

造船机器人研究现状及发展趋势

Research Status and Development Trends of Shipbuilding Robots

胡明伟^{1,2}, 孙宏伟^{1,2}, 闫文敏³, 苏翔⁴, 陈震⁵, 花磊^{1,2}

HU Mingwei^{1,2}, SUN Hongwei^{1,2}, YAN Wenmin³, SU Xiang⁴, CHEN Zhen⁵, HUA Lei^{1,2}

1. 江苏自动化研究所, 江苏连云港 222061

Jiangsu Automation Research Institute, Lianyungang 222061, Jiangsu, China

2. 中船数字信息技术有限公司, 北京 102609

China Shipbuilding Digital Information Technology Co., Ltd., Beijing 102609, China

3. 中国舰船研究院, 北京 100101

China Ship Research and Development Academy, Beijing 100101, China

4. 中国船舶集团有限公司第七一四研究所, 北京 100101

The 714 Research Institute of CSSC, Beijing 100101, China

5. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240

School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

基金项目: 江苏省基础研究计划(自然科学基金)(BK20231234); 中国船舶集团科学技术发展研究(海洋防务装备领域2023); 连云港市花果山英才“双创计划”资助项目([2022]15); 连云港市重点研发计划(CG2206)。

摘要

Abstract

【DOI】10.13788/j.cnki.cbgc.2025.07.Z1

[目的]为促进我国造船机器人的研发和应用,[方法]对船舶总装制造的现状和特点进行阐述,对世界各国造船机器人研制应用的相关政策措施进行分析。在此基础上,对国内外造船机器人的研发应用情况进行分析,并对典型造船机器人的特点进行归纳。围绕多品种、小批量、变构态的船舶中间产品制造模式,对造船机器人的研究方向和发展趋势进行展望。[结果]研究表明:造船机器人与人工智能等新一代信息技术深度融合能够实现船舶建造产业模式和企业形态根本性转变。[结论]研究成果可为我国造船机器人的研发和应用提供一定参考。

[Purpose] To promote the research and application of shipbuilding robots in China, [Method] the current situation and characteristics of ship assembly manufacturing are elaborated, and the relevant policy measures for the research and application of shipbuilding robots in various countries around the world are analyzed. On this basis, the research and application of shipbuilding robots at home and abroad are analyzed, and the characteristics of typical shipbuilding robots are summarized. The research direction and development trend of shipbuilding robots around the manufacturing mode of ship intermediate products with multiple varieties, small batches, and variable configurations is looked forward to. [Result] Research shows that the deep integration of shipbuilding robots with new generation information technologies such as artificial intelligence can achieve fundamental changes in the shipbuilding industry model and enterprise form. [Conclusion] The research results can provide some references for the development and application of shipbuilding robots in China.

关键词 Key words

造船机器人；船舶总装制造；研究现状
shipbuilding robot; ship assembly manufacturing; research status

0 引言

机器人技术推动了汽车、电子信息等传统制造业从机械化向智能化转型，实现了生产效率、产品质量的跨越式提升^[1-2]。船舶总装制造是典型的离散型、劳动密集型生产，由于船厂空间尺度大，建造优化周期长，工艺流程复杂，专业复杂度极大，单件小批量、中间产品种类非标件数量多，物理尺寸差异大，作业环境相对恶劣，对机器人技术应用提出了特殊要求^[3]。2025年，世界船舶工业保持2021年以来的复苏势头^[4]，市场逐步回暖，进入量价齐升的景气周期，全球完工交付与手持订单稳定增长。与此同时，船舶制造业生产负荷重，交付压力大，近3年的交船舶位基本锁定。绿色智能船舶需求量的不断提升显著增加了船舶总装制造的复杂程度，对世界各国造船企业提出了新挑战。

随着全球新一轮科技革命和产业变革的深入发展，机器人技术与先进造船技术加速融合，为船舶制造业智能化发展提供了历史机遇，世界主要造船国家纷纷加快船舶总装建造智能化转型步伐^[5]。以机器人代替人工作业，不仅能够将造船工人从“苦、脏、累”的作业环境中解脱出来，还能促使作业效率和质量提升，从而推动船海工程装备制造甚至是维护的脱胎换骨。造船机器人是指在船舶及海工装备制造中协助、替代操作人员完成艰难险等作业的智能化装备，能够适应

多品种、中小批量、柔性化需求的劳动密集型船舶、海工装备集成制造和半自动化、智能化交融运维模式的复杂需要，有效解决船舶与海工装备制造中环境恶劣、劳动强度大、用工监管难、质量参差不齐、效率低以及产业协同难等问题^[6]。

随着以日韩为主的船舶制造强国、欧美为核心的智能船舶和高端海工装备设计运维大国不断推进智能制造进程，机器人技术广泛地应用于船舶及海工装备制造的各个环节^[7-9]。在我国船舶制造产能饱和，交船、生产压力矛盾凸显背景下，机器替代人成为船企提质增效、破解低毛利态势的重要手段。但由于船海工程装备产品的非标准化和定制化特点，船企应用机器人进行作业仍有一定的困难，但经过近些年发展，机器人参与船海工程装备制造并助力船海工程装备发展已成为迫切需要。

本文对船舶总装制造的现状和特点进行阐述，通过与汽车制造模式的对比，对机器人技术应用的难点和局限性、世界各国造船机器人研制应用的相关政策措施、我国船舶总装制造面临的形势和挑战进行分析。在此基础上，对国内外先进造船企业造船机器人应用情况和目前主要的造船机器人类型和优缺点进行分析和归纳，围绕多品种、小批量、变构态的船舶中间产品制造模式，展望造船机器人的研究方向和发展趋势。

1 船舶总装制造现状和特点

造船技术水平分级情况^[10]见表1。到目前为止，我国船舶制造水平总体处于以中间产品（分段、部件、系统和设备等）专业化生产的集成制

造模式，该造船模式应用成组技术，以中间产品为导向，按区域组织生产，船体、舾装和涂装作业在空间上进行分道作业，在时间上有序安排，

实现设计、生产、管理一体化，均衡、连续地总装造船。典型船舶制造流程见图 1。图 1 中：AGV 为自动导向车（Automated Guided Vehicle），典型船舶制造流程主要包括预处理、组立制作、总组搭载、舾装制作、内外场涂装等工艺环节，具有典型的离散型、劳动密集型特点。

表 1 造船技术水平分级情况
Tab. 1 Shipbuilding Technology Levels

造船阶段	造船模式	主导技术	开始年份	模式特点	技术特点
传统	整体制造模式	铆接技术	1820 年	船台散装、码头舾装、整船涂装	劳动密集型
	分段制造模式	焊接技术	1950 年	分段建造、预舾装、预涂装	劳动密集型
现代	分道制造模式	成组技术	1970 年	分道建造、区域舾装、区预涂装	设备密集型
	集成制造模式	信息技术	1990 年	壳舾涂装一体化	信息密集型
将来	敏捷制造模式	智能技术	2000 年	产品模块、信息数字化、动态联盟、瞬时控制	知识密集型

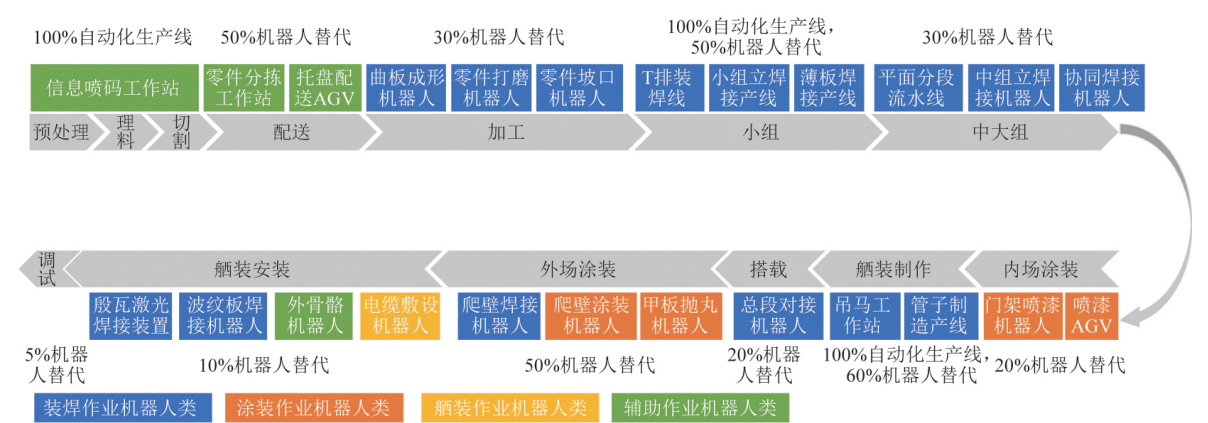


图 1 典型船舶制造流程
Fig. 1 Typical Shipbuilding Process

目前，机器人技术广泛应用在汽车制造领域，汽车通用部件多，一致性较好，批量生产量大，单件小，易于组装，产品周期短，出现问题易调整，通过机器人简单编程即可实现流水线式作业。然而，船舶制造的部件批量化程度低、单件大、生产周期长、工艺通道有限，船东需求多样化，这为标准化工作带来了极大的困难，进而对机器人的柔性和适应性提出了更高的要求。汽车制造与船舶制造模式对比情况见表 2。由表 2 可知：船舶与汽车在生产模式上存在巨大差别，导致机器人在船舶行业的推广应用比其他行业难度更大。首先，工业机器人的智能化水平还有待提升，船

舶行业作业场地特殊、空间复杂、零部件庞大，对机器人的智能化要求更高；其次，船舶行业的规模化和批量化生产程度不足，产品的非标准化和定制化特点明显，导致应用机器人所能带来的生产效率提升效果远远不如汽车行业等。因此，造船机器人的研发应用必须紧密围绕船舶总装制造的特点和需求，通过与现代造船模式的深度融合，提升船舶中间产品壳舾涂一体化关键制造环节的数字化和智能化水平，代替大量体力、脑力劳动和部分创造性脑力劳动，实现劳动密集型向技术密集型船舶总装建造作业模式的转变。

表 2 汽车制造与船舶制造模式对比
Tab. 2 Comparison of Automotive and Shipbuilding Manufacturing Models

项目	汽车制造	船舶制造
作业对象	小部件、标准化、低成本	零件庞大、定制化、成本高
生产方式	大批量、任务单一、生产周期短	中小批量、多任务、生产周期长
作业环境	与人隔离、结构化环境	半结构化环境、柔性移动
作业任务	焊接、搬运、装配、喷涂等	焊接、涂装、打磨、装配、加工等
机器人性能要求	高精度、高速度、高刚度	高柔顺性、高灵活性
机器人应用现状	以工业机器人为主，智能化、适应性要求差	以特种机器人为主，智能化、适应性要求高
生产线特点	以最终产品为对象组织流水作业，强调最终产品完整性；独立连续完整的传输设备	以中间产品为对象组织流水作业，强调中间产品完整性；没有连续完整的传输设备
整体水平	“灯塔”工厂、“工业 4.0”	数字化工厂、“工业 3.0”

2 造船机器人政策战略

围绕数字化、智能化、绿色化船舶制造要求，以日韩、欧美为主的造船强国纷纷制定造船机器人研发应用政策战略，见表 3。通过大范围推广“机器人换人”和“机器人辅助人”等智能化机器人装备，提高船舶制造生产率和质量，实现跨越式发展。

表 3 世界各国智能制造相关政策措施
Tab. 3 Policies Related to Shipbuilding Robots Around the World

国家 / 地区	政策措施
中国	《船舶总装建造智能化标准体系建设指南（2020 版）》 ^[11] 、《推进船舶总装建造智能化转型行动计划（2019—2021 年）》 ^[3] 、《船舶制造业绿色发展行动纲要（2024—2030 年）》 ^[12]
日本	《海事产业与生产力革命计划》 ^[13] 、《业务基础强化计划》 ^[14] 、《日本造船产业创新政策》、《创新造船技术研发支援项目》 ^[15]
韩国	《造船产业发展战略》 ^[16] 、《造船产业活力提升方案》、《韩国造船再腾飞战略》、《关于确保造船业超级差距优势的战略》、《韩国造船新一代领先战略》、《新一代造船工业法》 ^[17] 、《韩国造船超级差距蓝图 2040》 ^[18]
美国	《20 年国有船厂优化计划》、《船厂基础设施优化计划》 ^[19] 、《数字系统工程转型战略》、《制造技术计划》 ^[20] 、《国家造船研究项目》 ^[21] 、《集成数字造船计划》
欧洲	《欧洲智能造船学术项目》 ^[22] 、《英国国家造船战略》 ^[23] 、《荷兰综合海事制造产业政策》、《德国国家海事技术协调和加强总体规划》、《西班牙船舶工业生态系统现代化和多样化的经济复苏和转型战略项目》

2.1 中国

21 世纪初，通过学习日本精益造船管理模式，我国船舶工业实现了跨越式发展，核心设施和技术能力大幅提升。“十四五”期间，在《推进船舶总装建造智能化转型行动计划》^[3, 11-12]等相关政策战略支撑下，船舶工业领域大力推动数字化转型升级，并设定了明确的体系建设节点和要

求。骨干造船企业和机构积极有效地探索和研究造船机器人，并取得了一定的成果和进步，在组立焊接、涂装作业、舾装焊接等流程进行了小范围的示范应用^[24]。但机器人技术在船海工程装备制造的应用进程较为缓慢，工业机器人密度远低于其他行业水平及日韩船舶工业水平。

2.2 日本

21 世纪后，日本船舶工业面临与韩国和中国的激烈竞争，国际市场份额不断下降。为解决人口老龄化问题，提振日本船舶工业，日本政府相继推出多项船舶产业政策，以 2016 年推出的《海事产业与生产力革命计划》^[13] 最具代表性，该政策的三大目标之一是推进船舶生产自动化，进一

步优化造船流程，提升模块精度和舾装效率，目前该项目支持了基于人工智能的焊接机器人联动协作系统、大型立体曲面分段多焊接机器人协作系统、无数控数据准备的焊接机器人等机器人应用研发项目，预计到 2025 年实现造船生产效率提高 50%。

2.3 韩国

20 世纪 90 年代，借鉴日本川崎重工经验，韩国船舶工业通过逐步引进工业机器人解决劳动力短缺问题，并持续投入大量资金研发造船机器人。自 2018 年以来，陆续发布了 6 个与机器人技术应用相关的船舶产业发展战略。其中，2018 年提出的 K-Yard 项目计划通过推进造船过程自动化技术（曲板成形机器人、分段组立系统和无人化

部件制造等）等 5 个工作包，实现 2025 年降低制造成本 10%，中型船舶市场占有率达到 20% 的目标。2024 年，韩国产业通商资源部发布了《韩国造船超级差距技术路线图 2040》^[18]，提出“2040 年成为世界最高造船技术强国”的目标，该战略重点强调以协作机器人为核心的自动化技术，计划到 2040 年无人化处理率达到 50%。

2.4 欧美

欧美在世界船舶工业市场整体呈现下滑趋势，但得益于先进的数字化和智能化技术，美国军用船舶制造水平依然处于世界领先地位，其推行实施的船舶智能制造政策大多数针对军用船舶制造。2020 年，美海军实施的 ManTech 计划^[19-20] 中数字化智能化项目共计 53 个，其中，自动化和机器人项目占比高达 43%。舰船船体嵌件的自动焊接机器人 5 年节省了 2 440 万美元，减少了 20% 的切割、装焊劳动力。虽然劳动力成本不断攀升、制造业大量向外转移等问题导致欧洲船舶工业受到严重冲击，但船舶工业领域众多创新来源于欧洲，以英国为主的欧洲造船国家近年来期望通过政府投资实现船舶工业复兴。2022 年，英国发布的《英国国家造船战略》旨在通过机器人

技术与供应链数字化整合推动造船企业变革^[23]。欧盟实施的《欧洲智能造船学术项目》提出了一种智能造船框架，为船舶工业数字化转型提供了技术支撑。

未来 10 ~ 15 年，全球船舶工业将发生深刻变化，在新一轮增长周期内，船舶工业市场需求结构显著变化，日韩等造船厂通过顶层战略布局，持续推进智能化和数字化装备研制应用，力图拉大与其他造船国家在技术、质量和成本等方面的差距。同时，随着船海工程装备向智能化、高端化和绿色化方向发展，智能船海工程装备的制造亟须机器人技术的支撑，从而实现“智能船，智能造”的目标。

3 造船机器人应用现状

随着我国劳动力成本逐年攀升，“苦、脏、累、险”的船舶工业难以对中国工人形成吸引力，面临着“民工荒”问题，迫切需要“机器换人”。根据船舶总装制造工艺流程，按照作业任务类型，造船机器人大致可分为装焊作业机器

人、涂装作业机器人、舾装作业机器人和辅助作业机器人等。造船机器人的核心任务是替代人工完成船舶总装制造，核心指标是作业效率和自动化水平等。

3.1 装焊作业机器人

广义上的装焊作业机器人是融合传感器、自动化等技术与船体零件加工、装配、焊接工艺的高端智能机器人单元，主要应用于构件、组立、舱室、分段和管舾等制造过程。目前，部分智能单元与自动化设备相结合，基本上实现标准化、刚性的流水线，如板型材预处理生产线、小组立焊接生产线和管子制造产线等，其自动化水平可达到 100%。针对不同的船体部件结构拓扑形式，装焊作业机器人主要以工业机器人结合外部轴完成装焊作业任务，通过外部轴增加机器人的工作空间，如管道环缝焊接机器人和曲板成形机器人^[25-26]均采用轨道增加作业空间，见图 2(a)和图 2(b)。针对 T 排、小组立和薄板等大尺度简单标准的构件，采用龙门式机器人完成装焊作业，通过增加工业机器人的数量提升装焊效率，见图 2(c)^[27]。由于受到部分小组立和管件焊接工

艺工法的约束，机器人无法满足所有产品的装焊作业，针对该问题，部分企业研制应用了基于模型和视觉驱动的多臂协同龙门式焊接机器人，见图 2(d)。该机器人可在复杂小组立和中组立装焊作业中应用，但整体效果不太理想，存在焊接作业可达性不足等问题。针对舱室、中组立、分段等复杂狭小空间焊接作业，移动式焊接机器人和爬壁式焊接机器人等被提出，如德国迈尔船厂应用的多功能舱室焊接机器人通过模块化导轨快速拼接组装来实现舱室焊接，见图 2(e)。针对邮轮、集装箱船双层船壳结构，KU 等^[28]和 LEE 等^[29]研制了移动焊接机器人，可提升 25% 的焊接效率，见图 2(f)。针对液化天然气 (Liquefied Natural Gas, LNG) 液货舱高空焊接作业需求，三星重工业株式会社研制的足式焊接机器人可在液货舱壁上自由运动并执行焊接工作，见图 2(g)。

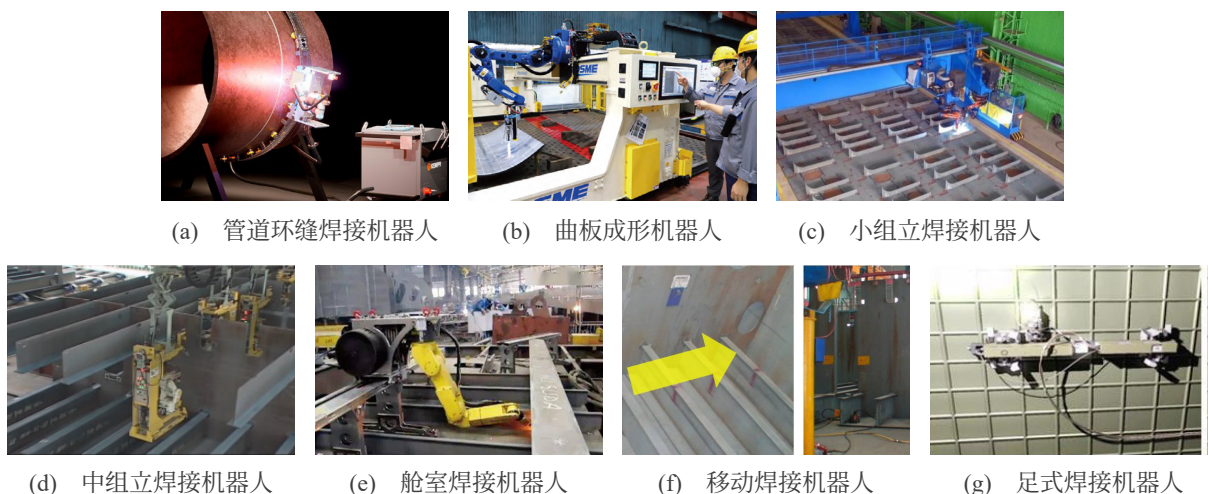


图 2 典型的加工 / 装配 / 焊接作业机器人

Fig. 2 Typical Processing/Assembly/Welding Robots

由于传统工业机器人存在负载自重比小、体积大、编程复杂、灵活性差和安全性差等问题，基于传统工业机器人研制的装焊作业智能单元依然难以满足工况多变、复杂结构、狭小空间的装焊作业任务。大型龙门机器人装备存在资金投入高、占地面积大、换产困难等问题。因此，众多船企逐步探索人机协作型装焊作业机器人的研制和应用^[30-32]，见图 3(a)。协作机器人是可以在协作区域内（机器人和人能够同时工作的安全区域）与人直接进行交互的机器人^[33-34]。西班牙纳凡蒂亚造船厂将协作机器人作为 Shipyard 4.0 和 Shipyard 5.0 的核心之一^[35]。韩国发布的《韩国造船超级差距蓝图 2040》将“超轻/高效协作机器人”项目作为三大板块技术之一，预计代替所有焊接工作的 20% 以上。截至 2024 年，韩国现代重工集团已引进 40 台协作机器人以解决现场工作量大和劳动力不足等问题^[25]。目前，人机协作型装焊机器人在格子间和中组立结构件焊接中

实现了初步应用，如现代重工集团、釜庆大学和越疆科技有限公司等机构研发的焊接协作机器人实现了狭小复杂环境下（中组、舱室、总组）的人机协同作业，在保证人-机-环境物理性交互安全条件下，通过人机协作、拖动示教、外力感知等功能有效降低相应环节工序作业工时，见图 3(b)～图 3(d)。为弥补协作机器人工作空间小的缺点，ANDERSEN 等^[36]针对船舶舱室焊接的需要，研发了移动焊接机器人，见图 3(e)；林肯电气公司基于协作机器人研制了 Guru 移动焊接机器人，能够适应造船车间多占位、多类型作业任务需求，见图 3(f)。

虽然人机协作型装焊作业机器人能够部署于船体任意部位，实现不同结构、工况、任务的高质量焊作业，在焊接、切割、涂装和舾装等方面具有广泛的应用前景。但在高空、密闭、高扬尘舱室（见图 4）环境下，协作机器人如何高效部署、稳定作业依然是亟待解决的现实问题。

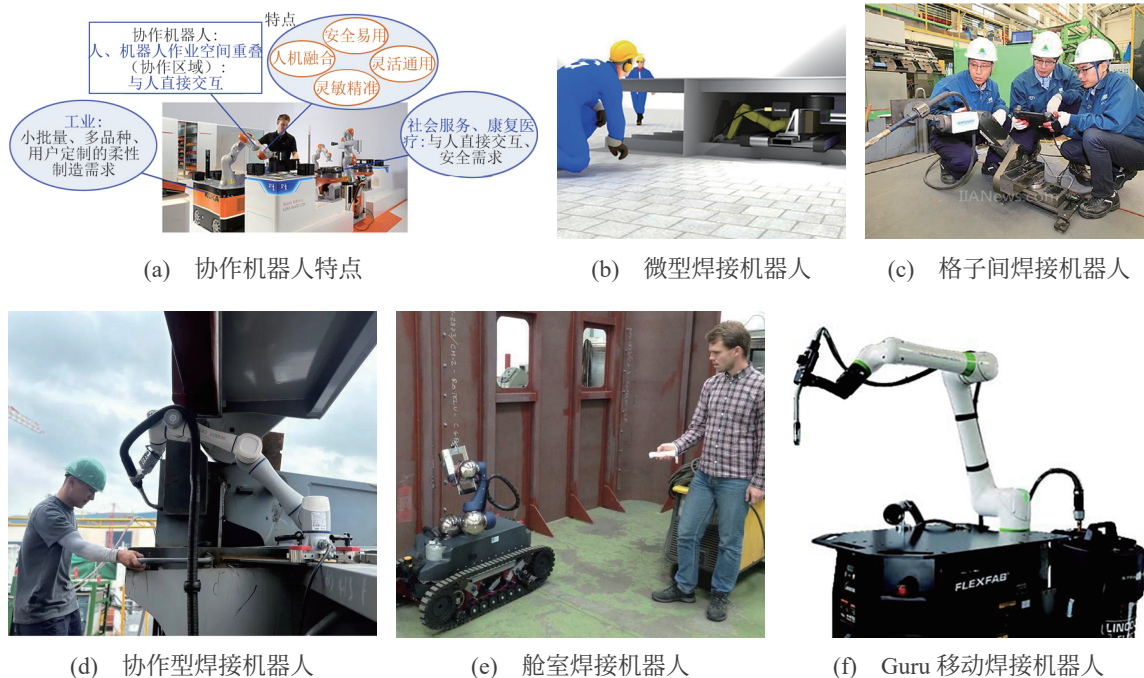


图 3 人机协作型装焊作业机器人

Fig. 3 Human Robot Collaborative Welding Operation Robot

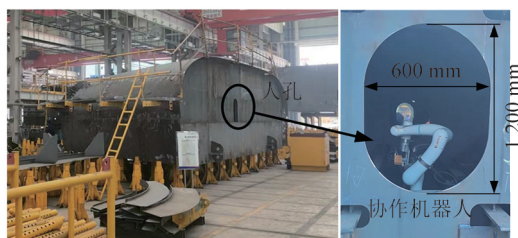


图4 密闭舱室环境

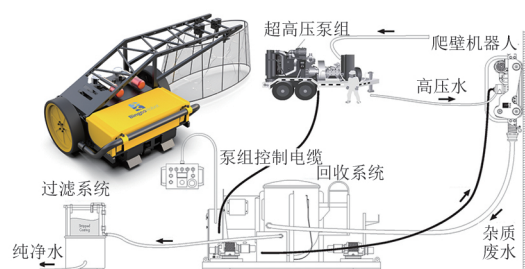
Fig. 4 High Dust Cabin Environment

3.2 涂装作业机器人

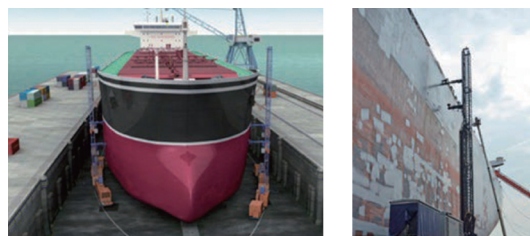
涂装是船舶总装制造中最艰苦和最危险的作业，存在严重的劳动力短缺问题。随着绿色化造船的发展及环保要求的日益严苛，涂装作业机器人成为各国研究的热点^[37]。涂装作业机器人主要分为爬壁式涂装机器人、框架式涂装机器人和移动式涂装机器人等，通过携带打磨、喷砂、除锈和喷漆等工具完成高精度、高质量的涂装作业。此外，还能与废气治理环保设备配合，实现粉尘、涂料和废气等回收，有效降低环境污染。

爬壁式涂装机器人通过负压和磁吸等形式附着于船体表面完成涂装作业，见图 5(a)^[38-39]。经过十余年的发展，其技术接近成熟。但该种类型机器人的越障性能、曲面吸附性能较差，难以满足非结构船体表面的涂装要求，如船首等部位。此外，受限于机器人的质量和体积等因素，机器人的作业准备工作较繁琐、效率较低，依然无法实现去脚手架作业，无法大量应用推广。框架式涂装机器人与龙门式机器人类似，通过轨道和桁架等携带防爆涂装机器人完成分段涂装作业，其典型代表为奥地利 Palfinger 公司研制的 Hull Treatment Carrier 系统^[40-41]和芬兰 Blastman 公司研制的 Blastman 机器人^[42]，分别应用于外场船体外壁面涂装和内场分段涂装，见图 5(b)和图 5(c)。Hull Treatment Carrier 系统由于价格高昂、部署繁琐，难以实际推广。Blastman 机器人能够进入作业对象空间内壁进行涂装作业，但其末端可达性较差，无法满足狭小空间内壁的涂装要求，目前主要应用于结构简单、尺寸较小的分段涂装。分段内部涂装依然采用人工作业方式，作业环境恶劣、劳动强度极大。移动式涂装机器人按照移动基体的不同可分为高架车式涂装机器人和移动涂装机械臂。高架车式涂装机器人利用高架车搭载喷涂设备在密闭罩中完成船体外壁面涂

装作业，见图 5(d)。西班牙 Syncroil 公司^[43]研制的涂装机器人由于高架车式涂装机器人控制困难、极易发生碰撞等问题。目前主流的作业方式依然为操作人员登高手持涂装设备完成作业。移动涂装机械臂是近年来内场涂装研究的热点，日本川崎重工业株式会社通过 AGV 搭载防爆机器人完成分段底部涂装，弥补了框架式涂装机器人作业可达性缺陷，见图 5(e)。但机器人整体尺寸、质量较大，不具备越障能力，适应性较差，依然无法解决分段内部涂装问题。总体而言，针对大尺度和结构化的外壁面涂装，涂装作业机器人具有较好的适应性，但非结构面及内壁面自动化涂装依然是亟待解决的关键问题。



(a) 爬壁式涂装机器人及系统



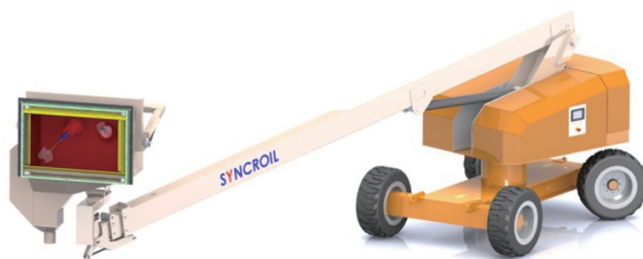
(b) Ship System 系统及部署场景

图5 典型的涂装作业机器人

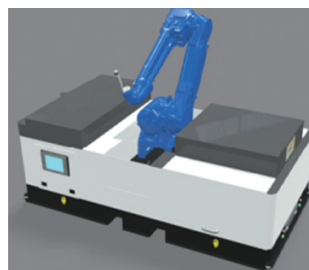
Fig. 5 Typical Painting Robots



(c) Blastman 机器人及系统



(d) 高架车式涂装机器人



(e) 移动涂装机械臂

图 5 典型的涂装作业机器人（续）

Fig. 5 Typical Painting Robots (Continued)

3.3 舾装作业机器人

舾装是船舶总装制造涉及专业、物料、人员和设备等生产要素最多的作业，且作业工艺工法标准化程度低、作业空间严重受限。因此，该环节的自动化率极低，国内外船企仅试点应用了小部分机器人或自动化装备，且整体效果不理想。耿志勇等^[44]提出了一种敷设电缆的机器人作业解决方案，以期提高船舶电缆敷设的工作效率与施工安全性，见图 6。大宇造船海洋研制的电线敷设机器人^[45-46]能够在水平、垂直以及曲面区域自动安装 15 kg/m 重的电缆，整个装置通过压缩空气进行移动，在钻井船上替代 30% 的布线工作量。

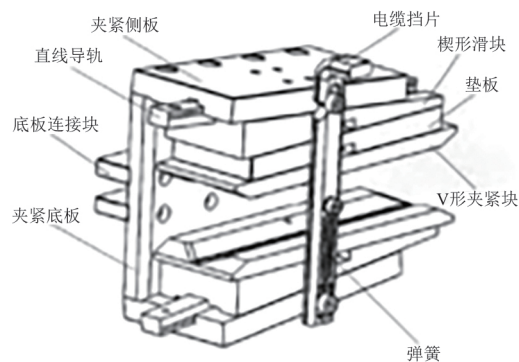


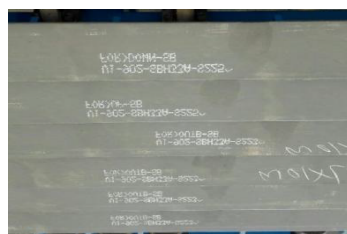
图 6 敷设电缆机器人

Fig. 6 Wire Installation Robot

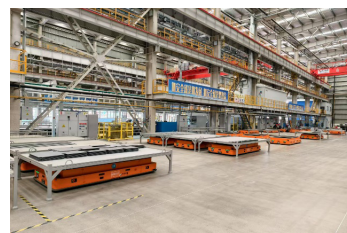
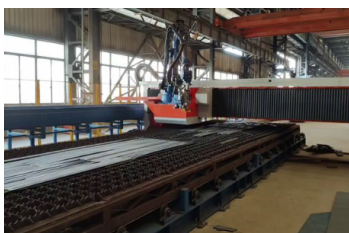
3.4 辅助作业机器人

辅助作业机器人的定义比较模糊，通常是指在船舶制造过程中协助操作人员完成重复性、危险性、高精度或高强度任务的智能装备，如信息喷码工作站、零件分拣工作站、物流 AGV 和外骨骼机器人等。其中，信息喷码工作站、零件分拣工作站、物流 AGV 是实现均衡流水式造船的关键装备。基于工业机器人的信息喷码工作站主要用于型材和条材等原材料制造信息的赋码，能够实现造船信息的一次性喷印，是数字化造船、无图生产的基础，见图 7(a)。由于船舶制造车间存在环境恶劣、光照复杂和背景干扰等问题，基于视觉、激光等传感器的零件分拣机器人难以成功应用于实际生产过程，普遍存在识别精度低、识别速度慢、复杂形状零件抓取困难等问题，该

环节整体处于半自动化状态，是先行制造流水线的堵点，见图 7(b)。物流 AGV 能够辅助操作人员实现船厂物料搬运和物流管理，目前广泛应用于船舶先行制造数字化车间内，见图 7(c)。如图 7(d) 所示，外骨骼机器人是近年来船企辅助作业机器人研究的热点，韩国大宇造船海洋株式会社采用可穿戴式外骨骼动力装置辅助和协助作业人员完成制造和维护作业^[47]，改善工人作业强度，提高作业效率和质量。制造维护成本、续航能力、助力性能是限制外骨骼机器人在船舶制造过程应用的主要因素。外骨骼机器人难以满足船厂作业环境复杂、任务灵活多变的需求，拖缆运行和穿戴包裹等存在极大的安全隐患，操作人员无法顺利进入脚手架和舱室等狭小空间。



(a) 信息喷码工作站及赋码信息



(b) 零件分拣机器人及作业对象

(c) 物流 AGV



(d) 外骨骼机器人及作业环境

图 7 辅助作业机器人

Fig. 7 Auxiliary Work Robots

综上所述,得益于国外先进自动化焊接、涂装等技术的发展,欧美、日韩等国外先进机器人生产商已经掌握了以壳、舾和涂等3种制造工艺为核心的造船机器人及系统集成技术,基本形成了完善的造船机器人技术体系。随着我国人力成本不断增加,造船机器人等高端装备需求快速提升,在精益生产和数字化制造的推进下,面向壳舾涂一体化智能制造的机器人取得了长足的发展和进步,船体先行制造阶段部署了以工业机器人为核心的型材、组立和薄板等智能生产线,自动化水平和生产效率显著提升。然而,大量的装

配、焊接和打磨等作业仍依赖于手工作业,特别是中组和大组等标准化程度较低的中间产品。舱室焊接、环缝涂装和甲板抛丸等造船机器人对总组搭载、坞内搭载等后行作业效率的提升效果并不显著。总体而言,造船机器人在先行作业阶段的应用依然存在工艺瓶颈和堵点,导致生产节拍不舒畅、质量稳定性差,与均衡有序、流水线式作业存在差距。分段涂装、总组搭载、码头舾装等后行作业环节的自动化和机械化程度极低,无法实现“去脚手架”作业。

4

造船机器人发展趋势

造船机器人与人工智能、大模型和无线通信等新一代信息技术深度融合,通过学习、模仿和掌握熟练劳务工技能,实现替代大部分人工脑力劳动,有效减少资源与能源的消耗和浪费,逐步应用甚至优化建造工艺,替代部分创造性脑力劳动,使船舶建造的质量和效率实现跨越式提升。

目前,造船机器人与造船流程深度融合的共性关键技术主要存在以下难题:

1) 机器人作业对象一致性差、精度低,具有多品种、小批量、用户定制等特点,亟须通过

自适应机构设计、智能感知与控制等技术提高造船机器人的泛化能力。

2) 作业环境复杂且恶劣,具有物理时空跨度大、高盐雾和强干扰等特点,造船机器人对复杂动态环境的感知能力、对恶劣环境的适应能力存在明显不足。

3) 高功率密度本体、稳定可靠通信、高鲁棒性控制、自适应人机协同等技术依然是造船机器人走向实用化和产业化的关键,仍须取得进一步发展。

4.1 人机协作型作业机器人

人机协作型作业机器人将自身的高精度、忍耐性与人类灵活适应能力相结合^[33],能够适应船舶制造过程中任务灵活多变、环境工作复杂等特点,由“机器人换人”转变为“机器人辅助人”和“机器人帮助人”^[48]。人机协作场景见图8。协作机器人具备部署成本低、编程简单、移动便利等优势,克服了轨道式和龙门式作业机器人单位面积产出比低、投资成本高、改线换产困难等问题,降低了造船工人对机器人编程技术的要求,有效缩短了船舶中间产品的制造周期。



图8 人机协作场景

Fig. 8 Human Machine Collaboration Scenario

4.2 仿生刚柔软耦合机器人

随着新材料、传感器和柔性驱动等技术的发展，仿生机器人得到了前所未有的进步，部分机器人已成功应用于汽车、农业和电子等行业。仿生刚柔软耦合机器人通过模仿人类的形态、功能和智能实现造船作业的模拟与超越。典型仿生机器人见图 9。蛇形机器人和仿生象鼻机器人等能够进入狭小作业空间完成舱室内壁涂装、焊接作

业；仿生爬壁机器人能克服轮式和履带式爬壁机器人越障能力弱的问题，完成舱室和非结构面船体的作业。人形机器人^[49]在船舶运维领域已经完成了初步应用，在船舶制造领域的应用亟待探索。韩国现代计划在 2027 年全面测试和部署人形机器人，用于执行复杂的焊接任务^[50]。



图 9 典型仿生机器人

Fig. 9 Typical Bionic Robots

4.3 自适应变构态机器人

固定构型或功能单一的机器人难以满足船舶中间产品制造、环境复杂多变的需求。自适应变构态机器人^[51-52]能够根据环境变化或任务要求改变自身结构形态以适应不同场景和功能需求，在电力巡检^[53]、航空航天和医疗等领域广泛应用。绝缘子检测变胞机器人能够通过夹持机构转动和移动实现在绝缘子串上的移动检测任务，见图 10。NYGAARD 等^[52]研制的变构态自

足机器人 Dyret 能够根据不同的地形、条件改变自身形状和腿长，同时结合人工智能不断学习行走环境并自适应调整。自适应变构态机器人优良的适应性和自主性突破了固定构型机器人的局限性，同一机器人能够兼顾搬运、检测、焊接和涂装等多种作业任务，进而减少装备数量，在船舶总组、舾装、分段制造等流程具有潜在的应用前景。



图 10 自适应变构态机器人

Fig. 10 Adaptive Variable Configuration Robots

4.4 跨域智能集群机器人

船舶总装制造具有物理时空跨度大、作业任务多样化的特点,是集多学科交叉、全产业链协同的复杂系统工程,几乎覆盖全维度自动化专业和领域。因此,制造过程涉及不同类型、功能和作业领域的机器人。目前,船厂部署应用的机器人系统之间信息交互、信息共享、协同作业程度

差,仅仅是独立作业的简单叠加,难以突破机器人系统的性能限制与单一领域的能力瓶颈。跨域智能集群机器人通过不同类型的机器人智能协同作业,突破物理时空约束,完成单一功能难以实现的复杂作业任务,在内外场涂装等流程中具有广阔的应用前景。

5

结论

世界造船业竞争格局日趋复杂,传统的机械化、半自动化粗放型作业方式已经难以适应智能绿色船舶的建造需求。造船机器人技术作为推动船舶工业技术变革和优化升级,实现船舶建造产业模式和企业形态根本性转变的重要手段,是世界各国争相研究的热点。与日韩等造船强国相比,我国的造船机器人发展仍明显处于滞后状态,在新技术和新方法的应用创新方面存在短板,大量的船舶制造作业仍以机械化、半自动化为主。

本文阐述了船舶总装制造的现状和特点,通过与汽车制造模式的对比,分析了机器人技术应

用的难点和局限性,综述了日本、韩国、欧美等主要造船国家机器人研制应用的相关政策措施。重点阐述了装焊作业机器人、涂装作业机器人、舾装作业机器人、辅助作业机器人等应用现状及亟待解决问题。造船机器人与造船工人的合作生产模式将由“机器人换人”转变为“机器人辅助人”和“机器人帮助人”,围绕多品种、小批量、变构态的船舶中间产品制造模式,提出了现阶段造船机器人的共性关键技术难题。人机协作型作业机器人、仿生刚柔耦合机器人、自适应变构态机器人是造船机器人未来发展的趋势。

参考文献:

- [1] ZHOU J, LI P G, ZHOU Y H, et al. Toward New-Generation Intelligent Manufacturing[J]. Engineering, 2018, 4(1): 11-20.
- [2] NOVIKOV A V, BARMIN A A, MUDROVA A A, et al. State and Prospects of Industrial Robotics in Shipbuilding[J]. Journal of Physics Conference Series, 2019, 1333: 052029.
- [3] 工业和信息化部. 推进船舶总装建造智能化转型行动计划(2019—2021年)[L]. 2019.
MIIT. Action Plan for Promoting Intelligent Transformation of Ship Assembly Construction (2019-2021)[L]. 2019.
- [4] 中国船舶工业行业协会. 一图读懂 2025 年 1 月至 4 月船舶统计数据 [EB/OL]. [2025-05-26]. <https://www.cansi.org.cn/cms/document/19694.html>.
China Association of the National Shipbuilding Industry. Understanding Ship Statistics Data from January to April 2025 with One Chart [EB/OL]. [2025-05-26]. <https://www.cansi.org.cn/cms/document/19694.html>.
- [5] ZHANG X, CHEN D. Shipbuilding 4.0: A Systematic Literature Review [J]. Applied Sciences, 2024, 14(14): 6363.
- [6] LEE D H. Robots in the Shipbuilding Industry[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30(5): 442-450.
- [7] 饶靖, 郗金波, 周荣富, 等. 中日韩典型船型建造关键周期对标分析 [J]. 造船技术, 2021, 51(1): 88-92.
RAO J, QIE J B, ZHOU R F, et al. Benchmarking Analysis of Key Construction Cycle of Typical China-Japan-ROK Ship Types[J]. Marine Technology, 2021, 51(1): 88-92.

- [8] 郗金波, 谢新, 韩涛, 等. 中韩造船业国际竞争力对标分析 [J]. 造船技术, 2021, 49(4): 51-54.
QIE J B, XIE X, HAN T, et al. Benchmarking Analysis of International Competitiveness of Shipbuilding Industries Between China and Republic of Korea[J]. Marine Technology, 2021, 49(4): 51-54.
- [9] 黄敏健, 谢新, 郗金波, 等. 船舶分段制造装备智能化需求分析 [J]. 造船技术, 2021, 49(6): 68-71.
HUANG M J, XIE X, QIE J B, et al. Analysis of Intelligent Demand for Ship Section Manufacturing Equipment[J]. Marine Technology, 2021, 49(6): 68-71.
- [10] 张玉奎, 张宜群. 船舶智能制造技术顶层研究 [J]. 应用科技, 2017, 44(1): 5-8.
ZHANG Y K, ZHANG Y Q. Top-Level Research for Intelligent Shipbuilding Technology[J]. Applied Science and Technology, 2017, 44(1): 5-8.
- [11] 工业和信息化部. 船舶总装建造智能化标准体系建设指南 (2020 版) [S]. 2020.
MIIT. Guide to the Construction of Intelligent Standard System for Ship Assembly Construction (2020 Edition)[S]. 2020.
- [12] 工业和信息化部. 船舶制造业绿色发展行动纲要 (2024—2030 年) [S]. 2020.
MIIT. Action Plan for Green Development of Shipbuilding Industry (2024-2030)[S]. 2020.
- [13] NMRI. I-Shipping Towards IoT Enabled Ships and Automated Shipping[S]. 2019.
- [14] MLIT of Japan. Amendment to the Maritime Transport Law and Other Laws Aimed at Strengthening the Foundation of the Maritime Industry[S]. 2020.
- [15] MLIT of Japan. Promotion of Technological Development in the Marine Industry[S]. 2021.
- [16] KR. Shipping Industry Development Strategy[EB/OL].[2025-05-22]. <https://www.laborplus.co.kr/news/articleView.html?idxno=12447>.
- [17] MOTIE. K-Shipbuilding Strategy for Next-Generation Market Dominance[S]. 2023.
- [18] MOTIE. K-Shipbuilding Super Gap Vision 2040[S]. 2024.
- [19] National Program Management Office of the United States. Shipyard Infrastructure Optimization Plan[S]. 2018.
- [20] National Program Management Office of the United States. Navy Manufacturing Technology[L]. 2021.
- [21] Department of the Navy. National Shipbuilding Research Project (NSRP)[S]. 2024.
- [22] EU. Smart European Shipbuilding Project[S]. 2024.
- [23] UK. National Shipbuilding Strategy [EB/OL]. [2025-05-30]. <https://www.gov.uk/government/publications/national-shipbuilding-strategy>.
- [24] 江苏省人民政府办公厅. 进一步提升全省船舶与海工装备产业竞争力若干政策措施新闻发布会 [EB/OL]. [2022-08-22]. http://www.jiangsu.gov.cn/art/2022/8/22/art_46548_249.html.
General Office of the Jiangsu Provincial Government. Press Conference on Several Policy Measures to Further Enhance the Competitiveness of the Shipbuilding and Marine Equipment Industry in the Province[EB/OL]. [2022-08-22]. http://www.jiangsu.gov.cn/art/2022/8/22/art_46548_249.html.
- [25] 王楚, 刘炆, 张子蕴. 韩国三大船企加快机器人应用缓解“用工荒” [J]. 中国船检, 2024(3): 22-28.
WANG C, LIU Y, ZHANG Z Y. Korea's Three Major Shipping Companies Speed up the Application of Robots to Alleviate the "Labor Shortage"[J]. China Ship Survey, 2024(3): 22-28.
- [26] XU J X, CHENG L L. Evaluation Method for Ship Hull Plates' Process Molding[J]. Journal of Ship Production & Design, 2018, 34(1): 1-8.
- [27] KRANENDONK. Panel Welding Line Solutions[EB/OL]. [2025-05-27]. <https://www.kranendonk.com/solutions/panel-welding-line/>.
- [28] KU N, HA S, ROH M I. Design of Controller for Mobile Robot in Welding Process of Shipbuilding Engineering[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2014, 1(4): 243-255.
- [29] LEE D H, KU N, KIM T W, et al. Development and Application of an Intelligent Welding Robot System for Shipbuilding[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(2): 377-388.

- [30] HU M. Research on Safety Design and Optimization of Collaborative Robots[J]. International Journal of Intelligent Robotics and Applications, 2023, 7(4): 795-809.
- [31] SHERWANI F, ASAD M M, IBRAHIM B S. Collaborative Robots and Industrial Revolution 4.0[C]//2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies. 2020.
- [32] TANNOUS M, MIRAGLIA M, INGLESE F, et al. Haptic-Based Touch Detection for Collaborative Robots in Welding Applications[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 64: 101952.
- [33] ISO. Robots and Robotic Devices-Collaborative Robots: ISO/TS 15066: 2016[S]. 2016.
- [34] ZACHARAKI N, DIMITROPOULOS N, MAKRIS S. Challenges in Human-Robot Collaborative Assembly In Shipbuilding and Ship Maintenance, Repair and Conversion (SMRC) Industry[J]. Procedia Cirp, 2022, 106: 120-125.
- [35] ARIAS V, BLANC S, HATHAWAY E, et al. Forecasting Trends and Challenges for a 4.0 Shipbuilding Workforce in Europe[R]. 2020.
- [36] ANDERSEN R S, BØGH S, MOESLUND T B, et al. Task Space HRI for Cooperative Mobile Robots in Fit-out Operations Inside Ship Superstructures[C]// 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. 2016.
- [37] 林焰, 衣正尧, 李玉平, 等. 大型船用坞内外板涂装机器人 [J]. 机器人, 2018, 40(1): 115-128.
LIN Y, YI Z Y, LI Y P, et al. Large Spraying Robots for Ship Shell Plate in Dock[J]. Robot, 2018, 40(1): 115-128.
- [38] HUANG H, LI D, XUE Z, et al. Design and Performance Analysis of a Tracked Wall-Climbing Robot for Ship Inspection in Shipbuilding[J]. Ocean Engineering, 2017, 131(1): 224-230.
- [39] 李安, 陶波, 丁汉. 磁吸附爬壁机器人研究进展及其应用探索 [J]. 机器人, 2025, 47(1): 123-144.
LI A, TAO B, DING H. Research Progress and Application of Magnetic Adhesion Wall-Climbing Robots[J]. Robot, 2025, 47(1): 123-144.
- [40] ÁLVAREZ B, PASTOR J A, ORTIZ F. An Architectural Framework for Modeling Teleoperated Service Robots[J]. Robotica, 2005, 24(4): 411-418.
- [41] Hapag-Lloyd. Hapag-Lloyd Tests Ship-Painting Robots [EB/OL]. [2025-05-28]. [https:// www.hapag-lloyd.cn/en/company/about-us/newsletter/2019/07/hapag-lloyd-tests-ship-painting-robots.html](https://www.hapag-lloyd.cn/en/company/about-us/newsletter/2019/07/hapag-lloyd-tests-ship-painting-robots.html).
- [42] Blastman. Blastman B20s Generation 4.0 [EB/OL]. [2024-06-22]. [https://www.blastman.com/ products/gantry-type-blast-cleaning-robots.html](https://www.blastman.com/products/gantry-type-blast-cleaning-robots.html).
- [43] Syncroil. Painting Robot[EB/OL]. [2025-24-05]. <https://syncroil.com/>.
- [44] 耿志勇, 叶超. 敷设电缆机器人在船舶生产中的实际应用 [J]. 船舶物资与市场, 2022, 30(1):7-9.
GENG Z Y, YE C. The Practical Application of Cable Laying Robots in Ship Production[J]. Marine Equipment/ Materials & Marketing, 2022, 30(1): 7-9.
- [45] 江文成, 樊志远. 日韩船舶智能制造的主要发展方向 [J]. 中国船检, 2019(2): 17-24.
JIANG W C, FAN Z Y. Main Development Direction of Japanese and Korean Ship Intelligent Manufacturing[J]. China Ship Survey, 2019(2): 17-24.
- [46] 金东昊, 金定敏, 徐在源, 等. 电线敷设机器人的控制系统: CN201410144106.9[P]. 2014-04-11.
KIM D H, KIM J M, SEO J W, et al. Control System of Wire Laying Robot: CN201410144106.9[P]. 2014-04-11.
- [47] MAXEY K. Korean Shipbuilders Forge Ahead with Robotic Exoskeletons[EB/OL]. [2025-06-01]. <https://www.engineering.com/korean-shipbuilders-forge-ahead-with-robotic-exoskeletons/>.
- [48] MASOOD J, VIDAL F, CASTRO D, et al. Robotized Technologies for Enhanced Shipyard Operations: Challenges and Solutions[J]. Green Manufacturing Open, 2024, 2(2): 6-12.
- [49] Robotics 24/7. Sarcos Successfully Demonstrates Robotics for Shipyard Maintenance, Inspection, and Repair [EB/OL]. [2025-06-01]. https://www.robotics247.com/article/sarcos_successfully_demonstrates_robotics_shipyard_maintenance_inspection_repair.
- [50] CHAND N. HD Hyundai Gears for Humanoid Welding Robots for Shipbuilding Automation [EB/OL]. [2025-06-02].

- <https://seanews.co.uk/shipping-news/hd-hyundai-gears-for-humanoid-welding-robots-for-shipbuilding-automation/>.
- [51] ZHUANG Z, GUAN Y, XU S, et al. Reconfigurability in Automobiles-Structure, Manufacturing and Algorithm for Automobiles[J]. International Journal of Automotive Manufacturing and Materials, 2022, 12: 251-277.
- [52] NYGAARD T F, MARTIN C P, TORRESEN J, et al. Real-World Embodied AI Through a Morphologically Adaptive Quadruped Robot[J]. Nature Machine Intelligence, 2021, 3: 410-419.
- [53] YUAN H, WANG H, LI S, et al. Revelation of Metamorphic Phenomenon Through the Equivalent Mechanisms and Development of the Novel Metamorphic Epicyclic Gear Trains[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 166: 104433.

