

考虑潮汐约束的船舶进出港调度策略研究

袁志涛^{1,2,3*}, 董嘉康¹, 刘克中^{1,2,3}, 王晶尧¹, 米小亮⁴, 桂艺恺¹

(1. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063; 2. 内河航运技术湖北省重点试验室, 湖北 武汉 430063; 3. 武汉理工大学 水路交通控制全国重点试验室, 湖北 武汉 430063; 4. 中华人民共和国舟山海事局, 浙江 舟山 316000)

摘要:大型船舶进出港调度对于提升港口效率来说至关重要,针对大型船舶受潮汐影响的港口,研究考虑潮汐约束的港口船舶进出港调度问题,同时兼顾泊位尺度差异、船舶安全间距、船舶靠离泊方式等现实因素,以所有船舶总延误时间最小为目标函数,构建了混合线性整数规划模型,并设计使用拉格朗日松弛启发式算法求解。以宁波舟山外钓作业区为例,使用真实的潮汐数据进行试验。结果表明,提出的考虑潮汐窗口约束的船舶进出港调度模型和算法能够在满足安全要求的前提下有效减少28.5%延误时间,对于一些受潮汐影响显著的港口调度具有一定的参考意义。

关键词:沿海港口;船舶调度;通航效率;拉格朗日松弛算法;潮汐约束

中图分类号:U692.3

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2026.01.011

Research on vessel scheduling strategies considering tidal constraints for port entry and exit

YUAN Zhitao^{1,2,3*}, DONG Jiakang¹, LIU Kezhong^{1,2,3}, WANG Jingyao¹, MI Xiaoliang⁴, GUI Yikai¹

(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan 430063, China; 3. National Key Laboratory of Waterway Transportation Control, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 4. Zhoushan Maritime Safety Administration of People's Republic of China, Zhoushan 316000, China)

Abstract: Efficient scheduling of large vessels entering and leaving ports is critical to improving port efficiency, particularly for ports affected by tidal constraints. This study investigates the ship scheduling problem in tide-influenced ports, incorporating tidal window constraints while accounting for berth size differences, vessel safety distances, and mooring/unmooring operations. A Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model is developed with the objective of minimizing the total delay time of all vessels, and a Lagrangian relaxation heuristic algorithm is designed for its solution. A case study using real tidal data from the Ningbo-Zhoushan Wai Diao operation area was conducted. The results show that the proposed scheduling model and algorithm, which consider tidal window constraints, can reduce vessel delays by 28.5% while meeting safety requirements. This approach provides valuable insights for scheduling in ports significantly affected by tides.

Key words: seaports; vessel scheduling; navigation efficiency; Lagrangian relaxation algorithm; tidal constraints

港口作为货物装卸的关键节点,发挥着不可替代的作用。港口的核心资源,具有建设成本高、建设周期长等特点。如何在现有资源条件下为船舶制订

高效的调度计划,成为港口运营管理中的重点问题^[1-2]。目前,提升港口通航效率的主要研究领域集中在船舶进出港调度。船舶进出港调度是一个综

收稿日期:2025-01-07

基金项目:国家自然科学基金项目(52031009)资助

作者简介:袁志涛(1989—),男,高级实验师,研究方向为水路交通安全保障与船舶交通组织调度。*通信作者:zyuan@whut.edu.cn

引用格式:袁志涛,董嘉康,刘克中,等.考虑潮汐约束的船舶进出港调度策略研究[J].中国航海,2026,49(1):105-115.

YUAN Z T, DONG J K, LIU K Z, et al. Research on vessel scheduling strategies considering tidal constraints for port entry and exit[J]. Navigation of China, 2026, 49(1): 105-115. (in Chinese)

合性研究问题,涉及船舶从进港到离港全过程中的多个决策环节。其中,潮汐是影响船舶调度的重要自然因素,特别是在一些开敞式码头,潮位和潮流的动态变化会直接影响船舶的进出港时机和靠离泊操作安全性。因此,研究潮汐约束下的船舶调度策略,对于提升港口通航效率和资源利用率具有重要的理论意义和实践价值。现有关于潮汐影响下的船舶进出港调度研究主要集中在泊位分配和船舶进出港次序优化两个方面。

在考虑潮汐约束的泊位分配研究中,学者们主要关注由于潮位变化导致的泊位可用性^[3]。DA-DASHI 等^[4]考虑航道水深变化,建立在同一港口多个集装箱码头之间的分配和调度数学模型。结果显示,模型可有效缓解潮汐对多个海运集装箱码头泊位调度的影响。SHEIKHOLESLAMI 等^[5]重点考虑潮汐效应,建立混合整数规划模型,优化伊朗某港口的泊位分配问题。同时对航道深度进行敏感性分析,发现海底疏浚可显著减少船舶延误时间。文捷等^[6]进一步考虑泊位水深变化,提出潮汐影响下的长方体排列模型,并通过两阶段贪心算法和遗传算法验证其有效性。

在潮汐约束下的船舶进出港次序优化研究中,重点是关注如何在吃水不同的船舶中安排进出顺序,以减少等待时间和航道冲突^[7-8]。张新宇等^[9]为提高双向航道调度效率,提出考虑单/双向通航模式转换的多目标优化模型。针对黄骅港区的限制性双向航道,张新宇等^[10]进一步提出基于关键航路风险点交通冲突消解优化模型,并通过改进的遗传算法有效降低了船舶的等待时间。郑红星等^[11]研究了潮汐影响下的泊位分配与船舶调度集成优化,并证实该方法可显著减少延误时间。JIA 等^[12]结合船舶进出港调度与锚地利用,提出优化模型并通过拉格朗日松弛启发式算法求解,减少了整体延误成本。徐国裕等^[13]提出了一种基于排序优化的算法,用于优化单向航道船舶进出港顺序。WANG 等^[14]通过建立混合整数规划模型优化异构船舶在定期班轮航线中的部署、调度与排序,以降低运营成本。

现有研究在潮位对船舶通航的影响建模方面已取得丰富成果^[4-6],但在考虑潮流变化对靠离泊操作的具体影响时,尚存在一定的局限性。因此本文提出了一种结合潮位和潮流变化的潮汐窗口分析方法,通过对潮流流速、流向的计算,优化船舶靠离泊的操作时机,从而为潮汐约束下的港口船舶调度问题提供了更细化的分析手段。

综上,本文提出了一个考虑潮位和潮流约束的

港口船舶进出港调度模型。该模型进一步引入潮汐窗口的概念,以潮流流速和流向为关键输入条件,确保船舶能够在安全的时间窗口内完成靠离泊操作。为了求解这一复杂的调度问题,采用拉格朗日松弛启发式算法求解,并通过数值试验验证了求得调度方案的可行性及优越性。研究结果表明,提出的调度模型能够有效减少船舶的延误时间,提高港口的整体调度效率,特别是在潮汐影响显著的港口具有一定的参考意义。

1 问题描述及模型构建

1.1 船舶进出港调度问题描述

对于纳入调度计划的船舶,可以分为进港船舶和离港船舶两类。图1展示了某个港口布局以及调度的实际过程。对于进港船舶,在船舶到港前,港方通常能够获取船舶的到港时间、船舶类型及载重吨等信息。在与码头方沟通确定需要靠泊的泊位以及预计靠泊时间后,等待获得进港许可。得到进港许可后方可航行驶入双向航道进港。当船舶在泊位完成装卸货物后,等待离港许可通知,然后航行至航道并驶离港口。

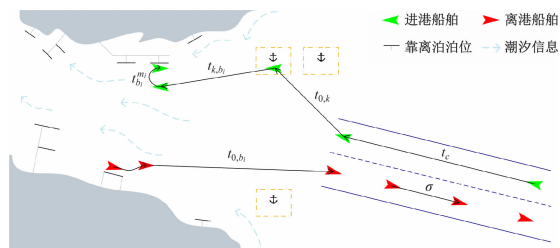


图1 港口布局和进出港调度示意

Fig. 1 Port layout and vessel entry/exit scheduling diagram

港口通常拥有多个不同类型及大小的泊位,分布在港区的不同位置。由于潮汐影响,航道内的水深会随时间变化。对于一些深吃水船舶,只有当水深足够时才能安全通过航道。同时,不同码头位置的泊位前沿水域潮汐情况也各不相同,船舶需在适宜的潮流条件下才能进行靠离泊作业。潮汐条件为港口调度的重要制约因素。港内锚地作为缓解港口拥堵的重要资源,发挥了关键作用:当进港船舶驶出航道但泊位潮汐条件不适合时,需在锚地等待;离港船舶若驶出泊位后航道水深不足,也需在锚地等待。为确保船舶按计划调度,港方需同时考虑潮汐、锚地因素,以提高港口服务效率。

1.2 潮汐窗口计算模型

潮汐对船舶的影响包括两个方面,分别是潮流和潮位。

潮位窗口的定义是基于航道水深的动态变化,

当水深低于船舶吃水和富余水深的总和时,船舶无法安全通过,因此需要选择合适的潮位窗口进入航道。船舶 i 的潮位窗口 W_{hi} 计算如式(1)所示。

$$W_{hi} = \bigcup_{l=1}^{u_i} [W_{il}, \bar{W}_{il}] = \{t \mid R(t) \leq R_{0i} + R_i\} \quad (1)$$

式(1)中: u_i 表示潮位窗口的个数, $[W_{il}, \bar{W}_{il}]$ 表示船舶 i 的第 l 个潮位窗口。 $R(t)$ 表示 t 时刻航道的水位, R_{0i} 表示船舶 i 的吃水, R_i 为船舶距离海底的富余水深。潮位窗口的范围由航道的实时水深决定,确保船舶底部距离航道底部的富余水深不小于 R_i 。这可以减少搁浅风险,尤其对深吃水船舶尤为重要。

潮流窗口则主要影响靠离泊操作,必须在流速和流向适宜的情况下完成。具体来讲,当船舶行驶至泊位前沿水域时,为了保持足够的舵效,需选择顶流时段操纵,以确保操纵的稳定性。同时,出于安全考虑,还应在缓流时段进行靠离泊操作。潮流窗口包括靠泊时间窗口和离泊时间窗口。船舶 i 的潮流窗口 W_{ci} 计算如式(2)~式(3)所示。

$$W_{ci} = \bigcup_{l=1}^{u_{2i}} [B_{ilm_i}, \bar{B}_{ilm_i}] = \{t \mid S_{b_i}(t) \times \cos(D_{b_i}(t) - D_{b_i}) \leq S_{0b,m_i} \mid \} \quad (2)$$

$$W_{ci} = \bigcup_{l=1}^{u_{2i}} [U_{Bilm_i}, \bar{U}_{Bilm_i}] = \{t \mid S_{b_i}(t) \times \cos(D_{b_i}(t) - D_{b_i}) \leq S_{0b,m_i} \mid \} \quad (3)$$

式(2)~式(3)中: D_{b_i} 表示泊位 b_i 的走向, $D_{b_i}(t)$ 表示在泊位 b_i 前沿水域在 t 时刻的流向, $S_{b_i}(t)$ 表示在泊位 b_i 前沿水域在 t 时刻的流速, S_{0b,m_i} 表示船舶 i 在泊位 b_i 以 m_i 靠离泊方式可进行靠离泊操纵的最大纵向流速, $[B_{ilm_i}, \bar{B}_{ilm_i}]$ 、 $[U_{Bilm_i}, \bar{U}_{Bilm_i}]$ 分别表示第 l 个靠泊和离泊窗口。潮流窗口的范围由泊位前沿水域的流速和流向决定,确保船舶在靠离泊操纵时顶流操纵,并且保证操纵能够在 $\leq S_{0b,m_i}$ 的范围内完成。这不仅能够避免船舶因流速过大引发操控偏移的风险,还能提升船舶在靠离泊过程中的舵效稳定性,对具有深吃水和低机动性的大型船舶尤为关键。

图2展示了某泊位前沿水域的靠泊时间窗口。为了便于展示涨落趋势,所有的潮位数据以平均水平 0.1 m 为基准。码头走向 $D_{b_i} = 170^\circ$,从图中可知,潮流相对于码头的横向分量普遍较小,对靠离泊操纵影响相对较小。纵向分量随流向和流速呈周期性变化。以顺靠为例,当纵向流速小于 $S_{0b,m_i} = 1 \text{ kn}$

且纵向流速大于 0 时,船舶可进行靠泊操作。这个时间段即为船舶 i 在靠泊泊位 b_i 的靠泊窗口(黄色区域)。在开敞式码头,可进行靠泊操纵的时间窗口通常较短,当实际靠泊时间超过这个时间窗口后,潮流情况会变得复杂,船舶需要前往锚地等待下一个窗口靠泊。

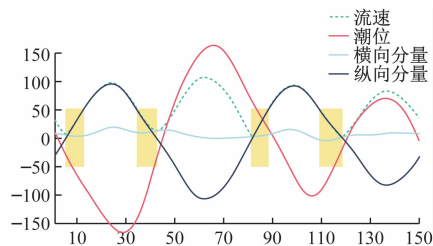


图2 某泊位前沿靠泊时间窗口示意图

Fig. 2 Illustration of berth front mooring time windows

1.3 模型基本假设

为了便于建模,做出如下假设:

1) 模型中所有与时间相关的单位都是安全间距 σ 的倍数。通过设置安全间距参数可使船舶在同一航道或泊位操作过程中保持一定的时间间隔,用于避免因操控时间不足而引发碰撞风险。同时,将所有与时间相关的单位设置为 σ 的倍数,能够统一调度周期中的时间尺度,以达到简化计算过程的目的。

2) 泊位布局为离散布局。

3) 港内锚地的布局为离散布局,且每个港内锚地最多只能容纳一艘船舶停留。

4) 在航道中所有船舶的航行速度恒定且相同,在港口水域任意两点间的航行时间相同。

5) 船舶的到港时间、航行时间和离泊时间均已知。

为了便于表述,将进港船舶编号 1 到 n_1 ,离港船舶编号 $n_1 + 1$ 到 $n_1 + n_2$,问题 P 可被建模为一个混合线性整数规划(MILP)问题。

1.4 决策变量及输入参数

决策变量如下:

x_{it} : 船舶 i 在时间 t 进入航道等于 1 , 否则为 0 ;

y_{ik} : 船舶 i 使用港内锚地 k 为 1 , 否则为 0 ;

y_{i0} : 船舶 i 不使用任何港内锚地,直接从航道口处驶入预定泊位为 1 , 否则为 0 ;

z_{ikt} : 船舶 i 在时刻 t 占用港内锚地 k 为 1 , 否则为 0 ;

β_{il} : 船舶 i 能在第 l 个靠泊窗口靠泊为 1 , 否则为 0 ;

e_i : 船舶 i 进入港内锚地的时间点;

f_i : 船舶 i 离开港内锚地的时间点;
 g_i : 进港船舶 i 的靠泊时间;
 d_i : 离港船舶 i 的离港时间;
 S_i : 船舶 i 在规划时间内无法被调度为 1, 否则为 0。

输入参数和说明见表 1。

表 1 参数类型及其说明

Tab. 1 Parameter types and descriptions

参数符号	参数定义
M	一个极大的整数
T	规划时间长度
n_1	进港船舶数量
n_2	离港船舶数量
A_i	进港船舶 i 的到港时间
L_i	离港船舶 i 的离泊时间
t_c	船舶通过航道的行驶时间
b_i	采用离散型泊位, 船舶 i 在泊位计划中预定的靠离泊泊位
a_k	港内锚地的数量
t_{0,b_i}	从航道口处行驶到预定泊位 b_i 的时间
$t_{0,k}$	从航道口处行驶到港内锚地 k 的时间
t_{k,b_i}	从港内锚地 k 行驶到预定泊位 b_i 的时间
W_{hi}	船舶 i 的潮位窗口
u_{1i}	船舶 i 的潮位窗口数量
$[W_{il}, \bar{W}_{il}]$	船舶 i 的第 l 个潮位窗口
m_i	船舶 i 的靠离泊操纵方式, 顺靠/离为 0, 掉头靠/离为 1
$t_{b_i m_i}$	在预定泊位 b_i 以 m_i 方式进行靠离泊操纵的时间
W_{ci}	船舶 i 的潮流窗口, 包括靠泊和离泊窗口
u_{2i}	表示船舶 i 的靠离泊窗口数量
$[B_{ilm_i}, \bar{B}_{ilm_i}]$	船舶 i 第 l 个靠泊时间窗口
$[U_{bil m_i}, \bar{U}_{bil m_i}]$	船舶 i 第 l 个离泊时间窗口
\bar{g}_i	进港船舶 i 预计靠泊时间
\bar{d}_i	离港船舶 i 预计离港时间
C_0	未被纳入到调度计划的单船的延误

1.5 目标函数及约束条件

1) 目标函数

将考虑潮汐约束的港口船舶进出港调度模型设为 P , 目标函数见式(4), 为最小化总延误时间。延

误时间指船舶在进出港调度过程中, 由于各种因素未能按计划完成操作所产生的总时间损失。它包含三个方面: 船舶的靠泊延误时间、船舶的离港延误时间以及在规划时间内未被纳入调度计划的船舶的延误时间。

$$P: f = \min \sum_{i=1}^{n_1} g_{i_{in}} - \bar{g}_i + \sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} d_i - \bar{d}_i + \sum_{i=1}^{n_1+n_2} C_0 S_i \quad (4)$$

① 靠泊延误时间: 码头方会为到港的船舶提前制定预计靠泊时间 \bar{g}_i 。船舶的靠泊延误时间指: 船舶到达港口后实际靠泊时间与预计靠泊时间之间的差值, 是进港船舶由于潮汐窗口、泊位安排或其他原因未能按计划靠泊时产生的时间差。

② 离港延误时间: 离港船舶 i 必须在既定时间 L_i 离泊。 \bar{d}_i 表示通常由码头方提前给出的船舶的预计离港时间, 船舶的离港延误时间是指: 船舶离开港口的实际时间与计划离港时间之间的差值。

③ 未被纳入调度计划船舶的延误时间: 在调度过程中, 若某艘船舶无法按照既定计划在规划时间内靠泊或离港, 则码头方需要重新评估并修订该船的泊位计划。此时, 该船将被纳入下一个规划周期的调度计划中, 以确保后续的调度任务不受其延误影响。为了量化这一过程, 引入了变量 S_i 记录相关数据。但是重新制订某艘船舶的调度计划可能会对下一规划周期内所有船舶的调度安排产生连锁效应, 甚至导致整个周期内的调度计划需要重新调整。因此通过引入一个参数 C_0 , 以表示在规划周期内未被纳入调度计划的单船的延误时间。

2) 约束条件

式(5)一式(9)为航道约束条件。式(5)表示在每个时间点最多有 1 艘进港船进入航道。式(6)表示每个时间点最多有 1 艘离港船进入航道。式(7)表示每艘成功调度的船只能进入航道 1 次。式(8)规定进港船不能在到港时间之前进入航道。式(9)表示船舶只能在其潮位窗口之内进入航道。

$$\sum_{i=1}^{n_1} x_{it} \leq 1 \quad (t = 1, \dots, T) \quad (5)$$

$$\sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} x_{it} \leq 1 \quad (t = 1, \dots, T) \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^T x_{it} \leq 1 - S_i \quad (i = 1, \dots, n_1 + n_2) \quad (7)$$

$$x_{it} = 0 \quad (i = 1, \dots, n_1; t = 1, \dots, A_i - 1) \quad (8)$$

$$x_{it} = 0$$

$$\left(\begin{array}{l} i = 1, \dots, n_1 + n_2; \\ t \in \{1, \dots, T\} \setminus \bigcup_{l=1}^{u_{il}} [W_{il}, \bar{W}_{il} - t_c] \end{array} \right) \quad (9)$$

式(10)一式(18)为港内锚地约束。式(10)表示每艘成功调度的船舶只能选择使用1个港内锚地,或者不使用锚地。式(11)和(12)规定进港船使用港内锚地的时间。式(13)和(14)规定离港船使用港内锚地的时间。式(15)关联变量 e_i, f_i 与 y_{i0} ,表示船舶如果使用港内锚地, $e_i \leq f_i$;否则, $e_i = f_i$ 。当船舶使用港内锚地时,通过约束 e_i 和 f_i 的值,明确船舶进入和离开港内锚地的时间。式(16)为港内锚地的容量约束,确保在每个港内锚地 k 每个时间点最多只有1艘船舶使用。式(17)一式(18)规定了港内锚地的使用时间。式(17)确保船舶 i 在 $t \in [e_i, f_i]$ 时, z_{ikt} 被设置为1,从而定义船舶 i 是否使用锚地 k 的时间范围,确保锚地资源的合理分配。式(18)表示船舶 i 使用港内锚地 k ,则必须在 k 中使用 $f_i - e_i + 1$ 时刻,确保变量 z_{ikt} 中记录的锚地使用时间与 e_i, f_i 的时间范围一致,从而反映船舶在锚地实际使用的时间。

$$\sum_{k=0}^{a_k} y_{ik} = 1 - S_i \quad (i = 1, \dots, n_1 + n_2) \quad (10)$$

$$e_i = \sum_{t=1}^T (t + t_c) x_{it} + \sum_{k=0}^{a_k} t_{0,k} y_{ik} \quad (i = 1, \dots, n_1) \quad (11)$$

$$f_i = g_i - \sum_{k=0}^{a_k} (t_{b,m_i} + t_{k,b_i}) y_{ik} \quad (i = 1, \dots, n_1) \quad (12)$$

$$e_i = \sum_{k=0}^{a_k} (L_i + t_{b,m_i} + t_{k,b_i}) y_{ik} \quad (i = n_1 + 1, \dots, n_1 + n_2) \quad (13)$$

$$f_i = \sum_{t=1}^T t x_{it} - \sum_{k=0}^{a_k} t_{0,k} y_{ik} \quad (i = n_1 + 1, \dots, n_1 + n_2) \quad (14)$$

$$f_i - M(1 - y_{i0}) \leq e_i \leq f_i \quad (i = 1, \dots, n_1 + n_2) \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{n_1+n_2} z_{ikt} \leq 1 \quad (k = 1, \dots, a_k; t = 1, \dots, T) \quad (16)$$

$$\begin{array}{l} e_i - M(1 - z_{ikt}) \leq \\ t \leq f_i + M(1 - z_{ikt}) \end{array} \quad \left(\begin{array}{l} i = 1, \dots, n_1 + n_2; \\ k = 1, \dots, a_k; t = 1, \dots, T \end{array} \right) \quad (17)$$

$$f_i - e_i + 1 - M(1 - y_{ik}) \leq$$

$$\sum_{i=1}^T z_{ikt} \leq M y_{ik}$$

$$(i = 1, \dots, n_1 + n_2; k = 1, \dots, a_k) \quad (18)$$

式(19)一式(21)分别表示船舶的靠泊时间和离港时间。式(19)规定了每艘进港船的靠泊时间 g_i 必须在靠泊窗口之内。式(20)规定纳入调度计划的进港船,只能选择1个窗口进行靠泊操作。式(21)表示离港船的离港时间,表示允许船舶早于预计离港时间离港。同时规定 $d_i = \bar{d}_i$,表示船舶 i 无法被调度。

$$B_{ilm_i} + t_{b,m_i} + M(1 - \beta_{il}) \leq$$

$$g_i \leq \bar{B}_{ilm_i} - M(1 - \beta_{il})$$

$$(i = 1, \dots, n_1; l = 1, \dots, u_{2i}) \quad (19)$$

$$\sum_{l=1}^{u_{2i}} \beta_{il} = 1 - S_i \quad (i = 1, \dots, n_1) \quad (20)$$

$$d_i - \bar{d}_i = \max \left\{ \sum_{t=1}^T (t + t_c) x_{it} - \bar{d}_i, 0 \right\}$$

$$(i = n_1 + 1, \dots, n_1 + n_2) \quad (21)$$

式(22)一式(29)规定了变量的二进制性和非负性。

$$x_{it} \in \{0, 1\}$$

$$(i = 1, \dots, n_1 + n_2; t = 1, \dots, T) \quad (22)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\}$$

$$(i = 1, \dots, n_1 + n_2; k = 0, \dots, a_k) \quad (23)$$

$$z_{ikt} \in \{0, 1\}$$

$$(i = 1, \dots, n_1 + n_2; k = 1, \dots, a_k; t = 1, \dots, T) \quad (24)$$

$$S_i \in \{0, 1\} \quad (i = 1, \dots, n_1 + n_2) \quad (25)$$

$$e_i, f_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, n_1 + n_2) \quad (26)$$

$$\beta_{il} \in \{0, 1\} \quad (i = 1, \dots, n_1; l = 1, \dots, u_{2i}) \quad (27)$$

$$g_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, n_1) \quad (28)$$

$$d_i \geq 0 \quad (i = n_1 + 1, \dots, n_1 + n_2) \quad (29)$$

2 拉格朗日松弛启发式算法

2.1 构造对偶问题

拉格朗日松弛算法能保留原问题的大部分结构,使得更容易通过求解松弛问题的解来生成原问题更高质量的可行解。在原问题 P 中,约束(16)具有较强的耦合性,通过松弛约束(16),同时乘以拉

格朗日乘子 $\lambda_{kt} \geq 0 (k=1, \dots, a_k; t=1, \dots, T)$ 并置于问题 P 的目标函数中, 得到以下松弛问题:

1) 松弛问题数学模型

$$P(\boldsymbol{\lambda}): f(\boldsymbol{\lambda}) = \min \sum_{i=1}^{n_1} g_i - \bar{g}_i + \sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} d_i - \bar{d}_i + \sum_{i=1}^{n_1+n_2} C_0 S_i + \sum_{k=1}^{a_k} \sum_{t=1}^T \lambda_{kt} \left(\sum_{i=1}^{n_1+n_2} z_{ikt} - 1 \right) \quad (30)$$

约束条件: 式(5)一式(15), 式(17)一式(29)。

式(30)中, $\boldsymbol{\lambda}$ 表示 λ_{kt} 值的矩阵, $f(\boldsymbol{\lambda})$ 表示松弛问题 $P(\boldsymbol{\lambda})$ 的最优目标函数值, 构造对偶问题如下:

$$P_{LD}: \max f(\boldsymbol{\lambda}) \quad (31)$$

拉格朗日松弛启发式算法的目标是求解对偶问题 P_{LD} 。通过求解松弛问题 $P(\boldsymbol{\lambda})$ 找到原问题 P 的最优解的下界 $f(\boldsymbol{\lambda})$, 再从所有求得的所有下界中找到一个最大值, 在寻找好的下界的过程中生成 P 的最优可行解。

2.2 拉格朗日松弛问题求解

为了求解松弛问题, 观察 $P(\boldsymbol{\lambda})$, 在目标函数中去掉常数项 $-\sum_{k=1}^{a_k} \sum_{t=1}^T \lambda_{kt}$ 可以将分解为两个相互独立的子问题:

1) 子问题1: 进港船舶数学模型

$$P_{in}(\boldsymbol{\lambda}): \min \sum_{i=1}^{n_1} \{g_i - \bar{g}_i\} + \sum_{i=1}^{n_1} \left\{ C_0 S_i + \sum_{k=1}^{a_k} \sum_{t=1}^T \lambda_{kt} z_{ikt} \right\} \quad (32)$$

约束条件: 式(5)、式(7)一式(12)、式(15)、式(17)一式(20)、式(22)一式(28)。

2) 子问题2: 离港船舶数学模型

$$P_{out}(\boldsymbol{\lambda}): \min \sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} \{d_i - \bar{d}_i\} + \sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} \left\{ C_0 S_i + \sum_{k=1}^{a_k} \sum_{t=1}^T \lambda_{kt} z_{ikt} \right\} \quad (33)$$

约束条件: 式(6)一式(7)、式(9)一式(10)、式(13)一式(15)、式(17)一式(18)、式(21)一式(26)、式(29)。

3) 子问题求解

为了便于求解 $P_{in}(\boldsymbol{\lambda})$ 和 $P_{out}(\boldsymbol{\lambda})$, 通过构建成本矩阵将其转换为非标准指派问题。首先对 $P_{in}(\boldsymbol{\lambda})$, 将时间 T 增广至 $T+n_1$, 用其表示进港船舶的变量 S_i 。定义其成本矩阵 $I_{it'k_1}(\boldsymbol{\lambda})$, ($i_{in}=1, \dots, n_1$;

$t'=1, \dots, T+n_1$), 表示在子问题 $P_{in}(\boldsymbol{\lambda})$ 中, 进港船舶 i 在 t 时刻进入航道的成本。

$$I_{it'k_1}(\boldsymbol{\lambda}) = \left\{ \begin{array}{l} \min_{k_1=0, \dots, a_k} \{I_{it'k_1}(\boldsymbol{\lambda})\}, \quad A_i \leq t' \leq T, \\ t' \in \bigcup_{l=1}^{u_{1i}} [W_{il}, \overline{W_{il}} - t_c] \\ C_0, \quad t' = T + i \\ + \infty, \quad \text{否则} \end{array} \right. \quad (34)$$

其中 $I_{it'k_1}(\boldsymbol{\lambda})$ 表示进港船舶 i 在 t 时刻进入航道且使用港内锚地 $k(k \geq 0)$ 的成本, 定义 $I_{it'k_1}(\boldsymbol{\lambda})$ 为:

$$I_{it'k_1}(\boldsymbol{\lambda}) = \left\{ \begin{array}{l} t' + t_c + t_{0,b_i} + t_{b_{m_i}} - \bar{g}_i, \quad k_1 = 0, \\ t' + t_c + t_{0,b_i} + t_{b_{m_i}} \geq \bar{g}_i, \\ t' + t_c + t_{0,b_i} \in \bigcup_{l=1}^{u_{2i}} [B_{il}, \overline{B_{il}} - t_{b_{m_i}}] \\ t' + t_c + t_{0,k_1} + t_{k_1,b_i} + t_{b_{m_i}} - \bar{g}_i + \\ \lambda_{k_1,t'+t_c+t_{0,k}} \\ k_1 > 0, \\ t' + t_c + t_{0,k_1} + t_{k_1,b_i} + t_{b_{m_i}} \geq \bar{g}_i, \\ t' + t_c + t_{0,k_1} + t_{k_1,b_i} \in \\ \bigcup_{l=1}^{u_{2i}} [B_{il}, \overline{B_{il}} - t_{b_{m_i}}] \\ \bar{g}_i - t_{b_{m_i}} - t_{k_1,b_i} \\ \sum_{t=t'+t_c+t_{0,k}} \lambda_{kt}, \quad k > 0, \\ t' + t_c + t_{0,k_1} + t_{k_1,b_i} < \bar{g}_i \\ + \infty, \quad \text{否则} \end{array} \right. \quad (35)$$

得到成本矩阵 $I_{it'k_1}(\boldsymbol{\lambda})$ 后, 子问题 $P_{in}(\boldsymbol{\lambda})$ 可转化为问题 $P_{in}^+(\boldsymbol{\lambda})$, 假设 $f_{in}^+(\boldsymbol{\lambda})$ 为 $P_{in}^+(\boldsymbol{\lambda})$ 的最优目标函数值, 则也是 $P_{in}(\boldsymbol{\lambda})$ 的最优目标函数值。

$$P_{in}^+(\boldsymbol{\lambda}): f_{in}^+(\boldsymbol{\lambda}) = \min \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{t'=1}^{T+n_1} I_{it'}(\boldsymbol{\lambda}) x_{it'} \quad (36)$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^{n_1} x_{it'} \leq 1 \quad (t' = 1, \dots, T+n_1) \quad (37)$$

$$\sum_{t'=1}^{T+n_1} x_{it'} = 1 \quad (i = 1, \dots, n_1) \quad (38)$$

$$x_{it'} \in \{0, 1\} \quad (i = 1, \dots, n_1; t' = 1, \dots, T+n_1) \quad (39)$$

对 $P_{out}(\boldsymbol{\lambda})$ 做相同的处理, 将时间 T 增广至 $T+n_2$, 定义离港船舶的成本矩阵 $O_{it'k_1}(\boldsymbol{\lambda})$, ($i = n_1+1, \dots, n_1+n_2; t''=1, \dots, T+n_2$)。

$$\mathbf{O}_{i^r k_1}(\boldsymbol{\lambda}) = \left\{ \begin{array}{l} \min_{k_1=0, \dots, a_k} \{ \mathbf{O}_{i^r k_1}(\boldsymbol{\lambda}) \}, \\ t'' \in \bigcup_{l=1}^{u_i} [W_{il}, \overline{W_{il}} - t_c] \\ C_0, \quad t'' = T + i - n_1 \\ + \infty, \quad \text{否则} \end{array} \right\} \quad (40)$$

$\mathbf{O}_{i^r k_1}(\boldsymbol{\lambda})$ 表示离港船舶*i*在*t*时刻进入航道且使用港内锚地*k*($k \geq 0$)的成本。

$$\mathbf{O}_{i^r k_1}(\boldsymbol{\lambda}) = \left\{ \begin{array}{l} \max \{ t'' + tc - \bar{d}_i, 0 \}, k_1 = 0, \\ t'' = L_i + t_{b, m_i} + t_{0, b_i} \\ \max \{ t'' + tc - \bar{d}_i, 0 \} + \\ \sum_{t=L_i+t_{b, m_i}+t_{k, b_i}}^{t''-t_{0, k}} \lambda_{k_{it}}, k_1 > 0, \\ t'' \geq L_i + t_{b, m_i} + t_{k_1, b_i} + t_{0, k_1} + \infty, \text{否则} \end{array} \right\} \quad (41)$$

同理,子问题 $P_{\text{out}}(\boldsymbol{\lambda})$ 转化为 $P_{\text{out}}^+(\boldsymbol{\lambda})$,假设 $f_{\text{out}}^+(\boldsymbol{\lambda})$ 为 $P_{\text{out}}^+(\boldsymbol{\lambda})$ 的最优目标函数,有

$$P_{\text{out}}^+(\boldsymbol{\lambda}) : f_{\text{out}}^+(\boldsymbol{\lambda}) = \min \sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} \sum_{t'=1}^{T+n_2} \mathbf{O}_{i^r}(\boldsymbol{\lambda}) x_{i^r} \quad (42)$$

约束条件:

$$\sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} x_{i^r} \leq 1 \quad (t'' = 1, \dots, T + n_2) \quad (43)$$

$$\sum_{t'=1}^{T+n_2} x_{i^r} = 1 \quad (i = n_1 + 1, \dots, n_1 + n_2) \quad (44)$$

$$x_{i^r} \in \{0, 1\} \quad \left(\begin{array}{l} i = n_1 + 1, \dots, n_1 + n_2; \\ t'' = 1, \dots, T + n_2 \end{array} \right) \quad (45)$$

$P_{\text{in}}^+(\boldsymbol{\lambda})$ 和 $P_{\text{out}}^+(\boldsymbol{\lambda})$ 属于两个规模的非标准指派问题,将成本矩阵补全为方阵后可以使用匈牙利算法求解。因此,对于松弛问题 $P(\boldsymbol{\lambda})$,其最优解为:

$$f(\boldsymbol{\lambda}) = f_{\text{in}}^+(\boldsymbol{\lambda}) + f_{\text{out}}^+(\boldsymbol{\lambda}) - \sum_{k=1}^{a_k} \sum_{t=1}^T \lambda_{kt} \quad (46)$$

2.3 次梯度优化算法与上界求解策略

由于在松弛问题中得到的下界解并不一定满足式(16), λ^η 表示第 η 次迭代时的乘子,根据RIZK^[15],已经证明在次梯度优化算法中对松弛问题的解 $f(\boldsymbol{\lambda}^\eta)$ 添加扰动可能会生成更好的可行解。因此,将 $f(\boldsymbol{\lambda}^\eta)$ 中求得 x_{it}^η 作为输入,引入二元决策变量,将问题 P 转化为资源受限项目调度问题 $P_{ub}(\boldsymbol{\lambda}^\eta)$,通过求解 $P_{ub}(\boldsymbol{\lambda}^\eta)$ 可修复在 $f(\boldsymbol{\lambda}^\eta)$ 中得到的不可行解。定义集合

$$\Omega = \left\{ i \mid \sum_{t=1}^T x_{it} = 1; i = 1, \dots, n_1 + n_2 \right\} \quad (47)$$

其包含所有纳入调度计划中的船舶。定义决策

变量 δ_{ij} (船舶*i*比船舶*j*早到达港内锚地*k*则为1;否则为0。其中 $i, j \in \Omega; i \neq j$)。则资源受限项目调度问题 $P_{ub}(\boldsymbol{\lambda}^\eta)$ 为:

$$f_{ub}(\boldsymbol{\lambda}^\eta) = \min \sum_{i=1}^{n_1} g_i - \bar{g}_i + \sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} d_i - \bar{d}_i + \sum_{i=1}^{n_1+n_2} C_0 S_i \quad (48)$$

约束条件:

$$e_j \geq f_i + 1 - M(1 - \delta_{ij}) \quad (i, j \in \Omega; i \neq j) \quad (49)$$

$$\delta_{ij} + \delta_{ji} \geq y_{ik} + y_{jk} - 1 \quad (i, j \in \Omega; i \neq j; k = 1, \dots, a_k) \quad (50)$$

$$\delta_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i, j \in \Omega; i \neq j) \quad (51)$$

虽然在问题 P_{ub} 中,进入航道的的时间已知,但调度的复杂性仍然存在于如何有效分配锚地资源,使得所有进港船舶的靠泊时间在靠泊窗口之内,从而确保所有船舶按计划操作并最小化总延误。在 $P_{ub}(\boldsymbol{\lambda}^\eta)$ 中, x_{it}^η 变为输入参数,引入 δ_{ij} 去除了时间*T*维度。式(49)和(50)通过确定其顺序,保证同一港内锚地船舶使用的时间不重叠。

乘子的更新采用标准的次梯度优化算法,乘子的更新方式如下:

$$\lambda^\eta = \left\{ \begin{array}{l} 0, \quad \eta = 1 \\ \max \left\{ \begin{array}{l} \lambda^{\eta-1} + \\ \alpha^{\eta-1} \times \left(\sum_{i=1}^{n_1+n_2} z_{ikt}^{\eta-1} - 1 \right), 0 \end{array} \right\}, \quad \eta \geq 2 \end{array} \right\} \quad (52)$$

式(52)中: λ 表示 λ_{kt} 值的矩阵,其中($k = 1, \dots, a_k; t = 1, \dots, T$)。在 $P(\boldsymbol{\lambda}^\eta)$ 解的基础上构建 $z_{ikt}^\eta, \alpha^\eta$ 表示第 η 次迭代时的步长,其值为:

$$\alpha^\eta = \varepsilon \frac{\min \{ f_{ub}(\boldsymbol{\lambda}^\eta), 2f(\boldsymbol{\lambda}^\eta) \} - f(\boldsymbol{\lambda}^\eta)}{\left\| \sum_{i=1}^{n_1+n_2} z_{ikt}^\eta - 1 \right\|^2} \quad (53)$$

$f_{ub}(\boldsymbol{\lambda}^\eta)$ 表示在 $P_{ub}(\boldsymbol{\lambda}^\eta)$ 中求得的最优解。当最优性间隙 $\text{gap} \leq 0.01$ 或迭代次数 $\eta > 100$ 时,算法终止。拉格朗日松弛启发式算法的伪代码如下。

2.4 算法求解性能验证

为了验证拉格朗日松弛启发式算法的求解性能,设计了6组不同规模的算例,字母后的数字代表船舶总数量,S20代表小规模算例20艘船舶。求解结果与CPLEX求解器求解效果对比,对比结果见表2。 N_t 列表示受潮汐影响的船舶数量,通过逐步增加其占总船舶数量的比例,观察受潮汐影响的船舶数量对求解结果的影响。gap列表示最优性间隙。

算法1: 拉格朗日松弛启发式算法

输入: 模型参数

输出: 最优性间隙 gap , 最优上界 b_{ub} , 最优下界 b_{lb}

1. : 初始化: 迭代次数 $\eta = 1$, 乘子 $\lambda^1 = 0$, 步长控制参数 $\varepsilon = 1$
2. : 最优上界 $b_{ub} = \infty$, 最优下界 $b_{lb} = -\infty$, 计数器 $count = 0$
3. : While $\eta \leq 100$
4. : 使用匈牙利算法求解松弛问题 $P(\lambda^\eta)$ 得到解 $f(\lambda^\eta)$, 构建 z_{it}^η
5. : if $f(\lambda^\eta) > b_{ub}$
6. : 更新最优下界 $b_{lb} = f(\lambda^\eta)$
7. : 重置计数器 $count = 0$
8. : else
9. : $count = count + 1$
10. : end
11. : if $count = 5$
12. : $\varepsilon = \varepsilon \times 0.8$, 重置计数器 $count = 0$
13. : end
14. : 调用 CPLEX 求解器求解 $P_{ub}(\lambda^\eta)$ 修复不可行解, 得到 $f_{ub}(\lambda^\eta)$
15. : if $f_{ub}(\lambda^\eta) < b_{ub}$
16. : 更新最优上界 $b_{ub} = f_{ub}(\lambda^\eta)$
17. : end
18. : 更新次梯度 $g_{-t} = \sum_{i=1}^{n_1+n_2} z_{it}^\eta - 1$
19. : 计算步长:
20. : $\alpha^\eta = \varepsilon \times (f_{ub}(\lambda^\eta) - f(\lambda^\eta)) \div \|g_{-t}\|$
21. : 更新乘子:
22. : $\lambda^{\eta+1} = \max\{\lambda^\eta + \alpha^\eta \times (g_{-t}), 0\}$
23. : 计算最优性间隙 $gap = (b_{ub} - b_{lb}) / b_{lb}$
24. : if $gap < 0.01$
25. : break
26. : end
27. : 更新迭代次数 $\eta = \eta + 1$
28. end

time 列表示求解时间。

通过对比可以看出,拉格朗日松弛启发式算法在每种算例下的求解结果与求解时间都远优于使用 CPLEX 求解器求解。两种求解方法的最优性间隙随着交通密度增加而增加。在小规模算例中(S20-7、S26-11、S32-16),拉格朗日松弛启发式算法表现稳定,随着 N_i 列的增加以及船舶数量的增加,其求解效果相差不大,求解时间没有明显变化。而 CPLEX 求解器表现不佳,其 gap 比拉格朗日松弛启

表2 不同规模算例下的求解效果对比

Tab.2 Comparison of solution performance for different problem sizes

算例	参数信息		LRHA		CPLEX	
	N_i	T	gap/%	time	gap/%	time
S20-7	7	288	0	6.9	0	74.8
S26-11	11	288	0.2	10.5	3.4	134.4
S32-16	16	288	0.7	15.3	16.7	275.1
B50-20	20	576	0.6	34.6	>100	2 943
B57-26	26	576	3.7	76.9	>100	3 600
B64-33	33	576	9.3	122.4	>100	3 600

发式算法求解方案的最优性间隙高了 16%。在大规模算例中(B50-20、B57-26、B64-33),CPLEX 在规定时间内没有求得合理的解决方案,或者在长时间求解得到的解决方案不理想。拉格朗日松弛启发式算法在大规模算例下的求解效果表现良好,最优性间隙在 0.6%—9.3% 之间。总体而言,拉格朗日松弛启发式算法能有效求解考虑潮汐约束的港口船舶进出港调度问题。

3 计算试验

3.1 参数设置

为了进一步验证模型的实用性,给出相关参数进行数值试验。进港船舶和离港船舶数量分别为每天在区间[8,9]中随机生成的整数。船舶预定的靠离泊位置 b_i 为在区间[1,12]符合均匀分布的随机整数。泊位数量设置为 12 个,其中#1-#3 泊位为万吨级泊位,其余为千吨级泊位。根据分配的靠离泊位置决定船舶大小,万吨级船舶为受潮汐影响的船舶。对于万吨级船舶,船舶吃水为[12.5,15.2]之间的随机数,富余水深 $R_i = 2$;靠离泊操纵时的最大纵向流速 S_{0b,m_i} 为 1.5 kn。航道及泊位前沿的潮汐数据基于宁波舟山港真实潮汐数据,由式(1)一式(3)计算得出船舶的时间窗。船舶的靠离泊方式 m_i 设置为 60% 的船舶选择顺靠/离泊,其余船舶选择掉头靠/离泊,靠离泊操纵时间 t_{b,m_i} 在万吨级泊位顺靠/离泊为 3,掉头靠/离泊为 4,其余泊位的船舶顺靠/离泊为 2,掉头靠/离泊为 3。

船舶之间的安全间距 σ 设置为 10 分钟,因此模型中每个时间单位为 10 分钟。船舶通过航道的的时间 t_c 设置为 12。港内锚地的数量 a_k 为 3 个,航行时间 t_{0,b_i} 、 t_{0k} 以及 t_{k,b_i} 为实际船舶在两点间的平均航行时间。根据泊位计划,将预计靠泊时间 \bar{g}_i 设置在

时间区间 $[25, T - 30]$ 内且在靠泊窗口内符合均匀分布的随机整数。到港时间 $A_i = \max\{1, \bar{g}_i - R_1\}$, R_1 为区间 $[100, 250]$ 内的随机整数。离泊时间 L_i 为区间 $[1, T - 35]$ 且在离泊窗口内符合均匀分布的随机整数,预计离港时间 $\bar{d}_i = \max\{1, L_i + R_2\}$,其中 R_2 为区间 $[-40, 80]$ 内的随机整数。在规划时间内无法被调度的船舶延误 C_0 被设置为 T ,以确保调度的首要目标是将所有船舶安排在调度计划中。

3.2 调度方案的可行性

为了验证求解得到的调度方案是否可行,设置算例 $n_1 = 7, n_2 = 8, T = 144$,计算得到的调度方案见图3。

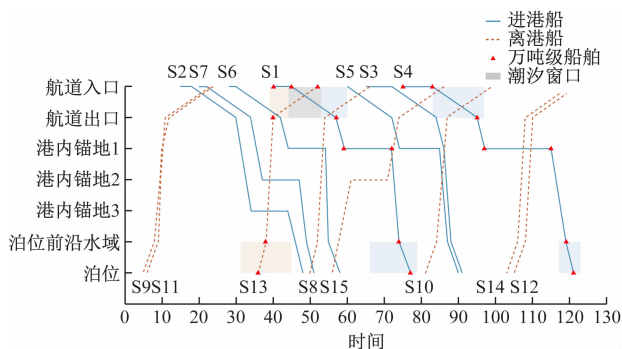


Fig. 3 Solution results of the scheduling scheme for the case study $n_1 = 7, n_2 = 8, T = 144$

在图3中,S1、S4、S13为万吨级船舶,因其吃水较深,会受到潮汐的限制。根据调度方案,三艘船舶在通过航道时,其航行时间均位于潮汐窗口范围内;抵达泊位前沿水域后,其靠泊和离泊操作时长也均满足潮汐窗口的要求。以S4为例:该船舶在第95时刻驶出航道,并于第97时刻到达港内锚地1。在锚地等待了18个时刻后,于第119时刻抵达泊位前沿并在靠泊窗口内顺利完成靠泊操作。这表明,通过合理利用港内锚地资源,有效缓解了潮汐窗口对船舶通航的限制。调度结果证明了优化港内资源调配的策略,不仅显著降低了潮汐对通航的影响,还提升了整体通航效率。

观察S2和S7,两艘船舶的到港时间较为接近。在调度方案中,为避免资源冲突并使靠泊延误为零,分别为它们分配了不同的港内锚地停泊。这种策略充分利用了港口资源,使得船舶调度更加高效。总体来看,整个调度方案涵盖了所有船舶从到港、进港、锚泊、靠泊到离泊、离港的全过程,全面验证了调度方案的可行性和实用性。

3.3 忽视潮汐影响的试验结果分析

如果在模型中忽视潮汐约束,则问题变成了一个纯粹的含有港内锚地的船舶进出港调度问题。为

了评估潮汐对船舶调度的影响,设置同时考虑潮位和潮流约束、只考虑潮流约束($W_{hi} = [1, T]$)、忽视潮汐约束($W_{hi} = [1, T], W_{ci} = [1, T]$)三组试验,分别记为“tide”、“current”和“none tide”。计算三组试验在不同规划天数下的目标函数值,对比其在不同情况下的平均增加比例以观察不同情况对船舶调度的延误影响。各天数下的每组试验取5次算例,结果取其平均值。试验结果如图4所示。

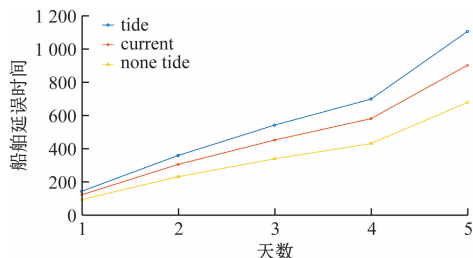


图4 不同潮汐约束下船舶延误时间比较

Fig. 4 Comparison of vessel delay times under different tidal constraints

随着船舶数量增加,受到潮汐影响的船舶数量也呈现相应增长,导致规划周期内船舶整体延误增加。即使不考虑潮汐影响,由于港内锚地本身的容量限制也会导致船舶整体延误随船舶数量的增加而增加。通过对比“tide”和“current”,可以得出航道中的潮位约束使船舶延误平均增加了19%;进一步,通过对比“current”和“none tide”,可以看出泊位前沿水域中的潮流约束使船舶整体延误平均增加了32%;最后,通过对比“tide”和“none tide”,表明考虑潮汐约束的情况下,船舶整体延误平均增加58%。结果表明,潮汐因素在港口船舶通航中的影响显著。

3.4 不同参数设置下试验结果对比分析

为了进一步验证模型的适用性,设计了9种不同的试验算例,涵盖了不同的船舶密度、锚地资源和泊位配置。其中Con7—Con9增加了四个万吨级泊位。具体试验参数设置如表3。

试验结果见表4。为了反映在规划时间内锚地资源的占用情况,定义锚地利用率 $RAT = \sum_{i=1}^{n_1+n_2} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{a_k} z_{ikt} / a_k \times T$,以量化在不同情况下港内锚地的使用效率。

根据不同算例的试验结果,模型在不同资源配置、船舶密度条件下表现出良好的适应性。随着船舶密度增加(Con1—Con3)导致调度难度加大,港口拥堵和船舶等待时间增多,从而延误时间增加。同时锚地利用率也逐步上升,表明更多船舶需要使用锚地资源进行等待,以减轻潮汐限制而产生的延误。

表3 试验参数设置

Tab.3 Experimental parameter settings

算例名称	船舶数量	港内锚地数量/个	泊位数量/个
Con1	(6,8) × day	3	12
Con2	(8,10) × day	3	12
Con3	(10,12) × day	3	12
Con4	(6,8) × day	5	12
Con5	(8,10) × day	5	12
Con6	(10,12) × day	5	12
Con7	(6,8) × day	3	16
Con8	(8,10) × day	3	16
Con9	(10,12) × day	3	16

在增加锚地数量后(Con4—Con6),船舶可以更加灵活地选择潮流窗口进行靠离泊,减少了延误时间。锚地数量的增加改善了调度效率,尤其是在船舶密度较大的情况下,这种改善更加明显。然而,结果显示锚地利用率较低,这是因为船舶占用锚地时间虽有增加,但分母部分($a_k \times T$)增长速度更快。这也反映了港口资源配置的冗余性,即在锚地资源较为充裕的情况下,部分锚地仍可能处于闲置状态。

泊位数量增加(Con7—Con9)后,更多船舶能够同时靠离泊,减少了船舶因泊位被占用需要在锚地等待的时间,故延误有所减少。但由于参数设置,受

表4 不同参数设置下的试验结果比较

Tab.4 Comparison of experimental results under different parameter settings

算例名称	指标	day = 1	day = 2	day = 3	day = 4	day = 5
Con1	目标函数	108	224	378	563	736
	RAT	0.23	0.19	0.21	0.24	0.22
Con2	目标函数	228	356	554	872	1 092
	RAT	0.25	0.24	0.25	0.27	0.29
Con3	目标函数	253	492	735	1 104	1 447
	RAT	0.26	0.33	0.29	0.31	0.35
Con4	目标函数	31	165	251	297	429
	RAT	0.08	0.11	0.15	0.17	0.16
Con5	目标函数	37	196	397	592	618
	RAT	0.15	0.16	0.15	0.18	0.18
Con6	目标函数	42	234	440	607	695
	RAT	0.22	0.20	0.18	0.24	0.21
Con7	目标函数	94	187	349	472	606
	RAT	0.33	0.27	0.31	0.32	0.35
Con8	目标函数	164	296	476	697	893
	RAT	0.32	0.33	0.29	0.34	0.37
Con9	目标函数	244	372	683	981	1 224
	RAT	0.36	0.37	0.46	0.45	0.43

潮汐约束的船舶密度相应变大,这意味着更多船舶需要停泊在锚地以应对潮汐窗口的限制。因此,锚地利用率在此阶段虽然有所提升,但延误的降幅仍相对较小,主要是由于增加泊位带来的潮汐影响更显著,潮汐约束仍限制了船舶调度的灵活性。

为了进一步验证求解出的调度方案在实际应用中的优势,选取算例 Con1—Con3 在 day = 1 ~ 5 内进行试验,将本文求解得到调度方案与“先到先服务”(FCFS)、“大船优先(LSF)”调度策略进行比较。记算例为 μ , $H = \left\{ \mu \mid \sum_{i=1}^{n_1+n_2} S_i \geq 1 \right\}$ 表示所有在规定时间内未将所有船舶纳入到调度计划中的算例个数。表5总结了使用拉格朗日松弛启发式算法与两种调度规则的结果对比。

表5 与其他调度策略试验结果比较

Tab.5 Comparison of experimental results with other scheduling strategies

算法	H	$\sum \text{RAT} / \sum \mu$	平均延误时间
LRHA	0	0.26	609.5
FCFS	8	0.11	852.4
LSF	6	0.22	724.7

LRHA 相对于 FCFS 使船舶整体延误时间减少了 28.5%, 相对于 LSF 减少了 15.9%。表明 LRHA 优化了港口资源的配置,能够有效减少船舶延误。同时,LRHA 的解可以将更多的船舶纳入到调度计划中。LRHA 的锚地利用率较高,表明调度方案较为高效地使用了港内锚地资源。FCFS 由于缺乏优化策略,不仅未能有效利用锚地资源,整体延误以及

调度计划的安排上表现最差。LSF 采用优先级调度,大船优先使用港内资源的调度策略使得锚地利用率提升至 0.22,但整体效果依旧不如 LRHA。另外也可观察到,LRHA 的锚地利用率为 0.26,表现中等。这可能由于 LRHA 通过松弛约束并使用启发式方法优化调度,虽然能够减少延误时间,但这种优化并未平衡分配锚地资源,造成锚地的非连续占用,从而影响了锚地的整体利用效率。

4 结束语

本文针对潮汐约束下的港口船舶进出港调度问题,提出了一个混合线性整数规划模型,模型中考虑了潮位的变化,以及潮流对船舶靠离泊时的具体影响。使用拉格朗日松弛启发式算法进行求解。研究结果表明,所提出的模型和算法能够在满足安全要求的前提下,使船舶的整体延误时间减少 28.5%,可有效提高港口调度效率,可为受潮汐影响显著港口大型船舶调度提供参考。

参 考 文 献

- [1] IMAI A, NISHIMURA E, HATTORI M, et al. Berth allocation at indented berths for mega-containerships [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 179(2): 579-593.
- [2] DEKKER S, VERHAEGHE R J. Development of a strategy for port expansion: an optimal control approach [J]. *Maritime Economics & Logistics*, 2008, 10: 258-274.
- [3] ZHEN L, LIANG Z, ZHUGE D, et al. Daily berth planning in a tidal port with channel flow control [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 106: 193-217.
- [4] DADASHI A, DULEBENETS M A, GOLIAS M M, et al. A novel continuous berth scheduling model at multiple marine container terminals with tidal considerations. *Maritime Business Review*, 2017, 2(2): 142-157.
- [5] SHEIKHOLESAMI A, MARDANI M, AYAZI E, et al. A dynamic and discrete berth allocation problem in container terminals considering tide effects [J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2020, 44: 369-376.
- [6] 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 Vessel Scheduling Problems Based on Rectangular Arrangement Under Tidal Influence [J]. *Journal of China Navigation*, 2024, 47(3): 81-88. (in Chinese)
- [7] KANERIA A, HAMIDI M, ZHU W, et al. Traffic Simulation of Houston Ship Channel for Assessing the Impact of Waterway Closures on Vessel Waiting Time [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 2019, 145(4): 04019014.
- [8] JIA Q, LI R, LI J. 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.
- [9] 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. Optimization model and algorithm for vessel scheduling in bidirectional navigation ports [J]. *Journal of China Navigation*, 2018, 41(2): 36-40. (in Chinese)
- [10] 张新宇,王志强,邓志鹏.黄骅港限制性双向航道船舶交通组织优化 [J]. *中国航海*, 2020, 43(4): 1-7.
ZHANG X Y, WANG Z Q, DENG Z P. Optimization of vessel traffic organization in restricted bidirectional navigation channels at Huanghua Port [J]. *Journal of China Navigation*, 2020, 43(4): 1-7. (in Chinese)
- [11] 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.
ZHENG H X, WU Y Q, SHAO S Y, et al. Integrated optimization of berth allocation and vessel scheduling considering tidal influence [J]. *Information and Control*, 2020, 49(1): 95-103. (in Chinese)
- [12] JIA S, LI C L, XU Z. Managing navigation channel traffic and anchorage area utilization of a container port [J]. *Transportation Science*, 2019, 53(3): 728-745.
- [13] 徐国裕,郭涂城,吴兆麟.单向水道船舶进出港最佳排序模式 [J]. *大连海事大学学报*, 2008, 34(4): 150-153.
XU G Y, GUO T C, WU Z L. Optimal sequencing model for vessel entry and exit in unidirectional channels [J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2008, 34(4): 150-153. (in Chinese)
- [14] WANG Y, WANG S. Deploying, scheduling, and sequencing heterogeneous vessels in a liner container shipping route [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 151: 102365.
- [15] RIZK N, MARTEL A, RAMUDHIN A. A Lagrangean relaxation algorithm for multi-item lot-sizing problems with joint piecewise linear resource costs [J]. *International Journal of Production Economics*, 2006, 102(2): 344-357.