

基于数字孪生技术在智慧水利工程中的应用研究

文 / 谢珍贞 长江工程监理咨询有限公司（湖北）

王 倩 长江工程监理咨询有限公司（湖北）

摘要：数字孪生是通过建立与物理实体高度映射的数字模型，实现物理世界与数字空间的实时交互与协同优化的新兴技术。在水利工程领域引入数字孪生理念，建立涵盖感知层，网络层，数字层，应用层的智慧水利数字孪生系统，对于提升水利工程数字化监测与管理能力，优化水资源调度与灾害预警决策效率、推动水利工程全生命周期智能化管理具有重要意义。然而智慧水利数字孪生的发展仍面临数据采集与融合标准不完善、模型构建精度与实时性不足、应用场景拓展与深度整合有待加强等现实挑战。本文在分析数字孪生技术价值内涵的基础上，提出了“筑基础，构模型，拓应用”的智慧水利数字孪生应用发展思路，以期数字孪生赋能现代水利工程建设提供参考。

关键词：数字孪生；智慧水利；全生命周期管理；精准调度；协同优化

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.082

引言

水利工程是国家重要的基础设施，事关国计民生、经济社会可持续发展。我国正处于从传统水利向现代水利转型发展的关键时期，迫切需要运用新一代信息技术推动水利工程数字化，网络化，智能化发展。数字孪生作为信息物理融合的前沿技术，通过在数字空间构建与物理实体高度一致的虚拟镜像，实现工程全要素，全过程，全周期的实时映射与交互，为水利工程数字化转型升级提供了新路径。将数字孪生理念引入水利工程，构建涵盖感知层，网络层，数字层，应用层的智慧水利数字孪生系统，能够显著提升水利工程的感知监测，数据处理，仿真优化、辅助决策等智能化水平，推动形成水利工程与数字技术深度融合的创新发展格局。

一、数字孪生技术在智慧水利工程中应用的重要意义

（一）提升水利工程数字化监测与管理能力

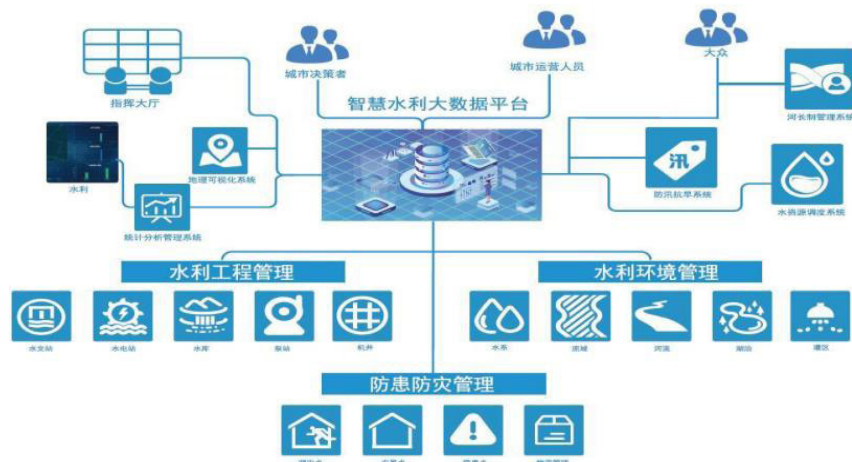
运用数字孪生技术能显著提升智慧水利工程数字化监测及精细化管理水平，采用在水利工程关键部位投放各类传感器，进而与数字孪生模型做到实时衔接，工程师可直观明察大坝的变形状况，应力等关乎健康状态的数据，快速对工程安全隐患进行预警^[1]。同时依据实测大数据对数字孪生模型参数进行精准校正，可大幅提升模型对实体工程状态的映射精准度，为工程实施调度控制，为检修维护等管理决策之事提供可靠的佐证，此外借助人工智能手段，诸如大数据分析的新技术，对监测数据加以挖掘，构建针对工程安全评估预警的模型，能更精准地预先判断工程风险，促成由“事后被动整改”到“事前主动防范”的管理观念升级，数字孪生技术显著增进了水利工程的感知能力，决策这类数字化能力，使工程管理的透明可视特性更凸显，对确保工程安全稳定运行、提升管理效能意义重大。

（二）优化水资源调度与灾害预警决策效率

智慧水利里，水资源优化调度与洪涝灾害精准预警是关键应用场景，数字孪生技术凭借搭建流域尺度的多源异构数据资源池，再搭建水文水资源数字孪生模型，可大幅增进调度及预警的分析计算效能，依托流域降雨情况，实时监测到的诸如河道水位的数据，引领流域数字孪生模型实施水量平衡分析，能快速测算不同调度方案的供需匹配水平，辅助制订兼顾防洪及供水要求的最优调度预案。模型还可对雷达降水预报等多源数据加以集成，模拟极端降雨环境下洪水的演进走势，测定洪水风险的层级，为精准预警与应急调度提供指引，数字孪生平台可达成水文，实现灾情等多元信息的整合展示，直观呈现水利工程应对防洪抗旱的作用，为科学统筹安排，为应急指挥决策构建支撑基础，从这里能看出数字孪生技术为水资源优化配置助力，为洪涝灾害的智能化防控开辟了新路径，能推动水利工程效益实现最大化发挥，促使流域水资源精细化管控水准上扬。

（三）促进水利工程全生命周期智能化管理

传统的水利工程管理多聚焦于运行阶段，设计，施工等阶段的数据难以传承共享，全生命周期管理尚未真正实现，数字孪生技术的引入，为打通水利工程全生命周期数据壁垒、实现数据价值最大化提供了可能。在设计阶段基于BIM技术构建工程数字孪生模型，可直观模拟施工进度计划，优化资源配置方案，提高设计质量和施工效率^[2]。施工阶段通过实时采集现场施工数据并与数字孪生模型链接，可实现工程形象进度，材料设备，质量安全等多维度透明化监管，有效控制工期和成本（如图一）。投运阶段充分继承前期模型数据，持续用监测数据丰富和优化模型，实现设计，施工，运维等全生命周期的数字化管理。此外借助数字孪生模型开展工程老化，断面失稳等典型灾害工况的仿真推演，并评估应急预案的可行性，能有效指导抢险救灾。



图一：数字孪生技术在水利工程中对各方的连接作用

二、数字孪生技术在智慧水利工程应用中的现实挑战

(一) 数据采集与融合标准体系不完善

数据是搭建数字孪生的基石，高精度孪生模型的构建，前提是有全面覆盖工程全生命周期的数据资源，但现今水利工程领域没有统一规范的数据采集及融合标准体系，拖慢了数字孪生在智慧水利里的深入应用步伐，各类物联网感知设备在接口与数据格式标准上缺乏统一性，采集的监测数据直接用于模型分析计算不太容易，数据清洗与转换这项工作的工作量超大。不同业务系统里分散有运维等阶段的工程数据，欠缺统一的描述标准跟编码规章，数据横向与纵向的打通及集成困难重重，无法为全生命周期数字孪生模型打造提供数据依托，工程健康监测数据的安全性与私密性要求颇高，但完善的数据共享交换安全机制至今未建立，造成多源异构数据汇聚流通的阻碍，数据基础的薄弱已然成为阻碍智慧水利数字孪生发展的“绊脚石”，急需快速搭建覆盖数据采集、传输、存储、管理、应用等环节的标准规范体系，筑牢数字孪生的数据壁垒。

(二) 模型构建精度与实时性有待提高

发挥数字孪生价值的关键是拥有实时性的孪生模型，然而为数据质量因素所扰，受计算能力等方面要素影响，现阶段水利工程数字孪生模型的构建水平有待再度提高，数字孪生刻画工程实体静态几何特征的精细程度欠佳，受限于BIM等数字化设计工具普及的水平，众多水利工程数字模型的颗粒度粗疏，不能支撑精细化仿真分析的开展。孪生模型针对工程动态演变过程的实时映射能力欠佳，部分水利工程的物联网布局存在欠缺，监测数据在时空上的分辨能力弱，数据传输的时延程度大，导致模型对实际工况的响应实时效果差，预测分析水平欠佳，多物理场耦合在机理建模及数值仿真上有技术瓶颈，水利工程牵扯流固耦合机理，诸如水土耦合之类的复杂作用机理，目前数字孪生模型对多场耦合机理的刻画精准

程度不够，对模型分析的可靠性造成了影响^[3]。海量监测数据和复杂机理模型的实时融合计算对算力的要求极高，可是目前欠缺与之相契合的高性能计算支撑，孪生模型构建存在精度低下、实时性不强等情形，不能充分实现对工程的仿真、预测及优化效用，后续应强化工程数字化设计举措，助力BIM在水利范畴的应用拓展；对物联网监测系统的布局加以优化，增强数据时空的分辨精细度；冲破多场耦合机理建模技术的瓶颈，改善模型仿真的精度水平；以创新方式构建支撑数字孪生的高性能计算架构，改善模型分析的时效性水平。

(三) 应用场景拓展与深度整合不足

数字孪生的应用价值需要在智慧水利的场景落地中充分体现，但目前智慧水利数字孪生的应用场景拓展还不够广泛，与水利业务的深度融合还不够紧密，数字孪生对实际生产的渗透力度有待加强。一方面多数水利工程的数字孪生应用还局限于运行监测，安全预警等单一场景，在设计优化，施工管控，检修养护等关键环节的应用覆盖面不广，难以形成覆盖工程全生命周期的数字孪生价值链条。另一方面水利工程规划设计，施工建设，运行管理等业务流程长期处于“烟囱式”割裂状态，数字孪生技术与既有业务的耦合程度不高，业务部门参与数字孪生平台的积极性不够，导致平台应用的广度和深度不足，同时水利行业缺乏数字孪生人才培养与管理机制创新，制约了数字孪生成果的推广应用。可见深度挖掘数字孪生在智慧水利中的场景应用潜力，打通产业链各环节，充分释放数字红利，是新阶段数字孪生发展的重点方向。未来要加强顶层设计，制定行业数字孪生发展路线图；创新体制机制，调动各方积极性，推动数字孪生与业务深度融合；加强复合型人才培养，为数字孪生发展提供智力支撑。

三、数字孪生技术在智慧水利工程中的应用策略

(一) 筑基础数融通，全息感知显

筑牢数据根基是推进智慧水利数字孪生发展的首要

工作,要加快建成覆盖水利工程全生命周期的数据感知与融通体系,为建立孪生模型提供优质的数据后盾,在数据采集这个阶段,需对水文加以统筹,视频等一众监测设备的调配,制定一致的数据通信接口,格式这类技术规格,实现感知数据制式化采集。处于数据管理阶段,需设立好水利工程数据资源目录体系,拟定统一的数据描述规范,编码等元数据对应的规范,采用数据清洗方式,关联等相关处理,达成施工等业务数据的集成共享,在数据应用的阶段,要搭建水利行业数字孪生标准框架,厘清模型对数据的需求点,引领物联网监测系统实施优化升级,促成感知数据和孪生模型的精准契合^[4]。应同步建立起完备的数据管理制度与安全保障机制,厘定数据产权的最终归属,保证数据汇聚呈有序态,另外需加速搭建水利行业公共数据开放共享平台,带动数据资源彼此互联互通,凭借数据基础的夯实,让各类工程全生命周期数据达成“1+1>2”的整合效应,助力智慧水利数字孪生发展踏上坦途。

(二) 构模型智能精,虚实交互畅

智慧水利应用的实现,关键是高实时的数字孪生模型,应充分挖掘新一代信息技术优势,提速构建全阶段,能完成智能分析的水利工程数字孪生模型,带动数字空间跟物理空间的深度互渗,应着重推动BIM技术在水利工程设计领域的采用,组建全工序参数化的三维模型格局,凭借4D、5D等技术实现拓展,达成工程建设全阶段的可视化模拟及优化。要推动物联网感知系统跟孪生模型的融合发展,采用模型参数化、数据同化等的技术途径,实现模型对工程实时运行情形的映射,要把关注点集中于大坝安全,诸如水库调度的关键应用场景,建成覆盖水动力,囊括结构力学等多场耦合机制的高精度仿真分析模型,提高模型对水利工程行为的阐释能力。与此同时要充分利用人工智能的优势,依托机器学习算法搭建水利工程健康诊断体系,调度优化决策相关的智能分析模型,增强模型对未来走向的预判,为优化控制提出建议的效能,需加大智能算法跟机理模型的融合力度,发展像灰箱建模这样的新方法,克服机理描述跟数据驱动的固有短板。处于模型构建的阶段时,应当统筹兼顾模型的通用性及领域针对性,要让共性开发达到最大规模,减少建模的成本投入,也需给予个性化定制以支持,提升模型于复杂水利工程的适应水平,还需构建云、端协同的高效计算支撑环境,满足数字孪生模型分析所需的算力,提升复杂模型运行响应的时效水平,采用强化模型构建及应用手段,驱动工程实体跟数字孪生模型的实时,实现数字空间与物理空间的深度交互及协同优化,充分释放数字孪生的赋能价值。

(三) 拓应用价值深,决策高效彰

数字孪生为一项智慧化技术,应用场景愈显丰富,造就的价值越发庞大,需以应用作牵引,以实际需求作为指引,加强数字孪生跟水利工程规划的协同,施工等业务流程的深度掺融,打造全生命周期智慧化管理的综

合方案,规划设计这一阶段,采用孪生模型开展工程地点选定,以布局优化等进行仿真分析,助力规划设计精细化程度上扬。利用孪生模型可视化的长处,实现资源配置的优化,强化质量与安全管理把控,拉高工程建设的效率水平,基于孪生模型强化工况数据的分析、健康诊断与调度优化,助力工程精细化管理水平上扬,要全力挖掘孪生模型在设备检修与养护里的潜力,应急事故解决处置等关键管理阶段的应用潜力,做到工程运维管理的精准把控,需大力推动数字孪生在流域防洪、水资源优化配置等方面的应用拓展,为流域“一张图”智慧管理提供有力支持^[5]。除工程管理范畴以外,还得把数字孪生应用拓展至水利科研领域,教育培训等范畴的应用,创新科研的既有模式,更新教学样式,增进公众体验效果,应加快推进行业数字孪生整合型应用平台搭建,打破数据藩篱,对各类智慧应用进行统筹整合,加快水利行业管理从数字化至智能化的跃升。应推动体制机制创新,夯实部门协同基础,优化数字孪生成果转化应用的效率水平,需进一步强化复合型人才的培养工作,完备人才管理规章,为数字孪生应用持续加深拓展提供智力后盾,依靠拓展数字孪生应用场景及宽泛度,搭建全要素汇聚、全过程覆盖、全链条衔接的智慧水利新架构,以数字化为支撑全面赋能水利高质量发展。

结语

数字孪生是智慧水利建设的核心智能技术,为破解水利工程高质量发展面临的瓶颈问题提供了新思路新方法。面对数据基础薄弱,模型能力不足,应用深度不够等发展难题,需要水利行业上下协同发力,系统谋划,从夯实基础数据、打造精准模型、拓展应用场景等环节入手,加快构建具有水利特色的数字孪生发展体系。未来,随着数字孪生等新技术的不断发展和成熟,水利行业将加速向信息化、智能化、精细化转型升级,数字孪生必将在智慧水利建设新征程中大放异彩。让我们携手并进,开拓创新,以数字之力打造智慧水利新未来,为保障国家水安全、推动流域高质量发展贡献智慧和力量。

参考文献

- [1] 林运东,张龙,刘勇.数字孪生技术在水利工程运行管理中的分析与探索[J].黑龙江水利科技,2025,(03):168-170.
- [2] 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(06):124-126.
- [3] 牛广利,李天旻,杨恒玲,等.数字孪生水利工程安全智能分析预警技术研究及应用[J].长江科学院院报,2023,(03):181-185.
- [4] 克利娅·木太力夫.数字孪生技术在水利水电信息化的应用研究[J].科学与信息化,2025,(09):22-24.
- [5] 龚春全,龚诗雯,贾莉.聚合通信技术在水利工程信息化建设中的应用研究[J].中国农村水利水电,2024,(04):165-168+174.