

智能监控技术在水利水电工程管理中的应用

刘 勇 张志睿

湖南澧水流域水利水电开发有限责任公司江垅水电站 湖南 张家界 427221

【摘 要】：水电站机电设备承担水能转换与机组稳定运行核心职能，传统人工巡检管控暴露出设备感知不完整、数据相互割裂及运维制度碎片化等短板。本研究立足数字孪生技术底座，聚焦机电设备感知适配、孪生数据融合及运维六项机制落地三类现实痛点，从机电感知终端布设、数字孪生平台搭建和全流程运维机制构建三个层面分别给出落地路径。依托机电设备数字镜像达成全维度实时监测、故障智能研判与闭环管控，能够提前识别机组潜在机电故障，提升运维效率与水能转化效益，为水电站机电设备数字化、精细化运维交付完整实操方案。

【关键词】：水电站机电设备；数字孪生；智能监控；数据融合；运维六项机制

DOI:10.12417/2811-0536.26.09.077

引言

数字孪生是水电行业数字化转型的核心技术路径，伴随机组容量持续提升，水轮发电机组、励磁系统及主变等设备长期高负荷运行，对状态在线监测、故障预判及规范化运维提出更严苛要求。传统人工运维暴露出设备感知覆盖不全、多源数据相互割裂、管理制度不成体系等突出问题，智能监控落地过程中专用传感适配性欠佳、数据接口不畅通、运维流程缺乏标准化机制，这些因素持续制约管理效能。依托传感采集、5G 传输、云计算及数字孪生建模技术，搭建机电设备虚拟镜像，同步配套六项机制完善管控体系，补齐传统运维短板，形成数字孪生赋能的智能化运维模式，为同类水电站机电数字化升级提供实践依据。

1 智能监控技术运用于水利水电工程管理的基础阐释

面向水电站机电设备的智能监控体系，以机电专用传感网络、5G 光纤双链路传输及数字孪生云平台为整体支撑，可适配水轮发电机组、高压开关柜、主变压器、励磁装置等核心监测场景，同步采集机组振动、轴承温度、绕组电流、油压、局放等二十余项运行参数，数据传输延迟控制在 100 毫秒内^[1]。依托数字孪生构建设备一比一虚拟镜像，结合机器学习搭建健康度评价模型，打通从机电感知、孪生仿真、故障研判到运维处置的全闭环流程，实现微米级振动异常捕捉与分钟级故障预警，借助远程调控减少现场人工巡检频次，融合机组运行、负荷及水文数据仿真推演最优工况。整套体系通过数字孪生建立设备实体与虚拟模型的双向映射，改变了依靠经验判断机组状态的粗放模式，为水电站机电设备全生命周期智能运维提供核心技术支撑。如图 1。

水电站机电设备智能监控数字孪生闭环架构

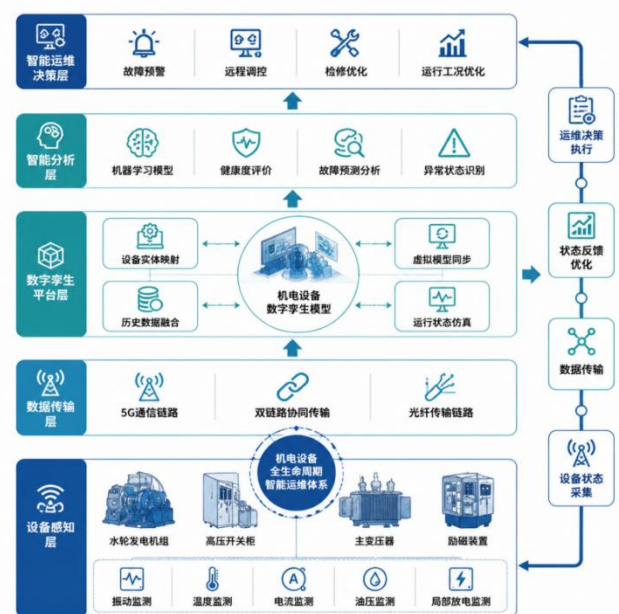


图 1 水电站机电设备智能监控数字孪生与六项运维机制闭环架构

2 水利水电工程管理运用智能监控技术现存制约因素

2.1 工程现场监控设备布设适配性不足

水电站机电厂房处于高湿、强电磁与油污共存的特殊工况环境，通用型传感元件长期部署于机组及高压柜周边，易受电磁干扰和油污侵蚀，信号失真、数据漂移等问题频发。汛期厂房渗漏或通风故障可能损坏机电传感通信节点，链路中断将直接导致机组振动、温度等核心运行数据断档，故障预警与负荷调控因而失去实时数据支撑。当前行业尚未形成机电设备专用传感选型的统一规范，坝体结构传感器与机组监测传感器在防护等级及抗干扰标准上存在混用，监测灵敏

度难以匹配微小振动、局部放电等细微故障特征。机电传感布设也缺乏量化点位标准,机组轴承、高压绕组等关键点位布设不足,辅助供水通风设备传感过度冗余,布设方案难以有效适应各类机电设备差异化的监测需求。

2.2 多类型监控数据融合互通水平偏低

市场内各类监测设备生产标准不统一,不同厂商采用差异化通信协议与数据存储格式,监测终端输出数据无法直接对接处理平台,接口适配消耗大量调试人力与时间。工程运行期间同步产生结构形变、机组运行、水文气象及环境生态等多维监测数据,各类信息分属独立存储通道,缺少统一归集转换模块,数据孤岛问题突出^[2]。传统数据库在算力与存储架构方面难以承载高频次海量数据的实时读写需求,数据清洗、分类及关联运算效率偏低,多源信息联动分析难以实现,大量监测数据仅完成基础存储而未能挖掘内在关联规律,难以支撑调度决策、故障预警等深层次智能化应用。

2.3 智能监控运维配套管理机制不完善

当前行业尚未形成统一的监控设备标准化巡检流程,运维人员检修操作缺少规范参照,设备故障排查与零部件更换工作随意性较强,漏检、检修不到位等问题易发。监控系统故障处置缺乏分级响应配套机制,故障上报、现场处置与事后复盘流程彼此割裂,信号丢失或设备失效等状况发生时处置周期较长,持续影响监控系统完整运行。行业复合型专业人才供给不足,现有运维人员仅掌握基础水利工程操作,缺少大数据与智能算法相关实操能力,监测数据解析工作难以深入开展。设备全生命周期管理模式尚未全面普及,传统定期检修方式仍占据主导,无法依据设备实时运行状态动态调整维保计划,整体运维成本偏高。

3 数字孪生赋能下水电站机电设备智能监控及六项机制落地实施路径

3.1 分机组分区布设机电专用感知终端,夯实数字孪生实体数据底座

(1) 坝体监测专用设备合理布置:水轮发电机组作为水电站核心机电装备,其轴承、转子、定子等部件的振动、温度及局放状态捕捉均依赖高灵敏度机电专用传感器。选型优先采用抗强电磁且防油污的光纤振动、温度及局放传感装置,沿机组轴系、定子绕组和高压母线分层布设,覆盖推力轴承、水导轴承、主变铁芯等故障高发区域,实现对微米级振动异常的精准捕捉。布设过程结合机组容量与电压等级划分监测

分区并制定位点密度标准,杜绝核心部件感知点位缺失及辅助设备传感过度冗余。所有传感设备加装防油污与防潮屏蔽配件以适应厂房恶劣工况,配套 5G 与光纤双冗余传输通道,将数据传输延迟稳定控制在 100 毫秒以内,避免线路故障引发运行数据中断。整套感知网络为数字孪生虚拟模型实时同步实体运行参数,达成机电设备全部件无死角状态采集,为孪生仿真及故障研判提供稳定可靠的数据源。

(2) 辅机电系统传感配套选型与布设:调速器、油压装置及冷却供水系统等辅机设备传感选型,需兼顾厂房油雾与电磁干扰环境、测量精度及长期稳定运行要求,针对油压、油温、冷却水流量、油泵振动等不同运行参数差异化配置专用传感装置,搭配压力变送器与流量变送器同步采集辅机联动运行数据,实现主机与辅机运行参数的联动采集。优先搭载自校准传感模块以削弱电磁干扰及油污造成的数据偏差,保障辅机参数长期采集准确性^[3]。在油压站、冷却水泵、阀门执行器等故障高发点位加密布设传感,常规通风排水设备适度减少监测点位,平衡监测精度与建设成本。所有传感通信模块统一标准化接口,可直接接入数字孪生一体化平台,配套边缘计算单元本地预处理原始数据,削减孪生平台云端传输负载。整套辅机传感布设方案贴合厂房机电工况实际,为主机与辅机联动的数字孪生仿真提供完整可靠的底层感知数据。

3.2 搭建机电设备数字孪生一体化数据交互仿真平台

(1) 多源监测数据统一归集模块搭建:多源机电数据统一归集模块建立在标准化通信接口规范基础上,用以破除各厂家机组、辅机及高压设备因传感协议不统一而形成的数据壁垒,可同步接入发电机组、主变压器、励磁装置、调速器以及水文负荷等多维度机电运行信号。模块内置数据转换与清洗单元,自动完成各类异构数据的格式统一与无效异常值剔除,适配高频次监测数据的持续写入需求,依托分布式存储架构承载 TB 级监测信息。传输层面兼容光纤与 5G 双通道接入,将各终端采集数据稳定汇总至平台,全程保障传输延迟控制在 100ms 以内。模块配套分级存储策略,对实时动态数据与历史归档数据加以区分,实现监测信息有序分类存放,打通底层感知设备与上层运算单元间的数据通道,使各业务板块的数据孤岛彻底打破,为后续智能分析供给完整、规整且可联动调用的基础数据源。

(2) 监测数据智能解析运算模块搭建:监测数据智能解析运算模块融合云计算算力与机器学习算法,承接归集模块所输出的标准化数据并开展多层次深度

运算。模块内置数字孪生健康评价模型，持续比对孪生镜像同步的实时参数与历史标准工况区间，快速识别振动异常、绕组过热及局部放电等故障并推送分钟级预警^[4]。结合负荷及来水水文数据开展孪生仿真耦合计算，自动生成最优负荷分配方案与停机检修优化建议。模块搭载边缘协同运算机制，基础异常识别任务可在本地完成，以此降低云端算力负荷并提升系统响应速度。针对海量监测数据搭建专属分析模型，挖掘各类参数间的内在关联规律，摆脱传统人工经验研判路径，以量化分析结论支撑工程管控决策，充分释放全域监测数据的内在应用价值。

3.3 建立适配机电设备运维的六项长效管控机制

(1) 设备日常巡检标准化流程制定：落实机电运维六项机制中的常态化巡检，需围绕机组传感、辅机监测终端、机房孪生平台及通信链路划分巡检分区，依照设备故障风险等级设置日、周、月三级巡检周期，明确各周期内传感元件、线路及孪生终端的具体核查项目与判定标准。巡检依托数字孪生实时数据进行状态检修，不再沿用单一周期定检模式，重点校验传感精度、线路防油屏蔽层完好性及 5G 光纤传输稳定性，对高电磁环境下的传感还需增加抗干扰性能检测。流程统一归纳为实体设备核查、孪生数据比对、小型传感故障就地处置及数字化台账归档四步，在孪生平台上统一填报标准，完整留存机组及辅机传感缺陷与运行参数记录。这套标准化巡检机制能约束人工随意操作，减少传感漏检与检修不到位问题，全程掌握感知设备全生命周期状态，从源头避免监测数据失真。

(2) 监控故障快速处置配套机制建立：落实机电运维六项机制中的分级故障处置，需按照故障影响机组运行程度划分为传感信号漂移、监测终端失效、通信链路中断及数字孪生平台仿真异常四类等级，配套相应处置流程并配置机电与数字化专职人员分别应对各类故障。数字孪生平台识别到传感异常或数据断联后自动推送故障点位及类型至运维移动端，可显著缩短故障定位时间；针对传感油污损坏、厂房通信线路故障等高频问题，在机电厂房就近存放标准化备用配件以减少调取耗时。机制同时配套故障复盘改进环节，每次处置完成后梳理根源、时长及优化方案并同步更新传感运维标准。同步落实人才培养机制，常态化开展机电实操与孪生平台运维的复合型培训，使运维人员兼具机组检修和数据分析能力，以此缩短故障处置时长并保障数字孪生机电监控系统的持续稳定运行。

4 数字孪生+六项机制赋能水电站机电运维应用价值

4.1 完善工程全域运行状态实时监测能力

全域布设机电专用传感可同步采集机组振动、轴承温度、局放、油压及辅机流量等二十余项核心指标，依托光纤与 5G 双链路将数据传输延迟控制在 100 毫秒以内，实现全部设备无间断状态采集。传感装置针对厂房高湿、油雾及强电磁工况进行适配，能精准捕捉微米级振动所反映的细微故障，即便在渗漏或检修等特殊工况下仍可保障监测链路稳定。数字孪生平台支持机组与辅机远程调控，大幅减少现场人工巡检频次，数据实时同步至虚拟镜像后一旦偏离标准区间即推送分钟级预警，提前识别定子过热、轴系失衡及油压异常等隐患。该体系有效克服了传统人工巡检数据滞后、覆盖不全及巡检空档期存在盲区的弊端，搭建起全天候全覆盖的数字感知网络，为机组运行安全构筑坚实的前置防线。

4.2 提升水利水电数据综合分析研判水平

数字孪生一体化归集模块整合主机、辅机、变压器及来水负荷等多源异构机电数据，以打破不同厂家设备间的数据孤岛，并依靠分布式存储承载高频监测数据的稳定读写。孪生仿真运算模块搭载机器学习模型，实时比对虚拟镜像参数与历史标准工况区间，自主挖掘温度、振动及负荷间关联规律，摆脱单纯依赖经验判断故障的模式^[5]。结合来水与负荷数据进行耦合仿真后，自动生成兼顾安全与能效的优化方案，同时提前预判设备老化及异常振动等隐患。边缘计算节点承接基础数据的本地预处理，有助于加快孪生平台响应速度，原始数据经清洗与仿真建模后转化为量化故障判定结论，不再仅作存储之用，为负荷调控、隐患治理及维保计划制定提供精准的数字化依据。

4.3 健全工程监控全流程规范化管理模式

机电常态化巡检、分级故障处置与人才培养等六项运维机制，搭配数字孪生平台构成完整运维链条，覆盖传感布设、数据同步、孪生仿真、故障处置及全周期维保各环节。统一传感接口、数据格式及操作规范，有助于降低调试与检修的人为误差，依托实时状态数据实施状态检修，可替代固定周期维保模式，节约人力与物资成本。通过人才培养机制打造机电与数字化复合型队伍，打通运行、检修及调度部门间的数据共享通道，实现机组运维、故障应急与负荷调配协同作业。数字孪生结合六项机制使流程全程留痕、责任划分精准、故障风险可控，推动水电站机电设备从经验式人工检修转向数字孪生驱动、六项机制约束的

标准化运维新形态。

5 结语

数字孪生构成水电站机电设备智能运维的核心技术载体,但现阶段专用传感适配性欠佳、多源数据相互割裂及运维制度不成体系等问题,仍制约着数字化运维成效的发挥。通过分区布设感知终端、搭建仿真

平台并配套落地完整六项机制,能够针对上述短板形成系统性方案,促使设备全域感知能力升级,孪生仿真对故障的研判精度也得到明显提升,标准化管控体系由此得以完整构建。伴随数字孪生技术持续迭代,未来运维体系将向虚实协同与全生命周期精细化管控演进,为机组安全稳定运行及水能高效转化提供长效数字化支撑。

参考文献:

- [1] 钟成,曾小芳.水利水电工程中智能监控系统的应用与效能研究[J].水上安全,2025,(20):79-81.
- [2] 刘德平.数字化时代水利水电工程施工技术的优化研究[J].水上安全,2025,(20):64-66.
- [3] 杨波.人工智能在水利工程设计行业的应用思考[J].黑龙江水利科技,2025,53(8):162-164.
- [4] 赵含雨.水利工程管理中智能监控系统的应用现状与未来发展趋势[J].中国战略新兴产业,2024,(36):60-62.
- [5] 张蕾.水利水电工程智能灌浆控制技术与控制系统分析[J].科学技术创新,2024,(15):123-126.