

ICS 93.160
CCS P 55

DB14

山西省标准化指导性技术文件

DB14/Z 6—2025

水利工程建设数字孪生技术应用指南

2025-07-23 发布

2025-11-01 实施

山西省市场监督管理局 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 基本要求	2
5 系统体系架构	3
6 数字孪生平台	5
7 信息化基础设施	13
8 典型业务应用	16
9 网络安全体系	19
10 保障体系	21
参考文献	24

前　　言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由山西省水利厅提出、组织实施和监督检查。

山西省市场监督管理局对本文件的组织实施情况进行监督检查。

本文件由山西省水利标准化技术委员会（SXS/TC20）归口。

本文件起草单位：山西省水利水电勘测设计研究院有限公司、山西普祐科技有限公司、山西省水利发展中心。

本文件主要起草人：王新宇、陈金水、周瑞红、丁逢、王印、李琳、苏晋姣、郝振宇、边少秋、王锦富、田贵智、卫元明、徐宁、李鹏犇、李杜元、王建峰、任够平、邸青春。

水利工程建设数字孪生技术应用指南

1 范围

本文件规定了山西省水利工程建设期数字孪生技术应用的主要内容，包括技术路径、数据管理、系统架构、数字孪生平台、信息化基础设施、典型业务应用以及网络安全与保障体系。

本文件适用于山西省新建和改扩建的大型水利工程建设期数字孪生技术的规划、设计、集成与应用。中小型水利工程可参照执行，并根据实际情况对相关技术要求进行适当调整或简化。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 22239 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求
- GB/T 36073 数据管理能力成熟度评估模型
- GB/T 36627 信息安全技术 网络安全等级保护测试评估技术指南
- GB/T 39204 信息安全技术 关键信息基础设施安全保护要求
- GB/T 39786 信息安全技术 信息系统密码应用基本要求
- GB/T 42131 人工智能 知识图谱技术框架
- GB/T 43441.1 信息技术 数字孪生 第1部分：通用要求
- GB 50174 数据中心设计规范
- GB/T 51269 建筑信息模型分类和编码标准
- CH/T 6006 时间序列InSAR地表形变监测数据处理规范
- SL/T 21 降水量观测规范
- SL/T 34 水文站网规划技术导则
- SL/T 58 水文测量规范
- SL 183 地下水监测规范
- SL/T 213 水利对象分类与编码总则
- SL/T 364 土壤墒情监测规范
- SL/T 725 水利水电工程安全监测设计规范
- SL/T 803 水利网络安全保护技术规范
- SL/T 809 水利对象基础数据库表结构及标识符
- SL/T 812.1 水利监测数据传输规约 第1部分：总则
- SL/T 837 数字孪生水利数据底板地理空间数据规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

水利工程

通过对地表水和地下水进行控制与调配,用于防洪、灌溉、供水、发电、生态保护等目标的工程设施,主要包括水库、堤防、泵站、水闸、灌区以及引调水工程等。

3.2

数字孪生

具有保证物理状态和虚拟状态之间以适当速率和精度同步的数据连接的特定目标实体的数字化表达。

[来源: GB/T 43441. 1—2023, 3. 5]

3.3

水利工程建设数字孪生

在水利工程建设期,基于数字孪生平台,融合建筑信息模型(BIM)、监测数据、环境数据以及业务管理数据,建立虚实映射体系,实现对工程质量、进度、安全和投资等核心业务的数字化、智能化管理。

3.4

数字孪生平台

由数据底板、模型库、知识库等资源,以及用于管理、表达和驱动这些资源的引擎组成的技术平台,通过虚拟数字空间,实现水利工程实体的同步映射与全过程智能管控,为建设期质量、进度、安全和投资等业务提供支撑。

3.5

数据底板

指数字孪生平台中用于支撑模型和业务应用的各类核心数据集合,包括基础数据、监测数据、业务管理数据、外部共享数据以及地理空间数据等。

3.6

四预功能

在水利工程建设期基于数字孪生技术形成的“预报、预警、预演、预案”核心管理功能,通过风险识别、阈值判定、方案推演和应急预案生成,实现闭环管理机制。

3.7

合成孔径雷达干涉测量(InSAR)

对合成孔径雷达在不同空间位置获取同一地区单次或多次观测数据的相位差等信息进行分析处理,获取三维地形信息的技术。

[来源: CH/T 6006—2018, 3.1.3]

4 基本要求

4.1 政策合规性要求

数字孪生技术的应用应遵循国家和山西省水利工程建设相关政策,并落实水利部《关于推进水利工程建设数字孪生的指导意见》《数字孪生水利工程建设技术导则(试行)》《数字孪生流域建设技术大纲(试行)》等文件要求,推动数字孪生技术在水利工程中的创新、集成和规范应用。

平台及系统部署应符合以下规定。

- a) 核心软硬件选型应符合 GB/T 39204 和 GB/T 39786 等标准要求。
- b) 网络安全体系建设应参照 SL/T 803, 建立全过程数据安全防护和管理机制, 数据采集与传输应优先采用国产密码算法, 确保数据的安全性。

- c) 系统功能与架构应覆盖水利工程建设期全过程, 围绕“人、机、料、法、环、测”等关键要素, 统筹施工准备、过程管理和竣工验收等业务, 综合应用新一代信息技术和智能设备, 充分考虑“四预”功能, 实现全过程智能管控。
- d) 主体工程开工前, 应完成数字孪生平台的顶层设计和系统部署, 为工程建设管理提供智慧化服务, 并为运行期系统的功能衔接与扩展奠定基础。

4.2 核心目标

水利工程建设期数字孪生技术应用, 应以提升工程质量、进度、安全和投资管理的数字化、智能化与精细化水平为核心目标, 主要包括以下内容。

- a) 风险预报: 集成多源感知数据, 实时识别施工风险、分级提示并输出处置建议。
- b) 阈值预警: 设定关键指标安全阈值, 实现自动报警与联动响应。
- c) 动态预演: 利用仿真引擎对施工流程、资源配置和应急预案等多场景、多方案实施动态推演、验证与优化, 为决策提供技术支撑。
- d) 预案生成: 融合数据分析与仿真结果, 自动生成并持续优化应急预案, 提升快速响应和处置能力。

4.3 基本原则

水利工程建设期数字孪生技术应用应遵循下列原则。

- a) 先进实用: 充分利用和整合现有信息化资源, 避免重复建设和资源浪费。
- b) 安全可靠: 应用云计算、大数据、物联网与人工智能等技术构建高精度、高可追溯的风险管控机制, 并保障系统运行的稳定可靠与数据的全过程安全。
- c) 迭代升级: 采用模块化、可扩展的系统架构, 支持业务功能弹性扩展和系统升级。
- d) 实时科学: 保障物理实体和虚拟模型的高频同步, 提升决策的科学性与时效性。

4.4 自主可信要求

数字孪生技术应用所涉及的软硬件及技术体系, 宜优先采用自主可信产品, 并符合以下要求。

- a) 关键软硬件(如芯片、操作系统、数据库、中间件等)应选用经国家或省级权威机构认证的自主可信产品, 并通过兼容性和安全性测试。
- b) 密码算法的采用应符合GB/T 39786要求, 并优先采用SM2、SM3、SM4等国家密码算法。
- c) 如确因技术限制需采用非自主可信产品, 应制定替代方案、数据备份和恢复演练计划, 开展风险评估, 并按规定程序报省级水行政主管部门备案。

4.5 分类实施

水利工程建设期数字孪生技术应用宜根据工程规模、流域特性和管理复杂度, 采用分类分级策略, 以优化资源配置、提升应用效益。具体要求如下。

- a) 大型水利工程宜实现全过程、全要素的数字孪生建设, 建立全生命周期数字化协同管控体系。
- b) 中小型水利工程可根据实际管理需求, 合理精简系统功能和模块, 聚焦核心业务场景, 实现功能集约与成本效益的平衡。
- c) 建设单位应开展数字孪生建设效益评估, 科学制定和动态调整分类实施路径与部署计划, 并完善反馈和持续改进机制。

5 系统体系架构

5.1 系统架构

5.1.1 水利工程建设期数字孪生系统的逻辑架构可划分为物理单元、信息化基础设施、数字孪生平台和典型业务应用四个层次，并由网络安全体系和保障体系提供全过程支撑。系统总体架构见图1。

5.1.2 系统架构宜符合以下要求。

- a) 应覆盖工程建设全过程和主要业务场景，实现物理实体与虚拟模型间的实时同步与虚实交互。
- b) 各功能模块应具备模块化、服务化和可扩展性，支持弹性部署和插件化集成。
- c) 系统架构宜采用微服务或面向服务的架构（SOA），支持B/S、C/S和混合部署模式，实现功能的热插拔与服务化集成，满足多用户并发访问和跨区域协同需求。
- d) 大型水利工程应避免本地化单节点部署，以保障系统的可扩展性和高可用性。
- e) 应提供标准化接口（如API、OGC服务、RESTful接口），以支持第三方系统集成和数据共享。

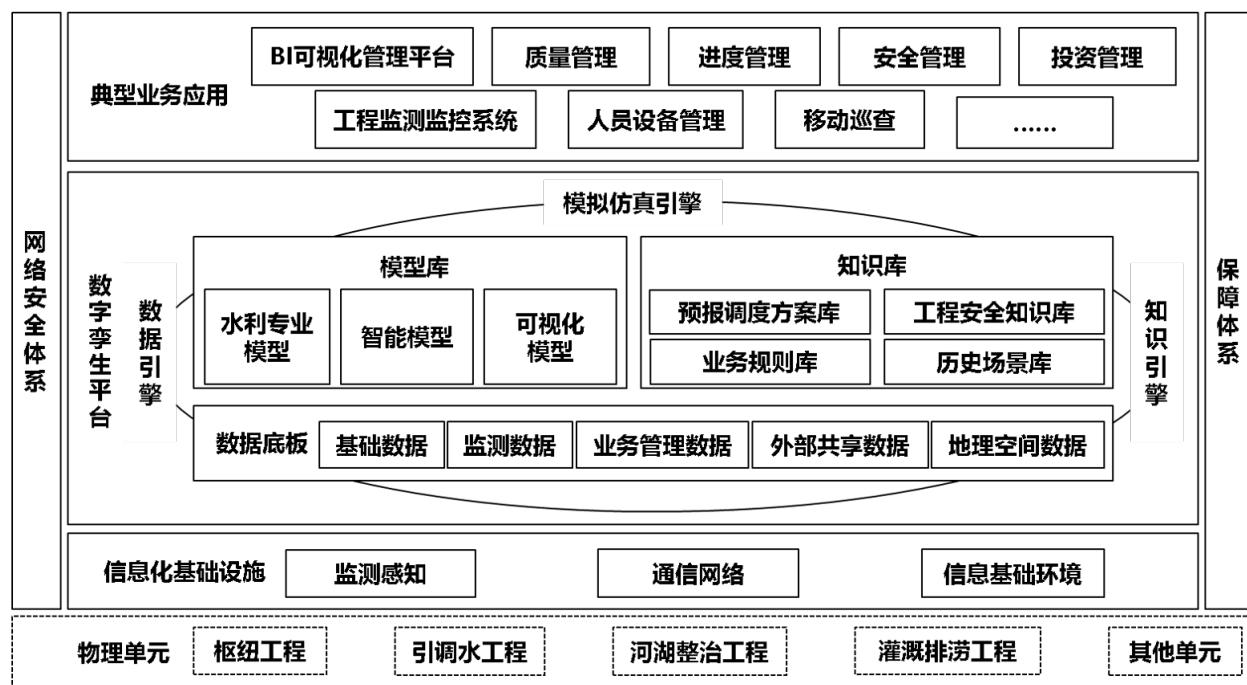


图1 水利工程建设数字孪生系统总体架构图

5.2 系统组成

5.2.1 物理单元

物理单元主要包括水利工程实体、施工场地、工程影响区域以及周边环境等。

5.2.2 信息化基础设施

信息化基础设施由监测感知、通信网络和信息基础环境等组成部分，主要承担数据采集、传输以及系统运行支撑等功能。

5.2.3 数字孪生平台

数字孪生平台主要由数据底板、模型库、知识库和孪生引擎构成，具体如下。

- a) 数据底板：包括基础数据、监测数据、业务管理数据、外部共享数据以及地理空间数据，为模型库和知识库提供数据支撑。

- b) 模型库: 集成水利专业模型、智能模型和可视化模型, 为典型业务应用提供算法和仿真支撑。
- c) 知识库: 包含预报调度方案、工程安全知识和业务规则库等, 支撑智能分析与辅助决策。
- d) 孪生引擎: 集成数据引擎、知识引擎和仿真引擎, 实现虚实映射、多源数据融合及多工况仿真推演。

5.2.4 典型业务应用

典型业务应用围绕水利工程建设期的质量、进度、安全和投资管理需求, 构建面向场景的智能化应用模块, 支持“四预”功能闭环和多业务协同。

5.2.5 网络安全体系

网络安全体系应覆盖平台各环节和数据全生命周期, 构建“防护—监测—响应—恢复”一体化安全体系, 主要包括网络安全、数据安全和应急响应机制等。

5.2.6 保障体系

保障体系为系统稳定运行和持续演进提供组织、科技与标准支撑, 主要包括组织机制、科技攻关和标准规范等。

6 数字孪生平台

6.1 数据底板

6.1.1 一般要求

数据底板应集成水利工程建设期各类关键数据资源, 以满足施工期数据采集、组织、共享和应用的全过程管理需求, 其建设宜符合以下要求。

- a) 数据分类与编码:
 - 1) 数据类型包括基础数据、监测数据、业务管理数据、跨行业共享数据及地理空间数据等;
 - 2) 编码体系应符合 SL/T 213 的规定, 并扩展至施工期临时设施, 如围堰、施工道路、监测点和临时管线等;
 - 3) 结构化数据应按照 SL/T 809 的规定进行统一编码; 半结构化数据 (如 XML、JSON 格式) 应标注数据字典; 非结构化数据 (如 BIM 模型、图像、视频等) 应建立元数据索引, 并包含时间戳、空间坐标和版本号等关键字段。
- b) 数据建模与设计:
 - 1) 数据库设计应遵循分层建模流程, 依次建立概念模型、逻辑模型和物理模型。其流程实施应符合 GB/T 36073 的相关规定;
 - 2) 概念模型应识别业务实体及关联关系, 并定义核心属性; 逻辑模型应建立字段定义、主外键约束和表间关联, 以保障数据规范化; 物理模型应设计存储架构、索引策略和数据分区机制;
 - 3) 数据模型宜通过 E-R 图或 UML 图进行可视化表达, 以提升模型的可读性、可审查性和可维护性。
- c) 数据质量控制:
 - 1) 数据质量应满足完整性、一致性、准确性、时效性和规范性要求;
 - 2) 关键监测数据缺失率应不高于 1%;
 - 3) 实时数据采集延迟应不高于 5 min;

- 4) 空间数据与工程对象的关联一致率应达到 100%;
- 5) 应建立数据质量应定期评估机制, 支持数据清洗、标准化和版本回退等功能, 并符合 GB/T 36073 的相关要求。
- d) 数据存储与架构:
 - 1) 结构化数据宜采用支持 ACID 事务的关系型数据库进行存储;
 - 2) 半结构化数据宜采用文档型或键值型数据库进行存储;
 - 3) 非结构化数据宜采用对象存储或分布式文件系统进行存储;
 - 4) 存储系统宜实施热、温、冷数据的分级管理策略, 并支持数据的自动沉降和多级缓存。
 - 5) 宜结合数据分类分级结果, 建立主数据、参考数据、元数据和数据血缘等管理机制。
- e) 时空基准:
 - 1) 空间基准应采用 2000 国家大地坐标系 (CGCS2000), 高程基准应采用 1985 国家高程基准; 当特殊区域需采用其他高程基准时, 应建立其与 1985 国家高程基准的转换关系;
 - 2) 时间基准应统一采用公历纪元和北京时间。
- f) 数据安全:
 - 1) 在数据传输、校验和敏感操作中, 应优先采用国产密码模块进行签名认证;
 - 2) 数据加密和分级保护应依据《水利数据分类分级规则》执行, 并建立访问控制和安全审计机制, 以保障建设期数据的完整性、保密性和可追溯性。

6.1.2 基础数据

基础数据宜覆盖建设期涉及的空间实体及其属性信息, 以支撑多专业模型的统一调用和场景构建, 其内容宜符合以下要求。

- a) 宜包括流域、河流、湖泊及在建水利工程等对象的几何边界、空间位置和属性信息。
- b) 数据编码宜依据 SL/T 809 进行统一, 并结合施工场景需求进行结构扩展和内容补充。
- c) 施工阶段新增的临时设施或对象应采用以“S-”为前缀的编码格式, 其编码规则应兼容 SL/T 213, 并扩展施工期特有的分类码和属性标识。

6.1.3 监测数据

监测数据宜支撑工程建设期雨情、水情、工情和安全的全过程监测, 并应具备统一采集、集中管理和动态分析的能力, 具体要求如下。

- a) 物理状态与设备运行数据: 包括降雨量、水位、流量、流速等雨情和水情指标; 变形、渗压、渗流量、应力应变、边坡位移、土层含水率等结构和地质安全指标; 以及工程设备设施的运行状态、振动等工情指标。
- b) 管理过程与运维数据: 包括人工上报的施工日志、质量验收结果和隐患记录; 施工现场及高风险作业面的视频监控; 以及设备维护记录、故障报警等管理和运维相关数据。
- c) 宜优先通过物联网感知设备自动化采集工程物理状态和施工进度等指标数据。
- d) 对于中小型工程, 在不降低风险识别和应急响应能力的前提下, 监测点布设密度可适度调整, 其减少幅度不宜超过 30%, 监测数据更新频率可放宽至每日一次。
- e) 关键断面和重要部位的安全监测指标应严格按照 SL/T 725 的规定执行。

6.1.4 业务管理数据

业务管理数据宜与BIM模型深度融合, 支撑工程建设期多场景下的智能管理应用, 并符合以下要求。

- a) 功能要求: 支撑工程建设期“预报、预警、预演、预案”四预功能的闭环管理, 并实现对进度、质量、安全、投资等核心业务的全过程数字化管理。

- b) 数据范围：包括施工计划、质量验收、隐患分级、成本核算等关键业务数据，以及隐蔽工程影像资料、施工日志、风险评估和仿真数据等。
- c) 动态关联：建立业务数据与 BIM 模型的时空映射关系，以实现进度偏差三维可视化预警、质量问题构件级追溯和安全风险动态仿真等功能。
- d) 时效性要求：关键业务数据的系统同步延迟不应超过 1h，设计变更信息同步延迟不应超过 12h。
- e) 数据交换：采用省级或行业统一的数据结构模板，并实施版本管理和数据备案机制。

6.1.5 外部共享数据

外部共享数据应具备跨系统、跨部门的数据协同能力，并宜符合以下要求。

- a) 数据来源：包括国家级、省级水利主管部门，地方政府和相关行业单位等，数据内容可涵盖流域雨情与水情、调度指令、气象遥感、人口分布、土地利用、突发事件、生态环境、渔业航运等。
- b) 数据类型：包括实时数据、历史时序数据、空间地理信息和政策文档等，以满足工程建设期的多元化数据需求。
- c) 更新机制：根据实际业务场景采用实时推送、周期性同步或按需拉取等方式。
- d) 数据质量与安全：所有接入数据应进行完整性、准确性和时效性校验，敏感或涉密数据应进行脱敏处理，并实施分级权限控制和访问审计。
- e) 接口规范：数据交互应符合国家或省级统一接口标准。空间数据服务应支持 OGC WMS、WFS 和 WMTS；实时数据接口宜支持 RESTful、MQTT 等协议；应提供开放 API，并完成接口测试和版本管理。

6.1.6 地理空间数据

地理空间数据建设宜依托“全国水利一张图”成果，结合卫星遥感、无人机倾斜摄影、激光雷达和 BIM 等技术，构建工程建设期多时态、全要素的三维数字空间。具体要求如下。

- a) 数据精度分级：按应用场景划分为 L1、L2、L3 三级，精度要求应符合 SL/T 837 的相关规定。
- b) 数字高程模型（DEM）：
 - 1) 工程管理和保护范围内，DEM 格网尺寸宜优于 5 m，地形变化显著区域应动态更新；
 - 2) 大坝、泵站等水工建筑物区域，DEM 格网尺寸宜优于 2 m，更新频率不宜低于每年一次；
 - 3) 湿陷性黄土地区的边坡和冲沟，宜在 DEM 中叠加标注土层分布与结构信息。
- c) 正射影像图（DOM）：
 - 1) 工程区全域影像分辨率宜优于 1 m，每年在汛前和汛后应各更新一次；
 - 2) 关键施工区域（如基坑、隧洞口等）影像分辨率宜优于 10 cm，并应随施工进度动态更新；
 - 3) 煤矿采空区宜叠加历史沉降监测数据，并标注采空区边界和沉降速率分布信息。
- d) 倾斜摄影模型：
 - 1) 施工管理区域模型分辨率宜优于 8 cm，宜每年更新一次；
 - 2) 高边坡、围堰等高风险区域模型分辨率宜优于 3 cm，暴雨发生后 48 h 内应完成复测；
 - 3) 湿陷性黄土地区模型分辨率宜优于 2 cm，以增强地质灾害的识别能力。
- e) 激光点云数据：
 - 1) 高边坡、基坑等高风险区域应采集激光点云，点密度不宜低于 50 点/m²，平面精度和高程精度应分别优于 0.1 m 和 0.05 m；
 - 2) 激光点云应与 BIM 模型融合，关键构件的配准误差不宜大于 5 cm。
- f) 水下地形数据：

- 1) 库区和回水影响区宜采用横断面法获取水下地形, 采样间距不宜大于 1 m, 数据采集工作应在汛后 30 日内完成;
- 2) 淤积严重区域的采样间距宜优于 0.5 m, 更新频率不宜低于每年 1 次-2 次。
- g) 建筑信息模型 (BIM) :
 - 1) 应充分利用现有 BIM 资源, 结合施工图纸和三维激光扫描等技术, 构建水工建筑物与机电设备的 BIM 模型;
 - 2) 模型分类与编码应符合 GB/T 51269 相关规定;
 - 3) 主要水工建 (构) 筑物模型应达到功能级精度 (LOD2.0) 及以上, 以满足可视化展示和功能分析需求;
 - 4) 重要机电设备、金属结构及监测设施应建立构件级模型 (LOD3.0), 并包含数量、几何、外观、位置和姿态等关键属性;
 - 5) 有条件单位可根据实际需求适度提高模型精度;
 - 6) 施工临时设施 (如导流洞、围堰等) 在拆除后, 其 BIM 模型应标注为“已废止”状态, 并独立存档, 保存期不应少于 10 年;
 - 7) 煤矿采空区施工前宜建立比例不小于 1:200 的三维地质模型, 并集成历史沉降监测数据;
 - 8) 工程主体发生改建、除险加固等结构性重大变更时, 应及时更新 BIM 模型。
- h) 矢量数据:
 - 1) 应包括水系、道路、居民地、行政界线等基础地理要素, 以及枢纽布置、征地范围、施工总布置、物料堆放区、爆破影响区等工程建设要素, 分类编码应符合 SL/T 213 的规定;
 - 2) 宜采用 SHP、GeoJSON、KML 等开放格式, 结构化数据统一存储于空间数据库, 实施集中管理和版本控制;
 - 3) 应建立元数据, 开展拓扑关系和属性校验, 平面容差不大于 0.1 m;
 - 4) 各参建单位应依据工程进展实时更新施工期数据, 历史数据归档期限不应少于 5 年。
- i) 合成孔径雷达数据 (InSAR) :
 - 1) 宜包括通过合成孔径雷达干涉测量 (InSAR) 技术获取的原始 SAR 影像、差分干涉图和时序形变产品, 应用于工程影响区高精度形变监测时, 处理方法应符合 CH/T 6006 的规定;
 - 2) 原始数据宜采用 GeoTIFF 格式, 形变产品宜采用 HDF5 格式, 面向关键区域的毫米级形变监测精度应满足设计要求;
 - 3) 应建立原始数据与产品的关联索引 (如轨道号、成像时间), 确保数据可追溯;
 - 4) 应记录传感器类型、成像模式、成像时间等元数据, 定期开展质量评估和时序分析;
 - 5) 原始数据归档期限不应少于 10 年, 形变产品宜根据卫星重访周期定期更新。汛期或特殊工况下, 宜结合地面监测设备进行加密监测与融合分析。
- j) 光谱数据:
 - 1) 应用于地物分类、水环境监测、建筑材料识别等场景时, 宜包括多光谱、高光谱影像及其反演产品, 波段范围 400 nm-2500 nm, 光谱分辨率应满足应用场景分析要求, 数据应经辐射定标和几何校正;
 - 2) 宜采用 ENVI 或 HDF5 格式存储, 按“SP_项目名称_对象类型_时间”的编码规则动态维护光谱特征库;
 - 3) 应记录传感器型号、波段、分辨率、光照条件等元数据, 定期校准;
 - 4) 野外采集时, 应在光照条件发生显著变化时进行白板校正, 异常数据应记录并作为模型材质优化的依据。

6.2 模型库

6.2.1 一般要求

模型库建设宜围绕水利工程建设期“四预”能力（预报、预警、预演、预案）需求，构建包括水利专业模型、智能模型和可视化模型的模型体系，并符合以下要求。

- a) 模型开发宜遵循组件化、模块化和标准化原则，并统一模型接口、调用协议及部署管理机制。
- b) 模型算法宜优先采用具备自主可信能力的技术框架，以实现与国产操作系统、数据库等软硬件环境的高适配性和安全性。
- c) 模型库宜具备良好的扩展性和全生命周期管理能力，支持模型的在线部署、动态更新、结果校核与迭代优化。
- d) 模型宜支持参数在线率定、仿真结果校核和运行过程的实时校正，以提升其适应性与准确性。
- e) 宜结合大数据、人工智能等自主可信技术，持续优化模型结构和参数体系，以提高模型的精度、稳定性与泛化能力。

6.2.2 水利专业模型

水利专业模型宜基于工程建设期质量、进度、安全、投资等核心业务需求构建，主要包括机理分析模型、数理统计模型和混合模型，并符合以下要求。

- a) 机理分析模型：依据水文、水力、岩土、结构等物理规律及工程力学原理，支持模拟施工进度、结构变形、工程响应与安全边界控制等过程。
- b) 数理统计模型：基于历史监测数据与机器学习算法，支持进度预测、资源配置优化与安全风险预警等场景。
- c) 混合模型：融合机理建模与统计学习方法，适用于地质-结构联动、环境-设备交互等复杂耦合场景的建模。
- d) 模型宜具备良好的可解释性和可追溯性，支持多源数据融合与多工况推演。

6.2.3 智能模型

智能模型宜依托人工智能技术，融合施工现场感知信息、设备状态信息、文档信息及管理流程，构建具备智能感知、语义理解与推理判断能力的业务支撑模型，具体要求如下。

- a) 视觉识别模型：基于图像识别算法，实现对施工现场图像和视频内容的智能识别，可用于围堰状态监测、边坡塌方检测、人员违规作业识别等。
- b) 声纹分析模型：基于声学特征提取技术，实现对施工设备振动、异响等音频信号的监测与识别，可用于设备健康诊断与维护提示。
- c) 自然语言处理模型：具备对施工日志、监理记录、质量报告等非结构化文本的分析能力，并构建语义图谱，以实现缺陷定位、问题追踪与责任溯源。
- d) 施工过程优化模型：融合历史数据、调度方案与工序信息，以开展资源配置优化、人机匹配及作业路径智能编排等辅助决策功能。
- e) 自主可信技术适配：模型算法宜优先适配具备自主可信能力的环境，以确保模型运行的可控性和安全性，并保障业务连续性与系统稳定运行。
- f) 数据安全与合规性：模型的数据采集、传输和存储过程宜采用国产密码算法加密，模型应纳入“四预”功能体系，以支撑施工风险动态推演和应急响应。
- g) 智能决策与推演模型：宜构建基于人工智能的决策推演模型，以支持施工方案多目标优化、边坡失稳概率推演及暴雨-渗流-结构耦合仿真，为工程进度、资源配置与风险防控提供量化决策依据。

6.2.4 可视化模型

可视化模型宜面向水利工程建设期业务场景构建,以支持施工关键信息的动态表达与交互分析,并符合以下要求。

- a) 展示内容集成:融合工程地貌变化、构筑物分布、水位演化、施工进度、设备状态、资源流转与风险态势等,实现时空动态一体化表达。
- b) 交互集成能力:支持与 GIS 客户端、三维客户端、浏览器等系统的无缝对接,提供标准 API 接口,实现与监测系统、调度平台、预警中心等业务系统的联动。
- c) 图形渲染性能:宜采用具有自主可信能力的图形引擎,并兼容国产操作系统和图形硬件,其响应时间不应高于 200 ms。
- d) 动态更新机制:支持实时数据推送、历史场景回放及时间轴控制,以满足关键节点对比、过程还原与风险演化分析等需求。
- e) 安全与权限控制:数据传输采用国产密码算法加密,具备多级用户权限管理机制,完整记录操作日志、调用路径及审计信息。

6.3 知识库

6.3.1 一般要求

知识库宜面向水利工程建设期业务需求,构建可复用、可扩展的知识支撑体系,为模型推演、风险预警与业务决策提供知识服务,并符合以下要求。

- a) 技术适配性:知识库管理系统应部署在具备自主可信能力的数据库环境中,其数据存储与传输过程宜采用 SM2、SM3、SM4 等国产密码算法。
- b) 知识建模能力:宜采用图数据库和向量数据库,支持知识图谱存储、语义索引与多模态检索,并统一支撑结构化和非结构化知识的建模与调用。
- c) 更新机制:知识库内容宜按季度定期更新;发生重大设计变更、突发事件或安全事故后,应在 24h 内完成相关知识内容的同步。
- d) 版本管理:应建立完备的知识版本管理机制,以记录变更时间、责任主体、数据来源与修改说明。
- e) 分类分级管理:知识内容应根据《水利数据分类分级规则》进行分级,明确核心数据、重要数据与一般数据,并健全访问控制、元数据标识与审计日志机制。
- f) 知识服务支撑:宜支持语义检索、知识增强生成 (RAG) 和因果推理等调用方式,并实现与 BIM/GIS 构件编码的融合,以提升知识的定位性与可解释性。
- g) 质量保障机制:宜采用标准化测试集和基准评测机制,定期评估知识库质量;知识抽取的准确率不宜低于 90%、召回率不宜低于 85%,图谱拓扑完整性应匹配系统业务需求。

6.3.2 预报调度方案库

预报调度方案库宜为水利工程建设期的“四预”功能提供调度策略支撑,具体要求如下。

- a) 应用场景:
 - 1) 预报支撑:为施工期水文、地质、进度等关键参数提供调度依据;
 - 2) 预警支撑:在监测数据超限时,自动匹配调度预案并推送至相关责任人;
 - 3) 预演验证:支持典型异常工况(如强降雨、设备故障、交通阻断)下的调度预案模拟验证;
 - 4) 预案生成:基于历史经验与规则推理,自动生成调度建议方案,并支持多方案比选与优化。

- 5) AI 辅助决策: 可应用机器学习算法实时优化施工机械调度、风险避让路径及物料供应计划。
- b) 建设内容:
 - 1) 方案类型: 宜覆盖区域防洪、输水工程生态流量、施工期临时调度、地质灾害应急、跨工程协同及 AI 辅助等场景;
 - 2) 数据绑定: 调度方案应与 BIM 构件、GIS 空间对象建立双向关联, 并支持地理映射与可视化表达;
 - 3) 版本控制: 应建立多版本控制机制, 以实现调度方案的可追溯与可比对;
 - 4) 接口规范: 应建设统一的 API 接口, 以实现与监测平台、预警系统等业务系统的对接;
 - 5) 可扩展性: 应支持新场景与新方案的灵活扩展, 并纳入统一版本管理。
 - 6) AI 模型管理: 宜建立机器学习模型的训练、部署、监控的闭环管理机制。

6.3.3 工程安全知识库

工程安全知识库宜为施工期事故分析、应急推演与风险防控提供知识支撑, 具体要求如下。

- a) 应用场景:
 - 1) 事故诱因分析: 可支持基于知识图谱与监测数据的事故成因追溯;
 - 2) 应急推演支撑: 可为典型事故(如边坡失稳、围堰渗漏、设备故障)提供应急处置的推演依据;
 - 3) 预案自动触发: 监测数据异常时, 可自动匹配应急处置规则并推送处置流程。
- b) 建设内容:
 - 1) 案例管理: 归集典型事故案例, 并记录事件的时间、地点、诱因、处置流程及效果评估;
 - 2) 规程管理: 应结构化存储安全监测标准、操作规程与技术指南;
 - 3) 数据联动: 应建立传感数据与预警阈值的动态映射机制, 并支持与安全系统实时关联;
 - 4) 知识建模: 宜采用关系型数据库管理案例元数据, 并采用图数据库构建事故知识网络, 以支持多维推理;
 - 5) 质量评估: 应定期开展知识质量评测, 以确保抽取准确率、网络完整性与应用成效满足要求。

6.3.4 业务规则库

业务规则库宜为建设期进度、质量、安全等监管业务提供规则支撑, 具体要求如下。

- a) 应用场景:
 - 1) 质量监控支撑: 可实现实测数据与设计标准的自动比对与验证;
 - 2) 安全预警支撑: 监测指标超限时(如位移速率 $> 20 \text{ mm/d}$), 可自动触发审核与处置流程;
 - 3) 流程合规支撑: 可支持对施工日志、监理报告等文本的智能解析与流程合规性审查。
- b) 建设内容:
 - 1) 规则建模: 应将相关标准细化为机读业务条目, 并标注条目 ID、适用场景与触发条件;
 - 2) 流程建模: 宜利用图谱等技术表达业务流程逻辑;
 - 3) 阈值建模: 应定义安全报警区间, 并支持在线配置与版本管理;
 - 4) 知识管理: 宜建立规则本体模型, 并采用图数据库管理规则的嵌套与拓扑关系;
 - 5) 系统集成: 应实现与监测平台、调度系统等的集成, 以支持规则的自动触发与闭环管理。

6.3.5 历史场景库

历史场景库宜为复杂工况推演、事故溯源与预案优化提供历史数据支撑, 具体要求如下。

- a) 应用场景:
 - 1) 工况推演支撑: 可为模型推演提供典型历史工况作为参考;
 - 2) 事故溯源支撑: 可通过历史事件回放与比对, 辅助事故成因分析;
 - 3) 预案优化支撑: 可支持历史预案与当前推演结果的比对, 以提供适用性验证与优化建议。
- b) 建设内容:
 - 1) 结构化数据管理: 应管理事件名称、发生时间、监测集 ID、预案版本号等关键信息;
 - 2) 非结构化数据管理: 宜采用向量数据库管理文本、音频、视频等非结构化数据, 以提高检索效率;
 - 3) 时空数据管理: 应采用 GeoJSON 等标准格式存储空间边界, 并通过 BIM 构件 ID 实现三维定位;
 - 4) 归档机制: 应分类归档所有历史场景, 并与特征指标库联动, 以便于模式分析与统计评估。

6.4 孪生引擎

6.4.1 一般要求

孪生引擎宜集成数据引擎、知识引擎和模拟仿真引擎, 以有效支撑水利工程建设期“四预”功能, 并符合以下要求。

- a) 应具备高并发、低时延和高吞吐量的数据加载与模型计算能力。
- b) 关键软硬件环境宜具备自主可信能力, 并应兼容国产 CPU、GPU 及操作系统。
- c) 应提供统一的 API 及 SDK 接口, 兼容 B/S、C/S 架构, 并支持多业务系统集成与功能扩展。
- d) 孪生引擎应遵循 5.1.2 中规定的架构原则, 采用模块化设计, 并支持功能组件的独立部署与动态调整。
- e) 图形渲染宜采用自主可信的图形接口, 以支持高效的三维可视化表达。
- f) 数据存储与传输宜全程采用 SM2、SM3、SM4 等国产密码算法, 并应符合 GB/T 39786 的相关要求。

6.4.2 数据引擎

数据引擎宜具备多源异构、多维度、多时空数据的汇聚、协同处理与共享能力, 并符合下列要求。

- a) 数据仓库架构: 应构建分层次、多类型的数据仓库, 并具备自动采集、清洗、标准化治理、发布及跨系统集成能力, 以统一管理结构化、半结构化与非结构化数据。
- b) 智能数据治理: 宜引入 AI 辅助数据治理工具, 以提升数据清洗、质量检测、标准化建模与内容标注的自动化水平, 并支持数据版本追溯、回退与动态增量同步。
- c) 数据库实现规范: 应明确定义主键、外键及表间关联关系; 字段命名宜采用“英文缩写_语义标识”格式(如 riv_water_level); 数值型字段宜推荐使用 DECIMAL、FLOAT 等数值类型, 并应避免使用字符类型存储。
- d) 数据格式兼容性: 平台应优先采用开放标准, 支持各类主流数据格式, 满足多源异构数据的有效集成。平台应支持的主要数据类型和对应格式要求如下。
 - 1) 地理空间数据: 栅格数据宜采用 GeoTIFF 格式; 矢量数据应支持 Shapefile (SHP) 格式, 宜支持 GeoPackage (GPKG) 格式;
 - 2) BIM 与工程数据: 应支持 IFC 格式, 宜支持 RVT、DGN 等格式及 STEP (STP) 格式;
 - 3) 实景三维数据: 倾斜摄影模型应支持 OSGB 格式与 OGC 3D Tiles 标准; 激光点云应支持 LAS 格式及其无损压缩格式 LAZ;

- 4) 通用三维数据: 网络传输与可视化应用应优先支持 glTF/glb 格式; 数据转换与处理可兼容 FBX、DAE、OBJ 等格式;
- 5) 数据服务与协议: 地理信息服务应遵循 OGC WMS、WFS、WMPS、TMS 等服务标准, 宜支持 OGC API 系列标准; 实时数据传输宜支持 MQTT、WebSocket 等协议;
- 6) 结构化数据: 应支持 JSON、XML 及 GeoJSON 格式。

6.4.3 知识引擎

知识引擎宜基于自主可信技术, 融合知识图谱、自然语言处理 (NLP) 和AI算法, 实现语义检索、规则推理及跨模态知识服务, 具体要求如下。

- a) 多模态检索与定位: 应支持自然语言、图像及声纹等多模态数据的语义检索与构件定位, 并与 BIM/GIS 编码建立关联, 以实现业务对象快速定位与信息调用。
- b) 规则推理与预警联动: 应构建质量与安全规则库, 并结合实时监测数据, 以实现超阈值预警与应急预案的自动匹配。
- c) 辅助决策与方案比选: 宜基于历史案例与实时数据, 生成施工方案优化建议, 并支持多目标 (如成本、工期、安全) 的比选。
- d) 技术性能要求: 宜具备低时延问答能力, 并支持高准确率的向量检索。
- e) 安全与权限管理: 应按照《水利数据分类分级规则》建立分级权限控制, 对敏感操作应设置多因素身份验证, 操作全过程可追溯, 并符合 SL/T 803 的相关规定。
- f) 知识一致性管理: 应按照 GB/T 42131、SL/T 213 等标准进行实体、关系与编码管理, 定期校验知识图谱的一致性与质量, 并消除冗余与冲突。

6.4.4 模拟仿真引擎

模拟仿真引擎宜满足大规模、高精准、实时性的施工仿真及风险演化推演需求, 具备灵活配置与闭环管理能力, 并符合下列要求。

- a) 施工场景仿真: 支持多工序、多对象施工场景推演, 具备底板数据加载和典型工序 (如围堰、高边坡等) 的动态模拟能力。
- b) 多模型联动计算: 具备水利专业模型的多模型联动与并行计算能力, 适配 AI 与大数据计算框架, 并支持多业务场景的仿真建模与推演。
- c) 风险推演与响应支撑: 支持大规模监测点的动态推演, 具备风险演化路径建模及分析能力, 输出进度修复、支护优化、爆破安全等建议, 并给出 AI 优化方案。
- d) 资源调度与性能适配: 宜基于 4D 进度模型实现风险预警与资源调度优化; 系统应适配自主可信软硬件环境, 并具备稳定运行与高效推演能力。
- e) 复杂地质条件模拟: 宜融合 BIM、InSAR、地质雷达及深埋监测等多源数据, 支持黄土、软土等特殊地质条件下, 降雨诱发的沉降、地下洞室开挖引发的岩爆等复杂风险的动态仿真与预警。

7 信息化基础设施

7.1 监测感知

7.1.1 基本要求

监测感知体系建设宜符合以下要求。

- a) 数据共享与覆盖能力：应充分共享数字孪生流域和水利工程已建监测数据，并按照“应设尽设、应测尽测、应在线尽在线”的原则，构建覆盖施工现场、自然河湖及取用水单元的“天空地水工”一体化监测感知体系。
- b) 监测站网建设与升级：应加强常规与应急监测站网能力，推动传统设备的智能化改造，按需扩展监测点位、监测项目及布设密度，以提高监测数据的完整性与时效性，并符合SL/T 812.1的相关规定。
- c) 前沿技术应用：宜优先应用北斗短报文、InSAR、无人机遥测、激光雷达、高清视频、光纤传感、地面与水下机器人等先进技术，以提升数据采集的空间覆盖与精度水平。
- d) 雨水情一体化监测：应科学布设测雨雷达、雨量计及水文监测设施，构建多层次、多维度的雨水情监测体系，以满足“三道防线”的建设要求。
- e) 应急通信保障：应建立北斗短报文、卫星通信、自组网等多元化应急通信体系，以保障极端灾害或突发情况下监测数据的可靠传输。
- f) 边缘计算部署：对于时延敏感或带宽受限的场景，宜部署边缘计算节点，以实施现场数据分层处理与高效传输，提升整体数据处理能力。
- g) 冗余与高可用性：对于重要水利工程的核心监测设施，应配置双电源与设备冗余，以提升系统的连续运行与故障自恢复能力。
- h) 安全与可信接入：应采用符合国家密码标准的加密认证与数据安全防护措施，以确保传感设备接入及数据传输过程的安全、可信与可溯源。

7.1.2 建设期监测

建设期监测内容与要求宜符合以下规定。

- a) 施工进度监测：应实时采集基坑开挖、基础浇筑、主体结构等主要工序的进度数据，并通过无人机巡检、传感器网络与BIM模型的协同，以实现施工状态的动态更新与全过程数据记录。
- b) 施工质量监测：应对混凝土强度、土方压实度、钢筋安装等关键质量指标持续监测，并利用传感器、激光扫描及AI融合图像识别算法，以实现质量数据的在线比对、异常识别与归档管理。
- c) 施工安全监测：应采集结构稳定性、地质变形、气象因素及危险源等相关数据，并结合北斗定位、InSAR、无人机巡查等技术，以实现隐患的早期识别与动态预警。
- d) 施工环境监测：应动态采集施工区噪音、扬尘及用水效率等环境参数，以支持生态保护与节水管理。
- e) 水文水资源监测：应规范监测雨量、水位、流量等主要水文要素，并参照SL/T 21、SL/T 34、SL/T 58、SL 183等标准执行。
- f) 墓情监测：宜在易旱区及灌区布设墒情监测站点，并依据SL/T 364实时采集土壤含水率数据，以支撑施工用水调控和水资源精细化管理。

7.2 通信网络

7.2.1 网络分区

7.2.1.1 通信网络应按照功能划分为业务网与工控网。

7.2.1.2 业务网应划分为业务管理区与互联网服务区；工控网应划分为实时控制区与过程监控区。

7.2.2 功能分区

7.2.2.1 实时控制区：应部署具备自主可信能力的 PLC、SCADA 及相关控制设备，以保障控制指令的实时交互与稳定传输。

7.2.2.2 过程监控区：应建设工控监测与管理系统，并结合边缘计算实现本地数据的缓存与预处理，以提升数据采集与反馈的及时性与可靠性。

7.2.2.3 信息管理区：应部署数字孪生平台与生产管理系统，以实现多业务、多工序的信息集成与集中调度。

7.2.2.4 互联网服务区：应以水利专有云为载体对接外部服务，并实施分级权限管理、网络隔离与数据安全审查。

7.2.3 业务网

7.2.3.1 业务网宜实现与上级水利业务网的互联互通，以保障工程建设期和相关业务系统的数据协同与服务联动。

7.2.3.2 应部署防火墙等安全防护设备，实施网络隔离，有效防范数据泄露与非法访问。

7.2.3.3 宜采用国产加密措施对数据传输进行加密，以保障数据的完整性与机密性。

7.2.3.4 宜采用租赁专线或自建光纤等方式进行连接，以确保关键业务数据的稳定高效传输。

7.2.4 工控网

7.2.4.1 实时控制区与过程监控区应物理隔离并分段互联，以防范网络干扰及攻击扩散。

7.2.4.2 应在核心区域部署防火墙与入侵检测等多层安全防护设备。

7.2.4.3 应采用国产加密措施保护数据传输，以确保数据完整性与机密性。

7.2.4.4 宜采用租赁专线或自建光纤等方式，以实现高可用及低时延通信。

7.3 信息基础环境

7.3.1 一般要求

7.3.1.1 应坚持自主可信、安全稳定、弹性扩展及绿色节能原则，以保障水利工程建设期数字孪生系统的建设与运行。

7.3.1.2 应综合考虑项目类型、地理分布与业务复杂度，合理规划软硬件资源部署，以提升系统运行效能。

7.3.1.3 应构建高可靠、易维护、可扩展和可持续演进的基础设施支撑平台。

7.3.2 机房与基础设施建设

7.3.2.1 机房设计与建设应根据调度中心统一规划，其建设标准应符合 GB 50174 的规定。

7.3.2.2 宜采用自建机房与物理服务器的部署方式，以满足对高实时性、高稳定性计算与存储能力的要求。

7.3.2.3 关键软硬件平台宜优先选用具备自主可信能力的产品，其核心部件应符合 GB/T 39786 及相关信息安全标准。

7.3.3 计算与存储资源配置

7.3.3.1 应配置高性能计算服务器、分布式存储系统及 AI 加速单元，以支持大数据处理与复杂仿真推演的算力需求。

7.3.3.2 存储系统应支持 L1-L3 级数据的分级管理，并具备多级缓存、分区存储与热数据识别能力。

7.3.3.3 应建立数据热度感知与资源动态调度机制,以提升施工、监测、仿真等多业务数据的协同处理效率。

7.3.3.4 应实现数据全流程管理,覆盖数据的接入、清洗、融合、分发、存储、共享与归档。

7.3.4 会商与调度中心建设

7.3.4.1 应建设具备实时监测、智能分析、仿真推演与调度指挥能力的综合调度中心,以支撑工程建设期全过程的业务协同与应急响应。

7.3.4.2 调度中心应与监测感知系统、建模分析系统、BIM 平台及施工管理系统实现深度集成,以支撑多部门、多系统业务的协同联动。

7.3.4.3 宜配置语音/视频调度、远程交互、智能会商等设施,以提升跨区域调度与应急响应能力。

7.3.4.4 调度中心应支撑“四预”功能,以实现进度预测、隐患识别、方案推演与应急决策的全流程业务。

8 典型业务应用

8.1 一般要求

典型业务应用宜符合以下要求。

- a) 应基于数字孪生技术,构建施工、设备、环境等多业务场景,并依托统一数据底板、模型库与仿真引擎,以实现物理实体与数字模型间的数据映射和动态业务联动。
- b) 应支持施工风险预警、安全阈值报警、多场景推演、应急预案管理等功能,以提升建设期的风险管控与辅助决策能力。
- c) 应强化 AI 技术融合,并结合知识图谱、图像识别、行为分析等智能模型,以支撑施工质量缺陷识别、安全风险推演、进度偏差修正等核心业务。
- d) 应集成质量管理、进度管理、安全管理、工程监测、人员设备管理及投资管理等应用,以推动数据互联与业务协同,从而构建统一的数字管理平台。
- e) 宜优先采用具备自主可信能力的软硬件产品;数据传输与存储均应采用国家密码算法,并符合信息安全相关标准的要求。
- f) 应支持模块化部署、分级扩展和标准化数据接口,并具备系统运行监控、在线升级及运维管理能力,以保障平台的稳定可靠运行。
- g) 应支持移动端业务接入,其关键业务功能应具备轻量化展示与操作能力,以满足现场人员进行实时采集、接收预警推送和任务闭环管理的需求。

8.2 典型应用场景

8.2.1 BI 可视化管理平台

8.2.1.1 功能要求:

- a) 应支持工程全局及关键业务状态的实时可视化展示与历史数据回溯,通过多源数据融合实现决策支持。
- b) 应集成分项工程质量监控数据、流程追溯机制及异常提示功能,构建基于 BI 分析的整改任务智能派发系统,实现问题发现-分派-验收的闭环管理。
- c) 应支持计划进度与实际进度、资源投入、人员设备等多维数据的动态比对分析,生成偏差诊断报告与优化策略。

- d) 应整合传感器数据与风险响应规则, 建立从隐患识别、阈值预警到应急指令触发与处置反馈的闭环管理体系, 深度契合“四预”(预报、预警、预演、预案)功能要求。
- e) 应实现合同履行、物资流转、资金消耗等指标的联动分析, 并宜支持AI驱动的成本预测与超支预警。

8.2.1.2 建设内容:

- a) 宜搭建基于BIM+GIS协同的BI可视化管理平台, 集成各业务核心数据、监控指标及管理看板, 并支持从工程全景到分部工程乃至构件级的多层次数据钻取与视图切换。
- b) 应部署标准化接口、聚合历史与实时数据, 构建覆盖全过程的业务追溯链, 以强化预案管理与执行监控。
- c) 应支持移动端轻量化展示, 其关键指标加载延迟不应高于3s, 并具备离线数据缓存与应急状态的智能推送能力。
- d) 平台应符合GB/T 43441.1等相关标准的规定, 实现数据底板、模型库、知识库的集成, 支撑“四预”功能闭环。

8.2.2 质量管理

8.2.2.1 功能要求:

- a) 应实现全工程链条的质量数据归档、自动比对与校验, 并支持对材料、工艺、检测等维度的趋势分析和质量风险提示。
- b) 应支持质量异常的自动检测、响应、处理建议与数据归档, 并完善验收、整改、台账留痕和追溯功能。
- c) 应实现缺陷与问题全周期的流转管理, 并支持责任归属、资源消耗和整改闭环管理。
- d) 宜应用AI图像识别技术, 以自动检测混凝土裂缝、钢筋外露等质量缺陷。

8.2.2.2 建设内容:

- a) 应建设覆盖原材料、工序、构件、分部工程等质量数据的采集和校验平台, 并支持电子签名和数据留痕。
- b) 应集成检测仪器数据, 以支持趋势分析、风险提示和整改台账的关联归档。
- c) 应利用BIM模型构建质量数据和空间工序的关联, 以实现责任划分的明晰化和问题的快速定位。
- d) 宜建设AI质检模型库, 以支持自动识别、智能归档与质量缺陷知识的智能推送。

8.2.3 进度管理

8.2.3.1 功能要求:

- a) 应支持多层次的进度计划编制、模拟调整和趋势分析, 并辅助关键节点的智能识别。
- b) 应实现计划与实际进度、资源消耗等关键信息的动态比对与偏差检测, 并提供实时预警。
- c) 应支持多方案的进度评估与资源配置优化建议, 为优化施工决策提供数据基础。
- d) 应满足进度统计、报表导出和数据归档等多项管理需求。
- e) 宜支持与AI调度模型联动, 以实现施工进度与资源需求的智能匹配。

8.2.3.2 建设内容:

- a) 应建设基于阶段节点和WBS体系的进度管理平台, 以全面覆盖计划、下达、反馈和调整的业务流程。
- b) 应集成物联网与BIM技术构建进度数据自动采集模块, 以实现多维数据融合与自动对比分析。
- c) 应支持与资源调度(人员、设备、物资等)系统的数据互联, 以提升施工组织的科学性和应急响应能力。

- d) 宜建设进度推演模型, 以支持暴雨、地质突变等异常工况下的进度重排与资源再分配。

8.2.4 安全管理

8.2.4.1 功能要求:

- a) 应实现危险源的分级属性管理与动态状态监控, 并支持风险分级预警与任务分派。
- b) 应完整覆盖隐患排查、整改、复核、归档的全过程, 以实现隐患治理的全生命周期管理与闭环流转。
- c) 应支持应急资源状态管理与演练过程数据的汇总分析。
- d) 宜配置现场智能穿戴设备、定位设备和传感器, 以提升现场安全数据的获取与预警能力。
- e) 宜应用 AI 行为识别模型, 以自动识别违规操作和异常行为。

8.2.4.2 建设内容:

- a) 应建设危险源数据库与多源信息采集平台, 以支撑危险源的可视化编码和分级溯源。
- b) 应建设隐患发现、整改、复查、销号的闭环流转系统, 并支持多方协同管理和移动端操作。
- c) 宜部署 AI 识别终端与人员定位设备, 以强化行为识别和数据化安全监控, 从而支撑风险的早期处置。
- d) 宜建设安全风险推演模型, 以支持暴雨、渗流、位移等多因素耦合下的风险演化分析。

8.2.5 投资管理

8.2.5.1 功能要求:

- a) 应实现投资概算、资源投入、进度状态的动态关联, 并支持多维度费用的核算和数据追踪。
- b) 应支持合同变更、概算调整的审批与归档, 并强化责任留痕和多级权限审核。
- c) 应支持资金计划全流程的节点预警、审批和核算, 并具备关键节点的风险提示和数据日志存储功能。
- d) 应提供投资场景分析工具, 以实现重点资金环节的预警和趋势辅助分析。
- e) 宜支持与 AI 成本预测模型联动, 以实现投资偏差的智能识别与修正建议。

8.2.5.2 建设内容:

- a) 应建设以 WBS 和合同台账为基础的投资管理系统, 以规范概算、合同、支付、报表等数据的全流程归集。
- b) 应集成资金计划与审批管理流, 以实现节点流转归档、多级审核与日志的可追溯性。
- c) 应配置风险评估、支出对比、场景分析等工具, 以辅助投资决策和项目风险管理。
- d) 宜建设投资偏差分析模型, 并支持与 BIM 模型、进度数据联动, 以实现投资与工程进度的动态匹配。

8.2.6 工程监测监控系统

8.2.6.1 功能要求:

- a) 应具备施工安全监测和结构风险预警能力, 并集成各类传感器数据, 以实现对边坡、围堰等关键部位的变形趋势监测与预警。
- b) 应实现工程设备运行参数的实时采集、监控与故障自动识别, 并支持异常工况分析和维护建议推送。
- c) 应支持环境参数的动态监测与污染物扩散分析, 并实现超标指标的自动预警与应急响应联动。
- d) 宜集成 InSAR、三维地质模型等专项监测技术, 以实现高边坡及关键结构的变形安全评估, 为加固与抢险措施决策提供依据。
- e) 宜支持与 AI 风险模型联动, 以实现多因素耦合下的结构安全智能评估。

8.2.6.2 建设内容:

- a) 宜建立“天空地水工”一体化监测感知网络，集成地面传感器、无人机、遥感影像与视频监控等多渠道数据采集平台，以实现全区域、分层次的动态监控。
- b) 应部署结构变形、设备参数、环境指标等信息采集与管理模块，并集成三维模型，以实现多业务数据的集中展示与分析。
- c) 应建立监测数据与专业模型、应急预案的集成分析与联动平台，以支撑智能风险判断和应急响应流程的自动运行。
- d) 宜建设AI监测模型库，以支持对边坡位移、渗流、裂缝等风险的自动识别与推演。

8.2.7 人员设备管理

8.2.7.1 功能要求:

- a) 应实现施工人员与设备的实时状态监控、考勤数据记录与异常提醒，并支持劳动力与设备资源的科学调配。
- b) 应支持危险区域的进出权限管理与实时风险预警，并能自动识别异常行为及联动应急广播等处置措施。
- c) 应实现设备运行状态、维护、故障信息的归档与趋势分析，以辅助维修计划制定和资源管理。
- d) 应支持通过移动端进行扫码登记、轨迹记录与行为分析，以提升现场管理效率与安全控制能力。

8.2.7.2 建设内容:

- a) 应建设人员设备定位、考勤、数据分析等功能于一体的智能化管理平台，以提升调度效率与安全保障能力。
- b) 应集成设备维护、运行状态数据与调度模型，以实现设备工况监控、维修建议和历史故障的归档分析，从而辅助施工组织和安全管理。
- c) 宜建设人员行为识别系统，以支持违规操作的自动告警与处置闭环管理。

8.2.8 移动巡查

8.2.8.1 功能要求:

- a) 应具备智能巡检路线自动规划功能，支持重点区域的自适应标定，并实现巡查任务的高效派发、动态轨迹追踪和全过程数据留存。
- b) 应支持现场问题的多媒体采集、分级上报及与BIM模型的定位绑定，并实现隐患的自动分级、整改任务的流转闭环与整改进度的实时跟踪。
- c) 应实现移动巡查与应急预案的实时联动，并在发现风险或异常事件时，自动推送风险源信息、处置流程和应急措施，以支撑问题发现、预警、响应、处置的全流程闭环管理。

8.2.8.2 建设内容:

- a) 应建设覆盖项目各参与方的移动巡查系统，并集成GPS定位、图像采集、语音输入等功能，以实现巡查任务的全流程数字化，从而支持现场问题的实时上报、分级派发与问题溯源管理。
- b) 应开发风险源识别、实时预警和应急联动模块，并将其对接监测数据平台、应急预案库以及BI三维可视化管理平台，以提升巡查的智能化水平与风险响应效率。

9 网络安全体系

9.1 网络安全

9.1.1 一般要求

- 9.1.1.1 应依据 SL/T 803、GB/T 22239 等标准,结合水利工程建设期实际,建立健全网络安全组织管理、安全技术、安全运行和监督检查体系。
- 9.1.1.2 应加强数据安全防护,全面保障数字孪生平台的运行安全和数据安全。
- 9.1.1.3 数字孪生系统应依据资产重要性、破坏影响和威胁等级,科学划分并落实网络安全等级保护的相关要求。
- 9.1.1.4 密码应用体系应依照 GB/T 39786 等标准同步规划和建设,并定期开展安全性评估。
- 9.1.1.5 列入水利关键信息基础设施的数字孪生工程,应网络安全等级保护的基础上强化安全防护措施,落实关键信息基础设施保护的相关要求,并实施重点防护。
- 9.1.1.6 项目单位应建立网络安全责任制,明确专人负责,定期组织安全培训与应急演练,以提升安全防护和应急响应能力。

9.1.2 网络边界隔离

- 9.1.2.1 工控网实时控制区与过程监控区之间应采用物理隔离网闸单向传输数据,防止直接互联。
- 9.1.2.2 工控网与业务网应物理隔离,宜采用专用前置区进行数据交互和访问管控。
- 9.1.2.3 数字孪生核心系统应部署于独立的逻辑或物理安全区域,并根据业务和设备类型细分为不同的安全子域,实施分级访问控制。
- 9.1.2.4 宜在物理隔离的基础上,支持移动端与工控网的有限数据交互,并采用单向加密通道和访问日志审计。

9.1.3 安全监测与威胁防御

- 9.1.3.1 宜配置安全态势感知平台,以满足网络规模扩展的需要,并支持对重大威胁的实时监测和行业威胁情报的对接。
- 9.1.3.2 应规范主机、网络和应用的安全基线配置,并定期进行评估和加固。
- 9.1.3.3 应具备对多源安全数据的关联分析能力,以及时识别网络攻击、异常流量、恶意通信等威胁,可分级生成预警和通知运维人员。
- 9.1.3.4 工控系统应配置特征检测和攻击行为识别机制,包括控制指令异常、流量异常、未授权设备、违规外联等,发现后应自动推送告警信息。
- 9.1.3.5 宜支持移动端行为日志的采集,以对移动应用端的操作行为进行记录与审计。

9.2 数据安全

9.2.1 数据分类与分级管理

- 9.2.1.1 数据应依照《水利数据分类分级规则》进行分类,分为核心数据、重要数据和一般数据。
- 9.2.1.2 核心数据(如工程设计、安全监测、进度控制等)应仅允许授权访问和操作,并全过程留痕。
- 9.2.1.3 重要数据(如质量记录、设备参数等)应加强身份鉴别和权限管理。
- 9.2.1.4 一般数据应保障在其传输和存储过程中的完整性与可用性。
- 9.2.1.5 宜结合 AI 模型训练、移动端访问等场景,细化数据访问控制策略,以防止模型训练数据泄露与移动应用端的越权访问。

9.2.2 国产密码技术与数据加密

- 9.2.2.1 核心数据和重要数据的存储与传输应采用 SM2、SM3、SM4 等国密算法进行全流程加密,并规范密钥管理。

9.2.2.2 数据跨网络传输或对外提供时,应履行审批、脱敏和加密处理程序,并符合省级或行业监管部门的相关要求。

9.2.3 安全监控与风险预警

9.2.3.1 应部署数据安全监控系统,以实时检测和预警数据泄漏、非法篡改、未授权访问等高风险行为。

9.2.3.2 每年至少开展一次数据安全风险评估,并按规定及时整改和上报评估结果。

9.2.3.3 宜每季度至少开展一次数据恢复演练,以提升系统的应急恢复能力。

9.2.3.4 核心数据应定期进行全量备份,并宜采用异地灾备和加密存储的方式;同时,应每季度至少开展一次数据恢复演练。

9.2.3.5 宜支持移动端数据访问日志的集中采集与异常行为识别,以提升移动端的数据安全监控能力。

9.2.4 数据隐私与创新应用

9.2.4.1 宜采用数据脱敏、隐私计算等创新技术,以强化敏感数据在共享、分析、展示等环节的安全保护。

9.2.4.2 应建立完善的数据共享审批机制和操作全流程溯源机制,以防控在信息公开及共享过程中的数据泄漏和隐私泄漏风险。

9.2.4.3 宜结合移动端数据展示场景,对敏感信息进行动态脱敏处理,以防止移动端的数据过度暴露。

9.3 应急响应机制

9.3.1 应急分级响应

9.3.1.1 应建立三级应急响应机制:红色预警(重大安全事件),应在15min内启用备用系统并启动应急处置程序;橙色预警(局部中断或临时不可用),应在30min内恢复关键业务;黄色预警(轻微故障),应在1h内完成处置及恢复。

9.3.1.2 宜支持移动端的应急指令推送与现场信息反馈,以提升应急响应效率。

9.3.2 应急演练

应每季度至少开展一次应急演练,覆盖设备故障、网络中断、数据篡改、工控系统攻击等典型安全场景,以检验应急预案的有效性,包括响应速度、备用系统切换能力、网络恢复能力及人员操作规范性。

9.3.3 预案完善与评估

9.3.3.1 每次演练后应形成评估报告,系统地记录应急处置流程和响应效果,并根据演练结果修订应急预案与操作规程,以实现安全管理持续改进。

9.3.3.2 演练应包含移动端系统故障、移动端数据异常等新型场景,以确保应急流程在移动环境下的有效性。

10 保障体系

10.1 组织机制

10.1.1 应建立覆盖数字孪生水利工程建设期全过程的组织管理体系,科学明确项目法人、设计单位、

施工单位、监理单位、供应商及运维单位等各方职责，确保系统建设与运行全周期的高效协作和责任落实。

10.1.2 宜设立由项目法人牵头的数字孪生项目专项工作组，联合参建各方，围绕质量、进度、安全、投资等重点事项，明确职责分工，强化跨部门协同和业务联动。

10.1.3 应明确系统运维责任主体，具备系统运行、维护、故障响应及技术支持能力，保障系统安全、稳定和高可用性。

10.1.4 应健全数据、设施、运维、代码及业务管理等制度，规范系统开发、部署、运行和维护流程。

10.1.5 应定期组织数字孪生技术、业务流程和信息安全等培训，持续提升管理、运维及操作人员的数字素养和安全意识。

10.1.6 应统筹整合现有信息系统和软硬件资源，推动资源共享与资产复用，避免重复建设，提高信息资源利用效率。

10.1.7 应建立多元化经费保障机制，通过多渠道筹措建设与运维资金，积极争取政策和社会资金支持，确保系统全生命周期经费充足。

10.2 科技攻关

10.2.1 应推进“天空地水工”一体化监测感知体系的研发，提升多元感知、异构数据融合和全域实时监测的能力，满足多场景动态管控需求。

10.2.2 应加强水文、水资源、水生态等专业模型的自主开发与本地化适配，支撑多业务场景应用，提升全过程质量控制与风险管理水平。

10.2.3 应推动人工智能、机器学习等技术在知识库、风险识别和辅助决策中的集成应用，提升系统智能分析和业务闭环能力。

10.2.4 应持续探索大数据、三维建模、虚拟现实、增强现实等新一代信息技术的集成应用，增强平台智能化和复杂业务支撑能力。

10.3 标准规范

10.3.1 应严格遵循国家、行业及地方相关标准，构建涵盖软硬件、数据、接口、平台等环节的技术标准体系。

10.3.2 市县级水利工程数字孪生项目宜参照本文件提出的软件架构设计与开发模型指引，提升全省技术协调性与数据融合能力。

10.3.3 硬件选型应满足互操作性和接口兼容性要求，支持多厂商设备集成与系统稳定运行。

10.3.4 数据标准应统一 BIM 模型、倾斜摄影、传感监测等多源数据的格式和编码，确保跨平台和跨系统的数据流转与共享。

10.3.5 软件架构设计应遵循分层、模块化、服务化原则，确保系统稳定、可扩展和易维护；应统一接口规范，强化功能复用，避免数据库直连和无序代码堆砌；高复用功能应封装为标准 API 或服务，推进数据中台和业务中台建设，提升系统集成度与运维效率。

10.3.6 应制定统一的用户界面、操作流程和权限管理标准，提升系统易用性和协同效率，优化智能服务体验。

10.3.7 软件规模与投资估算宜依据《省直部门信息化建设项目支出预算方案编制规范和预算编制标准》等规定，采用功能点分析法进行科学度量。

10.3.8 宜将功能点分析报告作为可行性研究、初步设计概算和项目结算审计的附件，分析过程和结果宜具备可追溯性和可复核性。

10.4 项目管理

10.4.1 应急分级响应

项目应依据软件工程规范，按阶段编制完整、规范的项目文档。文档体系包括但不限于：项目建议书、可行性研究报告、系统需求规格说明书、系统设计说明书、软件设计说明书及实施方案等。各阶段文档应达到相应标准深度和格式，作为项目审批、招标、验收和审计的重要依据。

10.4.2 软件开发模型

项目承建单位应根据项目规模、需求确定性、技术复杂度和风险，选择合适的软件开发模型，并在设计文档中明确。常用开发模型及适用情形如下。

- a) 瀑布模型：需求清晰稳定、边界固定、适合线性开发的项目。
- b) 增量模型：可分阶段交付、模块化开发、核心需求明确的项目。
- c) 螺旋模型：技术及需求不确定、需多轮风险控制和原型验证的复杂项目。
- d) 快速原型法：需求不明、需通过原型反复沟通确认的项目。
- e) 极限编程：需求变化快、需要持续交付与快速响应的项目，应配套自动化测试、持续集成与文档管理。

10.4.3 软件设计方法

项目应在概要设计阶段，结合系统特性明确采用结构化或面向对象设计方法，并在详细设计及后续文档中保持方法和工具选型一致。具体要求如下。

- a) 结构化设计：应以数据流图（DFD）、数据字典（DD）、实体-关系图（E-R 图）等，突出自顶向下的功能分解与清晰数据流，适用于流程驱动、模块化系统。
- b) 面向对象设计：应以统一建模语言（UML）为核心，应用用例图、类图、时序图、活动图等，重视封装、继承与多态，适用于对象关系复杂、需求变动频繁的系统，提升系统可扩展性和维护性。

参 考 文 献

- [1] 数字孪生流域共建共享管理办法（试行）（水信息〔2022〕146号）
 - [2] 数字孪生流域建设技术大纲（试行）（水信息〔2022〕147号）
 - [3] 数字孪生水利工程建设技术导则（试行）（水信息〔2022〕148号）
 - [4] 数字孪生流域数据底板地理空间数据规范（试行）（办信息〔2022〕325号）
 - [5] 数字孪生水网建设技术导则（试行）（水信息〔2022〕397号）
 - [6] 数字孪生水利“天空地水工”一体化监测感知夯基提能行动方案（2024—2026年）（水信息〔2024〕178号）
 - [7] 数字孪生调水工程建设技术导则（试行）
 - [8] 水利数据分类分级规则
 - [9] 生成式人工智能服务管理暂行办法
 - [10] 《省直部门信息化建设项目支出预算方案编制规范和算编制标准》（晋财行〔2020〕182号）
 - [11] DB34/T 4698 数字孪生灌区建设技术导则
 - [12] DB32/T 4733 数字孪生水网建设总体技术指南
 - [13] CH/T 9040 空间三维模型瓦片数据格式
 - [14] T/CWHIDA 0005 水利水电工程信息模型设计应用标准
 - [15] T/CWHIDA 0006 水利水电工程设计信息模型交付标准
 - [16] T/CWHIDA 0007 水利水电工程信息模型分类和编码标准
 - [17] T/CWHIDA 0009 水利水电工程信息模型存储标准
 - [18] DAMA国际. DAMA数据管理知识体系指南(原书第2版修订版)[M]. 北京:机械工业出版社, 2025.
-