文章编号:1000 - 4653(2026)04 - 0153 - 11

基于双目标动态规划的湛江徐闻港客滚船调度优化

李荣辉[1,2,3*]， 黄龙生[1]， 吴馥谧[1]， 李佳文[1,2,3]
(1. 广东海洋大学 船舶与海运学院, 广东 湛江 524000;
2. 广东省船舶智能安全研究中心,广东 湛江 524000;
3. 广东省南海海洋牧场智能装备重点实验室,广东 湛江 524000)

摘 要:作为全球最大客货滚装码头,湛江徐闻港在高峰运营时段面临严峻的船舶调度压力,对调度效率提出了更高的要求。针对上述问题,在前期研究的基础上,进一步考虑危险品滚装船专用泊位约束和船舶变速航行特性,提出一种客滚船进出港次序优化方法。首先将客滚船进出港次序优化问题建模为带时间窗的非对称旅行商问题(ATSPTW);其次,根据港池与航道的航行规则设定约束条件,进而构建反映船舶间最小调度时间间隔的权矩阵;接着以总调度时间与总等待时间最小化为目标,建立双目标动态规划模型;最后设计基于 Held-Karp 算法扩展的双目标 Pareto 优化算法进行求解。基于实际运营数据的数值试验结果表明,优化调度计划在总调度时间和总等待时间上均明显优于实际调度计划,优化率分别达到 6.50% 和 31.09%。在 FlexSim 三维仿真软件中进行的仿真试验进一步验证了优化调度计划的安全性和鲁棒性,整个运行过程中未出现任何违反航行规则的情况。该优化方法能够显著提高调度效率,可为徐闻港及其他类似港口在高峰时段的船舶调度提供决策支持。

关键词:水路运输;客滚船调度;动态规划;湛江徐闻港;双目标优化
中图分类号:U692.4 + 3　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.3969/j.issn.1000 - 4653.2026.04.017

Optimization of ro-pax vessel scheduling at Zhanjiang Xuwen Port based on bi-objective dynamic programming

Li Ronghui[1,2,3*], *Huang Longsheng*[1], *Wu Fumi*[1], *Li Jiawen*[1,2,3]
(1. Naval Architecture and Shipping College, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524000, China;
2. Guangdong Provincial Engineering Research Center for Ship Intelligence and Safety, Zhanjiang 524000, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Equipment for South China Sea Marine Ranching, Zhanjiang 524000, China)

Abstract: As the world's largest Roll-on/Roll-off Passenger (Ro-Pax) terminal, Zhanjiang Xuwen Port faces severe vessel scheduling pressure during peak operation periods, placing higher requirements on scheduling efficiency. To address this issue, this paper, based on previous research, proposes an optimization method for the inbound and outbound sequence of Ro-Pax vessels by further considering constraints on dedicated berth for Ro-Ro vessels carrying dangerous goods and the characteristics of variable-speed vessel navigation. First, the inbound and outbound sequencing problem of Ro-Pax vessels is modeled as an Asymmetric Traveling Salesman Problem with Time Windows (ATSPTW). Then, constraints are formulated according to the navigation rules of the harbor basin and channel, and a weight matrix reflecting the minimum scheduling time intervals between vessels was constructed. Subsequently, a bi-objective dynamic programming model is

收稿日期:2025-12-02
基金项目:国家自然科学基金项目(52571045,52171346);广东省教育厅普通高校高端装备制造重点领域专项(2023ZDZX3003);广东省青年创新人才资助计划(2022KQNCX024);广东省研究生创新计划项目-联合培养研究生示范基地(040510132301);广东省教学质量工程项目-科产教融合基地(010203132501)资助
第一作者(* 通信作者):李荣辉(1976—),男,教授,研究方向为港口调度优化、航海安全保障、船舶智能化等,(E-mail)lirh@gdou.edu.cn
引用格式:李荣辉,黄龙生,吴馥谧,等. 基于双目标动态规划的湛江徐闻港客滚船调度优化[J]. 中国航海,2026,49(4):153 - 163.
Li R H, Huang L S, Wu F M, et al. Optimization of ro-pax vessel scheduling at Zhanjiang Xuwen Port based on bi-objective dynamic programming[J]. Navigation of China, 2026, 49(4): 153 - 163. (in Chinese)

established to minimize total scheduling time and total waiting time. Finally, a bi-objective Pareto optimization algorithm extended from the Held-Karp algorithm is developed to solve the model. The numerical experiment resulst based on actual operational data show that the optimized scheduling plan significantly outperforms the actual scheduling plan in terms of both total scheduling time and total waiting time, with optimization rates reaching 6.50% and 31.09%, respectively. The simulation experiments conducted using the FlexSim 3D simulation software further verify the safety and robustness of the optimized scheduling plan, with no violation of navigation rules observed throughout the entire operation process. The proposed optimization method can significantly improve scheduling efficiency and provide decision support for vessel scheduling at Xuwen Port and other similar ports during peak operation periods.

Key words: waterway transportation; ro-pax terminal scheduling; dynamic programming; zhanjiang xuwen port; bi-objective optimization

湛江徐闻港作为全球最大的客货滚装码头,自2020 年正式开港运营以来,已成为连接广东与海南两省的重要海上交通枢纽,显著缩短了两地之间的航行距离与时间。该港承担着两岸主要的客滚运输任务,航次安排密集,特别在春运、能见度不良或台风后复航等高峰运营时段,现有依赖人工经验的调度方式使港口面临巨大的运输压力。例如,2023 年春运期间,因过海需求激增,徐闻港发生了严重交通拥堵事件,对区域民生及经济造成了不良影响。因此,研究高效、可靠且安全的船舶调度优化方法,已成为当前徐闻港运营亟待解决的关键问题。

目前,国内外关于客滚码头运营优化的研究主要集中于船舶配载[1-3]、泊位分配[4-5]、车辆调度[6-7]、班期优化[8-9]和航道交通优化[10-13],而针对港池内部交通优化的研究,特别是船舶进出港次序优化的研究仍较为有限[14]。客滚港口通常设有半封闭式港池,港口内部船舶活动密集且操纵水域受限,交通调度复杂性强,其优化研究具有挑战性。Jia 等[15-17]以徐闻港为背景,对操纵水域受限条件下的船舶进出港调度问题进行了探索,采用自适应模拟退火算法与蚁群算法进行求解,有效提升了调度效率。然而,既有研究仍存在一定的局限性:一方面,启发式算法虽然可以处理大规模算例,但无法保证解的最优性;另一方面,建立的模型尚未充分考虑徐闻港危险品滚装船运营对普通客滚船运营的影响,亦未考虑船舶在实际航行中的变速行为的影响。

船舶调度优化问题大多可归结为带时间窗的非对称旅行商问题(Asymmetric Traveling Salesman Problem with Time Windows, ATSPTW),可采用分支定界法等精确算法求精确最优解,亦可采用遗传算法等启发式算法求高质量可行解。动态规划法适用于生产计划等多目标、多阶段决策问题,能够获得精确最优解,但受到算法性能方面的限制,在船舶调度优化中的应用较少[18]。然而,在徐闻港当前运营规模下,动态规划仍是一种适宜的方法。

因此,本文在 Jia 等[15-17]研究的基础上,进一步引入危险品船调度约束与船舶变速运动模型,采用动态规划法解决客滚船进出港次序优化问题,致力于提升徐闻港在高峰时段的调度效率与通航安全性。

1 问题描述

徐闻港布局见图 1。徐闻港主要由半封闭式港池、突堤式码头和连接航道构成,港池内可航水域尺度较为狭小。港内共设 17 个泊位,其中#0 泊位为危险品滚装船专用泊位,#1 ~ #16 泊位为普通客滚船服务。徐闻港所服务的客滚船船长大多在 100 ~ 128 m,均配备双桨双舵和艏侧推器,靠离泊无拖船协助。

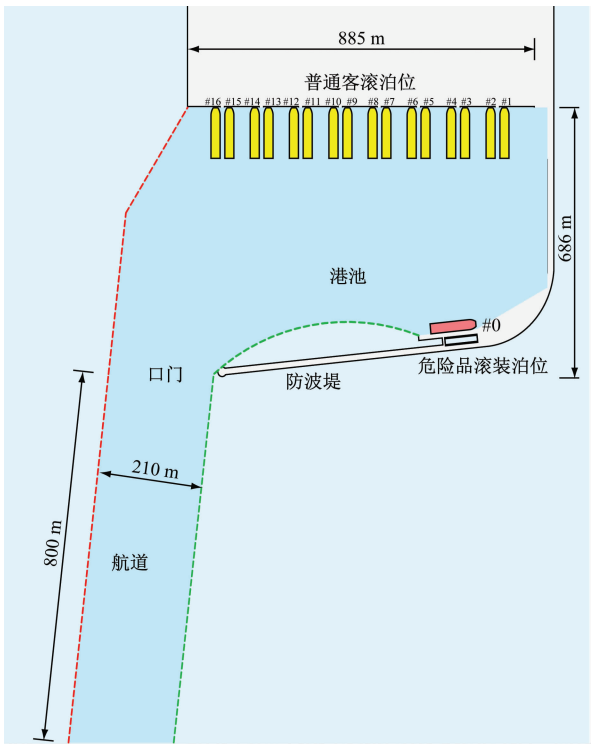


图 1 徐闻港布局

Fig. 1 Layout of Xuwen Port

受限于港口布局,同一时刻航道仅允许一艘船舶单向通行。徐闻港采用艏靠模式,仅出港船舶需

在回旋水域内完成掉头操作。尽管回旋水域理论上可容纳3艘船舶同时掉头,但对船舶协同操作的要求极高,风险较大,因此,当前调度规则仍限定同一时刻仅允许一艘船舶掉头,严重制约了港口通航效率。为提升调度效率,必须在保障安全的前提下突破这一限制,允许两艘船舶同时掉头。港池空间狭窄、船舶密集,且客滚船尺度较大,存在较高的碰撞风险,这对调度优化的安全性与精确性提出更高要求。

徐闻港客滚船进出港次序优化问题可描述为:在计划期内,根据已知的待调度船舶信息,在保障航行安全的前提下,确定最优的船舶进出港次序。该问题本质上为不返回起点的ATSPTW,并可通过引入虚拟船转化为返回起点的ATSPTW进行求解。其中,船舶和船舶间的最小调度时间间隔分别对应ATSPTW中的城市和城市间的距离。

2 权矩阵的计算

2.1 前提假设

为简化模型复杂度并明确计算边界,本文作出4项基本假设:

1)将船舶进出港路径简化为主线与支线,见图2。主线为必经通道,支线连接主线和泊位。船舶在主线上的运动简化为相反的匀变速过程。出港过程包括离泊并沿支线倒退、在主支线交点处停车并掉头进入主线、沿主线航行出港。进港过程包括沿主线航行进港、在主支线交点处不停车转向进入支线、沿支线前进并靠泊。

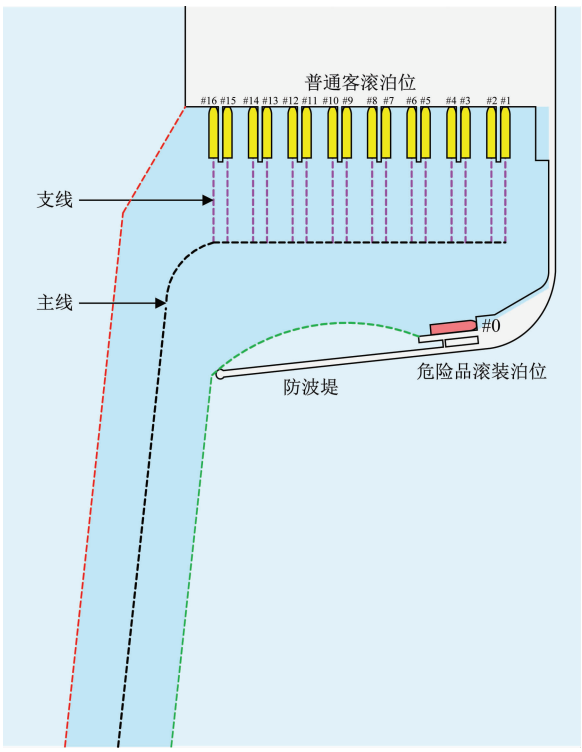


图2 主线与支线

Fig. 2 Main line and branch line

2)参数按最不利工况取值,并预留安全余量,确保调度计划有一定的鲁棒性。

3)进港船拟靠泊位在调度前已分配。

4)出港船调度区间为离泊至抵达航道外端,进港船调度区间为抵达航道外端至完成靠泊。

2.2 符号说明

主要符号及其具体含义见表1。

表1 符号说明

Tab. 1 Explanation of symbols

符号	说明
n	待调度船舶总数
i,j	船舶编号,$i,j\in N^+$
x_i	船舶i所靠泊位(或拟靠泊位)与口门之间的水平距离
x_i-x_j	普通客滚船i与船j支线间距离或其相反数,反映两船支线相对口门远近
T_{ittog}	普通客滚船i在回旋水域与口门之间的航行时间
t	当前时刻
$d_{ij}(t)$	当前时刻普通客滚船i与船j在主线上的水平距离
t_{ib}	出港船i离泊时刻或进港船i靠泊时刻
t_{ie}	船舶i抵达航道外端时刻
T_{btot}	出港普通客滚船在支线上的航行时间
T_{ttob}	进港普通客滚船在支线上的航行时间
T_{turn}	出港普通客滚船掉头所用时间
T_{f}	船舶在航道外指定位置与口门之间的航行时间
T_{out}	危险品船从离泊#0泊位至抵达口门所用时间
T_{in}	危险品船从抵达口门至靠泊#0泊位所用时间
a	普通客滚船在主线上的加速度绝对值
v_g	进港普通客滚船抵达口门时的航速
R	出港普通客滚船掉头形成的危险水域半径
S	主线上航行的两船需保持的最小安全距离

2.3 航行规则

为确保航行安全,港池内船舶须遵守以下航行规则:

1)当危险品船在港池内航行时,禁止其他任何船舶同时在港池内航行。

2)禁止在港池内发生追越、对遇和交叉相遇。

3）同时在主线上航行的两艘船舶船舯之间的距离不得小于最小安全距离 S。

4）禁止其他船舶进入出港船掉头时形成的半径为 R 的危险水域。

5）禁止两艘出港船在 $|x_i - x_j| < 2R$ 条件下同时在支线航行。

2.4 情形划分

根据两船进出港类型及先后顺序，所有情形可归纳为先出后出、先进后进、先进后出、先出后进等4种基本情形。以下为基于第2.3节所述航行规则分别给出特定子情形对应的约束条件，未列明的子情形无额外约束。

2.5 先出后出情形

本节讨论出港船 i 先于出港船 j 抵达口门的航行安全约束。

2.5.1 危险品船 i 先出，普通客滚船 j 后出

为满足规则1，船舶 i 抵达口门后，船舶 j 方可开始离泊，应满足

$$t_{j\mathrm{b}} \geqslant t_{i\mathrm{b}} + T_{\mathrm{out}} \tag{1}$$

2.5.2 普通客滚船 i 先出，危险品船 j 后出

为满足规则1，船舶 i 抵达口门后，船舶 j 方可开始离泊，应满足

$$t_{j\mathrm{b}} \geqslant t_{i\mathrm{b}} + T_{\mathrm{btot}} + T_{\mathrm{turn}} + T_{i\mathrm{ttog}} \tag{2}$$

2.5.3 普通客滚船 i 先出，普通客滚船 j 后出

设两船在主线上的运动为匀变速运动，其相对距离函数为

$$d_{ij}(t) = \left| x_j - x_i + \frac{1}{2}a(t_{j\mathrm{b}} - t_{i\mathrm{b}})^2 + a(t_{j\mathrm{b}} - t_{i\mathrm{b}})[t - (t_{j\mathrm{b}} + T_{\mathrm{btot}} + T_{\mathrm{turn}})] \right| \tag{3}$$

由于 $t_{j\mathrm{b}} - t_{i\mathrm{b}} > 0$，函数 $d_{ij}(t)$ 为增函数。根据不同相对位置，进一步区分为以下子情形：

1）子情形 A-1：若 $0 < |x_i - x_j| < 2R$，为避免船舶 j 掉头时船舶 i 处于其危险水域，船舶 j 开始掉头时两船水平距离应不小于 R，应满足

$$t_{j\mathrm{b}} + T_{\mathrm{btot}} \geqslant t_{i\mathrm{b}} + T_{\mathrm{btot}} + T_{\mathrm{turn}} + \sqrt{\frac{2[R - (x_j - x_i)]}{a}} \tag{4}$$

2）子情形 A-2：若 $0 < x_j - x_i < 2R$，为避免追越，船舶 j 掉头完毕时，两船水平距离须不小于 S，应满足

$$x_j - x_i + \frac{1}{2}a(t_{j\mathrm{b}} - t_{i\mathrm{b}})^2 \geqslant S \tag{5}$$

同时，为避免两船同时在支线航行，船舶 i 开始掉头后船舶 j 方可离泊，应满足

$$t_{j\mathrm{b}} \geqslant t_{i\mathrm{b}} + T_{\mathrm{btot}} \tag{6}$$

3）子情形 A-3：若 $0 < (x_i - x_j) < 2R$，为避免在主支线交点处发生交叉相遇，船舶 j 离泊时船舶 i 在主线上航行距离须不小于 $(x_i - x_j)$，应满足

$$t_{j\mathrm{b}} \geqslant t_{i\mathrm{b}} + T_{\mathrm{btot}} + T_{\mathrm{turn}} + \sqrt{\frac{2(x_i - x_j)}{a}} \tag{7}$$

同时，为避免追越，亦应满足式(5)。

4）子情形 A-4：若 $R \leqslant x_j - x_i < 2R$，为避免两船掉头时相互侵入危险水域，船舶 i 掉头完毕后船舶 j 方可开始掉头，应满足

$$t_{j\mathrm{b}} + T_{\mathrm{btot}} \geqslant t_{i\mathrm{b}} + T_{\mathrm{btot}} + T_{\mathrm{turn}} \tag{8}$$

5）子情形 A-5：若 $0 < x_j - x_i < R$，为避免船舶 i 掉头时船舶 j 进入船舶 i 危险水域，应满足

$$t_{j\mathrm{b}} \geqslant t_{i\mathrm{b}} + T_{\mathrm{btot}} + T_{\mathrm{turn}} \tag{9}$$

2.6 先进后进情形

本节讨论进港船 i 先于进港船 j 抵达口门的航行安全约束。

2.6.1 危险品船 i 先进，普通客滚船 j 后进

为满足规则1，船舶 i 完成靠泊后，船舶 j 方可抵达口门，应满足

$$t_{j\mathrm{e}} + T_{\mathrm{f}} \geqslant t_{i\mathrm{e}} + T_{\mathrm{f}} + T_{\mathrm{in}} \tag{10}$$

2.6.2 普通客滚船 i 先进，危险品船 j 后进

为满足规则1，船舶 i 完成靠泊后，船舶 j 方可抵达口门，应满足

$$t_{j\mathrm{e}} + T_{\mathrm{f}} \geqslant t_{i\mathrm{e}} + T_{\mathrm{f}} + T_{i\mathrm{ttog}} + T_{\mathrm{ttob}} \tag{11}$$

2.6.3 普通客滚船 i 先进，普通客滚船 j 后进

假定船舶在主线上的运动为从口门航速 v_g 开始的匀减速运动，则两船相对距离函数为

$$d_{ij}(t) = \left| v_{\mathrm{g}}(t_{j\mathrm{e}} - t_{i\mathrm{e}}) - \frac{1}{2}a(t_{j\mathrm{e}} - t_{i\mathrm{e}})^2 + a(t_{i\mathrm{e}} - t_{j\mathrm{e}})[t - (t_{j\mathrm{e}} + T_{\mathrm{f}})] \right| \tag{12}$$

由于 $t_{i\mathrm{e}} < t_{j\mathrm{e}}$，故 $d_{ij}(t)$ 为减函数。根据不同相对位置，进一步区分为以下子情形：

1）子情形 B-1：若 $x_j - x_i > 0$，为避免两船在主支线交点处发生交叉相遇，船舶 i 靠泊完毕后，船舶 j 方可抵达船舶 i 的支线，应满足

$$t_{j\mathrm{e}} + T_{\mathrm{f}} + T_{i\mathrm{ttog}} \geqslant t_{i\mathrm{e}} + T_{\mathrm{f}} + T_{i\mathrm{ttog}} + T_{\mathrm{ttob}} \tag{13}$$

为避免两船发生追越，船舶 i 抵达其支线时，两船距离 $d_{ij}(t)$ 应不小于 S，应满足

$$\left| v_{\mathrm{g}}(t_{j\mathrm{e}} - t_{i\mathrm{e}}) - \frac{1}{2}a(t_{j\mathrm{e}} - t_{i\mathrm{e}})^2 + a(t_{i\mathrm{e}} - t_{j\mathrm{e}})[t_{i\mathrm{e}} + T_{\mathrm{f}} + T_{i\mathrm{ttog}} - (t_{j\mathrm{e}} + T_{\mathrm{f}})] \right| \geqslant S \tag{14}$$

2)子情形 *B*-2:若 $x_i - x_j > 0$ 且 $t_{ie} + T_f + T_{ittog} < t_{je} + T_f + T_{jttog}$,则船舶 i 先抵达其支线。为避免追越,船舶 i 抵达其支线时,两船距离 $d_{ij}(t)$ 应不小于 S,亦应满足式(14)。

3)子情形 *B*-3:若 $x_i - x_j > 0$ 且 $t_{ie} + T_f + T_{ittog} > t_{je} + T_f + T_{jttog}$,则船舶 j 先抵达其支线。为避免追越,船舶 j 抵达其支线时 $d_{ij}(t)$ 应不小于 S,应满足

$$\left| v_g(t_{je} - t_{ie}) - \frac{1}{2}a(t_{je} - t_{ie})^2 + a(t_{ie} - t_{je})[t_{je} + T_f + T_{jttog} - (t_{je} + T_f)] \right| \geqslant S \tag{15}$$

4)子情形 *B*-4:若 $0 < |x_i - x_j| < 2R$,为避免两船同时在支线航行,船舶 i 靠泊完毕后,船舶 j 方可抵达其自身支线,应满足

$$t_{je} + T_f + T_{jttog} \geqslant t_{ie} + T_f + T_{ittog} + T_{ttob} \tag{16}$$

2.7 先进后出情形

本节讨论先进港船舶 i 与后出港船舶 j 之间的航行安全约束。

2.7.1 危险品船 i 先进,普通客滚船 j 后出

为满足规则 1,船舶 i 完成靠泊后,船舶 j 方可开始离泊,应满足

$$t_{jb} \geqslant t_{ie} + T_f + T_{in} \tag{17}$$

2.7.2 普通客滚船 i 先进,危险品船 j 后出

为满足规则 1,船舶 i 完成靠泊后,船舶 j 方可开始离泊,应满足

$$t_{jb} \geqslant t_{ie} + T_f + T_{ittog} + T_{ttob} \tag{18}$$

2.7.3 普通客滚船 i 先进,普通客滚船 j 后出

1)子情形 *C*-1:若 $0 < |x_i - x_j| < 2R$,为避免两船同时在支线航行产生冲突,船舶 i 完成靠泊后,船舶 j 方可开始离泊,亦应满足式(18)。

2)子情形 *C*-2:若 $x_j - x_i > 0$,为避免在主支线交点处发生交叉相遇及主线上对遇,船舶 i 完成靠泊后,船舶 j 方可抵达船舶 i 的支线,应满足

$$t_{jb} + T_{btot} + T_{turn} + \left[\frac{2(x_j - x_i)}{a}\right]^{\frac{1}{2}} \geqslant t_{ie} + T_f + T_{ittog} + T_{ttob} \tag{19}$$

3)子情形 *C*-3:若 $x_i - x_j > 0$,为避免在船舶 j 的主支线交点处发生冲突,船舶 i 抵达船舶 j 的支线后,船舶 j 方可开始离泊,应满足

$$t_{jb} \geqslant t_{ie} + T_f + T_{jttog} \tag{20}$$

2.8 先出后进情形

本节讨论先出港船舶 i 与后进港船舶 j 之间的航行安全约束。

2.8.1 危险品船 i 先出,普通客滚船或危险品船 j 后进

为避免两船发生对遇,船舶 i 完成出港且航路清爽后,船舶 j 方可抵达航道外端,应满足

$$t_{je} \geqslant t_{ib} + T_{out} + T_f \tag{21}$$

2.8.2 普通客滚船 i 先出,危险品船或普通客滚船 j 后进

为避免两船发生对遇,船舶 i 完成出港且航路清爽后,船舶 j 方可抵达航道外端,应满足

$$t_{je} \geqslant t_{ib} + T_{btot} + T_{turn} + T_{ittog} + T_f \tag{22}$$

2.9 参数设置

模型中的参数数值见表 2。所有参数取值均根据徐闻港实际运营数据与船舶操纵特性确定。

表 2 参数数值

Tab. 2 Parameter values

参数	数值	参数	数值
x_1/m	1 031	T_{1ttog}/s	648
x_2/m	996	T_{2ttog}/s	625
x_3/m	925	T_{3ttog}/s	579
x_4/m	890	T_{4ttog}/s	557
x_5/m	819	T_{5ttog}/s	510
x_6/m	784	T_{6ttog}/s	488
x_7/m	713	T_{7ttog}/s	442
x_8/m	678	T_{8ttog}/s	419
x_9/m	607	T_{9ttog}/s	373
x_{10}/m	572	T_{10ttog}/s	350
x_{11}/m	501	T_{11ttog}/s	304
x_{12}/m	466	T_{12ttog}/s	281
x_{13}/m	395	T_{13ttog}/s	235
x_{14}/m	360	T_{14ttog}/s	212
x_{15}/m	289	T_{15ttog}/s	166
x_{16}/m	254	T_{16ttog}/s	144
T_{btot}/s	300	T_{ttob}/s	480
T_{turn}/s	120	T_f/s	300
T_{out}/s	540	T_{in}/s	720
a/(m/s^2)	0.01	R/m	192
v_g/(m/s)	3.60	S/m	384

2.10 权矩阵的构建

通过枚举法确定船舶 i 与船舶 j 对应情形满足约束条件的精确至 s 的最小调度时间间隔 $\boldsymbol{C}_{i,j}$。$\boldsymbol{C}_{i,j}$

构成的矩阵 $\boldsymbol{C}$ 即为 n 座城市的、不返回起点的 ATSPTW(简称原问题)的权矩阵。

引入一艘编号为 0 的虚拟船作为起点,将原问题转化为($n+1$)座城市的、返回起点的 ATSPTW(简称新问题)。虚拟船与实际船之间的最小调度时间间隔定义为 0,构成向量 $\boldsymbol{0}_{1\times n}$;实际船与虚拟船之间的最小调度时间间隔定义为该船调度开始至调度结束所需总时间,构成向量 $\boldsymbol{\lambda}_{n\times 1}$;虚拟船的调度不产生等待时间。基于上述设定,新问题的权矩阵为

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}0 & \boldsymbol{0}_{1\times n}\\ \boldsymbol{\lambda}_{n\times 1} & \boldsymbol{C}\end{bmatrix} \tag{23}$$

求解新问题并剔除解中的虚拟船即可得到原问题的解。

3 动态规划建模与求解

3.1 求解方法的选择

新问题须满足以下硬时间窗约束:1)进港船须在拟靠泊位空闲时段进港;2)同一船舶的进出港次序必须与实际调度计划保持一致;3)每艘船舶等待时间不得超过预设上限;4)下一艘待调度实际船须满足与所有已调度船之间的最小调度时间间隔约束;5)对于满足 $x_i-x_j\geqslant 2R$ 的两艘普通客滚船,在先出后出情形下最小调度时间间隔理论上为 0,可同时离泊,但若两船未被安排同时离泊,则须按子情形 *A*-3 修正时间间隔,避免在主支线交点处发生交叉相遇;6)同一船舶靠泊后至少间隔 1 h 方可出港,以满足装卸时间需求;7)出港船装载完毕后方可出港,进港船到港后方可进港。若候选船不满足前三项约束,则直接跳过该船;若候选船不满足后四项约束,则通过更新权值来推迟其调度时刻,以满足相应约束。

新问题还受到以下软时间窗约束:出港船装载完毕或进港船到港后若未立即调度,将产生等待时间。

基于以上特性,本文选用动态规划法进行求解,该方法可有效处理多目标多阶段决策问题。相对于分支定界法等精确算法,基于动态规划思想设计的算法具有逻辑直接和结构简单等优势,但该方法求解大规模问题较慢,且存在内存溢出风险。本文采用二进制整数编码状态进行状态压缩,并利用位运算实现高效状态转移,从而建立动态规划模型,并根据基本方程进行递推求解。当 $n\leqslant 22$ 时,计算机能在合理时间(6 min)内计算出结果。当 $n>22$ 时,可以牺牲精确性,选择启发式算法,亦可减小规模,以 22 艘船为窗口进行滚动优化。

3.2 双目标动态规划数学模型的建立

3.2.1 阶段划分

将新问题划分为($n+2$)阶段,序号 $k\in\{0,1,2,\cdots,n,n+1\}$,每个阶段仅决策下一艘被调度船舶。其中,第 0 阶段和第($n+1$)阶段均选择虚拟船。

3.2.2 决策和策略

在第 k 阶段,决策变量 $u_k(\boldsymbol{s}_k)$ 为基于当前状态 $\boldsymbol{s}_k$ 所选择的下一艘被调度船舶。第 0 阶段~第 k 阶段的调度次序构成一个 k 阶段子策略 $\boldsymbol{p}_{0,k}$ 为

$$\boldsymbol{p}_{0,k}=\begin{bmatrix}0\\ u_1(\boldsymbol{s}_1)\\ u_2(\boldsymbol{s}_2)\\ \vdots\\ u_k(\boldsymbol{s}_k)\end{bmatrix} \tag{24}$$

式(24)中:首元素 0 为虚拟船。当 $k=n+1$ 时,$\boldsymbol{p}_{0,n+1}$ 构成一个完整的调度策略。

3.2.3 状态变量

第 k 阶段的状态变量 $\boldsymbol{s}_k$ 定义为

$$\begin{cases}\boldsymbol{s}_k=\begin{bmatrix}m_k\\ u_{k-1}(\boldsymbol{s}_{k-1})\end{bmatrix}, & k\geqslant 2\\ \boldsymbol{s}_1=\begin{bmatrix}m_1\\ 0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\overbrace{000\cdots001}^{n+1}\\ 0\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{s}_0=\begin{bmatrix}m_0\\ \varnothing\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\overbrace{000\cdots000}^{n+1}\\ \varnothing\end{bmatrix}\end{cases} \tag{25}$$

式(25)中:m_k 为一个($n+1$)位二进制整数,其第 i 位为 1 表示船舶 i 已被调度,为 0 表示船舶 i 未被调度;$u_{k-1}(\boldsymbol{s}_{k-1})$ 为在上一阶段($k-1$)中所选择的被调度船舶。

3.2.4 状态转移方程

第 k 阶段至第($k+1$)阶段的状态转移方程为

$$\boldsymbol{s}_{k+1}=\begin{bmatrix}m_k\,|\,(1\ll u_k(\boldsymbol{s}_k))\\ u_k(\boldsymbol{s}_k)\end{bmatrix} \tag{26}$$

式(26)中:“|”为按位或运算符;“<<”为左移运算符;$m_k\,|\,(1\ll u_k(\boldsymbol{s}_k))$ 为将 m_k 第 $u_k(\boldsymbol{s}_k)$ 位 Bit 由 0 变为 1。

3.2.5 阶段指标函数

第 k 阶段的阶段指标函数 $g_k(\boldsymbol{s}_{k+1},u_k)$ 和

$h_k(\boldsymbol{s}_{k+1},u_k)$分别为基于 $\boldsymbol{s}_k$ 选择 u_k 从而转移至 $\boldsymbol{s}_{k+1}$ 产生的调度时间和等待时间,分别按式(27)和式(28)计算。

$$g_k(\boldsymbol{s}_{k+1},u_k)=\begin{cases}\max\{\max\{\boldsymbol{D}_{u_i,u_k}\mid i=0,1,\cdots,k-1\},\ t_{u_k\mathrm{c}}-t_{u_{k-1}\mathrm{s}}\},\\ u_{k-1}\neq 0,\ u_k\in N_1\\ \max\{\max\{\boldsymbol{D}_{u_i,u_k}\mid i=0,1,\cdots,k-1\},\ t_{u_k\mathrm{a}}-t_{u_{k-1}\mathrm{s}}\},\\ u_{k-1}\neq 0,\ u_k\in N_2\\ \boldsymbol{D}_{u_{k-1},0},u_{k-1}\neq 0,u_k=0\\ 0,u_{k-1}=0,u_k\neq 0\end{cases}\tag{27}$$

$$h_k(\boldsymbol{s}_{k+1},u_k)=\begin{cases}t_{u_k\mathrm{b}}-t_{u_k\mathrm{c}},u_k\in N_1\\ t_{u_k\mathrm{e}}-t_{u_k\mathrm{a}},u_k\in N_2\\ 0,u_k=0\end{cases}\tag{28}$$

式(27)和式(28)中:$t_{u_{k-1}\mathrm{s}}$为 u_{k-1} 开始调度时刻(出港船离泊时刻或进港船抵达航道外端时刻);$t_{u_k\mathrm{a}}$和 $t_{u_k\mathrm{c}}$分别为 u_k 的预计到港时刻和预计装载完毕时刻;N_1 和 N_2 分别为出港船集合和进港船集合。

3.2.6 动态规划基本方程

目标函数为最小化总调度时间与最小化总等待时间:

$$\min z_1=\sum_{i=0}^{n+1}g_i(\boldsymbol{s}_{i+1},u_i)\tag{29}$$

$$\min z_2=\sum_{i=0}^{n+1}h_i(\boldsymbol{s}_{i+1},u_i)\tag{30}$$

本文采用 Pareto 最优作为评价标准:当且仅当不存在 u_i 满足式(31)条件时,决策 u_i^* 为第 i 阶段 Pareto 最优决策,u_i^* 组成的 $\boldsymbol{p}_{0,k}^*$为第 k 阶段 Pareto 最优子策略,$g_k(\boldsymbol{s}_{k+1},u_k^*)$和 $h_k(\boldsymbol{s}_{k+1},u_k^*)$为第 k 阶段 Pareto 最优阶段指标函数。

$$\begin{cases}\sum_{i=0}^{k}g_k(\boldsymbol{s}_{i+1},u_i)\leqslant\sum_{i=0}^{k}g_k(\boldsymbol{s}_{i+1},u_i^*)\\ \sum_{i=0}^{k}h_k(\boldsymbol{s}_{i+1},u_i)\leqslant\sum_{i=0}^{k}h_k(\boldsymbol{s}_{i+1},u_i^*)\\ \left(\sum_{i=0}^{k}g_k(\boldsymbol{s}_{i+1},u_i)<\sum_{i=0}^{k}g_k(\boldsymbol{s}_{i+1},u_i^*)\right)\cup\\ \left(\sum_{i=0}^{k}h_k(\boldsymbol{s}_{i+1},u_i)<\sum_{i=0}^{k}h_k(\boldsymbol{s}_{i+1},u_i^*)\right)\end{cases}\tag{31}$$

第 k 阶段 Pareto 最优过程指标函数 $\boldsymbol{f}_k(\boldsymbol{s}_{k+1})$表示从初始状态 $\boldsymbol{s}_0$ 转移至 $\boldsymbol{s}_{k+1}$所累积的最小调度时间与等待时间,其递推关系和边界条件为

$$\begin{cases}\boldsymbol{f}_k(\boldsymbol{s}_{k+1})=\boldsymbol{f}_{k-1}(\boldsymbol{s}_k)+\begin{bmatrix}g_k(\boldsymbol{s}_{k+1},u_k^*)\\ h_k(\boldsymbol{s}_{k+1},u_k^*)\end{bmatrix},\ k\geqslant 1\\ \boldsymbol{f}_0(\boldsymbol{s}_1)=\begin{bmatrix}0\\0\end{bmatrix}\end{cases}\tag{32}$$

当 $k=n+1$ 时,$p_{0,n+1}^*$为 Pareto 最优解,对应的 $\boldsymbol{f}_{n+1}(\boldsymbol{s}_{n+2})$为 Pareto 最优值。

3.3 双目标动态规划数学模型的求解

在双目标优化问题中,2 个目标函数同时达到绝对最小值的最优解未必存在。根据徐闻港实际调度需求,总调度时间最小化被确定为首要优化目标。因此,本文从 Pareto 最优解集中选取总调度时间最小的解作为最优调度计划。

经典的 Held-Karp 算法仅适用于单目标非对称旅行商问题(Asymmetric Traveling Salesman Problem,ATSP),为使其适用于本文建立的双目标优化模型,对其进行扩展:增加时间窗约束处理逻辑;嵌入 Pareto 最优判定流程。算法完整执行流程见图 3。

4 数值试验

4.1 算例说明

为验证算法有效性,选取徐闻港某次台风过境后复航初期的应急调度时段(18:15:00—22:00:00)作为计划期开展数值试验,数据均来源于徐闻港调度室档案资料和 AIS 历史轨迹。试验以第一艘船舶开始调度时刻作为调度起始时刻,以最后一艘船舶完成调度时刻作为调度结束时刻。复航初期存在大量压港车客,故出港船的装载完成时刻具有较强的可控性。因此,除进港后方可离港的船舶 G、船舶 E 和船舶 F 外,其余出港船在 18:15:00 均视为已装载完毕,不计等待时间。各船舶的等待时间上限设定为 1 200 s。计划期共涉及 22 艘次待调度船舶,具体信息汇见表 3。

4.2 计算结果与分析

计算得到 6 个 Pareto 最优值见图 4。

本文选取式(33)所示的 Pareto 最优值对应的解作为最优调度计划。

$$\boldsymbol{f}_{21}(\boldsymbol{s}_{22})=\begin{bmatrix}12\ 622\\ 5\ 168\end{bmatrix}\tag{33}$$

实际调度计划和优化调度计划见表 4,其甘特图分别见图 5 和图 6,进港船等待时间见图 7。

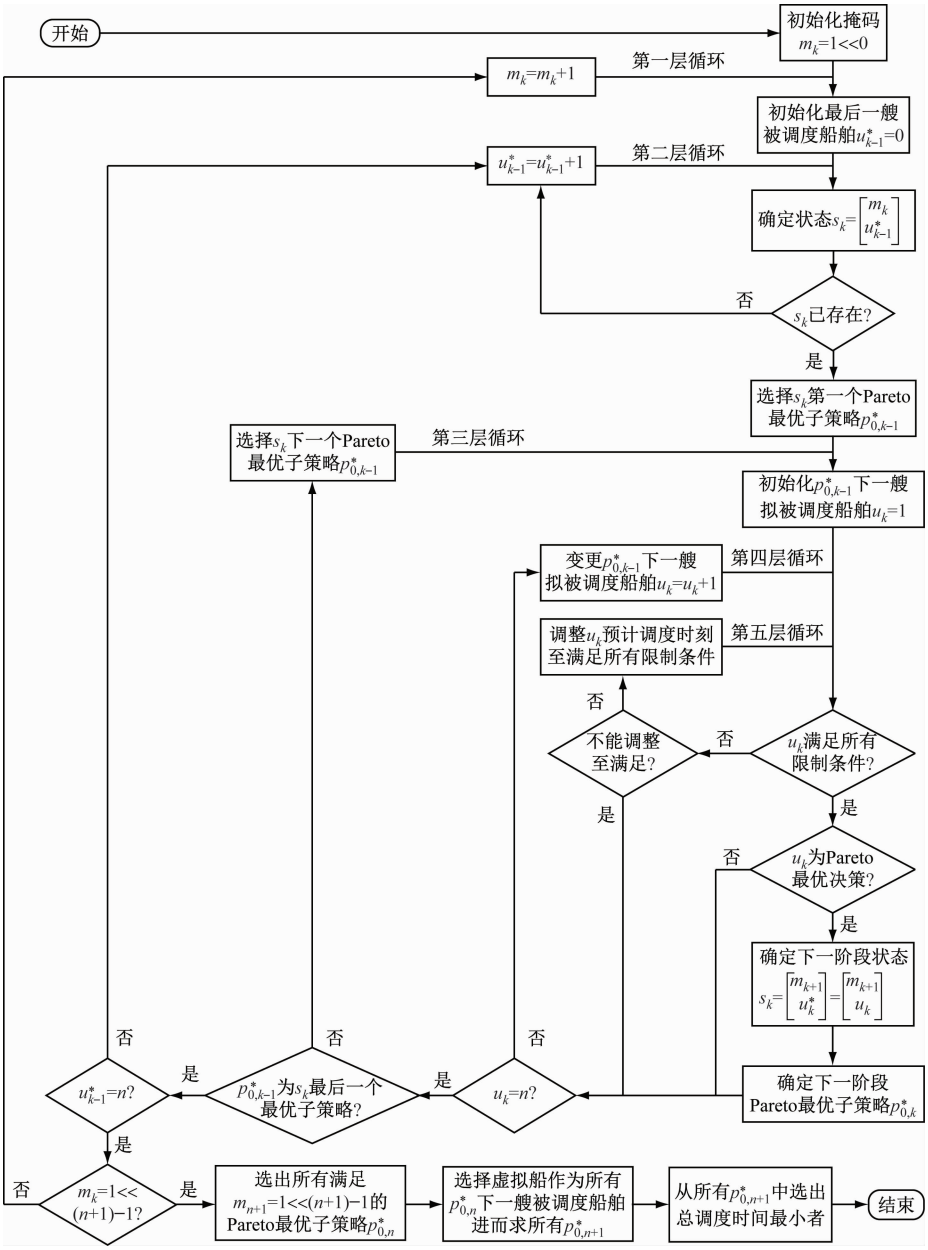


图 3 双目标动态规划数学模型求解流程

Fig. 3 Solution process for the bi-objective dynamic programming mathematical model

优化调度计划总调度时间减少 14 min 38 s,优化率为 6.50%;总等待时间减少 38 min 52 s,优化率为 31.09%。由于最后到港船舶 R 的预计到港时刻为 21:13:00,调度结束时刻不可能早于 21:31:04,因此总调度时间的理论最大优化率为 12.86%,而实际优化率达到理论上限的 50.59%,超过理论上限的 1/2。同时,优化调度计划总等待时间减少近 1/3,单艘船舶的等待时间亦降低至 20 min 以下,显著提升了调度效率。

该算法主要通过以下 3 种方式进行优化:

1)尽可能消除空闲时段、提升调度并行度,以缩短总调度时间;

2)优先安排已装载完毕的船舶出港及已到港的船舶进港,以减少总等待时间;

3)对等待时间超限的解进行剪枝,以控制每艘船舶的等待时间。

综上所述,优化调度计划在总调度时间和总等待时间 2 个指标上均实现了显著改进,验证了本文所提方法的有效性。

表 3 待调度船舶信息

Tab. 3 Information of vessels to be scheduled

船名	泊位	类型	预计装载完毕时刻	预计到港时刻
A	#10	出港	18:15:00	
B	#3	出港	18:15:00	
C	#14	出港	18:15:00	
D	#9	出港	18:15:00	
E	#8	进港		18:40:00
F	#9	进港		18:42:00
G	#10	进港		18:48:00
H	#16	进港		18:49:00
I	#5	出港	18:15:00	
J	#15	出港	18:15:00	
K	#7	出港	18:15:00	
L	#6	出港	18:15:00	
M	#7	进港		20:12:00
N	#14	进港		20:17:00
O	#15	进港		20:25:00
P	#13	出港	18:15:00	
Q	#11	出港	18:15:00	
G	#10	出港	初始值为 18:15:00 在计算过程中更新为进港靠泊完毕 1 h 后	
R	#11	进港		21:13:00
S	#0	进港		21:11:00
E	#8	出港	初始值为 18:15:00 在计算过程中更新为进港靠泊完毕 1 h 后	
F	#9	出港	初始值为 18:15:00 在计算过程中更新为进港靠泊完毕 1 h 后	

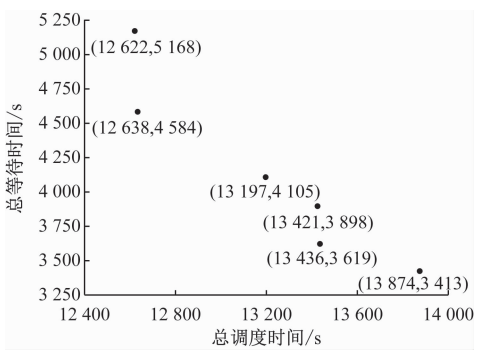


图 4 Pareto 最优值

Fig. 4 Pareto optimal values

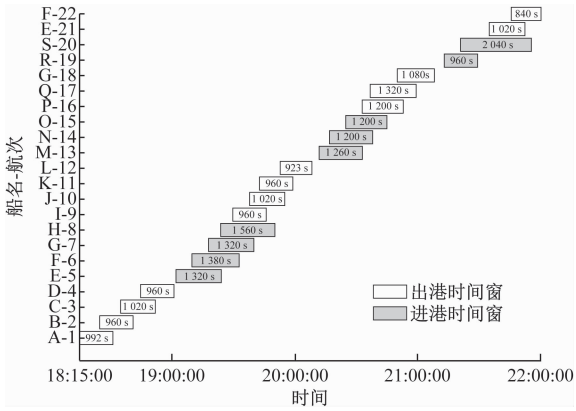


图 5 实际调度计划甘特图

Fig. 5 Gantt chart of actual vessel scheduling plan

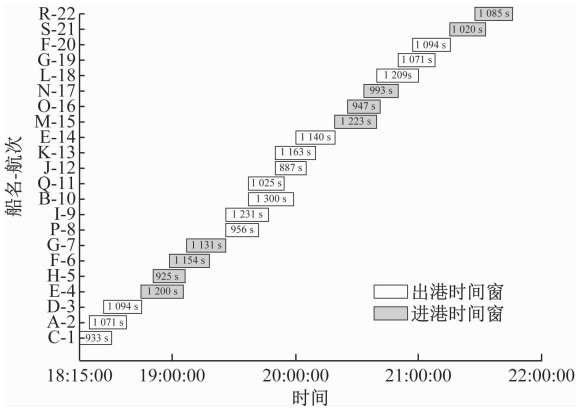


图 6 优化调度计划甘特图

Fig. 6 Gantt chart of optimized vessel scheduling plan

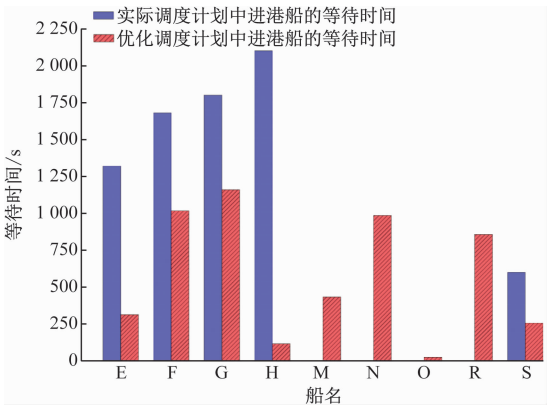


图 7 进港船等待时间

Fig. 7 Waiting time of inbound vessels

5 仿真试验

为验证优化调度计划的安全性和鲁棒性,在三维仿真软件 FlexSim 中构建徐闻港等比例仿真模型见图 8,并依据优化调度计划进行仿真运行。图 8 中:仿真系统中,任务执行器模拟船舶实体,直线与弯曲路径模拟船舶航行路径,发生器与吸收器分别用于触发和停止船舶运动,邻近检测模块实时监测船舶间距离及水域侵入情况。在港航行船舶数量见图 9。

表 4 实际调度计划与优化调度计划

Tab. 4 Actual and optimized vessel scheduling plans

航次	实际调度计划						优化调度计划					
	船名	泊位	类型	开始调度时刻	结束调度时刻	等待时间	船名	泊位	类型	开始调度时刻	结束调度时刻	等待时间
1	A	#10	出港	18:15:00	18:31:32		C	#14	出港	18:15:00	18:30:33	
2	B	#3	出港	18:25:00	18:41:00		A	#10	出港	18:20:00	18:37:51	
3	C	#14	出港	18:35:00	18:52:00		D	#9	出港	18:27:00	18:45:14	
4	D	#9	出港	18:45:00	19:01:00		E	#8	进港	18:45:14	19:05:14	0:05:14
5	E	#8	进港	19:02:00	19:24:00	0:22:00	H	#16	进港	18:50:57	19:06:22	0:01:57
6	F	#9	进港	19:10:00	19:33:00	0:28:00	F	#9	进港	18:58:57	19:18:11	0:16:57
7	G	#10	进港	19:18:00	19:40:00	0:30:00	G	#10	进港	19:07:20	19:26:11	0:19:20
8	H	#16	进港	19:24:00	19:50:00	0:35:00	P	#13	出港	19:26:11	19:42:07	
9	I	#5	出港	19:30:00	19:46:00		I	#5	出港	19:26:11	19:46:42	
10	J	#15	出港	19:38:00	19:55:00		Q	#11	出港	19:37:24	19:54:29	
11	K	#7	出港	19:43:00	19:59:00		B	#3	出港	19:37:24	19:59:04	
12	L	#6	出港	19:53:00	20:08:23		J	#15	出港	19:50:20	20:05:07	
13	M	#7	进港	20:12:00	20:33:00	0:00:00	K	#7	出港	19:50:20	20:09:43	
14	N	#14	进港	20:17:00	20:37:00	0:00:00	E	#8	出港	20:00:14	20:19:14	
15	O	#15	进港	20:25:00	20:45:00	0:00:00	M	#7	进港	20:19:14	20:39:37	0:07:14
16	P	#13	出港	20:33:00	20:53:00		O	#15	进港	20:25:26	20:41:13	0:00:26
17	Q	#11	出港	20:37:00	20:59:00		N	#14	进港	20:33:26	20:49:59	0:16:26
18	G	#10	出港	20:50:00	21:08:00		L	#6	出港	20:39:37	20:59:46	
19	R	#11	进港	21:13:00	21:29:00	0:00:00	G	#10	出港	20:50:03	21:07:54	
20	S	#0	进港	21:21:00	21:55:00	0:10:00	F	#9	出港	20:57:03	21:15:17	
21	E	#8	出港	21:35:00	21:52:00		S	#0	进港	21:15:17	21:32:17	0:04:17
22	F	#9	出港	21:46:00	22:00:00		R	#11	进港	21:27:17	21:45:22	0:14:17
总调度时间				3:45:00						3:30:22		
总等待时间				2:05:00						1:26:08		

仿真试验结果显示,优化调度计划在以下方面表现良好:同一时刻最多存在两艘船舶在回旋水域掉头;港池内同时航行的船舶不超过 3 艘;在港航行船舶不超过 4 艘;全程未发生因船舶间距过小而触发的紧急停车事件;未出现任何违反航行规则的情况。

实际应用中可能面临以下几类干扰,需采取相应措施进行抵御:若受到恶劣天气等威胁航行安全的干扰,则应调整参数(如增大 S)并重新计算;若受到装卸作业延迟等影响时间窗的干扰,则应视影响程度选择顺延原计划或重新计算;航速差带来的干扰主要依靠安全余量进行缓冲,抗干扰试验表明出港船 1 kn 以内的航速差或进港船 2 kn 以内的航速差仅仅会导致船舶间距减小,而不至于引发碰撞。

试验结果表明:本文所提出的方法得到的优化调度计划在仿真环境中能严格遵循各项航行规则,具备良好的安全性和鲁棒性,可为实际调度作业提供有效支持。

6 结 语

本文针对徐闻港高峰时段调度效率与通航安全性提升的需求,提出一种客滚船进出港次序优化方

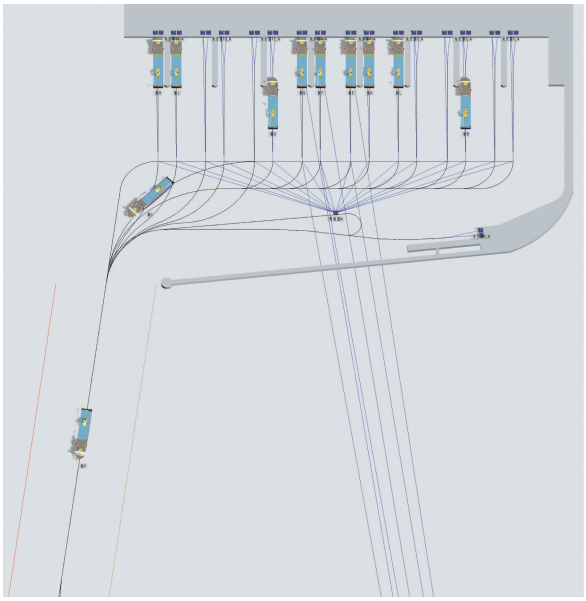


图 8 徐闻港三维仿真模型

Fig. 8 Three-dimensional simulation model of Xuwen Port

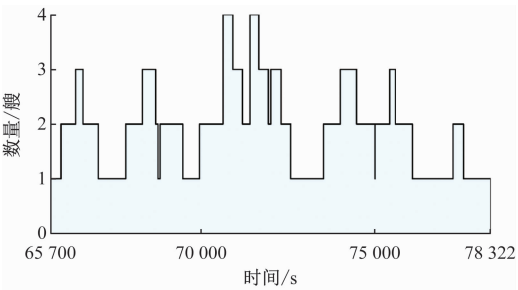


图 9 在港航行船舶数量

Fig. 9 The number of vessels navigating in port

法。该方法通过问题转化、权矩阵计算、动态规划建模和算法设计与求解获得最优进出港次序。数值试验与仿真试验结果表明,本文提出的优化方法构建的权矩阵准确反映了船舶间的运动状态与几何关系,所获得的进出港次序符合航行安全要求且优化效果显著。

本文提出的优化方法亦存在一定的局限性:在大规模问题求解上的效率有待提升,且尚未考虑泊位分配问题,亦未涉及与对岸新海港的协同调度。因此,未来将聚焦于以下方向深入探索。

1)与启发式算法结合,以提升算法在大规模问题下的性能。

2)推进船舶进出港次序与泊位分配之间的协同优化。

3)探索徐闻港与新海港的协同调度机制。

参 考 文 献

[1] 陈宁, 吕鹏, 胡斌. 琼州海峡客滚船渡海车辆配载优化决策研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2022, 44(5): 777-783.
Chen N, Lyu P, Hu B. Research on optimal decision-making of crossing sea vehicles stowage of RoRo passenger ship in the Qiongzhou strait[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2022, 44(5): 777-783. (in Chinese)

[2] Zhang Y, Tian H W, He L J, et al. A two-phase stowage approach for passenger-cargo RoRo ship based on 2D-KP: coping with complex rotation and safe navigation constraints[J]. IEEE Access, 2020, 8: 95807-95822.

[3] 马少康. 带二维装箱约束的客货滚装船配载决策[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
Ma S K. Passenger-cargo RoRo ships stowage planning decision with two-dimensional packing constraints[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020. (in Chinese)

[4] 张帝. 汽车滚装码头优化调度模型与算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2021.
Zhang D. Research of scheduling optimization model and algorithm on automotive Ro-Ro terminals [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2021. (in Chinese)

[5] 隋毅, 金建钢. 考虑汽车流冲突的汽车滚装码头泊位分配研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2024, 22(3): 118-133.
Sui Y, Jin J G. Berth allocation research on automobile Ro-Ro terminals considering vehicle flow conflicts[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2024, 22(3): 118-133. (in Chinese)

[6] 赵晓艺. 风后复航阶段客货滚装码头车辆优化调度研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
Zhao X Y. Vehicle scheduling optimization for Ro-Pax terminal when reopening after high winds[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)

[7] 熊得鹏. 客货滚装港口船舶与待渡场协调作业优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
Xiong D P. Research of coordinated operation optimization between ship and waiting-yard in passenger-cargo Ro-Ro port[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022. (in Chinese)

[8] 张佳漪. 基于运输需求预测的客滚船队排班优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2024.
Zhang J Y. Research on scheduling optimization of Ro-Ro passenger fleet based on transport demand forecasting [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2024. (in Chinese)

(下转第 174 页)

[28] Wang J, Chen J, Chen D, et al. LKM-UNet: large kernel vision mamba unet for medical image segmentation[C]//International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 360-370.

[29] Wang L, Li D, Dong S, et al. PyramidMamba: rethinking pyramid feature fusion with selective space state model for semantic segmentation of remote sensing imagery[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2025, 144: 1-11.

[30] Ma X, Zhang X, Pun M O. Rs 3 mamba: visual state space model for remote sensing image semantic segmentation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2024, 21: 1-5.

[31] Zheng J, Fu Y, Chen X, et al. EGCM-UNet: edge guided hybrid CNN-Mamba UNet for farmland remote sensing image semantic segmentation[J]. Geocarto International, 2025, 40(1): 1-20.

[32] Stokholm A, Buus-Hinkler J, Wulf T, et al. The AutoICE challenge[J]. The Cryosphere, 2024, 18(8): 3471-3494.

[33] Ren Y, Xu H, Liu B, et al. Sea ice and open water classification of SAR images using a deep learning model[C]//IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. New York: IEEE, 2020: 3051-3054.

[34] Chen L C, Zhu Y, Papandreou G, et al. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). Munich: ECCV, 2018: 801-818.

[35] Liu Z, Lin Y, Cao Y, et al. Swin transformer: hierarchical vision transformer using shifted windows[C]//Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision. Seattle: IEEE/CVF, 2021: 10012-10022.

[36] Xie E, Wang W, Yu Z, et al. SegFormer: simple and efficient design for semantic segmentation with transformers[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2021, 34: 12077-12090.

(上接第163页)

[9] 李召辉, 王博岩, 狄仲捷, 等. 基于智能调度系统的琼州海峡客滚运输班期优化[J]. 航海技术, 2025(3): 38-42.
Li Z H, Wang B Y, Di Z J, et al. Optimization of schedules for Ro-Ro passenger transportation in the Qiongzhou strait based on an intelligent scheduling system[J]. Marine Technology, 2025(3): 38-42. (in Chinese)

[10] 张新宇, 李瑞杰, 林俊, 等. 双向通航港口船舶调度优化模型与算法[J]. 中国航海, 2018, 41(2): 36-40.
Zhang X Y, Li R J, Lin J, et al. Vessel scheduling optimization in two-way traffic ports[J]. Navigation of China, 2018, 41(2): 36-40. (in Chinese)

[11] Liu B L, Li Z C, Sheng D, et al. Integrated planning of berth allocation and vessel sequencing in a seaport with one-way navigation channel[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2021, 143: 23-47.

[12] 李润佛, 张新宇, 李俊杰, 等. 基于强化学习的自学习遗传算法在船舶调度中的应用[J]. 大连海事大学学报, 2022, 48(3): 20-30.
Li R F, Zhang X Y, Li J J, et al. Application of self-learning Genetic Algorithm based on reinforcement learning in ship scheduling[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2022, 48(3): 20-30. (in Chinese)

[13] Lalla-Ruiz E, Shi X N, Voss S. The waterway ship scheduling problem[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 60: 191-209.

[14] Xu F Q, Ren H X, Duan Y T, et al. Joint optimization of ship traffic organization and berth allocation in a seaport with one-way channel[J]. Ocean Engineering, 2025, 326: 120843.

[15] Jia Q, Li R H, Li J W. Departure vessel scheduling optimization considering traffic restrictions in turning basin: a case study for Xuwen terminal[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(7): 1311.

[16] Jia Q, Li R H, Li J W, et al. Vessel traffic scheduling optimization for passenger RoRo terminals with restricted harbor basin[J]. Ocean and Coastal Management, 2023, 246: 106904.

[17] 贾琼. 操纵水域受限的客滚运输港口船舶调度优化研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2024.
Jia Q. Vessel scheduling optimization for semi-enclosed passenger RoRo terminals with restricted harbor basin[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2024. (in Chinese)

[18] Zhao R Q, Shu S N, Wu L X, et al. Robust vessel traffic scheduling with uncertain berth service times in a seaport[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2025, 200: 103294.