

数字孪生水利工程关键技术应用探析

赵同强

昆山市水事综合管理中心 江苏 昆山 215300

摘要: 数字孪生水利工程以物理实体为对象,运用数字孪生技术构建虚拟仿真系统,实现虚实映射、实时交互与智能决策,推动水利管理从经验驱动向数据驱动转变。其关键技术涵盖建模、数据采集与传输、仿真分析,支撑工程全生命周期数字化管控。当前面临模型精度、数据融合、系统集成等挑战,需通过多学科融合、统一数据标准、系统深度集成等策略应对。未来,数字孪生水利工程将与人工智能、区块链等技术深度融合,拓展流域管理、智慧水务等应用场景,并推动标准化与规范化发展,为水利行业智能化升级提供核心动力。

关键词: 数字孪生; 水利工程; 关键技术; 应用探析

引言: 在水利行业数字化转型的浪潮中,数字孪生水利工程作为新兴技术范式,正重塑传统水利管理模式。依托多学科交叉融合,其通过构建物理实体与虚拟模型的动态映射体系,实现了水利工程全生命周期的实时监测、仿真推演与智能决策。面对复杂水流条件与多源异构数据挑战,数字孪生技术正推动水利工程管理从经验驱动向数据驱动跃迁。本文将系统阐述其技术内涵、关键技术架构、应用实践瓶颈及协同创新路径,并展望技术融合、场景拓展与标准化建设对水利行业智能化升级的深远影响。

1 数字孪生水利工程概述

1.1 数字孪生技术概念

数字孪生技术是一种利用物理模型、传感器数据、运行历史等信息,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程的技术。它通过数据驱动,构建与物理实体动态交互的虚拟模型,实现对物理系统的实时监测、预测分析和优化控制,广泛应用于工业制造、智慧城市等领域。

1.2 数字孪生水利工程内涵与特征

数字孪生水利工程是以水利工程物理实体为对象,运用数字孪生技术,构建涵盖工程设施、水流运动、生态环境等要素的虚拟仿真系统。其核心特征包括虚实映射,即虚拟模型与物理实体在几何结构、物理属性和运行状态上高度一致;实时交互,通过传感器网络实时采集物理实体数据,驱动虚拟模型动态更新;智能决策,借助大数据分析、人工智能算法对虚拟模型进行仿真推演,为水利工程运行管理提供科学决策依据。数字孪生水利工程打破传统水利管理模式,实现从经验驱动向数据驱动、从被动应对向主动调控的转变。

1.3 数字孪生水利工程的应用价值

数字孪生水利工程在水利领域具有显著应用价值。在工程安全管理方面,通过实时监测与仿真分析,可提前发现大坝裂缝、堤防渗漏等安全隐患,提升工程风险预警能力。水资源管理层面,能够精准模拟水资源时空分布,优化水资源调配方案,提高水资源利用效率。在防洪减灾中,通过对洪水演进过程的动态仿真,为防洪决策提供准确的洪水预报和调度方案,降低洪涝灾害损失。此外,数字孪生水利工程还可助力水利工程全生命周期管理,从规划设计、建设施工到运行维护,实现全过程数字化、智能化管控^[1]。

2 数字孪生水利工程关键技术分析

2.1 建模技术

建模技术作为数字孪生水利工程的核心基础,涵盖了几何建模、物理建模以及行为建模等多个关键层面。几何建模主要借助三维激光扫描、无人机测绘等先进技术手段,对水利工程设施进行全方位、高精度的数据采集,精准获取其几何形状与空间位置信息,进而构建出逼真的三维模型,为后续的分析与模拟提供直观的几何框架。物理建模则以水力学、热力学等物理原理为基石,针对水利工程运行过程中的水流运动、热量传递等关键物理现象,建立精确的数学模型,实现对物理过程的深度模拟。行为建模则紧密结合水利工程的运行规则与调度策略,构建工程设施与环境交互的行为模型,动态模拟工程的运行状态。此外,多模型融合技术能够将几何、物理和行为模型有机整合,充分发挥各模型的优势,显著提升数字孪生模型的真实性与准确性,为水利工程的科学决策与高效管理提供有力支撑。

2.2 数据采集与传输技术

数据采集与传输技术在数字孪生水利工程中扮演着

实现虚实精准交互的关键角色。(1)在数据采集环节,综合运用多种先进技术手段,广泛获取水位、流量、水质、结构应力等多源异构数据。物联网传感器技术凭借其高灵敏度和智能化特性,能够实现数据的实时、自动采集,为水利工程运行状态的动态监测提供有力支持。卫星遥感、无人机监测等技术则凭借其覆盖范围广、宏观监测能力强的优势,可获取大范围、宏观的水利信息,弥补局部监测的不足。(2)在数据传输方面,借助5G、光纤通信等高速网络技术,构建起高效、稳定的数据传输通道,确保数据能够实时、准确地传输至数字孪生系统,有效减少数据延迟和丢失现象。此外,引入边缘计算技术,在数据采集端对海量数据进行初步处理和筛选,剔除无效和冗余数据,降低网络传输压力,提高数据处理效率,为数字孪生水利工程的实时决策和高效运行提供坚实保障^[2]。

2.3 仿真分析技术

仿真分析技术是数字孪生水利工程实现精准预测与科学决策的核心支撑。(1)该技术依托先进的数值模拟方法,如有限元分析、计算流体力学(CFD)等,对水利工程复杂的运行过程进行精细化仿真建模。通过模拟水流运动轨迹、速度分布以及结构在复杂工况下的受力状态等关键物理过程,深入剖析水利工程内在的运行规律。(2)结合大数据分析技术与人工智能算法,对海量的历史数据和实时监测数据进行深度挖掘与分析。运用机器学习、深度学习等算法建立高精度的预测模型,实现对水位变化趋势、水质动态演变、工程设施老化进程等关键指标的精准预测。(3)借助虚拟现实(VR)、增强现实(AR)技术,将抽象的仿真结果以直观、生动的可视化形式呈现,为管理人员提供沉浸式的决策分析环境,助力其快速理解复杂的水利工程运行态势,从而做出科学、合理的决策,保障水利工程的安全、高效运行。

3 数字孪生水利工程应用面临的挑战与策略

3.1 面临的挑战

数字孪生水利工程在推进过程中面临着多维度的严峻挑战。(1)在技术层面,模型构建精度是制约其发展的关键因素。由于水利工程往往涉及复杂的地形地貌以及多变的水流条件,这使得建模工作难度陡增,难以精确还原实际场景。同时,模型参数的准确获取也存在较大困难,参数的不准确会直接影响模型的可靠性和预测精度。(2)数据层面同样问题重重。水利工程涉及多源异构数据,这些数据在格式、标准等方面存在差异,导致融合与管理难度极大。而且,数据质量参差不齐,部分数据可能存在缺失、错误等问题,影响分析结果的准

确性。此外,数据安全和隐私保护也面临严峻威胁,一旦数据泄露,将带来不可估量的损失。(3)系统集成方面,数字孪生系统与现有水利信息系统兼容性不足,各子系统之间协同性差,难以实现信息的无缝流通和高效利用。同时,专业人才短缺以及建设成本高昂,也成为制约数字孪生水利工程推广应用的重要瓶颈。

3.2 应对策略

为有效应对数字孪生水利工程面临的挑战,需采取一系列针对性策略。(1)在技术研发领域,应积极推动多学科交叉融合,汇聚水利工程、计算机科学、数学等多领域专业力量,研发高精度建模算法与先进的数据处理技术,以此提升模型的准确性与可靠性,精准模拟水利工程复杂运行状态。(2)数据管理方面,建立统一的数据标准和管理平台至关重要。通过制定规范的数据格式和接口标准,实现多源异构数据的高效融合与共享,打破数据壁垒。同时,强化数据加密技术和访问控制机制,从技术和管理层面保障数据安全,防止数据泄露与滥用。(3)系统集成上,大力推进数字孪生系统与现有水利信息系统的深度集成,制定明确的系统接口规范,确保各子系统间能够实现无缝对接与协同工作,提升整体运行效率。此外,加大专业人才培养力度,通过高校开设相关专业课程、开展职业培训等方式,培养既精通水利工程业务又熟悉数字孪生技术的复合型人才,并探索多元化投资模式,降低建设成本,推动数字孪生水利工程广泛应用。

3.3 与现有水利技术的协同发展

数字孪生水利工程与现有水利技术的协同发展,是推动水利行业智能化升级的关键路径。(1)数字孪生水利工程与水利物联网技术深度结合,借助物联网设备广泛部署于水利工程各关键部位,实现对水位、流量、水质、设备运行状态等多维度数据的全面感知与实时采集。这些海量数据为数字孪生模型提供了丰富且精准的数据支撑,确保模型能够真实反映水利工程的实时运行状况。(2)与地理信息系统(GIS)融合,GIS凭借其强大的空间分析功能,可将水利工程的空间位置、地形地貌等信息与数字孪生模型有机结合,显著提升模型的空间表达和分析能力,助力精准定位问题区域、优化工程布局。(3)与水利工程自动化控制系统集成,构建数字孪生模型与物理实体的闭环控制体系。基于数字孪生模型的模拟分析和预测结果,实时调整自动化控制策略,实现水利工程的高效、精准运行,提升自动化管理水平。通过技术协同,实现优势互补,推动水利工程技术体系迈向新高度。

4 数字孪生水利工程发展趋势

4.1 技术融合深化

展望未来,数字孪生水利工程将与人工智能、区块链、量子计算等前沿技术开启深度融合的新征程。(1)人工智能技术凭借其强大的学习与优化能力,能够对数字孪生水利工程中的仿真分析模型进行深度优化。通过对海量历史数据和实时监测数据的深度挖掘与分析,不断调整模型参数,提升模型对水利工程运行状态的模拟精度,进而显著提高预测和决策的智能化水平,为水利工程的科学管理提供更智能的方案。(2)区块链技术以其去中心化、不可篡改等特性,为数字孪生水利工程的数据安全保驾护航。在数据共享过程中,区块链可确保数据的真实性和完整性,防止数据被恶意篡改,增强各参与方之间的信任,保障数据共享的安全性。(3)量子计算技术则以其超强的计算能力,为大规模数据处理和复杂模型计算提供有力支撑,大幅缩短计算时间,提升计算效率,推动数字孪生水利工程向更高层次发展,实现更精准的模拟和更智能的决策^[3]。

4.2 应用场景拓展

随着技术的不断进步与发展,数字孪生水利工程的应用场景将迎来更为广阔的拓展空间。(1)在流域管理层面,其应用将从以往聚焦单一工程设施管理,逐步向流域综合管理迈进。通过构建全流域的数字孪生模型,整合流域内各类水利工程、水资源分布、水环境状况以及水生态信息,实现全流域水资源、水环境、水生态的一体化管理。这有助于统筹协调流域内上下游、左右岸的用水需求,优化水资源配置,提升流域水安全保障能力。(2)在城市水务领域,数字孪生技术将深度融入城市供水、排水、防洪等多个关键环节。借助数字孪生模型,实现对城市水务系统的实时监测、精准分析和智能调度,打造智慧水务系统,提高城市水务管理的精细化水平。(3)数字孪生水利工程还将积极与乡村振兴战略相结合,助力农村水利设施智能化改造,实现农田灌溉精准管理,为农业增产增收提供有力支撑。

4.3 标准化与规范化发展

随着数字孪生水利工程在水利行业的广泛应用,标准化与规范化建设已然成为推动其可持续发展的关键趋势。(1)在标准制定方面,行业将积极行动,逐步构建起涵盖数据标准、建模规范以及系统接口标准在内的统一标准体系。明确数据格式、编码规则,规范建模流程与方法,统一系统接口标准,以此确保不同数字孪生系统之间能够实现无缝对接与高效协同,提升系统的兼容性和互操作性,打破信息孤岛,促进数据流通与共享。

(2)建立科学完善的数字孪生水利工程的质量评估和认证体系至关重要。通过制定严格的质量评估指标和认证流程,对系统建设和应用的全过程进行严格把控,保障系统在功能、性能、安全性等方面达到高质量标准。

(3)标准化与规范化发展将为数字孪生水利工程产业营造健康、有序的发展环境,推动技术创新与产业升级,提升行业整体竞争力。

结束语

综上所述,数字孪生水利工程作为水利行业智能化转型的关键力量,在概念内涵、关键技术、应用挑战与策略、发展趋势等方面均展现出巨大潜力。未来,随着技术融合的不断深化、应用场景的持续拓展以及标准化与规范化建设的推进,数字孪生水利工程将实现更精准的模拟、更智能的决策与更高效的管理。这不仅有助于提升水利工程的安全性、可靠性,还将推动水利行业整体向数字化、智能化方向迈进,为经济社会可持续发展提供坚实的水利支撑。

参考文献

- [1]李锴,张晶.数字孪生技术在水利工程中的应用[J].电子技术,2022,51(08):186-187.
- [2]陈继明.智慧水利发展现状及关键技术研究进展[J].河南水利与南水北调,2023,52(2):101-102.
- [3]刘斌,蒋涛,吉庆伟,等.数字孪生技术与智慧水利系统的融合及应用[J].江苏水利,2022(S2):41-44.