

基于UE引擎的数字孪生水库建设实践

张高军

北京五一视界数字孪生科技股份有限公司，北京

收稿日期：2025年9月8日；录用日期：2025年10月15日；发布日期：2025年10月29日

摘 要

面向数字孪生水库建设，建立UE引擎驱动的数字孪生平台，实现全要素、多层级水库场景建设以及水利专业模型算法的可视化表达，形成监测数据 - 业务数据 - 水利专业模型 - 可视化模型的高度集成应用，全面支撑水库日常管理、防洪四预、安全管理等业务，提高水库管理对象多元化三维表达方式和效率，为水库管理提供场景化决策支撑依据。

关键词

UE引擎，数字孪生，水库建设

Practice in Digital Twin Reservoir Construction Based on the UE Engine

Gaojun Zhang

Beijing 51WORLD Digital Twin Technology Co., Ltd., Beijing

Received: September 8, 2025; accepted: October 15, 2025; published: October 29, 2025

Abstract

For digital twin reservoir construction, a UE engine-driven digital twin platform was established. This platform enables comprehensive, multi-level reservoir scenario construction and the visualization of specialized water conservancy model algorithms. This platform integrates monitoring data, operational data, specialized water conservancy models, and visualization models. This platform comprehensively supports daily reservoir management, flood prevention and mitigation, and safety management. It improves the diversified three-dimensional representation and efficiency of reservoir management objects, providing scenario-based decision support for reservoir management.

Keywords

UE Engine, Digital Twin, Reservoir Construction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水库数字孪生技术是近年来新兴的一种信息技术，其核心是以物理水库为基础，通过数字化建模，构建出与实体水库系统相对应的数字镜像，实现对水库实体状态、行为和环境的实时模拟和分析[1]。这种技术融合了物联网、大数据、云计算、人工智能等多种先进技术，旨在提高水库的运行管理水平和防灾减灾能力。

对于数字孪生水库来说，如何构建能够对真实世界进行模拟的数字孪生体是难点。数字孪生体的构建需要生成高精度的三维虚拟场景，在三维场景的基础上，还需要结合水体的动力过程、水文数据，力求还原流域中水文过程及要素，最终将场景与动力过程结合，形成真实性强，可视化、动态化效果好的数字孪生体，以满足数字孪生水库的构建需求。传统三维可视化一般需要应用 3D max、Maya、Sketchup 进行建模后渲染，但是此类静态渲染方式效率低，且方案修改困难。通常具备利用数据底板构建可视化场景能力的引擎有：GIS 引擎、游戏引擎及 BIM 引擎[2]。GIS 引擎虽然具备构建超大场景的能力，但难以满足高精度场景要求，可视化水平较差；BIM 引擎仅能利用 BIM 模型构建局部场景在数字孪生中应用有限；随着技术进步，基于 GPU 的实时渲染软件进入市场，这类引擎具备构建高仿真效果场景能力，可利用高渲染引擎及物理引擎提升用户在三维地理信息上的视觉体验。借助游戏引擎集成数字高程模型、卫星遥感影像、无人机正射影像、无人机倾斜摄影、BIM 模型等，能够大大提升工程可视化表达能力和效果，并具有以下优势：① 能完整保留数据信息[3]；② 有优秀的实时渲染能力，可通过材质、光照等调整实现高水平、高精度的渲染；③ 基于蓝图的可视化编程，软件开发方便[4]；④ 便捷的二次开发，可实现数据采集、自动化控制等功能的拓展开发；⑤ 丰富的资源库、模型库，快速进行场地布置。

2. 数字孪生水库 UE 解决方案

2.1. 数字孪生水库 UE 引擎技术路线

2.1.1. 水库全要素场景的构成

根据《数字孪生水利数据底板地理空间数据规范》(SL/T 837-2025)、《水利数据库表结构及标识符编制总则》(SL/T 478)、《水利对象分类与编码总则》(SL/T 213)、《中国水库名称代码》(SL 259)等水利信息化相关技术规范，构建水库上下游、左右岸全要素数据底板，建设由地理空间数据体、水文在线监测数据、水质自动监测站、视频等物联感知数据以及信息支撑环境组成的数字化场景。

多级数据底板的构建核心在于有效融合多源异构地理空间数据，融合构建方法图下图 1 所示，包括多源异构数据的获取、数据治理以及多级底板融合构建三个方面。对于结构化模型数据，根据来源不同，如倾斜摄影模型(OSGB)数据、CAD 数据、BIM 类模型数据等，基于数据引擎，将输入系统的所有的静态数据、动态数据等多源数据通过时空结构(特别是空间结构)结构化成为一个有机体，对其他模块提供一切关于三维时空场景的服务。首先，通过对多源异构的地理空间数据进行数据治理，将其标准化为统一的

数据层和三维模型；其次，利用基于语义的大范围底板快速生成技术，生成大范围的 L1 和 L2 级底板，同时，针对重点工程，进一步采用模型轻量化技术进行处理，优化数据加载速度和视觉展示效果，实现 L3 级底板精细化管理和高效应用；最后，形成覆盖从流域到河道再至重点工程的三级底板体系。

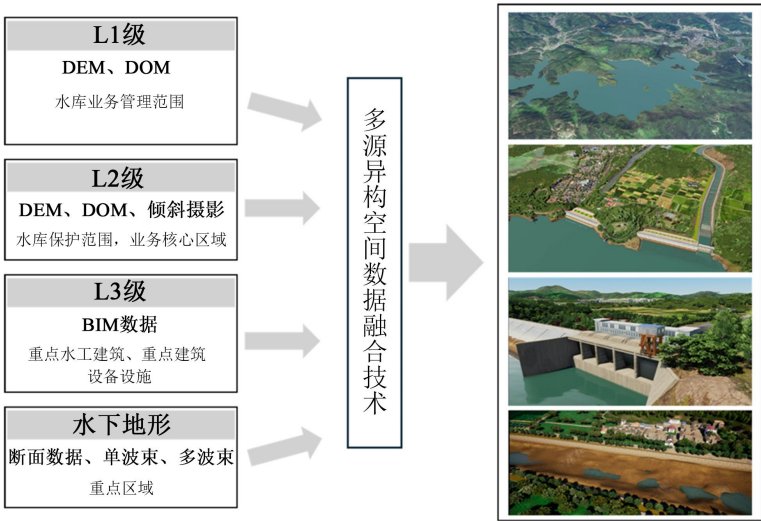


Figure 1. Reservoir space full-element digital scene composition
图 1. 水库空间全要素数字场景构成

在数字孪生水库的业务管理中会涉及多层级三维场景的切换，我们采用 LOD 机制和金字塔架构，可承载上万公里跨省地形三维场景、500 万 + 建筑模型、高清卫星影像(0.1 m/px)及动态流畅。通过为模型设置多个精度级别(高→中→低)，在远距离时自动切换到低模，显著减少多边形数量与 Draw Call，提升帧率。自动生成减少人工成本，并可以快捷地调整生成策略，平衡效果与性能，也可调整整体生成规则和结果迭代。合理设置 LOD 切换距离与过渡参数，可避免“跳变”现象，保证视觉平滑。

2.1.2. 数字底板生成及场景编辑处理

数字底板的生成由三个主要部分组成，多源数据准备、数据转换以及自动化建模。

(1) 多源数据准备

数字孪生水库多源模型数据一般包括 GIS (.shp)数据、栅格数据(DOM, DEM)、影像数据、高程模型数据、GeoTiff、BIM (.rvt, .RVT)模型、OSGB、3Dtiles 等时空数据。汇聚非结构、半结构化的海量多源数据，基于标准 ETL(抽取、转换、加载)流程，进行数据梳理、数据清理、数据转换、数据组合等，整合成结构化的数据集，解决数据混乱冲突、一数多源、数据质量参差不齐、数据冗余、数据缺值等问题。

(2) 数据转化

利用自研的 AES6 数据转换工具，实现数据识别、校验、导入、转化，以及场景底板预览、发布等功能。基于 OGC 标准服务(WMS 服务、WFS 服务、WMTS 服务等)，实现空间数据互操作。转换工具还可承担空间拓扑检查及修复的功能，为各个要素赋予了互相能够匹配的空间坐标。

(3) 自动化建模及轻量化处理

结构化模型数据一般包括倾斜摄影模型(OSGB)数据、CAD 数据、BIM 类模型数据等，涵盖建筑、道路、水域、植被、高程、影像等内容。根据模型数据复杂度的不同，首先对模型格式进行规范处理，然后将各结构化模型与底板在引擎中结合，进行模型轻量化处理、材质贴图优化。

模型轻量化处理是将模型的某些骨架进行简化或删除确保模型贴图质量较高、流畅度较高、数据体

量较小,通过格式转换、模型减面、剔除内部构件等方法进行处理。将数据格式为 OBJ、FBX、STL、IGS、IGES、JT、RVT、STP、STEP 转换为 OBJ、FBX 和 STL 格式文件;通过独立的底层算法,控制减面的目标数和对形状的控制参数,在对模型保留完整轮廓的同时减掉多余的面及面合并;通过算法提取外部模型,去除模型内部构件达到模型轻量化处理的效果。

2.1.3. 云渲染发布

在线云渲染将指令的渲染处理放在云端服务器,使用 WebRTC 来进行视频传输。而终端只需要通过网页连接到服务器去操作应用程序输入指令,同时将云渲染处理的结果以像素流的形式返回给终端展示。

基于构建的数字孪生场景,数字孪生引擎还可以将场景通过渲染链接方式进行分发展示:

① 底座场景高渲染服务发布

将处理后的物理实体可视化模型与物理现象可视化模型的融合渲染场景,通过物理实体场景融合、环境背景设置、水流状态及仿真场景配置后,将融合场景进行封装整合,然后发布成高渲染服务进行业务应用开发。

② 模型结果孪生场景高渲染服务发布

将专业机理模型、数理分析模型、遥感与视频智能识别模型结果孪生场景构建后进行封装整合,发布成高渲染服务进行业务应用开发。

③ 业务场景高渲染服务发布

将围绕着工程安全管理、防洪与水资源管理、流域生态环境管理及其他日常业务管理场景的业务应用场景进行封装整合,然后发布成高渲染服务进行业务应用开发。

2.1.4. 业务及算法模型数据映射

数据可视化技术方法本质上来说是利用模型顶点信息和 UV 划分等有效划分网格来建立现实世界场景的预测计算模型。采用物理材质和一些自定义的组件记录模拟物体表面材质、材料属性、外加载荷及约束等相关信息。在计算中就可以根据记录的物理信息计算最终的模拟结果,采用 GPU 辅助计算,充分利用 GPU 的高并发性,处理密集数据的计算,从而可以将外部的计算结果通过真实物理材质或可控着色的方式直接渲染到模型或者特效层上,最直观的反应仿真结果。

(1) 水位变化

利用接口形式实时获取或者接口调用历史数据,输入开始时间、结束时间、断面编号、数据采集频率、站点坐标、水位值等数据,实现对水位变化的仿真映射,并可以按正常水位、警戒水位、保证水位进行水情渲染等级划分。支持单一时刻静态表达和时间序列连续表达两种效果,可应用于水库上游、下游、闸前、闸后、坝前等区域。

(2) 水体流场

流场数据具备复杂的拓扑结构和高维性质,在时间和空间维度上展现出显著的内在连续性以及复杂的特征结构。基于这种特性,向量场动态渲染技术采用先进的数学模型和图形算法来实现流场的实时可视化。结合流体动力学原理,利用流线聚类方法来描述向量场的主要特征,进而精确模拟和展示水流的速度与方向,实现对水库下游洪水演进、河道漫溢、堤坝溃口淹没等场景的仿真模拟,流场映射结果以流线或流场箭头方式呈现。通过水流变化的动态可视化,增强对洪水演进过程的预测能力和对潜在风险的评估效果,优化应急响应策略和防洪措施。

(3) 水体淹没

根据水利专业模型计算的结果,输入表征淹没驱动范围 SHP 网格或含 DEM 信息的网格基底驱动面 tif 文件,通过模拟仿真引擎的解析能力,解析淹没数据空间位置及唯一对应的水深,并在物理实体可视

化模型的基础上，通过模拟真实水体材质的动态变化过程，实现基于本地历史数据、仿真计算后的结果数据来驱动淹没高度连续变化仿真映射，以模拟计算网格的时序变化过程仿真洪水的水流演进过程，展示水库泄洪淹没范围、淹没程度、影响对象等分析结果。水体淹没模型集成流程如下图 2 所示。

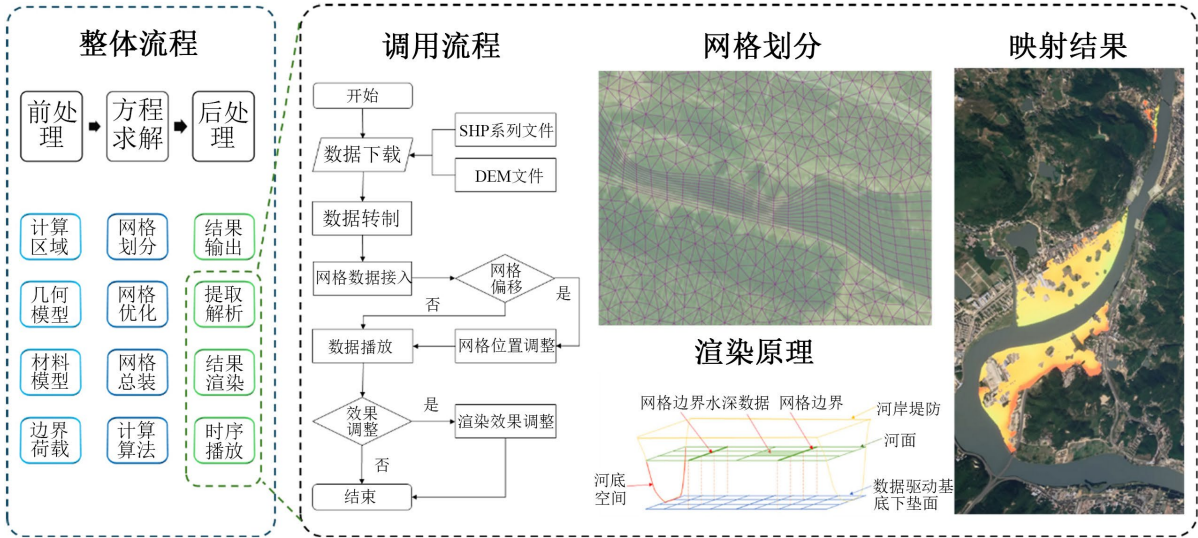


Figure 2. Water body inundation model integration flow chart
图 2. 水体淹没模型集成流程图

2.2. 数字孪生水库案例实践

以浙江省某水库为例，该水库是一座以供水为主，兼有防洪、灌溉和改善水环境功能的综合性水利工程，水库坝址以上控制流域面积 460 km²，水库总库容 2.35 亿 m³。

2.2.1. 全要素场景建设内容

L1 级建设范围：以公开数据构建水库一二级保护区范围及流域范围约 6000 平方公里。

L2 级建设范围：以现场照片、视频、GIS 等数据为基础，对工程周边场景内的水系、山系、道路、植被、场地等周边环境进行还原，构建水库保护区重点区域场景 200 平方公里，水库周围重点 10 千米水域及岸侧各 300 m 周边地块。

L3 级建设范围：重点水工建筑，包括东坝、西坝、副坝；重点建筑，包括取水口、管理房、闸室；设施设备。

2.2.2. 应用场景实现

(1) 综合场景实现

聚焦水库重点区域数字孪生场景，构建融合水库管理业务和可视化能力的综合场景。基于水库安全、运维、防汛、供水等业务态势动态监测、统计数据、预报数据、预警信息等，将水库管理核心业务在全要素场景中进行可视化呈现。

(2) 防洪四预场景实现

水库防汛调度模块，充分利用水雨情“三道防线”，密切监视水库管理范围内的雨情、水情、出入库流量、洪水预报情况，及时发布预警。动态预演水库及下游洪水、闸坝调度情况，洪水淹没风险，并依据预演方案、调度方案，确定工程调度、非工程措施和组织实施方式等，确保预案的可操作性，为防洪调度决策管理提供支撑。水库防洪四预场景如图 3 所示。



Figure 3. four reservoir flood prevention scenarios

图 3. 水库防洪四预场景

(3) 安全管理场景实现

如图 4, 安全管理场景包括运维管理、安全监测两个模块, 支撑安全监测、设备运行、智能空间管护、巡查管理、现场问题上报、隐患处理等业务功能实现。基于视频监控、无人机, 实现线上、线下同步运维; 基于大坝安全评估模型, 有限元算法构建, 实现工程安全态势感知监测、分析评估、仿真预演等功能。



Figure 4. Security management scenario

图 4. 安全管理场景

(4) 水资源管理

本项目水库的主要职责为供水, 构建水资源管理模块, 实现供水水量监测、供水量预报、供水计划执行、供水效益分析等功能, 确保城乡居民供水安全。

3. 结论

以 UE 引擎融合多源数据, 构建水库管理全要素可视化场景, 结合业务及水利算法模型映射, 驱动水利对象复杂的静态信息和动态变化过程, 旨在实现通过信息化手段解决物理世界水利对象向虚拟世界的映射, 形成监测数据 - 业务数据 - 水利专业模型 - 可视化模型的高度集成应用, 全面支撑水库日常管理、防洪四预、安全管理等业务, 提升水库管理的科学性和智能性。

参考文献

- [1] 张振军, 冯传勇, 魏猛. 水库数字孪生数据引擎及底板构建研究及实践[C]//中国大坝工程学会. 水库大坝智慧化建设与高质量发展会议论文集. 2023: 804-812.
- [2] 孙斌, 刘斌, 武健超, 等. 可视化场景中的 GIS 引擎与游戏引擎的融合技术实践[J]. 水利技术监督, 2024(2): 48-50.
- [3] 尤林奇, 王小平, 陶玉波, 等. 面向虚幻引擎的水利工程多源数据转化融合技术初探[J]. 水利信息化, 2024(3): 30-26.
- [4] 马绍江, 傅睿. 基于 UE4 蓝图编程的建筑结构可视化交互应用设计研究[J]. 山西建筑, 2020, 46(10): 197-198.