

潮汐影响下基于长方体排列的船舶调度问题研究

文捷¹, 刘昊雨², 王永才², 李春旭^{1,2}, 苏建光³, 张蕾³

(1.交通运输部水运科学研究院, 北京 100088, 2.中国人民大学, 信息学院, 北京 100872; 3. 青岛港国际股份有限公司, 青岛, 266011)

摘 要: 大型港口的泊位分配与船舶调度是决定港口吞吐量和运行效率的关键问题。船舶在选择泊位停靠时受泊位空闲时间、泊位长度、泊位实时水深等多方面的因素影响, 优化目的是缩短船舶的平均等待时间或总等待时间。本文研究面向青岛港的泊位分配与船舶调度问题, 在考虑潮汐影响下, 提出长方体排列问题模型, 描述潮汐影响下船舶有不同吃水深度、不同类型、不同服务时间需求的船舶调度问题。在所提模型基础上, 设计了两阶段贪心算法和船舶优先级与泊位分配的二维遗传算法, 通过仿真数据和青岛港的真实数据验证了该方法的有效性。

关键词: 泊位分配与船舶调度; 潮汐影响; 长方体排列; 两阶段贪心算法; 遗传算法

中图分类号: **文献标识码:** **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-4653.2022.03.001

Research on ship berth scheduling based on rectangular cuboid packing considering tidal effects

Jie Wen¹, Haoyu Liu², Yongcai Wang², Chunxu L.^{1,2}, Jianguang Su³, Lei Zhang³

(1.China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China; 2. School of Information, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 3. Qingdao Port International Co., Ltd., Qingdao, 266011, China)

Abstract: Berth allocation and ship scheduling in large ports are key issues that determine port throughput and operational efficiency. When a ship chooses a berth to dock, it is affected by many aspects such as berth idle time, berth length, and real-time water depth of the berth. The purpose of optimization is to study the berth allocation and ship dispatching problems of Qingdao Port. Under the influence of tides, a cuboid arrangement is proposed. The problem model describes the different draft depths, different types, and different service time requirements of ships under the influence of tides. Based on the proposed model, a two-level greedy algorithm and a two-dimensional genetic algorithm for ship priority and berth allocation are designed. Through simulation Data and real data from Qingdao Port verified the effectiveness of this method.

Key words: berth allocation and ship scheduling; tidal effects; cuboid arrangement; two-stage greedy algorithm; genetic algorithm

在大型港口中, 为计划入港的船舶分配泊位, 减少船舶的等待时间、提高港口的服务效率是重要问题[1][2][3]。为提高港口利用率、减少船舶滞留时间和拥堵、节省船舶的燃料及运营成本, 实现自动化、高效的船舶调度, 使得所有船舶的总等待时间最小是提升港口运行效率的关键。

在港口进行船舶调度与泊位分配时, 已知信息如下: (1) 港口的潮汐时刻表; (2)

港口各码头泊位的实时占用状态; (3) 在未来时间窗口(如7天)内, 预期到达锚地的船舶类型、到达时间、船舶长度、吃水深度、期望靠泊泊位类型等。船舶在选择泊位时, 会受到船舶长度、泊位占用状态等条件约束。此外, 对港口内的大型船舶, 水深是决定其是否能够进出泊位的重要因素。在涨潮时, 航道水位高, 此时大型船舶才能乘潮出入港。潮汐会周期性(通常为12小时)地影响泊

收稿日期: 2011-01-01

基金项目: 国家重点研发计划, 2020YFB171080

作者简介: 文捷(1987-), 男, 高级工程师, 研究方向为智能航运。Email: wenjie@wti.ac.cn

通信作者: 刘昊雨(2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向为优化算法。Email: hylu2187@ruc.edu.cn

引用格式: 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, 20xx, xx(x): xxx-xxx. WEN J, LIU H Y, WANG Y C, et al. Research on ship berth scheduling based on rectangular cuboid packing considering tidal effects [J]. Navigation of China, 20xx, xx(x): xxx-xxx. (in Chinese)

位水深,通过潮汐时刻表可以准确知道各时刻泊位的水深情况。

综上所述,本文研究考虑潮汐影响的船舶调度问题。在已知未来一段时间内的船舶的靠泊需求、各泊位实时状态的情况下,考虑潮汐、船舶长度、吃水深度等约束,通过合理调度船舶的靠泊方案,最终使得所有船舶的总等待时间最小。

1 引言

船舶泊位调度问题是港口物流管理中的一个关键问题,涉及到如船舶到达时间、靠泊时间、泊位资源、水深变化等多个方面。在过去的几十年里,许多学者和研究人员已经对船舶泊位调度问题进行了广泛的研究。现有的研究方法根据问题模型的差异主要可以分为两类。

第一类方法将船舶泊位调度问题建模为混合整数规划模型,然后通过求最优解的方式得到最佳调度方案。这类算法将不同方面的决策变量和约束条件整合到统一的数学模型中,以实现泊位资源的最优分配和调度安排。例如,文献[4]将问题建模为整数线性规划,并使用子梯度优化技术求解离散化模型的拉格朗日松弛模型。文献[5]考虑等待时间惩罚、迟到惩罚、处理成本以及船舶提前完成服务的利益,提出了三种计算高效的混合整数线性规划模型。文献[6]则建立了 0-1 整数规划模型,并将模型通过 Dantzig-Wolfe 分解分解为主问题模型和子问题模型,最终提出精确型分支定价算法。这些方法往往在复杂的实际环境中表现出局限性。

第二类方法为避免混合整数规划求解的高复杂度,利用遗传算法、贪婪算法等启发式算法进行求解,可以在短时间内得到较优解。在考虑离散泊位时,文献[7]提出了一种自适应岛屿进化算法,旨在最小化船舶的总加权服务成本。文献[8]设计改进禁忌搜索算法,同时使用长短禁忌表提高算法效率。在考虑连续泊位时,文献[9]将问题建模为二维装箱模型,并设计了一种简单的启发式算法进行求解。文献[10]建立连续泊位-岸桥分配的非线性数学规划模型,通过设计针对船舶泊位调度问题的贪心算法生成相应的泊位调度计划。

此外,为处理船舶到港的不确定性,文献[11]建立了基于场景的两阶段随机规划模型,将时间缓冲区的自适应搜索过程适应到粒子群优化算法。文献[12]将问题建立为两阶段鲁棒混合整数模型,利用分解算法将问题分解为主问题和分离问题进行求解。文献

[13]则同时考虑泊位和岸桥分配,提出基于泊位偏好与服务优先级的两阶段调度算法。

上述研究工作尚缺少对如下两方面关键信息的准确建模和充分利用:一是缺少准确的数学模型来描述潮汐影响泊位水深后,造成可停靠泊位可选集合的实时变化;二是缺少由于船舶尺寸限制、泊位水深限制的联合约束导致的可停靠集合实时变化的准确模型。尽管有研究[14][15]基于船舶长度与作业时间限制提出采用二维长方形来建模船舶的停靠需求,但文献[14]没有考虑潮汐和水深的影响,文献[15]简单将潮汐分为两种状态,没有对其周期性变化进行具体建模,且两者均未考虑不同泊位容纳能力的差异。

因此,针对潮汐对水深变化的影响,本文提出基于长方体排列的数学模型,将泊位时间描述为长方体容器的长度、泊位长度描述为容器宽度、水深描述为容器高度,之后将不同尺寸、不同吃水深度、不同服务时间需求的船舶描述为待排列的三维长方体,将泊位不冲突的约束描述为长方体空间排列不重叠,从而给出了船舶调度与泊位分配的直观排列模型。基于上述长方体排列模型,本文首先提出两阶段贪心算法,将调度问题划分为先排船舶优先级,再分配泊位两个阶段。第一阶段根据到达时间、作业时间、船舶长度、吃水深度采用四种贪心策略设计算法,第二阶段采用总等待时间最短的贪心策略。本文进一步考虑船舶调度优先级与泊位分配的联合优化,提出船舶优先级与泊位分配的二维遗传算法。

2 问题模型

2.1 长方体排列模型

本文提出基于长方体排列的优化模型。假设在使用长方体排列模型前,已根据船舶类型(如干散货船,油船,集装箱船)筛选相应的可用泊位。每艘船的停靠需求用一个长方体描述,分别将船舶 i 所需的靠泊时长、船舶长度、吃水深度,对应为长方体的长、宽、高,用 p_i 、 l_i 、 d_i 表示。船舶 i 的到达时间和离开时间分别用 at_i 、 lt_i 。同时,将每个泊位资源用一个长方体容器描述,泊位 j 的空闲时间表示为长方体容器可用空间的长度,泊位长度表示为长方体容器的宽度 b_j ,泊位容器的深度 h_j 是泊位初始水深度的基础上叠加上海潮的影响之后的水深,随潮汐周期性变化。

2.2 决策变量、目标函数与约束条件

基于上述长方体排列模型,我们定义如

下决策变量 x_{ijk} 和 t_i :

$x_{ijk} = \{0,1\}$ 表示船舶泊位选择决策,
 $x_{ijk} = 1$ 表示船舶 i 是停靠在泊位 j 的第 k 艘
 船; $t_i \in [0, \infty)$ 表示船舶 i 的靠泊时刻。

基于上述决策变量,每艘船的等待时间
 可以计算为: $lt_i - at_i - p_i$ 。问题的优化目标
 为船舶的总等待时间最短。

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (lt_i - at_i - p_i) \cdot x_{ijk} \quad (1)$$

其中 n 为船舶数量, m 为泊位数量。

为表示约束条件,定义映射函数 $s(j,k)$
 代表泊位 j 上第 k 艘停靠的船舶编号。问题的
 约束条件为:

$$x_{ijk} \cdot l_i \leq b_j, \forall i, k \in [1, n], j \in [1, m], \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n x_{ijk} = 1, \forall i \in [1, n] \quad (3)$$

$$t_{s(j,k)} \geq lt_{s(j,k-1)}, \forall j \in [1, m], k \in [1, n] \quad (4)$$

$$t_{s(j,k)} \geq at_{s(j,k)}, \forall j \in [1, m], k \in [1, n] \quad (5)$$

$$x_{ijk} \cdot d_i \leq h_j^{l_i}, \forall i, k \in [1, n], j \in [1, m], \quad (6)$$

$$x_{ijk} \cdot d_i \leq h_j^{h_i}, \forall i, k \in [1, n], j \in [1, m], \quad (7)$$

式(1)为目标函数,船舶等待时间由入
 港与出港两个过程产生,受到前船离港时间与
 潮汐的影响。式(2)保证停靠泊位长度不
 小于船长度;式(3)表示每个船舶都必须安
 排停靠,且只占一个泊位;式(4)确保同一
 个泊位停靠船只时间上不重叠;式(5)表示
 船舶的停靠时间晚于到达时间;式(6)表明
 船舶驶入泊位时刻满足船舶吃水深度要求。
 其中 $h_j^{l_i}$ 表示在船舶 i 在其驶入时刻 t_i 泊位
 j 的水深。式(7)则表明船舶驶出泊位时刻
 满足其吃水深度要求。

3 两阶段贪心的船舶调度算法

贪心算法在解决复杂优化问题时,虽然
 一般难以给出最优解,但可以给出较优的可
 行解,并且通过对比不同贪心规则算法的运
 行效果,可以分析出问题的关键点。针对船
 舶泊位调度的长方体排列模型,本文设计
 了两阶段贪心的船舶调度算法(TGA),第一
 阶段根据某种贪心规则(具体见 3.1 节)决
 定安排船舶的顺序,第二阶段根据各泊位当
 前占用情况,将待安排的船舶以使其等待时
 间最短的贪心规则安排到某一泊位。

3.1 第一阶段贪心规则

根据船舶调度实际运行时的一些规则,
 本文考察并设计了四种船舶排列的贪心规
 则:

1) 先来先安排算法(TGA-A)按照船舶
 到达的先后顺序为优先级排列船舶,保证了
 简单性和公平性,但可能受到长时间留港作
 业船舶的影响,导致整体等待时间较长;

2) 短作业优先算法(TGA-S)是针对先
 来先安排算法的缺点设计出的,优先调度作
 业时间最短的船舶,提高吞吐量。

3) 吃水深度优先算法(TGA-D)在实际
 中是被广泛使用的。考虑到潮汐的影响,吃
 水深度大的船舶更易受水位制约,错过高潮
 需长时间等待,因此常会优先安排这类船舶;

4) 船舶长度优先算法(TGA-L)是考虑
 到港口泊位的长度限制,长度大的船受泊位
 制约更加严重,所以优先安排大船,避免小
 船占用大船泊位。

3.2 第二阶段贪心规则

第一阶段基于贪心机制给出 n 艘船进行
 排列的优先顺序。第二阶段我们仍然基于贪
 心机制提出一种船舶泊位选择方法。

步骤 1 我们按照第一阶段的优先原则,
 将船舶进行排序后,加入队列。

步骤 2 对于当前待排列船舶 u , 找到能
 够容纳 u 且使 u 等待时间最短的泊位,将 u
 安排入该泊位,并将 u 从队列中删除。

步骤 3 遍历队列中所有船舶,执行步骤
 2),直到队列为空。

其中,如何找到能够容纳 u 且使其等待
 时间最短的泊位是问题的关键。本文对式
 (6)、(7)约束考虑潮汐影响,可以将水深
 动态建模为如下余弦函数,

$$h_j^t = W_j - (u_h / 2) \times [1 - \cos(2\pi * \Delta t / T_{tidal})] \quad (8)$$

式(8)中 Δt 为任意 t 时刻到高潮时刻的
 时间间隔, W_j 为高潮时 j 泊位水位, u_h 为
 高低潮时水位差, T_{tidal} 为潮汐变化周期。

算法 1 两阶段贪心调度算法

输入 船舶有序集合 S , 泊位集合 P
输出 调度方案 X , 总等待时间 T_w

```

1.  $T_w = 0, X = \emptyset$ 
2. 基于第一阶段规则对船舶排序并加入队列  $Q$ 
3. for ship  $i$  in  $Q$  do
4.   pop  $i$  from  $Q$ 
5.   for  $j$  in  $P$  do
6.     if ( $b_j > l_i$  and  $W_j \times 0.8 > d_i$ )
7.        $P_{available} \cdot add(j)$ 
8.   end for
9.   if ( $P_{available} \neq \emptyset$ ):
10.     $j, t_w^i = GSP(i, P_{available})$  // 见算法 2
11.     $X.add(\{i, j\})$ 
12.     $T_w += t_w^i$ 
13. end for
```

算法 1 首先按找启发式规则对船舶进行
 排序并依次加入队列(步骤 2),当队列不

为空时,取出队列中第一个船舶(步骤 3~4)。遍历所有泊位,判断当前船舶是否满足泊位的限制条件,包括泊位长度限制和水深限制,为保证船舶有充足时间驶入泊位,船舶吃水深度不能超过高潮时泊位水深的 0.8 倍。若满足,将泊位加入泊位候选队列(步骤 5~8)。如果泊位候选队列不为空,从中选择等待时间最短的泊位驶入,并计算等待时间,更新泊位可用信息(步骤 9~13)。

其中, GSP (Greedy Select Port) 是第二阶段的贪心算法,它基于当前船舶等待时间最短的思想选择泊位。这里的等待时间包括船舶因前船和潮汐影响等待驶入泊位的时间,也包括受潮汐影响驶出泊位的等待时间。算法 2 遍历所有满足长度及水深约束的泊位,遍历过程中获取泊位的空闲时间段,并进一步判断此时间段内船舶是否可以安全靠泊。

算法 2 GSP

输入 船舶 i , 可选泊位集合 $P_{available}$
输出 泊位 j , 船舶 i 的等待时间 t_w^i

1. $t_w^i = \infty$
2. for k in $P_{available}$ do
3. T_k^{free} = 泊位 k 的空闲时间段集合
3. for $[t_s^{free}, t_e^{free}]$ in T_k^{free} do
4. $t_{enter} = \max(r_i, t_s^{free})$
5. while $(h_k^{t_{enter}} < d_i)$
6. $t_{enter} += 30$ // 延后 30 分钟入港
7. $t_{leave} = t_{enter} + p_i$
8. while $(h_k^{t_{leave}} < d_i)$
9. $t_{leave} += 30$ // 延后 30 分钟出港
10. if $(t_{leave} > t_e^{free})$ // 超出空闲时间
11. continue // 此调度不合理
12. if $(t_w^i > t_{leave} - r_i - p_i)$ // 更新最优解
13. $t_w^i = t_{leave} - r_i - p_i$, $j = k$
14. end for
15. end for
16. $T_j^{free}.remove([t_{enter}, t_{leave}])$ // 更新泊位状态

具体而言,首先确定船舶驶入的时间为空闲时间段起点与船舶到达时间的最大值(步骤 4),然后判断当前时刻受潮汐影响是否可以驶入。否,则推迟 30 分钟,重复此过程直到可以驶入(步骤 5~6)。同样地,在船舶完成作业后,出港时需要判断水位条件。否,则每次推迟 30 分钟直至满足条件(步骤 7~9)。然后判断当前调度方案是否满足空闲时间要求(步骤 8)。船的等待时间即为等待驶入与等待驶出时间的总和。在遍历过程中,找到使得当前船舶等待时间最短的泊位,将其作为结果输出,并更新其可用状态信息(步骤 12~16)。

4 船舶优先级与泊位分配的二维遗传算法

两阶段贪心算法可以在船舶较少时给出满意的调度方案,但因其追求局部最优的限制,当船舶较多时很难提供合理的方案。对此,我们可以在船舶优先级和泊位分配两个方面进行更为广泛的搜索,提升船舶调度算法的性能。我们设计了船舶优先级与泊位分配的二维遗传算法(Gen-2D),以扩大决策搜索空间,解决两阶段贪心算法的不足。图 1 为优先级与泊位分配的二维遗传算法的具体流程。

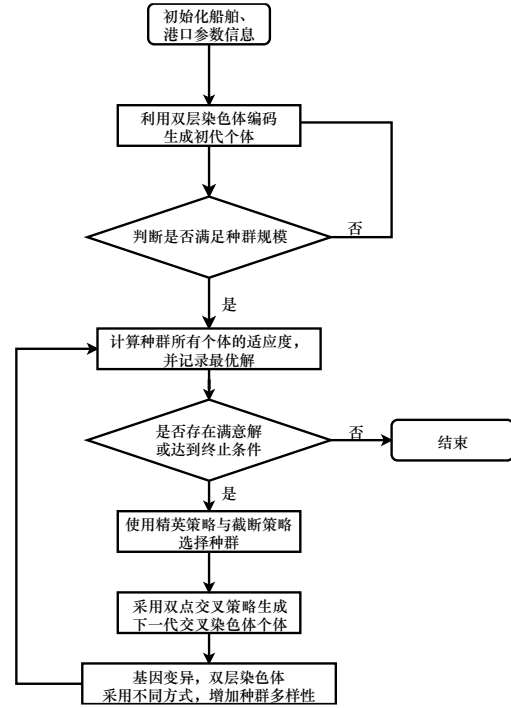


图 1 遗传算法流程图

Fig.1 Genetic Algorithm Flowchart

4.1 染色体编码与初始种群生成

针对本文中的船舶调度与泊位分配问题,我们采用双层的染色体方式编码。如图 2 所示的 $2 \times n$ 的矩阵表示一条染色体。对于染色体上层,我们随机生成一个 $[1, n]$ 的整数将其用来表示船舶停靠的优先级,优先级越高,优先停靠此船舶。对于染色体下层,我们根据满足该船长度与水位限制构造可选泊位集合,然后从中随机选取一个作为停靠泊位。

船舶编号	1	2	3	...
优先级	21	9	15	...
泊位	2	6	2	...

图 2 随机染色体编码示意图

Fig.2 Diagram of random chromosome coding

以图 2 为例,按照上述染色体生成方法随机生成一条染色体。图中染色体第一列表示 1 号船舶的优先级在所有船舶中排在第

21 位, 停靠在 2 号泊位; 第二列表示 2 号船舶的优先级在所有船舶中排在第 9 位, 停靠在 6 号泊位。对比第一列与第三列, 得知 3 号船舶的优先级高于 1 号船舶, 并且同样停靠在 2 号泊位。所以在实际调度中, 3 号船舶先于 1 号船舶驶入泊位。

4.2 适应度函数

模型的目标函数为计划期内所有船舶总等待时间最小, 设 $Z(x)$ 为目标函数总等待时间由式 (1) 计算。考虑到负数形式的适应度函数会使得遗传算法出现欺骗现象, 具体表现为: 在进化初期, 适应度极高的个体完全控制种群选择; 进而导致在进化后期, 个体间差异很小, 算法陷入局部峰值。因此, 我们采用适应度函数 $f(x) = 1/Z(x)$ 。

4.3 选择操作

本文采用精英选择与截断选择结合的策略: 将当前种群中的适应度最高的个体直接保留到下一代中, 以保证种群中的优秀基因得以继承。此外, 我们根据适应度值对种群中的个体按照从优到劣的顺序进行排序, 只有前半部分个体可以进行交叉变异操作。

4.4 交叉操作

本文采用两点交叉策略, 在染色体中随机选择两点, 两点之间的基因继承父代 1 相同位置的基因, 两点之外的基因继承父代 2 对应位置的基因。若交叉后存在优先级相同的船舶, 则随机为其排序。

4.5 变异操作

在本文中, 我们给定一个变异概率 p_m , 对每个染色体的每一位基因生成 0 到 1 的一个随机数, 如果随机数小于变异概率 p_m , 则将此基因进行变异操作。具体来讲, 染色体上层是此的与随机选择的另一基因位进行交换。染色体的下层将从该基因位对应船舶可停靠泊位集合中随机选择一个作为新的基因。

5 实验结果与分析

在本节, 我们将使用人工数据集[8]和青岛前湾港数据集对本文算法进行实验分析。

5.1 实验环境与参数设置

本文所使用的硬件平台是 AMD R7 5800 主频为 3.40GHz 的 CPU, 32GB 的 RAM 内存, 操作系统为 Windows 11, 算法代码均采用 Python 实现。GEN-2D 的参数设置为种群规模为 1000, 变异率 $p_m = 0.04$, 迭代轮次为 100, 连续 50 代结果无优化则提前终止算法。

5.2 人工数据集

首先, 人工数据集的生成方式为计划周

期是 168 个单位 (即一周, 168 小时)。潮汐周期为 12 小时 (720 分钟), 高低潮差为 4 米。集装箱码头泊位总共有 10 个, 待分配的集装箱船有三种类型, 喂给船, 中型船和大型船。

表 1 人工数据集各船型

Tab.1 ship types in the synthetic dataset

船型	长度(m)	吃水深度(m)	作业时长(h)
喂给船	$U[8,21]$	$U[3,5]$	$U[5,15]$
中型船	$U[21,30]$	$U[5,8]$	$U[15,30]$
大型船	$U[30,40]$	$U[8,15]$	$U[50,65]$

表 1 列出了每种船型的相关参数。符号 U 表示在指定的区间内以整数均匀分布, 船舶到达时间间隔服从指数分布, 按照平均时间间隔分别为 2 小时, 3 小时, 4 小时和 5 小时生成四组算例。

相应地, 挂靠的船舶数分别为 88 艘, 64 艘, 45 艘和 34 艘。每个算例中有 60% 的船舶是喂给船, 30% 的船舶是中型船, 10% 的船舶是大型船。

表 2 人工数据集各泊位

Tab.2 berths in the synthetic dataset

泊位编号	长度(m)	水深(m)
1	19	12
2	34	22
3	24	11
4	27	11
5	47	21
6	17	9
7	12	13
8	37	24
9	17	12
10	34	21

表 2 给出人工数据集的 10 个泊位的参数, 其中 70% 的小泊位, 长度分布在 [12, 30], 初始水深分布在 [8, 15]; 30% 的大泊位, 长度分布在 [30, 50], 水深分布在 [15, 25]。

表 3 人工数据集上不同算法的总等待时间

Tab.3 Total waiting time of different algorithms on synthetic dataset

算法	34	45	64	88
TGA-A	18,860	71,935	179,472	280,962
TGA-S	21,244	71,410	197,138	249,341
TGA-D	28,481	84,697	216,282	349,208
TGA-L	30,822	82,036	225,211	358,394
GNA-2D	15,860	51,927	144,863	228,049
提升率	15.91%	27.81%	19.28%	18.83%

表 3 中数据为船舶数量分别为 34, 45, 64 和 88 的情况下, 遗传算法与四种贪心算法的实验结果对比, 每种情况下运行 10 个实例, 结果取平均值。从表 3 中可以看出, 贪心算法中 TGA-A 与 TGA-S 算法效果最好, 原因在于两者的贪心策略直接与优化目

标相关。GEN-2D 在各算例下均优于所有贪心算法。提升率表示遗传算法相较于最优贪心算法总等待时间的缩短效率，GEN-2D 相比于贪心算法平均减少 20.46%的总等待时间，这得益于其强大的搜索能力。

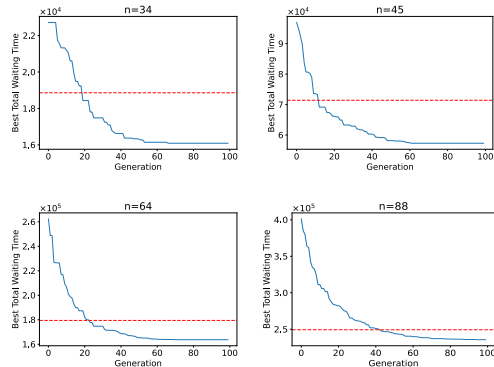


图3 遗传算法迭代图

Fig.3 Genetic Algorithm Iteration Diagram

图3给出了四组算例下遗传算法迭代图，图中虚线表示每组算例下最优贪心算法的总等待时间，从图中可以看出，遗传算法在100轮内均趋于收敛，并且在40轮以内得到的结果比最优贪心算法的结果更好。

表4 人工数据集上不同参数下 GEN-2D 算法的效率

Tab.4 Efficiency of GEN-2D algorithms with different parameters on synthetic dataset

船数	GEN-2D-S		GEN-2D-L		GEN-2D	
	成本	时间	成本	时间	成本	时间
34	18530	0.49	15071	48.88	15860	4.67
45	57881	0.63	50358	63.21	51927	6.19
64	168466	0.86	144071	81.56	144863	8.08
88	258827	1.07	217406	104.9	228049	10.60

为了比较 GEN-2D 算法的在不同参数下的效率，我们分别将种群规模设置为100和10,000得到 GEN-2D-S，GEN-2D-L 作为对比。表4中成本为目标函数结果，时间为算法运行时间，GEN-2D 算法的求解时间随问题规模呈线性增长，验证了算法的有效性。此外，GEN-2D 与 GEN-2D-L 成本相差不超过5%，但时间快一个数量级。

5.3 青岛前湾港数据集

青岛港是中国沿黄流域和环太平洋西海岸重要的国际贸易口岸和海上运输枢纽，包括青岛大港港区、黄岛油港区、前湾港区、董家口港区。其中，前湾港区是中国大陆最大的集装箱中转港、冷藏箱进出口港、世界第14大集装箱港口，目前集装箱吞吐量为中国沿海港口第三位。

表5 QQCT 公司泊位信息

Tab.5 QQCT's berth information

泊位名称	主要用途	泊位长(m)	水深(m)
1号泊位	集装箱	196.8	11.30
2号泊位	集装箱	241.2	11.30
3号泊位	集装箱	481.2	10.40
4号泊位	集装箱	312	8.60
5号泊位	集装箱	444	17.50
6号泊位	集装箱	378	17.50
7号泊位	集装箱	452.4	17.50
8号泊位	集装箱	405.6	17.50
9号泊位	集装箱	405.6	17.50
10号泊位	集装箱	405.6	17.50
11号泊位	集装箱	404.4	17.50

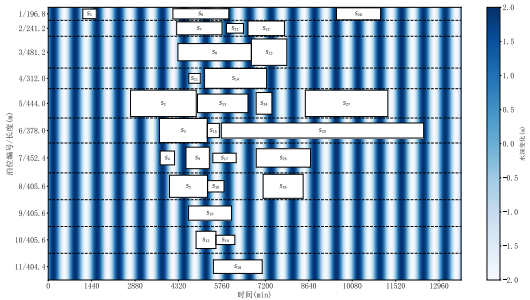
本文使用的实际数据集为前湾港 2020 年 11 月 28 日至 12 月 4 日共计 7 天的 QQCT 公司到港船舶。泊位数据见表5，船舶数据见表6。

表6 QQCT 公司 7 天内到港船舶

Tab.6 QQCT's ships arrive in 7 days

序号	船长(m)	吃水(m)	作业时间(h)	靠泊时间
1	145.7	9	7.45	11-28 19:08
2	400	10.6	36.3	11-29 21:31
3	366	12.3	26.36	11-30 13:32
4	210	11	7.93	11-30 13:54
5	335	10	20.97	11-30 19:02
6	154.5	8.5	30.91	11-30 20:55
7	196.7	8.5	25.09	11-30 22:59
8	260.7	10	40.58	11-30 23:42
9	324.8	9	12.9	12-01 04:10
10	215.3	10	23.71	12-01 05:35
11	148	8	6.34	12-01 05:43
12	261.1	8	10.98	12-01 09:43
13	280.5	8	27.88	12-01 10:31
14	299.9	9	27.78	12-01 14:25
15	215.1	8	6.67	12-01 15:57
16	172	9	9.02	12-01 16:08
17	142.7	7	12.91	12-01 18:59
18	205.5	10	26.98	12-01 19:19
19	140	5	10.45	12-01 20:01
20	228	10	111.79	12-01 23:41
21	145.7	8.5	9.4	12-02 02:33
22	221.1	7.5	20.12	12-02 14:27
23	399.9	10	19.09	12-02 16:17
24	328.2	9	8.68	12-02 18:57
25	278.8	10.6	29.99	12-02 19:00
26	363.6	9.8	22.11	12-02 22:47
27	400	10.5	45.6	12-03 22:07
28	182.9	9	24.35	12-04 15:20

从表5中可以看出实际中船舶长度与吃水深度呈正相关，同时12月1号有多艘船长超过200m的船舶到港，为调度带来一定困难。



(a) TGA-A 调度方案

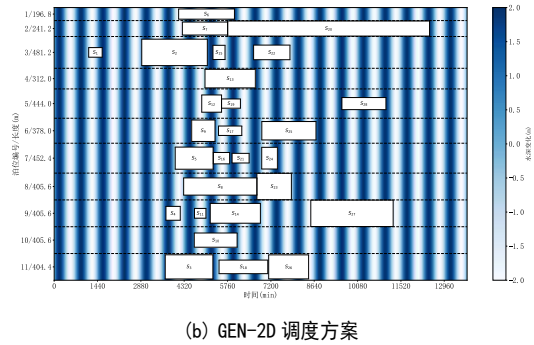


图4 前湾港数据集调度方案可视化

Fig.4 Visualization of Qianwan Port Scheduling Scheme

图4展示了在实际数据集上 TGA-A 与 GEN-2D 的调度方案。其中 TGA-A 的总等待时间为 461 分钟, GEN-2D 的总等待时间为 64 分钟, 相比前者缩减了 86.1% 的时长, 证明了 GEN-2D 的有效性。进一步对比可以发现, 在 TGA-A 中比 GEN-2D 中表示 14 号和 23 号船的长方体更长, 这是由于前者不合理的调度, 导致 14 号和 23 号船在出港时分别需要在 4 号、3 号泊位内等待涨潮, 这一过程耗时 390 和 30 分钟。

6 结束语

本文针对大型港口多种类型约束的船舶泊位调度问题, 考虑潮汐影响, 提出用长方体描述船舶靠泊需求, 用长方体容器描述泊位资源, 将船舶泊位调度问题用长方体排列模型建模。之后针对长方体最优排列问题, 分别提出两阶段贪心算法 TGA 和优先级与泊位分配的二维遗传算法 GEN-2D 对问题进行求解。实验结果表明, GEN-2D 方法能够在人工数据集和实际数据集中都能产生更优的船舶泊位调度方案。在未来工作中, 将结合实际问题的更多约束信息, 细化船舶调度模型和调度算法, 并在实际应用中进行测试。

参考文献

- [1] Li X, Mou J, Chen L, et al. Ship-Infrastructure Cooperation: Survey on infrastructure Scheduling for Waterborne transportation Systems[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 11(1): 31.
- [2] Rodrigues F, Agra A. Berth allocation and quay crane assignment/scheduling problem under uncertainty: a survey[J]. European Journal of Operational Research, 2022.
- [3] Chargui K, Zouadi T, Sreedharan V R, et al. A novel robust exact decomposition algorithm for berth and quay crane allocation and scheduling problem considering uncertainty and energy efficiency[J]. Omega, 2023, 118: 102868.
- [4] Park K T, Kim K H. Berth scheduling for container terminals by using a sub-gradient optimization technique[J]. Journal of the operational research society, 2002, 53(9): 1054-1062.
- [5] Jos B C, Harimanikandan M, Rajendran C, et al. Minimum cost berth allocation problem in maritime logistics: new mixed integer programming models[J]. Sādhanā, 2019, 44: 1-12.
- [6] 吴云强, 张戎. 单向航道下连续泊位分配与船舶调度集成优化[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(09): 246-255. WU Y Q, ZHANG R. Integrated Optimization of Continuous Berth Allocation and Ship Scheduling Under One-Way Channel[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(09): 246-255. (in Chinese)
- [7] Dulebenets M A. An Adaptive Island Evolutionary Algorithm for the berth scheduling problem[J]. Memetic Computing, 2020, 12(1): 51-72.
- [8] 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(01): 95-103+113. ZHENG H X, WU Y Q, SHAO S Y, et al. Integrated Ship Inbound and Outbound Port Order and Berth Allocation Scheduling under Tidal Influence[J]. Information and control, 2020, 49(1): 95-103, 113. (in Chinese)
- [9] 吴宗明, 郭姝娟, 赵丹. 基于启发式算法的连续泊位调度研究[J]. 中国水运(下半月), 2014, 14(03): 97-99. Wu Z M, Guo S J, Zhao D. Research on Continuous Berth Scheduling Based on Heuristic Algorithms[J]. China Water Transport (Bi-Monthly), 2014, 14(03): 97-99. (in Chinese)
- [10] 郝杨杨, 金永贺, 杨斌. 集装箱码头连续泊位-岸桥分配的仿真优化[J]. 计算机仿真, 2017, 34(04): 306-310. HAO Y Y, JIN Y H, YANG B. Simulation and Optimization of Continuous Berth and Quay Crane Allocation in Container Terminal[J]. Computer Simulation, 2017, 34(04): 306-310. (in Chinese)
- [11] Park H J, Cho S W, Lee C. Particle swarm optimization algorithm with time buffer insertion for robust berth scheduling[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 160: 107585.
- [12] Rodrigues F, Agra A. An exact robust approach for the integrated berth allocation and quay crane scheduling problem under uncertain arrival times[J]. European Journal of Operational Research, 2021, 295(2): 499-516.
- [13] 乐美龙, 刘秀玲. 基于泊位偏好与服务优先级的泊位和岸桥分配[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2013, 32(5): 709-712. LE M L, LIU X L. Berth and quay crane allocation based on berth preference and service priority[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2013, 32(5): 709-712. (in Chinese)
- [14] 李娜. 集装箱码头连续泊位与岸桥调度联合优化研究[D]. 大连海事大学, 2011. Li N. The Combined Scheduling of Continuous Berth and Quay Crane at Container Terminal[D]. Dalian Maritime University, 2011. (in Chinese)
- [15] 孙少文, 杨斌, 胡志华. 潮汐影响下的港口离散

泊位分配问题研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(04):486-492. SUN S W, YANG B, HU Z H. Research on discrete berth allocation under tidal influence at container terminal[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition) , 2014,37(04):486-492. (in Chinese)