

基于三维可视化技术的 区域河闸结构监测与防洪预警系统研究

柏军¹, 周正燊², 王扬志¹

(1. 常州市水利规划设计院有限公司, 江苏 常州 213000;

2. 湖州南太湖水利水电勘测设计院有限公司无锡分公司, 江苏 无锡 214000)

摘要:针对当前河闸结构监测技术和防洪智能分析能力较弱等问题,利用水利建筑信息模型和地理信息系统技术,开发了区域河闸结构监测与防洪预警系统的三维可视化技术。以常州市小坝河闸为例,使用多数据库架构对象关系映射框架,构建了支持多种数据库的体系,实现了河闸工程的三维可视化与防洪预警功能。结果表明,设计方法应用于小坝河河闸改造工程,构建了高精度的三维模型,实现了闸站运行的动态模拟和调度优化,提高了设计精度和管理效率。

关键词:BIM技术; 调度模拟; 水利工程; 小坝河闸站; 常州市

中图分类号:TV93 文献标识码:A 文章编号:1007-7839(2024)10-0062-0004

Research on regional river sluice structure monitoring and flood control early warning system based on 3D visualization technology

BO Jun¹, ZHOU Zhengshen², WANG Yangzhi¹

(1. Changzhou Water Resources Planning and Design Institute Co., Ltd., Changzhou 213000, China;

2. Wuxi Branch of Huzhou South Taihu Lake Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd., Wuxi 214000, China)

Abstract: In response to the weak monitoring technology and flood control intelligent analysis capability of current river gate structures, a three-dimensional visualization technology for regional river gate structure monitoring and flood control warning system has been developed using water conservancy building information model and geographic information system technology. Taking Xiaoba River Sluice in Changzhou City as an example, a multi-database architecture object relationship mapping framework was used to construct a system that supports multiple databases, achieving 3D visualization and flood warning functions for the river sluice project. The results indicate that the design method was applied to the renovation project of Xiaoba River Sluice, constructing a high-precision 3D model, achieving dynamic simulation and scheduling optimization of the sluice station operation, and improving design accuracy and management efficiency.

Key words: BIM technology; scheduling simulation; water conservancy engineering; Xiaoba River Sluice Station; Changzhou City

收稿日期: 2024-07-21

基金项目: 广东省区域联合基金(2022A1515110200)

作者简介: 柏军(1990—),男,工程师,主要从事水利规划设计研究工作。E-mail: bj0414@126.com

拦河闸是水利系统防洪的重要组成部分,是完善防洪除涝工程体系,保护区域生态环境和保障经济社会稳定发展的坚实基础。拦河闸结构健康监测(SHM)在近年受到了广泛关注。Michael Theiler^[1]将SHM定义为“实施损伤识别策略的过程”,即通过收集和分析数据了解结构状况并发现异常。SHM成功实施取决于传感器类型和定位设计、数据采集系统、控制器和电缆等复杂因素。这些因素受监测目标、基础设施结构行为和待测量数量的制约。在建筑、工程和施工(AEC)行业中,建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)作为一种信息技术,对提高项目成功率起到了关键作用,可以通过更低的成本实现更快的工程交付,从而提高生产力^[2-3]。BIM的优势在于三维模型中存储的信息清晰且易于访问,随着时间的推移,这些信息在建筑设计、信息交换、项目管理、标准验证和合规性、竣工数据和技术管理等多个领域产生了积极影响。

本研究依托江苏省常州市郑陆镇小坝河闸站改造工程,探索BIM在成功设计和设置SHM系统方面的能力,为SHM系统调试阶段的优化和验证提供了一种全面的方法。结合GIS功能,开发了区域河闸结构监测与防洪预警系统的三维可视化技术。利用该技术模拟闸站运行调度情况,计算小坝河闸站的特征水位及设计参数,为改变河网水系面貌,恢复、强化河道的防洪除涝功能提供技术支持和参考。

1 研究区现状

郑陆镇位于常州市东北部,该区域全为抽排区,区域内有内河横河、竖河、朝阳河及小坝河,外河北塘河从区域的南部穿过,芦浦港从区域东部穿过。现有排涝动力:新丰排涝站,设计流量 $4\text{ m}^3/\text{s}$,排入北塘河;联圩排涝站,设计流量 $4\text{ m}^3/\text{s}$,外排芦浦港;梅沟泵站,设计流量为 $2\text{ m}^3/\text{s}$,排入北塘河;近昌圩排涝站,设计流量 $1.18\text{ m}^3/\text{s}$,排入北塘河。小坝河长期未拓宽,过水流量不足。羌家泵站和节制闸设施年代久远,防洪排涝能力严重下降,面对社会经济快速发展的需求,现有排涝设施能力不足。基于此,本文采用BIM技术对小坝河闸站进行三维建模和运行调度优化,通过河闸改造,增强小坝河外排芦浦港的能力,保障城市安全。

2 系统框架设计与三维可视化

2.1 基于BIM与GIS的系统架构

BIM集成了时间、成本和设施管理等多个维度

的信息。工程师、施工人员、业主和管理人员可以通过BIM更有效地沟通和协作,提高项目的效率、质量和可持续性。BIM技术支持项目各阶段的协同设计和分析,发现和解决潜在问题。设计阶段,BIM提升设计精度和效率,减少错误和遗漏;施工阶段,优化施工计划、减少材料浪费和安全风险;管理阶段,提供详细建筑信息,支持设施维护和管理^[4-5]。在采用BIM技术的基础上,以GIS地图为底图,通过投影构建三维场景,将河闸的结构、地理位置及相关防洪数据可视化呈现,形成一体化的预警系统,其总体框架包含了基础设施、相关数据、系统支撑及业务推广组成,总体框架如图1所示。

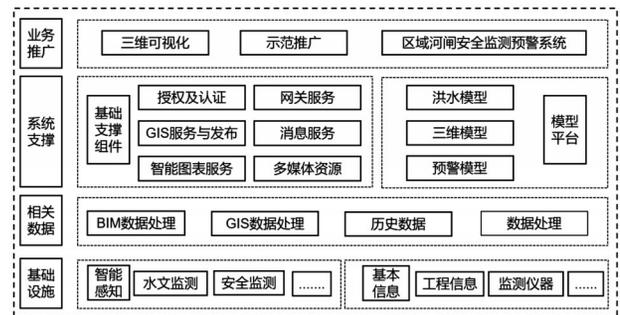


图1 研究区范围

(1) 基础设施

硬件设备:用于数据采集和传输的传感器、监测设备、服务器以及用于存储和处理数据的计算机硬件;网络设施:保证数据在各个系统组件之间流动的网络连接,包括局域网(LAN)、广域网(WAN)及相关的通信协议;平台基础:用于支撑系统运行的技术平台,包括数据库管理系统(DBMS)、操作系统、云计算平台等。

(2) 相关数据

监测数据:来自传感器和监测设备的实时数据,包括水位、流量、降雨量、气象数据等;历史数据:过往的河道水位、流量记录、降雨情况等,用于趋势分析和预测;GIS数据:地理信息系统数据,包括地形图、地质图、土地利用图等,用于空间分析和可视化;BIM数据:建筑信息模型中的结构数据、设计图纸、施工信息等,用于建模和模拟。

(3) 系统支撑

数据处理工具:用于数据清洗、存储、分析和可视化的软件工具,例如数据分析平台、数据挖掘工具等;模拟和分析软件:用于创建三维模型、模拟河闸运行、进行风险评估和优化的工具,包括BIM

软件、GIS软件;预警系统:实时监测和分析数据,及时发出预警的系统模块,包括报警机制、通知系统等。

(4)业务推广

安全监测:对水闸运行状态的监测和安全评估,及时发现并处理潜在问题;**防洪预警:**基于实时数据和历史数据分析,提供防洪预警信息和决策制定;**运营管理:**对河闸的运行调度、维护和管理,优化资源配置和提高运行效率;**决策支持:**综合分析报告和建议,辅助决策者进行规划、设计和应急响应。

2.2 三维可视化模型

小坝河闸站的三维建模包括主体结构和附属结构,具体流程如图2所示。主体和附属结构的建模方法基本相同,先依据结构族创建主体实体模型,再根据具体结构形式对实体进行开洞处理。最后,将门、窗等族和出入口模型嵌套。水泵房内部设备如水泵、电机、阀门等也以族形式建模,并精确放置于相应位置。模型考虑设备的运行状态及影响因素,如水泵的流量、扬程、效率,电机的功率、转速,以及阀门的状态等。根据设计要求进行水泵房的防水、防潮处理,确保模型准确性。完成水泵房建模后,继续建模其他附属结构如配电房、控制室、检修间等。所有附属结构与主体结构组合,形成完整的闸站三维模型。小坝河闸站三维模型如图3所示。

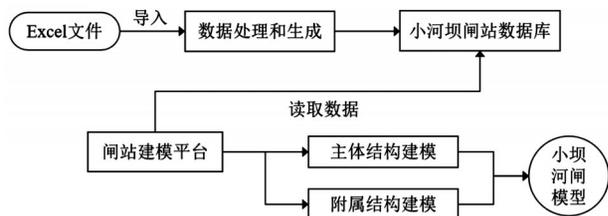


图2 小坝河闸站三维建模流程

3 河闸三维建模系统应用

3.1 小坝河闸站设计参数

根据1950—2016年间的常州站洪水位数据,采用年最大值法独立选样,并以P-Ⅲ型曲线进行经验频率计算,得到:泵站进水池的设计运行水位为3.30 m,最高运行水位为3.60 m,最低运行水位为3.00 m。泵站出水池的校核洪水位为5.95 m(200年一遇),设计洪水位为5.80 m(100年一遇),设计运行水位为5.20 m(10年一遇),最高运行水位为

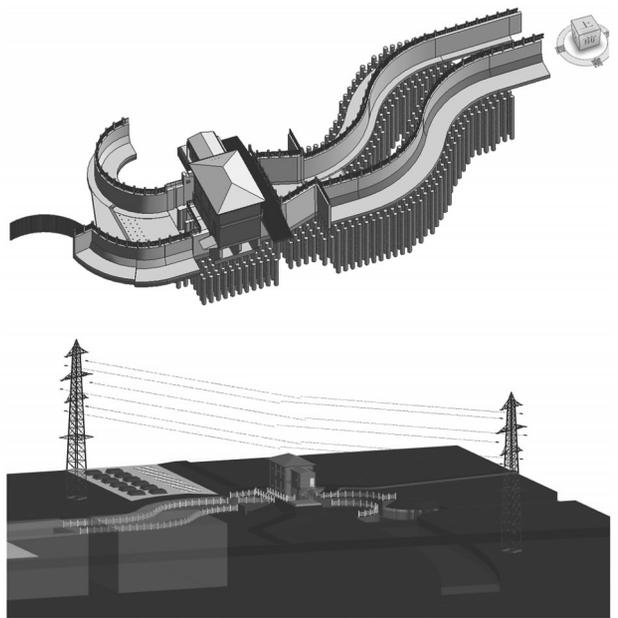


图3 小坝河闸站三维模型及全局可视化

5.80 m(100年一遇)。详细的工程特征水位数据,见表1。

小坝河闸站开通闸时,类似平底宽顶堰,堰顶高程1.0 m。根据《水闸设计规范》(SL256—2016)规定,水闸过流能力计算中,当堰流处于高淹没度($h_s/H_0 \geq 0.9$)时,按下式计算:

$$B_0 = \frac{Q}{\mu_0 h_s \sqrt{2g(h_0 - h_s)}} \quad (1)$$

$$\text{其中, } \mu_0 = 0.877 + \left(\frac{h_s}{H_0} - 0.65 \right)^2$$

式中: μ_0 为淹没堰流的综合流量系数。开通闸时,节制闸过流能力:正常蓄水位条件下过闸落差5~10 cm,闸下为常水位3.41 m,闸上水位3.46~3.51 m,闸孔敞开宽度4 m。计算结果见表2。

3.2 小坝河闸站三维建模与运行调度

采用C#编程语言,结合RevitAPI和Unity平台的二次开发技术,构建了小坝河闸站模型系统。系统集成三维漫游、空间量算、监控预警和鸟瞰图等模块,实现了小坝河闸站的快速生成和系统集成。三维漫游功能允许用户多角度观察和分析闸站构造和运行情况;空间计量功能提供精确的空间测量工具,支持工程设计和施工;监控预警功能实时监测关键运行参数,及时预警和应对异常情况;鸟瞰图功能提供宏观视角,全面展示小坝河闸站的布局和周边环境。小坝河闸站系统的施工推演如图4所示。

BIM施工推演展示了建筑工程的全貌和施工

表1 小坝河闸改造工程特征水位

序号	特征水位	水位值/m	备注
1	外河侧防洪校核水位	5.95	200年一遇洪水位
2	外河侧防洪设计及最高运行水位	5.80	100年一遇洪水位
3	外河侧设计运行水位	5.20	10年一遇洪水位
4	内河侧最高水位	3.60	内河控制最高水位
5	内河侧设计水位	3.30	泵站起抽水位
6	内河侧最低运行水位	3.00	泵站停机水位

表2 敞开的过流能力计算成果

水位组合/m		过闸落差/cm	闸孔净宽/m	流量系数 μ_0	过流能力/(m^3/s)	备注
上游	下游					
3.46	3.41	5	4	0.985	9.40	常水位条件下的过流能力计算
3.51	3.41	10	4	0.973	13.13	

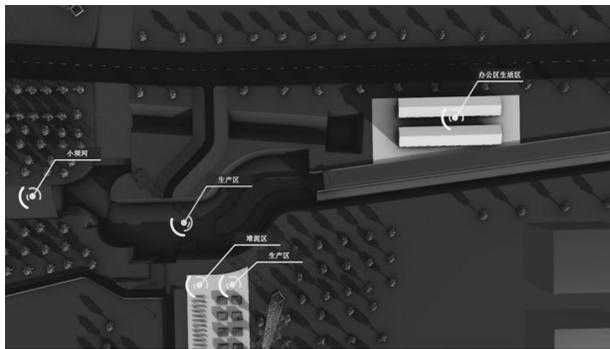


图4 小坝河闸站系统的施工推演

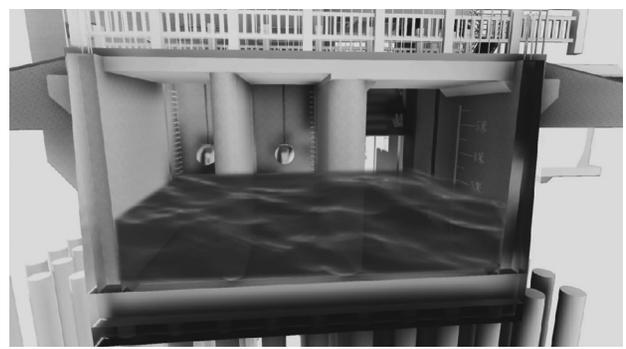


图5 小坝河闸站运行调度模拟

过程。通过三维建模技术,可以清晰地看到建筑物的结构、布局和施工顺序。推演过程中的每一个步骤都被精确模拟,从基础施工到主体结构的搭建,再到装修和机电安装,每一个细节都被精确把控。这样的推演有助于工程师提前发现潜在的问题和冲突,从而优化施工方案,提高施工效率和质量。而图5所展示的跨汛施工模拟,则强调了工程在特殊环境条件下的施工挑战。在汛期,水位上升、水流湍急,给施工带来了极大的不便和 risk。通过模拟施工过程,系统可以评估施工方案的可行性,预测可能遇到的问题,并制定相应的应对措施。

小坝河闸站的运行调度模拟见图5,考虑闸站工程功能要求,满足工程安全运行需要,按照设计规范相关要求,进行稳定水位组合计算。非汛期,利用外河水位低于内河水位的条件,灵活调度闸门,进行内河水质调换,这种调度方式不仅有利于改善

内河水质,还能为内河生态系统提供必要的支持。而在汛期,小坝河闸站的运行调度则更加复杂。当芦浦港水位达到小坝河起调水位并有继续上涨趋势时,闸站会及时关闸开泵,以降低内河水位。这一过程中,闸站会严格控制内河水位不超过最高控制水位,以确保内河区域的防洪安全。当分片内河水位下降到最低控制水位时,抽排工作会停止,以避免对内河生态环境造成不必要的影响。相反,当芦浦港水位低于小坝河起调水位并有继续降落趋势时,闸站会适时打开闸门,以维持内河与外河之间的水位平衡。此外,小坝河闸站在平水期也会进行节制闸的启闭操作,合理调整闸门的开启程度,以达到优化水资源利用的目的。在防渗方面,小坝河闸站选择了水位差最大的组合作为防渗水位组合。这样做的原因是,在最大水位差下,闸站的防渗能力能够得到最有效的检验和提升。根据计算

(下转第72页)

500 mg/L逐步升高至1 000 mg/L才能达到适宜的脱水固结效果,PAC/CPAM和PAC/CS也呈现相同的规律。从效果来看,对于底泥中有机质含量增加,PAC/APAM的泥饼含水率和过滤比阻受其影响程度最小。

参考文献:

- [1] 毕磊,邱凌峰. 污染底泥修复治理技术[J]. 中国环保产业,2010(11):32-35.
- [2] YUKE W, TIANCAI C, JINGGAN S, et al. Experimental study on static characteristics of the Yellow River silt under (triaxial) consolidated undrained conditions [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2023, 41(3): 285-294.
- [3] YUKE W, GAN W, YUKUAI W, et al. Recycling of dredged river silt reinforced by an eco-friendly technology as microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP) [J]. Soils and Foundations, 2022, 62(6): 1012-1016.
- [4] 杨磊. 絮凝体系用于环保疏浚底泥脱水及其温度干扰机理研究[D]. 天津:天津科技大学,2020.
- [5] YANG R, LI H, HUANG M, et al. A review on chitosan-based flocculants and their applications in water treatment [J]. Water Research, 2016(95):59-89.
- [6] 王郑,仲米贵,黄雷,等. 聚合氯化铝-壳聚糖复合絮凝剂对活性蓝19的脱色研究[J]. 工业水处理,2017,37(9):21-25.
- [7] 郭康鹰. 造纸污泥基有机高分子絮凝剂制备、效能及作用机制研究[D]. 济南:山东大学,2021.

(上接第65页)

结果,最大水位差为2.95 m,这意味着在正常运行情况下,闸站能够抵御2.95 m的水位差而不发生渗漏。

4 结 论

本文针对河闸安全监测可视化程度不足及防洪预警分析能力不够的问题,设计了河闸安全监测分析预警系统的总体框架和技术架构。文章深入剖析了网关服务结构和处理机制,构建了三维可视化的实现方法和流程,并基于BIM+GIS技术研发了区域河闸安全监测分析预警系统。研究表明,BIM联合GIS技术通过数字化手段将水利设施建设的各阶段(设计、施工、运营维护)紧密联结,提供三维可视化的工作环境,设计方案直观、施工流程清晰、资源管理高效。BIM技术强化了各方协作与沟通,减少信息孤岛,提升整体工作效率。然而,BIM技术在水利设计中还需克服技术培训门槛高、技术推广难

度大等难题。

参考文献:

- [1] THEILER M, SMARSLY K. IFC Monitor—An IFC schema extension for modeling structural health monitoring systems [J]. Advanced Engineering Informatics, 2018(37):54-65.
- [2] Ahn H Y, KWAK H Y, SUK J S. Contractors' transformation strategies for adopting building information modeling [J]. Journal of Management in Engineering, 2015, 32(1):5-6.
- [3] BRYDE D, BROQUETAS M, VOLM M J. The project benefits of Building Information Modelling (BIM) [J]. International Journal of Project Management, 2013, 31(7): 971-980.
- [4] 刘懿韬. BIM技术发展及其在水利工程中的应用[J]. 水利规划与设计,2019(10):64-66,132.
- [5] 蔡佳含. BIM技术在建筑工程项目成本管理应用中的影响因素研究[D]. 重庆:重庆大学,2022.