

数字孪生技术在水利工程中的应用

黄润德

新疆生产建设兵团建筑工程科学技术研究院有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘 要：数字孪生技术集成物联网、大数据、云计算与人工智能，构建与物理实体对应的虚拟模型，实现实时互动与高效协同。在水利工程中，该技术通过多层级应用框架，涵盖数据感知、传输、处理及应用，全面提升了水利工程的智能化管理水平。数字孪生技术从基建到平台构建，再至业务应用与智能监控，助力水利工程精准监测、预测与优化，高效利用水资源，确保工程安全，推动水利智慧化转型，为传统水利升级提供坚实技术保障。

关键词：数字孪生；水利工程；应用分析

引言

水利工程作为国民经济的重要基础设施，其安全与效率关乎国计民生。随着科技的飞速发展，数字孪生技术以其独特的优势，为水利工程的智能化管理开辟了新路径。该技术通过构建与物理实体精确对应的虚拟模型，实现了对水利工程运行状态的实时监测与精准预测。本文将深入探讨数字孪生技术在水利工程中的应用，分析其技术框架与具体实践，旨在为推动水利工程的智能化升级提供理论支持与实践指导。

1 数字孪生技术概述

数字孪生技术是一项前沿的数字化技术，它通过将多源信息集成，在虚拟空间中构建出与物理实体精确对应、实时互动、高效协同的虚拟模型。这一技术的核心在于物联网、大数据、云计算和人工智能等现代科技的深度融合。借助传感器等设备，数字孪生技术能够实时捕捉物理实体的各类数据，随后利用先进的算法和模型，在虚拟空间中重建这些实体的数字镜像。该数字模型不仅能够实时反映物理实体的状态变化，还能通过模拟和预测来优化其性能，提升整体效率和安全性。数字孪生技术由物理实体、数字模型和数据连接三大要素构成。物理实体是现实世界中的具体对象，如水利工程的坝体、水闸等关键设施。数字模型则是这些物理实体在虚拟空间中的精准再现，它集成了实体的所有关键特征和属性。数据连接技术，如传感器和数据采集系统，则充当了物理实体与数字模型之间的桥梁，确保了数据的实时、准确传输。数字孪生技术的引入，提高了生产效率和产品质量，还有助于节能减排、远程监控与维护，以及降低运营风险，数字孪生技术还能够实现个性化定制和灵活调整生产线，以满足不断变化的市场需求。

2 数字孪生技术在水利工程中的应用框架

2.1 数据感知层

数据感知层是数字孪生技术应用框架的根基，在水利工程复杂的运行环境中，其作用至关重要。通过密集部署各类先进传感器与设备，该层能够全方位、无死角地收集水利工程运行的多元数据。在水位监测方面，采用高精度的水位传感器，无论是江河湖泊的水位涨落，还是水库水闸的水位调控，都能精准捕捉，实时反馈水位的细微变化，为防洪抗旱、水资源调配等提供关键数据。流量监测则运用电磁流量计、超声波流量计等设备，准确测量水流流速与流量，掌握水体的动态信息，助力水利工程的科学调度；针对工程结构的安全监测，应力传感器、应变片和位移传感器发挥着不可或缺的作用。它们紧密贴合工程结构的关键部位，实时监测应力、应变和位移等参数，及时发现结构潜在的变形、损坏等隐患。如大坝监测中，通过这些传感器，能够敏锐察觉大坝坝体的微小裂缝、坝基的不均匀沉降等问题，为大坝的安全评估提供一手资料。温度传感器用于监测水利设施内部和周边环境温度，对混凝土浇筑过程中的温度控制、金属结构的热胀冷缩分析等意义重大，确保工程在适宜的温度条件下稳定运行，全方位保障数据的实时性与真实性，为后续的数据处理和应用奠定坚实基础。

2.2 数据传输层

(1) 水利工程分布广泛，从广袤平原到复杂山区，从大型水库到偏远灌溉渠道，环境多样且复杂。数据感知层采集的海量数据，涵盖水位、流量、设备运行状态等关键信息，急需准确、高效地传输至数据处理层。但复杂的地理环境、多变的气候条件，以及数据的多样性和实时性要求，都给数据传输带来极大挑战。如山区的地形阻碍信号传播，水域环境易干扰信号质量，这些都对数据传输的稳定性和可靠性构成威胁。(2) 为应对这些挑战，需综合运用多种先进网络技术。光纤通信凭借其高带宽、低损耗的显著优势，成为远距离数据传输

的主力。在大型水利枢纽与数据中心之间,铺设的光纤线路能以极快速度传输大数据量,满足实时性要求极高的监测数据传输,如洪水期对水位、流量的高频监测数据。在地形复杂的山区或水域,4G、5G以及卫星通信发挥着不可替代的作用。4G、5G网络部署便捷,能快速实现现场数据实时回传,管理人员可借此及时掌握工程运行动态,如施工现场设备的实时状态。卫星通信则突破地理限制,为偏远地区或信号薄弱区域的水利设施搭建可靠传输通道,确保数据不遗漏、不延迟,像偏远山区小型水电站的数据也能稳定传输。(3)保障数据传输准确性至关重要。为此,采用多种数据校验和纠错技术。在数据发送端,运用特定算法对原始数据编码,添加冗余信息形成校验码。接收端依据既定校验规则,将接收到的数据与校验码比对验证。发现数据错误或丢失,立即按照协议请求重传^[1]。

2.3 数据处理层

数据清洗是关键的第一步。由于传感器采集的数据可能存在噪声、异常值和缺失值等问题,通过数据清洗算法,去除无效数据,修复错误数据,补充缺失数据,提高数据的质量和可用性;对清洗后的数据进行整合,将来自不同传感器、不同时间和空间的数据进行关联和融合,构建起统一的数据视图,为后续分析提供全面的数据支持。在数据分析阶段,运用机器学习算法、深度学习模型等人工智能技术,对数据进行多维度分析。通过建立预测模型,能够根据历史数据预测水位、流量等关键参数的变化趋势,为水利工程的调度决策提供提前预警。利用聚类分析和关联规则挖掘,发现数据之间隐藏的关系和模式,如分析水利设施运行参数与环境因素之间的关联,为优化工程运行管理提供依据;基于数据分析结果,构建精确的数字孪生模型。通过对水利工程的物理结构、运行机制和环境因素的建模,实现对工程运行状态的数字化模拟和仿真,为应用层提供准确、可靠的数字模型,支撑各种应用场景的开展,为水利工程的智能化管理提供强大的数据驱动力。

3 数字孪生技术在水利工程中的具体应用

3.1 信息化基础设施建设

(1)在水利工程中融入数字孪生技术,信息化基础设施建设是关键环节。这环节的核心在于构建完善的监测感知体系,该体系通过广泛部署各类高精度传感器,实现对水位、流量、水质以及气象等多维度参数的实时监测。这些传感器如同水利工程中的“智能眼睛”,能够敏锐地捕捉到周围环境及工程本身的细微变化,收集到海量的基础数据,为后续的数字孪生模型构建和数据

分析提供丰富的信息源。(2)通信网络体系的建设同样至关重要。为了保障数据的稳定高速传输,采用有线与无线相结合的多元架构,光纤网络作为主干,确保数据在关键区域和核心节点的稳定传输;而在偏远或复杂地形区域,利用5G、卫星通信等无线技术,实现数据的无缝衔接和全面覆盖。这个体系的设计,旨在确保数据能够无延迟、无遗漏地汇聚到数据处理中心,为数字孪生技术的应用提供坚实的信息支撑。(3)数据存储与计算能力的提升也是不可或缺的一部分。运用分布式存储技术,构建安全可靠的数据存储系统,确保数据的持久保存和高效访问;借助云计算平台,提供强大的计算能力,支持对海量数据进行高效的分析和处理,为数字孪生技术在水利工程中的深入应用提供强有力的技术保障^[2]。

3.2 数字孪生平台构建

借助BIM、GIS等前沿技术构建水利工程信息模型,是打造数字孪生平台的核心。BIM技术精细还原水利工程的三维结构,包括大坝、水闸、渠道等各类水工建筑物,对建筑材料、构造细节等进行数字化建模,实现工程内部结构的可视化呈现。GIS技术整合地理空间信息,将水利工程置于地形地貌、水系分布等地理背景中,实现宏观与微观结合。通过这一平台,工程的实时运行数据、历史数据与模型深度融合,支撑数字孪生体与物理体的双向交互。管理人员可在三维可视化交互环境中,直观查看工程运行状态,进行虚拟操作,模拟不同工况下的工程响应,为科学决策提供直观、全面的数据支撑,数字孪生平台还能够通过物联网技术实时收集和传输现场传感器数据,提高模型的动态性和准确性。通过机器学习算法,平台能够预测潜在问题和风险,提前进行维护和调整,提高水利工程的可靠性和安全性;该平台还支持多学科协同设计和管理,促进跨部门、跨领域的信息共享和决策协同,为水利工程的全生命周期管理提供强大支持。

3.3 业务应用体系建设

(1)构建以分级智慧监管系统和项目智慧管理系统为核心的业务应用体系架构,实现了水利工程管理的智能化升级。分级智慧监管系统依据管理层级进行科学划分,从省级到基层,各层级部门职责明确,确保了数据的精准获取和高效协同监管。省级部门通过该系统对全省水利工程进行整体态势感知,为战略决策提供了有力支持;基层部门则专注于日常监测,实现了数据的细致收集。(2)项目智慧管理系统着眼于水利工程项目全生命周期的管理。在规划设计阶段,利用数字孪生技术模拟不同方案下的运行效果,辅助优化设计方案;在施

工建设阶段,借助物联网设备实现施工过程的可视化管理,及时发现并解决施工问题;在运营维护阶段,持续收集设备运行状态和安全指标等数据,为维护决策提供了科学依据。(3)基于实时数据和预测模型,系统可对水利工程运行进行优化调度,提高水资源利用效率,确保水利工程的安全、高效运行。这一体系的建立,全方位提升了工程管理效率,为水利工程的长期稳定运行提供了坚实保障^[3]。

3.4 智能监控与感知能力提升

在水利工程建设阶段,智能监控与感知能力提升至至关重要。引入高清摄像头、智能传感器等设备,结合图像识别、物联网等信息技术,实现施工现场全方位、全天候监控。通过图像识别技术,自动识别人员违规操作、设备异常运行等情况,及时预警。根据工程类别和监测需求,建设配套水文设施,如雨量计、水位计等,完善雨水情监测预报系统,精准掌握水情变化;部署质量监测传感器,对混凝土强度、钢筋应力等关键指标实时监测;安装工程安全监测设备,监测大坝位移、渗流等安全参数;运用设备运行状态监测技术,实时掌握机电设备运行状况,为数字孪生模型提供准确、全面的数据支持。在提升水利工程建设的智能监控与感知能力的同时,还需强化数据分析和决策支持系统。通过构建大数据平台,整合各类监测数据,运用先进的算法模型进行深入分析,以预测潜在风险并提供科学决策依据。此外,开发智能预警系统,结合历史数据和实时信息,对发生的自然灾害或工程事故进行早期预测,采取预防措施,确保工程安全和效率。

3.5 模拟预测与优化调度

(1)数字孪生技术创建的虚拟模型在模拟预测与优化调度中扮演着关键角色。这一模型能够设定多种工况,包括洪水期的高水位、枯水期的低流量、地震等极端灾害,以及设备突发故障等特殊情况,全面模拟水利工程的运行状态。在模拟过程中,模型会深入分析水流形态、结构应力应变等关键指标,对工程的安全性能进

行全面评估。(2)基于丰富的历史数据和实时运行数据,运用机器学习、深度学习等先进算法,数字孪生技术能够对水利工程的未来安全性能进行精准预测,及时发现并预判潜在风险。这一预测能力为工程的优化调度提供了科学依据,有助于提前采取措施,避免或减少潜在的安全隐患。(3)在模拟预测的基础上,数字孪生技术还能够结合各用水部门的需求,制定最优的水资源调配方案。通过动态调整运行参数,确保水利工程在安全、高效的状态下运行,实现水资源的最大化利用和合理分配。这一功能提升了水利工程的运行效率,还为水资源的可持续管理提供了有力支持。数字孪生技术还能实时监测水质情况,及时发现污染源并采取应对措施。通过与物联网设备的结合,实现数据的即时收集和分析,优化水资源的调度和管理。这保障了公众的饮水安全,还为环境保护和生态平衡提供了科学依据^[4]。

结束语

综上所述,数字孪生技术在水利工程中的应用,不仅提升了工程的智能化管理水平,还实现了水资源的高效利用与工程安全的全面保障。随着技术的不断进步与应用的深入拓展,数字孪生技术将在水利工程领域发挥更加重要的作用。未来,我们应继续深化对该技术的研究与实践,推动其与水利工程的深度融合,为构建安全、高效、智慧的水利工程体系贡献力量。

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]王晓波,范永学,韩东兴等.数字孪生技术在输变电工程中的应用分析与研究[J].浙江电力,2023,42(06):105-111.
- [4]顾思斌,陆炜,钟爱成.数字孪生技术在水利枢纽工程管理中的应用[J].江苏水利,2022(S2):28-31.