

基于多源数据融合的水电站数字孪生平台构建及可视化研究

张永胜

浙江华东测绘与工程安全技术有限公司 浙江杭州 310014

摘要: 随着能源行业数字化转型的深入,数字孪生技术为水电站的智能化运维管理提供了创新解决方案。本文针对水电站运维中存在的**数据孤岛、虚实交互不足、决策支持可视化程度低**等问题,提出了一种基于多源数据融合的水电站数字孪生平台构建方法。研究聚焦于**多源异构数据的集成技术、三维可视化建模与虚实交互机制**,在提升水电站安全管理水平、优化发电效率、强化防洪抗险能力方面具有很大的应用价值,为水电站全生命周期管理提供可靠的技术支撑。

关键词: 数字孪生;水电站;多源数据融合;智能运维

引言

水电站作为清洁能源的重要组成部分,其运营管理面临**设备复杂性高、安全风险大、调度决策依赖经验**等多重挑战^[1]。传统的水电站管理模式存在**数据碎片化、系统孤立、虚实交互不足**等问题,难以实现**全站资源的协同优化**。数字孪生技术通过各类型的仿真工具及物联网将现实世界中采集的真实信息实时映射到虚拟数字模型,从而能够在数字空间中对现实世界的产业设计、建造和运维过程进行分析和优化,帮助企业提升管理效率和决策准确性^[2-3]。

本文基于水电站数字孪生平台的整体架构,重点研究多源数据的采集、传输、融合与可视化应用。首先,系统分析水电站数字孪生平台的架构设计,包括**基础支撑层、数据互动层、数字孪生底座、平台层及应用层**;其次,探讨多源数据融合中的关键技术,如**数据清洗与治理、三维建模与动态驱动**;最后,通过应用场景验证平台的可视化效果与业务价值。研究旨在为水电站的数字化转型提供理论支持与实践参考。

一、水电站数字孪生平台构建的理论框架

(一) 数字孪生技术概述

数字孪生是物理实体的虚拟表示,通过实时数据同步和模拟分析,反映对象的全生命周期过程,其核心在于**虚实映射、实时交互与迭代优化**三大特性^[4-5]。对于水电站而言,数字孪生平台需整合**地理环境、设备状态、运行数据**等多源信息,构建从**宏观流域到微观零件**的多层次模型。这一平台不仅是漂亮的3D模型,更是融合实时数据、物理规律、智能算法的动态仿真系统,能同步

地映射真实电站的运行状态^[6]。

(二) 水电站多源数据特征与融合需求

水电站数据具有**多源性、异构性和时序性**特点。按来源可分为:(1)地理空间数据(GIS、DEM、倾斜摄影);(2)工程模型数据(BIM、三维机械模型);(3)实时监测数据(水位、流量、振动、温度传感器);(4)业务数据(运维记录、调度指令)。这些数据在格式、精度、更新频率上差异显著,传统管理方式难以实现有效集成^[7]。多源数据融合的目的是解决信息孤岛问题,形成统一的数据视图^[8]。

(三) 平台架构设计

水电站数字孪生平台采用**分层架构设计**,自下而上包括以下五层:

·**基础支撑层:**提供数字孪生建模和运行的数据来源,包括**水工建筑物、水电厂设备和智能传感器**构成的数字化感知体系和基础设施体系。这一层负责通过部署各类传感器(如**水位计、流量计、振动传感器、应力应变计、高清视频**等)完善感知网络^[9]。

·**数字孪生底座:**主要由**实体感知数据、GIS空间信息和BIM模型**组成,在此基础上对各种精度和来源的空间数据(矢量数据、地形数据、影像数据、倾斜摄影数据、激光点云数据等)和**业务数据(图像数据、监测数据等)**进行融合,构建**数据资源层级无缝转换的可视化场景**^[10]。

·**数字孪生平台层:**包括**二三维GIS平台和三维仿真引擎**,在数字孪生平台之上,根据应用需求,进行**各类场景可视化、业务应用仿真、以及全寿命周期管理**等业务的数字孪生交互和业务实现。

表1 水电站数字孪生平台五层架构功能说明

架构层次	核心功能	关键技术组件
基础支撑层	数据采集与感知	传感器网络、物联网设备、基础设施
数据互动层	数据传输与通信	混合组网通信、数据网关、传输协议
数字孪生底座	数据融合与场景构建	GIS、BIM、多源数据融合算法
平台层	仿真分析与可视化	二三维GIS平台、游戏引擎、仿真模型
应用层	业务应用与决策支持	可视化组件、业务算法、交互界面

·应用层：通过三维GIS、BIM数字建模、可视化渲染、轻量化等技术的使用，动态、高性能地加载和渲染不同层级的场景，支撑数字孪生的模拟仿真功能，满足水电厂各种业务应用需求。

二、多源数据融合的关键技术

(一) 数据采集与传输技术

多源数据采集依赖于物联网传感器网络与边缘计算网关的协同。传感器类型包括：水位计、流量计、振动传感器、应力应变计等。数据传输阶段需解决异构网络协议的统一问题，水位、流量、雨量、水质监测设备实时监测数据的采集、分析、监测和预警^[1]。

(二) 数据处理与治理

原始数据需经过清洗、降噪处理，以提升数据质量。

数据治理的关键在于建立统一的标准编码体系，解决多源异构数据的结构化问题。在建模阶段，需对地理空间数据、监测数据、业务数据等进行融合处理。平台通过业务数据，实现对事故状态的全天候、多维度实时监测，为应急决策提供可靠依据。数据治理的另一重要环节是建立数据质量评估机制，确保进入数字孪生模型的数据具有足够的可靠性和时效性。

(三) 数据建模与集成

水电站数字孪生模型包括几何模型（BIM+GIS）、物理模型（水力、机械方程）与行为模型（调度规则、故障逻辑）。模型集成通过数字孪生底座实现，其中关键步骤包括空间参考系统统一、LOD（多层次细节）优化、动态数据绑定。

表2 水电站数字孪生多源数据类型与处理方式

数据类型	来源	特点	处理技术
地理空间数据	GIS、遥感卫星	数据量大、空间参考不一	坐标转换、LOD简化
工程模型数据	BIM、CAD	结构复杂、细节层次多	轻量化处理、格式转换
实时监测数据	传感器	时序性强、频率高	流处理、异常检测
业务管理数据	运维系统、台账	结构化、多关联	关系数据库

三、水电站数字孪生可视化应用实现

(一) 综合监测与“一张图”管理

通过二三维一体化引擎，平台实现从流域级宏观视野到设备级微观细节的无级缩放。综合监测界面集成关键指标看板，如实时发电量、机组状态、水位流量、气象信息等，形成水电站运营的“数据仪表盘”。

一张图管理界面通过三维可视化呈现整个流域全貌，全面展示水位信息、出库流量、大坝状态、水雨情基本信息、工程空间位置分布等水电站宏观情况。放大地图后，可进行重点水电站中近景观察，在中近景中，可全面掌控水电站空间定位、水电站工情等；画面再放大，则可精细化观察拆解某个设备、零部件的运行情况^[1]。

(二) 仿真运行与虚实交互

通过实时数据驱动虚拟模型，平台可实现水力机组、

闸门启闭、水流状态的同步仿真。例如，水轮机的运转状态可根据实际转速、导叶开度等参数在虚拟模型中动态呈现，形成物理水电厂与孪生水电厂的镜像关系。平台还可对施工过程和作业过程进行仿真还原，以三维动画的形式展示发电开机流程、发电停机流程、清污机工作流程、闸门启闭流程等。

仿真运行的高级应用是预案推演功能。数字孪生平台提供了虚拟的应急演练环境，可以对应急人员进行沉浸式培训，提升其应急处置能力和协同配合水平。在真实事故中，数字孪生作为辅助决策工具，实时提供事故现场信息、应急预案、处置方案，辅助应急指挥人员科学决策。这一功能在防洪调度、事故处理等场景中尤为重要。

(三) 设备全生命周期管理

通过关联BIM模型与设备台账、运行参数、检修记

录,平台支持对水轮发电机组、变压器等关键设备的在线状态监测与预测性维护。设备异常时,系统自动触发告警并在三维模型中高亮定位,如轴承温度异常时虚拟模型颜色由绿转红^[12]。

设备全生命周期管理的优势在于能够清晰展示设备所处位置和设备的结构,关联设备运行参数、图纸资料、检修资料、保养信息等。设备信息可进行实时展示,设备运行状态异常、超寿命服役等信息可进行告警提示并差异化(高亮度等)显示,形成水电厂设备设施的全生命周期管理,能有效应对设备故障等突发事件。

(四) 虚拟巡检与培训仿真

虚拟巡检功能依据水电厂三维建模和数字孪生技术,可实现针对水轮机发电机组、地下厂房、廊道等不同场景巡检任务的定制。路径规划可自定义,在三维场景中绘制行走路线,手动添加路线中的兴趣停留点。在虚拟巡检中,自动记录巡检路线、设备参数、监测数据等,生成巡检日志。这一功能尤其针对关键设备、报警设备、故障设备可实现快速巡检,可增大巡检范围和频率,结合人工巡检方式,提高巡检工作效率^[13]。

四、结论与展望

本文系统研究了基于多源数据融合的水电站数字孪生平台构建方法及其可视化应用。研究表明,数字孪生技术通过整合多源异构数据、构建虚拟模型、实现虚实交互,能够显著提升水电站的智能化管理水平。平台在综合监测、仿真运行、防洪“四预”、设备管理和虚拟巡检等方面的应用,验证了其在提升水电站安全性、经济效益和运营效率方面的价值。

随着技术的不断成熟,数字孪生必将成为水电站数字化转型的核心引擎,为清洁能源的高效开发和可持续利用提供强大支撑。这一技术将助力水电行业应对日益复杂的运行环境,实现更安全、更高效、更智能的运营管理。

参考文献

[1] 张雪娟. 基于水电站施工效果的评价研究[J]. 黑龙江水利科技, 2023, 51(10): 174-177.

[2] 都兴伟. 数字孪生技术在水电站建设中的探索[J]. 水电站机电技术, 2024, 47(02): 52-55.

[3] 顾巍巍, 王瑾, 陈飞, 等. 基于UE引擎的数字孪生大坝安全监测系统[J]. 水利规划与设计, 2024, (05): 75-77+120.

[4] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(01): 1-18.

[5] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生模型构建理论及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(01): 1-15.

[6] 张建伟, 李毅男, 张龔, 等. 基于数字孪生的水库大坝安全监测: 关键技术与应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2025, 46(03): 1-9.

[7] 郭良基, 刘铁柱, 刘焱鑫. 三维可视化监控平台的多源数据融合处理机制研究[J]. 产品可靠性报告, 2025, (08): 73-75.

[8] 任杰, 于明洋. 多源数据融合的精细建模在建设工程中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(01): 189-192+197.

[9] 卢建华, 刘晓琳, 张玉炳, 等. 基于数字孪生的水库大坝安全管理云服务平台研发与应用[J]. 水利水电快报, 2022, 43(01): 81-86.

[10] 张晓阳, 杭旭超, 贾玉豪, 等. 基于BIM+GIS的土石坝安全监测管理平台研究及应用[J]. 人民珠江, 2022, 43(02): 24-29.

[11] 黄海兵, 三梅英, 张翼, 等. 流域水库-水电站数字孪生数据底座建设关键技术研究[J]. 陕西水利, 2025, (01): 99-102.

[12] 邓院林, 陈敏, 王伟. 基于数字孪生的大坝施工智慧管理平台[J]. 人民长江, 2021, 52(S2): 302-304+311.

[13] 王立波, 左涛, 刘恒, 等. 基于“Cesium+GIS”的智慧水库三维可视化监测预警系统研究与实现[J]. 测绘与空间地理信息, 2024, 47(08): 135-137.