

基于云-边-端的船舶车间动态排产算法及系统

王淦龙^{1,2}, 吴艳霞¹, 陈建勋^{2*}, 江浩², 王吉昌², 王继峰²

(1. 哈尔滨工程大学 计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001; 2. 中船数字信息技术有限公司, 北京 100161)

摘要: [目的]旨在构建基于云-边-端协同的智能管控体系, 提升生产过程可控性、缩短建造周期并强化决策支撑能力。[方法]以生产计划为驱动, 工艺流程为牵引, 设计云-边-端三级协同架构, 通过构建船体分段车间物理信息融合环境, 建立“计划、资源、执行”联动机制。提出混沌初始种群与自适应遗传操作的改进遗传算法(IGA), 融合模拟退火算法构建动态排产模型; 开发多源异构数据融合引擎, 实现设备状态、工序进度等实时数据驱动的排产优化。[结果]系统应用后, 船舶分段建造周期较传统模式缩短 19.7%, 生产异常响应时间缩短 75%, 设备负荷均衡指数优化 28%。[结论]提出的云-边-端协同管控模式有效破解船舶分段车间计划与执行的动态匹配难题, 建立的“感知、分析、决策、执行”闭环体系为船舶智能制造提供可复用的实施框架, 推动船舶工业数字化转型。

关键词: 船舶分段车间; 云-边-端协同; 动态排产算法; 生产管控系统

中图分类号: TP31 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2026.03.14

Dynamic Scheduling Algorithm and System for Ship Workshop Based on Cloud-Edge-Device Collaboration

WANG Ganlong^{1,2}, WU Yanxia¹, CHEN Jianxun^{2*}, JIANG Hao²,
WANG Jichang², WANG Jifeng²

(1. College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. China Shipbuilding Digital Information Technology Co., Ltd., Beijing 100161, China)

Abstract: [Purpose] Aims to establish a cloud-edge-device collaborative intelligent management and control system to enhance production process controllability, shorten construction cycles, and strengthen decision support capabilities. [Method] Driven by production plans and guided by process flows, a three-level cloud-edge-device collaborative architecture is designed. By constructing a physical-information fusion environment in the ship block workshop, a "plan-resource-execution" linkage mechanism is established. An improved genetic algorithm (IGA) combined with simulated annealing is proposed for the dynamic scheduling model, alongside the development of a multi-source heterogeneous data fusion engine to achieve full-factor visual management and control. [Result] After system implementation, the ship block construction cycle is reduced by 19.7% compared to traditional models, production anomaly response time is shortened by 75%, and the equipment load balancing index is optimized by 28%. [Conclusion] The proposed cloud-edge-device collaborative management and control model effectively resolves the dynamic matching dilemma between planning and execution in ship block workshops. The established "perception-analysis-decision-execution" closed-loop system provides a reusable implementation framework for intelligent ship manufacturing, promoting the digital transformation of the shipbuilding industry.

Key words: ship block workshop; cloud-edge-device collaboration; dynamic scheduling algorithm; production management and control system

收稿日期: 2024-08-14; 修回日期: 2025-10-31

作者简介: 王淦龙(1988—), 男, 硕士、高级工程师。研究方向: 船舶先进制造技术, 智能制造。

通信作者: 陈建勋(1988—), 男, 硕士、高级工程师。研究方向: 船舶先进制造技术, 智能制造。

0 引言

随着人工智能^[1]、大数据^[2]、工业互联网^[3]、物联网^[4]、数字孪生^[5]等新一代信息技术不断涌现,为应对竞争日益激烈的造船市场,船舶数字化转型和智能制造已成为发展趋势^[6-8]。目前船舶的分段生产车间存在着基于手工作业进行分段计划的编排,只能分解到较大的节点或工艺阶段,无法精细化排程指导车间班组进行生产。船舶建造过程信息反馈周期长、车间现场不透明,管理者无法实时获取现场信息,对生产中出现的随机扰动如设备故障、计划调整、任务撤销等,得不到及时有效的解决,尤其是分段对应的中间产品多,设计变更多,工作量大而复杂,船舶制造企业目前面临的主要挑战是生产计划与实际执行情况相差较大,计划不能有效指导生产,主要原因是生产实况获取不及时,计划更新不及时,人为编排计划考虑不周到。基于“云-边-端”协同架构的生产管控系统可实现管理和数据从产线端、工厂端到集团端的全面贯通,能够精准实现机台数据,工厂数据,集团管控业务与流程的精准监控与执行。能够实现数据自动采集,工厂管理高效,集团资源合理统筹,为领导决策提供精准数据支持。进而消除船舶建造过程中的“信息孤岛”,提高产品质量、生产效率和经济效益,加速船舶数字化转型^[3,9-10]。

由于云端高算力和存储能力,边缘端的高实时性,云-边-端协同可有效对产线端侧设备与中心云直接通信带来的低传输速率和带宽受限的压力,因此,近年来云-边-端协同架构成为研究的青睐对象。戴宁等基于云-边-端协同设计了织机的信息采集与监测系统,并从信息通信、数据存储和计算服务方面对织机设备信息采集和应用^[11]。文祥宇等^[12]开展了电力行业中配电网的云-边-端协同研究,以推进配电物联网的应用。崔双双等^[13]针对云-边-端架构中多模态数据统一表征难题,进行了多模态数据建模研究以满足云-边-端协同查询操作。招景明等^[14]设计了电力行业的云-边-端数据采集方案,可实现电力数据的高效采集。

然而,针对船舶建造过程中的云-边-端协同架构及任务调度研究鲜有报道,因此,本文以某船厂分段生产的预处理作业区、切割加工作业区、中小组立焊接生产线、分段装焊作业区、集配作业区、平面分段作业区的生产运行管控数字化为应用场景,以生产任务计划为驱动,工艺流程为牵引,生产过程为主线,通过系统之间的打通能够实现集团云子系统、工厂边子系统和产线端子系统的核心工艺,生产服务的一体化。建设船舶企业管理和数据从产线端,工厂端到企业端全面贯通的云-边-端协同架构,基于数字化车间的信息流和数据流,研究车间

制造运营系统内部结构的动态特性与运行机制,实现船舶车间生产计划的动态排产,进而实现车间生产全过程管控。

1 云-边-端协同架构及业务流程

1.1 云-边-端协同架构

面向船体数字化制造的云-边-端协同生产管控系统以动态排产算法为核心驱动力,通过企业中心云、工厂边、产线端3层架构实现“全局优化、实时调整、现场执行”的闭环管控。企业中心云子系统作为全局决策中枢,部署高级排产算法模块,其核心功能包括改进遗传算法引擎与算法自主学习模块。前者采用基于Logistic映射生成初始解空间的混沌初始化种群与自适应交叉变异机制,以生产任务包(Work Package, WP)、车间级工单(Work Order, WO)、班组级派工单(Work Job, WJ)、工艺物料清单(Bill of Materials, BOM)、设备产能日历为输入,输出工序级排产方案精细到设备及班组,工序任务排产耗时控制在5 min以内;后者通过接收边缘端上传的排产执行偏差数据,如计划工时与实际工时差异率,动态优化算法权重系数,并每2 h向工厂边子系统下发更新后的全局排产方案。

工厂边子系统承担实时动态调度职能,集成动态调度算法模块与数据预处理模块。动态调度算法模块采用模拟退火局部优化引擎,响应产线端实时扰动(如设备故障、物料缺料),通过调整工序优先级与设备分配策略实现排产方案局部修正,显著缩短异常响应时间,进而提升设备负荷平衡率;数据预处理模块通过OPC UA协议采集产线端实时数据(设备状态码、工序完工百分比),经噪声过滤剔除传感器异常值后生成算法输入的“实时约束条件”,如设备可用产能矩阵,并向云端反馈“排产执行偏差率”,当偏差率 $\geq 10\%$ 时触发云端重优化。

产线端子系统作为数据采集与执行反馈终端,构建算法驱动的现场数据采集网络。通过物联网(Internet of Things, IoT)传感器(射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)、可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)、视觉相机)实现设备运行参数(如切割机床主轴温度、焊接机器人负载率)与工序进度数据(如组立焊接完成度)的实时采集,采样频率50 ms/次,数据传输延迟 < 200 ms;数据质量监控模块对采集数据进行实时校验,当传感器故障时自动切换至备用数据通道,确保算法输入数据的可靠性。产线端每100 ms向边缘端推送“实时状态数据包”,并接收边缘端下发的调整后WJ派工单(含工序优先级调整指令),实现现场执行与算法决策的精准协同。基于云-边-端协同的船舶生产管控系统应用架构见图1。

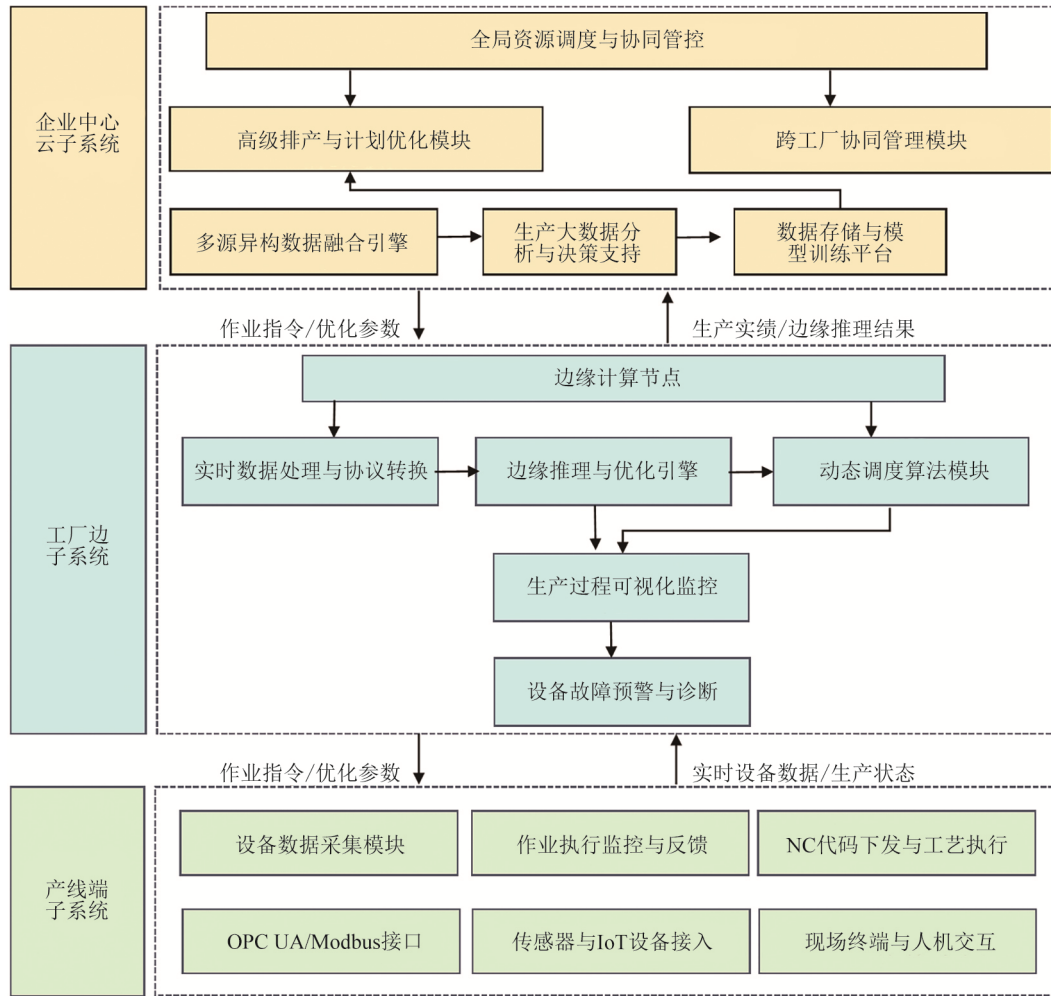


图1 基于云-边-端协同的船舶生产管控系统应用架构

Fig. 1 Application Architecture of Ship Production Management and Control System Based on Cloud-Edge-Collaboration

1.2 业务流程

基于云-边-端协同的业务流程以“算法决策、数据反馈、动态优化”为主线，将改进遗传算法与船舶分段生产全工序深度绑定。在排产计划生成阶段，云端算法模块接收主管部生产任务包（含分段图纸、工艺BOM、交期要求），并融合边缘端实时资源数据（如设备产能、班组人力、物料库存），通过改进遗传算法生成初始排产方案，经拆解为车间级WO工单和班组级WJ派工单后下发至产线端。生产执行过程中，产线端通过边缘网关采集设备状态（如切割机床故障信号）与工序进度（如零件分拣完成率），实时上传至边缘端；当边缘端检测到“设备负荷率 $>90\%$ ”或“工序延期 $>1\text{h}$ ”时，动态调度模块自动启动，通过模拟退火算法调整后续工序计划（如将高负荷设备任务迁移至空闲设备），并向产线端下发调整后的WJ派工单。最终，边缘端向云端反馈“排产偏差分析报告”，云端算法自学习模块基于反馈数据优化算法参数，形成“感知、决策、执行、优化”的完整闭环。通过该流程实现工序计

划达成率显著提升，异常响应时间显著缩短，进而验证云-边-端协同架构与动态排产算法的有效性。

2 基于云-边-端协同的船舶生产管控系统集成

基于云-边-端协同的船舶生产管控系统集成以“开放兼容、业务贯通、数据融合”为核心目标，通过架构层、接口层与业务层的3级联动，实现跨系统、跨层级的一体化管控。在架构设计上，系统依托企业中心云子系统、工厂边子系统及产线端子系统的层级分工，构建“云端统筹、边缘协同、终端执行”的集成框架。即企业中心云子系统负责全局资源调度与数据汇聚，工厂边子系统承担区域级生产协同与实时优化，产线端子系统则通过OPC UA、Modbus等协议实现底层设备数据的实时采集与指令下发，三者通过标准化接口实现数据与业务流程的纵向贯通。

在技术实现层面，系统采用“标准协议为主、定制开发为辅”的接口策略保障集成灵活性。对于主流工业软件与平台（如企业资源计划、IoT平台），

系统通过Web Service、RESTful API等标准接口实现数据交互；针对非标准协议的legacy系统，开发定制化适配模块，完成协议转换与数据格式标准化。例如，与数字化研发设计系统的集成中，系统通过中间表同步制造BOM、工艺图纸、三维模型等静态数据，并通过实时应用程序接口（Application Programming Interface, API）反馈生产过程中的工艺问题；与IoT平台的集成则采用Kafka消息队列实现设备状态、生产实绩等动态数据的高吞吐传输，反向通过边缘网关下发数控（Numerical Control, NC）代码与作业指令，形成“数据采集、分析、决策、执行”的闭环。

业务流程层面，系统集成以“计划、资源、执行”3级联动机制为牵引，打通从研发设计到生产制造的全流程数据链。数字化研发设计系统作为数据源头，向生产管控系统下发包含工时周期、物料清单、检验标准的数字化任务包；企业中心云子系统基于任务包生成月度生产计划，通过工厂边子系统

分解为班组级WJ派工单；产线端子系统将派工单与设备产能、物料配送等实时数据融合，驱动现场作业执行，并通过边缘端数据融合引擎将生产进度、设备负荷等实绩反馈至云端，支撑计划动态调整。此外，系统通过文件传输协议（File Transfer Protocol, FTP）服务器实现工艺附件（如NC代码、三维模型）的高效传输，并与厂内物流系统、质量管理体系集成，实现物料齐套性校验、质量追溯等延伸功能，形成覆盖“设计、计划、生产、检验”的全要素可视化管控。

该集成模式不仅消除了船舶分段车间的“信息孤岛”，更通过多源异构数据融合引擎实现工艺数据、设备数据、生产数据的深度关联，为动态排产算法提供实时数据支撑，同时为管理层决策提供全流程数据可视化看板，最终实现核心工艺与生产服务的一体化协同。基于云边端协同的船舶生产管控系统的集成见图2。

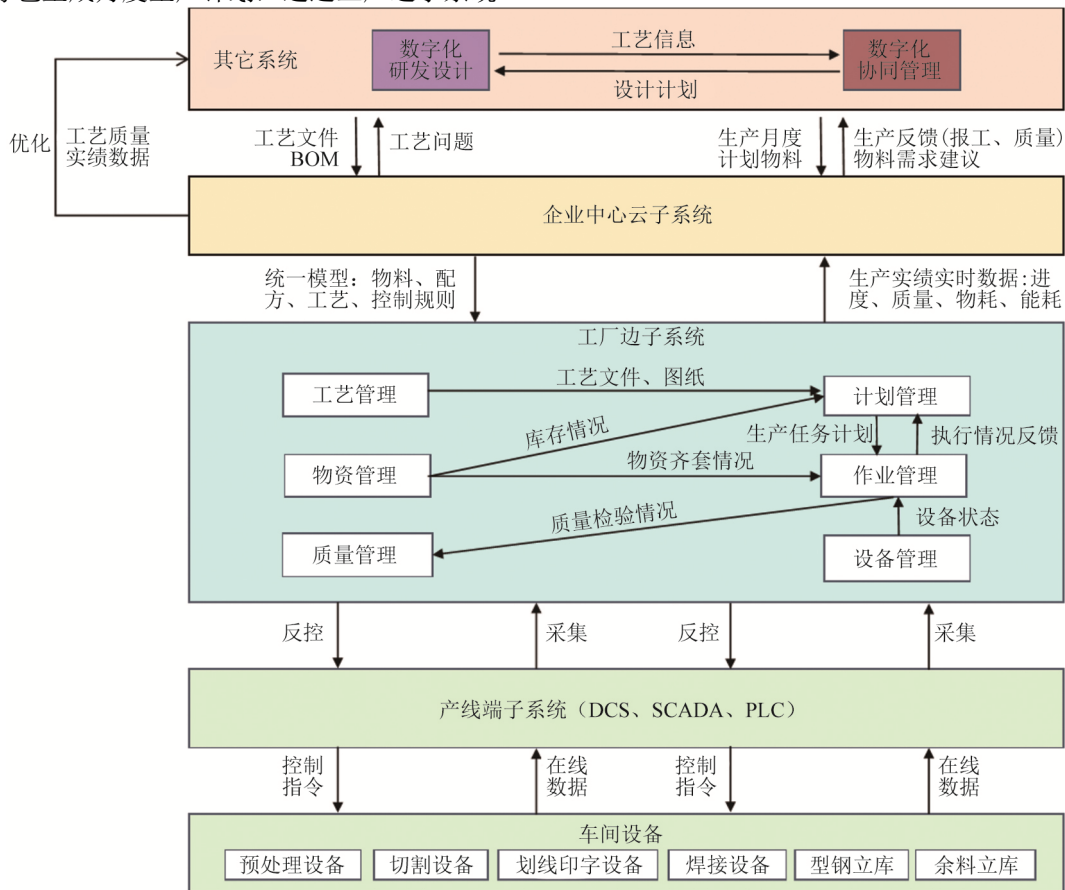


图2 基于云-边-端协同的船舶生产管控系统的集成

Fig. 2 System Integration of Ship Digital Manufacturing Based on Cloud-Edge-Collaboration

3 关键技术研究

3.1 云-边-端协同数据采集

云-边-端协同数据采集是实现船舶生产过程“感知、分析、决策、执行”闭环管控的核心支撑，

其通过构建“端侧实时采集、边缘协同处理、云端全局优化”的3级架构，破解了传统船舶车间数据采集滞后、多源异构集成困难、算力与实时性矛盾等瓶颈。该架构以数据全链路贯通为目标，结合船舶

建造过程中设备分布广、协议异构性强、数据类型多样的特点,实现从底层传感器到云端数据湖的高

效流转与统一治理。基于云边端协同的船舶数字化建造数据采集架构见图3。

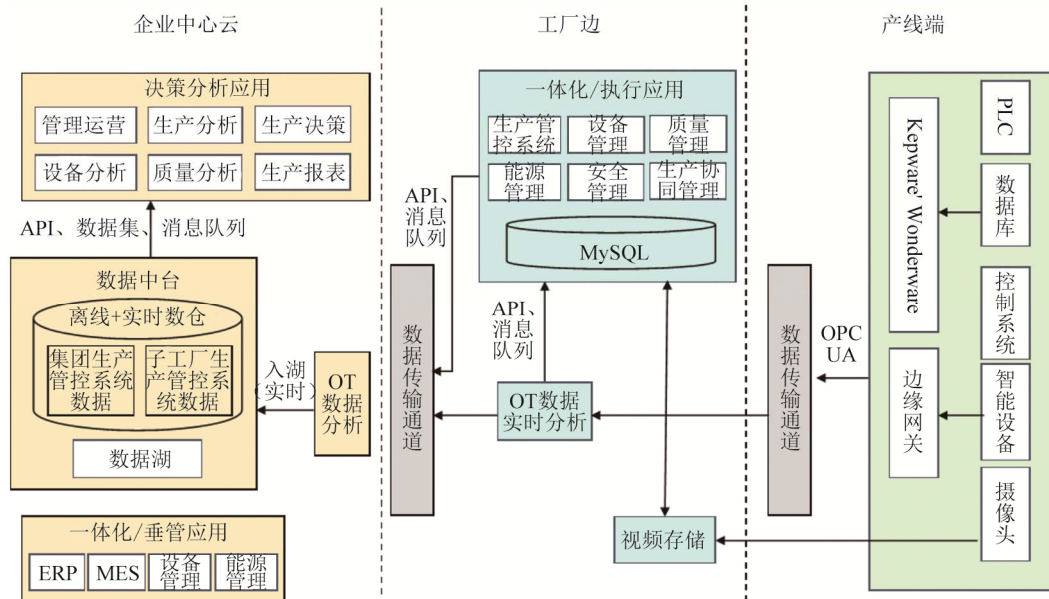


图3 基于云-边-端协同的船舶数字化建造数据采集

Fig. 3 Data Collection of Ship Digital Construction Based on Cloud-Edge-Collaboration

在数据采集架构层面,系统采用分层协同模式,产线端子系统作为感知层,通过OPC UA、Modbus、PROFINET等工业协议接入PLC、计算机数控(Computer Numerical Control, CNC)机床、自动导引车(Automated Guided Vehicle, AGV)、焊接机器人等生产设备,以及温度、振动、电流等传感器,实现设备运行参数、工序完工状态、物料流转信息的实时采集;工厂边子系统作为边缘处理层,部署边缘网关与实时数据处理引擎,对采集的原始数据进行协议转换、噪声过滤与特征提取,通过卡尔曼滤波实现设备状态数据(高频时序)与工序进度数据(低频事件)的时空对齐,形成结构化数据后,通过5G/工业以太网传输至云端,同时对视频监控等大流量数据采用本地存储、关键帧上传策略,降低带宽占用;企业中心云子系统作为数据应用层,依托数据湖实现多源数据的汇聚与治理,支持关系型数据库(MySQL)、时序数据库(InfluxDB)、文件存储等多模态数据的统一接入,通过数据资产地图构建(包含设备台账、数据字典、接口清单)实现数据追踪与质量管理。

关键模块协同方面,数据湖作为核心枢纽,实现业务数据与IoT数据的融合应用,通过数据治理模块对入湖数据进行清洗、标准化和关联,形成面向生产管控的主题数据集。边缘计算节点搭载轻量级人工智能(Artificial Intelligence, AI)推理模型,对实时采集的设备振动、电流数据进行边缘侧分析,实现设备故障预警,并将预警结果同步至云端,更

新设备健康度评估模型。此外,系统开发数据服务API网关,为动态排产算法、生产可视化看板、移动端应用程序(Application, APP)等上层应用提供标准化数据接口,支撑“计划、执行、反馈”全流程的数据驱动。

3.2 云-边-端协同任务调度

3.2.1 问题模型

船舶分段车间任务调度面临动态扰动响应滞后、资源配置冲突及云边协同机制缺失三大核心挑战。传统静态排产算法对设备故障、急件插入等随机扰动响应慢,远超生产允许停滞阈值;多工序与多资源的工艺兼容性约束导致设备负荷不均;云端全局计划与边缘端执行反馈存在“数据断层”。为此,本文提出“混沌初始化、自适应遗传操作与精英保留”改进遗传算法(Improved Genetic Algorithm, IGA),结合云边端协同架构实现“全局优化和实时调整”的二级调度。

以最小化最大完工时间(Makespan)、设备负荷均衡指数及急件订单延误率为多目标函数,数学模型如下:

$$\begin{cases} \min F = \alpha g_1 + \beta g_2 + \gamma g_3 \\ g_2 = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (u_i - \bar{\mu})^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: F 为综合优化指标,取值越小表示优化效果越优; g_1 为最小化最大完工时间; g_2 为最小化设备负荷均衡指数; g_3 为最小化急件订单延误率; α, β, γ 为权重系数,采用熵权-TOPSIS组合法确定,兼顾

生产效率与资源均衡; u_i 为设备*i*的负荷率; $\bar{\mu}$ 为平均负荷率; m 为参与生产的设备总数。

3.2.2 算法模型求解

1) 混沌初始化种群

针对传统随机初始化种群分布不均导致收敛速度慢的问题, 采用Logistic混沌映射生成初始解空间。设种群序列为 $x_{n+1} = \mu x_n(1 + x_n)$, μ 为混沌控制参数, x_0 为Logistic混沌映射的初始值, 用于生成均匀分布的初始种群; $x_0 \in (0,1)$ 且非0.25、0.50和0.75。初始种群与分段车间产线加工次序一一对应, 序列值代表加工机器序号, 出现次数代表机器启动次数。该方法利用混沌系统的遍历性, 使初始解均匀分布于可行域, 提升种群多样性。

2) 自适应交叉与变异

采用两点交叉法, 交叉概率 P_c 动态调整:

$$P_c = \begin{cases} P_{c_max} - \frac{(P_{c_max} - P_{c_min})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f' \geq f_{avg} \\ P_{c_max} & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_c 为自适应交叉概率; P_{c_max} 为最大交叉概率; P_{c_min} 为最小交叉概率; f' 为参与交叉的2个父代中较大适应值; f_{max} 、 f_{avg} 分别为当前种群最大与平均适应值。

通过降低高适应值个体交叉概率, 保护优质基因; 提高低适应值个体交叉概率, 促进种群进化。采用单点变异法, 变异概率 P_m 动态调整:

$$P_m = \begin{cases} P_{m_max} - \frac{(P_{m_max} - P_{m_min})(f_{max} - f)}{f_{max} - f_{avg}} & f \geq f_{avg} \\ P_{m_max} & f < f_{avg} \end{cases} \quad (3)$$

式中: f 为当前待变异个体的适应值; P_{m_max} 为最大变异概率; P_{m_min} 为最小变异概率。

通过 P_{m_max} 和 P_{m_min} 对高适应值个体降低变异概率, 避免破坏最优解; 对低适应值个体提高变异概率, 增强全局搜索能力。

3) 选择遗传操作

采用适应度比例选择和精英保留策略, 适应度比例选择根据个体适应度值大小按比例分配选择概率, 构造子代种群。精英保留策略将每代前10%最优个体直接传递至下一代, 平衡优质基因传承与种群多样性。试验结果表明, 该比例设置可使种群在进化初期保持探索活力, 后期聚焦最优解邻域搜索, 有效提升算法在复杂多模态问题中的收敛效率与解质量。

4 船舶分段车间调度应用

4.1 算法性能测试

从进化计算会议 (Congress on Evolutionary Computation, CEC) 测试函数集中选取具有代表性的函数进行测试, 选取 $F_1 \sim F_6$ 标准测试函数 (详见表1) 验证改进遗传算法 (IGA) 对比传统遗传算法 (GA) 的性能。

表1 测试函数相关参数

Tab. 1 Parameters of Test Functions

函数形式	函数维度	搜索范围	函数最小值
$F_1 = \sum_{i=1}^n x_i^2$	30	[-100, 100]	0
$F_2 = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^i x_j)^2$	30	[-100, 100]	0
$F_3 = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i)^2 + (x_i - 1)^2]$	30	[-30, 30]	0
$F_4 = \sum_{i=1}^n -x_i \sin(\sqrt{ x_i })$	30	[-500, 500]	-12 569.5
$F_5 = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right] + 20 + e$	30	[-32, 32]	0
$F_6 = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	30	[-600, 600]	0

图4为遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 和改进遗传算法 (Improved Genetic Algorithm, IGA) 在不同测试函数 ($F_1 \sim F_6$) 下, 平均适应度随迭代次数的变化情况。2种算法在各测试函数下, 平均适应度都随迭代次数增加而降低 (对于求最小值问题) 或优化 (对于求最大值问题), 说明IGA算法和GA算法均能在迭代过程中不断逼近最优解。

在收敛速度方面, IGA在多数测试函数中表现

更优, 其平均适应度下降更快, 能更快收敛到较优值。在收敛精度上, IGA在大部分测试函数中最终获得的平均适应度值优于GA, 表明其能找到更优解。这可能得益于IGA在遗传操作 (如选择、交叉和变异) 上的改进策略, 增强算法局部搜索能力和跳出局部最优的能力。这表明, IGA在收敛速度和精度上相比GA具有一定优势, 为相关优化问题提供了更有效的解决方案。

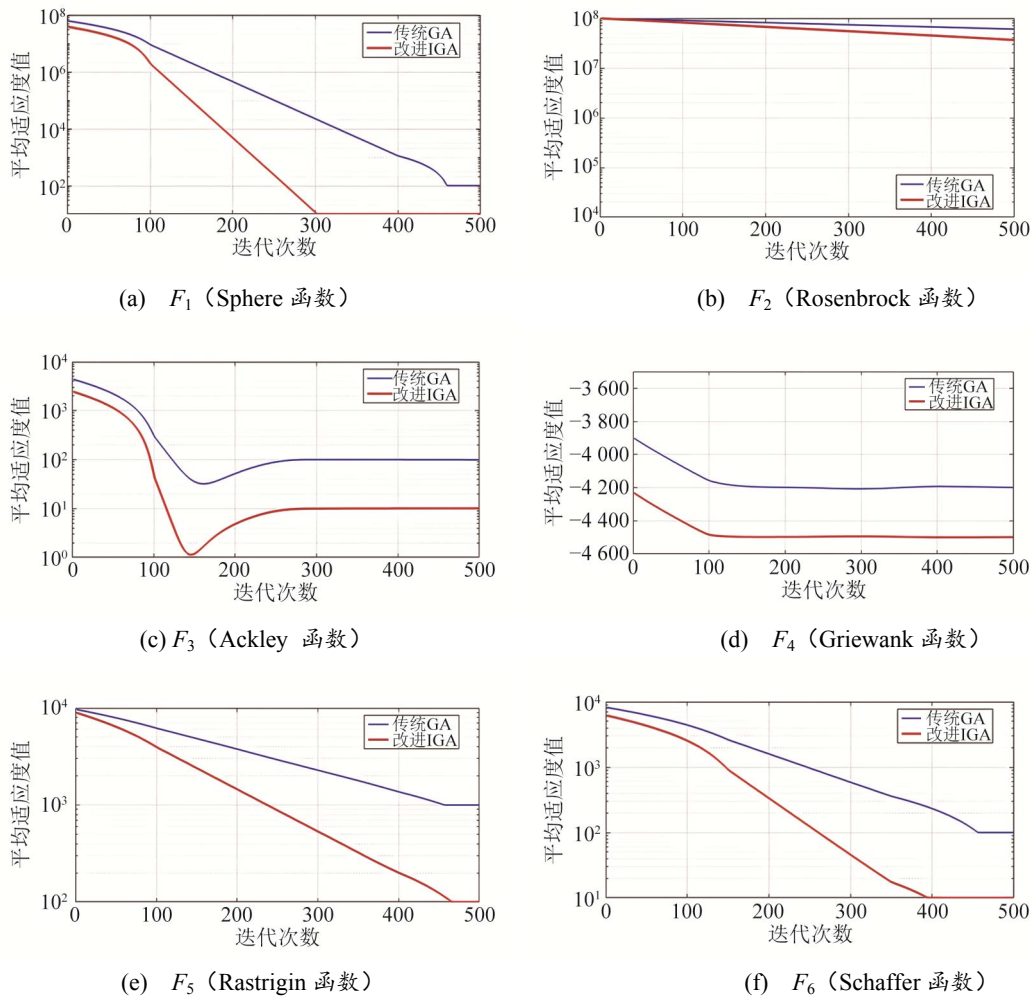


图4 IGA与GA在 $F_1 \sim F_6$ 测试函数中的迭代对比曲线

Fig. 4 Comparison of Iterative Curve Between IGA and GA Algorithms Under $F_1 \sim F_6$ Test Function

为验证本文所提出算法的有效性 with 实用性，改进遗传算法初始种群数量设置为200，最大交叉概率设置为1，最小交叉概率设置为0.7，最大变异率设置为0.3，最小变异率设置为0.01，迭代次数设置为200。试验过程设置加工10个平面分段工件，使用13台设备，并设置每一个工序的设备使用顺序。

图5为IGA和GA在迭代过程中最大完工时间的变化。IGA的最大完工时间的收敛曲线能快速下降且最终值更低，表明其在优化调度、缩短完工时间上不会陷入局部最优，能找到更优解，更适合应用在船舶分段车间的调度中。

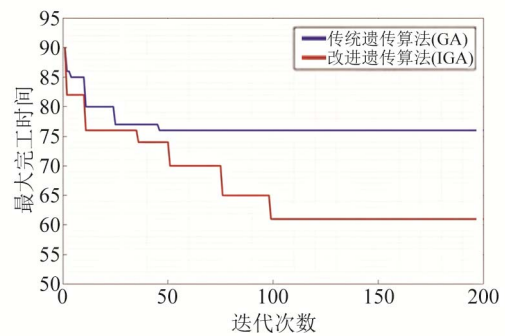


图5 IGA与GA算法的最大完工时间对比图

Fig. 5 Comparison Diagram of Maximum Completion Time Between IGA and GA Algorithms

4.2 船舶分段车间调度

以某船厂平面分段生产线为应用场景, 该产线包含预处理、数控切割、小组立焊接、中组立装配、大组立合拢、平面分段成型及终检7道核心工序, 配置13台加工设备(含数控切割机床3台、焊接机器人5台、组立胎位5个), 传统调度模式下, 因工序衔接不畅、设备负载失衡、紧急插单响应滞后, 导致分段建造周期波动大。

4.2.1 调度方案生成机制

基于云-边-端协同架构, IGA算法与生产执行过程深度融合, 实施流程: 云端接收10个平面分段工件的生产任务包(工艺BOM、工时定额、交期要求), 融合边缘端实时资源数据: 设备状态、班组人员、物料齐套性。产线端通过RFID与视觉相机采集在制品流转数据, 经边缘网关预处理后, 生成包含设备可用产能和工序优先级的“动态约束矩阵”。

IGA以最小化最大完工时间、设备负荷均衡指数、急件延误率为目标, 采用混沌初始化种群生成200组初始解, 经自适应交叉与变异操作, 迭代200次后输出工序级排产方案。当产线端上传设备故障信号, 边缘端模拟退火算法(初始温度 $T_0=100$) 在5 min内完成工序重分配, 更新工序优先级。

4.2.2 调度优化效果验证

IGA相较于GA在关键生产指标的优化情况见表2。IGA的最大完工时间为12.2 d, 较GA算法的15.2 d缩短19.7%, 验证算法在缩短建造周期上的优势。设备负荷均衡指数优化幅度达到28%, 异常响应时间缩短了75%, 这充分证明IGA在船舶分段车间调度中的实用性更高。

表2 IGA与GA对关键生产指标优化

Tab. 2 Optimization of Key Production Indicators by IGA and GA

指标	GA	IGA	优化幅度
最大完工时间/d	15.2	12.2	19.7%
设备负荷均衡指数	0.25	0.18	28.0%
异常响应时间/min	60	15	75.0%

产线端每100 ms上传实时状态数据, 边缘端通过OPC UA协议解析后驱动甘特图动态刷新, 管理层可实时监控工序进度, 云端看板实时展示计划达成率、在制品周转率等关键指标, 为生产管理提供数据驱动的决策依据。

IGA与云-边-端协同架构的结合, 有效解决船舶分段车间计划与执行动态匹配难题, 分段建造周期较传统模式缩短19.7%, 进而验证该方法在船舶车间调度的实用性。

5 结论

针对船舶分段车间计划与执行脱节、信息集成水平低等问题, 本研究构建了基于云-边-端协同的智能管控体系, 通过“计划、资源、执行”3级联动机制与IGA实现动态排产优化。结果表明: 本研究所提架构通过IGA、混沌初始化种群、自适应交叉变异等云端全局优化, 以及边缘端实时调整, 使最大完工时间较传统GA缩短19.7%, 设备负荷均衡指数优化28%, 异常响应时间缩短了75%, 有效破解了计划与执行动态匹配难题。提出的“感知、分析、决策、执行”闭环体系, 首次将云边端协同架构与船舶分段动态调度结合, 为离散制造过程的“数据驱动决策”提供新范式。

然而, 当前研究仍存在场景局限, 当前成果主要针对平面分段车间, 未来可向曲面分段、总装环节拓展, 并结合数字孪生技术构建虚实映射系统, 同时引入强化学习优化动态调度策略, 以适应多品种小批量柔性生产需求, 进一步推动船舶工业数字化转型。

参考文献:

- [1] MALIK S, MUHAMMAD K, WAHEED Y. Artificial Intelligence and Industrial Applications-A Revolution In Modern Industries[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2024: 102886.
- [2] YANG L. Measurement of High Quality Development of Manufacturing Industry Empowered by Big Data Based on Intelligent Sensor Systems[J]. Measurement: Sensors, 2024: 101092.
- [3] 王淦龙, 陈建勋, 吴清财, 等. 基于工业互联网的船舶智能建造整体管控平台设计[J]. 船舶工程, 2023, 45(3): 142-147.
WANG G L, CHEN J X, WU Q C, et al. Design of Integrated Management and Control Platform for Ship Intelligent Construction Based on Industrial Internet[J]. Ship Engineering, 2023, 45(3): 142-147.
- [4] 王伟, 尚东方, 韩雪. 基于时序特征数据高效索引技术的物联网感知设备安全自动监测技术[J]. 计算技术与自动化, 2024, 43(1): 61-65.
WANG W, SHANG D F, HAN X. Automatic Security Monitoring Technology of IoT Sensing Devices Based on Efficient Indexing Technology of Time Series Characteristic Data[J]. Computing Technology and Automation, 2024, 43(1): 61-65.
- [5] WANG L, CHEN J, ZHANG Y, et al. Research on Data Mapping and Fusion Method of Ship Production Workshop Based on Digital Twins[J]. Measurement and Control, 2024: 00202940241236088.

- [6] 祝能, 陈实, 蔡玉良, 等. 传感器数据在船舶数字化中的应用价值与挑战[J]. 中国造船, 2019, 60(3): 209-223.
ZHU N, CHEN S, CAI Y, et al. Applicable Value and Challenge of Sensor Data in Digitization of Ships[J]. Shipbuilding of China, 2019, 60(3): 209-223.
- [7] 庞龙. 制造执行系统在船舶制造企业中的应用[J]. 船舶职业教育, 2023, 11(3): 78-80.
PANG L. The Application of Manufacturing Execution System in Shipbuilding Enterprises[J]. Shipbuilding Vocational Education, 2023, 11(3): 78-80.
- [8] 刘微, 宋杨, 严平, 等. 船舶数字化建造发展现状与趋势[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(15): 173-176.
LIU W, SONG Y, YAN P, et al. Development Status and Trend of Ship Digital Construction[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(15): 173-176.
- [9] 王鹏宇, 郭威, 刘坚. 船舶智能制造流水线质量检验数据采集技术应用[J]. 造船技术, 2021, 49(4): 89-92.
WANG P Y, GUO W, LIU J. Application of Quality Inspection Data Acquisition Technology in Ship Intelligent Manufacturing Assembly Line[J]. Shipbuilding of China, 2021, 49(4): 89-92.
- [10] 董裕民, 张静, 谢昌佐, 等. 云边端架构下边缘智能计算关键问题综述: 计算优化与计算卸载[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(3): 765-776.
DONG Y M, ZHANG J, XIE Z C, et al. A Survey of Key Issues in Edge Intelligent Computing Under Cloud-Edge-Terminal Architecture: Computing Optimization and Computing Offloading[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(3): 765-776.
- [11] 戴宁, 徐开心, 胡旭东, 等. 云边端协同下的织机设备信息采集与监测系统[J]. 纺织学报, 2024, 45(8): 215-224.
DONG N, XU K X, HU X D, et al. Research on Information Acquisition and Monitoring System for Looms Based on Cloud Edge Collaboration[J]. Journal of Textile Research, 2024, 45(8): 215-224.
- [12] 文祥宇, 李帅, 刘文彬, 等. 面向配电网的云边端协同技术研究[J]. 山东电力技术, 2022, 49(7): 8-11.
WEN X Y, LI S, LIU W B, et al. Research on Cloud-Edge-User Collaboration Technology for Distribution Network[J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(7): 8-11.
- [13] 崔双双, 吴限, 王宏志, 等. 面向云边端协同的多模态数据建模技术及其应用研究[J]. 软件学报, 2023, 35(3): 1154-1172.
CUI S S, WU X, WANG H Z, et al. Multimodal Data Modeling Technology and Its Application for Cloud-Edge-Device Collaboration[J]. Journal of Software, 2023, 35(3): 1154-1172.
- [14] 招景明, 张捷, 宋鹏, 等. 一种高效的基于云边端协同的电力数据采集系统[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(5): 49-55.
ZHAO J M, ZHANG J, SONG P, et al. An Efficient Method of Electric Power Data Acquisition System Based on Cloud Edge Collaboration[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(5): 49-55.

(上接第123页)

- [7] SIMONE A. Ludwig. Optimization of Control Parameter for Filter Algorithms for Attitude and Heading Reference Systems[C]//IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2018.
- [8] 严恭敏, 苏幸君, 翁浚, 等. 基于惯导和无时延滤波器的舰船升沉测量[J]. 导航定位学报, 2016, 4(2): 91-93.
YAN G M, SU X J, WENG J, et al. Measurement of Ship's Heave Motion Based on INS and Zero-Phase-Delay Digital Filter[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2016, 4(2): 91-93.
- [9] ASSEFIN W, JINSEOK J, KIM S K, et al. Improved Attitude and Heading Accuracy with Double Quaternion Parameters Estimation and Magnetic Disturbance Rejection[J]. Sensors, 2021, 21(16): 5475.
- [10] 严恭敏, 翁浚. 捷联惯导算法与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2019.
YAN G M, WENG J. Strapdown Inertial Navigation Algorithm and Principles of Integrated Navigation[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2019.
- [11] SARIGUL O D, CELINK C, KINACI K O, et al. A System-Based Approach to Estimate Manoeuvring Performance of Naval Ships Supported by Captive Tests in Regular Waves[J]. Ocean Engineering, 2025, 321: 120378.
- [12] 中国电子科技集团公司第二十六研究所. 倾斜仪、水平仪通用规范: SJ 20873—2003[S]. 2003.
China Electronics Technology Group Corporation No.26 Research Institute. General Specifications for Inclinometers & Horizon-Meter: SJ 20873-2003[S]. 2003.