

# 控制与决策

Control and Decision

## 潮汐影响下考虑异类船舶的动态泊位与岸桥起重机分配优化

吴鹏, 朱昆峰

引用本文:

吴鹏, 朱昆峰. 潮汐影响下考虑异类船舶的动态泊位与岸桥起重机分配优化[J]. *控制与决策*, 2025, 40(8): 2553–2565.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.1174>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### [基于粒子群算法的满载需求可拆分车辆路径规划](#)

Split vehicle route planning with full load demand based on particle swarm optimization

*控制与决策*. 2021, 36(6): 1397–1406 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1323>

#### [基于Frenet坐标系的自动驾驶轨迹规划与优化算法](#)

Trajectory planning and optimization algorithm for automated driving based on Frenet coordinate system

*控制与决策*. 2021, 36(4): 815–824 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0748>

#### [区间数可重入混合流水车间调度与预维护协同优化](#)

Collaborative optimization of interval number reentrant hybrid flow shop scheduling and preventive maintenance

*控制与决策*. 2021, 36(11): 2599–2608 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0973>

#### [基于平衡鲸鱼优化算法的无人车路径规划](#)

Path planning of unmanned ground vehicle based on balanced whale optimization algorithm

*控制与决策*. 2021, 36(11): 2647–2655 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0416>

#### [现货市场补充作用下基于总量折扣的运输服务采购问题研究](#)

Transportation service procurement based on total discount under complementary effect of spot market

*控制与决策*. 2021, 36(11): 2794–2802 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0274>

# 潮汐影响下考虑异类船舶的动态泊位 与岸桥起重机分配优化

吴鹏<sup>†</sup>, 朱昆峰

(福州大学 经济与管理学院, 福州 350116)

**摘要:** 针对一类新的动态泊位与岸桥起重机分配问题, 综合考虑潮汐影响、异类船舶靠泊区域约束等现实因素, 同时优化不同船型船舶的靠泊时间、靠泊位置以及分配的具体岸桥, 最小化船舶延误成本和泊位偏离成本. 首先, 将上述问题构建为一个混合整数线性规划模型; 然后, 通过动态时间-泊位-岸桥表和岸桥起重机编号有向无环图解决船舶间时空不能重叠和岸桥不可交叉的复杂约束, 提出融合问题特征的自适应邻域搜索算法, 设计基于问题特性的岸桥数量和靠泊类型邻域结构算子并融合船舶靠泊顺序扰动算子以提升算法寻优能力; 最后, 基于福州江阴港实例的大量数值实验结果表明: 所提出算法的求解结果与商业求解器 CPLEX 获得的最优解平均偏差为 3.24%, 验证了所提出模型和算法的可行性; 针对大规模问题, 所提出算法平均仅需 33.51 s 即可求得高质量的近似最优解, 与现有可变邻域下降算法获得的方案相比, 所获得的方案平均可节约 38.69% 的成本.

**关键词:** 港口调度; 潮汐影响; 异类船舶; 混合整数线性规划; 自适应邻域搜索算法

**中图分类号:** U691.3; TP18 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2024.1174

**引用格式:** 吴鹏, 朱昆峰. 潮汐影响下考虑异类船舶的动态泊位与岸桥起重机分配优化 [J]. 控制与决策, 2025, 40(8): 2553-2565.

## Optimal dynamic berthing and crane allocation for heterogeneous vessels considering tidal effects

WU Peng<sup>†</sup>, ZHU Kun-feng

(School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** This work investigates a new dynamic berth and quay crane allocation problem by comprehensively considering practical factors such as tidal effects and constraints on the berthing areas of different types of vessels, aiming to optimally determine the berthing time, berthing location, and specific quay crane allocation for different types of vessels to minimize the costs of vessel delay and berth deviation. First, we formulate the problem into a mixed-integer linear programming model. Then, we address complex constraints such as non-overlapping spatial and temporal intervals for vessels and non-crossing of quay cranes through a dynamic time-berth-quay table and a quay crane numbering directed acyclic graph. Based on this, an adaptive variable neighborhood search algorithm (AVNS) includes neighborhood structure operators based on the number of quay cranes and types of berths, and integrates a vessel berthing sequence perturbation operator to enhance the algorithm's optimization capability. Extensive numerical experiments based on the real-world case of Jiangyin Port in Fuzhou show that the AVNS achieves an average deviation of 3.24% from the best solution obtained by the commercial solver CPLEX. For large-scale cases, the AVNS on average requires only 33.51 s to obtain high-quality near-optimal solutions. Compared to the solutions obtained using the variable neighborhood descent algorithm, the proposed AVNS achieves an average cost saving of 38.69%.

**Keywords:** port scheduling; tidal constraints; heterogeneous vessel; mixed-integer linear programming; adaptive variable neighborhood search algorithm

## 0 引言

随着经济全球化的持续深化, 国际海上贸易往

来愈加频繁, 全球近 80% 的货物依赖于海上航运完成. 港口作为现代海上物流系统的枢纽, 在全球贸易

收稿日期: 2024-10-06; 录用日期: 2025-05-21.

基金项目: 国家“万人计划”青年拔尖人才项目.

责任编辑: 龙建成.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: wupeng88857@126.com.

体系中发挥着不可替代的作用,其作业效率对于货物的快速周转至关重要。泊位和岸桥起重机作为港口作业的核心资源,其合理分配对于提高港口运营效率、降低船舶滞港成本具有重要意义。因此,如何优化这些资源的调度和分配,已成为港口运营中的一个关键问题。

Bierwirth 等<sup>[1]</sup>将现有研究中泊位分配问题 (berth allocation problem, BAP) 根据调度前船舶是否到达分为静态和动态两类,根据船舶可靠泊位置分为连续型、离散型和混合型 3 类。Imai 等<sup>[2]</sup>以在港所有船舶的总等待时间和作业时间最小为目标建立了离散型 BAP 模型。混合型是离散型的延伸,但是两者泊位利用率低,难以满足实际生产要求,学术界开始关注连续型 BAP。Lim<sup>[3]</sup>探讨了所有船舶在装卸货物前在港口等待的静态场景下的连续型 BAP,并将其与二维装箱问题联系起来。静态 BAP 的调度方案易于执行,但是过于理想化,与现实情况不符。Imai 等<sup>[4]</sup>则针对连续型动态 BAP 建立了混合整数非线性模型。但是,船舶在港作业时长主要取决于分配的岸桥数量,而岸桥调度又必须以泊位规划为前提。两者间的耦合关系使得码头前沿调度研究逐步聚焦于泊位和岸桥联合分配问题 (berth allocation and quay crane assignment problem, BACAP)。

Park 等<sup>[5]</sup>首次将泊位分配与岸桥起重机分配相结合,假设每艘船的处理时间与其分配的岸桥数量成反比,建立了 BACAP 数学模型;在此基础上,Türkoğulları 等<sup>[6]</sup>考虑相邻岸桥起重机不能跨越作业,以船舶偏离成本、靠离泊位延迟成本的和最小为目标,构建了混合整数规划模型;Cheimanoff 等<sup>[7]</sup>提出了时不变岸桥分配原则,建立了混合整数线性规划模型。BACAP 是仅考虑了岸桥分配数量的问题,而进一步考虑岸桥设备的个体差异性特征,为每个岸桥指定具体编号的精细化分配问题 (berth allocation and crane assignment specific problem, BACASP) 值得深入研究。Ji 等<sup>[8]</sup>针对 BACASP 建立了混合整数线性规划模型,并基于滚动时域的方法,设计了自适应大邻域搜索算法对模型求解;黄涵等<sup>[9]</sup>针对该问题建立了混合整数非线性模型并设计了基于快速非支配排序的遗传算法进行求解。

在港口作业中,由于影响泊位和岸桥分配的因素较多,学者开始关注不同影响因素下的泊位和岸桥分配问题。Agra 等<sup>[10]</sup>考虑了岸桥起重机具有不同装卸速度,建立了混合整数规划模型并设计了滚动时域启发式算法进行求解;乐美龙等<sup>[11]</sup>考虑了泊位偏移和岸桥干扰因素,以最小化船舶在港停泊时间

为目标,构建了混合整数规划模型,并设计了两阶段启发式算法对模型进行求解;Correcher 等<sup>[12]</sup>建立了考虑岸桥起重机行程时间的混合整数线性规划模型,并设计了遗传算法对模型求解;周鹏飞等<sup>[13]</sup>针对出口集装箱的分配问题,建立了数学模型并设计了禁忌搜索算法进行求解;Luo 等<sup>[14]</sup>考虑了自动化码头中岸桥起重机和集装箱自动引导车的集成调度问题,构建了混合整数规划模型;杨华龙等<sup>[15]</sup>考虑了船舶航速偏离,以班轮运输航次收益鲁棒优化为目标,建立了混合整数非线性规划模型;郑红星等<sup>[16]</sup>考虑了装卸倒箱的现实约束,构建了以集卡总等待时间最少为目标的混合整数线性规划模型,并设计了混合和声模拟退火算法进行求解;林爽等<sup>[17]</sup>针对港口自动跨运车状态估计问题,建立了数学模型,设计了改进的集员滤波算法对模型进行求解;蔡佳芯等<sup>[18]</sup>针对区域港口群内陆公共腹地的空箱状况,构建了多港口空箱存储与调运联合优化混合整数规划模型,并利用动态规划对港口群内各港口的空箱库存保有量区间进行了优化。

以上文献均未考虑潮汐对船舶进出港口时间的约束问题。随着船舶的大型化,水深对于船舶进出港的影响愈加显著,港口运行成本也会因潮汐的变化而波动。郑红星等<sup>[19]</sup>针对连续型动态 BACAP,以泊位偏移成本、岸桥移动成本与滞期成本的和最少为目标,建立了数学模型;Du 等<sup>[20]</sup>针对连续型动态 BAP,考虑潮汐影响下船舶进港航速问题建立了非线性混合整数规划模型,对模型进行线性化并使用商业求解器 CPLEX 求解;Zhen 等<sup>[21]</sup>基于潮汐影响,对航道服务水平进行了优化;Sheikholeslami 等<sup>[22]</sup>考虑了潮汐对靠离泊时间的影响,对连续型 BAP 建立了混合整数规划模型并设计了样本平均近似方法求解;Unsal 等<sup>[23]</sup>则在干散货码头 BAP 中考虑了潮汐影响。但是,极少学者将连续型动态 BACASP 在潮汐影响下进行研究。

此外,在实际港口运营过程中涌现出了新的挑战。以福州江阴港为例,其 1 号、2 号、5 号和 6 号泊位缺乏危险货物处理资质,这使得危险货物集装箱船舶只能在 3 号和 4 号泊位进行作业。装载特定大型卷钢的船舶由于泊位吞吐量的限制也被限定在 3 号泊位进行装卸操作。这些异类船舶仅能在固定的泊位区域进行靠泊作业,传统调度方法易出现大量不可行方案且调度难度增加,即使获得一个可行方案,也是考虑的最保守情形,得到方案成本较高。因此,在保证得到方案可行性的条件下,精细化考虑船舶的异质性可降低港口的运营成本。现有研究鲜有

对考虑异类船舶的连续型动态 BACASP 进行探讨.

综上所述, 本文旨在降低所有船舶在港成本, 重点考虑潮汐因素和异类船舶类型. 通过对船舶的靠泊顺序、靠离泊时间所在潮汐窗口、不同类型船舶的靠泊位置进行同步优化, 将连续型动态 BACASP 构建为一个混合整数线性规划模型. 考虑到问题的复杂性, 本文设计自适应邻域搜索算法 (adaptive variable neighborhood search algorithm, AVNS) 对问题进行求解, 为港口船舶调度提供有效的决策支持. 本文与现有文献的对比情况如表 1 所示.

表1 相关文献研究内容对比

现有研究	动态连续泊位	潮汐影响	异类船舶	起重机分配	模型	求解
Cheimanoff 等 <sup>[7]</sup>	√			√	MILP	VNS
乐美龙等 <sup>[11]</sup>	√				MILP	GA
Ji 等 <sup>[6]</sup>	√			√	MILP	ALNS
黄涵等 <sup>[9]</sup>	√				MINLP	NSGA-II
周鹏飞等 <sup>[13]</sup>				√	MILP	TS
Luo 等 <sup>[14]</sup>	√				MILP	MSSA
郑红星等 <sup>[19]</sup>	√	√			MINLP	NSGA
Sheikholeslami 等 <sup>[21]</sup>	√	√			MILP	CPLEX
本研究	√	√	√	√	MILP	AVNS

注: MINLP: 混合整数非线性规划; MILP: 混合整数线性规划; VNS: 变邻域搜索算法; TS: 禁忌搜索算法; ALNS: 自适应大邻域搜索算法; NSGA-II: 非支配排序的多目标遗传算法; MSSA: 麻雀搜索算法.

### 1 问题描述与建模

船公司在抵港前将船舶类型、船舶长度、船舶可分配岸桥个数、预计到达和离开港口时间等信息预报给挂靠港口. 港口经营人需要考虑潮汐和异类船舶的影响, 在码头岸线长度和岸桥起重机个数一定的条件下, 为船舶制定泊位和岸桥起重机分配计划. 将计划映射至二维时间-泊位图中, 如图 1 所示. 图 1 中: 横轴为码头岸线, 纵轴表示时间, 矩形表示计划到港船舶, 矩形长度表示船舶长度, 高度表示船舶在港时间, 岸桥起重机在与岸线平行的轨道上运行, 编号为船舶的岸桥具体分配. 其中: 深灰色矩形属于第 1 类异类船舶, 必须在码头岸线的第 1 类异类船舶靠泊区域 ( $d_1, d'_1$ ) 内作业; 浅灰色矩形属于第 2 类异类船舶, 要在码头岸线的第 2 类异类船舶靠泊区域 ( $d_2, d'_2$ ) 内作业; 白色矩形为普通船舶, 可在码头区域内的任意位置靠泊. 此外, 制定的计划还需要满足船舶的靠离泊时间在符合船舶吃水的潮汐高度的时间窗 ( $f_n, f'_n$ ) 内, 否则需要等待. 潮汐高度会随着时间的变化而周期性改变, 如图 2 所示. 同时, 计划方案还要满足船舶间时空上不可冲突的约束, 即图 1 中

任意两艘船舶在空间上均不重叠, 同一时间区间作业的船舶, 分配的岸桥编号互不交叉, 任意时刻在港作业船舶调用的岸桥总数不能超出港口总岸桥数量.

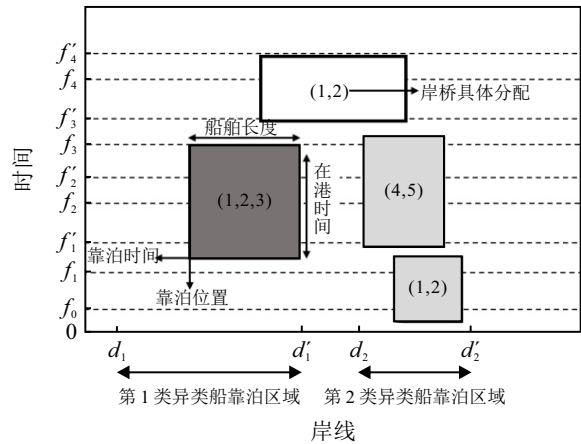


图1 港口时间-泊位示意图

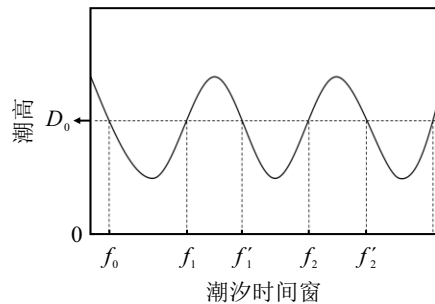


图2 潮汐周期示意图

本文针对连续型动态泊位与岸桥起重机分配问题, 综合考虑潮汐和异类船舶等要素, 以最小化计划周期内所有船舶的等待成本、泊位偏离成本和延误成本为目标构建了混合整数线性规划模型. 所提出模型基本假设如下:

- 假设 1** 异类船舶靠泊区域长度均大于对应异类船舶的船长;
- 假设 2** 船舶一旦靠泊, 其位置和装卸作业便不能改变或中断;
- 假设 3** 船舶靠离泊的操作时间以及岸桥起重机的移动时间包含在装卸时间内;
- 假设 4** 一台岸桥起重机同一时间内最多只能服务一艘船;
- 假设 5** 船舶分配的岸桥起重机数量在整个装卸过程中保持不变.

#### 1.1 符号定义

- 参数:
- $V$ : 所有类型船舶的集合,  $V = \{1, 2, \dots, |V|\}$ .
  - $K$ : 岸桥起重机的编号集合,  $k \in K$ .
  - $H$ : 潮汐高水位时间区间的集合,  $h \in H$ .
  - $A$ : 异类船舶类型集合,  $n \in A$ .

$a_i$ : 船舶*i*的预计到港时间,  $i \in V$ .

$l_i$ : 船舶*i*的长度, 其中包括到相邻停泊船舶的安全距离,  $i \in V$ .

$d_i$ : 根据船公司的计划, 船舶*i*预计离港的时间,  $i \in V$ .

$b_i$ : 船舶*i*的期望泊位位置,  $i \in V$ .

$f_h$ : 第*h*个高水位时间窗的开始时间,  $h \in H$ .

$f'_h$ : 第*h*个高水位时间窗的结束时间,  $h \in H$ .

$q_i^{\min}$ : 可分配给船舶*i*的岸桥起重机的最小数量,  $i \in V$ .

$q_i^{\max}$ : 可分配给船舶*i*的岸桥起重机的最大数量,  $i \in V$ .

$r_{iq}$ : 船舶*i*分配*q*台起重机的作业时间,  $i \in V, q \in (q_i^{\min}, \dots, q_i^{\max})$ .

$m_{in}$ : 已知 0-1 变量, 若船舶*i*为异类船舶中的第*n*类船型, 则为 1; 否则为 0,  $i \in V, n \in A$ .

$(d_n, d'_n)$ : 第*n*类异类船型的指定靠泊区域,  $n \in A, 0 \leq d_n < d'_n \leq L$ .

$W_{1i}$ : 船舶*i*到港后, 每单位靠泊延误时间所产生的成本,  $i \in V$ .

$W_{2i}$ : 船舶*i*的靠泊位置与期望泊位位置的偏离单位成本,  $i \in V$ .

$W_{3i}$ : 船舶*i*在预计出港时间后每单位延误时间所产生的成本,  $i \in V$ .

$L$ : 码头的总长度.

$Q$ : 岸桥起重机总数.

$T$ : 总计划时间.

决策变量:

$s_i$ : 船舶*i*的实际靠泊时间,  $i \in V$ .

$p_i$ : 船舶*i*的实际靠泊位置,  $i \in V$ .

$g_i$ : 船舶*i*的实际靠泊位置与期望泊位位置的偏差值,  $i \in V$ .

$u_i$ : 船舶*i*的离泊时间,  $i \in V$ .

$x_{iq}$ : 0-1 变量, 若*q*台岸桥分配给船舶*i*, 则为 1; 否则为 0,  $i \in V, q \in (q_i^{\min}, \dots, q_i^{\max})$ .

$t_{ih}$ : 0-1 变量, 若船舶*i*在第*h*个高水位时间窗靠泊, 则为 1; 否则为 0,  $i \in V, h \in H$ .

$e_{ih}$ : 0-1 变量, 若船舶*i*在第*h*个高水位时间窗离港, 则为 1; 否则为 0,  $i \in V, h \in H$ .

$w_{ik}$ : 0-1 变量, 若编号*k*是分配给船舶*i*的岸桥组中最左侧的岸桥编号, 则为 1; 否则为 0,  $i \in V, k \in K$ .

$y_{ij}$ : 0-1 变量, 若船舶*i*的离港时间早于船舶*j*的靠泊时间, 则为 1; 否则为 0,  $(i, j) \in V, i \neq j$ .

$z_{ij}$ : 0-1 变量, 定义港口前沿 0 刻度位置为最左侧靠泊位置, 港口前沿*L*刻度位置为最右侧靠泊位置, 若船舶*i*的靠泊位置在船舶*j*的左侧, 则为 1; 否则为 0,  $(i, j) \in V, i \neq j$ .

### 1.2 模型构建

问题的参数和用于构建问题数学模型的变量定义如下所示:

$$\min \sum_{i \in V} [W_{1i}(s_i - a_i) + W_{2i}g_i + W_{3i}(u_i - d_i)]. \quad (1)$$

$$f_h - T(1 - t_{ih}) \leq s_i, \quad \forall i \in V, \forall h \in H; \quad (2)$$

$$s_i \leq f'_h + T(1 - t_{ih}), \quad \forall i \in V, \forall h \in H; \quad (3)$$

$$\sum_{h \in H} t_{ih} = 1, \quad \forall i \in V; \quad (4)$$

$$s_j - s_i - \sum_{q=q_i^{\min}}^{q=q_i^{\max}} r_{iq}x_{iq} - T(y_{ij} - 1) \geq 0, \quad \forall (i, j) \in V, i \neq j, \quad \forall q \in (q_i^{\min}, \dots, q_i^{\max}); \quad (5)$$

$$p_j - p_i - l_i - L(z_{ij} - 1) \geq 0, \quad \forall (i, j) \in V, i \neq j; \quad (6)$$

$$y_{ij} + y_{ji} + z_{ij} + z_{ji} \geq 1, \quad \forall (i, j) \in V, i \neq j; \quad (7)$$

$$\sum_{q=q_i^{\min}}^{q=q_i^{\max}} x_{iq} = 1, \quad \forall i \in V; \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} w_{ik} = 1, \quad \forall i \in V; \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} kw_{ik} + \sum_{q=q_i^{\min}}^{q=q_i^{\max}} qx_{iq} - 1 \leq Q, \quad \forall i \in V; \quad (10)$$

$$\sum_{k' \in K} k'w_{jk'} - \sum_{k \in K} kw_{ik} - \sum_{q=q_i^{\min}}^{q=q_i^{\max}} qx_{iq} + Q(z_{ji} + y_{ij} + y_{ji}) \geq 0, \quad \forall (i, j) \in V, i \neq j; \quad (11)$$

$$s_i \geq a_i, \quad \forall i \in V; \quad (12)$$

$$g_i \geq b_i - p_i, \quad \forall i \in V; \quad (13)$$

$$g_i \leq b_i - p_i, \quad \forall i \in V; \quad (14)$$

$$u_i \geq d_i, \quad \forall i \in V; \quad (15)$$

$$u_i - s_i - \sum_{q=q_i^{\min}}^{q=q_i^{\max}} r_{iq}x_{iq} \geq 0, \quad \forall i \in V; \quad (16)$$

$$d_n m_{in} \leq P_i + L_i, \quad \forall i \in V, \forall n \in A; \quad (17)$$

$$P_i + L_i \leq d'_n + (1 - m_{in})(L - d'_n), \quad \forall i \in V, \forall n \in A; \quad (18)$$

$$f_h - T(1 - e_{ih}) - u_i \leq 0, \quad \forall i \in V, \forall h \in H; \quad (19)$$

$$u_i - f'_h - T(1 - e_{ih}) \leq 0, \forall i \in V, \forall h \in H; \quad (20)$$

$$\sum_{h \in H} e_{ih} = 1, \forall i \in V; \quad (21)$$

$$s_i, p_i, g_i, u_i \geq 0, \forall i \in V; \quad (22)$$

$$x_{iq} \in \{0, 1\}, \forall i \in V, \forall q \in (q_i^{\min}, \dots, q_i^{\max}); \quad (23)$$

$$t_{ih}, e_{ih} \in \{0, 1\}, \forall i \in V, \forall h \in H; \quad (24)$$

$$w_{ik} \in \{0, 1\}, \forall i \in V, \forall k \in K; \quad (25)$$

$$y_{ij}, z_{ij} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in V, i \neq j. \quad (26)$$

其中: 式(1)旨在最小化所有船舶的到达等待、泊位偏离与离泊延迟成本的和; 式(2)~(4)保证所有船舶在高水位期间靠泊; 式(5)~(7)确保任意两艘船舶时空上不能重叠; 式(8)表示必须在 $(q_i^{\min}, q_i^{\max})$ 内选择分配船舶*i*的岸桥起重机数量; 式(9)规定每艘船舶分配的岸桥起重机编号是固定的; 式(10)规定分配船舶*i*的岸桥起重机右侧编号不能超过*Q*; 式(11)保证了船舶*i*的最大岸桥编号*k*小于相对船舶*i*空间位置靠右侧船舶的最小岸桥编号*k'*, 使得码头前沿岸桥不能交叉使用; 式(12)保证船舶*i*只能在到港后靠泊; 式(13)和(14)规定了船舶*i*相对期望泊位位置*b<sub>i</sub>*的偏离距离; 式(15)和(16)保证船舶*i*必须在作业完成后离泊; 式(17)和(18)规定船舶*i*靠泊位置不能超出码头岸线, 且不同类型的异类船舶靠泊位置在固定区域 $(d_n, d'_n)$ 内, 普通船舶可在任意位置靠泊; 式(19)~(21)确保船舶在高水位期间离泊; 式(22)~(26)定义了变量约束范围。

### 1.3 问题复杂性分析

**定义 1** 潮汐影响下考虑异类船舶的动态泊位与岸桥起重机分配问题是一类 NP 难问题。

**证明** 考虑本文研究问题的一种特殊情况, 假设 1): 船舶类型相同, 即式(17)和(18)可以被松弛; 假设 2): 不考虑潮汐时间窗约束, 即式(2)~(4)和式(19)~(21)被松弛; 假设 3): 所有船舶作业时间确定。经典的动态泊位分配问题可以多项式规约为上述情形, 前者已被证明为 NP 难问题<sup>[24]</sup>。显然, 本文考虑的一般情形的潮汐影响下考虑异类船舶的动态泊位与岸桥起重机分配问题属于一类 NP 难问题, 因其同时考虑了潮汐时间窗和异类船型约束, 较经典问题更加复杂。□

## 2 AVNS 算法设计

潮汐影响下考虑异类船舶的动态泊位与岸桥起重机分配优化问题为 NP 难问题, 采用精确算法求解时, 随着问题规模增大, 计算难度会陡然上升, 难以

在合适的时间内得到解。因此, 常常选择大规模搜索算法来求解此类问题。可变邻域下降算法 (variable neighborhood descent, VND) 由 Pierre 等<sup>[25]</sup>最早提出, 用于求解经典组合优化旅行商问题 (traveling salesman problem, TSP)。VND 的核心思想是在迭代过程中动态地改变邻域结构, 以寻找质量更好的解。但是, 这样得到的解的多样性有限且易陷入局部最优。与 VND 相比, AVNS 增加了算子的自适应过程, 即在算法开始前赋予所有邻域结构和算子相应权重, 然后根据算子在迭代过程中得到的邻域解的质量更新邻域结构和算子被选择的概率。根据问题特性, 所设计 AVNS 通过动态时间-泊位-岸桥表和岸桥起重机编号有向无环图解决船舶间时空不能重叠以及岸桥不可交叉的复杂约束, 并采用船舶分配的岸桥个数和靠泊方式两种邻域结构。然后, 用交换算子和插入算子优化船舶调度顺序, 并设计了基于现有解的自适应邻域结构选择机制和自适应扰动算子选择机制, 通过两种机制不断调整每个邻域结构被选择的概率和船舶优化顺序扰动算子的被选择概率来高效求解模型, 以提高算法的寻优能力。

### 2.1 动态时间-泊位-岸桥列表

动态泊位分配思想最早由 Imai 等<sup>[26]</sup>于 2001 年提出, 其核心思想在于通过实时记录港口泊位的时空占用状态, 动态调整分配方案以消除船舶作业中的时空冲突。本文在此基础上进行了改进。首先引入潮汐水位时间窗约束条件, 然后考虑异类船舶的差异化靠泊需求, 同时增加记录可用岸桥起重机的个数。为此, 设计了动态时间-泊位-岸桥列表, 用于解决式(5)~(7)中时空重叠约束和式(8)的岸桥数量约束。

时间-泊位-岸桥列表由时间窗口编号、时间区间、可用泊位段和可用岸桥数 4 行构成。列数为动态变量, 每列对应 1 个时间窗口区间。窗口区间的边界与在港作业船舶的实际靠泊时间或离泊时间对应, 在泊位计划构建过程中, 时间窗口总数将随船舶的分配而逐步调整, 每列对应的可用泊位段和可用岸桥数量也随着在港作业船舶的泊位和岸桥的分配而动态调整。计划周期内的船舶按照顺序在当前最新的时间-泊位-岸桥列表依次分配。船舶靠离泊时间在潮高时间区间内的前提下, 首先从第 1 个时间窗口编号开始搜索, 需要满足 3 个条件: 1) 时间窗口区间长度需要大于分配船舶的在港时间; 2) 对应的可用泊位段需要大于船长, 对于异类船型, 当前窗口下的可用泊位段与该异类船型类别 $(d_n, d'_n)$ 的交集长度

需要大于船长; 3) 对应可用岸桥数量需要大于船舶待分配岸桥数量, 否则进入下一个时间窗口进行搜索. 分配完成后, 时间-泊位-岸桥列表根据现有表中在港船舶的靠离泊时间和占用岸桥个数进行更新. 每分配 1 艘船舶, 动态时间-泊位-岸桥列表更新 1 次, 直至所有船舶完成分配.

初始的动态时间-泊位-岸桥列表只有 1 个时间区间  $(0, T)$ , 对应的可用泊位段为  $(0, L)$ , 可用岸桥数量为  $Q$ .  $V_1$  在初始时间-泊位-岸桥列表中的第 1 个时间窗口搜索, 靠离泊时间均在潮高时间窗内, 找到最小成本的方案为在港时间区间  $(30, 90)$ , 靠泊位置区间为  $(123.5, 200)$ , 使用岸桥个数为 2.  $V_1$  分配完成后, 初始动态时间-泊位-岸桥列表将更新, 如表 2 所示. 时间窗口被分为 3 个: 时间窗口 2 下的可用泊位段, 将分为  $(0, 123.5) \cup (200, L)$ ; 其余时间窗口下没有有在港船舶, 可用泊位段为  $(0, L)$ . 时间窗口 2 下可用的岸桥数量为  $Q - 2$ ; 其余时间窗口下没有有在港船舶, 可用岸桥个数为  $Q$ . 下一艘船舶  $V_2$  将在表 2 中的条件下寻找可行分配方案, 如:  $V_2$  为第 1 类异类船型, 其可行靠泊区域为  $(0, 100)$ , 在表 2 中的条件下寻找成本最低分配方案, 首先从表 2 中 1 号时间窗口内搜索, 靠离泊时间均在潮高时间窗内的前提下, 可用泊位段取  $(0, L)$  与  $(0, 100)$  的交集, 满足条件后再判断可用岸桥数量, 均满足条件后计算当前最小成本, 否则进入下一个时间窗口. 搜索 3 个时间窗口后找到最低成本, 根据  $V_1$  和  $V_2$  分配方案更新动态时间-泊位-岸桥列表.

表2 动态时间-泊位-岸桥初始列表

时间窗口编号	1	2	3
时间窗口区间	$(0, 30)$	$(30, 90)$	$(90, T)$
可用泊位段	$(0, L)$	$(0, 123.5) \cup (200, L)$	$(0, L)$
可用岸桥数量	$Q$	$Q - 2$	$Q$

根据实时数据更新动态时间-泊位-岸桥列表中时间区间、可靠泊泊位区间和时间窗口下的可用岸桥个数. 所有船舶均在最新的动态时间-泊位-岸桥列表中寻找靠泊方案, 直至所有船舶完成分配, 可以有效地避免船舶在时空上重叠问题.

2.2 岸桥起重机编号有向无环图

有向无环图最早由 Türkoğulları 等<sup>[6]</sup>于 2014 年提出, 用于解决经典 BACASP 问题, 其核心思想是通过将调度问题建模为有向无环图, 优化任务的执行顺序和资源分配. 本文根据问题特性, 在此基础上将该方法核心思想融于 AVNS, 设计了岸桥起重机编号有向无环图, 用于解决模型 (9) ~ (11) 中岸桥起

重机编号不可交叉约束, 最终求解所构建模型.

岸桥起重机编号有向无环图是根据动态时间-泊位-岸桥列表中得到的岸桥数量, 通过动态分组和顺序编排, 避免同时段作业船舶的岸桥编号交叉. 首先, 基于在港时间是否重叠将船舶划分为多个集合; 然后, 对每个集合内的船舶按照实际靠泊位置由小到大排序; 再依次为船舶分配连续岸桥进行编号. 首船从 1 号岸桥开始, 后船的首个岸桥编号等于前船占用的最后一个岸桥编号加 1. 这种设计保证了码头前沿岸桥编号的连续性, 同时, 又解决了岸桥起重机编号不可交叉的问题. 每当船舶的调度方案被调整时, 重新计算岸桥分配的具体编号.

图 3 为岸桥起重机编号有向无环图. 如图 3 所示: 用圆形表示船舶节点;  $V_0$  表示源节点,  $V_{n+1}$  表示汇节点, 其中  $n$  为船舶总数, 与  $V_0$  连接的船舶的最左侧岸桥起重机编号为 1. 权重等于船舶分配的岸桥起重机个数, 在码头最左边没有船舶连接到节点  $V_0$ , 最右边没有船舶连接到节点  $V_{n+1}$ , 节点  $V_0$  和节点  $V_{n+1}$  的权重为 0. 若不同的船舶  $V_i$  与  $V_j$  间没有其他船舶, 且  $V_i$  在  $V_j$  空间上的左侧, 则添加一条弧, 其权重等于船舶  $V_j$  的岸桥数量. 源节点与汇聚节点间的每个路径的节点形成一个完整的序列, 表示有时间交集的船舶组, 权重的和等于分配岸桥个数的和. 有向无环图上最长路径长度小于或等于  $Q$ , 以及在同一时间作业的船舶所占用的岸桥起重机个数不能超过岸桥总数.  $V_0$  和  $V_8$  表示 2 个虚拟节点,  $V_0$  表示源节点,  $V_8$  表示汇节点.  $V_4$  分配的岸桥起重机个数为 3, 最左侧编号为 1, 具体岸桥编号为 (1, 2, 3).  $V_5$  分配的岸桥起重机个数为 2, 最左侧编号为 4,  $V_5$  的具体岸桥编号为 (4, 5).

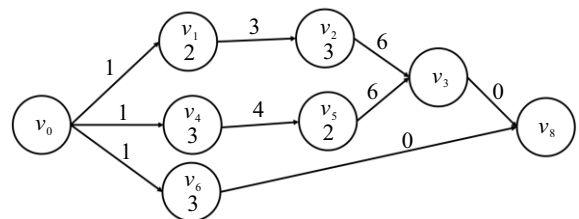


图3 岸桥起重机编号有向无环图

每艘船均是根据最新的动态时间-泊位-岸桥列表进行分配, 且根据调度方案构建对应的有向无环图可以有效解决船舶调度方案的岸桥起重机编号不可交叉约束.

2.3 自适应邻域结构选择机制

在船舶的靠泊顺序一定的情况下, AVNS 采用两种邻域结构来扩大算法寻优的解空间.

1) 分配给每艘船的岸桥起重机数量. 每艘船分配岸桥个数的改变会影响计划周期内所有船舶的调度. 在 $(q_i^{\min}, q_i^{\max})$ 内随机选择岸桥个数 $q$ , 用于调整船舶 $i$ 的作业时间 $r_{iq}$ , 拓展整个调度方案的解空间.

2) 每艘船的靠泊类型. 该邻域结构分为3种类型: ①  $\delta_i = 0$ , 在最新动态时间-泊位-岸桥列表中, 船舶 $i$ 以最小成本为目标进行分配; ②  $\delta_i = 1$ , 船舶 $i$ 分配在动态时间-泊位-岸桥列表中最小时间窗内的最右侧的位置; ③  $\delta_i = 2$ , 船舶 $i$ 分配在动态时间-泊位-岸桥列表中最小时间窗内最左侧的位置.  $\delta_i = 1$ 和 $\delta_i = 2$ 的靠泊类型是要考虑全局最优, 避免丢失最优解.

在自适应算法中, 奖励机制用于评估当前选择算子的效果, 用以逐步改进决策. 针对目标函数极小化问题, 本文提出了一种计算奖励值机制, 调整 AVNS 邻域结构的选择概率. 奖励值如下所示:

$$R = \max(0, F_{\text{old}} - F_{\text{new}}), \quad (27)$$

其中 $F_{\text{old}}$ 和 $F_{\text{new}}$ 分别为应用当前操作前后的目标函数值.

在每次迭代中, 根据邻域结构选择的改变带来的目标函数值变化 $\Delta F$ 计算奖励值 $R$ . 更新邻域结构的选择概率 $P_i$ , 使得奖励值较高的邻域结构在下次迭代中被选择的概率增加. 选择概率的更新公式如下所示:

$$P_i^{(t+1)} = \frac{P_i^{(t)} + \alpha \cdot R_i^{(t)}}{\sum_j (P_j^{(t)} + \alpha \cdot R_j^{(t)})}, \quad (28)$$

其中 $\alpha$ 为学习率, 用于控制选择概率的调整幅度.

### 2.4 自适应扰动算子选择机制

在进行自适应邻域结构选择迭代后, 若未改变船舶的分配顺序, 则可能会陷入局部最优解. 为避免这种情况, 本文引入了扰动策略. 1) 插入算子, 从当前船舶排列中随机选择一艘船舶, 设 $\beta$ 为其排列编号, 将其插入至 $[\max(\beta - \gamma, 0), \min(\beta + \gamma, |V|)]$ 范围内随机位置. 2) 交换算子, 从当前排列中随机选择一艘船舶, 设 $\beta$ 为其当前排列编号, 在 $[\max(\beta - \gamma, 0), \min(\beta + \gamma, |V|)]$ 范围内随机选择另一艘船舶, 交换两艘船舶的位置. 其中参数 $\gamma$ 为调节扰动尺度的平均值, 避免船舶插入到离初始位置较远的位置.

交换算子和插入算子进行自适应选择, 初始选择的概率均为 50%. 当选择某个算子后得到的目标函数值低于当前最优解时, 下次选择该算子的概率将会提高. 若算子得到的目标函数值低于当前最优解, 则增加算子被选择的概率 $\eta$ ; 否则为 0.

### 2.5 算法流程

所设计 AVNS 的算法流程如图 4 所示. 首先, 将所有船舶按照到达时间 $a_i$ 进行升序排序,  $V_i$ 的使用岸桥数量初始化为 $q_i^{\max}$ , 靠泊方式 $\delta_i$ 值初始化为 0. 依次对 $V_i$ 进行资源分配, 得到的方案为 AVNS 的初始解. 然后, 进行自适应邻域结构选择机制, 若更新

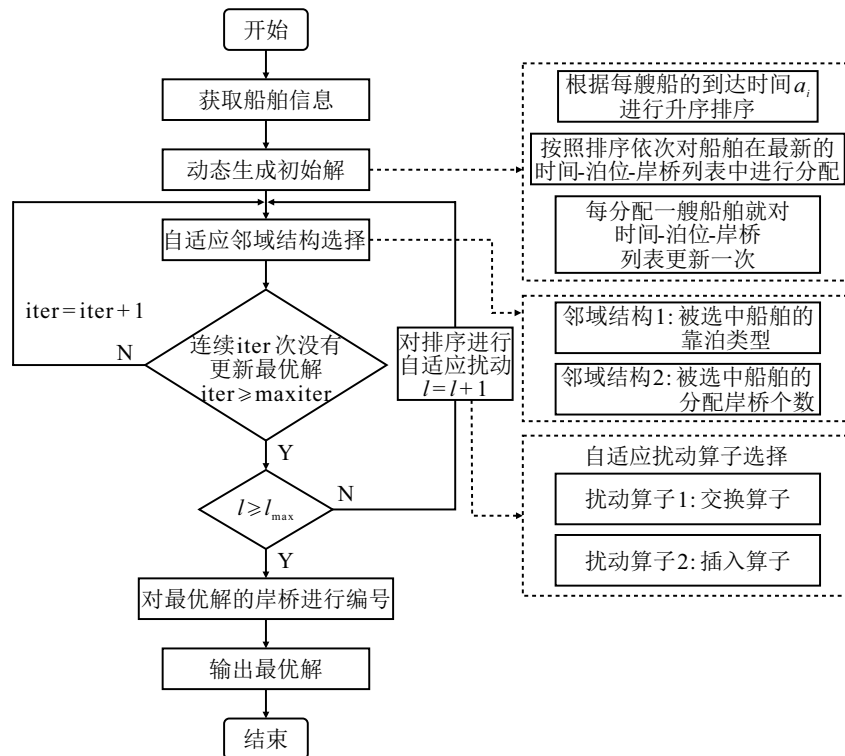


图4 AVNS 算法流程

最优解, 则迭代次数行  $iter$  重置为 0. 若连续运行  $maxiter$  次没有更新最优解, 则将对当前船舶排序进行扰动. 每次扰动后再运行自适应邻域结构选择机制. 当扰动次数达到  $l_{max}$  时, 根据最优分配方案进行岸桥具体编号, 输出最优方案, 算法终止.

### 3 算例分析

本节通过小规模算例对比商业求解器 CPLEX 与 AVNS 算法的求解结果, 大规模算例对比 AVNS 算法与 VND 算法的最优值和 CPU 运行时间, 以验证所构建模型和 AVNS 算法的正确性和有效性.

#### 3.1 参数设置与算例生成

AVNS 包含  $l_{max}$ 、 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\eta$  和  $maxiter$  等参数. 在正交实验中, 分别在一定范围内取值并在不同规模的算例中随机抽取 2 组对不同参数组合进行测试, 在足够大的迭代次数下, 根据 10 次测试结果平均值选择性能最佳的组合. 实验结果表明, 在所有测试实例中均表现较好的参数设置如下: 最大无更新迭代次数  $l_{max} = 25$ , 学习率  $\alpha = 10\%$ ; 扰动算子中最大扰动次数  $maxiter = 10$ , 插入交换的范围参数  $\gamma = 2$ , 选择概率增加值  $\eta = 5\%$ ; CPLEX 求解算例时间限制为 9000 s. 这组参数的组合被固定用于后续所有实验.

本文采用两类算例: 第 1 类是中小规模算例, 整个计划周期为 300 h, 根据船舶数量, 算例分为 3、6、9、15 和 21 共 5 组; 第 2 类将整个计划周期延长至 420 h, 用于大规模算例实验, 分为 30、40、50、60、70、80、90 和 100 共 8 组. 所有船舶的单位延迟靠泊成本  $W_{1i} = 1200$ , 单位偏离成本  $W_{2i} = 300$ , 单位延迟离港成本  $W_{3i} = 2400$ . 整个码头的长度定义为 1000 m, 共有 10 台岸桥起重机可供运行.

根据福州江阴港 2018 年 ~ 2023 年 5 年来到港船舶的类型比例, 设置算例小型、中型和大型船舶, 分别占船舶总数的 60%、30% 和 10%. 设置不同的船型的船长  $l_i$  服从范围内均匀分布, 如表 3 所示. 小型船舶船长服从  $U(12, 25]$  内均匀分布, 中型船舶船长服从  $U(25, 37]$  内均匀分布, 大型船舶船长服从  $U(37, 50]$  内均匀分布, 不同船型的可分配最大最小岸桥个数  $q_i^{min}$  和  $q_i^{max}$  取固定值. 船舶  $i$  的期望靠泊位置  $b_i$  在  $U(0, l_i)$  范围内呈均匀分布. 每个船型分配 1 个

岸桥时的作业时间用  $c_i$  值表示, 服从表 3 中对应均匀分布, 当船舶  $i$  分配  $q$  台岸桥时的作业时间  $r_{iq}$  为  $c_i/q$  时, 设置船舶  $i$  的期望离泊时间为  $(a_i + c_i/q_i^{max})$ .

所有船舶中异类船型占比 30%, 异类船舶中设置 3 种不同类型, 大型卷钢异类船型、危险品异类船型和罐装异类船型各占比 10%. 将 3 类异类船舶的靠泊区域设为 (0, 100)、(300, 400) 和 (600, 700). 根据中华人民共和国海事局官网的潮汐数据, 江阴港在一天中有 2 次高水位, 其中高水位时间占 1 个潮汐周期的 1/3, 本文定义 1 个潮汐周期为 30 h, 高水位时间为 10 h.

本文采用 C++ 编程语言在 Visual Studio 2022 软件上编写算法程序, 同时, 结合商业求解器 CPLEX12.8 求解模型, 所有测试算例均在配置为 Windows 11 @ 3.84 GHz (4 个处理器) 和 15.89 GB 内存的计算机上独立运行, 每个算例均独立运行 10 次取平均值. 所有算例采用统一编号, 如 3D-1 中, 3 表示船舶数量为 3, 1 表示在规模为 3 下的第 1 次实验.

#### 3.2 小规模仿真算例实验分析

商业求解器 CPLEX 与 AVNS 的运行结果如表 4 所示. 其中: UB 和 LB 分别为 CPLEX 求解结果的上界和下界;  $Obj_A$  为 AVNS 求解 10 次的平均值; CPU 为程序平均运行时间 (单位: s);  $gap_1(\%)$  表示 CPLEX 能够求得最优解时 AVNS 与 CPLEX 解的差值百分比, 其计算方式为  $gap_1(\%) = (Obj_A - UB)/UB$ ,  $gap_2(\%)$  表示 CPLEX 得到解的上界和下界不收敛时 AVNS 与 CPLEX 解的差值百分比, 其计算方式为  $gap_2(\%) = (Obj_A - LB)/LB$ ,  $T_C/T_A$  为 CPLEX 运行时间与 AVNS 运行时间的比值.

由表 4 得出, 当算例规模为 9 以下时, AVNS 获得的满意解与 CPLEX 获得的最优解平均偏差为 3.24%. 当算例规模达到 12 时, CPLEX 仍然能够求出最优解, 但是平均耗时是 AVNS 的 192 倍. 当算例规模达到 15 时, CPLEX 已无法求出最优解, 而 AVNS 可以在 4 s 内得到近似最优解. 由此可得出, 针对小规模算例, AVNS 可在较短时间内得到近似最优解或较 CPLEX 更高质量的解.

为进一步验证所提出算法求解模型的性能, 对 21 艘船舶的算例进行具体分析. 设置  $V_{10}$  和  $V_{13}$  为第 1 类异类船型,  $V_5$  和  $V_{17}$  为第 2 类异类船型,  $V_{16}$  和  $V_{20}$  为第 3 类异类船型, AVNS 运行结果如表 5 所示. 表 5 结果显示:  $V_2$ 、 $V_7$ 、 $V_9$  和  $V_{19}$  到港时间不在高水位的时间窗口内, 等待至时间点 30 开始靠泊,  $V_1$  到港时间不在高水位的时间窗口内, 等待至时间点

表3 船舶信息范围

船舶规模	$l_i$	$c_i$	$q_i^{min}$	$q_i^{max}$
小型	$U(12, 25]$	$U(10, 20]$	1	2
中型	$U(25, 37]$	$U(20, 60]$	2	4
大型	$U(37, 50]$	$U(60, 85]$	4	6

表4 小规模算例测试实验结果

规模	实验	CPLEX			AVNS		gap <sub>1</sub> /%	gap <sub>2</sub> /%	T <sub>C</sub> /T <sub>A</sub>
		UB	LB	CPU(S)	Obj	CPU(S)			
3	3D-1	145 827	145 827	0.47	145 827	0.03	-	0.00	15.67
	3D-2	84 828	84 828	0.18	84 828	0.26	-	0.00	0.69
	3D-3	170 712	170 712	0.03	170 712	0.18	-	0.00	0.17
6	6D-1	315 912	315 912	0.09	321 494	0.05	-	1.77	1.80
	6D-2	340 680	340 680	0.18	352 321	0.63	-	3.42	0.29
	6D-3	278 097	278 097	0.11	294 865	1.07	-	6.03	0.10
9	9D-1	500 988	500 988	7.54	556 264	1.52	-	11.03	4.96
	9D-2	605 584	605 584	5.70	642 546	1.59	-	6.10	3.58
	9D-3	509 640	509 640	2.39	534 544	1.57	-	4.89	1.52
12	12D-1	653 904	653 904	132.60	655 047	2.49	-	0.17	53.25
	12D-2	644 664	644 664	186.20	661 918	2.96	-	2.68	62.91
	12D-3	619 824	619 824	982.68	637 374	2.14	-	2.83	459.20
15	15D-1	812 919	562 919	1 563.83	615 843	3.24	-24.24	-	482.66
	15D-2	863 681	362 145	6 942.15	427 569	3.93	-50.49	-	1 766.45
	15D-3	936 327	430 970	3 721.09	604 420	2.84	-35.45	-	1 310.24
平均值				903.02		1.63		3.24	277.57

表5 21艘船舶的近似最优分配方案

船舶	靠泊时间	离泊时间	靠泊位置	岸桥组合	靠泊延误成本	靠泊偏离成本	离泊延误成本	总成本
1	60.00	90	537.26	(7, 8)	40 464	0	131 184	171 648
2	30.00	60	581.79	(7, 8)	14 976	0	84 744	99 720
3	90.00	120	744.60	(9, 10)	35 328	0	123 216	158 544
4	60.00	90	842.06	(9, 10)	32 400	0	124 080	156 480
5	152.06	180	301.72	(2, 3)	0	6 081	36 624	42 705
6	60.00	90	456.70	(5, 6)	17 064	0	93 504	110 568
7	30.00	60	721.99	(9, 10)	22 968	0	98 736	121 704
8	183.01	210	254.38	(1, 2)	0	0	48 816	48 816
9	30.00	60	167.86	(5, 6)	12 648	0	82 128	94 776
10	150.00	180	22.01	(1)	16 008	0	84 432	100 440
11	159.61	180	862.00	(4, 5, 6)	0	0	35 232	35 232
12	180.00	210	344.60	(3, 4)	0	6 201	49 944	56 145
13	213.28	240	64.81	(1, 2)	29 112	0	117 408	146 520
14	210.00	240	531.36	(7, 8, 9, 10)	26 676	0	111 912	138 588
15	90.00	120	703.12	(5, 6, 7, 8)	56 172	2 238	149 352	207 762
16	90.00	120	675.60	(1, 2, 3, 4)	58 512	0	171 384	229 896
17	215.86	240	315.29	(3, 4, 5, 6)	47 064	0	151 440	198 504
18	60.00	90	61.44	(1, 2, 3, 4)	34 476	0	107 976	142 452
19	30.00	60	60.90	(1, 2, 3, 4)	14 700	0	76 296	90 996
20	240.00	270	635.19	(1, 2, 3, 4, 5)	13 584	0	73 416	87 000
21	180.00	210	687.82	(5, 6, 7, 8, 9, 10)	9 720	0	66 072	75 792

60 开始靠泊, 得出结论若船舶  $V_i$  的到达时间  $a_i$  不在高水位区间, 则需要等待, 船舶的装卸完成时间点不在潮汐窗口的高水位区间内, 也需要等待离泊. 3 类异类船型均停靠在  $(d_n, d'_n)$  范围内. 表明模型中异类船舶在指定区域内靠泊、靠离泊位考虑潮汐约束在 AVNS 中均得到实现.

为了更直观地对 AVNS 运行结果进行阐述, 将表 5 中的结果映射到一个二维时间-泊位图中, 如图 5 所示. 3 类异类船型分别用黑色、深灰色和浅灰色表示, 普通船型用白色表示. 图中任意 2 艘船舶在空间上均不重叠, 同一时间区间作业的船舶, 分配的岸

桥编号互不交叉, 如  $V_{19}$ 、 $V_9$ 、 $V_2$  和  $V_7$  分配的岸桥分别为 (1, 2, 3, 4)、(5, 6)、(7, 8) 和 (9, 10). 表明了动态时间-泊位-岸桥表和岸桥编号有向无环图解决船舶间时空不能重叠和岸桥不可交叉的复杂约束的有效性. 异类船型靠泊在指定停靠区域, 验证了模型对异类船舶约束的有效性.

### 3.3 大规模仿真算例实验分析

在第 3.2 节小规模算例中比较了 CPLEX 与 AVNS 运行结果的差异. 为了更好地验证 AVNS 的求解能力, 本节将同等规模下 AVNS 与 VND 求解目标函数值和运行时间进行对比, 用以测试 AVNS

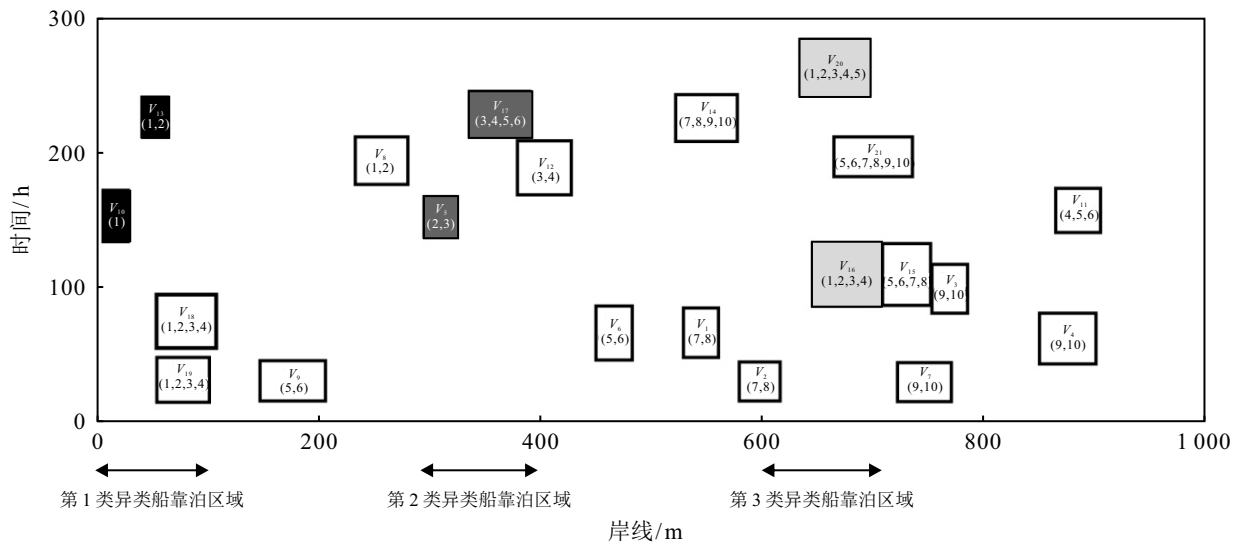


图5 21艘船舶的近似最优分配方案时间-泊位图

表6 大规模仿真算例实验结果分析

规模	实验	初始解		VND		AVNS		gap <sub>1</sub> /%
		Obj	CPU(S)	Obj <sub>V</sub>	CPU(S)	Obj <sub>A</sub>	CPU(S)	
30	30D-1	4281840	0.046	3079001	6.787	1973229	18.794	-35.913
	30D-2	4018370	0.043	2988531	10.681	2062577	11.694	-30.984
	30D-3	5383290	0.079	4437877	12.780	3194129	15.535	-28.026
40	40D-1	10278100	0.072	6788147	8.570	3681020	17.951	-45.773
	40D-2	7811040	0.073	5296545	9.274	2193291	19.290	-58.590
	40D-3	10740300	0.084	5893863	13.640	3544738	20.991	-39.857
50	50D-1	21398900	0.098	16319875	16.713	10137051	35.496	-37.885
	50D-2	17316900	0.091	11510025	14.266	5787629	28.439	-49.717
	50D-3	21252900	0.108	16772059	11.484	7441374	26.079	-55.632
60	60D-1	33279600	0.126	24690923	17.565	14119508	41.063	-42.815
	60D-2	32921000	0.122	23392139	9.673	13607433	33.892	-41.829
	60D-3	31653600	0.134	23463270	5.416	18738197	26.260	-20.138
70	70D-1	47777300	0.156	21895407	25.209	16480966	53.863	-24.729
	70D-2	53585100	0.178	26383851	17.667	20105143	21.006	-23.798
	70D-3	48435700	0.161	22496331	26.012	9301385	42.584	-58.654
80	80D-1	68739500	0.221	44736931	10.080	23239864	30.088	-48.052
	80D-2	64912000	0.197	46325424	14.798	27846375	34.904	-39.890
	80D-3	60516700	0.205	43411424	27.018	16108065	62.387	-62.894
90	90D-1	80728300	0.233	41348059	15.264	32876660	25.273	-20.488
	90D-2	88153200	0.250	55619409	20.662	40416105	32.741	-27.335
	90D-3	80476500	0.244	57811836	10.720	34935175	29.764	-39.571
100	100D-1	102441000	0.273	69582154	25.754	46217552	50.970	-33.578
	100D-2	117717000	0.291	56348932	34.460	39427653	54.652	-30.029
	100D-3	117658000	0.313	73134823	32.886	49534216	70.636	-32.270
平均值		47144839	0.158	29321952	16.557	18457056	33.514	-38.685

在大规模算例下的性能,如表6所示.其中:gap<sub>1</sub>(%)表示同等规模下AVNS与VND解的差值百分比,其计算方式为gap<sub>1</sub>(%)=(Obj<sub>A</sub>-Obj<sub>V</sub>)/Obj<sub>V</sub>.由表6运行结果可以得出:AVNS和VND相比于初始解均取得了较好结果;AVNS相比于VND,优化率平均提升了38.69%.两种算法求解模型的目标函数和CPU运行时变化趋势如图6和图7所示.当问题

规模为30时,两种算法与初始解目标函数差别不大,但是随着规模的增加,AVNS的优势逐步明显.由AVNS得到24个解决方案全部不劣于VND与初始解得到的方案,验证了所设计自适应邻域结构选择机制和自适应扰动算子选择机制的有效性.由图7可见,在运行时间方面,AVNS是最耗时的,但是求解时间没有随着规模的增加而显著增加.

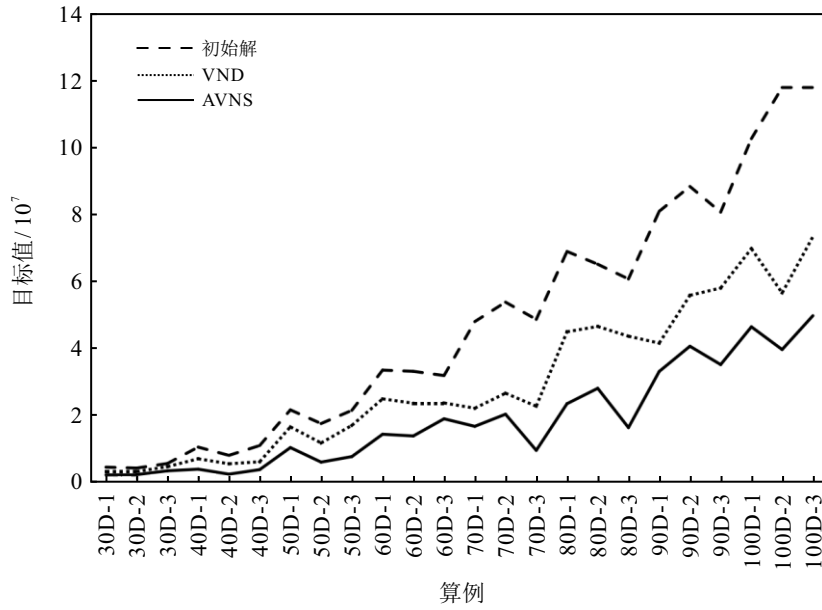


图6 大规模算例两种算法与初始解目标函数对比

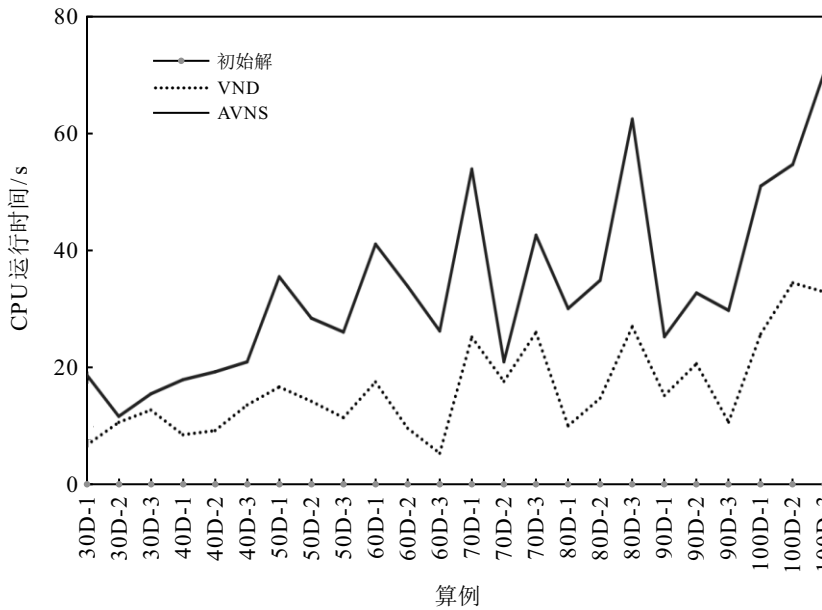


图7 大规模算例两种算法与初始解 CPU 运行时间对比

整体来看, AVNS 相比于 VND 在优化效果上有显著的优势, 且这种优势随着算例规模的增大而增大. 这是因为 AVNS 算法的自适应邻域结构选择和扰动算子可以有效地利用当前可行解, 对船舶的优化顺序进行重新排列, 能够较好地避免局部最优, 从而产生更好的可行解. 随着问题规模的增加, 自适应复杂度越来越高, 运行时间也越来越长, 但是 AVNS 在超大规模算例 100 艘船中用时不超过 2 min, 能够在短时间内获得高质量的近似最优解. 结果表明 AVNS 在计算能力和寻优能力上表现优于 VND.

### 4 结论

本文研究了潮汐影响下考虑异类船舶的动态泊位与码头起重机分配优化问题, 根据动态泊位分配

问题特性建立了以船舶到达等待、泊位偏差和离泊延迟成本三者的和最小为目标的混合整数线性规划模型, 根据对船舶的动态到达时间不同, 提出了动态时间-泊位-岸桥列表用以避免船舶的时空重叠, 有向无环图的方法解决了岸桥不可交叉的约束, 同时, 引入了自适应邻域结构选择机制和自适应选择扰动算子的思想, 设计了自适应邻域搜索算法来有效求解模型. 最后, 基于福州江阴港实例的大量数值实验结果表明, AVNS 能够有效解决动态泊位与码头起重机分配优化问题, 与现有方法相比可获得高质量的解决方案. 但是, 本文还有一定的不足, 未来可从以下几方面开展研究:

- 1) 在本研究的基础上考虑岸桥起重机操作的中

断、船舶到达时间和操作人员的不确定性的现实问题;

2) 对船舶航速进行优化, 避免船舶集中到港, 减少船舶等待时间以节约船舶延误成本;

3) 考虑现实作业中岸桥移动时间和碳排放<sup>[27]</sup>建立模型;

4) 开发 Benders 分解与 Tabu search 算法相结合的更高效算法<sup>[28-29]</sup>进行求解此类问题也是下一步需要深入研究的内容.

#### 参考文献 (References)

- [1] Bierwirth C, Meisel F. A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 202(3): 615-627.
- [2] Imai A, Nishimura E, Papadimitriou S. Berth allocation with service priority[J]. *Transportation Research — Part B: Methodological*, 2003, 37(5): 437-457.
- [3] Lim A. The berth planning problem[J]. *Operations Research Letters*, 1998, 22(2/3): 105-110.
- [4] Imai A, Sun X, Nishimura E, et al. Berth allocation in a container port: Using a continuous location space approach[J]. *Transportation Research — Part B: Methodological*, 2005, 39(3): 199-221.
- [5] Park Y M, Kim K H. A scheduling method for berth and quay cranes[J]. *OR Spectrum*, 2003, 25(1): 1-23.
- [6] Türkoğulları Y B, Taşkın Z C, Aras N, et al. Optimal berth allocation and time-invariant quay crane assignment in container terminals[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 235(1): 88-101.
- [7] Cheimanoff N, Fontane F, Kitri M N, et al. Exact and heuristic methods for the integrated berth allocation and specific time-invariant quay crane assignment problems[J]. *Computers & Operations Research*, 2022, 141: 105695.
- [8] Ji B, Tang M, Wu Z Y, et al. Hybrid rolling-horizon optimization for berth allocation and quay crane assignment with unscheduled vessels[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2022, 54: 101733.
- [9] 黄涵, 季彬. 多目标约束处理方法求解泊位岸桥联合分配问题[J]. *控制理论与应用*, 2023, 40(4): 761-771. (Huang H, Ji B. Multi-objective constraint handling method for solving berth allocation and quay crane assignment problem[J]. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(4): 761-771.)
- [10] Agra A, Oliveira M. MIP approaches for the integrated berth allocation and quay crane assignment and scheduling problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 264(1): 138-148.
- [11] 乐美龙, 刘秀玲. 基于泊位偏好与岸桥干扰的泊位和岸桥分配[J]. *运筹与管理*, 2014, 23(1): 90-100. (Le M L, Liu X L. Berth and quay crane allocation considering berth preference and quay crane interference[J]. *Operations Research and Management Science*, 2014, 23(1): 90-100.)
- [12] Correcher J F, Perea F, Alvarez-Valdes R. The berth allocation and quay crane assignment problem with crane travel and setup times[J]. *Computers & Operations Research*, 2024, 162: 106468.
- [13] 周鹏飞, 方波. 动态环境下集装箱码头堆场出口箱箱位分配建模与算法研究[J]. *控制与决策*, 2011, 26(10): 1571-1576. (Zhou P F, Fang B. Modeling and algorithm research on export container slots allocation under dynamic environments[J]. *Control and Decision*, 2011, 26(10): 1571-1576.)
- [14] Luo Y D, Liang X L, Zhang Y, et al. Energy-aware integrated scheduling for quay crane and IGV in automated container terminal[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(3): 376.
- [15] 杨华龙, 李德昌, 郑建风, 等. 考虑船舶航速偏离的集装箱班轮运输货运收益鲁棒优化[J]. *中国管理科学*, 2023, 31(4): 151-160. (Yang H L, Li D C, Zheng J F, et al. Freight revenue robust optimization for container liner shipping considering vessel sailing speed deviation[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2023, 31(4): 151-160.)
- [16] 郑红星, 刘保利, 匡海波, 等. 考虑实时预倒箱的出口箱堆场多场桥调度优化[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(9): 85-96. (Zheng H X, Liu B L, Kuang H B, et al. Multi-yard cranes scheduling optimization of export container yard considering real-time pre-marshaling[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(9): 85-96.)
- [17] 林爽, 张依恋, 丁宗贺, 等. 基于改进集员滤波的港口自动跨运车状态估计方法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(1): 129-136. (Lin S, Zhang Y L, Ding Z H, et al. State estimation of automated straddle carriers via improved setmembership filtering approach[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(1): 129-136.)
- [18] 蔡佳芯, 李宇博, 靳志宏, 等. 基于  $(D, U)$  控制策略的港口群空箱存储与调运联合优化[J]. *控制与决策*, 2022, 37(11): 3012-3022. (Cai J X, Li Y B, Jin Z H, et al. Inventory-repositioning integrated optimization of empty container in port group based on  $(D, U)$  control strategy[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(11): 3012-3022.)
- [19] 郑红星, 张敬涛, 刘保利. 考虑潮汐影响的连续泊位和岸桥集成调度[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(10): 2599-2611. (Zheng H X, Zhang J T, Liu B L. Integrated continuous berth allocation and quay crane scheduling under tidal influence at container terminal[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(10): 2599-2611.)
- [20] Du Y Q, Chen Q S, Lam J S L, et al. Modeling the impacts of tides and the virtual arrival policy in berth allocation[J]. *Transportation Science*, 2015, 49(4): 939-956.
- [21] 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.

- [22] Sheikholeslami A, Ilati R. A sample average approximation approach to the berth allocation problem with uncertain tides[J]. *Engineering Optimization*, 2018, 50(10): 1772-1788.
- [23] Unsal O, Oguz C. An exact algorithm for integrated planning of operations in dry bulk terminals[J]. *Transportation Research — Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 126: 103-121.
- [24] Correcher J, Alvarez R. Variable neighborhood search: Principles and applications[J]. *Expert Systems with Applications*, 2017, 89: 112-128.
- [25] Pierre H, Nenad M A. A biased random-key genetic algorithm for the time-invariant berth allocation and quay crane assignment problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 449-467.
- [26] Imai A, Nishimura E, Papadimitriou S. The dynamic berth allocation problem for a container port[J]. *Transportation Research — Part B: Methodological*, 2001, 35(4): 401-417.
- [27] 李新安, 何梦园. 我国制造企业数字化转型的碳减排效应研究[J]. *创新科技*, 2024, 24(10): 72-90.  
(Li X A, He M Y. Research on carbon emission reduction effect of digital transformation of manufacturing enterprises in China[J]. *Innovation Science and Technology*, 2024, 24(10): 72-90.)
- [28] 吴鹏, 颜宝卿. 基于双层规划的自动卡车运输专用网络设计优化[J]. *控制与决策*, 2023, 38(9): 2691-2700.  
(Wu P, Yan B Q. Optimal design of a dedicated network for automated truck transportation based on bi-level programming[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(9): 2691-2700.)
- [29] 翁武燕, 储诚斌, 吴鹏. 极小化加权完工时间的多资源工序的资源分配问题[J]. *控制与决策*, 2024, 39(8): 2765-2772.  
(Weng W Y, Chu C B, Wu P. Resource allocation to minimize the weighted completion time with multi-resource operations[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(8): 2765-2772.)

### 作者简介

吴鹏 (1987-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为运筹与优化管理、智能交通管理, E-mail: [wupeng88857@126.com](mailto:wupeng88857@126.com);

朱昆峰 (1994-), 男, 硕士生, 主要研究方向为运筹与优化管理、港口调度, E-mail: [zhukunfeng24@126.com](mailto:zhukunfeng24@126.com).