

DOI: 10.19364/j.1674-9405.2022.04.001

# 《数字孪生水利工程建设技术导则（试行）》解析

詹全忠, 陈真玄, 张 潮, 邹 希

(水利部信息中心, 北京 100053)

**摘要:** 2022年3月30日, 水利部印发《数字孪生水利工程建设技术导则(试行)》, 以指导数字孪生水利工程建设。从数字孪生水利工程建设的重要性、内涵、框架, 以及数据底板、模型库、知识库、孪生引擎、监测感知、通信网络、工程自动化控制、工程安全智能分析预警、网络安全体系、运维体系等数字孪生水利工程重点内容进行解读, 并对建设指标适用情况和共建共享要求进行说明。

**关键词:** 数字孪生; 水利工程; 建设技术; 导则

**中图分类号:** TP391.98; TV512

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-9405(2022)04-0001-05

水利部高度重视智慧水利建设, 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, 并将智慧水利作为新阶段水利高质量发展的显著标志<sup>[1]</sup>。2021年, 水利部先后出台了《关于大力推进智慧水利建设的指导意见》《智慧水利建设顶层设计》《“十四五”智慧水利建设规划》《“十四五”期间推进智慧水利建设实施方案》等系列文件。2021年12月23日, 水利部召开推进数字孪生流域建设工作会, 要求大力推进数字孪生流域建设, 水利行业掀起了建设数字孪生流域、数字孪生水利工程的高潮。

数字孪生流域、数字孪生水利工程等技术性强, 创新性高, 水利行业各单位一方面对一些概念的认识和理解存在差异, 另一方面对如何切实建设数字孪生流域、数字孪生水利工程存在困难, 迫切需要指导和规范。为此, 水利部编制并印发了《数字孪生流域建设技术大纲(试行)》和《数字孪生水利工程建设技术导则(试行)》(以下简称《导则》)等系列技术规范文件, 其中《导则》主要是细化数字孪生水利工程建设内容、方法, 重点回答数字孪生水利工程建什么、怎么建。

## 1 数字孪生水利工程建设的重要性

水的自然属性决定了流域内山水林田湖草沙等各生态要素和上下游、左右岸、干支流等各类单元紧密联系, 相互影响, 相互依存, 构成了流域生命共同体<sup>[2]</sup>。流域性是江河湖泊最根本、最鲜明的特

性, 这种特性决定了治水管水的思维和行为必须以流域为基础单元, 坚持流域系统观念, 坚持全流域“一盘棋”。因此, 智慧水利建设以数字孪生流域建设为核心与关键, 以数字孪生流域建设带动智慧水利建设, 通过数字化、网络化、智能化的思维, 战略, 资源, 方法, 提升水利决策与管理的科学化、精准化、高效化能力和水平<sup>[3]</sup>。

数字孪生水利工程是数字孪生流域建设的重要组成部分, 也是数字孪生流域建设的切入点和突破点。首先水利工程是流域生命共同体重要节点, 在防洪安全、水资源调配、生态环境保护等方面具有不可替代的重要作用, 开展数字孪生流域建设必须开展数字孪生水利工程建设; 其次, 水利工程相对来说范围小、业务清晰, 易于开展数字孪生。开展数字孪生水利工程建设可以为数字孪生流域建设做好示范。

## 2 数字孪生水利工程的内涵

### 2.1 数字孪生水利工程定义

《导则》给出了数字孪生水利工程定义: 以物理水利工程为单元、时空数据为底座、数学模型为核心、水利知识为驱动, 对物理水利工程全要素和建设运行全过程进行数字映射、智能模拟、前瞻预演, 与物理水利工程同步仿真运行、虚实交互、迭代优化, 实现对物理水利工程的实时监控、发现问题、优化调度的新型基础设施<sup>[4]</sup>。从这个定义可以看出, 数字孪生水利工程是新型基础设施, 是应用

收稿日期: 2022-06-17

作者简介: 詹全忠(1974-), 男, 湖北大冶人, 正高级工程师, 主要研究方向为网络安全。E-mail: zqz@mwr.gov.cn

新一代信息技术对水利工程进行智慧化改造后所形成的融合基础设施。

## 2.2 数字孪生水利工程建设范围

《导则》主要适用于大型和重要中型水利枢纽工程，以及大型和重要中型引水工程、河道工程中涵闸，泵站等重要节点。也就是说，在目前阶段主要鼓励大型和重要中型水利工程开展数字孪生水利工程建设，当然具备条件的中小型工程也可参照开展建设；《导则》主要规范点状和线状工程的重要节点数字孪生水利工程建设，后续将根据数字孪生水利工程推进情况，针对线状水利工程出台细则。

数字孪生水利工程建设物理范围包括工程管理和保护范围，这个是每个数字孪生水利工程建设必须完成项，同时可根据实际情况，特别是与所在流域管理机构或省级水行政主管部门协商，统筹考虑将工程上下游、干支流一定范围也纳入。

数字孪生水利工程包括数字孪生平台和信息

化基础设施，这是物理水利工程的孪生体，但是仅有这个孪生体不能发挥作用，还需要相应的应用系统，应用系统调用孪生体提供的算据、算法、算力等资源，支撑水利工程安全分析预警、防洪兴利智能调度等业务，另外还需要网络安全和保障体系提供保障，因此《导则》在规定数字孪生平台和信息化基础设施要求的同时，对典型应用、网络安全和保障体系等也提出了要求。水利工程单位在立项建设时，除了建设数字孪生水利工程，还需建设典型应用、网络安全和保障体系。

## 3 数字孪生水利工程框架

数字孪生水利工程系统组成包括实体工程、数字孪生水利工程（数字孪生平台、信息化基础设施）、典型应用，以及网络安全和保障体系，系统结构图如图 1 所示。

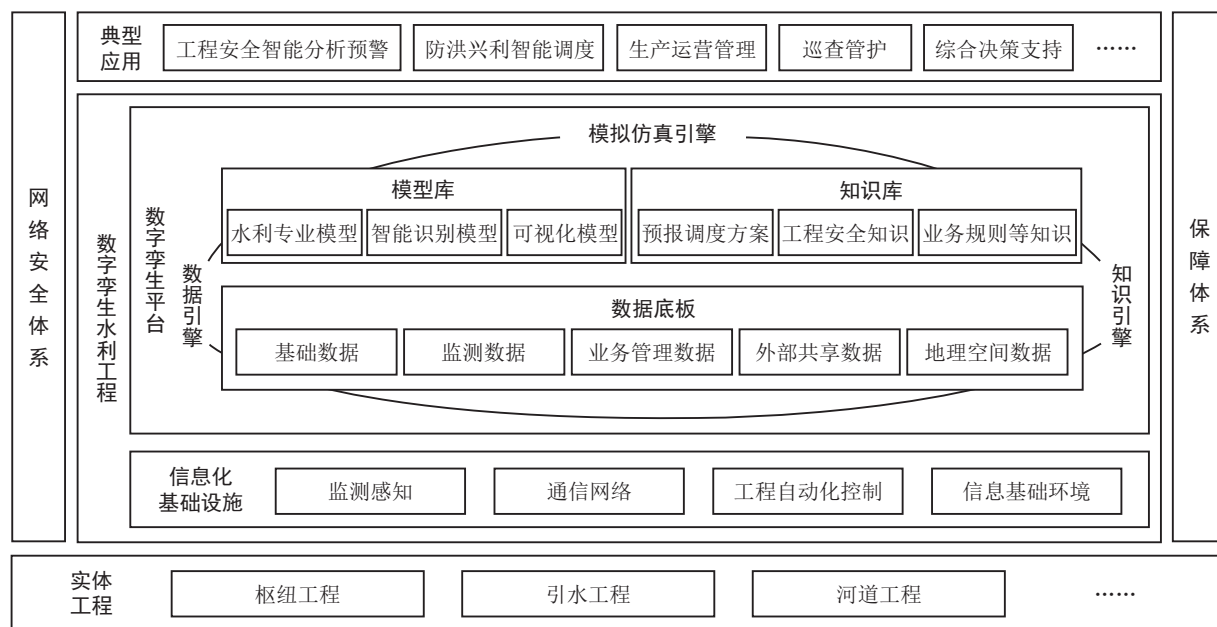


图 1 数字孪生水利工程系统结构图

整个架构与智慧水利建设顶层设计一脉相承，但是也根据水利工程特点对数字孪生平台进行了细化。顶层设计从概念上将数据、模型、知识与对应的管理和服 务一起描述，分为数据底板、模型平台、知识平台，《导则》从建设实施的角度进行分类，分为资源类（数据、模型、知识）、功能类（数据、知识、模拟仿真引擎）。

数字孪生水利工程建设的核心是应用，《导则》提出了包括工程安全智能分析预警、防洪兴利智能

调度、生产运营管理、巡查管护、综合决策支持等 5 类典型应用，前 2 类是核心和关键，是必须要建设的，后面 3 类是支撑工程管 理单位数字化转型，提升能力的，工程单位可根据实际选择建设。

## 4 数字孪生水利工程重点内容

### 4.1 数据底板

数据底板包括地理空间、基础、监测、业务管理和外部共享数据。数字孪生水利工程在共享水利

部本级 L1 级、相关流域管理机构及省级水行政主管部门 L2 级数据底板基础上，建设工程 L2 和 L3 级数据底板，工程水工建（构）筑物及重点区域应建设 L3 级，其他工程管理和保护范围可建设 L2 级。

为了便于数字孪生流域、数字孪生水利工程之间互联互通，《导则》强调地理空间数据采用全国统一时空基准，即：空间参考采用 2000 国家大地坐标系（CGCS2000），高程基准采用 1985 国家高程基准，时间系统采用公历纪元和北京时间。《导则》同时明确了数字高程模型（DEM）、正射影像图（DOM）、倾斜摄影模型、水下地形、建筑信息模型（BIM）等各类地理空间数据的空间精度，更新频率，技术手段等要求。《导则》强调外部共享数据的获取和利用，特别是工程运行调度影响的人口、土地利用等社会经济数据。

#### 4.2 模型库

模型包括水利专业、智能识别、可视化 3 类模型，其中水利专业模型分为以下 3 种：1）机理分析模型。是基于水循环自然规律等机理规律，用数学的语言和方法描述物理水利工程相关要素变化、活动规律和相互关系的数学模型。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水利工程相关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。

#### 4.3 知识库

知识库包括预报调度方案库、工程安全知识库、业务规则库等，《导则》明确了各项知识库的内容、更新要求等。对数字孪生水利工程来说，知识库的建设和应用对于工程安全极为重要，在现阶段，工程安全相关模型还不够成熟，还要更多依赖专家经验、工程风险隐患、隐患事故案例等知识进行会商研判。

#### 4.4 孪生引擎

孪生引擎包含数据、知识、模拟仿真等引擎，其中：数据引擎实现数据管理功能，对数字孪生水利工程相关数据进行汇聚、治理，并为知识、模拟仿真引擎及业务应用提供数据服务；知识引擎实现知识管理功能，对相关知识进行汇聚、构建，并提供知识推理等知识服务；模拟仿真引擎实现模型管理和物理工程模拟仿真功能，对各类模型进行版本管理、参数配置、训练优化等，并提供场景管理、仿真建模、仿真计算等模拟仿真功能。水利工程可

根据各自特点，选择将数据、知识、模拟仿真等引擎建成 3 个相对独立的模块，也可以是 1 个模块包括 3 个方面功能。

#### 4.5 监测感知

监测感知体系主要是以数字孪生水利工程高保真模拟运行为目标，在现有标准基础上，科学规划监测感知系统，扩展监测项目，加大监测密度，提高监测频次，为数据底板提供全要素实时感知数据。

对于监测手段，除了传统的监测站网监测，还鼓励采用卫星遥感、高清视频、无人机、无人船、地面和 underwater 机器人等新型监测手段。

对于监测设备，推荐使用一体化远程终端单位，支持多类传感器，融合多种功能，并能实现远程统一管理。要求支持 IPv6 协议，功耗要低。

对于通信方式，建议采用有线和无线相结合的方式，优先使用有线通信，特别是与监测中心长距离通信优先使用有线方式，在现地短距离通信可使用无线方式。具备条件的应建设北斗短报文、卫星通信等应急通信措施。

对于汇集平台，原则上应建立统一的汇集平台，不能每个监测项目建 1 个平台，但是根据实际，特别是网络隔离要求，部分监测项目可能需要在相应的网络内收集，这时可在该网络内建设子平台，但是最终应该汇集到一个总的汇集平台上。

水文监测包括雨量、水位、流量、泥沙监测等，优先共享流域管理机构、地方水行政主管部门相关水文站监测数据，根据工程管理需要增设监测站点、加密监测频次。

工程安全监测应根据工程实际，特别是工程安全评价等情况，进行风险分析，有针对性地确定监测项目、监测点位布置、精度与监测频次等，更新完善监测设施，提升在线监测感知能力，每个工程情况不一样，监测项目也不一样，主要从变形、渗流、应力应变及温度、环境量、运行状态、险情、工程专项监测及巡视检查等方面选择监测项目。

#### 4.6 通信网络

从安全角度出发，数字孪生水利工程网络应分为业务网、工控网等相互隔离的网络。工控网可分为实时控制区和过程监控区（非实时控制区），业务网可分为信息管理区和互联网服务区，根据工程实际，在不影响安全的情况下，可将实时控制区和过程监控区合并。

实时控制区用于部署控制工程设备运行的系

统、模块, PLC 和 SCADA 等应部署在该区域; 过程监控区用于部署工控系统监测与管理系统、模块, 运行监测、故障诊断、生产数据分析等系统应部署在该区域; 信息管理区用于部署数字孪生平台、生产管理系统等。互联网服务区用于部署对互联网提供服务的系统。

业务网应接入上级单位水利业务网。工控网如需与上级单位工控网连接, 应将实时控制区与过程监控区分别连接, 不能打破实时控制区与过程监控区的隔离。

#### 4.7 工程自动化控制

开展数字孪生水利工程建设, 应对工程的控制系统进行自动化升级改造, 实现对闸门、泵站、船闸、发电机组等工程设施进行自动化控制, 提高自动化水平。工程自动化控制系统为核心系统, 应具有冗余备份机制, 提高可靠性; 宜实现远程控制, 同时应具备现地控制功能; 应具备运行监控功能, 对被控制设备运转状态进行实时在线监测。

#### 4.8 工程安全智能分析预警

数字孪生水利工程核心目标是工程安全, 工程自身都不安全了, 防洪兴利作用就不可能发挥好。根据调研了解, 工程安全这方面业务, 成熟度还不是很高, 主要是依赖工程安全监测数据, 由于工程结构、环境等情况不一样, 除非是一些极端异常情况, 可从监测数据能判断工程安全出现的问题, 一般情况下, 单纯看工程安全实时监测数据, 很难判断工程是否存在或者存在什么样的安全问题。如同人的健康体检, 从单纯的体检指标来看, 很多指标有正常范围, 体检指标偏离这个范围, 只能说健康可能有问题, 但是这个正常范围是根据经验分析出来的平均值, 个体不一样, 有的人偏离这个范围也是健康的, 即使不健康, 也很难说清楚这个人是否一定会得什么病, 更说不清楚什么时候得病。

为进一步强化工程安全, 《导则》从“四预”的角度, 对工程安全业务进行梳理, 提出“安全性态预测、安全风险预警、安全状态预演、安全处置预案”的业务流程和功能要求:

1) 安全性态预测。工程安全首先还是需要需要进行安全监测, 但是不能简单使用各监测点实时监测数据, 需要建立工程安全监测分析模型, 将监测点上数据进行长系列趋势分析, 同时将多点、多种监测类型数据进行综合分析, 预测工程安全性态及其演化趋势, 这是工程安全智能分析预警的前提。

2) 安全风险预警。依据工程设计指标和专家经验等, 建立工程个性化安全预警指标体系, 根据安全性态预测提供的工程安全监测和预测数据, 对工程险情、安全隐患进行分级预警, 这是工程安全智能分析预警的基础。

3) 安全状态预演。一方面, 针对工程险情、安全隐患预警, 综合安全性态预测数据和工程设计相关信息、工程安全评价信息、工程安全薄弱环节、工程安全知识库等, 结合专家经验, 对工程当前安全风险状况及发展趋势进行会商研判(专家会诊); 另一方面, 也可根据工程调度方案, 对工程安全状态发展进行评估和推演, 这是工程安全智能分析预警的核心。

4) 安全处置预案。采用本地模型等将工程安全应急预案数字化, 根据工程安全风险研判结果, 依据应急预案, 制定工程应急调度、人员防灾避险等应对措施, 同时, 在预案执行过程中, 实时同步反馈预案实际执行情况, 动态评估工程安全状况, 滚动优化工程安全应对措施, 这是工程安全智能分析预警的关键。

#### 4.9 网络安全体系

物理水利工程非常重要, 重点工程一般有武警守卫, 数字孪生水利工程建设孪生工程与物理水利工程同步仿真运行、虚实交互、迭代优化, 同等重要。在数字孪生水利工程建设中, 要高度重视网络安全, 特别是水利工控系统, 在原来自动化程度不高或者对自动化控制依赖程度不高的情况下, 风险相对低一些, 但是随着数字孪生水利工程的推进, 自动化程度将越来越高, 风险将急剧增大, 需要更加重视网络安全保护。

《导则》多处提出网络安全相关要求, 除了网络安全体系这一章之外, 在总则部分提出“应遵照网络安全法、密码法等法律法规和标准规范要求, 同步开展网络安全体系设计、实施和使用, 加强密码应用, 强化数据安全, 采用安全可靠的技术、产品和服务”; 在监测感知体系总体要求部分, 提出“采取措施保障数据安全”; 在水利业务网连接部分, 提出“应采用防火墙等网络安全措施进行隔离, 宜采取加密措施进行数据传输加密”; 在工控网连接部分, 提出“应将实时控制区与过程监控区分别连接, 应采用防火墙等网络安全措施进行隔离, 应采取加密措施进行数据传输加密”; 在工程自动化控制部分, 提出“应加强工程自动化控制系统网络

安全保护”；在应用安全部分，提出“应加强业务应用自身安全防护”。

数字孪生水利工程系统网络安全等级保护等级原则上应不低于第三级，其中重要的系统可列为关键信息基础设施，要依据 SL/T 803—2020《水利网络安全保护技术规范》等标准规范，构建完善的网络安全组织管理、安全技术、安全运营和监督检查等体系，加强数据安全保护，全面保障数字孪生水利工程系统和数据安全。

#### 4.10 运维保障

数字孪生水利工程是一个复杂系统，要运行好这个复杂系统，持续发挥作用，需要有完善的运维保障体系支撑：1）需要有运维人员队伍、制度规范等基础条件；2）需要有运维经费，保障数据、模型、知识的更新，应用系统的迭代，安全体系的完善，设备设施的运转；3）需要有运维系统，实时掌握数字孪生水利工程运行状态，精准预警运行风险，自动处置运行故障。

#### 4.11 建设指标

《导则》以 2025 年为基准，以附表的方式列出了数字孪生平台、信息化基础设施、业务应用、网络安全等建设内容，建设指标和要求等，规定了数字孪生水利工程建设的基础版和提高版要求，基础版主要是兼顾一些基础较差、条件有限的工程管理单位的实际情况，为这些单位开展第一阶段建设提供指导，鼓励有条件的工程单位按照提高版甚至更高标准进行建设。

### 5 数字孪生水利工程共建共享

在共建方面，应在所在流域数字孪生流域建设的总体框架下，由水利工程管理单位与所在流域管理机构或省级水行政主管部门协商确定具体建设范围，确保不漏不重；应充分整合原有信息系统、现有数据等。在共享方面，要实现水利部、流域管理机构、省级水行政主管部门、水利工程管理单位之间数字孪生平台的互联互通，数据共享，业务协同，通过数据交换和服务调用等方式实现数据底板、模型库、知识库共享。

### 6 结语

鉴于数字孪生水利工程建设技术和实践均处于迅速发展的阶段，《导则》目前为试行版。当前，水利行业正在开展数字孪生流域、数字孪生水利工程先行先试，一方面，《导则》对先行先试工作进行指导规范；另一方面，也需要根据先行先试积累的经验对《导则》进行修订完善，形成正式版，更好地指导推进数字孪生水利工程建设。

#### 参考文献：

- [1] 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.
- [2] 中共水利部党组理论学习中心组. 为建设人与自然和谐共生的现代化贡献力量[EB/OL]. [2022-06-02]. [http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2022-06/01/c\\_1128695728.htm](http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2022-06/01/c_1128695728.htm).
- [3] 中国水利报. 社论：以时不我待的责任感使命感全力推进数字孪生流域建设[EB/OL]. [2022-05-15]. <https://mp.weixin.qq.com/s/N7YJDKTcPqNGZdu4Up1nKw>.
- [4] 中华人民共和国水利部. 数字孪生水利工程建设技术导则[A]. 北京：水利部信息中心，2022：4.

## Interpretation of Technical Guideline for Development of Digital Twin of Hydraulic Engineering (Trial)

ZHAN Quanzhong, CHEN Zhenxuan, ZHANG Chao, ZOU Xi

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

**Abstract:** On March 30th, 2022, the Ministry of Water Resources issued the *Technical Guidelines for Development of Digital Twin of Hydraulic Engineering (Trial)*, to guide the development of digital twin of hydraulic engineering. This article introduces the importance, connotation, framework of the development of digital twin, as well as the key contents such as data baseplate, model base, knowledge base, digital twin engine, monitoring perception, communication network, engineering automation control, engineering safety intelligent analysis and early warning, network security system, operation and maintenance system etc., and it also explains the applicable conditions of development indicators and requirements for co-development and sharing.

**Key words:** digital twin; hydraulic engineering; construction technology; guideline