

工程机械电气控制系统的智能化改造与应用研究

王嘉瑞, 王 珅, 刘旭鹏

(烟台港股份有限公司联通国际件杂货码头分公司, 山东 烟台 264000)

摘要 工程机械是工程项目施工的重要基础设施, 其电气控制系统作为核心部件, 需要满足功能性需求。本文以工程机械中的起重机为例, 探讨起重机电气控制系统智能化改造的技术路径以及应用措施, 以期提升工程机械运维以及控制水平提供借鉴。在工程机械电气控制系统智能化改造中, 采用传感器扩展、控制器升级、通信架构优化、人机界面重构等相关措施, 构建集状态感知、逻辑控制、数据交互于一体的新型电气控制系统, 满足工程机械设备的运行参数实时采集、故障代码自动记录、远程诊断支持等多样化功能, 旨在对提高工程机械的稳定性、可维护性以及智能化水平有所裨益。

关键词 起重机; 电气控制系统; 智能化改造; 传感器融合

中图分类号: TU85; TU17

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.06.008

0 引言

在现代社会工业自动化以及物联网技术高速发展的背景下, 工程机械逐步向数字化、网络化的方向发展。起重机作为工程机械中的重要类型之一, 具备高危作业特性, 而其电气控制系统关系到起重机的操作安全以及作业精度。目前新制造的工程机械普遍都集成智能功能, 而大量在役设备依然采用继电器或早期 PLC 控制架构, 无法满足工程机械的状态监控、协同调度、预防性维护等方面的需求。基于此, 对于现役起重机展开电气控制系统的智能化改造, 能够延长设备的使用寿命, 满足智慧工地管理需求。

1 工程机械电气控制系统智能化改造的必要性分析

1.1 设备服役周期延长需求

目前很多现役起重机运行时间在 15 年以上, 有些起重机设备主体结构完好、使用频率较低或经济性方面考虑依然处于服役状态。然而, 现役起重机的电气控制系统采用早期继电器逻辑或第一代 PLC, 其时间继电器、接触器、模拟量模块等元器件已经逐步停产。一旦发生故障需要更换, 则没有可替代配件。即使在更换时寻找到可替代性配件, 也会存在接口不兼容、性能参数偏差等情况, 造成维修周期延长以及故障率升高。为保证现役起重机的功能正常, 需要对电气控制系统模块化进行更新, 其采用当前主流工业自动化

产品替代老旧部件, 在不改变起重机机械结构与液压架构基础上恢复电气系统的可靠性与可维护性^[1]。

1.2 智慧工地管理要求

随着工程领域发展加快, 很多基础设施项目快速进行智慧工地建设, 其需要将施工机械接入统一管理平台, 实现设备定位、作业状态监控、工时自动统计以及调度协同。然而, 目前现役起重机电气系统只满足基本动作控制功能, 其内部未配置通信模块导致无法获取设备的位置、负载、运行时间等结构化数据^[2]。因此, 需要对现役起重机设备原有电气控制系统进行智能化改造, 其内部集成通信单元开放关键运行参数, 使其与 BIM 平台、物联网中台或项目管理系统对接以实现工程机械的数字化改造。

1.3 安全监管标准提升

国家市场监督管理总局修订发布的《起重机械安全技术规程》(TSG 51-2023) 及《起重机械定期检验规则》(TSG Q7015-2016) 等规范, 对起重设备的安全保护功能提出要求, 主要包含下述几项内容: 起重量显示与超载自动切断、起升高度双重限位、回转角度区域限制、整机倾斜状态监测等。而有些早期投入运营的起重机只配备机械式限位开关或简易报警装置, 无法满足起重机动作阈值判断以及自动干预需求。基于此, 进行起重机电气控制系统的智能化改造, 能够将设备内各种类型的传感器信号统一接入控制逻辑, 执行现行法规要求重构安全连锁程序以提高合规性^[3]。

作者简介: 王嘉瑞 (1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 工程技术。

2 智能化改造总体方案设计

2.1 改造对象选择

本文选择某 QUY80 型履带式起重机作为改造试验对象,其运行时间 12 年,主电路完好、液压系统稳定。然而,电气控制系统采用继电器逻辑+简易 PLC 组合,无 CAN 总线、无远程通讯能力。该设备的主要工作场景为风电塔筒吊装,这对起重设备的定位精度及安全联锁方面提出更高要求。在本次改造中针对起重设备的结构特性以及运行需求,其改造内容如下:电气控制系统本体需要保留原主电机、接触器、液压阀组等执行机构,只需要替代起重机中控制层硬件与软件逻辑。本次改造需要解决下述问题:一是实现起重机全部限位开关、重量传感器、角度编码器的信号接入;二是建立统一控制核心取代分散继电器;三是提供对外数据接口器,能够支持与项目管理平台的完整对接。本次改造兼顾设备实用性与场景适配性,在保留核心执行机构降低改造成本的同时,聚焦控制层智能化升级。通过信号全接入、控制核心集成及数据接口搭建,可大幅提升设备定位精度与安全防护能力,满足风电吊装高精度需求,同时实现设备运行数据实时上传。

2.2 改造原则

本次起重机电气控制系统智能化改造遵循兼容、可靠、可扩展的原则。兼容性原则是指改造完成的系统必须适配现有电压等级、传感器类型以及执行元件驱动方式;可靠性要求所有新增元器件满足 IP65 防护等级,并且电气控制系统具备看门狗与断电记忆功能,关键安全回路保留硬接线冗余;可扩展性说明在改造时需要预留 I/O 通道不少于 20%,通信协议支持 Modbus TCP、CANopen 及 4G DTU 输入。在本次改造中采取分阶段断电改造方式,先并行安装新系统,在调试验证后进行切换以免影响工期。上述改造过程中线路敷设沿原桥架走线,其接线端子统一编号、图纸同步更新以便后续能够顺利运营维护。

3 工程机械电气控制系统的智能化改造与应用

3.1 传感器系统扩展

本次改造以起重机原起重量限制器、起升高度限位、变幅角度限位控制为基础,在改造中新增多种类型的传感单元^[4]。起重机起升机构安装分辨率 0.1° 的绝对值编码器,其主要作用是实时计算吊钩的空间坐标;起重机回转平台安装量程 ±15°、精度 ±0.1° 的双轴倾角传感器,其能够监测起重机的水平状态;起重机主臂根部贴装应变片,并配合温度补偿模块了解结构应力变化情况。起重机变幅油缸活塞杆端集成磁致

伸缩位移传感器,其行程 0~8 m、重复精度 ±0.5 m,能够精准完成起重机臂长的实时解算。上述各项数据采用数字量输入方式,利用光电隔离模块接入控制平台,模拟信号经过信号调理板转换为 0~10 V 标准电压后送入控制器。传感器供电由独立 DC24V 电源模块提供,能够防止和动力回路造成干扰。上述改造中所有线缆选用屏蔽双绞线,屏蔽层单端接地以减少电磁噪声影响。此外,在改造完成后信号采样频率设定为 50 Hz,能够满足起重机的动作响应需求。

3.2 控制核心升级

本次起重机改造中将原继电器控制柜拆除,将其更换为工业级可编程控制器 PLC,CPU 模块支持浮点运算与 PID 调节,内置实时时钟与非易失存储器。I/O 模块配置包含 16 路数字量输入、16 路数字量输出、8 路模拟量输入、4 路高速计数通道,其安全相关逻辑采用独立安全继电器回路,并且和 PLC 控制系统输出联动控制主接触器线圈,进而形成硬件-软件的双重保护模式。而在本次改造中的 PLC 程序采用结构化文本 ST 编写,按照功能将其划分为起升控制、回转控制、变幅控制、安全联锁、数据记录等 5 个模块。每个动作指令均包含前置条件检查,如起升前需确认支腿完全伸出、风速低于 12 m/s。程序内置故障代码表,共定义 42 种异常状态,如“编码器通信中断”“重量信号超限”“倾角偏差过大”等,触发时自动锁停相关动作并记录时间戳。控制器安装于 IP54 防护箱内,箱体加装散热风扇与温湿度传感器,环境温度超过 60 °C 时自动降频运行。电源输入端配置浪涌保护器与 EMC 滤波器,确保在工地电网波动下稳定工作。

3.3 通信与数据传输

本次起重机电气控制系统智能化改造中,其控制系统采用双通信通道模式,主通道采用 CAN 总线、波特率 250 kbps,并且连接重量传感器、角度编码器以及驾驶室显示终端以实现毫米级控制指令交互。而辅通道则为工业以太网接口,能够支持 Modbus TCP 协议,其主要作用是进行上位机和项目管理平台的稳定通信。同时,在本次智能化系统内集成 4G DTU 模块,插入物联网 SIM 卡,通过 MQTT 协议将设备位置、运行状态、故障代码、累计工时等数据传输到云平台,并且数据传输间隔时间为 5 min、10 min 或 30 min。本地预留 RS485 接口机直接接入塔机群防碰撞系统。上述所有控制系统通信数据利用 JSON 格式封装,其字段中包含设备 ID、时间戳、经度、纬度、主钩高度、负载率、回转角度、当前工况等。数据传输时加密采用 AES-128 算法,能够防止未授权访问导致数据丢失或篡改。通

通过本次改造现场试验检测,在无遮挡环境下4G信号强度超过-95 dBm,数据上传成功率达98.7%;起重机作业现场钢结构密集区域采用调整天线位置方式,保证通信不受影响。此外,本次系统改造中通信日志自动存储与SD卡,其最大支持32GB以实现循环覆盖。

3.4 人机交互界面优化

本次改造中起重机驾驶室原为机械式仪表,将其替换为分辨率1280×800、亮度500 cd/m²的10.1英寸工业触摸屏,能够支持戴手套操作。该控制屏界面使用分级菜单设计方式,其主画面显示实时负载率、幅度、起升高度、回转角度、风速、整机倾角等参数,并且数值以大字字体呈现,背景色随负载发生变化,即:绿色<80%、黄色80%~90%、红色>90%。操作系统次级页面中,包含历史故障查询、系统设置、保养提醒、操作帮助等四个类型。而起重机故障记录则需要结合时间倒序排列,其每条故障记录包含故障代码发生时间、持续时长以及复位状态^[5]。保养提醒基于累计运行小时自动触发,如每500 h提示更换液压油。操作帮助嵌入图文说明,如“如何执行空载校准”。屏幕下方固定显示急停、回零、灯光三个物理按键图标,对应实体按钮状态实时同步。界面刷新率为1 Hz,避免频繁闪烁干扰视线。屏幕外壳通过ISO 13766振动测试,可在-20℃至+60℃环境下正常工作。所有图形元素采用矢量格式,缩放不失真。

4 工程机械电气控制系统智能化功能实现

本次起重机电气控制系统进行智能化改造后,能够实现起重机的多项智能化改变。起重机运行中PLC实时采集各传感器数据,其按照系统预设逻辑进行动作控制,如负载率达90%时自动限制起升速度,倾角超限时禁止回转。上述操作指令和系统响应部记录在内部存储器内,进而形成不可篡改的操作日志。如果系统运行中智能系统检测存在异常信号,则立即触发对应故障代码,锁停危险操作,并在驾驶室触摸屏内弹出相关告警信息。起重机设备位置和状态数据,利用4G网络传输到云端管理平台,管理人员能够远程查看设备在线状态、作业轨迹以及近期故障。此外,本次系统改造中预留API接口,以便后续升级改造中接入BIM施工管理系统或无人协同作业平台。

5 工程机械电气控制系统智能化改造后应用效果分析

本文选择某风电场一台QUY80履带起重机为例,其改造后连续运行10个月,累计作业时间620 h。该设备运行过程中系统稳定操作日志1.2万余条,触发

预警17次,其主要集中在风速超过设定限值或负载率达90%以上时,并且所有预警均和现场施工情况相符,这说明智能控制系统未存在误报、漏报或控制系统死机现象。而在起重设备发生异常情况后,PLC立即锁定相关动作,并形成明确的故障代码。维修人员利用手机APP远程调取起重机故障信息前后5 min历史数据曲线,使起重机故障平均诊断时间从原2 h缩短到15 min以内。

同时,本次智能化改造利用4G模块将信息传输到云平台内。通过数据统计得出起重设备月均在线率达92%,有效数据完整率达96.5%,通信稳定性满足日常管理需求。起重机操作司机反映新装触摸屏界面布局合理,企业运行中负载率、幅度、高度等关键参数一目了然,并且触摸屏颜色提示直观,司机操作逻辑和原操作习惯一致。此外,通过对起重机液压系统启停次数进行统计,发现在相同作业量情况下,智能化改造后设备启停次数较改造前减少12%,这说明控制指令具备平稳、连贯特性。在本项目改造的末期,由特检院出具第三方检验报告,确认该起重机各项安全保护功能均满足《起重机械定期检验规则》(TSG Q7015-2016)的要求,顺利通过年度检验。

6 结束语

工程机械电气控制系统智能化改造能够实现系统功能性提升,其采用传感器扩展、控制核心升级、通讯架构重构、人机界面优化等方式建设智能控制平台。本文选择某履带式起重机作为试验案例,在电气控制系统智能化改造中保留原有机械与液压系统,对电气控制系统进行现代化更新,能够实现投资成本可控、施工周期缩短、设备智能化水平提高,延长设备使用寿命。

参考文献:

- [1] 余东.PLC技术在提升电气控制系统改造中的应用[J].电子技术与软件工程,2020(16):113-114.
- [2] 左光廷,林杉,任铂.机电设备的电气自动化改造与维护分析[J].集成电路应用,2022,39(06):192-193.
- [3] 雒双平.电气控制系统现代化改造对设备性能提升的影响[J].产品可靠性报告,2024(03):142-143.
- [4] 魏斌.基于PLC对喷泉及LED灯电气控制系统改造[J].电脑知识与技术,2021,17(05):237-239.
- [5] 郭晓永.压缩机电气控制系统的变频改造及节能效益分析[J].机械管理开发,2023,38(05):180-181,184.