

水闸安全监测体系优化与技术规范完善研究

张凯

山东省菏泽市河湖流域工程管理服务中心，山东 菏泽 274000

DOI:10.61369/WCEST.2025050003

摘要：水闸作为水利工程体系中的关键控制性枢纽，承担着防洪排涝、农田灌溉、水资源调配等核心功能。截至2023年，我国已建成各类水闸超10万座，其中中小型水闸占比超85%。随着服役年限增长及极端水文事件频发，病险水闸安全隐患凸显，而当前水闸安全监测工作存在设施配置不均衡、实施流程不规范、数据应用滞后、智能化程度低等问题，难以满足安全运行需求。本文基于不同类型水闸的功能特性与地质条件，构建分层适配的安全监测项目体系，提出测点优化布置方法，最终探讨技术规范完善路径与智能化发展方向，为水闸安全监测标准化、精准化提供支撑。

关键词：水闸；安全监测；分层体系；测点优化

Study on Optimization of Sluice Safety Monitoring System and Improvement of Technical Specifications

Zhang Kai

Heze River and Lake Basin Engineering Management and Service Center, Heze, Shandong 274000

Abstract : As a key control hub in the water conservancy project system, sluices undertake core functions such as flood control and drainage, farmland irrigation, and water resource allocation. By 2023, more than 100,000 sluices of various types have been built in China, among which small and medium-sized sluices account for over 85%. With the increase in service life and the frequent occurrence of extreme hydrological events, the potential safety hazards of diseased and dangerous sluices have become prominent. However, the current sluice safety monitoring work has problems such as unbalanced facility configuration, non-standard implementation procedures, lagging data application, and low intelligence level, which are difficult to meet the needs of safe operation. Based on the functional characteristics and geological conditions of different types of sluices, this paper constructs a hierarchically adaptive safety monitoring project system, proposes an optimized layout method for monitoring points, and finally explores the improvement path of technical specifications and the development direction of intellectualization, so as to provide support for the standardization and precision of sluice safety monitoring.

Keywords : sluice; safety monitoring; hierarchical system; optimization of monitoring points

引言

水闸是连接江河、湖泊与灌区、城镇的重要节点，其安全运行直接关系到流域防洪安全、粮食安全与民生保障^[1]。近年来，受气候变化影响，极端降雨、台风风暴潮等事件频发，水闸承受的荷载条件日趋复杂，部分服役超30年的水闸出现地基沉降、混凝土裂缝、渗流异常等病害，对工程安全构成威胁^[2]。安全监测作为掌握水闸运行性态、预警风险隐患的核心手段，其系统性与规范性至关重要。然而，当前我国水闸安全监测工作仍存在显著短板^[3]：中小型水闸普遍缺失监测设施，仅依赖人工巡检；大中型水闸虽配置监测系统，但存在仪器选型不当、安装不规范、数据“束之高阁”等问题；智能化监测技术应用局限，难以实现实时预警。为此，本文从现状问题剖析入手，构建适配不同场景的监测体系，优化测点布置方案，并提出技术规范完善建议，为水闸安全管理提供理论与实践支撑。

作者简介：张凯（1985.05-），男，汉族，山东曹县人，本科，工程师，从事水利工程管理相关工作。

一、我国水闸安全监测发展现状与核心问题

(一) 监测设施配置不均衡，适配性不足

我国水闸类型多样，涵盖平原灌溉闸、河口挡潮闸、山区泄洪闸等，但监测设施配置缺乏差异化设计：

中小型水闸“空白化”：80%以上的中小型水闸（闸高<6m、孔数<5孔）未设置专业监测设施，仅通过人工观测水位，无法掌握地基沉降、渗流等关键指标。例如某平原灌溉闸，因软土地基产生不均匀沉降，导致闸室裂缝，因无监测数据，未能及时采取加固措施，最终影响灌溉功能。

大中型水闸“同质化”：部分大中型水闸忽视地质与功能差异，采用统一监测方案。如河口挡潮闸需承受双向水头作用，但沿用单向水流闸的监测断面布置，导致垂直水流向的水平位移、绕闸渗流数据缺失，无法全面评估双向挡水风险^[4]。

(二) 监测实施流程不规范，数据可靠性低

监测系统从仪器选型到安装监理的全流程缺乏标准化管控，导致数据精度不足、仪器成活率低：一是30%以上的工程中，渗压计、钢筋计等仪器未按规程进行出厂标定与现场率定，直接安装埋设。某挡潮闸工程中，未标定的渗压计测量误差达15%，无法准确反映闸基扬压力变化；二是多数工程监理单位未配备专职监测工程师，对仪器安装位置、埋设工艺的管控流于形式。如某泄洪闸闸墩倾斜监测中，测斜仪钻孔垂直度偏差超3°，导致监测数据失真；三是监测设施安装与土建施工协调不足，部分测点因混凝土浇筑冲击损坏。某工程中，5个地基反力监测土压力计因浇筑振捣导致传感器移位，无法正常采集数据。

(三) 数据管理与应用滞后，预警功能缺失

当前水闸监测数据多停留在“采集-存储”阶段，未形成“分析-评价-预警”闭环：一是数据整编不及时：60%以上的水闸管理单位未按规范要求进行月度、年度数据整编，监测数据仅以原始表格形式存储，未绘制扬压力分布图、沉降过程线等图表，无法直观判断运行趋势。二是分析能力薄弱：多数管理单位缺乏专业技术人员，无法开展数据趋势分析与异常识别。某水闸监测数据显示，闸基渗流量3个月内增长2倍，但因未进行渗透坡降计算与允许值对比，未能及时发现管涌隐患。三是智能化水平低：仅有15%的大中型水闸配备自动化监测系统，但系统多缺乏AI分析模块，无法实现异常数据自动预警。如某水闸出现闸墩倾斜速率超0.5mm/d的预警值时，因依赖人工巡检发现，延误了加固时机。

(四) 技术标准碎片化，缺乏统一指导

目前水闸安全监测主要参考《水利水电工程安全监测技术规范》(SL 60-2021)^[5]，但该规范涵盖大坝、堤防等多种工程类型，针对水闸的专项规定较为笼统：一方面未按水闸规模、地基类型、功能需求制定差异化监测要求，导致中小型水闸因标准过高难以实施，大型水闸因标准模糊存在监测盲区。另一方面新技术纳入不足：物联网传感器、数字孪生等新技术的应用标准缺失，如无线渗压计的数据传输协议、数字孪生模型的精度要求未明确，制约了智能化监测发展。

二、水闸安全监测分层体系构建与适配性分析

基于水闸规模、地质条件、功能需求的差异，构建“基础层+增强层+智能层”的分层监测体系，实现“按需监测、精准管控”。

(一) 基础层监测：保障核心安全的必选项目

基础层监测针对所有水闸，聚焦影响安全的关键指标，包括变形监测与渗流监测两类核心项目，确保掌握水闸整体稳定性。

① 变形监测反映水闸结构位移与形态变化，是判断工程安全的直观依据，具体内容如下：

一是水平位移监测：平原水闸采用视准线法（观测精度±2mm），山区地形复杂水闸采用前方交会法（精度±3mm），挡潮闸等双向受力水闸需同时布置顺水流、垂直水流向监测线。每个闸段顶部设1个测点，上下游翼墙每20m设1个测点，挡潮闸需在垂直水流向翼墙增设2-3个测点，覆盖双向位移需求。

二是垂直位移监测：软土地基采用几何水准法（精度±1mm）+分层沉降仪（监测深层土沉降），砂土地基仅采用几何水准法。闸墩四角、翼墙分缝两侧各设1个标点，不均匀沉降敏感区（如地基换填段）加密至5-10m1个测点。

三是接缝变形监测：施工缝采用单向测缝计（测量开合度），运行期出现裂缝的部位采用多向测缝计（同时测量开合度与剪切错动）。闸段分缝、翼墙与闸室连接缝等部位，寒冷地区需选用低温适应性仪器（工作温度-20℃~60℃）。

② 渗流监测预防管涌、流土等渗透破坏，核心监测内容如下：

在闸基扬压力监测方面：水位变幅大的水闸采用振弦式渗压计（量程0-50mH₂O，精度±0.1%FS），水位稳定的中小型水闸采用测压管（人工观测，精度±5mm）；纵向沿水流向设1-2个断面（进口、闸室段），横向设3-4个断面，覆盖最大水头断面、地质薄弱断面（如砂质粉土区），每个断面设3-5个测点，确保能绘制完整扬压力分布图。

岸墙、翼墙填土侧沿长度方向每10-15m设1个测点，黏性土岸坡用测压管，砂性土岸坡用渗压计，重点监测填土与岩基结合部位（易发生集中渗流）^[6]。计算绕闸渗流坡降，确保不超过地基允许渗透坡降（软土允许坡降≤0.15）。

(二) 增强层监测：针对复杂场景的可选项目

增强层监测适用于大型水闸、地质复杂水闸（如软土地基、高填土翼墙），补充应力应变、特殊渗流指标监测，深入掌握结构受力状态。

① 地基反力监测：采用土压力计（量程0-200kPa，精度±0.2%FS），布置于闸室底板下。基础处理后的水闸（如换填、灌浆）需沿顺水流向设2-3个断面，垂直水流向设1-2个断面，每个断面设3-5个测点，确保监测反力分布均匀性，最大基底应力不超过地基允许承载力的1.2倍，不均匀系数≤1.5（土基）。

② 翼墙土压力监测：高填土翼墙（填土高度>5m）在翼墙与填土结合面的中下部（距底部1/3、2/3高度处）各设1个土压力计，沿翼墙长度每15m设1组，监测主动土压力变化，预防翼墙

倾覆。

③钢筋应力监测：在底板支座、闸墩牛腿等应力集中部位布置钢筋计（量程 0~300MPa，精度 $\pm 1\text{ MPa}$ ），掌握钢筋受力状态，避免超筋破坏。大体积混凝土闸室（底板厚度 > 2m）布置应变计与无应力计（配套使用，扣除温度影响），监测混凝土内部应力，控制内外温差 $\leq 25^\circ\text{C}$ ，预防温度裂缝。

④混凝土温度监测：施工期大体积混凝土设表面、中心、距表面 $1/2$ 处 3 个测点，形成温度梯度，运行期每季度监测 1 次，掌握温度对结构变形的影响。

⑤渗透坡降监测：

一是闸基渗流量监测：根据渗流量大小选用三角堰（流量 $< 10\text{L/s}$ ）或矩形堰（流量 $10\text{--}100\text{L/s}$ ），布置于闸后排水渠，定期观测水位，计算渗流量，当渗流量突增 20% 以上时需预警。

二是闸下流态监测：采用视频监控（分辨率 1080P，帧率 25fps）+ 流速仪（精度 $\pm 0.01\text{m/s}$ ），观测泄流时是否出现折冲水流、漩涡，及时调整泄流方案，预防闸后河床冲刷。

（三）智能层监测：面向智慧管理的升级项目

智能层监测适用于重要枢纽水闸（如城市防洪闸、大型挡潮闸），整合物联网、AI、数字孪生技术，实现监测数据的实时分析与智能预警。

①物联网感知系统：采用无线传感器（如 LoRa、NB-IoT）实现数据自动采集，传输频率可设为 15 分钟 / 次（运行期）、5 分钟 / 次（汛期），避免人工观测误差。

②AI 数据分析模块：构建异常识别模型，对监测数据进行趋势预测（如基于 LSTM 算法预测沉降趋势），当指标超阈值（如倾斜速率 $> 0.3\text{mm/d}$ ）时自动推送预警信息至管理人员。

③数字孪生模型：建立水闸物理实体与数字模型的实时映射，模拟不同水文工况（如百年一遇洪水）下的结构响应，为应急调度提供模拟支撑。

三、水闸安全监测测点优化布置方法

测点布置需平衡“监测全面性”与“经济性、可操作性”，遵循以下原则^[7]：

①代表性原则：测点覆盖关键部位（如闸墩、底板、翼墙）与风险区域（地质薄弱区、荷载集中区），确保数据能反映水闸

整体性。②经济性原则：中小型水闸可简化监测项目（如仅保留基础层监测），大型水闸核心部位加密测点，非关键部位适当疏化，控制监测成本不超过工程总投资的 2%。③可操作性原则：测点避开施工干扰区（如混凝土浇筑仓、模板支撑区），便于仪器安装、维护与观测，如垂直位移测点需设置便于水准测量的观测平台。④动态调整原则：运行期若发现数据异常（如渗流量突增），可临时增补测点（如在异常区域增设渗压计），进一步定位风险源。

四、水闸安全监测技术规范完善与智能化发展

《水利水电工程安全监测技术规范》（SL 60—2021）在水闸专项监测中存在明显不足，包括分层标准缺失、技术条款笼统、智能化空白及评价指标模糊，导致适用性差、施工难执行、技术难落地且无法精准评价^[8-9]。对此，需按“规模 + 功能 + 地基”三维制定标准，细化全流程技术参数，还需新增“智能化监测”章节，明确感知设备、数据传输、AI 预警及数字孪生的技术要求。

推动水闸智能化监测，需从三方面入手：一是构建“监测 - 评价 - 预警”一体化平台，实现数据闭环管理；二是支持低成本、高可靠性监测设备的研发与成果转化；三是开展覆盖传感器安装、平台操作及数据分析的人员培训，提升智能化应用能力。

五、结论

水闸安全监测是保障工程安全运行的核心手段，当前我国水闸监测工作存在设施不均衡、实施不规范、数据应用滞后、标准不完善等问题^[10]。本文构建的“基础层 + 增强层 + 智能层”分层监测体系，可适配不同规模、功能、地质条件的水闸，结合测点优化布置原则与工程实例，验证了体系的合理性与经济性。

通过完善技术规范，构建分层分类标准、细化实施流程、纳入智能化技术，可实现水闸监测的标准化、精准化。未来，需进一步推动智能化平台建设、技术研发与人员培训，助力水闸安全监测从“人工为主”向“智能为主”转型，为水利工程现代化提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 丁瑶. 数字孪生水闸工程业务应用探究 [J]. 农业灾害研究, 2024, 14(03): 280–282.
- [2] 潘业路. 基于智能化安全监测的水利水闸管理研究 [J]. 网络安全和信息化, 2024, (02): 80–82.
- [3] 张诗媛, 邓鹏. 基于数字孪生的水闸工程安全运行管理系统设计与实现 [J]. 水电能源科学, 2024, 42(03): 123–127.
- [4] 谈叶飞, 马福恒, 王国利. 水闸工程标准化管理难点分析与对策建议 [J]. 中国水利, 2023, (18): 49–52.
- [5] 李绍文, 王伟章, 张成, 等. 水闸安全监测体系的基本构架 [J]. 水电与新能源, 2018, 32(11): 53–56, 61.
- [6] 高明云. 临淮岗工程水闸安全监测现代化改造方案 [J]. 河南水利与南水北调, 2023, 52(7): 116–117.
- [7] 马福恒, 胡江, 叶伟. 水闸安全监测技术规范关键要素研究 [J]. 水利水电技术, 2019, 50(4): 90–94.
- [8] 马福恒, 王国利, 俞扬峰, 等. 我国大中型水闸安全监测现状与对策建议 [J]. 中国水利, 2023, (13): 36–40.
- [9] 孙莉, 吴钢. 水闸工程风险隐患常见问题分析 [J]. 治淮, 2023, (04): 54–55.
- [10] 王艳, 王新春, 赵金川, 等. 基于多种监测手段的水闸安全性分析研究 [J]. 红水河, 2022, 41(06): 17–21+43.