

# 基于层级分解多目标进化算法的弹性供应链网络优化

阮昊龙<sup>1</sup>, 郭羽含<sup>2</sup>, 金海波<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 软件学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 浙江科技大学 理学院/大数据学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 针对制造业供应链会受到突发事件和市场波动等风险的影响而导致其韧性弱和客户满意度降低的问题, 建立以经济效益、环境保护、社会责任为评价指标, 多层次、多制造商、多产品类型的多级弹性供应链网络模型, 并提出一种基于层级分解的多目标进化算法进行求解。该算法基于精英竞争策略构造解环境, 提高使用精英解生成的子代质量; 引入罚函数处理不满足弹性设计的节点, 使精英个体在竞争中占据优势; 融合仓储设计目标松弛特性, 采用混合精英解选择策略和自适应子代生成策略进行种群更新, 提高算法的搜索效率并防止目标函数的过度优化。此外, 引入仓储评价指标进行多准则决策, 为供应链仓储设计提供了新的优化方向。基于企业真实数据进行的仿真实验结果表明, 相较于对照算法, 所提算法的最优平均解质量提高了18%, 平均求解时间降低了25%, 为求解弹性供应链网络优化问题提供了新的有效方案。

**关键词:** 弹性供应链; 多目标进化算法; 目标松弛; 选择策略; 自适应子代生成策略

DOI: 10.11907/rjtk.241953

扫描二维码阅读全文:



中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2026)002-0097-13

## Optimization of Elastic Supply Chain Network Based on Hierarchical Decomposition Multi-Objective Evolutionary Algorithm

RUAN Haolong<sup>1</sup>, GUO Yuhang<sup>2</sup>, JIN Haibo<sup>1</sup>

(1. School of Software, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

2. School of Science/School of Big-data Science, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** To address the issue of weak resilience and reduced customer satisfaction in the manufacturing supply chain due to risks such as emergencies and market fluctuations, a multi-level, multi manufacturer, and multi product elastic supply chain network model is established with economic benefits, environmental protection, and social responsibility as evaluation indicators. A multi-objective evolutionary algorithm based on hierarchical decomposition is proposed for solution. This algorithm constructs a solution environment based on elite competition strategy to improve the quality of offspring generated using elite solutions; Introducing a penalty function to handle nodes that do not meet elastic design requirements, allowing elite individuals to gain an advantage in competition; Integrating the relaxation characteristics of storage design objectives, a hybrid elite solution selection strategy and an adaptive offspring generation strategy are adopted for population updating to improve the search efficiency of the algorithm and prevent excessive optimization of the objective function. In addition, the introduction of warehousing evaluation indicators for multi criteria decision-making provides a new optimization direction for supply chain warehousing design. The simulation experiment results based on real enterprise data show that compared with the control algorithm, the proposed algorithm improves the quality of the optimal average solution by 18% and reduces the average solution time by 25%, providing a new and effective solution for solving the optimization problem of elastic supply chain networks.

**Key Words:** elastic supply chain; multi objective evolutionary algorithm; target relaxation; selection strategy; adaptive offspring generation strategy

收稿日期: 2024-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(62173171)

**作者简介:** 阮昊龙(2001-), 男, CCF 学生会员, 辽宁工程技术大学软件学院硕士研究生, 研究方向为供应链优化; 郭羽含(1983-), 男, 博士, CCF 会员, 浙江科技大学理学院/大数据学院副教授, 研究方向为智能搜索算法、供应链优化问题、车辆调度问题等; 金海波(1983-), 男, 博士, 辽宁工程技术大学软件学院副教授, 研究方向为复杂系统可靠性分析、优化维修策略制定、计算机视觉。本文通讯作者: 郭羽含。

## 0 引言

弹性供应链是制造业供应链网络设计中的重要一环,是指供应链在部分失效时仍能保持连续供应且快速恢复到正常供应状态的能力。通过提升供应链弹性,企业可以更好地应对市场挑战和不确定性,确保供应链的连续性和稳定性<sup>[1-2]</sup>。

近年来,研究人员在弹性供应链方面取得了一些成果。例如,Shishodia等<sup>[3]</sup>对1988–2020年发表的供应链弹性文献进行计量分析,指出弹性供应链设计的研究主题包括:识别供应链脆弱性与风险的关键驱动因素;分析风险对网络弹性的影响机制;评估风险传导与中断场景;量化供应链网络以提升其稳健性。Piprani等<sup>[4]</sup>指出多维供应链柔性对提高供应链弹性有显著贡献。Hasani等<sup>[5]</sup>考虑到医疗器械制造系统的中断风险,从经济和环境方面建立多目标优化供应链网络模型,采用改进强度帕累托进化算法获得弹性供应链网络设计。Jafar等<sup>[6]</sup>针对供应链容易出现多种运营和中断风险的问题,建立了一个两阶段混合随机规划模型,并引入多标准决策技术解决弹性供应链网络设计问题。蔡建湖等<sup>[7]</sup>研究了风险规避系数和信息不对称对绿色供应链成员最优决策及其效用的影响,引入成本共担契约来优化供应链性能的帕累托改进。郑广珠等<sup>[8]</sup>针对多供应商—单制造商构成的二级供应链中供应商配送批量不经济、配送时间无序导致物流成本高和卸货拥堵等问题,建立多供应商配送期量的双层规划模型,采用遗传算法与动态规划相结合的方法求解该模型。李珍萍等<sup>[9]</sup>以运行成本为目标建立两阶段随机规划模型,解决二级供应链中主供应商或运输路径中断导致需求无法满足的问题。刘墨林等<sup>[10]</sup>针对由一个生鲜电商与一个生鲜供应商组成的二级供应链构建集中式与分散式下的生鲜电商供应链决策模型,分析新鲜度需求弹性、服务需求弹性等因素对最优决策的影响。Bagul等<sup>[11]</sup>以单一产品的两级汽车供应网络为研究对象,加强多层多供应商网络采购策略,用于应对不确定的需求和供应商失败风险。Ali等<sup>[12]</sup>提出一种混合多准则决策方法,使用模糊理论处理参数,为医疗废物回收处理中心选址提供可靠性决策。Zhao等<sup>[13]</sup>通过使用异构时空图变换器捕获时间和空间信息来解决电子商务仓库配送问题。Lin等<sup>[14]</sup>提出一种多视图时空学习框架来预测采购需求和交付供应能力,从而适应不断变化的客户需求,并简化运营成本、提高配送效率。以上文献的研究对象为小型供应链网络或供应链网络中的部分环节,对于多制造商、多产品类型的大规模供应链网络全过程研究较少。通过整合多个供应源和物流渠道,供应链可以进一步提高效率<sup>[15]</sup>。因此,探索大规模弹性供应链网络设计具有现实意义。

弹性供应链网络设计为NP-hard问题,随着问题规模

的增加,对求解算法的要求越来越高<sup>[16]</sup>。吴功兴等<sup>[17]</sup>为缓解供应中断对企业的影响,提出基于模糊定价与中断风险的双目标闭环供应链网络模型,并基于可能性理论将双目标模型转换为单目标模型进行求解。Rasi等<sup>[18]</sup>从经济和环境维度设计了一个混合整数线性规划模型,使用遗传算法提高求解的鲁棒性。Yun等<sup>[19]</sup>考虑到经济、环境和社会因素,以及3种类型的分销渠道来建立供应链网络模型,使用混合遗传算法求解帕累托最优解。Wang等<sup>[20]</sup>以具有中断风险和产能约束的零售商、具有绿色偏好的消费者和制造商组成的三级供应链网络为研究对象,使用扩展NSGA-II算法更高效地获得帕累托解。

综上所述,现有弹性供应链网络设计模型未考虑多制造商、多产品类型的应用场景,求解算法无法兼顾求解质量和效率,特别是在大规模算例上求解质量不佳。为此,本文融合弹性供应链设计理念,综合考虑经济效益、环境保护、社会责任三方面因素,建立从原材料采购到废弃产品回收处理的多层次、多制造商、多产品类型的供应链网络模型,并提出一种基于层级分解的多目标进化算法(Stage-based Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition, SMOEA/D)进行求解。首先,选出惩罚处理后在竞争中占据优势的个体,基于精英个体,使用改进子代生成策略产生子代,以提高生成的子代质量;其次,引入仓储评价指标,采用混合精英选择策略和自适应子代生成策略进行分销阶段种群更新,满足仓储设计的目标松弛特性,同时防止对目标函数的过度优化;最后,参考企业真实数据设置不同规模的算例,在其上进行测试并分析比较不同算法的求解时间和求解质量。

## 1 供应链模型

### 1.1 问题描述

本文构建了一个由原料商、供应商、制造商、分销商、仓储、客户群以及回收处置中心组成的供应链网络。其中,原料商负责提供原材料;供应商负责将原材料加工成各种零部件;制造商负责从不同供应商购买所需零部件并进行最终加工;分销商负责接收不同制造商的各类产品并进行产品销售,以及对客户群的废弃产品进行初步分拣;仓储承担各类产品的存储;回收处置中心负责对废弃产品进行回收处理。

### 1.2 模型假设

(1)不同货物的运输成本不同,为简化模型,假设运输过程中产生的污染物只有碳排放,单位货物运输碳排放与运输距离成正比,各级之间运输能力能够满足供应链需求。

(2)不同制造商对应企业不同系列的产品,不同制造商生产线不同,生产的产品不同,假设生产过程中制造商和一种零部件供应商的数量比为1:3。

(3)不同原料商、供应商、制造商、回收处置中心的资质不同,所需的经济成本、产生的污染物排放、提供的社会效益以及最大供应和处理能力不同。

(4)客户群位置固定,仓储的位置根据城市客户群的分布选择。假设客户群均匀分布在城市中,以城市中心计算客户群与分销商、仓储的距离。

(5)本文涉及到的正向物流与逆向物流距离相等;回收处置中心对废弃产品中质量较好的产品进行加工处理以实现循环利用,对质量较差的产品进行无害化处理以得到原材料,假设该部分产生的收益与废弃产品回收和分拣成本一致。

(6)根据自身情况的不同,供应链中不同企业的污染物排放、企业超标与事故数量、企业绿色工作数量有所不同。

1.3 符号说明

本文涉及的符号定义如表 1–表 7 所示。

| Table 1 Collection definition |                               |  |
|-------------------------------|-------------------------------|--|
| 表 1 集合定义                      |                               |  |
| 集合                            | 定义                            |  |
| $R$                           | 原料商集合,其中每个原料商 $i \in R$       |  |
| $S$                           | 供应商集合,其中每个供应商 $j \in S$       |  |
| $M$                           | 制造商集合,其中每个制造商 $k \in M$       |  |
| $D$                           | 分销商集合,其中每个分销商 $p \in D$       |  |
| $W$                           | 仓储集合,其中每个仓储 $t \in W$         |  |
| $C$                           | 客户群集合,其中每个客户群 $l \in C$       |  |
| $T$                           | 回收处置中心集合,其中每个回收处置中心 $e \in T$ |  |
| $P$                           | 产品集合,其中每个产品 $c \in P$         |  |

| Table 2 Definition of quantity constants |                                     |     |
|------------------------------------------|-------------------------------------|-----|
| 表 2 数量常量定义                               |                                     |     |
| 常量                                       | 定义                                  | 单位  |
| $UCRM_{R_i}^P$                           | 生产单位产品 $P_c$ 需要原料商 $R_i$ 提供原材料的数量   | $t$ |
| $UPRC_{S_j}^P$                           | 生产单位产品 $P_c$ 所需供应商 $S_j$ 提供零部件的数量   | 个   |
| $DN_{D_p}^P$                             | 制造商 $M_k$ 提供给分销商 $D_p$ 的产品 $P_c$ 数量 | 个   |
| $WQ$                                     | 仓储 $W_t$ 的数量                        | 个   |
| $WA_{W_t}^P$                             | 仓储 $W_t$ 存储产品 $P_c$ 的总数量            | 个   |
| $BN_{C_l}^P$                             | 客户群 $C_l$ 中产品 $P_c$ 的回收数量           | 个   |
| $RR_{C_l}^P$                             | 客户群 $C_l$ 中产品 $P_c$ 的废弃回收率          | —   |

Table 3 Definition of maximum production processing capacity and pollutant emission limit constants

| 表 3 最大生产处理能力和污染物排放限制常量定义 |                                  |     |
|--------------------------|----------------------------------|-----|
| 常量                       | 定义                               | 单位  |
| $RMC_{R_i}$              | 原料商 $R_i$ 提供原材料的最大供应能力           | 个   |
| $SMC_{S_j}$              | 供应商 $S_j$ 提供零部件的最大供应能力           | 个   |
| $SCME_{S_j}$             | 供应商 $S_j$ 的最大碳排放限制               | $t$ |
| $SGME_{S_j}$             | 供应商 $S_j$ 的最大废气排放限制              | $t$ |
| $SWME_{S_j}$             | 供应商 $S_j$ 的最大废水排放限制              | $t$ |
| $SSME_{S_j}$             | 供应商 $S_j$ 的最大固体废物排放限制            | $t$ |
| $MMC_{M_k}$              | 制造商 $M_k$ 提供产品的最大供应能力            | 个   |
| $MCME_{M_k}$             | 制造商 $M_k$ 的最大碳排放限制               | $t$ |
| $MGME_{M_k}$             | 制造商 $M_k$ 的最大废气排放限制              | $t$ |
| $MWME_{M_k}$             | 制造商 $M_k$ 的最大废水排放限制              | $t$ |
| $MSME_{M_k}$             | 制造商 $M_k$ 的最大固体废物排放限制            | $t$ |
| $TMP_{T_e}^P$            | 回收处置中心 $T_e$ 对废弃产品 $P_c$ 的最大处理能力 | 个   |
| $TCME_{T_e}$             | 回收处置中心 $T_e$ 的最大碳排放限制            | $t$ |
| $TGME_{T_e}$             | 回收处置中心 $T_e$ 的最大废气排放限制           | $t$ |
| $TWME_{T_e}$             | 回收处置中心 $T_e$ 的最大废水排放限制           | $t$ |
| $TSME_{T_e}$             | 回收处置中心 $T_e$ 的最大固体废物排放限制         | $t$ |

Table 4 Definition of economic cost constants

| 表 4 经济成本常量定义                                                                                |                                      |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------|
| 常量                                                                                          | 定义                                   | 单位   |
| $URMP_{R_i}^P$                                                                              | 原料商 $R_i$ 为产品 $P_c$ 提供单位原材料的成本       | 元    |
| $USPP_{S_j}^P$                                                                              | 供应商 $S_j$ 为产品 $P_c$ 生产单位零部件的成本       | 元    |
| $UMPP_{M_k}^P$                                                                              | 制造商 $M_k$ 生产单位产品 $P_c$ 的成本           | 元    |
| $UDTC_{R_i S_j}^P$                                                                          | 原料商 $R_i$ 和供应商 $S_j$ 间单位原材料单位距离的运输成本 | 元    |
| $UDTC_{S_j M_k}^P$                                                                          | 供应商 $S_j$ 和制造商 $M_k$ 间单位零部件单位距离的运输成本 | 元    |
| $UDTC_{P_c}$                                                                                | 单位产品单位距离的运输成本                        | 元    |
| $WSP_{W_t}$                                                                                 | 仓储 $W_t$ 的运营成本                       | 元    |
| $URCP_{T_e}^P$                                                                              | 回收处置中心 $T_e$ 回收处理单位废弃产品 $P_c$ 成本     | 元    |
| $D_{R_i S_j}, D_{S_j M_k}, D_{M_k D_p}, D_{M_k W_t}, D_{D_p C_l}, D_{W_t C_l}, D_{D_p T_e}$ | 两地间的距离                               | $km$ |

Table 5 Definition of environmental protection constants

| 表 5 环境保护常量定义                                             |                                                         |     |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----|
| 常量                                                       | 定义                                                      | 单位  |
| $UDCE_{R_i S_j}^P$                                       | 原料商 $R_i$ 和供应商 $S_j$ 间单位原材料单位距离运输产生的碳排放量                | $t$ |
| $UPCE_{S_j}^P, UPGE_{S_j}^P, UPWE_{S_j}^P, UPSE_{S_j}^P$ | 供应商 $S_j$ 生产单位零部件产生的碳排放量、废气排放量、废水排放量、固体废物排放量            | $t$ |
| $UDCE_{S_j M_k}^P$                                       | 供应商 $S_j$ 和制造商 $M_k$ 间单位零部件单位距离运输产生的碳排放量                | $t$ |
| $UPCE_{M_k}^P, UPGE_{M_k}^P, UPWE_{M_k}^P, UPSE_{M_k}^P$ | 制造商 $M_k$ 生产单位产品 $P_c$ 产生的碳排放量、废气排放量、废水排放量、固体废物排放量      | $t$ |
| $UDCE_{P_c}$                                             | 单位产品单位距离产生的运输碳排放量                                       | $t$ |
| $RUDCE_{P_c}$                                            | 单位废弃产品单位距离产生的运输碳排放量                                     | $t$ |
| $URCE_{T_e}^P, URGE_{T_e}^P, URWE_{T_e}^P, URSE_{T_e}^P$ | 回收处置中心 $T_e$ 回收处理单位废弃产品 $P_c$ 的碳排放量、废气排放量、废水排放量、固体废物排放量 | $t$ |

Table 6 Definition of social responsibility constants

表6 社会责任常量定义

| 常量           | 定义                      | 单位 |
|--------------|-------------------------|----|
| $ESAQ_{S_j}$ | 供应商 $S_j$ 的企业超标与事故数量    | 件  |
| $GQ_{S_j}$   | 供应商 $S_j$ 的企业绿色工作数量     | 件  |
| $ESAQ_{M_k}$ | 制造商 $M_k$ 的企业超标与事故数量    | 件  |
| $GQ_{M_k}$   | 制造商 $M_k$ 的企业绿色工作数量     | 件  |
| $ESAQ_{T_e}$ | 回收处置中心 $T_e$ 的企业超标与事故数量 | 件  |
| $GQ_{T_e}$   | 回收处置中心 $T_e$ 的企业绿色工作数量  | 件  |

Table 7 Definition of decision variables

表7 决策变量定义

| 常量           | 定义                                    | 单位  |
|--------------|---------------------------------------|-----|
| $rn_{R_i}^P$ | 生产产品 $P_c$ 所需原料商 $R_i$ 提供原材料的数量       | $t$ |
| $sn_{S_j}^P$ | 生产产品 $P_c$ 所需供应商 $S_j$ 提供零部件的数量       | 个   |
| $mn_{M_k}^P$ | 制造商 $M_k$ 生产产品 $P_c$ 的数量              | 个   |
| $wn_{W_i}^P$ | 仓储 $W_i$ 为满足客户群 $C_i$ 需求存储产品 $P_c$ 数量 | 个   |
| $sc_{S_j}$   | 0-1 变量, 原料商被供应商 $S_j$ 选择为 1, 否则为 0    | -   |
| $mc_{M_k}$   | 0-1 变量, 供应商被制造商 $M_k$ 选择为 1, 否则为 0    | -   |
| $wc_{C_i}^P$ | 0-1 变量, 仓储被客户群 $C_i$ 选择为 1, 否则为 0     | -   |
| $dc_{D_p}$   | 0-1 变量, 回收处置中心被分销商 $D_p$ 选择为 1, 否则为 0 | -   |

## 2 模型目标函数

### 2.1 目标函数

目标函数综合经济、环境和社会责任三方面进行弹性供应链设计。由于三者的量纲和数量级不同,为直观感受不同供应链绿色设计的优劣,使用极大化方法对各方面数据进行缩放,使其落入  $[0, 1]$  之间,数值越小表示优化效果越好。

生产成本包括原材料购买成本、供应商生产零部件成本和制造商生产产品成本;运营成本为仓储运营成本;运输成本包括供应链网络中正向和逆向物流的运输成本;回收处理成本为回收处置中心对废弃产品的回收处理成本。经济成本 (Economic Cost, EC) 包括生产成本 (Production Cost, PC)、运营成本 (Operating Cost, OC)、运输成本 (Transport Cost, TC) 和回收处理成本 (Recycling Cost, RC)。公式为:

$$\min EC = PC + OC + TC + RC \quad (1)$$

$$PC = \sum_{i \in R} \sum_{j \in S} \sum_{c \in P} URMP_{R_i}^P rn_{R_i}^P sc_{S_j} + \sum_{j \in S} \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} USPP_{S_j}^P sn_{S_j}^P mc_{M_k} + \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UMPP_{M_k}^P mn_{M_k}^P \quad (2)$$

$$OC = WSP_{W_i} WQ \quad (3)$$

$$TC = \sum_{i \in R} \sum_{j \in S} \sum_{c \in P} UDTCP_{R_i S_j}^P D_{R_i S_j} rn_{R_i}^P sc_{S_j} + \sum_{j \in S} \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UDTCP_{S_j M_k}^P D_{S_j M_k} sn_{S_j}^P mc_{M_k} + \sum_{k \in M} \sum_{t \in W} \sum_{c \in P} UDTCP_{M_k W_t}^P D_{M_k W_t} WA_{W_t}^P + \sum_{k \in M} \sum_{p \in D} \sum_{c \in P} UDTCP_{M_k D_p}^P D_{M_k D_p} DN_{D_p}^P + \sum_{t \in W} \sum_{i \in C} \sum_{c \in P} UDTCP_{W_t C_i}^P D_{W_t C_i} wn_{W_t}^P wc_{C_i}^P + \sum_{p \in D} \sum_{i \in C} \sum_{c \in P} UDTCP_{D_p C_i}^P D_{D_p C_i} DN_{D_p}^P + \sum_{l \in C} \sum_{p \in D} \sum_{c \in P} RUDTCP_{C_l D_p}^P D_{D_p C_l} BN_{C_l}^P + \sum_{p \in D} \sum_{e \in T} \sum_{c \in P} RUDTCP_{D_p T_e}^P D_{D_p T_e} BN_{D_p}^P dc_{D_p} \quad (4)$$

$$RC = \sum_{p \in D} \sum_{e \in T} \sum_{c \in P} URCP_{T_e}^P BN_{C_l}^P dc_{D_p} \quad (5)$$

碳排放包括供应商、制造商生产碳排放,供应链网络正向和逆向物流运输碳排放,回收处置中心回收处理碳排放;废气排放包括供应商、制造商生产废气排放和回收处置中心回收处理废气排放;废水排放包括供应商、制造商生产废水排放和回收处置中心回收处理废水排放;固体废物

物排放包括供应商、制造商生产固体废物排放和回收处置中心回收处理固体废物排放。污染物排放 (Pollutant Emission, PE) 包括碳排放 (Carbon Emission, CE)、废气排放 (Gas-waste Emission, GE)、废水排放 (Water-waste Emission, WE) 和固体废物排放 (Solid-waste Emission, SE)。公式为:

$$\min PE = \omega_1 CE + \omega_2 GE + \omega_3 WE + \omega_4 SE \quad (6)$$

$$CE = \sum_{j \in S} \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPCE_{S_j}^P sn_{S_j}^P mc_{M_k} + \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPCE_{M_k}^P mn_{M_k}^P + \sum_{i \in R} \sum_{j \in S} \sum_{c \in P} UDCE_{R_i S_j}^P D_{R_i S_j} rn_{R_i}^P sc_{S_j} + \sum_{j \in S} \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UDCE_{S_j M_k}^P D_{S_j M_k} sn_{S_j}^P mc_{M_k} + \sum_{k \in M} \sum_{t \in W} \sum_{c \in P} UDCE_{M_k W_t}^P D_{M_k W_t} WA_{W_t}^P + \sum_{k \in M} \sum_{p \in D} \sum_{c \in P} UDCE_{M_k D_p}^P D_{M_k D_p} DN_{D_p}^P + \sum_{t \in W} \sum_{i \in C} \sum_{c \in P} UDCE_{W_t C_i}^P D_{W_t C_i} wn_{W_t}^P wc_{C_i}^P + \sum_{p \in D} \sum_{i \in C} \sum_{c \in P} UDCE_{D_p C_i}^P D_{D_p C_i} DN_{D_p}^P + \sum_{l \in C} \sum_{p \in D} \sum_{c \in P} RUDCE_{C_l D_p}^P D_{D_p C_l} BN_{C_l}^P + \sum_{p \in D} \sum_{e \in T} \sum_{c \in P} RUDCE_{D_p T_e}^P D_{D_p T_e} BN_{D_p}^P dc_{D_p} + \sum_{p \in D} \sum_{e \in T} \sum_{c \in P} URCE_{T_e}^P BN_{C_l}^P dc_{D_p} \quad (7)$$

$$GE = \sum_{j \in S} \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPGE_{S_j}^P sn_{S_j}^P mc_{M_k} + \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPGE_{M_k}^P mn_{M_k}^P + \sum_{p \in D} \sum_{e \in T} \sum_{c \in P} URGE_{T_e}^P BN_{C_l}^P dc_{D_p} \quad (8)$$

$$WE = \sum_{j \in S} \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPWE_{S_j}^P sn_{S_j}^P mc_{M_k} + \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPWE_{M_k}^P mn_{M_k}^P + \sum_{p \in D} \sum_{e \in T} \sum_{c \in P} URWE_{T_e}^P BN_{C_l}^P dc_{D_p} \quad (9)$$

$$SE = \sum_{j \in S} \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPSE_{S_j}^P sn_{S_j}^P mc_{M_k} + \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPSE_{M_k}^P mn_{M_k}^P + \sum_{p \in D} \sum_{e \in T} \sum_{c \in P} URSE_{T_e}^P BN_{C_l}^P dc_{D_p} \quad (10)$$

企业超标与事故数量包括供应商、制造商和回收处置中心的企业超标与事故数量;企业绿色工作数量包括供应商、制造商和回收处置中心的企业绿色工作数量。社会责

任 (Social Responsibility, SR) 包括企业超标与事故数量 (Enterprise Exceeding Standards and Accident Number, ES-AN) 和企业绿色工作数量 (Enterprise Green Work-quantity,

GW)。公式为:

$$\min SR = \omega_5 ESAN + \omega_6 / GW \quad (11)$$

$$ESAN = \sum_{j \in S} ESAQ_{S_j} + \sum_{k \in M} ESAQ_{M_k} + \sum_{e \in T} ESAQ_{T_e} \quad (12)$$

$$GW = \sum_{j \in S} GQ_{S_j} + \sum_{k \in M} GQ_{M_k} + \sum_{e \in T} GQ_{T_e} \quad (13)$$

式中: $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 分别为环境方面碳排放、废气排放、废水排放和固体废物排放的权重; $\omega_5, \omega_6$ 分别为社会责任方面企业超标与事故数量和企业绿色工作数量的权重。

因此,本文的目标函数为:

$$\min f = \alpha EC + \beta PE + \lambda SR \quad (14)$$

式中: $\alpha, \beta, \lambda$ 分别为经济、环境和社会责任的权重。

## 2.2 约束条件

供应链网络模型约束条件为:

$$RMC_{R_i} \geq rn_{R_i}^P sc_{S_j} \quad (15)$$

$$SMC_{S_j} \geq sn_{S_j}^P mc_{M_k} \quad (16)$$

$$MMC_{M_k} \geq mn_{M_k}^P \quad (17)$$

$$TMP_{T_e}^P \geq \sum_{p \in D} BN_{C_i}^P dc_{D_p} \quad (18)$$

$$rn_{R_i}^P sc_{S_j} \geq UCRM_{R_i}^P sn_{S_j}^P \quad (19)$$

$$sn_{S_j}^P mc_{M_k} \geq UPRC_{S_j}^P mn_{M_k}^P \quad (20)$$

$$mn_{M_k}^P = \sum_{t \in W} WA_{W_t}^P + \sum_{p \in D} DN_{D_p}^P \quad (21)$$

$$WA_{W_t}^P = \sum_{l \in C} wn_{W_t}^P wc_{C_l}^P \quad (22)$$

$$BN_{C_i}^P = wn_{W_t}^P RR_{C_i}^P + DN_{D_p}^P RR_{C_i}^P \quad (23)$$

$$SCME_{S_j} \geq \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPCE_{S_j}^P sn_{S_j}^P mc_{M_k} \quad (24)$$

$$MCME_{M_k} \geq \sum_{c \in P} UPCE_{M_k}^P mn_{M_k}^P \quad (25)$$

$$TCME_{T_e} \geq \sum_{p \in D} \sum_{l \in C} \sum_{c \in P} URCE_{T_e}^P BN_{C_i}^P dc_{D_p} \quad (26)$$

$$SGME_{S_j} \geq \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPGE_{S_j}^P sn_{S_j}^P mc_{M_k} \quad (27)$$

$$MGME_{M_k} \geq \sum_{c \in P} UPGE_{M_k}^P mn_{M_k}^P \quad (28)$$

$$TGME_{T_e} \geq \sum_{p \in D} \sum_{l \in C} \sum_{c \in P} URGE_{T_e}^P BN_{C_i}^P dc_{D_p} \quad (29)$$

$$SWME_{S_j} \geq \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPWE_{S_j}^P sn_{S_j}^P mc_{M_k} \quad (30)$$

$$MWME_{M_k} \geq \sum_{c \in P} UPWE_{M_k}^P mn_{M_k}^P \quad (31)$$

$$TWME_{T_e} \geq \sum_{p \in D} \sum_{l \in C} \sum_{c \in P} URWE_{T_e}^P BN_{C_i}^P dc_{D_p} \quad (32)$$

$$SSME_{S_j} \geq \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPSE_{S_j}^P sn_{S_j}^P mc_{M_k} \quad (33)$$

$$MSME_{M_k} \geq \sum_{c \in P} UPSE_{M_k}^P mn_{M_k}^P \quad (34)$$

$$TSME_{T_e} \geq \sum_{p \in D} \sum_{l \in C} \sum_{c \in P} URSE_{T_e}^P BN_{C_i}^P dc_{D_p} \quad (35)$$

$$sc_{S_j}, mc_{M_k}, wc_{C_l}^P, dc_{D_p} \in \{0, 1\} \quad (36)$$

$$rn_{R_i}^P, sn_{S_j}^P, mn_{M_k}^P, wn_{W_t}^P \geq 0 \text{ and } \in \mathbb{Z} \quad (37)$$

式中: $\forall i \in R, \forall j \in S, \forall k \in M, \forall t \in W, \forall p \in D, \forall l \in C,$

$\forall e \in T, \forall c \in P$ 。式(15)一式(17)为最大产能约束;式(18)为回收处置中心最大处理能力约束;式(19)一式(23)为数量约束;式(24)一式(26)为碳排放约束;式(27)一式(29)为废气排放约束;式(30)一式(32)为废水排放约束;式(33)一式(35)为固体废物排放约束;式(36)表示对应变量取值为0或1;式(37)表示对应的决策变量为非负整数。

## 2.3 模型转化

在供应链网络体系中,分散决策作为一种普遍存在的决策模式,表现为网络中的各个参与角色基于自身利益最大化的目标,独立自主地作出决策<sup>[21]</sup>。在该模式下,原料商—供应商选择、供应商—制造商选择、分销商—回收处置中心选择包含生产或回收处理职能,通过约束条件可以限制优化方向,但仓储—客户群选择需要额外指标限制优化方向。为发挥分散决策和集中决策的优势,根据供应链网络各角色职能,将总目标函数拆分为生产阶段(Production Stage, PS)、销售阶段(Sale Stage, SS)和回收处理阶段(Recycling Stage, RS)的目标函数<sup>[22]</sup>。其中,PS包括原料商、供应商和制造商;SS包括制造商、分销商、仓储和客户群;RS包括客户群、分销商和回收处置中心。

网络各阶段之间通过共同角色和数量关系联系,制造商在PS中生产的产品通过SS服务于客户群,客户群在SS中使用产品产生的废弃产品通过RS进行回收处理。PS决策生产阶段目标函数 $f_{PS}$ ,SS决策销售阶段目标函数 $f_{SS}$ ,RS决策回收处理阶段目标函数 $f_{RS}$ 。在PS中,原材料从原料商运输至供应商处加工成各种零部件,制造商从不同供应商处获取零部件,从而产出最终商品。PS不考虑从制造商出发的产品运输问题。 $f_{RS}$ 的计算公式为:

$$\min f_{PS} = \alpha EC_{PS} + \beta PE_{PS} + \lambda SR_{PS} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} EC_{PS} = & \sum_{i \in R} \sum_{j \in S} \sum_{c \in P} URMP_{R_i}^P rn_{R_i}^P sc_{S_j} + \sum_{j \in S} \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} USPP_{S_j}^P sn_{S_j}^P mc_{M_k} \\ & + \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UMPP_{M_k}^P mn_{M_k}^P + \sum_{i \in R} \sum_{j \in S} \sum_{c \in P} UDT C_{R_i S_j}^P D_{R_i S_j} rn_{R_i}^P sc_{S_j} \\ & + \sum_{j \in S} \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UDT C_{S_j M_k}^P D_{S_j M_k} sn_{S_j}^P mc_{M_k} \end{aligned} \quad (39)$$

$$PE_{PS} = w_1 CE_{PS} + w_2 GE_{PS} + w_3 WE_{PS} + w_4 SE_{PS} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} CE_{PS} = & \sum_{j \in S} \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPCE_{S_j}^P sn_{S_j}^P mc_{M_k} + \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPCE_{M_k}^P mn_{M_k}^P + \\ & \sum_{i \in R} \sum_{j \in S} \sum_{c \in P} UDCE_{R_i S_j}^P D_{R_i S_j} rn_{R_i}^P sc_{S_j} + \sum_{j \in S} \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UDCE_{S_j M_k}^P D_{S_j M_k} sn_{S_j}^P mc_{M_k} \end{aligned} \quad (41)$$

$$GE_{PS} = \sum_{j \in S} \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPGE_{S_j}^P sn_{S_j}^P mc_{M_k} + \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPGE_{M_k}^P mn_{M_k}^P \quad (42)$$

$$WE_{PS} = \sum_{j \in S} \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPWE_{S_j}^P sn_{S_j}^P mc_{M_k} + \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPWE_{M_k}^P mn_{M_k}^P \quad (43)$$

$$SE_{PS} = \sum_{j \in S} \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPSE_{S_j}^P sn_{S_j}^P mc_{M_k} + \sum_{k \in M} \sum_{c \in P} UPSE_{M_k}^P mn_{M_k}^P \quad (44)$$

$$SR_{PS} = \omega_5 \left( \sum_{j \in S} ESAQ_{S_j} + \sum_{k \in M} ESAQ_{M_k} \right) + \omega_6 / \left( \sum_{j \in S} GQ_{S_j} + \sum_{k \in M} GQ_{M_k} \right) \quad (45)$$

在 SS 中,不同产品从不同制造商运输至分销商、仓储,并根据客户群需求配送产品。SS 不考虑逆向物流中从客户群出发的废弃产品运输问题。 $f_{SS}$  的计算公式为:

$$\min f_{SS} = \alpha EC_{SS} + \omega_1 \beta PE_{SS} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \min EC_{SS} = & WSP_{W_i} WQ + \sum_{k \in M} \sum_{t \in W} \sum_{c \in P} UDT C_{P_c} D_{M_k W_i} WA_{W_i}^P + \\ & \sum_{k \in M} \sum_{p \in D} \sum_{c \in P} UDT C_{P_c} D_{M_k D_p} DN_{D_p}^P + \sum_{t \in W} \sum_{l \in C} \sum_{c \in P} UDT C_{P_c} D_{W_t C_l} wn_{W_t C_l}^P wc_{C_l}^P + \\ & \sum_{p \in D} \sum_{l \in C} \sum_{c \in P} UDT C_{P_c} D_{D_p C_l} DN_{D_p}^P \end{aligned} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} \min PE_{SS} = & \sum_{k \in M} \sum_{t \in W} \sum_{c \in P} UDCE_{P_c} D_{M_k W_i} WA_{W_i}^P + \\ & \sum_{k \in M} \sum_{p \in D} \sum_{c \in P} UDCE_{P_c} D_{M_k D_p} DN_{D_p}^P + \sum_{t \in W} \sum_{l \in C} \sum_{c \in P} UDCE_{P_c} D_{W_t C_l} wn_{W_t C_l}^P wc_{C_l}^P \\ & + \sum_{p \in D} \sum_{l \in C} \sum_{c \in P} UDCE_{P_c} D_{D_p C_l} DN_{D_p}^P \end{aligned} \quad (48)$$

在 RS 中,废弃产品从不同客户群运输至分销商处进行初步分拣,回收处置中心接收废弃产品并对其回收处理。RS 不考虑正向物流中发往客户群的产品运输问题。 $f_{RS}$  的计算公式为:

$$\min f_{RS} = \alpha EC_{RS} + \beta PE_{RS} + \lambda SR_{RS} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} EC_{RS} = & \sum_{p \in D} \sum_{l \in C} \sum_{c \in P} UDT C_{P_c} D_{D_p C_l} DN_{D_p}^P + \\ & \sum_{l \in C} \sum_{p \in D} \sum_{c \in P} RUDT C_{P_c} D_{D_p C_l} BN_{C_l}^P + \sum_{p \in D} \sum_{e \in T} \sum_{c \in P} RUDT C_{P_c} D_{D_p C_l} BN_{C_l}^P dc_{D_p} \end{aligned} \quad (50)$$

$$PE_{RS} = w_1 CE_{RS} + w_2 GE_{RS} + w_3 WE_{RS} + w_4 SE_{RS} \quad (51)$$

$$\begin{aligned} CE_{RS} = & \sum_{l \in C} \sum_{p \in D} \sum_{c \in P} RUDCE_{P_c} D_{D_p C_l} BN_{C_l}^P + \\ & \sum_{p \in D} \sum_{e \in T} \sum_{c \in P} RUDCE_{P_c} D_{D_p C_l} BN_{C_l}^P dc_{D_p} + \\ & \sum_{p \in D} \sum_{e \in T} \sum_{c \in P} URCE_{P_c} BN_{C_l}^P dc_{D_p} \end{aligned} \quad (52)$$

$$GE_{RS} = \sum_{p \in D} \sum_{e \in T} \sum_{c \in P} URGE_{P_c} BN_{C_l}^P dc_{D_p} \quad (53)$$

$$WE_{RS} = \sum_{p \in D} \sum_{e \in T} \sum_{c \in P} URWE_{P_c} BN_{C_l}^P dc_{D_p} \quad (54)$$

$$SE_{RS} = \sum_{p \in D} \sum_{e \in T} \sum_{c \in P} URSE_{P_c} BN_{C_l}^P dc_{D_p} \quad (55)$$

$$SR_{RS} = \omega_5 \sum_{e \in T} ESAQ_{T_e} + \omega_6 \sum_{e \in T} GQ_{T_e} \quad (56)$$

由式(38)、式(46)、式(49)相加提取公因式后的结果与式(14)可以推导出式(57),如此便将弹性供应链网络设计目标函数转化为各阶段子问题的目标函数,使供应链网络设计问题的求解具有更强的灵活性。表示为:

$$\min f = f_{PS} + f_{SS} + f_{RS} \quad (57)$$

### 3 弹性供应链设计算法

#### 3.1 算法流程

分解为多目标优化算法中的基础策略。基于分解的

多目标进化算法(Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition, MOEA/D)首先将一个多目标优化问题分解为不同的单目标优化子问题,然后在同一时间内对这些子问题进行优化<sup>[23]</sup>;同时,引入目标函数标准化方法解决不同类型目标函数值量纲不同的问题<sup>[24]</sup>。本文使用精英竞争策略、混合精英解选择策略<sup>[25]</sup>、自适应子代生成策略、多准则决策改进 MOEA/D, 提出 SMOEA/D 算法。如图 1 所示,算法步骤为:

(1)初始化参数。输入算例规模  $L$ , 初始解规模  $N$ , 最大迭代次数  $G$ , 约束变量  $C$  等。

(2)初始化种群。根据前文 2.3 节子问题目标函数的作用域以及算例规模  $L$  的大小生成  $N$  个初始解。

(3)节点惩罚。检查约束条件,如果出现约束条件不满足的情况,根据后续 3.2 节执行节点惩罚策略,对不满足条件的节点目标函数进行惩罚,降低其被选择概率。

(4)种群选择。根据子问题目标函数选取不同的精英解,根据后续 3.3 节精英竞争策略挑选单目标邻域精英解,双目标邻域精英解根据各自目标函数进行该目标领域精英解挑选。

(5)种群更新。根据后续 3.5 节选择父代个体,基于单邻域交叉策略和混合邻域交叉策略生成子代,其中混合邻域交叉策略子代数量比根据算法的迭代统计自适应生成。

(6)种群变异。对步骤(5)生成的子代执行变异操作,将步骤(2)中不满足条件的节点变异率乘以惩罚系数,加速供应链网络设计的转化。

(7)终止判断。当迭代次数  $t$  达到最大迭代次数  $G$  时则停止迭代,按照供应链网络模型顺序对各阶段解按序拼接得到供应链网络设计,并将子问题最优解转化为全局最优解,否则转至步骤(3)。

#### 3.2 节点惩罚

罚函数法是优化算法领域中用于处理约束优化问题的一类重要方法<sup>[26]</sup>。其基本思想为在目标函数计算过程中加入一个罚项,以此来惩罚违反约束条件的解,从而引导算法寻找满足约束条件的最优解。当解不满足约束条件时,罚项会使目标函数的值变得更差,从而使该解在优化过程中不被优先选择。反之,当解满足约束条件时,罚项为 1,即不进行惩罚。

罚函数根据问题的约束条件和目标函数进行设计。当函数的约束条件不满足时,对不满足节点进行标记,根据节点接到的任务与最大能力比值设置节点目标函数被放大的倍数,约束条件超出得越多,目标函数被放大得越多,这样算法更容易求解供应链网络模型。计算公式为:

$$P = \frac{\sum_{a=1}^N NUM_a}{MAX_b} \quad (58)$$

式中: $P$  为惩罚系数; $MAX_b$  为不满足约束条件时节点  $b$  的最大生产或处理能力; $N$  为选择节点  $b$  进行生产或回收处理任务的节点数量; $NUM_a$  为节点  $a$  交付给节点  $b$  进行生

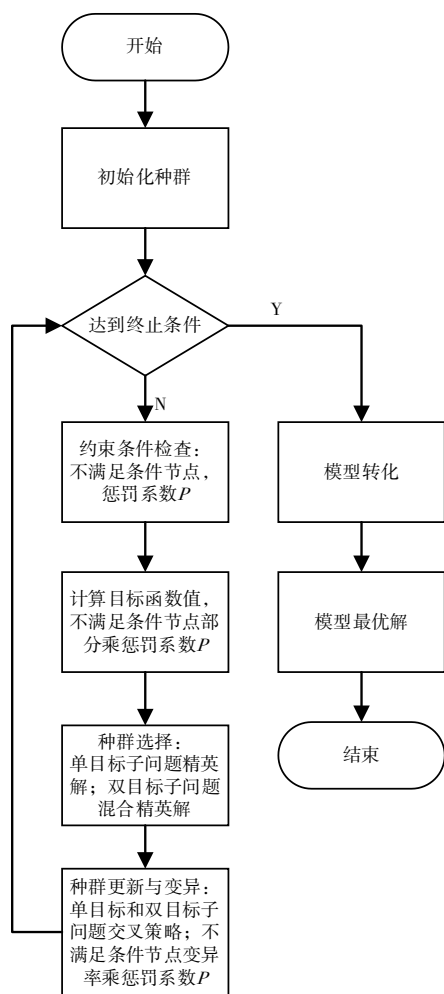


Fig. 1 Algorithm flow

图1 算法流程

产或回收处理的任务数量。

区别于直接丢弃不满足条件的解,该方法相当于对算法求解的中间过程进行了松弛处理,通过增加目标函数、提高变异率来加速弹性供应链网络设计的转化。

### 3.3 种群选择

精英解竞争选择策略模拟自然界的竞争机制,通过竞争筛选出目标函数最优的个体。该策略选择出的个体用于下一步骤中的种群更新,父代个体对应的供应链网络设计优劣影响算法的搜索效率,精英个体质量越高,算法搜索性能越好<sup>[27]</sup>。对于单目标子问题,根据节点惩罚处理后的目标函数值进行选择,顺序不能出错,否则节点惩罚措施失效。对于无约束条件的子问题设置额外的评价指标,这样处理可以在没有相应约束条件的情况下,通过多目标优化满足供应链弹性设计和客户需求。为保证双目标子问题满足供应链网络设计要求,通过不同的目标函数分别选取精英解。混合精英解选择策略可以达到无约束条件时的目标函数约束效果<sup>[28]</sup>。设置约束条件是为了防止出现供应不足或处理能力不足的情况,与约束条件不同的是,无条件约束是利用两个目标函数之间的联系为供应链设计提供优化方向。

### 3.4 仓储评价指标

为加速算法收敛并辅助供应链仓储设计,本文提出仓储评价指标(Warehouse-evaluation Indicator, WI)可视化不同类型产品在仓储之间数量分布的离散程度。不同于最小值问题,过于追求WI数值的平均会造成供应链弹性下降,出现客户需求响应速度变慢等情况<sup>[29]</sup>。为应对该情况,考虑WI的目标松弛特性处理双目标子问题。计算公式为:

$$WI = \frac{1}{WQ} \sum_{c \in P} stdev_{P_c} \quad (59)$$

$$stdev_{P_c} = \left( \sum_{i \in W} \left( WA_{W_i}^P - avg \right) / WQ \right)^{\frac{1}{2}} \quad (60)$$

$$avg = \frac{1}{WQ} \sum_{i \in W} WA_{W_i}^P \quad (61)$$

### 3.5 种群更新

#### 3.5.1 单目标子问题交叉策略

单目标子问题的精英解被选出后,基于解节点的环境完成子代生成。具体来说,将精英解中相同决策问题的所有节点组合称为解节点的环境。在该环境中,随机选择两个解节点组合,以解节点组合对应目标函数的倒数比作为双方的被选择概率,根据被选择概率从父代中依次选择节点组成新的子代,以概率 $\theta$ 进行变异,对于不满足约束条件的标记节点,同样可以将惩罚系数作用于概率 $\theta$ 。此处,之所以使用倒数比是因为本文的目标函数为最小化问题,数值越小表示优化效果越好,也意味着数值较小的解节点组合应该有更大的被选择概率。

使用解节点的环境是因为即使是单目标子问题依旧包含多个决策问题,如PS的单目标子问题总体来说包括原料商—供应商选择决策和供应商—制造商选择决策两个问题,看似不需要增加额外步骤,但是本文以多制造商、多产品类型的弹性供应链网络设计为研究对象,制造商不同则意味着不同的供应商—制造商选择决策问题,核心供应商虽然能够给制造商带来显著收益,但是不同制造商选择同一供应商反而会降低供应链弹性,当核心供应商面临突发情况时,会给整个供应链带来巨大影响<sup>[30]</sup>。此外,单目标子问题目标函数是从供应链角度来考虑弹性供应链网络设计,而子代生成是根据具体决策问题考虑弹性供应链网络设计,划分过于细致发挥不出集中决策的优势,过于笼统发挥不出分散决策的优势。如果没有解节点环境,仅依据目标函数进行子代生成,弹性供应链网络设计中优化较差的部分更容易进入下一代,影响子问题解的质量和求解时间。单目标子问题交叉策略示意图见图2。

#### 3.5.2 双目标子问题交叉策略

双目标子问题的精英解被选出后,使用单目标子问题交叉策略基于仓储评价指标和目标函数生成一定数量的两种子代,使用随机选取的方式从双目标精英解中各选择一个父代,随机交叉重组产生一种子代<sup>[28]</sup>。计算两组精

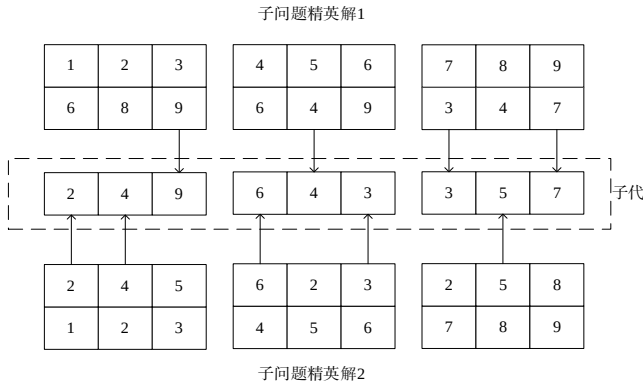


Fig. 2 Cross strategy for single objective subproblems

图2 单目标子问题交叉策略

英解指标的平均值,如果仓储评价指标值变小且目标函数变小,约束变量 $C$ 归0,交叉重组子代、仓储评价指标子代和目标函数子代的数量比为2:1:1;如果仓储评价指标值变小,目标函数未变小,约束变量 $C$ 归0,交叉重组子代、仓储评价指标子代和目标函数子代的数量比为1:1:2;如果仓储评价指标值未变小,目标函数变小且约束变量 $C < 11$ ,约束变量 $C$ 加1,交叉重组子代、仓储评价指标子代和目标函数子代的数量比为1:2:1;否则,约束变量 $C$ 加1,交叉重组子代、仓储评价指标子代和目标函数子代的数量比为1:1:2。设置约束变量 $C$ 是为了防止仓储评价指标过度优化。由于仓储评价指标和目标函数均能对弹性供应链网络设计产生影响,当某一指标未更新时,增加对该指标的探索。

相较于综合经济、环境、社会责任三方面目标函数的优化,WI优化相对简单,这也意味着模型在求解初期,WI总是能够带来效率方面的提升;WI达到相对稳定范围时,加大对目标函数的探索,可实现计算资源的分配,防止二者优化速度不平衡带来的资源浪费,加快走出局部最优解,避免小范围内的重复探索与优化,提高了优化效率。在收敛后期,鉴于WI的松弛特性,其优化可能已经超出理想范围,此时WI的平均值同样相对稳定,因此减少WI的探索以及其与目标函数的交叉,但与此同时也增加了种群多样性,依旧能够为弹性供应链设计作出贡献。混合精英解选择策略中目标函数精英解的选择保证了父代来源,可为自适应子代生成策略以及求解算法的性能和稳定性作出保障。双目标子问题交叉策略示意图见图3。

## 4 性能分析

### 4.1 实验环境与参数设置

实验语言环境为Python3.10,操作系统为Windows11,实验运行环境为AMD Ryzen 7 8845H CPU @3.8Hz,32 GB RAM。

为确保模型的稳定性,使用具有机构或者政府监管的

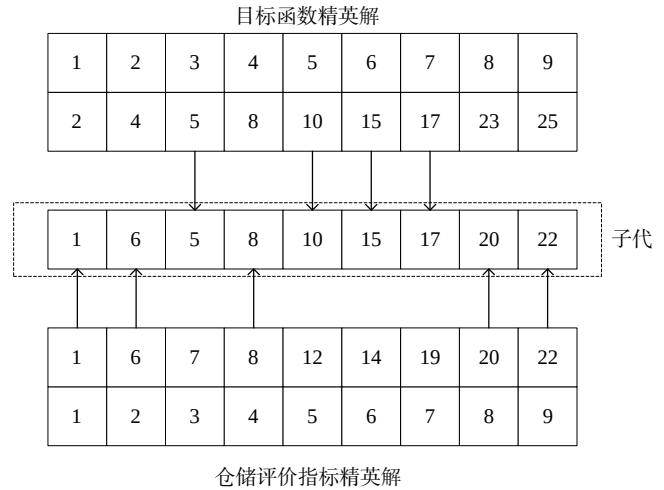


Fig. 3 Cross strategy for binocular labeling subproblem

图3 双目标子问题交叉策略

数据源作为实验参数设置来源。供应链网络模型具体参数设置见表8。

Table 8 Parameter settings

表8 参数设置

| 参数                                                                                       | 取值范围        | 参数                                                     | 取值范围         |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------|--------------|
| $SCME_{S_j}, MCME_{M_i}, TCME_{T_e}$                                                     | U[6-9]      | $SCME_{S_j}, MCME_{M_i}, TGME_{T_e}$                   | U[3-6]       |
| $SWME_{S_j}, MWME_{M_i}, TWME_{T_e}$                                                     | U[18-54]    | $SSME_{S_j}, MSME_{M_i}, TSME_{T_e}$                   | U[5-15]      |
| $RMC_{R_i}, SMC_{S_j}, MMC_{M_i}, TMP_{T_e}^P$                                           | U[1-2]      | $UPCE_{S_j}^P, UPCE_{M_i}^P, URCE_{T_e}^P$             | U[1-8]       |
| $URGE_{T_e}^P, UPGCE_{S_j}^P, UPGCE_{M_i}^P$                                             | U[0.1-0.6]  | $UPWE_{S_j}^P, UPWE_{M_i}^P, URWE_{T_e}^P$             | U[0.8-4.5]   |
| $UPSE_{S_j}^P, UPSE_{M_i}^P, URSE_{T_e}^P$                                               | U[0.3-0.8]  | $UDCE_{R_i}^P, UDCE_{S_j}^P, UDCE_{M_i}^P, UDCE_{P_e}$ | U[1-3]       |
| $ESAQ_{S_j}, ESAQ_{M_i}, ESAQ_{T_e}$                                                     | U[0-10]     | $UDTC_{S_j}^P, UDTC_{M_i}^P, UDTC_{P_e}, RUDCE_{P_e}$  | U[5-40]      |
| $URMP_{R_i}^P$                                                                           | U[0.6-0.8]  | $URCP_{T_e}^P$                                         | U[0.4-0.76]  |
| $UCRM_{R_i}^P, UPRC_{S_j}^P$                                                             | U[1.2-2.5]  | $USPP_{S_j}^P, UMPP_{M_i}^P$                           | U[0.3-0.7]   |
| $WSP_{W_i}$                                                                              | U[120-310]  | $GQ_{S_j}, GQ_{M_i}, GQ_{T_e}$                         | U[0-10]      |
| $DN_{D_p}^P, WA_{W_i}^P$                                                                 | U[20-700]   | $RR_{C_i}^P$                                           | U[0.05-0.16] |
| $D_{R_i}^P, D_{S_j}^P, D_{M_i}^P, D_{D_p}^P, D_{M_i}^P, D_{D_p}^P, D_{D_p}^P, D_{D_p}^P$ | U[25-3 618] | /                                                      | /            |
| $D_{W_i}^P, D_{D_p}^P, D_{D_p}^P$                                                        |             |                                                        |              |

### 4.2 算例设置

实验中涉及到的求解算法初始解规模为40,迭代次数

为 300 次,变异率为 0.1。文献[31]验证了在华企业绩效与可持续目标函数有显著的正向关系。由于本文的研究对象同样为在华企业,适用于相应的专家系统权重参数,如果研究对象处于国外,需要另行作出调整。以单一制造商为核心进行供应链网络设计时可以调整不同的参数权重,挑选出更加符合企业的生产偏好,适当放松对污染物排放或企业超标与事故数量等的优化,但是这也意味着调整权重会带有主观意向,这在多原料商、多供应商、多制造商、多产品类型、多回收处置中心的供应链网络设计过程中会带来公平性问题。为公平起见,使用具有权威性和认可度的三方面评价指标权重参数作为目标函数权重参数,即本文供应链模型中各指标对应的权重比例依据专家系统设置<sup>[31]</sup>:经济、环境、社会责任的权重比为 0.39:0.28:0.32;碳排放、废气排放、废水排放、固体废物排放的权重比为 0.27:0.27:0.23:0.23;企业超标与事故数量、企业绿色工作数量的权重比为 0.43:0.57。实验参考某制造业数据分别设置不同算例中原料商、供应商、制造商、分销商、仓储、客户群、回收处置中心的数目,共设置了 9 个不同规模的算例。具体如表 9 所示。

Table 9 Example scale  
表 9 算例规模

| 算例 | 原料商 | 供应商 | 制造商 | 分销商 | 仓储 | 客户群 | 回收处置中心 |
|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|--------|
| 1  | 20  | 50  | 3   | 30  | 6  | 30  | 20     |
| 2  | 20  | 50  | 3   | 60  | 12 | 60  | 20     |
| 3  | 20  | 50  | 3   | 100 | 20 | 100 | 20     |
| 4  | 30  | 90  | 6   | 30  | 6  | 30  | 30     |
| 5  | 30  | 90  | 6   | 60  | 12 | 60  | 30     |
| 6  | 30  | 90  | 6   | 100 | 20 | 100 | 30     |
| 7  | 50  | 140 | 9   | 30  | 6  | 30  | 40     |
| 8  | 50  | 140 | 9   | 60  | 12 | 60  | 40     |
| 9  | 50  | 140 | 9   | 100 | 20 | 100 | 40     |

4.3 求解结果分析

选取不同的供应链网络设计多目标优化算法进行比较分析,验证本文算法的有效性。本文对 NSGA-II 算法的精英解策略进行适应性调整,以 MOEA/D 算法为基础,引入最优化理论中的罚函数,参考 MOSA 中暂时接受差解的思想等进行策略与算法的创新与应用,因此选取 NSGA-II<sup>[32]</sup>、MOEA/D<sup>[33]</sup>、MOSA<sup>[34]</sup> 作为对照算法。采用 NSGA-II、MOEA/D、MOSA、SMOEAD 算法对所有算例分别各执行 20 次,算法的平均运行时间和平均求解质量见表 10。可以看出,对于小规模算例 1-3,SMOEAD 的平均求解时间分别比 NSGA-II、MOEA/D、MOSA 降低 18.35%、16.31%、17.16%,平均求解质量分别提升 8.67%、8.15%、24.66%;对于中等规模算例 4-6,SMOEAD 的平均求解时间分别比 NSGA、MOEA/D、MOSA 降低 26.02%、27.71%、26.49%,平均求解质量分别提升 14.61%、13.19%、29.35%;对于大规模算例 7-9,SMOEAD 的平均求解时间分别比 NSGA、MOEA/D、MOSA 降低 31.33%、32.65%、32.86%,平均求解质量分别提升 19.65%、18.31%、31.58%。

Table 10 Comparison of solution time and solution quality among various algorithms

表 10 各算法求解时间和求解质量比较

| 算例 | NSGA-II  |         | MOEA/D   |         | MOSA     |         | SMOEAD   |         |
|----|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
|    | 时间/s     | 解质量     | 时间/s     | 解质量     | 时间/s     | 解质量     | 时间/s     | 解质量     |
| 1  | 7.791 3  | 0.388 5 | 7.507 2  | 0.384 5 | 7.716 3  | 0.471 0 | 5.627 8  | 0.353 1 |
| 2  | 13.023 3 | 0.385 7 | 12.716 7 | 0.383 1 | 13.342 7 | 0.467 6 | 11.179 2 | 0.353 2 |
| 3  | 20.824 2 | 0.386 3 | 20.510 7 | 0.386 3 | 19.707 5 | 0.468 3 | 18.092 4 | 0.353 6 |
| 4  | 17.305 6 | 0.383 2 | 17.653 0 | 0.376 1 | 16.901 8 | 0.460 2 | 10.966 3 | 0.325 5 |
| 5  | 28.388 7 | 0.381 6 | 28.999 1 | 0.375 4 | 28.388 7 | 0.461 0 | 21.240 4 | 0.325 8 |
| 6  | 42.854 9 | 0.379 5 | 44.043 9 | 0.374 1 | 44.399 2 | 0.461 9 | 35.892 5 | 0.325 8 |
| 7  | 31.078 3 | 0.385 5 | 31.280 9 | 0.377 7 | 31.462 2 | 0.451 8 | 17.258 8 | 0.309 6 |
| 8  | 46.040 9 | 0.385 5 | 47.957 4 | 0.380 7 | 47.759 5 | 0.452 8 | 32.983 1 | 0.309 7 |
| 9  | 69.720 6 | 0.385 3 | 70.368 8 | 0.379 0 | 70.914 9 | 0.453 3 | 54.960 4 | 0.309 8 |

图 4 为各算法求解质量的可视化比较。可以看出,对于小规模算例 1-3,NSGA-II 与 MOEA/D 的求解质量无明显差异,SMOEAD 的求解质量最好,MOSA 的求解质量最差;对于中等规模算例 4-6,SMOEAD 的求解质量最好,相较于小规模算例 1-3 的求解质量提升最多,其次是 MOEA/D 提升较多,NSGA-II、MOSA 的求解质量提升不明显;对于大规模算例 7-9,SMOEAD 的求解质量进一步提高,MOSA 的求解质量稍稍提高,NSGA-II 和 MOEA/D 的求解质量没有提高。

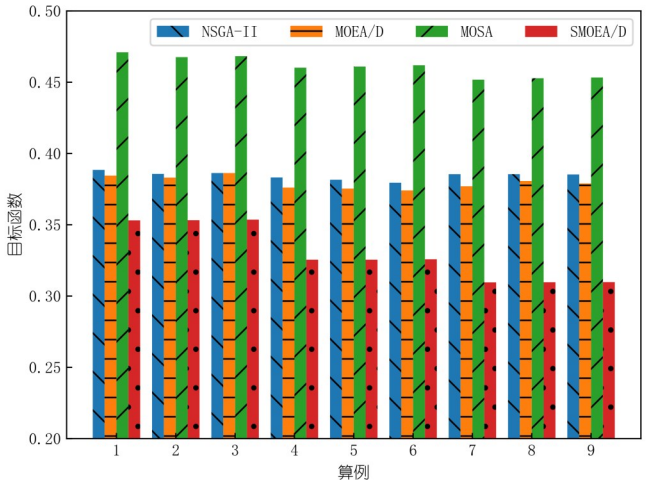


Fig. 4 Visual comparison of solution quality of various algorithms  
图 4 各算法求解质量可视化比较

图 5 为各算法求解时间的可视化比较。可以看出,NSGA-II 对算例 4 的求解时间相较算例 1 增加 1.22 倍,对算例 7 的求解时间相较算例 4 增加 0.79 倍。MOEA/D 对算例 4 的求解时间相较算例 1 增加 1.35 倍,对算例 7 的求解时间相较算例 4 增加 0.77 倍。MOSA 对算例 4 的求解时间相较算例 1 增加 1.19 倍,对算例 7 的求解时间相较算例 4 增加 0.86 倍,SMOEAD 对算例 4 的求解时间相较算例 1 增加 0.94 倍,对算例 7 的求解时间相较算例 4 增加 0.57 倍。总体来说,随着供应链规模的增加,模型求解时间的增长幅度不同,SMOEAD 对各规模算例求解时间的增长幅度小于 NSGA-II、MOEA/D、MOSA。

分别选择 NSGA-II、MOEA/D、MOSA 和 SMOEA/D 算法

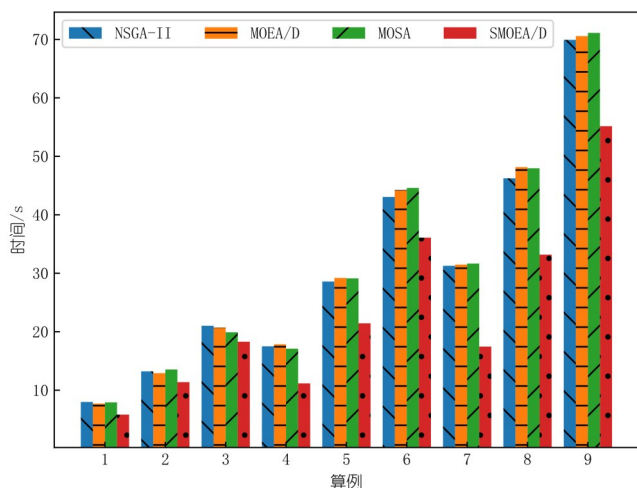


Fig. 5 Visual comparison of solution times for various algorithms

图5 各算法求解时间可视化比较

迭代完成之后目标函数的最优值,即从每个算法每次运行得到的最优解中选出目标函数最小值,记录最优目标函数中双目标和单目标子问题的占比,结果如表 11 所示。同时记录 WI 与双目标子问题目标函数之间的横向关系,结果如表 12 所示。具体来说,首先在算例 1、2、3 之间,算例 4、5、6 之间,算例 7、8、9 之间进行比较,可以看出,随着客户群数量的增加,增加一定数量的仓储,双目标子问题目标函数基本保持稳定。其次在算例 1、4、7 之间,算例 2、5、8 之间,算例 3、6、9 之间进行比较,可以看出,双目标子问题目标函数逐步降低,但是 NSGA-II、MOEA/D、MOSA 的单目标子问题目标函数随着算例规模的增加出现增长,说明三者对双目标子问题之外的 PS、RS 单目标子问题优化效果并不好。SMOEAD 的单目标子问题目标函数随着算例规模的增加效果变好,再次说明 SMOEA/D 能够应对大规模问题,同时验证了算法的有效性。本文算法中单目标子问题解节点环境的构建充分利用了分散决策的优势,降低了集中决策中其他节点选择决策问题对该节点选择决策问题的影响,进而提升了单目标子问题的优化效果,保障了其求解大规模问题的性能。

对表 12 中的算例 2、3 进行分析,可以看出,MOEA/D

Table 11 Analysis of the proportion of objective functions

表 11 目标函数占比分析

| 算例 | NSGA-II |         | MOEA/D  |         | MOSA    |         | SMOEAD  |         |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|    | 双目标     | 单目标     | 双目标     | 单目标     | 双目标     | 单目标     | 双目标     | 单目标     |
| 1  | 0.068 9 | 0.310 1 | 0.069 5 | 0.307 2 | 0.071 5 | 0.384 6 | 0.068 5 | 0.284 2 |
| 2  | 0.070 8 | 0.309 3 | 0.067 7 | 0.313 1 | 0.070 0 | 0.384 1 | 0.068 4 | 0.284 3 |
| 3  | 0.070 5 | 0.307 8 | 0.068 7 | 0.311 1 | 0.071 3 | 0.380 6 | 0.068 8 | 0.284 4 |
| 4  | 0.045 4 | 0.333 3 | 0.045 2 | 0.322 2 | 0.045 7 | 0.404 8 | 0.043 4 | 0.281 5 |
| 5  | 0.045 1 | 0.327 5 | 0.044 8 | 0.324 7 | 0.044 6 | 0.404 4 | 0.043 3 | 0.281 7 |
| 6  | 0.045 2 | 0.330 7 | 0.044 3 | 0.323 8 | 0.045 4 | 0.400 1 | 0.043 7 | 0.281 8 |
| 7  | 0.030 4 | 0.349 0 | 0.030 2 | 0.334 5 | 0.030 6 | 0.405 3 | 0.028 7 | 0.280 6 |
| 8  | 0.030 1 | 0.348 4 | 0.029 4 | 0.339 7 | 0.030 1 | 0.412 2 | 0.028 7 | 0.280 7 |
| 9  | 0.029 5 | 0.352 1 | 0.030 0 | 0.343 1 | 0.030 0 | 0.416 2 | 0.028 8 | 0.280 6 |

的 WI 高于 SMOEA/D,MOEA/D 的双目标子问题目标函数值低于 SMOEA/D,说明以子问题目标函数为标准,SMOEAD 在小规模算例中对 WI 的探索超出理想范围,结合表 10 中的平均解质量可知,当运行次数增加时,SMOEAD 依旧可以胜任小规模供应链网络设计。在算例 1、4、5、6、7 中,SMOEAD 的 WI 均低于 NSGA-II、MOEA/D、MOSA,且 SMOEA/D 的双目标子问题目标函数值均低于 NSGA-II、MOEA/D、MOSA,说明此时 SMOEA/D 在 WI 和目标函数两方面的优化效果均较好,可以认为达到了理想状态的网路设计,验证了 SS 下目标函数和 WI 双目标子问题优化的必要性,但同时也说明了虽然 SMOEA/D 在小规模问题上已经取得显著成效,但是仍有优化空间。在算例 8 中,SMOEAD 的 WI 高于 NSGA-II、MOEA/D、MOSA 且 SMOEA/D 的双目标子问题目标函数值均低于 NSGA-II、MOEA/D、MOSA,算例 9 中 SMOEA/D 的 WI 高于 NSGA-II、MOEA/D 但低于 MOSA,且 SMOEA/D 的双目标子问题目标函数值均低于 NSGA-II、MOEA/D、MOSA,表明了 SS 双目标优化下子代生成策略对 WI 目标松弛问题的支持,以及 WI 辅助目标函数共同完成供应链网络设计的有效性。具体来说,WI 和目标函数从两个方面评价双目标子问题的供应链网络设计,由于其角度不同,依据不同指标选出的解可以相互补充,即使一个指标没有更新,其解的内部组成也发生了相应变化,相较其他算法最大限度地保留了种群多样性带来的优势,进而提升了算法对模型的支持。当规模进一步增大时,WI 与目标函数相比始终更易探索到最优解附近,确保了算法始终能够发挥较好的性能。

Table 12 The horizontal relationship between the objective functions of the WI and the dual-objective subproblems

表 12 WI 与双目标子问题目标函数之间的横向关系

| 算例 | NSGA-II   |         | MOEA/D    |         | MOSA      |         | SMOEAD    |         |
|----|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|    | WI        | 双目标     | WI        | 双目标     | WI        | 双目标     | WI        | 双目标     |
| 1  | 225.122 6 | 0.068 9 | 187.970 2 | 0.069 5 | 211.832 9 | 0.071 5 | 120.132 2 | 0.068 5 |
| 2  | 118.331 8 | 0.070 8 | 168.841 8 | 0.067 7 | 285.868 6 | 0.070 0 | 118.866 4 | 0.068 4 |
| 3  | 206.312 9 | 0.070 5 | 130.663 6 | 0.068 7 | 200.398 1 | 0.071 3 | 125.860 7 | 0.068 8 |
| 4  | 99.389 5  | 0.045 4 | 96.901 1  | 0.045 2 | 85.037 1  | 0.045 7 | 78.450 5  | 0.043 4 |
| 5  | 112.707 4 | 0.045 1 | 97.725 0  | 0.044 8 | 160.588 3 | 0.044 6 | 66.192 2  | 0.043 3 |
| 6  | 120.279 8 | 0.045 2 | 131.215 7 | 0.044 3 | 170.214 9 | 0.045 4 | 91.675 4  | 0.043 7 |
| 7  | 81.147 6  | 0.030 4 | 80.129 9  | 0.030 2 | 90.866 6  | 0.030 6 | 63.806 8  | 0.028 7 |
| 8  | 95.700 6  | 0.030 1 | 88.687 9  | 0.029 4 | 57.914 1  | 0.030 1 | 116.372 1 | 0.028 7 |
| 9  | 78.852 1  | 0.029 5 | 76.104 1  | 0.030 0 | 102.107 4 | 0.030 0 | 91.913 4  | 0.028 8 |

#### 4.4 弹性分析

为测试 NSGA-II、MOEA/D、MOSA 和 SMOEA/D 在大规模算例下得到的供应链网络设计弹性,将具有约束条件的供应链节点最大生产或回收处理能力降低 20%,分析受影响的节点数量占比,结果见图 6。可以看出,使用 SMOEA/D 求得的供应链设计在弹性特征方面表现良好,NSGA-II 与 MOEA/D 在弹性特征方面表现相近,MOSA 在弹性特征方面表现不佳。NSGA-II、MOEA/D、MOSA 将不满足约束条件的解直接舍弃,造成部分信息丢失,使得设计结果更

倾向于基于核心节点的解,然而这与供应链网络弹性设计存在冲突。SMOEA/D中的节点惩罚能够暂时接受不满足条件的点,通过将惩罚系数作用于目标函数和变异率来加速供应链设计的转化,更适合弹性供应链网络设计。

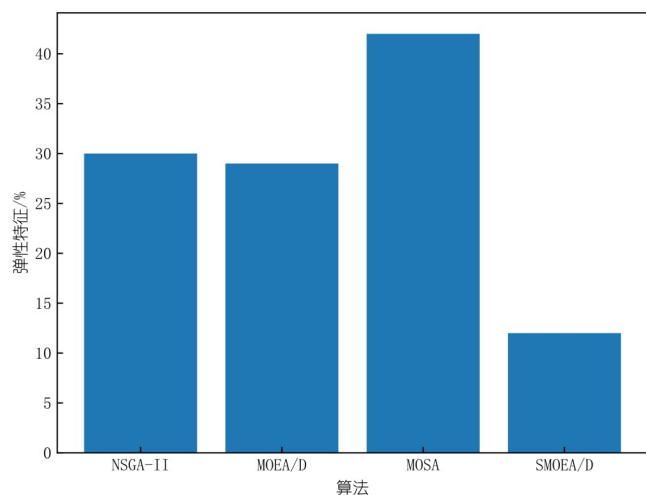


Fig. 6 Comparison of resilience in supply chain network design under different algorithms

图6 不同算法下供应链网络设计弹性比较

为测试NSGA-II、MOEA/D、MOSA和SMOEA/D在大规模算例下的客户满意度弹性,随机挑选20%的客户销量数据,以10%的数据波动增加或减少一个客户群的需求量,分析供应链网络中不能够满足客户群需求的节点占比。结果见图7。可以看出,NSGA-II、MOEA/D、MOSA对于客户满意度弹性的支持效果较差,随机干扰下的供应链网络设计不能满足客户需求量变化的概率较大。SMOEA/D中的混合精英解选择策略和自适应子代生成策略能够在不过多占用目标函数优化资源的情况下提高供应链网络弹性设计环节中的客户满意度。结合表10、表12和图7可知,在相同的迭代次数下,混合精英解选择策略中的WI因具有探索容易和目标松弛等特性,探索到了比NSGA-II、MOEA/D更加丰富的种群多样性。WI探索超过理想范围可能会对目标函数造成影响,但是快速收敛又能够保证结果的充分探索,综合影响下提高了供应链目标函数的求解质量,同时改善了客户满意度弹性。供应链的不同阶段有不同的核心需求,例如在生产阶段,制造商需要更优质的供应价格和更稳定的供货源;在分销阶段,为满足客户需求,需要更出色的仓储设计;在回收处理阶段需要更绿色环保的废弃产品处理手段。目标函数增多虽然会增加模型的求解难度,但是能够完善供应链网络设计。正确利用目标函数之间的关系进行供应链设计能够更高效地获得高质量解。

#### 4.5 灵敏性分析

选择NSGA-II、MOEA/D、MOSA和SMOEA/D在算例9中WI、目标函数的迭代过程进行分析。由于SMOEA/D的双目标子问题精英解分为两部分,4种算法均选取一半数

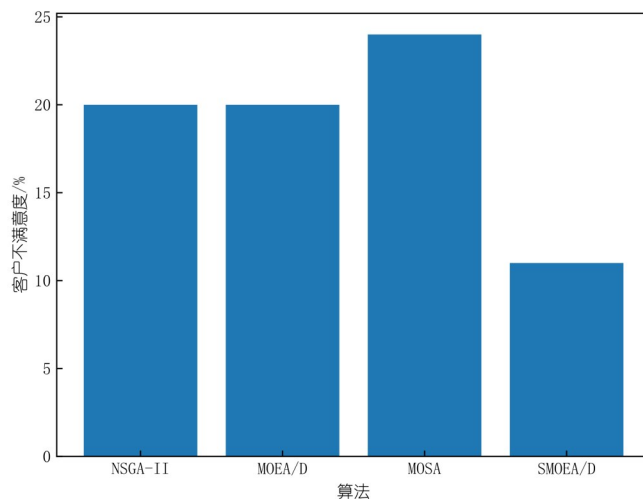


Fig. 7 Comparison of customer satisfaction elasticity under different algorithms

图7 不同算法下客户满意度弹性比较

量的精英解求平均值作为迭代次数下的WI和目标函数。结果如图8、图9所示。由图8可以看出,NSGA-II和MOEA/D的WI收敛较为均匀;在大规模问题中,MOSA迭代截止时收敛迹象不明显,最终收敛需要1000代,与其他算法迭代300次便能收敛相比效果缓慢;SMOEA/D的收敛最快,在迭代100次时WI便已经收敛到20左右,但最优解对应的WI为90左右。自适应子代生成策略在迭代初期保证了WI的快速优化,在迭代后期减少了WI对资源的占用,与此同时提供超范围的种群多样性信息,配合混合精英解选择策略达到优化目标函数求解质量和供应链网络弹性的效果。

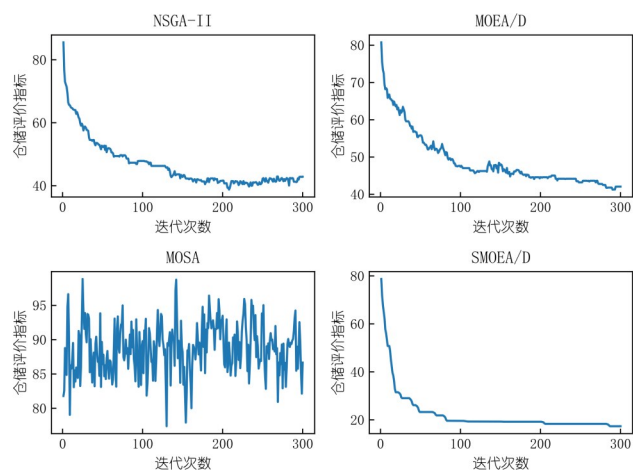


Fig. 8 WI iteration curve

图8 WI迭代曲线

由图9可以看出,NSGA-II的收敛速度较为均匀,MOEA/D的收敛速度先快后慢,MOSA的收敛效果较差。结合图9和表10中的求解质量可以看出,即使是大规模问题优化,MOSA相比于NSGA-II和MOEA/D依旧能有一定程度的提升,侧面证实了增加随机性或种群多样性会对算

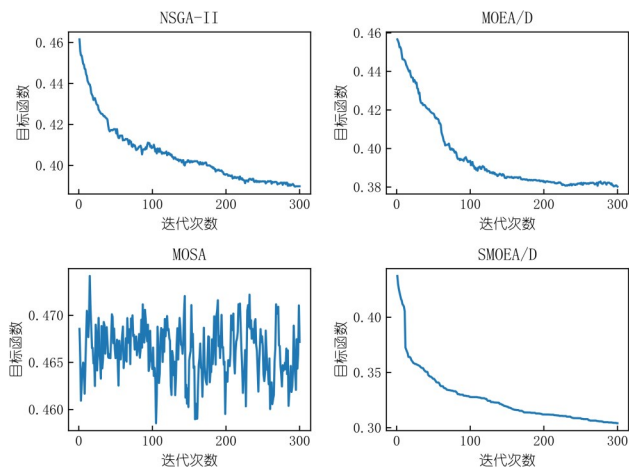


Fig. 9 Objective function iteration curve

图9 目标函数迭代曲线

法优化有一定效果。本文算法通过使用额外指标的目标松弛特性提供不一样的种群多样性,提出解节点环境发挥集中和分散决策的优势,防止规模增大时其他无关节点对该节点选择决策的影响。可以看出,SMOEA/D开始时收敛非常迅速,之后收敛速度下降,但是求解效果很好,与其他算法相比稳定性和有效性更佳,即使是面临更大的算例规模时依旧可以发挥作用。结合图8和图9可以看出,NSGA-II在目标函数和WI两方面的收敛均较为均匀,这对于求解帕累托前沿问题来说是优点,但是对于供应链网络设计问题来说不够灵活;MOEA/D的求解效果优于NSGA-II,但不如SMOEA/D;MOSA对于大规模算例的求解效果不好;SMOEA/D初期收敛速度快源自于双目标子问题的快速优化,目标函数在快速收敛后的优化过程主要受单目标子问题影响,这种方式更加灵活。

## 5 结语

本文以多层次、多制造商、多产品类型的弹性供应链网络为研究对象,以供应链弹性设计为关注点,考虑经济、环境、社会责任三方面因素,针对供应链不同阶段子问题提出一种基于层级分解的多目标进化算法。该算法引入仓储评价指标,通过对精英解筛选策略、子代生成策略进行改进,提高弹性供应链网络设计质量和灵活性,减少求解时间。实验结果表明,相较于对照算法,所提算法对小规模算例的平均求解质量提高了13%,平均求解时间降低了17%;对中等规模算例的平均求解质量提高19%,平均求解时间降低26%;对大规模算例的平均求解质量提高了23%,平均求解时间降低了32%。此外,当算例规模增加时,所提算法的平均求解时间增幅小,得到的弹性供应链网络设计应对市场波动时的弹性更好。后续考虑将采用深度强化学习技术分析挖掘供应商的历史数据来预测其可靠性,如根据供应商交付产品的时间跨度、交付产品质

量、未按时交付次数等为不同供应商赋予不同的可靠性数值,然后使用可靠性数值设计更具弹性的供应链网络。同时,为保证模型的稳定性和鲁棒性,增强其迁移应用能力,考虑探索更有效的方法处理数据的不确定性和噪声,使模型在数据源质量得不到保障时依旧可以很好地运行。

## 参考文献:

- [1] MING T C. Facing market disruptions: values of elastic logistics in service supply chains[J]. International Journal of Production Research, 2021, 59(1):286-300.
- [2] ACEMOGLU D, TAHBAZSALEHI A. Firms, failures, and fluctuations: the macroeconomics of supply chain disruptions [EB/OL]. <https://www.nber.org/papers/w27565>.
- [3] SHISHODIA A, SHARMA R, RAJAGOPAL R, et al. Supply chain resilience: a review, conceptual framework, and future research[J]. The International Journal of Logistics Management, 2023, 34(4):879-908.
- [4] PIPRANI A Z, JAAFAR N I, ALI S M, et al. Multi-dimensional supply chain flexibility and supply chain resilience: the role of supply chain risks exposure[J]. Operations Management Research, 2022, 15:307-325.
- [5] HASANI A, MOKHTARI H, FATTAHI M. A multi-objective optimization approach for green and resilient supply chain network design: a real-life case study [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 278(1):123199.
- [6] JAFAR N, ALI S T, NAVID S, et al. Business continuity-inspired resilient supply chain network design [J]. International Journal of Production Research, 2021, 59(5):1331-1367.
- [7] CAI J H, JIANG L, YANG M Y, et al. Green supply chain game models considering risk aversion under information asymmetry [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2024, 44(5):1615-1632.  
蔡建湖, 蒋乐, 杨梦园, 等. 不对称信息下考虑风险的绿色供应链决策研究[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(5):1615-1632.
- [8] ZHENG G Z, YANG X Y, ZHANG R M, et al. Optimization of suppliers material delivery intervals and batch based on bi-level programming [J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(7):87-92.  
郑广珠, 杨晓英, 张瑞敏, 等. 基于双层规划的多供应商物料配送期量优化[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(7):87-92.
- [9] LI Z P, LIU L, LIU R Y, et al. Design problem of resilient supply chain network based on multiple recovery strategies [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(11):3510-3522.  
李珍萍, 刘璐, 刘若阳, 等. 基于多种恢复策略的弹性供应链网络设计问题[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(11):3510-3522.
- [10] LIU M L, DAN B, MA S X. Optimal strategies and coordination of fresh E-commerce supply chain considering freshness-keeping effort and value-added service[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(8):76-88.  
刘墨林, 但斌, 马崧莹. 考虑保鲜努力与增值服务的生鲜电商供应链最优决策与协调[J]. 中国管理科学, 2020, 28(8):76-88.
- [11] BAGUL A, MUKHERJEE I. Enhanced sourcing strategy for centralized multi-tier multiple suppliers network with failure risks [J]. International Journal of Productivity and Performance Management, 2020, 71(1):211-244.
- [12] ALI M B, FATEMEH B, MASOOD F, et al. Evaluating and prioritizing the healthcare waste disposal center locations using a hybrid multi-criteria decision-making method[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1):15130.

- [13] ZHAO X, WANG S, WANG H, et al. HST-GT: heterogeneous spatial-temporal graph transformer for delivery time estimation in warehouse-distribution integration e-commerce [C]//Proceedings of the 32nd ACM International Conference on Information and Knowledge Management, 2023:3402-3411.
- [14] LIN L, LU Z, WANG S, et al. MulSTE: a multi-view spatio-temporal learning framework with heterogeneous event fusion for demand-supply prediction [C]//Proceedings of the 30th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2024: 1781-1792.
- [15] JONATHON M, ALBERT M, MATTHEW P. Conceptualising redundancy and flexibility towards supply chain robustness and resilience[J]. Journal of Risk Research, 2020, 23(12): 1541-1561.
- [16] GAMRATH G, GLEIXNER A, KOCH T, et al. Tackling Industrial-Scale Supply Chain Problems By Mixed-Integer Programming[J]. Computational Mathematics, 2019, 37(6): 866-888.
- [17] WU G X, SUN Z Y, JU C H. Closed-loop supply chain network design model considering interruption risk and fuzzy pricing[J]. Computer Science, 2022, 49(7): 220-225.  
吴功兴,孙兆洋,琚春华. 考虑中断风险与模糊定价的闭环供应链网络设计模型[J]. 计算机科学, 2022, 49(7): 220-225.
- [18] RASI E R, SOHANIAN M. A multi-objective optimization model for sustainable supply chain network with using genetic algorithm[J]. Journal of Modelling in Management, 2020, 16(2): 714-727.
- [19] YUN Y, CHULUNUNSUH A, GEN M. Sustainable closed-loop supply chain design problem: a hybrid genetic algorithm approach[J]. Mathematics, 2020, 8(1): 84.
- [20] WANG X Q, CHEN G, XU S. Bi-objective green supply chain network design under disruption risk through an extended NSGA-II algorithm[J]. Cleaner Logistics and Supply Chain, 2022, 3: 100025.
- [21] ZHAO X, PENG B H, ZHENG C Y, et al. Closed-loop supply chain pricing strategy for electric vehicle batteries recycling in China[J]. Environment, Development and Sustainability, 2021, 24(6): 1-28.
- [22] HEYDARI J, GOVINDAN K, BASIRI Z. Balancing price and green quality in presence of consumer environmental awareness: a green supply chain coordination approach[J]. International Journal of Production Research, 2021, 59(7): 1957-1975.
- [23] PRUVOST G, DERBEL B, LIEFOOGHE A, et al. On the combined impact of population size and sub-problem selection in MOEA/D [C]//European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization, 2020: 131-147.
- [24] GUO Y H, YU J Y, LIU W J, et al. Modeling and solution for sustainable supply chain network design problem in manufacturing industry[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(7): 2112-2133.  
郭羽含,于俊宇,刘万军,等. 制造业可持续供应链网络建模及求解[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(7): 2112-2133.
- [25] ZHANG Y, WANG G G, LI K Q, et al. Enhancing MOEA/D with information feedback models for large-scale many-objective optimization[J]. Information Sciences, 2020, 522: 1-16.
- [26] ZHANG Q, PANG G, WANG G. A novel sequential three-way decisions model based on penalty function[J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 192: 105350.
- [27] ZHOU X, LU J, HUANG J, et al. Enhancing artificial bee colony algorithm with multi-elite guidance[J]. Information Sciences, 2021, 543: 242-258.
- [28] LIANG X, CHEN J B, GU X L, et al. Improved adaptive non-dominated sorting genetic algorithm with elite strategy for solving multi-objective flexible job-shop scheduling problem[J]. IEEE Access, 2021, 9: 106352-106362.
- [29] TORABIZADEH M, YUSOF M N, MA'ARAM A, et al. Identifying sustainable warehouse management system indicators and proposing new weighting method[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 248: 119190.
- [30] LI C, HAO W, JING D. Modelling flexible decisions about sustainable supplier selection in multitier sustainable supply chain management[J]. International Journal of Production Research, 2023, 61(14): 4603-4624.
- [31] LI G, SHAO S, ZHANG L. Green supply chain behavior and business performance: evidence from China[J]. Technological Forecasting & Social Change, 2019, 144: 445-455.
- [32] HOSAMO H H, SOLVANG M T, KOFOED H N, et al. Multiobjective optimization of building energy consumption and thermal comfort based on integrated BIM framework with machine learning-NSGA II[J]. Energy & Buildings, 2022, 277: 112479.
- [33] YANG Z, QIU H B, GAO L, et al. Surrogate-assisted MOEA/D for expensive constrained multi-objective optimization[J]. Information Sciences, 2023, 639: 119016.
- [34] WANG K P, LI X Y, GAO L, et al. A genetic simulated annealing algorithm for parallel partial disassembly line balancing problem[J]. Applied Soft Computing Journal, 2021, 107: 107404.

(责任编辑:尹晨茹)