

数字孪生黄河“全链条”建设思考与实践

于海泓

(水利部黄河水利委员会信息中心, 450004, 郑州)

摘要: 建设数字孪生流域是提升国家水安全保障能力的重要支撑。加快构建具有预报、预警、预演、预案“四预”功能的数字孪生黄河体系,是贯彻落实黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略的迫切需要,是推动新阶段黄河流域水利高质量发展、全面提升水安全保障能力的有力驱动和强力支撑。通过数字孪生黄河建设,推动黄河流域治水业务发展向数字化、网络化、智能化转变。回顾了治黄信息化建设发展历程,分析了信息化各环节之间当前存在的协同不足等问题,阐明了数字孪生黄河“全链条”建设的背景、意义和基础,基于数字孪生黄河建设需求提出信息采集、通信传输、数据管理、系统开发、运行维护“全链条”建设思路,明确了主要框架、逻辑关系及关键技术。整体框架设计计划分为构建黄河数字孪生平台、完善黄河信息基础设施、构建“2+N”业务应用、完善黄河网络安全体系和保障体系,探讨了“全链条”各环节的协同目标和主要建设内容,推动打造前后衔接、左右关联、上下贯通的有机整体,阐述了初步取得的实践成果及经验,以期为数字孪生黄河及其他流域数字孪生规划和建设提供参考。

关键词: 数字孪生黄河;全链条;协同;数字孪生水利;黄河流域生态保护和高质量发展

Thoughts and practice on the “full-chain” construction of the Digital Twin Yellow River//YU Haihong

Abstract: Building digital twin basins is a vital means of enhancing national water security. Accelerating the development of a digital twin Yellow River system equipped with forecasting, early warning, rehearsal, and contingency planning functions is an urgent requirement for implementing the national strategy of ecological protection and high-quality development in the Yellow River basin. It serves as a strong driver and support for advancing high-quality water conservancy development in the basin and improving water security capabilities in the new stage. By constructing the Digital Twin Yellow River, water management in the basin is being transformed toward digitalization, networking, and intelligent operations. This paper reviews the historical evolution of informatization in Yellow River governance, analyzes existing issues such as insufficient coordination among different stages of information systems, and clarifies the background, significance, and foundation of the “full-chain” construction of the Digital Twin Yellow River. Based on construction needs, a “full-chain” development concept encompassing information collection, communication transmission, data management, system development, and operation and maintenance is proposed. The core framework, logical structure, and key technologies are defined. The overall architecture includes building the digital twin platform, upgrading information infrastructure, developing “2+N” business applications, and improving network security and support systems. The paper further explores the synergy objectives and major tasks of each link in the “full chain”, aiming to create an integrated, coherent, and interconnected system. Preliminary achievements and practical experiences are presented to serve as a reference for planning and constructing digital twin systems for the Yellow River and other river basins.

收稿日期:2025-05-07 修回日期:2025-07-01

作者简介:于海泓,党委书记、主任,高级工程师,主要从事水利信息化工作和研究。

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3209201)。

Keywords: Digital Twin Yellow River; full chain; coordination; digital twin water conservancy; ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin

中图分类号: TV882.1+TP27

文献标识码: B

文章编号: 1000-1123(2025)13-0014-10

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2025.13.003

习近平总书记指出“推进中国式现代化,要把水资源问题考虑进去”“中国式现代化,也包括水利现代化”“没有信息化就没有现代化”。水利部坚定不移推动数字孪生水利建设,加快发展水利新质生产力,大力推进数字孪生流域、数字孪生水网、数字孪生工程建设。建设数字孪生流域是提升国家水安全保障能力的重要支撑。江河保护治理是一个庞大复杂的系统工程,必须坚持数字赋能,依托现代信息技术变革治理理念和治理手段。借助数字孪生黄河建设,为流域水系、水利工程、水利管理运行体系动态在线监测提供先进感知手段,为流域管理创新发展提供基础支撑,促进传统防御决策向智能化发展,推动黄河流域治水业务发展向数字化、网络化、智能化转变。水利部黄河水利委员会(以下简称黄委)紧跟时代发展要求,积极落实水利部安排部署,全力构建全流域贯通、全领域覆盖、全链条联动的数字孪生黄河体系,为黄河保护治理工作提供信息化驱动引领和支撑保障。

近年来黄河信息化建设取得了积极成效,数字化、网络化、智能化技术应用不断取得新进展,但与黄河流域高质量发展需求和水利部数字孪生水利建设整体要求相比,还存在监测感知体系不健全、数据汇聚不全面、统筹建设不系统等问题和不足,距离形成有效衔接、统一高效的有机整体尚有差距。为全力构建数字孪生黄河体系,以新质生产力赋能黄河流域生态保护和高质量发展,亟须加强数字孪生黄河信息采集、通信传输、数据管理、系统开发、运行维护“全链条”建设,全面提升数字孪生黄河建设效能,更好赋能黄河保护治理事业高质量发展。

一、黄河信息化发展概况

黄河信息化发展历史是在长期治黄实践中,利用信息化技术支撑服务黄河保护治理工作的探索过程和经验积累,是当前开展数字孪生黄河建设的重要基础。通过回顾信息化技术演进过程和黄河信息化发展历史,为当前数字孪生黄河建设提供有益借鉴。

1.20世纪黄河信息化发展

淮河“75·8”大洪水后,为解决黄河下游防汛通信的迫切问题,黄委于1977年成立通信总站,1986年成立黄河防汛自动化测报计算中心(2002年为适应“数字黄河”工程建设需要,两家单位合并组建成立目前的黄委信息中心)。到20世纪末,黄河通信相继建成郑州至三门峡数字微波电路、郑州至东营微波通信干线等,开展了黄河“96·8”洪水遥感监测,成功研制了遥测电子水尺,建成了“小花间”(小浪底水利枢纽至花园口水文断面区间)暴雨洪水预警预报系统,提高了洪水预报精度、缩短了预报时间;开发了黄河下游洪水预报调度系统及黄河下游工情险情会商系统、远程异地会商系统,在黄河防汛中发挥了重要作用,其中黄河下游防洪防凌决策支持系统获得国家“八五”科技攻关重大科技成果奖。

2.“数字黄河”工程建设

2001年黄委党组提出“数字黄河”工程建设,治黄信息化进入全面、快速发展阶段。编制了《“数字黄河”工程规划》,于2003年正式得到批复;遥感技术应用进一步深入,开展凌情、洪水、河势、墒情、河道清障、河口湿地生态等遥感监测;建成水利行业最大的通信专网、计算机广域网和水利行业第一家数据中心;初步建成黄河防汛抗旱、水量调度、工程管理和电子政务等六大应用系统;提出“数字黄河”工程框架体系并获得大禹水利科学技术奖一等奖,在国内外产生深远影响。网络安全得以强化,逐步建立核心网络与骨干节点的边界访问控制系统、入侵防护系统等。

3.信息化“六个一”推进

2016年为扭转数据资源碎片化和应用资源碎片化局面,黄委推动开展“一张图”“一个数据库”“一站式登录”“一目了然的监管”“‘一竿子’到底”“一个单位来抓”等信息化“六个一”重点工作,取得了扎实成效。初步搭建起统一的地理信息公共服务平台和服务门户;水文气象等重要数据集中到黄委数据中心;开发综合信息服务门户系统,初步实现各类政务信息、业务信息的聚合展现;行业管理工作得到加强,走出一条

突出应用的信息化资源整合路子。

4. 数字孪生黄河建设

2021年水利部印发《智慧水利建设顶层设计》《“十四五”智慧水利建设规划》，推进数字孪生流域建设，明确将数字孪生黄河作为建设重点。同年黄委成立数字孪生黄河建设领导小组，组织编制《数字孪生黄河建设规划（2022—2025）》并于2022年3月正式颁布。

近年来，黄委遵循“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”要求，推动数字孪生黄河建设不断取得进展。感知体系方面，通过水文监测、视频监控、无人机巡查、卫星遥感等，实时采集雨情、水情、凌情、工情、险情、泥沙、水质等数据；数据平台建设方面，初步建成黄河云数据中心，整合水利工程、水文、气象等多源数据，初步实现重要数据共享；模型构建方面，开发了降雨径流预报、水库群联合调度、水沙演进、水量调度等水利专业模型，以及遥感影像和视频图像智能识别模型；应用系统开发方面，建成黄河水旱灾害防御四预系统、水资源管理与节约保护应用系统等，赋能防汛、水资源管理等黄河保护治理业务。

二、数字孪生黄河“全链条”建设的认识与思考

黄河信息化建设虽然取得了显著成效，但仍存在监测感知体系不健全、算据获取能力亟待提升、通信传输保障能力薄弱、数据共享机制不完善、跨部门协作存在壁垒、业务信息化管理体系不健全、业务应用智能化水平仍需提高、运维体系不完善、网络安全防护能力不足，以及建设分散、标准不统一等问题。同时各环节之间协同不足问题越来越凸显，影响了数字孪生黄河整体效能，包括：信息采集与通信传输、数据存储脱节，采集设备协议不统一导致数据传输效率低从而影响实时性，数据分散、不能及时入库导致数据孤岛和应用割裂；通信传输与数据管理对接流程优化不足导致关键信息入库延迟，模型更新、系统应用滞后；数据管理与系统开发结合不够紧密，数据格式与业务系统兼容性不够，开发需要对数据重复清洗加工，拖累响应速度；各环节与运维缺乏高效协同，信息采集、通信传输、数据管理、应用系统的运维自动化程度有待提升，流程不够顺畅，系统开发预留的运维接口兼容性不足，全方位高效运维保障还需进一步提升等。

鉴于对黄河信息化发展历程及以上存在问题的

认识，当前科学构建数字孪生黄河体系，应摒弃局部分散、各自为政的建设方式，运用发展、全面、系统的思维提升数字孪生黄河建设效能，加快发展水利新质生产力，为黄河保护治理提供信息化驱动引领和支撑保障。

1. “全链条、全周期、全业务”建设思路

按照“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”要求，锚定“构建全流域贯通、全领域覆盖、全链条联动的数字孪生黄河体系”目标，通过统一架构、智能中台、闭环反馈等手段强化技术、标准和管理协同，打造信息采集、通信传输、数据管理、系统开发、运行维护“全链条”，服务规划设计、建设管理、应用赋能“全周期”，支撑水灾害、水资源、水生态、水环境、水文化“全业务”，持续推动数字孪生黄河建设。

从信息化专业性角度分析，打造“全链条”数字孪生黄河体系的信息化建设业务流程，是先将业务数据化、再将数据业务化的过程。建设数字孪生黄河需要注重“全链条”覆盖和联动，切实提升各链条的专业能力与水平。打造“全链条”须突出专业精通、技术精湛和上下贯通，熟悉信息化专业、水利专业以及它们结合起来的有关专业和技术，全面提升信息采集、通信传输、数据管理、系统开发、运行维护各环节科研能力和技术水平；打造前后衔接、左右关联、上下贯通的有机整体；强化科技创新与产品研发，聚焦业务需求、生产需要、技术瓶颈等开展技术攻关与实践探索；在科研和技术上精益求精，以创新驱动培育发展信息化新质生产力。

2. 数字孪生黄河“全链条”建设框架

数字孪生黄河建设总体框架划分为构建黄河数字孪生平台、完善黄河信息基础设施、构建“2+N”业务应用、完善黄河网络安全体系和保障体系（见图1）。一是构建黄河数字孪生平台，内容包含黄河数据底板、黄河模型平台、黄河知识平台等方面。二是完善黄河信息基础设施，包括通信传输、水利感知网、黄河业务网、黄河云、基础环境等方面。三是构建“2+N”业务应用体系，通过黄河数字孪生平台，调用数字孪生流域相关业务的算据、算法、算力等资源，实现与物理流域同步仿真运行、虚实交互、迭代优化。四是完善黄河网络安全体系，包括黄河网络安全管理体系、技术体系、运营体系等。五是完善黄河保障体系，包括组织管理、标准规范、技术创新、运维体系、人才队伍和宣传交流等。

在总体框架下,以“采集-传输-数据-系统-运维”为核心链条,注重各环节贯通、协同与联动,构建全生命周期、全要素联动的智能化治理体系。在建设过程中,信息采集在实现全域覆盖、全要素实时监测,提升高精度动态监测及极端环境下采集能力的基础上,强化采集数据的高效传输、存储和应用;通信传输在实现全覆盖、高可靠的数据传输,强化补盲、强链,打通通信“最后一公里”以及提升极端环境下通信韧性的基础上,优化关键信息数据实时传输保障;数据管理在实现多源数据融合与智能分析,提升算据、算力支撑服务能力的基础上,加强全流域数据共享与应用,提升对各信息系统的支撑服务能力与水平;系统开发在建设具有“四预”(预报、预警、预演、预案)功能的智能化应用系统、提升多目标协同优化及虚实交互控制能力的基础上,强化对数据的高效处理与调用,提升系统响应水平;运行维护在实现全生命周期系统健康管理,提升自动化运维、标准化运维能力的基础上,加强与各环节的深入结合,提升运维效率和快速反应能力。主要包括以下建设内容。

(1)信息采集

持续推进“天空地水工”一体化监测感知体系建设。拓展卫星遥感应用的广度和深度,强化水利遥感卫星在防洪防凌、水资源管理等业务中的应用与提升。提高遥感采集能力,开展遥感智能提取技术研究,扩展智能识别模型,丰富遥感智能提取要素。研究开发遥感智能解译提取平台,创新遥感智能提取与在线协同一体化作业方式,提升解译自动化和智能化水平。升级黄委无人机应用管理平台,提升无人机工程巡检智能识别能力。优化视频管理平台,推进流域内视频资源整合接入,优化平台运维统计分析功能,研发视频平台的智能识别模块,打通从智能识别到信息告警的全流程。

(2)通信传输

提高防汛通信能力,研究5G通信/无线新技术应用,解决黄河下游“最后一公里”的信息传输瓶颈。开展黄河下游信息网络无盲区、无死角互联探索和黄委干线微波5G技术升级改造试验,利用黄河下游“十四五”防洪工程安全监测与信息化项目开展4G LTE信号补盲试点工作。优化通信传输优先级,确保

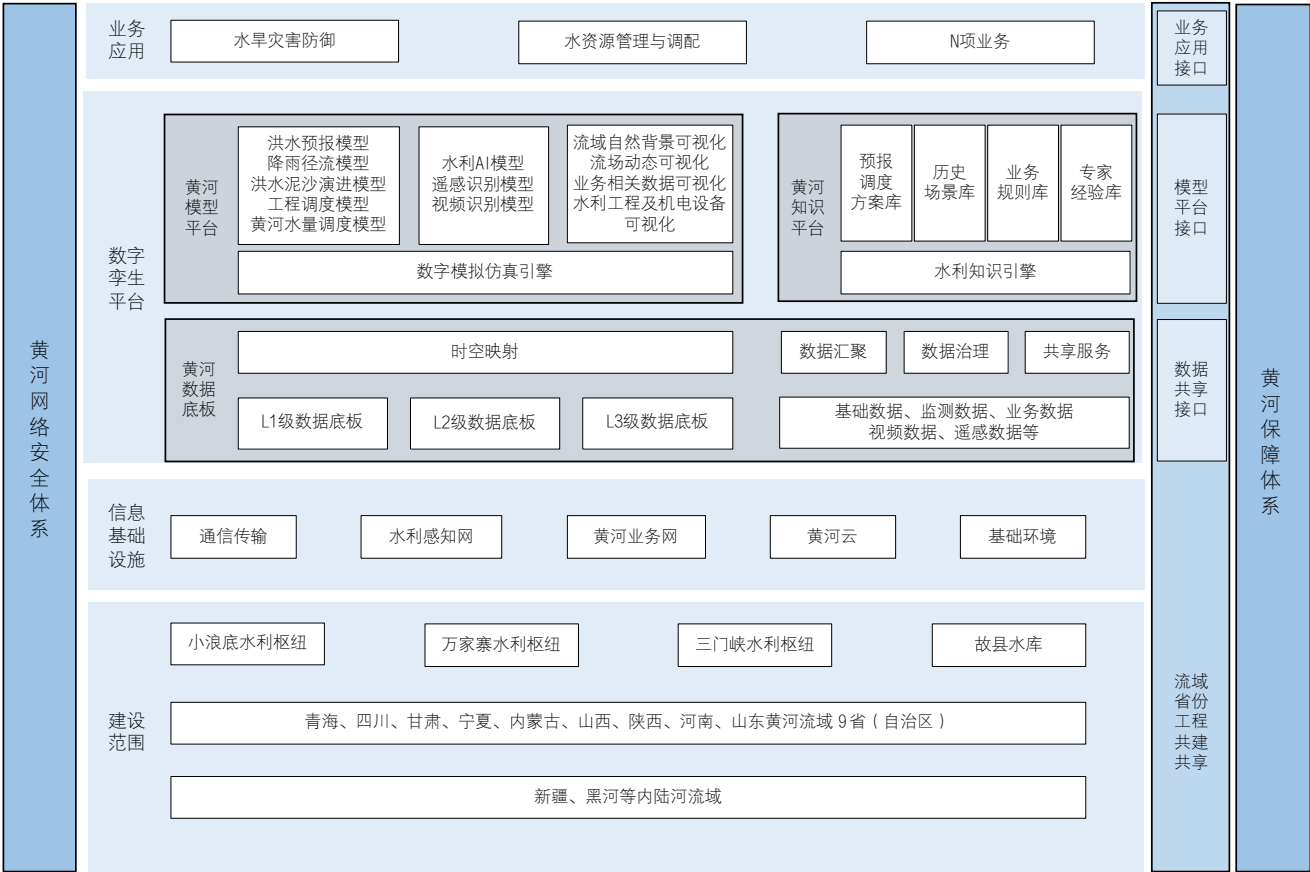


图1 数字孪生黄河建设总体架构

关键数据存储管理与应用无延迟。优化计算机骨干网络,推进黄委各单位无线网络覆盖,推进终端准入系统建设,加强黄委核心网准入集中管理。

(3) 数据管理

推进多源异构算力资源池建设,打造流域管理机构数据归集平台。加强数据安全保障,构建黄河数据安全保护体系。推进“一数一源一路径”整合,推动形成多源异构化数据汇聚、标准化数据治理、精细化数据服务的“全链条”数据管理体系。推进多源数据共享使用,汇聚更新黄河流域各类数据,完善取水口、堤防、水闸等主题数据仓库建设。提升黄委水利大模型算力支撑能力,优化黄河数据中心基础平台与服务门户,提升数据服务能力。

(4) 系统开发

夯实以黄河“一张图”为基础的流域数字孪生数据底板,持续整合流域L2级、L3级地理空间数据,实现空间数据和属性数据的一体化展示。面向“2+N”业务管理,实现空间数据的统计分析和空间信息服务资源共享。完善提升“2+N”业务应用系统。水旱灾害防御方面,不断升级完善流域防洪业务应用。水资源管理方面,持续完善流域水资源管理与节约保护业务应用,完善取水口监管专题图,优化流域取水管理平台。N项业务应用方面,持续优化河防工程管理系统,深化河湖管理应用系统,完善黄委政府网站。做好纪检监察、水土保持、水利监督和水利遗产管理等信息化支撑工作。加快推进人工智能大模型搭建,提升智能化支撑能力。优化系统运维接口兼容性,保障与运维平台的顺畅衔接,提升运维效率。

(5) 运行维护

完善信息系统运维管理平台,统一运维标准、流程和服务,提升各类基础设施和应用系统的运维自动化水平。完善预案,强化演练,加强黄河通信专网汛前检查和防汛防凌视频监控点巡检维护。保障网络平稳安全运行及黄委各类视频会议会商顺利开展。强化移动会商支撑,以“现场应急视频指挥”为使用场景,推进集智能车载起降无人机、卫星通信、移动视频会商于一体的“黄小通”建设。加强黄委网络安全攻防演练,强化日常和重要活动期间网络安全保障。优化核心网安全体系,持续推进网络安全态势感知平台建设,逐步实现全河覆盖。开展网络安全态势感知功能模块智能化研究,提高监测精准率,推动构建黄委网络安全全时“金钟罩”。

3. 关键技术

数字孪生黄河是通过数字化、网络化、智能化手段对黄河流域进行全要素、全过程的虚拟映射和动态模拟,以实现精准治理和科学决策的复杂系统工程,其关键技术涵盖以下诸多领域。

(1) 数据采集与感知技术

多源遥感技术是数字孪生黄河建设的重要数据获取手段,通过卫星遥感、无人机遥感及航空遥感,实现对黄河流域大范围、高频次的动态监测。黄河全长5464 km,流域面积75.2万km²,范围广、监测难,遥感通过卫星、无人机实现全域覆盖,弥补地面站点不足,通过高频监测动态追踪洪水、凌情、河道变迁和水土流失,实现“天空地”一体化分析,支撑黄河保护治理。其中,卫星遥感可提供宏观、周期性的黄河流域地表覆盖情况、植被指数、水体变化等信息,适用于黄土高原水土流失监测、河道演变分析等;无人机遥感则具备高分辨率、灵活机动的特点,可应用于关键河段局部洪涝灾害评估、黄河河道工程巡查等场景。物联网技术通过在黄河大堤及水库坝体等河道工程部署各类智能传感器,实现对雨水情、泥沙输移、工程安全等要素的实时监测感知,该技术应用大幅度提升监测数据的时效性和准确性,为黄河洪水预报、水资源调度和工程安全预警提供坚实的数据支撑。视频智能识别技术结合AI算法,利用高清摄像头、红外热成像仪等设备,实现对黄河堤防、闸坝等防洪工程,以及水位、流量、冰凌等的实时监视及智能预警,显著提升黄河防洪减灾的智能化水平,为工程管理和灾害防控提供高效的技术手段。

(2) 三维建模与仿真技术

建筑信息模型(BIM)与倾斜摄影建模技术是支撑黄河流域智慧化治理的核心数字化手段。在黄河保护治理中,BIM技术通过参数化建模精确构建小浪底水利枢纽、三门峡水利枢纽等关键工程的数字化镜像,集成结构应力、泄洪能力等工程参数,实现从规划设计到运行维护的全生命周期管理。倾斜摄影建模则通过无人机搭载多镜头相机,沿黄河主河道及重点支流进行多角度航测,采集高分辨率影像,经三维重建生成黄河流域高精度实景模型。结合数字正射影像(DOM)和数字高程模型(DEM),可构建流域地表的高保真三维场景,分辨率可达厘米级,适用于黄河河道河势演变分析、洪水淹没模拟等应用。基于多源数据融合开发黄河专业仿真系统,耦合水沙动力学模型、冰凌演进预

测模型、生态流量评估模型等核心算法模块,通过高性能计算,可动态模拟不同来水来沙条件下河道冲淤变化过程,预测72小时内洪水演进态势,评估调水调沙工程方案的潜在影响,为黄河保护治理决策提供量化分析工具。

(3) 边缘计算与数据汇聚技术

边缘计算技术在黄河保护治理中构建“云-边-端”协同的新型监测体系。针对黄河流域地形复杂、监测站点分散的特点,在重点水文站、防洪工程等关键节点部署边缘计算设备,实现对水位、流量、含沙量等核心参数的高效处理。数据本地化处理可显著改善黄河基础数据传输延迟情况,提升关键业务的响应速度。基于黄河多源异构数据特点构建的数字孪生数据中台,包括数据采集层、数据存储层、计算治理层及服务应用层等,通过构建多源异构数据的全链路管理体系,实现海量数据汇聚治理应用,为黄河调水调沙、防洪调度等核心业务提供分钟级的数据服务响应能力,支撑黄河流域全要素数字化映射。这种“边缘实时感知—中台智能分析—全域协同决策”的技术架构,将显著提升黄河保护治理的精准化水平和应急响应效率。

(4) 高性能计算与大数据分析技术

高性能计算与大数据分析技术已成为现代治黄工作的核心支撑,其应用显著提升了黄河保护治理的智能化水平和决策效率。通过构建异构计算架构,水利数值模型的运算效率得到数量级提升。在数字孪生黄河建设中,高性能计算与人工智能计算的融合应用为复杂水沙关系求解提供每秒百亿亿次的算力支撑。通过时空大数据挖掘,对流域内众多监测站点的实时数据进行智能分析,智慧化赋能黄河保护治理。大数据分析技术在黄河流域的应用体现在多源异构水情数据的融合处理与智能挖掘等方面。集成气象、水文、遥感等各类数据源,构建黄河PB级时空数据库。通过开发具有水利专业特色的分析算法,显著提升黄河水文预报精度、水资源调度效率和工程风险管理能力等。

(5) 大模型加持技术

构建基于千亿参数大模型的黄河治理认知引擎,深度融合黄河流域水文、气象、地质等多学科知识图谱,实现复杂治理问题的语义化理解和推理。通过持续学习历史治黄经验和实时数据,形成动态演进的“黄河保护治理知识大脑”,构建具有认知智能的黄河保护治理决策支持系统。实现流域态势智能感知(实

时处理卫星遥感、物联网监测等多元数据)、风险概率预测(含泥沙淤积、冰凌洪水等典型场景)和治理策略优化生成(综合考虑水利工程调度、生态补水等约束条件),推动黄河流域保护治理从经验驱动向“数据驱动+AI仿真”的智慧决策模式转型。

(6) 智能决策与可视化技术

融合虚拟现实(VR)、增强现实(AR)及数字孪生技术,构建高精度、沉浸式的黄河流域三维全景可视化场景。依托卫星遥感、无人机航测、水文监测站等多源数据融合,实现黄河流域地形、水文动态、水利工程设施的毫米级建模与实时渲染。通过建设具备“四预”功能的智能决策支持系统,结合水文模型、机器学习预测算法及多目标优化分析,为黄河洪水调度、生态补水、泥沙治理等关键业务提供动态决策辅助。在黄河下游防洪调度、小浪底水库优化运行等场景中,有效延长洪水预报预见期,提升应急响应效率,提高黄河流域治理的精准化与智能化水平。

(7) 安全与可靠性技术

基于纵深防御体系架构,构建覆盖物联网终端、边缘计算节点、云端数据中心的立体化网络安全防护系统,重点保障数字孪生黄河关键基础设施安全运行。针对黄河流域内众多物联网监测终端,部署轻量化入侵检测系统及可信执行环境,实现设备身份双向认证与数据加密传输,确保水位、流量、工情险情等核心数据安全传输;在沿黄重大水利枢纽边缘计算节点建立区域安全防护中心,通过AI异常检测实时阻断违规访问;云端构建覆盖全流域的网络安全态势感知平台,重点防护小浪底等核心工程控制系统,采用SM9算法实现跨部门数据安全共享。在网络层采用软件定义边界技术,建立动态访问控制机制;在数据中心层运用AI驱动的安全态势感知平台,实时监测APT攻击、DDoS等高级威胁。通过国密算法SM4/SM9实现数据全生命周期加密,结合区块链技术确保重要数据的不可篡改性。系统可靠性方面,采用双活数据中心架构与异地容灾备份,保障黄河关键业务系统安全稳定。

4. 组织保障

为保证数字孪生黄河“全链条”建设顺利推进,需加强组织保障。强化组织领导,发挥黄委数字孪生黄河建设领导小组及办公室作用,优化资源、整合力量、高位推动。加强建设管理,贯彻项目建设的项目法人负责制、招标投标制、工程监理制和合同管理制,高标

准高水平推动建设。完善体制机制,建立项目审批、建设质量监督和后评估等制度。注重多方合作,充分发挥“外脑”优势。

三、数字孪生黄河建设的实践成效

按照水利部对数字孪生流域建设的安排部署,黄委持续推进数字孪生黄河建设,取得了阶段性成效。

1. 信息采集体系初步建立

黄委与中国资源卫星应用中心建立了高速数据直连通道,共建“水利遥感技术联合实验室”,初步构建了以卫星遥感监测为龙头、无人机监测和视频监视为支撑的“天空地水工”一体化监测感知体系。平均每年采集处理卫星遥感影像5000余景,影像最高分辨率达亚米级。在防汛关键期实现重点河段遥感监测“每日一图”,记录洪水发生、发展、消退的时空变化过程,为洪水防御会商决策提供了详实数据支撑。开展流域(片)河湖库遥感监测图斑解译,为流域“统一规划、统一治理、统一调度、统一管理”重点工作提供了有力支撑(见图2)。

建设黄委无人机应用管理平台(见图3),具备了无人机装备统一管理和数据汇聚能力。在2024年沿川-吴王浮桥跑舟事件中,卫星和无人机动态跟踪跑舟位置与分布情况,“黄小通”将现场情况实时传送到

黄河防汛调度中心,为事件应急处置提供了有力支撑。建设黄河视频综合管理平台,整合接入各类视频系统资源7300余路,可根据需要对水位、流速、漂浮物等进行智能识别,研发光电测沙仪、“智能石头”、“坝岸卫士”等,开展堤防隐患探测技术应用等,在黄河保护治理中发挥了重要作用。

2. 通信传输网络初具规模

黄河通信网建成SDH微波干线站30个、微波支线站109个、宽带无线接入站123个、通信铁塔153座,无线线路总长约4500 km,形成了“公网为主、公专结合”的通信传输体系。建设宽带无线接入系统及卫星应急通信指挥车,为抢险现场临时指挥部提供全天候全天时通信保障和视频会商环境。开展郑济微波河南渠村至山东刘庄站5G改造,带宽升至1000 M。在河南段建设2处4G LTE网络试点,各项技术指标均大幅度高于4G公网接入摄像机,应用效果良好,为后续黄河通信专网改造提供了技术验证。

黄委逐步建成了以委机关为核心,上联水利部、下接委属各单位、外联流域各省(自治区)水利厅,涵盖委级、省级、市级、县级、一线班组的五级计算机网络(见图4)。其中驻郑州单位通过同城光纤实现1000 M互联,郑州外单位通过公网、专线或微波等方式互联,共接入终端20 000余台,承载了黄河防汛、水资源调

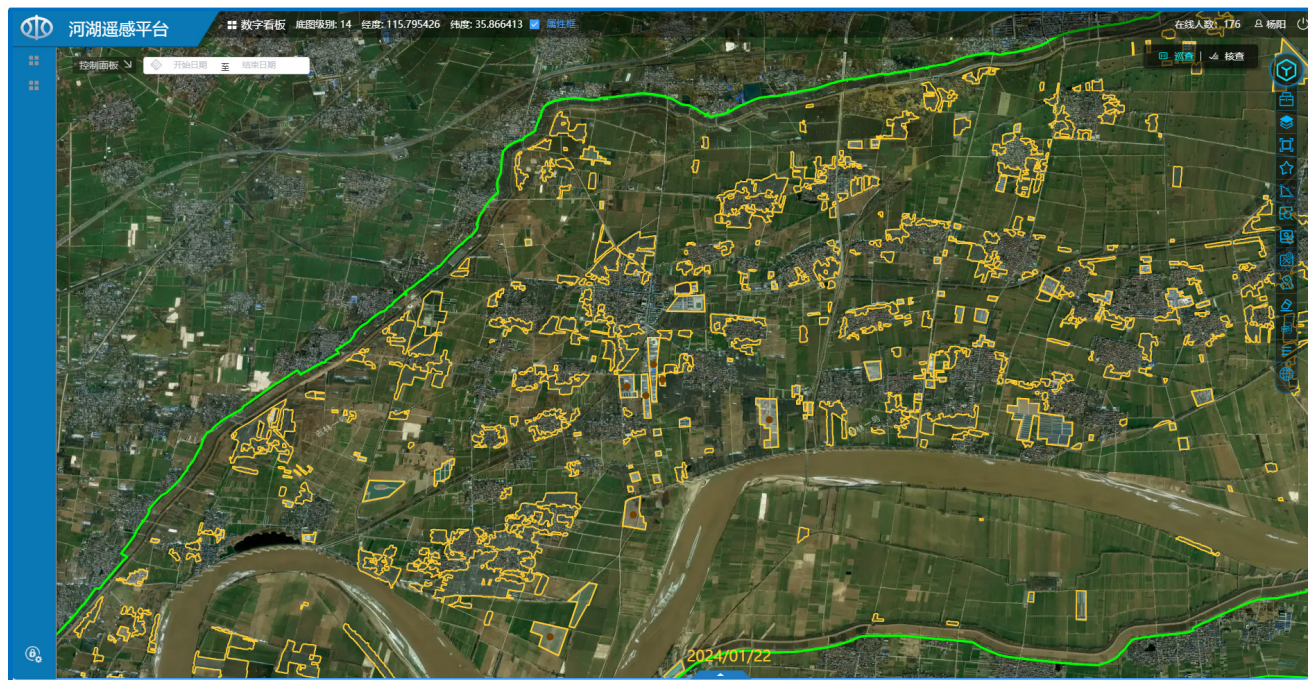


图2 黄河流域(片)河湖库遥感监测平台

度、视频会商等重要业务应用。

3. 数据治理能力不断加强

目前黄委基本形成了以黄河数据为中心、各单位分级负责的数据存储管理体系。持续推动全河数据资源整合,先后制定了《黄委数据资源目录及元数据标准》《黄委信息资源共享管理办法》《黄河一张图数据共享与使用管理办法(试行)》等,汇聚整编黄委各类数据资源目录。基于黄河云研发黄河数据中心基础平台(见图5),实现委级基础数据的全面汇聚、高效治理。按照“一数一源一路径、一数多用”原则,实现基础数据与业务数据的治理融合。建设水库、堤防、水闸等9个主题数据仓库,将6836万条原始数据治理生成1561万条成果数据。实现3712个国产物理计算核心和88 TB国产存储资源的统一管理。建成涵盖国产化与非国产化的算力资源体系,形成多元算力融合黄河云框架体系,保障了黄委100余项业务系统的稳定运行。

4. 系统开发能力稳步提升

建成全河统一的地理信息服务平台黄河“一张图”,初步建成“2+N”水利业务应用体系和综合办公政务应用体系。水旱灾害防御方面,建设黄河水旱灾害防御四预系统(见图6),强化预报调度业务协同,在防洪防凌会商、调水调沙等实战中发挥重要作用。水资源管理方面,建设水资源管理与节约保护应用系统,完成流域范围6600余个地表水一级取水口上图,实现对流域127个国家重点地表水水质站的动态掌握,为保障流域省(自治区)用水提供了有力支撑。水行政执法与河湖管理方面,建成水行政执法遥感应用系统、执法巡查监控系统和涉水违法案件处置系统,实现“发现—跟踪—处理”全过程闭环管理,形成“天上查、地上跟、网上办”的信息化处理机制。工程建设与运行管理方面,开展水库矩阵平台和三维数字

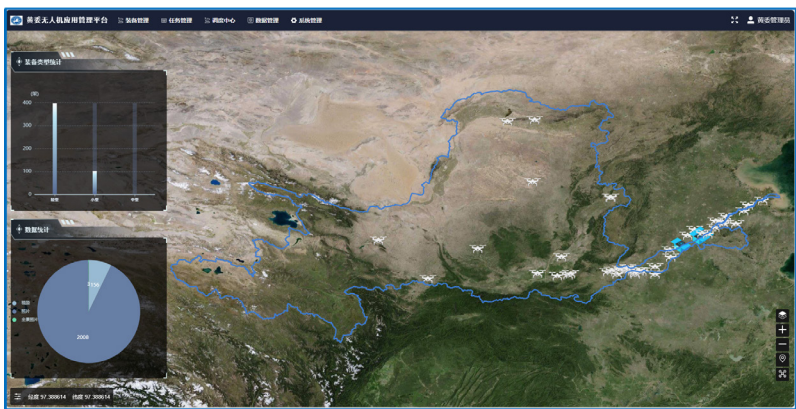


图3 黄委无人机应用管理平台



图4 黄委计算机网络拓扑



图5 黄河数据中心基础平台



图6 黄河水旱灾害防御四预系统

化场景构建。政务管理方面,完成黄委机关及委属事业单位电子政务国产化改造,构建黄委国产化环境下统一的政务办公平台。同时,在防洪规划、人事考核、水利监督、安全生产、水文化建设等方面也建设了相应的应用系统,提供了有效的信息化支撑。推进人工智能大模型应用,建立政务、防汛、水库矩阵管理检索增强(RAG)知识库,初步建成黄委统一水利大模型应用服务门户,实现黄委办公及业务问题智能检索、交互问答、方案建议等。

5. 运行维护能力持续增强

初步建成了具备实时监控、资产管理、可视化展示等功能的智能运维监控平台(见图7),实现对832项信息基础设施和重要业务系统的实时监控管理。云视讯平台实现黄委与水利部及委属118个单位的互联互通,在郑州“7·20”特大暴雨洪水、2021年黄河秋汛洪水、疫情防控等关键时期发挥了至关重要的作用。完成黄委网络安全能力提升与IPv6网络设备改造,核心网网络安全基础防御和监测预警能力有效增强。开展核心网网络资产清查,建立“白名单”准入制度。加强关键信息基础设施和重要信息系统等级保护工作,完成黄委103个已建重要信息系统定级备案。建立黄委网络安全通报机制,强化网络安全日常监测和重要时期防守。

四、结语与展望

在回顾总结黄河信息化发展历程的基础上,结合当前数字孪生黄河建设现状及问题,围绕如何提升数字孪生黄河建设效能,研究提出信息采集、通信传输、数据管理、系统开发、运行维护“全链条”建设思路,阐述了“全链条”的概念、框架及逻辑关系,对开展“全链条”各环节协同建设的目标及内容进行了初步探讨。简述了近年来数字孪生黄河建设实践成果,一定程度上验证了“全链条”建设的实际成效。未来,聚焦“全链条”建设,如何全面提升数字孪生黄河建设效能,持续培育发展黄河流域高质量发展新质生产力,仍待进一步研究和完善。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[M].北京:人民出版社,2021.
- [2] 中共中央 国务院印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》[J].中华人民共和国国务院公报,2021(30):15-35.
- [3] 中共中央 国务院印发《数字中国建设整体布局规划》[N].人民日报,2023-02-28(1).
- [4] 本刊编辑部.东风万里绘宏图 习近平总书记指引数字中国建设述评[J].中国网信,2023(3):4-15.



图7 智能运维监控平台

- [5] 李国英. 加快建设数字孪生流域 提升国家水安全保障能力[J]. 中国水利, 2022(20):1.
- [6] 李国英. 建设数字孪生流域 推动新阶段水利高质量发展[N]. 学习时报, 2022-06-29(1).
- [7] 蔡阳. 数字孪生水利建设进展与发展思考[J]. 水利信息化, 2025(1):1-7+20.
- [8] 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.
- [9] 蔡阳. 以数字孪生流域建设为核心 构建具有“四预”功能智慧水利体系[J]. 中国水利, 2022(20):2-6+60.
- [10] 钱峰, 夏润亮. 数字孪生水利赋能水利新质生产力发展框架研究[J]. 中国水利, 2024(8):6-10+5.
- [11] 钱峰, 成建国, 夏润亮, 等. 数字孪生水利“天空地水工”一体化监测感知体系构建与应用初探[J]. 中国水利, 2024(24):39-47.
- [12] 李文学, 寇怀忠. 关于建设数字孪生黄河的思考[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(2):27-31.
- [13] 夏润亮, 李涛, 余伟, 等. 流域数字孪生理论及其在黄河防汛中的实践[J]. 中国水利, 2021(20):11-13.
- [14] 李仁俊, 密玲. 数字孪生黄河水利工程安全智能分析预警技术[C]//河海大学, 江苏省水利学会, 浙江省水利学会, 等. 2024(第十二届)中国水利信息化技术论坛论文集. 2024:852-859.
- [15] 司林波, 萧欣茹. 数字孪生何以破解黄河流域数字化治理的“碎片化”困境——基于整体性治理的运行框架[J]. 学习论坛, 2024(1):58-66.
- [16] 吴兴, 李维国. 数字孪生黄河水利工程中的大数据应用[C]//河海大学, 江苏省水利学会, 浙江省水利学会, 等. 2024(第十二届)中国水利信息化技术论坛论文集. 2024:479-485.
- [17] 王林, 冯培. 数字孪生黄河建设研究及防汛应用[C]//河海大学, 武汉大学, 长江水利委员会网络与信息中心, 等. 2023(第十一届)中国水利信息化技术论坛论文集. 2023:584-589.
- [18] 张雨, 张云生. 数字孪生黄河技术路线分析[J]. 网络安全和信息化, 2022(12):84-88.
- [19] 覃炆扬, 郭俊, 刘懿, 等. 数字孪生流域知识图谱构建及其应用[J]. 水利水电快报, 2023, 44(11):115-120.
- [20] 张军晖, 黄希扬, 桂明宇, 等. 面向数字孪生工程的水利知识图谱构建及应用[J]. 人民黄河, 2024, 46(4):121-124+130.
- [21] 杨燕, 叶枫, 许栋, 等. 融合大语言模型和提示学习的数字孪生水利知识图谱构建[J]. 计算机应用, 2025, 45(3):785-793.
- [22] 曹顺亚, 李月华, 裴志方, 等. 数字孪生技术在水利水电工程中的应用[C]//河海大学, 浙江水利水电学院, 河北工程大学, 等. 2024(第三届)城市水利与洪涝防治学术研讨会论文集. 2024:12-22.
- [23] 张旭哲, 原鹏举, 胡莎, 等. 数字孪生技术在智慧大坝中的应用现状及趋势[J]. 水电能源科学, 2025, 43(2):168-171.
- [24] 侯毅, 虞鸿, 张冬, 等. 关于数字孪生水利建设中BIM深化应用的思考[J]. 建筑经济, 2023, 44(S2):301-304.
- [25] 牛广利, 李天旻, 杨恒玲, 等. 数字孪生水利工程安全智能分析预警技术研究及应用[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(3):181-185.
- [26] 朱长富, 甘郝新, 何宝根. 数字孪生水利工程建设动态智能监测系统研发与应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(S1):41-47+62.

责任编辑 李博远