

基于数字孪生的水电厂设备故障预测与健康管理研究

史宏博¹, 刘朋成², 杨博瀚²

(1. 国网东北分部绿源水力发电公司太平湾发电厂; 2. 国家电网公司东北分部)

【摘要】文章聚焦基于数字孪生的水电厂设备故障预测与健康管理研究, 阐述数字孪生技术原理, 分析其在水电厂设备领域应用的重要意义, 详细介绍基于该技术的设备故障预测方法(含模型构建、数据处理等环节)及设备健康管理方法。研究表明, 数字孪生技术能显著提升水电厂设备故障预测准确性与设备健康管理水平, 保障水电厂安全高效运行, 为水电行业设备管理提供新路径与技术支持。

【关键词】数字孪生; 水电厂设备; 故障预测; 健康管理

中图分类号: TV738

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.022

Research on Fault Prediction and Health Management of Hydropower Plants Based on Digital Twins

SHI Hong-bo¹, LIU Peng-cheng², YANG Bo-han²

(1.State Grid Northeast Branch Green Source Hydropower Power Company Taiping Bay Power Plant; 2.Northeast
Branch of State Grid Corporation of China)

【Abstract】The article focuses on the research of fault prediction and health management for hydropower plant equipment based on digital twin, expounds on the technical principles of digital twin technology, analyzes the great significance of its application in the field of hydropower plant equipment, and details the equipment fault prediction methods (including links such as model construction and data processing) as well as equipment health management methods based on this technology. Studies have shown that digital twin technology can significantly improve the accuracy of hydropower plant equipment fault prediction and the level of equipment health management, ensure the safe and efficient operation of hydropower plants, and provide new paths and technical support for equipment management in the hydropower industry.

【Keywords】digital twin; hydropower plant equipment; fault prediction; health management

1 引言

水电作为清洁能源,在我国能源结构中占据举足轻重的地位。水电厂设备长期运行过程中易发生故障,而传统设备管理方式在故障预测与健康管理方面存在一定局限性。应用数字孪生技术可实现设备运行状态精准感知、故障提前预警及科学健康管理等功能,对于提升水电厂运行可靠性、降低运维成本、保障电力稳定供应具有重大意义,已成为水电行业的研究重点。

2 数字孪生的概述

数字孪生是充分利用物理模型、传感器实时数据及运行历史信息,融合多学科、多物理量、多尺度与多概率维度开展模拟的过程,可在虚拟空间完成对实体设备的映射,以完整呈现对应实体设备的全

生命周期过程。其并非单纯构建虚拟模型,而是通过数据交互实现物理实体与虚拟模型的实时同步及双向驱动^[1]。

在技术架构上,数字孪生包含数据采集层、数据传输层、数据处理与分析层及应用层:数据采集层借助各类传感器,采集物理实体的温度、压力、振动等运行操作数据;数据传输层依托物联网、5G 等通信技术,将采集的数据快速精准传输至云端或本地服务器;数据处理与分析层运用大数据分析、人工智能等技术方法,实现对海量数据的清洗、挖掘与建模;应用层则通过直观清晰的可视化界面,展示设备状态、性能预测等关键信息,为决策提供支撑作用。

3 基于数字孪生的水电厂设备故障预测与健康管理价值

将数字孪生技术应用于水电厂设备故障预测与

健康管理,不仅能显著提升水电厂运营效率与运行可靠性,还可有效降低运维成本,具备较高实用价值。通过构建设备数字孪生模型,实现对设备运行数据的实时采集与深度分析,能够提前识别潜在故障隐患^[2]。传统故障检测多为事后诊断模式,而数字孪生技术可实时监测设备振动、温度、压力等信息数据并开展趋势分析,进而采用机器学习算法构建故障预测模型,预测设备故障发生的可能性及时间节点,以便运维人员提前制定维修计划,避免突发故障导致的停机损失,保障电力稳定供应。

在健康管理层面,数字孪生技术为设备健康状态评估提供综合化、实时化服务。以设备全生命周期数据为支撑,建立设备从设计、制造到运行维护的健康档案,直观呈现设备实时状态与历史运行信息。运维人员可依据这些信息科学安排设备维护保养工作,并优化维护策略,推动维护模式从定期维护向状态导向的精准维护转变,从而提升设备利用率、延长设备使用寿命、降低整体运维成本。

4 基于数字孪生的水电厂设备故障预测

4.1 孪生模型的构建

孪生模型构建是水电厂基于数字孪生开展设备故障预测的基础,需精准映射物理设备的结构、行为与性能。以水轮机为例,其数字孪生模型构建需从多维度推进。①几何模型构建。采用三维激光扫描技术获取水轮机叶片、转轮及蜗壳的精确几何形态,扫描精度可达0.1mm~1mm,通过点云数据生成高精度三维模型,确保模型与实体在几何尺寸上高度吻合,如叶片厚度误差可控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 内^[3];借助计算机辅助设计(CAD)技术,将设计图纸中的精细尺寸参数整合至模型,保障模型的完整性与可靠性。②物理模型构建。基于水轮机物理工作原理(如流体力学、材料力学),构建描述其工作特性的数学模型:流体力学层面,运用计算流体力学(CFD)技术,通过求解Navier-Stokes方程模拟水流在蜗壳、导叶及转轮中的动态行为,深入分析压力分布、流速变化等关键参数;材料力学层面,结合水轮机部件在高速旋转与水流冲击下的受力情况,采用有限元分析(FEA)方法计算部件应力与应变分布,确保模型精准反映物理实体的力学性能。

4.2 数据采集处理

针对设备关键部位及易故障部位部署传感器:如水轮机轴承处设置振动传感器监测振动信号,其频率响应范围为0~10kHz,灵敏度可达 $100\text{mV}\cdot\text{g}^{-1}$;发电机绕组处安装温度传感器,测量精度达 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。同时,通过数据采集系统定时采集设备运行日志,获取设备开停时间、运行工况切换等信息。数据处理环节还包含特征工程,用于提取反映设备运行状况的核心特征:通过时域分析,计算振动信号的均值、方差及峰值等指标;通过频域分析实现时域信号至频域信号的转换,并提取特征频率成分。

4.3 故障特征提取

频域分析通过傅里叶变换将时域信号转换至频域,分析特定频率成分的变化规律。以水轮机为例,正常工况下其振动频谱具有特定频率分布,叶片开裂会导致其固有频率及倍频的幅值出现异常变化,通过监测这些特征频率下的幅值,可判断叶片是否存在故障隐患;叶片产生裂纹后,上述特定频率下的幅值会发生明显改变。

时频分析方法融合时域与频域信息,能更全面地反映信号特性,小波变换是时频分析的常用技术:通过选取适配的小波基函数对信号进行分解,获取信号在不同尺度下的时频分布。对水轮机故障信号实施小波变换,可捕获不同时间尺度下的信号突变信息,进而分析其失效时间与频率特性。

5 基于数字孪生水电厂设备健康管理

5.1 评估指标的构建

构建科学合理的评估指标体系,是基于数字孪生开展水电厂设备健康管理、全面准确反映设备健康状态的重要前提。在设备性能维度,水轮机效率为核心指标,正常运行时,大型混流式水轮机效率通常维持在90%~95%(见表1)。通过对比水轮机实时监测效率与设计效率,可评判其性能状况;若效率低于90%,可能预示水轮机内部存在磨损、气蚀等问题,进而影响设备健康。

同时,水轮机流量偏差也是关键评价指标。设计流量是保障水轮机平稳运行的核心参数,实际运行流量与设计流量的偏差需控制在 $\pm 10\text{mm}$ 范围内;超出该范围将导致水轮机脱离最优工况,加剧设备损耗。

对于发电机,功率因数为重要评估指标,通常需维持在0.8~0.95;功率因数过低表明发电机运行状态不佳,可能存在励磁系统故障或负载配置不合理问题,影响发电效率与设备寿命。此外,发电机定子、转子温度不可忽视:定子绕组正常运行温度一般不超过120℃,转子绕组正常运行温度一般不超过130℃;温度过高会加速绝缘材料老化,严重时可能诱发短路故障,威胁设备安全。

在设备运行稳定性维度,振动与摆度为核心指标:在规定工况下,水轮机轴承水平方向振动幅度通常不超过70μm,垂直方向不超过50μm;在规定转速范围内,发电机轴摆度通常不超过150μm。振动与摆度超标,表明设备存在失衡、对中偏差或零部件松动问题,长期运行将导致设备损坏。

表1 评估指标

设备类型	评估指标	指标范围/说明
水轮机	效率	正常运行时,90%~95%;不超过90%可能暗示内部存在问题
水轮机	流量偏差	实际运行流量与设计流量偏差应限制在±10mm范围内
发电机	功率因数	通常维持在0.8~0.95范围内;过低说明运行状态较差
发电机	定子绕组温度	正常运行时一般不超过120℃
发电机	转子绕组温度	正常运行时一般不超过130℃
水轮机/发电机	振动幅度 (水轮机轴承)	水平方向不超过70μm;垂直方向不超过50μm
发电机	轴摆度	在规定的转速范围内,通常不会超过150μm

5.2 实时监控预警

实时监控预警是基于数字孪生的水电厂设备健康管理体系中至关重要的环节,可及时识别设备潜在故障隐患,保障水电厂安全平稳运行。在水电厂设备上密集部署各类高精度传感器,实现对设备的全方位实时监控:在水轮机叶片、轴承、主轴等关键组件安装振动传感器,测量精度可达0.1μm,能实时捕捉设备运行中的微小振动波动;在水轮机蜗壳、导叶等关键部位布设压力传感器,测量精度高达0.01MPa,主要用于监测水压波动;在发电机定子绕

组、转子绕组及铁芯设置温度传感器,精度达±1℃,实现设备温度实时监控。

借助物联网技术将传感器采集的数据传输至数据处理中心,传输速率达毫秒级。数据处理中心采用大数据分析 with 人工智能算法,对海量实时数据进行深度挖掘与分析;当监测数据超出正常阈值时,系统将立即触发预警机制。

6 结语

总之,数字孪生技术为水电厂设备故障预测与健康管理带来创新性变革。通过建立精准的孪生模型、开展有效的数据采集与处理、实施科学的故障预测及综合的健康管理等举措,水电厂设备管理水平实现显著提升。

未来,在数字孪生技术与其他新兴技术深度融合的背景下,水电厂设备潜能有望进一步释放,能源利用效率将持续提升,为水电行业可持续发展注入新动能,推动水电行业迈向智能化、现代化发展新阶段。

参考文献

[1] 尤渺. 基于模糊 Petri 网和马尔科夫链理论的水电厂设备故障应急响应模型[J]. 电子设计工程, 2024, 32 (10): 59-63.

[2] 冯玉川. 水电厂设备自动化故障诊断系统研究[J]. 自动化应用, 2024, 65 (22): 80-82.

[3] 吴晓翠, 游超. 数字化技术在水电厂设备状态监测与故障诊断中的应用[J]. 数字技术与应用, 2025, 43 (2): 223-225.

[4] 尤渺. 基于模糊 Petri 网和马尔科夫链理论的水电厂设备故障应急响应模型[J]. 电子设计工程, 2024, 32 (10): 59-63.