

基于数字孪生的水资源保护规划研究

王 梁¹ 赵鹏程²

1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司 河南 郑州 450003

2. 中国国际工程咨询有限公司 北京 100048

摘 要：随着全球水资源问题的日益严峻，科学合理的水资源保护规划至关重要。数字孪生技术作为新兴技术，为水资源保护规划提供了创新的解决方案。基于此，本文深入探讨了数字孪生技术在水资源保护规划中的应用，分析了其在水资源保护规划中的优势，详细介绍了基于数字孪生的水资源保护规划框架及关键技术，旨在推动数字孪生技术在水资源领域的广泛应用，提升水资源保护规划的科学性与精准性。

关键词：数字孪生；水资源；保护规划

引言：水资源是人类社会赖以生存和发展的基础性自然资源，但当前全球面临着水资源短缺、水污染严重、水生态系统退化等诸多问题。传统的水资源保护规划方法在应对复杂多变的水资源系统时，存在信息获取不全面、模型模拟精度不足、决策缺乏实时性等局限。数字孪生技术作为一种融合了物联网、大数据、云计算、人工智能等多种前沿技术的创新手段，能够构建与现实水资源系统高度相似的虚拟模型，高度实现对水资源系统的实时监测、精准模拟和智能决策，为水资源保护规划带来了新的机遇和变革。深入研究基于数字孪生的水资源保护规划，对于提高水资源利用效率、加强水环境保护、维护水生态平衡具有重要的现实意义。

1 数字孪生在水资源保护规划中的优势

1.1 全面实时的信息获取

传统水资源监测手段往往存在监测点分布不均、数据采集频率低等问题，难以全面实时地掌握水资源系统的状态。数字孪生技术通过密集部署的传感器网络，能够高度实现对水资源系统全方位、多层次、高频率的数据采集，涵盖水量、水质、水生态等各个方面，为水资源保护规划提供丰富、准确的实时信息。

1.2 精准的模拟预测

数字孪生模型基于先进的水文、水质模型和大量历史数据进行构建和校准，能够更加真实地反映水资源系统的内在运行机制。利用对不同情景下水资源系统的模拟预测，如气候变化、人类活动影响下的水资源变化趋势，为水资源保护规划提供科学准确的依据，提前制定应对策略。

1.3 可视化决策支持

数字孪生技术将复杂的水资源系统以直观的三维可视化形式呈现出来，用户可以清晰地看到水资源的分

布、流动、水质变化等情况^[1]。更重要的是，利用对不同决策方案的模拟结果进行可视化展示，决策者能够更加直观地比较各种方案的优劣，从而做出更加科学合理的决策。

1.4 动态优化调整

在水资源保护规划实施过程中，实际情况可能会发生变化。数字孪生模型能够根据实时监测数据及时调整模型参数，对规划方案进行动态优化，最终确保水资源保护规划始终适应实际需求，提高规划的有效性和适应性。

2 基于数字孪生的水资源保护规划框架

2.1 数据采集与传输层

数据采集与传输层是数字孪生水资源保护规划框架的“感官系统”，其核心在于构建覆盖“空天地一体化”的多源异构感知网络。利用部署高精度传感器阵列（如雷达式水位计、ADCP流速仪、多参数水质分析仪）、卫星遥感终端（Landsat水文监测模块、Sentinel-2水质反演算法）及无人机巡检系统（搭载热红外成像和光谱传感器），实现厘米级水位监测、毫克级污染物检测及实时水生态扫描。在数据传输环节，采用边缘计算节点进行前端数据筛选（如基于LSTM的异常值过滤），通过5G专网与NB-IoT低功耗网络融合传输，确保高时效数据（如洪水过程）与低频监测数据（如地下水采样）的分流传输。数据汇聚节点部署区块链智能合约，实现多源数据的时间戳对齐与完整性校验，为后续分析提供可靠原始数据。

2.2 数据处理与存储层

数据处理与存储层对采集到的数据进行清洗、去噪、整合等预处理，去除数据中的异常值和噪声，确保数据的准确性和完整性。在此基础上，利用大数据存储技术（如分布式文件系统、数据库等）对处理后的数据

进行存储,为后续的数据分析和模型构建提供数据支持。同时,该层还负责对数据进行管理和维护,进一步保障数据的安全性和可靠性。

2.3 模型构建与仿真层

基于水资源系统的物理规律和数学模型,利用GIS技术构建水资源系统的三维地理模型,结合水文模型(如SWAT模型、MIKE流域模型等)、水质模型(如QUAL2K模型、EFDC模型等)模拟水资源的运动、转化和污染扩散过程^[2]。在模型构建过程中,可利用历史数据对模型进行参数校准和验证,确保模型的准确性和可靠性。通过对不同工况下水资源系统的仿真模拟,预测水资源的变化趋势,进而为水资源保护规划提供科学依据。

2.4 应用层

应用层提供“监测-预警-决策-评估”全链条服务:

第一,智能监测预警系统。基于LSTM-CNN混合神经网络构建多要素耦合预警模型,实现干旱、洪涝、水污染事件的72小时提前预警,预警信息通过GIS热力图与AR实景标注进行可视化呈现;第二,规划方案推演平台。该平台提供多目标优化工具包(NSGA-II算法库),支持水资源分配、生态补水、治污方案的比选评估,通过Shapley值分解量化各方案的效益分布;第三,实时调度决策系统。构建强化学习驱动的调度引擎,在数字孪生环境中进行百万次策略试错,生成最优调度方案,采用数字水印技术实现调度指令的全流程溯源;第四,公众参与平台。开发水资源碳足迹计算器、虚拟水源地游览等交互应用,通过区块链存证技术实现污染举报信息的可信存证。

2.5 用户层

用户层形成“政府-科研机构-公众-企业”协同治理网络:首先,管理部门。配备数字孪生监管驾驶舱,集成取水许可区块链存证、排污权交易智能合约等功能,实现“一网通管”;其次,科研机构。开放模型API接口与算力资源池,支持水文模型创新大赛,通过联邦学习技术实现跨机构数据协作;此外,社会公众。通过微信小程序提供水质地图查询、节水行为积分兑换等服务,建立“河长制”数字助手,支持全民护水活动管理;最后,企业用户。提供工业用水数字画像服务,基于数字孪生模型优化企业循环水系统,通过绿证交易机制激励节水减排。

3 基于数字孪生的水资源保护规划关键技术

3.1 传感器技术

传感器作为水资源数据实时采集的核心设备,其性能优劣直接影响着数据质量。高精度传感器可精确测量

水位的微小变化、水流速度的细微差异以及水质成分的精准含量。例如压力式水位传感器,利用水压与水位的对应关系,利用高灵敏度的压力感应元件,能将水位变化精确转化为电信号输出,测量精度可达毫米级,为防洪、灌溉、供水等水利决策提供精准水位数据^[3]。电磁流量计则依据电磁感应原理,对导电流体(即水流)通过磁场时产生的感应电动势进行测量,从而准确获取流量数据,且不受流体温度、压力、密度等因素影响,测量精度高且稳定性强。多参数水质传感器更是能同时检测多种水质指标,如酸碱度(pH)、溶解氧、化学需氧量等,通过不同的感应模块,将各类水质信息转化为电信号,经数据处理后输出准确的水质数据。未来,传感器技术将朝着小型化、智能化、低功耗方向大步迈进。小型化使得传感器能更便捷地部署于复杂的水资源监测环境,如狭小的管道、偏远的河道角落等,扩大监测范围。而智能化方面,传感器将内置智能算法,能够自动识别数据异常、进行数据校准,甚至根据周边环境变化自适应调整测量参数。另一方面,低功耗设计则可大幅延长传感器的续航时间,减少维护频次,降低监测成本,助力实现更广泛、更高效的水资源监测覆盖。

3.2 物联网技术

物联网技术成功搭建起了传感器与数据传输网络间的桥梁。在水资源领域,无线传感器网络的构建是关键应用。众多分布于不同地理位置的传感器节点,采用无线通信技术(如蓝牙、Wi-Fi、ZigBee等)相互连接,并与数据汇聚节点相连,最终接入数据处理中心。该连接方式轻松实现了数据的高效传输与共享,即便传感器节点处于偏远山区或无人值守区域,也能将采集的数据实时送达处理中心。

并且,值得肯定的是,物联网技术赋予了对传感器设备远程管理和控制的能力。管理人员可通过网络远程开启或关闭传感器、调整传感器的测量周期、更新传感器的软件程序等。如,在暴雨来临前,可远程提高水位传感器的测量频率,以便更及时准确地掌握水位变化^[4]。这样一来,极大提高了传感器的运行效率,大幅度减少了人工现场操作的成本与风险,也便于对传感器设备进行集中化、智能化的维护管理。

3.3 大数据与云计算技术

第一,大数据技术对于海量水资源数据的处理能力至关重要。水资源系统产生的数据量庞大且繁杂,涵盖不同时间、空间尺度下的水位、流量、水质等多源数据。大数据技术利用分布式存储和并行计算等手段,能够高效存储这些数据,并运用数据挖掘、机器学习算法

等对数据进行深度分析。通过对长时间序列的水位和流量数据挖掘,可准确分析出河流的季节性变化规律以及洪水、干旱等极端事件的发生频率和强度;对水质数据的聚类分析,能发现水质污染的潜在来源和传播路径。

第二,云计算技术则为大数据处理和数字孪生模型运行提供强大支撑。云计算平台拥有海量的计算资源和存储资源,可根据用户需求灵活分配。在数字孪生模型模拟复杂的水资源系统时,如模拟大型流域的水流运动和水质变化过程,需要进行大量的数值计算,云计算平台能够快速响应,提供所需的计算能力,大幅缩短模型运算时间。在此基础上,用户借助云计算平台,通过网络浏览器或专用客户端,随时随地访问数字孪生系统,上传数据、运行模型、获取分析结果,实现高效便捷的数据处理与模型运算。

3.4 人工智能技术

人工智能技术在数字孪生的水资源保护规划中扮演着核心角色。具体表现如下:一是机器学习算法基于大量历史数据进行学习训练,从而建立起预测模型。以水质变化预测为例,神经网络算法通过构建包含输入层、隐藏层和输出层的网络结构,将历史水质数据以及相关影响因素(如气温、降水、周边污染源排放等)作为输入,经过大量数据训练,调整网络中的权重和阈值,使模型能够准确预测未来水质变化趋势。支持向量机算法则通过寻找一个最优分类超平面,对水资源需求量等数据进行分类和回归分析,预测不同情景下的水资源需求。

二是深度学习技术进一步提升对复杂水资源系统的建模与分析能力。其利用深度神经网络,能够自动从大量数据中提取特征,无需人工手动设计特征提取方法^[5]。例如,在对流域内复杂的水动力系统建模时,深度学习模型可自动学习水流在不同地形、地貌下的运动模式,提高模型的精度和效率。在优化决策方面,人工智能技术通过智能算法(如遗传算法、粒子群优化算法等)在众多规划方案和调度策略中搜索最优解,综合考虑水资源利用效率、生态环境保护、经济成本等多目标因素,为水资源保护规划提供科学合理的决策支持。

3.5 地理信息系统(GIS)技术

GIS技术专注于对水资源系统地理空间信息的处理。

在数字孪生模型构建中,首先利用GIS技术采集水资源系统的地理空间数据,如地形地貌、水系分布、土地利用类型等,利用数字化手段将这些信息存储于数据库中。随后,基于这些数据构建三维地理模型,能够直观、立体地展示水资源的分布情况,包括河流的走向、湖泊的位置与范围、流域的边界等。

而且,GIS技术与水文模型、水质模型紧密结合。在水文模拟中,GIS提供的地形地貌数据作为水文模型的基础输入,用于计算水流路径、汇流时间等参数,实现对流域内降水-径流过程的精确模拟。在水质模拟方面,GIS可直观展示污染物在地理空间上的扩散路径和影响范围,结合水质模型计算结果,为污染防控和治理提供空间决策支持。

结语:数字孪生技术为水资源保护规划提供了创新的理念和方法,具有全面实时的信息获取、精准的模拟预测、可视化决策支持和动态优化调整等优势。通过构建基于数字孪生的水资源保护规划框架,运用传感器技术、物联网技术、大数据与云计算技术、人工智能技术、地理信息系统技术等关键技术,能够实现对水资源系统的精细化管理和科学决策。未来,应进一步加强数字孪生技术在水资源领域的研究与应用,推动技术创新和实践探索,不断提升水资源保护规划的水平 and 成效,实现水资源的可持续利用和水生态环境的有效保护。

参考文献

- [1]杨振宇,张彦波.数字孪生技术在水利工程规划与设计中的应用[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(1):041-044.
- [2]钟小阳,王留杰,陈亮雄,杨静学.数字孪生东江对东江水资源管理的影响探析[J].广东水利水电,2024(10):111-115+121.
- [3]徐丽娟.基于智慧水利的数字孪生对流域水资源管理的影响探析[J].黑龙江水利科技,2024,52(2):124-126.
- [4]罗飞龙,刘辉,侯征军,岑权军.珠三角水资源配置工程数字孪生平台架构[J].数字技术与应用,2024,42(7):161-163.
- [5]赵岚清.山东省数字孪生推动智慧水利建设相关研究[J].黑龙江水利科技,2025,53(1):147-149.