

ICS 93.160

CCS P55

团 体 标 准

T/CHI XXX—2026

水利数字孪生体系构建与智慧协同管控 技术规范

Technical specifications for the construction of digital twin systems and intelligent
collaborative control and management in water resources

(征求意见稿)

提交反馈意见时，请将您知道的专利连同支持性文件一并附上。

2026-XX-XX 发布

2026-XX-XX 实施

中国高技术产业发展促进会 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 总体要求	3
4.1 构建原则	3
4.2 核心目标	4
4.3 合规性要求	4
5 总体架构设计与要求	5
5.1 总体架构设计	5
5.2 建设原则	5
5.3 技术要求	5
6 关键技术要求	6
6.1 物联网技术	6
6.2 大数据技术	6
6.3 人工智能技术	6
6.4 BIM 与 GIS 融合技术	6
6.5 虚拟仿真技术	7
6.6 网络与数据安全技术	7
6.7 数据资源体系要求	7
7 模型与仿真服务平台要求	8
7.1 模型集成与管理	8
7.2 仿真引擎	8
7.3 模型率定与验证	8
7.4 平台服务能力	9
8 服务与应用层要求	9
8.1 交互与可视化要求	9
8.2 智能应用与服务要求	10
9 网络安全与运维保障要求	11
9.1 网络安全	12
9.2 运维保障	12
附录 A (资料性) 实施与评价指南	14
附录 B (规范性) 水利数据分类与编码	15
附录 C (规范性) 感知设备技术参数与选型指引	16
附录 D (规范性) 模型精度验证方法与计算公式	17
附录 E (资料性) 协同管控流程	19
附录 F (资料性) 运维日志与考核记录表	20

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由xxx促进会标准化工作委员会提出。

本文件由中国高技术产业发展促进会归口。

本文件起草单位：苏州科技大学、长江水利委员会长江科学院、长沙理工大学、新疆农业大学。

本文件主要起草人：

征求意见稿

水利数字孪生体系构建与智慧协同管控技术规范

1 范围

本文件规定了智慧水利数字孪生体系的架构、数字孪生体构建、数据资源、模型与仿真、交互可视化、智能应用、协同管控逻辑、安全运维等方面的技术要求与应用规范；

本文件适用于省级及以上流域管理机构、水行政主管部门、水利工程管理单位及相关企事业单位开展智慧水利数字孪生系统的规划、设计、建设、管理和评价。其他相关领域可参照执行。

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—2019 《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》

GB/T 36333—2018 《信息技术 大数据 政务数据开放共享》

SL/T 789—2020 《水利网络安全等级保护基本要求》

SL/T 810—2021 《水利数据分类与编码规范》

SL/T 811—2021 《水利数据共享交换技术导则》

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

智慧水利 smart water conservancy

指以新一代信息技术（如物联网、大数据、人工智能、数字孪生等）深度融合水利业务，实现对水文、水资源、水工程、水生态等全要素的全面感知、智能分析、科学决策和精准管控的现代化水利发展模式。

3.2

数字孪生 digital twin

在物理世界与信息空间之间建立高保真、动态同步的虚拟映射关系，通过数据驱动与模型驱动相结合，实现对物理对象全生命周期的实时监控、模拟预测与优化控制。

3.3

数字孪生体 digital twin instance / digital twin entity

针对某一具体物理对象（如水库、河道、泵站等）构建的数字化镜像，包含其几何、属性、行为、规则及运行状态等多维信息，是数字孪生系统的基本组成单元。

3.4

虚拟仿真 virtual simulation

利用计算机建模与可视化技术，在虚拟环境中对水利系统进行动态模拟，用于方案比选、应急演练、培训教学等，但不一定具备与物理实体的实时双向交互能力。

3.5

数据中台 data middle platform

面向水利业务构建的统一数据资产平台，集成多源异构数据，提供数据采集、治理、存储、服务和共享能力，支撑上层应用快速调用高质量数据。

3.6

业务中台 business middle platform

将水利核心业务能力（如调度规则、预警模型、审批流程等）抽象为可复用的服务模块，实现业务逻辑的标准化、组件化和敏捷响应，支撑多样化应用场景快速构建。

3.7

物联网感知技术 IoT sensing technology

通过部署传感器、遥测终端、视频监控等设备，实现对水位、流量、雨量、水质、工程结构安全等水利要素的自动采集与远程传输。

3.8

大数据处理技术 big data processing technology

包括数据清洗、融合、存储、计算与分析等技术，用于处理海量、多源、高维、实时的水利数据，支撑智能决策。

3.9

人工智能算法 AI algorithms

应用于水利领域的机器学习、深度学习、强化学习等算法，用于洪水预报、需水预测、异常检测、智能调度等任务。

3.10

地理信息系统 GIS Geographic information system

用于管理、分析和可视化水利空间数据的技术平台，支持流域划分、淹没分析、路径规划等空间决策。

3.11

数字孪生建模精度 modeling accuracy of digital twin

衡量数字孪生体对物理对象几何形态、物理特性、运行规律等还原程度的指标，通常包括空间分辨率、时间粒度、参数误差范围等维度。

3.12

实时交互延迟 real-time interaction latency

指从物理系统状态变化到数字孪生体完成更新并反馈控制指令所需的时间，是衡量数字孪生系统实时性与闭环控制能力的关键性能指标，通常要求在秒级甚至毫秒级。

3.13

应用术语 application terminology

3.14

防洪调度数字孪生 digital twin for flood control and dispatch

构建流域-水库-河道-城市防洪体系的数字镜像，支持洪水演进模拟、调度方案预演、风险预警与应急响应优化。

3.15

水资源配置数字孪生 digital twin for water resources allocation

基于供需平衡模型与多目标优化算法，在数字空间中模拟不同来水情景下的水量分配方案，实现跨区域、多用户、多水源的协同调度。

3.16

工程运维数字孪生 digital twin for hydraulic infrastructure operation & maintenance

针对大坝、闸门、泵站、渠道等水利工程，集成 BIM、结构健康监测、设备状态诊断等数据，实现全生命周期的智能巡检、故障预警与维修决策。

3.17

水生态监测数字孪生 digital twin for aquatic ecosystem monitoring

融合水质、水生生物、水文情势、岸线变化等多维数据，构建河流湖泊生态系统的动态数字模型，支撑生态流量保障、污染溯源与修复效果评估。

4 总体要求

4.1 构建原则

水利数字孪生体系的构建应遵循以下基本原则：

- a) 需求导向：以水利核心业务管控需求为出发点，聚焦防洪调度、水资源配置、工程运维、水生态监管等关键场景，确保体系建设服务于实际业务目标；
- b) 协同优先：强化跨层级、跨部门、跨区域的协同机制，打破数据孤岛与业务壁垒，推动信息共享与联合决策；
- c) 技术适配：在保障技术先进性的同时注重实用性与可落地性，合理选用感知、建模、仿真、智能分析等技术手段，避免过度设计或能力冗余；
- d) 安全可控：覆盖数据、网络、平台、应用等全维度安全，落实访问控制、加密传输、权限管理、

日志审计等措施，确保系统整体安全可靠；

e) 迭代优化：建立动态演进机制，根据业务发展、技术进步和运行反馈，持续优化体系架构、模型精度与服务能力。

4.2 核心目标

提出实现水利工程全生命周期数字化管控、水利业务智能化决策、水资源高效化利用、水安全精准化保障等核心目标，明确与现有水利信息化系统（如国家水利数据共享平台、流域管控系统）的兼容适配要求，确保数据互通、业务协同。

4.3 合规性要求

4.3.1 法律法规遵循

体系构建应符合以下现行有效法律法规的基本要求：

a) 《中华人民共和国网络安全法》——落实关键信息基础设施保护、网络运行安全和数据本地化等要求；

b) 《中华人民共和国数据安全法》——建立健全数据分类分级、风险评估、应急处置和出境管理机制；

c) 《中华人民共和国个人信息保护法》——在涉及人员信息（如巡检人员、用户用水信息等）采集与处理时，须取得合法授权，最小必要使用，并采取去标识化或匿名化措施；

d) 《中华人民共和国保守国家秘密法》及相关规定——对涉密水利工程数据和模型，严格执行保密管理要求；

e) 《中华人民共和国水法》《中华人民共和国防洪法》《中华人民共和国水土保持法》等水利专项法律——确保业务逻辑与管控规则符合法定职责与管理边界。

4.3.2 行业标准与规范引用

应优先采用并符合以下水利及信息化相关标准：

SL/T 789—2020《水利网络安全等级保护基本要求》；

SL/T 810—2021《水利数据分类与编码规范》；

SL/T 811—2021《水利数据共享交换技术导则》；

GB/T 22239—2019《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》；

GB/T 36333—2018《信息技术 大数据 政务数据开放共享》等相关国家标准。

当本规范要求高于所引用标准时，以本规范为准；当引用标准更新后，应及时评估并同步调整实施要求。

4.3.3 数据全生命周期合规管理

在数据采集、传输、存储、处理、共享、应用及销毁各环节，应做到：

a) 数据采集须具备明确业务目的和合法依据，禁止超范围、超权限采集；

b) 跨境或跨区域数据传输应履行审批或备案程序，重要数据原则上不得出境；

c) 敏感数据（如水库大坝结构参数、城市供水管网拓扑等）应实施加密存储与访问控制；

d) 数据共享须通过统一数据服务平台进行，落实“谁提供、谁负责，谁使用、谁管理”原则；

e) 建立数据使用日志审计机制，确保操作可追溯、责任可认定。

4.3.4 安全审查与监督检查

为确保水利信息系统持续符合国家网络安全与数据安全相关法律法规及行业监管要求，应建立健全覆盖系统建设、运行和变更全过程的安全审查与监督检查机制。相关责任单位须严格落实以下要求：

- a) 体系上线前应通过网络安全等级保护测评（原则上不低于三级）和数据安全风险评估；
- b) 定期接受水利主管部门或其授权机构的合规性检查、安全审计与效能评估；
- c) 发生重大安全事件或法规政策调整时，应在 30 日内完成合规影响分析并提交整改报告。

4.3.5 持续合规机制

牵头单位应建立动态合规管理机制，包括：

- a) 设立合规联络人，跟踪法律法规与标准更新；
- b) 每年至少组织一次合规培训与制度评审；
- c) 将合规要求嵌入项目立项、招标、验收及运维等关键流程，实现“合规前置、全程管控”。

5 总体架构设计与要求

5.1 总体架构设计

水利数字孪生体系的总体架构采用“感知层—通信层—数据层—应用层”的四层架构，旨在通过各层次间的有效协作，实现水利工程的安全管理、数据处理以及智能决策。

感知层：定位为信息收集的基础层级，主要功能是通过各类传感器（如水位计、雨量计等）对水利环境中的物理参数进行实时监测，并将这些数据传输至上级。该层负责确保数据的准确性与及时性。

通信层：位于感知层之上，其作用在于提供稳定可靠的通信网络，支持数据从感知层到数据层的高效传输。通信层需要保证数据传输的速度与安全性，通常包括有线和无线网络技术。

数据层：作为核心处理中心，承担着数据存储、处理及分析的任务。此层级不仅需要具备强大的计算能力以支持大数据分析，还应建立完善的数据治理体系，确保数据的质量和安全。

应用层：基于前几层提供的数据支持和服务，面向用户提供多样化的应用服务，例如洪水预警、水资源管理等。这一层强调用户体验与业务流程的深度融合，致力于提升决策效率和服务水平。

5.2 建设原则

统一规划、分步实施：在整体架构设计上保持一致性，同时根据实际情况逐步推进项目建设。

物理真实、虚拟映射：确保数字孪生系统能够精确反映实际水利工程的状态变化。

数据驱动、模型支撑：利用高质量的数据资源和先进的数学模型来指导系统运作。

业务协同、智能决策：促进不同业务部门之间的合作，通过智能化手段提高决策质量。

开放兼容、安全可控：既保证系统的对外交互能力，也重视信息安全和个人隐私保护。

5.3 技术要求

先进性：采用最新的科技成果，保证技术方案处于行业前沿。

开放性：遵循国际标准和协议，便于与其他系统集成。

可扩展性：预留足够的空间和技术接口，方便后续升级和扩展。

可靠性：确保系统能够在各种条件下稳定运行，减少故障发生率。

安全性：全面考虑网络安全、数据安全等方面的要求，防止未经授权的访问和攻击。构建一个科学合理、高效安全的技术框架。

6 关键技术要求

6.1 物联网技术

物联网终端设备应满足以下技术要求：

- a) 通信协议：优先采用 MQTT、CoAP、HTTP/HTTPS 等标准化协议；涉水专用设备可兼容 SL/T 809—2021《水利物联网终端通用技术要求》规定的协议；
- b) 数据传输加密：所有感知数据在传输过程中须采用 TLS 1.2 或国密 SM4/SM9 等加密算法，确保端到端安全；
- c) 网络拓扑结构：支持星型、树型或混合组网方式，适应山区、平原、城市等多样化部署环境；
- d) 接入网关：应具备协议解析、边缘计算、断点续传、设备认证与心跳检测功能，支持不少于 1000 台终端并发接入，并通过水利行业入网认证。

6.2 大数据技术

大数据处理平台应满足以下要求：

- a) 技术架构：采用“采集—存储—计算—服务”分层架构，支持批流一体处理模式；
- b) 数据挖掘算法：在洪水趋势预测、用水行为分析、异常工情识别等场景中，应明确算法类型（如时间序列模型、聚类、图神经网络等）、输入输出格式及验证指标（如 $MAE \leq 5\%$ 、 $F1\text{-score} \geq 0.85$ ）；
- d) 性能优化指标：单日处理能力不低于 10 TB 水利数据，关键业务数据端到端处理延迟不超过 5 分钟，查询响应时间 ≤ 3 秒（百万级记录）。

6.3 人工智能技术

AI 技术在水利数字孪生中的应用应遵循以下规范：

- a) 数据样本采集：训练数据应覆盖典型工况与极端事件（如百年一遇洪水），标注准确率 $\geq 95\%$ ，样本需经脱敏与质量校验；
- b) 模型训练流程：采用“数据预处理—特征工程—模型训练—交叉验证—上线评估”闭环流程，支持自动化机器学习（AutoML）；
- c) 精度验证标准：
 - 洪水预报模型：洪峰流量误差 $\leq 10\%$ ，预见期 ≥ 24 小时；
 - 工程故障诊断模型：故障识别准确率 $\geq 90\%$ ，误报率 $\leq 5\%$ ；
- d) 模型部署优化：支持容器化部署（Docker/Kubernetes），推理延迟 ≤ 1 秒，具备模型版本管理与在线更新能力。

6.4 BIM 与 GIS 融合技术

BIM 与 GIS 的融合应满足：

- a) 融合方法：采用“BIM 轻量化 + GIS 空间索引”集成策略，支持 LOD（Level of Detail）分级加载；

- b) 数据格式转换：BIM 模型（IFC 格式）应可无损转换为 CityGML、3D Tiles 或 GLTF 等 GIS 兼容格式；
- c) 空间参考系统：统一采用 CGCS2000 坐标系，高程基准为 1985 国家高程基准；
- d) 可视化展示：支持 Web 端三维渲染（基于 CesiumJS 或 Mapbox），帧率 ≥ 30 FPS，加载响应时间 ≤ 5 秒（单工程模型 ≤ 500 MB）。

6.5 虚拟仿真技术

虚拟仿真系统应满足以下技术指标：

- a) 实时性：交互延迟 ≤ 200 ms，仿真推演步长 ≤ 1 分钟，渲染帧率 ≥ 25 FPS；
- b) 渲染精度：几何模型误差 $\leq 0.5\%$ ，材质与光照效果应符合物理真实感要求；
- c) 交互方式：支持鼠标、键盘、触控及 VR 设备多模态交互，操作响应时间 ≤ 100 ms；
- d) 多用户协同：支持不少于 10 个用户同时在线协同仿真，状态同步误差 ≤ 1 秒，具备会话管理与权限控制机制。

6.6 网络与数据安全技术

网络安全：

- a) 按 SL/T 789—2020 要求实施三级及以上等级保护；
- b) 网络分区：划分为感知域、数据域、应用域和管理域，域间部署防火墙与安全隔离网闸；
- c) 部署入侵检测系统（IDS）与入侵防御系统（IPS），启用日志集中审计；
- d) 远程运维须通过 SSL VPN 或国密 IPsec VPN 接入，双因素认证强制启用。

数据安全：

- a) 传输加密：采用 TLS 1.3 或国密 SSL 协议；
- b) 存储加密：敏感数据（如工程结构参数、用户信息）须使用 AES-256 或 SM4 加密存储；
- c) 访问控制：基于 RBAC（角色访问控制）模型，实施最小权限原则；
- d) 安全审计：记录所有数据访问、修改、导出操作，日志留存不少于 6 个月。

应急处置：

- a) 制定《网络安全与数据安全事件应急预案》，明确事件分级（I~IV级）、响应流程与时限；
- b) 每季度开展一次应急演练，重大汛期前必须完成专项演练；
- c) 关键系统 RTO（恢复时间目标） ≤ 4 小时，RPO（恢复点目标） ≤ 15 分钟。

6.7 数据资源体系要求

数据分类：

- a) 基础数据：包括地理空间数据（地形、水系、行政区划）、水利工程基础信息（名称、坐标、设计参数等）；
- b) 监测数据：涵盖水文（雨量、水位、流量）、工情（闸门开度、大坝位移）、视频图像、水质等实时感知数据；
- c) 业务数据：调度指令、审批记录、应急预案、用水计划等管理类数据；
- d) 共享数据：依据 SL/T 811—2021 向外部系统提供的标准化交换数据；
- e) 孪生数据：用于驱动数字孪生体运行的融合数据，包括状态数据、仿真结果、AI 预测值等。

数据治理：

- a) 采集频率与质量：水文数据采集频率不低于 5 分钟/次，完整性 $\geq 98\%$ ，准确性 $\geq 95\%$ ；
- b) 清洗融合：建立统一时空基准下的多源数据融合规则，消除冗余与冲突；

c) 组织存储:

- 时序数据存入 InfluxDB、TDengine 等时序数据库;
- 空间数据存入 PostGIS、GeoMesa 等空间数据库;
- 文档与非结构化数据采用对象存储 (如 MinIO);

d) 元数据管理: 遵循 SL/T 810—2021, 建立覆盖数据来源、格式、更新周期、责任人等字段的元数据目录。

数据服务:

- a) 提供统一 RESTful API 或 GraphQL 接口, 支持按主题、区域、时间范围等维度查询;
- b) 构建数据服务总线 (DSB), 实现跨系统数据调用与订阅推送;
- c) 数据共享与交换应通过水利数据共享平台进行, 遵循“申请—审批—授权—审计”流程, 确保可管可控。

7 模型与仿真服务平台要求

7.1 模型集成与管理

平台应具备对多源、多尺度、多类型水利模型的全生命周期管理能力, 具体要求如下:

- a) 统一接入: 支持水文模型 (如新安江、HEC-HMS)、水动力模型 (如 MIKE、Delft3D、SOBEK)、水资源配置模型、工程安全评估模型、AI 预测模型等异构模型的标准化接入;
- b) 注册与元数据管理: 所有模型须在平台注册, 提供名称、类型、适用范围、输入/输出参数、时空分辨率、开发单位、版本号、依赖环境等元数据信息;
- c) 封装规范: 采用 Docker 容器或 Web 服务 (如 WPS、gRPC) 对模型进行封装, 确保运行环境隔离与接口标准化;
- d) 组合编排: 支持基于业务流程的模型链式调用与协同计算 (如“降雨—产汇流—河道演进—淹没分析”链路), 提供图形化编排工具;
- e) 版本管理: 实现模型版本控制、回滚、对比与灰度发布功能, 保留历史版本不少于 5 年, 并记录变更日志与验证结果。

7.2 仿真引擎

仿真引擎是支撑“四预” (预报、预警、预演、预案) 能力的核心组件, 应满足以下要求:

- a) 高并发计算: 支持不少于 100 个仿真任务并行执行, 单任务最大计算资源可动态分配 (CPU ≥ 32 核, 内存 ≥ 128 GB);
- b) 实时/超实时仿真:
 - 实时仿真: 仿真时钟与物理时间同步, 延迟 ≤ 1 分钟;
 - 超实时仿真: 支持加速比 ≥ 10 倍 (如 1 小时洪水过程在 6 分钟内完成推演);
- c) 情景模拟能力:
 - 支持多情景设定 (如不同降雨强度、调度方案、工程失效模式);
 - 可自动生成“预报—预警—预演—预案”闭环推演报告, 包含风险区域、影响人口、推荐措施等要素;
- d) 可视化耦合: 仿真结果应能实时驱动三维场景渲染, 支持动态叠加水深、流速、风险等级等图层。

7.3 模型率定与验证

关键业务模型须经过严格率定与验证，确保其在数字孪生环境中的可信度：

a) 率定方法：

- 采用自动优化算法（如 SCE-UA、遗传算法）结合人工调参；
- 率定数据应覆盖丰、平、枯典型年及极端事件，样本量不少于 3 个完整水文年；

b) 精度验证指标：

- 水文预报模型：确定性系数（NSE） ≥ 0.75 ，洪峰相对误差 $\leq 10\%$ ；
- 水动力模型：水位模拟误差 $\leq \pm 0.15$ m，淹没范围重合度 $\geq 85\%$ ；

c) 验证流程：

- 分为“内部验证”（训练期）与“外部验证”（非训练期）两个阶段；
- 验证结果需经专家评审并形成《模型验证报告》，作为模型上线准入依据；

d) 持续校准机制：建立基于新监测数据的在线反馈校准通道，每季度至少开展一次模型性能评估。

7.4 平台服务能力

平台应面向各级水利部门、科研机构及第三方开发者提供开放、弹性、按需的服务能力：

a) 模型即服务（MaaS）：

- 提供标准化模型调用 API，支持按模型、按区域、按时段计费或授权使用；
- 支持用户上传自有模型并通过平台安全沙箱运行；

b) 仿真即服务（SimaaS）：

- 用户可通过 Web 端提交仿真任务参数，平台自动调度资源、执行仿真并返回结果；
- 支持仿真任务状态查询、中断、重试与结果下载；

c) 服务接口规范：

- 遵循 OGC WPS、OpenAPI 3.0 等国际标准；
- 接口响应时间 ≤ 2 秒（简单查询），复杂仿真任务返回异步任务 ID；

d) 服务治理：

- 具备服务注册、限流、熔断、监控与日志追踪能力；
- 服务调用记录应纳入统一审计台账，保存期限不少于 3 年。

模型集成与管理：支持多源、多尺度、多类型水利模型的统一接入、注册、封装、组合与版本管理。

仿真引擎：要求具备高并发计算、实时/超实时仿真、情景模拟（“四预”：预报、预警、预演、预案）能力。

模型率定与验证：规定关键模型的率定方法与精度验证流程。

平台服务能力：提供模型即服务（MaaS）、仿真即服务（SimaaS）等开放式服务接口。

8 服务与应用层要求

8.1 交互与可视化要求

8.1.1 可视化引擎

可视化引擎是支撑数字孪生体沉浸式呈现的核心组件，应满足以下要求：

a) 二三维一体化：无缝融合二维地图（如行政区划、水系图）与三维实景模型（如 BIM 工程、倾斜摄影），支持视角自由切换与联动操作；

b) 多细节层次 (LOD)：根据视距、性能负载动态调整模型精细度，确保大规模场景（如全流域）流畅渲染，帧率 ≥ 25 FPS；

c) 虚拟现实 (VR) /增强现实 (AR) 支持：

- VR 模式支持头戴式设备（如 HTC Vive、PICO）进行沉浸式洪水推演或工程巡检；
- AR 模式支持移动终端通过摄像头叠加工程结构信息、水位预警线等虚拟要素于真实场景；

d) 跨平台渲染能力：基于 WebGL 或国产图形引擎（如 Mars3D、CesiumChina）构建，兼容主流浏览器及国产操作系统。

8.1.2 交互方式

为提升用户操作效率与协同体验，应支持多样化、自然化的交互模式：

a) 多端适配访问：

- 大屏端：支持指挥中心拼接屏展示，分辨率 $\geq 4K$ ，布局可自定义；
- 桌面端：提供专业版 Web 应用，支持复杂分析与模型配置；
- 移动端：适配 iOS/Android，支持离线地图、实时告警推送、现场拍照上报等功能；

b) 自然交互：

- 支持手势识别（缩放、旋转、点选）、语音指令（如“显示 XX 水库当前水位”）；
- 语音识别准确率 $\geq 90\%$ （在安静环境下），响应延迟 ≤ 1 秒；

c) 多人协同会商：

- 支持 ≥ 10 人同时在线标注、标绘、方案比选；
- 提供音视频通话、屏幕共享、操作同步与会商记录自动归档功能。

8.1.3 场景渲染规范

针对水利核心业务场景，制定统一的可视化表达标准：

a) 洪水演进：

- 动态渲染淹没范围、水深梯度（色阶分级）、流速矢量箭头；
- 时间轴支持快进、暂停、回放，时间步长 ≤ 5 分钟；

b) 工程调度：

- 实时显示闸门开度、泵站启停状态、输水流量等参数；
- 调度指令执行过程以动画形式呈现（如水流路径变化）；

c) 风险态势：

- 采用热力图、风险等级图标（红/橙/黄/蓝）标识隐患区域；
- 支持叠加人口、基础设施等承灾体信息，生成影响评估图层；

d) 通用规范：所有图层须符合 SL/T 810—2021 数据编码与符号标准，确保跨系统一致性。

8.2 智能应用与服务要求

8.2.1 通用能力要求

智能应用体系应构建以下基础性、可复用的通用能力，支撑上层业务敏捷创新：

a) 数据智能分析：

- 集成时序预测、异常检测、关联规则挖掘、时空聚类等算法；
- 关键业务指标（如洪峰流量、需水量）预测误差 $\leq 10\%$ ，分析结果支持下钻溯源。

b) 知识图谱构建：

- 构建覆盖“工程—水文—法规—预案—历史事件”的水利领域知识图谱；
- 支持基于图谱的智能问答（如“某断面生态流量不足时应启动哪级预案？”）与辅助推理。

c) 业务智能引擎：

- 融合规则引擎（Drools）、流程引擎（Activiti）与 AI 推理模块；
- 支持动态加载调度规则、预警阈值等策略，决策响应时间 ≤ 1 秒。

d) 典型应用场景规范（指导性要求）：

各智能应用应围绕以下重点场景建设，并满足相应能力指标：

- 流域防洪“四预”：实现“降雨预报→洪水预警→调度预演→预案生成”闭环，预演方案生成 ≤ 10 分钟，预警提前量 ≥ 3 小时；
- 水资源管理与调配：支持多水源联合调度、多用户需求匹配，配置方案生成 ≤ 5 分钟，满足生活、生产、生态用水协同；
- 大型水利工程智能运行与调度：实现闸泵站自动控制、设备健康诊断（准确率 $\geq 90\%$ ）、优化调度（能耗降低 $\geq 5\%$ ）；
- 河湖生态健康评估与保护：构建生态健康指数模型，月度评估覆盖水质、水量、生物、岸线四维，支持污染溯源模拟；
- 水利工程建设与安全监管：融合 BIM+IoT+AI，实现施工进度、质量、安全风险智能监控，隐患识别及时率 $\geq 95\%$ 。

8.2.2 服务封装与开放要求

为支撑智慧水利体系高效协同与智能应用生态构建，需推动核心业务能力向标准化、服务化、可复用方向演进，确定系统开发基本原则。

a) 应用功能组件化：

- 将智能能力拆分为独立、可插拔的功能组件（如“洪水预报组件”“生态流量计算组件”）；
- 组件具备标准化输入/输出接口、性能指标说明及依赖清单。

b) 服务化架构：

- 所有组件通过微服务方式对外提供，采用 RESTful API、gRPC 或消息队列通信；
- 纳入统一服务注册中心，支持服务发现、限流、熔断与调用链追踪。

c) 外部系统集成：

- 支持与以下系统安全高效对接：
 - 国家及省级政务服务平台（实现“一网通办”事项联动）；
 - 应急管理部应急指挥平台（实现灾情信息互通、预案协同）；
 - 水利部数据共享交换平台、流域综合管控系统；
 - 城市级城市信息模型（CIM）平台或城市运行管理中心（IOC）。
- 对接须遵循 SL/T 811—2021《水利数据共享交换技术导则》，并通过网络安全等级保护三级认证。

d) 开放生态支持：

- 提供开发者门户，开放 SDK、API 文档、测试沙箱及示例代码；
- 建立应用审核与上架机制，鼓励第三方开发合规智能应用，丰富服务生态。

打造“可视、可感、可算、可协同、可服务”的服务与应用层，推动水利业务从“经验驱动”向“数据+模型+智能”驱动转型，全面支撑智慧水利高质量发展。

9 网络安全与运维保障要求

9.1 网络安全

水利数字孪生体系应严格遵循《中华人民共和国网络安全法》《中华人民共和国数据安全法》及《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》（GB/T 22239—2019），落实网络安全等级保护制度（原则上不低于第三级），并满足以下专项安全要求：

- a) 数据安全：
 - 按照 SL/T 789—2020 和《水利数据分类分级指南》实施数据分类分级管理；
 - 敏感数据（如工程结构参数、用户用水信息）在传输和存储过程中须采用国密 SM4 或 AES-256 加密；
 - 建立数据访问审批与审计机制，确保“谁使用、谁负责”，操作日志留存不少于 6 个月。
- b) 应用安全：
 - 所有 Web 应用须通过安全开发规范（如 OWASP Top 10）审查，防范注入、跨站脚本（XSS）、越权访问等风险；
 - 关键业务功能（如调度指令下发）须实施双因子认证与操作二次确认；
 - 定期开展渗透测试与代码安全审计，高危漏洞修复时限 ≤ 72 小时。
- c) 模型安全：
 - 模型文件、训练数据、推理接口须纳入统一安全管控，防止未授权调用、篡改或逆向工程；
 - AI 模型部署环境应隔离于通用计算资源，启用模型输入合法性校验与输出异常检测机制；
 - 涉及关键基础设施的模型变更须经安全影响评估后方可上线。
- d) 终端安全：
 - 物联网感知终端、移动巡检设备等须具备唯一身份标识、固件签名验证与远程锁定能力；
 - 终端操作系统及通信模块应定期更新安全补丁，禁止使用默认口令或弱密码；
 - 接入网络前须通过安全准入检查（如 NAC 系统），不符合安全策略的设备禁止入网。

9.2 运维保障

9.2.1 硬件运维

为保障硬件设备长期可靠运行，须建立覆盖巡检、监测、维护到应急响应的标准化运维机制，确定硬件维护制度性要求。

- a) 日常巡检频率：
 - 感知设备（水位计、雨量站等）：汛期每日 1 次，非汛期每周不少于 2 次；
 - 服务器、存储及网络核心设备：7×24 小时远程监控，现场巡检每周 1 次；
- b) 巡检内容：
 - 设备供电、通信状态、传感器精度、物理环境（温湿度、防雷）等；
 - 记录设备运行日志、告警信息及电池/电源健康状态；
- c) 维护流程：
 - 建立设备全生命周期台账，实行“一机一档”；
 - 故障报修→远程诊断→现场处置→复检验收→闭环归档；
- d) 故障处理时限：
 - 一级故障（影响防洪调度、供水安全）：响应 ≤ 30 分钟，修复 ≤ 4 小时；
 - 二级故障（部分功能降级）：响应 ≤ 2 小时，修复 ≤ 24 小时；
 - 三级故障（非核心功能异常）：修复 ≤ 72 小时。

9.2.2 软件运维

为保障软件系统长期高效运行，须建立覆盖实时监控、版本管理、数据保护和操作审计的全周期软件运维机制，做到风险可预警、变更可管控、数据可恢复、行为可追溯，确定软件系统运行维护要求。

a) 日常监控：

- 对操作系统、中间件、数据库、应用服务等实施性能与可用性监控（CPU、内存、磁盘、连接数等）；

- 设置阈值告警，异常事件自动推送至运维平台；

b) 版本更新与漏洞修复：

- 软件版本变更须经测试环境验证后恢复发布；

- 高危安全漏洞须在官方公告后 7 日内完成修复；

c) 数据备份：

- 核心业务数据每日增量备份、每周全量备份，异地备份周期 ≤ 7 天；

- 备份数据保留不少于 5 年，每年至少开展 1 次恢复演练；

d) 运维日志制度：

- 所有运维操作（配置修改、服务启停、数据导出等）须记录操作人、时间、内容、审批依据；

- 日志集中存储、加密保护，防篡改、防删除，保存期限 ≥ 3 年。

9.2.3 模型运维

在数字孪生流域和智慧水利体系中，模型是实现预报、预警、预演、预案（“四预”）能力的核心引擎。其运维关键是其物理逻辑的准确性、参数的时效性与输出结果的可信度，以此为目标，建立模型运维基本要求。

a) 日常监控：

- 实时监测模型运行状态（调用频次、响应时延、资源占用）、输出稳定性及精度漂移；

- 设置精度预警阈值（如 NSE 下降 > 0.1 ），触发自动告警；

b) 参数校准：

- 基于最新监测数据，每季度对水文、水动力等关键模型进行参数再率定；

- 极端水文事件（如超标洪水）发生后，须在 7 日内完成模型回溯校验；

c) 迭代更新：

- 建立模型版本迭代机制，新版本上线前需通过验证测试与专家评审；

- 支持 A/B 测试或多模型并行运行，确保更新过程平滑无感；

d) 文档管理：

- 每个模型须配套《模型说明书》《验证报告》《运维手册》，随版本同步更新。

附则：牵头单位应每年组织一次网络安全与运维保障体系评审，结合业务变化、技术演进和事件复盘，持续优化制度流程与技术措施，确保水利数字孪生体系“建得好、用得稳、守得住”。

附录 A

(资料性)

实施与评价指南

- A.1 实施路径：分阶段建设目标、任务与里程碑建议。
- A.2 评价指标体系：提出从数据质量、模型精度、系统性能、应用成效、运维能力等多维度评价数字孪生系统建设与应用水平的参考指标。

征求意见稿

附录 B

(规范性)

水利数据分类与编码

表 B.1 水利数据分类与编码表

一级分类代码	一级分类名称	二级分类代码	二级分类名称	主要数据内容示例
A	基础地理信息	A01	行政区划	省、市、县、乡镇边界，行政区划代码
A	基础地理信息	A02	地形地貌	DEM、等高线、坡度、坡向
A	基础地理信息	A03	水系水文基础	河流、湖泊、水库、沟渠矢量，流域边界
B	水利工程信息	B01	水库工程	工程名称、位置、库容、坝型、设计标准、管理单位
B	水利工程信息	B02	水闸工程	闸门数里、孔口尺寸、启闭方式、设计流量
B	水利工程信息	B03	泵站工程	装机容量、扬程、泵型、运行状态
B	水利工程信息	B04	堤防工程	堤线长度、防洪标准、断面结构
B	水利工程信息	B05	灌区与渠系	干支斗农渠、控制面积、输水能力
B	水利工程信息	B06	其他水利工程	渡槽、倒虹吸、水电站等
C	水文水资源监测数据	C01	雨量数据	实时/历史降雨量（分钟级、小时级）、累计雨量
C	水文水资源监测数据	C02	水位数据	河道、水库、地下水水位
C	水文水资源监测数据	C03	流量数据	断面流量、引排水量
C	水文水资源监测数据	C04	水质数据	pH、溶解氧、氨氮、COD、重金属等
C	水文水资源监测数据	C05	蒸发与墒情	水面蒸发、土壤含水量
C	水文水资源监测数据	C06	视频图像	河道监控、工程巡检视频、无人机航拍
D	水资源管理数据	D01	用水户信息	工业、农业、生活、生态用户取水许可、用水计划
D	水资源管理数据	D02	取水许可与计量	取水口位置、许可量、实际取水量
D	水资源管理数据	D03	水资源配置方案	跨区域调水计划、应急供水方案
E	防汛抗旱业务数据	E01	洪水预报成果	洪峰时间、洪峰流量、过程线
E	防汛抗旱业务数据	E02	预警信息	暴雨、洪水、山洪、干旱预警等级与范围
E	防汛抗旱业务数据	E03	调度指令与执行记录	水库泄流指令、闸门开度调整
E	防汛抗旱业务数据	E04	灾情与险情信息	堤防管涌、溃坝风险、受灾人口、经济损失
F	河湖生态数据	F01	河湖健康评估指标	生态流量满足率、水生生物多样性指数、岸线自然率
F	河湖生态数据	F02	水土保持监测	土壤侵蚀模数、植被覆盖度
F	河湖生态数据	F03	水域岸线管理	河湖管理范围、划界成果、违建信息
G	工程建设与安全监管	G01	工程施工进度	BIM模型、关键节点完成情况
G	工程建设与安全监管	G02	安全监测数据	大坝位移、渗流、应力应变、裂缝
G	工程建设与安全监管	G03	质量检测与验收	混凝土强度、钢筋检测报告
H	业务管理与共享数据	H01	用户与权限信息	组织机构、角色、账号
H	业务管理与共享数据	H02	共享交换元数据	数据目录、接口说明、更新频率
H	业务管理与共享数据	H03	政策法规与标准	水法规、技术标准、应急预案
I	数字孪生专用数据	I01	孪生体模型数据	BIM+GIS融合模型、LOD分级模型
I	数字孪生专用数据	I02	仿真推演结果	洪水淹没图、调度方案对比、风险热力图
I	数字孪生专用数据	I03	AI预测与诊断结果	故障预警标签、需水预测值、水质异常评分

附录 C

(规范性)

感知设备技术参数与选型指引

表 C.1 感知设备技术参数表

序号	设备类型	主要用途	关键技术参数要求	选型建议
1	雷达水位计	河道、水库、渠道水位监测	- 测量范围: 0~30 m	优先选用非接触式雷达, 避免泥沙淤积影响; 山区河道建议带波浪滤波功能
			- 精度: ± 2 mm 或 $\pm 0.1\%$ FS (取大者)	
			- 分辨率: 1 mm	
			- 输出接口: RS485/4~20 mA/MQTT	
			- 防护等级: IP68	
			- 工作温度: $-30^{\circ}\text{C}\sim+70^{\circ}\text{C}$	
2	超声波水位计	封闭井、小断面水位监测	- 测量范围: 0~10 m	适用于静水环境; 不推荐用于高风、高湿或水面波动剧烈区域
			- 精度: $\pm 0.25\%$ FS	
			- 受温度、气压影响需带补偿	
3	压力式水位计	地下水、深水水库水位监测	- 量程: 0~100 mH ₂ O	适合长期埋设, 需定期校准; 注意防雷与电缆密封
			- 精度: $\pm 0.1\%$ FS	
			- 温度补偿: 内置	
			- 通信: SDI-12/Modbus	
4	翻斗式雨量计	降雨量自动采集	- 分辨率: 0.1 mm 或 0.2 mm	选用双翻斗结构抗堵塞; 寒冷地区需带加热融雪功能

附录 D

规范性

模型精度验证方法与计算公式

D.1 模型精度验证方法与计算公式

表 D.1 通用验证指标及计算公式汇总表

序号	指标名称	符号	计算公式 (纯文本)	说明
1	确定性系数 (Nash-Sutcliffe Efficiency)	NSE	$NSE = 1 - \frac{[\sum(Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2]}{[\sum(Q_{obs,i} - Q_{obs_mean})^2]}$	理想值=1; NSE \geq 0.75 为良好
2	相对误差 (单点)	RE	$RE_i = (Q_{sim,i} - Q_{obs,i}) / Q_{obs,i} \times 100\%$	常用于洪峰评估
3	平均相对误差	MRE	$MRE = (1/n) \times \sum (Q_{sim,i} - Q_{obs,i}) / Q_{obs,i}$	
4	洪峰流量相对误差	PE	$PE = (Q_{sim_peak} - Q_{obs_peak}) / Q_{obs_peak} \times 100\%$	要求
5	洪峰出现时间误差	TE	$TE = t_{sim_peak} - t_{obs_peak}$	单位: 小时; 要求
6	均方根误差	RMSE	$RMSE = \sqrt{(1/n) \times \sum(Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}$	单位与原始数据一致
7	平均绝对误差	MAE	$MAE = (1/n) \times \sum Q_{sim,i} - Q_{obs,i} $	
8	相关系数 (Pearson)	R	$R = \frac{\sum[(Q_{sim,i} - Q_{sim_mean})(Q_{obs,i} - Q_{obs_mean})]}{\sqrt{[\sum(Q_{sim,i} - Q_{sim_mean})^2] \times [\sum(Q_{obs,i} - Q_{obs_mean})^2]}}$	$0 \leq R \leq 1$

符号说明:

- $Q_{sim,i}$: 第 i 时刻模拟值
- $Q_{obs,i}$: 第 i 时刻实测值
- Q_{obs_mean} : 实测值的平均值
- Q_{sim_mean} : 模拟值的平均值
- n: 样本数量
- sqrt 表示平方根

D.2 淹没范围重合度（适用于水动力模型）

- 公式：

$$\text{淹没重合度}(\%) = (\text{模拟淹没区域} \cap \text{实际淹没区域}) \text{面积} \div \text{实际淹没区域面积} \times 100\%$$

- 合格标准： $\geq 85\%$

D.3 分场景验证合格标准（指导值）

表 D.2 模型验证合格标准阈值表

模型类型	关键指标	合格标准
水文预报模型	NSE, PE, TE	$NSE \geq 0.75$; $ PE \leq 10\%$; $ TE \leq 2$ 小时
水动力模型（水位）	RMSE（水位）	≤ 0.15 米
水动力模型（淹没）	淹没重合度	$\geq 85\%$
AI 预测模型	MAE, R ²	MAE $\leq 5\%$ 里程; R ² ≥ 0.85
工程安全监测模型	异常检出率、误报率	检出率 $\geq 90\%$; 误报率 $\leq 5\%$

附录 E
(资料性)
协同管控流程

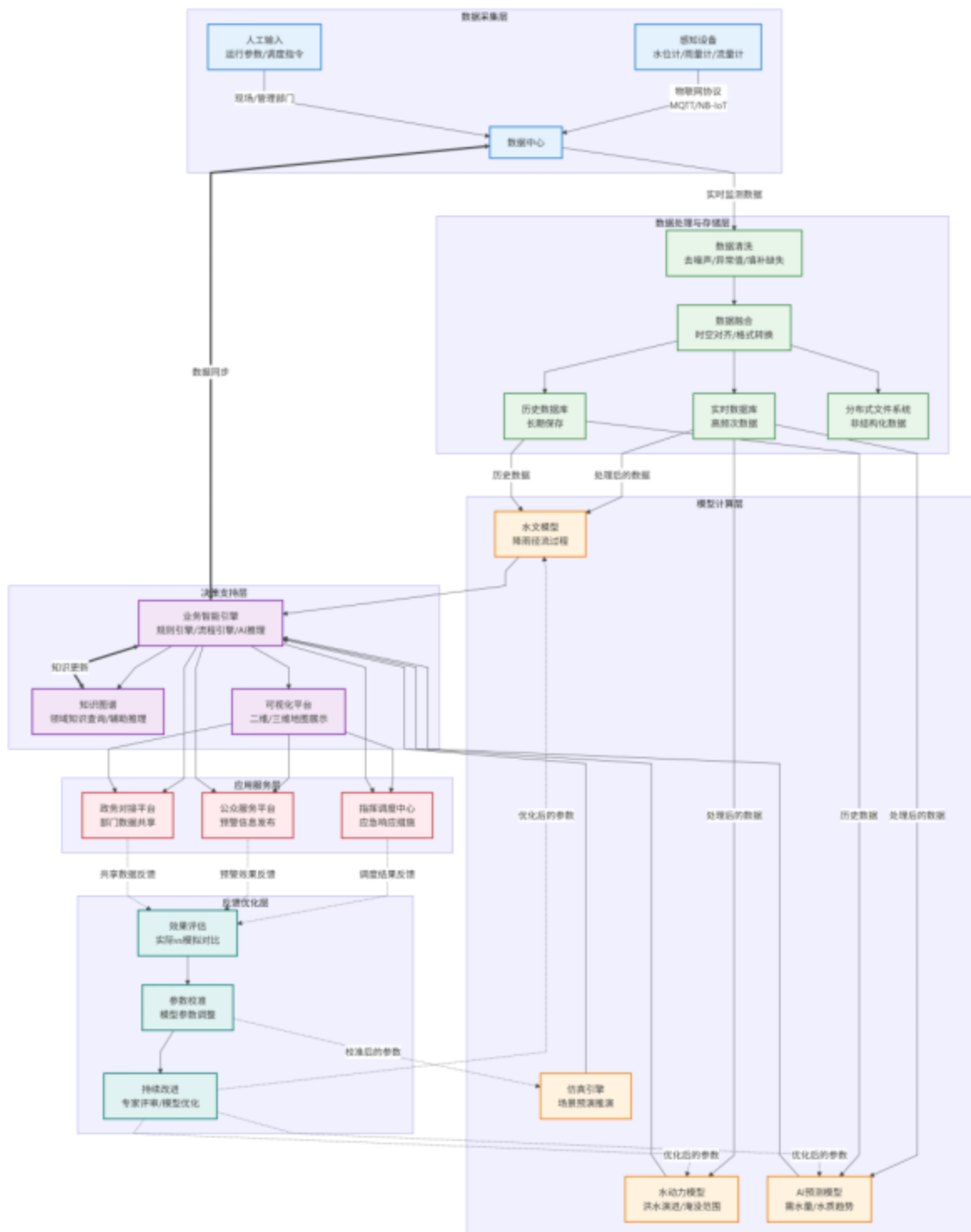


图 E.1 协同管控流程图

