

基于迭代贪婪算法的船舶不规则分段 建造空间调度方法

杨智鹏¹, 郑 鹏^{1*}, 苕道方¹, 金 琳², 严 哲³

(1. 上海海事大学 物流工程学院, 上海 201306; 2. 沪东中华造船(集团)有限公司, 上海 200129; 3. 上海外高桥造船有限公司, 上海 200120)

摘 要: [目的]针对船舶曲面分段形状不规则特点和胎位场地空间利用率低的问题, [方法]提出一种基于改进贪婪迭代算法的分段空间调度方法。以分段二维投影的最小包络矩形为对象, 设计包含分段顺序关系和旋转角度的两段式编码方式以及左下定位策略与地平线搜索策略相结合的空间定位解码方式。以最大化胎位空间利用率为优化目标, 在算法迭代过程中综合采用动态破坏与重建、混合局部搜索以及模拟退火算子平衡算法全局和局部搜索能力。针对包络矩形引起的空间浪费, 提出不规则分段再下落方法, 进一步优化布局。[结果]试验结果表明, 改进算法在空间利用率和计算效率上均优于传统方法。[结论]成果为船舶分段生产计划的优化提供有效支持, 并具有较强的实用性。

关键词: 船舶制造; 空间调度; 智能优化算法

中图分类号: U671.99 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2026.06.14

Spatial Scheduling Method for Irregular Ship Blocks on Moulding Bed Based on Iterative Greedy Algorithm

YANG Zhipeng¹, ZHENG Peng^{1*}, CHANG Daofang¹, JIN Lin², YAN Zhe³

(1. School of Logistics Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. Hudong-Zhonghua Shipbuilding (Group) Co., Ltd., Shanghai 200129, China; 3. Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: [Purpose] Addressing the irregularly shaped blocks and low space utilization in jig sites, [Method] a block spatial scheduling method based on an improved greedy iterative algorithm is proposed. Taking the minimum bounding rectangles of 2D projections of blocks as objects, it design a two-stage encoding method incorporating block sequencing relationships and rotation angles, and a spatial positioning decoding method combining the Bottom-Left placement strategy with the skyline search strategy. Aiming to maximize jig space utilization, the algorithm comprehensively adopts dynamic destruction-reconstruction, hybrid local search, and simulated annealing operators to balance global and local search capabilities during iteration. Finally, targeting space waste caused by bounding rectangles, a repositioning method for irregularly shaped blocks is proposed to further optimize the layout. [Result] Experimental results show the improved algorithm outperforms traditional methods in both space utilization and computational efficiency. [Conclusion] It provides effective support for optimizing ship block production planning and exhibits strong practicality.

Key words: shipbuilding; spatial scheduling; intelligent optimization algorithm

收稿日期: 2025-03-11; 修回日期: 2025-06-25

基金项目: 工信部项目(CBG01N23-02-04)

作者简介: 杨智鹏(2000—), 男, 硕士研究生。研究方向: 船舶工程及空间调度。

通信作者: 郑 鹏(1990—), 男, 博士、讲师。研究方向: 复杂制造系统的建模、仿真与优化。

E-mail: zhengpeng@shmtu.edu.cn

0 引言

船舶制造业是我国重要的工业支柱产业之一, 不仅支撑经济发展, 也是衡量国家工业化水平的关键标志。依托技术优势和规模效应, 我国已成为全球造船业的重要力量。近年来, 国际航运需求复苏带动船舶订单量快速增长, 对企业生产效率和精细化管理提出了更高要求。因此, 船舶企业在编制生产计划时, 必须全面统筹设备、场地等各类约束条件, 以确保生产任务的高效衔接与顺利推进。

船舶制造工艺流程复杂, 以船体建造为基础, 包含部件装配、分段制作、总段组合、船坞合拢等众多阶段, 涉及不同类型的人员、设备和场地等生产资源。各生产阶段的顺畅执行直接关系到后续工序的开展, 因此企业需制定切实可行的生产计划, 保障生产进度平稳有序。分段是船舶建造的核心中间产品。由于单件体积大, 作业周期长, 分段对应的胎位场地空间资源成为船舶生产效率的最大瓶颈之一。因此, 如何高效利用这一瓶颈资源, 最大化生产效率, 满足船舶建造的总进度要求, 成为分段车间排程研究的核心问题。

船舶分段的空间调度问题可归类为一类特殊的二维空间排样问题。在二维空间排样理论的发展历程中, 国内外学者围绕几何布局优化与智能算法融合展开了一系列创新研究。VARGHESE等^[1]基于“二维装箱”问题思路, 提出优先采用最左、最下摆放原则的矩形空间布局算法。KIMMS等^[2]创新性地设计了“关键顶点计算法”, 通过减少几何顶点比对次数, 显著提升空间重叠检测效率。随着智能算法的发展, 陶宁蓉等^[3]采用禁忌搜索的邻域搜索策略, 解决了复杂排样问题; 马少辉等^[4]将遗传算法与临界多边形算法结合, 开发了动态空间调度方法; 王静静等^[5]通过改进遗传算法的交叉方式, 增强了全局寻优能力; 高勃等^[6]运用蚁群学习算法求解智能工厂的零件排样问题, 验证了算法在实际生产中的适用性。

针对船舶建造特有的分段空间调度问题, 学者提出了专业化解决方案, 主要聚焦于启发式规则在定位策略上的应用研究。LEE等^[7-8]开创性地提出最大剩余空间利用、初始定位等启发式规则, 奠定了船舶分段调度理论基础。郭美娜等^[9]开发基于树搜索的动态调度方法, 通过局部启发式算法, 实现时段性空间优化。张志英等^[10]采用时空综合分解法, 将复杂问题转化为短周期单平台子问题。聂兰顺等^[11]结合任务优先级策略与启发式布局规则, 构建单场地调度算法。朱辉等^[12]提出多优先规则算法, 配合左下定位策略解码调度序列。ZHANG等^[13]融合首次浪费最小的启发式定位策略与迭代倍增局部搜索算法, 显著提升方案最优性。王蕾^[14]针对船厂实

际场景, 设计二维动态启发式算法与粒子群算法混合模型, 取得显著工程应用效果。

综上所述, 学者们对船舶分段的空间调度方面已有了不少研究, 但目前寻求调度方案的算法选择有限, 且考虑到分段不规则特性的文献数量较少。鉴于此, 本文提出了一种改进贪婪迭代算法, 以最大化胎位空间利用率为目标, 考虑了船舶分段在胎位中摆放的旋转情况。该算法融合了动态破坏重建、混合局部搜索和接受新解等创新机制来提高算法解的搜索效率, 设计了一种融合地平线搜索启发式规则的改进左下定位策略对分段进行了定位处理, 帮助算法实现胎位空间利用率最大化, 并通过多组试验验证了算法的有效性。

1 问题描述与建模

分段是船舶建造过程中的重要中间产品, 分段胎位的空间调度是确保高效建造的关键。在这一过程中, 需要合理安排每个分段在胎位上的位置, 以最大限度地利用胎位资源, 降低生产成本, 提高分段建造效率。针对船舶分段建造问题, 具体需要确定每个分段空间的占用位置和开工时间, 使分段能够在合适的时间和地点开始建造。假设胎位一般能满足分段的高度要求, 不存在分段过高无法建造的情况; 假设胎位内的所有位置都可进行分段的放置; 假设分段的平面投影已经包含加工以及转移等操作所需的安全距离空间; 片段供应、分段翻转以及移除场地等操作均由吊车实现。同时, 要求分段建造过程相互之间不能重叠, 即同一场地空间不能在同一时间被不同分段重复占用。

基于上述假设, 将船舶不规则分段建造空间调度问题定义如下: 分段装焊车间有长为 L 、宽为 W 的矩形胎位场地, 且场地内部不存在不可占用的空间; 现有 N 个不规则分段待处理, 分段的集合定义为 $B=\{B_1, B_2, \dots, B_i, \dots, B_N\}$; 其中, 任一分段 B_i 的面积为 A_i , 其平面投影为具有 m 个顶点的不规则多边形, 分段 B_i 的顶点集合为 $(x_i, y_i)=\{(x_{i1}, y_{i1}), (x_{i2}, y_{i2}), \dots, (x_{im}, y_{im})\}$; 当前可放置分段的胎架面积为 A_Y , 已经被分段包围起来无法再放置其他分段的空隙面积为 A_N 。

针对胎位可用空间, 调度前应满足:

$$\begin{cases} A_Y = LW \\ A_N = 0 \end{cases} \quad (1)$$

调度后应满足:

$$A_Y + A_N = \sum_{i=1}^n A_i = LW \quad (2)$$

模型以最大化已放置的分段空间利用率为优化目标, 表达式为

$$\max U = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{LW - A_Y} \quad (3)$$

2 融合地平线搜索策略的迭代贪婪算法设计

基于胎位调度模型,设计了一套融合地平线搜索策略的迭代贪婪算法,以最大化胎位空间利用率为优化目标,生成不规则分段在胎位上的空间调度方案。算法流程见图1。

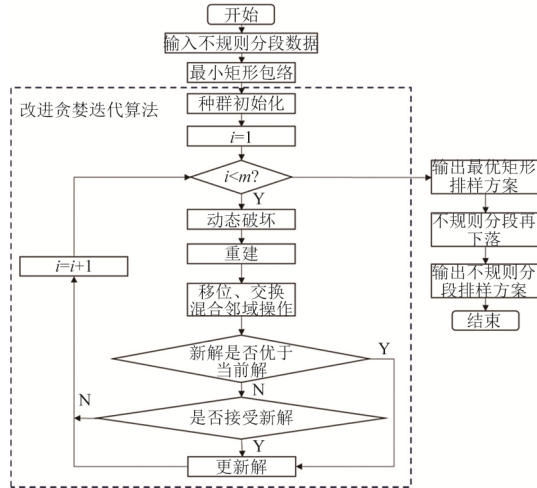


图1 总体算法流程图

Fig. 1 Overall Algorithm Flowchart

对于输入的船舶不规则分段数据,首先,进行最小包络矩形处理,将问题转化为二维空间排样问题;其次,针对包络处理后的分段数据,设计了基于分段旋转和排序顺序的两段式编码,并针对编码内容,采用改进的地平线搜索策略进行解码,以实现分段的定位处理;之后,设计了一种改进的贪婪迭代算法,对分段进行定序处理,相较于传统贪婪迭代算法,改进的贪婪迭代算法采用动态破坏算子,根据当前解的优劣动态调整破坏尺度,并结合局部搜索的规则,帮助算法跳出局部最优;最后,根据不规则分段的下落规则,将包络矩形分段转化为原始的不规则分段,并进行二次下落处理,最终得到船舶不规则分段的胎位空间调度方案。

2.1 分段最小包络矩形处理

针对胎位上不规则分段的加工需求,采用最小包络矩形算法对不规则多边形进行包络矩形处理。最小包络矩形是计算给定二维形状最小外接矩形的有效算法,该矩形以最小面积完全包裹住指定形状。该算法的核心思想是简化二维不规则图形,使其形状特征更接近矩形,从而实现紧凑排列,最终生成布局图案。所有多边形顶点应包含在矩形内,并与矩形的4条边相接。

早期的最小包络矩形求解方法主要基于穷举法,但其计算复杂度高且速度较慢。基于穷举法的思路,发现多边形中最远2点靠近坐标轴时,生成的包络矩形相对较小。因此,最小包络矩形的求解步骤为:首先,确定多边形类型;然后,根据旋转角度将多

边形的每条边旋转,使其与坐标轴重合;最后,排序所有新多边形的包络面积。

通过最小包络矩形算法,可以将不规则分段转化为规则矩形块,便于后续算法的计算与处理。这一过程将问题从二维不规则排样简化为“二维装箱”问题,相较于直接使用原始形状,包络矩形显著减少了计算的几何信息,提高了装箱算法的效率。

2.2 考虑分段旋转的两段式编码设计

通过最小包络矩形算法,胎位上的不规则多边形分段可以简化为不同大小的矩形,进而设计包含两段式编码的贪婪迭代算法进行分段排序来生成胎位调度计划。

贪婪迭代算法是发明最早、应用最广泛的智能优化算法,其参考自然界遗传进化的概念,基于“适者生存”的自然法则,在迭代计算过程中自动积累优秀的片段,并逐渐产生更接近最优解的方案。

在采用贪婪迭代算法求解不规则分段的胎位调度问题时,将问题的解转化成染色体的表示形式,染色体采用双链编码结构。在编码过程中,算法使用2层编码结构,表示待排序分段的顺序以及放置角度的信息。如,一个有8个分段的胎位调度计划方案,其编码方式见图2。图2中:第一层编码代表待排序分段的排序顺序,编码长度为分段总数,其中的数字 k 表示编号为 k 的分段在该顺序建造。在胎位调度计划开始时,分段将从第1个开始进行排序,一直到最后一个。第2层编码代表该分段是否需要旋转90°的旋转,其中0代表该分段不旋转,1代表将该分段旋转90°再放入胎位中进行排序。通过待排序分段的排序顺序和旋转角度编码来展示该分段在胎位中的空间属性,合理表示该分段在胎位调度计划中的调度情况,为后续调度优化奠定基础。

矩形顺序	3	5	1	8	6	4	7	2
旋转角度	1	1	0	1	0	0	0	1

图2 双层编码规则示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Dual Encoding Rules

2.3 基于改进地平线搜索策略的解码方法

算法解码过程是将编码转化为具体调度方案的过程,针对分段调度,生成胎位布置图。对于多个分段包络矩形的排样问题,最重要在于其矩形的定位策略。本算法采用基于左下定位策略的地平线搜索算法:1)将包络矩形按照排序规则(即矩阵顺序编码)进行排序,给予每个矩形一个确定的排序顺序;2)从排序后的矩形中挑选第一个未被放置的矩形,将该矩形放置在当前可用空间的左下角,随后更新当前待排序空间的边界,即将该矩形占用的空间从可用空间中去除;3)依次将未排序的矩形从可用空间的右上角出发,找到可以下降和左移的最大

距离, 根据可向左下移动的最大距离移动该矩形, 随后继续更新当前待排序空间的边界, 直到所有矩形完成排序。

以第4块矩形为例, 图3为第4块矩形采用左下定位策略在胎位空间中排序的过程。

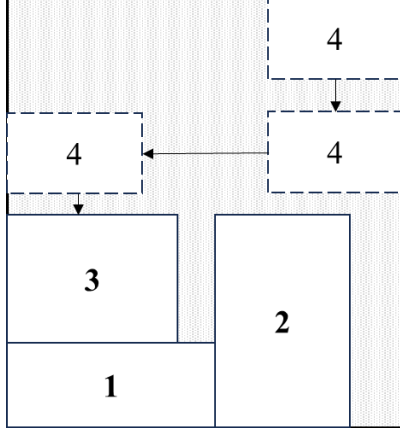


图3 左下定位策略图

Fig. 3 Positioning Strategy Diagram at Lower Left

在处理高度不规则的船舶分段时, 普通的左下定位策略容易在分段之间产生大量不规则的空隙, 这些空隙难以被后续分段有效利用, 导致空间利用率低下。因此基于左下定位策略, 引入地平线搜索的启发式规则来优化定位策略, 见图4。地平线搜索策略的核心思想是尽可能填平当前堆放轮廓(地平线), 优先将分段放置在能降低最高点或填补凹陷的位置。其优势在于通过主动寻找“洼地”进行填充, 能更有效地利用分段自身的不规则形状去契合已有的堆放轮廓, 减少难以利用的无效空间; 同时, 维持相对平整的堆放前沿, 为后续分段放置创造更好的基础, 避免因局部过高或过深导致布局恶化。

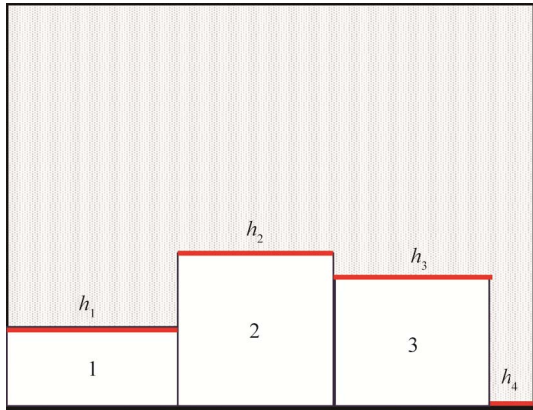


图4 地平线示意图

Fig. 4 Schematic Diagram of Skyline

在调度计划开始时, 初始化地平线为容器底部的水平线。针对每个待放置的分段, 采用左下定位策略进行排序, 排序完成后判断该分段摆放位置下

的地平线高度是否为最低。若该地平线已为最低, 根据分段的高度更新地平线高度; 若该位置地平线并非最低, 应按照剩余地平线的高度从低到高进行对比, 以评估其地平线长度与分段长度的关系。当地平线长度大于分段长度时, 将分段放置于相应的地平线上, 并更新地平线以反映新物品的位置。地平线启发式算法通过不断调整地平线来适应新放置的物品, 能够显著减少未使用空间, 提高装箱效率。图5为以序号5分段为例, 相较于普通的左下定位策略, 地平线启发式算法下分段5在胎位中的位置更加合理, 并且增加了可供排序的空间, 提高了整体空间利用率。

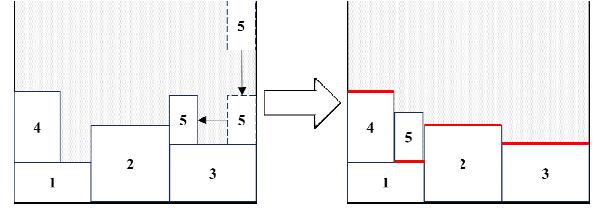


图5 地平线算法下的分段调度

Fig. 5 Segmented Scheduling Under Skyline Algorithm

2.4 改进贪婪迭代算法设计

2.4.1 种群初始化

在胎位调度计划中, 面积较大的分段能够更好地利用有限的胎位空间, 因此在分段调度中, 往往先将较大的分段放在靠前的摆放顺序中, 保证面积较大的分段成功放入胎位后再摆放较小的分段补齐剩余空间。在算法开始之前, 首先计算每个分段的最小包络矩形面积, 按照面积从大到小作为分段的摆放顺序, 即面积最大的分段作为第1个摆放。然后依次生成多个随机的0和1作为分段的旋转角度。如对于5个分段, 最小包络矩形面积大小为 $S_3 < S_1 < S_4 < S_2 < S_5$, 分段摆放顺序编码即为(5, 2, 4, 1, 3), 再随机生成旋转角度编码如(0, 1, 1, 0, 0), 即生成算法的初始解。

2.4.2 破坏和重建

破坏和重建是贪婪迭代算法中寻求新解的重要部分。破坏步骤主要是通过暂时移除一部分分段的排序顺序和旋转角度, 避免算法陷入局部最优解中, 并为后续的重建提供机会来探索新的可行解; 重建步骤是将破坏步骤中被移除的分段重新加入到排序中, 通过重建尝试不同排序顺序和旋转角度来帮助算法寻求更好的解。

普通的贪婪算法通常会使用固定的破坏尺度来对项目进行破坏, 即每次破坏项目的数量都是固定值。本文算法设立了动态调整的破坏率, 其会根据当前解的优劣来进行动态调整破坏尺度, 帮助算法适应不同阶段的搜索。当目前的分段摆放方案更好时, 算法将减小破坏率以进行更精细的局部搜索;

当摆放方案较差时,将增大破坏率来进行更广泛的解空间探索。动态调整破坏率 R_{Des} 为

$$R_{Des} = D_0 + D_C \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{LW - A_Y} \right) \quad (4)$$

式中: D_0 为动态破坏当中的基础破坏率; D_C 为动态破坏时的动态破坏系数。

在重建步骤中,算法将每个被破坏的步骤所移除的分段重新插入当前解中。对于每个待重建的分段,算法会考虑其所有的可放置位置和旋转状态,并逐步尝试将其插入到当前序列的所有可行位置。在此过程中,引入随机旋转率 r 来评估分段在重建后是否改变旋转状态。无论分段经过旋转与否,算法都会评估不同插入位置的适应度,找到各个分段最适合的放置位置和旋转状态,从而选择最佳的调度方案。随后,分段将依据所选方案将分段逐步放置在指定位置,并实时更新当前解的状态。通过该算法,充分利用每一步选择的局部最优解,不断改善整体解。最终,随机旋转的引入不仅增加了了解的多样性,还帮助算法更全面地探索解空间,从而提高找到全局最优解的可能性。

2.4.3 局部搜索与接受新解

局部搜索是主要通过对当前解逐步进行小幅度的改动来寻求更优解的一种方法。通常情况下,局部搜索步骤只用交换、移位其中一种方式来进行操作。本算法应用一种混合局部搜索的方法,结合了交换、移位2种操作,在局部搜索中进行了多次迭代,且每次迭代随机选择交换和移位其中一种操作进行,并选择每次最优的局部方案作为当前的最优方案。

在解的选择部分中,引入模拟退火算法中的接受新解方法来决定是否接受新生成的解,即使新解不一定优于前面所生成的最优解。首先,在新解生成时,比较其与当前解的适应度。若新解优于当前解,直接接受新解作为当前的最优解;若新解不如当前解,则以一定概率接受新解。接受概率计算公式为

$$P = e^{\frac{-|E_{new} - E_{current}|}{T}} \quad (5)$$

式中: E_{new} 为新解的适应度; $E_{current}$ 为当前解的适应度; T 为温度常数,其温度随着迭代次数的增加而逐渐减低。

$$T = 1 + \frac{I}{I_{max}} \quad (6)$$

式中: I 为当前算法迭代的次数; I_{max} 为算法中设置的最终迭代次数。

通过上述计算方法,新解的接受概率将随着迭代次数增加而降低,模拟物理退火过程中的冷却过程,逐渐减少对较差解的接受,收敛到全局最优解。

局部搜索和接受新解方法可以帮助算法跳出局

部最优解的限制,优化最优解的探索过程,提高了算法的全局搜索能力和最终解的质量。

2.5 不规则分段再下落

针对由包络矩形排序图所对应的不规则分段排序图,提出了一种优化不规则图形布局的方法,以减少由于包络矩形引起的图形间空隙,并提高空间利用效率。首先,针对每个不规则图形识别其对应的包络矩形,并进一步查找这些矩形下方的矩形,前提是所查找的矩形并不位于胎位二维空间的最下方。之后,通过实施逐步下落的策略,对每个不规则图形进行模拟移动,直至其与下方矩形对应的不规则图形即将发生重叠。该过程使用射线投射的碰撞检测算法,以精确判断2个不规则图形之间的重叠关系。该算法通过从一个图形的边界点向外发射射线,计算射线与另一个图形边界的交点数量。通常选择一个边界点作为射线的起始点,沿水平方向发射。算法遍历目标图形的所有边缘,检查射线是否与每条边相交,并累加交点的数量。因射线在穿过图形时进入和离开的次数不同,若交点总数为奇数,表示2个图形存在重叠;若为偶数,表示没有重叠。最终,通过判断不规则分段在再下落过程中是否会与其下方的分段发生重叠,进一步确定不规则分段再下落的距离。

在不规则分段再下落的实际操作中,如果当前不规则图形与相应底部矩形对应的不规则图形之间不存在重叠,则允许该图形继续向下移动,直至达到重叠的临界状态。该方法能够有效减少不规则图形之间的空隙,同时确保各图形之间不会发生重叠,从而维护整个排序图的整齐性与合理性。该策略的实施将有助于实现更高效的空间配置,从而提升整体的设计效率与效果。

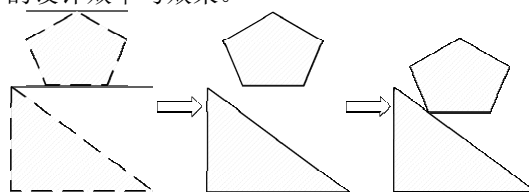


图6 不规则分段再下落示意图

Fig. 6 Schematic Diagram of Irregular Segmentation and Subsequent Descent

3 实例验证与结果分析

为验证本文算法的有效性,进行以下仿真试验。试验中所用到的图形数据来自EURO Special Interest Group on Cutting and Packing (ESICUP)数据集,并根据船舶实际制造过程中生产的货舱边底、货舱舷侧、货舱隔舱、上建、艏部舷墙和机舱甲板等不规则分段形状对试验数据中的图形进行筛选处理。胎位场地设置为长300 m,宽300 m的正方形场

地。将试验数据分成9组不同的案例，其中案例1～案例3包含30个分段，案例4～案例6包含20个分段，案例7～案例9包含10个分段。算法采用Python编程，程序运行环境为主频位5.1 GHz的AMD Ryzen7 7745HX，16 GB内存，GPU为RTX4070。

3.1 参数设置

为进一步验证所提算法的有效性，通过正交试验优化基础破坏率、动态破坏系数和随机旋转率3个参数，确定参数最佳组合，提升算法的性能。

1) 确定因子及其对应水平。选定3个参数作为影响遗传算法性能的因子，分别为基础破坏率、动态破坏率和随机旋转率；对3种因子进行考察，每种因素设置3个不同水平，并设计正交试验。以算例2为例，设定贪婪迭代算法的终止时间为60 s，每种参数组合分别运行10次，取相应参数组合下求得的胎位利用率 U 的平均值。正交试验结果见表1。

表1中：因子1、因子2和因子3分别表示基础破坏率、动态破坏系数和随机旋转率3个算法参数。其中，基础破坏率水平分别取0.1、0.2和0.3，动态破坏系数水平分别取0.6、0.5和0.4，随机旋转率水平分别取0.4、0.5和0.6。表1中数值为每组试验对应的

算法组合，如试验2即基础破坏率取水平1（0.1）、动态破坏系数取水平2（0.5）、随机旋转率取水平3（0.4）。以最大空间利用率作为评价指标，该算法参数组合下对应的目标函数值为91.82%。

表1 正交试验数据

Tab. 1 Orthogonal Experimental Data

试验编号	因子 1	因子 2	因子 3	$U/\%$
1	1	1	1	91.32
2	1	2	3	91.82
3	1	3	2	90.51
4	2	1	3	91.35
5	2	2	2	92.01
6	2	3	1	91.24
7	3	1	2	91.18
8	3	2	1	91.62
9	3	3	3	90.78

2) 极差分析。采用极差分析法对数据进行分析，其分析结果见表2。其中： K 为某因素处于某水平时的试验数据之和； K_{avg} 为 K 值在每个水平下的平均值； R 为该因素的极差值，用于对因素的主次进行排序。

表2 极差分析表

Tab. 2 Range Analysis

项目	因子 1（基础破坏率）			因子 2（动态破坏系数）			因子 3（随机旋转率）		
	水平 1	水平 2	水平 3	水平 1	水平 2	水平 3	水平 1	水平 2	水平 3
K	2.746	2.746	2.736	2.739	2.755	2.725	2.742	2.740	2.737
K_{avg}	0.912	0.915	0.912	0.913	0.918	0.908	0.914	0.913	0.912
R	0.003			0.010			0.002		
最佳水平	2			2			1		

各因素各水平的均值情况见图7，可以确定求解当前问题的最佳参数组合为：基础破坏率0.2（水平2）、动态破坏系数0.3（水平2）、随机旋转率0.6（水平1）。

通过正交试验得到的参数设置，本文所有算法的通用设置为：最大迭代次数为100次、算法运行终止时间为60 s、基础破坏率取0.2、动态破坏系数取0.3，随机旋转率取0.6。



图7 因子各水平均值图

Fig. 7 Factor-Level Mean Values Chart

3.2 试验对比与有效性分析

3.2.1 分段空间定位策略性能分析

在普通左下定位策略的基础上，提出了1种左下定位策略与地平线启发式相结合的改进定位策略。为验证该策略的有效性，针对9组算例分别对比了2种定位策略下的算法性能，试验结果见表3。表3中：相较于普通左下定位策略，本文提出的改进定位策略在不同规模算例下均取得更优的结果，且随着数据量的增加，该算法的优化效果也更为显著。以案例2为例，对案例2中30个不规则分段进行最小包络矩形操作后，将包络的矩形通过普通左下定位策略算法和本文算法分别进行排样，见图8。图8(a)为普通左下定位策略算法的排样结果，图8(b)为本文基于左下定位策略的地平线启发式算法的排样结果。对比最后的排样结果，可以看出本文算法的排样效果能够提升约5.7%。

表3 定位策略算法效果对比表

Tab. 3 Comparison of Positioning Strategy Algorithm Performance

案例	普通左下定位策略		本文定位策略	
	最优解/%	平均解/%	最优解/%	平均解/%
1	86.81	84.02	92.25	88.54
2	87.15	84.55	92.88	87.64
3	86.33	83.89	91.03	87.26
4	85.28	83.52	90.34	86.54
5	85.63	83.94	90.87	86.17
6	86.26	82.76	91.66	85.54
7	82.71	79.05	88.60	84.21
8	82.45	79.67	87.46	83.87
9	83.16	79.88	86.48	83.29

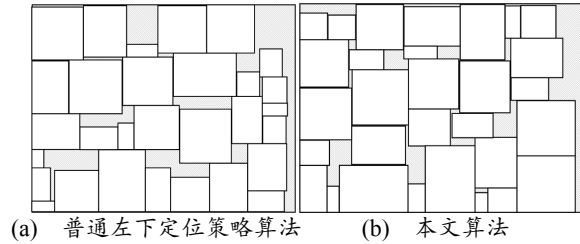


图8 定位策略算法效果对比图

Fig. 8 Comparison of Positioning Strategy Algorithm Performance

3.2.2 改进贪婪迭代算法性能分析

为验证所提改进贪婪迭代算法的性能,针对9组算例,在采用相同定位策略的基础上,将所提算法与传统遗传算法、原始贪婪迭代算法进行性能对比分析,3种算法的迭代次数均为100次,见表4。

表4 智能算法效果对比表

Tab. 4 Comparison of Intelligent Algorithm Performance

案例	传统遗传算法		传统贪婪迭代算法		改进贪婪迭代算法	
	最优解/%	平均解/%	最优解/%	平均解/%	最优解/%	平均解/%
1	88.48	86.71	89.94	86.49	92.25	88.54
2	88.20	85.42	88.56	85.77	92.88	87.64
3	88.63	86.05	87.75	86.41	91.03	87.26
4	87.03	85.71	88.04	84.73	91.34	86.54
5	86.98	85.42	86.45	85.14	90.87	86.17
6	88.66	84.86	90.52	85.72	91.66	85.54
7	83.70	81.09	84.35	81.44	88.60	83.21
8	82.33	80.12	82.64	79.34	86.46	82.87
9	84.39	80.97	83.44	80.74	86.48	83.29

由表4可知:相较于其他2种算法,提出的改进贪婪迭代算法在相同的迭代次数条件下,针对所有算例均可得到最优解。在算法稳定性方面,全部9组试验中,改进贪婪迭代算法的均值在9组中更优,显示出较强的算法稳定性。

以案例2为例,将3种算法所得到的矩形排样结果划为不规则分段排样结果,再结合不规则分段再下落规则,对分段实行再下落操作,并输出最终的胎位调度方案图,见图9。相较于传统遗传算法和传统贪婪迭代算法,本算法在解的水平上提升近9.3%。

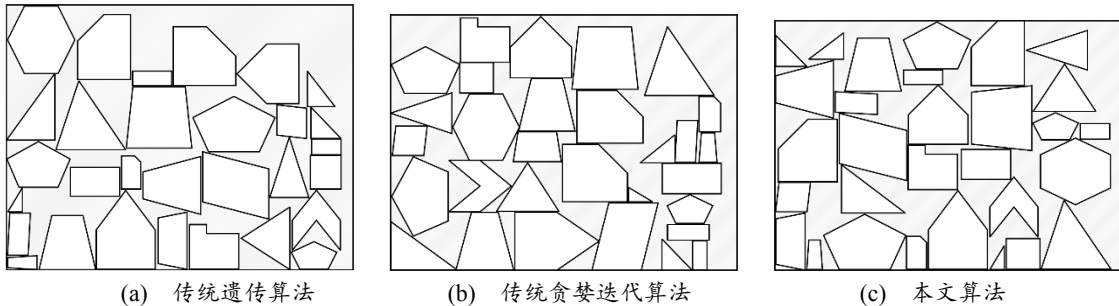


图9 胎位调度方案对比图

Fig. 9 Comparison of Moulding Bed Scheduling Schemes

4 结论

分段建造空间调度是船舶建造过程的核心瓶颈

和关键问题。针对分段不规格尺寸特点,在传统左下定位策略基础上引入地平线搜索策略,通过动态

维护和更新场地状态, 优化分段定位规则; 提出了一种改进的贪婪迭代算法, 将分段的顺序和布置角度信息融入算法的初始化和解码流程, 融合动态破坏重建、混合局部搜索和接受新解等机制, 避免算法陷入局部最优; 针对包络矩形所产生的空隙, 提出不规则分段再下落规则, 进一步优化分段排样结果。案例分析表明, 所提方法能够有效解决船舶不规则分段在胎位空间的调度问题, 提高实际胎位调度的效率和效果, 为船舶制造企业提高生产效率、降低制造成本提供了有力支撑。

参考文献:

- [1] VARGHESE R, YOON D Y. Dynamic Spatial Block Arrangement Scheduling in Shipbuilding Industry Using Genetic Algorithm[C]//3rd IEEE International Conference on Industrial Informatics. 2005.
- [2] KIMMS A, KIRÁLY H. An Extended Model Formulation for the Two-Dimensional Irregular Strip Packing Problem Considering General Industry-Relevant Aspects[J]. European Journal of Operational Research, 2023, 306(3): 1202-1218.
- [3] 陶宁蓉, 蒋祖华, 刘建峰. 带时间窗约束的船体分段空间调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2010(12): 2674-2679.
TAO N R, JIANG Z H, LIU J F. Spatial Scheduling Problem with Time Window Constraint for Block Assembly in Shipbuilding[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010(12): 2674-2679.
- [4] 马少辉, 陆春霞. 船体不规则分段的动态空间调度算法[J]. 运筹与管理, 2014(6): 281-287.
MA S H, LU C X. A Dynamic Spatial Scheduling Algorithm for Irregular Blocks in Shipbuilding[J]. Operations Research and Management Science, 2014(6): 281-287.
- [5] 王静静, 瞿少成, 李科林. 一种基于并行交叉遗传算法的二维不规则排样问题求解[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(7): 188-193.
WANG J J, QU S C, LI K L. A Two-Dimensional Irregular Layout Problem Solving Based on Parallel Cross Genetic Algorithm[J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(7): 188-193.
- [6] 高勃, 张红艳, 朱明皓. 面向智能制造的不规则零件排样优化算法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(6): 1673-1680.
GAO B, ZHANG H Y, ZHU M H. Optimization Algorithm of Irregular Parts Layout for Intelligent Manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(6): 1673-1680.
- [7] LEE K J, LEE J K, CHOI S Y. A Spatial Scheduling System and its Application to Shipbuilding: DAS-CURVE[J]. Expert Systems with Applications, 1996, 10(3/4): 311-324.
- [8] LEE K J, LEE S J, PARK H K, et al. Developing Scheduling Systems for Daewoo Shipbuilding: DAS Project[J]. European Journal of Operational Research, 1997, 97(2): 380-395.
- [9] 郭美娜, 李波. 基于树搜索的一种动态空间调度方法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(14): 180-184.
GUO M N, LI B. Dynamic Spatial Scheduling Approach Based on Tree-Search[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(14): 180-184.
- [10] 张志英, 马姗姗. 基于综合分解策略的船体分段空间调度方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(22): 189-194.
ZHANG Z Y, MA S J. Approach on Block Spatial Scheduling in Shipbuilding Based on Integrated Decomposition Method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(22): 189-194.
- [11] 聂兰顺, 靳金涛, 战德臣, 等. 基于配置空间理论的启发式空间调度算法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(10): 2590-2598.
NIE L S, JIN J T, ZHAN D C, et al. Heuristic Spatial Scheduling Algorithm Based on Configuration Space Theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(10): 2590-2598.
- [12] 朱辉, 杨立乾, 赵金楼. 基于优先规则的船舶分段空间调度算法[J]. 工业工程, 2020, 23(2): 76-82.
ZHU H, YANG L Q, ZHAO J L. Priority Rule-Based Spatial Scheduling Algorithm for Blocks in Shipbuilding[J]. Industrial Engineering Journal, 2020, 23(2): 76-82.
- [13] ZHANG H, LIU Q, WANG L, et al. An Iteratively Doubling Local Search for the Two-Dimensional Irregular Bin Packing Problem with Limited Rotations[J]. Computers and Operations Research, 2022, 137: 1-11.
- [14] 王蕾. 面向船体曲面分段建造的空间调度方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
WANG L. Spatial Scheduling Oriented to Curved Block in Shipbuilding[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.