

智能铺排作业规范技术研究

刘孟云¹, 刘军朴¹, 吴秉蔚², 俞钧杰², 潘永军³

(1. 中国船级社上海规范研究所, 上海 200135; 2. 上海交通建设总承包有限公司, 上海 200120; 3. 中交疏浚技术装备国家工程研究中心, 上海 201208)

摘要: 铺排船作为交通装备工程作业的关键船型, 对于航道治理和沿海护底工程具有重要意义。本文基于国内外铺排技术的发展现状及应用情况, 结合多功能智能铺排船建造项目, 深入探讨了智能铺排的核心技术, 包括自动锚泊定位系统、充灌装置与自动控制系统、智能吊装系统等, 并首次制定了智能铺排作业规范技术要求和功能附加标志, 填补了该领域的规范标准空白, 为智能铺排作业和系统开发提供了理论依据。本项研究对我国智能铺排船舶建造与应用的工程实践具有重要价值。

关键词: 铺排船; 智能铺排; 作业规范; 自动化控制; 技术标准

中图分类号: U662.1 **文献标志码:** A

Research into the Rules for Intelligent Geotextiles Laying Vessels

LIU Mengyun¹, LIU Junpu¹, WU Bingwei², YU Junjie², PAN Yongjun³

(1. Shanghai Rules & Research Institute, China Classification Society, Shanghai 200135, China; 2. Shanghai Communications Construction Contracting Co., Ltd., Shanghai 200120, China; 3. CCCC National Engineer Research Center of Dredging Technology and Equipment Co. Ltd., Shanghai 201208, China)

Abstract: Geotextile layer vessels play a crucial role in transportation equipment engineering, particularly in channel regulation and coastal revetment projects. Based on the current development status and application scenarios of geotextile laying technology domestically and internationally, combined with the construction project of multi-functional intelligent geotextile layer vessels, this paper thoroughly discusses the core technologies of intelligent geotextile laying, including the automatic mooring and positioning system, filling device and automatic control system, intelligent lifting system, etc. It also develops technical requirements and functional additional notions for intelligent geotextile laying operation rules for the first time, filling the gap in normative standards in this field, and provide theoretical basis for intelligent geotextile laying operation and system development. The research in this paper has important value for the engineering practice of the construction and application of intelligent geotextile-laying vessels in China.

Key words: geotextile-laying vessel; intelligent laying; operational specification; automation control; technical standard

1 引言

铺排船是一种为适应航道治理工程和沿海护底工程的需求而建造的专用工程船舶^[1], 其在航道治理、沿海护底工程及各类海岸防护项目中发挥着举足轻重的作用。这些船舶不仅承载着建设与维护水上交通基础设施的重任, 更是推动水上工程技术创新与发展的重要力量。

然而, 随着科技的日新月异, 传统的手动或半自动铺排作业方式逐渐暴露出效率低下、精度不足及安全隐

患等诸多问题。这些问题不仅制约了水上工程项目的进

度与质量, 也对铺排船的技术升级与智能化发展提出了新的挑战^[2]。为了应对这些挑战, 智能铺排作业技术应运而生。该技术通过引入自动化控制、人工智能等先进技术, 旨在实现铺排作业的精准化、高效化与智能化。这不仅能够有效提升施工效率与质量, 还能显著降低作业风险与成本, 为水上工程项目的顺利实施提供有力保障。

在此背景下, 本文聚焦于智能铺排作业技术的应用需求与发展趋势, 对国内外铺排技术的最新进展进行了

全面梳理与分析。同时，结合多功能智能铺排船的建造实践，本文深入探讨了智能铺排作业的核心技术体系、功能模块及应用场景。在此基础上，本文首次提出了智能铺排作业的技术规范要求与功能附加标志体系，为智能铺排作业技术的标准化、规范化发展奠定了坚实基础。

综上所述，本文的研究不仅具有重要的理论意义与实践价值，更有望为智能铺排船舶的建造与应用提供有力支撑与指导，推动我国水上工程领域迈向智能化、高效化未来。

2 铺排技术现状分析

近年来，随着自动化、信息化及智能化技术的飞速发展，铺排技术迎来了前所未有的革新机遇。国内外科研机构与工程企业纷纷投入资源，探索将先进科技融入铺排作业中，旨在提升作业效率、保障施工精度并降低安全风险^[3-4]。智能铺排技术应运而生，它融合了高精度定位系统、自动化控制系统、远程监控与数据分析等前沿技术，实现了铺排作业的全流程智能化管理。荷兰和德国在智能铺排技术上有较为成熟的应用经验，其自动化和智能化设备在全球范围内具有很高的市场份额^[5]。我国也在江海港口和航道工程中积极探索，在装备研发和工程船舶都有重要突破。

智能铺排技术的核心在于其高效的数据处理能力与实时的作业调控机制。通过集成传感器网络，实时监测作业环境参数与船舶状态，结合先进的算法模型，智能铺排系统能够精准规划作业路径、优化材料铺设策略，并在作业过程中进行动态调整，确保施工精度与效率。同时，远程监控与数据分析功能为工程管理者提供了全面的作业信息，便于及时发现问题、调整策略，进一步提升了工程的安全性与可控性^[6-7]。

当前，智能铺排技术已在全球范围内多个重大工程项目中得到成功应用，展现出其在提升工程效率、降低成本、保障安全等方面的显著优势。随着技术的不断成熟与应用持续拓展，智能铺排技术有望成为未来水上工程作业的主流模式，引领铺排技术向更加智能化、高效化的方向发展。

3 铺排核心设备和系统集成

铺排船铺排作业是一个涉及多个环节和多种设备的复杂水上施工过程，典型铺排施工流程如图1所示。在

施工操作中，需要严格遵守作业规程和标准，确保施工安全和质量。

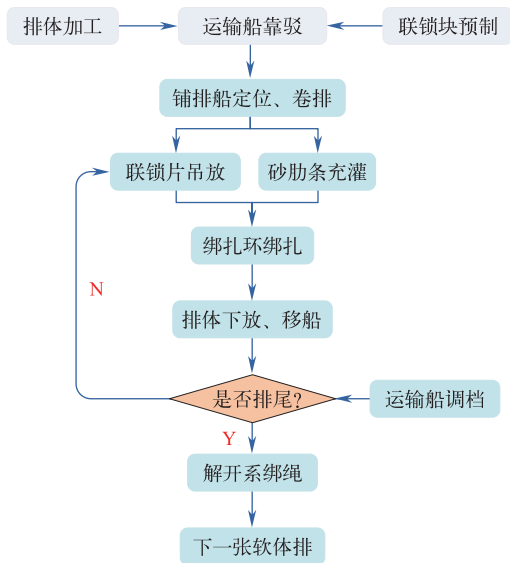


图1 典型铺排施工流程

铺排作业的高效与精准，依赖于一系列精密的核心设备与智能系统的集成运作，铺排作业定位如图2所示。这些设备与系统的融合，不仅是现代铺排技术的关键所在，更是推动水上工程作业向智能化、高效化迈进的强大动力。

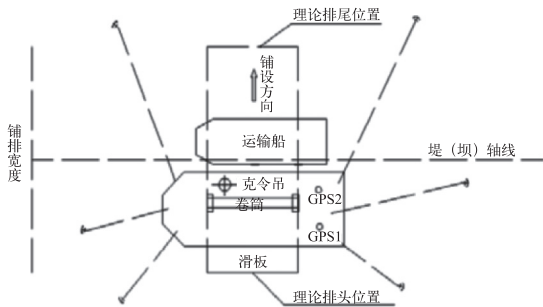


图2 铺排作业定位

自动锚泊定位系统作为智能铺排作业的关键技术之一，通过高精度的DGPS和其他传感器，实现了船舶在复杂水域环境中的精确定位和稳定作业。这一系统不仅大幅提高了作业效率，还显著减少了人工操作带来的误差和风险，为铺排作业的精准实施提供了坚实保障。

充灌装置自动控制系统则彻底改变了传统的人工充灌方式。全自动机械臂吸砂充灌技术的引入，使得操作人员只需在控制系统中设置相关参数，机械臂便能按照

指令精准完成吸砂、运输和充灌工作。这一过程不仅高效，而且确保了充灌的准确性和一致性，进一步提升了施工质量和效率。

智能吊装系统则是通过集成传感器、动态补偿装置和自适应控制算法，实现了吊装作业的高效、平稳和精准。该系统能够实时监测吊装过程中的各种参数，并根据环境变化进行动态调整，确保了吊装动作的准确性和稳定性，从而大幅降低了安全风险。

此外，可视化铺排作业监测系统通过实时重构水下地形，构建了铺排船作业的三维可视化系统，如图3所示。这一系统不仅实现了铺排轴线轨迹的实时显示和施工精准定位，还为作业人员提供了直观、实时的图形界面，使得铺排作业更加高效、安全和精准。

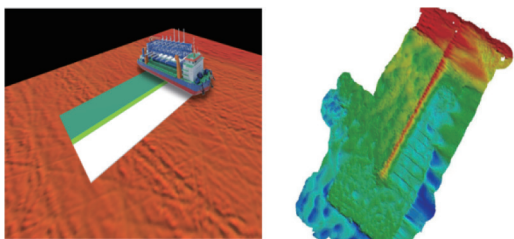


图3 三维可视化

智能铺排作业集成实现铺排作业核心设备和监控系统的集成控制，能够综合利用状态监测所获得的各种信息和数据，对铺排设备与系统的运行状态、健康状况，以及铺排作业的状态、能效状况等进行分析和评估，为设备与系统的使用、操作和控制、检修、管理等方面的决策提供支持。

4 实船项目“智能”方案

2024年1月“交通建设九号”“交通建设十号”两条铺排船交付，是国内排水量最大、智能化程度最高的绿色低碳多功能铺排船，该船由中交上航局投资、疏浚研究中心总包建造，如图4所示。该铺排船配备一套多功能铺排船作业自动化系统，并利用计算机、网络、PLC和传感器等技术，对铺排船施工作业过程中的作业设备进行控制与监测，对全船数据的采集、存储、处理，并通过计算机网络系统实现全船数据的共享，为船舶操纵人员提供监测信息、决策信息和操作控制。

智能铺排集成系统由锚泊定位和系泊控制系统、铺排控制系统、甲板桁架吊控制系统、机械臂式充灌控制

系统，以及施工定位显示及三维可视化软件、SCADA（数据采集与监视控制）软件组成，并由光纤环网、PLC系统和计算机（服务器、工作站）等设备来实现。子系统可独立运行，对单个设备进行控制，子系统间也可进行数据交互，协同控制完成铺排等作业过程。

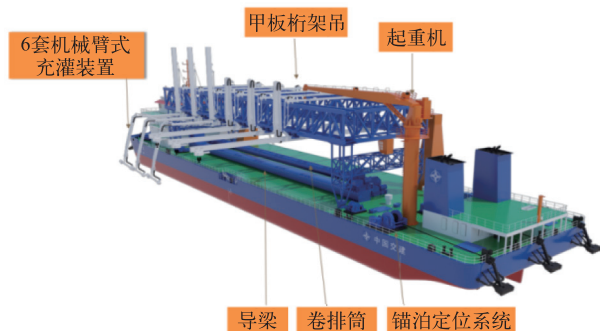


图4 多功能铺排船

该实船项目“智能”方案，实现了作业状态监测和机舱监测报警集成化，以及自动电站、施工定位及三维可视化、靠泊绞车自动控制、桁架吊智能吊装和一键移船，铺排船功能如图5所示。

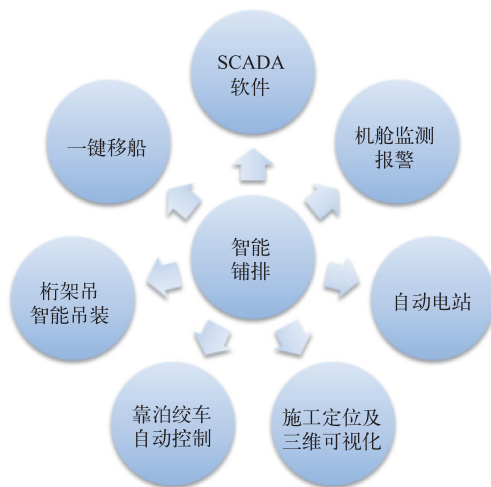


图5 铺排船功能

该铺排船施工作业过程由多个作业装备协同完成，包括吊装作业、吸砂充灌作业和铺排作业，每个作业过程涉及的作业装备见表1。施工作业自动化系统通过对作业装备的遥控单动控制、遥控联动控制及遥控自动控制，实现对作业过程的控制。现场操作箱仅具备对各个作业装备的手动（单动）控制功能，操纵台具备遥控单动控制、遥控联动控制及遥控自动控制功能，各控制方式通过转换开关进行切换，并在上位人机界面提供状态诊

断，在满足自动控制诊断条件的情况下，可以切入自动控制流程。在自动控制过程中，如有条件不满足的情况，发出报警信号，并直接切入应急处置操作流程。

表 1 铺排船施工作业过程及作业装备

序号	作业类型	作业装备
1	吸砂充灌作业	机械臂、泥浆泵、冲水泵、冲水喷头和系泊绞车
2	吊装作业	桁架起重机、系泊绞车
3	铺排作业	锚泊绞车、系泊绞车、卷排筒绞车和翻板绞车

该实船项目“智能”方案，通过状态监测所获得的各种信息和数据，对铺排设备与系统的运行状态、健康状况，以及铺排作业的状态、能效状况等进行分析和评估，为设备与系统的使用、操作和控制、检修、管理等方面的决策提供支持，还包括应急处理。这套完整可行的技术方案是制定智能铺排作业规范技术框架和要求的重要支撑。

5 实船应用效果

该型多功能铺排船配备了自动锚泊定位系统、自动充灌装置和智能吊装系统等先进设备，能够在复杂环境中实现高效作业。在实际使用中，“交通建设九号”表现出了极高的适应性和稳定性，无论是顺水、逆水还是垂直水流条件下都能保持高精度作业。

1) 提效节能效果方面，智能铺排技术在实际应用中体现了显著的提效节能效果。通过自动化和智能化设备的引入，施工过程中的许多繁琐步骤得以简化，从而大幅提高了施工效率。例如，通过三维建模和自动化控制，减少了人工测量和调整的时间，提高了摊铺速度和精度。自动充灌装置和智能吊装系统也显著提升了作业效率。此外，由于减少了人工操作环节，施工过程中的人为错误率也显著下降，进一步提升了整体施工质量。

2) 质量保障效果方面，智能铺排技术在质量保障方面同样表现优异。通过高精度的定位系统和实时监控技术，施工过程中的每一个细节都得到了严格控制。例如，通过实时监测铺排厚度、坡度和平整度等参数，确保了路面结构的高质量。智能吊装系统的自适应控制算法能够动态调整吊装动作，确保每一块混凝土连锁片的精准安装。

3) 安全保障效果方面，安全性是智能铺排技术的重要优势之一。通过自动化设备的广泛应用和智能监控系统

的引入，施工现场的安全风险得到了有效降低。例如，通过远程控制和实时监控，减少了人员在现场的暴露时间，降低了安全事故的发生概率。智能系统还具备实时监控和自我诊断功能，能够及时发现潜在危险并采取预防措施。

实船项目“智能”方案的应用效果，进一步为确保智能铺排作业规范技术框架和要求的先进性和适用性提供了重要支撑。

6 智能铺排作业规范

通过分析铺排作业设备、作业模式和作业流程等方面的技术应用现状，结合我国铺排船应用的工程实践经验，开展铺排作业设备和系统运行状态监测、健康状况评估、能效状况等关键智能应用技术研究。在此基础上，为制定出智能铺排作业规范技术要求，首先提出了智能铺排的含义，即能综合利用状态监测所获得的各种信息和数据，对铺排设备与系统的运行状态、健康状况，以及铺排作业的状态、能效状况等进行分析和评估，为设备与系统的使用、操作和控制、检修、管理等方面的决策提供支持。综合考虑了智能技术应用层级，以及规范引领和适用性要求，提出了一种“基本功能+补充功能”的智能铺排规范技术框架，如图 6 所示。该技术框架切合当前的实际技术水平，具有较高的适用性，同时为未来技术应用指明了方向，具有可扩展性，能持续促进智能技术在铺排船上的应用。

实现智能铺排的基本功能，首先是铺排作业主要设备/系统能够实现自动控制，至少包括锚泊定位绞车、吊装设备、翻板绞车和卷排筒驱动绞车。并能获取运行状态、工作参数等，见表 2，应能在作业控制站予以显示，但不规定具体显示方法，以方便监测和保障安全为原则，可以根据重要程度和作业流程动态显示。除参数监测外，还规定必要时增加设置视频监测设备。铺排作业质量保障方面，配备铺排作业可视化系统，实现铺排成状态进行仿真，并根据仿真结果和搭接^[8]衡准要求实现预警。所有报警显示应覆盖监测和操作位置，在应急情况或必要时，操作人员具有优先权，能接管操作，且控制权转换时不应引起船舶及其设备运行状态的严重变化。

此外，智能铺排要实现铺排作业相关设备运行状态、健康状况的数据监测采集、分析评估，并提供决策支持。因此，除能获取运行状态、工作参数外，还应对这些设备及系统进行状态监测，见表 3。

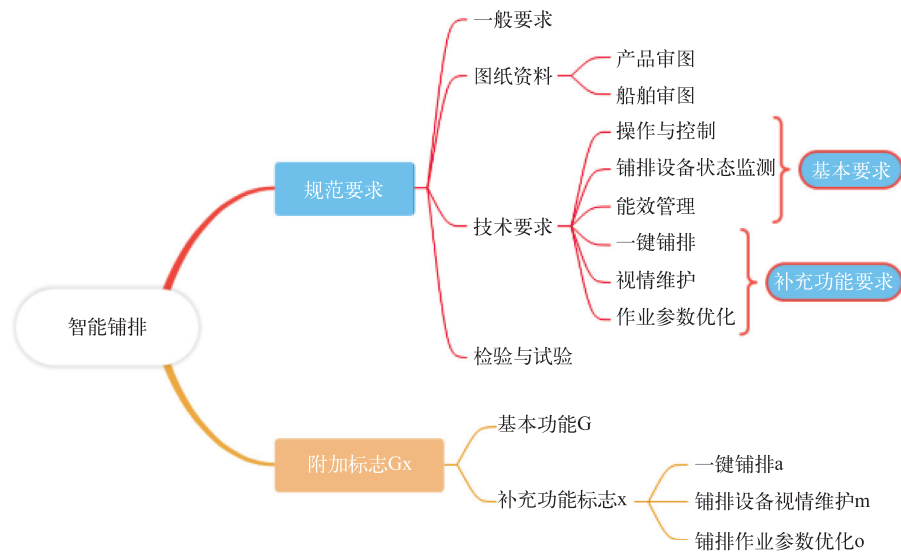


图6 智能铺排规范技术框架

表2 铺排设备监测参数清单

序号	设备名称	监测参数
1	锚泊定位绞车	钢丝绳长度
		钢丝绳速度
		钢丝绳载荷
		绞车电机转速
		绞车电机功率
		绞车电机扭矩
		刹车状态
		离合器状态
2	翻板绞车	绞车电机转速
		绞车电机功率
		绞车电机扭矩
		翻板角度传感器
		刹车状态
3	卷排筒驱动绞车	钢丝绳长度
		钢丝绳速度
		卷筒速度
		绞车电机功率
		绞车电机扭矩
		刹车状态
4	(桁架)起重机 (包括桁架 大车电机、小 车电机及起升 电机)	降放速度和长度
		行走速度
		限位开关
		电机转速
		电机功率
		运行频率
		输出转矩
5	其他	船舶吃水
		风、浪、涌等数据
		视频监控画面
		变频柜内温度
		变频柜内湿度
		液压系统压力和油温

表3 铺排设备状态监测清单

序号	设备名称	监测范围	监测目的
1	锚泊定位绞车	齿轮箱	磨损
		传动轴轴承	磨损、密封性能
2	翻板绞车	齿轮箱	磨损
		传动轴轴承	磨损、密封性能
3	卷排筒驱动绞车	齿轮箱	磨损
		传动轴轴承	磨损、密封性能
4	起重机电动机	定子	定子状态
		转子	转子工作状态，如匝间状态（同步电机）、平衡状态、偏心状态和转子断条状态（异步电机）
		轴承	磨损

最后，智能铺排要实现铺排作业能效及能耗的数据监测采集、分析评估，并提供决策支持。铺排船通常是非自航船舶，其主要能效是作业能效。通过实时获取作业状态、铺排长度和能耗数据，对铺排作业能效及能耗状况进行评估、报告和报警。因此，需要对铺排作业期间主要耗能设备的参数进行采集，除运行状态、工作参数外还包括燃料消耗数据。考虑铺排船的作业特性，应能自动计算单次作业燃料消耗量、施工工艺能效指数等。并根据预定的评估方法和衡准进行比较分析，自动评估能耗/能效状况，并输出评估结论，提出能效优化和改进

的辅助决策建议。

附加功能方面，提出了一键铺排、视情维护和作业参数优化三个智能应用。其中，一键铺排是基于控制流程和逻辑时序，在单个锚位移船周期内能按既定程序自动运行，实现铺排作业一键自动运行，并考虑安全措施、应急措施，实现铺排作业异常应对。视情维护是一种基于设备实际运行状态的维护策略，它通过收集和评估系统的实时状态信息来进行维护决策，鉴于规范要求的通用性，采用直接指向现有规范章节。作业参数优化是根据工程计划、船舶自身状况、土质条件和环境条件等因素实现工作参数初始化和工作参数优化等功能。通过评估铺排的精度和速度，给出铺排作业参数优化方案，实现经济产量或者最大产量目标。基于这一目标，提出了铺排船作业参数和影响因素范围要求。

智能铺排作业规范结合了铺排船实船“智能”方案应用成果，研究形成了包括图样资料、操作与控制、状态监测等功能模块的技术要求。并根据现行《智能船舶规范》技术框架^[9]，制定出智能铺排技术要求和附加标志，形成了完整的智能铺排作业规范技术要求。

7 结论

本文针对业界对利用智能化技术提高铺排施工安全性、高效性的迫切需求，深入研究了智能铺排船作业技术及其应用现状、铺排船智能化作业技术研究、实船“智能”方案应用效果及智能铺排作业规范等内容。揭示了智能技术在铺排作业中的重要性和应用价值，识别出智能铺排作业的关键技术，并制定了完整的智能铺排作业规范技术要求。本研究为建造智能化铺排船、申请智能船舶附加标志、开发智能铺排系统等提供了依据，有利于推动铺排船智能化应用和推广。

然而，智能铺排技术应用是一个多方面、多层次的系统工程，还需更多应用实践进一步修订技术要求。后续将从以下方面完善研究。

1) 自动化设备的集成与优化。充灌和吊装时铺排流程中的两个重要环节，结合工艺开发、应用全自动机械臂吸砂充灌装置和自动吊运装置。这种自动化设备的应用不仅可以提高工作效率，还能减少人为错误，提升作业质量。

2) 智能铺排系统的开发与应用。开发智能铺排作业系统，协同控制完成铺排作业全过程。结合模糊逻辑和

神经网络的学习能力，设计出模糊神经控制器，以解决铺排船运动控制中的难题。综合提升铺排作业的精确性、稳定性、作业效率和作业效能。

3) 数据可视化与实时监控。进一步升级三维可视化系统，构建铺排质量预测模型，实现铺排作业趋势预判，提高排布敷设的控制精度。铺排设备方面，在作业状态和异常监测的基础上，进一步构建铺排设备健康状况预测模型。

4) 环保与节能措施。开发适用铺排作业的能效管理系统，构建单次作业燃料消耗量、施工工艺能效指数等能耗及能效指标、评价模型，提升能效优化能力。

参考文献

- [1] 钱耀，孙钦扬. 铺排船铺排系统设备设计的思路与方法[J]. 中国水运(下半月)，2009，9(20): 14-16.
- [2] 李成良，徐秀萍. 计算机控制系统发展方向的探讨[J]. 数字技术与应用，2018，36(3): 230-231.
- [3] 黄永健，丁留谦，孙东亚，等. 排体护岸工程的铺排施工[J]. 水利水电技术，2007(2): 74-77.
- [4] 郭晓浩. 长江铺排船的开发建设[J]. 船海工程，2003(1): 1-6.
- [5] 冯海暴. 深水铺排船滑板支撑结构受力模型分析研究[J]. 中国造船，2017(4): 132-140.
- [6] DABKE C S, RAWES B C, IENGAR S S. Role of geotextiles in marine construction[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1992, 11(3): 223-233.
- [7] DING Z Z, WANG C, BABAR A A, et al. Tailoring high efficiency polypropylene based composite geotextiles for dewatering fly ash slurries[J]. Composites Communications, 2021(26): 5-24.
- [8] 朱启，刘卫国. 预制块联锁矩阵软体结构水下铺排施工技术及应用[J]. 水利建设与管理，2023(8): 30-34.
- [9] 中国船级社. 智能船舶规范 2024 [M]. 北京：人民交通出版社，2024: 1-2, 82-87.

作者简介：刘孟云（1984—），男，本科，副高级工程师，主要研究方向为智能船舶技术应用研究、船舶数字化检验应用技术研究、船厂智能制造技术、产品智能工厂体系等。

收稿日期：2025-04-27