

薄板平面分段制造执行管控技术

Thin Plate Flat Block Manufacturing Execution Control Technology

韦青嵩¹, 甄希金², 董家琛^{1,2}

WEI Qingsong¹, ZHEN Xijin², DONG Jiachen^{1,2}

1. 广船国际有限公司, 广州 511462

Guangzhou Shipyard International Co., Ltd., Guangzhou 511462, China

2. 上海船舶工艺研究所, 上海 200032

Shanghai Shipbuilding Technology Research Institute, Shanghai 200032, China

摘要

Abstract

【DOI】10.13788/j.cnki.cbgc.2025.07.Z2

[目的] 为实现船厂薄板平面分段高效建造, 发挥薄板平面分段流水线最大产能, 促进设计、工艺、制造等业务流程及数据信息深度融合, [方法] 通过面向工艺流程的设计模型驱动车间组织生产, 突破基于物联网的关键生产要素及工艺数据采集, 形成基于车间工艺建模、计划排程、指令驱动、执行反馈的薄板平面分段流水线全流程制造执行管控技术。[结果] 结果表明: 该技术可显著提升高端船舶产品的生产质量和效率。[结论] 研究成果可为薄板平面分段制造执行管控提供一定参考。

[Purpose] In order to achieve high-quality and efficient construction of thin plate plane segmentation in shipyards, maximize the production capacity of thin plate plane segmentation assembly lines, promote the deep integration of design, process, manufacturing and other business processes and data information, [Method] by driving workshop production organization through process oriented design models, key production factors and process data collection based on the Internet of Things are broken through, and a full process manufacturing execution control technology for thin plate plane segmentation assembly lines based on workshop process modeling, planning and scheduling, instruction driven, and execution feedback is formed. [Result] The results indicate that this technology can significantly improve the production quality and efficiency of high-end ship products. [Conclusion] The research results can provide some references for the execution control of thin plate planar segmented manufacturing.

关键词

Key words

模型驱动; 计划排程; 执行管控

model driven; planning schedule; executive control

0 引言

近年来，汽车滚装运输船（Pure Car and Truck Carrier, PCTC）市场持续火爆，船厂敏锐把握 PCTC 细分船型市场的需求，承接大量订单，三大造船指标也不断创下新高。PCTC 船为降低船舶质心，大量采用 5 mm ~ 9 mm（以 6 mm 为主）厚的钢板。广船国际有限公司建造的 7 000 车和 8 600 车系列 PCTC 船分别包括 426

个和 390 个分段，薄板分段占比达 30% 以上。为满足项目进度要求，每天需要生产至少 4 个薄板分段，鉴于此，亟须优化设计、工艺和制造等业务流程，基于物联网、大数据和人工智能等先进技术，实现薄板平面分段制造执行管控，进一步释放薄板平面分段流水线整体效能，保持高水平发展态势。

1 薄板平面分段制造执行管控流程分析

为解决薄板平面分段流水线数据不畅通、节拍不匹配、业务流程交叉等问题，从薄板平面分段流水线实物流、业务流和信息流等 3 个方面对薄板线管控流程进行全面剖析，以实物流为牵引、业务流为导向、信息流为依据，构建数字工艺模型，驱动车间制造执行，自动完成计划排程、下发和反馈，采集工位信息并生产工艺数据进行可视化，实现薄板平面分段制造执行管控^[1-2]。薄板

平面分段制造执行管控流程见图 1。图 1 中：OPC 为开放性过程控制（OLE for Process Control）；PLC 为可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller）；DAP 为详细组立程序（Detail Assembly Procedure）；PDM 为产品数据管理（Product Data Management）；ERP 为企业资源计划（Enterprise Resource Planning）；AM 为船舶生产设计软件（Aveva Marine）。

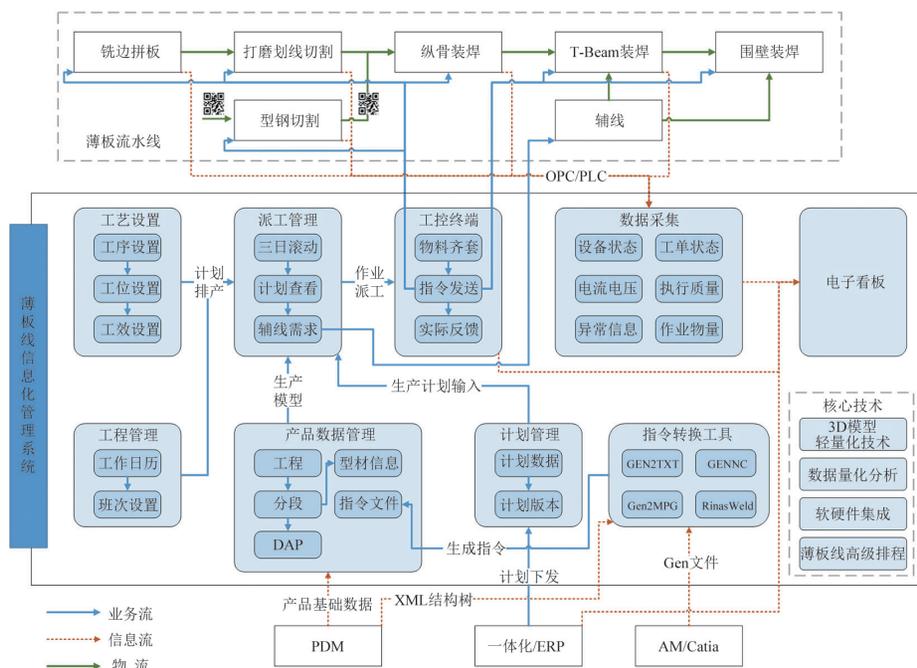


图 1 薄板平面分段制造执行管控流程

Fig. 1 Execution and Control Process for Segmented Manufacturing of Thin Plate Planes

1.1 薄板平面分段流水线组成

薄板平面分段流水线主要生产工位包括 1 条片段线和 2 条分段线。其中：片段线包含激光拼板工位、大板喷丸划线切割工位、纵骨装焊工位和型材加工生产线；分段线包含 T-Beam 装配工

位、T-Beam 焊接机器人工位、围壁装焊工位。薄板分段依次经拼板、切割、纵骨装焊、T-Beam 装焊和围壁装焊等工序作业形成。

1.2 薄板平面分段制造执行管控业务流程

薄板平面分段制造执行管控包括计划管理、指令转换、产品数据管理、工艺配置、日程管理、派工管理、工控终端、数据采集和大屏看板等业务流程。

首先，从企业一体化系统中获取月度计划，在系统中管理计划版本和维护计划数据；其次，通过指令转换工具把 AM 生产设计模型转换为工位生产指令。然后，在系统中维护拼板、切割、

纵骨、T-Beam、围壁等中间产品数据和工效模型数据。根据日程安排、产品数据、工艺信息和计划，在系统中完成三日滚动计划编排，并将日程计划发布至各工位工控终端，在终端上完成执行反馈。最后，基于物联网技术采集各工位生产工艺数据，构建薄板平面分段流水线自动执行反馈机制，以大屏看板为载体，分析生产工艺数据，实现制造执行业务管控。

1.3 薄板平面分段制造执行管控数据信息流分析

根据薄板平面分段制造执行管控业务流程，对数据信息流进行分析，一方面从 ERP、PDM、AM 等系统获取生产计划、产品结构和分段模型等数据，另一方面从流水线各工位获取设备状态和生产工艺等数据，将这些数据加工、转换为执

行管控的过程信息，形成端到端派工反馈机制，实现基于模型的生产设备驱动，确保生产过程的精确可靠。最终，对设备状态和计划实际等生产数据进行可视化分析和展示。

2

薄板平面分段流水线数字工艺模型

为保证中间产品模型信息单一数据来源，通过构建制造工艺模型，向车间制造执行管控提供基础支持。为实现车间量化派工，构建流水线工

效模型，形成一套基于薄板分段生产工艺流程、流水线运行机理的数字工艺模型，为车间制造执行精准管控提供模型数据支持^[3-4]。

2.1 构建制造工艺模型

制造工艺模型是薄板平面分段流水线表达作业内容和流程的业务模型，通过与 PDM 系统集成，解析分段产品结构数据。面向薄板平面分段流水线激光拼板、大板切割、纵骨装焊、T-Beam

装焊和围壁装焊等工艺流程，重构制造物料清单（Manufacturing Bill of Materials, MBOM），实现 MBOM 与工艺流程一一匹配。

2.2 构建流水线工效模型

流水线工艺流程与传统生产方式有所区别，作业环节紧扣，自动化程度高。以激光拼板为例，将激光拼板工位的作业流程拆分为第一块板

上料及定位，第二块板上料及定位，钢板夹紧及铣刀准备，板材同步铣边，焊接小车定位，焊接，开始下一条焊缝动作、片体移动和夹紧等工

艺步骤，工艺参数与产品规格和材质相关，与车间计划排产紧密联动，为量化派工提供计算依据。各工位工效模型及其附表见表1~表6。表

2中：LHAW为激光电弧复合焊接（Laser Hybrid Arc Welding）；MAG为富氩混合气体保护焊（Metal Active Gas Arc Welding）。

表1 激光拼板工位工效模型

Tab. 1 Efficiency Model of Laser Splicing Workstation

工艺步骤	描述	标准作业时间 /s
STA01-01	第一块板上料及定位	1 100
STA01-02	第二块板上料及定位	1 100
STA01-03	钢板夹紧及铣刀准备	30
STA01-04	两块同步铣边	见表 2，根据板厚对应铣边速度，基于物量换算时间
STA01-05	焊接小车定位	110
STA01-06	焊接	见表 2，根据板厚对应焊接速度，基于物量换算时间
STA01-07	开始下一条焊缝动作、片体移动、夹紧	60

表2 激光拼板工位工效模型附表

Tab. 2 Appendix to the Efficiency Model of Laser Splicing Workstation

焊接方式	板厚 /mm	焊接速度 /(cm/min)	铣边速度 /(cm/min)
LHAW	4	250	400
	6	250	400
	8	250	400
	10	250	400
	12	210	350
	14	180	350
LHAW+MAG	16~18	110	300
	20	100	300
	25	80	250

表3 切割工位工效模型

Tab. 3 Efficiency Model of Cutting Workstation

工艺步骤	描述	标准作业时间 /s
STA02-01	加载程序及参考定位	60
STA02-02	喷丸及划纵骨线	1 700
STA02-03	横向线（流水线方向）	2 200
STA02-04	其他线条	2 200
STA02-05	其他形状切割时间	见表 4，根据板厚对应切割速度，基于物量换算时间
STA02-06	外边部切割时间	见表 4，根据板厚对应切割速度，基于物量换算时间

表4 切割工位工效模型附表

Tab. 4 Appendix to the Efficiency Model of Cutting Workstation

板厚 /mm	电流 /A	速度 /(mm/min)
4	55	140
5	55	127
6	55	115
6	90	220
8	90	205
10	90	185
12	90	175
15	200	200
16	200	190
20	200	150
20	280	190
25	200	115
25	280	155

表 5 纵骨装焊工位工效模型

Tab. 5 Efficiency Model of Longitudinal Bone Welding Workstation

工艺步骤	描述	标准作业时间 /s
STA03-01	拾取纵骨, 移动到装配线	210
STA03-02	放置纵骨、调整、压紧、程序加载	—
STA03-03	焊接小车焊接	见表 6, 根据型材厚度对应焊接速度, 基于物量换算时间
STA03-04	压紧打开、焊接小车回到原点、清枪	60
STA03-05	自动模式循环时间	120

表 6 纵骨装焊工位工效模型附表

Tab. 6 Appendix to the Efficiency Model of Longitudinal Bone Welding Workstation

角焊形式	型材厚度 /mm	焊接速度 /(cm/min)
MAG	4	180
MAG	6	180
MAG	8	160
MAG	10	140
MAG	12	140
MAG	14	100
MAG	20	80
MAG	25	80

3

模型驱动的车间制造执行管控

管控平台可以接收 AM 设计软件 / 一体化系统下发的板材零件、大板片体、型材零件和 T-Beam 片体等模型文件, 通过数据驱动的模式指令转换接口, 实现铣边拼板、喷丸划线切割、纵

骨装焊、型材加工和 T-Beam 机器人焊接等指令的转换, 完成基于模型的薄板平面分段流水线各工位生产指令设计^[5]。

3.1 激光拼板工位

激光拼板工位作为薄板平面分段流水线第一道工序, 作业过程中包括来料确认、基准线对齐、板宽测量、铣边和拼板焊接等关键环节, 通过解析设计零件模型 gen 文件, 获取板架名称、

材质、数量、铣边量和板材长度等基本信息, 根据拼板工艺, 分析计算板材进出料宽度和铣边长度、焊接长度等数据, 采用 OPC 工业协议写入 PLC 模块, 驱动激光拼板工位生产作业。

3.2 喷丸划线切割工位

大板片段喷丸划线切割工位是薄板平面分段流水线第二道工序, 完成大板片段三点定位、纵骨线喷丸、结构划线、内孔切割和外轮廓切割等关键环节, 根据设备参数及工艺要求, 解析套料大板片段 gen 文件, 配置切割机作业范围、匹配

切割机全局坐标, 批量规划纵骨结构线喷丸、绘制, 设计跳桥、缓冲过度、坡口和点火延迟等工艺, 基于全局最优距离算法优化喷丸、划线、切割路径, 生成作业指令, 驱动喷丸划线切割工位生产作业。

3.3 纵骨装焊工位

喷丸划线切割工位完成作业后经侧边夹持小车运输至纵骨装焊工位, 完成型材进料、抓取、定位和焊接等关键环节, 根据设备参数及工艺要

求, 解析型钢零件模型 gen 文件和大板片段 gen 文件, 获取板架名称、型材数量、焊脚高度、铣边量、规格和材质等基本信息, 配置纵骨装焊设备

作业范围及缓焊段长度，基于模型识别型材安装方向，分析计算型材间距、型材长度和起止焊位

置等数据，匹配焊接工艺策略，采用 OPC 工业协议写入 PLC 模块，驱动纵骨装焊工位生产作业。

3.4 型材加工生产线

型材加工生产线作为薄板平面分段流水线的辅线，为纵骨装焊工位供应型材，主要有型材矫直、铣边喷丸、切割和分拣等关键环节，根据设备参数及工艺要求，解析型钢零件模型 gen 文件和大板片段 gen 文件，获取型材名称、规格和长度等基本信息，分析计算型材面板、腹板形成的夹角驱动胎架机构动态调整；基于大板片段 gen 文件，识别型材安装方向驱动分拣门架正反向旋

转。面向型材加工工艺流程，制定型材生产线“四进五出”生产策略（见表 7），最终生成 xml 文件，实现由模型驱动的型材生产线矫直、铣边喷丸、切割和分拣作业。表 7 中：BP 为球扁钢（Bulb Plate）；AL 为角钢（Angle Steel）；FB 为扁钢（Flat Bar）；CT 为企业内部代码，表示成品 T 型钢。

表 7 “四进五出”生产策略
Tab. 7 Production Strategy of "Four in and Five out"

阶段	进出料口	规则
进料	校直前	球扁钢 BP, 高度 ≤ 280 mm 角钢 AL, 高度 ≤ 280 mm 扁钢 FB, 高度 ≤ 280 mm
	铣边前	球扁钢 BP, 高度 > 280 mm 角钢 AL, 高度 > 280 mm 扁钢 FB, 高度 > 280 mm
	切割前	T 型材 CT
	缓存工位	大型 T 型材
出料	主线	球扁钢 BP 角钢 AL 扁钢 FB
	余料斗	根据余料编号判断
	主线缓存斗	混合套料
	长料斗	> 350 mm
	短料斗	< 350 mm

3.5 T-Beam 焊接机器人工位

T-Beam 焊接机器人工位是焊接大型 T 梁角焊缝和垂直立缝的智能焊接工位，由 2 个门架 4 台机器人协同作业组成，采用离线编程的方式解析设计模型文件驱动机器人作业。通过读取 STP

文件，识别焊缝特征，匹配工艺规则，突破基于 3D 模型和运动学分析的焊接作业路径自动规划技术，生成的焊接程序支撑 T-Beam 焊接机器人高效执行。

4

薄板平面分段流水线生产计划管控

4.1 基于资源约束的薄板平面分段流水线排产

为满足薄板平面分段流水线连续生产、节拍均衡的要求，分析流水线生产特点，结合数字工

艺模型，开展基于资源约束的薄板平面分段流水线排产技术研究。流水线核心资源包括场地和工

艺装备，由于流水线的中间产品无法转运至外场缓存，必须连续生产，并且不仅需要满足后道工序需求，还需要满足当前工位开工条件，采用顺推的排产方法对流水线进行排产^[6-7]。分析瓶颈工

位，输出受负荷产能约束的计划结果，优化生产节拍和排班策略，生成有依据、可执行的薄板平面分段流水线生产计划，见图2。

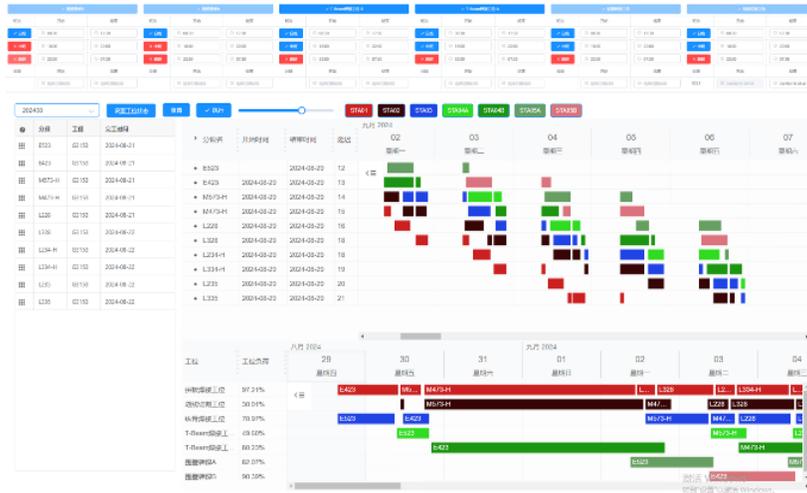


图2 薄板平面分段流水线计划

Fig. 2 Plan for Thin Plate Plane Segmented Production Line

4.2 端到端的任务执行与反馈

为确保生产任务指令高效、精准执行，建立端到端任务下发、执行与反馈机制，基于薄板平面分段流水线排产结果，物料清单（Bill of Materials, BOM）、工艺图纸、生产指令与生产任务同步传输至流水线各工位工控机，工位间遵循

任务互锁原则，确保任务按顺序生产。工控端执行来料确认、指令传输、开工/完工确认、质量检查和运输至下道工序等业务环节，形成生产执行反馈闭环，见图3。

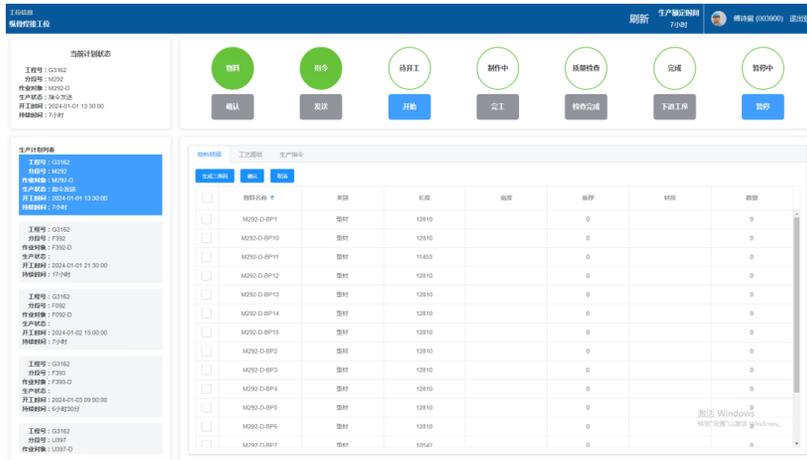


图3 工控端执行反馈

Fig. 3 Feedback Execution on the Industrial Control End

5

薄板平面分段流水线数据采集与可视化

5.1 基于物联网的关键生产要素及工艺数据采集

为更好地监测现场工位设备运行状况，将生产任务主动反馈机制转变为被动采集模式，真实反映薄板平面分段流水线生产情况，梳理生产线各工位关键生产要素及工艺数据，根据数据类型、形成特点和传输方式，重点围绕 OPC、PLC、Modbus、TCP/IP、文件解析等形式，制定不同的采集策略^[8-10]。

为实现与薄板平面分段流水线各工位的快速连接，对工位设备边缘侧数据高效读写、存储、分析，构建时序型边缘数据库，提供聚合类、选择类、转换类、预测类计算服务，满足对设备状态、设备状态起始时间、设备运行及空闲时间、设备故障、设备报警、设备加工及运行参数等信息进行采集、存储和分析的要求，见图 4。

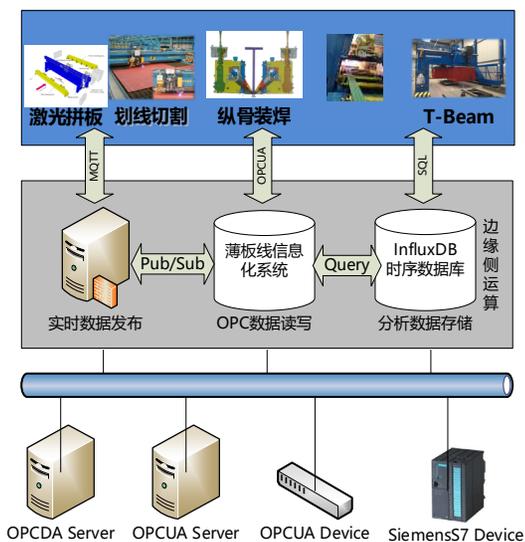


图 4 基于物联网的数据采集、传输与存储
Fig. 4 Data Collection, Transmission, and Storage Based on the Internet of Things

5.2 自助式薄板线生产工艺数据分析

运用低代码自助式报表分析服务，统计各工位日/周/月完成分段数、焊缝数、打磨长度、喷墨长度、切割长度、打磨耗时、喷墨耗时、切割耗时和型材加工数等车间制造执行关键指标，使用图表完成各指标可视化分析^[11-13]，见图 5。

针对薄板平面分段流水线关键工位关键设

备进行持续追踪分析，基于物联网的数据采集技术，开展面向设备待机、操作、报错、频次的分析，使得车间管理人员更加直观地了解设备运行情况、生产能力。通过热力图矩阵分析激光拼板使用频率，见图 6。结合车间排班作息，反映车间实际生产情况，大大降低运维成本。



图 5 自助式生产报表
Fig. 5 Self-Service Production Report

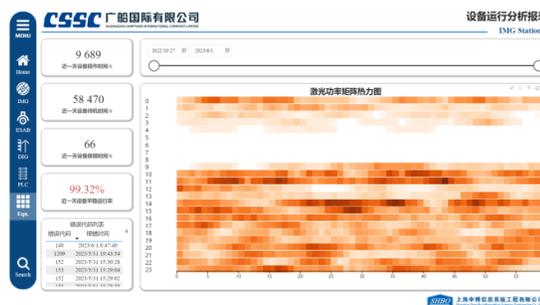


图 6 关键设备运行分析
Fig. 6 Key Equipment Operation Analysis

本文提出了一种薄板平面分段制造执行管控技术,通过构建工艺数据模型来确保生产流程的精确性和效率,利用模型驱动车间制造执行管控,实现生产指令的自动化转换和下发,基于资源约束的计划管控技术优化生产节拍,实现端到

端的任务执行与反馈,最后通过物联网技术进行关键生产要素数据采集与可视化,为船厂提供了一套从设计到制造全流程的高效、自动化生产执行管控解决方案,显著提升了高端船舶产品的生产质量和效率。

参考文献:

- [1] 杨润党,续爱民,甄希金,等.船舶薄板平面分段产线技术发展及应用现状[J].船舶工程,2022,44(10):16-23.
YANG R D, XU A M, ZHEN X J, et al. Development and Application Status of Ship Thin Plate Plane Segmented Production Line Technology[J]. Ship Engineering, 2022, 44(10): 16-23.
- [2] 李兰美,黄斐,陈明铭.豪华邮轮建造特点初步分析[J].造船技术,2014(2):10-13.
LI L M, HUANG F, CHEN M M. Preliminary Analysis of the Construction Characteristics of Luxury Cruise Ships[J]. Marine Technology, 2014(2): 10-13.
- [3] 苏鹏程.薄板平面分段流水线生产计划仿真与优化研究[D].广西钦州:北部湾大学,2021.
SU P C. Research on Simulation and Optimization of Production Plan for Thin Plate Plane Segmented Production Line[D]. Qinzhou, Guangxi: Beibu Gulf University, 2021.
- [4] 梅先志,姚飏,马晓平,等.薄板平面分段流水线多工位协同的计划管控[J].造船技术,2018(6):77-82.
MEI X Z, YAO B, MA X P, et al. Planning and Control of Multi-Station Collaborative Production Line for Thin Plate Plane Segmentation[J]. Marine Technology, 2018(6): 77-82.
- [5] 王世利,毛祖杰,韦乃琨,等.面向大型豪华邮轮薄板平面分段流水线的信息化技术[J].船舶标准化工程师,2021,54(1):15-20.
WANG S L, MAO Z J, WEI N K, et al. Information Technology for Thin Plate Flat Segmented Assembly Line for Large Luxury Cruise Ships[J]. Ship Standardization Engineer, 2021, 54(1): 15-20.
- [6] 董家琛,韦乃琨,侯星,等.推拉结合的船舶分段智能车间高级排程方法[J].船舶工程,2021,43(6):24-29.
DONG J C, WEI N K, HOU X, et al. Advanced Scheduling Method for Ship Segmented Intelligent Workshop Combining Push and Pull[J]. Ship Engineering, 2021, 43(6): 24-29.
- [7] 王长武.船体平面分段生产线生产节拍研究[D].江苏镇江:江苏科技大学,2017.
WANG C W. Research on the Production Cycle of Ship Surface Segmentation Production Line[D]. Zhenjiang, Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2017.
- [8] 孟宁,孔宁,韩峻峰,等.基于 OPC UA 技术的 T 型梁焊接机器人在线监测系统[J].造船技术,2023,51(2):67-70.
MENG N, KONG N, HAN J F, et al. Online Monitoring System for T-Beam Welding Robot Based on OPC UA Technology[J]. Marine Technology, 2023, 51(2): 67-70.
- [9] 刘雨田,孙晓军.基于 OPC UA 的船舶薄板平面分段加工智能车间的构建[J].中外船舶科技,2019(4):12-15.
LIU Y T, SUN X J. Construction of an Intelligent Workshop for Segmented Processing of Ship Thin Plate Planes Based on OPC UA [J]. China and Foreign Shipbuilding Technology, 2019(4): 12-15.
- [10] 程庆和,杭小平.基于物联网的船舶分段加工数字化车间[C]//数字化造船学术交流会议.2017.
CHENG Q H, HANG X P. Digital Workshop for Segmented Ship Processing Based on the Internet of Things[C]// Digital Shipbuilding Academic Exchange Conference. 2017.
- [11] 董家琛,李沁,侯星,等.船厂薄板车间工艺数据治理与可视化应用[J].造船技术,2024,52(3):78-83.

- DONG J C, LI Q, HOU X, et al. Process Data Governance and Visualization Application in Shipyard Thin Plate Workshop[J]. Marine Technology, 2024, 52(3): 78-83.
- [12] 王程程, 朱立谷, 张迪. 一种面向时序数据的交互式可视化系统 [J]. 中国传媒大学学报 (自然科学版), 2017, 24(1): 64-70.
- WANG C C, ZHU L G, ZHANG D. An Interactive Visualization System for Time-Series Data[J]. Journal of Communication University of China (Natural Science Edition), 2017, 24(1): 64-70.
- [13] 张小晖, 郝洁. 智能化、可视化的大数据治理体系的研究与应用 [J]. 数字技术与应用, 2020, 38(2): 27-29.
- ZHANG X H, HAO J. Research and Application of Intelligent and Visualized Big Data Governance System[J]. Digital Technology and Applications, 2020, 38(2): 27-29.

