

考虑潮汐和泊位偏好的连续型泊位分配优化

章嘉文¹, 初良勇^{1,2}

(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] 由于潮汐因素对船舶进出港口航道有影响, 以及船舶偏离偏好泊位也对船舶处理时间有影响, 所以研究连续型泊位分配问题要综合考虑潮汐与偏好泊位两个因素的影响。以计划期内所有到港船舶的总时间最小为目标, 将偏好泊靠点作为约束条件构建混合整数线性规划模型, 并设计模拟退火遗传混合算法进行求解。该混合算法将遗传算法的全局搜索能力与模拟退火的局部搜索能力相结合, 提升了算法的搜索效率。通过算例求解验证了算法和模型的有效性。

[关键词] 连续型泊位分配; 模拟退火遗传混合算法; 混合整数线性规划模型; 潮汐因素; 偏好泊位

[中图分类号] U 691.3

Continuous Berth Allocation Optimization Considering Tidal Conditions and Berth Preferences

ZHANG Jiawen¹, CHU Liangyong^{1,2}

(1. Navigation College of Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Institute of Shipping, Xiamen 361021, China)

Abstract: The research focuses on the continuous berth allocation problem considering tidal factors and preferred berthing positions, which influence ship entry and exit in port channels and the processing time of ships deviating from preferred berths. Aiming to minimize the total time of all ships arriving at the port within the planned period, a mixed integer linear programming model is constructed, incorporating preferred berthing points as constraints. A hybrid algorithm combining the global search capability of genetic algorithms with the local search power of simulated annealing is designed for solution. This combination enhances the search efficiency of the algorithm. The effectiveness of the algorithm and model is validated through example solutions.

Keywords: continuous berth allocation; simulated annealing-improved genetic hybrid algorithm; mixed integer linear programming model; tidal factors; preferred berthing positions

0 引言

在港口运营中, 泊位分配问题 (berth allocation problem, BAP) 尤为关键, 它直接影响到港口的运作效率和吞吐能力。泊位分配问题可根据港口岸线的不同划分方式分为三种类型: 离散型、混合型及连续型。离散型泊位分配指根据一定的规格将港口的岸线划分为一系列相邻的泊位, 一个泊位只能供一艘船停靠, 且一艘船只能在一个泊位停靠。Xiang 等^[1]对离散型泊位分配问题进行研究, 考虑船

[收稿日期] 2023-12-08

[基金项目] 国家社科基金重大项目“面向应急决策的重大灾害势感知理论、方法与应用研究”(22AZD108)

[作者简介] 通信作者: 初良勇 (1973—), 博士, 教授, 博导, 从事交通运输规划与管理、智慧港口和智能物流方向研究 E-mail: chuliangyong@163.com

http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb

船在港的不确定处理时间, 建立基于 K-means 均值的鲁棒性模型。混合型泊位分配同样将岸线划分为许多泊位, 与离散型不同, 混合型中一艘大船可以同时使用几个泊位, 且只要空间足够, 几艘小船也能同时停泊在同一个泊位^[2]。连续型泊位分配 (continuous berth allocation problem, CBAP) 是将岸线划成长度较小的泊位, 船舶靠泊时需要占用多个泊位, 当停泊空间足够且泊位划分得足够小, 货船可以停泊在码头岸线的任何一个位置。唐世轩等^[3]研究连续型泊位分配问题, 考虑了多种对泊位分配计划有影响的干扰因素, 并量化了这些干扰因素建立了优化模型。按照船舶到港时间, 泊位分配问题可以划分为两个类型: 静态泊位分配和动态泊位分配。静态泊位分配是指对泊位进行分配之前, 所有的船舶均已到港^[4]。动态泊位分配是指在进行泊位分配时, 还有船舶未到港, 但是这些未到港船舶的到港时间是已知的^[5-6]。动态泊位分配中的船舶到港规律更符合港口生产实践。

泊位分配问题是 NP-hard 问题。当算例规模较小时, 可使用 CPLEX 整数规划求解器求出问题的精确解^[7-8]; 当算例规模较大时, 整数规划方法无法在短时间内求得最优解, 需要引入启发式算法求解^[9-10]。船舶进出港口航道时, 必须考虑航道水深是否满足船舶的吃水深度要求。由于潮汐因素, 港口泊位和航道的水深呈周期性变化, 这对船舶进出港口产生显著影响^[11-13]。然而, 在现有的 CBAP 研究中, 一个常常被忽视的重要自然因素是潮汐。因此, 一个考虑潮汐因素的连续型泊位分配模型对于确保港口运营的安全性和效率至关重要。另外, 船舶偏离偏好泊位会使作业成本增加, 从而影响港口整体运营效率。本文旨在探索并建立一个考虑潮汐和偏好泊位影响的连续型泊位分配模型, 这一模型不仅能提高港口的泊位利用率和吞吐量, 还能为港口管理者在复杂环境下提供科学的决策支持, 并为优化港口运营提供重要的理论和实践指导。

1 问题描述及模型构造

1.1 问题描述

港口航道水深受潮汐因素影响, 在一个潮汐周期内航道水深呈周期性变化, 所以按潮汐变化将周期内的航道水深划分为低水位时段和高水位时段, 需要乘潮进出港的船舶只能在高水位阶段通过航道进出港口。设潮汐周期时长为 T_1 、高水位阶段时长为 T_2 , 计划时间窗内有 Z 个潮汐周期, 第一个潮汐周期内高水位时段的开始时间为 O , 那么 $[O, O + T_2), \dots, [O + (Z - 1) T_1, O + T_2 + (Z - 1) T_1)$ 即为所有的潮汐高水位时段。

本文将大型船舶进出口受潮汐影响的连续型泊位分配问题描述为: 已知船舶到港时间和在偏好泊位的作业时间, 以计划期内的到港船舶为研究对象, 使到港船舶在潮汐因素的影响下能尽快在偏好泊靠点附近开始作业, 兼顾船舶的时空不能重叠的限制条件, 要求所有船舶在港总时间之和最小, 求出所有船舶的靠泊位置和靠泊时间。

1.2 符号及定义

模型参数及变量详见表 1 和表 2。

表 1 模型参数及其定义
Tab. 1 Model parameters and their definitions

参数	定义	参数	定义
N	船舶集合, 船舶总数 $n = N $	L	岸线长度
Z	潮汐周期集合, 潮汐周期总数 $z = Z $	a_i	船舶 i 预计到港时间
O	第一个潮汐周期内高水位时段开始时间	l_i	船舶 i 的长度
T_1	一个潮汐周期时长	h_{θ}	船舶在偏好泊位 θ 的处理时间
T_2	潮汐周期内高水位时段长度	β	船舶处理时间控制参数, 本文取 1
R_i	二进制常量, 如果船舶 i 需要乘潮入港, R_i 等于 1, 否则 R_i 等于 0	M	一个足够大的数

表 2 模型决策变量及其定义

Tab.2 Model decision variables and their definitions

变量	变量类型	定义
s_i	整数变量	表示船舶 i 的服务开始时间
p_i	整数变量	表示船舶 i 的停泊位置
d_i	整数变量	表示船舶 i 的停泊位置与偏好泊位的偏离距离
h_i	整数变量	表示船舶 i 的处理时间
e_i	整数变量	表示船舶 i 的服务结束时间
t_s	整数变量	表示船舶 i 的开始服务时间所在的潮汐周期
t_e	整数变量	表示船舶 i 的结束服务时间所在的潮汐周期
x_{ij}	二进制变量	当船舶 j 靠泊时间晚于船舶 i 离港时间时 $x_{ij} = 1$, 否则 $x_{ij} = 0$
y_{ij}	二进制变量	当船舶 i 停靠在船舶 j 的上方时 $y_{ij} = 1$, 否则 $y_{ij} = 0$

1.3 模型假设

1) 岸线上所有停泊位置的水深都满足每一艘非乘潮船靠泊的吃水深度要求, 潮汐因素只影响乘潮船舶进出港口航道; 2) 船舶在偏好靠泊点的装卸时间最短, 而在其他位置的装卸时间随着船舶与偏好靠泊点距离的增大而增加; 3) 船舶一旦停泊, 其靠泊位置就不能改变, 直到服务结束才能离开; 4) 每个靠泊点一次只能处理一艘船舶, 一艘船舶可以在多个靠泊点接受服务; 5) 开始装卸到港船舶时, 港口岸线上没有之前未装卸完的船舶; 6) 船舶间的安全距离包含在船长之内。

1.4 数学模型

本文提出的 CBAP 混合线性整数规划模型, 具体如下:

$$\min \sum_{i \in N} (e_i - a_i); \tag{1}$$
$$h_i = h_0 + d_i \beta; \tag{2}$$
$$e_i \geq s_i + h_i, \forall i \in N; \tag{3}$$
$$d_i \geq p_i - b_i, \forall i \in N; \tag{4}$$
$$d_i \geq b_i - p_i, \forall i \in N; \tag{5}$$
$$e_i \leq s_j + M(1 - x_{ij}), \forall i, j \in N, i \neq j; \tag{6}$$
$$p_i + l_i \leq p_j + M(1 - y_{ij}), \forall i, j \in N, i \neq j; \tag{7}$$
$$x_{ij} + x_{ji} + y_{ij} + y_{ji} \geq 1, \forall i, j \in N, i \neq j; \tag{8}$$
$$s_i \geq a_i, \forall i \in N; \tag{9}$$
$$p_i + l_i \leq L, \forall i \in N; \tag{10}$$
$$O + (t_s - 1)T_1 \leq s_i + M(1 - A_i), \forall i \in N; \tag{11}$$
$$O + (t_s - 1)T_1 + T_2 \geq s_i - M(1 - A_i), \forall i \in N; \tag{12}$$
$$O + (t_e - 1)T_1 \leq e_i + M(1 - A_i), \forall i \in N; \tag{13}$$
$$O + (t_e - 1)T_1 + T_2 \geq e_i - M(1 - A_i), \forall i \in NV; \tag{14}$$
$$t_s \geq 0, \forall i \in N; \tag{15}$$
$$t_e \leq Z - 1, \forall i \in N; \tag{16}$$
$$t_e \geq t_s, \forall i \in N; \tag{17}$$
$$x_{ij}, y_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in N; \tag{18}$$
$$s_i, p_i, e_i, t_s, t_e, d_i \in \{0, 1, \dots, \infty\}, \forall i \in N. \tag{19}$$

目标函数公式 (1) 以所有船舶总在港时间最小为目标, 其中 $e_i - a_i$ 即为船 i 在港总时间。约束式 (2) 确保船舶在港时间与其停泊位置之间的关系, 船舶 i 偏离偏好泊位 b_i 会增加船舶在港处理时间 h_i 。约束式 (3) 确保船舶 i 从开始装卸时刻 s_i 直至经过 h_i 小时完成装卸任务后才能离港。约束式 (4) ~ (5) 用于计算船舶实际靠泊位置 p_i 与其偏好泊位 b_i 之间的偏离距离, 并确保偏离距离为正。为防止服务资源的冲突, 约束式 (6) ~ (8) 确保任两艘船舶在时间和空间上的服务安排不会出现重叠。其中, 约束式 (6) 确保任意服务时间有重叠的船舶 i 和 j 对应的 x_{ij} 为 0, 约束式 (7) 确保任意两艘服务空间有重叠的船舶 i 和 j 对应的 y_{ij} 为 0, 约束式 (8) 确保任意两艘船舶的服务时间和空间至少有一个不重叠。约束式 (9) 保证船舶必须在到达港口后才能开始接受服务, 而约束式 (10) 则限定船舶仅能在指定的岸线范围内靠泊。对于特定需要考虑潮汐影响的船舶, 设立了额外的约束条件, 约束

式(11)~(12) 确保乘潮船的开始处理时间 s_i 必须在第 t_s 个潮汐高水位时段 $[O + (t_s - 1)T_1, O + (t_s - 1)T_1 + T_2)$ 内, 式(13)~(14) 确保乘潮船 i 的服务结束时间 e_i 必须在第 t_e 个潮汐高水位时段 $[O + (t_e - 1)T_1, O + (t_e - 1)T_1 + T_2)$ 内。最后, 约束式(16)~(17) 详细规定了乘潮船接受和结束服务时间与潮汐周期之间的关系。如, 约束式(16) 确保船舶 i 结束所在的潮汐周期 t_e 在计划期所含的潮汐周期总数 Z 内, 约束式(17) 确保船舶开始服务时间所在的潮汐周期 t_s 小于或等于船舶结束服务所在的潮汐周期 t_e 。所有这些约束条件(2)~(17) 共同构成了本研究的模型框架。而约束式(18)~(19) 则明确了决策变量的类型和取值范围, 以确保模型的实际可用性和有效性。

2 算法设计

本文设计了模拟退火遗传混合算法 (simulated annealing-improved genetic hybrid algorithm, SA-IGA) 来求解模型。相较于传统的遗传算法, 本文所采用的 SA-IGA 混合算法增加精英保留策略和解的模拟退火策略, 并将遗传算法中的单点变异机制改成多点变异机制, 此外, 在算法选择亲代的方式上, 以锦标赛法代替传统的轮盘赌的方式选择亲代^[14]。算法采用两阶段求解的方式, 第一阶段用算法更新解中船舶靠泊位置, 第二阶段用启发式算法确定船舶的开始服务时间、服务时间、服务结束时间。算法的初始解采取在可行域内随机生成的方式。通过随机生成初始解, 算法可以探索解空间的不同区域, 从而增加找到全局最优解的机会, 减少陷入局部最优解的概率。

2.1 解的编码

算法中解的编码采取单层编码的方式。染色体中存储的数据为船舶的停泊位置。单层编码降低了算法的计算复杂度, 提升了算法的运行速率。图 1 为 10 艘船舶解的编码方式。

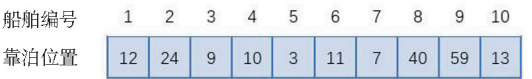


图 1 解的编码方式
Fig.1 Encoding method of the solution

2.2 适应度函数

算法中的适应度函数为目标函数值的倒数, 目标函数的质量越高, 解的适应度越大。由于解当中只包含船舶的泊位信息, 因此在适应度函数中需要引入第二阶段的启发式算法来求解船舶的泊位信息之外的信息, 然后再根据所有信息求出解的适应度。

2.3 解的更新策略

1) 精英保留策略。通过精英保留策略, 算法能够保持每一代中的优秀解, 防止其丢失, 并有助于全局优化的收敛^[15]。这种策略有助于维护优秀遗传信息, 加速优化过程, 提高算法的性能和效果。

2) 两点交叉策略。通过锦标赛法选择进行交叉的亲代, 即随机挑选 compete_size 个染色体, 选取其中适应度最高的染色体作为亲代。为了执行两点交叉, 随机选择两个交叉点, 确保第一个交叉点的位置小于第二个交叉点的位置, 具体交叉过程如图 2 中的步骤一所示。

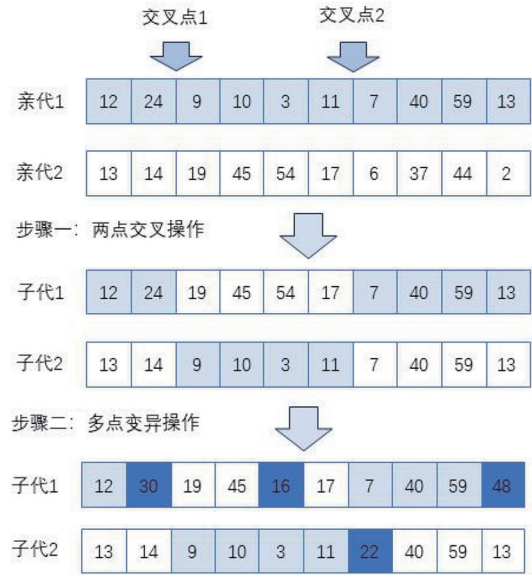


图 2 交叉和变异操作
Fig.2 Crossover and mutation operations

通过两点交叉操作, 算法实现了遗传信息的重新组合, 允许父代个体之间的基因交流, 从而有望产生具有更好适应度的子代, 有助于搜索空间的广泛探索和最优解的发现。

3) 多点变异策略。本文引入多点变异机制, 亲代交叉所产生的子染色体中每个基因都按照概率 p_a 进行突变, 具体变异过程如图 2 中的步骤二所示。多点变异可以帮助算法在搜索空间中进行局部搜索, 因为它可以导致某些个体在某些基因发生变异, 有助于探索局部优化区域。

4) 模拟退火策略。算法中引入模拟退火机制, 所有新解都按照概率 p_s 进行模拟退火操作。模拟退火操作有助于遗传算法在搜索空间中更广泛地探索, 并有望发现全局最优解。通过允许一定程度的随机性和接受不稳定解, 模拟退火操作增加了算法的鲁棒性和全局搜索能力, 是解决复杂优化问题的有效工具。

2.4 SA-IGA 算法求解流程

算法运行流程如表 3 中伪代码所示。该伪代码描述了一个结合改进遗传算法 (IGA) 和模拟退火 (SA) 的优化方法, 用于解决优化问题。算法首先生成 size_pop 个初始解, 设置代数计数器, 并创建一个空的精英个体集合 (1 ~ 3 行)。接着, 进入主循环, 循环迭代直到达到最大代数 max_generations。在每一代中, 算法应用精英保留, 选择并传递 elite_size 个适应度最高的个体到下一代, 并初始化一个新的种群 (5 ~ 6 行)。然后, 在内部循环中, 通过锦标赛选择方法选择父代个体, 对它们应用交叉和变异操作生成子代, 再将子代添加到新种群中 (8 ~ 12 行)。部分子代还会经过模拟退火操作进一步优化 (14 ~ 15 行)。随后, 新种群替代当前种群, 精英集合更新为包含当前代中的最佳个体, 代数计数器增加 (17 ~ 19 行)。最终, 当达到最大代数限制时, 精英集合中的最佳个体作为最终优化结果。这个算法综合运用了遗传算法的进化策略和模拟退火的局部搜索, 在优化问题中寻找最优解。

表 3 算法运行流程
Tab.3 Algorithm operation flow

SA-IGA 算法求解流程	
1:	InitializeX[1..size_pop] = Generate initial fish population
2:	Initialize generation counter
3:	Initialize an empty elite set
4:	while (generation <= max_generations) do
5:	Apply elitism to select and carry forwardelite_size individuals to the next generation
6:	Initialize a new population
7:	while (new_population is not full) do
8:	Select parent1 using tournament selection
9:	Select parent2 using tournament selection
10:	Apply crossover to parent1 and parent2 to create child1 and child2
11:	Apply mutation to child1 and child2
12:	Add child1 and child2 to the new population
13:	end while
14:	If rand(0,1) < ps
15:	population[i] = call _simulated_annealing function
16:	End if
17:	Update the population with the new population
18:	Update the elite set with the best individuals
19:	Update the generation counter
20:	end while
21:	Return the best individual from the elite set

2.5 第二阶段启发式算法流程图

第二阶段启发式算法流程如图 3 所示, 第二阶段的启发式算法将第一阶段求得的入港船舶的停泊位置作为输入, 根据船长、到港时间、潮汐条件、重叠约束等因素确定船舶的开始服务时间与离港时间。

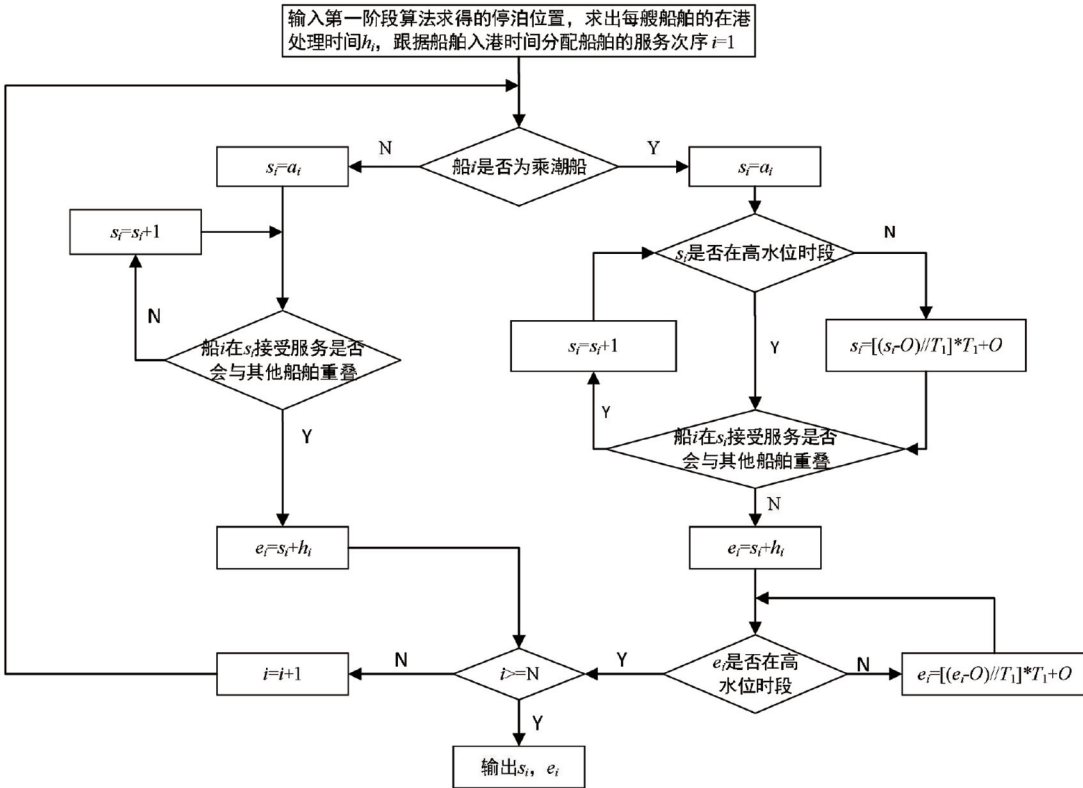


图 3 第二阶段启发式算法求解流程
Fig.3 Heuristic solution process for the second stage

3 算例分析

实验所使用的计算机配置有 Windows10 系统、i7 处理器、8 GB 内存, 并采用 Python 语言进行编程求解。SA-IGA 算法的相关参数为: 种群规模 (pop_size), 500; 最大迭代次数 (max_generations), 200; 精英个体数 (elite_size), 10; 竞标赛选择个体数 (compete_size), 20; 基因变异概率 p_a , 0.1; 模型退火概率 p_s , 0.1。

3.1 算例求解

算例参考 Seyedalizadeh 等^[17]的研究, 本实验设定的岸线长度为 3200 m, 涉及三种类型的船舶, 其船长分别为 150、200 和 250 m (包括船舶之间的安全距离)。特别地, 船长为 250 m 的船舶需要在高水位时段入港。这些船舶在偏好泊位上的处理时间分别设定为 5、7 和 9 h, 且船舶靠泊位置与偏好泊位的距离越大, 船舶在泊位上的处理时间越长。实验中连续型泊位分配问题采取离散化处理的形式将泊位的时间和空间划分为多个阶段, 最小的时间单位为 0.5 h, 空间单位为 50 m。本实验的计划周期为 36 h, 潮汐周期数为 3, 即一个潮汐周期 12 h。第一个计划周期内高水位开始时刻为 1:00, 因此本实验的时空范围设定为 64 × 72 个单元。具体的到港船舶数据见表 4。本研究使用表 4 中 11 ~ 30 号船舶的数据进行实验, 相应的算例分别命名为 e-11、e-12 至 e-30。

图 4 为 SA-IGA 所求的泊位分配方案的甘特图, 该方案的目标函数值为 571。图 4 中时间轴上浅蓝色所覆盖的区域为潮汐高水位时段, 且计划周期内共有 3 个高水位时段。所有乘潮船的服务开始时间与服务结束时间均在高水位时段中, 且停泊位置偏离偏好泊位的船舶的处理时间均与其偏离程度呈正相关, 验证了 SA-IGA 所得的泊位分配方案的可行性。由于泊位空间有限, 方案中船 15、17、18、21、24、27、28 到港后需要等待泊位一段时间, 直到有足够数量的泊位空闲才能接受装卸服务。方案中船 3 为乘潮船, 因为其结束服务时间不在潮汐高水位时段内, 船 3 离港时间延长至第二个潮汐高

水位时段的开始时刻。潮汐因素和偏离偏好泊位对船舶装卸效率有显著影响，因此在泊位分配时，这些因素应当被重点考虑。本文提出的线性整数规划模型将这些因素作为约束条件，例如大型船舶只能在潮汐高水位阶段进出口，且船舶偏离偏好泊位将产生相应的费用，并随偏离程度增大而增加。这确保了模型求解结果与港口实际操作相符，并为港口岸侧的泊位分配提供了有效的参考。

表 4 30 艘到港船舶数据
Tab.4 Data of 30 arriving vessels

船舶 编号	到达 时间 a_i	船长 l_i	偏好 泊位 b_i	处理 时间 h_{θ}	是否 乘潮	船舶 编号	到达 时间 a_i	船长 l_i	偏好 泊位 b_i	处理 时间 h_{θ}	是否 乘潮
1	0	3	12	10	否	16	15	3	12	10	否
2	1	4	24	14	否	17	16	4	24	14	否
3	2	5	36	18	是	18	17	5	36	18	是
4	3	3	47	10	否	19	18	3	47	10	否
5	4	4	59	14	否	20	19	4	59	14	否
6	5	5	12	18	是	21	20	5	12	18	是
7	6	3	24	10	否	22	21	3	24	10	否
8	7	4	36	14	否	23	22	4	36	14	否
9	8	5	47	18	是	24	23	5	47	18	是
10	9	3	59	10	否	25	24	3	59	10	否
11	10	4	12	14	否	26	25	4	12	14	否
12	11	5	24	18	是	27	26	5	24	18	是
13	12	3	36	10	否	28	27	3	36	10	否
14	13	4	47	14	否	29	28	4	47	14	否
15	14	5	59	18	是	30	29	5	59	18	是

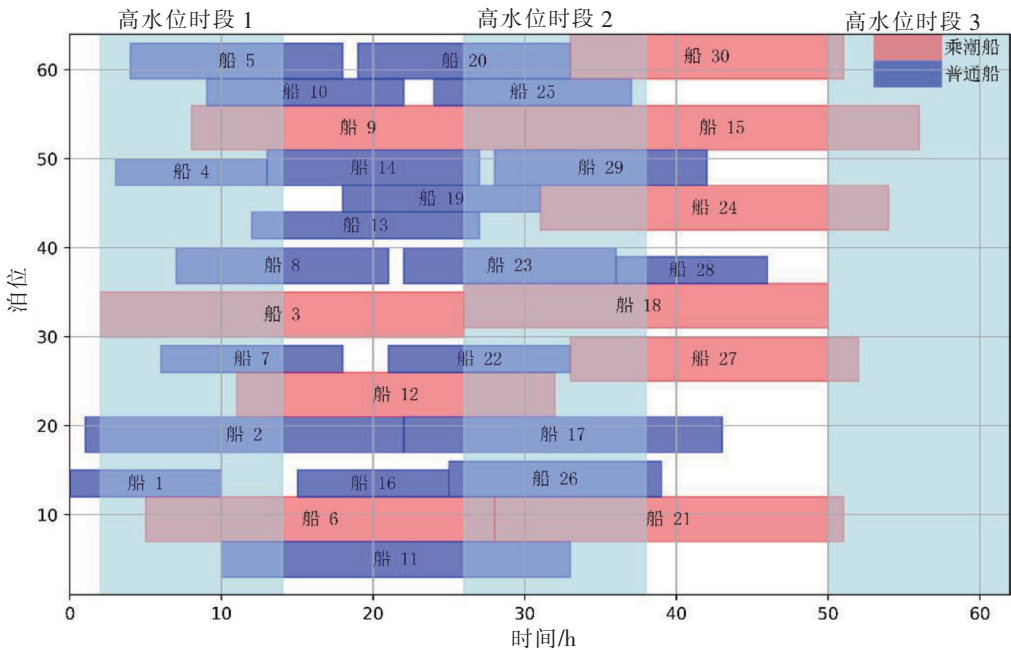


图 4 泊位分配方案甘特图
Fig.4 Gantt chart of berth allocation scheme

3.2 模型有效性验证

将 1.4 中构建的线性混合整数规划模型导入 CPLEX 12.6 求解器中，并以 e-11 至 e-20 的小型算例数据作为输入进行了求解。如表 5 所示，求解结果表明所构建的模型是有效的，使用整数规划方法，能够在相对较短的时间内为中小规模算例找到合适的泊位分配方案。然而，随着算例规模的增大，模

型的求解时间也相应增加，一旦算例达到一定规模，求解时间可能会延长至数小时。因此，为了在更短的时间内得到高质量的泊位分配方案，需要引入启发式算法进行模型求解。

3.3 算法有效性验证

根据 SA-IGA 和 CPLEX 两种方法求解大型算例得到的分析结果（见表 6），可以看出误差（GAP）范围为 1.33% ~ 6.04%。这表明，在大多数情况下，SA-IGA 算法能够产生与 CPLEX 极为接近的解。特别是在大规模的算例中，SA-IGA 算法能够在较短的时间内得到近似于最优解的次优解，且这种误差水平是完全可接受的。这些结果有效地证明了 SA-IGA 算法在解决复杂模型中的实用性和可行性。

3.4 算法对比分析

为了验证 SA-IGA 算法的高效性，将算法求解 e-21，e-22，…，e-30 的结果与 IGA（改进遗传算法）和 GA（遗传算法）的求解结果（见表 6）进行对比分析。发现，SA-IGA 比 IGA 和 GA 更适合求解泊位分配问题，它能在相近的求解时间内求出质量更高的解。同时还发现，IGA 算法的求解质量普遍高于 GA，验证了本文算法改进思路的可行性；而 SA-IGA 算法的求解质量又普遍高于 IGA，验证了模拟退火策略与遗传算法结合的可行性。

表 5 CPLEX 求解中小算例的结果

Tab.5 Results of small test cases solved by CPLEX		
算例编号	目标值	运行时间/s
e-11	169	0.3
e-12	191	0.4
e-13	204	1.2
e-14	219	1.3
e-15	248	2.8
e-16	262	3.2
e-17	277	6.5
e-18	310	6.4
e-19	326	13.1
e-20	346	14.8

表 6 CPLEX 与 SA-IGA 求解大算例的结果

Tab.6 Results of large test cases solved by CPLEX and SA-IGA

算例 编号	GAP/%	CPLEX		SA-IGA		IGA		GA	
		目标值	运行时间/s	目标值	运行时间/s	目标值	运行时间/s	目标值	运行时间/s
e-21	1.33	376	20.7	381	77.4	390	44.8	399	29.8
e-22	4.62	389	35.4	407	82.5	405	55.2	411	34.0
e-23	4.47	403	80.6	421	98.4	440	57.9	446	38.9
e-24	6.04	430	208.8	456	114.9	469	69.0	483	46.4
e-25	4.50	444	144.5	464	107.6	486	59.5	496	45.4
e-26	3.28	458	500.2	473	108.4	495	78.6	506	49.1
e-27	4.55	483	679.8	505	116.2	528	84.5	540	44.2
e-28	5.44	496	945.47	523	115.3	531	104.2	554	57.6
e-29	4.85	515	2086.6	540	118.2	564	99.4	574	62.8
e-30	-	-	-	571	120.6	621	102.2	634	72.2

注:1)GAP = 100% × (SA-IGA 的目标值 - CPLEX 目标值)/CPLEX 的目标值;2) CPLEX 求解的时间上限设置为 3600 s,模型求解时间超过 3600 s 则为“-”。

图 5 为用 SA-IGA、IGA、GA 三种算法求解 e-30 的收敛对比图。其中 GA 在 180 代时收敛于 634，IGA 在 110 代时收敛于 621，SA-IGA 在 160 代时收敛于 571。由图 5 分析可知，对 GA 进行改进可提高算法收敛速度和求解质量，而加入模拟退火策略可以使算法具有更强的跳出局部最优解的能力。

4 结论

针对船舶大型化趋势，综合考虑潮汐因素对船舶进出港口的影响以及偏好泊位在船舶靠泊处理中的作用，本文构建了一种动态连续型泊位分配问题的混合

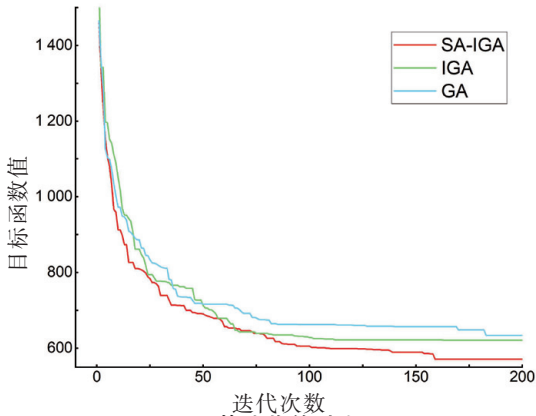


图 5 算法收敛对比图
Fig.5 Comparison of algorithm convergence

线性整数规划模型。为求解此模型,设计了基于 SA-IGA 的两阶段混合算法。通过详细的算例分析,验证了所提出的模型及算法的有效性,展示了其在集装箱码头泊位分配实践中的应用潜力。

本研究初步将潮汐对港口影响分为高低水位两个阶段。未来研究可以潮汐对进出港航道的影响进行更细致的分类。本文关注的是港口装卸操作中泊位分配这一环节,未来研究应考虑多个环节的联合调度,如将泊位、岸桥、港口内运输车辆等多种资源进行综合调度。此外,本文采用的算法求得的分配合方案与精确解存在一定差距,未来研究应使用更加高效和快速的算法来实现更精确的求解。

[参 考 文 献]

- [1] XIANG X, LIU C. An expanded robust optimisation approach for the berth allocation problem considering uncertain operation time[J]. *Omega*, 2021, 103: 102444.
- [2] KORDIĆ S, DAVIDOVIĆ T, KOVAČ N, et al. Combinatorial approach to exactly solving discrete and hybrid berth allocation problem[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(21/22): 8952-8973.
- [3] 唐世轩, 金建钢, 卢春霞, 等. 考虑多种类干扰事件的集装箱码头泊位分配问题[J]. *大连海事大学学报*, 2021, 47(4): 30-38.
- [4] IMAI A, NAGAIWA K, TAT C W. Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 1997, 31(1): 75-94.
- [5] 李斌, 唐志斌. 基于计算物流和群集智能的多集装箱码头泊位分配[J]. *计算机工程与应用*, 2023, 59(16): 262-284.
- [6] MARTIN-IRADI B, PACINO D, ROPKE S. The multiport berth allocation problem with speed optimization: exact methods and a cooperative game analysis[J]. *Transportation Science*, 2022, 56(4): 972-999.
- [7] YAN S, LU C C, HSIEH J H, et al. A network flow model for the dynamic and flexible berth allocation problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 81: 65-77.
- [8] VENTURINI G, IRIS Ç, KONTOVAS C A, et al. The multi-port berth allocation problem with speed optimization and emission considerations[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 54: 142-159.
- [9] JI B, YUAN X, YUAN Y. Modified NSGA-II for solving continuous berth allocation problem: using multiobjective constraint-handling strategy[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(9): 2885-2895.
- [10] BACALHAU E T, CASACIO L, DE AZEVEDO A T. New hybrid genetic algorithms to solve dynamic berth allocation problem[J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 167: 114198.
- [11] CHEIMANOFF N, FONTANE F, KITRI M N, et al. A reduced VNS based approach for the dynamic continuous berth allocation problem in bulk terminals with tidal constraints[J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 168: 114215.
- [12] 徐亚伟, 王志明, 李芸. 考虑潮汐影响的连续泊位分配策略[J]. *上海海事大学学报*, 2021, 42(4): 39-46.
- [13] 郑红星, 吴云强, 邵思杨, 等. 考虑潮汐影响的泊位分配与船舶调度集成优化[J]. *信息与控制*, 2020, 49(1): 95-103, 113.
- [14] 张家骅, 李爱平, 刘雪梅. 行驶时间区间不确定的装配线物料配送路径规划[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(18): 2239-2246.
- [15] 牛铁铭, 李雷孝, 李杰, 等. 基于 LSTM 和 EGA 的 Ceph 调优方法[J]. *计算机工程与设计*, 2023, 44(4): 1129-1135.
- [16] 袁瑞萍, 王伟, 李俊韬, 等. 不确定性条件下多阶段应急物资多式联运调度研究[J]. *运筹与管理*, 2023, 32(6): 33-39.
- [17] SEYEDALIZADEH GANJI S R, BABAZADEH A, ARABSHAHI N. Analysis of the continuous berth allocation problem in container ports using a genetic algorithm[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2010, 15(4): 408-416.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 周云龙)