

DOI: 10.19364/j.1674-9405.2022.04.002

《数字孪生流域建设技术大纲（试行）》解析

谢文君, 李家欢, 李鑫雨, 贺挺, 赵轩哲

(水利部信息中心, 北京 100053)

摘要: 2022年3月, 水利部印发《数字孪生流域建设技术大纲（试行）》, 明确了数字孪生流域的具体建设内容, 细化了技术要求。介绍数字孪生流域建设背景, 以及定义、建设范围及目标、建设原则等建设内涵, 阐明智慧水利总体框架和数字孪生流域建设框架, 进一步厘清相互关系。详细说明数据底板、模型平台、知识平台等组成的数字孪生平台, 以及水利感知网、水利信息网、水利云等组成的信息化基础设施两大组成部分的主要建设任务, 对涉及的具体功能要求和技术要点进行详细解析, 就数字孪生流域建什么、达到什么标准及需要重点把握的技术环节等问题进行解读, 并对数据孪生流域建设过程中涉及的数据安全特别是地理空间数据安全应用等重要问题和集成共享相关要求进行了说明。

关键词: 数字孪生流域; 数字孪生平台; 信息化基础设施; 数据底板; 模型平台; 知识平台

中图分类号: TP391.98

文献标志码: A

文章编号: 1674-9405(2022)04-0006-07

0 引言

国家“十四五”规划纲要提出了“构建智慧水利体系, 以流域为单元提升水情测报和智能调度能力”的明确要求^[1]。2021年6月, 水利部提出将推进智慧水利建设作为推动新阶段水利高质量发展的六条实施路径之一^[2], 并将智慧水利作为新阶段水利高质量发展的显著标志; 2021年12月, 水利部召开推进数字孪生流域建设工作会议, 要求大力推进数字孪生流域建设, 各流域管理机构、地方水行政主管部门和有关水利工程管理单位陆续开展数字孪生流域先行先试项目建设, 水利行业掀起了建设数字孪生流域的高潮。

数字孪生流域是智慧水利的核心与关键, 是一项复杂的系统工程, 必须加强组织、顶层谋划、统筹协调、协同推进。为统一要求、明确标准, 避免重复建设、信息孤岛, 水利部组织编制了《数字孪生流域建设技术大纲（试行）》^[3]（以下简称《技术大纲》）, 重点回答数字孪生流域建什么、达到什么标准等问题, 细化建设任务和具体内容。

1 建设内涵

数字孪生流域技术性强、创新性高, 各地各单

位对一些概念的认识和理解存在差异, 并且对如何切实做好数字孪生流域建设存在困难。为加强技术指导 and 进一步规范数字孪生流域建设, 以便工作上明确任务边界、分工协作, 避免重复建设、投资浪费, 技术上统一标准, 防止出现条块分割、信息孤岛现象, 《技术大纲》明确了数字孪生流域的定义、建设范围及目标、建设原则等内容。

1.1 定义

数字孪生流域是以物理流域为单元、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活动全过程进行数字映射、智能模拟、前瞻预演, 与物理流域同步仿真运行、虚实交互、迭代优化^[4], 实现对物理流域的实时监控、发现问题、优化调度的新型基础设施。

其中, 对物理流域全要素和水利治理管理活动全过程进行数字映射、智能模拟、前瞻预演是路径, 与物理流域同步仿真运行、虚实交互、迭代优化是特征, 实现对物理流域的实时监控、发现问题、优化调度是目的, 水利业务与信息技术融合的新型基础设施是定位。

1.2 建设范围及目标

考虑到当前水利信息化建设基础, 以及“2+N”业务应用的重点范围, “十四五”期间数字孪生

收稿日期: 2022-07-04

作者简介: 谢文君(1981-), 男, 湖北浠水人, 正高级工程师, 主要从事水利数据管理和信息系统研究及建设工作。

E-mail: xiewj@mwr.gov.cn

流域建设范围确定为大江大河大湖及主要支流、重点流域和重点区域。

总体建设目标是：按照“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”要求，以数字化、网络化、智能化为主线，以数字化场景、智能化模拟、精准化决策为路径^[5]，在水利一张图^[6]基础上构建全国统一的数据底板，升级扩展三维展示、数据融合、分析计算、动态场景等功能，建设完善数字孪生平台、提升信息化基础设施能力，实现与物理流域同步仿真运行、虚实交互、迭代优化，支撑“四预”（预报、预警、预演、预案）功能实现和“2+N”智能应用运行，提升水利决策与管理的科学化、精准化、高效化能力和水平，为新阶段水利高质量发展提供有力支撑和强力驱动。

为充分发挥新一代信息技术的支撑驱动作用，针对算据要素和精度尚不满足要求、模型算法距高保真目标有差距、计算存储算力不强等问题^[7]，实现以下具体目标：

1) 算据方面。算据是物理流域及其影响区域的数字化表达，是构建数字孪生流域的数据基础，包括自然地理、干支流水系、水利工程、经济社会等信息。构建全国统一、及时更新的数据底板，建成覆盖全国的L1级数据底板，主要江河流域重点区域建成L2级数据底板，重点水利工程建成L3级数据底板，保持数字孪生流域与物理流域的精准性、同步性、及时性，为数字孪生流域提供全面及时算据支撑。

2) 算法方面。算法是物理流域自然规律的数学表达，是构建数字孪生流域的关键，包括模型和知识等平台内容。建成模型和知识平台，提升模型的标准化和集约化水平，进一步加强与业务的深度融合，对物理流域全要素和水利治理管理活动全过程进行模拟仿真和前瞻预演，确保数字孪生流域的模拟和物理过程实现高保真，为数字孪生流域提供智能实用算法服务。

3) 算力方面。算力是数字孪生流域高效稳定运行的重要支撑，包括计算、通信、存储等基础设施资源。按照“集约高效、共享开放、按需服务”的原则，实现县级及以上水利单位水利业务网全覆盖并有效服务各类信息及时高效传输应用需要，IPv6在水利业务网实现规模化部署和应用，建成省级及以上水行政主管部门水利云，支撑计算存储资源按需分配、弹性伸缩，为数字孪生流域提供安全可靠

算力保障。

1.3 建设原则

1) 需求牵引，应用至上。这是数字孪生流域建设的总要求，建设应服务于“2+N”水利业务应用，以需求为牵引，强化“四预”功能，支撑强化流域治理管理，做到建设成果实用管用。围绕水利业务工作实际需求，将数字孪生流域建设与流域治理管理“四个统一”（统一规划、统一治理、统一调度、统一管理）相结合，强化业务薄弱环节，优化重塑业务流程，并注重用户体验，推进信息技术与水利业务深度融合，有力支撑精准化决策。

2) 系统谋划，分步实施。应做好总体安排与近期工作的衔接，确保数字孪生流域建设过程中分步发挥实效，把握好不同建设节点的具体任务要求，有序推进各项任务实施。按照《智慧水利建设顶层设计》要求，根据需求迫切性、技术可行性、条件成熟性，先期开展技术攻关和试点示范，形成一批可复制可推广的成果，在此基础上，有步骤、分阶段推进。

3) 统筹推进，协同建设。高度重视数字孪生流域标准化建设和已有成果利旧，重点解决好信息孤岛问题，确保网络互联、信息共享、业务协同。按照“全国一盘棋”思路，建立健全各参建单位协作推进和共建共享体制机制，强化全流程各环节管理，加强各方面的技术衔接，保障数字孪生流域建设不漏不重。

4) 整合资源，集约共享。以整合为手段，通过机制体制创新和信息技术深入应用，实现信息资源共享，促进“2+N”业务应用协同。按照“整合已建、统筹在建、规范新建”要求，充分利用现有的信息化及国家新型基础设施，有针对性补充完善升级，实现各类资源集约节约利用和互通共享，避免重复建设。

5) 更新迭代，安全可控。按照国家关于网络安全和数据安全等方面的要求，统筹发展和安全，守住安全底线，做到风险可控、确保安全。不断进行数据更新和功能迭代，保持与物理流域的同步性和孪生性。推进国产化软硬件应用，不断提升网络安全风险态势感知、预判、处置与数据安全防护能力。

2 技术框架

智慧水利由数字孪生流域、业务应用、网络安全体系、保障体系等组成。其中，数字孪生流域

是智慧水利建设的核心与关键,包括数字孪生平台和信息化基础设施;流域防洪、水资源管理与调配及 N 项业务应用调用数字孪生流域提供的算据、算法,算力等资源。总体框架如图 1 所示。

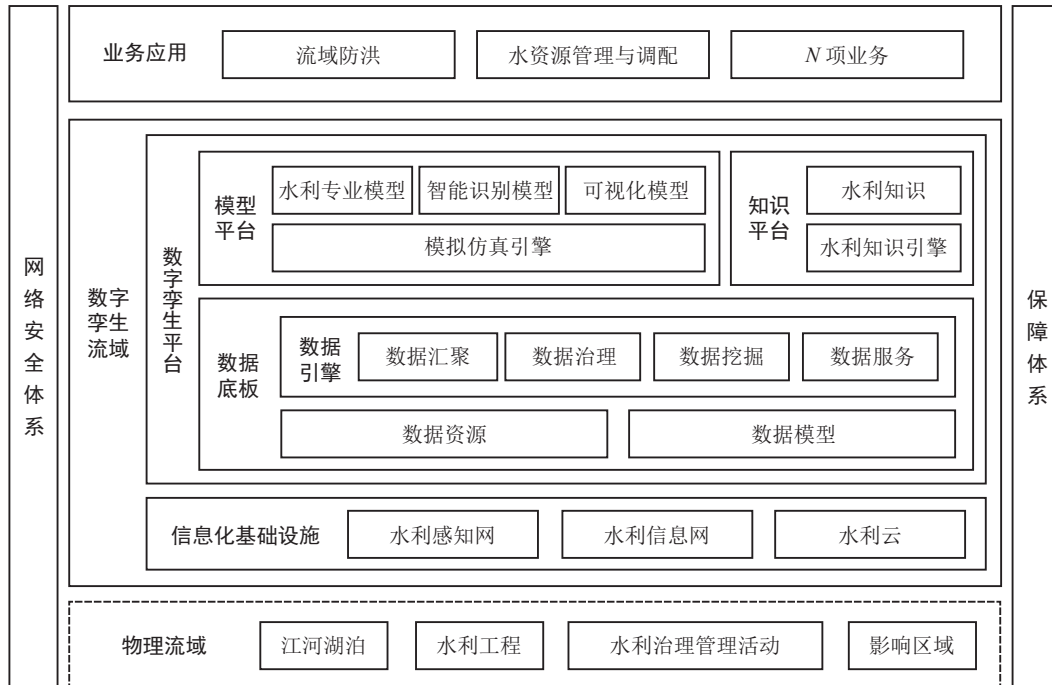


图 1 智慧水利总体框架

图 1 显示,从技术构成上看,业务应用、网络安全体系和保障体系不属于数字孪生流域的组成部分。但从任务实施来看,为确保建设内容完整和体现建设成果成效,通常在开展数字孪生流域相关项目建设时,都会涵盖主要业务应用、网络安全和保障体系等内容,各单位还可根据水利业务实际需求对具体内容进行扩展补充。

数字孪生平台主要由数据底板、模型平台、知识平台等构成。数据底板汇聚水利信息网传输的各类数据,经处理后为模型和知识平台提供数据服务;模型平台利用数据底板成果,以水利专业模型分析物理流域的要素变化、活动规律和相互关系,通过智能识别模型提升水利感知能力,利用模拟仿真引擎模拟物理流域的运行状态和发展趋势,并将以上结果通过可视化模型动态呈现;知识平台汇集数据底板产生的相关数据、模型平台的分析计算结果,并融合业务规则与专家经验,经水利知识引擎处理形成知识图谱和知识库服务水利业务应用。

信息化基础设施主要由水利感知网、水利信息网、水利云等构成。水利感知网负责采集数字孪生流域所需各类数据,通过水利信息网将数据传输至数字孪生平台数据底板,水利云负责提供数据计算

和存储资源。

数字孪生流域建设框架如图 2 所示。

3 主要任务

《技术大纲》以规范性附表的方式列出了数据底板、模型平台、知识平台、水利感知网、水利信息网、水利云等各部分的建设主体,建设内容与范围,指标参数或技术要求,更新频率等主要技术指标要求,其中更新频率设计了基本版和提高版 2 种要求,为各单位开展数字孪生流域建设提供了根本遵循和业务指导。

3.1 数据底板

数据底板是在水利一张图基础上升级扩展,完善数据类型、范围、质量,优化数据融合、分析计算等功能。主要包括数据资源、数据模型和数据引擎等内容。

《技术大纲》明确数据资源的时间基准采用北京时间,空间基准采用 2000 国家大地坐标系(CGCS2000),高程基准采用 1985 国家高程基准,主要包括基础、监测、业务管理、跨行业共享、地理空间等数据内容。其中,基础数据包括流域、河流、湖泊、水利工程等水利对象的主要属性和空间

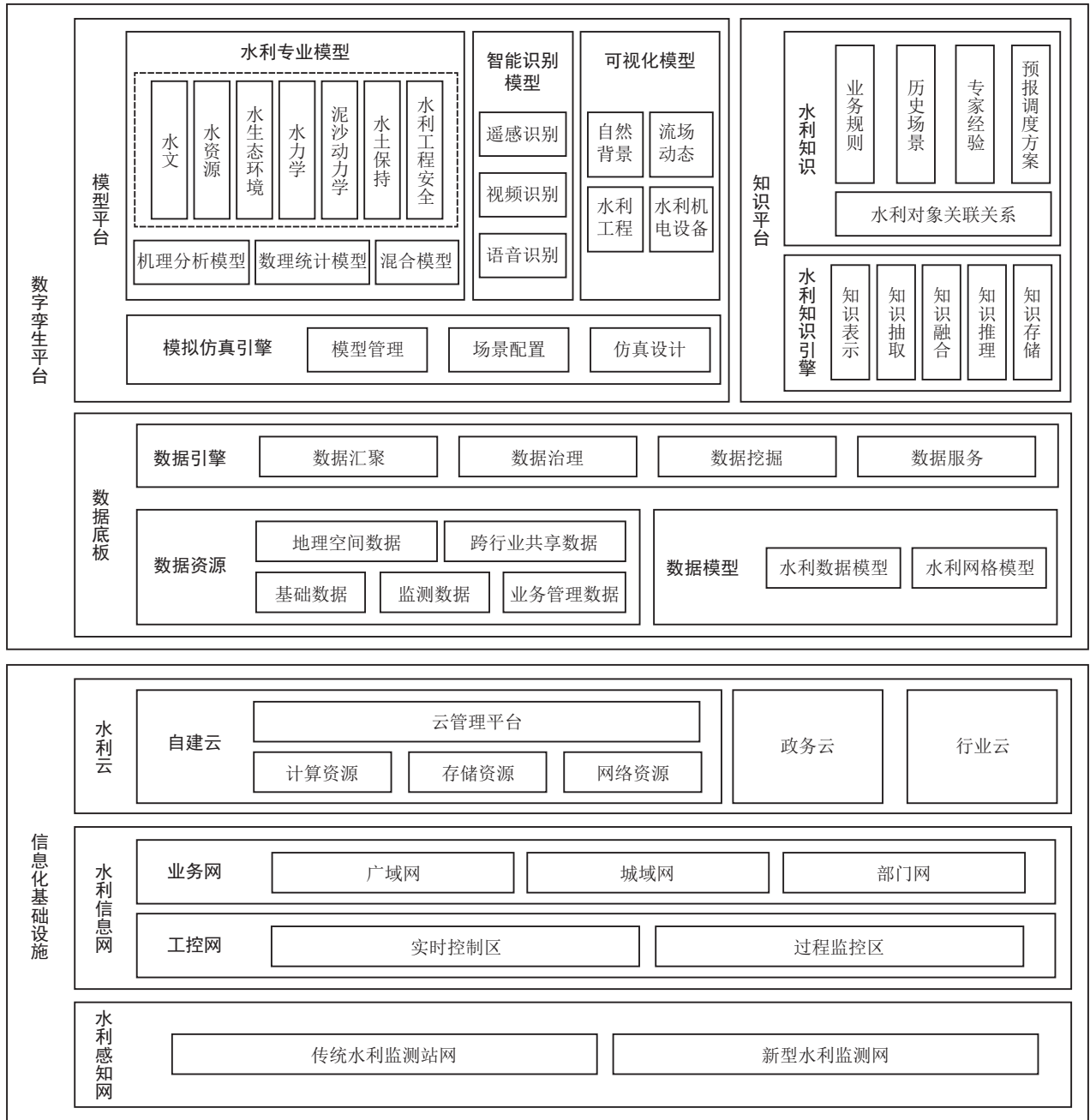


图 2 数字孪生流域建设框架

数据；监测数据包括水文、水资源、水生态环境、水灾害、水利工程、水土保持等水利业务的监测数据；业务管理数据包括流域防洪、水资源管理与调配等“2 + N”业务应用数据；跨行业共享数据包括需从其他行业部门共享的经济社会、土地利用、生态环境、气象、遥感等相关数据；地理空间数据主要包括数字正射影像图（DOM）、数字高程模型（DEM）/数字表面模型（DSM）、倾斜摄影影像/激光点云、水下地形、建筑信息模型（BIM）等数据。地理空间数据按照数据精度和建设范围分为

L1, L2, L3 三级：L1 级是进行数字孪生流域中低精度面上建模，主要包括全国范围的 DOM 和 DEM/DSM 等数据；L2 级是进行数字孪生流域重点区域精细建模，主要包括重点区域的高分辨率 DOM、高精度 DEM/DSM、倾斜摄影影像/激光点云、水下地形等数据；L3 级是进行数字孪生流域重要实体场景建模，主要包括重要水利工程相关范围的高分辨率 DOM、高精度 DEM、倾斜摄影影像/激光点云、水下地形、BIM 等数据。

数据模型包括水利数据和网格模型。水利数据

模型^[8]是面向水利业务应用多目标、多层次复杂需求,构建的完整描述水利对象的空间、业务、关系和时间特征一体化组织的数据模型,在技术上破解了传统GIS数据组织仅顾及空间关系的限制,业务上突破了信息组织受业务片面性影响的局限性,具有松耦合组织和可扩展性特点。水利网格模型是根据行政区划、自然流域、水资源功能区和数值计算等需求构建的网格化管理模型,实现流域防洪、水资源管理与调配等水利业务的网格化联动。

数据引擎主要包括数据汇聚、治理、挖掘、服务等内容。数据汇聚通过构建涵盖业务数据汇集、视频级联集控、遥感接收处理等数据管理的平台化能力,为模型和知识平台提供数据支撑;数据治理对汇集后的多源数据进行统一清洗和管理,提升数据的规范性、一致性、可用性,避免数据冗余和冲突,包括数据的模型管理、血缘关系建立、清洗融合、质量管理、开发管理及元数据管理等;数据挖掘运用统计学、机器学习、模式识别等方法从数据资源中发现物理流域全要素之间存在的关系和水利治理管理活动全过程的规律,通过图形、图像、地图、动画等方式展现,包括描述性、诊断性、预测性和因果性分析等;数据服务依托已有国家和水利行业的数据共享交换平台,实现各类数据在各级水行政主管部门之间的上报、下发与同步,以及与其他行业之间的共享,包括数据地图服务开发、数据资源目录、问题反馈、服务共享和管控等。

3.2 模型平台

《技术大纲》提出了按照“标准化、模块化、云服务”的要求,制定模型平台开发、模型调用、共享和接口等技术标准,保障各类模型的通用化封装及模型接口的标准化,以微服务方式提供统一调用服务,供各单位进行调用。主要包括水利专业、智能识别、可视化模型和模拟仿真引擎。

水利专业模型包括以下3类模型:1)机理分析模型是基于水循环自然规律,用数学语言和方法描述物理流域的要素变化、活动规律和相互关系的数学模型,应是水利专业模型建设的重点;2)数理统计模型是基于数理统计方法,从海量数据中发现物理流域要素之间的关系并进行分析预测的数学模型;3)混合模型是将机理分析与数理统计进行相互嵌入、系统融合的数学模型。按照具体的应用场景,水利专业模型主要有水文、水资源、水生态环境、水力学、泥沙动力学、水土保持、水利工程安

全等模型。

智能识别模型将人工智能与水利特定业务场景相结合,实现对水利对象特征的自动识别,进一步提升水利感知能力,包括遥感、视频、语音等识别。

可视化模型包括自然背景、流场动态、水利工程、水利机电设备等,通过对各类模型进行可视化构建,面向具体的业务应用真实展现物理流域中各种水利业务场景。

模拟仿真引擎是以数据底板为基础,具有数据底板加载、场景管理、模拟仿真、空间分析、三维渲染等服务能力,结合水利专业模型计算过程及结果,进行仿真模拟,包括物理工程的同步直观表达、工程建设运行全过程高保真模拟、支撑数字孪生体与物理体的交互分析、支持工程安全前瞻预演、工程安全应急预案动态模拟等典型功能。以流域防洪为例,可实现对业务应用提供三维展示、三维计算、洪水淹没分析、预报结果模拟仿真等服务。当前,以GIS平台、游戏引擎为代表的两大模拟仿真技术路线各有所长,现有各类产品的功能模块、程序架构、扩展接口、模型格式、底层实现等的理解和定义各不相同,造成通用化程度低,相互移植困难,水利部正在开展相关研究以确定统一的技术要求。

3.3 知识平台

知识平台利用知识图谱和机器学习等技术实现对水利对象关联关系和水利规律等知识的抽取、管理和组合应用,为数字孪生流域提供智能内核,支撑正向智能推理和反向溯因分析,主要包括水利知识和水利知识引擎。其中,水利知识提供描述原理、规律、规则、经验、技能、方法等的信息,水利知识引擎是组织知识、进行推理的技术工具,水利知识经知识引擎组织、推理后形成支撑研判和决策的知识图谱或知识库。知识平台应关联到可视化模型和模拟仿真引擎,实现各类知识和推理结果的可视化。水利知识为决策分析提供支撑信息,包括水利对象关联关系、业务规则、历史场景、专家经验和预报调度方案等。水利知识引擎主要实现水利知识表示、抽取、融合、推理和存储等功能。

3.4 水利感知网

《技术大纲》提出了水利感知网应围绕数字孪生流域和“2+N”水利业务应用需求,利用传感、定位、视频、遥感等监测技术,扩大对物理流域的监测范围,补充完善监测要素类型和数据内容。主

要包括传统和新型水利监测网，宜采用有线、无线等网络为主，北斗短报文、5G、窄带物联网（NB-IoT）、紫蜂协议（ZigBee）、远距离无线电（LoRa）等为辅的通信方式，与水利信息网建立安全连接。在时间、数据敏感或带宽资源占用巨大的监测告警，智能图像，AR等物联网应用场景中构建边缘计算网络，与水利云等计算资源互联互通，有机结合。

传统水利监测站网应以数字孪生流域建设为目标，牵引物理流域的监测系统建设和运行，通过优化站点布局、升级改造传统监测系统，扩大监测范围、增设监测要素、增加数据传输频次，推进自动在线监测，实现信息采集提档升级，促进物理流域监测系统的科学建设和高频乃至在线运行，为数字孪生流域的高保真建设运行提供基础算据。另外，需进一步完善现有监测站网雨情、水情、工情监测站点，合理新建站点，考虑模型和参数率定等因素，还可设立试验站点，明确各类数据采集方式、范围、频次。

针对新型水利监测网，提出了要加强卫星遥感、航空遥感、高清视频、无人机、无人船、地面和水下机器人等新型监测手段应用，提升水利管理活动的动态感知能力，满足水利业务对数据和信息在空间尺度、时间频次等方面的需求。除日常业务外，还应具备快速掌握溃坝、决堤、滑坡、堰塞湖及超标洪水等各类涉水险情现场情况的能力。

3.5 水利信息网

水利信息网主要包括水利业务网和工控网。水利业务网包括广域网、城域网、部门网，其中广域网包括骨干网、流域省区网、地区网等。水利工控网应与水利业务网物理隔离，宜分为实时控制区和过程监控区。《技术大纲》提出了要开展水利信息网通信能力提升建设，优化调整骨干网和流域省区网网络结构，进行IPv6适配改造。扩大互联网连接带宽，支撑与社会公众、企业的信息交互与服务。整合共享互联网接入，缩减互联网接入端口数量。充分考虑面向下一代网络和扩容需求，积极利用网络新技术优化网络结构、增强资源动态调配能力。在实现互联互通的基础上，按照业务应用需求对网络流量进行自适应引导和质量保证，提高业务灵活调度能力。

3.6 水利云

对于水利云的建设，《技术大纲》提出了水利云可采用自建云、共享行业云和政务云等方式，主要

包括一级、二级水利云及水利工程管理单位计算存储资源。其中一级水利云应包括基础计算与存储、高性能计算、人工智能计算、灾备中心、视频会议和会商调度等内容。明确提出了二级水利云应整合利用已有基础设施资源，适当扩充计算存储能力，充分依托地方政务云、行业云，实现同城或异地灾备，进一步扩展优化机房环境、提档升级计算存储设备，建设完善视频会议系统和会商调度中心。针对水利过程管理单位计算存储，《技术大纲》提出应根据数字孪生水利工程的需要，充分整合利用已有基础设施资源，提档升级计算存储能力，进一步扩展优化机房环境，建设完善会商调度中心。

4 数据安全

《技术大纲》指出了数字孪生流域建设过程中，随着海量数据的不断汇聚，数据价值不断提升，新技术不断涌现和应用，数据面临新的安全风险。要高度关注数字孪生流域的数据安全，确保数据处于有效保护和合法利用的状态，具备保障持续安全状态的能力。要围绕数据活动全流程构建一套从数据采集、存储、使用、加工、传输、提供、销毁的全生命周期数据安全防护体系，具备敏感数据识别、数据脱敏、权限管控、异常检测、审计监测预警等数据安全能力，确保数字孪生流域建设过程中的数据安全。

依据《测绘地理信息管理工作国家秘密范围的规定》（自然资发〔2020〕95号），数字孪生流域建设形成的部分高精度地理空间数据成果涉及国家秘密，应严格按照现行相关规定在涉密环境使用。确需在非涉密环境进行应用的部分数据成果，应按照《自然资源部办公厅关于推进地理信息保密技术研发和服务工作的通知》（自然资办发〔2021〕22号）要求，采取国家认定的地理信息保密处理技术进行处理并履行相应审查程序，在使用过程中还应采取密码保护和网络安全防护等多种技术手段，确保地理空间数据成果安全。上述地理空间数据需公开使用的，还应依据《地图管理条例》第十五条规定要求，报送有审核权的测绘地理信息行政主管部门审核。

5 集成共享

针对数字孪生流域建设过程中的集成共享，《技术大纲》提出了数字孪生流域建设过程中应根据实际应用场景和基础软硬件环境可选择分布式或

集中式等开发模式实现各功能模块的集成;应遵循《数字孪生流域共建共享管理办法(试行)》,按照分工进行任务建设、成果共享、集成组装;应构建统一的基于云架构、兼顾多源数据特征、分级运行的数字孪生流域原型系统。其中信息化基础设施宜参照基础设施即服务(IaaS)模式建设;数字孪生平台宜参照平台即服务(PaaS)模式建设;“四预”功能实现和“2+N”智能业务应用宜参照软件即服务(SaaS)模式建设,最终通过数据服务、消息队列、数据库同步、文件交换等方式,实现流域、区域、工程之间集成共享。

6 结语

数字孪生流域建设技术和实践处于快速发展阶段,《技术大纲》为试行版,在执行过程中将根据业务实际需求和技术发展趋势进行更新完善。为了确保形成标准化、规范化、系统化有机整体,实现互联互通、数据共享、融合发展,避免各自为政、低水平重复建设,有力有序有效开展建设工作,应充分依托现有水利信息化资源,杜绝低水平重复建设。当前,水利部正在组织开展数字孪生流域建设先行先试工作,将先行先试建设的良好经验在全国广泛推广,为各省市地区、各重点水利工程的数字

孪生建设提供借鉴,为持续完善《技术大纲》提供实践指导,为下一步在全行业开展数字孪生流域建设提供技术参考。

参考文献:

- [1] 十三届全国人大四次会议,全国政协十三届四次会议. 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[N]. 人民日报, 2021-03-13(1).
- [2] 中华人民共和国水利部. 水利部部署数字孪生流域建设工作[EB/OL]. [2022-07-10]. http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202112/t20211223_1556623.html.
- [3] 中华人民共和国水利部. 数字孪生流域建设技术大纲(试行)[R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2022: 1-23.
- [4] 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.
- [5] 曾焱, 程益联, 江志琴, 等. “十四五”智慧水利建设规划关键问题思考[J]. 水利信息化, 2022(1): 1-5.
- [6] 蔡阳, 谢文君. 全国水利一张图建设与应用[J]. 水利信息化, 2020(1): 1-5.
- [7] 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).
- [8] 蔡阳, 谢文君, 程益联, 等. 全国水利一张图关键技术研究综述[J]. 水利学报, 2020, 51(6): 685-694.

Interpretation of Technical Guideline for Development of Digital Twin of River Basins (Trial)

XIE Wenjun, LI Jiahuan, LI Xinyu, HE Ting, ZHAO Xuanzhe

(Information Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: In March 2022, the Ministry of Water Resources issued the *Technical Guideline for Development of Digital Twin of River Basins (Trial)*, which clarifies detailed development content and technical requirements of digital twin river basins. This paper introduces the construction background, definition, construction scope and goals, construction principles and other construction connotations of the digital twin river basins, clarifies the overall framework of smart water conservancy and the digital twin river basins construction framework, further clarifies the interrelationship, and explains in detail the data baseboard, model platform, and knowledge platform. The specific construction tasks of the two main components of the digital twin platform and the information infrastructure composed of the water conservancy perception network, the water conservancy information network, and the water conservancy cloud are analyzed in detail, and the specific functional requirements and technical points involved are analyzed in detail. It explains the issues of what to build digital twin river basins, what standards to be reached, and the technical aspects that need to be mastered, and explain the important issues and integration and sharing requirements involved during the development of digital twin river basins, such as data security, especially the security application of geospatial data.

Key words: digital twin river basins; digital twin platform; information infrastructure; data baseboard; model platform; knowledge platform