

集装箱化运输单箱配载问题研究综述

李峰, 王厦饶, 刘小平, 王亚玲

(军事科学院 系统工程研究院后勤科学与技术研究所, 北京 100071)

摘要: **目的** 探索集装箱化运输单箱配载问题模型及典型求解算法研究现状, 为相关领域展开深入研究提供参考。**方法** 通过分析常见的单集装箱装载问题模型, 梳理已有的求解算法, 提出单箱装载问题求解算法的优化方向和思路建议。**结论** 作为集装箱化运输的重要环节, 单箱装载对提高物流运输能力和经济效益有着重要的意义, 现有的求解算法仅仅是初步解决单箱装载问题, 但仍存在一定的不足, 一方面是考虑到约束条件有限, 不满足实际应用需要; 另一方面是求解方案质量有待提高, 求解的时间和效率尚有改进空间。

关键词: 集装箱化运输; 单箱配载; 问题模型; 综述

中图分类号: U169 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)23-0259-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.23.037

Research Overview of Single Container Stowage in Containerized Transportation

LI Feng, WANG Xia-rao, LIU Xiao-ping, WANG Ya-ling

(Institute of Logistic Science and Technology of Academy of System Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100071, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the research status of problem model and typical solution algorithm of single container stowage, so as to provide reference for further research in relevant fields. Through the analysis on the common problem model, the existing solution algorithm of single container was sorted out, and the optimization direction and ideas of the solution algorithm of single container stowage problem were put forward. As an important link of containerized transportation, single container stowage is of great significance to improve logistics transportation capacity and economic benefits. The existing solution algorithm can only solve the single container stowage problem preliminarily, but there are still some deficiencies. On the one hand, the constraints are limited, which does not meet the needs of practical application. On the other hand, the solution quality needs to be improved, and there is room for improvement in the solution time and efficiency.

KEY WORDS: containerized transportation; single container stowage; problem model; review

集装箱与托盘是目前全球贸易最主要的运载工具, 广泛应用于物流领域的生产、运输、仓储等环节, 被认为是 20 世纪物流产业中的两大关键性创新^[1], 在集装箱化运输中起到了极大的作用。集装箱配载作为集装箱化运输的关键环节, 其模型及算法的优劣程度对

现代物流全流程的作业效率及运转能力有着重大影响, 进入新世纪以来, 随着全球贸易的日趋频繁, 受经济效益驱动, 集装箱单箱配载问题研究更加深入, 并逐步成为物流领域相关算法研究的热点。文中结合前人的文献研究, 对集装箱单箱配载模型进行了形式

收稿日期: 2021-05-09

基金项目: 军委科技委基础加强计划技术领域基金 (2020-JCJQ-JJ-362)

作者简介: 李峰 (1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为军事物联网、智能化军事物流。

化定义,对常见问题模型进行了梳理分类,并对集装箱单箱配载问题求解算法进行了分析,指出求解算法的优缺点,最后结合物流集装化运输单箱配载在实际应用场景中的约束条件,展望未来单箱配载问题研究趋势。

1 单箱配载定义及模型

集装箱单箱装载问题一般涉及箱体和货物 2 组数据,在建立单箱配载模型时,箱体数量为确定值,主要考虑货物类型和数量、目标函数和约束条件等,这些元素对于模型的复杂度有一定影响,也与模型的求解算法息息相关。早期的研究文献中,单箱装载涉及的约束条件仅有货物与集装箱尺寸,例如 Dyckhoff^[2]认为单箱装载问题是将整批或部分货物装入单个容器中,以达到最大化容积利用率或最小化未使用的容器容积的目标。随着研究的推进,在学术界逐渐把该类问题归纳为单箱配载问题 (Single Container Loading Problem, SCLP) 是切割包装领域的经典问题之一。

1.1 定义

基于已有文献的研究思路和成果^[3-7],文中把集装箱单箱配载问题归纳抽象为将一批小对象装载到一个空白容器的三维背包问题。

1.1.1 问题描述

假设有一批数量为 N_k 的长方体待装货物集合 B , 集合中的任一项目定义为 b_i , b_i 的长、宽、高和重量分别是 l_i, w_i, h_i, g_i , 价值为 v_i 。现将这批货物加载到长、宽、高分别为 L, W, H 的单个集装箱 C 中,装载的货物体积不可超出集装箱最大容积 V , 装载货物的价值不可超出货物集合 B 的总最大价值 v , 同时,要求装载后的集装箱重心必须控制在各维度上的中心范围 $[X_1, X_2][Y_1, Y_2][Z_1, Z_2]$ 内。要求在满足现实装载的约束条件下,寻找一个可以最大限度利用该集装箱总容积或最大化加载货物总价值的可行装载方案。

约束条件:装载货物的体积不能大于集装箱的最大容积;装载货物的价值不能大于货物集合的最大价值;加载到集装箱内的货物必须进行正交包装;加载到集装箱内的货物箱体之间互不重叠;完成装载后,集装箱的重心必须控制在允许的范围。

1.1.2 数学表示

为了便于描述和理解,以集装箱容器 C 的右下角为坐标原点,建立空间坐标系 $C(x, y, z)$, 坐标系的坐标轴对应集装箱的长、宽、高。填装不同类型的货物到集装箱容器 C 的内部空间中,货物 b_i 右下后顶点坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 集合 B 中的每个项目都满足

$$\begin{cases} x_i \in x = \{0, 1, \dots, L - \min l_i\} \\ y_i \in x = \{0, 1, \dots, W - \min w_i\}, k = 1, 2, \dots, m_i, \text{ 其中,} \\ z_i \in x = \{0, 1, \dots, H - \min h_i\} \end{cases}$$

$\min l_i, \min w_i, \min h_i$ 为所有货物中最小货物的长、宽、高的值。

引入决策变量 δ 和 β_i 。

$$\delta = \begin{cases} 0 & \text{以加载货物总价值最大作为函数目标} \\ 1 & \text{以容积利用率最大作为函数目标} \end{cases}$$

$$\beta_i = \begin{cases} 0 & \text{货物}i\text{没有装入集装箱} \\ 1 & \text{货物}i\text{已经装入集装箱} \end{cases}$$

基于上述条件及定义,单箱装载问题的数学表示为:

$$\max T = \frac{\delta \sum_{i=1}^{N_k} v_i \beta_i}{v} + (1 - \delta) \frac{\sum_{i=1}^{N_k} V_i \beta_i}{V} \quad 0 \leq \delta \leq 1 \quad (1)$$

$$V_i = [x_i, x_i + l_i] * [y_i, y_i + w_i] * [z_i, z_i + h_i] \quad (2)$$

$$x_i + l_i < L, y_i + w_i < W, z_i + h_i < H \quad (3)$$

$$V(b_i) \cap V(b_j) = \emptyset, i, j \in B, i \neq j \quad (4)$$

$$\begin{cases} X_1 \leq \frac{\sum_{i=1}^{N_k} g_i X_i \beta_i}{\sum_{i=1}^{N_k} g_i \beta_i} \leq X_2 \\ Y_1 \leq \frac{\sum_{i=1}^{N_k} g_i Y_i \beta_i}{\sum_{i=1}^{N_k} g_i \beta_i} \leq Y_2 \\ Z_1 \leq \frac{\sum_{i=1}^{N_k} g_i Z_i \beta_i}{\sum_{i=1}^{N_k} g_i \beta_i} \leq Z_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_i, y_i, z_i 为第 i 件货物在集装箱容器 C 中的空间坐标, $i = 1, 2, \dots, N_k$ 。式 (1) 为单箱装载问题的目标函数,表示集装箱装载货物总价值最大化和容积利用率最大化。其中, δ 和 $1 - \delta$ 表示货物总价值和容积利用率在整个目标优化过程中所占的比重;式 (2) 表示项目 b_i 在集装箱容器 C 中占有的空间;式 (3) 表示货物均可包装在集装箱容器 C 内;式 (4) 表示装载在集装箱上的货物相互之间不能重叠;式 (5) 表示装载后的集装箱重心在长度方向、宽度方向和高度方向都必须在规定的重心范围内。

当然,在实际的配载中,需要考虑更多的约束条件 ($k \geq 2$), 如方向限定、负载强度、稳定性、项目分组、物品的分类、多点运输情况、完整性装运、运输优先次序、装载安排的复杂性、集装箱重量限制及箱内重量分布等^[8]。

1.2 问题模型

文中仅针对单个容器装载问题模型展开研究,根

据加载的小项目类型进行模型分类。在单集装箱装载问题中,同一规格的货物可看作是全等问题模型,即相同项目装载问题(Identical item packing problem, IIPP);给定货物集合同类型项目相对较多,不同类型项目相对较少,这种弱异类货物类型通常看作是单个大对象放置问题(Single Large Object of Placement Problem, SLOPP)模型;给定的货物集合由相对较多的不同类型的项目和相对较少的相同项目组成,则看作单一背包问题(Single Knapsack Problem, SKP)模型,文中按照上述模型对研究文献进行分类。

1.2.1 全等项目装载问题模型

全等项目装载问题模型有 2 种情况。一是所加载的货物本身尺寸规格完全相同,为了便于求解,部分文献将加载货物类型假设为全等项目。Han 等^[9]规定了一个矩形容器和一批大小与形状恒定不变得小矩形,将小矩形沿着容器的底面和垂直面加载,剩余空间会形成一个新的矩形空间,然后进行迭代,直到容器空间完全加载完毕。另一种情况是通过把要加载的包装容器装载到托盘上,或是堆叠成规格相同的货物塔,从而构建全等的货物类型,这样做可以简化问题模型,便于求解。Wang 等^[10]提出了将货物包装在均匀矩形纸板箱中的全等问题模型,并假设货物的目的地相同、货物无方向约束、货物承载强度足够且重心分布均匀,加入货物正交包装的约束条件来求解。

1.2.2 单个大对象放置问题模型

在实际的装载中,货物的尺寸规格往往是非均匀类型的,根据货物的异构强弱程度,分为了单个大对象放置问题模型和单一背包问题模型,单个大对象放置问题模型所加载的货物集合为弱异类,即货物类型相对较少,且同类型货物数量较大。Bortfeldt 等^[7]假设装载的货物类型为弱异构类,建立以最大限度加载货物体积为目标函数的问题模型,除货物必须包装在箱体并保证相互之间不重叠且正交包装等基本约束条件外,该模型还考虑了货物的方向约束和稳定性约束等实际装载约束条件。闫淑娟^[11]面向弱异类单箱装载布局优化问题,以集装箱空间利用率最大化函数作为目标函数,加载了数量约束、方向约束、放置约束、容积约束等约束函数建立数学模型。由于单个大对象放置问题模型只能识别相对较少的不同项目类型,当装载货物类型与模型假设不一致时,此类问题模型相适应的算法求解效率则难以体现。

1.2.3 单一背包问题模型

单一背包问题模型是加载强异构类货物的情况下的典型单箱装载问题模型。GEHRING 等^[12]针对单一集装箱强异构类包装容器的排列问题(即矩形包装),选取稳定性约束、方向约束、叠加约束以及重量约束作为限制条件建立问题模型,重点研究了负载严重不均的问题模型。卜雷等^[13]在方向约束、容积约

束、质量约束和重心约束等条件下,将货物装入单集装箱中,使得集装箱的容积利用率或装载质量利用率最大,采用的实例共有 16 件货物,这些货物的类型多,但同类型货物数量较少。Huang 等^[14]建立了以集装箱内部装载物品的体积最大化为目标,加载方向约束、货物包装在箱内且互不交叠等约束条件的问题模型,并采用 100 个典型强异构类实例的测试集进行实验,其中每个实例约有 130 个包装容器和 100 种不同类型。在采取一般算法的前提下,单一背包问题模型通常在容积利用率方面低于之前 2 种问题模型,需要结合单一背包问题模型特点开展进一步的研究。

2 单箱装载问题典型求解算法

单箱装载问题是严格意义上的 NP-Hard 问题,问题所涉及的集装箱容器空间越大,装载项目越多,求解的难度就越大。在过去几十年中,研究集装箱装载问题的文献提出了一系列求解方案,包括但不限于精确算法、启发式算法、元启发式算法、树搜索等,这些典型求解算法能够寻求相应问题模型的最优解或近似解,为集装箱单箱装载问题提供解决方案。文中根据集装箱单箱装载问题求解算法相关文献阶段的研究进展情况,将现有的算法划分为如下几种。

2.1 精确算法

精确算法是一种能够求得问题最优解的算法,分支定界法、割平面法、动态规划法、整数规划法和线性规划法等都属于精确算法的一种。在求解单箱装载问题时,一方面当问题规模较小的情况,精确算法可为集装箱单箱装载提供可行解,董梅^[15]在集装箱装载问题模型受到不得超重、超高和超长等限制的情况下,采用线性规划方法求出能使目标函数运输总利润最大化的最优解;同时,还提出动态划分法,把单箱装载问题转换为动态规划问题,把装入一种货物作为一个阶段,进行分阶段逐步求解,从而得到货物装载的最大体积,以此来反推出装载策略的最优解。Junqueira 等^[16]提出一种基于混合整数线性规划模型的方法,考虑了货物稳定性、货物完全装入集装箱以及货物互不重叠等约束因子,目标条件是在兼顾货物卸载顺序避免额外搬运的前提下,使得集装箱加载容积最大化,通过随机生成的实例进行模型和方法计算测试。结果表明,该方法能够很好地解决中等规模的单箱装载问题。另一方面,精确算法可为启发式方法提供初始解,以便求出更好的解。Liu 等^[17]在 Lim^[18]研究的基础上,提出一种具有轴重约束的单箱装载问题的整数规划公式,并开发了拉格朗日松弛算法,有效、高效地获得了最优解。

单箱装载问题需考虑多种约束条件,是典型的

NP-Hard 问题,并不存在绝对意义上的精确解,通常只寻求最优解或近似解,通过精确算法求解这类问题时,随着实例数量规模增大,会带来“组合爆炸”现象,在现有的计算能力下,难以找到最优解,因此,精确算法受限于求解的实例数量,近年来相关研究逐渐减少。

2.2 启发式算法

随着问题模型规模逐渐增大,精确算法无法满足集装箱单箱装载问题最优解的求解,启发式算法应运而生。启发式算法是借助某种直观判断或试探的,通过归纳已有经验并结合实验分析,推理求得问题模型的次优解或最优解的方法。目前,启发式算法是单箱装载问题研究领域最常用的算法之一,文中结合 Fanslau 等^[19]的分类方法展开研究论述,将基于启发式的解决思路分类为以下几种。

1) 筑墙法。建造垂直层的“墙壁”来填充集装箱空间,加载的货物以长方体层的形式沿着容器的边进行垂直填充,形成墙壁,逐步筑墙填充集装箱空间。Pan 等^[20]采用筑墙法处理多点约束单箱装载问题。

2) 堆垛法。通过堆叠的方法构建一个堆栈,例如托盘塔,将货物堆叠在托盘上,再将堆叠好的托盘排列在集装箱内部,以节省最多的空间。Gehring 等^[21]提出的遗传算法即采用堆垛法进行货物装载。

3) 分层法。在水平层填充货物,一层一层水平包装。Lim 等^[22]使用动态优先级来处理货物装载问题,采用贪婪启发式算法自底向上逐层构造的单箱装载方案。

4) 砌块法。也被称为积木法,是使用矩形的包装容器填充集装箱。Zhang 等^[23]提出一种基于多层搜索的三维集装箱装载问题启发式分块加载算法。

5) 箱体分割法。箱体分割方法是基于包装计划的切片树表示,每个切片树对应一个连续分割的容器,通过断头台切割,将容器连续分割成更小的部分,从而使得切片树的叶子能够对应于待装载的包装容器。Bortfeldt 等^[7]设计了基于箱体分割法遗传算法。

启发式算法包括构建启发式和改进启发式,比如贪婪算法和局部搜索算法。Araya^[24]提出一种新的块构建法,基于波束搜索策略求解单容器装载问题,所谓波束搜索策略可理解为分支定界搜索的一种变体。Zhang 等^[23]通过分块装载的启发式算法,提出一种基于多层搜索的高效求解方案,在深度优先搜索算法的基础上,增加多层搜索算法来确定每个阶段的块看,使更接近于最优解。

虽然,较之精确算法,启发式算法能够更快地找到最优或接近最优的解,是大多数单箱装载问题的首选求解方法,但由于贪婪算法和局部搜索算法在搜索过程中存在停滞问题,且只能进行局部分析求解,在复杂货物类型的情况下,启发式算法仍存在一定的局

限性。

2.3 元启发式算法

元启发式算法是在传统启发式算法的基础上进行改进,不需要借助某个特定问题的特定条件,其应用范围更加广泛,也是目前单箱装箱问题研究采用得最多的一种方法。元启发式算法主要包含有禁忌搜索算法、模拟退火算法、遗传算法、蚁群优化算法、粒子群优化算法、人工鱼群算法、人工蜂群算法、人工神经网络算法、抓取搜索法等一系列算法^[25]。Bortfeldt 等^[26]引入了禁忌搜索算法 (Tabu Search Algorithm, TSA) 用于解决集装箱装载问题。Wang 等^[27]提出一种基于搜索的单箱装载问题模拟退火算法 (MSA)。Pino R 等^[28]提出一种遗传算法求解集装箱装载问题。Domingo B M 等^[29]提出一种粒子群优化算法,对要装入单集装箱中的不同类型货物的盒型序列以及层型向量的顺序进行演化,从而求解集装箱装载问题; Zhou 等^[30]从实际应用的角度出发,提出种群优化算法,通过个体之间的相互作用和加载约束,完成货物最佳位置装载的目标,以解决托盘或无托盘三维集装箱装载问题。

元启发式算法虽具备较强的全局寻优能力,但依赖于问题的初始条件,在其设定不当的情况下,元启发式算法的收敛性和搜索速度都会受到影响,导致难以求得最优解,通常来说,元启发式算法适用于各种单箱装载问题模型求解,应用广泛,但无法保证求解效率。

2.4 超启发式算法

近年来,智能计算技术的发展为解决 NP-hard 问题带来了新的思路,学者们提出了一种可用于合成多种不同算法的高效算法概念,那就是超启发式算法^[31] (Hyper-Heuristic Algorithm, HHA)。超启发式算法分为 2 个层面:问题域,需要借助应用领域专家对具体求解问题实例的相关背景知识及性质特征进行分析,为问题域层面提供问题定义、问题表示、评估函数等信息,同时提供一系列可用于求解该问题实例的低层启发式算法 (Low-Level Heuristic, LLH); 高层策略层面,由智能计算专家来设计高效的超启发式算法操纵管理机制,根据问题域所提供的相关特征信息,通过操纵或管理一组低层启发式算法,选择已有的或构造出新的启发式算法。这 2 个层面之间存在领域信息屏蔽,高层策略并不受问题域的参数影响,因此,只需调整或修改问题域的问题定义、问题表示、初始解、评估函数及低层次启发式算法集合等问题域特征信息,便能够将超启发式算法快速移植到新的问题上,实现跨领域迁移。

超启发式算法是一种较为特殊的搜索方法,简单来说,这是一种能够搜索优化启发式算法的启发式算

法, 通过从预选定的启发式算法集合中选择或自动生产新的、适当的启发式方法, 进而有效求解问题, 它的关键在于如何在启发式方法空间中高效地开展搜索, 选择最恰当的启发式算法^[32]。对于装箱问题, Thomas J 等^[33]提出一种新的超启发式算法, 结合遗传算法和超启发式算法, 以集装箱空间最大利用率为目标函数, 在可接受时间范围内, 对二维矩形块高效包装的最优解或次最优解进行搜索。Burke E K^[34]提出了一种针对二维条状装箱问题 (2-D Strip Packing Problem) 基于遗传编程的超启发式算法, 对现有启发式算法进行模块化分解并通过模块演化的方式获取新的启发式算法进行求解。Fukunaga A S^[35]提出的基于遗传编程的超启发式算法, 则着重研究了约束可满足性问题 (Satisfiability Problem, SAT)。Chaurasia S N 等^[36]首先提出一种基于引导变异的进化算法和局部搜索相结合的求解集装箱装载问题的方法; 后来, 为找到更加优化的求解方法, Chaurasia S N 等^[37]还提出了一种基于遗传算法的超启发式算法框架并结合参数的动态选择应用于集装箱配载问题, 实验结果表明, 该算法在求解质量及效率方面均优于现有算法。

相较于启发式算法, 超启发式算法的搜索空间由低层启发式算法集合构成, 而非由问题实例的解集合空间构成, 它不能直接对问题实例进行求解, 因此, 在解决单箱配载问题模型的某一具体实例时, 单单从求解效率及质量方面来说, 超启发式算法并不具备太大优势。超启发式算法可根据不同的问题实例的相关信息生成适用于该问题实例的启发式算法来求解, 具备一定的通用性, 可挖掘的潜力很大, 能够根据不同的问题模型, 调整 LLH 算法集和高层策略, 搜索适用于不同单箱配载问题模型的求解算法^[38]。

2.5 人工智能算法

人工智能算法融合利用了人工智能、数学、自动化和计算机等多学科多领域知识, 能够让计算机模拟人类思考方式, 学习人类智能行为, 从而实现机器的认知、识别、分析和决策能力的智能化提升, 进而对问题模型进行优化求解, 获得相对最优解。人工智能算法主要包括 2 个特点: 通过学习借鉴自然现象发生的原理, 分析生物智能、常见物理现象相关规律并加以利用, 从而实现对数据的处理、对算法的优化、对模型参数的控制等一系列功能; 在不具备精确逻辑模型或数学模型的情况下, 即可借助一些特定信息 (例如: 个体群体之间的评价、进程状态信息等) 进行搜索, 获取最优解或次最优解^[39-40]。

目前, 针对单箱装载配载问题上的人工智能算法研究较少, 吴秀丽^[41]则列举了智能算法在装箱作业中的应用现状。Razouk C 等^[42]提出一种基于码量优化的改进装箱算法。Kureichik V 等^[43]在萤火虫优化算

法的基础上开发了一种生物启发算法, 该算法能够在多项式时间内接收一组最优解。人工智能算法可通过智能感知、智能处理及智能决策等技术对将要装载到单集装箱内的货物进行信息统计和分类处理, 并根据实际装载场景, 合理加入约束条件, 借助经验数据不断细化问题模型, 根据已知数据调整问题模型的参数、条件等信息, 自适应优化求解算法以求得最佳的单箱配载方案, 从而提高求解的准确性和求解效率。

人工智能算法在各个领域应用广泛, 相关的技术如云计算、大数据等正处于高速发展阶段, 现有研究多聚焦于人工智能算法本身, 学者们对其在具体问题实例及算法拓展应用方面的研究尚不成熟, 有待进一步深入研究, 对于单箱配载问题的求解, 人工智能算法是未来研究的主要方向之一, 它仍然存在很大的进步空间。

2.6 混合算法

混合算法是融合 2 种或多种类型算法求解, 根据算法混合类型来分类, 主要有分段混合和并行求解 2 种类型。

分段混合算法是在不同阶段分别采用不同的算法求解, Martello 等^[44]提出一种 2 级分支和边界方法求解集装箱问题, 第 1 阶段, 通过树搜索的方法确定容器和项目的所有可能组合, 第 2 阶段, 使用边界方法评估第一级树搜索的每个节点, 并验证其将项目打包到容器中的能力; Ilkyeog Moon 等^[45]考虑有平衡限制的集装箱装载问题, 提出一个具有上下界的混合整数规划模型, 结合最深底部左侧填充 (Deepest bottom left with fill, DBLF) 策略、贪婪启发式算法和基本的遗传算法来寻找在允许重量平衡范围内的最大可能的体积; Lim 等^[18]在满足美国加州车辆法典 (California Vehicle Code, CVC) 中有关卡车轮轴重量法律要求的基础上, 提出一种基于线性整数规划模型和抓壁算法相结合的启发式综合求解方法, 通过真实案例数据实验测试的结果验证了算法的有效性; 李伟等^[46]针对单箱配载问题, 设定以集装箱空间利用率最大化的目标函数, 选取质量约束、尺寸约束、稳定性约束、方向约束及优先级约束等限制条件, 提出一种基于遗传算法的改进遗传模拟退火算法进行初步求解, 并借助禁忌搜索算法对优化后的解再次优化, 从而寻找到最优解; 胡瑞等^[47]考虑了货物底置位置、允许侧放方式、最大堆码层数等约束因子, 并针对这种多约束条件下的装箱问题提出基于空间划分的启发式算法, 随后, 进一步结合遗传算法提出一种混合遗传算法来求解此问题。

并行算法指 2 种或 2 种以上的算法并行运行, Mack D 等^[48]采取模拟退火方法和禁忌搜索算法并行化求解单箱装载问题; José Fernando 等^[49]通过最大空

间表示技术管理容器中的空闲空间,将新的放置过程和基于随机密钥的多种群遗传算法并行结合,求解每个盒子放置的最大空间,并在基准数据实例进行了广泛测试,该方法具有较为良好的性能;廖星等^[50]提出一种加入自适应权重的并行粒子群优化算法,其目标是提高装箱效率,缩短装箱时间,以快速完成单箱配载任务为目标,与标准粒子群优化算法及其他传统启发式算法相比,该算法计算速度有效提升。

3 发展趋势

单箱装载问题是物流行业的一个重要聚集点,相关求解算法的研究对提高物流运输能力和经济效益具有重要意义。目前,已有的算法能够初步解决单箱装载问题,但仍不满足实际的应用需要。文中通过对现有相关文献的梳理分析,提出以下几个方面的建议。

1) 运用标准实验进行测试。通过基准测试数据进行算法的测试,更容易比较出各个算法之间的优劣,尽可能让所使用的测试程序标准化,有利于研究者继续深入开发创新,找到求解能力更好的算法。

2) 问题模型加载更多约束条件。在实际的装载问题中,所涉及的限制因素更多,比如考虑货物的动态到货时间进行按时分配货物装箱顺序及放置位置,考虑货物到货地点不同的多点运输限制,考虑货物的上方或下方禁止码放的限制,考虑同一批货物完整性装运限制,以及危险品装载限制等一系列约束条件,这些制约因素的存在使得任何理论上可行的解决方法都可能价值有限,在算法中加入更多符合实际场景的约束条件求解问题,是国内外学者的主要研究方向^[38—49]。

3) 优化完善求解算法。由于单箱装载问题是典型的 NP-Hard 问题,随着参与项目数量的增多,求得最优解(或近似解)的时间所需要的时间随之增加,改进现有的算法,缩短问题的求解时间和求解效率,并提高算法灵活性和解决方案质量,也是未来研究的主要目标之一。

4) 注重理技融合。超启发式算法和人工智能算法是目前较为前沿的单箱装载问题求解算法,但国内外研究学者在这两方面的相关研究多停留在理论阶段,实际应用领域仍存在较大空白,未来应该进一步结合大数据、云计算和人工智能等高新技术,注重实际应用研究,提高理论研究价值,实现单箱配载问题模型算法在实际应用场景下优化完善^[51—61]。

4 结语

文中梳理了国内外大量相关文献,结合国内外现有的单箱装载问题研究,分别描述了目前较为常见的

问题模型及典型求解算法,合理分析已有研究成果,给出了相关研究趋势展望。集装化单箱装载问题具有较好的理论研究价值和较强的现实应用价值,在实际场景中所涉及的因素与变量必然更加复杂,这需要更加深入地研究,建立更完善、更贴近实际情况的问题模型,改进传统的求解算法,从而提高解决方案质量,为进一步推动物流领域现代化发展奠定基础。

参考文献:

- [1] 贺登才,刘伟华.现代物流服务体系研究(第二版)[M].北京:中国财富出版社,2018,10:171.
HE Deng-cai, LIU Wei-hua. Research on Modern Logistics Service System (Second Edition)[M]. Beijing: China Fortune Publishing House, 2018, 10: 171.
- [2] DYCKHOFF H. A Typology of Cutting and Packing Problems[J]. European Journal of Operational Research, 1990, 44(2): 145—159.
- [3] ZHU Wen-qi, OON W C, LIM A, et al. The Six Elements to Block-building Approaches for the Single Container Loading Problem[J]. Applied Intelligence, 2012, 37(3): 431—445.
- [4] WÄSCHER G, HAUBNER H, SCHUMANN H. An Improved Typology of Cutting and Packing Problems[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 183(3): 1109—1130.
- [5] JIN Zhi-hong, OHNO K, JIALI D U. An Efficient Approach for the Three-Dimensional Container Packing Problem with Practical Constraints[J]. Asia-Pacific Journal of Operational Research, 2004, 21(3): 279—295.
- [6] 袁梦. 集装箱单箱混合装载优化问题研究[D]. 大连: 东北财经大学, 2018: 1—56.
YUAN Meng. Research on Optimization of Single Container Mixed Loading[D]. Dalian: Northeast University of Finance and Economics, 2018: 1—56.
- [7] BORTFELDT A, GEHRING H, MACK D. A Parallel Tabu Search Algorithm for Solving the Container Loading Problem[J]. Parallel Computing, 2003, 29(5): 641—662.
- [8] BISCHOFF E E, RATCLIFF M S W. Issues in the Development of Approaches to Container Loading[J]. Omega, 1995, 23(4): 377—390.
- [9] HAN C P, KNOTT K, EGBELU P J. A Heuristic Approach to the Three-Dimensional Cargo-Loading Problem[J]. International Journal of Production Research, 1989, 27(5): 757—774.
- [10] WANG Zhou-jing, LI K W. Layer-Layout-Based Heuristics for Loading Homogeneous Items into a Single Container[J]. Journal of Zhejiang University-Science

- A: Applied Physics & Engineering, 2007, 8(12): 1944—1952.
- [11] 闫淑娟. 面向单箱弱异类 CLP 的一种改进启发式方法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016: 1—61.
YAN Shu-juan. Research on an Improved Heuristic Method for Single Box Weakly Heterogeneous CLP[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016: 1—61.
- [12] GEHRING H, BORTFELDT A. A Parallel Genetic Algorithm for Solving the Container Loading Problem[J]. International Transactions in Operational Research, 2002, 9(4): 497—511.
- [13] 卜雷, 袁新江, 蒲云, 等. 基于遗传算法的集装箱单箱三维装载优化问题[J]. 中国铁道科学, 2004(4): 109—112.
BO Lei, YUAN Xin-jiang, PU Yun, et al. Three Dimensional Optimization of Container Loading Based on Genetic Algorithm[J]. China Railway Science, 2004(4): 109—112.
- [14] HUANG Wen-qi, HE K. A New Quasi-human Algorithm for the Strongly Heterogeneous Container Loading Problem[C]// 2007 Japan-China Joint Workshop on Frontier of Computer Science and Technology (FCST 2007), 2007: 3—8.
- [15] 董梅. 集装箱装箱问题研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2008: 1—57.
DONG Mei. Research on Container Packing[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008: 1—57.
- [16] JUNQUEIRA L, MORABITO R, YAMASHITA D S. MIP-Based Approaches for the Container Loading Problem with Multi-Drop Constraints[J]. Annals of Operations Research, 2012, 199: 51—75.
- [17] LIU Ming, MAN Xiao-yi, ZHENG Fei-feng, et al. An Integer Programming Model for the Single Container Loading Problem with Axle Weight Constraints[C]// 2017 14th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM), 2017.
- [18] LIM A, MA H, QIU C, et al. The Single Container Loading Problem with Axle Weight Constraints[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 144(1): 358—369.
- [19] FANSLAU T, BORTFELDT A, et al. A Tree Search Algorithm for Solving the Container Loading Problem[J]. Inform Journal on Computing, 2010, 22(2): 222—235.
- [20] PAN L, CHU S C K, HAN G, et al. A Tree-Based Wall-Building Algorithm for Solving Container Loading Problem with Multi-Drop Constraints[C]// IEEE International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management, IEEE, 2010.
- [21] GEHRING H, BORTFELDT A. A Genetic Algorithm for Solving the Container Loading Problem[J]. International Transactions in Operational Research, 1997, 4(5/6): 401—418.
- [22] LIM A, MA H, XU J, et al. An Iterated Construction Approach with Dynamic Prioritization for Solving The Container Loading Problems[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(4): 4292—4305.
- [23] ZHANG De-fu, PENG Yu, LEUNG S C H. A Heuristic Block-Loading Algorithm Based on Multi-Layer Search for the Container Loading Problem[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(10): 2267—2276.
- [24] ARAYA I, RIFF M C. A Beam Search Approach to the Container Loading Problem[J]. Computers & Operations Research, 2014, 43: 100—107.
- [25] DYCKHOFF H, FINKE U. Cutting and Packing in Production and Distribution[M]. Berlin: Springer, 1992: 1—248.
- [26] BORTFELDT A, GEHRING H. Ein Tabu Search-Verfahren für Container Belade Probleme Mit Schwach Heterogenem Kistenvorrat[J]. Operations-Research-Spektrum, 1998, 20(4): 237—250.
- [27] WANG Hong-tao, WANG Z J, LUO J. A simulated Annealing Algorithm for Single Container Loading Problem[C]// International Conference on Service Systems & Service Management, IEEE, 2012.
- [28] PINO R, FERNANDEZ I, FUENTE D D L, et al. A Genetic Algorithm Approach to a 3D Container Loading Problem[J]. International Journal of Logistics Systems & Management, 2011, 10(2): 192—207.
- [29] DOMINGO B M, PONNAMBALAM S G, KANAGARAJ G. Particle Swarm Optimization for the Single Container Loading Problem[J]. IEEE International Conference on Computational Intelligence & Computing Research, 2013, 5(2): 18—24.
- [30] ZHOU Qi-feng, LIU X. A Swarm Optimization Algorithm for Practical Container Loading Problem[C]// IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, 2017: 29—35.
- [31] 江贺. 超启发式算法: 跨领域的问题求解模式[J]. 中国计算机学会通讯, 2011, 7(3): 63—70.
JIANG He. Super Heuristic Algorithm: A Cross Domain Problem Solving Model[J]. Communication of Chinese Computer Society, 2011, 7(3): 63—70.
- [32] 黄子钊, 庄子龙, 滕浩, 等. 自动化码头出口箱位分配优化超启发式算法[J]. 计算机集成制造系统, 2021(21): 1—26.
HUANG Zi-zhao, ZHUANG Zi-long, TENG Hao, et al. Super Heuristic Algorithm for Optimization of Export Container Allocation in Automated Terminals[J].

- Computer Integrated Manufacturing System, 2021(21): 1—26.
- [33] THOMAS J, CHAUDHARI N S. Design of Efficient Packing System Using Genetic Algorithm Based on Hyper Heuristic Approach[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 73: 45—52.
- [34] BURKE E K, HYDE M, KENDALL G, et al. A Genetic Programming Hyper-Heuristic Approach for Evolving 2-D Strip Packing Heuristics[J]. IEEE Trans Evol Comput. 2010, 14(6): 942—958.
- [35] FUKUNAGA A S. Automated Discovery of Local Search Heuristics for Satisfiability Testing[J]. Evolutionary Computation, 2008, 16(1): 31—61.
- [36] CHAURASIA S N, SUNDAR S, SINGH A. A Hybrid Evolutionary Approach for Set Packing Problem[J]. OPSEARCH, 2015, 52(2): 271—284.
- [37] CHAURASIA S N, KIM J H. An Evolutionary Algorithm Based Hyper-Heuristic Framework for the Set Packing Problem[J]. Information Sciences, 2019, 12(505): 1—31.
- [38] 何雨. 超启发式算法综述[J]. 数字技术与应用, 2020, 38(9): 94—95.
HE Yu. Summary of Super Heuristic Algorithm[J]. Digital Technology and Application, 2020, 38(9): 94—95.
- [39] 李晓岩. 船舶航线规划数学建模及求解的人工智能算法[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(4): 34—36.
LI Xiao-yan. Artificial Intelligence Algorithm for Mathematical Modeling and Solution of Ship Route Planning[J]. Ship science and technology, 2021, 43(4): 34—36.
- [40] 李慧慧, 李俊丽. 人工智能深度学习的激光图像分割研究[J]. 激光杂志, 2021, 42(2): 106—109.
LI Hui-hui, LI Jun-li. Laser Image Segmentation Based on Artificial Intelligence Deep Learning[J]. Laser Journal, 2021, 42(2): 106—109.
- [41] 吴秀丽. 智慧仓内的智能算法应用现状综述[J]. 物流技术与应用, 2019, 24(8): 118—123.
WU Xiu-li. Overview of Intelligent Algorithm Application in Intelligent Warehouse[J]. Logistics Technology and Application, 2019, 24(8): 118—123.
- [42] RAZOUK C, BENADADA Y, BOUKACHOUR J. Adapted Bin-Packing Algorithm for the Yard Optimization Problem[J]. Bioinspired Heuristics for Optimization, 2019, 774(19): 137—152.
- [43] KUREICHIK V, KUREICHIK L, KUREICHIK V J, et al. Bioinspired Algorithm for 2D Packing Problem[J]. Computer Science On-Line Conference. Springer, Cham, 2018, 764(1): 39—46.
- [44] MARTELLO S, PISINGER D, VIGO D. The Three-Dimensional Bin Packing Problem[J]. Operations Research, 2000, 48(2): 256—267.
- [45] MOON I, NGUYEN T V. Container Packing Problem with Balance Constraints[M]. New York: Springer-Verlag, 2014, 36(4): 837—878.
- [46] 李伟, 杨超宇, 孟祥瑞. 基于混合遗传算法的多品种货物装箱问题研究[J]. 包装与食品机械, 2020, 38(3): 51—56.
LI Wei, YANG Chao-yu, MENG Xiang-rui. Research on Multi Variety Goods Packing Problem Based on Hybrid Genetic Algorithm[J]. Packaging and Food Machinery, 2020, 38(3): 51—56.
- [47] 胡瑞, 丁香乾, 张峰, 等. 基于混合遗传算法的多约束集装箱装载问题研究[J]. 电子技术应用, 2006(2): 24—26.
HU Rui, DING Xiang-qian, ZHANG Feng, et al. Research on Multi-Constraint Container Loading Problem Based on Hybrid Genetic Algorithm[J]. Application of Electronic Technology, 2006(2): 24—26.
- [48] MACK D, BORTFELDT A, GEHRING H. A Parallel Hybrid Local Search Algorithm for the Container Loading Problem[J]. International Transactions in Operational Research, 2010, 11(5): 511—533.
- [49] GONGALVES J F, RESENDE M G C. A Parallel Multi-Population Biased Random-Key Genetic Algorithm for a Container Loading Problem[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(2): 179—190.
- [50] 廖星, 袁景凌, 陈旻骋. 一种自适应权重的并行 PSO 快速装箱算法[J]. 计算机科学, 2018, 45(3): 233—236.
LIAO Xing, YUAN jing-ling, CHEN Min-cheng. A Parallel PSO Fast Packing Algorithm with Adaptive Weight[J]. Computer Science, 2018, 45(3): 233—236.
- [51] 李昱蓉, 侯波. 集装箱单箱三维装载问题研究[J]. 物流科技, 2013, 36(12): 71—74.
LI Yu-rong, HOU Bo. Research on 3D Loading of Single Container[J]. Logistics Technology, 2013, 36(12): 71—74.
- [52] HUANG Wen-qi, HE K. A Caving Degree Approach for the Single Container Loading Problem[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 196(1): 93—101.
- [53] CHUA C K, NARAYANAN V, LOH J. Constraint-Based Spatial Representation Technique for the Container Packing Problem[J]. Integrated Manufacturing Systems, 1998, 9(1): 23—33.
- [54] LIU Sheng, SHANG Xiu-qin, CHENG Chang-jian, et al. Heuristic Algorithm for the Container Loading Problem with Multiple Constraints[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 108: 149—164.

- [55] 丁纺, 侯兆烽, 赵凯芳. 多种货物三维装箱问题研究[J]. 中国设备工程, 2021(4): 222—224.
DING Fang, HOU Zhao-feng, ZHAO Kai-fang. Research on Three-Dimensional Packing Problem of Various Goods[J]. China Equipment Engineering, 2021(4): 222—224.
- [56] 何利文, 张幸宁. 基于遗传算法的SDN网络装箱问题研究[J]. 计算机与数字工程, 2020, 48(3): 633—637.
HE Li-wen, ZHANG Xing-ning. Research on SDN Network Packing Problem Based on Genetic Algorithm[J]. Computer and Digital Engineering, 2020, 48(3): 633—637.
- [57] 张洪军, 邢红光. 改进蚁群算法在港口集装箱装载中的应用[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2020, 36(1): 37—41.
ZHANG Hong-jun, XING Hong-guang. Application of Improved Ant Colony Algorithm in Port Container Loading[J]. Journal of Qiqihar University (Natural Science Edition), 2020, 36(1): 37—41.
- [58] 张钧, 贺可太. 求解三维装箱问题的混合遗传模拟退火算法[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(14): 32—39.
ZHANG Jun, HE Ke-tai. Hybrid Genetic Simulated Annealing Algorithm for 3D Bin Packing Problem [J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(14): 32—39.
- [59] 郑斐峰, 蒋娟, 梅启煌. 最小化集装箱运输成本的配载优化[J]. 计算机科学, 2019, 46(6): 239—245.
ZHENG Fei-feng, JIANG Juan, MEI Qi-huang. Stowage Optimization to Minimize the Cost of Container Transportation[J]. Computer Science, 2019, 46(6): 239—245.
- [60] 郭向阳, 杨冰峰, 张春和. 基于蚁群算法的军用车辆器材装箱配载问题[J]. 包装工程, 2016, 37(11): 195—198.
GUO Xiang-yang, YANG Bing-feng, ZHANG Chun-he. Loading Problem of Military Vehicle Equipment Based on Ant Colony Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(11): 195—198.
- [61] 尚正阳, 顾寄南, 唐仕喜, 等. 高效求解三维装箱问题的剩余空间最优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(5): 50—56.
SHANG Zheng-yang, GU Ji-nan, TANG Shi-xi, et al. Efficient Residual Space Optimization Algorithm for Three-Dimensional Packing Problem[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(5): 50—56.