

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.02.017

基于BIM+UE的市政给排水厂站数字孪生系统

张 宁¹, 邓京楠¹, 余 乐¹, 乔 亮¹, 陈积义¹, 王文明²,
杨淇棕²

(1. 湖南省建筑设计院集团股份有限公司, 湖南 长沙 410000; 2. 湖南先导洋湖再生水有限公司, 湖南 长沙 410208)

摘 要: 针对市政给排水厂站类项目设计、施工、运维阶段存在的数据脱节,以及运维平台子系统多且数据分散等问题,提出建筑信息模型(BIM)+虚幻引擎(UE)技术路线的数字孪生运维管理平台产品方案,重点打通BIM数字化交付及数据处理、基于UE的BIM数据优化和功能开发、UE与平台前端集成和数据通信等关键技术路线。以长沙市洋湖再生水厂(三期)项目为典型案例,结合项目业务逻辑和管理需求研发数字孪生系统并实现云端交付,将数字孪生系统作为顶层数据集成展示平台并与运维工作深度融合。该平台部署投用后,达到了有效提高现场人员巡检效率、拓展运维管理维度、提升项目数字化形象和影响力的效果。

关键词: BIM; 游戏引擎; 数字孪生; 智慧运维; 智慧水务

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)02-0107-09

Digital Twin System of Municipal Water Supply and Drainage Plants Based on BIM+UE

ZHANG Ning¹, DENG Jingnan¹, YU Le¹, QIAO Liang¹, CHEN Jiyi¹,
WANG Wenming², YANG Qiliang²

(1. Hunan Architectural Design Institute Group Co. Ltd., Changsha 410000, China; 2. Hunan Pioneer Yanghu Reclaimed Water Co. Ltd., Changsha 410208, China)

Abstract: In response to the current situation of information isolation in the design, construction, operation and maintenance of municipal water supply and drainage plant projects, a product solution for digital twin operation and maintenance management platform based on BIM+UE is proposed. The focus is on building key technical routes such as BIM digital delivery and data processing, BIM data optimization based on UE and function development, UE and the platform interface integration, as well as data communication. Taking Changsha Yanghu reclaimed water plant (phase III) project as a typical case, the digital twin system is developed and delivered in the cloud as the top-level data display platform deeply integrated with operation and maintenance work based on the project's business logic and management requirements. After the platform was deployed and put into use, it effectively improved the inspection efficiency of on-site personnel, expanded the dimensions of operation and maintenance management, enhanced the digital image and influence of the project.

基金项目: 长沙市科技计划重大专项(kh2401024)

共同一作: 邓京楠 E-mail:307736665@qq.com

Keywords: BIM; game engine; digital twin; smart operation and maintenance; smart water

作为数字基础设施建设的关键内容,水务行业正面临前所未有的发展机遇^[1]。总体来看,目前我国大多数水厂、污水处理厂运行已进入自动化阶段,大中型城镇项目部分实现信息化管理,能够基于平台实现数据面板查看和报表统计等应用,但仍存在平台信息不互通、缺少智能决策支撑、可视化效果以及人机交互性较差等问题^[2]。在数字水厂、智慧水厂探索中,数字孪生技术也逐渐受到重视,成为业务场景搭建、多源信息集成的有力抓手^[3]。我国从2018年雄安新区规划纲要开始对数字孪生城市概念进行政策布局,随着2021年“十四五”规划明确提出“水务行业新发展”“探索建设数字孪生城市”等内容,水务行业数字孪生应用明显提速^[2]。

数字孪生的基础即数字模型,核心是数据。实践表明,建筑信息模型(BIM)技术可为“数字孪生”提供基础数据支撑,并支持基于真实场景的数据联动和业务协同,最大程度满足项目运营管理要求。近年来在高速公路、轨道交通、水利等工程项目领域,基于BIM的数字化管理平台已得到广泛应用^[4-6],延伸并拓展了BIM数据应用的维度。但是,目前基于BIM的数字孪生项目实践中普遍存在以下难点问题:①缺少数字化交付标准方法。BIM技术普遍应用于设计校核与施工虚拟建造,对数字化交付环节重视不足、把控不严,运维阶段难以充分发挥BIM数据资产价值。②平台端模型渲染难度较大。常规运维平台网页端图形引擎难以支撑包含精细化构件的BIM模型,若采用客户端渲染又无法与网页端的信息化平台有机融合。③数字孪生系统与业务管理脱节。部分数字孪生系统停留于场景展示,未实现多子系统运维数据集成、融合应用,难以在巡检、资产管理等日常业务场景发挥作用。

1 基于BIM+虚幻引擎(UE)的数字孪生平台

UE是一款功能强大的游戏引擎,能够保证高质量渲染效果、实现影视级画质与特效,其3D实时渲染和仿真模拟能力也被逐渐应用到工程建设领域。以水利行业数字孪生平台为典型代表^[7-9],多个项目引入UE游戏引擎技术提升BIM模型可视化表达和仿真模拟应用效果。

基于上述问题和UE引擎的性能特点,提出BIM+UE的整体技术路线(见图1),基于BIM模型实现设计、施工应用和数字化交付^[10-11],以竣工BIM成果作为数字化运维场景并通过游戏引擎提升场景表达效果和开展仿真应用,进一步结合项目应用和管理需求,完成功能模块开发和运维数据接入^[1]。重点针对BIM数字化交付及数据处理方案、基于UE的BIM数据优化和关键技术开发方案、UE与平台前端集成和数据通信方案等内容开展研究,并结合市政给排水实际项目业务逻辑和管理需求,形成相对完整和标准化的BIM+UE数字孪生平台解决方案。

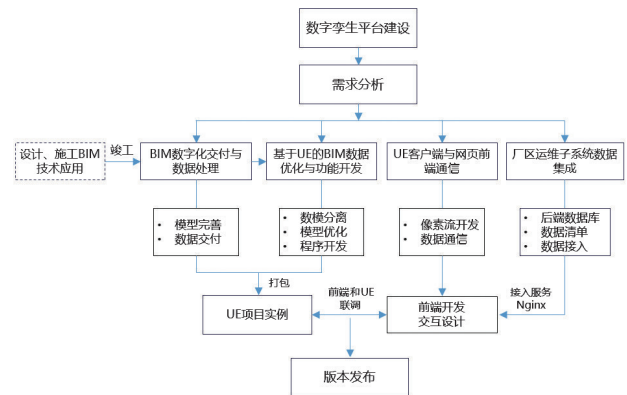


图1 基于BIM+UE的数字孪生平台开发技术路线

Fig.1 Development technology roadmap for BIM+UE-based digital twin platform

2 BIM数字化交付与数据处理方案

主要针对Revit软件生成的BIM模型进行建模和数据处理方法探究,涉及模型数据完善、优化、导出和交付等技术环节^[12]。

2.1 模型完善

针对运维期重点关注的工艺、电气类构件,按照管道、管件、管道附件、机械设备、电缆桥架、电气设备等分类进行复核;并根据不同功能系统分别设置管道系统类型,确定配色要求。按照阀门、管件、闸门、水泵等子类别,确定构件编码体系和各类构件应包含的参数要求。结合参数化工具批量录入构件信息,形成标准化数据结构。针对墙、梁、柱、板等土建构件,制定连接及扣减规则,并通过面层拆分和薄层贴面等方法进行构件拆分和材质优化,提高模型渲染过程的材质处理效率。

2.2 数据导出与交付

经验证,通过Fbx、Obj、IFC等通用格式可实现BIM模型与UE、Cesium等引擎的数据交互^[3,13],但在模型切片、数据处理过程中,仍存在不同程度的数据结构错乱、材质丢失问题。专业引擎特有的数据输出格式,经测试更能保证数据的可用性,如通过Datasmith文件格式导入UE,在保留数据结构的基础上,还能通过设置面片数等级和导出参数范围控制数据容量,在实际项目中更为可行。

3 基于UE的BIM数据优化和功能开发方案

3.1 数据与模型分离技术应用

以BIM模型导出的Datasmith文件为源数据,采用数模分离技术,将BIM模型构件携带的数据信息与几何模型剥离并导入数据库(见图2)。一方面通过数模分离将BIM模型进一步轻量化处理,提升平台端模型运行效率;另一方面为资产数据的增、删、改、查等批量操作奠定基础,实现数据库构件信息的高效管理。



a. Datasmith 文件数据结构



b. 基于BIM模型编码体系的数模分离技术路线

图2 基于Datasmith文件的数模分离方案

Fig.2 Data and model separation scheme based on Datasmith files

3.2 基于UE的BIM数据处理与优化方案

① BIM模型几何构件碰撞系统优化。通过物理模拟系统实现重力模拟、碰撞体识别,基于UE开

发碰撞体批量处理工具,实现海量精准碰撞体自动生成,保证碰撞体与几何实体空间属性的一致性,还原虚拟巡检过程中的真实路径与可达范围。

② 管道模型渲染性能与流向效果优化。三维管道模型导入后易引起面数超标、纹理贴图坐标(UV)混乱等问题,增加额外渲染压力;根据BIM模型自带的起、终节点以及材质信息,定制开发管道模型自动重建功能,降低管道几何面数,并同步添加管道动态流向效果。

③ UE关卡优化。下载带有经纬度的卫星图,在UE引擎GIS关卡中运行地图编辑器,输入角坐标或自动识别填充经纬度生成地图边界,搭建区域场景。针对项目BIM模型构件数量过大的问题,必须单独设置关卡以避免保存耗时问题,模型导入后可通过坐标与GIS地图对位匹配。

3.3 模型动态渲染与虚拟仿真技术路线

① BIM模型动态渲染技术。基于Nanite虚拟几何体系统功能,通过GPU-Driven实时渲染方案保证模型的像素级细节处理;结合动态数据压缩技术,支持高细节流送和自动多细节层次(LOD),在保证渲染细节的同时支持海量物体对象,有效提升系统帧率和流畅度。以单个水厂项目模型为例,可将帧率由10帧左右稳定提升至30帧以上。

② 运行可视化虚拟仿真技术。充分发挥游戏引擎的仿真性能,添加水体材质并配置水体动态特效,针对搅拌、曝气等工艺设备制作动态特效,并通过接入设备启停数据、实时曝气数据,还原现场设备运行状态和效果。将计算流体力学(CFD)模拟结果与数字孪生场景相结合,在三维场景辅助水力分析、展示流场分布,为工艺虚拟仿真奠定基础^[14]。

4 UE客户端与网页前端通信方案

4.1 基于 WebRTC 的像素流开发与管理

以UE像素流云渲染技术为核心,基于WebRTC实时通信技术,将服务器客户端渲染结果通过视频流送形式传输并嵌入Web前端,将前端的操作传回UE客户端进行操控,实现UE客户端和Web前端实时交互(见图3)。通过搭建网页端数字孪生系统,由云端服务器完成实时渲染,终端用户无需高配置电脑即可流畅地使用平台,突破本机硬件限制。

针对像素流自身存在的启动和进程管理不便、渲染资源利用率不高等问题,自研 Pixel Streaming 后

台多进程自动管理系统(见图4),优化像素流开发模式。

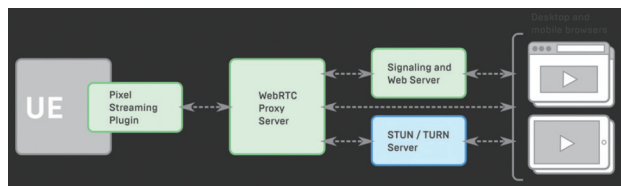
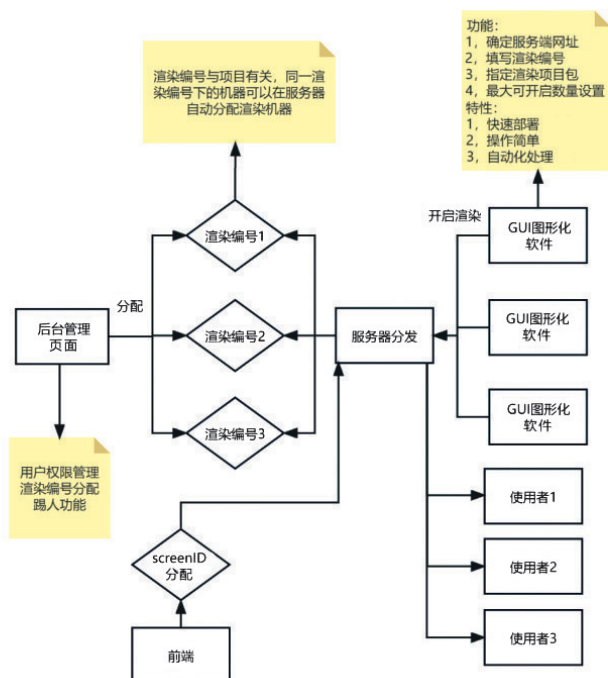
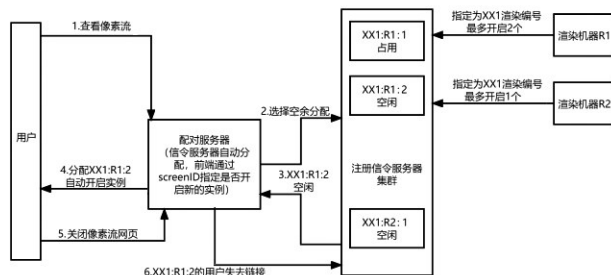


图3 基于WebRTC的远程服务技术路线

Fig.3 Technology roadmap for remote services based on WebRTC



a. 渲染服务和分发后台工作流



b. 用户和服务自动管理过程

图4 Pixel Streaming 工作流及自动管理技术路线

Fig.4 Workflow and automatic management technology roadmap of Pixel Streaming

在运行过程中,通过管理系统启动渲染服务,并通知服务器注册,服务器发送指令给渲染端完成项目动态开启与关闭,实现多用户、多项目、多渲染机器、多实例进程自动管理,以及云渲染资源动态

分配,满足多人同时访问需求。

4.2 数据通信框架

UE与前端数据通信框架是实现用户界面与前端交互的关键组件,充当数据传输的桥梁。在数据通信过程中,由UE端开放允许前端调用的函数接口,前端通过约定的数据格式(Json)调用相应API,如动态时间、动态天气、显示/隐藏构件、为固定物体切换材质等。

5 厂区运行数据集成方案

5.1 现有生产子系统数据集成

数字孪生系统与运维子系统数据集成方案见图5。

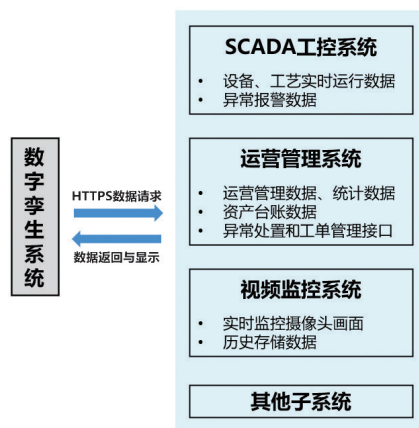


图5 数字孪生系统与运维子系统数据集成方案

Fig.5 Data integration plan for digital twin system, operation and maintenance subsystem

针对市政给排水厂站类项目,以BIM竣工模型作为数字孪生系统的空间定位数据基础,梳理各工艺单元、不同工艺设备需接入的运行参数,形成数据变量需求清单。数字孪生系统通过超文本传输安全协议(HTTPS)方式按照指定频率向其他子系统服务器实时进行数据请求,包括数据采集与监视控制(SCADA)系统、运营管理系统和视频监控系统等,服务器收到请求并处理后,返回响应数据,实现运行数据对接。

5.2 物联网数据对接

若新建或现状项目缺少数据集成系统,则需要基于数字孪生运维场景,针对构筑物相关工艺设备和传感器,通过物联网通信协议进行数据对接,或开发能够适配多种物联网通信协议的中间件,灵活适应各种类型物联网设备和数据格式,实现高效数据交换和通信优化,提升数据集成和控制的效率。

6 案例应用

6.1 项目概况

洋湖再生水厂(三期)项目位于长沙市湘江新区,地处洋湖湿地公园腹地,设计规模10万 m^3/d ,2023年建成投产,定位为湖南省绿色污水处理厂标杆项目,已建成SCADA系统、信息化平台、视频监控等多个独立的管理子系统。

项目前期,结合厂区日常管理及数字化业务情况进行专题调研并确定功能需求,以竣工BIM数据为基础,实现BIM+UE+运维管理跨界融合,开发基于Web端的数字孪生系统,作为信息化建设最顶层的数据集成展示平台(见图6)。

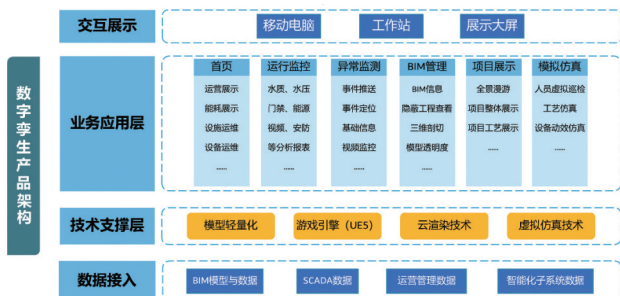


图6 洋湖再生水厂数字孪生系统产品架构

Fig.6 Digital twin system product architecture of Yanghu reclaimed water plant

洋湖再生水厂数字孪生系统也是湖南省第一个落地应用的水务BIM数字孪生系统,包括首页运行驾驶舱、生产运行和异常监测3大功能模块,涵盖BIM构件管理、项目展示与模拟仿真等应用内容。

6.2 数字孪生平台开发过程

① BIM数据处理与优化

以项目竣工BIM模型为基础,结合平台开发需求进行模型数据处理和优化。针对厂区重点关注的工艺管线,按照不同功能系统进行分类、配色梳理;对主要工艺设备与现场的一致性进行复核,区分设备材质类别(见图7);对结构、建筑构件的连接和扣减关系,以及外部材质进行处理(见图8),提高渲染效率。

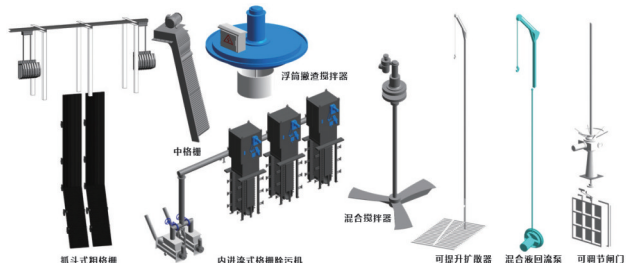
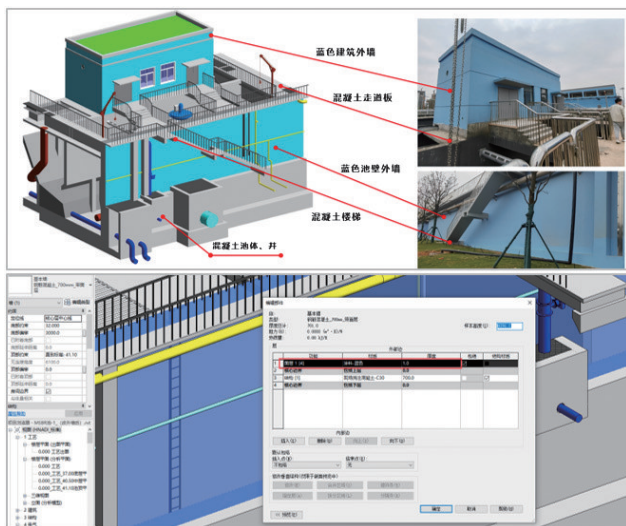
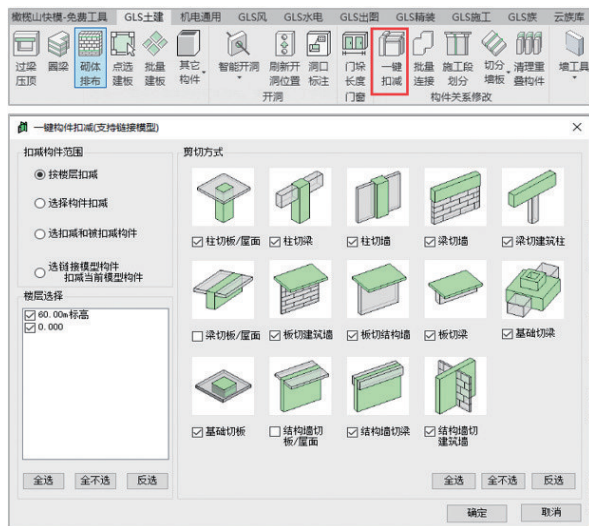


图7 工艺设备BIM模型复核及材质区分

Fig.7 BIM model review and material differentiation for process equipment



a. 土建专业构件材质梳理



b. 构件连接及扣减关系处理

图8 结构和建筑专业BIM模型材质优化、扣减关系处理

Fig.8 Material optimization and deduction relationship processing for structural and architectural BIM models

进一步通过UE专用模型导出插件,设置面片数量等级为8,并按照项目BIM模型参数信息构成,勾选尺寸标注、标识数据、材质和装饰等主要参数组,导出Datasmith文件作为BIM输入数据。

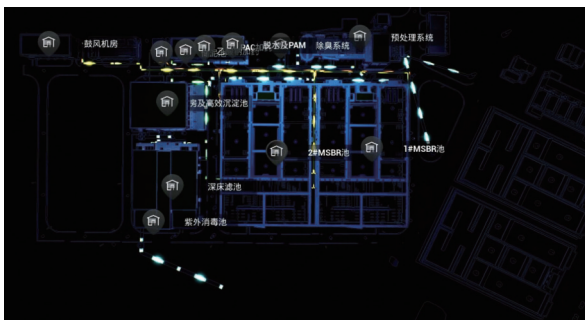
② 基于UE优化BIM模型及数字孪生场景

通过数模分离技术应用,对BIM模型进行轻量化处理,提升模型运行效率;进一步基于UE工具批量完成构件碰撞优化、管道重建与面数优化、管道

流向添加等应用(见图9)。



a. 添加碰撞后的模型场景

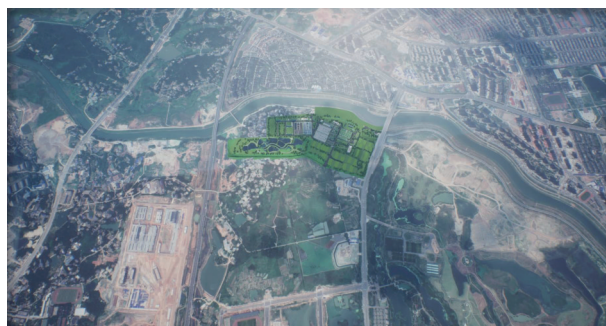


b. 管道流向添加效果

图9 模型碰撞及管道流向的处理效果

Fig.9 Processing effects of model collision and pipe flow direction

模型定位拼装、现状厂区及周边场景优化见图10。



a. 基于GIS底图的模型定位拼装



b. 现状厂区工程及周边湿地场景重建

图10 模型定位拼装、现状厂区及周边场景优化

Fig.10 Model positioning and assembly, optimization of current plant area and surrounding scenarios

在场景搭建和细节处理方面,主要包括模型的地理信息系统(GIS)落图与拼装、建筑材质优化、天气与时间环境特效添加等。为进一步完善数字孪生场景,提升整体展示效果,还对现状一、二期厂区及周边湿地进行了环境模型重建。

③ 虚拟仿真设计与应用

以生化处理构筑物MSBR池为重点开展虚拟仿真应用。一方面,针对池体实际建成和运行效果,添加水体、设备材质,并以设备实时启停数据、曝气量数值驱动设备动态特效,实现工艺构筑物运行状态的虚拟仿真。另一方面,探索将CFD模拟分析结果输出为文本数据,并在三维模型场景中以数据驱动水力流动特效,为实现水力在线仿真积累技术基础。

④ 数字孪生系统开发与运维数据集成

针对像素流开发和管理、运维数据集成,搭建低耦合可复用的系统功能框架。以创新的像素流方案,实现多进程动态可配置管理,全功能模块实时数据动态驱动。针对UE端与前端之间的数据、操作交互需求,梳理API接口清单并编制说明文档,作为功能开发指导依据。

针对洋湖再生水厂各工艺单元及重点设备的数据显示和监控需求,整理SCADA、信息化运营管理系统、视频监控系统变量清单,通过HTTPS方式按照1次/30s的频率进行数据请求,具体对接的数据类型包括以下3类:

- SCADA工控系统的设备、工艺实时运行数据,异常报警数据;
- 信息化运营管理系统的运行监控与统计数据,以及异常处置流程和工单管理接口、资产台账等数据;
- 视频监控系统数据等。

6.3 数字孪生功能模块

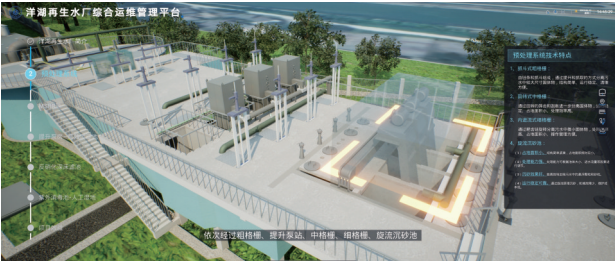
① 数字孪生运行驾驶舱

运行驾驶舱模块见图11。

运行驾驶舱直观展示项目关键运行指标和统计数据,以保障再生水厂稳定生产为目的,对厂区整体范围、各工艺段进行实时在线监控。定制开发全景漫游功能,满足日常接待和宣传需要;接入实时天气数据,实现天气、光照实时模拟,同步虚拟现实环境,具体见图12。



图 11 运行驾驶舱模块:实时运行和统计数据集成
Fig.11 Dashboard module:real-time operations and integrated statistical data



a.厂区工艺全景浏览



b.天气与时间环境特效

图 12 全景浏览功能及厂区环境仿真效果
Fig.12 Panoramic browsing function and plant environment simulation effects

② 生产运行管理

基于BIM模型模拟工艺管道流向,接入管道实时流量数据,以数据驱动管道流动效果。针对各工艺单元、重点设备进行集中监控,及时、准确、全面、直观地掌握设备设施运行状况(见图13)。通过接入设备启停与运行数据(见图14),实时驱动设备动态效果,实现虚实一致。

通过数据请求,在数字孪生场景中集成各运维子系统实时运行数据,用户可通过第一人称视角漫游进行厂区虚拟巡检,实现沿途关键工艺点位、设备运行数据自动弹出查看以及监控视频调用。在地下资产管理方面,基于BIM模型实现管线和设备信息查看,辅助检修定位。

③ 异常监测及报警

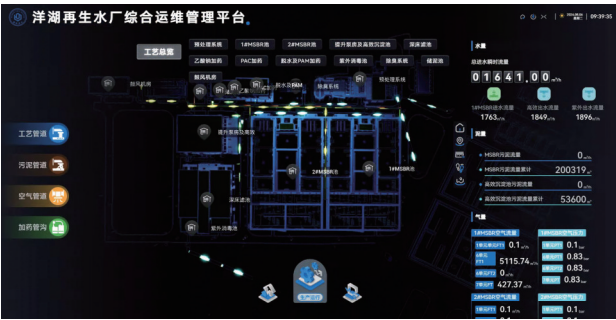


图 13 生产运行模块:工艺管线模拟仿真

Fig.13 Production operations module:process pipeline simulation



图 14 生产运行模块:工艺段关联实时运行和监控数据
Fig.14 Production operations module:process segment linked with real-time operation and monitoring data

集成设备、水质报警信息,并通过工艺单元定位解析,支持在数字孪生场景中自动进行视角快速定位,并支持报警区域历史告警信息汇总查看(见图15)。



图 15 数据监测及异常报警模块工作逻辑

Fig.15 Data monitoring and exception alarm module work logic

进一步结合信息化平台工单系统跳转功能,实现异常事项的全过程闭环管理。

7 应用效益分析

洋湖再生水厂(三期)数字孪生系统于2023年9

月完成部署并投入使用,验证了基于BIM+UE数字孪生系统开发方案的可行性与先进性。经过近一年的运行,主要在以下4个方面产生了明显效益:

① 多源数据集成,数字孪生深度融合日常管理。结合定制开发的三维漫游巡检、第一人称自由巡检功能,集成SCADA、信息化平台、视频监控等多源数据,提升巡检、数据调取查看和抄录效率,将现场需要近1 h的巡视时间缩短至约10 min。

② 发挥数字资产价值,拓展运维管理维度。深度应用竣工BIM资产,实现设计、施工、运维全过程数据流转^[15],通过接入实时运行数据实现动静态信息融合。在确保虚拟和现实空间数据一致性基础上,辅助地下、池内管道和设备等隐蔽资产定位与管理。

③ 提升项目影响力,数字化工作得到高度认可。作为湖南省重点示范项目,解决了信息化平台、智慧工艺系统缺乏展示手段的问题。系统交付以来,先后接待亚洲水务代表团、2023年湖南省污水处理厂厂长培训、国资委数字化调研、湖南省委领导调研等10余个团队(300余人次)现场平台观摩。

④ 打造数字孪生标杆,积极拓展数字化业务。与业主单位联合申报多项国家级、省级数字化奖项及示范案例,各自发挥在工艺设计、软件开发和业务管理方面的优势,联合开展数字化业务对接,已成功获得多项同类型项目数字孪生系统开发服务合同。

8 结论

以BIM+UE为技术核心,打通BIM模型数据处理、基于UE的BIM模型和场景优化、工艺仿真与动效展示、运维数据集成、异常监控报警等关键技术,通过创新的像素流方案,全功能模块由实时数据动态驱动,功能框架插件化、低耦合可复用,形成了集对外展示、数据监控、运营管理为一体的综合性平台产品。但经运行发现,该系统仍存在数字孪生应用场景有限、技术创新为主而仿真应用不足、运营管理需求覆盖尚不全面等问题。未来的完善方向:①更加贴合管理需要,定制巡检内容,在线自动巡检并同步输出结果,智能识别异常数据、实时报警并实现构件级的精确场景定位;②实现基于BIM的构件级设备智能管理,结合设备振动、噪声、温度、

频率等物理监测数据和AI算法,实现异常监控、智能报警和预测性维护;③厂区人员管理与智能安防,实现室内外一体化人员定位、在线健康监测,融合厂区门禁、视频监控、安防管理和数字孪生系统,实现非法停留和越界事件预警;④厂网河湖一体化平台打造,通过“一张图”平台管理,形成覆盖全系统的数据在线监测网络和虚拟仿真系统,真正让数据资产变为知识,并持续产生价值。

参考文献:

- [1] 王浩铭. 数字化技术在水务项目全产业链中的应用研究[J]. 给水排水, 2023, 49(8): 124-128.
WANG H M. Application and research of digital technology in the whole industry chain of water projects [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(8): 124-128(in Chinese).
- [2] 张金松, 李旭, 张炜博, 等. 智慧水务视角下水务数字化转型的挑战与实践[J]. 给水排水, 2021, 47(6): 1-8.
ZHANG J S, LI X, ZHANG W B, et al. Challenges and practice of water digital transformation from the view of smart water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(6): 1-8(in Chinese).
- [3] 龚利民, 林峰, 李震, 等. 基于数字孪生的智慧污水处理厂建设和应用实践[J]. 给水排水, 2023, 49(11): 138-143.
GONG L M, LIN F, LI Z, et al. Smart wastewater treatment plant construction and application based on digital twins [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(11): 138-143(in Chinese).
- [4] 周星宇, 周建光, 姚建明, 等. 基于BIM的高速公路建设管理数字协同应用实践[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(25): 167-170.
ZHOU X Y, ZHOU J G, YAO J M, et al. Practice of digital collaborative application in highway construction management based on BIM [J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(25): 167-170(in Chinese).
- [5] 区永刚. 基于BIM的长距离引水工程智慧运维管理方案研究[J]. 中国建设信息化, 2023(20): 65-69.
OU Y G. Research on intelligent operation and maintenance management scheme of long-distance water diversion project based on BIM [J]. Informatization of China Construction, 2023(20): 65-69(in Chinese).
- [6] 符润泽. 城市轨道交通数字孪生运维管理平台[J]. 现代城市轨道交通, 2023(8): 100-104.

- FU R Z. Urban rail transit digital twin operation and maintenance management platform [J]. Modern Urban Transit, 2023(8):100-104(in Chinese).
- [7] 任晓军. 数字孪生三峡建设与展望[J]. 水利发展研究, 2024, 24(9):9-15.
- REN X J. Digital twin-based Three Gorges development and its prospect [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(9):9-15(in Chinese).
- [8] 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.
- LIANG A P, ZHANG F Q, CAI Y Z, et al. Research and application of digital twin construction management system for water resources projects [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2024 (2): 39-43 (in Chinese).
- [9] 侯毅, 虞鸿, 张冬, 等. 关于数字孪生水利建设中BIM深化应用的思考[J]. 建筑经济, 2023, 44(增刊2): 301-304.
- HOU Y, YU H, ZHANG D, et al. Thoughts on the advanced application of BIM technology in the digital twin of water conservancy industry [J]. Construction Economy, 2023, 44(S2):301-304(in Chinese).
- [10] 袁健. 基于OpenBIM赋能全地下污水厂数字孪生建设[J]. 中国给水排水, 2024, 40(2):70-74.
- YUAN J. Digital twin construction of underground sewage treatment plant assisted by OpenBIM [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(2):70-74(in Chinese).
- [11] 张宁, 邓京楠. 市政污水处理厂改扩建工程BIM技术应用研究[J]. 中国给水排水, 2024, 40(14):79-84.
- ZHANG N, DENG J N. Application of BIM technology in renovation and expansion project of a municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(14):79-84(in Chinese).
- [12] 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.
- JIANG P Q, WU J, LIU H, et al. Research on lightweight technology of digital twin hydraulic engineering based on BIM [J]. Yellow River, 2024, 46(5):133-137, 144(in Chinese).
- [13] 蒋海刚, 凌瑞, 邓益兵. 基于BIM技术的建筑机房数字化巡检系统研发与应用[J]. 土木建筑工程信息技术, 2024, 16(3):99-103.
- JIANG H G, LING R, DENG Y B. Development and application of a BIM-based digital inspection system for building equipment rooms [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2024, 16(3):99-103(in Chinese).
- [14] 李柱, 杨澜, 钱刚. 基于模型驱动实现水厂生产智能调度管理[J]. 中国给水排水, 2023, 39(24): 106-110.
- LI Z, YANG L, QIAN G. Implementation of intelligent scheduling in waterworks based on model-driven [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(24): 106-110(in Chinese).
- [15] 王浩正, 冯宇, 孙文超, 等. 城市排水系统模型综述[J]. 中国给水排水, 2021, 37(22):1-10.
- WANG H Z, FENG Y, SUN W C, et al. Review of urban drainage system models [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(22):1-10(in Chinese).

作者简介:张宁(1991—),男,河南驻马店人,硕士,高级工程师,主要从事BIM技术研究和工程咨询、数字孪生系统研发工作。

E-mail:343013044@qq.com

收稿日期:2024-11-05

修回日期:2024-11-26

(编辑:衣春敏)