

基于改进遗传算法的航空集装箱装载优化

张长勇, 刘佳瑜

(中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300)

摘要: **目的** 为保证货物在运输中的平稳性与安全性, 优化航空运输中集装箱的装载布局问题, 提出一种改进遗传算法并开展航空集装箱装载应用研究。**方法** 考虑货物装载的 7 种现实约束条件, 以集装箱体积利用率为优化目标, 建立航空集装箱多箱装载优化模型。采用三段式实数编码随机产生初始种群, 并加入最优个体保护策略增强遗传算法的全局收敛性, 结合不同约束条件构造合理的适应度函数。**结果** 以真实航空货物信息作为实验数据, 实验结果表明在满足多种现实约束的条件下, 集装箱体积平均利用率由优化前的 74.07% 提高到 83.99%, 装载件数明显增加, 适用于航空集装箱的运输装载。**结论** 算法能够应用于航空集装箱装载运输中, 为航空运输业实现智能化装载、提高运输效率创造了条件。

关键词: 现实约束; 航空集装箱; 多箱装载; 改进遗传算法; 可视化

中图分类号: TP301.6; TP181; U169 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)11-0253-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.11.033

Optimization of Aviation Container Loading Based on Improved Genetic Algorithm

ZHANG Chang-yong, LIU Jia-yu

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

ABSTRACT: In order to ensure the smoothness and safety of cargo in transportation and optimize the problem of container loading layout in air transportation, an improved genetic algorithm is proposed and the research of air container loading application is carried out. Considering seven practical constraints of cargo loading, taking the container volume utilization rate as the optimization objective, the multi-container loading optimization model of air container is established. The initial population is randomly generated by three-stage real coding, and the optimal individual protection strategy is added to enhance the global convergence of the genetic algorithm. A reasonable fitness function is constructed by combining different constraints. Taking the real air cargo information as experimental data, the experimental results show that the average utilization rate of container volume is increased from 74.07% to 83.99%, and the number of loading pieces is significantly increased, which is suitable for air container transportation. The algorithm can be applied to air container loading and transportation, creating conditions for the realization of intelligent loading and the improvement of transportation efficiency in the air transportation industry.

KEY WORDS: realistic constraints; air container; multi container loading; improved genetic algorithm; visualization

随着民航业的快速发展和智慧机场的加快建设, 实现航空货物的自动化装卸势在必行。装载算法是解决自动化装载的关键问题之一, 在航空运输领域中,

由于货舱形状的特殊性, 航空集装箱的规格和型号较多, 且多属于不规则集装箱, 此类切割型集装箱的装载研究是对传统三维装箱问题的扩展, 有利于充分利

收稿日期: 2021-07-13

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。

用货舱的有限空间,对提高航空货运效率和行业竞争力至关重要。

用三维装箱算法解决实际货物装箱问题已成为近年来的研究热点。在以规则集装箱为研究对象时,王素欣等^[1]提出并引入了多概率随机游走策略和修复策略,尽可能增加解的多样性;刘胜等^[2]提出多层树搜索算法,将墙构造法与水平层构造法相结合,该算法适用于强异构货物装载中;Yaru等^[3]利用320个典型实例验证调整之后的化学反应优化算法的有效性;Mauro等^[4]将多种不同方法融合之后,提出一种整体算法来满足集装箱使用数量最少,是对经典装箱问题的扩展;李俊等^[5]以最小化船舶堆栈占用数量为目标,针对内河集装箱船舶配载决策问题进行模型优化;目前仅有很少一部分国外学者如Junqueira等^[6]将货物的动态稳定性作为约束条件进行考虑;桂黎红等^[7]以功能沙发为例,通过研究多点装卸,对货物的快速合理装卸的算法进行设计与优化;Yu等^[8]为保证每个盒子的合理分配,提出一种曲折排序的启发式算法;Mahvash等^[9]、吴蓓等^[10]、那日萨等^[11]在算法设计中考虑了重心、承载能力、混装约束等多种约束条件,分别提出了较为实用的算法。

在以航空集装箱为研究对象时,Paquay等^[12]以被截断的平行六面体容器为研究载体,将应用限定在航空集装箱上,通过考虑物品的易碎性、稳定性,验证所提的混合整数线性规划的有效性;Felix等^[13]考虑了与集装箱形状和尺寸、航空公司和运输目的地相关的约束,提出基于左空位的排序修正方法。Célia等^[14]将三维装箱问题延伸到空运装载中,通过考虑箱体的承重、脆弱性、稳定性和方向性提出一种建设性的启发式算法;张长勇等^[15]提出一种混合遗传算法去解决多箱型集装箱装载问题。

综上所述,目前国内外对于三维装箱问题的已有大量的研究,但针对非标准集装箱体的研究较少。在实际的航空运输行业中,尺寸、容积、形状各异的非标准集装箱可以降低货运成本和提高运输效率,因此有必要对于航空集装箱的装载优化问题开展研究。文中以实现集装箱体积利用率最大为优化目标,设计一种改进遗传算法,来对航空集装箱装载应用进行研究,为机器码垛提供方案的同时使得装载更加安全、高效。

1 问题描述

航空集装箱多箱装载问题可以描述为:将 n 种数量有限的货物装入到多个尺寸设置为 $W \times H \times D$ 的集装箱中,最大限度地利用每个集装箱的空间;其中集装箱的最大容积与载质量为 V 、 M ,货物 n_i 的尺寸为 $w_i \times h_i \times d_i$ 、质量为 m_i 。为提高航空集装箱运输中对集装箱的合理利用,进而提高经济效益,在满足实际约

束的情况下使各集装箱的体积利用率最大,约束条件主要围绕以下几点。

1) 体积约束。装载货物总体积不得大于集装箱可容纳的最大体积。

2) 质量约束。装载货物的总质量不得大于集装箱可承受的最大质量。

3) 货物稳定性约束。放置过程中不得悬空放置,避免造成货物损坏。

4) 方向约束。考虑实际装载中货物的摆放状态,文中货物只能沿水平方向旋转放置。

5) 重心约束。装载货物之后,集装箱垛型的整体重心应处于合理的范围内。

6) 不重叠约束。垛型中的任意货物之间不得相互重叠嵌入。

7) 承重约束。为确保下层货物的完好性,多个货物交错叠放时要求下层货物承载能力优于上层货物。

假设条件的提出能够降低实际装箱问题复杂性,从而简化数学模型,文中假设条件主要围绕以下几点。

1) 货物形状均为规则长方体,尺寸各异且均小于集装箱尺寸。

2) 货物由于挤压产生的变形忽略不计。

3) 货物可放置在集装箱中的任意位置。

4) 货物到达同一目的地,不考虑中途装卸。

2 模型建立

将集装箱的左后下角坐标作为空间直角坐标系的原点,以各集装箱底面为 xy 平面、垂直底面向上为 z 轴。符号说明如下: n 、 N 分别为待码放货物以及集装箱总数量; α_{ij} 为0/1变量,用于判断货物是否装入集装箱中; λ_j 为0/1变量,用于判断航空集装箱是否使用; M_j 、 V_j 为集装箱 j 的最大载质量及最大容积; w_i 、 h_i 、 d_i 、 m_i 、 (x_{gi}, y_{gi}, z_{gi}) 为货物 i 的长、宽、高、体积、质量及其重心坐标; B_i 、 L_i 分别为货物所承受的重量及其最大承受力; $[x_{con1}, x_{con2}]$ 、 $[y_{con1}, y_{con2}]$ 、 $[0, z_{con}]$ 分别为 x 、 y 、 z 轴的重心安全区间; (x_i, y_i, z_i) 、 (x'_i, y'_i, z'_i) 分别为货物 i 在集装箱中的左后下位置坐标和右前上角坐标。

将目标函数设置为集装箱的体积利用率,表示为:

$$\max U = \frac{\sum_{i=1}^n w_i h_i d_i}{\sum_{j=1}^N V_j \lambda_j} \quad (1)$$

对 $\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \forall j \in \{1, 2, \dots, N\}$, 有:

$$\sum_{i=1}^n m_i \alpha_{ij} \leq M_j \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n v_i \alpha_{ij} \leq V_j \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} = n \quad (4)$$

$$z'_i - z_i = h_i \quad (5)$$

$$\sum_p S_{pi} = (x'_i - x_i)(y'_i - y_i) \quad (6)$$

式中: $S_{pi} = [(x'_i - x_i + x'_p - x_p) - (\max\{x'_p, x'_i\} - \min\{x_p, x_i\})] \times [(y'_i - y_i + y'_p - y_p) - (\max\{y'_p, y'_i\} - \min\{y_p, y_i\})]$,
 $p \in \{p | z_p = z'_i, x_q \leq x_i, y_q \leq y_i, x'_q \geq x'_i, y'_q \geq y'_i\} \cup \{p | z_p = z'_i, \max\{x'_p, x'_i\} - \min\{x_p, x_i\} < x'_i - x_i + x'_p - x_p, \max\{y'_p, y'_i\} - \min\{y_p, y_i\} < y'_i - y_i + y'_p - y_p\}$ 。

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{con1} \leq \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} m_i x_{gi}}{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} m_i} \leq X_{con2} \\ Y_{con1} \leq \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} m_i y_{gi}}{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} m_i} \leq Y_{con2} \\ Z_{con1} \leq \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} m_i z_{gi}}{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} m_i} \leq Z_{con} \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_i + \frac{1}{2} w_i - x_k - \frac{1}{2} w_k \geq \frac{1}{2} w_i + \frac{1}{2} w_k \\ y_i + \frac{1}{2} h_i - y_k - \frac{1}{2} h_k \geq \frac{1}{2} h_i + \frac{1}{2} h_k \\ z_i + \frac{1}{2} d_i - z_k - \frac{1}{2} d_k \geq \frac{1}{2} d_i + \frac{1}{2} d_k \end{array} \right. \quad (8)$$

$$B_i = \sum_q m_q + \sum_p m_p \frac{S_{pi}}{w_p h_p} < L_i \quad (9)$$

式中: $S_{pi} = [(x'_i - x_i + x'_p - x_p) - (\max\{x'_p, x'_i\} - \min\{x_p, x_i\})] \times [(y'_i - y_i + y'_p - y_p) - (\max\{y'_p, y'_i\} - \min\{y_p, y_i\})]$,
 $q \in \{q | a_{qi} = a_{ij}, z_q \leq z'_i, x_q \geq x_i, y_q \geq y_i, x'_q \leq x'_i, y'_q \leq y'_i\}$,
 $p \in \{p | a_{pi} = a_{ij}, z_p \leq z'_i, \max\{x'_p, x'_i\} - \min\{x_p, x_i\} < x'_i - x_i + x'_p - x_p, \max\{y'_p, y'_i\} - \min\{y_p, y_i\} < y'_i - y_i + y'_p - y_p\}$ 。

在以上数学优化模型中, 式(2)、式(3)分别表示质量与体积约束, 要求货物总体积与总质量均小于集装箱的最大容纳质量、最大容积; 式(4)表示待装载货物必须装入集装箱中; 式(5)为货物的放置姿态约束, 货物只能在水平方向旋转摆放; 式(6)表示货物稳定性约束; 式(7)表示重心约束; 式(8)表示不重叠约束, 为了保持稳定性, 任意 2 个货物之间不可重叠放置; 式(9)表示货物承重约束, 不同货物交错叠放时要求下层货物承载能力优于上层货

物, 保证下层货物不被损坏。

3 算法设计

3.1 货物装载次序原则

集装箱为切割型不规则形状, 集装箱在坐标轴中位置关系见图 1, 货物在装载过程中装载次序会影响最终集装箱的体积利用率, 因此设定文中货物装载次序原则: 水平方向上依次沿 x 轴至 y 轴方向放置每层; 在高度方向沿下底面至上依次放置, 即沿 z 轴方向放置每层。

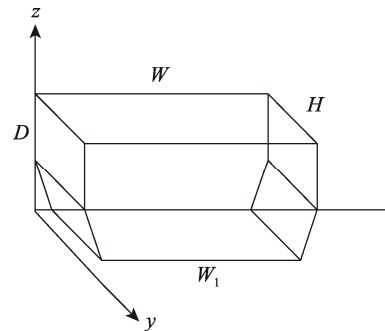


图 1 集装箱示意图

Fig.1 Container schematic diagram

3.2 个体编码与解码

3.2.1 编码预处理及集装箱数量计算

1) 集装箱数量 N 。在编码之前根据待装载货物信息计算所需集装箱的数目有利于提高编码能力与有效性。

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i h_i d_i)}{\sum_{j=1}^4 V_j} \quad (10)$$

2) 货物及集装箱编号。将待码放货物 i 和待装载集装箱 j 分别按照自然数序列依次进行编号。

3) 放置方向编号。因货物只在水平方向上旋转放置, 若货物的放置方向为 $w_i // W_j$ 、 $h_i // H_j$ 、 $d_i // D_j$, 则编号为 1; 若货物放置方向为 $h_i // W_j$ 、 $w_i // H_j$ 、 $d_i // D_j$, 则编号为 2。

3.2.2 编码及解码设计

多集装箱装载问题受多种因素的影响, 文中的影响因素为货物编号、货物放置方向、集装箱编号, 选用三段式的实数编码法, 货物的每种装载方案对应编码长度为 $3n$ 的符号串 $S = (S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n, S_{n+1}, \dots, S_{n+i}, \dots, S_{2n}, S_{2n+1}, \dots, S_{3n})$, $S_1 - S_n$ 为货物编号; $S_{n+1} - S_{2n}$ 表示货物放置状态, 因货物只可水平旋转放置, 则 S_{n+i} 取 1 或 2; $S_{2n+1} - S_{3n}$ 为装载集装箱编号, 则 S 编

码可以表示编码为 S_1 — S_n 的货物按照 2 种放置姿态装进编码为 S_{2n+1} — S_{3n} 的航空集装箱中。

3.3 算法设计

3.3.1 评价函数

通过适应度函数的大小来评价群体中个体所对应装载方案的优劣,在实际装载中,最大化集装箱的体积利用率能够节省使用数量,从而降低运输成本,因此将体积利用率的大小作为优化目标,适应度函数表示见式(11)。

$$F' = \frac{\sum_{i=1}^n w_i h_i d_i}{\sum_{j=1}^N V_j \lambda_j} \quad (11)$$

对于违反装载重心约束、装载承重约束以及货物不重叠约束条件的个体,在求解适应度函数的过程中给予相应的惩罚使得符合条件且较优的个体能够有较大的概率被选择。通过考虑约束条件,将不可行的装载方案进行惩罚操作,即在原函数基础上减去相对应的罚值,以此来提高被选择的概率。评价函数表示为式(12),其中, H 表示罚函数, k 表示惩罚因子,文中为获得更多初始解,根据经验选取 $k=1$;式(13)—(15)依次为针对垛型重心、不重叠约束以及承重约束提出的罚函数。

$$F = F' - H = F' - k[\sum_{r=1}^9 \max(0, H_r)] \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{aligned} H_1 &= \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} m_i x_{gi}}{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} m_i} - x_{con2}, H_2 = x_{con1} - \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} m_i x_{gi}}{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} m_i} \\ H_3 &= \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} m_i y_{gi}}{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} m_i} - y_{con2}, H_4 = y_{con1} - \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} m_i y_{gi}}{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} m_i} \\ H_5 &= \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} m_i z_{gi}}{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} m_i} - z_{con} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{aligned} H_6 &= \frac{1}{2} w_i + \frac{1}{2} w_k - (x_i + \frac{1}{2} w_i - x_k - \frac{1}{2} w_k) \\ H_7 &= \frac{1}{2} h_i + \frac{1}{2} h_k - (y_i + \frac{1}{2} h_i - y_k - \frac{1}{2} h_k) \\ H_8 &= \frac{1}{2} d_i + \frac{1}{2} d_k - (z_i + \frac{1}{2} d_i - z_k - \frac{1}{2} d_k) \end{aligned} \right. \quad (14)$$

$$H_9 = B_i - L_i \quad (15)$$

3.3.2 遗传操作过程

对个体进行遗传操作,包括选择、交叉与变异。

1) 选择操作。基于对个体适应度的评估,利用

轮盘赌对个体进行选择,并通过最优个体保护策略来提高较优个体被选择的概率。

轮盘赌:根据每个个体的相对评价价值 $P_i = F_i / \sum F_i$ 来选择个体,第 g 代个体 S_q^g 被选择的概率为:

$$P_g(q) = \frac{[F_g(q) - \min F_g(q)]}{\sum_{q=1}^N [F_g(q) - \min F_g(q)]} \quad (16)$$

最优个体保护策略:马氏链理论表明带有最优保持操作的遗传算法一定收敛到全局最优解^[16]。根据遗传算法中的“适者生存”原则,尽可能保证高适应度值的个体留下,以此来保留最优的算子,因此当生成新一代种群后,根据评价函数大小,用上一代中的最优个体去替代本代中适应度最低的,从而使得最优个体得以保存下来,提高了优秀个体被选择的概率。

2) 交叉操作。交叉操作能够使遗传算法保持较好的全局搜索能力,它可以保证种群在整个过程中的稳定性。利用两点交叉法,在编码符号串 $[1, 3n]$ 中随机产生 2 个交叉点进行基因交换。

3) 变异操作。变异操作可以保证种群的多样性,避免因交叉操作引起的局部收敛。利用顺序逆转变异法,先在父代选择 2 个变异点,然后以相反的顺序在 2 个点之间对基因进行重新排列,以维持种群的多样性。

3.4 改进遗传算法流程

1) 将集装箱的型号、尺寸与货物的基本信息输入程序,计算集装箱数量 N ,进行编码预处理。

2) 设置遗传算法的各个运行参数,令初始迭代概率为 0。

3) 随机生成初始种群 S ,避免算法出现早熟现象,便于全局搜索。

4) 对个体进行解码操作,即根据货物装载次序原则进行装载。

5) 通过将个体适应度函数值降序排列进行比较;采用最优个体保护策略,将前 10% 的个体直接复制到下一代种群中,令 $g=g+1$ 。

6) 对选择后的个体进行交叉、变异操作,返回步骤 4。

7) 根据迭代次数来判断是否结束算法,若迭代次数超过最大迭代次数,则表示满足收敛条件,结束算法,此时最优解为集装箱装载方案;否则转步骤 3。

4 实验验证

4.1 算例对比

文中采用的是随机生成算例,此算例多用于验证复杂多约束条件问题的模型与算法^[6]。表 1 中的参数

设置同文献[6]一致, 取 $W=H=D$, 货物尺寸按表 1 随机生成, 取集装箱尺寸为 $100\text{ cm}\times 100\text{ cm}\times 100\text{ cm}$ 、 $200\text{ cm}\times 200\text{ cm}\times 200\text{ cm}$ 的 2 种, 对每种集装箱下的不同类型货物随机生成 10 组算例, 其平均结果见表 1。

算法运行参数设置: 种群规模、交叉概率、变异概率、迭代次数分别为 50、0.95、0.1、200。

通过选取 Junqueira (2012) [6], 与同样采用相同测试算例的那日萨 (2017) [11] 进行对比, 文献[6]与文献[11]中均包含针对多种现实约束, 以体积利用率最大为优化目标, 提出了求解方法, 因此具有可比性。对比文中所提算法结果见表 2。

由表 2 可以看出, 文中在考虑稳定性以及重心约束条件下, 在体积利用率表现上, 优于文献[11]中提出的启发式搜索算法, 而且文中所提改进遗传算法装载体积利用率更加平均, 究其原因是最优个体保护策略的加入使算法能够收敛到全局最优, 从而使得装载方案中货物放置更加合理; 在计算时间方面与文献[11]所提出的启发式搜索方法接近, 但明显优于文献[6]所提出的精确方法, 因为精确算法在面对这种大规模强异构的求解问题时, 在现有的计算能力下, 寻求最优解变得很难, 而文中提出的启发式算法执行效率较高, 能够满足实际装载运输要求, 验证表明文中算法适用于航空运输装载中。

4.2 实例验证

为更加直观表现文中所提算法的有效性与可信

度, 选取某物流公司采集的具体货物数据进行实际的集装箱装载, 其中货物信息见表 3。

在满足 7 个现实约束条件的前提下对 100 件货物进行装载, 对改进遗传算法运行 30 次求取较优结果。由表 4 可以看出, 优化之后 3 个集装箱平均体积利用率为 83.99%, 较优化前的 74.07% 提高了 9.92%; 优化之后平均装载件数增多了 5.69 件; 平均装载时间为 22.27 s, 在保证较高体积利用率的同时以较快的速度得到装箱方案。计算结果表明所提算法考虑的约束条件比较全面, 与实际工作环境相符, 能够有效提高集装箱利用率, 满足实际工程需要。改进遗传算法在 81 代左右时, 评估值达到稳定, 表明算法能够在短时间内收敛到全局最优解, 且收敛速度较快。

将装载结果进行可视化处理, 以此来反映装载结果以及方案的优越性, 通过装载结果仿真图可以直观看出货物的具体码放位置, 2 个集装箱的具体装载示意图见图 2, 通过不同颜色来反映不同货物。可以看出, 在考虑货物实际的方向约束后货物摆放姿态更符合实际装载情况, 改进遗传算法对装载方案的优化使得集装箱装载更加平均, 体积利用率更大; 将稳定性约束作为罚函数之一, 货物摆放垛型的平均接触率较大, 货物基本不存在因为悬空而出现被损坏的情况; 剩余空间主要集中在了集装箱的“剪角”部分, 究其原因是在装载过程中, “剪角”部分空间狭小, 不能放置异构性较强的航空货物, 在实际装载中, 可以考虑将一些体积较小货物或异形货物集中放置在剩余的“剪角”空间中, 来充分有效地利用集装箱空间。

表 1 算例数据
Tab.1 Example data

货物类型	随机选取区间	货物种类数	算例组
A_k	$[0.25W, 0.75W]$ 、 $[0.25H, 0.75H]$ 、 $[0.25D, 0.75D]$	5	A_5
		10	A_{10}

表 2 算法对比结果
Tab.2 Algorithm comparison results

算例组		W=H=D=100 cm		W=H=D=200 cm	
		空间利用率/%	时间/s	空间利用率/%	时间/s
A ₅	文献[6]	71.44	418.2	66.73	78.31
	文献[11]	72.14	3.7	70.73	5.7
	文中	80.33	3.4	79.12	6.2
A ₁₀	文献[6]	94.02	1 600.76	78.38	1 687.84
	文献[11]	79.97	22.1	77.73	17.8
	文中	82.98	20.5	81.54	18.34

表 3 货物数据
Tab.3 Cargo data

货号	长/cm	宽/cm	高/cm	质量/kg	货号	长/cm	宽/cm	高/cm	质量/kg
1	60	53	85	23.5	51	80	53	76	36.5
2	80	53	78	33.2	52	88	73	75	44.9
3	85	53	69	45.1	53	88	80	79	49.2
4	50	81	80	36.2	54	81	98	70	58.9
5	88	53	80	39.6	55	82	62	75	55.7
6	78	53	79	45.2	56	80	85	80	40.5
7	75	77	50	40.3	57	85	79	83	45.2
8	75	77	43	40.6	58	60	75	78	36.2
9	72	52	77	44.1	59	50	75	78	39.5
10	87	53	60	33.6	60	82	55	76	44.9
11	78	53	80	33.2	61	75	60	65	42.6
12	69	79	53	32.1	62	53	80	76	41.2
13	50	88	80	26.9	63	73	88	60	55.2
14	52	72	75	31.9	64	78	79	80	26.3
15	53	80	85	30.2	65	80	78	81	36.5
16	53	79	76	31.4	66	32	78	81	27.5
17	80	50	85	40.5	67	32	78	81	27.5
18	84	72	52	50.1	68	32	78	82	30.5
19	53	80	96	52.9	69	80	58	82	55.2
20	53	80	78	47.5	70	63	60	86	36.9
21	53	75	79	44.1	71	70	67	78	44.2
22	84	71	50	32.5	72	60	65	90	33.8
23	72	52	92	45.2	73	63	83	75	45.2
24	94	53	69	62.5	74	90	68	80	59.3
25	53	92	90	63.4	75	63	75	87	50.2
26	86	79	83	56.4	76	95	87	65	59.7
27	50	86	78	50.2	77	100	82	70	25.3
28	80	86	52	60.7	78	66	81	60	28.6
29	86	69	53	45.2	79	92	63	80	47.3
30	80	53	76	45.3	80	69	95	53	46.3
31	85	66	76	47.1	81	70	80	80	60.5
32	80	53	76	44.2	82	85	72	72	32.6
33	85	66	76	33.6	83	63	96	80	36.2
34	65	44	76	25.6	84	85	76	79	58.2
35	85	66	76	35.6	85	50	65	82	36.1
36	65	66	55	44.7	86	68	84	72	33.2
37	65	66	52	37.8	87	100	63	80	58.6
38	65	66	33	26.9	88	88	80	53	53.4
39	65	66	43	36.4	89	79	53	75	48.9
40	65	73	80	37.3	90	84	60	80	46.2
41	45	73	80	42.8	91	82	62	82	45.2
42	89	90	80	56.8	92	63	75	79	44.2
43	78	50	81	48.6	93	73	80	75	36.5
44	72	82	75	53.2	94	62	34	60	25.1
45	80	80	85	55.4	95	62	80	33	33.7
46	60	86	83	45.2	96	95	80	55	68.2
47	83	79	85	51.2	97	95	80	48	60.3
48	78	75	81	50.3	98	72	90	75	61.4
49	76	92	55	47.5	99	75	70	75	55.2
50	60	53	70	46.5	100	95	80	33	23.6

表 4 装载结果
Tab.4 Loading results

集装箱 序号	优化前				优化后			
	体积利用率/%	装载件数	装载总体积/m ³	平均装载时间/s	体积利用率/%	装载件数	装载总体积/m ³	平均装载时间/s
AMF1	75.21	25	10.98	19.23	82.37	30	12.03	20.34
AMF2	72.36	31	10.56	20.56	86.28	39	12.60	23.97
AMF3	74.65	27	10.90	20.11	83.32	31	12.16	22.50
平均值	74.07	27.67	10.81	19.97	83.99	33.3	12.26	22.27

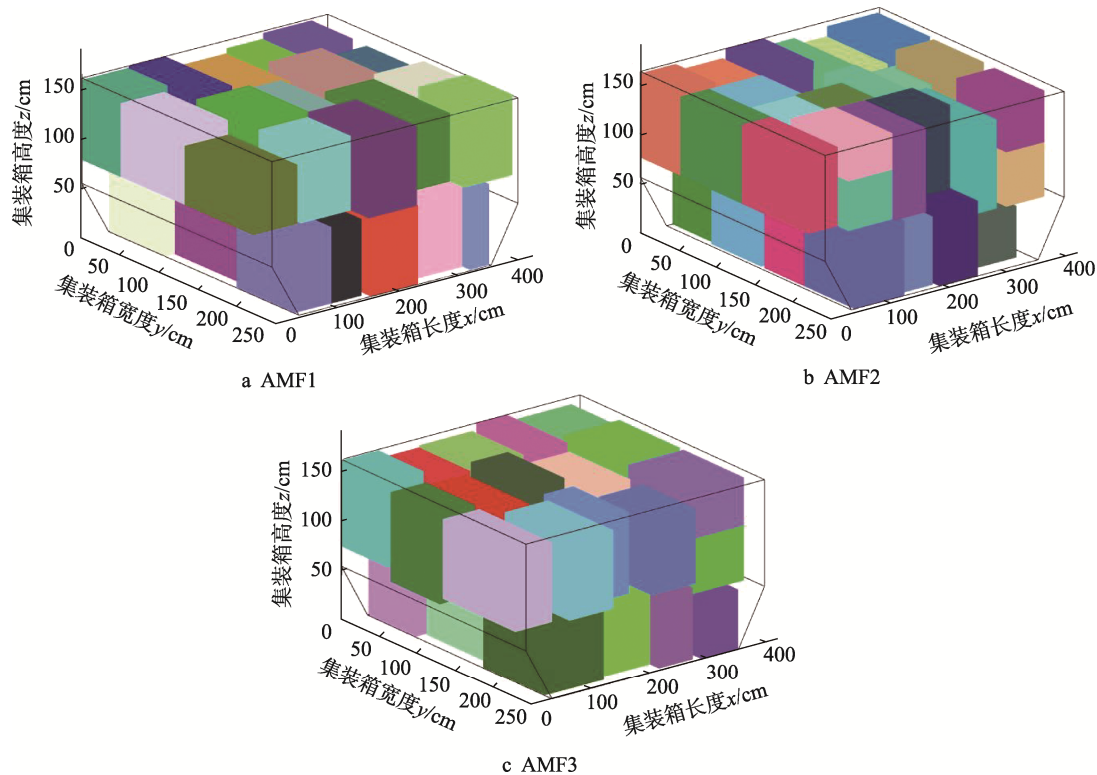


图 2 集装箱装载效果
Fig.2 Effect of container loading

5 结语

文中考虑航空运输中的 7 种现实约束,以航空集装箱的多箱装载优化问题为研究对象,建立以集装箱空间利用率为优化目标的数学模型,提出一种求解多箱装载问题的改进遗传算法。算法采用三段式实数编码法设计货物的放置原则。为提高算法的全局收敛性,在遗传操作中加入最优个体保护策略,设计了罚函数以加强货物垛型的稳定性,进一步提高装载优化效果。通过算例对比,证明所提算法对于物装载有着较好的适应性和有效性。利用某物流公司真实货物数据进行实验验证,3 个集装箱体积平均利用率由优化前的 74.07%提高到 83.99%,装载件数明显增加,装载时间也符合实际装载需求,且能在较短时间内收敛到最优解。结果表明了文中算法适用于航空集装箱的

运输装载,为航空货运业实现智能化装载,进而提高运输效率和行业竞争力创造了有利条件。

参考文献:

[1] 王素欣, 温恒, 卢福强, 等. 货物三维装箱问题建模及其乌鸦搜索算法优化[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(8): 21-30.
WANG Su-xin, WEN Heng, LU Fu-qiang, et al. Modeling of 3D Cargo Loading Problem and Optimization of Crow Search Algorithm[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(8): 21-30.

[2] 刘胜, 沈大勇, 商秀芹, 等. 求解三维装箱问题的多层树搜索算法[J]. 自动化学报, 2020, 46(6): 1178-1187.
LIU Sheng, SHEN Da-yong, SHANG Xiu-qin, et al. A Multi-Level Tree Search Algorithm for Three Dimen-

- sional Container Loading Problem[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(6): 1178-1187.
- [3] SU Ya-ru, YE Yan-ming, CHEN Shu-hao, et al. A Hybrid Chemical Reaction Optimisation Algorithm for Solving 3D Packing Problem[J]. *International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems*, 2021, 14(1/2): 117-131.
- [4] MAURO D, FABIO F, MANUEL I. A Branch-and-Price Algorithm for the Temporal Bin Packing Problem[J]. *Computers and Operations Research*, 2020, 114: 1-16.
- [5] 李俊, 张煜, 计三有, 等. 多箱型内河集装箱船舶配载决策研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(1): 200-207.
- LI Jun, ZHANG Yu, JI San-you, et al. Inland Container Ship Stowage Planning Decision with Multiple Container Types[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019, 19(1): 200-207.
- [6] JUNQUEIRA L, MORABITO R, YAMASHITA D S. Three Dimensional Container Loading Models with Cargo Stability and Load Bearing Constraints[J]. *Computers&Operations Research*, 2012, 39(1): 74-85.
- [7] 桂黎红, 李俚. 面向多点卸货的箱柜类货物的装箱策略研究[J]. *包装工程*, 2020, 41(11): 209-213.
- GUI Li-hong, LI Li. Packaging Strategy of Furniture Goods for Multi-Point Unloading[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(11): 209-213.
- [8] FU Yu, BANERJEE A. Heuristic/Meta-Heuristic Methods for Restricted Bin Packing Problem[J]. *Journal of Heuristics*, 2020, 26(5): 637-662.
- [9] MAHVASH B, AWASTHI A, CHUAHAN 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.
- [10] 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 Bei, DING Wen-ying, DU Yan-hua, et al. Adaptive Random Algorithm Based on Gravity Loading to Solve 3D-MBSBPP[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(11): 3084-3093.
- [11] 那日萨, 崔雪莲, 韩琪玮. 基于实际约束的三维装箱问题优化算法[J]. *工业工程与管理*, 2017, 22(4): 10-16.
- NA Ri-sa, CUI Xue-lian, HAN Qi-wei. An Optimization Algorithm for Solving Three-Dimensional Container Loading Problem with Practical Constraints[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2017, 22(4): 10-16.
- [12] 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.
- [13] FELIX T S, BHAGWAT C R, KUMAR N, et al. Development of a Decision Support System for Air-Cargo Pallets Loading Problem: A Case Study[J]. *Expert Systems With Applications*, 2005, 31(3): 472-485.
- [14] CÉLIA P, SABINE L, MICHAËL S. A Tailored Two-Phase Constructive Heuristic for the Three Dimensional Multiple Bin Size Bin Packing Problem with Transportation Constraints[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 267(1): 52-64.
- [15] 张长勇, 刘佳瑜. 基于混合遗传算法的多箱型集装箱装载问题研究[J/OL]. *北京航空航天大学学报*: 1-11[2021-05-20]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0665>.
- ZHANG Chang-yong, LIU Jia-yu. Research on Multi Container Loading Problem Based on Hybrid Genetic Algorithm[J/OL]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*: 1-11[2021-05-20]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0665>.
- [16] 汪民乐. 遗传算法的收敛性研究[J]. *计算技术与自动化*, 2015, 34(1): 58-62.
- WANG Min-le. Research on Convergence of Genetic Algorithm[J]. *Computing Technology and Automation*, 2015, 34(1): 58-62.

责任编辑: 曾钰婵