

考虑预分配策略的航空货物多箱装载优化

张长勇, 翟一鸣

(中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津市 300300)

摘要: 为了解决当前多数装箱算法未考虑装载顺序约束, 不能有效解决航空货物装载的实际应用问题, 开展多箱装载优化算法研究。方法 首先采用 K-means 算法对货物进行预分配, 将聚类簇特性相同的货物分配到同一个集装箱; 然后利用极点法得到极点序列, 结合遗传算法进行寻优产生各集装箱的布局方案。结果 对某机场物流公司的 160 件货物数据进行实验, 并与连续性策略进行比较, 证明了含预分配策略的极点装载法能够有效避免个别集装箱利用率偏低的情况, 并将集装箱利用率的总体方差降到 0.51。结论 算法在考虑货物装载顺序约束的情况下, 在多箱装载优化中能够实现货物的合理分配, 具有较好的工程应用性。

关键词: 多箱装载; 装载顺序约束; 预分配策略; 极点装载法

中图分类号: TB485.3; TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)15-0075-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.15.012

Multi-container Loading Optimization of Air Cargo Considering Pre-distribution Strategy

ZHANG Chang-yong, ZHAI Yi-ming

(College of Information Engineering and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

ABSTRACT: The work aims to research a multi-container loading optimization algorithm, so as to solve the problem that most of the current packaging algorithms do not consider the loading order constraints and cannot effectively solve the problem of practical application of air cargo loading. First, the K-Means algorithm was used for cargo pre-allocation, and the cargoes with the same clustering characteristics were assigned to the same container. Then, the extreme point order was obtained by extreme points (Eps), and the genetic algorithm was used to optimize the layout scheme of each container. 160 cargo data of an airport logistics company were used for experiments and compared with the continuity strategy, which proved that the Eps loading method with pre-allocation strategy could effectively avoid the low utilization of individual container and make the population variance of container utilization drop to 0.51. Considering the constraints of cargo loading order, the algorithm can realize the rational allocation of cargo in multi-container loading optimization and has better engineering applicability.

KEY WORDS: multi-container loading; loading order constraint; pre-distribution strategy; Eps loading method

航空货物运输过程中, 装箱是一个影响运输质量的关键环节。目前, 航空集装箱中货物的实际装载主要依靠工人的技能与经验, 而人工处理大型货物装载

的思维能力有限, 因此研究集装箱装载问题, 对提高空间利用率、降低劳动强度、提升民航的自动化水平等方面都有着非常重要的现实意义。

收稿日期: 2020-01-14

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51707195); 中央高校基本科研业务费专项基金 A 类(3122016A009)

作者简介: 张长勇(1978—), 男, 博士, 中国民航大学副教授, 主要研究方向为智能电器与机场自动化。

许多学者针对不同的研究背景对装载优化问题进行研究,并提出了一系列有建设性的算法。国内方面,张钧等^[1]以装箱理论研究为主,提出了一种混合遗传模拟退火算法,提高了箱体的填充率。李娜等^[2]以海运集装箱配载为研究背景,建立双目标整数规划模型,并提出了基于非支配排序遗传算法的求解方法。雷定猷等^[3]以铁路货运配载为研究背景,针对不同尺寸、密度的矩形货物平衡装载问题,提出了一种双层混合局域搜索算法。闫肃等^[4]以武器维修材料为研究对象,提出了应用于装箱问题的分层启发式算法。

国外方面,MOHANTY 等^[5]提出使用连续性策略来解决单一类型集装箱的多箱装载问题。Toffolo 等^[6]以集装箱利用率为优化目标,提出了一种多阶段的启发式分解算法。Pisinger D 等^[7-12]以班轮运输为研究背景,对搜索算法进行设计与优化。Menghani^[13]考虑了多种约束条件,并对遗传算法进行改进,以寻找全局最优解。另外 Paquay、Jamrus 和 Araya 等^[14-16]学者也提出了应用于装箱问题中的算法。

通过梳理文献可以发现,对于装箱问题的研究主要集中在离线、单箱装载问题。对于多箱装载优化问题,尤其是装载顺序约束条件下的多箱装载问题研究较少,因此针对航空运输背景下货物的多箱装载问题,在考虑货物装箱的及时性和顺序的前提下,利用含预分配策略的极点装载法进行布局优化,并通过某机场物流公司的真实货物数据,验证算法的工程实用性。

1 问题描述

相较于铁路、水路货物运输,航空货物运输有着独有的特点。例如:航空货物体积、材质差异大,异构程度强。针对强异构航空货物的装载优化问题,可定义为:有大量质量不等、形状各异的航空货物及多个航空货运 AMA 集装箱,求其装载布局方案,在满足以下约束的条件下,使用集装箱数量最少。

考虑以下约束。

1) 装载顺序约束。考虑货物装箱的顺序性,即货物必须随到随装,不能缓存,以适应航空货物的实时装箱。

2) 体积约束。已装载货物的总体积不超过集装箱本身的最大容积。

3) 重量约束。已装载货物的总重量不超过集装箱的最大承载能力。

4) 稳定性约束。禁止被装载的货物悬空,即每个被装载的货物必须得到集装箱底部或者其他货物的支撑。

5) 正交放置约束。在放置过程中要求货物是正交放置的,即货物的边缘与集装箱的边缘平行或垂

直,货物与货物的边缘也是平行或垂直的。

6) 重心约束。集装箱装载的货物合重心不超过其几何中心。

2 数学模型

2.1 模型假设

由于航空运输背景下装箱问题的复杂性,做假设如下所述。

- 1) 货物、集装箱的形状均为长方体。
- 2) 货物密度均匀,重心为其几何中心。
- 3) 可忽略货物由挤压产生的微小形变。
- 4) 货物到达同一目的地。

2.2 模型建立

以 AMA 集装箱的底面为 xy 平面,垂直底面向上方向为 z 轴建立坐标系。设 n 为待装货物的总数量, N 为航空集装箱总数量; w_j, h_j, d_j, m_j 为第 j 个货物的宽、高、长、质量; W, H, D, M 为航空集装箱的宽、高、长、最大承重能力; (x_{lj}, y_{lj}, z_{lj}) 为货物 j 在集装箱内部左后下角坐标; (x_{rj}, y_{rj}, z_{rj}) 为货物 j 在集装箱内部右前上角坐标; g_i 为第 i 个集装箱内垛型重心高度; P_i 和 Q_i 为 0—1 变量。且有:

$$P_i = \begin{cases} 1 & \text{(第 } i \text{ 个货物被装载)} \\ 0 & \text{(第 } i \text{ 个货物未被装载)} \end{cases},$$

$$Q_i = \begin{cases} 1 & \text{(第 } i \text{ 个集装箱被使用)} \\ 0 & \text{(第 } i \text{ 个集装箱未被使用)} \end{cases}$$

据此,建立航空货物装载优化的数学模型如下所述。

目标函数为集装箱所使用的数量最少:

$$\min \sum_{i=1}^N Q_i \quad (1)$$

所有货物都必须装载到集装箱内,即货物数量约束:

$$\sum_{i=1}^n P_i = n \quad (2)$$

货物总体积约束:

$$\sum_{j \in i} w_j \times h_j \times d_j \leq W \times H \times D, \forall i \in \{i | Q_i = 1, i = 1, 2, \dots, N\} \quad (3)$$

货物总重量约束:

$$\sum_{j \in i} m_j \leq M, \forall i \in \{i | Q_i = 1, i = 1, 2, \dots, N\} \quad (4)$$

货物装载三维尺寸约束:

$$\begin{cases} 0 \leq x_{lj} + w_j \leq D \\ 0 \leq y_{lj} + h_j \leq W \\ 0 \leq z_{lj} + d_j \leq H \end{cases} \quad (5)$$

集装箱装满货物后的重心范围约束:

$$g_i \leq \frac{1}{2} H \quad (6)$$

3 算法设计

针对航空货物的多箱装载问题，提出基于 K-means 的数据聚类预处理算法对货物进行预处理，将聚类簇特性相同的货物分配到同一个集装箱。再利用极点装载法得到各集装箱的布局方案。算法流程见图 1。其中，所需集装箱的最少数量为：

$$N_c = \left\lceil \frac{\sum_{i=1}^n w_i h_i d_i}{WHD} \right\rceil$$

(7)

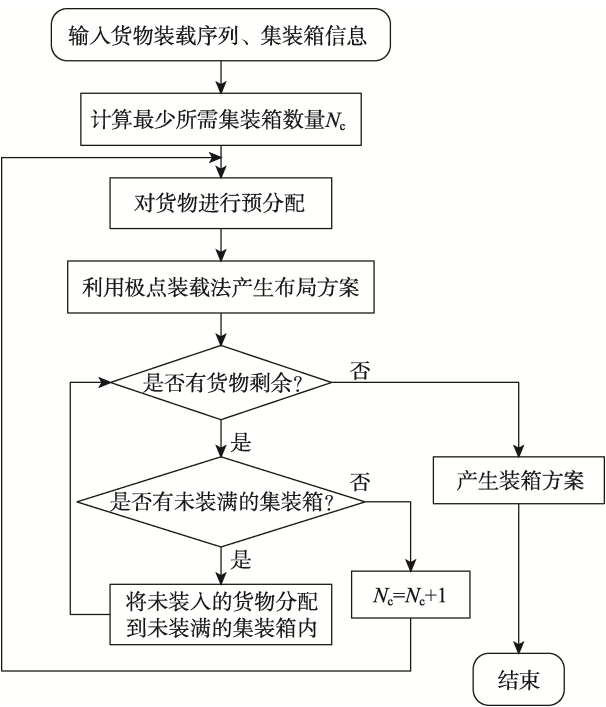


图 1 算法流程
Fig.1 Algorithm flow

3.1 基于 K-means 算法的货物预分配

利用 K-means 算法对货物进行预分配，将一组强异构货物数据拆成多组弱异构数据。聚类工作主要围绕体积、易碎性 2 项进行。体积聚类后有利于满足空间约束，易碎性聚类后有利于保证货物运输的安全性。将聚类簇特性相同的货物分配到同一个集装箱，以优化布局效果，提高集装箱的利用率。考虑到实际货物中易碎性货物的比例较少，故将所有易碎性货物装载到一个集装箱。在有货物剩余且有未装满的集装箱时，将未装入的货物根据聚类簇特性中易碎性相似的原则分配到集装箱中。

3.2 基于极点装载法的货物装载

这里借鉴文献提出的极点法^[17]（Extreme Points, Eps）来完成货物装载。为找到每个货物的最佳放置点，设定多条规则并赋予权重，改变了文献[17]中仅通过轴优先级对极点进行排序的策略。规则及其权重

设定见表 1，规则 1 使货物按照坐标轴优先级进行有序放置；规则 2 保证不同货物的顶面在同一平面上，为未装载的货物提供更大的装载空间；规则 3 能提高货物底面被支撑的比例，使得货物码放过程更加稳定；规则 4 与 5 使得货物尽可能地先放置水平面，再沿 z 轴放置。根据它们对货物装载效果的影响大小，分别赋予 0.5，0.2，0.1，0.1，0.1 的权重。为防止过拟合，加入正则项 0.29α 以保证规则的合理性。表格规则可以简化为：

$$k = 0.5 \frac{m_1}{M_0} + 0.2 \frac{m_2}{M_0} + 0.1 \frac{m_3}{M_0} + 0.1 \frac{m_4}{M_0} + 0.1 \frac{m_5}{M_0} + 0.29\alpha$$

(8)

将式（8）作为适应度函数，染色体选择采用轮盘赌方法，交叉、变异分别采用单点交叉及基本位变异策略。采用遗传算法求其最优值，并将其对应的 corner-point 作为放置点对当前货物进行码放。其中： M_0 为 corner-point 总数量； m_i 为按该规则 i 在总量中的排序次数； k 为每个 corner-point 的优化值；每进行一次遗传算法，所有 k 重新进行一次计算并排列。每完成一次货物装入，按照所设定规则对极点序列进行一次更新，同时记录剩余未装载货物。以此方式持续下去，直至全部货物装入。极点装载法的流程见图 2。

4 实例验证

文中将基于 K-means 的极点装载法以 C 语言编程实现，采用某机场物流公司的真实货物数据验证算法的布局效果。由于考虑了货物的易碎性问题，而货物中并无此项数据，故货物的易碎性由随机数产生。数值越大表示货物承重能力越好，反之则表示货物承重能力越差。其中，遗传算法参数取值分别为：种群规模 50，交叉概率 0.6，变异概率 0.1，终止条件为连续运行 100 代。待装载集装箱为航空货运 AMA 集装箱，其尺寸为 318 cm×244 cm×244 cm。

表 1 规则及其权重设定
Tab.1 Rules and weight settings

次序 i	规则	原始值 t	权重 f
1	轴优先级 $y > x > z$ (坐标值不减小)	$\frac{m_1}{M_0}$	0.5
2	当前货物与角点左侧货物 等高度	$\frac{m_2}{M_0}$	0.2
3	当前货物底面积不超过 支撑面底面积	$\frac{m_3}{M_0}$	0.1
4	包络线面积小	$\frac{m_4}{M_0}$	0.1
5	剩余空间容积小	$\frac{m_5}{M_0}$	0.1

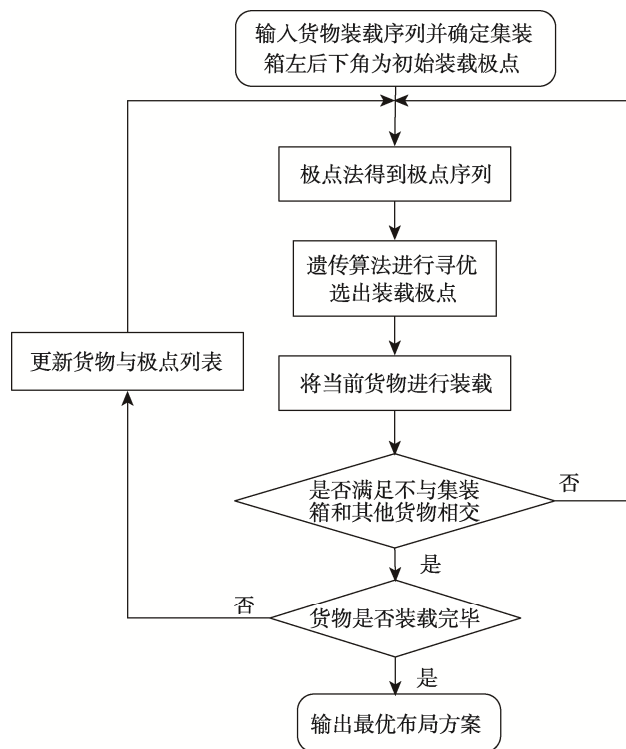


图 2 极点装载法
Fig.2 Eps loading method

实验中, 首先利用聚类算法将货物数据划分为 4 类, 聚类簇特性分为大体积易碎、大体积非易碎、小体积易碎、小体积非易碎, 相对应的聚类结果见图 3, 横、纵坐标轴为归一化处理后体积、易碎性值。由图 3 可见航空货物的体积相差较大, 异构程度强, 在考虑装载顺序约束的条件下对货物进行直接装箱, 可能会造成货物布局不合理、集装箱体积利用率低等情况。

经过 K-means 对货物进行预处理后, 将每簇中的货物利用极点装载法装载到各个集装箱。航空货物信息及装载情况见表 2。限于篇幅, 表 2 仅列出了部分航空货物数据及其布局位置。

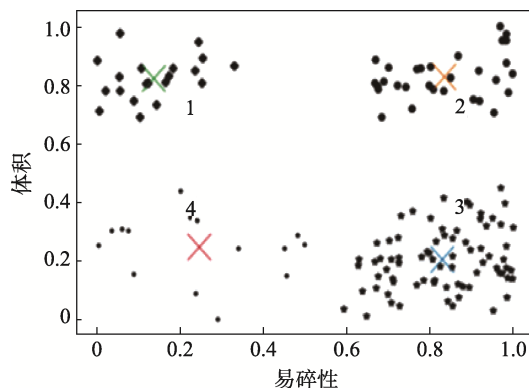


图 3 聚类结果
Fig.3 Clustering results

文中比较了 2 种分配方案, 即在连续性策略、预分配策略下均采用极点装载法产生布局方案。为直观评价算法的布局效果, 采用 Matlab 编程实现布局方案的可视化。如图 4 所示, 分别为在连续性策略及预分配策略下的航空货物布局情况。其中, 在预分配策略下, 集装箱 1 装载的是小体积、非易碎货物, 集装箱 2 装载的是大体积、非易碎货物, 集装箱 3 装载的是易碎性货物。从图 4 中可以直观地看出, 含预分配策略的极点装载法由于利用 K-means 算法降低货物的异构性, 使货物分配更合理, 货物之间的支撑面积更大, 稳定性更好。在货物装载过程中, 将易碎性货物单独成箱, 保证了货物运输中的安全性。

由 2 种分配策略得到的集装箱利用率见表 3。由表 3 可知, 含预分配策略的极点装载法得到的总体方差较小, 集装箱利用率更加均衡。因为货物装载顺序一定, 使用连续性策略的装载方案会出现小的货物不能合理利用剩余空间位置的情况, 导致最后集装箱的利用率偏低, 集装箱 3 的体积利用率只有 76.76%。使用预分配策略的装载方案将聚类簇特性相同的货物分配到同一个集装箱, 有效避免了个别集装箱体积利用率偏低的情况。

表 2 航空货物数据及布局位置
Tab.2 Air cargo data and layout location

货号	宽×高×长/cm	质量/kg	易碎性	放置位置坐标	所装集装箱
1	77×96×58	63.5	0.2123	(0,63,0)	3
2	69×33×51	21.6	0.6542	(78,0,50)	1
3	88×89×56	31.7	0.3487	(211,45,149)	3
4	13×25×50	11.5	0.8814	(218,115,198)	2
...	...	...	...	...	...
160	97×45×41	32.6	0.7568	(253,57,100)	1

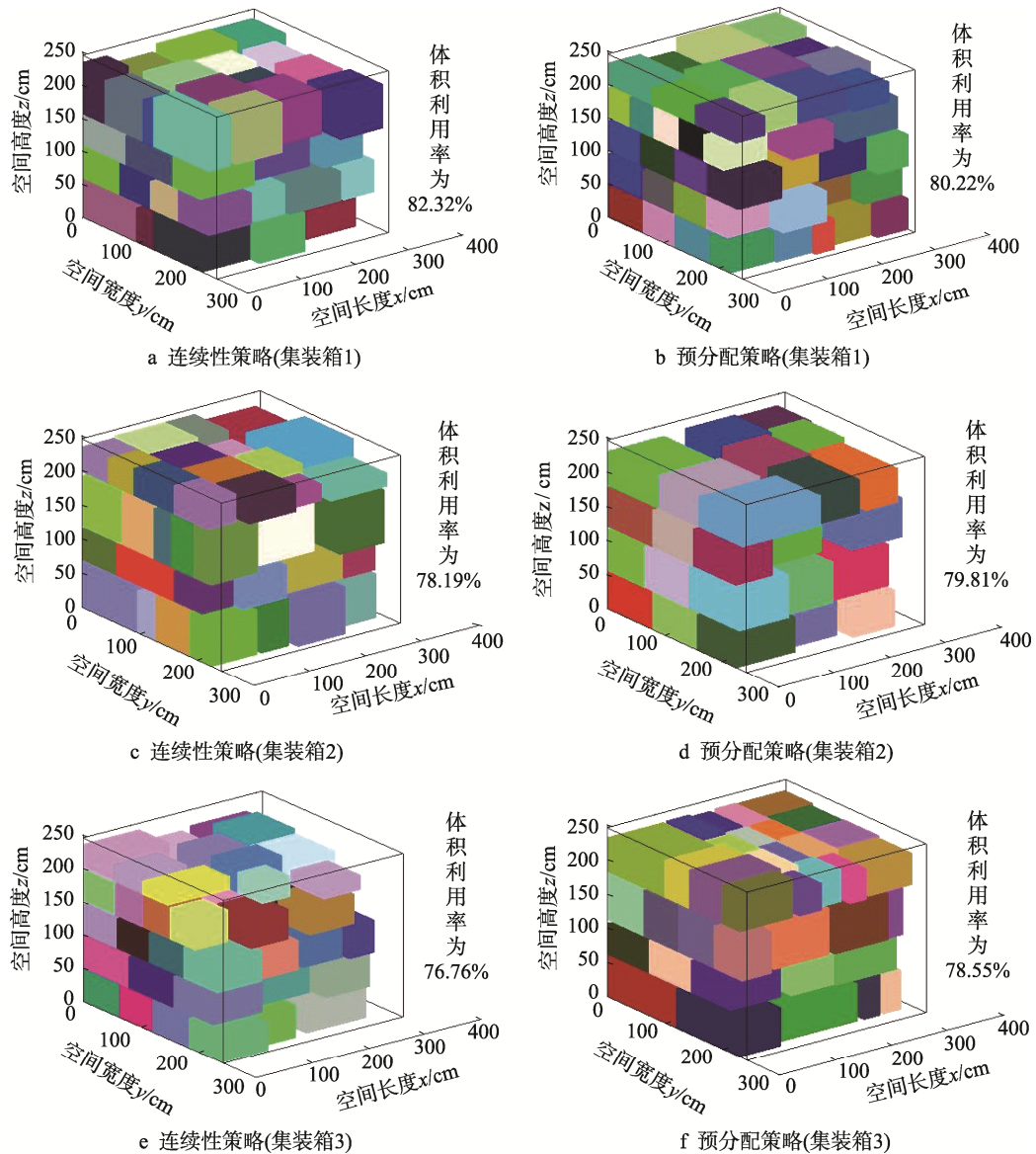


图 4 货物布局效果
Fig.4 Cargo layout effect

表 3 2 种分配策略集装箱利用率比较
Tab.3 Comparison of container utilization of two distribution strategies

分配策略	第 i 个集装箱的利用率/%			平均 利用率/%	总体方差
	1	2	3		
连续性策略	82.32	78.19	76.76	79.09	5.56
预分配策略	80.22	79.81	78.55	79.53	0.51

5 结语

文中对航空运输背景下的多箱装载问题进行综述和分析,提出了含预分配策略的极点装载法,利用 K-means 算法从体积、易碎性 2 方面对货物进行预处理,再通过极点装载法对货物进行优化布局。在考虑货物装箱的及时性和顺序的条件下,保证强异构货物

的合理装箱,满足了某些流水线上航空货物装箱的实时性,有较强的实际应用价值。下一步可以考虑更多现实约束条件下的航空货物装载问题。

参考文献:

[1] 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 Boxing Problem[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(14): 32—39.
- [2] 李娜, 边展, 徐奇, 等. 集卡提箱预约配额与场桥配置的联合优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(6): 206—214.
LI Na, BIAN Zhan, XU Qi, et al. Joint Optimization of Container Card Booking Quota and Field Bridge Configuration[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(6): 206—214.
- [3] 雷定猷, 朱向. 一种带平衡约束的三维装载问题双层混合局域搜索算法[J]. 中南大学学报, 2018, 25(4): 903—918.
LEI Ding-you, ZHU Xiang. Bi-level Hybrid Local Search Algorithm for 3D Loading Problems with Balance Constraints[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(4): 903—918.
- [4] 闫肃, 闫鹏程, 孙江生, 等. 武器维修器材分层装箱算法研究[J]. 包装工程, 2012, 33(9): 81—84.
YAN Su, YAN Peng-cheng, SUN Jiang-sheng, et al. Research of Layer Packaging Arithmetic for Weapon Servicing Equipment[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(9): 81—84.
- [5] MOHANTY B B, MATHURK, IVANCIC N J. Value Considerations in Three-dimensional Packing a Heuristic Procedure Using the Fractional Knapsack Problem[J]. Eur J Operational Res, 1994, 74(1): 143—151.
- [6] TOFFLO T A M, ESPRIT E, WAUTERS T, et al. A Two-dimensional Heuristic Decomposition Approach to a Three-dimensional Multiple Container Loading Problem[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 257(2): 526—538.
- [7] PISINGER D, ROPKE S. Large Neighborhood Search[M]. Berlin: Cham Springer, 2019: 99—127.
- [8] BROUER B D, KARSTEN C V, PISINGER D. Optimization in Liner Shipping[J]. Annals of Operations Research, 2018, 271(1): 205—236.
- [9] TRIVELLA A, PISINGER D. Bin-packing Problems with Load Balancing and Stability Constraints[C]// Inform Transportation and Logistics Society, 2017: 1—5.
- [10] TRIVELLA A, PISINGER D. The Load-balanced Multi-dimensional Bin-packing Problem[J]. Computers & Operations Research, 2016, 74(2): 152—164.
- [11] TRIVELLA A, PISINGER D. Integrating Load-balancing into Multi-dimensional Bin-packing Problems[C]// 28th European Conference on Operational Research, 2016: 1—23.
- [12] PISINGER D. Heuristics for the Container Loading Problem[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 141(2): 382—392.
- [13] MENGHANI D, GUHA A. Packing Boxes into Multiple Containers Using Genetic Algorithm[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series C, 2016, 97(3): 441—450.
- [14] PAQUAY C, SCHYNS M, LIMBOURG S. A Mixed Integer Programming Formulation for the Three-dimensional Bin Packing Problem Deriving from an Air Cargo Application[J]. International Transactions in Operational Research, 2016, 23(1/2): 187—213.
- [15] JAMRUS T, CHIEN C. Extended Priority-based Hybrid Genetic Algorithm for the Less-than-container Loading Problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 96(1): 227—236.
- [16] ARAYA I, RIFFM C. A Beam Search Approach to the Container Loading Problem[J]. Computers & Operations Research, 2014, 43(3): 100—107.
- [17] CRAINIC T G, PERBOLI G, TAGEI R. Extreme Point-based Heuristics for Three-dimensional Bin Packing[J]. Inform Journal on Computing, 2008, 20(3): 368—384.