

基于 K-means 与关键点的组合行李码放算法

张长勇, 吴智博

(中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300)

摘要: **目的** 为了解决当前航空行李码放流程中存在的劳动密集、效率低下的问题, 开展行李码放算法研究。**方法** 搭建含有重量、体积和货舱空间约束的航空行李码放数学模型, 采用聚类、排序、关键点构建策略, 设计一种 K-means 聚类与“关键点”思想相结合的组合式算法。**结果** 采用 100 件真实旅客行李数据进行了实验, 结果表明算法给出的布局方案规划合理, 垛型左右两侧质量之差低于 1%, 满足了货舱的空间约束与载重平衡约束。**结论** 算法具备在复杂环境下得到优良布局方案的能力, K-means 聚类的引入也将机器学习领域的聚类算法引入装箱问题, 架起了机器学习算法与传统装箱算法的桥梁, 为今后装箱问题算法的设计提供了一条新思路。

关键词: 航空行李; 三维装箱; K-means 聚类; 组合算法

中图分类号: TP301.6; TP181 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)09-0090-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.09.015

Combined Luggage Stacking Algorithm Based on K-means and Key Points

ZHANG Chang-yong, WU Zhi-bo

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

ABSTRACT: The paper aims to study the luggage stacking algorithm to solve the labor-intensive and inefficient problems in the current flight luggage stacking process for check-in. In this paper, a mathematical model of flight luggage with weight, volume and cargo compartment constraints was built. By using clustering, ranking and key point construction strategy, a new algorithm combining K-means clustering and "key point" idea was designed. Experiments on 100 pieces of real passenger baggage showed that the layout plan given by the algorithm was reasonable. The difference of mass between the left and right sides of the stack was less than 1%, which satisfied the space constraint and load balancing constraint of the cargo compartment. The algorithm has the ability to obtain excellent layout scheme in complex environment. The introduction of K-means clustering algorithm establishes a bridge for machine learning algorithm and traditional packing problems, and provides a new idea for design of bin-packing problem algorithm in the future.

KEY WORDS: flight luggage; three-dimensional container loading; K-means clustering; combinational algorithm

航空行李运输是客运航线必不可少的组成部分, 也是装卸人员、乘机旅客以及航空公司各方共同参与的重要环节。飞机相比火车、汽车、轮船等交通工具, 既有类似之处, 又有其特殊性, 例如: 不确定因素多、载重配平要求高、货舱空间不规则等。

多年来, 我国航空行李装卸一直以人工作业为主, 这种传统的作业模式已经暴露了很多问题。例如: 装卸效率低、劳动强度高、空间浪费大。以装卸机器人代替传统人力劳动是今后必然趋势, 而其中核心问题——航空运输背景下行李码放规划问题在国内尚

收稿日期: 2019-01-02

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51707195); 天津市自然科学基金重点支持项目(12JCZDJC34200)

作者简介: 张长勇(1978—), 男, 博士, 中国民航大学副教授, 主要研究方向为机场智能与自动化技术、智能控制技术。

属空白,它的解决使机器人具备了在货舱复杂环境中得到优良布局方案的能力,能有效降低货舱空间浪费、减少作业人员数量,从而提高航空公司运输收益。

航空行李码放的理论实质是三维装箱问题,对于此类 NP-hard 问题,“关键点法”是近年来应用较为广泛的求解思想,大量组合算法都是以此为基础设计得到的。“关键点”思想由 Crainic T G 等^[1]在 2008 年首次提出。随后,Crainic T G 等^[2]又对算法进行了改良,提出了含有两阶禁忌搜索的布局优化策略。游伟等^[3]将改进的遗传算法与“关键点”构造法结合,克服了“关键点”算法在寻找全局最优方面的劣势。张莹等^[4]、朱向等^[5]、Sridhar R 等^[6]、Mahvash B 等^[7]分别将各自的布局策略与“关键点”思想结合,在不同的约束条件下均得到了较高的装载空间利用率。

上述学者虽然在装箱问题的算法设计方面做了大量探索,但由于其主要目的为学术研究,并未考虑实际的工程环境,因此,也有部分学者从应用的角度出发,针对不同的背景设计了相应的算法,算法融入了某些实际约束。例如,Kaabi J 等^[8]针对物流中的打包问题开展了研究,算法侧重于优化箱子的数量与平衡每个箱子内货物的重量;Mantovani S 等^[9]、Zhou K^[10]以铁路运输为背景,在货物装载布局方面开展了研究;郑斐峰等^[11]采用遗传算法,优化了港口班轮运输中集装箱的配载方案;闫肃等^[12]以武器维修器材为研究对象,提出了一种分层启发式装箱算法;郑琰等^[13]对货运飞机装载时某些非标准货物的布局位置开展研究,提出了“砌墙”式建构算法与一种四规则深度优先搜索法结合的启发式搜索算法。

通过对文献的梳理不难看出,针对装箱问题的研究大多集中于货物运输。在航空运输背景下,多数学者的关注点集中于货运飞机内部的布局规划问题^[13—16],在客机旅客行李处理方面的研究并不多见,因此,文中构建规划模型,提出一种将 K-means 聚类算法与“关键点”思想结合的航空行李布局算法,并通过实际旅客行李数据验证了算法的有效性和实用性。

1 问题描述

虽然文中的出发点是为窄体客机的旅客交运行李提供码放布局方案,但是目前现役窄体客机种类较多,货舱规格也不尽相同,很难构建一组通用的模型来配合所有型号的客机。文中针对目前国内现役客运飞机中的主力机型——A319 开展研究,该型客机货舱的外部结构见图 1,前货舱的纵向截面、舱门参数见图 2a—b。

可以看出,负责装卸旅客行李的货舱均处于飞机腹部,底面中心部分为平底,左右部分为对称斜面,形状较为特殊。特别是后货舱,处于飞机后部垂直尾翼和水平尾翼附近,空间更为复杂,并且区域功能较

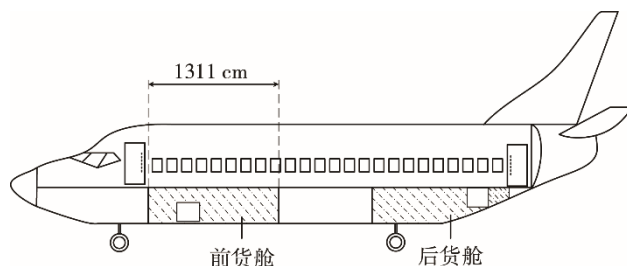
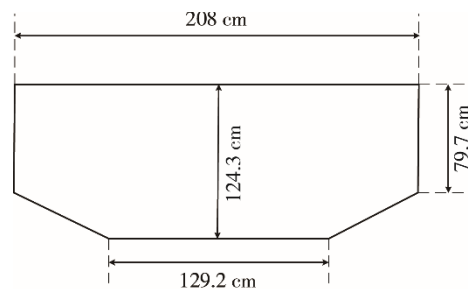
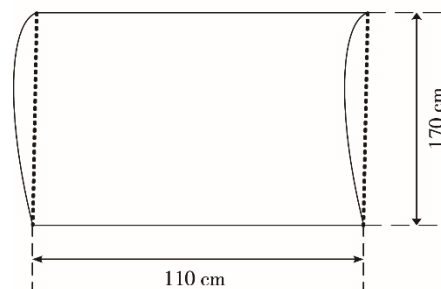


图 1 A319 客机货舱

Fig.1 Cargo hold of A319 airliner



a 纵向截面



b 前货舱舱门

图 2 A319 客机前货舱参数

Fig.2 Parameters of fore hold of A319 airliner

为固定,可以用来运输特殊货物如海鲜、活体动物等。为不失一般性,文中的模型搭建、算法设计、实验验证将以 A319 前货舱为对象。

考虑到航空行李运输货舱空间不规则,旅客行李体积、质量、材质差异大,旅客对于运输损失的容忍度低等独有的特点。针对强异构旅客行李的布局问题,可以定义为:有大量形状各异、质量不等的旅客行李及固定尺寸的飞机货舱,求其装载方案,在装载所有行李的前提下,使行李的密度最高,货舱失衡最小。通过经验分析与实地调研,确定了以下约束条件如下所述。

- 1) 货舱体积约束。单一或全部行李的体积不能大于货舱的最大装载容积。
- 2) 货舱质量约束。单一或全部行李的质量不能大于货舱的最大承载能力。
- 3) 货舱空间约束。单一行李的尺寸不能超过货舱门的尺寸,行李垛型的长、宽、高不能超出货舱的尺寸。

由于现实问题的复杂性,所以有必要将问题进行简化,给出假设条件如下所述。

1)行李形状为长方体。实际航空运输中,旅客行李以各尺寸拉杆箱、硬纸板箱为主,并且,许多复杂的形状也可拆分为多个小长方体。

2)行李密度均匀,重心位于几何中心。

3)行李承重性良好,能满足多层叠装,且由挤压产生的微小形变可忽略。

4)货舱左下方、右下方均为近似为平滑斜面,且前、后斜度一致。

2 数学模型

考虑到飞机货舱空间的特殊性和复杂性,为便于计算,首先将货舱垂直翻转,然后以底面为 xz 平面,垂直底面向上方向为 y 轴,左、后、下角为坐标原点建立空间直角坐标系。符号说明: n 为行李的总数量; w_j, h_j, d_j, m_j 为第 j 号行李的宽、高、深、质量; $W_{\min}, W_{\max}, H, D, M$ 分别为货舱的宽(最小)、宽(最大)、高、深、最大承重能力; W_d, H_d 分别为货舱门的宽、高; (x_{lj}, y_{lj}, z_{lj}) 为第 j 号待完成码放行李的左、后、下角坐标, $j=1, 2, \dots, n$; (x_{rj}, y_{rj}, z_{rj}) 为第 j 号待完成码放行李的右、前、上角坐标, $j=1, 2, \dots, n$; $(x_{r\max}, y_{r\max}, z_{r\max})$ 为行李垛型中右、前、上角坐标的最大值; m_l, m_r 为行李垛型左、右侧总质量; P_j 为0/1变量,第 j 号行李是否被装载,若已装载则 $P_j=1$;否则 $P_j=0$ 。

据此,建立航空行李码放布局优化数学模型:

$$\sum_{j=1}^n p_j = n \quad (1)$$

$$F_p = \frac{\sum_{j=1}^n w_j \cdot h_j \cdot d_j}{0.5 \cdot H (W_{\min} + W_{\max}) z_{\max}} \quad (2)$$

$$F_b = \frac{m_r - m_l}{m_l} \times 100\% \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j \cdot h_j \cdot d_j \leq \frac{(W_{\min} + W_{\max}) HD}{2} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n m_j \leq M \quad (5)$$

$$w_j < W_d, h_j < H_d \quad (6)$$

$$x_{rj} < W_{\max}, y_{rj} < H, z_{rj} < D \quad (7)$$

$$y_{lj} \leq 1.13x_{lj} + 79.7 \quad x_{lj} \in [0, 39.4] \quad (8)$$

$$y_{rj} \leq 124.3 \quad x_{rj} \in (39.4, 168.6)$$

$$y_{lj} \leq -1.13x_{lj} + 314.74 \quad x_{lj} \in [168.6, 208]$$

其中:式(1)为第1个目标函数,当某件行李已被装载后,指示变量 P 置1,当全部 n 件行李被装载后,指示变量 P 之和将等于 n ,所以,式(1)表示算法必须完成装载全部行李的装载;式(2)为第2个目标函数,分子为全部行李的体积之和,分母为当前垛型所占用空间的估计值,即货舱的截面积与垛型最

大深度的乘积,分数的值表示了航空行李布局密度的估计值,为节约货舱空间,算法应将其最大化;式(3)为第3个目标函数,表示以货舱底面中心线为界,垛型右侧与左侧质量之差占左侧垛型质量的百分比,为确保飞机的平衡,算法应将其最小化;式(4—5)表示飞机货舱内装载航空行李的总体积、总质量小于货舱的装载空间、最大承重能力;式(6)表示每件行李的尺寸必须小于货舱舱门;式(7—8)表示码放完成后,行李垛型的尺寸必须小于装载空间。

3 算法设计

针对上述航空行李码放问题的布局优化模型,考虑到飞机货舱的特殊空间约束、平衡约束和航空行李异构性强的特点,采用K-means与“关键点法”组合的形式,提出了一种组合启发式算法,分为K-means数据预处理和“关键点法”布局2个阶段。

第1阶段为基于K-means的数据聚类预处理算法,主要作用是将一组强异构行李数据拆分为多组弱异构数据,从而降低码放算法的计算难度,优化布局效果,提升算法整体的解算速度。因为旅客行李的差异性主要集中在质量、体积2个方面,并且,质量聚类后有助于满足平衡目标,体积聚类后更有利于满足空间约束。所以,聚类工作主要围绕质量、体积2项进行。这一阶段由以下5个步骤组成。

1)数据检查。由于旅客行李种类繁多、形状各异,而货舱行李的装载应当满足货舱门和货舱尺寸、承重约束,因此,第1步首先对单件行李的尺寸与全部行李的总质量、总体积进行检查,确保单件行李尺寸可以放入货舱,全部行李的质量、体积不超过货舱的承载能力、空间容积。

2)数据准备。质量、体积数据的量纲不同,聚类没有意义,因此,有必要将质量、体积数据提取后进行离差标准化,去除量纲后作为聚类准则对行李数据进行聚类。

3)首次分配。随机确定 k 个初始点作为质心,计算数据集中每个点到 k 个质心的距离,并将该点分配至距离最近的质心所在的簇。 k 值的确定按照旅客交运行李的情况与实际需求,一般为4类,即大体积大质量、大体积小质量、小体积大质量、小体积小质量。

4)迭代分配。更新质心的坐标为该簇所有点的平均值,并重复计算每个点到质心的距离、更新数据点的分配结果,当连续 m 次分配结果不发生改变时,视为聚类完成。 m 值的确定按照实际需求,一般为3~6。

5)数据整理。针对即将进行的布局算法,对聚类完成的数据进行整理,首先按照大质量与小质量相

互穿插的规则将各类排序,再将每类内部的行李按体积从高到低排序。

第 2 阶段为基于“关键点”思想的布局算法,主要作用是在满足飞机货舱的特殊约束的前提下,按一定规则将全部行李逐个放入货舱。该阶段算法分为“关键点”生成、旅客行李码放 2 个子算法。

所谓“关键点”,即为可供下一件行李的左、后、下角放置的点。首个“关键点”为坐标原点(0, 0, 0),随着行李的不断码放,“关键点”生成规则定义为垛型中两件行李的横、纵交叉点,二维、三维状态下的“关键点”见图 3—4。

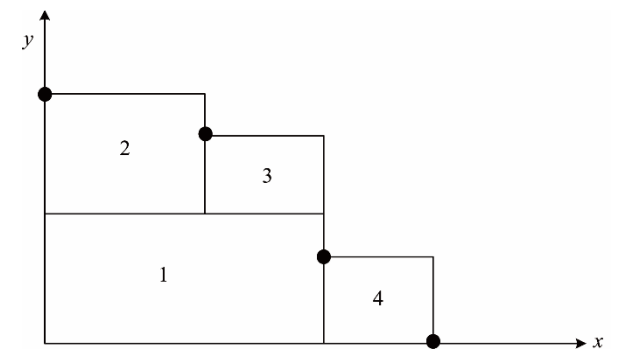


图 3 二维“关键点”
Fig.3 Two-dimensional "key points"

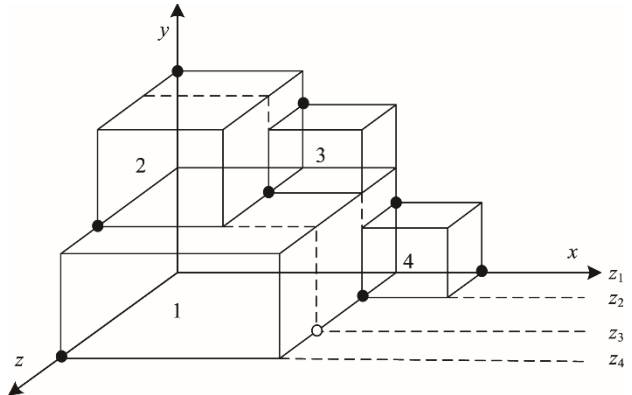


图 4 三维“关键点”
Fig.4 Three-dimensional "key points"

可以发现,若欲求得三维状态下的所有“关键点”,只需将问题降维,按照 z 坐标的不同将垛型划分为 z_1, z_2, z_3 等多个平面,再逐一计算,因此,这一步的关键的是构建出二维状态下求取“关键点”的算法。另外,这样计算可能会产生一些错误的“关键点”,这类点仅在二维时可用,如图 4 中的空心圆圈。它们的特点是总会有一个“关键点”与之只有 z 坐标不相等,出现这种情况时,应当留下 z 值最小的并将其他点删去。

1) 二维“关键点”生成算法。算法共分 2 个步骤,第 1 步为确定包含“关键点”的行李,第 2 步为确定“关键点”,算法伪代码如下所述。

Begin

```
s=0, k=0
for(j=1; j<=n; j++)
    if( $x_j+w_j>s$ )
        k=k+1
         $e_k=j$  //  $e_k$  为含“关键点”的行李
         $s=x_j+w_j$ 
    end if
end for
 $P_2=\{(0,y_{e_1}+h_{e_1})\}$  //  $P_2$  为二维状态下的“关键点”集合
for(j=2;j<=k;j++)
     $P_2= P_2 \cup \{(x_{e_{j-1}}+w_{e_{j-1}},y_{e_j}+h_{e_j})\}$ 
end for
 $P_2= P_2 \cup \{(x_{e_m}+w_{e_m},0)\}$ 
End
```

2) 三维“关键点”生成与行李装填。基于步骤 1) 的算法,三维状态下只需确定垂直面 z 的个数并在每个 z 内运行 1),生成三维“关键点”。由于已有了第 1 阶段的聚类 and 排序过程,为降低算法的复杂度,提高运行效率,该步骤行李与“关键点”遵循首个匹配原则。自第 1 个“关键点”开始对所有待码放行李进行搜索,将满足货舱尺寸约束的首个行李与当前“关键点”配对,同时更新“关键点”。当所有行李都与“关键点”配对后,整个航空行李码放算法结束。

4 实验验证

为测试上述组合启发式算法的性能,考虑到 A319 型飞机客舱的典型布局为 124 人,每趟航班旅客的托运行李约为 100 件,从某机场自助行李托运设备中随机抽取 100 组国内旅客行李数据,对算法的布局效果进行验证,实验数据见表 1。

表 1 航空行李实验数据
Tab.1 Test data of f light luggage

编号	图像	宽/cm	高/cm	深/cm	质量/kg
1		72	49	35	28.92
2		69	44	37	26.30
3		66	46	31	20.34
...	...	...	...	...	...
98		38	29	22	11.47
99		35	30	25	11.74
100		36	25	20	9.92

将上述模型和布局算法以 C 语言编程实现,可快速制定出针对 A319 飞机货舱的旅客行李的布局方案。以货舱纵深 100 cm 为单位,各单位空间内的行李编号见表 2,行李垛型相关指标见表 3。利用 Matlab 将方案可视化,布局排样见图 5。

从表 2、表 3 与图 5 中可以发现,旅客行李垛型满足货舱空间约束,形状较为规整,体积较大的货物位于货舱里侧,且同等质量、体积的货物布局集中,便于行李装卸。以货舱中心线为界,左、右半部分的

垛型深度相差较大,这也是聚类算法的必然结果和旅客行李特性的真实反映——旅客行李中体积、质量都大或都小的数量并不多,算法为了飞机的载重平衡而牺牲了左、右两侧的垛型深度的平齐。相对于旅客行李总量,飞机货舱空间较为富裕,因此对填充率的要求不高,但布局结果的垛型密度达到 73.4%,在文中强异构测试数据、空间约束复杂的条件下,数据是令人满意的,这也意味着为货舱留下了 71.8%的剩余空间装载其它货物,为航空公司创造更多的收益。

表 2 行李布局方案
Tab.2 Luggage layout scheme

序号	纵深范围 d/cm	行李编号
1	$0 \leq d < 100$	1,2,3,4,5,6,8,11,32,36,40,50,51,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,81,82,84,85,86,91,94,98
2	$100 \leq d < 200$	7,9,10,12,15,17,41,56,80,83,87,88,89,90,92
3	$200 \leq d < 300$	13,14,16,18,19,20,21,22,24,25,26,93,95,96,97,99,100
4	$300 \leq d < 400$	23,27,28,29,30,31,33,34,47,55
5	$400 \leq d < 500$	35,37,38,39,42,43,44,45,46,48,57,59,62,64,69
6	$500 \leq d < 600$	49,52,53,54,58,60,61,63,65,66,67,68

表 3 行李垛型指标
Tab.3 Index of luggage stack

左半部分 最大深度 D_{maxl}/cm	左半部分 总质量 m_l/kg	右半部分 最大深度 D_{maxr}/cm	右半部分 总质量 m_r/kg	垛型 密度/%	货舱可 再利用容积/%
541	773.86	200	767.79	73.40	71.80

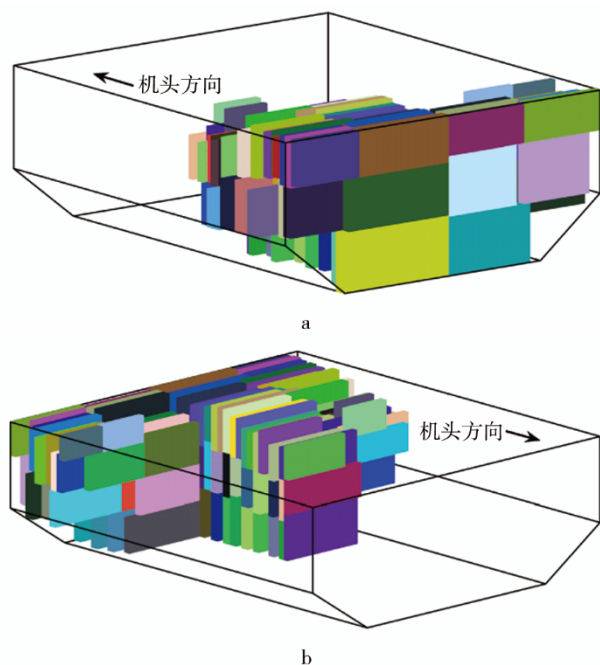


图 5 100 件行李布局排样
Fig.5 Layout of 100 pieces of luggage

5 结语

综合考虑了飞机货舱的特殊空间约束、航空行李

的较强异构性以及客机装载的平衡需求,在“关键点”布局思想的基础上拓展,提出了一种基于 K-means 的航空行李码放算法。通过真实旅客行李数据的实验,结果表明,算法给出的布局方案规划合理,满足航空行李运输约束条件,行李坐标计算正确,是一个优良的方案。另外,文中将机器学习领域的聚类算法引入装箱问题,架起了机器学习算法与传统装箱算法的桥梁,也为今后装箱问题算法的设计提供了一条新思路。在接下来的工作中,可以在对模型和算法继续优化的基础上推广至其他型号的客机,进一步提高实用价值。

参考文献:

- [1] CRAINIC T G, PERBOLI G, TADEI R. Extreme Point-based Heuristics for Three-dimensional Bin Packing[J]. *Inform Journal on Computing*, 2008, 20(3): 368—384.
 - [2] CRAINIC T G, PERBOLI G, TADEI R. TS2PACK: A Two-level Tabu Search for the Three-dimensional Bin Packing Problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 195(3): 744—760.
 - [3] 游伟, 雷定猷, 朱向. 三维装箱问题的偏随机密钥混合遗传算法[J]. *计算机工程与应用*, 2014, 50(22): 265—270.
- YOU Wei, LEI Ding-you, ZHU Xiang. Biased Random-

- key Hybrid Genetic Algorithm for Three-dimensional Loading Problem[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2014, 50(22): 265—270.
- [4] 张莹, 刘二超, 戚铭尧. 考虑支撑面约束的三维装箱问题快速求解方法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2014, 14(2): 192—198.
ZHANG Ying, LIU Er-chao, QI Ming-yao. Quick Algorithm for the Three-dimensional Bin Packing Problem with Support Surface Constraints[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2014, 14(2): 192—198.
- [5] 朱向, 雷定猷. 带平衡约束三维装箱问题的双层混合遗传算法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(2): 203—209.
ZHU Xiang, LEI Ding-you. Bi-level Hybrid Genetic Algorithm for Three-dimensional Container Loading Problem with Balancing Constrains[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 15(2): 203—209.
- [6] SRIDHAR R, CHANDRASEKARAN M, PAGE T. Multi Objective Optimization of Heterogeneous Bin Packing using Adaptive Genetic Approach[J]. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, 9(48): 1—9.
- [7] MAHVASH B, AWASTHI A, CHAUHAN S. A Column Generation-based Heuristic for the Three-dimensional Bin Packing Problem with Rotation[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2018, 69(1): 78—90.
- [8] KAABI J, HARRATH Y, BOUOUDINA H E, et al. Toward Smart Logistics: A New Algorithm for a Multi-objective 3D Bin Packing Problem[C]// *Smart Cities Symposium 2018*. IET, 2018: 1—5.
- [9] MANTOVANI S, MORGANTI G, UMANG N, et al. The Load Planning Problem for Double-stack Inter-modal Trains[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 267(1): 107—119.
- [10] ZHOU K. The Pallet Loading Method of Single Category Cargo Based on Railway Containerized Transport[C]// *Proceedings of the 2018 10th International Conference on Computer and Automation Engineering*, ACM, 2018: 243—249.
- [11] 郑斐峰, 梅启煌, 刘明, 等. 基于遗传算法与贪婪策略的多港口集装箱配载研究[J]. *运筹与管理*, 2018, 27(5): 1—7.
ZHENG Fei-feng, MEI Qi-huang, LIU Ming, et al. Research on Genetic Algorithm and Greedy Method of Stowage Planning in Multiple Ports[J]. *Operations Research and Management Science*, 2018, 27(5): 1—7.
- [12] 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.
- [13] 郑琰, 李鹏. 求解非标准货物货机群装载问题的启发式搜索算法[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(23): 64—74.
ZHENG Yan, LI Peng. A Heuristic Algorithm for Solving the Cargo Aircrafts Group Loading Problem with Non-standard Goods[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(23): 64—74.
- [14] RAMOS A G, SILVA E, OLIVEIRA J F. A New Load Balance Methodology for Container Loading Problem in Road Transportation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 266(3): 1140—1152.
- [15] BRANDT F, NICKEL S. The Air Cargo Load Planning Problem-a Consolidated Problem Definition and Literature Review on Related Problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 275(2): 399—410.
- [16] LURKIN V, SCHYNS M. The Airline Container Loading Problem with Pickup and Delivery[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 244(3): 955—965.