

基于集装箱倒箱和岸桥作业均衡的集装箱船配载优化

黄森佳^{1,5}, 姜桂艳^{1,2,3,4,5*}, 张 露²

(1. 宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315832; 2. 新疆大学 科技学院, 新疆 阿克苏 843000;

3. 国家道路交通安全工程技术研究中心 宁波大学分中心, 浙江 宁波 315832; 4. 现代城市交通技术江苏高校协同创新中心, 江苏 南京 210000; 5. 宁波港航物流服务体系协同创新中心, 浙江 宁波 315832)

摘要: 为了减少集装箱船舶装船作业所需时间, 在岸桥并行作业的工况条件下, 针对集装箱船舶先卸后装的作业模式, 综合考虑集装箱船舶纵向强度、岸桥作业安全距离等实际约束和集装箱倒箱量对装船作业时间的影响, 构建了以装船作业时间最短为目标的集装箱船舶配载优化模型, 引入岸桥作业均衡参数, 用以衡量岸桥作业的均衡性, 并使用遗传算法对模型进行求解. 实证分析结果表明, 在本文假定的实验条件下, 该方法能够在减少岸桥装船作业时间的同时保证集装箱倒箱量的优化和岸桥作业量的均衡.

关键词: 集装箱船舶; 装船作业; 岸桥; 配载; 作业均衡

中图分类号: U693.33

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 04-0109-06

集装箱船舶配载主要解决集装箱船舶的装载问题, 其目的是在保证船舶稳性的基础上, 减少装船作业时间, 提高码头装卸设备的利用效率^[1-3]. 在现有的集装箱船舶配载研究成果中, 装船作业时间的优化主要是通过均衡各台岸桥的作业量和减少集装箱倒箱量来实现.

Wilson等^[2]研究了倒箱量对岸桥利用率的影响, 建立了以装船作业时间最短为目标的整数规划模型, 并用分支定界算法进行了求解; Kang等^[4]在保证船舶稳性得到满足的前提下, 以倒箱量最小和岸桥移动次数最少为目标, 建立了集装箱船舶单港配载整数规划模型, 并使用贪婪算法对该模型进行了求解; Sciomachen等^[5-6]考虑了集装箱船舶稳性和岸桥作业安全距离的约束, 以岸桥移动次数最少为目标建立了整数规划模型, 使用三维后发式装箱算法对模型进行了求解; Liu等^[7]分析了岸桥作业安全距离与装船作业时间的关系, 使用基于块的集装箱布局算法对配载问题进行了求解; 乐美龙等^[8]考虑了岸桥作业安全距离约束, 以倒箱数最少和岸桥最迟完成工作时间最短为目标建立

了整数规划模型, 并用遗传算法进行了求解; 李俊等^[9]考虑了堆场发箱顺序和集装箱船舶配载之间的联系, 分析了倒箱量对装船作业时间的影响; Monaco等^[10]考虑了堆场作业和倒箱量对配载的影响, 以装船作业时间最短为目标建立了一个0~1整数规划模型, 并使用两阶段后发式算法对模型进行了求解. 这些研究大都考虑了集装箱倒箱量对装船作业时间的影响, 或者考虑了岸桥作业量均衡对装船作业时间的影响, 少有综合考虑这两者对装船作业时间的影响. 只考虑集装箱倒箱量的影响, 可能会使集装箱船舶纵向力矩过大; 而只考虑岸桥作业量均衡的影响, 则会使在装载过程中倒箱量过大.

由于集装箱船舶配载问题已被证实属于NP难题^[11], 难以用精确算法进行求解, 而遗传算法因具有较强的鲁棒性和全局搜索能力, 在NP难题求解方面应用广泛, 且取得了良好的效果^[13-15].

本文综合考虑集装箱倒箱量和岸桥作业量均衡对装船作业时间的影响, 在船舶的适航性条件约束下, 以最小化装船作业时间为目标, 构建基于

收稿日期: 2018-12-14. 宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(71431001).

第一作者: 黄森佳(1993-), 男, 浙江嘉兴人, 在读硕士研究生, 研究方向: 智能运输系统. Email: 18368080626@163.com

*通信作者: 姜桂艳(1964-), 女, 黑龙江鸡西人, 博士/教授, 研究方向: 智能运输系统. Email: jiangguiyan@nbu.edu.cn

岸桥作业量均衡的集装箱船舶配载模型,设计求解算法,并通过数值实验对模型和算法的有效性和先进性进行了实证分析.

1 问题描述

基于岸桥作业量均衡的集装箱船舶配载问题是指集装箱船舶在当前港口配载过程中,在先卸后装条件下,考虑待装载的集装箱在船舶贝内的分布对岸桥作业的影响,在集装箱船舶稳性约束下,确定所有待装载的集装箱在船舶中的具体位置,编制出集装箱船舶在当前港口的装卸计划.配载过程为:在船舶稳性约束下将具有相同目的港、尺寸的集装箱组成的集装箱组装载到船舶的贝位内,且使每台岸桥作业区域内的待装载集装箱数量较为均匀,使相同目的港的集装箱在一个贝位内的分布尽量集中,减少混装贝数量,以此来减少倒箱量,从而减少船舶的装船作业时间.

集装箱船舶配载主要包括2个阶段:(1)贝位分配阶段,主要考虑集装箱在船舶纵向上的布置.(2)贝内排箱阶段,确定每个集装箱在贝内的具体位置.其中贝位分配阶段是整个配载的关键和基础,本文主要对贝位分配阶段进行研究.

本文中岸桥作业量均衡通过岸桥最迟完成作业时间来衡量,由于在配载过程中采用后到港箱先装,先到港箱后装的装载策略,因此在贝位分配阶段各贝位中集装箱的倒箱量为0.通常集装箱倒箱一般只发生在混装贝中,考虑到贝位分配阶段产生的混装贝在后续的贝内排箱阶段可能会产生影响集装箱船舶装船作业时间的倒箱量,因此在贝位分配阶段需对混装贝的数量进行优化.本文使用现实中每个混装贝平均产生的倒箱作业时间来量化混装贝对集装箱船舶装船作业时间的影响.集装箱船舶装船作业时间用岸桥最迟完成工作时间及由于贝位混装产生的潜在倒箱时间之和表示.

考虑到基于岸桥作业量均衡的集装箱船舶配载的特点,提出如下假设:(1)集装箱船舶物理结构已知;(2)待装载集装箱相关信息已知;(3)不考虑特殊箱的装载,只考虑6.096 m标准普通箱的装载;(4)待装船集装箱数量不大于船舶最大装载量,即不考虑集装箱装船选择问题;(5)集装箱先卸后装,计算岸桥作业量时只考虑装船作业量;(6)只考虑始

发港的装载情况,不考虑后续港口的装载情况;(7)每台岸桥装/卸一个集装箱所需时间相同.

2 模型构建

2.1 参数设置

设 i 为贝位编号, $i=1,2,\dots,I$; j 为列编号, $j=1,2,\dots,J$; k 为层编号, $k=1,2,\dots,K$; p 为港口编号, $p=1,2,\dots,P$; q 为岸桥编号, $q=1,2,\dots,Q$; w_{ijk} 为在位置 (i,j,k) 的集装箱的质量; t 为岸桥装载一个集装箱所用的时间; n_i^p 为贝位 i 中含有的集装箱的目的港数量 p ; γ 为岸桥作业均衡系数,可表示为:

$$\gamma = \sum_{q=1}^Q |n_q - \bar{q}| / \bar{q}, \quad (1)$$

其中 $\bar{q}$ 为每台岸桥分配到的工作量的平均值.

决策变量:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{在位置}(i,j,k)\text{上存在集装箱,} \\ 0, & \text{否则,} \end{cases} \quad (2)$$

$$x_i = \begin{cases} 1, & \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J n_i^p > 1, \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (3)$$

2.2 数学模型

假设每台岸桥装载一个集装箱所需的时间为 t ,以 f 为目标函数,建立以集装箱船舶装船作业时间最小为目标的优化模型,即

$$f = \min \{f_1 + \alpha f_2\}, \quad (4)$$

$$f_1 = \max \sum_{q=1}^Q t \cdot n_q, \quad (5)$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^I x_i. \quad (6)$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^I n_i \leq N, \quad (7)$$

$$x_{ijk} \leq 1, \quad (8)$$

$$x_{ijk} \geq x_{ij(k+1)}, \quad (9)$$

$$B_{q+1}^p - B_q^p \geq 4, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk} \cdot w_{ijk} \leq W, \quad (11)$$

$$-Q_1 \leq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk} \cdot w_{ijk} - \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk} \cdot w_{ijk} \leq Q_1, \quad (12)$$

$$[t] \leq (\sum_{i=1}^I 12W \cdot b_i) / (B \cdot L^2) \leq 0, \quad (13)$$

式(4)确保集装箱船舶装船作业时间最小,其中 α 为影响系数,表示现实中一个混装贝中倒箱所需的平均时间与贝位容量和待装载集装箱量有关;式(5)为岸桥最迟完成作业时间,其中 n_q 表示岸桥 q 作业范围内待装载集装箱数量;式(6)为混装贝数量;式(7)表示保证装载的集装箱总量不超过船舶的最大装载量,其中 N 表示集装箱船舶的最大装载量, n_i 表示贝位 i 中集装箱的数量;式(8)表示保证每个箱位最多装载一个集装箱;式(9)表示保证被占用的箱位下面箱位不能为空;式(10)表示相邻岸桥在作业时至少间隔4个贝位,其中 B_q^p 表示第 q 台岸桥装载目的港为 p 的集装箱时的工作位置;式(11)表示保证装载的集装箱总质量不能超过船舶的最大载质量,其中 W 表示集装箱船舶最大载质量;式(12)为船舶的纵向受力约束,其中 Q_i 表示集装箱船舶的最大纵向强度, A 表示集装箱船舶后部贝位集合, P 表示集装箱船舶前部贝位集合;式(13)表示集装箱船舶吃水差约束^[16],其中 W_i 表示第 i 贝集装箱质量, B 表示船宽, b_i 表示 i 贝到船舶浮心的纵向距离, L 表示船长, $[t]$ 表示可用吃水差最小值。

3 算法设计

算法设计的整体思路是先用启发式装船算法求出初始可行解,再使用遗传算法对初始可行解进行优化,从而得到更为精确的满意解。为了提高生成的初始解的质量,在生成初始解的过程中对数据进行预处理。具体的做法是模拟现实中配载过程,先根据订舱信息将需要进行装卸作业的集装箱按目的港和质量划分为集装箱组,再根据船舶的空间结构,将集装箱组按照装船算法装载到船舶的贝内,得到集装箱组在船上的总体分布,生成初始解。

由于遗传算法能很好地处理配载过程中的并行性以及搜索的非线性,因此可在简化的问题中并入各种约束,使得算法简洁、有效。在获得初始可行解后使用遗传算法对其进行优化,以实现模型目标函数寻优。

3.1 初始解的生成与优化

初始解的质量对后续的优化过程影响较大,因此需在产生初始解的过程中尽可能提高初始解的质量,产生初始解的具体步骤为:

Step 1 将集装箱按目的港和质量划分为多个集装箱组,按目的港由远及近的顺序对集装箱组进行排序,将集装箱按重、中和轻箱的比例进行分配,保证集装箱质量分布均匀。

Step 2 以 Step 1 中的顺序将集装箱组装载到贝内,判断集装箱组中集装箱数量与当前贝位容量的大小。若当前贝位容量小于集装箱组中集装箱的数量,则执行 Step 3;若当前贝位容量大于或等于集装箱组中集装箱的数量,则执行 Step 4。

Step 3 选取未装满的贝位,将集装箱组剩余的集装箱装载到贝位内,直至该集装箱组内的集装箱全部装载完成。

Step 4 判断有无剩余的集装箱组,若有,则以 Step 1 中的顺序选取一个新的集装箱组,并执行 Step 2,否则执行 Step 5。

Step 5 生成初始解。

3.2 染色体编码及初始种群的生成

本文用装船矩阵表示初始解,矩阵中每个元素表示目的港为 p 的集装箱在贝位 i 中的数量,解是对各目的港集装箱在船舶纵向分布的反映。初始种群个体的生成方式为:将原有的集装箱船舶贝位顺序打乱随机生成一个新的序列,并按从头到尾的顺序使用装船算法进行处理,将经过处理后序列作为初始染色体。本文采用十进制编码方式,染色体的基因代表贝位装载的集装箱数量。

3.3 适应度值计算

由于目标函数是求集装箱船舶装船作业时间的最小值,因此目标函数最小的染色体的适应度最高,适应度值计算公式为:

$$f = 1 / \min(f_1 + \alpha f_2 + \beta f_3). \quad (14)$$

3.4 遗传操作

遗传操作主要包括了选择操作、交叉操作和变异操作。具体为:(1)选择操作,采用轮盘赌选择策略进行选择操作,根据个体的适应度值大小进行概率选择,适应度值大的个体比适应度值小的个体被选中的概率大。(2)交叉操作,选择将集装箱贝位作为交叉单位,在染色体上随机产生2个交叉点。(3)变异操作,随机产生2个变异点,然后交换贝位的排列顺序。

3.5 终止规则

每迭代一次,计算出每个个体的适应度函数

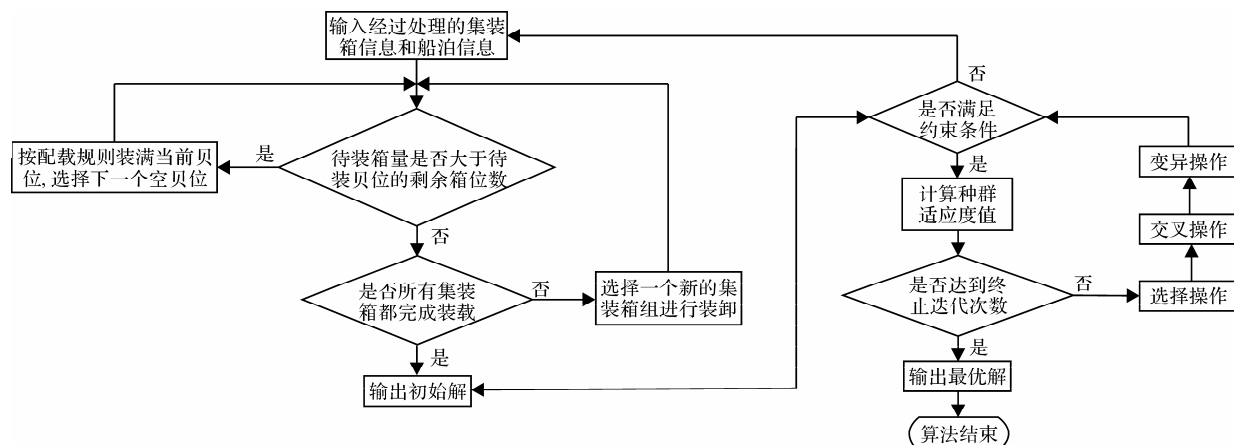


图1 算法总流程

值, 并保留较优解. 迭代步数达到终止迭代次数时终止. 若满足条件则输出最优解, 如不满足则继续进行遗传操作. 算法总流程如图1所示.

4 实证分析

4.1 实验背景

本算例中集装箱船舶所在航线共有5个挂靠港, 集装箱船舶容量为1841 TEU, 船舶贝位13到贝位33能够容纳集装箱的数量均为98 TEU, 其他贝位的容量见表1

表1 贝位容量

贝位号	容量/TEU	贝位号	容量/TEU	贝位号	容量/TEU
1	49	9	85	39	90
3	56	11	85	41	27
5	75	35	96	43	27
7	79	37	94		

船舶的船长为189.25 m, 船宽为28.40 m, 漂心距尾柱距离为95.76 m, 空船平均吃水为7.52 m, 浮心距尾柱距离为94.42 m, 横稳心距基线高度为12.68 m, 总吨为235.42 t. 集装箱按质量分为重箱(21~30 t)、中箱(11~20 t)和轻箱(0~10 t), 3种集装箱的数量占集装箱总量的比例分别为30%、30%和40%. 根据本研究集装箱船舶的特点, 确定作业岸桥数量为4台, 岸桥作业最小间距为4个贝位, 岸桥装载一个集装箱所需时间为1 min. 参照文献[7]和现实操作中影响系数的确定方式, 根据本案例中集装箱船舶贝位容量和待装载集装箱量确定影响系数 α (取值20). 由于集装箱装载量的规模大小会影响算法的运行效率, 为了进一步验证模型的

合理性和算法的有效性, 选用规模大小分别为1064、878、617和238 TEU的4种不同装载规模的案例进行计算, 各案例具体信息见表2. 通过Matlab软件进行计算优化.

表2 各案例待装载集装箱数量

目的港	案例1	案例2	案例3	案例4
1	214	176	202	56
2	303	306	110	48
3	210	173	108	32
4	198	56	69	36
5	139	167	128	66

4.2 实验方案设计

依据遗传算法染色体交叉概率和变异概率的选取原则, 将染色体交叉概率和变异概率分别设为0.9和0.1, 实验方案设计具体为: (1)针对不同装载规模的案例, 研究岸桥作业范围划分对装船作业时间和岸桥作业均衡系数的影响, 分析各案例中不同岸桥作业范围划分方案的优劣, 得出各案例中最佳岸桥作业范围的划分方案. (2)在各案例最佳岸桥作业范围划分方案下, 针对实验背景中给出的4种不同装载规模的案例, 将只考虑倒箱量的方法^[3-4,8-10]作为方法1, 将只考虑岸桥作业量均衡的方法^[5-7]作为方法2, 本文方法为综合考虑了倒箱量和岸桥作业量均衡的影响. (3)将本文方法与方法1和方法2所得到的优化结果进行比较, 验证本文方法的有效性和先进性.

4.3 实验结果分析

4.3.1 岸桥作业范围划分

案例中分配的岸桥台数为4, 岸桥最小作业间

距为 4 个贝位时, 共有 6 种满足岸桥作业量均衡要求的岸桥作业范围划分方案. 在实际作业过程中, 为避免岸桥之间的相互干扰, 岸桥的作业范围往往是连续的, 因此本文岸桥作业范围的划分也采用连续划分的方法, 具体分配方案见表 3.

表 3 岸桥作业范围划分

方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
5-6-6-5	5-5-6-6	5-6-5-6	6-5-5-6	6-6-5-5	6-5-6-5

注: 表中 4 个数字组成表示每台岸桥作业范围内的贝位数量, 如“5-6-6-5”表示有 4 台岸桥作业, 各台岸桥作业范围内的贝位数量分别为 5, 6, 6, 5.

不同划分方案下各案例装船作业时间和岸桥作业均衡系数优化结果见表 4. 从表 4 可知, 案例 1 中, 方案 2 和方案 5 的划分方法能在最小化装船作业时间的同时保证装船过程中岸桥作业的均衡性. 案例 2 中, 方案 6 所得到的装船作业时间较短, 岸桥作业均衡系数也较小. 案例 3 中, 综合考虑各划分方案的装船作业时间和岸桥均衡系数, 方案 6 的划分方式能在最小化装船作业时间的同时保证岸桥作业的均衡性. 案例 4 中, 方案 1 和方案 5 的划分方式能在最小化装船作业时间的同时保证岸桥作业的均衡性.

表 4 各案例装船作业时间和岸桥作业均衡系数优化结果

案例	参数	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
1	t_L/min	335	334	365	354	334	354
	C_q	0.429	0.421	0.376	0.421	0.421	0.421
2	t_L/min	309	321	306	300	307	292
	C_q	0.273	0.656	0.419	0.246	0.428	0.483
3	t_L/min	246	256	236	256	236	230
	C_q	0.784	0.729	0.914	0.772	1.083	0.862
4	t_L/min	134	136	136	138	134	134
	C_q	2.000	2.084	2.084	2.000	2.000	2.019

注: 表中 t_L 为装船作业时间; C_q 为岸桥作业均衡系数.

4.3.2 不同计算方法的优化结果

表 5 为不同计算方法得到的优化结果. 从表 5 可知, 在案例 1~4 条件下, 本文方法得到的目标函数值最优, 表明装载规模较小时, 由于倒箱所需的时间占总作业时间的比例较大, 因此最小化倒箱量能有效地减少岸桥作业时间, 随着案例规模的扩大, 倒箱所需时间占总作业时间的比例越来越小, 作业量均衡对岸桥作业时间的影响越来越大,

因此当装载规模增大时, 在对倒箱量进行优化的同时考虑作业量均衡的影响非常重要. 综上所述, 在本文案例条件下, 本文方法优于方法 1 和方法 2, 在案例规模为 600 TEU 到 800 TEU 时, 本文方法的优化效果最为明显.

表 5 不同计算方法得到的优化结果

算法	案例 1	案例 2	案例 3	案例 4
方法 1	351	432	334	138
方法 2	374	327	276	138
本文方法	334	292	230	134

5 结论

结合集装箱船舶配载的实际情况, 考虑岸桥作业与集装箱船舶配载作业的紧密联系, 在岸桥并行作业的工况条件下, 引入了岸桥作业均衡系数来衡量各台岸桥作业的均衡性; 基于集装箱船舶的适航性约束, 建立了以船舶装船作业时间最短为目标的集装箱船舶配载优化模型. 考虑到直接求解的复杂性, 采用了装船算法生成初始配载方案, 结合现有的人工配载经验, 通过遗传算法实现对初始配载方案的优化, 简化了计算过程, 所得结果满足集装箱船舶适航性和岸桥作业量均衡的要求. 通过对一个 1 841 TEU 集装箱船舶的配载实例, 研究了不同岸桥作业范围划分方案对装船作业时间和岸桥作业均衡系数的影响, 并用 4 组不同规模的装载案例验证了本文方法对于小规模装载案例具有较好的优化效果.

参考文献:

[1] Ambrosino D, Sciomachen A, Tanfani E. Stowing a containership: The master bay plan problem[J]. Transportation Research Part A, 2004, 38(2):81-99.

[2] Wilson I D, Roach P A. Principles of combinatorial optimization applied to container-ship stowage planning [J]. Journal of Heuristics, 1999, 5(4):403-418.

[3] 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.

[4] Kang J G, Kim Y D. Stowage planning in maritime container transportation[J]. Journal of the Operations Research Society, 2002, 53(4):415-426.

[5] Sciomachen A, Tanfani E. The master bay plan problem: A solution method based on its connection to the three-dimensional bin packing problem[J]. IMA Journal

- of Management Mathematics, 2003, 14(3):251-269.
- [6] Sciomachen A, Tanfani E. A 3D-BPP approach for optimizing stowage plans and terminal productivity[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 32(183): 1433-1446.
- [7] Liu F, Low M Y H, Ying H S, et al. Stowage planning of large containership with tradeoff between crane workload balance and ship stability[J]. Lecture Notes in Engineering & Computer Science, 2010, 2182(1):1537-1543.
- [8] 乐美龙, 洪严. 考虑桥吊工作时间和翻箱次数的配载[J]. 系统工程, 2014, 32(7):87-93.
- [9] 李俊, 张煜, 计三有, 等. 集装箱船舶装箱排序问题的两阶段算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(1): 183-190.
- [10] Monaco M F, Sammarra M, Sorrentino G. The terminal-oriented ship stowage planning problem[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 239(1): 256-265.
- [11] Dubrovsky O, Levitin G, Penn M. A genetic algorithm with a compact solution encoding for the container ship stowage problem[J]. Journal of Heuristics, 2002, 8(6): 585-599.
- [12] Cohen M W, Coelho V N, Dahan A, et al. Container vessel stowage planning system using genetic algorithm [C]//20th European Conference Applications of Evolutionary Computation, Amsterdam, 2017:557-572.
- [13] 汪照, 李有明, 赵翠茹. 基于自适应遗传算法的 OFDMA 资源分配[J]. 宁波大学学报(理工版), 2013, 26(1):23-27.
- [14] 何燕, 胡燕海, 毛育强, 等. 面向集装箱船同贝同步装卸的堆垛协同作业方法[J]. 宁波大学学报(理工版), 2014, 27(1):124-128.
- [15] 周超, 胡燕海, 李建辉. 基于遗传算法的柔性作业车间柔性分批调度问题研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2015, 28(2):128-132.
- [16] Imai A, Sasaki K, Nishimura E, et al. Multi-objective simultaneous stowage and loading plan for a container ship with container rehandle in yard stacks[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 171(2):373-389.

Optimization of container ship stowage based on container re-handling and balanced operation of quay crane

HUANG Senjia^{1,5}, JIANG Guiyan^{1,2,3,4,5*}, ZHANG Lu²

(1.Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315832, China;

2.College of Science and Technology, Xinjiang University, Aksu 843000, China;

3.Ningbo University Sub-center, National Road Traffic Management Engineering Technology Research Center, Ningbo 315832, China; 4.Jiangsu Province Collaborative Innovation Center for Modern Urban Traffic Technologies, Nanjing 210000, China;

5.Collaborative Innovation Center of Ningbo Port Logistics Service System, Ningbo 315832, China)

Abstract: To further decrease berthing time of container vessels, this paper proposes a stowage optimization model for container ships with the objective of shortest loading time, on the condition of parallel operation of quay crane. The model works for the container ships that adopt the rules of unloading first and loading next operation, with consideration of the actual constraints of longitudinal strength of container ship, safe distance of quayside crane operation and the influence of re-handling on loading operation time. The equilibrium parameters of quay-crane operation are introduced to measure the equilibrium of quay-crane operation. The empirical analysis results show that under the experimental conditions, this method can reduce the loading time of quayside crane and ensure the optimization of container re-handling numbers and balance of quayside crane operation capacity.

Key words: container ships; loading operation; quay cranes; stowage; balance of operation

(责任编辑 史小丽)