

基于数字孪生的水电站智能运维系统设计与优化研究

余 厅

贵州西源发电有限责任公司 贵州 六盘水 553000

摘要: 本文聚焦基于数字孪生的水电站智能运维系统设计与优化。首先阐述数字孪生技术基础及水电站运维场景需求,分析数字孪生在水电站运维中的适配性。接着详细设计系统总体架构与核心模块,包括数据采集与预处理、数字孪生模型构建、智能诊断与预测、运维决策优化模块。随后研究系统优化策略与算法,涵盖模型轻量化、数据驱动动态修正、人机协同与可解释性增强。研究成果为水电站运维提供智能化解决方案,助力提升运维效率与安全性,推动水电行业智能化发展。

关键词: 数字孪生; 水电站智能运维; 系统设计; 优化研究

引言: 水电站作为能源系统核心枢纽,其运维管理至关重要。传统运维方式存在响应滞后、成本高企等问题,难以满足复杂运维需求。数字孪生技术作为前沿技术体系,通过物理实体与虚拟模型实时映射等,为复杂系统运维提供新路径。其动态仿真、多源数据融合等特性高度适配水电站运维场景。本文旨在设计基于数字孪生的水电站智能运维系统,并研究优化策略与算法,以提升运维智能化水平,保障水电站安全稳定运行,推动能源行业可持续发展。

1 数字孪生与水电站运维关键技术

1.1 数字孪生技术基础

数字孪生技术是通过物理实体与虚拟模型的实时映射、数据交互及动态仿真,实现对物理系统全生命周期管理的前沿技术体系,核心涵盖物理实体、虚拟模型、数据链路、服务应用四大核心要素。其技术基础贯穿感知、建模、仿真、决策全流程,其中高精度感知依赖物联网传感技术实现物理信号的实时采集,多维度建模融合几何建模、物理建模、行为建模等技术构建与实体一致的虚拟映射,动态仿真依托数值计算与人工智能算法复现物理系统运行状态,实时决策则通过数据分析与规则引擎输出最优方案^[1]。该技术打破了物理世界与虚拟世界的壁垒,通过数据驱动实现对复杂系统的精准感知、预测与调控,为水电站这类大型复杂能源设施的运维管理提供了全新技术路径,其跨领域融合特性也为后续适配水电站运维场景奠定了核心技术支撑。

1.2 水电站运维场景需求分析

水电站作为能源系统的核心枢纽,其运维场景具有设备结构复杂、运行环境严苛、安全要求极高、运维周期长等显著特征,核心需求集中于安全保障、效率提升、成本控制三大维度。在安全保障方面,水轮发电机组、输电

线路、泄洪设施等关键设备的故障易引发重大安全事故,需实现故障的早期预警与精准定位;效率提升层面,传统运维依赖人工巡检与经验判断,存在响应滞后、排查低效等问题,亟需智能化手段优化运维流程、缩短故障处置时间;成本控制方面,大型设备的盲目检修与备件积压导致运维成本高企,需通过精准预测实现视情检修,降低非必要支出。随着新能源电力系统的融合发展,水电站还需适配电网调峰调频的动态需求,运维工作需具备更强的实时性与协同性,这些需求为数字孪生技术的应用提供了明确的场景导向。

2 数字孪生在水电站运维中的适配性

2.1 动态仿真能力与实时映射优势

数字孪生的动态仿真与实时映射特性,高度适配水电站运维需求,为动态管控难题提供关键支撑。实时映射借助物联网传感网络与边缘计算,毫秒级采集、传输水电站关键设备运行参数及环境数据,实现虚拟模型与物理实体状态同步,打破传统“离线监测、滞后响应”局限^[2]。动态仿真基于多物理场耦合算法,复现水电站不同工况下的设备运行状态,精准模拟故障演化与连锁反应。运维人员可在虚拟场景开展设备运行推演、故障模拟排查,无需中断生产,提升运维安全性,提前预判风险,为运维策略制定提供精准数据,弥补传统运维对动态工况适配不足的缺陷。

2.2 多源异构数据融合与可视化分析

水电站运维数据多源异构,涵盖设备传感、检修记录等多种类型,传统管理整合难、分析效率低、可视化不足。数字孪生技术具备强大融合能力,通过数据标准化、分布式存储与边缘计算,统一整合清洗不同格式、维度数据,消除数据孤岛。依托可视化渲染技术,以三维模型、动态图表等形式直观呈现融合数据,涵盖设备

内部结构等核心信息。运维人员可全景监控,快速定位异常关联部件,精准追溯故障根源。这提升了数据利用率,推动运维决策从“经验驱动”转向“数据驱动”,增强运维精准性与高效性。

2.3 闭环反馈机制支持运维策略迭代

数字孪生构建的“感知-分析-决策-执行-反馈”闭环机制,深度适配水电站运维策略迭代需求,形成良性循环。物理实体运行数据实时传至虚拟模型,经分析诊断、预测风险后,决策模块输出运维方案下达执行单元,执行效果数据再反馈至模型验证策略、修正参数、优化算法。针对设备老化、工况变化等问题,闭环反馈可动态调整运维策略,如优化诊断算法精度、调整检修周期、优化机组调度方案。这种持续迭代特性,使运维策略与设备状态、外部环境需求匹配,提升运维管理适应性与科学性,推动水电站运维从“被动检修”向“主动优化”转型。

3 基于数字孪生的水电站智能运维系统设计

3.1 系统总体架构设计

基于数字孪生的水电站智能运维系统采用分层架构设计,自上而下分为感知层、数据层、模型层、应用层与保障层,各层级协同联动实现运维全流程的智能化管控。感知层作为数据采集终端,部署于水电站关键设备与全域场景,集成振动传感器、温度传感器、水位计等各类传感设备及视频监控装置,实现物理实体状态与环境信息的全面感知;数据层承担数据处理核心职责,通过边缘计算节点完成数据预处理,依托分布式数据库实现多源数据的安全存储与高效调用,配备数据加密与备份模块保障数据可靠性;模型层是系统核心支撑,构建涵盖几何、物理、行为的多维度数字孪生模型,融合仿真算法与人工智能模型实现状态推演与故障预测;应用层面向运维实际需求,提供故障诊断、预测检修、决策优化等核心服务,以可视化界面实现人机交互;保障层涵盖硬件支撑、软件协议、安全防护等模块,为系统稳定运行提供全方位保障。该架构实现了“数据-模型-应用”的深度融合,确保系统具备实时性、可靠性与可扩展性。

3.2 核心模块详细设计

3.2.1 数据采集与预处理模块

数据采集与预处理模块是智能运维系统的基础支撑模块,核心功能涵盖多源数据采集、标准化处理、质量控制三大子功能,确保输入模型的数据精准可靠。采集子模块采用“有线+无线”混合采集方案,针对水轮发电机组、变压器等核心设备,通过有线传感网络采集振动、温度、压力等关键运行参数;针对库区环境、输电线路等广域场景,采用无线传感节点与无人机巡检结合的方

式采集环境数据与图像数据,数据传输采用5G与工业以太网协同技术保障实时性。预处理子模块通过数据清洗去除噪声数据与异常值,采用标准化算法将不同量级、不同格式的数据转换为统一标准;依托特征提取算法挖掘数据核心特征,为模型构建提供高质量数据输入。另外,模块配备数据质量评估单元,通过完整性、准确性、实时性指标对数据进行动态监测,确保数据满足运维分析与决策需求,为后续模型构建与智能诊断奠定坚实数据基础。

3.2.2 数字孪生模型构建模块

该模块是系统核心技术,采用“多维度融合+动态修正”思路,精准虚拟映射物理实体。先基于水电站设计图纸和设备三维模型,用几何建模技术构建几何模型,还原设备结构等;接着融合力学等理论构建物理模型,明确参数耦合关系;再结合设备运行历史与实时数据,用机器学习算法构建行为模型,精准复现运行状态^[1]。为提升适配性,配备动态修正单元,依实时运行和故障反馈数据调整参数,保证与实体状态一致。同时支持多尺度模型协同,能实现从单设备部件到全电站系统的层级化构建,满足精细化诊断和全局分析需求,为智能运维提供全面模型支撑。

3.2.3 智能诊断与预测模块

此模块依托数字孪生模型与人工智能算法,精准诊断和提前预测水电站设备故障,涵盖故障诊断、寿命预测、风险评估功能。故障诊断子模块用“模型仿真+数据驱动”融合算法,虚拟模型模拟故障工况构建特征库,结合实时数据精准识别故障类型、位置及演化趋势。寿命预测子模块基于设备运行数据、老化规律和实时参数,用剩余寿命预测算法预判核心设备剩余寿命,为检修计划提供依据。风险评估子模块综合多维度信息构建指标体系,量化评估潜在故障影响。模块输出结果反馈至界面和决策模块,为运维提供精准导向,提升故障处置及时性与针对性。

3.2.4 运维决策优化模块

该模块基于智能诊断与预测结果,结合运维规范等实现运维策略智能优化与精准输出。先构建运维决策知识库,整合运维标准、手册、案例等信息提供规则支撑;再结合故障类型等因素,用多目标优化算法平衡安全、成本、效率目标,生成包含检修时间等具体内容的最优运维方案。为提升可行性,支持方案仿真验证,用数字孪生模型评估对电站运行的影响。同时具备动态调整功能,依实时反馈和工况变化优化策略。此外,以可视化表单和指令形式推送方案至运维执行单元,实现决策与执行无

缝衔接,提升运维规范性与高效性。

4 系统优化策略与算法研究

4.1 模型轻量化优化

模型轻量化优化是提升数字孪生运维系统实时性与部署灵活性的关键策略,针对水电站数字孪生模型结构复杂、计算量大、对硬件要求高的问题,从模型结构、计算方法、数据处理三方面开展优化。在模型结构优化方面,采用模型简化算法,去除几何模型中对运行状态影响微小的细节特征,保留核心结构与关键参数;对物理模型采用降阶处理,通过模态截断、简化耦合关系等方式,降低模型计算维度。在计算方法优化方面,引入边缘计算技术,将部分模型计算任务下沉至边缘节点,减少中心服务器的计算压力,提升数据处理与决策响应速度;采用并行计算算法,实现多任务同步处理,提高模型仿真效率。在数据处理优化方面,采用数据采样与压缩技术,在保证数据有效性的前提下,减少输入模型的数据量,降低计算负荷。通过轻量化优化,确保模型在满足精度要求的同时,具备更快的计算速度与更低的硬件部署成本,适配水电站运维现场的实时管控需求。

4.2 数据驱动的动态修正机制

数据驱动的动态修正机制是保障数字孪生模型长期精准性的核心策略,通过实时数据与历史数据的融合分析,实现模型参数与结构的动态调整。机制核心包括数据采集与分析、偏差识别、参数修正、验证反馈四个环节:首先通过感知网络实时采集设备运行数据,结合历史运维数据与故障数据,构建修正数据集;随后通过对比分析虚拟模型输出结果与物理实体实际运行状态,识别模型偏差,明确偏差来源(如参数漂移、模型结构不匹配等);基于偏差数据,采用机器学习算法(如梯度下降、贝叶斯优化等)动态调整模型参数,对模型结构进行适应性优化;最后通过物理实体运行数据验证修正后模型的精度,若满足要求则完成修正,若不满足则重新进入偏差识别环节,形成闭环修正流程。该机制有效解决了设备老化、工况变化、环境干扰导致的模型失准问题,确保数字孪生模型始终与物理实体保持高度一致,为智能运维提供持续可靠的模型支撑。

4.3 人机协同与可解释性增强

人机协同与可解释性增强策略旨在提升智能运维系统的实用性与可信度,解决人工智能算法“黑箱”问题与复杂场景下机器决策的局限性。在人机协同方面,系统构建“机器决策+人工审核”的协同模式:机器基于模型与算法输出初步运维方案,运维人员通过可视化界面查看方案依据、模型仿真过程、数据支撑等信息,结合现场经验对方案进行审核与调整,复杂场景下可通过人机交互界面直接干预模型计算与决策过程^[4]。在可解释性增强方面,采用可解释人工智能算法,将复杂模型的决策过程拆解为清晰的逻辑链条,通过可视化图表呈现决策依据(如关键参数、故障特征、历史案例匹配度等),使运维人员能够理解决策背后的原理。同时,系统配备知识图谱模块,整合设备结构、故障机理、运维规范等知识,为决策解释提供理论支撑。该策略既充分发挥智能算法的高效性与精准性,又依托人工经验弥补机器决策的不足,提升运维决策的可靠性与落地可行性。

结束语

本文围绕基于数字孪生的水电站智能运维系统展开研究,从系统设计到优化策略均取得一定成果。通过构建分层架构与核心模块,实现运维全流程智能化管控;提出的优化策略与算法有效提升系统实时性、精准性与实用性。然而,水电站运维场景复杂,未来仍需持续探索,进一步优化模型算法,拓展应用场景,提升系统在复杂工况下的适应能力,为水电站智能化运维提供更完善的技术支撑,推动水电行业高质量发展。

参考文献

- [1]邵月波,谢昭明.数字孪生技术赋能智慧水电站可持续发展[J].国际工程与劳务,2025,(06):32-35.
- [2]王保民.基于数字孪生技术的水电站机组智能运维系统设计研究[J].网络安全和信息化,2025,(05):64-66.
- [3]余鹏,陈果,吴美琪,等.大型水电站设备数字孪生体应用路线研究[J].科技创新与生产力,2024,45(12):119-123+126.
- [4]赵文君,黄信坤.基于数字孪生的水利枢纽工程安全分析预警研究与实践——以江垭、皂市水电站为例[J].湖南水利水电,2024,(06):52-53.