

DOI: 10.7672/sgjs2025120072

# 数字孪生技术在水利工程“六项机制”中的应用

陈丽芳<sup>1,2</sup>

(1. 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200232;  
2. 上海市水务局防汛减灾工程技术中心, 上海 200232)

[摘要] 为研究数字孪生技术在水利工程安全生产风险管控“六项机制”中的应用场景,依托淀山湖岸线堤防改造工程开展了试点应用,结果表明,数字孪生技术在查找机制上可集成现场实时数据快速查找定位危险源;在研判机制上可通过“直接评定法”及“作业条件危险性评价法”计算风险等级,利用颜色警示对应模型构件;在预警机制上可通过实时监测数据自动分析、触发报警,并定位监控视频;在防范机制上可通过方案模拟、VR等方式进行培训或事故演练;在处置机制和责任机制上可快速定位事故位置、处置方案、责任人员、历史数据等。数字孪生技术在水利工程“六项机制”中的应用属于一个复杂而系统的过程,可有效提升水利工程安全生产管理水平,为水利工程建设赋能增值。

[关键词] 数字孪生;水利工程;管理;监测;风险分析

[中图分类号] TV21

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)12-0072-08

## Application of Digital Twin Technology in the “Six Mechanisms” of Water Conservancy Project

CHEN Lifang<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Water Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200232, China;  
2. Shanghai Water Bureau Flood Control and Disaster Reduction Engineering  
Technology Center, Shanghai 200232, China)

**Abstract:** In order to study the application scenarios of digital twin technology in the “six mechanisms” of safety production risk control in water conservancy projects, this paper conducted a pilot application based on Dianshan Lake shoreline embankment renovation project. The results show that digital twin technology can integrate real-time on-site data to quickly search and locate hazardous sources in the search mechanism; The risk level can be calculated through the “direct assessment method” and “job condition hazard assessment method” in the analysis mechanism, and corresponding model components can be alerted with colors; In the early warning mechanism, real-time monitoring data can be automatically analyzed, alarms can be triggered, and monitoring videos can be located; Preventive mechanisms can be trained or accident drills can be conducted through program simulations, VR, and other methods; It quickly locates the accident location, disposal plan, responsible personnel, historical data and so on in terms of disposal mechanism and responsibility mechanism. The application of digital twin technology in the “six mechanisms” of water conservancy engineering is a complex and systematic process, which can effectively improve the safety production management level of water conservancy project, empower and add value to water conservancy project construction.

**Keywords:** digital twin; water conservancy project; management; monitoring; risk analysis

### 0 引言

水利工程作为国民经济的重要基础设施,其安

全性与稳定性至关重要。现阶段水利工程普遍采用传统建造与维护模式,其建造效率较低,安全建设风险存在隐患,如建设过程经历汛期、防洪预警不及时、巡堤检查不到位、工程设计缺乏充分考虑

等,这些问题都会导致水利工程在建设或运维中出现各种各样的安全隐患,严重影响工程质量及正常运行。2022年水利部提出要建立风险管控“六项机制”,有效遏制生产安全事故,为新阶段水利高质量发展提供坚实的安全保障<sup>[1]</sup>。

数字孪生技术作为一种新兴的数字化技术,正逐渐在各领域展现出其强大的应用潜力,也已取得不少成果。张程等<sup>[2]</sup>提出了将“六项机制”建设融入安全生产管理基础工作、与“数字孪生”建设同步推进等建议思考,提出了将“六项机制”建设融入安全生产管理基础工作、与“数字孪生”建设同步推进等建议思考;张波等<sup>[3]</sup>结合水利工程运行管理单位安全生产特点和规律,搭建了基于数字孪生的安全生产风险管控平台框架,实现对安全生产风险的智慧监管;马建新等<sup>[4]</sup>根据水利部水利安全生产状况评价已有成果和水利工程管理单位安全生产管理实际,结合数字孪生水利工程算法建设,建立基于风险管理的水利工程管理单位安全生产状况评价指标体系和模型。

虽然现在数字孪生技术在水利工程中的应用已有一些成果<sup>[5-11]</sup>,但多用于运维管理阶段,针对工程建设动态过程中安全生产风险管控的“六项机制”应用案例相对较少。

本文旨在系统分析数字孪生技术在水利工程“六项机制”中的应用,初步研究查找机制、研判机制、预警机制、防范机制、处置机制和责任机制的应用场景,探讨其如何提升水利工程的管理水平和安全性,为水利工程建设过程中的安全生产风险管控提供新的思路和方法。

## 1 数字孪生技术概述

数字孪生技术作为当今科技领域的一大创新,正日益受到广泛关注和应用。它利用先进的计算机技术和3D建模技术,将现实世界中的物体、过程或系统进行数字化建模,并在虚拟环境中进行仿真和分析,从而实现对现实世界的精准控制和优化。这一技术不仅改变了传统行业的运营模式,也为各行各业带来前所未有的发展机遇。

近年来,数字孪生技术得到了长足发展。随着全球经济的数字化转型,数字孪生技术已成为各行各业追求高质量发展的焦点和新引擎。目前,数字孪生已广泛应用于工业、城市管理、能源电力、医疗、水利等领域,市场增长潜力巨大。

在数字孪生技术应用中,水利工程是一个典型的应用场景。数字孪生水利工程是以物理水利工程为单元、时空数据为底座、数学模型为核心、水利

知识为驱动,对物理水利工程全要素和建设运行全过程进行数字映射、智能模拟、前瞻预演,与物理水利工程同步仿真运行、虚实交互、迭代优化,实现对物理水利工程的实时监控、问题发现、优化调度<sup>[12]</sup>。

现阶段数字孪生水利工程应用建设普遍存在以下难点<sup>[13]</sup>。

1) 物联网感知数据和时空数据不足。物联网感知设备主要存在地上多、地下少,预警设备多、监测设备少,水文监测设施不足等问题,物联网感知数据难以全面覆盖,时空数据存在二维数据多、三维数据少的问题。在数字孪生流域建设过程中,场景仿真模拟缺乏全面的时空数据支撑。

2) 时空数据信息利用难。存在海量多源异构水利时空数据,如大面积城市建筑数据、各尺度模型文件,包含GIS、BIM及倾斜摄影、激光点云、卫星云图等时空数据,格式多样、来源不一。

3) 数字孪生场景构建与实时可视化渲染难。以物理流域为单元、时空数据为底座、数学模型为核心、水利知识为驱动,对物理流域全要素和水利治理管理全过程进行数字化映射、智能化模拟,实现与物理流域同步仿真运行、虚实交互、迭代优化,是数字孪生流域的核心建设重难点。

## 2 数字孪生体系搭建

### 2.1 依托工程概况

淀山湖岸线堤防改造工程(以下简称“工程”)位于上海市青浦区淀山湖岸线区域,项目以沿岸堤防改造为主,建设实施内容包括:改造护岸长度共计4.7km,新建6m宽沿湖防汛通道2.6万m<sup>2</sup>,新建陆域绿化面积3.5万m<sup>2</sup>,项目总用地面积12.3万m<sup>2</sup>。项目建设重难点主要体现在:①工程水上施工涉及临湖围堰及水闸围堰打桩、填土施工、抽水排水等工作,工作量大、危险源多;②工程施工区域均有老结构,部分岸段存在老的桩基础,存在拆除、清除障碍等工作;③工程沿线有众多建筑物毗邻施工区域,施工空间狭小,对其保护工作是重难点;④工程沿线存在多处管线,包含通信管线、水管等,施工过程中需注意安全开挖距离;⑤工程施工过程中需考虑汛期影响及工作。

### 2.2 数字孪生系统架构

针对依托项目特点及数字孪生存在的难点问题,梳理并增加水利工程安全监测感知、图像采集体系,包括变形监测、渗流监测、应力应变及温度监测、环境质量监测及其他专项监测内容,获取的工程安全监测及图像数据统一汇聚至数字孪生平台中的数据底板,为模型计算、可视化展示、孪生应用

提供实时数据基础。

数字孪生系统架构以水利部数字孪生工程建设要求为原则,搭建主要内容包含系统信息化基础设施、数字孪生平台及典型应用场景,具体架构如图1所示。

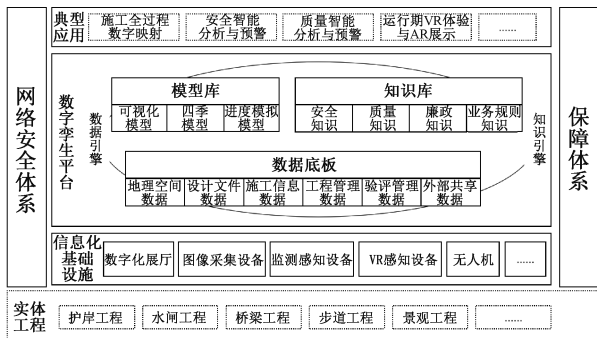


图1 系统架构

Fig.1 System architecture

### 2.3 数据底板搭建

构建工程一张图数据底板,包含淀山湖地理空间数据、基础数据、监测数据、业务数据及外部共享数据。工程建设过程中不断完善数据类型、数据范围、数据质量,同时优化数据融合,为工程建设全过程孪生应用提供支撑。

1)基础数据。采用 BIM 技术创建工程三维设计模型,包括但不限于红线范围内的船闸、水闸、护岸、老桥、主桥、需拆迁民房、地质与地形及市政管线、市政道路等,专业包括但不限于建筑、结构、机电、钢结构、场地等,并在此基础上深化,使其满足实施阶段的模型精度要求(见图2)。

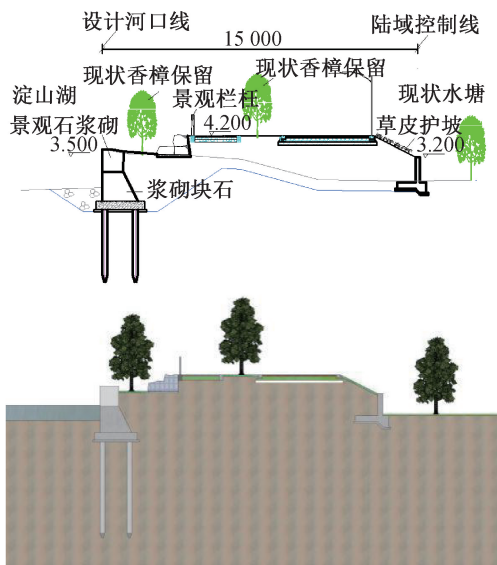


图2 设计CAD图与模型

Fig.2 Design CAD drawings and model

2)地理空间数据。工程基于倾斜摄影技术,通

过实景建模软件分阶段构建项目周边实景模型。创建的场地模型做单体化处理,添加周边信息,并叠加设计 BIM 模型,辅助查验工程与周边地块、建筑物、施工场地间关系,为项目危险源判别、老旧桩基拆除实施、周边建筑物空间测量等阶段及应用提供科技手段(见图3,4)。

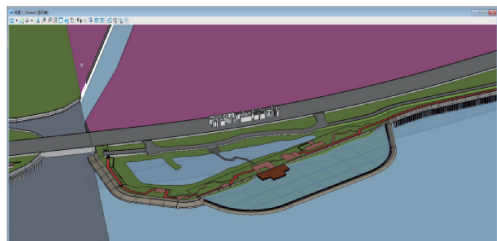


图3 堤防BIM模型

Fig.3 BIM model of embankment

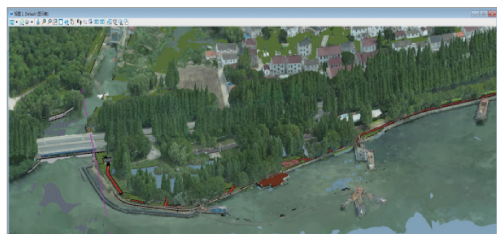


图4 实景+BIM模型

Fig.4 Real scene + BIM model

3)实际业务数据。业务数据是项目建设中重要的管理数据。工程采用项目管理平台,利用手机端收集建设过程中细节数据,如施工日期、施工人员、实施班组、施工机械等,同步于平台后实现业务管理过程的共享与交互,实现建设全过程安全生产风险管控信息实时化、信息化、共享化(见图5)。

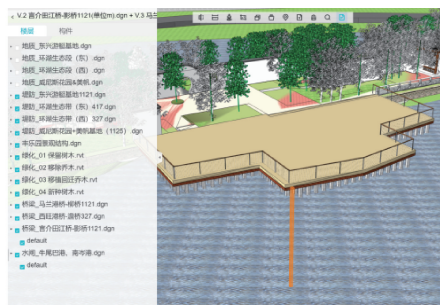


图5 实际业务数据

Fig.5 Actual business data

### 3 “六项机制”数字孪生应用场景分析

安全风险“六项机制”是水利部近年来为了深入推进安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防体系建设,进一步提升水利安全风险防控能力所提出的要求,即查找、研判、预警、防范、处置和责任。项目依托案例工程,研究采用数字孪生技术辅

助安全风险“六项机制”进行项目管理的方案(见图6)。

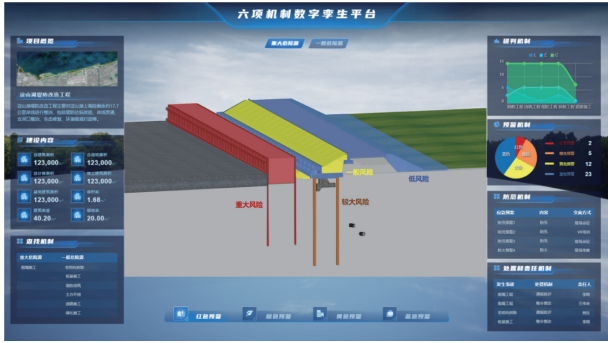


图6 “六项机制”数字孪生平台

Fig. 6 “Six mechanism” digital twin platform

### 3.1 查找机制

查找机制是水利工程安全管理的基础,旨在及时发现潜在的安全隐患。查找机制主要工作内容包含全面辨识危险源、定期辨识并动态更新危险源工作。传统的查找机制主要依赖人工巡检和经验判断,存在主观性和局限性问题。

工程通过构建三维数字模型,监测并孪生现场施工环境、进场人员、临时设备用水用电、进度、方案等,提前集合拼装各专业各要素,实现项目全面、系统检查,迅速定位潜在安全隐患和故障点,如结构碰撞、错位等,提高查找机制的准确性和效率。

本工程为堤防工程动态建设,主要建设内容及流程可简化为:围堰施工—老结构拆除—桩基施工—堤防胸墙混凝土浇筑。按施工流程,将其分为重大危险源及一般危险源,其中围堰施工需大量施工人员、措施及水电,为重大危险源,在数字底板建设查找机制模块中,对正在施工的围堰采用红色高亮进行标识;其他部位施工为一般危险源,采用蓝色高亮进行标识。基于平台,收集并孪生展示项目施工动态过程数据,在“查找机制”模块控件中单击高亮孪生展示本阶段内各危险源,并可在实施过程中根据进度进行危险源动态更新,如图7所示。

### 3.2 研判机制

研判机制是水利工程安全管理的重要环节,需对查找到的隐患进行深入分析和评估。研判机制主要工作内容包含科学评价风险等级、建立风险监管清单及定期开展安全生产状态评价。

本工程在研判机制中采用数字模型计算功能,提前研判风险等级,结合模型进行高亮展示。针对堤防工程特性,对重大危险源采用“直接评定法”,如人员集中区域、围堰工程、供电系统及基坑工程均为重大危险源,利用数据底板赋予高亮红色围栏

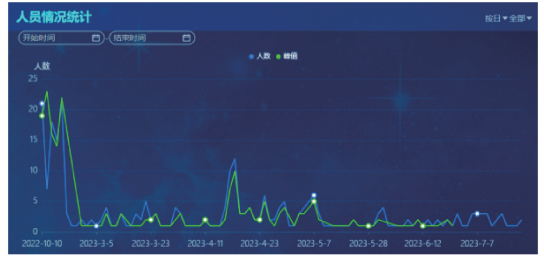
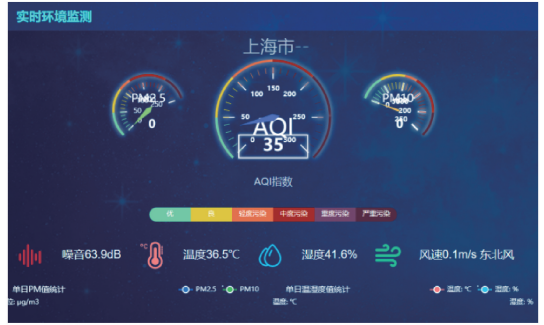
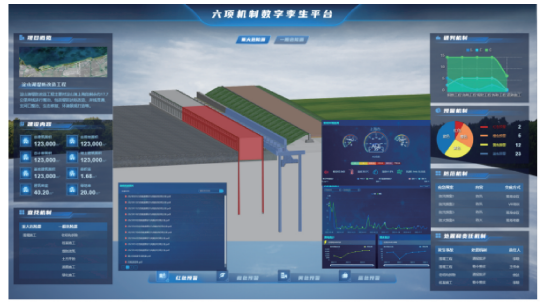


图7 查找机制模块

Fig. 7 Search mechanism module

警示提醒。对于一般危险源,采用“作业条件危险性评价法”(以下简称“LEC法”)进行辨识; $D = LEC$ ,其中 $L$ 为事故或危险事件发生的可能性,判定准则如表1所示; $E$ 为人们暴露于危险环境的频率,判定准则如表2所示; $C$ 为一旦发生事故会造成的

损失后果,判定准则如表 3 所示; $D$  为作业条件的危险性,判定准则如表 4 所示。

表 1 事故或事件发生的可能性( $L$ )判定准则

Table 1 Criteria for determining the likelihood of accident or occurrence ( $L$ )

分值	事故、事件或偏差发生的可能性	项目事件
10	完全可以预料	
6	相当可能,或危害的发生不能被发现(没有监测系统),或在现场没有采取防范、监测、保护、控制措施,或在正常情况下经常发生此类事故、事件或偏差	钢筋工程
3	可能,但不经常;或危害的发生不易被发现,即现场无检测系统或保护措施(如无保护装置、个人防护用品等),也未做过任何监测;或未严格按照操作规程执行;或在现场有控制措施,但未有效执行或控制措施不当;或危害在预期情况下发生	水上作业、原有旧堤防拆除、运输车辆、混凝土浇筑
1	可能性小,完全意外;或危害的发生易被发现;现场有监测系统或曾做过监测,或过去曾经发生类似事故、事件或偏差,或在异常情况下发生过类似事故、事件或偏差	堤防工程
0.5	很不可能,可设想;危害一旦发生能及时被发现,并能定期进行监测	—
0.2	极不可能;有充分、有效的防范、控制、监测、保护措施,或员工安全卫生意识相当高,严格执行操作规程	—
0.1	实际不可能	—

表 2 暴露于危险环境的频繁程度( $E$ )判定准则

Table 2 Criteria for determining the frequency of exposure to hazardous environments ( $E$ )

分值	频繁程度	项目事件
10	连续暴露	—
6	每天工作时间内暴露	水上作业 原有旧堤防拆除 运输车辆 混凝土浇筑 钢筋厂
3	每周 1 次或偶然暴露	钢筋工程
2	每月 1 次暴露	—
1	每年几次暴露	—
0.5	非常罕见地暴露	—

结合数据底板及数字孪生计算模型,将该套计算公式内置于平台后台,针对不同模型、不同部位提前判定并赋予  $L, E, C$  数值,按公式计算风险等级  $D$  值,并判定存在的重大风险、较大风险、一般风险和低风险 4 个等级危险源,分别采用红、橙、黄、蓝 4 种颜色标识,并现场展示安全风险空间分布图。

单击“研判机制”模块可自动跳转出各类项目  $L, E, C$  具体数据,系统根据数据自动计算风险等级  $D$  值,并关联至对应模型,赋予模型警示颜色(见图 8)。

表 3 损失后果严重性( $C$ )判定准则

Table 3 Criteria for determining the severity of loss consequences ( $C$ )

分值	法律法规及其他要求	人员伤亡	直接经济损失/万元
100	严重违法违反法律法规和标准	10 人以上死亡,或 50 人以上重伤	5 000 以上
40	违反法律法规和标准	3 人以上、10 人以下死亡,或 10 人以上、50 人以下重伤	1 000 以上
15	潜在违反法规和标准	3 人以下死亡,或 10 人以下重伤	100 以上
7	不符合上级或行业的安全方针、制度、规定等	丧失劳动力、截肢、骨折、听力丧失、慢性病	10 以上
2	不符合公司的安全操作程序、规定	轻微受伤、间歇不舒服	1 以上
1	完全符合	无伤亡	1 以下

表 4 作业条件的危险性( $D$ )判定准则

Table 4 Criteria for determining the hazard of homework construction ( $D$ )

危险值	风险等级		警示颜色
>320	A/1 级	极其危险	红色
160~320	B/2 级	高度危险	橙色
70~160	C/3 级	显著危险	黄色
0~70	D/4 级	轻度危险	蓝色

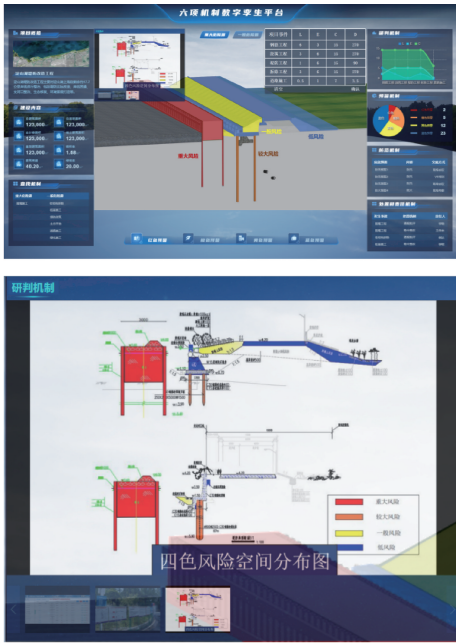
### 3.3 预警机制

预警机制是水利工程安全管理的重要手段,旨在提前发现并预防潜在的安全风险。预警机制包括强化监测监控、及时实施预警及提升监测预警能力。

本工程数字孪生技术在预警机制中的应用主要体现在实时监测和预警信息发布两方面。工程以“整合已建、统筹在建、规范新建”为原则,通过海康威视、华智极云、地磅称重、无人机航拍等设施手段,提升对工程监测和智能感知能力,实现对工程的实景孪生,如实时采集本工程建设过程中的堤防位移、沉降、汛期水位等数据和环境数据,通过网络传输至数字孪生平台进行分析和处理,一旦数据出现异常或超过预设的安全阈值,将在三维数据底板中相应位置高亮展示预警标识,并自动触发预警机制,通过短信、邮件等方式向相关人员发送预警信息,提醒其及时采取措施(见表 5、图 9)。

### 3.4 防范机制

防范机制是水利工程安全管理的关键环节,旨在通过采取一系列措施来降低安全风险。防范机制工作内容包含强化风险源头控制、实施风险分级管控、落实风险管控措施、加强隐患排查治理、推进



项目事件	L	E	C	D
钢筋工程	6	3	15	270
浇筑工程	3	6	15	270
堤防工程	1	6	15	90
拆除工程	3	6	15	270
道路施工	0.5	1	7	3.5
清空				确认

图 8 研判机制模块

Fig. 8 Analysis mechanism module

表 5 预警及措施

Table 5 Warning and measures

预警级别	严重程度	风险名称	警示颜色	应采取的行动(措施)	实施期限
I级预警	特别严重	围堰工程	红色	在采取措施降低危害前,不能继续作业,对改进措施进行评估	立刻
II级预警	严重	桩基工程	橙色	采取紧急措施降低风险,建立运行控制程序,定期检查、测量及评估	立即或近期整改
III级预警	较重	护坡工程	黄色	可考虑建立目标、操作规程,加强培训及沟通	2年内治理
IV级预警	一般	挡墙工程	蓝色	可考虑建立操作规程、作业指导书,但需定期检查	有条件、有经费时治理

水利安全生产标准化建设及加强防范措施控制。

工程在前期通过编制重大事故隐患治理方案、应急预案等,采用数字交底、安全教育 VR 培训、数字会议等方式进行提前防范。

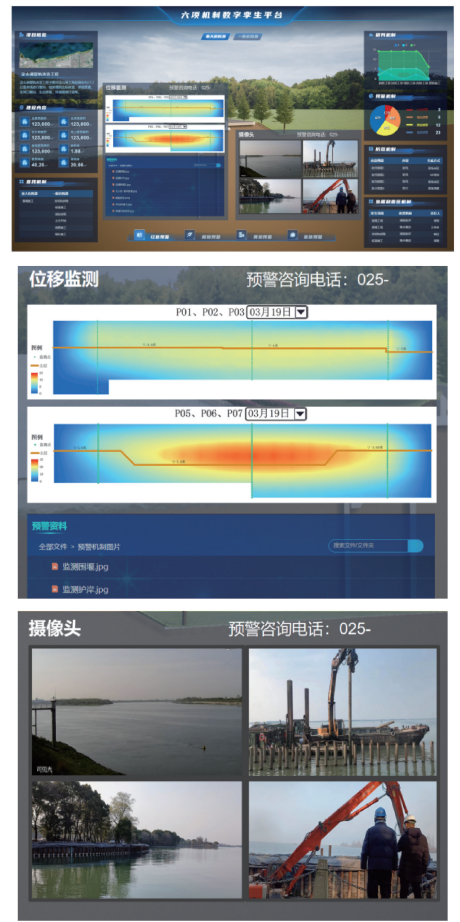


图 9 预警机制模块

Fig. 9 Warning mechanism module

在工程的围堰施工阶段,提前模拟围堰施工过程,提前防范可能出现的与原有建筑物、管线间碰撞等问题。同时,基于数字技术辅助工程人员对围堰的断面、施工方案进行优化,提高施工效率和质量。

在原堤防老结构拆除阶段,提前模拟演示拆除过程,实时在线测量施工或拆除范围内管线距离,减少拆除过程中对周边建筑物的影响,降低安全风险。同时,通过模拟分析对拆除后的材料运输、场地布置进行规划,为后续施工做好准备。

在工程建设过程中,结合移动端实时上报可能存在的质量问题,流程流转后基于线上平台查看质量位置、提出整改意见、回复整改结果,实现各质量问题数据全程可查询、可追溯(见图 10)。

### 3.5 处置与责任机制

处置机制和责任机制是水利工程安全管理的最后环节,旨在安全事故发生后迅速应对并追究责任。具体内容包含健全完善应急预案、快速有效开展应急处置、加强应急保障能力建设。

在处置机制中,本工程在建设过程中根据工程

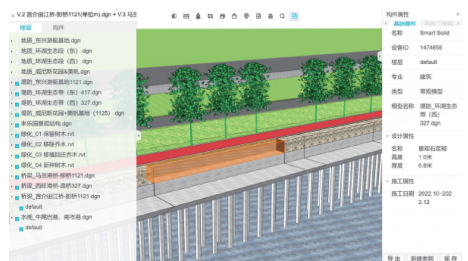


图 10 防范机制模块

Fig. 10 Preventive mechanism module

图 11 处置和责任机制模块

Fig. 11 Disposal and responsibility mechanism module

危险源和可能发生的事故险情,提前制订具有针对性、实用性、可操作性的生产安全事故应急预案和现场处置方案,并指定相应责任人。一旦发生安全事故,数字孪生平台可快速定位事故位置和影响范围,并提供相关的工程信息和历史数据,弹出推荐的应急方案。这有助于决策者快速制订针对性的应急处置方案,减少事故损失和影响。同时,通过数字孪生技术的模拟分析功能,还可协助制定和完善安全管理制度与规范,提高处置效率和效果。

在责任机制中,本工程基于数字孪生平台记录、查询水利工程的整个生命周期信息,包括设计、施工、运维等各阶段的数据和记录,便于在事故发生后快速查明原因和责任主体,为追究责任提供依据(见图 11)。

### 4 结语

本文依托淀山湖岸线堤防改造工程案例,研究了数字孪生技术在水利工程安全生产风险管控“六

项机制”中的应用方案,阐明了数字孪生技术在水利工程中的应用优势和发展场景。

1)在查找机制方面,数字孪生技术可实时监测并孪生现场施工环境、进场人员、临时设备用水用电、进度及方案等情况,帮助工程师迅速定位当前阶段施工中的潜在隐患,如管道碰撞、结构错位等,避免施工过程中的安全问题;基于平台红色高亮展示重大危险源、蓝色高亮展示一般危险源,全面、定期辨识并动态更新危险源。

2)在研判机制方面,数字孪生技术可基于平台结合直接评定法研判重大危险源风险等级,结合 LEC 法研判一般危险源风险等级,结合模型分别对重大风险、较大风险、一般风险和低风险 4 个等级危险源进行红、橙、黄、蓝 4 种颜色展示,帮助工程师深入分析隐患产生的地点、原因和潜在影响,建立风险监管清单。

3)在预警机制方面,数字孪生技术可通过实时监控、监测和数据分析,提前发现建设过程中的堤防位移、沉降、汛期水位等数据和环境数据异常,一旦超过安全阈值将高亮展示预警标识,并自动触发预警机制,定位监控视频,及时提醒相关人员采取措施。

4)在防范机制方面,数字孪生技术可采用数字交底、安全教育 VR 培训、数字会议等方式进行提前交底、培训防范,如提前模拟围堰施工过程及在线测量其与原有建筑物、管线间距离等,降低安全风险。

5)在处置机制和责任机制方面,数字孪生技术可结合生产安全事故应急预案和现场处置方案,快速定位事故位置和影响范围,并提供相关的工程实时信息和历史数据,明确应急方案及责任人,为处置和追究责任提供依据。

综上所述,数字孪生技术在水利工程“六项机制”中的应用是一个复杂而系统的过程,需在实践中不断探索和完善,以便给水利工程未来发展带来更广阔的空间和机遇。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 水利部. 构建水利安全生产风险管控“六项机制”的实施意见[Z]. 2022.  
Ministry of Water Resources. Implementation opinions on building “Six Mechanisms” for risk control of water conservancy safety production[Z]. 2022.
- [ 2 ] 张程,谢凯,胡书庭,等. 太湖流域水利安全生产风险管控“六项机制”建设探索与展望[J]. 中国水利,2024(2):52-55.  
ZHANG C, XIE K, HU S T, et al. “Six Mechanisms” for production safety and risk management in the Taihu Basin: exploration and prospects[J]. China water resources, 2024(2): 52-55.
- [ 3 ] 张波,赵松鹏. 基于数字孪生的安全生产风险管控平台研究[J]. 人民珠江,2023,44(9):104-110,116.  
ZHANG B, ZHAO S P. Risk control platform of safety production based on digital twin [J]. Pearl River, 2023, 44(9): 104-110, 116.
- [ 4 ] 马建新,王伟,赵松鹏. 水利安全生产状况评价指标体系构建及应用[J]. 中国水利,2022(22):69-71,68.  
MA J X, WANG W, ZHAO S P. Establishment and application of an evaluation index system for water safety production[J]. China water resources, 2022(22):69-71,68.
- [ 5 ] 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.  
RAO X K, MA R, ZHANG L, et al. Study and design of dike engineering safety management system based on GIS+BIM+IoT digital twin [J]. China rural water and hydropower, 2022(1): 1-7.
- [ 6 ] 孙一,魏涛,赵静,等. 基于数字孪生技术的智慧水利应用研究[J]. 移动信息,2023,45(9):171-173.  
SUN Y, WEI T, ZHAO J, et al. Research on intelligent water conservancy application based on digital twin technology [J]. Mobile information, 2023, 45(9): 171-173.
- [ 7 ] 黄立锴. 浅谈数字孪生技术在智慧水利工程中的应用[J]. 珠江水运,2022(16):46-48.  
HUANG L K. Application of digital twin technology in smart water conservancy project[J]. Pearl River water transport, 2022(16): 46-48.
- [ 8 ] 李毅,黄诗峰,臧文斌,等. 基于虚拟地理环境的数字孪生流域防洪应用技术探讨[J]. 遥感学报, 2024, 28(5): 1330-1339.  
LI Y, HUANG S F, ZANG W B, et al. Discussion on flood control application technology of digital twin basin based on virtual geographic environment [J]. National remote sensing bulletin, 2024, 28(5): 1330-1339.
- [ 9 ] 谢明霞. 数字孪生水利内涵及应用场景研究[J]. 人民长江, 2024, 55(2): 245-251, 264.  
XIE M X. Connotation and application scenarios of digital twin water conservancy [J]. Yangtze River, 2024, 55(2): 245-251, 264.
- [ 10 ] 张绿原,胡露骞,沈启航,等. 水利工程数字孪生技术研究与探索[J]. 中国农村水利水电,2021(11):58-62.  
ZHANG L Y, HU L Q, SHEN Q H, et al. Research and exploration of digital twin technology in water conservancy engineering[J]. China rural water and hydropower, 2021(11): 58-62.
- [ 11 ] 纪喆,部暖,何宗涛. 基于数字孪生技术的安全生产管理模块探讨[J]. 海河水利,2024(S1):87-91.  
JI Z, GAO N, HE Z T. Safety production management module based on digital twin technology [J]. Haihe water resources, 2024(S1): 87-91.
- [ 12 ] 蔡阳. 数字孪生水利建设中应把握的重点和难点[J]. 水利信息化,2023,(3):1-7.  
CAI Y. Key and difficult points to be grasped in the construction of digital twin water conservancy [J]. Water resources informatization, 2023(3): 1-7.
- [ 13 ] 薛萍萍,韩斐,陈柏. 数字孪生技术在某泵站运行管理中的应用[J]. 水利技术监督,2024,32(6):45-48.  
XUE P P, HAN F, CHEN B. Application of digital twin technology in operation and management of a pumping station [J]. Technical supervision in water resources, 2024, 32(6): 45-48.