

基于3DMAX + UE的排涝泵站数字化平台应用研究

游伟航¹, 嵇莹¹, 刘雄², 秦红花³, 李博³, 杨祖强¹, 陈华^{1*}

¹武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉

²湖北省生态环境监测中心站, 湖北 武汉

³中工武大设计集团有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年12月28日; 录用日期: 2026年1月21日; 发布日期: 2026年4月30日

摘要

针对排涝泵站在运维管理与数字可视化中存在管理效率不高、三维环境交互不足与场景数字化程度不高的问题, 提出一种排涝泵站数字化设计及平台系统构建方案。通过采用3Dmax对泵站主体结构及设备精细化静态建模, 结合Unreal Engine (UE)强大的动态渲染功能与便捷的蓝图可视化脚本, 开发了具备高真实感的动态数字场景、设备实时监控与虚拟交互操作等系统功能的泵站数字化平台。研究成果构建了标准化建模-轻量化处理-UE仿真交互-平台系统集成-像素流推送工序流程, 通过设计面向泵站业务的“数据-模型-业务”三层联动架构, 实现了监测数据、三维模型与泵站运维业务的融合与响应。选取武汉市银莲湖垵排涝泵站进行应用示范, 验证了该平台在设备可视化、四预功能、综合信息管理等方面的应用成效, 对智慧水利建设管理方面起到了一定的推动作用。

关键词

数字化, 3DMAX, 虚拟引擎(UE), 排涝泵站

Research on the Application of a Digital Platform for Drainage Pumping Stations Based on 3DMAX and UE

Weihang You¹, Ying Ji¹, Xiong Liu², Honghua Qin³, Bo Li³, Zuqiang Yang¹, Hua Chen^{1*}

¹State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan Hubei

²Hubei Ecological Environmental Monitoring Center Station, Wuhan Hubei

³CEWUD Group Company Limited, Wuhan Hubei

Received: December 28, 2025; accepted: January 21, 2026; published: April 30, 2026

作者简介: 陈华(1977-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智慧水利、流域智能监测与模拟研究。

*通讯作者 Email: chua@whu.edu.cn

文章引用: 游伟航, 嵇莹, 刘雄, 秦红花, 李博, 杨祖强, 陈华. 基于 3DMAX + UE 的排涝泵站数字化平台应用研究[J]. 水资源研究, 2026, 15(2): 131-141. DOI: 10.12677/jwrr.2026.152016

Abstract

Aiming at the problems of low management efficiency, insufficient three-dimensional environment interaction and low scene digitalization in the operation and maintenance management and digital visualization of drainage pumping stations, this paper proposes a digital design and platform system construction scheme. By 3Dmax for detailed static modeling of the main structure and equipment and the powerful dynamic rendering function and convenient blueprint visualization scripting of Unreal Engine (UE), a digital platform with high-realism dynamic digital scenes, real-time equipment monitoring and virtual interactive operation functions is developed. The research outcomes establish a standardized workflow encompassing standardized modeling, lightweight processing, UE-based simulation interaction, platform system integration, and pixel stream pushing. Designing a three-tier “data-model-business” interactive architecture tailored to pumping station operations, the integration and responsive coordination of monitoring data, 3D models, and pumping station operation and maintenance services are realized. The Yinlianhuyuan Drainage Pumping Station in Wuhan is selected as a case study for application demonstration. This verification validates the platform effectiveness in equipment visualization, the “four-prevention” functions, and comprehensive information management. The proposed framework contributes to advancing the construction and management of smart water conservancy initiatives.

Keywords

Digitization, 3DMAX, UE, Drainage Pumping Station

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. 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

随着数字化转型与数字孪生技术的深入发展，水利工程基础设施的数字化和智能化管理已成为现代城市治理的重要方向[1]-[3]。排涝泵站作为城市防洪排涝系统的关键枢纽，其运行的可靠性与高效性直接关系到人民的生命财产与城市公共安全，然而传统管理模式的诸多瓶颈，已难以适配新时期智慧水务的发展需求。

传统排涝泵站运维管理模式存在明显局限[4]：日常运维依赖纸质记录与人工巡检，效率低且易存信息偏差；内涝应急时缺少调度所需可视化支撑，难以直观掌握现场态势、开展科学调度；同时传统业务系统仅“数据台账式”呈现，设备监测、运维、应急等业务分散于多系统，数据孤岛突出，无法实现工程全局管控与业务协同，严重制约管理科学化水平。

数字孪生技术的出现，为突破上述瓶颈提供了新的技术路径[5][6]。通过构建全场景可视化环境，借助动态渲染技术高保真还原泵站场景与运行细节，集成 IoT 监测数据实现全局状态实时呈现；更能打破业务壁垒，融合全流程管理需求，推动泵站管理从“被动响应”向“主动预判”转型。目前，水利工程数字化平台虽已探索出 BIM + GIS + IOT 技术[7]、GIS + UE [8]、Cesium + UE [9]、Cesium + Vue + SpringRoot 架构[10]等技术路线，在信息集成或视觉仿真方面各有优势，但仍存在“可视化能力不足”与“管理功能薄弱”的双重局限：可视化层面，GIS、Cesium 引擎的动态特效处理弱，BIM 模型轻量化难，难兼顾场景真实感与交互流畅性；管理层面，多数平台停留在模型展示与数据可视化阶段，数据与业务脱节，缺乏全流程管理支撑，未能充分发挥数字孪生价值。

本文提出基于 3DMAX 与 UE 的排涝泵站数字化平台构建方案，通过 3DMAX 实现高精度静态建模，结合

UE 强大动态渲染与蓝图脚本, 既解决现有技术的可视化短板, 又针对传统管理局限, 构建集实时监测、场景交互、运维管理与应急演练于一体的平台, 为泵站智能化管理提供技术支撑, 也为智慧水利数字孪生应用提供参考。

2. 应用需求与研究思路

2.1. 应用需求

针对传统排涝泵站管理存在的诸多短板, 数字孪生场景的搭建为排涝泵站的运维管理提供高度集成的可视化界面, 通过设备运行监测、水文水情监测、视频监控等信息[11]的实时关联呈现, 搭配场景虚拟交互功能, 同步实现设备远程监视与虚拟巡检管理, 提升管理流程的便捷性与数据利用率; 结合三端架构与像素流推送技术开发具备四预[12]功能的可视化应用, 模拟推演设备运行响应及不同调度方案的实施效果, 实现主动避险、辅助决策的目的, 提升泵站的安全运行水平和风险应对能力。通过系统集成技术构建设备运行可视化、综合信息管理、设备运行维护等业务一体化管理框架, 实现多业务数据互通与管理流程协同, 消除“数据孤岛”, 保障各业务环节的信息同步与高效联动。

2.2. 研究思路

排涝泵站数字化平台通过整合业务信息、空间信息、识别信息与监测信息多源信息, 为数字孪生场景构建提供数据支持。基于 3DMAX 对泵站室外建筑与室内设施设备手工精细建模, 利用 UE 引擎对全局场景仿真处理与渲染, 实现泵站数字孪生场景的构建。通过开发三端分层架构, 结合像素流推送技术[13], 集成一个能为用户提供设备运行可视化、泵站四预、综合信息管理和设备运行维护管理四大功能模块的统一平台。其研究思路图可见图 1。

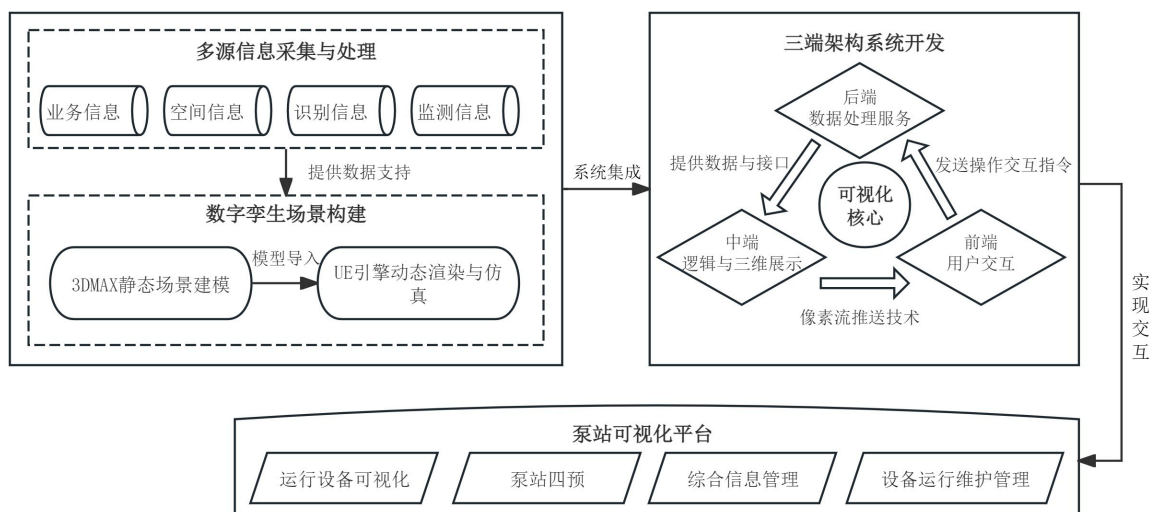


图 1. 泵站数字化平台系统研究思路图

3. 基于 3DMAX + UE 的排涝泵站可视化与系统集成技术

3.1. 基于 3DMAX 的数字化场景构建

排涝泵站结构复杂, 设备精度高, BIM 模型往往难以体现复杂设备组件的几何细节, 因此本研究以 3DMAX 作为建模工具, 对泵站进行高精度的三维还原。

针对室外场景建筑, 依据 CAD 设计图纸建模, 确保数字模型在尺寸上与现实泵站相统一。对于室内设备设施, 结合设备点云扫描数据与 CAD 图纸, 刻画其关键特征, 满足模型几何细节上的精度要求。为使模型高效导入 UE 引擎并保持稳定性, 同步进行了基于视觉重要性的层次化细节(LOD)规划、材质 ID 的分配与 UVW 坐标

的规范化展开。优化后的场景资源包总体积为 20 GB。其中，关键设备的最高细节模型(LOD0)面数均控制在 15 万面，配套生成的 3 个低细节层级 LOD1-LOD3 的模型面数分别控制在约 8 万面、3 万面与 1 万面。

3.2. 基于 UE 的可视化渲染

为了实现泵站运行状态、环境动态以及应急预案执行的实时感知与交互推演，本研究采用 3A 级别的游戏引擎[14]——UE 作为开发引擎。引擎在搭载 NVIDIA RTX 3090GPU 的标准工作站上测试，生成的材质球数量不超过 50 个，场景灯光数量不超过 10 盏，完整场景的加载时间约为 3.5 秒，在 4K 与 2K 场景分辨率下进行漫游浏览时，UE 编辑器视口帧率可稳定维持在 45 FPS 与 60 FPS 以上，GPU 显存占用峰值约为 11 GB，在控制模型复杂度的同时，保证了视觉真实感。其核心开发内容如下。

1) 多尺度场景融合

多尺度场景的融合为三维场景变换提供了可视的空间基底。基于 UE 的 Nanite 虚拟化几何体技术，可实现 3Dmax 模型细节的自动加载与渲染，结合 LOD 细节层次生成与静态网格合并优化，完成泵站手工建模与倾斜摄影[15]实景模型的轻量化处理；通过预处理卫星影像与 DEM 高程数据，在 UE 中构建泵站所在范围的真实地形，依托坐标系统实现多源模型的空间配准，解决大范围地理环境与泵站模型的融合问题。

2) 场景仿真与渲染

利用 UE 数据驱动的动态材质编辑能力，将实时水位、流量等监测数据映射为水面高程变化、流速矢量可视化及水体浑浊度动态表现，实现物理参数与视觉效果的实时联动。借助 Lumen 动态全局光照与 Volumetric Clouds 体积云系统，模拟不同气象条件下的光照与大气效果，为风险预演提供符合实际工况的视觉支撑。

3) 交互逻辑开发

通过蓝图可视化编程与 C++混合开发模式，为三维场景赋予交互逻辑，如模型的点击高亮、实时参数弹窗、洪水场景可视化与预案展示等功能。但具体而言，平台不依赖于复杂的水动力数值模拟，而是采用数据映射-场景变化的推演机制：将实时或预报的水位、流量等关键参数，通过预设脚本，驱动三维场景中水面的升降以及动态渲染，从而直观反映不同情况下可能出现的场景效果，为管理决策提供视觉化参考。

3.3. 像素流推送技术

3.3.1. 技术概述

为适配智慧水利背景下排涝泵站可视化平台的多场景应用需求，解决传统终端硬件对 UE 高精度三维场景的访问壁垒，支撑跨终端远程协同，本研究集成了 UE 像素流推送技术。

该技术基于 WebRTC 协议构建低延迟传输链路，结合 H.264/H.265 高效视频编码标准对服务器端渲染的像素流进行压缩处理，客户端通过浏览器即可无插件接收高清视频流并完成交互操作——用户输入指令经 WebRTC 协议实时回传服务器，经场景渲染更新后形成响应闭环，延迟控制在毫秒级。依托信令服务器实现多终端与渲染服务器的点对点连接，结合 LOD 动态适配与带宽自适应调整机制，确保 PC 端均能流畅访问高保真场景，同步获取设备实时运行数据与险情推演结果。

3.3.2. 性能测试与分析

1) 测试环境配置

① 服务器端：服务器型号：联想 SR658HV2；形态：2U 双路机架服务器；CPU：海光 5380；内存：128 GB；硬盘：PCIe SSD 48GB；显卡：NVIDIA RTX 3090；操作系统：Ubuntu 22.04.5 LTS。

② 客户端：CPU：Intel i5-13600KF；内存：64 GB；硬盘：PCIe SSD 500 GB；显卡：NVIDIA RTX 5070；操作系统：Windows 11 23H2。

2) 测试指标与结果

表 1. 测试指标与结果

测试指标	测试方法	测试结果
启动延迟	测试从请求到画面出现时间	平均 6.5 s
画面质量	SSIM 指标	SSIM ≥ 0.92
画面延迟	测试操作到画面响应时间差	平均 80 ms
断链率	持续运行 24h 统计	0.1%

3) 并发访问与资源占用

表 2. 并发访问与资源占用

模拟并发用户数	CPU 占用率(平均)	GPU 显存占用(平均)	内存占用(平均)	网络带宽占用(每用户)
1 用户	10%	8 GB	15 GB	50 Mbps
3 用户	25%	24 GB	45 GB	150 Mbps
5 用户	50%	40 GB	75 GB	250 Mbps

4) 结果分析

测试结果与指标可见表 1，基于 UE 像素流推送技术构建的可视化平台，在所述测试环境下，能够实现端到端平均 80 ms 的交互延迟，画面质量良好(SSIM ≥ 0.92)，启动延迟平均为 6.5 s，断链率仅为 0.1%。系统的资源占用与并发访问测试结果可见表 2，初步证明了其技术方案的可行性与一定的扩展性，能够满足排涝泵站日常运维管理中多角色协同巡检的业务需求。

3.4. 数字化平台系统开发

3.4.1. 数字化平台系统框架

排涝泵站数字化平台系统基于 BS 结构设计总体框架，包含业务应用层、系统支撑层、数据服务层与基础设施层四个部分，通过标准规范体系、网络安全体系等相关标准体系实现数字化平台系统稳定而高效地运行，其框架可见图 2。

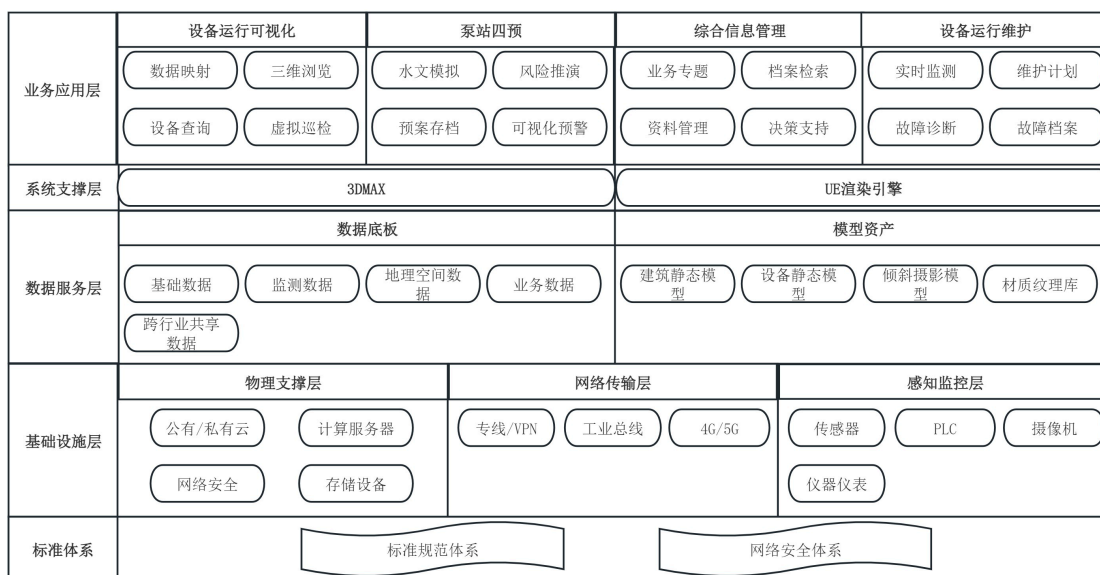


图 2. 泵站数字化平台系统框架

3.4.2. 基于三端分层架构的系统集成

排涝泵站数字化平台采用三端分层架构，即前端用户操作交互层、中端逻辑与三维展示层、后端数据处理与服务发布层。

1) 后端数据服务层：负责采集与管理实时、历史、模型及其用户数据，再封装成应用程序接口服务，通过服务器向网络开放服务，同时可以进行数据分析等逻辑处理，是整个平台的数据枢纽。

2) 中端展示层：以 UE 为核心，负责数字化场景的实时渲染。采用像素流推送技术，通过外部制作的推流方案，把本地的程序通过低延迟视频流的方式推送至前端浏览器。在 UE 内部，将编写的交互逻辑封装成前端可调用的接口，实现用户操作与三维场景变化的交互。

3) 前端交互层：是用户的操作入口与交互界面，采用 Vue 框架[16]开发，负责接收中端服务器推送的视频流，同时还提供多种样式的图标，能实时接入并展示后端的数据。

3.4.3. 面向泵站运维管理的数据链路

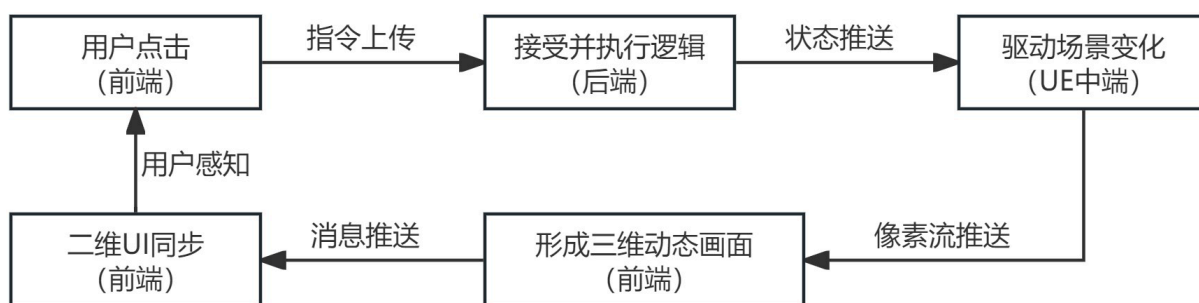


图 3. 数字化平台系统交互数据链路概图

数字化平台通过数据流与控制流的闭环交互，为排涝泵站运维管理提供了智能化的执行框架。以设备状态巡查与故障定位这一典型业务场景为例，其端到端的数据链路概图如图 3 所示，具体阐述如下：

1) 用户点击：管理人员在 Web 前端可视化界面中，点击三维场景内的某一运行机组模型。该点击事件生成一个带有设备唯一 ID 的查询指令。

2) 逻辑执行：查询指令通过 WebSocket/API 实时上传至后端服务。后端服务接收指令后，并行执行两项核心逻辑：① 实时数据获取：通过预设的数据接口，查询该设备的实时监测数据。② 业务规则判断：将查询到的实时数据与预设的安全阈值进行比对。若任何参数超限，则立即在业务系统中生成一条设备异常预警事件，并存入告警数据库。

3) 状态推送：后端服务将查询到的实时数据、设备静态属性以及可能产生的预警信息，封装为标准化的 JSON 数据包，通过模型 - 数据接口主动推送至 UE 服务器。

4) 三维场景驱动与渲染：UE 服务器接收到数据包后，其内部的蓝图系统根据设备 ID 定位到对应的三维模型，并驱动执行以下渲染指令：① 状态高亮：改变模型材质，使其高亮显示。② 动态效果：根据运行状态数据，驱动三维动画。③ 告警触发：若数据包中包含预警标志，则自动触发模型红色闪烁材质与告警音效。

5) 动态画面展示与 UI 同步：UE 渲染引擎将更新后的三维画面，通过像素流编码服务器，以低延迟视频流形式推送至前端浏览器。同时，前端 UI 层接收到后端推送的标准化数据包，并据此同步更新设备旁的信息面板，以图表、列表等形式展示运行参数与预警详情。

6) 用户感知与决策：管理人员在浏览器中同步感知到三维场景中设备的视觉状态与二维面板中的参数信息，从而迅速掌握设备健康状况，完成巡查或定位故障。此感知结果可即刻触发下一控制流，形成“交互 - 感知 - 决策 - 执行”的管理闭环。

3.4.4. 平台安全管理

为满足该泵站平台网络安全与运维管理要求，同步设计了一套安全与权限管理体系。

1) 身份认证与分级授权

所有用户需通过用户名/密码 + 动态验证码的方式进行身份认证。系统预定义多种角色，并为每个角色配置其在平台界面中的操作权限。

2) 外网访问策略

为保证系统作为关键基础设施的网络安全，本平台遵循安全隔离原则，部署于泵站内部的生产控制专网或独立的内网环境中，不直接开放公网访问入口。

3) 操作日志审计

平台完整记录所有用户的关键操作日志，包括但不限于登录、数据查询、指令下发、预案启动、配置修改等。日志信息将存入安全数据库供审计与追溯。

4) 会话管理

为防止因人员离开而导致的未授权操作，平台对用户会话进行主动管理。系统设定操作超时时间，超时后自动锁定或退出登录。同时，支持管理员远程强制注销特定用户的活跃会话。

4. 项目应用——以武汉市银莲湖垸排涝泵站为例

4.1. 区域概况

武汉市银莲湖垸区域属于长江冲积平原，地势较为低洼平坦，平均海拔低于长江的汛期水位，一旦遭遇强降雨时，形成的内涝水很难通过自身重力自然流入长江。且该位置属于亚热带季风气候，雨量充沛，在梅雨季节时，极易发生持续性的暴雨，加之上游不断来水与长江水位顶托，内涝风险不容小视。银莲湖垸排涝泵站介于长江与通顺河之间，是长江干堤上的关键水利设施，它服务于地势低洼的银莲湖垸，承担着长江在高水位时期间排水排涝的核心任务。当前，该泵站正处于建设阶段，建成后将直接保障垸内区域社会活动的正常运行，对维护当地人民生命财产与发展具有不可替代的作用。

4.2. 银莲湖垸排涝泵站可视化场景

排涝泵站可视化场景是数字化平台的基础，目标在于创建一个与真实泵站高度一致、兼具真实感与可交互性的数字孪生环境。本项目以银莲湖垸排涝泵站为对象，基于 3DMAX 与 UE 组合，成功打造了银莲湖垸排涝泵站的高真实感数字孪生场景，为数字化平台集成与交互提供了沉浸式的三维可视化基础。基于 3DMAX 的泵站网格模型可见图 4(a)与图 4(b)，在 UE 中的渲染效果图可见图 5(a)与图 5(b)。

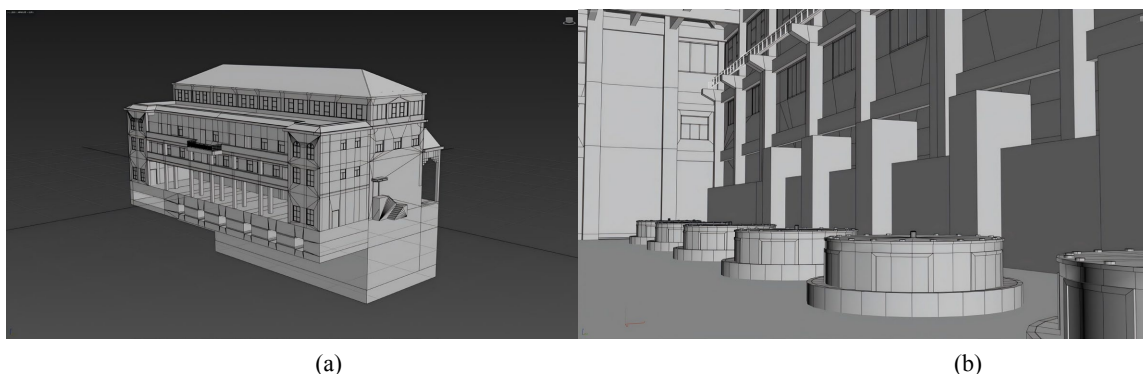


图 4. 3DMAX 泵站室外与室内设备网格模型



图 5. UE 中的仿真渲染效果图

4.3. 银莲湖垸排涝泵站数字化平台系统

4.3.1. 平台集成

在可视化平台中，基于 UE 内部封装的强大蓝图逻辑功能与 C++ API，能将现实数据实时映射到三维场景。通过三端分层架构，用户能直接在平台界面进行点击操作，实现三维场景的变换、沉浸浏览、信息检索与功能演示。采用的像素流推送技术，能使用户在任何可以访问 Web 的浏览器上实现浏览，如图 6 为泵站可视化平台界面。



图 6. 银莲湖垸可视化平台界面

4.3.2. 功能应用

银莲湖垸排涝泵站的数字化平台系统，为操作用户提供了运行设备可视化、泵站四预、综合信息管理、设备运行维护管理四大功能。

1) 运行设备可视化

通过数据接口与传感器相连接，将设备的实时运行参数动态映射至构建好的三维模型上，并在可视化平台

中展示出来，用户通过点击界面上的设备，可以实现对平台内所有设备的运行状态可视化。这一功能可使管理者迅速掌握泵站设备布局与整体运行状况，同时也方便管理者向他人进行展示与汇报，图 7 展示了可视化平台的运行设备可视化功能界面。

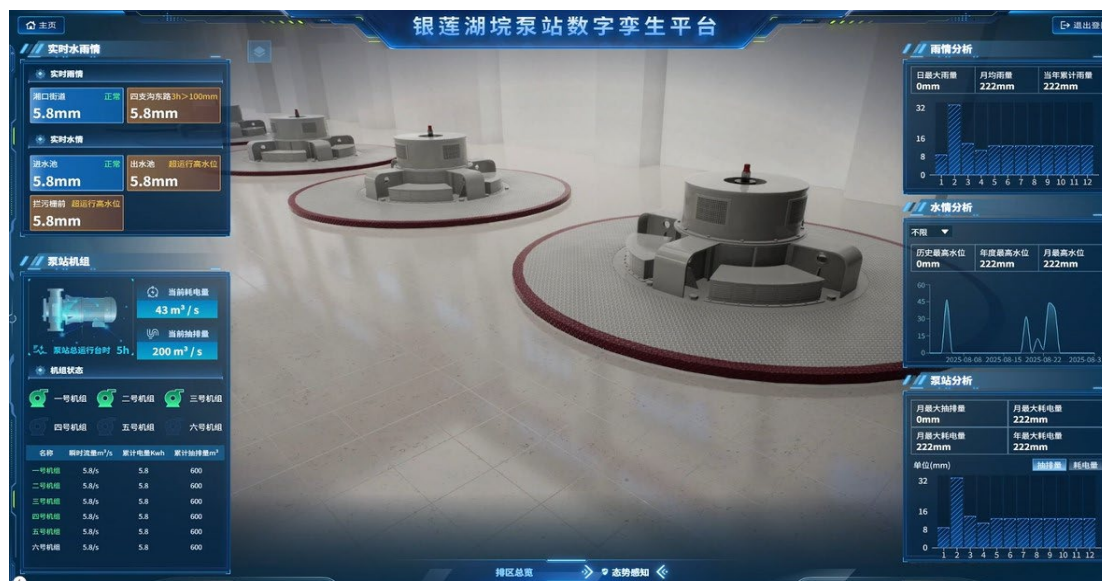


图 7. 运行设备可视化功能界面

2) 泵站四预

平台实现了以三维动态场景为核心的预报、预警、预演、预案功能。平台可集成外部水文气象预报成果，可依据预设的安全阈值对监测数据进行实时判断，一旦触发预警条件，即在三维场景与二维面板中进行告警提示，提升风险感知能力。平台预演功能支持多情景动态模拟与可视化推演，主要包括历史情景演练、设计情景模拟与未来情景预演。历史情景演练基于系统存储的历史监测数据构建情景库，可对典型历史水位过程进行三维场景回放；设计情景模拟支持导入工程设计水位过程数据，在三维环境中模拟不同设计工况下的水流变化。上述两类情景均以进水池单断面水位数据为基础，结合渠道地形坡降信息，通过插值算法自动构建三维水面模型。未来情景预演则可导入外部水力模型模拟输出的多断面水情时序数据，实现水面动态渲染与洪水演进可视化。同时，在预演过程中，系统可自动匹配并展示相应的应急预案，将其转化为可视化的操作指引。泵站可视化平台的四预功能界面可见图 8(a)、图 8(b)。



图 8. 泵站四预功能界面

3) 综合信息管理

综合信息管理平台的数据集成，支持快速信息查阅与一键检索功能，能迅速了解设备类型分布与工程状况。通过业务专题分析，能为特定的业务场景提供监测与决策支持。图 9 展示了可视化平台的综合信息管理功能界面。



图 9. 综合信息管理功能界面



图 10. 设备运行与维护功能界面

4) 设备运行与维护

设备运行与维护模块中, 三维模型与数据一一对应, 可以让运维人员对泵站的主要设备进行远程监视, 通过整合设备数据, 为制定高效的维修更换计划提供数据支撑, 有效降低突发性的故障风险。监测管理中, 可以对雨量、水情、工程安全状况进行实时监测。设定的巡检管理可基于工程规章, 创建自定义的巡检计划, 将其巡检结果实时同步平台, 自动归入设备档案, 为管理优化提供便捷。图 10 展示了可视化平台的设备运行与维护功能界面。

5. 总结与展望

本研究对排涝泵站的数字化平台系统构建提出一种新的技术路径, 从应用需求与研究思路出发, 重点论述了结合 3DMAX 与 UE 引擎搭建的数字孪生场景与数字化平台系统集成。采用的三端分层架构与像素流推送技术, 实现了跨终端、低延迟的高保真场景访问与交互操作, 可有效提升泵站管理的智能化水平。

当前, 平台结合建设期的实际需要, 重点服务于工程规划、设计与施工阶段, 与工程建设同步推进。随着银莲湖垵排涝泵站正式投入运行, 平台将进一步接入上游来水预报模型与泵站进水渠道的一维、二维水动力数值模型, 通过长序列的运行监测数据, 对模型参数进行动态校正与迭代优化, 提升平台的“正向-逆向-正向”的闭环推演能力, 逐步提高数字模型与物理水利工程之间的同步性与孪生性, 为泵站长期运行管理及决策支持提供技术支撑。

基金项目

国家重点研发计划项目(2023YFC3209101); 水利部重大科技项目(SKS-2022020)。

参考文献

- [1] 牛广利, 李天阳, 杨恒玲, 等. 数字孪生水利工程安全智能分析预警技术研究及应用[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(3): 181-185.
- [2] 蔡健. 数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用研究[J]. 长江技术经济, 2022, 6(S1): 245-247.
- [3] 张绿原, 胡露骞, 沈启航, 等. 水利工程数字孪生技术与探索[J]. 中国农村水利水电, 2021(11): 58-62.
- [4] 唐传宇. 排涝泵站自动化升级改造研究[J]. 低碳世界, 2024, 14(9): 109-111.
- [5] 姜佩奇, 伍杰, 刘辉, 等. 基于 BIM 的数字孪生水利工程轻量化技术研究[J]. 人民黄河, 2024, 46(5): 133-137+144.
- [6] 王凡, 李镇江, 武健超. 数字孪生工程可视化平台设计[J]. 水利规划与设计, 2024(10): 140-144.
- [7] 梁爱萍, 张发清, 蔡运忠, 等. 基于 BIM+GIS+IoT 技术的水利工程数字孪生工地建设管理系统研究与应用[J]. 水利技术监督, 2024(2): 39-43.
- [8] 金有杰. 基于 GIS 和 UE 的水利数字孪生双引擎驱动技术研究[C]//中国水利学会, 西安理工大学. 2024 中国水利学术大会论文集(第一分册). 2024: 19-24.
- [9] 张青怡, 刘鹏飞, 汤灏, 等. 基于 UE4 引擎和 Cesium 的数字孪生流域可视化方法研究与应用[C]//河海大学, 浙江省水利学会, 上海市水利学会, 江苏省水利学会, 安徽省水利学会. 2025 (第十三届)中国水利信息化技术交流会论文集. 2025: 1257-1266.
- [10] 何成威, 朱乔利, 谈政, 等. 基于 Cesium 的水利工程三维可视化平台开发研究[J]. 中国农村水利水电, 2024(1): 225-230+236.
- [11] 刘思微, 田莹, 徐永兵, 等. 数字孪生泵站三维智能巡检的研究与应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(4): 788-797.
- [12] 蔡阳, 成建国, 曾焱, 等. 加快构建具有“四预”功能的智慧水利体系[J]. 中国水利, 2021(20): 2-5.
- [13] 庞南茜, 李俊, 沈博文, 等. 基于 UE+推流架构的数字孪生楼宇建模及可视化应用[J]. 中国建设信息化, 2024(13): 86-90.
- [14] 胡起云. UE4 游戏引擎的建筑可视化表现探析[J]. 装饰, 2016(8): 134-135.
- [15] 高咪, 曹文, 石明. 倾斜摄影测量技术在智慧水利系统中的应用研究[J]. 科技与创新, 2025(19): 216-218+222
- [16] 李晓薇. vue.js 前端应用技术分析[J]. 网络安全技术与应用, 2022(4): 44-45.