

## 数字孪生技术在水利工程运行管理中的分析与探索

陈剑<sup>1</sup> 冷渊<sup>2</sup>

1 镇江高新区蒋乔街道办事处, 江苏 镇江 212000

2 江苏河海建设有限公司, 江苏 镇江 212000

**[摘要]**数字孪生技术是物理世界和虚拟空间深度融合的重要纽带,它正在对水利工程的运行管理模式产生深远影响。它的关键之处在于给物理工程打造出一个能够动态呈现的虚拟映射,依靠实时数据来驱动,并且借助多维度模型进行仿真操作,以此达成对工程状态的全方位感知、对运行过程的精准推算、对管理决策的智能优化以及对风险态势的提前预警。文章全面阐述了数字孪生技术在提高水利工程实时监测能力、智能决策水平、预测性维护效果以及全生命周期管理效能方面的重大意义;细致探究了其在运行维护体系、流域水情监测、水资源管理以及生态保护等核心领域所具备的研究价值;精心构想出了系统的整体框架,着重分析了虚拟体构建、数据流转、模型集成以及仿真控制等关键环节的具体设计路径以及相应的支撑技术。

**[关键词]**数字孪生; 水利工程; 运行管理

DOI: 10.33142/hst.v8i6.16905

中图分类号: TV697

文献标识码: A

### Analysis and Exploration on Digital Twin Technology in the Operation and Management of Water Conservancy Projects

CHEN Jian<sup>1</sup>, LENG Yuan<sup>2</sup>

1. Jiangqiao Street Office, Zhenjiang High tech Zone, Zhenjiang, Jiangsu, 212000, China

2. Jiangsu Hehai Jianshe Co., Ltd., Zhenjiang, Jiangsu, 212000, China

**Abstract:** Digital twin technology is an important link for the deep integration of the physical world and virtual space, and it is having a profound impact on the operation and management mode of water conservancy projects. Its key lies in creating a dynamic virtual mapping for physical engineering, driven by real-time data, and utilizing multi-dimensional models for simulation operations, in order to achieve comprehensive perception of the engineering status, accurate calculation of the operating process, intelligent optimization of management decisions, and early warning of risk situations. The article comprehensively elaborates on the significant importance of digital twin technology in improving the real-time monitoring capability, intelligent decision-making level, predictive maintenance effectiveness, and full lifecycle management efficiency of water conservancy projects; Thoroughly explored its research value in core areas such as operation and maintenance system, watershed water situation monitoring, water resource management, and ecological protection; The overall framework of the system was carefully conceived, with a focus on analyzing the specific design paths and corresponding supporting technologies for key links such as virtual body construction, data flow, model integration, and simulation control.

**Keywords:** digital twin; water conservancy engineering; operation management

水利工程属于国家水资源调控、防洪减灾、供水保障以及生态修复方面的核心基础设施,其能否安全、高效且智能地运行,与国计民生紧密相关。传统运行管理模式大多依靠有限监测点所获取的信息以及凭借经验来做决策,在状态感知的全面程度、风险预警的及时程度、资源配置的精准程度以及管理决策的科学程度等方面都面临着诸多严峻挑战。物联网、大数据、人工智能以及建模仿真等数字技术发展十分迅速,这为解决上述难题开辟了全新的途径。数字孪生技术,借助构建物理实体于虚拟空间中的动态且高保真的映射,并且依靠实时数据驱动来达成虚实之间的交互、迭代优化以及智能决策,正在逐步成为推动水利工程运行管理方式发生变革的关键核心力量。

#### 1 数字孪生技术在水利工程运行管理中的重要性

##### 1.1 实现工程状态实时感知与可视化

数字孪生体与物联网感知网络所获取的海量、多源且

实时的数据实现了深度融合,由此突破了传统监测手段在空间覆盖范围、时间密度以及信息维度方面存在的种种局限。它将坝体应力应变情况、库区水位流量状况、闸门启闭的具体状态、机电设备的工况、库岸地质位移情况以及水质参数等诸多方面的多维信息加以整合,进而于虚拟空间当中构建起工程全要素、全场景并且全时域的动态镜像。管理者能够凭借高度可视化的孪生界面,较为直观地洞悉工程整体的运行态势,精准地定位出局部出现异常的区域,达成从宏观全景至微观细节的无缝穿透式监控,彻底转变以往那种依赖报表与图表形成的抽象认知模式。

##### 1.2 赋能运行决策智能化与精准化

基于实时数据驱动构建起来的数字孪生体,有着颇为强大的模拟推演以及预测分析方面的实力。其能够将水力学、结构力学、水文学等多个学科领域的机理模型加以集成,同时还会融合像机器学习、深度学习这类数据驱动算

法,进而于虚拟环境当中针对复杂的运行工况展开高保真的仿真操作。就好比说,在开展防洪调度相关工作的时候,它便可以极为迅速地去模拟在不同降雨情形之下、不同泄洪方案之中的库区水位状况、下游河道的演进情况以及风险所可能产生的影响范围;而在水资源调配方面,它同样能够精准地去预测在不同调度策略作用之下所呈现出的供需平衡状况以及生态流量保障的效果。这样一种“先进行试验再付诸行动”的虚拟推演的能力,能够为管理者给予科学且量化的决策方面的依据,进而使得调度方案在精准性、预见性以及抗风险能力等方面都获得较为显著的提升。

### 1.3 驱动管理模式向预测性、主动性转变

传统水利工程在维护方面,大多采用定期检修或者在出现问题之后才进行应急处理这样的模式,如此一来,其效率就会比较低,并且处于一种较为被动的状态。而数字孪生技术不一样,它会持续去分析运行数据以及模型仿真的结果,凭借这种方式,能够很好地识别出设备性能出现退化的趋势、结构损伤演化的规律,还有那些潜在的风险隐患<sup>[1]</sup>。再结合故障预测以及健康管理方面的相关理论,就能够达成对关键设备剩余使用寿命做出精准预测的目标,同时还能对结构安全状态展开动态的评估,并且对于突发险情可以实现早期的预警功能。

### 1.4 提升工程全生命周期管理效能

数字孪生体全程伴随水利工程,从规划设计环节开始,一直到施工建造阶段,再到长期的运行维护时期,直至最终的退役阶段。在设计阶段的时候,能够借助它来开展虚拟验证方面的相关工作,进而对设计参数加以优化。到了施工阶段,它可以用来监控工程的进度以及质量情况,并且还能和 BIM 模型相互结合起来。而在运行阶段,所积累起来的海量数据会和模型一同持续地进行迭代优化操作,这为后续可能开展的改扩建工作以及性能提升事宜提供了极为宝贵的历史依据,同时也搭建起了相应的仿真平台<sup>[2]</sup>。这样一种贯穿于整个过程始终的数字连续性特点,切实保证了工程信息资产能够得以完整地进行积累,并且可以实现高效的复用,还成功打通了工程各个阶段之间存在的信息壁垒,从而大幅度提升了工程在规划、设计、施工以及运维等方面一体化协同管理的整体效能以及可持续发展的能力。

## 2 数字孪生技术在水利工程运行管理中的研究方向

### 2.1 助力运行管理和工程维护体系建设

一项水利工程可能兼有防洪度汛、发电供电、农田灌溉、城镇供水和改善环境等多方面的作用,具有很强的综合性,各水利工程对水资源的要求不同,相互配合又彼此影响。水利工程运行管理单位针对水利工程自身运行特性,在数字孪生虚拟体中模拟各项工作任务,通过分析模拟运行数据,及时掌握运行中的各种情况,发现工程运行缺陷和问题。同时,结合外界环境变化,对运行管理及时有效地调整,实时监测水利工程运行安全,实现水利工程的智能化运行。

数字孪生技术在水利设施设备维修养护工作中,通过采集实时监测数据、数字孪生数据,并以历史数据为依据、以数字模型为架构对水利设施设备进行分析,制定合理的解决方案,这样既能提高养护水平,又能大大提高工作效率,通过信息数据对缺陷和故障做出快速反应,减少水利工程运行管理部门的人力、物力、财力投入,使水库运行实现维修养护专业化、高效化管理,实现水利工程的安全稳定运行<sup>[3]</sup>。

### 2.2 为建设流域水情监测体系提供支持

数字孪生构成了构建智慧流域的关键基础。在研究方面,需要将关注点集中于如下方面:着手构建起流域级别的空天地一体化立体感知网络,并且建立起数据高效融合的相关机制,以此来给孪生体给予全方位的、涉及所有要素的、具备高时空分辨率的水情数据方面的有力支撑;着力研发那种能够实现多尺度水文水动力耦合的高精度仿真模型,达成从单一工程一直到整个流域范围内的水文过程、洪水演进情况以及水资源在时空分布上的精准模拟与预测效果;深入探索依托孪生体所开展的雨洪资源联合调度相关事宜、针对旱情的动态评估以及相应的应对措施、水生态过程的模拟等方面的应用情况,从而进一步提升对流域进行统筹管理的能力。

### 2.3 提升水利工程运行中水资源科学管理水平

数字孪生给水资源的精细化管理工作带来了十分有力的工具。着重去研究构建这样一个平台,那就是水资源配置以及调度方面的数字孪生仿真优化平台,这个平台能够对多水源、多用户还有多目标情况下的复杂决策模拟给予支持。同时还要去开发那种基于孪生体的取用水实时监控技术,还有用水效率的动态评估技术以及能够生成优化建议的技术。要研究把气象预报、需水预测以及工程状态融合起来的水资源供需平衡智能预警与自适应调度方法。还要去探索像水权交易、生态补偿这类机制在孪生环境里该如何进行模拟评估以及获得相应的支持。

### 2.4 推动水资源保护和生态区建设

将生态环境保护目标融入水利工程运行的数字孪生体系。研究内容涉及构建河流生态系统响应模型,模拟不同调度方案对生态要素的影响,开发生态流量实时监控、保障效果评估与优化技术,研究工程运行与区域水环境质量、水土保持的协同模拟与调控方法,探索生态修复工程规划、效果模拟与后评估应用。

## 3 数字孪生技术在水利工程运行管理中的具体设计

### 3.1 整体构想

水利工程数字孪生系统的感知层依靠智能传感器、无人机、遥感卫星等,采集物理世界数据,传输层用物联网等技术构建数据传输网络,数据与模型层是核心,应用服务层开发核心应用模块,交互反馈层反馈结果给物理工程实体。

### 3.2 仿真控制

要设计能够支持多物理场耦合的仿真引擎,此引擎得

能高效地去求解那些像水动力、结构力学、渗流以及水质等相互之间有作用的复杂问题。要达成多时间尺度仿真的实现,以满足从设备瞬态响应的秒级情况一直到年际尺度水文情势变化分析这样不同层面的需求。还要构建起实时或者超实时的仿真能力,在一些关键决策支持的场景当中,得在物理过程尚未发生之前就把仿真的推演给完成了。要去开发用于仿真流程自动化的管理工具,以此来支持对仿真场景的快速配置操作,还有任务的调度安排、参数的管理工作以及对结果展开分析等工作。在仿真过程中,要始终和物理实体保持着极为紧密的数据驱动以及交互控制关联,依据实时数据来动态地修正模型的各项参数以及边界条件,并且要把仿真所输出的优化方面的建议或者是控制指令切实作用到物理系统的执行机构之上。

### 3.3 水利工程数字孪生系统设计思路

#### 3.3.1 数字孪生虚拟体体系方案设计

虚拟体乃是物理工程于数字空间所对应的等价映射形态。其设计应当涵盖如下方面:要包含高精度的几何模型,借助 GIS、BIM 以及倾斜摄影测量等相关技术来构建工程以及环境方面从毫米级直至公里级跨度的多尺度三维可视化模型;还需有集成多物理场机理模型,将水力学、水文学、结构力学、土力学、材料科学等诸多领域中的数学模型加以整合,以此精准描绘水流运动、结构响应、渗流稳定等一系列物理过程;另外行为模型与规则模型也是必要的,通过它来定义工程设备的操作逻辑、调度规则、安全阈值以及管理规程等运行方面的诸多约束条件,同时也规定智能体的行为方式;最后还有数据驱动模型,运用机器学习、深度学习等手段,从历史数据以及实时数据当中去挖掘运行规律,进而构建设备性能退化预测、异常检测等各类模型。

#### 3.3.2 水利工程数字孪生数据采集与传输设计

数据对于孪生体而言,就好比是其血液一般的存在。在采集端的设计方面,务必要做到能够涵盖诸多不同类型的数据,像结构安全监测方面的数据、机电设备状态相关的数据、水文水情方面的数据、环境数据以及管理业务方面的数据等,都要涉及在内,并且要着重去关注传感器的智能化特性、朝着微型化方向的发展情况、低功耗的要求以及在部署时所具备的高可靠性。而在传输层的设计环节当中,则需要着力去解决一些关键问题,比如异构网络的融合难题、海量数据要实现高效的传输、保证低时延且高可靠的通信、数据传输过程中的安全防护等等。并且要着手去构建一个统一的数据接入平台,以此来达成多源异构数据能够实现标准化的接入操作、完成数据的清洗处理工作、实现数据的融合整合以及做好数据的存储管理工作。

#### 3.3.3 水利工程数字孪生模型设计

模型设计在构建高保真虚拟体方面占据着极为重要的位置,其框架应当具备模块化、层次化以及可扩展等特性。其中,模型融合无疑是一项十分关键的挑战,具体而言,要达成机理模型与数据驱动模型的融合,借助物理规

律来对数据模型加以约束,并且运用数据模型去修正机理模型的参数或者弥补该模型存在的不足之处;还要实现多尺度模型的耦合,比如把宏观层面的流域水文模型和微观层面的工程水力学模型紧密且无碍地衔接起来;得实现多时间尺度模型的协同,以此来契合不同分析任务的各项需求<sup>[4]</sup>。并且,模型校核、验证以及确认这一系列的过程务必要贯穿于模型的整个生命周期当中,要充分利用历史数据以及实时数据不断地对模型参数进行校准,以此来验证模型预测的精度,最终确认模型针对特定应用场景所具有的适用性。

### 3.4 水利工程数字孪生系统相关技术

实现上述设计构思,离不开一系列关键技术作为支撑:物联网以及智能感知技术能够为数据源头带来源源不断的活水;多源异构数据融合技术可消除信息孤岛现象;多物理场耦合建模仿真技术是虚拟体高保真度得以实现的基础所在;人工智能和大数据分析技术赋予了智能诊断、预测以及决策的能力;高性能计算与云计算技术可保障复杂模型得以高效求解,并且能够处理海量数据;可视化与人机交互技术能够提供直观且高效的监控以及操作界面;边缘计算技术实现了数据的就近处理,从而降低了传输时延以及带宽压力;信息安全技术则可保障系统以及数据的安全与可靠性。

## 4 结语

数字孪生技术构建起水利工程物理实体和虚拟模型之间深度交互且能持续迭代的融合体系,这给破解传统运行管理于状态感知、风险预判、决策优化以及模式创新等方面所存在的瓶颈带来了极具革命性的解决办法。它的核心价值体现在把工程运行状态变得全息透明化了,让管理决策过程走向科学智能化,并且使得维护策略达成预测主动化,这些都贯穿于提升工程全生命周期的管理效能当中。系统设计的重点在于构建高保真、多维度并且能够动态演化的虚拟体体系,要打通实时且精准的数据采集传输链路,达成多维多尺度模型的深度融合以及高效的仿真效果,同时还要集成应用物联网、大数据、人工智能以及云计算等一系列前沿技术。虽说在模型精度、数据质量、标准规范以及系统集成等方面依然面临着诸多挑战,不过数字孪生技术毫无疑问是水利工程运行管理朝着数字化、网络化以及智能化转型升级的必然走向和核心推动因素。

### [参考文献]

- [1]冯海军.数字孪生技术与智慧水利建设探究[J].科技与创新,2024(24):95-101.
- [2]夏红明,张国文,喻未.数字孪生技术在泵站运行管理中的应用[J].南昌工程学院学报,2025,44(1):21-26.
- [3]徐文浩.数字孪生技术在调水工程建设与管理中的应用研究[J].工程技术研究,2025,10(6):124-126.
- [4]李远强.数字赋能河湖长制的实现路径与对策[J].广西水利水电,2025(2):94-100.

作者简介:陈剑(1988.11—),男,本科,汉族,专业:建筑环境与设备工程。