文章编号:1000 - 4653(2022)04 - 0146 - 09

散货港装船设备分配与船舶交通组织协调优化

王婧赟[1], 张新宇[1], 杨炳栋[2], 郭文强[1], 刘凤良[3]
(1. 大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026;2. 黄骅港引航站, 河北 沧州 061113;
3. 中华人民共和国沧州海事局, 河北 沧州 061110)

摘 要:针对装船设备利用率与船舶进出港效率不匹配的问题,提出了一种应用于散货港口的装船设备分配与船舶交通组织协调优化模型,同时设计了一种基于启发式筛选规则的多目标遗传算法(Multi-Objective Genetic algorithm based on Heuristic Screening Rules, MOGA-HSR)。该算法融合了单向航道的船舶交通组织规则以及船货匹配规则,使用一种自适应交叉及变异概率函数,加快了求解的收敛速度。以黄骅港煤炭港区为例设计仿真试验,结果表明,MOGA-HSR 求得的船舶进出港总时间和船舶总等待时间比带精英策略非支配排序的遗传算法(Genetic Algorithm for Non-Dominated Sorting with Elitist Strategy, NSGA-Ⅱ)求解结果分别缩短 2.7% 和 2.5%,比先到先服务(First Come First Service, FCFS)求解结果分别缩短 38% 和 30.8%,验证了模型和算法的有效性。

关键词:船舶交通组织优化;装船设备分配;启发式筛选规则;多目标遗传算法;散货港口
中图分类号:U691 + .31 **文献标志码**:A

Optimization of Cargo Handling Machinery Allocation and Ship Traffic Organization for Bulk Cargo Ports

WANG Jingyun[1], *ZHANG Xinyu*[1], *YANG Bingdong*[2], *GUO Wenqiang*[1], *LIU Fengliang*[3]
(1. Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
2. Pilot Station of Huanghua Port, Cangzhou 061113, China;
3. Cangzhou Maritime Safety Administration of the People's Republic of China, Cangzhou 061110, China)

Abstract: A model for bulk cargo ports to optimize cargo handling machinery allocation and ship traffic organization is introduced. A multi-objective genetic algorithm based on heuristic screen rules (MOGA-HSR) is designed. The algorithm integrates the traffic organization rules for one-way waterway and the cargo-ship matching rules. The self-adaptive crossover and mutation probability function is introduced to accelerate the convergence process. Simulations of Huanghua Coal Port are performed with MOGA-HSR and genetic algorithm for non-dominated sorting with elitist strategy (NSGA-Ⅱ), respectively. The simulation results show that the overall entering-leaving time and ship waiting time for the former are 2.7% and 2.5% shorter compared to those for the latter. And compared to the principle of first come first served (FCFS), they are shortened by 38% and 30.8% respectively, which demonstrated the effectiveness of the new method.

Key words: ship traffic organization; allocation of cargo handling machinery; heuristic screen rules; multi-objective genetic algorithm; bulk cargo port

近年来,港口和航运业发展迅速,但当前港航领域问题繁多,其中岸线资源集约化利用等方面问题尤为突出。此外,在水运行业安全、环保和节能的需求引领下,缩短船舶等待时间对于提高港口的转运效率、减少船舶在港口的碳排放量意义重大。

作为水运大国,我国水运货物周转量占货物总周转量的比重长期维持在 50% 以上[1],其中,散货运输更是在整个水运市场中占有较大的比重。因

收稿日期:2021-07-09
基金项目:国家自然科学基金资助课题(51779028)
作者简介:王婧赟(1997—),女,河南郑州人,硕士,研究方向为港口船舶交通组织优化。E-mail:wangjingyun@dlmu.edu.cn
通信作者:张新宇(1978—),男,辽宁大连人,教授,博士,研究方向为船舶交通组织优化、无人驾驶船舶自主航行技术、海事大数据。E-mail: zhangxy@dlmu.edu.cn

此,优化散货港口的资源配置并提高港口的货物周转效率能够助力港口早日实现碳达峰、碳中和目标。一方面,合理分配装船设备是提升港口装船效率的重要保障;另一方面,有序、高效的船舶进出港过程在提高装船设备工作效率方面发挥着关键作用。目前,沿海散货港口的设备作业效率都已显著提升,但港口的运营效率仍受船舶进出港效率的限制,存在装卸设备与船舶之间相互等待的现象,极大地降低了港口的作业效率。此外,港口在实际作业过程中,大多是先制定船舶进出港计划,然后安排装船作业设备,并未将船舶进出港计划与装船设备分配进行协调优化。因此,研究两者的协调优化是散货港口亟须解决的问题之一。

近年来,为合理分配散货港口的资源,打造绿色低碳港口,国内外学者对此已展开研究。在分配装船设备方面,胡光忠[2]为平衡船舶总在港时间和卸船机总作业能耗,对散货码头泊位和卸船机的联合调度问题进行了研究;吴山[3]研究了散货码头装卸作业线机械设备配置优化问题,提升了码头的装卸能力并降低了码头的运营成本;PEREZ D[4]、宓为建[5]等在研究煤炭码头泊位分配问题时,考虑了泊位与机械的联合调度;于跃[6]研究了进口散货港口的泊位分配和卸船机集成优化问题;GAO Z 等[7]研究了钢铁厂的船舶卸船调度问题,以优化船舶装卸顺序以及实现皮带输送机和船舶的最佳配置;冯鹏等[8]研究了考虑装船机联机作业的煤炭出口码头装船作业调度优化。然而,随着码头作业机械自动化程度的提高,船舶在港装卸作业效率也逐渐增加,船舶较低的进出港效率逐步成为制约港口转运效率的主要因素。为减少此问题带来的负面影响,许多学者开展了相关研究,ZHANG X Y 等[9]针对单向航道单港池的离散泊位散货港口,对固定计划期内船舶调度和泊位分配的集成问题进行研究;ZHANG X Y 等[10]为提高单向航道散货港口的泊位利用率,研究了多港池散货港口船舶调度优化问题;张新宇等[11]以航道为主要对象,研究了黄骅港限制性双向航道条件下的船舶交通组织优化模型与算法。此外,许多学者针对不同的航道类型开展了船舶交通组织的相关研究,JIA S 等[12-13]考虑不同类型航道的特点,将船舶进出港过程作为关键因素,研究了船舶与泊位联合下的交通组织问题;郑红星等[14]研究了受周期性潮汐影响的复合航道船舶调度优化问题;牛猛等[15]研究了上海洋山深水港的锚地分配与船舶协调的交通组织问题。目前,学界在散货港口装卸设备与船舶交通组织协调优化领域的研究文献相对较少,已有的研究大多仅针对港口码头资源或者船舶进出港交通组织优化,并未针对装卸设备利用率与船舶进出港效率不协调问题而对两者进行协调优化。

目前,对散货港口进行协调优化的研究相对较少,可借鉴的研究主要集中在集装箱码头,包括岸桥、集卡、场桥、泊位等资源之间的协调优化。张笑菊等[16]为加速集装箱在码头内部的周转,研究了基于同贝同步装卸作业的岸桥与集卡联合调度问题;NIU B 等[17]研究了综合堆场集卡调度问题和存储分配问题;梅益群等[18]同时考虑泊位和岸桥资源,研究了考虑泊位偏好和岸桥移动频数的泊位岸桥联合调度两阶段优化问题;YANG H Y 等[19]对进口集装箱的货柜配置和堆场起重机配置问题进行了优化;赵姣等[20]研究了集装箱码头岸吊、集卡和场吊的集成调度问题;王小寒等[21]基于“轨道吊—集卡”协同装卸方案,综合研究了作业区域动态划分、贝位分配以及多轨道吊调度多层次联合优化问题;THANOS E 等[22]以码头堆场内集装箱转运距离最小为目标,研究了具有特定码头起重机配置的连续泊位分配问题;高钰珊等[23]针对集装箱港口的整体系统,建立了泊位、岸桥、集卡三种资源整合的集装箱港口综合调度模型;郑红星等[24]将岸桥指派、岸桥分配和岸桥调度集成为一体,对岸桥和泊位资源进行协调调度研究。上述文献虽然对装卸设备与其他因素的协调进行了系统的研究,也设计了有效的算法进行求解,但大多没有考虑船舶进出港的具体时间分配问题。

综上所述,本文针对装船设备利用率与船舶进出港效率不匹配等问题,根据船舶按照固定时间间隔组队进出单向航道的实际情况,构建以船舶总等待时间和占用航道的时间最小为目标函数的装船设备分配与船舶交通组织协调优化模型。针对优化模型的特点并兼顾求解的效率,设计 MOGA-HSR,最终得到船舶进出港计划表,通过不同船舶数量的仿真试验对模型的合理性和算法的有效性进行验证。

1 问题描述和模型构建

1.1 问题描述

本文研究问题可表述为:在船舶的预计抵港时间、泊位忙闲状态等信息都已知的前提下,以一个计划周期内所有申请进出港的船舶为研究对象,将装船设备分配作为主要约束条件,考虑单向航道船舶

组队进出港的实际情况,合理安排船舶进出港的时间和装船设备的作业时间,最终达到船舶交通组织过程中船舶占用航道的总时间和总等待时间最短的目的。

1.2 装船设备分配与船舶交通组织协调优化模型

1.2.1 假设条件

针对本文拟解决的问题,作出如下假设:

1)港口的天气状况、泊位的水深等均满足各船舶的停靠要求。

2)每艘船舶有且仅有一个已知指派泊位,且船舶在作业过程中不能移泊。

3)装船机不允许交叉跨越,同一船舶在装船过程中只允许由一台装船机进行作业。

4)引航员、拖船和堆场存储货物资源充足。

1.2.2 符号定义

i:船舶编号;

k:泊位编号;

p:货物种类编号;

m:装船机编号;

n:组队时间间隔编号;

$n_{\max}$:组队时间间隔的最大编号;

T:组队时间区间;

r:船舶 i 被服务的次序;

α_1:异向船舶组队安全时距修正参数;

α_2:同向进港船舶组队安全时距修正参数;

α_3:同向出港船舶组队安全时距修正参数;

e_{ip}:皮带运送船舶 i 所需货物 p 的距离;

b_{ip}:皮带运送船舶 i 所需货物 p 的速度;

l_i:船舶 i 的长度;

sl:装船机总数;

h:异向船舶的组队安全时距;

h':同向进港船舶的组队安全时距;

h'':同向出港船舶的组队安全时距;

a_i:船舶 i 的到港时间;

x_i:船舶 i 开始进出港的时间;

y_i:船舶 i 结束进出港的时间;

v_i:船舶 i 的行驶速度;

s_i:船舶 i 在航道中的行驶距离;

t_i:船舶 i 在航道中的行驶时间;

g_{im}^k:装船机 m 在泊位 k 对船舶 i 的作业时长;

CA_{pi}:船舶 i 需要装载货物 p 的量;

ETD_i:进港船舶 i 的预计离港时间;

$\overline{f_i}$:船舶 i 的乘潮时间窗上界;

$\underline{f_i}$:船舶 i 的乘潮时间窗下界;

$\sum_i w_i$:船舶 i 等待进出港的时间;

$\sum_m w_m$:船舶 i 等待装船机空闲的时间;

$\sum_k w_k$:船舶 i 等待泊位空闲的时间;

η_m:装船机 m 的台时效能;

Q_i:船舶 i 是否受潮高约束,若是则为1,否则为0;

U_{ikr}:泊位 k 是否第 r 个被船舶 i 使用,若是则为1,否则为0;

SL_{mk}^i:装船机 m 是否在泊位 k 被船舶 i 使用,若是则为1,否则为0;

IO_i:船舶 i 的进出港方向,为1表示进港,为0表示出港;

X_{in}:船舶 i 是否在第 n 个时间间隔开始进出港,若是则为1,否则为0;

A_{ik}:船舶 i 所需货物种类是否与泊位 k 提供的货物种类匹配,若是则为1,否则为0;

v_{behind}:后船的行驶速度;

v_{before}:前船的行驶速度;

l_{before}:前船的船长。

1.2.3 模型建立

基于上述假设条件及符号定义,本文建立的数学模型如下。

$$\min Z_1 = \max(y_i) - \min(x_i) \tag{1}$$

$$\min Z_2 = \sum_i w_i + \sum_m w_m + \sum_k w_k \tag{2}$$

$$x_i \geqslant a_i \tag{3}$$

$$X_{in} \times x_i \leqslant T \times \left(\frac{n}{n_{\max}}\right) \tag{4}$$

$$T \times (n-1)/n_{\max} \leqslant X_{in} \times x_i \tag{5}$$

$$X_{in} \times x_i \times (1 - IO_i) < X_{j(n+1)} \times x_j \times IO_j \tag{6}$$

$$\sum_k SL_{mk}^i \leqslant sl \tag{7}$$

$$\sum_i SL_{mk}^i \leqslant 1 \tag{8}$$

$$\sum_m SL_{mk}^i \leqslant 1 \tag{9}$$

$$\sum_i \sum_k U_{ik(r-1)} \times x_i \leqslant \sum_j \sum_k U_{jk(r-1)} \times x_j \tag{10}$$

$$CA_{pi} = g_{im}^k \times SL_{mk}^i \tag{11}$$

$$(y_i - y_j) \times SL_{mk}^i \times SL_{mk}^j > 0 \tag{12}$$

$$(x_i - 1)(ETD_i - g_{im}^k - y_i - e_{ip}/b_{ip}) \geqslant 0 \tag{13}$$

$$\underline{f_i} \leqslant x_i \times Q_i \leqslant \overline{f_i} \tag{14}$$

$$\underline{f_i} \leqslant y_i \times Q_i \leqslant \overline{f_i} \tag{15}$$

$$\sum_i U_{ikr} \leqslant 1 \tag{16}$$

$$\sum_i U_{ikr} \times A_{ik} = 1 \tag{17}$$

$$\sum_{k} U_{ikr} \times A_{ik} = 1 \tag{18}$$

$$\sum_{r} U_{ikr} \times A_{ik} = 1 \tag{19}$$

$$(IO_i - IO_j)(U_{ikr} \times x_i - U_{jk(r-1)} \times x_j) \geqslant h \tag{20}$$

$$[1 - (IO_i - IO_j)](U_{ikr} \times x_i - U_{jk(r-1)} \times x_j) \geqslant h' \tag{21}$$

$$[1 - (IO_i + IO_j)](U_{ikr} \times x_i - U_{jk(r-1)} \times x_j) \geqslant h'' \tag{22}$$

$$h = \frac{\max(l_i, l_j) \times \alpha_1}{v_{behind}} \tag{23}$$

$$h' = \frac{l_{behind} \times \alpha_2}{v_{before}} \tag{24}$$

$$h'' = \frac{\max(l_i, l_j) \times \alpha_3}{v_{behind}} \tag{25}$$

其中,式(1)为第一个目标函数,表示船舶占用航道的总时间最短。式(2)为第二个目标函数,表示所有船舶的总等待时间最短。

式(3)~式(25)为约束条件,其中,式(3)表示船舶开始进出港时刻必须晚于船舶的准备时刻。式(4)和式(5)表示船舶组队进出港的时间范围,要求船舶在其分配的组队时间区间内完成进出港过程。式(6)表示各船舶按照固定时间组队进出港的先后顺序约束:出口港的特点之一是空船进港,满载出港,因此,当进港船舶与出港船舶同时申请进出港时,优先安排船舶出港。式(7)~式(9)表示装船机作业的数量约束,包括码头同一时刻作业的装船机总数约束,同一时刻服务于同一艘船舶的装船机数量约束。式(10)~式(12)表示存在装船作业冲突的装船机作业时间的安排方式,主要对装船机服务时间进行冲突消解:当一台装船机出现同时服务于两艘船舶的情况时,该装船机应首先服务于下一阶段最先有服务安排的泊位对应的船舶,另一艘船舶需在其泊位停靠等待。式(13)表示连接堆场和待装煤炭船舶的皮带服务于船舶的时间。式(14)和式(15)表示航道的潮高对深吃水船舶进出港时间的限制:由于完成货物装载的出港船舶以及大型船舶吃水深度较大,需在潮高达到一定阈值时才能开始进出港,故此类船舶需要在吃水满足航道潮高约束的规定时段内完成进出港。式(16)~式(19)表示服务于同一艘船舶的泊位数量约束,此外,根据船货匹配原则[25],船舶可停靠泊位对应的堆场必须存有船舶所需货物,否则船舶不可停靠此泊位。式(20)~式(25)为船舶组队安全时距约束,即组队船舶在航行过程中需保持的安全时距,包括同一队伍相邻船舶间的安全时距和相邻队伍间的安全时距,该时距需根据船舶的进出港方向、港口的自然条件和船舶的相关参数确定。

2 算法设计

目前,求解港口船舶交通组织优化问题采用的算法可分为精确算法和智能优化算法两大类,智能优化算法能够以优于精确算法的求解速度得到问题的满意解。船舶交通组织优化问题已被证实为一个非确定性多项式(Nondeterministic Polynomially,NP)难题[26],一般将求得的满意解作为问题的最优解。本文建立的船舶交通组织协调优化模型具有约束条件多、模型复杂且难以采用精确算法求解的特点,因此,需要设计一种针对问题特点的智能优化算法对模型进行求解,以高效并准确地求得船舶的进出港序列。

NSGA-Ⅱ作为目前最流行的多目标遗传算法之一,能够降低非劣排序遗传算法的复杂性,具有运行速度快、解集收敛性好等优点,但该算法在随机生成解集后缺少对初始解的筛选过程,导致初始解的质量无法在一定程度上得到保证。本文将单向航道的船舶交通组织规则和船货匹配原则引入NSGA-Ⅱ算法,并根据修正归一准则设计适应度函数,加入自适应交叉及变异概率,从而设计MOGA-HSR,算法步骤为步骤1~步骤7,具体流程如图1所示:

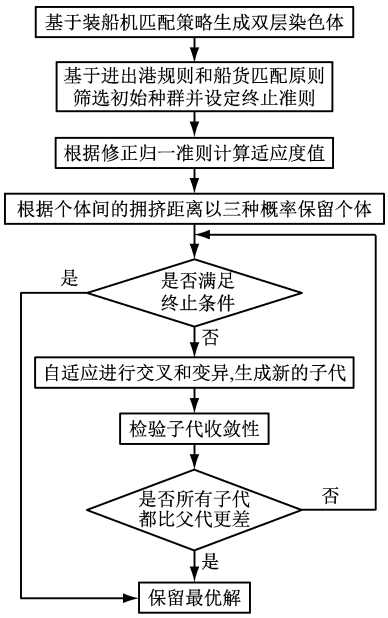

图1 MOGA-HSR流程图

步骤1:基于装船机匹配策略生成双层染色体,第一层染色体为船舶的进出港序列,第二层染色体为与各船舶相匹配的装船机编号。其中,第一条染色体是根据船舶申请进出港的时间先后对船舶进行编号构成的,双层染色体的数量为N'个,转入步

骤 2。

步骤 2:基于港口制定的船舶进出港规则、船货匹配原则对初始解进行筛选,去掉不符合规则的个体,并从中选择前 n' 个符合规则且性能较优的解作为初始种群,设定最大遗传代数为 m' 代,转入步骤 3。

步骤 3:为扩大种群多样性,并且便于在之后的步骤中对种群进行非支配排序操作,根据修正归一准则,对适应度值进行归一化处理并进行修正,具体表达式如式(26)和式(27)所示。其中,$\omega^2 \times \sum_i [\varphi_i(Z_1,Z_2)]^2$ 表示惩罚项,本文采用幂函数变换法对目标函数进行修正,以保证分母的非负性,转入步骤 4。

$$\Phi_1 = Z_1 \Big/ \left\{ Z_1 + \omega^2 \times \sum_i [\varphi_i(Z_1,Z_2)]^2 \right\} \tag{26}$$

$$\Phi_2 = Z_2 \Big/ \left\{ Z_2 + \omega^2 \times \sum_i [\varphi_i(Z_1,Z_2)]^2 \right\} \tag{27}$$

步骤 4:通过非支配排序,分别计算个体间的拥挤距离,在此基础上计算平均拥挤距离与最小拥挤距离的中间值,按照拥挤距离大小将个体分为 3 类,分别为拥挤距离大于平均值的个体、介于平均拥挤距离与中间值之间的个体、中间值与最小值之间的个体,依次以 $p_1 = 0.2$、$p_2 = 0.4$、$p_3 = 0.4$ 的概率保留这三类个体,转入步骤 5。

步骤 5:进行交叉和变异操作并产生子代,设计两个动态参数对交叉和变异概率进行控制,采用线性更新的方式更新每一个子代的交叉和变异概率。式(28)和式(29)分别为交叉和变异对应的更新公式,其中,n' 表示当前的代数,$n'_{\max}$ 表示最大的迭代代数,p_{cs} 和 p_{ms} 分别表示交叉和变异变化的初始概率值,p_{ce} 和 p_{me} 分别表示交叉和变异变化的终止概率值,$p_c(n)$ 和 $p_m(n)$ 分别表示当前的交叉和变异的概率值,转入步骤 6。

$$p_c(n) = p_{cs} - n' \times (p_{cs} - p_{ce}) / n'_{\max} \tag{28}$$

$$p_m(n) = p_{ms} + n' \times (p_{me} - p_{ms}) / n'_{\max} \tag{29}$$

步骤 6:返回步骤 3 和步骤 4,计算子代的序值和拥挤距离,并将计算结果与其父代的值进行比较,若生成的所有解决方案均比其相应的父代差,即为满足收敛准则,转入步骤 7,否则,从步骤 5 开始继续进行循环操作。

步骤 7:重复步骤 1 ~ 步骤 6,直到符合设定的终止条件时保留最优解。

3 仿真试验与分析

为验证 MOGA-HSR 求解船舶进出港计划的合理性、有效性、优越性,以黄骅港煤炭港区船舶进出港过程为例进行仿真试验。

黄骅港煤炭港区航道为单向航道,实行单进单出通航模式。煤炭港区概况如图 2 所示,一期堆场连通一期泊位,最小距离 640 m;二期堆场连通二期泊位,最小距离 690 m;三期、四期筒仓与四期堆场均连通三期、四期泊位,最小距离依次为 720 m、1 000 m。在试验初始阶段,泊位(图 2 中编号#1 ~ #17)状态如表 1 所示。根据黄骅港的实际生产情况,装船机(图 2 中编号 SL1 ~ SL13)的台时效能为:一期、二期工程装船机台时效能为 2 451 t/h;三期、四期工程装船机台时效能为 5 712 t/h。此外,根据煤炭港区实际情况,将本文的皮带传送速度设定为 5 m/s。

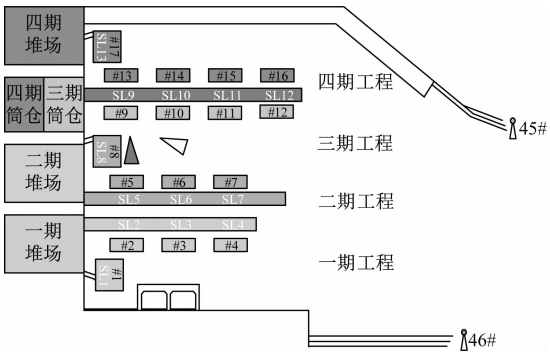

图 2 黄骅港煤炭港区示意图

表 1 泊位状态表

泊位编号	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17
忙闲状态	忙	闲	闲	闲	闲	忙	闲	闲	闲	闲	忙	闲	忙	忙	闲	闲	闲

基于某天黄骅港煤炭港区进出港的船舶数据设计 7 组仿真试验,各组试验的船舶数量依次为 15、20、25、30、35、40、45,每组船舶分别采用 4 种不同的求解方法在相同环境下运行 10 次,15 艘船舶的具体数据如表 2 所示。

在硬件环境为 Intel(R) Core(TM) i7-7500U CPU,2.70 GHz 主频,8 GB 内存的条件下开展上述试验。其中,CPLEX 软件版本为 12.6.3,采用分支定界法求解并设置运行最大时间为 3 600 s。MOGA-HSR 与 NSGA-Ⅱ在 R2016a 版本的 Matlab 中

运行,MOGA-HSR 与 NSGA-Ⅱ的算法参数均设置为:代沟0.9,最大遗传代数200代,内置pareto系数0.3,交叉概率区间[0.2,0.8],变异概率区间[0.002,0.09]。

3.1 船舶进出港计划合理性验证

采用 MOGA-HSR 对船舶基础数据进行求解,得到的15艘船舶进出港计划如表3所示,以该表为例对 MOGA-HSR 求得船舶进出港计划的合理性进行验证。根据黄骅港的实际情况,将每天的0时0分记为0时刻,并按照分钟累加计时,则一天内船舶的进出港组队时间窗依次为[0,360]、[361,720]、[721,1 080]、[1 81,1 440]。

表2 船舶数据

船舶编号	方向	吨位/t	煤种	锚地	泊位编号	申请时刻/min	船长/m	船宽/m	乘潮时间窗/min	航速/kn
1	进	29 167	精块4	1	#2	0	190	32	–	8.0
2	进	40 932	中硫石炭5000	2	#3	5	225	32	–	8.9
3	进	28 717	神混5500	2	#8	26	199	22	–	9.4
4	进	27 972	神混4500	1	#10	33	174	26	–	9.3
5	进	39 884	特低灰	3	#17	75	225	34	[150,700]	9.8
6	出	31 166	保德原煤	–	#7	289	190	32	[500,750]	8.6
7	出	29 097	外购石炭5000	–	#4	494	189	32	[720,900]	8.2
8	出	21 450	伊泰9	–	#13	586	160	24	–	8.2
9	出	38 431	神混5500	–	#12	788	225	32	–	9.3
10	出	24 530	神混4500	–	#15	805	190	30	–	9.4
11	出	39 026	特低灰	–	#17	860	225	32	–	9.4
12	进	29 131	外购5000	2	#5	1 012	190	33	[1 250,1 600]	9.0
13	进	19 611	伊泰9	1	#15	1 040	174	26	–	9.7
14	进	14 379	清车煤	1	#7	1 058	178	28	–	9.3
15	进	16 749	神优1	2	#12	1 070	173	24	–	9.8

表3 15艘船舶进出港计划表

船舶编号	进出港方向	进港时刻/min	预计离港时刻/min	实际离港时刻/min	离开航道时刻/min	装船机编号	装船机作业时间窗/min	装船时间/min	传送带运输时间/min
1	进	0	864	–	92	SL2	[150,864]	714	150
2	进	20	1 448	–	122	SL3	[446,1 448]	1 002	446
3	进	54	1 157	–	162	SL8	[454,1 157]	703	454
4	进	103	538	–	210	SL10	[244,538]	294	244
5	进	160	751	–	256	SL13	[332,751]	419	209
6	出	–	–	510	609	SL7	–	–	–
8	出	–	–	610	704	SL9	–	–	–
7	出	–	–	760	854	SL4	–	–	–
9	出	–	–	822	929	SL12	–	–	–
10	出	–	–	880	988	SL11	–	–	–
11	出	–	–	920	1 028	SL13	–	–	–
15	进	1 095	1 437	–	1 198	SL12	[1 261,1 437]	176	416
13	进	1 116	1 461	–	1 227	SL11	[1 255,1 461]	206	397
14	进	1 142	1 633	–	1 249	SL7	[1 281,1 633]	352	348
12	进	1 266	2 141	–	1 408	SL5	[1 428,2 141]	713	258

装船机作业分配验证:9号船与15号船分配的装船机序号相同,但9号船在822时刻开始出港,15号船在1 261时刻开始使用装船机,装船机作业时间区间不存在重合区段。经验证,船舶进出港计划表中的装船机作业时间均得到保证。

船舶安全保障验证:5号船为进港船舶,11号船为出港船舶,两艘船的指派泊位相同,但占用泊位的时间区间不同。经验证,泊位使用均得到保证。

船舶乘潮验证:5号船为进港船舶,其乘潮时间窗为[150,700],最终为其安排的进港时刻为160,5号船占用航道的结束时刻为256,满足乘潮需要。经验证,其他船舶乘潮进出港的时间区间均得到保证。

船舶组队验证:第一支进港船舶组队编号为[1,2,3,4,5],此队列中第一艘船舶从0时刻开始进港,256时刻最后一艘船舶结束进港,此时船舶的组队时间窗为[0,360]。第二支进港船舶组队编号为[15,13,14,12],此队列中第一艘船舶从1 095时刻开始进港,1 408时刻最后一艘船舶结束进港,此支进港队列在第四个时间间隔完成进港。第一支出港船舶组队编号为[6,8,7,9,10,11],此队列中第一艘船舶从510时刻开始出港,最后一艘船舶的开始出港时刻为920,结束出港时刻为1 028,在第二和第三个时间窗出港。经验证,其他船舶组队进出港的时间间隔也得到保证。

验证结果表明,本文提出的MOGA-HSR求解出的最优船舶进出港计划满足所建模型的约束条件,具有合理性。

3.2 算法有效性验证

将本文中的协调优化模型进行简化,使用CPLEX求解器,CPLEX的运行时间上限设置为60 min,各组求解结果如表4所示。

表4 MOGA-HSR与CPLEX求解结果对比

试验序号	船舶数量	MOGA-HSR			CPLEX		
		Z_1/min	Z_2/min	运行时间/min	Z_1/min	Z_2/min	运行时间/min
1	15	1 517	2 292	2.6	1 609	2 579	4.4
2	20	1 578	2 563	3.4	1 719	2 940	12.2
3	25	1 761	2 904	4.6	2 006	3 450	37.9
4	30	1 775	3 169	5.7	2 223	4 069	60.0
5	35	2 194	3 328	6.5	3 333	5 451	60.0
6	40	2 548	3 557	7.4	5 333	8 398	60.0
7	45	2 848	3 839	8.2	9 208	14 181	60.0

根据表4中MOGA-HSR与CPLEX的对比结果可知,船舶数量从15艘增加至45艘时,本文提出的MOGA-HSR依然能在9min内得到求解结果,验证了MOGA-HSR的有效性。

3.3 算法优越性分析

3.3.1 算法求解时间分析

各算法的求解时间如表5所示。根据表5可知,随着船舶数量的增加,各算法的求解时间均平稳增加,MOGA-HSR与NSGA-Ⅱ的求解时间差异不大。但根据图3中算法的收敛性对比可知,MOGA-HSR均在130代附近收敛,NSGA-Ⅱ均在180代附近收敛,MOGA-HSR的收敛性能更优,这是因为MOGA-HSR加入了筛选规则,并且采用了自适应交叉及变异操作,因此收敛速度更快,但所需的求解时间较长。此外,FCFS的求解时间在1 min左右的原因在于,FCFS不存在迭代优化的过程,只有一系列判断和累加步骤,因此其求解速度最快。

在求解时间方面,本文提出的MOGA-HSR与其他算法相比稍有不足,但差异并不明显,且其收敛性具有显著优势。

3.3.2 算法求解结果分析

表5中G_1、G_2均为差异(Gap)值,用于表示本文提出的MOGA-HSR与NSGA-Ⅱ、MOGA-HSR与FCFS分别在两个目标函数上的差异度。由表5中的各组试验数据可知,相比于NSGA-Ⅱ与FCFS、NSGA-Ⅱ与MOGA-HSR求解目标函数值的优势随船舶数量的增加而更加显著。船舶数量较少时,MOGA-HSR与其他两种方法求解的目标函数值差异较小,但随着船舶数量从15艘增加至45艘,各算法的目标函数值求解结果和Gap值均增大。当船舶数量为45艘时,MOGA-HSR求解的船舶占用航道的总时间为2 848 min,总等待时间为3 839 min,相同条件下比FCFS减少了60.2%的航道占用时间和53.2%的船舶等待时间。由此可见,MOGA-HSR

表 5　目标函数值求解结果

试验序号	船舶数量	MOGA-HSR			NSGA-Ⅱ					FCFS				
		Z_1/min	Z_2/min	求解时间/min	Z_1/min	G_1/%	Z_2/min	G_2/%	求解时间/min	Z_1/min	G_1/%	Z_2/min	G_2/%	求解时间/min
1	15	1 517	2 292	2.6	1 549	2.1	2 317	1.1	2.4	1 834	20.9	2 581	12.6	0.3
2	20	1 578	2 563	3.4	1 612	2.2	2 619	2.2	3.3	1 993	26.3	2 958	15.4	0.4
3	25	1 761	2 904	4.6	1 800	2.2	2 968	2.2	4.5	2 302	30.7	3 615	24.5	0.6
4	30	1 775	3 169	5.7	1 825	2.8	3 248	2.5	5.5	2 400	35.2	4 113	29.8	0.7
5	35	2 194	3 328	6.5	2 260	3.0	3 421	2.8	6.4	3 118	42.1	4 513	35.6	0.8
6	40	2 548	3 557	7.4	2 627	3.1	3 664	3.0	7.2	3 837	50.6	5 133	44.3	1.0
7	45	2 848	3 839	8.2	2 940	3.2	3 966	3.3	8.1	4 562	60.2	5 881	53.2	1.2
平均值		2 032	3 093	5.5	2 088	2.7	3 172	2.4	5.3	2 864	38.0	4 113	30.8	0.7

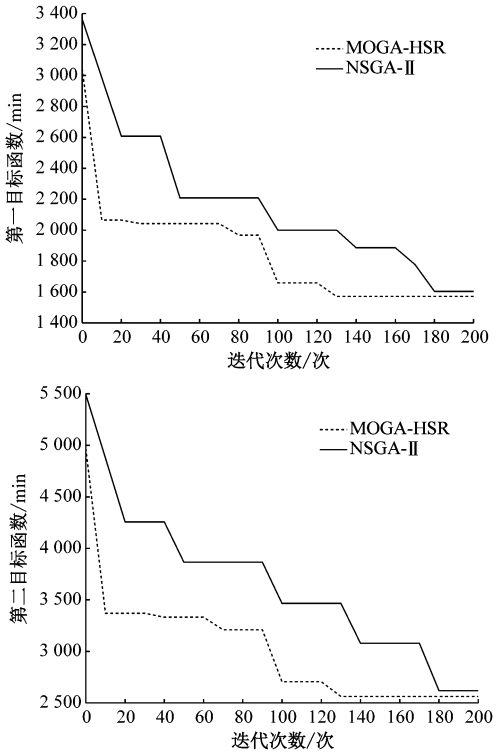

图 3　算法收敛性对比——以 20 艘船为例

的计算结果比其他算法更优,并且随着船舶数量的增加,MOGA-HSR 的优势更加明显,而 NSGA-Ⅱ和 FCFS 的求解质量随船舶数量增加迅速下降,这是因为与 NSGA-Ⅱ相比,MOGA-HSR 对初始解进行了筛选。此外,基于 FCFS 规则的算法仅根据船舶申请进出港的先后顺序进行调度,因此,随船舶数量的增加,得到的目标函数值也急剧增加。

综上所述,本文提出的 MOGA-HSR 收敛性能更好,且求得的目标函数值结果更优,能够在保留 NSGA-Ⅱ全局寻优特点的基础上提升解的质量,并弥补 NSGA-Ⅱ在求解时间方面的劣势。

4　结束语

本文研究了散货港口装船设备分配与船舶交通组织协调优化问题,通过构建以船舶总等待时间和占用航道时间最小为目标函数的船舶交通组织协调优化模型,优化了船舶进出港序列,降低了船舶在港等待时间,提高了船舶进出港效率。可为船舶交通服务(Vessel Traffic Services,VTS)中心安排下一阶段的船舶进出港计划提供参考,对推动绿色智慧港口的建设具有重要意义。

此外,本文根据所建协调优化模型的特点,设计了 MOGA-HSR。多组仿真对比试验的结果表明,MOGA-HSR 更适用于本文所建优化模型的求解,为设计解决此类问题的算法提供了新思路。

本文研究了确定性的装船设备分配与船舶交通组织协调优化问题,但未考虑实际中存在的不确定因素,如装船机的非正常作业情况等,下一步将研究考虑不确定因素的船舶交通组织优化问题。同时,为了提高求解速度,还需进一步研究新的求解算法。

参　考　文　献

[1]　中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2020:373-374.

[2]　胡光忠. 考虑能耗的散货码头泊位和卸船机联合调度研究[D]. 广州:暨南大学,2017.

[3]　吴山. 散货码头装卸作业线机械设备配置优化研究[J]. 化工设计通讯,2017,43(11):141.

[4]　PEREZ D, JIN J G. Integrated Dedicated Berth Allocation and Specialised Handling Equipment Assignment in Bulk Ports[J]. International Journal of Shipping and Transport Logistics, 2020, 12(6): 543-562.

[5]　宓为建,王郡娴,张晓华,等. 基于多目标遗传算法的

煤码头泊位与机械联合调度[J]. 上海海事大学学报,2016,37(2):46-52.

[6] 于跃. 进口散货港口泊位分配——卸船机调度集成优化[D]. 大连:大连海事大学,2017.

[7] GAO Z, SUN D F, ZHAO R, et al. Ship-Unloading Scheduling Optimization for a Steel Plant [J]. Information Sciences,2021,544.

[8] 冯鹏,郭子坚,姜影,等. 考虑装船机联机作业的煤炭出口码头装船作业调度优化[J]. 上海海事大学学报,2021,42(2):26-33.

[9] ZHANG X Y, LIN J, GUO Z J, et al. Vessel Transportation Scheduling Optimization Based on Channel-Berth Coordination [J]. Ocean Engineering, 2016, 112:145-152.

[10] ZHANG X Y, LI R J, CHEN X, et al. Multi-Object-Based Vessel Traffic Scheduling Optimisation in a Compound Waterway of a Large Harbour[J]. Journal of Navigation, 2018,1-19.

[11] 张新宇,王志强,邓志鹏. 黄骅港限制性双向航道船舶交通组织优化[J]. 中国航海,2020,43(4):1-7.

[12] JIA S, WU L X, MENG Q. Joint Scheduling of Vessel Traffic and Pilots in Seaport Waters[J]. Transportation Science,2020,54(6):1495-1515.

[13] JIA S, LI C L, XU Z. Managing Navigation Channel Traffic and Anchorage Area Utilization of a Container Port [J]. Transportation Science, 2019, 53 (3): 728-745.

[14] 郑红星,刘保利,邓春远,等. 单向航道散货港口船舶调度优化[J]. 运筹与管理,2018,27(12):28-37.

[15] 牛猛,王钟逸,李亚军,等. 考虑使用优先权的泊位分配和船舶调度集成优化[J]. 高技术通讯,2020,30(9):972-981.

[16] 张笑菊,曾庆成,陈子根,等. 基于同贝同步装卸的岸桥与集卡联合调度优化模型[J]. 上海交通大学学报,2019,53(2):188-196.

[17] NIU B, XIE T, TAN L J, et al. Swarm Intelligence Algorithms for Yard Truck Scheduling and Storage Allocation Problems [J]. Neurocomputing, 2016, 188: 284-293.

[18] 梅益群,韩晓龙. 考虑泊位偏好和岸桥移动的泊位岸桥联合调度[J/OL]. 计算机工程与应用:1-10[2021-05-08]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/11. 2127. TP. 20210207. 1324. 012. html.

[19] YANG H Y, WANG L, XU Q, et al. Collaborative Optimization of Container Allocation and Yard Crane Deployment Based on Truck Appointment System[C]// Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018,1074(1):012185.

[20] 赵姣,叶然然. 集装箱码头岸吊、集卡和场吊集成调度的建模与求解[J/OL]. 工业工程与管理:1-13[2021-03-18]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/31. 1738. T. 20200618. 1400. 004. html.

[21] 王小寒,贾玉林,蔡佳芯,等. 铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化[J/OL]. 控制与决策:1-10[2021-03-05]. https://doi. org/10. 13195/j. kzyjc. 2020. 0597.

[22] THANOS E, TOFFOLO T, SANTOS H G, et al. The Tactical Berth Allocation Problem with Time-Variant Specific Quay Crane Assignments [J]. Computers & Industrial Engineering,2021,155:107168.

[23] 高钰珊,陈宁. 集装箱港口多资源协同调度优化模型[J]. 物流技术,2020,39(6):64-67.

[24] 郑红星,尹昊,曹红雷,等. 考虑潮汐影响的离散型泊位和岸桥集成调度[J]. 运筹与管理,2017,26(6):167-175.

[25] 陈仙桃. 面向远洋运输业的船货匹配方法研究及应用[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.

[26] 张新宇,李瑞杰,林俊,等. Y形分叉复式航道船舶交通调度优化建模[J]. 大连海事大学学报,2018,44(2):1-8.

(上接第145页)

[11] 胡甚平, 黄常海, 张浩. 基于云模型的海上交通系统风险蒙特卡罗仿真[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(4): 20-26.

[12] 陈昌源, 戴冉, 冯纪军,等. 改进灰色模型在海上交通综合安全指数预测应用[J]. 中国航海, 2017, 40(1): 58-63.

[13] 乔正义. 对宁波港船舶交通安全评价的研究分析[D]. 大连:大连海事大学, 2014.

[14] 张清. 锚地水域通航风险研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2012.

[15] 李道科, 唐寒秋, 董斌,等. 台湾海峡两岸客滚船通航风险评估[J]. 中国航海, 2012, 35(2): 64-67.

[16] 罗福才, 林焰, 王运龙. 基于综合安全评估的渔船安全风险分析[J]. 大连海事大学学报, 2011, 37(2): 51-53.

[17] 轩少永, 黎法明, 胡甚平,等. 广州港水域船舶航行风险评估[J]. 中国航海, 2013, 36(4): 96-99.

[18] ZAMAN M B, KOBAYASHI E, et al. Risk of Navigation for Marine Traffic in the Malacca Strait Using AIS [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2015, 14: 33-40.

[19] 杨立波, 王旺, 陈厚忠,等. 海上交通安全监管水域风险判断模型[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015, 39(2): 316-319.

[20] ISO/IEC Guide51-2014. Safety Aspects-Guidelines for Their Inclusion in Standards[S]. 2014.