

自动化控制技术在机电工程中的改进与应用探讨

李建卿

招商局船舶工业集团青岛船厂有限公司 山东 青岛 266000

【摘要】：针对机电工程自动化控制存在信号传输滞后、多设备协同性差、故障识别能力不足、工况自适应弱四类缺陷，以船舶建造、特种设备焊接机电装备为研究对象，依托 IIOT-MAS、多模态视觉感知、AI 判别算法、无模型自适应控制完成技术优化，搭建高速边缘传输模块、多智能体协同逻辑、智能故障判别算法与动态调控程序。优化方案落地船舶焊接智能管控、特种设备闭环调控、产线故障自主处置、多工序一体化联动场景，形成一套适配重工特种设备的智能自动化控制实施体系，为机电工程智能制造升级提供完整技术参考。

【关键词】：自动化控制；机电工程；船舶智能制造；AI 视觉感知；多智能体系统

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.020

船舶建造、承压特种设备制造领域机电装备长期依赖传统自动化控制体系，焊接机器人等核心设备受船舱复杂作业环境、多层多道非线性焊接工况制约，普遍存在数据交互延迟、多机组联动失调等现实问题。新一代工业物联网与人工智能技术为机电控制系统智能化升级提供技术支撑，现有研究多侧重单一传感或单一控制算法优化，缺少面向船舶特种设备全流程成套改进方案。本文以自动化控制技术现存短板为切入点，设计分层优化改进方案，并结合船舶焊接、特种设备生产场景完成工程落地应用，探索适配重工制造场景的机电智能控制实现路径。

1 自动化控制技术适配机电工程存在现存缺陷

1.1 控制信号实时响应速度不足

船舶建造特种设备焊接机器人配套传统自动化控制单元依托有线传输链路完成传感数据交互，激光视觉采集的坡口点云、熔池图像、电弧电压电流多源信息需经过多层中转节点完成信号解析，数据传输链路存在固定时延区间。焊接作业过程中工件受热产生持续性形变，马鞍形焊缝、多层多道焊道位置偏移量处于动态变化状态，控制信号滞后会造成焊枪轨迹纠偏动作滞后于工件实时形变状态。多模态传感设备同步输出的海量原始数据未搭载轻量化预处理模块，完整数据流全部上传至主控制器完成运算，控制器算力被海量基础数据占用，焊缝跟踪偏差无法在毫秒区间完成修正，非结构化船舱焊接场景下信号延迟带来的轨迹误差会持续累积，直接增加焊缝未熔合、焊偏缺陷产生概率。

1.2 多设备协同联动匹配度偏低

船舶分段焊接工位部署焊接机器人、送丝机组、烟气处理装置、工装变位机多类机电设备，各类设备搭载独立控制程序，设备之间不存在统一时序调度基准。传统自动化控制架构未引入工业物联网多智能体协同机制，变位机完成工件角度翻转动后，焊接机器人无法同步获取变位后工件空间坐标参数，激光视觉扫描程序需要重新启动完整点云重建流程^[1]。多机组运

行参数调控逻辑相互独立，送丝速度、焊接电流、工装旋转速率无法形成联动匹配关系，厚板多层多道填充作业时工装转动速度与焊枪行走速率出现节奏错位，坡口填充量分布不均匀，工位多设备独立运行模式无法满足船舶大构件连续焊接作业的协同作业需求。

1.3 故障自主识别判断能力薄弱

船舶机电焊接装备运行过程会同步产生电弧声波、熔池成像、电流波动、保护气体流量变化多维度状态信息，传统自动化控制仅依托单一电流阈值开展故障判定，无法完成多模态信息融合分析。电弧飞溅、工件错边、送丝卡顿等异常工况对应的多源数据特征存在交叉重叠现象，单一维度监测信号难以区分不同故障类型，控制单元仅能识别超出固定阈值的极端故障，细微熔透不足、层间微气孔类早期缺陷无法被捕捉。系统内部未搭载深度学习特征提取模型，无法对现场持续采集的感知数据完成在线学习迭代，特种设备长期作业产生的部件老化带来的渐变式运行异常无法实现提前识别，故障出现后仅能触发停机报警指令，不具备故障类型自主判别功能。

1.4 复杂工况自适应调节性能差

船舶建造现场存在舱内密闭空间、高低温交替作业环境、工件装配尺寸偏差等多变工况条件，传统自动化控制程序采用固定工艺参数集完成焊接作业，程序内部未搭建动态参数补偿运算模块。中厚板焊接热输入持续改变工件轮廓形态，焊枪 TCP 位姿偏差随焊接进程持续变化，原有控制逻辑仅能依照预设轨迹完成匀速行走，无法根据激光视觉实时反馈的坡口截面轮廓调整每层焊道填充宽度^[2]。变极性等离子弧焊、脉冲 MAG 焊等多工艺切换场景下，控制单元不能自主匹配对应熔透调控参数，散热条件差异带来的熔池形态变化无法触发参数动态修正，强时变非线性焊接工况下固定控制逻辑难以维持焊缝成形稳定性。

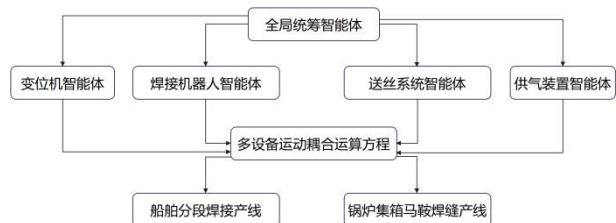
2 自动化控制技术针对机电工程实施优化改进

2.1 搭建高速实时信号传输处理模块

基于 IIOT 工业互联网架构搭建分层式数据传输链路, 在船舶焊接机器人各传感终端部署轻量化边缘计算单元, 激光视觉采集的坡口点云、熔池二维图像、电弧声电信号完成本地降维预处理, 仅保留焊缝特征关键数据向上层控制节点传输。链路采用工业 WiFi 虚拟网桥完成多传感智能体数据互通, 依托 DockerSwarm 集群压缩数据传输协议栈, 削减多层中转节点带来的传输时延。模块内置点云轻量化解析算子, 通过 t-SNE 非线性流形学习剔除传感采集冗余像素与噪声数据, 多模态感知数据流同步并行输送至主控单元, 毫秒级完成焊缝轨迹偏差数据解析运算, 实现船舱非结构化焊接场景下形变偏移数据即时传输, 模块架构可直接为各类船舶特种设备机电控制系统的数据传输改造提供标准化技术方案, 为多源感知闭环控制体系搭建提供底层硬件支撑思路。

2.2 构建多机组统一协同控制逻辑

依托 IIOT-MAS 多智能体分层模型重构船舶焊接工位全部机电设备控制底层逻辑, 设立全局统筹智能体作为时序调度核心, 将变位机、焊接机器人、送丝系统、气体供给装置封装为独立执行智能体单元, 智能体之间依靠联盟协作机制完成参数实时交互。统一空间坐标基准算法同步工装变位动作与激光视觉三维重建流程, 变位机角度调整完成后自动向焊接机器人智能体推送工件更新后的点云坐标数据, 跳过完整二次扫描流程^[3]。逻辑体系内置多设备运动耦合运算方程, 将工装旋转速率、焊枪行走速度、送丝流量纳入同一运算模型完成联动匹配, 整套协同控制逻辑可移植应用于船舶分段、锅炉集箱马鞍形焊缝等多规格特种设备焊接产线, 为多机电装备柔性联动控制系统开发提供完整理论模型与工程实现路径。见图 1。



2.3 植入 AI 故障识别自主判别算法

以焊接电弧光谱、熔池图像、电压声波多模态融合特征为基础搭建混合特征筛选框架, 框架对采集到的海量高维传感原始数据做分层处理, 融合 Fisher 滤波器与包装器联合算法完成冗余信息剔除与有效特征提取, 依托筛选后的特征数据集构建 SVM-CV 交叉验证分类模型, 依托模型内在分类逻辑实现各类焊接缺陷的精准判别。算法内部嵌入 LSFP-Tracker 专用焊缝特征跟踪器, 持续捕捉焊接进程中熔池轮廓、液面起伏等细微形貌变化特征, 同时配套稀疏字典学习机制, 实时收录气孔、未

焊透、焊偏、层间夹渣等典型故障对应的特征原子样本。船舶焊接产线持续产出的现场感知数据流会不断输入字典完成在线迭代更新，持续优化缺陷识别精度。整套 AI 判别算法直接部署于船舶焊接机电设备边缘控制单元完成本地实时运算，全程无需调取云端算力支撑即可完成微小早期缺陷识别，算法架构可适配船舶不同类型焊接特种设备配套的多源传感采集体系，能够为高端重型装备机电故障在线监测系统的算法开发提供成熟可复用模型参考，有效填补多模态信息融合故障判别技术在船舶智能制造领域落地应用的现有研究空白。

2.4 增设动态工况自适应调控程序

基于无模型自适应控制 MFAC 框架开发焊接过程动态参数补偿运算程序, 程序内置坡口截面轮廓解析模型读取激光视觉实时反馈的工件点云数据, 依据多层多道焊填充策略自主计算每层焊道填充宽度与焊枪 TCP 最优位姿^[4]。程序引入 PSO-ANFIS 预测模型解析熔池形态与热输入、散热条件之间的耦合关联, 针对船舶舱内密闭散热差、工件装配尺寸偏差、焊接热变形等时变工况实时修正电流、送丝速度、行走速度工艺参数。程序适配脉冲 MAG、变极性等离子弧焊多类船舶主流焊接工艺, 可根据全位置焊接平、仰、立焊不同工况自动切换熔透控制策略, 该自适应调控程序开发思路能够为复杂特种设备非线性时变机电控制系统优化提供完整实现方案, 丰富智能制造工况自适应控制领域的技术研究体系。

3 自动化控制技术投入机电工程开展实际运用

3.1 船舶机电焊接设备智能管控运行

整套管控体系依托 IIOT-MAS 分层架构完成船舶分段焊接机器人全流程数据统筹, 激光复合视觉智能体持续采集马鞍形坡口三维点云与熔池动态图像, 声音、电流、电压传感单元同步同步采集焊接过程多源特征数据, 边缘端搭载模型-数据双驱动质量评价模型完成实时运算。系统打通本地工控终端与远程服务器的数据传输通道, 完整留存船体厚板多层多道焊接全周期传感数据、工艺参数与焊缝成形检测信息, 形成船舶建造焊接工序完整数据溯源链条。管控体系内置多模态特征耦合判定模块, 对焊缝根部未焊透、表面气孔、层间熔合不良等缺陷输出量化概率评估结果, 管控架构适配船舱狭小密闭、多工位并行作业场景, 可为船舶智能制造车间数字化管控平台搭建提供成套落地技术范式, 完善船舶焊接数字化管控相关工程研究案例。

3.2 特种设备机电装置自动闭环调控

核电管道、锅炉集箱等特种设备焊接机电单元搭载 MFAC 无模型自适应调控程序形成完整闭环控制链路, 复合视觉传感器同步捕捉工件内外壁熔池形貌变化, t-SNE 流形学习算法对高维传感数据完成降维筛选后输入 PSO-ANFIS 熔透预测模型。调控链路根据全位置焊接平焊、立焊、仰焊工况差异动态修正

焊接电流、送丝速率与焊枪行走姿态,点云配准误差分数算法实时修正因装配偏差、焊接热变形产生的TCP位姿偏移量。闭环调控机制摒弃固定参数运行模式,依靠现场实时感知数据持续更新工艺补偿参数,整套调控方案可直接应用于承压类特种设备高精度焊接生产线,丰富特种设备机电装备自适应闭环控制的工程实践样本,为高端承压装备智能焊接系统开发提供可复用的技术实现路径。

3.3 产线机电机组故障在线自主处置

船舶焊接产线各机电执行单元内置AI多模态故障判别算法,电弧光谱、熔池图像、气流传感采集的多维特征同步输入SVM-CV分类模型完成故障类型判定,稀疏字典学习模块持续收录现场新增异常特征原子,不断扩充故障特征识别数据库。边缘计算单元独立完成故障判定运算,判定结果同步下发至机器人、送丝机、焊机底层控制模块,针对送丝卡顿、焊偏、保护气流量异常等不同故障匹配差异化参数修正指令,轻微工况异常无需中断设备运行即可完成参数动态补偿^[5]。故障原始传感数据、判别特征与处置参数同步上传至集群管理平台,形成故障处置数据样本库,该在线处置模式能够为重工类连续生产产线机电故障智能处置系统研发提供算法与架构参考,充实工业机电装备故障自愈控制相关研究实例。

参考文献:

- [1] 田亚丽,陈建勋,王雷,等.面向数字化制造的船舶生产线群控方法[J].制造业自动化,2024,46(10):136-141+195.
- [2] 陈华斌,肖润泉,陈善本.焊接机器人视觉感知及智能化焊接关键技术研究进展[J].机械制造文摘(焊接分册),2025,(3):5-12+30.
- [3] 刘季杭,何开平,刘亚,等.基于数据驱动的船舶中组立智能焊接技术应用研究[J].电焊机,2024,54(10):99-107.
- [4] 张泽鹏,茅云生,傅何琪,等.基于混沌麻雀算法的船用焊接机器人轨迹优化[J].船舶工程,2022,44(5):134-140.
- [5] 马佳玮,孙菁伯,迟关心,等.基于立体视觉和YOLO深度学习框架的焊缝识别与机器人路径规划算法[J].焊接学报,2024,45(11):45-49.

3.4 多工序机电系统一体化智能联动

船舶分段制造下料、坡口加工、机器人焊接、焊缝打磨全工序机电设备封装为独立执行智能体,DockerSwarm集群搭建虚拟网桥完成跨工序智能体高速数据交互,全局统筹智能体统一管控各工序设备时序与空间坐标基准。坡口加工设备输出工件三维点云数据直接同步至焊接机器人视觉系统,跳过重复扫描重建流程,焊缝打磨机器人依托焊接工序留存的焊缝轨迹点云自主生成打磨路径,非均匀有理B样条曲线完成曲面轨迹规划,多工序设备运动参数通过联盟协作机制同步匹配。一体化联动架构消除单工序设备独立运行带来的数据断层,该联动实现方式拓展多工序机电装备协同控制理论的工程应用边界,为大型构件全流程智能制造产线搭建提供完整技术参考模型。

5 结语

船舶与特种设备制造领域机电自动化控制体系的智能化改造需依托感知、传输、协同、调控多维度技术协同推进,多智能体分层架构与多模态AI识别算法可有效化解传统控制模式下的工况适配难题。边缘端轻量化数据处理、无模型自适应调控程序能够适配船舱复杂多变的焊接作业环境,打通多工序机电设备的数据互通壁垒。各类落地应用场景验证整套优化方案具备工程复用价值,相关技术框架可为后续重型装备机电控制系统数字化迭代提供可行思路,也为智能制造背景下特种设备机电装备的技术革新拓展研究方向。