



船舶吃水约束下的船闸调度策略 研究与实践*

陈志宏¹, 杨正², 何平¹, 翁庆龙¹, 张坤¹, 杜晓啸¹, 林盛梅²

(1. 江苏省泰州引江河管理处, 江苏 泰州 225300; 2. 南京畅森科技有限责任公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 针对高港船闸调度人工参与度高、实时性差、效率低等问题, 开展了船舶吃水约束下的船闸调度策略研究。首先, 通过融合 BLF 和 HR 算法中的贪心策略, 提出一种符合高港船闸实际业务需求的排档方法, 解决闸室排档灵活度低、空间浪费大的问题, 有效提高了闸室面积利用率。其次, 基于船舶实时感知数据和闸室实时水位, 构建船闸动态调度模型并进行求解, 通过自动生成船舶调度方案并根据船舶实际情况动态更新, 一方面能够节省船闸调度的人工操作量, 另一方面可以减少因船舶未准时到达、瞒报吃水等因素导致重新调整调度的时间耗费, 从而提高船闸通航效率。最后, 基于实例验证分析, 结果表明, 与 2024 年相比, 闸室面积利用率和船舶平均过闸时间分别提高了 13.73% 和 17.39%。

关键词: 调度策略; 闸室排档算法; 闸室面积利用率; 平均过闸时间; 船舶吃水

中图分类号: U641.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0104-06

Research and practice on lock scheduling strategies under ship draught constraints

CHEN Zhihong¹, YANG Zheng², HE Ping¹, WENG Qinglong¹, ZHANG Kun¹, DU Xiaoxiao¹, LIN Shengmei²

(1. Taizhou Yinjiang Canal Administration of Jiangsu Province, Taizhou 225300, China;

2. Nanjing Changmiao Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: To address issues such as high manual involvement, poor real-time performance, and low efficiency in the scheduling of Gaogang ship lock, this study conducts research on ship lock scheduling strategies under the constraint of ship draught. Firstly, by integrating the greedy strategies of the BLF and HR algorithms, a berthing arrangement method that meets the actual operational needs of Gaogang ship lock is proposed which solves the problems of low flexibility and large space waste, effectively improving the utilization rate of the lock chamber area. Secondly, based on real-time ship perception data and real-time water level in the lock chamber, a dynamic scheduling model for the ship lock is constructed and solved. By automatically generating ship scheduling and dynamically updating plans according to the actual conditions of ships, on the one hand, it can reduce the manual operation volume of ship lock scheduling, and on the other hand, it can reduce the time consumption, thereby improving the navigation efficiency of the ship lock. Finally, through case verification and analysis, the results show that compared with 2024, the utilization rate of lock chamber area and the average lockage time of ships have increased by 13.73% and 17.39% respectively.

Keywords: scheduling strategy; chamber scheduling algorithm; utilization rate of lock chamber area; average lockage time; ship draught

高港船闸地处连接长江航运的引江河源头, 是泰州地区最大的通江口门, 受潮汐影响大, 目

前主要依靠人工进行调度。船闸调度效率低、调整耗时耗力, 且超吃水船舶调度难度大, 大大影

收稿日期: 2025-07-08 录用日期: 2025-08-21

*基金项目: 江苏省水利科技项目(2024042)

作者简介: 陈志宏(1976—), 男, 高级工程师, 研究方向为水利工程和船闸运行管理。

响了高港船闸的通航效率。

在船舶调度策略方面, 国内外学者进行了广泛研究。针对船舶过闸调度问题, 高瑶^[1]构建通航仿真模型, 生成了极端天气下的船舶调度策略。Liu 等^[2]利用动态多群体粒子群优化算法, 生成船闸汛期泄洪下的船舶调度方案。李明伟等^[3]建立了船闸选择-排布优化模型, 通过改进 GA-PSO 混合优化算法求解船队过闸策略。针对闸室排档优化问题, 李珍尧等^[4]确定了船舶权重和入闸序列, 通过路径转移等策略生成闸室船舶排布。庞学丽^[5]构建多因素风险评估模型, 采用遗传算法优化闸室排档方案。邓伟等^[6]设置船舶类型、大小、吃水权重, 构建排序模型并验证了效果。Wu 等^[7]基于闸次分配、闸室排布和过闸速度提出一种邻域搜索算法。

上述研究未考虑潮汐和船舶实际吃水对船闸调度的影响, 难以贴合高港船闸的实际需求。而目前关于潮汐影响船舶调度的研究主要针对港口场景, 较少涉及船闸, 且调度时多采用船舶申报数据, 难以避免船舶瞒报、谎报真实数据等情况。文捷等^[8]研究船舶报港计划、港口货物运输量和潮汐周期, 提出潮汐时间窗概念, 为船舶规划最佳靠泊航线。崔皓天^[9]从船舶报港时间、尺寸、吃水深度 3 方面构建三维长方体排列模型, 研究二阶贪心策略进行求解。章嘉文等^[10]构建潮汐约束下的 MILP 模型来解决港口泊位岸桥联合调度问题。

本文基于潮汐对船闸调度的影响, 综合考虑船舶类型、吃水、尺寸等约束, 研究一种船闸动态调度策略, 旨在提高船舶调度效率、提升船闸通过能力。

1 船闸调度模型构建

构建船闸调度模型首先需确定多目标函数, 并设置约束条件, 确保船舶调度策略符合船闸实际需求。本文选择闸室面积利用率最大化和船舶平均过闸时间最短作为优化目标。

1.1 多目标函数构建

多目标函数包括闸室面积利用率和船舶平均

过闸时间子函数。定义多目标函数为 F , 闸室面积利用率子函数为 U , 船舶平均过闸时间子函数为 $\bar{V}$ 。

闸室面积利用率为一个闸次船舶占地总面积与闸室有效停靠面积之比, 见式(1)。

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n a_{ij} l_i w_i}{(1 - \alpha) S_t} \quad (1)$$

式中: α 为船舶安全停靠系数, 为船舶排档预留安全距离; S_t 为闸室总面积; l_i 、 w_i 分别为船舶 i 的长度和宽度; a_{ij} 为二进制变量, 用于判断船舶是否在该闸次, 船舶 i 在闸次 j 中, a_{ij} 为 1, 否则为 0。

船舶平均过闸时间指一个计划期内船舶过闸总时长与过闸船舶数之比, 受每个闸次船舶类型、数量、尺寸和吃水等影响, 定义影响因子为 β 。为统一闸室面积利用率与船舶平均过闸时间的计算维度, 对船舶平均过闸时间进行归一化处理, 定义为 $\bar{V}'$ 。

$$\bar{V} = \sum_{i=1}^n \frac{\beta S_i}{n} \quad (2)$$

$$\bar{V}' = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{\bar{V} - V_{\min}} \quad (3)$$

因此, F 可确定为:

$$F = U + \bar{V}' \quad (4)$$

1.2 约束条件

约束条件见式(5)~(12)。

$$0 \leq x_{ij} \leq L, \quad \forall i \in g_{ij}, j \in m_{giT} \quad (5)$$

$$0 \leq y_{ij} \leq W, \quad \forall i \in g_{ij}, j \in m_{giT} \quad (6)$$

$$0 \leq x_{ij} + l_i \leq L, \quad \forall i \in g_{ij}, j \in m_{giT} \quad (7)$$

$$0 \leq y_{ij} + w_i \leq W, \quad \forall i \in g_{ij}, j \in m_{giT} \quad (8)$$

$$(l_i, w_i) \in \{(L, W), (W, L)\} \quad (9)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{船舶 } i \text{ 在闸次 } j \text{ 中} \\ 0 & \text{船舶 } i \text{ 不在闸次 } j \text{ 中} \end{cases} \quad (10)$$

$$0 \leq x_{ij} + l_i \leq x_{kj}, \quad \forall i, k \in g_{ij}, i \neq k, x_{ij} \leq x_{kj}, j \in m_{giT} \quad (11)$$

$$0 \leq y_{ij} + w_i \leq y_{kj}, \quad \forall i, k \in g_{ij}, i \neq k, y_{ij} \leq y_{kj}, j \in m_{giT} \quad (12)$$

式中: x_{ij} 、 y_{ij} 为船舶 i 在闸次 j 中的横、纵坐标;

L 、 W 分别为闸室有效停靠面积的长度和宽度； g_{ij} 为船舶初始预排列序号； m_{giT} 为船舶预排档队列序号； x_{kj} 、 y_{kj} 为船舶 k 在闸次 j 中的横、纵坐标。上述约束条件中，式(5)~(8)表示船舶排档不能超出闸室边界；式(9)表示排档方向须与闸室平行；式(10)表示一艘船只能选择一个闸次，避免船舶重复分配；式(11)、(12)表示船舶不能重合。

2 船闸调度模型求解方法

船闸调度模型借助水上电子卡口、AIS(automatic identification system, 船舶自动识别系统)、水位计等感知设备, 获取船舶身份、到达时间、类型、尺寸、吃水及闸室水位等实时数据, 进行模型求解, 流程见图 1。

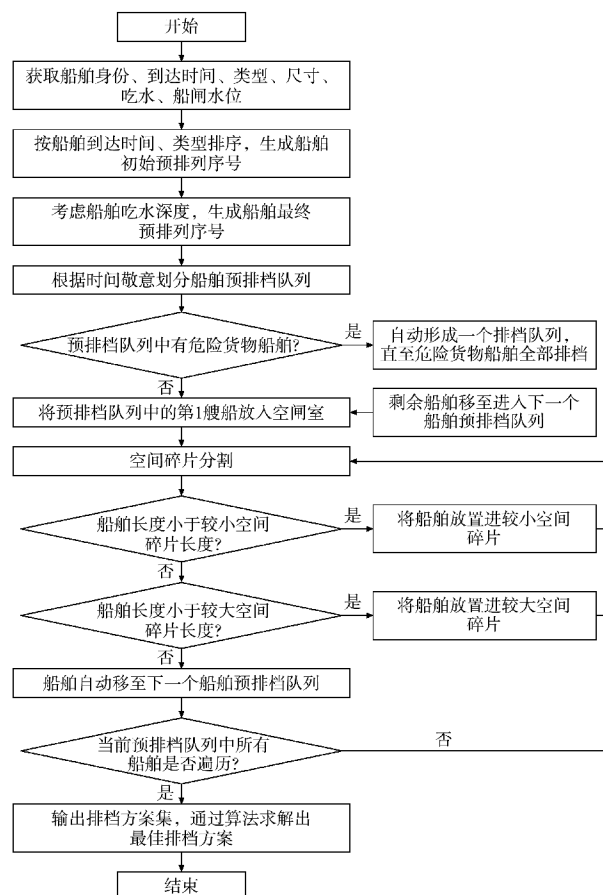


图 1 高港船闸调度模型求解流程

Fig. 1 Scheduling model solution procedure of Gaogang ship lock

2.1 船舶过闸排序及闸次预排档队列确认

2.1.1 考虑船舶实际吃水的船舶过闸排序

将船舶按类型划分队列并根据到达时间排序, 见式(13)。

$$g_{ij(t)} = g_{ij} + \lceil \lambda [D - (H_t - H_r)] \rceil \quad (13)$$

式中: λ 为惩罚系数, 为防控船舶超吃水风险, 当船舶吃水大于标准时触发, 延后船舶排序; D 为船舶吃水; H_t 为船闸实时水位; H_r 为富余水深; $g_{ij(t)}$ 为船舶最终预排列序号。

2.1.2 基于船舶到达时间的排档队列划分

船舶平均待闸时间指一个计划期内船舶待闸总时长与待闸船舶数之比, 定义为 $\bar{V}_1$ 。将取整后的船舶平均待闸时间作为单位时间区间, 将 1 d 分割成多个区间, 并根据船舶到达时间将船舶划分至每个区间内, 作为每个闸次的预排档船舶, 步骤如下。

1) 对船舶平均过闸时间 $\bar{V}_1$ 进行取整处理, 定义取整后单位时间区间为 $\bar{V}_c$ 。

$$\bar{V}_c = \begin{cases} \lceil \bar{V}_1 \rceil & \lceil \bar{V}_1 \rceil - \bar{V}_1 < 0.5 \\ \lfloor \bar{V}_1 \rfloor & \bar{V}_1 - \lfloor \bar{V}_1 \rfloor < 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

2) 定义每天第 1 艘船舶到达时间为 T , 向下取整得到整点 T_c 。

3) 从 T_c 开始, 对当天剩余时间进行单位区间划分, 若最后一个区间剩余时长不足 $\bar{V}_c$ 按一个区间算。此时每个区间形成一个船舶预排档队列, 定义为 M 。

2.2 基于 BLF (bottom-left-fill, 左下填充) 和 HR (harmonic rematching, 谐波重匹配) 算法融合的船舶闸室排档方法改进

船舶闸室排档可以用二维装箱问题求解, BLF 算法在此基础上进行了优化, 提出了空间碎片分割思路, 实现二维空间利用率最大化, 但是也存在一些缺陷, 如选择排档目标时采用随机策略, 易导致排档方案不符合实际业务需求、增加模型计算量和时间耗费等问题。本文基于 BLF 算法, 融合 HR 算法的贪心策略, 每次均选择面积最大的船舶进行空间碎片分割, 一是为了让大型船舶尽快过闸, 防止拥堵; 二是可以通过大小船相嵌, 实现闸室面积利用率最大化。

2.2.1 排档优化方法前提条件

本文根据高港船闸的实际业务场景, 调整了船舶闸室排档的前提条件。1) 假设船舶从左到右开始进闸, 设计第 1 艘船从箱子右下角最低处开始放置。2) 由于船闸长度大于宽度, 且闸室只停靠两排船舶, 本文采用纵向空间分割方式。3) 排档时优先放置预排档队列中的危险货物船舶和集装箱船。4) 危险货物船舶不能与其他船舶同一闸次过闸, 若预排档队列中存在其他类型船舶, 这些船舶自动移至下一队列; 集装箱船可与其他船舶(危险货物船舶除外)同闸次过闸。

2.2.2 基于空间碎片分割的闸室船舶排档优化

1) 将船舶 i_1 从船闸右下角最低处开始放置, 并沿船舶左侧边进行空间纵向分割, 形成两个空间碎片 S_1 和 S_2 , 其中 S_1 面积大于 S_2 , 见图 2。

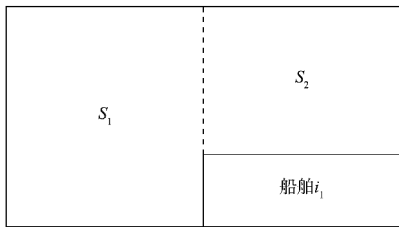


图 2 船舶 i_1 放入空间碎片 S_2

Fig. 2 Putting the ship i_1 into the space debris S_2

2) 将船舶 i_2 从最右边放置, 对比 i_2 与 S_2 的长度, 见图 3。①若 i_2 长度小于 S_2 长度, i_2 可直接放入 S_2 , 并沿 i_2 左侧边进行纵向分割, 生成新的空间碎片; ②若 i_2 长度等于 S_2 长度, i_2 可正好放入 S_2 , 此时不再进行纵向分割, 仅 S_2 面积变小; ③若 i_2 长度大于 S_2 长度, 则继续与 S_1 对比, 若 i_2 长度小于 S_1 长度, 则将 i_2 放入 S_1 , 并沿 i_2 左侧边进行纵向分割; ④若 i_2 长度大于 S_2 长度, 则继续与空间碎片 S_1 对比, 若船舶 i_2 长度等于空间碎片 S_1 长度, 则将船舶 i_2 放入空间碎片 S_1 , 此时不再进行纵向分割; ⑤若船舶 i_2 长度大于空间碎片 S_1 长度, 该船自动移至下一预排档队列。

3) 当空间碎片无法放下当前船舶预排档队列中任意一艘船, 结束该闸次排档。

4) 该闸次排档完成后队列中剩余的船舶, 自动移入下一船舶预排档队列。

5) 按照上述排档规则, 遍历船舶预排档队列中的所有船舶, 生成排档方案集 R 。

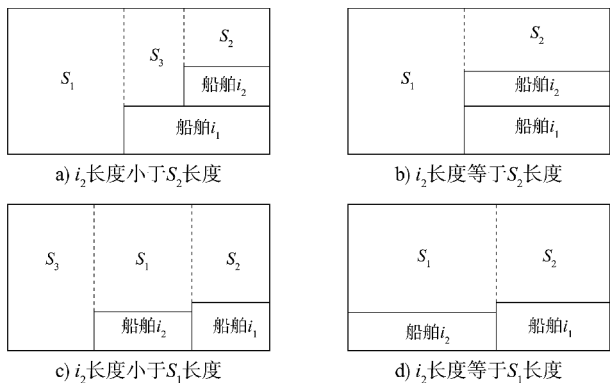


图 3 船舶和空间碎片的长度对比

Fig. 3 Comparison of length between ship and space debris

2.3 多目标函数求解方法

本文基于排档方案集 R , 针对闸室面积利用率最大化和船舶平均过闸时间最短目标优化, 采用 Pareto 占优解得多个非劣解, 形成非劣解集。在目标空间中, 这些解形成 Pareto 前沿。目前用于求解 Pareto 前沿问题的算法主要有两类, 一类是基于数学规划的技术, 另一类则是基于遗传算法的技术。

3 高港船闸调度实例效果验证

3.1 实施流程

本文选取 2025 年 5 月某日高港船闸部分下行船舶数据进行实例验证。高港船闸闸室尺寸长 196 m、宽 16 m, 船舶安全停靠系数 α 设为 0.118。闸室有效停靠面积 2 765.952 m^2 , 船闸水位 4.5 m, 富余水深 0.5 m。船舶到达时间、类型、尺寸、实际吃水和闸室水位等感知数据见表 1。基于船舶数据划分船舶预排档队列, 见表 2。

表 1 船舶过闸数据
Tab. 1 Ship lockage data

序号	船名	到达时间	船舶类型	长×宽/ (m×m)	实际 吃水/m
118	信远 819	10:03:00	集装箱船	62×13	3.2
119	四航货 6666	10:07:00	危险货物船舶	78×13	3.9
120	江海 78888	10:16:00	普通货船	53×10	2.9
121	邮川 638	10:21:00	危险货物船舶	47×8	3.0
122	平南荣达 8288	10:28:00	普通货船	41×6	2.6

续表1

序号	船名	到达时间	船舶类型	长×宽/ (m×m)	实际 吃水/m
123	大福 8768	10:35:00	普通货船	67×12	2.8
124	华航 902	10:46:00	集装箱船	55×10	2.7
125	和润 863	10:59:00	集装箱船	52×8	3.1
126	顺运 8258	11:06:00	普通货船	67×13	4.2
127	信远 9688	11:14:00	普通货船	54×10	2.9
128	海亚 006	11:23:00	普通货船	42×5	2.8
129	冠峰 1800	11:35:00	普通货船	54×10	2.4
130	皖寿县 9	11:44:00	普通货船	58×11	3.3
131	苏盐城货 090998	11:56:00	普通货船	49×9	2.2

表 2 船舶预排档队列

Tab.2 Pre-arranged ship berthing queue

船舶预排档序号	船名	预排档队列
1001	四航货 6666	10
1002	邮川 638	
1003	信远 819	
1004	华航 902	
1005	和润 863	
1006	江海 78888	
1007	海亚 006	
1008	平南荣达 8288	
1009	大福 8768	
1101	信远 9688	11
1102	冠峰 1800	
1103	皖寿县 9	
1104	苏盐城货 090998	
1105	顺运 8258	

1) 由于第 10 个预排档队列中有危险货物船舶，危险货物船舶单独一个闸次排档。由于闸室可完全容纳 2 艘危险货物船舶，因此只有一种排档

方案，见图 4a)。2) 第 10 个预排档队列中剩余的 6 艘船自动移入第 11 个队列。由于第 11 个预排档队列中有集装箱船，因此优先排档集装箱船，最终生成两种排档方案，见图 4b)、c)。通过自动计算两个方案的闸室利用率，最终选择方案 1 为最优排档方案。3) 由于第 11 个预排档队列仅排档 4 艘船，剩余的 8 艘船自动移入第 12 个队列继续排档，后续船舶均按照相同规则排档，直至当天所有船舶排档完成。

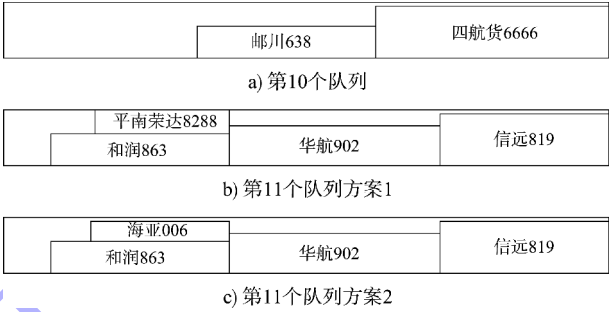


图 4 船舶过闸排档方案
Fig.4 Scheduling schemes of ship lockage

3.2 效果分析

按照上述实施流程，对高港船闸 2025 年 5 月某日所有过闸船舶进行调度排档，并计算每个闸次的闸室面积利用率、船过闸时间和船舶平均过闸时间，见图 5。高港船闸 2024 年闸室面积利用率为 63.50%，船舶平均过闸时间为 1.15 h。实例验证表明，闸室面积利用率均值为 72.22%，船舶平均过闸时间为 0.95 h，较 2024 年分别提高了 13.73%和 17.39%。

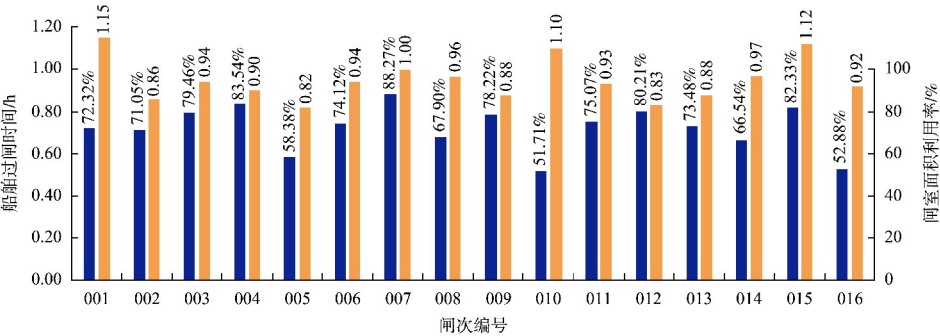


图 5 高港船闸所有闸次过闸数据
Fig.5 Data of all lockages at Gaogang ship lock

4 结论

1) 基于船舶实时感知数据进行动态调度,能够有效减少因船舶未准时到达重新调整调度的问题,消除船舶吃水超深的安全隐患,提高船闸整体通过能力。实例验证表明,采用此方法后,高港船闸平均过闸时间从 1.15 h 缩减至 0.95 h,过闸效率提升了 17.39%。

2) 采用船舶实际检测尺寸进行排档,减少了船舶瞒报尺寸的风险,提升了排档方案的可行性。结果表明,采用此方法后,闸室面积利用率从 63.50% 提升至 72.22%。

参考文献:

- [1] 高瑶. 极端场景下三峡-葛洲坝枢纽通航调度策略仿真研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2024.
- GAO Y. Simulation research on traffic scheduling strategy of three gorges-gezhouba junction under extreme environment[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2024.
- [2] LIU S, ZHANG Y, GUO W J, et al. Ship scheduling problem based on channel-lock coordination in flood season [J]. Expert systems with applications, 2024, 254: 124393.
- [3] 李明伟, 王梓鹤, 杨中仪, 等. 计入船舶待闸时间影响的船闸调度优化方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(5): 848-857.
- LI M W, WANG Z H, YANG Z Y, et al. Research on optimization method for ship lock scheduling considering the impact of ship waiting time [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(5): 848-857.
- [4] 李珍尧, 赵尊荣, 叶子良, 等. 考虑闸室面积利用率的三峡船闸调度方法[J]. 大连海事大学学报, 2023, 49(4): 76-87.
- LI Z Y, ZHAO Z R, YE Z L, et al. A dispatching method for Three Gorges ship locks considering the utilization of lock chamber area [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2023, 49(4): 76-87.
- [5] 庞学丽. 考虑风险因素下复合通航模式双向联合调度方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- PANG X L. Study on the bi-directional joint scheduling method of composite navigation modes considering risk factors[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.
- [6] 邓伟, 颜淑婷, 熊浩奇, 等. 湘江船闸船舶综合优先级的通航调度算法研究[J]. 电脑知识与技术, 2025, 21(3): 21-23.
- DENG W, YAN S T, XIONG H Q, et al. Research on navigation scheduling algorithm of ship comprehensive priority in Xiangjiang ship lock [J]. Computer knowledge and technology, 2025, 21(3): 21-23.
- [7] WU Z Y, JI B, YU S S. Modeling and solution algorithm for green lock scheduling problem on inland waterways[J]. Mathematics, 2024, 12(8): 12081192.
- [8] 文捷, 刘昊雨, 王永才, 等. 潮汐影响下基于长方体排列的船舶调度问题研究[J]. 中国航海, 2024, 47(3): 81-88.
- WEN J, LIU H Y, WANG Y C, et al. Research on ship berth scheduling based on cuboid arrangement considering tidal effects [J]. Navigation of China, 2024, 47(3): 81-88.
- [9] 崔皓天. 考虑潮汐影响的集装箱班轮运输调度与航速优化研究[D]. 济南: 山东交通学院, 2025.
- CUI H T. Study on scheduling and speed optimization of container liner transport considering the influence of tides [D]. Jinan: Shandong Jiaotong University, 2025.
- [10] 章嘉文, 初良勇. 考虑潮汐和船舶到港时间不确定性的泊位岸桥联合调度[J]. 计算机工程与应用, 2025, 61(20): 379-390.
- ZHANG J W, CHU L Y. Joint scheduling of berths and quay cranes considering tides and uncertainty in ship arrival times [J]. Computer engineering and applications, 2025, 61(20): 379-390.

(本文编辑 王传瑜)