

智慧水利数字孪生系统对极端天气风险的响应机制

张向往

河北省石津灌区事务中心 河北 石家庄 050034

摘 要：极端天气频发加剧水利系统运行风险，传统管控模式难以适配复杂多变的水文应急场景。现有水利防控体系存在响应流程固化、资源调配粗放、协同能力不足等短板，本文依托数字孪生技术搭建全新的水利风险响应体系，构建架构支撑、分级流程、赋能模式、保障机制四位一体的完整运行体系。体系依托全域数据感知与层级联动架构，细化极端天气风险分级响应流程，通过多元赋能模式提升管控精细化程度，搭配动态优化与长效保障机制稳固系统运行效能，可为水利领域极端天气风险防控提供科学化的运行支撑。

关键词：智慧水利；数字孪生；极端天气；风险响应；水利管控

引言：气候环境的持续变化，让暴雨、干旱、强对流等极端天气的发生频次与影响强度持续提升，对流域水文调控、水利工程运维、水域安全管控造成极大冲击。传统水利管控方式智能化程度有限，风险识别滞后、处置模式单一、资源统筹不足等问题逐步凸显，难以适配复合型、突发性的极端天气风险防控需求。数字孪生技术可实现水利场景数字化映射与动态化管控，能够有效弥补传统水利防控的运行短板，依托该技术搭建专业化风险响应体系，成为提升水利系统抗风险能力的重要路径。

1 智慧水利数字孪生系统极端天气风险响应的架构体系

1.1 全域感知数据支撑架构

全域感知数据支撑架构是智慧水利数字孪生系统应对极端天气风险的底层载体。该架构覆盖流域水文、水利工程、地理环境、气象要素等全部水利相关监测维度，搭建立体化的数据采集传输体系。各类前端监测设备部署于河道、水库、堤坝、泵站等水利关键点位，持续采集水位、流速、雨量、设备运行状态等各类基础数据。架构搭建标准化数据传输通道，统一各类异构数据的传输格式与接入标准，保障不同类型监测数据可以稳定录入系统数据库。架构设置独立的数据甄别与规整模块，针对极端天气场景下数据波动、数据缺失、数据异常等各类问题开展预处理工作，剔除无效信息，规整杂乱数据^[1]。结构化的数据存储模式，可对海量水利监测数据进行分类归档，夯实极端天气风险处置的数据底层支撑。

1.2 分层协同联动运行架构

分层协同联动运行架构是系统开展极端天气风险响应的核心运行框架。架构按照水利风险响应的运行逻辑划分多层运行模块，各模块设置专属运行职能与工作边界，形成层级化的运行体系。底层模块专注基础数据处理与状态识别，承接全域感知架构传输的各类数据，完成水利场景状态的精准辨识。中层模块聚焦风险层级划分与任务拆解，依据识别的场景状态，界定极端天气带来的水利风险类型，拆分对应处置工作内容。顶层模块负责统筹各类响应工作推进，对接各中层运行单元，分配对应处置工作内容。各层级模块保持独立运行状态，层级间设置专属数据交互通道，实现指令下达、状态反馈、信息流转的顺畅推进，构建层级清晰、权责明确的风险响应运行体系。

1.3 多维度资源适配架构

多维度资源适配架构为极端天气风险响应提供全方位资源保障，统筹整合水利系统各类运行资源、设备资源与管控资源。架构对区域内水利工程设备、调度物资、运维人力、管控权限等各类资源进行系统化梳理登记，建立完整的资源信息台账。台账涵盖各类资源的分布位置、可用状态、承载能力及适用场景等关键信息。架构搭载智能资源匹配模块，可依据不同极端天气的风险特征，调取适配的水利管控资源与处置资源。针对高强度降雨、极端高温、强对流等不同天气场景，动态调整资源调配方向与资源投入规模，补齐不同风险场景下的资源缺口。整套架构实现水利各类资源的精细化统筹调配，适配不同极端天气场景下的风险处置需求。

2 智慧水利数字孪生系统极端天气风险的分级响应流程

2.1 风险态势动态甄别环节

风险态势动态甄别环节是分级响应流程的前置基础环节。系统依托全域感知架构接入的各类水利与气象数据,完成对极端天气衍生风险的逐项筛查。环节聚焦水文异动、工程异变、流域环境波动等各类风险源头,对监测数据的变化幅度、演变节奏进行细致研判。系统依托内置判别规则,区分不同强度的极端天气影响范围,划分水利风险的影响层级^[2]。该环节摒弃固化判定标准,依据实时数据变化更新风险研判内容,适配极端天气多变的演变特征。环节重点捕捉隐性风险与渐进式风险,精准区分常规水文波动与极端天气引发的突发性风险,为后续响应流程启动提供精准依据。

2.2 响应指令智能触发环节

响应指令智能触发环节承接风险甄别结果,启动对应等级的风险处置流程。系统绑定各层级风险对应的响应规则,不同风险等级对应差异化的处置启动标准。风险研判结果达标后,系统自动解锁对应处置权限,生成专属响应指令。指令内容细化至水利管控的具体板块,涵盖水文调控、设备管控、区域防控等细分工作内容。系统依据风险覆盖范围,确定指令覆盖的管控单元,明确各板块处置工作的启动节点。该环节依托标准化判定逻辑,杜绝人为研判偏差带来的处置滞后,保障风险处置工作及时启动。

2.3 处置动作协同推进环节

处置动作协同推进环节落实各项风险应对实操工作,落地系统下发的各类响应指令。各水利管控单元接收对应工作指令后,开展针对性的风险处置操作。水利工程设备依据指令完成启闭、调蓄、降压等调控操作,流域水文管控板块开展水域态势管控工作。各管控单元按照既定处置逻辑分步推进工作,细化各阶段处置内容与推进节奏。系统对各单元处置进度进行全程跟进,规范各项操作的执行标准。该环节打通多板块处置壁垒,落实精细化、层级化的风险处置操作,覆盖极端天气风险防控的各个关键环节。

2.4 响应状态动态续转环节

响应状态动态续转环节贯穿风险处置全周期,管控响应流程的持续、切换与终止。系统实时采集风险处置过程中的水文数据、设备数据与环境数据,更新风险实时态势。风险出现升降级变化时,系统调整对应响应等级,更新配套处置指令与管控方式。风险态势趋于平稳、各类指标回归正常区间后,系统逐步缩减处置管控力度,有序终止阶段性响应流程。风险持续蔓延或出现

新的隐患时,系统延长响应周期,迭代更新处置方案,维持稳定的风险管控状态。

3 智慧水利数字孪生系统极端天气风险响应的核心赋能模式

3.1 全域态势实时联动模式

全域态势实时联动模式依托数字孪生映射能力,完成水利流域整体运行状态的全景呈现。该模式打通流域内河道、水库、闸站、堤防等各类水利单元的信息链路,整合区域内水文、气象、工程运行的各类状态信息。搭建完整的流域态势展示维度,细化水域演变、设备运行、环境变化等各类状态信息的展示颗粒度。针对极端天气带来的复杂水文变化,完成区域态势信息的动态更新,精准捕捉水域运行的细微变动^[3]。依托数字化映射能力,打破传统水利管控的区域割裂问题,拓展风险响应的感知边界,为极端天气风险管控提供完整的态势信息支撑。

3.2 多要素协同调度模式

多要素协同调度模式围绕水利运行各类核心要素,搭建系统化的调度运行方式。该模式覆盖水文资源、工程设备、防控资源、运维力量等关键管控要素,梳理不同要素的运行属性与调配逻辑。结合极端天气带来的水文变化特征,调整各类水利要素的运行配比与投入结构。针对水资源调蓄、工程设备启停、防控物资调配等工作,建立针对性的调度逻辑。依据不同要素的功能属性完成分工适配,理顺各类水利要素的运行优先级。依托多要素整合调度的运行方式,填补单一要素管控的局限性,提升极端天气下水利风险管控的精细度。

3.3 动态局势自适应应对模式

动态局势自适应应对模式适配极端天气局势多变的特征,实现管控方式的自主调整。极端天气演变进程存在不确定性,水文态势与工程运行状态会出现阶段性波动。该模式依托系统内置的自适应调控逻辑,依据局势变化调整管控策略与处置方式。局势趋于平缓阶段,收缩水利管控的覆盖范围与投入力度。局势持续恶化阶段,升级管控标准,拓展风险处置的覆盖维度。系统依托实时数据完成局势判断,自主调整管控节奏与处置重点,适配极端天气不同演变阶段的管控需求。

3.4 跨场景联动处置模式

跨场景联动处置模式突破单一风险场景的处置局限,适配多元极端天气风险的处置需求。暴雨、洪涝、高温、干旱等极端天气会催生差异化的水利风险,风险呈现形式与防控重点存在明显区别。该模式整合各类极

端天气风险场景的处置逻辑,搭建通用性与针对性兼具的处置体系。面对复合型天气风险,切换适配的处置逻辑,联动多类水利管控单元开展处置工作。覆盖单一风险场景与复合风险场景的处置需求,丰富系统应对极端天气风险的处置维度,强化复杂天气环境下水利运行的风险防控能力。

4 智慧水利数字孪生系统极端天气风险响应的优化与保障机制

4.1 系统运行动态优化机制

系统运行动态优化机制适配极端天气下水利管控的复杂变化,持续更新平台整体运行能力。流域水文环境和水利设施工况始终处于变动状态,气象更迭、季节交替、设备损耗都会改变水域运行状态,固定的系统参数和运行逻辑很难适配不断变化的风险场景。机制依托历次风险处置留存的运行数据,细致排查平台运行过程中暴露的各类问题。修正数据采集产生的误差,补齐特殊风险场景的适配短板,调整僵化的管控逻辑。结合区域高发的暴雨、干旱、强对流等天气类型,微调平台内部的风险判定标准,更新水利工程调控的运算依据。定期核对系统模块承载上限、数据处理速度与信息传输质量,优化平台整体运行架构,提升恶劣天气侵袭下系统的抗压能力与稳定性^[4]。通过持续的数据复盘和功能调试,迭代升级底层算法,贴合流域环境与水利设备的实时变化状态。

4.2 响应流程迭代完善机制

响应流程迭代完善机制针对极端天气风险处置全流程,持续打磨处置方式、补齐流程短板。极端天气引发的水文风险形态多样,叠加状态复杂,传统固化的处置流程难以应对不断出现的新型风险状况。机制全面梳理各类极端天气的处置全过程,逐一检查流程衔接、环节推进、指令落地等关键节点存在的疏漏。针对风险识别滞后、环节衔接不畅、管控覆盖不足等问题,重新梳理流程推进逻辑,调整各环节的实施步骤。补充复合型极端天气对应的专属处置流程,填补特殊场景的处置空白。删减流程中多余的操作步骤,缩短整体处置耗时,明确各流程节点的执行规范与权责范围,细化不同风险等级对应的具体处置操作。

4.3 技术运行稳定保障机制

技术运行稳定保障机制夯实系统风险响应的技术基础,让平台在恶劣气象环境下保持稳定运行状态。极端天气会对现场监测硬件、数据传输链路、后台运算模块造成不同程度的干扰和损耗。机制围绕硬件设备、传输体系、运算系统搭建分层防护模式,落实全方位运维工

作。常态化开展设备巡检工作,重点排查恶劣天气过后出现的设备老化、零件磨损、传感器失灵等问题,及时完成设备检修、部件更换与精度校准。搭建具备抗干扰能力的数据传输体系,降低恶劣天气对信号传输的影响,保证监测数据持续录入系统。动态把控后台服务器运行负荷,针对高并发数据处理场景调整运算配比,缓解数据堆积与运算延迟现象。依托内置的智能检测模块主动排查系统隐患,快速处理突发技术故障,维持风险处置工作的平稳推进。

4.4 联动协同长效保障机制

联动协同长效保障机制梳理各水利管控单元的协作方式,构建稳定可持续的风险响应协作体系。极端天气风险处置涉及流域管理、设备运维、物资调度、隐患排查等多个工作板块,各单元高效配合是风险管控落地的关键。机制清晰划分各管控单元的工作范围与职责边界,细化不同风险等级对应的具体工作内容与执行标准。搭建标准化的跨单元信息交互渠道,打通各管控板块之间的信息壁垒,实现管控信息高效互通。结合各类极端天气处置场景,固定物资调配、设备调控、隐患治理的协作流程,统一各岗位操作规范^[5]。常态化开展协同磨合演练,优化多单元配合模式,排查并补齐工作衔接中的漏洞,持续完善跨区域、跨板块的联动运行逻辑。

结束语

整套智慧水利数字孪生风险响应体系,通过多层架构搭建、标准化流程运行、智能化模式赋能与全方位机制保障,形成一套完整的极端天气水利风险处置体系。体系可适配各类极端天气带来的差异化、复合型水利风险,打破传统水利管控的运行局限,提升水利风险响应的精细化与智能化水平。多维度的运行优化与协同保障机制,能够持续适配动态变化的流域环境与风险场景,为水利安全稳定运行筑牢坚实的数字化防控屏障。

参考文献

- [1] 李晓光. 浅谈郑州市智慧水利数字孪生平台的构建[J]. 河南水利与南水北调,2025,54(2):86-87,90.
- [2] 肖雪峰,樊茗钰. 数字孪生技术在智慧水利中的应用现状及趋势[J]. 湖南水利水电,2026(1):79-81.
- [3] 张凤翔. 数字孪生驱动下的沂沭泗智慧水利建设实践与路径探析[J]. 治淮,2026(2):54-56.
- [4] 金文昊. 水利工程智慧运行管理中的数字孪生系统实践[J]. 工程技术研究,2026,11(3):160-162.
- [5] 何泽兴. 数字孪生驱动的水利工程全生命周期智慧化管理机制[J]. 中国水运,2026(12):95-96,139.