

孙永平, 薛领. 典型工程数字孪生建设经验对数字孪生南水北调工程建设的启示[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1072-1079. SUN Y P, XUE L. Enlightenment of typical engineering digital twin construction experience on the construction of digital twin of South-to-North Water Transfers Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6): 1072-1079. (in Chinese)

典型工程数字孪生建设经验对 数字孪生南水北调工程建设的启示

孙永平¹, 薛领²

(1. 中国南水北调集团有限公司, 北京 100036; 2. 中国南水北调集团水网智慧科技有限公司, 北京 100036)

摘要:大型调水工程是实现水资源优化配置的关键,也是构建国家水网的基础,具有跨流域覆盖区域广、水工建筑物种类多、运行工况复杂等特点。采用调查研究的方法分别对浙东引水工程、千岛湖配水工程、南水北调东线工程等大型调水工程数字孪生关键内容如数据底板、模型库和知识引擎等建设现状进行调研,根据各自工程特点分析其数字孪生建设的特色,总结上述大型调水工程数字孪生建设的经验。在此基础上分析南水北调后续工程数字孪生建设要求,提出数字孪生南水北调工程建设的若干建议,为南水北调后续数字孪生工程建设提供参考。

关键词:调水工程;数字孪生;南水北调工程;数据底板;模型库;知识引擎

中图分类号:TV68 **文献标志码:**A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0104

南水北调工程具有跨流域覆盖区域广、水工建筑物种类多、运行工况复杂等特点。国家“十四五”新型基础设施建设有关规划提出:要推动大江大河大湖数字孪生、智慧化模拟和智能业务应用建设。水利部通过全国水利工作会议进行部署,先后出台《关于大力推进智慧水利建设的指导意见》和《数字孪生流域共建共享管理办法》,在规划方面先后编制《智慧水利建设顶层设计》和《“十四五”智慧水利建设规划》,并通过《数字孪生流域建设技术大纲》《数字孪生水利工程建设技术导则》《水利业务“四预”基本技术要求》等有关技术标准进行充实,在此基础上对具体实施也编制和发布了《“十四五”期间推进智慧水利建设实施方案》《关于开展数字孪生流域建设先行先试工作的通知》《关于开展数字孪生流域总体建设方案的通知》《2022年水利网信工作要点》等重要文件。上述体系文件的出台为数字孪生建设奠定了坚实的基础。

数字孪生流域和数字孪生工程顶层研究工作、关键流程研究、关键技术研究、云技术应用、技术标准体系建立等已开展了相关工作,但针对大型调

水工程的数字孪生建设与数字孪生建设总体要求相比,特别是与工程本身的地位和建设需要相比,现阶段大型调水工程数字孪生建设除物联感知体系存在不足、信息基础设施“算力”有欠缺、业务应用智能化水平有待提升和网络安全防护能力不足外,还存在各单位标准不统一,发展不均衡,数据无法统一等“散、小”的特点,尚未构建国家水网一张图,即使与国内其他先进工程的数字孪生建设技术水平相比,也存在一些不足。为落实水利部关于数字孪生南水北调工程建设的工作部署和国务院国资委关于加快推进国有企业数字化转型工作要求,根据新阶段南水北调工程高质量发展要求,更好地建设数字孪生南水北调工程,必须在调水工程数字孪生建设现状调研的基础上,充分借鉴相关工程数字孪生的建设经验才能更好地实现中国南水北调集团有限公司“十四五”数字化转型专项规划提出的目标^[1]。

1 水利工程数字孪生研究进展

在数字孪生技术机理研究方面。王松岳等^[2]从

收稿日期:2023-10-17 修回日期:2023-11-13 网络出版时间:2023-12-01

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231201.0922.006

作者简介:孙永平(1972—),男,内蒙古扎赉特旗人,正高级工程师,主要从事水利工程管理研究。E-mail:kjfbzbc@163.com

通信作者:薛领(1987—),男,河南南阳人,高级工程师,主要从事信息化研究。E-mail:lingersnow@163.com

运行机制、实施步骤、应用领域 3 个方面探讨了数字孪生技术的机理。张绿原等^[3]对水利工程数字孪生技术进行了研究与探索,结合水利工程在线仿真决策系统的建设经验,讨论了该技术架构设计以及在建设过程中需要关注解决的重点问题。高念高^[4]探讨了智慧水利数字孪生工程的顶层设计、技术框架以及大数据应用成效等。尚海龙等^[5]对数字孪生流域建设业务的工作流程、数据流程、信息共享需求、系统功能与性能的需求进行分析,阐释不同环节与不同应用场景下数字孪生流域的工作机理及建设需求。刘子涵等^[6]通过总结河道治理工程施工期洪水风险类型和定量评估方法,形成在建工程复杂环境条件下的地形勘测、洪水模拟、风险预警、应对措施制定的完整解决方案。林莉等^[7]提出了水质安全建设总体框架,阐述了数据底板建设、模型与知识库扩展、业务应用支撑等主体建设内容与核心技术。

在数据底板方面。黄喜峰等^[8]提出了构建数字孪生山洪小流域数据底板的关键技术及方法,接入空、天、地多维信息,构建了覆盖试点流域全空间、全尺度、全业务的数字底板。刘业森等^[9]提出了面向防洪“四预”的数据底板建设框架和主要技术路线,从数据采集整编、多源异构数据汇聚、多维多尺度数据融合、业务信息资源库、底板专题图、专业模型数据标准化、数据资源共享管理平台和可视化技术等方面阐述了主要内容和关键技术路线。王娇怡等^[10]研究探讨了数字孪生海河平台数据底板建设技术方案。左强等^[11]分析了数字孪生黄河拦沙坝数据底板建设案例。赵薛强等^[12]基于 GNSS 和 USBL 技术研究构建水陆一体化定位系统,融合水陆一体化定位技术、有缆 ROV 和水下摄影测量设备等研发水下摄影测量系统,实现数字孪生水陆三维实景数据底板的获取。张振军等^[13]提出了数字化场景的构成及实现路径,构建了丹江口水库全范围地形级、重点河段景观级、地物实体级数字化场景。曾国雄等^[14]提出数据底板构建总体框架及实现路径,以期从数据底板构建的关键环节指导孪生数据获取、汇集、存储、治理、使用等工作。

在模拟仿真分析方面。杰德尔别克·马迪尼叶提等^[15]充分利用 Revit 族参数化功能,建立了可视化、仿真度高的泵站模型,同时运用 Navisworks 对泵站进行深化设计、碰撞检查、虚拟施工等,为水利工程大型泵站 BIM 应用提供了经验。曹知真等^[16]

分析了数字孪生流域智能化模拟存在的问题及技术需求。

在可视化研究方面。徐健等^[17]探讨可视化与数字孪生流域内在联系及其视觉效果,从数据可视化、三维仿真模拟及知识图谱 3 个方面对数字孪生流域可视化关键技术进行研究。张力等^[18]的研究成果初步形成了水利数字孪生三维模拟仿真全链条解决方案,并通过多个数字孪生项目实例展示了其应用效果。

在云平台应用方面。李文正^[19]探索了数字孪生流域的基本概念和端、边、云系统架构以及数字孪生流域关键技术,提出了从流域碎片化感知到流域全局特征感知的数字孪生流域三角形设计模型。段瑞丰等^[20]提出面向数字孪生流域的云网融合逻辑架构,总结分析面向数字孪生流域的云网融合关键技术对充分发挥新一代信息技术对数字孪生流域建设的支撑驱动作用。贺挺等^[21]基于组件技术、工作流技术、SOA 架构和容器技术等构建水利部数字孪生流域模型管理云平台。

在标准体系建设方面。冶运涛等^[22]提出了一套由基础共性标准、信息化基础设施标准、数字孪生平台标准、业务应用标准、网络安全标准、建设与运行标准等构成的以数字孪生水利为核心的智慧水利标准体系。李宗礼等^[23]分析了我国智慧水利标准体系建设的现状和存在的主要问题,探索了智慧水利标准体系建设的思路、方向和任务,初步构建了智慧水利标准体系框架。

在关键技术与重点难点方面。黄艳等^[24]梳理了现阶段流域数字孪生发展需求,探索了敏捷响应配置平台技术等数字孪生流域建设关键技术。王磊等^[25]论述了如何利用无人机倾斜摄影测量技术制作 1:500 的 DEM 数据的方法。蔡阳^[26]阐述了数字孪生水利建设中在算据感知、算据更新、模型平台、知识平台、算力、业务应用“四预”、网络安全、技术标准、工作协调、资金投入、人才等方面应把握的难点及解决思路。侯毅等^[27]重点对建设过程中的海量数据融合、数据轻量处理、场景渲染发布、数据可视可算、数据共享共建等关键技术问题展开了深入全面的论述,分析了技术难点、解决路径和具体方法。

在实际应用探索方面。韩红星等^[28]以数字孪生黄河和长江中游行蓄洪空间数字孪生平台为例对其应用效果进行了探索。刘昌军等^[29]针对淮河

流域防洪预报、预警、预演、预案“四预”试点工作,提出了数字孪生淮河流域智慧防洪试点建设方案,探索了数字孪生淮河流域智慧防洪“四预”新模式,研究了试点区域数字孪生底板、数字化场景、数字化流场和数字映射、基于高性能并行计算的水文水动力学实时模拟预报技术等。蔡运忠等^[30]以洪泽湖周边滞洪区近期建设工程为依托,设计了基于数字孪生技术的工程建设管理平台架构和应用体系,实现水利工程全生命周期管理和优化。周逸琛等^[31]提出数字孪生水利建设保障体系,通过 2022 年水利部开展的数字孪生流域建设先行先试予以实践验证。傅志浩等^[32]针对广西某水利枢纽信息化基础与管理现状,尝试将数字孪生技术应用在实际业务中,赋能水利工程运行管理,实现了水利枢纽工程的数据底板、模型库、防汛知识库、防汛“四预”等任务。

2 典型工程数字孪生建设经验分析

为学习借鉴其他大型调水工程数字孪生建设经验,根据已建工程数字孪生建设技术水平和发展情况,选择浙江、江苏等科技发达省份进行大型引(调)水工程数字孪生建设专题调研,旨在了解业界数字孪生工程建设等方面的最新进展情况。

2.1 典型工程概况

东南沿海作为我国经济发展发达地区,智慧水利建设与应用相对领先,典型调水工程与南水北调新建工程类似,如浙东引水工程是浙江省跨流域最多、引调水线路最长的水资源战略配置工程,千岛湖配水工程与正在建设的“引江补汉”工程类似,都为全程封闭式自流隧洞输水工程等,为此本次选择浙江和江苏两省引水工程进行调查研究。

2.1.1 浙东引水工程

浙东引水工程旨在解决浙东萧绍宁舟地区水资源短缺问题,是解决环杭州湾地区水资源平衡、合理调配水资源工作的一个重要组成部分,是浙江省跨流域最多、引调水线路最长和受益区域最广的水资源战略配置工程。

浙东引水工程数字孪生主要建设内容包括浙东引水数字化管理应用、上虞枢纽(姚江上游西排工程)数字化平台及钱塘江流域防洪减灾数字化平台。具有“数据多源汇聚、决策智慧支持、业务深度融合、应用共享共用”的特点,形成全生命周期全融合的管控体系,实现“水雨情信息一键查询、防汛形势一键研判、洪水预警一键发出、调度方案一键生成、

最优抢险方案一键拟定”等快速响应功能。

2.1.2 千岛湖配水工程

杭州市第二水源千岛湖配水工程是保障杭州市供水安全、提升饮水水质的重大民生工程。千岛湖水从湖边的“进水口”金竹牌出发,通过 113 km 的输水隧洞,途经建德、桐庐、富阳,到达闲林水库的“大碗”配水井,最后通过下游输水线路到达杭州的各大水厂内。“大碗”采用了“库中库”的设计,实现了让碗与库中的水既可做到相对隔离又可相互调剂。隧洞未设置任何加压泵站,完全依靠水流自身的重力全程封闭式自流输水,不仅节约能耗、降低运行成本,水流到达终点时还有富余的能量用来发电,同时也避免沿程污染问题,保障了水质安全。

2.1.3 南水北调东线工程江苏段

南水北调东线江苏水源公司选取信息基础设施条件相对较好的洪泽站作为数字孪生南水北调工程建设先行先试地点,洪泽站是南水北调东线第三梯级泵站之一,位于淮安市洪泽县境内的三河输水线上,介于洪金洞和三河船闸之间,紧邻洪泽湖。洪泽站主要由泵站、挡洪闸、进水闸、洪金地涵、引河等工程设施组成,主要任务是通过与下级金湖站联合运行,由金宝航道、入江水道三河段向洪泽湖调水并结合宝应湖、白马地区排涝。江苏水源公司在确定试点工程、模型库分期分类开发建设及网络安全防线等方面重点开展工作,系统梳理现有建设基础,编制数字孪生建设规划,分期分类开发建设水利专业模型、人工智能模型及可视化模型,同步筑牢安全边界、可信验证、安全测试及传输加密。

2.2 典型工程数字孪生建设现状

水利数字孪生系统是集约、统一、开放、共享的智能中枢平台,为上层应用提供统一、规范、标准、智能和可视化的服务支撑,其核心包括数据底板、模型库、知识引擎和人机交互平台。数据底板可实现全域信息感知、数据汇集、数据清晰和数据挖掘;模型库可实现模型标准化构建、智能推荐和自动调参;知识引擎可实现正向智能推理和反向溯因分析;人机交互平台通过人机交换交互设备设施,采用虚拟现实等可视化手段实现人机高交互。

2.2.1 数据底板

浙东引水工程和千岛湖配水工程在沿线交界断面、引水枢纽、重要控制性工程等位置建立水位、流量、水质、工情等自动采集系统,通过设置水雨情、

流量、水质、视频、工情等相关监测项目和测点实时监测水位、水量和水质等要素变化、结构安全响应和机电设备设施工作状态,同时为扩大感知要素的内容范围,还与当地水文、气象、地质、环保等十多个相关平台或数据库进行数据交换。

江苏水源公司建成统一物联网平台,汇聚了下属十多座泵站水情、工情、水质等物联网感知数据,构建了800多个物模型、20 000多个测点,基本涵盖了泵站现有各类监控数据,初步建立了归一、标准的物联数据模型。

数据底板汇聚水利信息网传输的各类数据,为智慧水利提供“算据”,浙东引水工程、千岛湖配水工程和江苏水源公司根据各单位的具体情况在不同方面建立了数据底板,在基础数据、监测数据、业务管理数据、跨行业共享数据、地理空间数据等的建立提供了参照。

2.2.2 模型库

模型是实现数字孪生“四预”的基础,所调研的引水工程充分考虑工程地理位置和影响因素,集成气象预报信息、水文地质信息、工程架构材料信息、运行管理信息和影响区社会经济生态现状信息工程建立相应的预测、预报、预警、诊断、调度模型,其中主要模型包括气象-水文耦合模型、水文-水动力耦合模型、结构安全评估模型、运行调度模型、机电设备健康诊断模型、可视化人机交互模型等,其中对于大规模地形三维的建设需求,采用DEM作为三维地形数据。

针对江苏境内水库众多的实际,江苏水源公司研究开发了多尺度湖泊来水预报模型、多尺度优化调度模型、站内经济运行模型等六大模型,选取洪泽站作为数字孪生江苏南水北调工程建设先行先试对象,完成泵站数字化反向建模,对主机组关键零部件进行BIM建模,开展孪生体数据实时交互等工作。

江苏水源公司以多尺度湖泊专业模型来分析物理流域要素变化、活动规律和相互关系,提升水利感知能力,并通过可视化模型动态呈现,为物理流域的运行状态和发展趋势的研判提供支撑。

2.2.3 知识引擎

浙东引水工程通过内置计算模型、优化算法,对日常引水调度形势研判、数据治理等提供智慧支持,水网格局一张图,应用和数据省市县共享共用,实现“管理标准化、感知实时化、调度科学化、处置精准化、应用场景化”,为构建“实时研判、在线调

度、信息共享、场景展示”的浙东现代水网数字化平台打下坚实基础。

千岛湖配水工程数字孪生基于规则推理和知识图谱构建劣化预警、时序预测、评价指标体系及故障诊断知识库等,开展设备状态趋势分析、设备健康状态评价及设备故障诊断,有效提高安全管控及工程整体运维水平。

江苏水源公司通过知识图谱构建、异构知识融合、知识图谱推理诊断等知识库体系建立,形成区域防洪、水资源调配、工程安全智能预警和综合决策支持等,达到“自感知、自报警、自保护、自学习、自决策、自调优”的智能化目标。

浙东引水工程、千岛湖配水工程及江苏水源公司基于规则推理和知识图谱构建的知识库体系等,汇集数据底板产生的相关数据、模型平台的分析计算结果,经水利知识引擎处理形成知识图谱服务水利业务应用。

2.2.4 人机交互平台

人机交互平台以AR+GIS+BIM技术为支撑,为用户提供三维立体的沉浸式体验,为实现全局信息把控提供统一入口,建立安全高效的建造监控、信息共享、协同运作、业务分析和决策支持系统,实现工程建设管理“业务全覆盖、要素全管理、过程全记录”,助力工程项目提质增效,可以按照工程片区对业务数据进行分级分类展示,在实现施工信息可视化展示的同时,打造友好人机界面,为工程建设管理赋能增效。

3 数字孪生南水北调工程建设的总体要求和特点分析

3.1 数字孪生南水北调工程建设的总体要求

数字孪生南水北调工程建设以数字孪生南水北调工程标准规范体系建设为引领,数字化场景、智慧化模拟、精准化决策为路径,通过建设一张物联网感知网、一个数据治理湖、一朵计算存储云,构建国家水网一张图,打造南水北调工程智慧大脑。围绕数字孪生南水北调工程建设的实际需要,以工程线路为单元,中国南水北调集团有限公司、各工程管理局协同推进,基于统一规范标准和接口,确保数字孪生南水北调工程建设成果能够成为有机整体和孪生体系。

建设任务包括数字底板、模型库、知识引擎和人机交互平台,在南水北调工程一张图集成的数据

基础上完善数据底板,建设数据汇聚平台、数据管理平台。按照“标准化、模块化、云服务”的要求,集成专业模型、智能模型、可视化模型,提供统一调用服务,汇集整合东线、中线、引江补汉工程已有及新建模型,构建数字孪生南水北调工程模型平台。以知识图谱为技术框架,构建应急处置方案库、南水北调工程知识库、结构化业务规则库、历史场景模式库、知识化专家经验库和知识引擎南水北调工程知识平台^[1]。

3.2 数字孪生南水北调工程特点分析

数字孪生南水北调工程建设范围主要包括中线工程、东线工程和引江补汉工程。中线工程主要通过封闭式渠道全程自流输水,东线工程 13 级泵站逐级提水北上,两线工程已全面建成通水运行超 9 年。引江补汉工程是深埋长隧洞输水工程,已于 2022 年 7 月开工建设。三段工程规模庞大、特点分明,为数字孪生南水北调工程提供了丰富的应用场景,同时也给建设统筹工作带来巨大挑战。

首先是工程分布范围广,跨多个流域和气候地理和地质条件区,从而要求水文模型、地质灾害预报预警模型及其影响因素存在一定的差别。

其次是建筑物种类繁多,包括高填方、深挖方、渡槽、倒虹吸、水闸、泵站、隧洞等,其中有些建筑物都是国内甚至世界级规模,同时面临膨胀土、冻胀、水锤等各种不利因素,其安全评价影响因素多、难度大。

调水工程涉及多因素调度和运行管理,包括水量、水质、水生态和水环境,因此其多因素耦合、多尺度模型和自然-人为两重因素交织,从而形成变量类型多、数据源头广和系统性强等特点。

再者就是目前已经建立的部分感知系统存在技术水平参差不齐、接口标准不一、数据库众多、智能化水平不高等问题。

4 典型工程经验对数字孪生南水北调工程建设的启示

4.1 加强数字孪生工程建设的场景定位与需求分析

根据水利部及中国南水北调集团有限公司安排部署、南水北调工程特点和科技发展趋势,数字孪生南水北调工程流域建设、数字孪生工程建设与流域治理、工程运行管理和科技产业发展相结合,可有力地支撑引调水工程的精准决策和产业发展。

南水北调工程涉及的数字孪生应用繁多,围绕南水北调工程的中心工作和业务实际需求,场景定位与需求分析是数字孪生南水北调工程流域建设的前提,正确的场景定位与需求分析有助于信息化建设健康有序发展。

4.2 充分借鉴已有工程经验

充分借鉴本次调查研究中各个调水工程数字孪生建设中的经验,同时参照相关文件精神和文献成果,在相关规划的指引下做好南水北调工程数字孪生实施方案的设计和实施。在调研工程经验借鉴方面不仅要借鉴具体技术,还需要进行企业文化、管理模式、设计理念等方面全方位借鉴。如浙东引水工程和千岛湖配水工程自动采集系统的建立,与多个相关平台或数据库数据交换的方式,江苏水源公司建立的统一物联网平台及针对众多水库研发的模型,浙东引水工程建立的水网格局一张图应用和数据共享共用方式,千岛湖配水工程及江苏水源公司基于规则推理和知识图谱构建的知识库体系等,为数字孪生南水北调工程数据底板、模型库、知识库体系、人机交互等的建立提供了参照与借鉴。如千岛湖配水工程与引江补汉工程具有很大的相似性,都具有水库引水、隧道自流输水以及地质复杂等特点。千岛湖配水工程作为已建工程,在设计理念、概算投资及工程施工等都具有参考意义,既相对隔离又相互调剂“引水入碗”的创新设计理念,隧洞全封闭自流输水富余能量利用、成本控制措施及特殊地形地貌施工等,具有很大的参考价值。南水北调工程可在打牢数字化建设的基础上,以数字化战略为引领,探索水利信息化数据业务及迭代创新的数字化产品模式在设计及 EPC 业务等方面的效益点。通过数字化转型赋能传统业务,实现生产和管理的提升,实现商业模式的创新,不断为客户创造新价值。造新价值。

4.3 以问题为导向,确定关键切入点

针对现阶段物联感知体系存在不足的具体问题,根据数字孪生数据底板建设要求,按流域、工程、水体、人员、物质、保障等构建多层次、多尺度和多要素全过程全场景信息感知体系,打造空天地潜一体化感知网络,特别是针对极端暴雨、水质灾变、滑坡和机电设备设施异常等风险,明确多路径感知要素和感知方法,构建韧性感知网络。

针对信息基础设施“算力”有欠缺的问题,需要借助并行计算、集群计算和云计算的高效计算系统

搭建方法,在充分利用现有设施的前提下,构建高算力集群,实现水文气象耦合模型、水质水量耦合模型、水工程静力耦合模型的高精度在线模拟仿真和人机交互的实时反应。

针对业务应用智能化水平有待提升的问题,需要借助支持向量机、随机森林、深度学习、知识图谱等人工智能方法,提高系统的自适应能力和智能化水平,实现“四预”和辅助决策支持的人性化、智能化和高效化。

针对网络安全防护能力不足问题,需要借助硬软件深度融合方法,采用注册认证、分级管控、物理硬隔离结合病毒防护、木马检测拒止等措施,结合区块链、密码学和信息隐藏等措施保证数据安全和信息的一致性、同步性。

针对各家单位标准不统一、发展不均衡、数据无法统一等“散、小”的特点,需要制定统一标准规范,构建适合南水北调工程本身特点的水网一张图。

4.4 理顺逻辑过程和信息线条,加强有针对性的模型研发

针对现阶段数字孪生主要是数据展示而深度挖掘不足的问题,南水北调工程数字孪生建设应加强多源数据输入到多目标和数据深度挖掘的研究,理顺逻辑链路,清晰数据流和信息流线条,使得从原始多源数据深度融合到提取大型调水工程“四预”所需要知识并转化为大型调水工程提高运行管理效益和规避风险的能力,为此必须充分研发各类模型,包括调水工程所需要的多相多场耦合模型、流激振动模型、结构损伤模型、有压无压输水隧洞水锤预测模型、渡槽倒虹吸等复杂结构数字仿真模型、高填方深挖方非饱和组合结构多种工况下稳定分析模型等,借助于并行算法、云计算、端边云协同等技术实现模型储备、参数预估、实时校正等功能,从而保证数字孪生建设达到实际效果^[33]。

5 结论

结合实际情况提出近期中国南水北调集团有限公司数字化转型发展路径的建议:紧紧围绕赋能南水北调工程,服务国家水网,为建设国际一流跨流域供水工程开发运营集团化企业提供数字化支撑和保障的总体目标,着力强化预报、预警、预演、预案功能,全面提升南水北调工程数字化、网络化、智能化水平,切实提高“三个安全”保障能力,持续深

化数据与模型、业务与技术的深度融合;精准聚焦中国南水北调集团有限公司业务综合管控、水网工程精准管控、涉水主业精细管控的业务主线,着力构建数字化管控体系、技术标准体系、数据治理体系、网络安全体系;全力打造基础云平台、数据治理平台、数字孪生平台、应用支撑平台、智能应用平台;重点夯实数据治理能力、基础设施支撑能力、网络安全防护能力、自主创新能力、人才保障能力、市场开拓能力。到2025年,数字化转型对南水北调事业和中国南水北调集团有限公司高质量发展的驱动引领和支撑保障作用初步显现,中国南水北调集团有限公司产业数字化和数字产业化“两翼齐飞”的总体格局初步形成。产业数字化方面取得明显进展,基本建成新型数字基础设施、数字赋能平台以及数字孪生南水北调工程1.0版,初步构建智慧管控体系和“国家水网一张图”,为构建数字孪生国家骨干水网奠定基础。

参考文献:

- [1] 中国南水北调集团有限公司. “十四五”数字化转型专项规划[R]. 2022.
- [2] 王松岳, 陈凤琴, 朱照远. 数字孪生技术在智慧水利建设中的应用[J]. 山东水利, 2023(9): 13-14. DOI: 10.16114/j.cnki.sdsl.2023.09.005.
- [3] 张绿原, 胡露骞, 沈启航, 等. 水利工程数字孪生技术与探索[J]. 中国农村水利水电, 2021(11): 58-62. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2021.11.010.
- [4] 高念高. 数字孪生水利工程中的大数据应用初探[J]. 信息技术与标准化, 2023(8): 87-91.
- [5] 尚海龙, 田苡菲, 王志扬, 等. 数字孪生流域主要建设需求分析[J]. 中国水利, 2023(3): 54-59.
- [6] 刘子涵, 李延峰, 吕鹏举, 等. 数字孪生贾鲁河在工程施工期防洪度汛中的应用[J]. 水利信息化, 2023(4): 28-34, 63. DOI: 10.19364/j.1674-9405.2023.04.005.
- [7] 林莉, 李全宏, 曹慧群, 等. 数字孪生丹江口水质安全建设挑战与举措[J]. 中国水利, 2023(11): 32-36. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2023.11.009.
- [8] 黄喜峰, 刘启, 刘荣华, 等. 数字孪生山洪小流域数据底板构建关键技术及应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(4): 17-26. DOI: 10.19760/j.nwuu.zk.2023041.
- [9] 刘业森, 刘昌军, 郝苗, 等. 面向防洪“四预”的数字孪生流域数据底板建设[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(6): 6-14. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2022196.
- [10] 王娇怡, 张夏, 刘恒伟. 数字孪生海河平台数据底板构建研究[C]// 中国水利学会减灾专业委员会. 第十三届防汛抗旱信息化论坛论文集. 水利部海河水利委员会水利信息中心, 2023: 7. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.010426

- [11] 左强, 李骁. 数字孪生黄河拦沙坝数据底板建设案例分折[J]. 中国水利, 2023(5): 59-62. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2023.05.016.
- [12] 赵薛强, 张永. 数字孪生水下水下三维实景数据底板获取技术研究[J]. 水利信息化, 2023(2): 24-27, 33. DOI: 10.19364/j.1674-9405.2023.02.005.
- [13] 张振军, 冯传勇, 魏猛. 水库数字孪生数据引擎及底板构建研究及实践[C]// 中国大坝工程学会. 水库大坝智慧化建设与高质量发展. 长江水利委员会水文局汉江水文水资源勘测局, 长江水利委员会水文局, 长江水利委员会水文局长江中游水文水资源勘测局, 2023: 9. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.001631
- [14] 曾国雄, 何林华, 唐宗仁, 等. 以统一数据底板构建标准锚定数字孪生流域建设目标[J]. 中国水利, 2022(20): 38-41. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2022.20.021.
- [15] 杰德尔别克·马迪尼叶提, 牛志伟, 崩鹏程, 等. 基于 Revit 及 Navisworks 软件的泵站 BIM 模型及其应用[J]. 水电能源科学, 2018(6): 92-95.
- [16] 曹知真, 魏亚男. 数字孪生流域智能化模拟关键问题与技术需求[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: 15-22. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.024214.
- [17] 徐健, 赵保成, 魏思奇, 等. 数字孪生流域可视化技术研究与实践[J]. 水利水电快报, 2023, 44(8): 127-130. DOI: 10.15974/j.cnki.slsdkb.2023.08.019.
- [18] 张力, 张航, 刘成堃, 等. 水利数字孪生平台三维模拟仿真技术研究与应用[J]. 人民长江, 2023, 54(8): 9-18. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.08.002.
- [19] 李文正. 数字孪生流域系统架构及关键技术研究[J]. 中国水利, 2022(9): 25-29. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2022.09.015.
- [20] 段瑞丰, 霍建伟, 张强, 等. 面向数字孪生流域的云网融合架构研究[J]. 水利信息化, 2023(4): 35-40. DOI: 10.19364/j.1674-9405.2023.04.006.
- [21] 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/OL]. 水利水电技术(中英文): 1-18. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20230816.0959.004.html>.
- [22] 冶运涛, 蒋云钟, 曹引, 等. 以数字孪生水利为核心的智慧水利标准体系研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(4): 1-16. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2023040.
- [23] 李宗礼, 张宜清, 邢子强, 等. 对智慧水利标准体系构建的思考[J]. 中国水利, 2023(5): 55-58. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2023.05.015.
- [24] 黄艳, 张振东, 李琪, 等. 智慧长江建设关键技术难点与解决方案的思考与探索[J]. 水利学报, 2023, 54(10): 1141-1150. DOI: 10.13243/j.cnki.slx.2023.0015.
- [25] 王磊, 陈若舟, 倪艺萍, 等. 无人机倾斜摄影构建数字孪生水利工程关键技术及应用[C]// 河海大学, 福建省幸福河湖促进会, 福建省水利学会, 2022: 12. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.028479
- [26] 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. DOI: 10.19364/j.1674-9405.2023.03.001.
- [27] 侯毅, 华陆韬, 王文杰, 等. 数字孪生流域三维数据底板建设及应用 [J/OL]. 人民长江. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1202.TV.20231107.1329.004.html>.
- [28] 韩红星, 孙国勇. 数字孪生技术在智慧水利工程中的应用[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: 102-108. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.024224.
- [29] 刘昌军, 吕娟, 任明磊, 等. 数字孪生淮河流域智慧防洪体系研究与实践[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(1): 47-53. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2023.01.017.
- [30] 蔡运忠, 程扬, 梁爱萍, 等. 数字孪生水利工程建设管理平台研发及应用[J]. 水利发展研究, 2023, 23(8): 19-23. DOI: 10.13928/j.cnki.wrd.2023.08.004.
- [31] 周逸琛, 杨非, 钱峰. 数字孪生水利建设保障体系应用与思考[J]. 水利信息化, 2023(3): 31-35. DOI: 10.19364/j.1674-9405.2023.03.006.
- [32] 傅志浩, 杨楚骅, 廖祥君. 数字孪生水利工程构建与应用实践[C]// 中国水利学会. 2022中国水利学术大会论文集(第四分册). 中水珠江规划勘测设计有限公司, 2022: 7. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.059372.
- [33] 方卫华, 孙勇, 徐兰玉. 端边云协同数字孪生水闸研究[M]. 南京: 河海大学出版社, 2022.

Enlightenment of typical engineering digital twin construction experience on the construction of digital twin of South-to-North Water Transfers Project

SUN Yongping¹, XUE Ling²

(1. China South-To-North Water Diversion Corporation Limited, Beijing 100036, China; 2. China South-to-North Water Diversion Group Water Networks Intelligent Technology Co., Ltd, Beijing 100036, China)

Abstract: Large scale water diversion projects are the key to achieving optimal allocation of water resources and the foundation for building national water network. They have the characteristics of wide cross basin coverage areas and

complex operating conditions due to the variety of hydraulic structures. The method of investigation and research is adopted to investigate the current construction status of digital twins in large-scale water transfer projects such as the Zhejiang East Water Transfers Project, the Qiandao Lake Water Distribution Project, and the East Route of the South-to-North Water Transfers Project. Based on the characteristics of each project, the characteristics of their digital twin construction are analyzed, and the experience of digital twin construction in the above-mentioned large-scale water diversion projects is summarized. On this basis, the requirements for the construction of digital twins in the subsequent projects of the South-to-North Water Transfers Project were analyzed, and several suggestions for the construction of digital twins in the South-to-North Water Transfers Project were proposed, providing reference for the subsequent construction of digital twins in the South-to-North Water Transfers Project.

Key words: water diversion project; digital twins; South-to-North Water Transfers Project; data backplane; model library; knowledge engine

(上接第 1071 页)

Control measures of water temperature of the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project main channel with large discharge in winter

CHEN Weijiang¹, ZUO Li¹, HUANG Minghai², WU Yongyan³, GAO Sen⁴

(1. China South-to-North Water Diversion Corporation Limited, Beijing 100036, China; 2. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd, Wuhan 430010, China; 4. China South-to-North Water Diversion Middle Route Corporation Limited, Beijing 100036, China)

Abstract: On the premise of ensuring the safety of water delivery in winter, it is an important measure to adopt non-ice-covered large discharge water delivery mode to enhance the main canal water conveyance capacity of the South-to-North Water Transfers Project in winter, the thermal insulation of canal water conveyance is one of the key technical bottlenecks to ensure the operation of non-ice-covered water conveyance of main canal.

Based on the analysis of the water temperature and ice condition in the 8 winters since the water supply of the whole line under the current regulation of the Middle Route project, the operation method of non-ice-covered large-flow water conveyance is put forward to realize water conveyance and heat preservation in winter, aiming at four kinds of dispatching operation schemes of different water flow, such as 350, 280, 210 and 150 m³/s, simulation analysis of each scheme of water transfer in strong cold winter, cold winter, flat winter and warm winter weather conditions such as the winter heat preservation effect of the main canal. On this basis, a proposal for optimal operation of non-ice-covered water conveyance and thermal insulation of main canal in winter is proposed.

The results of numerical simulation show that: according to different typical winter weather conditions, the non-ice-covered large-flow water transfer operation mode is adopted under limited conditions, it can shorten the flow time of water conveyance and reduce the heat loss of water body, thus achieving the effect of heat preservation, the water temperature at the end of the open channel is also higher than that at the end of the open channel, at the same time, it can also effectively solve the problem of limited water conveyance capacity in winter.

Based on the short-term air temperature forecast and water temperature forecast in the main canal, it is suggested that water transfer operation mode with larger water discharge should be adopted as far as possible under the typical winter weather conditions such as cold winter, flat winter and warm winter, and under the strong cold winter weather conditions, non-ice-cap large flow water conveyance model can be used in time and channel sections.

Key words: Middle Route of South-to-North Water Transfers Project; water delivery without ice covered; large discharge; thermal insulation measure; numerical simulation