DOI 10.15302/J-SSCAE-2026.03.026

我国智能造船装备及产业化发展研究

樊宇薇[1,2]，薛鸿祥[1,2*]，林忠钦[2,3]，方梅[1,2]，张延松[4]，胡小才[5]，陈震[1]

（1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院，上海 200240；2. 中国海洋装备工程科技发展战略研究院，上海 200240；3. 上海交通大学，上海 200240；4. 上海交通大学机械与动力工程学院，上海 200240；5. 上海外高桥造船有限公司，上海 200137）

摘要：全球造船业正在经历以数字化、网络化、智能化为标志的深刻变革，发展智能造船装备并推动产业化发展是建设制造强国和海洋强国的关键支撑与核心路径。本文辨析了智能造船装备及产业化发展的基本概念和重大价值，总结了设计／制造／管理一体化，新一代信息技术的系统性融合，绿色化、柔性化、协同化发展等国际趋势，从供应链自主化取得进展、产业生态向多元协同演进两方面厘清了国内现状。针对基础技术能力、智能设备供给能力、产线系统集成能力，系统梳理了我国智能造船装备及产业化发展的基础条件，辨识了装备本体、系统集成、产业生态、船厂应用等层面的发展挑战。进一步论证了智能造船装备及产业化发展的“两步走”战略目标和相应的重点任务，阐述了船体建造、舾装、涂装三大工艺环节的技术发展主攻方向，提出了先行工序的自动化改造、关键工序的机器人替代与柔性升级、系统集成与数字孪生应用等大型船厂智能造船装备的三阶段应用路径。可从装备供应商转型、造船企业主导升级、产业生态与政策支持、标准体系与人才支撑等方面协同发力，精准推动我国智能造船装备及产业化的高质量发展。

关键词：智能造船；造船装备；装备产业化；机器人工作站；智能焊接；智能产线

中图分类号：U66；F426　　**文献标识码：**A

Intelligent Shipbuilding Equipment and Industrialization in China

Fan Yuwei[1,2], Xue Hongxiang[1,2*], Lin Zhongqin[2,3], Fang Mei[1,2], Zhang Yansong[4], Hu Xiaocai[5], Chen Zhen[1]

(1. School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. China Strategy Institute of Ocean Engineering, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 5. Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: The global shipbuilding industry is undergoing a profound transformation characterized by digitalization, networking, and intelligence. Developing intelligent shipbuilding equipment and advancing its industrialization are crucial for boosting China's strength in manufacturing and marine development. This study clarifies the basic concept and strategic value of intelligent shipbuilding equipment and its industrialization, and summarizes international trends, including the integration of design, manufacturing, and

收稿日期：2026-03-10；**修回日期：**2026-05-05

通讯作者：*薛鸿祥，上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院教授，研究方向为船舶与海洋工程结构安全性评估；E-mail: hongxiangxue@sjtu.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“我国船舶智能装备及产业高质量发展战略研究”(2025-HZ-26)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

management; systemic integration of next-generation information technologies; and shift toward green, flexible, and collaborative development. It also sorts out the current domestic development status from two dimensions: progress in supply chain localization, and evolution of the industrial ecosystem toward diversified collaboration. Focusing on basic technological capabilities, intelligent equipment supply capabilities, and production line system integration capabilities, the study reviews the foundational conditions for the development of intelligent shipbuilding equipment and its industrialization in China, and identifies development challenges at four levels: equipment capabilities, system integration, industrial ecosystem, and shipyard application. Furthermore, the study elaborates on the two-step strategic goals and corresponding key tasks, expounds on the main technological development directions for the three major links of hull construction, outfitting, and coating, and proposes a three-stage application path for intelligent shipbuilding equipment in large shipyards: automation retrofitting of preceding processes, robotic replacement and flexible upgrading of key processes, and system integration with digital twin applications. Concerted efforts should be made from four aspects: transformation of equipment suppliers, shipbuilding enterprise-led upgrades, industrial ecosystem and policy support, as well as standards system and talent support, so as to precisely promote the high-quality development of intelligent shipbuilding equipment and its industrialization in China.

Keywords: intelligent shipbuilding; shipbuilding equipment; equipment industrialization; robot workstation; intelligent welding; intelligent production line

一、前言

全球造船业正在经历以数字化、网络化、智能化为标志的深刻变革，立足第四次工业革命背景的智能制造将成为占据未来产业制高点和国际竞争主导权的关键领域[1-2]。以大模型为代表的新一代人工智能（AI）技术迅速演进，开始对制造业生产模式与经济形态产生深远影响，为制造业转型升级提供了历史性机遇。船舶工业是典型的离散型、劳动密集型制造业，作业环境“脏、险、难”，具有依赖人工、重复性强的生产特点，以智能装备为核心的智能化转型成为船舶工业应对人力成本上升、破解生产效率与质量瓶颈、实现高质量发展的重大选择。发展自主可控的智能造船装备，对于保障我国船舶产业链安全、全面提升国际市场竞争力具有突出价值。

世界造船大国充分认识到发展智能造船装备的重要意义并积极开展布局。韩国在智能船厂建设与造船装备领域提出2040年前实现50%工序无人化的目标，在智能焊接、涂装机器人、数字化管控平台等方面逐步积累优势，加速工业机器人和协作机器人的船厂部署。日本推动多家船厂数字化转型与造船装备升级，在精密加工与自动化方面保持特色。欧洲船企在大型邮轮等高附加值船型的智能制造装备、模块化建造等方面形成优势。我国在“十三五”时期提出船舶总装建造“三步走”发展规划，积极研发面向船体分段制造阶段的智能装备、智能产线、智能车间并开展核心成果的示范应用[3]，整体处于数字化普及、智能化探索的发展阶段。《“十四五”智能制造发展规划》（2021年）将船舶制造列为重点领域，《“人工智能+制造”专项行动实施意见》（2025年）提出推动AI技术融入船舶等装备生产全流程，“十五五”规划纲要强调智能化、绿色化、融合化发展方向，为智能造船装备及产业化提供了良好的发展环境。

国内外围绕船舶智能制造和智能装备广泛开展了学术研究与探索。工业4.0背景下智能工厂实施路径等智能制造理论框架为造船业智能化转型提供了参照[4]，船舶智能制造及智能船舶产品的趋势研判成果反映了领域研究热点与演进脉络[5]，船舶智能工厂设计案例[6]、船舶制造业智能化升级方向[7]、智能船厂建设实践[8]等显现了智能船厂建设进展，造船领域工业4.0技术应用[9]、船舶智能制造关键问题分析[3]、船舶生产中的机器人焊接技术应用[10]等代表了造船装备与技术研究进展，海洋工程装备的建造设备、国内船厂造船装备等的应用梳理[11-12]体现了相关装备产业研究动态。整体来看，既有研究有助于理解和把握船舶智能制造的宏观框架与关键技术突破方向，而对作为智能制造物理基础和核心载体的智能造船装备本身的发展缺乏足够关注与深度剖析。

就当前的行业实践来看，我国智能造船装备面临设备利用率低、产线集成困难、系统协同障碍等发展困境，以及技术成熟度、管理适配性、产业协同度、经济可行性等维度的挑战，相应的复杂性和系统性远超单纯的技术研发层次。为此，本文以智能造船装备及产业化为主线，诊断发展的关键瓶颈，提出分层次、可操作的解决方案。分析智能造

船装备的产业化发展需求，明晰发展紧迫性与战略价值；梳理国际趋势与国内现状，辨识技术、设备、产线等层面的基础条件，剖析装备本体、系统集成、产业生态、船厂应用等层面的关键问题；提出目标任务、技术方向、发展路径以及进一步的产业化发展策略，为推进智能造船装备产业化、支撑船舶工业高质量发展提供基础参考。

二、智能造船装备及产业化的发展需求

智能造船指在船舶设计、建造、管理、服务的全生命周期过程中，融合应用数字化、网络化、智能化技术并以数据为核心驱动力，实现设计制造一体化、生产管控柔性化、决策管理智能化的新型造船模式。智能造船相较传统的工业自动化生产具有三方面的新特征：从单工序自动化向全流程集成化转变，传统的工业自动化生产聚焦于单一工序的效率提升，而智能造船强调设计、建造、管理、服务全链条的数据贯通与协同优化；从预设程序执行向自主感知决策转变，传统的自动化装备依据预设程序执行固定动作，而智能造船装备融合机器视觉、力觉传感、AI算法，具有自主感知工况、实时调整作业策略等能力；从经验驱动向数据驱动转变，传统造船高度依赖工人经验与技能，而智能造船以海量生产数据为基础，依托数据分析与智能算法开展工艺优化、质量预测、决策支持。

智能造船装备在上述变革中发挥着关键作用。一方面，智能造船装备是智能船厂建设的物理基础，与物联网、大数据、数字孪生等技术融合应用，作为数据采集、传输、处理的终端节点，成为构建智能船厂数字基座的前提。另一方面，智能造船装备的研制和应用直接牵引造船工艺的创新与升级，装备技术成熟度和产业化水平决定智能造船的实施深度与行业广度。因此，推动智能造船装备的产业化发展是实现船舶工业智能化转型的核心依托与必由之路，主要体现在三方面。

一是拓展装备产业战略空间，培育船舶工业新的增长点。当前，我国造船业的国际国内订单持续旺盛，散货船、集装箱船、油船、气体船等主力船型均处于批量建造阶段。与此同时，造船业的劳动力结构性短缺问题较为突出，熟练装配工、焊接工缺口量大，全行业进入了“机器换人”的刚性需求阶段。在此背景下，智能造船装备已从个别工序的零星试点转向覆盖切割、成形、装配、焊接、涂装、检测等主力工序的全面部署，对品类、性能、集成度等提出了更高要求。智能造船装备的产业化，不仅是满足船厂自身升级需求的当务之急，而且是串联装备研发制造、系统集成、工业软件、运维服务等重点环节进而形成产业新生态的战略机遇，有望成长为船舶工业价值链中的新兴支柱。

二是保障产业链自主可控、筑牢造船强国的基础性要素。造船业是关系国民经济命脉与国防安全的战略性产业，而部分高端智能造船装备与核心部件依赖进口，在国际供应链波动加剧的背景下相关装备自主化事关我国造船产能的稳定性和抗风险能力。推动智能造船装备产业化发展，加快关键装备和核心技术的国产化替代，需要在设计仿真软件、高性能传感器、智能控制器、工业机器人核心部件等关键环节构建自主可控的技术体系，充分摆脱“卡脖子”隐患，对于巩固并提升我国造船业的国际市场竞争力、保障产业链和供应链安全具有不可替代的价值。

三是驱动造船模式的根本性变革，重塑全球市场竞争格局。智能造船装备产业化的深层价值在于触发造船模式的系统性跃迁，不是单一工具的升级替代，而是将数据采集、传输、处理能力深度嵌入生产全流程，使船舶建造从经验驱动转向数据驱动。我国智能造船装备具有“成熟一批、部署一批、攻关一批”的梯次推进发展特点，部分内场工序实现规模化应用并取得突出成效，而复杂曲面加工、外场作业等环节仍处于攻关阶段。随着产业化进程的深入，智能造船装备的规模化应用和数据贯通将逐步重塑造船模式，支撑我国造船业在国际市场竞争中从“跟跑”“并跑”发展到“领跑”。

三、智能造船装备及产业化的国际趋势与国内现状

（一）国际趋势

在全球制造业智能化转型的浪潮下，世界造船大国都将智能造船作为提升产业竞争力的核心举措[8]，尽管发展路径各有侧重，但是共性趋势较为明晰。

1. 以数字主线为核心的设计 / 制造 / 管理一体化

在传统的船舶建造模式中，设计、制造、管理等环节相对割裂，信息传递依赖二维图纸和纸质文档，效率低下且易出错。未来的智能船厂将构建以数字主线为核心的集成化信息平台，支撑船舶全生命周期数据的贯通与协同。① 韩国船厂在这一方向上具有系统性优势。现代重工业株式会社正在分阶段推进“基于数字化的造船未来战略”项目，加快向智能船厂转型。2019 年，三星重工业株式会社开始推行数字化转型战略，提高数据驱动的自动化程度[13]。韩华海洋株式会社开展了物联网、AI 等信息技术的融合应用，初步构建了基于自动化设备和机器人系统的安全高效生产体系[14]。韩国《K-造船超级差距蓝图 2040》[15]提出了从劳动密集型船舶建造系统转型为自动化基础船舶建造系统的发展目标，确立了数字主线贯通的顶层设计方向。② 欧洲以德国迈尔船厂为代表，率先实践数字主线概念，构建了包括设计、采购、生产、交付等环节在内的全生命周期业务流程，确保海量工程数据的一致性与可追溯性，成为应对大型邮轮等复杂巨系统建造挑战的核心支撑。③ 日本造船业在数字化转型过程中将设计与制造信息的一体化贯通作为重要方向，有超过 10 个船厂的数字化转型项目得到公共资金支持[7,16]，也在《造船业振兴路线图》（2025 年）中将数字化基础设施列为关键任务[17]。④ 新加坡海庭有限公司、新加坡科技工程有限公司等船厂在修理改装领域具有优势，应用三维扫描方式对现有船舶进行逆向建模，为改装设计提供精确的数字化输入，可视为特定业务场景中的数字主线理念实践。

综合各国的发展经验看，数字主线的核心内涵体现在 3 个层面。① 构建单一数据源，将设计模型、工艺参数、物料信息、生产进度、质量记录、设备状态等船舶相关数据汇集到统一的数字化平台，由此消除信息“孤岛”，构成企业唯一可信的数据基座。② 实现模型驱动，以三维数字化模型取代二维图纸，成为设计、工艺、制造、检验等主要环节的共通依据。工人可在生产现场通过移动终端实时查看三维作业指导，机器人可自动从模型中提取信息并进行路径规划与任务执行，管理系统可基于模型完成状态开展进度跟踪与资源调配。③ 延伸全生命周期追溯，将数字主线从建造阶段拓展至船舶交付后的运营维护环节。船东可基于交付的数字化模型进行设备管理与维修规划，船厂可分析运营数据并为后续的船舶设计优化提供依据，促进从交船到提供全生命周期服务的商业模式升级。

2. 新一代信息技术的系统性融合

工业机器人、工业物联网、数字孪生等新一代信息技术正在从单点试用走向系统性集成应用，成为智能船厂的核心技术支撑[5,8,18]。① 韩国船厂在这一方向上投入最大、进展显著，以“AI+数字+机器人”战略为核心，追求高端船型生产线的柔性与精度双重领先。在工业机器人方面，现代重工业株式会社使用造船协作机器人超过 170 台[19]，也在加速研发适用焊接、测量、成型、管控等生产环节的人形机器人[20]。三星重工业株式会社与专业机器人公司合作开发配置 AI 功能的焊接机器人，积极扩大机器人应用范围[21]。② 日本船厂侧重从生产现场的具体工艺瓶颈出发，针对焊接、装配等关键环节开发专用化的智能装备，再依托精密工程设备解决特定工艺难题。③ 新加坡受土地资源的明显约束，将数字孪生技术作为提升空间效率的主要手段。以新加坡海庭有限公司为代表，广泛应用数字孪生对船厂布局进行仿真优化，合理规划生产区、物流区、仓储区的空间配置，积极发展垂直智能仓储系统和自动化物流体系，依托自动导引运输车（AGV）、有轨制导车（RGV）等装备开展物料的精准高效配送。在检测环节，利用无人机、爬壁机器人进行船体的快速检测与损伤评估。④ 欧洲企业在工业软件开发、复杂系统集成方面积淀深厚，依托较强的数字化设计能力支撑高端定制化船舶装备的智能化演进。

综合各国的发展经验看，新一代信息技术的系统性融合呈现 3 个清晰方向。① 在工业机器人领域，船舶制造的非标准、大尺寸、复杂曲面等特点对机器人应用提出极高要求。机器人应从执行固化程序的自动化设备演进为具备感知与决策能力的智能化装备，集成多模态传感与智能决策算法，实现自主适应工件偏差、实时调整作业轨迹、免示教的智能焊接、喷涂与装配。协作机器人成为当前阶段的“轻量级”解决方案。② 在工业物联网方面，船厂内的设备、物料、工装、人员等生产要素被赋予数字身份，通过泛在的物联网传感器与高速无线网络实现全面感知与互联，为精细化管理和智能决策

提供实时且透明的数据基础。③ 在数字孪生方面，构建与物理船厂充分对等且实时同步的虚拟模型，在数字空间中进行仿真预测与方案评估，支持生产状态的实时监控、异常工况的提前预警、极端情况下的远程操控[22]。

3. 绿色化、柔性化、协同化成为发展方向

未来的智能船厂不仅追求高效，而且强调可持续、宽适应、开放性，因而绿色化、柔性化、协同化成为各国船厂共同追求的发展方向。① 在绿色化方面，国际海事组织在《船舶温室气体减排战略》（2023 年）中提出到 2050 年实现净零排放的目标，是对造船工艺绿色化的更高要求[23-24]。挪威船级社发布的《面向 2050 年的海事展望》（2025 年）指出，数字化与脱碳的协同发展是未来造船业的核心趋势[25]。智能船厂通过能源管理系统开展全厂能耗的精细化监控与优化，以最大限度地减少能源浪费；对于涂装等高污染工序，采用环保涂料与工艺，集成智能化的挥发性有机化合物（VOCs）处理系统，实现近零排放。智能制造本身带来的资源利用率提升与浪费削减，也是对低碳发展的直接贡献。② 在柔性化方面，欧洲船厂面对大型邮轮的高度定制化需求，广泛推行模块化建造理念，将船舶分解为标准的超级总段或功能模块，在专业化车间内完成高度预舾装后再进行总组搭载；针对性开发了基于 AGV 的柔性生产线、可快速重构的机器人工作站等。未来的智能船厂将通过模块化产线设计、可重构机器人工作站、软件定义的控制系统等技术手段，构建功能丰富的生产柔性，支持不同船型、不同批量之间的低成本生产和快速切换。③ 在协同化方面，船舶建造是涉及众多供应商的复杂系统工程，智能船厂将通过工业互联网平台与设计院、船东、供应商、物流服务商等产业链上下游企业开展紧密协同，如设计方案的云端协同评审、订单与物料信息的实时共享、生产进度对船东透明开放，最终形成高效、敏捷、共赢的产业生态。

（二）国内现状

近年来，我国智能造船装备加速发展，产业链上各层级初步形成了自主供应能力。上游基础部件的国产化率逐步提高；在中游装备制造方面，切割、焊接、加工、组立等核心工序实现国产装备的规模化应用；在下游系统集成方面，智能产线、智能车间的整体解决方案能力不断增强。从竞争格局看，国外品牌长期主导高端市场的局面正在改变，国产品牌在多个主力环节的市场占有率快速提升。

1. 供应链自主化取得进展

在产业发展初期，国内智能造船装备市场长期被国外品牌主导，不仅采购与维护成本高昂，而且技术迭代与服务响应也受制于人。经过持续的技术攻关与市场培育，相应局面已发生根本性转变，在切割、焊接、加工、组立等船舶建造核心环节涌现出一批具备较强竞争力的国内供应商（见表 1），国产智能造船装备的市场占有率获得显著提升。

在高功率激光切割方向，华工激光、大族激光等品牌实现从市场追赶者到主导者的跨越，相应产品在性价比、本土化服务方面具有优势，广泛应用于船舶板材和型材的高精度切割作业。在焊接流水线、部件装配等系统集成方向，唐山开元、中基科技、视比特等品牌提供了可替代进口的成套解决方案，显著降低了船厂的设备投资与运营成本，提升了工艺需求的响应速度。

2. 产业生态向多元协同演进

我国智能造船装备的产业生态从过去主要依赖大型造船集团的内部配套，向大型国企引领、专业化制造商支撑、科技公司赋能的多元协同体系演进。以中国船舶集团有限公司为代表的大型国企发挥着战略引领、系统集成的链主作用，推动内部设计院所、造船企业、装备研发中心的协同，实现从船舶设计到智能装备研制与示范应用的全链条闭环；攻克了诸多智能造船装备国产化难题，通过建设智能船厂标杆为全行业提供了样板，切实带动了市场需求。

一批专业化装备制造商深耕细分领域，形成了“专精特新”发展特质，成为构建智能造船装备产业生态的重要支撑。芜湖行健智能机器人有限公司深耕智能焊接与装配单元，中基科技（武汉）有限公司围绕船舶建造工艺需求发展智能化船体分段焊接生产线，华工科技产业股份有限公司发挥信息化优势研发智能化的下料分拣及物料配送系统，唐山开元自动焊接装备有限公司关注中小组立机器人智能化焊接的应用推广，宁波金凤焊割机械制造有限公司聚焦型钢的下料切割，中国船舶集团有限公司第七一六研究所专注智能化管道焊接生产解决方案。这些企业直面特定工艺痛点，提供了模块化、

高柔性的解决方案，弥补了大集团产品线无法覆盖的细分市场，增强了整个产业链的韧性与活力。

工业软件与AI技术提供商也在加快融入智能造船装备产业生态，推动智能造船装备从自动化向智能化发展。国内企业在船舶三维设计、工艺仿真、生产管理等细分工业软件领域推出了自主产品，能够逐步替代进口产品。机器视觉、深度学习等技术在焊接质量检测、切割路径优化、设备预测性维护等场景的落地应用不断拓展。设备互联、数据采集与远程运维平台等工业互联网建设提速，为智能造船装备的全生命周期管理提供了数据基础。

四、我国智能造船装备及产业化发展的基础条件

得益于国家智能制造战略的持续推进，我国智能造船装备及产业化发展稳步实施，形成了技术、设备、产线协同提升的良好态势。智能装备的技术攻关与工程落地持续推进，整体应用深度与广度不断拓展。在底层技术维度，智能感知、实时分析、自主决策、精准执行等核心方向持续突破，为装备的智能化升级筑牢了技术根基。在装备应用维度，围绕船体分段制造、管子加工、分段涂装三大关键生产环节，国内形成了打磨、理料、焊接、涂装等方面的系列化智能造船装备，在骨干船厂完成示范验证并开展规模化推广[3]。从量化成效看，“十三五”时期国内骨干船厂船舶总装建造效率显著提升，每修正总吨工时平均消耗已从35下降到26左右。整体上，当前国内骨干船厂普遍处于传统装备存量改造、智能装备增量部署并行的关键过渡期，智能化应用正由单工序单点突破向跨工序产线集成、全流程协同优化稳步演进。

（一）基础技术能力

智能造船装备及其产业化发展从根本上依赖基础技术能力的系统性支撑。国内在智能感知与测量、智能工艺算法与决策、离线编程与运动控制、数字孪生与系统互联等关键技术方向形成了一定的研发积累和应用基础，但各方向的技术成熟度与工

表1　船舶建造核心环节具有竞争力的国内供应商

工序	设备 / 装备	主要供应商
切割	大功率高精度激光切割机	华工科技产业股份有限公司、大族激光科技产业集团股份有限公司、济南邦德激光股份有限公司、苏州迅镭激光科技有限公司
	条材流水线	唐山开元自动焊接装备有限公司、小池酸素（唐山）有限公司、中基科技（武汉）有限公司、宁波金凤焊割机械制造有限公司
	型材生产线	唐山开元自动焊接装备有限公司、中基科技（武汉）有限公司、湖南视比特机器人有限公司、上海大界机器人有限公司、宁波金凤焊割机械制造有限公司、上海沪工焊接集团股份有限公司
焊接	先行小组立焊接线	芜湖行健智能机器人有限公司、唐山开元自动焊接装备有限公司
	小组立焊接流水线	唐山开元自动焊接装备有限公司、中基科技（武汉）有限公司、湖南视比特机器人有限公司、上海中巽科技股份有限公司
	复杂小组立焊接流水线	唐山开元自动焊接装备有限公司、中基科技（武汉）有限公司、芜湖行健智能机器人有限公司、上海中巽科技股份有限公司、卡尔克鲁斯机器人科技（中国）有限公司
	T排装焊流水生产线	无锡华联科技集团有限公司、中基科技（武汉）有限公司、湖南视比特机器人有限公司
	吊马智能制造单元	唐山开元自动焊接装备有限公司、芜湖行健智能机器人有限公司
	平面分段流水线	唐山开元自动焊接装备有限公司、中基科技（武汉）有限公司、无锡华联科技集团有限公司
	中大组立智能焊接	唐山开元自动焊接装备有限公司、中基科技（武汉）有限公司、芜湖行健智能机器人有限公司
加工	零件自由边智能打磨	华工科技产业股份有限公司、芜湖行健智能机器人有限公司、油特机械工具（大连）有限公司、广东熙瑞智能科技有限公司
	复杂曲板智能加工	唐山开元自动焊接装备有限公司、中国船舶集团有限公司第七一六研究所
	肋骨冷弯	武汉理工大学、上海船舶工艺研究所

程化水平存在差异。

1. 智能感知与测量技术

智能感知与测量是智能造船装备获取工况信息、几何精度的“感官”基础，分为多模态环境感知、大尺度三维测量两个方面：前者通过视觉、力学、声学等传感器实时捕捉焊接熔池、焊缝位置、加工形貌等工况信息，为装备的闭环控制提供输入；后者借助激光跟踪、摄影测量等手段对船体分段进行大尺度三维建模与精度回弹，支撑分段搭载与总组对合的几何闭环。经过多年技术攻关，平直焊缝的视觉识别与跟踪达到了工程可用水平，基于深度学习的复杂焊缝特征点提取方法可在弧光、飞溅等强干扰下实现稳定识别[26]，基于深度学习的焊接质量在线监测与缺陷评估方法取得阶段性应用进展[27]。

也要注意到，基于可见光成像的视觉识别易受船舶车间焊接弧光、烟尘、板材锈迹油污等的干扰，复杂工况下的应用鲁棒性仍是突出短板[28-29]；大尺度三维测量依赖的激光跟踪仪、高精度相机等核心器件仍依赖进口，偏低的国产化程度不利于感知系统的规模化部署。后续，多模态融合感知与主动光源抑制是突破弧光及烟尘干扰的关键路径，需研发适配造船大尺度场景的便携式国产三维测量装备，提高感知软硬件的自主可控水平，有效降低批量应用成本。

2. 智能工艺算法与决策技术

智能工艺算法与决策是将感知信息转化为装备作业指令的核心环节，涵盖焊接工艺参数自适应、成形变形预测、加工路径规划、工艺知识建模与决策优化等，相应能力水平事关智能装备在非标准且多变的船舶建造场景中开展自主作业。在算法支撑层面，基于深度学习的工艺建模方法提高了复杂工艺的预测精度，如应用改进卷积神经网络（CNN）后，船体曲面板材热弯成形变形预测误差控制在5%以内[30]，感应加热线预测模型实现对期望变形量的逆向求解[31]，为工艺参数的快速生成提供了分析基础。在决策应用层面，单工序实时决策已初步落地，如面向大型结构件的爬行机器人可基于视觉感知结果自主完成焊缝识别、焊缝跟踪、多层多道自动排道等作业决策[32]，在部分场景下可替代人工完成工艺参数微调与路径修正。

也要注意到，现有制造工艺的机器学习多为针对特定工况的训练测试，而面对材料、尺寸、接头结构多变的复杂工业场景的泛化能力有限[33]；工艺知识仍以经验规则、单一模型为主，缺乏覆盖“材料–工艺–装备–环境”全要素的系统化知识图谱，导致算法面对新工况时通常需要重新标定。后续，融合机理物理模型、数据驱动算法的混合建模是提升模型泛化能力的重要路径，需搭建适配造船全流程的工艺知识图谱、工艺决策大模型，推动焊接、成形类智能装备从单工序局部智能升级为全流程自主决策。

3. 离线编程与运动控制技术

离线编程与运动控制是三维模型驱动装备自动化作业的关键环节。离线编程通过计算机辅助设计（CAD）模型自动生成焊接、切割、弯制等工序的机器人轨迹与工艺参数，运动控制保证装备在执行轨迹时的位姿精度与动态性能，两方面共同支撑船舶复杂结构的高效自动化加工。基于CAD模型的离线编程在船体结构件焊接中得到了广泛应用，混合离线编程方法以融合CAD模型与视觉识别的方式显著提升了复杂焊缝编程的自动化程度[34]。针对多管相贯结构的专用离线编程方法也得到验证，支持开展相贯焊缝的自动化轨迹与焊枪姿态规划[35]。

也要注意到，现有的离线编程方法依赖CAD模型的完整性及精度，而船体建造中普遍存在模型简化、现场偏差、装焊变形，往往导致离线轨迹与实际工况存在偏差而需大量的人工干预修正[36]；在运动控制层面，高精度伺服电机、精密减速器等核心运动部件仍依赖进口，国内产品在高速、重载工况下的动态精度与可靠性存在差距。后续，搭载视觉在线测量的自适应轨迹校正是缩小理论模型与现场实物偏差的有效路径，需开展高精度运动零部件国产化攻关、优化运动控制算法，以增强国产装备的运动控制性能。

4. 数字孪生与系统互联技术

数字孪生与系统互联是支持装备集群协同、生产全局优化的数字化基座。构建物理装备的虚拟映射并建立实时数据交互，驱动生产过程的全要素数字化、全流程可视化、决策智能化。面向造船流程的数字孪生在分段建造、舾装等环节获得了探索性应用，通过船体零件拣选与加工实时资源配置验证了数字孪生驱动的调度优化潜力[37]，面向造船全流程的数字孪生框架成为研究前沿[38]，数字孪生在船

船设计、建造、运维等阶段的系统性应用也是研究热点[39]。

也要注意到，数字孪生模型在交互实时性、数据有效性、模型精准性等方面尚存不足[40]，而造船领域的数字孪生应用集中在工位、分段等局部场景；工业互联通用标准的行业定制化适配能力存在整体性不足，多源异构数据难以实现语义统一，实时互通共享存在明显瓶颈[41]，造船行业现有标准适配场景偏少、落地适配程度有限。后续，轻量化数字孪生建模与“边云”协同计算配合可有效压低数字孪生部署成本，应建立适配造船行业的专属数字孪生标准体系与工业软件平台，支持装备集群要素互联贯通并发挥数字孪生全局优化价值。

（二）智能设备供给能力

智能单点设备是智能产线的基础单元，相应技术水平和应用广度事关船舶制造环节的自动化与智能化程度。智能装配、加工、成形、焊接、喷涂、物流等方面的关键单点设备国产化进展良好，逐步从试点示范转向规模化推广，相关应用集中在工艺相对标准、环境基本可控的先行制造阶段。应用成熟的部分智能单点设备如表2所示。

在智能装配与物流设备方面，机器人替代人工作业成为明确趋势。江南造船（集团）有限责任公司的吊马智能工作站集成了视觉识别、智能抓取与焊接技术，实现从零件装配到成品下料的全流程自动化，可将传统的27人团队精简至5人，展现了标准化部件批量生产的显著优势。在物料搬运方面，AGV/RGV逐步扩大应用。新一代AGV集成了激光雷达和视觉导航，可在复杂的船厂环境中进行动态路径规划与有效避障，单车适用于小部件配送，多车协同的集群作业成为大型分段运输的柔性化解决方案。然而，面对船厂金属环境干扰强、布局非标准等实际条件，导航稳定性增强、多设备协同调度、与生产节拍的高效匹配等仍是待化解的难题。

在智能加工与成形设备方面，高精度、数字化的切割与成形装备成为现代化船厂的标准配置。大功率（30~60 kW）激光切割机逐步推广应用，切割精度高、热变形小，可处理4~40 mm厚度的钢板并能完成V型、Y型等复杂坡口切割，为后续的自动化焊接提供了基础条件。成形技术能力与工程需求之间存在显著差距。以肋骨加工为例，工艺模式与装备数十年来未有根本性变革，仍依赖大量手工作业与人工经验判断，成为制约生产线自动化水平与效率提升的瓶颈环节。未来需发展集成自动测量、智能弯曲、工艺数据库的成套装备，支持从设计数据到成形加工的一键式、精准化作业。此外，曲板成形智能装备仍是船舶制造的短板，规模化应用范围有限，但行业已围绕该工序开展技术攻关与工程试点，取得了阶段性应用进展。例如，南通中远海运川崎船舶工程有限公司与国外企业合作开发的水火弯板机器人，目标自动化率可设定为60%~70%，但剩余部分仍需人工干预。未来实现全自动成形依赖海量的工艺数据积累，需要采用AI技术进行自主学习与迭代优化[42]。

智能焊接设备是应用广泛的产品类型，朝着更智能、更柔性的方向发展。对于小组立等平直、规则焊缝，焊接机器人工作站得到规模化应用，提升了焊接的质量稳定性和一致性。然而，船舶焊接面临场景复杂（如狭小空间、高空、曲面）和材料多

表2　应用成熟的部分智能单点设备

作业位置	主要设备	工作内容
材料准备作业区	矫平机、抛丸机、烘干机	钢材矫平、抛丸、涂漆
切割作业区	数控激光、等离子切割机	船体零件切割、打磨
加工作业区	卷板机、油压机、肋骨冷弯机、水火弯板机	船体零件冷、热加工
部件作业区	埋弧自动焊、CO_2自动角焊机、小组立机器人自动焊	分段小组立装焊
平直作业区	自动拼板焊接、划线切割打磨、纵骨装配、纵骨焊接、肋板装配、中组立焊接、分段搬运台车、分段顶升出运	分段中、大组立装焊
管制作业区	管材立体仓库、锯切机、弯管机、机器人法兰自动焊机、相贯线切割机、立体管单元焊接机	管子内场制作
涂装作业区	喷砂机、真空吸砂机、除尘器、涂装机器人	分段冲砂、打磨、涂装

样（如殷瓦钢、高强钢）的现实挑战，许多特殊位置的焊接仍依赖经验丰富的焊工，开展全场景机器人应用任重道远。

涂装与喷砂的作业环境最为恶劣，长期面临高粉尘、空间密闭、有毒化学物质暴露等问题，是船厂智能化改造中需求迫切、难度最高的环节。智能除锈机器人、悬臂式喷涂机器人、爬行喷涂小车等装备已投入应用，在提升效率、保障安全方面取得明显成效。然而，对于结构复杂、曲率变化大的区域以及狭小舱室，相关智能设备在路径自适应规划、作业全覆盖、漆膜均匀性控制等方面[43]仍难以完全替代熟练工人的经验与灵活性。

国内智能单点设备应用取得“从无到有、从点到面”的突破，在提升特定工序质量、效率、安全性方面成效显著。从产业实践角度看，国内优势船厂在智能单点设备的装机规模、场景覆盖广度、与主流船型适配深度等方面处于全球第一梯队。然而，作为全球造船业智能化转型的共性难题，从单点可用到全局好用仍受限于相关设备在复杂工况下的可靠性、柔性以及与制造执行系统 / 企业资源计划[44]的深度集成能力。

（三）产线系统集成能力

从船舶建造的核心流程角度看，智能产线在“壳、舾、涂”三大环节的应用呈现“壳强、舾弱、涂更弱”的不均衡发展态势。三大环节的装备集成水平事关船舶的建造成本、周期和质量，而国产装备的系统化集成能力是从单点应用迈向全局智能化的关键瓶颈。

1. 船体建造装备

船体结构制造（壳工序）是船舶建造中工程量最大、流程最复杂的环节，涵盖钢板预处理、理料、切割、边缘打磨、曲形 / 折弯加工、坡口加工、小组立装焊、中组立装焊、大组立装焊、总组、搭载等细分方面。壳工序装备发展具有鲜明的“前端成熟、后端瓶颈”特征。

在前端材料处理环节，智能装备应用最为成熟和广泛。针对钢材预处理，集成自动上下料、高速抛丸、机器人喷涂的智能预处理生产线基本实现国产化与普及应用[12]。针对切割，高功率激光与等离子复合切割机、集成视觉识别与机器人分拣的智能切割流水线成为主流装备类型。

在部件与分段装焊环节，智能装备应用逐步深入但难度加大。在小组立阶段，引入智能化成套设备实现从零件到部件的自动化、流水化生产，传统上依赖人工画线、搬运、点焊的作业模式被逐步替代，焊接质量和效率得到全面提升，生产周期显著缩短。在中组立阶段，面对结构复杂、空间狭小、焊缝长、板材厚等挑战，逐步引入协作焊接机器人、纵骨装焊一体化等智能装备，在解决厚板焊接变形控制、复杂焊缝自主跟踪等难题方面展现出良好能力。针对从小组立到中组立的内场焊接，智能化应用带来了 20%~40% 的效率提升并显著节约了人力需求。然而，随着构件复杂度和集成度的进一步提升，智能装备技术瓶颈开始显现，如在分段装配（大组立）车间，曲面分段制造、非标准件自动化装配焊接等方面的能力存在短板，大量作业依然依赖人工。

在巨型总段建造与搭载环节，相关装备的智能化处于攻坚阶段。百吨级及以上分段的船坞搭载仍然依赖熟练工人的经验、起重工的熟练操作[45]，核心难点在于大尺度空间下的动态精密测量、多自由度智能调姿、多设备系统级协同。后续需重点攻关大尺度空间智能测量与多装备协同搭载技术，推动总段对接从经验驱动向数据驱动转变。

2. 管舾装备

舾装工序涉及船舶管路系统、铁舾件、设备单元的制造及安装，相应装备体系涵盖管子加工、单元组装、托盘配送、现场装配等环节。其中，管子加工占全船舾装工程量的 25% 以上，是管舾装备智能化升级的核心应用场景。当前，管舾装备发展具有“加工领先、装配薄弱”的阶段性特征，在船厂的应用水平呈现梯次性差异。

在加工环节，管子成形主要依赖半自动冷弯弯管机，管段的组对与焊接则高度依赖人工组装与吊机配合的传统作业模式；管子切割自动化已有一定进展，但综合水平参差不齐。部分先进产线实现从定长切割、法兰自动装配到多机器人协同焊接的全工序自动化，配套制造执行系统、数字孪生平台实施全流程数字化管控；而绝大多数中小船厂普遍采用锯切、手动弯管、人工焊接等传统作业方式[11]。管子加工生产线大规模推广的技术瓶颈主要体现在非标准小管径、超薄壁管、复杂异形接口等的识别、夹持、精加工，现有设备的处理成功率、质量

稳定性未能全面超越经验丰富的技术工人。针对物流与装配，智能立体仓库、AGV/RGV 物流车队等开始试点应用，但全厂级智能配送与模块化预舾装仍处于探索阶段，信息传递滞后引发的供需错配问题尚未有效解决。

管舾装备的能力建设仍存在短板，需要装备企业和船厂开展协同并在应用迭代过程中提升国产装备的成熟度。质量检测环节的自动化水平相对滞后，压力测试仍以人工连接、目测判断为主，焊缝无损检测的自动化手段不足，检测数据未能实现自动采集与追溯，全过程质量管控未能充分闭环。新燃料船舶（如液化天然气、氨、甲醇等）建造对管系加工提出了更高要求，双相不锈钢、铝合金等特殊材料管件的加工工艺及装备适应性缺乏系统性研究。

3. 涂装装备

涂装工序直接决定船舶结构的防腐防护性能、服役寿命、外观质量，也因涉及 VOCs 排放、粉尘污染等问题[11-12]而成为环境保护与职业健康监管的核心节点。船舶涂装智能化发展呈现“环保驱动、应用滞后”的总体特征。

涂装是作业环境最恶劣、人工替代需求最迫切的环节，法规和安全方面的压力持续增强，而现有涂装机器人的复杂曲面适应性与自主作业能力仍有不足。相关装备研发以绿色化、密闭化、自动化作为核心方向。在表面预处理阶段，封闭式喷砂室开始逐步替代传统的开放式喷砂工艺。针对喷涂作业，正在提升多自由度喷涂机器人、基于三维模型的离线编程系统、在线膜厚检测仪等装备的性能。

尽管涂装智能化技术取得阶段性突破，但实际工程应用仍面临多方面挑战。内场分段涂装环节作业环境封闭且结构复杂，现有磁吸式、轨道式、爬壁机器人在复杂曲面、狭小空间内的通过性、附着稳定性、自适应路径规划能力不足，不足以完全替代人工作业。外场船坞涂装环节面临环境干扰大、作业面广等难题，爬壁机器人等设备的可靠性、续航能力、全自主作业水平仍待突破。涂装车间全域环境参数（如温湿度、VOCs 浓度、风速）的智能监测与闭环调控技术不够完善，废气高效收集、处理装备与涂装生产流程的智能联动机制未能建立，涂装全流程的绿色化、智能化协同管控能力仍需提升。

五、我国智能造船装备及产业化发展面临的挑战

智能造船装备发展是涉及软硬件融合应用、关键技术与特定工艺高度适配、产业链各环节协同创新的复杂系统工程。智能造船装备的技术研发与能力提升并不意味着能在船厂复杂环境中自然发挥预期效能，在从实验室研究到船厂应用落地的过程中面临着技术、管理、生态等层面的复合型挑战。

（一）装备本体层面不好用与不适用问题并存

智能造船装备本体层面的核心问题在于可靠性、适应性、设计理念的局限性。部分国产装备的作业精度与长期稳定性不能完全适应高标准的造船工艺要求，在持续高负荷的复杂工况下性能衰减与故障率问题较为突出[46]。本土化服务可使装备在维护性上具备一定优势，但不少装备研发完成后直接进入船厂现场调试应用，缺乏充分的中试验证和可靠性测试。这些未经充分验证的装备进入船厂后，需要在现场进行长时间的调试磨合，既干扰船厂的正常生产进度，又因频繁出现故障而影响船厂对国产装备的使用信心。全行业缺乏贴近船厂实际工况的第三方可靠性验证平台，装备企业难以开展有效验证。装备设计理念存在一些误区，许多产品为了追求广泛的通用性而设计得功能“大而全”，导致系统复杂、切换调试耗时，在面对船舶多品种、小批量生产时表现出柔性不足，反而降低了核心作业效率。

（二）系统集成层面信息“孤岛”与协同断链问题突出

从单台智能造船装备到智能化生产系统的跃迁面临着严峻的系统集成瓶颈。“重硬件、轻软件”现象普遍，许多智能装备缺乏深度嵌合的制造执行系统、高级计划排程、质量管理系统，难以有效融入船厂整体生产流程，造成先进设备闲置与投资效益低下。各类装备的接口标准、数据格式缺乏统一规范，数字化串线、全流程数据收集较为困难，各类工序装备难以开展协同联动与系统集成，基于数据的生产优化与智能决策落地困难，制约了智能制造系统的整体效能，也因维护标准、技术要求差异明显而增加了运维成本和工作量。国产装备在核心

工业软件、船舶建造工艺数据库、智能算法方面积累薄弱，多数装备的智能化水平局限于感知与执行层面，在工况预测、工艺优化、自主决策等高阶能力上存在不足，进一步提高了系统集成的难度。

（三）产业生态层面供需错配与知识壁垒显现

健康的智能造船装备产业生态尚未成熟，供需结构性矛盾、跨领域知识传递障碍制约行业发展质量。智能装备供需之间存在错配，船厂需求高度个性化并期待可深度定制、持续迭代的解决方案，而供应商为了控制研发成本与市场风险倾向于推广标准化、批量化的成熟产品，导致针对复杂场景的有效供给不足。装备供应商、船厂之间缺乏长期稳定的战略合作关系，多为项目制形式的短期任务，未能建立协同创新机制。南通中远海运川崎船舶工程有限公司与唐山开元自动焊接装备有限公司开展了超过10年的战略合作，从单条小组立机器人焊接生产线起步并拓展出多条生产线，供应商能够充分熟悉现场工艺并不断优化装备；但此类深度绑定合作模式在行业内仍属少数，实际上多数船厂并未与核心供应商建立稳定的合作关系，导致供需衔接不畅、装备研发与实际生产脱节，不利于精准提升智能装备技术水平。更深层次的问题在于，多数集成商对船舶产品的全生命周期设计逻辑缺乏全面理解，未能深度介入船舶总体设计环节，相应的智能装备研发多停留在被动适配现有工艺的阶段，缺乏引领全流程工艺变革的系统级创新能力。

（四）船厂应用层面内部能力条件不足

船厂是智能造船装备落地应用的核心载体，船厂自身的规划能力、管理水平、人才储备直接决定智能装备的实际效能释放水平。多数船厂对自身智能化转型的战略目标、实施路径、工艺需求缺乏系统性梳理与清晰规划，对装备投入后的预期效益、适配场景、升级空间论证不充分，导致部分智能装备投产后与生产节拍、工艺流程适配度不高，未能充分发挥应有价值。与此同时，船厂普遍面临生产交付与技术改造的双重压力，船舶建造周期紧、任务重，智能化改造往往需要停产调试、重构工艺流程，边生产边改造的统筹难度大，一定程度上延缓了智能装备的部署节奏与应用深度。传统造船以人工调度、经验管控为主的生产管理模式，与智能装备数据驱动、精益协同的运行逻辑存在明显冲突，多数船厂的组织架构、考核机制、流程体系未能随智能装备部署而同步调整，数据驱动的生产优化、质量追溯、预测性维护难以落地。此外，智能装备的运维、调试、二次开发具有较强的跨学科属性，需要从业人员兼具机械、自动化、信息技术知识和船舶工艺认知，而当前船舶行业人才培养体系与企业实际需求存在错位，复合型运维与工艺人才短缺，既制约已部署装备的效能释放，也不利于后续的工艺迭代与装备升级。

六、我国智能造船装备及产业化发展的系统构思

（一）目标任务

为了积极应对挑战并精准把握机遇，我国智能造船装备产业需设定清晰、务实、前瞻性的发展目标，产业发展的核心驱动力也应围绕提升造船本质效率、满足绿色环保法规两大根本需求。可采取“两步走”战略发展目标：到2030年，着力突破一批制约行业发展的关键核心技术，显著提高智能切割、焊接、涂装等环节核心装备的自主化水平与工程应用深度，基本实现国产装备从可用向好用、耐用的实质性转变；到2035年，培育形成具有全球市场竞争力的智能装备系统解决方案供应商，建成代表国际先进水平的智能化示范船厂，构建协同高效、安全可控的智能造船产业生态。

在实施路径上，应摒弃追求“一步到位”的理想化思维，采取迭代优化、滚动发展的务实原则。鼓励产业链上下游通过联合试点、共建示范线等方式，将智能造船装备置于真实复杂的生产环境中持续运行、暴露问题、优化改进，在实践中完成技术成熟度提升与商业模式验证。为此，可重点开展五方面工作。① 筑牢数据和标准基座。构建覆盖全流程、全要素的数据采集与流通体系，支撑跨设备、跨系统的数据互联互通。制定并推广统一的行业数据模型、通信协议、接口标准，为构建全数据驱动的智能车间、实现数字化转型打下坚实基础。② 集中攻关核心技术。可通过设立国家重点技术装备攻关专项等形式，针对智能感知、精密控制、工艺算法等基础共性技术以及船舶特有的复杂曲面加工、智能焊接、高质量涂装等应用技术，整合优势资

源、集中开展突破，增强产业核心创新能力。③ 研制标志性智能装备系统。重点支持面向大型分段、总段建造的智能焊接机器人集群系统、三维曲面智能加工中心、集成智能物流的模块化预舾装单元等装备的研发与工程化验证，形成代表行业发展水平的高端装备产品。④ 培育多层次市场主体。支持有条件的行业领军企业整合必要资源并转型为提供软硬件一体化解决方案的系统集成商，积极培育在工业软件、核心功能部件、智能传感器等细分领域深耕的“专精特新”企业，形成大中小企业融通发展的健康生态。⑤ 建设国家级中试验证平台。建设面向软硬件协同、人机环境融合的集成测试与验证环境，着力解决从实验室技术到车间规模化、高可靠性应用的工程化问题，降低智能造船新技术和新装备的产业化风险。

（二）主要工艺环节的技术发展方向

1. 船体建造环节

船体建造是最复杂的核心工艺环节，技术发展方向是基于统一的三维模型数据源，推动工艺高度细分和装备高柔性化适配。在切割环节，发展超高功率的智能化激光切割技术，提升厚板切割效率与精度。在成形环节，研发基于大数据、AI的智能曲面成形装备与工艺系统，突破复杂曲板成形工艺参数自学习优化、水火弯板机器人路径自主规划、在线检测与成形质量闭环控制等关键技术，逐步摆脱对操作人员的经验依赖。在物流环节，推广智能化转运、分拣与仓储系统，发展适用于船舶大尺寸、异形构件的AGV/RGV智能调度技术，推动从钢材堆场到加工工位的全流程物料自动流转。在装配焊接环节，开发适用于各类细分装配场景（小组立、中组立、大组立）的智能化装焊装备，突破厚板多层多道焊缝自适应跟踪、复杂节点机器人路径自主规划、协作机器人免示教编程等关键技术。在系统层面，应用集成AI技术的数字孪生系统，开展工艺参数的持续优化与迭代。

2. 舾装环节

在舾装环节，智能化发展宜划分先行、后行两个阶段。在先行阶段，舾装与船体建造深度交叉，应重点推动管子加工全工序的智能化升级。发展管件自动识别与智能套料技术，攻关非标准管件柔性装夹与自适应焊接技术，建立基于制造执行系统的管子加工全流程数字化管控体系；推动物流与仓储系统的精细化、数字化、智能化发展，支持管子从加工、试压到托盘配送的全链条信息追溯与准时化配送。在后行阶段，应发展基于模块化、单元化设计的智能预舾装生产线，制定舾装单元化、标准化接口规范，将大量舾装作业从船坞阶段前移至内场车间以显著缩短船坞周期；广泛应用增强现实与虚拟现实技术，支持复杂狭小空间内的远程辅助装配、管路系统可视化校验与实时检测、人员沉浸式高效培训。此外，针对新燃料船舶（如液化天然气、氨、甲醇）的舾装需求，前瞻布局双相不锈钢、铝合金等特殊材料管件的智能化加工技术研发。

3. 涂装环节

涂装是贯穿船舶建造全过程、环境保护要求极高的工序，应以绿色、高效、高质量为核心发展方向。在表面处理方面，研发适用于船体大立面作业的高空车式智能冲砂与喷涂系统，集成真空回收与粉尘实时监控装置，实现开放式作业条件下的粉尘近零排放；开发用于各类舱室的全自动清扫、拉毛、除锈智能装备，突破狭小空间内自主导航、曲面自适应贴合、作业质量在线评估等关键技术。在喷涂作业方面，发展适用于封闭式分段的内部自动化涂装解决方案，研制多自由度喷涂机器人、基于三维模型的离线编程系统，支持漆膜厚度的在线检测与自适应调控；开展智能涂装装备、高效废气收集处理装置的集成化设计与协同控制，构建涂装车间全域环境参数的实时监测与智能调控系统。

（三）大型船厂的应用路径

大型船厂作为船舶工业智能化转型的主力军，应在智能装备发展方面发挥示范引领作用，通过先行先试、分步实施，为全行业探索出可复制、可推广的发展路径。可按照“由点及面、由易到难、由单点到系统”的递进式发展原则，分为3个阶段有序推进。

1. 先行工序的自动化改造阶段

此阶段重在积累经验、培养人才、建立信心，为后续的深入改造打好基础。以技术较成熟、效益较明显的工序为切入点，推动“机器换人”。优先在钢材预处理、数控切割、小组立平直焊缝焊接、标准管件加工等环节推广应用自动化装备与小型工

作站，以标准化、批量化生产场景为突破口，获得可量化的效率提升与成本节约。同步建设基础数据采集体系，在自动化装备中嵌入数据采集模块，对设备运行状态、生产节拍、能源消耗等参数进行采集与存储，为后续的数据驱动优化打好基础。可在船厂内部设立专职的智能制造牵头部门，统筹推进智能产线规划建设、新技术导入验证等。

2. 关键工序的机器人替代与柔性升级阶段

此阶段重在攻克技术难点、积累工艺数据、迭代关键算法，提升智能装备的工艺适应性与使用可靠性。面向劳动强度大、作业环境恶劣、工艺复杂的工序，推动机器人替代与柔性化升级。攻关复杂曲面焊接、曲板冷热成形、狭小空间内焊接、非标准件柔性装配等技术，发展协作机器人、免示教智能焊接系统、自适应装配装备等。以中组立装焊、曲面分段建造等典型场景为攻坚重点，探索人机协作的优化作业模式，建立相应的工艺数据库和算法模型库，形成可复用的工艺知识资产。

3. 系统集成与数字孪生应用阶段

推进各工序装备的互联互通与系统集成，构建全流程数字孪生平台，实现数据驱动的精益生产。打通设计数据、制造执行系统的信息链路，实现三维模型直接驱动设备作业，消除设计与制造之间的数据断层。建立全要素数据采集与流通体系，统一设备接口标准和数据交换协议，支撑工艺优化、质量追溯、预测性维护、智能决策。推动结构建造、舾装、涂装三大工艺的节奏协同与资源动态调度，实现“壳舾涂”一体化均衡生产。同步推进管理变革与组织能力升级，建立适应智能化生产模式的扁平化管控架构、数据驱动的绩效考核体系，将行业智能化转型从技术层面延伸至管理模式。

七、我国智能造船装备及产业化的发展策略

（一）推动装备供应商向深度工艺合作伙伴及全生命周期服务商转型

可建立深入理解船舶建造特定工艺的常态化机制，使装备供应商的研发活动贴合船厂实际生产和应用瓶颈环节，针对性开发高实用价值的专用或高柔性化装备。在产品战略上，聚焦特定应用场景并关注智能造船装备的高可靠性和易维护性，主动承担跨行业技术转化职能，将汽车、航空、航天等装备领域的自动化、数字化成熟方案进行创造性改良后引入船舶建造领域。在商业模式上，积极探索基于服务的商业模式、按效能付费等新型合作模式，与造船企业构建风险共担、利益共享的长期战略合作关系，合理缓解船厂在智能装备方面的初期投资压力。

（二）引导造船企业主导智能化升级并构建协同创新机制

造船企业作为智能装备的需求方与应用方，应从被动采购的使用者转变为智能化升级的主导者和联合创新者。立足自身产品定位与核心竞争力，系统梳理工艺痛点与升级目标，制定智能化发展规划以及可执行、可评估的详细需求规格，为内外部协同创新提供明确的需求牵引。确立数据资产的战略地位，建立涵盖数据采集、治理、分析、应用的全链条管理体系，为数据驱动的工艺优化与生产决策筑牢基础。主动开放典型生产场景与工艺数据，以共同投资方、联合开发方的身份，与行业领先的装备供应商、软件开发商、科研机构组建创新联合体，建立从需求提出、原型验证到迭代优化的“产学研用”闭环。将跨学科复合型人才引进培养、现有工程技术队伍技能提升置于优先位置，同步推动组织架构优化和管理流程变革，形成与智能化生产模式相适配的企业内部管理体系。

（三）营造产业创新生态并完善政策支持体系

建议行业管理部门统筹营造良好的产业创新生态，引导和规范智能造船装备产业健康有序发展。在科技创新方面，建议在中长期科技规划、重点研发计划等科技渠道中为智能造船装备核心和共性技术攻关提供稳定支持，依托行业龙头企业、国家级创新中心布局建设“产学研用”协同创新平台，集中突破关键技术瓶颈。在产业支持方面，可进一步优化完善首台（套）重大技术装备的保险补偿、示范应用、公共采购政策，有效降低用户端的试错风险与使用成本；探索设立船舶制造业智能化改造专项引导基金与产业协同创新基金，为产业链上关键环节的示范性项目、供需联合攻关项目提供精准支持。在生态构建方面，积极倡导并支持组建跨学科、跨行业的智能造船产业创新联盟，为产业链上下游协同攻关、供需对接等提供平台化服务；建立

智能造船装备品质分级评价制度，定期发布行业推荐清单，为船厂选型采购提供客观参考，引导市场朝着品质优先方向转型。

（四）加强标准体系建设和人才培养支撑

在标准体系建设方面，应加快制定智能造船装备的互联互通、数据交换、安全规范等行业标准，建立统一的智能装备评价认证体系，为装备规模化推广与系统集成提供规范依据。在人才培养方面，可引导船舶类职业院校、应用型高校增设智能产线运维、机器人焊接工艺编程等“微专业”，壮大契合行业实际技能需求的人员规模。依托区域船舶产业集群，由管理部门、行业协会、装备企业、船厂联合建设共享型智能制造实训基地，解决智能化开发、维护、调试人员缺乏现场经验的现实问题，降低单一企业的人员培养成本。建立和健全人才激励机制，完善技能认证体系，吸引更多的跨学科人才参与船舶智能制造领域发展。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 10, 2026; **Revised date:** May 5, 2026

Corresponding author: Xue Hongxiang is a professor from the School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University. His major research field is structural safety assessment for naval architecture and ocean engineering. E-mail: hongxiangxue@sjtu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the High-quality Development Strategy of China’s Marine Intelligent Equipment and Industry” (2025-HZ-26)

参考文献

[1] 骆晓萌，石琎，张磊，等. 数字工艺赋能船舶智能制造[J]. 船舶工程，2024，46(7)：16-36.
Luo X M，Shi J，Zhang L，et al. Digital process enables ship intelligent manufacturing[J]. Ship Engineering，2024，46(7)：16-36.

[2] 苏波，李培根，瞿国春，等. 我国智能制造发展十年回顾总结与未来展望[J]. 中国工程科学，2026，28(1)：48-57.
Su B，Li P G，Qu G C，et al. Ten-year review and future prospect of intelligent manufacturing development in China[J]. Strategic Study of CAE，2026，28(1)：48-57.

[3] 王体涛. 船舶智能制造的发展前景和关键问题[J]. 船舶工程，2022，44(10)：4-7.
Wang T T. Development prospects and key issues of shipbuilding intelligent manufacturing[J]. Ship Engineering，2022，44(10)：4-7.

[4] Wu K，Xu J，Zheng M M. Industry 4.0：Review and proposal for implementing a smart factory[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2024，133(3)：1331-1347.

[5] 衣正尧，弥思瑶，朱嘉晟，等. 船舶智能制造及其智能船舶产品发展趋势的可视化分析[J]. 船舶工程，2025，47(4)：106-115.
Yi Z Y，Mi S Y，Zhu J S，et al. Visual analysis of trends in intelligent ship manufacturing and intelligent ship product[J]. Ship Engineering，2025，47(4)：106-115.

[6] Yi Z Y，Mi S Y，Tong T Q，et al. Intelligent initial model and case design analysis of smart factory for shipyard in China[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence，2023，123：106426.

[7] 胡玉真，刘书宏，门志国，等. 船舶制造业智能化升级现状及我国发展战略研究[J]. 舰船科学技术，2025，47(20)：1-6.
Hu Y Z，Liu S H，Men Z G，et al. Research on the intelligent upgrade of shipbuilding industry and China’s development strategy[J]. Ship Science and Technology，2025，47(20)：1-6.

[8] 牛延丹，沈文轩. 中国智能船厂建设探索[J]. 中国船检，2024(3)：11-16.
Niu Y D，Shen W X. Exploration of intelligent shipyard construction in China[J]. China Ship Survey，2024(3)：11-16.

[9] Zhang X W，Chen D Y. Shipbuilding 4.0：A systematic literature review[J]. Applied Sciences，2024，14(14)：6363.

[10] Wahidi S I，Oterkus S，Oterkus E. Robotic welding techniques in marine structures and production processes：A systematic literature review[J]. Marine Structures，2024，95：103608.

[11] 彭涛，林忠钦，杨建民，等. 海洋工程装备建造设备发展浅探[J]. 中国工程科学，2016，18(4)：109-112.
Peng T，Lin Z Q，Yang J M，et al. An exploration of development of construction device for ocean engineering equipment[J]. Strategic Study of CAE，2016，18(4)：109-112.

[12] 郄金波，周明欢. 国内船厂造船装备现状分析与发展建议[J]. 造船技术，2018，46(6)：1-4，9.
Qie J B，Zhou M H. Status analysis and development suggestions of shipbuilding equipment in domestic shipyards[J]. Marine Technology，2018，46(6)：1-4，9.

[13] 机器人为中心！三星重工打造未来船厂[EB/OL]. (2024-03-25)[2026-02-09]. https://www.eworldship.com/html/2024/Shipyards_0325/201781.html.
Robot-centric！ Samsung Heavy Industries to build future shipyard[EB/OL]. (2024-03-25)[2026-02-09]. https://www.eworldship.com/html/2024/Shipyards_0325/201781.html.

[14] 打造巨型智能船厂！韩华海洋增资 15 亿美元“押注”未来市场[EB/OL]. (2023-08-26)[2026-02-09]. https://www.eworldship.com/html/2023/Shipyards_0826/195470.html.
Hanwha Ocean to build mega smart shipyard！ The company raises $1.5 billion in “betting on” future market [EB/OL]. (2023-08-26)[2026-02-09]. https://www. eworldship. com/html/2023/Shipyards_0826/195470.html.

[15] MOTIE announces K-shipbuilding super gap vision 2040[EB/OL]. (2024-07-02)[2026-02-09]. https://english.motie.go.kr/eng/article/EATCLdfa319ada/1935/view pageIndex=3&bbsCdN=2.

[16] 日本造船业加快推进数字化转型[EB/OL]. (2023-10-25)[2026-02-09]. https://www. eworldship. com/html/2023/ShipbuildingAbroad_1025/197273.html.
Japan’s shipbuilding industry accelerates digital transformation[EB/OL]. (2023-10-25)[2026-02-09]. https://www.eworld-

ship.com/html/2023/ShipbuildingAbroad_1025/197273.html.

[17] 造船業再生ロードマップの策定[EB/OL].(2025-12-26)[2026-02-09]. https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_tk5_000090.html.
Formulation of the shipbuilding industry revitalization roadmap[EB/OL].(2025-12-26)[2026-02-09]. https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_tk5_000090.html.

[18] 陈震，甄希金，王体涛. 船舶智能制造[J]. 船舶工程，2022，44(10)：3.
Chen Z，Zhen X J，Wang T T. Ship intelligent manufacturing[J]. Ship Engineering，2022，44(10)：3.

[19] 协作机器人突破170台！造船业“用工荒”倒逼转型[EB/OL].(2025-12-16)[2026-02-09]. https://www.eworldship.com/html/2025/Shipyards_1216/217150.html.
Collaborative robots exceed 170 units！ Shipbuilding “labor shortage” forces transformation[EB/OL].(2025-12-16)[2026-02-09]. https://www.eworldship.com/html/2025/Shipyards_1216/217150.html.

[20] 人形机器人入场！造船巨头加速打造智能船厂[EB/OL].(2025-09-22)[2026-02-09]. https://www.eworldship.com/html/2025/Shipyards_0922/215012.html.
Humanoid robots enter the scene！ Shipbuilding giants accelerate the construction of smart shipyards[EB/OL].(2025-09-22)[2026-02-09]. https://www.eworldship.com/html/2025/Shipyards_0922/215012.html.

[21] 携手强援！造船巨头开发AI焊接机器人[EB/OL].(2025-10-27)[2026-02-09]. https://www.eworldship.com/html/2025/Shipyards_1027/215861.html.
Joining forces with strong partners！ Shipbuilding giant develops AI-powered welding robot[EB/OL].(2025-10-27)[2026-02-09]. https://www.eworldship.com/html/2025/Shipyards_1027/215861.html.

[22] Lee Y G，Ju S，Woo J H. Simulation-based planning system for shipbuilding[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing，2020，33(6)：626-641.

[23] 范爱龙，严新平，李忠奎，等. 我国航运业绿色低碳发展的需求、路径与展望[J]. 船海工程，2024，53(4)：1-5，12.
Fan A L，Yan X P，Li Z K，et al. Demand，pathway，and prospects of green and low-carbon development in China’s shipping industry[J]. Ship & Ocean Engineering，2024，53(4)：1-5，12.

[24] International Maritime Organization. 2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships：Resolution MEPC.377(80)[R]. London：Marine Environment Protection Committee，2023.

[25] Det Norske Veritas. Maritime forecast to 2050[R]. London：Det Norske Veritas，2025.

[26] Ma Y K，Fan J F，Yang H Z，et al. An efficient and robust complex weld seam feature point extraction method for seam tracking and posture adjustment[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics，2023，19(11)：10704-10715.

[27] Truong V D，Wang Y F，Won C，et al. A deep learning-based machine vision system for online monitoring and quality evaluation during multi-layer multi-pass welding[J]. Sensors，2025，25(16)：4997.

[28] Lei T，Rong Y M，Wang H，et al. A review of vision-aided robotic welding[J]. Computers in Industry，2020，123：103326.

[29] Guo Q，Yang Z，Xu J T，et al. Progress，challenges and trends on vision sensing technologies in automatic/intelligent robotic welding：State-of-the-art review[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing，2024，89：102767.

[30] Wang S，Jia H H，Fu Y X，et al. Improved CNN for predicting line heating forming deformation of complex hull curved plate[J]. Materials，2025，18(23)：5318.

[31] Thinh N T，Bae K Y，Yang Y S. Using a novel CNN model for predicting the induction heating lines to obtain a desired deformed shape of steel plate[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing，2023，24(10)：1781-1791.

[32] 冯消冰，王建军，王永科，等. 面向大型结构件爬行机器人智能焊接技术[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2023，63(10)：1608-1625.
Feng X B，Wang J J，Wang Y K，et al. Intelligent welding technology for large structures crawling robot[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology)，2023，63(10)：1608-1625.

[33] Ra D，Lee J，Lee M，et al. Physics-informed machine learning across manufacturing processes：Recent advances，challenges，and directions[J]. Journal of Manufacturing Systems，2026，85：72-95.

[34] Zheng C，An Y S，Wang Z X，et al. Hybrid offline programming method for robotic welding systems[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing，2022，73：102238.

[35] Liu Y，Tang Q，Tian X C，et al. A novel offline programming approach of robot welding for multi-pipe intersection structures based on NSGA-II and measured 3D point-clouds[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing，2023，83：102549.

[36] Gao X，Zhao L M，Chen Z L，et al. A 3D vision-guided adaptive trajectory correction system for robot offline programming[J]. Engineering Research Express，2026，8(1)：015227.

[37] Wang X D，Hu X F，Wan J F. Digital-twin based real-time resource allocation for hull parts picking and processing[J]. Journal of Intelligent Manufacturing，2024，35(2)：613-632.

[38] Iwańkowicz R，Rutkowski R. Digital twin of shipbuilding process in shipyard 4.0[J]. Sustainability，2023，15(12)：9733.

[39] Mauro F，Kana A A. Digital twin for ship life-cycle：A critical systematic review[J]. Ocean Engineering，2023，269：113479.

[40] Tao F，Zhang H，Zhang C Y. Advancements and challenges of digital twins in industry[J]. Nature Computational Science，2024，4(3)：169-177.

[41] Xu H S，Wu J，Pan Q Q，et al. A survey on digital twin for industrial Internet of things：Applications，technologies and tools[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials，2023，25(4)：2569-2598.

[42] 王昭. 船舶复杂曲面外板水火弯板加工工艺参数设计及工艺规划技术研究[D]. 镇江：江苏科技大学，2022.
Wang Z. Research on process parameter design and process planning technology of line heating for ship’s complex curved outer plate[D]. Zhenjiang：Jiangsu University of Science and Technology，2022.

[43] 高正杰，刘建峰，沈新新，等. 船舶涂装机器人应用技术分析[J]. 船舶与海洋工程，2020，36(3)：56-60.

Gao Z J，Liu J F，Shen X X，et al. Technological analysis on the application of ship painting robot[J]. Naval Architecture and Ocean Engineering，2020，36(3)：56-60.

[44] 方磊，蔡向辉，柳小兵，等. MES 系统在船舶管子智能制造的应用[J]. 船海工程，2025，54(3)：137-142.
Fang L，Cai X H，Liu X B，et al. Application of manufacturing execution system in the intelligent manufacturing of ship pipe[J]. Ship & Ocean Engineering，2025，54(3)：137-142.

[45] 俞国庆，郜世杰，王凯，等. 船舶分段合拢曲面自动焊接工艺及其应用[J]. 机电设备，2024，41(6)：74-80.
Yu G Q，Gao S J，Wang K，et al. Application on automatic welding technology of ship segmented closed surface[J]. Mechanical and Electrical Equipment，2024，41(6)：74-80.

[46] 周荣富，梁伟，汪璇，等. 面向智能制造的船舶小组立中间产品工艺路线[J]. 造船技术，2021，49(1)：71-75.
Zhou R F，Liang W，Wang X，et al. Ship sub-assembly intermediate product technology route towards intelligent manufacturing[J]. Marine Technology，2021，49(1)：71-75.