 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i5.10512

Analysis on the Digital Transformation Path of Quality Control and Technical Management of Hydropower Unit Maintenance

Rongxi Huang

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Honghe Prefecture, Yunnan, 661100, China

Abstract

The challenges in maintaining long-term operation quality control and outdated management approaches for hydropower units severely compromise equipment safety and maintenance efficiency. This study identifies critical control points and technical limitations in maintenance quality management, analyzes the limitations of traditional management models in condition assessment, process control, and parameter validation, and establishes implementation pathways for digitalized maintenance workflows, data acquisition, and documentation management. It further explores the operational mechanisms of digital systems in fault prediction, behavior tracking, and process supervision. The research provides actionable solutions to enhance maintenance standardization and digital management effectiveness, offering practical significance for transitioning hydropower station equipment maintenance from experience-based to data-driven approaches.

Keywords

hydropower units; maintenance quality control; technical management; digital transformation

水电机组检修质量控制与技术管理数字化转型路径探析

黄荣熙

红河广源水电开发有限公司，中国·云南 红河州 661100

摘要

水电机组长期运行中检修质量控制难度大、管理手段滞后，严重制约设备运行安全与维护效率，文章研究了检修质量管控中的关键环节与技术弱点，分析了传统管理模式在状态评估、工艺控制与参数验证中的局限表现，构建了数字化条件下检修流程、数据采集与文档管理的实施路径，并探讨了数字系统在故障预警、行为追踪与流程监督中的作用机制。研究为提升检修标准化水平与数字化管理效能提供了可行方案，对推动水电站设备维护由经验型向数据驱动型转变具有实践意义。

关键词

水电机组；检修质量控制；技术管理；数字化转型

1 引言

水电机组作为能源系统核心设备，其运行安全性与检修质量紧密关联。当前部分电站在检修过程中仍依赖人工经验，状态评估不准、工艺执行不稳、技术文档分散等问题导致故障频发与效率低下。技术管理手段缺乏数据支持，信息割裂现象普遍，已难以支撑复杂设备的精细化运维。面对设备结构复杂化与运行工况多变化的趋势，构建以数据驱动为基础的数字化检修体系成为提升质量控制能力的关键路径。文章聚焦典型检修环节中的问题表现，梳理技术管理数字化转型的具体实践方案，并分析数字系统对质量提升的支撑机制，为水电站检修作业提供系统化优化思路。

【作者简介】黄荣熙（1985–），男，中国福建晋江人，本科，工程师，从事电气工程及其自动化技术研究。

2 检修质量控制的关键环节分析

2.1 状态评估标准的不确定性问题

在水电机组检修工作中，设备状态评估作为前置工序对后续拆检范围与处理策略具有直接影响，其准确性决定

了资源配置效率与故障预控能力。

（1）参数选取不统一：各厂站对振动、温升、电流波动等状态参数的采集方式与阈值定义存在差异，无法形成统一评估体系。部分评估仍依赖人工巡检结果，造成数据主观性强。

（2）采样周期不稳定：运行监测系统数据更新频率不足，难以覆盖动态负载变化下的设备响应，造成短时异常无法识别。

（3）评估结果缺乏量化等级：大多数评估报告以合格/不合格方式呈现，缺乏故障趋势、劣化速度等连续型信息支持，难以建立状态与故障模式的直接映射关系。

（4）缺少历史对比数据：评估时未引入历史运行参数基线，无法有效识别长期演变性缺陷，导致预警延迟或过度检修。

2.2 工艺执行中的人为偏差控制

检修环节中大量依赖操作人员现场作业，特别是在轴系找正、密封组件安装、电气连接处理等步骤中，操作细节直接影响设备后期运行稳定性[1]。工艺执行一致性差成为质量波动的主要原因。检修作业过程中缺乏在线监测与过程记录装置，无法捕捉每一操作动作的偏差程度。一旦出现定位误差、紧固力矩不足或接线顺序错误，往往在试运行阶段才暴露出问题。工艺标准虽有文本规范，但实际执行中存在对细节口头交底、图纸理解偏差等情形，导致同一方案下不同班组作业效果存在显著差异。关键步骤如绝缘耐压试验、转子中心调整等多依赖经验值判断，缺少统一的量化校核手段，无法有效评估偏差程度。此外，部分维修点位受限于空间条件与可达性，实际操作过程中的力学受力条件与理想工况不符，增加了误差产生的风险。

2.3 检修后参数恢复的精准验证

机组完成检修作业后，如何验证设备性能恢复程度是检修质量闭环控制的关键，目前部分单位在试运行过程中以机组“能带负荷运转”作为评估依据，缺乏对运行参数的量化验证与趋势分析。关键指标如转速波动、负载响应时间、冷却效率、电磁偏心率等应在出厂基准或历史优值对比下进行检验，但实际操作中常规只记录电流、电压等表观数据，忽略了动态响应与细节行为。部分高频数据未被采集，如润滑系统油温波动、轴承振动包络等难以呈现真实状态。参数记录存在信息孤岛现象，电气、机械、控制各子系统数据未融合对比，无法识别系统间联动异常。缺少统一平台用于数据归档与分析，使得历史工况回溯难度大，参数波动趋势缺乏连续性验证机制，影响下一轮检修策略制定的针对性与前瞻性。

3 技术管理的数字化转型实践

3.1 检修流程节点的数字化改造

水电站在检修管理过程中应构建基于流程驱动的数字作业平台，将任务计划、工单生成、进度反馈与节点验收集成在同一系统中，实现全过程在线管控。平台可设定作业结构树，将每次检修任务拆解为子任务单元，并绑定执行人、操作时限、验收标准与过程附件，提升作业透明度与责任清晰度[2]。作业流转过程中，系统根据任务状态自动生成时间戳记录，确保每一环节可回溯、可核查，杜绝漏项与模糊责任。现场作业人员使用移动终端进行任务接收、标准查阅与检验上传，形成从调度层到操作层的信息直通链条。

平台部署需基于现场通信条件选型适配的终端设备，可采用工业平板或防护型PDA，搭配蓝牙传感器或二维码工器具管理模块。检修任务开始前，由调度端预设任务模板与检修工序流程，系统自动派发至执行班组并推送安全技术交底信息。任务完成后，需上传作业影像或关键参数截图作为流程闭合依据，验收环节通过审核节点设定多人联合确认机制，确保异常项必须处理完成后方可归档。所有流程数据自动归入设备履历系统，为后续状态趋势分析与运维策略调整提供基础支撑。

3.2 设备运行数据的实时采集机制

为实现设备运行状态与检修行为的联动管理，可在关键位置部署分布式智能传感单元，采集如主轴振动、油温油压、绕组温度、漏电流等关键参数，通过边缘计算网关实现就地预处理后上传至监测中心平台[3]。数据采集频率建议控制在1Hz至10Hz之间，确保覆盖动态响应特征，特别是在大负荷波动工况下形成完整运行轨迹。采用无线采集方式需保障抗干扰能力与断点缓存能力，在通信受限条件下可自动切换为本地存储模式并在链路恢复后补发数据。

平台应设置阈值判断模块与数据质量评估模块，支持对采集值进行上下限判断、变化速率监控与异常数据剔除，形成可用于预警与检修决策的数据源。关键部位的状态数据与检修时间节点绑定，系统可自动判断是否出现检修后指标反弹、故障复发或未达预期修复效果。为加强数据的可读性，建议部署可视化大屏或嵌入移动端界面，展示设备实时状态、历史曲线与报警记录，并具备按区域、设备类型与时间筛选功能，方便检修人员快速定位风险设备。

3.3 技术文档的电子化管理路径

水电机组检修涉及大量工艺规程、图纸资料与历史检修记录，建议构建文档集中化管理平台，将所有资料转化为标准化电子格式，并按设备编码、工种分类与检修时间轴进行索引整理。平台支持多终端调阅功能，班组人员可在移动终端快速查询与当前作业相匹配的标准作业流程、故障处理方案与历史经验记录。系统应设置版本控制机制，保证每份文档在修订后自动覆盖旧版，避免误用过期工艺规程。

为保障检修记录的完整性，应制定统一的电子记录模板，在每次作业过程中实时填写作业数据、操作时间、执行人员等内容。关键操作点如转子拆装、密封更换、绝缘处理等应附带过程照片、测量数据截图与操作视频，上传至检修记录库，并自动关联至对应设备编号。系统还应具备全文检索与关键词推荐功能，便于技术人员基于历史文档快速提取相关案例与参数。电子档案支持导出PDF归档、云端备份与权限分级管理，确保技术资料在共享便利的同时具备安全保障。

4 数字化转型对检修质量的促进作用

4.1 故障预警反应速度的提升

数字化预警系统基于实时数据采集与异常特征识别，构建运行参数偏移模型，实现故障征兆的提前捕捉[4]。系统结合振动波形突变量、油温升速、励磁电流偏移值与转子偏心趋势对关键设备建立多维监测矩阵，使预警过程由人工巡检转向连续监测模式。在负荷波动剧烈的工况下，系统自动筛选动态变化速率较高的参数并触发二级分析模块，形成更具针对性的风险提示。预警数据按时间顺序记录在监控平台中，使检修人员能够快速定位异常源头，缩短人工确认时长。系统支持阈值自适应调整，在环境温度、负荷幅度变化较大时自动修正阈值区间，降低误触发概率。

为量化预警效率，构建典型机组运行案例数据，并形成如下数据表1：

表1：数字化预警系统故障识别时长对比表

工况类型	传统巡检发现时长（min）	数字化系统预警时长（min）
主轴振动异常	46	12
冷却水温升异常	38	9
励磁电流偏移	52	15
油压下降趋势	41	11

主轴振动异常在传统巡检模式下依赖班组巡查周期，平均需 46 分钟才能被发现，而数字系统基于振动 RMS 与峰值因子偏移量自动识别，仅需 12 分钟即可触发预警。冷却水温升异常在传统模式中往往在温升幅度累积后才能被注意，而自动采集机制通过温升速率阈值触发预警，使发现时间缩短为 9 分钟。励磁电流偏移在传统模式下受监控人员判断差异影响较大，数字化系统通过设定 dI/dt 边界值实现快速提示，识别速度显著提升。

4.2 操作行为记录的规范追踪

检修操作规范性管理可依托视频采集装置与操作日志系统实现全过程记录，系统在检修开始前绑定作业人员身份信息与工单任务编号，自动启动作业区域内摄像头与工具状态采集装置，对每一操作动作、工具启用次数、关键参数录入进行同步记录。作业过程中的数据如螺栓力矩值、测试时间点、操作顺序等可通过电子工单系统自动抓取并上传服务器，生成带有时间戳的操作链条[5]。对存在步骤错序、检测遗漏或参数异常的作业，系统可设定预警阈值发出提示，并标记为“需复核”状态，待技术人员在线确认后方可归档。全部行为记录统一归入作业数据库，并可按照人员、设备、工艺类型进行分类检索，为后期操作标准优化、人员培训评估与失误责任划分提供清晰的数据支撑，提升水电机组检修作业过程的规范性和可控性。

4.3 检修全流程的闭环监督能力

水电机组检修过程中需建立任务驱动的数据闭环机制，将任务下发、执行反馈、验收复核、资料归档形成统一流转通路。系统设定检修任务开始节点，由调度模块派发任务至班组终端，班组在接收后提交操作计划并绑定检修设备信息，执行中过程数据如温升测试结果、振动响应曲线、绝缘测量值等可由仪表直接接入系统并与任务单关联写入。各子节点进度状态自动上传，系统依据标准工时模板判断进度偏差并输出预警提示。任务完成后，系统自动比对运行参数与检修前基线，判断性能是否恢复至安全阈值以内，并生成验收报告。最终归档模块将完整检修包归入设备运行履历，包括作业记录、图像资料、关键曲线与检验数据，构成完整可审计闭环，提升检修质量的可追溯性、全过程可控性与事后数据调取的便利性。

5 结论

水电机组检修质量控制存在状态评估标准差异大、工艺执行偏差高与参数验证手段滞后等问题，需依托数字化技术构建全过程管理机制。作业流程数字化集成可实现工单生成、节点反馈与验收归档的一体化控制，运行数据的实时采集机制增强了对故障特征的动态感知能力，技术文档的电子化管理提升了资料调用效率与版本管控精度。数字系统在预警识别、操作记录、流程闭环监督等方面显著提升检修行为的可控性与标准化程度，推动作业过程向量化、透明化、可追溯方向演进。下一阶段可在智能算法辅助分析、设备健康趋势建模与远程交互协同方面拓展应用场景，提升系统联动响应能力与智能决策水平。

参考文献

[1] 李胜鑫. 刍议如何高效开展水电机组检修管理工作[J].福建水力发电,2024,(02):85-87.

[2] 肖湘曲.基于数据驱动的水电机组故障诊断研究[D].华中科技大学,2024.

[3] 肖荣,耿在明,王义平,等. 虚拟现实和增强现实技术在水电机组检修中的应用[J].电力设备管理,2024,(18):184-186.

[4] 张伟林.基于振摆信号的水电机组故障诊断技术的研究与应用[D].西华大学,2024.

[5] 马小波.价值链视角下水电机组检修成本管理研究[D].昆明理工大学,2024.