[引用格式]邢大宁,窦军伟,章嘉文. 考虑潮汐和泊位偏好的泊位岸桥联合调度优化[J]. 集美大学学报(自然科学版),2026,31(5):566-580. DOI:10.19715/j.jmuzr.2026.05.06.

考虑潮汐和泊位偏好的泊位岸桥联合调度优化

邢大宁[1,2]，窦军伟[1]，章嘉文[1]

（1. 集美大学航海学院，福建 厦门 361021；2. 福建航运研究院，福建 厦门 361021）

[摘要] 针对大船进出港口受潮汐影响大及码头泊位岸桥资源有限的问题，综合考虑潮汐时间窗、岸桥动态调度、岸桥不可跨越、泊位偏好与岸桥干扰等因素，以船舶等待服务成本、延迟离港处罚成本、泊位偏离惩罚成本和岸桥作业成本之和最小为目标构建混合整数规划模型，并设计了一种蜣螂优化算法和遗传算法相结合的蜣螂-遗传混合算法用来求解船舶靠泊与岸桥作业方案。分别用CPLEX与蜣螂-遗传混合算法求解不同规模的算例，结果表明本算法可以在平均13 min内求出与CPLEX平均偏差为3.83%的近似解；对比于传统蜣螂算法和遗传算法的求解结果，本算法求解出的调度方案更优，目标值分别优化了12.84%和15.52%。通过对重要参数进行敏感性分析，发现不同的潮汐高水位开始时刻和泊位偏离系数会影响船舶在港总成本。

[关键词] 集装箱码头；潮汐影响；泊位偏好；泊位岸桥联合调度；蜣螂-遗传混合算法

[中图分类号] U 691.3；S 972.8 [文章编号] 1007－7405（2026）05－0566－15

Joint Scheduling Optimization of Berth and Quay Cranes Considering Tides and Berth Preferences

XING Daning[1,2], DOU Junwei [1], ZHANG Jiawen [1]

(1. Navigation College of Jimei University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Institute of Shipping, Xiamen 361021, China)

Abstract: Regarding the problem of large ships entering and leaving the port under the influence of tides and the limited resources of berths and bridges at the terminal, the tidal time window, dynamic scheduling of bridges, non-spanning of bridges, and the interference between berth preferences and bridges, etc., were comprehensively considered. A mixed-integer planning model to minimize the sum of the cost of ship waiting service, delayed departure penalty cost, berth deviation penalty cost, and the cost of bridges and berths was constructed, and a hybrid algorithm combining the dung beetle optimizer algorithm was designed. Solving the problem was aimed at getting the ship berthing and bridge operation scheme. CPLEX and the dung beetle optimizer-genetic hybrid algorithm were used to solve different scales of cases, and the results showed that the dung beetle optimizer-genetic hybrid algorithm can find an approximate solution with an average deviation of 3.83% from CPLEX in an average of 13 min; comparing the results of the dung beetle algorithm and the genetic algorithm,

[收稿日期] 2025－04－07
[基金项目] 福建省科技厅创新战略研究项目（2025R0043）；福建省社科基金项目（FJ2025B184）
[通信作者] 邢大宁，博士，副教授，从事港口物流系统优化与仿真方向研究。E-mail:dnxing@jmu.edu.cn

dung beetle optimizer-genetic hybrid algorithm results in a better scheduling scheme, and the objective values were optimized by 12.84% and 15.52%. A sensitivity analysis of the important parameters revealed that different tidal high water start times and berth deviation coefficients affected the total cost of a ship's stay in port.

Keywords: container terminal; tidal influence; berth preferences; joint scheduling of berths and quay cranes; dung beetle optimizer-genetic hybrid

0　引言

泊位分配问题（berth allocation problem，BAP）和岸桥调度问题（quay crane scheduling problem，QCSP）是港口作业的重要决策问题。充分利用泊位和岸桥资源，采用泊位岸桥联合调度可实现码头合理运营，因此，优化泊位和岸桥调度已成为提升港口竞争力的有力举措。国内外学者对此展开了深入的研究，如 Park 等[1]最早将 BAP 和 QCSP 进行联合研究，并采用两阶段启发式算法求解。

潮汐会影响船舶的靠泊时间。Zheng 等[2]研究具有潮汐时间窗约束和位移策略的泊位岸桥联合调度问题，建立了混合整数模型，并设计了自适应大邻域搜索算法求解。Li 等[3]考虑潮汐因素对集装箱港口作业的影响，为使泊位偏离惩罚成本、船舶在港时间成本和岸桥移动成本之和最小，建立了泊位岸桥调度优化模型，并设计了混沌量子鲸鱼优化算法求解。郑红星等[4]研究潮汐作用下大船进出港的泊位岸桥联合调度问题，以最小化船舶在港成本为目标构建模型，并设计了混合遗传算法求解。

船舶实际靠泊位置与偏好泊位的距离也会影响船舶作业，偏离距离越大，集卡水平方向运输距离越远，船舶作业时间越长。Tavakkoli 等[5]指出，岸桥间的相互干扰会降低岸桥作业效率。Jiang 等[6]综合考虑岸桥作业间的干扰、碳成本和不确定的船舶到达时间，构建了混合整数规划模型，并设计了改进蜣螂算法求解。梅益群等[7]为研究泊位偏离对总成本的影响，建立了考虑泊位偏好和岸桥移动的两阶段模型，并设计改进粒子群算法求解。敖丹等[8]在模型中引入岸桥之间的干扰指数和泊位偏差系数，以最小化船舶在港总成本为目标建立模型。

泊位岸桥联合调度还需要考虑岸桥数量不变约束和变动约束。在不变约束下，分配给船舶的岸桥数量固定不变。在变动约束下，分配给船舶的岸桥数量可能随时间而变化，即岸桥是动态调度的。Cheimanoff 等[9]研究连续泊位和岸桥分配数量不变问题，以泊位偏离成本、等待成本和延误成本之和最小为目标构建模型，并设计了可变邻域搜索方法求解。Thanos 等[10]研究岸桥数量变动的泊位岸桥联合调度问题，以堆场内的集装箱转运距离最小为目标建立模型，并设计模拟退火算法求解。以往的研究大多假设分配给每艘船舶的岸桥数固定，然而岸桥资源有限，实际中更需要考虑岸桥动态调度，提高岸桥利用率。

综上所述，现有文献鲜有将潮汐因素和岸桥动态调度策略共同考虑，部分研究忽视了泊位偏好与岸桥干扰对船舶作业的影响，这会导致船舶实际到港作业位置发生较大偏差。鉴于此，本文研究潮汐影响和部分岸桥动态调度下的泊位岸桥联合调度优化问题，考虑泊位偏好、岸桥干扰和岸桥之间不能相互跨越等约束，建立混合整数规划模型，旨

在最小化所有抵港船舶的等待服务成本、延迟离港惩罚成本、泊位偏离惩罚成本和岸桥装卸成本，以期得到泊位岸桥联合调度最佳方案。

1 问题描述

本文以计划期内所有抵港船舶为研究对象，针对集装箱码头的连续泊位和岸桥联合调度问题，考虑潮汐因素、泊位偏好和岸桥干扰对船舶靠泊和岸桥作业计划的影响，着重研究在潮汐影响下船舶仍能在偏好位置附近靠泊以及部分岸桥可动态调度的需求，兼顾岸桥间不可跨越、船舶时空不可重叠等约束条件，建立混合整数规划模型，目的是为每艘船舶分配最佳的靠泊位置、靠泊时间和具体的岸桥。

泊位岸桥联合调度可以用时空二维图表示（见图 1）。根据潮汐周期表和船舶吃水定义水位时段概念。如果此时的水位能够满足大船（图 1 中船舶 1、船舶 2、船舶 3）吃水深度要求，则称为高水位时段，反之则称为低水位时段。大船必须在高水位时段才能进出港口，而小船（图 1 中船舶 4、船舶 5）进出港口则无须考虑潮汐影响。考虑到部分岸桥动态调度，在大船等待高水位时段离港期间，原先分配给大船的岸桥就可以移动给相邻的船舶进行装卸任务，不必等其离港后再移动，减少岸桥资源的闲置时间。

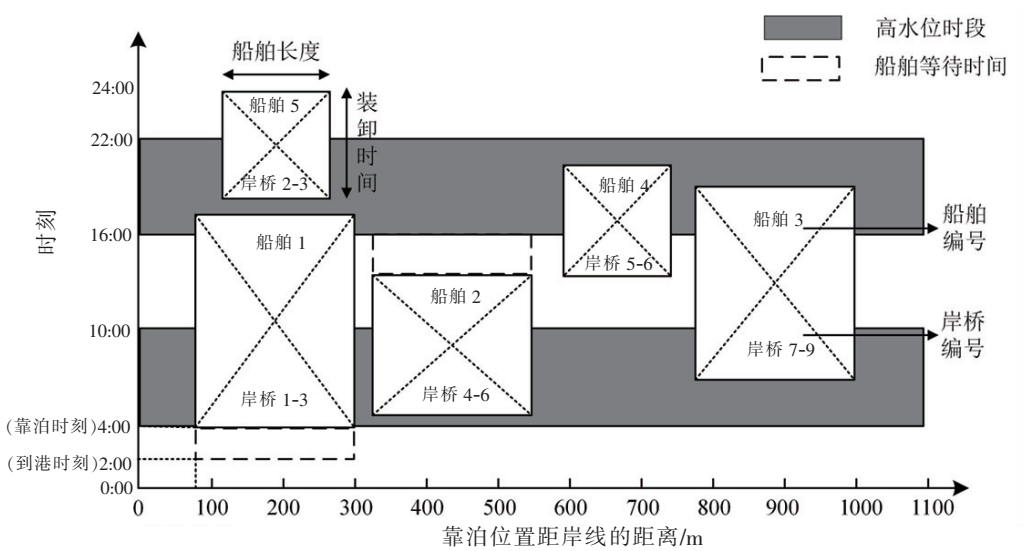


图 1 潮汐影响下的泊位和岸桥联合调度

Fig.1 Joint scheduling of berths and quay cranes under tidal influence

2 模型构建

2.1 模型假设

模型需满足以下条件：1）泊位连续且在同一条岸线上；2）港口水深满足所有船舶的吃水深度要求，但大船进出港受潮汐影响，需要乘潮进出港；3）每艘船舶都有其偏好靠泊位置，船舶实际靠泊位置距离偏好泊位越远，装卸作业成本越高；4）岸桥在不同泊位间可以移动但彼此不可交叉；5）岸桥的工作效率保持不变，且作业中不会发生故障；6）岸桥在相邻船舶间的移动时间可忽略不计；7）每艘船舶只能靠泊一次，靠泊

后不得移动；8）船长包括船舶间的安全距离。

2.2　模型参数及变量

本文构建泊位岸桥联合调度模型使用到的参数、变量及其定义如表 1 所示。

表 1　模型参数、变量及其定义

Tab. 1　Model parameters and definitions

符号	定义	符号	定义
T	计划周期	$t_{\mathrm{ar},i}$	船舶 i 的预抵港时刻
V	到港船舶集合，$i,j \in V$	m_i	船舶 i 装卸所满足的岸桥工时
$c_i^{\min}$	分配给船舶 i 的最小岸桥数量	b_i	船舶 i 的偏好泊位
$c_i^{\max}$	分配给船舶 i 的最大岸桥数量	T_{s}	距离 0 时刻最近的高水位开始时刻
R_i	分配给船舶 i 的岸桥数量集合，$R_i = [c_i^{\min}, c_i^{\max}]$	T_{c}	高水位时段持续时间
$Q_{\max}$	岸桥总数	$t_{\mathrm{latest},i}$	船舶 i 的最迟离港时刻
N	潮汐周期集合	$C_{\mathrm{offset},i}$	单位泊位偏移成本
$N_{\max}$	计划周期内潮汐周期总数	f_i	船舶 i 实际靠泊位置与偏好泊位的偏离距离
L	岸线长	α	岸桥干扰系数
l_i	船舶 i 的长度	η	泊位偏差系数
T_{cyc}	一个潮汐周期时长	M	一个极大的正数
$C_{\mathrm{wait},i}$	单位时间等待服务费用	$t_{\mathrm{d},i}$	船舶 i 延迟离港时间
$C_{\mathrm{delay},i}$	单位时间延迟离港惩罚成本	W_i	二进制变量，如果船舶 i 需要乘潮进港，$W_i = 1$，否则为 0
$C_{\mathrm{load},i}$	岸桥单位时间的作业成本	R_{iq}	二进制变量，有 q 台岸桥分配给第 i 艘船舶时，$R_{iq} = 1$，否则为 0
p_i	船舶 i 的实际靠泊位置	x_{ij}	二进制变量，当船舶 j 靠泊发生在船舶 i 离港后时，$x_{ij} = 1$，否则 $x_{ij} = 0$
$t_{\mathrm{b},i}$	船舶 i 的靠泊时间	y_{ij}	二进制变量，当船舶 j 实际停靠在船舶 i 的右端时，$y_{ij} = 1$，否则 $y_{ij} = 0$
$l_{q,i}$	船舶 i 最左端的岸桥编号	u_{ij}	二进制变量，当船舶 j 在船舶 i 装卸完成后再靠泊时，$u_{ij} = 1$，否则 $u_{ij} = 0$
$r_{q,i}$	船舶 i 最右端的岸桥编号		
$t_{\mathrm{e},i}$	船舶 i 的实际离港时间		
$n_{\mathrm{s},i}$	船舶 i 开始作业时所在的潮汐周期		
$n_{\mathrm{e},i}$	船舶 i 离港时所在的潮汐周期		
h_i	船舶 i 的作业时间		
E_i	船舶 i 的作业结束时间		

2.3　目标函数及约束条件

基于以上分析，本文构建的混合整数规划模型为：

$$\min \sum_{i \in V} \left[C_{\mathrm{wait},i}(t_{\mathrm{b},i} - t_{\mathrm{ar},i}) + C_{\mathrm{delay},i} t_{\mathrm{d},i} + C_{\mathrm{offset},i} f_i + C_{\mathrm{load},i} \sum_{q \in R_i} q R_{iq} h_i \right]; \tag{1}$$

$$t_{\mathrm{b},i} \geqslant t_{\mathrm{ar},i}, \forall i \in V; \tag{2}$$

$$t_{\mathrm{d},i} \geqslant 0, t_{\mathrm{d},i} \geqslant t_{\mathrm{e},i} - t_{\mathrm{latest},i}, \forall i \in V; \tag{3}$$

$$f_i \geqslant p_i - b_i, f_i \geqslant b_i - p_i, \forall i \in V; \tag{4}$$

$$E_i = t_{\mathrm{b},i} + h_i, \forall i \in V; \tag{5}$$

$$\sum_{q \in R_i} q^{\alpha} R_{iq} h_i \geqslant (1 + f_i \eta) m_i, \forall i \in V; \tag{6}$$

$$p_i + l_i \leqslant L, \forall i \in V; \tag{7}$$

$$t_{e,i} \geqslant E_i, \forall i \in V; \tag{8}$$

$$t_{e,i} \leqslant T - 1, \forall i \in V; \tag{9}$$

$$t_{e,i} \leqslant t_{b,j} + M(1 - x_{ij}), \forall i,j \in V, i \neq j; \tag{10}$$

$$p_i + l_i \leqslant p_j + M(1 - y_{ij}), \forall i,j \in V, i \neq j; \tag{11}$$

$$x_{ij} + x_{ji} + y_{ij} + y_{ji} \geqslant 1, \forall i,j \in V, i \neq j; \tag{12}$$

$$E_i \leqslant t_{b,j} + M(1 - u_{ij}), \forall i,j \in V, i \neq j; \tag{13}$$

$$r_{q,i} \leqslant l_{q,j} + M(1 - y_{ij}) + Mu_{ij} + Mu_{ji} - 1, \forall i,j \in V, i \neq j; \tag{14}$$

$$T_s + (n_{s,i} - 1) T_{cyc} \leqslant t_{b,i} + M(1 - W_i), \forall i \in V; \tag{15}$$

$$T_s + (n_{s,i} - 1) T_{cyc} + T_c \geqslant t_{b,i} - M(1 - W_i), \forall i \in V; \tag{16}$$

$$T_s + (n_{e,i} - 1) T_{cyc} \leqslant t_{e,i} + M(1 - W_i), \forall i \in V; \tag{17}$$

$$T_s + (n_{e,i} - 1) T_{cyc} + T_c \geqslant t_{e,i} - M(1 - W_i), \forall i \in V; \tag{18}$$

$$n_{e,i} \leqslant N_{max} - 1, n_{e,i} \geqslant n_{s,i}, \forall i \in V; \tag{19}$$

$$\sum_{q \in R_i} R_{iq} \leqslant 1, \forall i \in V; \tag{20}$$

$$l_{q,i} \leqslant r_{q,i}, \forall i \in V; \tag{21}$$

$$\sum_{q \in R_i} qR_{iq} = r_{q,i} - l_{q,i} + 1, \forall i \in V; \tag{22}$$

$$\sum_{q \in R_i} qR_{iq} \geqslant c_i^{min}, \sum_{q \in R_i} qR_{iq} \leqslant c_i^{max}, \forall i \in V; \tag{23}$$

$$r_{q,i} \leqslant Q_{max}, \forall i \in V; \tag{24}$$

$$x_{ij}, y_{ij}, u_{ij}, R_{iq}, W_i \in \{0,1\}, \forall i,j \in V; \tag{25}$$

$$t_{b,i}, h_i, E_i, p_i, t_{e,i}, n_{s,i}, n_{e,i}, t_{d,i}, f_i \in \{0,1,\cdots,\infty\}, \forall i \in V。 \tag{26}$$

其中：式（1）是目标函数，表示船舶等待服务成本、延迟离港惩罚成本、泊位偏离惩罚成本以及岸桥作业成本之和最小；式（1）中 $C_{wait,i}(t_{b,i} - t_{ar,i})$ 表示船舶进港后等待靠泊作业产生的成本，$C_{delay,i} t_{d,i}$ 表示船舶实际离港时间晚于计划离港时间产生的成本，$C_{offset,i} f_i$ 表示船舶实际靠泊位置偏离偏好泊位产生的成本，$C_{load,i} \sum_{q \in R_i} qR_{iq} h_i$ 表示岸桥装卸船舶产生的成本；式（2）表示船舶作业必须在到港后才能进行；式（3）表示船舶是否延迟离港以及延迟离港的时间；式（4）表示泊位偏离的距离约束，确保距离偏差为正；式（5）定义了船舶作业结束时间为开始作业时间与岸桥作业时间之和；式（6）确保每艘船都能在规定的时间内完成作业；式（6）中 q^{α} 表示岸桥干扰造成的效率损失，$f_i \eta$ 表示船舶偏离偏好泊位造成的额外装卸时间且偏离距离 f_i 越大船舶装卸所需要的岸桥作业时间越长；式（7）表示所有靠泊船舶必须在岸线范围内；式（8）表示船舶离港时间必须晚于船舶装卸结束时间；式（9）表示船舶在计划周期内离港；式（10）表示船舶 i 的实际离港时间早于船舶 j 的靠泊时间，确保两船服务时间不会重叠；式（11）确保船舶 i 和船舶 j 的靠泊位置不会重叠；式（12）确保任意两

船的靠泊位置和服务时间不能同时发生冲突；式(13)~(14)确保该船作业结束后分配到的岸桥可以为其他船舶作业，使大船装卸结束后在低水位等待离港期间其分配到的岸桥可以移动给其他船舶作业，满足部分岸桥动态调度约束；式(15)~(16)确保大船必须在高水位时段进港；式(15)~(16)中 $M(1-W_i)$ 表示大船受潮汐影响，小船不受潮汐约束；式(17)~(18)确保大船必须在高水位时段离港；式(19)表示大船离港所在的潮汐周期在计划期内，且进港所在的潮汐周期早于离港所在的潮汐周期；式(20)表示岸桥在同一时刻最多服务于一艘船舶；式(21)确保岸桥不能相互跨越；式(22)定义了分配给船舶的岸桥数量；式(23)表示任意时刻分配给每艘船舶的最小和最大岸桥数量约束；式(24)表示所有船舶分配到的岸桥数量总和要满足岸桥总数量限制；式(25)~(26)表示模型中变量的约束。

3　算法设计

泊位岸桥联合调度是 NP-hard 问题，算法求解时间随船舶和岸桥数量的增加呈指数增长。CPLEX 软件能在短时间内得到小规模问题的精确解，但求解大规模问题的时间较长。而启发式算法能快速得到近似解。Xue 等[11]于 2023 年受自然界蜣螂种群行为的启发提出了蜣螂优化（dung beetle optimizer，DBO）算法，该新型算法具有收敛速度快、参数少、易于理解和实现等特点，被应用于解决复杂的调度和优化问题。如 Xu 等[12]综合考虑泊位分配与能源调度，提出一种基于主从博弈的泊位分配与微电网集群联合优化调度方法，设计了一种 DBO 算法用以求解。在寻找最优解过程中，DBO 算法仍存在初始种群分布不均匀，容易陷入局部最优解，全局搜索能力较弱等缺陷，针对以上问题，本文设计一种改进蜣螂优化算法来求解。

首先，采用反向学习策略初始化蜣螂个体位置，使种群在解空间中分布更均匀；然后，在蜣螂优化算法的基础上引入遗传算法中的交叉和变异操作，通过使用种群的演化，同时探索多个潜在解，并在整个搜索空间中寻找全局最优解。本文分成两个阶段求解泊位岸桥联合调度问题。第一阶段将 DBO 算法和遗传算法（genetic algorithm，GA）相结合，提出了蜣螂-遗传混合算法（dung beetle optimizer-genetic hybrid algorithm，DBO-GA）以求出船舶靠泊时间、靠泊位置和分配到的岸桥数量；第二阶段采用动态规划法[13]得到岸桥的具体分配方案。

3.1　解的编码和解码

本文采用自然数编码，根据船舶预抵港时间进行编码。解的编码如图 2 所示。

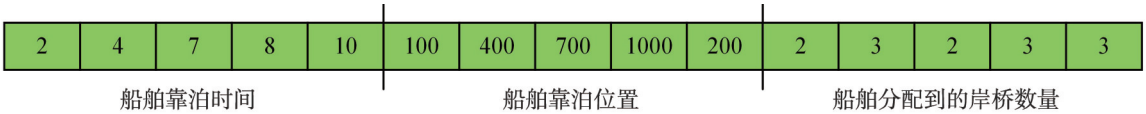


图 2　编码形式

Fig.2　Encoding form

船舶 i 的靠泊时间在 $[t_{\mathrm{ar},i},t_{\mathrm{latest},i}]$ 内随机生成，靠泊位置一般是在岸线范围 $[0,L-l_i]$ 内随机生成，但是这种选择使得定义域非常大，维度太高，导致算法收敛速度慢。因

此，针对模型和问题特征，要使船舶 i 的靠泊位置在偏好泊位附近生成须缩小定义域，同时要满足岸线长度约束（7）。岸桥分配数量在 $[c_i^{\min}, c_i^{\max}]$ 内随机生成，满足约束（23）。

解码分为两阶段进行。第一阶段：通过解的编码确定计划期内抵港船舶的靠泊时间、靠泊位置和分配到的岸桥数量。第二阶段：基于第一阶段确定的船舶之间的时空关系，将特定的岸桥分配给船舶，岸桥在岸线上由左到右且按编号由小到大依次排列。

解码步骤如下：

步骤 1）从靠泊在岸线最左侧位置的船舶开始分配岸桥，假设给船舶 i 分配 q 台岸桥，则将第 1 台岸桥到第 q 台岸桥分配给船舶 i。将靠泊船舶分成两组。一组记为 V_1，表示已分配到具体岸桥的船舶；另一组记为 V_2，表示未分配到具体岸桥的船舶。

步骤 2）将岸桥也分成两组。一组记为 Q_1，表示岸桥被有服务时间重叠的船舶占用；一组记为 Q_2，表示未被占用。

步骤 3）在 V_2 中找到靠泊在岸线最左侧位置的船舶 j，检查在 V_1 中是否有船舶的服务时间与船舶 j 有重叠。如果有重叠，则在 Q_2 中从编号最小的岸桥开始分配，直到满足船舶 j 所需的岸桥数量为止。

步骤 4）如果 V_1 中有大船装卸结束后在低水位等待离港，V_2 中有船靠泊在该大船的左侧或右侧，那么将分配给该大船的岸桥中编号最小的或编号最大的一台岸桥移动到 V_2 中相邻的船舶作业，然后从 Q_2 中编号最小的岸桥开始分配，直到满足所需的岸桥数量为止。

步骤 5）重复以上步骤，直到完成所有船舶的分配。

以上操作满足岸桥不可交叉作业的约束，但可能会违反式（10）~（12）和式（24）的约束，因此需要逐个调整船舶的岸桥分配方案。调整策略如下：在 V_2 中找到靠泊时间最早的船舶，检查该船舶和 V_1 中的船舶是否违反时空冲突约束。如果违反则调整该船舶的靠泊时间，使其在冲突船舶离港后再靠泊；如果该船舶分配到的最右侧岸桥编号违反岸桥总数约束，则调整其靠泊时间，等待 V_1 中的船舶离港后再靠泊。

3.2 反向学习初始化蜣螂种群

采用随机序列生成的方式初始化种群，会使得蜣螂个体分布不均匀，因而本文采用反向学习策略初始化蜣螂个体的位置，使蜣螂个体均匀分布于整个解空间，增强种群多样性，防止算法陷入局部最优。算法初始解一般是在解空间上下界之间随机生成，反向学习是用上界与下界之和减去初始解，其计算式为

$$X_{\text{obl}} = U_1 + L_1 - X_{\text{ini}}。 \tag{27}$$

其中：X_{ini} 表示初始种群；U_1 和 L_1 分别表示 X_{ini} 解空间的上界和下界。

本文分别计算反向学习生成的蜣螂种群和初始蜣螂种群的适应度值，然后选择适应度值较高的蜣螂个体组成新的初始种群。

3.3 解的更新策略

1）滚球蜣螂位置更新。根据蜣螂在搜索空间有无遇到障碍，滚球蜣螂的位置更新分为两种。蜣螂在前行过程中未遇到障碍物时，蜣螂会利用天体进行导航，确保粪球沿直线滚动，其未遇到障碍时的位置更新策略为

$$X_r^{(k+1)} = X_r^{(k)} + a \times h \times X_r^{(k-1)} + b \times \Delta x, \quad \Delta x = \left| X_r^{(k)} - x_{\text{wor}} \right|。 \tag{28}$$

其中：$X_r^{(k)}$ 为第 r 只蜣螂经第 k 次迭代后得到的位置；a 为自然系数；h 表示偏转系数；b 是随机数，在（0，1）内取值；Δx 表示光照强度；x_{wor}表示全局最差位置。

滚球蜣螂遇到障碍时会选择跳舞来更新路线，其位置更新策略为

$$X_r^{(k+1)} = X_r^{(k)} + \tan(\theta) \times |X_r^{(k)} - X_r^{(k-1)}|。\tag{29}$$

其中：θ 表示偏转角，在［0，π］内取值。

2）雏球蜣螂位置更新。雌性蜣螂会将粪球滚到合适的地方产卵，由于产卵的区域是动态的，所以雏球的位置更新随迭代次数动态变化，雏球位置更新公式为

$$B_r^{(k+1)} = x_{\mathrm{loc}} + g_1 \times (B_r^{(k)} - L_2) + g_2 \times (B_r^{(k)} - U_2)。\tag{30}$$

其中：$B_r^{(k)}$ 为第 r 只雏球经第 k 次迭代后得到的位置；x_{loc} 为局部最优位置；U_2 和 L_2 分别表示产卵区域的上界和下界；g_1 和 g_2 表示两个独立的随机向量。

3）小蜣螂位置更新。小蜣螂的位置随觅食区域的动态更新而调整，其更新公式为

$$X_r^{(k+1)} = X_r^{(k)} + C_1 \times (X_r^{(k)} - L_3) + C_2 \times (X_r^{(k)} - U_3)。\tag{31}$$

其中：$X_r^{(k)}$ 为第 r 只小蜣螂经第 k 次迭代后得到的位置；U_3 和 L_3 分别表示小蜣螂觅食区域的上界和下界；$C_1 \sim N(0,1)$，表示服从正态分布的随机数；C_2 为大小是 $1 \times D$ 且在（0，1）内的随机向量。

4）偷窃蜣螂位置更新。部分蜣螂会偷窃其他蜣螂粪球，如果偷窃蜣螂在全局最优位置 x_{glo} 处抢夺粪球，则其位置更新公式为

$$X_r^{(k+1)} = x_{\mathrm{glo}} + S \times g \times (|X_r^{(k)} - x_{\mathrm{loc}}| + |X_r^{(k)} - x_{\mathrm{glo}}|)。\tag{32}$$

其中：$X_r^{(k)}$ 为第 r 只偷窃蜣螂经第 k 次迭代后得到的位置；x_{glo}为全局最优位置；S 为偷窃系数；g 为大小是 $1 \times D$ 且服从正态分布的随机向量。

5）交叉操作。采用轮盘赌和精英保留策略选择迭代后适应度值较高的两个父代个体进行交叉，采用顺序交叉的方法操作。在父代 1 和父代 2 中随机选择起始位置，将父代 1 上的基因复制到子代相应的位置上，然后按照顺序从父代 2 中填补子代缺少的基因，如图 3 所示。通过交叉操作，两个父代个体交换部分基因，生成更优的子代个体；同时通过基因重组扩大搜索空间，保持种群多样性。

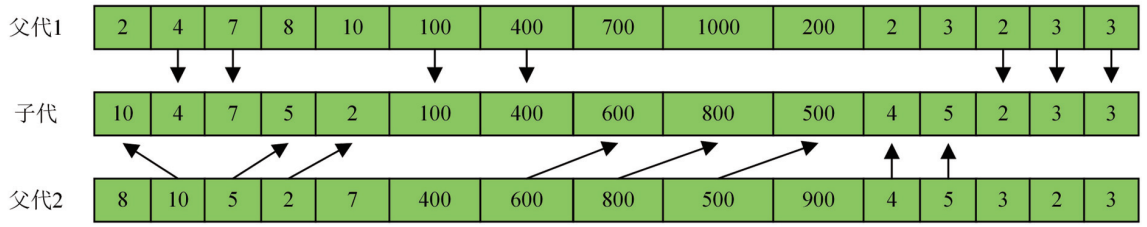


图 3　交叉操作

Fig.3　Cross operation

6）变异操作。本文选择替换变异进行变异操作，经过父代个体交叉产生的子代基因按照变异概率突变，在父代个体中随机选择两个基因 a 和 b，然后将 a 和 b 互换，生成新的基因值，如图 4 所示。变异操作通过随机改变个体的基因来产生新的个体，帮助算法跳出局部最优解，有助于找到全局最优解。



图 4 变异操作

Fig.4 Variation operation

3.4 适应度函数

适应度值越高代表蜣螂个体位置越好，适应环境的能力越优秀。基于目标函数最小化的特点，本文选取目标函数值的倒数作为适应度函数，即船舶等待服务成本、延迟离港处罚成本、泊位偏离惩罚成本以及岸桥作业成本之和的倒数。设 $f(x)$ 为模型中的目标函数，则蜣螂种群中的个体适应度值用 $1/f(x)$ 表示。

3.5 算法流程

DBO-GA 算法求解泊位岸桥联合调度模型的流程如图 5 所示。

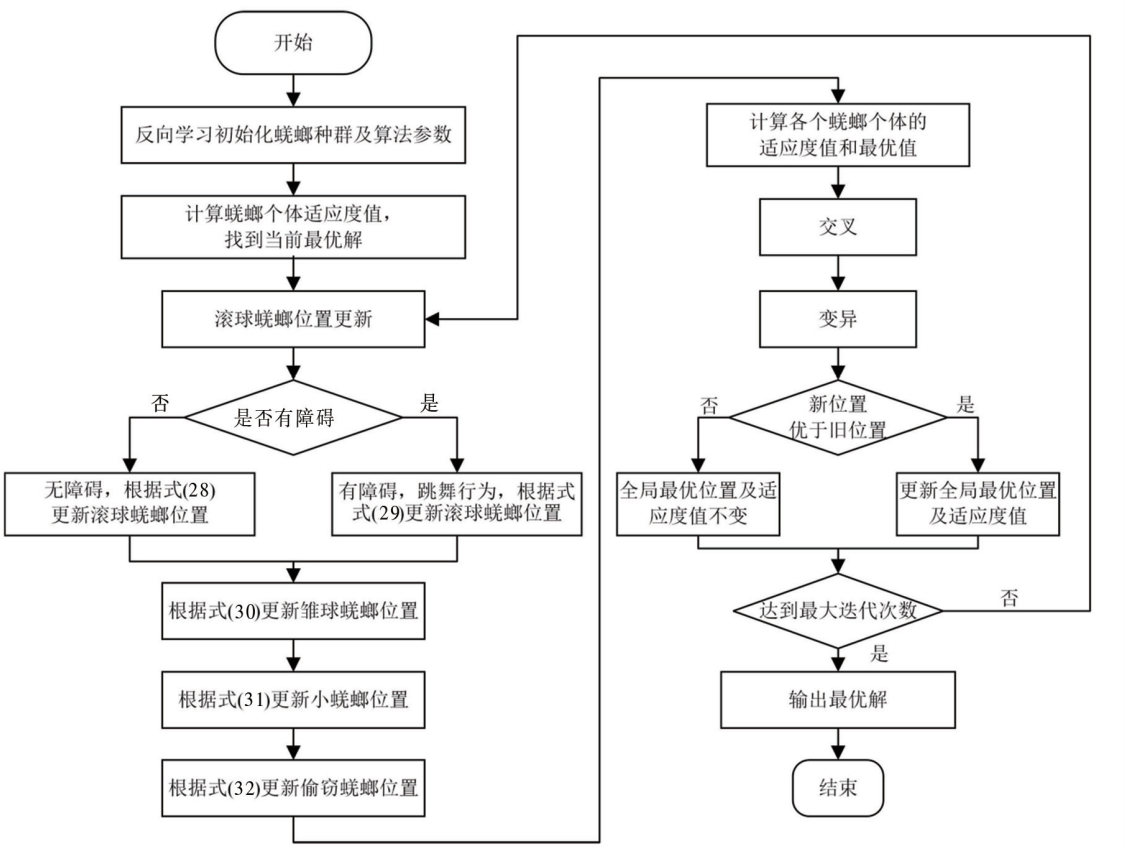


图 5 DBO-GA 算法流程

Fig.5 Flow chart of DBO-GA algorithm

4 算例分析

4.1 初始数据

采用文献［14］中 21 艘到港船舶的相关数据设计案例，岸线长度为 1200 m，计划

周期为 180 h，岸桥数为 12，从左起编号依次为 1、2、…、12。考虑到泊位偏离和岸桥干扰造成的损失，将泊位偏离系数和岸桥干扰系数分别设为 0.01、0.9。设定船长超过 300 m 为大船，需要在高水位时段进出港口；其余为小船，进出港不考虑潮汐约束。设定一个潮汐周期为 12 h，第一个高水位时段开始时间记为 04 时，结束时间为 10 时，高水位时段持续时间为 6 h，单个岸桥在单位时间内的装卸作业成本为 0.1 元/h。计划期内到港船舶的相关数据见表 2。

表 2　到港船舶数据

Tab. 2　Vessel arrival data

船舶编号	船长/m	偏好位置/m	预计抵港时间/h	最晚离港时间/h	岸桥服务工时/h	最小岸桥数/台	最大岸桥数/台	等待服务成本/元	延迟离港成本/元	偏离成本/元
1	150	650	1	21	18	2	2	8	8	1
2	350	100	1	26	96	3	6	40	40	3
3	150	700	2	16	11	2	2	4	4	1
4	400	550	2	25	113	3	7	48	48	3
5	300	600	18	51	113	3	5	48	48	2
6	200	650	22	41	25	2	3	12	12	1
7	350	450	35	46	18	3	6	8	8	3
8	400	250	38	54	27	3	7	12	12	3
9	300	300	50	79	114	3	5	48	48	2
10	300	800	54	88	105	3	5	44	44	2
11	200	200	78	100	30	2	3	12	12	1
12	250	850	78	104	66	2	4	28	28	2
13	350	750	86	112	109	3	6	44	44	3
14	400	500	90	112	84	3	7	32	32	3
15	250	950	94	105	22	2	4	8	8	2
16	200	800	102	122	31	2	3	12	12	1
17	200	600	110	129	36	2	3	16	16	1
18	350	300	122	149	108	3	6	44	44	3
19	150	900	122	136	13	2	2	4	4	1
20	200	50	152	183	49	2	3	20	20	1
21	250	500	152	168	19	2	4	8	8	2

4.2　运行结果分析

算例实验在 MATLAB R2022a 上编码并运行求解。计算机配置为英特尔 Core i5、12 GB 内存、1.0 GHz。DBO-GA 算法的各个参数设置如下：种群规模为 180，按照 6∶6∶7∶11 的比例划分滚球蜣螂、雏球蜣螂、小蜣螂和小偷蜣螂的数量，最大迭代次数为 800，偏转系数 $h = 0.1$，翻滚系数 $\varphi = 0.3$，翻滚概率阈值 $\lambda = 0.1$，偷窃系数 $S = 0.5$，交叉概率为 0.7，变异概率为 0.1。在 MATLAB 上运行求解得到船舶在港服务总成本为 5406 元。为形象地表示计划期内抵港船舶的靠泊计划，绘制了图 6 所示的泊位分配甘特图。

岸桥调度优化的具体结果如表 3 所示。

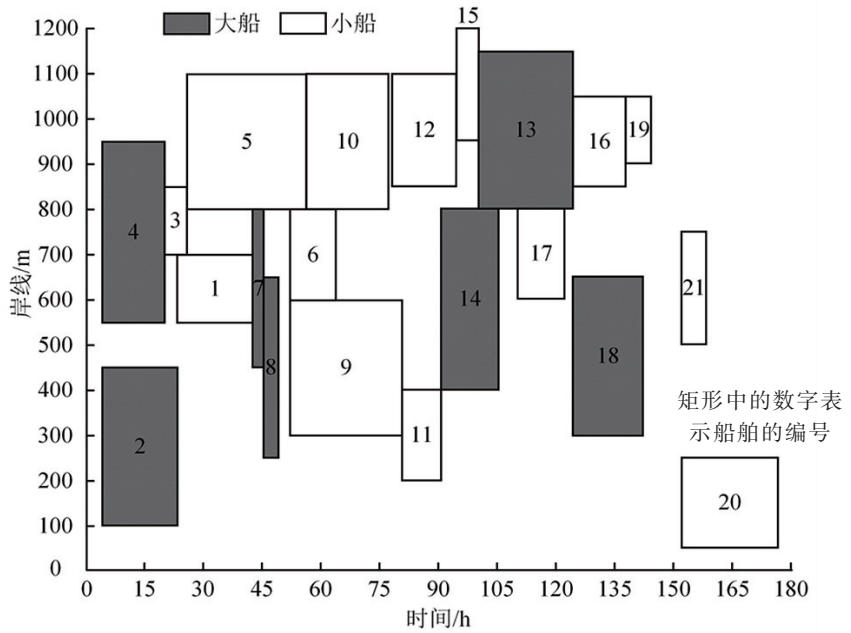


图 6 泊位分配甘特图

Fig.6 Gantt chart of berth allocation

表 3 岸桥作业方案

Tab. 3 Quay crane operation plan

船舶编号	岸桥编号	作业时段	船舶编号	岸桥编号	作业时段
1	5—7	23.2—42.2	11	2—4	80.5—90.5
2	1—5	4.0—23.2	12	9—11	78.0—94.5
3	8—9	20.1—25.6	13	9—12	100.2—124.0
4	6—10	4.0—20.1	14	5—8	90.5—105.4
5	9—11	25.6—56.2	15	10—12	94.5—100.0
6	7—8	52.0—63.7	16	9—11	124.0—137.7
	6	49.1—63.7	17	7—8	110.0—122.0
7	5—8	42.2—45.2	18	4—7	124.0—142.0
8	3—6	45.2—49.1	19	10—11	137.7—144.2
9	3—5	52.0—80.5	20	1—3	152.0—176.5
10	9—11	56.2—77.2	21	6—8	152.0—158.3

分析图 6 和表 3 可知，DBO-GA 算法求得的泊位岸桥联合调度方案符合模型的约束：大船均在潮汐高水位时段进出港，满足吃水深度要求；大船装卸结束后在等待高水位时段离港期间，部分岸桥动态调度满足岸桥数量变动约束，且岸桥均未发生交叉作业；超过 90% 的船舶靠泊位置与偏好泊位的偏差小于 150 m。在满足潮汐和岸桥调度约束下，船舶入港并完成装卸作业，泊位和岸桥资源得到了充分利用。

由图 6 还可知，本文算例中的大船均在低水位时段到港，因此它们进港靠泊时间相

应地延迟，需要分别等待 3、2、7.2、7.2、14.2、0.5、2 h，直到高水位时段才能进港靠泊作业。此外，由于船舶到港时间比较集中，船舶 1、船舶 3、船舶 5 和船舶 19 需要等待数小时才能靠泊作业。4 号、7 号、13 号、14 号和 18 号大船作业结束后处在高水位时段，故无需等待即可离港。然而，2 号和 8 号大船作业结束后处在低水位时段，不满足离港的水深要求，因此需分别等待 4.8 h 和 2.9 h。在等待离港期间，岸桥 5 从大船 2 移动到相邻的船舶 1 进行装卸作业，岸桥 6 从大船 8 移动到相邻的船舶 6 上进行作业，部分岸桥动态调度充分利用了岸桥资源，符合码头作业的实际。

考虑到泊位偏好对船舶作业的影响，船舶 1、船舶 5 和船舶 14 的实际靠泊位置均与偏好泊位有较大的偏差，导致水平运输距离较远，岸桥作业效率降低，从而造成船舶未能在计划的时间内离港。

4.3　算法有效性验证

为验证 DBO-GA 算法的有效性，设计了 14 个不同规模的算例，分别采用 DBO-GA 算法与 CPLEX 软件求解，计算结果见表 4。

表 4　CPLEX 、DBO-GA、DBO、GA 算法结果对比

Tab. 4　Comparison of results between CPLEX, DBO-GA, DBO and GA algorithm

问题规模（$i \times q$）	CPLEX		DBO-GA		DBO		GA		偏差/%		
	目标值/元	运行时间/s	目标值/元	运行时间/s	目标值/元	运行时间/s	目标值/元	运行时间/s	G_1	G_2	G_3
5 × 12	1 361	193	1 373	245	1 387	266	1 384	258	0.88	1.01	0.79
5 × 14	1 277	175	1 286	213	1 297	230	1 294	226	0.70	0.85	0.62
10 × 12	2 926	730	3 015	446	3 257	471	3 229	453	3.04	7.43	6.63
10 × 14	2 735	628	2 814	405	2 993	462	2 957	429	2.89	5.98	4.84
15 × 12	4 041	1 001	4 176	620	4 643	810	4 789	928	3.34	10.06	12.80
15 × 14	3 852	914	3 975	543	4 360	725	4 476	830	3.19	8.83	11.19
21 × 12	5 159	1 462	5 406	897	6 523	1 147	6 840	1 384	4.79	17.12	20.96
21 × 14	4 811	1 290	5 025	821	6 051	1 063	6 319	1 205	4.45	16.96	20.48
30 × 12	7 115	4 116	7 473	1 153	9 033	1 452	9 469	1 681	5.03	17.27	21.08
30 × 14	6 689	3 860	7 014	1 069	8 428	1 361	8 845	1 580	4.86	16.78	20.70
35 × 12	8 870	6 368	9 346	1 247	11 593	1 694	12 290	1 867	5.37	19.38	23.95
35 × 14	8 498	5 981	8 915	1 102	10 807	1 580	11 504	1 778	4.91	17.51	22.51
40 × 12	—	—	11 356	1 362	14 360	1 897	15 428	2 030	—	20.92	26.39
40 × 14	10 137	7 056	10 782	1 154	13 416	1 602	14 255	1 809	6.36	19.63	24.36

注：“—”表示模型求解时间超过 7 200 s 仍未得到结果；i 和 q 分别表示船舶和岸桥数量。

用 DBO-GA 算法求得的目标值 I 和用 CPLEX 软件求得的精确解 C 之间的偏差 G_1 的计算公式为：$G_1 = (I - C)/C \times 100\%$ 。由实验结果（见表 4）分析可知：CPLEX 能在较短的时间内求得小规模算例的精确解，但随着算例规模的增加，CPLEX 求解时间增加，甚至无法在规定时间内求得可行解，而 DBO-GA 均能在可接受的时间内求得接近精确解的目标值。从目标值上看，DBO-GA 与 CPLEX 求解结果的最大偏差为 6.36%，平均偏差

为 3.83%；从时间上看，CPLEX 平均求解时间为 2598 s，DBO-GA 的平均求解时间为 806 s。这表明 DBO-GA 算法能有效解决不同规模算例下的泊位岸桥联合调度问题。

4.4 算法对比分析

为验证算法的优越性，分别采用 DBO-GA、传统 DBO 和 GA 算法求解不同规模的算例，对比结果如表 4 所示。采用 DBO-GA 算法和传统 DBO 算法求得的目标值之间的偏差记为 G_2，采用 DBO-GA 算法和传统 GA 算法求得的目标值之间的偏差记为 G_3，则 $G_2 = (D - I)/D \times 100\%$，$G_3 = (G - I)/G \times 100\%$。其中：$D$ 为用传统 DBO 算法求得的目标值；G 为用传统 GA 算法求得的目标值。

分析表 4 可知：DBO-GA 算法求解的目标值优于 DBO 和 GA 算法，平均优化效果分别为 12.84% 和 15.52%。随着算例规模增加，DBO-GA 算法的优势更加明显，可以在更短的时间内求出高质量的解，验证了 DBO-GA 算法求解本文问题的优越性。此外，由表 4 可知：当船舶数量保持不变时，适当增加岸桥数量，船舶在港总成本越小，算法求解时间越快；当岸桥数量一定时，船舶在港总成本和求解时间随船舶的规模增加而增加。

图 7 为用 DBO-GA、传统 DBO 和传统 GA 三种算法求解本文算例的结果收敛对比图。由图 7 可知，DBO-GA 迭代至 320 代时目标值收敛于 5406 元，DBO 迭代至 470 代时目标值收敛于 6523 元，GA 迭代至 430 代时目标值收敛于 6840 元，这表明 DBO-GA 不仅能更快地找到最优解，而且能跳出局部收敛，向全局搜索。用 DBO-GA 算法求解本文算例的目标值优于传统 DBO 和 GA 算法，优化效果分别为 12.84% 和 15.52%，验证了 DBO-GA 算法在求解泊位岸桥联合调度问题上具有明显优势。

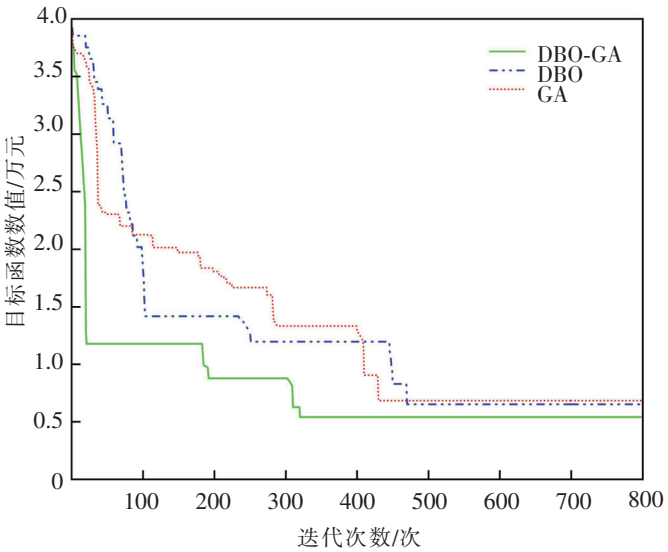


图 7 DBO-GA、DBO 和 GA 算法结果收敛对比

Fig.7 Convergence comparison of DBO-GA, DBO and GA algorithm

4.5 敏感性分析

为研究潮汐和偏好泊位对本文联合调度问题的影响，本研究开展了敏感性分析。以本文算例为研究对象，分别量化潮汐起始时刻和泊位偏差系数的变化对总成本的作用效应。为直观表现总成本的变化，将其分成等待服务成本、延迟离港惩罚成本、泊位偏离惩罚成本、岸桥作业成本四部分具体表示。潮汐开始时刻和泊位偏差系数的变化对各部分成本的影响分别如表 5 和表 6 所示。

分析表 5 可知，潮汐高水位时刻 T_s 的变化会使得船舶总成本发生波动，并且 T_s 的变化主要影响等待服务成本和延迟离港成本。因为，大船必须在高水位时段才能进出港口。如果大船进港时刻和离港时刻小于潮汐开始时刻，那么大船须等到高水位时刻才能进出港，造成船舶等待靠泊时间和延迟离港时间大大增加。

分析表 6 可知，泊位偏差系数 η 的增加会造成船舶在港总成本不断增加，并且，η 值增大主要会导致船舶延迟离港惩罚成本和岸桥作业成本增加。因为当船舶靠泊位置偏离偏好泊位时，码头中水平运输工具的运输时间增加，岸桥工作效率降低，以及岸桥装卸作业时间增加，使得船舶在港时间延长。此外，大船装卸结束时可能不处在高水位时段，需要等待，从而造成船舶延迟离港。

表 5　不同潮汐开始时刻下的求解结果

Tab. 5　Results of different tide onset moments

单位：元

潮汐开始时刻	等待服务成本	延迟离港惩罚成本	泊位偏离惩罚成本	岸桥作业成本	总成本
2:00	2 470	1 857	1 050	103	5 480
6:00	2 815	1 509	1 050	103	5 477
8:00	2 702	1 581	1 050	103	5 436
10:00	2 890	1 455	1 050	103	5 498

表 6　不同泊位偏差系数下的求解结果

Tab. 6　Results of different berth deviation factors

单位:元

泊位偏差系数	等待服务成本	延迟离港惩罚成本	泊位偏离惩罚成本	岸桥作业成本	总成本
0.05	2 621	1 867	1 050	125	5 663
0.10	2 621	2 169	1 050	150	5 990
0.15	2 621	2 478	1 050	175	6 324
0.20	2 621	2 804	1 050	200	6 675

5　结论

基于大船乘潮进出港和码头资源有限的现实，本文着重研究了潮汐和泊位偏好影响下的连续泊位和岸桥联合调度问题，综合考虑了潮汐时间窗、岸桥动态调度和泊位偏好等因素，建立了混合整数规划模型，并设计了一种 DBO-GA 算法来求解。求解结果表明，到港船舶均能在计划期内完成靠泊、装卸作业和离港等操作，大船进出港满足潮汐约束，船舶的靠泊位置和在港服务总成本得到了优化控制。通过求解不同规模的算例，验证了模型和算法的有效性，DBO-GA 算法能在较短的时间内求得与 CPLEX 软件求解的结果平均偏差为 3.83% 的近似解，随着算例规模增加，DBO-GA 算法有更稳定的优化效果。对比传统 DBO 算法和遗传算法的求解结果，DBO-GA 算法能在更短的时间内求出更优的解，验证了本文算法在求解此类问题时的高性能。通过对潮汐高水位时刻 T_s 和泊位偏差系数 η 进行敏感性分析，发现不同的潮汐高水位开始时刻会影响船舶在港总成本。泊位偏差系数 η 越大导致船舶在港总成本越高，因此在制定泊位岸桥联合调度计划时，考虑 η 能有效使到港船舶靠泊在偏好泊位附近，降低总成本。本研究结果能为港口船舶靠泊和岸桥调度的相关决策提供数据参考。

本文研究的是受潮汐影响的集装箱船舶进出港限制，未来可以研究其他船型进出港

需要的不同潮高约束。本文考虑了单一码头的连续泊位和岸桥联合调度问题，未来可以进一步探讨多码头之间的泊位分配和岸桥调度问题，考虑不同码头之间的资源共享、作业协调和最优调度策略，以实现整个港口内抵港船舶的在港服务总成本最小化。

[参 考 文 献]

[1]Park Y M,Kim K H. A scheduling method for berth and quay cranes[J]. OR Spectrum,2003,25(1):1-23.

[2]Zheng H,Wang Z,Fan X. Integrated rescheduling optimization of berth allocation and quay crane allocation with shifting strategies[J]. Ocean Engineering,2024,301:117473.

[3]Li M W,Xu R Z,Yang Z Y,et al. Optimizing berth-crane allocation considering tidal effects using chaotic quantum whale optimization algorithm[J]. Applied Soft Computing,2024:111811.

[4]郑红星,张敬涛,刘保利. 考虑潮汐影响的连续泊位和岸桥集成调度[J]. 计算机集成制造系统,2018,24(10):2599.

[5]Tavakkoli-Moghaddam R,Makui A,Salalhi S,et al. An efficient algorithm for solving a new mathematical model for a quay crane scheduling problem in container ports[J]. Computers & Industrial Engineering,2009,56(1):241-248.

[6]Jiang M,Ma F,Zhang Y,et al. Collaborative scheduling optimization of container port berths and cranes under low-carbon environment[J]. Sustainability,2024,16(7):2985.

[7]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]. 计算机工程与应用,2022,58(6):241-249.

[8]敖丹,杨勇生. 基于作业链的泊位与岸桥协同调度研究[J]. 计算机工程与应用,2022,58(7):9.

[9]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 & Operations Research,2022,141:105695.

[10]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.

[11]Xue J,Shen B. Dung beetle optimizer:a new meta-heuristic algorithm for global optimization[J]. The Journal of Supercomputing,2023,79(7):7305-7336.

[12]Xu X,Li Z,Jiang X,et al. Port berth allocation and microgrid cluster joint optimization scheduling based on master-slave game[J]. Journal of Cleaner Production,2024,452:142220.

[13]Turkogullar Y B,Tasknn Z C,Aras N,et al. Optimal berth allocation and time-invariant quay crane assignment in container terminals[J]. European Journal of Operational Research,2014,235(1):88-101.

[14]Zhang C,Zheng L,Zhang Z,et al. The allocation of berths and quay cranes by using a sub-gradient optimization technique [J]. Computers & Industrial Engineering,2010,58(1):40-50.

（责任编辑　朱雪莲　英文审校　周云龙）