

船舶修造全流程数字孪生体系构建及绿色低碳生产管控研究

蔡伟巍

上海中远海运重工有限公司 上海 201913

摘要：船舶修造行业生产工序繁杂、作业链条冗长，整体生产流程复杂，传统粗放的管控模式难以适配现代化生产要求，长期存在能源消耗偏高、生产资源利用率低下、污染全过程管控薄弱等突出问题，制约行业绿色高质量发展。本文立足船舶修造全流程生产作业特征，深入梳理数字孪生技术架构与行业绿色低碳精细化管控的内在逻辑与适配关系，构建贴合船舶修造实际应用场景的绿色数字化管控体系。文章系统完善全域数据采集、多维度建模融合、一体化管控平台搭建的完整实施路径，依托前沿数字化技术重构能耗管控、污染物治理、生产资源配置的精细化新型管控模式。通过从体系运行规范、标准化数据管理、全流程管控流程、长效运维机制等多个维度，全方位优化升级船舶修造行业低碳生产运营模式，有效解决传统生产管理的各类短板，可为新形势下船舶修造行业绿色低碳与数字化智能化融合转型提供重要的理论依据和实践支撑。

关键词：船修造；数字孪生；全流程体系；绿色生产；低碳管控

引言：船舶修造是航运产业与高端装备制造领域的核心支撑产业，生产工序繁杂、作业场景多元、资源投入量大，生产过程伴随持续性能源消耗与污染物排放。传统船舶修造生产长期沿用人工主导的管控模式，数据流通不畅、资源调配固化、管控精度不足等问题普遍存在，粗放式生产模式难以适配当下行业绿色化、数字化转型的发展趋势。数字孪生技术凭借数字化复刻、数据整合、智能管控的技术优势，能够深度融入工业生产全流程。依托该技术重构船舶修造生产管控体系，打通生产全链条数字化管控壁垒，落实精细化低碳生产要求，成为推动船舶修造产业提质降碳、转型升级的重要方式。

1 船舶修造生产与数字孪生基础体系

1.1 船舶修造全流程生产构成

船舶修造生产体系包含多段衔接紧密的作业环节，各环节形成完整的生产链条。前期生产涵盖船体结构下料、构件加工、部件装配等基础工序，完成船舶主体结构的初步成型。中期生产聚焦分段合拢、整体搭载、管路铺设、电气设备安装等核心作业，搭建船舶完整的结构框架与配套系统^[1]。后期生产围绕船舶涂装、舾装完善、设备调试开展，补齐船舶外观防护与功能配置。船舶维修生产涵盖船体损耗检测、破损结构修复、老旧设备更换、系统性能调校等专项作业。各生产环节对应专属作业标准与作业模式，覆盖船舶建造、改造、维修的全部生产场景，构成船舶修造行业的完整生产体系。

1.2 船舶修造传统生产运行特征

传统船舶修造生产依托线下人工管控模式推进作业开展，生产推进依托一线作业经验与固定生产流程。生产数据依靠人工记录、纸质存档的方式留存，数据采集覆盖范围有限，数据更新存在滞后性。各生产工序独立推进，工序之间的数据流通渠道单一，生产信息难以实现互通共享。现场生产管控依靠人工巡查、阶段性检查的方式落实，管控覆盖范围存在局限。生产资源按照固定方案分配调度，资源调配模式固化，难以适配不同作业场景的生产需求。生产管控模式偏向粗放化，细分作业环节的管控精细度不足。

1.3 数字孪生技术基础架构与组成要素

数字孪生技术具备多层次结构化架构体系，各层级承担专属技术功能，支撑数字化生产管控落地。数据采集层为技术运行提供基础支撑，负责各类生产数据、设备数据、环境数据的全面采集与初步整理。模型构建层依托数字化技术搭建对应生产场景的数字化模型，还原实体生产场景的各类结构与运行状态。数据处理层对采集的原始数据进行筛选、梳理、规整处理，保障数据的准确性与可用性。功能应用层依托规整后的数据与数字模型，搭建适配生产管控的各类数字化功能。完整技术体系涵盖数据、模型、算法、应用多项核心组成部分，支撑全场景数字化管控运作。

1.4 绿色低碳生产管控基础逻辑

船舶修造绿色低碳生产管控围绕生产能耗、污染排放、资源利用三大核心维度搭建运行逻辑。管控工作针

对生产过程中的各类能源消耗开展精细化约束,规范能源使用方式。管控体系针对施工产生的废气、废水、固废等污染物制定管控标准,约束各类污染排放行为。管控模式聚焦生产资源高效利用,减少原材料浪费、设备空耗等低效生产行为。低碳管控贯穿船舶修造全部生产环节,以精细化管控方式优化生产模式,降低生产活动对生产环境的影响,搭建可持续的船舶修造生产运行模式。

2 船舶修造数字孪生体系搭建关键内容

2.1 船舶修造生产数据采集体系建设

船舶修造数字孪生体系稳定运行,依托完善的数据采集体系作为底层支撑。数据采集工作覆盖修造现场各类生产资源与作业环节,针对施工设备运行状态、场地作业环境、物料消耗情况、工序作业进度开展全方位信息收录^[2]。布设适配船舶修造复杂工况的智能采集设备,捕捉现场各类动态生产信息。分类梳理船舶建造、船舶维修不同场景的采集需求,划定针对性的数据采集范围与采集维度。规范各类生产信息的采集标准,统一数据收录口径,规避信息错乱、内容缺失等问题。搭建全覆盖、标准化的数据采集框架,为后续数字化建模、数据处理及平台运行提供扎实的数据来源。

2.2 生产要素数字化建模搭建

生产要素数字化建模是实现船舶修造数字化管控的核心环节。围绕船舶修造现场实体要素开展数字化复刻,涵盖场地空间、施工设备、原辅材料、船体结构、作业人员等全部生产组成部分。结合船舶修造各工序的作业特点,细化建模精度,细化不同生产要素的结构参数、运行参数与状态参数。区分静态要素与动态要素的建模方式,静态要素聚焦空间结构、设备型号等固定信息录入搭建,动态要素侧重作业状态、物料存量等可变信息的实时匹配搭建。依托专业化建模技术完成实体要素的数字化转化,构建适配船舶修造全作业流程的数字模型集群。

2.3 全流程数据传输与融合架构构建

船舶修造现场生产数据类型繁杂、来源分散,专属数据传输与融合架构可实现各类信息的有效整合。搭建专属的场内数据传输通道,承接前端采集设备收录的各类生产数据,保障信息传输的稳定性与时效性。针对结构数据、能耗数据、进度数据、环境数据等不同类型信息开展分类处理,破除不同作业环节的数据壁垒。设计标准化的数据融合规则,对零散、异构的原始数据进行统一规整、分类整合。打通各作业模块、设备模块与数字模型之间的信息通路,实现各类生产数据的集中归集与统一管理,支撑数字化体系常态化运转。

2.4 船舶修造数字孪生平台功能搭建

数字孪生平台承载船舶修造全流程数字化管控的各类核心功能,对应生产实际需求完成模块搭建。围绕现场生产管控、要素管理、状态监测、流程管控等实际业务,设置独立功能模块。细化各模块的业务适配能力,覆盖物料管理、设备管控、工序监管、生产资源调配等各类基础业务。对接前端数据采集与模型系统,实现生产状态的数字化呈现与业务的线上化处置。依托平台功能模块细化生产管控颗粒度,落实精细化生产管理模式,为船舶修造绿色低碳生产管控提供数字化载体,支撑生产模式的智能化升级。

3 基于数字孪生的船舶修造绿色生产管控模式

3.1 生产能耗数字化管控方式

船舶修造各作业环节会产生不同类型的能源消耗,数字化管控方式可对能耗行为进行规范约束。依托数字孪生数据体系对接各类耗能设备,捕捉电力、燃油、水能等各类能源的消耗情况^[3]。细化各施工工序的能耗管控单元,拆分段加工、船体搭载、涂装施工等不同工序的能耗条目。依托数字化手段梳理能耗产生的全过程内容,识别作业过程中存在的低效耗能行为。依托平台数据支撑调整设备运行工况,规范设备启停时长与运行状态。细化现场用能管理标准,依托数字化手段细化用能管控颗粒度,优化船舶修造整体用能结构,减少无效能源消耗。

3.2 修造作业污染物管控路径

船舶修造施工过程会产生涂装废气、施工废水、废弃物料等多种污染物质,数字化体系可优化污染管控形式。针对涂装、打磨、清洗等易产生污染的作业工序,搭建针对性的数字化管控模块。记录各施工环节污染物产生的基本信息,梳理污染产生的工序来源与生成规律。依托数字化管控手段规范现场施工操作流程,约束不规范施工带来的污染增量。细化不同污染物的处置流程与管控标准,依托数字化模块落实各工序污染管控要求。推进污染管控工作的精细化落地,弱化施工活动对作业场地及周边环境的影响。

3.3 生产资源集约化管控模式

船舶修造涉及钢材、涂料、管材、配件等大量生产物料,资源利用水平直接影响生产绿色化水平。数字孪生平台可整合现场各类生产资源信息,梳理物料储备、领用、消耗的全过程内容。规整各类物料的使用标准,结合施工工序需求规划物料领用额度与使用范围。把控物料损耗细节,减少随意浪费、过度领用等不合理用料行为。统筹调配现场施工设备与人力资源,匹配各工序

的作业需求,规避资源闲置、空转等低效问题。提升各类生产资源的利用效率,构建集约高效的现场资源管理形式。

3.4 全流程低碳作业管控方式

船舶修造低碳作业管控覆盖生产全链条的操作规范与管理要求。依托数字孪生体系串联各工序的低碳管控内容,搭建连贯的现场作业管控体系。细化各施工环节的低碳操作规范,约束粗放式施工带来的高耗高排问题。依托数字化数据支撑优化工序排布方式,规整现场施工秩序。把控现场作业的每一处管控细节,落实精细化低碳作业要求。持续优化现场作业模式,推动船舶修造生产作业向低耗、低排、高效的绿色化方向转变。

4 船舶修造数字孪生与低碳管控优化路径

4.1 数字孪生体系运行机制优化

船舶修造数字孪生体系的长效运行,需要依托科学完善的运行机制作为支撑。结合船舶修造现场复杂的作业场景,梳理体系各层级的运行逻辑,明确数据采集、模型运算、平台应用的递进运行规则。规整各功能模块的运行权限与作业边界,理顺生产管控各环节的业务流转顺序。针对传统数字化运行模式中存在的流程漏洞、运行卡顿等问题,调整体系内部运行逻辑。优化模型更新与信息迭代的运行规则,保障数字化体系适配修造工序的动态变化。完善体系运维管理细则,规范日常运行维护工作内容,提升数字孪生体系运行的稳定性与适配性。

4.2 生产数据管理体系完善

生产数据是数字孪生赋能低碳管控的核心载体,规范化的数据管理模式可提升生产管控精准度。完善船舶修造全场景数据管理规范,统一各类生产、能耗、排放数据的录入与存储标准。优化数据筛选与清洗流程,剔除无效、错乱的劣质数据,保留有效生产信息。搭建分层分类的数据存储架构,对物料数据、能耗数据、工序数据、环境数据进行分类归档。细化数据调用与管理规范,规范不同业务场景的数据使用流程。持续补齐各工序数据采集与管理短板,夯实数字化低碳管控的数据基础。

4.3 绿色低碳管控流程升级

传统船舶修造低碳管控流程存在管控颗粒粗放、流程单一的问题,无法适配精细化绿色生产需求。依托数字孪生技术重构低碳管控流程,重构能耗管控、污染管控、资源管控的业务流程。细化各施工工序的低碳管控

节点,将绿色管控要求融入下料、加工、搭载、涂装、维修等全作业环节。简化冗余的管控步骤,精简线下繁琐的审批与核查流程,提升管控工作推进效率。细化各管控环节的执行标准,明确各工序低碳管控的执行重点,让绿色生产管控流程更贴合现场作业实际。

4.4 数字化低碳生产运维体系完善

数字化运维工作保障低碳生产管控模式的常态化落地。搭建适配船舶修造行业的数字化运维框架,覆盖设备运维、平台运维、生产运维多个维度。细化数字平台日常运维工作内容,定期排查系统运行隐患,保障平台各项低碳管控功能正常运转。结合现场低碳生产作业需求,更新运维工作内容与管理标准。对接一线生产作业场景,调整运维工作侧重点,匹配不同修造工序的低碳管控需求。搭建常态化运维模式,维系数字化低碳生产体系的稳定运转,持续提升船舶修造绿色生产管控水平。

结束语

行业绿色发展与数字化转型是相辅相成、双向赋能的重要发展过程,二者深度融合是船舶修造产业转型升级的核心趋势。数字化技术的创新落地与深度应用,能够彻底革新船舶修造行业陈旧、粗放的传统生产管控模式,破解行业发展瓶颈。通过搭建规范化、标准化的数字孪生运行体系,完善生产全流程的数据采集、分析、管理与融合机制,针对性重构适配船舶建造、维修、改造等多元作业场景的智能化低碳作业管控模式,有效改善船舶修造行业生产管理粗放、能源消耗过高、生产资源浪费、环保管控不到位等各类突出痛点。在此基础上,持续优化数字化管控体系运行机制与现场生产运维模式,迭代升级全链条绿色管控流程与标准体系,可稳步提升船舶修造全过程生产资源利用效率、能耗精细化管控能力与污染物治理水平,全面赋能船舶修造产业提质增效,推动行业实现高质量、绿色化、数字化的可持续长效发展。

参考文献

- [1]姜天际.船舶修造企业常见危险作业管理要点分析[J].船舶物资与市场,2025,33(5):103-105.
- [2]陈如东.船舶修造初期的风险管控实践探讨[J].劳动保护,2025(6):104-105.
- [3]张雅茹,盛进路,牛文斌.船舶修造有限空间作业安全风险研究[J].工业安全与环保,2024,50(11):54-59.