

数字孪生技术在水利工程设计中的应用研究

赵雅琪

新疆花城勘测设计研究有限责任公司 新疆 伊宁 835000

摘要: 数字孪生技术作为新兴技术手段,在水利工程设计领域展现出巨大应用潜力。本文深入探讨数字孪生技术在水利工程设计中的应用,涵盖数据采集、虚拟模型构建、仿真分析等关键环节。通过实际分析,验证其能提升设计精准度、优化工程方案、增强风险预警能力。研究表明,数字孪生技术可实现水利工程全生命周期管理,为水利工程设计创新与智能化发展提供新思路,推动水利行业迈向新阶段。

关键词: 数字孪生技术;水利工程;设计;应用

1 数字孪生技术

数字孪生技术是一种通过构建物理对象的数字映射,实现虚拟与现实同步的先进技术。该技术集成了物联网、云计算、人工智能、大数据等多种前沿技术,能够对物理世界进行全方位的仿真和管理。数字孪生技术具有诸多显著特点。它具备互操作性,物理对象和数字空间可双向映射、动态交互和实时连接;有可扩展性,能集成、添加和替换数字模型,扩展多尺度、多物理、多层次的模型内容;具有实时性,可借助计算机对数据进行识别和处理,表征随时间变化的物理实体;保真度高,数字虚体模型与物理实体在几何结构、状态、相态和时态上都高度相似;同时具备闭环性,能基于对物理实体的内在机理描述、规律分析和趋势洞察,形成优化指令或策略。在实际应用中,数字孪生技术已展现出巨大价值,在制造业,企业可创建产品或设备的数字孪生体,在虚拟环境中进行设计、测试和优化,降低试错成本,提高生产效率和产品质量。在智慧城市建设中,城市管理者能通过创建城市数字孪生体,更好地规划和管理城市资源,提高运行效率和居民生活质量。在医疗健康领域,可创建患者的数字孪生体,助力医生制定个性化治疗方案,还能优化医疗设备设计^[1]。随着技术的不断进步,数字孪生技术正与人工智能、大数据分析等进一步结合,逐步拓展至更多领域,有望实现更高层次的自动化和智能化管理,为各行业的发展带来新的机遇和变革。

2 水利工程设计的基本原则

水利工程设计是保障水资源合理利用与水利设施安全运行的关键环节,需遵循一系列基本原则。安全第一原则是水利工程设计的基础,设计必须充分考虑工程所在地的地质、水文、气象等自然条件,确保工程结构在各种极端情况下都能保持稳定与安全,抵御洪水、地震等自然灾害的侵袭,保障人民生命财产安全。经济合理

原则要求在满足功能需求的前提下,优化设计方案,降低工程成本。这包括合理选择建筑材料、施工工艺,提高资源利用效率,减少不必要的浪费,使工程在全生命周期内实现经济效益最大化。环境友好原则强调水利工程建设应与生态环境相协调,设计时需充分考虑工程对周边生态的影响,采取有效措施保护水生生物栖息地、减少水土流失、维护生态平衡,实现水利工程建设与环境保护的双赢。可持续发展原则要求水利工程具备长期稳定运行的能力,满足未来社会经济发展的需求。设计应预留一定的扩展空间,适应未来技术进步和用水需求的变化,确保工程能够持续发挥效益,为子孙后代留下宝贵的水资源。

3 数字孪生在水利工程设计中的应用场景

3.1 流域水文模拟与洪水预警

流域水文模拟与洪水预警是数字孪生技术在水利工程设计中的关键应用场景之一。在流域水文模拟方面,数字孪生技术整合了历史水文数据、实时气象数据以及地理信息系统(GIS)数据等多源异构数据。这些数据经过清洗和标准化处理后,输入到基于水动力模型和人工智能算法的洪水预测模型中。例如,利用机器学习算法对历史洪水事件进行深度学习,模型可以挖掘出洪水发生的内在规律,从而准确预测未来可能出现的洪水情况。以海河流域“23·7”特大洪水为例,通过构建覆盖“云-雨-水-工”的立体监测网络,融合气象卫星、水文站点、无人机等多源数据,数字孪生系统提前72小时锁定了洪峰流量,为人员转移赢得了关键窗口,大大降低了洪水灾害造成的损失。在洪水预警方面,数字孪生系统与预警模型紧密集成^[2]。当预测结果超过预设的阈值时,系统会自动触发预警信号,通过短信、广播、应急大屏等多渠道,将预警信息直达防汛一线和受影响群众。在2024年湖南团洲垸堤防决口事件中,基于实时水

位数据的智能预警系统提前触发应急响应,避免了更大损失。系统还可以模拟不同预警措施的可能影响,从而优化预警响应方案,提高预警的准确性和有效性。

3.2 水利枢纽工程设计与优化

水利枢纽工程是水利工程中的重要组成部分,其设计与优化对于工程的整体性能和效益至关重要。数字孪生技术为水利枢纽工程的设计与优化提供了强大的支持。在设计阶段,数字孪生技术可以创建水利枢纽工程的虚拟模型,实现工程的全生命周期管理。设计师可以在虚拟环境中对工程进行全方位的模拟和优化,提前发现设计中的潜在问题。研究表明,应用数字孪生技术后,设计方案的成功率提高了20%,设计迭代时间减少了30%。在优化阶段,数字孪生技术可以实时监测水利枢纽工程的运行状态,通过数据分析和模型预测,为工程的优化提供决策支持。优化后的调度方案可以提高15%的发电效率,同时降低对环境的影响。数字孪生技术还可以模拟不同工况下工程的运行情况,为工程的维护和管理提供科学依据,延长工程的使用寿命。

3.3 生态水利工程协同设计

生态水利工程强调在满足人类对水资源需求的同时,保护和修复生态环境。数字孪生技术为生态水利工程的协同设计提供了有效的平台。在生态水利工程设计中,需要考虑水利工程与生态环境的相互作用。数字孪生技术可以将水利工程与周边的生态系统进行数字化建模,实现两者的协同设计和优化。系统可以模拟不同的生态修复方案,评估其对河湖生态系统的影响,帮助决策者制定合理的生态修复方案。通过实施生态修复,河湖生态系统可以得到显著改善,生物多样性增加30%,河湖景观也更加美丽。数字孪生技术还可以促进不同利益相关者之间的协同合作,在生态水利工程设计中,涉及到政府部门、科研机构、企业和社会公众等多个利益相关者。数字孪生平台可以提供共享的信息平台,实现各方之间的信息共享和协同决策。各方可以在虚拟环境中对设计方案进行讨论和评估,提出各自的意见和建议,从而形成更加科学、合理的生态水利工程设计方案。

3.4 水利工程全生命周期管理

水利工程的全生命周期管理包括设计、施工、运营和维护等各个阶段。数字孪生技术为水利工程的全生命周期管理提供了全面的解决方案。在设计阶段,数字孪生技术可以创建水利工程的虚拟模型,实现工程的三维可视化设计和协同设计。设计师可以在虚拟环境中对工程进行模拟和分析,提前发现设计中的问题,并进行优化。数字孪生模型可以为施工阶段提供详细的技术支

持和指导,确保施工过程的顺利进行。在施工阶段,数字孪生技术可以实时监测施工进度和质量,通过与施工计划的对比分析,及时发现施工过程中的偏差,并采取相应的措施进行调整。在运营阶段,数字孪生技术可以实时监测水利工程的运行状态,通过数据分析和模型预测,为工程的运行管理提供决策支持。例如,数字孪生系统可以实时监测大坝的结构健康状况,通过传感器收集的数据,实时分析大坝的应力、位移等关键参数,及时发现大坝的裂缝或变形,确保大坝安全。系统可以模拟大坝建设及运行对环境的影响,为工程的生态保护提供科学依据。在维护阶段,数字孪生技术可以通过对历史数据的分析,预测设备的故障和维修需求,实现预防性维护^[3]。

4 数字孪生技术在水利工程设计中实施路径

4.1 数据采集与集成

数据采集与集成是数字孪生技术在水利工程设计中实施的首要环节,是构建准确数字孪生模型的基础。水利工程涉及的数据类型繁多,涵盖水文、气象、地质、工程结构等多方面。利用先进传感器技术实现实时数据采集。在流域内,部署雨量站、水位站、流量站等,实时获取降雨量、水位、流量等水文数据;借助气象雷达、卫星遥感等手段,获取气象数据,包括气温、风速、风向、气压等;通过地质勘探和监测设备,获取地质结构、地下水位等地质数据。同时对于水利工程本身,安装各类传感器监测大坝的应力、位移、渗流,水轮机的振动、温度等运行数据。采集到的数据存在噪声、缺失值等问题,需进行数据清洗。运用滤波算法去除噪声,采用插值、拟合等方法填补缺失值。对数据进行标准化处理,统一数据格式和单位,确保不同来源数据的一致性和可比性。构建统一的数据管理平台,将清洗后的各类数据进行集成。采用数据库技术存储数据,利用数据仓库实现数据的集中管理和高效访问。通过数据接口和中间件技术,实现不同系统、不同格式数据之间的互联互通,为后续虚拟模型构建提供全面、准确的数据支持。

4.2 虚拟模型构建与验证

虚拟模型构建与验证是数字孪生技术的核心环节,旨在构建与实际水利工程高度相似的虚拟模型,并通过验证确保模型的准确性和可靠性。基于采集的数据,运用三维建模技术构建水利工程的三维几何模型,包括大坝、水闸、渠道等建筑物的外观和结构。结合物理模型和数学模型,构建水利工程的水动力学模型、结构力学模型等,模拟水流运动、结构受力等物理过程。利用人

工智能算法,如机器学习、深度学习等,对历史数据进行分析和学习,构建智能预测模型,实现对水利工程运行状态的预测。采用历史数据验证和现场试验验证相结合的方式,利用历史水文、气象等数据,对虚拟模型进行回溯模拟,将模拟结果与实际监测数据进行对比,评估模型的准确性。开展现场试验,如水库调度试验、大坝应力应变试验等,将试验数据与模型预测结果进行对比,进一步验证模型的可靠性。若验证结果不满足要求,对模型进行修正和优化,直至模型达到预期精度。例如,在某水库数字孪生模型验证中,通过不断调整模型参数和算法,使模型预测的水位、流量等指标与实际数据的误差控制在允许范围内。

4.3 仿真分析与决策支持

仿真分析与决策支持是数字孪生技术发挥价值的关键环节,通过对虚拟模型进行仿真分析,为水利工程设计和运行管理提供决策依据。开展洪水演进仿真,模拟不同洪水场景下,洪水在流域内的传播过程,预测洪峰到达时间、淹没范围等,为防洪决策提供支持。进行工程运行仿真,模拟水利工程在不同工况下的运行状态,如不同水位、流量下的水电站发电效率、水闸开度调节对水流的影响等,优化工程运行方案。开展生态影响仿真,模拟水利工程对周边生态环境的影响,如对鱼类洄游、水质变化的影响,为生态保护措施的制定提供依据。基于仿真分析结果,构建决策支持系统。该系统能够根据不同的决策目标和约束条件,提供多种决策方案,并对各方案进行评估和比较。例如,在防洪决策中,系统可以根据洪水预报信息,结合水库的调蓄能力,提供多种调度方案,评估各方案的防洪效果和损失情况,为决策者提供科学决策依据。决策支持系统具有实时性和动态性,能够根据实时监测数据及时调整决策方案,提高决策的科学性和有效性。

4.4 平台开发与系统集成

平台开发与系统集成是数字孪生技术在水利工程设计中实施的重要保障,旨在构建一个统一、高效的数字孪生平台,实现各系统的集成和协同工作。采用分层架

构设计数字孪生平台,包括数据层、模型层、应用层和展示层。数据层负责数据的存储和管理;模型层集成各类虚拟模型和仿真分析算法;应用层提供洪水预警、工程调度、生态保护等具体应用功能;展示层通过可视化界面,将分析结果和决策信息直观地展示给用户^[4]。运用云计算、大数据、物联网等技术,实现数字孪生平台与现有水利信息系统的集成。通过数据接口和API,实现与水文监测系统、气象预报系统、水库调度系统等互联互通,实现数据的共享和交换。同时采用微服务架构,将数字孪生平台的各个功能模块进行解耦,实现系统的灵活部署和扩展。开发完成后,对数字孪生平台进行实际应用和测试。根据用户反馈和实际运行情况,对平台进行优化和改进,提高平台的性能和稳定性。例如,增加新的数据源和模型算法,丰富平台的功能;优化平台的用户界面,提高用户体验。通过不断的应用和优化,使数字孪生平台能够更好地服务于水利工程设计和运行管理。

结束语

数字孪生技术在水利工程设计中的应用研究,为水利工程建设与管理带来新的机遇与挑战。其凭借精准模拟、实时监测与智能决策等优势,显著提升水利工程的设计质量与运行效率。然而技术发展仍面临数据安全、模型精度等难题。未来,需进一步深化技术研究,加强跨学科合作,推动数字孪生技术在水利工程设计中的广泛应用,助力水利事业高质量发展。

参考文献

- [1]包振东,刘建龙,胡锦等.数字孪生技术在泵站工程中的应用[J].江苏水利,2023(07):28-32.
- [2]李涛,燕永存,朱霄霄等.数字孪生技术在卧虎山至锦绣川水库调水工程中的应用[J].数字技术与应用,2023,41(06):47-49.
- [3]宋敏,周伊文.数字孪生技术赋能水利工程建设管理路径[J].水利经济,2023,41(06):73-78+113.
- [4]崔雷.数字孪生技术在现代化水利工程中的应用[J].科技与创新,2023,(22):143-145+148.