

船舶制造中机器人技术的应用

杨 勇

上海外高桥造船海洋工程有限公司 上海 201306

摘要: 船舶制造流程复杂,对精度、效率及环境适应性要求高,机器人技术正成为关键驱动力。其应用涵盖焊接、切割、喷涂、装配、搬运及检测等环节:焊接机器人提升焊缝质量与效率;切割机器人实现高精度板材加工;喷涂机器人确保涂层均匀且环保;装配与搬运机器人处理重型构件,缩短周期;检测机器人利用无损检测和AI识别保障安全。未来,机器人技术将进一步推动船舶制造智能化、柔性化与绿色化发展。

关键词: 船舶制造; 机器人技术; 应用

引言:在全球船舶工业迈向智能化、高效化与绿色化的转型浪潮中,机器人技术正成为推动产业升级的核心力量。船舶制造因结构复杂、作业环境严苛、质量要求严苛,传统人工模式面临效率低、成本高、安全风险大等挑战。而机器人技术凭借高精度、高适应性及自动化能力,在焊接、切割、喷涂、装配、检测等关键环节实现突破,不仅显著提升了生产效率与产品质量,更助力船舶制造突破环境限制,降低人力依赖。本文将系统探讨机器人技术在船舶制造中的具体应用、关键挑战及创新方向。

1 船舶制造工艺特点与机器人技术适配性分析

1.1 船舶制造的典型工艺流程

船舶制造流程复杂且环环相扣,各核心环节需紧密衔接。分段建造是基础,将船舶整体拆分为多个结构分段,在车间内完成切割、焊接、装配等工序,形成独立的船体单元,此环节对精度要求极高,直接影响后续总装质量;总组搭载是关键,把制造好的分段运输至船台或船坞,通过起重设备进行定位、对接与焊接,逐步搭建起完整船体框架,作业空间大且涉及重型构件搬运;舾装贯穿制造全程,包括动力系统、导航设备、管路、电缆等设备与设施的安装,涵盖机电、舾装件等多领域,作业场景分散且工序繁杂;涂装为船舶提供防护,在船体表面进行除锈、喷漆等处理,需应对不同舱室、不同材质表面,同时要满足防腐、防海生物附着等特殊要求。

1.2 船舶制造对机器人的技术需求

(1) 高负载能力与大尺度作业空间:船舶分段重量可达数百吨,总组搭载时需搬运重型构件,且船体长度常超百米,机器人需具备吨级以上负载能力,同时能在大作业半径内精准移动,适配船舶制造的大型化特点。(2) 多材料适应性:船舶制造涉及钢材、铝材、复合材料等多种材质,不同材料的切割、焊接、打磨工艺差异

大,机器人需配备可切换的末端执行器,能根据材料特性调整作业参数,确保在不同材质上的加工质量^[1]。(3) 复杂环境下的稳定性:船舶制造常处于潮湿、盐雾的船台/船坞环境,部分工序还伴随振动,机器人需具备防水、防腐蚀性能,且机身结构与控制系统需抗振动干扰,保证长期稳定运行。(4) 与数字化系统的协同能力:船舶制造依赖CAD/CAM/CAE等数字化系统进行设计与模拟,机器人需能读取系统生成的加工数据,实现路径自动规划与实时数据交互,提升制造精度与效率,适配数字化造船模式。

2 船舶制造中机器人技术的具体应用

2.1 焊接与切割机器人

(1) 自动化焊接工艺在船体分段中的应用:船体分段焊接是船舶制造核心工序,传统人工焊接易受疲劳、技能差异影响,导致焊缝质量不稳定。弧焊机器人凭借高精度焊缝跟踪系统,可在复杂船体结构(如肋板、纵骨连接部位)实现连续焊接,针对厚钢板采用多层多道焊工艺,确保焊缝成型均匀;激光焊机器人则适用于铝合金船体等轻量化结构,通过高能量密度激光束实现快速熔接,热影响区小,减少船体变形,目前已在高速客船、特种船舶分段制造中广泛应用,使焊接效率提升30%以上,焊缝合格率从人工的85%提升至98%以上。(2) 机器人切割技术的精度与效率优势:船舶制造需对钢板进行复杂形状切割(如船体曲线、孔位加工),等离子切割机器人可应对厚度达50mm的碳钢,切割速度达1.5m/min,且通过数控系统精准执行切割路径,误差控制在 $\pm 0.5\text{mm}$;激光切割机器人则针对薄板、复合材料等精细切割场景,如船舶上层建筑的铝合金面板切割,能实现复杂花纹、异形孔的高精度加工,避免人工切割的毛刺、尺寸偏差问题,同时减少材料浪费,将板材利用率从人工切割的75%提升至90%以上,大幅缩短分段预制周期^[2]。

2.2 喷涂与防腐机器人

(1) 自动化喷涂对涂层均匀性与环保性的提升：船舶涂装需保证涂层厚度均匀（通常要求80-120 μm ），人工喷涂易出现漏喷、流挂现象。喷涂机器人通过可编程喷涂路径，结合流量控制系统，可在船体表面（包括舱室内部、甲板区域）实现均匀喷涂，同时配备高压无气喷涂设备，减少涂料雾化浪费；部分机器人还搭载VOCs回收装置，将涂料挥发物排放量降低40%，既符合环保要求，又减少对操作人员健康的影响，目前在散货船、集装箱船的外板涂装中应用，使涂装返工率从15%降至5%以下。(2) 防腐处理中的机器人应用：船舶防腐除涂装外，阴极保护系统安装至关重要。阴极保护自动化安装机器人可携带磁吸附装置，在船体水下部分（如船底、舷侧）移动，精准定位牺牲阳极块安装位置，通过自动焊接或螺栓固定完成安装，避免人工潜水作业的高风险；针对船舶压载水舱等封闭空间的防腐处理，机器人还可搭载喷砂装置，先对舱内表面进行除锈处理，再同步完成防腐涂料喷涂，实现“除锈-喷涂”一体化作业，提升防腐处理效率与质量稳定性。

2.3 装配与搬运机器人

(1) 重型构件的自动化搬运与定位：船舶总组搭载时，需搬运数百吨的船体分段、主机基座等重型构件，龙门机器人系统凭借大跨度（可达60m）、高负载（最大负载1000吨）能力，通过激光定位与液压调平系统，将分段精准对接至船台基准位置，定位误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ ，避免传统起重设备依赖人工指挥导致的对接偏差；此外，AGV搬运机器人在车间内负责分段零部件（如大型管路、设备基座）的运输，通过路径规划系统实现无人化搬运，减少构件转运过程中的碰撞损伤，提升车间物流效率^[3]。(2) 模块化装配中的协作机器人应用：船舶舾装模块化装配（如管路模块、电气柜模块）需人机协同作业，协作机器人（Cobot）通过力传感技术，可与操作人员共同搬运重量20-50kg的模块，在定位安装时实时调整姿态，避免模块碰撞；例如在机舱管路模块装配中，协作机器人辅助人工完成法兰对接、螺栓预紧，既降低人工劳动强度，又通过精准定位保证管路连接密封性，使模块装配效率提升25%，减少因装配偏差导致的管路泄漏问题。

2.4 检测与维护机器人

(1) 无损检测机器人：船体焊缝、钢板内部缺陷检测是保障船舶安全的关键，超声检测机器人可通过水浸耦合或接触式探头，在船体分段焊缝区域自动移动，生成实时超声图像，识别内部裂纹、未熔合等缺陷；涡流检测机器人则适用于铝合金结构表面缺陷检测，如船舶

上层建筑的铝型材连接部位，无需耦合剂即可快速检测，检测效率是人工的3倍，且可存储检测数据，实现缺陷追溯。(2) 船体表面缺陷自动识别技术：船体表面缺陷（如凹陷、划痕、涂层破损）传统依赖人工目视检测，效率低且易漏检。表面缺陷检测机器人搭载高清相机与AI图像识别系统，可在船体表面移动时快速采集图像，通过算法对比标准模型，自动识别缺陷类型与尺寸，精度达0.1mm，检测覆盖率达100%，目前已在船舶出厂检验、定期维护中应用，将检测时间缩短60%^[4]。(3) 水下检测与维修机器人：船舶运营期间需对水下结构进行检测维修，ROV（遥控水下机器人）可携带水下相机、机械臂，在水深数百米的环境下检测船底海生物附着、螺旋桨磨损情况，针对小面积涂层破损，可通过机械臂搭载的小型喷涂设备完成修复；AUV（自主水下航行器）则适用于大范围水下巡检，如船舶航线沿途的海底管道、码头桩基检测，无需人工遥控，自主规划路径并传回检测数据，降低水下作业风险与成本。

2.5 3D打印与增材制造机器人

(1) 金属3D打印在船舶零部件快速成型中的应用：船舶部分复杂零部件（如特种阀门、推进系统配件）传统铸造工艺周期长、模具成本高。金属3D打印机器人（如激光选区熔化SLM机器人）可采用钛合金、不锈钢等金属粉末，根据CAD模型直接成型零部件，无需模具，将研发周期从传统的3-6个月缩短至1-2个月；例如某船舶企业通过3D打印制造的船舶尾轴密封件，不仅满足强度要求，还通过拓扑优化设计减轻重量15%，目前已在船舶备件制造、特种船舶定制化零部件生产中推广。(2) 复合材料增材制造的机器人路径规划：复合材料（如碳纤维增强树脂基复合材料）在船舶轻量化制造中需求增长，其增材制造需精准控制材料铺设路径。复合材料3D打印机器人通过多轴联动系统，结合材料挤出速度控制，可按照船舶构件（如上层建筑面板、船舱隔板）的受力需求，实现纤维定向铺设，提升构件抗疲劳性能；例如在高性能游艇的船体甲板制造中，机器人根据甲板不同区域的强度要求，调整碳纤维铺设密度与角度，使甲板重量减轻20%，同时抗弯强度提升25%，路径规划精度达 $\pm 0.1\text{mm}$ ，确保复合材料构件性能稳定。

3 船舶制造中机器人技术的关键挑战与创新方向

3.1 技术瓶颈分析

(1) 复杂曲面自适应加工技术：船舶船体、舱室结构多为复杂曲面，且存在焊接变形、板材误差等问题，传统机器人依赖预设路径加工，难以实时调整姿态。例如在船体曲面焊接时，若曲面弧度偏差超过0.5mm，机器

人易出现焊缝偏移；切割复杂曲面钢板时，也无法动态补偿材料弹性形变，导致加工精度下降，目前仅能通过人工辅助校准，制约了自动化效率。(2) 多机器人协同作业的调度与避障：船舶总组搭载等工序常需多台机器人（如焊接、搬运机器人）同步作业，作业空间交叉重叠。现有调度系统难以精准分配任务，易出现任务冲突；且机器人避障多依赖预设地图，面对临时出现的工装、人员等障碍物，响应延迟达2-3秒，存在碰撞风险，目前多通过限制机器人作业范围解决，降低了空间利用率。(3) 离线编程与仿真技术的精度优化：船舶构件尺寸大、结构复杂，离线编程时需建立高精度三维模型，但实际构件存在制造误差，导致仿真路径与现场工况偏差。例如为10米长的船体分段编写焊接程序时，仿真中忽略的2mm装配间隙，会使实际焊接出现未焊透问题；且仿真无法完全模拟潮湿、振动等现场环境，导致机器人实际作业精度比仿真结果低15%-20%。

3.2 智能化升级路径

(1) 人工智能赋能：在视觉识别方面，通过深度学习算法训练机器人识别不同材质、缺陷特征，使船体表面缺陷识别准确率提升至95%以上；力反馈控制可让机器人在装配时感知接触力，如协作机器人安装管路法兰时，实时调整力度，避免过度挤压导致密封件损坏；自主决策能力则能让机器人应对突发状况，如焊接时检测到焊丝耗尽，自动暂停并发出补给信号，减少人工干预。(2) 数字孪生与虚拟调试技术：构建船舶制造全流程数字孪生模型，将机器人运动数据、构件加工数据实时映射至虚拟场景，可提前发现多机器人协同冲突，调试效率提升40%；虚拟调试时，模拟潮湿、振动等环境对机器人的影响，优化作业参数，如调整喷涂机器人在高湿度环境下的涂料粘度与喷涂速度，使实际涂层均匀性与仿真结果偏差缩小至5%以内，减少现场试错成本^[5]。

3.3 人机协作模式探索

(1) 柔性化生产中人与机器人的安全交互：在机器人作业区域设置毫米波雷达与红外传感器，当人员靠近时，机器人自动降低运行速度（从1m/s降至0.3m/s），若距离小于0.5米则紧急停机；采用柔性机械臂设计，即使发生碰撞，也能通过形变缓冲冲击力，避免人员受伤，满足船舶舾装等需人机近距离配合的场景需求。(2) 增强现实（AR）辅助的机器人操作界面：操作人员佩戴AR眼镜，可实时查看机器人作业参数（如焊接电流、切割速度）与三维模型标注，无需低头查看控制台；在机器人故障排查时，AR界面能叠加显示故障部位拆解步骤与维修指引，如喷涂机器人喷嘴堵塞时，引导人员精准拆卸更换，将故障处理时间从1小时缩短至20分钟。

结束语

机器人技术在船舶制造领域的应用，已从单一工序替代迈向全流程智能化协同，成为推动产业变革的核心引擎。其不仅攻克了传统制造中精度、效率与安全性的痛点，更通过与数字孪生、人工智能等技术的深度融合，重构了船舶制造的柔性化生产模式。未来，随着人机协作的进一步深化与复杂环境适应能力的突破，机器人技术将助力船舶制造实现更高水平的绿色化、智能化发展，为全球航运业的高质量转型注入持久动能。

参考文献

- [1]孔玥.船舶制造业智能工厂关键技术及其标准综述[J].大众标准化,2021,(23):50-52.
- [2]朱昱颖,孙宏伟,朱加雷,赵晓鑫.船舶中小组立焊接机器人的发展与应用现状[J].船舶工程,2022,44(01):104-106.
- [3]喻军,王羽泽,李超等.船舶制造焊接机器人应用关键技术[J].船舶与海洋工程,2020,35(06):49-50.
- [4]桂纪军.船舶制造焊接机器人应用关键技术分析[J].船舶物资与市场,2020,(04):43-44.
- [5]谢静远,邢宏岩.面向船舶小组立的门式机器人焊接系统应用[J].造船技术,2021,49(06):72-74.