

基于数字孪生的水利枢纽安全智能诊断与预警研究

邓钦元

塔里木河流域卡拉贝利水利枢纽管理中心

DOI:10.12238/hwr.v9i10.6601

[摘要] 为应对大型水利枢纽在长期运行中面临的坝体结构性态演变、坝基渗流问题、泄洪设施疲劳损伤以及金属结构可靠性下降等复杂安全挑战,本文设计了一种深度融合数字孪生技术的智能诊断与预警系统。该系统核心在于通过多源感知网络获取枢纽全生命周期数据,并驱动机理模型与数据模型的协同计算,实现对挡水建筑物、泄水建筑物及关键设备运行状态的实时评估、异常根源的精准诊断与潜在风险的超前预警。本文详细剖析了系统如何具体应用于大坝变形与应力、渗流场、闸门振动等核心安全指标的监控与诊断,阐述了从数据感知到智能决策的闭环技术路径,旨在为实现水利枢纽安全管理的数字化、精细化与智能化转型提供一套可落地的解决方案。

[关键词] 数字孪生; 水利枢纽安全; 智能诊断; 预警; 渗流稳定

中图分类号: TV **文献标识码:** A

Construction of an Intelligent Diagnosis and Early Warning System for Hydraulic Hub Safety Based on Digital Twin

Qinyuan Deng

Tarim River Basin Kalabelli Hydraulic Hub Management Center, Kashi, Xinjiang

[Abstract] To address the complex safety challenges faced by large-scale hydraulic hubs during long-term operation, such as the evolution of structural behavior of dams, seepage stability of dam foundations, fatigue damage of flood discharge facilities, and reliability degradation of metal structures, this paper designs an intelligent diagnosis and early warning system deeply integrated with digital twin technology. The core of this system lies in acquiring full lifecycle data of the hub through a multi-source perception network and driving the collaborative computation of mechanistic and data-driven models. This enables real-time assessment of the operational status of water-retaining structures, flood discharge structures, and key equipment, along with precise diagnosis of anomaly root causes and advanced warning of potential risks. This paper elaborates on how the system is specifically applied to monitor and diagnose core safety indicators, including dam deformation and stress, seepage fields, and gate vibrations. It details the closed-loop technical pathway from data perception to intelligent decision-making, aiming to provide a practical and implementable solution for the digital, refined, and intelligent transformation of safety management in hydraulic hubs.

[Key words] Digital twin; Hydraulic hub safety; Intelligent diagnosis; Early warning; Seepage stability

引言

水利枢纽安全是国家水安全战略的重要基石。其核心建筑物如大坝、高边坡、隧洞、闸门系统等,长期处于复杂水力、力学及环境耦合作用之下,其材料性能退化与结构损伤是一个累积且不可逆的动态过程。传统安全监测体系依赖于孤立的传感器数据和阈值报警,存在显著局限:难以从局部测量值反演结构整体性态,如通过少数测点位移推断坝体整体应力重分布;对渗流、裂缝扩展等渐进式风险的早期征兆不敏感,预警滞后;对于泄洪闸门、启闭机等动设备的突发性故障缺乏有效的预测能力。

数字孪生技术为实现水利枢纽安全的“全息感知、深度认知、科学预知”提供了革命性的范式。本研究聚焦于水利枢纽安全的具体痛点,构建一个具有物理含义、模型驱动、数据赋能的数字孪生系统。该系统不仅是对物理枢纽的静态复制,更是一个能够模拟其不同内外荷载作用下响应、并能基于实时数据进行自我校准与学习的动态虚拟模型。重点解决如何利用该技术实现对枢纽结构性态、渗流稳定、设备健康三大核心安全问题的精准把控,推动安全管理从“被动响应”向“主动预警、预测性维护”的根本性转变。

1 面向水利枢纽安全的数字孪生内涵与架构

本系统所构建的数字孪生体,是以数据、模型与服务为核心要素,与物理水利枢纽在全生命周期内协同演进、虚实交互的有机整体。其核心在于通过高保真建模、实时数据驱动与智能分析预警,实现枢纽运行状态的精准映射、安全态势的深度认知与风险的超前防控。

1.1 核心内涵

数字孪生技术是指通过构建与物理实体在形态、状态、规则上高度一致的多维、多尺度虚拟模型,并利用实时数据驱动其运行,从而在数字空间中实现对物理实体的全生命周期映射、监控、仿真与优化的一项综合性技术。数字孪生体的有效性建立在三大核心要素的深度融合之上。

(1) 高保真模型是其骨架。这超越了传统的三维几何表达,集成了从一维传感器数据、二维平面应力分析到三维实体有限元的多尺度物理机理模型。此类模型能够精确模拟大坝结构在复杂荷载(如库水压力、温度变化)作用下的应力应变分布,以及坝基渗流场随库水位波动的动态响应过程,为结构性态评估提供坚实的物理基础。

(2) 实时数据是其血液。数据来源于布设于枢纽关键部位的密集传感器网络,涵盖GNSS与测量机器人(整体变形)、应变计组(局部应力)、渗压计(扬压力与绕坝渗流)、裂缝计(裂缝动态)及振动传感器(闸门与机组状态)等。这些多源监测数据的持续注入,确保了数字孪生体能够同步反映物理实体的真实状态,维持其“生命”活力。

(3) 诊断预警是其大脑。该核心功能基于融合后的多源数据与模型仿真结果,运用智能算法进行综合比对、分析与推理。它不仅能够实现从表面现象到内在机理的故障诊断,更能依据外部荷载变化与内部性能演变,对未来潜在风险进行预测与预警,构成系统的智能决策中心。

1.2 系统总体架构

系统采用感知、数据、模型、仿真、诊断与应用五层闭环架构,确保从状态感知到智能决策的完整链路。

(1) 感知控制层作为基础,构建了“空-天-地-水-工”一体化的监测网络。具体技术手段包括:利用分布式光纤传感(DTS/DAS)实时感知混凝土坝体温度场与裂缝发展;采用微渗径系统精确定位土石坝渗漏路径;在泄洪闸门支铰等关键部位布设应力传感器,并在液压启闭机油路集成在线油液监测传感器,以实现关键金属结构疲劳与磨损状态的实时监控。

(2) 数据与模型层构成系统的中枢。其中,数据中枢负责对前述多源异构监测数据进行时序化处理、标准化与质量校验,并特别关注渗流数据与库水位、降雨量之间的滞后关联,以及变形数据对水温、气温变化的时效性响应等深层信息挖掘。模型仓库则集中存储并管理经过历史实测数据反演与校正的各类专业模型,包括用于结构静动力分析的有限元模型、用于评估渗透稳定性(渗透坡降、逸出点)的渗流场模型、用于分析消能流态与空化风险的计算流体动力学(CFD)模型,以及关键机械设备

的故障预测与健康诊断(PHM)模型。

(3) 仿真与计算层是驱动数字孪生体运行的核心引擎。该层接收实时外部荷载(如当前库水位),调用相应的机理模型进行实时或准实时数值仿真。例如,在接收到未来24小时洪水预报过程线后,仿真层能够快速模拟不同闸门启闭方案下的下游流量与流速分布,为泄洪消能安全评估提供定量依据。

(4) 诊断与预警层是系统智能的集中体现。其多源信息融合诊断功能通过对比监测数据与模型仿真结果,识别异常偏差。一旦发现某坝段位移持续偏离预期,系统将自动关联该区域的应力仿真、渗压及裂缝监测数据,进行根源综合分析,判别是基础变形、扬压力异常抑或材料性能退化所致。同时,动态智能预警模块摒弃了传统固定阈值方法,转而采用统计过程控制(SPC)与机器学习技术,为各监测点建立自适应预警阈值,并对裂缝扩展速率、渗流量变化等时效性指标构建与时间、环境因子相关的预测模型,从而实现趋势性、前瞻性的风险预警。

(5) 应用与交互层作为系统与用户的接口,提供三维可视化安全驾驶舱。它将专业的分析结果,如渗流等势线、结构应力云图、设备振动频谱等,直观地叠加在BIM模型上进行一体化展示。此外,该层支持虚拟调度预演功能,例如在数字空间中模拟闸门启闭全过程,预先评估其对结构振动的影响,为运行决策提供安全、可控的试验环境。

2 基于数字孪生的水利枢纽安全智能诊断与预警研究

数字孪生技术在水利枢纽安全中的核心价值,体现在其能够基于多源数据与机理模型,实现对结构性态、渗流稳定及设备运行状态的深度诊断与预测性维护、前瞻性风险预警。以下将分别阐述三大关键安全问题的智能诊断与预警进行分析。

2.1 基于数字孪生的水利枢纽结构性态安全智能诊断与预警

大坝的变形与应力场是评估其结构性态安全最直接的指标。本系统通过构建高保真仿真模型与实时监测数据的动态交互,实现了对结构性态的精准诊断。在技术实现层面,系统内置了经过长期监测数据(如垂线、引张线数据)反演与校正的有限元模型。该模型的先进性在于能够精确模拟混凝土的徐变特性、弹性模量随龄期变化等时效效应,确保了物理机理的准确性。

其诊断与预警流程为一个严密的闭环:(1) 实时仿真计算。系统接收当前库水位与坝体温度场数据,驱动经过校正的有限元模型,仿真计算出坝体在各荷载组合下的理论变形与应力分布。(2) 执行多源数据比对。将GNSS、应变计等传感器的实测值,与仿真值在空间域(各坝段、各高程)与时间域(全生命周期)进行系统性比对。当系统识别到某区域出现“实测位移持续大于仿真值叠加不确定性区间”的异常模式时,便会自动定位异常区域。(3) 启动多维度根源分析与预警。系统自动调取该异常区域的历史仿真记录、材料参数演化曲线,并联动分析该区域的渗压监测数据与裂缝开合度变化,综合判断异常根源是基础地质构造的缺陷活化、坝体材料性能的长期退化,抑或是其他隐蔽病害,同时给出预警提示。例如,心墙土石坝某断面若出现实测沉降量

持续大于仿真预测值的现象,系统将预警提示存在心墙固结沉降异常或内部侵蚀的潜在风险。

2.2 基于数字孪生的水利枢纽渗流稳定安全智能诊断与预警

渗流稳定性直接关系到坝基与坝肩的安全,是数字孪生技术重点监控的领域。系统通过构建与真实地质条件紧密耦合的渗流场模型,实现了对渗流态势的动态评估与风险溯源。具体技术实现依赖于一个能够精确模拟非稳定渗流的数学模型,该模型与坝址区详尽的地质构造模型深度融合,从而准确反映复杂地质条件对渗流路径的影响。诊断与预警流程始于渗流场全域对比:系统将布设于坝基、绕坝路线的渗压计网络所采集的实测孔隙水压力数据,与基于当前库水位驱动的渗流场仿真结果(包括等势线分布与逸出点位置)进行全场域、高精度的对比。在此过程中,系统对关键安全指标进行持续监控,如渗透坡降是否超过设计允许值,以及渗流量、水质(特别是浑浊度)的变化趋势。一旦发现下游测压管水位出现异常抬升等警讯,系统立即启动智能诊断与预警。通过在数字孪生体中快速模拟多种可能的故障情景(如防冲帷幕局部失效、排水棱体或排水孔淤堵),并将各情景下的模拟数据与实测数据进行匹配度分析,从而推断出最可能的故障原因及其空间位置。对于土石坝,系统尤为关注渗流量与浑浊度的联动变化,因为这是判断内部管涌风险的关键前兆指标。

2.3 基于数字孪生的水利枢纽金属结构设备安全智能诊断与预警

闸门、启闭机等金属结构设备的突发故障可能引发连锁性灾难后果。数字孪生技术通过状态监测与模型预测,实现了从“事后维修”到“预测性维护”的转变。技术实现的核心是在关键设备上部署振动、应力、油液品质等在线监测传感器,并建立融合了机理模型与数据驱动模型的故障预测与健康(PHM)系统。其中,机理模型(如结构动力学模型)负责揭示故障的物理根源,而数据驱动模型(如基于长短期记忆网络LSTM的剩余寿命预测算法)则擅长从历史数据中学习退化规律。

其诊断与预警维护流程如下:首先进行全生命周期状态监测,持续采集闸门在启闭过程中的振动频谱、支铰应力幅值等动态响应数据。接着,利用数据驱动模型进行早期故障智能识别,当振动频谱中出现与结构固有频率相关的异常峰值,或应力时程中检测到异常的冲击载荷时,系统能够精准识别出潜在的螺栓松动、疲劳裂纹或轨道卡阻等故障并发出预警。在此基础上,PHM模型依据设备性能的历史退化数据,预测关键部件的剩余使用寿命,如液压缸密封件的老化周期、钢丝绳的疲劳寿命等,从而在故障发生前主动生成预测性维护工单,指导管理人员在非汛期等窗口期进行针对性检修,有效规避运行风险。

3 系统实现的预期效益与挑战

3.1 预期效益

本系统通过数字孪生技术的全面应用,预期在水利枢纽安

全管理中实现多维度效益提升。在诊断能力方面,系统实现从“单点报警”到“全场域、多证据链协同诊断”的跨越,显著提升对结构性态异常与渗流隐患的定位与定性准确性。在预警机制上,依托时效性数据的趋势外推与实时仿真推演,可实现对裂缝稳定性演变与渗流破坏风险的早期识别,使预警窗口期较传统方法提前数周甚至数月,增强安全管理的主动性。运维方面,系统基于设备实时状态监测与预测性健康评估,推动运维模式由“定期检修”向“视情维修”转变,在保障安全的同时有效避免过度维修与维修不足,显著优化运维成本并提升资源利用效率。此外,在应对超标准洪水或地震等极端工况时,系统可借助孪生体进行多情景快速模拟与后果评估,为应急决策与抢险调度提供科学依据,提升枢纽在极端条件下的韧性与响应能力。

3.2 面临挑战

然而,系统在建设与运行过程中仍面临若干关键技术挑战。首先,模型精度与计算效率之间存在突出矛盾,高保真机理模型虽能准确反映物理过程,但计算资源消耗大、耗时长,难以满足实时仿真与快速响应的需求,亟须引入模型降阶、并行计算等高效算法以寻求二者平衡。其次,系统效能高度依赖于传感网络的覆盖广度与数据质量,尤其在水利枢纽所处的恶劣环境下,传感器长期稳定性、抗干扰能力与数据连续性是影响系统可靠性的关键制约因素。最后,知识融合与系统集成亦为重要挑战,如何将领域专家的隐性经验知识有效编码为可计算的诊断规则,并与数据驱动模型实现深度融合,是构建具有通用性与强解释性智能诊断系统的核心难点。

4 结束语

本文围绕水利枢纽安全管理核心需求,系统性地提出了一套深度融合数字孪生技术的解决方案。通过构建“感知-建模-仿真-诊断-预警”的闭环架构,该方案将物理枢纽的复杂运行状态精准映射至动态演进的虚拟空间,实现了三大核心能力的突破。数字孪生技术的深度应用,旨在构建一个与物理枢纽同步运行、虚实互动的智能系统,如同一位“虚拟首席安全官”,为工程长期安全与高效运行提供前所未有的智能化保障。展望未来,研究将聚焦于模型轻量化、小样本故障诊断等关键技术难题的攻关,持续推动该体系从理论构想走向全面工程实践,为水利基础设施的智慧化管理与安全可控运行提供坚实支撑。

[参考文献]

- [1]张社荣,王鼎华,严磊,等.基于数字孪生的大坝安全智能预警方法研究[J].水利学报,2022,53(8):899-908.
- [2]刘昌军,李建州,孔令仲,等.水利工程数字孪生平台构建与实现[J].水利信息化,2021,(4):1-7.
- [3]刘永强,冯平,李建勋.面向流域智慧管理的数字孪生框架及其关键技术与挑战[J].水力发电学报,2022,41(3):1-12.

作者简介:

邓钦元(1986--),男,汉族,湖南汨罗人,本科,工程师,研究方向为水利枢纽工程管理。