

数字孪生技术的应用及进展

王爱民¹ 吴阳阳²

黄河勘测规划设计研究院有限公司测绘信息工程院 河南 郑州 450000

摘要：随着科技发展，数字孪生技术备受关注，在水利行业应用前景广阔。本文概述了数字孪生技术及其关键技术，涵盖建模与仿真、物联网、大数据与人工智能、云计算等方面。重点阐述其在水利工程建设、水资源管理、防洪减灾等多领域的应用情况，并对未来在水利行业发展趋势，如与人工智能深度融合、多源数据融合与知识图谱应用、云平台与边缘计算协同发展、全流域一体化数字孪生建设等进行探讨，旨在为推动水利行业数字化发展提供参考。

关键词：数字孪生；技术应用；进展

引言：当今，各行业正加速数字化转型，水利行业亦不例外。数字孪生技术凭借能构建物理实体虚拟模型、实现双向映射与深度融合等优势，为水利行业带来新机遇。它可助力解决传统水利管理面临的诸多难题，提升管理效率与决策精准性。从水利工程建设到水资源调配、防洪减灾等工作，数字孪生技术都有着重要应用价值。本文将详细探讨其相关应用及未来发展趋势，以期助力水利行业更好地迈向智能化、现代化。

1 数字孪生技术概述

数字孪生技术是一种利用数字化手段对物理实体或系统进行全面、精确建模和仿真的技术，旨在创建物理世界的虚拟数字副本，并实现二者之间的实时双向交互与深度融合。其核心在于通过传感器采集物理实体的各类数据，如几何形状、物理特性、运行状态等，借助先进的建模方法和算法构建虚拟模型。这个虚拟模型不仅在外观和结构上与物理实体高度相似，更能实时反映其真实状态和行为，预测潜在故障和性能变化。数字孪生技术具有实时性、高保真度、双向映射以及全生命周期覆盖等特点，广泛应用于制造业、智慧城市、医疗健康、交通运输等多个领域，为优化设计、提升生产效率、改善管理决策以及创新服务模式等提供了有力支撑，正逐渐成为推动各行业数字化转型和智能化升级的关键技术力量^[1]。

2 数字孪生的关键技术

2.1 建模与仿真技术

建模与仿真技术是数字孪生的核心基础。通过运用计算机辅助设计、多物理场建模等方法，精准构建物理实体的虚拟模型，精确还原其几何、物理特性及行为规律。仿真则利用数值算法模拟实体在不同工况下的运行状态，提前验证设计方案、预测性能表现，为优化决策提供依据，有效缩短产品研发周期，降低成本，提升产

品质量与系统可靠性，广泛应用于航空航天、汽车制造等复杂工程领域。

2.2 物联网技术

物联网技术是数字孪生实现数据采集与传输的关键。它将各类传感器部署于物理实体，实时采集温度、压力、位置等数据，并通过网络将这些数据传输至数字孪生模型。借助低功耗广域网、蓝牙等通信技术，确保数据稳定、高效传输，实现物理世界与虚拟世界的紧密连接，为数字孪生模型提供持续、准确的数据源，支撑模型实时更新与精准映射，在智能工厂、智能城市等场景中发挥关键作用，保障系统的实时监测与精准控制。

2.3 大数据与人工智能技术

大数据与人工智能技术为数字孪生赋予智能分析与决策能力。大数据技术可处理海量、多源、异构数据，挖掘数据中的潜在模式与规律，提取有价值信息用于模型优化。人工智能技术中的机器学习算法能对历史数据进行学习训练，实现故障诊断、性能预测等功能；深度学习算法则在图像识别、语音识别等方面助力数字孪生系统更智能地感知与理解物理世界，增强系统的自适应能力与决策科学性，推动数字孪生在复杂场景下的高效应用。

2.4 云计算技术

云计算技术为数字孪生提供强大的计算资源与灵活的部署方式。通过云平台的弹性计算能力，数字孪生系统能够快速处理复杂模型的运算任务，满足大规模数据存储与高并发访问需求。云计算支持按需分配资源，降低数字孪生应用的前期建设成本与技术门槛，方便用户随时随地访问与管理数字孪生模型。同时，云平台的高可用性与数据备份机制保障了数字孪生系统的稳定运行，促进其在不同行业的广泛推广与应用，加速数字化转型进程^[2]。

3 数字孪生技术在水利方面的应用

3.1 水利工程建设

3.1.1 设计阶段优化

在水利工程设计阶段,数字孪生技术大显身手。运用建模与仿真手段构建虚拟模型,能模拟不同设计方案下水利工程的状况。例如设计水库时,可展示不同坝高、坝型对应的水流情况、库容变化及结构稳定性。通过数字孪生模型,设计师能直观对比各方案优劣势,考量对周边生态影响等因素。像分析哪种方案对下游生态干扰最小,进而精准优化设计,避免施工阶段因设计缺陷带来的变更,让设计更贴合实际需求,保障水利工程从源头就具备科学性与合理性,为后续建设筑牢良好基础。

3.1.2 施工过程管控

施工过程中,数字孪生技术助力有效管控。依靠物联网传感器,实时采集施工现场设备运行参数、施工进度、材料质量等数据反馈至虚拟模型。管理人员借助模型实时监控,若发现如灌浆施工进度慢于计划,或某批次钢筋质量未达标等问题,可迅速调配资源、调整工序,督促整改。它能及时发现隐患,保障施工有序推进,确保工程按时按质完工,提升整体施工效率与质量。

3.1.3 竣工验收评估

竣工验收时,数字孪生模型至关重要。它整合施工全程数据,含隐蔽工程资料等。通过对比实际工程与设计的要求,利用模型全面评估。比如查看大坝的防渗性能、水闸的操作灵活性是否达标。从结构安全到功能完备,都能精准判断。若发现不符之处,可及时整改完善,确保水利工程质量合格,符合交付标准,为后续安全运营提供有力保障,让验收工作更科学、高效。

3.2 水资源管理

3.2.1 水资源动态监测

水资源动态监测是水资源管理的关键环节,数字孪生技术为此提供了有力支撑。通过在河流、湖泊、水库等关键节点广泛布设传感器,同时结合卫星遥感等先进手段,能实时获取水资源的水量、水质、水位等多维度数据。这些数据会源源不断传输至数字孪生平台,进而在虚拟模型中精准呈现水资源的时空分布情况。例如,可实时掌握某流域内不同季节各支流的水量变化趋势,以及湖泊水质的动态波动状况。一旦数据出现异常,能迅速预警,便于相关部门及时采取应对措施,为后续水资源的科学调配、保护以及合理利用筑牢数据基础,切实保障水资源的可持续管理。

3.2.2 水资源精准调配

水资源精准调配借助数字孪生技术可实现高效且科学的决策。先是运用大数据分析和人工智能预测技术,精准预估区域内农业、工业、生活等各方面的水资源需求量以及可利用量。在此基础上,利用数字孪生模型模拟不同调配方案下水资源在各用水单元的分配效果,综合考量水资源利用效率、生态需水等诸多因素。比如模拟将水库水源优先补给农业灌溉或保障城市供水等不同策略的影响,对比后选出最优方案,使有限的水资源能在满足各方需求的同时,最大程度提升综合利用效益,维持区域水资源的供需平衡,助力经济社会稳定发展。

3.3 防洪减灾

3.3.1 洪水预警预报

数字孪生技术助力洪水预警预报更精准高效。整合气象、水文等多源数据,如实时降雨量、河流水位流量等,输入数字孪生模型,它可实时模拟洪水演进路径与态势。运用机器学习等算法分析数据,预测洪水的发生时间、峰值及影响范围。比如,能提前数小时精准预告某河流段洪峰将至,相关部门借此及时发布预警,组织群众转移、调配防洪物资,合理安排水库泄洪等应对措施,为防洪减灾争取主动,有效减少洪水造成的生命财产损失。

3.3.2 灾后评估与恢复重建

在灾后阶段,数字孪生技术大有用途。结合实地受灾情况,数字孪生模型可快速评估水利设施损毁程度、洪水淹没范围和受灾严重性。通过模拟不同恢复重建方案,对比分析成本、效果等差异,如比较不同堤坝修复方案对防洪能力的提升情况。进而为制定科学重建计划提供依据,助力受灾地区高效修复水利工程,恢复生态与生产生活秩序,尽快重回正轨。

3.4 水环境监测与治理

3.4.1 水环境质量实时监测

数字孪生技术为水环境质量实时监测带来革新。在各类水体中布放水质传感器,像酸碱度、溶解氧、污染物浓度等指标能被实时采集,随即传输至数字孪生平台。借助该平台构建的虚拟模型,水环境质量的时空变化直观呈现出来,一旦某区域水质出现异常波动,如河流某段溶解氧骤降,可迅速察觉并预警。这不仅能及时掌握水环境状况,更为后续精准治理、保障水生态健康提供了关键且可靠的数据支撑。

3.4.2 污染源追溯与管控

在水环境治理中,数字孪生技术利于污染源追溯与管控。通过收集分析水环境质量数据以及各污染源排放

数据,数字孪生模型发挥作用,运用大数据分析等手段,精准追溯污染源位置、排放路径与强度。例如可明确某湖泊污染是源于上游工厂违规排污还是周边生活污水直排。基于此,制定针对性管控举措,加强对污染源的监管与整治,从源头切断污染,有效改善水环境质量,推动水环境持续向好发展。

3.4.3 水生态修复模拟与决策

数字孪生技术在水生态修复方面意义重大。利用其构建的模型可模拟不同水生态修复措施,比如种植水生植物、构建人工湿地等对水生态系统产生的影响,分析各措施实施后对水质改善、生物多样性提升等方面的预期效果。对比多种方案后,能清晰知晓哪种修复方式更契合实际需求,从而为水生态修复工程的科学决策提供有力依据,助力水生态系统逐步恢复平衡、实现良性发展^[3]。

4 数字孪生技术在水利行业的未来发展趋势

4.1 与人工智能的深度融合

在水利行业,数字孪生技术与人工智能的深度融合趋势愈发凸显。人工智能凭借其强大的数据分析、模式识别及预测能力,能助力数字孪生实现更多智能化应用。例如,利用深度学习算法分析水利工程设施的历史运行数据,精准识别潜在故障特征,实现故障的提前预警与智能诊断,降低运维风险。在防洪减灾方面,通过机器学习对海量气象、水文数据进行分析,更准确地预测洪水发生概率与强度,辅助制定科学的防洪策略。同时,在水资源管理中,也能基于人工智能预测用水需求,优化调配方案。二者融合,将促使数字孪生模型从简单的状态呈现向智能决策助手转变,全方位提升水利管理的智能化水平。

4.2 多源数据融合与知识图谱应用

多源数据融合与知识图谱应用会成为水利行业数字孪生发展的关键一环。水利领域的数据来源广泛,涵盖地理空间数据、实时监测数据、社会经济数据等。通过融合这些多源异构数据,构建水利知识图谱,能够梳理出数据间复杂的关联关系,比如将流域的地形地貌、水资源分布与周边人口用水需求、产业发展情况等联系起来,形成完整的知识网络。基于此知识图谱,不仅可以实现智能查询,快速获取所需信息,还能进行深度推理分析,挖掘隐藏在数据背后的规律和价值,为水资源调配、水利工程规划等各类决策提供更全面、精准且有深度的依据,推动水利业务更加科学高效地开展。

4.3 云平台与边缘计算协同发展

云平台与边缘计算协同发展在水利行业数字孪生应用中有着广阔前景。云平台拥有强大的计算资源和海量存储能力,能够承载复杂的数字孪生模型,方便水利部门进行大规模数据的存储、管理以及复杂运算。而边缘计算则侧重于在靠近数据源的边缘端,对采集到的实时数据进行预处理和初步分析,例如在水利工程现场的传感器端,先对水流、水位等数据进行筛选和简单分析,减少向云平台传输的数据量,降低传输延迟,提高整个系统的实时响应能力。

4.4 全流域一体化数字孪生建设

全流域一体化数字孪生建设是水利行业数字孪生技术未来的重要发展方向。以往数字孪生多应用于单个水利工程或局部区域,未来将着眼于整个流域的综合管理。构建涵盖全流域水资源、水生态、防洪减灾等多方面的一体化数字孪生平台,整合流域内所有相关数据,打破信息孤岛,实现全流域的统一规划、协同调度与科学决策。例如,在面对洪水时,可统筹流域内各水库、水闸等防洪工程的联合调度;在水资源管理上,综合考虑上下游、左右岸的用水需求进行合理调配。

结束语

数字孪生技术作为数字化时代的关键力量,正以前所未有的速度改变着我们的世界。从制造业到智慧城市,从医疗健康到交通运输,其应用已渗透到各个关键领域,为优化决策、提升效率和创新服务模式提供了坚实支撑。尽管仍面临数据安全、技术标准等挑战,但随着与新兴技术的深度融合以及在微观和宏观领域的持续拓展,数字孪生技术必将在未来展现出更为广阔的前景,助力全球各行业实现智能化升级,开创更加高效、智能、可持续的发展新局面,引领人类迈向数字智能的新纪元^[4]。

参考文献

- [1] 何冰 谢天祥. 数字孪生技术的应用及进展[J]. 电力信息与通信技术,2021,19(7):83-89.
- [2] 贺兴 艾芊等.数字孪生技术的应用及进展[J].电网技术,2020(6):11-13
- [3] 齐波 张鹏等.数字孪生技术的应用及进展[J].高电压技术,2021(5):22-24
- [4] 王林 晏锋 任重等.数字孪生技术的应用及进展[J].电工技术,2021(21):167-168