

水利水电工程中数字孪生技术的应用

任伟莹

河北省水利水电勘测设计研究院集团有限公司，天津，300220；

摘要：随着信息技术的飞速发展，数字孪生技术在水利水电工程领域展现出了巨大的应用潜力。本文详细阐述了数字孪生技术在水利水电工程中的重要意义，重点探讨了该技术在工程规划设计、建设施工、运行管理以及防洪减灾等多个阶段的具体应用情况，并分析了当前应用中面临的挑战与未来发展趋势。旨在为推动数字孪生技术更好地服务于水利水电工程建设与管理，提升工程的综合效益提供参考与借鉴。

关键词：数字孪生技术；水利水电工程；应用

DOI：10.69979/3060-8767.25.10.029

引言

水利水电工程作为关乎国计民生的重要基础设施，对于水资源的合理开发利用、防洪减灾以及能源供应等方面都起着关键作用。传统的水利水电工程建设与管理模式往往依赖于经验以及相对离散的监测数据，在应对复杂多变的工况、提高工程精细化管理水平以及实现高效协同等方面存在一定局限性。而近年来兴起的数字孪生技术，通过构建与物理实体工程相对应的虚拟数字模型，并实现二者之间的实时交互、数据融合与双向映射，为水利水电工程的全生命周期管理带来了全新的思路与方法。借助数字孪生技术，能够更加精准地模拟工程运行状态、提前预测各类潜在问题、优化决策制定过程，从而提升水利水电工程的安全性、可靠性以及综合效益。

1 数字孪生技术在水利水电工程中应用的意义

数字孪生技术在水利水电工程中有着多方面重要作用。在规划设计阶段，通过建立虚拟模型，模拟不同设计方案下的水流情况、受力分布等，对比分析各方案优劣，进而选出最优设计，有效规避后续施工因设计不合理而大改的问题。建设施工时，实时监控施工进度、质量与环境，利用数字孪生模型提前察觉安全隐患、质量问题，便于及时调整，保障施工顺利推进。进入运行管理阶段，凭借该技术能精准掌握实时运行状态，提前预警设备故障、水文异常等状况，辅助管理人员科学调度水资源、维护设备，延长工程寿命，提升运行效益。而在洪水期，借助数字孪生模型可快速模拟洪水演进过程，为防洪指挥决策提供准确依据，合理安排水库泄洪、堤防加固等防洪举措，最大限度降低洪水带来的损失。总之，数字孪生技术全方位助力水利水电工程高质量发展，提升其综合效能。

2 数字孪生技术在水利水电工程各阶段的应用

2.1 在工程规划设计阶段的应用

2.1.1 地形地貌与水文地质模拟

利用数字孪生技术整合卫星遥感、无人机测绘等多源数据，构建高精度的地形地貌和水文地质数字模型。通过该模型可以清晰地了解工程选址区域的地形起伏、土壤类型、地下水位等情况，为确定大坝、厂房等建筑物的合理位置提供科学依据。例如，在某大型水利枢纽规划时，通过数字孪生模型对不同选址的地形条件进行分析，考虑到水流顺畅、基础承载能力等因素，最终确定了最优的坝址位置。

2.1.2 工程方案虚拟建模与比选

针对不同的工程设计方案，如大坝的不同坝型（重力坝、拱坝、土石坝等）、电站的不同布置形式等，分别建立数字孪生虚拟模型。然后在模型中模拟水流、应力应变等各种工况，分析各方案在不同运行条件下的性能指标，像工程稳定性、发电量、防洪能力等。以某水电工程为例，通过数字孪生模型对比了拱坝和重力坝方案，发现拱坝在利用地形优势、节省工程量以及提高发电水头方面更具优势，最终选择了拱坝方案进行施工。

2.1.3 生态环境影响预测

水利水电工程建设不可避免地会对周边生态环境产生影响，数字孪生模型可以结合生态模型，模拟工程建成后对河流生态系统、动植物栖息地等方面的改变。例如，在水利水电工程建设中，借助数字孪生技术深入分析水库蓄水后对鱼类洄游通道的阻隔情况。依据精准的分析结果，提前合理规划并建设鱼道等生态补偿措施，有效缓解鱼类洄游受阻问题，从而最大程度减少工程对生态环境的负面影响。

2.2 在工程建设施工阶段的应用

2.2.1 施工进度实时监控与管理

在施工现场布置各类传感器，如 GPS 定位传感器、

摄像头等,将采集到的施工设备位置、施工人员活动、工程形象进度等数据实时传输到数字孪生模型中。管理人员通过模型可以直观地查看各施工部位的进展情况,对比计划进度,及时发现进度滞后的环节并分析原因,采取增加施工资源、优化施工顺序等措施来保证施工进度按计划推进。

2.2.2 施工质量控制与安全预警

利用数字孪生模型对施工过程中的关键质量控制点进行实时监测,比如混凝土浇筑的温度、强度等参数,一旦出现不符合质量标准的情况,模型及时发出预警提示。同时,对于施工现场的安全隐患,如高边坡的稳定性、深基坑的支护情况等,通过数字孪生模型结合力学分析算法,提前预测可能发生的滑坡、坍塌等安全事故,提醒施工人员做好防范措施。

2.2.3 施工资源优化配置

根据数字孪生模型中反映的施工进度和实际需求,对施工材料、机械设备、人力资源等进行合理调配。例如,当某一施工区域需要大量的钢材进行结构施工时,通过模型分析各仓库的库存情况以及运输路线,及时调度钢材运输,避免出现材料短缺或积压的现象,提高施工资源的利用效率。

2.3 在工程运行管理阶段的应用

2.3.1 设备状态监测与故障诊断

在水利水电工程里,于各类机电设备、闸门等关键所在精心安装传感器,使其能实时抓取设备运行参数,像温度、振动、转速等,并传输至数字孪生模型。模型运用专业数据分析与故障诊断算法,全方位评估设备健康状态。一旦有异常,可凭借分析水轮发电机组振动频谱等方式,精准判断故障位置与原因,及时维修,大幅缩短设备停机时长,保障工程正常运转。

2.3.2 水资源优化调度

数字孪生模型发挥关键作用,紧密结合实时的水文气象数据以及用水需求详情,搭建起水资源调度优化模型,让水库蓄水、放水等调度决策更具智能化。比如枯水期,依据模型对来水情况的预测,精细调控水库下泄流量,充分保障下游生态、灌溉及生活用水需求;丰水期时,则科学安排泄洪,巧妙兼顾防洪、发电等多方面效益,实现水资源的高效利用。

2.3.3 工程效益评估与提升

借助数字孪生模型,能对水利水电工程的防洪、发电、灌溉、供水等诸多效益展开实时评估。细致分析不同运行策略下效益的变动情况,从中发现可优化之处。随后通过持续调整运行管理举措,像优化机组发电水头、提高灌溉水利用效率等,稳步提升工程综合效益,让水

利水电工程更好地服务于社会发展。

2.4 在防洪减灾方面的应用

2.4.1 洪水实时监测与预报

在整个流域范围内,科学且广泛地布置众多雨量站、水位站等监测设施,这些设施如同敏锐的触角,时刻捕捉着实时的降雨、水位等关键数据,并准确无误地传输至数字孪生模型里。而该模型会巧妙融合气象预报数据以及流域的水文模型,凭借强大的运算能力,精细地对洪水的发生时间、洪峰流量、洪水演进路径等进行实时预报。如此一来,防洪指挥部门便能提前依据这些准确的预报信息,有条不紊地做好诸如物资调配、人员组织等各方面的准备工作,为应对洪水筑牢坚实基础,保障防洪工作的高效开展。

2.4.2 防洪调度决策支持

当洪水来袭的危急时刻,数字孪生模型开始发挥其巨大作用。它能够依据已有的各类数据,逼真地模拟出不同防洪调度方案实施后洪水的淹没范围、受灾区域等详细情况。决策者借助这些直观且精准的模拟结果,可以迅速对比分析,进而从众多方案中挑选出最优的防洪调度方案。比如精准地确定水库在何时进行泄洪最为恰当、具体的泄洪流量控制为多少,以及明确堤防的哪些区域是加固的重点所在等关键决策内容。通过这样科学合理的调度安排,最大限度地降低洪水对流域内居民的生命财产安全以及基础设施所造成的严重危害,守护一方安宁。

2.4.3 灾后恢复与重建指导

洪水逐渐退去后,满目疮痍的受灾场景亟待恢复与重建。此时,数字孪生模型就如同一位经验丰富的向导,依据收集到的受灾情况相关数据,全面且深入地分析工程设施所遭受的损毁程度,细致梳理对生态环境造成的破坏情况等重要信息。然后,依据这些分析成果,为灾后恢复重建工作提供极具价值的指导意见。例如,通过严谨的评估,确定哪些水利工程受损最为严重,需要优先开展修复工作,并且详细规划出具体该如何修复,才能更好地恢复其防洪和供水等关键功能,助力受灾地区尽快恢复往日生机。

3 数字孪生技术在水利水电工程应用中面临的挑战

3.1 数据质量与整合问题

水利水电工程涉及的数据种类繁多,包括水文、气象、工程结构、设备运行等多方面的数据,且数据来源广泛,数据格式、精度等各不相同。要实现数字孪生模型的准确构建和有效应用,需要对这些海量、异构的数

据进行高质量的整合、清洗以及校准,确保数据的准确性、完整性和一致性,这是当前面临的一大难题。

3.2 模型精度与实时性平衡

一方面,要提高数字孪生模型对水利水电工程复杂物理过程(如水流的紊流模拟、结构的非线性力学行为等)的模拟精度,往往需要采用更复杂的计算模型和算法,这会增加计算量,影响模型的实时更新速度;另一方面,若过于追求实时性而简化模型,又会导致模拟结果与实际情况偏差较大。如何在模型精度和实时性之间找到合理的平衡点,是需要攻克的关键问题。

3.3 专业人才短缺

数字孪生技术是多学科交叉的产物,应用于水利水电工程领域需要既懂水利工程专业知识,又熟悉信息技术、数据分析、建模等相关技术的复合型人才。然而目前这类复合型人才相对匮乏,限制了数字孪生技术在水利水电工程中更深入、广泛的应用。

3.4 成本投入与效益评估

构建和维护数字孪生系统需要投入大量的资金用于硬件设备购置、软件研发、数据采集与传输等方面,而对于其带来的效益,如防洪减灾效益、运行管理效益等的量化评估还缺乏统一、完善的标准,这使得部分水利水电工程单位在应用数字孪生技术时存在顾虑。

4 数字孪生技术在水利水电工程应用中的发展趋势

4.1 与人工智能、大数据深度融合

在未来的发展中,数字孪生技术与人工智能、大数据分析的融合会愈发深入。人工智能的深度学习算法犹如一把精准的钥匙,能深度挖掘海量水利水电工程数据,让故障诊断、洪水预报变得更准确且智能。而大数据技术则像一个高效的管家,实现数据的妥善存储、便捷管理与快速调用,为数字孪生模型筑牢坚实的数据根基,使其能在实际应用中发挥出更强大的效能,助力水利水电工程管理更上一层楼。

4.2 云平台应用拓展

云平台对于水利水电工程数字孪生模型而言意义重大。借助云平台强大的网络功能,能轻松实现数字孪生模型的远程部署,打破地域与部门的限制,让不同地区、不同部门的相关人员都可便捷访问和使用。大家可以依托云平台开展联合调度,分享彼此的经验,在交流合作中,切实提高水利水电工程跨区域、跨部门的协同

管理水平,推动整个行业协同共进。

4.3 全生命周期一体化应用

水利水电工程全生命周期一体化数字孪生应用正逐步成为发展趋势。从项目最初的规划、设计构思,到热火朝天的建设施工阶段,再到后续漫长的运行管理以及必要的更新改造等各个环节,都将统一纳入数字孪生平台的管理范畴。如此一来,数据能够实现无缝传递,在全流程中都能基于精准的数据进行优化决策,保障工程在各个阶段都能高效、科学地推进,提升整体效益。

4.4 标准规范与政策支持完善

随着数字孪生技术在水利水电工程领域应用范围的不断扩大,国家和行业越发重视其标准规范与政策支持的完善工作。会逐步明确数字孪生模型构建时的各项要求,细致规定数据格式、接口标准等关键内容,让模型的建设有章可循。同时,出台更多利好政策,积极鼓励水利水电工程单位大胆应用该技术,为行业的数字化转型营造良好环境,推动整个水利水电行业朝着更智慧、更先进的方向迈进。

5 结语

数字孪生技术在水利水电工程中的应用前景广阔,其在工程规划设计、建设施工、运行管理以及防洪减灾等多个方面都发挥着重要作用,能够有效提升水利水电工程的综合效益和精细化管理水平。然而,目前在应用过程中还面临着数据质量、模型精度、人才短缺以及成本效益评估等诸多挑战。展望未来,随着技术的不断发展以及与其他先进技术的融合,加上标准规范和政策支持的不断完善,数字孪生技术必将在水利水电工程领域得到更深入、更广泛的应用,助力我国水利水电事业迈向新的高度。

参考文献

- [1]陈朝河.试析数字孪生技术在智慧水利工程中的应用[J].智慧中国,2025,(06):108-109.
- [2]王志东,魏至胜,匡桂喜.数字孪生技术在水利工程中的应用研究[J].智能城市,2025,11(02):134-136.
- [3]蒋国栋,邓大建,李莉,李伟明,黄浩,谢秋霞.数字孪生技术在水利工程中的应用[J].电子技术,2024,53(09):96-97.
- [4]黄一彬,马洪羽.数字孪生技术在水利工程中的应用[J].水电站机电技术,2023,46(06):85-86.
- [5]朱敏,施闻亮.数字孪生技术在水利工程中的实践与应用[J].江苏水利,2022,(S2):81-85.