

基于混合遗传算法的飞机腹舱装载优化

张长勇*, 王彤

(中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300)

摘要: **目的** 以航空运输背景下货舱行李的码放问题为研究对象, 旨在实现货舱空间利用率的最大化。**方法** 在考虑行李姿态、货舱空间、体积、重量、不重叠等多种实际约束的条件下, 搭建航空行李码放模型, 设计一种启发式与改进遗传算法相结合的混合遗传算法。首先利用基于极值点的启发式算法对初始种群加以优化, 加快种群进化速度, 得到初始高质量装载方案; 然后通过设计混合选择及混合变异算子, 利用改进的遗传算法对多组可行方案寻优, 进而得到货舱空间利用率最大、垛型重心偏移量最小的装载布局方案; 最后通过某机场自助行李托运系统采集的真实旅客行李数据进行实验, 并实现装载方案的可视化。**结果** 利用偏大、偏小和混合型 3 种行李数据进行实验测试, 实验结果表明在满足货舱多种实际约束的条件下, 混合遗传算法平均空间利用率达到 89.71%, 相比已有货舱码垛算法提高了 9.25 个百分点, 垛型规划更加科学合理。**结论** 所提算法可快速收敛并防止局部最优, 对于不规则货舱空间以及异构行李具有更好的适应性, 可实现货舱码垛的快速合理布局规划。

关键词: 三维装箱; 航空行李; 混合遗传算法; 多约束

中图分类号: TB485.3; TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)21-0200-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.21.027

Optimization of Aircraft Cargo Hold Loading Based on a Hybrid Genetic Algorithm

ZHANG Changyong*, WANG Tong

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

ABSTRACT: The work aims to study the baggage stacking in the cargo hold under the background of air transportation, so as to maximize the utilization of cargo hold space. Considering practical constraints such as baggage posture, volume, weight, non-overlapping requirements, a model for aviation baggage storage was developed. Additionally, a hybrid genetic algorithm combining heuristic techniques with an improved genetic algorithm was designed. Firstly, an extreme points-based heuristic algorithm was employed to optimize the initial population and accelerate the population evolution speed to obtain high-quality initial loading schemes. Then, through the design of hybrid selection and mutation operators, the improved genetic algorithm was used to optimize the multiple feasible schemes, resulting in a loading layout scheme with maximum cargo space utilization rate while minimizing deviation of palletizing center of gravity. Finally, an experiment was conducted with real passenger baggage data collected from an airport self-service baggage check system to visualize the loading scheme. The baggage data in oversized, undersized, and mixed types were selected for experimental testing. The results demonstrated that under the conditions of satisfying various practical constraints of cargo holds, the average space utilization rate of the hybrid genetic algorithm reached 89.71%. This represents an improvement of 9.25% compared to existing cargo hold stacking algorithms, resulting in more scientific and reasonable stacking planning. The proposed algorithm can converge quickly and prevent local optima, showing better adaptability to

收稿日期: 2024-06-21

基金项目: 中央高校高水平培育项目 (3122023PY04)

*通信作者

irregular cargo hold spaces and heterogeneous luggage. It enables rapid and reasonable layout planning for cargo hold stacking.

KEY WORDS: three-dimensional packing; air baggage; hybrid genetic algorithm; multiple constraints

航空行李运输是客运服务必不可少的组成部分,而目前我国航空行李装卸大多依靠工人的技能和经验,存在人工码放思维能力有限、劳动强度高、装卸效率低、空间浪费大等问题。因此,开展航空运输背景下行李码放规划问题的研究成为提升航空运输效率的关键环节之一,相关核心技术的应用对于提高航空运输企业效益、降低人员劳动强度、实现民航货运行业降本增效具有重要的现实意义。

在当前航空行李处理流程中,飞机货舱行李码放问题作为亟需解决的关键问题,属于三维装箱问题,是 NP-hard 问题。对此,遗传算法由于具有卓越的全局搜索能力和灵活的问题建模特性,近年来已成为解决此类问题的广泛应用方法,许多组合算法都是基于遗传算法设计而成的^[1-2]。张钧等^[3]考虑多种实际约束条件,以体积利用率最大化为目标,提出了一种融合遗传算法和模拟退火的混合算法以解决集装箱装载问题。陈丙成等^[4]将遗传算法与贪心算法融合,同时配合三维空间分割方法,以解决航空集装箱的装箱最优问题,其装载方案较人工计算更精确且更具稳定性。周丽等^[5]针对多箱型三维装箱问题,分别从装箱顺序和带有改进型算子这 2 方面设计混合遗传算法,以提高电商仓储领域打包环节包装箱的利用率。Yang 等^[6]针对三维料箱设计和包装问题,设计了一种由遗传算法和放置算法组成的双层启发式方法,以获得总成本最小的装箱方案。Tsao 等^[7]针对物流背景下的三维多箱型装箱问题,将模拟退火和遗传算法相结合,以最大限度地减少所需箱子数量和箱子的总未使用空间。Yang 等^[8]针对电商物流背景下的多阶开维三维矩形包装问题,提出了一种将遗传算法与 Gurobi 求解器相结合的新型元启发式方法,以提高求解质量和计算效率。

尽管许多学者对装箱问题的算法设计进行了深入研究,但这些研究主要集中在理论层面,忽视了实际工程中对特定应用场景及各种现实约束条件的需求。因此,一些研究人员基于实际应用,设计了针对特定场景的算法,并将实际的约束条件融入其中^[9-11]。Kuo 等^[12]提出了一种将非支配排序遗传算法 II 和多目标粒子群优化算法相结合的元启发式方法,以求解考虑车辆平衡和集装箱利用率的多目标集装箱装载问题。Yan 等^[13]针对具有时间窗口和三维载荷约束的车辆配送问题,提出一种基于 Metropolis 准则的自适应大邻域搜索算法与遗传算法相结合的 2 层方法以最小化运输成本。Kang 等^[14]针对物流领域的三维装箱问题提出一种改进遗传算法,并利用剩余空间约束下的砌墙方法堆放货物,提高了装箱效率和空间利用率。Rajaci 等^[15]针对装卸码头的多集装箱装载问题,提出

了一种基于列生成的启发式算法,以在合理时间内提供总成本最小的解决方案。Zhou 等^[16]针对空运代理的货运计划问题开展了研究,将偏置随机密钥遗传算法与两阶段贪婪启发式算法相结合以求得运输物的最优路线规划和可行的装箱方案。

综上所述,目前针对三维装箱算法的研究多集中在集装箱或车辆的装载方面,虽能达到较高的空间利用率,但仍存在实际约束条件考虑不全面、缺乏对不规则箱体空间的研究等问题。鉴于开展飞机腹舱行李码放问题的研究具有其特殊性,如约束条件多、实时性要求高、货舱空间不规则等,本文在综合考虑行李姿态和不规则货舱空间等多种实际约束的前提下,提出了一种混合遗传算法。该算法融合了基于极值点的启发式算法和改进的遗传算法,并利用乘机旅客真实的行李数据进行了验证,展示了该算法在不规则空间制约下仍能提高货舱空间利用率的显著优势,解决了现有三维装箱算法难以适用于不规则货舱空间及异构行李的问题。

1 问题描述

当前我国客机种类繁多,各种机型的货舱尺寸各不相同,但它们都具有不规则的空间结构。为便于研究,本文以民航客机的主力机型,即空客 A319 的货舱为研究的基础模型。图 1 展示了该机型货舱的外部轮廓,图 2a 和图 2b 分别展示了前货舱的纵截面和舱门的相关参数。

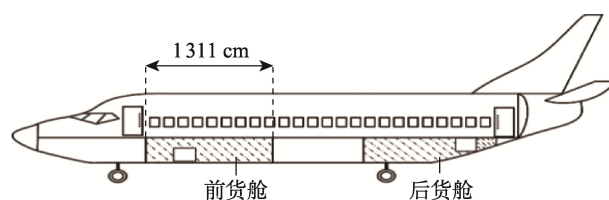


图 1 A319 型客机货舱
Fig.1 Cargo hold of A319 aircraft

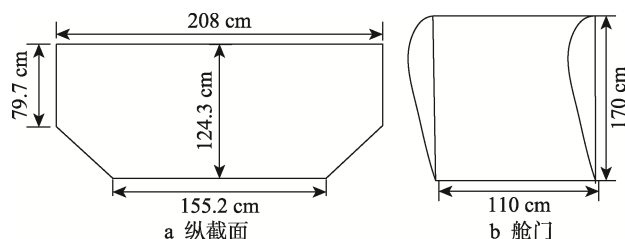


图 2 A319 客机前货舱参数
Fig.2 Forward cargo hold parameters of A319 aircraft

飞机腹舱行李码放问题具备其独有的特点,如货舱内部空间不规则、行李尺寸和重量各异、乘客对行

李损耗的敏感度较高等。针对上述问题,本文将飞机腹舱行李码放问题定义如下:在固定尺寸的飞机货舱内,面对体积和质量各异的行李,寻找一种最优的装载方案,确保所有行李都能装载,并在此基础上最大化行李垛型的密度,同时最大限度地减少货舱内的失衡现象。经过对相关文献的深入分析和实际需求的详细调查,本文确定了如下约束条件。

货舱体积与质量约束:行李的总体积和总质量不得超过货舱的最大容积和承载能力。

货舱空间约束:每件行李的尺寸必须符合货舱门的尺寸要求,行李码放完毕形成垛型的长度、宽度及高度在货舱的空间范围内。

不重叠约束:码放时,任意2个行李都必须彼此独立放置,不得有重叠或嵌入现象。

装载顺序约束:考虑航空行李码垛过程中的顺序装载,以适应实时码放。

行李姿态约束:为了方便摆放带轮行李箱,应把短边作为高度边,面积较大的那一面平放在地面上。行李的摆放方式有2种:在确保行李的各个面水平或垂直于货舱底面的前提下,以长宽面为底面,可以进行90°水平旋转。

鉴于实际问题较为复杂,故需对问题作简化,提出以下假设条件^[17]。

1) 行李的重心密度均匀,其重心即为几何中心。

2) 行李具有一定的承重能力,因挤压引起的行李变形可忽略,可允许多层码放。

3) 行李形状假定为规则长方体。在实际空运中,乘客携带的行李以各类带轮行李箱和硬质包装箱为主,即使少数行李形状不规则,将其视为长方体也不会影响装载,故假设合理。

4) 货舱的左、右下方都是光滑的斜面,前后的倾斜角度相同。

2 数学模型

飞机货舱码垛是一种单箱装载问题,要求在满足货舱复杂约束条件的前提下,尽可能地减少空间的使用。图3展示了建立空间直角坐标系的方法:将货舱的左边缘线、下边缘线和后边缘线的延长线交点作为坐标原点,货舱底面为XY平面,垂直向上的方向作为Z轴。符号说明如下: w_j 、 h_j 、 d_j 、 m_j 为待码放的第 j 个行李的宽度、高度、深度和质量; $W_{\max}$ 、 $W_{\min}$ 、 $H_{\max}$ 、 $H_{\min}$ 、 D 为货舱内部的宽度(最大)、宽度(最小)、高度(最大)、高度(最小)和深度; W_d 、 H_d 为货舱门的宽度和高度; S_j 、 P_j 为行李传送车上行李顺序与行李装载顺序; (x_{lj}, y_{lj}, z_{lj}) 为第 j 个已完成装载行李的左、后、下角坐标; (x_{rj}, y_{rj}, z_{rj}) 为第 j 个已完成装载行李的右、前、上角坐标; n 为行李的总数量; M 为货舱最大承重量; r_{CM_i} 为任意装载行李 i 与YZ面的距离; d_x 为货舱底面中心值; $(x_{r\max}, y_{r\max}, z_{r\max})$ 为行李垛型中右、前、上角坐标的最大值。

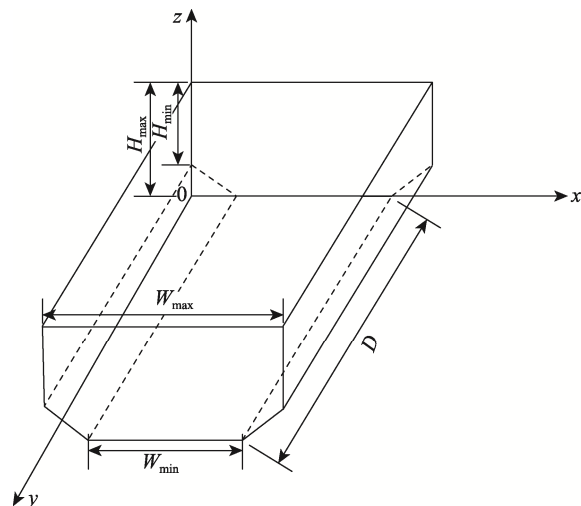


图3 飞机货舱内部坐标图

Fig.3 Coordinate diagram of aircraft cargo hold interior

据此,建立航空行李码放布局优化数学模型:

$$\min\{w_j, h_j, d_j\} \leq \min\{W_d, H_d\} \quad (1)$$

$$c \leq \max\{W_d, H_d\} \quad (2)$$

$$\text{其中, } c \in \{c | w_j, h_j, d_j, c \neq \min\{w_j, h_j, d_j\}, c \neq \max\{w_j, h_j, d_j\}, \forall j \in \{j | j=1, 2, \dots, n\}\}$$

$$\max\{w_j, h_j, d_j\} \leq \max\{W_{\max}, H_{\max}, D_{\max}\} \quad (3)$$

$$\min\{w_j, h_j, d_j\} \leq \min\{W_{\min}, H_{\min}, D_{\min}\} \quad (4)$$

$$\text{其中, } \forall j \in \{j | j=1, 2, \dots, n\}$$

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

$$y_{rj} - y_{lj} = h_j \quad (6)$$

$$[(x_{rj} - x_{lj}) - w_j][z_{rj} - z_{lj} - d_j] = 0 \quad (7)$$

$$u \neq v \quad (8)$$

$$\text{其中, } \forall u \in \{x_{la} \leq u \leq x_{ra}\}, \forall v \in \{x_{lb} \leq v \leq x_{rb}\}$$

$$\forall a, b \in \{a=1, 2, \dots, n, b=1, 2, \dots, a, \dots, n\}$$

$$S_j = P_j, \forall j \in \{j | j=1, 2, \dots, n\} \quad (9)$$

$$x_{rj} \leq W_{\max}, y_{rj} \leq D, z_{rj} \leq H_{\max} \quad (10)$$

$$\begin{cases} x_{rj} \geq \frac{W_{\max} - W_{\min}}{2} - \frac{z_{rj}}{H_{\max} - H_{\min}} \times \frac{W_{\max} - W_{\min}}{2}, \\ z_{rj} \leq H_{\max} - H_{\min} \\ x_{rj} \leq W_{\max}, z_{rj} \geq H_{\max} - H_{\min} \end{cases} \quad (11)$$

$$P_{\min} = \left| \frac{\sum_{i=1}^n r_{CM_i} m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} - d_x \right| + \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n w_i h_i d_i}{[0.5 \times (H_{\max} - H_{\min}) \times (W_{\max} + W_{\min}) + W_{\max} \times H_{\min}] \times y_{\max}} \right) \quad (12)$$

其中, 式 (1)~(2) 为飞机货舱门约束, 表示所有行李全部需要通过货舱门放至货舱完成码放, 该约束条件规定, 单个行李的长度、宽度、高度之中的最小值和中间值不得超过货舱门的宽度和高度; 式 (3)~(4) 为行李尺寸约束, 以确保各个行李都可以放至飞机货舱内; 式 (5) 为载重约束, 表示行李装载后的总质量不得超过货舱的承重能力; 式 (6)~(7) 为行李姿态约束, 式 (6) 限定行李只能沿高度方向旋转, 式 (7) 规定行李只能水平或垂直于货舱方向放置; 式 (8) 为嵌入约束, 确保行李在码放时不会彼此重叠; 式 (9) 为顺序约束, 表示行李需要依照传送带上的到达顺序依次码放; 式 (10)~(11) 为货舱尺寸约束, 共同表示行李码放垛型的尺寸必须小于飞机货舱尺寸; 式 (12) 为优化目标, 旨在最大化货舱空间利用率的同时, 最大限度地减小货舱中垛型的重心偏移量。

3 算法设计

用于解决货舱行李码放问题的混合遗传算法由 2 部分组成: 基于极值点的启发式算法和改进的遗传算法。通过基于极值点的启发式算法生成初始码放方案, 即产生初始种群; 在此基础上, 利用改进的遗传算法在多个可行码放方案中进行寻优, 最终获得货舱空间利用率最大、垛型重心偏移量最小的码放布局方案。如图 4 所示为算法的装载流程。

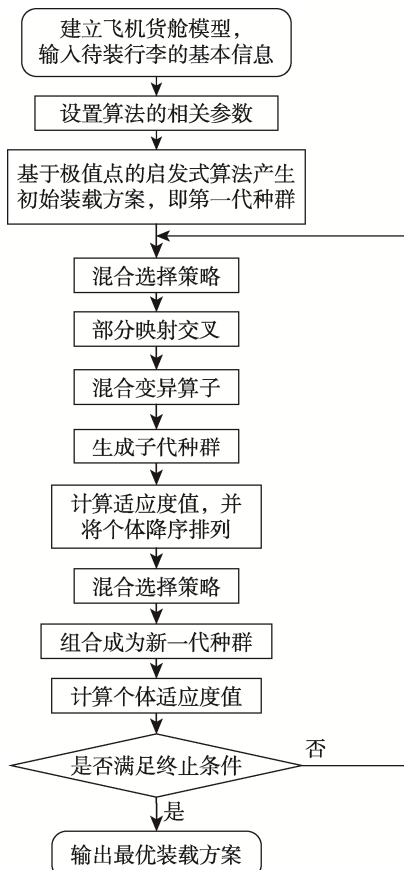


图 4 算法装载流程
Fig.4 Algorithm loading flow

3.1 基于极值点的启发式算法

针对不规则货舱空间, 相比于采用传统种群初始化方式, 即采用随机排序方法随机产生多条染色体个体组成所需的初始种群^[18], 本文引入基于极值点的启发式算法对初始种群优化, 该策略能生成高质量初始种群, 加快种群进化速度, 保证种群的多样性。如图 5 所示, 其流程主要包括 3 个部分: 生成、选择、去除极值点。

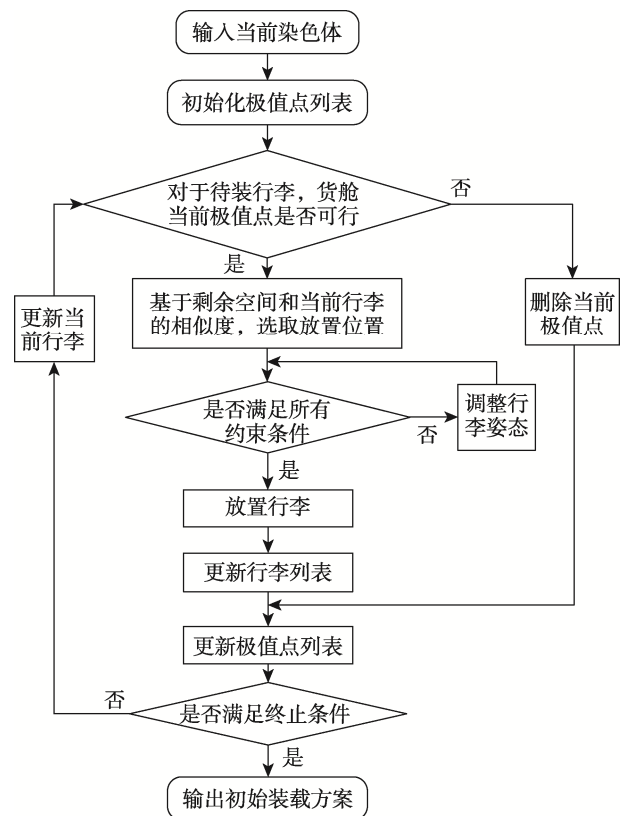


图 5 基于极值点的启发式算法流程
Fig.5 Heuristic algorithm flow based on extreme points

3.1.1 极值点的生成

极值点的初始列表仅包含货舱的左前下角, 如式 (13)。

$$\left(\frac{W_{\max} - W_{\min}}{2}, 0, 0 \right) \quad (13)$$

当行李 i 被放置在极值点 (x_i, y_i, z_i) 时, 该点从列表中删除, 并添加 3 个点, 即 $(x_i + w_i, y_i, z_i)$ 、 $(x_i, y_i + d_i, z_i)$ 和 $(x_i, y_i, z_i + h_i)$ 。

3.1.2 极值点的选择

对于每个行李 i , 根据式 (1)~(11) 约束条件判断每个极值点的可行性。对于每个可行的极值点 e , 通过式 (14) 进行评估。 (rx_e, ry_e, rz_e) 指的是 e 的相关空间的维度。行李 i 被放置在具有最高评价函数的极值点上, 然后更新极值点列表。

$$fit_{ei} = \begin{cases} N, & \text{if } rx_e = w_i, ry_e = d_i, \\ & \text{AND } rz_e = h_i \quad \text{two or more satisfy} \\ N/2, & \text{if } rx_e = w_i, ry_e = d_i, \\ & \text{AND } rz_e = h_i \quad \text{only one satisfy} \\ & \text{or } \max\{W_{\max}, D, H_{\max}\} \times 3 - \\ & (rx_e + ry_e + rz_e - w_i - d_i - h_i) \end{cases} \quad (14)$$

其中, N 是一个足够大的正数, 以确保在 3 种条件下 fit_{ei} 的差异, 例如 $N = \max\{W_{\max}, D, H_{\max}\} \times 10$ 。

3.1.3 去除极值点

如果极值点相关空间维度对应的长、宽、高均小于所有未装行李的长度、宽度和高度, 则将该点从极值点列表中删除。

3.2 改进的遗传算法

遗传算法能对 NP-hard 问题进行快速、随机的全局搜索, 但存在局部搜索能力较差、收敛速度较慢、寻优结果欠佳的问题^[19]。在本节中, 为快速准确地求解行李装载问题, 进行了以下关键修改: 提出一种混合选择算法, 有助于快速收敛并防止局部最优; 引入混合变异算子丰富种群多样性, 避免早熟并跳变局部最优。

3.2.1 编码与解码

本文算法的编码通过两段式编码方式来实现, 其中包括行李装载顺序与放置状态 2 个部分。行李每种布局方案对应编码长度为 $2n$ 的符号串: $S = (S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n, S_{n+1}, \dots, S_{n+i}, \dots, S_{2n})$, $S_1 \sim S_n$ 表示行李的装载顺序, 与每件行李的编号相对应; $S_{n+1} \sim S_{2n}$ 表示行李的放置方式。在允许其任意旋转的情况下, 每件行李有 6 种不同的摆放方式, S_{n+i} 用自然数 1~6 表示, 但由于本文添加了行李姿态约束, 只允许以长宽面为底面, 可水平 90° 旋转, 共 2 种放置方式, 则 S_{n+i} 取 1、2。S 编码可以表示编码为 $S_1 \sim S_n$ 的行李按照不同放置姿态码放至飞机货舱。

解码时, 第 i 个待码放的行李按照染色体 S 的基因 S_i 、 S_{n+i} 分别代表的行李装载顺序、放置状态进行装载。例如, 解码后的结果 (5, 2, 3, 1, 4-2, 1, 1, 2, 2) 表示行李的装载顺序为 5, 2, 3, 1, 4, 分别按照编号为 2, 1, 1, 2, 2 的放置状态码放至飞机货舱中。行李放置状态如图 6 所示。

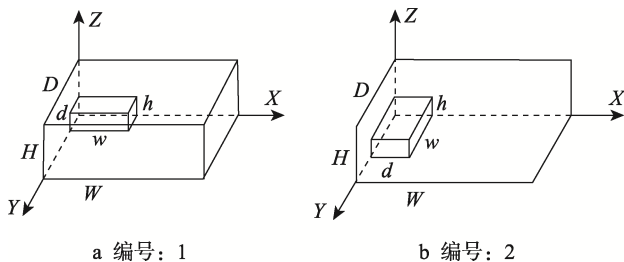


图 6 行李放置状态示意

Fig.6 Illustration of the baggage placement status

3.2.2 适应度函数和混合选择算子

适应度函数的任务是对种群个体的优劣进行评估, 本文算法把目标函数设为适应度函数^[20]。针对本文货舱行李码放问题, 目标函数值越小则个体越优。假设种群中有 N 个个体, C_i 是第 i 个个体, $f(C_i)$ 表示 C_i 的适应度值。即对种群的任意个体 C_i , 其适应度为

$$f(C_i) = \left| \frac{\sum_{i=1}^n r_{CM_i} m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} - d_x \right| + (1 - \sum_{i=1}^n w_i h_i d_i / \{[0.5 \times (H_{\max} - H_{\min}) \times (W_{\max} + W_{\min}) + W_{\max} \times H_{\min}] \times y_{\max}\}) \quad (15)$$

此处, 对货舱空间利用率和重心偏移量设置了相等的权重, 以确保优化目标的平衡, 从而得到综合性能较为均衡的解决方案。等值权重赋予算法在多变条件下保持稳定性的能力, 无需频繁调整优化策略, 从而提高算法的适应性。此外, 这种权重设置作为一个基准, 便于根据后续实际效果的反馈调整各目标的相对重要性, 维护多优化目标之间的动态平衡, 以增强算法整体的适应性和灵活性。

一旦确定了所有个体的适应度值, 就会选择一些优秀的个体进入下一代。选择算子的作用是为一代选择一些符合条件的染色体, 良好的选择算子将有助于快速收敛并防止局部最优^[21-23]。传统选择算子如轮盘赌策略、锦标赛策略等, 充分体现了遗传算法的“优胜劣汰”机制, 但在个体进化效率不高的情况下, 这些策略的收敛速度较慢, 甚至可能出现过早收敛的现象。为了应对上述问题, 本文在选择算子的设计过程中引入“精英”选择思想, 仅选择种群中最优秀的个体, 因此能显著加快收敛速度。然而, 如果种群的遗传多样性不足, 则可能导致算法早熟, 陷入局部最优。为此, 本文设计了混合选择算子对种群进行选择操作, 即按照一定比例进行个体优选。

本文采用混合选择策略。对初始种群进行混合选择时, 通过计算适应度值对个体进行降序排列, 选择排名前 3/4 的种群规模数量的个体直接进入下一代, 其余 1/4 种群规模数量的个体进行后续的部分映射交叉等遗传操作, 从而构成子代种群。对子代种群进行混合选择时, 通过计算适应度值 (此处只需重新计算通过交叉变异操作产生的新个体适应度值), 选择排名前 3/4 的种群规模数量的个体直接进入下一代, 其余 1/4 种群规模数量的个体按照基于极值点的启发式算法产生, 从而组成新一代种群。对于新一代种群, 只需重新计算按照基于极值点的启发式算法产生的新个体适应度值。通过采用混合选择策略, 保持了种群的多样性, 防止算法过早收敛, 提高了算法整体的效率和解的质量。

3.2.3 部分映射交叉

本文使用部分映射交叉法,通过随机选择编码序列中的 2 个交叉点,将 2 点之间的区段作为交叉操作的目标区域,进行编码值的交换。具体步骤如下:首先,依据部分映射关系对第 1 部分的编码值进行交换;然后,按照前一部分交叉点的位置,在相应位置交换第 2 部分的编码值。图 7 展示了交叉过程的示例。

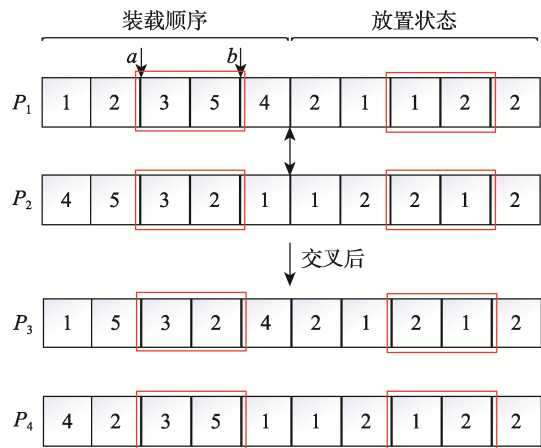


图 7 交叉示意
Fig.7 Cross diagram

3.2.4 混合变异算子

变异算子丰富了种群多样性,防止遗传算法陷入局部最优^[24]。本文提出了一种将交换变异算子和反转变异算子相结合的混合变异算子。为了使用交换和反转变异算子,首先生成 1~n 的 2 个随机整数 p_1 和 p_2 作为变异点。假设种群中有 N 个个体, S_i 是第 i 个个体。为了避免算法过早收敛,装载顺序采用反转变异算子,放置状态采用交换变异算子。在反转变异操作中,将行李装载顺序 $S_i^{p_1}$ 和 $S_i^{p_2}$ 之间的基因片段进行反转。具体方法是:首先在父代中随机选择 2 个变异点,然后在子代中将这 2 个变异点之间的基因片段以相反的顺序重新排列。在交换变异操作中,行李放置状态 $S_i^{n+p_1}$ 和 $S_i^{n+p_2}$ 交换。本文通过混合变异算子的设计合理进行种群变化,加强种群的多样性,防止非成熟收敛现象的发生,同时避免交叉操作导致的局部收敛问题。变异过程示例如图 8 所示。

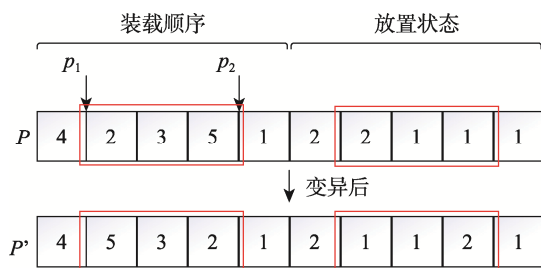


图 8 变异示意
Fig.8 Mutation diagram

4 实例验证

为验证混合遗传算法在处理飞机不规则货舱空间及异构程度不同行李方面的适应性,选取了 3 类真实行李数据进行测试,包括偏大、偏小和混合型,结果显示算法能高效生成货舱内部行李的优良布局方案。

目前,大多数关于机场背景下的三维装载研究主要集中在集装箱的装载规划问题上,而本文则聚焦于不规则货舱空间内的行李码放问题,且针对的是真实行李数据,暂仅发现文献[25]可直接用作比较的对象。为更好地对比实验效果,本文采用与该文献相同的行李数据进行实验测试,行李基本参数见表 1。将启发式货舱码垛算法和混合遗传算法分别单独运行 20 次,其效果对比见表 2,其中各项指标均为算法独立运行 20 次所得到的平均值。结果表明,通过混合遗传算法生成的装载方案在空间利用率上表现更优,且能为货舱留下更多剩余空间装载其他货物,行李码放更合理科学,算法求解快速高效。

通过采用混合遗传算法,生成的货舱码放效果如图 9 所示,图 9a~9c 分别展示了 3 类行李数据的码放效果。

在空间利用率方面,由于偏大和偏小型行李组的异构性低于混合型的,故其码放效果相对更优,垛型整齐度更高,产生的空隙也更少。综合 3 组实验结果,使用启发式货舱码垛算法的空间利用率平均为 80.46%,而采用混合遗传算法的空间利用率提升至 89.71%,这表明本文所提混合遗传算法可显著提高空间利用率。

在算法求解时间方面,2 种算法均可快速高效实现行李的实时布局规划,3 组实验数据的 20 次平均计算时间均在 1 s 以内,完全满足行李处理现场的时间要求。

在货舱可再利用容积方面,采用本文混合遗传算法,3 组实验最终布局结果的平均垛型密度达到 89.71%,这也意味着货舱仍留有 71.15%的空间可用于装载其他货物,即相较于启发式货舱码垛算法,货舱可再利用容积提高了 4.80 百分点。行李垛型的布局规划合理,在满足复杂货舱空间限制的情况下,能最大限度地利用货舱空间,以便于后续装载其他货物,从而为航空公司创造更多的收益。

表 1 行李基本参数
Tab.1 Basic baggage parameters

参数	第 1 组 (偏大型)	第 2 组 (偏小型)	第 3 组 (混合型)
平均长度/cm	58.8	35.8	44.0
平均宽度/cm	44.9	27.5	30.6
平均高度/cm	33.8	23.7	28.5
平均质量/kg	17.4	8.5	14.5
行李数量/件	80	120	100

表 2 2 种行李码垛算法效果对比
Tab.2 Comparison of effects of two baggage palletizing algorithms

货物 实验组	启发式货舱码垛算法				混合遗传算法			
	空间 利用率/%	平均运行 时间/s	货舱可再利用 容积/%	重心 偏移量/cm	空间 利用率/%	平均运行 时间/s	货舱可再利用 容积/%	重心 偏移量/cm
偏大型	81.24	0.22	66.15	8.25	89.74	0.19	70.58	7.56
偏小型	82.63	0.34	68.34	7.62	91.85	0.30	73.14	6.42
混合型	77.52	0.27	64.57	9.53	87.53	0.22	69.73	8.27
平均	80.46	0.28	66.35	8.47	89.71	0.24	71.15	7.42

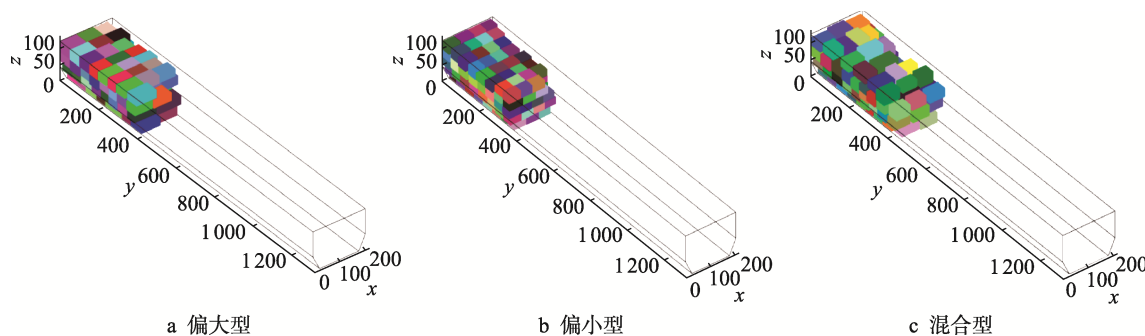


图 9 货舱码放效果
Fig.9 Renderings of stacking in cargo hood

在垛型重心偏移量方面,主要考虑飞机的平衡问题,2种算法皆可满足各行李组的垛型重心偏移量在飞机货舱允许范围内,基本达到了货舱码垛对垛型重心偏移的要求。

5 结语

针对不规则飞机货舱的行李码放问题,在满足货舱实际装载约束的前提下,提出了一种启发式与改进遗传相融合的混合遗传算法。该算法除考虑体积、质量、嵌入等常见约束外,还特别考虑了货舱门、行李姿态约束。利用偏大、偏小和混合型3种行李数据进行实验测试,结果表明,该算法在多种不同工况皆能快速提供合理优良的码放布局方案,从而有效提高行李垛型的密度,最大限度地利用货舱空间,以便后续装载其他货物,为航空公司创造更多的收益。在未来的研究中,考虑到航空货舱装载的复杂性和特殊性,还需进一步探索纳入载重利用率等多优化目标及增加行李承载能力等约束条件。此外,可继续优化数学模型和装载算法,并在此基础上扩展应用至物流仓储管理和集装箱码头操作等领域潜在的不规则空间装载场景,进一步验证其广泛的适用性和灵活性。

参考文献:

- [1] BOUKEDROUN M, DUVIVIER D, AIT-EL-CADI A, et al. A Hybrid Genetic Algorithm for Stochastic Job-Shop Scheduling Problems[J]. RAIRO - Operations Research, 2023, 57(4): 1617-1645.
- [2] DUAN S L, JIANG S L, DAI H, et al. The Applications of Hybrid Approach Combining Exact Method and Evolutionary Algorithm in Combinatorial Optimization[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2023, 10(3): 934-946.
- [3] 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, 47. ZHANG J, HE K T. Study on Hybrid Genetic and Simulated Annealing Algorithm for Three-Dimensional Packing Problems[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(14): 32-39, 47.
- [4] 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 B C, LI Y H. Optimal Design of Packing for Single Unit Load Device Based on Heuristic Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(17): 244-251.
- [5] 周丽, 杨江龙, 赵俊辉, 等. 基于混合遗传算法的多箱型三维装箱问题研究[J]. 包装工程, 2022, 43(21): 213-223. ZHOU L, YANG J L, ZHAO J H, et al. Research on Multi Box 3D Packing Problem Based on Hybrid Genetic Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(21): 213-223.
- [6] YANG Y, WU Z L, HAO X D, et al. Two-Layer Heuristic for the Three-Dimensional Bin Design and Packing Prob-

- lem[J]. *Engineering Optimization*, 2024, 56(10): 1601-1638.
- [7] TSAO Y C, TAI J Y, VU T L, et al. Multiple Bin-Size Bin Packing Problem Considering Incompatible Product Categories[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 247: 123340.
- [8] YANG J L, LIU H W, LIANG K B, et al. A Genetic Algorithm with Lower Neighborhood Search for the Three-Dimensional Multi-Order Open-Size Rectangular Packing Problem[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2024, 2024(1): 4456261.
- [9] 吴蓓, 丁文英, 杜彦华, 等. 基于重力装载的自适应随机算法求解多箱型三维装箱问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2020, 26(11): 3084-3093.
- WU B, DING W Y, DU Y H, et al. Adaptive Random Algorithm Based on Gravity Loading to Solve 3D-MBSBPP[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(11): 3084-3093.
- [10] GZARA F, ELHEDHLI S, YILDIZ B C. The Pallet Loading Problem: Three-Dimensional Bin Packing with Practical Constraints[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 287(3): 1062-1074.
- [11] ZHU W W, CHEN S, DAI M, et al. Solving a 3D Bin Packing Problem with Stacking Constraints[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, 188: 109814.
- [12] KUO R J, HO P C, ZULVIA F E. Application of Metaheuristics Algorithm on a Multi-Objective Container Loading Problem Considering Container's Utilization and Vehicle's Balance[J]. *Applied Soft Computing*, 2023, 143: 110417.
- [13] YAN M, CHU L Y, WU X C. The Split Delivery Vehicle Routing Problem with Time Windows and Three-Dimensional Loading Constraints[J]. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 2024, 20(2): 786-807.
- [14] KANG Z J, GUAN Y, WANG J K, et al. Research on Genetic Algorithm Optimization with Fusion Tabu Search Strategy and Its Application in Solving Three-Dimensional Packing Problems[J]. *Symmetry*, 2024, 16(4): 449.
- [15] RAJAEI M, MOSLEHI G, REISI-NAFCHI M. The Multiple Container Loading Problem with Loading Docks[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2024, 31(3): 1671-1698.
- [16] ZHOU G H, LI D, BIAN J S, et al. Airfreight Forwarder's Shipment Planning: Shipment Consolidation and Containerization[J]. *Computers & Operations Research*, 2024, 161: 106443.
- [17] 邢志伟, 侯翔开, 李彪, 等. 基于动态四叉树搜索的民航行李车码放算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2022, 48(12): 2345-2355.
- XING Z W, HOU X K, LI B, et al. Civil Aviation Luggage Cart Stacking Algorithm Based on Dynamic Quadtree Search[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2022, 48(12): 2345-2355.
- [18] 崔会芬, 许佳瑜, 杨京帅, 等. 基于遗传算法的3L-CVRP 优化问题研究[J]. *交通信息与安全*, 2018, 36(5): 124-131.
- CUI H F, XU J Y, YANG J S, et al. An Optimization of 3L-CVRP Based on a Genetic Algorithm[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2018, 36(5): 124-131.
- [19] 张长勇, 翟一鸣. 基于改进遗传算法的航空集装箱装载问题研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(7): 1345-1352.
- ZHANG C Y, ZHAI Y M. Air Container Loading Based on Improved Genetic Algorithm[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(7): 1345-1352.
- [20] LU Y Q. The Three-Stage Integrated Optimization of Automated Container Terminal Scheduling Based on Improved Genetic Algorithm[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021: 6792137.
- [21] 崔会芬, 许佳瑜, 朱鸿国, 等. 基于改进遗传算法的三维单箱装箱问题研究[J]. *工业工程与管理*, 2018, 23(1): 86-89.
- CUI H F, XU J Y, ZHU H G, et al. Study on Three Dimensional Single Box-Packing Based on Improved Genetic Algorithm[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2018, 23(1): 86-89.
- [22] CHEKANIN V A, CHEKANIN A V. Multimethod Genetic Algorithm for the Three-Dimensional Orthogonal Packing Problem[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1353(1): 012109.
- [23] HUANG Y Y, HUANG S F, JIN C. 3D-Container Loading Problem with a Distribution Plan Based on Hybrid Quantum Genetic Algorithm[J]. *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 2021, 55(4): 117-132.
- [24] NISHIYAMA S, LEE C, MASHITA T. Solving 3D Container Loading Problems Using Physics Simulation for Genetic Algorithm Evaluation[J]. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 2021, E104.D(11): 1913-1922.
- [25] 张倩倩. 基于多目标优化的航空行李实时码放算法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2021: 32-40.
- ZHANG Q Q. Research on Real-Time Baggage Stacking Algorithm Based on Multi-Objective Optimization[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2021: 32-40.