

智能制造技术在船舶制造领域的应用

宁凯

中国船舶集团有限公司第七一三研究所 450000

摘要: 针对传统船舶制造效率低、精度不足、人力短缺等瓶颈,结合学者最新研究成果,把智能制造技术深度融入到船舶制造当中,能为船厂的智能化转型提供有力支撑。研究采用了文献研究法、案例分析法,明确了数字孪生、大模型、AI 等技术在设计、加工装配、质检运维各环节的具体应用流程,提升效率 40%以上、降低缺陷率 90%以上。研究结论表明,合理运用智能制造技术,能有效破解行业痛点,实现船舶制造全流程的协同优化,推动行业高质量发展。

关键词: 智能制造;船舶制造;数字孪生;工业大模型;智能质检

引言

全球船舶制造正朝着“船舶制造 4.0”转型,中国船舶订单份额在全球处于领先地位,但传统制造模式存在设计周期长、加工精度低、运维滞后等问题,不加快智能化转型,会难以维持行业领先地位,所以智能化是产业升级的必由之路。船舶制造领域的智能制造,就是融合数字孪生、AI、工业机器人等技术,实现设计、加工、质检、运维全流程智能化管控的技术体系。船厂结合自身实际灵活运用这些方法,能助力船厂提质增效、降低成本,推动绿色船舶发展,提升中国船舶制造行业的核心竞争力。

1 船舶制造全流程核心环节概述

船舶制造是典型的复杂离散型制造,核心流程能分为五大环节。一是设计环节,它的核心是完成船型规划与结构设计,传统模式存在周期长、模型复用率低、设计与生产脱节等问题,引入智能设计技术,能有效破解这些痛点[1]。二是钢材加工环节,涵盖切割、打磨等工序,需要保障钢材利用率和加工精度,传统人工操作效率低还误差大,采用自动化加工装备,能提升加工质量和效率。

三是部件装配环节,从小组立到总装,对装配精度和协同性要求特别高,尤其是超大型集装箱船、LNG 船等高端船型,精度得控制在毫米级,装配过程缺乏智能管控,很容易就会出现装配偏差[2]。四是质量检测环节,覆盖整个制造流程,传统依赖人工检测,漏检率高、效率低,应用智能质检技术,能实现全流程精准检测。五是运维服务环节,重点聚焦船舶交付后设备的维护与故障诊断,传统模式响应滞后,还依赖人工经验,构建预测性运维体系,能提升运维响应速度和精准度[3]。

2 智能制造核心技术界定与分类

以船舶制造需求为导向,船舶制造领域核心的智能制造技术可以分为四大类。其中数字孪生与虚拟仿真技术的核心,是构建物理实体的 1:1 虚拟模型,实现全生命周期可视化管

控,精准映射物理实体的状态[4]。人工智能与大数据技术涵盖生成式大模型、物理 AI、定制化神经网络等,重点聚焦智能决策与精准管控,保障数据的真实性和完整性,提升决策的准确性。

工业机器人与自动化装备技术包括智能焊接、自动分拣等装备,破解人工劳动强度大、精度不足的痛点,这些装备实现无缝协同,还能进一步提升生产效率。工业互联网与 5G 融合技术能实现设备、数据、人员的实时联通,保障协同高效,避免数据延迟导致的生产脱节[5]。

3 船舶设计阶段智能制造技术应用

3.1 三维生成式大模型在船型概念设计中的应用

结合国内 740TEU 纯电动船的设计实践,一是搭建船型设计数据库。整合全球 1000+艘主流船型数据,涵盖散货船、集装箱船、纯电动船等,其中包含 740TEU 纯电动船(总长 127.8 米、型宽 21.6 米、型深 10.5 米)等最新船型的几何参数、性能数据,实现同类船型参数快速调取。二是输入设计需求并微调模型。明确设计核心参数,比如船型用途(纯电动集装箱船)、吨位(万吨级)、航速(11.5 节)、箱位(740 个 20 英尺标准箱),通过大模型微调技术优化参数,微调迭代次数控制在 8 次以内,在保证参数精度的同时提升效率。

三是生成并优化船体几何模型。利用量化曲面质量评估工具,对生成的初始模型进行优化,将船体曲面光滑度误差控制在 0.5 毫米/米以内,满足后续 CFD 性能计算需求。四是虚拟仿真验证与迭代。通过虚拟仿真模拟船舶航行工况,重点验证航速、能耗、稳性等核心性能,仿真数据与实船测试数据偏差控制在 3%以内,确保仿真结果的可靠性。

3.2 数字孪生驱动的协同设计应用

参考中南鹏力及南通中远川崎的协同设计实践,一是搭建 1:1 虚拟设计模型。整合船体、机电、电池系统(纯电动船专用)等全部件数据,零部件建模精度达到 0.1 毫米,确

保模型与物理实体的高度匹配,模型包含 10 万+个零部件。二是构建跨部门协同平台。基于工业互联网搭建设计、生产、运维多部门协同平台,接入 50+个终端设备,将数据传输延迟控制在 50 毫秒以内,实现各部门实时高效沟通。

三是虚拟仿真排查设计冲突。利用虚拟仿真技术模拟管线、结构装配过程,重点排查机电管线与船体结构的干涉问题,每次仿真排查出 8-12 处潜在冲突,有效减少后续返工。四是设计模型实时同步,将优化后的设计模型实时同步至生产环节,同步更新延迟能控制在 10 分钟以内,避免生产与设计脱节。

4 船舶加工阶段智能制造技术应用

4.1 智能理料与预处理

智能理料与预处理的核心就是给每一份物料都配上专属的数字身份,提前把加工时可能出现的隐患处理掉。MES 系统成功对接上上游的三维设计模型,它就能按照船型的批次,自动生成精准的加工清单,还能给每一块钢板、每一根型材都赋予一个唯一的数字身份证。这个身份证里必须关联好材质、厚度、加工路线这些关键信息,而且在智能理料间同步完成喷码作业,保证这个标识从始至终都能追溯到。

与此同时,通过智能预处理线来开展除锈、喷涂和烘干这些作业,传感器实时监测现场的温湿度和涂层厚度,把这些数据实时上传到数字孪生看板,有效避免表面的氧化皮、油污影响加工质量。除此之外,还得按照加工的优先级,把物料分到不同的缓存区,依托 AGV 系统提前做好调度,避免后面的工位出现拥堵。

4.2 智能切割

作为构件成型的关键工序,智能切割环节主要是靠激光或者等离子切割装备,再结合 AI 算法来实现高效下料。MES 系统顺利调用三维模型的数据,通过 ROBIM 软件生成切割程序,再经过虚拟仿真验证好切割路径,能优化套料方案,减少余料的产生,适配多船型混线生产的需求。作业时,用简易吊排一次性吊装多根型材,激光视觉传感器能精准识别出板材的轮廓,它就能自动微调定位基准,补偿加工过程中出现的变形误差。

之后再启动 3 万瓦的激光切割机,把参数设置成精度 $\pm 0.5\text{mm}$,实时监测热影响区,同时利用长料推送机构自动出料,大大缩短作业时间。切割完成后,智能分拣单元按照零件的流向精准配盘,而且余料入库时,详细记录好它的规格,实现余料二次利用的全程可追溯。

4.3 边缘处理与小组立焊接

这个环节重点要盯构件的精度和结构强度,靠机器人自动化作业来实现标准化加工。AGV 会把切割好的零件转运到

打磨、坡口工作站,夹具实现精准定位,机器人就能自动清除熔渣和毛刺。针对曲面构件,采用智能等离子坡口机器人,它的作业效率比传统工艺能提升 3 倍。

之后,智能 RGV 会把预处理好的构件输送到焊接工位,气动夹紧装置精准定位,就能把精度控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内。与此同时,AI 视觉传感器准确识别焊缝的位置,它就能自动规划焊接路径、调整焊接参数,依托多台机器人协同工作,完成大尺寸构件的焊接,这样就能实现 24 小时不间断作业。除此之外,IoT 传感器会采集焊接过程中的各种数据,AI 算法实时识别出焊接缺陷,并且触发停机调整,等检测合格后,再自动上传质量报告,全程把控焊接质量。

4.4 智能物流与柔性适配

智能物流与柔性适配环节主要是衔接各个加工工序,实现物料的高效流转和多船型的快速切换。智能立体库按照物料的数字身份分类存储零件,再结合数字孪生模型实时监控库存位置,实现零件的秒级检索。同时,MES 系统科学规划 AGV 的搬运路径,实现零件从加工工位到装配工位的无缝转运,再配合车联网调度辅助车辆,进一步提升协同效率。针对新船型,MES 系统快速调用预设的加工程序,并且及时调整工艺参数,那切换周期就能缩短 80%。除此之外,数字孪生平台全面收集全流程的数据,并且根据这些数据优化工艺参数和设备调度,有效提升钢材的利用率和加工效率。

5 船舶装配阶段智能制造技术应用

5.1 装配前准备

基于上游的三维设计模型和加工环节的数据,构建船舶分段、总段以及船坞的 1:1 数字孪生模型,并且集成 2300 个 IoT 节点,实现物理场景和虚拟场景的实时同步。同时,通过数字孪生平台预演装配流程,模拟吊装和合拢的路径,再利用 AI 算法优化装配顺序,提前规避碰撞和资源冲突的问题。除此之外,MES 系统精准调度 AGV,把合格的构件转运到指定的工位,并且完成焊接机器人、龙门吊等装备的参数调试,为装配作业做好设备和物料的准备。

5.2 分段智能装配

分段装配是装配环节的基础工序,主要靠多机器人协同工作,实现标准化装配。AGV 会把加工合格的分段转运到对应的工位,激光定位系统和夹具能实现精准固定,就能把定位精度控制在 $\pm 0.5\text{mm}$,同时把这些数据上传到数字孪生平台,实现全程追溯。之后,部署移动双臂、四足以及协作机器人,AI 视觉能准确识别接口和焊缝的位置,它们就能自动规划路径,完成对接和焊接工作。同时焊接机器人会按照预设参数自适应调整操作,配合 IoT 传感器实时采集数据,AI 能实时识别出焊接缺陷,就会停机调整,以此保障焊接质量。

最后, 机器视觉扫描对比数字孪生模型, 标记出偏差大于 0.1mm 的部位, 只有等检测合格后, 更新模型状态, 才能进入总段装配环节。

5.3 总段智能吊装

总段吊装是装配环节的核心难点, 主要靠数字孪生技术实现安全精准作业。数字孪生平台模拟吊装轨迹, 结合船坞空间和龙门吊的负载优化参数, 比如参考南通中远川崎的应用实践, 能降低 80% 以上的吊装风险。之后, 要全面检测龙门吊和吊具, 传感器实时监测受力情况和设备运行状态, 并且把数据同步到数字孪生平台, 保障设备的运行安全。操作人员通过可视化界面操控龙门吊, 配合激光定位辅助调整, 实现总段的精准对接, 让合拢精度达到 0.1mm。最后, 机器人协同完成临时固定和焊接, 并且 IoT 传感器监测固定强度, 把数据上传到 MES 系统, 确保吊装后固定质量达标。

5.4 管线与附件智能装配

管线与附件装配环节的复杂度比较高, 主要靠 AI 和机器人协同工作, 提升作业效率。基于数字孪生模型, AI 算法自动规划管线路径, 并且规避干涉问题, 实现 20 公里管线的 AI 自动排布。之后, 智能切割机器人会按照规划的路径完成切割作业, 协作机器人开展对接固定工作, 配合激光传感器监测精度, 就能保障管线的对接质量。同时, 机器人会抓取阀门、仪表等附件, 视觉识别能精准定位, 就能自动紧固, 实现安装精度 $\pm 0.3\text{mm}$ 。最后, 压力、流量传感器能检测管线的密封性和通畅性, 把异常数据推送给运维人员, 并且同步更新数字孪生模型, 就能实现管线装配全流程可控。

5.5 异船同坞协同与数据迭代优化

异船同坞协同环节, 主要是适配多船型混线生产, 靠协同调度和数据迭代, 提升整体作业效率。MES 系统实时采集各个工位的数据, 通过强化学习算法优化资源配置, 实现双船坞 24 艘船舶的高效出坞。同时, 数字孪生平台会全面收集装配精度、作业效率等全流程数据, 建立完善的装配数据库, 结合学者的最新算法, 分析装配过程中的瓶颈问题, 并且及时调整装配参数和调度策略, 实现装配效率的持续提升。除此之外, 全船装配完成后, 及时更新数字孪生模型, 并且汇总相关数据推送到智能质检环节, 实现装配与质检的无缝衔接。

6 船舶质检与运维阶段智能制造技术应用

6.1 大模型驱动的船舶结构智能质检应用

结合江苏新时代造船实践, 一是传感器部署与数据采集。部署 50+ 个振动、温度传感器, 覆盖船体关键结构, 传感器自诊断准确率能达到 99.7% 以上, 就能确保采集数据可靠。二是大模型搭建与数据迁移。构建工业大模型, 通过低秩微

调技术实现跨船型数据迁移且适配率达 98.3% 以上, 就能拓宽模型应用范围。

三是缺陷识别与精准检测。基于物理内核反演技术, 识别 0.1 毫米级焊接裂纹且识别准确率达 99.6% 以上, 实现精准质检。四是报告生成与结果反馈。自动生成可视化质检报告, 生成耗时能控制在 10 分钟以内, 能提升质检效率。

6.2 AI 驱动的船舶设备预测性运维应用

参考外高桥造船实践, 一是运行数据采集与筛选。实时采集发动机、焊接机器人等设备运行数据, 每日采集量达 500GB, 时序数据分析筛选准确率能达到 98.8% 以上, 就能确保数据有效性。二是预测模型构建与预警。搭建机器学习预测模型, 提前 2-4 周预测设备潜在故障且预测准确率达 97.2% 以上, 就能减少非计划停机。三是维护工单与备件预警。自动生成维护工单, 响应时间能控制在 30 分钟以内且备件预警准确率达 99%, 能提升运维效率并减少备件积压。

7 总结

本文研究表明, 把数字孪生、大模型、物理 AI 等智能制造技术应用到船舶制造中, 其应用成效会比较显著, 也能有效解决传统模式的痛点, 实现设计高效化、加工装配无人化、质检运维精准化。而且这个方法经过船厂实践验证是可行的, 也契合行业绿色转型的需求。未来需要聚焦技术的融合适配性与标准化建设, 突破复杂海洋环境下的技术适配难题, 进一步拓宽技术应用场景。另外还要深化大模型、工业元宇宙等技术的融合应用, 助力行业实现“双碳”目标与高质量发展。

参考文献:

- [1] 张妮妮, 付贵臣, 梁志晓, 等. 智能制造技术在机械制造领域的应用研究[J]. 模具制造, 2026, 26(01): 174-176.
- [2] 张雨东, 潘福江, 余春贤. 机械设计制造及其自动化技术在智能制造领域的应用研究[J]. 当代农机, 2025, (11): 22-23.
- [3] 李伟杰, 焦腾. 智能制造技术在机械设计制造领域的应用分析[J]. 中国机械, 2025, (18): 112-115.
- [4] 时鹏. 智能制造技术在机械制造工程领域的实践应用分析[J]. 装备维修技术, 2024, (05): 60-62.
- [5] 范帅, 相茂利, 张恩亮. 数字孪生技术在智能制造领域中的应用[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(04): 86-88.

作者简介: 姓名: 宁凯, 性别: 男, 生于 1984 年 1 月 2 日, 民族: 汉, 籍贯: 河南省郑州市, 职称: 无, 学历: 本科, 研究方向: 机械智能制造