

基于双40英尺岸桥装卸的船舶多港主贝配载优化决策

张艳伟, 马佳乐

(武汉理工大学 物流工程学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 考虑双40英尺岸桥装卸、20英尺与40英尺干货箱和冷藏箱配载、船舶舱盖等影响,以航线倒箱次数及双40英尺岸桥总装卸次数最小为目标,建立船舶多港主贝配载问题混合整数规划模型,提出舱位内20英尺和40英尺箱混装及非混装两种策略,设计基于启发式规则的超尺寸装箱算法求解两种策略下的配载方案。实例验证表明,采用该配载模型和求解算法能得到优化的配载方案。分析两种策略下的配载结果发现,非混装策略能有效提升总装卸作业效率,同时在同等初始条件下,双40英尺岸桥较普通岸桥至少提升24.5%的作业效率。

关键词: 多港主贝配载;船舶配载;多箱型;双40英尺岸桥;超尺寸装箱

中图分类号: U695.2

文献标志码: A

Optimal Decision of Multi-Port Master Bay Stowage Based on Twin-40-foot Quay Cranes Loading and Unloading

ZHANG Yanwei, MA Jiale

(School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: Based on the consideration of the loading and unloading of twin 40' quay cranes, the stowage of 20' and 40' dry containers and reefer containers, and the influence of ship hatch cover, a mixed integer programming model is established to solve the multi-port main master bay plan problem, whose aim is to minimize the total loading and unloading times of container crane on the route. The bin packing algorithm with over-sized items is designed based on heuristic rules to obtain the stowage plans of 20' and 40' containers in the cabin in mixed loading strategy and non-mixed loading strategy. It is found that the non-mixed loading strategy can

effectively improve the total loading and unloading efficiency and the stowage model and algorithm can optimize the stowage plan, which generally improves the efficiency by at least 24.5% compared with common quay cranes under equal conditions.

Key words: multi-port master bay plan problem; stowage plan; multi container types; twin-40-foot quay crane; bin packing algorithm with over-sized items

截至2019年,我国集装箱吞吐量已增至26 107万TEU(国际标准箱)。集装箱贸易量的不断增长促进了海运船舶的大型化发展以及码头前沿装卸设备的更新换代。其中,双40 ft(1 ft=30.48 cm)岸桥为双吊具设计,通过吊具伸缩,单侧吊具可以吊取1个40 ft箱、2个20 ft箱或1个20 ft箱(艏艉装卸)。船舶配载情况良好时,双吊具同时使用,一次装卸2个40 ft箱,若岸桥吊具对位亦满足要求,最多一次装卸4个20 ft箱。即理论上最多可以在一次作业中完成2个40 ft集装箱或4个20 ft集装箱的装卸,在降低船舶周转时间和提升码头装卸效率方面具备突出优势^[1],陆续被各大集装箱码头投入使用。

为充分发挥双40 ft岸桥的效率,需尽可能保证岸桥双吊具的常见作业工况^[2],避免其余工况因频繁调节吊具浪费时间,但双40 ft岸桥受其自身的限制,无法实现将2个40 ft集装箱同时装载到集装箱船不同层的两个箱位,因此,虽然双40 ft岸桥能够加快码头作业的速度,但同时亦对集装箱船配载计划提出了更高的要求。本文旨在提出适合多港口双40 ft岸桥装卸的配载策略和模型,为船舶挂靠港双40 ft岸桥装卸提供条件,同时适用于普通岸桥作业。

多港集装箱船配载主贝计划问题(MP-

收稿日期: 2020-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(60904067)

第一作者: 张艳伟(1977—),女,副教授,工学博士,主要研究方向为港口数字孪生、智能决策与算法。

E-mail: zywtg@whut.edu.cn



论文
拓展
介绍

MBPP),旨在将不同属性的集装箱划分箱组,实现箱组到船舶具体贝位的一一匹配,并运往后续港口,同时需兼顾船舶稳性、容量等条件。Wilson等^[3]为高效制定配载计划,提出采用分阶段法研究船舶全航线配载问题,并通过在目标函数中加入启发式规则得到较优配载方案,由于数学规划求解效率较低,仅得到了局部最优结果。Wilson等^[4]提出了一种多港口运输集装箱船配载计划生成方法,同时考虑了各港口并行作业普通岸桥数量最大化问题。张维英等^[5]采用多阶段法研究非混装情况下20 ft及40 ft标准箱的配载问题,在主贝计划中以贝位占用数量最少、倒箱量最少和集装箱船载箱率最高为目标,通过基于二叉搜索树算法求解得到了船舶预配载方案。Pacino等^[6]提出一种生成近似最优配载计划的两阶段方法,以最小化倒箱为目标,使用CPLEX求解器求解混装策略下的主贝计划(MBPP)问题。Monaco等^[7]研究了面向码头的船舶配载规划问题,以最小化集装箱运输时间和堆场移动次数为目标建立了二元整数模型,其设计的禁忌搜索算法能够在较短时间内找到近似最优解,但该模型忽略了堆栈的稳定性约束。Ambrosino等^[8-9]将MBPP扩展为多港口主贝计划(MP-MBPP)问题,考虑了舱盖对配载的影响,以最小化船舶在港停泊时间为目标建立了新型混合整数规划模型,能够在较短时间内求解可容纳超大型船舶的配载计划。Li等^[10]研究了集装箱班轮运输配载规划问题,以20 ft和40 ft普通箱为研究对象,通过基于启发式算法的贪婪随机自适应搜索算法求解MBPP问题。

以上对多港口主贝计划问题的研究很少考虑双40 ft岸桥装卸对配载的要求,且配载箱型较为单一,

难以适应大型港口装卸设备更新换代的趋势。本文考虑双40 ft岸桥装卸对配载的要求,以20 ft和40 ft普通箱和冷藏箱为配载对象,以岸桥装卸次数(双40 ft岸桥适合率最高)与倒箱最小为总目标,考虑船舶稳性等限制构建多港口主贝计划配载模型,通过基于启发式规则的装箱算法验证可满足双40 ft岸桥装卸的配载策略,同时验证模型的有效性。

1 问题描述

集装箱船的多港口配载问题旨在为航线经营商指定的特定航线的集装箱船制订配载计划,其目标是满足服务需求并缩短船舶在各个港口的停留时间^[11]。空船自初始港装载起航,途经各港口 p ,分别完成卸载当前目的港的集装箱组并装载一组带有目的港 d 属性的集装箱,行至最终港卸下所有集装箱。集装箱船的货舱以若干具有防漏结构的舱盖划分为甲板 and 舱内两部分,一块舱盖可覆盖其下几个相邻贝位。假设将某一舱盖的甲板和舱内位置都分配给一个目的地,采用此配载方式可以避免舱盖的多次抬放并提高装卸效率^[12]。海船结构如图1所示,一般使用连续的奇数01、03、05……表示船舶奇数贝,用奇数贝之间的偶数02、06、10……表示船舶偶数贝。

船舶配载时,首先需重点考虑双40 ft岸桥对配载的要求,划分箱组时尽量保证可以满足双40 ft岸桥常见满载装卸工况,发挥双40 ft岸桥装卸优势。其次需尽量避免冷藏箱倒箱,且冷藏集装箱仅可堆存于安装有电源插头的特殊箱位,同时需考虑船舶全航线稳性^[13]。

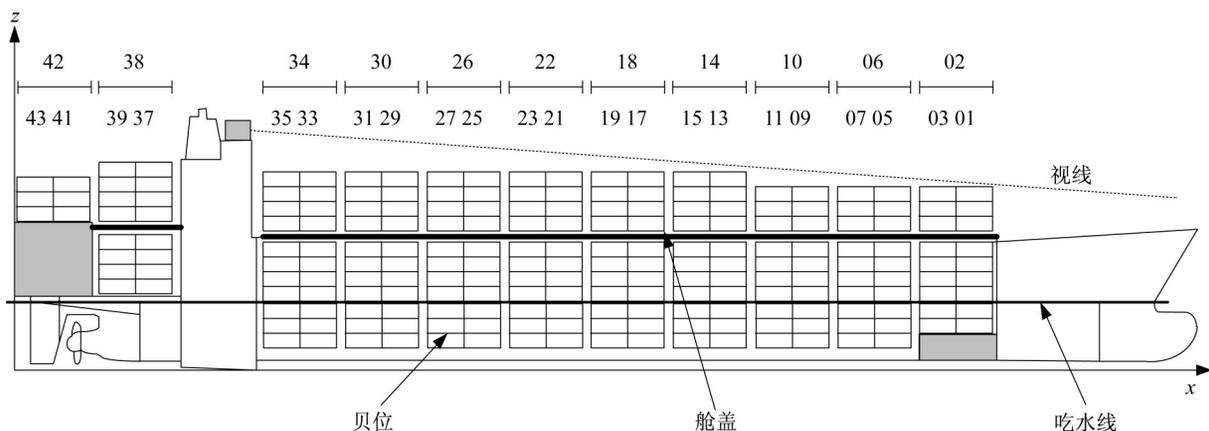


图1 船舶结构

Fig. 1 Ship structure

2 数学模型

基于以下假设建立MP-MBPP模型:

- (1)航线各挂靠港中待装集装箱的属性信息已知,如集装箱的类型、尺寸、目的港、数量、质量等。
- (2)集装箱船结构已知,包括船舶贝位数量、各贝容量、编号等信息。
- (3)仅考虑20 ft和40 ft干货箱和冷藏箱,忽略超限箱和危险箱等。

2.1 集合

P 为集装箱船航线经过的港口集合。

S 为集装箱尺寸集合, $\forall s \in S = \{1, 2\}$, 1表示集装箱尺寸为20 ft, 2表示集装箱尺寸为40 ft。

T 为集装箱类型集合, $T = \{\tau_1, \tau_2\}$, τ_1, τ_2 分别表示集装箱为普通干货箱和冷藏箱。

H 为船舶舱盖集合, $H = H_P \cup H_A = H_L \cup H_R$, 其中 H_P 为船舶船首舱盖集合, H_A 为船舶船尾舱盖集合, H_L 为船舶左舷舱盖集合, H_R 为船舶右舷舱盖集合。

H_{pc} 为岸桥在 p 港服务的舱盖子集。

$Q(p)$ 为港口 p 的 (o, d) 对集合(o 表示初始港, d 表示目的港), $Q(p) = \{a | o, p, d \in P, a = (o, d)\}$ 。

2.2 参数

$N(a)$ 为港口 p 的待装船集装箱箱量, TEU, $a \in Q(p), \forall p \in P$ 。

h 为船舶舱盖编号, $\forall h \in H$ 。

M_h 为舱位 h 的最大普通干货箱容量, TEU, $\forall h \in H$ 。

M_h^R 为舱位 h 的最大冷藏箱容量, TEU, $\forall h \in H$ 。

W_h 为舱位 h 的最大载重量, $\forall h \in H$ 。

\bar{w}_s 为尺寸为 s 的集装箱平均箱重, $\forall s \in S$ 。

H_h 为舱位 h 舱内可用集装箱箱位容量, $\forall h \in H$ 。

P_h 为舱位 h 甲板可用集装箱箱位容量, $\forall h \in H$ 。

Q_1 为最大横向稳性公差。

Q_2 为最大纵向稳性公差。

m_p 为 p 港口分配的岸桥数量, $\forall p \in P$ 。

C_p 为 p 港口最大完工操作次数的下限, $\forall p \in P$ 。

2.3 变量

$x_{h, st}(a)$ 为在舱位 h 装载的尺寸为 s 、箱型为 τ 且满足初始港为 o , 目的港为 d (即满足 (o, d) 对)的集装箱数量。 $x_{h, st}(a) = x_{h, st}(a) \cup x_{d, st}(a)$, 其中, $x_{h, st}(a)$ 与 $x_{d, st}(a)$ 分别代表舱内与甲板上装载的尺寸为 s 、箱型为 τ 且满足初始港为 o , 目的港为 d

的集装箱数量, $a = (o, d) \in Q(p)$ 。

$y_{h, st}(p), y_{d, st}(p)$ 分别表示在港口 p 、舱内与甲板完成装卸后的集装箱量, 是一个状态变量。

$z_h(p)$ 为0—1变量, 舱位 h 在 p 港不为空则为1, 否则为0。

$z_{d, h}(p), z_{h, h}(p)$ 为0—1变量, 表示舱位 h 的甲板或舱内不为空则为1, 否则为0。

$r_{h, st}(a)$ 为在舱位 h 产生的舱盖倒箱量(产生倒箱的舱盖之上的所有集装箱的数量)。

$f_{p, h}$ 为如果发生舱盖倒箱, 则为1, 否则为0。

2.4 多目标优化模型

多目标优化模型如表1所示。

本文的优化目标分别为最小化航线内各港口倒箱量和最小化航线内各港口岸桥装卸次数, 即满足双40 ft岸桥常见满载装卸工况的集装箱对最多。式(3)表示所有拟装船的集装箱均可装船。式(4)、(5)表示港口集装箱船的集装箱状态更新。式(6)~(8)限制了集装箱船的承重和容量。式(9)、(10)限制了船舶的稳性公差。式(11)表示当舱盖为空时, 才可以装入相应舱盖的舱内, 且待装箱量不大于舱内容量。式(12)~(14)限定了在何种情况下可以发生舱盖倒箱, 并对倒箱总量加以限制。式(15)限制同一目的港至少相隔2个舱盖距离分配岸桥。式(16)使航线各港口双40 ft岸桥的最大完工时间尽可能小, 即满足双40 ft满载作业工况的配载箱尽量多。

3 求解方法

MP-MBPP属于三维装箱问题, 是难以精确求解的NP(non-deterministic polynomial)难问题。为避免集装箱船配载方案搜寻空间大、耗时长, 可以采用基于集装箱分组、排序的启发式算法^[14]或构造算法^[10]构造初始解, 设计优化算法进一步提高初始解质量, 以便在有效时间内获得较优解。结合研究对象NP难特点, 论文根据目的港、尺寸类型等属性将集装箱分组, 按舱盖地址重新划分贝位, 将MP-MBPP转化为“集装箱箱组-新贝位”装箱问题, 通过挖掘贝位剩余容量等启发信息, 设计启发式规则, 有效解决考虑双40 ft岸桥装卸的多箱型集装箱船的MP-MBPP。

由于同一箱组中的集装箱数量可能大于待装贝位容量, 需要进一步拆分箱组, 依次装载^[5], 以解决物品尺寸超过箱子容量的超尺寸装箱问题。基于启发式规则的超尺寸装箱算法原理是当待装集装箱组

表1 多目标优化模型

Tab. 1 Multi-objective optimization model

目标函数:	
$f_1 = \min \sum_{p \in P} \sum_{a \in Q(p)} \sum_{h \in H} r_{h, \sigma\tau}(a)$	(1)
$f_2 = \min C_p$	(2)
约束条件:	
$\sum_{a \in Q(p)} \sum_{s \in S} \sum_{\tau \in T} x_{h, \sigma\tau}(a) = N(a), \forall p \in P, \forall a \in Q(p)$	(3)
$y_{h, \sigma\tau}(p) = y_{h, \sigma\tau}(p-1) + x_{h, \sigma\tau}(a), \forall p \in P, \forall a \in Q(p), \forall s \in S, \forall \tau \in T$	(4)
$y_{h, \sigma\tau}(p) = y_{h, \sigma\tau}(p-1) - \sum_{a \in Q(p)} r_{h, \sigma\tau}(a) + x_{h, \sigma\tau}(a), \forall p \in P, \forall a \in Q(p), \forall s \in S, \forall \tau \in T$	(5)
$\sum_{a \in Q(p)} \sum_{s \in S} \sum_{\tau \in T} x_{h, \sigma\tau}(a) \bar{w}_s \leq W_h, \forall p \in P, \forall h \in H$	(6)
$\sum_{a \in Q(p)} x_{h, 1r_1}(a) + 2 \sum_{a \in Q(p)} x_{h, 2r_1}(a) \leq M_h, \forall p \in P, \forall h \in H$	(7)
$\sum_{a \in Q(p)} x_{h, 1r_2}(a) + 2 \sum_{a \in Q(p)} x_{h, 2r_2}(a) \leq M_h^R, \forall p \in P, \forall h \in H$	(8)
$ \sum_{h \in H_L} \sum_{a \in Q(p)} \bar{w}_s(x_{h, \sigma\tau}(a) + x_{h, \sigma\tau}(a)) - \sum_{h \in H_R} \sum_{a \in Q(p)} \bar{w}_s(x_{h, \sigma\tau}(a) + x_{h, \sigma\tau}(a)) \leq Q_1, \forall p \in P$	(9)
$ \sum_{h \in H_A} \sum_{a \in Q(p)} \bar{w}_s(x_{h, \sigma\tau}(a) + x_{h, \sigma\tau}(a)) - \sum_{h \in H_P} \sum_{a \in Q(p)} \bar{w}_s(x_{h, \sigma\tau}(a) + x_{h, \sigma\tau}(a)) \leq Q_2, \forall p \in P$	(10)
$\sum_{a \in Q(p)} \sum_{\tau \in T} (x_{h, 1r}(a) + 2x_{h, 2r}(a)) \leq H(1 - \sum_{d > p} z_{d, h}(p-1) + f_{p, h})$	(11)
$z_{h, h}(p+1) + z_{d, h}(p) \leq 1 + f_{p+1, h}, \forall p \in P, \forall h \in H$	(12)
$\sum_{a \in Q(p)} r_{h, \sigma\tau}(a) \leq f_{p, h} P_h, \forall p \in P, \forall h \in H$	(13)
$\sum_{a \in Q(p)} r_{h, \sigma\tau}(a) \geq y_{h, \sigma\tau}(p-1) - (1 - f_{p, h}) P_h, \forall p \in P, \forall h \in H$	(14)
$\sum_{h \in H_{pc}} Z_h(p) + \sum_{h+2 \in H_{pc}} Z_h(p) \geq m_p - Z_h(p), \forall p \in P$	(15)
$\sum_{h \in H_{pc}} \sum_{a \in \{(p, d)\}} \sum_{\tau \in T} (x_{d, h, 1r}(a) + x_{h, 1r}(a) + r_{h, 1r}(a) + 2(x_{d, h, 2r}(a) + x_{h, 2r}(a) + r_{h, 2r}(a))) / 4 +$	(16)
$\sum_{h \in H_{pc}} \sum_{a \in \{(a, p)\}} \sum_{\tau \in T} (x_{d, h, 1r}(a) + x_{h, 1r}(a) + r_{h, 1r}(a) + 2(x_{d, h, 2r}(a) + x_{h, 2r}(a) + r_{h, 2r}(a))) / 4 \leq C_p$	

大于当前港剩余容量最大的贝位,则按照剩余容量最大的贝位分割集装箱组,依次完成各拆分部分的装载。当待装箱组中的集装箱类型、尺寸存在差异时,不同的箱组分割策略将对配载结果产生较大影响。本文考虑贝位内是否混装20 ft与40 ft集装箱,提出船舶偶数贝(40 ft贝)内20 ft箱和40 ft箱混装、20 ft箱和40 ft箱不混装两种配载策略,具体配载策略如图2和图3所示。

4 算例求解

4.1 案例参数

以船舱容量为1 696 TEU、舱盖数为10的海运集装箱船为例,验证算法的有效性。船舶贝位信息如表2所示^[15],船舶稳性相关参数纵倾力矩为437 383 800 N·m,横稳心距基线高度为12.68 m^[14]。

船舶所经航线包含5个港口,航次中具体的货

表2 船舶各贝位装载量

Tab. 2 Capacity of each bay of the ship

贝位编号	01	03	05	07	09	11	13	15	17	19	21
装载量/TEU	45	51	69	73	79	79	81	81	92	92	92
贝位编号	23	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43
装载量/TEU	92	92	92	92	92	92	92	88	84	24	24

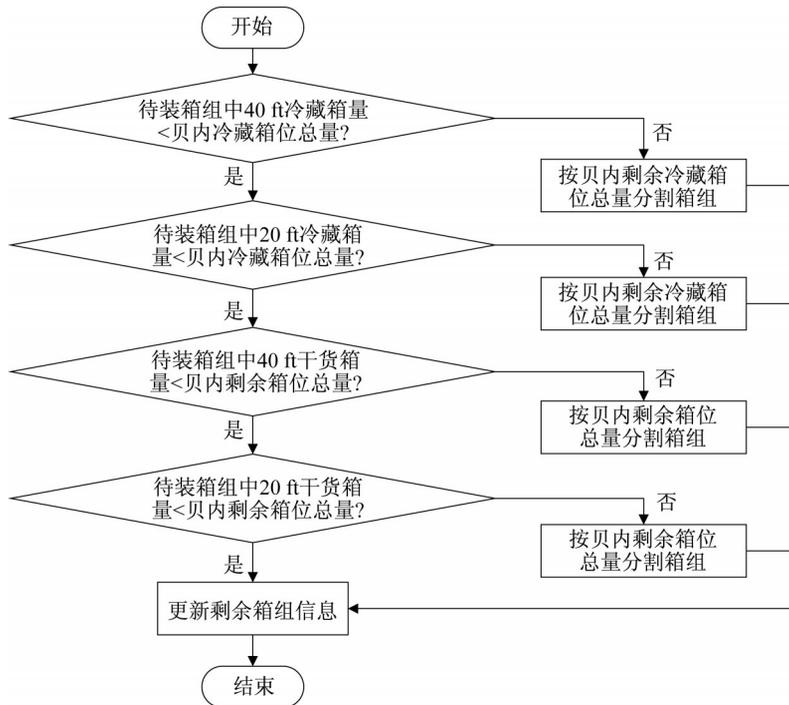


图 2 贝内混装策略

Fig. 2 Mixed loading strategy in bay

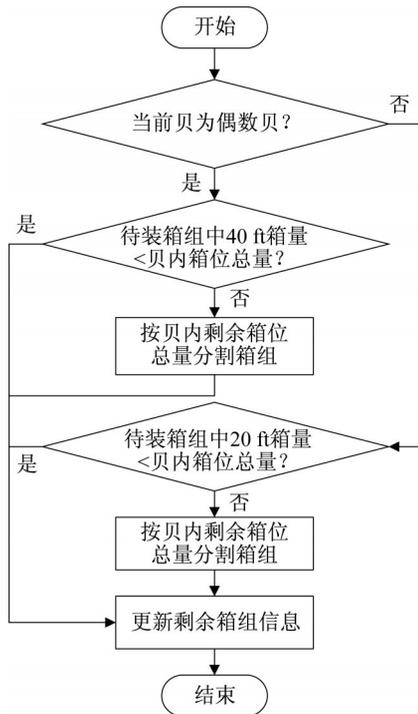


图 3 贝内不混装策略

Fig. 3 Non-mixed loading strategy in bay

运量如表 3 所示,其中 c 表示干货箱,rc 表示冷藏箱。

由于海船的装卸需要考虑舱盖的影响,现按照该船的 10 个舱盖自艏至艉以 01~11 的顺序进行编

号,结合船舶结构与各贝容量,重新划分后的舱位容量信息如表 4 所示,配载时将以舱盖所在舱位所覆盖的甲板和舱内的容量为单位进行集装箱组的装卸。其中,每个舱内容纳的冷藏箱位数分别是 8、16、28、32、32、32、32、32、22、0。

4.2 结果分析

若不使用启发式规则,则难以在有效时间内获得船舶配载方案,加入此规则后,原问题最大计算规模由 C_{1694}^{657} 减少为 C_{22}^{16} ,大大加快了求解速度。实例的配载方案最优解不存在倒箱作业,船舶偶数贝(40 ft 贝)内 20 ft 箱和 40 ft 箱混配、20 ft 箱和 40 ft 箱不混配两种配载策略致使船舶贝位占用率不同,同时,两种策略下,双 40 ft 岸桥满载作业次数及装卸完工时间亦有不同。

4.2.1 不同配载策略对结果的影响

为更好地表示不同策略对双 40 ft 岸桥的装卸效率的影响,引入对二者差值进行定量分析后的比值参数 α , $\alpha = (\text{贝内混装策略下双 40 ft 岸桥装卸次数} - \text{贝内不混装策略下双 40 ft 岸桥并行作业装卸次数}) / \text{贝内混装策略下双 40 ft 岸桥装卸次数} \times 100\%$,表示同等条件下,不混装策略相较于混装策略工作效率提升的程度。由表 5 可以看出,岸桥数量充足时,不混装策略明显优于混装策略,最高可提升超过 30% 的效率。

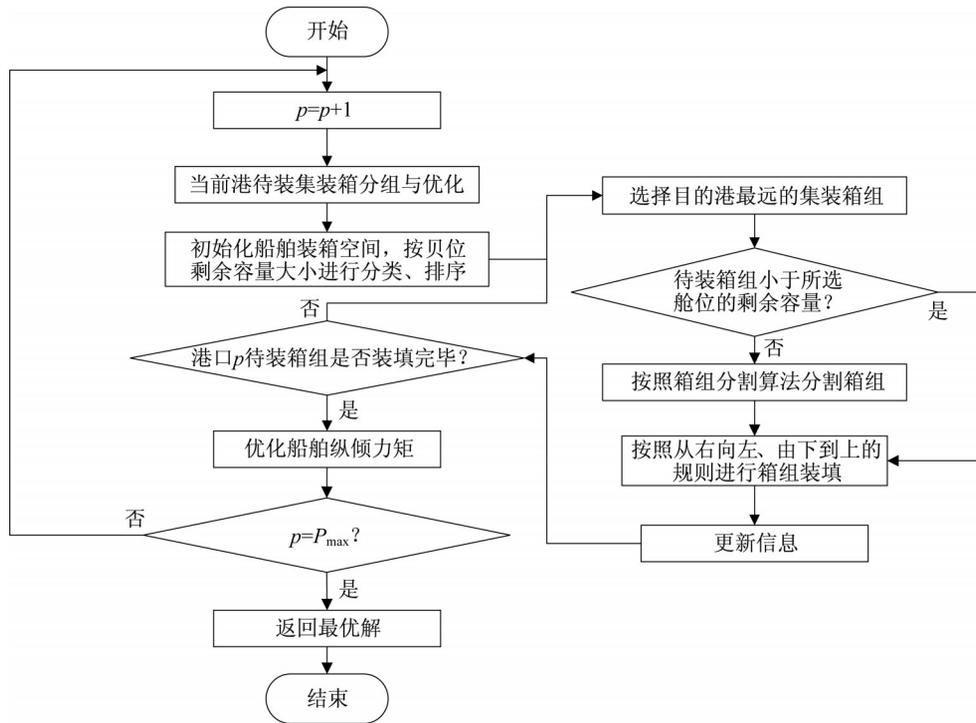


图4 算法流程图

Fig. 4 Flowchart of algorithm

表3 船舶货运箱量

Tab. 3 Number of shipping containers

港口	目的港2 货运箱量/TEU				目的港3 货运箱量/TEU				目的港4 货运箱量/TEU				目的港5 货运箱量/TEU			
	20 ft		40 ft		20 ft		40 ft		20 ft		40 ft		20 ft		40 ft	
	c	rc	c	rc												
起始港1	94	4	20	3	75	5	15	0	265	20	30	4	40	0	4	1
起始港2					160	10	19	1	95	8	30	0	100	7	15	0
起始港3									89	6	38	2	50	5	12	0
起始港4													140	16	28	1

表4 舱位容量

Tab. 4 Hatch capacity

舱位编号	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
甲板容量/TEU	54	66	66	66	88	88	88	88	88	88	48
舱内容量/TEU	42	76	92	96	96	96	96	96	96	84	0

表5 双40 ft岸桥并行作业各港口总装卸次数

Tab. 5 Total loading and unloading times of twin-40-foot quay crane parallel operation at each port

策略	总装卸次数				
	港口1	港口2	港口3	港口4	港口5
贝内混装策略	83	55	49	114	61
贝内不混装策略	83	42	42	75	42
$\alpha/\%$	0	23.6	14.3	34.2	31.1

图5、图6分别为各港口最多可以配备的双40 ft岸桥的数量与船舶贝位占用率,可以发现非混装策略下各港口最多可分配的双40 ft岸桥数量相对更多,船舶贝位占用率也更高。

4.2.2 岸桥类型对结果的影响

普通岸桥在贝内不混装策略下相较于贝内混装策略提升的效率见表6,可以发现,普通岸桥与双40 ft岸桥呈现出相同的效率提升趋势。

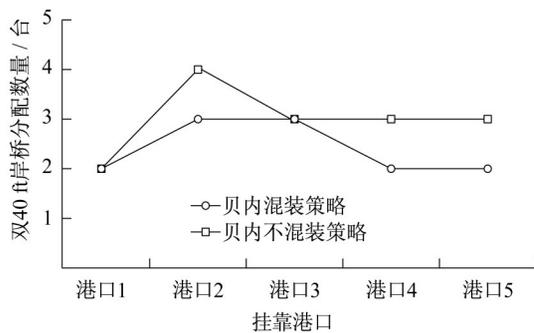


图5 各挂靠港最多配备的双40 ft岸桥数

Fig. 5 Maximum number of twin-40-foot quay cranes in each port

为体现不同策略下双40 ft岸桥与普通岸桥相比可提升的装卸效率,引入对二者差值进行定量分析后的比值参数 β , $\beta=(\text{普通岸桥并行作业各港口总装卸次数}-\text{双40 ft岸桥并行作业各港口总装卸次数})/\text{普通岸桥并行作业各港口总装卸次数} \times 100\%$,表示同等条件下,双40 ft岸桥较普通岸桥可提升的工作效率。

双40 ft岸桥较普通岸桥可提高的作业效率见图7。由图7可见,贝内不混装策略允许并行作业的岸

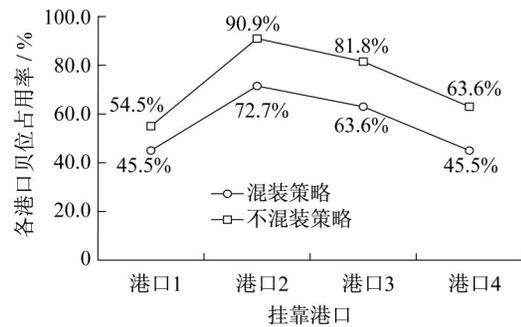


图6 贝位占用率

Fig. 6 Occupancy rate of bay

表6 普通岸桥可并行作业各港口总装卸次数

Tab. 6 Total loading and unloading times of common quay crane parallel operation at each port

策略	总装卸次数				
	港口1	港口2	港口3	港口4	港口5
贝内混装策略	110	82	72	152	81
贝内不混装策略	110	66	50	111	83
$\alpha/\%$	0	19.5	30.6	27.0	-2.5

桥数量更多且避免了频繁更换吊具,相比于贝内混装策略,能够在不同程度上提升更多的作业效率。

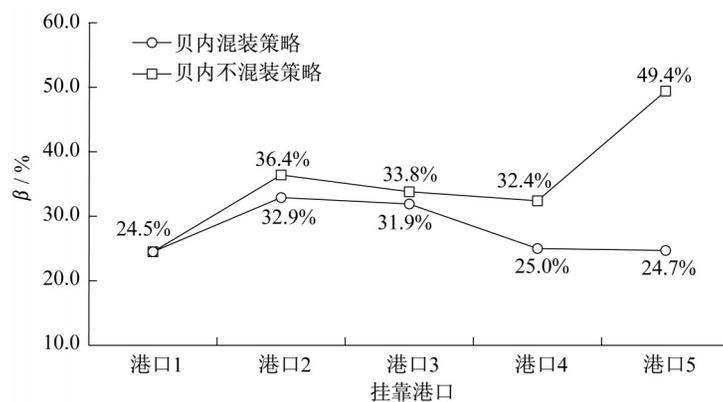


图7 双40 ft岸桥较普通岸桥效率提升比率

Fig. 7 Efficiency improvement ratio of twin-40-foot quay crane compared with common quay crane

5 结论

本文考虑双40 ft岸桥配备及船舶舱盖等对集装箱船航线的影响,以20 ft和40 ft干货箱和冷藏箱位作为配载箱型,以航线各港口装卸次数和舱盖倒箱最小为目标,以船舶稳性和容量等为约束,研究了考虑多港口双40 ft岸桥装卸的船舶主贝计划问题。提出了20 ft与40 ft集装箱混装和不混装两种装箱策略,利用多港口主贝计划模型设计了基于启发式规

则的超尺寸装箱算法。结果表明,设计的模型和算法能够为实际算例提供有效的解决方案,主要有以下两个结论:

(1)在岸桥数量充足时,双40 ft岸桥在贝内不混装策略下的装卸效率明显优于贝内混装策略。

(2)配载模型和算法求解的配载方案能满足配备双40 ft岸桥的需要,若配备双40 ft岸桥进行装卸,同等条件下,较普通岸桥提升的比例在贝内不混装策略下呈现出更好的上升趋势。

作者贡献说明:

张艳伟:确定研究内容,修改文稿,确定文稿。

马佳乐:设计实验,整理结果数据,撰写文稿。

参考文献:

- [1] 周鹏飞,刘科.集装箱码头新型岸桥装卸系统仿真分析[J].港口技术,2017,54(5):16.
ZHOU Pengfei, LIU Ke. Simulation analysis of handling system of new-type container crane [J]. Port Engineering Technology, 2017,54(5):16.
- [2] YU J, TANG G, LI D. Optimal number of quay cranes in container terminals with twin-40-feet quay cranes [C]// The 10th International Conference on Computer Modeling and Simulation. New York: Association for Computing Machinery, 2018:162-167.
- [3] WILSON I D, ROACH P A. Container stowage planning: a methodology for generating computerised solutions [J]. Journal of the Operational Research Society, 2000, 51(11): 1248.
- [4] 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(3): 137.
- [5] 张维英,林焰,纪卓尚,等.集装箱船全航线预配优化模型与算法研究[J].大连理工大学学报,2008,48(5):673.
ZHANG Weiyang, LIN Yan, JI Zhuoshang, *et al.* Optimum model and algorithm of containership's pre-stowage planning in full routes [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008,48(5):673.
- [6] PACINO D, DELGADO A, JENSEN R M, *et al.* Fast generation of near-optimal plans for eco-efficient stowage of large container vessels [C]// The 2nd International Conference on Computational Logistics. Berlin, Heidelberg: Springer 2011:286-301.
- [7] MONACO M F, SAMMARRA M, SORRENTINO G. The terminal-oriented ship stowage planning problem [J]. European Journal of Operational Research, 2014, 239(1): 256.
- [8] AMBROSINO D, PAOLUCCI M, SCIAMACHEN A. A MIP heuristic for multi port stowage planning [J]. Transportation Research Procedia, 2015, 10:725.
- [9] AMBROSINO D, PAOLUCCI M, SCIAMACHEN A. Computational evaluation of a MIP model for multi-port stowage planning problems [J]. Soft Computing, 2017, 21(7):1.
- [10] LI J, ZHANG Y, JI S, *et al.* Multi-stage hierarchical decomposition approach for stowage planning problem in inland container liner shipping [J]. Journal of the Operational Research Society, 2020, 71(3):381.
- [11] COHEN M W, DAHAN A, KASPI I. Software system for container vessel stowage planning using genetic algorithm [C]// GECCO 2015 — Companion Publication of the 2015 Genetic and Evolutionary Computation Conference. New York: Association for Computing Machinery, 2015: 1519-1520.
- [12] 宓为建,张晓华,秦翌,等.集装箱码头装船贝内发箱顺序决策[J].中国工程机械学报,2016,14(4):369.
MI Weijian, ZHANG Xiaohua, QIN Zhao, *et al.* Decisions on container retrieving orders for container terminals [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2016,14(4):369.
- [13] 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):75.
YANG Wei, HAN Xiaolong. Loading optimization problem of container liner [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2018,44(1):75.
- [14] 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.
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.
- [15] 高现飞.基于双40英尺岸桥的集装箱船多港智能配载研究[D].武汉:武汉理工大学,2019.
GAO Xianfei. Research on multi-port intelligent stowage of container ships based on double 40 ft quay crane [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.