

不确定箱量下内河集装箱班轮航线动态配载决策

李俊¹, 张煜², 计三有², 马杰³

(1. 武汉科技大学 汽车与交通工程学院, 湖北 武汉 430081; 2. 武汉理工大学 物流工程学院, 湖北 武汉 430063; 3. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 内河集装箱班轮运输中海关抽检可导致外贸箱箱量不断发生变化, 班轮航线配载需要动态决策。基于滚动调度策略, 将当前港口的配载决策按随机事件划分为多个阶段, 以最小化班轮堆栈占用数量和相邻阶段间配载计划偏差为目标, 构建单港口单阶段的配载决策模型, 进而滚动实现班轮航线动态配载决策。基于大邻域搜索思想设计一种包含整数规划、破坏器与修复器的精确启发式算法, 实现港口多阶段滚动配载。基于真实场景的算例研究表明, 在优化堆栈占用数量方面, 模型与算法之间差异不大, 但在考虑相邻阶段间配载计划偏差时, 算法的求解结果要优于模型。因此, 模型与算法可用来辅助实现不确定箱量下内河集装箱班轮航线动态配载决策, 且算法表现更优, 可实现配载计划对不确定箱量的鲁棒吸收。

关键词: 集装箱运输; 航线配载; 不确定箱量; 精确启发式; 滚动调度; 动态决策

中图分类号: U691 **文章标识码:** A **文章编号:** 1007-3221(2020)07-0064-08 **doi:** 10.12005/orms.2020.0173

Dynamic Stowage Planning Decision for Inland Container Liner Route Shipping with Uncertain Container Quantity

LI Jun¹, ZHANG Yu², JI San-you², MA Jie³

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 3. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: The inland container liner route stowage planning needs to make the dynamic decision as the quantity of foreign trade containers can be changed by the customs inspection continuously. Based on the rolling scheduling strategy, the stowage planning of current port is divided into multiple stages according to the random event, namely, customs inspection. The stowage planning model for a single stage in current port is developed with the objective of minimizing the ship stack occupancy number and the differences of stowage plans between adjacent stages. Then the liner route stowage planning decision is made by rolling. The matheuristic algorithm which contains the integer programming, the destructor and the rebuilder is proposed to make the multiple stages rolling stowage planning for each port. Numerical examples based on real-world shipping scenarios show the difference between the proposed model and algorithm for minimizing the ship stack occupancy number is small. And for the differences of stowage plans between adjacent stages, the results from the algorithm are better than the model. Therefore, the proposed model and algorithm can be utilized to assist in making the dynamic stowage planning decision for inland container liner route shipping with uncertain container quantity. They can both make the stowage plans to absorb the uncertain container quantity robustly and the algorithm has a better performance than the model.

Key words: container shipping; route stowage planning; uncertain container quantity; matheuristic; rolling scheduling; dynamic decision

0 引言

内河集装箱班轮由于体型较小、容量有限, 船

舶稳性对配载计划十分敏感, 且与班期相比船方往往更强调舱容利用率。同时, 内河集装箱班轮运输中, 海关抽检可能导致外贸箱发生箱量变化, 班轮航线配载决策需要不断考虑箱量变化影响, 是一个

收稿日期: 2018-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71372202, 51679182)

作者简介: 李俊(1989-), 男, 湖北钟祥人, 讲师, 博士, 研究方向: 港口作业调度与优化算法; 通讯作者。

动态决策问题。

已有的集装箱班轮航线配载决策理论大多研究海运船舶,往往假设船舶在航线上各港口节点的作业集装箱信息已知来制定航线配载方案,仍属于静态决策的范畴。这些学者的研究方法主要包括启发式算法^[1-3]、遗传算法^[4-6]、多阶段方法^[7-8]、整数规划^[9]等。内河集装箱班轮与海运船舶相比,一方面由于货流不均衡性且船舶体型更小,船方往往更强调舱容利用率;另一方面班轮航线配载会受到集港过程中外贸箱箱量变化影响,已有的静态决策方法配载效率退化明显,难以满足内河集装箱班轮航线动态配载决策需求。

为此,本文考虑内河集装箱班轮运输中外贸箱不确定箱量影响,研究不确定箱量下班轮航线动态配载决策方法。考虑海关抽检导致外贸箱箱量变化这一随机事件,基于随机事件驱动的滚动调度策略,构建班轮航线多港口多阶段滚动调度的动态配载决策模型。同时引入大邻域搜索思想,设计一种包含混合整数规划模型、破坏器与修复器的精确启发式算法,实现港口多阶段配载决策。最后基于真实场景的算例研究验证模型与算法的有效性。

1 问题描述与建模分析

内河集装箱班轮航线运输中顺序遍历多个港口节点,航线上任意两个港口节点(始发港 o 和目的港 d)之间的集装箱流向可用一个二元副 $a=(o,d)$ 唯一标识,记为 $O-D$ 副 a 流向。班轮航线配载决策中,上一港口节点输出的配载计划作为输入来制定下一港口节点配载计划。对于外贸箱而言,由于存在海关抽检这一随机事件,其集港过程中普遍存在集港后临时抽检、放关情况不理想、临时加箱等不确定性因素干扰,使配载计划隐含极强的脆性,如图1所示。

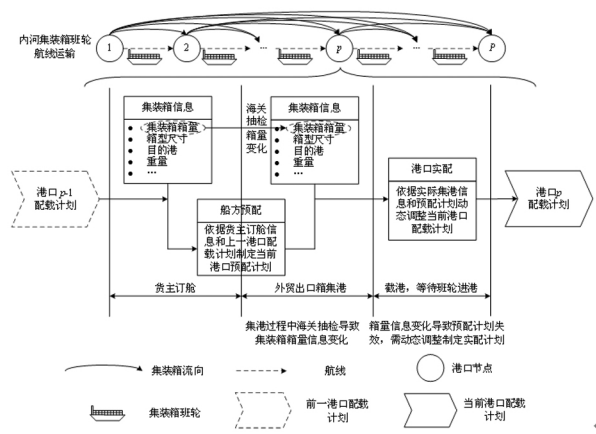


图1 内河集装箱班轮航线动态配载决策

具体来说,集装箱集港后海关进行临时抽检以及抽检后放关情况不理想会使得原计划中包含的集装箱无法进行装船作业,从而导致装船集装箱箱量的减少;同时由于海关抽检而错过原航次的集装箱进行临时装船使得原计划中未包含的集装箱需要进行装船作业,从而导致装船集装箱箱量的增加。由于内河集装箱班轮船体结构的特殊性,实际箱信息的微小误差都会使得当前港口的预配与实配计划发生失效,从而需要对原计划进行动态调整。不仅会增加港口的额外作业成本,也会对班轮运输的经济性和时效性产生不良影响。

综上,内河集装箱班轮航线配载决策中,对于外贸箱而言,需考虑海关抽检导致箱量变化对其影响。在满足船舶航行安全性前提下,制定出满足航线各港口节点之间运输需求的配载计划。同时考虑到内河班轮运输的独特性和经济性,以最小化航线班轮堆栈占用数量为目标,实现被占用堆栈的高效利用,保证船舶的舱容利用率。

2 模型构建

2.1 假设条件

针对内河集装箱班轮航线运输中外贸箱集港特点,考虑现实约束,做出以下假设:

- (1) 考虑同一尺寸的普通箱;
- (2) 集装箱集港后存在临时抽检以及抽检后放关情况不理想;
- (3) 由于临时抽检而错过原航次的集装箱需要进行临时装船。

2.2 模型建立

为了方便建模,将内河集装箱班轮贝位内堆栈按前半部、后半部、左半部、右半部分成不同的堆栈集合,如图2所示。

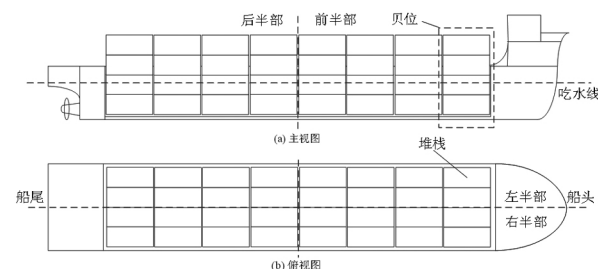


图2 内河集装箱班轮结构

(1) 集合

P : 航线港口集合; $Q(p)$: 当前港口 p 的 $O-D$ 副集合, $Q(p) = Q_b \cup Q_s(p)$, $\forall p \in P$; $Q_b(p)$: 途经当前港口 p 的 $O-D$ 副集合, $Q_b(p) = \{a | o, d \in$

$P: \rho < p < d, \rho = (o, d)\}; Q_s(P):$ 当前港口 p 始发的 $O-D$ 副集合, $Q_s(p) = \{a | o = p, d \in P, \rho = p < d, a = (o, d)\}; G:$ 集装箱重量等级集合, 分为轻、中、重三个等级, 即 $G = \{1, 2, 3\}$; $J:$ 班轮所有堆栈集合, 从船头到船尾、从左到右依次对堆栈进行编号, 得到堆栈集合 $J = J_F \cup J_A = J_L \cup J_R$; $J_F:$ 班轮前半部堆栈集合; $J_A:$ 班轮后半部堆栈集合; $J_L:$ 班轮左半部堆栈集合; $J_R:$ 班轮右半部堆栈集合; $NT_p:$ 当前港口 p 的阶段数集合, $NT_p = \{t | 0 \leq t \leq T_p\}$ 。

(2) 参数

$T_p:$ 当前港口 p 截港时的最后阶段; $N_{ig}(a): t$ 阶段, 从当前港口 p 流向后续港口 d 的重量等级为 g 的待装船集装箱箱量 (TEU), $\forall t \in NT_p, a = (o, d) \in Q_s(p), g \in G$; $N_{ig}^+(a): t$ 阶段, 由于海关抽检导致的从当前港口 p 流向后续港口 d 的重量等级为 g 的增加箱量 (TEU), $\forall t \in NT_p - \{0\}, a = (o, d) \in Q_s(p), g \in G$; $N_{ig}^-(a): t$ 阶段, 由于海关抽检导致的从当前港口 p 流向后续港口 d 的重量等级为 g 的减少箱量 (TEU), $\forall t \in NT_p - \{0\}, a = (o, d) \in Q_s(p), g \in G$; $w_g:$ 重量等级为 g 的集装箱平均重量 (ton), $g \in G$; $\Delta LG:$ 班轮允许的最大纵向重量差 (ton); $\Delta CG:$ 班轮允许的最大横向重量差 (ton); $ST_j:$ 堆栈 j 的最大箱位容量 (TEU), $\forall j \in J$; $SW_j:$ 堆栈 j 的最大载重量 (ton), $\forall j \in J$; $L:$ 一个大数。

(3) 变量

$x_{ijg}(a): t$ 阶段, 堆栈 j 内 a 流向下重量等级为 g 的集装箱箱量 (TEU), $\forall t \in NT_p, g \in G, j \in J, a \in Q(p), p \in P$; $y_{ij}(a): 0-1$ 变量, t 阶段, 若班轮堆栈 j 被 a 流向下的集装箱占用则为 1; 否则为 0, $\forall t \in NT_p, j \in J, a \in Q(p), p \in P$ 。

(4) 模型

针对内河集装箱班轮运输中外贸箱箱量变化特点, 采用基于随机事件驱动的滚动调度策略来实现班轮航线动态配载决策。考虑船舶的舱容利用率, 以最小化班轮堆栈占用数量为目标, 实现被占用堆栈空间的高效利用, 保证班轮航线运输的经济性。对于航线上任意港口的配载决策而言, 利用多阶段决策的无后效性, 针对海关抽检导致外贸箱箱量变化这一随机事件, 基于随机事件将当前港口的配载决策划分为多个阶段, 每个随机事件驱动一个阶段, 保证各阶段最优来实现整体最优。基于随机事件驱动的班轮航线多港口多阶段滚动调度策略如图 3 所示。图中, 初始状态下阶段数 $t = 0$, 当海

关抽检导致箱量发生变化时, 更新阶段数 $t = t + 1$, 依次类推, 当前港口 p 截港时记录下最后阶段 T_p 。构建当前港口 p 任意阶段 t 的配载决策模型 (Stowage Planning Model), 记为 $SPM(t), \forall t \in NT_p - \{0\}, p \in P - \{1\}$:

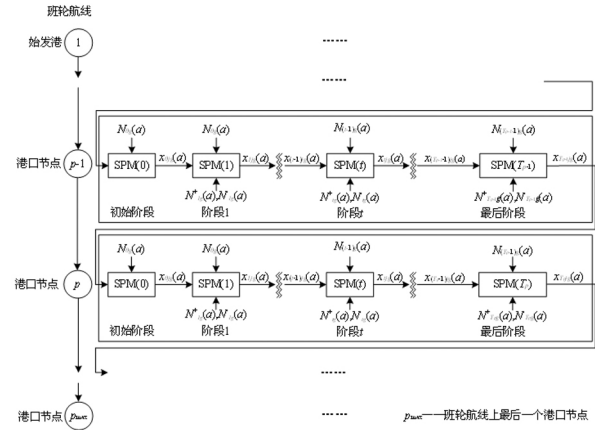


图3 内河集装箱班轮航线多港口多阶段滚动调度策略

$$f_1(t) = \min \sum_{a \in Q(p)} \sum_{j \in J} y_{ij}(a) \quad (1)$$

$$f_2(t) = \min \sum_{a \in Q_s(p)} \sum_{j \in J} |y_{ij}(a) - y_{(t-1)j}(a)| \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ijg}(a) = N_{ig}(a), \forall a \in Q_s(p), g \in G \quad (3)$$

$$N_{ig}(a) = N_{(t-1)g}(a) + N_{ig}^+(a) - N_{ig}^-(a), \forall a \in Q_s(p), g \in G \quad (4)$$

$$x_{ijg}(a) = x_{tjg}(a), \forall a \in Q_b(p), g \in G, j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij}(a) \geq 1, \forall a \in Q(p) \quad (6)$$

$$\sum_{a \in Q(p)} y_{ij}(a) \leq 1, \forall j \in J \quad (7)$$

$$y_{ij}(a) \leq \sum_{g \in G} x_{ijg}(a) \leq L \cdot y_{ij}(a), \forall j \in J, a \in Q(p) \quad (8)$$

$$\sum_{a \in Q(p)} \sum_{g \in G} x_{ijg}(a) \leq ST_j, \forall j \in J \quad (9)$$

$$\sum_{a \in Q(p)} \sum_{g \in G} x_{ijg}(a) \cdot w_g \leq SW_j, \forall j \in J \quad (10)$$

$$\left| \sum_{a \in Q(p)} \sum_{g \in G} \left(\sum_{j \in J_F} x_{ijg}(a) \cdot w_g - \sum_{j \in J_A} x_{ijg}(a) \cdot w_g \right) \right| \leq \Delta LG \quad (11)$$

$$\left| \sum_{a \in Q(p)} \sum_{g \in G} \left(\sum_{j \in J_L} x_{ijg}(a) \cdot w_g - \sum_{j \in J_R} x_{ijg}(a) \cdot w_g \right) \right| \leq \Delta CG \quad (12)$$

$$x_{ijg}(a) \geq 0, x_{ijg}(a) \in Z, \forall j \in J, g \in G, a \in Q(p) \quad (13)$$

$$y_{ij}(a) = \{0, 1\}, \forall j \in J, a \in Q(p) \quad (14)$$

式(1)~式(2)为目标函数, 其中式(1)表示最小化当前港口任意阶段的班轮堆栈占用数量, 实现航线班轮堆栈占用数量最小, 保证被占用堆栈的高效利用; 式(2)表示最小化当前港口相邻阶段之间配载计划偏差, 保证配载计划的鲁棒性。式(3)~式(14)为约束条件。其中式(3)表示当前港口任意阶段集装箱装船约束; 式(4)表示当前港口任意

阶段的集装箱流平衡约束;式(5)表示到达当前港口时已装船集装箱箱位固定约束;式(6)保证当前港口任意 $O-D$ 阶段班轮航线上任意副流向下的集装箱至少占用一个堆栈;式(7)保证当前港口任意阶段班轮任意堆栈至多被一种 $O-D$ 副流向下的集装箱占用,避免出现为了卸载下方集装箱,而需要暂时卸下再重新装船的阻塞箱;式(8)定义决策变量 $x_{ijg}(a)$ 与 $y_{ij}(a)$ 之间的关系:若 $x_{ijg}(a) > 0$, 则说明当前港口 t 阶段堆栈 j 内堆放有 a 流向下的集装箱,此时 $y_{ij}(a) = 1$;若 $x_{ijg}(a) = 0$, 则说明当前港口 t 阶段堆栈 j 内没有堆放 a 流向下的集装箱,此时 $y_{ij} = 0$;式(9)保证当前港口任意阶段班轮任意堆栈的载箱量满足容量约束;式(10)保证当前港口任意阶段班轮任意堆栈的载重量满足约束;式(11)保证当前港口任意阶段班轮满足纵向重量差约束;式(12)保证当前港口任意阶段班轮满足横向重量差约束;式(13)和(14)定义决策变量的取值范围。

由于不存在上一阶段,去除上述子目标(2)和约束(4)可得到当前港口 p 初始阶段 $t=0$ 的配载决策模型 SPM(0) 如下: $\{SPM(0)\} \{f_1(0) = \min \sum_{a \in Q(p)} \sum_{j \in J} y_{ij}(a); (3), (5) \sim (14)\}$ 。

2.3 下界值模型

对于优化目标 $f_1(t)$ 而言,直接基于当前港口截港时最后阶段 $t = T_p$ 的集装箱信息进行配载决策,不考虑当前港口各阶段配载计划之间的差异性,即不考虑配载计划的鲁棒性,可得到原问题中优化目标 $f_1(t)$ 的下界值模型(Low Bound Model 1, LBM1)。当前港口 p 截港后所有待装船集装箱的箱量等信息均变为已知,即 $N_{T_p g}(a)$ 已知。此时,将约束式(4)修改为:

$$N_{ig}(a) = N_{T_p g}(a), \forall a \in Q_s(p), g \in G \quad (15)$$

$$(LBM1) \{f_1(t) = \min \sum_{a \in Q(p)} \sum_{j \in J} y_{ij}(a); (3), (15), (5) \sim (14)\}$$

同样地,对于优化目标 $f_2(t)$ 而言,不考虑优化目标 $f_1(t)$ 影响,直接对其进行单独优化,可得到其下界值模型(Low Bound Model 2, LBM2):

$$(LBM2) \{f_2(t) = \min \sum_{a \in Q_s(p)} \sum_{j \in J} |y_{ij}(a) - y_{(t-1)j}(a)|; (3) \sim (14)\}$$

上述模型 LBM1 与 LBM2 分别用来确定模型 SPM 中两个优化目标 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 的下界值,进行后续模型及算法求解性能分析。

3 算法设计

精确启发式算法(Matheuristic Algorithm, MA)是将数学规划融入到启发式架构中的一种算法。已有船舶航线配载相关研究中,仅文献[10]针对海运集装箱船舶的全航线主贝计划设计了名为两阶段渐进随机修复进程(Two-level progressive Random Fixing Procedure)的混合整数规划启发式(Mixed Integer Programming Heuristic)方法,通过对模型中变量的松弛与修复来分阶段实现求解。本文引入大邻域搜索思想,设计一种包含混合整数规划模型、破坏器与修复器的精确启发式算法,来实现内河集装箱班轮航线运输中当前港口多阶段配载决策。算法主要思路如下:

Step 1 初始解生成。当前港口初始阶段 $t=0$ 时,求解模型 SPM(0) 得到当前港口的初始配载方案;

Step 2 阶段数更新。当海关抽检导致外贸箱箱量发生变化时,更新当前港口阶段数 $t = t + 1$;

Step 3 破坏器设计。当前阶段 $t(t > 0)$ 下,将当前港口始发的所有 $O-D$ 副流向按集装箱箱量是否发生变化,分为两部分。其中未发生箱量变化的 $O-D$ 副流向集合记为 $A_0(t)$,发生箱量变化的记为 $A_1(t)$ 。设计两种不同的破坏策略,对上一阶段的配载计划进行破坏,将部分集装箱取出后重新配载,实现对初始解邻域结构的搜索:

(1) 随机破坏(Random Destruction)。从集合 $A_0(t)$ 和 $A_1(t)$ 内随机选择集装箱进行破坏,其中对于集合 $A_0(t)$ 内任意 $O-D$ 副流向 a' 而言,假设其对应集装箱占用堆栈数量为 $O(a')$,则随机生成 $[0, O(a')]$ 范围内整数,实现对应数量堆栈内集装箱破坏,取出的集装箱需重新配载。对于集合 $A_1(t)$ 内任意 $O-D$ 副流向 a'' 而言,假设其对应集装箱占用堆栈数量为 $O(a'')$,若箱量变化为正数(即箱量增加),则随机生成 $[0, O(a'')]$ 范围内整数,实现对应数量堆栈内集装箱破坏,取出的集装箱与增加的集装箱需重新配载;若箱量变化为负数(即箱量减少),则随机生成 $[1, O(a'')]$ 范围内整数 k ,若 k 个堆栈内任意重量等级 g 下的集装箱箱量之和 $n_g(k)$ 满足 $n_g(k) \geq N_{ig}^-(a'')$,则对该 k 个堆栈内集装箱进行破坏,若 $n_g(k)$ 不满足 $n_g(k) \geq N_{ig}^-(a'')$,则重新生成 k 至满足条件,取出的集装箱

减去减少箱量后需重新配载;

(2) 固定破坏(Fixed Destruction) 。集合 $A_0(t)$ 内集装箱保留上一阶段的配载结果 ,对集合 $A_1(t)$ 内所有 $O-D$ 副流向集装箱进行破坏 ,取出的集装箱需重新配载;

Step 4 修复器设计。当前阶段 $t(t > 0)$ 下 ,对破坏器取出的集装箱进行重新配载 ,实现配载计划的修复。针对破坏后取出的集装箱 ,基于下界模型 LBM2 求解实现重新配载。由于初始阶段下已对原问题中优化目标 $f_1(t)$ 即当前港口的班轮堆栈占用数量进行优化 ,在下一阶段中仅考虑对优化目标 $f_2(t)$ 进行优化 ,保证与上一阶段配载计划中堆栈占用结果的偏差最小 ,亦可保证对当前阶段下班轮堆栈占用数量的优化。以此类推 ,可以滚动实现当前港口后续所有阶段配载计划的求解;

Step 5 完成模型 LBM2 求解 ,输出当前港口 $t(t > 0)$ 阶段下的配载方案;

Step 6 重复上述 Step 2 ~ 5 ,完成当前港口多阶段滚动配载决策。

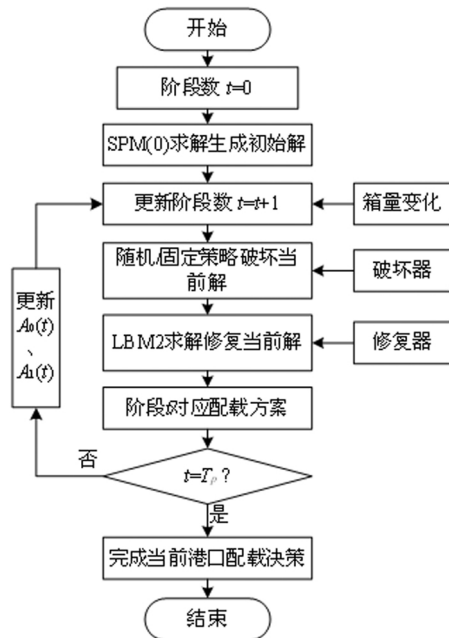


图4 精确启发式算法设计

4 算例研究

4.1 算例设计

根据国家标准 GB/T 19283-2010 ,以长江集装箱班轮运输为例 ,选取三艘不同尺寸类型(小、中、大型)的集装箱班轮进行算例研究 ,班轮相关信息如表 1 所示。

表 1 长江集装箱班轮信息

编号	堆栈	单列载重/t	总容量/TEU	$\Delta LG/t$	$\Delta CG/t$
S_1	32	45	96	30	30
S_2	48	60	192	30	30
S_3	72	75	360	40	40

为验证不同模型的求解效果 ,基于长江集装箱班轮实际运输场景设计一系列算例进行研究。考虑 4 条包含不同港口数目的航线 ,见表 2。每条航线中 ,考虑 3 种不同的班轮装载率 ,见表 3。其中 ,班轮装载率是指班轮离港时所有装船集装箱总箱量与其总容量之间的比率值 ,值越大表示班轮装载集装箱越多。采用诸如 $S_1L_1C_{45}$ 的方式来表示不同的算例 ,其中第一部分 S_1 表示班轮船型 ,第二部分 L_1 表示班轮航线 ,第三部分 C_{45} 表示班轮装载率。

表 2 班轮航线设计

航线	L_1	L_2	L_3	L_4
港口数	4	5	6	7

表 3 班轮装载率

编号	C_{45}	C_{65}	C_{85}
装载率	45%	65%	85%

4.2 算例求解

所有的数学模型 SPM、LBM1 以及 LBM2 均采用 Gurobi 7.5.1 求解。采用随机破坏和固定破坏策略的精确启发式算法(MA) 分别记为 MA_Random 和 MA_Fixed 基于 Python 3.6 编程实现。所有的算例均在 4GB 内存笔记本电脑(Intel Core I7-5500U ,2.40GHz) 上运行求解。每个算例中 ,航线各港口均考虑 5 个阶段的箱量变化 ,各阶段下不同副流向下集装箱箱量可增可减且箱量变化随机生成。为了保证模型的求解效率 ,将其单次求解时间限制设置为 60 秒。

4.2.1 多目标优化权重分析

由于模型 SPM 中含有两个子目标 ,引入权重系数 λ_1, λ_2 将其目标函数转化为:

$$f(t) = \min \left(\lambda_1 \sum_{a \in Q(p)} \sum_{j \in J} y_{ij}(a) + \lambda_2 \sum_{a \in Q_s(p)} \sum_{j \in J} |y_{ij}(a) - y_{(t-1)j}(a)| \right) \quad (16)$$

为了确定合适的权重系数 ,选择体型最大的班轮 S_3 对应算例设计多组对比试验 ,结果如下表 4 所示。表中 f_1 表示航线班轮堆栈占用数量 ,对所有港口最后阶段班轮堆栈占用数量求和得到 ,即 $f_1 = \sum_{p \in P} \sum_{a \in Q(p)} \sum_{j \in J} y_{T,p}(a)$ (单位:个); f_2 表示班轮航线配载计划偏差之和 ,即 $f_2 = \sum_{p \in P} \sum_{t \in NT_p - \{0\}} \sum_{a \in Q_s(p)} \sum_{j \in J} |y_{ij}(a) - y_{(t-1)j}(a)|$ (单位:个); T 表示每个算例的求解时间(单位:秒)。

表 4 不同权重比率下求解结果

算例	$\lambda_1:\lambda_2=100:1$			$\lambda_1:\lambda_2=50:1$			$\lambda_1:\lambda_2=10:1$			$\lambda_1:\lambda_2=1:1$			$\lambda_1:\lambda_2=1:10$			$\lambda_1:\lambda_2=1:50$			$\lambda_1:\lambda_2=1:100$		
	f_1	f_2	T	f_1	f_2	T	f_1	f_2	T	f_1	f_2	T	f_1	f_2	T	f_1	f_2	T	f_1	f_2	T
$S_3L_1C_{45}$	103	3	3.2	102	2	2.7	102	2	2.6	103	2	2.8	102	2	2.5	103	2	3	104	2	3.2
$S_3L_1C_{65}$	144	2	2.9	144	2	3	144	2	3.1	144	2	2.9	144	2	3	144	2	2.9	144	2	2.9
$S_3L_1C_{85}$	192	1	62.5	192	1	62.2	192	1	62.2	192	1	62.6	192	1	62.2	192	1	62.3	193	2	63
$S_3L_2C_{45}$	140	2	64.6	139	2	63.6	139	2	63.5	139	2	63.7	139	2	63.5	139	2	63.7	139	1	64.2
$S_3L_2C_{65}$	193	1	123.1	195	2	63.3	193	1	123.1	193	1	123.1	193	1	63.3	193	1	63.3	193	1	123.2
$S_3L_2C_{85}$	255	2	63.4	257	2	63.2	257	2	63.5	257	2	63.8	256	2	63.6	255	2	63.3	257	2	63.4
$S_3L_3C_{45}$	186	2	93.2	186	2	127.9	186	2	91.9	186	2	104.8	186	2	97.2	186	2	121.2	186	2	103.3
$S_3L_3C_{65}$	247	3	71.4	250	3	71	246	3	79.8	247	3	71.9	246	3	70.5	250	3	79	246	3	75.4
$S_3L_3C_{85}$	324	3	125.7	321	3	125.5	324	3	125.2	320	2	126.3	324	3	125.3	321	3	128.2	324	3	125.3
$S_3L_4C_{45}$	239	6	73	237	6	189.1	235	6	132.7	239	6	151.6	235	7	132.2	238	7	129.3	241	6	73.3
$S_3L_4C_{65}$	323	7	197.5	323	7	161.4	325	7	250.4	323	7	157.5	325	7	250.8	322	7	187.6	322	7	190.9
$S_3L_4C_{85}$	394	4	98	394	3	83.6	395	4	68.6	399	5	68.2	394	3	80.9	396	3	83.9	394	4	68.3
平均	228.3	3	81.5	228.3	2.9	84.7	228.2	2.9	88.9	228.5	2.9	83.3	228	2.9	84.6	228.3	2.9	82.3	228.6	2.9	79.7

从表 4 中可以看出,不同权重系数 λ_1 、 λ_2 比率下,模型 SPM 对两个子目标的优化程度差异不大,仅在求解时间方面存在一定差异性。综合来看设置 $\lambda_1:\lambda_2=1:10$ 时,模型 SPM 优化两个子目标时平均值均最小,且平均求解时间与最短平均时间的差异也较小。为此,后续模型 SPM 求解时,选择设置 $\lambda_1:\lambda_2=1:10$ 。

4.2.2 模型与算法结果

由于算法 MA_Random 具有一定随机性,每个

算例连续优化 10 次后取平均值。对于不同班轮而言,模型 SPM 与不同算法 MA 的求解结果如表 5~7 所示。表中 f_1 、 f_2 、 T 含义与表 4 中一致; gap_1 和 gap_2 分别表示模型与算法求解不同目标与下界值之间偏差(单位:%),其中, $gap_1=100\times\frac{(f_1\text{ from SPM or MA}-f_1\text{ from LBM1})}{f_1\text{ from LBM1}}$, $gap_2=100\times\frac{(f_2\text{ from SPM or MA}-f_2\text{ from LBM2})}{f_2\text{ from LBM2}}$ 。

表 5 模型与不同算法求解结果-班轮 S1

算例	LBM1		LBM2		SPM					MA_Random					MA_Fixed				
	f_1	T	f_2	T	f_1	gap_1	f_2	gap_2	T	f_1	gap_1	f_2	gap_2	T	f_1	gap_1	f_2	gap_2	T
$S_1L_1C_{45}$	48	60.2	2	22.7	51	6.3	2	0	32	51	6.3	2	0	24.5	51	6.3	2	0	25.4
$S_1L_1C_{65}$	67	61.1	2	51	9	3	2	0	62.3	70	4.5	2	0	50.1	70	4.5	2	0	52.3
$S_1L_1C_{85}$	85	0.6	2	1	88	3.5	2	0	1.1	88	3.5	2	0	0.8	88	3.5	2	0	1
$S_1L_2C_{45}$	60	0.4	2	1.6	64	6.7	2	0	1.7	65	8.3	2	0	1.6	65	8.3	2	0	1.7
$S_1L_2C_{65}$	84	0.7	3	1.9	92	9.5	3	0	2.1	91	8.3	3	0	1.6	91	8.3	3	0	1.9
$S_1L_2C_{85}$	113	0.7	2	1.7	117	3.5	2	0	1.8	117	3.5	2	0	1.6	117	3.5	2	0	1.7
$S_1L_3C_{45}$	84	2.4	5	2.9	98	16.7	5	0	3.6	98	16.7	5	0	2.6	98	16.7	5	0	3.1
$S_1L_3C_{65}$	102	0.6	6	2.6	116	13.7	6	0	2.7	114	11.8	6	0	2.5	114	11.8	6	0	2.6
$S_1L_3C_{85}$	153	60.9	1	63.3	156	2	1	0	65.4	156	2	1	0	43.4	156	2	1	0	45.5
$S_1L_4C_{45}$	99	60.9	10	63.3	127	28.3	11	10	46.5	127	28.3	10	0	20.1	127	28.3	10	0	21.8
$S_1L_4C_{65}$	130	1.3	10	3.9	165	26.9	10	0	4.1	165	26.9	10	0	3.1	165	26.9	10	0	3.1
$S_1L_4C_{85}$	173	60.7	5	52.3	184	6.4	5	0	63.3	185	6.9	5	0	50.4	185	6.9	5	0	53.3
平均	99.8	25.9	4	22.4	110.6	10.5	4.2	0.8	23.9	110.4	10.5	4	0	16.9	110.4	10.5	4	0	17.8

表 6 模型与不同算法求解结果-班轮 S2

算例	LBM1		LBM2		SPM					MA_Random					MA_Fixed				
	f_1	T	f_2	T	f_1	gap_1	f_2	gap_2	T	f_1	gap_1	f_2	gap_2	T	f_1	gap_1	f_2	gap_2	T
$S_2L_1C_{45}$	63	0.2	2	0.9	66	4.8	2	0	1.1	66	4.8	2	0	0.8	66	4.8	2	0	0.9
$S_2L_1C_{65}$	96	60.3	2	61	100	4.2	2	0	62.6	99	3.1	2	0	51	99	3.1	2	0	51.7
$S_2L_1C_{85}$	121	0.4	3	1	127	5	3	0	1.2	127	5	3	0	0.9	127	5	3	0	1
$S_2L_2C_{45}$	86	0.6	2	2.1	89	3.5	2	0	2.2	92	7	2	0	2	92	7	2	0	1.9
$S_2L_2C_{65}$	125	0.5	2	1.8	130	4	2	0	2	130	4	2	0	1.5	130	4	2	0	1.6
$S_2L_2C_{85}$	167	11.4	2	1.9	169	1.2	2	0	1.9	169	1.2	2	0	1.7	169	1.2	2	0	1.8
$S_2L_3C_{45}$	111	0.6	5	3.3	123	10.8	5	0	3.8	122	9.9	5	0	2.2	122	9.9	5	0	2.4
$S_2L_3C_{65}$	150	63.8	5	63	165	10	5	0	66.7	161	7.3	5	0	43.1	161	7.3	5	0	45.8
$S_2L_3C_{85}$	205	0.8	5	4.5	218	6.3	5	0	3.1	220	7.3	5	0	2.5	220	7.3	5	0	2.6
$S_2L_4C_{45}$	145	18.2	8	9.1	174	20	8	0	7.3	173	19.3	8	0	5.2	173	19.3	8	0	7
$S_2L_4C_{65}$	190	1	9	5.3	221	16.3	10	11.1	8.3	221	16.3	9	0	4.2	221	16.3	9	0	4.3
$S_2L_4C_{85}$	251	61.1	5	4.7	260	3.6	6	20	5	260	3.6	5	0	2.9	260	3.6	5	0	3.2
平均	142.5	18.2	4.2	13.2	153.5	7.5	4.3	2.6	13.18	153.3	7.4	4.2	0	9.8	153.3	7.4	4.2	0	10.4

表 7 模型与不同算法求解结果-班轮 S3

算例	LBM1		LBM2		SPM					MA_Random					MA_Fixed				
	f_1	T	f_2	T	f_1	gap_1	f_2	gap_2	T	f_1	gap_1	f_2	gap_2	T	f_1	gap_1	f_2	gap_2	T
$S_3L_1C_{45}$	98	1.4	2	2.8	102	4.1	2	0	2.5	102	4.1	2	0	1.7	102	4.1	2	0	2.5
$S_3L_1C_{65}$	141	1.6	2	2.9	144	2.1	2	0	3	144	2.1	2	0	2.7	144	2.1	2	0	2.6
$S_3L_1C_{85}$	190	61	1	63	192	1.1	1	0	62.2	192	1.1	1	0	53.1	192	1.1	1	0	52.2
$S_3L_2C_{45}$	135	62.5	1	64.7	139	3	2	100	63.5	139	3	1	0	44.8	139	3	1	0	47.5
$S_3L_2C_{65}$	190	120.7	1	123	193	1.6	1	0	63.3	193	1.6	1	0	93.2	193	1.6	1	0	102.6
$S_3L_2C_{85}$	252	61.1	2	63.5	256	1.6	2	0	63.6	256	1.6	2	0	44.5	256	1.6	2	0	53.9
$S_3L_3C_{45}$	182	130.3	2	87.2	186	2.2	2	0	97.2	187	2.7	2	0	93.9	187	2.7	2	0	94.3
$S_3L_3C_{65}$	243	69.4	3	69.8	246	1.2	3	0	70.5	247	1.6	3	0	51.6	247	1.6	3	0	71.2
$S_3L_3C_{85}$	315	121.8	2	125.3	324	2.9	3	50	125.3	320	1.6	2	0	105.4	320	1.6	2	0	107.4
$S_3L_4C_{45}$	225	126.9	6	130.9	235	4.4	7	16.7	132.2	238	5.8	6	0	130.8	238	5.8	6	0	130.9
$S_3L_4C_{65}$	300	185	7	134.1	325	8.3	7	0	250.8	323	7.7	7	0	131.2	323	7.7	7	0	132.1
$S_3L_4C_{85}$	389	79.6	3	84.4	394	1.3	3	0	80.9	396	1.8	3	0	59.6	396	1.8	3	0	64.2
平均	221.7	85.1	2.7	79.3	228	3.1	2.9	13.9	84.6	228.1	3.1	2.7	0	67.7	228.1	3.1	2.7	0	71.8

从表 5 中可以看出,对于小型班轮 S_1 而言,由于考虑航线配载计划的鲁棒性,模型 SPM、算法 MA_Random 与 MA_Fixed 求解得到的航线班轮堆栈占用数量与下界值之间的平均偏差较大。但从表 6 和表 7 中可以看出,随着班轮体型的增大以及堆栈数量的增多,模型及算法得到的航线班轮堆栈占用数量与下界值之间的平均偏差逐渐减小至 3% 左右。总体来看,在优化航线班轮堆栈占用数量方面,模型 SPM、算法 MA_Random 与 MA_Fixed 三者之间差异不大。

从表 5 至表 7 中可以看出,由于采用下界模型

LBM2 作为修复器,算法 MA_Random 与 MA_Fixed 总能求得与下界值相同的航线配载计划偏差之和,因而它们在鲁棒性方面的表现要优于模型 SPM。同时在求解时间方面,算法 MA_Random 与 MA_Fixed 也较模型 SPM 更优。两种不同破坏策略下,算法 MA_Random 在求解时间方面表现略优。

综上,由于模型 SPM、算法 MA_Random 与 MA_Fixed 考虑对班轮航线各港口各阶段配载计划之间偏差进行优化,其对应航线班轮堆栈占用数量与下界值模型(LBM1)之间存在较大的偏差。但模型 LBM1 仅基于当前港口最后阶段的集装箱信

息进行配载决策,其结果势必会在较大程度上优于上述两者。同时,随着船舶体型增大,模型 SPM、算法 MA_Random 以及 MA_Fixed 对应平均偏差逐步减少至合理范围内。对于班轮航线配载计划偏差之和而言,模型 SPM 对应结果在数量上与下界值模型(LBM2)之间差异很小;而算法 MA_Random 与 MA_Fixed 则表现更优,总是可以得到与模型 LBM2 相同结果,说明模型 SPM、算法 MA_Random 与 MA_Fixed 在配载计划的鲁棒性方面均表现较好。算例研究表明,模型 SPM 与算法 MA 可用来辅助实现不确定箱量下内河集装箱班轮航线动态配载决策,且后者表现更优。两种不同破坏策略下,算法 MA_Random 在求解时间方面略优于算法 MA_Fixed。

5 结论

本文针对内河集装箱班轮运输中外贸箱箱量变化特点研究班轮航线动态配载决策方法。基于随机事件驱动的滚动调度策略,以最小化航线班轮堆栈占用数量为目标,构建班轮航线多港口多阶段滚动调度的动态配载决策模型。同时,基于大邻域搜索思想设计一种精确启发式算法来实现港口的多阶段滚动配载决策。算例研究发现,针对外贸箱箱量变化特点,模型 SPM 和算法 MA 可用来辅助实现内河集装箱班轮航线动态配载决策。算法 MA 较模型 SPM 而言表现更优,且随着船舶体型增大,模型与不同算法求解航线班轮堆栈占用数量结果与下界值之间偏差呈逐渐减小趋势。对于算法 MA 而言,两种不同破坏策略在求解质量方面无差异,在求解时间方面算法 MA_Random 表现略优。下一步研究中,将针对求解效率更高的动态配载决策算法进行开发。

参考文献:

- [1] Ding D, Chou M C. Stowage planning for container ship: a heuristic algorithm to reduce the number of shifts [J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 246: 242-249.
- [2] 张维英, 林焰, 纪卓尚. 集装箱船全航线 Bay 位排箱优化模型 [J]. *上海交通大学学报*, 2007, 41 (2): 199-204.
- [3] Low M H Y, Zeng M, Hsu W J, Huang S Y, Liu F, Win C A. Improving safety and stability of large containerships in automated stowage planning [J]. *IEEE Systems Journal*, 2011, 5(1): 50-60.
- [4] Azevedo A T, Arruda E F, Salles-Neto L L, Chaves A A, Moretti A C. Solution of the 3D stochastic stowage planning for container ships through representation by rules [C]//Fourth International Workshop Proceedings, *Eureka*, 2013: 120-129.
- [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.
- [6] Imai A, Sasaki K, Nishimura E, Papadimitriou S. Multi-objective simultaneous stowage and load planning for a container ship with container rehandle in yard stacks [J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 171: 373-389.
- [7] Wilson I D, Roach P A, Ware J A. Container stowage pre-planning: using search to generate solutions, a case study [J]. *Knowledge - Based System*, 2001, 14: 137-145.
- [8] Kang J G, Kim Y D. Stowage planning in maritime container transportation [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2002, 53: 415-426.
- [9] Ambrosino D, Paolucci M, Sciomachena A. Experimental evaluation of mixed integer programming models for the multi-port master bay plan problem [J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2015, 27: 263-284.
- [10] Ambrosino D, Paolucci M, Sciomachena A. A MIP heuristic for multi-port stowage planning [J]. *Transportation Research Procedia*, 2015, 10: 725-734.