

高英, 高尽辉, 尚银磊, 等. 数字孪生南水北调中线工程建设思路[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1080-1088. GAO Y, GAO J H, SHANG Y L, et al. Construction ideas for the digital twin of Middle Route of South-to-North Water Transfers Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6): 1080-1088. (in Chinese)

数字孪生南水北调中线工程建设思路

高英¹, 高尽辉², 尚银磊¹, 赵元³, 李春阳⁴, 吴佳敏⁴

(1. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 郑州 450016; 2. 中国南水北调集团水网智慧科技有限公司, 北京 100036;
3. 中国南水北调集团有限公司, 北京 100036; 4. 中国南水北调集团中线有限公司, 北京 100036)

摘要:南水北调工程受限于当时规划设计和信息化总体建设水平, 存在输水调度不能与沿线受水区实现供需最优配置, 水质监测自动预警程度不高、水污染突发事件应急处置缺乏科学决策支持及工程安全风险不能主动精准预警等问题。为解决上述问题, 基于南水北调中线工程的建设现状和数字孪生技术特点, 从框架设计、技术路线规划 2 个方面提出数字孪生南水北调中线工程的总体建设思路, 并且围绕工程安全、供水安全、水质安全的“四预”需求, 详细阐述实施路径和重点建设内容, 为数字孪生南水北调中线工程建设提供重要参考。

关键词:数字孪生; 南水北调中线; 工程安全; 供水安全; 水质安全

中图分类号: TV68 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0105

数字孪生以实时同步、虚实映射、高保真等特性为拓展流域科学研究提供了一种新的工具^[1-3], 其核心是构建仿真模型以实现信息空间和物理空间的无缝集成与实时映射^[4-5], 从而对物理空间对象进行全生命周期管控, 降低复杂系统预测不确定性和规避应急事件带来的风险^[6-7]。数字孪生技术通常包括传感器数据采集、建模模拟、数据分析、虚拟仿真和可视化等技术^[8], 为水利工程和资源管理提供实时高分辨率信息, 有助于优化决策和资源利用^[9-10], 当前已广泛应用于流域防洪、水资源管理与调配、水利工程建设和运行管理、河湖管理等方面^[11-12]。国外研究有: Bartos 等^[13]提出了将水力求解与在线数据同化相结合的雨洪系统数字孪生模型, 以更好地掌握和控制雨洪系统动态; Alperenc 等^[14]基于 3 种不同的神经网络, 构建了用于模拟山洪的水文数字孪生模型, 提高了山洪预测精度且极大减少了计算时间; Ranjbar 等^[15]建立了法国加来渠道的数字孪生框架, 实现了不同情境下运河动态的精准模拟。国内研究有: 蒋云钟等^[16]提出了智慧流域概念, 描述了通过物理流域与数字流域无缝集

成实现对流域的智慧化管理; 黄艳等^[17]探索了面向流域水工程防灾联合智能调度的数字孪生长江建设, 实现了洪水预报、预警、预演、预案以及工程智能调度全过程模拟, 为精准应对流域性大洪水提供技术支持; 刘昌军等^[18]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, 开发了淮河流域智慧防汛系统, 实现了防洪“预报预警实时化、预演实景化、预案实地化”; 周超等^[19]构建了水利业务问题与决策流程的数字孪生建模平台, 对长江流域的水工程预报调度业务体系进行了模拟运行, 可大幅度节约时间和人力成本; 李文学等^[20]、甘郝新等^[21]、廖晓玉等^[22]分别探索了数字孪生黄河、数字孪生珠江、数字孪生松辽的建设方案, 为全国数字孪生流域的体系建设提供思路框架和案例参考。

南水北调中线工程(以下简称“中线工程”)是缓解我国北方水资源短缺、优化水资源配置、改善生态环境的基础设施^[23]。自 2014 年 12 月 12 日正式通水以来, 已平稳运行近 9 年, 截至 2023 年 11 月 13 日, 累计为河南、河北、天津和北京 4 省(市)受水区调水超过 600 亿 m³, 直接受益人口超 1.08 亿人^[24],

收稿日期: 2023-09-25 修回日期: 2023-10-29 网络出版时间: 2023-11-15

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231114.1433.008>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC30055505)

作者简介: 高英(1971—), 女, 吉林延边人, 正高级工程师, 主要从事水利工程规划设计和数字化的研究与应用。E-mail: 413012731@qq.com

为黄河流域生态保护和高质量发展及中原城市群发展、京津冀协同发展等重大区域发展战略提供了有力支撑^[25-26]。此外,中线公司积极推进工程运行信息化建设工作,在信息化基础设施和业务应用建设等方面取得了显著成效^[27],自动化调度和运行决策支持系统基本覆盖各生产环节和业务领域,有力支撑了中线运行管理的业务需要;同时中线公司也积极推动了物联网、人工智能、云计算、大数据等新一代信息技术在中线的试点应用^[28]。

数字孪生南水北调中线工程建设充分利用新一代信息技术,以确保“3个安全”(工程安全、供水安全、水质安全)为原则,以提升工程数字化、网络化、智能化水平,强化“四预”(预报、预警、预演、预案)功能为核心目标,最终实现对中线安全运行和水资源调度的精准化决策支持。本文立足中线工程信息化基础条件及存在问题,开展数字孪生中线工程建设探讨,以期为中线工程数字孪生建设提供科技支撑,为其他引调水工程的数字孪生建设提供样板,支撑我国加快构建数字孪生国家水网。

1 基础条件及存在问题分析

1.1 基础条件

中线工程总干渠全长 1 432 km,跨越长江、黄河、海河、淮河四大流域,其通过节制闸、退水闸、倒虹吸工作闸、分水闸、泵站等实现总干渠输水、给沿线供水目标供水和生态补水等功能。

数字孪生中线工程建设范围包括中线公司总部、5个分公司和44个管理处,共涉及307座输水建筑物、259个通信站点、67座节制闸、970个安全监测站及87 497个测点、13个水质自动监测站、30个水质监测断面。目前中线已建立了三网隔离、区域防护、覆盖“云、边、端”的网络信息传输系统和安全防护体系,以及42个运行管理系统(其中基础支撑类7个、业务类21个、办公管理类14个),支撑中线的正常运行管理。

1.2 存在问题分析

虽然中线已建立了基本完备的信息化设施和应用体系,但在网络通信、基础支撑、工程安全、供水安全、水质安全、资金安全及智能应用等方面尚存在问题,见表1。

表1 南水北调中线工程信息化现状与不足

Tab. 1 Status and deficiency of information technology in the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project

功能	现状	与数字孪生要求的差距
网络通信	建立了中线三网隔离、区域防护、覆盖“云、边、端”的网络信息传输系统和安全防护体系	与水利专网的节点未完全连通;不能共享沿线流域和各水行政主管部门的涉水信息
基础支撑	建立了时空信息服务平台和数据治理平台	数据底座基础不牢;数据资源的整合、治理、共享和交换能力欠缺;数据治理架构与对数据底板要求不匹配
工程安全	基本形成问题及风险发现—上报—处理—消缺的闭环,具备初步的问题预警能力	过水断面以下主动发现工程安全隐患的水下常规巡检机制尚未建立;缺乏左岸水库及交叉河流汛期对总干渠工程安全风险的主动精准预警
供水安全	能够支撑日常的水量调度和应急调控,基本能满足日常调度管理需求	缺乏与沿线受水区各地市供水目标的信息共享;未建立一体化水量优化调度系统
水质安全	基本实现了水质指标的时间、空间维度的预警以及突发水质事件部分渠段的预演	突发水质事件处置决策与总干渠输水调度尚未建立全线联合调控机制
资金安全	基本实现了资金全面使用管理	尚需加强与南水北调集团财务管理系统对接;进一步整合和优化系统功能
智能应用	开展了智能视频分析的初步应用;建立了大数据分析模型,初步实现了工程巡查问题的预警	与数字孪生模型平台建设需求和支撑“四预”功能实现有很大差距

网络通信:中线工程采用在渠道两侧自建光纤通道、进城市节点租用裸光纤的方式组建光传输网络,通过6个10G骨干环和48个2.5G区域环连接了全线308个现地站、44个管理处、5个分公司和1个总部。在单站设备故障、单边光缆中断的情况下,仍然能够通过自愈的方式实现通信链路畅通,

确保工程调度安全。建立了三网隔离、区域防护、覆盖“云、边、端”的网络信息传输系统和安全防护体系,但目前尚存在与水利专网的节点未完全连通,无法共享沿线流域和各受水区水行政主管部门的涉水信息等问题。

基础支撑:建设了中线时空信息服务平台(简称

一张图),初步积累了部分基础空间数据、工程数据、专题业务数据、运行状态数据、BIM 信息及无人机三维实景数据,并以时空信息服务方式进行融合发布。同时建设了数据管理及治理平台,初步具备数据汇聚、存储、开发、服务以及平台管理功能。但数据底座基础不牢,在数据资源的整合、治理、共享和交换能力上欠缺,数据治理架构与数字孪生中线对数据底座的要求不匹配;算力资源需要进一步扩充,提高传输、计算和存储的支撑能力。

工程安全:建立了工程巡查维护实时监管系统、工程安全自动化监测系统、防洪信息管理系统、INSAR 变形监测系统、左岸排水建筑物防洪复核与风险分析系统、安全风险分级管控系统、闸站视频监控监控系统 7 个主要业务系统,基本形成问题及风险发现—上报—处理—消缺的闭合环,具备初步的工程安全问题预警能力,但目前多系统、多渠道的信息还未有效集成和挖掘应用;对过水断面以上的设备设施,以工程巡查系统、安全监测系统和视频监控系统为主,基本形成了主动、常态排查 10 大类 33 个专业安全隐患的工作机制。但对过水断面以下主动发现工程安全隐患的水下常规巡检机制尚未建立,对汛期的总干渠左岸洪水造成的风险尚不能主动精确预警。

供水安全:建立了闸站监控系统、日常调度管理系统、输水调度数据分析管理系统、闸站视频监控监控系统 4 个主要业务系统,支撑日常的水量调度和应急调控,基本能满足日常调度管理需求。但尚不能与沿线受水区各地市实现信息共享,难以建立需水—供水—输水—水源的一体化水量调度系统,故不能实现从源头到龙头的水资源最优化调度,提高供水保证率,确保供水安全。

水质安全:在 13 个水质自动监测站、30 个水质

监测断面基础上建立了水质监测系统,在共享沿线环保监测数据、水厂监测数据基础上建立了从源头到龙头的输水水质业务化管理平台,初步实现了水质指标的时间、空间维度的预警以及突发水质污染事件时部分渠段的预演,初步具备了水质监测—预警—调控决策支持的功能,但仍存在突发水质事件的处置决策与总干渠输水调度尚未建立联合调控的问题,缺乏对污染水体处置进行精准模拟和精准退水处置的手段。

资金安全:建立了 NC 财务系统、预算管理系统、合同管理系统 3 个重要的系统,基本实现了“预算管理为龙头、项目管理为中心、资产管理为对象、成本管控为目标”的资金全面使用、管理的目标,但还要加强与集团财务管理系统的对接和进一步整合优化系统功能。

智能应用:建立了水动力与水质耦合模型,实现了部分渠段的水质预报和预警;建立了小流域洪水预报模型,实现了部分左岸排水建筑物的洪水预演和风险预警;开展了视频智能分析应用,初步构建了视频智能识别模型;建立了大数据分析模型,初步实现了工程巡查问题按类别、级别、区域和专业的预警;建立了关联分析模型,初步实现了重要输水建筑物的安全监测数据与 BIM 模型的精准关联和预警。虽然各业务应用相继开展了智能应用场景的尝试,但与数字孪生模型平台的建设需求和支撑“四预”功能的实现还有很大差距。

2 总体建设思路

基于中线工程信息化建设现状,对标数字孪生建设要求,提出数字孪生中线工程“三步走”的建设思路,见图 1。

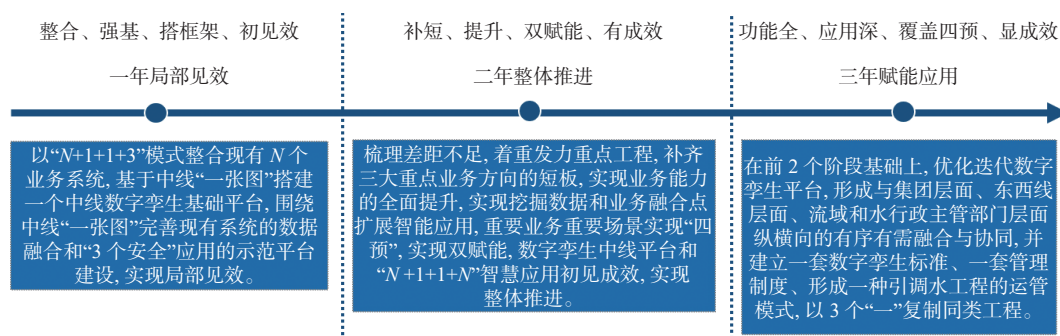


图 1 数字孪生中线工程“三步走”建设思路

Fig. 1 Three-step construction ideas of digital twin of the Middle Route

一年局部见效。以 2023 年为建设起步年,以整合、强基、搭框架、初见效为目标,在现有中线工程

信息化基础设施和业务应用系统基础上,选择典型渠段以“N+1+1+3”模式,即整合现有 N 个业务系统,

在中线“一张图”基础上,搭建1个中线数字孪生基础平台,进行“3个安全”的“四预”应用建设,实现局部见效。

二年整体推进。以2024年为整体提升年,以补短、提升、双赋能、有成效为目标,依托前期搭建的一个中线数字孪生基础平台,系统性地开展数据治理,夯实数据底板,完善信息化基础设施和网络安全防护能力。在工程安全方面重点建设水下工程巡检系统、左岸水库风险评估系统;在供水安全方面重点建设覆盖从源头—干线—分水口—配套工程—水厂的水量调度系统;在水质安全方面重点将现有水质业务系统扩建,实现功能覆盖中线工程全线。补齐三大重点业务的短板,一方面实现业务能力的全面提升,一方面挖掘数据和业务的融合点,扩展智能应用,对重要业务和重要场景实现“四预”,实现双赋能,数字孪生中线智慧应用模式见成效,实现整体推进。

三年总体见效。以2025年为赋能应用年,以功能全、应用深、覆盖“四预”、总体见效为目标,基于前2个阶段建设成果,优化迭代数字孪生平台,形成与集团、东线、流域委和受水区水行政主管部门间的纵横向、有序、有需的数据融合与业务协同,并建立一套数字孪生标准、一套业务管理系统、形成一种引调水工程的运管模式,以3个“一”复制到同类工程,赋能智慧管理、智慧监督、智能风控等 N 项应用,打造引调水工程的数字孪生样板,实现数字孪生中线工程建设总体见成效。

3 技术路线和建设框架

按照“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”的要求,以现存问题为导向,以数字化、网络化、智能化为主线,走数字化场景、智慧化模拟、精准化决策的路径^[28],在中线时空信息服务地图的基础上筑牢统一的数据底板,提升信息化基础设施能力,构建数字孪生中线模型平台和知识平台。

3.1 技术路线

数字孪生南水北调中线工程建设的核心是“ $N+1+1+N+1$ ”,即整合现有 N 个业务系统,通过数据治理提升1张时空信息服务地图,并支撑构建中线数字底板(基础);基于数字底板建设1个数字孪生平台(核心);支撑以“3个安全”为主的 N 项业务应用(支撑);以 N 项业务应用集成1个中线门户,实现全要素信息总揽。技术路线图见图2。

提升1张时空信息服务地图。通过整合现有

N 个业务应用系统,提升1张时空信息服务地图,以此为基础构建中线数据底板,以自然地理、干支流水系、水利工程、经济社会信息和工程运行管理信息为主要内容,对工程进行全要素数字化映射,实现工程数字化场景与实时信息交互,保持两者的同步性、孪生性。

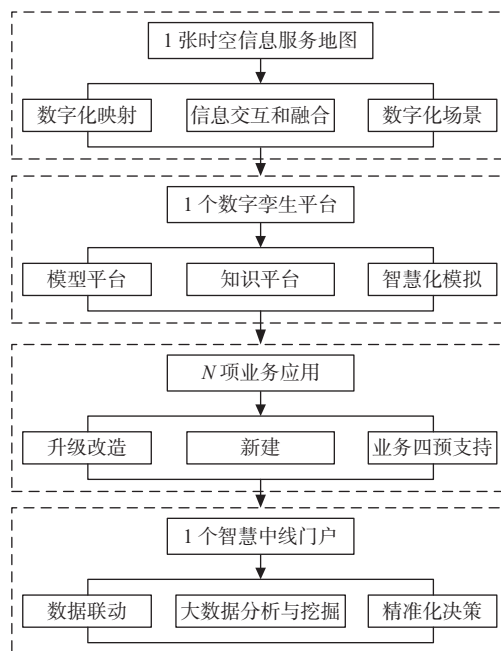


图2 数字孪生中线工程建设技术路线

Fig. 2 Technical route of digital twin of the Middle Route construction

建设1个数字孪生平台。基于1个数字孪生平台实现工程智慧化模拟。利用时空信息服务平台构建的中线数字化场景,研发精细化、多维多时空尺度的水利数学模型和知识平台,支撑“四预”的模拟分析。

支撑 N 项业务应用。支撑以“3个安全”为主的 N 项业务应用,实现中线不同业务领域的精准化和数字化支持,保证各项业务正常运行。

集成1个智慧中线门户。基于 N 项业务应用构建1个智慧中线门户,通过数据联动、大数据分析挖掘实现中线工程“3个安全”预报及预警,实现数据驱动精准化决策支撑。

3.2 建设框架

以“3个安全”为核心开展业务领域“四预”的需求分析,结合中线工程发展现状和实际需求,统筹参考水利部智慧水利顶层设计及数字孪生流域建设技术大纲,提出数字孪生中线建设框架,见图3。

数字孪生中线工程建设框架主要包括网络安全体系、标准规范体系及运行维护三大体系。网络安全体系的基础设施包括由北京主数据中心和郑州灾备数据中心构成的中线云;由控制专网、业务内

网和业务外网组成的信息传输设施;对水情、水质、工情等监测的感知设施。网络安全体系的核心框架主要包括 1 个智慧中线门户和 1 个数字孪生平台,其中:智慧中线门户的核心部分是实现数据分析、

空间展示、专题展示及多维赋能等功能的领导驾驶舱;而数字孪生平台主要包含用于模拟仿真引擎的模型平台,作为知识引擎的知识平台及基于时空服务平台搭建的数据底板。

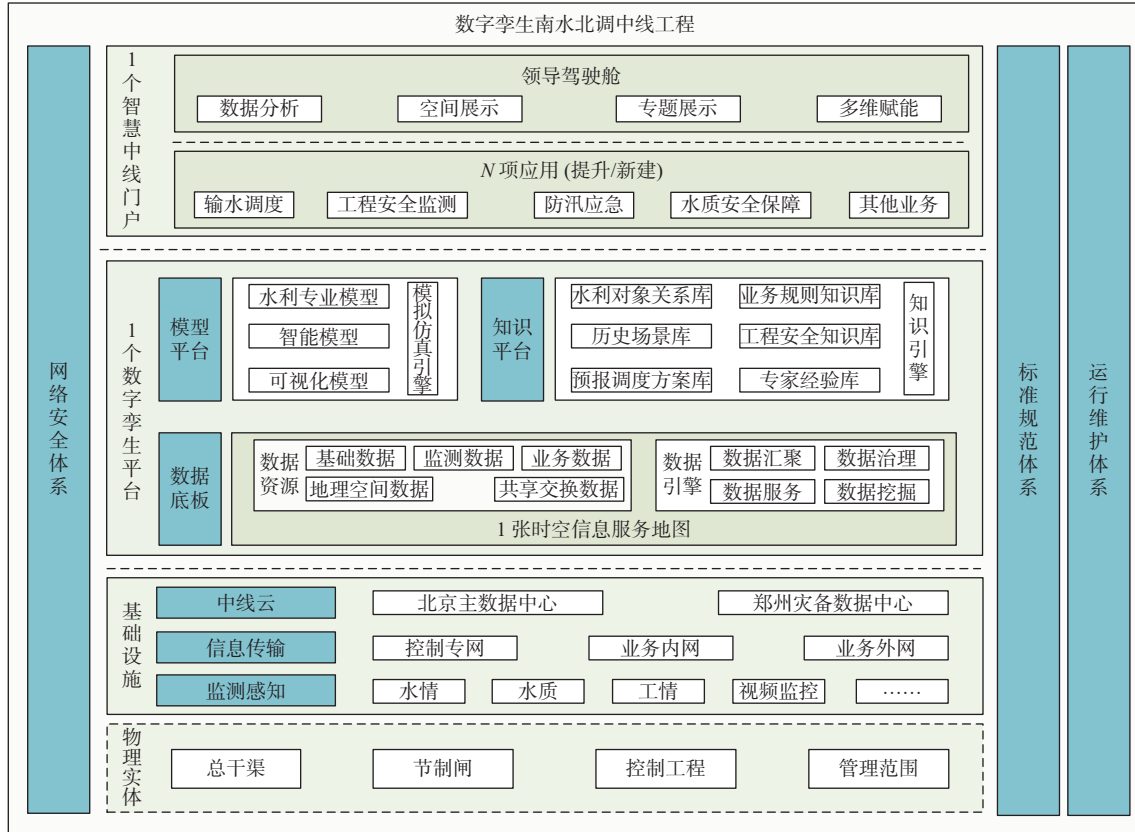


图 3 数字孪生中线工程建设框架
Fig. 3 Construction frame of digital twin of Middle Route

依托中线工程物理实体和基础设施,通过时空信息服务地图为中线工程数字孪生数据底板提供空间信息数据,再融合模型平台和知识平台,构建中线工程数字孪生平台,为“3 个安全”N 项智能业务应用提供支撑。

4 重点建设内容

4.1 数字孪生平台

建设数字孪生中线数据底板。基于时空信息服务地图构建南水北调中线工程数据底板,为业务应用提供“算据”支撑,建成基础数据统一、工程数据权威、监测数据全面、二维和三维一体化、三级贯通的数据底板,将地理信息、水空间信息、水工程信息、水专题业务信息、实时运行管理信息、工程 BIM 信息、遥感影像及无人机实景信息以“一张图”的形式集成、融合,搭建中线数字孪生场景,为“3 个安全”和其他业务应用提供支撑。

数据底板的建设重点是建立中线数据资源中心,以数据治理平台和共享交换平台为基础,与现有业务系统通过数据接口、数据库、文件等方式接入数据治理平台,针对各类数据分别建立 ETL 治理模型,实现数据的标准化治理;针对每类数据特点构建数据治理任务,实现数据的来源统一、标准统一和持续治理入库。建立面向智慧应用的数据共享交换平台,为多维融合应用提供治理后持续和安全的数据服务。通过数据资源中心的建设,构建“一数一源”的数据资源体系;通过业务系统的责任归口,建立“一源一主”的数据责任体系;面向智慧应用,实现“一源 N 用”的数据服务体系,为智慧化模拟提供“算据”。

构建数字孪生模型平台和知识平台。建设数字孪生模型平台和知识平台,构建标准统一、接口规范、敏捷复用的水利专业模型和通用可扩展的遥感、视频等 AI 分析模型,支持水利专业模型服务、智能

分析模型服务的统一管理和发布,通过数据底板和模型平台深度整合,实现模型计算的数据支撑和模拟成果在数字化场景上的多维展示和实时交互。建设结构化、自优化、自学习的水利知识平台,融合知识表示、知识抽取、知识推理等功能的水利知识引擎,为决策分析提供知识依据。

4.2 工程安全应用

实现工程结构安全“四预”应用。基于中线工程数字孪生平台,集成现有的工程巡查维护实时监控系统、工程安全自动化监测系统、水雨情监测系统、防洪信息管理系统、INSAR 变形监测系统、左岸排水建筑物防洪复核与风险分析系统、安全风险分级管控系统及闸站视频监控系统的数据库,通过监测数据、业务数据与数字孪生体集成,实现主体工程、水雨情、工情、机电设备等全要素信息的虚实映射、同步联动,通过构建工程安全预警模型,在数字场景中进行智能模拟,对风险进行预警、预演,形成预案,保证工程平稳、安全运行。

构建左岸防洪安全预警体系。中线沿线水文气象形势错综复杂,沿线交叉河流的河道特征各有不同,为开展主动、精准的防汛工作,构建左岸防洪安全预警系统,与受水区水行政主管部门共享沿线交叉河流及左岸水库的水情、工情及雨情信息,结合左岸排水建筑物的控制流域面积,构建产汇流、一维和二维水动力学模型对洪水演进过程模拟预演,分析淹没、冲刷、积水、洪水漫堤入渠等各类风险,提出应急处置措施。对沿线的左岸小型水库,模拟预演水库溃坝、洪水下泄以及与河道洪水同频率遭遇后对总干渠造成的各风险,提出应急处置措施,提高左岸洪水对总干渠影响的预警、预演、风险分析与应急处置能力。

建设总干渠水下常态巡检系统。基于声呐成像、深度学习、水下空间定位等技术,建立中线水下智能巡检系统,实现水下巡检轨迹追踪、问题识别、BIM 可视化精准定位、问题综合研判、问题资料管理、巡检报告自动生成的全要素关联和全过程管理,推动中线水下巡检工作从被动发现向主动巡检的转变,消除中线的巡检盲区,提升巡检效率和水平,为工程隐患的综合研判提供技术支撑。

提升现有防洪影响分析系统应用。中线经历十多年的建设,现状地形地貌与原规划阶段相比已发生较大的变化。现有左岸排水建筑物防洪影响分析系统,仅对部分典型左排建筑物的汇流面积和有

关参数进行复核分析和原设计洪水进行对比,从而对现状中线的防洪能力是否能满足原设计标准进行研判,后续应结合已有工作成果,与数字孪生中线建设内容进行匹配性改造提升,扩大其在中线的应用范围,实现中线全线左排建筑物防洪影响的分析功能,对工程安全进行评价。

4.3 供水安全应用

构建“四预”供水安全专业模型。基于现行调度规则,整合改造闸站监控系统、日常调度管理系统、输水调度数据分析系统等,构建总干渠一、二维水动力学闸站联合调度模型,对不同输水条件和闸站调度方式进行分析模拟与推演,提前掌控上游闸站调度对下游水情的影响,实现中线沿线水情预报、超阈值预警、调度方案预演和调度预案生成,为中线正常供水调度和应急调度提供决策支持,形成具有“四预”功能的供水安全保障体系。

建立水量联合调度系统。中线供水涉及水源、分水口、节制闸、退水闸、水厂以及沿线的调蓄水库等,通过建立“水源—需水—供水—输水”一体化水量优化调度模型,基于用水对象的优先级和来水量、用水量的变化适时调整各分水口门、退水闸的泄水量,提高中线供水保证率,确保中线供水安全。

持续开展建筑物流态优化。在中线局部渠段开展的墩、槽、柱流态模拟与优化研究中,通过在墩后增加导流罩(墩)有效解决了墩子对水流的流态扰动问题,即流态得到优化、流速更趋于平稳、输水能力得到提升。充分挖掘该项目取得的成果并推广应用于总干渠其他渠段或建筑物流态优化项目上,为总干渠常态大流量输水创造有利条件,保障供水安全。

以效益分析辅助优化调度。基于南水北调工程通水效益指标信息化管理系统,以中线沿线的县域供水目标为单元,收集中线社会效益、经济效益、生态效益相关的指标数据,评估分析中线通水后的效益,将结果反馈到水量联合调度系统中,作为调水计划优化的参考,辅助提高供水效益。

4.4 水质安全应用

建立水质全过程“四预”体系。依托中线工程数字孪生平台,联合机器学习和水动力-水质耦合模型,实现风险污染物时空变化过程演进的仿真模拟,包括污染物扩散模拟预演、应急调控模拟、风险源管理等场景,支撑风险污染物全过程管控和智慧决策。通过建设供水水质预报、水质污染事件预警、污染物扩散模拟、应急退水模拟、退水应急处置的

全流程供水水质管理的预报、预警、预演、预案系统,全面提高中线水质“四预”管理能力。

补充水生态监测手段。基于中线总干渠中实验鱼的洄游数据,对实验鱼在监测区域内出现的时间记录,推算实验鱼所处位置,并叠加数字孪生场景,模拟实验鱼洄游轨迹,开发南水北调中线水生环境智能监测系统,在掌握实验鱼洄游规律的同时评估洄游区水质情况,实现生物手段对水质的监测和研判。

强化水质智能检测。基于计算机视觉技术研发 AI 藻类监测设备,嵌入南水北调中线工程藻类视频图像识别算法,智能分析中线总干渠内藻类特征,判定藻体类型,解译藻类覆盖度、厚度、生物量等信息,实现藻类视频图像和量化数据提取与保存,对水质进行评估。

完善水污染应急退水模拟与风险分析。选取典

型退水闸和下游退水河道,利用中线数字化场景,构建水动力-水质耦合模型,模拟水污染发生时的总干渠退水过程与可能发生的风险,有针对性地提出退水方案和相关工程处理措施,为管理单位提供决策支持,提高应对水质突发风险及事件的能力。

4.5 标准规范体系建设

标准规范是规范数字孪生建设的重要手段,结合数字孪生南水北调中线工程建设,依据水利部印发的相关数字孪生指导性文件,在对数字孪生南水北调工程内涵、参考架构、关键技术等进行系统认识基础上,构建数字孪生南水北调工程标准体系框架,见图 4。该标准体系框架统揽和规范了南水北调数字孪生技术发展和系统开发,使数字孪生技术能够协调应用和共享,避免出现技术孤岛,以先进技术标准引领南水北调工程高质量发展。

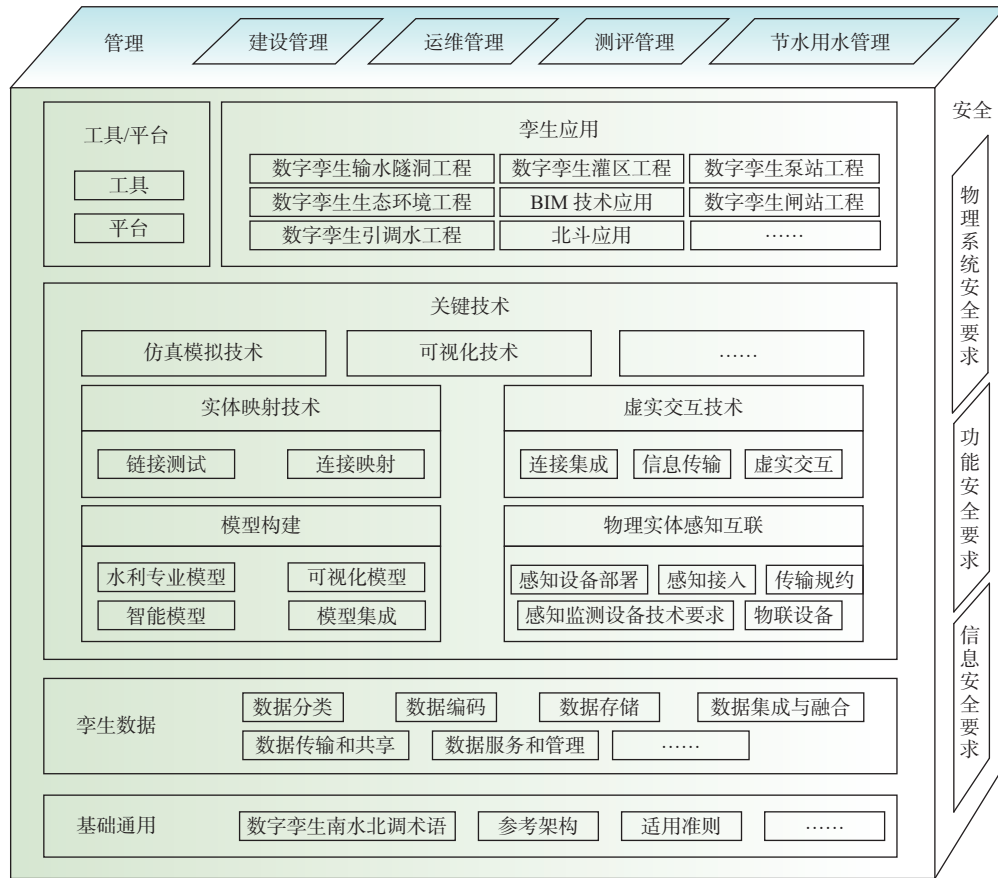


图 4 数字孪生中线工程标准体系框架

Fig. 4 Standard system framework of digital twin of the South-to-North Water Transfers Project

标准体系主要由基础通用、孪生数据、关键技术、平台/工具、孪生应用、管理、安全 7 部分组成,以系统思维建立数字孪生南水北调工程建设管理所需的标准体系,全面包含南水北调工程的业务领域,并统一协调,满足南水北调数字孪生业务建设管理需求。

5 总结与展望

基于南水北调中线工程信息化现状,分析了其与数字孪生建设要求存在的差距,提出了数字孪生中线工程建设思路、技术路线、总体框架和实施路径,明确了数字孪生平台、工程安全应用、供水安全

应用、水质安全应用、标准规范体系等方面的重点建设内容。南水北调工程作为国家水网骨干网的重要组成部分,要发挥科技创新引领作用,在推进水网数字化、调度智能化、监测预警自动化和加强实体水网与数字水网融合,提升水网工程科技和智能化水平方面做出行业示范。

参考文献:

- [1] TAO F, ZHAN H, LIU A, et al. Digital twin in industry: State-of-the-art[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(4): 2405-2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.
- [2] 李喆,叶松,杨星玥,等.数字孪生驱动的南水北调中线水源工程水质平台设计与开发[J].*长江科学院院报*, 2023, 40(3): 174-180. DOI: 10.11988/ckyyb.20221660.
- [3] 申振,姜爽,聂麟童.数字孪生技术在水利工程运行管理中的分析与探索[J].*东北水利水电*, 2022, 40(8): 62-65. DOI: 10.14124/j.cnki.dbsl22-1097.2022.08.022.
- [4] 贺兴,艾芊,朱天怡,等.数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战[J].*电网技术*, 2020, 44(6): 2009-2019. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1983.
- [5] 宫志群,王永志,廖少明,等.基于数字孪生的建设工程项目管理数字化[J].*土木工程学报*, 2023, 56(7): 82-91. DOI: 10.15951/j.tmgxb.23040317.
- [6] 张绿原,胡露骞,沈启航,等.水利工程数字孪生技术研究及探索[J].*中国农村水利水电*, 2021(11): 58-62.
- [7] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex system[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2017.
- [8] 王巍,刘永生,廖军,等.数字孪生关键技术及体系架构[J].*邮电设计技术*, 2021(8): 10-14. DOI: 10.12045/j.issn.1007-3043.2021.08.003.
- [9] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2022.20.010.
- [10] 蔡阳,成建国,曾焱,等.加快构建具有“四预”功能的智慧水利体系[J].*中国水利*, 2021(20): 2-5.
- [11] 李卫斌,张珊珊,张天一,等.数字孪生技术及其在水利行业的应用[C]//中国水利学会.2022年中国水利学术大会论文集(第四分册).黄河水利出版社, 2022: 5. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.059384
- [12] 冶运涛,蒋云钟,梁犁丽,等.数字孪生流域:未来流域治理管理的新基建新范式[J].*水科学进展*, 2022, 33(5): 683-704. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.05.001.
- [13] BARTOS M, KERKEZ B. Pipedream: An interactive digital twin model for natural and urban drainage systems[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2021, 144: 105120. DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.105120.
- [14] ALPERENC I, ARTIGUE G, KURTULUS B, et al. A hydrological digital twin by Artificial Neural Networks for flood simulation in Gardon de Sainte-Croix basin, France[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Britain: IOP Publishing, 2021, 906(1): 012112.
- [15] RANJBAR R, DUVELLA E, ETIENNE L, et al. Framework for a digital twin of the canal of Calais[J]. *Procedia Computer Science*, 2020, 178: 27-37. DOI: 10.1016/j.procs.2020.11.004.
- [16] 蒋云钟,冶运涛,王浩.智慧流域及其应用前景[J].*系统工程理论与实践*, 2011, 31(6): 1174-1181. DOI: 10.12011/1000-6788(2011)6-1174.
- [17] 黄艳,喻杉,罗斌,等.面向流域水工程防灾联合智能调度的数字孪生长江探索[J].*水利学报*, 2022, 53(3): 253-269. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210865.
- [18] 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.1673-9264.2021375.
- [19] 周超,唐海华,李琪,等.水利业务数字孪生建模平台技术与应用[J].*人民长江*, 2022, 53(2): 203-208. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.02.034.
- [20] 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. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2021376.
- [21] 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. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2021340.
- [22] 廖晓玉,高远,金思凡,等.松辽流域智慧水利建设方案初探[J].*中国防汛抗旱*, 2022, 32(2): 40-43,53. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2021339.
- [23] 刘雪梅,卢汉康,李海瑞,等.知识驱动的水利工程应急方案智能生成方法:以南水北调中线工程为例[J].*水利学报*, 2023, 54(6): 49-56. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20220994.
- [24] 李程喜,段文刚,马啸,等.南水北调中线工程京石段冬季水温回归预测模型[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(2): 352-361. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2023.0036.
- [25] CHENG Z, ZHAO Y, SONG T. et al. White elephant or golden goose? An assessment of Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project from the Perspective of regional water use efficiency[J]. *Water Resource Management*, 2023, 37: 819-834. DOI: 10.1007/s11269-022-03405-9.
- [26] 练继建,杨德明,赵新.南水北调中线工程冬季输水冰情风险研究[J].*水利水电科技进展*, 2023, 43(1): 63-70. DOI: 10.3880/j.issn.10067647.2023.01.010.
- [27] 中华人民共和国水利部.关于大力推进智慧水利建设的指导意见[EB].http://xxzx.mwr.gov.cn/xxgk/tzgg/202112/t20211227_1556995.html.
- [28] 中华人民共和国水利部.数字孪生水网建设技术导则(试行)[EB].http://xxzx.mwr.gov.cn/xxgk/gbjb/slxxhjb/202207/t20220711_1584823.html.

Construction ideas for the digital twin of Middle Route of South-to-North Water Transfers Project

GAO Ying¹, GAO Jinhui², SHANG Yinlei¹, ZHAO Yuan³, LI Chunyang⁴, WU Jiamin⁴

(1. Henan Water & Power Engineering Consulting Co., Ltd, Zhengzhou 450016, China; 2. China South-to-North Water Transfer Group Water Network Intelligent Technology Co., Ltd, Beijing 100036, China; 3. China South-to-North Water Diversion Corporation Limited, Beijing 100036, China; 4. China South-to-North Water Diversion Middle Route Corporation Limited, Beijing 100036, China)

Abstract: The Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project is a major strategic infrastructure project to optimize the allocation of water resources and improve the ecological environment in China. However, due to the limited level of planning and information construction, there are a series of challenges, including that the water supply destination cannot realize the optimal dispatching of water transport to achieve supply and demand balance, the automatic degree of early warning in water quality monitoring is inadequate, the disposal of water contamination accident lacks scientific decision-making support and the engineering safety risks cannot be actively and accurately warned.

In order to provide scientific and technological support for the construction of the digital twin of Middle Route of South-to-North Water Transfers Project, to provide a model for the construction of digital twins in other water transfers projects, and to support the acceleration of construction of digital twins in the national water network of China, this paper aims to build a unified data base plate, improve the ability of information infrastructure, build a digital twin Middle Route model platform and knowledge platform, and finally realize the precise decision support for the safe operation of the Middle Route and water resources scheduling on the basis of the Middle Route spatio-temporal information service map. Based on the construction status of the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project and the characteristics of digital twin technology, the gap between the informatization status and the requirements of digital twin construction was analyzed. According to the requirements of digital twin construction, the overall thought of the construction of the digital twin of Middle Route of South-to-North Water Transfers Project from two frame design and technical route planning based on the construction status of the project and characteristics digital twin technology is put forward.

The implementation path is elaborated in detail with the principle of “three safety” of engineering safety, water supply safety and water quality safety and the core objectives of improving the level of digitization, networking and intelligence of the project, and strengthening the four pre-functions of “forecast, early warning, preview and plan”. The key construction contents of digital twin platform, engineering safety application, water supply safety application, water quality safety application and standard specification system are clarified. Through the establishment of the standard system required for the construction and management of the digital twin of South-to-North Water Transfers Project with systematic thinking, it comprehensively covers the business areas of the South-to-North Water Transfers Project, and is unified and coordinated to meet the construction and management needs of the digital twin business of the South-to-North Water Transfers Project.

Through the three-step construction of digital twin of Middle Route of South-to-North Water Transfers Project, that is, the local effect in the first year, the overall promotion in the second year, and the enabling application in the third year, the synchronous simulation operation and iterative optimization of the physical Middle Route and the digital Middle Route are realized, helping the Middle Route to play a greater role in the development of the national economy. As an important component of the backbone network of the national water network, the South-to-North Water Transfers Project should play a leading role in scientific and technological innovation, and make industry demonstrations in promoting the digitization of water networks, intelligent dispatching, automation of monitoring and early warning, strengthening the integration of physical water networks and digital water networks, and improving the level of science and technology and intelligence of water network projects, which provides an important reference for the construction of the digital twin of Middle Route of South-to-North Water Transfers Project.

Key words: digital twin; Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project; engineering safety; water supply safety; water quality safety