

数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用

李世玺

河北省水利水电勘测设计研究院集团有限公司 天津 300221

摘要：本文聚焦于数字孪生技术在水利工程运行管理的应用，详细解析了该技术的基本原理与显著优势，并深入探讨了其在水利领域的实际应用场景。通过剖析典型应用案例，本文展现了数字孪生技术如何赋能水利工程，实现管理的高效化与精准化，有力推动了智慧水利的建设进程，为水利行业的现代化管理提供了宝贵的实践经验和理论支撑。

关键词：数字孪生技术；水利工程；运行管理；智慧水利；案例分析

引言：随着信息技术的日新月异，数字孪生技术正逐步渗透至水利工程领域，成为提升管理效能的关键工具。该技术凭借对物理对象的高精度数字建模，实现了对水利工程运行状态及趋势的实时追踪与预测，为运行管理开辟了新路径。本文深入剖析数字孪生技术在水利工程管理中的应用，旨在挖掘其潜力，为智慧水利的构建提供实践指导与理论支撑，助力水利行业迈向智能化、高效化的新阶段。

1 数字孪生技术基础

数字孪生技术，作为当今信息技术发展的前沿领域之一，正以其独特的优势在各个行业中展现出巨大的应用潜力。这一技术源于“Digital Twin”的概念，又称数字镜像或数字化映射，它通过构建物理对象的数字模型，实现了对物理实体运行状态、变化趋势的实时模拟和预测。数字孪生技术不仅为工程领域的决策提供了强有力的支持，还为智慧城市、医疗健康、航空航天等多个领域带来了革命性的变革。

1.1 数字孪生技术的核心要素

数字孪生技术的核心在于构建与物理对象高度相似的数字模型。这一模型的构建依赖于多个关键要素，包括（1）数据：数据是数字孪生的基础。它涵盖了物理对象的各种属性数据、运行状态数据、环境数据等。这些数据的采集通常依赖于传感器、物联网设备等手段。为了确保数据的准确、真实和全面，还需要进行数据清洗、预处理和融合。高质量的数据是构建精准数字模型的前提，也是实现数字孪生技术价值的关键。（2）模型：模型是数字孪生的核心。它是对物理对象的抽象和简化，通过建立物理模型、数学模型、统计模型等，对物理对象的结构、行为、性能等进行描述和模拟^[1]。这些模型不仅反映了物理对象的当前状态，还能预测其未来的变化趋势。（3）平台：平台是数字孪生的载体。它

集成了数据管理、模型构建、仿真分析、可视化展示等多种功能，为各种基于数字孪生技术的应用提供了一个统一的操作环境。用户可以通过平台方便地对数字孪生模型进行操作、分析和应用。（4）技术支撑：数字孪生技术的实现离不开一系列先进技术的支撑。这些技术包括物联网技术、大数据技术、云计算技术、建模与仿真技术、人工智能技术、虚拟现实技术等。这些技术共同构成了数字孪生技术的技术体系，为数字孪生模型的构建、运行和优化提供了强大的支持。

1.2 数字孪生技术的构建流程

数字孪生技术的构建流程通常包括以下几个步骤：（1）确定目标：首先需要明确数字孪生模型的具体应用目标。这些目标可能包括提高生产效率、优化产品设计、预测设备故障等。明确目标有助于指导后续的数字孪生模型构建工作。（2）选定对象：根据目标选定要创建数字孪生的物理对象或系统。这些对象可以是工厂生产线、机器设备、城市基础设施等。选定对象后，需要对其进行详细的了解和分析，以便为后续的数字模型构建提供准确的信息。（3）部署传感器：在物理对象上安装传感器，用于收集其运行状态、环境参数等数据。这些传感器可以将物理对象的信息实时传输到数字模型中，为模型的运行和更新提供数据支持。（4）数据集成与处理：将来自不同来源的数据集成到统一的数据平台上，并进行清洗、预处理和融合。这一步骤的目的是确保数据的准确性和一致性，为后续的数字模型构建和分析提供可靠的数据基础。（5）构建模型：使用建模工具或编程语言，根据收集和处理后的数据构建数字孪生模型。这一步骤可能包括三维建模、仿真建模等。构建出的数字模型需要能够准确反映物理对象的结构和行为。（6）模型验证与优化：通过与实际对象进行对比和验证，评估模型的准确性和可靠性。如果模型与实际对象

的行为和性能存在差异,需要对模型进行调整和优化。这一步骤是确保数字孪生模型有效性的关键。(7) 实时更新与应用: 确保数字孪生模型能够及时获取和处理最新的数据,并反映物理对象的最新状态。同时将数字孪生模型应用于实际场景中,如优化产品设计、改进制造流程、提高系统效率等。

1.3 数字孪生技术的优势

数字孪生技术具有诸多优势,这些优势使得它在各个行业中得到了广泛的应用:(1) 实时监控与预测: 数字孪生模型能够实时反映物理对象的运行状态,并预测其未来的变化趋势。这使得决策者可以及时了解物理对象的状况,并采取相应的措施进行干预和优化。(2) 优化决策: 通过数字孪生模型,决策者可以在虚拟环境中对物理对象进行模拟和实验,从而评估不同决策方案的效果。这有助于决策者做出更加科学、合理的决策。(3) 降低成本与风险: 数字孪生技术可以在虚拟环境中对物理对象进行故障预测和维护优化,从而降低设备故障率和维护成本。同时,通过模拟实验和风险评估,还可以降低实际运行中的风险。(4) 促进创新与发展: 数字孪生技术为各个行业的创新和发展提供了新的手段和方法。通过构建数字模型进行模拟和优化,可以推动新技术、新产品的研发和应用。

2 数字孪生技术在水利工程运行管理的具体应用

数字孪生技术作为信息技术与传统水利工程的深度融合,正在逐步改变水利工程运行管理的面貌。

2.1 水资源管理与配置

水资源是水利工程的核心要素,其管理与配置直接关系到水利工程的效益和可持续发展。数字孪生技术通过构建流域或区域水资源管理系统的数字模型,实现了对水资源的全面、精准管理。(1) 数字孪生模型能够集成多源数据,包括气象数据、水文数据、地形地貌数据等,形成对流域或区域水资源的全面感知。通过对这些数据的分析和处理,模型可以预测不同时间尺度下的水资源供需状况,为水资源的优化配置提供科学依据。(2) 数字孪生模型还能够模拟不同调度方案下的水资源分配情况,评估各种方案的优劣。这有助于决策者根据实际需求和水资源状况,制定出最优的调度方案,实现水资源的高效利用。(3) 数字孪生技术还能够支持水资源管理的动态调整。随着气象条件、用水需求等因素的变化,数字孪生模型可以实时更新数据,调整调度方案,确保水资源管理的灵活性和适应性。

2.2 防洪减灾

防洪减灾是水利工程的重要任务之一。数字孪生技

术通过模拟洪水演进过程,为防洪减灾提供了有力的支持。(1) 在洪水发生前,数字孪生模型可以根据气象预报和实时水文数据,预测洪水的淹没范围、水深、流速等关键参数^[2]。这些预测结果可以为防洪减灾工作提供科学依据,帮助决策者提前制定防洪预案,采取必要的防洪措施。(2) 在洪水发生时,数字孪生模型可以实时监控洪水演进过程,评估防洪工程的效果。通过对比实际洪水情况与模型预测结果,可以及时发现防洪工程存在的问题和不足,为后续的防洪工作提供改进方向。(3) 数字孪生技术还可以支持防洪减灾的应急响应。在洪水灾害发生后,模型可以迅速评估灾害损失,为救援和重建工作提供决策支持。

2.3 水质监测与管理

水质是水利工程运行管理的重要指标之一。(1) 数字孪生技术通过在水体中布设传感器网络,实时监控水质指标,并将数据同步至数字孪生模型中进行分析,实现了对水质的全面、精准监测。(2) 传感器网络可以实时监测水体的温度、pH值、溶解氧、浊度等关键水质指标。这些数据被实时传输至数字孪生模型中,模型通过对数据的分析和处理,可以及时发现水质异常并追溯污染源。(3) 数字孪生模型还可以根据水质监测结果,预测水质变化趋势,为水质管理提供科学依据。通过对比不同时间、不同地点的水质数据,可以评估水质改善措施的效果,为后续的水质管理工作提供改进方向。(4) 数字孪生技术还可以支持水质管理的公众参与。通过构建水质信息发布平台,将水质监测结果实时发布给公众,提高公众的环保意识和参与度,共同推动水质改善工作。

2.4 水利工程安全监测与维护

(1) 数字孪生技术通过构建水利工程的三维模型,集成结构安全监测、设备运行状态监测等数据,实现了对水利工程的远程监控、故障诊断和预防性维护。(2) 数字孪生模型可以实时监控水利工程的结构安全状况,包括大坝、堤防、水闸等关键工程部位。通过对比模型预测结果与实际监测数据,可以及时发现工程结构存在的问题和隐患,为后续的维修和加固工作提供科学依据。(3) 数字孪生模型还可以监测水利工程的设备运行状态,包括水泵、发电机、闸门等关键设备。通过实时监测设备的运行参数和性能指标,可以及时发现设备故障并进行预警,避免设备故障对水利工程运行造成严重影响。(4) 数字孪生技术还可以支持水利工程的预防性维护^[3]。通过对历史数据和实时监测数据的分析,可以预测设备的寿命和维修周期,制定合理的维修计划,降低

维修成本和提高设备可靠性。

3 数字孪生技术应用的案例分析

3.1 数字孪生三峡：提升水利“四预”系统效率

长江设计集团利用自主研发的“水利专业决策（WPD）的‘数据-模型-业务’组态式孪生构建技术”，成功实现了三峡工程的数字孪生。这一创新性的技术框架，不仅简化了传统水利系统建模的复杂性，还显著提高了水利“四预”（预报、预警、预演、预案）系统的开发效率。（1）在三峡工程中，数字孪生技术通过集成多源实时数据，包括水文气象、大坝安全监测、发电机组运行状态等，构建了高度精确的虚拟三峡模型。该模型能够实时反映三峡工程的运行状态，并基于历史数据和实时监测信息，对洪水、干旱等极端天气事件进行准确预报。同时，结合先进的预警算法，数字孪生三峡能够在潜在风险发生前，及时发出预警信号，为防洪调度提供关键决策支持。（2）在防洪调度方面，数字孪生三峡通过预演不同调度方案下的洪水演进过程，评估各方案对下游地区的影响，从而帮助决策者制定出最优的调度预案。这些预案不仅能够有效减轻洪水灾害的损失，还能在保证大坝安全的前提下，最大限度地发挥三峡工程的综合效益。

3.2 数字孪生丹江口：全方位守护水库安全

数字孪生丹江口模型是长江设计集团针对丹江口工程的综合性安全管理工具，涵盖大坝、水质、库区、防洪兴利及供水安全等多方面。（1）该模型实时监测并预警工程状态，尤其在2023年汉江秋汛中发挥了关键作用。通过模拟不同降雨情景，模型准确预测了洪水关键参数，助力防汛部门科学调度，确保防洪有效。同时实时监测大坝安全，预警隐患，保障工程安全运行。（2）在汛后蓄水阶段，模型评估不同蓄水方案对下游影响，助力决策者制定既满足蓄水又确保下游安全的预案。数字孪生丹江口模型全方位守护水库安全，为丹江口工程的科学管理和安全运行提供了坚实的技术支撑。

3.3 数字孪生北江：提升流域防洪管理水平

数字孪生北江模型平台是长江设计集团针对广东省北江流域防洪工程体系构建的创新工具。该平台集成了实时监测和历史数据，全面支持北江流域防洪的“四预”功能。通过模拟不同洪水情景，数字孪生北江能够评估防洪工程在洪水中的效能，为决策者提供科学决策依据，并优化防洪调度预案的制定与实施^[4]。同时该平台实时监测各防洪工程的运行状态和安全状况，及时发现并预警潜在的安全隐患和调度风险。在提升流域防洪管理水平上，数字孪生北江还通过可视化展示和数据分析，帮助决策者直观了解洪水演进过程、趋势以及工程运行状态和效果。这些信息为决策者提供了全面的支持，使他们能够更科学、准确地制定和实施防洪调度预案，从而提升北江流域的防洪能力，确保流域内人民生命财产安全，促进流域可持续发展。

结语

数字孪生技术为水利工程运行管理带来了革命性的变革，实现了实时监控、精准预测与科学决策，展现出广阔的应用前景和巨大的实践价值。展望未来，智慧水利建设将更加倚重数字孪生技术。然而，数据安全、隐私保护、跨部门协同及标准制定等问题仍需关注。我们应积极应对挑战，探索解决方案，推动数字孪生技术在水利工程领域的深入应用与持续发展，为水利事业贡献力量。

参考文献

- [1]孙伟.数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用[J].山西水利,2023,(05):51-53+61.
- [2]霍建伟,李永胜,张军琿,等.数字孪生技术在引调水工程运行管理中的应用[J].小水电,2021,(05):15-17.
- [3]孙伟.数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用[J].山西水利,2023,(05):51-53+61.
- [4]申振,姜爽,聂麟童.数字孪生技术在水利工程运行管理中的分析与探索[J].东北水利水电,2022,40(08):62-65.