

# 基于数字孪生技术的水利安全生产管理策略

闵令娟<sup>1</sup>, 李贺<sup>2</sup>, 尤春荣<sup>3</sup>

(1. 山东省水利综合事业服务中心, 山东 济南 250014; 2. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046;

3. 济南电子机械工程学院, 山东 济南 250101)

**【摘要】**文章对数字孪生技术展开研究,探索数字孪生技术与水利工程安全生产管理体系的融合路径。介绍了数字孪生的概念、应用流程与框架,从数据建模、智能预测、健康评估、实时监测等环节入手,重点阐述了基于数字孪生技术的水利安全生产管理策略,通过灵活运用数字孪生技术,为决策提供数据支持,实现水利安全生产的动态、精准管理。研究表明,数字孪生技术在水利安全生产管理中具有显著优势,可有效提升管理效率与安全性,对推动水利行业的安全发展意义重大。

**【关键词】**数字孪生技术;水利安全生产;实时监测;健康评估;数据建模

**【中图分类号】**F426.91

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1009-6159(2025)-05-0045-03

## Management Strategies for Water Engineering Safety Production Based on Digital Twin Technology

MIN Lingjuan<sup>1</sup>, LI He<sup>2</sup>, YOU Chunrong<sup>3</sup>

(1. Water Resources Comprehensive Development Center of Shandong Province, Jinan, Shandong 250014, China;

2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China;

3. Jinan Electronic and Mechanical Engineering School, Jinan, Shandong 250101, China)

**Abstract:** This paper studies digital twin technology and explores the integration path between digital twin technology and the safety production management system of water engineering. It introduces the concept, application process and framework of digital twin, and focuses on the management strategies for water engineering safety production based on digital twin technology from the aspects of data modeling, intelligent prediction, health assessment, and real-time monitoring. By flexibly applying digital twin technology, it provides data support for decision-making and realizes dynamic and precise management of water engineering safety production. The research shows that digital twin technology has significant advantages in water engineering safety production management, which can effectively improve efficiency and safety, and is of great significance for promoting the development of the water engineering safety production industry.

**Key words:** Digital twin technology; Water engineering safety production; Real-time monitoring; Health assessment; Data modeling

数字孪生技术作为一项新型技术,物理实体与数据模型间保持密切联系,通过数据模型来推演物理实体对象未来变化过程,能够提前识别未来可能出现的问题,具备预防性特征。近年来,数字孪生技术逐渐引入水利安全生产管理领域,管理水平、管理效率得到全面提升,展露出极高实用价值。应积极推动数字孪生技术和水利安全生

产管理体系深度融合,实现安全生产目标。

## 1 数字孪生技术概述

### 1.1 概念

数字孪生技术本质上属于虚拟化、数字化实

收稿日期:2025-03-16

作者简介:闵令娟(1976—),女,工程师

体对象,数字实体和物理实体相互对应,在数字环境内模拟物理实体对象未来一段时间的变化情况,精准理解、推演物理实体行为特性,从中辨别潜在风险隐患,提前介入问题,采取防治处理措施。数字孪生技术由物理实体、数字实体与数据链接三部分组成。物理实体是现实世界中的实体对象,包括设备、机械和各类构筑物;数字实体是物理实体对象的数学模型;数据链接负责保持物理实体、数字实体相互对应关系。

### 1.2 应用流程

数字孪生技术以推演目标对象未来变化为功能定位,技术应用流程包含数字建模、数据分析、识别预测、出具报告四道环节组成。数字建模环节,按照物理实体构建数据模型,数据模型和物理实体完全一致,手动输入模型属性数据,包括几何尺寸、构造形式、运行参数等,根据物理实体对象变化情况,动态刷新数据模型,实时调整模型状态。数据分析环节,采取关联分析、数据挖掘等技术手段,从原始数据中提取描述物理实体对象行为的特征值,作为有效信息,把有效信息提交给智能算法处理,从中检测异常值。识别预测环节,根据历史数据并参考相关案例,总结物理实体对象的行为习惯,以及目标问题变化规律,根据数据分析结果,客观评价物理实体实时状态,预测未来变化情况,从中识别到潜在隐患。出具报告环节,定期出具物理实体对象预测报告,附带问题解决建议,组合运用到可视化工具,出具更为直观的图表、三维模型,帮助用户全面了解物理实体对象情况。

### 1.3 应用架构

目前,在水利安全生产管理领域,数字孪生技术应用架构包含危险源辨识、风险预测、风险评价、风险管控、安全检查、事故调查、应急演练、安全教育培训等诸多应用场景。

## 2 水利安全生产管理策略

### 2.1 数据建模

数字孪生技术属于一种新型建造模式和管理模式,强调在物理实体对象发生变化前,依托数学模型来预测目标事件后续走向,安全事故发生前,针对性采取防治处理措施。因此,应构建面向水利设施、工艺技术、重要机电设备的数据模

型,为数字孪生技术奠定应用基础。以水利泵闸数据模型为例,使用 Revit 建模软件,提前确定水利泵闸几何外形结构,软件内建立单体构件的模型文件,再把全部构件模型文件相互整合,即可形成水利泵闸数据模型,数据模型和实体结构的场分布状态及物理属性保持一致。继续向模型输入水利泵闸基本信息和实时数据,数据类型分为空间数据、监测数据和业务数据。其中,空间数据用于描述水利泵闸结构形状和几何尺寸,以及相同空间环境内,水利泵闸和其他水利构筑物间的空间位置关系,具体输入 DEM 数字高程模型、倾斜摄影模型或是 DOM 数字正射影像,以及水利泵闸坐标位置、型号尺寸等基本信息。监测数据即为水利泵闸实时运行数据,用于反应水利泵闸使用状况和运行条件,包括水平位移梁、沉降量、结构应力分布情况、阀门开度、电机转速、上下游水位、叶轮进出口与导叶出口压力。业务数据是水利安全生产管理期间所产生的相关数据,如维护保养报告、安全巡查结论、值班管理数据等,把人工记录、处理的业务数据定时上传给数据模型,实施统一管理。

### 2.2 智能预测

智能预测是数字孪生技术最为核心的应用价值,可以协助管理人员,高效处理海量数据,客观总结物理实体对象及目标事件的变化规律,再结合实时数据,预测未来特定时刻的物理实体运行状况,以及外部环境条件,提前发现当前已存在和即将形成的安全隐患。水利安全生产管理过程中,存在诸多物理实体对象,不同类型物理实体的安全影响因素、隐患形成规律存在明显差别,管理人员必须建立多套智能预测机制,确定面向各类物理实体对象的分析预测方法。以水利泵闸设施为例,核心安全指标包括过闸流量、水位、结构变形和设备温度。对于过闸流量,上下游水位和闸门开度为安全影响因素,建立水力学机理模型,根据监测数据来判别流态,导入流量公式,计算当前流态水闸过流能力。对于水位,安全影响因素包含闸门开度、水文站水位、降雨量、泵站开机台数,着手构建神经网络模型,精准预测最具可能性的水位变化情况。对于结构变形,安全影响因素以结构外部荷载情况为主,着手构建有限元模型,分析实时工况或是预设工况时的闸

室结构、闸门结构应力应变情况。对于设备运行温度,安全影响因素包含运行功率、电流电压、环境温度、叶片开度等,着手建立时序分析模型,绘制运行参数、工作温度的关系曲线,拟合分析历史运行数据,根据参数间影响效应,预判设备运行温度未来变化趋势。

### 2.3 健康评估

水利设施运行条件较为恶劣,长时间遭受水流冲刷和环境侵蚀,叠加复杂受力状况、材料老化等内部因素,水利工程投运使用期间,水利设施老化、磨损与腐蚀程度较为严重,陆续出现坝基沉降、坝身开裂、水闸结构变形等质量病害,由此形成安全隐患。对此,需应用数字孪生技术,建立面向水利构筑物及配套设备的健康智能评估机制,根据在线监测数据和智能预测报告,定期评价物理实体对象健康状态。管理人员结合实际情况,科学设定各项健康评价指标,根据当前掌握的数据信息,客观评价物理实体对象的健康程度。同时,汇总分析不同时期的健康评估报告,基于健康状态变化程度,预测未来发展趋势,提前调整物理实体对象的风险等级。

### 2.4 实时监测

维持数据模型和物理实体对象的实时关联状态,根据物理实体变化情况,同步更新模型属性状态,是保证数字孪生结果和智能预测报告内容真实可信的重要前提。数字孪生技术落地应用期间,必须同步建立在线监测系统,将其作为数据模型、物理实体的关联纽带。基于水利安全生产管理要求,划定监测范围,确定监测对象,部署无线传感器网络构成在线监测系统。传感器种类包括流速传感器、温度传感器、压力传感器等,把水利设施及机电设备运行参数、水文参数和环境参数纳入监测范畴,实时监测数据经过预处理后,同步发送给数字孪生平台,全局监控水利工程建设过程和投运使用情况。

### 2.5 安全“四预”

第一,预报机制。分为故障预报、风险预报两种情况。故障预报是根据历史数据来总结设备故障演变成规律,按照实时监测数据,预测未来短时间内的故障概率。风险预报负责推演灾害天气对水利工程结构造成的影响,预测应力应变、坝基沉降等安全指标未来变化趋势,及早发现安

全隐患。第二,预警机制。采取分级预警方法,综合分析历史数据和实时数据,判断当前时刻是否存在风险隐患,以及即将发生的安全事故,即刻发送报警信号,评定风险等级,提醒管理人员采取对应等级的应对措施。第三,预演机制。数据模型推演特殊场景,精准预测各类安全事故的发生过程、影响范围和总体受损程度,帮助管理人员提前了解安全事故具体情况,科学制定应急处置预案。同时,数字孪生技术也可用于执行调度预演任务,提前制定多套调度计划,依托数据模型,逐一推演各套调度计划的实施过程,重点分析设备振动量等安全指标变化情况,并按照智能预测结果,着手修改调度计划内容。第四,预案机制。为充分应对突发紧急情况与安全事故,管理人员着手制定多套应急处置预案。数字孪生技术用于验证预案可行性,取代常规的安全演练活动,直接在数字环境内模拟安全事故发生过程和应急处置预案实施过程,判断应急管理效果是否达到预期要求,总结、处理应急处置预案存在的问题。

## 3 结语

数字孪生技术已成为水利安全生产管理体系不可分割的重要组成部分,也是加快管理模式转型升级步伐、充分应对复杂管理形势的必然选择。水管单位应深入了解数字孪生技术,合理规划技术应用思路,把数字孪生技术和传统管理手段相结合,积极采取数据建模、智能预测、健康评估、实时监测、安全“四预”五项管理策略,搭建安全生产管理的数字孪生平台,从而提升工程安全运行水平。

### 参考文献

- [1] 卢建华,刘晓琳,张玉炳,等.基于数字孪生的水库大坝安全管理云服务平台研发与应用[J].水利水电快报,2022,43(1):81-86.
- [2] 邓鹏,张诗媛,王旭滢.水利泵闸工程安全管理中数字孪生技术的应用研究[J].水利信息化,2024,(2):16-20+35.
- [3] 郝芝建,梁宏意,陈卓.基于数字孪生大藤峡的安全生产管理系统建设与应用[J].人民珠江,2023,44(S2):125-130.
- [4] 檀焰春,杨丁杰.水利管理中数字孪生技术的应用现状与前景[J].治淮,2024,(11):59-60.
- [5] 章和盛.数字孪生技术在大型水利设施管理中的应用[J].中国安防,2024,(9):92-96.

(责任编辑 张玉燕)