

求,冲破国外技术垄断,提升我国船舶工业在全世界范围内的核心竞争实力,助力我国从造船大国向造船强国转变。当前全球造船业竞争愈发激烈,智能焊接技术成熟使用下,可以使得我国船舶制造企业形成高端船舶建造领域差异化优势,增加国际订单的接收能力,保持住我国在全球造船业的领先地位。

## 4 智能化建造模式下船舶焊接质量控制与工艺优化策略

### 4.1 构建智能化焊接质量检测体系

依靠机器视觉、超声波、射线检测等智能化技术来创建起线上检测、线下复查的全过程质量检测系统。在线检测阶段,在焊接机器人上安装视觉传感器和超声波传感器,实时采集焊缝成形、内部缺陷等数据,用AI算法快速识别气孔、裂纹、未焊透等缺陷,反馈到控制系统中,触发参数调整或者停机预警。离线复核阶段用智能化射线检测设备、三维扫描技术对关键焊缝做全面检测,生成数字化检测报告,实现缺陷定位、分级、追溯。同时创建检测数据共享平台,整合全流程检测数据,给后续工艺改进给予数据支撑。AI算法依靠不断学习历史缺陷数据来改善识别模型,从而加强缺陷的检出准确率,三维扫描技术可以准确地还原焊缝的形状,给缺陷分析及工艺改进赋予直观的依据。

### 4.2 优化智能化焊接工艺参数体系

依靠大数据以及人工智能技术来创建焊接工艺参数智能优化模型。先整合历史焊接数据、材料性能数据、结构参数数据,建立标准化的工艺数据库,包括不同钢材、不同焊缝类型对应的最佳参数范围。其次,利用机器学习算法分析参数与焊接质量、效率之间的关系,结合实时焊接过程的数据,动态地调整焊接电流、电压、焊接速度、保护气体流量等核心参数,从而达到“一缝一参”的精确控制。对复杂结构的焊接,事先采用仿真模拟的方法来优化焊接的路线和参数,减少现场试焊次数,削减试错成本,提升工艺的匹配度。工艺数据库要经常增添新的焊接案例及材料信息,机器学习算法随着应用的效果而持续进行优化,保证参数调整的合理性、适用性,满足不同船型、不同工况下的焊接需求。

### 4.3 搭建焊接过程智能化监控与调控平台

依靠物联网技术创建焊接过程智能监控与调控平台,对焊接设备、工艺参数、环境状况实施全方位监测。在焊接工作站上布置传感器,对设备运行状况、焊接参数变化、车间温度湿度等实施数据采集,然后上传至云平台集中分析。平台具有数据可视化、异常预警、智能调度等功能,可以及时发现设备故障、参数偏离等问题,通过远程控制或者自动调节功能来保证焊接过程的稳定。并行开展多设备协同监测与调度,安排合理的工作资源分配,防止工序出现冲突的情

况,进而使整体的生产效率得到提升。另外,采用数字孪生技术创建焊接过程的虚拟仿真模型,从而达到物理场景和虚拟场景之间同步反映,在问题发生前就采取干预措施。云平台可以实现多终端访问,方便管理人员随时了解生产情况,数字孪生模型可以给工艺优化提供模拟测试环境,减少现场调试的风险。

### 4.4 强化智能化焊接人才培养与团队建设

智能化焊接技术的落地应用,需要有专业的人员来支持。一方面建立“技术研发+实操应用+运维管理”的复合型人才培养体系,同高校、职业院校合作开设智能化焊接相关专业,有针对性地培养掌握焊接工艺、人工智能、设备运维等知识的专业人才。另一方面加强现有员工的技能培训,开展智能化焊接设备操作、控制系统调试、数据分析等专项培训,提高员工的智能化技术应用能力。建立人才激励机制,调动技术人员进行技术创新和工艺改进的积极性,组建专业的智能焊接技术团队,对工艺优化、设备保养、问题排查等负责,保证焊接质量控制和工艺优化的人事支持。邀请行业专家开展专题讲座,建立校企实践基地,提高人才的实操能力,用绩效考核和成果奖励来激发员工的创新积极性,建设高素质人才队伍。

## 5 结语

综上所述,智能化建造模式给船舶焊接质量控制及工艺改善赋予了新的途径,是解决传统焊接难题,促使船舶工业转型升级的关键手段。本文从智能化焊接技术的应用现状和核心意义出发,分别从检测系统、参数优化、过程监控、人员培养四个方面来提出一些改进措施,为船舶制造业焊接工序的智能化改造提供实践经验参考。由于船舶焊接技术伴随着人工智能、物联网等新技术的发展也朝着更精准、更高效率、更环保的方向发展。船企要主动拥抱技术变革,加快智能设备引进和技术融合,持续改善焊接质量控制及工艺体系,不断加强核心竞争力,为我国的船舶工业高质量发展注入强劲动力。

### 参考文献

- [1] 金富日. 超声无损检测技术及其在船舶焊接中的应用研究[J]. 中国修船, 2024, 37(S1): 28-31.
- [2] 许议, 冯正甫, 李永恒. 船舶焊接生产技术与质量改进对策研究[J]. 中国机械, 2024, (29): 90-93.
- [3] 曾令庭. 广西内河船舶焊接质量分析及整改措施的研究[J]. 珠江水运, 2024, (12): 14-16.
- [4] 朱叶铭. 船舶焊接质量无损检测存在的问题及对策[J]. 船舶物资与市场, 2024, 32(04): 111-113.
- [5] 徐志华. 无损检测在内河船舶焊接中的实际运用[J]. 船舶物资与市场, 2023, 31(12): 41-43.

# Technical Analysis on Stability Improvement of Hydraulic Systems for Steel Hoisting Machinery

Mingming Sun

Maintenance and Overhaul Center, Chengde Branch of HBIS Group Co., Ltd., Chengde, Hebei, 067000, China

## Abstract

As the core equipment for metallurgical production and heavy material handling, steel hoisting machinery relies on the stability of its hydraulic systems to ensure equipment operation efficiency and production safety. Aiming at the problems such as pressure fluctuation, actuator instability and oil contamination that are prone to occur in hydraulic systems under complex working conditions like heavy load, impact and high temperature, this paper conducts technical analysis from four dimensions: hydraulic component performance optimization, oil contamination control, system dynamic characteristic regulation and intelligent monitoring and early warning. By introducing proportional servo valve control technology, adaptive filtering algorithm, online oil purification device and digital twin monitoring system, a multi-dimensional stability improvement system is established. Industrial test verification shows that the optimized hydraulic system achieves a 12.7% reduction in pressure fluctuation rate, an 18.3% improvement in response speed and a 42.6% extension in mean time between failures, which provides theoretical support and engineering practice scheme for the efficient and stable operation of hydraulic systems of steel hoisting machinery.

## Keywords

Steel Hoisting Machinery; Hydraulic System; Stability Improvement; Intelligent Monitoring; Oil Purification

## 钢铁起重机械液压系统稳定性提升技术分析

孙明明

河钢股份有限公司承德分公司维护检修中心, 中国·河北承德 067000

## 摘要

钢铁起重机械作为冶金生产与重型物料转运的核心装备, 其液压系统的稳定性直接决定设备运行效率与生产安全。针对液压系统在重载、冲击、高温等复杂工况下易出现的压力波动、执行元件失稳、油液污染等问题, 本文从液压元件性能优化、油液污染控制、系统动态特性调控及智能监测预警四个维度展开技术分析。通过引入比例伺服阀控制技术、自适应滤波算法、在线油液净化装置及数字孪生监测系统, 构建多维度稳定性提升体系。经工业试验验证, 优化后的液压系统压力波动率降低12.7%, 响应速度提升18.3%, 平均无故障时间延长42.6%, 为钢铁起重机械液压系统的高效稳定运行提供了理论支撑与工程实践方案。

## 关键词

钢铁起重机械; 液压系统; 稳定性提升; 智能监测; 油液净化

## 1 引言

在钢铁工业智能化转型背景下, 起重机械承担着钢水包转运、原料装卸、成品吊装等关键工序的作业任务, 其运行稳定性直接影响冶金生产的连续性与安全性。液压系统作为起重机械的动力核心, 通过液体压力能传递实现重载升降、变幅回转等动作, 但在高温、粉尘、冲击载荷等恶劣工况下, 易出现压力脉动、阀口卡滞、油液劣化等问题, 导致系统响应滞后、定位精度下降, 甚至引发安全事故。据中国钢铁工业协会统计, 2023年全国钢铁企业因液压系统故障

导致的起重机械停机事件占设备总故障的37.2%, 平均单次停机损失超20万元。

当前国内外学者针对液压系统稳定性的研究主要集中在元件级参数优化与系统级控制算法改进。德国力士乐公司开发的负载敏感液压系统通过动态调节泵输出流量降低能耗, 但在重载冲击下仍存在压力超调问题; 国内高校提出的滑模变结构控制算法虽能提升系统抗干扰能力, 但存在高频抖振缺陷。现有研究多聚焦单一技术维度, 缺乏对液压系统“元件-介质-控制-监测”全链条的协同优化方案。

本文基于钢铁起重机械的典型工况特征, 从液压元件性能强化、油液污染主动防控、动态响应特性调控及智能运维体系构建四个层面, 系统性提出稳定性提升技术路径, 旨在为重型装备液压系统的可靠性升级提供理论依据与技术

【作者简介】孙明明(1986-), 男, 中国河北承德人, 本科, 机械工程师, 从事钢铁冶金机械制造研究。

范式<sup>[1]</sup>。

## 2 钢铁起重机械液压系统的稳定性需求与失效机理

### 2.1 典型工况下的稳定性需求

钢铁起重机械的作业场景具有“重载、频繁启停、多向冲击、高温辐射”的显著特征。以160t冶金铸造起重机为例，其主起升机构需在1200℃钢水包辐射热环境下，完成1.5m/s的平稳升降动作，要求液压系统压力波动率 $\leq 5\%$ ，位置控制精度 $\leq \pm 2\text{mm}$ ；回转机构在承受偏载冲击时，需保持角速度波动 $\leq 3\%$ ，避免钢水泼洒风险。此外，设备年作业时超7000小时，对液压系统的耐久性与抗疲劳性提出严苛要求。

### 2.2 主要失效机理分析

**压力脉动与冲击响应失配：**起重机械在起升/制动瞬间，负载突变会引发液压管路中的压力冲击波，当冲击波频率与管路固有频率耦合时，会产生共振现象，导致管接头松动、密封件损坏。某钢厂实测数据显示，起升机构制动时系统压力瞬时峰值可达稳态压力的2.3倍，加速液压元件疲劳损伤。

**油液污染引发的元件劣化：**钢铁生产环境中的氧化铁粉尘、焊渣颗粒极易侵入液压系统，当油液污染度达到NAS 8级时，伺服阀阀芯磨损率会提升4-6倍，导致阀口流量特性漂移，系统响应滞后时间从150ms增至480ms。同时，高温环境下油液氧化速率加快，酸值每升高0.5mgKOH/g，滤芯堵塞风险增加30%。

**执行元件动态特性衰减：**液压缸活塞与缸筒的磨损会导致内泄漏量增大，当泄漏量超过额定流量的5%时，系统闭环控制的稳定性裕度显著下降。某起重机变幅液压缸在服役3年后，内泄漏量达8.2L/min，导致变幅动作出现明显爬行现象。

**控制算法鲁棒性不足：**传统PID控制在面对变负载、参数时变等非线性工况时，易出现超调量过大、调节时间过长等问题。在钢水包偏载工况下，常规PID控制的压力超调量可达18%，而自适应控制算法可将超调量抑制在5%以内。

## 3 液压系统稳定性提升关键技术

### 3.1 液压元件性能优化技术

**比例伺服阀的抗污染设计：**针对钢铁行业高粉尘特点，开发带前置过滤的比例伺服阀，将阀芯与阀套的配合间隙从传统的 $5\mu\text{m}$ 优化至 $8\mu\text{m}$ ，同时在阀口增设 $10\mu\text{m}$ 烧结金属过滤层，使元件抗污染能力提升60%。通过计算流体力学(CFD)仿真优化阀口流道形状，将压力损失降低12%，流量增益线性度提高至98.5%。

**高压大流量柱塞泵的减振降噪：**采用斜盘倾角自适应调节技术，使柱塞泵在10-100%流量区间内保持均匀流量输出，压力脉动幅值从1.2MPa降至0.3MPa。在泵体与安装基座之间设置橡胶金属复合减振垫，通过模态分析优化垫的刚度与

阻尼特性，使泵组振动加速度从 $12\text{m/s}^2$ 降至 $3.5\text{m/s}^2$ 。

**液压缸的密封与耐磨强化：**开发聚四氟乙烯-青铜复合材料支撑环，将液压缸的耐磨寿命提升2倍；采用格来圈+斯特封组合密封结构，在16MPa工作压力下实现零泄漏。通过有限元分析优化缸筒壁厚分布，将缸筒的耐压等级从25MPa提升至31.5MPa，满足重载冲击工况需求<sup>[2]</sup>。

### 3.2 油液污染主动防控技术

**分级过滤与在线净化系统：**构建“吸油过滤-高压过滤-回油过滤-旁路净化”四级过滤体系，吸油口采用 $100\mu\text{m}$ 折叠滤芯，高压管路设置 $5\mu\text{m}$ 压力过滤器，回油管路配置 $3\mu\text{m}$ 磁性过滤器，同时增设旁路式静电净油机，实现油液污染度稳定控制在NAS 6级以内。

**油液状态实时监测技术：**集成温度、压力、粘度、污染度四参数传感器，通过物联网平台实时传输油液状态数据。当监测到油液粘度变化率超过10%或污染度升至NAS 7级时，系统自动触发预警并启动旁路净化装置，确保油液品质处于最优状态。

**热平衡调控技术：**采用水冷式油冷却器与智能温控阀联动控制，将液压油工作温度稳定在40-55℃区间。通过计算油液温度与粘度的关联模型，建立温度补偿算法，使系统在不同温度下保持一致的动态响应特性。

### 3.3 系统动态特性调控技术

**自适应滤波与压力脉动抑制：**在液压管路中增设亥姆霍兹共振器，通过仿真计算确定共振器的容积与管径参数，对100-500Hz频段的压力脉动衰减率可达40dB以上。同时引入自适应陷波滤波算法，实时识别管路共振频率并动态调整滤波参数，有效抑制压力波动。

**负载敏感与能量回收控制：**采用负载敏感变量泵与比例多路阀组成的节能回路，根据执行元件的负载需求动态调节泵输出流量，使系统压力始终略高于负载压力1-2MPa，既减少溢流损失，又避免压力冲击。在下降工况下，通过液控单向阀与蓄能器组合实现势能回收，可降低系统能耗15-20%。

**非线性补偿与鲁棒控制：**建立包含液压油压缩性、管路弹性、元件摩擦等因素的系统非线性模型，基于模型预测控制(MPC)算法设计控制器，对负载扰动与参数变化具有强鲁棒性。工业试验表明，该控制策略可使起升机构的位置跟踪误差从 $\pm 5\text{mm}$ 缩小至 $\pm 1.2\text{mm}$ 。

### 3.4 智能监测与预警技术

**数字孪生系统构建：**建立液压系统的数字孪生模型，通过实时采集的压力、流量、温度等数据驱动模型运行，实现物理系统与虚拟模型的精准映射。当模型预测到某元件即将发生故障时，提前72小时发出预警，为计划性维护提供依据。

**故障诊断与寿命预测：**采用振动频谱分析与油液铁谱分析相结合的方法，对液压泵、马达等旋转部件进行故障诊断。基于Weibull分布模型建立元件寿命预测算法，准确率