

7-20-2021

Collaborative Optimization of Ship Stowage Plan and Yard Container Unloading for Container Terminal

Zhixiong Liu

1. School of Mechanical Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;;

Hanwen Qian

2. School of Automotive and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

Jialan Yan

2. School of Automotive and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Collaborative Optimization of Ship Stowage Plan and Yard Container Unloading for Container Terminal

Abstract

Abstract: Stowage plan is an important component of the operation production for the container terminal, which directly affects the handling efficiency and shipping safety. *The aim is minimizing the total reloading numbers of both the yard and the ship bay, in view of the constraint of ship heeling moment and loading for light upon heavy, the model is employed for collaborative optimization of stowage plan and yard unloading for multiple destination ports and multiple bays. The hybrid evolutionary strategy algorithm is adopted with the local search algorithm. As to ship stowage play for multiple bays, a heuristic rule for the ship bay assignment is presented to assign the ship bay in the initialization phase of the individual coding for the algorithm. A three-dimension individual coding is designed and the encoding method is employed based on the yard unloading generation combining with the ship bay loading rule and the bay column load method.* The computational results of different size examples show that the hybrid evolutionary strategy algorithm based on the heuristic rule has better optimization performance than particle swarm optimization algorithm and heuristic algorithm.

Keywords

container terminal, stowage plan, yard container unloading, evolutionary strategy algorithm, heuristic rule

Recommended Citation

Liu Zhixiong, Qian Hanwen, Yan Jialan. Collaborative Optimization of Ship Stowage Plan and Yard Container Unloading for Container Terminal[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(7): 1689-1698.

集装箱码头船舶多贝位配载与堆场取箱协同优化研究

刘志雄¹, 钱翰文², 颜家岚²

(1. 武汉科技大学 机械自动化学院, 湖北 武汉 430081; 2. 武汉科技大学 汽车与交通工程学院, 湖北 武汉 430065)

摘要: 船舶配载是集装箱码头生产作业的重要内容, 直接关系到集装箱船舶的装卸作业效率和航行安全性。以最小化堆场取箱翻箱次数与船舶贝位翻箱次数之和为目标, 考虑船舶贝位横倾稳定性和重不压轻等约束条件, 针对多目的港船舶多贝位配载与堆场取箱顺序协同优化问题进行建模分析。采用与局部搜索相结合的混合演化策略算法对船舶配载问题进行优化计算。针对船舶多贝位配载, 提出一种面向船舶贝位分配的启发式规则, 用于算法中个体编码初始化阶段的船舶贝位分配。设计了一种三维个体编码, 提出了基于堆场取箱顺序生成、船舶贝位装箱规则和贝位列装箱方法相结合的解码方法。通过不同规模算例说明, 相比粒子群算法和启发式算法, 采用启发式规则的混合演化策略算法具有较好的优化性能。

关键词: 集装箱码头; 船舶配载; 堆场取箱; 演化策略算法; 启发式规则

中图分类号: TP391.9; U169.6

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 07-1689-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0161

Collaborative Optimization of Ship Stowage Plan and Yard Container Unloading for Container Terminal

Liu Zhixiong¹, Qian Hanwen², Yan Jialan²

(1. School of Mechanical Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;

2. School of Automotive and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

Abstract: Stowage plan is an important component of the operation production for the container terminal, which directly affects the handling efficiency and shipping safety. *The aim is minimizing the total reloading numbers of both the yard and the ship bay, in view of the constraint of ship heeling moment and loading for light upon heavy, the model is employed for collaborative optimization of stowage plan and yard unloading for multiple destination ports and multiple bays. The hybrid evolutionary strategy algorithm is adopted with the local search algorithm. As to ship stowage play for multiple bays, a heuristic rule for the ship bay assignment is presented to assign the ship bay in the initialization phase of the individual coding for the algorithm. A three-dimension individual coding is designed and the encoding method is employed based on the yard unloading generation combining with the ship bay loading rule and the bay column load method.* The computational results of different size examples show that the hybrid evolutionary strategy algorithm based on the heuristic rule has better optimization performance than particle swarm optimization algorithm and heuristic algorithm.

Keywords: container terminal; stowage plan; yard container unloading; evolutionary strategy algorithm; heuristic rule

收稿日期: 2020-04-04 修回日期: 2020-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(71372202)

第一作者: 刘志雄(1975-), 男, 博士, 教授, 研究方向为系统仿真与优化。E-mail: lzx_brad@126.com

引言

集装箱船配载计划是集装箱码头生产作业的重要环节,合理的集装箱船配载计划可以减少翻倒箱作业,提高装卸效率;同时也可以提高船舶箱位利用率,保证船舶稳性和航行安全性。集装箱船配载计划主要包括船舶主贝计划和贝内计划,其中,由于考虑船舶横倾稳定性、不同集装箱目的港和重不压轻等装船约束条件,贝内计划相比主贝计划更为复杂,一直都是学术界的研究热点问题之一,本文也主要考虑贝内计划。

集装箱船配载计划是指将堆场箱区的待装船集装箱依次装入船舶贝内具体的箱位。进行船舶贝内配载时,需要考虑装船集装箱的目的港区别、贝内垂直箱位方向上重不压轻以及船舶贝位横倾力矩要求等,一方面减少后期在中途港装卸作业时增加翻倒箱作业量,降低操作成本,提高装卸效率。另一方面,避免货损,提高船舶航行安全性。对于码头堆场而言,由于配载计划制定前,堆场集装箱堆存状态已经确定。为减少码头堆场翻倒箱次数,提高堆场装卸效率,制定配载计划时也需要考虑堆场集装箱的装船顺序即取箱顺序。因此,对于船舶贝内配载和堆场取箱顺序,单一方面的优化分析都存在局限性。集装箱船贝内配载计划应该与堆场集装箱取箱顺序综合考虑,从全局角度实现整体协同优化。

在堆场取箱(装船)顺序研究方面,文献[1-4]等均结合给定的船舶配载计划和堆场堆存状态,以堆场翻倒箱最小化对集装箱装船顺序进行了建模和优化分析。在集装箱船舶贝内配载方面,文献[5-7]等从集装箱船舶全航线角度考虑多目的港情况针对集装箱船舶贝内配载问题进行建模和优化求解分析。金健等^[8]针对边装边卸工艺下的集装箱船舶配载问题建模和求解分析。李俊等^[9]以堆栈占用数量最小化为优化目标,针对内河集装箱船舶贝内配载问题进行了研究。而针对船舶贝内配载和堆场装船顺序协同优化方面,Akio 等^[10]针对单目的港贝

位,以装船时堆场翻箱最少和集装箱船舶配载后横倾力矩最小为目标对贝内配载和装船顺序综合优化进行了分析,但没有考虑混合目的港情况。黎明等^[11]以堆场翻箱率和卸船翻箱率之和最小化以及船舶稳性最小化为目标,针对单一目的港的集装箱装船顺序问题进行了研究。其设计算例单一,过于简单。张煜等^[12]采用两阶段方法求解集装箱船舶贝内配载问题,首先通过堆场派送规则生成堆场取箱顺序,然后根据该取箱顺序和装船规则,通过贝内配载仿真模型得到贝内配载方案,再结合仿真优化的方法,实现贝内横倾力矩最小化。刘志雄等^[13]将船舶贝内配载与堆场取箱顺序 2 个问题作为一个整体进行协调处理,以翻倒箱次数最小为目标建立船舶贝内配载和堆场取箱顺序协调优化模型,并采用演化策略算法进行了优化分析。但该文问题模型中,对于船舶贝内配载问题的处理只考虑单个贝位的贝内装船问题,未考虑多个贝位的装船情况,与实际生产情况有差距,并且多贝位的贝内装船问题更复杂。从已有研究看,目前针对多目的港的船舶贝内配载与堆场取箱顺序协同优化研究还比较缺乏。

针对已有文献[13]的研究,本文将问题模型中的船舶单贝位装船问题进一步延伸和拓展为多贝位的装船问题,以求与实际生产情况更为接近。并且针对处理问题规模的增加,对求解算法进一步改进,以提高求解效率。

因此,本文综合考虑船舶多贝位贝内配载和堆场取箱顺序,以堆场取箱和船舶中途港卸载时翻箱数量之和最小化为目标,针对全航线多目的港的集装箱船舶多贝位配载问题进行建模和优化分析,实现集装箱船配载与堆场取箱顺序的协同优化。

1 问题描述

本文以堆场取箱时翻倒箱次数和船舶中途港卸载时翻倒箱次数之和最小化为目标,针对多目的港多贝位集装箱船舶配载问题进行优化分析,具体问题可以描述如下:假设集装箱船舶从初始港出

发, 沿途停靠多个港口并卸载集装箱。在初始港, 集装箱船舶有多个待装载的空贝位, 对应的待装集装箱在堆场的堆存情况已知。要求将堆场集装箱装载到船舶的多个空贝位中, 为每个船舶贝位制定合理的配载方案, 并确定堆场箱区合理的取箱顺序。

得到的最终结果需要满足以下要求: 一方面, 保证船舶航行和堆场装船的约束条件; 另一方面, 使堆场贝位装船时的翻箱次数和船舶贝位卸载时的翻箱次数之和最小, 如图 1 所示。

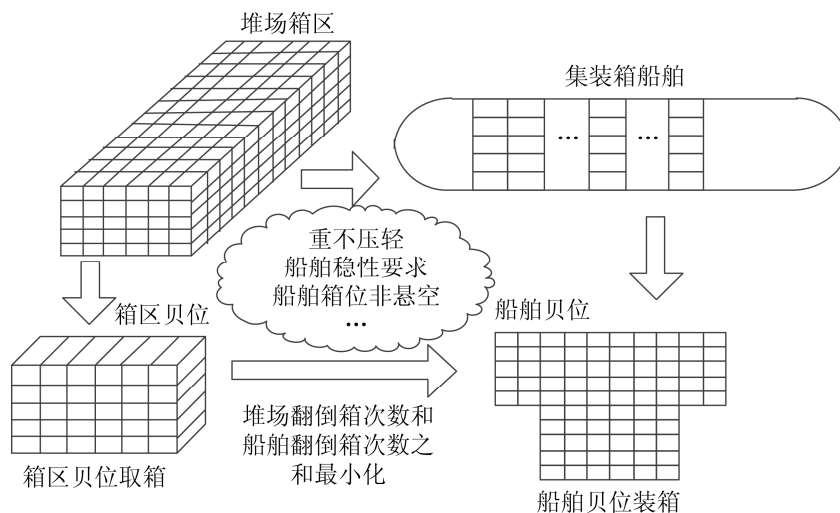


图 1 集装箱船舶配载示意图
Fig. 1 Schematic diagram of container ship stowage

2 建模分析

2.1 假设条件

- (1) 只考虑同一尺寸普通箱。
- (2) 考虑一个目的港装船, 沿途多目的港卸载。
- (3) 不考虑舱盖对船舶贝位倒箱的影响。
- (4) 堆场待装集装箱总数和质量小于船舶贝内箱位数及最大承重。
- (5) 堆场集装箱随机放置, 且有足够空间用于倒箱。

2.2 基本参数

- (1) d 为堆场箱区待装船的集装箱编号, $n=1, 2, \dots, D$;
- (2) D 为堆场箱区待装船集装箱的总数量(单位: 个);
- (3) $yc(i, j, k)$ 为堆场箱区第 i 个贝位第 j 列第 k 层的箱位, 该箱位堆放集装箱对应编号为 $d, i=1, 2, \dots, I, j=1, 2, \dots, J, k=1, 2, \dots, K$;

(4) $sc(b, r, t)$ 为集装箱船舶第 b 个贝位第 r 列第 t 层的箱位, $b=1, 2, \dots, B, r=1, 2, \dots, R_b, t=1, 2, \dots, T_b$;

(5) $sl(b, r, t)$ 为堆场箱区箱位 $yc(i, j, k)$ 所放置第 d 个集装箱的取箱顺序, 即准备装船的顺序, $sl(b, r, t)=s_d$;

(6) w_d 为堆场箱区第 d 个集装箱的重量(单位, t);

(7) $W(b, r)$ 为船舶贝位 b 第 r 列集装箱的重量之和;

(8) wt_d 为堆场箱区第 d 个集装箱的重量类型(取值为 3, 2, 1, 分别表示重、中、轻箱);

(9) p_d 为堆场箱区第 d 个集装箱的所属目的港编号, $p_n=1, 2, \dots, P$;

(10) α 为集装箱宽度, 取值 2.438 m;

(11) β 为船舶两相邻集装箱间隙, 取值 0.3 m;

(12) λ 为自定义力矩敏感系数, 可设置为 5 t, 10 t 等, 其值越小则约束越强, 本文取值 $\lambda=5$ t, 保证最严格的横倾力矩约束。

2.3 决策变量

(1) $q(d, b, r, t)$ 为堆场箱区第 d 个集装箱是否放入船舶箱位 $sc(b, r, t)$ 中。

$$q(d, b, r, t) = \begin{cases} 1, & \text{第} d \text{个集装箱放入箱位} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

(2) $sp(b, r, t)$ 为船舶箱位 $sc(b, r, t)$ 中所放置集装箱的目的港编号。

$$sp(b, r, t) = \begin{cases} p_d, & q(d, b, r, t) = 1 \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

(3) $x(b, r, t, h)$ 为船舶箱位 $sc(b, r, t)$ 中所放置第 n 个集装箱的倒箱次数。令 $sc(b, r, h)$ 为 $sc(b, r, t)$ 的上方箱位，并且存在

$$x(b, r, t, h) = \begin{cases} 1, & sp(b, r, t) < sp(b, r, h) \\ 0, & sp(b, r, t) \geq sp(b, r, h) \end{cases}$$

$$h = t + 1, t + 2, \dots, T;$$

(4) $a(t, g)$ 为船舶同贝位同列第 t 层和第 g 层 2 个集装箱的目的港是否相同。

$$a(t, g) = \begin{cases} 0, & sp(b, r, g) = sp(b, r, t) \\ 1, & \text{否则} \end{cases}$$

$$g = 1, 2, \dots, t - 1;$$

(5) $y(i, j, k, m)$ 表示船舶箱位 $yc(i, j, k)$ 中所放置集装箱的倒箱次数。令 $yc(i, j, m)$ 为 $yc(i, j, k)$ 上方的集装箱，并且存在

$$y(i, j, k, m) = \begin{cases} 1, & sl(i, j, k) < sl(i, j, m) \\ 0, & sl(i, j, k) \geq sl(i, j, m) \end{cases}$$

$$m = k + 1, k + 2, \dots, K$$

2.4 模型构建

计算船舶所有装载集装箱贝位的翻倒箱次数之和，对船舶同贝位同列相同目的港集装箱的翻倒箱次数只计算一次，如式(1)所示：

$$f_1 = \sum_{i=b}^B \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^{T-1} \left(\prod_{g=1}^{t-1} a(t, g) \cdot \sum_{h=t+1}^T x(b, r, t, h) \right) \quad (1)$$

计算堆场取箱装船时的翻倒箱次数之和，如式(2)所示：

$$f_2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K-1} \sum_{m=k+1}^K y(i, j, k, m) \quad (2)$$

求解船舶贝位翻倒箱次数和堆场翻倒箱次数的之和最小化，也是本文的目标，如式(3)所示：

$$\min f = \min(f_1 + f_2) \quad (3)$$

计算船舶同贝位同列装载集装箱重量之和，如式(4)所示：

$$W(b, r) = \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D w_d \cdot q(d, b, r, t) \quad (4)$$

船舶贝位的横倾力矩限制如式(5)，(6)所示：

$$\left| \sum_{r=1}^{R_b/2} W(b, r) \left(\frac{R_b + 1 - 2r}{2} \right) (\alpha + \beta) - \sum_{r=R_b/2+1}^{R_b} W(b, r) \left(\frac{2r - R_b - 1}{2} \right) (\alpha + \beta) \right| \leq HM \quad (5)$$

$$HM = (R_b - 1) (\alpha + \beta) \lambda / 2 \quad (6)$$

船舶贝位内每个集装箱箱位最多只能被一个集装箱占用，如式(7)所示：

$$\sum_{d=1}^D q(d, b, r, t) \leq 1 \quad (7)$$

每个集装箱必须占用一个船舶贝位的一个箱位，如式(8)所示：

$$\sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T q(d, b, r, t) = 1 \quad (8)$$

船舶贝位内某个箱位放置的集装箱不能悬空，即放入集装箱的箱位下方箱位不能为空，如式(9)所示：

$$\sum_{d=1}^D q(d, b, r, t) - \sum_{d=1}^D q(d, b, r, h) \geq 0 \quad (9)$$

$$h \in \{t + 1, t + 2, \dots, T\}$$

集装箱装船时的重不压轻约束条件，如式(10)所示：

$$\sum_{d=1}^D q(d, b, r, t) \cdot wt_d - \sum_{d=1}^D q(d, b, r, h) \cdot wt_d \geq 0 \quad (10)$$

$$h \in \{t + 1, t + 2, \dots, T\}$$

船舶装载时堆场先发箱不能置于后发箱的上面，如式(11)所示：

$$\sum_{d=1}^D q(d,b,r,t)(D-s_d) - \sum_{d=1}^D q(d,b,r,h)(D-s_d) \geq 0 \tag{11}$$

保证任意一个堆场集装箱在装船时都必定能分配一个船舶贝位的一个箱位, 如式(12)所示:

$$\frac{s_d}{D} \leq \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T q(d,b,r,t) \tag{12}$$

3 算法设计

本文采用演化策略算法(也称进化策略算法)求解集装箱船舶配载和堆场取箱协同优化问题, 同时考虑到船舶多贝位装载, 为了提高算法搜索效率, 设计了一种启发式规则用于初始方案的生成, 并与演化策略算法联合求解问题。

3.1 面向船舶贝位分配的启发式规则

该启发式规则是为集装箱船舶的每个待装贝位分配集装箱, 也就是说, 此规则将在优化算法设计中的个体初始化阶段被使用, 为堆场待装船集装箱分配贝位, 启发式规则设置具体为:

- (1) 根据集装箱在堆场的堆放情况, 按照每个集装箱所处的堆场层数从高到低的顺序, 对集装箱排序;
- (2) 对堆场同一层的集装箱, 按照目的港号由大到小排序;
- (3) 从堆场箱区最高层开始, 逐层按照集装箱目的港顺序将集装箱分配给船舶贝位;
- (4) 当船舶当前贝位装载完毕, 则选择下一个贝位进行分配集装箱。如果当前贝位未装载完毕, 则转向堆场箱区下一层进行集装箱分配作业;
- (5) 分配完毕后, 可得到船舶各贝位的集装箱分配情况, 即为堆场箱区待装船的集装箱分配船舶贝位。

上述启发式规则的目标是在优化算法初始化阶段, 尽可能较少堆场箱区和船舶贝位的翻倒箱次数, 并且使得贝位的混装目的港数目尽可能少。

3.2 演化策略算法设计

结合本文研究问题的特点, 针对演化策略算法的个体编码和解码方法如图 2 所示。

3.2.1 编码设计

结合启发式规则, 对演化策略算法的编码设计一种三维个体编码, 具体如表 1 所示。

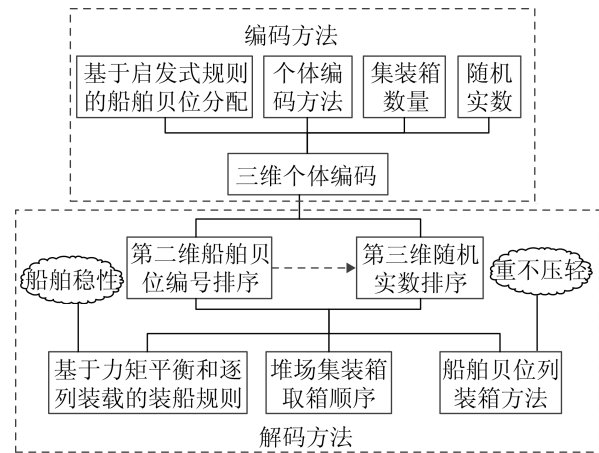


图 2 个体编码和解码方法

Fig. 2 Individual encoding and decoding methods

表 1 三维个体编码

Tab. 1 3D Individual coding

集装箱编号	船舶贝位	实数 z_n
1	1	z_{n1}
⋮	⋮	⋮
d	b	z_{nd}
⋮	⋮	⋮
D	B	z_{nD}

表 1 表示算法种群中第 n 个个体, 编码长度为待装船集装箱数量 D 。编码中第一维为集装箱编号, 第二维即为根据 3.1 节启发式规则分配给每个集装箱的船舶贝位, 第三维为实数向量 z_n , 为算法种群中第 n 个个体。算法初始化阶段, 个体编码第三维 z_n 随机生成。

3.2.2 解码设计

针对上述编码和本文研究问题, 解码方法为:

- (1) 堆场取箱顺序生成

针对表 1 的个体编码, 首先以第二维为基准进行从小到大的排序, 第一维和第三维同步变化; 然

后以第三维为基准进行从小到大排序，第二维不变，第一维同步变化。此操作后，由第一维可以得到集装箱编号的次序，即可认为是堆场箱区集装箱的取箱顺序。

(2) 船舶贝位装箱规则

为了保证船舶装载后的横倾稳性，采用基于力矩平衡和逐列装载的装箱规则^[14]，以船舶贝位中轴线为基准，由贝位中轴线左右两侧第一列开始，由内向外逐列装入集装箱。当每列装载完毕后，计算并比较船舶贝位中轴线两侧的横倾力矩。左侧横倾力矩大，则选择右侧贝位列作为下次装载对象，反之亦然。

(3) 贝位列装箱方法

为保证装箱过程中的重不压轻约束，采用以下方法对个体编码进行解码，以实现贝位列装箱。

1) 对于船舶贝位某一列待装箱位，根据堆场取箱顺序，拟选择第一个集装箱装入该待装箱位。

2) 根据该列剩余空箱位数量和重不压轻约束，判断取箱顺序中后续未装入的集装箱，从数量和重量(小于当前拟装载的集装箱重量)上是否满足。

3) 如果满足，该箱放入待装箱位。如果不满足，则放弃该集装箱，根据取箱顺序进而顺序选择下一个集装箱，重复上述步骤，直至该列装载完毕。

3.2.3 重组和变异算子

重组算子和变异算子仍采用文献[14]中的方法。随机选择父代2个个体，采用基于三点交叉互换的方法交换个体编码中的第三维 z_{nd} 值。变异算子则根据小概率选择重组后的子代个体，对个体编码随机选择一个 z_{nd} ，采用重新赋值的方法。

3.2.4 局部搜索策略

由于问题规模和求解复杂性，为了提高算法的搜索效率，针对单个个体，本文采用基于两点互换的局部搜索策略，即在个体编码中，随机选择2个不同的集装箱编码，交换其第三维 z_{nd} 值，如图3所示。



图3 局部搜索

Fig. 3 Local search

综上所述，针对船舶多贝位贝内配载与堆场取箱协同优化问题，本文提出的基于启发式规则的混合演化策略算法结构如图4所示。

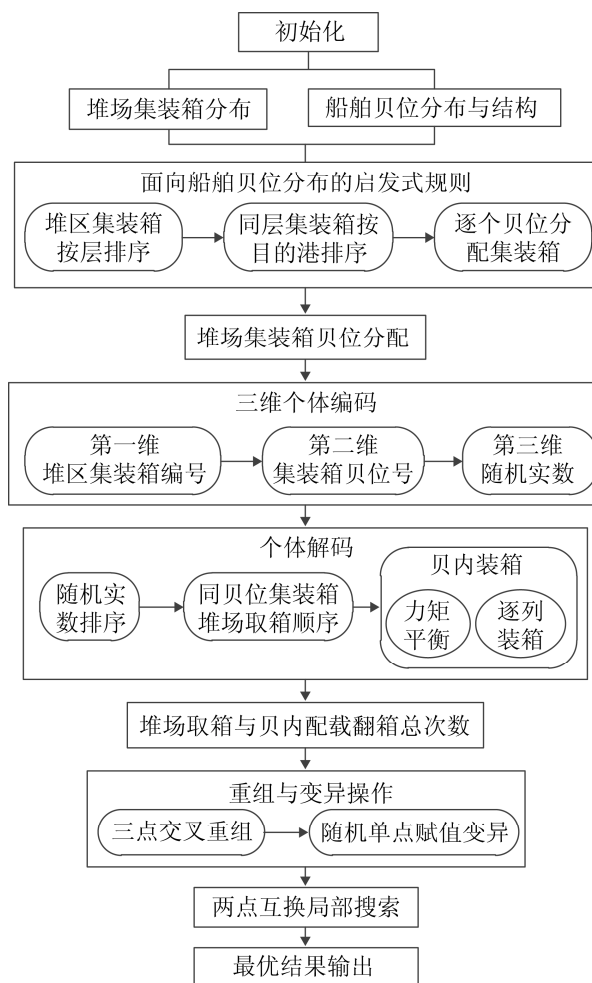


图4 基于启发式规则的混合演化策略算法结构

Fig. 4 Structure of hybrid evolution strategy algorithm based on heuristic rules

4 实验分析

4.1 算法对比设置

本文同时采用启发式算法和粒子群算法与本文所提出的算法进行优化对比分析。这里将本文提出的算法称为基于启发式规则的混合演化策略算

法(Hybrid Evolutionary Strategy Algorithm based on Heuristic Rule, HES-HR)。另外, 提出一种基于装船规则的启发式算法(Heuristic Algorithm based on Shipping Rule, HA-SR)。该算法首先对堆场按层取箱, 在每一层取箱时按照目的港从远到近的顺序依次取箱, 然后基于力矩平衡和逐列装船的规则对每个贝位进行装载。针对粒子群算法 PSO, 粒子编解码方法与演化策略算法相同, 在算法初始化阶段, 也采用启发式规则针对每个粒子编码中的集装箱进行贝位分配。采用基于惯性权重线性递减的粒子群算法, 编解码方式与 HES-HR 算法相同。

为了检验本文算法设置中启发式规则的优劣性, 本文采用不带启发式规则的混合演化策略算法 HES 与 HES-HR 进行对比分析。对于 HES, 通过个体编解码后, 得到堆场取箱顺序, 然后随机选择船舶贝位, 根据船舶贝位装箱规则和贝位列装箱方法进行编解码装船。

4.2 参数设置

HES-HR 算法中, 设置父代种群数量 $\mu=30$, 子代种群数量 $\lambda=20$, 局部搜索次数为 3 次。HES 与 HES-HR 的参数设置相同。PSO 算法中, 粒子种群设置为 30, 学习因子 $c_1=c_2=2$, 惯性权重 w 随着迭代次数从 0.9 线性递减到 0.4。

在求解时, HES-HR 算法、HES 算法和 PSO 算法最大迭代次数设置为 1 000 次, 连续运行 20 次。HA-SR 算法属于单纯启发式方法, 只运行 1 次。

4.3 实验算例

设置了 12 组不同规模的算例如表 2 所示。堆场待装集装箱尺寸为 20 ft, 重量有重、中、轻箱 3 种类型。设置重箱重量范围是 16~20 t, 数量占总箱数的 50%; 中箱的重量范围是 11~15 t, 数量占总箱数的 30%; 轻箱的重量范围是 5~10 t, 数量占总箱数的 20%, 集装箱重量和目的港号在规定范围内随机生成。为方便计算分析, 采用图 1 所示的船舶贝位结构, 设置不同的层和列数量, 表示不同的贝位结构。

4.4 启发式规则实验分析

为了验证启发式规则的有效性, 选取算例 P1, P2 和 P3, 同时采用 HES-HR 算法和 HES 算法对算例进行求解, 算例运行结果如表 3 所示。其中, f_1 为 20 次运行的最小总倒箱次数, f_2 为 20 次运行的平均总倒箱次数, f_3 为 20 次运行的平均堆场贝位倒箱次数, f_4 为 20 次运行的平均船舶贝位倒箱次数, M 为 20 次运行的所有贝位的最大横倾力矩 (t·m), t 为平均求解时间(s)。

表 2 实验算例
Tab. 2 Experimental examples

算例 编号	船舶贝 位数量	堆场待装集 装箱数目	目的港 数目	各目的港集装箱数目				
				2 号港	3 号港	4 号港	5 号港	6 号港
P1	10	600	3	220	200	180	0	0
P2	10	600	4	120	200	180	100	0
P3	10	600	5	120	100	180	100	100
P4	15	900	3	320	300	280	0	0
P5	15	900	4	220	200	280	200	0
P6	15	900	5	180	200	180	200	140
P7	20	1 200	3	400	300	500	0	0
P8	20	1 200	4	300	300	400	200	0
P9	20	1 200	5	280	300	240	200	180
P10	25	1 500	3	500	620	380	0	0
P11	25	1 500	4	360	360	320	460	0
P12	25	1 500	5	300	280	320	240	360

表 3 启发式规则算例分析
Tab. 3 Example analysis of heuristic rules

算法		P1	P2	P3
HES-HR	f_1	1	4	5
	f_2	4.7	7.3	8.3
	f_3	0	0	0
	f_4	4.7	7.3	8.3
	M	51.2	46.4	41.8
	t	240.1	282.4	322.6
	HES	f_1	84	159
f_2		105.6	169.3	213
f_3		89.3	114	142.7
f_4		16.3	55.3	70.3
M		56.2	52.9	42.8
t		344.4	408.4	462.6

根据式(6)可得允许的最大横倾力矩为 61.61 t·m (贝位结构均为 10 列)。从表 3 的结果可以看出, 对于横倾力矩值, 2 种算法的横倾力矩均在约束范围内。而对于堆场和船舶倒箱次数, 在相同迭代次数下, 可以看出 HES-HR 算法的求解结果明显优于 HES 算法。同时, 由于加入启发式规则, HES-HR 算法的求解时间更短, 综合求解效率明显优于 HES 算法。因此, 启发式规则能够明显提升混合演化策略算法的优化效果。该启发式规则针对堆场取箱,

按照集装箱码放层数以及目的港从大到小进行排序, 然后进行取箱装船, 既考虑了在堆场取箱时尽量减少翻箱, 又考虑了装船后, 后到港集装箱在下层堆放, 先到港集装箱在上堆放, 也尽可能减少翻箱。因此, 由此启发式规则生成的初始解在优化目标上有明显改善。

4.5 计算结果

本文分别采用 HES-HR 算法、PSO 算法 HA-SR 算法针对表 2 中的算例进行求解, 运行结果如表 4 所示, 其他如图 4~7 所示。

从表 4 和图 5 看, 对于最小化总翻箱次数的目标来说, HES-HR 算法的优化效果明显好于 PSO 算法和 HA-SR 启发式算法。从图 5 可以看出, 当算例规模较小时, HES-HR 算法和 PSO 算法相比实际的装船方式(HA-SR), 得到的堆场和船舶贝位倒箱总次数均较少。但相同迭代次数下, HES-HR 算法求得的总倒箱次数更少, 求解效率更好。当算例规模增大时, HES-HR 算法明显优于 PSO 算法和 HA-SR 算法, 仍然能在较短时间内求得最优的船舶贝位倒箱次数和堆场贝位倒箱次数。

表 4 不同算法计算结果
Tab. 4 Calculation results of different algorithms

算法	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	
HES-HR	f_1	1	4	5	1	6	10	9	11	14	13	15	18
	f_2	4.7	7.3	8.3	5.3	8.7	13.7	12.3	15.5	16.3	16.7	18.3	19.3
	f_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	f_4	4.7	7.3	8.3	5.3	8.7	13.7	12.3	15.5	16.3	16.7	18.3	19.3
	M	51.2	46.4	41.8	32.7	43.7	35.9	38.5	47.0	47.4	49.8	40.7	50.2
	t	240.1	282.4	322.6	285.9	368.5	415.6	372.5	418.9	467.5	445.7	479.6	562.4
	PSO	f_1	18	20	22	19	32	50	98	107	112	102	124
f_2		22.0	26.7	28.7	26.7	36.7	57.3	105.7	108.5	128.3	111.3	128.7	135.0
f_3		0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
f_4		22.0	26.7	28.7	25.7	36.7	57.3	105.7	108.5	128.3	110.3	128.7	135.0
M		38.5	42.0	37.4	38.5	37.2	41.5	38.6	34.6	49.1	55.5	47.0	59.3
t		118.5	139.4	218.7	180.4	218.6	304.5	262.8	328.6	394.7	355.4	407.4	480.9
HA-SR		f_1	26	29	32	55	68	95	116	124	151	158	168
	f_2	26	29	32	55	68	95	116	124	151	158	168	184
	f_3	0	1	1	3	0	1	0	3	0	0	1	5
	f_4	26	28	31	52	68	94	116	121	151	158	167	179
	M	45.2	31.5	31.0	42.7	40.9	32.5	43.4	37.9	49.6	44.9	32.5	46.7
	t	3	3	4	5	6	6	5	5	6	5	5	6

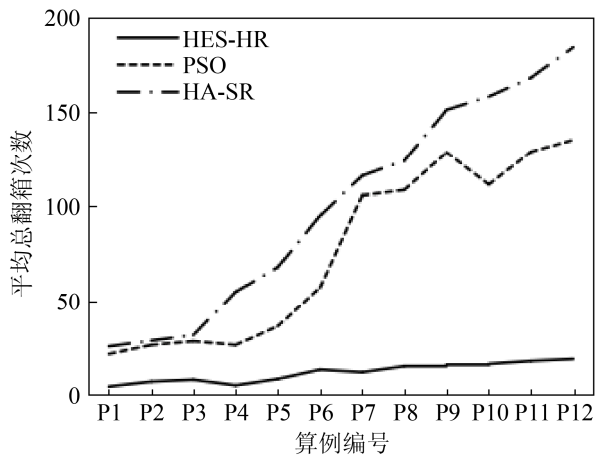


图 5 平均总倒箱次数对比图

Fig. 5 Comparison of average total emptying times

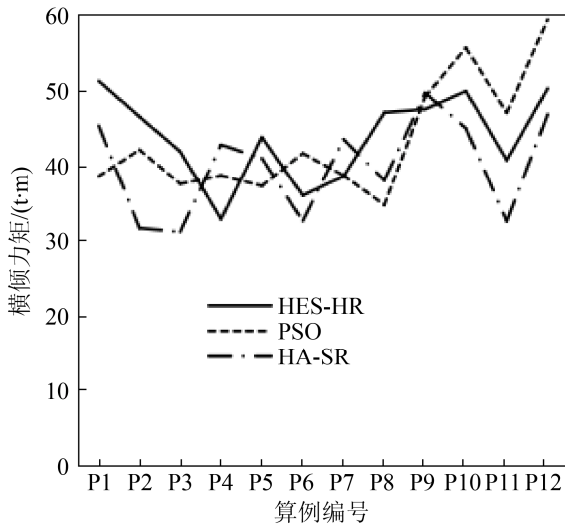


图 6 最大横倾力矩对比图

Fig. 6 Comparison of maximum heeling moments

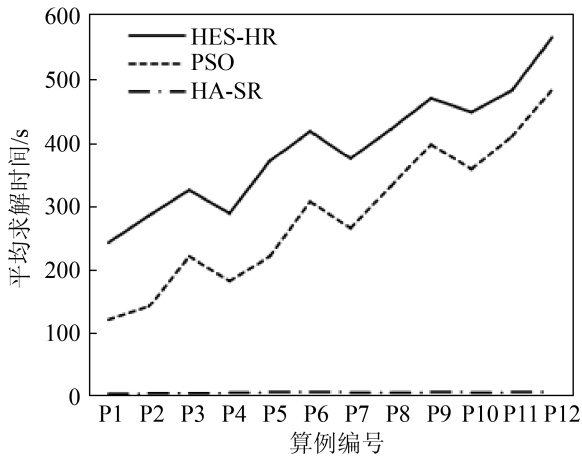


图 7 求解时间对比图

Fig. 7 Comparison of solution time

从图 6 来看, 由于算法均采用基于力矩平衡和逐列装载的装船规则解码, 因此横倾力矩均严格保证在约束范围内(横倾力矩最大值为 61.61 t·m), 说明了该规则的有效性。从图 7 来看, HA-SR 算法由于基于规则配载, 因此求解时间很短。HES-HR 算法虽求解时间略长于 PSO 算法, 但在可接受范围内且结果更优, 因此综合求解效果更好。同时从图 8 可以看出, 对于多目的港多贝位的船舶贝内配载和堆场取箱协同优化问题, HES-HR 算法能够在较少的迭代次数下收敛至最优解, 收敛速度明显优于 PSO 算法, 表现出良好的优化性能。

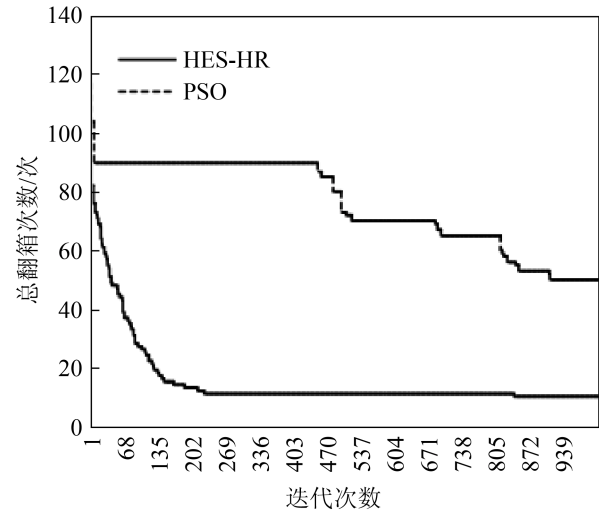


图 8 算例 6 进化曲线

Fig. 8 Shows evolution curve of example 6

5 结论

良好的船舶配载计划能够减少装载作业过程中的翻倒箱次数, 有助于提高装卸效率, 保证航行安全性。本文综合堆场取箱顺序与船舶多贝位贝内配载问题, 在考虑船舶稳性和重不压轻等约束条件下, 以整体翻倒箱次数最小化为目标, 实现堆场取箱与船舶多贝位贝内配载的协同优化。在建模分析的基础上, 提出了基于启发式规则和演化策略的优化算法进行优化求解, 计算结果显示了算法的有效性。

本文研究主要针对船舶多贝位贝内配载和堆场取箱的协同优化, 进一步的研究将结合堆场取

箱、船舶主贝计划和贝内计划的协同优化展开。

参考文献:

- [1] 朱明华, 范秀敏, 程奂翀, 等. 集装箱装船顺序问题的启发式算法研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(9): 1070.
Zhu Minghua, Fan Xiumin, Cheng Huanchong, et al. Heuristics for Export Container Loading Sequence Problem[J]. Journal of China Mechanical Engineering, 2010, 21(9): 1070.
- [2] 靳志宏, 兰辉, 边展, 等. 基于现实约束的集装箱装船顺序优化[J]. 大连海事大学学报, 2011, 37(1): 71-74.
Jin Zhihong, Lan Hui, Bian Zhan, et al. Optimization on Containership Loading Scheduling based on Actual Constraints[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2011, 37(1): 71-74.
- [3] Ji M J, Guo W W, Zhu H L, et al. Optimization of Loading Sequence and Rehandling Strategy for Multi-Quay Crane Operations in Container Terminals[J]. Transportation Research Part E (S1366-5545), 2015(80): 1-19.
- [4] 祝慧灵, 计明军, 郭文文, 等. 基于配载计划的集装箱提箱顺序和倒箱策略优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(2): 191-199.
Zhu Huiling, Ji Mingjun, Guo Wenwen, et al. Optimization of the Container Retrieving Sequence and Rehandling Strategy based on Stowage Plan[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(2): 191-199.
- [5] 祝慧灵, 计明军. 集装箱船舶全航线配载优化模型与改进遗传算法[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(5): 59-67.
Zhu Huiling, Ji Mingjun. Optimal Model and Improved Genetic Algorithm of Containership Stowage on Full Route[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(5): 59-67.
- [6] Araújo E J, Chaves A A, Neto L L, et al. Pareto Clustering Search Applied for 3D Container Ship Loading Plan Problem[J]. Expert Systems with Applications (S0957-4174), 2015, 44(1): 50-57.
- [7] 杨蔚, 韩晓龙. 集装箱班轮运输配载优化问题[J]. 大连海事大学学报, 2018, 44(1): 72-79.
Yang Wei, Han Xiaolong. Loading Optimization Problem of Container Liner[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2018, 44(1): 72-79.
- [8] 金健, 宓为建, 夏孟珏. 基于边装边卸工艺的集装箱船配载决策[J]. 上海海事大学学报, 2019, 40(3): 6-13.
Jin Jian, Mi Weijian, Xia Mengjue. Stowage Decision of Container Ships based on Dual Cycling Process[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2019, 40(3): 6-13.
- [9] 李俊, 张煜, 计三友, 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 Sanyou, 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.
- [10] Akio I, Kazuya S, Etsuko N, et al. Multi-Objective Simultaneous Stowage and Load Planning for a Container Ship with Container Rehandle in Yard Stacks[J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2006, 171(2): 373-389.
- [11] 黎明, 翟金刚. 集装箱装船顺序的多目标整数规划优化模型[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(10): 3636-3639.
Li Ming, Zhai Jingang. Multi-objective Integer Programming Optimization Model for Loading Sequence of Container Ship[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(10): 3636-3639.
- [12] 张煜, 程惠敏, 徐进, 等. 考虑堆场派送顺序的混合目的港贝内排箱及其仿真优化[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(3): 831-839.
Zhang Yu, Cheng Huimin, Xu Jin, et al. Simulation Optimization on Multi-Ports Slot Plan Problem Considering Dispatching Sequence of Containers in Yard[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 831-839.
- [13] 刘志雄, 颜家岚, 张煜. 集装箱船舶贝内配载和堆场装船顺序协调优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(6): 223-230.
Liu Zhixiong, Yan Jialan, Zhang Yu. Coordinated Optimization Problem of Slot Planning and Shipment Sequencing[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(6): 223-230.
- [14] 刘志雄, 颜家岚, 张昱玮. 基于演化策略算法的集装箱船舶贝内配载优化[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(9): 2725-2731.
Liu Zhixiong, Yan Jialan, Zhang Qiwei. Optimization of Slot Plan Problem Based on Evolutionary Strategy Algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2019, 40(9): 2725-2731.