

数字孪生三江平原涝区管理平台构建与应用

刘永强,张 钰,孙昊聪

(河海大学水利水电学院)

摘要:针对当前农田涝区管理水平落后、智慧化程度不高等问题,基于农田涝区主要业务需求分析,以物理涝区为单元、业务应用为牵引,提出了基于数字孪生的涝区管理平台框架。运用 BIM+GIS、物联网、无人机倾斜摄影等技术,研究了涝区数字化、可视化场景的构建方法,搭建了涝区三级地理空间数据底板,建立了包含感知设备层、平台支撑层、业务应用层及用户交互层的平台架构,并开发了涝区一张图、智慧防汛、维护保养等功能模块。三江平原 A 农田涝区应用验证结果表明,基于该框架搭建的数字孪生涝区管理平台实现了防洪“四预”、农田排涝与维护保养等功能,提升了涝区管理的科学性与信息化水平,验证了平台框架设计的合理性与关键技术应用的可行性,可为数字孪生技术在涝区管理领域的应用提供参考。

关键词:数字孪生;涝区管理;智慧水利;管理平台;三江平原

Construction and application of a digital twin-based management platform for waterlogged area in the Sanjiang Plain//Liu Yongqiang, Zhang Yu, Sun Haocong (*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University*)

Abstract: To address the problems of outdated management levels and low degree of intelligence in current waterlogged farmland areas, a digital twin-based management platform framework for waterlogged areas is proposed based on an analysis of key business requirements, taking physical waterlogged areas as units and business applications as driving forces. Using BIM+GIS, the Internet of Things (IoT) and UAV oblique photogrammetry, methods for constructing digital and visualized scenarios of waterlogged areas are developed. A three-level geospatial data foundation is established, a platform architecture consisting of sensing device layer, platform support layer, business application layer and user interaction layer is designed, and functional modules including a unified map of the waterlogged area, intelligent flood control and maintenance management are developed. A case study conducted in a waterlogged farmland area of the Sanjiang Plain shows that the proposed digital twin-based management platform realizes functions such as four pre-measures (forecasting, early warning, rehearsing, pre-planning) for flood control, farmland drainage and maintenance management, and improves the scientific and informatization levels of waterlogged area management, validating the rationality of the platform framework design and the feasibility of key technologies. This study provides a reference for the application of digital twin technology in waterlogged area management.

Key words: digital twin; waterlogged area management; smart water conservancy; management platform; the Sanjiang Plain

数字孪生^[1-3]指通过多学科交叉、多物理量、多维多尺度的仿真过程,借助数字化手段构建虚拟环境下与实体等价的数字模型,实现对物理世界的动态映射和智能模拟。近年来,水利部先后发布《关于“十四五”期间大力推进智慧水利建设的指导意见》《智慧水利建设顶层设计》《数字孪生流域建设技术大纲(试行)》《数字孪生水利工程建设技术导则(试行)》《水利业务“四预”功能基本技术要求(试行)》《数字孪生灌区建设技术指南(试行)》等

指导文件和技术要求,明确提出构建“智慧水利”体系,发挥数字孪生动态映射功能,推动新阶段水利高质量发展。已有学者对数字孪生技术在水利领域的研究与应用开展了大量探索,如王万祯等^[4]从多角度探讨了石羊河数字孪生流域建设实施内容;谢崇宝等^[5]提出了现代化数字灌区的主要业务应用结构体系及主体功能;肖宏宇等^[6]集成物联网、数字孪生、水利模型与灌区水资源调度技术,探索了灌区动态感知体系与水资源调度仿真模拟,实现了水资

源可视化管理和智慧决策;边晓南等^[7]基于德州市水资源现状,提出了水资源数字孪生三维模型框架,探讨了虚实体交互、数据服务平台及数字孪生互联互通等技术的可行性,促进水资源信息化管理水平的提升;贺挺等^[8]提出了基于组件技术的模型管理方式及基于云工作流的模型搭建方法,推进数字孪生流域模型平台建设;韩鹏等^[9]利用物联网、大数据、BIM+GIS 等技术构建了全景式数字孪生调水管理系统,提升了调水工程建设、调度运行及智慧管理的信息化水平;赵菲等^[10]利用卫星通导遥融合技术构建了新型水利信息系统,实现了数字孪生水库“四预”(预报、预警、预演、预案)功能。此外,数字孪生黄河^[11]、数字孪生长江^[12]、数字孪生珠江^[13]、数字孪生小流域^[14]等的建设应运而生,掀起了数字孪生水利建设的热潮。然而,当前针对数字孪生涝区的框架结构及关键技术研究尚显不足,尤其是关于数字孪生农田涝区的业务需求与应用模式,亟须开展系统性研究。

数字孪生农田涝区以物理涝区为单元、数据资源为底座、模型库为核心、知识库为驱动,基于 GIS、BIM、物联网等技术,结合作物特性实现农田排涝、防洪“四预”及维护保养功能的信息化管理。农田涝区的形成与水文、气象、地形、地貌及排水条件密切相关,通常山区谷底以渍害为主,平原坡地则易发生涝灾。松辽流域三江平原作为典型农田涝区,涵盖平原坡地、平原洼地及沼泽湿地等多种类型,并担负黑龙江省产粮重任,构建其数字孪生系统具有重要意义。因此,本文选取三江平原 A 农田涝区为研究对象,以“需求牵引”为出发点、以“提升能力”为落脚点,构建一套基于数字孪生的涝区管理平台架构体系,并开发数字孪生涝区管理平台,以期数字孪生技术在农田涝区管理中的应用提供参考。

1 典型涝区概况及管理业务分析

1.1 典型涝区概况

A 涝区位于三江平原中东部,行政隶属于黑龙江省鸡西市,地理坐标为 45°43′32″N~46°11′03″N、132°45′43″E~133°40′28″E。作为三江平原重要产粮基地,该区域地势自西北向东南倾斜,闭流洼地较多。受台风、热对流及地形影响,区域年平均降水量约为 559.3 mm,7 月下旬至 8 月中旬暴雨频发,洪水紧随暴雨,峰型急涨缓落,加重了平原低洼地的洪涝灾情。该地区自建国起共发生洪涝灾害近 30 次,排泄不及时致使大面积耕地受涝。目前,该涝区控制面积达 358.14 万 hm²,其中耕地面积为 244.52 万 hm²,易涝面积为 241.52 万 hm²,严重影响粮食生产安全。

2011 年中央一号文件《关于加快水利改革发展的决定》指出,要加快农田水利设施建设,重视农田易涝地区的治理,强调在发展农田灌溉的同时应解决现有农田的防洪治涝问题,构建防灾减灾建设与管理的保障体系,并以信息化管理为长远目标,这为本文应用数字孪生等信息化技术解决该区域涝灾管理问题提供了政策导向。

目前,A 涝区现有的治涝骨干工程包括排水渠道 19 条、排水涵洞 9 座、分水闸 32 座、涵闸 18 座、渡槽 4 座、退水闸 2 座、排水泵站 1 座等。田间工程采用斗渠、斗沟东西向布置,间距 500~800 m,沟渠之间设有道路和林带;农渠间距 100 m,与农沟相间布置,农渠与相邻农沟间距 50 m。

1.2 涝区管理业务分析

A 涝区现有的管理模式为传统人工巡检,已无法满足现代化管理需求。因此,在加强涝区排干清淤、工程扩建的同时,应从涝区实际管理需求出发,基于涝区现状条件,围绕治涝与除涝主题,以监测数据为基础,将涝区管理聚焦于农田排涝、防洪“四预”及维护保养等业务,为数字孪生涝区管理平台的搭建提供思路。

a. 数据监测主要包括水位监测、流量监测、降雨监测和视频监控。结合三江平原 A 涝区地形特征,利用高精度地形图、历史洪水数据及水文测站信息,将易积水的低洼地段、水闸、泵站等排水设施进出水口、关键排干汇入口等影响洪水或积水分布的节点作为涝区关键监测点,通过布设传感设备获取水位、流量、流速、雨量等要素信息,实现对主要积水区域和排水节点的全面有效覆盖。例如,利用水位计对涵闸、开敞式闸的闸前水位、强排站进水池水位及穿堤涵闸的出口水位进行实时监测,以分析其排水能力;在排干汇入承泄区口处布置标准监测断面,利用流量计监测泵闸出口、渠道口、干支流沟渠的水流流速并评估流量负荷,防止水流积聚;借助雨量计分析降雨强度和密度。各节点共同组成涝区全方位监测感控体系,为后续农田排涝、防洪“四预”等业务提供数据支撑。

b. 农田排涝针对作物生长期的内涝积水进行清排,将实时监测的积水深度、作物受淹情况和设施运行状态作为变量,以积水深度最小化、作物损失最小化、设备利用最大化为目标函数,以监测区域内积水深度、排水设施流量、作物受涝面积、排水模数、排涝设施运行状态为约束条件,通过权重分配计算区域排水优先级得分,确定涝区优先排涝顺序,进而调控闸门开度和泵站运行参数以控制排水速率,实现

资源的优化配置。其中,排水模数是排水模型设计的基本参数,也是衡量排涝能力的主要技术指标之一^[15]。区别于城市排涝的即时性,农作物耐涝时长一般为1~3 d,且A涝区以水田为主,故排水模数可根据下式计算:

$$q_w = [p_{3d} - (d + e)t - h]/86.4t \quad (1)$$

式中: q_w 为水田设计排水模数, $m^3/(s \cdot km^2)$; p_{3d} 为设计3 d暴雨量,mm; h 为水田滞蓄水深,mm; d 为田间渗漏损失,mm; e 为田间蒸发损失,mm; t 为排出历时,取4 d。

c. 防洪“四预”旨在根据气象部门共享的数据,运用通信、遥测、物联网和计算机技术,实现雨量、水位、流量、气温、湿度、风向、风速及土壤水分等水情、气象数据的实时收集和处理;在此基础上,对过境洪水的淹没范围及洪峰流量进行预报预警,动态模拟预演洪水形势、人员疏散、抢险救援等场景,并及时更新河道、沟渠、水库、蓄滞洪区等区域的应急预案^[16]。

d. 维护保养包括对涝区内排水沟道、排水渠道、排水涵洞、渡槽、排水闸站等工程制定检查计划,记录并查看维修保养情况,上传和反馈问题,通过APP辅助管理人员及时发现并处理隐患,确保排涝体系正常运行,提高排涝效率和安全性。

2 平台总体设计

2.1 建设任务

数字孪生三江平原涝区建设通过感控体系搭建、数据底板构建、模型库与知识库建设,实现物理涝区的数字化改造。以涝区管理业务需求为导向,构建集涝区一张图、智慧防汛、维护保养等功能于一体的可视化、智能化管理应用体系,以此提出数字孪生涝区管理平台的总体架构。其中,数据底板建设通过整合涝区已有监测数据、业务管理数据及外部共享数据,重点开展BIM+GIS等地理空间数据的集成与融合,且BIM模型建模精度不低于LOD350,确保数据的精确性与全面性;模型库包含洪水预报模型、暴雨预报模型、农田排涝模型、闸泵联合调度模型、设备安全评价及预测模型等涝区专题模型,以及可视化与智能识别模型;知识库则包含预报调度方案库、业务规则库、工程安全知识库、历史场景知识库等。

2.2 平台总体架构

平台采用B/S架构进行设计,以网络传输为基础,自下而上构建感知设备层、平台支撑层、业务应用层,并贯穿网络安全体系和运行维护体系,紧密结合涝区管理需求,总体架构见图1。

a. 网络传输基底。借助物联网、通用分组无线



图1 数字孪生涝区管理平台总体架构

服务(GPRS)等传输技术,保障多源数据的实时采集与云端传输,提升平台的响应速度和处理能力,为实现涝区全域互联提供坚实的技术支撑。

b. 感知设备层。基于物联网技术,通过布设摄像头、无线射频识别技术(RFID)、水位计、雨量计等感知设备,全方位动态监测涝区关键节点,构建全域数据采集体系,筑牢数字化涝区基底。

c. 平台支撑层。作为涝区管理平台的“大脑”,该层涵盖模型库、知识库及数据引擎建设,承担数据加载、分析、处理、清洗、共享及知识库调用等任务,实现以数据底板为基础,模型库为核心,知识库为驱动的数字表达。

d. 业务应用层。以涝区管理业务为导向,通过对物理实体位置、运行规则等要素的数字赋能,整合涝区一张图、智慧防汛、维护保养等功能模块,以全面提升涝区综合管理效率和应急处置能力。

e. 用户交互层。基于 MVC 框架结构设计的 Web 服务器,及时处理 HTTP 请求,通过 URL 实现准确映射,保障数据的实时交互与安全管理;同时通过用户角色权限控制,实现分级高效管理。

感知设备层采集的监测数据通过网络传输基底上传至平台支撑层,完成数据存储、分析等操作,业务应用层基于数据分析结果响应管理需求,最终通过 Web 服务器在用户交互层实现双向交互与分级管理。

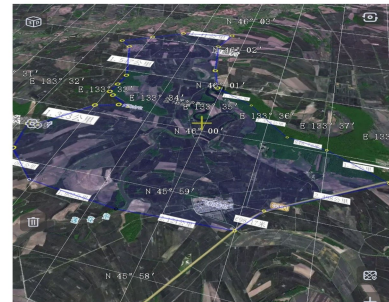
3 关键技术

3.1 可视化场景构建技术

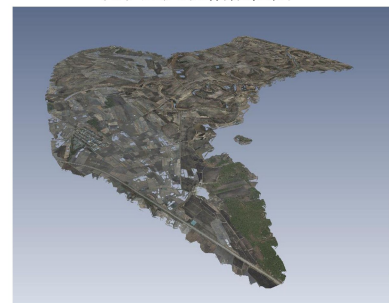
传统的场景构建多用于大范围区域地形模型展示,难以表现建筑物、道路及水流等细节。因此,本文引入三级地理空间数据底板构建概念,以满足涝区空间数据对可视化表达的精细化需求。其中,L1和L2级数据底板数据主要从水利部和省级水利管理平台共享获取;在数据无法共享时,采用卫星遥感地图、无人机倾斜摄影^[17]等GIS技术进行数据补充^[18];L3级数据底板利用BIM建模^[19]等技术实现建筑物的精细表达,GIS与BIM的集成与融合在建模质量、仿真精度、渲染表达等方面均具有显著优势,为A涝区可视化场景构建提供技术支撑。

a. 无人机倾斜摄影技术。该技术是实现三维场景建模的重要手段^[20],其数据格式易于网络分布与共享应用。本文采用大疆经纬M300 RTK无人机搭载禅思P1相机进行数据采集,相机焦距为35 mm,有效像素为4500万,像元尺寸为4.4 μm;航摄相对高度为200 m,航向重叠率为80%,旁向重叠率为70%,可获取研究区多角度影像。借助

ContextCapture Center 软件处理无人机拍摄的多角度图像,通过对相机参数、影像数据及POS数据进行多视角影像密集点特征匹配,进而完成区域网的自由网多视影像联合约束平差解算,确定图像的空间位置和角度,建立影像间的几何关系。基于匹配成功的特征点生成点云数据,经过数据编辑、切割等操作构建三维不规则三角网(TIN)模型。该软件支持图像纹理自动映射,增强了三维场景模型的仿真效果。三江平原A涝区三维场景建模结果如图2所示。



(a) 无人机拍摄范围



(b) 倾斜摄影模型

图2 三维场景建模结果

b. BIM+GIS 融合技术。通过将包含几何信息和属性数据的BIM模型^[21-22]与覆盖地理信息、地形数据及空间关系的GIS模型融合,构建涝区全要素地理空间数据底板,强化可视化场景表达。BIM+GIS融合技术可通过FBX、IFC、Shapefile等数据格式转换实现信息交互与工作协同^[23-24]。利用FME软件实现BIM模型的局部坐标向区域坐标系的转换,并基于Helmert地理坐标转换算法实现BIM模型与GIS模型在空间位置上的对齐,确保数据格式的兼容性与信息的完整性。利用共享云平台集成GIS与Revit模型,实现涝区从宏观到微观的可视化场景构建及地理信息全覆盖,强化涝区数字化表达,同时为防洪“四预”、维护保养等功能的实现提供精准的数据支撑。

3.2 物联网技术

物联网技术^[25]采用感知层、网络层和应用层三层架构,实现排涝设施与智慧响应的互联互通。感知层由RFID、雷达水位计、超声波流量计、称重式雨量计等设备组成。结合A涝区区域特点,在低洼地

段、排水设施进出口、排干汇入口等易涝节点布设监测设备,动态监测水位、流量、流速及排涝设备状态,布设时充分考虑设备性能及测量精度,同时在泵站、水闸、排水渠出口处安装视频监控设备,辅助巡检及远程管理。网络层由各种局域网、互联网、有线和无线通信网等构成,设置1个中心站、36个遥测站,采用GPRS连接分布广泛的传感器节点,适应涝区远距离覆盖需求,保证数据高效安全地传送。应用层对集成数据进行清洗、分析和处理,提供跨领域的新型应用和服务。

物联网云平台^[26]具备海量数据储存和扩展能力。基于MVC-EF-Bootstrap技术体系在云端建立Web服务器,与浏览器进行交互,能够实现涝区监测数据的实时上传与存储,满足高效处理海量数据的需求。

3.3 数据库设计

以水利部颁布的《数字孪生水利工程建设技术导则(试行)》为参照,在共享水利部、流域管理机构等部门相关知识库的基础上,结合涝区管理业务特点,构建基于MySQL的预报调度方案库、业务规则库、工程安全知识库、历史场景知识库等,为数字化涝区管理提供智能决策支撑。利用E-R图(实体关系图)表达实体、属性及实体间的关系与约束,梳理业务规则与逻辑结构(图3)。其中,矩形框表示实体,椭圆形框表示属性,菱形框表示实体间的关系,连接线表示关系的约束,多个实体通过不同关系紧密相连。例如,“水文监测站”实体通过“一对多”关系关联多条“传感信息”,每条传感信息包含“传感设备ID”“采集时间”等属性;“预警信息”与“传感信息”之间的“一对多”关系则用于关联同一预警下

的多源传感数据,以支撑分析决策。“用户”与“设备”为“多对多”关系,一个用户可管理多台设备,每台设备也可由多个用户管理。

数据库采用Entity Framework 框架实现数据交互,前端使用Bootstrap构建整洁直观的操作界面,代码采用IOC(控制反转)+AOP(面向切面编程)+DDD(领域驱动设计)模式,系统支持轻量级缓存、缩略图上传及服务调用。运用Redis缓存技术^[27]优化数据存储和访问效率,减轻后端数据库的压力,提高数据访问速度和系统响应能力。接口端设计遵循一致性与安全性原则,前后端基于HTTP协议的网络通信进行交互,保障涝区运行管理的稳定与安全。通过构建预报预警-防洪排涝-响应调用引擎,实现应急决策向实时化、精准化转变。其中,预报预警模块利用监控与传感器采集的实时信息,结合历史场景知识库,基于洪水预报模型预测涝区洪水淹没范围及积水趋势,并及时发布预警信息;防洪排涝模块依托农田排涝模型、闸泵联合调度模型,结合业务规则库、安全知识库,实现防洪排涝与资源的高效利用;响应调用模块接收并处理预警与排涝调度指令,快速生成应急预案并推送至相关用户。

4 平台功能应用

4.1 涝区一张图

涝区一张图是集区域水系、地形、地貌、水利设施等多维度信息为一体的数字化地图,支持图层管理、坐标定位、底图切换、二维与三维场景切换、缩放、旋转等操作,可实现大范围尺度上涝区自然环境的二三维地图展示。为满足不同尺度可视化需求,构建L1~L3级地理空间数据底板,其中,L1级覆盖

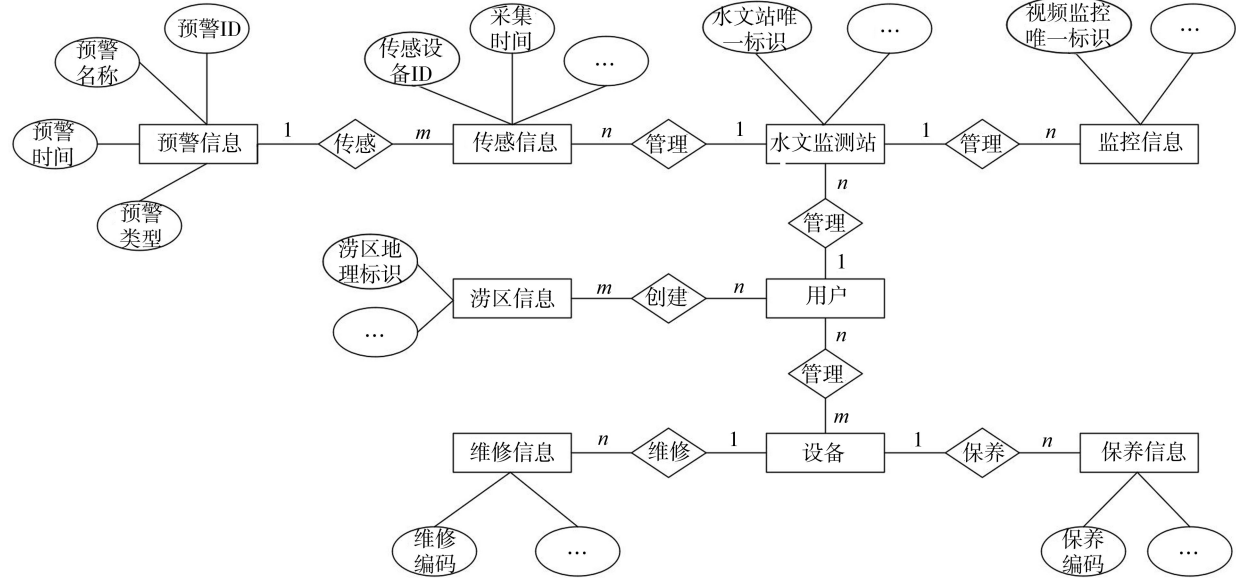


图3 数据库E-R图

涝区整体及周边流域水系,L2 级聚焦涝区区域划分与典型建筑物标注,L3 级为 BIM 模型的精细化表达,通过与 GIS 模型融合完成可视化场景展示,并以此作为三江平原 A 涝区管理底图,强化了视觉效果,使用户能够立体、直观、全面地查看 A 涝区实况,实现对涝区的全局把控(图 4)。

4.2 智慧防汛

智慧防汛旨在整合多方位监测/监控数据及历史数据的基础上,实现防洪“四预”及农田排涝功能。

a. 数据监测。基于实景现场布设的物理传感设备获取雨量、水位、流量、排涝工程运行状态等实时监测数据,支持按关键字段查询,并以图表形式为管理者提供可视化数据视图。借助视频监控系统的实时性,通过光纤和无线网络将实时视频信息传输至监控中心,实现关键节点全天候动态监测,辅助管理人员开展安全巡检。

b. 预报预警。将气象部门提供的水雨情数据传输至云端服务器,以知识库、模型库和算法为驱动,对特征数据进行提取、分析与处理,评估涝区自排能力。通过洪水预报模型和暴雨预报模型,采用人机交互方式动态分析并预报洪水淹没范围、位置、面积及农田积水态势,为涝区精准调度决策提供支撑。同时选取涝区内关键排干界面作为控制点,根据排干设计流量,对实时监测流量和预测流量超出设定阈值的情况进行预警,提高涝区防御的及时性。

c. 农田排涝。依据 A 涝区实际监测范围,布设土壤墒情监测 13 处、水位监测 85 处、表面流速监测 28 处,实时监测农田积水深度与土壤湿度。通过分析 A 涝区作物在不同生长阶段的耐水性,将作物耐涝时长纳入农田排涝模型,确定排水优先级,降低积

水对作物生长的负面影响。基于洪水预报模型和农田排涝模型,引入系统算力^[28-31]和大数据分析技术^[32]对未来降雨情景进行预测,进而优化闸泵联合调度方案,实现实时数据驱动的动态优化。闸泵联合调度模型采用启发式优化的多目标算法,以排水效率最优、能耗最小、设备状态最佳为目标函数,以泵站、节制闸、排水涵闸的联合调配流量、闸孔过流能力和机电设备、排水建筑物安全为约束条件,优化得到泵站和各闸门的分配流量。结合泵站特性曲线、闸门开度流量曲线,确定泵站各机组开启数量、转角和转速及各闸门开启数量和高度,实现闸泵联合排水最优,及时清排农田积水。在设施资源有限的情况下,优先清排积水较深、作物耐涝能力弱的区域。系统提供远程操作界面,同时支持人工干预和手动调节,确保调度灵活性。

d. 预案预演。基于知识库调用引擎,挖掘历史场景^[33]、业务规则等信息,实现应急预案的智能生成、更新和优化。在 BIM+GIS 模型融合的基础上,利用实时水雨情数据和空间分析能力,动态模拟洪水演进情景,完成预报预警-防洪排涝-信息发布-联合响应的全过程预演,合理指导群众疏散与抢险救灾,辅助运管人员快速决策^[34-35]。利用移动 APP、现场 LED 屏等方式向管理部门及社会公众发布紧急通知,及时组织人员疏散;居民可通过平台获取预警信息或发送求助信号,管理部门及时响应并开展联动救援,筑牢人民生命安全红线。

4.3 维护保养

基于设备安全评价及预测模型要求,合理设定变压器、水泵、电机、闸门、启闭机等设备的安全监测阈值。通过在泵站和水闸安装各类传感器,实现设

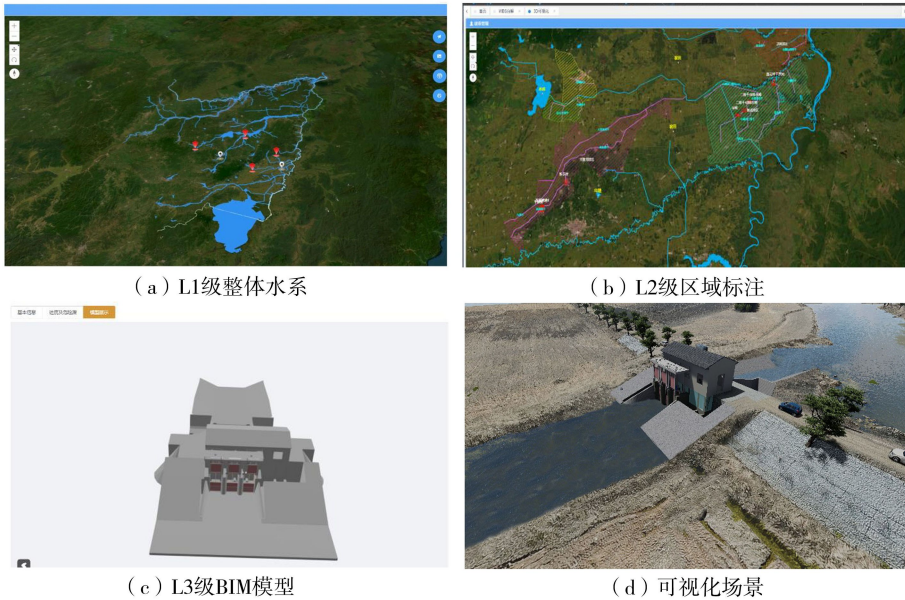


图 4 涝区一张图效果展示

备温度、压力、流量、水位、振动、摆度等运行状态参数的自动化采集。结合传感器采集的实时数据、历史运行数据、设备维修保养记录等多维度数据资源,进行交叉对比分析,支持设备信息的联动查询,提升设备运行状态的研判感知能力。当系统监测到设备参数异常时,及时推送预警信息至相关人员,督促其开展现场实地巡检。系统以时间为主线,展示巡检人员、巡检时间、巡检详情等信息,便于维修人员及时上报设备状态、反馈检查结果,处理异常状况并完成备案记录,进一步提高维护保养效率与质量。

5 结 语

数字孪生技术是推动水利智慧化转型的重要手段之一。本文以三江平原农田涝区为研究对象,在分析农田涝区管理核心业务需求的基础上,遵循“需求牵引,应用至上”的原则,提出了基于数字孪生的涝区管理平台架构体系。通过重点研究涝区可视化场景构建、多源数据融合的数据库设计等关键技术,搭建了 A 涝区智慧化管理平台,实现了涝区多尺度、全要素数据的监测、集成、分析与处理,完成了物理涝区在虚拟空间的数字化映射与赋能。平台集成了涝区一张图、防洪“四预”、维护保养等功能,推动了涝区管理向信息化、数字化迈进,为数字孪生在涝区治理领域的研究提供了思路,也为智慧水利的全面推进提供了实践参考。

参考文献:

[1] Grieves M, Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems [M]. Kahlen F J, Flumerfelt S, Alves A. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham:Springer,2017:85-113.

[2] 李英华,原立格. 信息化背景下 5G 通信技术对智慧水利建设的作用分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6): 132-133. (Li Yinghua, Yuan Lige. Analysis of role of 5G communication technology in smart water conservancy construction under the background of informatization[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(6):132-133. (in Chinese))

[3] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展;在 2023 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2023, 23(1): 1-11. (Li Guoying. Thoroughly implement the spirit of the 20th National Congress of the Communist Party of China and solidly promote the high-quality development of water conservancy in the new stage;speech at the National Water Conservancy Work Conference in 2023 [J]. Water Resources Development Research,2023,23(1):1-11. (in

Chinese))

[4] 王万祯,康德奎,王晓军. 石羊河数字孪生流域建设探讨[J]. 中国农村水利水电,2022(8):117-120. (Wang Wanzhen, Kang Dekui, Wang Xiaojun. Exploration of digital twin watershed construction for Shiyang River[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(8):117-120. (in Chinese))

[5] 谢崇宝,白静,张武雄,等. 现代化数字灌区建设主体功能及主要应用结构体系探讨[J]. 中国农村水利水电, 2024(4): 141-145. (Xie Chongbao, Bai Jing, Zhang Wuxiong, et al. Discussion on major function and key application structure system of modernized digital irrigation district[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(4):141-145. (in Chinese))

[6] 肖宏宇,陈石磊,王帅,等. 数字孪生灌区水资源调度管理平台设计与实现[J]. 长江科学院院报, 2025, 42(8):170-178. (Xiao Hongyu, Chen Shilei, Wang Shuai, et al. Digital twin water resource scheduling and management platform for irrigation area [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42(8): 170-178. (in Chinese))

[7] 边晓南,张雨,张洪亮,等. 基于数字孪生技术的德州市水资源应用前景研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022,53(6):79-90. (Bian Xiaonan, Zhang Yu, Zhang Hongliang, et al. Research on application prospect of water resources in Dezhou based on digital twin technology[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(6):79-90. (in Chinese))

[8] 贺挺,李凤生,成建国,等. 水利部数字孪生流域模型管理云平台设计及应用研究[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(2):1-15. (He Ting, Li Fengsheng, Cheng Jianguo, et al. Design and application research of digital twin basin model platform of Ministry of Water Resources [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024,55(2):1-15. (in Chinese))

[9] 韩鹏,李琨,庄志凤,等. 胶东调水工程信息化建设关键技术研究[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(增刊 2):446-450. (Han Peng, Li Kun, Zhuang Zhifeng, et al. Research on key technologies of information construction of Jiaodong Water Diversion Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2022,53(S2):446-450. (in Chinese))

[10] 赵菲,江威,丁小辉,等. 卫星通导遥技术在数字孪生流域建设应用潜力与初探[J]. 水利水电技术(中英文), 2023,54(增刊 2):369-377. (Zhao Fei, Jiang Wei, Ding Xiaohui, et al. Application potential and initial exploration of communication, navigation and remote sensing satellite technology in digital twin watershed construction [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(S2):369-377. (in Chinese))

[11] 栗铭.《数字孪生黄河建设规划(2022—2025)》发布

- [J]. 人民黄河,2022,44(6):174. (Li Ming. Release of the Digital Twin Yellow River Construction Plan (2022-2025) [J]. Yellow River,2022,44(6):174. (in Chinese))
- [12] 程海云. 推进长江数字孪生流域建设的水文实践与思考[J]. 中国水利,2022(15):49-50. (Cheng Haiyun. Hydrological practice and thinking of promoting the construction of digital twin watershed of the Yangtze River [J]. China Water Resources, 2022(15):49-50. (in Chinese))
- [13] 甘郝新,吴皓楠. 数字孪生珠江流域建设初探[J]. 中国防汛抗旱,2022,32(2):36-39. (Gan Haoxin, Wu Haonan. Study on the construction of the digital twin Pearl River Basin [J]. China Flood & Drought Management, 2022,32(2):36-39. (in Chinese))
- [14] 庞家锋,林凯荣,郑炎辉,等. 小流域数字孪生建设关键技术及应用:以广东佛山市三水區大塘引涌为例[J]. 中国防汛抗旱,2022,32(7):19-23. (Pang Jiafeng, Lin Kairong, Zheng Yanhui, et al. Research and application of key technologies for digital twin construction in small watersheds: taking Datang diversion channel in SanShui District of Foshan City in Guangdong Province as an example [J]. China Flood & Drought Management, 2022,32(7):19-23. (in Chinese))
- [15] 崔宗培,徐乾清,吴以鳌,等. 中国水利百科全书(第三卷)[M]. 北京:水利电力出版社,1991.
- [16] 叶瑞禄,左翔,刘修恒. 数字孪生秦淮河流域防洪四预平台建设与应用[J]. 人民长江,2024,55(3):13-20. (Ye Ruilu, Zuo Xiang, Liu Xiuheng. Construction and application of four pre-platform for flood control of digital twin Qinhuai River Basin [J]. Yangtze River, 2024, 55(3):13-20. (in Chinese))
- [17] 贾智乐. 飞马 F200 无人机在大型水利工程及 BIM 建设中的应用[J]. 测绘通报,2019(9):159-162. (Jia Zhile. Application on large-scale water conservancy projects and BIM construction by FEIMA F200 UAV [J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2019(9):159-162. (in Chinese))
- [18] 梁鑫,侯精明,王添,等. 基于多源数据融合的城市洪涝模拟高精度地形构建方法[J]. 水利水电科技进展,2024,44(6):56-63. (Liang Xin, Hou Jingming, Wang Tian, et al. A method for constructing high-precision terrain for urban flood simulation based on multi-source data fusion[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(6):56-63. (in Chinese))
- [19] 龚健,包腾飞,陈知渊,等. 基于 BIM 技术的地下空间曲线钢管分段排布算法[J]. 水利水电科技进展,2022,42(5):108-114. (Gong Jian, Bao Tengfei, Chen Zhiyuan, et al. A BIM technology-based algorithm for steel pipe segmentation arrangement of underground space curves [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(5):108-114. (in Chinese))
- [20] 满旺,李宗梅,聂芹,等. 数字孪生技术在小型水库管理中的应用初探[J]. 测绘通报,2023(1):20-25. (Man Wang, Li Zongmei, Nie Qin, et al. A preliminary study on the application of digital twin technology in the management of small reservoirs [J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2023(1):20-25. (in Chinese))
- [21] Liu Ting, Zhang Sherong, Wang Chao. A BIM-based safety management framework for operation and maintenance in water diversion projects [J]. Water Resources Management,2021,35(5):1619-1635.
- [22] Kaushik S, Dhote P R, Thakur P K, et al. An integrated approach for identification of waterlogged areas using RS and GIS technique and groundwater modelling [J]. Sustainable Water Resources Management, 2019, 5(4):1887-1901.
- [23] 李献忠,张社荣,王超,等. 基于 BIM+GIS 的长距离引调水工程运行管理集成平台设计与实现[J]. 水电能源科学,2020,38(9):91-95. (Li Xianzhong, Zhang Sherong, Wang Chao, et al. Design and implementation of long distance water diversion project operation management integration platform based on BIM + GIS [J]. Water Resources and Power,2020,38(9):91-95. (in Chinese))
- [24] Zhang Sherong, Hou Dejun, Wang Chao, et al. Integrating and managing BIM in 3D web-based GIS for hydraulic and hydropower engineering projects [J]. Automation in Construction,2020,112:103114.
- [25] Rao Xiaokang, Ma Rui, Zhang Li, et al. Research and design of a digital twin-driven smart river basin platform [J]. Metaverse,2022,3(2):11.
- [26] 杨婷婷,李志一,赵冬泉. 基于物联网大数据的城市降雨径流控制率分析[J]. 水电能源科学,2020,38(5):15-17. (Yang Tingting, Li Zhiyi, Zhao Dongquan. Analysis of urban rainfall runoff control rate based on internet of things big data [J]. Water Resources and Power,2020,38(5):15-17. (in Chinese))
- [27] 方豪文,周建中,贾本军,等. Redis 内存数据库在长江上游水资源管理决策支持系统中的应用研究[J]. 水力发电,2021,47(7):33-38. (Fang Haowen, Zhou Jianzhong, Jia Benjun, et al. Application of Redis memory database in the water resource management decision support system of the Upper Yangtze River [J]. Water Power,2021,47(7):33-38. (in Chinese))
- [28] 杨晶,路恒通,金鑫,等. 机器学习赋能智慧水利的现实基础、应用现状及发展前景[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(10):137-147. (Yang Jing, Lu Hengtong, Jin Xin, et al. The practical foundation, current application status, and future prospects for the integration of machine learning in empowering intelligent water conservancy [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(10):137-147. (in Chinese))

(下转第 75 页)

time monitoring and management system for water resources in river basin[J]. Advances in Water Science, 2003,14(3):255-259. (in Chinese))

[3] 金菊良,常哲,周亮广,等. 流域水资源安全风险评价问题的系统分析[J]. 水利水电科技进展,2025,45(5):112-118. (Jin Juliang, Chang Zhe, Zhou Liangguang, et al. System analysis of water resources security risk assessment in river basins[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 (5) : 112-118. (in Chinese))

[4] 李云胜. 泰安市水资源综合管理信息系统设计与实现 [D]. 济南:山东大学,2014.

[5] Fujita I, Muste M, Kruger A. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications[J]. Journal of Hydraulic Research, 1998, 36 (3) :397-414.

[6] Astsatryan H, Hayrapetyan A, Narsisian W, et al. An interoperable cloud-based scientific GATEWAY for NDVI time series analysis[J]. Computer Standards & Interfaces, 2015,41:79-84.

[7] 唐洪武,陈诚,陈红,等. 实体模型表面流场、河势测量中图像技术应用研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35 (5) : 567-572. (Tang Hongwu, Chen Cheng, Chen Hong, et al. Review of image processing technique applied to measurement of surface flow field and river regime of physical model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35 (5) : 567-572. (in Chinese))

[8] 陈红,周国梁,闫静,等. 基于回归分析的表面流场粒子匹配算法[J]. 水利水电科技进展,2020,40(1):32-36. (Chen Hong, Zhou Guoliang, Yan Jing, et al. Study on particle matching algorithm for surface flow field based on regression analysis [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (1) : 32-36. (in Chinese))

[9] 陈妃奋. 基于深度学习的字轮式水表读数识别研究与应用[D]. 桂林:桂林电子科技大学,2021.

[10] 陈文萍,娄嘉骏,江少锋,等. 基于 YOLOv5 的水表字轮读数自动识别方法[J]. 仪表技术, 2023 (3) : 43-46. (Chen Wenping, Lou Jiajun, Jiang Shaofeng, et al. Research on automatic recognition method of water meter wheel indications based on YOLOv5 [J]. Instrumentation Technology, 2023 (3) : 43-46. (in Chinese))

[11] 高菊,叶桦. 一种有效的水表数字图像二次识别算法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43 (增刊 1) : 153-157. (Gao Ju, Ye Hua. An effective two-times recognition algorithm of meter digital image[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43 (S1) :153-157. (in Chinese))

[12] 任荣梓,高航. 基于反馈合并的中英文混排版面 OCR 技术研究[J]. 计算机技术与发展, 2017, 27 (3) : 39-43. (Ren Rongzi, Gao Hang. Investigation on layout analysis technology of Chinese and English mixed OCR based on feedback merging [J]. Computer Technology and Development, 2017, 27 (3) : 39-43. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 03 - 06 编辑:俞云利)

+++++

(上接第 70 页)

[29] 高玉琴,王慧,刘钺,等. 基于空间信息格网的南京市洪水风险评估[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (6) : 6-12. (Gao Yuqin, Wang Hui, Liu Yue, et al. Flood disaster risk assessment in Nanjing City based on spatial information grids[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (6) : 6-12. (in Chinese))

[30] 高玉琴,徐诺,汪键,等. 基于复杂网络的洪涝灾害链风险评估[J]. 水资源保护, 2025, 41 (2) : 115-122. (Gao Yuqin, Xu Nuo, Wang Jian, et al. Risk assessment of flood disaster chain based on complex network[J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (2) : 115-122. (in Chinese))

[31] 郑德凤,高敏,李钰,等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50 (3) : 1-8. (Zheng Defeng, Gao Min, Li Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50 (3) : 1-8. (in Chinese))

[32] 谢遵党. 水利水电工程数字设计工厂建设构想与实践[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54 (2) : 60-72. (Xie Zundang. Concept and practice of digitalized design factory for water conservancy and hydropower engineering [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54 (2) : 60-72. (in Chinese))

[33] Li Daqian. Research on data sharing of water conservancy informatization based on data mining and cloud computing [C] // Journal of Physics: Conference Series. Chongqing: IOP Publishing, 2021: 012130.

[34] 徐宗学,卢兴超,施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45 (1) : 1-9. (Xu Zongxue, Lu Xingchao, Shi Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 (1) : 1-9. (in Chinese))

[35] 杨芳,李旭东,宋利祥,等. 城市暴雨洪涝灾害链风险评估方法[J]. 水资源保护, 2025, 41 (5) : 52-60. (Yang Fang, Li Xudong, Song Lixiang, et al. Risk assessment methodology for rainstorm-induced urban flood disaster chain[J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (5) : 52-60. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 03 - 13 编辑:雷燕)