460, 71972069); 湖南省研究生科研创新项目(CX20201105); 湖南省自然科学基金项目(2021JJ30195); 湖南省教育厅项目(18A297, 20A127, 20C0533); 湖南省社会科学基金项目(18YBA267); 湖南省社会科学评审委项目(XSP20YBC251, GLX235).

责任编辑: 唐加福.

†通讯作者. E-mail: liuchangshi964@126.com.

划,更符合城市物流实际情况。

解决城市物流配送问题的关键在于合理规划车辆路径,即求解城市物流配送的车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP)。起初,企业仅采用燃油车配送,学者们主要研究关于燃油车辆的VRP。Yao等<sup>[1]</sup>以车辆使用固定成本、运输成本与等待成本之和最小为目标构建了带时间窗的VRP数学模型;范厚明等<sup>[2]</sup>综合考虑了多类型车辆和客户动态需求等因素,以总成本最小为目标构建了时变路网条件下的动态VRP模型;刘长石等<sup>[3]</sup>研究了时变路网条件下的低碳VRP,以碳排放量最小为目标建立时变VRP模型;Silva等<sup>[4]</sup>以总成本最小为目标构建了带时间窗的动态VRP模型。以上文献均能有效提高城市物流配送效率,为后续研究提供了借鉴。

随着科学技术的发展与节能减排的需要,近年来汽车企业推出了电动车。电动车作为零排放的车辆,能有效减少环境污染,许多企业开始采用电动车进行物流配送。因此,部分学者开始研究电动车辆路径问题(electric VRP, EVRP)。Erdoğan等<sup>[5]</sup>研究带充电站的EVRP,以行驶距离最短为目标构建了EVRP模型;Schneider等<sup>[6]</sup>研究带时间窗与允许途中充电的EVRP,设计了变邻域搜索与禁忌搜索相结合的混合启发式算法求解;揭婉晨等<sup>[7]</sup>综合考虑了车辆行驶里程限制、车辆数量限制和顾客需求可拆分等情况建立EVRP模型;葛显龙等<sup>[8]</sup>以总成本最小为目标构建了带软时间窗的EVRP模型。随着研究的深入,考虑到电动车续航能力不足、充电时间长等因素,学者们研究了不同充电策略下的EVRP。Keskin等<sup>[9]</sup>研究了常规充电与快速充电两种充电方式下的带时间窗EVRP;张鹏威等<sup>[10]</sup>构建了有限充电设备下多配送中心的EVRP数学模型;葛显龙等<sup>[11]</sup>建立了部分充电策略下的EVRP模型,设计了混合模拟退火算法求解。以上研究均能有效促进节能减排。

由于环境规制、区域限行与电动车里程限制等因素,单一使用燃油/电动车队难以满足城市物流配送的需要,业界与部分学者开始研究混合车队的VRP(mixed fleet vehicle routing problem, MFVRP)。Duin等<sup>[12]</sup>构建了带时间窗MFVRP模型,并通过实验验证了混合车队配送能有效降低碳排放。Macrina等<sup>[13]</sup>考虑电动车里程限制及其在配送途中可以进入充电站充电等情况,构建了带时间窗的MFVRP模型。Ren等<sup>[14]</sup>研究带时间窗MFVRP,设计了改进变邻域算法求解。Goeke等<sup>[15]</sup>综合考虑客户需求、时间窗、

混合车队等因素,构建了多目标MFVRP模型。李得成等<sup>[16]</sup>比较分析燃油车和电动车的差异,构建了带时间窗的MFVRP模型。肖建华等<sup>[17]</sup>以总成本最优构建了混合车队的车辆配置及路径优化模型。以上成果更符合城市物流配送现状,为求解MFVRP提供了借鉴。

已有成果为深入研究MFVRP奠定了良好基础,但仍存在如下研究缺口:1)已有研究大多假定配送成本只与车辆行驶距离相关,与城市混合车队配送的实际情况不够吻合。混合车队的配送成本不仅包含车辆使用的固定成本,还包含车辆使用时间产生的驾驶员工资,电动车在配送途中的充电成本,燃油车的油耗与碳排放费用等成本,应予以综合考虑。2)已有文献大多采用完全充电策略,延长了电动车在配送过程中由于电量不足在充电站的充电时间,增加了电动车使用的时间成本与充电成本。因此,本文综合考虑城市区域限行、混合车队、电动车行驶里程、已有充电设施、部分充电策略等因素,以车辆使用固定成本、驾驶员工资、电动车的充电成本、燃油车的油耗与碳排放成本之和最小为目标构建MFVRP模型,并设计一种改进蚁群算法求解,以期能为城市物流配送的MFVRP提供决策参考。

## 1 问题描述

某城市配送中心同时采用电动车与燃油车服务客户(图1)。限行区域、充电站位置、车辆容量、客户位置、需求量和 service 时间已知。各客户需求量均小于车辆容量,能且只能被一辆车服务一次。

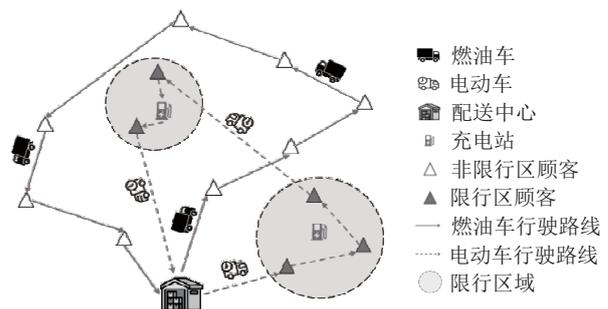


图1 混合车辆配送路径示意图

为了明确本文适用范围,提出如下假设:

- 1) 燃油车服务非限行区域的客户,电动车服务限行区域内的客户;
- 2) 燃油车在行驶过程中产生油耗与碳排放,在服务时间内发动机关闭,不产生油耗与碳排放;
- 3) 电动车从配送中心出发时电池满电,在配送途中电量不足时就近进入充电站充电;

4) 电动车采用部分充电策略,配送途中最多只允许充电一次;

5) 车辆具有固定使用成本,根据使用时间计算驾驶员工资。

决策问题:如何合理规划车辆路径,使得所有车辆的固定使用成本、驾驶员工资、电动车充电成本、燃油车油耗与碳排放成本之和最小。

## 2 数学模型

### 2.1 符号与变量

1) 集合.  $N$  为非限行区域客户集合;  $M$  为限行区域客户集合;  $C$  为所有客户集合,  $C = M \cup N$ ;  $S$  为电动车充电站集合;  $V$  为物流系统内所有节点集合,  $0$  为配送中心,  $V = N \cup S \cup 0$ ;  $A$  为燃油车集合;  $B$  为电动车集合;  $K$  为所有车辆集合,  $K = A \cup B$ ;  $P_{is}^k$  为车辆  $k$  从客户  $i$  行驶到充电站  $s$  充电时已经服务的客户集合;  $F_s^k$  为车辆  $k$  在充电站  $s$  充电后还需要继续服务的客户集合;  $p^k$  为车辆  $k$  服务的所有客户集合,  $P^k = P_{is}^k \cup F_s^k$ , 且  $P_{is}^k \cap F_s^k = \emptyset$ .

2) 参数。

① 客户参数:  $u_i$  为客户  $i$  的服务时间,  $m_i$  为客户  $i$  的需求量。

② 车辆参数:  $R_1$  为燃油车容量,  $R_2$  为电动车容量,  $D_1$  为燃油车行驶速度,  $D_2$  为电动车行驶速度,  $Q$  为电动车电池最大容量,  $f_{ijk}$  为燃油车以  $D_1$  速度在路段  $(i, j)$  上行驶的单位里程油耗率,  $t_{ijk}$  为燃油车以  $D_1$  速度在路段  $(i, j)$  上行驶的单位里程碳排放率,  $e$  为电动车以速度  $D_2$  行驶时的单位里程耗电率,  $E$  为电动车单位充电时间的充电量。

③ 车辆行驶参数:  $d_{ij}$  为节点  $i$  到节点  $j$  的距离;  $a_{ijk}$  为燃油车  $k$  从节点  $i$  行驶到节点  $j$  的时间,  $a_{ijk} = d_{ij}/D_1$ ;  $b_{ijk}$  为电动车  $k$  从节点  $i$  行驶到节点  $j$  的时间,  $b_{ijk} = d_{ij}/D_2$ ;  $G_{ijk}$  为电动车  $k$  从节点  $i$  行驶到节点  $j$  的消耗电量,  $G_{ijk} = d_{ij} \times e$ ;  $q_{ik}$  为电动车  $k$  到达节点  $i$  时的剩余电量;  $T_{sk}$  为电动车  $k$  在充电站  $s$  的充电时间;  $\omega_{isk}$  为电动车  $k$  从节点  $i$  行驶到充电站  $s$  补充的电量;  $\beta_{ik}$  为车辆  $k$  到达节点  $i$  的时间;  $l_{ik}$  为车辆  $k$  离开节点  $i$  的时间。

④ 成本参数:  $p_1^c$  为燃油车的固定使用成本,  $p_1^e$  为电动车的固定使用成本,  $p_2^c$  为燃油车使用单位时间的驾驶员工资,  $p_2^e$  为电动车使用单位时间的驾驶员工资,  $p_3$  为电动车的单位充电时间成本,  $p_4$  为燃油车的单位油耗量成本,  $p_5$  为燃油车单位碳排放量成本,  $c_1$  为所有车辆的固定使用成本,  $c_2$  为车辆使用时

间产生的驾驶员工资,  $c_3$  为电动车充电成本,  $c_4$  为燃油车油耗成本,  $c_5$  为燃油车碳排放成本。

3) 决策变量.  $z_k$  为0-1变量, 如果车辆  $k$  被启用, 值为1, 否则值为0;  $y_{ik}$  为0-1变量, 如果车辆  $k$  访问节点  $i$ , 值为1, 否则值为0;  $x_{ijk}$  为0-1变量, 如果车辆  $k$  从节点  $i$  行驶至节点  $j$ , 值为1, 否则值为0;  $Y_{isk}$  为0-1变量, 如果车辆  $k$  从节点  $i$  行驶至充电站  $s$  充电, 值为1, 否则值为0。

### 2.2 MFVRP数学模型

以总配送成本最小为目标构建MFVRP模型, 具体如下:

$$\min = c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_5. \quad (1)$$

$$c_1 = p_1^c \sum_{k \in A} z_k + p_1^e \sum_{k \in B} z_k, \quad (2)$$

$$c_2 = p_2^c \sum_{k \in A} \left( \sum_{i \in N \cup 0} \sum_{j \in N \cup 0} x_{ijk} a_{ijk} + \sum_{i \in N} y_{ik} u_i \right) + p_2^e \sum_{k \in B} \left( \sum_{i \in M \cup 0} \sum_{j \in M \cup 0} x_{ijk} b_{ijk} + \sum_{i \in M} y_{ik} u_i + \sum_{i \in M} \sum_{s \in S} Y_{isk} T_{sk} \right), \quad (3)$$

$$c_3 = p_3 \sum_{k \in B} \sum_{i \in M} \sum_{s \in M} Y_{isk} \omega_{isk}, \quad (4)$$

$$c_4 = p_4 \sum_{i \in N \cup 0} \sum_{j \in N \cup 0} \sum_{k \in A} x_{ijk} D_1 a_{ijk} f_{ijk}, \quad (5)$$

$$c_5 = p_5 \sum_{i \in N \cup 0} \sum_{j \in N \cup 0} \sum_{k \in A} x_{ijk} D_1 a_{ijk} t_{ijk}. \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \sum_{k \in K} y_{ik} = 1, \forall i \in C; \quad (7)$$

$$\sum_{j \in C} x_{0jk} \leq 1, \forall k \in K; \quad (8)$$

$$\sum_{i \in V, i \neq j} x_{ijk} = \sum_{j \in V, j \neq i} x_{jik}, \forall k \in K; \quad (9)$$

$$0 \leq \sum_{i \in N} m_i y_{ik} \leq R_1, \forall k \in A; \quad (10)$$

$$0 \leq \sum_{i \in M} m_i y_{ik} \leq R_2, \forall k \in B; \quad (11)$$

$$l_{ik} = \beta_{ik} + \mu_i, \forall i \in C, k \in K; \quad (12)$$

$$\beta_{jk} = l_{ik} + a_{ijk}, \forall i \in N \cup 0, j \in N \cup 0, k \in A; \quad (13)$$

$$\beta_{jk} = l_{ik} + b_{ijk}, \forall i \in M \cup 0, j \in M \cup 0, k \in B; \quad (14)$$

$$\beta_{sk} = \beta_{ik} + b_{isk}, \forall i \in M \cup 0, s \in S, k \in B; \quad (15)$$

$$q_{0k} = Q, \forall k \in B; \quad (16)$$

$$G_{ijk} = d_{ij}e, \forall i \in M \cup 0, j \in M \cup 0, k \in B; \quad (17)$$

$$q_{jk} = q_{ik} - G_{ijk}, \forall i \in M \cup 0, j \in M, k \in B; \quad (18)$$

$$q_{sk} = q_{ik} - G_{isk}, \forall i \in M, s \in S, k \in B; \quad (19)$$

$$Q - \sum_{i \in P_{is}^k \cup 0} \sum_{j \in P_{is}^k \cup 0} G_{ijk}x_{ijk} - G_{j sk}Y_{j sk} \geq 0, \quad (20)$$

$$\forall s \in S, k \in B;$$

$$\omega_{isk} = G_{slk}x_{slk} + \sum_{l \in F_s^k} \sum_{j \in F_s^k \cup 0} G_{ljk}x_{ljk}, \quad (21)$$

$$\forall i \in P_{is}^k, s \in S, k \in B;$$

$$\omega_{isk} = T_{sk}E, \forall i \in M, s \in S, k \in B; \quad (22)$$

$$q_{sk} + \omega_{isk} \leq Q, \forall i \in M, s \in S, k \in B; \quad (23)$$

$$\sum_{i \in M} \sum_{s \in S} Y_{isk} \leq 1, \forall k \in B; \quad (24)$$

$$l_{sk} = \beta_{sk} + T_{sk}, \forall s \in S, k \in B; \quad (25)$$

$$x_{ijk}, y_{ik}, z_k, Y_{isk} \in \{0, 1\}. \quad (26)$$

式(1)为目标函数,使总配送成本最小.式(2)表示所有车辆的固定使用成本.式(3)表示驾驶员工资(燃油车的行驶时间与服务时间产生的驾驶员工资,电动车的行驶时间、服务时间与充电时间产生的驾驶员工资).式(4)表示电动车的充电成本.式(5)和(6)分别表示燃油车的油耗成本与碳排放成本.式(7)表示每个客户能且只能被一辆车服务一次.式(8)表示每辆车最多只能被使用一次.式(9)表示车辆进入某节点必须从该节点离开.式(10)和(11)分别表示燃油车与电动车的容量限制.式(12)表示车辆到达节点时间、服务时间与离开该节点时间之间的关系.式(13)和(14)分别表示燃油车、电动车离开节点时间与从该节点行驶到下一个节点的时间之间的关系.式(15)表示电动车从上一个节点行驶到充电的时间计算方法.式(16)表示电动车从配送中心出发时电池满电.式(17)表示电动车电量消耗计算方法.式(18)表示电动车从上一个节点到达下一个节点的剩余电量计算方法.式(19)表示电动车从客户到达充电站时的剩余电量.式(20)表示电动车从当前节点选择下一个节点的电量限制条件:满足电动车从当前节点行驶到下一个服务节点的电量,并且满足从下一个节点行驶到最近充电站的电量.式(21)表示部分充电策略下电动车充电量的计算方法:满足从当前充电站行驶到下一个服务客户的电量,并满足该电动车继续配送所有未服务客户的电量,还要满足车辆

从最后一个客户返回配送中心的电量.式(22)表示电动车充电时间、充电率与充电量的关系.式(23)表示电动车的最大充电限制.式(24)表示电动车最多只允许充电一次.式(25)表示电动车到达充电站时间、充电时间与离开充电站时间的关系.式(26)表示变量取值限制.

### 2.3 燃油车的油耗率与碳排放率计算

MEET模型<sup>[18]</sup>综合考虑车辆特征、载重、行驶距离、行驶速度与道路坡度等因素计算车辆油耗率与碳排放率,适用范围广.根据MEET模型,装载量为 $load_{ijk}$ 的车辆 $k$ 以速度 $D_1$ 在路段 $(i, j)$ 上的单位里程碳排放率 $t_{ijk}$ (kg/km)定义为

$$t_{ijk} = \varepsilon(D_1) \times Z / 1000. \quad (27)$$

其中: $\varepsilon(D_1)$ (g/km)为碳排放率的估计函数, $Z$ 为载重修正因子.

$$\varepsilon(D_1) = \delta_0 + \delta_1 D_1 + \delta_2 (D_1)^2 + \delta_3 (D_1)^3 + \delta_4 / D_1 + \delta_5 / (D_1)^2 + \delta_6 / (D_1)^3, \quad (28)$$

其中 $\delta_0 \sim \delta_6$ 为预定义参数.

$$Z = \chi_0 + \chi_1 b + \chi_2 b^2 + \chi_3 b^3 + \chi_4 D_1 + \chi_5 (D_1)^2 + \chi_6 (D_1)^3 + \chi_7 / D_1. \quad (29)$$

其中: $\chi_0 \sim \chi_7$ 为预定义参数; $b$ 为车辆 $k$ 当前载重 $load_{ijk}$ 与容量 $R_1$ 的比值.

根据文献[19],1L汽油相当于2.32 kg的碳排放量.因此,单位里程油耗率 $f_{ijk} = t_{ijk} / 2.32$ .

## 3 改进蚁群算法设计

VRP为NP-hard问题,难以求得最优解,通常采用启发式算法求得满意解.MFVRP比VRP更复杂,求解更困难.蚁群算法属于启发式算法,具有启发式搜索、信息正反馈与分布计算等优点,能有效解决多种复杂组合优化问题<sup>[20]</sup>.根据问题与模型的特点,本文设计一种改进蚁群算法求解,思路如下:

1)针对蚁群算法容易陷入局部最优的缺陷,将所有蚂蚁随机放置在各个节点,增加蚂蚁搜索的随机性;

2)针对蚁群算法收敛速度慢的缺陷,采用基于精英蚂蚁策略的信息素更新方法提高算法的收敛性能.

改进蚁群算法分为3个阶段,具体如下:

第1阶段:算法初始化与客户分类.

step 1: 数据初始化.输入限行区域、充电站、配送

中心、客户、燃油车与电动车等数据。

step 2: 客户分类. 根据限行区域与客户坐标将所有客户分为非限行区域客户集合  $N$  与限行区域客户集合  $M$ .

第2阶段: 设计蚁群算法, 采用蚁群算法的5个步骤分别求解集合  $N$  与  $M$  的行驶路径。

step 1: 初始化. 令  $\text{MaxIter}$  为算法最大迭代次数;  $\text{BestRoute}$  为最优路线;  $H$  为蚂蚁数量;  $\text{Iter}$  为当前迭代次数,  $\text{Iter} = 1$ ;  $\text{TotalCost}$  为燃油车总配送成本,  $\text{TotalCost} = +\infty$ .

step 2: 构建可行解。

step 2.1: 将  $H$  只蚂蚁随机放置在各节点, 令  $h = 1$ .

step 2.2: 派出蚂蚁  $h$ , 令  $W_h$  为蚂蚁  $h$  的未访问节点集合, 禁忌表  $\text{tabu} = \emptyset$ , 令  $k = 1$ .

step 2.3: 派出车辆  $k$ .

step 2.4: 计算车辆  $k$  从当前节点  $i$  行驶到下一个节点  $j$  的转移概率  $P_{ij}^{hk}$ , 即

$$P_{ij}^{hk} = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij})^{\theta_1} (\eta_{ij})^{\theta_2}}{\sum_{\gamma \in W_h} (\tau_{i\gamma})^{\theta_1} (\eta_{i\gamma})^{\theta_2}}, & j \in W_h; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (30)$$

其中:  $\tau_{ij}$  为信息素浓度;  $\eta_{ij}$  为能见度,  $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ ;  $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别为2种因子的重要性。

step 2.5: 找出  $P_{ij}^{hk}$  值最大的节点  $j_a$ ,  $\text{load}_{ij_a k} = \text{load}_i - m_{j_a}$ , 如果  $\text{load}_{ij_a k} \geq 0$ , 则  $\text{tabu}_h^{x+1} = j_a$ ,  $j_a \notin W_h$ ; 否则, 车辆  $k$  返回配送中心,  $\text{tabu}_h^{x+1} = 0$ ,  $k = k + 1$ , 转入 step 2.3.

step 2.6: 如果  $W_h \neq \emptyset$ , 则转入 step 4, 否则  $h = h + 1$ .

step 2.7: 如果  $h < H$ , 则转入 step 2.2.

step 3: 当前迭代的结果计算. 计算当前迭代的最优配送成本  $\text{Cost}_{\text{iter}}$  与最优路线成本  $\text{Route}_{\text{iter}}$ , 如果  $\text{Cost}_{\text{iter}} \leq \text{TotalCost}$ , 则  $\text{TotalCost} = \text{Cost}_{\text{iter}}$ ,  $\text{BestRoute} = \text{Route}_{\text{iter}}$ .

step 4: 信息素更新. 令精英蚂蚁  $\omega$  为当前迭代中总配送费用最低的蚂蚁, 采用基于精英蚂蚁策略的信息素更新方法, 即

$$\tau_{ij}^{\text{new}} = \tau_{ij}^{\text{old}} (1 - \rho) + \sum_{h=1}^H \Delta\tau_{ij}^h + \Delta\tau_{ij}^{\omega}. \quad (31)$$

$$\Delta\tau_{ij}^h = \begin{cases} U/\text{cost}_h, & \text{蚂蚁} h \text{ 经过路段} (i, j); \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (32)$$

$$\Delta\tau_{ij}^{\omega} = \begin{cases} \psi(U/\text{cost}_h), & \text{精英蚂蚁} \omega \text{ 经过路段} (i, j); \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (33)$$

其中:  $\rho$  为挥发率,  $0 \leq \rho < 1$ ;  $\Delta\tau_{ij}^h$  为蚂蚁  $h$  在路段  $(i, j)$  上的信息素增加量;  $\Delta\tau_{ij}^{\omega}$  为精英蚂蚁  $\omega$  在路段  $(i, j)$  上的信息素增加量;  $U$  为常数;  $\text{cost}_h$  为蚂蚁  $h$  的总配送费用;  $\psi$  为精英蚂蚁信息素的权重。

step 5: 蚁群算法结束规则. 如果  $\text{Iter} \leq \text{MaxIter}$ , 则转入 step 2, 否则算法结束。

第3阶段: 电动车最优充电决策与总配送成本计算。

step 1: 输入第2阶段得出的电动车最优行驶路径  $\text{BestRoute}_M$ 、限行区域客户坐标、充电站坐标、电动车速度  $D_2$ 、单位里程耗电率  $e$ 、单位充电时间的充电量  $E$ 。

step 2:

step 2.1: 针对每一辆电动车的行驶路径, 在保障电动车电量恰好能配送完所分配客户的前提下, 尝试在每2个节点之间插入离上一个节点距离最近的充电站。

step 2.2: 计算插入该充电站后的车辆行驶时间、充电时间、充电量与总配送成本。

step 2.3: 得出总配送成本最优的充电决策。

step 2.4: 得出所有电动车最优充电决策情况下的总配送成本。

step 3: 计算总配送成本. 根据第2阶段的燃油车总配送成本、第3阶段的电动车最优充电决策情况下的总配送成本, 得出MFVRP的总配送成本。

## 4 算例分析

### 4.1 实验设置

由于当前没有关于MFVRP的标准算例, 同时考虑到客户具有不同类型的坐标分布、需求量与服务时间, 选用Solomon算例<sup>[21]</sup>中的C1、C2、R1、R2、RC1与RC2类型算例的坐标、需求量和和服务时间等数据作为本文算例的基本数据. C1与C2、R1与R2、RC1与RC2类型算例分别属于集中分布、随机分布、混合分布. C1与C2类型算例的各客户服务时间为90 min, 其他类型算例的各客户服务时间为10 min. 各算例有一个配送中心和100个客户。

为符合本文测试要求, 补充如下数据:

1) 各算例以坐标(25, 50)、(20, 30)、(40, 10)、(60, 60)为中心、半径为10 km画圆设定4个限行区域。

2) 各限行区域设一个充电站,以该区域内所有客户坐标的平均值作为充电站坐标。

3) 参考文献[17, 22],并根据微型货车与电动车的实际情况,设定  $R_1 = 550 \text{ kg}$ ,  $R_2 = 220 \text{ kg}$ ,  $D_1 = 60 \text{ km/h}$ ,  $D_2 = 50 \text{ km/h}$ ,  $Q = 80 \text{ kWh}$ ,  $e = 0.6 \text{ kw/h}$ ,  $E = 1 \text{ kWh/min}$ ;根据文献[22]的车辆固定使用费用与工资标准,设定  $p_1^c = 200 \text{ 元/辆}$ ,  $p_1^e = 220 \text{ 元/辆}$ ,  $p_2^c = 0.3 \text{ 元/min}$ ,  $p_2^e = 0.3 \text{ 元/min}$ ;根据我国目前的碳交易价格与汽油售价,设定  $p_3 = 0.0528 \text{ 元/kg}$ ,  $p_4 = 7 \text{ 元/L}$ 。

4) 根据 MEET 模型<sup>[18]</sup>,燃油车的碳排放率参数  $\delta_0 = 110$ ,  $\delta_1 = 0$ ,  $\delta_2 = 0$ ,  $\delta_3 = 0.000375$ ,  $\delta_4 = 8702$ ,  $\delta_5 = 0$ ,  $\delta_6 = 0$ ;  $\chi_0 = 1.27$ ,  $\chi_1 = 0.0614$ ,  $\chi_2 = 0$ ,  $\chi_3 = -0.0011$ ,  $\chi_4 = -0.00235$ ,  $\chi_5 = 0$ ,  $\chi_6 = 0$ ,  $\chi_7 = -1.33$ 。

5) 根据文献[23-24],蚁群算法的参数  $\theta_1 = 1$ ,  $\theta_2 = 3$ ,  $\rho = 0.2$ ,  $\psi = 4$ ,  $U = 10$ 。

算法采用 Matlab 2020 a 编程,在 Intel (R) Core (TM) i7-6700 CPU@ 3.40 GHz 3.41 GHz、内存 8 GB 的微机上运行。

## 4.2 实验分析

### 4.2.1 多类型算例的混合车辆路径规划分析

采用多类型算例进行实验,计算结果如表 1 所示。其中:IN 表示算例名称,TC 表示总配送成本(单位:元),DC 表示驾驶员工资(单位:元),FEC 表示油耗与碳排放成本(单位:元),ECC 表示充电成本(单位:元),FE 表示碳排放量(单位:kg),FVN 表示燃油车使用总数量(单位:辆),EVN 表示电动车使用总数量(单位:辆),FTD 表示燃油车行驶总距离(单位:km),ETD 表示电动车行驶总距离(单位:km),RT 表示程序运行时间(单位:s)。

表 1 不同类型算例的混合车辆路径优化结果

IN	TC	DC	FEC	ECC	FE	FVN	EVN	FTD	ETD	RT
C101	4790.7	2945.2	585.4	0	190.7	3	3	501.7	262.9	70.7
C102	4772.7	2940.0	572.7	0	186.5	3	3	490.4	257.8	70.0
C201	4623.2	2954.2	619.6	9.3	201.8	3	2	531.6	273.5	71.6
C202	4638.1	2957.1	631.9	9.1	205.8	3	2	541.9	272.6	71.9
R101	2309.6	584.4	665.1	0	216.6	2	3	579.4	314.6	68.1
R102	2311.8	584.5	667.3	0	217.3	2	3	572.6	313.2	68.9
R201	2300.1	583.4	656.0	0.5	214.7	2	3	562.3	319.3	68.7
R202	2317.7	584.2	666.5	6.9	217.1	2	3	571.6	321.0	69.1
RC101	2409.6	591.9	764.1	13.5	248.9	3	2	654.6	280.3	71.7
RC102	2409.4	591.7	764.9	12.7	249.1	3	2	655.5	278.3	72.4
RC201	2406.7	591.2	763.1	12.3	248.5	3	2	653.8	277.8	71.8
RC202	2412.6	592.7	766.1	13.7	249.5	3	2	656.0	281.7	72.8

根据表 1 的结果可知:

1) 由 TC 与 DC 的值可知,C1、C2 类型算例的总配送成本与驾驶员工资远远高于 R1、R2、RC1 与 RC2 类型算例求得的解。C1 与 C2 类型算例的驾驶员工资高达总配送成本的 62.67%,其他类型仅仅为 24.93%。主要原因在于 C1 与 C2 类型算例的各客户服务时间长达 90 min,其他类型算例仅 10 min。说明客户服务时间是物流配送成本的主要影响因素之一,应少采用送货上门的配送模式,多采用智能快递柜、集中委托收货等末端收货模式,降低客户服务时间。

2) 根据 FEC、FE 与 FTD 的结果可知,燃油车油耗与碳排放成本和行驶距离存在正相关关系,燃油车行驶 1 km 平均产生 0.38 kg 二氧化碳,说明燃油车导致一定程度的大气污染,应尽可能采用新能源汽车进行

物流配送。

3) 根据 TC、FEC 与 ECC 的结果可知,燃油车的油耗与碳排放成本占总配送成本的 24.43%,说明车辆路径规划不仅要考虑经济成本,还要考虑环境成本;电动车充电成本仅仅占总配送成本的 0.24%,说明使用电动车配送确实能有效降低车辆能耗成本,应该尽量采用电动车开展城市配送。

4) 根据 RT 的值可知,本文算法的最大运行时间为 72.9 s,最小运行时间为 68.1 s,说明本文算法能在非常短的时间内给出符合决策者目标的混合车辆路径规划方案,具有可行性与有效性。

客户坐标为集中分布的算例 C102、随机分布的算例 R102、混合分布的算例 RC102 的车辆路径规划如图 2 所示(圆圈代表限行区域)。

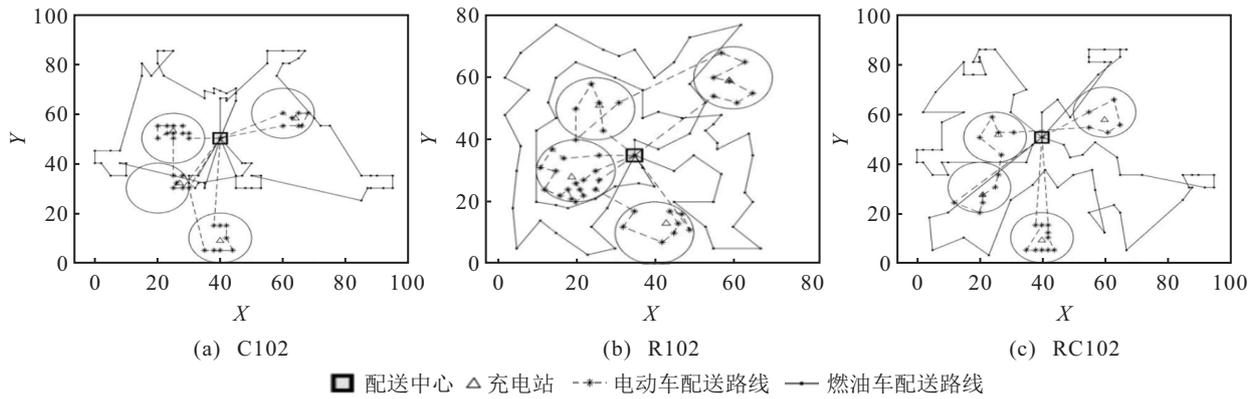


图2 不同类型算例的路径规划

从图2的车辆路径规划结果可知:1)燃油车服务非限行区域客户,电动车服务限行区域客户,有部分电动车进入充电站充电;2)相邻位置的客户都是由同一辆车服务;3)车辆路径清晰明了,鲜少迂回与交叉.说明本文设计的改进蚁群算法能根据实际情况合理规划车辆路径,有效降低总配送成本.

#### 4.2.2 不同优化算法的实验结果分析

为了验证改进蚁群算法(improved ant colony

algorithm, IACA)的有效性,另外编写求解MFVRP的模拟退火算法(simulated annealing algorithm, SAA),将IACA与SAA进行对比实验.参考文献[25]的方法,设定SAA的初始温度为100,冷却因子为0.92,马尔科夫链长度为200,迭代次数为600次.采用C2与RC2类型算例的实验结果如表2所示.其中:IR表示IACA与SAA的总配送成本之间的节约比率,其余符号的含义同表1.

表2 不同优化算法的计算结果

IN	IACA				SAA				IR/%
	TC	FEC	FE	RT	TC	FEC	FE	RT	
RC204	2420.9	776.0	252.8	72.0	2465.4	803.1	261.6	134.6	1.84
RC205	2422.1	773.7	252.0	74.7	2465.0	799.3	260.4	129.0	1.77
RC206	2421.8	775.7	252.7	70.9	2438.2	782.7	255.0	123.0	0.68
C204	4634.0	629.0	204.9	72.0	4970.6	703.8	229.3	119.8	7.26
C205	4637.9	630.1	205.3	74.6	4930.4	671.7	218.8	116.0	6.31
C206	4641.3	631.4	205.7	72.3	4948.3	691.5	225.2	127.0	6.61

根据表2的计算结果可知:1)根据TC的值,IACA在所有算例求得的总配送成本都优于SAA求得的值,平均节约3.81%,最低节约0.68%,最高节约7.26%.说明IACA能有效降低物流配送成本.2)由FEC与FE的值可知,IACA在所有算例求得的燃油车油耗与碳排放成本都优于SAA求得的值,平均节约5.19%,最低节约0.90%,最高节约11.89%.说明IACA能有效减少车辆碳排放,降低环境污染.3)IACA在所有算例的运行时间都远远小于SAA的运行时间.因此,IACA能在非常短的时间内求解MFVRP,有效降低物流成本、减少燃油车的碳排放,具有可行性、合理性与有效性.

#### 4.2.3 电动车完全充电与部分充电策略结果分析

在所有参数不变的前提下,将电动车部分充电策略与完全充电策略进行对比实验,实验结果如

表3所示.其中:ETC表示电动车的总配送成本(单位:元),ECT表示电动车在充电站的充电时间(单位:min),GP表示部分充电策略条件下电动车充电成本与完全充电策略情况下电动车充电成本之间的节约比率,其余符号的含义同表1所示.

从表3的结果可知:1)由ECC的值得出,部分充电策略下各算例的电动车充电成本显著优于完全充电策略下的充电成本,平均节约19.64%,最低节约5.36%,最高节约40%.2)由ETC的值可知,部分充电策略下各算例的电动车总配送成本均优于完全充电策略下的总配送成本,但是仅平均节约0.485%.原因在于部分充电策略下充电成本仅占电动车总配送成本的1.52%,完全充电策略下充电成本仅占电动车总配送成本的1.91%.因此,总配送成本节约比例非常小.3)由ETD的结果可知,采用部分充电策

表3 电动车部分充电与完全充电策略计算结果

IN	部分充电策略				完全充电策略				IR / %	GP / %
	ETC	ECC	ECT	ETD	ETC	ECC	ECT	ETD		
RC101	624.6	7.5	15.0	291.9	629.4	12.5	25.0	297.1	0.77	40.00
RC102	623.9	13.4	26.8	280.1	624.6	14.5	29.0	280.1	0.11	7.58
RC103	624.5	12.8	25.6	283.0	630.2	17.0	34.0	291.5	0.91	24.71
RC201	621.8	12.3	24.6	276.2	624.1	13.6	27.2	280.4	0.37	9.56
RC202	623.6	12.4	24.8	281.2	629.6	17.0	34.0	290	0.96	27.06
RC203	624.1	13.2	26.4	281.1	629.6	17.0	34.0	290	0.88	22.35
C201	1 271.5	9.3	18.6	269.2	1 273.6	11.2	22.4	271.9	0.17	16.96
C202	1 271.5	8.6	17.2	270.2	1 273.0	11.2	22.4	270.2	0.12	23.21
C203	1 273.8	10.6	21.2	273.5	1 274.7	11.2	22.4	275.0	0.07	5.36

略可有效减少电动车行驶距离,平均节省行驶距离4.42 km. 4)由ECT的结果可知,部分充电策略的充电时间比完全充电策略的充电时间更短,平均节约充电时间26.72%.说明采用部分充电策略,企业虽然不能大幅度降低总配送成本,但能有效缩短电动车的使用时间,减少充电费用.

4.2.4 灵敏性分析

1) 电动车电池容量灵敏性分析.

令电池容量以10的步长在[50,110]的范围内变动,其他参数不变,算例RC205的计算结果如表4所示.其中:Q表示电动车电池容量(单位:kwh),其余符号的含义如表1和表2所示.

由表4的结果可知:1)随着电池容量的不断增加,总配送成本、充电成本、充电时间、电动车总行驶距离与驾驶员工资不断降低,电动车使用数量保持不变.2)当电池容量由50 kwh增加至90 kwh时,电动车配送成本和充电费用有明显的降低趋势,而当电池容量由90 kwh增加至110 kwh时,没有明显变化.原因在

表4 电动车电池容量灵敏性分析计算结果

Q	ETC	EVN	ECC	ECT	ETD	EDF
50	642.6	2	37.5	75.0	291.9	202.6
60	629.4	2	23.5	47.0	278.5	189.4
70	624.8	2	17.3	34.6	276.2	184.8
80	622.7	2	12.3	24.6	278.6	182.7
90	619.7	2	7.4	14.8	278.6	179.7
100	615.8	2	2.3	4.6	276.2	175.8
110	614.8	2	0	0	277.3	174.8

于电池容量较大的电动车不需要在途中充电或者仅需短暂充电即可完成配送任务.说明在一定范围内增加电动车电池容量具有优化效果,应根据实际配送范围大小合理选择电动车进行配送,减少充电时间,缩短因充电而导致的车辆行驶距离.

2) 限行区域大小灵敏性分析.

令限行区域半径以5的步长在[5,25]的范围内变动,其他参数不变,算例RC205的计算结果如表5所示.其中:r表示限行区域半径(单位:km),其余符号的含义如表1和表2所示.

表5 限行区域大小灵敏性分析计算结果

r	FTC	FVN	FEC	FE	FTD	FDf	ETC	EVN	ETD	EDF
5	1 952.2	3	856.6	279.0	731.6	495.4	299.2	1	146.6	79.2
10	1 795.2	3	771.7	251.4	661.3	423.4	621.8	2	276.2	181.8
15	1 632.7	3	666.5	217.1	570.4	366.1	898.5	3	367.1	238.5
20	1 255.5	2	563.5	183.5	483.1	291.9	1 244.5	4	559.6	364.5
25	1 138.7	2	166.4	166.4	439.1	227.7	1 784.7	6	710.8	464.6

由表5的结果可知:随着限行区域半径的不断变大,需要使用电动车配送的客户也不断增多,电动车配送成本、使用数量、行驶距离与驾驶员工资也呈现出不断增加的趋势;与此同时,需要使用燃油车配送

的客户不断减少,燃油车配送成本、使用数量、碳排放量、行驶距离与驾驶员工资呈现出不断减少的趋势.说明限行区域大小变化,能显著影响混合车队的车辆路径规划.

3) 限行区域内充电站数量灵敏性分析.

令限行区域半径 $r$ 以5的步长在 $[10, 20]$ 的范围内变动,其他参数不变,并分别设定限行区域中包含1个或2个充电站(第2个充电站位置为第1个充电站位置纵横坐标分别向右向上偏移 $r/2$ 的距离),算例C205的计算结果如表6所示.其中: $n$ 表示限行区域内充电站的个数,其余符号的含义如表1、表2和表5所示.

表6 限行区域内充电站数量灵敏性分析计算结果

$r$	$n$	ETC	EVN	ETD	EDF
10	1	1497.0	3	299.90	837.0
	2	1493.2	3	289.20	833.1
15	1	2179.6	4	436.87	1294.4
	2	2158.9	4	400.10	1278.4
20	1	2884.0	5	695.20	1784.0
	2	2864.3	5	550.60	1764.3

由表6的结果可知:1)当限行区域的半径较小( $r = 10$ )时,电动车配送成本、行驶距离与驾驶员工资在不同充电站数量之间的变化差异较小.说明小范围内增加充电站数量没有明显的优化效果.2)当限行区域较大( $r = 15, r = 20$ )时,电动车配送成本、行驶距离在不同充电站数量之间的变化差异较大.说明限行区域较大时,增加彼此之间距离较远的充电站数量具有明显的优化效果,也说明充电站的数量与位置需要科学设置、合理安排.

5 结论

本文针对城市部分区域限行、物流系统中燃油车与电动车并存的实际情况,研究了城市物流配送混合车队的路径规划问题,以总成本最小为目标构建了MFVRP模型,并设计了改进蚁群算法进行求解.多类型的仿真实验结果表明:1)改进蚁群算法能根据实际情况在非常短的时间内科学规划混合车队车辆路径,有效降低总配送成本,减少碳排放;2)采用部分充电策略,企业能有效缩短电动车使用时间,减少充电费用;3)城市限行区域的大小变化显著影响混合车队的车辆路径规划;4)限行区域较大时,增加充电站数量有利于电动车配送,充电站数量与位置需要科学安排.

参考文献(References)

[1] Yao Y, Zhu X N, Dong H Y, et al. ADMM-based problem decomposition scheme for vehicle routing problem with time windows[J]. Transportation Research—Part B: Methodological, 2019, 129: 156-174.

[2] 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.)

[3] 刘长石, 申立智, 盛虎宜, 等. 考虑交通拥堵规避的低碳时变车辆路径问题研究[J]. 控制与决策, 2020, 35(10): 2486-2496.  
(Liu C S, Shen L Z, Sheng H Y, et al. Research on low-carbon time-dependent vehicle routing problem with traffic congestion avoidance approaches[J]. Control and Decision, 2020, 35(10): 2486-2496.)

[4] Silva Júnior O S, Leal J E, Reimann M. A multiple ant colony system with random variable neighborhood descent for the dynamic vehicle routing problem with time windows[J]. Soft Computing, 2021, 25(4): 2935-2948.

[5] Erdoğan S, Miller-Hooks E. A green vehicle routing problem[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2012, 48(1): 100-114.

[6] 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.

[7] 揭婉晨, 杨珺, 陆坚毅. 基于分支定价算法的电动汽车车辆路径问题[J]. 运筹与管理, 2016, 25(4): 93-100.  
(Jie W C, Yang J, Lu J Y. Electric vehicle routing problem based on a branch-and-price algorithm[J]. Operations Research and Management Science, 2016, 25(4): 93-100.)

[8] 葛显龙, 竹自强. 带软时间窗的电动车辆路径优化问题[J]. 工业工程与管理, 2019, 24(4): 96-104.  
(Ge X L, Zhu Z Q. The electric vehicles routing problem with soft time window[J]. Industrial Engineering and Management, 2019, 24(4): 96-104.)

[9] Keskin M, Çatay B. A matheuristic method for the electric vehicle routing problem with time windows and fast chargers[J]. Computers & Operations Research, 2018, 100: 172-188.

[10] 张鹏威, 李英, 成琪. 有限充电设施下的多配送中心电动车辆路径问题研究[J]. 工业工程与管理, 2019, 24(5): 97-105.  
(Zhang P W, Li Y, Cheng Q. Multi-depot electric vehicle routing problem under limited recharging infrastructures[J]. Industrial Engineering and Management, 2019, 24(5): 97-105.)

[11] 葛显龙, 李祖伟, 葛小波. 考虑灵活充电策略的带时间窗物流配送路径优化研究[J]. 控制理论与应用, 2020,

- 37(6): 1293-1301.  
(Ge X L, Li Z W, Ge X B. Research on logistics distribution route optimization with time window considering flexible charging strategy[J]. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(6): 1293-1301.)
- [12] Duin J V, Tavasszy L, Quak H. Towards E(lectric)-urban freight: First promising steps in the electric vehicle revolution[J]. *European Transport Europei*, 2013, 2013(54): 1-19.
- [13] Macrina G, Laporte G, Guerriero F, et al. An energy-efficient green-vehicle routing problem with mixed vehicle fleet, partial battery recharging and time windows[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 276(3): 971-982.
- [14] Ren X, Huang H, Feng S, et al. An improved variable neighborhood search for bi-objective mixed-energy fleet vehicle routing problem[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 275: 124155.
- [15] Goeke D, Schneider M. Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 245(1): 81-99.
- [16] 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.)
- [17] 肖建华, 王超文, 陈萍, 等. 基于城市道路限行的多能源多车型车辆路径优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(5): 1339-1348.  
(Xiao J H, Wang C W, Chen P, et al. The multi-energy heterogeneous fleet vehicle routing optimization under urban traffic restriction[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2017, 37(5): 1339-1348.)
- [18] Hickman A J. *Methodology for calculating transport emissions and energy consumption*[R]. Brussels: Cold Starts, 1999.
- [19] 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.)
- [20] 胡蓉, 陈文博, 钱斌, 等. 学习型蚁群算法求解绿色多车场车辆路径问题[J]. *系统仿真学报*, 2021, 33(9): 2095-2108.  
(Hu R, Chen W B, Qian B, et al. Learning ant colony algorithm for green multi-depot vehicle routing problem[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(9): 2095-2108.)
- [21] Solomon M M. Algorithms for the vehicle routing problem with time windows constraints[J]. *Operation Research*, 1987, 35(2): 254-265.
- [22] 郭放, 杨珺, 杨超. 考虑充电策略与电池损耗的电动汽车路径优化问题研究[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(9): 106-118.  
(Guo F, Yang J, Yang C. Study on the electric vehicle routing problem in the present of charging strategy and battery consumption[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(9): 106-118.)
- [23] 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.
- [24] Xiao Y Y, Konak A. The heterogeneous green vehicle routing and scheduling problem with time-varying traffic congestion[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016, 88: 146-166.
- [25] 尚正阳, 顾寄南, 王建平. 求解带能力约束车辆路径优化问题的改进模拟退火算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(8): 2260-2269.  
(Shang Z Y, Gu J N, Wang J P. Improved simulated annealing algorithm for capacitated vehicle routing problem[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(8): 2260-2269.)

### 作者简介

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;

陈慧璇(1998—), 女, 硕士生, 从事车辆路径问题的研究, E-mail: chenxxxx@126.com;

吴张(2002—), 男, 硕士生, 从事应急物流、车辆路径问题的研究, E-mail: wuzhang0629@foxmail.com.

(责任编辑: 齐 霖)