

## 绿色包装与循环经济

# 可移动快递柜和车载机器人协同配送绿色路径优化

李文科<sup>1</sup>, 罗泽龙<sup>1</sup>, 廖虹<sup>2</sup>, 吕杭宁<sup>1</sup>, 黄海南<sup>1</sup>, 陈诚<sup>1\*</sup>

(1.福建农林大学 交通与土木工程学院, 福州 350002; 2.平潭综合实验区城乡建设与  
交通运输服务中心, 福建 平潭 350400)

**摘要:** 目的 提高“最后一公里”配送效率, 提出一种可移动快递柜和车载机器人协同的新型绿色配送模式。方法 首先考虑客户服务偏好、时间窗、车辆容量以及可移动快递柜与配送机器人的协同, 以碳排放量最小化为目标, 构建路径优化模型。其次针对问题特点, 设计适用的自适应大规模邻域搜索算法。最后基于实际案例进行数值实验分析。结果 设计的算法在15个案例上能求得与Gurobi在1 h时间限制下相同或更优的解。若以配送成本最小化为目标, 则10个案例中有3个会得到不同的解, 碳排放量最小化目标所求解能以约0.3%的成本增加获得2.41%的碳排放量降低。在碳排放量和配送成本上, 可移动快递柜和车载机器人协同配送模式比仅货车配送模式分别减少53.29%和33.38%, 比固定快递柜模式减少41.85%和62.01%, 比车辆移动停靠自提模式减少37.80%和32.76%。结论 可移动快递柜和配送机器人协同配送能取得较好的效益, 建立的路径优化模型和设计的求解算法可为低碳可持续的城市配送体系的构建提供参考依据与决策支持。

**关键词:** 绿色车辆路径问题; 可移动快递柜; 配送机器人; 碳排放

中图分类号: TB48; U492

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)09-0241-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.09.028

## Green Vehicle Routing Optimization for Collaborative Delivery with Mobile Parcel Lockers and Onboard Robots

LI Wenke<sup>1</sup>, LUO Zelong<sup>1</sup>, LIAO Hong<sup>2</sup>, LYU Hangning<sup>1</sup>, HUANG Hainan<sup>1</sup>, CHEN Cheng<sup>1\*</sup>

(1. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;  
2. Pingtan Comprehensive Experimental Zone Urban and Rural Construction and Transportation  
Service Center, Fujian Pingtan 350400, China)

**ABSTRACT:** The work aims to propose a new green delivery mode using mobile parcel lockers and onboard robots for collaboration to improve the 'last mile' delivery efficiency. First, considering customer preferences, time windows, the vehicle capacity and the coordination between mobile parcel lockers and delivery robots, a route optimization model was built with the objective of carbon emissions minimization. Second, an adaptive large neighborhood search algorithm was developed to solve the corresponding routing problem. Finally, numerical experiment analyses were conducted using instances generated from a real case. The proposed algorithm obtained the same or better solution as the Gurobi solver under the time limit of 1 h on fifteen instances. Three out of ten instances obtained different solutions when taking cost minimization as objective. Among them, solutions under carbon emissions minimization were with about 0.3% higher cost and 2.41% lower carbon emissions. In terms of carbon emissions and delivery costs, the collaborative delivery using

收稿日期: 2025-03-12

基金项目: 福建省自然科学基金(2023J01474); 国家社会科学基金(22BGL005); 国家级大学生创新创业训练项目(202410389033); 福建农林大学校级大学生创新训练项目(202410389368)

\*通信作者

mobile parcel lockers and onboard robots could achieve a reduction of 53.29% and 33.38% when compared with truck-only system, a reduction of 41.85% and 62.01% when compared with the fixed parcel lockers system, and a reduction of 37.80% and 32.76% when compared with the vehicle mobile parking for the self-pickup system. Benefits of the proposed delivery system are validated. The proposed route optimization model and the designed solution algorithm can provide a valuable reference and decision support for building a low-carbon sustainable urban delivery system.

**KEY WORDS:** green vehicle routing problem; mobile parcel locker; delivery robot; carbon emission

物流业和快递业是现代经济的重要支柱,也是碳排放的主要来源之一<sup>[1]</sup>。然而,随着电商和物流业的快速发展,配送需求迅猛增长。随着碳达峰、碳中和战略目标的推进,如何实现高效低碳的物流配送成为物流从业者面临的关键问题<sup>[2]</sup>。与此同时,除了越来越精准的时效性需求,消费者对配送服务的多样性和个性化需求也日益突出,送货上门和客户自提就是2类典型的的不同需求<sup>[3]</sup>。

近几年,凭借能够提供更高效、更灵活且更低碳的配送服务,无人配送设备被越来越多地应用于“最后一公里”配送实践,如智能快递柜<sup>[4]</sup>、无人机<sup>[5]</sup>、无人车<sup>[6]</sup>、配送机器人<sup>[7]</sup>等。随后,为更好地发挥了各类配送设备的效益,大车+小车协同的2阶段配送的模式被提出,如货车+无人机<sup>[8]</sup>,货车+配送机器人<sup>[9]</sup>等。此外,为规避固定智能快递柜模式占用较多资源的问题,可移动快递柜(Mobile Parcel Locker, MPL)的概念被提出<sup>[10]</sup>。Schwerdfeger等<sup>[11]</sup>首次研究了MPL路径问题,表明根据客户自取的时间及位置偏好动态地改变MPL的位置可有效减少固定设施的布置数量。Kotschau等<sup>[12]</sup>比较了MPL、固定快递柜(Fixed Parcel Locker, FPL)以及送货上门3种服务模式的应用情况,表明了MPL在降低运营成本方面的优势。Peppel等<sup>[13]</sup>将MPL引入一个已有配送网络,案例研究显示,引入MPL可降低约8.7%的配送成本和5.4%的碳排放。以上有关MPL的研究均仅关注客户自取的单一服务模式场景。

为同时提供送货上门和客户自提2种服务,学者们探讨了如何结合自提点(驿站/智能快递柜)优化货车配送路径<sup>[14]</sup>。进一步,周林等<sup>[15]</sup>提出了一种车辆移动停靠自提模式,货车既完成传统送货上门服务,也在路线中的某些节点停留一段时间充当自提点。显然,若将可移动智能快递柜应用于车辆移动停靠自提模式将有助于全链条无人配送服务的构建。因此,本文提出利用可移动快递柜搭载小型配送机器人(Delivery Robot, DR)同时提供客户自取和送货上门2种服务的城市物流全链条无人配送模式(如图1所示),并深入探讨该模式的配送效益。首先,考虑车辆容量、客户时间窗、自提服务半径、客户服务水平以及MPL与DR的协同等相关约束,以碳排放量最小化为目标,建立MPL和DR协同配送绿色路径问题(Green Routing Problem for Mobile Parcel Locker with Delivery Robots, GRPMPLDR)的数学模型。其

次,针对问题特点,设计自适应大规模邻域搜索算法(Adaptive Large Neighborhood Search, ALNS),以实现问题的高效求解。最后,基于数值实验探讨该模式的效益。

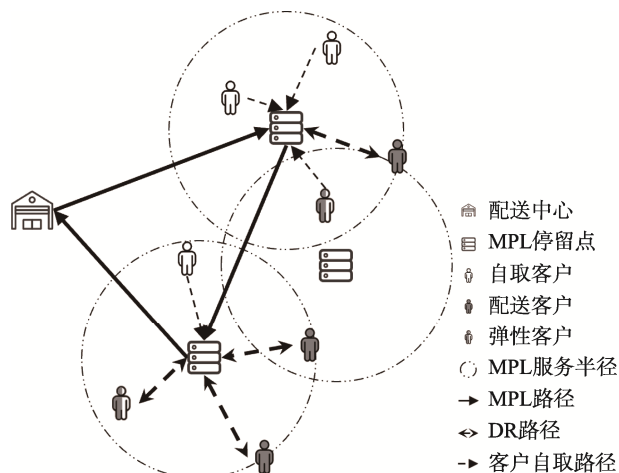


图1 可移动快递柜和机器人协同配送示意图  
Fig.1 Illustration of collaborative delivery using MPLs and DRs

## 1 问题描述

GRPMPLDR具体可以描述为:在包括1个配送中心 $0$ 、1组可供MPL停靠的停留点 $V^s$ 和1组有配送需求的客户点 $V^c$ 的配送网络中,配送中心内有若干容量为 $Q$ 的MPL $L$ ,每辆MPL搭载了若干DR $K$ 。停留点和客户点均具有时间窗,用 $[s_i, e_i]$ 表示。当MPL自主行驶至规定停留点时,位于服务半径 $\pi^p$ 内的客户可自行领取包裹;DR则可为半径在 $\pi^d$ 内的客户执行配送上门服务,服务时间为 $t_i$ 。DR往返于MPL与客户处,每次只服务1个客户,并在完成配送后立即返回MPL。在任一个停留点处,DR可以被多次派出。所有MPL都从配送中心出发,并最终返回。

## 2 数学模型

### 2.1 符号定义

将GRPMPLDR定义在图 $G=(V, A)$ 上,其中 $V$ 代表节点集合, $V=V^s \cup V^c \cup \{0\}$ , $0$ 表示配送中心。 $A=A^1$

$\cup A^2$  为弧集,  $A^1 = \{(i, j) \mid i, j \in V^S \cup \{0\}, i \neq j\}$  为第一层级 MPL 的行驶弧集,  $A^2 = \{(i, j) \mid (i \in V^S \wedge j \in V^C) \vee (i \in V^C \wedge j \in V^S)\}$  为第二层级 DR 的路线弧集。其余符号设定见表 1。

## 2.2 目标函数

使用式 (1) 计算 MPL 的二氧化碳排放量<sup>[16]</sup>, 其中  $E_{ij}(w)$  表示载具运载质量为  $w$  的物品从节点  $i$  行驶至节点  $j$  时的二氧化碳排放量,  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  分别表示和距离、载质量相关的碳排放量系数。

$$E_{ij}(w) = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 w) d_{ij} \quad (1)$$

在 GRPMPLDR 中, DR 在执行配送任务时直接往返于快递柜与客户之间, 每次为 1 个客户服务配送 1 件包裹, 故 DR 从停留点  $j$  出发服务客户  $i$  (需求量为  $w$ ) 的碳排放量  $E_{ij}^r(w)$  可用式 (2) 计算 (设每件包裹质量为 2 kg)。

$$E_{ij}^r(w) = 2E_{ij}^r(1) = 2(\varepsilon_1^r + \varepsilon_2^r) d_{ij} \quad (2)$$

因此, 碳排放最小化的目标函数如式 (3) 所示。

$$\min C_1 = \sum_{(i,j) \in A^1} \sum_{l \in L} \varepsilon_2^v p_{ijl} d_{ij} + \sum_{(i,j) \in A^1} \sum_{l \in L} \varepsilon_1^v x_{ijl} d_{ij} + \quad (3)$$

$$2(\varepsilon_1^r + \varepsilon_2^r) \sum_{(i,j) \in A^2} \sum_{l \in L} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} y_{ijklm} d_{ij}$$

式中:  $\varepsilon_1^v$ ,  $\varepsilon_2^v$  分别表示 MPL 和 DR 的与其行驶距离相关的碳排放量系数;  $\varepsilon_1^r$ ,  $\varepsilon_2^r$  分别表示 MPL 和 DR 与其载质量相关的碳排放量系数。

## 2.3 约束条件

GRPMPLDR 的约束条件见式 (4) ~ (27)。

$$\sum_{j \in V^S} x_{0jl} \leq 1, \forall l \in L \quad (4)$$

$$\sum_{i \in 0 \cup V^S} x_{ijl} \leq 1, \forall j \in V^S, l \in L \quad (5)$$

$$\sum_{i \in 0 \cup V^S} x_{ijl} = \sum_{i \in 0 \cup V^S} x_{jil}, \forall j \in 0 \cup V^S, l \in L \quad (6)$$

$$\sum_{i,j \in A^2} \sum_{l \in L} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} y_{ijklm} + \sum_{j \in V^S} \sum_{l \in L} z_{ijl} = 1, \forall i \in V^C \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V^C} y_{ijklm} \leq 1, \forall j \in V^S, l \in L, k \in K, m \in M \quad (8)$$

$$d_{ij} \cdot \sum_{l \in L} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} y_{ijklm} \leq \pi^d \cdot f_i^d, \forall i \in V^C, j \in V^S \quad (9)$$

$$d_{ij} \cdot \sum_{l \in L} z_{ijl} \leq \pi^p \cdot f_i^p, \forall i \in V^C, j \in V^S \quad (10)$$

$$s_j \leq a_{jl}^L \leq b_{jl}^L \leq e_j, \forall l \in L, j \in V^S \quad (11)$$

$$a_{jl}^L \geq b_{li}^L + t_{ij}^L - BM \cdot (1 - x_{ijl}), \forall i, j \in V^S, l \in L \quad (12)$$

$$|V^C| \cdot \sum_{i \in 0 \cup V^S, i \neq j} x_{ijl} \geq \sum_{i \in V^C} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} y_{ijklm}, \forall j \in V^S, l \in L \quad (13)$$

$$|V^C| \cdot \sum_{i \in 0 \cup V^S, i \neq j} x_{ijl} \geq \sum_{i \in V^C} z_{ijl}, \forall j \in V^S, l \in L \quad (14)$$

$$s_i \leq \varphi_i \leq e_i, \forall i \in V^C \quad (15)$$

$$a_{jl}^L - BM \cdot (1 - z_{ijl}) \leq \varphi_i, \forall i \in V^C, l \in L, j \in V^S \quad (16)$$

$$a_i^R - BM \cdot (1 - \sum_{j \in V^S} \sum_{l \in L} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} y_{ijklm}) \leq \varphi_i, \forall i \in V^C \quad (17)$$

$$\sum_{i \in V^C} y_{ijklm} \leq \sum_{i \in V^C} y_{ijlk(m-1)}, \forall j \in V^S, \quad (18)$$

$$l \in L, k \in K, m \in M, m > 1$$

$$a_i^R \geq a_{i'}^R + t_{i'}^R + 0.5 \cdot t_{ij}^R + 0.5 \cdot t_{ij}^R - BM \cdot (2 - y_{ijklm} - y_{ijlk(m-1)}), \quad (19)$$

$$a_i^R \geq a_{ij}^L + 0.5 \cdot t_{ij}^R - BM \cdot (1 - y_{ijklm}), \forall i \in V^C, \quad (20)$$

$$j \in V^S, l \in L, k \in K, m \in M$$

$$b_{jl}^L \geq \varphi_i + t_i - BM \cdot (1 - z_{ijl}), \forall i \in V^C, j \in V^S, l \in L \quad (21)$$

$$b_{jl}^L \geq \varphi_i + t_i + 0.5 \cdot t_{ij}^R - BM \cdot (1 - \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} y_{ijklm}), \quad (22)$$

$$\forall i \in V^C, j \in V^S, l \in L$$

$$\sum_{i \in V^C} \sum_{j \in V^S} z_{ijl} + \sum_{i \in V^C} \sum_{j \in V^S} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} y_{ijklm} \leq Q, \forall l \in L \quad (23)$$

$$p_{ijl} \leq BM \cdot x_{ijl}, \forall i, j \in A^1, l \in L \quad (24)$$

$$\sum_{i \in V^S} p_{ijl} = \sum_{i \in V^S} p_{jil} + \sum_{i \in V^C} z_{ijl} + \sum_{i \in V^C} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} y_{ijklm}, \quad (25)$$

$$\forall j \in V^S, l \in L$$

$$\sum_{i \in V^C} \sum_{j \in V^S} \sum_{l \in L} z_{ijl} \leq |V^C| \cdot \eta \quad (26)$$

$$a_{ij}^L, b_{ij}^L, a_i^R, \varphi_i \geq 0, \forall i \in V^C, j \in V^S, l \in L \quad (27)$$

表 1 模型符号与变量定义

Tab.1 Model symbols and decision variables

| 符号         | 含义                           | 符号          | 含义                                                                |
|------------|------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------|
| $d_{ij}$   | 节点 $i$ 至节点 $j$ 处的距离          | $y_{ijklm}$ | 当 $y_{ijklm}=1$ , 客户 $i$ 由停在 $j$ 的 MPL $l$ 的 DR $k$ 在其第 $m$ 次配送服务 |
| $t_{ij}^L$ | MPL 从停留点 $i$ 行驶至停留点 $j$ 所需时间 | $z_{ijl}$   | 当 $z_{ijl}=1$ , 客户 $i$ 到停在 $j$ 的 MPL $l$ 自提                       |
| $t_{ij}^R$ | DR 从停留点 $i$ 来回客户 $j$ 所需时间    | $p_{ijl}$   | MPL $l$ 在弧 $(i, j)$ 行驶时的负载量                                       |
| $f_i^d$    | 当 $fd=i=1$ , 客户 $i$ 接受配送上门服务 | $a_{ij}^L$  | MPL $l$ 到达停留点 $j$ 的时刻                                             |
| $f_i^p$    | 当 $fp=i=1$ , 客户 $i$ 接受自取服务   | $b_{ij}^L$  | MPL $l$ 离开停留点 $j$ 的时刻                                             |
| $BM$       | 足够大的正数                       | $a_i^R$     | DR 到达客户 $i$ 的时刻                                                   |
| $x_{ijl}$  | MPL $l$ 从停留点 $i$ 行驶至停留点 $j$  | $\varphi_i$ | 客户 $i$ 的服务开始时刻                                                    |

其中, 式(4)表示每个 MPL 从配送中心出发 1 次; 式(5)保证每个停留点最多被访问 1 次; 式(6)确保 MPL 在停留点的进出平衡; 式(7)表示每个客户的需求都被满足; 式(8)表示 DR 每次只为 1 个客户服务; 式(9)为自取最大距离约束; 式(10)为 DR 服务半径约束; 式(11)表示停留点时间窗约束; 式(12)保证 MPL 行驶过程中的时间连续性; 式(13)和式(14)约束了决策变量间的逻辑关系; 式(15)表示客户服务的时间窗约束; 式(16)~(17)表示服务必须在车辆到达之后开始; 式(18)保证了 DR 的服务次序; 式(19)保证 DR 在同一停留点多次服务的时间连续性; 式(20)保证 DR 到达客户时间的合理性; 式(21)~(22)保证 MPL 的离开时间晚于所有自取与配送客户服务完成时间; 式(23)为 MPL 的容量约束; 式(24)保证只有 MPL 行驶的路径上才存在负载量; 式(25)表示 MPL 负载量更新。为保证服务水平, 式(26)约束自取客户占总客户数的比例 ( $\eta$  表示允许的自取客户占总客户数的最大比例), 式(27)定义了决策变量的取值范围。

### 3 算法设计

带时间窗车辆路径问题(Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW)属于典型的 NP 难问题<sup>[17]</sup>, GRPMPLDR 是比 VRPTW 更为复杂的组合优化问题, 因此需要设计启发式算法进行较大规模问题的求解。ALNS 最早由 Ropke 和 Pisinger 提出<sup>[18]</sup>, 已经被广泛应用于解决各类车辆路径问题及变体。节点的移除与插入是 ALNS 算法的核心, 并通过记录移除与插入不同算子在优化过程中的表现动态调整各算子的权重, 提高算法对问题的适应性, 以快速获得更优解。本文针对 GRPMPLDR 的特点设计适用的 ALNS 算法。

#### 3.1 算法框架

算法 1 给出了本文设计的 ALNS 算法流程。在每次迭代开始时, 根据各算子权重, 使用轮盘赌机制选择 1 个移除算子和 1 个插入算子, 依次在当前解上执行它们, 从而得到一个解, 应用 Metropolis 准则判断解的接受情况, 同时更新算子权重, 重复该过程, 直到满足终止条件。

#### 3.2 初始解生成

初始解生成的思路是先将客户分配给停留点, 再将问题转化为一个小规模 VRPTW。

1) 将客户分配给停留点。首先, 按式(28)计算每个停留点  $j$  的评分  $f_j$ 。其次, 按  $f$  值降序为停留点分配客户, 直到所有客户都被分配。

$$f_j = \frac{N_j}{d_{0j} + T_j} \quad (28)$$

式中:  $N_j$  为该停留点覆盖范围内的客户数量;  $T_j$  表示该停留点覆盖范围内全部客户中最早与最晚开始服务的时间差。

2) 将问题转化为 VRPTW。DR 在停留点处的服务顺序确定之后, 每个停留点就可以看作是一个具有时间窗和服务时间的虚拟客户, 于是问题就转化成 VRPTW。按如下步骤确定 DR 的服务顺序:

Step 1 初始化集合  $K$  及每个 DR  $k$  空闲时间窗  $[a_k, b_k]$ , 计算最大可推迟时间  $\sigma = b_k - a_k$ ;

Step 2 将需要服务的客户放入集合  $V^{KC}$ , 并按其时间窗开始时间升序排列;

Step 3 选择第一个客户  $i$ , 将其分配给最早可服务时间最小的 DR  $k^*$ , 更新  $k^*$  的空闲时间窗为  $a_{k^*} = \max\{b_{k^*}, s_{k^*} + T_{ij} + t_i\}$ , 最大可推迟时间为  $\sigma = \min\{b_i - T_{ij} - s_{ik}, \sigma\}$ ;

Step 4 从  $V^{KC}$  中删除客户  $i$ , 若  $V^{KC} \neq \emptyset$ , 转 Step 3, 否则由式(29)~(31)计算由 DR 配送服务产生的停留点时间窗  $[a_j^R, b_j^R]$  以及服务时间  $t_j$ , 其中  $i^*$  为该停留点最晚完成服务的客户。

#### 算法 1 ALNS 算法

输入: 初始解  $S_0$ ; 移除与插入算子集合  $O_S^R, O_C^R, O_S^I, O_C^I$ ; 算子权重  $\pi_S^R, \pi_C^R, \pi_S^I, \pi_C^I$ ; 最大迭代次数  $N$ ; 破坏停留点迭代次数  $N_s$ ; 初始温度  $T_0$ ; 降温速率  $e$

```

1:  $S \leftarrow S_0, i_A \leftarrow 0, i_s \leftarrow 0$ 
   while  $i_A < N$ 
2:   if  $i_s \geq N_s$ 
3:      $S' \leftarrow O_S^R(S, \pi_S^R)$ 
4:      $i_s \leftarrow 0$ 
5:      $S' \leftarrow O_C^R(S', \pi_C^R)$ 
6:      $S' \leftarrow O_S^I(S', \pi_S^I)$ 
7:      $S' \leftarrow O_C^I(S', \pi_C^I)$ 
8:     if  $f(S') < f(S)$  or  $\text{rand}(0, 1) < e^{-(f(S') - f(S)) / T}$ 
9:        $S \leftarrow S'$ 
10:    if  $f(S) < f(S^*)$ 
11:       $S^* \leftarrow S$ 
12:    更新  $\pi_S^R, \pi_C^R, \pi_S^I, \pi_C^I$ 
13:     $T \leftarrow e \cdot T, i_A \leftarrow i_A + 1, i_s \leftarrow i_s + 1$ 
14:  return  $S^*$ 

```

$$a_j^R = \min\{s_{ir}\} \quad (29)$$

$$b_j^R = a_j^R + \sigma \quad (30)$$

$$t_j = s_{i^*k} + t_{i^*} + 2T_{i^*j} - a_j^R \quad (31)$$

采用以下计算方式逐一合并自取客户时间窗。若  $i, r$  均为停留点  $j$  的客户, 不失一般性, 令  $a_i \leq a_r$ , 则停留点  $j$  的时间窗  $[a_j, b_j]$  和服务时间  $t_j$  使用式(32)~(34)计算。

$$a_j = \begin{cases} \max\{a_i, a_r - \max\{a_i + t_i - a_r - t_r, 0\}\} & a_r \leq b_i \\ \min\{a_r + t_r - t_i, b_i\} & a_r > b_i \end{cases} \quad (32)$$

$$b_j = \begin{cases} \min\{b_j, b_r\} & a_r \leq b_i \\ b_i & a_r > b_i \end{cases} \quad (33)$$

$$t_j = \max\{t_i, t_r, a_r + t_r - a_j\} \quad (34)$$

### 3.3 移除算子

#### 3.3.1 停留点移除算子

停留点移除算子可调整停留点的启用情况, 以及可移动 MPL 的访问顺序, 因其对解的结构影响较大, 设定在每经过一定迭代次数后应用该算子。

1) 随机移除: 随机选择一个停留点, 将其从路径中移除, 将其服务的全部客户放入移除客户集。

2) 整点移除: 某些停留点的客户服务情况可能已经较优, 将停留点与客户作为整体考虑, 进行移除。

3) 路线移除: 移除服务客户最少 MPL 路线, 将其服务的所有客户放入移除客户集合。

4) 长等待移除: 该算子除路线中平均客户服务时间最长的停留点。

#### 3.3.2 客户移除算子

这类算子可改变客户的服务方式或者服务的停留点。

1) 随机移除: 该算子只需每次随机选择 1 个客户移除, 并将其放入移除客户集合。

2) 最差移除: 每次选择能使移除后目标函数值减少最多的客户进行移除。

3) 最远配送移除: 每次选择配送客户中配送距离最远的客户移除并放入移除客户集合。

4) 评分移除: 按式 (35) 计算每个客户的评分, 移除服务选择空间较大的客户。

$$G(i) = \varphi(f_i^d + f_i^p) + \chi(e_i - s_i) + \psi N_i \quad (35)$$

式中:  $N_i$  表示能够服务客户  $i$  的停留点数量。

5) 相关性移除: 首先随机选择 1 个种子客户, 使用式 (36) 计算其余客户与种子客户的相关性,  $R(i, j)$  值越小, 代表相关性越高每次移除相关性最高的客户。

$$R(i, j) = \varphi d_{ij} + \chi(|e_i - e_j| + |s_i - s_j|) + \psi(|f_i^d - f_j^d| + |f_i^p - f_j^p|) \quad (36)$$

### 3.4 插入算子

分别针对停留点与客户设计插入算子。对于停留点与客户, 都设计了贪婪插入, 并为了增加随机性, 引入了噪声版本; 对于客户插入, 还设计了后悔插入和引入噪声的版本, 以及相关性插入算子。在每次插入弹性客户时, 先随机选择一种服务方式, 再将其插入到路线中。

1) 贪婪插入 (噪声): 停留点或客户插入路径前

后的目标函数差值为插入成本, 以插入成本最小的方式将其插入。相应的噪声版本即为每个位置的插入成本随机生成一个  $[1-w, 1+w]$  的乘数。

2) 客户后悔插入 (噪声): 某客户的后悔值为插入最佳位置与次最佳位置的插入成本之差, 每次选择后悔值最大的停留点或客户将其插入最佳位置。相应的噪声版本即为每个客户后悔值随机生成一个  $[1-w, 1+w]$  的乘数。

3) 客户相关性插入算子: 计算其与路线中全部现有客户的相关性, 按相关性降序依次以贪婪方式插入路线中。

## 4 数值实验

### 4.1 案例介绍

以福建省福州市平潭综合实验区城区为例, 选择西航国际广场为中心, 周边宽 3 km、长 4 km 的范围作为研究区域, 选取了 85 个客户点以及 11 个备选停留点, 将中国邮政速递营业部作为配送中心 (如图 2 所示)。为更全面地评估 MPL+DR 模式的效益, 在数值实验中比较碳排放目标和配送成本目标。MPL+DR 模式的配送包括组合车辆的启用成本以及 MPL 和 DR 的行驶成本, 如式 (37) 所示。

$$\min C_2 = H \sum_{j \in V^S} \sum_{l \in L} x_{0jl} + c_1 \sum_{(i,j) \in A^1} \sum_{l \in L} x_{ijl} d_{ij} + \quad (37)$$

$$2c_2 \sum_{(i,j) \in A^2} \sum_{l \in L} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} y_{ijklm} d_{ij}$$

式中:  $H$  表示组合车辆的单位启用成本;  $c_1$ 、 $c_2$  分别表示其单位距离行驶成本。

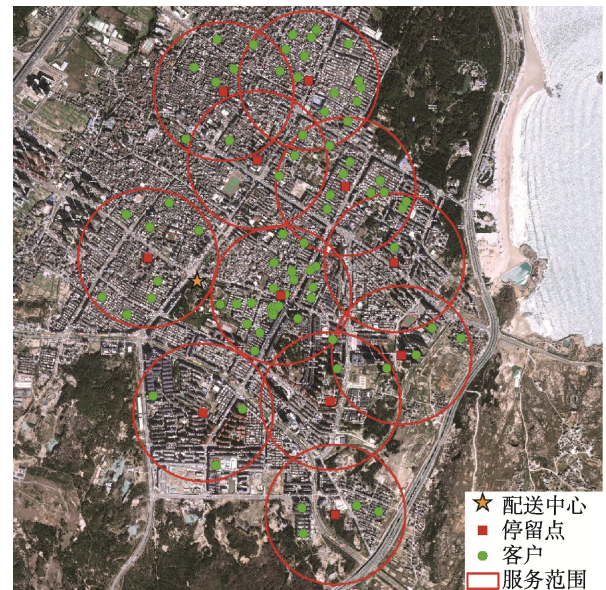


图 2 客户及停留点分布情况

Fig.2 Distribution of customers and potential stops

实验中设定每个 MPL 搭载 2 个 DR, 合计固定成本 100 元。MPL 的速度为 18 km/h, 容量为 50 kg,

单位距离成本 1 元/km; DR 的速度为 3.6 km/h, 服务半径为 1 km, 单位距离成本 0.1 元/km。客户自取的最大距离为 0.5 km, 碳排放量计算的相关参数取值为  $\varepsilon_1^v=0.000\ 41\ \text{kg CO}_2\text{e}/(\text{km}\cdot\text{kg})$ ,  $\varepsilon_2^v=0.266\ \text{kg CO}_2\text{e}/\text{km}$ ,  $\varepsilon_1^r=0.000\ 22\ \text{kg CO}_2\text{e}/(\text{km}\cdot\text{kg})$ ,  $\varepsilon_2^r=0.003\ 98\ \text{kg CO}_2\text{e}/\text{km}$ 。

#### 4.2 算法性能测试

为测试 ALNS 的有效性, 在 85 个客户中随机选择 15、25、30 个客户分别生成 5 个小规模案例, 在小规模案例上比较 ALNS 算法与商业求解器 Gurobi 的求解结果。对 Gurobi 设置 3 600 s 的求解时间限制, 算法使用 Python 编程, 在 CPU 型号为 AMD Ryzen7 5700X、3.40 GHz 处理器、32 GB 内存、64 位 Windows11 操作系统的个人电脑上运行。对于 ALNS 算法, 每个案例运行 5 次, 取其中的最好值, 结果见表 2, 分别记录了 Gurobi 和 ALNS 在两种目标函数下的求解结果与求解时间,  $g_{ap1}=(C_1^{\text{ALNS}}-C_1^{\text{Gurobi}})/C_1^{\text{Gurobi}}\times 100\%$ 、 $g_{ap2}=(C_2^{\text{ALNS}}-C_2^{\text{Gurobi}})/C_2^{\text{Gurobi}}\times 100\%$  分别记录了 2 种目标函数下 ALNS 算法与 Gurobi 所得解的差距。

当客户规模为 15 和 25 时, ALNS 算法与 Gurobi 均能以较快的速度找到全局最优解。当客户规模达到 30 时, 虽然 Gurobi 能够求得所有案例的可行方案, 但已无法求得最优解。ALNS 则在全部案例中都求得了优于 Gurobi 的解, 同时 ALNS 在求解速度上也有着较大优势。这表明当问题规模变大时, ALNS 在求解质量与求解速度方面的优势变得显著, 体现了本文设计的 ALNS 的可行性与有效性。

#### 4.3 目标函数分析

表 3 对比了客户规模为 15 和 25 案例在 2 种目标函数下的最优解,  $g_{ap}^c=(C_2^c-C_1^c)/C_1^c\times 100\%$  和  $g_{ap}^e=(C_1^e-C_2^e)/C_2^e\times 100\%$ 。分别表示 2 种目标函数下对应解在碳排放和配送成本上的差距。10 个案例中仅有 3 个(15-04、25-02 和 25-03)在 2 个目标函数下求得了不同的解。这是因为碳排放和配送成本均主要受 MPL 和 DR 的行驶距离影响, 故在大部分案例中得到了相同的解。在碳排放量最小化目标下, 载具的碳排放量还与其负载量相关, 因此最优解会尽可能在路线的初期服务更多的客户。上述 3 个案例在 2 个目标函数下的解在路线中的负载量变化情况如图 3 所示。

对于以碳排放量最小化为目标的解, 可移动快递柜的负载下降更快, 并且在案例 25-02 中甚至访问了更少的停留点。在全部解存在差异的案例中, 以碳排放量最小化为目标的解的配送成本仅比以配送成本最小化为目标的解的配送成本增加了约 0.3%, 而对应的碳排放量却降低了 2.41%。因此, 以碳排放量最小化为目标, 可以得到以较小的成本代价获得较大降碳效果的解。

#### 4.4 配送模式对比

将本文研究的 MPL+DR 模式分别与仅货车配送模式、固定快递柜模式(FPL)和车辆移动停靠自提模式<sup>[17]</sup>进行对比, 见表 4。就 MPL+DR 模式而言, MPL 是主要的碳排放来源, 引入 DR 可以有效降低配送碳排放, 其碳排放量仅占整个配送过程的 7.05%左右,

表 2 ALNS 与 Gurobi 求解结果  
Tab.2 Solution results of ALNS and Gurobi

| 案例     | Gurobi               |              |                |              | ALNS                 |              |                |              | $g_{ap1}/\%$ | $g_{ap2}/\%$ |
|--------|----------------------|--------------|----------------|--------------|----------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
|        | $C_1/\text{kg CO}_2$ | $T/\text{s}$ | $C_2/\text{元}$ | $T/\text{s}$ | $C_1/\text{kg CO}_2$ | $T/\text{s}$ | $C_2/\text{元}$ | $T/\text{s}$ |              |              |
| 15-01  | 2.72                 | 2.21         | 110.31         | 0.69         | 2.72                 | 2.67         | 110.31         | 4.96         | 0.00         | 0.00         |
| 15-02  | 2.52                 | 1.41         | 109.97         | 0.81         | 2.52                 | 2.45         | 109.97         | 1.56         | 0.00         | 0.00         |
| 15-03  | 2.11                 | 1.57         | 108.15         | 0.31         | 2.11                 | 1.44         | 108.15         | 0.13         | 0.00         | 0.00         |
| 15-04  | 2.92                 | 1.17         | 111.18         | 0.33         | 2.92                 | 0.87         | 111.18         | 0.16         | 0.00         | 0.00         |
| 15-05  | 2.57                 | 2.79         | 110.11         | 1.12         | 2.57                 | 0.84         | 110.11         | 1.19         | 0.00         | 0.00         |
| 25-01  | 2.41                 | 42.04        | 110.02         | 11.55        | 2.41                 | 3.29         | 110.02         | 0.51         | 0.00         | 0.00         |
| 25-02  | 2.88                 | 97.99        | 111.34         | 67.50        | 2.88                 | 1.02         | 111.34         | 13.84        | 0.00         | 0.00         |
| 25-03  | 2.74                 | 2 941.03     | 110.99         | 2 424.31     | 2.74                 | 1.19         | 110.99         | 8.02         | 0.00         | 0.00         |
| 25-04  | 2.70                 | 158.91       | 110.95         | 298.93       | 2.70                 | 14.25        | 110.95         | 3.27         | 0.00         | 0.00         |
| 25-05  | 2.93                 | 211.74       | 111.96         | 117.13       | 2.93                 | 24.31        | 111.96         | 2.12         | 0.00         | 0.00         |
| 30-01* | 3.65                 | 3 600.00     | 114.61         | 3 600.00     | 2.84                 | 3.53         | 112.22         | 12.14        | -22.19       | -2.09        |
| 30-02* | 3.42                 | 3 600.00     | 114.21         | 3 600.00     | 2.72                 | 3.39         | 111.14         | 1.64         | -20.47       | -2.69        |
| 30-03* | 3.45                 | 3 600.00     | 112.87         | 3 600.00     | 2.57                 | 4.82         | 110.73         | 6.57         | -25.51       | -1.90        |
| 30-04* | 3.66                 | 3 600.00     | 114.14         | 3 600.00     | 2.79                 | 8.64         | 110.99         | 9.08         | -23.77       | -2.76        |
| 30-05* | 3.52                 | 3 600.00     | 114.43         | 3 600.00     | 2.91                 | 12.32        | 111.73         | 1.85         | -17.33       | -2.36        |
| 平均值    | 2.77                 | 1 430.72     | 111.68         | 1 394.85     | 2.51                 | 5.67         | 110.79         | 4.47         | -7.28        | -0.79        |

表 3 2 种目标函数下求解结果对比  
Tab.3 Comparison on results under two objective functions

| 案例    | 碳排放量最小化                     |            |          | 配送成本最小化                     |            |          | gap <sup>e</sup> /% | gap <sup>e</sup> /% |
|-------|-----------------------------|------------|----------|-----------------------------|------------|----------|---------------------|---------------------|
|       | $C_1^e$ /kg CO <sub>2</sub> | $C_2^e$ /元 | $T$ /s   | $C_1^c$ /kg CO <sub>2</sub> | $C_2^c$ /元 | $T$ /s   |                     |                     |
| 15-01 | 2.72                        | 110.31     | 2.21     | 2.72                        | 110.31     | 0.69     | 0.00                | 0.00                |
| 15-02 | 2.52                        | 109.97     | 1.41     | 2.52                        | 109.97     | 0.81     | 0.00                | 0.00                |
| 15-03 | 2.11                        | 108.15     | 1.57     | 2.11                        | 108.15     | 0.31     | 0.00                | 0.00                |
| 15-04 | 2.92                        | 111.49     | 1.17     | 2.94                        | 111.18     | 0.33     | 0.68                | 0.28                |
| 15-05 | 2.57                        | 110.11     | 2.79     | 2.57                        | 110.11     | 1.12     | 0.00                | 0.00                |
| 25-01 | 2.41                        | 110.02     | 42.04    | 2.41                        | 110.02     | 11.55    | 0.00                | 0.00                |
| 25-02 | 2.88                        | 111.77     | 97.99    | 2.92                        | 111.34     | 67.50    | 1.37                | 0.39                |
| 25-03 | 2.74                        | 111.27     | 2 941.03 | 2.89                        | 110.99     | 2 424.31 | 5.19                | 0.25                |
| 25-04 | 2.70                        | 110.95     | 158.91   | 2.70                        | 110.95     | 298.93   | 0.00                | 0.00                |
| 25-05 | 2.93                        | 111.96     | 211.74   | 2.93                        | 111.96     | 117.13   | 0.00                | 0.00                |
| 平均值   | 2.65                        | 110.60     | 346.09   | 2.67                        | 110.50     | 292.27   | 0.72                | 0.09                |

但由于续航与载重原因, 难以适应大范围的配送任务, 使用 MPL 搭载 DR 进行配送可以弥补 DR 在此方面的不足, 提升整体的配送效率与灵活性。

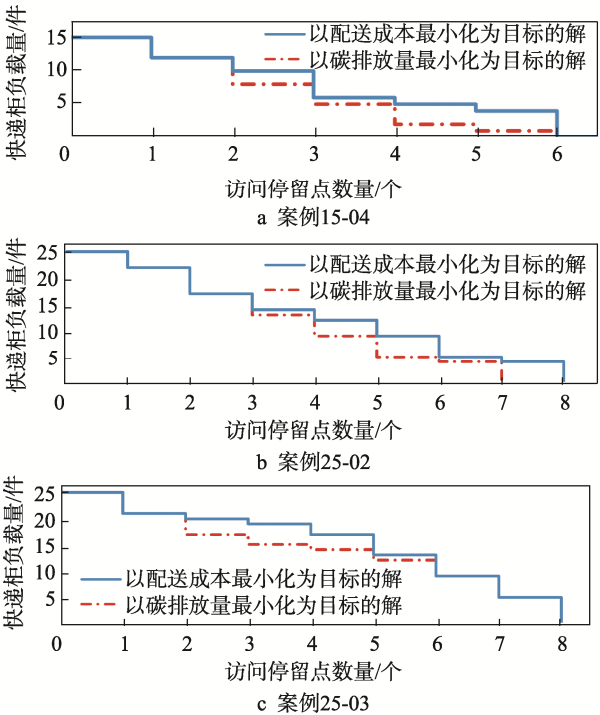


图 3 3 个案例解的可移动快递柜负载量变化  
Fig.3 Payloads of MPL in three cases

与仅货车模式相比, MPL+DR 模式可实现碳排放降低 53.29%, 配送成本减少 33.38%。这是因为在 MPL+DR 模式下, MPL 不必前往每一个客户处, 显著减少了可移动快递柜的行驶距离。同时, DR 的并行配送能更好地满足客户时间窗约束, 从而减少了 MPL 的使用数量。DR 的单位距离碳排放和行驶成本

均远低于可移动快递柜, 故配送方案取得了较显著的碳排放量和配送成本的降低。

FPL 模式需预先部署 FPL 作为自提点, 货车将包裹运送至 FPL 之后, 客户自行完成取件。本文利用集合覆盖模型确定案例中 FPL 的布局。FPL 模式下碳排放主要来源于 2 个部分: 配送车辆和 FPL 的日常运维。使用式 (38) 计算 FPL 的碳排放量, 其中,  $p_f$  表示 FPL 的平均功率, 取值为 30 W;  $h$  为使用时长, 取值为 24 h;  $\varepsilon^e$  表示发电设施每千瓦时产生的碳排放量, 取值为 0.377 3 kg CO<sub>2</sub>/kWh。PFL 的固定成本取值 20 元/d。

$$E_f = hp_f \varepsilon^e \tag{38}$$

MPL+DR 模式可以降低 41.85% 的碳排放量。从配送成本来看, FPL 模式需要布置大量固定快递柜, 固定设施的投入成本也相对较高。将 MPL+DR 模式与车辆移动停靠自提模式比较时, 考虑 50% 上门配送和 50% 客户自取的情形。相较而言, MPL+DR 模式减少了 37.80% 的碳排放量, 并节约 32.76% 的配送成本。这是因为在移动自提模式下, 虽然部分客户可以在车辆停靠处自取, 但由于车辆需要在配送途中等待客户取件, 且仍有部分订单需由货车完成上门配送服务, 故车辆的使用数量和行驶距离比可移动快递柜更多。

4.5 敏感性分析

对 DR 的行驶速度和服务半径进行敏感性分析。将 DR 的服务半径设置在 [0.5, 1.5] km 上, 步长为 0.25; 行驶速度设置在 [2.4, 6] km/h 上, 步长为 1.2, 结果如图 4 所示。无论是提升 DR 的速度, 还是扩大其服务半径, 都能够有效降低配送方案的碳排放量。提升 DR 速度或扩大 DR 服务半径均能增加 MPL 在每个停留点的服务客户数, 减少 MPL 的总行驶距离。然而, 当 DR 的服务半径较小时, 提高 DR 的行驶速度带来的碳排放降低就十分有限。

表 4 配送模式对比  
Tab.4 Comparison of different delivery modes

| 序号 | 配送模式     | 客户服务方式          |       | 碳排放量/kg CO <sub>2</sub> e | 配送成本/元 |
|----|----------|-----------------|-------|---------------------------|--------|
| 1  | MPL+DR   | 上门配送            | MPL   | 3.43                      | 213.65 |
|    |          |                 | DR    | 0.26                      | 4.97   |
|    |          |                 | 总     | 3.69                      | 218.62 |
|    | 仅货车      |                 | 货车/总  | 7.90                      | 328.15 |
| 2  | MPL+DR   | 客户自取            | MPL/总 | 2.96                      | 109.98 |
|    |          |                 | 送货车   | 2.66                      | 109.46 |
|    |          |                 | FPL   | 2.43                      | 180.00 |
|    |          |                 | 总     | 5.09                      | 289.46 |
| 3  | MPL+DR   | 50%上门配送+50%客户自取 | MPL   | 3.24                      | 211.51 |
|    |          |                 | DR    | 0.15                      | 3.27   |
|    |          |                 | 总     | 3.39                      | 214.78 |
|    | 车辆移动停靠自提 |                 | 货车/总  | 5.45                      | 319.42 |

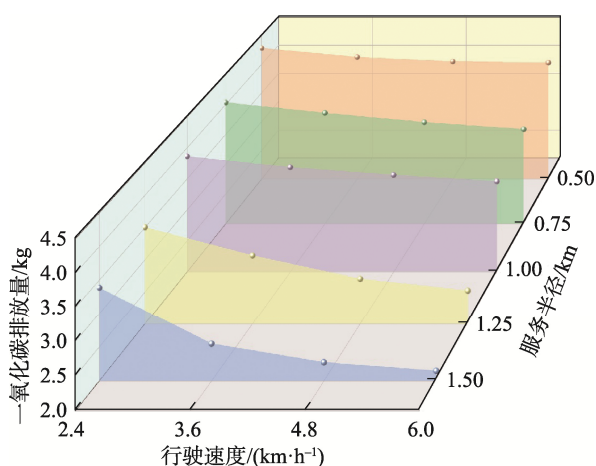


图 4 配送机器人行驶速度与服务半径敏感性分析  
Fig.4 Sensitivity analysis on speed and radius  
for delivery robots

## 5 结论

本文研究了 MPL 和 DR 协同配送的路径优化问题，在这种新型的无人配送模式中，可同时满足客户自取与配送 2 种需求。首先以碳排放量最小化为目标，构建了混合整数优化模型，其次针对问题特点，设计了自适应大邻域搜索算法，最后通过数值实验表明了该模式的效益，得到了以下结论：

1) MPL 与 DR 协同配送可以利用 MPL 弥补 DR 在行驶速度与配送距离方面的弱点，提高其配送能力。而 DR 可以增加 MPL 的灵活，提供更有效的上门配送服务。该模式能有效减少城市物流配送过程中因绕行产生的额外碳排放，并降低配送成本。

2) DR 行驶速度的提升和服务半径的扩大均能有

效降低配送方案的碳排放，同时提高这 2 个因素则可以带来十分显著的碳排放量降低效果。

进一步的研究将考虑该配送模式在不同城市环境下的应用情况，以及将可停留点选址作为配送方案决策的一部分，从而获得更优方案，并考虑 DR 每次配送为多个客户提供服务及其充电因素等。

## 参考文献：

- [1] 何黎明. 我国物流业 2023 年发展回顾与 2024 年展望[J]. 中国流通经济, 2024, 38(3): 3-8.  
HE L M. The Review of China's Logistics Industry Development in 2023 and the Outlook of 2024[J]. China Business and Market, 2024, 38(3): 3-8.
- [2] 杨超, 张惠珍, 钱陇骏. 改进麻雀搜索算法求解多目标低碳冷链物流车辆路径问题[J]. 包装工程, 2024, 45(3): 251-261.  
YANG C, ZHANG H Z, QIAN L J. Improved Sparrow Search Algorithm to Solve the Routing Problem of Multi-Objective Low-Carbon Cold Chain Logistics Vehicle[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(3): 251-261.
- [3] 陈诚, 孙环欣, 杜帅举, 等. 考虑交付可选的货车无人机并行配送路径问题研究[J]. 数学的实践与认识, 2024, 54(6): 186-200.  
CHEN C, SUN H X, DU S J, et al. Research on Parallel Drone Scheduling Vehicle Routing Problem with Delivery Options[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2024, 54(6): 186-200.
- [4] LIU D, DENG Z H, ZHANG W B, et al. Design of Sustainable Urban Electronic Grocery Distribution Net-

- work[J]. Alexandria Engineering Journal, 2021, 60(1): 145-157.
- [5] 贾兆红, 王少贵, 刘闯. 多模式下的车辆和无人机联合配送模型与优化算法[J]. 控制与决策, 2024, 39(7): 2125-2132.
- JIA Z H, WANG S G, LIU C. Vehicle and Drones Joint Distribution Model and Optimization Algorithm in Multi-Mode[J]. Control and Decision, 2024, 39(7): 2125-2132.
- [6] 范厚明, 宋彬彬, 王琪, 等. 时变路网下同时配集货车-无人车协同配送路径问题[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 589-599.
- FAN H M, SONG B B, WANG Q, et al. Van-Unmanned Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-up under Time-Dependent Road Networks[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2025, 53(4): 589-599.
- [7] DE MAIO A, GHIANI G, LAGANÀ D, et al. Sustainable Last-Mile Distribution with Autonomous Delivery Robots and Public Transportation[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 163: 104615.
- [8] BI Z L, GUO X W, WANG J C, et al. Truck-Drone Delivery Optimization Based on Multi-Agent Reinforcement Learning[J]. Drones, 2024, 8(1): 27.
- [9] YU S H, PUCHINGER J, SUN S D. Van-Based Robot Hybrid Pickup and Delivery Routing Problem[J]. European Journal of Operational Research, 2022, 298(3): 894-914.
- [10] 人民网-北京频道. 移动快递柜“现身”文创园 国家文创实验区推动智慧园区加速升级 [EB/OL]. (2022-03-18)[2025-04-24]. <http://bj.people.com.cn/n2/2022/0318/c82846-35180243.html>.
- [11] SCHWERDFEGGER S, BOYSEN N. Optimizing the Changing Locations of Mobile Parcel Lockers in Last-Mile Distribution[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 285(3): 1077-1094.
- [12] KÖTSCHAU R, SOEFFKER N, EHMKE J F. Mobile Parcel Lockers with Individual Customer Service[J]. Networks, 2023, 82(4): 506-526.
- [13] PEPPEL M, SPINLER S, WINKENBACH M. Integrating Mobile Parcel Lockers into Last-Mile Delivery Networks: An Operational Design for Home Delivery, Stationary, and Mobile Parcel Lockers[J]. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2024, 54(4): 418-447.
- [14] MANCINI S, GANSTERER M. Vehicle Routing with Private and Shared Delivery Locations[J]. Computers & Operations Research, 2021, 133: 105361.
- [15] 周林, 洪凌睿, 何华英, 等. 考虑客户取货行为和车辆移动停靠自提的最后一公里配送研究[J]. 控制与决策, 2024, 39(11): 3810-3818.
- ZHOU L, HONG L R, HE H Y, et al. Last Mile Delivery Optimization Considering Customers' Self-Pickup Behavior and Vehicle Mobile Parking for Self-Pickup[J]. Control and Decision, 2024, 39(11): 3810-3818.
- [16] CHEN C, DEMIR E. Drones and Delivery Robots: Models and Applications to Last Mile Delivery[M]. Cham: Springer International Publishing, 2022: 859-882.
- [17] 孟建军, 石坤, 刘亚彤, 等. 基于客户满意度的低碳冷链多式联运路径优化[J]. 包装工程, 2024, 45(13): 268-275.
- MENG J J, SHI K, LIU Y T, et al. Multimodal Transport Path Optimization of Low-Carbon Cold Chain Based on Customer Satisfaction[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(13): 268-275.
- [18] ROPKE S, PISINGER D. An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows[J]. Transportation Science, 2006, 40(4): 455-472.