

ICS 93.140

CCS P 67

T/WEA

团 体 标 准

T/WEA XXXX—2026

疏浚工程数字孪生应用技术规程

Code of practice for digital twin application technology in dredging
engineering

(征求意见稿)

2026 - XX - XX 发布

2026 - XX - XX 实施

中国智慧工程研究会 发布

目 次

前言 III

引言 V

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

5 系统架构与功能要求 3

6 数据与接口要求 6

7 模型构建与更新要求 9

8 分析推演预警与闭环控制要求 10

9 成果表达与交付要求 13

10 运行维护与安全要求 14

11 评价与验收要求 15

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专利的责任。

本文件由中国智慧工程研究会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

全国团体标准信息平台

引 言

疏浚工程是港口、航道、河湖整治与水利水运基础设施建设的重要组成部分，具有作业区域广、工况变化快、施工组织复杂、外部约束多等特点。疏浚过程受水文气象、潮汐海况、泥沙特性、通航条件、环保要求及装备工况等多因素耦合影响，容易出现“超挖、欠挖、回淤、浑浊带扩散、施工扰动影响敏感区、生产效率波动”等典型问题。传统管理模式往往依赖分散的数据采集与事后统计，存在数据孤岛、信息滞后、过程不可视、预测能力弱、决策响应慢等不足，难以满足现代疏浚工程对精细化组织、质量可控、环保合规与成本工期统筹的要求。

数字孪生技术通过构建与疏浚工程对象（工程体、施工过程、装备系统、环境系统）相对应的虚拟模型，融合多源异构数据实现状态同步、过程可视、仿真推演与预测预警，从而支撑“方案比选—施工组织—过程控制—质量验收—运营维护”的全生命周期管理。对疏浚工程而言，数字孪生应用的核心价值在于：将测量成果、施工参数、装备状态与环境监测等关键数据在统一时空基准下进行融合与关联，形成面向生产、质量与环保的闭环控制体系，提升施工过程的可控性与可追溯性，降低超欠挖与回淤风险，减少环境影响事件发生概率，并提高资源配置效率。

目前，疏浚工程数字孪生应用在建设目标、模型边界、数据口径、精度分级、接口规范、成果表达与验收评价等方面仍缺乏统一技术要求，导致系统建设随意性较强、可复用性不足、跨项目对标困难。为规范疏浚工程数字孪生应用的技术路线与实施要求，本文件提出数字孪生应用的总体原则、系统架构、数据要求、模型与仿真要求、业务应用与闭环控制要求、运行维护与评价验收要求，为建设单位、设计单位、施工单位、监理单位及系统集成与运维单位提供可执行的技术依据。

疏浚工程数字孪生应用技术规程

1 范围

本文件规定了疏浚工程数字孪生应用的总体要求、系统架构与功能要求、数据与接口要求、模型构建与更新要求、分析推演预警与闭环控制要求、成果表达与交付要求、运行维护与安全要求及评价与验收要求等内容。

本文件适用于港口与航道疏浚、河道清淤、库区清淤、吹填造地及相关配套工程在勘测设计、施工组织、施工实施、质量验收与运行维护阶段的数字孪生系统建设与应用。仅用于单一可视化展示且不具备数据同步与分析推演能力的三维展示系统不适用。

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 2001 全球定位系统（GPS）测量规范

GB/T 18316 数字测绘成果质量检查与验收

GB/T 22239 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求

GB/T 25069 信息安全技术 术语

GB/T 26224—2010 信息技术 软件生存周期过程 重用过程

GB/T 35273 信息安全技术 个人信息安全规范

GB/T 51212 建筑信息模型应用统一标准

GB/T 51269 建筑信息模型分类和编码标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

数字孪生 digital twin

在统一时空基准下，利用模型与数据对物理对象或过程进行映射与同步更新，实现状态感知、分析推演与决策支撑的虚实融合系统。

3.2

疏浚工程数字孪生 dredging engineering digital twin

以疏浚工程对象为核心，融合测量、施工、装备与环境等多源数据，构建并持续更新虚拟模型，用于支撑疏浚工程全生命周期管理的数字孪生系统。

3.3

工程底床基准 surface datum

用于描述疏浚区域水下地形高程（或水深）参考的统一基准，包括高程基准、潮位基准与投影坐标基准等。

3.4

设计疏浚断面 design dredging section

依据设计文件规定的疏浚边界、设计高程（或设计水深）及边坡线形成的目标断面或目标面。

3.5

超挖 over-dredging

疏浚后底床高程低于设计高程（或水深超过设计水深）并超过允许偏差的情况。

3.6

欠挖 under-dredging

疏浚后底床高程高于设计高程（或水深小于设计水深）并超过允许偏差的情况。

3.7

回淤 siltation

疏浚完成后在一定时间内因泥沙输运与沉积导致底床高程回升（或水深减小）的现象。

3.8

浑浊带 turbidity plume

疏浚作业扰动造成悬浮泥沙浓度升高并随水动力扩散形成的高浑浊水体区域。

3.9

多源数据融合 multi-source data fusion

对测深、定位、产量、姿态、环境监测、视频等数据进行时空对齐、关联匹配与一致性处理的过程。

3.10

预警 warning

基于阈值规则、模型输出或趋势预测，对潜在风险状态进行分级提示并给出处置建议的信息输出。

3.11

服务水平协议 service level agreement, SLA

由系统建设单位（或业主）与系统建设/运维责任方约定的服务目标与保障要求文件，规定系统可用性、响应时间、修复时间、数据时效、备份恢复、支持范围与考核方式等指标及其测量方法。

4 总体要求

4.1 建设目标

疏浚工程数字孪生应用应以支撑工程质量可控、施工过程可视、环保风险可管、资源调度可优与成果可追溯为目标，实现以下能力：

- a) 状态同步：关键对象（施工区底床、装备工况、产量进度、环境指标）具备可配置的同步更新机制；
- b) 过程可视：施工区域、装备轨迹与关键指标可视化展示，支持按时间回放；
- c) 分析推演：支持产能预测、回淤评估、超欠挖趋势识别、浑浊带扩散分析等一种或多种能力；
- d) 预警与闭环：支持质量与环保预警，形成“识别—处置—复核—销项”的闭环留痕；
- e) 成果交付：形成满足验收与归档要求的数据成果、模型成果与过程记录成果。

4.2 建设原则

系统建设应遵循以下原则：

- a) 风险与业务牵引：优先覆盖超欠挖、回淤、环保敏感区影响、通航安全与装备故障等高风险场景；
- b) 数据先行：明确时空基准、数据字典、质量控制指标与接口规范，保证可用、可信、可追溯；
- c) 分级实施：按项目规模、装备类型与数字化基础分阶段建设，支持迭代升级；
- d) 模型可解释：模型边界、假设条件、精度等级与适用范围应明确，输出结论应可追溯；
- e) 安全合规：落实网络安全、数据安全与权限审计要求，保障系统稳定运行。

4.3 典型应用场景

数字孪生应用应以场景化方式组织功能与数据配置，典型应用场景与关键数据要素见表1。

表1 疏浚工程数字孪生典型应用场景与关键数据要素

场景类别	主要目标	关键数据要素	典型输出
方案与施工组织	方案比选、工序优化、资源配置	设计断面/边界、施工船机能力、潮汐气象、通航限制	施工组织推演、工期与成本测算
过程生产监控	进度与产量跟踪	船位轨迹、挖深/流量、产量计量、作业参数	产量日报、进度偏差预警
质量控制	控制超欠挖与断面偏差	测深成果、设计模型、施工轨迹、实时挖深	超欠挖分布图、复测任务单
环保管控	控制浑浊带与敏感区影响	浑浊度/悬浮物、流速流向、敏感区边界	环保预警、影响评估报告
回淤与维护	评估回淤趋势与维护策略	多期测深、泥沙资料、水动力条件	回淤评估、维护疏浚建议
装备健康与安全	降低故障与安全事件	设备状态码、关键部件参数、视频/作业记录	故障预警、停机建议与处置闭环

5 系统架构与功能要求

5.1 系统总体架构

疏浚工程数字孪生系统宜采用“感知采集—边缘处理—平台服务—应用呈现—集成接口”的分层架构，以满足现场低时延、弱网可用、多源数据融合与业务闭环管理需求。系统总体架构应与图1相符。

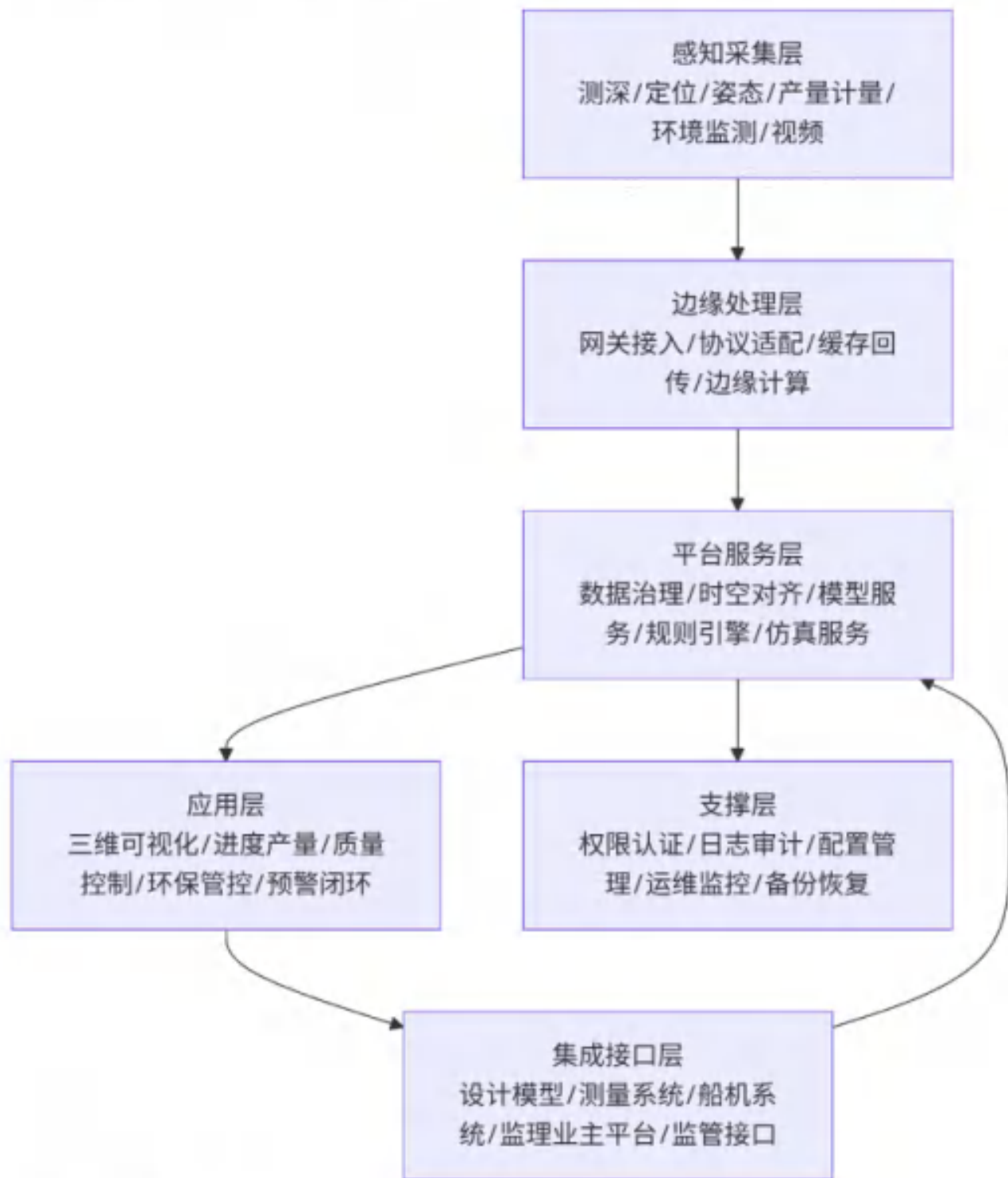


图1 疏浚工程数字孪生系统总体架构

5.2 系统功能构成

系统应围绕疏浚工程“生产—质量—环保—安全—成本”的管理目标配置功能模块，宜至少包括以下功能单元：

- a) 工程对象管理：维护工程区域、施工分区、设计疏浚边界与断面、控制点、敏感区、航道通航区等主数据；
- b) 装备与资源管理：维护疏浚船机、管线、泥驳、辅助船、卸泥区/吹填区等资源台账与能力参数；
- c) 多源数据接入与治理：支持测深、定位、姿态、产量、流量、泵压、浑浊度、气象水文、视频等数据接入，提供清洗、去噪、缺失识别、异常检测与质量评估；

d) 时空融合与状态同步：实现多源数据统一时间基准、统一坐标与潮位基准下的对齐与融合，形成可回放的施工过程状态；

e) 数字孪生模型管理：包括底床地形模型、设计目标模型、施工过程模型、装备工况模型与环境影响模型，支持版本管理与增量更新；

f) 分析与仿真推演：包括产能预测、进度偏差识别、超欠挖识别、回淤趋势评估、浑浊带扩散分析等一种或多种能力；

g) 预警与闭环处置：支持预警分级、责任分派、处置留痕、复核与销项归档；

h) 成果表达与交付：支持二维/三维成果表达、统计报表、过程证据链、验收资料与归档包输出；

i) 系统运维与审计：包括设备在线率、数据延迟、模型健康度、日志审计、权限管理与备份恢复。

5.3 关键对象与模型边界

系统应明确数字孪生对象范围与模型边界，避免“全量建模但不可用”。模型边界宜包括：

a) 空间边界：施工水域范围、疏浚边界、影响评估边界、敏感区边界；

b) 时间边界：施工期全周期；如涉及回淤评估，可延伸至维护期；

c) 对象边界：底床地形、设计目标、施工轨迹、船机工况、泥沙输运与水动力；

d) 精度边界：地形模型精度等级、同步频率、可用于验收判定的最小网格/断面间距等。

5.4 数据接入能力要求

系统数据接入能力应满足疏浚工程典型应用场景需要，关键数据要素配置应符合表1的要求。系统应具备以下数据接入与处理能力：

a) 定位与姿态数据：支持北斗/GNSS定位、航向、横摇/纵摇/艏摇等姿态数据接入；

b) 测深数据：支持单波束/多波束测深成果与实时测深数据接入，明确潮位改正、声速改正与坐标转换流程；

c) 产量与工况数据：支持挖深/流量/泵压/功率/泥浆浓度等工况参数接入，并与产量计量口径一致；

d) 环境监测数据：支持浑浊度/悬浮物、流速流向、气象等接入，明确采样频率与校准要求；

e) 视频与事件数据：支持作业区视频接入与事件标注，形成证据留痕。

5.5 业务应用功能要求

5.5.1 生产与进度监控

系统应支持按施工分区、船机、班次、日期等维度统计产量与工时，形成进度偏差识别能力；当进度偏差超过设定阈值时，应触发预警并形成处置闭环。

5.5.2 质量控制

系统应支持将测深成果与设计目标模型进行对比，输出超挖、欠挖、边坡偏差与关键断面偏差 质量控制输出宜支持网格化差值图、断面对比图与问题清单导出，并可生成复测任务或整改工单。

5.5.3 环保管控

系统应支持对浑浊度/悬浮物监测数据进行趋势分析与超限判定，必要时结合流速流向开展扩散趋势分析；当敏感区边界附近监测指标达到阈值时，应触发环保预警并记录处置过程与复核结果。

5.5.4 回淤评估与维护建议

系统宜支持多期测深对比，形成回淤量、回淤速率与空间分布评估结果，并可输出维护疏浚建议区段与优先级。

5.5.5 通航与作业安全

系统可集成AIS/船舶交通态势数据与作业区围栏，支持违规闯入、近距离会遇等安全提示或预警，并形成处置留痕。

5.6 性能要求

系统性能应满足施工管理实时性与稳定性要求，至少应规定：

- a) 数据延迟：关键生产与安全数据端到端延迟应满足项目管理需求；
- b) 可用性：系统平台应满足项目约定的可用性指标；
- c) 并发能力：满足多船多分区同时在线监控与回放；
- d) 弱网容错：边缘侧应具备缓存与断点续传能力，断网期间可维持基本告警/记录，恢复后自动补传并标记补传数据；
- e) 可追溯性：关键数据、模型版本、阈值版本、预警与处置记录应可追溯。

6 数据与接口要求

6.1 时空基准与统一基准要求

疏浚工程数字孪生系统应建立统一的时空基准体系，保证测深、定位、施工工况与环境监测数据在同一基准下可对齐、可融合、可复核。时空基准总体要求如下：

- a) 坐标基准：应明确采用的平面坐标系、投影参数与坐标转换方法；
- b) 高程/潮位基准：应明确采用的高程基准或潮位基准（如当地潮位基准面、设计基准面等），并明确潮位改正流程与改正数据来源；
- c) 时间基准：应明确统一时间源（如GNSS授时、NTP授时或等效机制），并规定允许的最大时钟偏差；

d) 基准变更控制：当坐标或潮位基准发生调整时，应执行变更审批并对历史数据、模型版本与成果输出进行一致性处理，形成可追溯记录。

系统应在数据入库前完成基准统一与转换，并对转换参数、算法版本与责任主体进行记录。

6.2 数据分类与主数据管理

6.2.1 数据分类

系统数据宜分为：

- a) 基础工程数据：项目、标段、施工分区、设计疏浚边界、设计断面、敏感区、通航区、卸泥区/吹填区等；
- b) 测量数据：单波束/多波束测深成果、潮位/水位、声速剖面、控制点成果等；
- c) 船机与工况数据：船位、航向、姿态、挖深、流量、泵压、功率、泥浆浓度、产量计量等；
- d) 环境监测数据：浑浊度/悬浮物、流速流向、气象、水质指标等；
- e) 事件与业务数据：作业计划、班次、工单、预警记录、处置记录、复测记录、验收记录、日志审计等；
- f) 衍生数据：网格化地形差值、超欠挖分布、回淤评估结果、仿真预测结果等。

6.2.2 主数据对象

系统应建立主数据清单并实施统一编码，主数据至少包括：项目、施工分区、设计断面/目标面、测量航线/测点、船机设备、传感器/监测点位、敏感区、预警类型、阈值版本、模型版本、工单类型。主数据对象之间的关联关系（例如“施工分区—设计断面—测量航线—船机轨迹—成果输出”）应可追溯。

6.3 数据字典与编码规则

系统应建立数据字典与编码规则，数据字典至少包括字段名称、含义、单位、精度、取值范围、采样频率、缺失处理规则、数据来源、校准周期、质量指标与责任单位。编码规则应满足唯一性、可扩展性与可读性要求，宜采用“项目—对象类型—分区—序号—版本”的组合编码方式。数据字典与编码规则应纳入配置管理，变更应留痕并可回滚。

6.4 数据质量控制要求

系统应具备全链路数据质量控制能力，至少包括：

- a) 在线监测：设备在线率、数据上报率、延迟、丢包率监测；
- b) 完整性校验：关键字段缺失识别，缺失触发告警并记录缺失段；
- c) 合理性校验：越界、突变、漂移、噪声过大等异常检测；
- d) 一致性校验：同一对象多源数据的一致性比对与偏差分析；

- e) 校准管理：测深设备声速校准、环境传感器校准、定位与姿态设备校准计划与记录；
- f) 数据修复策略：对缺失与异常数据可采用补采、插值或删除等方式处理，但不得覆盖或篡改原始数据；处理后的衍生数据应与原始数据链路关联，保证可追溯。

6.5 数据接入与接口要求

6.5.1 接入方式

系统应支持以下接入方式：

- a) 设备直连接入；
- b) 边缘网关接入（推荐用于船机工况、视频与高频数据）；
- c) 第三方平台对接（如船机管理系统、测量管理系统、监理业主平台等）。

6.5.2 接口协议与数据格式

系统接口应采用开放、可维护的协议与格式，接口文档应至少包含：认证方式、字段映射、数据频率、时间戳规则、错误码、重试策略、幂等要求与版本管理。数据格式宜采用JSON/CSV/二进制协议等，并对时序数据明确采样频率与聚合规则。

6.5.3 接口安全与审计

接口应支持身份认证、访问控制、传输加密与调用审计。对涉及敏感信息的数据（如人员信息、关键工程位置敏感数据）应实施最小必要原则、脱敏或分级授权访问，并记录访问日志与导出行为。

6.6 数据留存、备份与归档要求

系统应规定数据留存策略、备份策略与归档策略，至少包括：

- a) 原始数据留存期限与压缩策略；
- b) 关键成果数据（测深成果、差值成果、验收成果）的长期归档要求；
- c) 工单、预警、处置与复测记录的留存与审计要求；
- d) 备份频率、备份介质、异地备份与恢复演练频次；
- e) 数据销毁流程与审批机制（达到留存期限或项目结束时适用）。

系统数据类别、关键字段及质量指标宜按表2配置。系统数据质量控制指标应符合表2的要求。

表2 数据类别、关键字段与质量指标

数据类别	关键字段（示例）	采集/更新频率建议	质量指标建议	备注
GNSS定位与姿态	vessel_id、x/y、heading、roll/pitch、timestamp	1 - 5 s	延迟≤2 s，丢包率≤1%	需时间同步

表2 数据类别、关键字段与质量指标（续）

数据类别	关键字段示例	采集/更新频率建议	质量指标建议	备注
实时挖深/工况	dredge_depth、flow、pressure、power、timestamp	1~10 s	有效率≥98%	与产量口径一致
测深成果	grid/point、depth、tide_corr、sound_speed、time	任务驱动	质量可检验、可复核	需基准统一
环境监测	turbidity/ssc、current、meteo、timestamp	10~300 s	校准可追溯、缺失可告警	敏感区重点
事件与工单	warning_id、level、zone、action、evidence	事件驱动	全量留痕、可审计	闭环评价依据

7 模型构建与更新要求

7.1 模型体系总体要求

系统应构建与疏浚工程管理目标相匹配的数字孪生模型体系，模型应满足边界清晰、精度可分级、更新可持续、输出可解释的要求。模型体系宜包括：

- a) 底床地形模型：反映施工区现状底床形态；
- b) 设计目标模型：反映设计疏浚目标面、边界与边坡要求；
- c) 施工过程模型：反映船机轨迹、施工参数与施工影响范围；
- d) 装备工况模型：反映关键设备工况、产能与能耗；
- e) 环境影响模型：反映浑浊带扩散趋势、敏感区影响评估等；
- f) 回淤评估模型：反映回淤量与回淤速率趋势。

模型体系的组成、边界与主要输出应与项目应用场景一致；模型体系构成与关联关系见图2。模型体系构成与关联关系应符合图2的要求。

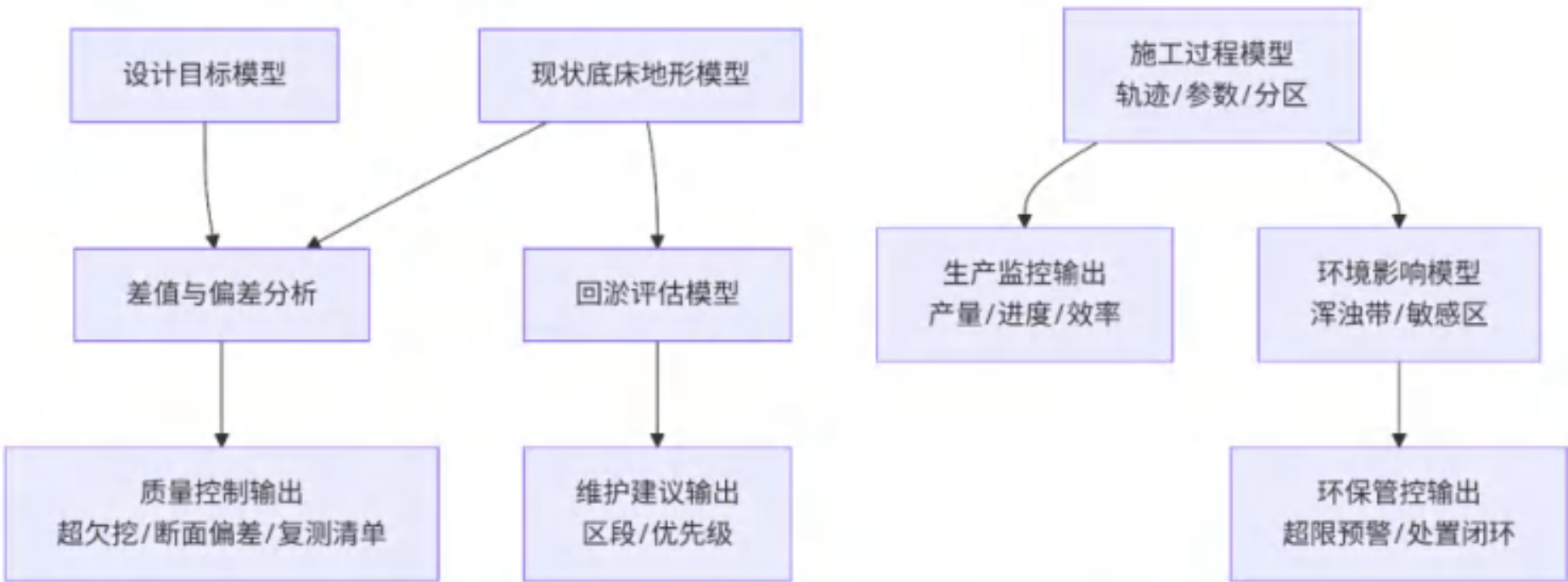


图2 疏浚工程数字孪生模型体系构成与关联关系

7.2 精度分级与适用性要求

系统应对模型精度进行分级管理，至少应明确：

- a) 地形模型网格分辨率或断面间距；
- b) 高程/水深精度与误差评估方法；
- c) 同步更新频率与时效性要求；
- d) 不同精度等级的适用场景（如过程控制、质量验收、趋势分析）。

精度分级应与测量方案、设备能力与验收要求相匹配，并在项目实施方案中明确。

7.3 地形模型构建要求

7.3.1 数据来源与处理

地形模型应基于测深成果构建，测深数据应完成潮位改正、声速改正、坐标转换与质量检核。地形建模应明确插值方法、异常值剔除规则、网格生成规则与边界约束。

7.3.2 更新机制

地形模型应支持增量更新与多期版本管理。每次更新应记录测量时间范围、覆盖范围、数据质量评估结果与模型版本号，保证可回溯。

7.4 设计目标模型构建要求

设计目标模型应来源于设计文件，宜包含：设计边界、设计水深/高程、边坡参数、允许偏差与控制断面。设计模型应具备版本控制；当设计变更时，应同步更新并对已施工区域进行影响评估与记录。

7.5 施工过程模型构建要求

施工过程模型应基于船位轨迹、作业参数与施工分区规则构建，至少应支持：

- a) 作业轨迹与作业覆盖率统计；
- b) 分区产量与工时统计；
- c) 作业参数与质量结果关联分析；
- d) 支持按时间轴回放与关键事件标注。

7.6 环境影响与回淤模型要求

对涉及环保敏感区或监管要求的项目，系统宜建立环境影响模型或等效分析方法，至少支持浑浊度超限判定与扩散趋势分析；对回淤敏感区段，宜建立回淤评估模型，支持多期测深对比与趋势评估。模型假设、适用范围与不确定性说明应明确，并在输出中给出解释信息。

8 分析推演预警与闭环控制要求

8.1 总体要求

系统应基于数据融合结果与数字孪生模型输出，形成面向生产、质量、环保与安全的分析推演与预警闭环控制能力。分析推演结果应可解释、可回放、可追溯，并与数据版本、模型版本、阈值版本保持一致。预警闭环控制应覆盖“识别—分级—发布—处置—复核—销项—复盘”的全过程。

8.2 分析推演能力要求

8.2.1 生产与产能分析

系统应支持按船机、分区、班次与日期统计产量、工时、效率等指标，并识别效率异常或产能波动原因。产能预测宜结合历史产能、设备工况、潮汐海况与通航限制等因素开展推演，输出预测产量区间与影响因子说明。

8.2.2 质量差值与断面偏差分析

系统应支持将现状地形模型与设计目标模型进行差值分析，输出网格化差值结果、断面对比结果与偏差统计。差值分析应明确差值计算分辨率、边界约束、异常点处理与允许偏差口径，并支持按施工分区生成问题清单。

8.2.3 环保影响分析

系统应支持浑浊度/悬浮物等环境监测数据的趋势分析与超限识别，必要时可结合流速流向进行扩散趋势判断，输出影响范围估计与敏感区风险提示。环保分析输出应明确监测点位、采样频率、背景值设定与超限持续时间统计口径。

8.2.4 回淤趋势评估

系统应支持多期测深对比，计算回淤量、回淤速率与空间分布，并对回淤高风险区段给出维护建议。回淤评估应明确对比时间窗、测深覆盖一致性要求与误差传递说明。

8.3 预警分级、触发与解除规则

系统应建立预警等级与响应策略，预警等级、触发依据与处置要求宜按表3执行。预警等级、触发依据与处置要求应符合表3的规定。

预警触发宜采用“阈值+趋势+场景约束”的组合方式：

- a) 阈值触发：指标超过上限/下限或偏差超过允许偏差；
- b) 趋势触发：指标变化率超过阈值、持续超限或接近临界线；
- c) 场景约束：在特定区域（敏感区、航道边界）、特定工序或特定时段（潮汐窗口、通航窗口）

启用更严格阈值；

d) 解除规则：解除应满足“指标回归正常区间且持续稳定”并经复核确认，必要时设置迟滞区间避免频繁抖动。

表3 预警等级、触发依据与处置要求

预警等级	典型触发依据	处置要求	复核要求
一级	质量或环保重大超限；敏感区影响显著；通航/安全重大风险	立即停止相关作业，启动应急处置，调整方案并上报	立即复测/复核，形成专项报告
二级	超欠挖偏差显著；浑浊度持续超限；关键设备异常导致失控风险	立即整改，调整参数与组织，必要时局部停工	30 min~2 h内复核，留痕销项
三级	偏差接近临界；效率异常；环保指标短时超限或上升趋势明显	限时整改，加强监测与复测	4 h内复核或次班复核
四级	风险苗头或管理缺口；数据质量异常提示	提醒关注，纳入巡检与复盘	24 h内核实并记录

8.4 典型预警场景控制要求

8.4.1 超挖预警与控制

系统应基于差值分析结果识别超挖区域，并按预警等级输出超挖范围、超挖量估计与建议控制措施。超挖控制宜包括：调整挖深设定、优化航线与作业路径、降低单位时间挖深变化率、加强实时测深或增加复测频次等。超挖处置完成后应进行复测复核，复核结果应作为销项依据。

8.4.2 欠挖预警与控制

系统应识别欠挖区域并给出欠挖修整清单，清单应包含区域位置、欠挖量估计、优先级与建议复挖策略。欠挖处置应避免因补挖导致相邻区域超挖或边坡失稳风险上升，必要时应采取分层分段复挖策略并实施过程复测。

8.4.3 断面偏差与边坡控制

对控制断面与边坡控制要求明确的工程，系统应输出断面偏差对比与边坡偏差提示。当边坡偏差接近或超过允许范围时，应触发预警并提出作业参数调整建议；处置后应按断面复测确认。

8.4.4 环保超限预警与控制

当浑浊度/悬浮物等指标在敏感区附近达到触发条件时，系统应输出超限持续时间、影响范围趋势与建议措施。处置措施可包括：调整作业时段（避开涨落潮敏感窗口）、降低扰动强度、优化排泥方式、增加围隔措施、加强监测频次等。环保预警销项应以复测/监测回归与持续稳定为条件，并形成证据链。

8.4.5 进度偏差与产能波动预警

当实际产量与计划产量偏差超过阈值或效率持续异常时，系统应触发预警并给出可能原因分析，并提出资源调度与组织优化建议。处置后应评估偏差收敛情况并记录。

8.4.6 数据质量异常预警

当关键数据出现持续缺失、延迟过大、漂移或异常波动时，系统应输出数据质量告警并提示可能影响的模型与业务模块；必要时应启用降级策略（如暂停自动预警、改为人工复核）并派发运维工单。

8.5 闭环工单与证据链要求

8.5.1 工单生成与派发

预警触发后系统应自动生成工单或经值班人员确认生成。工单应包含：预警类型、等级、位置、触发依据摘要、关联对象、建议措施、响应时限与责任单位。责任分派应与项目组织结构与分包界面一致。

8.5.2 处置记录

处置过程应形成可追溯记录，至少包括：处置措施、执行时间、执行人、现场照片/视频、参数调整记录、复测任务与结果。对关键质量与环保预警，处置记录宜包含复测数据或第三方监测数据。

8.5.3 复核与销项

销项应由独立复核人员确认。复核内容至少包括：指标回归、差值收敛、敏感区风险解除或数据恢复正常等。销项应关联数据版本、模型版本与阈值版本，并形成归档包。

8.5.4 复盘与优化

系统应支持预警回放与复盘分析，输出误报/漏报分析、阈值合理性评估、处置效率分析与改进建议，并纳入规则/阈值/培训/组织优化的闭环。

9 成果表达与交付要求

9.1 成果体系总体要求

系统成果应满足“可验收、可归档、可复核、可追溯”的要求，成果体系应包括数据成果、模型成果、分析成果与过程证据成果。成果类型与交付内容见表4。成果交付内容应符合表4的要求。

表4 成果类型与交付内容

成果类型	交付内容示例	主要用途	交付频次建议
数据成果	原始与清洗数据、测深成果、环境监测数据、工况数据	复核追溯、审计与归档	日/周/阶段
模型成果	现状地形模型、设计目标模型、差值模型、版本记录	质量控制与验收	阶段/验收
分析成果	超欠挖分布、断面对比、回淤评估、环保趋势分析	决策与整改	日/周/专项
过程证据	预警记录、工单闭环、处置证据链、复测记录、日志审计	合规与追责	实时/阶段
报表与归档包	日报月报、阶段总结、验收资料包	管理与验收	周/月/验收

9.2 成果表达要求

系统应支持二维与三维成果表达，并支持按施工分区、时间范围与预警类型筛选。质量成果应支持差值热力表达、断面对比图与问题清单导出；环保成果应支持监测曲线、超限统计与影响范围提示；进度成果应支持计划—实际对比与偏差趋势展示。成果表达应标注基准信息、时间范围与版本信息。

9.3 成果文件格式与命名

系统应规定成果文件格式与命名规则，宜支持常用格式。命名规则应包含项目、分区、成果类型、时间范围与版本号，保证可归档与可检索。

9.4 交付与验收衔接

系统交付成果应与项目质量验收、计量支付、环保核查与监理旁站记录等业务衔接。用于验收判定的成果应具备可复核的原始数据链路与处理记录，并明确责任主体与签认流程。

10 运行维护与安全要求

10.1 运维总体要求

系统上线运行后应建立覆盖“平台—边缘—终端—网络—模型—数据”的全栈运维体系，确保系统连续稳定运行、关键数据持续可用、预警闭环可执行。运维体系应包括组织职责、运维制度、SLA指标、故障处置流程、备份恢复策略、版本管理与持续优化机制。

运维组织宜至少包含：建设单位（或业主）信息化管理角色、施工单位生产与测量负责人、系统集成方运维负责人、现场设备维护人员与数据/模型管理员。运维职责边界应清晰，关键岗位应落实值守与替岗机制。

10.2 运维监控

系统应建立运行监控指标体系，至少包括：

- a) 系统可用性：平台服务可用性、关键功能可用性；
- b) 数据在线率：定位、工况、测深、环境等关键数据在线率；
- c) 时效指标：端到端数据延迟、预警触发时延、工单派发时延；
- d) 质量指标：数据有效率、异常占比、补传比例；
- e) 模型健康度：模型推理成功率、输出稳定性、版本命中情况；
- f) 存储与资源：CPU/内存/磁盘、带宽、边缘缓存占用与回传积压。

10.3 设备管理、校准与巡检

系统应对测深设备、定位与姿态设备、产量计量设备、环境监测设备、边缘网关、通信设备等建立资产台账，至少包含设备型号、序列号、安装位置、责任人、校准周期、维护记录与寿命管理信息。关键设备应建立校准计划并落实校准记录可追溯。

现场巡检应覆盖：供电与防护、固定安装牢固性、连接线缆与密封、防腐与防水、设备自检状态、数据上报与时间同步状态。对潮湿、盐雾、冲击振动环境，应采取针对性防护措施，并将防护措施纳入巡检表。

10.4 数据与模型运维

10.4.1 数据运维

数据运维应包括：数据字典维护、字段变更管理、数据质量监控、缺失与异常处置、数据补传与标记、关键数据人工复核机制。对用于质量验收与计量支付的数据，应建立“数据冻结”机制，冻结后仅允许追加说明与勘误记录，不得直接覆盖原始记录。

10.4.2 模型运维

模型运维应包括：模型版本管理、上线审批、灰度发布、回滚机制、模型参数与阈值校准、模型输出一致性检查与误报/漏报复盘。模型更新应与数据版本、施工阶段变化与设备能力变化相匹配，并形成更新记录与影响评估结论。

10.5 备份恢复与应急保障

系统应制定备份策略与恢复策略，至少包括：

- a) 数据备份频率、备份范围（原始数据、清洗数据、模型版本、阈值配置、工单与日志）；
- b) 备份介质与异地备份；
- c) 恢复时间目标与恢复点目标；
- d) 定期恢复演练与演练记录。

当发生断网、平台故障或关键设备故障时，应启用应急保障措施，确保关键预警与处置闭环能够以降级方式运行，并在恢复后补齐数据与记录。

10.6 网络与数据安全

10.6.1 权限与认证

系统应采用统一身份认证与分级授权管理，落实最小权限原则。对阈值调整、模型切换、成果导出、数据删除/冻结、预警闭环销项等关键操作应进行权限控制与审计留痕，必要时采用双人复核或双因素认证。

10.6.2 传输与存储安全

对外部链路 with 关键接口应采用传输加密，关键数据在存储侧宜采用加密或等效保护措施（适用时）。数据访问、导出与共享应按数据分类分级进行控制，并记录访问日志。

10.6.3 审计与追溯

系统应记录登录、访问、配置变更、阈值调整、模型版本切换、预警发布、工单处置、成果导出等关键审计日志。审计日志应具备防篡改能力或等效控制，满足追溯与责任认定需求。

11 评价与验收要求

11.1 验收总体原则

系统验收应以“可用、可控、可验、可追溯”为目标，采用场景化验收方式，即围绕典型业务场景完成从数据接入到模型输出再到预警闭环与成果交付的全过程验证。

11.2 验收内容

验收宜至少包括以下内容：

- a) 架构与功能符合性：系统分层架构与功能模块满足第5章要求；
- b) 数据与接口符合性：时空基准统一、数据字典与编码规则、质量控制与接口安全满足第6章要求；
- c) 模型与更新符合性：模型体系构成与关联关系与图2相符，模型精度分级与更新机制满足第7章要求；
- d) 分析与预警闭环：预警分级与处置要求符合表3，关键场景闭环可演练、可留痕、可销项；
- e) 成果交付：成果类型与交付内容符合表4，成果文件可复核、可追溯、可归档；
- f) 运维与安全：运维监控、SLA、备份恢复与审计能力满足第10章要求。

11.3 验收方法

验收方法宜采用：

- a) 文档审查：实施方案、数据字典、接口文档、模型说明、阈值与规则配置、运维制度与安全制度；
- b) 现场核查：设备安装、数据上报、时间同步、基准一致性、边缘缓存与补传；
- c) 联调测试：接口联通、数据完整性与一致性、权限与审计；
- d) 场景化演练：按质量控制、环保管控、进度偏差、数据质量异常等典型场景完成预警闭环；
- e) 抽样核验：抽取若干分区、若干测深批次与若干预警工单核验其数据链路证据链；
- f) 性能测试：并发、时延、弱网降级、补传与恢复能力测试。

11.4 验收输出与整改闭环

验收应形成验收报告，至少包括：验收范围、测试记录、问题清单、整改要求、整改完成情况与最终结论。对影响安全、质量或环保合规的重大问题，应在整改通过前不得投入正式使用。

11.4.1 运行评价与持续评估

系统上线后应开展运行评价，评价指标宜包括：

- a) 数据在线率、延迟、有效率与异常占比；
- b) 预警命中率、误报率、漏报事件回溯；
- c) 工单闭环率、平均响应时长、超时率与重复发生率；
- d) 质量偏差收敛效率、环保超限事件减少情况、进度偏差改善情况；

e) 系统可用性与故障统计。

运行评价结果应作为阈值与规则优化、模型校准与运维改进的依据，并形成持续改进记录。

全国团体标准信息平台