

文章编号:1006-2467(2020)04-0331-13

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2020.04.001

考虑工艺顺序和组合分段的多堆场调度方法

孟令通¹, 蒋祖华¹, 陶宁蓉², 刘建峰³, 郑虹¹

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306;
3. 上海外高桥造船有限公司, 上海 200137)

摘要:为了解决船舶分段多堆场调度过程中工作效率低、运输成本高的问题,针对多堆场调度任务执行顺序、进场及阻挡分段移动等环节,综合考虑堆场的工艺属性、分段形状组合等要素,建立以最小化运输成本为目标的分段多堆场调度模型.通过对比分析2种进场分段堆位分配策略,提出阻挡分段跨堆场调度的移动策略;改进传统的任务顺序调整策略,并用禁忌搜索算法进行优化;最后,分析堆场占用率及各个调度策略组合对实验结果的影响.实验结果表明,堆位分配策略和阻挡分段的跨堆场调度策略能有效降低多堆场调度的运输成本,减少阻挡分段产生的比例,进而达到提高运输效率的目的.

关键词:组合分段;多堆场调度;启发式调度策略;禁忌搜索算法

中图分类号:TP 391; U 672

文献标志码:A

Multi-Stockyard Scheduling Considering Technological Process and Combined Assembly Block

MENG Lingtong¹, JIANG Zuhua¹, TAO Ningrong², LIU Jianfeng³, ZHENG Hong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306,
China; 3. Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: In order to improve the current status of low work efficiency and high transportation costs in multi-stockyard scheduling, a multi-stockyard scheduling model was established. It aimed at the execution sequence and the procedure of incoming blocks and relocating blocks. The pursued objective was to minimize the total cost which considered the process attribute of multi-stockyard and combination of blocks. This paper compared and analyzed two approaches of incoming blocks allocation, and proposed a moving strategy between multi-stockyard of obstructive blocks. Moreover, it also improved the traditional scheduling sequence by Tabu search. Finally, the effects of stockyard occupancy rate and the comparison of various scheduling strategies on the experimental results were analyzed. The results show that the block allocation and moving strategies can effectively reduce the total cost in multi-stockyard scheduling as well as the proportion of obstructive blocks. These new strategies can effectively improve the transport efficiency.

收稿日期:2019-02-03

基金项目:国家自然科学基金(71501125),工业和信息化部高技术船舶项目([2017]614号-9)

作者简介:孟令通(1993-),男,黑龙江省牡丹江市人,硕士生,研究方向为船舶堆场调度.

通信作者:蒋祖华,男,教授,博士生导师,电话(Tel.):021-34206819;E-mail:zhjiang@sjtu.edu.cn.

Key words: combined block; multi-stockyard scheduling; heuristic scheduling strategy; Tabu search algorithm

符号说明:

$d_{i,j}$ — 分段 i 允许进出堆位 j 的方向

$d_{j_i^s}(d_{j_i^e})$ — 路径 $R_{j_i^s}(R_{j_i^e})$ 的运输距离

$d(y_i^s, y_i^e)$ — 分段起始堆场 y_i^s 和终止堆场 y_i^e 之间的最短路径距离

E_y — 堆场 y 与道路可直接通行的堆位集合

g_{k,j_i^s} — 移动路径 $R_{j_i^s}$ 上阻挡分段 k 的堆场内运输距离, $k = 1, 2, \dots, n_{j_i^s}$

g_{κ,j_i^e} — 移动路径 $R_{j_i^e}$ 上阻挡分段 κ 的堆场内运输距离, $\kappa = 1, 2, \dots, n_{j_i^e}$

$j_i^s(j_i^e)$ — 分段 i 的起始(终止)堆位

j_y — 堆场 y 中的堆位 j

$n_{j_i^s}(n_{j_i^e})$ — 路径 $R_{j_i^s}(R_{j_i^e})$ 上的阻挡分段数量

在现代造船模式中,分段作为基本生产单元在完成脱胎后,需经过预舾装、舾装、涂装、总组等工艺流程,最后完成船体搭载。堆场作为分段任务的缓冲地,具有承担了部分后期加工任务的作用,在堆场中可以完成预舾装、涂装等工序。堆场中分段的调度由平板车完成,为了确保调度作业的准时性,减少调度成本,提高堆场作业效率,优化堆场调度策略至关重要。目前,许多传统的调度方式仅适用于单堆场的调度情况,而单堆场调度属于多堆场调度的特例,主要应用于堆场和车间之间的分段流转。传统调度方法虽然可以提高单堆场调度的效率、增加分段调度的合理性,但忽略了分段的工艺流向,并不适用于多堆场调度。然而,船厂内堆场数量众多,分段是在多个堆场和车间之间流转的,因此,设计合理的船舶分段多堆场调度方法是提高船厂内堆场整体调度效率的关键。

多堆场调度并不是单堆场调度的简单叠加,虽然其调度过程也是通过规划分段调度的位置以及路线,进而确定分段任务的执行顺序,但仍有诸多不同之处。

对于四面通行的单堆场调度,平板车的运输路径多为直线。文献[1]以减少无效移动为目标,规划堆场布局和内部通道,用阻挡分段率验证分段调度在船舶生产中的重要意义。文献[2]在文献[1]的基础上重新定义了堆场分段位置的分配问题,以进出堆场阻挡分段为优化目标,设计遗传算法优化分段堆位,提高了堆场调度效率。文献[3]在遗传算法优

$q_{i,y^s}(q_{i,y^e})$ — 分段 i 所在为起始(终止)堆场的工艺属性,

$$q_{i,y^s}(q_{i,y^e}) \in \{1, 2, \dots, \tilde{P}\}$$

$R_{j_i^e}$ — 任务分段终止堆场边缘移动道路到终止堆位,阻挡分段数量最少的堆位集合所形成的路线,其中位于堆场边缘的堆位记为 $\epsilon(R_{j_i^e})$

$R_{j_i^s}$ — 任务分段从起始堆场堆位移动到堆场边缘道路,阻挡分段数量最少的堆位集合所形成的路线,其中位于堆场边缘的堆位记为 $\epsilon(R_{j_i^s})$

STA_p^i — 任务分段 i 的工艺阶段, $p = 1, 2, \dots, \tilde{P}$

$y_{k,j_i^s}^0$ — 移动路径 $R_{j_i^s}$ 上阻挡分段 k 的起始堆场, $k = 1, 2, \dots, n_{j_i^s}$

$y_{\kappa,j_i^e}^0$ — 移动路径 $R_{j_i^e}$ 上阻挡分段 κ 的目标堆场, $\kappa = 1, 2, \dots, n_{j_i^e}$

$y_i^s(y_i^e)$ — 任务分段 i 的起始(终止)堆场

化分段堆位的基础上,设计进场分段和阻挡分段的启发式移动策略用于求解四面通行堆场的堆位分配问题。文献[4]以阻挡分段数量为优化目标,设计进场分段的堆位选择策略和阻挡分段的移动策略,得出分段任务的执行顺序对调度结果有着重要影响的结论。

在实际应用中,直线运输路径一般用于场地资源不紧张的情况。当场地资源有限时,平板车的运输路径主要为折线。节点状态模型是适用于折线运输的调度模型且其分段形状均为矩形。文献[5]设计了启发式规则以确定分段移动路线,并通过遗传算法优化分段在堆场中的堆位。文献[6]结合了分段质量和移动距离,用双层遗传算法确定分段的调度顺序及其在堆场中的停放位置,并设计了启发式算法规划分段最优移动路线。文献[7]在文献[4]的基础上,以分段移动度为优化目标,针对单面通行堆场设计了5种阻挡分段的移动策略,并用多链DNA遗传算法对分段任务的执行顺序进行求解。文献[8]以分段移动度为优化目标,考虑分段工艺阶段和多堆场堆位优先级,针对多个堆场的分段调度问题,设计了阻挡分段启发式调度规则。文献[9]提出将分段进行组合堆置,但仅研究了组合分段在单堆场中的调度问题,并没有涉及多堆场调度。

针对多规格分段布局的研究大多不划分堆位且调度场景主要集中在分段建造车间内。文献[10]深入分析了分段属性以及加工平台、加工空间、加工流程等各类约束,设计了一种贪婪的启发式搜索算法,

并与网格搜索算法和遗传算法进行了对比。文献[11]考虑了不同规格和摆放方向的分段,将问题表述为一个混合整数规划(MIP)模型,设计了调度优先级规则和对角填充空域分配方法。文献[12]同时考虑了分段布局 and 模糊建造时间,提出用模糊三角时间模型表示不确定的分段开工和完工时间,并设计了遗传算法优化分段加工位置。

以上研究都是只针对单一规格分段、堆位固定且只能容纳一个分段的堆场调度问题,可处理的分段数量和种类较少,简化了分段在各个堆场流转过程中任务的连续性,忽略了分段的工艺顺序。针对上述问题,本文在文献[13]的基础上提出了组合分段

多堆场调度模型,考虑堆位内组合分段之间的干涉,设计了多堆场分段堆位选择策略和阻挡分段跨堆场移动策略,以确定分段的目标堆位;改进了传统的任务顺序调整策略,并用禁忌搜索算法进行优化;最后,讨论了不同调度策略对运输成本的影响,并通过实例求解得到多堆场内任务和阻挡分段的多堆场调度方案。

1 问题模型

1.1 问题描述

分段多堆场调度示意图如图 1 所示,多堆场调度与单堆场调度的差异如表 1 所示。

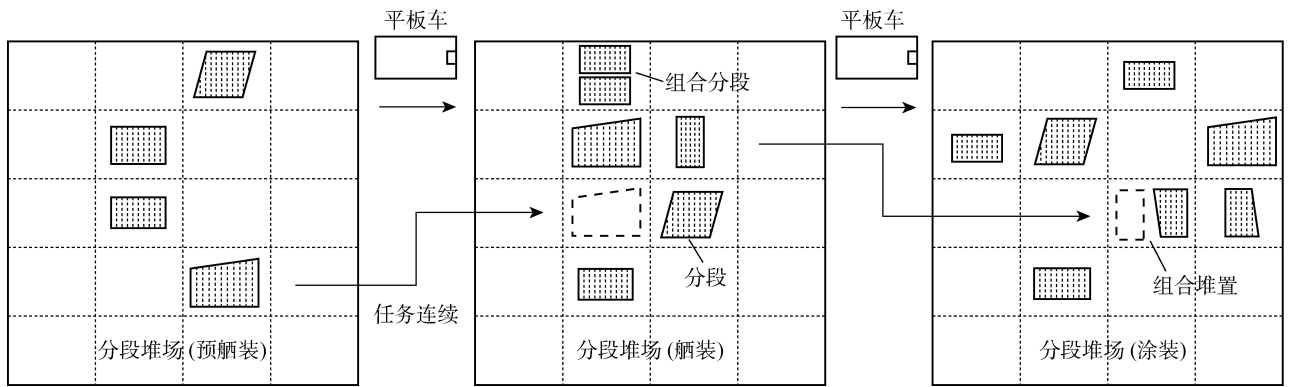


图 1 分段多堆场调度示意图

Fig. 1 Sketch of block transportation in multi-stockyard scheduling

表 1 多堆场调度与单堆场调度的差异

Tab. 1 Difference between multi-stockyard scheduling and stockyard scheduling

调度方法	调度时间窗	工艺顺序	任务执行策略	阻挡分段	目标函数	移动路线
单堆场	固定	不考虑	混合算法优化	原堆场	阻挡分段数量	堆场内部
多堆场	滚动周期	考虑	时间余量	跨堆场	运输成本	堆场内外

已知 \tilde{Y} 个分段堆场(堆场 y 由 $M_y \times N_y$ 个矩形堆位组成, $y = 1, 2, \dots, \tilde{Y}$)、场地四周的通行情况以及场地之间的通行道路数量,在调度周期 \tilde{T} 中,给定一组已知起始堆位 j_i^s 和终止堆场 y_i^e 的直角梯形分段,任务规模记为 D_T 。多堆场调度问题是指根据工艺要求为任务分段及调度过程中产生的阻挡分段选择合适的堆场及堆位,具体内容包括规划其堆场内外的移动路线、确定任务执行的日期及顺序、选择分段的进场位置、选择阻挡分段堆场的堆位,最终使得调度周期 \tilde{T} 内的运输成本最小。

多堆场调度遵循以下假设:

(1) 堆场均为组合分段堆场,一个堆位可以堆置 1 个大型分段,或 2 个小型分段;

(2) 各堆场规格不同,但堆位序号的编码方式

相同,从堆场左上角开始依次由左至右、由上至下编号;

(3) 所有分段投影的外包络线均简化为直角梯形,组合分段在一个堆位内按照堆位编码方式左右水平堆置;

(4) 堆场之间由道路连接,不考虑道路宽度对平板车运输的影响;

(5) 堆场外运输先将分段运输至堆场边缘,再进行堆场内运输,且堆场外运输时将堆场视为节点;

(6) 堆场可进行部分后期加工,如完成预晒装、涂装等工序;

(7) 阻挡分段不能再次产生阻挡,待完成后期加工后可以跨堆场调度;

(8) 任务分段和阻挡分段根据下一个工序选择

堆场.

1.2 数学模型

多堆场调度主要从两个角度对调度进行优化:

① 减少调度过程中产生阻挡分段的数量,降低分段重复搬运造成的资源浪费;② 优化分段移动路线,降低平板车油耗. 目标函数将综合这两个方面进行考虑.

决策变量:

$$l_{i,j}^t = \begin{cases} 1, & \text{第 } t \text{ 天分段 } i \text{ 堆置在堆位 } j \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$r_i^t = \begin{cases} 1, & \text{第 } t \text{ 天分段 } i \text{ 可以运输到其他堆场} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$c_{i,j_i^e} = \begin{cases} 1, & \text{分段 } i \text{ 可以堆置或组合堆置于终止堆位 } j_i^e \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$S_{i_t}^h = \begin{cases} 1, & \text{第 } t \text{ 天任务 } h_t \text{ 是分段 } i \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, \tilde{I}; \quad j = 0, 1, \dots, \tilde{J}$$

$$t = 1, 2, \dots, \tilde{T}; \quad h_t = 1, 2, \dots, \tilde{H}_t$$

其中: $t=0$ 表示堆场的初始状态; \tilde{T} 表示调度周期内的最后一天.

目标函数:

(1) 任务分段移动时产生的阻挡分段总数

$$\Omega = n_{j_i^s} l_{i,j_i^s}^{t-1} + n_{j_i^e} l_{i,j_i^e}^{t+1} \quad (1)$$

(2) 任务分段和阻挡分段在堆场内的运输距离

$$B = \sum_{k=1}^{n_{j_i^s}} g_{k,j_i^s} + d_{j_i^s} l_{i,j_i^s}^{t-1} + \sum_{\kappa=1}^{n_{j_i^e}} g_{\kappa,j_i^e} + d_{j_i^e} l_{i,j_i^e}^{t+1} \quad (2)$$

(3) 任务分段及阻挡分段跨堆场间的运输距离

$$C = d(y_i^s, y_i^e) + \sum_{j_i^s=1}^{n_{j_i^s}} d(y_i^s, y_{k,j_i^s}^0) + \sum_{\kappa=1}^{n_{j_i^e}} d(y_i^e, y_{\kappa,j_i^e}^0) \quad (3)$$

优化目标函数表示为

$F =$

$$\min \sum_{t=1}^{\tilde{T}} \sum_{h_t=1}^{\tilde{H}_t} \sum_{i=1}^{\tilde{I}} [w_m \Omega + w_1 (B + C)] c_{i,j_i^e} S_{i_t}^h \quad (4)$$

式中: w_m 表示移动阻挡分段的权重; w_1 表示平板车负载运输的权重.

s. t.

(1) 分段运输在调度周期内执行,

$$1 \leq t \leq \tilde{T} \quad (5)$$

(2) 堆场中同一个堆位上至多可以堆置 2 个小型分段.

$$\sum_{i=1}^I l_{i,j_y}^t \leq 2, \quad (6)$$

$$t = 1, 2, \dots, \tilde{T}; \quad j_y = 0, 1, \dots, \tilde{J}$$

(3) 任务分段所在堆场符合分段所处的工艺阶段,分段的下一个工艺阶段是在合适的堆场进行,

$$\text{STA}_p^i = q_{i,y^s}, \quad \text{STA}_{p+1}^i \leq q_{i,y^e} \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, \tilde{I}$$

(4) 阻挡分段只有在完成当前工艺阶段之后才能运输至下一堆场,对阻挡分段 k , 若 $r_k^t = 0$, 则

$$y_{k,j_i^s}^0 = y_i^s, \quad d(y_i^s, y_{k,j_i^s}^0) = 0 \quad (8)$$

(5) 分段只能通过堆场与周围道路可直接通行的堆位进出堆场,其余的堆场方向视为围墙禁止通行. 若一个 6×10 堆场只能单面通行且堆场内的分段只能从堆场上方运输出去,可通行堆位集合 $E_y = \{0, 1, \dots, 9\}$, 对于进出堆场路线的边缘堆位有

$$\epsilon(R_{j_i^s}) \in E_{y_i^s}, \quad \epsilon(R_{j_i^e}) \in E_{y_i^e} \quad (9)$$

(6) 在执行任务的过程中,进入目标堆场时,不能超过堆场容量,因此需要在目标堆场中找出能满足大型分段或组合分段的堆位,

$$\sum_{j_i^e=0}^{\tilde{J}} c_{i,j_i^e} \geq 1 \quad (10)$$

对目标函数求解之前,首先要获取各堆场已知的初始状态,包括堆场规格、分段布局 and 堆场四周的通行情况,分段只能经过堆场与道路可直接通行的堆位(即矩形堆场的某些边)进出堆场. 若分段按照策略无候选堆位或堆场已经堆满分段时,则将分段运输到 6 号堆场,并在目标函数中加入惩罚值 Z .

2 模型求解

2.1 组合分段干涉方向判断

利用启发式规则判断组合分段在一个堆位内的干涉方向:在可行的空域内,分段的最终参考点位置要尽可能靠近可行域最左下角的顶点,也就是文献[13]中的最左最下规则. 如图 2 所示, b_1 为堆位中已经堆置好的分段,需要将分段 b_1 的顶点 G_1 靠近堆位最左下角的顶点; b_2 是即将与 b_1 组合堆置的分段,顶点 G_2 需要尽量靠近分段 b_1 . 因此,分段 b_1 的可移动方向为上、左、下,即移动方向 $d_{b_1,j} = j - N, j + N, j - 1$; 当 $d_{b_1,j} = j + 1$ 时,阻挡分段数量会增加.

使用空域的方法,对组合分段通过包络转角进

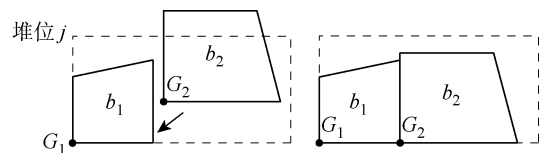


图 2 可行空域分段堆位最左最下规则

Fig. 2 The left-bottom rule of feasible space in cell

行顺序.

2.3 多堆场分段堆位选择策略

部分堆场可以进行某些分段的工艺加工,例如:在涂装堆场中,只允许堆置涂装及涂装工艺之前的分段,也就是约束条件中的 $STA_{p+1}^i \leq q_{i,y^e}$. 确定任务分段堆置的堆场后需选择该堆场内的堆位. 首先,需要确定候选堆位集合,分段可以堆置的堆位包括堆场中的空堆位集合 A_1 和可以组合堆置的堆位集合 A_2 , 获取堆位集合的步骤如下:

步骤1 获取任务 h_i 中分段的当前加工工艺阶段 p' 以及堆场分段工艺偏好 p'' ($p', p'' = 1, 2, \dots, \bar{P}$). 设初始状态时堆位集合 $A = A_1 = A_2 = \emptyset$, A 为目标堆场中的所有堆位.

步骤2 选择 $p' < p''$ 的堆场作为分段的目标堆场,将目标堆场中的所有堆位加入堆位集合 A .

步骤3 判断 A 是否为空集. 若 $A = \emptyset$, 则将堆位加入 A_1 , 进而判断堆位中分段是否可以与任务分段组合堆置; 否则返回步骤2, 直至 A 中分段遍历完毕. 若可以组合堆置, 则将堆位加入 A_2 .

步骤4 得到集合 A_1 和 A_2 .

步骤5 若 A_1 和 A_2 都为空集, 则说明该堆场已经达到堆场容量上限.

候选堆位是允许堆置进场分段的堆位, 具体堆位的选择有如下两种策略.

策略1 若任务分段是组合分段, 则选择候选集合 A_2 中出场时间相同的分段进行组合堆置; 若分段是大型分段, 或者无出场时间相同的组合分段, 则计算每个空堆位与周围分段的平均出场间隔时间

$$\Delta\tau_j = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R |\tau_{h_i} - \tau_r|$$

其中: R 表示候选堆位四周的分段数量; τ_{h_i} , τ_r 分别表示任务分段和四周各个分段的预计出场时间. 选择与周围分段平均出场间隔时间最小的位置作为进场堆位.

策略2 综合考虑进场分段对在场分段及空堆位的影响, 选择合适的堆位堆置进场分段. 堆位候选集合中每个可行堆位在放置任务分段后, 需计算当前阶段预计产生的调度成本, 并选择对后续分段移动影响最小的堆位, 具体步骤如下:

步骤1 获取任务分段 i 的堆位候选集合 A_1 和 A_2 .

步骤2 将分段 i 堆置于候选集合中的堆位 j' ($j' \in A_1 \cup A_2$), 获取分段 i 堆置于 j' 的运输成本 $\alpha = w_m n_{j^e} + \lambda w_1 d_{j^e}$, 其中, λ 为成本系数.

步骤3 对堆场中的其余分段, 将与之相比出

场时间较早的分段不计, 计算预计产生的出场移动成本 $\alpha_1 = \sum_{j' \in A_1 \cup A_2} (w_m n_{j'} + \lambda w_1 d_{j'})$.

步骤4 对堆场中每个可推置堆位 $j'' \in A_1 \cup A_2$, 同理计算有分段进入该堆位时的预计移动成本 $\alpha_2 = \sum_{j'' \in A_1 \cup A_2} (w_m n_{j''} + \lambda w_1 d_{j''})$, 得到分段 i 堆置于堆位 j 对整个堆场的影响指标 $V_{j'} = \alpha + \alpha_1 + \alpha_2$.

步骤5 返回步骤2, 直至候选集合中堆位遍历完毕.

步骤6 选择 $V_{j'}$ 值最小的堆位作为分段 i 的进场堆位 j .

2.4 阻挡分段跨堆场移动策略

在多堆场调度阻挡分段的堆位选择过程中, 阻挡分段可以在原有堆场中进行调度, 也可以在完成当前堆场的部分加工后直接运输到其他堆场. 若需要移动到其他堆场, 则要首先确定阻挡分段接下来要被运输的目标堆场. 目标堆场可以是符合阻挡分段下一阶段工艺属性的堆场或仅仅是临时堆场, 但不能返回阻挡分段当前工艺阶段之前的堆场, 否则将影响其他堆场内部的周转, 进而增大运输成本. 为了降低运输的嵌套性, 阻挡分段在位置重新分配的过程中不允许再次产生阻挡分段, 只可以选取平板车能够直接到达的堆场堆位.

策略3 将阻挡分段就近堆置在原堆场, 剔除原堆场中的任务分段路径, 选择通行无阻挡的堆位; 区分大型分段和组合分段, 挑选与周围分段出场时间较为接近的堆位进行堆置.

策略4 拓宽阻挡分段的堆位选择范围. 根据工艺阶段, 确定阻挡分段的堆场, 根据阻挡分段对堆场空堆位及在场分段的影响指标确定阻挡分段重新分配的堆场及堆位, 其具体流程如图5所示. 其中: y' 为任务 i 的当前堆场; A' 为阻挡分段移动的堆位集合.

2.5 禁忌搜索

2.5.1 禁忌搜索结构 通过邻域搜索优化任务的执行顺序. 设: π 为初始解; TL 为一个空的禁忌搜索集合; Iter 和 NIter 分别表示总迭代次数和结果没有提升的次数. 当 $\text{Iter} \geq \text{MaxIter}$ 或者 $\text{NIter} \geq \text{NonImpIter}$ 时, 则终止循环. 计算步骤见文献[9].

2.5.2 邻域搜索 由于在多堆场调度中处理的分段数量较多, 本文构建了两种邻域搜索方式, 其示意图如图6所示, 其中 2#3 表示2号堆场的3号堆位. 首先, 选择任务周期中的某一天, 将任意两个任务进行交换, 或将某一任务插入到某两个任务之间

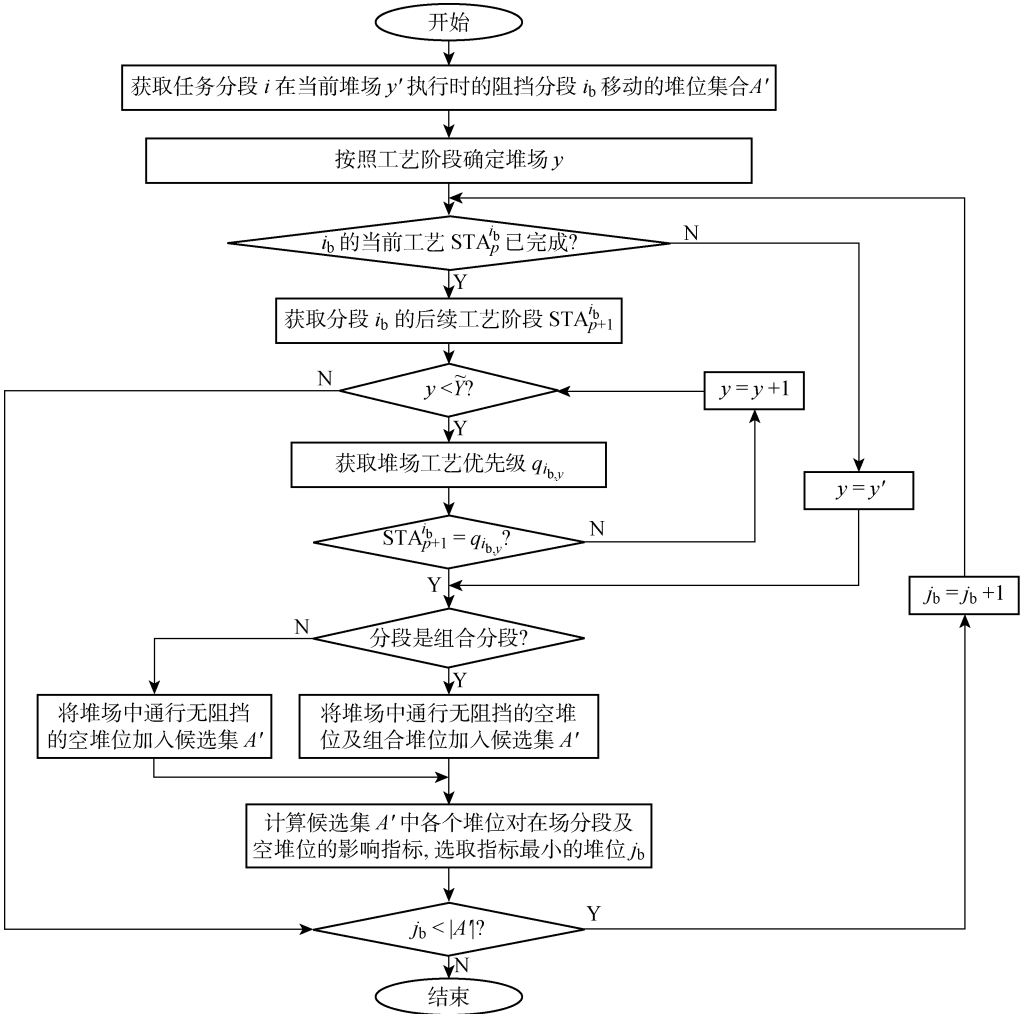


图 5 阻挡分段移动策略 2 的流程图

Fig. 5 Flowchart of moving strategy 2 with obstructive blocks

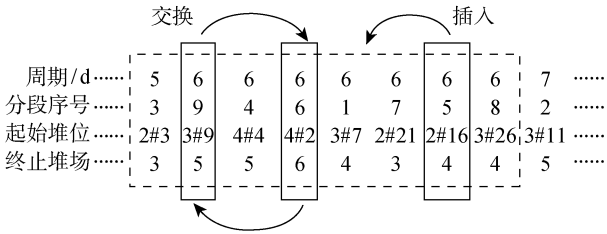


图 6 邻域搜索示意图

Fig. 6 Illustration of neighborhood search

执行,并检测该任务的可行性.若 $\sum_{j=0}^{\bar{J}} c_{i,j_i^e} < 1$,说明已经超出该堆场容量,则需要在运输成本中加入惩罚 Z .

禁忌搜索表是在搜索过程中为了防止重复循环记录邻域变换的集合,每个任务用 (t, m, x_1, x_2) 表示.其中: m 表示领域搜索的模式, $m = 0$ 表示交换模式, $m = 1$ 表示插入模式; x_1, x_2 表示任务取出后,交换或插入的位置.

3 算例分析

3.1 调度结果分析

为了验证模型以及算法的可行性,本文设计了多组实验对其进行验证.为了提高数据的实用性,所生成的数据在分段规模、堆场占用率、堆场布局等方面均参考了船厂的实际调度数据.程序采用 java 代码编写,在 3.2 GHz 双核处理器、8 GB 内存的计算机上运行.

输入参数设定如下:

- (1) 调度周期 10 天;滚动周期 2 天;分段在堆场中的平均停留时间 3 天.
- (2) 组合及非组合分段数量为 200 个;堆场初始占用率分别为 70%、80%、90%.
- (3) $w_m = 1, w_1 = 0.01$,当分段按照策略无候选堆位或堆场已经堆满分段时,则将分段运输到 6 号堆场,并在目标函数中加入惩罚 $Z = 5$.

(4) 堆场状态为 5 个单面通行的堆场. 堆场 1 为 4×5 ; 堆场 2 为 5×6 ; 堆场 3 为 5×6 ; 堆场 4 为 6×10 ; 堆场 5 为 6×10 ; 堆场 6 为最终的总组堆场, 不考虑堆场 6 内的分段如何移动(相当于节点), 共有 200 个堆位. 堆场编号决定了分段按照工艺要求

只能运输到堆场编号较大的堆场, 堆场内每个堆位的间距为 10 m, 堆场布局及初始状态如图 7 所示, 堆场之间的距离如表 3 所示.

(5) 禁忌搜索中 $\text{MaxIter}=100$, $\text{NonImpIter}=50$.

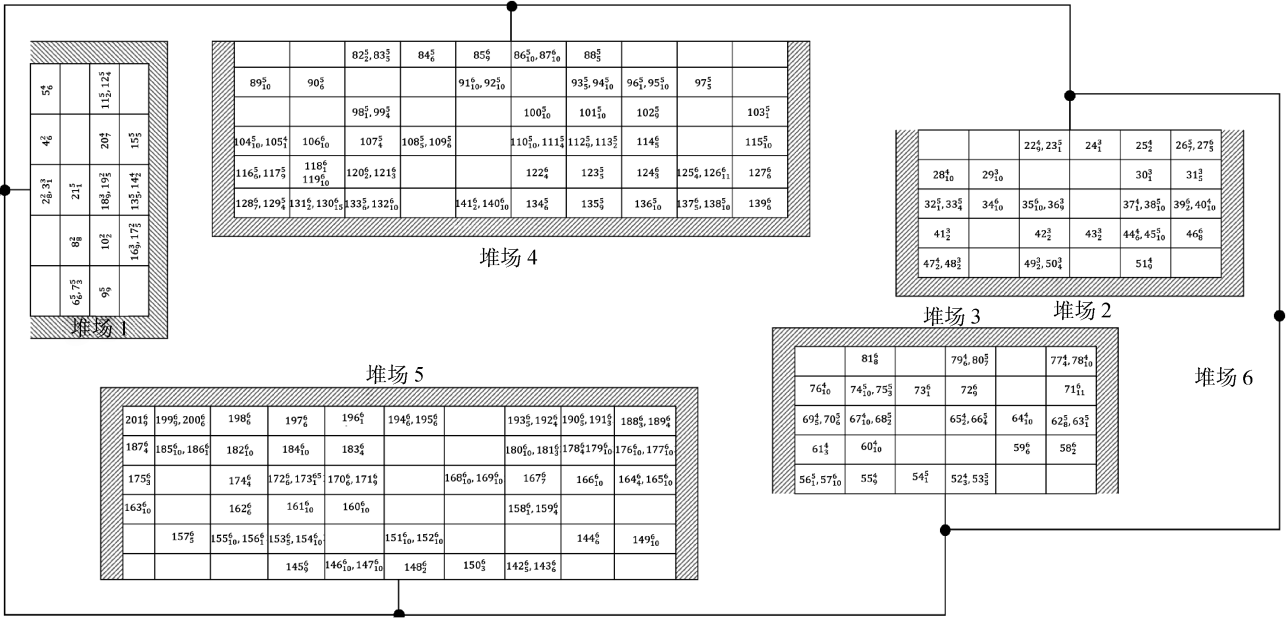


图 7 多堆场调度堆场布局实例
Fig.7 Example of multi-stockyard layout

表 3 堆场之间的距离(m)

Tab.3 Distance between multi-stockyard (m)

堆场	堆场 1	堆场 2	堆场 3	堆场 4	堆场 5	堆场 6
1	0	200	500	500	200	600
2	200	0	300	300	100	500
3	500	300	0	300	500	400
4	500	300	300	0	300	300
5	200	100	500	300	0	200
6	600	500	400	300	200	0

任务执行顺序策略:① 按照搭载时间余量确定任务的执行顺序;② 改进任务的执行顺序并用禁忌搜索进行优化.

堆场堆位选择策略:① 以平均出场间隔时间最小为依据选择进场堆位;② 综合考虑进场分段对在场分段及空堆位的影响后选择堆位.

阻挡分段移动策略:① 根据工艺阶段,在下游堆场中以平均出场间隔时间最小为依据选择阻挡分段堆位;② 在①的基础上,根据阻挡分段对堆场空堆位及在场分段的影响指标确定阻挡分段堆位.

组合对比任务执行顺序策略、进场分段堆位选择策略及阻挡分段移动策略(共 8 种策略组合方

式),在新进入堆场的分段数量为 0 或与进入堆场 6 的分段数量相同的条件下进行实验.

当新进入 5 个堆场的分段数量为 0 时,代表周期内没有中小组立加工成为分段,即没有分段从加工车间运输至堆场;当新进入 5 个堆场的分段数量等于堆场进入堆场 6 的分段数量时,调度周期内的堆场平均占用率可以维持在 70%、80%、90%左右. 组合策略的调度结果对比如表 4 所示,其中, F 为目标函数; r 为阻挡分段数量占任务分段的比例. 由表 4 可知:在多堆场调度中,若堆场都是单面通行,则其阻挡分段的比例较高;当无新分段进入堆场时,几种方法 r 的均值分别在 30%、33%、37%左右;当堆

表 4 组合策略调度结果对比

Tab. 4 Comparison of scheduling results among several strategy combinations

堆场初始 占用率/%	堆场平均 占用率变化	任务执行 顺序策略	进场堆位 选择策略	阻挡分段移动策略			
				①		②	
				<i>F</i>	<i>r</i> /%	<i>F</i>	<i>r</i> /%
70	递减	①	①	632.1	35.68	593.1	28.64
			②	627.4	34.67	581.1	27.14
		②	①	621.2	31.66	568.7	25.63
			②	610.5	29.64	552.1	23.62
	不变	①	①	880.9	76.88	715.6	52.76
			②	868.4	75.39	703.9	50.76
		②	①	852.3	65.83	664.8	47.74
			②	837.3	63.30	644.7	46.73
80	递减	①	①	689.5	43.72	611.9	30.15
			②	675.3	41.70	599.0	28.64
		②	①	626.1	36.18	587.4	26.14
			②	607.4	34.36	583.5	25.63
	不变	①	①	1 037.5	89.45	785.8	60.80
			②	1 014.7	87.94	772.1	58.79
		②	①	982.6	80.92	757.3	54.28
			②	961.4	78.38	734.3	53.27
90	递减	①	①	758.7	47.24	672.9	37.69
			②	730.8	45.73	653.9	36.18
		②	①	712.0	36.68	640.0	29.17
			②	694.8	34.17	628.2	27.64
	不变	①	①	1 474.0	101.01	875.5	76.88
			②	1 438.1	98.99	853.7	72.87
		②	①	1 334.9	93.47	837.4	61.32
			②	1 295.9	88.94	821.9	59.80

场平均占用率保持相对稳定时,几种方法的阻挡分段比例分别在 60%、70%、82%左右.

通过对比分析任务执行顺序策略,进场分段位置选择策略和阻挡分段移动策略,可以得到在其他条件相同的情况下,任务执行顺序策略②相比策略①对调度结果有一定程度的提升且始终优于策略①;在堆场占用率较低时,与策略①的目标函数值、阻挡分段数量相近,策略②对于阻挡分段非放回式的多堆场调度并没有较大的提升空间;而当分段数量较多时,任务执行顺序策略②的优化效果较为明显,说明以完成搭载的时间余量规划任务执行顺序只是考虑了分段对搭载的影响,并没有考虑分段在堆场中调度的干涉,而通过改进策略并用禁忌搜索进行优化后能够使任务在执行日期内的排序更加合理.

进场分段位置选择策略②相较于策略①对调度结果的优化有一定程度的提升,说明考虑进场分段对整个堆场影响的堆位选择策略同样适用于多堆场调度.通过考虑相邻堆位分段相对出场时间均值的方式选择堆位,而不是直接根据阻挡分段数量或是移动距离长短进行判断,其相邻分段的出场时间可能较为接近,但在处理组合分段时有一定的局限性.策略①中组合分段只能与出场时间相同的分段进行组合堆置,当堆场较为复杂、占用率较高时,组合分段可选择的堆位较少,可能会出现组合分段独占一个堆位的情况,使调度成本上升.

阻挡分段移动策略②对求解任务目标函数的优化程度很明显.当堆场占用率逐渐递减时,在堆场初始占用率分别为 70%、80%、90%的情况下,阻挡分段移动策略②相比于策略①的目标函数值分别有

7.6%、10.8%、11.5%的降低;当堆场平均占用率保持不变时,策略②相比于策略①分别有 19.1%、24.6%、37.9%的降低,这主要是由于当保持 5 个堆场中的分段总数不变时,堆场密度可能出现不平衡,进而造成某个堆场分段占用率很高,而其他几个堆场分段占用率较低的情况.策略①的阻挡分段调度方式极大地增加了堆场本身的负担,因此出现了很多阻挡分段无堆位可放的现象,增加了惩罚,从而提高了调度成本;而策略②将已经完成加工的阻挡分段移动到下一工艺阶段的堆场符合调度的工艺方向,在一定程度上避免了分段过于集中的现象,降低了多堆场调度的复杂性.

3.2 实例验证

堆场 4 示意图如图 8 所示.堆位编号从第 1 个堆位开始记为 4#0,向右依次递增,到最后一个堆位 4#59,共 60 个堆位.其中:分段 82_2^5 表示分段 82 第 2 天执行,将运输到堆场 5;分段的执行日期是经过滚动周期调整后的执行日期;分段 83 与 82 组合堆置,堆置方式由他们的形状大小决定.

当堆场占用率为 70%时,分别使用任务执行策略②、进场堆位选择策略②、阻挡分段移动策略②作为分段调度策略.由于数据量较大,表 5 只列出了第 1 天和第 2 天的分段调度任务,表中第 1 组数据表示分段 3 于第 1 天执行从堆场 1 的堆位 2 运输到 3

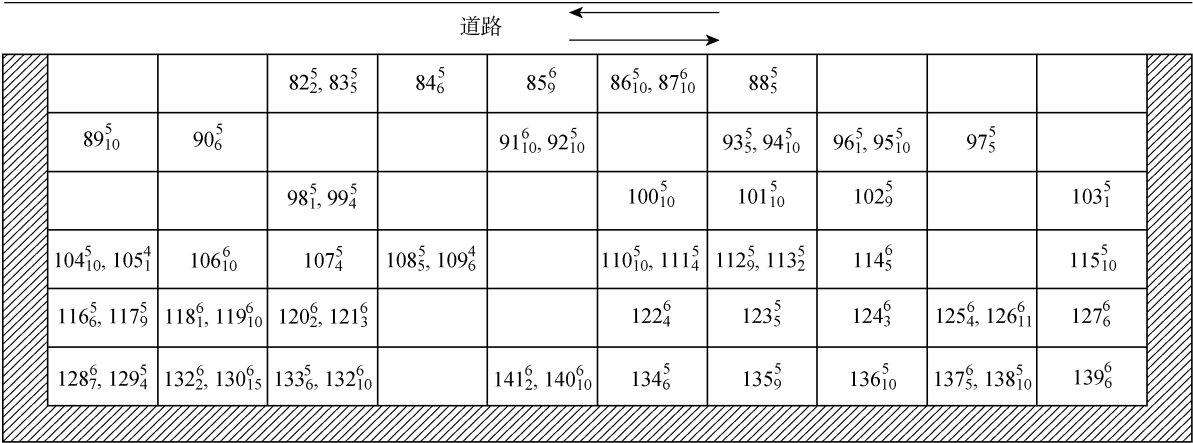


图 8 堆场 4 示意图
Fig. 8 Illustration of stockyard 4

表 5 分段调度任务
Fig. 5 Block scheduling tasks

分段	执行时间	初始堆位	目标堆场	分段	执行时间	初始堆位	目标堆场	分段	执行时间	初始堆位	目标堆场
3	第 1 天	1#2	3	98	第 1 天	4#22	5	43	第 2 天	2#21	3
9	第 1 天	1#10	2	103	第 1 天	4#29	5	48	第 2 天	2#24	3
18	第 1 天	1#12	3	118	第 1 天	4#41	6	49	第 2 天	2#26	3
23	第 1 天	2#2	5	196	第 1 天	5#55	6	52	第 2 天	3#2	4
24	第 1 天	2#3	3	156	第 1 天	5#17	6	58	第 2 天	3#6	6
30	第 1 天	2#10	3	158	第 1 天	5#22	6	65	第 2 天	3#14	4
32	第 1 天	2#12	5	173	第 1 天	5#36	6	68	第 2 天	3#16	5
37	第 1 天	2#16	4	186	第 1 天	5#48	6	82	第 2 天	4#2	5
41	第 1 天	2#18	3	4	第 2 天	1#3	2	105	第 2 天	4#30	5
47	第 1 天	2#24	4	11	第 2 天	1#14	5	113	第 2 天	4#36	5
54	第 1 天	3#3	5	14	第 2 天	1#17	4	120	第 2 天	4#42	6
56	第 1 天	3#5	5	17	第 2 天	1#16	4	131	第 2 天	4#51	6
63	第 1 天	3#12	5	25	第 2 天	2#4	4	141	第 2 天	4#54	6
73	第 1 天	3#21	6	39	第 2 天	2#17	6	148	第 2 天	5#4	6
96	第 1 天	4#17	5	42	第 2 天	2#20	3	187	第 2 天	5#49	6

号堆场的任务.

第 1 天以及第 2 天的任务调度结果如表 6 所示. 其中,任务 1 表示分段 158 首先执行,从堆场 5 的堆位 22,经过堆位 12-11-1,最终运输至堆场 6. 但是,在执行任务 1 时,将会遇到阻挡分段,而分段 144 是堆场 5 中出场时间比较晚的分段,因此将该分段任务提前执行,经过堆位 11-1 出场,然后再运输到堆场 6.

表 6 分段任务调度结果

Fig. 6 Results of block scheduling tasks

任务	执行时间	分段	移出堆场路径	进场移动路径
1	阻挡分段	144	5 # 11-1	6 #
	第 1 天	158	5 # 22-12-11-1	6 #
2	阻挡分段	183	5 # 45-44-34-24-23-13-12-11-1	6 #
	第 1 天	196	5 # 55-45-44-34-24-23-13-12-11-1	6 #
3	阻挡分段	160	5 # 25-24-23-13-12-11-1	6 #
		161	5 # 26-25-24-23-13-12-11-1	6 #
	第 1 天	173	5 # 36-26-25-24-23-13-12-11-1	6 #
4	第 1 天	156	5 # 17-7	6 #
5	阻挡分段	157	5 # 18-8	6 #
	第 1 天	186	5 # 48-6	6 #
6	第 1 天	96	4 # 17-7	5 # 8-18-28-38-48
7	阻挡分段	90	4 # 11-1	5 # 55-1-11-12-13-23-24-34-44-45
	第 1 天	98	4 # 22-12-11-1	5 # 1-11-12-13-23-24-34-44-45-55
8	第 1 天	103	4 # 29-19-9	5 # 1-11-12-13-23-24-25-26-36
9	阻挡分段	106	4 # 31-21-11-1	6 #
	第 1 天	118	4 # 41-31-21-11-1	6 #
10	第 1 天	54	3 # 3	5 # 1-11-12-13-23-24-34-44-45
11	第 1 天	56	3 # 5	5 # 1-11-12-22
12	第 1 天	73	3 # 21-15-9-3	6 #
13	阻挡分段	58	3 # 6-0	6 #
	第 1 天	63	3 # 12-6-0	5 # 7-17
14	阻挡分段	29	2 # 7-1	3 # 8-3-9
		34	2 # 13-7-1	6 #
	第 1 天	47	2 # 24-25-19-13-7-1	4 # 1-11-21-31-41
15	第 1 天	24	2 # 3	3 # 39-15-21-27-28
16	第 1 天	30	2 # 10-9-3	3 # 39-15-21-27
17	第 1 天	37	2 # 16-10-9-3	4 # 1-11-12-22
18	第 1 天	32	2 # 12-13-7-1	5 # 1-11-12-13-23-24-34-44
19	第 1 天	41	2 # 18-19-13-7-1	3 # 39-15-21
20	第 1 天	23	2 # 2	5 # 1-11-12-13-23-24-34-44
21	阻挡分段	6	1 # 5-0	5 # 19-10
		7	1 # 5-0	4 # 20-1-11-21
	第 1 天	9	1 # 10-5-0	2 # 17-13-19-25
22	阻挡分段	10	1 # 11-10-5-0	2 # 24-1-7-13-19-18
	第 1 天	18	1 # 12-11-10-5-0	2 # 0-6-24
23	第 1 天	3	1 # 2	3 # 5

(续表)

任务	执行时间	分段	移出堆场路径	进场移动路径
24	第 2 天	148	5 号 4	6 号
25	阻挡分段	175	5 号 39-38-28-18-8	6 号
	第 2 天	187	5 号 49-39-38-28-18-8	6 号
26	第 2 天	141	4 号 54-44-34-24-23-13-12-11-1	6 号
27	第 2 天	105	4 号 30-31-21-11-1	5 号 8-18-28-38-39-49-59
28	阻挡分段	114	4 号 37-38-28-29-19-9	6 号
	第 2 天	113	4 号 36-37-38-28-29-19-9	5 号 9-19
29	第 2 天	82	4 号 2	5 号 8-18-28-38-39-49
30	阻挡分段	107	4 号 32-31-21-11-1	5 号 9
	第 2 天	120	4 号 42-32-31-21-11-1	6 号
31	阻挡分段	47	4 号 41-31-21-11-1	4 号 54-1-11-12-13-23-24-34-44
		119	4 号 41-31-21-11-1	6 号
	第 2 天	131	4 号 51-41-31-21-11-1	6 号
32	第 2 天	65	3 号 14-15-9-3	4 号 1-11-21-31-41-51
33	第 2 天	68	3 号 16-15-9-3	5 号 8-18-28-38-39-49
34	第 2 天	52	3 号 2	4 号 9-19-29-28-38-37-47
35	阻挡分段	31	2 号 11-10-4	3 号 6-0
	第 2 天	39	2 号 17-11-10-9-3	6 号
36	第 2 天	25	2 号 4	4 号 1-11-21-31-41
37	第 2 天	43	2 号 21-15-9-3	3 号 0-6
38	第 2 天	49	2 号 26-27-21-15-9-3	3 号 3-9-15-16
39	第 2 天	42	2 号 20-19-13-7-1	3 号 0
40	第 2 天	48	2 号 24-18-19-13-7-1	3 号 3-9-15-14
41	第 2 天	4	1 号 3	2 号 3-9-15-21-27
42	第 2 天	17	1 号 16-11-10-5-0	4 号 1-11-21-31-32-42
43	第 2 天	11	1 号 14-9-8-3	5 号 8-18-28-38-39
44	阻挡分段	19	1 号 12-11-10-5-0	2 号 26-1-7-13-19-20
	第 2 天	14	1 号 17-12-11-10-5-0	4 号 9-19-29-28-38-37-36

4 结 论

针对船舶分段多堆场调度过程中成本高、效率低的问题,提出考虑分段工艺阶段的组合分段多堆场调度模型,增加了阻挡分段调度的灵活性,并通过改进和优化传统多堆场调度任务的执行顺序得到了新的调度方案. 主要结论如下:

(1) 分析对比了单堆场和多堆场调度的区别,构建了组合分段多堆场调度模型,考虑了分段工艺阶段、堆场容量及堆场四周通行情况,量化了多堆场调度的运输成本.

(2) 在考虑分段搭载节点的基础上设计了启发式规则用于调整任务的执行顺序,并通过禁忌搜索进行优化,结果表明该方法对于平均占用率较高的

堆场效果明显,可以有效地降低多堆场调度的运输成本.

(3) 考虑阻挡分段的跨堆场调度,设计了阻挡分段的移动策略,将已完成当前工艺的阻挡分段提前运输至目标堆位,提升了多堆场调度的效率.

本文的研究对象为两种规格的直角梯形分段多堆场调度,对于形状不规则的堆场或任意规格分段的堆场调度方法还需进一步深入研究.

参考文献:

[1] PARK C, SEO J, KIM J, *et al.* Assembly block storage location assignment at a shipyard: A case of Hyundai Heavy Industries[J]. **Production Planning and Control**, 2007, 18(3): 180-189.

[2] PARK C, SEO J. Mathematical modeling and solving procedure of the planar storage location assignment problem[J]. **Computers and Industrial Engineering**, 2009, 57(3): 1062-1071.

[3] PARK C, SEO J. Comparing heuristic algorithms of the planar storage location assignment problem[J]. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2010, 46(1): 171-185.

[4] TAO N R, JIANG Z H, QU S P. Assembly block location and sequencing for flat transporters in a planar storage yard of shipyards [J]. **International Journal of Production Research**, 2013, 51(14): 4289-4301.

[5] 张志英, 徐建祥, 计峰. 基于遗传算法的船舶分段堆场调度研究[J]. **上海交通大学学报**, 2013, 47(7): 1036-1042.

ZHANG Zhiying, XU Jianxiang, JI Feng. Shipbuilding yard scheduling approach based on genetic algorithm[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2013, 47(7): 1036-1042.

[6] 曾建智, 张志英, 邢艳, 等. 基于双层遗传算法的单时间窗分段堆场调度计划与优化[J]. **计算机集成制造系统**, 2016, 22(9): 2165-2174.

ZENG Jianzhi, ZHANG Zhiying, XING Yan, *et al.* Block stockyard scheduling and optimization with single time window based on dual-layer genetic algorithm [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2016, 22(9): 2165-2174.

[7] 陈凯, 蒋祖华, 刘建峰, 等. 带有进场时间窗的船舶分段堆场调度[J]. **上海交通大学学报**, 2016, 50(9): 1390-1398.

CHEN Kai, JIANG Zuhua, LIU Jianfeng, *et al.* Shipbuilding yard scheduling with block inbound time window[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2016, 50(9): 1390-1398.

[8] 陶宁蓉, 蒋祖华, 刘建峰, 等. 考虑工艺流程的船体分段多堆场调度问题研究[J]. **河北工业科技**, 2017, 34(1): 12-17.

TAO Ningrong, JIANG Zuhua, LIU Jianfeng, *et al.* Multi-stockyard scheduling problem considering technological process of hull blocks[J]. **Hebei Journal of Industrial Science & Technology**, 2017, 34(1): 12-17.

[9] 孟令通, 蒋祖华, 陶宁蓉, 等. 船舶组合分段堆场调度方法[J]. **上海交通大学学报**, 2019, 53(7): 780-788.

MENG Lingtong, JIANG Zuhua, TAO Ningrong, *et al.* Combined assembly block scheduling in storage yard of shipbuilding [J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2019, 53(7): 780-788.

[10] ZHENG J L, JIANG Z B, CHEN Q. Block spatial scheduling modelling and application in shipbuilding [J]. **International Journal of Production Research**, 2012, 50(10): 2744-2756.

[11] KWON B, LEE G M. Spatial scheduling for large assembly blocks in shipbuilding [J]. **Computers & Industrial Engineering**, 2015, 89: 203-212.

[12] DAI L, HU H, CHEN F. A GA-based heuristic approach for offshore structure construction spatial scheduling under uncertainty[J]. **Ships and Offshore Structures**, 2015, 10(6): 660-668.

[13] 赵明华. 面向船体曲面分段建造的空间调度及调整算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.

ZHAO Minghua. Study on spatial scheduling and adjustment algorithm oriented to curved block in shipbuilding [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.

(本文编辑:石易文)