

智慧水利视角下工程建设现场数字化监管体系构建

任冰心

新疆农发集团人才科技有限公司 新疆 图木舒克 844000

摘 要：智慧水利的纵深发展对工程建设现场监管提出了感知泛在、分析智能、决策协同的全新要求。当前施工现场监管面临数据孤岛、模型割裂与响应滞后三重困境，其根源在于业务逻辑的碎片化与数据治理的浅层化。本文基于智慧水利“感知—认知—决策—执行”闭环框架，提出工程建设现场数字化监管体系的层次化构建路径，涵盖多源感知融合层、数据中台与数字孪生底座、智能预警与辅助决策引擎以及多主体协同响应机制。重点阐释数据驱动的监管逻辑转型、模型驱动的风险预判能力重塑以及平台驱动的治理结构优化。研究认为，数字化监管的本质不是技术叠加，而是监管权力关系与信息流结构的重构，需要同步推进标准规范体系与组织适配机制建设，方能实现从“被动记录”向“主动治理”的范式跃迁。

关键词：智慧水利；工程建设现场；数字化监管；数据中台；智能预警

引言

水利工程建设具有投资规模大、建设周期长、地质条件复杂、安全风险高等显著特征，其现场监管长期依赖人工巡查、定期报表和事后追溯等传统手段。随着“数字中国”与“智慧水利”战略的深入推进，水利部明确提出构建“2+N”智慧水利体系，强调数字孪生流域与水利工程同步建设，这为工程建设现场的监管模式革新提供了技术牵引与政策依据。然而，现实中的现场数字化监管实践往往陷入“设备堆叠”与“界面翻新”的误区，感知终端各自为政、数据系统互不连通、预警模型脱离工况，致使数字化工具未能真正提升监管效能。究其根本，在于缺乏从智慧水利全局视角出发的系统性体系设计，将数字化监管简单理解为技术应用，而忽视了其作为管理范式的内在逻辑变革。本文试图回答的核心问题是：在智慧水利的整体框架下，工程建设现场数字化监管体系应当如何构建？

1 现场监管的现实困境与逻辑反思

1.1 三重困境的深层表征

当前工程建设现场监管面临的困境可概括为“数据烟囱”“模型孤岛”与“响应迟滞”。所谓数据烟囱，是指视频监控、位移监测、渗流观测、环境气象、人员定位等各类感知系统由不同部门在不同时期分批建设，数据格式、传输协议、采集频率互不兼容，形成物理上并置、逻辑上隔绝的信息碎片。模型孤岛则体现为安全评估模型、进度预测模型、质量判别模型各自独立运行，缺乏数据交互与结果互认机制，同一组监测数据在

不同模型中可能得出相互矛盾的结论。响应迟滞表现为从异常信号出现到现场处置指令下达，中间历经数据上报、人工研判、层层审批等环节，时效性严重不足，尤其在高边坡失稳、深基坑涌水等突发险情中，这种延迟往往意味着处置窗口的错失。

1.2 困境的根源剖析

上述困境并非单纯的技术落后所致，其深层根源在于两个层面的错位。其一是监管业务逻辑与数据技术逻辑的割裂：传统监管以工序为单位、以责任划分为主线，而数据技术以连续流、关联性为特征，两者之间缺乏有效的映射与转换机制。其二是数字化建设的“项目制”思维与监管需求的“持续性”特征相悖，各参建单位倾向于采购独立的数字化子系统以满足合同考核，而非从全生命周期视角构建统一的数据生态^[1]。更深层地，监管权力的碎片化——业主、监理、施工、设计、政府监督各方各掌一部分数据、各有各的信息发布渠道——使得数据共享不是技术难题，而是利益与信任难题。

1.3 智慧水利视角下的逻辑转向

智慧水利的核心要义在于“透彻感知、全面互联、深度挖掘、智能应用”，其本质是水利系统的全要素数字化、全流程智能化、全主体协同化。将这一逻辑投射到工程建设现场，意味着监管体系必须完成三个转向：从“点状监测”转向“面域感知”，即不再孤立监测若干指标，而是构建覆盖地形、结构、水文、气象、施工行为的多维感知场；从“阈值报警”转向“态势研判”，即不再依赖单一参数超限触发警报，而是通过

多源数据融合识别风险演化趋势；从“层级上报”转向“扁平响应”，即压缩信息传递链条，让预警信息直达决策与执行终端。这三个转向共同指向一个核心命题：数字化监管体系的构建必须以数据逻辑重塑管理流程，而非在旧有流程上叠加新工具。

2 数字化监管体系的层次化架构

基于智慧水利“感知—认知—决策—执行”的闭环逻辑，本文提出工程建设现场数字化监管体系的四层架构，各层之间通过标准化的数据接口与业务协同协议实现纵向贯通。

2.1 多源感知融合层：从单一信号到立体感知场

感知层是监管体系的物理基础，其构建重点不在于感知设备的种类与数量堆砌，而在于实现异质感知信号的时空配准与语义融合。具体而言，需将北斗/GNSS 位移监测、阵列式渗压计、分布式光纤应变传感器、无人机倾斜摄影、物联网环境气象站、智能安全帽定位终端等异构感知源纳入统一的时间基准与空间坐标系，并通过边缘计算节点完成原始数据的清洗、校准与初步特征提取^[2]。该层的关键设计原则是“感知即治理”——感知数据的质量（精度、频率、完整性）必须满足后续分析与决策的需求，而非仅仅满足“有数据”的形式要求。为此，应建立感知设备的在线自诊断与冗余校验机制，确保感知场在不同工况条件下的鲁棒性。

2.2 数据中台与数字孪生底座：构建统一数据资产

数据中台的核心功能并非简单的数据汇集，而是完成多源异构数据的标准化治理、关联建模与资产化管理。在这一层，需要制定统一的数据编码体系与元数据标准，将地质勘察资料、设计图纸、施工日志、监测序列、视频流等结构化与非结构化数据进行实体关联，形成以工程构筑物为索引的数据图谱。基于此，数字孪生底座通过 BIM+GIS 融合技术构建施工现场的三维数字镜像，并将实时感知数据动态映射至模型中的对应构件与区域。需要强调的是，数字孪生不仅服务于可视化展示，更关键的是提供空间计算与时空分析能力——例如，通过模型比对设计标高与实际开挖面的差异、通过剖面分析推演浸润线变化对坝体稳定性的空间影响。数据中台与数字孪生的结合，本质上是将监管对象从“图纸上的设计”转化为“数据中的活体”，使每一方土石、每一根锚索都具有可追溯、可分析的数字身份。

2.3 智能预警与辅助决策引擎：从数据到研判的跃迁

该层是监管体系实现“智能”的核心环节，其设计逻辑应超越传统的单指标阈值法，转向基于多源数据融合的风险态势评估模型。具体技术路径包括：利用时序数据分析建立施工期变形、渗流等关键指标的动态基线，通过统计过程控制识别异常波动模式；运用机器学习方法（如随机森林、梯度提升树）构建多因素耦合的风险分级模型，综合考量地质条件、施工强度、气象影响、历史事故案例等异质信息；开发基于知识图谱的隐患推理引擎，将规范条文、专家经验、工程案例转化为可计算的知识网络，实现从“数据异常”到“可能致灾情景”的语义推理。该层的关键不在于算法先进性，而在于模型的可解释性与可更新性——监管人员需要理解预警信号的生成逻辑，并能够在施工条件变化时对模型进行迭代校准。因此，决策引擎应配套模型管理模块，支持参数调整、特征增减与版本回溯。

2.4 多主体协同响应机制：闭环执行的制度保障

数字化监管的最终价值体现在响应行动的及时性与有效性。该层构建以预警信息流为驱动、以责任主体为节点的协同响应网络。具体设计包括：建立分级预警—分级响应的映射规则，不同预警等级对应不同的通知范围、处置流程与上报要求；开发移动端与桌面端协同的应急调度平台，支持任务派发、现场取证、处置反馈的全流程留痕；构建基于区块链或分布式账本的响应记录存证机制，确保每个环节的责任不可篡改^[3]。但必须认识到，技术平台只是载体，响应效率的提升根本上依赖于组织流程的重构——需将数字化监管要求嵌入各参建单位的岗位职责与考核体系，明确监理单位对预警处置的监督责任、施工单位的主体执行责任、建设单位的资源保障责任，以及政府监督部门的远程抽查责任。只有技术与制度双轮驱动，才能形成“感知—预警—响应—反馈—优化”的完整闭环。

3 体系构建的关键支撑与实现路径

3.1 业务流程再造与组织适配

传统的线性化、分段式管理流程中，信息在各环节之间逐级传递，决策链条长、响应速度慢。数字化条件下，应推动流程向并行化、扁平化方向重构：将质量验评、安全巡查、材料报验等高频事项的审批流和消息流搬到线上，减少纸质文件流转和线下签字环节；将日常监管数据的填报、审核、统计合并在一个数据流中，实现“一次录入、多方共享”；将预警处置流程与现场作业流程紧密衔接，当预警发生时，系统自动通知相关责任人并限时要求反馈，超时未响应则逐级上报，形成刚性约束。与此相适应，组织层面的管理职责和岗位设

置也需调整,应设立数据管理员、系统运维专员等新角色,明确各岗位在数据采集、审核、分析、处置各环节的权责边界,避免“技术上线、管理脱节”的局面。

3.2 标准规范体系与制度框架

标准规范层面,除前文所述的数据标准外,还需制定接口标准(规定不同厂商设备与平台之间的通信协议)、安全标准(规定数据加密、访问控制、日志审计等方面的技术要求)和运维标准(规定系统日常巡检、备份恢复、故障处理的操作规程)。制度框架层面,应修订完善水利工程建设现场监管的相关管理办法,将数字化监管要求纳入合同条款和考核指标体系,明确各参建单位使用数字化平台的法定义务和责任边界;建立数据质量责任制,对故意瞒报、漏报、篡改数据的行为制定处罚细则;建立数字化监管效能评估制度,定期对系统的覆盖率、在线率、预警准确率和处置及时率进行量化考核,将评估结果与参建单位的信用评价联动挂钩。

3.3 信息安全与数据治理

工程建设现场数据涉及工程结构参数、施工工艺细节、人员身份信息敏感内容,一旦泄露或被恶意篡改,不仅影响监管公信力,更可能危及工程安全。因此,安全防护必须贯穿体系全层级:感知层需加强终端设备身份认证和数据加密,防止非法接入和数据窃听;传输层采用VPN或专用通道,并部署入侵检测系统;分析层和决策层实施严格的访问权限管理,按最小必要原则授予用户数据查看和操作权限;反馈层对移动端通信进行安全加固^[4]。数据治理方面,应建立数据分级分类管理制度,区分公开数据、内部数据和涉密数据,分别采取不同的存储和共享策略。同时,制定数据备份和灾难恢复预案,确保在极端情况下体系能够快速恢复基本功能,保障监管工作不中断。

3.4 人才培养与迭代优化

当前水利工程建设现场的管理人员、技术人员和操作工人普遍存在数字技能参差不齐的问题,需制定分层分类的培训方案:对管理层重点培训系统操作、数据解读和决策应用能力,对一线人员重点培训数据采集终端使用、移动端填报流程和预警响应规范,对运维团队

重点培训系统维护、故障排除和数据分析基础。培训方式可采用线上微课、现场实操、考核认证等多种形式,并建立常态化考核机制。此外,数字化监管体系不应是一成不变的静态系统,而应建立迭代优化机制,定期收集用户反馈、分析系统运行日志、评估预警模型的准确率,据此对数据阈值、分析算法、界面交互等进行持续调整和升级。同时,密切跟踪人工智能、区块链、5G-A等前沿技术的发展态势,适时将成熟技术引入体系,使数字化监管能力与智慧水利的整体演进保持同步。

4 结语

智慧水利为工程建设现场监管提供了超越“工具升级”的范式变革机遇。本文所构建的四层数字化监管体系,其理论贡献在于揭示了技术架构与治理逻辑之间的内在统一性:感知融合层解决“看得全”的问题,数据中台与孪生底座解决“认得准”的问题,智能决策引擎解决“判得快”的问题,协同响应机制解决“管得住”的问题。四者环环相扣,任何一层的缺失或薄弱都将导致整个体系的功能折减。更为关键的是,本文强调数字化监管的成功与否,最终取决于监管权力的数据化重塑——将传统的科层制信息传递转变为扁平化、透明化的数据共享网络,将经验驱动的个人判断转变为模型辅助的集体决策。这一转变不可能一蹴而就,需要在标准规范、组织适配、安全保障等方面持续投入与迭代优化。唯有秉持系统思维,超越技术决定论,方能真正构建起与智慧水利战略目标相匹配的工程建设现场数字化监管新格局。

参考文献

- [1] 张建云,刘九夫,金君良.智慧水利的关键技术与应用展望[J].水利学报,2021,52(12):1387-1398.
- [2] 程晓陶,黄金池.数字孪生技术在水利工程全生命周期管理中的应用框架[J].水利水电技术,2022,53(8):1-10.
- [3] 王浩,王建华,秦大庸.基于数据驱动的水利工程安全智能监测体系研究[J].水力发电学报,2023,42(3):1-12.
- [4] 陈祖煜,汪小刚,孙平.水利工程施工现场风险智能识别与预警技术综述[J].岩土工程学报,2022,44(6):985-996.