

# 数字孪生技术在泵站工程中的应用

包振东<sup>1</sup>, 刘建龙<sup>2</sup>, 胡 锦<sup>1</sup>, 顾 昊<sup>2</sup>

(1. 南京市水利规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210014; 2. 江苏省秦淮河水利工程管理处, 江苏 南京 210022)

**摘要:** 研究数字孪生工程网络构架下的用户交互模式以及可视化引擎渲染技术, 在泵站数据中心化管理体系下, 研究 GIS+BIM+监测数据的数据融合, 形成泵站工程数据底板。基于数据底板以及水利专业模型建设可视化业务管理平台, 实现信息综合管理、智能巡检功能, 并基于降水预报模型以及体积反演逼近法实现泵站联合调度下的积淹模拟, 完成四预应用功能。平台的部署应用提高泵站综合决策管理水平, 为智慧水利建设提供支撑。

**关键词:** 数字孪生; 泵站; 可视化; 管理系统

中图分类号: TV675

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2023)07-0028-0005

## Research on the application of digital twin technology in pumping station engineering

BAO Zhendong<sup>1</sup>, LIU Jianlong<sup>2</sup>, HU Jin<sup>1</sup>, GU Hao<sup>2</sup>

(1. Nanjing Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210014, China;

2. Management Division of Qinhuai River Hydraulic Engineering of Jiangsu Province, Nanjing 210022, China)

**Abstract:** Research the user interaction mode and visualization engine rendering technology under the digital twin engineering network architecture. Under the centralized management system of pump station data, study the data fusion of GIS+BIM+monitoring data to form the pump station engineering data base plate. Based on the data base and water conservancy professional model, a visual business management platform is constructed to achieve comprehensive information management and intelligent inspection functions. Based on the precipitation prediction model and volume inversion approximation method, flood simulation under joint scheduling of pumping stations is achieved, completing the four pre application functions. The deployment and application of the platform improves the comprehensive decision-making and management level of pumping stations, providing support for the construction of smart water conservancy.

**Key words:** digital twin; pumping station; visualization; management system

武定门泵站位于南京市外秦淮河下游, 距三汊河入江口 12.6km, 为双向灌排两用泵站, 是秦淮河流域的主要控制工程之一。工程主要承担南京市城区内秦淮河范围内的防洪、排涝、改善水环境等任务。为贯彻推进智慧水利建设, 赋能泵站工程运维, 本文基于数字孪生技术, 开展数字孪生武定门

泵站工程建设, 实现“统一业务管理信息、提高决策调度智能化水平”。

### 1 数字孪生泵站工程框架

根据数字孪生规划要求, 建设数字孪生泵站工程的信息化基础设施以及数字孪生平台<sup>[1-2]</sup>, 建设架

收稿日期: 2023-05-04

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021068)

作者简介: 包振东(1991—), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为金属结构及 BIM 技术应用。E-mail: 609925703@qq.com

构见图1。本工程中信息化基础设施建设是在已有信息化设施的基础上进行的,根据数字孪生工程建设要求,本工程主要针对泵站工程中泵组、辅机、电气柜、闸门、启闭机、清污机等设备,建设自动化控制、监测体系,完善水雨情信息采集、工程安全监测内容,健全泵站运维巡检、物资管理等信息子系统。

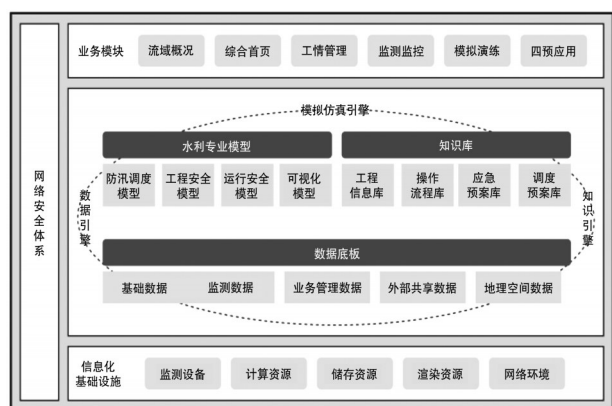


图1 数字孪生泵站建设框架

建设数字孪生平台需要以数据底板作为“算据”支撑,补充完善模型库、知识库,建设数字孪生体,在此基础上使用模拟仿真引擎进行三维仿真渲染,形成可视化的运营业务系统。

### 1.1 网络以及系统平台搭建

数字孪生泵站采用B/S架构C/S架构共存的模式,可通过本地客户端访问或者在浏览器端访问的形式实现数字孪生工程的场景交互,交互模式见图2。将数据底板中地理空间数据封装,于可视化引擎中进行渲染。中台作为数据底板各项数据的扭转中心,通过防火墙、网闸、堡垒机等一系列安全手段保证网络安全与数据获取能力,并通过API请求与交互事件方式实现与可视化引擎的数据同步。

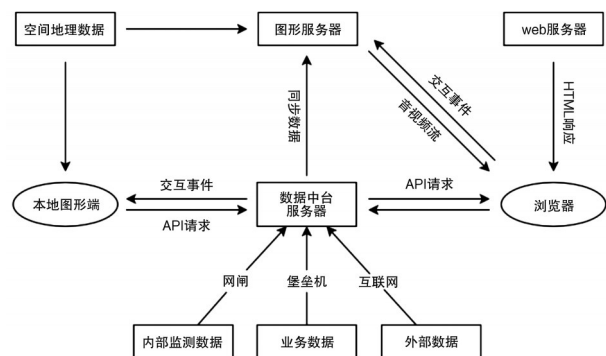


图2 数字孪生场景交互模式

浏览器端用户基于云渲染技术,降低本地配置要求,将负载交给服务器端。具体是将地理空间数据加载至图形服务器,通过图形服务器上的可视化引擎进行渲染;通过web服务器实现系统的网页端加载,并基于信令技术和webRTC技术,实现用户对图形服务的实时交互。

### 1.2 可视化引擎

针对多源、多维、多时空,多分辨率、多坐标系数据,采用数据融合技术与细节层次区分LOD技术对大范围影像、地形、河流、BIM模型、水利专业模型演算结果等进行三维可视化渲染,在不同分辨率等级和视角下采用不同细节来展示同一场景,以提高场景的渲染速度;通过实例化、轻量化、骨架动画等技术,优化BIM模型渲染性能,实现GIS场景下的构件级泵站BIM模型渲染,为工程运行过程的实时状态同步和用户交互打基础。

基于模型对象生命周期技术,完成地理空间数据状态呈现、状态执行的周期性渲染更新,实现物理状态同步以及模拟状态仿真,生命周期见图3。主要分为系统启动、数字孪生空间更新、数字模拟空间更新3个部分。

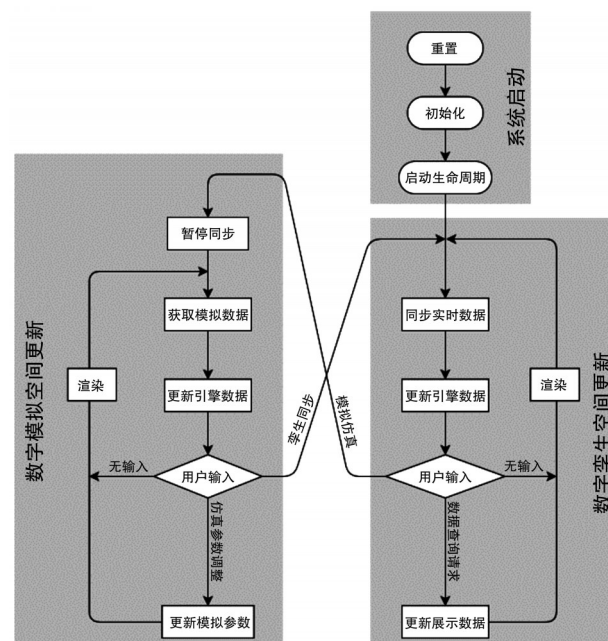


图3 数字孪生可视化引擎生命周期

系统启动过程首先进行模型状态重置,以保证上次引擎运行结束后的状态重置;并对模型状态进行初始化,完成当前时间下与实体工程的状态的初次同步。该过程为可视化引擎数据层面更新变化,并不进行画面渲染。

数字孪生空间更新流程首先获取中台实时状态数据并与可视化引擎数据进行对比,判断实时物理状态变化,并进行数据更新;同时监听用户交互输入,判断并完成输入指令。完成数据更新后,根据当前可视化LOD级别进行可视化渲染,并进入下一个循环生命周期。

当用户需要进行模拟仿真时,进入数字模拟空间更新流程,数字孪生空间实时同步将进入暂停状态,转而进入数字模拟空间,进行该空间的循环生命周期;原本进行同步的实时状态数据,将转变为根据用户输入进行的模拟仿真数据。直到系统接收到结束模拟仿真指令后,结束数字模拟空间生命周期,重新开始数字孪生空间生命周期。

## 2 数据底板搭建

数据底板是构建数字孪生系统的基础,是知识模型、水利模型的“算据”。需要对工程的设计、业务、安全、监测等资料进行调查和梳理,结合四预要求对其进行补充,并采用共享交换的方式接入其他行业数据形成资源池。基于资源池进行数据治理、数据存储、数据管理,从而形成数据底板。

泵站工程数字孪生底板构建内容主要涵盖基础数据、监测数据、业务管理数据、外部共享数据、地理空间数据。其中地理空间数据主要服务于可视化仿真渲染,基础数据、监测数据以及外部共享数据服务于水利专业模型、知识模型,业务管理数据服务于日常管理。

### 2.1 GIS、BIM、监测数据融合

BIM数据是基于工程模型的构件级数据,具有构件全生命周期信息,几何信息精度高,但缺少现实空间定位,数据可视化过程中信息丢失严重,更新困难<sup>[3-4]</sup>。GIS数据是地理空间对象信息数据,具有较成熟的可视化处理手段及更新方法,几何信息与现实空间定位具有映射关系,但对对象信息停留在宏观层面,与对象实体关联度较低<sup>[5]</sup>。监测数据是工程运行指标的标量数据,更新频率稳定数据量大,包含大量可处理信息,但普遍缺乏空间定位概念,无法与几何信息、现实空间定位信息产生关联<sup>[6]</sup>。

平台对地理空间数据进行分析融合,研究GIS数据三维化处理方法以及BIM数据的坐标系转换方式,将多种空间几何数据结构化,形成统一空间坐标系下的三维结构化数据,实现BIM、倾斜摄影、DEM、DOM、水下地形数据的无损接入。以此为基础,赋予监测信息空间属性,实现GIS、BIM、监测数据的集成与融合。BIM数据、GIS数据与监测数据的融合与交换,使得平台在建模质量、仿真精度、决策效率、渲染表达等方面都有着明显的提升。数据融合成果如图4所示。

### 2.2 数据中心化统一管理

武定门泵站实体工程已经投入运行多年,已有多套投入使用的信息化基础设施和管理系统,但这些设施和管理系统之间大多独立运作,信息孤岛效应显著,存在大量的信息冗余。在数据底板建设过

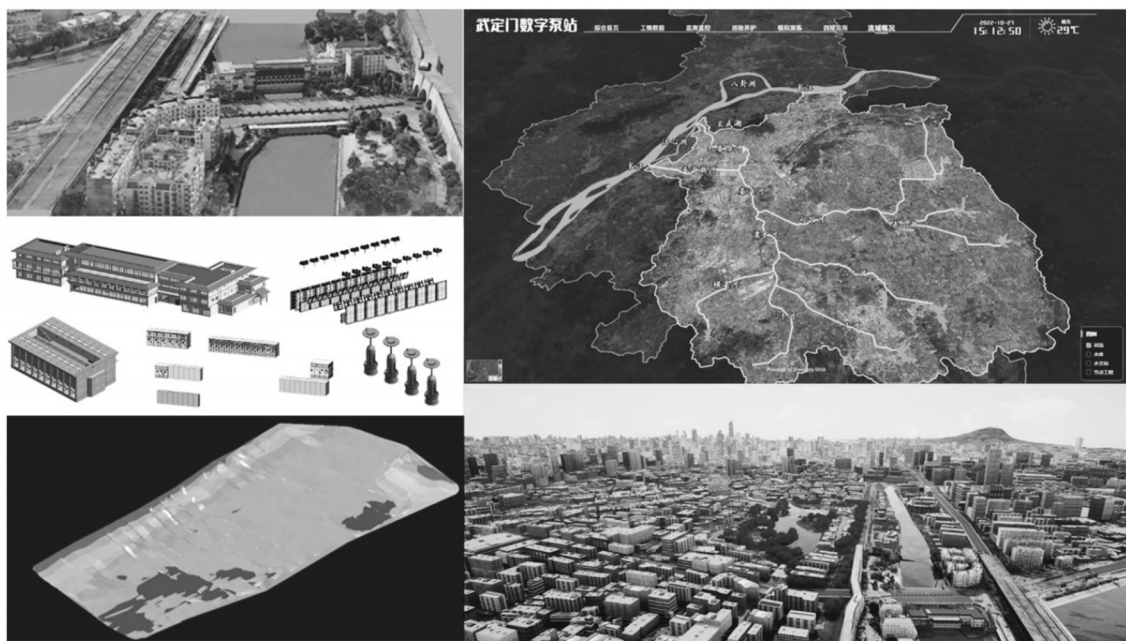


图4 数据底板融合



程中需要统筹考虑原有与新建内容的管理,在保证本地数据完整统一的基础上,还需保证外部共享数据接入后的数据统一性,以及未来新增数据体系的兼容性。

泵站工程数据主要分为基础数据、水雨情数据、工情监测数据、业务数据。首先要对数据进行标准化处理,其中水雨情、工情、物资、监测、巡检、预报等结构化数据,由于数据分辨率、时相、格式等标准不统一,存在各种冲突,需要通过字段映射、空间叠加、人工核实等方式进行融合处理。在此基础上与空间数据进行一致性处理,需要考虑空间数据与业务数据的关联融合,包括统一对象编码和统一接口、属性挂接、拓扑关系建立和空间关系挂接等。工程中,监控、图档资料等非结构化数据,种类繁多,难以使用。可依据数据内容进行分类,基于智能识别算法识别其中信息,将部分非结构化数据转化为结构化数据进行储存,赋予映射关系。这类数据可为知识库提供依据,实现快速调用查看。

现有数据存在于多个子系统,系统之间数据独

立性较高,常规业务模式采用点对点数据互通或者通过API的方式交互数据,数据对接级别为 $N \times (N-1)$ 。新的业务系统的接入存在极大的开发维护成本。本工程采用中心式数据中台架构对原有业务系统结构进行重新梳理,提供数据汇聚服务从 $N \times (N-1)$ 的对接模式简化为 $N \times 1$ 的对接模式,结合数据标准化处理模式,可大大提高数据结构化程度以及储存能力,提高了数据对接效率。

数据中台模式为数字孪生系统的大数据量、高并发数、高算力等需求提供可靠的数据基础保障。

### 3 可视化业务平台

依托数据底板以及水利专业模型,基于可视化引擎进行呈现,搭建数字孪生可视化平台。该平台主要实现综合信息管理、智能巡检以及四预相关应用。

#### 3.1 综合信息管理

平台基于数据底板提供的各类数据,通过三维可视化场景,实现综合信息展示、查看、查询等功能(见图5)。



(a)综合信息展示



(b)综合信息查看、查询

图5 综合信息管理功能

基于水雨情数据,真实反映泵站周边实时水位和天气的变化情况。区别于传统数值显示模式,可更加清晰地展现不同水位下泵站周边淹没情况,对防汛决策有着巨大的帮助。

基于工情数据,直观反映泵站各专业设备的布局及各工艺环节的三维状态;区别于传统一张图的展示方式,采用透视模式、自发光模式、剖切模式等三维场景独有的显示模式直观反映泵站主要设备运行状态,结合UI界面数值显示,可定性、定量地观察到整个泵站的运行状态以及主要设备运行状态。采用区域展示、点击交互、列表聚焦等展示形式,直观快捷查看设备信息。

统计分析泵站运维调度数据,了解泵站历年的

调度水量、年度运行日历、调度任务运行记录,以及本年度调水任务过程中各机组运行、停机情况,调度周期内流量、水位变化情况。对机组运行状况进行分析,统计年、月、日泵运行时长。结合水文站抽排量,分析各机组运行效率,通过图表直观反映机组抽排水量。根据机组运行过程中三相电流、三相电压、功率、温度等数据分析单台机组开机过程,评价机组运行状态。

对闸门及启闭机运行状态分析,统计启闭机运行时长、开关机时间、闸门故障情况和保养记录,还可实时反映启闭机运行数据。

#### 3.2 智能巡检

结合工程采用智能巡检系统,通过物联网设备

和RFID芯片的应用,实现巡检任务的快速执行和问题反馈。平台基于三维可视化场景,采用动态场景追踪以及监控追踪的模式,直观反映巡检进度、故障及设备异常情况,通过模型交互查看巡检点位的详细信息,追溯过往历史巡检结果,综合分析故障原因并快速诊断。

对历史数据进行综合分析,统计巡检到位率、结果正常率、设备故障率,同时统计年度异常次数以及异常平均解决时间,通过图表综合显示历史巡检结果。针对巡检任务统计巡检时间、巡检人、检查数等基本信息,分区域统计巡检结果,通过孪生工程逐区域展示巡检点巡检结果,并通过用户交互或列表方式进一步聚焦查看巡检点具体信息。

### 3.3 四预应用

在城市排涝调度过程中,往往需要根据预报降水量安排泵站联合排涝。基于数字孪生数据底板进行淹没调度模拟,可有效提高各泵站开机调度运行效率,避免排涝能力不足导致的城市积淹和排涝能力过剩水位过低导致的生态影响和能源浪费。

系统基于联排区域泵站调度情况以及孪生空间数据底板构建南京城区范围内4座泵站(武定门泵站、铁窗棂泵站、西水关泵站、象房村泵站)联合排涝调度模型,将数据底板转化为栅格化高程点,采用体积反演逼近方法分析计算淹没情况。

$$f(H) = Q - V_{\text{淹没}} = Q - \sum_{i=1}^n s(H - H_i) \quad (1)$$

式中: $Q$ 为降水总量, $\text{m}^3$ ;  $V_{\text{淹没}}$ 为淹没高程下的总淹水量, $\text{m}^3$ ;  $H$ 为淹没水位高程, $\text{m}$ ;  $i$ 为栅格化网格区域索引;  $H_i$ 为栅格区域地表平均高程, $\text{m}$ 。

根据南京市城管局修订的适合南京本地降雨过程的暴雨强度公式,如公式(2)、公式(3),模拟不同强度降雨和各泵站不同开机流量下,区域内积淹水与排水情况,对区域内易积淹点积淹情况进行分析预警以及淹没推演。

$$i = \frac{64.300 + 53.800 \lg P}{(t + 32.900)^{1.011}} \quad (2)$$

$$q = \frac{10\,716.700(1 + 0.837 \lg P)}{(t + 32.900)^{1.011}} \quad (3)$$

式中: $i$ 为暴雨强度, $\text{mm}/\text{min}$ ;  $t$ 为降雨历时, $\text{min}$ ;  $P$ 为重现期;  $q$ 为暴雨强度, $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)$ 。

平台将多种模拟预案与历史排涝调度方案进行对比模拟,为联合调度方案的制定和防洪决策提供有效的参考,提高决策质量和效率。在工程安全模型方面,建立武定门泵站工程健康评价指标体系,将武定门泵站工程的健康状态分级,建立预测模型,选择科学的方法确定诊断结果。

## 4 结 语

武定门数字孪生泵站的实施,提供了数字孪生泵站工程框架搭建的基本思路,建设了完整的泵站工程数据底板,实现了运管信息的可视化综合管理,实现水工程联合调度模拟预演以及防洪联合调度预案的生成,为武定门泵站工程充分发挥水工程防洪减灾效益提供支撑。

### 参考文献:

- [1] 高英,赵亚永,屈志刚,等. 基于BIM的数字综合管理系统在穿黄工程运维中的应用[J]. 人民黄河,2022,44(4): 157-160.
- [2] 陈述,纪勤,陈云,等. 基于知识图谱的智慧水利研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3): 143-153.
- [3] 孙源,王国光,赵杏英,等. BIM模型轻量化技术研究与实现[J]. 人民长江,2021,52(12): 229-235.
- [4] 饶小康,马瑞,张力,等. 基于GIS+BIM+IoT数字孪生的堤防工程安全管理平台研究[J]. 中国农村水利水电,2022(1): 1-7.
- [5] 华陆韬,朱灿,薛苍松,等. 基于BIM+GIS技术的水利工程数字孪生系统应用研究[J]. 浙江水利科技,2022,50(6): 14-17.
- [6] 叶宏,孙勇,阎峻,等. 数字孪生智能抽水蓄能电站研究及其检修应用[J]. 水电能源科学,2022,40(6): 201-206.