

基于人工鱼群和模拟退火算法的电商快递纸箱规格优化

丁奥¹, 张媛¹, 朱磊², 杨晓静¹, 王家宁¹

(1.北京印刷学院 机电工程学院, 北京 102600; 2.北京印刷学院 青岛研究院, 青岛 266000)

摘要: **目的** 对快递纸箱规格优化进行研究, 在满足商品对纸箱需求和不增加纸箱规格种类的前提下, 达到尽可能减少包装材料使用量的目标。**方法** 根据商品对快递纸箱的实际需求, 以瓦楞纸使用总量最小化为目标函数, 以商品和纸箱规格的匹配关系为约束条件建立优化模型。使用人工鱼群与模拟退火算法融合的求解算法对模型求解。**结果** 在仿真实验中, 使用文中提出的建模求解方法得到的纸箱规格优化方案较中国邮政现行纸箱规格体系瓦楞纸使用量节省了23%, 而采用k-means聚类分析得到的纸箱规格优化设计方案中瓦楞纸使用量仅节省了11%。**结论** 该方法可以满足商品批量小、种类多、尺寸各异、动态更新的电商环境下快递纸箱规格优化的需求, 有助于改善快递行业包装过度使用的现状。

关键词: 电商物流包装; 包装规格优化; 人工鱼群算法; 模拟退火算法

中图分类号: TB485.3; TP301.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)13-0218-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.13.030

E-Commerce Express Carton Specification Optimization Based on Artificial Fish Swarm and Simulated Annealing Algorithm

DING Ao¹, ZHANG Yuan¹, ZHU Lei², YANG Xiao-jing¹, WANG Jia-ning¹

(1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China;
2.Qingdao Research Institute, Beijing Institute of Graphic Communication, Qingdao 266000, China)

ABSTRACT: This paper aims to achieve the goal of reducing the use of packaging materials as much as possible on the premise of meeting the demand of commodities for cartons and not increasing the types of carton specifications through research on the optimization of express carton specifications. According to the actual demand of the commodities for express cartons, the objective function is minimized total amount of corrugated paper used, and the matching ship between the commodity and the carton specifications is used as the constraint condition, to establish an optimization model. The solution algorithm obtained by fusing artificial fish swarm algorithm and simulated annealing algorithm is used to solve the model. In the simulation experiment, the carton specification optimization scheme obtained by using the modeling solution method proposed in this paper saves 23% of corrugated paper compared with the current carton specification system of China Post Group Corporation, while the carton specification optimization scheme obtained by k-means cluster analysis only saves 11% of corrugated paper. The method proposed in this paper can meet the needs of express carton specifications optimization in an e-commerce environment featured by small batch size, many types, different sizes, and dynamic updates, helping reduce the excessive use of packaging in the express industry.

KEY WORDS: E-commerce logistics package; package specification optimization; artificial fish swarm algorithm; simulated annealing algorithm

收稿日期: 2020-10-09

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1403103); 北京市教委科技计划(KM201810015006, KM2019100151007)

作者简介: 丁奥(1991—), 男, 北京印刷学院硕士生, 主攻物流安全监测与信息化技术。

通信作者: 朱磊(1982—), 男, 博士, 北京印刷学院高级工程师, 主要研究方向为快递物流技术与绿色包装。

近年来,我国快递行业蓬勃发展,中国已成为世界最大的快递服务市场,且规模仍在扩大。国家邮政局公布的数据显示,2019 年和 2020 年的国内快递业务量分别为 635 亿件和 834 亿件^[1]。在快递行业高速发展的同时,快递包装和缓冲物的过度使用造成了严重的资源占用和回收处置问题。由于快递纸箱无法与商品实际大小匹配,电商快递包裹经常出现“大箱装小物”的情况,为了保证商品的安全完好,又不得不使用大量的缓冲材料填充空隙,这是快递包装过度使用的一个重要原因。如何设置合理的快递纸箱规格系列,尽可能做到“箱物匹配”,使用最少的包装材料实现快递运输包装的功能,是目前电商物流行业亟待解决的问题。

许多学者对包装规格优化问题进行了研究。金国斌等^[2]提出了物流链中包装优化的概念。刘立琼等^[3]详细论述了网购快递包装标准化建立的必要性。莫森等^[4]提出以集装单元尺寸分割作为瓦楞纸箱尺寸设计的基础。支凯强等^[5]对集装箱拼箱情境下的包装尺寸标准化问题进行了研究。尹迎等^[6]使用先对平面切割划分再优化高度的方法对药品包装规格进行优化。秦文翔等^[7]提出使用 RGBD 投影方法测量箱体尺寸,使用遗传算法优化箱体堆码方式。尽管上述研究成果已经对相关概念、方法和应用进行了探索,但是仅适合品类相对固定的大宗货物包装的尺寸设计和优化,无法满足小批量、多品种、动态化的电商快递场景下纸箱规格优化的需求。文中结合电商包裹的特点,将商品对快递纸箱的实际需求作为基本依据,构建以瓦楞纸使用总量最小化为目标函数,以商品与纸箱规格匹配关系为约束的快递纸箱规格优化模型。针对该模型约束条件复杂,现有方法不适合该模型求解的情况,因此提出基于人工鱼群和模拟退火算法融合的求解算法。

人工鱼群算法是一种模拟自然界鱼群觅食行为的群体智能算法^[8],其基本思想是人工鱼个体根据步进后新位置的适应度、附近人工鱼所在位置的适应度和附近人工鱼同伴的密度,执行相应的觅食、聚群、尾随和随机行为。经过迭代,鱼群寻找到适应度最高的位置就是算法求得的解。该算法有充分的理论及应用基础,包括对人工鱼群算法进行改进以应用于机械结构优化^[9];将人工鱼群算法与粒子群算法结合应用于管道泄漏分析、电力系统调度^[10-11];对人工鱼群算法求得的解进行模拟退火操作,应用于冶金配电网供应^[12];将随机森林算法与人工鱼群算法结合用于医学预测^[13]等。模拟退火算法是一种概率算法,为了避免贪心策略造成陷入局部最优,该算法受启发于粒子随温度下降从无序到有序运动的现象,通过引入模拟退火算子,使寻优过程存在随机性,随机性随着迭代次数的增加而逐渐减弱。在文献[12]和文献[14]的研究中,将模拟退火算法与人工鱼群算法进行了融合,

取得了不错的效果,因此,综合人工鱼群算法可以快速得到优化效果良好的可行解和模拟退火算法能在一定程度克服陷入局部最优的特点。对 2 种算法进行融合改进,从而得到适合文中模型求解的算法,这是利用建模-求解逻辑实现快递纸箱规格优化的关键。

1 快递纸箱规格优化模型的建立和求解

1.1 优化模型的建立

1.1.1 问题描述和建模假设

电商快递环境下,商品具有小批量、多品种、动态化等特点,因此,基于商品对纸箱的实际需求设计和优化电商快递纸箱规格体系是一个新颖且更符合现实需求的思路。所谓商品对快递纸箱的实际需求包括:由商品外尺寸的长、宽、高决定其实际需求纸箱的外尺寸长、宽、高(考虑到瓦楞纸的厚度及模型简化的需求,商品对纸箱的外尺寸的实际需求统一在商品外尺寸基础上加 15 mm^[15])和商品数量决定的纸箱实际需求量。如何根据商品对纸箱的实际需求,通过建立数学模型并求解的方法,从而对纸箱规格体系进行优化是文中欲解决的问题。

为便于数学描述,对于 n 种商品,其对快递纸箱的实际需求可以表示为式(1)所示的矩阵 $\mathbf{P}$ 。 $\mathbf{P}$ 的行向量 $\mathbf{p}^1, \mathbf{p}^2, \dots, \mathbf{p}^n$ 表示 n 种商品对应的 n 种需求,每个行向量由 4 个元素构成,依次分别对应该商品对纸箱长、宽、高的实际需求和对纸箱的数量需求。

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}^1 \\ \mathbf{p}^2 \\ \dots \\ \mathbf{p}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x^1 & p_y^1 & p_z^1 & p_q^1 \\ p_x^2 & p_y^2 & p_z^2 & p_q^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_x^n & p_y^n & p_z^n & p_q^n \end{bmatrix} \quad (1)$$

假设对于某种商品,其与纸箱的匹配条件如下所述。

1) 该商品实际需求纸箱的长、宽、高 (p_x, p_y, p_z) 不能大于与之匹配纸箱规格的长、宽、高 (x, y, z)。

2) 当有多种纸箱规格满足条件 1 时,选择容积使用率最高的纸箱规格与该商品建立匹配关系。

考虑到快递纸箱多为半叠盖式纸箱^[16],其展开图见图 1。对于长、宽、高为 x_i, y_i, z_i 的 i 规格纸箱,单个纸箱瓦楞纸使用量 Z_i 可近似由式(2)得出(粘口不计)。

$$Z_i = 2 \times (x_i + y_i) \times (y_i + z_i) \quad (2)$$

基于上述表述,电商快递纸箱规格优化问题可以简化为:假设 $\mathbf{P}$ 已知,商品与纸箱的匹配关系严格满足匹配条件 1 和 2,且单个纸箱瓦楞纸使用量按式(2)计算,设计 m 种纸箱规格使 $\mathbf{P}$ 所表示的全部商品的包装需求得到满足时,总瓦楞纸使用量 Z 最小。

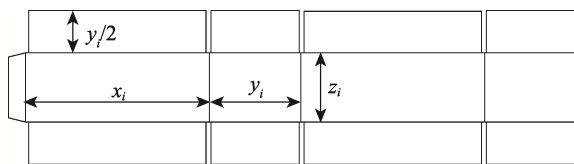


图 1 半叠盖式纸箱展开图

Fig.1 Expanded view of the packaging box for half folding

1.1.2 优化模型的数学表达

首先,在构造优化模型前对涉及的变量进行必要的说明。为便于查阅,表 1 汇总了各变量及其含义。其中, Z 表示在商品的全部需求得到满足的情况下瓦楞纸的总使用量,即目标函数值。 m 为纸箱规格总数,即总共有 m 种纸箱规格,由规划者规定。 M_i 表示在严格满足 2.1.1 节所述匹配条件 1 和 2 时,与 i 规格纸箱匹配的商品的集合(默认为非空集合); A 表示全部商品的集合; Z_i 表示 i 规格纸箱的单箱瓦楞纸使用量,可由 2.1.1 节中式(2)求得; Q_i 表示与 i 规格纸箱匹配的商品对包装纸箱的总需求量,可由式(3)求得。

$$Q_i = \sum_{k \in M_i} p_q^k \quad (3)$$

表 1 优化模型中变量汇总

Tab.1 Summary of variables in the optimization model

符号	说明
Z	瓦楞纸总使用量
m	纸箱规格数
M_i	与 i 规格纸箱匹配的商品的集合
A	全部商品的集合
Z_i	单个 i 规格纸箱的瓦楞纸使用量
Q_i	i 规格纸箱的总需求量

根据 2.1.1 节中的问题描述和假设条件,可构造电商快递纸箱规格优化的数学模型,见式(4—6)。其中,式(4)是目标函数,由各规格纸箱的瓦楞纸使用量相加得到;式(5)和式(6)是约束条件,从集合的角度约束了每种商品仅匹配一种纸箱规格且商品对包装纸箱的全部需求得到满足。该模型求解的难点在于随着包装规格的变化,不仅 Z_i 随之变化,商品与纸箱的匹配关系也发生变化。并且 Q_i 的变化无法通过明确的函数进行表达,故模型无法基于求导得到最优解。传统的粒子群算法或遗传算法在求解此模型时的基本思路是以包含 $3 \times m$ 个元素的向量作为个体(m 种纸箱规格的长、宽、高排列为向量形式),然后构造种群并通过粒子群算法的速度更新和个体更新机制或遗传算法的染色体选择、交叉、变异机制在高维空间中进行寻优。高维度的解空间和庞大的种群将造成优化效果不佳,寻优效率低等问题,因此,

需要提出一种面向该模型的求解算法。

$$\min Z = \sum_{i=1}^m Z_i Q_i \quad (4)$$

$$\text{条件 } M_\alpha \cap M_\beta = \emptyset, (\alpha \neq \beta; \alpha = 1, 2, \dots, m; \beta = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

$$M_1 \cup M_2 \cup \dots \cup M_m = A \quad (6)$$

1.2 基于人工鱼群算法和模拟退火算法融合模型求解算法

文中提出的求解算法融合了人工鱼群算法和模拟退火算法,并针对模型背景进行了改进。其核心思想是:巧妙定义个体,并在迭代中利用轮替机制将规格系列优化问题拆分为若干单个规格优化问题,从而把 $3 \times m$ 维优化空间降为 3 维。在轮替机制内每种纸箱规格的优化以贪心策略为基础,利用人工鱼群算法的部分概念和机制以及模拟退火算法的概率性实现个体更新。

求解算法与传统人工鱼群算法的不同主要体现在如下几个方面。

1) 人工鱼的定义。每种纸箱规格对应一条人工鱼,纸箱规格的长、宽、高对应人工鱼在三维空间的坐标。人工鱼的移动相当于调整对应的纸箱规格。适应度使用目标函数评价,目标函数越小适应度越高。每条人工鱼的位置都会对适应度产生影响,它们都试图通过自己的移动让适应度升高。这与传统人工鱼群算法中鱼群的定义有所不同。

2) 行为的定义。觅食行为通过人工鱼直接移动到适应度高的目的位置点实现。随机行为指目的位置使适应度下降时,也以模拟退火算子和当前人工鱼尝试觅食次数共同决定的概率移动到该位置。模拟退火操作被直接植入随机行为中,以达到避免寻优过程陷入局部最优而过早收敛的目的,这一点与文献[12]和[14]中对人工鱼群算法的解进行模拟退火操作有所不同。求解算法中,放弃了传统人工鱼群算法的尾随和聚群行为。这是因为人工鱼定义的改变,在纸箱规格优化问题中,规划者不希望 2 种纸箱规格尺寸非常接近,增加不必要的采购、管理成本,所以人工鱼不能存在尾随和聚群行为,相反人工鱼之间须保持相对孤立。在求解算法中引入了孤立行为,可确保不同纸箱规格的差异化。

3) 在原始的人工鱼群算法中,视野是以人工鱼所在位置为中心的一定范围,觅食、聚群和尾随行为均在视野内发生。文中求解算法对视野进行了拆分,使用觅食范围来描述觅食行为寻找目的位置点的范围,使用距离阈值 d 实现孤立行为。这种拆分可以为算法提供灵活性。

求解算法的步骤如下所述。

1) 初始化。对于 m 种纸箱规格,设定 m 条人工鱼 $f_1, f_2, \dots, f_m$ 。在三维空间中,每条人工鱼的三维坐

标对应一种纸箱规格的长、宽、高。人工鱼活动的范围是该空间中 $p_x^{\min} < x < p_x^{\max}$, $p_y^{\min} < y < p_y^{\max}$, $p_z^{\min} < z < p_z^{\max}$ 的区域, 简称可行域。其中 $p_x^{\min}$, $p_y^{\min}$, $p_z^{\min}$, $p_x^{\max}$, $p_y^{\max}$, $p_z^{\max}$ 分别为需求矩阵 $\mathbf{P}$ 第 1, 2, 3 列的最小值和最大值。第 m 号人工鱼 f_m 的位置不随迭代而变化, 其坐标固定为式 (7)。如此设置的目的是保证所有商品都能有纸箱规格与之匹配。剩余 $m-1$ 条人工鱼的位置在可行域内按照一定方式初始化, 从而得到人工鱼的初始位置矩阵 $\mathbf{F}^0 = [f_1^0, f_2^0, \dots, f_{m-1}^0, f_m]$ 。矩阵 $\mathbf{F}$ 及内部向量的上标表示迭代次数。在初始化时, 还需要输入算法参数, 包括迭代次数 G , 每次迭代中人工鱼尝试觅食的次数上限 C , 以及为确保人工鱼互相孤立而设定的距离阈值 d 。

$$\mathbf{f}_m = (p_x^{\max}, p_y^{\max}, p_z^{\max}) \quad (7)$$

2) 迭代。在每轮迭代中, 随机不放回地从第 1 到 $m-1$ 号人工鱼中选择 1 条。在其觅食范围 (以其自身位置为中心的 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 立方体空间范围) 内随机选择一个点作为目的位置点。目的位置点与其他人工鱼所在位置的距离不能小于 d , 否则重新选择目的位置点, 即孤立行为。为了提升算法效

率, 孤立行为使用曼哈顿距离进行计算和比较。在确保孤立的前提下, 计算人工鱼移动到目的位置点的适应度, 如果适应度不变或升高则移动到目的位置点, 即觅食行为。适应度下降则执行随机行为, 以模拟退火算子和当前尝试次数共同决定的概率移动到该目的位置点, 若未移动, 则重新选择目的位置点。每轮迭代中, 人工鱼寻找目的位置点的次数上限为 C , 尝试次数达到 C 仍未移动, 则保持静止, 选择下一条人工鱼重复上述操作。直到第 1 到 $m-1$ 号人工鱼都选过, 进入下轮迭代。

得到可行解: 在第 G 轮迭代结束后算法终止, 输出 m 条鱼的位置矩阵 $\mathbf{F}^G$, 即优化后的纸箱规格矩阵 (可行解)。第 G 代的目标函数 Z^G , 即此时瓦楞纸的总使用量。

求解算法的流程见图 2, 其中 g 为一个与 G 对应的计数变量, 记录当前迭代次数。 c 为一个与 C 对应的计数变量, 记录此轮迭代中人工鱼已经进行的尝试次数。 θ 为模拟退火算子与当前尝试次数共同决定的概率值, 其计算方法见式 (8)。 e 表示自然对数的底, Z_{old} 表示人工鱼未移动时目标函数的值, Z_{new} 表

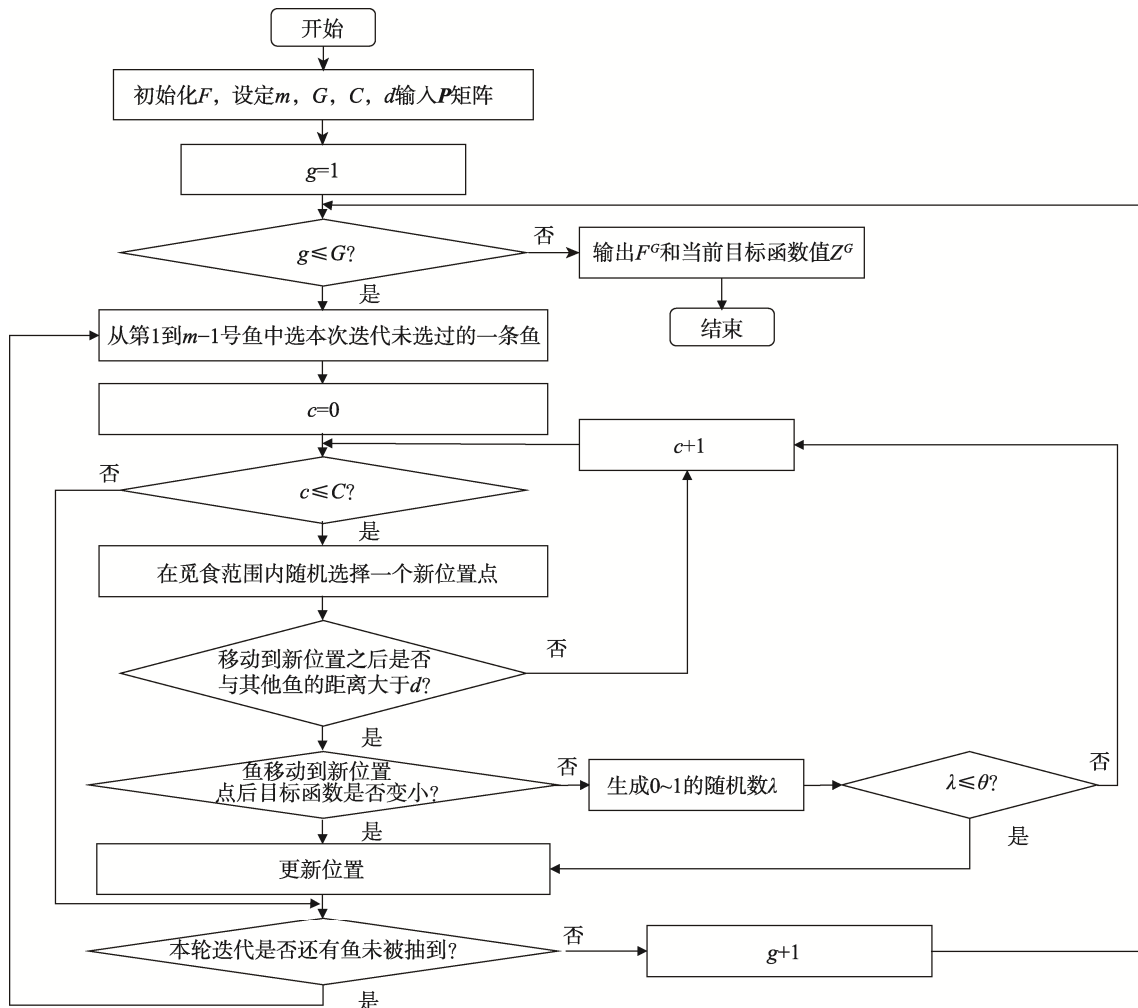


图 2 算法流程
Fig.2 Algorithm flowchart

示人工鱼移动到目的位置点后目标函数的值。 T^g 表示当前退火温度,由式(9)得到。 μ 为常数,一般取0.8~0.99。 T^0 为初始温度,经测试发现可以设定为初始化 F^0 后求得目标函数值 Z^0 的1%。计算 θ 时,引入变量 c 的目的是鼓励人工鱼多次尝试觅食行为,其尝试觅食失败次数越少,接受随机行为概率越小,从而避免盲目的随机行为。

$$\theta^g = \frac{c \cdot e^{\frac{-(Z_{\text{new}} - Z_{\text{old}})}{T^g}}}{C} \quad (8)$$

$$T^g = \mu^g T^0 \quad (9)$$

2 仿真实验和结果分析

仿真实验中,采集了国内3家有代表性的综合性电商平台2019—2020年度上半年自营的667种数码类商品的纸箱实际需求尺寸和纸箱需求数量作为需求矩阵 P 。采集到的数据中对纸箱长、宽、高的实际需求范围为67~530 mm,50~370 mm,29~290 mm,对纸箱的总需求量为62 992 463个。仿真中,目标函数的计算均基于矩阵 P 。为简化模型,假设在快递物流中,每件商品使用一个快递纸箱,不考虑合并装箱的情况。仿真在配置Intel Core i5处理器的计算机上基于Matlab R2014a(MathWorks公司开发的数学软件)实现。中国邮政现行的快递纸箱规格系列作为比较基准,见表2。

2.1 求解算法的参数选择

2.1.1 随机算子的必要性和参数选择

为验证模型中引入式(8)所示随机算子的必要性,控制变量进行测试。 F^0 初始化方式见式(10)。一般情况下, $s_x^{\min}, s_y^{\min}, s_z^{\min}, s_x^{\max}, s_y^{\max}, s_z^{\max}$ 分别取

$$F^0 = \begin{bmatrix} s_x^{\min} + 1 \times \frac{s_x^{\max} - s_x^{\min}}{m} & s_y^{\min} + 1 \times \frac{s_y^{\max} - s_y^{\min}}{m} & s_z^{\min} + 1 \times \frac{s_z^{\max} - s_z^{\min}}{m} \\ s_x^{\min} + 2 \times \frac{s_x^{\max} - s_x^{\min}}{m} & s_y^{\min} + 2 \times \frac{s_y^{\max} - s_y^{\min}}{m} & s_z^{\min} + 2 \times \frac{s_z^{\max} - s_z^{\min}}{m} \\ s_x^{\min} + 3 \times \frac{s_x^{\max} - s_x^{\min}}{m} & s_y^{\min} + 3 \times \frac{s_y^{\max} - s_y^{\min}}{m} & s_z^{\min} + 3 \times \frac{s_z^{\max} - s_z^{\min}}{m} \\ \dots & \dots & \dots \\ s_x^{\min} + m \times \frac{s_x^{\max} - s_x^{\min}}{m} & s_y^{\min} + m \times \frac{s_y^{\max} - s_y^{\min}}{m} & s_z^{\min} + m \times \frac{s_z^{\max} - s_z^{\min}}{m} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$d = \eta \frac{(s_x^{\max} - s_x^{\min}) + (s_y^{\max} - s_y^{\min}) + (s_z^{\max} - s_z^{\min})}{m} \quad (11)$$

随机算子中 μ 取值过小,算子迅速收敛为0,表现为随机行为过早消失; μ 取值过大,算子收敛过慢而影响目标函数收敛速度。对比发现, μ 取0.95较为适宜。

2.1.2 不同初始化方法对优化的影响

保持2.1.1节其他参数不变,使用带随机算子

表2 中国邮政纸箱规格系列
Tab.2 Carton specification series of China Post Group Corporation

序号	长/mm	宽/mm	高/mm
1	530	370	290
2	530	290	230
3	430	270	210
4	350	230	190
5	290	190	170
6	260	180	150
7	230	160	130
8	210	140	110
9	195	135	105
10	175	115	95
11	145	105	85
12	130	90	80

$p_x^{\min}, p_y^{\min}, p_z^{\min}, p_x^{\max}, p_y^{\max}, p_z^{\max}$ 。为提高与邮政现行规格系列的可比性,仿真中 $s_x^{\max}, s_y^{\max}, s_z^{\max}, s_x^{\min}, s_y^{\min}, s_z^{\min}$ 分别取邮政现行规格中最大及最小纸箱的长、宽、高。可行域也相应地设定为三维空间中 $s_x^{\min} < x < s_x^{\max}, s_y^{\min} < y < s_y^{\max}, s_z^{\min} < z < s_z^{\max}$ 的区域。规格种类 $m=12$,尝试次数阈值 $C=15$,迭代次数 $G=300$ 。距离间隔阈值 d 按照式(11)设定。在使用式(10)初始化 F^0 时,式(11)中的 d 为相邻2条人工鱼初始位置曼哈顿距离的 η 倍,此处 η 取0.4。分别对引入随机算子,使人工鱼有随机行为($\mu=0.95$),不引入随机算子,只采用贪心策略2种情况的优化效果进行测试。每种情况重复测试10次取均值,绘制10次测试平均目标函数值随迭代次数变化折线图(见图3),可以看出引入随机算子优化效果得到一定程度提升。

($\mu=0.95$)的求解算法框架,仅改变初始化方式。按照式(10)方法初始化 F^0 ,在可行域内完全随机初始化 F^0 以及使用邮政现行规格系列作为 F^0 这3种情况的优化效果进行测试,每种情况重复测试10次取均值,得到图4。使用式(10)方法初始化效果和使用邮政现行规格系列初始化效果接近,而完全随机初始化效果较差。使用式(10)初始化的优点是可以使人工鱼相对均匀地分布在可行域中,从而提升优化效果。

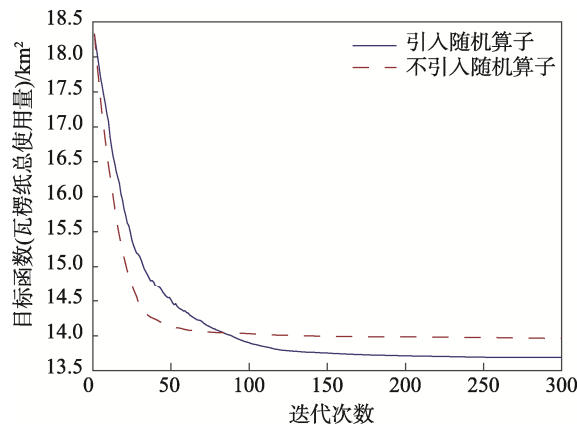


图 3 引入随机算子前后对比
Fig.3 Comparison chart before and after introducing random operator

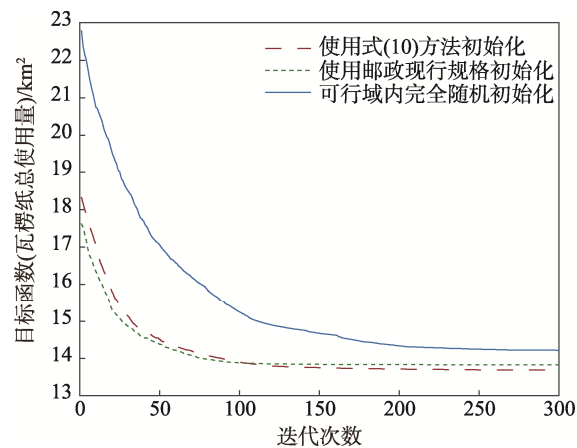


图 4 不同初始化方法对优化效果的影响
Fig.4 Effect of different initialization methods on optimization

2.1.3 其他参数的选择

一般情况下 C 和 G 越大，寻优越细致，但是会造成复杂度的升高。 C 设定为 15， G 设定为 300 是较为均衡的选择。此时既能得到优化效果良好的可行解，又能控制运算时间（仿真实验单次求解可在 15 s 内完成），从而适应电商平台全品类情况下更大的数据量和定期的数据更新。使用式（11）设定 d 时， η 取值应大于 0 小于 1，取值越大可以确保各纸箱规格的差异化程度越高，其数值对优化结果有一定影响。仿真实验中 η 取 0.4 时， d 约为 3 cm，即 2 种纸箱规格长、宽、高的总差异须大于 3 cm，与邮政现行规格系列一致而更具可比性。觅食范围不宜过大，否则影响算法鲁棒性并且计算过程中将增大触发孤立行为的频率从而造成计算资源不必要的浪费，10 mm×10 mm×10 mm 是一个相对理想的范围。求解算法作为一种启发式智能算法，其优化结果有一定波动，经过测试中发现，目标函数的波动范围为平均值±3%。

2.2 仿真结果分析

使用文中所述建模求解方法得到的 12 种纸箱规格优化方案在满足 P 中全部需求的情况下，瓦楞纸使用量为 13.744 km²。邮政现行 12 种纸箱规格的瓦楞纸使用量为 17.786 km²。进一步以通过聚类分析间接实现纸箱规格优化的方法作为对比。具体地，使用 k-means 算法^[17]以 P 中商品对纸箱实际需求的长、宽、高为特征，基于欧氏距离对商品进行聚类（k-means 聚类类别数设定为 12，迭代次数设为 300），聚类后再根据每类商品中长、宽、高的最大需求值设计与该类商品匹配的纸箱规格。该方法得到 12 种纸箱规格的瓦楞纸使用量为 15.973 km²。对比数据见表 3，可见文中提出的建模求解方法具有良好的优化效果。

2.3 纸箱规格数量对优化结果的分析

使用文中所述建模求解优化方法，汇总规格数量 m 取不同值时的优化结果，得到图 5（曲线由多项式拟合得到）。纸箱规格越多，瓦楞纸使用量越小，与直观的判断一致。理想情况是为每种尺寸的包装需求设计一种纸箱规格，此时瓦楞纸使用量为 9.3862 km²。然而 m 取值过大时，纸箱生产和采购将丧失规模效应，也不利于库存管理和包装操作，因此，在实际优化中，应平衡利弊后选取合适的 m 值。

表 3 优化结果对比
Tab.3 Comparison of optimization results

优化方法	规格数量	瓦楞纸使用量/km ²	节省瓦楞纸用量/%
建模求解优化	12	13.688	23.02
k-means 算法聚类优化	12	15.822	11.02
邮政现行规格系列	12	17.782	

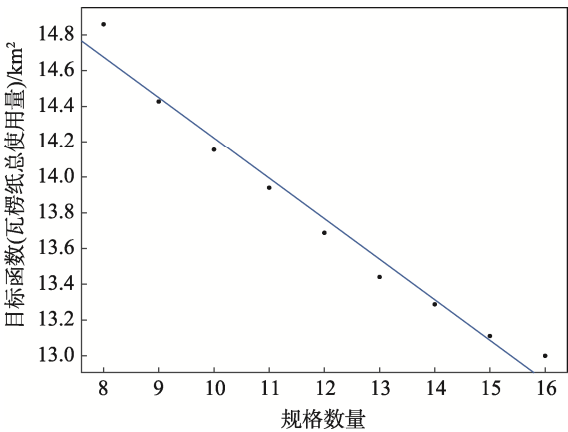


图 5 不同 m 取值时优化后目标函数值
Fig.5 Objective function values after optimization at different m values

3 结语

针对电商包裹特点,论述了以瓦楞纸总使用量最小化为目标函数,以快递纸箱与商品实际需求匹配关系为约束构建优化模型,使用人工鱼群和模拟退火算法融合的改进算法对优化模型进行求解的快递纸箱规格优化方法,并通过仿真实验证明了方法的优化效果。该方法注重商品对快递纸箱的实际需求,充分考虑了影响瓦楞纸使用量的因素,适用于解决商品品种繁多、尺寸各异、动态更新的电商场景下的快递纸箱规格优化问题,对减少快递包装过度使用的情况具有积极意义。在之后的工作中,将针对电商平台订单合并场景下,多种产品组合装箱的情况进行研究,并继续完善文中论述的优化模型和求解算法。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家邮政局官网. 国家邮政局公布2019/2020年邮政行业运行情况[EB/OL]. (2021-02-26) [2021-01-14/2020-01-14]. http://www.spb.gov.cn/xw/dtxx_15079/202001/t20200114_2005598.html
- [2] The Official Website of the State Post Bureau of the People's Republic of China. The State Post Bureau Announced the Operation of the Postal Industry in 2019[EB/OL]. (2021-02-26) [2021-01-14]. http://www.spb.gov.cn/xw/dtxx_15079/202001/t20200114_2005598.html
- [3] 金国斌. 物流链中的运输包装优化问题[J]. 包装工程, 2005, 26(3): 93—95.
JIN Guo-bin. Optimization of Transport Package in Logistics Chain[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(3): 93—95.
- [4] 刘立琼. 网购快递包装标准化的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2017: 5—49.
LIU Li-qiong. The Research of Packaging Standardization for Online Delivery[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2017: 5—49.
- [5] 莫森. 基于物流包装尺寸标准化的集合包装优化系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008: 9—78.
MO Sen. Study on System of Gather Packaging Optimization Based on Logistics Packaging Dimension Standardization[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008: 9—78.
- [6] 支凯强. 集装箱拼箱中产品包装尺寸标准化问题研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2018: 23—38.
ZHI Kai-qiang. Research on Standardization of Product Packing Size in Container LCL[D]. Qingdao: Qingdao University, 2018: 23—38.
- [7] 尹迎, 王转, 程国全, 等. 多种产品系列化包装箱尺寸设计的研究[J]. 物流技术, 2011, 30(1): 132—135.
YIN Yin, WANG Zhuan, CHENG Guo-quan, et al. Study on the Size Optimization for Serial Multi-Product Packing Boxes[J]. Logistics Technology, 2011, 30(1): 132—135.
- [8] 秦文翔, 郭玲, 林舒泓. 基于RGBD的箱体尺寸测量与包装优化[J]. 计算机与现代化, 2019(5): 46—50.
QIN Wen-xiang, GUO Lin, LIN Shu-hong. Box Dimension Measurement and Packing Optimization Based on RGBD[J]. Computer and Modernization, 2019(5): 46—50.
- [9] 李晓磊. 一种新型的智能优化方法-人工鱼群算法[D]. 杭州: 浙江大学, 2003: 13—67.
LI Xiao-lei. A New Intelligent Optimization Method-Artificial Fish School Algorithm[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003: 13—67.
- [10] XU H, ZHAO Y Q, YE Z, et al. Integrated Optimization for Mechanical Elastic Wheel and Suspension Based on an Improved Artificial Fish Swarm Algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2019, 137: 1—8.
- [11] 王闯, 张勇, 李学贵, 等. 改进粒子群算法及其在聚类分析中应用[J/OL]. 系统仿真学报: 1—12 [2020-04-05]. <http://kns-cnki-net.vpn1.bigc.edu.cn/kcms/detail/11.3092.v.20200331.0911.004.html>.
WANG Chuang, ZHANG Yong, LI Xue-gui, et al. An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Application in Clustering Analysis[J/OL]. Journal of System Simulation: 1—12 [2020-04-05]. <http://kns-cnki-net.vpn1.bigc.edu.cn/kcms/detail/11.3092.v.20200331.0911.004.html>.
- [12] YUAN G H, YANG W X. Study on Optimization of Economic Dispatching of Electric Power System Based on Hybrid Intelligent Algorithms (PSO and AFSA)[J]. Energy, 2019, 183: 926—935.
- [13] 金显华, 赵元庆. 模拟退火和人工鱼群算法的冶金配电网状态估计[J]. 电气应用, 2013, 32(20): 44—48.
JIN Xian-hua, ZHAO Yuan-qing. State Estimation of Metallurgical Distribution Network Based on Simulated Annealing and Artificial Fish Swarm Algorithm[J]. Electrotechnical Application, 2013, 32(20): 44—48.
- [14] ZHU Y A, XU W Y, LUO G L, et al. Random Forest Enhancement Using Improved Artificial Fish Swarm for the Medial Knee Contact Force Prediction[J]. Artificial Intelligence in Medicine, 2020, 103: 1—10.
- [15] 黄伟, 郭业才, 王珍. 模拟退火与人工鱼群变异的优化的小波盲均衡算法[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(11): 4124—4126.
HUANG Wei, GUO Ye-cai, WANG Zhen. Orthogonal Wavelet Transform Blind Equalization Algorithm Based on Artificial Fish Swarm Optimization of Mutation Operator and Simulated Annealing[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(11): 4124—4126.
- [16] GB/T 6544—2008, 瓦楞纸板[S].
GB/T 6544—2008, Corrugated Fiberboard[S].
- [17] GB/T 16606.2—2018, 快递封装用品 第2部分 包装箱[S].
GB/T 16606.2—2018, Packing for Express Service Part 2 Packaging Box[S].
- [18] 杨俊闯, 赵超. K-Means 聚类算法研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(23): 7—14.
YANG Jun-chuang, ZHAO Chao. Survey on K-Means Clustering Algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(23): 7—14.