

装备防护

基于启发式算法的单航空集装箱的装箱优化设计

陈丙成¹, 李艳华²

(1.中国南方航空股份有限公司上海分公司, 上海 201803; 2.北京交通大学, 北京 100044)

摘要: **目的** 为了解决当前航空业因航空集装箱上货物的组装编排均由人工完成, 尚无任何软件系统可以实现自动计算, 造成航空货运经济效益和时效性低下的问题, 开展航空集装箱 (ULD) 装箱算法研究。**方法** 应用先进的贪心算法与遗传算法相结合的启发式算法研究单个航空集装箱的装箱最优问题。**结果** 对单个航空集装箱 (ULD) 装箱进行了装箱模型构建和算法优化, 使得节省的航空集装箱空间得到全部利用, 实现最优装箱。**结论** 文中算法计算出的装载方案较人工计算更精确、更具稳定性, 且经济效益更高。后续还有望把这种算法转化为高度智能化的软件系统, 对航空货运自动化和 workflow 标准化具有一定的推动意义。

关键词: 启发式算法; 航空集装箱; 装箱优化; 优化

中图分类号: U619 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)17-0244-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.17.034

Optimal Design of Packing for Single Unit Load Device Based on Heuristic Algorithm

CHEN Bing-cheng¹, LI Yan-hua²

(1.China Southern Airlines Co., Ltd., Shanghai 201803, China; 2.Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the algorithm of unit load device (ULD) to solve the economic benefits and timeliness problems of air cargo in the aviation industry of China because the assembly and arrangement of the cargo on the air container is completed manually, and there is no software system to realize automatic calculation. In this paper, the heuristic algorithm was combined with the advanced greedy algorithm and genetic algorithm to study the optimal packing of single unit load device. The packing model was built and the algorithm for a single unit load device (ULD) was optimized, which can make full use of the space saved by the ULD and realize the optimal packing. The loading scheme proposed is more accurate, more stable and more economical than the manual calculation. In the future, it is expected to transform this algorithm into a highly intelligent software system, which will promote the automation and workflow standardization of air freight.

KEY WORDS: heuristic algorithm; Unit Load Device; packing optimization

当前随着信息通讯技术的发展, 实现了与各行业的跨界融合, 衍生出“互联网+”的经济生态。中国航空货运发展信息化水平较低, 以全货机集装箱装载问题为例, 当前基本处于人工计算模式, 很难将空间及重量利用到最大限度, 阻碍其自动化原因是未能实现自动计算, 因此, 解决装箱问题是提高航空货运信息

化重点研究方向之一。

1 相关研究文献综述

装箱问题涉及的领域多、应用背景广, 不同情况的解决方法差异很大。近年来, 关于物流行业装箱问

收稿日期: 2020-04-19

基金项目: 国家重点研发项目 (2016YFC0802601)

作者简介: 陈丙成 (1983—), 男, 高级经济师, 高级政工师, 主要研究方向为航空安全、物流供应链等。

题的研究较多。蔡其琛和陈峰^[1]（2017 年）研究了出厂物流装箱问题，在带装载组合约束的前提下，采用精确算法和启发式算法进行数值实验和案例分析，结果表明，设计的分支定界算法有效提高了求解效率并能运用于实践中。李孙寸等^[2]（2018 年）通过多元优化算法（Multi-variant optimization algorithm, MOA）求解了三维装箱问题，探讨了随机放置和局部调整优化到最优解的算法。尚正阳、顾寄南和丁卫^[3]（2018 年）提出了一种启发式最优剩余空间算法，实现了二维矩形装箱问题的高效求解，通过空间分割、放置位置选择和最优解搜索来实现对三维矩阵装箱问题的求解。胡智莹、周翔和李建伶等^[4]（2019 年）通过启发式算法和模拟退火法解决现实中多种约束条件下存在的三维装箱问题。卓雪艳、何勇和吴灵芳等^[5]（2019 年）提出采用层次分析法（AHP）对车辆的配载和装箱约束进行分析，用全局协调优化方法解决三维空间规划，采用 C++ 语言的 MFC 模块实现配载装箱的自动化和智能化。李云云、席裕庚和李德伟等^[6]（2019 年）提出了新的容重比降序算法和改进的降序首次适应算法，通过分析重量、体积等海运集装箱重要属性，探讨将若干货物最佳组合装箱。马鑫和廖哲文^[7]（2019 年）研究物流装箱问题过程中，提出启发式算法和模型是当前的研究热点，研究更加关注实践应用，认为特定运输方式和人工智能相关素算法是未来研究的方向。张长勇、吴智博和王艳芳^[8]（2019 年）对航空行李装箱提出 K-means 聚类的引入，使算法具有解算时间随异构性的增强而降低的优势，设计的码放策略有面填充和箱填充 2 个阶段。

这些研究多集中在物流装箱上，航空方面的研究很少，航空集装箱（Unit Load Device, ULD）的装箱问题更少。航空装箱问题研究主要集中在 2 方面：单个航班多个航空集装箱的装载最大化问题和单个航空集装箱装载最大化问题。文中主要考虑单个航空集装箱的装箱问题，通过运用改进的启发式算法来实现空间利用率和装载价值的最大化，并对限高进行测试验证。

2 航空集装箱基本原理及装载问题分析

航空集装箱是一种容器或载体，航空运输时供货物、邮件、行李等专用，是专为飞机设计的，特点轻便，小巧^[9]。近年来，随着各航空公司全货机和宽体飞机的投入使用，航空集装箱作为全货机和宽体飞机上载运货物和行李必不可少的设备。在全货机和宽体飞机运输中，将货物装载于航空集装箱上，然后通过操作平台将航空集装箱放置型号相符的全货机和宽体飞机货舱。

2.1 航空集装箱的基本原理

在现实中，高亚音速大型客机的机身剖面图大多是圆形或椭圆形，见图 1。客机机身外形特点决定着其装载的航空集装箱的三维呈现出非标准长方体的特点，这也是与海运和陆运所采用标准集装箱最大的不同之处。航空集装箱设计中，考虑飞机特殊外形，设计不同三维形状和重量限制的航空集装箱，目的在满足图 1 所示的机舱剖面图轮廓要求的同时，实现飞机舱容利用率最大化。

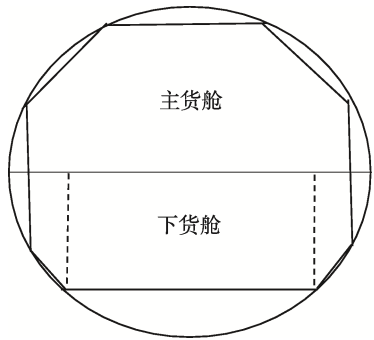


图 1 货机机身截面
Fig.1 Fuselage section diagram of cargo freight

不同飞机机型因其机身宽度和高度存在巨大差异，应配备不同材质、型号、尺寸的航空集装箱，以适用飞机货舱的限制。不同的航空集装箱不同规格尺寸见表 1，确保能够在飞机上进行装载。

表 1 航空集装箱规格
Tab.1 Specification of unit load device

底板尺寸代码	尺寸(L×W×H)/mm	最大总质量（含自身质量）/kg	
		货机主舱	客机腹舱
A	3175×2235×1626	6804	4625
	3175×2235×2438		
K	1562×1534×1143	—	1588
	1562×1534×1626		
M	3175×2438×1626	6804	4625
	3175×2438×2438		
L	3175×1534×1626	—	3175
P	1534×1194×1626	—	1225
Q	2438×1534×1626	—	2449

为了更加直观认识航空集装箱的立体空间感，文中选取国内全货机比较普遍使用的航空集装箱类型，包括 PMC-Q4，PMC-Q5，PMC-Q6，PMC-QL，PMC-QM，PGA-Q5，AKE，ALF 等，示意见图 2。

航空集装箱装载过程中，要重点解决航空集装箱的限高和收口问题，文中以最常用的 PMC-Q5，PMC-Q4 型为例，其中 PMC-Q5 剖面见图 3。

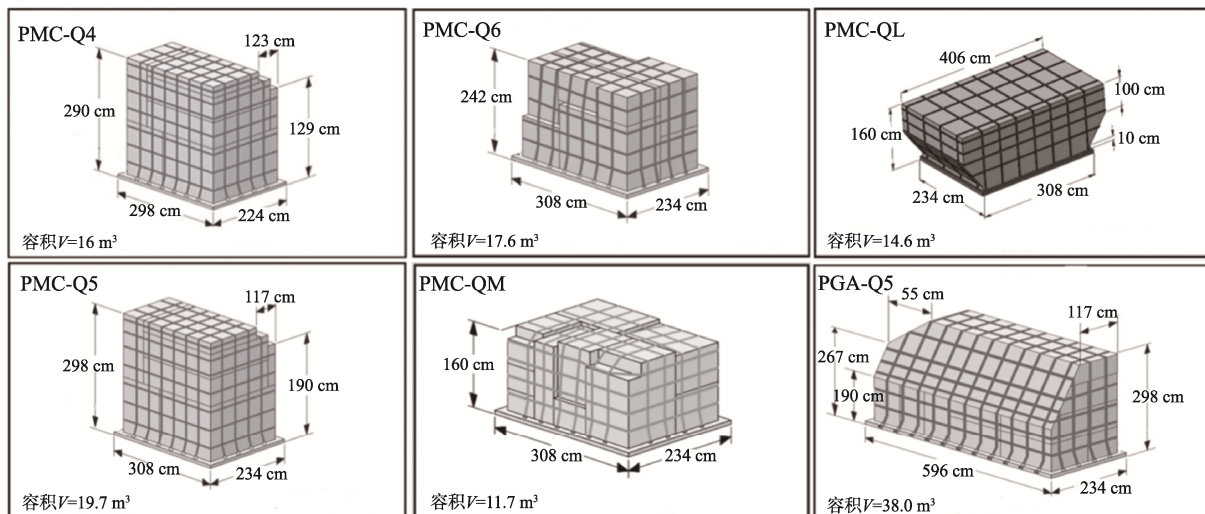


图2 航空集装器类型
Fig.2 Types of unit load device

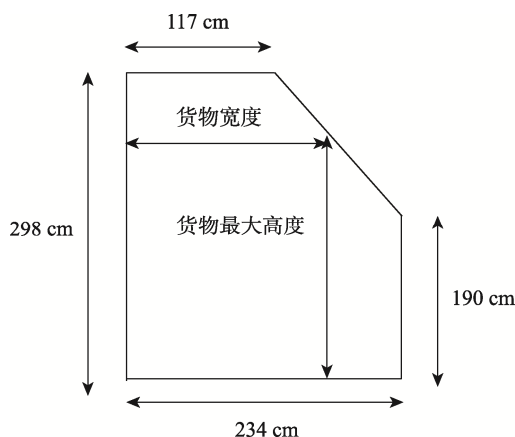


图3 PMC-Q5 收口示意
Fig.3 Closure of PMC-Q5

文中基于 PMC-Q5 型规格, 提出了 PMC-Q5 型航空集装器装载限高公式:

$$H_{\max} = 298 - \{(W - 117) \times 105 \div 117\} - 1 \quad (1)$$

式中: $H_{\max}$ 为装载在该类型航空集装器的货物最大限高; W 为装载在该类型航空集装器的货物的宽度。

同理, 文中基于 PMC-Q4 型规格, 提出了 PMC-Q4 型航空集装器装载限高公式:

$$H_{\max} = 290 - \{(W - 100) \times 161 \div 124\} - 1 \quad (2)$$

2.2 航空集装器装载问题分析

单个航空集装器货物装载是一项复杂且难度高的工作, 现行航空集装器组货计算方式主要还是采用人工方式, 效率低且不具备可复制性。目前, 国内航空公司基本都是依赖于航空公司吨控(舱位管理)人员和现场组装人员的工作经验。航空公司在舱位批复和集装器分配过程中, 吨控人员根据整个航空的货物情况以及货物重量、体积等要素, 靠经验进行人工计

算进行分配舱位和集装器数量, 这过程存在 3 个方面问题: 不同经验的工作人员, 差异性较大; 准确率不高, 每个集装器的舱容使用率无法达到最大化; 需要投入大量的高素质的人才, 且模拟组装效率不高。在航空集装器组装过程中, 吨控人员无法为现场组装人员提供一套专业化的组装方案, 造成现场组装人员也是靠经验进行现场货物组装, 与吨控人员组装方案完全脱离。

文中对航空集装器装载问题进行系统建模, 运用了贪心算法和遗传算法等运筹学领域的先进算法对模型进行了算法设计, 对单个航空集装器装箱问题模型设计。

3 单航空集装器装箱问题的研究假设

单个航空集装器装箱问题是为了解决该航空集装器装载最大化, 具体表述为: 在规定的装载条件约束和限制下, 通过选取某一种装载方法进行装载, 最大限度地实现航空集装器的容积和重量的利用率最大化, 实现该航空集装器的装载最优化。在航空装载实际操作过程中, 航空货运代理人为了装载方便, 基本上都会把货物包装成长方体托盘(箱子)再进行航空运输。根据建模需要, 文中所涉及的装载货物将被简化为长方体, 并称为“托盘(箱子)”。

3.1 单个航空集装器装箱问题的目标函数

文中对单个航空集装器装箱问题的形式化定义^[10]: 给定一个航空集装器 U 和一个托盘(箱子)的集合 $P = (p_1, \dots, p_n)$, 航空集装器的体积为 V_U 。假定每个托盘(箱子)都为矩形, 每个托盘(箱子) p_i 的长、宽、高分别为 l_i, w_i, h_i , 每个托盘(箱子)的体积为 $v_i = l_i \times w_i \times h_i$ 。假设 B 是 P 的一个子集, 定义 B 中所有托盘(箱子)体积之和为 V_B , 即 $V_B = \sum_{p_i \in B} v_i$ 。

问题的目标是选择 P 的一个子集 B , 使得 V_B 最大, 并且满足条件: 对任何托盘 (箱子) $p_i \in B$, 在航空集装箱 U 中对应有一个装填位置; 所有 B 中的托盘 (箱子) 必须全部包含在 U 中; B 中任何 2 个托盘 (箱子) 都不重叠。若定义子集 B 对应的填充率为 V_B/V_U 。用式 (3) 表示该模型目标函数。

$$Z = \text{MAX} (V_B/V_U) \quad (3)$$

3.2 单个航空集装箱装箱问题的约束条件

航空集装箱在装载过程中要满足一般的装载约束条件, 同时也要满足航空安全的要求。文中所涉及的单个航空集装箱装箱问题的约束条件具体如下所述。

1) 装载航空集装箱的托盘 (箱子) 不能超出航空集装箱装载指引规定的边界。

2) 装载航空集装箱的托盘 (箱子) 之间码放要满足“大不压小、重不压轻、木不压纸”的原则, 不能因为码放问题造成相互重叠、悬空。

3) 装载航空集装箱的托盘 (箱子) 要码放稳固, 采取平放的方式。

4) 装载航空集装箱的托盘 (箱子) 不能翻转, 仅能水平旋转 90° 。

5) 所有托盘 (箱子) 的容积总和一定小于该航空集装箱的容积。

4 运用启发式算法解决单航空集装箱装箱问题

启发式算法是指可接受的时间和空间下解决组合优化问题的可行解。现阶段主要有模拟退火法和蚁群算法等以仿自然体算法为主。文中引入标准托盘 (后文简称标托) 的概念, 对产生装箱顺序的启发式算法进行优化改进。根据日常算托盘的经验, 尺寸满足长为 $80 \sim 102 \text{ cm}$ 、宽为 $100 \sim 130 \text{ cm}$ 、高小于 160 cm 称为标托, 因此, 所有托盘分为标托与非标托。在对集装箱进行填充的过程中, 优先考虑属于标托货物, 如果装不下更多标托时, 再考虑其他非标托货物。

4.1 三空间分割法

航空集装箱的装箱算法是采取经典的三空间分割法, 基于二叉树数据结构的算法来对三维空间进行分解^[11]。具体主要步骤如下所述。

1) 装载前, 整个航空集装箱视为三维空间, 用二叉树的根节点相对应于三维空间。

2) 托盘 (箱子) 的装箱顺序的原则是选择空间最优, 以此类推。

3) 托盘 (箱子) 装进航空集装箱的原则是从里往外, 且紧贴三维空间的相邻两侧。将剩余的不规则空间进行分割, 分割原则是沿着托盘 (箱子) 与航空

集装箱没有接触的三面进行分割, 得到新的三维空间 L, M, R , 见图 4。

4) 按照步骤 1 重新对每个新的三维空间进行分解, 直至空间用满为止。

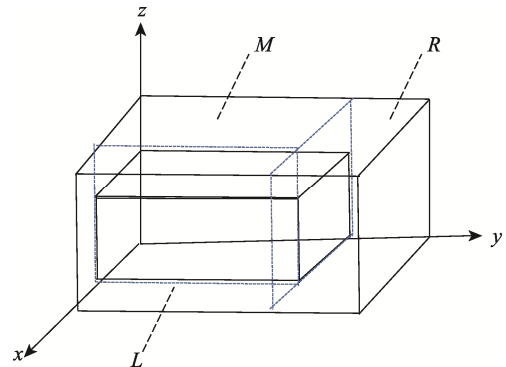


图 4 三空间分割
Fig.4 Three space division

4.2 可放置点

文中用三维坐标系表示单个航空集装箱, 并确保航空集装箱的底部的顶点与坐标系的原点重合, 坐标系中的 x, y, z 轴表示航空集装箱的长、宽、高, 即 (l, w, h) ^[12]。航空集装箱在装置过程中, 每个托盘 (箱子) 必须靠住航空集装箱或者前一个托盘 (箱子), 因此, 采取以下方法记录可放置点, 见图 5。

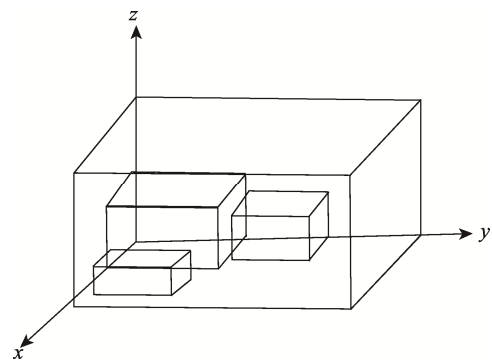


图 5 可放置点
Fig.5 Placement points

用每个托盘 (箱子) 底部的顶点作为其放置坐标, 并结合其可 90° 旋转的特点, 假设托盘 (箱子) p_i 放入航空集装箱后沿 x, y, z 轴分为 l_i, w_i, h_i , 只考虑箱子水平方向上 90° 旋转, 则可以按照 (l_i, w_i, h_i) 和 (w_i, l_i, h_i) 2 种顺序来考虑箱子的装载。

1) 第 1 个托盘 (箱子) 可放置点为 $(0, 0, 0)$, 若第 1 个箱子可以放入点 $(0, 0, 0)$ 处, 则第 2 个托盘 (箱子) 的可放置点有 3 个, 分别为 $(l_1, 0, 0), (0, w_1, 0), (0, 0, h_1)$ 。

2) 假设第 2 个托盘 (箱子) 放置在点 $(l_i, 0, 0)$, 则删除点 $(l_i, 0, 0)$, 增加点 $(l_1+l_2, 0, 0), (l_1, w_2, 0), (l_2, 0,$

h_2), 则第3个托盘(箱子)有5个可放置点。

3) 考虑第 i 个有托盘(箱子), 不失一般性, 若选择点 (x, y, z) 作为放置点, 则在放入托盘(箱子) p_i 时, 应从可放置点中删除点 (x, y, z) , 再增加 $(x+l_i, y, z)$, $(x, y+w_i, z)$, (x, y, h_i) 。

综上所述可以得出, 每放一个托盘(箱子), 就删除1个和增加3个可放置点, 净增2个可放置点。如果第 i 个托盘(箱子)不能放在所有的可放置点, 则直接考虑第 $i+1$ 个托盘(箱子), 因此, 考虑第 m 个托盘(箱子)的最多可放置点为 $2 \times (m-1) + 1$ 。

4.3 以剩余空间为单位进行装载

在航空集装箱中没有装载托盘(箱子)之前的空间视为剩余空间, 可以用六元矩阵来描述一个剩余空间, 公式为:

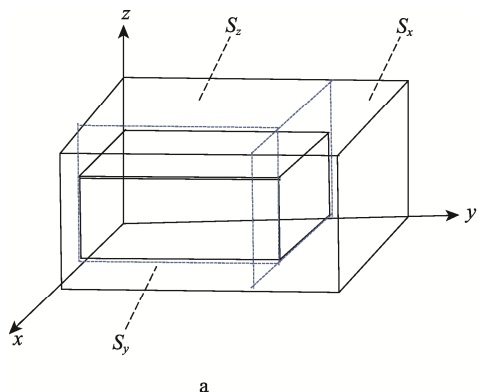
$$S_{n \times 6} = (x, y, z, S_l, S_w, S_h)_{n \times 6} \quad (4)$$

式中: (x, y, z) 描述了空间的参考点; S_l, S_w, S_h 分别为空间在3个维度上的长度、宽度和高度; $S_{n \times 6}$ 的每一行代表一个剩余空间, 其中 n 为剩余空间的数目。

1) 剩余空间的生成。前文介绍了可装置点的生成, 见图5, 每个可装置点将对应产生一个剩余空间, 每装入一个托盘(箱子), 将产生3个新的未被填充的剩余空间: S_x, S_y, S_z 。由于同时删除原来的一个已被填充的剩余空间, 即最多有 $2m+1$ 个剩余空间。

2) 剩余空间的切割。考虑图6a和图6b 2种剩余空间的切割法。图6a和图6b 2种不同的切割法产生的空间 S_x, S_y 。最终选择哪种取决于哪种方式能产生更大的剩余空间。用 V_x 和 V_y 分别表示 S_x, S_y 的体积, 令 $V_a = \max(V_{x^a}, V_{y^a})$, $V_b = \max(V_{x^b}, V_{y^b})$, 若 $V_a > V_b$, 则选择图6a的切割方式, 否则选择图6b的切割方式。不失一般性, 对于剩余空间 $S_j = (x_j, y_j, z_j, S_{l_j}, S_{w_j}, S_{h_j})$, 在填入托盘(箱子) $p_i(l_i, w_i, h_i)$ 之后, 切割产生的剩余空间。

图6a切割法产生的空间为:



$$S_{x_a} = [x_j + l_j, y_j, z_j, S_{l_j} - l_i, S_{w_j}, S_{h_j}]$$

$$S_{y_a} = [x_j, y_j + w_i, z_j, l_i, S_{w_j} - w_i, S_{h_j}]$$

$$S_{z_a} = [x_j, y_j, z_j + h_i, l_i, w_i, S_{h_j} - h_i]$$

图6b种切割法产生的空间如下:

$$S_{x_b} = [x_j + l_j, y_j, z_j, S_{l_j} - l_i, w_i, S_{h_j}]$$

$$S_{y_b} = [x_j, y_j + w_i, z_j, S_{l_j}, S_{w_j} - w_i, S_{h_j}]$$

$$S_{z_b} = [x_j, y_j, z_j + h_i, l_i, w_i, S_{h_j} - h_i]$$

3) 剩余空间的排序更新。若在剩余空间 S_j 中完成填充, 将产生3个新的剩余空间: S_x, S_y, S_z , 将切割完成的剩余空间合并到剩余空间的矩阵 S 中, 同时删除 S_j 。同理, 每个子空间在装填托盘(箱子)的过程中, 在放入托盘(箱子)后同样被继续分割为3个空间, 同时将其添加到剩余空间集中, 而原空间则相应地从剩余空间集中去掉。

在完成对剩余空间的增减操作后, 需要对剩余空间进行重新排序, 为了使空间利用率最大化, 剩余空间之间的先后顺序按以下方式进行排序, 从航空集装箱的地面逐渐往上堆放托盘(箱子), 具体为: z 由小到大进行排序; 若 z 相同, 再按 x 由小到大进行排序; 若 z 和 x 相同, 再按 y 由小到大进行排序。

这样排序的目的不仅是为了提高空间的利用率, 更是为了降低整体的重心和提高航空集装箱的稳定性。

为了保持剩余空间几何 $S_{n \times 6}$ 的有序性, 在放入一个托盘(箱子)后产生新的剩余空间并排序的过程中, 对剩余空间的更新需要的算法复杂度为 $O(n)$ 。

4) 剩余空间的分割合并。为了把航空集装箱的剩余空间最大化利用, 将文中的 $S_a(x_a, y_a, z_a, S_{al}, S_{aw}, S_{ah})$ 和 $S_b(x_b, y_b, z_b, S_{bl}, S_{bw}, S_{bh})$ 2个剩余空间进行重新分割和合并。必须满足以下条件。

条件1: $S_a(x_a, y_a, z_a, S_{al}, S_{aw}, S_{ah})$ 和 $S_b(x_b, y_b, z_b, S_{bl}, S_{bw}, S_{bh})$ 处于同一个底面 (z 平面), 即 $z_a = z_b$ 。

条件2: $S_a(x_a, y_a, z_a, S_{al}, S_{aw}, S_{ah})$ 和 $S_b(x_b, y_b, z_b,$

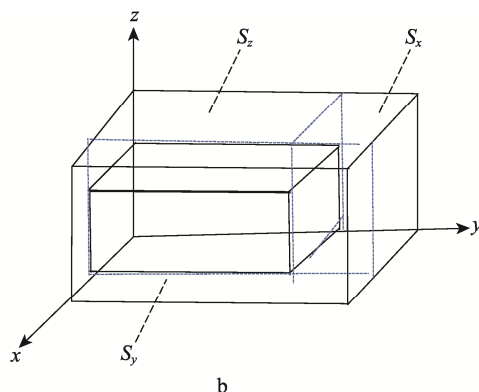


图6 剩余空间
Fig.6 Residual space

S_{bl}, S_{bw}, S_{bh}) 等高, 即 $S_{ah} = S_{bh}$ 。

条件 3: $S_a(x_a, y_a, z_a, S_{al}, S_{aw}, S_{ah})$ 和 $S_b(x_b, y_b, z_b, S_{bl}, S_{bw}, S_{bh})$ 相邻, 且底面至少有两边平齐。

满足条件 1、条件 2 且保证条件 3 的可合并剩余空间总共有以下 2 种情况。

1) 情况 a, $y_a = y_b$, $x_a + S_{al} = x_b$, $s_{aw} = S_{bw}$ 。
 $x_a + S_{al} = x_b$, $s_{aw} = S_{bw}$ 2 个式子说明 2 个剩余空间相邻, 且底面至少有 2 边平齐, 经过合并得到剩余空间 $(x_a, y_a, z_a, S_{al+bl}, S_{aw}, S_{ah})$ 。

2) 情况 b, $x_a = x_b$, $y_a + S_{aw} = y_b$, $S_{al} = S_{bl}$ 。
 $y_a + S_{aw} = y_b$, $S_{al} = S_{bl}$ 2 个式子说明 2 个剩余空间相邻, 且底面至少有 2 边平齐, 经过分割合并得到剩余空间 $(x_a, y_a, z_a, S_{al}, S_{aw+bw}, S_{ah})$ 。

4.4 装箱顺序

1) 初始化托盘 (箱子) 集合。所有托盘 (箱子) 的集合 P 可以表示为 p_i 的集合, 每个托盘 (箱子) p_i 有长 l_i 、宽 w_i 和高 h_i , 表示托盘 (箱子) 是否进行 90° 旋转的 0—1 变量 O_{w_i} , 以及对应的编号 i ($i=1,2,3,\dots,n$), 因此 P 由一个 $5 \times n$ 的矩阵表示, 在对矩阵进行表示之前, 需要对每个托盘 (箱子) 的尺寸进行坐标转换, 即调整长与宽的顺序, 原则为将托盘 (箱子) p_i 按照长、宽、高的表示方法来表示, 并且宽 $>$ 长。当箱子按照 p_i 按照这种方式表示时, $O_{w_i}=1$, 若箱子进行了 90° 旋转, $O_{w_i}=0$, 因此, 初始化箱子集合 $P = \{b_1, b_2 \dots b_i \dots b_n\} = \{l_i, w_i, O_{w_i}, i\}_{5 \times n}$, 其中 $w_i > l_i$, $O_{w_i}=1$ 。

2) 装箱序列。假设托盘 (箱子) 集合 $P = \{b_1, b_2 \dots b_i \dots b_n\}$ 有 n 个托盘 (箱子), 那么装箱序列实际上就是对这 n 个托盘 (箱子) 的排列组合, 因此理论上存在 $n!$ 个装箱序列。如果将所有托盘 (箱子) 与剩余空间可能组合的都保留下来, 那么在装箱序列上, 即填充托盘 (箱子) 的过程中的算法复杂度就是 $O(n!)$, 由于对剩余空间的更新需要的算法复杂度为 $O(n)$, 因此理论上总算法的复杂度为 $O(n \times n!)$ 。

3) 装箱顺序的算法。文中采用贪心算法的策略, 每步只保留最佳的效果和最优的组合, 确保了所得到的解在局部来看是足够好的, 有效解决遍历所有托盘 (箱子) 将产生过于庞大的解的数量造成的时间过程和占有资源过多的问题。由于采用贪心算法解决装箱序列问题, 那么贪心算法的算法复杂度为 $O(n)$, 总算法的复杂度变为算法复杂度为 $O(n^2)$ 为空间利用率最大化, 托盘 (箱子) 与剩余空间组合按照①和②顺序的保留: ①航空集装箱放入托盘 (箱子) 优先使用地面, 即剩余空间的底面积利用率最高; ②若底面积利用率相同, 比较托盘 (箱子) 的体积, 保留最大体积的托盘 (箱子)。在贪心算法的策略下, 需要对托盘

(箱子) 进行排序, 具体方法为对所有托盘 (箱子) P , 调整长与宽, 使得长 $<$ 宽, 即按照托盘 (箱子) $p_i = (l, w, h)$, $l < w$, 进行表示, 并计算托盘 (箱子) 的立方数 V_i , 以及底面积 M_i ; 对托盘 (箱子) P 进行排序, 首先按照 M_i 的值进行降序排列, 若 M_i 相同, 则按照 V_i 的值进行降序排列, 若 V_i 相同, 则按照 w_i 值进行降序排列。

4.5 运用算法流程解决装箱问题

单个航空集装箱装箱问题是在给定一个特殊的航空集装箱 (Q5, Q4, Q6, QM) 的条件下, 计算该航空集装箱能否满足装载给定托盘的需求。托盘 (箱子) 集合 P 由一个 $5 \times n$ 的矩阵表示, 问题的目标就是求解这个航空集装箱是否能满足装载所有的托盘 (箱子) P 。考虑到机型特点与航空集装箱货物最大高度限制的检测, 对单个航空集装箱装箱算法的算法步骤如下所述^[13-14]。

1) 初始化托盘 (箱子)。初始化托盘 (箱子) P , 得到 $5 \times n$ 的矩阵 $P = \{b_1, b_2 \dots b_i \dots b_n\} = \{l_i, w_i, O_{w_i}, i\}_{5 \times n}$, 其中 $w_i > l_i$, $O_{w_i}=1$, 剩余空间集合 $S_{6 \times m} = \{S_j\} = \{0, 0, 0, l, w, h\}, m=1$ 。

2) 对所有托盘 (箱子) P 进行标托与非标托的归类。分为 2 类: 标托与非标托。根据贪心策略, 按照底面积从大到小的原则, 对 2 类标托进行排序, 得到标托集合 P_g , 非标托集合 P_h , 将 P_g 与 P_h 合并, 产生经过排序后的托盘 (箱子) 集合 P' 。

3) 判断 P' 是否为空, 若否, 考虑 P' 中第 1 个托盘 (箱子) P_1' 进入步骤 4; 若是, 进入步骤 8。

4) 判断该托盘 (箱子) 能否放入当前的剩余空间集合 $S_{n \times 6}$ 中。按顺序查找剩余空间, 如果存在剩余空间 S_j , 使得托盘 (箱子) 能够放入该剩余空间, 进入步骤 5, 如果不存在能够放入该托盘 (箱子) 的剩余空间, 进入步骤 7。

5) 输出该托盘 (箱子) 在集合 P 中的编号, 箱子的放置点 (x, y, z) , 以及判断托盘 (箱子) 是否经过旋转的 0—1 变量 O_{w_i} , 并将该成功放入剩余空间的托盘 (箱子) 置入矩阵中, 并从 P' 中删除, 更新 P' 。

6) 根据剩余空间的产生算法, 产生新的剩余空间, 删除已被填充的剩余空间, 然后对已有剩余进行合并操作, 并重新排序, 完成对剩余空间集合 $S_{n \times 6}$ 的更新, 返回步骤 3。

7) 判断托盘 (箱子) 是否已经经过 90° 旋转, 如果 $O_{w_i}=1$, 对托盘 (箱子) 进行 90° 旋转, 并令 $O_{w_i}=0$, 返回步骤 4。如果 $O_{w_i}=0$, 说明该托盘 (箱子) 已经经过 90° 旋转, 仍然无法填充入剩余空间, 则判断该托盘 (箱子) 不能装入航空集装箱, 将其从 P' 中删除, 并放入表示未填充托盘 (箱子) 的矩阵中。更新 P' 并返回步骤 3。

8) 算法结束。

4.6 航空集装箱限高检测验证

基于文中第 1 部分介绍的飞机机身剖面图和航空集装箱三维规格的特点^[15], 在实际装载过程中, 需要对航空集装箱限高进行检测验证, 避免造成装卸货物过程中碰撞飞机的舱壁, 造成经济损失和不安全事件。文中选取国内全货机常用的 PMC-Q5, PMC-Q4 型为例进行限高检测验证。假设托盘(箱子) $b_i = \{l_i, w_i, O_{w_i}, i\}_{5 \times n}$, $l_i < w_i$, 装载在剩余空间 $S_j = (x, y, z, S_l, S_w, S_h)$ 时, 具体的检测方法如下所述。

1) 若装载在 PMC-Q5 型航空集装箱上, 根据文中 PMC-Q5 型航空集装箱装载限高公式(1), 得到限高要满足 $h_i + z_j < 298 - \{(w_i - y_j - 117) \times 105 \div 117\} - 1$ 。

2) 若装载在 PMC-Q4 型航空集装箱上, 根据文中 PMC-Q4 型航空集装箱装载限高公式(2), 得到限高要满足 $h_i + z_j < 290 - \{(w_i - y_j - 100) \times 161 \div 124\} - 1$ 。

5 结语

文中应用先进的贪心算法与遗传算法相结合的启发式算法, 对单个航空集装箱装箱进行了装箱模型构建和算法优化, 采取连续性的装箱策略, 所计算出的装载方案较人工计算更精确、更具稳定性且经济效益更高。下一步将重点开发设计一个航空集装箱装箱自动编排的自动化程序, 不仅能够规避为经验或疏忽等原因而带来的航空集装箱装箱编排不合理或者舱位编排利用率低等不利结果, 提高航空集装箱装箱编排的合理性及经济性, 更能够节省编排人员复杂的板位计算过程, 有效解放劳动力, 提升工作的航空货运信息化程度。

参考文献:

- [1] 蔡其琛, 陈峰. 带装载组合约束的汽车出厂物流组合装箱问题的模型和分支定界算法研究[J]. 工业工程与管理, 2017(6): 57—62.
CAI Qi-chen, CHEN Feng. Research on Models and Algorithms of Bin Packing Problem With Pattern Constraints on Outbound Logistics[J]. Industrial Engineering & Management, 2017(6): 57—62.
- [2] 李孙寸, 施心陵, 张松海, 等. 基于多元优化算法的三维装箱问题的研究[J]. 自动化学报, 2018, 44(1): 106—115.
LI Sun-cun, SHI Xin-ling, ZHANG Song-hai, et al. Multi-variant Optimization Algorithm for Three Dimensional Container Loading Problem[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(1): 106—115.
- [3] 尚正阳, 顾寄南, 丁卫, 等. 求解二维矩形装箱问题

的启发式算法[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(3): 584—585.

- SHANG Zheng-yang, GU Ji-nan, DING Wei, et al. Heuristic Algorithm for 2D Rectangle Packing Problem[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(3): 584—585.
- [4] 胡智莹, 周翔, 李建伶, 等. 基于混合模拟退火算法的多约束装箱问题研究[J]. 无线互联科技, 2019, 16(23): 113—114.
HU Zhi-ying, ZHOU Xiang, LI Jian-ling, et al. Research on Multi-constraint Packing Problem Based on Hybrid Simulated Annealing Algorithm[J]. Wuxian Hulan Keji, 2019, 16(23): 113—114.
- [5] 卓雪艳, 何勇, 吴灵芳, 等. 大型车辆配载与装箱优化方法及系统设计研究[J]. 机械设计与制造, 2019(10): 20—23.
ZHUO Xue-yan, HE Yong, WU Ling-fang, et al. Research on Cargo Allocation and Vehicle Loading Problem and System Design[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(10): 20—23.
- [6] 李云云, 席裕庚, 李德伟, 等. 多集装箱装箱问题启发式算法研究[C]// 第 30 届中国过程控制会议(CPCC 2019), 2019: 7.
LI Yun-yun, XI Yu-geng, LI De-wei, et al. Research on Heuristic Algorithms for the Packing Problems of Multi container[C]// Chinese Process Control Conference(CPCC 2019), 2019: 7.
- [7] 马鑫, 廖哲文. 装箱问题在物流领域的研究回顾与分析——基于美国科学情报研究所科研数据库(Web of Science, 1989—2018)的科学计量分析[J]. 科技促进发展, 2019, 15(7): 675.
MA Xin, LIAO Zhe-wen. Review and Analysis of Research on Bin Packing Problem in Logistics Field——Scientometric Analysis Based on Web of Science Database (1989—2018)[J]. Science & Technology For Development, 2019, 15(7): 675.
- [8] 张长勇, 吴智博, 王艳芳. 基于 K-means 的航空行李快速装箱算法[J]. 包装与食品机械, 2019, 37(3): 38—42.
ZHANG Chang-yong, WU Zhi-bo, WANG Yan-fang. Fast Container Loading Algorithm for Airline Luggage Registration Based on K-means Clustering[J]. Packaging and Food Machinery, 2019, 37(3): 38—42.
- [9] 赵忠义. 航空货运的操作设备与装载特点[J]. 新商务周刊, 2017(24): 194.
ZHAO Zhong-yi. Operation Equipment and Loading Characteristics of Air Cargo[J]. New Business Weekly, 2017(24): 194.
- [10] 魏丽军. 求解装箱问题的启发式算法研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008: 10.
WEI Li-jun. Research on Heuristic Algorithms for the Packing Problems[D]. Xiamen: Xiamen University,

- 2018: 10
- [11] 尹世荣. 用自适应的混合遗传算法解三维装箱问题研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 8—9, 18—19.
YIN Shi-rong, A Self-adaptive Hybrid Genetic Algorithm for 3D Bin Packing Problem[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013: 8—9, 18—19.
- [12] 张德富, 魏丽军, 陈青山, 等. 三维装箱问题的组合启发式算法[J]. 软件学报, 2007, 18(9): 2083—2087.
ZHANG De-fu, WEI Li-jun, CHEN Qing-shan, et al. A Combinational Heuristic Algorithm for the Three-dimensional Packing Problem[J]. Journal of Software, 2007, 18(9): 2083—2087.
- [13] 张丽霞. 航空货运飞机装载问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012: 20—22.
ZHANG Li-xia. Research on Air Cargo Loading Problem[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics The Graduate School, 2012: 20—22.
- [14] 阎威武, 邵惠鹤, 田雅杰. 集装箱装载的一种启发式算法[J]. 信息与控制, 2002, 31(4): 354—355.
YAN Wei-wu, SHAO Hui-he, TIAN Ya-jie. A Heuristic Algorithm For Three Dimension Packing Problem[J]. Information and Control, 2002, 31(4): 354—355.
- [15] 张劫, 衡红军, 杨晓雪. 航空货运装载问题算法设计与研究[J]. 计算机工程, 2005(S1): 28—30.
ZHANG Jie, HENG Hong-jun, YANG Xiao-xue. Design and Research for Algorithm of Air Cargo Loading Problem[J]. Computer Engineering, 2005(S1): 28—30.