

文章编号:1000-4653(2025)S1-0166-09

基于混合启发式算法的集装箱爆炸品 装箱问题研究与优化

钟鑫¹, 任鸿翔¹, 王德龙¹, 韦德鉴²

(1. 大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026;

2. 平陆运河集团有限公司, 广西 南宁 530029)

摘要:在海运危险货物集装箱运输中,科学合理的装箱方案对提升运输安全至关重要。针对运输中危险货物中爆炸品的特殊配装和隔离要求,以最小化所需集装箱数量为目标,提出了一种基于拟人式装载策略的混合粒子群遗传算法(GA-PSO)。该混合启发式算法结合了遗传算法的全局搜索能力和粒子群算法的局部优化能力,通过引入种群多样性监控算法的搜索效率和收敛性,进一步提升了算法性能。通过模拟5组10种爆炸品货物的装箱场景,该算法与遗传算法相比,装箱方案质量更好,时间消耗更少。

关键词:三维装箱问题;混合粒子群遗传算法;拟人式装载策略

中图分类号:U695.2⁺²

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.S1.023

Research and optimization of container explosives packing problem based on hybrid heuristic algorithm

ZHONG Xin¹, REN Hongxiang¹, WANG Delong¹, WEI Dejian²

(1. Dalian Maritime University, School of Navigation, Dalian, 116026;

2. Pinglu Canal Group Co., Ltd, Nanning, 530029)

Abstract: In the container transportation of dangerous goods by sea, a scientific and reasonable loading scheme is crucial to enhance transportation safety. A hybrid particle swarm genetic algorithm based on anthropomorphic loading strategy is proposed for the special fitting and segregation requirements of explosives in dangerous goods, with the goal of minimizing the number of containers required. The hybrid heuristic algorithm combines the global search capability of genetic algorithm and the local optimization capability of particle swarm algorithm and further improves the algorithm performance by introducing population diversity to monitor the search efficiency and convergence of the algorithm. By simulating the packing scenarios of 5 groups of 10 types of explosives cargoes, the algorithm provides a better-quality packing scheme, and less time consumption compared to the genetic algorithm.

Key words: three-dimensional packing problems; hybrid particle swarm genetic algorithm; anthropomorphic loading strategy

据国际海事组织统计,危险货物约占国际海运总量的50%,且随着集装箱吞吐量的持续增长,危险货物集装箱运输量呈稳步上升趋势。在危险货物

中,爆炸品因化学不稳定性,面临火灾、爆炸及环境污染等极高安全风险^[1]。因此,本文聚焦于危险品中第1类爆炸品的集装箱装箱方案,旨在优化海上

收稿日期:2025-04-29

基金项目:广西科技重大专项(桂科AA23062053);广西重点研发计划(AB22080106)

作者简介:钟鑫(2001—),男,硕士研究生,研究方向为船舶配积载。E-mail:zx945256@163.com

通信作者:任鸿翔(1974—),男,教授,博士,研究方向为虚拟现实。E-mail:dmu_rhx@163.com

引用格式:钟鑫,任鸿翔,王德龙,等.基于混合启发式算法的集装箱爆炸品装箱问题研究与优化[J].中国航海,2025,48(增刊1):166-174.

ZHONG X, REN H X, WANG D L, et al. Research and optimization of container explosives packing problem based on hybrid heuristic algorithm[J]. Navigation of China, 2025, 48(Sup. 1):166-174. (in Chinese)

危险货物集装箱的配装效率与安全性。

爆炸品在经过合适包装处理后可视为长方体箱子,常用的 20 英尺和 40 英尺标准集装箱为长方体容器。因此,集装箱爆炸品装箱问题本质上属于三维装箱问题(Three-dimensional Packing Problems, 3D-BPP),且需考虑爆炸品的特殊约束条件。三维装箱问题的求解主要分为装载方式和求解算法两部分。装载方式包括“层”级、空间划分、建堆法等逻辑,而求解算法涵盖数学规划、数值优化和启发式算法^[2]。目前,大多数学者采用启发式算法通过迭代寻优获得近似最优方案。

国内方面,张英贵等^[3]区别于直接将货物构造为货物块的方法,提出了一种基于混合货物分类和结构判断的货物块单元构造方法。刘胜等^[4]采用箱子-片-条-层-实体的顺序生成装载方案,并结合多层树搜索算法求解三维装箱问题。吕雪菊等^[5]采用自适应空间划分的装箱策略,并结合遗传算法对装箱模型进行求解;万飞等^[6]改进传统单链遗传算法为双链,提升装箱效率和精度;张钧等^[7]结合多种算法,构建以集装箱体积利用率最大化为目标的三维装载模型。

国外方面,HARRATH 等^[8]采用一种三阶段分层启发式算法,实现不同尺寸和质量箱子的最少数量均质化组合;ERBAYRAK 等^[9]首次针对扩展问题提出一种多目标混合整数规划模型;MENGHANI 等^[10]分析启发式与元启发式算法,采用改进的遗传算法寻找最优解;NASCIMENTO 等^[11]针对单集装箱装载,提出一种迭代的整数线性规划和约束规划模型;DOMINGO 等^[12]应用粒子群优化算法求解单容器装箱问题。

然而,针对多对多三维装箱问题,现有研究多集中于单一过程的普通货运装箱,暂无涉及危险货物配装与隔离的组合优化问题。此外,在处理大规模多类型货物场景时,现有方法普遍存在配装效率低下和收敛性不足等问题。因此,本文以 20 英尺和 40 英尺标准集装箱为研究对象,聚焦于多类型爆炸品的装箱问题,以最小化所需集装箱数量为目标函数,综合考虑爆炸品的基本和特殊约束,构建一个多约束整数规划模型,在此基础上,提出拟人式装箱策略,并结合遗传算法和粒子群算法优化装箱方案。通过模拟试验验证算法的高效性和收敛性,为集装箱爆炸品装箱问题提供一种可靠的算法支持。

1 问题描述

将一组 m 个 n 种类型的爆炸品合理装载至 20

英尺或 40 英尺两种规格的集装箱内,求所需集装箱数量最少的装箱方案。

1.1 问题假设

为简化实际装箱问题,本文提出以下假设:

- 1) 集装箱内部空间视为标准长方体;
- 2) 爆炸品经过合适包装后可视为标准长方体;
- 3) 在满足所有既定约束条件下,货物可放置于集装箱内任意可行位置。

1.2 约束条件

在研究爆炸品装箱问题时,需优先考虑以下基本约束。1) 重量约束:集装箱内货物总质量不得超过其最大允许有效载荷。2) 体积约束:待装货物总体积必须小于集装箱内部可用体积。3) 尺寸约束:所有货物尺寸需小于 40 英尺集装箱的内部尺寸。4) 重心约束:装载完成后,集装箱重心需保持在合理范围内,以确保运输稳定性。5) 方向约束:货物需遵循正交或平行原则,允许六种标准放置姿态,如图 1 所示。部分爆炸品因特殊性仅允许平放,即两种放置姿态。6) 不重叠约束:每一件货物都必须拥有独立且完整的空间位置,货物之间彼此任意部分互不相交,及货物之间严禁任何形式的重叠。7) 稳定性约束:货物底面必须有集装箱底面或其他货物顶面作为支撑,严禁悬空。

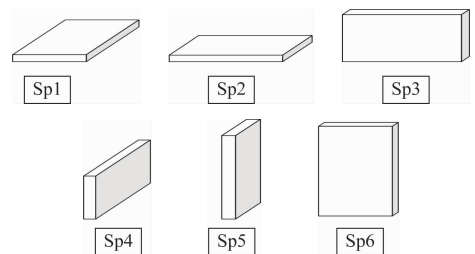


图 1 放置姿态

Fig. 1 Placement pose

此外,鉴于危险货物的特殊性,依据《国际海运危险货物规则》(International Maritime Dangerous Goods Code, IMDG Code)的相关规定,对于仅涉及爆炸品子类间的隔离,不涉及不同货物集装箱之间的积载和隔离要求,如果第 1 类货物在一起能安全地积载或运输而不会明显地增加事故率或在一定量的情况下不会明显提高事故后果等级,可视其为“可配装的”。根据这一标准,第 1 类货物被分成若干配装类。根据 IMDG Code 7.2.7.1.4 允许混合积载的第 1 类货物,如表 1 所示,满足其要求的第 1 类货物可以积载在同一封闭货物运输组件中。

因此在爆炸品装箱时应满足以下隔离约束。

- 1) 除 L 类外,其他类别的爆炸品只要配装类相同,

可以配装。2) L 类爆炸品只能与同一类型的 L 类配装。3) G 和 N 类爆炸品在满足特定条件下可以与 C、D 和 E 类配装。4) C、D 和 E 类爆炸品之间可以相互配装。5) 除 A 和 L 类外, S 类爆炸品可与其他类别的爆炸品相互配装。

表 1 允许混合积载的第 1 类货物

Tab.1 Segregation of Class 1 (explosive) materials

类别	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	N	S
A	X												
C			X	X ⁶	X ⁶		X ¹				X ⁴	X	
D			X ⁶	X ⁶	X		X ¹				X ⁴	X	
E			X ⁶	X ⁶	X		X ¹				X ⁴	X	
F						X							X
G			X ¹	X ¹	X ¹		X						X
H								X					X
J									X				X
K										X			X
L											X ²		
N			X ⁴	X ⁴	X ⁴							X ³	X ⁵
S	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X ⁵	X

综上所述,在满足基本约束和隔离约束的条件下,优化爆炸品装箱方案,构建高效安全的配装策略,确保运输过程的安全性及合规性。

2 模型构建

2.1 变量说明

本文构建的数学模型所用到的变量及相关说明见表 2。

2.2 数学模型

本文数学模型的目标函数定义为所需集装箱的数量最少,目标函数如式所示。

$$\min f(t) = n_{20} + n_{40} \quad (1)$$

$\alpha_{ik} = 1$, 表示箱子被放置到集装箱 k 中, 否则 $\alpha_{ik} = 0$; $\beta_i = 1$, 表示箱子 i 有 6 种放置姿态, 否则 $\beta_i = 0$, 仅允许 2 种平放姿态。

$$\sum_{i \in N} \alpha_{ik} m_i < M_k, k \in D \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} \alpha_{ik} v_i < V_k, k \in D \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_i + l_i \leq L_k, i \in N, k \in D \\ y_i + w_i \leq W_k, i \in N, k \in D \\ z_i + h_i \leq H_k, i \in N, k \in D \end{cases} \quad (4)$$

表 2 辅助变量和说明

Tab.2 Auxiliary variables and descriptions

辅助变量	说明	辅助变量	说明
N	货物集合	n_{20}	20 ft 集装箱数量
D	集装箱集合	n_{40}	40 ft 集装箱数量
L_k	集装箱长度	l_i	货物长度
W_k	集装箱宽度	w_i	货物宽度
H_k	集装箱高度	h_i	货物高度
M_k	集装箱最大载重量	m_i	货物质量
V_k	集装箱体积	v_i	货物体积
(Z_{xm}, Z_{xn})	x 轴方向重心安全区间	X_i	货物重心 x 坐标
(Z_{ym}, Z_{yn})	y 轴方向重心安全区间	Y_i	货物重心 y 坐标
(Z_{zm}, Z_{zn})	z 轴方向重心安全区间	Z_i	货物重心 z 坐标
x_i	货物左下角 x 坐标	x_{ie}	货物右上角 x 坐标
y_i	货物左下角 y 坐标	y_{ie}	货物右上角 y 坐标
z_i	货物左下角 z 坐标	z_{ie}	货物右上角 z 坐标
tp_i	货物配装类	l_{sn}	旋转后长度
α_{ik}	货物 i 是否被放置到集装箱 k	w_{sn}	旋转后宽度
β_i	旋转标识	h_{sn}	旋转后高度

数学模型的约束条件可表达如下:

$$\begin{cases} Z_{xm} < \frac{\sum_{i \in N} \alpha_{ik} m_i X_i}{\sum_{i \in N} \alpha_{ik} m_i} < Z_{xn}, k \in D \\ Z_{ym} < \frac{\sum_{i \in N} \alpha_{ik} m_i Y_i}{\sum_{i \in N} \alpha_{ik} m_i} < Z_{yn}, k \in D \\ Z_{zm} < \frac{\sum_{i \in N} \alpha_{ik} m_i Z_i}{\sum_{i \in N} \alpha_{ik} m_i} < Z_{zn}, k \in D \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} l_{s1} = l_i \wedge w_{s1} = w_i \wedge h_{s1} = h_i, i \in N \\ l_{s2} = w_i \wedge w_{s2} = l_i \wedge h_{s2} = h_i, i \in N \\ l_{s3} = l_i \wedge w_{s3} = \beta_i h_i + (1 - \beta_i) w_i \wedge h_{s3} = \beta_i w_i + (1 - \beta_i) h_i, i \in N \\ l_{s4} = w_i \wedge w_{s4} = \beta_i h_i + (1 - \beta_i) l_i \wedge h_{s4} = \beta_i l_i + (1 - \beta_i) h_i, i \in N \\ l_{s5} = \beta_i h_i + (1 - \beta_i) l_i \wedge w_{s5} = w_i \wedge h_{s5} = \beta_i l_i + (1 - \beta_i) h_i, i \in N \\ l_{s6} = \beta_i h_i + (1 - \beta_i) w_i \wedge w_{s6} = l_i \wedge h_{s6} = \beta_i w_i + (1 - \beta_i) h_i, i \in N \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} P_1 : x_i \leq x_{ie} \wedge x_{ie} \geq x_j, i \in N, j \in N, i \neq j \\ P_2 : y_i \leq y_{ie} \wedge y_{ie} \geq y_j, i \in N, j \in N, i \neq j \\ P_3 : z_i \leq z_{ie} \wedge z_{ie} \geq z_j, i \in N, j \in N, i \neq j \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} z_i + h_i = z_j, i \in N, j \in N, i \neq j \\ x_i = x_j, i \in N, j \in N, i \neq j \\ y_i = y_j, i \in N, j \in N, i \neq j \\ l_j \times w_j \times 0.8 \leq l_j \times w_j, j \in N, i \neq j \end{cases} \quad (8)$$

$$tp_i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13\}, i \in N \quad (9)$$

在上述整数规划模型中,式(1)~(9)为本文的目标函数和约束条件;式(1)为目标函数;式(2)表示质量约束;式(3)表示体积约束;式(4)表示尺寸约束;式(5)表示重心约束;式(6)表示方向约束;式(7)表示不重叠约束,在同一集装箱内,当且仅当 $P_1 \wedge P_2 \wedge P_3$ 成立,两个箱子有重合部分,否则两个箱子没有重合部分;式表示稳定性约束;式表示隔离约束,爆炸品配装类 A~L(不包括 I)、N 和 S,对应数字 1~13。

3 混合启发式算法

海运集装箱配装问题因涉及大规模多类型货物及隔离条件而复杂性较高。传统启发式算法在解决此类问题时存在耗时长、结果质量低和收敛性差等问题。因此,本文提出了一种基于拟人式装载策略(Anthropomorphic Loading Strategy, ALS)的混合粒子群遗传算法,以提高配装效率和结果质量,同时增强算法的收敛性。

3.1 拟人式装载策略

本文装载方式采用简化的拟人式装载策略,其核心在于对放置点进行生成、删除和排序,模拟人工装载思路。在面对大规模多类型货物时,该策略对比其他多数装载策略,以货物类型为整体进行放置,具有规则简单、计算效率高的特点,且其较差解可作为全局优化算法的初始解^[4],为后续启发式算法进一步优化装箱方案提供基础。

3.1.1 放置点的生成

在集装箱装箱问题中,放置点是用于定位货物的三维坐标点。当集装箱为时空,以空间坐标系原点作为初始放置点。货物放置时,将其左下后角与放置点对齐,确保满足各项约束条件。具体过程如下:将货物 j 装入放置点 P_0 ,当满足各项约束时,删除放置点 P_0 ,同时新增 3 个放置点 P_1 、 P_2 和 P_3 ,并存储至放置点的集合中,如图 2a 所示。

基于货物块单元^[3]和空间合并^[13]的研究,本文对放置点的生成做出以下改进:当两个货物同时满

足以下条件时,可将其合并为一个货物。

1) 存在共面:两个货物在两个坐标轴上的投影完全重合。

2) 存在一个轴相接:在第三个坐标轴上,两个货物的投影相接。

以 y 轴方向上货物相接为例,当满足各项约束和以上条件时,两个货物可在 y 轴方向合并,如图 2b 所示。此时,删除原放置点 P_0 ,新增一个放置点 P_1 并存储至放置点集合中。与不合并相比,该方法减少了两个放置点,当面对大规模货物时,可显著优化装箱效率。

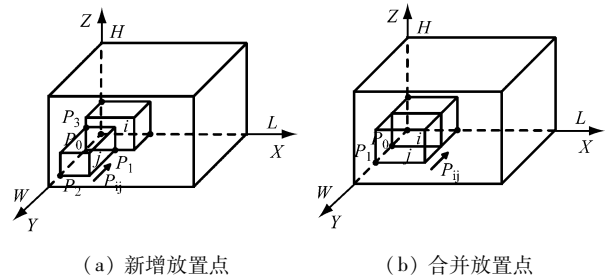


图 2 放置点的生成

Fig. 2 Spawn of drop points

3.1.2 放置点的删除

每一个放置点都是一个潜在的货物放置坐标^[13],为最大化利用集装箱空间,当满足以下任一条件时删除该放置点:

- 1) 待装货物某种放置姿态在该点满足约束且确定装入。
- 2) 待装货物及其他类型货物在该点均不满足约束。

3.1.3 放置点的排序

在放置点集合中,每次生成新的放置点后,会根据货物“先里后外、先低后高”的原则进行排序,优先级依次为 y 、 x 和 z 坐标,模拟人工装载思路,确保集装箱空间的高效利用。

3.1.4 装载策略流程

拟人式装载策略流程如图 3 所示,相关操作下:

- 1) 初始化信息:载入待装货物基本信息,确定货物类型放置顺序及初始姿态。
- 2) 处理放置点:依次检验货物在放置点的装载可行性。若不满足约束条件,检验下一类型货物;若所有剩余类型货物均不满足,则删除该放置点。若满足约束条件,删除该放置点并生成新放置点,随后进行排序。
- 3) 新增集装箱:当前集装箱无可用放置点时,新增一个与待装货物尺寸匹配的集装箱。
- 4) 结束装载:所有货物装载完成后,输出初始

状态下的装箱策略。

该装载策略通过动态调整放置点和集装箱数量,确保装箱过程高效且符合约束条件。

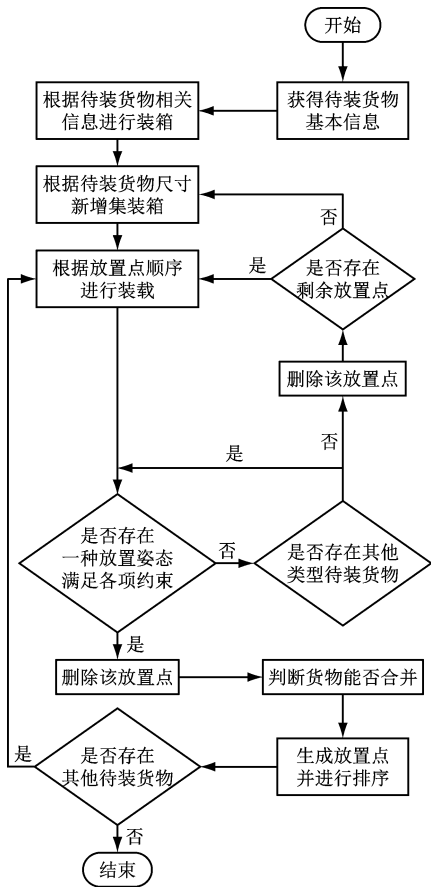


图3 拟人式装载策略流程

Fig. 3 Flowchart of anthropomorphic loading strategy

3.2 混合粒子群遗传算法

遗传算法在求解三维装箱问题中展现出较强的全局搜索能力,但局部搜索效果欠佳^[5-7]。而粒子群算法在局部搜索中表现出色,具有良好的收敛性。因此,本文以遗传算法为基本框架,融入粒子群算法,充分发挥两者优势,更高效地解决爆炸品装箱问题。

3.2.1 遗传算法设计

1) 编解码

本文装箱问题受货物类型放置顺序和初始放置姿态的影响,采用“双链”式实数编码^[6]。假设有 n 种货物需要装载,则每个个体由两个染色体组成,每个染色体包含 n 个基因,如图4所示。

$$\text{双链染色体} = \begin{bmatrix} x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \\ r_1, r_2, r_3, \dots, r_i \end{bmatrix}$$

$x_i \in \{1, \dots, n\}$ 表示类型 i 的货物装载顺序。

$r_i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 表示类型 i 的货物初始放置姿态。

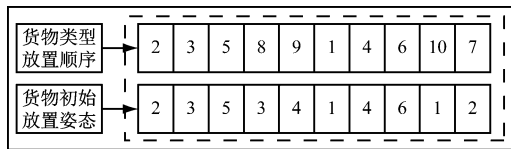


图4 编码示意

Fig. 4 The encoding schematic

2) 适应度函数

本文将所需集装箱数量的倒数作为适应度函数 $f_{fit}(x)$, 依据式(10), 适应度越高, 所需集装箱数量越少, 对应的装箱方案越优。

$$f_{fit}(x) = 1/f(x) \quad (10)$$

3) 选择算子

本文算子选择采用精英保留策略, 及保留最优秀的1/4个体。与传统遗传算法的轮盘赌法相比, 该策略能最大化利用精英个体的基因, 显著提升后代个体质量^[6]。

4) 交叉算子

将保留的1/4精英个体与全部父类中随机1/4个体进行两两交叉, 获得1/2子类个体。同时, 按照父类的产生方法随机生成1/2新个体作为补充, 形成下一代子类种群。通过不断引入新的个体, 扩大算法的搜索范围。

染色体采用顺序交叉: 在两个父代染色体中随机选择两个交叉点, 将父代染色体1的基因片段复制到子代1的对应位置, 再从父代染色体2中按顺序填入子代1中缺失的基因, 另一个子代以类似方式生成如, 图5所示。

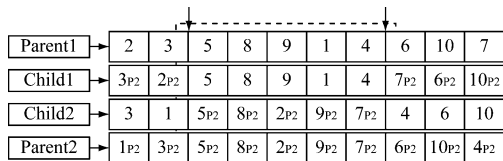


图5 染色体交叉示意

Fig. 5 The chromosome crossing schematic

5) 变异算子

在种群进化过程中, 变异是保持染色体多样性的重要环节。染色体采用逆序变异: 随机选择一段连续的基因序列, 并将其反转如图6所示。

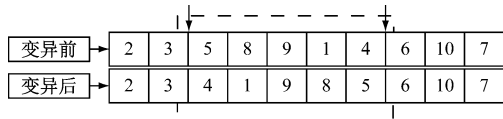


图6 染色体变异示意

Fig. 6 The chromosomal variation schematic

6) 种群多样性

现有体现算法搜索能力的研究较少, 本文通过

将种群多样性作为衡量算法搜索范围和收敛程度的关键指标,能够有效反映算法的搜索行为和性能。根据公式,较高的多样性表明算法在适应度最高个体附近有较大的探索范围,而较低的多样性则表明算法在进行局部较优搜索,种群可能趋于收敛。通过监测每次迭代的种群多样性 $f_{div}(t)$,可以深入了解算法在搜索过程中的动态变化,从而为算法的优化和参数调整提供重要依据。

$$f_{div}(t) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (1/f_{fit}(x_i) - \min f(t))^2}}{N} \quad (11)$$

式中: t 表示迭代次数, $\min f(t)$ 表示当前迭代种群中适应度最高个体对应所需的集装箱数量。

3.2.2 粒子群算法设计

遗传算法在选择、交叉和变异操作后虽能保持较高的种群多样性,但精英个体染色体的破坏会导致搜索方向的不确定性和收敛速度的降低。为此,本文提出改进策略:在每次遗传操作后融入粒子群算法思想,将种群个体视为粒子,利用个体经验和群体经验调整粒子位置,使其在解空间中逼近最优解。根据式,将粒子位置更新公式分解为两种模式,以增强算法的收敛能力。

$$\begin{cases} x_i(t+1) = \omega x_i(t) + c_1 r_1 (p_i - x_i(t)) \\ x_i(t+1) = \omega x_i(t) + c_2 r_2 (g_i - x_i(t)) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $x_i(t)$ 表示第 t 次迭代粒子 i 的位置; ω 为惯性权重,控制全局与局部搜索的平衡; c_1 和 c_2 是学习因子,分别调节个体极值和群体极值对粒子位置更新的影响; r_1 和 r_2 是在 $[0,1]$ 范围内的随机数,用于引入随机性。 p_i 为粒子 i 的历史最优位置, g_i 为整个种群的历史最优位置。

3.3 算法总流程

基于拟人式装载策略的混合遗传粒子群算法求解集装箱爆炸品三维装箱问题的流程如图7所示,步骤如下:

步骤1:初始化种群:随机生成货物类型放置顺序和初始姿态的列表,并设置算法参数。

步骤2:采用拟人式装载策略对每个个体的染色体序列进行装箱。

步骤3:根据装载结果计算个体适应度和种群多样性。

步骤4:检查是否满足迭代终止条件,若满足则输出最优方案;否则继续流程。

步骤5:执行选择、交叉和变异操作。

步骤6:更新个体历史最优位置和种群历史最优位置。

步骤7:依据粒子群算法更新个体位置。

步骤8:返回步骤2

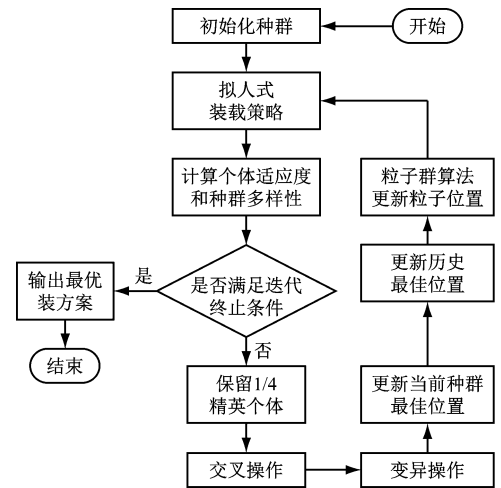


图7 算法流程图

Fig. 7 Algorithm flowchart

4 试验方案

为验证基于拟人式装载策略的混合粒子群遗传算法(ALS-GA-PSO)的有效性。本文对多个算例进行测试,并与双链遗传算法^[6](ALS-GA)进行比较。

4.1 参数设置

本文试验采用 Matlab 编程对算法进行实现,计算机配置为 AMD Ryzen 5 4600H Radeon Graphics 3.00 GHz、8GB 内存和 Windows 11 操作系统。试验以 20 ft 和 40 ft 集装箱为三维装载容器,对 10 种爆炸品(共 5 170 个包装件)进行测试。相关爆炸品信息见表 3。

表3 爆炸品信息

Tab. 3 Explosives information

类型	长度/ mm	宽度/ mm	高度/ mm	质量/ mm	数量/ 个
1	1 200	1 100	600	120	700
2	1 600	800	700	120	800
3	2 100	1 100	800	130	600
4	2 800	580	500	200	550
5	3 300	610	520	220	600
6	3 500	1 000	530	230	400
7	4 400	630	550	240	420
8	5 200	730	600	250	450
9	6 600	1 100	500	300	300
10	7 200	800	600	3 500	350

在测试算例前,设置两种算法的相关参数:种群规模 $p_p = 60$ 、精英选择比例 $p_r = 1/4$ 、交叉概率 $p_c = 0.7$ 、变异概率 $p_m = 0.2$ 、迭代次数 $I_t = 50$ 、惯性权重 $\omega_{\max} = 0.8$ 、 $\omega_{\min} = 0.2$ 、个体学习因子 $c_1 = 0.3$ 和社会学习因子 $c_2 = 0.4$ 。

本文针对爆炸品装箱问题,通过改变货物的配装类和旋转标识设计不同算例。根据第 2 节所提出的数学模型,每个算例第一行的数字 1~13 分别与爆炸品配装类 A~L(不包括 I)、N 和 S 相对应;第二行的数字中,1 代表该类型货物有 6 种放置姿态,0 则表示仅允许 2 种平放姿态。所有货物的配装类和旋转标识按货物类型顺序排列,试验采用 S1~S5 算例。具体数据见表 4。

表 4 S1~S5 算例具体数据

Tab. 4 S1~S5 specific data of the case

算例	数值									
S1	3	13	11	6	5	12	4	7	5	3
	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0
S2	4	6	10	8	3	5	4	1	12	5
	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0
S3	5	7	12	13	10	3	4	2	13	4
	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0
S4	3	13	11	6	5	12	4	7	5	3
	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0
S5	3	13	11	6	5	12	4	7	5	3
	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0

4.2 算例分析与比较

采用 ALS-GA-PSO 和 ALS-GA 算法对算例 S1~S5 进行三维装箱操作。

对单个算例 S1 进行分析,ALS-GA-PSO 算法在满足约束条件下,所得最优装箱方案如表 5、表 6 和图 8 所示。根据图 9 的试验数据,ALS-GA-PSO 算法的种群丰富度和所需集装箱数量变化曲线呈下降后平稳趋势,而 ALS-GA 算法波动较大且无明显收敛趋势,表明 ALS-GA-PSO 在迭代过程中能有效过渡到局部搜索并收敛于较优方案。

表 7 所示 S1~S5 算例试验结果进一步验证了 ALS-GA-PSO 算法的优越性,其最佳方案所需最小集装箱数量均优于 ALS-GA,且时间消耗更少。

综上所述,ALS-GA-PSO 算法在解决集装箱爆炸品装箱问题时,展现出更佳的局部搜索能力和收敛性,能更高效地制定优秀装箱方案。

表 5 集装箱装载信息

Tab. 5 Container loading information

箱号	集装箱类型/ft	配装类
1	20	[3,5,7]
2	20	[3,5,7]
3	20	[3,5,7]
...
93	40	[3,4]
94	40	[3,4,5,12,13]
95	40	[3,5,12,13]
...
202	20	12
203	20	12

表 6 爆炸品配装信息

Tab. 6 Explosives dispensing information

箱号	货物类型	配装类	放置点坐标			放置姿态
			X	Y	Z	
1	8	7	0	0	0	1
1	8	7	0	730	0	1
1	8	7	0	1 460	0	1
1	1	3	5 200	0	0	6
...
102	2	13	11 200	0	1 400	2
102	9	5	0	0	1 800	1
103	10	3	0	0	0	1
...
203	6	12	0	1 000	1 590	1

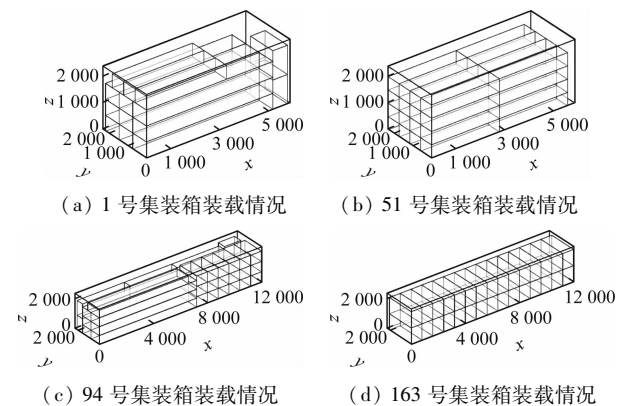


图 8 S1 部分集装箱装载情况

Fig. 8 S1 Partial container loading

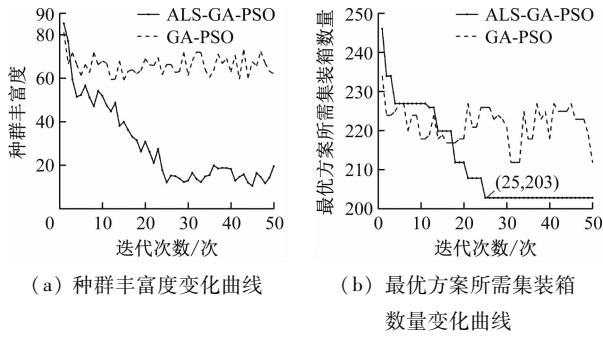


图9 数据变化曲线图

Fig.9 Data change graph

表7 S1~S5 算例试验数据

Tab.7 S1~S5 Experimental data for examples

算例	算法	最佳方案所需最小集装箱数量/个	时间/s
S1	ALS-GA-PSO	203	68.7414
	ALS-GA	208	77.2415
S2	ALS-GA-PSO	228	53.7878
	ALS-GA	235	63.5639
S3	ALS-GA-PSO	216	66.6947
	ALS-GA	229	76.6003
S4	ALS-GA-PSO	208	68.4329
	ALS-GA	215	75.7168
S5	ALS-GA-PSO	205	63.8283
	ALS-GA	207	77.0037

5 结束语

本文基于海运爆炸品配装与隔离要求,提出了一种拟人式装载策略的混合粒子群遗传算法,该算法有较强的全局搜索能力和局部优化能力,有效解决了大规模多类型装箱问题中的效率低下和收敛性不足问题,且在解决集装箱爆炸品三维装箱问题上具有较高效率和适用性。

模型目前仅针对第1类爆炸品,未涵盖其他危险货物类别。未来研究将聚焦于其他危险货物的规划分组,并将其整合至现有模型,以构建更全面实用的集装箱危险货物配装辅助模型。

参 考 文 献

[1] 文元桥,张奇,肖长诗,等. 危险货物水路运输知识图谱的构建[J]. 中国航海, 2019,42(4):1-6.
WEN Y Q, ZHANG Q, XIAO C S, et al. Construction of knowledge graph for dangerous goods in waterway transport[J]. Navigation of China, 2019,42(4):1-6.

(in Chinese)

[2] 刘永,岳志城,王勇,等. 三维装载优化模型与算法研究综述[J]. 包装工程, 2024,45(17):216-225.
LIU Y, YUE Z C, WANG Y, et al. Review of 3D packing optimization model and algorithm [J]. Packaging Engineering, 2024,45(17):216-225. (in Chinese)

[3] 张英贵,姚瓊华,高全,等. 铁路集装箱混合货物平衡装载布局优化模型与算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022,22(2):214-222.
ZHANG Y G, YAO Y H, GAO Q, et al. Optimization model and algorithm of balanced loading layout of railway container mixed goods [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022,22(2):214-222. (in Chinese)

[4] 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 S, SHEN D Y, SHANG X Q, et al. A multi-level tree search algorithm for three dimensional container loading problem[J]. Acta Automatica Sinica, 2020,46(6):1178-1187. (in Chinese)

[5] 吕雪菊,倪静. 基于自适应空间划分策略的三维装箱问题[J]. 系统工程, 2020,38(4):95-102.
LYU X J, NI J. Three dimensional container loading problem based on adaptive spatial partition strategy[J]. Systems Engineering, 2020,38(4):95-102. (in Chinese)

[6] 万飞,闫华,李睿,等. 强异类硬质直方体三维装箱双链改进遗传算法研究[J]. 包装工程, 2024,45(15):226-232.
WAN F, YAN H, LI R, et al. Improved genetic algorithm for three dimensional boxing of strong heterogeneous hard cubes with double chains [J]. Packaging Engineering, 2024,45(15):226-232. (in Chinese)

[7] 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.
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. (in Chinese)

[8] Harrath Y. A three-stage layer-based heuristic to solve the 3D bin-packing problem under balancing constraint [J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2022,34(8):6425-6431.

[9] ERBAYRAK S, ÖZKİR V, YİLDİRİM U M. Multi-objective 3D bin packing problem with load balance and

- product family concerns [J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 159:107518-107529.
- [10] MENGHANI D, GUHA A. Packing boxes into multiple containers using Genetic Algorithm [J]. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 2016, 97 (3):441-450.
- [11] NASCIMENTO O X, QUEIROZ T A, JUNQUEIRA L. Practical constraints in the container loading problem: comprehensive formulations and exact algorithm [J]. Computers & Operations Research, 2021, 128: 105186-105203.
- [12] DOMINGO B M, PONNAMBALAM S G, KANAGARAJ G. Particle swarm optimization for the single container loading problem [C]. Computational Intelligence & Computing Research (ICCIC), 2012 IEEE International Conference on. NewYork:IEEE, 2012:1-6.
- [13] 张晓龙, 钟珑昕, 徐智浩, 等. 残余空间最小化的启发式在线三维装箱策略研究 [J]. 机床与液压, 2025, 53 (2):197-201.
- ZHANG X L, ZHONG L X, XU Z H, et al. Research on heuristic online 3D bin packing strategy with residual space minimization [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2025, 53 (2):197-201. (in Chinese)