

数字孪生在水利枢纽设计中的应用

伍玉良

山东水和设计咨询有限公司 山东 烟台 264003

摘要：随着全球气候变化加剧和水资源供需矛盾日益突出，现代水利枢纽工程正朝着更安全、更智能、更高效的方向发展。传统的水利枢纽设计方法在应对复杂地质条件、多目标协同优化以及全生命周期管理等方面面临诸多挑战。数字孪生（Digital Twin）技术作为一种集成了物联网（IoT）、大数据、人工智能（AI）、三维建模与仿真等前沿技术的综合性解决方案，为水利枢纽的设计、建设与运维提供了全新的范式。本文系统阐述了数字孪生的核心内涵与技术架构，深入剖析了其在水利枢纽设计阶段的关键应用场景，包括高保真三维地质建模、多物理场耦合仿真、设计方案智能比选与优化、施工过程预演以及风险预测与韧性评估。最后，文章探讨了当前应用中存在的数据壁垒、模型精度与计算效率平衡、标准体系缺失等挑战，并对未来的发展趋势进行了展望，旨在为推动我国智慧水利建设提供理论参考与实践指导。

关键词：数字孪生；水利枢纽；工程设计；BIM；多物理场仿真；智能优化

引言

水利枢纽是国家水网核心节点，在防洪、水资源调配等方面作用关键，但具有投资大、结构复杂等特点。全球极端天气频发，社会对工程安全与生态要求提高，传统设计模式局限性凸显，设计阶段的疏漏可能引发严重后果。当下，数字化等科技革命重塑工程建设行业，数字孪生技术应运而生。它构建物理与虚拟空间实时双向映射，能精准描述、诊断、预测和决策物理实体全要素等。对于水利枢纽这一复杂巨系统，数字孪生是系统性思维与方法论，在设计阶段可深度整合多源信息，模拟真实世界规律与约束，推动设计从“经验驱动”转向“数据与模型双驱动”。所以，深入研究数字孪生在水利枢纽设计中的应用，兼具重大理论意义与迫切现实需求。

1 数字孪生的概念、内涵与技术架构

1.1 数字孪生的核心定义与内涵

数字孪生最早由Michael Grieves教授于2002年提出，最初用于产品全生命周期管理。其核心思想是为物理实体创建一个与其保持同步更新的、高保真的虚拟副本（即“孪生体”）。这个孪生体不仅仅是静态的几何模型，更是包含了物理实体的属性、行为、规则及其所处环境信息的动态知识库^[1]。在水利工程领域，数字孪生的内涵可以概括为“三全四维”：“三全”指全要素（涵盖枢纽所有物理构件、地质、水文、气象等环境要素）、全过程（覆盖规划、设计、施工、运维、退役等全生命周期）、全价值链（集成安全、经济、生态、社会等多维度价值目标）。“四维”指在传统的三维空间基础上，增加了时间维度（4D），并进一步融合了反映物理状态和业务逻辑的

数据维度（5D）与反映物理规律的机理模型维度（6D），最终形成一个可交互、可推演、可进化的智能体。

1.2 水利枢纽数字孪生的技术架构

一个完整的水利枢纽数字孪生系统常采用分层架构主要包括以下五个层面：

1.2.1 感知与控制层

这是数字孪生的物理基础。通过部署在坝址区域各类传感器（如GNSS位移监测、渗压计、应力应变计、水位计、雨量计、水质监测仪等）、无人机、卫星遥感以及未来的智能建造装备，实现对物理世界全方位、全天候的数据采集与指令执行。

1.2.2 数据资源层

该层负责汇聚、存储、治理来自感知层、历史档案、设计资料、外部环境（如气象预报、流域水文模型）等多源异构数据。关键技术包括时空数据库、数据湖/仓、数据清洗与融合、元数据管理等，旨在构建统一、权威、鲜活的“数据底板”。

1.2.3 模型与仿真层

这是数字孪生的“大脑”和核心竞争力所在。该层集成了多种模型：一是几何模型：基于BIM（建筑信息模型）和GIS（地理信息系统）技术构建的高精度、参数化的三维实体模型。二是机理模型：基于物理定律（如流体力学、固体力学、岩土力学）构建的数学模型，用于模拟大坝结构应力、渗流场、洪水演进、泥沙输移等物理过程。三是数据驱动模型：利用机器学习、深度学习等AI算法，从海量历史数据中挖掘规律，用于预测设备故障、优化调度策略等。四是混合模型：将机理模型与

数据驱动模型相结合,弥补单一模型的不足,提高仿真预测的准确性与鲁棒性。

1.2.4 功能应用层

面向不同业务场景,提供具体的应用服务。在设计阶段,主要功能包括方案比选、仿真分析、碰撞检查、施工模拟、风险评估等。

1.2.5 交互展示层

通过Web端、移动端、VR/AR/MR等沉浸式技术,为工程师、管理者和决策者提供直观、交互式的可视化界面,支持多方案同屏对比、虚拟漫游、数据钻取等操作,极大地提升了人机协同效率。

这五个层次通过统一的API接口和数据总线紧密耦合,形成一个“感知-分析-决策-执行”的闭环反馈系统。

2 数字孪生在水利枢纽设计阶段的关键应用

设计是水利枢纽工程的源头,决定了项目的成败。数字孪生技术在此阶段的应用,从根本上改变了设计流程和工作模式。

2.1 高保真三维地质与地形建模

地质条件是水利枢纽设计的基石。传统勘察手段(如钻孔、物探)获取的是离散点数据,难以精确刻画复杂的地质构造(如断层、软弱夹层、溶洞)。数字孪生通过融合多源地质数据(钻孔、剖面、地球物理勘探、InSAR地表形变等),利用地质统计学、机器学习插值算法(如克里金法、反距离权重法)以及专业的地质建模软件(如GOCAD, Leapfrog),构建出连续、精细、属性丰富的三维地质模型(3D Geological Model)。该模型不仅能清晰展示岩土体的空间分布和物理力学参数,还能与BIM结构模型无缝集成,为后续的坝基处理、边坡稳定分析、地下厂房开挖等关键设计环节提供坚实的数据支撑^[2]。同时,通过高分辨率卫星影像、激光雷达(LiDAR)点云数据,可以快速生成厘米级精度的数字高程模型(DEM)和数字正射影像(DOM),精确还原坝址区的真实地形地貌,为枢纽总体布置、料场规划、施工道路设计等提供依据。

2.2 多物理场耦合仿真与性能预测

水利枢纽是一个涉及水、土、结构相互作用的复杂系统。数字孪生的强大之处在于能够进行多物理场耦合仿真,全面预测设计方案在各种工况下的性能表现。(1) 结构-渗流耦合分析:将大坝的BIM结构模型导入有限元分析软件(如ANSYS, ABAQUS),并与三维地质模型结合,模拟水库蓄水后坝体及坝基内的渗流场分布。进而将渗流压力作为荷载施加到结构模型上,分析坝体的应力、应变和稳定性。这种耦合分析能更真实地反映工程实际,有效避免因忽略渗流影响而导致的安全隐患。(2) 洪

水演进与溃坝风险模拟:基于高精度DEM和水动力学模型(如HEC-RAS, MIKE系列),可以模拟不同重现期洪水在库区和下游河道的演进过程,评估泄洪建筑物的泄流能力及下游淹没风险。更重要的是,可以进行极端情景下的溃坝洪水模拟,为应急预案制定和下游居民疏散提供科学依据。(3) 温控防裂仿真:对于大体积混凝土重力坝,温度应力是导致裂缝的主要原因。数字孪生可以建立包含混凝土配合比、浇筑程序、冷却水管布置等详细信息的精细化模型,结合气象数据,模拟混凝土从浇筑到后期运行全过程的温度场和应力场演变,从而优化温控措施,预防裂缝产生。这些仿真结果不再是孤立的数值报告,而是直接叠加在三维可视化模型上,使设计人员能够直观地“看到”问题所在,从而做出更明智的决策。

2.3 设计方案智能比选与多目标优化

面对复杂的约束条件(如安全、投资、工期、生态流量、移民安置等),设计师往往需要在多个备选方案之间进行权衡。传统方法依赖专家经验打分,主观性强且效率低下。数字孪生为此提供了量化、客观的决策支持工具。通过构建一个包含所有设计方案参数(如坝型、坝高、泄洪孔口尺寸、机组台数等)的参数化模型库,可以自动调用后台的仿真引擎,批量计算每个方案在安全性(如抗滑稳定安全系数)、经济性(如工程总投资、度电成本)、生态性(如下泄生态流量保证率)等多个维度的性能指标^[3]。随后,利用多目标优化算法(如遗传算法、粒子群算法)或数据可视化技术(如平行坐标图、雷达图),帮助决策者快速识别出Pareto最优解集(即在某一目标上无法再改进而不损害其他目标的方案集合),从而选出综合效益最佳的设计方案。这一过程极大地提升了设计的科学性和效率。

2.4 施工过程4D/5D预演与冲突检测

设计成果最终要通过施工来实现。数字孪生将时间维度(4D)和成本维度(5D)融入设计模型,实现了对施工全过程的虚拟预演。(1) 4D施工模拟:将BIM模型与详细的施工进度计划(如Primavera P6导出的计划)关联,可以动态模拟从场地平整、基础开挖、大坝浇筑到机电安装的每一个施工步骤。这有助于提前发现工序逻辑错误、资源冲突(如大型吊车作业空间不足)、物流瓶颈等问题,优化施工组织设计。(2) 5D成本管控:在4D模型的基础上,挂接工程量清单和定额信息,可以实现工程成本的动态模拟和预警。当设计方案发生变更时,系统能自动计算出对总造价的影响,为限额设计提供即时反馈。(3) 碰撞检查:在复杂的地下厂房或廊道系统中,

机电、水力、暖通等各专业管线密集交错。通过在数字孪生平台上进行全专业的碰撞检查,可以在设计阶段就发现并解决90%以上的硬碰撞(实体干涉)和软碰撞(间距不足),避免施工阶段的返工,节约大量成本和时间。

2.5 工程风险预测与韧性评估

现代工程设计理念越来越强调“韧性”,即系统在遭受扰动后吸收、适应并恢复的能力。数字孪生通过集成气候模式、地震动参数、设备可靠性数据库等,可以在设计阶段就对工程未来可能面临的各种风险进行量化评估。例如,利用区域气候模型(RCM)的未来情景数据,可以评估在气候变化背景下,未来几十年入库径流的变化趋势,从而校核水库的兴利库容和防洪库容是否仍然合理。同样,通过输入不同强度的地震波,可以进行大坝的抗震性能时程分析,评估其在强震下的损伤状态和剩余承载力,为抗震设防标准的确定提供依据。这种前瞻性的风险评估,使得设计方案更具韧性和适应性。

3 挑战与展望

3.1 挑战

尽管数字孪生在水利枢纽设计中展现出巨大潜力,但其广泛应用仍面临一些挑战:(1)数据壁垒与标准缺失:水利、测绘、地质、电力等行业数据格式各异,缺乏统一的数据标准和共享机制,导致“数据孤岛”现象严重。(2)模型精度与计算效率的平衡:高保真、多物理场耦合模型计算量巨大,如何在保证精度的同时实现实时或近实时仿真,是技术上的难点。(3)人才与知识体系重构:数字孪生要求工程师不仅要懂专业,还要具备数据科学、编程和系统集成能力,现有人才培养体系亟待改革。

3.2 展望

展望未来,数字孪生在水利枢纽设计中的应用将呈现以下趋势:(1)与AI深度融合:AI将不仅用于数据分析,还将用于自动生成设计初稿、自主优化参数、智能

诊断模型缺陷,实现更高水平的自动化设计^[4]。(2)向全生命周期贯通:设计阶段构建的数字孪生体将成为后续施工、运维阶段的核心资产,实现“一模到底”,真正打通全生命周期的数据链和业务链。(3)构建流域级数字孪生:从单个工程向整个流域扩展,将多个水利枢纽、河道、湖泊、城市管网等纳入统一的数字孪生流域框架,实现水资源的系统治理和联合调度。

4 结语

数字孪生技术正在深刻变革水利枢纽的设计范式。它通过构建一个虚实交融、动态演化的高保真虚拟映射,赋能设计人员以前所未有的洞察力去理解复杂系统、预测未来行为、优化设计方案。从高精度地质建模到多物理场仿真,从智能方案比选到施工风险预演,数字孪生的应用贯穿了设计的各个环节,有效提升了设计的科学性、前瞻性、协同性和经济性。尽管在数据、模型和人才方面仍存在挑战,但随着技术的不断成熟和标准的逐步建立,数字孪生必将成为智慧水利建设的核心引擎,为保障国家水安全、推动水利高质量发展提供强大的技术支撑。未来的水利枢纽设计,将不再是图纸上的静态描绘,而是在一个活的、会思考的数字生命体中进行的动态创造与持续进化。

参考文献

- [1]宋金伟.数字孪生技术在黔中水利枢纽工程中的应用[J].水科学与工程技术,2025,(01):60-63.
- [2]肖曾,刘义.水利工程设计中数字孪生技术的应用研究[J].低碳世界,2025,15(12):66-68.
- [3]刘瑞瑞.数字孪生技术在水利工程设计中的应用研究[C]//河海大学,江苏省水利学会,浙江省水利学会,上海市水利学会.2024(第十二届)中国水利信息化技术论坛论文集.黄河口水文水资源勘测局,2024:259-263.
- [4]耿振云.数字孪生水利发展历程、关键技术与设计要点[J].水利水电工程设计,2025,44(03):1-9.