

doi: 10.19920/j.cnki.jmsc.2021.10.007

# 整合逆向物流协同配送动态路径优化问题研究<sup>①</sup>

徐小峰, 姜明月, 邓忆瑞

(中国石油大学(华东)经济管理学院, 青岛 266580)

**摘要:** 整合逆向物流的协同配送面临着客户需求随机并发、行驶路径开环多变等不确定性挑战, 这给配送路径动态规划和方案柔性制定带来了更严苛的要求。为此, 使用“时间片”划分方式, 将动态配送问题转化为一系列静态优化问题, 提出了整合逆向物流的协同配送动态路径优化两阶段求解策略。首先, 通过考虑车载量以及时间窗等软硬约束条件, 构建以总物流成本最小和客户满意度最大的多配送中心协同配送初始-实时动态路径规划模型。其次, 设计带有非支配排序与精英策略的多目标免疫遗传算法 MOIGA 对模型进行求解。最后, 研究结果表明客户满意度与物流运营成本之间呈现悖反关系, 高配送成本会带来高客户满意度, 在相同成本支出情况下, MOIGA 算法产生的规划方案客户满意度优于 NSGA- II、MOIA, 这也验证了模型的有效性以及方法优越性。

**关键词:** 随机需求; 同时取送货; 协同配送; 动态车辆路径问题; MOIGA

**中图分类号:** F506      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-9807(2021)10-0106-21

## 0 引言

随着互联网商业模式兴起和环保法规强制推行, 由退货返修、废旧回收、容器流转等带来的逆向物流日渐受到市场重视。在商务部和德勤联合发布的《中国物流产业投资促进报告 2015-2016》中指出中国逆向物流市场将在 2016 年~2020 年超过 2 万亿元市场容量, 在整个社会物流体系中的占比将超过 20%, 由此可以看出逆向物流在我国物流供应链中日益显著的影响地位。但是正、逆向物流独立运行会带来成本增加、拣货冲突等问题, 对同时具有正、逆需求的客户进行拆分服务还会影响到客户满意度, 进而影响企业长期利益和战略目标实现<sup>[1]</sup>, 此外, 在技术进步的推动以及各企业竞争、合作不断加剧的情况下, 物流行业的正逆向协作模式也得到了广泛的关注<sup>[2,3]</sup>。这些机遇和挑战促使当前物流运作模式

由传统正向物流网络为主向正逆向统筹兼顾的协同模式转变, 以降低协同物流网络的整体运营成本并提升客户服务质量。考虑到正逆向物流网络中客户需求是随机并发、动态多变的, 采用同时取送货协同运作模式, 在降低车辆空载率、减少物流成本以及提高顾客满意度等方面具有很大深挖潜能, 尤其是在温室气体排放、城市交通拥堵日益严峻形势下, 整合逆向物流所带来的商业成本优势及环保社会效益日渐显现。因而, 在考虑客户需求随机并发下整合逆向物流的协同配送动态路径优化问题(dynamic vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery, DVRPSPD) 成为物流与供应链管理领域值得关注的热点问题。

整合逆向物流的协同配送模式较单向的独立运作模式更为复杂。一般情况下动态车辆路径问题(dynamic vehicle routing, DVRP) 多是将正逆向物流拆分进行独立研究, 因此只需考虑车辆在配

① 收稿日期: 2019-05-23, 修订日期: 2020-01-12。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71871222); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(19CX04037B)。

作者简介: 徐小峰(1982-), 男, 山东莱阳人, 博士, 教授。Email: xuxiaofeng@upc.edu.cn

送节点的车载容量限制,在此基础上进行配送路径动态规划<sup>[4]</sup>。而 DVRPSD 在对车辆进行分仓操作时,还要考虑装/卸货对车辆容量的动态影响,这无疑加大了配送路径动态规划和方案产生的难度<sup>[5]</sup>。针对单向动态路径规划,多数研究均采用将动态问题转化为一系列静态问题的处理方法。葛显龙等<sup>[6]</sup>和张景玲等<sup>[7]</sup>提出了“初始优化+实时优化”的两阶段总成本最小化求解策略。王妍妍和孙佰清<sup>[8]</sup>考虑不同阶段不同物资需求与供给的关系及其动态变化特性,在车载量约束条件下,使用线性加权法构建求解因物资短缺造成的延迟损失与物资分配的总成本最小化。马祖军和周愉峰<sup>[9]</sup>则是考虑受灾地区血液随机需求、容量限制等因素,构建多目标 LIP 模型,运用小生境技术改进的多目标 NSGA-II 算法权衡最小成本与最优时效性。Abdallah 等<sup>[10]</sup>使用了“时间片”方式将动态路径问题转化为系列静态路径运输成本最小化问题。Armas 和 Melián-Batista<sup>[11]</sup>通过设置快速重新优化阶段将动态需求整合到已有方案中。Barkaoui 等<sup>[12]</sup>使用混合遗传算法求解带有时间窗及车载量限制的最大化客户满意度的单配送中心动态路径优化问题。Chen 等<sup>[13]</sup>对拥有有限数量的车辆单配送中心以及具有硬时间窗的动态客户进行研究,将其动态路径问题转化为一系列静态路径问题,并运用自适应大邻域搜索算法求解最小化运输成本和使用车辆数。上述研究多是以单配送中心单目标的闭环 DVRP 为研究对象,忽略了多配送中心间的统筹协调和多目标间的矛盾冲突,而在实践应用中多配送中心联合作业已成为发展趋势,因此研究多配送中心之间的协作运营显得非常重要。

最初关于逆向物流车辆路径(vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries, VRPSD)的文献多是以单配送中心进行研究,后逐渐转向复杂的多配送中心多目标问题研究,目前多配送中心协作的多目标 VRPSD 研究尚处于起步阶段。Avci 和 Topaloglu<sup>[14]</sup>在拥有不同车型的单配送中心基础上,将问题扩展到多配送中心,并设计了自适应局部混合搜索算法求解多目标问题。Lai 和 Cao<sup>[15]</sup>在时间窗限制以及车载量限制

的情况使用差分进化算法求解最小化行驶距离。Lyu 等<sup>[16]</sup>在车载量及车辆行驶距离限制下,运用贪婪随机自适应搜索(GRASP)和迭代局部搜索(ILS)混合的 GRASP-ILS 算法求解带有逆向需求的多个仓库和回收站协作的车辆调配问题。Ma 等<sup>[17]</sup>在软时间窗约束、车载量限制以及考虑客户满意度条件下,采用改进的遗传算法求解多配送中心协作下的调配方案。Nagy 和 Salhi<sup>[18]</sup>根据就近原则将多配送中心转化为多个单配送中心优化问题,并采用改进领域搜索规则启发式算法进行路径优化。Belgin 等<sup>[19]</sup>研究两级闭环配送网络的 VRPSD 问题,并结合可变邻域下降算法和局部搜索算法的优势设计了混合启发式算法。Yu 和 Lin<sup>[20]</sup>针对多配送中心闭环的 LRPSD,在车载量限制情况下运用多启动模拟退火算法进行求解。Wang 等<sup>[2]</sup>在多配送中心协作基础上,运用混合 NSGA-II 算法求解车载量限制下的运输资源及企业成本最小化双重目标。张江华等<sup>[21]</sup>针对带有车辆时间窗的多配送中心的 VRPSD,运用混合禁忌搜索算法求解最短车辆行驶距离和最小车辆使用的双目标问题。Kachitvichyanukul 等<sup>[22]</sup>在硬时间窗、车载量与车辆数量限制下,利用线性加权法综合考虑运输成本、车辆数量最小化以及满足需求最大化等目标,但求解结果显示较为单一,无法提供多种决策方案。Wang 等<sup>[23]</sup>在时间窗及车载量限制下,提出了考虑成本以及客户满意度的正逆向多配送中心多目标路由定位问题。

不难发现无论是基于单配送中心或是多配送中心的研究都尚未与多目标研究进行较好的融合,且研究多是从闭环静态配送网络运营视角出发,未考虑开环网络的客户服务质量问题,如此以往会对企业长期运营、客户覆盖率及忠诚度产生不利影响。目前关于多配送中心多目标的 DVRP-SPD 研究较少,Xiang 等<sup>[24]</sup>提出了考虑最小化运营成本快速启发式方法,用以解决时间窗和车载量限制下新事件发生带来的时间表动态优化问题。Zhu 和 Sheu<sup>[25]</sup>在随机需求和车队协调的情况下,开发自适应大邻域搜索算法进行单配送中心成本最小化的求解。马艳芳等<sup>[26]</sup>考虑客户需求随机模糊性,构建相应的不确定性数学模型,并引进模糊

随机算子改进粒子群算法,求解单配送中心下最小化企业成本和最大化客户满意度. Zhu 等<sup>[27]</sup>在考虑车载量约束下,运用多目标膜算法解决了一对多动态拾取和送货问题. Gendreau 等<sup>[28]</sup>针对新客户动态出现及时间窗约束情形,提出使用领域搜索算法求解时间窗偏差以及运营成本加权最小问题. Yuchi 等<sup>[29]</sup>构建了闭环供应链中位置-库存-路径(LIRP-CL)系统,并设计了基于禁忌搜索和模拟退火的新型混合启发式算法,用于求解正逆向多个配送中心的协作运营问题.可以看出当前研究多集中在具体业务操作层面,尚未有考虑客户随机需求的多配送中心多目标DVRPSD系统研究.

综合上述研究可以看出,以上研究问题还存在以下不足: 1) 研究对象多是封闭式的单向DVRP研究(车辆起始点固定),较少有开放式的正逆向DVRP研究(车辆起始点无限制); 2) 研究目标多为单一选择目标,忽视了多目标决策需求; 3) VRPSD研究背景多是静态闭环确定环境下,没有考虑动态变化的开环情形; 4) 研究视角多以企业为中心考虑配送成本控制,忽略了配送服务

的客户满意度影响.因此,在客户需求随机并发环境下,针对整合逆向物流的协同配送动态路径优化问题,综合考虑时间窗、车载量等软硬约束条件,设定总成本最小、客户满意度最高为目标函数,构建考虑同时配送和回收情况的开放式协同配送动态车辆路径优化模型,并设计带有非支配排序与精英策略的多目标免疫遗传算法(multi-objective immune genetic algorithm, MOIGA)对模型进行求解分析,最后通过算例分析结果来验证模型的科学性和方法的有效性.

### 1 问题描述

DVRPSD可以概括为:在由多个配送中心构成的协同配送网络中,多配送中心之间考虑发货/取货等不同客户需求、随机动态的新需求、开放式行驶路径以及协同定位等问题,在车载量硬限制及时间窗软约束下,动态整合多配送中心资源,合理规划/更新配送路径,最大程度发挥协同效益,图1为其示意图.

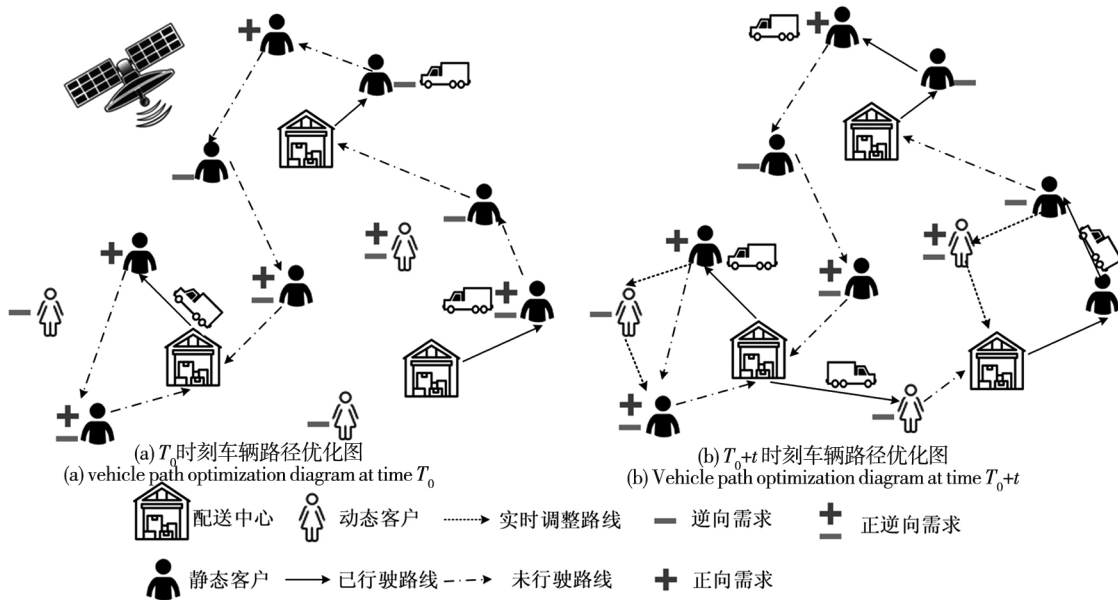


图1 DVRPSD示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DVRPSD

为防止频繁数据输入计算及行驶路径更新带来的运营成本增加,引入了“时间片”概念对协同配送服务动态信息进行更新,通过设置时间间隔  $t$  将实时动态优化问题转化为一系列特定时点

的静态优化问题,对  $t$  时间段内出现的客户需求进行批处理.这需要调度中心根据当前需求先规划好  $T_0$  时刻的车辆行驶路线(如图 a),然后在  $T_0 + t$  时刻调度中心将  $t$  时间段内的新需求加入,

重新生成新的规划方案(如图 b) 以便及时、高效满足客户需求.

相应的数学描述为: 给定的开环协同物流网络  $G=(N, R)$   $N$  为  $G$  中所有节点集合  $N=\{C \cup D\}$   $C$  为客户集合  $D$  为配送中心集合;  $R$  为  $G$  中各节点间距离集合  $R=\{r_{ij}\}$  且  $r_{ij}=r_{ji}, i, j \in N$ . 在  $T_0$  初始时刻, 由  $m_0$  个配送中心负责  $n_0$  个客户的送货、拣货服务, 车辆从配送中心出发, 直至无法满足客户需求时返回任一配送中心. 其中  $m \in D$  表示拥有  $K_m(k_m=1, 2, \dots, K_m)$  辆最大载重量为  $Q$  的货车单个配送中心  $D=\{1, 2, \dots, m_0\}$   $n \in C_0$  表示客户服务编号  $C_0=\{1, 2, \dots, n_0\}$ . 针对动态出现的随机需求, 调度中心按照每隔固定时间  $t$  划分“时间片”的方式对客户需求进行信息更新, 在进行路径规划  $T_p(p=1, 2, \dots, P)$  时刻, “时间片” $p$  内尚未服务和新出现的客户集合为  $C_p, n=1, 2, \dots, n_p$ , 客户  $n(n \in C_p)$  的配送需求  $b_{np}$  和回收需求  $h_{np}$  将加入到已执行的配送方案中进行重新规划. 此时, 剩余配送量为  $w_{uk}^{(mp)}$ , 车辆  $k(k \in k_m, m \in D)$  所处位置  $u(u \in U_p)$  被设为“关键点”(即将服务的客户和正在服务的客户所处位置)  $U_p=\{1, 2, \dots, u_p\}$ , 客户集合  $C=U_p \cup C_p$ . 这些“关键点”将作为虚拟配送中心指派停靠在該点的车辆, 在满足车载量以及剩余配送量前提下对尚未服务的老客户及随机出现的新客户进行服务. 为提高客户服务满意度, 要求车辆  $k$  服务 1 次就可以满足客户  $n$  全部需求. 同时每个客户还具有时间窗  $[ET, LT]$  限制, 早于  $ET$  或晚于  $LT$  访问都要承担相应的成本损失.

## 2 模型假设及相关定义

### 2.1 前提假设

- 1) 配送中心及客户地理位置可知, 并可动态获取客户的需求信息以及车辆所处地理位置、车载容量等状态信息;
- 2) 配送中心拥有的车辆已知且总量充足;
- 3) 车辆能保持  $v$  的平均速度行驶;
- 4) 客户的正、逆向需求不允许拆分执行;
- 5) 不考虑配送中心装卸货物时间.

### 2.2 参数及变量定义

表 1 模型符号定义

Table 1 Model parameter definition

| 符号             | 含义                      |                                                                      |
|----------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 集合             | $C_p$                   | $T_p$ 时刻新出现客户以及尚未服务客户集合 $n$ 为客户节点, $C_p=\{1, 2, \dots, n_p\}$        |
|                | $D$                     | 配送中心集合, $m$ 为配送中心节点, $m \in D$ , $D=\{1, 2, \dots, m_0\}$            |
|                | $U_p$                   | $T_p$ 时刻“关键点”集合, $u$ 为“关键点”节点, $u \in U_p, U_p=\{1, 2, \dots, u_p\}$ |
| 参数             | $p$                     | 时间片划分 $p=0, 1, 2, \dots, P$                                          |
|                | $r_{ij}^{(p)}$          | “时间片” $p$ 内节点 $i$ 到节点 $j$ 点的距离, $i, j \in N, i \neq j$               |
|                | $d_{ij}^{(p)}$          | “时间片” $p$ 内节点 $i$ 到节点 $j$ 需要的时间, $i, j \in N, i \neq j$              |
|                | $b_{np}$                | $T_p$ 时刻客户 $n$ 配送需求量                                                 |
|                | $h_{np}$                | $T_p$ 时刻客户 $n$ 回收需求量                                                 |
|                | $k$                     | 从配送中心或“关键点”出发进行回收、配送活动的车辆 $k=1, 2, \dots, k_m, m \in D$              |
|                | $v$                     | 车辆的行驶速度                                                              |
|                | $c_l$                   | 单位时间延迟服务的惩罚成本                                                        |
|                | $f$                     | 发车的固定成本                                                              |
|                | $c_e$                   | 单位时间提前服务的等待成本                                                        |
|                | $g$                     | 单位距离配送费用                                                             |
|                | $t_{ip}$                | $T_p$ 时刻节点 $i$ 所需的服务时间                                               |
|                | $q_{knp}$               | 在“时间片” $p$ 内车辆到达客户 $n$ 时的承载量                                         |
|                | $w_{uk}^{(mp)}$         | “时间片” $p$ 内配送中心 $m$ 的车辆 $k$ 在服务完“关键点” $u$ 后剩余配送量                     |
| $\lambda_{ip}$ | “时间片” $p$ 内到达节点 $i$ 的时刻 |                                                                      |
| 变量             | $x_{ikj}^{(mp)}$        | 1 表示 $T_p$ 时刻从 $m$ 发出的车辆 $k$ 经节点 $i$ 驶向 $j$ , 其他为 0                  |
|                | $y_{kn}^{(mp)}$         | 1 表示客户 $n$ 由 $T_p$ 时刻从 $m$ 发出的车辆 $k$ 服务, 其他为 0                       |
|                | $z_{ikj}^{(mup)}$       | 1 表示 $T_p$ 时刻 $u$ 发出属于 $m$ 的车辆 $k$ 经节点 $i$ 驶向 $j$ , 其他为 0            |
|                | $l_{kn}^{(mup)}$        | 1 表示客户 $n$ 由 $T_p$ 时刻 $u$ 发出属于 $m$ 的车辆 $k$ 服务, 其他为 0                 |

### 2.3 软时间窗中的客户满意度界定

在物流配送服务中, 能否按时得到服务是影响客户满意度的关键因素, 并且满意度会随实际与预期服务时间偏差的增大而降低. 但是, 在实际运行中客户对服务时间窗的要求并非完全刚性, 而是带有一定的弹性调整空间. 对于带有软时间窗客户满意度量化分析, 一般都是将满意度转化

为 0-1 数值<sup>[30,31]</sup>, 1 代表最大满意度, 0 代表最小满意度. 图 2 为软时间窗与客户满意度的关系图. 考虑客户最佳服务时间并非完全是整个时间窗, 而是时间窗内的特定时段, 传统软时间窗无法准确的表达客户满意度, 为此, 构建了如图 3 所

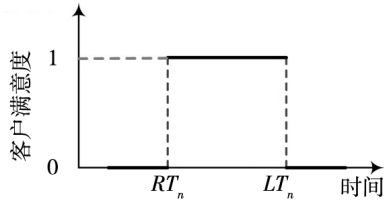


图 2 传统软时间窗与客户满意度关系

Fig. 2 Relationship between traditional soft time window and customer satisfaction

示, 基于梯形模糊隶属函数时间窗与客户满意度的关系. 图 4 给出了动态的梯形模糊隶属函数时间窗与客户满意度的关系, 其中,  $[ET_{np}, et_{np}, lt_{np}, LT_{np}]$  表示“时间片” $p$  内客户  $n$  的模糊时间窗范围.

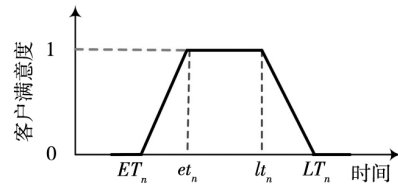


图 3 梯形隶属函数下软时间窗与客户满意度关系

Fig. 3 Relationship between soft time window and customer satisfaction under trapezoid membership function

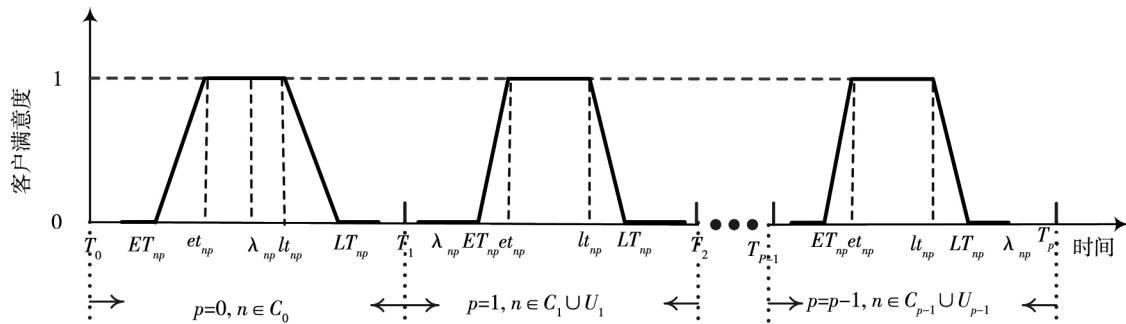


图 4 梯形隶属函数下的软时间窗与客户满意度动态关系

Fig. 4 Dynamic relationship between soft time window and customer satisfaction under trapezoid membership function

假设客户  $n$  服务开始时间为  $\lambda_{np}$ , 软时间窗限制  $[ET_{np}, LT_{np}]$  最佳服务时刻为  $[et_{np}, lt_{np}]$ . 第  $p$  阶段客户满意度  $s_{np}$  的梯形隶属函数描述如下

$$s_{np} = \begin{cases} \frac{\lambda_{np} - ET_{np}}{et_{np} - ET_{np}}, & ET_{np} \leq \lambda_{np} < et_{np} \\ 1, & et_{np} \leq \lambda_{np} < lt_{np} \\ \frac{LT_{np} - \lambda_{np}}{LT_{np} - lt_{np}}, & lt_{np} \leq \lambda_{np} \leq LT_{np} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

### 3 两阶段数学模型

借鉴以往研究成果<sup>[6,10,11,32]</sup>, 确定多配送中心多目标 DVRPSD 的求解思路, 将动态连续优化问题分解为多阶段静态一次性优化问题, 建立“初始优化+实时优化”两阶段模型进行求解.

#### 3.1 初始路径优化模型

在  $T_0$  初始时刻 ( $p=0$ ), 调度中心从运营成本以及客户服务两个角度, 根据已知客户需求进行路径规划. 对于配送企业而言, 运营成本主要包括运输成本、固定发车成本、机会成本和惩罚成本 4 个组成部分.

$$\begin{aligned} \min Z_1 = & \sum_{m \in D} \sum_{k \in k_m} \sum_{i \in C_0 \cup D} x_{ikj}^{(mp)} r_{ij}^{(p)} g + \\ & \sum_{m \in D} \sum_{k \in k_m} \sum_{i \in D} \sum_{j \in C_0} x_{ikj}^{(mp)} f + \\ & c_e \sum_{n \in C_0} \max\{ET_{np} - \lambda_{np}, 0\} + \\ & c_l \sum_{n \in C_0} \max\{\lambda_{np} - LT_{np}, 0\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $\sum_{m \in D} \sum_{k \in k_m} \sum_{i \in C_0 \cup D} x_{ikj}^{(mp)} r_{ij}^{(p)} g$  为总运输成本;  $\sum_{m \in D} \sum_{k \in k_m} \sum_{i \in D} \sum_{j \in C_0} x_{ikj}^{(mp)} f$  表示总固定发车成本;  $c_e \sum_{n \in C_0} \max\{ET_{np} - \lambda_{np}, 0\}$  表示因早于时间窗引起的

总机会成本;  $c_l \sum_{n \in C_0} \max\{\lambda_{np} - LT_{np}, 0\}$  为晚于时间窗引起的总惩罚成本。

同时,为了强化客户服务质量,提出了客户平均满意度

最大化目标,并将其转化为最小化问题

$$\min S_1 = 1 - \frac{\sum_{n \in C_0} s_{np}}{n_0} \quad (3)$$

故  $1 - S_1$  为客户平均满意度。

初始阶段路径优化模型具体如下

$$\min\{Z_1, S_1\} \quad (4)$$

约束条件

$$\sum_{n \in C_0} y_{kn}^{(mp)} b_{np} \leq Q, \forall m \in D, k \in k_m \quad (5)$$

$$y_{kn}^{(mp)} (q_{knp} + h_{np} - b_{np}) \leq Q, \forall m \in D, k \in k_m, n \in C_0 \quad (6)$$

$$\sum_{j \in D} x_{ikj}^{(mp)} = 0, \forall m, i \in D, k \in k_m \quad (7)$$

$$\sum_{m \in D} \sum_{k \in k_m} y_{kn}^{(mp)} = 1, \forall n \in C_0 \quad (8)$$

$$\sum_{m \in D} \sum_{j \in C_0 \cup D} \sum_{k \in k_m} x_{ikj}^{(mp)} = 1, \forall i \in C_0 \quad (9)$$

$$\lambda_{jp} = (\lambda_{ip} + t_{ip} + d_{ij}^{(p)}) x_{ikj}^{(mp)}, p = 0, \forall i, j \in C_0 \cup D, k \in k_m, m \in D \quad (10)$$

$$\sum_{m \in D} \sum_{k \in k_m} \sum_{j \in C_0} x_{ikj}^{(mp)} = \sum_{j \in D} \sum_{k \in k_m} \sum_{i \in C_0} x_{ikj}^{(mp)} \quad (11)$$

其中式(5)表示配送中心发车时刻的车载量限制;式(6)表示车辆处于客户节点货物装卸环节的车载量限制;以免车辆在运输过程中出现回收超载现象;式(7)避免车辆从一个配送中心直接驶往另一配送中心;式(8)保证每个客户都能服务到,且仅能访问一次;式(9)保证车辆服务完客户后必须离开。式(10)表示直接互通的两个节点之间的开始服务时间关系,车辆到达  $j$  点的时刻等于车辆到达  $i$  的时刻加上服务  $i$  的时间以及车辆在  $i, j$  两点行驶的时间;式(11)表示车辆从某一配送中心出发,最终回到任意一个配送中心。

### 3.2 实时路径优化模型

由于配送过程中车辆的承载量会随客户需求

动态变化,这将极大增加配送车辆调度的复杂程度。因此,该阶段的主要任务是确认客户需求完成情况并合理划分车辆状态(行驶或服务)。为此,引入“关键点”(即将服务的客户和正在服务的客户所处位置)作为状态划分的评判依据,一旦到达系统设定的  $T_p (p = 1, 2, 3, \dots, P)$  更新时刻,“时间片” $p$  内新出现的客户需求即会加入物流网络,已完成的服务需求会将客户列表中剔除。将“关键点”作为虚拟配送中心派送停靠在该点的车辆,在满足剩余车载量约束下对尚未服务的客户以及新出现的客户进行服务,若不能满足客户需求则需从配送中心重新调度车辆。这其中,“关键点”之前的行驶路线不允许改变,服务完“关键点”的配送车辆属性(车辆地理位置、剩余载重以及车辆状态)将作为动态路径规划的前提条件。基于以上描述,构建实时阶段的车辆路径优化数学模型。

与初始阶段( $p = 0$ )相同,实时阶段( $p = 1, 2, 3, \dots, P$ )的目标函数依然由配送运营成本  $Z_2$  和客户平均满意度  $S_2$  双目标构成。这其中  $Z_2$  与  $Z_1$  最大区别在于运输成本由配送中心新派车辆和“关键点”出发车辆两部分构成

$$\begin{aligned} \min Z_2 = & \sum_{m \in D} \sum_{k \in k_m} \sum_{i \in C_p \cup U} \sum_{p_u \in U} \sum_{j \in C_p \cup D} z_{ikj}^{(mp)} r_{ij}^{(p)} g + \\ & \sum_{m \in D} \sum_{k \in k_m} \sum_{j \in C_p \cup D} x_{ikj}^{(mp)} r_{ij}^{(p)} g + \\ & \sum_{m \in D} \sum_{k \in k_m} \sum_{i \in D} \sum_{j \in C_p} x_{ikj}^{(mp)} f + \\ & c_e \sum_{n \in C_p} \max\{ET_{np} - \lambda_{np}, 0\} + \\ & c_l \sum_{n \in C_p} \max\{\lambda_{np} - LT_{np}, 0\} \quad (12) \end{aligned}$$

式中  $\sum_{m \in D} \sum_{k \in k_m} \sum_{i \in C_p \cup U} \sum_{p_u \in U} \sum_{j \in C_p \cup D} z_{ikj}^{(mp)} r_{ij}^{(p)} g$  表示由“关键点”出发车辆的运输成本;  $\sum_{m \in D} \sum_{k \in k_m} \sum_{j \in C_p \cup D} x_{ikj}^{(mp)} r_{ij}^{(p)} g$  为该阶段配送中心新派出车辆的运输成本。同时,实时阶段的客户平均满意度目标如式(13)所示

$$\min S_2 = 1 - \frac{\sum_{i \in C_p} s_n}{n_p} \quad (13)$$

实时阶段路径优化模型具体如下

$$\min \{Z_2, S_2\} \quad (14)$$

约束条件

$$\sum_{n \in C_p} l_{kn}^{(mup)} b_{np} \leq w_{uk}^{(mp)}, \forall m \in D, k \in k_m, \\ u \in U_p, p = 1, 2, \dots, P \quad (15)$$

$$l_{kn}^{(mup)} (q_{knp} + h_{np} - b_{np}) \leq Q, \forall m \in D, k \in k_m, \\ u \in U_p, n \in C_p, p = 1, 2, \dots, P \quad (16)$$

$$\sum_{n \in C_p} y_{kn}^{(mp)} b_{np} \leq Q, \forall m \in D, k \in k_m, \\ p = 1, 2, \dots, P \quad (17)$$

$$y_{kn}^{(mp)} (q_{knp} + h_{np} - b_{np}) \leq Q, \forall m \in D, k \in k_m, \\ n \in C_p, p = 1, 2, \dots, P \quad (18)$$

$$\sum_{j \in D} x_{ikj}^{(mp)} = 0, \forall m \in D, k \in k_m, \\ p = 1, 2, \dots, P \quad (19)$$

$$\sum_{m \in D} \sum_{k \in k_m} y_{kn}^{(mp)} + \sum_{m \in D} \sum_{k \in k_m} \sum_{u \in U_p} l_{kn}^{(mup)} = 1, \\ \forall n \in C_p, p = 1, 2, \dots, P \quad (20)$$

$$\sum_{m \in D} \sum_{j \in C_p \cup D} \sum_{k \in k_m} x_{ikj}^{(mp)} = 1, \forall i \in C_p, \\ p = 1, 2, \dots, P \quad (21)$$

$$\lambda_{jp} = (\lambda_{ip} + t_{ip} + d_{ij}^{(p)}) x_{ikj}^{(mp)}, \forall k \in k_m, m \in D, \\ i \in C_p \cup U_p \cup D, j \in C_p \cup D, p = 1, 2, \dots, P \quad (22)$$

$$\sum_{i \in D \cup C_p} \sum_{j \in U_p} \sum_{k \in k_m} x_{ikj}^{(mp)} + \sum_{i \in C_p \cup U_p} \sum_{j \in U_p} \sum_{k \in k_m} z_{ikj}^{(mup)} = 0, \\ p = 1, 2, \dots, P \quad (23)$$

$$\sum_{m \in D} \sum_{i \in U_p} \sum_{j \in D \cup C_p} \sum_{k \in k_m} z_{ikj}^{(mup)} = u_p, p = 1, 2, \dots, P \quad (24)$$

$$\sum_{m \in D} \sum_{j \in C_p} \sum_{k \in k_m} x_{ikj}^{(mp)} + \sum_{m \in D} \sum_{i \in U_p} \sum_{j \in D \cup C_p} \sum_{k \in k_m} z_{ikj}^{(mup)} = \\ \sum_{i \in C_p} \sum_{k \in k_m} \sum_{j \in D} x_{ikj}^{(mp)} + \sum_{i \in U_p \cup C_p} \sum_{k \in k_m} \sum_{u \in U_p} \sum_{j \in D} z_{ikj}^{(mup)}, \\ p = 1, 2, \dots, P \quad (25)$$

其中式(15)对从“关键点”发出的车辆进行路径规划时,需要保障该车辆路线中的客户需求量不能超过其剩余配送量;式(16)对从“关键点”发出的车辆进行路径规划时,需要保障车辆处于客户节点进行装卸活动时不可超过其承载量 $Q$ 限制;式(17)对于新派出的车辆,则其在出发时不可超过其承载量 $Q$ 限制;式(18)表示新派出的车

辆服务客户节点时不可超过承载量 $Q$ 的限制;式(19)避免新派出的车辆从一个配送中心直接驶往另一配送中心;式(20)表示客户点 $n$ ( $n \in C_p$ )都能服务到,且仅访问一次;式(21)保证车辆服务完客户点 $n$ ( $n \in C_p$ )后必须离开;式(22) $T_p$ 时刻车辆 $k$ 到达 $j$ 点的时刻等于车辆到达 $i$ 的时刻加上服务 $i$ 的时间以及车辆在 $i, j$ 两点行驶的时间;式(23)和式(24)表示对“关键点”为单向访问,即只能发出车辆;式(25)表示从配送中心新出发的车辆以及从虚拟配送中心出发的全部车辆返回任一配送中心。

## 4 模型求解

以往对于多目标问题解决方案中,多是通过线性赋权策略将多目标问题转化为单目标问题进行求解,此种方式虽然降低了求解难度,但是赋权过程具有较大的主观性,且求解结果单一,无法针对不同决策偏好提供有效备选方案,因此目前较多学者采用多目标算法求解多种决策方案<sup>[33,34]</sup>。多目标遗传算法(NSGA-II)是近年来多目标算法的应用热点,具有优越的大空间处理能力,在路径规划求解方面以及多目标求解展现出良好的性能,但其仍有易陷入局部最优解等缺陷<sup>[2,35,36]</sup>。为避免“早熟”现象以及得到分布较为均匀的非劣解集,设计了将NSGA-II的非支配排序操作、精英保留策略与免疫算法浓度调节机制相融合的多目标免疫遗传算法(multi-objective immune genetic algorithm, MOIGA)。该方法既可保证种群自我调节功能,又能实现优秀个体记忆保留,能有效克服一般寻优过程尤其是多峰函数寻优过程中“早熟”问题,具有更好保持种群多样性及全局搜索能力。

### 4.1 两阶段求解策略

根据上述建立的“初始路径优化模型+实时路径优化模型”两阶段数学模型,提出相应的两阶段求解策略,如图5所示。协同网络系统中的各配送中心在获知车辆、客户等相关信息基础上采

用“时间片”驱动策略规划行驶路径,即设定固定的时间间隔  $t$  进行车辆调度,借助多目标免疫遗传算法(MOIGA)求得最大化客户满意度以及最小化企业成本双重目标.

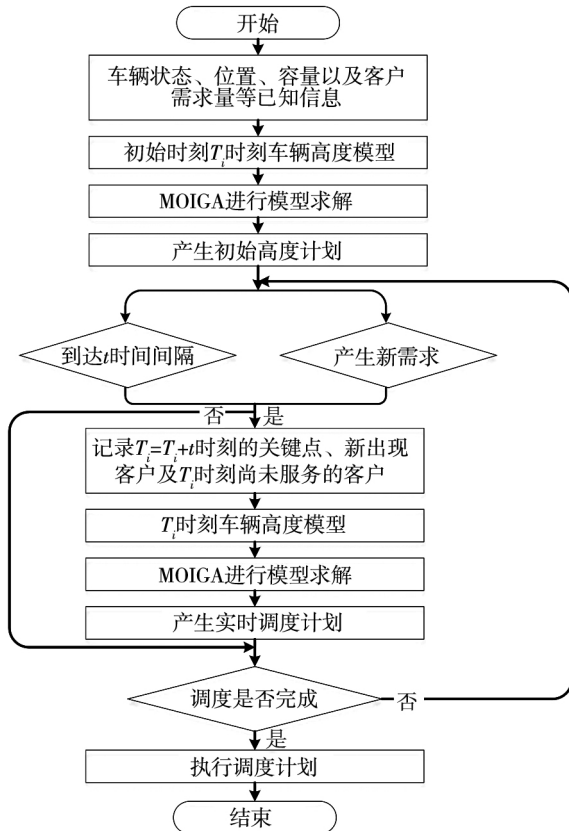


图 5 两阶段求解策略

Fig. 5 Two stage solution strategy

### 4.2 MOIGA 算法

使用带有非支配排序与精英策略的 MOIGA 对问题进行求解,具体操作流程如图 6 所示.

步骤 1 识别抗原. 分析问题以及解的特征,输入目标函数和约束作为抗原.

步骤 2 产生初始抗体. 由于所解决的问题具有多个配送中心及开放式等特点,因此根据编码所有物流节点来表示车辆行驶路径,如图 7,编码基因由等于客户节点数量  $n$  以及所需车辆数  $k$  构成,即每种抗体的总长度为  $n + 2k$ ,例如第  $k$  车辆的行驶路线为  $m_m \rightarrow n_i \rightarrow n_s \rightarrow n_j \rightarrow m_0$ . 在上述编码的基础上随机产生  $F$  个个体以及规模为  $B$  的记忆库,将二者结合形成初始种群.

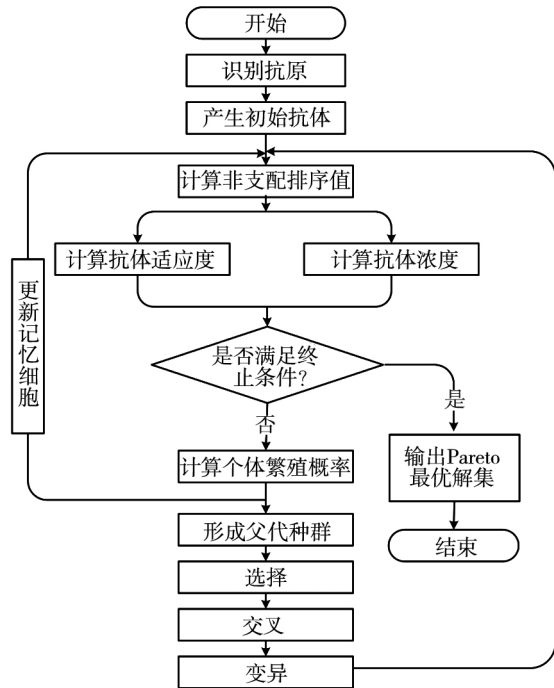


图 6 MOIGA 流程图

Fig. 6 Flowchart of MOIGA

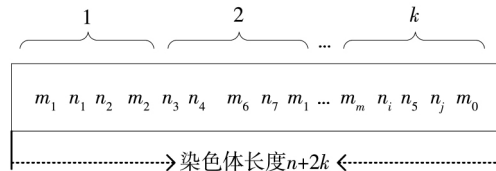


图 7 编码机制

Fig. 7 Encoding mechanism

步骤 3 计算非支配排序值. 计算初始种群的非支配值  $Rank_v$ , 为评估抗体适应度做准备.

步骤 4 评论抗体的多样性. 为保证解决方案的多样性,使用抗体与抗原之间的亲和力  $A_v$  以及抗体浓度  $C_v$  两部分进行综合评估,其中  $A_v$  表示抗体与抗原的识别程度,其使用  $Rank_v$  来表示, $Rank_v$  越小表示抗体与抗原之间的亲和力越好; $C_v$  用来表示相似抗体所占比例, $C_v$  越大说明个体在群体比重越高.

步骤 5 判断是否满足结束条件(迭代次数) 是则结束,否则继续下一步操作.

步骤 6 计算个体期望繁殖率  $P_v$ . 每个个体的期望繁殖率  $P_v = \frac{A_v}{C_v}$ ,使得具有较高  $A_v$  和较小  $C_v$  的抗体更有机会繁殖.



步骤7 形成父代种群. 按照繁殖概率  $P_i$  进行降序排列, 提取前  $F$  个个体构建父代种群, 同时采用精英策略, 根据非支配排序值按升序排列提取前  $x$  个存入记忆库, 然后按照期望繁殖率  $P_v$  选择  $B-x$  个优秀个体存入记忆库.

步骤8 遗传操作. 通过选择、交叉以及变异操作得到新种群, 再从记忆库中提取记忆细胞, 共同构成新一代群体后返回步骤3.

MOIGA 伪代码如表2所示.

表2 MOIGA 伪代码

Table 2 Pseudocode of MOIGA

|                                                     |
|-----------------------------------------------------|
| <i>begin</i>                                        |
| <i>initialize individuals, chrom</i>                |
| <i>for i ← 1 to maxgen</i>                          |
| <i>calculate individuals.fitness</i> //计算各抗体适应度     |
| <i>calculate individuals.rank</i> //计算各抗体的非支配排序值    |
| <i>calculate individuals.concentration</i> //计算抗体浓度 |
| <i>calculate individuals.excellence</i> //计算各抗体繁殖概率 |
| <i>update B using elite strategy</i> //使用精英策略更新记忆库B |
| <i>new F</i> //生成父代种群F                              |
| <i>individuals.chrom ← [B, F]</i> //形成新种群           |
| <i>end</i>                                          |
| <i>calculate individuals.fitness</i> //计算各抗体适应度     |
| <i>calculate individuals.rank</i> //计算各抗体的非支配排序值    |
| <i>output()</i> //输出结果                              |

## 5 算例仿真

### 5.1 算例设计

由于整合逆向物流的协同配送 DVRP 缺少标准的测试算例库, 在运用文献 [37] 中的配送中心坐标以及静态/动态客户坐标、时间窗以及部分配送需求等信息的基础上, 融合部分逆向需求数据、服务时间和模糊时间窗信息、客户信息. 具体算例

数据如表 A1 和表 A2 所示(见附录). 本算例中的车辆最大载重为  $Q = 5t$ , 速度  $v = 3 \text{ km/h}$ , 单位距离配送费用  $g = 15 \text{ 元}$ , 固定发车费  $f = 50 \text{ 元/辆}$ , 单位时间的机会成本  $c_e = 10 \text{ 元}$ , 惩罚成本  $c_l = 15 \text{ 元}$ , 开始服务时间为 0, 时间间隔  $t = 100$ , 同时使用欧式距离定义任意两个节点间的距离.

### 5.2 算例分析

设置种群规模  $a = 200$ , 迭代次数为 600 次, 交叉概率  $p_c = 0.8$ , 变异概率  $p_m = 0.2$ , 分别使用 MOIGA 算法、NSGA-II 算法与 MOIA 算法进行求解, 图 8 为得到的 Pareto 非劣解集分布, 其中横坐标为目标函数  $Z_1$  (企业总成本), 纵坐标为  $S_1$  (平均客户满意度). Pareto 非劣解集的每一个点对应不同的车辆初始行驶路线, 并按照成本递增规律对非劣解集的计划路线进行编制, MOIGA 求得方案如表 3, 其他两种算法见表 A3 和表 A4(见附录).

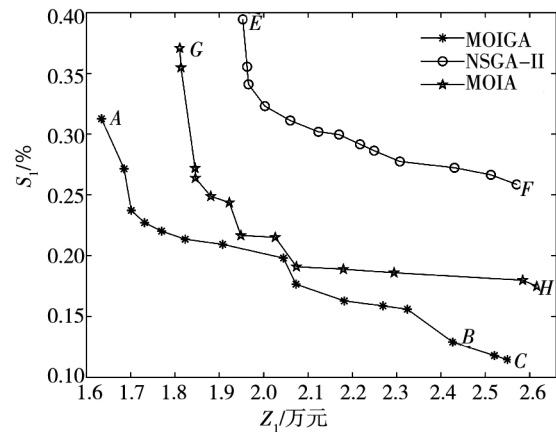


图8 Pareto 非劣解集在目标空间的分布图

Fig. 8 Distribution of Pareto noninferior solution set in target space

表3 MOIGA 的初始路线方案

Table 3 Scheduling schemes of initial route by MOIGA

| 方案 | 路径                                                                                   | $Z_1$ /元  | $(1 - S_1) / \%$ |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------|
| 1  | 1→25→12→8→21→17→14→1; 1→20→10→11→13→22→9→27→18→7→23→1; 3→19→6→26→5→4→2; 2→24→16→15→1 | 16 343.60 | 68.73            |
| 2  | 3→19→12→26→5→4→2; 1→25→6→8→21→17→14→1; 1→20→10→11→13→22→9→27→18→7→23→1; 2→24→16→15→1 | 16 853.24 | 72.85            |
| 3  | 2→24→16→15→1; 1→25→6→8→21→17→14→1; 1→20→10→11→13→22→9→27→18→7→23→1; 3→19→12→26→4→5→2 | 17 014.87 | 76.27            |

续表 3

Table 3 Continues

| 方案 | 路径                                                                                   | $Z_1$ /元  | $(1 - S_1) / \%$ |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------|
| 4  | 1→25→6→8→21→17→14→1; 3→19→12→26→4→24→2; 1→20→10→11→13→22→9→27→18→7→23→1; 2→5→16→15→1 | 17 313.71 | 77.28            |
| 5  | 3→19→12→26→4→24→2; 2→5→20→15→1; 1→25→6→8→21→17→14→1; 1→16→10→11→13→22→9→27→18→7→23→1 | 17 698.07 | 77.98            |
| 6  | 1→25→6→8→21→17→14→1; 1→16→10→11→13→22→9→27→18→7→23→1; 3→19→12→26→4→5→2; 2→24→20→15→1 | 18 230.11 | 78.64            |
| 7  | 2→21→16→15→1; 1→25→6→8→24→17→14→1; 1→20→10→11→13→22→9→27→18→7→23→1; 3→19→12→26→4→5→2 | 19 074.90 | 79.06            |
| 8  | 3→19→12→6→14→26→3; 1→25→8→21→17→23→2; 3→11→10→13→22→9→5→27→18→7→3; 1→15→20→16→4→24→1 | 20 445.24 | 80.19            |
| 9  | 1→15→20→16→4→24→1; 3→19→12→6→26→14→3; 1→25→8→17→21→23→2; 3→11→10→13→22→9→5→27→18→7→3 | 20 729.23 | 82.34            |
| 10 | 1→25→8→17→21→23→2; 3→19→12→6→5→24→3; 3→11→10→13→22→9→26→27→18→7→3; 1→15→20→16→4→14→1 | 21 818.79 | 83.71            |
| 11 | 1→25→8→20→17→23→2; 3→19→12→6→16→5→3; 1→15→21→4→26→14→1; 3→11→10→13→22→9→24→27→18→7→3 | 22 689.87 | 84.12            |
| 12 | 3→11→10→13→22→9→24→27→18→7→3; 1→15→21→4→14→17→1; 3→19→12→6→16→26→3; 1→25→8→20→5→23→2 | 23 240.76 | 84.40            |
| 13 | 3→19→12→6→26→14→3; 1→8→25→17→21→23→2; 3→11→10→13→22→9→5→27→18→7→3; 1→15→20→16→4→24→1 | 24 261.71 | 87.10            |
| 14 | 1→8→25→17→26→23→2; 3→19→12→6→21→5→3; 1→15→20→16→4→14→1; 3→11→10→13→22→9→24→27→18→7→3 | 25 203.80 | 88.21            |
| 15 | 3→19→12→6→5→26→3; 1→8→25→17→21→23→2; 3→11→10→13→22→9→24→27→18→7→3; 1→15→20→16→4→14→1 | 25 497.22 | 88.54            |

表 4 多目标算法的初始阶段对比

Table 4 Contrast of multi-objective algorithms in initial stage

| 指标                | 算法        |           |           |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|
|                   | MOIGA     | NSGA-II   | MOIA      |
| 方案数               | 15        | 13        | 13        |
| 运行时间/s            | 649.69    | 1 082.70  | 592.37    |
| $(1 - S_1)$ 最大值/% | 88.54     | 74.14     | 82.51     |
| $(1 - S_1)$ 最小值/% | 68.73     | 60.56     | 62.92     |
| $Z_1$ 最大值/元       | 25 497.22 | 25 705.38 | 26 158.79 |
| $Z_1$ 最小值/元       | 16 343.60 | 19 530.41 | 18 108.11 |

结合图 8、表 3 及表 A3 和表 A4 中所列数据, 可发现 MOIGA、NSGA-II 及 MOIA 都可以得到若干个非劣解集, 并且均显示平均客户满意度与配送企业成本之间呈现相悖现象. 结合表 4 中对比, 运用 MOIGA 算法求得 A 点中行驶路线产生的企业成本为 16 343.60 元, 平均客户满意度为 68.73%, C 点中的行驶路线产生的企业成本 25 497.22 元, 平均客户满意度达到 88.54%, 以 9 153.62 元的企业成本客户满意度增加了 19.81 个百分点. NSGA-II 求得的 E 点企业成本为 19 530.41 元, 客户满意度为

60.56%，F点的企业成本为25 705.38元，客户满意度为74.14%，以6 175.24元的成本客户满意度提高了13.58个百分点。MOIA则以3 689.28元的成本客户满意度提高了18.19个百分点。首先从求解数量来看，MOIGA > MOIA > NSGA-II。其次，也看出MOIGA的全局搜索能力优于NSGA-II和MOIA，MOIGA求得的解不仅在数量而且在解的质量上要优于NSGA-II和MOIA。此外在相同成本下，MOIGA求得的客户满意度更大，例如MOIGA求得的B点成本为24 261.71元，客户满意度为87.1%，NSGA-II求得的F点的成本为25 705.38元，客户满意度为74.14%。MOIA在H点比C点花费更多的成本，客户满意度却仍小于C点的客户满意度。但从求解效率方面看，MOIGA的求解效率要劣于MOIA的求解效率。最后，也可以看出多配送中心相互协作，车辆初始出发点和最终停靠点不同。配送企业必然希望以尽量少的成本换取更高的客户满意度。从综合角度来看，MOIGA所求得解更符合企业决策需求。

由上述分析可知MOIGA的Pareto解集更能保证配送企业的利益和服务客户的需求，因此，在 $T_0$ 时刻从MOIGA求得的若干个决策中随机选择一个初始行驶路线B，然后在间隔 $t = 100$ 时间段后对该路线进行重新规划，如图9所示。

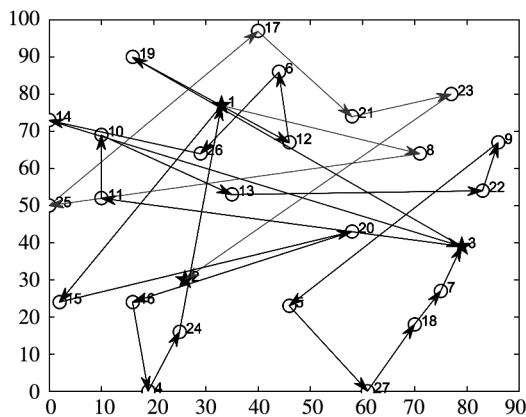


图9 初始路线行驶图

Fig. 9 Initial routes

到达时刻  $T_1 = 100 (T_1 = T_0 + t)$  时，调度中心

获得表A2的动态客户需求以及位置等信息，同时可得到行驶在路线1(③→19→12→6→26→14→③)的车辆正处在14→26行驶过程中；路线2(①→8→25→17→21→23→②)的车辆处在节点23中；路线3(③→11→10→13→22→9→5→27→18→7→③)的车辆正处在节点5；路线4(①→15→20→16→4→24→①)的车辆则处在24→①的行驶路程中。所以 $T_1$ 时刻的“关键点”即为客户节点5和客户节点23。由于车辆正在行驶的路线不可改变，故可认为路线1、路线4已经行驶完毕，同时将客户点5、客户点23看作“虚拟配送中心”进行动态路径规划得到非劣解集，见图10，相应行驶路线如表5(MOIGA)、表A5(NSGA-II)和表A6(MOIA)所示。

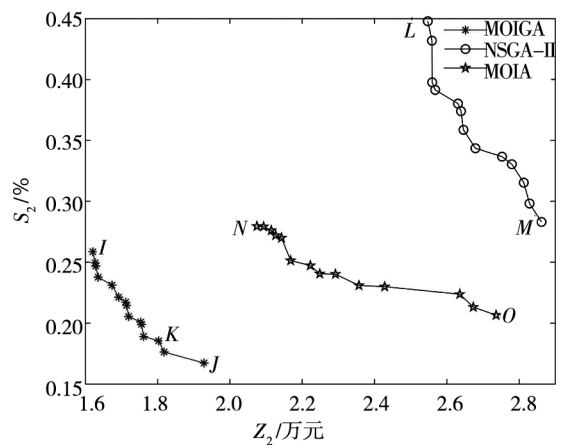


图10 动态路径非劣解集在目标空间的分布图

Fig. 10 Distribution diagram of noninferior solution set of dynamic path in target space

在动态路径优化阶段，通过图10、表5及表A5和表A6可发现，MOIGA所求得的非劣解集优于NSGA-II和MOIA。从解的数量及质量上看，MOIGA求得结果要优于NSGA-II和MOIA，MOIGA可以实现以最小的成本换取最大的客户满意度，而且3种算法也均显示出平均客户满意度与企业成本之间呈现相悖现象。结合表6的结果对比，MOIGA所求I点和J点的企业运营成本和客户满意度分别为(19 285.75元，83.27%)以及(16 208.91元，74.14%)，企业运营成本的投入增加带动了客户满意度的增加。从求解效率来看，MOIGA劣于MOIA，但都明

显优于 NSGA-II 的运行时间. 因此, 从综合评估角度来看, 在动态路径规划阶段中 MOIGA 所求得解也更符合企业的决策需求. 同时, 为更明显的观察初始路线的变化情况, 随机选取点  $K$  作为企业决策

者在  $T_1$  做出的决策方案, 如图 11 所示. 可以看出根据新需求的出现, 虚拟配送中心“5”和虚拟配送中心“23”的行驶路线都发生了调整, 而且增配了车辆服务客户.

表 5 MOIGA 的动态路线方案

Table 5 Scheduling schemes of dynamic route by MOIGA

| 方案 | 路径                                                                                                               | $Z_1 / \text{元}$ | $(1 - S_1) / \%$ |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|
| 1  | 5→28→51→35→7→3; 23→31→1; 2→45→29→38→43→34→41→44→49→32→42→27→36→37→18→50→52→3; 1→33→48→39→40→47→55→54→30→46→53→2  | 16 208.91        | 74.14            |
| 2  | 1→33→48→39→40→47→55→54→30→46→53→2; 5→28→51→35→7→3; 23→31→1; 2→45→29→38→34→43→41→44→49→32→42→27→36→37→18→50→52→3; | 16 274.35        | 75.04            |
| 3  | 2→45→29→38→43→34→41→44→49→32→42→27→36→37→18→50→52→3; 5→51→28→35→7→3; 23→31→1; 1→33→48→39→40→47→55→54→30→46→53→2  | 16 290.00        | 75.32            |
| 4  | 5→51→28→35→7→3; 23→31→1; 2→45→29→38→34→43→41→44→49→32→42→27→36→37→18→50→52→3; 1→33→48→39→40→47→55→54→30→46→53→2  | 16 355.44        | 76.22            |
| 5  | 2→45→29→38→43→34→28→44→49→32→42→27→36→37→18→50→52→3; 5→51→41→35→7→3; 23→31→1; 1→33→48→39→40→47→55→54→30→46→53→2  | 16 739.15        | 76.88            |
| 6  | 5→51→28→35→7→3; 23→31→1; 2→45→29→38→34→43→41→44→49→32→42→37→36→27→18→50→52→3; 1→33→48→39→40→47→55→54→30→46→53→2  | 16 923.40        | 77.87            |
| 7  | 1→33→48→39→47→40→50→54→30→46→53→2; 5→28→51→35→7→3; 23→31→1; 2→45→29→38→34→43→41→44→49→32→42→27→36→37→18→55→52→3  | 17 116.89        | 78.27            |
| 8  | 5→51→28→35→7→3; 23→31→1; 2→45→29→38→43→34→41→44→49→32→42→27→36→37→18→55→52→3; 1→33→48→39→47→40→50→54→30→46→53→2  | 17 143.45        | 78.54            |
| 9  | 5→51→28→35→7→3; 23→31→1; 2→45→29→38→34→43→41→44→49→32→42→27→36→37→18→55→52→3; 1→33→48→39→47→40→50→54→30→46→53→2  | 17 197.98        | 79.45            |
| 10 | 23→31→1; 2→45→29→38→34→43→41→44→49→32→42→37→27→36→18→55→52→3; 5→28→51→35→7→3; 1→33→48→39→47→40→50→54→30→46→53→2  | 17 530.43        | 79.91            |
| 11 | 5→51→28→35→7→3; 2→45→29→38→43→34→41→44→49→32→42→37→27→36→18→55→52→3; 23→31→1; 1→33→48→39→47→40→50→54→30→46→53→2  | 17 556.99        | 80.09            |
| 12 | 23→31→1; 2→45→29→38→34→43→41→44→49→32→42→37→27→36→18→55→52→3; 1→33→48→39→47→40→50→54→30→46→53→2; 5→51→28→35→7→3  | 17 611.52        | 81.09            |
| 13 | 1→33→48→39→47→40→50→54→30→46→53→2; 5→51→41→35→7→3; 23→31→1; 2→45→29→38→43→34→28→44→49→32→42→37→27→36→18→55→52→3  | 18 029.81        | 81.45            |
| 14 | 5→51→41→35→7→3; 23→31→1; 2→45→29→38→34→43→28→44→49→32→42→37→27→36→18→55→52→3; 1→33→48→39→47→40→50→54→30→46→53→2  | 18 180.48        | 82.37            |
| 15 | 23→31→1; 2→45→29→38→43→28→18→44→49→32→42→37→27→36→34→55→52→3; 5→51→41→35→7→3; 1→33→48→39→47→40→50→54→30→46→53→2  | 19 285.75        | 83.27            |

表6 动态阶段的多目标算法对比

Table 6 Contrast of multi-objective algorithms in dynamic stage

| 指标                          | 算法        |           |           |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
|                             | MOIGA     | NSGA-II   | MOIA      |
| 方案数量                        | 15        | 13        | 14        |
| 运行时间/s                      | 645.21    | 1 197.09  | 521.10    |
| (1 - S <sub>2</sub> ) 最大值/% | 83.27     | 71.69     | 79.34     |
| (1 - S <sub>2</sub> ) 最小值/% | 74.14     | 55.21     | 72.04     |
| Z <sub>2</sub> 最大值/元        | 19 285.75 | 28 616.36 | 27 361.05 |
| Z <sub>2</sub> 最小值/元        | 16 208.91 | 25 472.44 | 20 746.23 |

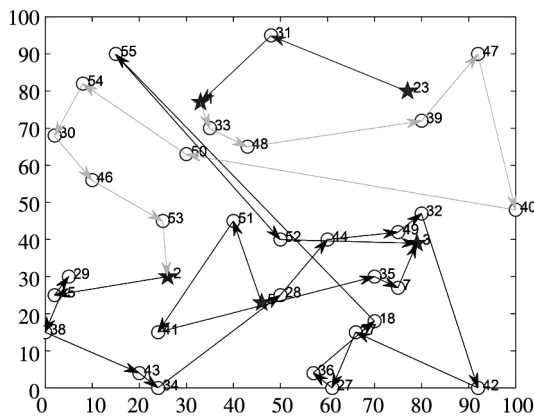


图11 动态路径行驶图

Fig. 11 Dynamical routes map

## 6 结束语

协同配送的蓬勃发展使得各企业间经济相关程度不断加深,日益严苛的物流环保政策也迫使各生产运营企业开始着眼于完善逆向物流体系的构建.为此,从服务企业以及需求客户等多角度出发,试图将多目标、正逆向需求、动态路径规划以及时间窗等多种影响因素融合到 MDVRP 问题研究当中.文章选取了服务企业总成本最小以及客户满意度最大为优化目标,建立了“初始静态 + 实施动态”的两阶段路径规划模型,运用设计的 MOIGA 与 NSGA-II、MOIA 进行对比求解,两个阶

### 参考文献:

[1] Xu X, Hao J, Deng Y, et al. Design optimization of resource combination for collaborative logistics network under uncertainty [J]. Applied Soft Computing, 2017, 56: 684 - 691.  
 [2] Wang Y, Zhang J, Assogba K, et al. Collaboration and transportation resource sharing in multiple centers vehicle routing optimization with delivery and pickup [J]. Knowledge-Based Systems, 2018, 160: 296 - 310.

段的实验结果不仅验证了算法的优越性以及数学模型的合理性,而且增加了规划方案的有效性和可选择性.结合案例分析给出主要的管理启示如下.

1) 在目标选择方面,满足客户需求前提下客户满意度最大化与企业运营成本最小化等目标之间存在悖反关系.比如,在求解初始和动态路径优化的 Pareto 前沿面中,客户满意度越高,企业所花费的成本也就越高.企业运营成本与客户满意度并重的决策方案比单纯追求企业成本最小化更具有现实意义.在如今快节奏的生活方式中,客户的时间观念和要求日益增加,企业物流的服务时间会直接影响到客户对于公司的直观印象,继而会影响公司信誉、客户忠诚度以及客户覆盖率.

2) 在计算强度方面,协同配送网络动态需求分批调整避免了协同配送过程中实时高频计算带来成本损耗.企业可以根据以往不同地区的配送业务繁忙程度,及时调整“时间片”大小来进行配送和回收活动,实现最小化企业成本及最大化客户满意度.

3) 在方案决策方面,企业可以根据自身的经营状况、发展需求以及企业文化等影响因素,来选择适宜的配送方案.对于类似顺丰速运、京东物流等追求服务速度与质量的企业,则更倾向于选择客户满意度较高的决策方案.

针对目前配送企业拥有的车型不一以及对客户群体的分级分类等现实情况,在后续研究中考虑将多车型混合和带有客户服务优先级的 DVRPSPD 作为进一步研究方向.例如可根据配送中心拥有的不同装载量车型,在考虑协同配送量尽可能均衡前提下,提升配送车辆与规划路线的匹配度,减少车辆空载率和空驶时间.同时,配送中心还可根据实际服务过程中客户粘性、服务频率及信用状况等,划分不同客户服务优先级,继而对配送服务的反馈效果及方案选择做出相应调整.

- [3] Xu X, Hao J, Yu L, et al. Fuzzy optimal allocation model for task-resource assignment problem in a collaborative logistics network [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2019, 27(5): 1112–1125.
- [4] 王付宇, 叶春明, 王涛, 等. 震后伤员救援车辆两阶段规划模型及算法研究 [J]. *管理科学学报*, 2018, 21(2): 68–79.  
Wang Fuyu, Ye Chunming, Wang Tao, et al. Research on two stage planning model and algorithm of wounded rescue vehicle after earthquake [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2018, 21(2): 68–79. (in Chinese)
- [5] Dethloff J. Vehicle routing and reverse logistics: The vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up [J]. *OR-Spektrum*, 2001, 23(1): 79–96.
- [6] 葛显龙, 王旭, 邓蕾. 基于联合配送的开放式动态车辆路径问题及算法研究 [J]. *管理工程学报*, 2013, 27(3): 60–68.  
Ge Xianlong, Wang Xu, Deng Lei. Research on open and dynamic vehicle routing problems based on joint distribution [J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2013, 27(3): 60–68. (in Chinese)
- [7] 张景玲, 王万良, 赵燕伟. 基于沿途补货的多配送中心动态需求 VRP 建模及优化 [J]. *计算机集成制造系统*, 2013, 19(4): 869–878.  
Zhang Jingling, Wang Wanliang, Zhao Yanwei. Modeling and optimization for dynamic requests multi-depot vehicle routing problem with replenishment on the way [J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2013, 19(4): 869–878. (in Chinese)
- [8] 王妍妍, 孙佰清. 多受灾点应急物资动态多阶段分配模型研究 [J]. *中国管理科学*, 2019, 27(10): 138–147.  
Wang Yanyan, Sun Baiqing. Dynamic multi-stage allocation model of emergency materials for multiple site [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2019, 27(10): 138–147. (in Chinese)
- [9] 马祖军, 周渝峰. 国家血液战略储备库选址—库存问题 [J]. *管理科学学报*, 2018, 21(3): 54–68.  
Ma Zujun, Zhou Yufeng. Location-inventory problem for national strategic blood reserves [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2018, 21(3): 54–68. (in Chinese)
- [10] Abdallah A M F M, Essam D L, Sarker R A. On solving periodic re-optimization dynamic vehicle routing problems [J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 55: 1–12.
- [11] de Armas J, Melián-Batista B. Variable neighborhood search for a dynamic rich vehicle routing problem with time windows [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 85: 120–131.
- [12] Barkaoui M, Berger J, Boukhtouta A. Customer satisfaction in dynamic vehicle routing problem with time windows [J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 35: 423–432.
- [13] Chen S, Chen R, Wang G, et al. An adaptive large neighborhood search heuristic for dynamic vehicle routing problems [J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2018, 67: 596–607.
- [14] Avci M, Topaloglu S. A hybrid metaheuristic algorithm for heterogeneous vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery [J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 53: 160–171.
- [15] Lai M, Cao E. An improved differential evolution algorithm for vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries and time windows [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2010, 23(2): 188–195.
- [16] Lyu X, Wang N, Yang Z, et al. Shipper collaboration in forward and reverse logistics [J]. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 2018, 13(5): 1–37.
- [17] Ma Y, Li Z, Yan F, et al. A hybrid priority-based genetic algorithm for simultaneous pickup and delivery problems in reverse logistics with time windows and multiple decision-makers [J]. *Soft Computing*, 2019, 23(15): 6697–6714.
- [18] Nagy G, Salhi S. Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries [J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 162(1): 126–141.
- [19] Belgin O, Karaoglan I, Altiparmak F. Two-echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Mathematical model and heuristic approach [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 115: 1–16.
- [20] Yu V F, Lin S. Multi-start simulated annealing heuristic for the location routing problem with simultaneous pickup and delivery [J]. *Applied Soft Computing*, 2014, 24: 284–290.
- [21] 张江华, 李进, 高敏刚. 同时集散货物的开放式车辆路径问题研究 [J]. *中国管理科学*, 2013, 21(4): 187–192.  
Zhang Jianghua, Li Jin, Gao Mingang. Research on the open vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pickups [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2013, 21(4): 187–192. (in Chinese)
- [22] Kachitvichyanukul V, Sombuntham P, Kunnapadeelert S. Two solution representations for solving multi-depot vehicle routing problem with multiple pickup and delivery requests via PSO [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 89: 125–136.

- [23] Wang X, Yang F, Lu D. Multi-objective location-routing problem with simultaneous pickup and delivery for urban distribution [J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2018, 35(4): 3987–4000.
- [24] Xiang Z, Chu C, Chen H. The study of a dynamic dial-a-ride problem under time-dependent and stochastic environments [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 185(2): 534–551.
- [25] Zhu L, Sheu J. Failure-specific cooperative recourse strategy for simultaneous pickup and delivery problem with stochastic demands [J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 271(3): 896–912.
- [26] 马艳芳, 闫芳, 康凯, 等. 不确定同时取送货车辆路径问题及粒子群算法研究 [J]. *运筹与管理*, 2018, 27(12): 73–83.  
Ma Yanfang, Yan Fang, Kang Kai, et al. An improved particle swarm optimization for simultaneous pickup and delivery vehicle routing problems with time windows under a fuzzy random environment [J]. *Operations Research and Management Science*, 2018, 27(12): 73–83. (in Chinese)
- [27] Zhu Z, Xiao J, He S, et al. A multi-objective memetic algorithm based on locality-sensitive hashing for one-to-many-to-one dynamic pickup-and-delivery problem [J]. *Information Sciences*, 2016, 329: 73–89.
- [28] Gendreau M, Guertin F, Potvin J, et al. Neighborhood search heuristics for a dynamic vehicle dispatching problem with pick-ups and deliveries [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2006, 14(3): 157–174.
- [29] Yuchi Q, Wang N, He Z, et al. Hybrid heuristic for the location-inventory-routing problem in closed-loop supply chain [J/OL]. *International Transactions in Operational Research*, 2018, <https://doi.org/10.1111/itor.12621>.
- [30] Xu J, Yan F, Li S. Vehicle routing optimization with soft time windows in a fuzzy random environment [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2011, 47(6): 1075–1091.
- [31] Ghannadpour S F, Noori S, Tavakkoli-Moghaddam R, et al. A multi-objective dynamic vehicle routing problem with fuzzy time windows: Model, solution and application [J]. *Applied Soft Computing*, 2014, 14: 504–527.
- [32] Hu Z, Sheu J, Zhao L, et al. A dynamic closed-loop vehicle routing problem with uncertainty and incompatible goods [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 55: 273–297.
- [33] 徐小峰, 刘靖. 多阶段并发的协同物流网络任务-资源集成调配模型 [J]. *运筹与管理*, 2018, 27(7): 43–48.  
Xu Xiaofeng, Liu Jing. Task-resource integrated assignment model for collaborative logistics network under multi-stage concurrence [J]. *Operations Research and Management Science*, 2018, 27(7): 43–48. (in Chinese)
- [34] Xu X, Hao J, Zheng Y. Multi-objective artificial bee colony algorithm for multi-stage resource leveling problem in sharing logistics network [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 142: 106338.
- [35] Wu Z, Kwong C K, Aydin R, et al. A cooperative negotiation embedded NSGA-II for solving an integrated product family and supply chain design problem with remanufacturing consideration [J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 57: 19–34.
- [36] Ombuki B, Ross B J, Hanshar F. Multi-objective genetic algorithms for vehicle routing problem with time windows [J]. *Applied Intelligence*, 2006, 24(1): 17–30.
- [37] 王万良, 黄海鹏, 赵燕伟, 等. 基于车辆共享的软时间窗动态需求车辆路径问题 [J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(5): 1056–1063.  
Wang Wanliang, Huang Haipeng, Zhao Yanwei, et al. Dynamic customer demand VRP with soft time windows based on vehicle sharing [J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2011, 17(5): 1056–1063. (in Chinese)

## Dynamic vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery in collaborative distribution under demand concurrent

XU Xiao-feng, JIANG Ming-yue, DENG Yi-rui

School of Economics and Management, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

**Abstract:** The uncertainty in dynamic route planning and flexible scheme formulation will bring more severe challenges for collaborative distribution with simultaneous pickup and delivery, due to random concurrent of customer demand and variable open-loop of driving route. In this paper, “time slice” is applied to transforming dynamic vehicle routing problem (DVRP) into a series of static optimization problems, and a two-stage solution strategy for collaborative distribution with simultaneous pickup and delivery is proposed. Firstly, taking soft and hard constraints such as vehicle load and time window into account, a two-stage vehicle routing model composed by initial and actual time stage is constructed, which aims at minimizing the total logistics cost and

maximizing customer satisfaction. Secondly, a multi-objective immune genetic algorithm (MOIGA) combined with non-dominated ranking and elite strategy is designed to solve the model. Finally, the results show that the relationship between customer satisfaction and logistics operation cost is contrary. High distribution cost will bring high customer satisfaction. Under the same cost expenditure, the customer satisfaction of schemes generated by MOIGA is higher than that by NSGA-II or MOIA, which verifies the effectiveness and superiority of the model.

**Key words:** random demand; simultaneous pickup and delivery; collaborative distribution; DVRP; MOIGA

附录:

表 A1 初始节点需求数据  
Table A1 Needs data of initial nodes

| 节点 | 坐标       | 模糊时间窗               | 配送需求量 | 回收需求量 | 服务时间 |
|----|----------|---------------------|-------|-------|------|
| 1  | (33, 77) |                     |       |       | 0    |
| 2  | (26, 30) |                     |       |       | 0    |
| 3  | (79, 39) |                     |       |       | 0    |
| 4  | (19, 0)  | [74, 80, 130, 144]  | 0.4   | 0     | 5    |
| 5  | (46, 23) | [58, 78, 108, 128]  | 1.4   | 1.2   | 5    |
| 6  | (44, 86) | [15, 45, 55, 85]    | 0.1   | 0.2   | 5    |
| 7  | (75, 27) | [99, 109, 156, 166] | 0     | 0.2   | 2    |
| 8  | (71, 64) | [47, 77, 87, 117]   | 2     | 1.8   | 10   |
| 9  | (86, 67) | [85, 95, 105, 115]  | 0.4   | 0.2   | 5    |
| 10 | (10, 69) | [21, 36, 76, 91]    | 1     | 0     | 3    |
| 11 | (10, 52) | [9, 29, 59, 79]     | 0     | 0.5   | 3    |
| 12 | (46, 67) | [37, 47, 97, 107]   | 0     | 0.8   | 3    |
| 13 | (35, 53) | [21, 41, 100, 121]  | 0.5   | 0.9   | 5    |
| 14 | (0, 73)  | [74, 84, 164, 174]  | 0.6   | 0.2   | 5    |
| 15 | (2, 24)  | [58, 88, 128, 158]  | 0.8   | 1     | 3    |
| 16 | (16, 24) | [15, 55, 85, 125]   | 1.2   | 1.3   | 5    |
| 17 | (40, 97) | [56, 76, 136, 156]  | 0.4   | 0     | 5    |
| 18 | (70, 18) | [87, 127, 147, 187] | 0.4   | 0.2   | 2    |
| 19 | (16, 90) | [0, 30, 70, 100]    | 0.8   | 1     | 5    |
| 20 | (58, 43) | [10, 50, 70, 110]   | 1     | 1.2   | 5    |
| 21 | (58, 74) | [30, 70, 90, 130]   | 1     | 1     | 3    |
| 22 | (83, 54) | [21, 51, 91, 121]   | 0.5   | 0.2   | 3    |
| 23 | (77, 80) | [74, 94, 154, 174]  | 0.3   | 0.2   | 3    |
| 24 | (25, 16) | [58, 98, 118, 158]  | 1     | 0.7   | 5    |
| 25 | (0, 50)  | [15, 40, 100, 125]  | 0     | 0.1   | 5    |
| 26 | (29, 64) | [56, 96, 116, 156]  | 1.3   | 1     | 5    |
| 27 | (61, 0)  | [87, 107, 167, 187] | 0     | 0.6   | 5    |



表 A2 动态客户需求数据  
Table A2 Needs data of dynamic nodes

| 节点 | 坐标        | 模糊时间窗             | 配送需求量 | 回收需求量 | 服务时间 |
|----|-----------|-------------------|-------|-------|------|
| 28 | ( 50 25)  | [65 105 155 195]  | 0.2   | 0     | 3    |
| 29 | ( 5 30)   | [70 90 120 140]   | 0.6   | 0.5   | 5    |
| 30 | ( 2 68)   | [59 99 119 159]   | 0.3   | 0     | 5    |
| 31 | ( 48 95)  | [80 110 150 180]  | 0     | 0.2   | 3    |
| 32 | ( 80 47)  | [78 108 218 248]  | 0.5   | 0.8   | 10   |
| 33 | ( 35 70)  | [66 96 136 166]   | 1     | 1.2   | 10   |
| 34 | ( 24 0)   | [83 113 123 153]  | 0.5   | 0     | 5    |
| 35 | ( 70 30)  | [94 114 144 164]  | 0     | 0.3   | 3    |
| 36 | ( 57 4)   | [67 87 247 267]   | 0.2   | 0     | 5    |
| 37 | ( 66 15)  | [79 94 234 259]   | 0.2   | 0.2   | 3    |
| 38 | ( 0 15)   | [100 114 166 180] | 0     | 0.3   | 3    |
| 39 | ( 80 72)  | [80 80 190 190]   | 0.2   | 0.4   | 5    |
| 40 | ( 100 48) | [90 120 182 222]  | 0.1   | 0.2   | 3    |
| 41 | ( 24 15)  | [76 105 134 163]  | 0     | 0.4   | 3    |
| 42 | ( 92 0)   | [60 94 234 264]   | 0.2   | 0.1   | 3    |
| 43 | ( 20 4)   | [59 79 144 165]   | 1     | 0.5   | 10   |
| 44 | ( 60 40)  | [99 139 180 220]  | 0.1   | 0.2   | 3    |
| 45 | ( 2 25)   | [42 102 340 400]  | 0.3   | 0     | 3    |
| 46 | ( 10 56)  | [99 109 230 240]  | 0.1   | 0.1   | 3    |
| 47 | ( 92 90)  | [79 84 187 197]   | 0.2   | 0     | 5    |
| 48 | ( 43 65)  | [94 114 124 144]  | 0.6   | 0     | 5    |
| 49 | ( 75 42)  | [74 130 190 250]  | 0     | 0.2   | 3    |
| 50 | ( 30 63)  | [90 130 220 260]  | 0.2   | 0.3   | 5    |
| 51 | ( 40 45)  | [40 50 110 120]   | 0.1   | 0     | 3    |
| 52 | ( 50 40)  | [30 60 340 370]   | 0.1   | 0.1   | 3    |
| 53 | ( 25 45)  | [120 130 260 270] | 0.1   | 0     | 3    |
| 54 | ( 8 82)   | [90 105 115 130]  | 0     | 0.2   | 3    |
| 55 | ( 15 90)  | [90 110 300 320]  | 0.1   | 0     | 5    |

表 A3 初始路线调度方案(NSGA-II)  
Table A3 Scheduling schemes of initial route by NSGA-II

| 方案 | 路径                                                                                   | $Z_1 / \text{元}$ | $S_1 / \%$ |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------|
| 1  | 2→27→17→13→26→15→4→24→2; 3→10→16→12→22→5→2; 1→19→20→11→6→9→21→23→3; 1→25→14→8→18→7→3 | 19 530.41        | 60.56      |
| 2  | 3→10→16→12→22→5→2; 2→27→17→14→26→15→4→18→2; 1→19→20→11→6→9→21→23→3; 1→25→13→24→8→7→3 | 19 626.80        | 64.45      |
| 3  | 2→27→17→14→26→15→4→18→2; 1→19→20→11→6→9→21→23→3; 3→10→16→12→22→5→2; 1→25→13→8→24→7→3 | 19 656.97        | 65.90      |
| 4  | 3→10→16→12→22→5→2; 2→27→17→14→26→15→7→18→2; 1→25→13→8→24→4→3; 1→19→20→11→6→9→21→23→3 | 20 026.98        | 67.69      |
| 5  | 1→19→20→11→6→9→21→23→3; 2→25→8→14→26→4→27→18→2; 3→10→16→12→22→5→2; 1→15→13→24→17→7→3 | 20 599.25        | 68.88      |
| 6  | 2→4→8→14→26→7→27→18→2; 3→10→16→12→22→5→2; 1→19→20→11→6→9→21→23→3; 1→25→13→17→24→15→3 | 21 233.85        | 69.81      |
| 7  | 3→10→16→12→22→5→2; 2→25→8→14→26→4→27→18→2; 1→15→13→17→24→7→3; 1→19→20→11→6→9→21→23→3 | 21 699.38        | 70.03      |
| 8  | 3→10→16→12→22→5→2; 1→19→20→11→6→9→21→23→3; 2→4→8→14→26→7→27→18→2; 1→25→13→24→17→15→3 | 22 173.12        | 70.83      |
| 9  | 3→25→8→14→26→7→27→18→3; 2→10→16→12→22→5→2; 1→13→20→11→6→9→21→23→17→2; 3→15→19→24→4→1 | 22 490.52        | 71.36      |
| 10 | 2→25→8→14→26→7→27→18→2; 3→10→16→12→22→5→2; 1→19→20→11→6→9→21→23→3; 1→4→13→17→24→15→3 | 23 070.91        | 72.25      |
| 11 | 1→19→20→11→6→9→21→23→3; 2→25→8→14→26→4→7→18→2; 3→10→16→12→22→5→2; 1→27→13→17→24→15→3 | 24 302.66        | 72.76      |
| 12 | 2→27→8→14→26→25→7→18→2; 3→10→16→12→22→5→2; 1→19→20→11→6→9→21→23→3; 1→4→13→17→24→15→3 | 25 123.28        | 73.34      |
| 13 | 2→4→8→14→26→25→7→18→2; 1→19→20→11→6→9→21→23→3; 3→10→16→12→22→5→2; 1→27→13→17→24→15→3 | 25 705.38        | 74.14      |

表 A4 初始路线调度方案(MOIA)  
Table A4 Scheduling schemes of initial route by MOIA

| 方案 | 路径                                                                                   | $Z_1$ /元  | $S_1$ /% |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------|
| 1  | 3→19→10→25→11→26→14→1; 1→17→24→16→4→27→18→2; 1→8→15→5→9→23→7→2; 2→20→21→6→12→13→22→1 | 18 108.11 | 62.92    |
| 2  | 1→8→15→5→9→23→7→2; 3→19→10→25→11→26→14→1; 1→17→24→16→4→18→27→2; 2→20→21→6→12→13→22→1 | 18 135.61 | 64.52    |
| 3  | 2→17→24→16→4→18→27→2; 1→8→15→5→9→23→7→1; 3→19→10→25→11→26→14→1; 2→13→21→6→12→20→22→1 | 18 453.15 | 72.80    |
| 4  | 2→8→15→5→9→23→7→1; 2→20→21→6→12→13→22→1; 3→19→10→25→11→26→14→1; 2→17→24→16→4→27→18→1 | 18 460.64 | 73.61    |
| 5  | 1→8→15→5→9→23→7→1; 2→6→21→13→12→20→22→1; 3→19→10→25→11→26→14→1; 2→17→24→16→4→27→18→2 | 18 807.99 | 75.11    |
| 6  | 3→19→10→25→12→26→14→1; 2→17→24→16→4→27→18→2; 2→8→15→5→9→23→7→1; 1→6→11→13→21→20→22→1 | 19 225.77 | 75.63    |
| 7  | 3→19→10→25→21→14→26→1; 2→17→24→16→4→27→18→2; 2→8→15→5→9→23→7→1; 1→6→11→13→12→20→22→1 | 19 485.67 | 78.33    |
| 8  | 2→17→24→16→4→18→27→2; 3→19→10→25→21→26→14→1; 1→8→15→5→9→23→7→1; 2→6→11→13→12→20→22→1 | 20 261.01 | 78.48    |
| 9  | 2→17→15→5→9→23→7→1; 3→19→10→25→21→14→26→1; 2→18→8→16→4→27→24→2; 1→6→11→13→12→20→22→1 | 20 738.44 | 80.90    |
| 10 | 3→19→10→25→21→27→14→1; 2→17→24→16→4→26→23→1; 2→8→15→5→9→18→7→1; 2→6→11→13→12→20→22→1 | 21 797.39 | 81.11    |
| 11 | 3→19→10→25→21→14→27→1; 2→17→24→16→4→26→18→1; 2→8→15→5→9→23→7→1; 2→6→11→13→12→20→22→1 | 22 940.53 | 81.40    |
| 12 | 2→17→20→16→4→27→23→1; 3→19→10→25→21→26→14→1; 2→8→15→5→9→18→7→1; 2→24→11→6→12→13→22→1 | 25 841.34 | 82.01    |
| 13 | 3→19→10→25→21→14→26→1; 2→17→16→20→4→27→18→2; 1→8→15→5→9→23→7→1; 2→24→11→6→12→13→22→1 | 26 158.79 | 82.51    |

表 A5 动态路线方案( NSGA-II )  
Table A5 Scheduling schemes of dynamic route by NSGA-II

| 方案 | 路径                                                                                                              | $Z_2$ /元   | $S_2$ /% |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------|
| 1  | 5→7→38→36→42→35→2; 23→2; 3→32→37→18→27→28→43→53→49→40→47→31→39→52→44→2; 2→34→41→51→48→33→54→46→29→45→30→55→50→1 | 25 472. 44 | 55. 21   |
| 2  | 5→7→38→36→42→35→2; 23→2; 3→40→37→18→27→28→43→53→49→32→39→31→47→52→44→2; 2→34→41→51→48→33→54→46→29→45→30→55→50→1 | 25 586. 76 | 56. 81   |
| 3  | 3→32→37→18→27→28→44→53→49→40→47→31→39→52→43→2; 5→7→38→36→42→35→2; 23→2; 2→34→41→51→48→33→54→46→29→45→30→55→50→1 | 25 593. 41 | 60. 23   |
| 4  | 23→2; 3→40→37→18→27→28→44→53→49→32→39→31→47→52→43→2; 5→7→38→36→42→35→2; 2→34→41→51→48→33→54→46→29→45→30→55→50→1 | 25 677. 30 | 60. 85   |
| 5  | 2→34→41→51→48→33→54→46→29→45→30→55→33→1; 5→7→38→36→42→35→2; 23→2; 3→32→37→18→27→28→44→53→49→40→47→31→39→52→43→2 | 26 306. 51 | 61. 97   |
| 6  | 5→7→38→36→42→35→2; 23→2; 3→40→37→18→27→28→44→53→49→32→39→31→47→52→43→2; 2→34→41→51→48→33→54→46→29→45→30→55→33→1 | 26 390. 39 | 62. 60   |
| 7  | 5→7→38→36→42→35→2; 23→2; 3→40→37→18→27→28→44→32→49→53→50→31→39→52→43→2; 2→34→41→51→48→33→54→46→29→45→33→55→30→1 | 26 459. 54 | 64. 13   |
| 8  | 23→2; 3→32→37→18→27→28→44→40→49→53→50→31→39→52→43→2; 5→7→38→36→42→35→2; 2→34→41→51→48→33→54→46→29→45→30→55→47→1 | 26 789. 64 | 65. 64   |
| 9  | 3→32→37→18→27→28→44→40→49→53→50→31→39→52→43→2; 5→7→38→36→42→35→2; 23→2; 2→34→41→51→33→48→54→46→29→45→30→55→47→1 | 27 525. 39 | 66. 33   |
| 10 | 5→7→38→36→42→35→2; 23→2; 3→40→37→18→27→28→44→32→49→53→50→31→47→52→43→2; 2→34→41→51→48→39→54→46→29→45→30→55→33→1 | 27 796. 63 | 66. 95   |
| 11 | 2→34→41→51→48→39→54→46→29→45→30→55→33→1; 5→7→38→36→42→35→2; 23→2; 3→32→37→18→27→28→44→40→49→53→50→31→47→52→43→2 | 28 126. 73 | 68. 46   |
| 12 | 5→7→38→36→42→35→2; 23→2; 3→40→37→18→27→28→44→32→49→53→50→31→48→52→43→2; 2→34→41→51→39→47→54→46→29→45→30→55→33→1 | 28 286. 26 | 70. 18   |
| 13 | 23→2; 5→7→38→36→42→35→2; 3→32→37→18→27→28→44→40→49→53→50→31→48→52→43→2; 2→34→41→51→39→47→54→46→29→45→30→55→33→1 | 28 616. 36 | 71. 69   |

表 A6 动态路线方案(MOIA)  
Table A6 Scheduling schemes of dynamic route by MOIA

| 方案 | 路径                                                                                                              | $Z_2$ /元  | $S_2$ /% |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------|
| 1  | 5→41→38→40→47→31→1; 23→3; 3→7→37→18→35→44→49→32→39→51→53→46→30→54→29→45→50→55→2; 1→33→48→52→28→27→42→36→34→43→2 | 20 746.23 | 72.04    |
| 2  | 5→41→38→40→47→31→1; 23→3; 3→35→37→18→7→44→49→32→39→51→53→46→30→54→29→45→50→55→2; 1→33→48→52→28→27→42→36→34→43→2 | 20 930.47 | 72.07    |
| 3  | 5→41→38→40→47→31→1; 23→3; 3→18→37→7→35→44→49→32→39→51→53→46→30→54→29→45→50→55→2; 1→33→48→52→28→27→36→42→34→43→2 | 21 142.78 | 72.38    |
| 4  | 5→41→38→40→47→31→1; 23→3; 3→7→37→18→35→49→44→32→39→51→53→46→30→54→29→45→50→55→2; 1→33→48→52→28→27→42→36→34→43→2 | 21 265.29 | 72.79    |
| 5  | 5→41→38→40→47→31→1; 23→3; 3→18→37→7→35→49→44→32→39→51→53→46→30→54→29→45→50→55→2; 1→33→48→52→28→27→42→36→34→43→2 | 21 426.45 | 73.00    |
| 6  | 5→41→38→40→47→31→1; 23→3; 3→7→37→18→35→44→49→32→39→51→30→46→50→53→29→45→54→55→2; 1→33→48→52→28→27→36→42→34→43→2 | 21 678.72 | 74.86    |
| 7  | 5→41→38→40→47→31→1; 23→3; 3→7→37→18→35→44→49→32→39→51→53→46→50→54→29→45→30→55→2; 1→33→48→52→28→27→36→42→34→43→2 | 22 224.34 | 75.27    |
| 8  | 5→41→38→40→47→31→1; 23→3; 3→52→35→37→18→7→49→32→44→51→53→46→30→50→45→29→54→55→2; 1→33→48→39→28→27→42→36→34→43→2 | 22 484.85 | 75.94    |
| 9  | 5→41→38→40→47→31→1; 23→3; 3→37→18→7→52→44→49→32→39→51→50→46→30→29→45→53→54→55→2; 1→48→33→35→28→27→42→36→34→43→2 | 22 917.99 | 75.98    |
| 10 | 5→41→38→40→47→31→1; 23→3; 3→42→18→7→52→44→49→32→39→51→50→46→30→53→29→45→54→55→2; 1→48→33→35→28→27→37→36→34→43→2 | 23 568.85 | 76.90    |
| 11 | 5→41→38→40→47→31→1; 23→3; 3→52→35→37→18→7→49→32→44→51→53→46→30→50→45→29→54→55→2; 1→33→48→27→28→39→42→36→34→43→2 | 24 279.43 | 77.00    |
| 12 | 5→41→38→31→47→49→3; 23→3; 1→44→18→7→35→32→40→39→50→46→29→30→55→54→45→34→51→52→2; 1→33→48→28→27→42→37→36→43→53→2 | 26 357.63 | 77.62    |
| 13 | 5→41→38→31→47→40→3; 23→3; 1→35→18→7→44→32→49→39→50→46→54→30→55→29→34→45→51→52→2; 1→33→48→28→27→42→36→37→43→53→2 | 26 730.94 | 78.68    |
| 14 | 5→41→38→31→47→49→3; 23→3; 1→35→18→7→44→32→40→39→50→46→29→30→55→54→45→34→51→52→2; 1→33→48→28→27→42→36→37→43→53→2 | 27 361.05 | 79.34    |