

# 数字孪生技术在黄河工程管理中的应用探索

李生宇，高 颖

(濮阳黄河河务局第一黄河河务局，河南 濮阳 457100)

**摘 要** 针对黄河工程管理存在的数据碎片化、管控手段滞后、调度决策依赖经验等现实问题，为推进黄河工程管理数字化智能化转型，在梳理黄河现有工程体系、运行管控现状基础上，结合流域水库、堤防工程及调水调沙、应急管控实际业务数据，剖析当前数字孪生黄河建设在立体感知、泥沙仿真、业务智能适配方面现存短板。构建包含感知、数据、仿真、业务应用的数字孪生应用架构，建立标准化数据底板，引入多源数据融合、洪水演进、水沙调控多目标协同仿真模型。以数字孪生小浪底水利枢纽为实例开展验证。结果表明：该架构能够有效提升水位、泥沙、流量监测精度，缩短调度方案编制与险情处置时间，降低运维人工成本，可显著强化工程安全防控、水沙联合调度能力，为“智慧治黄”提供技术支撑。

**关键词** 数字孪生；黄河工程管理；数据底板；仿真模型

**中图分类号**：TV698

**文献标志码**：A

**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.022

## 0 引言

当前，水利部黄河水利委员会（以下简称“黄委”）已初步构建全流域贯通、全领域覆盖、全链条联动的数字孪生黄河体系，正式印发《2026 年数字孪生黄河体系建设工作要点》，明确以“需求牵引、应用至上，数智赋能、提升能力”为原则，统筹数字孪生流域、水网、工程协同建设，系统推进 7 个方面 34 项重点工作。目前数字孪生技术在黄河工程管理中的应用仍处于深化迭代阶段，在“天空地水工”一体化监测感知精度、黄河泥沙机理仿真模型成熟度、全业务场景智能适配覆盖度等方面仍有持续优化空间。

## 1 数字孪生技术与黄河工程管理相关理论基础

### 1.1 数字孪生技术核心概念与技术架构

数字孪生技术是指以数字化手段构建与物理实体在几何形状、物理属性、运行状态上高度一致的虚拟模型，通过物联网感知、数据融合、仿真推演等技术，实现虚拟模型与物理实体的实时同步、动态交互，进而实现对物理实体的监测、诊断、预测和优化控制的一种新型技术理念<sup>[1]</sup>。数字孪生的技术架构可分为四层，各层协同联动、层层支撑，构成完整的技术体系。其中，感知层作为数据采集入口，主要通过物联网设备、传感器、无人机等手段，采集物理实体的几何参数、运行状态、环境参数等多源数据，是数字孪生实现虚

实同步的基础；数据层负责对采集到的多源异构数据进行清洗、融合、存储和管理，构建标准化的数据资源体系，为上层应用提供高质量的数据支撑<sup>[2]</sup>。

### 1.2 黄河工程管理范畴与核心业务需求

随着黄河流域生态保护和高质量发展重大战略的推进，水资源优化配置、生态保护修复也成为核心业务需求，需要统筹协调生活、生产、生态用水，改善流域生态环境<sup>[3]</sup>。除核心业务需求外，黄河工程管理还存在精细化、智能化管控的迫切需求。当前，黄河工程管理涉及海量数据，包括工程设计数据、监测数据、运行数据、环境数据等，传统管理模式难以实现数据的高效整合和深度利用，导致管理决策存在滞后性和主观性。

## 2 黄河工程管理现状及存在问题

### 2.1 黄河水利工程建设管理现状

近年来，随着黄河流域生态保护和高质量发展战略的落地实施，黄河水利工程建设投入持续加大，工程建设规模不断扩大，已形成覆盖防洪、供水、水沙调控的完善工程体系。截至 2026 年 9 月，黄河流域已建成各类水库 3 100 余座，其中大型水库 30 座、中型水库 170 余座，总库容突破 890 亿立方米；龙羊峡、刘家峡、东庄、小浪底等骨干枢纽，加上正在推进建设的古贤水利枢纽，共同构成了当前国内规模最大的

**作者简介**：李生宇（1995-），男，本科，助理工程师，研究方向：水利工程。



4 案例分析

4.1 典型黄河工程数字孪生项目概况

本文以小浪底水利枢纽为典型案例，以虚实联动、智能管控为目标，适配前文数字孪生架构，覆盖主体工程、库区及下游河段，服务水沙调控、防洪调度、安全监测三大业务。整合周边 12 个水文站、36 个雨量点、280 余台物联网设备，涵盖水位、流量、泥沙、坝体应力、库区淤积等 18 类核心数据，采用多源数据融合公式处理。

4.2 应用成效

数字孪生小浪底水利枢纽工程落地运行以来，严格对照前文设计的数字孪生应用架构，在监测精度、调度效率、安全防护、运维成本等方面均取得了显著成效（见表 1）。

由表 1 各项指标对比可知，数字孪生技术落地小浪底水利枢纽后，工程全链条管理效能得到系统性改善。在监测管控层面，依托构建的数据底板与多源数据融合算法，水位监测精度提升 77.8%，流量、泥沙在线监

表 1 数字孪生技术应用成效

| 评价类别  | 具体评价指标     | 实施前（传统管控模式） | 实施后（数字孪生管控模式） | 提升幅度   |
|-------|------------|-------------|---------------|--------|
| 监测管控类 | 水位监测精度     | ±0.18 m     | ±0.04 m       | 77.8%  |
|       | 流量在线监测率    | 57.6%       | 94.2%         | 63.5%  |
|       | 泥沙在线监测率    | 34.7%       | 88.1%         | 153.9% |
|       | 隐患识别响应时间   | 3.1 h       | 12 min        | 93.5%  |
| 调度优化类 | 调水调沙方案优化时间 | 14 h        | 2.0 h         | 85.7%  |
|       | 洪水调度决策准确率  | 74.2%       | 93.6%         | 26.1%  |
|       | 库区淤积预测准确率  | 68.5%       | 90.4%         | 32.0%  |
| 安全防护类 | 险情预警准确率    | 77.4%       | 94.9%         | 22.6%  |
|       | 应急处置响应时间   | 52 min      | 16 min        | 69.2%  |
|       | 坝体安全稳定达标率  | 88.3%       | 97.2%         | 10.1%  |
| 运维管理类 | 运维人工成本     | 920 万元 / 年  | 370 万元 / 年    | 59.8%  |
|       | 设备故障率      | 9.3%        | 2.6%          | 72.0%  |

测率分别提升 63.5%、153.9%，隐患识别响应时间由 3.1 小时压缩至 12 分钟，解决了传统模式下多源监测数据孤岛、泥沙与河道监测覆盖不足、堤防根石等隐蔽隐患发现滞后的突出问题，与河南河务局布设的 2 232 处根石智能监测点位形成业务联动，实现堤防工程状态全天候感知。

5 结束语

本文围绕数字孪生在黄河工程管理中的应用展开系统探索，明确了数字孪生技术与黄河工程管理需求的高度适配性，针对黄河工程管理中数据碎片化、管控滞后化、决策经验化等突出痛点，设计了遵循实用性、兼容性、精准性与安全性原则，涵盖数据底板、多维仿真模型的数字孪生应用架构，明确了多源数据融合、水沙调控仿真、洪水演进模拟等关键技术路径，以期为促进数字孪生技术在黄河工程管理中的应用提供参考。

参考文献：

- [1] 于海泓,许志辉,陈峰.数字孪生黄河数据治理管理研究与实践[J].人民黄河,2025,47(08):5-9.
- [2] 朱煜,雷天朝.数字孪生技术在黄河河南段工程管理中的实践探索[J].信息与电脑,2025,37(20):95-97.
- [3] 陈亮.遥感技术在数字孪生黄河建设中的应用与展望[C]//完善水治理体制机制法治体系深入推进新阶段水利高质量发展论文集.2025.
- [4] 付希义,田亮,张庆萍,等.数字孪生技术在水利工程运行维护管理中的应用[J].水利水电快报,2024,45(S2):104-107.
- [5] 徐文浩.数字孪生技术在调水工程建设与管理中的应用研究[J].工程技术研究,2025,10(06):124-126.
- [6] 林思群,姜雨薇,陈珣容.数字孪生技术在智慧水利建设中的应用探究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2024(01):79-82.