

文章编号:1671-1637(2012)03-0092-09

集装箱码头混合交叉作业集成调度模型

陈超, 张哲, 曾庆成

(大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:针对集装箱码头进出口作业系统中泊位分配、装卸作业、水平搬运等诸多环节之间的关系,分析了现有进出口作业系统对集装箱码头生产效率与运营成本的影响。运用系统工程优化理论,提出混合交叉作业集成调度方法与同步优化技术,以泊位分配、设备配置、集装箱卡车(集卡)行驶路径为决策变量,以集装箱码头最小运营成本为目标函数,建立了三阶段集成调度优化模型,设计了双层遗传求解算法。在双层遗传算法中,上层遗传算法用于搜索集装箱码头设施设备的合理配置组合,下层遗传算法在上层算法的基础上优化集卡行驶路径。计算结果表明:与独立装卸作业过程相比,使用混合交叉作业集成调度模型时,集卡数量为22 veh,减小了66.2%,集卡行驶总距离为10 389.8 km,减小了17.4%;与单独调度方式相比,使用混合交叉作业集成调度模型时,集卡行驶总距离减小了14.5%,码头运营总成本为84 266.2元,降低了4.6%。可见,使用集装箱码头混合交叉作业集成调度模型,能有效提高集装箱码头生产效率,明显降低运营成本。

关键词:集装箱码头;集成调度;混合交叉作业;泊位分配;设备配置;行驶路径;双层遗传算法

中图分类号:U691.3

文献标志码:A

Integrated scheduling model of mixed cross-operation for container terminal

CHEN Chao, ZHANG Zhe, ZENG Qing-cheng

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

Abstract: Aiming at the relations among several links such as berth distribution, loading operation and unloading operation and horizontal handling in the import and export operation system of container terminal, the effect of existed import and export operation system on the production efficiency and operation cost of container terminal was analyzed. By using optimization theory of system engineering, the integrated scheduling method of mixed cross-operation and synchronous optimization technology were put forward. The berth distribution, equipment configuration and the driving path of container truck were taken as decision variables, the minimum operation cost of container terminal was taken as objective function, 3-stage integrated scheduling optimization model was established, and the hierarchic genetic algorithm was designed to solve the model. In the hierarchic genetic algorithm, the upper layer genetic algorithm was used to search for the reasonable configuration combinations of facilities and equipments for container terminal, and the lower layer genetic algorithm was used to optimize the driving path of container truck based on the upper layer genetic algorithm. Calculation result indicates that compared with the independent loading and unloading operation process, by using integrated scheduling model of mixed cross-operation, container truck number is 22, and reduces by 66.2%. The total driving distance of container trucks is 10 389.8 km, and decreases by 17.4%.

收稿日期:2011-12-24

基金项目:国家自然科学基金项目(71001012)

作者简介:陈超(1955-),男,辽宁大连人,大连海事大学副教授,从事港口与物流系统规划研究。

Compared with the single scheduling system, by using integrated scheduling model of mixed cross-operation, the total driving distance of container trucks decreases by 14.5%. The total operation cost of container terminal is 84 266.2 yuan, and reduces by 4.6%. It is clear that by using the integrated scheduling model of mixed cross-operation for container terminal, the production efficiency of container terminal can increase significantly, and the operation cost of container terminal can reduce obviously. 4 tabs, 6 figs, 20 refs.

Key words: container terminal; integrated scheduling; mixed cross-operation; berth distribution; equipment configuration; driving path; hierarchic genetic algorithm

Author resume: CHEN Chao(1955-), male, associate professor, +86-411-84725577, chenchaovip@126.com.

0 引言

为了改善港口服务质量,提高港口设备运行效率,采用岸桥同贝同步装卸与集装箱卡车(简称集卡)在多个岸桥与场桥之间运行的混合交叉作业方式,是当前集装箱码头进出口作业系统生产运作方式的发展方向。集装箱码头进出口作业系统主要由靠泊环节、装卸环节、搬运环节与堆放环节构成,各环节分别包括泊位、岸桥、集卡、堆场、场桥等要素。作业系统调度是利用和组织码头各种设施设备,使其协调运作完成集装箱在码头的进出口作业。目前,集装箱码头采用的作业方式主要有独立装卸作业和混合交叉作业。所谓独立装卸作业,是指对单一船舶采用的装卸分离、先卸后装的作业方法,通常要求集卡固定在指定的岸桥和场桥之间运行,而出口集装箱采用集中入港、集中堆放的策略。该作业方式通常也被称为作业线法,虽然有利于提高船舶装卸作业的可靠性,但由于在装卸过程中设备存在半程空载运行和集卡被绑定而不能由其他船舶、岸桥与场桥共享,不利于码头设备使用效率的提高。所谓混合交叉作业,是指对码头所有靠泊船舶采用同贝同步装卸的作业方法,集卡可以在多个船舶、岸桥与场桥之间运行,而出口集装箱可以采用随机入港、分散堆放的策略。该作业方式通常也被称为作业面法,不仅有利于提高设备使用效率、降低港口生产运营成本,同时也可以改善港口服务质量。不同作业方式对作业系统各环节的设施设备配置及运营调度要求不同,在混合交叉作业方式下,出口集装箱分散堆放与多艘船舶同时在港作业无疑将增大码头各设施设备调度配置难度,因此,如何同步解决码头泊位分配、设备配置组合和集卡行驶路径选择这3个主要问题,成为集装箱码头生产作业调度的关键问题。

目前,已有研究文献大多只是研究在独立装卸

作业方式下的集装箱码头生产调度,Yan等为了解决港口装卸作业效率和能源消耗问题,建立了基于知识系统的集装箱码头场桥调度模型^[1];Guo等运用可容启发与回溯算法的组合搜索,求解了场桥派遣与作业序列的优化问题^[2];Salido等针对泊位分配、岸桥调度和堆场堆放3个关键环节,建立了组合优化决策支持系统与分析模型,对码头生产行为进行评价^[3];靳志宏等对集装箱码头岸桥调度问题构建了非线性数学规划模型,并针对问题的特点设计了基于任务排序的遗传算法^[4];Cao等研究了岸桥和集卡的协调调度问题,建立了混合整数规划模型,并设计了遗传算法进行模型求解^[5];陈超等研究了在装卸岸桥-搬运集卡-堆场吊桥作业系统下的设备优化配置问题,建立了码头生产运作的非线性整数优化模型^[6];计明军等研究了码头集卡与岸桥的协调调度问题,建立了基于总完工时间最小的优化模型,并设计了优化算法求解模型^[7];Zeng等将集装箱码头装卸船作业视为一个流水车间问题,分别建立了装船与卸船作业的仿真优化模型^[8-9];周鹏飞等建立了面向随机环境的集装箱码头泊位-岸桥分配模型,并设计了相应的遗传求解算法^[10];Kim等针对集装箱码头岸桥调度问题建立了混合整数规划模型,并运用分支定界法求解最优岸桥调度方案^[11];Bish为了最小化船舶在港时间,针对集装箱码头堆场选择、集卡配置、岸桥作业3个问题进行组合调度^[12];曾庆成等运用干扰管理方法,建立了泊位分配-岸桥调度干扰管理模型,并设计了基于局部重调度与禁忌搜索算法的仿真优化算法求解模型^[13]。上述研究主要是对集装箱码头进出口作业系统的某一环节或相邻环节进行了调度优化,缺乏对生产作业系统所有环节的综合考虑。

关于混合交叉作业方式下的集装箱码头进出口作业系统集成调度同步优化的研究相对较少,Nishimura

等研究了混合交叉作业方式的集卡路径优化问题,但是忽略了对出口集装箱分散堆放对泊位分配环节的考虑^[14];Goodchild 等论证了混合交叉作业下岸桥双循环装卸作业的可行性,并指出该作业方式能有效降低集卡配置数量,但仅仅考虑了泊位和岸桥之间的协调优化,而没有考虑集卡路径优化^[15-16];曾庆成等研究了混合交叉作业下岸桥同贝同步装卸作业的装卸序列优化与出口集装箱积载计划问题,但忽略了出口集装箱分散堆放和泊位分配对装卸序列与积载计划的影响^[17];Zeng 等基于多岸桥的集卡分配问题建立了两阶段优化模型,并分别设计了两阶段禁忌搜索算法和增强学习算法求解模型^[18-20]。在混合交叉作业方式下,采用单独调度与协调调度虽然能在一定程度上优化系统内单一环节或相邻环节的相关要素,但无法实现系统的整体优化。考虑到混合交叉作业方式下集装箱码头进出口作业系统各环节之间的相互影响、相互作用、相互制约、相互耦合,因此,采用集成调度可以更好地实现系统相关环节及要素的整体优化,提高码头生产作业效率与降低生产运营成本。

本文针对影响码头生产效率和运营成本的泊位分配、设备配置组合和集卡行驶路径选择等问题,提出了基于混合交叉作业方式的集装箱码头进出口作业系统各环节整体调度思路,建立了集装箱码头集成调度优化模型,设计了一种双层遗传算法求解模型。

1 集装箱码头集成调度模型

1.1 问题描述

在混合交叉作业方式下,首先为到港船舶分配

具体泊位,待船舶靠泊后,集卡从靠泊船舶的岸桥接装卸船的集装箱,将其运至指定的进口箱区,由场桥将集装箱吊至指定位置堆放;然后集卡空驶至出口箱区,装上出口集装箱,根据出口箱的装船要求,将其运至指定装运船舶的岸桥下,由岸桥进行装船作业。此时,该船舶与岸桥可能是原先的卸箱船舶与原先的卸箱岸桥,也可能是其他船舶与其他岸桥,混合交叉作业过程见图 1。船舶靠泊的位置不同,出口集装箱分散堆放的分布不同,船舶装卸箱数量与装卸进度的要求不同,都将直接影响船舶停靠的泊位分配、岸桥的数量调配、箱区场桥的数量配置及搬运集卡的数量配置与路径选择,最终将影响码头生产作业效率和生产运营成本。

在保证提高码头生产作业效率的前提下,为了降低码头生产运营成本,在考虑码头生产运营成本构成时,不仅应该包括各种设施占用和设备使用成本,还应包括各种设备的闲置成本。由于设备的闲置成本与设备的投资规模大小成正比,大型设备如岸桥、场桥的闲置成本明显高于小型设备如集卡的闲置成本,因此,在进行码头设备配置时,应避免发生岸桥、场桥作业等待集卡的现象,而只允许出现集卡等待岸桥、场桥作业的情况。由此,从使用和闲置 2 个方面去考虑码头设备的运行成本可以更好地反映码头生产运营成本的实际情况。

在混合交叉作业方式下,从码头装卸作业过程看,影响码头生产作业效率和运营成本的主要因素有船舶停靠泊位位置、设备配置组合、集卡行驶路径选择与设备使用与闲置成本等。码头泊位分配可视

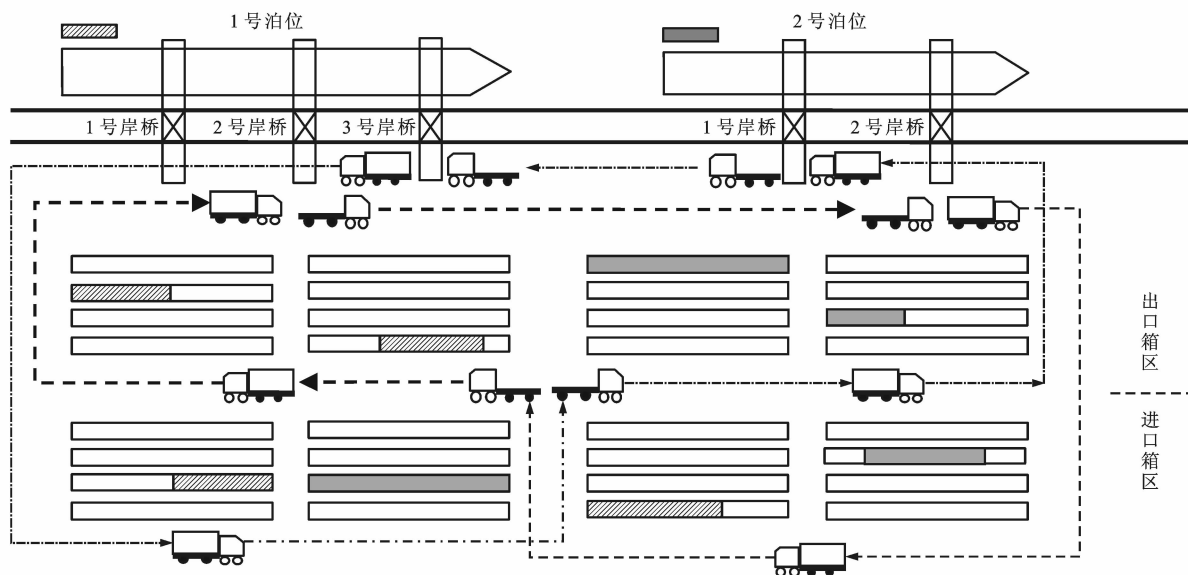


图 1 混合交叉作业

Fig. 1 Mixed cross-operation

为一个典型的指派问题(Allocation Problem, AP);设备配置组合可视为一个典型的多重背包问题(Multiple Knapsack Problem, MKP);集卡路径优化选择可视为一个典型的旅行商问题(Traveling Salesman Problem, TSP)。由于这3个问题之间相互影响、相互耦合、相互作用、相互制约,共同决定着集装箱码头生产作业效率和运营成本,因此,集装箱码头集成调度问题也可以视为上述3个典型问题的复合问题,可运用三阶段模型进行求解。

1.2 码头泊位分配选择模型

在考虑每个泊位只停靠一艘船舶的情况下,集装箱码头泊位分配是一个典型的0-1指派问题。假设 E 为某一时刻集装箱码头挂靠船舶集合, $i \in E$; W 为集装箱码头泊位集合, $w \in W$; S 为可选泊位分配方案集合, $s \in S$; $t_{1,i}$ 为船舶 i 到港时刻; $t_{2,i}$ 为船舶 i 开始装卸作业时刻; $h_{1,w}$ 为 w 泊位水深; $h_{2,i}$ 为船舶 i 吃水; ρ_1 为0-1变量,如果方案 s 被选择, ρ_1 为1,否则为0; ρ_2 为0-1变量,船舶 i 停靠在 w 泊位, ρ_2 为1,否则为0; $C_{1,s}$ 为在泊位分配方案 s 下的码头运营成本,则有

$$\min f_1 = \sum_{s \in S} C_{1,s} \rho_1 \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{s \in S} \rho_1 = 1 \quad (2)$$

$$t_{2,i} - t_{1,i} \geq 0 \quad (3)$$

$$\sum_{w \in W} (h_{1,w} - h_{2,i}) \rho_2 \geq 0 \quad (4)$$

$$\rho_1, \rho_2 \in \{0, 1\} \quad (5)$$

式中: f_1 为泊位选择分配函数。

约束式(2)保证仅有1个泊位分配方案被选择;约束式(3)为船舶到港时间约束;约束式(4)为泊位吃水约束;约束式(5)为决策变量0-1约束。

1.3 设备配置组合模型

集装箱码头设备配置组合是指以岸桥为基准需要配置的集卡数量和场桥数量的组合,是1个典型的多重背包问题。对于任意1个集装箱码头,设 K 为可选码头设备配置组合的集合, $k \in K$; θ_k 为0-1变量,如果码头配置组合 k 被选择, θ_k 为1,否则 θ_k 为0; $C_{2,k}$ 为在设备配置组合 k 下的码头运营成本,则有

$$\min f_2 = \sum_{k \in K} C_{2,k} \theta_k \quad (6)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k \in K} \theta_k = 1 \quad (7)$$

$$\theta_k \in \{0, 1\} \quad (8)$$

式中: f_2 为设备配置组合函数。

约束式(7)保证仅有1个码头设备配置组合被选择;约束式(8)为决策变量0-1约束。

码头运营成本由泊位占用成本、设备使用成本和设备闲置成本构成。在既定的泊位分配选择方案和设备配置组合方案下,设码头运营成本为 C_3 ,则有

$$\min C_3 = \sum_{i \in E} T_{2,i} c_1 + \sum_{i \in E} T_{3,i} x_i c_2 + \frac{f_3}{v_2} c_3 + \sum_{i \in E} T_{3,i} (m_{1,i} + m_{2,i}) c_4 + \sum_{i \in E} T_{3,i} x_i c_5 / 4 \quad (9)$$

$$\text{s. t. } x_i \leq \frac{q_i + 1}{2} \quad (10)$$

$$x_i \leq X_i \quad (11)$$

$$m_{1,i} + m_{2,i} \geq \frac{x_i v_1}{v_3} \quad (12)$$

$$\max(m_{1,i}) \leq M_1 \quad (13)$$

$$\max(m_{2,i}) \leq M_2 \quad (14)$$

$$T_{2,i} < T_{1,i} \quad (15)$$

$$T_{2,i} = T_{3,i} + T_4 = \frac{Q_{1,i} + Q_{2,i}}{v_1 x_i} + T_4 \quad (16)$$

$$m_{1,i}, m_{2,i}, x_i \in \mathbf{N} \quad (17)$$

式中: x_i 为船舶 i 的岸桥调配数量; $m_{1,i}$ 、 $m_{2,i}$ 分别为船舶 i 进行装船作业和卸船作业的场桥数量,且每个场区只有1个场桥; $T_{1,i}$ 为船舶 i 在港作业要求时间; $T_{2,i}$ 为船舶 i 在港停泊总时间; $T_{3,i}$ 为船舶 i 在港装卸作业时间; T_4 为船舶在港非生产性停泊时间; X_i 为泊位配置给船舶 i 的最大岸桥数量; M_1 、 M_2 分别为堆场最大出口、进口箱区数量; f_3 为集卡行驶路程; v_1 为岸桥装卸速度; v_2 为集卡行驶速度; v_3 为场桥运行速度; c_1 为泊位的单位占用成本; c_2 为岸桥的单位运行成本; c_3 为集卡的单位运行成本; c_4 为场桥的单位运行成本; c_5 为集卡的单位闲置成本; q_i 为船舶 i 的贝位数量; $Q_{1,i}$ 、 $Q_{2,i}$ 分别为船舶 i 装箱数量和卸箱数量。

目标函数(9)保证码头运营总成本最小;约束式(10)保证船舶在进行多头作业时,2台岸桥之间至少应该有1个贝位的间隔要求;约束式(11)保证船舶装卸作业开头数量不能超过码头最大配置岸桥数量;约束式(12)保证装卸船时场桥作业速度不小于岸桥作业速度,间接避免岸桥等待集卡的现象;约束式(13)、(14)分别保证分配给船舶进出口箱区数量均不能超过堆场最大进出口箱区数量;约束式(15)保证船舶在港作业时间须满足要求;约束式(16)为船舶在港时间计算方式;约束式(17)为决策变量取值要求。

1.4 集卡行驶路径选择模型

集卡行驶路径选择是典型的旅行商问题。本文采用集卡混合交叉作业方式,因此,可将作业集卡按路径分成 2 类,一类是进行船舶 i 卸箱船舶 j ($i \neq j$) 装箱交叉作业的集卡,即集卡装载从船舶 i 卸船岸桥卸载的集装箱,将其运送到船舶 i 的进口箱区,再行驶到船舶 j 的出口箱区装载集装箱,将其运送到船舶 j 装船岸桥;一类是进行船舶 i 装卸混合作业的集卡,即装载从船舶 i 卸船岸桥卸载的集装箱,将其运送到船舶 i 的进口箱区,再行驶到船舶 i 的出口箱区装载集装箱,将其运送到船舶 i 的装船岸桥。则各类集卡行驶路径之和 f_3 为

$$\min f_3 = \sum_{i \in E} D_2 n_i g_i + \sum_{i \in E} \sum_{j \in E} (D_1 + d_{ij}) n_{ij} g_{ij} \quad (18)$$

$$\text{s. t. } 2n_i g_i + 2n_{ji} g_{ji} \geq Q_{1,i} \quad (19)$$

$$2n_i g_i + 2n_{ij} g_{ij} \geq Q_{2,i} \quad (20)$$

$$\frac{D_1 + d_{ij}}{n_{ij} v_2} \leq \min \left\{ \frac{4}{v_1}, \frac{2}{v_3} \right\} \quad (21)$$

$$\frac{D_2}{n_i v_2} \leq \min \left\{ \frac{4}{v_1}, \frac{2}{v_3} \right\} \quad (22)$$

$$\sum_{i \in E} \sum_{j \in E} n_{ij} / 2 + \sum_{i \in E} n_i \leq N \quad (23)$$

$$n_{ij}, n_i, g_{ij}, g_i \in \mathbf{N} \quad (24)$$

式中: n_{ij} 与 n_i 分别为进行船舶 i 卸箱船舶 j 装箱交叉作业与船舶 i 装卸混合作业的集卡数量; g_{ij} 与 g_i 分别为进行船舶 i 卸箱船舶 j 装箱交叉作业与船舶 i 装卸混合作业的集卡平均往返次数; D_1 为进行船舶 i 卸箱船舶 j 装箱交叉作业的集卡行驶距离; D_2 为进行船舶 i 装卸混合作业的集卡行驶距离; d_{ij} 为船舶 i 、 j 泊位间的距离; N 为码头最大配置集卡数量。

目标函数(18)保证各类集卡行驶路径之和最短;约束式(19)、(20)分别保证船舶 i 的待装卸箱量均能得到充分满足;约束式(21)、(22)分别保证 2 类集卡发班间隔时间应不大于岸桥作业间隔时间和场桥作业间隔时间的最小值,避免岸桥、场桥等待集卡的现象;约束式(23)保证集卡总数量不得超过码头集卡最大配置数量;约束式(24)为决策变量取值要求。

2 模型求解

基于三阶段模型之间的相互联系,本文设计双层遗传算法求解集装箱码头集成调度模型。由于 AP 模型和 MKP 模型的目标函数均是降低集装箱码头生产运营总成本,而 TSP 模型的目标函数是优化集卡行驶路径,因此,按照目标函数将本文模型分成 2 层求解。

双层遗传算法的上层用于搜索集装箱码头泊位、岸桥、场桥、集卡等设施设备的合理配置组合,下层在上层所选码头设施设备配置组合的基础上获得集卡最短行驶路径,然后将结果反馈到上层,继而影响上层搜索过程。目标函数在上下层算法的不断反馈中达到最优,双层遗传算法流程见图 2。

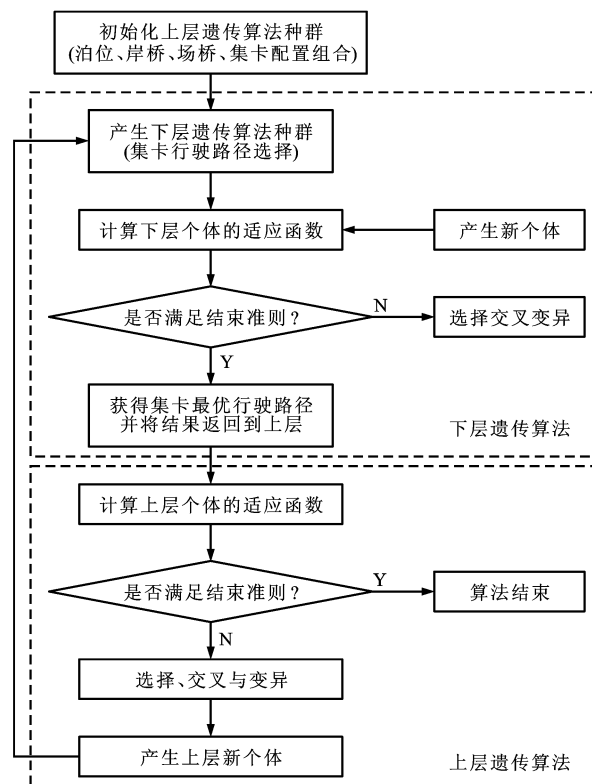


图 2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flow

2.1 编码方式

在上层遗传算法中,本文采用十进制二重结构编码方式对染色体进行编码,染色体长度为码头泊位、岸桥、场桥、集卡等设施设备种类数量。假设某一时刻 A、B 两艘船舶待泊作业,该情况下的染色体包括 2 艘船舶的泊位编号、岸桥配置数量、进出口箱区数量、混合作业集卡数量、A 船卸 B 船装交叉作业集卡数量、B 船卸 A 船装交叉作业集卡数量等 12 类数量,即染色体长度为 12。个体染色体的二重结构编码由变量码和校验码 2 行组成,上行为变量校验码,下行为变量取值。其中校验码数值为不同种类码头设施设备配置上限,当随机产生的变量值大于其校验码时,校验该染色体不合格,重新产生新染色体,上层染色体见图 3。

在图 3 中,每个变量码皆小于其对应的校验码,下行变量码表示 A 船泊位编号为 2, B 船泊位编号

校验码 (4) (4) (5) (5) (9) (8) (9) (8) (9) (9) (9) (9)
 变量码 (2) (3) (2) (3) (6) (4) (7) (4) (4) (4) (6) (8)

图3 上层染色体

Fig. 3 Upper layer chromosome

为3,A船岸桥配置数量为2,B船岸桥配置数量为3,A船进口箱区数量为6,A船出口箱区数量为4,B船进口箱区数量为7,B船出口箱区数量为4,A船卸B船装交叉作业集卡数量为4,A船混合作业集卡数量为4,B船混合作业集卡数量为6,B船卸A船装交叉作业集卡数量为8。

在下层遗传算法中,本文采用字符串对染色体编码。每个染色体表示1个集卡行驶路径,染色体中每个正整数代表1个集卡途经位点编号。染色体长度为16,1~4号位点表示A船卸B船装交叉作业集卡行驶路径,5~8号位点表示A船混合作业集卡行驶路径,9~12号位点表示B船混合作业集卡行驶路径,13~16号位点表示B船卸A船装交叉作业集卡行驶路径,下层染色体见图4。

(2) (4) (3) (1) (2) (3) (1) (2) (1) (3) (4) (3) (1) (2) (3) (3)

图4 下层染色体

Fig. 4 Lower layer chromosome

在图4中,染色体表示A船卸B船装交叉作业集卡行驶路径为A船2号岸桥→进口箱区4→出口箱区3→B船1号岸桥;A船混合作业集卡行驶路径为A船2号岸桥→进口箱区3→出口箱区1→A船2号岸桥;B船混合作业集卡行驶路径为B船1号岸桥→进口箱区3→出口箱区4→B船3号岸桥;B船卸A船装交叉作业集卡行驶路径为B船1号岸桥→进口箱区2→出口箱区3→A船3号岸桥。

2.2 生成初始种群

上层算法初始种群的生成是由集装箱码头各种设施设备配置组合的选择决定,下层算法初始种群的生成是由随机产生的集卡行驶路径决定,上层和下层分别产生 R_1 和 R_2 个个体,组成初始种群。

2.3 适应函数和选择操作

在求解目标函数的最小值时,上下层算法的非线性加速适应函数为

$$F(r_l) = \begin{cases} \frac{1}{G - G_{\min}} & G \geq G_{\min} \\ Z & G < G_{\min} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $F(r_l)$ 为上下层算法适应函数; r_l 表示第 l 个个体的变量值; Z 为充分大的待定常数; G 为当前目标函数值; G_{\min} 为当前最优目标函数值。

Z 选取策略为:在初始迭代时, Z 与第1和第2小目标差值的倒数尽量接近,以避免早熟,在后期迭代中逐步扩大差距。

本文采用轮盘赌策略选择种群,染色体被选择的概率 p_1 为

$$p_1 = \frac{F(r_l)}{\sum_{l=1}^R F(r_l)} \quad (26)$$

$$R = R_1 + R_2$$

2.4 交叉操作

根据上下层遗传算法染色体编码的特点,交叉规则采取非常规码的不变位法,即随机产生同染色体有相同长度的基准量,每位数字均由0或1组成,其中1表示该位点不变,0表示该位点变化。以上层遗传算法为例,交叉操作具体变化方式见图5。

基准量	(1)	(0)	(0)	(1)	(1)	(0)	(0)	(1)	(0)	(1)	(1)	(0)
父代A	(2)	(4)	(3)	(1)	(2)	(3)	(5)	(3)	(1)	(3)	(2)	(4)
父代B	(3)	(2)	(4)	(2)	(3)	(1)	(2)	(4)	(5)	(2)	(4)	(1)
子代A	(2)	(2)	(4)	(1)	(2)	(1)	(2)	(3)	(5)	(3)	(2)	(1)
子代B	(3)	(4)	(3)	(2)	(3)	(3)	(5)	(4)	(1)	(2)	(4)	(4)

图5 交叉操作

Fig. 5 Crossover operation

2.5 变异操作和终止规则

首先以事先设置的变异概率 p_2 在1到染色体长度之间随机产生2个数字,然后在这2个位置互换基因值,当算法达到预设的进化迭代次数时,算法自动终止。

3 计算结果分析

假设集装箱码头有4个顺岸式泊位,对应的岸桥数量分别为2、3、4、2。在某一时刻,两艘船舶(编号分别为1、2)等待挂靠,船舶1待卸箱量为640 TEU,待装箱量为700 TEU;船舶2待卸箱量为430 TEU,待装箱量为500 TEU。集装箱码头布局结构见图6, $L_1 \sim L_8$ 与 $U_1 \sim U_8$ 分别为出口箱区与进口箱区编号。泊位、船舶相关参数见表1。本文利用MATLAB软件可以编程求解出本案例中1、2两艘船舶的挂靠泊位编号、岸桥配置数量、集卡数量、场桥数量与集卡最优行驶路径。

利用MATLAB软件,当设置双层遗传算法染色体选择概率 p_1 为0.90,变异概率 p_2 为0.08,最大迭代次数为200时,求解结果为船舶1停靠在3号泊位;船舶2停靠在2号泊位; $x_1 = 4; x_2 = 4; m_{1,1} = 4\{U_3, U_4, U_6, U_8\}; m_{2,1} = 4\{L_2, L_3, L_6, L_7\}; m_{1,2} =$

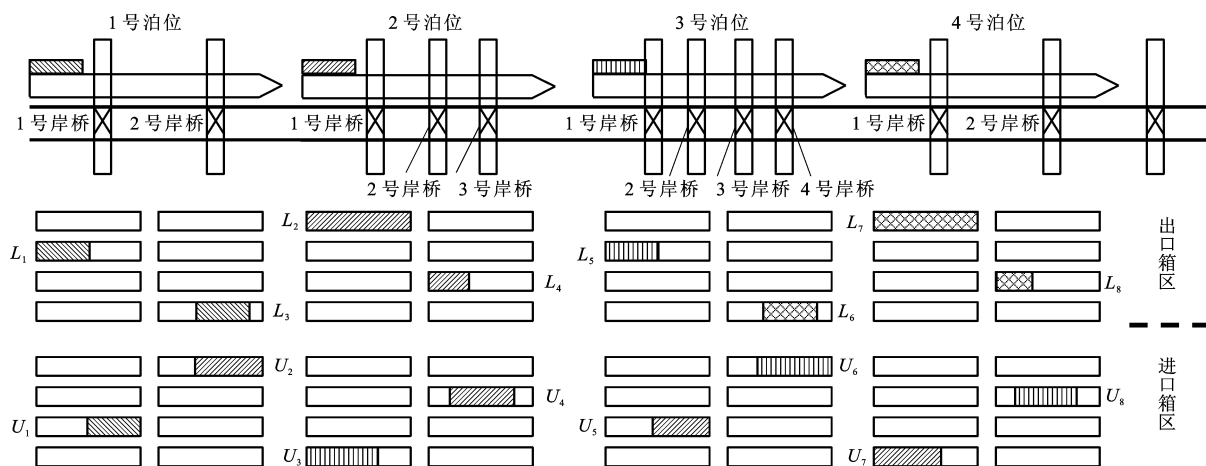


图 6 布局结构

Fig. 6 Layout structure

表 1 参数取值
Tab. 1 Parameter values

参数	取值	参数	取值
$v_1 / (\text{TEU} \cdot \text{h}^{-1})$	40	$q_2 / \text{贝}$	8
$v_2 / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	18	$X_1 / \text{台}$	4
$v_3 / (\text{TEU} \cdot \text{h}^{-1})$	20	$X_2 / \text{台}$	4
$c_1 / (\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	1 600	$M_1 / \text{区}$	8
$c_2 / [\text{元} \cdot (\text{h} \cdot \text{台})^{-1}]$	882	$M_2 / \text{区}$	8
$c_3 / [\text{元} \cdot (\text{h} \cdot \text{veh})^{-1}]$	52	N / veh	40
$c_4 / [\text{元} \cdot (\text{h} \cdot \text{台})^{-1}]$	169	$T_{1,1} / \text{h}$	12
$c_5 / [\text{元} \cdot (\text{h} \cdot \text{veh})^{-1}]$	30	$T_{1,2} / \text{h}$	12
$q_1 / \text{贝}$	10	T_4 / h	2

表 2 优化路径与工作量

Tab. 2 Optimization paths and operation amounts

行驶路径	路径距离/km	操作箱量/TEU
3号泊位 1号岸桥→进口箱区 8→ 出口箱区 3→2号泊位 3号岸桥	11.5	100
3号泊位 2号岸桥→进口箱区 3→ 出口箱区 4→3号泊位 2号岸桥	9.8	156
3号泊位 3号岸桥→进口箱区 6→ 出口箱区 3→3号泊位 3号岸桥	7.7	204
3号泊位 4号岸桥→进口箱区 4→ 出口箱区 1→2号泊位 4号岸桥	11.9	96
2号泊位 1号岸桥→进口箱区 2→ 出口箱区 4→2号泊位 1号岸桥	5.6	170
2号泊位 2号岸桥→进口箱区 4→ 出口箱区 5→2号泊位 2号岸桥	6.3	150
2号泊位 3号岸桥→进口箱区 5→ 出口箱区 6→3号泊位 4号岸桥	8.1	192
2号泊位 4号岸桥→进口箱区 7→ 出口箱区 7→3号泊位 1号岸桥	9.2	168

$4\{U_2, U_4, U_5, U_7\}; m_{2,2} = 4\{L_1, L_3, L_4, L_5\}; n_{12} = 7;$
 $n_1 = 6; n_2 = 4; n_{21} = 5; g_{12} = 14; g_1 = 30; g_2 = 40;$
 $g_{21} = 36$ 。使用混合交叉作业集成调度模型,集卡
 数量为 22 veh,集卡行驶总距离为 10 389.8 km,码
 头运营总成本为 84 266.2 元。集卡优化行驶路径
 见表 2。

如果采用独立装卸作业方式,计算该情况下集
 卡配置数量和集卡行驶路径,结果见表 3。船舶 1
 进行装船作业需要集卡数量为 28 veh,卸船作业需
 要集卡数量为 29 veh;船舶 2 进行装船作业需要集
 卡数量为 36 veh,卸船作业需要集卡数量为 26 veh;
 集卡行驶总距离为 12 584.7 km。与独立装卸作业
 过程相比,使用混合交叉作业集成调度配置模型,集
 卡数量可减小 66.2%,集卡行驶距离可减小
 17.4%。

如果使用单独调度方式,分别配置集装箱码头
 各类设施设备,根据船舶当前位置和泊位空闲情况
 对船舶挂靠泊位进行选择,根据岸桥、集卡、场桥各

自作业效率和船舶在港时间要求进行配置,对比集
 装箱码头不同调度方式下各种设备配置数量、集卡
 行驶距离和码头运营总成本,结果见表 4。

从表 4 可以看出,当使用单独调度方式,集卡行
 驶总距离为 12 158.1 km,码头运营总成本为
 88 345.7 元;当使用集装箱码头混合交叉作业集成
 调度模型集卡行驶总为 10 389.8 km,可减小距离
 14.5%,码头运营总成本为 84 266.2 元,降低了
 4.6%。可见,使用集装箱码头集成调度模型能有效
 降低码头生产运营成本,使用集卡混合交叉作业方
 式能明显缩短集卡空载行驶距离。

表 3 独立装卸作业

Tab. 3 Independent loading and unloading process

行驶路径	集卡数量/veh	路径距离/km	操作箱量/TEU
3 号泊位 1 号岸桥→进口箱区 3	9	7.9	109
3 号泊位 2 号岸桥→进口箱区 4	5	4.2	204
3 号泊位 3 号岸桥→进口箱区 6	5	3.9	220
3 号泊位 4 号岸桥→进口箱区 8	9	8.1	107
出口箱区 2→3 号泊位 1 号岸桥	11	9.3	105
出口箱区 3→3 号泊位 2 号岸桥	8	7.2	135
出口箱区 6→3 号泊位 3 号岸桥	4	3.5	279
出口箱区 7→3 号泊位 4 号岸桥	6	5.4	181
2 号泊位 1 号岸桥→进口箱区 2	10	8.3	88
2 号泊位 2 号岸桥→进口箱区 4	5	4.1	179
2 号泊位 3 号岸桥→进口箱区 5	9	7.9	93
2 号泊位 4 号岸桥→进口箱区 7	12	10.5	70
出口箱区 1→2 号泊位 1 号岸桥	8	7.2	80
出口箱区 3→2 号泊位 2 号岸桥	4	3.3	175
出口箱区 4→2 号泊位 3 号岸桥	4	3.4	169
出口箱区 5→2 号泊位 4 号岸桥	9	7.6	76

表 4 优化结果对比

Tab. 4 Comparison of optimization results

项目	单独调度	集成调度
船舶 1 停靠泊位编号	1	3
船舶 1 停靠岸桥调配数量/台	4	4
船舶 1 停靠进口箱区配给数量/区	4	4
船舶 1 停靠出口箱区配给数量/区	4	4
集卡配置总数量/veh	31	22
码头运营总成本/元	88 345.7	84 266.2
项目	单独调度	集成调度
船舶 2 停靠泊位编号	2	2
船舶 2 停靠岸桥调配数量/台	3	4
船舶 2 停靠进口箱区配给数量/区	4	4
船舶 2 停靠出口箱区配给数量/区	4	4
集卡行驶总距离/km	12 158.1	10 389.8

4 结 语

集装箱码头进出口作业系统是个随机动态的复杂系统,系统内各环节相互影响、相互作用、相互制约、相互耦合,如何有效调度协调各环节运作以实现系统整体运行最优具有重要的现实意义。本文针对码头泊位分配、设备配置组合和集卡行驶路径选择 3 个关键环节,采用集卡混合交叉作业方式,建立了

集成优化调度模型,并设计双层遗传算法进行求解。算例结果表明,集装箱码头混合交叉作业集成调度同步优化能有效提高码头生产作业效率、降低生产运营成本,实现系统调度整体最优。

本文假设船舶同一时间靠泊进行混合交叉作业,进一步研究可考虑船舶在不同时点靠泊的情况,探讨带有时间窗的集装箱码头进出口作业系统生产调度问题。

参 考 文 献 :

References :

[1] YAN Wei, HUANG You-fang, CHANG Dao-fang, et al. An investigation into knowledge-based yard crane scheduling for container terminals[J]. Advanced Engineering Informatics, 2011, 25(3): 462-471.

[2] GUO Xi, HUANG S Y, HSU W J, et al. Dynamic yard crane dispatching in container terminals with predicted vehicle arrival information[J]. Advanced Engineering Informatics, 2011, 25(3): 472-484.

[3] SALIDO M A, RODRIGUEZ-MOLINS M, BARBER F. A decision support system for managing combinatorial problems in container terminals[J]. Knowledge-Based Systems, 2012, 29(5): 63-74.

[4] 靳志宏,李 娜. 基于泊位计划的集装箱码头岸桥动态调度优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(3): 58-64.

JIN Zhi-hong, LI Na. Optimazation of quay crane dynamic scheduling based on berth schedules in container terminal[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(3): 58-64. (in Chinese)

[5] CAO Jin-xin, SHI Qi-xin, LEE D H. Integrated quay crane and yard truck schedule problem in container terminals[J]. Tsinghua Science and Technology, 2010, 15(4): 467-474.

[6] 陈 超,王海燕. 集装箱码头泊位生产运作优化模型[J]. 大连海事大学学报, 2009, 35(4): 52-54, 58.

CHEN Chao, WANG Hai-yan. An optimal model of container quay berth production operation[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2009, 35(4): 52-54, 58. (in Chinese)

[7] 计明军,靳志宏. 集装箱码头集卡与岸桥协调调度优化[J]. 复旦学报:自然科学版, 2007, 46(4): 476-480, 488.

JI Ming-jun, JIN Zhi-hong. A united optimization of crane scheduling and yard trailer routing in a container terminal[J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 2007, 46(4): 476-480, 488. (in Chinese)

[8] ZENG Qing-cheng, YANG Zhong-zhen. Integrating simulation and optimization to schedule loading operations in container terminals[J]. Computers and Operations Research, 2009, 36(6): 1935-1944.

[9] 曾庆成,杨忠振. 集装箱码头卸船作业调度方案的两阶段禁忌搜索算法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(2): 109-112, 122.

ZENG Qing-cheng, YANG Zhong-zhen. Two-phase tabu search algorithm of unloading operation scheduling project in

- container wharf[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2007, 7(2): 109-112, 122. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] KIM K H, PARK Y M. A crane scheduling method for port container terminals[J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 156(3): 752-768.
- [12] BISH E K. A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal[J]. *European Journal of Operational Research*, 2003, 144(1): 83-107.
- [13] 曾庆成, 胡祥培, 杨忠振. 集装箱码头泊位分配-装卸桥调度干扰管理模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(11): 2026-2035.
ZENG Qing-cheng, HU Xiang-pei, YANG Zhong-zhen. Model for disruption management of berth allocation and quay crane scheduling in container terminals[J]. *Systems Engineering—Theory and Practice*, 2010, 30(11): 2026-2035. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] GOODCHILD A V, DAGANZO C F. Double-cycling strategies for container ships and their effect on ship loading and unloading operations [J]. *Transportation Science*, 2006, 40(4): 473-483.
- [16] GOODCHILD A V, DAGANZO C F. Crane double cycling in container ports: planning methods and evaluation [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2007, 41(8): 875-891.
- [17] 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 algorithm of 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)
- [18] ZENG Qing-cheng, YANG Zhong-zhen, LAI Lu-yuan. Models and algorithms for multi-crane oriented scheduling method in container terminals[J]. *Transport Policy*, 2009, 16(5): 271-278.
- [19] 李 娜. 集装箱码头连续泊位与岸桥调度联合优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
LI Na. The combined scheduling of continuous berth and quay crane at container terminal[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011. (in Chinese)
- [20] 焦 宇, 康与涛, 尹小贝, 等. 港口交通资源承载力预测预警模型[J]. *交通运输工程学报*, 2012, 12(2): 84-92.
JIAO YU, KANG YU-tao, YIN Xiao-bei, et al. Forecasting and early-warning model of port traffic resource carrying capacity[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2012, 12(2): 84-92. (in Chinese)

(上接第 72 页)

- [7] LEONG W, HENSHER D A. Embedding decision heuristics in discrete choice models: a review[J]. *Transport Reviews*, 2012, 32(3): 313-331.
- [8] ARENTZE T A, TIMMERMANS H J P. ALBATROSS: overview of the model, application and experiences[C]//TRB. *Innovation in Travel Modeling 2008*. Portland: TRB, 2008: 1-27.
- [9] JOU R C, KITAMURA R, WENG M C, et al. Dynamic commuter departure time choice under uncertainty[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2008, 42(5): 774-783.
- [10] HANNES E, JANSSENS D, WETS G. Mental map of daily activity travel routines[C]//TRB. 88th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2009: 1-17.
- [11] CHORUS C G. A new model of random regret minimization[J]. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 2010, 10(2): 181-196.
- [12] THIENE M, BOERI M, CHORUS G C. Random regret minimization: exploration of a new choice model for environmental and resource economics [J]. *Environmental and Resource Economics*, 2012, 51(3): 413-429.
- [13] CASPAR G C. Random regret minimization: an overview of model properties and empirical evidence [J]. *Transport Reviews*, 2012, 32(1): 75-92.
- [14] KIVETZ R, NETZER O, SRINIVASAN V. Alternative models for capturing the compromise effect[J]. *Journal of Marketing Research*, 2004, 41(3): 237-257.
- [15] BIERLAIRE M, FETIARISION M. Estimation of discrete choice models: extending BIOGEME[C]//STRC. 9th Swiss Transport Research Conference. Ascona: STRC, 2009: 1-21.