

基于混合遗传算法的多航空集装箱装箱优化设计

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, 开展航空集装箱装箱算法研究。**方法** 充分利用精英选择策略的精英遗传算法和轮盘赌的简单遗传算法相结合, 研究多航空集装箱的装箱最优问题。**结果** 以某航空公司的某国际航线选取了20 d的历史数据来进行实验, 计算得出, 国际航线平均舱位利用率提升了5%。**结论** 对多航空集装箱装箱进行了装箱模型构建和算法优化, 提升了航空货运舱容利用率, 装载得到了有效地优化, 实现了装箱最优。

关键词: 混合遗传算法; 航空集装箱; 装箱优化; 设计

中图分类号: U169 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)05-0181-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.05.023

Optimal Design of Packing for Multi Unit Load Device Based on Hybrid Genetic 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 work aims to study the algorithm of unit load device to solve the problems that in the aviation industry of China, the assembly and arrangement of the cargo on the air container is completed manually, and there is no software system to realize automatic calculation. The elite genetic algorithm which made full use of the elite selection strategy was combined with the simple genetic algorithm of roulette to study the optimal packing of multi unit load device. Historical data of 20 d of an international airline were selected for experiment. The result showed that availability of space in the international route was increased by 5%. The packing model was built and the algorithm of multi unit load device was optimized. It improves the use ratio of air freight hold capacity, effectively improves the packing and achieves optimal packing.

KEY WORDS: hybrid genetic algorithm; unit load device; packing optimization; design

疫情下航空货运迎来史无前例的市场机遇, 也促进了航空企业的变革和发展, 特别是在货运运力供给出现短期严重不足的情况下, 提高航班的装载率显得尤为重要。提高航班载运率的主要瓶颈之一是信息化程度较低。多年来, 航空货运信息化进展较为缓慢, 内生动力不足, 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, 很难将空间及装载量实现最优化, 阻碍其自动化原因是未能实现自动计算^[1]。当“互联网+”生态遇到疫情后, 推动各行业优化和创新发展, 最大特点是与互联网的融合更加紧密。基于此, “互联网+航空货运”是未来发展的趋势, 解决装箱问题是提高航空货运信息化重点研究方向之一。

收稿日期: 2020-06-07

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。

1 相关研究文献综述

近年来,关于装箱问题的研究文献涉及的领域比较广,主要集中在使用以下几种算法。曹先彬等^[2-3]运用免疫遗传算法来研究装箱问题的求解,通过实验表明,该算法具有很好的全局收敛性,能有效解决装箱问题。刘胜等^[4]提出了一种求解三维装箱问题的启发式二叉树搜索算法,满足三维装箱的约束条件和多样性最强的测试算例中,结果表明装箱率显著提高。李灿毅、张沙清^[5]采用基于浏览器引擎的 WebGL 技术构建了一个多容器多货物的 web 装箱系统,利用解析几何知识给出了装箱仿真过程中矢量数据的渲染以及相关几何变换算法。张森均^[6]提出通过数学建模与遗传算法分析多维装箱问题,提高了空间利用率,达到利润最大化。李孙寸等^[7]用多元优化算法 (Multi-variant optimization algorithm, MOA) 实现三维装箱问题的求解,并用实例的测试仿真效果证明了该算法的有效性和可行性。张玉梅等^[8]发明了一种采用遗传算法,结合容器数量与空间利用率,筛选出使用容器最少且空间利用率最高的最佳容器组合装箱方案。何利文等^[9]提出了基于遗传算法的 SDN 增强路径装箱方法,解决了多约束条件下的装箱问题,有效优化网络的负载,提高网络资源的利用率。张长勇等^[10]提出一种基于 K-means 聚类的算法,结合“砌墙式”思想,设计了“面填充”与“箱填充”2 个阶段码放策略,解决航空行李装箱问题。张长勇等^[11]提出以 K-means 聚类与“关键点”组合式算法解决航空行李码放流程效率低下的问题,该算法给出的布局方案规划合理,满足了飞机货舱的空间约束与载重平衡约束。

通过梳理相关文献发现,关于装箱问题的研究,有涉及物流领域,有少数涉及航空行李箱,但均未涉及航空集装箱的装箱问题。相较于物流领域的其他集装箱的装箱问题,航空集装箱更为复杂,而航空行李箱只是航空集装箱中相对简单的一种。为此,文中在前人研究基础上,结合航空集装箱的特点,采取连续性的装箱策略,利用遗传算法确定航空集装箱使用顺序,进行全局寻优,解决多航空集装箱装箱问题。

2 航空集装箱及装载的机理分析

航空集装箱 (Unit Load Device, ULD)^[12]主要是用于全货机和宽体飞机承运货邮行李的设备,有集装板和集装箱。常用的集装板有 PMC-Q4, PMC-Q5, PMC-Q6, PMC-QL, PMC-QM, PGA-Q5 等类型,常用的集装箱有 AKE, ALF 等类型。在全货机和宽体飞机运输中,将货物装载于航空集装箱上,再把航空集装箱固定在飞机的货舱。采用航空集装箱运输,可以在飞机装卸过程中采用机械化操作,有效提高装载效率,同时,也是确保运输安全的关键,避免因货

物在飞机货舱移动而影响飞机载重平衡。

航空集装箱是根据飞机椭圆形机身的特点设计而成,对组装后的收口有严格的要求,避免刮碰飞机内舱壁。航空集装箱不是常规的长方体,每一种航空集装箱均具有较为规范形状尺寸。在飞机的不同位置,能装载的航空集装箱尺寸和类型各不相同,根据该形状尺寸的限制进行货物的预装载,能够保证航空集装箱正常装载于飞机上,因此,相较于其他的运输方式,多航空集装箱的装箱问题更为复杂。

目前,国内航空集装箱的装载都是采用人工计算方式,使得标准化程度不高,在现场组装货物中,实际执行时与舱位管理人员预排一定程度上出现偏差,预先的舱位编排无法得以贯彻执行,货物不正常组装集装箱的情况时有发生。这些问题很多程度上困扰着航空公司的收益问题和服务品质问题。

3 多航空集装箱的装箱优化分析

3.1 研究假设和问题描述

在航空运输中,不同航空集装箱适载机型不同,每种机型所适用的航空集装箱一般有几种,相互之间也是可以相互调换,比如:2 个 PMC 集装板的位置可以装 6 个 AKE 集装箱。基于此,考虑多航空集装箱装箱的问题,就是在已定的约束条件限制下,如何布局使得方案最优。最优方案主要评价标准:装完特定的一批航空货物,目标是使用最少的航空集装箱;在存在多种航空集装设备可以相互调换的情况下,目标是使用尽可能多的运输成本较低的航空集装箱类型;以上 2 点的前提是确保装载的安全,航空货物要均匀分布在航空集装箱中,航空集装箱的装载要满足质检要求;航空集装箱也要均匀分布在飞机货舱,满足载重平衡的要求。

3.2 选取的装载策略

在设计解决多航空集装箱装箱算法时,一般可以选择连续性策略、预分配策略和同时性策略等 3 种策略。3 种不同策略对比分析见表 1。

文中在设计算法时,将采取连续性策略,按照单航空集装箱装箱方法装满,再选择下一个航空集装箱,以此类推。在已知航空集装箱装载顺序时,连续性策略的多航空集装箱装箱算法步骤如下所述^[13]。

1) 初始化数据,箱子 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n\} = \{d_i, w_i, h_i, O_{w_i}, i\}_{s \times n}$, 包含集装箱使用顺序的航空集装箱集合 $= \{U\}$, 用 U 表示当前航空集装箱,并令 $U = U_j, j = 0, U_0 = 0$ 。

2) 检测航空集装箱集合是否为空,若为空,则表示当前航空集装箱集合全部用完,算法结束。否则令 $j = j + 1$, 使用下一个航空集装箱。

表 1 载策略对比分析
Tab.1 Comparative analysis of loading strategies

装载策略	原理	特点	难点问题
连续性策略	按照单航空集装箱装箱方法装满，再选择下一个航空集装箱，以此类推。	航空集装箱逐个装满	需要考虑单个航空存在多种不同尺寸的集装箱；选择不同类型的航空集装箱顺序，影响装载效果
预分配策略	对每组预先分配的航空集装箱和箱子的组合进行单航空集装箱的装箱问题算法	预先分配给不同的航空集装箱	较适合大小均匀的箱子；难点在于需提前知道航空集装箱的数量
同时性策略	每个箱子装载前，要根据所有航空集装箱可用空间选择合适的集装箱进行装载	同一个时间装载多个航空集装箱	航空货站组装时，无法同时组织多个航空集装箱；需要吨控环节明确使用航空集装箱的数量和种类组合，给货站组装提高了难度

3) 针对当前航空集装箱 $U=U_j$ ，执行单航空集装箱的装箱算法，得到成功装入航空集装箱中的箱子集合 P_k ，以及未装入的箱子集合 N_k 。

4) 检测 N_k 是否为 0，是则算法结束；所有箱子均已装入航空集装箱。否则返回步骤 2。

由连续性策略的算法可以看出，由于航空集装箱的选择顺序将对装载结果会产生较大的影响，因此如何确定航空集装箱的选择顺序是算法设计的关键。

3.3 遗传算法的全局寻优

3.3.1 航空集装箱使用顺序的遗传算法编码

针对航空集装箱使用顺序的遗传算法编码需由一条染色体 S 构成， S 表示每个航空集装箱的使用顺序。若考虑的航空集装箱数量为 Q ，该染色体串将由 Q 个基因位组成，则表示航空集装箱对应值由正整数 $1 \sim Q$ 的随机生成。以 8 个航空集装箱为例，对应的以下染色体 S ：2-1-7-4-8-3-5-6，即表示航空集装箱 1—8 的使用顺序为 2-1-7-4-8-3-5-6。

3.3.2 群体评价与适应度

按照重要性高低，把航空集装箱装箱过程中决定方案可行和优劣要素分为：第 1 要素，所有箱子是否都能装载，这是装载的可行性，量化的指标为装载不足的空间大小；第 2 要素，航空集装箱是否有剩余，这是装载的经济性，量化指标是没有利用的航空集装箱数量；第 3 要素，使用的最后 1 个航空集装箱的剩余空间大小，这是装载的自由度，量化指标是最后 1 个航空集装箱的剩余体积。综上，航空集装箱装箱过程中，按照重要性高低来安排，优先考虑第 1 要素，再考虑第 2 要素，最后考虑第 3 要素。

3.3.3 策略选择

充分利用精英选择策略的精英遗传算法和轮盘赌的简单遗传算法的特点，文中选择策略结合 2 种算法，具体见图 1。

3.3.4 交叉策略

染色体代表航空集装箱顺序，染色体采取部分匹配交叉策略，对父代 1 和父代 2 染色体随机产生 2 个

交叉点，2 交叉点之间的区域为匹配区域，交叉产生的新染色体仍然是从 1 到 Q 的排列，避免出现重复的数字，具体见图 2。

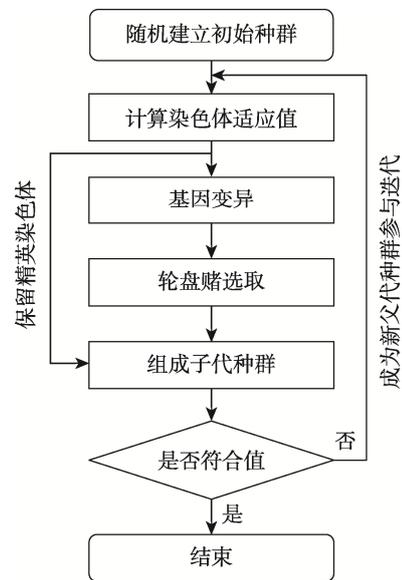


图 1 遗传算法流程
Fig.1 Flow chart of genetic algorithm



图 2 遗传算法交叉策略
Fig.2 Crossover strategy of genetic algorithm

交换后，根据映射关系把子代 1 染色体和子代 2 染色体匹配区域外的数字进行交换，避免出现重复的数字，使得子代 1 染色体和子代 2 染色体都由自然数

1 到 N 随机产生的, 见图 3。



图 3 遗传算法部分匹配交叉调整示意
Fig.3 Schematic diagram of partial matching and cross adjustment of genetic algorithm

3.3.5 变异策略

文中采用逆转变异法, 以图 4 为例, 在父代染色体 (5, 9, 3, 2, 7, 6, 10, 1, 4, 8) 中随机选择 2 和 1 作为交换点, 在匹配区间 (2, 7, 6, 10, 1) 进行反序排练, 形成逆转后的染色体为 (5, 9, 3, 1, 10, 6, 7, 2, 4, 8)。



图 4 遗传算法变异策略示意
Fig.4 Diagram of genetic algorithm variation strategy

3.3.6 混合遗传算法流程

综合分析遗传算法编码、群体评价与适应度、策

略选择、交叉策略和变异策略等五大关键要素^[14], 建立混合遗传算法流程如下所述。

1) 初始化参数。包括航空集装箱集合中所有航空集装箱器的类型、数量、编号, 箱子集合 B 中各箱子的尺寸等。染色体数为 0, 代数 g 为 0。

2) 产生初始种群。每条染色体由一条基因串构成, 随机抽取不重复自然数 $1 \sim Q$, 表示各种航空集装箱器的使用顺序。

3) 采取轮盘赌方法, 通过交叉与变异策略进行遗传操作, 产生子代。交叉概率为 0.3, 变异概率为 0.7。

4) 采取连续性的策略, 按照染色体代表的航空集装箱器使用顺序进行装箱算法。

5) 计算适应值。按照种群评价策略中的三因素评价方法, 不需对染色体的适应度进行计算, 只需要对第 g 代种群进行评价并排序。

6) 产生新种群。根据精英遗传算法和轮盘赌相结合的方法产生新的种群。

7) 代数为 $g+1$ 时, 算法回到步骤 3 继续进行, 直至最高代数。

8) 得出最优解后, 对染色体进行解码, 即为航空集装箱器最优装箱方案。

3.4 实验结果验证分析

文中以某航空公司的某国际航线选取了 20 d 的历史数据来进行实验。具体试验数据及结果见表 2。

表 2 某航空公司某国际航线实证分析
Tab.2 Empirical analysis of an international airline

日期	体积/m ³	舱位利用率/%		舱位利用率 增幅/%	节省量		
		使用前	使用后		体积/m ³	QM 板数	质量/kg
5.2	147	81.8	85.5	3.8	9	0.82	1145
5.7	66	76.1	79.4	3.3	3	0.27	382
5.9	160.9	74.4	81.2	6.8	16	1.45	2036
5.11	131.9	76.3	82.9	6.5	12	1.09	1527
5.14	129.7	76.5	83.8	7.2	14	1.27	1782
5.16	81.1	72.2	74.8	2.6	3	0.27	382
5.18	127	78.3	82.4	4.2	7	0.64	891
5.21	120	74.0	78.8	4.9	9	0.82	1145
5.23	124.5	71.1	76.8	5.7	11	1.00	1400
5.25	87.75	66.9	69.5	2.5	3.5	0.32	445
5.28	72.1	75.3	82.1	6.8	7	0.64	891
5.30	85.5	68.3	72.2	3.9	6	0.55	764
6.1	178.6	81.2	88.0	6.8	15	1.36	1909
6.6	144	76.3	79.5	3.1	6	0.55	764
6.8	186.5	70.5	72.0	1.5	4	0.36	509
6.11	60.6	77.8	86.1	8.3	7	0.64	891
6.13	60.9	74.3	76.7	2.4	3	0.27	382
6.15	63.4	69.4	72.5	3.1	3	0.27	382
6.18	79.9	75.1	81.2	6.1	7	0.64	891
5.2	52.3	76.0	80.4	4.4	3	0.27	382

实验结果验证表明, 20 d 国际航线的数据可知, 舱位利用率平均提升了 5%, 说明模型和算法提升了航空货运舱容利用率, 装载得到有效的优化^[15]。

4 结语

文中基于航空集装箱特性提出了混合遗传算法, 综合分析遗传算法编码、群体评价与适应度、策略选择、交叉策略和变异策略等五大关键要素后, 建立混合遗传算法流程进行全局寻找最优优化方案, 解决了多航空集装箱装箱最优化结果, 从而得出如下结论。

1) 结合航空集装箱装载机理, 对比同时性、预分配和连续性等 3 种一般策略后, 提出采取连续性策略作为多航空集装箱装箱算法。

2) 把精英选择策略的精英遗传算法与轮盘赌的简单遗传算法相结合, 形成文中的混合遗传算法, 所计算出的装载方案较人工计算更精确、更稳定且经济效益更高。

目前, 在整个中国航空业, 尚无任何软件系统可以实现货物舱位编排的自动计算, 所有的计算工作均由人工完成, 效率较为低下。各航空公司使用人工计算时, 考虑计算数据总量较少, 难以在有限的时间内实现最优方案求解, 因此, 下一步需要把这种算法转化为高度智能化的软件系统, 对航空货运自动化与工作流程标准化具有一定的推动意义。

参考文献:

- [1] 陈丙成, 李艳华. 基于启发式算法的单航空集装箱的装箱优化设计[J]. 包装工程, 2020, 41(17): 244—251.
CHEN Bing-cheng, LI Yan-hua. Optimal Design of Packing for Single Unit Load Device Based on Heuristic Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(17): 244—251.
- [2] 曹先彬, 刘克胜, 王煦法. 基于免疫遗传算法的装箱问题求解[J]. 小型微型计算机系统, 2000, 21(4): 361—363.
CAO Xian-bin, LIU Ke-sheng, WANG Xu-fa. Solve Packing Problem Using An Immune Genetic Algorithm[J]. Mini-micro Systems, 2000, 21(4): 361—363.
- [3] 梅国建, 赵中凯, 唐伟. 器材分层集装问题的遗传算法应用研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2003(3): 50—53.
MEI Guo-jian, ZHAO Zhong-kai, TANG Wei. Research of Genetic Algorithm for the Delaminating Packing Problem of Equipment[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2003(3): 50—53.
- [4] 刘胜, 朱凤华, 吕宜生, 等. 求解三维装箱问题的启发式正交二叉树搜索算法[J]. 计算机学报, 2015, 38(8): 1530—1543.
LIU Sheng, ZHU Feng-hua, LYU Yi-sheng, et al. A Heuristic Orthogonal Binary Tree Search Algorithm for Three Dimensional Container Loading Problem[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(8): 1530—1543.
- [5] 李灿毅, 张沙清. 基于 WEB 的多容器多货物三维装箱系统构建研究[J]. 电脑知识与技术, 2016, 12(19): 183—184.
LI Can-yi, ZHANG Sha-qing. Research on the Construction of Multi Container and Multi Cargo 3D Packing System Based on Web[J]. Computer Knowledge and Technology, 2016, 12(19): 183—184.
- [6] 张森均. 基于遗传算法的多维装箱问题的研究[J]. 电子世界, 2017(10): 81.
ZHANG Sen-jun. Research on Multidimensional Packing Problem Based on Genetic Algorithm[J]. Electronics World, 2017(10): 81.
- [7] 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.
- [8] 张玉梅, 陈仰鹏, 陈开活, 等. 基于遗传算法的适配装箱方法、装置、设备和存储介质: 中国, 109447311A[P]. 2019-03-08.
ZHANG Yu-mei, CHEN Yang-peng, CHEN Kai-huo, et al. Adaptive Packing Method, Device, Equipment And Storage Medium Based on Genetic Algorithm: China, 109447311A[P]. 2019-03-08.
- [9] 何利文, 唐澄澄, 周睿, 等. 基于遗传算法的 SDN 增强路径装箱问题研究[J]. 计算机技术与发展, 2019, 29(7): 150—154.
HE Li-wen, TANG Cheng-cheng, ZHOU Rui, et al. Research on Packing Problem of SDN Path Enhancement Based on Genetic Algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2019, 29(7): 150—154.
- [10] 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.
- [11] 张长勇, 吴智博. 基于 K-means 与关键点的组合行

- 李码放算法[J]. 包装工程, 2019, 40(9): 90—95.
- ZHANG Chang-yong, WU Zhi-bo. Combined Luggage Stacking Algorithm Based on K-means and Key Points[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(9): 90—95.
- [12] 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.
- [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] 崔雪莲, 那日萨, 于明朕, 等. 散套装货物混合装载问题优化算法及其可视化[J]. 工业工程与管理, 2019, 24(4): 81—87.
- CUI Xue-lian, NA Ri-sa, YU Ming-zhen, et al. Optimization Algorithm and Visualization of Mixed Loading Problem for Bulk and Group Cargo[J]. Industrial Engineering and Management, 2019, 24(4): 81—87.
- [15] 秦鉴. 铁路适盘货物装载方案优化及系统开发[D]. 北京: 北京交通大学, 2015: 23—25.
- QIN Jian. System Development on Optimization of Railway Suitable Palletized-goods Loading Program[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015: 23—25.