 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i1.4484

Research on the application of digital twin technology in intelligent water conservancy projects

Xiaocong Li

China Tower Co., Ltd. Xinxiang City Branch, Xinxiang, Henan, 450000, China

Abstract

With the rapid development of digital twin technology, its application in intelligent water conservancy projects has attracted increasing attention. In this paper, the current situation, long-term goal and the combination of intelligent hydraulic engineering and digital twin technology are reviewed. In particular, the application of digital twin technology in monitoring and warning system of water conservancy project, optimal allocation and management of water resources, intelligent water and urban water system management, intelligent water conservancy project operation and maintenance management is discussed. By means of real-time data collection and analysis, hydrological modeling and prediction, risk assessment and emergency plan formulation, digital twin technology can effectively enhance the intelligence of water conservancy projects, improve water resources allocation, enhance the efficiency of urban water system management, and provide scientific basis for the maintenance of facilities. This study lays a theoretical foundation for the application of digital twin technology in the field of intelligent hydraulic engineering and provides a practical reference.

Keywords

digital twin technology; Intelligent water conservancy project; Applied research; Early warning system

数字孪生技术在智慧水利工程中的应用研究

李小葱

中国铁塔股份有限公司新乡市分公司，中国 · 河南 新乡 450000

摘　要

随着数字孪生技术的迅猛发展，其在智能水利工程项目中的应用研究日益受到关注。本文综述了智能水利工程的当前状况、长远目标及其与数字孪生技术的结合点。特别探讨了数字孪生技术在水利工程监控预警体系、水资源优化配置与管理、智能水务及城市水系统治理、智能水利工程运维管理等方面的具体运用。借助于实时数据的收集与解析、水文建模与预判、风险评价与应急方案制定等方法，数字孪生技术可有效增强水利工程的智能化程度，改善水资源调配，提升城市水系统管理效能，并为设施的维护提供科学依据。本研究为数字孪生技术在智能水利工程领域的应用奠定了理论基石并提供了实践参考。

关键词

数字孪生技术；智慧水利工程；应用研究；预警系统

1 引言

水资源是人类生存与社会进步之基石，伴随全球气候变迁及人口规模扩张，其管理正遭遇史无前例的考验。智能水利工程项目作为应对上述难题的关键策略，其重心在于借助当代信息技术增强水利工程的智能化程度。数字孪生技术作为一项崭新的信息化手段，通过创建物理对象的虚拟对应体，达成对实际物体的即时监测、解析与优化。

【作者简介】李小葱（1980–），女，中国河南巩义人，本科，工程师，从事通信行业研究。

2 数字孪生技术在智慧水利工程中的潜在应用价值

数字孪生技术在智能水利工程中显现出较大的应用潜力。借助构建水利工程及其周边环境的数字化映射，该技术为管理者提供了详尽且直观的信息展示与决策辅助，增强了决策的科学性和效能。数字孪生技术可仿真不同调度策略下的水库运行状况，评估这些策略对下游河流流量、生态平衡及社会经济的潜在影响，可实现水资源的合理分配和高效利用[1]。此外，这一技术能协助制定防洪应急计划，提升防洪减灾的能力，并通过实时监控大坝等水利设施的核心参数，保障水利工程的安全稳定运行。数字孪生技术还可以促进水资源的跨区域协同治理，推动水利行业向智能化、环保化、高效化的方向发展。总之，数字孪生技术在智能水利工程中

扮演着非常重要的角色，其应用将为水利行业的可持续发展带来新的动力。

3 智慧水利工程的概述

3.1 水资源管理的现状

目前，全球范围内的水资源管理正遭遇多重挑战，如水资源匮乏、水质污染、气候变化对水循环的扰动及人口膨胀所施加的压力。传统水资源管理模式通常基于人工观测与经验决策，存在实时响应不足及准确性欠佳的问题，难以适应日益复杂的水环境变化。加之水资源分配与使用效率低下，加剧了资源的无谓损耗。在部分区域因缺乏高效监控与治理机制，洪涝与旱灾等自然灾难频现，对社会经济发展及民众生活质量造成了深远影响。鉴于此，亟待开发一种新型管理模式，以提升水资源管理的智能化与精细化程度。

3.2 智慧水利工程的目标

智慧水利工程能够融合先进的信息技术、物联网技术、大数据分析及人工智能等手段，实现对水资源的全方位感知、智能化分析与精确调控。该工程的核心目标涵盖如下方面：提升水资源利用效率，减少资源浪费，保障水资源的可持续利用。实现水资源的实时监测与动态管理，增强应对极端气候事件的能力 [2]。优化水资源分配，协调各区域、各行业及各类用户的用水需求。保护水环境生态系统，减轻水体污染，维持水生态系统的健康与稳定。

3.3 数字孪生技术与智慧水利工程需求的契合点

数字孪生技术可以构建物理实体的虚拟映射，借助实时数据交换达到对物理实体的仿真、解析与优化效果。在智能水利工程项目中，该技术与工程项目的契合点体现在多个方面。首先，可覆盖水利工程的整个生命周期管理，涵盖设计、建设直至运维阶段，利用数字孪生模型实施仿真与优化。其次，通过数字孪生模型的运用，可以实现对水利工程项目的动态监测，有效识别并预判潜在故障，及早采取维护措施，进一步提升工程的安全性能与稳定运行。借助数字孪生技术能模拟多种水资源管理方案及紧急应对策略，为管理层提供科学决策支持，促进水资源的合理分配与高效调度 [3]。

4 数字孪生技术在智慧水利工程中的应用

4.1 水利工程监测与预警系统

4.1.1 实时数据采集与分析

数字孪生技术在水利工程领域的应用为实时监控与管理带来了革命性的变革。通过在物理环境中布设各类传感器，数字孪生系统可持续采集水位、流量及水质参数等核心数据。这些传感器所获取的数据经由高速网络传输至云端，并借助云计算的强健算力，配合大数据分析技术，实现对庞杂信息的深度解析与智能化处理。运用前沿的算法与模型，数字孪生平台可识别数据中的异常模式与潜在趋势，预判可能发生的状况，进一步发挥预警作用 [4]。例如，通过对历史与实时数据的综合分析，该系统可预测洪水发生的概率，及时采取预防措施，以减轻灾害带来的影响，同时数字孪生技术可以优化水资源的配置与管理，提升水利系统整体运作的效能与稳定性。

4.1.2 水文模拟与预测

数字孪生技术作为一种新颖的仿真手段，通过构建虚拟的水文环境以模拟实际世界中的水文循环过程。借助数字孪生模型，研究者可整合历史水文资料与当前监控数据，建立一个高精度的水文模拟系统。该系统具备实时反映江河、湖泊、水库等水体动态演变的能力，进一步预判未来特定时期的水文变迁趋势。通过此类仿真研究者得以预先辨识出潜在的洪涝及干旱威胁，为水利设施的运营管理提供科学支撑。例如，在洪涝预警领域，数字孪生模型可通过综合考量降水量、河道水位、土壤含水量等多项指标，预估洪涝事件的发生概率及其可能波及的区域。

4.1.3 风险评估与应急预案

数字孪生技术在水利工程项目中的运用为风险的评估与管理带来了革新性的工具。通过建立水利工程的数字孪生模型，可实现对结构安全性、环境影响及运行效能等多方面数据的实时监测与深入分析。利用前沿的数据分析与仿真技术，数字孪生系统可预见如洪水、渗水、结构老化等潜在风险，并对其进行精确的量化评价。依据此类评估结论，水利设施的管理人员可编制更加精准且具科学性的应急方案。这些方案不仅涵盖了传统意义上的应急措施，还能依据实时数据动态调整应对策略，保证在遭遇极端气候或突发事件等紧急状况时能及时高效地作出反应，最大限度地减轻人员伤害和经济损失。

4.2 水资源优化调度与管理

4.2.1 水库、河流的数字孪生模型

借助水库与河流的数字孪生模型构建可以实现水资源管理的全方位模拟与预测，该技术依托先进传感器、数据采集及分析工具，构建出能实时映射现实世界水流、水质、水位等核心参数的虚拟水体环境。此类模型可以深化对复杂水文现象的理解，并评估各类气象条件及人为活动对水资源的潜在影响。非常关键的是数字孪生模型可仿真多种水资源调配策略，例如，水库泄流调控、河流污染防控措施等，以预测其对生态环境及下游用水需求在不同时间尺度上的影响。通过此类仿真分析，管理者得以直观对比各方案的优势与劣势，进一步选定最为合理且可持续的水资源管理路径。

4.2.2 水资源分配与调度优化

借助数字孪生技术构建起一个虚拟的水资源管理系统，实现对现实世界水资源状态的精准模拟与实时监测。通过运用物联网传感器所采集的数据，该技术能对包括河流、水库及地下水在内的各种水资源进行动态解析，并预估其未来的演变趋势。由此管理者可以根据气象预测、季节交替以及用水需求等多重因素，制定更为科学且合理的水资源调配计划。

4.2.3 水质监测与保护

数字孪生技术借助构建虚拟水体模型，可实现与现实环境中水质数据的即时同步及分析。该技术运用传感器网络来采集水体的关键参数，如温度、pH 值、溶解氧浓度以及浑浊度等，并将这些数据上传至云平台以供进一步处理与解析。借助此类实时监控手段，可及时捕捉到任何异常波动，揭示可能存在的污染源头。此外，通过融合地理信息系统（GIS）与遥感技术的应用，可精确锁定污染位置并对其传播轨迹及影响区域做出详尽分析。此举不仅有利于污染事件的即时应对，同时也为相关治理策略的制定提供了坚实的科学支撑。

4.3 智慧水务与城市水系统管理

4.3.1 城市排水系统的数字孪生

数字孪生技术作为一种革新的方法论，通过构建与实际城市排水系统相匹配的虚拟模型为城市规划者及工程师提供了更为详尽的系统运行洞察与预判能力。借助该技术可在多种降水条件下仿真雨水流动与排水流程，进一步识别出潜在的运行障碍与问题区域。此类仿真手段可为城市规划者在排水管网的设计上做出优化决策，例如，调整管径大小、改善管网分布或增加蓄水装置，以增强系统对极端气候的适应能力。同时数字孪生模型亦能实现对城市排水系统运行状况的实时监测，快速定位并处理故障，提升系统的稳健性和运作效能。

4.3.2 智能供水系统的优化

数字孪生技术在城市供水系统中的应用标志着水资源管理领域的一次革命性突破。通过构建供水系统的虚拟模型，实现了实时监测与深入分析的功能。该系统可即时采集各类关键数据，如水压、流量及水质等，精准地掌握供水网络的运行状况。凭借先进的数据分析与机器学习算法，供水调度策略得到了较大优化，保证了水资源的有效配置。

4.3.3 城市防洪排涝的模拟与规划

数字孪生技术在城市供水系统中的应用推动了水资源管理的革命性变革。通过构建供水系统的虚拟模型，实时监测与分析得以实现。该系统可即时采集包括水压、流量、水质等在内的关键参数，精准掌握供水网络的运行状况。运用先进的数据分析及机器学习算法，供水调度策略得以优化，保障了水资源的有效配置。

4.4 智慧水利工程的维护与管理

4.4.1 设施健康监测与寿命预测

数字孪生技术作为一种创新的解决策略，通过构建水利工程设施的虚拟模型，实现了对实际设施的实时监控与深入分析。该技术依托物联网传感器采集的数据，融合高级数据分析及机器学习算法，可精确评估设施的运行状态。借助持续性的监测，数字孪生系统具备预测设施使用寿命、辨识潜在故障节点并预先发出警报的能力。此举有利于迅速开展维修与保养作业，还能有效防范意外故障的发生，保障水利工程的安全与稳定。通过优化维护方案，数字孪生技术还可在降低成本的同时延长设施的服役时间，提升水利系统的经济效能与环境友好性。

4.4.2 维护决策支持系统

借助数字孪生技术，水利工程维护决策支持系统得以创建与实际水利设施相匹配的虚拟模型。此系统经由实时监测与数据分析，可以实现对水利工程结构健康状态的精准评价。依托于上述数据系统能提出具体的维护建议，例如，明确需更换或修复的组件，及确定最优的维护时机。同时系统还能依据过往数据和维护档案，推算各类维护作业的成本，以支持预算规划。非常关键的是系统具备模拟多种维护计划的能力，并预估这些计划对设施效能与使用寿命的长远影响，进一步辅助管理者选定最经济且可持续的维护方针。

4.4.3 资产管理与生命周期评估

数字孪生技术在水利工程项目管理中占据核心地位，其通过构建虚拟水利工程模型实现了对物理资产的全方位生命周期管理。自设计初期起该技术便能进行方案的仿真与优化，以保证工程设计的科学性和实施的可行性。在施工期间借助数字孪生技术可实现对工程进度及质量的动态监控，迅速识别并解决潜在问题，提升施工效率与工程质量。进入运营阶段后该技术还能持续跟踪水利工程的实际运行状况，运用数据驱动的方法预测维护需求，有效降低非计划停机率，延长设备的服役周期。

5 结语

本文全面分析了数字孪生技术在智慧水利工程中的应用，指出其在提高水资源管理效能、优化调度方案、强化监测预警机制及改善城市水务管理等方面的重要作用。通过建立水利工程的数字孪生模型，可以实现对复杂水系统的实时监控与精确预测，为决策者提供坚实的科学依据，有效解决各类水问题。随着数字孪生技术的不断进步与完善，其在智慧水利工程领域的应用将更为广泛且深入，为实现水资源的可持续利用和水环境的全面保护提供强大的技术支持。

参考文献

[1] 韩月朦. 数字孪生技术在智慧水利工程中的应用研究 [J]. 河南水利与南水北调, 2024, 53 (11): 88-90.

[2] 苟文萱. 数字孪生技术在智慧水利中的应用探讨 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2024, (10): 23-25.

[3] 蒋国栋,邓大建,李莉,等. 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] 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: 5.