

# 基于改进遗传算法的直发包装 SKU 归并优化方法

徐畅<sup>1</sup>, 王军<sup>1,2\*</sup>, 潘嘹<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** **目的** 采用直发包装 SKU 归并优化方法, 通过减少最小存货单位 (Stock Keeping Unit, SKU) 的种类, 来达到节省物料成本的目的。 **方法** 综合运用 k-means 聚类分析和组合优化理论, 建立直发包装 SKU 归并模型, 并设计基于非均匀变异算子的遗传算法求解方法。以随机生成 SKU 尺寸信息及其对应的直发包装订购数量的测试数据集为例, 通过对比归并前后的 SKU 种类数和物料成本来验证优化方法的有效性和可行性。 **结果** 优化后, 直发包装 SKU 归并方案中 SKU 种类的平均降低率为 33.13%, 归并可使物料成本平均下降 2.84%。 **结论** 研究成果可丰富直发包装领域的相关研究, 对优化供应链结构, 促进包装系列化、智能化发展具有指导意义。

**关键词:** 最小存货单位; 直发包装; 聚类分析; 非均匀变异算子; 遗传算法

中图分类号: TS206.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)19-0248-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.19.032

## Optimization Method of SKU Merging for Delivered with Original Package Based on Improved Genetic Algorithm

XU Chang<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1,2\*</sup>, PAN Liao<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangsu Wuxi 214122, China)

**ABSTRACT:** The work aims to use the SKU merging optimization method of delivered with original package (DWOP) to achieve the purpose of saving material costs by reducing the types of stock keeping units (SKUs). K-means clustering analysis and combinatorial optimization theory were used comprehensively to establish the SKU merging model of DWOP. Afterwards, the genetic algorithm based on non-uniform mutation operator was designed to solve this problem. With the test data set of randomly generated SKU size information and its corresponding order quantity of DWOP as an example, the effectiveness and feasibility of the optimization method were verified by comparing the number of SKU types and the material cost of DWOP before and after merging. The results showed that the average reduction rate of the SKU types in the DWOP SKU merging scheme after optimization was 33.13%, and the average material cost reduction rate was 2.84%. The research results can enrich the related research in the field of DWOP and have guiding significance for optimizing the supply chain structure and promoting the serialization and intelligent development of packaging.

**KEY WORDS:** stock keeping unit; delivered with original package; clustering analysis; non-uniform mutation operator; genetic algorithm

收稿日期: 2023-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(51205167); 江苏省自然科学基金(BK20151128); 国家一流学科建设轻工技术与工程(LITE 2018-29)

截至 2021 年 12 月, 我国的网络购物用户规模已达 8.4 亿, 是全球最大的网络零售市场, 而伴随网络购物而生的是井喷式增长的快递量<sup>[1]</sup>。2021 年 9 月 15 日印发的《“十四五”塑料污染治理行动方案》中明确, 到 2025 年, 电商快件基本实现不再二次包装。应对此现状, 包装供应链物流相关企业正大力推进原厂直发包装 (Delivered With Original Package, DWOP), 即减少原供应链路里品牌商仓库和电商平台这 2 个流程, 将产品直接从工厂发出后进行订单配送, 到达消费者手中。

消费者网购需求日益广泛, 也导致了最小存货单位 (Stock Keeping Unit, SKU) 种类的暴增, 由此引发的快递件数上涨<sup>[2-4]</sup>、二次包装需求量扩大<sup>[5-7]</sup>、包装废弃物增加<sup>[8-10]</sup>、材料和资源浪费<sup>[11-13]</sup>等一系列现实问题, 已引起了社会各界的广泛关注。Zhu 等<sup>[14]</sup>基于客户订单和仓库的分布, 提出了一种 K-links 启发式聚类算法来归并多个仓库之间的 SKU, 以达到降低运输成本的目的; Zhang 等<sup>[15]</sup>提出了一种多仓库整合的储存优化方法, 通过仓库间的转运来归并多个子订单中的 SKU, 并利用 Benders 分解算法求解, 有效地降低了总成本; Bahrami 等<sup>[16]</sup>以总拣选时间和订单交付周期为衡量标准, 提出了一种新的 SKU 存储归并优化方法, 可以更好地缩短总拣选行程距离和订单完成时间; Wang 等<sup>[17]</sup>提出了一种优化订单拣选操作的方法, 引入 “good move pair” 的概念, 根据不同订单中 SKU 的数据特征来进行归并, 以快速地得到更好的储位分配方式; 黄敏芳等<sup>[18]</sup>提出了为简化打包的两阶段在线智能优化方法, 能够生成不同情景及仓库配置时打包的归并优化方案, 有效降低了网购订单的履行成本。综上所述, 面对急剧增长的 SKU 种类数, 可根据不同的数据特征对 SKU 进行归并, 并对仓储部署、拣货路径、订单打包等进行有效整合, 从而达到降低成本、提高效率的目的<sup>[19-21]</sup>。

然而, 现有的 SKU 归并研究主要集中在传统包装供应链路的电商平台环节 (储存、拣货、打包), 原厂直发包装的出现简化了原供应链路, 使其不再具备该环节。但庞大的 SKU 种类使得直发包装在产品工厂环节就存在尺寸规格繁多、物料成本昂贵的问题。

同时, 直发包装投入使用的时间尚短, 在该领域进行 SKU 归并的研究尚为空白, 目前在实际应用中, 仍采用人工计算或凭经验的方式对直发包装 SKU 进行归并, 不仅效率低下, 还往往不能取得期望的效果。因此, 为适应直发包装应用场景, 本文提出了产品工厂环节中的直发包装 SKU 归并优化模型及方法, 尝试通过直发包装 SKU 归并来降低 SKU 种类数, 以达到节省物料成本的目的。

## 1 问题描述与建模

### 1.1 问题描述

使用直发包装虽然减少了品牌商仓库 (二次包装) 和电商平台 (储存、拣货、打包) 2 个环节, 如图 1 所示。但在直发包装应用场景中, 一种 SKU 对应着与之尺寸匹配的一种直发包装, 品牌商向纸板厂订购不同尺寸的直发包装盒时, 也会根据该 SKU 的需求量、销量等因素综合考虑每种直发包装盒的订购量。因此, 庞大的 SKU 种类使直发包装在产品工厂环节便存在着尺寸规格繁多、物料成本居高不下的问题, 这也成为了推动直发包装应用的阻力之一。本文要解决的问题是对直发包装 SKU 进行归并, 以此来降低品牌商向纸板厂商订购不同尺寸直发包装时的分散订购量, 增加同尺寸直发包装的订购量, 使其达到以订购量为阶梯的数量折扣, 满足降低物料成本的目的。

### 1.2 归并描述

将不同的 SKU 分别进行直发包装作业, 直发包装的种类会和 SKU 种类一样繁多, 如图 2 所示, 每种 SKU 都对应着与其匹配尺寸的直发包装盒。直发包装 SKU 归并指将若干不同尺寸的 SKU (即不同种类) 采用同一尺寸的直发包装, 如 2 种 SKU 经归并后使用的直发包装尺寸相同, 则称两者得到了归并, SKU 种类数从 2 个变为 1 个。以 2 种 SKU 做归并为例, 若 SKU1 的长宽高分别为  $l_1$ 、 $w_1$ 、 $h_1$ , SKU2 的长宽高分别为  $l_2$ 、 $w_2$ 、 $h_2$ , 在归并时会出现如表 1 中的 8 种情况。

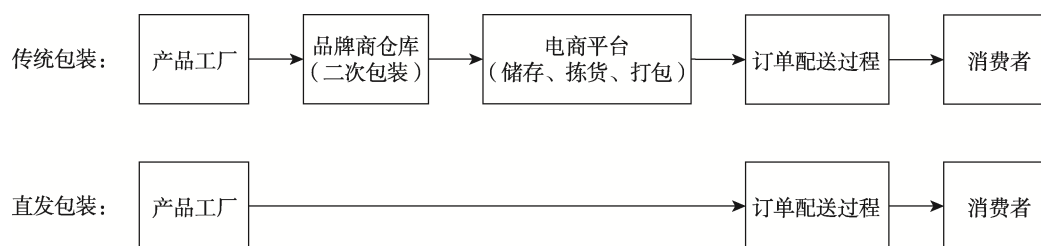


图 1 传统包装与直发包装供应链的比较

Fig.1 Comparison of traditional packaging and DWOP supply chains

表1 尺寸比较情况  
Tab.1 Size comparison

| 序号 | 尺寸比较情况                            | 归并后的 SKU 尺寸     |
|----|-----------------------------------|-----------------|
| 1  | $l_1 < l_2, w_1 < w_2, h_1 < h_2$ | $l_2, w_2, h_2$ |
| 2  | $l_1 > l_2, w_1 < w_2, h_1 < h_2$ | $l_1, w_2, h_2$ |
| 3  | $l_1 < l_2, w_1 > w_2, h_1 < h_2$ | $l_2, w_1, h_2$ |
| 4  | $l_1 < l_2, w_1 < w_2, h_1 > h_2$ | $l_2, w_2, h_1$ |
| 5  | $l_1 > l_2, w_1 > w_2, h_1 < h_2$ | $l_1, w_1, h_2$ |
| 6  | $l_1 > l_2, w_1 < w_2, h_1 > h_2$ | $l_1, w_2, h_1$ |
| 7  | $l_1 < l_2, w_1 > w_2, h_1 > h_2$ | $l_2, w_1, h_1$ |
| 8  | $l_1 > l_2, w_1 > w_2, h_1 > h_2$ | $l_1, w_1, h_1$ |

在讨论直发包装 SKU 归并时, 为保证归并后的 SKU 均能装入直发包装, 需要分别将各个 SKU 的长、宽、高进行比较, 选取较长边作为归并后的尺寸。虽然可能存在“小 SKU 装大盒子”的情况, 但越多 SKU 选用同尺寸的直发包装盒, 品牌商也会相应地增加该种直发包装盒的订购量, 生产纸盒时所能达到的数量折扣也就越高。将“分散订购”变为“归并订购”, 在很大程度上存在着使物料成本降低的可能。需注意的是, 本文所指的 SKU 尺寸为该 SKU 所代表的最小外切长方体的长、宽、高。

### 1.3 模型假设

- 1) SKU 和直发包装所代表的空间形状均为长方体。
- 2) SKU 在直发包装中正交装载。
- 3) 所有 SKU 均能够被其所对应的直发包装容纳, 即直发包装的尺寸在理论上不受限, 且尺寸大于被装载的 SKU。
- 4) 忽略直发包装材料厚度变化。
- 5) 不考虑直发包装破损情况。

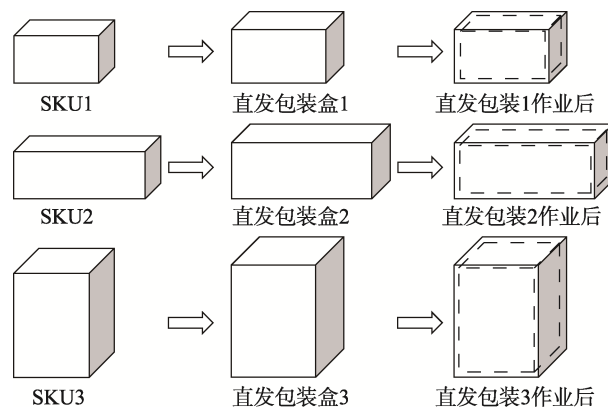


图2 不同尺寸 SKU 进行直发包装作业  
Fig.2 DWOP operation with SKUs of different sizes

### 1.4 符号说明

本文建模所用三维坐标系如图3所示。以 SKU 的长、宽、高所在的直线作为  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴, 其左-后-下角所在的点为坐标原点, 各边所在的方向为正方向。

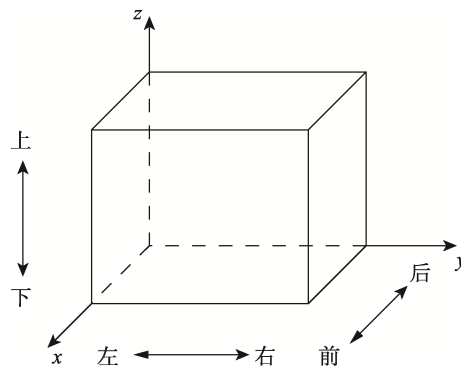


图3 空间坐标系建立示意图  
Fig.3 Schematic diagram for coordinate system establishment

模型中所涉及的参数定义如表2所示。

表2 参数定义  
Tab.2 Parameter definition

| 符号                                            | 参数定义                                                              | 类别   |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------|
| $x_{SKUInf}, y_{SKUInf}, z_{SKUInf}$          | 直发包装制造尺寸 (长、宽、高)                                                  | 几何参数 |
| $x_{SKUInfin}, y_{SKUInfin}, z_{SKUInfin}$    | 直发包装内尺寸 (长、宽、高)                                                   |      |
| $x_{SKUInfout}, y_{SKUInfout}, z_{SKUInfout}$ | 直发包装外尺寸 (长、宽、高)                                                   |      |
| $X_{new}, Y_{new}, Z_{new}$                   | 归并后直发包装长、宽、高                                                      | 成本参数 |
| $N$                                           | SKU 所对应的直发包装订购数量                                                  |      |
| $D$                                           | 数量折扣                                                              |      |
| $X^l, X^h, X^w$                               | 0、1 变量, $X^l=1, X^h=1, X^w=1$ 分别表示放置 SKU 后的直发包装的长边平行于 $x, y, z$ 轴 | 位置参数 |
| $Y^l, Y^h, Y^w$                               | 0、1 变量, $Y^l=1, Y^h=1, Y^w=1$ 分别表示放置 SKU 后的直发包装的宽边平行于 $x, y, z$ 轴 |      |
| $Z^l, Z^h, Z^w$                               | 0、1 变量, $Z^l=1, Z^h=1, Z^w=1$ 分别表示放置 SKU 后的直发包装的高边平行于 $x, y, z$ 轴 |      |
| $K_n$                                         | k-means 聚类簇数量                                                     | 聚类参数 |
| $P_{ij}$                                      | 表示第 $i$ 个聚类中心中第 $j$ 个 SKU 的物料成本                                   |      |
| $C_iA$                                        | 0、1 变量, 判断每一个 SKU 是否被归并方案所包含                                      |      |
| $C_iX$                                        | 表示在第 $i$ 个聚类中心下的第 $X$ 个变量                                         |      |

## 1.5 模型构建

目标函数:

$$\min \sum_{i=1}^{K_n} \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad (1)$$

约束条件:

$$C_i X_{\text{new}} \geq \max \{C_i x_{\text{SKUInfoutj}}\} \quad (2)$$

$$C_i Y_{\text{new}} \geq \max \{C_i y_{\text{SKUInfoutj}}\} \quad (3)$$

$$C_i Z_{\text{new}} \geq \max \{C_i z_{\text{SKUInfoutj}}\} \quad (4)$$

$$C_i A = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$C_i X_{\text{new}}^l + C_i X_{\text{new}}^h + C_i X_{\text{new}}^w = 1 \quad (6)$$

$$C_i Y_{\text{new}}^l + C_i Y_{\text{new}}^h + C_i Y_{\text{new}}^w = 1 \quad (7)$$

$$C_i Z_{\text{new}}^l + C_i Z_{\text{new}}^h + C_i Z_{\text{new}}^w = 1 \quad (8)$$

式(1)为模型的目标函数,表示归并后直发包装 SKU 的总物料成本函数;式(2)表示各个聚类中心下所形成的直发包装长应该大于等于该簇内 SKU 长的最大值;式(3)表示各个聚类中心下所形成的直发包装宽应该大于等于该簇内 SKU 宽的最大值;式(4)表示为各个聚类中心下所形成的直发包装高应该大于等于该簇内 SKU 高的最大值;式(5)表示每一个 SKU 都应该被包装,且单个直发包装内只能装载单个 SKU,不能混装,其中 0 表示待包装,1 表示已包装;式(6)——(8)表示 SKU 必须与直发包装正交放置,不能倾斜放置于直发包装内。

## 2 算法设计

### 2.1 初始解的快速生成

直发包装 SKU 归并优化问题面临的首要难点就是归并方案的可行空间会随 SKU 种类的增加而急剧膨胀,使得归并优化操作时的求解复杂度极高。针对该难点,本文围绕哪些 SKU 可以使用同一种直发包装即可以进行归并这个关键问题,采用聚类分析思想,以 SKU 的尺寸信息作为归并的关联纽带。基于人工经验知识(尺寸信息中的长、宽、高距离)进行初步 k-means 聚类,针对数目为 50 种及以下的 SKU 数据集,由于体量较小,根据经验值设定初始聚类数目;当 SKU 种类数大于 50 时,本文设定聚类数目计算方式为 SKU 种类数除以 16 取整,快速生成较好的初始可行解,以降低后续处理的复杂度<sup>[22-23]</sup>。

设定各个 SKU 样本为  $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ , 初始聚类中心为  $C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_k\}$ , 通过欧几里得距离公式计算如下:

$$\text{dist}(X_i, C_j) = \sqrt{\sum_{t=1}^3 (X_{it} - C_{jt})^2} \quad (9)$$

式中:  $X_i$  为第  $i$  个对象;  $C_j$  为第  $j$  个聚类中心;  $X_{it}$  为第  $i$  个对象第  $t$  属性,对 SKU 样本  $X_i$  而言,  $X_{i1}$  为第  $i$  种 SKU 的长度,  $X_{i2}$  为 SKU 的宽度,  $X_{i3}$  为 SKU 的高度;  $C_{jt}$  为第  $j$  个聚类中心第  $t$  个属性。

### 2.2 基于非均匀变异算子的遗传算法

在解决直发包装 SKU 归并优化问题时,需首要考虑 SKU 的尺寸信息, k-means 聚类分析得到初始解后,运用组合优化理论,结合非均匀变异算子的特性更新全局最优解,算法流程图如图 4。

具体实现过程如下:

1) 读取数据并进行预处理。其中包含的数据有直发包装订购数量折扣、纸板单价、直发包装内尺寸、制造尺寸、外尺寸及其对应的数量。为了减少初始 SKU 种类,对读取的直发包装 SKU 数据进行 k-means 聚类分析。

2) 产生初始化群体。通过遗传算法进行求解,设置进化计数器为 0,个体数目为  $n$ ,随机生成  $N$  个个体作为初始种群。将遗传算法中的个体通过二进制编码形式进行存储,所构成的二进制编码集群如图 5 所示。

3) 个体评价。利用适应度函数对每一个个体进行适应度计算,本文选取个体所代表的物料成本作为适应度函数。

4) 选择操作。采用锦标赛制进行“优胜劣汰”,随机选取  $N_u$  数量个体进行比较,从中选取最大适应度值的个体进入下一代种群,不断重复该过程,直到下一代种群数量与上一代种群数量一致。

5) 交叉操作。采用洗牌交叉方法对亲代个体进行交叉操作,从而产生子代个体,并计算其个体适应度值。其中,洗牌交叉定义为,将一个亲代基因取一半,再加上来自另外一个亲代基因的一半,构成一个新的子基因。

6) 变异操作。采用多项式变异方法进行变异操作,子代  $x_i^{(l,t+1)}$  为亲代个体  $x_i^{(l,t)}$  与  $\beta_i$  相加的和,计算  $\beta_i$  的值见式(10)。

$$\beta_i = \begin{cases} (2u_i)^{\frac{1}{\eta_u+1}} - 1 & u_i < 0.5 \\ 1 - [2(1-u_i)]^{\frac{1}{1+\eta_u}} & u_i \geq 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\eta_u$  为自定义的非负实数,通常取 1;  $u_i$  的取值为 0~1 的随机数。在每个个体存储当前结果下计算适应度函数的结果,再进行判断是否达到最大迭代次数。

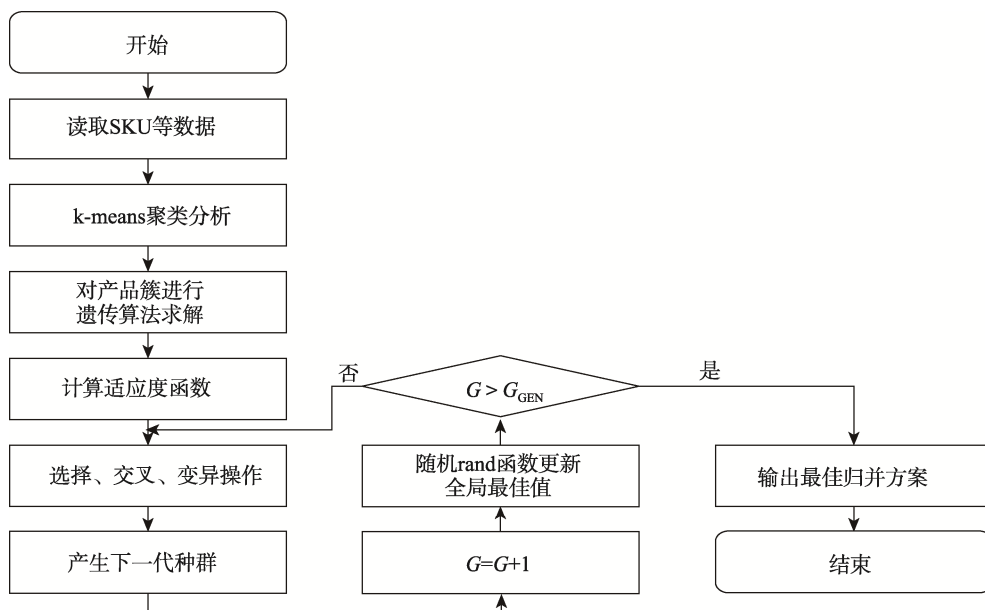


图 4 算法流程

Fig.4 Algorithm flowchart

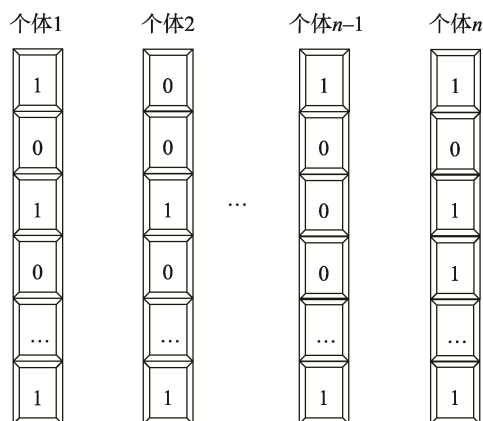


图 5 遗传算法二进制编码集群

Fig.5 Genetic algorithm binary coded cluster graph

7) 优化变异操作。在标准遗传算法的变异过程中添加优化变异操作, 优化过程通过非均匀变异算子进行更新, 非均匀变异算子可以表示如下:

$$f_{i,j}^{n+1} = \begin{cases} f_{i,j}^n + \Delta(s, U_{\max}^f - f_{i,j}^n) & r < 0.5 \\ f_{i,j}^n - \Delta(s, f_{i,j}^n - U_{\min}^f) & r \geq 0.5 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $f_{i,j}^n$  为遗传算法迭代中的第  $i$  个个体第  $j$  维度元素;  $s$  为当前迭代次数;  $U_{\min}^f$  和  $U_{\max}^f$  分别为遗传算法迭代为第  $n$  次时, 每一维度的最小值和最大值;  $r$  取值为 0~1 的随机数;  $\Delta(s, y)$  函数的计算见式 (12)。

$$\Delta(s, y) = y \times (1 - r^{\frac{(1-s)}{s_{\max}}}) \quad (12)$$

式中:  $s_{\max}$  为最大迭代次数;  $b$  为决定非均匀度的参数。在进行非均匀变异算子优化时, 依次对每一个个体进行非均匀遗传变异。变异运算流程如图 6 所示。

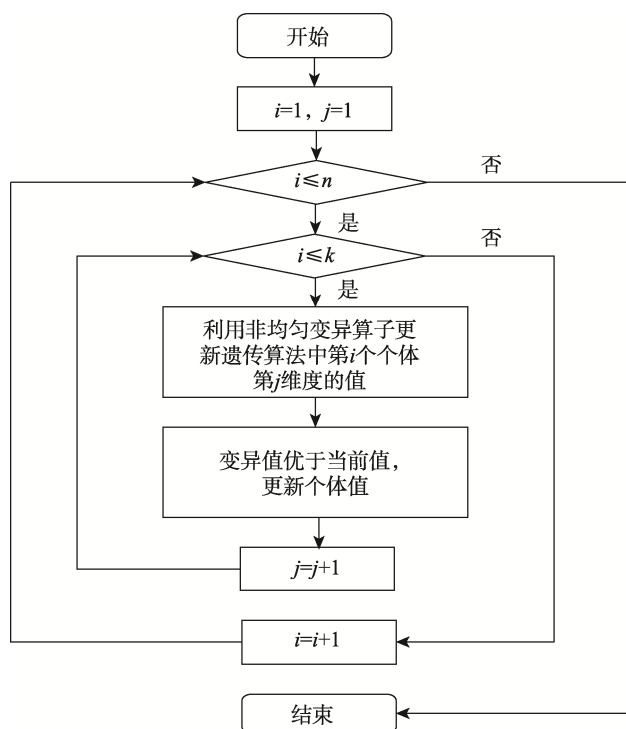


图 6 变异运算流程

Fig.6 Mutation operation flowchart

8) 新个体评价。对上一步产生的新个体计算其适应度值, 更新全局最佳值。

9) 检查终止条件。若算法满足终止条件, 则输出结果, 算法结束; 否则, 返回步骤 4。

通过以上方法, 可确定直发包装 SKU 归并的最优方案, 将所有归并后的目标函数的负数作为其适应值返回给遗传算法, 通过迭代可确定该归并方案是给定当前信息下满足约束条件的全局最优解。

3 试验分析

目前,在直发包装领域,还没有公开的测试集,常见的做法是随机生成数据以验证优化方法。现建立一个包含 100 种 SKU 的测试数据集,长、宽、高的取值范围分别为 140~260 mm、40~120 mm、40~120 mm,SKU 所对应的直发包装订购数量取 9 000~100 000 内的随机数。本次测试选取纸板材质为厂商提供的型号为 K5R 的 C 楞纸板,单价为 3.85 元/m<sup>2</sup>。物料成本计算见式(13),厂商提供的直发包装盒纸板面积计算见式(14),表 3 为不同直发包装盒订购量对应的数量折扣。

$$P_{\text{SUM}} = \sum_{i=1}^n S_i \times P_i \times N_i \times D_i \tag{13}$$

式中:  $P_{\text{SUM}}$  为总物料成本;  $n$  为直发包装种数,  $i=1,2,\dots,n$ ;  $S$  为直发包装盒纸板面积;  $P$  为纸板单价;  $N$  为数量;  $D$  为数量折扣。

$$S = [2 \times (L + W) + 20] \times (H + 2 \times W) \tag{14}$$

式中:  $S$  为直发包装盒纸板面积;  $L$ 、 $W$ 、 $H$  分别为直发包装盒制造尺寸的长、宽、高。

| 表 3 直发包装订购数量及其数量折扣<br>Tab.3 Order quantity of DWOP and its quantity discount |         |
|------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 数量/件                                                                         | 数量折扣    |
| 小于 1 万                                                                       | 1       |
| [1, 3)万                                                                      | 0.964 9 |
| [3, 5)万                                                                      | 0.942 9 |
| [5, 10)万                                                                     | 0.929 0 |
| 大于等于 10 万                                                                    | 0.892 9 |

3.1 遗传算法参数设置

参考范厚明等<sup>[24-25]</sup>的研究,本文设置了若干组不同的种群规模、交叉概率( $p_c$ )和变异概率( $p_m$ )进行正交试验。先控制种群规模为 200 不变,确定最优的( $p_c$ ,  $p_m$ )组合。每个组合试验做 10 次并取平均值,得到优化结果如图 7~8 所示。

从图 7 可以看出,  $p_c=0.75$  时,归并后的物料成本和 SKU 种类数都最少;从图 8 可以看出,  $p_m=0.001$  时归并后物料成本和 SKU 种类数都相对较小。因此,本文确定了交叉概率和变异概率的最优组合为( $p_c$ ,  $p_m$ )=(0.75, 0.001),基于该组合,改变种群数量,得到试验结果如表 4 所示。

随着种群规模的增大,优化结果在种群规模为 200 时达到最小值,出于迭代次数和优化效果的考虑,文中遗传算法各参数的设置见表 5。

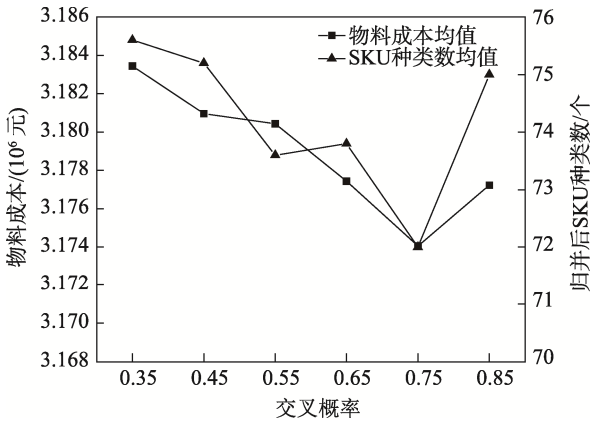


图 7 交叉概率对物料成本和归并后 SKU 种类的影响

Fig.7 Effect of crossover probability on packaging material cost and number of SKUs after merging

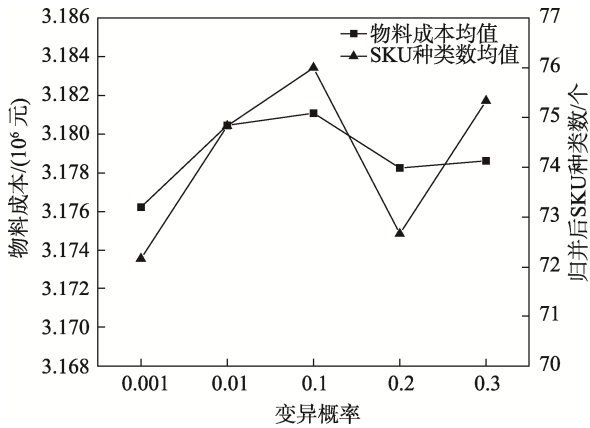


图 8 变异概率对物料成本和归并后 SKU 种类的影响

Fig.8 Effect of mutation probability on packaging material cost and number of SKUs after merging

表 4 种群规模对物料成本和归并后 SKU 种类的影响  
Tab.4 Effect of group size on packaging material cost and number of SKUs after merging

| 种群规模 | 物料成本均值/元     | 归并后 SKU 种类数 | 迭代次数 |
|------|--------------|-------------|------|
| 50   | 3 187 374.89 | 81          | 176  |
| 100  | 3 178 261.52 | 79          | 166  |
| 150  | 3 179 856.74 | 79          | 179  |
| 200  | 3 171 574.14 | 74          | 197  |
| 250  | 3 182 138.43 | 79          | 145  |
| 300  | 3 173 560.05 | 71          | 113  |

表 5 遗传算法参数  
Tab.5 Genetic algorithm parameters

| 参数名称 | 参数值   |
|------|-------|
| 种群规模 | 200   |
| 迭代次数 | 200   |
| 交叉概率 | 0.75  |
| 变异概率 | 0.001 |



### 3.2 试验运算及结果

本文的实验环境为 MATLAB R2020a, 选取随机生成的 SKU 尺寸信息及对应的直发包装订购数量的测试数据集为例, 采用本文设计的算法进行寻优测试, 验证该方法的可行性和有效性。SKU 的长、宽、高取范围分别为 140~260 mm、40~120 mm、40~120 mm, SKU 所对应的直发包装订购数量取 9 000~100 000 内的随机数, 纸板材质为 K5R 的 C 楞纸板, 数量折扣如表 3 所示, 直发包装盒面积采用式 (14) 的计算方式。为了保证结果的准确性, 实验将在 SKU 种类数为 25、50、100、200 这 4 个规模下, 各做 10 组求平均值。

首先, 对数据进行 k-means 聚类分析处理得到初始解, 当 SKU 种类数为 25 和 50 时, 根据经验值设定初始聚类数目分别为 3 和 5。当 SKU 种类数为 100 和 200 时, 设定初始聚类数目的计算方式为 SKU 的数目除以 16 并取整, 即取初始聚类数目分别为 6 和 12。图 9 为得到的聚类散点图。

实验按照表 5 的参数进行设定, 运行算法求解模型, 寻优测试结果如表 6~7 所示。

观察表 6~7 可知, 当  $N=25$  (归并前 SKU 种类数为 25) 时, 物料成本下降得最多, 经过归并后, SKU

种类数从 25 变为 15, 即归并前 25 种 SKU 对应着 25 种不同尺寸的直发包装盒, 但归并后, 可在使用 15 种直发包装的情况下, 将物料成本下降 5.46%。对比 4 种 SKU 种类数下的寻优结果可知, 经过归并后的 SKU 种类数都相较归并前下降明显, 物料成本也都有一定程度的下降。其中, SKU 种类降低率的范围为 18.00%~40.00%, 平均值为 33.13%; 物料成本下降率范围为 1.70%~5.46%, 平均值为 2.844%。这充分说明了, 通过直发包装 SKU 归并, 不仅可以减少不同种类直发包装的分散订购量、促进包装系列化, 还可以使同种直发包装订购量跨越数量折扣阶梯, 达到降低物料成本的目的, 同时也证明了该算法的可行性。

寻优效果方面, 在 4 种 SKU 种类规模下运行本文设计的基于非均匀变异算子的遗传算法与同参数设置下的标准遗传算法, 将两者的收敛曲线进行对比, 如图 10 所示。从图 10 可以看出, 在相同的迭代次数下, 本文遗传算法的迭代过程更曲折, 优化结果也优于标准遗传算法。由此可知, 相较于标准遗传算法, 本文设计的基于非均匀变异算子的遗传算法具有更好的全局搜索能力, 能够获得更加优秀的直发包装 SKU 归并方案, 证明了该优化遗传算法的有效性。

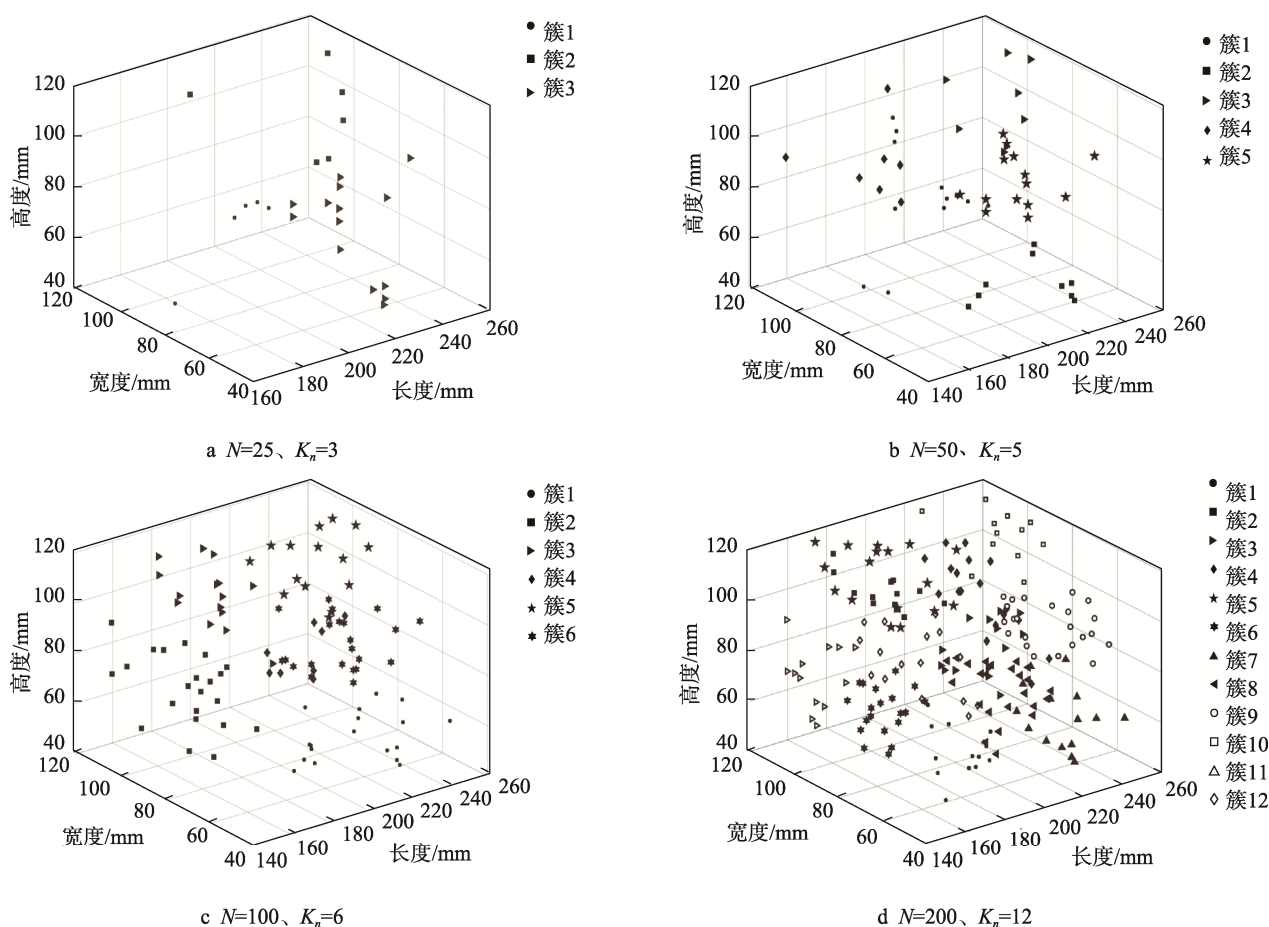


图9 聚类散点图

Fig.9 Cluster scatter diagram

| 表 6 归并前后 SKU 种类比较                                     |             |             |             |
|-------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Tab.6 Comparison of SKU type before and after merging |             |             |             |
| $N$                                                   | 归并前 SKU 种类数 | 归并后 SKU 种类数 | SKU 种类降低率/% |
| 25                                                    | 25          | 15          | 40.00       |
| 50                                                    | 50          | 41          | 18.00       |
| 100                                                   | 100         | 65          | 35.00       |
| 200                                                   | 200         | 121         | 39.50       |

| 表 7 归并前后物料成本比较                                          |           |           |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Tab.7 Material cost comparison before and after merging |           |           |           |
| $N$                                                     | 归并前物料成本/元 | 归并后物料成本/元 | 物料成本下降率/% |
| 25                                                      | 706 215   | 667 628   | 5.46      |
| 50                                                      | 1 435 397 | 1 403 718 | 2.21      |
| 100                                                     | 3 192 428 | 3 138 235 | 1.70      |
| 200                                                     | 6 313 703 | 6 186 975 | 2.01      |

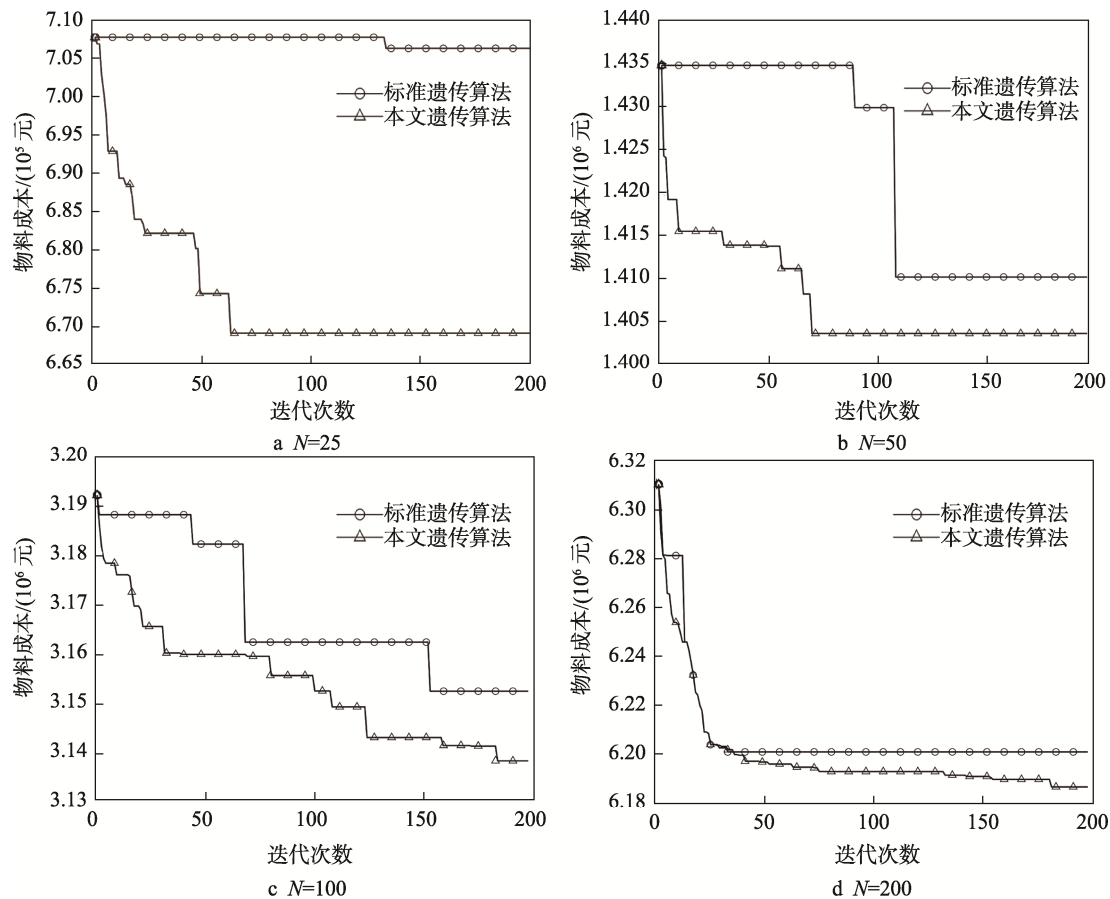


图 10 遗传算法收敛曲线对比  
Fig.10 Comparison of convergence curves of genetic algorithms

## 4 结语

根据以上分析,可得出如下结论:所建模型考虑了纸板类型及其单价、SKU 尺寸信息及其对应的直发包装订购量和数量折扣,包含了直发包装生产中的大部分因素,贴近实际;使用该优化方法能通过归并降低 SKU 种类数,达到降低物料成本的目的,且操作简单,仅通过归并订购增加了同种直发包装盒的订购量,不会改变原有产品的生产结构,具有可行性;基于非均匀变异算子的遗传算法相较于标准遗传算法的局部搜索能力有所提高,能获得更加优秀的直发包装 SKU 归并方案,具有有效性。

未来可以在以下 3 个方面继续探究:在模型中考虑人工成本、运输成本;数据处理时加入一些其他需要考虑的因素,如运输距离,使问题更贴近实际;进一步提高遗传算法在求解该类问题上的效果。

## 参考文献:

[1] 朱江. 浅谈我国物流包装的发展现状及问题[J]. 物流工程与管理, 2018, 40(9): 140-141.  
ZHU Jiang. The Present Situation and Problems of the Development of Logistics Packaging in China[J]. Logistics Engineering and Management, 2018, 40(9):



- 140-141.
- [2] 郑克俊, 翟小可, 李锦莹. 快递包装混合回收闭环供应链决策与协调[J]. 包装工程, 2022, 43(21): 224-231.
- ZHENG Ke-jun, ZHAI Xiao-ke, LI Jin-ying. Decision-Making and Coordination of Closed-Loop Supply Chain for Mixed Recycling of Express Packages[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(21): 224-231.
- [3] ZHOU Min, HUANG Jin-long, WU Ke-xin, et al. Characterizing Chinese Consumers' Intention to Use Live E-Commerce Shopping[J]. Technology in Society, 2021, 67(6): 101767.
- [4] XIAO Quan, WAN Shan-shan, ZHANG Xing, et al. How Consumers' Perceptions Differ towards the Design Features of Mobile Live Streaming Shopping Platform: A Mixed-Method Investigation of Respondents from Taobao Live[J]. Journal of Retailing and Consumer Services, 2022, 69(2): 103098.
- [5] 吴卫, 姚文静. 物联网时代下减少二次包装的新思考[J]. 包装工程, 2017, 38(12): 200-203.
- WU Wei, YAO Wen-jing. New Thinking for Reducing Secondary Packaging in the Internet of Things[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(12): 200-203.
- [6] GHISELLINI P, ULGIATI S. Circular Economy Transition in Italy. Achievements, Perspectives and Constraints[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 243: 1-18.
- [7] HUBER M, ARCHODOULAKI V M, POMAKHINA E, et al. Environmental Degradation and Formation of Secondary Microplastics from Packaging Material: A Polypropylene Film Case Study[J]. Polymer Degradation and Stability, 2022, 195: 109794-109801.
- [8] 张昇. 包装废弃物回收车辆路径问题的改进遗传算法[J]. 包装工程, 2018, 39(17): 147-152.
- ZHANG Yi. Improved Genetic Algorithm for Vehicle Routing Problem in Packaging Waste Recycling[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(17): 147-152.
- [9] LI Zeng, ZHOU Ya, ZHANG Hui-jun, et al. Driving Factors and Their Interactions of Takeaway Packaging Waste Generation in China[J]. Resources Conservation and Recycling, 2022, 185(7): 106467.
- [10] KIM Y, KANG J, CHUN H. Is Online Shopping Packaging Waste a Threat to the Environment[J]. Economics Letters, 2022, 214: 110398-110401.
- [11] 贾县民, 屈亚美. 低碳物流国内研究综述[J]. 包装工程, 2022, 43(15): 289-300.
- JIA Xian-min, QU Ya-mei. Review of Domestic Research on Low-Carbon Logistics[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(15): 289-300.
- [12] YANG Jia-hui, LONG Ru-yin, CHEN Hong. Decision-Making Dynamic Evolution among Groups Regarding Express Packaging Waste Recycling under Different Reference Dependence and Information Policy[J]. Waste Management (New York, N Y), 2022, 138: 262-273.
- [13] 曹巍, 刘南. 终端网点参与下电子商务物流外包的协调策略研究[J]. 管理工程学报, 2015, 29(4): 194-204.
- CAO Wei, LIU Nan. Coordination Strategy of E-Commerce Logistics Outsourcing with Channel End-Nodes Involved[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2015, 29(4): 194-204.
- [14] ZHU Shan, HU Xiang-pei, HUANG Kai, et al. Optimization of Product Category Allocation in Multiple Warehouses to Minimize Splitting of Online Supermarket Customer Orders[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 290(2): 556-571.
- [15] ZHANG Yuan-kai, LIN Wei-hua, HUANG Min-fang, et al. Multi-Warehouse Package Consolidation for Split Orders in Online Retailing[J]. European Journal of Operational Research, 2021, 289(3): 1040-1055.
- [16] BAHRAMI B, AGHEZZAF E H, LIMÈRE V. Enhancing the Order Picking Process through a New Storage Assignment Strategy in Forward-Reserve Area[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(11): 1-22.
- [17] WANG Meng, ZHANG Ren-qian, FAN Kun. Improving Order-Picking Operation through Efficient Storage Location Assignment: A New Approach[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 139(1): 1-13.
- [18] 黄敏芳, 张源凯, 王颜新. 网上超市拆分订单的合并打包优化决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(2): 286-296.
- HUANG Min-fang, ZHANG Yuan-kai, WANG Yan-xin. A Decision-Making Method of Package Consolidation for Split Orders in Online Supermarket[J]. Systems Engineering —Theory & Practice, 2021, 41(2): 286-296.
- [19] JOHANSSON L, SONNTAG D, MARKLUND J, et al. Controlling Distribution Inventory Systems with Shipment Consolidation and Compound Poisson Demand[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 280(1): 90-101.

- [20] 胡志才. “新零售”背景下智能包装设计的发展与应用研究[J]. 包装工程, 2022, 43(14): 221-228.  
Hu Zhi-cai. Development and Application of Intelligent Packaging Design under the Background of New Retail[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(14): 221-228.
- [21] STASKIEWICZ A, HVAM L, HAUG A. A Procedure for Reducing Stock-Keeping Unit Variety by Linking Internal and External Product Variety[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2022, 37(1): 344-358.
- [22] 赵晨. 大型网上超市拆分订单的合并打包方案决策方法研究[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2018: 18-25.  
ZHAO Chen. Package Consolidation Scheme Decision Method for the Split-Orders of Hyper Online Supermarkets[D]. Liangning: Dalian University of Technology, 2018: 18-25.
- [23] 傅立伟, 武森. 基于属性值集中度的分类数据聚类有效性内部评价指标[J]. 工程科学学报, 2019, 41(5): 682-693.  
FU Li-wei, WU Sen. A New Internal Clustering Validation Index for Categorical Data Based on Concentration of Attribute Values[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(5): 682-693.
- [24] 范厚明, 张跃光, 田攀俊, 等. 时变路网下异型车辆动态配置与路径优化[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(2): 455-470.  
FAN Hou-ming, ZHANG Yue-guang, TIAN Pan-jun, et al. Dynamic Vehicle Routing Problem of Heterogeneous Fleets with Time-Dependent Networks[J]. Systems Engineering —Theory & Practice, 2022, 42(2): 455-470.
- [25] ARRAM A, AYOB M. A Novel Multi-Parent Order Crossover in Genetic Algorithm for Combinatorial Optimization Problems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 133(3): 267-274.

责任编辑: 曾钰婵