



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

# 控制与决策

CONTROL AND DECISION



## 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

周林, 洪凌睿, 何华英, 杜建辉

引用本文:

周林, 洪凌睿, 何华英, 杜建辉. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1360>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [基于粒子群算法的满载需求可拆分车辆路径规划](#)

Split vehicle route planning with full load demand based on particle swarm optimization

控制与决策. 2021, 36(6): 1397–1406 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1323>

#### [基于时空聚类求解带容积约束的选址-路径问题](#)

Time-space cluster based location-routing problem with capacitate constraints

控制与决策. 2021, 36(10): 2504–2510 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0073>

#### [车辆与无人机组组合配送研究综述](#)

Review on vehicle-UAV combined delivery problem

控制与决策. 2021, 36(10): 2313–2327 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1315>

#### [基于16方向24邻域改进蚁群算法的移动机器人路径规划](#)

Mobile robots path planning based on 16-directions 24-neighborhoods improved ant colony algorithm

控制与决策. 2021, 36(5): 1137–1146 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0600>

#### [考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题](#)

Vehicle routing problem of refined oil secondary distribution considering unloading sequence constraints

控制与决策. 2020, 35(12): 2999–3005 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1756>

# 考虑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

周林<sup>†</sup>, 洪凌睿, 何华英, 杜建辉

(重庆理工大学 管理学院, 重庆 400054)

**摘要:** 为提高最后一公里配送效率并降低配送成本, 基于送货上门和自提两种配送需求, 提出送货上门与车辆停靠移动自提相结合的混合交付模式并开展配送优化研究. 首先, 通过客户取货行为研究建立车辆停靠调度与客户取货行为关联; 在此基础上, 开展车辆停靠选址-停靠时长调度-车辆路径集成决策, 构建以车辆使用成本、路径成本和自提失败追索成本之和最小的混合整数规划模型; 然后, 针对该问题特征设计改进的变邻域搜索算法高效求解, 并通过仿真实验对算法的有效性进行验证; 最后, 开展模型及关键参数的敏感性分析. 实验结果表明, 移动停靠自提、调度时长粒度、停靠点数量及收费模式等对配送系统影响显著, 综合考虑这些因素对最后一公里配送系统构建具有较强的现实意义.

**关键词:** 客户取货行为; 车辆移动停靠自提; 改进变邻域搜索算法; 最后一公里配送

中图分类号: TP301

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1360

**引用格式:** 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.

## Last mile delivery optimization considering customers' self-pickup behavior and vehicle mobile parking for self-pickup

ZHOU Lin<sup>†</sup>, HONG Ling-ru, HE Hua-ying, DU Jian-hui

(College of Management, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

**Abstract:** To improve the efficiency of last-mile delivery and reduce delivery costs, based on the demands for home delivery and self-pickup, this paper proposes a hybrid delivery mode that combines home delivery with vehicle mobile parking for self-pickup. Subsequently, optimization research on delivery is conducted. Firstly, a correlation between vehicle parking scheduling and customers' self-pickup behavior is established through the study of customers' self-pickup. Building upon this foundation, an integrated decision-making process for vehicle stop location selection, parking time scheduling, and vehicle routing is carried out. A mixed-integer programming model is formulated with the objective of minimizing the sum of vehicle usage costs, routing costs, and self-pickup failure recovery costs. Subsequently, an improved variable neighborhood search algorithm is designed to efficiently solve this problem, and its effectiveness is validated through simulation experiments. Finally, a sensitivity analysis of the model and key parameters is conducted. Experimental results show that vehicle mobile parking for self-pickup, scheduling time granularity, number of stops, and charging mode significantly impact the delivery system. Comprehensive consideration of these factors holds practical significance in the optimization of the last-mile delivery system.

**Keywords:** customers' self-pickup behavior; vehicle mobile parking for self-pickup; modified variable neighborhood search algorithm; last mile delivery

## 0 引言

根据国家邮政局统计数据显示, 2022年我国快递服务企业总业务量累计完成1105.8亿件, 近3

年平均同比增长21.1%, 业务量连续9年位居世界第一<sup>[1]</sup>. 快递业务量急剧增长在促进物流行业发展的同时也带来了巨大的运营挑战. 由于客户位置分

收稿日期: 2023-09-23; 录用日期: 2024-02-25.

基金项目: 教育部人文社会科学项目(23YJC630264); 重庆市基础研究与前沿探索专项项目(CSTB2023NSCQ-MSX0383); 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2022T1AD-KPX0061); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202201101); 重庆理工大学研究生创新项目(gzlcx20242093).

责任编辑: 王光臣.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: zhoulin1205@126.com.

散以及对时效性和个性化需求的不断提高,使得最后一公里配送成本占据整个物流供应链的35%~65%<sup>[2]</sup>。因此,如何降低最后一公里配送成本成为电子商务供应链和物流服务企业急需思考和解决的关键问题。

物流企业间日益激烈的市场竞争以及客户的个性化需求共同驱动最后一公里交付方式创新。Du等<sup>[3]</sup>对现有的交付方式进行了详细介绍。目前,主流的交付方式分为车辆送货上门和客户自提两类。其中,自提服务被公认为是降低最后一公里配送成本的重要方法。自提服务通过允许快递公司包裹放入快递柜或便利店支持客户随时便捷自取,不仅有助于保护客户隐私、增加灵活性,还能够通过集中配送实现配送规模经济效应,同时通过减少车辆行驶距离有效降低碳排放<sup>[4]</sup>。

针对自提服务,早期的研究主要集中在自提点选址研究。Deutsch等<sup>[5]</sup>以自提点的开放成本和客户取货距离成本为目标开展自提点选址研究;周翔等<sup>[6]</sup>构建了考虑客户满意度和客户点覆盖程度的自提点选址模型;李珍萍等<sup>[7]</sup>基于客户对自提和退换货两类需求,研究了涵盖自提柜、网点和便利店的3种自提点类型的选址分配问题;陈义友等<sup>[8]</sup>根据客户选择行为特征,分别建立了考虑随机选择行为和最优选择行为的自提点选址模型;韩珣等<sup>[9]</sup>考虑客户选择行为受多个自提点的影响,构建了在竞争环境下的自提点选址模型。

鉴于最后一公里配送运作过程中客户需求的个性化,同时考虑送货上门和客户自提两种服务方式的配送优化问题成为近年来国内外学者的研究热点。周林等<sup>[10]</sup>根据客户存在送货上门和客户自提两类服务需求,建立了考虑两种服务方式的自提点选址和车辆路径联合优化模型;郭放等<sup>[11]</sup>考虑服务站点可以分别为车辆充电和客户自提提供服务,构建了关于电动汽车服务站点选址和配送路径模型;代颖等<sup>[12]</sup>将快递服务半径视为衡量快递服务水平的重要指标,建立了考虑带自提服务半径决策的自提点选址和路径优化模型;Zhou等<sup>[13]</sup>在多配送中心场景下,提出了基于自提柜和转运中心的两级车辆路径问题;dos Santos等<sup>[14]</sup>考虑了快递柜可以作为包裹收集处和配送中转节点,同时引入了临时快递员协助配送,提出了考虑众包运输的两级快递柜选址和配送路径模型;Mancini等<sup>[15]</sup>建立了考虑自提、送货上门和两者兼具的3种类型客户需求的自提点选址和配送路径模型;周林等<sup>[16]</sup>基于多种类型的客户需求和不同

快递柜容量,建立了多元个性化需求的多容量快递柜选址和配送路径优化模型;Yu等<sup>[17]</sup>在不同类型的客户基础上,考虑专用配送车辆和临时配送车辆,提出了带有时间窗口、转运节点和交付选项的众包配送问题;Dumez等<sup>[18]</sup>在客户可以指定交付方式、偏好级别和时间窗口的前提下,建立了考虑不同交付选择的物流配送路径模型。

上述研究为考虑两种服务方式下的最后一公里配送系统设计提供了丰富的模型和方法支撑,但通过分析发现,当前的研究主要基于实际运作过程中通过设立自提柜或者自提点等固定设施来满足客户自提需求的场景。很显然,由于自提服务设施建设会带来较高的运营成本,仅适用商圈及大规模社区等客户需求固定、频次高、需求量大的区域<sup>[19]</sup>。在商务部等9部门于2021年联合制定的《商贸物流高质量发展专项行动计划(2021-2025年)》中提到,要“发展商贸物流新业态新模式”“综合解决配送货车‘通行难、停靠难、装卸难’等问题”,为配送模式创新应用提供了重要的支撑保障。然而在实际的运营过程中,小型配送车辆会在某些客户相对集中区域附近的可临时停靠处(如车库、临时停靠点、门卫岗亭、商超门口等)短暂停留等待客户自提以替代自提点的大量建设,从而降低配送总成本。因此,为该实际场景下的配送运作提供科学的方法支撑,具有重要的现实意义。

综上,本文基于最后一公里配送环境下存在的带时间窗送货上门(home delivery with time window, HDTW)和客户自提(customers' pickup, CP)两类典型需求,从降低自提设施投资和提高车辆利用率的视角出发,提出车辆移动停靠自提模式(vehicle mobile parking for self-pickup, VMPS)服务自提需求客户。具体而言,车辆在服务HDTW需求的同时,充分利用由于时间窗产生的等待时间间隔临时停靠路边、小区停车位或者公共停车场等待客户自提。该模式下,车辆不仅能够同时提供送货上门和自提服务,还能为客户提供灵活的自提位置。此外,考虑到客户到车辆停靠点自提的效率受到客户取货行为的影响,本文提出考虑客户取货行为和移动停靠自提模式的最后一公里配送优化问题(last mile delivery optimization considering customers' self-pickup behavior and vehicle mobile parking for self-pickup, LMDO-CPB-VMPS),开展具有可变停靠时长的停靠点决策-停靠时长调度-车辆路径集成优化,为构建精益的最后一公里配送系统提供理论和方法支撑。

## 1 问题描述与模型建立

### 1.1 问题描述

在最后一公里配送系统中存在HDTW和CP两类客户需求:针对有HDTW需求的客户,需要在规定时间窗内开展送货上门服务;针对有CP需求的客户,需要其到车辆移动停靠点自提.由于客户的个体特征差异,客户到车辆停靠点取货的时间受到客户取货行为的影响(分析与建模见1.2节),客户到车辆停靠点取货的成功率受客户取货行为和车辆停靠时长的双重影响.若客户未能在车辆停靠点取货成功,则会产生自提失败追索成本.由此,问题研究的目标是通过分析客户的取货行为,开展车辆停靠点选址、车辆停靠时长与车辆访问HDTW客户和停靠点路径的联合决策,以期构建最优的配送系统.LMDO-CPB-VMSP示意图如图1所示.

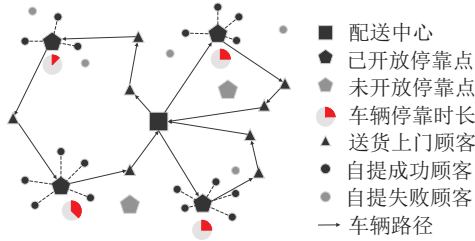


图1 LMDO-CPB-VMSP示意图

用 $V$ 表示所有节点集合,有

$$V = N_D \cup N_P \cup N_{HD} \cup N_{CP}.$$

其中: $N_D = \{0\}$ 为配送中心, $N_P$ 为候选停靠点集合, $N_{HD}$ 为有送货上门需求的客户集合, $N_{CP}$ 为有自提需求的客户集合.任意客户 $i \in N_{HD} \cup N_{CP}$ 存在配送需求 $q_i$ ,针对任意客户 $i \in N_{HD}$ ,车辆服务时间为 $s_i$ ,存在时间窗 $[E_i, L_i]$ ,需要在给定的时间窗内完成配送服务.自提客户在车辆停靠时未取货成功产生的单位需求追索配送成本为 $u$ ,以此来实现对所有自提客户的交付服务. $A = A_R \cup A_C$ 为弧集,其中 $A_R = \{(i, j) | i, j \in N_D \cup N_P \cup N_{HD}, i \neq j\}$ 为路径弧集, $A_C = \{(i, j) | i \in N_P, j \in N_{CP}\}$ 为自提弧集.任意弧 $(i, j)$ 对应距离 $d_{ij}$ 和旅行时间 $t_{ij}$ .配送中心车辆集合为 $K$ ,任意车辆 $k \in K$ 的最大装载量为 $Q_k$ ,最大运行时间为 $T_k$ ,固定使用成本为 $F_k$ .车辆的单位行驶距离成本为 $\beta$ .

针对车辆路径规划, $at_i^k$ 为车辆 $k$ 到达节点 $i$ 的时间, $wt_i^k$ 为车辆 $k$ 提前到达节点 $i$ 的等待时长.

针对车辆停靠调度, $L_{min}$ 为车辆在停靠点处的最小停留时长, $L_{max}$ 表示车辆在停靠点处的最大停留时长, $t_{kp}$ 表示车辆 $k \in K$ 在停靠点 $p \in N_P$ 处的实际停靠时长,有 $t_{kp} \in [L_{min}, L_{max}]$ .由于车辆停靠时间

是连续的,为了降低调度的复杂性并匹配实际运行过程中的调度需求,通过最小停靠时长粒度 $\tau$ 实现调度的离散化.

根据决策需求,决策变量设置如下.

$x_{ij}^k$ : 0-1变量,当车辆 $k \in K$ 经过弧 $(i, j) \in A_R$ 时为1,否则为0;

$y_p$ : 0-1变量,候选停靠点 $p \in N_P$ 被选为停靠点时为1,否则为0;

$z_{ij}$ : 0-1变量,自提客户 $i \in N_{CP}$ 被分配到停靠点 $j \in N_P$ 自提时为1,否则为0;

$st_i$ : 整数变量,表示车辆在停靠点 $i \in N_P$ 的停靠时长决策, $st_i \in \{L_{min}/\tau, L_{min}/\tau + 1, \dots, L_{max}/\tau\}$ .

### 1.2 客户取货行为模型

针对车辆停靠移动自提服务,当车辆到达停靠点时,该停靠点覆盖范围内的自提客户将会自发前往取货.基于对实际场景的调查发现,自提客户 $i \in N_{CP}$ 到达停靠点 $p \in N_P$ 的时间 $t_{ip}$ 由两部分构成:客户的响应(准备)时间 $t_{ip}^1$ 和从客户位置到取货点的路径时间 $t_{ip}^2$ .由于客户个体特征差异,客户前往车辆停靠点取货的行为受个体特征影响,取货行为主要体现在接到取货信息后,采取取货行动的响应时间(即 $t_{ip}^1$ )上.通过大量客户的统计调查,客户的取货响应时间大致服从截尾正态分布,即 $t_{ip}^1 \sim TN_i(u_i, \sigma_i^2, a, b)$ .相关计算公式如下:

$$t_{ip} = t_{ip}^1 + t_{ip}^2, \quad (1)$$

$$f(t_{ip}^1) = \frac{1}{\alpha\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left(-\frac{(t_{ip}^1 - u_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (2)$$

$$\alpha = \phi\left(-\frac{u_i}{\sigma_i}\right). \quad (3)$$

式(1)为自提客户 $i$ 到达停靠点 $p$ 所需要的时间;式(2)为自提客户响应时间 $t_{ip}^1$ 的概率密度函数;式(3)为归一系数的计算公式,确保密度函数积分为1.其中: $u_i$ 和 $\sigma_i$ 分别为截尾正态分布的均值和标准差; $a$ 和 $b$ 分别为截尾密度函数的下界和上界; $\phi$ 为标准的0-1正态分布.

据此,使用截尾正态分布对应的概率密度来描述客户取货行为.当车辆 $k$ 在停靠点 $p$ 的停靠时长 $t_{kp}$ 大于客户 $i$ 到达停靠点所需要的时间 $t_{ip}$ ,则认为客户 $i$ 取货成功.据此,当车辆停靠时长为 $t_{kp}$ 时,可计算出停靠点 $p$ 的期望取货成功客户数量

$$E_p(t_{kp}) = \sum_{i \in N_{CP}} f(t_{kp} - t_{ip}^2) z_{ip} = \sum_{i \in N_{CP}} \frac{1}{\alpha\sqrt{2\pi}\sigma_i} \int_0^{t_{kp} - t_{ip}^2} \exp\left(-\frac{(t - u_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) dt \cdot z_{ip}. \quad (4)$$

根据上文分析,自提成功的客户数量取决于车辆的停靠时长,停靠时间越长,自提成功的客户数量越多.然而,过长的停留时间可能与后续HDTW客户的配送时间窗冲突.因此,本文将车辆在停靠点的停靠时长作为决策变量,通过支持可变停靠时长以充分提高资源利用效率并降低配送成本.

### 1.3 混合整数规划模型

基于上述分析,LMDO-CPB-VMPS的混合整数规划模型构建如下:

$$\min F_k \sum_{k \in K} \sum_{(0,j) \in A_R} x_{0j}^k + \beta \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A_R} d_{ij} x_{ij}^k + \mu \left( |N_{CP}| - \sum_{p \in P} E_p(st_i \tau) \right). \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \sum_{(0,j) \in A_R} x_{0j}^k = \sum_{(j,0) \in A_R} x_{j0}^k = 1, \forall k \in K; \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{(0,j) \in A_R} x_{0j}^k \leq |K|; \quad (7)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_R} q_i x_{ij}^k + \sum_{(i,p) \in A_R} \sum_{(j,p) \in A_C} q_j z_{jp} x_{ip}^k \leq Q_k, \quad \forall k \in K; \quad (8)$$

$$\sum_{(i,p) \in A_R} x_{ip}^k = \sum_{(p,j) \in A_R} x_{pj}^k, \forall k \in K; \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A_R} x_{ij}^k = 1, \forall j \in N_{HD}; \quad (10)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_C} z_{ij} = 1, \forall i \in N_{CP}; \quad (11)$$

$$\frac{1}{|N_P|} \sum_{(i,j) \in A_C} z_{ij} \leq y_j, \forall j \in N_P; \quad (12)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A_R} x_{ij}^k = y_j, \forall j \in N_P; \quad (13)$$

$$at_i^k \leq L_i, \forall i \in V/N_{CP}, k \in K; \quad (14)$$

$$at_i^k + wt_i^k + st_i \tau + s_i + t_{ij} - M(1 - x_{ij}^k) \leq at_j, \quad \forall (i,j) \in A_R, k \in K; \quad (15)$$

$$wt_i^k = \max(0, E_i - at_i^k), \forall i \in V/N_{CP}; \quad (16)$$

$$l_{\min} \leq st_i \tau \leq l_{\max}, \forall i \in N_P; \quad (17)$$

$$at_i^k + wt_i^k + st_i \tau + s_i + t_{i0} \leq T_k, \quad \forall i \in V/N_{CP}, k \in K; \quad (18)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \forall (i,j) \in A_R, k \in K; \quad (19)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \forall i \in N_P; \quad (20)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\}, \forall (i,j) \in A_C; \quad (21)$$

$$st_i \in Z, \forall i \in N_P; \quad (22)$$

$$at_i^k, wt_i^k \in R_+, i \in V/N_{CP}. \quad (23)$$

目标函数式(5)表示车辆使用的固定成本、车辆行驶距离的路径成本和追索配送成本之和最小.约束(6)表示车辆从配送中心出发且必须返回配送中心;约束(7)表示使用车辆数量的限制;约束(8)表示车辆所提供货物不超过其最大容量;约束(9)表示车流守恒条件,车辆到达某节点后,必须离开该点;约束(10)表示有且仅有一辆车为HDTW客户提供服务;约束(11)表示自提客户都会被分配至一个停靠点;约束(12)表示存在自提客户的停靠点处于开放状态;约束(13)表示有且仅有一辆车会访问开放的停靠点;约束(14)表示车辆到达节点时间必须在其规定最迟到达时间前;约束(15)表示车辆行驶时间的连续性;约束(16)表示车辆提前到达节点则必须等待;约束(17)表示车辆的停靠时长存在上下限;约束(18)表示车辆运行时间不超过其最大工作时长;式(19)~(23)表示决策变量的取值范围.

## 2 改进的变邻域搜索算法

LRP属于NP-hard问题,LMDO-CPB-VMPS作为它的复杂变体也属于NP-hard<sup>[20]</sup>,对于中大规模的该类问题,精确算法和商业求解器求解困难.变邻域搜索算法(variable neighborhood search, VNS)<sup>[21]</sup>是一种基于局部搜索的元启发式算法,适用于求解组合优化问题.本文在文献[16]的基础上,基于问题特征设计了改进型变邻域搜索算法(modified variable neighborhood search, MVNS)求解该问题.

算法的基本思想是在每次搜索过程中首先利用改进的抖动策略对当前解进行扰动,然后通过变邻域下降算法和后优化过程搜索局部最优解,直至满足终止条件后停止算法,并输出最终最优解.在搜索过程中,为减少陷入局部最优解的可能性,采用Metropolis新解接受准则.MVNS算法流程图2.

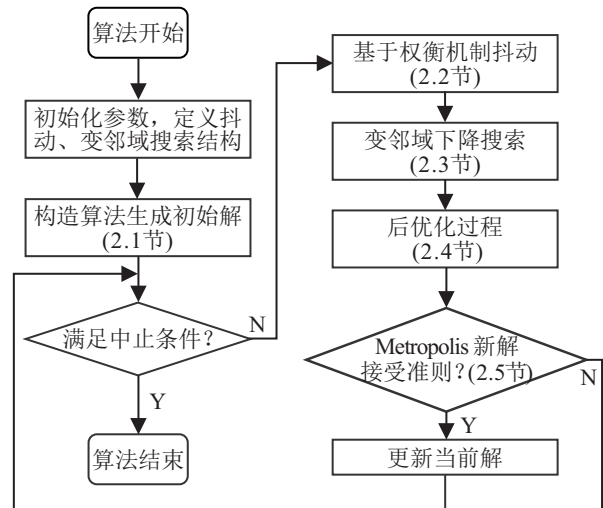


图2 MVNS算法流程

## 2.1 构造初始解

由于初始解的质量对后续算法的优化影响显著,较优的初始解能够提高算法寻优效率<sup>[22]</sup>.因此,本文借鉴文献[16]的思路,设计“先自提客户分配-后车辆路径-再车辆停靠调度”的3阶段构造算法,以实现在较短时间内构造具有较好质量的可行解.算法主要过程如下.

阶段1: CP客户分配.开放所有候选停靠点,将所有CP客户分配至距其最近的停靠点.

阶段2: HDTW客户车辆路径.基于经典的Solomon插入算法<sup>[23]</sup>构造面向HDTW客户的车辆路径规划.

阶段3: 车辆停靠调度.首先,基于阶段2构造的车辆路径计算两个客户节点之间最大自由时差;然后,针对任意有CP客户分配的停靠点,按照最大可停靠时长原则将各停靠点插入车辆路径.

## 2.2 基于权衡机制的抖动策略

抖动作为变邻域搜索的核心组件,通过改变解的搜索方向实现搜索空间的多样化避免陷入局部最优.本文基于问题特征设计如下4类抖动邻域结构.

节点移动( $N_1$ ): 随机从当前车辆路径中选择 $\max\{5\% \times |N_R|, 5\}$ 个节点移除,再将所有移除节点按照最小成本原则插入路径.

路径重组( $N_2$ ): 随机选择两条路径,并分别选择长度为3的片段 $\zeta_1$ 和片段 $\zeta_2$ ,互换两片段.

停靠点开闭( $N_3$ ): 随机改变一个停靠点的状态.如果选择的停靠点已开放,则将其关闭并将其所服务的自提客户按照最近距离原则分配给其他已开放停靠点;反之,如果该停靠点未开放,则开放该位置并将距其最近的自提客户分配至此.

停靠时长变更( $N_4$ ): 随机选择2个已开放停靠点并随机改变车辆的停靠时长,即 $t_{kp} = t_{kp} + \text{random}(L_{\min}/\tau, L_{\max}/\tau) \cdot \tau$ .

本文基于上述4类邻域结构对当前解进行扰动.为提高邻域结构选择效率以提升算法寻优性能,设计兼顾求解质量和多样性权衡机制的抖动策略.具体而言:基于任意邻域结构在历史 $\text{It}_{\text{shaking}}$ 次迭代过程中对解质量提升表现和对解多样性贡献动态更新选择权重,并采用轮盘赌开展邻域结构选择.

针对任意邻域结构 $N_k$ ,其在历史 $\text{It}_{\text{shaking}}$ 次迭代过程中对求解质量贡献计算公式为

$$\rho_{N_k}^q = \frac{1}{\text{It}_{N_k}} \sum_{it=1}^{\text{It}_{N_k}} \frac{|f(x_{it}) - f(x'_{it})|}{f(x_{it})}. \quad (24)$$

其中: $\text{It}_{N_k}$ 为邻域结构 $N_k$ 被选中的次数, $f(x_{it})$ 和

$f(x'_{it})$ 分别表示第 $it$ 次使用邻域结构 $N_k$ 抖动前后的目标函数值.

同理,邻域结构 $N_k$ 对解多样性贡献度计算公式为

$$\rho_{N_k}^d = \frac{1}{\text{It}_{N_k}} \sum_{it=1}^{\text{It}_{N_k}} \frac{|A| - \sum_{(i,j) \in A} D_{(i,j)}(x_{it}, x'_{it})}{|A|}, \quad (25)$$

其中 $D_{(i,j)}(x, x') = 1$ 表示弧 $(i, j) \in A$ 同时存在于解 $x$ 和 $x'$ 中,否则 $D_{(i,j)}(x, x') = 0$ .

邻域结构 $N_k$ 在第 $it$ 次抖动时被选择的权重为

$$w_{it, N_k} = \varphi_1 \rho_{N_k}^q + \varphi_2 \rho_{N_k}^d, \quad (26)$$

其中 $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 分别表示求解质量和多样性权重系数,且有 $\varphi_1 + \varphi_2 = 1$ .

基于上述定义,当利用轮盘赌策略开展时,邻域结构 $N_k$ 被选择的概率为

$$P_{it, N_k} = \frac{w_{it, N_k}}{\sum_{k \in K} w_{it, N_k}}. \quad (27)$$

## 2.3 变邻域下降搜索

变邻域下降搜索(variable neighborhood decent, VND)作用在于对抖动生成的解进行局部寻优以提高当前解的质量.基于对解空间特征分析,本文定义基于3种操作的5个VND邻域结构,具体如下.

节点交换: 随机选择一条路径以及该路径上的两个不同节点,交换两节点( $N_5$ ). 随机选择两条路径并各自选择一个节点,交换两节点( $N_6$ ).

节点插入: 随机选择一条路径以及待插入的节点,再将该节点插入随机选择的位置( $N_7$ ). 随机选择一条路径和待插入的节点,再随机选择另一条路径和插入该路径的位置,将待插入节点插入所选择的位置( $N_8$ ).

2-opt( $N_9$ ): 选择两条路径并各自选择一条边 $(x_i, x_{i+1})$ 和 $(y_i, y_{i+1})$ ,使用 $(x_i, y_{i+1})$ 和 $(y_i, x_{i+1})$ 代替原来的两条边.

执行VND时,设定邻域搜索最大次数 $I_{\max}$ ,按照设定VND邻域结构集合的顺序,依次访问当前解 $x$ 的邻域解.在规定的邻域搜索次数内,如果能找到邻域解 $x_1$ 优于 $x$ ,则更新最优解 $x_b$ 并返回第1个邻域结构重新搜索.重复上述操作直到搜索完所有的邻域解都没有更新最好解,则停止VND算法并输出最好解.

## 2.4 后优化过程

由于VND在搜索过程中具有随机性,会出现车辆在部分HDTW客户处的到达时间早于客户最早时

间窗的情况而产生没有价值的等待. 因此, 提出后优化过程将这类等待时间转化为车辆在停靠点的停靠时长, 从而实现当前路径方案下的车辆停靠调度优化.

### 2.4.1 松弛时差定义

本文基于文献[24]对时差的定义, 假设一条可行路径  $route_i = (V_0, V_1, \dots, V_i, \dots, V_n)$ ,  $V_0$  为配送中心,  $V_i$  为车辆访问的节点, 车辆在  $V_i$  点工作的开始时间必须在区间  $[E_i, L_i]$  之内, 车辆可以提前到达, 但是等到  $E_i$  才开始工作.  $E_0$  和  $L_0$  分别为配送中心的开始时间和关闭时间, 所有车辆均要在  $L_0$  之前回到配送中心.

**定义1** 定义车辆在  $V_i$  点工作的最早完成时间为  $EF_i$ , 计算公式为

$$EF_i = \max(E_i + s_i, EF_{i-1} + t_{i-1,i} + s_i). \quad (28)$$

**定义2** 定义车辆在  $V_i$  点工作的最迟开始时间为  $LS_i$ , 计算公式为

$$LS_i = \min(L_i, LS_{i+1} - t_{i,i+1} - s_i). \quad (29)$$

由于车辆在  $V_0$  点无服务工作,  $s_0 = 0$ , 故有  $EF_0 = E_0, LS_0 = L_0$ . 由  $EF_0, LS_0$  可分别正向、逆向计算出  $route_i$  中各点的  $EF$  和  $LS$  值.

**定义3** 定义车辆在  $V_i$  的松弛时差为  $span_i$ , 计算公式为

$$span_i = LS_i - EF_{i-1} - t_{i-1,i}. \quad (30)$$

### 2.4.2 后优化步骤

step 1: 对于当前解, 找到所有开放的停靠点集合  $\{N_R | y_p = 1, p \in N_P\}$ ;

step 2: 根据停靠点内自提客户的数量从大到小依次排序, 记录到列表  $L$ ;

step 3: 按照列表  $L$  顺序计算停靠点  $p$  的松弛时差, 并更新车辆  $k$  在此点的停靠时长

$$t_{kp} = \lfloor span_i / \tau \rfloor \cdot \tau. \quad (31)$$

### 2.5 新解的接受策略和算法终止准则

本文通过在搜索过程中允许接受部分较差解来增大对搜索空间的扰动, 以减小算法陷入局部最优解的可能性. 本文采用模拟退火算法中的 Metropolis 接受准则<sup>[25]</sup>来控制 MVNS 在一定条件下接受较差解.

在每次循环中, 记录当前的最优解, 并与上一次循环的最优解进行比较. 如果当前的最优解与上一次迭代的最优解相同或更差, 则表明此循环未能找到更好的解. 本文允许最优解最大连续不改进的次数为  $N_{\text{not-improve}}$ , 即当连续  $N_{\text{not-improve}}$  次循环中都未找到

更优解时, 算法将终止.

## 3 实验仿真分析

为了验证本文提出的模型与方法, 基于实际运作场景生成不同规模的算例开展实验仿真分析. 计算机操作系统为 Linux CentOS 9; CPU 为 Intel Ice Lake 3.2 GHz, 32 G 内存; 所有算法均使用 python 语言实现, IDE 为 python 3.9 和 Gurobi 9.5.

### 3.1 参数设置

通过大量统计调查分析, 客户取货行为参数为:  $u_i = 15, \sigma_i^2 = 20, a = 0, b = 30$ . 模型相关参数设置如下:  $\tau = 10 \text{ min}, T_k = 240 \text{ min}, Q_k = 50, F_k = 80, \beta = 2.0, \mu = 5.0$ . 经过大量测试, 算法相关参数设置如下: 最好解连续不改进次数  $N_{\text{not-improve}} = 100$ , VND 最大搜索次数  $I_{\text{max}} = 200, It_{\text{shaking}} = 50, \varphi_1 = 0.55, \varphi_2 = 0.45$ .

### 3.2 测试算例

由于 LMDO-CPB-VMPSP 与经典 LRP 存在显著差异, LRP 标准算例无法用于仿真实验, 因此本文基于我国城市配送的现实场景构造算例集. 构造规则如下: 所有节点基于  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$  的方形区域. 配送中心坐标为  $(5\ 000, 5\ 000)$ , 为保证客户满意度, 任意自提客户至少与一个停靠点的间距不超过  $0.8 \text{ km}$ . 停靠点和客户数量分别位于  $[2, 15]$  和  $[28, 300]$  内.

算例采用  $pX-Y-Z-(R)$  表示,  $X, Y, Z$  分别表示停靠点数量、送货上门客户数量和自提客户数量,  $R$  表示该相同规模的不同算例.

### 3.3 算法有效性实验

1) 与商业求解器对比分析. 首先将 MVNS 在 10 组小规模算例上与商业求解器 Gurobi 进行比较, 运行时间上限设置为  $3\ 600 \text{ s}$ , 运行结果见表 1. 其中: TC 表示总成本(单位: 元), Time 表示算法运行时间(单位: s), Gap 表示与最优解的偏差.

表 1 小规模算例求解结果对比

算例	Gurobi		MVNS		Gap
	TC	Time	TC	Time	
p2-8-20-a	<b>226.3</b>	37.7	<b>226.3</b>	28.7	0
p2-8-20-b	<b>245.9</b>	37.7	<b>245.9</b>	30.7	0
p3-10-30-a	<b>215.8</b>	98.1	<b>215.8</b>	67.5	0
p3-10-30-b	<b>234.1</b>	146.8	<b>234.1</b>	98.7	0
p4-10-40-a	<b>217.1</b>	1 329.9	<b>217.1</b>	60.9	0
p4-10-40-b	<b>239.0</b>	1 234.2	<b>239.0</b>	76.3	0
p4-12-50-a	<b>334.8</b>	2 445.9	<b>334.8</b>	85.0	0
p4-12-50-b	<b>357.5</b>	2 573.4	<b>357.5</b>	92.3	0
p5-15-60-a	—	—	<b>374.2</b>	78.6	—
p5-15-60-b	—	—	<b>387.6</b>	103.2	—

从表1可以看出,在Gurobi求得最优解的8组算例中,MVNS均以更快的速度取得同样解.此外,Gurobi随着算例规模的增加求解时间显著增加,而MVNS求解时间相对比较稳定.特别地,针对较大规模算例p5-15-60-a和p5-15-60-b,Gurobi已无法在给定时间内获得最优解,而MVNS依然可以在较短的时间内完成求解.

2) 算法组件有效性分析.为了验证自适应搜索和后优化机制的有效性,分别将无权衡机制抖动策略算法(MVNS-I)、无后优化机制算法(MVNS-II)与

MVNS算法应用于15组大规模算例,每种算法在各算例下运行10次,得到结果如表2所示.其中:Best表示算法获得的最好解,Avg.表示平均值,Gap表示与所有算法求得最好解的偏差.

从表2可以看出,MVNS在所有算例上均取得最好解.与MVNS-I、MVNS-II相比,最好解分别提高了1.8%和3.2%,平均值分别提高了4.4%和6.4%,算法运行时间平均节约了5.8%和15.0%.可知,自适应搜索和后优化机制均有助于提高算法的求解效率和求解质量.

表2 大规模算例求解结果对比

算例	MVNS-I				MVNS-II				MVNS			
	Best	Avg.	Time	Gap	Best	Avg.	Time	Gap	Best	Avg.	Time	Gap
p3-15-35	<b>319.6</b>	332.6	114.1	0	<b>319.6</b>	339.9	149.3	0	<b>319.6</b>	325.2	109.5	0
p3-25-25	<b>458.4</b>	487.7	119.2	0	<b>458.4</b>	482.7	171.2	0	<b>458.4</b>	468.3	118.2	0
p3-35-15	<b>586.9</b>	665.2	113.7	0	<b>586.9</b>	640.2	199.8	0	<b>586.9</b>	603.7	128.1	0
p5-30-70	<b>555.5</b>	673.6	241.4	0	<b>555.5</b>	637.1	394.3	0	<b>555.5</b>	571.1	297.6	0
p5-50-50	<b>704.0</b>	827.5	366.6	0	718.8	819.6	495.5	2.1	<b>704.0</b>	735.6	436.0	0
p5-70-30	951.8	1002.5	648.3	1.6	960.5	1011.3	678.2	2.5	<b>937.1</b>	984.2	627.8	0
p8-45-105	<b>795.9</b>	882.8	674.7	0	814.2	895.4	729.9	2.3	<b>795.9</b>	823.1	658.8	0
p8-75-75	1175.7	1281.0	785.0	3.0	1184.6	1259.7	841.6	3.8	<b>1141.2</b>	1201.8	709.1	0
p8-105-45	1531.6	1661.9	924.5	2.4	1548.7	1671.2	882.3	3.5	<b>1496.3</b>	1536.1	799.4	0
p10-60-140	896.2	928.0	869.6	4.4	894.7	952.0	1001.3	4.2	<b>858.6</b>	893.3	906.1	0
p10-100-100	1651.0	1752.7	1047.3	2.0	1700.8	1757.6	1074.4	5.1	<b>1618.3</b>	1661.6	1020.3	0
p10-140-60	2057.7	2136.9	1236.9	4.2	2071.8	2142.9	1215.1	4.9	<b>1975.0</b>	2020.5	1106.5	0
p15-90-210	1597.8	1661.5	1156.0	2.6	1645.4	1733.8	1233.5	5.7	<b>1556.7</b>	1613.2	1068.6	0
p15-150-150	2331.1	2439.7	1390.3	2.8	2428.2	2489.3	1529.5	7.1	<b>2267.2</b>	2336.4	1225.2	0
p15-210-90	3153.7	3229.5	1555.3	4.3	3214.4	3278.5	1623.1	6.3	<b>3023.9</b>	3126.7	1413.2	0
Avg.	1251.1	1330.9	749.5	1.8	1273.5	1340.7	814.6	3.2	1219.6	1260.1	708.3	0

3.4 车辆移动停靠自提有效性分析

为验证车辆移动停靠自提交付方式的有效性,开展传统自提和车辆移动停靠自提两类配送模式的对比分析.传统自提模式下客户到自提点自提,采用单位自提成本 $\mu$ 来反映客户到自提柜自提的平均服务成本.同时,为了反映不同单位自提成本下两种自提模式的效果,基于p15-150-150算例开展不同 $\mu$ 值下的对比分析,结果如图3所示.

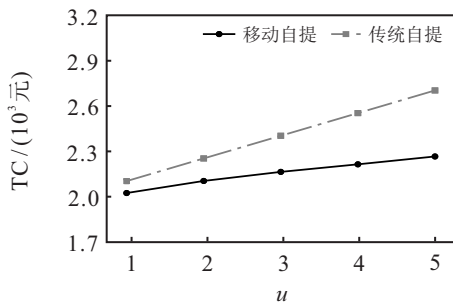


图3 车辆移动停靠自提有效性分析

由图3可知,与传统自提交付方式相比,移动自提可以有效降低总配送成本,并且随着 $\mu$ 值增加,移

动自提模式效果越显著,即随着自提成本的增加,移动自提模式价值越明显.

3.5 灵敏度分析

为探究模型中主要参数对配送系统运营成本的影响以指导管理实践,以具有15个停靠点、300个客户的算例为基础开展关键参数敏感性分析.

1) 调度时长粒度敏感度分析.为了反映车辆停靠调度时长粒度对系统结果和算法的影响,开展 $\tau$ 在取值为5 min、10 min、15 min和20 min情况下的仿真实验,结果如图4所示.

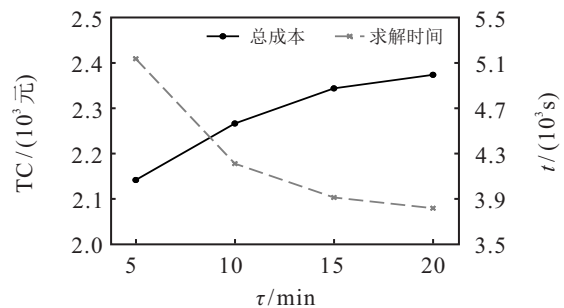


图4 调度时长粒度的敏感度分析

由图4可知,随着 $\tau$ 值的增加,算法求解时间显著下降,但解质量也在不断下降.表明细粒度的 $\tau$ 有助于促进更优调度,但是由于决策空间更加复杂使得求解复杂性增加,带来更长的求解时间.结果表明,在实际的调度过程中,需要兼顾求解质量和求解效率设置合理的调度粒度.

2) 停靠点数量与收费模式敏感度分析.为了研究停靠点对配送系统的影响,开展不同停靠点数量( $|N_P| = 5, 10, 15, 20$ )与计费模式(收费和免费)下的仿真分析.其中:免费模式(R1)为车辆免费停靠,收费模式(R2)为车辆停靠的收费标准为10元/小时.仿真结果如图5所示.

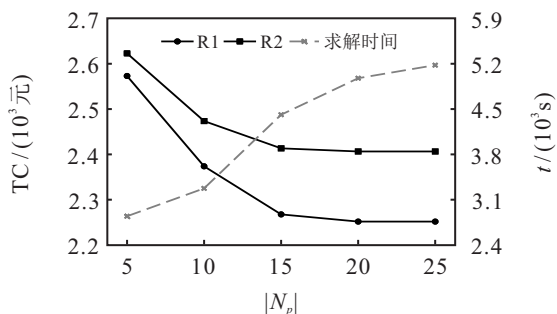


图5 停靠点数量与计费模式的敏感度分析

由图5可知,随着候选停靠点数量的增加,两类计费模式下的总成本均呈下降趋势,并在 $|N_P| \in (15, 20)$ 时配送系统趋于最优状态.对比收费模式和免费模式,显然免费模式有助于实现经济性,成本降低由1.9% ( $|N_P| = 5$ )到6.2% ( $|N_P| = 20$ ).此外,通过对比不同停靠点数量下算法的运行时间可以看出,随着停靠点数量的增加,算法求解时间呈增加趋势.结果表明,候选停靠点数量对配送系统的经济性和算法效率影响显著,丰富的候选停靠点布局有助于促进更优的配送系统,同时也将带来更复杂的求解需求.

## 4 结论

为了构建更经济、高效的最后一公里配送系统,本文面向送货上门和客户自提双重配送需求,提出了车辆移动停靠自提模式,利用车辆开展送货上门的同时,在停靠点停靠等待客户自提以开展双重配送服务.针对该问题,从停靠点选址、停靠时长决策与车辆路径集成优化的视角开展模型构建与算法研究.基于商业求解器和算法组件对比测试表明了所设计的算法具有较好的求解性能.其次,通过移动自提模式、调度时长粒度以及停靠点的仿真分析,得出若干重要结论与管理启示:

1) 移动停靠自提模式有助于提高配送系统的经济性,且随着单位自提成本的增加,效果更加显著.物

流企业可以在自提成本较高的区域引入移动停靠自提模式以降低配送成本.

2) 精细化的停靠调度通过合理规划车辆在停靠点的停靠时长来提高配送系统的经济性,但调度时长粒度越细,算法运行时间越长,企业需要根据实际调度需求合理设置调度粒度.

3) 候选停靠点数量越多越有助于提高配送系统的经济性,城市建设和规划部门可以适当规划或增加收费或免费的城市配送车辆临时停靠点,采取如公共停车位免费限时停靠等措施支持配送车辆灵活停靠,从而提高最后一公里配送效率并降低配送成本.

考虑客户对不同时间窗和交付方式的偏好程度等情况,开展更具现实特征的最后一公里配送优化将是未来可拓展的研究方向.

## 参考文献(References)

- [1] 邮欣. 2022年邮政寄递业务量完成1391亿件[N]. 人民邮电, 2023-01-19(1).
- [2] McLeod F, Cherrett T, Song L Y. Transport impacts of local collection/delivery points[J]. International Journal of Logistics Research and Applications, 2006, 9(3): 307-317.
- [3] Du J H, Wang X. Matching model for multiple delivery methods in last-mile delivery for online shopping[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2022, 2676(1): 556-572.
- [4] 杨聚平, 杨长春, 姚宣霞. 电商物流中“最后一公里”问题研究[J]. 商业经济与管理, 2014(4): 16-22. (Yang J P, Yang C C, Yao X X. Research on the ‘last-mile’ issue in the E-commerce logistics system[J]. Journal of Business Economics, 2014(4): 16-22.)
- [5] Deutsch Y, Golany B. A parcel locker network as a solution to the logistics last mile problem[J]. International Journal of Production Research, 2018, 56(1/2): 251-261.
- [6] 周翔, 许茂增, 吕奇光. 基于顾客点分布的自提点逐渐覆盖选址模型[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(11): 2879-2888. (Zhou X, Xu M Z, Lv Q G. Pickup point gradual covering location model based on customer-points’ distribution[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(11): 2879-2888.)
- [7] 李珍萍, 毛小寸. 多需求多类型自提点选址分配问题[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(11): 2889-2897. (Li Z P, Mao X C. Location and assignment problem of pickup points under multiple types of demands[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(11): 2889-2897.)
- [8] 陈义友, 张锦, 罗建强. 顾客选择行为对自提点选址的影响研究[J]. 中国管理科学, 2017, 25(5): 135-144. (Chen Y Y, Zhang J, Luo J Q. The impact of customers’ choice behavior on pickup point location[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(5): 135-144.)

- [9] 韩珣, 张锦, 陈义友. 基于联合覆盖的自提点服务组合优化问题[J]. 管理学报, 2018, 15(6): 927-935.  
(Han X, Zhang J, Chen Y Y. Service composition of pickup point under cooperative coverage[J]. Chinese Journal of Management, 2018, 15(6): 927-935.)
- [10] 周林, 林云, 王旭, 等. 网购城市配送多容量终端选址与多车型路径集成优化[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(4): 1139-1147.  
(Zhou L, Lin Y, Wang X, et al. Integrated optimization for multiclass terminal location-heterogeneous vehicle routing of urban distribution under online shopping[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(4): 1139-1147.)
- [11] 郭放, 黄宏军, 杨珺. 考虑顾客取货半径的电动汽车路径优化与服务策略研究[J]. 管理工程学报, 2020, 34(1): 154-163.  
(Guo F, Huang H J, Yang J. Study on the electric vehicle routing optimization and service strategy with the consideration of customer self-pickup radius[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2020, 34(1): 154-163.)
- [12] 代颖, 罗荆璇, 杨斐, 等. 带服务半径决策的农村快递系统选址-路径优化[J]. 系统工程, 2023, 41(5): 43-52.  
(Dai Y, Luo J X, Yang F, et al. A location-routing problem in rural delivery system with service radius decisions[J]. Systems Engineering, 2023, 41(5): 43-52.)
- [13] Zhou L, Baldacci R, Vigo D, et al. A multi-depot two-echelon vehicle routing problem with delivery options arising in the last mile distribution[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 265(2): 765-778.
- [14] dos Santos A G, Viana A, Pedroso J P. 2-echelon lastmile delivery with lockers and occasional couriers[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 162: 102714.
- [15] Mancini S, Gansterer M. Vehicle routing with private and shared delivery locations[J]. Computers & Operations Research, 2021, 133: 105361.
- [16] 周林, 朱芳彬, 代应, 等. 多元个性化需求驱动的最后公里配送选址-路径研究[J]. 控制与决策, 2022, 37(10): 2745-2752.  
(Zhou L, Zhu F B, Dai Y, et al. Multiple personalized demands driven last mile delivery location-routing problem[J]. Control and Decision, 2022, 37(10): 2745-2752.)
- [17] Yu V, Jodiawan P, Redi A A N P. Crowd-shipping problem with time windows, transshipment nodes, and delivery options[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 157(2): 102545.
- [18] Dumez D, Lehuédé F, Péton O. A large neighborhood search approach to the vehicle routing problem with delivery options[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2021, 144: 103-132.
- [19] 张锦, 陈义友. 物流“最后一公里”问题研究综述[J]. 中国流通经济, 2015, 29(4): 23-32.  
(Zhang J, Chen Y Y. The review of research on the ‘last mile’ in logistics[J]. China Business and Market, 2015, 29(4): 23-32.)
- [20] 黄凯明, 卢才武, 连民杰. 多层次设施选址-路径规划问题建模及算法[J]. 控制与决策, 2017, 32(10): 1803-1809.  
(Huang K M, Lu C W, Lian M J. Modeling and algorithm for multi-echelon location-routing problem[J]. Control and Decision, 2017, 32(10): 1803-1809.)
- [21] Mladenović N, Hansen P. Variable neighborhood search[J]. Computers & Operations Research, 1997, 24(11): 1097-1100.
- [22] Bräysy O, Gendreau M. Vehicle routing problem with time windows, part I: Route construction and local search algorithms[J]. Transportation Science, 2005, 39(1): 104-118.
- [23] Solomon M M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints[J]. Operations Research, 1987, 35(2): 254-265.
- [24] 潘立军, 符卓. 求解带时间窗车辆路径问题的插入检测法[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(2): 319-322.  
(Pan L J, Fu Z. Insertion detection method for vehicle routing problem with time windows[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2012, 32(2): 319-322.)
- [25] 李珍萍, 周文峰, 张煜炜, 等. 考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题[J]. 控制与决策, 2020, 35(12): 2999-3005.  
(Li Z P, Zhou W F, Zhang Y W, et al. Vehicle routing problem of refined oil secondary distribution considering unloading sequence constraints[J]. Control and Decision, 2020, 35(12): 2999-3005.)

## 作者简介

周林 (1987—), 男, 教授, 博士, 从事智慧物流与供应链、大规模优化等研究, E-mail: zhoulin1205@126.com;

洪凌睿 (2000—), 男, 硕士生, 从事车辆路径优化、物流网络优化等研究, E-mail: hlr1229@stu.cqut.edu.cn;

何华英 (1998—), 女, 硕士, 从事城市配送优化的研究, E-mail: 1761204628@qq.com;

杜建辉 (1990—), 男, 讲师, 博士, 从事公共交通网络优化、智能优化算法等研究, E-mail: jh\_du@cqut.edu.cn.