

## 多场桥分区域平衡策划下的集装箱堆场箱位分配问题

范厚明, 姚 茜, 马梦知

(大连海事大学 战略管理与系统规划研究所, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 集装箱码头堆场出口箱箱位分配和场桥调度对码头运营效率有重要影响. 为了合理分配箱位和调度场桥, 采用分区域平衡策划方法, 在给定批量任务下, 考虑场桥实际作业中的安全距离, 以均衡各场桥作业任务量和减少场桥的非装卸时间为目标, 建立混合整数规划模型, 并设计遗传算法求解, 通过不同批量任务的实验分析验证所提出方法的有效性. 研究表明, 分区域平衡策划方法可以更好地解决箱位分配和箱区多场桥联合作业的优化问题.

**关键词:** 箱位分配; 场桥作业均衡; 混合整数规划模型; 遗传算法

**中图分类号:** N945; U691

**文献标志码:** A

## Storage space allocation based on regional workload balance planning of multiple yard cranes in container terminal yard

FAN Hou-ming, YAO Xi, MA Meng-zhi

(Institute of Transportation Strategy Management and Systematic Planning, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China. Correspondent: FAN Hou-ming, E-mail: fhm468@163.com)

**Abstract:** The storage space allocation and yard crane scheduling in a container terminal are vital to the efficiency of terminal operation. In order to reasonably allocate the storage space and make the yard crane schedule, the regional workload balance method is adopted. When the tasks of one block are given, a mixed integer programming model is established to balance the workload of yard cranes and reduce the unproductive time, taking the safety distance between the yard cranes during the operation process into account. A genetic algorithm is used to solve the model. Numerical experiments with different scale of tasks verify the effectiveness of the adopted method. The results show that the regional workload balance planning method can better solve the optimization problem of storage space allocation and yard crane joint scheduling.

**Keywords:** storage space allocation; workload balance of yard cranes; mixed integer programming model; genetic algorithm

### 0 引言

随着船舶大型化的发展, 每艘船舶的集港箱量增多, 港口需要安排更多的人力物力来完成集港箱在堆场的装卸作业. 在码头堆场, 集装箱的装卸作业主要由场桥完成, 箱区单场桥作业效率渐渐不能满足大型船舶的集港需求, 未来多场桥作业方案将更多地被港口采用, 以提高堆场的装卸效率, 缩短船舶的集港时间. 基于此, 本文针对出口箱箱区多场桥作业的箱位分配问题进行研究.

在集装箱码头的堆场箱位分配问题上, Bazzazi等<sup>[1]</sup>以平衡箱区作业量和最小化集装箱在港时间为目标, 建立了堆场箱位分配模型; Chen等<sup>[2]</sup>提出了出

口箱堆位分配两阶段优化算法, 对装船时的水平搬运距离进行了优化, 并均衡了各箱区的作业量; 陈超等<sup>[3]</sup>以集卡接运单位集装箱平均作业时间最少和场桥作业成本最低为目标, 构建了出口箱箱区选择与箱位分配两阶段非线性整数规划模型; 周鹏飞等<sup>[4]</sup>针对出口箱交箱时间的动态不确定性, 建立了规划模型优化单台龙门吊行驶距离和翻箱量; 邵乾虔等<sup>[5]</sup>通过马尔可夫链预测方法将随机交箱序列转化为广义交箱系列, 建立了场桥调度优化的两阶段数学模型, 用以最小化预翻箱数量和单场桥作业移动距离.

在多场桥调度问题上, Li等<sup>[6]</sup>以最小化总工作迟延时间为目标研究了多场桥调度问题, 并考虑了场桥

收稿日期: 2015-09-06; 修回日期: 2015-11-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61473053).

作者简介: 范厚明(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事交通运输规划与管理等研究; 姚茜(1991—), 女, 硕士生, 从事交通运输工程的研究.

间相互干涉的现实约束; He 等<sup>[7]</sup>、Chang 等<sup>[8]</sup>根据滚动计划方法建立了多箱区多场桥动态调度模型, 以计划期总工作量溢出最少为目标, 设计了遗传算法进行求解; 赵磊等<sup>[9]</sup>以集装箱堆场场桥作业箱量均衡和作业时间均衡为目标, 建立了场桥均衡调度模型; Lee 等<sup>[10]</sup>研究了两台场桥的作业调度问题, 以最小化总作业时间为目标, 运用模拟退火算法进行了求解; 郑红星等<sup>[11]</sup>研究了混堆模式下集装箱码头的多场桥调度问题, 对所有任务的等待成本和场桥非装卸成本进行了优化。

综上所述, 现有对箱位分配问题的研究一般假设一个箱区只能由一台场桥进行作业, 较少考虑箱区多场桥作业的情况, 而针对多场桥调度问题的研究均假设任务的堆存位置为已知, 通常没有考虑堆存空间的分配问题, 也很少考虑场桥作业均衡, 并且一些研究忽略了多场桥作业可能出现的相互干涉的情况. 本文将场桥调度和堆存空间分配作为一个整体进行研究, 同时考虑场桥间的安全距离约束, 以均衡各场桥作业任务量和最小化场桥非装卸时间为目标, 构建箱区多场桥共同作业下的箱位分配优化模型, 并设计遗传算法对模型进行求解。

## 1 问题描述

码头出口集装箱在堆放时一般要求同一箱型、同一目的港的集装箱堆放在堆场的同一贝位上, 一些港口在编制堆存计划时还特别要求同船舶集装箱尽可能堆放在同一箱区, 以减少装船时间, 提高码头作业效率. 为了提高集港效率, 缩短船舶在港时间, 一些港口给箱区配备两台场桥同时作业。

当箱区两台场桥同时进行收箱作业时, 容易出现以下问题: 1) 场桥作业量不均衡和长距离跑位. 当作业任务在两台场桥间分配不合理时, 可能造成场桥作业不均衡和长距离跑位. 2) 场桥空耗和效率低. 由于传统场地策划规则要求同类箱组堆放在同一区域, 同组箱可能会连续分配给一台场桥, 导致另一台场桥空耗和作业效率低. 3) 场桥间相互干扰. 相邻场桥间必须保持一定的安全距离, 以避免产生作业干扰, 同时这个安全距离可供集卡进行停车和在场桥间进行移动, 通常两台场桥间的安全距离为 160 英尺<sup>[6]</sup>。

为了合理分配箱位, 促进场桥作业均衡和提高场桥作业效率, 本文采用分区域平衡策划方法进行场地策划, 即根据箱区配备的场桥数量将箱区分为相应数量的大致相等的机械作业区域, 同一作业区域可堆放不同类别的集装箱, 并保证每个作业区域中作业箱量基本持平, 从而实现场桥作业任务量均衡. 图 1 为分区域平衡策划下场桥作业均衡示意图。

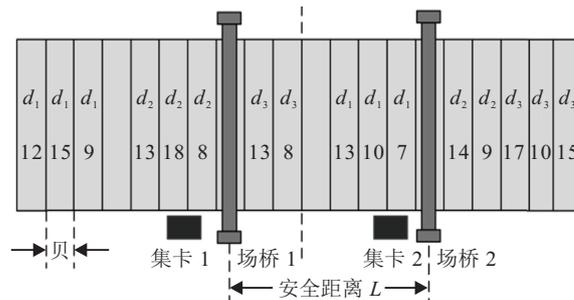


图 1 分区域平衡策划下场桥作业均衡示意图

在图 1 中:  $d_1$ 、 $d_2$  和  $d_3$  为 3 个不同的目的港, 数字表示对应目的港在该贝位增加的箱量;  $L$  为场桥间的安全距离. 在场桥作业均衡状态下, 各场桥的作业任务量相近, 作业任务分配合理, 不会出现场桥作业偏头的现象, 有利于减少场桥的空耗和场桥的长距离跑位, 从而实现人力资源与作业设备的合理调度, 提高场桥的作业效率。

综合考虑集装箱码头堆场箱位分配要求和场桥间安全距离约束, 本文探讨多场桥共同作业下, 某艘船的集港箱在一个箱区的箱位分配问题, 构建以最小化各场桥作业任务量方差和场桥非装卸时间为目标函数的混合整数规划模型, 旨在均衡各场桥作业任务量, 减少场桥的空闲时间和场桥长距离跑位, 提高场桥平均作业效率。

本文的研究基于以下假设前提: 1) 箱型一致且属于同一船舶; 2) 每批任务到达的集卡数量、集卡的到达时刻和集装箱目的港信息已知; 3) 相邻场桥间必须保持作业安全距离; 4) 目的港不同的集装箱不能堆存在一个贝位; 5) 贝内预留翻箱位; 6) 将一个集装箱装卸作业视为一个任务, 即集装箱装卸作业的任务量和集装箱数相等。

## 2 模型建立

针对箱区多场桥作业的箱位分配问题, 本文建立混合整数规划模型进行求解, 目标是均衡各场桥作业任务量和减少场桥的非装卸时间, 其中场桥的非装卸时间包括场桥空闲时间和场桥跑位时间。

### 2.1 符号说明

1) 输入参数。

$b \in [1, B]$  为箱区第  $b$  个贝位,  $B$  为箱区总贝位数;  $d \in [1, D]$  为某艘船的第  $d$  个目的港;  $e$  为箱区第  $e$  个作业场桥;  $n \in [1, N]$  为某批量任务中的第  $n$  个集装箱装卸任务 (第  $n$  个集装箱),  $N$  为该批量任务总数;  $\alpha$  为场桥作业均衡的权重;  $C_b$  为贝位  $b$  的最大堆存箱量;  $N_b$  为贝位  $b$  预留翻箱位的数量;  $C_{bd}^0$  为贝位  $b$  堆放目的港  $d$  的集装箱的初始箱量;  $l_0$  为单位贝位的长度;  $L$  为同时作业的两个场桥间的安全距离;  $V$  为场桥大车行驶速度 (场桥大车是场桥的行走机构, 用以实现

场桥的水平移动);  $T_0$  为场桥完成一个集装箱装卸任务的时间.

2) 中间变量.

$Q_e$  为场桥  $e$  的作业任务量;  $\bar{Q}$  为场桥平均作业任务量;  $H_{ie}$  为场桥  $e$  第  $i$  次集装箱装卸任务,  $i \in [1, Q_e]$ ;  $t_{S(H_{ie})}$  为任务  $H_{ie}$  对应集卡到达堆场的时刻;  $t_{R(H_{ie})}$  为场桥到达任务  $H_{ie}$  作业位置对应的时刻;  $t_{F(H_{ie})}$  为任务  $H_{ie}$  的完成时刻,  $t_{F(H_{0e})}$  用于定义场桥作业的初始时刻 0;  $T_{W(H_{ie})}$  为完成任务  $H_{ie}$  对应的场桥空闲时间;  $T(H_{(i-1)e}, H_{ie})$  为场桥  $e$  完成一个任务后移动到下一个任务的作业位置所需要的时间;  $B(H_{ie})$  为任务  $H_{ie}$  所在的贝位号,  $B(H_{0e})$  为场桥  $e$  的初始贝位号;  $P_e^t$  为  $t$  时刻场桥  $e$  所处的贝位,  $t$  为作业任务期间的任意时刻.

3) 决策变量.

$X_{ne}$  为 0-1 变量, 若集装箱装卸任务  $n$  分给场桥  $e$ , 则  $X_{ne} = 1$ , 否则  $X_{ne} = 0$ ;  $Y_{ndb}$  为 0-1 变量, 若目的港为  $d$  的集装箱  $n$  分给贝位  $b$ , 则  $Y_{ndb} = 1$ , 否则  $Y_{ndb} = 0$ .

### 2.2 MIP 模型

根据以上假设条件和变量设置建立箱位分配和场桥调度问题的数学表达式.

目标函数

$$\min Z = \alpha f_1 + (1 - \alpha)f_2,$$

$$f_1 = \sum_{e=1}^E (Q_e - \bar{Q})^2,$$

$$f_2 = \sum_{e=1}^E \sum_{i=1}^{Q_e} T_{W(H_{ie})} + \sum_{e=1}^E \sum_{i=1}^{Q_e} T(H_{(i-1)e}, H_{ie});$$

约束条件

$$\sum_{e=1}^E X_{ne} = 1, \tag{1}$$

$$\sum_{b=1}^B Y_{ndb} = 1, \tag{2}$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{d=1}^D Y_{ndb} + N_b + \sum_{d=1}^D C_{bd}^0 \leq C_b, \tag{3}$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{e=1}^E X_{ne} = \sum_{n=1}^N \sum_{d=1}^D \sum_{b=1}^B Y_{ndb}, \tag{4}$$

$$Q_e = \sum_{n=1}^N X_{ne}, \tag{5}$$

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{e=1}^E Q_e}{E}, \tag{6}$$

$$t_{F(H_{ie})} = T_0 + \max\{t_{R(H_{ie})}, t_{S(H_{ie})}\}, \tag{7}$$

$$T_{W(H_{ie})} = \max\{t_{S(H_{ie})} - t_{R(H_{ie})}, 0\}, \tag{8}$$

$$t_{R(H_{ie})} = t_{F(H_{(i-1)e})} + T(H_{(i-1)e}, H_{ie}), \tag{9}$$

$$T(H_{(i-1)e}, H_{ie}) = \frac{|B(H_{ie}) - B(H_{(i-1)e})| \times l_0}{V}, \tag{10}$$

$$P_e^t - P_{e-1}^t \geq L. \tag{11}$$

在上述模型中: 目标函数中的  $f_1$  为各场桥作业任务量的方差,  $f_2$  为场桥的非装卸时间, 包括场桥空闲时间和跑位时间; 约束条件 (1) 表示每个任务只能由一台场桥完成; 式 (2) 表示每个集装箱只能分配到一个贝位; 式 (3) 确保贝位内箱量不超过贝位的最大堆存箱量; 式 (4) 表示各场桥作业的集装箱数量之和等于各贝位增加的集装箱数量之和; 式 (5) 和 (6) 分别定义了  $Q_e$  和  $\bar{Q}$ ; 式 (7)~(9) 分别表示场桥各任务的完成时刻、场桥完成任务对应的空闲时间和场桥到达作业任务的时刻; 式 (10) 表示场桥从一个任务移动到下一个任务所需要的时间; 式 (11) 保证场桥间留有安全作业距离.

### 3 模型求解

在分区域平衡策划下, 各场桥的作业区域是确定的, 如果获得了集装箱贝位分配方案, 则可根据场桥的作业区域和集装箱的到达顺序, 确定对应的场桥调度方案. 本文设计遗传算法对模型进行求解. 为了便于对遗传算法的步骤进行描述, 在染色体编码中体现了集装箱贝位分配和场桥调度方案, 而在交叉和变异操作中则仅体现了贝位分配方案, 具体步骤如下:

1) 染色体编码. 采用实数编码, 集装箱贝位分配方案对应的染色体长度为作业任务数, 染色体的基因值为集装箱分配的贝位号, 例如, 当箱区两台场桥共同作业时, 10 个集装箱装卸任务在 40 个贝位进行分配的方案对应的染色体示意图如图 2 所示, 其中场桥作业集装箱序号由场桥作业区域各贝位分配的集装箱序号确定.

集装箱序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
集装箱分配贝位号	22	10	40	14	18	33	7	32	12	26
场桥序号	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
场桥作业集装箱序号	2	4	5	7	9	1	3	6	8	10

图 2 染色体

2) 初始种群的生成. 在式 (1)~(4) 的约束下, 随机生成初始种群. 由于模型中要求场桥间保持一定的安全距离, 避免发生相互干扰, 而初始种群中的一些个体可能不满足场桥间安全距离的要求, 需要剔除此类个体. 本文首先生成一定数量的满足约束条件 (1)~(4) 的个体, 然后从这些个体中选出满足相邻场桥间安全距离要求的个体, 使个体数量达到种群容量.

3) 适应度函数与选择操作. 鉴于本文是求解目标函数的最小值, 算法中取目标函数的倒数值作为适应度函数. 本文按轮盘赌选择方法执行选择操作, 并将当前群体中适应度最高的个体完整地复制到下一代种群中.

4) 交叉和变异操作. 采用两点交叉的方式对父代进行交叉操作生成子代, 将交叉得到的子代个体进行简单的单点变异, 变异范围根据箱区各贝位初始堆存状态确定, 具体交叉和变异操作过程如图 3 所示.

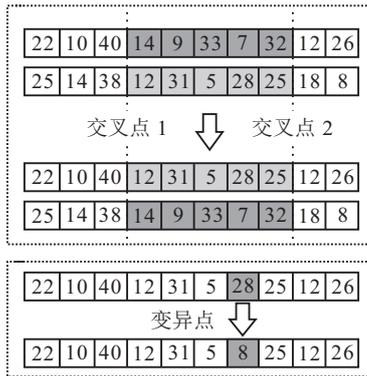


图 3 交叉和变异操作

5) 不满足约束的个体处理. 在交叉变异操作中会产生一些不满足贝位最大堆存箱量和多场桥作业安全距离约束的个体, 按照生成初始种群的方法, 随机生成可行解, 替代不可行解.

6) 终止规则. 当算法的进化代数达到最大迭代次数时, 算法终止.

## 4 算例分析

### 4.1 算例描述

在本文算例中: 场桥数量为两台; 箱区规模为 40 个贝位  $\times$  6 个堆垛  $\times$  4 个堆层; 每个贝预留 3 个贝位以满足倒箱需要, 即每个贝位包含 21 个可堆存箱位. 某集装箱码头箱区有 50 个集装箱装卸任务, 各集装箱的目的港和对应集卡到达时刻见表 1, 各贝位初始堆存量和对应目的港见表 2.

箱区内设有两台场桥, 两场桥之间的最小安全距离为 160 英尺, 即 8 个贝位. 单位贝位的长度取 7 m, 场桥的运行速度为 100 m/min, 场桥装卸一个集装箱的时间为 3 min. 两台场桥的初始贝位号分别为 1 和 40, 场桥作业均衡的权重取 0.5.

表 1 箱区内任务情况

任务	到达时刻/min	目的港	任务	到达时刻/min	目的港	任务	到达时刻/min	目的港
1	1	2	18	20	1	35	53	3
2	2	1	19	26	1	36	58	1
3	3	1	20	27	2	37	59	3
4	6	2	21	28	3	38	60	3
5	7	1	22	30	3	39	62	2
6	7	2	23	32	1	40	64	2
7	9	3	24	35	2	41	65	1
8	10	1	25	42	2	42	66	3
9	10	3	26	43	2	43	68	1
10	12	1	27	45	1	44	69	2
11	12	2	28	47	1	45	71	3
12	13	1	29	47	2	46	74	3
13	13	1	30	47	1	47	75	2
14	15	1	31	51	1	48	76	1
15	17	1	32	51	3	49	77	2
16	17	1	33	52	2	50	80	3
17	18	1	34	52	3			

表 2 箱区各贝位初始堆存情况

贝位号	初始箱量	对应目的港									
1	7	1	11	5	2	21	3	1	31	15	2
2	12	1	12	10	2	22	8	1	32	8	2
3	9	1	13	9	2	23	5	1	33	7	2
4	13	1	14	15	2	24	6	1	34	3	2
5	16	1	15	9	2	25	11	1	35	16	2
6	16	1	16	7	3	26	3	1	36	7	3
7	9	1	17	9	3	27	5	1	37	14	3
8	16	1	18	12	3	28	4	1	38	10	3
9	2	1	19	6	3	29	4	1	39	7	3
10	9	2	20	13	3	30	6	2	40	15	3

4.2 结果分析与比较

采用 Matlab R2010b 进行编程求解,种群大小设置为 100,交叉率为 0.7,变异率为 0.08,最大迭代次数为 1500.随着迭代次数的增加,系统均值和种群均值的收敛效果如图 4 所示.

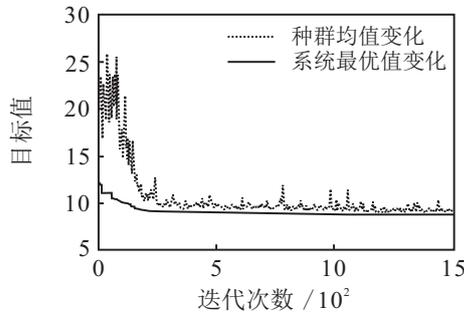


图 4 GA 的收敛过程

在图 4 中:算法迭代至 1046 次时,目标值收敛于 8.76,此时两台场桥的作业任务量均为 25 箱,场桥的非装卸时间为 17.52 min,其中场桥的空闲时间为 6.74 min,跑位时间为 10.78 min,场桥的平均作业效率为 17.9 箱/h,该批任务完成总时间为 167.52 min.详细的集装箱贝位分配和场桥调度实验结果如表 3 所示.

根据求解的箱位分配和场桥调度方案得到场桥的实时行走路径,如图 5 所示.

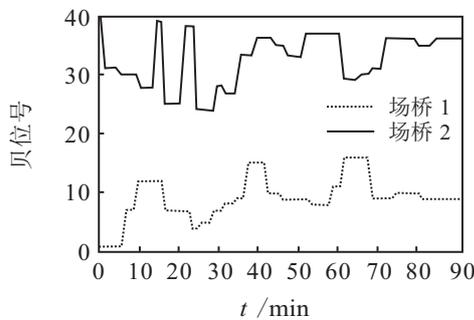


图 5 两台场桥的实时行走路径

从图 5 可以看出,两台场桥的路径无交点,任意时刻两台场桥所在的贝位保持一定的间距,说明求解的箱位分配与场桥调度方案没有出现在场桥间的相互影响或干扰,并满足场桥间安全距离的要求.

传统场地策划规则要求同类箱组堆放在同一区

表 3 贝位分配和场桥调度

场桥作业序号	场桥 1		场桥 2	
	任务	贝位号	任务	贝位号
1	2	1	1	31
2	3	7	4	30
3	6	12	5	28
4	11	12	7	39
5	12	7	8	25
6	13	7	9	38
7	14	4	10	24
8	15	5	16	28
9	18	7	17	27
10	19	8	20	33
11	23	9	21	36
12	24	15	22	36
13	25	10	26	35
14	27	9	29	33
15	28	9	32	37
16	30	8	34	37
17	31	8	35	37
18	33	11	36	29
19	37	16	39	30
20	38	16	40	31
21	41	9	42	36
22	43	9	45	36
23	44	10	46	36
24	47	10	49	35
25	48	9	50	36

域,而在分区域平衡策划下,箱区根据配备的场桥数量划分为多个不同的机械作业区域,同类箱组可堆放在箱区不同的机械作业区域.

针对本文算例,若采用传统场地策划规则,则两台场桥的作业任务量分别为 27 和 23 箱;场桥的非装卸时间为 28.89 min,其中场桥的空闲时间为 7.35 min,跑位时间为 21.54 min;场桥的平均作业效率为 16.67 箱/h,该批任务完成的总时间为 179.89 min.与传统场地策划规则相比,本文采用的分区域平衡策划方法更优越,可以均衡各场桥的作业任务量,有利于减少场桥的空闲时间和跑位时间.

为了进一步验证分区域平衡策划方法的有效性,对不同批量任务进行实验,在实验中不改变相关参数的取值,只改变算例任务的批量大小和集卡的到达情况,不同批量任务的实验结果如表 4 所示.

表 4 不同批量任务

实验序号	任务批量	传统场地策划				分区域平衡策划				作业效率增加百分比/%
		任务量方差	非装卸作业时间/min	任务完成总时间/min	平均作业效率/(箱/h)	任务量方差	非装卸作业时间/min	任务完成总时间/min	平均作业效率/(箱/h)	
1	30	0	14.54	104.54	17.21	0	6.7	96.7	18.61	8.13
2	40	2	22.66	142.66	16.82	0	15.12	135.12	17.76	5.59
3	50	8	28.89	179.89	16.67	0	17.52	167.52	17.9	7.38
4	60	2	42.17	222.17	16.18	0	21.07	201.7	17.9	10.62
5	70	8	50.63	260.63	16.11	0	21.84	231.84	18.11	12.41

从表4可以看出,在传统场地策划规则下,场桥作业任务量可能分配不均衡,场桥完成任务时间较长,而分区域平衡策划方法可以促进场桥作业均衡,减少场桥的非装卸时间,缩短任务完成时间,有利于提高场桥的平均作业效率。

当箱区由3台场桥共同作业时,对文中的算例进行实验,得到分区域平衡策划方法下3台场桥的作业量分别为16、17和17,基本实现了场桥作业均衡,此时场桥的非装卸时间为87.68 min,包括跑位时间12.74 min和空闲时间74.94 min。由于任务数量设置较小,3台场桥同时作业时场桥长时间空闲,而场桥间安全距离和场桥作业均衡约束对3台场桥同时作业影响更大,使可行解空间缩小,导致场桥跑位时间增加。增加任务数量有利于减少场桥空闲时间,但受到场桥间安全距离的影响,可行解空间会更小,甚至得不到可行解。因此,在分区域平衡策划方法下,箱区配置两台场桥更有利于得到箱位分配和场桥调度综合优化问题的最优解。

## 5 结 论

本文对多场桥分区域平衡策划下的集装箱堆场箱位分配问题进行了研究,考虑相邻场桥间的安全距离,建立了箱位分配和多场桥调度模型,并设计了遗传算法对模型进行求解。算例结果表明:本文采用的分区域平衡策划方法优于传统场地策划规则,能更好地解决多场桥联合作业问题,可以均衡各场桥作业任务量,有利于减少场桥的非装卸作业时间,提高场桥平均作业效率,进而提高码头的整体服务水平。但本文还存在一些不足,将各集卡的到达时刻视为已知,而实际中受各种因素的影响,集卡的到达时刻是不确定的。因此,动态环境下箱位分配和多场桥联合作业的优化问题将作为未来的研究方向。

## 参考文献(References)

- [1] Bazzazi M, Safaei N, Javadian N. A genetic algorithm to solve the storage space allocation problem in a container terminal[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 56(1): 44-52.
- [2] Chen L, Lu Z. The storage location assignment problem for outbound containers in a maritime terminal[J]. *Int J of Production Economics*, 2012, 135(1): 73-80.
- [3] 陈超, 台伟力, 杨逸蓝, 等. 出口箱随机入港下的箱区选择与箱位分配协调调度[J]. *上海交通大学学报*, 2014, 48(4): 544-557.  
(Chen C, Tai W L, Yang Y L, et al. Coordinated scheduling problem for block choice and slot arrangement under outbound container random arrival[J]. *J of Shanghai Jiaotong University*, 2014, 48(4): 544-557.)
- [4] 周鹏飞, 方波. 动态环境下集装箱码头堆场出口箱箱位分配建模与算法研究[J]. *控制与决策*, 2011, 26(10): 1571-1576.  
(Zhou P F, Fang B. Modeling and algorithm research on export container slots allocation under dynamic environments[J]. *Control and Decision*, 2011, 26(10): 1571-1576.)
- [5] 邵乾虔, 徐奇, 边展, 等. 考虑了交箱时间不确定性的场桥堆存作业优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(2): 394-405.  
(Shao Q Q, Xu Q, Bian Z, et al. Stockpiling operating optimization for yard crane with containers delivery time uncertainty[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2015, 35(2): 394-405.)
- [6] Li W K, Wu Y, Petering M E H, et al. Discrete time model and algorithms for container yard crane scheduling[J]. *European J of Operational Research*, 2009, 198(1): 165-172.
- [7] He J L, Chang D F, Mi W J, et al. A hybrid parallel genetic algorithm for yardcrane scheduling[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2010, 46(1): 136-155.
- [8] Chang D F, Jiang Z H, Yan W, et al. Developing a dynamic rolling-horizon decision strategy for yard crane scheduling[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2011, 25(3): 485-494.
- [9] 赵磊, 胡志华, 李淑琴. 基于作业均衡的集装箱堆场箱区场桥作业调度[J]. *武汉理工大学学报*, 2013, 35(1): 69-74.  
(Zhao L, Hu Z H, Li S Q. Container yard crane scheduling for operations balance between yard cranes[J]. *J of Wuhan University of Technology*, 2013, 35(1): 69-74.)
- [10] Lee D H, Zhi C Q M. Scheduling of two-transtainer systems for loading outbound containers in port container terminals with simulated annealing algorithm[J]. *General Information*, 2007, 107(1): 115-124.
- [11] 郑红星, 于凯. 基于混合遗传算法的混堆箱区内场桥调度研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2013, 13(5): 150-158.  
(Zheng H X, Yu K. Yard crane scheduling in the mixture storage block base on hybrid genetic algorithm[J]. *J of Transportation System Engineering and Information Technology*, 2013, 13(5): 150-158.)