

数字孪生技术在水文水资源领域的实践探讨

孟逸琳

黄河水利委员会郑州水文水资源勘测局 河南 郑州 450053

摘要：通过探讨数字孪生技术在水文水资源领域的实践应用，定义了数字孪生技术，并分析了其在水文水资源系统中的适用性，指出其能有效应对系统的复杂性、动态性和不确定性。文章讨论了技术应用面临的挑战，列举了数字孪生技术在洪水预报、水资源管理、水质监测保护和水利工程运行维护等方面的应用场景，提出加强技术研发、优化模型算法、强化系统稳定性等应对策略。

关键词：数字孪生技术；水文水资源；实践探讨；技术优化；发展建议

1 数字孪生技术的定义

数字孪生技术是一种融合多学科、多技术的综合性技术，通过对物理实体进行数字化建模，构建与物理实体在全生命周期内实时交互、高度映射的虚拟模型。该技术以物联网、大数据、云计算、人工智能等技术为支撑，将物理实体的几何结构、材料属性、运行状态、环境因素等信息进行数字化表达，并借助传感器实时采集物理实体的运行数据，传输至虚拟模型中，实现虚拟模型对物理实体的动态仿真和精准模拟。在数字孪生系统中，物理实体与虚拟模型之间形成双向交互，虚拟模型不仅可以实时反映物理实体的当前状态，还能通过数据分析和仿真预测物理实体未来的运行趋势，为决策提供支持。例如，在工业生产中，数字孪生技术可对生产设备进行建模，实时监测设备运行参数，预测设备故障，提前安排维护，降低停机时间和维修成本。在水文水资源领域，数字孪生技术能够将流域、水体、水利工程等物理对象数字化，为水文水资源的研究、管理和决策提供全新的手段和视角。

2 数字孪生技术在水文水资源领域的适用性分析

2.1 水文水资源系统的特点与需求

水文水资源系统具有显著的复杂性、动态性和不确定性特点。复杂性体现在系统涉及众多要素，包括降水、径流、蒸发、土壤含水量等水文要素，以及地形地貌、地质条件、植被覆盖等环境要素，各要素之间相互作用、相互影响，形成复杂的非线性关系。动态性表现为水文水资源系统的状态随时间不断变化，受气候变化、人类活动等因素影响，降水、河流水量、水质等要素呈现出季节性、年际变化。不确定性则源于对水文过程认知的局限性、观测数据的误差以及未来气候变化和人类活动的不可预知性，使得水文水资源的预测和决策面临较大困难。基于这些特点，水文水资源领域存在多

方面的需求。在水文预报方面，需要更精准的预报技术，以提前掌握洪水、干旱等灾害的发生发展趋势，为防灾减灾提供及时准确的信息。水资源管理方面，要求实现水资源的优化配置，合理分配水资源，满足不同地区、不同行业的用水需求，同时保障生态用水。水质监测与保护需要实时掌握水质变化情况，及时发现污染源，采取有效的治理措施。水利工程运行与维护则期望能够实时监测工程状态，预测工程安全隐患，提高工程运行的安全性和可靠性^[1]。

2.2 数字孪生技术如何满足这些需求

数字孪生技术凭借其独特的优势，能够有效满足水文水资源领域的上述需求。在应对复杂性方面，数字孪生技术可以整合多源数据，包括遥感数据、地面监测数据、模型模拟数据等，构建包含水文水资源系统各要素的数字化模型，通过对模型的分析和仿真，深入理解系统各要素之间的相互关系，揭示复杂的水文过程。例如，通过构建流域数字孪生模型，将地形地貌、河网水系、土壤特性等信息纳入模型，模拟降水-径流过程，分析不同因素对径流的影响。对于动态性特点，数字孪生技术借助物联网传感器实时采集水文水资源数据，实现对物理系统的实时监测，并将数据传输至虚拟模型中，使虚拟模型能够实时反映物理系统的动态变化。利用大数据分析和人工智能算法，对实时数据进行处理和分析，预测系统未来的发展趋势。如在洪水预报中，实时采集降雨量、河道水位、流量等数据，输入数字孪生模型，结合历史数据和算法预测洪水的演进过程和峰值流量。针对不确定性，数字孪生技术通过构建多种情景模拟，分析不同情景下系统的响应，为决策提供多种方案。例如，在水资源规划中，设置不同的气候变化情景和用水需求情景，利用数字孪生模型模拟水资源的供需平衡情况，为制定合理的水资源规划方案提供依据。

3 数字孪生技术在水文水资源领域应用面临的挑战

3.1 数据采集与传输的局限性

在数字孪生技术应用于水文水资源领域时, 数据采集与传输面临诸多局限。一方面, 水文水资源数据采集点分布广泛, 且部分区域环境恶劣, 如偏远山区、高原地区等, 导致数据采集设备的安装、维护难度大, 数据采集成本高。同时, 一些传统的数据采集设备存在精度低、稳定性差的问题, 难以满足数字孪生技术对高精度数据的需求。另一方面, 数据传输过程中存在网络覆盖不足、传输速率低、信号不稳定等问题。在偏远地区, 移动通信网络信号弱, 甚至无信号覆盖, 无法实现数据的实时传输; 即使在网络覆盖区域, 大量数据的实时传输也对网络带宽提出了很高要求, 容易出现数据传输延迟、丢包等现象, 影响数字孪生模型的实时性和准确性^[2]。

3.2 模型构建与仿真的复杂性

水文水资源系统的复杂性决定了数字孪生模型构建与仿真的难度较大, 模型构建需要准确描述水文水资源系统的物理过程和相互关系, 涉及到众多学科知识和复杂的数学物理方程。然而, 由于对水文过程的认识还不够深入, 部分过程难以用精确的数学模型进行描述, 导致模型存在一定的不确定性。此外, 模型参数的率定和验证也面临困难, 需要大量的实测数据和复杂的计算过程, 而且不同区域的水文水资源系统具有独特性, 模型参数难以通用。在仿真方面, 随着模型规模的增大和精度的提高, 计算量呈指数级增长, 对计算资源的需求巨大, 现有的计算设备和技术难以满足大规模、高精度仿真的需求, 导致仿真效率低下, 无法实现实时仿真。

3.3 实时监控与决策支持系统的稳定性与可靠性问题

实时监控与决策支持系统是数字孪生技术在水文水资源领域应用的重要组成部分, 但目前其稳定性和可靠性存在不足。系统在运行过程中, 可能会受到硬件故障、软件漏洞、网络攻击等因素的影响, 导致系统出现故障或数据丢失, 影响实时监控和决策支持功能的正常运行。例如, 服务器硬件故障可能导致系统停机, 无法实时接收和处理数据; 软件漏洞可能被黑客攻击, 窃取或篡改数据, 影响决策的准确性。此外, 决策支持系统依赖于模型和算法的准确性, 但由于水文水资源系统的复杂性和不确定性, 模型和算法存在一定的误差, 可能导致决策失误。而且系统在面对突发事件和复杂情况时, 其响应速度和决策能力也有待提高。

4 数字孪生技术在水文水资源领域的应用场景

4.1 洪水预报与预警系统

数字孪生技术在洪水预报与预警系统中具有重要应

用价值, 通过构建流域洪水数字孪生模型, 整合气象、地形、水文等多源数据, 实时模拟洪水的形成、演进过程。利用物联网传感器实时采集降雨量、河道水位、流量等数据, 输入数字孪生模型, 模型根据预设的算法和参数, 预测洪水的发展趋势, 包括洪峰流量、到达时间、淹没范围等信息。当预测到洪水可能达到警戒水位或造成灾害时, 系统及时发出预警信息, 通知相关部门和人员采取应对措施。例如, 在某流域洪水预报中, 数字孪生模型提前72小时准确预测洪峰流量和到达时间, 为下游地区的人员疏散和防洪准备争取宝贵时间, 有效降低洪水灾害损失。

4.2 水资源优化配置与管理

在水资源优化配置与管理方面, 数字孪生技术可以构建区域水资源数字孪生模型, 对水资源的供需情况进行全面模拟和分析。模型考虑水资源的来源(如降水、地表水、地下水)、用水需求(农业、工业、生活、生态用水)以及水资源的调配工程(如水库、调水工程)等因素, 通过模拟不同的水资源配置方案, 评估各方案的可行性和效益。例如, 在某地区水资源配置中, 利用数字孪生模型模拟了不同水库调度方案下的水资源供需平衡情况, 为制定科学合理的水资源配置方案提供依据, 实现水资源的高效利用和可持续发展。同时, 数字孪生模型还可以实时监测水资源的动态变化, 及时调整水资源配置策略, 应对水资源短缺或丰沛等不同情况^[3]。

4.3 水质监测与保护

数字孪生技术能够助力水质监测与保护工作。构建水质数字孪生模型, 将水质监测数据、污染源信息、水生态环境数据等纳入模型, 实时模拟水质的变化过程。通过传感器实时采集水体的化学指标(如酸碱度、溶解氧、重金属含量等)和生物指标(如藻类数量、微生物群落等), 传输至数字孪生模型中, 模型分析水质变化趋势, 预测水质污染的发生和扩散情况。当发现水质异常时, 系统可以快速定位污染源, 评估污染影响范围和程度, 并提出相应的治理措施和建议。例如, 在某河流的水质监测中, 数字孪生模型及时发现了某工厂排污导致的水质恶化问题, 通过模拟分析确定了污染源位置和污染扩散路径, 为环保部门采取治理措施提供有力支持, 有效保护河流水质。

4.4 水利工程运行与维护

对于水利工程运行与维护, 数字孪生技术可以构建水利工程数字孪生模型, 对水利工程的结构安全、设备运行状态进行实时监测和评估。在模型中集成水利工程的设计参数、施工资料、运行数据等信息, 利用传感器

实时采集工程结构的变形、应力、渗流等数据，以及设备的运行参数（如水位、流量、压力、温度等），传输至数字孪生模型中。模型通过分析这些数据，判断工程结构的安全性和设备的运行状况，预测潜在的安全隐患和设备故障。例如，在某水库大坝运行中，数字孪生模型通过对大坝变形数据的分析，提前发现大坝局部区域的异常变形，及时发出预警，为工程维护和加固提供重要依据，保障水利工程的安全运行。同时，数字孪生技术还可以辅助水利工程的调度运行，通过模拟不同的调度方案，评估其对工程安全和水资源利用的影响，实现水利工程的优化调度。

5 数字孪生技术在水文水资源领域应用应对策略

5.1 加强数据采集与传输技术的研发与应用

为解决数据采集与传输的局限性问题，应加大对相关技术的研发投入。在数据采集方面，研发高精度、高稳定性、低功耗的数据采集设备，提高设备在恶劣环境下的适应能力，降低设备的安装和维护成本。例如，研发适用于偏远山区的太阳能供电、无线传输的数据采集设备，实现自动采集和远程传输数据。同时，推广应用新型传感器技术，如智能传感器、纳米传感器等，提高数据采集的精度和效率。在数据传输方面，加强通信网络建设，扩大网络覆盖范围，提高网络传输速率和稳定性。利用5G、物联网、卫星通信等技术，构建多网融合的数据传输体系，确保数据能够实时、准确地传输。例如，在偏远地区采用卫星通信作为主要传输方式，在网络覆盖区域采用5G网络传输，实现数据的无缝传输。

5.2 优化模型构建与仿真算法，提高模拟精度

针对模型构建与仿真的复杂性问题，需要不断优化模型构建方法和仿真算法。在模型构建方面，加强对水文水资源过程的研究，深入理解各要素之间的相互关系，改进数学物理模型，提高模型的准确性和适用性。利用机器学习、深度学习等人工智能技术，对模型参数进行自动率定和优化，减少人工干预，提高参数率定的效率和精度。建立模型共享和验证平台，促进不同区域、不同类型模型的交流和验证，提高模型的通用性。在仿真算法方面，研发高效的计算算法和并行计算技

术，降低计算量，提高仿真效率^[4]。例如，采用分布式计算、云计算等技术，实现大规模模型的快速仿真，另外，还应加强模型的不确定性分析，量化模型误差，为决策提供更可靠的依据。

5.3 强化实时监控与决策支持系统的稳定性与可靠性

为提高实时监控与决策支持系统的稳定性和可靠性，应从硬件、软件和算法等多方面入手。在硬件方面，采用冗余设计，配置备用服务器、网络设备等，确保在硬件故障时系统能够正常运行。定期对硬件设备进行维护和升级，提高设备的性能和稳定性。在软件方面，加强软件的开发和测试，采用先进的软件开发技术和框架，提高软件的质量和安全性。及时修复软件漏洞，更新软件版本，增强软件的兼容性和稳定性。在算法方面，优化决策支持算法，提高算法的准确性和可靠性。结合实际案例对算法进行验证和改进，提高算法在复杂情况下的决策能力。建立系统的备份和恢复机制，定期对数据进行备份，确保在系统故障或数据丢失时能够快速恢复数据，保障系统的正常运行。

结束语

综上所述，数字孪生技术在水文水资源领域具有广阔的应用前景，能够显著提升水资源管理的效率和准确性。未来，随着技术的不断发展和完善，数字孪生技术将在水文水资源领域发挥更加重要的作用，为水资源的高效利用和可持续发展提供有力支撑。我们应持续关注技术进展，加强技术研发与应用，推动水文水资源管理的现代化进程。

参考文献

- [1]徐健,赵保成,魏思奇,等.数字孪生流域可视化技术研究与实践[J].水利水电快报,2023,44(08):127-130.
- [2]陈成勇,潘旭,周成宽.基于数字孪生水文建设的探讨[J].黑龙江水利科技,2023,51(11):157-160.
- [3]于莉,隋高阳,于锐.水文水资源管理在防洪减灾中的应用研究[J].中国建材,2024,(02):134-136.
- [4]张晓芳.水利工程中的水文水资源管理应用分析[J].农业开发与装备,2023,(07):124-126.