

水利工程机电设备质量管理与自动化监控技术探究

姜军杰

新疆水发建设集团有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i5.6355

[摘要] 水利工程作为国民经济和社会发展的重要基础设施,其机电设备的安全稳定运行直接关系到工程效益的发挥。本文结合水利工程机电设备的运行环境复杂、技术要求高、社会影响大等特点,系统阐述了质量管理与自动化监控技术的理论框架与技术路径。通过分析水利工程机电设备全生命周期质量管理的关键环节,构建了基于风险防控的质量管理体系;同时,针对水利工程自动化监控需求,提出了多技术融合的监控架构与实施要点,为提升水利工程机电设备管理智能化水平提供理论支撑。

[关键词] 水利工程; 机电设备; 质量管理; 自动化监控技术

中图分类号: TV734 文献标识码: A

Exploration of Quality Management and Automated Monitoring Technology for Electromechanical Equipment in Hydraulic Engineering

Junjie Jiang

Xinjiang Shuifa Construction Group Co., Ltd.

[Abstract] As a crucial infrastructure for national economic and social development, the safe and stable operation of electromechanical equipment in hydraulic engineering is directly related to the realization of project benefits. This paper, taking into account the characteristics of hydraulic engineering electromechanical equipment, such as a complex operating environment, high technical requirements, and significant social impact, systematically elaborates on the theoretical framework and technical pathways of quality management and automated monitoring technology. By analyzing the key links in the full lifecycle quality management of hydraulic engineering electromechanical equipment, a risk prevention and control-based quality management system is constructed. Meanwhile, in response to the demand for automated monitoring in hydraulic engineering, a multi-technology integrated monitoring architecture and implementation key points are proposed, providing theoretical support for enhancing the intelligent level of electromechanical equipment management in hydraulic engineering.

[Key words] hydraulic engineering; electromechanical equipment; quality management; Automated monitoring technology

引言

随着“智慧水利”战略的深入推进,水利工程机电设备正加速向大型化、集成化、智能化方向演进,这对设备质量管理与运行监控提出了全新挑战。传统以事后维修为主的管理模式因无法满足现代水利工程对高效性、安全性和可持续性的要求,正面临深刻变革需求。当前国际水利工程领域已形成以ISO 55000 资产管理体系为核心的质量管理框架,其通过整合全生命周期成本(LCC)分析与可靠性为中心维护(RCM)策略,为设备管理提供了系统性方法论;在技术实施层面,欧美国家普遍采用SCADA系统与工业物联网(IIoT)技术构建实时数据采集与远程控制网络。与此同时,国内研究侧重于数字孪生技术与建筑信息模型

(BIM)的深度融合,力求通过虚拟映射实现设备状态的可视化预判。然而,现有研究多聚焦单一技术维度或普适性管理框架,尚未形成针对水利工程机电设备特殊运行环境(如高湿、强腐蚀、大负荷冲击等)的系统化整合方案,如何将国际先进管理体系与本土技术创新有机结合,构建符合水利工程场景特性的智能监控与质量保障体系,已成为制约行业数字化转型的关键瓶颈。

1 水利工程机电设备特性

1.1 设备运行环境复杂

水利工程机电设备多部署于露天、潮湿、多尘等恶劣环境,需长期承受水压、腐蚀、泥沙冲刷等作用。这种环境导致设备磨损加剧、故障率升高,对材料耐候性、密封性能及结构强度提

出更高要求。以新疆为例,阿尔塔什水利枢纽冬季气温达 -30°C ,夏季地表温度超 60°C ,设备需满足 -40°C 至 $+70^{\circ}\text{C}$ 宽温运行;叶尔羌河灌区泵站年沙尘天数超100天,设备防护等级需达IP65以上;玛纳斯河灌区地下水矿化度达 15g/L ,金属结构需采用耐蚀合金或涂层防护。

1.2 设备功能多样性与技术集成性

现代水利工程机电设备涵盖水力机械、电气控制、金属结构等多个专业领域,形成以水泵机组、闸门系统、输变电设备为核心的功能网络,设备间通过自动化控制系统实现联动。例如,新疆“500”引水工程机电系统整合水力机械、电气控制与金属结构技术,数百公里输水干渠通过光纤环网实现7座泵站联动调度,数据传输延迟严格控制在 50ms 以内;阿尔塔什水电站机电设备兼容水电调峰、光伏发电与储能装置,能量管理系统需实现 0.1Hz 级电网频率精准控制。

1.3 社会效益与安全风险双重性

水利工程机电设备故障可能导致供水中断、堤防溃决等重大事故,其运行可靠性直接关联公共安全。例如叶尔羌河灌区泵站停机将影响百万亩棉田灌溉;乌鲁木齐“红岩水库”向主城区供水,设备故障将危及百万人口用水安全;博斯腾湖水位调控失误可能导致湿地退化。

2 水利工程机电设备质量管理

“设备-工程-民生”的传导链条,决定了水利机电设备管理必须建立全生命周期质量管控体系。以新疆为例,新疆水利工程机电设备质量管理是维系南疆灌溉生命线、北疆能源动脉、东疆供水网络的关键纽带,任何环节的质量失控都可能引发农业减产、城市断水、生态退化等连锁反应。基于新疆“高寒、干旱、风沙”的极端环境特征与“长距离、大功率、多能互补”的工程特性,机电设备质量管理需构建覆盖选型、运维、报废全生命周期的管控体系,形成技术可靠性与社会效益的双重保障。

2.1 选型阶段

新疆水利工程机电设备选型阶段需构建“环境适应-民生保障-成本优化”的三维决策框架,形成技术可行性与社会价值平衡的选型逻辑。

(1) 环境适应。在环境适应性维度,设备需通过极端环境模拟验证,包括高寒地区的冷热冲击循环试验、风沙区的IP68防护等级认证及盐碱环境的耐蚀合金材料筛选。通过构建多物理场耦合仿真模型,量化评估设备在 -40°C 至 $+70^{\circ}\text{C}$ 温变、 8g/m^3 沙尘浓度、 15g/L 矿化度水体等极端工况下的性能衰减规律,形成适应新疆“高寒、干旱、风沙”特征的技术适配方案。(2) 民生保障。民生需求导向要求设备选型与区域发展诉求深度耦合。针对农业主产区,建立灌溉保证率与设备可靠性的映射模型,通过冗余设计将水泵机组可用度提升至 99.9% ,确保灌溉需求不受设备故障影响。城市供水系统需构建“N+2”冗余架构,结合管网水力模型优化设备配置,使极端工况下仍能维持 80% 基础供水能力。生态补水场则采用高精度控制算法,将水位调控精度控制在 $\pm 2\text{cm}$ 范围内,避免湿地生态系统因水情突变遭受不可逆损

害。(3) 成本优化。全生命周期成本最优决策需统筹设备经济性与社会效益。通过建立LCC(寿命周期成本)评估模型,量化比较不同技术方案的购置成本、运维支出及报废残值,结合能效比优化、模块化设计、可回收材料应用等策略,实现综合成本最低化。采用CFD流场优化技术提升水泵效率 $3\%-5\%$,运用预测性维护降低故障率 40% ,结合环保设计使设备报废回收价值提升 25% ,形成涵盖“设计-运行-退役”的全周期成本管控闭环。

2.2 运维阶段

运维阶段是机电设备质量管控的核心环节,需构建“智能感知-精准预测-人才赋能”的三维管理体系,形成覆盖全要素、全流程、全周期的质量保障闭环。

(1) 智能感知。在智能监控层面,通过部署极端环境适配的传感器网络实现多参数监测,整合SCADA系统实时数据、无人机巡检影像、盐雾监测记录等多源信息,构建设备健康指数评价体系。基于BIM与数字孪生技术的三维可视化平台,实现设备运行状态的空间定位与趋势预判,故障点定位精度达到亚米级。结合云计算与物联网技术,构建远程运维支持体系,通过专家系统实现故障诊断知识的实时推送,显著降低现场处置成本与响应时延。(2) 精准预测。预测性维护体系以设备运行数据为核心,采用LSTM神经网络等时序分析算法构建故障预测模型,通过历史数据训练与实时数据更新实现预测模型的动态优化。基于设备健康指数与故障概率分布,建立维护资源分配数学模型,动态调整维护周期与作业内容,在保障设备可靠性的前提下降本增效。结合供应链管理理论,构建备件需求预测与库存优化模型,通过安全库存设定与供应商协同机制,实现关键部件供应的及时性与经济性平衡。(3) 人才赋能。人员能力建设方面,创新“机电+水利+数据”复合培养模式,通过交叉培训体系强化运维人员的跨学科知识融合能力。构建结构化运维知识库,运用知识图谱技术实现隐性经验显性化,结合数字孪生平台开展仿真训练,显著缩短新员工胜任周期。建立标准化应急响应流程,通过风险矩阵评估确定应急预案优先级,运用蒙特卡洛模拟优化响应路径,结合常态化演练机制持续提升重大故障处置能力,形成“监测-预警-处置-优化”的运维管理闭环。

2.3 报废阶段

新疆水利工程机电设备报废阶段作为全生命周期质量管控的终端环节,需构建“环保回收-资源再生-安全处置”三位一体的闭环管理体系。

(1) 环保回收。在环保回收层面,通过XRF荧光分析技术对退役设备进行材料成分精准分级,例如水泵转子铜含量 $\geq 94\%$ 方可进入再生流程,同步采用GC-MS手段对多氯联苯电容器、石棉绝缘件等危险废物实施污染物筛查,确保土壤二噁英浓度低于 0.1ng-TEQ/kg 的严苛环保标准,并建立微生物群落监测机制,要求设备拆除区域土壤呼吸强度恢复至周边 80% 以上方可验收生态修复成效。(2) 资源再生。资源再利用环节通过《水利机电设备报废技术导则》规范技术替代路径,如泵站更新中采用永磁电机实现吨水能耗 15% 的显著下降,同时构建PLC模块、轴承等关键部

件的国产化替代清单,某工程疫情期间通过备件战略储备维持运行187天的实践验证了供应链韧性,而VR技能传承系统更使新员工培养周期缩短50%。(3)安全处置。在安全处置维度,严格遴选具备资质的专业机构实施危废处理,运用数字化手段对处置流程进行全周期监控与可视化追溯,最终通过第三方检测报告确保持证处置效果。该体系通过材料循环利用、技术迭代升级与生态修复的协同推进,不仅实现资源回收价值最大化,更构筑起环境风险防控的最后屏障,为新疆水利工程可持续发展提供闭环式质量保障。

3 水利工程机电设备自动化监控技术体系

水利工程机电设备自动化监控技术体系以“感知-传输-分析-决策-执行”闭环架构为核心,通过分层解耦设计实现系统模块化部署,其技术架构可细化为以下四个层级。

3.1 感知层

感知层作为水利工程自动化监控体系的数据采集前端,通过多维感知网络构建实现了对水文参数、设备状态及环境要素的精准捕获。(1)在水文参数监测方面,部署了多普勒流速仪、雷达水位计等高精度设备。例如新疆某水利枢纽采用非接触式雷达水位计替代传统压力式传感器,有效解决了高含沙水流中的淤积干扰问题,确保水位测量精度达毫米级。(2)在设备状态监测领域,通过振动传感器、温度传感器及油液分析仪等装置,对水轮发电机组、闸门启闭机等核心设备实施实时状态监控,如北疆某泵站构建的无线振动传感器网络,可动态捕捉轴承故障特征频率,为预测性维护提供数据支撑。(3)针对新疆特殊气候环境,环境参数感知体系配置了沙尘浓度传感器、太阳辐射计及土壤温湿度传感器等专用设备,例如南疆某灌区通过布设土壤三参数传感器,实现了对盐碱地改良过程中电导率、pH值及温湿度的同步监测,为精准灌溉与土壤修复提供了科学依据。

3.2 传输层

传输层采用多技术融合的混合通信网络架构,构建起覆盖全面、可靠稳定的传输体系。(1)在有线传输领域,枢纽工程区域部署工业以太网并采用环网冗余结构。新疆某大型水库通过双光缆环网设计实现链路级冗余,单点故障自愈时间压缩至50毫秒以内,确保核心业务数据传输的连续性。(2)针对偏远灌区地理条件限制,构建4G/5G与LoRa互补的无线传输网络。塔里木河流域管理局在干流布设的LoRa网关实现30公里超远距离覆盖,配合太阳能供电系统形成自主供电通信节点,有效解决沙漠腹地监测终端的持续运行难题。(3)在无公网覆盖区域,集成北斗短报文与天通卫星通信模块构建应急传输通道,叶尔羌河水文站通过北斗终端穿透极端天气屏障,实现水文数据的准实时回传。这种分层组网策略形成了“光纤环网保核心、无线专网延末梢、卫星通信补盲区”的立体化传输格局,为水利工程自动化监控提供了全域覆盖的通信支撑。

3.3 控制层

控制层作为水利工程自动化监控体系的核心执行单元,通过多层级智能控制系统实现设备级的精准操控与区域级的协同调度。(1)PLC控制系统。采用模块化PLC构建分布式控制系统

(DCS),实现闸门群控、泵站联动等复杂逻辑。如新疆某水电站采用双机热备的冗余PLC架构,通过并行计算与无缝切换机制,将机组并网时间从传统方案的90秒压缩至30秒内,显著提升电力调峰响应速度。(2)SCADA平台。在监控界面层面,开发基于GIS的水利工程三维可视化监控界面,集成视频监控、设备状态、报警信息等数据。例如,新疆某灌区系统通过数字孪生技术实现128个电磁阀的同步调度,结合预置控制算法将响应延迟控制在200毫秒以内,确保灌溉指令的即时执行;南疆某地通过移动端APP实现工单数字化流转,结合AR辅助检修功能,使设备维护效率提升60%,故障定位时间缩短至15分钟内。这种“中心控制-远程监控-现场协同”的三级控制体系,形成了覆盖设备层、区域层、管理层的一体化智能执行网络。

3.4 决策层

决策层作为水利工程自动化监控体系的核心智能中枢,通过多维度分析引擎实现数据价值深度挖掘与决策方案智能生成。(1)大数据平台。基于Hadoop生态构建的水利大数据平台,通过分布式存储与计算框架整合结构化时序数据与非结构化监测影像。例如新疆水科院搭建的省级平台已接入1.2万个监测节点,实现每秒百万级数据点的实时入库,日增量达15TB,为上层分析提供海量数据基座。(2)AI算法库。在算法模型层面,研发的设备故障预测库集成随机森林、支持向量机等机器学习算法,结合振动频谱分析实现轴承、齿轮等关键部件的剩余寿命预测;水量调度模型采用深度强化学习框架,动态耦合水文预报、用电负荷等多约束条件。例如新疆某湖水水质预测模型通过LSTM神经网络捕捉时空关联特征,将水华风险预警时间提前72小时,预测准确率达89%。(3)数字孪生系统。数字孪生系统作为决策层的终极载体,数字孪生系统融合BIM建模与GIS时空分析,构建水利工程全要素虚拟映射体,某引水工程通过CFD流体仿真与结构力学计算耦合,实现渠道冲刷形态的动态预测。

4 结束语

水利工程机电设备质量管理需立足工程特性,构建覆盖全生命周期的精细化管控体系;自动化监控技术则需突破环境适应性、数据融合、智能分析等关键技术瓶颈。未来,随着数字孪生、边缘智能、区块链等技术的深度融合,水利工程机电设备管理将向“预测性维护+自主决策”方向演进,为智慧水利建设提供核心支撑。

[参考文献]

- [1]徐晓莉,刘哲,钮月磊,等.水利工程机电设备故障细化诊断与智能运维方法研究[J].江西水利科技,2023,49(1):07.
- [2]蒋亚东,石焱文.数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用[J].科技通报,2019,35(11):11.
- [3]王才,付立文.水管单位设施设备标准化管理要求分析[J].海河水利,2021,(z1):017.

作者简介:

姜军杰(1991--),男,汉族,河南鄯陵人,大学本科,工程师,研究方向为水利工程建设管理。