

基于智慧大坝的管理体系构建

林勘尘 林育任

福建水口发电集团有限公司

DOI:10.32629/hwr.v9i12.6720

[摘要] 随着信息技术的飞速发展,水利工程领域正逐步迈向智能化时代。智慧大坝作为水利基础设施的重要组成部分,其高效、精准的管理体系构建对于保障大坝安全运行、提升水资源管理水平具有至关重要的意义。本文深入探讨了智慧大坝的概念内涵,分析了传统大坝管理体系存在的局限性,在此基础上详细阐述了基础智慧大坝的管理体系构建的目标、原则、总体架构以及关键模块,并通过实际案例验证了该管理体系的有效性。研究表明,基于智慧大坝的管理体系能够实现对大坝全方位、全生命周期的实时监测与智能管控,显著提高大坝运行的安全性和可靠性,为水利行业的数字化转型提供有力支撑。

[关键词] 智慧大坝; 管理体系; 信息化建设; 实时监测; 智能决策

中图分类号: TV42+1.1 **文献标识码:** A

Construction of a Management System Based on Smart Dams

Kanchen Lin Yuren Lin

Fujian Shuikou Power Generation Group Co., Ltd.

[Abstract] With the rapid advancement of information technology, the field of hydraulic engineering is progressively transitioning into an intelligent era. As a critical component of water conservancy infrastructure, smart dams play a pivotal role in ensuring safe dam operations and enhancing water resource management efficiency, thereby necessitating the development of an efficient and precise management system. This paper examines the concept of smart dams, identifies the limitations inherent in traditional dam management systems, and systematically elaborates on the objectives, guiding principles, overall architecture, and core modules of a foundational smart dam management system. The effectiveness of the proposed system is demonstrated through practical case studies. The findings indicate that a smart dam-based management system enables comprehensive, real-time monitoring and intelligent control throughout the entire lifecycle of dam operations, significantly improving operational safety and reliability. Furthermore, it provides robust support for the digital transformation of the water conservancy sector.

[Key words] Smart dam; Management system; Informatization; Real-time monitoring; Intelligent decision-making

引言

传统大坝管理模式依赖分散化系统、人工经验判断,存在信息壁垒突出、响应效率不足、全生命周期管控薄弱等短板,已难以适配现代水利工程精细化、智能化的发展诉求。数字孪生、物联网、人工智能等新一代信息技术的突破,为大坝管理的革新提供了核心支撑,智慧大坝应运而生,成为破解传统管理困境、提升水利工程治理能力的关键路径。

1 概况

水库大坝作为重要的水利工程枢纽,发挥着巨大的工程效益,承载着人民日常生活及工农业生产的艰巨任务。总书记高度重视能源建设保障工作,他强调:能源保障与安全是关系国

家经济社会发展的全局性、战略性问题。全面且及时掌握水电站各处的运行状况对维系大坝长久稳定运作意义重大,通过水情调度系统、闸门控制系统等,可以辅助对应专业人员及时掌握当前水情信息或闸门开合度等信息。但水电站具有多专业并存、交融等特点,传统的大坝安全监控管理模式,当出现地震、洪水等特殊工况时,领导人员需要依次向各专业部门了解该部门当前所辖部位的运行情况,综合考虑后才可决定需要执行的措施,效率较为低下。构建一套基于智慧大坝的管理体系,可帮助运维人员全面掌握大坝安全相关要素,快速调整大坝运行方式,及时预警设备结构异常,提升大坝安全保障能力。

2 实施背景

2.1 更智能化的系统是保障大坝安全的迫切需要

全面掌握水电站各处的运行状况是保障水利枢纽安全运行的重要前提。2020年6月5日,江西宁都县肖田乡的长罗水电站发生溃坝事故,造成2人死亡。经事故调查分析,电站并无数字化集成的大坝安全管理系统,运维人员未能及时掌握现场缺陷情况,诸多安全隐患逐渐积累终酿大祸。水电站现场管控涉及作业面广、专业不同等问题,利用数字孪生、系统集成、数据融合等技术,将水电站众多的现场环境条件数字化集成至智慧大坝系统,实现水电站的精细化管控、趋势的精准化预测、决策的科学化支持,是保障大坝安全的迫切需要。

2.2 更高效化的方案是水电生产作业的必然选择

随着3D扫描建模技术及虚幻5引擎在数字化领域的加深应用,数字孪生技术在大型建筑工程领域中得到了广泛应用,近年来逐渐应用到水电水利工程领域,实现了电站的智慧管控,在保证孪生平台与现场高度对应吻合的前提下,避免了许多人工前往现场的时间成本^[1]。

3 基于智慧大坝的管理体系构建

3.1 数字孪生-基于三维扫描技术的智慧大坝管理体系基石

3.1.1 水电站数字孪生系统总体架构

水电站大坝数字孪生系统用于大坝安全可视管理与分析交互,依托大坝及设备的三维模型底座并贯通大坝安全监测仪器构建而成^[2]。系统由信息展示、数据库、模型库等5个功能引擎模块组成,可实时监控并对大坝结构及变形、渗流等安全指标开展数字化、智慧化映射及时空数据展示,“一屏掌握”大坝安全状态,实施可视化预警告警,支撑精准化决策。

3.1.2 水电站数字孪生系统的功能与原理

根据水电站大坝数字孪生平台整体架构、技术架构及逻辑架构,目前在数据底板建设、模型库建设、知识库建设、智能应用方面取得了一些建设成效。主要包括:

(1) 信息展示模块建设。本套系统在主界面集中显示了电站运行情况(环境量、通航信息、机组出力等)、实时监控、测点完好度统计、重要部位状况等最为关键的信息,现场值班人员与管理层能够第一时间了解到电站当前的基础运行状况。

(2) 数据库模块建设。完成了电站监测测点、防汛调度、强震台站相关的基础数据、监测数据、业务管理数据的汇聚、治理、挖掘和分析,并创新性完成多尺度空间数据底板融合。在此模块中各项数据均支持查询历史信息,工作人员可自由查询过去数小时乃至数年的数据,通过对比当前数据与历史极值,可对该设备或结构态势进行初步判断。

(3) 模型库模块建设。结合通航的河床冲淤需求,研发构建了基于河道演进的水库冲淤模型、水库冲淤热力图、具有补偿反算能力的流域降雨水库防洪调度模型、基于有限元的大坝渗流分析模型、大坝安全分析预警数理统计模型等。

(4) 模拟仿真模块建设。仿真训练模块全面扫描构造了大坝的三维模型和重点设备,可通过漫游形式快速熟悉电站情况,同

时重点设备处可查看设备拆卸安装过程及运行原理讲解视频,以供学员直观了解学习设备基础操作^[3]。该模块汇集BIM、倾斜摄影、DEM、DOM、增强现实(AR)等技术,真实搭建数字化场景。对采集到的数据进行处理和优化,去除噪声和错误数据,确保模型的准确性和完整性。

(5) 知识库模块建设。该模块汇集数据引擎产生的相关数据服务、模型库的分析计算结果,利用知识引擎实现工程安全知识库、预报调度方案库、业务规则库、经验库和历史场景库等。同时为智能应用、模型库提供知识服务,智能应用的成果也可以在知识库中汇集。

3.2 系统集成-基于集成策略的智慧大坝管理体系框架

大型水电站各专业相关的管理系统众多,例如大坝安全在线管理系统、水情调度系统以及数字孪生系统等。水电站的高效运行和管理离不开多个系统的协同工作,为全面提高大坝的管理质量与效率,将多系统集成整合,形成一个统一的整体,实现信息共享、协同控制和优化管理,是提高水电站的整体性能和可靠性的有效举措,也是构建智慧大坝管理体系的重要框架。智慧大坝管理体系中的系统集成主要可分为监控系统集成、控制系统集成、信息系统集成三个类别,同时各系统间又彼此交融。

3.2.1 信息系统集成

水电站智慧大坝系统中的数字孪生系统为了能够及时展示大坝各处的实时数据信息,需要利用数据开发平台从大坝安全监测系统、水情调度系统、闸门控制系统等原有专业应用系统,汇聚基础数据、监测数据、业务管理数据等,根据数据治理平台制定的标准体系,进行数据清洗、转换等工作。不同系统平台间通过构建各自的接口,将自身系统内数据经过处理还原后输入数字孪生系统,经过再次转换呈现于管理人员眼前,做到了各系统间数据的实时互通,多系统数据的融合展示,为管理人员的科学化决策提供了有力的数据支撑。

3.2.2 监控系统集成

水电站智慧大坝系统中的强震监测系统与水情调度系统进行了集成,通过强震监测系统实时监测水电站各处强震台阵的地震烈度等。而水情调度系统则实时反馈大坝流域的水位、气温等环境量变化与上级单位调度指令,根据系统内提前设定好的规则,若水情调度系统收到了泄洪指令,则该系统将会查询强震监测系统中水电站是否发生一级以上烈度地震,若出现,则会在系统界面进行告知,提醒电站现场运维人员是否有误继续从事该项操作。监控系统的集成,一定程度上为水电站的精细化管控上了一道保险。

3.2.3 控制系统的集成

例如闸门控制系统与坝前大型漂浮物监测系统进行了集成,当大坝上游出现类似集装箱或失控船只等大型漂浮物,坝前大型漂浮物监测系统将第一时间捕捉到该物体,在给电站值班人员发送预警信息的同时时刻监视其运动轨迹,若此漂浮物仍有向大坝闸门前进的迹象,坝前大型漂浮物监测系统将再次发送预警信息并联动闸门控制系统做出紧急处置预案下达指令,闸门

值守人员可随时通过闸门控制系统进行闸门的启闭以应对漂浮物可能到来的撞击,提高了大坝的安全性

3.3 政策支持-基于信息深度融合技术的智慧大坝管理体系核心

对大坝管理者来说,大坝的日常服役状态是否正常是管理层最为关心的问题。然而对管理人员来说,仅凭自身对当前电站的情况了解所下的判断,不仅不够面面俱到,也缺乏客观性。为克服上述不足,项目组充分利用“互联网+”、物联网、云计算、人工智能等新一代信息技术以及相应行业规范和专家经验,构建智慧大坝管理体系,针对数据挖掘难题,建立基于“信息深度融合”的对象性态评判体系进行电站服务性态诊断,实现多层次、多维度的大坝安全分析,为大坝运行方向提供决策支撑。

3.3.1 基于信息深度融合的大坝运行决策科学化支持做法简介

大坝服役性能是一个受多因素协同作用下材料与结构交互影响的非线性动态演化过程,其效应量间的时变演化关系可直观反映出建筑物的健康状况,因此,为准确掌握、评判电站运行情况,势必需要综合考虑水情、通航、变形、渗流、地震等多因素对结构安全的影响。

为此,项目组建设了信息深度融合的数据监测管理模块,通过软件技术将多个自动化系统集成于智慧大坝管理系统,可满足在网站、专业软件、平板电脑、智能手机等多终端中查询、录入、检查监测数据的需求,使人员能够及时快速了解大坝各处的状况。除此之外,模型研发了监测可信度和精确度自动判别功能,切实克服了传统管理模式中需要人工耗费大量精力对数据进行筛选剔除的避免,依托历史对比、同期对比、统计模型、神经网络和速率公式等监控指标,对大坝各处数据进行独立离线分析计算,并在此基础上根据分级预警指标,根据异常比例进行分级预警,以此表征预警对应的异常程度,实现大坝各处数据的自动、高效、准确筛查。

3.3.2 形成基于人工智能技术的大坝服役性态综合评价方法

鉴于大坝服役状况评价具有不确定性和复杂性的特点,项目组在数据监测管理模块所深度融合的各类信息之上,根据相关行业规范和专家经验,用人工智能技术模拟人类工程师评判大坝安全的推理逻辑,建立智能化的大坝服役性态综合评价方法,切实克服传统人为主观评价的方式存在主观性与片面性较大的弊端。该方法选取大坝各方面监测信息、重要数据及指标准则组合为分析资料,采用机器学习方法对大坝历史数据进行深度分析,挖掘各影响因子对坝体结构的作用机理,并根据规则推理法模拟专家决策过程,形成相应的评判规则库和推理系统对大坝安全性态进行定性评价,将大坝状况划分为“正常”“轻微异常”“一般异常”“严重异常”四个档次,实现智能化的大坝安全评判。

4 实施成效

4.1 守牢安全防线,保障大坝安全

某电站自2024年深化应用智慧大坝管理体系以来,实现连续安全生产,高质量完成全年目标任务。通过以数字孪生为主题的智慧大坝系统,全面总览大坝运行性态,及时掌握大坝各处缺陷状况并向有关单位和部门反馈,做好相关应急预案准备,确保了整个汛期安全。

4.2 打破专业壁垒,提高素质水平

随着智慧大坝管理体系的应用,各专业人员自身业务部分管理水平提升成效显著,同时也更多接触到平时较少接触的其他专业领域。模拟仿真模块的应用,让各专业人员能够更轻松地学习水电站的各类知识,简单易懂的操作,激发了各年龄员工的学习热情,水电站人员整体素质水平得到有效的提升。在各专业人员均能总览电站服役状态后,各类遗漏的缺陷隐患数量也大大减少,电站的总体安全水平得到了显著提高。

4.3 融合多元数据,促进科学决策

智慧大坝管理体系有效克服了传统依靠人工经验进行判断大坝运行状况评判的弊端,其通过对大坝监测数据、上下游水情、地震烈度等多源监测信息进行深度融合,建立各监测量的分析模型,深度挖掘各物理量的相关性,从而更加准确地掌握大坝运行性态,评判安全等级。在该管理体系应用实施的过程中,其对大坝安全评价的客观性与准确率经过人员现场比对基本吻合,安全分析评判可靠率达到90%以上,表明智慧大坝管理体系可有效实现精确、科学的大坝安全评判,为大坝管理人员准确掌握大坝服役状态提供了有效手段,同时也为领导层的决策提供了科学化的支持。

5 结语

智慧大坝管理体系能够有效破解传统大坝管理中的难题,提升大坝运维管理水平。智能大坝管理系统以数字孪生为基石,通过集成各种先进技术和功能模块,形成了覆盖大坝全生命周期的智能化管控模式,该体系的落地不仅验证了数字技术在水利工程领域的应用潜力,更为行业数字化转型提供了可借鉴的实践样本。随着人工智能、大数据等技术的持续迭代,智慧大坝管理体系可进一步向多元化、全要素智能预测和全场景自主决策方向发展。

[参考文献]

- [1]吕朝磊,吴苏,李鹏,等.数字孪生技术赋能智慧水库平台建设[J].物联网技术,2025,15(11):103-106+110.
- [2]张旭哲,原鹏举,胡莎,等.数字孪生技术在智慧大坝中的应用现状及趋势[J].水电能源科学,2025,43(02):168-171.
- [3]戴天将,傅春江.水电站大坝运行安全管理和新技术新发展[J].大坝与安全,2024,(04):1-5.

作者简介:

林勘尘(1992--),男,汉族,福建福州人,大学本科,研究方向:大坝安全管理、水工监测。

林育任(1997--),男,汉族,福建福州人,大学本科,研究方向:大坝安全管理、水工监测。