

船舶外板喷涂机器人研究现状 及关键技术进展

李传涛^{1a}, 姚玉南^{1a*}, 范世东^{1b}, 秦伟民²

(1. 武汉理工大学, a. 船海与能源动力工程学院; b. 交通与物流工程学院, 武汉 430063; 2. 南通象屿海装股份有限公司, 南通 226361)

摘 要: [目的]为突破船舶外板人工喷涂效率低、质量差且污染重的瓶颈并为行业绿色转型提供参考。[方法]从驱动技术、三维重构、路径规划、质量控制及环保技术 5 个维度调研国内外成果, 系统梳理喷涂机器人关键技术进展, 对比分析爬壁式、轨道式和高架式 3 类驱动形式的性能差异与适用场景, 归纳三维重建精度、工艺参数对涂层质量的影响规律及环保减排措施效果。[结果]结果表明: 爬壁式灵活但承载有限且易损伤涂层, 轨道式精度高但工程量巨大且缺乏自适应, 高架式范围广效率高但移动受限, 3 类机器人均已得到较大发展, 但在曲面自适应、多机协同、闭环检测及通用性方面仍存共性瓶颈。[结论]未来应发展柔性贴合机构、集群智能协同、环保集成、在线检测闭环调控及数字孪生虚拟平台, 协同突破瓶颈, 推动喷涂机器人从示范走向大规模应用, 促进涂装智能化绿色化转型。

关键词: 船舶喷涂机器人; 驱动技术; 路径规划; 质量控制; 环保技术

中图分类号: U672.7

文献标志码: A

Research Status and Key Technological Advancements of Ship Hull Spray Painting Robots

LI Chuantao^{1a}, YAO Yunan^{1a*}, FAN Shidong^{1b}, QIN Weimin²

(1. Wuhan University of Technology, a. School of Naval Architecture, Ocean and Energy power Engineering, b. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan 430063, Hubei, China; 2. Nantong Xiangyu Shipbuilding & Offshore Engineering Co., Ltd. Nantong 226361, Jiangsu, China)

Abstract: [Purpose] To break through the bottleneck of low efficiency, poor quality, and heavy pollution in manual spraying of ship hull outer plates, and to provide a reference for the industry's green transformation, this paper systematically reviews the progress of key technologies for spray painting robots and clarifies the characteristics and applicable scenarios of different technical routes.. [Method] From five dimensions—drive technology, 3D reconstruction, path planning, quality control, and environmental protection technology—this paper surveys domestic and international achievements, compares and analyzes the performance differences among three drive forms: wall climbing, track based, and elevated, and summarizes the accuracy of 3D reconstruction, the influence of process parameters on coating quality, and the effectiveness of environmental emission reduction measures. [Result] The results indicate that wall climbing type is flexible but has limited payload and tends to damage the coating; the track based type offers high precision but requires heavy preliminary work and lacks self adaptation to curvature changes; the elevated type covers a wide range with high efficiency but is restricted in mobility. All three types have achieved considerable development, yet they still share common bottlenecks in curved surface adaptability, multi robot collaboration, closed loop inspection, and versatility. [Conclusion] In the future, efforts should be directed toward developing flexible conformal mechanisms, swarm intelligence collaboration, integrated environmental protection, online inspection closed loop control, and digital twin virtual platforms. These synergistic developments will help break through the bottlenecks, promote spray painting robots from pilot demonstrations to large scale applications, and facilitate the intelligent and green transformation of coating operations.

Key words: ship painting robot; drive technology; path planning; quality control; Environmental technology

0 引言

近年来,在国家制造强国和海洋强国战略推动下,船舶工业正向高端化、智能化和绿色化方向发展。工业和信息化部在高新技术船舶科研项目及相关规划中,将船体表面处理与涂装技术列为重点发展方向之一。根据工业和信息化部的统计数据,2025年我国造船完工量5 369万载重吨,新接订单量10 782万载重吨,手持订单量27 442万载重吨,分别占全球总量的56.1%、69%和66.8%^[1]。船舶建造规模的持续扩大,对船体表面喷涂作业的效率、质量和环保性提出了更高要求。

船舶喷涂的主要作用在于提高船体结构的耐腐蚀性能、防止海生物附着并改善外观质量。船舶长期处于复杂海洋环境中,受盐雾腐蚀、微生物侵蚀及机械磨损等影响,若涂层性能不足,将导致船体腐蚀加剧、航行阻力增加及能耗上升,从而影响其经济性与安全性^[2]。同时,喷涂过程中大量使用含有有机溶剂的涂料,作业会产生漆雾和挥发性有机化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs),对环境及作业人员健康造成不利影响。因此,实现高效率、高质量、低污染的喷涂作业已成为船舶制造的重要需求。

船舶喷涂对象涵盖平面分段、曲面分段及复杂立体结构等多种形式,由于船体结构尺寸大、曲面复杂且作业环境多变,传统喷涂长期依赖人工完成,存在作业强度大、效率低、涂层质量稳定性差等问题。在坞内外板等高空作业场景中,还存在坠落、中毒及环境污染等安全风险。根据相关统计,人工喷涂的涂料利用率仅为40%~60%,大量漆雾扩散造成材料浪费和环境污染^[3]。随着造船节拍加快和环保法规日益严格,传统人工喷涂方式已难以满足现代船舶制造需求。为提高喷涂效率与质量,喷涂机器人逐渐成为船舶喷涂的重要发展方向。通过机器人进行喷涂作业,可实现轨迹精确控制和工艺参数稳定调节,从而提高涂层均匀性、减少材料浪费,并有效降低漆雾对环境和人员的危害。

目前,针对船舶结构特点,已发展出爬壁式、轨道式及高架式等多种喷涂机器人形式,以适应大尺度复杂曲面的作业需求。同时,随着传感与控制技术的发展,喷涂机器人正由单一自动化向智能化方向演进,在喷涂工艺控制、轨迹规划及系统集成等方面取得了一定进展。然而,受船体结构复杂性及作业环境不确定性的影响,现有船舶喷涂机器人在曲面适应性、路径规划精度、喷涂质量稳定控制及环保集成等方面仍存在不足。本文在总结国内外研究现状的基础上,重点分析驱动技术、三维重构、路径规划、质量控制及环保技术等关键技术,归纳存在的问题,并对未来发展趋势进行展望。

1 船舶外板喷涂机器人研究进展

船舶外板喷涂机器人系统通常由控制平台、执行机构及感知单元构成,控制平台通过有线或无线通信方式与机器人实现信息交互。机器人在作业过程中依托传感系统获取自身位姿、作业环境特征及船体表面几何信息,并将相关数据实时反馈至控制系统;控制系统结合喷涂工艺要求,对喷涂参数及运动轨迹进行动态调整,从而实现船体表面的连续喷涂作业。针对船体结构尺度大、曲面复杂及作业环境多变等特点,喷涂机器人应具备良好的环境适应性与轨迹规划能力,以保证涂层质量与作业效率。为系统分析船舶喷涂机器人的发展现状,本文选取国内外具有代表性的喷涂机器人系统进行整理与对比,其主要技术特征见表1。

表 1 国内外船舶喷涂机器人主要技术特征

Tab. 1 Main technical characteristics of domestic and foreign ship painting robots

时间	团队	型号	类别	喷涂效率/(m ² /h)	漆雾防护
1990	日本Urakami研究所	VM400	爬壁式	290	有
2010	韩国大邱机电与材料研究所	—	爬壁式	500	无
2013	西班牙Syncroil公司	Painting Robot	高架式	1 400	有
2016	奥地利Palfinger公司	HTC-SD	轨道式	600	无
2016	意大利Lesta公司	Lesta LEBOT C5	轨道式	250	无
2023	法国AMBPR、Sercel	Green Dock Robot H28	高架式	1 000	有
2025	印度尼西亚D. Tjipto	Eco-Automated Painting Spray Machine	轨道式	280	有
2026	印度尼西亚Rahino	—	爬壁式	40	无

2017	上海外高桥造船公司	磁吸式喷漆机器人	爬壁式	600	有
2022	江苏海洋装备研究院	智能涂装系统	轨道式	300	有
2023	江苏科技大学	无人机自适应喷涂装置	无人机	20	无
2024	天津彼合彼方	喷漆机器人	爬壁式	720	有
2024	武汉理工大学	环保型爬壁喷漆机器人	爬壁式	420	有
2024	浙江万邦重工、鼎立	象群	高架式	450	有
2025	哈尔滨工程大学	AGV复合式	轨道式	200	无
2025	上海海恒科技	Treatment Carrier H	高架式	1 500	有
2026	天津海洋石油工程公司	柔性智能喷涂系统	轨道式	200	有

目前,船舶喷涂机器人所使用的驱动技术主要包括爬壁式、高架式和轨道式3种。爬壁式驱动技术通过永磁或真空吸附使机器人附着于船体外板表面,并依靠轮式或履带机构实现壁面移动,具有结构紧凑、灵活性强、曲面适应性好的特点,因此广泛应用于船体侧部及局部曲面的喷涂作业。轨道式驱动技术通过在船坞地面或坞墙铺设专用导轨,引导大型框架结构沿船体纵向运动,刚性好、定位精度高,可实现多轴联动与工艺模块的快速切换。高架式驱动技术采用自行走底盘搭载升降臂或折叠臂,将喷涂执行机构送至指定高度位置,无需与船体接触,避免了涂层碾压风险且承载能力大,适用于大面积高效喷涂场景,不同形式的喷涂机器人在几个方面的对比见表2^[4],随着技术的发展和研究的深入,复合式驱动技术(如爬壁与高架协同)、无人机技术也有望应用于船舶喷涂机器人,以兼顾复杂曲面适应性与大范围作业效率。

表 2 不同形式喷涂机器人性能对比

Tab.2 Performance comparison of spray robots in different forms

形式	有效载荷	喷涂效率	单次喷涂面积	曲面适应性	成本	可靠性	灵活性	环保型
爬壁式	低	低	小	一般	低	一般	高	一般
高架式	高	高	大	好	高	好	低	好
轨道式	高	低	大	好	高	好	高	好

1.1 国外研究进展

1.1.1 爬壁式

自20世纪90年代起,日本浦上研究所便开展了爬壁喷涂机器人的探索。1999年,该所研制出“VM400系列”履带式永磁间隙吸附爬壁机器人^[5],采用滚刷执行机构,见图1。然而,该类机器人存在作业效率低、涂装质量不高以及漆雾污染等问题。

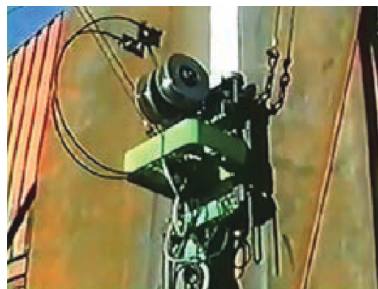


图 1 日本 VM400-1 爬壁喷漆机器人

Fig. 1 Japanese VM400-1 wall-climbing painting robot

2010年,韩国大邱机电与材料研究所(Daegu Mechatronics & Materials Institute, DMMI)开发了一款具备视觉功能且可自主规划轨迹的爬壁喷涂机器人^[6]。该机器人采用永磁轮吸附与菱形框架结构,提高了对复杂曲面的适应性,但未设计漆雾回收功能,且搭载能力有限。2026年,印度尼西亚学者Rahino等设计了一种适用于船舶坞修阶段、在水线以上作业的履带式爬壁喷涂机器人系统^[7],见图2,该系统能够自适应控制喷涂参数,以确保涂层均

匀性，验证其在涂层一致性、作业速度和作业安全性方面均有显著提升。

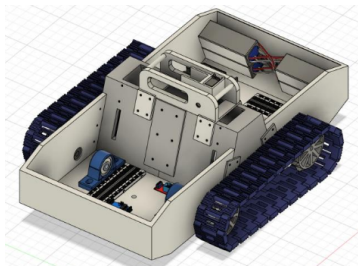


图 2 印度尼西亚 Rahino 爬壁喷漆机器人
Fig. 2 Rahino wall-climbing painting robot from indonesia

1.1.2 轨道式

在轨道式喷涂机器人领域，2016年奥地利Palfinger公司研制的Ship system系列（HTC-SD系统）是国际上的典型代表^[8]。该系统采用位于船坞地面的专用钢轨来引导大型框架式结构沿船体纵向运动，通过非接触式附壁的轨道框架搭载喷涂执行机构进行作业，避免了爬壁机器人行走机构对已涂涂层造成碾压损伤的问题，同时可实现除锈与喷涂功能的一体化快速切换。同时，Palfinger的HTC系统曾于2019年在赫伯罗特公司的九艘船舶上进行了实际测试应用，其单台单元每小时可喷涂约600 m²~800 m²涂料，可在数小时内完成一整道涂层作业，同时有效解决了手工喷涂时常见的过量喷涂问题，使得涂层厚度更加均匀，显著降低涂料消耗量^[9]。

此外2016年意大利Lesta公司也开发了面向大型工件的轨道式喷涂机器人系统^[10]。该系统分为2类：1）地面式轨道系统采用轨道与电动平台相结合，机器人沿轨道移动，通过自学习功能记录行程，可完成长达14.7 m工件的喷涂任务；2）架空式龙门结构则在立柱上架设轨道，机器人倒挂安装，可实现纵向、垂直和水平三向运动，有效扩大了作业覆盖范围。2025年，印度尼西亚学者Tjipto等^[11]开发了一种名为“生态自动化喷漆机”的设备。该设备旨在通过封闭式喷涂与优化的参数控制，减少船舶喷涂过程中的环境污染，并显著提高涂料利用效率，见图3。

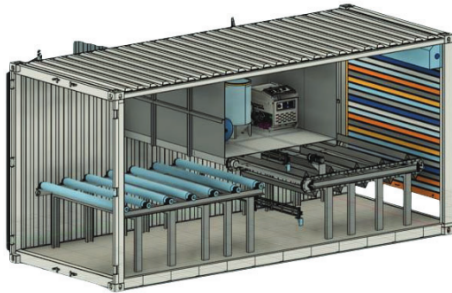
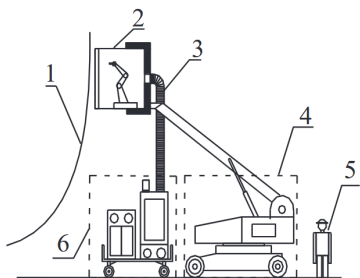


图 3 印度尼西亚生态自动化喷漆机
Fig. 3 Ecological automatic painting machine in Indonesia

1.1.3 高架式

2011年，意大利Rina Vincenzo公司提出了一种高架车搭载喷涂机器人的概念模型^[12]，图4中设置了真空防护罩和漆雾回收管路以防止漆雾扩散，并采用多自由度机械臂提升喷涂灵活性。然而，对于大表面、大跨距的艏艉区域仍难以完成作业。



- 1—船体外板；2—喷涂机械手臂及漆雾防护回收平台；3—漆雾回收管路；
4—高架喷涂车体；5—地面工人；6—供料及回收控制系统

图4 意大利高架式机器人模型

Fig. 4 Italian elevated robot model

2013年，西班牙Syncroil公司成立并推出了基于高架车搭载的坞内密闭式喷涂机器人模型^[13]。该模型通过密闭式漆雾回收罩减少了环境污染，提高了喷涂效率。但其整体尺寸在相对紧凑的船坞内仍显较大，且轨迹控制精度有待提升。2023年法国AMBPR公司与Sercel公司联合研发了Green Dock Robot^[14]，将伸缩臂高空作业平台与智能机器人技术相结合，通过激光扫描自主识别船体轮廓，生成喷涂轨迹，可在干船坞中完成从高压水清洗到喷砂除锈再到喷涂的全流程自动化作业，为高架式方案在高空大范围作业中的应用提供了新思路。2024年，韩国Lee等学者探索了协作机器人在船体喷涂中的应用^[15-16]，提出一种基于阻抗接触模型的控制技术。该研究旨在通过机器人实现恒定的接触力，以减少对操作员技能的依赖，提升作业安全性与效率。

1.2 国内研究进展

1.2.1 爬壁式

国内在爬壁式喷涂机器人领域的研究起步较早。1996年，哈尔滨工业大学王炎等^[17]在全国智能机器人学术交流会暨第六届青年机器人学术研讨会中，针对石化企业金属大罐的防腐作业提出了一种喷砂喷漆用履带式磁吸附爬壁机器人，并指出该类机器人在船舶涂装作业中的潜在应用价值。2011年，青岛科技大学李惠娟^[18]提出如图5所示永磁吸附结合履带行走的结构设计，并针对船体的特殊结构提出了控制系统的设计方案。

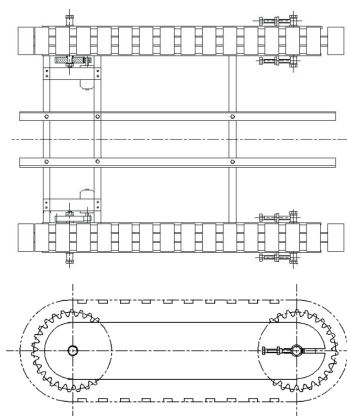
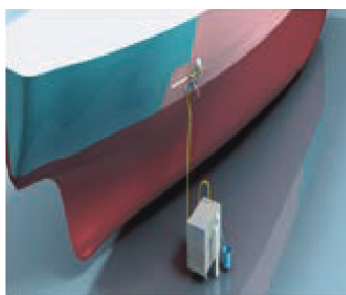


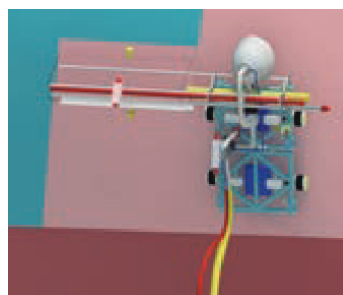
图5 青岛科技大学双履带方案示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the dual-track scheme of Qingdao University of Science and Technology

2013年，上海外高桥造船有限公司（简称“外高桥造船”）立项喷涂机器人项目，2015年开展了实船喷涂试验，2017年完成了自动喷漆机器人控制系统及整体结构的升级换代^[19]。2018年，大连理工大学林焰团队^[4,20]利用重构思想，针对船舶外板喷涂提出了一种基于爬壁机器人的拖涂式往复滑台喷涂系统，采用轮式行走与磁吸附方式，实现了喷涂作业、视觉轨迹规划与自动控制，并集成了漆雾回收和防坠落等安全环保设计，见图6。



(a) 复杂曲面爬壁拖涂



(b) 柔性爬壁机器人拖涂

图6 大连理工大学喷涂机器人样机模型设计

Fig. 6 Design of the prototype model of the spray painting robot at Dalian University of Technology

江苏科技大学Xu等^[21]同样设计了一款用于船舶喷涂的壁面爬行机器人，其创新点在于将涂料输出装置与主机分离，并详细设计了试验环境与方法来验证其喷涂工艺，旨在消除人工经验带来的随机误差，提升漆膜厚度的稳定性。2024年，彼合彼方^[22]推出新款自动喷漆机器人，搭载定位模块和自动化系统，无需人工控制即可在船体等弯曲表面作业，并于当周在江南造船（集团）有限公司、大连船舶重工集团有限公司试用。同年，武汉理工大学王冲等^[23]优化了一种自带VOCs和漆雾回收模块的爬壁式机器人，能在完成船舶外板喷漆作业的同时对喷涂过程中产生的漆雾和VOCs气体进行回收，减少了环境污染，实现了绿色造船。2026年，江苏科技大学Huang等^[24]专注于能够适应复杂曲面的船舶外板喷涂机器人，设计了位姿调整、水平往复和升降等机构，通过正交试验确定了最佳工艺参数组合。

1.2.2 轨道式

国内在轨道式喷涂机器人方面的研究以龙门式结构为主要代表。2022年，外高桥造船杨振等^[25]依据船舶分段喷涂方案提出了如图7所示的一种悬臂式多自由度喷涂机器人，能够覆盖船舶双底层、三角舱和横舱壁等大多数分段。

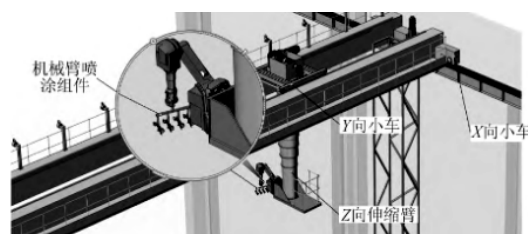


图7 外高桥造船悬臂式多自由度喷涂机器人各子系统

Fig. 7 Subsystems of the cantilever multi-degree-of-freedom spray painting robot in Shanghai Waigaoqiao

2023年，江苏科技大学季剑波^[26]设计并建造了龙门式结构的喷涂机器人系统，具有超大工作空间、灵活度高、适应性强等优点，但针对船舶曲面的喷涂质量还需要进一步开展研究，同年江苏科技大学海洋装备研究院制造了智能涂装系统^[27]，可实现船舶带结构面及曲面分段的智能喷涂。大幅提高喷涂效率和漆膜膜厚均匀度。2025年，哈尔滨工程大学郗金波^[28]面向船舶分段涂装作业空间大、结构复杂的特征，提出了自动导引车（Automatic Guided Vehicle, AGV）复合式机器人以及索并联式机器人的两类喷涂系统设计方案，具有较强的可扩展性和环境适应性，同年江苏科技大学Xu等^[29]在前期季剑波等人的基础上针对船舶分段复杂的喷涂需求，改进设计了一种九轴龙门式喷涂机器人系统，为解决多余冗余轴带来的逆运动学求解难题提出了一种简化方法，通过固定龙门架的X轴、Y轴及Z轴，将问题简化为六轴机械臂的逆解，并通过差分进化算法优化求解，验证了其精度和效率。2026年，海洋石油工程股份有限公司^[30]发布我国首套海洋油气装备柔性智能喷涂系统，所采用的柔性智能喷涂系统采用模块化设计，具备高度自适应能力。

1.2.3 高架式

2007年，山东科技大学江浩团队^[31]提出了一种能够适应各种不同大小船舶及简单曲面的喷漆作业的船舱喷漆移动机器人设计方案，见图8，并于2009年完成了三维模型与动力学、有限元仿真^[32]。

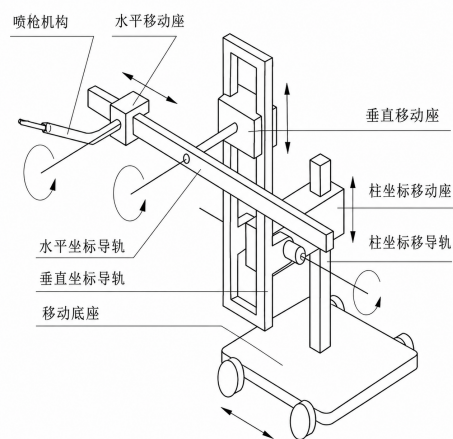


图 8 山东科技大学船舱喷漆移动机器人设计方案

Fig. 8 Design Scheme of Mobile Robot for Cabin Painting at Shandong University of Science and Technology

2015年，大连理工大学肖宇晨^[33]提出了基于高空作业车的“定点喷漆”及“船体轮廓连续喷漆”2种智能喷漆方式。2017年，哈尔滨工业大学张英勇^[34]研发了一款面向超大船体外表面喷涂的高架式喷涂机器，见图9。



图 9 哈尔滨工业大学喷涂机器人

Fig. 9 Spray painting robot of Harbin Institute of Technology

2019年，大连海洋大学衣正尧等^[35]设计一种高架与爬壁复合的喷涂机器人。2023年，上海交通大学胡小才等^[36]联合外高桥造船设计一种三级伸缩臂架结构的封闭结构面全覆盖喷涂机器人，能够实现狭窄船舱的内部空间工作。合肥工业大学李梦祥^[37]针对大型复杂表面的喷涂作业，设计一种宏微结构式柔索驱动喷涂机器人。2024年，万邦船舶重工（舟山）有限公司（简称“万邦重工”）^[38]首次自主研发了集除锈与喷涂于一体的“大象”机器人原型机，与浙江鼎力机械股份有限公司（简称“浙江鼎力”）联合研制的“象群”系列机器人正式上岗，并已规模化应用于生产。2025年，浙江鼎力在投资者互动平台宣布已针对船舶领域研发推出喷涂机器人新产品，可实现喷涂轨迹自运行控制，自动连续喷涂速率不低于 $450 \text{ m}^2/\text{h}$ ^[39]。年底，上海海桓科技有限公司（简称“海桓科技”）在全球首发了“Treatment Carrier H”系列智能喷涂平台^[40]，34 m作业高度， $1500 \text{ m}^2/\text{h}$ 的喷涂效率较传统方式提升近十倍，已在舟山中远海运重工有限公司投入使用。

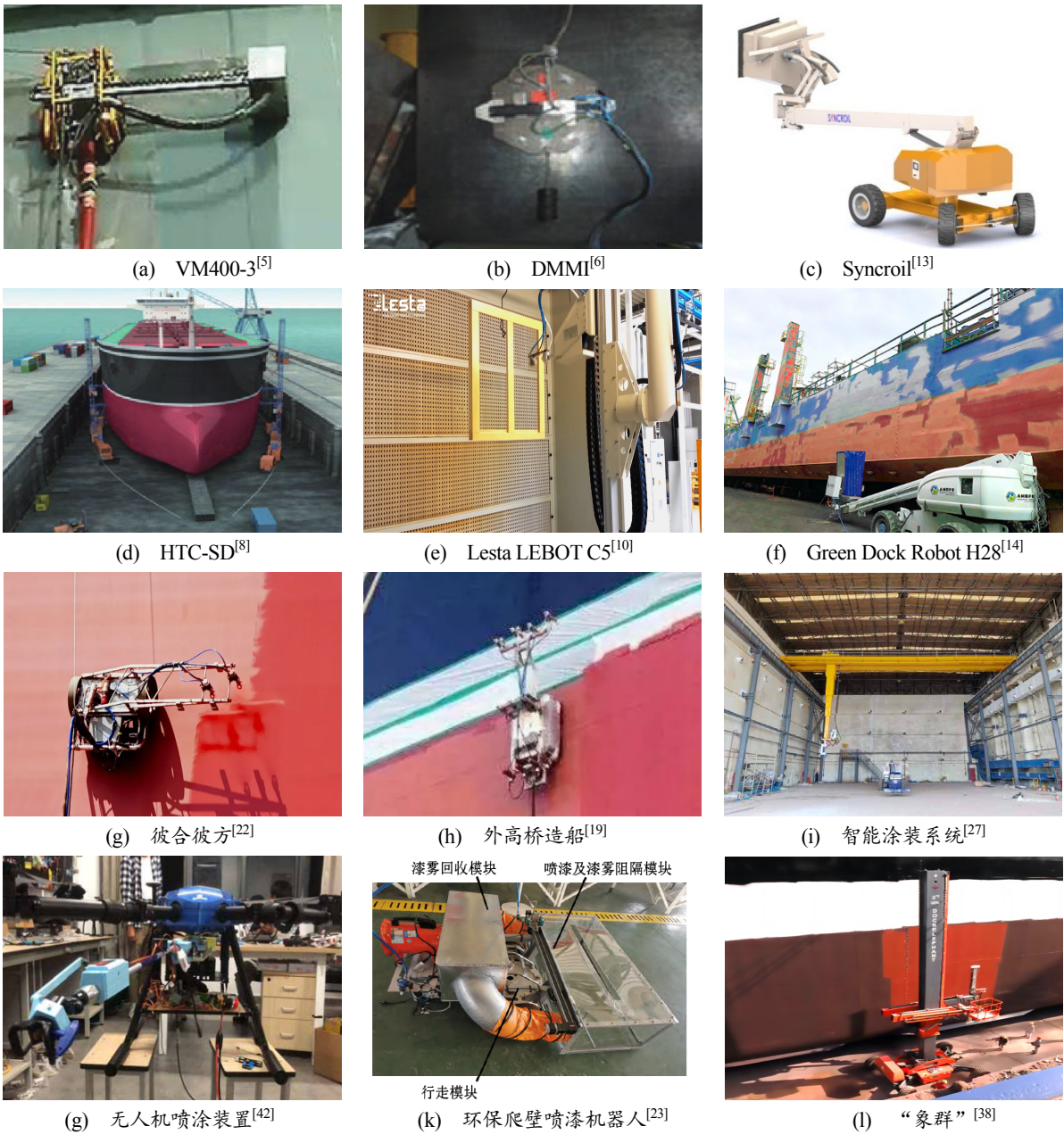
1.2.4 无人机式

多旋翼无人机在空中运动自由度高、灵活性好、垂直起飞、自主悬停等特点，作为智能喷涂平台的载体，支撑自适应喷涂装置的多自由度稳定运动。近年来，无人机喷涂技术逐渐向船舶行业延伸，2022年，江苏科技大学蔡友辉^[41]针对船舶外板喷涂无人机（Unmanned Aerial Vehicle Intelligent Spray Painting, UAV-ISP）系统的稳定性问题，提出了多约束智能路径规划方法，利用多目标粒子群算法与蚁群算法实现喷涂路径优化，并基于线性主动抗扰控制算法设计了喷涂无人机的稳定控制系统，通过Mission Planner地面站软件进行控制，实验验证了所提方法的喷涂路径准确性和无人机飞行稳定性。2023年，邹绍福^[42]以无人机为载体设计了一种面向船舶外板的自适应喷涂

装置，并提出相适应的自适应喷涂控制方法。万勋科技公司^[43]研发出猎户座Orion空中柔韧气幕系留喷涂机器人，适配DJI M400等小型无人机平台，基于Pliabot柔韧具身智能机器人技术，搭载独家专利的柔韧关节、柔韧气幕隔离技术与柔韧流体控制技术，喷涂散溢度降低80%，适用于墙面、塔筒等大面积、低空喷涂场景，兼具高安全性与精准作业能力。

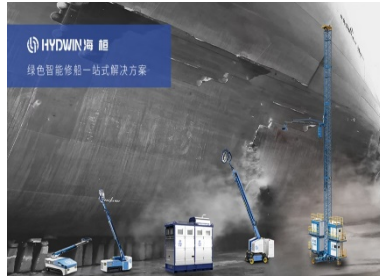
然而，由于负载能力与作业灵活性受限和喷涂质量难以稳定达标，上述研究与产品真正应用于船舶实际建造和坞修现场的案例仍然鲜见，无人机船舶喷涂技术整体上仍处于研发与试验验证阶段。后续在低空经济的发展下，无人机的喷涂方案也会更加成熟，也将逐步进入船舶行业。

国内外开发的典型船舶喷漆机器人见图10。





(m) AGV 复合式^[28]



(n) Treatment Carrier H^[40]



(o) 柔性智能喷涂系统^[30]

图 10 国内外开发的典型船舶喷漆机器人

Fig. 10 Typical Ship Painting Robots Developed Both Domestically and Internationally

2 船舶外板喷涂机器人关键技术

2.1 三维重构

准确的船体三维模型是机器人喷涂路径规划的前提条件。船舶外板尺度大、曲率变化复杂且作业环境多变，传统依赖固定计算机辅助设计(Computer-Aided Design, CAD)模型的方法难以适应现场装配偏差及船体动态变形，目前，三维重建技术包含摄影测量、结构光扫描、时间飞行和激光雷达重建技术^[28]等，而其中激光雷达技术因其高精度和广泛适用性在许多领域占据重要地位，其预期建模精度相较船舶分段建造误差可以提高接近一个数量级，为喷涂轨迹规划和保证实际喷涂的作业精度和效果奠定基础。

点云数据处理方面，Huo等^[44]针对船体分段点云的粗配准问题，提出了一种广泛适用的配准框架。Guan等^[45]利用激光扫描技术获取船体三维点云数据，通过迭代最近点算法进行点云预处理，采用传统曲面建模与快速曲面建模两种方法完成船体曲面重建。2025年，沈顺喜^[46]提出了一种基于视觉识别的船体喷涂路径及控制系统，采用多模态传感模块采集船体表面数据，避免了传统静态模型导致的喷涂路径错位、漏喷或过喷问题。

三维曲面重建方面，Abbas等^[47]使用地面激光扫描仪对贴有靶点的海啸渔船和双体船进行扫描获取船体点云，并利用相机获得靶点精确位置与船体点云进行配准，验证了激光扫描与图像配准在船体重建中的有效性。法国船级社(Bureau veritas, BV)于2025年发布了Augmented Surveyor 3D工具^[48]，利用无人机搭载LiDAR传感器采集点云数据并构建三维数字模型，通过AI技术自动识别和定位腐蚀、裂纹等缺陷，为船舶结构检测提供了高精度的三维可视化平台。夏志新等^[49]利用3D激光点云和图像数据实现散货船3D模型重建和关键部位自动化测量，提高了船舶建模的真实感和测量速度。史家伟等^[50]提出了一种多视角图像三维重建方法，融合SAM模型实现船体曲面外板智能点云分割，通过双曲抛物面拟合与匹配代价优化，在15min内生成百万级点云，最大误差3 mm，为曲面数字化检测与喷涂规划提供了高精度数据支撑。

在上述研究的基础上，哈尔滨工程大学郝金波^[28]集成了360°全景激光雷达和智能视觉识别技术，可根据涂装任务一键启动完成结构物涂装，具备高度自适应能力，见图11。南京航空航天大学王化明团队^[51]采用线激光视觉传感器扫描工件得到3D点云，通过去除背景及分割工件点云，实现了基于3D点云模型参数化重建的复杂工件机器人喷涂。这些研究表明，基于激光雷达的三维重建技术正在从船体检测领域向喷涂机器人环境感知与路径规划方向拓展，为船舶喷涂的自动化与智能化提供了重要的技术支撑。

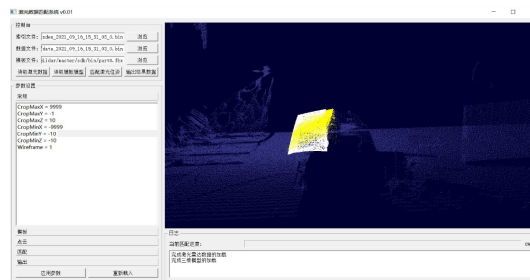


图 11 激光雷达数据匹配软件界面

Fig. 11 Interface of LiDAR data matching software

2.2 路径规划

喷涂路径规划是实现船舶外板高质量喷涂的核心技术之一。合理的喷涂路径不仅直接影响涂层的厚度均匀性和表面质量，还关系到喷涂效率、涂料利用率及机器人运动的安全性。船舶外板表面形状复杂多变，存在船艏、船艉等大曲率区域及多种结构特征如肋板、焊缝等，这对路径规划算法提出了较高的要求。目前，喷涂路径规划方法主要包含基于模型的三维路径生成和基于智能优化的轨迹参数求解两大技术模块^[52]。

在基于模型的三维路径生成方面，华霄桐等^[53]清华大学研究团队针对NURBS自由曲面，类比绘画时不同尺寸的画笔思想，提出了通过改变喷涂距离来调节喷幅尺寸并配合变速喷涂的变尺寸画笔优化方法，以增强对复杂曲面的处理能力。江苏科技大学Xu等^[54]研究团队利用立体光刻（Stereo Lithography, STL）切片算法对船舶曲面喷涂轨迹进行动态数值模拟，通过生成喷枪轨迹关键点并拟合其位置与姿态，构建了两相流喷涂模型和碰撞黏附模型，从而分析曲面上的涂层厚度分布，见图12。石祥滨等^[55]提出了一种基于点云薄切技术的协作机器人喷漆轨迹规划算法，通过计算点云模型密度确定切片厚度，将薄片上的点直接作为初始轨迹点，避免了传统算法中大量搜索最近点对的缺陷，同时引入孤立森林算法去除异常值并结合曲线拟合进行轨迹规划。Hua等^[56]提出了一套融合点云分割与轨迹序列优化的路径规划方法，首先采用基于最小曲率点的区域生长算法将三维实体分割为不同子曲面，然后利用平面与点云相交算法为每个子曲面生成最优喷涂轨迹，最后通过基于交换进化粒子的序列优化算法将所有子曲面的轨迹连接成完整轨迹。

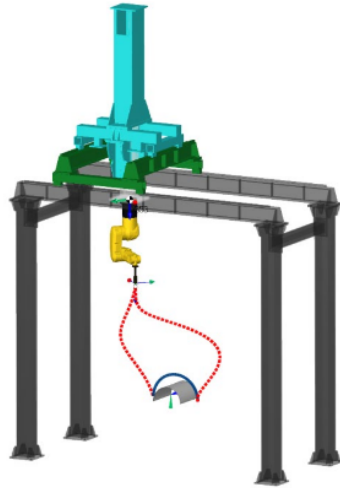


图 12 弧面离线编程轨迹导入

Fig. 12 Arc surface offline programming trajectory import

在基于智能优化的轨迹参数求解方面，国内外学者提出了许多具有自主搜索全局路径能力的算法，包括改进的遗传算法^[57]、粒子群算法^[58]、灰狼算法^[59]、鲸鱼算法^[60]和RRT路径规划算法^[61]等。Liu等^[62]针对船舶分段大块面的喷涂特征，建立了基于 β 分布的漆膜厚度分布模型，并采用第三代非支配排序遗传算法（Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III, NSGA-III）对工作时间与漆膜厚度方差进行多目标优化，在保证涂层均匀性的同时最大化涂料利用率。Cai等^[63]针对无人机智能喷涂系统在船舶外板应用中的路径不稳定问题，采用了多目标粒子群与蚁群相结合的算法，同时考虑多约束条件进行喷涂路径规划。袁海陶^[64]考虑喷涂速度、喷涂距离和喷涂轨迹时间间隔提出了一种基于鲸鱼算法的多目标优化喷涂路径规划方法，显著提高作业效率和质量。钱振华等^[65]、王慧雄^[52]和池吕庭等^[66]分别采用不同的改进RRT算法对喷涂机器人路径规划开展研究，均提高了机器人的作业效率，减少了喷涂浪费。

2.3 质量控制

涂层厚度是衡量喷涂质量的核心指标，直接影响船舶的抗腐蚀性能和使用寿命。根据国际海事组织（International Maritime Organization, IMO）《保护涂层性能标准》90%以上的检测点干膜厚度应不小于规定膜厚，其余检测点膜厚不小于规定膜厚的90%^[67]。因此，通过优化喷涂工艺参数实现涂层厚度的精确控制，是保证喷涂质量的关键环节。

在喷涂工艺参数优化领域，国内外学者围绕喷涂距离、喷涂速度、喷涂压力和喷嘴结构等关键参数开展了大量研究。Shi等^[68]针对船舶分段大平面Z字形喷涂轨迹加减速段涂层厚度不均匀的问题，提出了一种考虑加减速段

的动态优化喷枪流量方法，建立了变流量涂层厚度分布模型，通过模式搜索法优化加减速段的喷枪流量，使得整个超大平面涂层厚度均匀性达到最优，数值模拟验证了该方法的可行性。王飞等^[69]提出了一种基于灰狼算法的船体分段结构面漆料全覆盖喷涂路径规划方法，首先构建平面喷枪喷涂模型，确定区域全覆盖喷涂路径目标函数，通过灰狼算法求解获得喷涂间距、速度等关键参数，采用规划后的路径进行喷涂能够保证漆膜厚度平整性，从而有效提高了漆料利用率与喷涂效率。大连海洋大学衣正尧等^[70]以4种不同入口结构的扇形喷嘴为对象，应用计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）手段建立数学模型并进行了腔体内流场的数值模拟，对比分析了4种喷嘴轴心线上的压力变化曲线和速度变化曲线，见图13，为后续扇形喷嘴选型和深度模拟提供了参考依据。

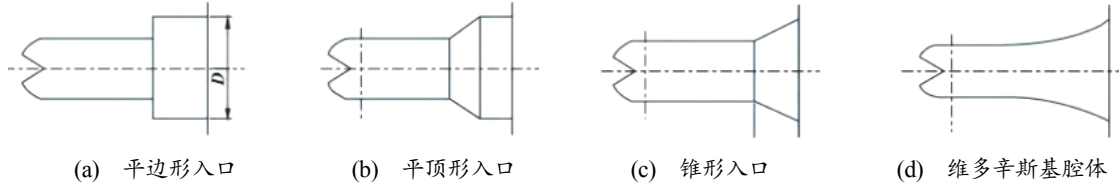


图13 4种入口结构

Fig. 13 Four types of inlet structures

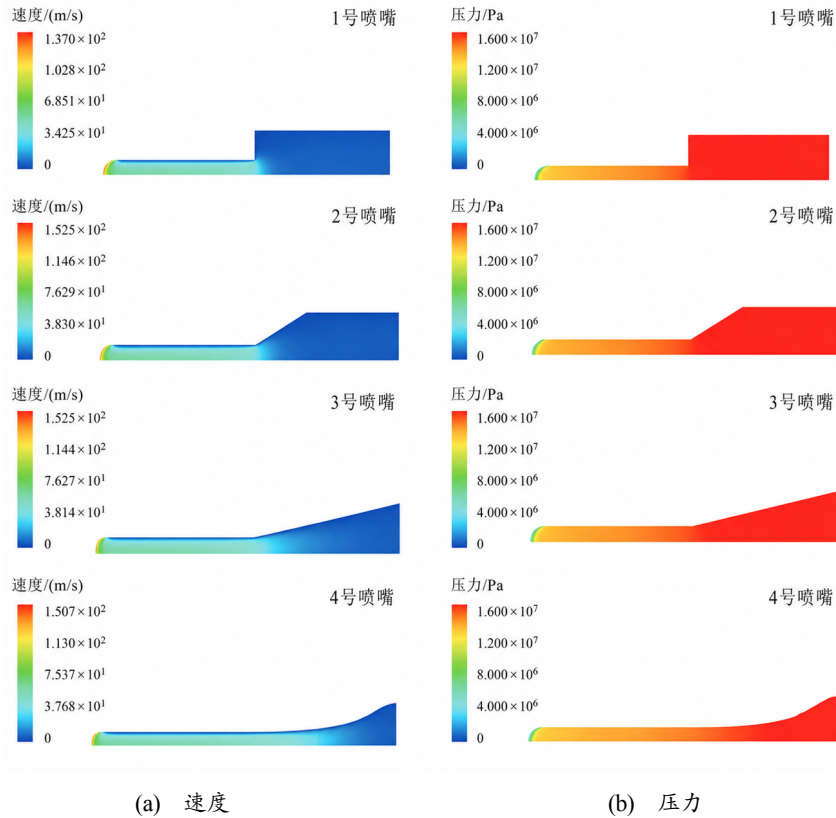


图14 4种喷嘴的速度与压力云图

Fig. 14 Fan nozzles with four different inlet structures

在国外研究方面，2008年，韩国STX造船海洋研究所Kim等^[71]开发了预测干膜厚度的经验公式，通过试验数据分析喷涂距离、喷涂速度、压力和喷嘴尺寸等参数与膜厚的关系，确定了合适的喷涂模式，为解决因依赖工人经验导致的过度用漆和效率下降问题提供了定量依据。韩国蔚山大学的Kim等^[72]利用喷涂机器人采集5种不同喷涂距离和速度条件下的试验数据集，提出了一种将已知距离和速度下的厚度函数转化为未知条件下的预测方法，观察到该方法与基于人工神经网络的方法相比具有更稳定和准确的预测性能。德国弗劳恩霍夫研究所Kelm等^[73]采用统计方法研究了机器人喷涂速度、泵压和电压等参数对带焊缝、螺栓和焊接圆角等复杂几何表面涂层厚度均匀性的影响，通过方差分析确定了机器人移动速度是最具影响力的因素，在优化参数组合下干膜厚度值在100μm~142 μm范围内，为复杂几何结构的均匀涂层分布和工艺参数优化提供了基础依据。

2.4 环保技术

船舶涂装过程中产生的漆雾和VOCs是船舶制造行业的主要污染源之一。因此，环保型喷涂机器人的研发已成为行业绿色转型的重要方向，相关技术围绕漆雾/VOCs的捕集回收与末端治理展开。

在漆雾捕集与回收技术方面，国内外已形成气幕隔离、负压回收、干式过滤等多种技术路线。西班牙Syncroil公司和意大利Rina Vincenzo公司较早提出了密闭式漆雾回收罩的概念设计^[12-13]。中国矿业大学费波^[3]获取合适的工艺参数后设计“漆雾高效捕集-VOCs宽负荷调节-吸附脱附”一体化催化氧化工艺及装置，实现漆雾去除效率95.3%，VOCs去除效率96.88%。大连海洋大学衣正尧等^[70]针对船舶外板喷涂机器人设计了一种负压真空回收罩，通过CFD数值仿真研究了不同尺寸回收罩方案对漆雾回收效率的影响，漆雾回收率可达84%，VOCs近零排放，但设备投资较高。舟山中远海运重工熊元元^[74]定制的全自动智能化环保型喷漆机器人集自动喷涂和漆雾、VOCs回收于一体，能有效捕捉和净化喷涂过程中产生的漆雾颗粒与VOCs气体。

在集成式回收系统设计方面，2026年，Lu等^[75]以“气幕隔离、多级吸附、负压回收”的协同理念设计了一套集成式回收系统，通过CFD仿真和试验验证了其在最优工况下的去除效率为86.2%。Zheng等^[76]首次尝试应用微纳米气泡（Micro- and Nano-Bubbles, MNB）辅助吸收器来去除气相VOCs，去除率达90%。德国Dürr公司开发的Eco Paint Jet无过喷漆涂系统采用按需喷墨式喷涂技术，无需遮蔽即可实现高精度双色或多色喷涂，上漆率接近100%，大幅减少了漆雾和VOCs的无组织排放，见图15^[77]。法国AMBPR公司研发的Green Dock Robot集成于高架车上^[14]，可从高压水清洗、喷砂除锈到喷漆全流程自动化作业，其中喷漆环节通过建立局部密闭环境，有效减少了漆雾扩散。挪威Jotun^[78]于2019年推出溶剂型船舶底漆，据称可将VOCs排放量降低80%~90%，从源头实现了低VOCs船舶涂料的开发。

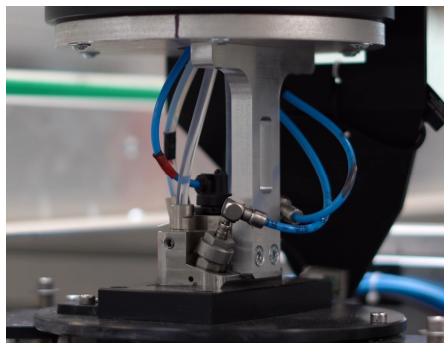


图 15 德国 Eco Paint Jet 无过喷漆涂系统

Fig. 15 The Eco Paint Jet non-overspray painting system from germany

上述方法均符合大气污染物综合排放标准^[79]中VOCs排放限值的要求，然而，现有环保技术在实现高效治理的同时，也普遍面临初期设备投资高、运行能耗大等问题。因此在追求高去除效率的同时，降低系统投资与运行成本、提高技术经济性是环保技术工程推广应用的关键。

3 面临的技术挑战与瓶颈

1) 曲面适应能力。船体艏艉区域曲率变化剧烈，爬壁机器人刚性结构变形能力弱，高架机器人末端距离调整响应延迟，轨道机器人对线型变化缺乏自适应能力。如何在不牺牲吸附力或精度的前提下实现大范围柔性贴合与距离自适应控制仍是技术难点。

2) 协同作业效率。船舶涂装面积巨大，单机作业效率有限，多机器人协同喷涂是提高效率的必然方向。然而，多机器人协同作业面临任务分配、避碰协调、通信延迟等复杂问题，尤其在船坞空间受限、多机同时作业时，路径冲突和碰撞风险显著增加。

3) 环保回收干扰。真空回收罩虽然能有效回收漆雾，但其对喷涂流场的干扰不容忽视——回收气流可能改变漆雾沉积轨迹，影响涂层均匀性。如何在保证回收效率的前提下最小化对喷涂过程的影响，仍需在结构设计和控制策略上进行优化。

4) 质量闭环控制。当前膜厚检测仍多采用离线方式，无法实时反馈调整喷涂参数。视觉检测方法受光照条件和漆膜表面反射特性影响较大，检测精度有待提高。如何将检测系统与喷涂控制系统深度融合，是实现智能化喷

涂的关键瓶颈。

5) 通用模块设计。爬壁式机器人受限于有效载荷, 轨道式机器人需要大量前期准备, 高架式机器人在紧凑船坞内移动受限。大型船厂需要处理不同船型、不同尺寸的分段, 单一类型的喷涂机器人难以满足多种作业场景的需求, 亟须提高设备的通用性和可重构性。

6) 虚实映射偏差。当前喷涂过程仿真多基于理想化模型, 难以精准映射实际作业中的动态变化, 如船体弹性变形、环境气流扰动、涂料流变特性非线性变化等, 导致虚拟验证结果与实体喷涂效果存在偏差, 降低了离线编程的可靠性和数字孪生技术的工程实用价值。

4 未来发展趋势与展望

围绕当前技术瓶颈与发展需求, 船舶喷漆机器人技术将朝着以下6个方向加速发展。

1) 曲面适应与柔性贴合。刚柔耦合机构将进一步发展, 通过柔性连接增强机器人曲面自适应能力。爬壁机器人采用主动变磁力与柔性铰链结合, 高架机器人引入激光-力觉融合距离调控, 轨道机器人发展可重构轨道或主动悬架, 共同突破大范围柔性贴合技术瓶颈。

2) 多机协同与集群智能。随着5G通信技术和边缘计算的发展, 多台喷涂机器人将实现高效的集群协同作业。通过集群智能算法实现任务分配、路径规划和实时避碰协同, 可大幅提升大面积喷涂作业的整体效率。同时, 云端平台可实现多机器人之间的资源共享和工艺数据库的实时更新, 有效降低通信延迟和碰撞风险。

3) 环保集成与源头减排。新型低VOCs涂料的开发与应用将从源头减少污染物生成; 高效的漆雾回收集成系统将进一步成熟, 通过优化回收罩结构与气流组织, 有望实现90%以上的回收效率, 同时将对喷涂流场的干扰降至最低。活性炭纤维吸附材料的优化和可再生技术将降低回收系统的运行成本。超高压水射流除漆等物理除锈技术与喷涂工序的进一步集成, 将推动船舶涂装向“干法”绿色方向转变。

4) 智能检测与闭环控制。基于机器学习方法建立喷涂工艺参数与涂层厚度之间的非线性映射模型, 通过少量工艺试验数据训练即可准确预测不同参数组合下的涂层厚度分布, 进而实现喷涂参数的快速优化。融合视觉、光谱共焦、太赫兹等多源传感信息, 开发高鲁棒性的在线检测系统, 与喷涂控制系统深度融合, 形成“喷涂-检测-反馈-调整”的闭环控制, 大幅减少经验试错成本, 缩短工艺调试周期。

5) 模块设计与快速转换。模块化设计理念将使得爬壁、高架、轨道等不同驱动模块可快速重组或混合作业, 以适应不同船型、不同区域的喷涂需求。通过快换接口和标准化模块, 单一机器人平台可灵活切换多种作业模式, 降低设备购置与维护成本, 提高设备利用率。

6) 数字孪生与过程仿真。基于数字孪生技术的喷涂过程仿真和实时监控将实现工艺流程的可视化和喷涂质量的在线预测。喷涂过程中多传感器采集的实时数据可驱动三维虚拟模型, 反映喷涂状态并进行工艺参数的在线评价和闭环优化, 有效缩短现场调试时间, 减少试喷浪费。同时, 数字孪生模型可用于离线编程和碰撞检测, 为复杂曲面和多机协同提供虚拟验证平台。

5 结论

经过多年发展, 船舶喷涂机器人技术取得了显著进步, 已形成爬壁式、轨道式和高架式3类成熟技术路线, 并在三维重构、路径规划、质量控制及环保技术等方面积累了丰富的研究成果。然而, 当前船舶喷涂机器人仍面临大曲率复杂曲面的柔性贴合与可靠吸附难以兼顾、多机器人协同作业在任务分配与避碰协调方面存在挑战、漆雾回收系统对喷涂流场的耦合干扰影响涂层均匀性、涂层厚度在线检测尚未形成闭环控制, 以及爬壁、轨道和高架3类设备通用性不足等技术瓶颈。近年来, 喷涂机器人技术正从实验室研究向工程应用加速转化, 但欧美日韩等发达国家在核心部件、控制算法及系统集成方面仍处于领跑地位。我国作为世界第一造船大国, 船舶涂装作业量大面广, 喷涂机器人在国内具有巨大的市场应用前景。然而, 由于国内船舶喷涂机器人产业化起步较晚, 科技成果转化率低, 以及关键部件成本较高等问题, 市场应用率仍有待提升。随着智能制造战略的深入推进与环保法规的持续完善, 喷涂机器人技术必将逐步在国内船舶制造与修船行业获得广泛应用。

参考文献:

- [1] 刘洁. 三大指标“领跑”全球、高端转型获突破 “数”说 2025 年中国船舶工业亮眼成绩[EB/OL]. [2026-05-12]. <https://news.cctv.com/2026/02/01/ARTIATyWZhzt9gUSXCzRyvq6260201.shtml>.

- Liu J. Three Major Indicators "Leading" Globally, Breakthrough in High-end Transformation. "Figures" Show the Impressive Achievements of China's Shipbuilding Industry in 2025 [EB/OL]. [2026-05-12]. <https://news.cctv.com/2026/02/01/ARTIATyWZhzt9gUSXCzRyvq6260201.shtml>
- [2] 刘雪梅, 杨晓浪, 卢军国, 等. 大型船舶分段涂装机器人的应用和发展[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(6): 503-508.
Liu X M, Yang X L, Lu J G, et al. Overview of painting robot for large ship blocks[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2023, 21(6): 503-508.
- [3] 费波. 船舶涂装工艺 VOCs 处理关键技术及试验性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
Fei B. Key Technologies and experimental research on VOCs treatment of ship painting[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [4] 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.
- [5] Painting robot (water tank): urakami research & development[EB/OL]. [2026-05-14]. <http://www.urakami.co.jp/en/05/11.html>.
- [6] Kim J H, Park S M, Kim J H, et al. Design and experimental implementation of easily detachable permanent magnet reluctance wheel for wall-climbing mobile robot[J]. Journal of Magnetism, 2010, 15(3): 128-131.
- [7] Rahino J R G, Widjaja R S, Putri A N. Design of an automated ship hull painting system during the docking process using crawler robot[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2026, 1585(1): 012038.
- [8] Echemi. Hamburg Hosts Automatic Hull Coating Technology. [EB/OL]. [2026-05-14]. <https://www.echemi.com/cms/7033.html>.
- [9] 国际船舶网. 赫伯罗特测试船舶涂装机器人 [EB/OL]. [2026-05-14]. https://www.eworldship.com/html/2019/ShipOwner_0711/150947.html.
International Ship Network. Hapag-Lloyd Tests Ship Painting Robot [EB/OL]. [2026-05-14]. https://www.eworldship.com/html/2019/ShipOwner_0711/150947.html.
- [10] Stagista S. Lesta painting robots for large-scale systems [EB/OL]. [2026-05-14]. <https://www.lesta.it/en/lesta-painting-robots-for-large-scale-systems/>.
- [11] Tjipto D, Widjaja R S, Prananda J, et al. Design of an automated paint spray machine to support the implementation of a green shipyard[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2025, 1473(1): 012069.
- [12] Vincenzo R. Apparatus and method for the painting of hulls of boats or the like: WO2012038806(A3)[P]. 2013-07-31.
- [13] Painting robot | SYNCROIL[EB/OL]. [2026-05-14]. <https://syncroil.com/index.php/painting-unit>.
- [14] Haulotte. Green Dock Robot by AMBPR and Sercel. [EB/OL]. (2023-04-21). [2026-05-14]. <https://haulotte-community.haulotte.com/a/greendockrobot-boom-lift-robot-revolutionizes-naval-industry/>.
- [15] Lee J J, Lee H S, Yi H. Control of collaborative robot based on impedance contact model for ship hull painting operations[J]. Applied Technology Paper, 2024, 12(2): 157-162.
- [16] Lee J, Lee H, Yi H, et al. A study on the measurement of ship hull paint thickness using collaborative robots and depth cameras[J]. Korean Society for Precision Engineering, 2024, 41(9): 707-711.
- [17] 王炎, 姜有. 喷砂喷漆用履带式磁吸附爬壁机器人[C]//全国智能机器人学术交流会暨第六届青年机器人学术研讨会, 1996: 783-786.
Wang Y, Jiang Y. Tracked Magnetic Adsorption Wall-Climbing Robot for Sandblasting and Painting[C]//Proceedings of the National Academic Exchange Conference on Intelligent Robotics and the 6th Youth Robotics Symposium, 1996: 783-786.
- [18] 李惠娟. 应用于船体喷漆的爬壁机器人的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2011.
Li H J. Study of the wall-climbing robots used for hull painting[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2011.
- [19] 今日头条. 机器人自动喷漆! 外高桥造船涂装作业 so easy![EB/OL]. [2026-05-14]. <https://www.toutiao.com/article/6498788367575024142/>.
Toutiao. Robot Automatic Painting! SWS Coating Operation So Easy! [EB/OL]. [2026-05-14]. <https://www.toutiao.com/article/6498788367575024142/>.
- [20] 林焰, 衣正尧, 李玉平, 等. 坞内船舶外板喷涂机器人多功能创新设计[J]. 船舶工程, 2018, 40(10): 15-18.
Lin Y, Yi Z Y, Li Y P, et al. Multi-functional innovative design of hull shell plate spraying robot in dock [J]. Ship Engineering, 2018, 40(10): 15-18.

- [21] Xu P, He J Y, Liao L, et al. Experimental design and spray technology research of ship paint spraying robot[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 612(3): 032067.
- [22] 喷漆机器人-彼合彼方机器人(天津)有限公司[EB/OL]. [2026-05-14]. <https://www.bingoorobot.cn/fangfu/penqijiqiren.html>.
Bingoo Robot. Painting Robot [EB/OL]. [2026-05-14]. <https://www.bingoorobot.cn/fangfu/penqijiqiren.html>.
- [23] 王冲, 黄林, 鲁夏阳, 等. 船用环保型爬壁喷漆机器人的设计及应用[J]. 船舶工程, 2024, 46(6): 157-162.
Wang C, Huang L, Lu X Y, et al. Design and application of eco-friendly ship wall-climbing painting robot[J]. Ship Engineering, 2024, 46(6): 157-162.
- [24] Huang S J, Liu Z Q, Yuan H T. Design and performance assessment of ship outer panel spraying robot[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2026, 67: 60-70.
- [25] 杨振, 胡小才, 邓啸尘, 等. 悬臂式多自由度喷涂机器人在船舶分段涂装中的使用可行性分析[J]. 船海工程, 2022, 51(1): 132-136.
Yang Z, Hu X C, Deng X C, et al. Feasibility analysis of multi degree of freedom cantilever spraying robot in ship block coating[J]. Ship & Ocean Engineering, 2022, 51(1): 132-136.
- [26] 季剑波. 面向船舶分段的龙门式喷涂机器人系统设计与喷涂轨迹规划研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023.
Ji J B. Research on system design and spraying trajectory planning of gantry spraying robot for ship segmentation [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023.
- [27] 江苏科技大学海洋装备研究院. 智能涂装系统 [EB/OL]. [2026-05-14].
<https://justmeti.just.edu.cn/2021/0521/c9643a331138/page.htm>.
Marine Equipment Institute, Jiangsu University of Science and Technology. Intelligent Coating System[EB/OL]. [2026-05-14].
<https://justmeti.just.edu.cn/2021/0521/c9643a331138/page.htm>.
- [28] 郗金波. 面向船舶分段的大空间智能喷涂装备关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2025.
Qie J B. Research and application of intelligent coating equipment with redundant degrees of freedom in large space[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2025.
- [29] Xu J M, Liu J H, Jing X W, et al. Kinematic analysis and optimisation of a gantry spraying robot for ship blocks[J]. Alexandria Engineering Journal, 2025.
- [30] 新华网. 我国首套海洋油气装备柔性智能喷涂系统投用 [EB/OL]. [2026-05-14].
<https://www.news.cn/20260122/bbefbb4f5c504f09b040277685dce708/c.html>.
Xinhuanet. China's first flexible intelligent spraying system for offshore oil and gas equipment put into use[EB/OL]. [2026-05-14].
<https://www.news.cn/20260122/bbefbb4f5c504f09b040277685dce708/c.html>.
- [31] 江浩, 王传江. 一种船舱除锈喷漆移动机器人的设计[J]. 船舶工程, 2007, 29(5): 37-39.
Jiang H, Wang C J. A design of mobile robot used in the cabin for descaling and spray-paint[J]. Ship Engineering, 2007, 29(5): 37-39.
- [32] 王传江, 江浩, 孙秀娟, 等. 舰船除锈喷漆机器人的研究与设计[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(1): 60-62.
Wang C J, Jiang H, Sun X J, et al. Study and design of descaling and spray-painting robot used in shipbuilding industry[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(1): 60-62.
- [33] 肖宇晨. 直臂式高空作业车船体喷漆轨迹控制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
Xiao Y C. Research on trajectory control of telescopic boom aerial work platform for hull spray painting[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [34] 张英勇. 面向超大船体外表面的喷涂机械臂研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
Zhang Y Y. Research on a spraying robot arm for the surface of superlarge hull[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [35] 衣正尧, 林焰, 隋江华, 等. 高架与爬壁重构的船舶外板喷涂机器人设计[J]. 机床与液压, 2019, 47(21): 24-28.
Yi Z Y, Lin Y, Sui J H, et al. Design of shipboard spraying robot based on elevated and wall climbing reconfiguration [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(21): 24-28.
- [36] 胡小才, 陈铮, 吴彪, 等. 船舱狭窄封闭空间喷涂机器人结构设计与自动喷涂流程[J]. 机械设计与研究, 2023, 39(4): 21-26.
Hu X C, Chen Z, Wu B, et al. Design and automatic operation planning of cabin spraying robot system[J]. Journal of Mechanical Design and Research, 2023, 39(4): 21-26.

- [37] 李梦祥. 柔索驱动喷涂机器人主从遥操作示教系统和控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
Li M X. Master-slave teleoperation teaching system and control strategy of cable-driven spraying robot[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023.
- [38] “象群”承载着时代的未来应运而生——万邦重工联合浙江鼎力研制的机器人正在成为船舶涂装降碳、降 VOCs 排放的主力军[J]. 中国修船, 2024, 37(2): 1.
Elephant Herd: Born for the Future - The Robot Developed by Banchang Heavy Industry and Zhejiang Dingli Becomes the Main Force for Carbon Reduction and VOCs Reduction in Ship Coating [J]. China Ship Repair, 2024, 37(2): 1.
- [39] 中国路面机械网. “智能平台+机器人”, 鼎力开启船底喷涂作业“无人化”新时代! [EB/OL]. [2026-05-14]. <https://news.lmjx.net/2025/202509/2025092215153366.shtml>.
China Pavement Machinery Network. "Intelligent Platform + Robot": Dingli Ushers in a New Era of Unmanned Ship Bottom Painting [EB/OL]. [2026-05-14]. <https://news.lmjx.net/2025/202509/2025092215153366.shtml>.
- [40] 中国船舶报. 海恒科技发布成套化智能装备, 一站式绿色修造方案引行业瞩目[EB/OL]. [2026-05-14]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzA4ODE1OTgwNQ==&mid=2651561661&idx=4&sn=8bf6b0a42e84ab0cceeabae5544ccfd&chksm=8a54a0b8270f9edeb433508ad8ec906291c6187b18688b1bf486b006b575e32126cf89ad9f63&scene=27.
China Ship News. Haihuan Technology Releases complete set of intelligent equipment, one-stop green repair solution attracts industry attention [EB/OL]. [2026-05-14]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzA4ODE1OTgwNQ==&mid=2651561661&idx=4&sn=8bf6b0a42e84ab0cceeabae5544ccfd&chksm=8a54a0b8270f9edeb433508ad8ec906291c6187b18688b1bf486b006b575e32126cf89ad9f63&scene=27.
- [41] 蔡佑辉. 船舶外板智能喷涂平台的路径规划与稳定性控制方法[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2022.
Cai Y H. Path planning and stability control method for intelligent spray painting platforms for ship's outer panels [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2022.
- [42] 邹绍福. 船舶外板自适应喷涂装置研发及喷涂质量控制方法研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023.
Zou S F. Research on the development of adaptive spraying device and its spraying quality control method for ship's outer Panel[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023.
- [43] 万勋科技. 空中柔韧气幕系留喷涂机器人. [EB/OL]. [2026-06-12]. <https://www.wissonrobotics.com/h-col-406.html>.
Wisson Technology Aerial flexible air curtain tethered spray painting robot [EB/OL]. [2026-06-12]. <https://www.wissonrobotics.com/h-col-406.html>.
- [44] Huo S L, Liu Y J, Wang J, et al. A broadly applicable coarse alignment framework for the point cloud of hull blocks[J]. Journal of Ship Production and Design, 2024, 40(3): 145-173.
- [45] Guan L W, Chen L. Trajectory planning method based on transitional segment optimization of spray painting robot on complex-free surface[J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2019, 46(1): 31-43.
- [46] 沈顺喜, 王艳珍, 陈启豪, 等. 基于视觉识别的船体喷涂路径规划及控制系统及机器人: CN121191130A[P]. 2025-12-23.
Shen S X, Wang Y Z, Chen Q H, et al. Hull Painting Path Planning and Control System Based on Visual Recognition and Robot: CN121191130A [P]. 2025-12-23.
- [47] Abbas M A, Lichti D D, Chong A K, et al. Improvements to the accuracy of prototype ship models measurement method using terrestrial laser scanner[J]. Measurement, 2017, 100: 301-310.
- [48] Augmented surveyor 3D (AGS 3D) safer, faster, smarter ship and offshore inspections powered by LiDAR, AI, and 3D modeling [EB/OL]. [2026-05-14]. <https://marine-offshore.bureauveritas.com/digital/digital-classification/augmented-surveyor-3d-ags-3d>.
- [49] 夏志新, 陈聪, 梁凯, 等. 基于图像-激光点云融合数据的船舶建模及轮廓测量系统及方法: CN119027482A[P]. 2024-11-26.
Xia Z X, Chen C, Liang K, et al. Ship Modeling and Contour Measurement System and Method Based on Image-Laser Point Cloud Fusion Data: CN119027482A [P]. 2024-11-26.
- [50] 史家伟. 基于多视图图像的船体曲面外板表面几何重建方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2025.
Shi J W. Research on the method of geometric reconstruction of ship shell plates based on multi-view images[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2025.
- [51] 王化明, 沈颖, 姜少华, 等. 基于点云的复杂工件机器人喷涂方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2026, 47(1): 25-30.
Wang H M, Shen Y, Jiang S H, et al. Robot spraying method for complex workpiece based on point cloud[J]. Journal of Jiangsu

- University (Natural Science Edition), 2026, 47(1): 25-30.
- [52] 王慧雄. 船舶涂装机器人轨迹规划关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2025.
Wang H X. Research on key technology of trajectory planning for cabin painting robot[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2025.
- [53] 华霄桐, 张思敏, 刘兴杰, 等. 基于椭圆双 β 喷枪模型的喷涂轨迹优化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(12): 985-992.
Hua X T, Zhang S M, Liu X J, et al. Optimization of spraying trajectory based on elliptical double β spraying gun model[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2020, 60(12): 985-992.
- [54] Xu J M, Cheng H L, Liu J H, et al. Dynamic numerical simulation of curved surface coating trajectory based on STL slicing algorithm[J]. Coatings, 2024, 14(3): 251.
- [55] 石祥滨, 李泓锦, 黄盛. 基于点云薄切技术的协作机器人喷漆轨迹规划算法[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2024, 41(3): 53-60.
Shi X B, Li H J, Huang S. Collaborative robot painting trajectory planning algorithm based on point cloud thin-slicing technology [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2024, 41(3): 53-60.
- [56] Hua R X, Ma H X, Zou W, et al. A Spraying path planning algorithm based on point cloud segmentation and trajectory sequence optimization[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2024, 22(2): 615-630.
- [57] 刘梦真, 郭丽峰, 郑雨潇, 等. 基于遗传混沌粒子群算法的喷涂机器人时间最优轨迹规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2025(10): 63-68.
Liu M Z, Guo L F, Zheng Y X, et al. Time optimal trajectory planning of spraying robot based on genetic chaotic particle swarm optimization algorithm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2025(10): 63-68.
- [58] Ekrem Ö, Aksoy B. Trajectory planning for a 6-axis robotic arm with particle swarm optimization algorithm[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 122: 106099.
- [59] 梅伟, 赵云涛, 毛雪松, 等. 基于离散灰狼算法的喷涂机器人路径规划方法[J]. 计算机应用, 2020, 40(11): 3379-3384.
Mei W, Zhao Y T, Mao X S, et al. Path planning method for spraying robot based on discrete grey wolf optimizer algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2020, 40(11): 3379-3384.
- [60] 吴英杰. 基于改进鲸鱼优化算法的移动机器人路径规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2025.
Wu Y J. Research on path planning for mobile robots based on improved whale optimization algorithm[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2025.
- [61] Yi J H, Yuan Q N, Sun R T, et al. Path planning of a manipulator based on an improved P_RRT* algorithm[J]. Complex & Intelligent Systems, 2022: 8(3): 2227-2245.
- [62] Liu X, Feng Y, Zeng Q, et al. Multi-objective optimization of spraying trajectory planning for large ship blocks using evolutionary computation[J]. Procedia CIRP, 2021, 104: 530-535.
- [63] Cai Y H, Zhou H G, Liu J F, et al. Research on path generation and stability control method for UAV-based intelligent spray painting of ships[J]. Journal of Field Robotics, 2022, 39(3): 188-202.
- [64] 袁海陶. 船体外板自动喷涂轨迹规划及质量控制技术研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2025.
Yuan H T. Research on automatic spray trajectory planning and quality control technology for ship outer panels[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2025.
- [65] 钱振华, 万莉, 何家健. 基于 RRT 算法的喷涂机器人路径规划方法研究[J]. 机械工程师, 2025(6): 117-124.
Qian Z H, Wan L, He J J. Research on path planning of spray robot based on RRT algorithm[J]. Mechanical Engineer, 2025(6): 117-124.
- [66] 池吕庭, 鲁宇明, 黎政秀. 改进 RRT*算法的移动机器人路径规划[J]. 机械科学与技术, 2026, 45(1): 131-140.
Chi L T, LU Y M, Li Z X. Improved RRT* algorithm for mobile robot path planning[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2026, 45(1): 131-140.
- [67] 中国船级社. 实施 IMO《所有类型船舶专用海水压载舱和散货船双舷侧处所保护涂层性能标准》暂行指南 2007[EB/OL]. [2026-05-14]. <https://www.ccs.org.cn/ccswz/specialDetail?id=201900001000006493>.
China Classification Society. Interim guidelines for the implementation of the IMO performance standard for protective coatings for dedicated seawater ballast tanks on all types of ships and double-skin spaces of bulk carriers 2007[EB/OL]. [2026-05-14].

<https://www.ccs.org.cn/ccswz/specialDetail?id=201900001000006493>.

- [68] Shi T J, Xu J M, Cui J, et al. Variable velocity coating thickness distribution model for super-large planar robot spraying[J]. *Coatings*, 2023, 13(8): 1434.
- [69] 王飞, 何祖军, 苏贞. 一种船体分段漆料全覆盖的喷涂路径规划方法[J]. *计算机与数字工程*, 2023, 51(12): 2867-2872.
Wang F, He Z J, Su Z. A spraying path planning method for full coverage of hull segmented paint[J]. *Computer and Digital Engineering*, 2023, 51(12): 2867-2872.
- [70] 衣正尧, 李峰, 张梦, 等. 船舶喷涂机器人扇形喷嘴内射流模拟对比分析[J]. *机床与液压*, 2022, 50(21): 43-47.
Yi Z Y, Li F, Zhang M, et al. Comparative analysis of jet simulation in fan-shaped nozzle of ship spraying robot[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2022, 50(21): 43-47.
- [71] Kim D, Lee D, Kim H. A study on development and verification of prediction formula for realization of standard process for hull block coating method[J]. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 2008, 45(6): 637-645.
- [72] Kim G W, Lee S H, Kwon Y K. A simple paint thickness estimation model in shipyard spray painting[J]. *Journal of the Korea Society of Computer and Information*, 2023, 28(2): 209-216.
- [73] Kelm D, Marquardt T, Momber A, et al. Statistical investigations into automated spray-applied stripe coats to complex geometries of floating offshore wind foundations[J]. *Materials and Corrosion*, 2025, 76(6): 858-873.
- [74] 熊元元, 陈东, 朱雨雷, 等. 船舶自动喷涂机器人 VOCs 及漆雾回收系统设计[J]. *船海工程*, 2025, 54(3): 1-5.
Xiong Y Y, Chen D, Zhu Y L, et al. Design of VOCs and paint mist recovery system for ship automatic spraying robots [J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2025, 54(3): 1-5.
- [75] Lu K Y, Chen Y J, Li L, et al. Integrated design and performance validation of an advanced VOC and paint mist recovery system for shipbuilding robotic spraying[J]. *Processes*, 2026, 14(7): 1047.
- [76] Zheng J R, Cheng W H, Huang H H, et al. Innovative VOC removal by using a micro- and nano-bubble absorber for the painting process of shipbuilding industries[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, 726: 137747.
- [77] Dürr and PPG earn R&D 100 award for overspray-free paint application[EB/OL]. [2026-05-14].
<https://www.durr.com/jp/media/news/news-detail/view/duerr-and-ppg-earn-rd-100-award-for-overspray-free-paint-application-79431>.
- [78] Jotun. Hardtop AX [EB/OL]. [2026-05-14]. <https://www.jotun.cn/cn-zh/products-and-services/products/hardtop-ax>.
- [79] GB 16297—1996 大气污染物综合排放标准[S]. 1996.
GB 16297—1996 Integrated emission standard of air pollutants[S]. 1996.

收稿日期: 2026-05-19; 修回日期: 2026-08-12

作者简介: 李传涛 (2001—), 男, 硕士研究生。研究方向: 复杂系统可靠性; 喷涂机器人。

通信作者: 姚玉南 (1974—), 男, 博士研究生、副教授。研究方向: 复杂系统可靠性; 装备智能运维保障; 运维机器人。