文章编号:1000 - 4653(2026)04 - 0106 - 10

基于双档靠泊的泊位与多转运模式协同调度优化

梁承姬[1*], 廖毅明[1], 王 钰[1], 赵 锐[1], 顾峰峰[2], 韩 露[3]
(1. 上海海事大学 物流科学与工程研究院, 上海 201306;
2. 上海河口海岸科学研究中心 交通运输部重点实验室, 上海 201201;
3. 长江口航道管理局 交通运输部, 上海 200003)

摘 要:转运枢纽港通常需面对高密度的水水转运,但港口资源有限,难以制定高效泊位调度方案。针对该问题考虑多船层叠式停靠同一泊位通过岸桥直接转运的双档靠泊方式,并将其与间接转运和改进的直接转运综合,提出一种结合多种转运方式的泊位调度方案。该方案考虑转运时间窗、船舶匹配关系和岸桥宽度等约束,同时决策泊位分配与转运方式选择,以转运成本和船舶相关成本最小化为目标建立混合整数规划模型;针对模型求解复杂性,采用自适应大邻域搜索(ALNS)算法,设计破坏与修复算子及自适应权重更新机制,在不同规模算例下与 Gurobi、遗传算法(GA)、模拟退火算法进行对比。通过权重敏感性分析验证模型在不同成本权重设定下的稳定性,并以上海洋山港支线泊位实际到港数据为案例验证方案适用性。结果表明:相比于传统方案,该方案能有效降低船舶等待时间进而减少任务总完工时间,并大幅减少卡车运输和堆场存储成本,船舶总等待时间减少 63.48%,总运营时间减少 5.73%,总运营成本降低 65.09%。改进 ALNS 在中小规模算例结果与 Gurobi 求解结果偏差在 3% 以内,大规模实例相比于 GA、SA 能够在较短时间内获得高质量解,展现出良好的稳定性与求解效率。

关键词:水路运输; 泊位分配; 双档靠泊; 多转运模式协同; 自适应大规模邻域搜索
中图分类号:U691 + .3 **文献标志码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1000 - 4653.2026.04.012

Coordinated optimization of berth allocation and multiple transshipment modes with double-berthing

Liang Chengji[1*], *Liao Yiming*[1], *Wang Yu*[1], *Zhao Rui*[1], *Gu Fengfeng*[2], *Han Lu*[3]
(1. Institute of Logistics Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;
2. Shanghai Estuarine & Coastal Science Research Center, Key Laboratory of Ministry of Transport, Shanghai 201201, China; 3. Yangtze Estuary Waterway Administration Bureau, Ministry of Transport, Shanghai 200003, China)

Abstract: Transshipment hub ports typically handle high-density water-to-water transshipment, while limited port resources pose significant challenges for efficient berth scheduling. To address this issue, a berth scheduling approach integrating multiple transshipment modes is proposed by incorporating a double-berthing operation, which allows vessels to berth side-by-side at the same berth and conduct direct transshipment via quay cranes. The double-berthing operation is further integrated with indirect transshipment and improved direct transshipment to form a coordinated transshipment framework. A mixed-integer programming model is formulated to jointly determine berth allocation and transshipment mode selection, with the objective of minimizing transshipment costs and vessel-related operational costs. The model incorporates practical

收稿日期:2025-12-24
基金项目:国家重点研发计划(2024YFB2605900);国家自然科学基金项目(W2512091、72271125、72501171);国防科工局船舶工业技术能力提升专项(QT1451-0415043)资助
第一作者(*通信作者):梁承姬(1970—),女,教授,博士,研究方向为港口物流系统运作计划与优化研究,(E-mail)liangcj@shmtu.edu.cn
引用格式:梁承姬,廖毅明,王钰,等.基于双档靠泊的泊位与多转运模式协同调度优化[J].中国航海,2026,49(4):106 - 115.
Liang C J, Liao Y M, Wang Y, et al. Coordinated optimization of berth allocation and multiple transshipment modes with double-berthing [J]. Navigation of China, 2026, 49(4): 106 - 115. (in Chinese)

constraints including transshipment time windows, vessel matching relationships, and quay crane width limitations. To solve the resulting complex optimization problem, an Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) algorithm is developed. Multiple destroy and repair operators together with an adaptive weight updating mechanism are designed to enhance the exploration capability and computational efficiency of the algorithm. Computational experiments of different scales are conducted, and the proposed algorithm is compared with the Gurobi solver, Genetic Algorithm (GA), and Simulated Annealing (SA). In addition, weight sensitivity analysis is performed to evaluate the robustness of the model under different cost weight settings. The applicability of the proposed approach is further verified using real arrival data from feeder berths at Shanghai Yangshan Port. The results show that, compared with traditional scheduling schemes, the proposed approach significantly reduces vessel waiting time and overall completion time while substantially decreasing truck transportation and yard storage costs. Specifically, the total vessel waiting time is reduced by 63.48%, the total operational time by 5.73%, and the overall operational cost by 65.09%. Furthermore, the improved ALNS achieves solutions within 3% of those obtained by Gurobi for small-and medium-sized instances, and obtains high-quality solutions within shorter computation times than GA and SA for large-scale instances, demonstrating strong robustness and computational efficiency.

Key words: waterway transportation; berth allocation; double-berthing; multi-mode transshipment coordination; adaptive large neighborhood search

海运是国际贸易的主要运输方式,占全球贸易总值的80%以上。作为海运关键节点,港口承担着货物装卸、储存和转运任务,其运营效率直接影响全球贸易的稳定性和经济效益。泊位分配问题是港口运营调度的核心环节之一,可归结为受时空约束的NP-hard组合优化问题,需在多目标权衡下确定船舶的靠泊位置和时间,具有高度的决策复杂性。随着港口集装箱吞吐量和转运任务的持续增长,在有限泊位资源约束下,如何在保障转运作业连续性的同时,合理制订船舶靠泊计划,已成为提升港口运行效率和中转服务能力的关键问题。

围绕泊位分配问题,已有研究从泊位资源协调、调度扰动恢复和动态决策等角度展开大量探索。Lyu等[1]研究转运环境下码头间泊位共享及船舶间转运协作条件下的泊位分配恢复问题。文献[2]针对母船与支线船转运场景,综合考虑岸桥分配,研究泊位分配的干扰恢复机制。Moorthy等[3]引入矩形包装框架,求解数据不确定性情况下的主泊位随机调度问题。为提升求解质量与效率,Zheng等[4]结合排队、稳定性和聚类的三阶段泊位分配优化策略。Cheimanoff等[5]采用贪心随机自适应搜索和迭代局部搜索方法,联合优化泊位和堆场资源配置。Xiang等[6]提出一种自适应动态调度策略,求解多周期下泊位与相关资源的动态集成优化问题。文献[7]进一步采用深度强化学习方法,通过离线训练实现动态泊位分配的智能决策。

上述研究在提升泊位利用率和调度鲁棒性方面取得了一定成果,但对泊位与船舶间转运的协同关系研究相对较少。基于泊位分配与转运作业之间的紧密关联,部分学者开始探究在不同转运模式下的协同优化问题。宋阳等[8]针对直接转运模式,采用改进遗传算法(Genetic Algorithm, GA)优化泊位与岸桥集成调度。Zeng等[9]研究在直接转运条件下泊位与堆场空间的联合分配问题。Tao等[10]提出多集群堆叠策略应对堆场拥堵,并设计三阶段启发式方法求解泊位和堆场联合优化问题。Pang等[11]设计迭代分解启发式方法优化泊位分配与转运路线,并以珠江三角洲为例进行验证。丁一等[12]综合考虑船舶靠泊时间与转运匹配等约束,制定多码头泊位资源分配方案。唐梦宇等[13]将视角扩展至水铁联运,利用滚动窗口策略与双层GA求解船舶与列车间的集装箱转运协调问题。

尽管泊位分配研究文献丰富,但专门讨论船对船转运的研究仍较有限。Nellen等[14]的研究分类显示,码头直接集装箱转运的研究存在局限,且多被视为可选设计而非核心问题。AI Samrout等[15]将船对船直接转运纳入泊位调度问题,建立集成优化模型,并改进GA求解高质量调度方案。实际应用中,船对船转运已得到广泛应用,上海洋山港[16]和厦门港等码头已常态化采用双档靠泊模式。

综上,现有研究在泊位分配及其与岸桥、堆场以及转运作业的协同优化方面取得一定进展,但多数研究将转运方式选择与泊位分配作为独立决策,未充分考虑船舶间转运任务与泊位的时空耦合关系。并且,现有研究多针对单一转运模式开展优化,船对船转运的模式尚未引起足够重视,未能系统地刻画不同转运方式对泊位资源占用和调度冲突的影响,难以应对有限资源下多船协同靠泊与高密度转运并存的复杂场景。

因此,本文提出一种多转运模式协同优化的泊位分配问题,综合双档靠泊、直接转运和间接转运等3种模式,考虑同一泊位多船层叠式停靠的场景,并

扩展直接转运时间窗以增强调度灵活性,提出一种改进的自适应大邻域搜索(Adaptive Lange Nevghborhood Seaorch, ALNS)算法求解该问题。通过对比传统模型,验证了多种转运模式的协同优化及双档靠泊的优势。

1 问题描述与建模

1.1 多种水水转运下的泊位分配问题

转运港是全球航运网络的核心枢纽,需处理多类型船舶和货物的中转集装箱作业。水水转运是主要操作模式,包含间接转运和直接转运两种典型方式。

1)间接转运是指将集装箱卸至堆场暂存,再运至目标船舶,适用于装卸时间和到港时间不匹配的场景,但增加堆场存储和运输成本。

2)直接转运是指集装箱卸货后直接沿岸线运输到目标船舶进行装卸,可降低存储成本并提升转运效率,但需船舶同时在港。由于传统直接转运仅考虑从船 A 转运到船 B 时,船 B 晚于船 A 到港的情况,船舶到达顺序固定,转运时间窗较小。改进直接转运允许船 B 先于船 A 到港,可灵活调整船舶到达顺序,放宽转运时间窗限制,仅需满足两船同时在港时间大于转运处理时间窗。这一改进不仅扩展了直接转运的适用场景,还减少了对堆场的依赖,并降低了整体转运成本,直接转运时间窗示意见图 1。

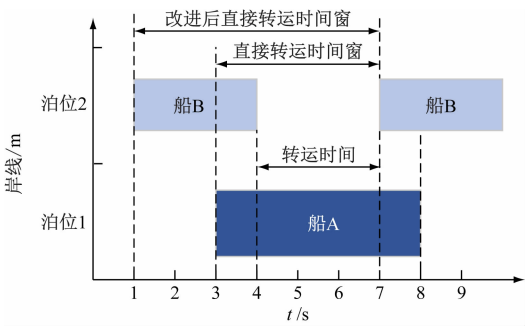


图 1 直接转运时间窗示意

Fig. 1 Schematic diagram of time windows for direct transshipment

为进一步提高泊位利用率并减少船舶等待成本,引入一种无需船载起重机等特殊设备的双档靠泊策略。该策略允许多艘船舶在同一泊位停靠,较大船舶靠近岸线,较小船舶停靠外侧,船舶之间保持安全距离,避免碰撞,岸桥宽度大于泊位内全部船舶宽度与船间安全距离总和,集装箱可在两船间通过港口岸桥完成转运,能有效减少泊位占用,无需堆场存储和卡车运输,减少存储、运输成本,但双档靠泊仍受多种因素限制:两船并排停靠对定位、系固和安全间距要求高;需船舶到港时间及作业时长匹配方能发挥效率,更适用于转运船舶密集、到港规律性强的场景。潮流大、流速高和水深或旋回空间受限等条件也会增加靠离泊风险,限制其实施。

双档靠泊、直接转运和间接转运等 3 种转运方式港口示意见图 2。图 2 中:船 A 的中转集装箱通过双档靠泊方式,用岸桥 A 运输到船 B,船 A 与船 B 保持安全距离,船 D 到船 E 同理。船 A 的中转集装箱另一部分通过间接转运方式,先用卡车运输到堆场,等船 F 到达后再运至泊位 4 装卸。船 C 的中转集装箱通过岸线直接运输到泊位 4,再转运到船 F。在港口高密度转运场景下,采用间接转运加传统直接转运的现有协同模式进行泊位分配时,容易引发泊位资源冲突、港口拥堵和船舶处理效率低下等问题。因此,本文提出一种多转运模式协同优化方法,以应对多类型船舶和多样化转运需求。由于问题涉及泊位分配、转运模式选择、作业衔接和安全约束等离散决策变量,适合采用混合整数规划(Mixed Integer Programming,MIP)进行建模,既保持模型结构清晰,又可统一描述整型决策。研究以转运成本和船舶相关成本最小化为目标,综合考虑船舶到达时间、转运时限、堆场资源和船舶优先级等因素,构建 MIP 模型,旨在帮助港口运营商在满足转运需求的同时,提升运营效率、降低成本并提高资源利用率。

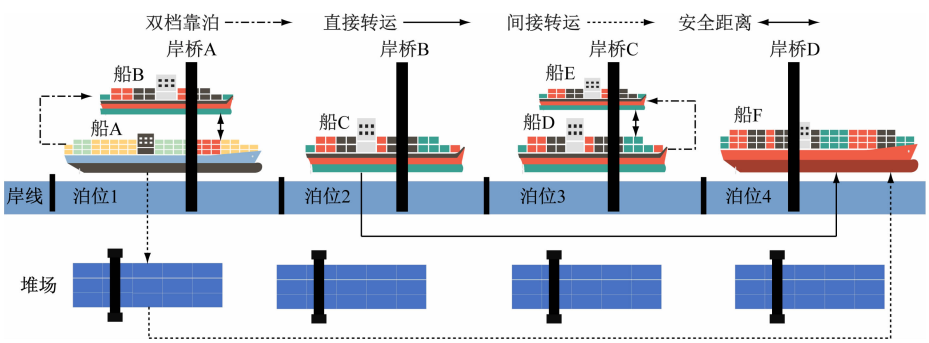


图 2 3 种转运方式港口示意

Fig. 2 Schematic diagram of the port with three transshipment modes shoreline direct transshipment time window

1.2 模型假设与符号说明

模型假设如下:

1)船舶预计到港/离港时间等信息已知。

2)船舶的中转信息已知。

3)港口每个泊位的单个集装箱平均装卸时间为定值。

4)船舶宽度与船舶装卸时间呈正相关。

1.2.1 参数定义

I 为船舶集合;R 为泊位集合;b_i 为船 i 预期离开时间;e_i 为船 i 的实际到达时间;h_i 为船 i 的装卸时间;W_{ij} 为船 i 到船 j 的转运集装箱数;$d_{rr',\mathrm{D}}$ 为泊位 r 到泊位 r' 的直接转运距离;$d_{rr',\mathrm{I}}$ 为泊位 r 到泊位 r' 的间接转运平均距离;$C_{i,\mathrm{V}}$ 为船 i 的单位时间罚款成本;$C_{i,\mathrm{U}}$ 为船 i 的单位时间等待成本;w 为船舶单位时间违规成本占船舶 i 预期装卸时间的权重;k 为船舶单位时间等待成本占船 i 预期装卸时间的权重;C_{T} 为双档靠泊的单位集装箱服务成本;C_{D} 为直接转运的单位集装箱服务成本;C_{I} 为间接转运的单位集装箱服务成本;f 为岸桥宽度;s 为船舶宽度换算系数,即单位装卸时间所对应的船舶宽度;L 为船舶之间避免碰撞所需的最小安全距离;M 为很大的正整数。

1.2.2 决策变量定义

c_i 为船 i 开始工作时间;l_i 为船 i 实际离开时间;v_i 为船 i 超出预期离开时间的偏差;x_{ir} 为如果船 i 停靠在泊位 r 则值为 1,否则为 0;y_{ijr} 为如果船 i 和船 j 都停靠在泊位 r,且船 i 停靠时间早于船 j 则值为 1,否则为 0;A_{ijr} 为如果船 i 和船 j 停靠在同一泊位 r,船 i 的开始工作时间早于船 j,离开时间晚于船 j 则值为 1,否则为 0;z_{ij} 为如果存在从船 i 到船 j 的转运值为 1,否则为 0;$\varphi_{ij,\mathrm{D}}$ 为如果从船 i 到船 j 采用直接转运值为 1,否则为 0;$\varphi_{ij,\mathrm{I}}$ 为如果从船 i 到船 j 采用间接转运值为 1,否则为 0;$\varphi_{ij,\mathrm{T}}$ 为如果从船 i 到船 j 采用双档靠泊值为 1,否则为 0;P_{ijr} 为当船 i 和船 j 都停靠在泊位 r 时值为 1,否则为 0;$Q_{ijrr'}$ 为当船 i 停靠在泊位 r,船 j 停靠在泊位到 r' 时为 1,否则为 0。

1.3 模型构建

$$\min\ (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5) \tag{1}$$

$$Z_1 = \sum_{i\in I} C_{i,\mathrm{V}}(l_i - b_i)^+ \tag{2}$$

$$Z_2 = \sum_{i\in I} C_{i,\mathrm{U}}(c_i - e_i) \tag{3}$$

$$Z_3 = \sum_{i,j\in I,i\neq j}\sum_{r\in R} C_{\mathrm{T}}x_{ir}x_{jr}(W_{ij}\varphi_{ij,\mathrm{T}} + W_{ji}\varphi_{ji,\mathrm{T}}) \tag{4}$$

$$Z_4 = \sum_{i,j\in I,i\neq jr,r'\in R,r\neq r'} C_{\mathrm{D}}x_{ir}x_{jr'}d_{rr',\mathrm{D}}(W_{ij}\varphi_{ij,\mathrm{D}} + W_{ji}\varphi_{ij,\mathrm{D}}) \tag{5}$$

$$Z_5 = \sum_{i,j\in I,i\neq jr,r'\in R,r\neq r'} C_{\mathrm{I}}(x_{ir}x_{jr} + x_{ir}x_{jr'})d_{rr',\mathrm{I}}(W_{ij}\varphi_{ij,\mathrm{I}} + W_{ji}\varphi_{ij,\mathrm{I}}) \tag{6}$$

$$C_{i,\mathrm{V}} = w\cdot h_i, i\in I \tag{7}$$

$$C_{i,\mathrm{U}} = k\cdot h_i, i\in I \tag{8}$$

$$c_i \geqslant e_i, i\in I \tag{9}$$

$$l_i \geqslant c_i + h_i, i\in I \tag{10}$$

$$v_i \geqslant l_i - b_i, i\in I \tag{11}$$

$$\sum_{r\in R} x_{ir} = 1, i\in I \tag{12}$$

$$P_{ijr} \leqslant x_{ir}, i,j\in I; i\neq j; r\in R \tag{13}$$

$$P_{ijr} \leqslant x_{jr}, i,j\in I; i\neq j; r\in R \tag{14}$$

$$P_{ijr} \geqslant x_{ir} + x_{jr} - 1, i,j\in I; i\neq j; r\in R \tag{15}$$

$$Q_{ijrr'} \leqslant x_{ir}, i,j\in I; i\neq j; r,r'\in R; r\neq r' \tag{16}$$

$$Q_{ijrr'} \leqslant x_{ir*}, i,j\in I; i\neq j; r,r'\in R; r\neq r' \tag{17}$$

$$Q_{ijrr'} \geqslant x_{ir} + x_{ir'} - 1, i,j\in I; i\neq j; r,r'\in R; r\neq r' \tag{18}$$

$$z_{ij}\cdot M \geqslant W_{ij}, i,j\in I; i\neq j \tag{19}$$

$$z_{ij} \leqslant W_{ij}\cdot M, i,j\in I; i\neq j \tag{20}$$

$$A_{ijr} + A_{jir} + y_{ijr} + y_{jir} \leqslant x_{ir}, i,j\in I; i\neq j; r\in R \tag{21}$$

$$A_{ijr} + A_{jir} + y_{ijr} + y_{jir} \leqslant x_{jr}, i,j\in I; i\neq j; r\in R \tag{22}$$

$$A_{ijr} + A_{jir} + y_{ijr} + y_{jir} \geqslant x_{ir} + x_{jr} - 1, i,j\in I; i\neq j; r\in R \tag{23}$$

$$l_i \leqslant c_j + (1 - y_{ijr})\cdot M, i,j\in I; i\neq j; r\in R \tag{24}$$

$$c_i \leqslant c_j + M\cdot(1 - A_{ijr}), i,j\in I; i\neq j; r\in R \tag{25}$$

$$l_j \leqslant l_i + M\cdot(1 - A_{ijr}), i,j\in I; i\neq j; r\in R \tag{26}$$

$$s\cdot(h_i + h_j) + L \leqslant f + M\cdot(1 - A_{ijr}), i,j\in I; i\neq j; r\in R \tag{27}$$

$$\sum_{r\in R} A_{ijr} = \varphi_{ij,\mathrm{T}}, i,j\in I; i\neq j \tag{28}$$

$$c_j \leqslant l_i - W_{ij} + M\cdot(1 - \varphi_{ij,\mathrm{D}}), i,j\in I; i\neq j \tag{29}$$

$$l_j + M\cdot(1 - \varphi_{ij,\mathrm{D}}) \geqslant c_i + W_{ij}, i,j\in I; i\neq j \tag{30}$$

$$l_i \leqslant c_j + M\cdot(1 - \varphi_{ij,\mathrm{I}}), i,j\in I; i\neq j \tag{31}$$

$$\varphi_{ij,\mathrm{T}} + \varphi_{ij,\mathrm{I}} + \varphi_{ij,\mathrm{D}} = z_{ij}, i,j\in I; i\neq j \tag{32}$$

$$e_i, c_i, l_i, v_i > 0, i\in I \tag{33}$$

$$x_{ir}\in\{0,1\}, i\in I; r\in R \tag{34}$$

$$z_{ij}\in\{0,1\}, i,j\in I; i\neq j \tag{35}$$

$$\varphi_{ij,\mathrm{T}}, \varphi_{ij,\mathrm{D}}, \varphi_{ij,\mathrm{I}}\in\{0,1\}, i,j\in I; i\neq j \tag{36}$$

$$y_{ijr}, A_{ijr}, P_{ijr}\in\{0,1\}, i,j\in I; i\neq j; r\in R \tag{37}$$

$$Q_{ijrr'}\in\{0,1\}, i,j\in I; i\neq j; r,r'\in R; r\neq r' \tag{38}$$

式(1)为目标函数,旨在最小化港口转运流程中的总成本包含船舶违规成本、船舶等待成本、双档靠泊成本、直接转运成本和间接转运成本等 5 个部分见式(2)~式(6);式(7)~式(8)规定船舶的单位时间违规成本和等待成本与其处理时间正相关,以体现优先级;式(9)确保船舶作业开始时间不早于到

港时间;式(10)确保船舶离开时间不小于作业开始时间加作业时长;式(11)确保仅当船舶实际离开时间超过预计时间时计算违规成本;式(12)确保每艘船都停靠在泊位;式(13)~式(15)确保辅助变量正确表示船舶是否停靠在同一泊位;式(16)~式(18)确保辅助变量正确表示船舶是否停靠在不同泊位;式(19)~式(20)确保有转运任务的船舶必须选择一种转运方式,无转运任务的船舶不选择;式(21)~式(23)确保同一泊位停靠的船舶可选择顺序或同时停靠,但不可兼得;式(24)确保未采用双档靠泊时,船舶在同一泊位必须按顺序停靠;式(25)~式(26)采用双档靠泊时,船舶必须同时段停靠同一泊位,且转运船舶的开始和离开时间需满足作业时间要求;式(27)确保采用双档靠泊时,岸桥宽度必须大于两艘船舶的宽度与安全距离之和;式(28)确保双档靠泊时,船舶只能同时停靠在一个泊位;式(29)~式(30)确保采用直接转运时,船舶同时靠泊时间需满足转运任务要求;式(31)确保间接转运时,船舶必须在源船舶转运完成后靠泊;式(32)确保转运任务必须从双档靠泊、直接转运、间接转运 3 种方式之一完成;式(33)~式(38)定义决策变量的取值范围。

2 算法设计

由于泊位分配问题为 NP-hard,叠加转运模式选择和多类时间窗约束后,问题复杂度进一步增加,Gurobi 在中大规模实例上难以在限定时间内获得最优解。因此,本文选用 ALNS 算法作为求解方法,ALNS 算法在处理大规模组合优化问题时具有良好的灵活性,可根据问题特点自定义破坏与修复算子,并通过动态权重平衡全局搜索与局部改进。本文采用同时定义泊位分配与转运选择的混合编码结构,并设计破坏、修复和转运更新算子改进一般的 ALNS 算法。以适配多转运模式下的复杂约束和多目标优化特性。改进 ALNS 算法流程见图 3。

2.1 编码

算法采用混合编码方式,结合整数编码和矩阵编码,以解决泊位分配和船舶转运的组合优化问题。

1)整数编码(见图 4):船舶与泊位的分配关系如图 4 所示。图 4 中:非零数字为船舶编号;数字 0 为泊位分隔符,表示船舶在泊位上的停靠顺序。

2)矩阵编码(见图 5):中转集装箱分布矩阵第 1 行第 2 列表示船 1 有 1 个时间步长的集装箱需转运至船 2,其他同理;矩阵区分船 1 到船 2 与船 2 到船 1 的转运关系;根据集装箱分布矩阵确定转运关系矩阵,矩阵值为 1、2 和 3,分别代表双档靠泊、直接转运和间接转运。

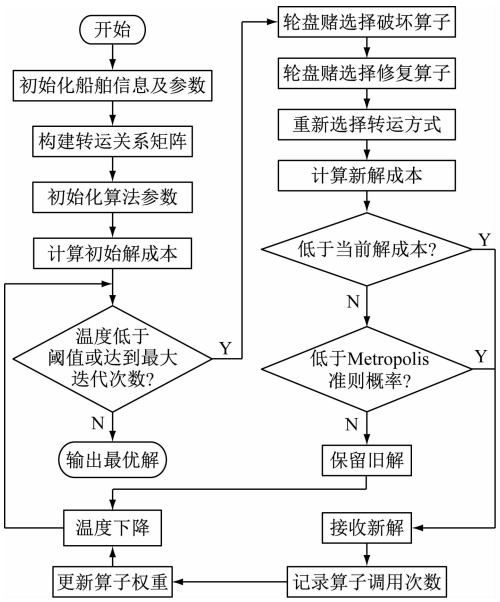


图 3 改进 ALNS 算法流程

Fig. 3 Flowchart of the improved ALNS algorithm

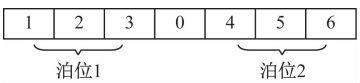


图 4 整数编码

Fig. 4 Integer encoding

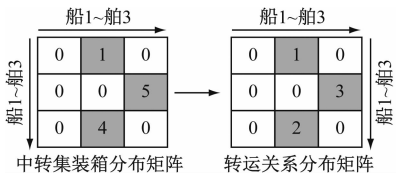


图 5 矩阵编码

Fig. 5 Matrix coding

2.2 算子设计

算法采用 4 个破坏算子、3 个修复算子和 2 个转运更新算子,根据算子权重动态选择算子。破坏修复步骤如下:

1)根据不同规则从船舶列表中选取船舶移除。

2)根据修复规则将移除船舶插回原列表,破坏和修复见图 6。

①相关性破坏算子:对船舶停靠泊位、停泊时间和船舶装卸时间的相关性进行移除,可有效打破局部结构,避免陷入局部最优,节点的相关性程度表达式为

$$R(i,j) = w_1|r_i - r_j| + w_2|c_i - c_j| + w_3|h_i - h_j| \tag{39}$$

式(39)中:w_1、w_2 和 w_3 分别为停靠泊位 r、靠泊时间 c 和船舶装卸时长 h 的权重系数;$R(i,j)$ 越大表示节

点的相关性越小。

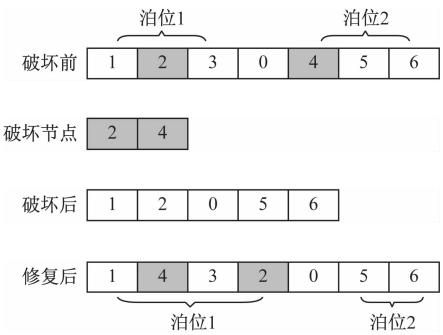


图 6 破坏和修复

Fig. 6 Destruction and repair

②成本相关性删除:选择成本最高的船舶移除,采用时间相关或泊位相关策略选择另一艘船移除。时间相关表示船舶在同一时间段停靠不同泊位,泊位相关表示船舶在不同时间段由同一泊位提供服务。该算子可直接作用于高成本结构,加快对关键瓶颈的重构。

③随机破坏算子:随机选取一定数量的船舶并移除,引入必要的搜索多样性以保证整体搜索的广度。

④随机修复算子:随机选择泊位和停靠顺序,将被移除的船舶插入解中,用以提供多样化解的初始结构。

⑤贪婪修复算子:选择使总成本增加最小的插入位置,能快速构建一个质量较高的可行解,为搜索提供稳定的基准。

⑥后悔值修复算子:评估每个插入位置的"后悔值",选择最大后悔值位置插入,能避免短视选择,提升后续搜索空间质量。

$$C_{i,\Delta} = C_{i,\mathrm{A}} - C_{i,\mathrm{B}} \tag{40}$$

$$C_{\mathrm{R}} = \min_2 C_{i,\Delta} - \min C_{i,\Delta} \tag{41}$$

式(40)~式(41)中:$C_{i,\mathrm{A}}$为插入候选位置 i 后的目标成本;$C_{i,\mathrm{B}}$为插入前的目标成本;$C_{i,\Delta}$为插入后的成本增量;$\min_2 C_{i,\Delta}$为该次插入的次佳插入成本;$\min C_{i,\Delta}$为该次插入的最佳插入成本;最大后悔值 C_{R} 为次佳插入成本 $\min_2 C_{i,\Delta}$和最佳插入成本 $\min C_{i,\Delta}$之差。

⑦转运更新算子:随机选择转运方式更新已有转运关系的转运方式,避免固定采用单一转运方式,增强对多模式场景的适应性。

⑧贪婪更新算子:选择使总成本最小的转运方式进行更新,能高效地改进局部方案,并能快速收敛到质量较高的解。

2.3 自适应算子权重更新

ALNS 算法通过自适应权重调整机制优化算子选择过程。算法在迭代过程中依据破坏算子和修复算子的解质量表现动态更新其权重。本文基于算子表现设定了 4 个奖励类别为

$$p = \begin{cases} p_1, & \text{当前最优解} \\ p_2, & \text{优于当前解} \\ p_3, & \text{不是更好但被接受的解} \\ p_4, & \text{解被接收准则拒绝} \end{cases} \tag{42}$$

式(42)中:p 为算子在不同表现下获得的奖励值。各类算子的初始权重设定为均匀分布,在算子选择阶段,根据当前权重构造概率分布并按概率选取算子。算子执行后,根据生成解质量给予相应奖励,并通过自适应更新机制调整其权重,其更新公式为

$$w_i = (1 - \lambda) w_i + \lambda p \tag{43}$$

式(43)中:w_i 为算子 i 的权重;λ 为介于 0 和 1 之间的参数,用于平衡历史权重与当前奖励的影响,权重更新后,对同一类型算子权重进行归一化处理,以构造新的算子选择概率分布,用于后续算子选择,其概率更新公式为

$$q_i = \frac{w_i}{\sum_{i \in \Omega} w_i} \tag{44}$$

式(44)中:q_i 为算子 i 的选择概率;Ω 为当前类型算子的集合,算子类型分为破坏算子、修复算子和转运更新算子;分母为该类所有算子的权重之和,通过归一化保证同类型算子的选择概率之和为 1。

3 数值试验

3.1 算例生成和参数设置

预期船舶服务时间间隔在规划范围内随机生成,实际到达时间在预期时间的偏差范围内随机生成。参考泊位分配相关文献[17],参数设置如下:船舶宽度换算系数 $s = 0.8$,直接转运相邻泊位距离 $d_{rr',\mathrm{D}} = 5$,间接转运方式相邻泊位平均距离 $d_{rr',\mathrm{I}} = 20$,等待成本 $C_{i,\mathrm{U}} = 50$,罚款成本 $C_{i,\mathrm{V}} = 200$,双档靠泊服务成本 $C_{\mathrm{T}} = 5$,直接转运服务成本;$C_{\mathrm{D}} = 12$,间接转运服务成本 $C_{\mathrm{I}} = 30$,改进 ALNS 算法限制最大迭代次数为 1 000 次。电脑的操作系统为 Windows11,主频为 2.3 GHz,运行内存为 8G,采用 Python 编译算法程序,调用 Gurobi 12.0.1 求解模型,设置最大求解时间为 2 h。参考文献[15]~文献[17]生成 10 组实例,实例相关参数见表 1。表 1 中:实例 1 为 5 艘船舶到达码头,有 2 个泊位提供服务,其中,船 1 有中转集装箱需转运至船 4。

3.2 模型对比与分析

本研究验证了转运方式对港口泊位分配优化的

表1 实例相关参数

Tab.1 Parameters of the test instances

实例	泊位数量/个	船舶数量/艘	转运船舶对
1	2	5	(1,4)
2	3	10	(1,4) (6,8)
3	4	15	(1,4) (6,8) (11,13)
4	5	20	(1,4) (6,8) (11,13) (16,19)
5	5	25	(1,4) (6,8) (11,13) (16,19) (21,24)
6	6	30	(1,4) (6,8) (11,13) (16,19) (21,24) (27,29)
7	6	35	(1,4) (6,8) (11,13) (16,19) (21,24) (27,29) (31,34)
8	7	40	(1,4) (6,8) (11,13) (16,19) (21,24) (27,29) (31,34) (36,39)
9	7	50	(1,4) (6,8) (11,13) (16,19) (21,24) (27,29) (31,34) (36,39) (42,47)
10	8	60	(1,4) (6,8) (11,13) (16,19) (21,24) (27,29) (31,34) (36,39) (42,47) (53,58)

影响,对比了以下两种模型:

1)采用直接转运和间接转运方式。

2)采用双档靠泊、直接转运和间接转运方式。

通过对比求解结果,评估转运模式对优化效果和计算效率的影响。不同模型的求解对比见表2。表2中:差距为目标值的优化程度;数值越大表示优化效果越好;符号'—'为模型无法在2 h内求解完成;符号'/'为模型在2 h求解时间内得到的当前最优可行解。

表2 不同模型的求解对比

Tab.2 Comparison of solutions for different models

实例	Gurobi(模型1)				Gurobi(模型2)				
	目标值	等待时间/h	运营时间/h	计算时间/s	目标值	等待时间/h	运营时间/h	计算时间/s	差距/%
1	2 141	7.7	11.0	0.05	765	3.0	10.0	0.02	64.27
2	3 360	12.0	15.0	3.77	900	3.5	14.5	0.70	73.21
3	3 629	12.5	18.5	290.66	1 294	4.5	15.5	9.00	64.34
4	3 148	10.0	19.7	1 047.55	1 054	3.5	19.7	21.47	66.52
5	3 667	11.5	23.0	4 935.54	1 573	5.0	23.0	82.18	57.10
6	/3 636	/10.8	/25.0	—	1 533	4.8	25.0	99.96	—
7	/4 590)	/11.7	/27.0	—	1 543	4.8	26.5	211.52	—
8	/4 866)	/11.9	/28.5	—	1 678	5.3	28.5	2 291.14	—
9	/10 500	/39.8	/35.0	—	/4863	/26.0	/33.5	—	—
10	/19 842	/61.9	/37.0	—	/11446	/44.1	/35.5	—	—

由表2可知:模型1和模型2均可求解小规模算例,而在较大规模下,模型2仍能求解,但计算时间较长,而模型1则无法求解。在小规模实例1~实例5中,相较于模型1,模型2的目标值降低65.09%,港口总运营时间减少5.73%,船舶等待时间缩短63.48%,计算时间缩短86.92%。这表明模型2显著缩短泊位切换频率和等待时间,提高转运效率并缩短任务完成时间,还降低了港口运营成本,展现优异的优化性能。

模型1和模型2在提升泊位资源利用方面的优势分别见图7和图8。图7和图8中:船舶矩形的宽度由处理时间决定,处理时间越长,矩形越宽。有等待时间的船舶矩形上移以作区分。船1通过双档靠泊将集装箱运至船4,体现为船1矩形完全包含船4,表明同时在泊位2作业,船11到船13同理。船6到船8采用改进直接转运,船8可在船6之前到达,

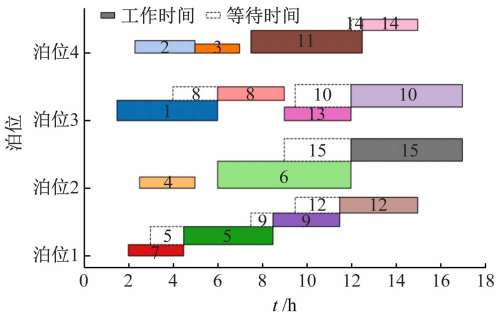


图 7 模型 1 算例 3 甘特图

Fig. 7 Gantt chart of model 1 with instance 3

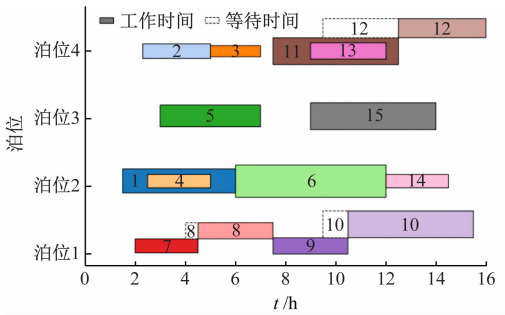


图 8 模型 2 算例 3 甘特图

Fig. 8 Gantt chart of model 2 with instance 3

明显减少了等待时间。总体而言,双档靠泊和改进直接转运的运用,大幅减少了泊位使用时长和等待时间,从而提升港口转运效率并缩短任务完成时间。

同时,在不同算例规模下,相比于模型 1,在满足船舶靠泊需求的同时,模型 2 在等待成本、违规成本和转运成本方面均有所降低,体现出更优的成本控制能力,不同规模下模型成本对比图见图 9。

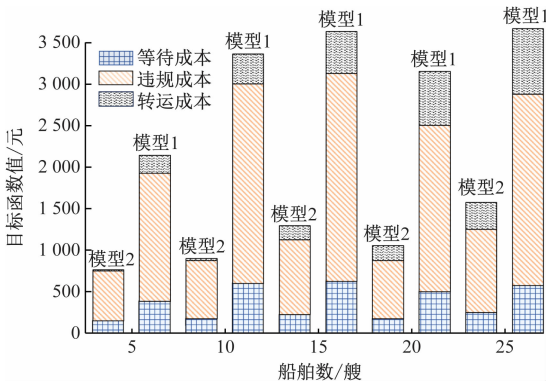


图 9 不同规模下模型成本对比

Fig. 9 Comparison of model costs under different scales

3.3 算法对比

在较大规模算例下 Gurobi 求解效率低,难以得到可行解,本文采用改进 ALNS 算法求解模型 2,并同时引入 GA 与模拟退火算法进行性能对比,Gurobi 与算法对比见表 3,算法的收敛曲线对比图见图 10。为降低算法随机性,算法运行 10 次取平均值。

表 3 Gurobi 与算法对比

Tab. 3 Comparison between Gurobi and algorithms

实例	Gurobi(模型 2)		模拟退火算法(模型 2)			遗传算法(模型 2)			改进 ALNS 算法(模型 2)		
	目标值	计算时间/s	目标值	计算时间/s	差距/%	目标值	计算时间/s	差距/%	目标值	计算时间/s	差距/%
1	765	0.02	791	0.18	3.81	784	8.15	2.53	770	1.17	0.65
2	900	0.70	938	0.33	4.18	926	14.30	2.86	906	5.23	0.67
3	1 294	9.00	1 354	0.85	4.65	1 335	29.76	3.14	1 305	15.43	0.85
4	1 054	21.47	1 153	1.21	9.32	1 134	52.13	7.65	1 080	30.19	2.47
5	1 573	82.18	1 772	2.88	12.67	1 739	123.99	10.52	1 632	77.61	3.75
6	1 533	99.96	1 723	3.41	12.43	1 684	146.22	9.85	1 578	92.28	2.94
7	1 543	211.52	1 752	5.94	13.55	1 719	255.11	11.37	1 593	164.13	3.24
8	1 678	2 291.14	1 934	54.32	15.28	1 899	2 329.46	13.22	1 740	1 532.91	3.69
9	/4 863	—	5 027	65.92	—	4 944	2 826.93	—	4 527	1 861.17	—
10	/11 446	—	13 232	83.45	—	13 021	3 578.59	—	11 980	2 357.16	—

由表 3 和图 10 可知:在实例 1 ~ 实例 8 中,改进 ALNS 算法的解与 Gurobi 的平均差距为 2.78%;在小规模实例中,改进 ALNS 算法求解时间略高于 Gurobi,但随着实例规模增大,其计算效率逐渐提升并超越 Gurobi。通过对比 3 种启发式算法可知:ALNS 解质量最佳,GA 次之,SA 相对较弱;在计算时间方面,SA 最快,ALNS 居中,GA 最慢,表明 ALNS 算法在解质量与计算效率之间取得较好平衡,体现了其求解本问题的高效性。

3.4 权重敏感性分析

为评估模型在不同成本权重下的稳定性,基于 5 组权重对小规模算例进行敏感性分析见表 4。由

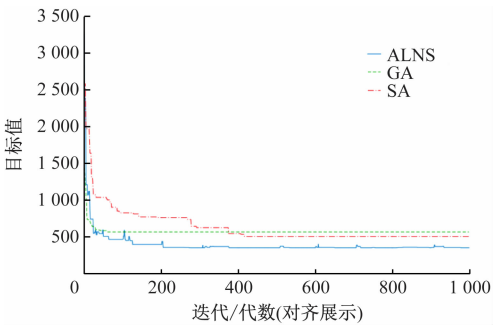


图 10 收敛曲线对比图

Fig. 10 Comparison of convergence curves

表 4 可知:随着等待成本权重的提高,模型更偏向减少船舶等待;当违规成本权重增大时,模型更重视保障船舶按期离泊,缩短运营时间。不同权重组合虽目标值存在明显差异,但核心运营指标相比于最优解波动较小。其中,模型 1 对权重变化更敏感,而模型 2 的变化相对平缓,表现出更好的适应性。总体而言,模型 2 在不同权重设定下均能保持稳定的泊位分配方案和求解质量,表现出良好的参数鲁棒性。

3.5 上海洋山港案例分析

为验证模型在实际港口场景中的适用性,本研究选取上海洋山港作为案例。洋山港规定仅支线泊位允许双档靠泊,其实际作业中双档靠泊概率约为 20%。本研究以 2025 年 12 月 6 日洋山港支线泊位的实际到港数据为例,基于本文模型生成调度甘特图,并与当日实际作业方案进行对比,结果见图 11 和图 12。

表 4 权重敏感性分析

Tab. 4 Sensitivity analysis of weights

实例	模型	$w=200,k=50$			$w=200,k=100$			$w=400,k=50$			$w=400,k=100$			$w=40,k=10$		
		目标值	等待时间	运营时间	目标值	等待时间	运营时间	目标值	等待时间	运营时间	目标值	等待时间	运营时间	目标值	等待时间	运营时间
1	1	2 141	7.7	11.0	2 526	7.0	10.7	3 681	7.4	10.6	4 066	6.8	10.5	601	8.5	11.2
	2	765	3.0	10.0	915	2.5	9.7	1 365	2.7	9.6	1 515	2.3	9.5	165	3.5	10.2
2	1	3 360	12.0	15.0	3 960	11.2	14.7	5 760	11.6	14.6	6 360	10.9	14.5	960	13.0	15.2
	2	900	3.5	14.5	1 075	2.9	14.3	1 600	3.2	14.2	1 775	2.7	14.1	200	4.3	14.7
3	1	3 629	12.5	18.5	4 254	11.6	18.2	6 129	12.0	18.1	6 754	11.2	18.0	1 129	13.4	18.9
	2	1 294	4.5	15.5	1 519	3.8	15.3	2 194	4.2	15.2	2 419	3.5	15.0	335	6.0	15.8
4	1	3 148	10.0	19.7	3 648	9.3	19.4	5 148	9.6	19.3	5 648	8.9	19.2	1 148	11.0	19.9
	2	1 054	3.5	19.7	1 229	2.9	19.5	1 754	3.2	19.4	1 929	2.7	19.3	320	5.5	19.9

由图 11 和图 12 可知:与实际调度方案相比,本文模型在泊位利用效率和作业及时性方面均表现出明显优势。通过采用双档靠泊策略,模型在保证作业及时性的同时减少了泊位占用数量,使泊位资源利用率提升约 5.9%。同时,整体目标值降低约 78.6%,港口总运营时间缩短约 8.9%。结果表明,所提模型能有效压缩整体作业周期并实现更有序的泊位安排,在实际港口支线作业场景中具有良好的应用潜力。

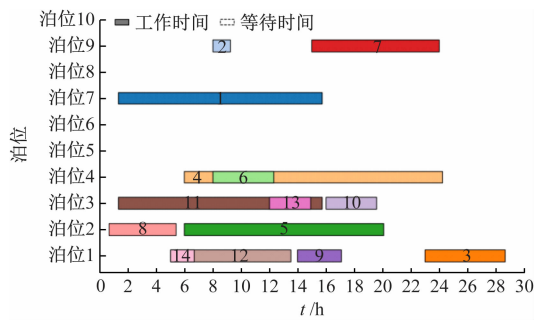


图 11 模型调度甘特图

Fig. 11 Gantt chart of model scheduling

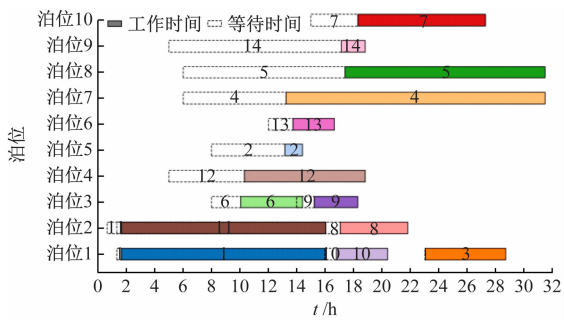


图 12 港口实际调度甘特图

Fig. 12 Gantt chart of actual port scheduling

4 结 语

本文针对高密度水水中转场景下的港口泊位分配问题,构建多转运方式协同优化模型,整合双档靠泊、改进型直接转运和间接转运模式,实现泊位资源

的灵活配置,提升港口整体运营效率;设计改进的ALNS算法,在中小规模算例中与精确求解器结果偏差较小,在大规模实例中可在较短时间内获得高质量解,实现了解质量与计算效率的良好平衡;权重敏感性分析表明,模型在不同成本权重设定下均能保持稳定的泊位分配方案和调度性能,具有良好的参数鲁棒性;以上海洋山港支线泊位实际数据进行案例验证,结果表明,所提方案在保证作业及时性的同时可提高泊位资源利用率并缩短整体作业周期,为高密度船舶转运场景下的泊位资源分配提供新思路。

本文尚未考虑船舶配载的作业时序,即中转集装箱需等待上层集装箱装卸完成后方可开展后续处理,这将直接影响转运任务的启动时机与关联船舶的靠泊协同。此外,船舶间转运的协同机制仍有进一步优化空间。未来可基于多智能体强化学习框架,开发动态调度策略以应对港口复杂作业场景,提升调度方案的实时响应能力。

参 考 文 献

[1] Lyu X H, Negenborn R R, Shi X N, et al. A collaborative berth planning approach for disruption recovery [J]. IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems, 2022, 3: 153-164.

[2] Lyu X H, Jin J G, Hu H. Berth allocation recovery for container transshipment terminals[J]. Maritime Policy & Management, 2020, 47(4): 558-574.

[3] Moorthy R, Teo C P. Berth management in container terminal: the template design problem [J]. OR Spectrum, 2006, 28(4): 495-518.

[4] Zheng J, Yang L, Han W, et al. Berth assignment for liner carrier clusters under a cooperative environment [J]. Computers & Operations Research, 2021, 136: 1-13.

[5] Cheimanoff N, Féniès P, Kitri M N, et al. Exact and metaheuristic approaches to solve the integrated production scheduling, berth allocation and storage yard allocation problem [J]. Computers & Operations Research, 2023, 153: 1-24.

[6] Xiang X, Lee L H, Chew E P. An adaptive dynamic scheduling policy for the integrated optimization problem in automated transshipment hubs[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023, 21(3): 2701-2715.

[7] Lyu Y Q, Zou M K, Li J, et al. Dynamic berth allocation under uncertainties based on deep reinforcement learning towards resilient ports[J]. Ocean & coastal management, 2024, 252: 1-13.

[8] 宋阳, 姜桂艳. 考虑直接转运的泊位与岸桥集成调度优化[J]. 物流技术, 2023, 42(7): 48-52.
Song Y, Jiang G Y. Integrated scheduling optimization of berths and quay cranes considering direct transshipment[J]. Logistics Technology, 2023, 42(7): 48-52. (in Chinese)

[9] Zeng Q, Feng Y, Chen Z. Optimizing berth allocation and storage space in direct transshipment operations at container terminals [J]. Maritime Economics & Logistics, 2017, 19: 474-503.

[10] Tao Y, Lee C Y. Joint planning of berth and yard allocation in transshipment terminals using multi-cluster stacking strategy[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2015, 83: 34-50.

[11] Pang K W, Liu J Y. An integrated model for ship routing with transshipment and berth allocation[J]. IIE Transactions, 2014, 46(12): 1357-1370.

[12] 丁一, 唐鸣, 陈铠敏. 基于多目标优化的多码头转运港泊位资源分配研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(7): 104-111.
Ding Y, Tang M, Chen K M. Berth resource allocation for multi-terminal transit ports based on multi-objective optimization [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2024, 43(7): 104-111. (in Chinese)

[13] 唐梦宇, 梁承姬. 基于滚动窗策略的港口海铁联运集装箱转运优化[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(1): 185-191.
Tang M Y, Liang C J. Container transshipment optimization of terminal sea-rail intermodal transport based on rolling window strategy [J]. Application Research of Computers, 2023, 40(1): 185-191. (in Chinese)

[14] Nellen N, Lange A K, Jahn C. Potentials of direct container transshipment at container terminals [C] // Changing Tides: The New Role of Resilience and Sustainability in Logistics and Supply Chain Management-Innovative Approaches for the Shift to a New Era. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL), Vol. 33. Berlin: Epubli GmbH, 2022: 679-705.

[15] Al Samrout M, Sbihi A, Yassine A. An improved genetic algorithm for the berth scheduling with ship-to-ship transshipment operations integrated model [J]. Computers & Operations Research, 2024, 161: 106409.

[16] 洋山港海事局. 上海洋山深水港全面实现"内支线集装箱船舶双档靠泊"[EB/OL]. (2023-06-27)[2025-09-21]. https://www.sh.msa.gov.cn/hsyw/94665.jhtml?utm.
Yangshan Port Maritime Safety Administration. Full implementation of "doublebank berthing" for feeder container vessels at Shanghai Yangshan Deepwater Port [EB/OL]. (2023-06-27) [2025-09-21]. https://www.sh.msa.gov.cn/hsyw/94665.jhtml?utm. (in Chinese)

[17] Guo L M, Zheng J F, Du J, et al. Integrated planning of berth allocation, quay crane assignment and yard assignment in multiple cooperative terminals [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2024, 183: 103456.