

水电站机电设备运维管理及施工质量数字孪生管控研究

刘 勇 张志睿

湖南澧水流域水利水电开发有限责任公司江垭水电站 湖南 张家界 427221

【摘 要】：水电站机电设备是电站发电、调度核心载体，传统人工管控易出现监管缺位、故障预判滞后等问题。当前机电管控存在六项机制落地不完善、数字孪生应用浅层化、专业人才短缺等短板，易引发机组停机、电气故障等隐患。本文结合江垭水电站实操数据，梳理机电设备全周期管理问题，围绕设备进场、安装调试、运维拆解质控节点，融合机电管控六项机制与数字孪生技术提出智能化优化路径，为机电精细化数字化管控提供支撑。

【关键词】：水电站机电设备；运维管理；质量控制；数字孪生；六项管控机制

DOI:10.12417/2811-0528.26.20.076

引言

水电站机电系统包含水轮发电机组、高压电气、闸门启闭设备、在线传感装置，安装精度与运维水平直接影响发电效益。当下智能机组普及，但多数电站仍重土建、轻机电，六项长效管理机制未常态化运行，数字化监测不足，设备安装偏差、故障频发。本文立足机电专业视角，引入数字孪生可视化平台，结合六项机制搭建全流程质控体系，形成适配机电专业的智能管理方案。

1 水电站机电设备管理与数字孪生管控概述

机电设备管理工作贯穿物资采购、设备进场、安装施工、系统调试、日常运维全生命周期，机电安装质量管控是整套管理体系的核心内容。六项管控机制与数字孪生技术的深度融合，能够为发电机组长期稳定运行提供基础保障^[1]。水利部2025年发布的行业统计公报指出，国内大中型水电站近半数机电故障问题，均源于管理制度不完善、数字化监测体系缺失、六项管控机制执行不到位。水电站机电设备结构精密、系统联动性极强，轴系装配、高压线路接线、自动化系统调试等关键工序容错空间极小，单纯依靠事后检修模式无法彻底消除设备运行风险。六项长效管控机制可统筹调配人力、专项资金、检测仪器、备品备件等各类管理资源，数字孪生技术能够搭建设备三维立体模型，整合现场安装、实时传感、检修运维等多维度数据，实现施工与运行全过程可视化风险预警。全流程质量管控模式可有效规避配件质量不达标、安装精度超标等施工问题，保障机组达成三十年稳定运行标准，缩减非计划停机造成的经济损失。

2 机电设备管理现存现状与突出问题

国内水电站普遍存在重土建、轻机电的管理偏向，机电物资采购、现场安装、设备检修、备件储备、安全监管六大管理板块相互割裂，六项管控机制难以形成常态化落地应用，现场

监管约束力度不足。机电系统数字化改造面临资金短缺问题，设备更新迭代、传感设备运维相关资金拨付进度缓慢，制约数字孪生技术的落地普及。行业内部具备高级职称的机电技术人员占比仅为12%，一线作业人员普遍缺乏数字孪生应用、六项机制落地相关专项培训，专业能力难以适配智能机组的现代化管控需求。县级水电站数字化管理平台整体覆盖率达78.5%，数字孪生建模、设备故障智能预警等核心功能仅实现基础浅层应用，各机电子系统数据相互独立形成信息孤岛，一体化管控模式无法落地，设备安装缺陷、运行故障等问题持续发生。多数电站数字化管控仅停留在基础数据录入层面，未结合机电安装、设备运维现场工况动态迭代优化，数字化工具难以支撑设备隐患排查、安装质量管控等核心业务，数字化提质增效作用无法充分发挥。

3 机电设备安装运维全流程质量管控关键环节

3.1 机电设备进场前置质量管控

进场前置管控可从源头规避机电设备固有缺陷，图纸校核、施工方案审核、设备质量核验的一体化管控模式，可同步结合数字孪生预建模完成施工校验工作。水利部2024年行业统计数据表明，落实前置管控搭配孪生预校验的工程项目，调试整改资源投入可降低37.6%，设备整体缺陷率下降41.3%。设备到货前期，建设单位、生产厂家、施工单位、监理单位四方联合开展机电图纸会审工作，逐一核对设备轴系公差、电气绝缘参数、传感设备布设点位，通过孪生平台搭建简易三维模型模拟设备吊装与安装流程，提前排查规避现场管线排布冲突问题。设备配置参数如需调整变更，需经过多方联合审批，严禁作业人员私自改动设备装配参数^[2]。监理单位针对机组吊装、电缆敷设、自动化接线等专项施工方案开展严格审核，将轴系同心度、设备绝缘电阻作为核心质控指标，不符合施工标准的方案需退回整改完善。发电机、开关柜、传感设备等核心物资实行双人进场验收制度，不合格物资直接做退回处理。依

托数字孪生数据库建立物资台账,对进场检测仪器完成精度合规检定,特种作业人员依据六项管控机制完成分层技术交底,所有施工资料同步录入孪生平台完成归档。

机电设备进场阶段的质控管理,往往决定后续安装运维工作的整体稳定性,多数隐蔽性设备故障都源于进场核验环节的疏漏。水电工程机电设备品类繁杂,精密元器件与大型成套设备混杂进场,传统人工清点核验模式容易出现漏检、错检问题。依托数字孪生前置建模优势,可针对不同型号设备建立专属参数档案,对比设备出厂技术标准与工程设计要求,实现批量设备的标准化核验。针对密封件、绝缘耗材、传感探头等易损耗小件,依托平台分类登记入库,结合现场施工进度动态把控物资领用节奏,规避长期存放造成的设备老化、性能衰减问题。前置管控体系的完善,能够大幅减少后期安装工序的返工调整,为现场标准化施工筑牢基础条件。

3.2 机电设备安装调试动态质量管控

六项管控机制结合数字孪生技术可实现安装调试全过程动态数据采集,及时发现并整改设备装配存在的各类隐患。2024年机电施工现场巡查数据显示,同步落实双体系管控的工程项目,设备一次调试合格率达95.8%,传统人工管控模式下的设备调试合格率仅为72.5%。施工现场严格执行机电工程三级自检制度,设备装配检测产生的各类数据实时上传至孪生平台,监理人员通过线上核查结合线下抽检的方式完成双重复检。机组装配施工严格把控轴系间隙参数,测温传感设备接入孪生系统可实时捕捉设备温度变化,及时识别过热隐患。设备基座完成人工保护层清理作业后,配套布设位移监测传感装置。高压电缆布设坐标同步录入孪生三维模型,隐蔽管线施工完成后,提前二十四小时组织多方联合验收,留存完整施工影像资料。

机组试运行阶段持续监测设备温度、机体振动等核心参数,参数超标时孪生平台自动触发预警信号,设备养护周期不少于十四天。监理平行抽检范围不低于施工自检总量的20%,现场排查的所有质量问题统一录入孪生台账,依托六项管控机制完成分级闭环整改。工程施工杜绝机电分包环节以包代管的乱象,依托孪生平台人员台账信息实现施工责任精准追溯。机电安装调试属于高精度交叉作业,土建配套、机电装配、自动化布线多工序同步施工,现场工况复杂、工序衔接紧凑,人为操作误差、工序交叉冲突极易诱发设备质量隐患。传统调试工作依赖技术人员经验判断,数据记录碎片化,难以形成完整的施工溯源链条。数字孪生动态管控模式可实现施工全过程数据留痕,将设备装配、线路连接、系统调试的各项参数与施工工序一一对应,梳理各专业施工的衔接节点,规避交叉施工带来的工序冲突。平台可结合实时运行数据修正施工偏差,逐步优

化设备装配精度,让机组运行参数始终贴合行业规范标准,有效提升整套机电系统的装配稳定性与运行可靠性^[3]。

3.3 竣工移交与运维长效质量管控

竣工核验移交、数字化资料归档、周期性现场巡检,共同构成机电设备全周期质量管控闭环,核心机组质保周期匹配工程三十年设计使用年限。安装施工全部完成后,施工单位先行开展内部预验收,对照孪生三维模型排查设备轴系偏差、传感装置失效等各类缺陷,结合六项管控机制明确整改时限,整改全过程影像资料同步存入孪生数据库。全套验收资料统一录入孪生平台归档,完整留存设备出厂证明、系统调试记录、隐蔽工程施工影像等原始资料,验收达标后方可移交运维单位开展后续管理,工程遗留问题需复验合格后完成销项。孪生平台可搭建智能化巡检模式,落实季度全面巡检、年度专项巡检制度,汛期重点针对闸门机电设备开展专项监测,平台自动识别设备运行异常并推送预警信息。现场故障问题保证四十八小时内人员到场处置,调取孪生平台原始运行数据完成责任界定,定期汇总设备故障数据,结合六项管控机制开展运维工作复盘。

竣工移交后的长效运维是保障电站长期安全运行的关键,传统运维模式侧重故障事后处置,缺乏系统性的设备状态研判与隐患预判能力。数字孪生归档的全周期施工与运行数据,可为后期运维工作提供完整的数据支撑,运维人员可依托历史参数对比设备实时运行状态,精准识别设备性能衰减趋势。结合六项管控机制建立的运维复盘体系,可持续积累设备故障处置经验,针对性优化巡检重点与运维频次,逐步完善机电设备长效管控体系,推动运维模式由事后被动抢修转变为事前主动预判,持续提升机电系统运行稳定性与安全冗余能力。

4 机电全周期管理优化对策方案

4.1 落地机电六项管控机制,搭建数字化监督体系

六项管控机制覆盖物资采购、设备验收、现场安装、设备检修、备件管理、安全管控六大核心板块,清晰划分各参建单位管理权责,填补现场管理空白区域。水利部2025年统计数据显示,六项管控机制搭配数字孪生监管模式落地后,机电设备缺陷发生率可下降34.7%。机电管控专项细则可结合工程实际修订完善,设备参数变更、系统调试、工程验收等全流程工作依托孪生平台线上留痕,杜绝事后补录资料的违规行为。水行政主管部门开展线上常态化巡查,第三方机构按月落实线下督查工作,搭建电子督办台账。一般性管理问题限期七日完成闭环整改,绝缘参数异常、机体振动超标等重大隐患实行挂牌督办,孪生平台实时同步更新整改进度^[4]。工程配套追责机制可对六项机制落实不到位、施工数据造假等违规人员开展约谈扣分处理,全过程线上监管模式能够弥补人工阶段性检查存在

的疏漏,实现机电施工与运维工作的全方位管控。通过数字化手段固化管控流程,让各项管理制度不再局限于书面条款,深度融入现场作业各个环节,形成长效、常态化的治理格局。

4.2 统筹专项资金与复合型人才建设

拓宽机电工程资金筹措渠道,引入社会资本参与电站数字孪生系统升级改造,公益性水电站落实分级财政配套资金政策,保障传感设备更新、智能平台运维相关资金稳定投入。机电专项资金实行分科目线上核算,按季度开展资金审计工作,杜绝资金挪用问题。企业常态化组织数字孪生应用、六项管控机制落地专项月度培训,联动水利类院校搭建人才输送渠道,充实机电专业技术团队。绩效薪酬体系与机组运行稳定性、隐患处置效率、管控机制落地成效直接挂钩,优化内部人才结构。人员现场操作记录由孪生平台全程留存,通过定期专项考核补齐人员专业短板,培育适配数字化管控模式的机电复合型技术队伍。针对性的人才培养与激励模式可有效盘活内部人力资源,破除传统运维团队技术固化、理念滞后的问题,适配智慧水电站的长期发展建设需求。

4.3 深化数字孪生全域应用,搭建一体化智能平台

补齐电站传感设备布设、孪生建模软硬件配置短板,搭建覆盖物资采购溯源、施工精度监测、设备故障预警、日常运维巡检、备品备件管控的一体化智能管理平台,实现各类运行数据实时线上流转^[5]。打通设备生产厂家、施工安装、运维管理多方数据接口,统一接入孪生三维数据库,破除行业长期存在的数据孤岛问题。运维人员通过移动端设备实时上传现场设备

缺陷影像资料,孪生平台自动识别预警,大幅缩短故障处置时长。发电机组、主变压器、启闭机等核心设备布设温振、绝缘监测传感装置,设备实时运行数据同步映射至三维模型内部,提前预判各类潜在故障隐患。2024年行业实测数据表明,结合六项管控机制的机电孪生平台可提升28.3%的管理效率,改善人工统计误差、工程档案追溯困难等行业痛点,推动机电质量管控工作的数字化、可视化升级。见图1。



图1 水电站机电设备数字孪生+六项机制全周期质量管理流程

5 结语

本文围绕机电设备安装运维、数字孪生管控开展分析,梳理六项机制、数字化建设现存短板,明确设备进场、安装、运维全流程质控要点。从落地六项管控机制、资金人才保障、深化数字孪生应用三方面提出优化对策,降低机组故障概率。未来机电管理需持续推广数字孪生,严格落实六项长效机制,完成传统运维向数字化智能管控转型,保障机电系统长期稳定运行,释放电站综合效益。

参考文献:

- [1] 赵冬保.水利水电工程施工质量信息化管理及控制浅析[J].新潮电子,2025(10):37-39.
- [2] 丁成花.水利水电工程建筑质量控制与项目管理创新实践[J].门窗,2025(24):139-141.
- [3] 孟翔,孔雷.水利水电工程建设质量评估及控制技术探析[J].水利技术监督,2025(5):138-141242.
- [4] 张伟亚.水利水电工程施工质量控制与优化策略研究[J].水利科学与寒区工程,2025,8(5):138-140.
- [5] 马宏元,李长青.水利水电工程施工质量控制关键技术研究[J].水上安全,2025(8):190-192.