

文章编号:1671-1637(2014)06-0092-08

出口箱随机入港下的码头泊位-集卡-箱区协调调度模型

陈超,邱建梅,台伟力

(大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:针对出口箱随机入港分散堆放对码头装卸作业系统泊位分配、集卡路径与箱区选择的影响,分析了甲板箱与舱内箱的不同装卸特点。以船舶停靠泊位和进口箱堆放箱区为决策变量,以集卡行驶距离最短为目标函数,构建了离散泊位状况下泊位-集卡-箱区协调调度混合整数规划模型。通过三层依次交叉,开发了基于遗传算法的三层启发式算法,上层搜索泊位数据,中间层搜索船舶数据,下层搜索进口箱箱区数据,并进行实例验证。计算结果表明:与传统方法相比,应用离散泊位下泊位-集卡-箱区协调调度混合整数规划模型可以同步确定最优的船舶停靠泊位、进口箱堆放箱区、集卡行驶路径,集卡行驶总距离缩短11.42%,码头装卸作业系统效率明显提高。可见,提出的模型有效。

关键词:物流工程;码头装卸作业系统;协调调度;泊位分配;集卡路径;箱区选择;遗传算法

中图分类号:U691.3

文献标志码:A

Coordinated scheduling model of berth-truck-block at container terminal with random arrival of export containers

CHEN Chao, QIU Jian-mei, TAI Wei-li

(School of Transportation Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

Abstract: Aiming at the influence of the dispersion stacking of export containers with random arrival on the berth allocation, truck route and block choice of container terminal handling operation system, the different handling characteristics between the containers on deck and in cabin were analyzed. The allocating berth of ship and the stacking area of import containers were taken as decision variables, the minimum traveling distance of truck was taken as objective function, and the mixed integer programming model of coordinated scheduling for berth-truck-block under discrete berth condition was set up. Through the three levels of cross in turn, the three-level heuristic algorithm based on genetic algorithm was developed, allocation berth data were searched in the superstratum algorithm, ship data were searched in the interlayer algorithm, the stacking area data of import container were searched in the substratum algorithm, and example verification was carried out. Calculation result shows that compared with the traditional method, the optimal allocating berth of ship, the stacking area of import container and the traveling distance of truck can be confirmed by using the mixed integer programming model of coordinated scheduling for berth-truck-block under discrete berth condition, the total traveling

收稿日期:2014-07-13

基金项目:国家自然科学基金项目(71372086)

作者简介:陈超(1955-),男,辽宁大连人,大连海事大学教授,从事集装箱物流系统规划研究。

distance of truck reduces by 11.42%, and the efficiency of container terminal handling operation system significantly improves. So the proposed model is effective. 4 tabs, 5 figs, 21 refs.

Key words: logistics engineering; container terminal handling operation system; coordinated scheduling; berth allocation; truck route; block choice; genetic algorithm

Author resume: CHEN Chao(1955-), male, professor, +86-411-84724239, chenchaovip@126.com.

0 引言

泊位、集卡、堆场是集装箱码头装卸作业系统中具有点、线、点功能特征的3个主要环节。船舶停靠泊位不同,集装箱堆放分布不同,集卡行驶路径将会有所不同,三者相互影响与作用,共同决定着码头装卸作业系统的运行效率和成本,因此,只有统筹考虑,协调调度,同步优化,才能保证码头生产调度决策的科学性与合理性。

为了解决泊位、集卡、堆场的协调问题,确保船舶装卸作业效率,常规做法是先制定码头泊位分配计划,确定船舶停靠泊位,并结合船舶在港装卸作业量,选定进出口箱堆放箱区;然后,在船舶抵港前,安排航次出口箱集中入港与堆放,使出口箱区位置与船舶停靠泊位一一对应;最后,在装卸作业时,实现集卡在作业船舶与集装箱堆放箱区两点间行驶,保证了集卡行驶路径最短与装卸作业效率最高。上述这种策略通常被称为出口箱集中入港策略,然而,近年来,随着港口数量的增加与港口竞争的日益激烈,一些港口为了向航运公司和货主提供便利服务与提升自身竞争力,并改善集中入港下船舶航次截载时间过早、港区周边交通压力过大的状况,开始采用出口箱随机入港策略来组织生产。在出口箱随机入港下,对于入港较早的集装箱,由于航次与出口箱量均没有确定,码头难以为其提前预留指定箱区,只能根据堆场实际空闲情况进行分散堆放。出口箱的这种分散堆放,无疑会给码头船舶泊位分配、进口箱堆放箱区选择、集卡行驶路径的协调运作增加难度,同时也给码头生产调度决策提出严峻挑战。

目前,有关集装箱码头生产调度的大量研究主要集中在出口箱集中入港下的码头泊位分配、岸桥分配、集卡路径、场桥作业以及箱区选择等单一环节的单独调度和相邻两个环节的协调调度等问题。Lai等在考虑船舶先到先服务(FCFS)的原则下,设计了启发式算法优化泊位分配^[1];Imai等研究了连续泊位的分配问题,并建立了与泊位一一对应的优化模型^[2-3];Bierwirth等研究了泊位分配与岸桥的协调调度问题,运用整数规划思想建

立了复杂模型,并开发了启发式禁忌搜索算法进行求解^[4];Nishimura等在泊位分配问题的研究中分析了船舶停靠泊位与出口箱堆放位置的距离对泊位分配的影响^[5];Han等研究了集装箱码头泊位与岸桥的协调调度问题,分析了出口箱堆放位置对模型构建的影响^[6-8];Nishimura等提出了集卡的动态路径优化问题,并设计了遗传算法进行求解^[9];陈超等针对出口箱箱区选择与箱位分配协调调度问题,提出了出口箱箱区选择与箱位分配两阶段模型,并设计了基于遗传算法的双层启发式算法^[10];曾庆成等从提高岸桥重载运行效率的角度出发,提出了同贝同步混合装卸调度模型,并设计了启发式优化算法求解模型^[11];王斌在求解集装箱码头堆场混堆问题中指出堆场堆放效率主要取决于集卡在泊位与箱区间行驶的距离,并采用线性规划模型把每艘船装卸的集装箱分配到各个箱区中^[12],但缺少多船同时作业下多集卡路径对箱区选择影响的研究;赵苏针对最优作业效率的出口箱场区分配问题进行研究,提出了最优场区计划分配模型^[13];郑红星等研究了混堆模式下的集装箱箱区指派问题,建立了以箱区间作业量均衡为目标的整数规划模型,并采用模拟退火算法求解,实现了集装箱堆场箱区空间资源的优化配置^[14],但仅涉及了箱区选择的单独调度,缺少装卸作业系统其他环节对优化配置的影响;陈超等以码头最小运营成本为目标函数建立调度优化模型,依次解决泊位分配、岸桥配置和集卡路径问题^[15];康志敏等分别研究了集装箱码头集卡路径优化问题和堆场空间资源配置优化问题,通过设计遗传算法,构建两阶段优化模型进行求解^[16-17];张志英等研究了遗传算法在泊位调度中的应用问题,并设计了相应的算法改进规则,提高了求解速度和质量^[18-21]。

上述研究虽然有的考虑了出口箱堆放位置对泊位分配的影响,有的考虑了出口箱堆放位置与船舶停靠泊位对集卡行驶路径的影响,但仅仅都是对出口箱集中堆放下的考虑,而缺少对出口箱分散堆放下的考虑,以及在对码头泊位、集卡、堆场等多个环

节协调调度的研究。在已有研究的基础上,本文就目前产业界采用出口箱随机入港策略的发展趋势,针对出口箱分散堆放对码头泊位分配、集卡行驶路径与进口箱堆放箱区选择影响的复杂性,提出了出口箱随机入港下的码头泊位、集卡、箱区协调调度问题,并将其视为由泊位分配变异问题(Variant Berth Allocation Problem, VBAP)与进口箱区多重选址问题(Multi-location Problem, MLP)构成的复合定位路径问题(Complex Location Routing Problem, CLRP),构建了离散泊位下的泊位-集卡-箱区协调调度模型,开发了基于遗传算法的三层启发式算法,对模型进行同步优化,并应用算例验证了模型和算法的有效性。

1 泊位-集卡-箱区协调调度模型

1.1 问题描述

在出口箱随机入港情形下,出口箱分散堆放,使船舶与箱区之间的位置对应关系,不再是集中入港下那种一对一的简单关系,而是一对多的复杂关系。在这种情形下,一方面要根据出口箱在码头前方堆场各个箱区堆放的分布情况,为船舶确定预配停靠泊位;另一方面,还要根据码头后方堆场各个箱区空闲的分布情况,为进口箱确定预选堆放箱区。同时,由于船舶舱盖跨度通常为多个箱宽,码头在装卸作业时,只能按照先甲板、后舱内、再甲板的顺序进行作业。其中,在对甲板箱作业时,岸桥采用独立分别装卸作业,包括单船独立分别装卸作业和多船交叉混合作业,集卡则既可固定在作业船舶与出口箱区 2 点间行驶,即两点式作业,又称线作业方法,也可灵活在 2 艘作业船舶与各自进口箱区和出口箱区 4 点间行驶,即四点式作业,又称面作业方法。在对舱内箱作业时,为了提高岸桥与集卡的重载运行效率,岸桥还可进行单船边装边卸作业,集卡在作业船舶与其出口箱区、进口箱区 3 点间行驶,即三点式作业,也称面作业方法,集卡作业方法见图 1。针对甲板箱和舱内箱,采用的作业方法不同,集卡行驶的路径则不同,码头调度还需结合不同作业法对集卡行驶路径形成的影响,对船舶预配泊位和预选箱区进行反复调整,最终,同步确定船舶停靠泊位、集卡行驶路径、进口箱堆放箱区,获得集装箱码头泊位-集卡-箱区协调调度的优化决策方案。

由此可见,在出口箱随机入港情形下,集卡行驶距离,作为码头装卸作业中一项重要的可变成本,不仅与船舶装卸量和出口箱堆放分布有关,而且还与

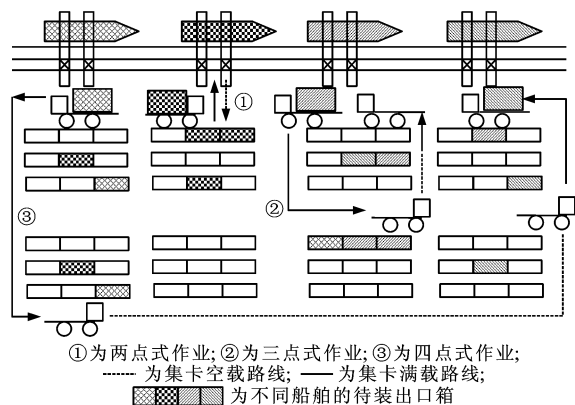


图 1 集卡作业方法

Fig. 1 Truck working methods

船舶停靠泊位、进口箱堆放分布以及作业方法选用有关。鉴于出口箱随机入港情形下的分散堆放对码头泊位分配、集卡路经、箱区选择影响的复杂性,考虑到泊位分配、集卡路经、箱区选择之间相互影响、作用、耦合的关系,以及三者对码头装卸作业系统运行效率和运作成本的影响,本文在优先选用高效作业方法的基础上,以船舶停靠泊位和进口箱堆放箱区为决策变量,以集卡行驶总距离最短为目标函数,结合码头泊位分配变异问题与堆放箱区多重选址问题的特性,构建出口箱随机入港下的码头泊位-集卡-箱区协调调度模型。

1.2 协调调度优化模型

考虑到计划期,采用滚动调度法,即每当发生有船舶到达或离开的情况,实行再调度,且集卡行驶距离均采用从箱区中心点至船舶中心点的曼哈顿距离。

令 B 为码头泊位集合, $i \in B$; V 为计划期内到港船舶集合, $j, j', p \in V$, 其中 j 为目标船舶, p 为与 j 进行交叉混合装卸作业的船舶, j' 为再调度后计划与 j 停靠在同一泊位的船舶; D_i 为泊位 i 的水深; d_j 为船舶 j 的吃水; A_i 为泊位 i 的长度; A_j 为船舶 j 的长度; X_{ij} 为决策变量,若船舶 j 停靠在泊位 i , 其值为 1, 否则为 0; t_{1j} 为船舶 j 到港时间; t_{2j} 为船舶 j 作业开始时间; t_{3j} 为船舶 j 作业完成时间; t_{4j} 为船舶 j 离港时间; h_{ij} 为船舶 j 在泊位 i 装卸作业时间; L 、 U 分别为堆场出口箱堆放箱区数量和进口箱可用箱区数量; M_1 为计划出口箱总量; M_2 为计划进口箱总量; m_l 为第 l 个出口箱区堆存量; m_u 为第 u 个进口箱区计划堆存量; C_l 为第 l 个出口箱区的堆存容量; C_u 为第 u 个进口箱区的堆存容量; Q_{1j} 为船舶 j 的待装出口箱量; Q_{2j} 为船舶 j 的待卸进口箱量; S_{ju} 为决策变量,若船舶 j 选择了第 u 个进口箱区实施堆放,其值为 1, 否则为 0; N 为码头可用岸桥总数

量; n_p 为船舶 p 分配岸桥数量; c 为卸箱岸桥序号; k 为装箱岸桥序号; Y_{culk} 为两船交叉混合装卸甲板箱量,即集卡在 $c \rightarrow u \rightarrow l \rightarrow k$ 上的作业次数,其中岸桥 c, k 服务于不同船舶; Y_{culc} 为单船边装边卸舱内箱量,即集卡在 $c \rightarrow u \rightarrow l \rightarrow c$ 上的作业次数; Z_{lk}, Z_{cu} 分别为船舶独立装、卸作业量,即在 $l \rightarrow k$ 上的集卡独立装箱作业次数和在 $c \rightarrow u$ 上的集卡独立卸箱作业次数; d_{culk} 为在 $c \rightarrow u \rightarrow l \rightarrow k$ 上集卡单次作业行驶距离; d_{culc} 为在 $c \rightarrow u \rightarrow l \rightarrow c$ 上集卡单次作业行驶距离; d_{lk} 为在 $l \rightarrow k$ 上集卡单次作业行驶距离; d_{cu} 为在 $c \rightarrow u$ 上集卡单次作业行驶距离; d 为交叉混合装卸作业船舶间距; D 为在港船舶作业的集卡行驶总距离。以 Z 为目标函数,构建的泊位-集卡-箱区协调调度模型为

$$\min Z = D \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} X_{ij} \quad (1)$$

$$D = \sum_{c=1}^{n_j} \sum_{u=1}^U \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{n_p} Y_{culk} (d_{culk} + d) + \sum_{c=1}^{n_j} \sum_{u=1}^U \sum_{l=1}^L S_{ju} Y_{culc} d_{culc} + \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{n_j} Z_{lk} + \sum_{c=1}^{n_j} \sum_{u=1}^U S_{ju} Z_{cu} d_{cu} \quad (2)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i \in B} X_{ij} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V} X_{ij} \leq 1 \quad (4)$$

$$(d_j - D_i) X_{ij} \leq 0 \quad (5)$$

$$(A_j - A_i) X_{ij} \leq 0 \quad (6)$$

$$t_{1j} - t_{2j} \leq 0 \quad (7)$$

$$t_{3j} - t_{4j} \leq 0 \quad (8)$$

$$\frac{h_{ij} + h_{ij'}}{2} \leq \left| \frac{t_{2j} + t_{3j}}{2} - \frac{t_{2j'} + t_{3j'}}{2} \right| \quad (9)$$

$$\sum_{c=1}^{n_p} \sum_{u=1}^U \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{n_j} S_{ju} Y_{culk} + \sum_{c=1}^{n_j} \sum_{u=1}^U \sum_{l=1}^L S_{ju} Y_{culc} + \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{n_j} Z_{lk} = Q_{1j} \quad (10)$$

$$\sum_{c=1}^{n_j} \sum_{u=1}^U \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{n_p} S_{ju} Y_{culk} + \sum_{c=1}^{n_j} \sum_{u=1}^U \sum_{l=1}^L S_{ju} Y_{culc} + \sum_{c=1}^{n_j} \sum_{u=1}^U S_{ju} Z_{cu} = Q_{2j} \quad (11)$$

$$\sum_{j \in V} Q_{1j} = \sum_{l=1}^L m_l = M_1 \quad (12)$$

$$\sum_{j \in V} Q_{2j} = \sum_{u=1}^U m_u = M_2 \quad (13)$$

$$m_l \leq C_l \quad (14)$$

$$m_u \leq C_u \quad (15)$$

$$0 < \sum_{u=1}^U S_{ju} \leq U \quad (16)$$

$$\sum_{j \in V} n_j \leq N \quad (17)$$

$$\min \{Z_{cu}, Z_{lk}\} \geq 0 \quad (18)$$

$$X_{ij}, S_{ju} \in \{0, 1\} \quad (19)$$

$$Y_{culc}, Y_{culk}, Z_{lk}, Z_{cu}, Q_{1j}, Q_{2j}, m_l, m_u \in \mathbf{Z} \quad (20)$$

$$M_1, M_2, C_l, C_u, U, L, n_j, N \in \mathbf{Z}^+ \quad (21)$$

$$d_{culk}, d_{culc}, d_{cu}, d_{lk}, h_{ij} \geq 0 \quad (22)$$

式(1)、(2)为模型目标函数,即参与在港船舶作业的集卡行驶总距离最小,其中包括两船交叉混合装卸作业、单船边装边卸作业和单船独立分别装卸作业的集卡行驶距离;式(3)保证每艘船舶只停靠1个泊位;式(4)保证每个泊位每次只能服务1艘船舶;式(5)、(6)保证停靠船舶需满足该泊位水深与长度等物理条件限制;式(7)保证船舶在抵港后才能进行靠泊作业;式(8)保证船舶完成作业后才可离港;式(9)保证在先后调度中,计划停靠同一泊位的船舶装卸作业时间不能发生重叠;式(10)、(11)保证在不同作业方式下集卡作业总次数等于船舶装卸箱量;式(12)、(13)保证所有停靠船舶装卸箱总量与堆场计划堆存量间的等量关系;式(14)、(15)保证每个箱区计划堆存量不能超过箱区堆存容量;式(16)为进口箱箱区选择约束;式(17)保证参与装卸作业岸桥总数量不得超过码头最大可用岸桥数量;式(18)为单船独立分别装卸作业次数约束;式(19)为决策变量取值约束;式(20)~(22)为变量取值范围约束。

2 三层启发式算法

鉴于泊位-集卡-箱区协调调度问题包含多个NP-hard求解难问题,本文开发了基于遗传算法(Genetic Algorithm, GA)的三层启发式算法,算法流程见图2。基本思路是先通过上层搜索泊位,中间层搜索船舶,下层搜索进口箱箱区,产生泊位、船舶、进口箱箱区的不同序列组合;然后,确定集卡行驶路径,计算集卡行驶总距离,并反馈给序列组合产生区;再进行反复迭代,直到获取最优解,即集卡行驶总距离最短的泊位、船舶、箱区组合。

2.1 染色体编码

采用字符串编码方式对染色体进行编码,每条染色体由3层字符串构成,代表泊位-船舶-进口箱箱区的1种分配方案。第1层基因值表示码头泊位编号;第2层基因值表示到港船舶编号(按照船舶到港时间增加的顺序从小到大编号);第3层基因值表

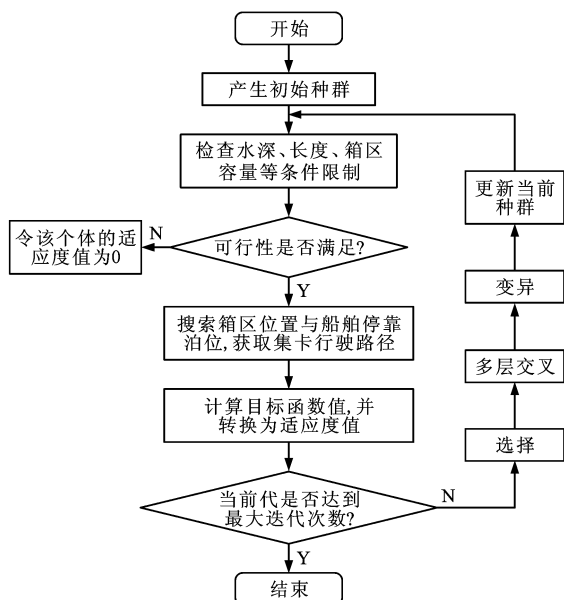


图2 遗传算法流程

Fig. 2 Genetic algorithm flow

染色体	泊位	1									2									3								
	船舶	2									4									1								
	进口箱箱区	1	4	3	6	8	0	5	7	2	1	5	0	8	9	3	5	4	0	6	0	0	7	9	2	3	1	0

图3 初始染色体

Fig. 3 Initial chromosome

本文将种群个体 g 的适应度函数 $f(g)$ 设定为目标函数的倒数, 即

$$f(g) = \frac{1}{1 + q + A(g)} \quad (23)$$

$$q \geq 0$$

$$q + A(g) \geq 0$$

式中: q 为待定常数; $A(g)$ 为个体 g 的原目标函数。

2.4 选择操作

采用轮盘赌选择法, 令每个个体被选择的概率与其适应度值成比例。在种群数量为 G , 个体 g 的

示每艘船舶对应选择的进口箱箱区编号, 0 表示不需要箱区, 其中, 考虑到本文对进口箱区可灵活选择的设定, 每艘船舶可选择至多 3 个进口箱堆放箱区, 并允许发生交叉。初始染色体见图 3, 第 1 层表示泊位编号 1、2、3; 第 2 层为每个泊位的挂靠船舶编号及挂靠顺序, 如泊位 1 的挂靠船舶及顺序依次为 2、4、1; 第 3 层为每艘船舶的进口箱堆放箱区编号, 如船舶 2 的进口箱堆放箱区为 1、4、3。

2.2 初始种群生成

假设码头泊位数量为 b , 预靠泊作业船舶数量为 v , 并在 $[1, v-1]$ 区间随机选择 $b-1$ 个点, 从而可以生成 1 个泊位-船舶-进口箱箱区组合的染色体编码序列, 该过程反复进行直到产生 G 个个体, 生成初始种群。

2.3 适应度函数

鉴于本文问题是求解带有 1 个约束的最小值问题, 而目标函数值越小, 适应度值相应就越大, 因此,

适应度为 $f(g)$ 时, 选择概率 p_{sel} 为

$$p_{sel} = f(g) / \sum_g f(g) \quad (24)$$

2.5 交叉操作

本文采用 2 层交叉法(图 4), 即保留第 1 层不变, 以 1 个泊位对应的船舶和箱区块为单位, 第 2、3 层依次交叉的方法。首先进行上层交叉, 具体步骤为: 保持泊位层和箱区层不变, 在父代染色体中随机选择某个泊位下相同基因个数的船舶序列段进行交换; 然后处理交换后得到的中间体, 即分别剔除其船舶层未发

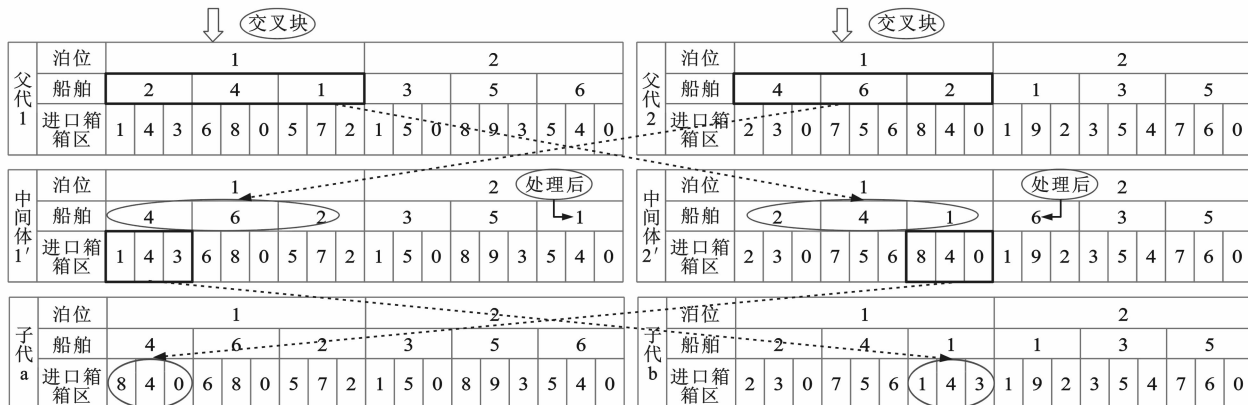


图4 染色体交叉

Fig. 4 Chromosome crossover

生交叉的重复基因,并补足丢失基因。其次进行下层交叉,具体步骤为:保持泊位层和船舶层不变,在完成上层交叉的染色体中随机选择某艘船舶下箱区序列段进行交换得到子代,交叉概率设为 p_{cr} 。

2.6 变异操作

使用染色体 3 层编码的特点,提出以下 2 种变异方法:一种是对选中的个体以概率 p_{mut} 随机交换船舶层某 2 个位的值;另一种是对选中的个体以概率 p_{mut} 随机交换箱区层某 2 个位的值。

2.7 终止条件

当种群的进化代数达到预设的最大迭代次数时,计算终止并输出计算结果。

3 计算结果分析

设定某集装箱码头有 4 个离散型泊位,从左到右依次编号为 1~4,泊位间距为 80 m。船舶抵港时间与装卸作业信息见表 1,码头可用岸桥总数为 10 台,出口箱区数量为 8(编号分别为 $L_1 \sim L_8$),船舶 1 对应出口箱量分别为 240、80 TEU 的出口箱堆放在 $L_1、L_4$,船舶 2 对应出口箱量分别为 220、100、60 TEU 的出口箱分别堆放在 $L_6 \sim L_8$,船舶 3 对应出口箱量为 150 TEU 的出口箱堆放在 L_5 ,船舶 4 对应出口箱量分别为 140、200 TEU 的出口箱分别堆放在 $L_2、L_3$ 。可用进口箱区数量为 13(编号分别为 $U_1 \sim U_{13}$),堆场布局见图 5。通过对已知数据的分析可知,船舶 1、4 和船舶 2、3 可进行混合交叉装卸,作业量分别为 150、125 TEU。每艘船都遵循先卸甲板箱,再装卸舱内箱,最后后装甲板箱的装卸作业规则,在港作业量分类见表 2。

表 1 船舶抵港时间与作业信息

Tab. 1 Arriving times and working informations of ships				
船舶编号	1	2	3	4
船舶长度/m	220	238	190	280
作业开始时刻	2:00	2:40	5:30	6:20
作业结束时刻	8:30	9:00	14:00	14:30
甲板装、卸箱量/TEU	150、60	185、45	90、140	80、170
舱内装、卸箱量/TEU	170、160	195、195	60、120	260、220
出口箱量/TEU	240、80	220、100、60	150	140、200
分配岸桥数量/台	2	3	2	3

利用 MATLAB 软件进行编程,设最大迭代次数为 150,交叉概率 p_{cr} 为 0.50,变异概率 p_{mut} 为 0.01,求解得到泊位、船舶、进口箱箱区配置组合的最优解:船舶 1 挂靠泊位 1,进口箱堆放在箱区 $U_1、U_4$;船舶 2 挂靠泊位 3,进口箱堆放在箱区 $U_7、U_{10}$;

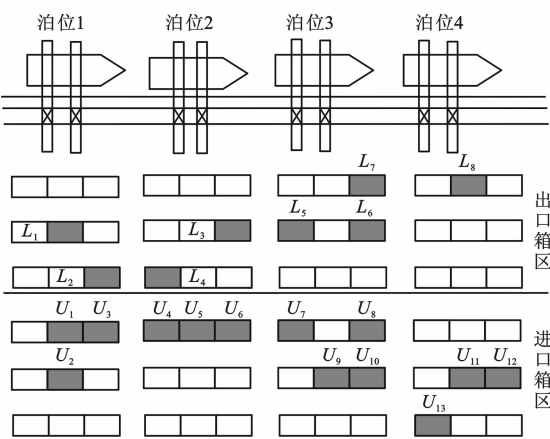


图 5 堆场布局

Fig. 5 Yard layout

表 2 船舶作业量

Tab. 2 Ship working volumes

船舶编号	交叉混合作业量与独立作业量/TEU	边装边卸作业量与独立装卸量/TEU	交叉混合作业量与独立作业量/TEU
1	0,60	160,10(独装)	150,0
2	0,45	195,0	125,60
3	125,15	60,60(独卸)	0,90
4	150,20	220,40(独装)	0,80

船舶 3 挂靠泊位 4,进口箱堆放在箱区 $U_8、U_{11}$;船舶 4 挂靠泊位 2,进口箱堆放在箱区 $U_3、U_6$ 。集卡路径优化结果见表 3。

为了检验模型优化效果,本文将进口箱分散堆放下的协调调度同步优化结果与传统的进口箱集中堆放下的计算结果进行比较,见表 4,在传统进口箱集中堆放下的集卡行驶总距离为 1 199.86 km,而在进口箱分散堆放下同步优化后的结果为 1 062.89 km,减少了 11.42%,进一步降低了港口经营成本。

4 结 语

本文就目前集装箱码头在竞争环境下采用出口箱随机入港策略的发展趋势,针对出口箱分散堆放对码头泊位分配、集卡行驶路径、进口箱堆放箱区选择影响的复杂性,提出了出口箱随机入港下的码头泊位、集卡、箱区协调调度问题,并构建了泊位-集卡-箱区协调调度模型,开发了基于遗传算法的 3 层启发式算法。通过算例应用与对比分析,结果表明本文模型和算法可以同步优化船舶停靠泊位、集卡行驶路径、进口箱堆放箱区,从而缩短集卡行驶总距离,提高码头装卸作业效率,降低生产运作成本,为码头泊位、集卡、堆场协调调度决策提供了新的思路和方法。今后,随着对集装箱码头出口箱随机入港调度决策的深入研究,码头装卸作业系统多环

表 3 集卡路径优化结果

Tab. 3 Optimal results of truck routes

装卸方式	操作对象	集卡行驶路径	装箱量与卸箱量/TEU	集卡行驶距离/km
多船交叉混合装卸作业	甲板箱	$L_1 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow U_3 \rightarrow L_1$	150, 150	133.05
		$L_7 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow U_8 \rightarrow L_7$	100, 100	68.70
		$L_8 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow U_{11} \rightarrow L_8$	25, 25	30.18
单船边装边卸作业	舱内箱	$1 \rightarrow U_4 \rightarrow L_4 \rightarrow 1$	80, 80	73.36
		$1 \rightarrow U_1 \rightarrow L_1 \rightarrow 1$	80, 80	64.14
		$2 \rightarrow U_7 \rightarrow L_6 \rightarrow 2$	195, 195	150.35
		$3 \rightarrow U_8 \rightarrow L_5 \rightarrow 3$	60, 60	66.48
		$4 \rightarrow U_6 \rightarrow L_3 \rightarrow 4$	80, 80	61.12
		$4 \rightarrow U_3 \rightarrow L_2 \rightarrow 4$	140, 140	122.50
单船独立分别装卸作业		$1 \rightarrow U_1 \rightarrow 1$	0, 60	39.60
		$2 \rightarrow U_{10} \rightarrow 2$	0, 45	32.58
		$3 \rightarrow U_{11} \rightarrow 3$	0, 75	69.90
		$4 \rightarrow U_6 \rightarrow 4$	0, 20	14.72
		$L_1 \rightarrow 1 \rightarrow L_1$	10, 0	4.20
		$L_6 \rightarrow 2 \rightarrow L_6$	25, 0	8.75
		$L_8 \rightarrow 2 \rightarrow L_8$	35, 0	16.80
		$L_5 \rightarrow 3 \rightarrow L_5$	90, 0	59.40
		$L_3 \rightarrow 4 \rightarrow L_3$	120, 0	47.04

表 4 计算结果比较

Tab. 4 Comparison of calculation results

船舶编号	靠泊泊位分配	进口箱分散堆放箱区选择结果	进口箱集中堆放箱区选择结果	减少距离/%
1	1	U_1, U_4	U_1, U_3	
2	3	U_7, U_{10}	U_9, U_{10}	
3	4	U_8, U_{11}	U_{11}, U_{12}	
4	2	U_3, U_6	U_5, U_6	
集卡行驶总距离/km		1 062.89	1 199.86	11.42

节的协调或集成调度将会使本文提出的方法和思路得到进一步完善。

参考文献：

References：

- [1] LAI K K, SHIH K. A study of container berth allocation[J]. Journal of Advanced Transportation, 1992, 26(1): 45-60.
- [2] IMAI A, SUN Xin, NISHIMURA E, et al. Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2005, 39(3): 199-221.
- [3] LEE Y, CHEN C Y. An optimization heuristic for the berth scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 196(2): 500-508.
- [4] BIERWIRTH C, MEISEL F. A survey of berth allocation

- and quay crane scheduling problems in container terminals[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 202(3): 615-627.
- [5] NISHIMURA E, IMAI A, PAPADIMITRIOU S. Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 131(2): 282-292.
- [6] HAN Xiao-le, LU Zhi-qiang, XI Li-feng. A proactive approach for simultaneous berth and quay crane scheduling problem with stochastic arrival and handling time[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 207(3): 1327-1340.
- [7] 周鹏飞, 康海贵. 面向随机环境的集装箱码头泊位-岸桥分配方法[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(1): 161-169. ZHOU Peng-fei, KANG Hai-gui. Study on berth and quay-crane allocation under stochastic environments in container terminal[J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 2008, 28(1): 161-169. (in Chinese)
- [8] 张艳伟, 石来德, 宓为建, 等. 集装箱码头出口箱集港堆存模型研究[J]. 中国工程机械学报, 2007, 5(1): 32-38. ZHANG Yan-wei, SHI Lai-de, MI Wei-jian, et al. Storage space allocation for outbound containers [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2007, 5(1): 32-38. (in Chinese)
- [9] NISHIMURA E, IMAI A, PAPADIMITRIOU S. Yard trailer routing at a maritime container terminal[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2005, 41(1): 53-76.
- [10] 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 Chao, TAI Wei-li, YANG Yi-lan, et al. Coordinated scheduling problem for block choice and slot arrangement under outbound container random arrival [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48(4): 544-557. (in Chinese)
- [11] 曾庆成, 杨忠振, 陆靖. 集装箱码头同贝同步装卸调度模型与算法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(1): 88-93. ZENG Qing-cheng, YANG Zhong-zhen, LU Jing. Scheduling model and integrating loading and unloading operations in same ship-bay at container terminal[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(1): 88-93. (in Chinese)
- [12] 王斌. 集装箱码头堆场的一种动态随机堆存方法[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(4): 147-153. WANG Bin. Dynamic and stochastic storage model in a container yard[J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 2007, 27(4): 147-153. (in Chinese)
- [13] 赵苏. 基于最优作业路效率的出口箱场区分配研究[D]. 北京: 清华大学, 2007. ZHAO Su. Export containers block allocation based on best roadstead efficiency [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese)
- [14] 郑红星, 王晓薇, 董键, 等. 混堆模式下集装箱堆场箱区指派优化方法[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2013,

- 37(1):1-5.
- ZHENG Hong-xing, WANG Xiao-wei, DONG Jian, et al. Optimization approach on container block allocation in container yard with mixed storage mode[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2013, 37(1): 1-5. (in Chinese)
- [15] 陈超,张哲,曾庆成.集装箱码头混合交叉作业集协调调度模型[J].交通运输工程学报,2012,12(3):92-100.
- CHEN Chao, ZHANG Zhe, ZENG Qing-cheng. Integrated scheduling model of mixed cross-operation for container terminal[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(3): 92-100. (in Chinese)
- [16] 康志敏,吴洪明.港口集装箱码头集卡优化调度研究[J].物流工程与管理,2011,33(2):58-61.
- KANG Zhi-min, WU Hong-ming. Research on optimized scheduling for container truck at port container wharfs[J]. Logistics Engineering and Management, 2011, 33(2): 58-61. (in Chinese)
- [17] 毛钧,李娜,靳志宏.基于混堆模式的集装箱码头堆场空间资源配置优化[J].大连海事大学学报,2014,40(1):117-122.
- MAO Jun, LI Na, JIN Zhi-hong. Optimization of the allocation of space resources in a container terminal based on mixed stacking pattern[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2014, 40(1): 117-122. (in Chinese)
- [18] 张志英,徐建祥,计峰.基于遗传算法的船舶分段堆场调度研究[J].上海交通大学学报,2013,47(7):967-971.
- ZHANG Zhi-ying, XU Jian-xiang, JI Feng. Shipbuilding yard scheduling approach based on genetic algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(7): 967-971. (in Chinese)
- [19] JOHN A, YANG Zai-li, RIAHI R, et al. Application of a collaborative modelling and strategic fuzzy decision support system for selecting appropriate resilience strategies for sea-port operations[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(3): 159-179.
- [20] 张煜,王少梅.基于遗传算法的泊位连续化动态调度研究[J].系统仿真学报,2007,19(10):2161-2164.
- ZHANG Yu, WANG Shao-mei. Research of dynamic berth allocation of continuous case based on GA[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(10): 2161-2164. (in Chinese)
- [21] 陈超,邱建梅,台伟力,等.出口箱随机入港下的集装箱码头泊位调度[J].交通信息与安全,2014,32(1):91-96.
- CHEN Chao, QIU Jian-mei, TAI Wei-li, et al. Berth allocation planning in container terminals for the outbound containers arrival in random order[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2014, 32(1): 91-96. (in Chinese)
- (上接第73页)
- Department of Transportation, 2010.
- [11] Bureau of Transportation statistics, US Department of Transportation. National transportation statistics 2011[R]. Washington DC: Bureau of Transportation Statistics, US Department of Transportation, 2011.
- [12] Bureau of Transportation statistics, US Department of Transportation. National transportation statistics 2012[R]. Washington DC: Bureau of Transportation Statistics, US Department of Transportation, 2012.
- [13] Bureau of Transportation statistics, US Department of Transportation. National transportation statistics 2013[R]. Washington DC: Bureau of Transportation Statistics, US Department of Transportation, 2013.
- [14] 孙浩杰,吴群琪,汪蕴慧.现代物流业优化经济结构的实证分析[J].经济问题,2011,13(6):70-76.
- SUN Hao-jie, WU Qun-qi, WANG Yun-hui. An empirical study on the impact of the logistics industry to economic structure[J]. Economic Problems, 2011, 13(6): 70-76. (in Chinese)
- [15] 裴长洪.2013年我国宏观经济形势分析[J].当代经济研究,2013(9):1-11.
- PEI Chang-hong. Analysis of China's macroeconomic situation of 2013[J]. Contemporary Economic Research, 2013(9): 1-11. (in Chinese)
- [16] 中国季度宏观经济模型(CQMM)课题组.2012—2013年中国宏观经济预测与分析[J].厦门大学学报:哲学社会科学版,2012(3):17-25.
- Project Team of China's Quarterly Macroeconomic Model (CQMM). China's macroeconomy in 2012-2013: forecast and analysis[J]. Journal of Xiamen University: Arts and Social Sciences, 2012(3): 17-25. (in Chinese)
- [17] 范振宇,王宇鹏.基于现代综合运输体系的高速公路发展阶段特征分析及展望[J].公路交通科技,2006,23(7):150-153.
- FAN Zhen-yu, WANG Yu-peng. Characteristic analysis of expressway development in China and its prospects based on modern integrated transportation system[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(7): 150-153. (in Chinese)
- [18] 李晓峰,张亚东,于世军.高速公路网络布局的区域适应性评价指标[J].公路,2008(3):113-117.
- LI Xiao-feng, ZHANG Ya-dong, YU Shi-jun. A study on evaluation indices on adaptability between expressway network layout and regional characteristics[J]. Highway, 2008(3): 113-117. (in Chinese)
- [19] 徐海成,李健,杨艳.中国公路交通与经济发展关系的实证研究[J].长安大学学报:社会科学版,2007,9(2):8-13.
- XU Hai-cheng, LI Jian, YANG Yan. Relationship between highway transportation and economic development in China[J]. Journal of Chang'an University: Social Science Edition, 2007, 9(2): 8-13. (in Chinese)