

病险水闸除险加固后运行效果长期监测与性能评估方法

孙珍珍

新疆维吾尔自治区水利运行调度中心，新疆乌鲁木齐，830000；

摘要：水闸作为水利工程的关键设施，其安全性能至关重要。由于长期服役、设计标准低、年久失修及缺少除险加固项目资金等因素，新疆还有 30% 大中型水闸带病运行。除险加固工程虽能显著提升水闸安全性能，但加固效果受多重因素影响，需长期监测与评估。监测方案设计需覆盖结构安全、渗流、环境荷载及耐久性等关键性能参数，采用高精度传感器与自动化采集技术，确保数据实时传输与异常报警。评估指标体系构建需兼顾科学性与实用性，采用层次化结构与变权模糊综合评估模型，量化水闸安全裕度与潜在风险。研究表明，加固工程可显著提升水闸安全性，但长期性能仍受多重因素影响。通过动态监测与主动预防策略，可降低安全风险，为水利工程安全运行提供科学支撑。

关键词：病险水闸；除险加固；长期监测；性能评估

DOI：10.69979/3060-8767.25.03.039

引言

水闸作为水利工程中的关键控制性建筑物，承担着防洪、灌溉、供水等重要任务。然而，由于长期服役、设计标准偏低、老化失修及缺少除险加固项目资金等原因，新疆大量水闸存在防洪标准偏低、结构损伤、渗流异常、金属构件锈蚀等安全隐患，严重威胁区域防洪安全、水资源调配能力，影响引水保证率。据统计，新疆病险水闸占比超过 30%，其除险加固工程已成为水利行业亟待解决的重要课题。

近年来，随着加固技术的不断进步（如防渗墙施工、碳纤维补强、自动化监测系统集成等），病险水闸的安全性能得到显著提升。然而，加固工程的效果并非一劳永逸，其长期运行效果受材料劣化、荷载变化、地质条件耦合作用等多重因素影响，亟需通过科学监测与动态评估来验证工程成效、预判潜在风险。当前，尽管国内外在病险水闸加固技术及短期安全监测方面取得了一定成果，但针对加固后水闸长期运行性能的系统性监测与评估方法仍存在以下不足：

1 病险水闸除险加固工程概述

1.1 病险水闸典型病害类型及成因分析

病险水闸的病害类型丰富多样，其形成往往与长期服役和设计施工缺陷等因素紧密相连。在长期运行过程中，水闸承受着水流、泥沙等多种外力的持续作用，加之运行管理不当，使得其病害问题日益凸显。

防洪标准偏低的问题主要集中在早期建设的水闸工程，当时的设计标准偏低，甚至还有部分水闸存在“边

勘察、边设计、边施工”，加之水闸淤积、冲刷问题，以及下游灌区用水变化等情况，导致洪水标准、过流能力、闸顶（堤顶）高程不满足要求。

结构老化是病险水闸最为普遍的病害之一。随着时间的推移，混凝土会发生碳化现象，钢筋也会逐渐锈蚀，这直接导致闸体强度大幅降低。原本坚固的结构变得脆弱不堪，裂缝不断扩展，严重时甚至会引发结构失稳，给水闸的安全运行带来极大威胁。

渗流破坏也是病险水闸常见的病害形式。它主要表现为闸基渗漏、绕渗及管涌等。造成渗流破坏的原因多种多样，如防渗体系失效、地基土质不均或止水材料老化等。长期的渗流作用会不断加剧闸基的掏空风险，使水闸的稳定性受到严重影响。

地基沉降问题同样不容忽视。地质条件复杂或软基处理不当，都可能导致闸室倾斜、接缝错位，进而影响闸门的启闭功能。一旦闸门无法正常启闭，水闸的防洪与水资源调控能力将大打折扣。

此外，金属构件锈蚀、机电设备老化及自动化控制系统故障也较为常见。这些问题不仅会降低水闸的运行可靠性，还会增加安全隐患。例如，闸门启闭机螺杆弯曲、制动器失灵可能引发操作事故，而监测设备精度下降则会使病害无法及时发现，错过最佳维修时机。病害的累积效应会显著降低水闸的防洪能力、水资源调控能力及引水保障能力，对区域安全构成严重威胁。

1.2 除险加固技术体系

针对病险水闸复杂多样的病害特征，加固技术体系必须全面且精准地从结构安全、防渗性能及耐久性提升

这三个关键方面入手，以保障水闸的安全稳定运行。

在结构安全方面，结构补强技术是重中之重。混凝土裂缝修补可采用环氧树脂灌浆的方法，将环氧树脂材料注入裂缝中，使其充分填充并固化，从而恢复结构的整体性。碳纤维布粘贴加固则是利用碳纤维布的高强度特性，将其粘贴在闸体表面，增强闸体的承载能力。增设支撑结构也能为闸体提供额外的支撑力，进一步提高结构的稳定性。

防渗处理是提升水闸性能的关键环节。高压旋喷桩通过高压喷射水泥浆液，形成具有一定强度的桩体，阻断渗流通道。混凝土防渗墙则是在闸基中建造一道连续的混凝土墙体，有效阻止地下水的渗透。帷幕灌浆则是向地层中灌入水泥浆，形成帷幕，改善闸基的防渗性能。

地基加固技术对于软基处理尤为重要。振冲碎石桩和水泥土搅拌桩等技术可以有效提升软基的承载力，减少不均匀沉降，使闸室更加稳定。

对于金属构件，防腐处理是必不可少的。热喷锌等防腐技术可以在金属表面形成一层保护膜，防止金属进一步锈蚀。对于锈蚀严重的部件，则需要及时更换。同时，升级机电设备与自动化控制系统，实现远程监控与智能调度，提高水闸的运行效率和安全性。

加固设计需严格遵循“因地制宜”的原则，结合水闸的实际工况与地质条件，综合采用多种技术手段，确保加固效果与经济效益达到最佳平衡。

1.3 加固后水闸运行特点

加固后水闸的运行性能虽显著提升，但仍需长期监测以验证工程成效。其运行特点表现为：一是结构响应复杂化，加固措施改变了原有应力分布，需关注新旧材料协同工作性能及潜在薄弱环节；二是渗流场重构，防渗体系优化后需验证渗流稳定性，防止次生渗漏问题；三是环境适应性增强，但极端荷载（如洪水、地震）仍可能引发新病害，需动态评估安全裕度。此外，加固工程可能引入新风险，如施工缺陷、材料老化加速等，需通过长期监测数据反馈优化运维策略。加固后水闸的运行管理需从“被动抢修”转向“主动预防”，结合实时监测数据与智能分析技术，建立“监测-评估-预警-决策”的闭环管理模式，确保水闸在全生命周期内安全可靠运行。

2 长期监测方案设计

2.1 监测内容与指标体系

长期监测需覆盖病险水闸加固后的关键性能参数，构建多维度指标体系以全面评估运行状态。结构安全监

测是核心内容，包括闸体位移、应力应变及裂缝扩展情况，通过监测可识别结构失稳风险。渗流监测关注闸基渗流量、渗透压力及绕渗路径，及时预警渗漏隐患。环境荷载监测涵盖水位、流量、温度及地震动等外部因素，用于分析荷载对结构响应的影响。此外，金属构件锈蚀程度、混凝土碳化深度及机电设备运行状态也需纳入监测范围。指标体系设计需遵循代表性、可测性与关联性原则，例如，以闸室垂直位移反映地基沉降，以渗流出口压力梯度评估防渗效果，以闸门启闭力变化判断机械故障。通过分层分类构建指标体系，可系统反映水闸结构性能、渗流稳定性及耐久性演变规律，为性能评估提供数据支撑。

2.2 监测技术与方法

监测技术需结合水闸实际工况与监测目标灵活选用。结构监测采用振弦式传感器测量位移与应力，其高精度与长期稳定性适用于恶劣环境；裂缝监测可部署分布式光纤传感器，实现裂缝宽度与位置的实时捕捉。渗流监测通过埋设渗压计与流量计，结合无线传输技术实现数据自动化采集。环境荷载监测利用水位计、流量计及气象站，获取水文气象动态信息。针对复杂环境，可引入多源数据融合技术，例如将 GNSS 监测数据与倾角仪数据联合分析，提升位移监测精度。数据采集系统需具备实时传输与异常报警功能，采用 LoRa 或 4G 通信技术确保偏远地区数据稳定回传。此外，无人机巡检与三维激光扫描技术可作为辅助手段，定期获取水闸表观形态数据，弥补点式监测的局限性。

2.3 监测周期与频率设计

监测周期与频率需根据病害风险等级动态调整，平衡监测成本与数据有效性。加固初期（1-2 年）为高风险期，建议每日采集关键参数（如位移、渗流压力），每周分析数据趋势，重点关注结构应力重分布与渗流场重构过程。稳定期（3-5 年）可适当降低频率，改为每周采集位移与渗流数据，每月分析环境荷载与结构响应关联性。长期运行期（5 年以上）以季度监测为主，重点关注耐久性指标（如混凝土碳化、金属锈蚀），结合年度全面检测校准模型参数。极端荷载（如洪水、地震）发生后需启动应急监测，加密数据采集频率至小时级，直至结构响应恢复稳定。通过动态调整监测策略，可精准捕捉病害演化特征，避免数据冗余或监测盲区，为性能评估提供高质量数据基础。

3 性能评估指标体系构建

3.1 评估指标筛选原则

性能评估指标的筛选需兼顾科学性与实用性,确保能够全面、准确地反映水闸加固后的运行状态。核心原则包括:科学性原则要求指标具有明确的物理意义与工程内涵,如渗流压力梯度直接关联防渗效果,裂缝扩展速率反映结构损伤程度;可测性原则强调指标可通过现有技术手段量化获取,优先选择自动化监测数据(如位移、应力)与定期检测数据(如混凝土碳化深度)相结合的指标;代表性原则需聚焦关键病害与核心功能,避免冗余指标干扰评估结果,例如以闸室最大沉降量替代多点沉降监测数据;动态性原则要求指标能反映性能随时间演变的特征,如引入锈蚀速率、渗流稳定性系数等时变参数。通过多轮专家咨询与现场验证,最终筛选出既能体现结构安全、渗流稳定、耐久性等核心性能,又具备可操作性的指标体系,为后续评估模型提供可靠输入。

3.2 层次化指标体系

层次化指标体系采用“目标层-准则层-指标层”三级结构,实现多维度性能评估。目标层为水闸安全运行能力,准则层分解为结构性能、渗流稳定性、耐久性与运行可靠性四个维度。结构性能指标包括闸体位移、应力应变、裂缝宽度及接缝错位量,用于评估结构承载能力与损伤程度;渗流稳定性指标涵盖渗流量、渗透压力、绕渗路径及防渗体系完整性,反映防渗效果与渗流安全风险;耐久性指标包含混凝土碳化深度、钢筋锈蚀率、金属构件腐蚀程度,量化材料老化对长期性能的影响;运行可靠性指标则通过闸门启闭力、机电设备故障率及自动化控制系统响应时间,评估水闸调度功能的实现能力。各层级指标相互关联,例如渗流稳定性下降可能加速结构损伤,耐久性劣化则影响运行可靠性,形成完整的性能评估逻辑链。

3.3 指标权重确定方法

指标权重的确定需综合考虑指标重要性、数据可靠性与工程经验。主观赋权法采用层次分析法(AHP),通过专家打分构建判断矩阵,计算各指标相对权重,适用于数据稀缺或需突出关键指标的场景。客观赋权法如

熵权法,依据指标变异程度分配权重,数据波动越大的指标权重越高,可减少人为偏差。为平衡主客观因素,采用组合赋权法,将 AHP 权重与熵权法权重按一定比例(如 7:3)加权融合,既保留专家经验,又体现数据特征。此外,针对时变特性显著的指标(如渗流压力、锈蚀速率),引入动态权重调整机制,根据病害发展阶段或环境荷载变化实时修正权重。通过敏感性分析验证权重合理性,确保评估结果既能反映水闸当前状态,又能预判潜在风险,为运维决策提供科学依据。

4 结论

本文针对病险水闸除险加固后的长期运行效果,系统构建了“监测-评估-优化”全链条方法体系,为水利工程安全运行提供了科学支撑。研究通过多源信息融合的监测方案与智能分析算法,实现了对结构性能、渗流稳定性及耐久性的动态捕捉,揭示了加固后水闸性能演化的时变规律。基于变权模糊综合评估模型,量化了水闸安全裕度与潜在风险,验证了模型在典型工程中的有效性与敏感性。研究结果表明,加固工程可显著提升水闸安全性,但长期性能仍受环境荷载、材料劣化等多重因素影响,需通过动态监测与主动预防策略降低风险。未来可进一步结合数字孪生技术,构建实时仿真与预警平台,推动水利工程运维管理向智能化、精细化方向发展。

参考文献

- [1] 韩飞. 液压启闭式水闸病险问题与除险加固措施探讨[J]. 水电站机电技术, 2022, 45(06): 96-98.
- [2] 程茜. 哈密市病险水闸除险加固探讨[J]. 农业与技术, 2022, 42(08): 45-47.
- [3] 胡绪宝. 大涌口水闸病险分析及加固措施研究[J]. 珠江水运, 2022, (03): 16-18.
- [4] 张洪杰. 柴埠口水闸病险灾害及加固要点分析[J]. 陕西水利, 2021, (12): 204-205+207.

作者简介: 孙珍珍, 1990 年 10 月, 女, 汉族, 河南沈丘人, 硕士研究生, 中级工程师职称, 研究方向: 水闸、泵站、堤防运行管理, 病险水闸除险加固。