基于安全监控系统升级的桥式起重机双起升机构同步偏差治理研究

郭飞武　徐正林
大唐石泉水力发电厂 陕西 安康 725200

【摘　要】：结合大唐石泉水力发电厂 2 号厂房桥式起重机电气系统整体技术改造项目，针对桥机双起升机构升降运行不同步、安全监测体系不完善、电气控制稳定性不足等设备问题，开展专项科技研发与工程应用研究。本次项目研发围绕安全监控数据采集体系搭建、双起升异步故障机理溯源、PLC 主从闭环同步控制优化三项核心内容开展技术攻关。研究严格依据 GB/T 28264-2017、DL/T 1070-2014 等行业标准，依托空载、50%额定载荷、额定满载三组现场工况试验，完成缺陷成因量化分析，设计闭环同步调控方案并完成电气系统升级改造。改造后经现场 72h 连续带载实测，双起升机构空载升降同步偏差稳定控制在±2mm 以内、额定载荷工况偏差≤±3mm，满足双钩同步误差小于 20mm 的规范要求；安全监控系统数据采集响应时延≤200ms，数据采样准确率达 99.7%，设备合规性与运行可靠性显著提升，可保障厂区 2×45MW 水轮发电机组转子精密吊装作业安全，可为水电厂同类起重设备技术改造与研发工作提供工程参考。

【关键词】：桥式起重机；安全监控系统；双起升机构；PLC 闭环控制；故障治理

DOI:10.12417/2705-0998.26.14.002

1 引言

大唐石泉水力发电厂 2 号厂房桥式起重机是机组检修的核心特种设备，额定起重量 2×100t，主要承担发电机组转子吊装作业任务，长期负责两台 45MW 水轮发电机组转子吊装、重型设备检修吊运工作。该设备长期运行于厂房潮湿、电磁干扰强、频繁重载启停的环境中，按照 DL/T 1070-2014《水电厂桥式起重机技术条件》要求每半年开展一次预防性检查，近三年设备缺陷统计显示：双主钩起升动作不同步故障年均上报 6 次，空载升降最大偏差可达 12mm，额定载荷工况下偏差最高达到 18mm，极易引发吊装转子受力偏移；缺少全过程在线运行安全监测，不符合 GB/T 28264 起重设备强制监控要求[1]；原有电气控制系统元件老化，近三年发生电气回路故障 11 次，控制参数匹配度较差。其中双起升机构升降偏差属于重大设备安全隐患。

为彻底消除设备运行隐患，提升桥机运行智能化管控水平，电厂依托本次桥机电气整体改造项目立项开展科技攻关，确定三项核心研发内容：搭建标准化安全监控数据采集体系、系统研究双起升机构不同步故障机理、研发 PLC 主从闭环同步控制并优化电气控制系统。电气系统整体采用上位工业控制计算机、PLC 与基础变频传动组成的三级控制系统，由 PLC 实现整车运行时序逻辑控制，变频传动驱动各机构协调动作，从系统架构层面为缺陷闭环治理提供可靠保障，也为桥机整体电气系统更换与安全监控系统升级提供了工程载体。

2 项目三项核心研发内容研究

2.1 桥机安全监控系统数据采集体系研发

本项研发严格遵循 GB/T 28264-2017《起重机械安全监控管理系统》规范的全部检查项目要求[1]，结合 2 号厂房桥机现场密闭潮湿、电磁干扰大的运行工况，完成起重安全监控平台整体设计、硬件布设与通信通道搭建。监控系统按规范要求由信息采集单元、信息处理单元、控制输出单元、信息存储单元、信息显示单元、信息输出接口单元与远程传输单元组成，并集成电子围栏与视频监控功能，形成以吊钩为中心的吊装危险区域投影警戒，人员闯入可触发声光警示与视频抓拍，实现监测预警一体化管控。

依据国标强制检查条目，系统需完成起升高度、起吊载荷、运行行程、机构运行时长、故障报警 6 项核心数据采集。研发过程中，配套加装精度 0.1mm 的起升高度编码器、精度 0.5 级的起重载荷传感器、行程采集单元，建立桥机关键参数高频采集机制，设置数据采集周期为 100ms，编码器信号传输时延控制在≤200ms，搭建的工业级抗干扰实时传输链路已通过电磁干扰测试，在强电磁环境下数据丢包率＜0.3%。系统采样周期不大于 100ms，可满足运行周期内的实时采集要求。

为保障采集源覆盖全机所有运行工况，监控系统除前述核心数据外，还实时采集变频器母线电压、输出电流、输出电压与输出力矩等运行数据，监测各机构电动机转速、电流与电压，采集主副钩吊点载荷、起升速度与超速状态、制动器投入状态、门限位联锁信号、激光防碰撞距离以及一次回路与关键控制回路的通断状态，并按时间点记录操作指令与各限位状态，形成完整的运行数据链。针对桥机现场强电磁干扰环境，通信通道采用工业以太网与屏蔽信号线结合的布设方式，数据链路与动力回路分离敷设，通讯线缆与动力线缆分槽布置，可有效避免变频调速产生的谐波与电磁串扰对数据采集造成干扰，保障监控数据在满载重载工况下的传输质量。系统设置分级管理权

限，仅授权人员可进行内部管理与参数设置；开机时系统将执行自检，并对警报、显示功能进行验证，当系统自身发生故障时，立即发出报警并触发止停功能；在存储容量即将耗尽前，将提示管理人员完成数据备份保存，供电中断后内部信息可完整保留。

2.2 双起升机构异步故障机理试验研究

依据 GB 6067.1-2010《起重机械安全规程》现场检验要求[3]，依托 2 号厂房桥机开展空载、50%额定载荷、100%额定载荷三组工况试验，每组工况重复开展 7 次升降循环试验，围绕机械传动偏差、电气控制参数差异、负载与环境扰动三大维度开展系统性故障机理研究，全程记录升降偏差、电机电流、制动器动作时序等关键数据，累计采集有效试验数据 378 组。

（1）机械传动维度试验分析

经实测，两侧减速机齿轮磨损间隙差值最大为 0.12mm；新旧钢丝绳弹性形变系数偏差为 8%，额定载荷下单侧钢丝绳拉伸差值可达 4-6mm；卷筒同轴度偏差为 0.15mm，两侧制动器制动间隙差值为 0.2mm，多重机械因素叠加造成空载升降基础偏差达 6-8mm，经测算，机械因素占同步偏差总成因的 37%。

（2）电气控制维度试验分析

两台起升驱动电机已运行 25 年以上，绕组直流电阻偏差为 3.2%，额定转矩输出差值为 4.5%；原有两套驱动的加减速时间、速度闭环参数未统一校准，PLC 输出响应时差最高为 350ms，电气响应不同步进一步放大了运行偏差，电气参数差异占偏差成因的 29%。

（3）负载扰动维度试验分析（核心诱因）

转子吊装偏载工况下，双钩最大载荷差可达 1.2t，两台电机输出电流差值最大为 11A，额定工况下同步偏差飙升至 18mm。综合判定，吊载重心偏移、偏载载荷不均是造成双起升不同步的核心诱因，负载扰动因素占整体偏差的 34%。

通过完整的多工况试验研究，已量化各类因素对同步偏差的影响权重，试验结果清晰表明，机械因素、电气参数差异与负载扰动三类成因相互叠加、逐级放大，其中偏载工况下的负载扰动是引发同步偏差超限的关键因素，该量化结论可为后续同步控制策略设计、电气改造方案编制提供完整的理论与数据支撑，同时验证了单纯依靠机械精调无法根治同步偏差问题，必须从电气闭环控制层面开展综合治理，该结论为本次改造的核心技术判断。

2.3 PLC 主从闭环同步控制策略与电气系统优化研发

基于前述两项研发成果，开展双起升机构主从跟随闭环控制技术研发，同步完成整套起升电气控制系统的优化升级。依据 GB/T 3811 起重机设计规范要求[2]，双起升机构采用带编码器的矢量闭环变频调速方案，电机轴配置绝对值编码器以精确测量位置与速度，同步偏差阈值设计为 20mm；当高度同步误差超过限值时，系统自动触发报警提示，超限后立即执行紧急停机，实现同步偏差的动态实时校正。

研发构建以 1 号起升编码器为基准、2 号起升机构从动跟随的 PLC 闭环控制逻辑，由 PLC 实时读取安全监控系统上传的双钩高度数据，每 100ms 动态比对两侧升降高度差值，依据偏差数值自动调节从动机构电机的输出转速，实现升降行程偏差的实时校正，程序单次调节响应时长≤150ms。

同时对原有起升电气控制回路进行重构优化，完善单台电机速度闭环反馈控制功能，统一两台起升机构加减速、转矩、制动的全部整定参数，完善同步偏差超限联锁保护逻辑。变频驱动选用具备直接转矩控制能力、转矩响应时间不大于 2ms、支持零速满转矩防溜钩及安全转矩关断功能的变频器，配置内置制动斩波器以吸收再生电能，且具备瞬时停电跨越与转速跟踪再启动功能；变频器前端设置塑壳断路器提供保护，变频器容量按电动机功率配置并预留 50%的裕量，起升机构变频器电流不低于电机额定电流的 1.5 倍，可满足重载工况下 150%过载 1min 的运行需求，供货阶段需提供变频器功率选型计算书供审核确认。

PLC 选用国产自主可控硬件平台，CPU 采用国产高性能自主可控处理器，主频不低于 266MHz，内置用户内存容量不小于 8M，支持双冗余以太网接口，且两路网口具备独立 IP 地址，遵循 IEC61131-3 标准支持梯形图、结构文本、功能块图等多语言编程，支持 MODBUS RTU 与 OPC 国际标准通讯，并支持 61850 电力规约；采用 PROFINET 协议实现变频器、PLC 与上位机之间的通讯。结合 2 号厂房桥机整体电气改造工程，同步更换防护等级为 IP55 的控制柜、起重专用耐弯折电缆，完成电缆绝缘测试、保护传动试验，全回路电缆绝缘电阻均大于 1MΩ，最高检测数值为 3.6MΩ，提升了整套电气系统的抗干扰能力与运行稳定性。同时完成全桥 6 台电动机的变频化更换，主起升与副起升电机型号为 YZP225M1-8、大车行走电机型号为 YZP160M-6、小车行走电机型号为 YZP132M-6，能效等级按 NB/T 42084 达到二级及以上[4]；配套强制风冷风机与绕组热保护装置，并将热保护开关量接入 PLC 实现电机过热保护；同步更换起升、大车、小车机构的全部制动器，摩擦片采用铜基粉末材质，制动弹簧采用 65Mn 高强度弹簧，配套电力液压推动器并加注专用制动液压油，保证制动性能与整机匹配。整车动力、控制电缆全部更换为船用阻燃型号，动力电缆采用 CEFR/DA 型号、二次电缆采用 CEFR/SA 型号，弱电信号采用屏蔽线，电缆与端子容量按额定容量的 1.5 倍设计；司机室、电气室及桥架照明系统全部更换为 LED 灯具并配置专用照明变压器与独立回路，低压配电区域铺设 0 级绝缘橡胶垫，全面提升电气系统可靠性与现场适应能力。

改造后的电气控制系统在实现双钩同步闭环控制的同时，

全面恢复并强化了起升、大小车机构的安全保护功能，包括起升旋转限位与重锤限位、超速保护、零位保护、电源断相与失压保护、装置过热过流保护、接地故障保护、电动机缺相保护、电动机过载保护及瞬时掉电保护，同时配置激光防碰撞传感器对两台小车运行距离进行实时监测，形成完整闭合的整机安全防护体系，从保护逻辑与硬件配置两个层面消除了原系统因保护机制不完善带来的运行风险。

3 项目现场实施与应用成效

本次三项核心研发内容全部融入 2 号厂房桥机电气技术改造全过程，严格按照电厂外包施工管理、两票三制要求开展现场作业，避开发电机组高峰发电时段完成设备安装、程序调试、空载及带载试验，所有试验项目均参照国家标准验收条目逐项核验，整体施工工期为 42 日历天，较计划工期提前 3 天完工。施工期间按要求落实安全措施费用投入，设置施工区域隔离与吊装警戒，所有特种作业人员均持证上岗，保障改造过程安全生产。安装调试合格后按照《GB 5905》要求开展负荷试验，由承包方提供试验配重块，对起升机构、制动系统及电气部分的性能保证值进行验证；同步完成安康市市场监督管理局开工告知手续及安康市特种设备检验检测所监督检验，取得特种设备准用证，并交付桥机运行操作与维护保养规程，开展配套技术培训，形成从改造实施到合规取证的全链条闭环管理。

从运维层面看，改造后桥机起升机构运行参数全部纳入在线监测体系，故障定位时间大幅缩短，检修工作由周期性巡检转变为按需精准维护，配合完善的操作维护规程与培训体系，现场运维标准化水平显著提升；同步完成改造的照明、制动器与电缆系统进一步降低了整机故障概率，为机组检修作业提供了连续可靠的起吊保障。

4 结论

依托 2 号厂房桥机电气改造开展的三项科技研发内容层层递进，以安全监控数据体系为基础、故障机理量化研究为依据、闭环同步控制为核心，系统性解决了老旧厂房桥机双起升机构运行不同步的问题。三项研发内容紧密贴合现场工况，所有改造指标、试验项目、关键参数均满足 GB/T 28264[1]、GB/T 3811[2] 等现行标准要求，经数百组现场试验数据验证，设备同步精度、运行稳定性、合规性全部达标，兼顾了设备合规性与运行安全性，可为同类型水电厂起重设备技术升级提供成熟的研发思路与工程实践案例。后续可依托现有监控采集体系，进一步拓展设备故障智能预判、在线运维相关研究，持续提升起重设备智能化管控能力。

参考文献：

[1] GB/T 28264-2017,起重机械安全监控管理系统[S].

[2] GB/T 3811-2008,起重机设计规范[S].

[3] GB 6067.1-2010,起重机械安全规程第 1 部分：总则[S].

[4] NB/T 42084-2016,起重及冶金用三相异步电动机能效限定值及能效等级[S].