

基于数字孪生的水电站智能状态评估与故障预警系统研究

南江涛

西藏大唐扎拉水电开发有限公司，西藏 山南 851299

DOI:10.61369/WCEST.2025060004

摘 要： 随着水电站规模与运行复杂度的提高，传统监测与维护模式已难以满足高效、安全运行的需求。本文提出基于数字孪生技术的水电站智能状态评估与故障预警系统。通过构建虚实融合的数字孪生模型，实现设备运行数据的实时感知、状态评估与预测性维护。系统结合大数据分析、人工智能与物理建模技术，对关键设备进行智能诊断与寿命预测。研究表明，该系统可显著提高水电站运行的可靠性与智能化水平，为数字化水电建设提供技术支撑。

关 键 词： 数字孪生；水电站；状态评估；故障预警；智能运维

Research on Intelligent Condition Assessment and Fault Early Warning System for Hydropower Stations Based on Digital Twin

Nan Jiangtao

Tibet Datang Zhala Hydropower Development Co., Ltd., Shannan, Tibet 851299

Abstract： With the increasing scale and operational complexity of hydropower stations, traditional monitoring and maintenance models have struggled to meet the demands for efficient and safe operation. This paper proposes an intelligent condition assessment and fault early warning system for hydropower stations based on digital twin technology. By constructing a digital twin model that integrates virtual and real elements, the system enables real-time perception of equipment operation data, condition assessment, and predictive maintenance. Combining big data analytics, artificial intelligence, and physical modeling techniques, the system performs intelligent diagnostics and lifespan predictions for key equipment. The research results indicate that this system can significantly enhance the reliability and intelligence level of hydropower station operations, providing technical support for the digital construction of hydropower.

Keywords： digital twin; hydropower station; condition assessment; fault early warning; intelligent operation and maintenance

引言

近年来，数字孪生技术在工业领域的应用迅速发展，为复杂系统的智能管理提供了新思路。水电站作为能源系统的重要组成部分，其设备数量多、工况复杂，迫切需要智能化管理手段。本文从数字孪生的视角出发，研究水电站智能状态评估与故障预警系统的关键技术与实现路径，旨在提升水电站的安全性、经济性和运维效率。

一、数字孪生技术概述与理论基础

（一）数字孪生的概念与发展历程

数字孪生（Digital Twin）是指在虚拟空间中构建与现实物理实体相对应的数字模型，通过实时数据交互实现虚实映射与同步演化的技术体系。该概念由美国密歇根大学教授 Grieves 于 2003 年提出，并首次应用于 NASA 航天器健康管理。随着物联网、人工智能与大数据的发展，数字孪生已成为智能制造与智慧能源的

重要支撑技术。在制造领域用于设计、监控与全生命周期管理，在能源领域广泛应用于电网、风电及水电站的智能监测与优化控制。其发展正由单体孪生向系统级、群体级演进，并与云计算和边缘计算融合，推动能源行业数字化与智能化转型。

（二）数字孪生的关键组成与实现机制

数字孪生系统主要由物理实体、虚拟模型、数据交互与服务平台四个核心部分构成。物理实体是现实中可感知、可测量的对象，如设备、系统或环境；虚拟模型则是基于物理实体特征建立

的高精度数字化映射模型，通过数学建模、有限元分析和数据驱动算法相结合，形成可实时仿真的数字副本。数据交互层是虚实连接的关键环节，通过传感器网络、工业互联网和边缘计算技术，实现数据的高频采集、传输与动态更新；服务平台则承担着模型运算、数据存储、状态分析与可视化展示等功能，为系统的智能运维与决策支持提供基础。实现机制上，数字孪生依托于实时数据驱动模型更新，通过反馈与预测形成闭环控制，使虚拟模型能够动态反映物理实体的运行状态，并通过智能算法实现预测性分析与自适应优化，从而达到虚实同步、智能决策的目标。

（三）数字孪生在水电站中的应用价值

在水电站领域，数字孪生技术的引入为设备状态监测与运行优化带来了革命性变化。通过构建水轮机、发电机组及辅助系统的数字孪生体，可实现对关键设备的多维度实时监控与健康评估，及时发现潜在故障风险。基于孪生模型的仿真分析，可在虚拟环境中预测不同工况下设备的性能变化与能量损耗，从而优化运行调度方案，提升水电站的能效与安全性。同时，数字孪生结合人工智能算法，可实现设备的寿命预测与智能维护，减少非计划停机时间。其在水电站群的远程集中监控与协同调度中也展现出显著优势，为实现智慧水电与绿色能源管理提供技术支撑。

二、水电站智能状态评估模型构建

（一）系统结构与功能设计

水电站智能状态评估系统的总体架构通常由数据采集层、模型层与应用层三部分构成，形成一个从信息感知到智能决策的闭环体系。数据采集层是系统的基础部分，主要负责实时收集设备运行状态、环境参数和监测信号，包括水轮机振动、温度、压力、电气参数等信息。该层通过传感器网络、工业物联网及SCADA系统实现多源数据的高频采集与传输，为上层分析提供丰富的数据支撑。模型层是系统的核心，承担数据建模、状态分析与健康评估等功能。通过构建设备的物理模型与数据驱动模型，实现虚实融合的运行状态映射。该层利用大数据分析、人工智能与数字孪生技术对采集数据进行动态仿真与特征建模，实时评估设备健康状态。

（二）运行数据融合与特征提取方法

在水电站复杂的运行环境中，多源异构数据的融合是实现精准状态评估的关键。数据主要来源于传感器网络、SCADA系统、历史运行记录以及设备维护日志等，不同来源的数据在采样频率、格式及精度上存在显著差异。为此，系统采用数据清洗、时间同步与统一编码技术，确保多源信息的一致性与可比性。融合过程中引入特征工程思想，对关键运行参数进行统计分析并降维处理，通过主成分分析（PCA）、小波变换及相关性分析等方法提取代表设备运行状态的核心特征。针对复杂设备的动态特性，还可利用深度学习中的自编码器或卷积神经网络对高维时序数据进行特征自动提取与模式识别。

（三）状态评估算法与指标体系

水电站智能状态评估的核心在于建立科学的评估模型与指标

体系，以量化方式反映设备的健康水平。首先，在指标体系设计上，应根据设备类型与运行特征设置多维评估指标，包括机械性能、电气稳定性、热特征、振动信号、能效指标等，形成分层分权的综合评价体系。算法层面上，常采用模糊综合评估法实现多因素的综合分析，通过隶属度函数与权重矩阵计算设备的健康等级。其次，引入机器学习方法如支持向量机（SVM）、随机森林、梯度提升树等，对历史数据进行训练，实现对设备异常趋势的预测与识别。针对大规模数据环境，可利用深度神经网络（DNN）与长短期记忆网络（LSTM）建立动态评估模型，从而对复杂非线性关系进行自学习与优化。

三、故障预警机制与实现技术

（一）故障数据建模与模式识别

水电站设备运行过程中，故障往往以隐蔽、渐变的形式出现，因此建立精准的故障数据建模与模式识别机制至关重要。故障数据建模以时序监测数据为核心，通过对振动、温度、电流、电压、流量等参数的动态采集与分析，构建设备运行状态的多维数据特征空间。为了捕捉故障早期征兆，系统利用滑动窗口法对时间序列进行分段建模，并通过差分分析、趋势拟合与频谱分析识别异常变化。异常检测算法在该过程中发挥关键作用，常用方法包括统计阈值检测、孤立森林（Isolation Forest）、主成分分析（PCA）降维异常识别以及基于重构误差的自编码器检测等。这些算法能够有效区分正常波动与异常行为，从而识别潜在故障模式。

（二）预警模型的训练与优化

故障预警模型的核心在于利用机器学习与深度学习方法，从大量历史数据中挖掘故障发生的规律与演变趋势。首先在模型训练阶段，需对历史故障样本进行标注与平衡处理，避免类别不平衡导致模型偏差。传统算法如支持向量机（SVM）和随机森林在小样本场景下表现稳定，而在大规模数据环境中，深度学习方法如卷积神经网络（CNN）和长短期记忆网络（LSTM）表现出更强的时序特征捕捉能力。LSTM尤其适用于处理非线性、长周期的运行信号，可通过记忆门结构提取故障演化特征，实现对未来状态的趋势预测。同时，贝叶斯推理方法可在模型中引入不确定性评估，对预测结果进行置信度量化，从而提升预警决策的可靠性。模型优化过程中可采用交叉验证、超参数调优与特征选择等技术手段，确保模型在不同运行工况下的泛化能力。

（三）预警系统的可视化与决策支持

预警系统的最终目标是将复杂的分析结果以直观、可操作的方式呈现给运维人员，从而辅助科学决策。系统可视化平台通过集成三维数字孪生模型、数据面板与告警中心，实现对设备运行状态、健康趋势与故障风险的动态展示。预警结果通过颜色标识、风险等级图与趋势曲线的方式呈现，使运维人员能够迅速识别异常部位及风险程度。同时，系统提供多层次的决策支持功能，包括自动生成预警报告、智能推荐维护策略与基于历史案例的知识推理。通过融合专家规则与机器学习预测结果，系统可实现多源信息的综合判断，形成智能化辅助决策机制。在应急响应

方面，平台可通过移动终端或控制中心实时推送告警信息，并结合地理信息系统（GIS）定位故障设备，指导维护人员快速处置。该可视化与决策支持体系不仅提高了预警响应效率，还为水电站实现智能化、可视化和协同化管理提供了有力保障。

四、系统开发与工程应用验证

（一）数字孪生系统平台架构设计

数字孪生水电站系统平台的整体架构以“感知—孪生—决策—优化”的逻辑构建，融合硬件、软件与数据交互三大体系。硬件部署方面，系统主要由多类型传感器、工业控制终端、边缘计算节点及高性能服务器组成。传感器布设于关键设备与运行环境中，实现对振动、温度、流量、压力、电能质量等信息的实时采集；边缘计算节点承担数据预处理、过滤与初步分析任务，减轻中心服务器的计算压力。软件模块层包括数据管理模块、模型仿真模块、状态评估模块、预警分析模块与可视化展示模块。数据管理模块负责数据清洗、同步与存储；模型仿真模块构建基于物理规律与数据驱动的混合孪生模型；状态评估与预警模块实现设备健康评估与风险预测；可视化模块通过三维建模与动态图表，实现设备运行状态的实时展示。数据交互方面，系统利用工业物联网（IIoT）与云平台技术建立多层通信机制，采用 MQTT 与 OPC-UA 等标准协议，确保信息传输的高可靠性与低延迟。平台还通过 API 接口与调度系统、SCADA 平台进行数据互联，实现虚实融合与智能闭环控制，为水电站提供全面、实时的运维支撑。

（二）工程案例与应用效果分析

以西南地区某大型水电站为工程案例，系统在机组监测、运行优化与故障预警方面取得显著成效。在部署过程中，通过对主机设备、进水口闸门、冷却系统及电气控制设备的全面传感监测，构建了完整的数字孪生体，实现了物理实体与虚拟模型的双向映射。系统通过实时数据流监控，实现设备健康状态可视化与异常自动识别。当监测到机组振动幅值异常上升时，系统通过预警模型及时识别出轴承磨损趋势，并提前 15 小时发出维护警报，

避免了一次可能的停机事故。在运行优化方面，系统根据历史运行数据与仿真结果，动态调整水轮机导叶开度与负荷分配，使发电效率提升约 3.7%。此外，平台的可视化监控界面极大提高了运维人员的工作效率，实现了从人工巡检到智能巡检的转变。通过对应用效果的分析，该系统在故障预测准确率、设备利用率与维护成本控制等方面均表现优异，验证了数字孪生技术在水电领域的工程可行性与经济效益。

（三）技术挑战与未来发展方向

尽管数字孪生技术在水电站智能化建设中取得了显著进展，但仍面临若干技术挑战。首先，数据安全与隐私保护问题亟需解决，海量运行数据的实时传输与云端存储容易遭受网络攻击与信息泄露风险，需要通过加密通信、访问控制与多重身份验证来保障系统安全。其次，模型泛化与自适应能力不足是当前数字孪生在复杂工况下应用的瓶颈。由于水电站工况变化频繁，不同流域、不同机型的特征差异较大，现有模型往往缺乏跨场景迁移能力。未来可通过引入联邦学习与自进化模型技术，实现模型在不同站点间的协同优化与知识共享。此外，系统的实时性与计算效率仍需提升，如何在保证高精度的同时实现低延迟计算，是数字孪生落地的关键。展望未来，数字孪生将与人工智能、大数据分析 & 边缘计算深度融合，构建多层协同的智能水电体系，实现从单站管理向流域级智慧调度的跨越，为清洁能源的高效、安全与可持续运行提供核心动力。

五、结语

本文围绕基于数字孪生的水电站智能状态评估与故障预警系统展开研究，构建了集数据采集、模型仿真、智能分析与决策支持于一体的综合体系。研究结果表明，数字孪生技术能够有效提升水电站设备运行的可视化、智能化与安全性，实现从被动维护向主动预测的转变。通过工程应用验证，该系统在运行优化与风险防控方面展现出显著优势。未来，将进一步加强模型自适应学习与多站点协同优化，推动智能水电的持续发展与实践落地。

参考文献

- [1] 肖楚生. 水电站机电设备智能运维系统的关键技术与应用展望 [J]. 小水电, 2025, (04): 64–69. DOI: CNKI: SUN: XSDI.0.2025-04-016.
- [2] 刘钰琦, 王瑞清, 肖权, 等. 水电站调速器数字孪生系统建设探索与研究 [J]. 水电站机电技术, 2025, 48(03): 30–36+135. DOI: 10.13599/j.cnki.11-5130.2025.03.008.
- [3] 孙雨欣. 水电机组状态预警与健康评估研究及其数字孪生运维系统设计 [D]. 西安理工大学, 2024. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2024.001983.
- [4] 杨洋. 面向数字孪生的水电站调速系统状态评估关键技术研究 [D]. 三峡大学, 2024. DOI: 10.27270/d.cnki.gsxau.2024.000470.
- [5] 李井林. 基于 BIM 的曲线梁桥参数化建模及智能运维应用研究 [D]. 西华大学, 2024. DOI: 10.27411/d.cnki.gscgc.2024.000886.
- [6] 王栋. 空天地感知数据驱动下高拱坝混凝土智能振捣研究 [D]. 天津大学, 2022. DOI: 10.27356/d.cnki.gtjdu.2022.004266.
- [7] 陈曦, 曹波. 数字技术在水库大坝智能设计中的应用 [C]// 中国大坝工程学会, 巴西大坝委员会, 西班牙大坝委员会, 美国大坝委员会. 建造安全韧性绿色的国家水网之“结”. 长江水利水电开发集团 (湖北) 有限公司; , 2024: 119–123. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.030885.
- [8] 唐一中. 水电机组状态识别与故障诊断研究及其数字孪生运维平台开发 [D]. 西安理工大学, 2024. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2024.001913.
- [9] 刘雷. 面向数字孪生的水轮发电机转子故障诊断模型研究 [D]. 三峡大学, 2024. DOI: 10.27270/d.cnki.gsxau.2024.000587.
- [10] 余栋. 基于多源信息融合的水电机组智慧运维研究 [D]. 西安理工大学, 2024. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2024.000542.