智能监测系统在河南黄河堤防中的应用实践

李思语[1]，黄亚楠[2]

（1. 豫西黄河河务局孟津黄河河务局，河南 洛阳 471000；
2. 濮阳黄河河务局第一黄河河务局，河南 濮阳 457100）

摘 要 黄河河南段地上悬河特征显著，堤防隐患多发，传统人工管护存在监测盲区大、预警滞后、效率偏低等问题，难以满足精细化防汛管控需求。为提升堤防智慧防控水平，相关部门依托数字孪生水利建设布局，搭建天空地水工一体化智能监测系统，实现全域堤防全天候闭环监测。通过 2024-2026 年实测应用与典型河段对比验证，该系统可弥补水下及深层监测缺陷，险情上报时长缩短 97.4%，有效提升隐患预判与应急处置能力，实现堤防管护由被动抢险向主动防控转型。本文通过总结系统应用成效，分析现存短板并提出优化对策，以期为黄河堤防及同类水利工程智慧化建设提供参考。

关键词 黄河堤防；智能监测；数字孪生；堤防管护

中图分类号：TV871.2 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.007

0 引言

堤防是防洪保安全的重要工程。鉴于堤防决口对公众造成的危害性，国内外对防御洪水的堤防大都设置了监视其安全运行的监测设备[1]。黄河河南段横贯三门峡、洛阳、郑州、开封、濮阳等 8 市，是下游地上悬河起始段，堤防工程作为防洪第一道屏障，沿线分布 197 处险工、300 余处临河易冲刷堤段，根石走失、堤身渗漏、坝岸坍塌、水下冲坑等隐患多发，直接威胁黄淮海平原防洪安全。长期以来，堤防管护依赖人工徒步、车辆巡查，仅能观测堤面可视病害，水下根石、深层土体位移无法常态化监测；汛期多暴雨、高水位叠加，人工巡查覆盖面有限、险情上报滞后，易错失抢险窗口期[2]。本文选择 2024-2026 年河南黄河完整运行监测数据，对梳理系统建设架构、运行模式与应用成效，客观分析落地难点并给出优化方案，具有极强的工程实操价值。

1 工程概况与监测需求

1.1 河段工程条件

河南黄河干流堤防总长 565 km，标准化堤防 482 km，未达标薄弱堤段 83 km；控导、险工坝垛合计 5 690 道，穿堤涵闸 26 座，北金堤滞洪区配套堤防 128 km。工程核心风险分为四类：

1. 坝岸根石冲刷走失，调水调沙期间大流量、高流速水流持续顶冲、淘刷坝垛根基，水下根石易出现松动、位移、悬空塌落，形成隐蔽性冲坑，无地表直观病害，人工巡查无法识别[3]。

2. 堤身渗流安全隐患，汛期高水位长时间浸泡堤体，水体沿土体孔隙渗透扩散，易引发堤身散浸、局部管涌、流土等病害，持续发展将直接造成堤体塌陷、滑坡。

3. 堤体不均匀变形失稳，老旧堤段土体固结时间短、土质混杂，在水压力、土体自重及外部荷载作用下，易产生垂直沉降、深层水平位移，诱发局部滑坡险情[4]。

4. 人为及外部环境风险，滩区非法取土、河道乱堆渣、违规搭建浮桥、破坏堤防植被等违法行为屡禁不止，直接破坏堤防工程完整性与河道行洪条件。

1.2 传统监测模式存在缺陷

在智慧监测系统建成投运前，河南黄河堤防管护长期沿用“人工巡查 + 季度探摸 + 汛期抽检”的传统管护模式，虽能满足基础巡护需求，但无法适配精细化、前置化、常态化的现代防汛管控要求[5]。日常堤防巡查以管护人员徒步、驱车巡堤为主，每日仅开展 1 次全覆盖巡查，仅可识别堤面裸露裂缝、表层坍塌等可视病害，对水下坝垛根基、堤身深层土体的隐蔽隐患完全存在监测盲区。水下根石状态、河床冲坑发育情况仅依靠季度人工涉水探摸，监测频次极低，无法捕捉调水调沙期水沙动态变化引发的瞬时冲刷隐患。

作者简介：李思语（1993-），女，本科，工程师，研究方向：水利工程。

堤身渗流、土体变形无常态化监测设备，仅在汛期高水位期间开展不定期人工抽检，监测数据连续性差、时效性不足，无法实现隐患动态追踪[6]。

2 智能监测系统总体架构与感知网络布设

2.1 系统总体架构

结合河南黄河堤防狭长带状、点位分散、野外工况复杂的工程特点，本次智能监测系统摒弃传统单一监测、局部布设的建设思路，采用分层模块化、全域协同的设计理念，整体构建感知采集层—云端计算层—业务应用层三级联动架构。

感知采集层作为系统的数据基础，重点搭建天空地水工一体化立体感知体系。利用地面高清视频、智能传感终端实现堤岸、坝垛工况的全天候实时采集；搭配水下无人测艇、移动式声呐设备，补齐水下冲刷、根石淘空的监测短板，彻底解决传统监测模式盲区多、覆盖不全的问题。

云端计算层为系统智能研判核心，依托黄河数字孪生“豫黄大脑”平台算力支撑，对前端多源异构数据进行统一清洗、筛选、去噪、存储与融合。通过搭载堤防专用AI识别算法、渗流变形预警模型、工程安全评价模型，自动甄别无效干扰数据，精准捕捉工程异常工况，量化研判堤防安全状态，为前端业务应用提供可靠的数据支撑与智能分析结果。

业务应用层面向各级管护与防汛部门的实操需求，搭建多终端协同应用体系。涵盖市级智慧指挥PC平台、基层“河务通”移动端APP、防汛应急会商大屏、防汛物资智能调度、隐患闭环管理等功能模块，实现监测可视化、预警精准化、处置流程化、管控闭环化，打通智能监测从“数据采集”到“现场落地”的“最后一公里”。

2.2 全域感知设备布设与参数统计

关注监测系统运行，加强全域感知布控，全时段采用精细化布控原则。结合黑港口、马渡等黄河堤防险段，设置高密度智能传感系统与水下高清监控设备；对工程设备较完善路段，采取定点时控，必须确保监控区域无盲区，有效降低运维成本。截至2026年5月，河南黄河地区全线路安装智能控防设备，具体感知设备及参数统计如表1所示。

3 智能监测系统核心业务功能

3.1 数字孪生可视化全景管控

系统整合堤防工程台账、实时监测数据、河道水情、气象数据、防汛物资、值守人员等87类业务数据，搭建全域565 km堤防精细化三维数字孪生模型，彻底替代传统纸质台账、二维工程图纸的粗放管理模式。平台可实现任意坝垛、堤段、涵闸的单点精准溯源，点击监测点位即可实时调取实时传感曲线、无人机巡检影像、水下三维地形扫描数据、历史隐患处置记录，实现堤防工程“一张图”智能化管控。

3.2 工程安全动态智能评价

系统内置适配黄河堤防的安全指数评价算法，摒弃单一指标研判模式，整合实时渗流压力、堤体沉降位移、河道水流参数、气象降雨四类共17项核心监测指标，自动量化计算0分～100分堤防安全指数，将工程状态划分为安全、基本安全、轻度风险、高风险四个等级。2026年相关部门开展汛前进行安全动态模型推演，精准锁定风险点，提前完成风险预防部署。

3.3 人机协同巡查与汛期应急预演

在日常管护中，系统依托智能监测数据自动研判堤段工况，针对无异常的稳定堤段减少人工巡查频次，

表1 河南黄河堤防智能监测感知设备布设统计表

监测维度	设备类型	布设数量	核心监测指标	采集周期
地面视频监控	高清AI摄像头、高空瞭望塔	878处+18座高空摄像头	河道水位、工程破损、人为破坏、浮桥违规作业	实时视频监控，异常工况AI即时抓拍上传
坝岸智能传感	位移、倾角、振动、含水率传感终端（智能石头）	1 962套	根石位移、坝体倾斜、水流冲刷振动、土体含水率变化	1 min自动采集，超限秒级预警
水下探测	多波束无人测艇、移动式声呐探测仪	22套移动监测站	水下冲坑深度、根石分布状态、河床高程演变、水下土体淘空范围	汛期每周常态化探测，险情触发自动复测建模
堤防深层监测	渗压计、沉降计、深层测斜仪	326组监测剖面	堤身渗流压力、垂直沉降量、深层水平位移、土体滑动趋势	5 min高频采集，数据连续实时上传

针对预警点位、风险区段自动规划最优巡查路线，一线人员依托手机 APP 完成现场复核、拍照上传、隐患销号，实现“智能预判、精准巡查、闭环管控”，全年人工巡查里程较传统模式下降 62%，极大地减轻了基层工作压力。

4 智能监测系统在典型河段中的应用成效分析

为了精准监测智能监控设备投放对河南黄河下游风险监控成效，选择开封黑岗口险工作为堤防智能监测系统应用试点，并将 2023 年年前采用人工管护与 2025 年后采用智能系统管护核心数据指标对比，直观展现试点河段系统监测与防汛成效，详见表 2。

4.1 开封黑岗口险工长期监测应用成效

开封黑岗口险工为黄河著名老险工，堤体建设年限久、土体结构复杂，高水位浸泡下渗漏、变形风险突出。本次系统在该区段布设 12 组深层渗流、沉降监测剖面，开展为期 24 个月的连续性常态化监测，获取了完整的水位—渗流—变形关联实测数据。系统通过大数据拟合分析，精准识别出高水位工况下的堤身渗漏敏感区段，为工程加固提供精准数据支撑。2025 年依托监测成果实施 PVC 防渗板桩专项加固工程后，同等水位条件下堤身孔隙水压力平均下降 41%，彻底消除了长期存在的管涌、散浸安全隐患，实现了从“被动抢险”到“精准治险”的转变。

表 2 试点河段系统投运前后管护核心指标对比表

评价指标	2023 年（纯人工管护）	2025 年（智能系统全覆盖）	改善幅度
单次险情确认上报时长	2.7 h	4.2 min	缩短 97.4%
年均人工巡查总里程	1 260 km	479 km	下降 62.0%
汛期提前预警隐患数量	13 处	87 处	提升 569.0%
险情处置平均耗时	112 min	36 min	缩短 67.9%
水下隐蔽隐患漏判率	38.6%	5.3%	下降 33.3%
年度一线管护人力投入	18 人·月	7 人·月	减少 61.1%

4.2 综合应用效益及应用实践总结

一是取得显著防洪成效，依赖技术打通监测盲区，提前规避风险。2024-2026 年汛期检测发生隐患共 87 处，没有产生重大安全隐患，确保了河南段堤防安全基础；二是取得明显管护效益，降低了人工巡查成本。对比 2023 年，2025 年河南黄河段总体堤防管护成本显著降低；三是堤防决策更加科学，连年实测应用智能系统提高了堤防监测精准性，有效规避了资源浪费，实现智能防控精细化与智慧化。

针对上述现场实操问题，结合黄河堤防管护长远需求，制定贴合一线、可落地的优化升级方案。一是强化设备防护与精细化运维，优化传感终端防水、防雷、防淤积防护结构，配套太阳能自供电模块，解决野外供电、防护难题；二是建立分区网格化运维台账，依托移动端实现故障自动预警、智能派单、维修闭环，缩短设备故障处置周期。

5 结束语

推进河南黄河段堤防智能监测系统应用工程较为复杂，然而在应对风险挑战、强化堤坝智能防控、保障河南段黄河流域安全上发挥重要作用。通过应用智能监测系统将先进技术与管理业务深度融合，创建数驱动与协同智能处理高校管理体系。未来，随着 5G/6G、物联网、人工智能、数字孪生等技术的发展，堤坝风险防控将朝着更加智能化与自动化的方向发展，逐步实现“无人值守、智能巡检、自主决策”的现代化管控模式，从整体上筑牢江河安澜的数字安全屏障。

参考文献：

[1] 毕华威,巩汝涛.生态护坡技术在黄河堤防工程中的应用实践研究[J].科海故事博览,2026(10):109-111.
[2] 安伯达,戴康,吴雅茹.黄河下游堤防工程中渗流控制技术优化与实践研究[J].城市建设理论研究(电子版),2026(05):187-189.
[3] 赵寿刚,李娜,张清明,等.黄河下游堤防现代化运行管理的创新路径与实践探索[J].人民黄河,2026,48(01):140-145.
[4] 岳亚超,张伟.黄河堤防养护管理主要问题及改进措施探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2025(36):45-47.
[5] 杨兆鹏,刘虎,黄玉恒.黄河山东段堤防工程无损检测技术集成应用[J].长江工程职业技术学院学报,2026,43(01):23-26.
[6] 马红旭,刘吉森.黄河岸防根基监测系统应用研究[J].山东水利,2024(05):63-65.