

基于反向学习 BWO 算法的集装箱 港口泊位分配优化方法

李明伟¹, 李庆勇², 杨中仪³, 李向阳¹

(1. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451;

3. 哈尔滨工程大学 经济管理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:随着全球航运的快速发展,港口货运量与日俱增,船舶拥堵、延误现象逐渐严重,港口的运行也受到了严重的制约,因此本文针对当前港口货运量激增、船舶拥堵、污染加重的问题,提出了一种以船舶实际在港时间与期望在港时间差值最小、运营成本和污染排放最低为目标函数,以时间、空间、机械设备等限制为约束条件的港口调度规划(TB&P)模型;为了求解 TB&P 模型,对基础白鲸算法(BWO)提出改进,设计一种反向学习白鲸算法(OBWO)对 TB&P 模型进行求解;通过港口实例数据验证优化模型和改进算法的可行性与优越性。验证结果表明,建立的模型相较于传统模型,能够降低船舶的延误程度 30% 以上,同时减少港口内水域的污染;提出的求解算法与本文选取的算法相比,求解精度提高 40% 以上。

关键词:港口调度;多目标优化;BWO 算法;反向学习

中图分类号:U658.1

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.04.010

A container port berth allocation optimization method based on the reverse learning BWO algorithm

LI Mingwei¹, LI Qingyong², YANG Zhongyi³, LI Xiangyang¹

(1. College of Ship Building Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin, 300451; 3. College of Management Science and

Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract: With the rapid development of global shipping, port cargo volumes are increasing significantly, leading to growing issues of vessel congestion and delays, which in turn severely constrain port operations. In response to the challenges posed by surging cargo volumes, ship congestion, and aggravated pollution, this paper proposes a Time-Berth & Pollution (TB&P) model. The model takes the difference between the actual and expected time in port as the objective function, aiming to minimize operating costs and pollution emissions, subject to constraints related to time, space, and machinery/equipment. To solve the TB&P model, an improved version of the basic Beluga Whale Optimization (BWO) algorithm is developed, termed the Opposition Learning Beluga Whale Optimization (OBWO) algorithm. The feasibility and superiority of the proposed model and improved algorithm are verified through case data from a port. Results demonstrate that, compared with traditional models, the established model significantly reduces the extent of ship delays and mitigates water pollution in the port area. Furthermore, the proposed OBWO algorithm exhibits enhanced stability and accuracy relative to other selected algorithms.

收稿日期:2024-10-22

基金项目:黑龙江省自然科学基金重点项目(JJ2022ZD0103)资助

通信作者:李明伟(1984—),男,教授,研究方向为智慧航道、智慧孪生建造及运维。E-mail: limingwei@hrbeu.edu.cn

引用格式:李明伟,李庆勇,杨中仪,等.基于反向学习 BWO 算法的集装箱港口泊位分配优化方法[J].中国航海,2025,48(4):84-92.

LI M W, LI Q Y, YANG Z Y, et al. A container port berth allocation optimization method based on the reverse learning BWO algorithm [J]. Navigation of China, 2025, 48(4): 84-92. (in Chinese)

Key words: port dispatching; multi-objective optimization; BWO algorithm; reverse learning

船舶调度与泊位分配是港口管理中的重要环节,在满足港口管理规则的前提下,合理的泊位分配可以大幅提高港口的运行效率^[1],在先进技术的推动下,国内多个大型港口具备了智能化的能力,实现了港口生产调度指挥的高效运行^[2]。

船舶调度中的一大重点问题是如何合理有效地分配泊位,在泊位的分配与船舶的调度方面,国内外学者已经做出了丰富的研究。CHEIMANOFF 等^[3]针对海港集装箱码头泊位与装卸机械分配问题,构建了一种计入到港船舶的时间不确定性的规划模型,并针对求解问题提出了一种混合整数线性公式(MILP)和可变邻域搜索(VNS)方法,试验方案表明该方法尤其针对大型集装箱港口泊位分配可以提供一个较为优质的解决方案;LU 等^[4]将集装箱港口的规划与作业进行整合,在船舶到达时间不确定、装卸集装箱数量不确定的情况下,共同优化战略层面的规划和战术层面的泊位堆场空间分配。丁可等^[5]基于已有的船舶进出港调度的研究成果,提出了贪心-遗传算法(G-GA)模型。

船舶调度中的另一大痛点则是船舶的拥堵延误情况,在减少船舶延误方面,国内外学者也做了较多的研究,ZHEN 等^[6]基于对称泊位布局的旋转装载模式(SBLRLM)和压载限制等新问题,提出了一种混合整数规划(MIP)模型,以共同决策,使所有船舶的总迟到率最小化。王宁宁等^[7]通过优化调度模型和算法处理,动态地产生泊位调度方案,从而最大化提高港口作业的效率 and 资源平衡,提高船舶的满意度和降低延误水平。JAKUB 等^[8]考虑了算法运行时限制下泊位分配问题(BAP)的算法选择,为特定的目标函数安排船舶泊位,提出了一种新的方法(ASP)来选择算法组合,该算法组合将解决所考虑的BAP实例并返回良好的解决方案。CERESER 等^[9]针对泊位与岸桥分配问题,提出了一个混合整数线性规划(MILP)公式,旨在最大限度地减少等待时间和船舶的处理时间。

目前针对泊位分配、船舶调度等方面的研究较为丰富,能够获得较为优质的调度优化方案,但对于如何衡量船舶在港口中的满意程度以及拥堵状况,并针对船舶拥堵、作业超时等一系列衍生问题提出相应的解决方案,上述文献并未详细提及,还需要进一步的研究。

因此,为了更准确描述船舶的延误程度,本文首次尝试引入船舶期望在港时间来衡量船舶的在港时间长短和拥堵延误程度,并引入时间惩罚因子作为

超时惩罚,以减少当前港口运营过程中船舶延误加剧的现象,同时考虑港口作业过程中,港方利益、船东利益和污染排放的平衡问题,建立一种港口调度规划(Time-Berth&Pollution, TB&P)模型,构建了一种基于基础白鲸算法(Beluga Whale Optimization, BWO)的TB&P模型的求解方法,最后基于码头实例测试TB&P模型与反向学习白鲸算法(Opposition learning Beluga Whale Optimization, OBWO)的可行性和优越性。

1 TB&P 模型的建立

根据船舶的作业流程,船舶在港口中的停留时间一般分为三个主要阶段:进出航道和离靠泊的流转阶段、装卸作业阶段、停泊等待阶段。从船舶接到调度指令直至船舶完全离港,可视为一个完整的调度过程,如图1所示。

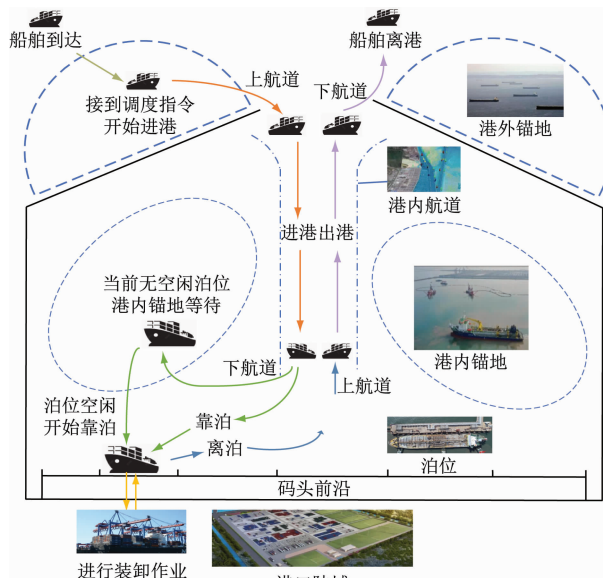


图1 船舶进港作业

Fig. 1 Ship entry operation diagram

本文对每个作业环节设置期望在港时间,期望在港时间是指船舶按照正常作业顺序,在没有任何其他船舶影响以及机械足够的情况下,完成每个子环节所花费的时间。

1.1 模型的假设条件与符号

1.1.1 模型假设条件

为尽量符合港口的实际作业情况,本文尝试从船舶、泊位、岸桥等方面作出以下假设:

- 1) 码头泊位为离散型泊位;
- 2) 到港船舶基本信息已知;
- 3) 所有船型均为标准集装箱船型;

4) 船舶分配泊位已知且固定,且船舶没有移泊要求;

5) 在船舶进港作业全过程中,岸桥的作业效率保持不变;

6) 相邻泊位岸桥移动距离相同;

7) 岸桥调度过程中不影响其他船舶的装卸效率。

1.1.2 参数与符号

TB&P 模型参数按集合变量、输入变量、从属变量、0-1 决策变量分类设置如下(见表1~表4)。

表1 输入变量

Tab.1 Input variables

变量	变量说明
T_{Ai}	船舶 i 到达时刻
T_{Di}	船舶 i 期望在港时间
T_{Ri}	船舶 i 实际在港时间
V_{ei}	船舶 i 在拖轮协助下的满载速度
V_{fi}	船舶 i 在拖轮协助下的空载速度
L_{Bj}	泊位 j 长度
G	超时赔付系数
γ_T	时间-成本折算系数
C_p	岸桥移动单位长度的成本
C_{im}	船舶 i 最大可接受岸桥数
C_{id}	船舶 i 期望可接受岸桥数
L_{Vi}	船舶 i 长度
V_{ci}	船舶 i 载箱量
C_w	岸桥装卸效率
D_{WTi}	船舶 i 吨位
β	时间惩罚系数
P	最大在港延迟系数
N	岸桥移动步长
L_c	航道长度
L_{B0j}	泊位 j 到航道口的距离

表2 集合变量

Tab.2 Collection variables

变量	变量说明
V	船舶集合, ($V = \{1, 2, 3, \dots, v\}$)
B	泊位集合, ($B = \{1, 2, 3, \dots, b\}$)
C	岸桥集合, ($C = \{1, 2, 3, \dots, c\}$)
T	时间集合, ($T = \{1, 2, 3, \dots, t\}$)
V_o	船舶进港顺序集合
V_B	船舶靠泊泊位集合
V_C	船舶分配岸桥集合

表3 0-1 决策变量

Tab.3 0-1 Decide variables

变量	变量说明
J_i	当在港时间与期望时间比值超过 P 时,为 1
J_p	当在港时间与期望时间比值超过 G 时,为 1
x_{ijk}	船舶 i 在 j 泊位被第 k 个服务时,为 1
C_{int}	岸桥 n 在 t 时刻为船舶 i 服务时,为 1
b_{ji}	泊位 j 在 t 时刻被船舶 i 占用时,为 1
α_{it}	船舶 i 在 t 时刻在港,为 1
m_{nbb^*}	岸桥 n 从 b 泊位移动至 b^* 时,为 1

表4 从属变量

Tab.4 Dependent variables

变量	变量说明
T_{Si}	船舶 i 接到调度指令的时刻
T_{Ci}	船舶 i 从港外锚地行驶到航道口的时刻
T_{wc}	船舶 i 等待到达航道安全距离的时刻
T_{u1i}	船舶 i 进港时的上航道时刻
T_{ui}	船舶 i 进港时在航道行驶的时间
T_{u2i}	船舶 i 进港时的下航道时刻
T_{wb}	船舶 i 在港内锚地等待靠泊的时间
T_{stay}	船舶 i 产生污染的时间
T_{ubi}	船舶 i 从航道出口到泊位 b 所需的时间
T_{b1i}	船舶 i 开始靠泊的时刻
T_{bi}	船舶 i 靠泊所需时间
T_{b2i}	船舶 i 靠泊完成的时刻
T_{w1i}	船舶 i 开始作业的时刻
T_{wi}	船舶 i 作业的时间
T_{w2i}	船舶 i 作业完成的时刻
T_{l1i}	船舶 i 开始离泊的时刻
T_{li}	船舶 i 离泊所需的时间
T_{l2i}	船舶 i 离泊完成的时刻
T_{d1i}	船舶 i 离港时的上航道时刻
T_{d2i}	船舶 i 离港时的下航道时刻
T_{Li}	船舶 i 完全离港的时刻
C_k	当前泊位 k 拥有的岸桥台数
N	岸桥移动步长

1.2 模型的目标函数确定

港方利益、船方利益和环保要素是港口运营调度中需要考虑的核心问题。为保证码头的运营效率

和可持续发展,平衡三者的相互关系,本文构建以在港时间与期望时间之差最小、额外赔付成本最少、污水排放量最低作为目标函数的 TB&P 模型。TB&P 模型的目标函数可由下式确定:

$$F = \min(\xi_1 F_1 + \xi_2 F_2 + \xi_3 F_3) \quad (1)$$

式(1)中: F 为总目标函数, F_1 、 F_2 、 F_3 为三个子目标函数, ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 为各子目标函数的权重系数。

为满足港口在不同时期的运营需求,本文尝试设置各子目标函数的权重值 ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 ,在不同时期对相应的指标加以特别关注,权重调节因子应满足式(2):

$$\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 1 \quad (2)$$

1.2.1 子目标函数 F_1 的确定

在模型目标函数 F_1 中,本文考虑设置最大时间迟滞系数 P 来衡量船舶在港的时间长短,时间迟滞程度即期望在港时间与实际在港时间的比值,当超出最大时间迟滞系数 P 后,引入时间惩罚系数 β 对超出部分进行惩罚,并把实际在港时间与期望在港时间的差值、时间超出部分的惩罚结果作为第一个目标函数 F_1 ,并由下式确定:

$$F_1 = \min \sum_{i=1}^n \left[(T_{Ri} - T_{Di}) + \beta \left(\frac{T_{Ri}}{T_{Di}} - P \right) J_i \right] \quad (3)$$

式(3)中: F_1 为第一个子目标函数, T_{Ri} 代表 i 号船舶的实际在港时间, h; T_{Di} 代表 i 号船在理想状态下的期望在港时间, h; β 为时间惩罚系数,这里取 0.25, P 为最大时间延迟系数,取值根据世界各国主要港口平均在港时长与我国主要港口在港时长对比确定,目前世界各主要港口船舶在港时长为我国的 1.06 ~ 3.21 倍不等; J_i 为 0-1 变量。 T_{Ri} 计算方式如下:

$$T_{Ri} = T_{L2i} - T_{Si} \quad (4)$$

式(4)中: T_{L2i} 为 i 号船舶的离港时间, T_{Si} 为船舶 i 开始调度的时间。

1.2.2 子目标函数 F_2 的确定

本文主要考虑两方面的运营成本:码头前沿岸桥的移动成本、超出一定时间保证率所赔付船方的经济成本,并将这两部分之和作为目标函数 F_2 :

$$F_2 = \min \left[\sum_{i=1}^n \gamma_{Ti} \left(\frac{T_{Ri}}{T_{Di}} - G \right) J_p + N C_p \right] \quad (5)$$

式(5)中: F_2 为第二个目标函数,万元;考虑到不同船型的延误成本有所不同,因此设置 γ_{Ti} 为 i 号船的时间-经济折算系数,其数值根据船型确定; G 为赔付系数; C_p 单个岸桥移动一个步长所产生的成本。 N 为岸桥移动步长; J_p 、 $m_{(nbb)^*}$ 为 0-1 变量,计算方式如式(6)。

$$N = \sum_{b \in B} \sum_{n \in C} m_{nbb}^* \quad (6)$$

1.2.3 子目标函数 F_3 的确定

船舶污染的主要污染物有含油污水、生活污水、船舶垃圾三类;由于港口内水域流动性较差,生态环境较为脆弱,因此 TB&P 模型考虑船舶在作业过程中在码头前沿水域产生的含油污水,并将其作为最终的优化目标 F_3 ,可由下式确定:

$$F_3 = \sum_{i \in v} \left(\frac{T_{wi}}{D} W_i \right) \quad (7)$$

式中: F_3 为第三个目标函数, kg; T_w 为船舶作业时间; D 为一天的时间,取 24 h; W_i 为船舶 i 单位时间污水产生速率, t/d,应根据下式确定:

$$W_i = \frac{2 \times (0.6 \times E + 35)}{24 \times D_{WT}} \quad (8)$$

式中: E 为船舶主辅机总功率, kW; D_{WT} 为船舶总吨位, t。

1.3 模型的约束条件确定

为保证 TB&P 模型符合实际情况,确定约束条件如下:

$$T_{Ai} \leq T_{Si} \quad (9)$$

$$T_{w1i} \geq T_{u2i} \quad (10)$$

$$T_{wi} = V_{Ci}/C_w \sum_{n \in N} \sum_{i \in v} C_{int} \quad (11)$$

$$T_{1i} \geq T_{w2i} \quad (12)$$

$$T_{li} \geq T_{d2i} \quad (13)$$

$$\sum_{j \in B} \sum_{i \in V} b_{ij} \leq b \quad (14)$$

$$LV_i b_{ij} \leq L_{Bj} \quad (15)$$

$$\sum_{n \in C} C_{int} \leq C_{im} \quad (16)$$

$$\sum_{i \in v} \sum_{i \in T} \alpha_{ii} = v \quad (17)$$

$$\sum_{n \in c} C_{int} \leq c \quad (18)$$

$$\sum_{i \in v} \sum_{j \in b} x_{ijk} = v \quad (19)$$

$$T_{ul,i+1} \geq T_{uli} + 6L_{Vi}/v_{ii} \quad (20)$$

$$T_{dl,i+1} \geq T_{dli} + 6L_{Vi}/v_{ii} \quad (21)$$

约束(9)表示船舶到达港外锚地的时间早于开始调度的时间;约束(10)表示开始作业时间晚于靠泊完成时间;约束(11)表示作业完成时刻的计算方式;约束(12)表示开始离泊的时刻不能早于作业完成的时刻;约束(13)表示完成作业后船舶离开港口的时刻不能早于离泊的时刻;约束(14)表示同一时刻正在使用的泊位数量不能超过港口所拥有的泊位最大数量;约束(15)表示当船 i 在 j 泊位停靠时,船长不能超过泊位长度;约束(16)任何时刻为 i 船服务的岸桥总数不能超过船舶所能接受的最大数量;

约束(17)表示所有船舶在港次数只有1次且不考虑重复作业;约束(18)表示同时工作的岸桥数量不能超过港口拥有岸桥数量;约束(19)表示船舶*i*在泊位*j*上靠泊且被服务的次数只有一次;约束(20)表示进港时航道内两船安全距离约束;约束(21)表

示出港时航道内两船安全距离约束。

1.4 模型的从属变量确定

本文根据港口作业的实际流程,结合变量关系,确定从属变量,流程如图2所示。

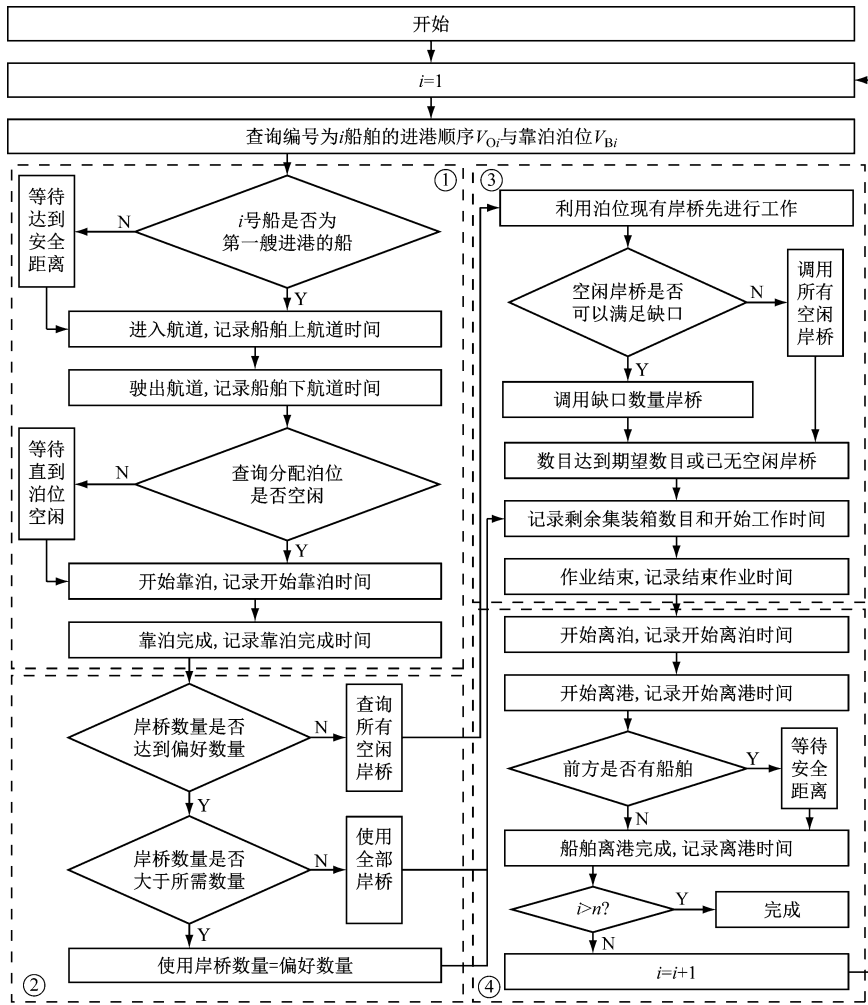


图2 从属变量确定流程图

Fig. 2 Dependent variable determination flowchart

2 TB&P 模型求解方法

TB&P 模型的求解是一个典型的 NP-Hard 问题,此类问题一直是研究的热点方向,但受制于问题本身的复杂性和多元性,其求解效果有待进一步提高。随着计算机技术的提高,考虑到群智能优化算法在解决优化问题方面具有较好表现^[10],特别是 BWO 算法在求解此类问题时具有较好的精度和稳定性,因此本文尝试采用新型群智能优化算法 BWO 对 TB&P 模型进行求解。但经过实际测试发现, BWO 算法在求解 TB&P 模型时初始解的质量有待改进,且较容易陷入局部最优^[11],因此本文尝试改进 BWO 算法,以获得 TB&P 模型的更优质解。

2.1 OBWO 算法种群初始化方法

BWO 算法由 CHANG 等^[12]于 2022 年提出,是一种通过模拟成年白鲸生活行动的新兴仿生多目标优化算法。本文在文献^[12]的基础上,基于反向学习策略^[13],设计 OBWO 算法,限于篇幅,这里只列出改进的部分。

基于反向学习策略初始化种群的基本思路为:首先在可行域内产生 N 个初始解,再对每个初始解生成对应的反向解,更新公式如下:

$$O_{Pi} = K(X_{\min d} + X_{\max d}) - X_i \quad (22)$$

式中: K 为分布在 $[0, 1]$ 之间的随机数, O_{Pi} 为初始解 X_i 所对应的反向解, $X_{\max d}$ 和 $X_{\min d}$ 分别表示所有初始解中第 d 维向量的最大值与最小值。

种群初始化与反向解生成完毕后,将二者合并

为序列长度为 $2N$ 的解集合,对每个解求解适应度函数值并进行排序,选取适应值为前 N 个的较优的解作为初始种群,完成种群的初始化。OBWO 算法的种群探索、开发和模拟鲸落阶段均与文献[13]保持一致。

2.2 OBWO 算法编码规则

OBWO 算法的优化变量为 v 艘船的进港次序 (V_{O_i})、靠泊泊位 (V_{B_i});为匹配 OBWO 算法的优化特性和变量表达,构造优化变量的编码矩阵,每一个矩阵即为一条白鲸个体,矩阵内实数均为整数。具体编码形式如表 5 所示。

表 5 OBWO 算法个体 n 编码规则

Tab.5 Encoding for individual n in the OBWO

到港船舶编号	进港次序 V_{O_i}	靠泊泊位 V_{B_i}
	$Beluga(n,1,;)$	$Beluga(n,2,;)$
1	2	2
2	3	2
:	:	:
13	9	5
14	11	3

3 实例研究

为验证 TB&P 模型与 OBWO 算法的有效性和优越性,本文基于集装箱码头实际数据进行实例研究,验证二者在实际应用中的可靠性与实用性。

3.1 实例数据

本次实例以我国北方某大型港口集装箱港区为例,结合来船实际,设置参数如表 6 所示。

表 6 泊位信息

Tab.6 Berth Information 单位:m

编号	长度	水深	航道口距离
1	200	25	600
2	300	25	500
3	400	30	400
4	400	30	400
5	400	30	500
6	400	30	600

到港船舶以 14 艘船为一组,如表 7 所示。

3.2 TB&P 模型有效性分析

3.2.1 期望在港时间与时间惩罚因子有效性分析

为了探求时间惩罚因子对 TB&P 模型优化结果表现的影响,本文考虑设置模型 A 作为对比。模型

A 与 TB&P 模型相比,将船舶总在港时间设置为目标函数 F_1 ,其余与原模型均保持一致,以最后的实际在港时间作为对比标准,试验结果如表 8 所示。

表 7 船舶信息

Tab.7 Ship Information

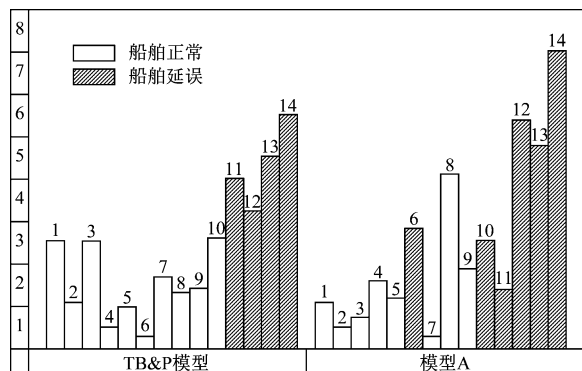
船舶编号	吨级/t	船长/m	吃水/m	载箱/TEU	C_p	C_m
1	3 000	106	5.8	350	1	2
2	20 000	183	10.5	1 500	2	3
3	30 000	241	12	3 000	3	4
4	50 000	295	13	5 500	3	6
5	70 000	300	14	6 500	6	8
6	10 000	141	8.3	1 000	2	3
7	10 000	141	8.3	1 000	2	3
8	50 000	293	13	5 500	4	6
9	70 000	299	14	6 000	6	8
10	30 000	241	12	3 000	3	4
11	30 000	241	12	3 000	3	4
12	20 000	183	10.5	1 500	2	3
13	50 000	280	13	5 000	4	6
14	50 000	295	14	6 500	4	6

表 8 两种模型对比数据

Tab.8 Comparative data of the two models

船舶编号	TB&P 模型			对比模型 A		
	V_{O_i}	V_{B_i}	T	V_{O_i}	V_{B_i}	T
1	6	2	63.76	7	2	27.38
2	7	6	27.36	3	3	12.79
3	9	3	63.61	1	5	18.62
4	1	4	12.85	8	4	40.14
5	12	6	24.77	14	3	29.9
6	5	6	7.33	11	1	70.99
7	4	6	42.4	2	4	7.33
8	13	6	33.25	12	4	103.06
9	11	5	35.68	6	4	47.19
10	2	5	65.33	4	4	63.91
11	3	4	100.58	5	5	35.07
12	8	2	81.34	9	5	134.88
13	10	5	113.61	10	3	119.86
14	14	5	138.12	13	3	175.71
合计			809.99			886.83

由表8可以看出, TB&P模型在船舶总在港时间方面相较于模型A减少了76.84 h, 同比下降8.7%。若根据本次计算结果, 将产生赔付, 即 $G > 1.8$ 的情况视为船舶延误(取值仅为测试使用, 具体值需根据实际情况确定), 则两种模型的船舶在港时间分布图如图3所示, 其中一个时间窗格为25 h。



注: 柱状上方数字为船舶编号。

图3 两种模型船舶在港时间分布

Fig. 3 Time distribution map of two models ships in port

通过图3可知, TB&P模型相比模型A在延误船舶数量方面由6艘减少至4艘, 同比下降33.3%。可见, 引入时间惩罚因子后, 制定的调度方案更加节省时间, 并且能在一定程度上减少船舶延误的状况。

3.2.2 TB&P模型权重值有效性分析

本文尝试引入了目标函数权重因子 ξ , 通过改变每个目标函数的权重值来改变优化侧重点。为验证子目标函数权重值对TB&P模型的影响, 本文设置了三组权重组合进行仿真试验, 如表9所示。

表9 权重系数取值及应用情形

Tab. 9 Specific gravity coefficient and its application

应用情形	情景描述	ξ_1	ξ_2	ξ_3
应用情形 I	降低船舶的逗留缓解船舶延误情况, 提高船东的满意度。	0.8	0.1	0.1
应用情形 II	降低因船舶延误产生的额外成本, 提高港口利益。	0.1	0.8	0.1
应用情形 III	减少船舶等待过程和作业过程中的污水排放, 保护港内海水水质。	0.1	0.1	0.8

按上述三组权重系数分别取值进行计算, 在其他条件均相同的情况下, 计算结果如图4所示。三种应用情形的时间、成本分布如图5~图7所示, 其

中, 横坐标代表船舶编号, 纵坐标代表在港时间, 单位为h。

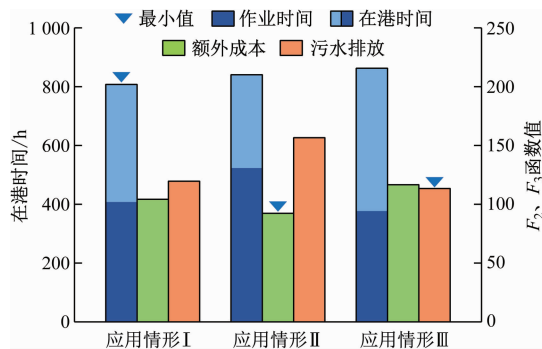


图4 三种应用情形的计算结果

Fig. 4 The calculation results of three application cases

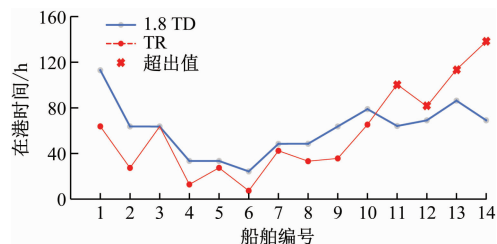


图5 应用情形 I 时间-成本分布

Fig. 5 Application Case I time-cost profile

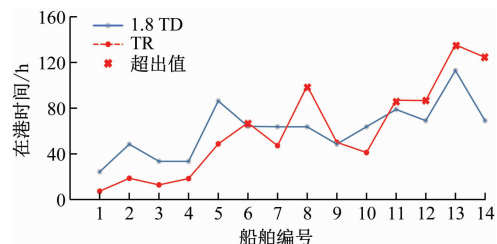


图6 应用情形 II 时间-成本分布

Fig. 6 Application Case II time-cost profile

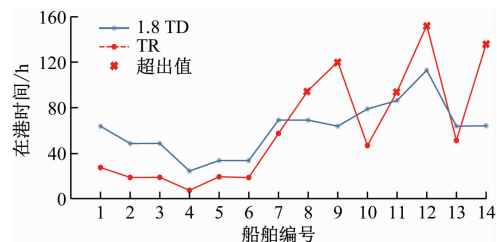


图7 应用情形 III 时间-成本分布

Fig. 7 Application Case III time-cost profile

由应用情形 I 可以看出, 相较于应用情形 II、应用情形 III, 通过提高权重系数 ξ_1 的值, 船舶的实际在港时间分别减少了4.7%、6.2%, 同时污染排放量、额外成本也均有所增加。由图5~图7的结果可以看出, 这是因为应用情形 I 下的调度方案, 通过优化组合船舶的进港顺序和泊位分配, 牺牲了一部分船舶的在港时间, 使得大多数船舶的在港时间处于较低水平。

由应用情形 II 可以看出,相较于应用情形 I、应用情形 III,通过提高权重系数 ξ_2 的值,港口运营的额外成本分别减少了 11.5%、20.9%,这是因为应用情形 II 下的调度方案为减少额外成本,产生了更少的岸桥调度次数,同时由图 6 可知,应用情形 II 延误船舶的赔付水平较其他两种应用情形更低,因此产生了更少的额外赔付成本,总额外成本为三种应用情形中最低。

由应用情形 III 可以看出,相较于应用情形 I、应用情形 II,通过提高权重系数 ξ_3 的值,码头前沿的污水排放分别减少了 5.2%、27.6%。由图 4 可以看出,这是由于应用情形 III 下的调度方案通过优化船舶的进港顺序与泊位分配,使得作业时间最短,因此在码头前沿产生的污染最少。

综上所述,由三种应用情形下的结果可以看出,本文通过增加子目标函数的权重值来降低子目标函数值的尝试是有效的。当重点关注某一指标时,该指标下的目标函数可以获得较好的结果,其他指标的目标函数值虽有所上升,但尚在可接受的范围内。

3.3 OBWO 求解算法优化有效性分析

为评估本文提出的 OBWO 算法在求解 TB&P 模型的表现,本文选用在港口优化调度领域应用比较广泛的粒子群优化算法(PSO)^[14]、模拟退火算法(SA)^[15]对 TB&P 模型进行求解,同时选用基础 BWO 算法进行对比计算,旨在验证算法改进有效性。四种算法各 5 次计算结果的平均迭代曲线如图 8 所示。

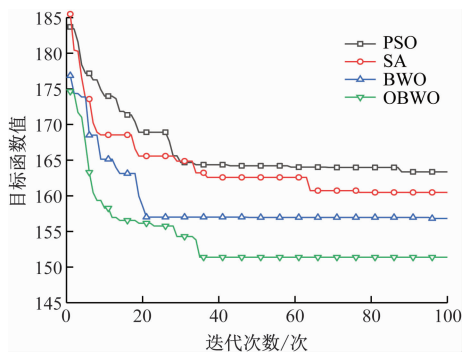


图 8 算法平均收敛曲线

Fig. 8 The algorithm averages the convergence curve

由图 8 迭代曲线可以看出,在求解 TB&P 模型时,相较于 SA 与 PSO 算法,BWO 算法收敛速度较快,可以在第 20 代左右获得更为优质的解;OBWO 算法较 BWO 算法相比,收敛速度稍慢,约在 30 代左右收敛,但解的质量较 BWO 大幅提高,因此说明本文引入反向学习机制可以提高种群的质量,获得更为优质的解。

4 结束语

1) TB&P 模型设置多个目标函数,能够更好地实现时间、经济和环境的综合相对最优,平衡三者的相互关系,较好地保证了码头的运营效率和可持续发展。

2) TB&P 模型设置了各目标函数的权重值,可以实现对当前重要指标 5% 以上的改进幅度,同时其他指标的劣化程度也在可接受的范围内。因此 TB&P 模型可以通过调节权重,满足不同工况下的相对较优方案的制定。

3) 与对比算法相比,本文提出的 OBWO 算法在求解 TB&P 模型时,能够获得更为优质的解,说明本文提出的求解算法具有更好的性能。利用 TB&P 模型与改进后的算法,能够得到合理、高效、绿色的船舶调度方案,有效提高码头前沿的运行效率,为水运事业提供新思路。

参 考 文 献

- [1] 张新宇,林俊,郭子坚,等. 基于模拟退火多种群遗传算法的港口船舶调度优化[J]. 中国航海,2016,39(1):26-30.
ZHANG X Y, LIN J, GUO Z J, et al. Vessel scheduling optimization based on simulated annealing and multiple population genetic algorithm [J]. Navigation of China, 2016,39(1):26-30. (in Chinese)
- [2] 俞晓帆,尹泉,傅晨娟,等. 港口智能调度系统的建设和应用[J]. 中国水运,2020(6):55-58.
YU X F, YIN X, FU C J, et al. Construction and application of port intelligent dispatching system [J]. China Water Transport,2020(6):55-58. (in Chinese)
- [3] CHEIMANOFF N, FONTANE F, KITRI M N, et al. Exact and heuristic methods for the integrated berth allocation and specific time-invariant quay crane assignment problems [J]. Computers and Operations Research, 2022, 141: 105695.
- [4] LU Z, DAN Z G, SHUAIAN W, et al. Integrated berth and yard space allocation under uncertainty [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2022, 162: 1-27.
- [5] 丁可,徐言民,宏关旭,等. 基于贪心-遗传优化算法的中长期船舶进出港调度优化[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2023,47(4):770-774.
DING K, XU Y M, GUAN H X, et al. Medium and long-term ship entry and exit scheduling optimization based on greedy-genetic optimization algorithm [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2023,47(4):770-774. (in Chinese)
- [6] ZHEN C, WEN Y W, YING J, et al. Joint berth

- allocation and ship loader scheduling under the rotary loading mode in coal export terminals [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2022, 162: 229-260.
- [7] 王宁宁,施灿涛,索伟岚. 基于启发式规则的散杂货港口泊位调度研究[J]. *北京信息科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 34(3): 16-22.
WANG N N, SHI C T, SUO W L, et al. Research on berth scheduling of bulk cargo port based on heuristic rule [J]. *Journal of Beijing Information Science & Technology University*, 2019, 34 (3): 16-22. (in Chinese)
- [8] JAKUB W, MACIEJ D, ÉRIC S. Selecting algorithms for large berth allocation problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 283(3): 844-862.
- [9] CERESER B L H, DE OLIVEIRA A R L, MORETTI A C. A mathematical model and solution method for the berth allocation problem with variable handling time and continuous time horizon [J]. *Pesquisa Operacional*, 2022, 42: 261709.
- [10] PRENCIPE L P, MARINELLI M. A novel mathematical formulation for solving the dynamic and discrete berth allocation problem by using the Bee Colony Optimisation algorithm [J]. *Applied Intelligence* 2021, 51: 4127-4142.
- [11] 陈曦明,张军伟. 融合 FDB 策略和切线飞行的改进白鲸优化算法[J]. *计算机时代*, 2023(11): 46-51.
CHEN X M, ZHANG J W. Improved BWO algorithm combining FDB strategy and tangent flight[J]. *Computer Era*, 2023(11): 46-51. (in Chinese)
- [12] CHANG T Z, GANG L, ZEBG M. Beluga whale optimization: a novel nature-inspired metaheuristic algorithm [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2022, 251: 109215.
- [13] MENG A, WU Z, ZHANG Z, et al. Optimal scheduling of integrated energy system using decoupled distributed CSO with opposition-based learning and neighborhood re-dispatch strategy [J]. *Renewable Energy*, 2024: 224120102.
- [14] ZHEN L, YU S, WANG S, et al. Scheduling quay cranes and yard trucks for unloading operations in container ports [J]. *Annals of Operations Research*, 2019, 273(1-2): 455-478.
- [15] BILAL K, SHAHID M. A hybrid evolution strategies-simulated annealing algorithm for job shop scheduling problems [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, 133: 108016.
-
- (上接第 83 页)
- [16] DETERT M. How to avoid and correct biased riverine surface image velocimetry [J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(2): 1-17.
- [17] FUJITA I. Surface velocity measurement of river flow using video images of an oblique angle[C]//*Proceeding of the 27th Congress of IAHR, Environmental and Coastal Hydraulics*, 1997: 227-232.
- [18] 刘晓平,李明,方松森,等. 桥区河段横流对船舶航行的影响[J]. *水利水电工程学报*, 2012(2): 21-26.
LIU X P, LI M, FANG S S, et al. Influence of cross current on ship in bridge navigable waters [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2012 (2): 21-26. (in Chinese)
- [19] 商宇薇. 不同墩径下双圆柱桥墩弯道水流特性研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
SHANG Y W. Research on bend flow characteristics of double-cylinder piers under different pier diameters [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022. (in Chinese)
- [20] 李蔚. 基于立体视觉与 LSPIV 的河流水动力过程近距遥感测量系统[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
LI W. Near-field remote sensing of riverine hydrodynamic processes with 3D large scale particle image velocimetry[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)