

# 新型水利工程智能安全监测系统研究

李伟

河北省水利工程局集团有限公司, 河北石家庄, 050000;

**摘要:**为解决传统水利工程监测系统痛点, 本文研究新型智能安全监测系统。构建“感知层—边缘层—云端层”三级架构, 集成多源数据融合、智能预警模型优化、极端工况应急保障等核心技术。通过典型工程应用验证, 系统实现全要素毫米级监测、异常秒级响应, 预警准确率超88%。研究成果有效提升工程安全管控能力, 推动水利管理向数字化、智能化转型, 具备广阔推广前景。

**关键词:** 水利工程; 新型智能安全监测系统; 设计

**DOI:** 10.69979/3060-8767.26.05.078

水利工程安全关乎流域防洪减灾与民生保障, 传统监测系统存在数据滞后、覆盖不全面、智能化水平低等短板, 难以适配复杂环境下工程安全管控需求。本文聚焦新型水利工程智能安全监测系统研发, 整合多源感知、边缘计算与AI预警技术, 构建三级架构体系, 旨在破解传统监测瓶颈, 为水利工程安全管理数字化转型提供技术支撑。

## 1 新型水利工程智能安全监测系统总体架构设计

### 1.1 架构设计理念与目标

针对传统水利监测系统数据滞后、覆盖局限、智能化不足等痛点, 新型系统以“全域感知、边缘智能、云端协同、精准预警”为核心理念, 构建立体化监测体系。核心目标为实现全要素24小时不间断监测、异常事件秒级识别告警、风险处置全链条闭环管理, 推动安全管控从“被动应对”向“主动预防”转型。

相较于传统系统, 其创新特征体现在: 分层分布式架构兼顾实时处理与深度分析, 多源数据融合提升识别准确性, 增量学习机制实现模型动态更新, 适配工程与环境演化需求。

### 1.2 三级架构体系组成

新型水利工程智能安全监测系统采用“感知层—边缘层—云端层”三级架构, 各层级功能定位清晰、协同联动高效, 形成完整的数据采集—处理—分析—应用链路。

感知层作为系统的数据源头, 承担全要素精准感知任务。基于水利工程不同监测对象特性, 构建多维度传感器网络: 针对坝体结构监测, 部署遥测引张线仪、遥测垂线座标仪、静力水准仪、渗压计、测缝计等, 实现坝体变形、应力、渗流等参数的毫米级采集; 针对环境

与水文监测, 配备雷达水位计、雨量计、水质传感器等, 实时捕捉水位、降雨量、水体指标等动态变化; 针对外部风险监测, 整合视频监控摄像头、入侵检测传感器等监测装置, 实现对人员入侵、非法采砂、生物危害等隐患的全面感知。传感器网络采用混合拓扑结构, 核心区域采用星型架构保障传输稳定性, 偏远区域采用LoRa等低功耗广域网技术构建自组织网络, 兼顾覆盖范围与能耗控制, 同时通过GPS授时与NTP协议组合实现多源数据的时间同步, 确保数据时空一致性。

边缘层作为系统的智能核心, 承担数据预处理与实时响应任务。基于设备研发的边缘计算终端, 集成轻量化AI算法与数据处理模块, 实现监测数据的本地实时分析与智能决策。边缘层核心功能包括三方面: 一是数据清洗与筛选, 剔除传感器噪声、异常值等无效数据, 提取关键特征参数; 二是实时智能识别, 通过嵌入轻量化图像识别模型, 实现游泳、钓鱼、非法采砂等高危行为的秒级识别与声光告警, 推动风险防范关口前移; 三是数据本地缓存与断点续传, 在网络中断等极端情况下保障数据不丢失, 网络恢复后自动同步至云端平台。边缘层的部署大幅降低了云端计算压力与数据传输带宽需求, 提升了系统在复杂环境下的响应可靠性。

云端层作为系统的决策中枢, 承担全局数据分析、模型训练与管理调度任务。构建“水利工程综合管理平台”, 整合多源监测数据与专业水利模型, 实现工程运行状态的全面管控。云端层核心功能涵盖: 一是大数据融合分析, 通过数据层、特征层、决策层三级融合策略, 整合感知层与边缘层数据, 挖掘多参数耦合关联特征, 精准研判工程安全状态; 二是智能模型训练与优化, 基于多个水利工程多年的历史数据样本, 训练优化专用图像识别模型与安全评估模型, 提升风险识别准确率与预警精度; 三是全流程管理与服务, 实现监测数据可视化

展示、风险分级预警发布、处置任务派发、责任追溯等功能,构建“预报—预警—预演—预案”四位一体的应急管理体系。

## 2 系统核心关键技术研究

### 2.1 多源数据融合与特征提取技术

水利工程监测数据具有多源异构、非线性、非平稳的特性,单一数据源难以全面反映工程安全状态,多源数据融合技术是提升系统监测精度的核心支撑。新型系统采用分层融合策略,实现数据信息的深度挖掘与有效整合。在数据层融合阶段,对不同传感器采集的原始数据进行标准化处理,统一数据格式与量纲,通过数据拼接形成全域数据集;在特征层融合阶段,针对不同类型数据提取差异化特征参数,如从位移时序数据中提取最大位移、位移速率、趋势项斜率等特征,从渗流数据中提取渗压梯度、渗流路径等特征,再通过主成分分析(PCA)进行降维处理,消除数据冗余,得到包含工程结构与环境状态的复合特征向量;在决策层融合阶段,整合边缘层实时识别结果与云端深度分析结论,通过加权投票法实现多模型决策协同,提升风险判断的可靠性。

针对水利工程风险的时空动态性特征,创新提出时空特征关联分析方法。基于GIS技术构建工程空间信息模型,将监测点数据与工程信息、水文地质分区等空间信息进行叠加融合,实现风险的空间定位与溯源。例如,通过关联坝体位移监测数据与软弱夹层分布信息,可精准识别潜在滑坡风险区域;通过耦合降雨量与渗流数据的时序变化特征,可揭示防渗体系失效的演化规律。时空特征关联分析有效破解了传统监测中“重数据采集、轻关联分析”的难题,为早期风险识别提供了有力支撑。

### 2.2 智能预警模型构建与优化

智能预警模型是实现工程风险精准预判的核心,新型系统采用“数据驱动+物理约束”的混合建模思路,兼顾模型预测精度与工程可解释性。针对水利工程不同风险类型,构建多维度预警模型体系:针对结构变形、渗流异常等渐变风险,采用LSTM神经网络模型,利用其记忆单元捕捉时序数据的长期依赖关系,实现风险趋势的精准预测,结合前期渗压与降雨数据,可提前48小时预测渗流异常,准确率达88%以上;针对裂缝、渗漏等局部缺陷,采用CNN卷积神经网络模型,通过卷积核提取图像数据的空间特征,实现坝体表面裂缝的自动识别与尺寸量化,识别准确率超过98%;针对强震、极端降雨等突发风险,构建基于物理机理的有限元模型,结合实时监测数据实现风险快速评估与应急响应。

为提升模型的适应性与鲁棒性,建立动态更新与自适应优化机制。通过增量学习算法,实时吸收新的监测数据与工程案例,在线调整模型参数,避免因工程结构老化、环境变化导致的模型精度下降;采用迁移学习方法,利用已建工程的历史数据预训练模型,再结合新建工程的少量实测数据进行微调,大幅缩短模型训练周期,降低数据依赖门槛。同时,构建分级分类预警指标体系,根据风险等级划分红色、橙色、黄色、蓝色四级预警,针对不同预警等级制定差异化响应策略,确保预警信息精准直达一线责任人,提升应急处置效率。

### 2.3 极端工况下应急保障技术

极端工况下的监测连续性与应急响应能力是衡量系统可靠性的关键指标。新型系统针对强震、断网、断电等极端场景,构建多维度应急保障体系。在通信保障方面,融合5G与北斗卫星通信技术,实现“天地一体”的无缝通信覆盖:正常工况下通过5G网络实现高速数据传输,在极端断网场景下自动切换至北斗短报文通信模式,保障监测数据与预警信息的稳定传输,如极端强降雨导致断网断电时,北斗卫星信道成功保障了监测数据的持续传输。在供电保障方面,采用“太阳能+锂电池+备用发电机”的混合供电方案,针对偏远监测站点优先采用太阳能供电,配备大容量锂电池保障阴雨天持续工作,关键节点部署备用发电机,确保极端情况下系统不间断运行。

针对强震等突发灾害,构建快速评估与应急响应机制。通过在边缘层集成地震触发识别模块,实现强震信号的实时捕捉与系统应急启动;基于AI代理模型快速计算震后大坝应力、位移等响应数据,在3分钟内完成工程安全状态全面“体检”,为震后应急处置提供科学依据。同时,系统预设各类极端工况的应急处置预案,通过数字孪生技术实现灾害演进过程的模拟预演,辅助管理人员制定最优处置策略,提升应急响应的科学性与高效性。

## 3 系统应用验证与效能分析

### 3.1 应用场景选取与测试方案设计

为验证新型水利工程智能安全监测系统的实用性与可靠性,选取大型水利项目典型应用场景开展实地测试。大型水利项目作为大型水利工程代表,具有结构复杂、监测点多、风险因素多样的特点,重点测试系统对大型坝体结构安全监测、极端水文条件下预警响应的效能,同时存在地理位置偏远、运维条件有限、传统监测手段滞后等问题,重点验证系统的低功耗、易部署特性

与规模化应用能力。

测试方案围绕系统核心功能设定三项关键指标：一是监测精度，对比系统监测数据与传统人工测量数据、高精度基准仪器数据的偏差；二是响应效率，统计异常事件从识别到告警的时间间隔，评估系统实时性；三是预警准确率，通过长期运行统计系统预警结果与实际风险事件的吻合度，验证模型可靠性。测试周期涵盖汛期、枯水期等不同水文季节，兼顾正常工况与极端天气场景，确保测试结果的全面性与客观性。

### 3.2 应用测试结果与效能评估

在实地应用测试中，系统表现出优异的监测与预警效能。坝体位移监测数据与基准仪器偏差小于 0.5mm，渗流、应力等参数监测精度满足 GB50021-2001《岩土工程勘察规范》要求；针对汛期水位骤升、人员违规靠近坝体等异常事件，系统平均响应时间仅为 2.3 秒，实现现场声光告警与远程信息推送的同步触发；运行期间共发出预警信息 17 次，其中 15 次准确对应实际风险隐患，预警准确率达 88.2%，有效避免了 2 起潜在安全事故。特别是在汛期极端降雨过程中，系统提前 72 小时预测坝体渗流异常，为运维单位及时采取防渗加固措施提供了充足时间，保障了工程安全运行。

偏远测点的测试中，系统的适应性与经济性得到充分验证。采用太阳能供电的传感器网络持续稳定运行超过 6 个月，日均能耗仅为传统监测系统的 15%；通过北斗短报文通信实现了偏远地区的数据稳定传输，解决了山区网络覆盖不足的难题；系统部署周期仅为 3 天，较传统监测系统缩短 60% 以上，且运维成本降低 50%。测试期间，系统成功识别非法进入行为 3 起、坝体局部渗漏 1 处，预警准确率达 90%，为基层水利工程安全管理提供了低成本、高效率的解决方案。形成了可复制、可推广的规模化应用模式。

效能对比分析表明，与传统监测系统相比，新型水利工程智能安全监测系统在监测精度、响应效率、预警准确率等核心指标上实现显著提升，同时大幅降低了部署与运维成本，尤其适用于不同规模、不同环境条件的水利工程，具备广阔的应用前景。

## 4 发展展望

未来，随着新一代信息技术与水利工程的深度融合，新型水利工程智能安全监测系统将向更智能、更协同、更绿色的方向发展。在技术创新方面，需进一步加强数字孪生技术的深度应用，构建物理实体与数字模型的实时映射与交互联动，实现工程全生命周期的智能化模拟与预演；探索区块链技术在数据安全与责任追溯中的应用，保障监测数据的真实性与不可篡改，强化各环节安全责任落实。在功能拓展方面，应推动监测系统与水利工程运维管理、水资源调度等业务的深度融合，实现“监测—评估—运维—调度”的全链条协同；加强跨区域、跨流域监测数据的共享与联动，构建全域水利安全监管网络，提升水旱灾害联防联控能力。在绿色低碳方面，需持续优化传感器与监测设备的低功耗设计，推广太阳能、风能等清洁能源供电方案，降低系统运行能耗；研发环保型监测设备与材料，减少对生态环境的影响，实现技术创新与生态保护的协同发展。

## 5 结束语

本研究开发的新型水利工程智能安全监测系统，借助架构革新与技术融合，切实突破了传统监测的局限。该系统在多场景下的成功运用，证实了其技术的可行性与实践价值。未来，需持续推进技术融合与标准构建，促进系统的规模化推广，以助力构建全域水利安全保障体系，为水利工程的高质量运维以及水安全战略的实施夯实技术基础。

### 参考文献

- [1] 赵一琦, 曾彬. 新型水利工程智能安全监测系统研究[J]. 科技与创新, 2025, (24): 80-82.
- [2] 向羽丰. 智能水网建设对水利工程管理效率提升作用的研究[J]. 水上安全, 2025, (17): 7-9.
- [3] 乔国祥. 水利工程管理中水闸安全监测与智能化运维技术研究[J]. 城市建筑空间, 2025, 32(S1): 365-366.
- [4] 张文豪. 智能监测系统在水利工程安全管理中的应用研究[J]. 河南水利与南水北调, 2025, 54(04): 84-85.
- [5] 马新江. 智能传感技术在水利工程安全监测及数据管理中的应用[J]. 大众标准化, 2025, (06): 48-50.