

考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化方法研究

刘静^a, 王勇^{a,b*}, 阳静^a

(重庆交通大学 a.经济与管理学院 b.绿色物流智能技术重庆市重点实验室, 重庆 400074)

摘要: **目的** 针对传统快递物流即时配送中存在难以准时服务动态客户和配送时效性差等问题, 提出动态订单插入策略和 Time Window 指派策略, 研究考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化问题。**方法** 首先, 结合快递物流即时配送网络的周期性需求和新增订单需求, 构建以物流运营成本最小和车辆使用数目最少的双目标车辆路径优化模型。其次, 设计改进的多目标蚁群优化算法求解优化模型, 该算法通过局部优化策略和外部档案更新机制来增强帕累托优化的求解质量, 进而提出动态订单插入策略和 Time Window 指派策略, 进一步提升算法的整体搜索性能。再次, 将改进的多目标蚁群优化算法与多目标粒子群算法、多目标灰狼优化算法和多目标多元宇宙优化算法进行对比分析, 验证了提出算法的有效性。最后, 结合重庆市某快递物流即时配送网络进行实例优化研究, 并分析探讨了不同服务时间段的划分对物流运营成本、车辆使用数目和惩罚成本等指标的影响。**结果** 优化后的物流运营成本下降 48%, 车辆使用数目减少 12 辆, 将配送中心服务时间分为 3 个时间段的优化方案效果最好。**结论** 提出的模型和算法有助于降低物流运营成本并减少配送车辆的使用数目, 为考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化提供方法支持和决策参考。

关键词: 动态新增订单需求; 即时配送; Time Window 指派; 改进的多目标蚁群优化算法; 帕累托优化解
中图分类号: U49; TB48 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2025)05-0197-12
DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.05.25

On-demand Delivery Optimization Methods for Express Logistics Services Considering Dynamic New Order Demands

LIU Jing^a, WANG Yong^{a,b*}, YANG Jing^a

(a. School of Economics and Management, b. Chongqing Key Laboratory of Intelligent Logistics Network, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a dynamic order insertion strategy and a time window assignment strategy to study the optimization problem of express logistics on-demand delivery considering dynamic new order demands, so as to solve problems of difficulty in providing timely services to dynamic customers and poor delivery timeliness in traditional express logistics on-demand delivery. Firstly, a bi-objective vehicle routing optimization model was constructed to minimize the logistics operation cost and the number of vehicles used, considering the periodic demand of the express logistics on-demand delivery network and the new order demand. Secondly, an improved multi-objective ant colony algorithm was designed to solve the optimization model. This algorithm enhanced the quality of Pareto optimal solutions through local optimization strategies and external archive update mechanisms. And a dynamic order insertion strategy and

收稿日期: 2024-12-26

基金项目: 国家自然科学基金 (72371044); 重庆市教委科学技术研究重大项目 (KJZD-M202300704); 巴渝学者青年项目 (YS2021058)

*通信作者

a time window assignment strategy was further proposed to improve the overall search performance of the algorithm. Thirdly, the improved multi-objective ant colony algorithm was compared and analyzed with the multi-objective particle swarm optimization algorithm, the multi-objective grey wolf algorithm, and the multi-objective multi-verse algorithm, verifying the effectiveness of the proposed algorithm. Finally, an instance optimization study was conducted based on a certain express logistics on-demand delivery network in Chongqing, and the impact of different service time period divisions on indicators such as logistics operation cost, and the number of vehicles used, and penalty cost were analyzed and discussed. The results showed that the logistics operation cost was reduced by 48% after optimization, and the number of vehicles used was reduced by 12. The optimization scheme that divided the service time of the distribution center into three time periods had the best effect. In conclusion, the model and algorithm proposed in this paper are helpful to reduce the logistics operation cost and the number of vehicles used, providing method support and decision-making reference for the optimization of express logistics on-demand delivery considering dynamic new order demands.

KEY WORDS: dynamic new order demands; on-demand delivery; time window assignment; improved multi-objective ant colony optimization algorithm; Pareto optimization

随着城市化进程的加速和人们生活节奏的加快,消费者对便捷、高效生活需求的要求越来越高,“懒人经济”和“万物到家”等新消费趋势推动即时配送行业的蓬勃发展。动态变化的客户需求使得即时配送行业面临新的挑战,尤其是在午晚餐时段、节假日或网络购物促销活动期间,动态配送订单量在短时间内急剧增加^[1],导致即时配送过程中难以有效满足客户的服务需求,加大了即时配送的“准时制”难度,增加了物流运营总成本^[2-3]。为了提高即时配送效率,降低物流配送运营成本,合理划分配送服务周期与高效处理动态新增订单需求显得尤为重要。国内外学者针对考虑动态新增订单需求的车辆路径问题和快递物流即时配送的车辆路径问题进行了一系列研究。

在考虑动态新增订单需求的车辆路径问题研究方面,李想等^[4]以物流运营总成本最低、碳排放量最少、生鲜产品新鲜度最高为目标,构建动态新增订单需求下的冷链物流车辆路径优化模型,并设计改进的模拟退火算法对模型进行求解;张金良等^[5]研究客户需求动态变动的车辆路径问题,以总成本最小化为目标建立优化模型,设计了改进的遗传算法将动态车问题转化为静态问题进行求解;Wang等^[6]以最小化物流运营成本和配送车辆使用数目为目标构建双目标优化模型,并提出一种考虑动态订单需求插入策略的非支配遗传算法求解模型;Wang等^[7]构建最小化总运营成本和最大化客户满意度的双目标优化模型,并结合车辆合作策略,设计非支配排序-大规模邻域搜索混合算法,研究动态订单需求下的车辆路径问题;Li等^[8]以车辆行驶距离最小化为优化目标建立模型,研究客户订单需求动态变化的车辆路径问题,并提出自适应遗传算法对问题进行求解。Alvarez等^[9]研究动态客户订单需求的车辆路径问题,构建包含惩罚成本和配送成本的物流成本最小化模

型,并设计改进的智能算法求解模型。由上述文献可知,国内外相关学者在考虑动态订单需求的车辆路径问题的模型构建和求解算法设计方面进行了系统研究,为考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化模型构建和算法设计提供了理论支撑和研究方法切入。

在快递物流即时配送的车辆路径问题研究方面,Li等^[10]结合客户多时间窗的服务需求,以最小化总成本为优化目标建立模型,应用智能算法进行模型求解;李楠等^[11]研究客户需求周期性的车辆路径问题,构建以总配送成本最小化为目标的机会约束规划模型,并提出一种两阶段混合优化算法求解模型;Wang等^[12]考虑灾难响应时部分客户需要多次救援的情况,构建惩罚成本和等待时间最小化的双目标优化模型,并设计改进的自适应大规模邻域搜索算法求解模型;邱晗光等^[13]基于服务利润最大化构建城市配送动态订单的车辆路径优化模型,设计贪婪算法进行模型求解,并根据客户的动态订单需求变化分配服务时间窗;Hoogeboom等^[14]为了减少车辆配送时间和降低违反客户服务时间窗风险,提出客户时间窗指派策略,有效减少违反时间窗的情况;Wang等^[15]研究考虑时间窗指派的应急物流网络优化问题,构建总运营成本、配送时间和车辆数目最小化的多目标优化模型,提出多目标自适应大规模邻域搜索-分割混合算法求解模型;Côté等^[16]提出一种基于客户优先访问顺序的时间窗指派策略,构建旨在最小化配送成本和惩罚成本的多周期车辆路径优化模型,并提出改进的自适应大规模邻域搜索算法进行模型求解。上述文献主要从周期性配送和客户时间窗指派 2 个方面研究快递物流即时配送的车辆路径问题,而结合动态新增订单需求研究快递物流即时配送的优化方法还有待深入拓展。

本文研究考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化问题,以物流运营总成本和车辆使用数目

最小化为目标构建双目标数学规划模型, 进而设计改进的多目标蚁群优化算法 (Improved Multi-Objective Ant Colony Optimization, IMOACO) 进行求解。该算法通过设计局部优化策略和外部档案更新机制以改善帕累托优化的质量, 同时提出动态订单插入策略和时间窗指派策略, 进一步提升算法的寻优性能。将该算法与多目标粒子群算法、多目标灰狼优化算法和多目标多元宇宙优化算法进行对比, 验证了提出算法的有效性。最后, 结合实际案例研究考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化方案, 并分析探讨不同服务时间段划分对相关指标优化结果的影响, 为考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化问题研究提供新思路。

1 问题描述

当前, 快递物流即时配送行业呈现高峰时段配送时效差、客户服务时间窗需求多、配送服务不及时等特点^[3,17]。考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化研究旨在设计更加高效的快递物流即时配送网络, 以降低快递物流企业的运营成本。本文研究的客户需求包括客户服务的周期性需求和动态新增订单需求, 研究过程中需要结合客户的服务时间窗特征

以及新增动态订单需求, 为客户指派合适的服务时间窗, 在即时配送线路中高效插入动态新增订单需求, 进而降低物流运营成本, 实现快递物流即时配送线路的合理优化。考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化前后对比如图 1 所示。

图 1a 为优化前的快递物流即时配送网络, 部分客户存在多个服务时间窗需求, 由于配送车辆的不合理调度, 导致车辆无法在客户要求的时间窗内到达, 产生了违反客户时间窗的现象。针对网络中的动态新增订单需求, 配送中心通常单独派遣车辆为其进行配送服务。优化后的配送网络如图 1b 所示, 基于周期性客户时间窗需求, 将配送中心的服务时间划分为多个时间段, 车辆在不同时间段共享, 将动态新增订单合理插入配送路径, 结合时间窗指派策略, 进一步减少车辆使用数量, 消除车辆违反客户时间窗的现象。

2 双目标数学规划模型

2.1 符号定义

本研究所构建模型的相关集合、变量及决策变量的定义分别见表 1~3。

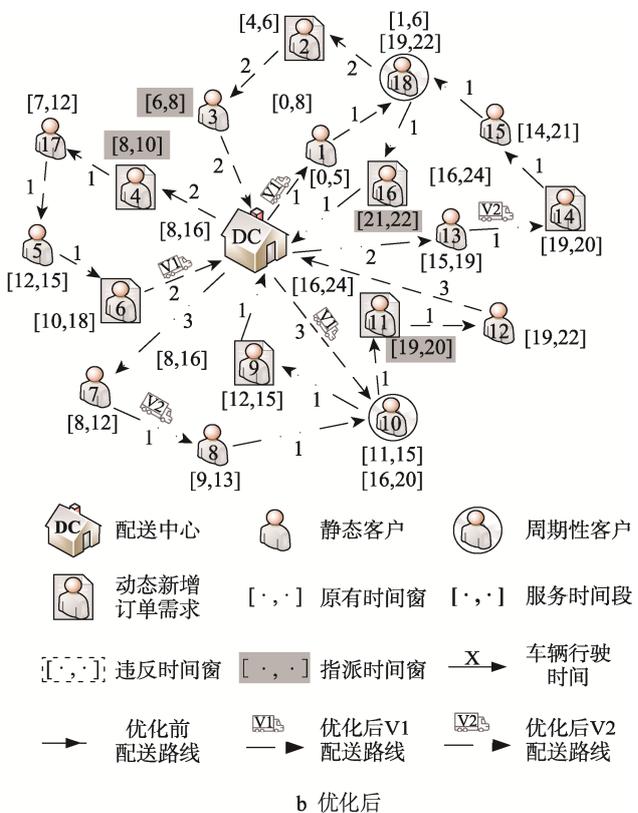
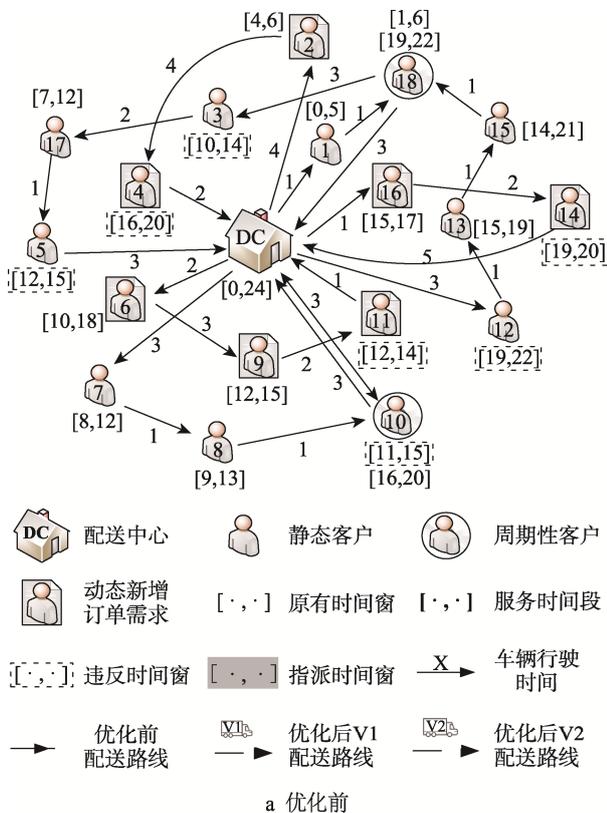


图 1 考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化前后对比
Fig.1 Comparison before and after optimization of on-demand delivery for express logistics services considering dynamic new order demands

表 1 集合定义
Tab.1 Set definition

集合	定义
C_s	静态客户集合, $a \in C_s$
C_d	动态新增订单需求客户集合, $b \in C_d$
C	客户集合, $C = C_s \cup C_d$
I	客户与配送中心的集合, $I = C \cup \{0\}$, 其中 0 表示配送中心
V	配送车辆的集合, $v \in V$
T	一个工作周期内服务时间段的集合, $t \in T$
F_v^t	在第 t 个服务时间段内, 配送车辆 v 的配送路径集合
S_{vn}^t	在第 t 个服务时间段内, 配送车辆 v 沿配送路线 n 服务的客户集合, $t \in T, v \in V, n \in F_v^t$

表 2 变量定义
Tab.2 Variable definition

变量	定义
D_{ij}	节点 i 与节点 j 之间的距离, $i, j \in I, i \neq j$
f	车辆每公里耗油量 (L/km)
p	汽油的价格 (元/L)
Q_v	配送车辆 v 的最大载质量, $v \in V$
q_i	客户 i 在一个工作周期的需求量, $i \in C$
q_i^t	客户 i 在第 t 个服务时间段的需求量, $t \in T, i \in C$
M_v	配送车辆 v 的年维护成本
N	1a 内的工作周期数
λ	车辆早到或晚到客户点的单位时间惩罚成本
φ	单位时间指派成本
ω	单位距离动态附加成本
$[E_0^t, L_0^t]$	在第 t 个服务时间段内, 配送中心的服务时间窗, $t \in T$
$[e_i^t, l_i^t]$	在第 t 个服务时间段内, 客户 i 的原始服务时间窗, $t \in T, i \in C$
$[g_i^t, h_i^t]$	在第 t 个服务时间段内, 为客户 i 指派的服务时间窗, $t \in T, i \in C$
DT_{ivn}^t	在第 t 个服务时间段内, 配送车辆 v 沿路径 n 行驶离开节点 i 的时间, $t \in T, v \in V, n \in F_v^t, i \in I$
AT_{ivn}^t	在第 t 个服务时间段内, 配送车辆 v 沿路径 n 行驶, 到达节点 i 的时间, $t \in T, v \in V, n \in F_v^t, i \in I$
WT_{ivn}^t	在第 t 个服务时间段内, 配送车辆 v 沿路径 n 行驶, 在节点 i 处等待时间, $t \in T, v \in V, n \in F_v^t, i \in I$
TT_{ijvn}^t	在第 t 个服务时间段内, 配送车辆 v 沿路径 n 从节点 i 到节点 j 的行驶时间, $t \in T, v \in V, n \in F_v^t, i, j \in I, i \neq j$
$ C $	客户点总数
$ F_v^t $	在第 t 个服务时间段内, 配送车辆 v 的服务路径总数, $t \in T, v \in V$
$ S_{vn}^t $	在第 t 个服务时间段内, 配送车辆 v 沿路径 n 服务的客户点总数, $t \in T, v \in V, n \in F_v^t$
B	一个足够大的数

表 3 决策变量定义
Tab.3 Decision variable definition

决策变量	定义
μ_i^t	在第 t 个服务时间段内, 若客户 i 被指派新的时间窗, $\mu_i^t = 1$; 否则, $\mu_i^t = 0, t \in T, i \in C$
z_v^t	在第 t 个服务时间段内, 若配送车辆 v 被用于服务客户, $z_v^t = 1$; 否则, $z_v^t = 0, t \in T, v \in V$
y_{ijvn}^t	在第 t 个服务时间段内, 若配送车辆 v 沿路径 n 从节点 i 行驶到节点 j , $y_{ijvn}^t = 1$; 否则, $y_{ijvn}^t = 0, t \in T, v \in V, n \in F_v^t, i, j \in I, i \neq j$
x_{ivn}^t	在第 t 个服务时间段内, 配送车辆 v 沿路径 n 服务客户 i , $x_{ivn}^t = 1$; 否则, $x_{ivn}^t = 0, t \in T, v \in V, n \in F_v^t, i \in C$
δ_k	若客户 k 需求具有周期性, $\delta_k = 1$; 否则, $\delta_k = 0, k \in C_s$
ψ_b^t	在第 t 个服务时间段内, 若新增订单需求 b 被插入路径, $\psi_b^t = 1$; 否则, $\psi_b^t = 0, t \in T, b \in C_d$

2.2 模型构建

本文以物流运营总成本 T_C 和配送车辆使用数 Z 最小为目标, 构建考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化模型, 见式 (1) ~ (2)。

$$\text{Min } T_C = T_{C1} + T_{C2} + T_{C3} + T_{C4} + T_{C5} \quad (1)$$

$$\text{Min } Z = \max_{t \in T} \left\{ \min_{v \in V} z_v^t \cdot \min \left(\sum_{n \in F_v^t} \sum_{j \in C} y_{0jvn}^t, 1 \right) \right\} \quad (2)$$

式 (1) 中, T_{C1} 表示车辆的配送成本, 表达式见式 (3)。

$$T_{C1} = \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{n \in F_v^t} \sum_{i, j \in I, i \neq j} y_{ijn}^t \cdot D_{ij} \cdot f \cdot p \quad (3)$$

T_{C2} 表示车辆的维护成本, 表达式见式 (4)。

$$T_{C2} = \sum_{v \in V} \frac{M_v}{N} \cdot \max_{t \in T} \left\{ \min_{v \in V} z_v^t \cdot \min \left(\sum_{n \in F_v^t} \sum_{j \in C} y_{0jvn}^t, 1 \right) \right\} \quad (4)$$

T_{C3} 表示车辆早到或晚到客户点的惩罚成本, 表达式见式 (5)。

$$T_{C3} = \lambda \cdot \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{n \in F_v^t} \sum_{i \in C} x_{ivn}^t \cdot \max \{ e_i^t - AT_{ivn}^t, AT_{ivn}^t - l_i^t, 0 \} + \lambda \cdot \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{n \in F_v^t} \sum_{i \in C} \mu_i^t \cdot \max \{ g_i^t - AT_{ivn}^t, AT_{ivn}^t - h_i^t, 0 \} \quad (5)$$

T_{C4} 表示时间窗指派成本, 表达式见式 (6)。

$$T_{C4} = \varphi \cdot \sum_{t \in T} \sum_{i \in C} \mu_i^t \cdot \min \{ |e_i^t - g_i^t|, |h_i^t - l_i^t| \} \quad (6)$$

T_{C5} 表示动态附加成本, 表达式见式 (7)。

$$T_{C5} = \omega \cdot \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{n \in F_v^t} \sum_{i, j \in I} \sum_{b \in C_d} \psi_b^t \cdot (y_{ibvn}^t \cdot D_{ib} + y_{bjvn}^t \cdot D_{bj} - D_{ij}) \quad (7)$$

配送车辆路径优化问题约束见式 (8) ~ (18)。

$$\sum_{v \in V} \sum_{n \in F_v^t} x_{ivn}^t = 1, \forall t \in T, i \in C \quad (8)$$

$$\sum_{j \in C} y_{0jvn}^t = \sum_{j \in C} y_{j0vn}^t = 1, \forall t \in T, v \in V, n \in F_v^t \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I} y_{ijvn}^t - \sum_{i \in I} y_{jivn}^t = 0, \forall t \in T, v \in V, n \in F_v^t, j \in I \quad (10)$$

$$\sum_{n \in F_v^t} \sum_{j \in C} y_{0jvn}^t = |F_v^t|, \forall t \in T, v \in V \quad (11)$$

$$\sum_{i, j \in S_{vn}, i \neq j} y_{ijvn}^t \leq |S_{vn}^t| - 1, \forall t \in T, v \in V, n \in F_v^t \quad (12)$$

$$DT_{ivn}^t + TT_{ijvn}^t - B(1 - y_{ijvn}^t) \leq AT_{jvn}^t, \quad (13)$$

$$\forall t \in T, v \in V, n \in F_v^t, i, j \in I, i \neq j \quad (13)$$

$$DT_{ivn}^t + TT_{ijvn}^t + B(1 - y_{ijvn}^t) \geq AT_{jvn}^t, \quad (14)$$

$$\forall t \in T, v \in V, n \in F_v^t, i, j \in I, i \neq j \quad (14)$$

$$AT_{ivn}^t + WT_{ivn}^t + TT_{ijvn}^t - B(1 - y_{ijvn}^t) \leq AT_{jvn}^t, \quad (15)$$

$$\forall t \in T, v \in V, n \in F_v^t, i, j \in I, i \neq j \quad (15)$$

$$AT_{ivn}^t + WT_{ivn}^t + TT_{ijvn}^t + B(1 - y_{ijvn}^t) \geq AT_{jvn}^t, \quad (16)$$

$$\forall t \in T, v \in V, n \in F_v^t, i, j \in I, i \neq j \quad (16)$$

$$E_0^t \leq DT_{0vn}^t < AT_{0vn}^t \leq L_0^t, \forall t \in T, v \in V, n \in F_v^t \quad (17)$$

$$AT_{0vn}^t \leq DT_{0v(n+1)}^t, \forall t \in T, v \in V, n \in F_v^t, n \neq |F_v^t| \quad (18)$$

其中: 式 (8) 表示在每个服务时间段内, 每个客户只被访问一次; 式 (9) 表示配送车辆行驶路径从配送中心出发, 完成配送任务后最终回到配送中心; 式 (10) 表示节点流量守恒; 式 (11) 表示配送车辆的行驶路径数目; 式 (12) 用于消除子回路; 式 (13) ~ (16) 限制了配送车辆到达节点的时间; 式 (17) 表示配送车辆沿着任意一条路径出发和返回配送中心的时间均在其服务时间窗内; 式 (18) 保证了配送车辆服务时间的连续性。

考虑动态新增订单需求的路径优化约束见式 (19) ~ (24)。

$$\begin{cases} \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{n \in F_v^t} x_{kvn}^t = 1, \forall k \in C_s & \text{if } \delta_k = 0 \\ \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{n \in F_v^t} x_{kvn}^t > 1, \forall k \in C_s & \text{if } \delta_k = 1 \end{cases} \quad (19)$$

$$\sum_{t \in T} q_i^t = q_i, \forall i \in C_s \quad (20)$$

$$\sum_{a \in C_s} x_{avn}^t \cdot (\delta_a^t \cdot q_a^t + \max \{ |\delta_a^t - 1|, -\delta_a^t \} \cdot q_a) + \sum_{b \in C_d} \psi_b^t \cdot x_{bvn}^t \cdot q_b \leq Q_v, \forall t \in T, v \in V, n \in F_v^t \quad (21)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{n \in F_v^t} \mu_i^t \cdot x_{ivn}^t \leq 1, \forall t \in T, i \in C \quad (22)$$

$$\mu_i^t \cdot g_i^t \leq \mu_i^t \cdot AT_{ivn}^t \leq \mu_i^t \cdot h_i^t, \quad (23)$$

$$\forall t \in T, v \in V, n \in F_v^t, i \in C \quad (23)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{n \in F_v^t} \sum_{a \in C_s} x_{avn}^t \cdot (\delta_a^t + \max \{ |\delta_a^t - 1|, -\delta_a^t \}) + \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{n \in F_v^t} \sum_{b \in C_d} \psi_b^t \cdot x_{bvn}^t = |C| \quad (24)$$

其中: 式 (19) 表示周期性客户需求在一个工作周期内被多次访问; 式 (20) 表示周期性客户在每个服务时间段的需求量之和等于该客户点的需求总量; 式 (21) 表示在任意时间段内, 任意一条配送路径上所有客户的需求量不超过配送车辆的最大载质量; 式 (22) 限制任意时间段内, 每个客户只接受一次时间窗指派; 式 (23) 表示应在指派的时间窗内对客户进行服务; 式 (24) 表示服务客户点的总数目。

决策变量见式 (25) ~ (30)。

$$\mu_i^t = \{0, 1\}, \forall t \in T, i \in C \quad (25)$$

$$z_v^t = \{0, 1\}, \forall t \in T, v \in V \quad (26)$$

$$y_{ijvn}^t = \{0, 1\}, \forall t \in T, v \in V, n \in F_v^t, i, j \in I, i \neq j \quad (27)$$

$$n \in F_v^t, i, j \in I, i \neq j \quad (27)$$

$$x'_{ivm} = \{0,1\}, \forall t \in T, v \in V, n \in F'_v, i \in C \quad (28)$$

$$\delta_k = \{0,1\}, \forall k \in C_s \quad (29)$$

$$\psi'_b = \{0,1\}, \forall t \in T, b \in C_d \quad (30)$$

3 改进的多目标蚁群优化算法

针对考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化模型, 本文提出 IMOACO 算法进行求解。首先, 根据客户时间窗分布特征确定配送中心的服务时间段; 其次, 在不同的服务时间段内应用 IMOACO 算法优化配送路径, 在算法搜索过程中采用局部优化策略增强算法的寻优能力^[18], 并设计外部档案更新机制防止迭代过程中优质解丢失, 进而提出动态订单插入策略和时间窗指派策略; 最后, 通过非支配排序确定最终配送方案。IMOACO 算法具体流程如图 2 所示, 其中: g 表示蚂蚁个体, m 表示蚂蚁数量, Run 表示算法当前迭代次数, max_Run 表示算法最大迭代次数。由图 2 可知, 本文提出的 IMOACO 算法设计了基于蚂蚁数量的局部优化策略和外部档案更新机制, 提高了初始解的多样性和优化解获取的可靠性, 并在算法主流程设计过程中集成动态订单插入策略和时间窗指派策略, 进而提高了算法收敛性和算法全局搜索能力。算法主流程计算过程复杂度为 $O(g)$, 由于算法设计过程集成了基于蚂蚁数量的局部优化过程, 本文建议算法的复杂度为 $O(mg)$ 。

3.1 IMOACO 算法

3.1.1 外部档案更新

为避免因外部档案容量限制导致优质解丢失的问题, 通过设计一种外部档案更新机制, 存储蚂蚁在迭代过程中寻找到的非支配解。首先对迭代产生的解集进行非支配排序, 并选出非劣解集。然后判断非劣解集与外部档案的解之间的支配关系, 若非劣解集中的某个解与外部档案的解不存在任何支配关系, 则将该解存入外部档案; 若非劣解集中的某个解被外部档案的解支配, 则该解不存入外部档案; 若非劣解集中的某个解支配外部档案的解, 则将外部档案中的原解删除并将该解存入档案。外部档案更新机制的伪代码如下。

输入: 当前迭代产生的解集, 外部档案 T , T 的最大容量 max_num

输出: 更新后的外部档案 T

- 1: 对迭代产生的解集进行非支配排序, 获取非劣解集 S_{run}
- 2: **for** $i = 1: |S_{run}|$
- 3: **for** $j = 1: |T|$
- 4: **if** S_{run}^i 支配 T_j **then** // S_{run}^i 表示 S_{run} 中的第 i 个解, T_j 表示 T 中的第 j 个解
- 5: $T = T / \{T_j\} \cup \{S_{run}^i\}$
- 6: **else** T_j 支配 S_{run}^i
- 7: 保持 T 不变

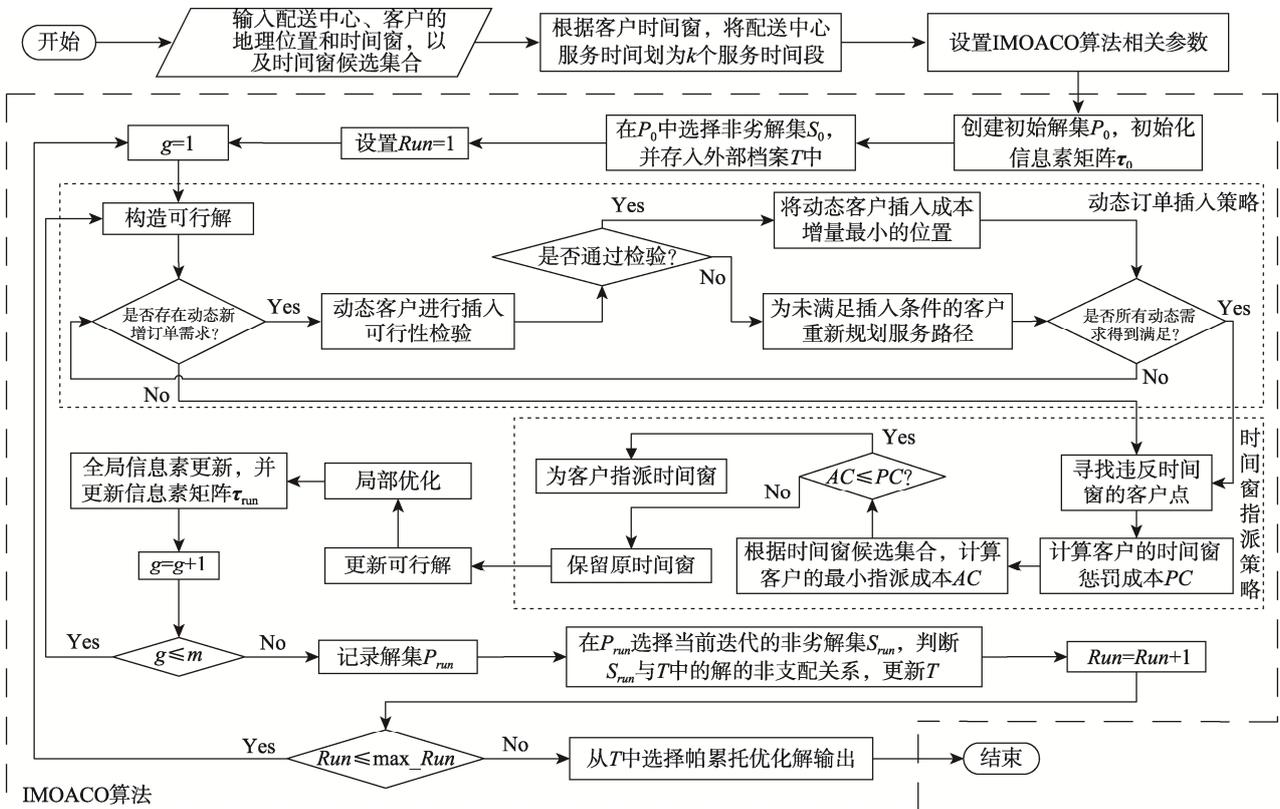


图 2 IMOACO 算法流程
Fig.2 Flowchart of IMOACO algorithm

```

8:     else  $S_{run}^i$  与  $T_j$  不存在支配关系
9:  $T = T \cup \{S_{run}^i\}$ 
10:    end if
11:  end for
12: end for
13: if  $|T| > \max\_num$  then
14:  repeat
15:    计算  $T$  中每个解的拥挤距离
16:    删除拥挤度值小的解
17:  until  $|T| \leq \max\_num$ 
18: end if
    
```

3.1.2 帕累托优化解选择

基于非支配排序^[19]和拥挤度距离^[20]计算, 从而选择帕累托最优解。遍历空间中的所有个体并进行快速非支配排序, 通过比较相互之间的支配关系, 将解集划分为不同的非支配层级。同一层级中的解之间互不支配, 而更高层级的解可以支配低层级的解。层级最高的非支配解不被其他层级的解支配, 进而构成帕累托最优前沿。在帕累托前沿中, 根据式 (31) 计算个体的拥挤度距离 c_i , 选择拥挤度距离大的个体作为帕累托最优解输出。

$$c_i = \sum_{s=1} \frac{F_{i+1}^s - F_{i-1}^s}{\max F_i^s - \min F_i^s} \quad (31)$$

式中: F_i^s 为个体 i 的第 s 个目标函数值。

3.2 算法检验

为了验证本文所提算法的有效性, 将其与多目标粒子群 (Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO) 算法^[21]、多目标灰狼优化 (Multi-Objective Grey Wolf Optimizer, MOGWO) 算法^[22]和多目标多元宇宙优化 (Multi-Objective Multi-Verse Optimization, MOMVO) 算法^[23]进行对比分析。本文从 Gehring & Homberger Benchmark 数据集中选取 4 组具有时间窗约束的车辆路径规划问题 (Vehicle Routing Problems with Time Windows, VRPTW) 标准算例, 每组算例包含 5 个数据集, 并对静态客户、周期性客户和动态新增订单需求客户数目进行不同比例的设置。算例数据集特征如表 4 所示。

根据现有研究^[21-24], 算法相关参数设置详见表 5。应用表 5 中的 4 种算法将每组算例分别运算 15 次, 记录不同算例的最佳运营成本、车辆使用数目和求解时间进行对比, 如表 6 所示。

表 4 算例数据集特征

Tab.4 Characteristics of datasets in instances

算例	数据集	静态客户 数目/个	周期性客户 数目/个	新增订单客户 数目/个	车辆容量/ kg
1~5	C1_2_1、C1_2_2、C1_2_3、C1_2_4、RC1_2_1	100	40	60	200
6~10	C1_2_5、C1_2_6、C1_2_7、C1_2_8、RC1_2_2	90	40	70	200
11~15	C2_2_1、C2_2_2、C2_2_3、C2_2_4、RC2_2_1	120	20	60	200
16~20	C2_2_5、C2_2_6、C2_2_7、C2_2_8、RC2_2_2	100	20	80	200

表 5 算法相关参数设置

Tab.5 Related parameter settings of algorithms

算法	参数	符号	数值
IMOACO	信息素启发式因子	α	1
	期望启发式因子	β	2
	全局信息素挥发系数	ρ	0.85
	最大迭代次数	\max_Run	200
	种群规模	$popsiz$	100
MOPSO	惯性权重	ω_{max}	0.6
		ω_{min}	0.01
	学习因子	c_1	1
		c_2	1
	最大迭代次数	\max_Run	200
MOGWO	种群规模	$popsiz$	100
	最大迭代次数	\max_Run	200
	种群规模	$popsiz$	100
MOMVO	虫洞存在概率	WEP_{min}	0.2
		WEP_{max}	1
	旅行距离速率	TDR_{min}	0
		TDR_{max}	0.4
	开采度	P	6
	最大迭代次数	\max_Run	200
	种群规模	$popsiz$	100

应用本文提出的 IMOACO 算法计算的运营成本分别与其他 3 种多目标算法进行 t 检验和 p 值检验分析, 结果表明, IMOACO 算法与其他 3 种算法得到的结果存在显著差异。在运营成本方面, IMOACO 算法求解得到的运营成本均值为 2 437.1 元, 相比 MOPSO、MOGWO、MOMVO 算法分别降低 22.5%、10.1%和 11.5%; 在车辆使用数目方面, IMOACO 算法求解得到的车辆使用数目最少; 在求解时间方面, IMOACO 的平均求解时间为 313.6 s, 与其他 3 种算法相比具有明显优势。由表 6 可知, 本文建议算法可以在低于其他 3 种算法的求解时间内获取优于其他 3 种算法的运营成本和车辆使用数, 证明本文建议算法相比其他 3 种算法具有较好的算法收敛性。研究结果进一步表明, 本文提出的 IMOACO 算法在求解考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化问题方面具有更好的寻优能力。

4 实例分析

4.1 实例数据

以重庆市某快递物流配送中心 (DC) 及其服务

表6 不同算法优化结果对比
Tab.6 Comparison of optimization results of different algorithms

算例	IMOACO			MOPSO			MOGWO			MOMVO		
	运营成本/元	车辆使用数/辆	求解时间/s	运营成本/元	车辆使用数/辆	求解时间/s	运营成本/元	车辆使用数/辆	求解时间/s	运营成本/元	车辆使用数/辆	求解时间/s
1	2 706.4	8	304.4	3 480.3	8	398.2	2 898.6	8	395.7	2 854.6	9	315.7
2	2 879.4	7	315.9	2 910.8	9	318.7	3 329.4	7	316.1	3 079.4	8	437.32
3	3 504.1	9	325.6	3 755.3	10	340.8	3 563.2	9	328.9	3 850.8	10	325.4
4	3 691.4	9	31.4	4 010.9	11	329.6	3 722.9	11	312.6	4 192.8	10	326.4
5	3 908.4	11	323.1	4 778.6	11	304.2	4 274.8	10	308.1	4 167.1	10	307.6
6	2 559.5	8	346.1	3 160.4	9	340.4	2 858.9	9	350.4	2 874.3	8	353.9
7	2 572.1	7	352.1	3 088.4	8	344.6	2 833.4	8	347.2	2 963.4	7	359.6
8	3 472.2	9	387.9	4 179.2	11	387.7	3 664.1	9	378.5	3 675.4	10	378.7
9	3 355.7	9	375.1	3 981.2	10	374.2	3 671.6	9	382.9	3 692.1	9	427.2
10	3 594.2	9	337.9	4 334.4	11	392.1	4 164.1	11	396.9	3 811.1	10	417.8
11	1 378.1	3	243.7	1 983.9	4	267.3	1 455.8	5	401.3	1 992.7	4	321.3
12	1 935.1	3	268.3	2 710.4	5	273.3	2 250.4	4	279.1	2 044.8	4	278.9
13	1 857.5	5	295.7	2 977.7	6	310.7	2 294.5	6	466.7	2 416.3	5	315.4
14	2 020.7	5	336.9	2 645.1	6	342.5	2 465.4	5	304.9	2 289.1	5	246.7
15	1 430.3	3	254.5	1 987.9	3	263.81	1 463.9	3	297.3	1 461.5	3	282.7
16	1 354.4	3	277.6	2 063.6	4	290.9	1 475.6	4	306.1	1 678.8	3	300.1
17	1 669.0	4	330.7	3 185.5	5	312.6	2 286.4	5	350.9	2 370.8	5	306.1
18	1 668.9	4	313.2	2 622.6	5	357.1	2 044.4	4	353.9	2 096.8	5	437.4
19	1 804.2	4	284.6	2 727.2	4	354.2	1 920.6	5	343.1	2 133.1	5	355.9
20	1 380.9	3	284.4	2 309.7	4	295.1	1 578.8	4	270.7	1 460.1	3	304.4
均值	2 437.1	7	313.6	3 144.7	8	330.0	2 710.8	7	344.6	2 755.3	7	340.0
<i>t</i> 值	—			-9.93			-6.98			-8.0		
<i>p</i> 值	—			2.9×10^{-9}			5.9×10^{-7}			8.3×10^{-8}		

的110个客户点(C1~C73为静态客户, C74~C110为动态新增订单需求客户)为例,对考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化问题进行实例研究,配送中心和客户点的具体地理位置分布如图3所示。结合相关文献和多次实验结果^[6,21,24],模型和算法相关参数设置如表7所示。

4.2 优化结果

基于客户时间窗数据分布特征,将配送中心的服务时间窗划分为0—8时、8—16时和16—24时共3个时间段,应用提出的IMOACO算法对考虑动态新

增订单需求的快递物流即时配送优化模型进行求解,得到优化前后物流运营成本、车辆使用数目和惩罚成本等相关指标,结果如图4所示。

由图4可知,优化后的快递物流即时配送网络有效降低了运营成本和车辆使用数目。其中,配送成本降低1 837.7元,车辆维护成本减少493.1元,违反客户的服务时间从15.4h降至2.1h,惩罚成本节约159.6元,运营成本下降48%,车辆使用数目减少12辆,同时减少4条车辆行驶路径。表8为应用动态订单插入策略后的快递物流即时配送优化方案。

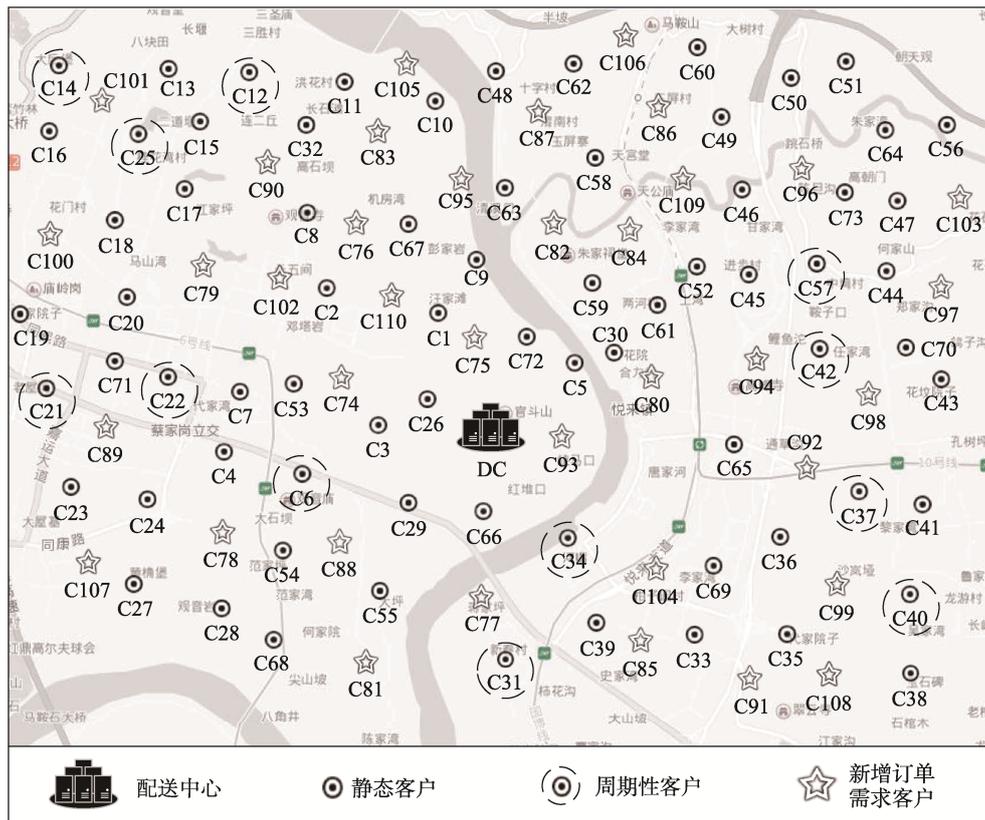


图 3 配送中心与客户的地理分布

Fig.3 Geographical distribution map of distribution center and customers

表 7 实验参数设置

Tab.7 Parameter settings in experiment

参数	含义	取值	参数	含义	取值
f	车辆耗油量 ($L \cdot km^{-1} \cdot 辆^{-1}$)	0.15	p	汽油价格 (元/L)	8
λ	单位时间惩罚成本 (元/h)	12	Q	车辆最大载质量 (kg)	400
φ	单位时间指派成本 (元/h)	6	M	车辆年维护成本 (元/辆)	15 000
ω	单位距离附加成本 (元/km)	10	N	1a 内的工作周期数	365
α	信息素启发式因子	1	\max_Run	算法最大迭代次数	200
β	期望启发式因子	2	m	蚂蚁数目	100
ρ	全局信息挥发系数	0.8			

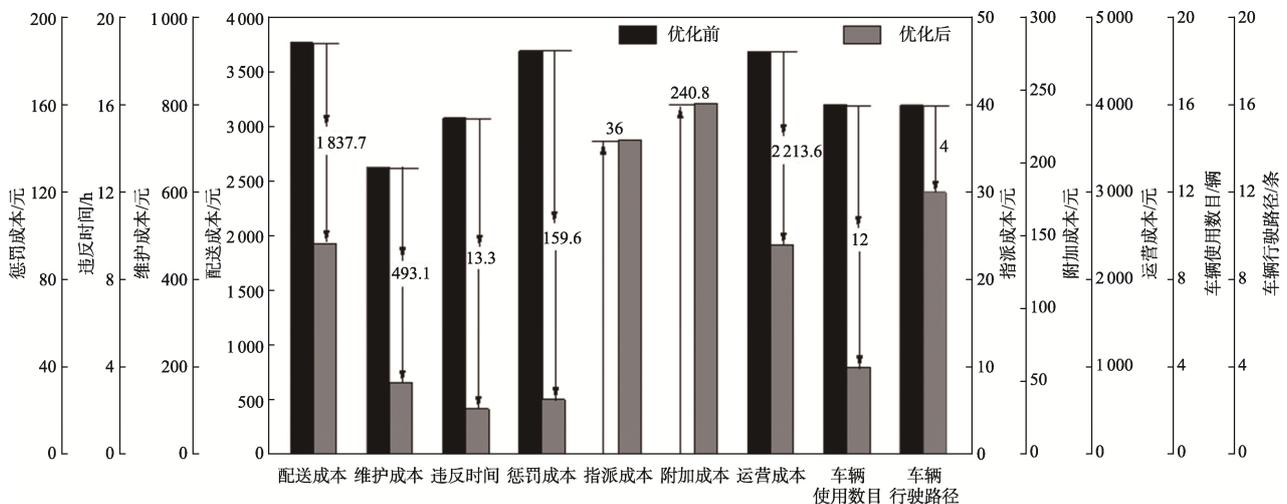


图 4 考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化前后相关指标对比

Fig.4 Comparison of related indicators before and after optimization of on-demand delivery for express logistics services considering dynamic new order demands

表 8 考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化方案

Tab.8 Optimization of on-demand delivery for express logistics services considering dynamic new order demands

服务时间段	配送路径	车辆
0—8 时	DC→C30→C52→C45→C46→C60→C63→DC	V1
	DC→C24→C71→C18→C25 [#] →C14 [#] →C12 [#] →C48→DC	V2
	DC→C22 [#] →C4→C21 [#] →C27→C6 [#] →C8→C1→DC	V3
	DC→C42 [#] →C33→C34 [#] →C40 [#] →C38→C37 [#] →C70→C56→C72→DC	V4
8—16 时	DC→C57 [#] →C73→C64→C50→C49→C5→C87*→C86*→C95*→C67→C62→C9→DC	V1
	DC→C82*→C105*→C109*→C11→C13→C17→C12 [#] →C14 [#] →C101*→C25 [#] →C7→C2→C89*→DC	V2
	DC→C16→C54→C81*→C29→C6 [#] →C68→C78*→C107*→C26→C21 [#] →C22 [#] →C19→C102*→C74*→DC	V3
	DC→C31 [#] →C55→C85*→C34 [#] →C69→C36→C92*→C43→C41→C42 [#] →C93*→DC	V4
16—24 时	DC→C84*→C59→C75*→C106*→C58→C96*→C51→C97*→C44→C57 [#] →C47→C61→C80*→DC	V1
	DC→C76*→C10→C83*→C32→C47→C12 [#] →C14 [#] →C100*→C20→C15→C90*→C79*→C110*→DC	V2
	DC→C31 [#] →C88*→C66→C6 [#] →C28→C22 [#] →C23→C53→C3→DC	V3
	DC→C94*→C65→C103*→C37 [#] →C98*→C40 [#] →C99*→C35→C108*→C91*→C39→C104*→C34 [#] →C77*→DC	V4

注：#表示周期性客户，*表示新增订单需求客户。

由表 8 可知，优化后的快递物流即时配送网络中包含 12 条配送路径，与优化前的服务方案相比，仅需派遣 4 辆车即可满足客户的配送服务需求。

4.3 不同服务时间段划分敏感性分析

为了进一步研究不同服务时间段对优化结果的

影响，将配送中心的时间窗分别划分为 1、2、3、4 个服务时间段（分别用 Q1、Q2、Q3、Q4 表示），分析讨论不同服务时间段划分对考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送方案的优化结果。4 种时间段划分的服务时间窗详见表 9，不同服务时间段划分后的优化结果如图 5 所示。

表 9 不同服务时间段划分的时间窗

Tab.9 Time windows divided by different service periods

服务时间段划分数目	每段服务时长/h	服务时间段			
		1	2	3	4
1	24	0—24 时	—	—	—
2	12	0—12 时	12—24 时	—	—
3	8	0—8 时	8—16 时	16—24 时	—
4	6	0—6 时	6—12 时	12—18 时	18—24 时

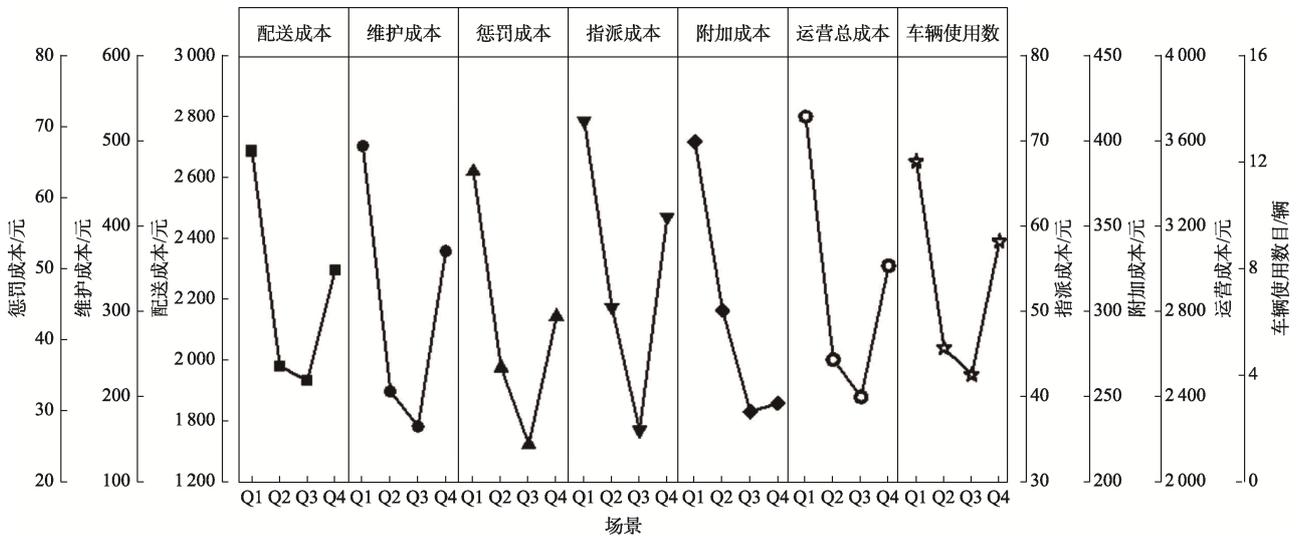


图 5 不同服务时间段划分的优化结果对比

Fig.5 Comparison optimization results under different service periods

由图 5 可知, 将配送中心的服务时间窗划分为 3 个时间段时, 考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化方案最优, 运营成本先降低后增加, 最少为 2 396.6 元, 相较于其他 3 种划分模式分别降低 35.4%、6.8% 和 20.4%, 车辆使用数目比其他 3 种方案分别减少 8、1 和 5 辆。

5 结语

本文研究了考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送问题, 构建了物流运营总成本和车辆使用数目最小化的双目标优化模型, 并提出一种 IMOACO 算法求解模型。该算法通过局部搜索操作和外部档案更新机制设计提升了帕累托优化解的质量, 同时提出动态订单插入策略和时间窗指派策略, 增强了算法的搜索性能。将 IMOACO 算法与 MOPSO、MOGWO 和 MOMVO 算法求解的运营成本、车辆使用数目和求解时间进行对比分析, 进一步验证了该算法在处理考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化问题时的高效性。

以重庆市某快递物流配送中心的实际数据为例, 对考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送问题进行研究, 发现优化后的快递物流即时配送网络运营成本节约 2 213.6 元, 配送车辆减少 12 辆, 违反时间窗的惩罚成本降低 86.4%。本文进一步讨论了不同服务时间段划分下相关运营指标的变化情况, 研究结果表明, 将配送中心服务时间分为 3 个时间段的优化方案效果明显优于其他 3 种模式。本文提出的考虑动态新增订单需求的快递物流即时配送优化方法能够为快递物流企业提供新的实践思路, 有助于降低快递物流企业的运营总成本, 提高快递物流的即时配送效率, 有效推动智慧高效的都市快递物流配送体系建设。

参考文献:

- [1] 余海燕, 唐婉倩, 吴腾宇. 带硬时间窗的 O2O 生鲜外卖即时配送路径优化[J]. 系统管理学报, 2021, 30(3): 584-591.
YU H Y, TANG W Q, WU T Y. Vehicle Routing Problem with Hard Time Windows for Instant Delivery of O2O Fresh Takeout Orders[J]. Journal of Systems & Management, 2021, 30(3): 584-591.
- [2] JANJEVIC M, WINKENBACH M. Characterizing Urban Last-Mile Distribution Strategies in Mature and Emerging E-Commerce Markets[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2020, 133: 164-196.
- [3] HESS A, SPINLER S, WINKENBACH M. Real-Time Demand Forecasting for an Urban Delivery Platform[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2021, 145: 102147.
- [4] 李想, 闵德权, 张祺. 随机需求下半开放式冷链物流车辆路径优化[J]. 包装工程, 2022, 43(7): 160-169.
LI X, MIN D Q, ZHANG Q. Routing Optimization of Semi-Open Cold-Chain Logistics Vehicle under Random Demand[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(7): 160-169.
- [5] 张金良, 李超. 碳排放影响下的动态配送车辆路径优化研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(9): 184-194.
ZHANG J L, LI C. Research on Dynamic Distribution Vehicle Route Optimization under the Influence of Carbon Emission[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(9): 184-194.
- [6] WANG Y, ZHE J, WANG X, et al. Collaborative Multi-center Reverse Logistics Network Design with Dynamic Customer Demands[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 206: 117926.
- [7] WANG Q, LI H, WANG D, et al. Bi-Objective Perishable Product Delivery Routing Problem with Stochastic Demand[J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 175: 108837.
- [8] LI J, LIU R, WANG R. Handling Dynamic Capacitated Vehicle Routing Problems Based on Adaptive Genetic Algorithm with Elastic Strategy[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2024, 86: 101529.
- [9] ALVAREZ A, CORDEAU J F, JANS R. The Consistent Vehicle Routing Problem with Stochastic Customers and Demands[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2024, 186: 102968.
- [10] LI J, QIN H, BALDACCIO R, et al. Branch-and-Price-and-Cut for the Synchronized Vehicle Routing Problem with Split Delivery, Proportional Service Time and Multiple Time Windows[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 140: 101955.
- [11] 李楠, 胡蓉, 钱斌, 等. 两阶段混合优化算法求解模糊需求下多时间窗车辆路径问题[J]. 控制与决策, 2022, 37(6): 1573-1582.
LI N, HU R, QIAN B, et al. Two Stage Hybrid Optimization Algorithm for Vehicle Routing Problem with Multiple Time Windows under Fuzzy Demand[J]. Control and Decision, 2022, 37(6): 1573-1582.
- [12] WANG W, YANG K, YANG L, et al. Distributionally Robust Chance-Constrained Programming for Multi-Period Emergency Resource Allocation and Vehicle Routing in Disaster Response Operations[J]. Omega, 2023, 120: 102915.
- [13] 邱晗光, 周继祥, 龙跃. 顾客可选末端交付方式和时间窗的城市配送动态订单接受优化研究[J]. 中国管理

- 科学, 2020, 28(8): 114-126.
- QIU H G, ZHOU J X, LONG Y. Research on the Dynamic Order Acceptance in Urban Delivery Considering Customer Choice of the Last-Mile Delivery Modes and Time Slots[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(8): 114-126.
- [14] HOOGEBOOM M, ADULYASAK Y, DULLAERT W, et al. The Robust Vehicle Routing Problem with Time Window Assignments[J]. Transportation Science, 2021, 55(2): 395.
- [15] WANG Y, WANG X, FAN J, et al. Emergency Logistics Network Optimization with Time Window Assignment[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 214: 119145.
- [16] CÔTÉ J F, MANSINI R, RAFFAELE A. Multi-Period Time Window Assignment for Attended Home Delivery[J]. European Journal of Operational Research, 2024, 316(1): 295-309.
- [17] XU X F, WEI Z F. Dynamic Pickup and Delivery Problem with Transshipments and LIFO Constraints[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 175: 108835.
- [18] WU H, GAO Y. An Ant Colony Optimization Based on Local Search for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup-Delivery and Time Window[J]. Applied Soft Computing, 2023, 139: 110203.
- [19] CARLOS L L J, JAIME S N J, RUI F J, et al. Non-Dominated Sorting Genetic-Based Algorithm for Exploiting a Large-Sized Fuzzy Outranking Relation[J]. European Journal of Operational Research, 2021, 293(2): 615-631.
- [20] 徐帆, 马良, 张惠珍, 等. 改进樽海鞘算法求解带时间窗的应急选址路径问题[J]. 包装工程, 2024, 45(5): 220-229.
- XU F, MA L, ZHANG H Z, et al. Improved Salp Swarm Algorithm for Solving Multi-Objective Emergency Location Routing Problem with Time Windows[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(5): 220-229.
- [21] HU Z, WANG L, QIN J, et al. Optimization of Facility Location and Size Problem Based on Bi-Level Multi-Objective Programming[J]. Computers & Operations Research, 2022, 145: 105860.
- [22] FALLAHI A, BANI E A, VARMAZYAR M. Towards Sustainable Scheduling of Unrelated Parallel Batch Processors: A Multiobjective Approach with Triple Bottom Line, Classical and Data-Driven Robust Optimization[J]. Computers and Operations Research, 2025, 173: 106863.
- [23] LIU Z F, ZHAO S X, LUO X F, et al. Two-Layer Energy Dispatching and Collaborative Optimization of Regional Integrated Energy System Considering Stakeholders Game and Flexible Load Management[J]. Applied Energy, 2025, 379: 124918.
- [24] XU X, WANG C, ZHOU P. GVRP Considered Oil-Gas Recovery in Refined Oil Distribution: From an Environmental Perspective[J]. International Journal of Production Economics, 2021, 235: 108078.