

老旧水利枢纽设施的安全评估与更新方案研究

吕晓荟 杜洁

威海市水利事务服务中心，山东威海，264200；

摘要：老旧水利枢纽设施作为国家水资源调控与防灾减灾的重要基础设施，其安全运行直接关系到人民生命财产安全与社会经济可持续发展。随着服役年限增长，这类设施普遍面临结构老化、设备衰退、功能不足等问题，安全风险日益凸显。本文基于水利工程行业标准与前沿技术成果，构建涵盖结构完整性、运行可靠性、生态适应性的三维安全评估体系，提出“结构加固-设备升级-智能赋能-生态协同”的综合更新方案，为老旧水利枢纽设施的安全管控与效能提升提供理论支撑和技术参考。研究成果对推动水利基础设施高质量发展、保障水安全具有重要现实意义。

关键词：老旧水利枢纽；安全评估体系；更新改造；智能监测；生态保护

DOI：10.69979/3060-8767.26.01.027

1 老旧水利枢纽设施安全评估体系构建

1.1 评估原则

评估原则需兼顾科学性、全面性、可操作性与动态性。科学性上，以水利工程力学、材料科学等专业理论为支撑，遵循行业规范，指标定义与计算方法明确统一，保障结果客观、过程可重复。全面性方面，涵盖结构实体、运行设备、环境条件、管理水平等多维度，既关注显性结构损伤，也重视隐性功能衰退与生态风险。可操作性上，优先选取数据易获取、便于检测统计的指标，避免复杂难量化项，方法兼顾专业与实用，降低实施成本。动态性要求适配设施老化过程与不同服役阶段特征，纳入气候变化等不确定因素，支持安全状况动态更新，为后续维护提供依据^[1]。

1.2 评估指标体系

1.2.1 结构完整性指标

该指标聚焦水利枢纽主体结构的安全稳定状态，是评估的核心内容。二级指标包括材料性能、结构损伤、基础稳定性3个方面：

材料性能：涵盖混凝土碳化深度、钢筋锈蚀速率、砌体强度、钢材力学性能等三级指标，反映结构材料的老化退化程度；

结构损伤：包括混凝土裂缝宽度与长度、坝体渗漏量、结构变形量、金属结构腐蚀程度等三级指标，体现结构实体的损伤状况；

基础稳定性：涉及坝基不均匀沉降、岸坡稳定系数、地质病害发育程度等三级指标，评估结构基础的安全状态。

1.2.2 运行可靠性指标

该指标反映水利枢纽设施的运行效能与设备保障能力，二级指标包括设备状况、运行参数、管护水平3个方面：

设备状况：涵盖发电机组效率、闸门启闭设备完好率、监测设备正常运行率、电气系统可靠性等三级指标；

运行参数：包括设计流量保障率、供水压力稳定性、防洪标准达标情况、能耗指标等三级指标；

管护水平：涉及维护保养频率、应急预案完备性、人员专业素养、技术档案完整性等三级指标。

1.2.3 生态适应性指标

该指标体现水利枢纽运行对周边生态环境的影响及自身的生态兼容能力，二级指标包括水质影响、生态流量、环境适配3个方面：

水质影响：涵盖库区水体富营养化程度、污染物排放达标率、底泥淤积量等三级指标；

生态流量：包括最小生态流量保障率、下泄流量过程合理性等三级指标；

环境适配：涉及对水生生物栖息地的影响、水土流失控制状况、景观协调性等三级指标。

1.3 评估方法

1.3.1 指标数据获取

通过现场检测、仪器监测、资料查阅等多种方式收集指标数据。结构类指标采用无损检测技术（如超声波检测、电磁感应检测）与现场取样试验相结合的方式获取；运行类指标通过自动化监测系统、设备运行记录提取；生态类指标结合水质监测数据、生态调查结果分析；管护类指标通过查阅档案资料、实地调研评估。

1.3.2 指标权重确定

运用层次分析法（AHP）确定各级指标权重。构建

层次结构模型，邀请水利工程设计、施工、管理领域的专家对指标重要性进行两两比较打分，构建判断矩阵，通过一致性检验后计算各级指标权重，确保权重分配的科学性与合理性。

1.3.3 综合评估模型

采用模糊综合评价法进行安全等级判定。建立“很安全、安全、基本安全、不安全、极不安全”五级评价标准，构建模糊评价矩阵，结合指标权重进行模糊合成运算，最终得出老旧水利枢纽设施的综合安全等级，明确主要风险点与薄弱环节^[2]。

1.3.4 动态修正机制

结合水利枢纽运行监测数据，建立评估结果动态修正模型。每3-5年开展一次全面评估，每年基于监测数据进行局部修正，及时更新安全等级与风险识别结果，为后续更新改造提供动态依据。

2 老旧水利枢纽设施更新方案设计

2.1 更新原则

2.1.1 安全优先原则

更新改造以消除安全隐患、提升安全防护能力为首要目标，重点解决结构稳定性不足、设备可靠性低等核心问题，确保水利枢纽能够抵御设计标准内的各类风险，保障运行安全。

2.1.2 功能适配原则

更新方案需兼顾水利枢纽的防洪、供水、发电、生态等多元功能，根据区域发展需求优化功能配置，提升设施对新时代水利需求的适配性，实现功能效益最大化。

2.1.3 经济可行原则

综合考虑更新成本与长期效益，选择性价比高的技术方案与材料设备，避免过度改造。采用分阶段、分优先级的更新策略，优先解决关键风险点，合理控制投资规模，确保方案的经济性与可实施性。

2.1.4 生态友好原则

更新改造过程中注重生态保护，采用环保型材料与施工工艺，减少对周边生态环境的扰动。落实生态流量保障、水质改善等生态修复措施，实现水利枢纽与生态环境的和谐共生。

2.1.5 智能升级原则

结合物联网、大数据、数字孪生等现代信息技术，推动老旧水利枢纽向智能化、信息化转型，提升设施监测、控制、管理的智能化水平，增强运行效率与风险预警能力^[3]。

2.2 核心更新技术方案

2.2.1 结构加固与修复技术

混凝土结构修复：对碳化、裂缝、剥落等病害，采

用“高压水射流清理-环氧砂浆修补-聚脲防水涂层”的三级处理工艺，深度孔洞采用无收缩细石混凝土回填，确保修复强度与耐久性；

防渗体系重建：构建“垂直防渗+水平防渗”的复合防渗体系，垂直方向采用多头小直径深层搅拌桩形成防渗帷幕，水平方向铺设复合土工膜，提升坝体防渗能力；

基础稳定性增强：对坝基不均匀沉降区域采用高压喷射灌浆加固，对岸坡滑坡隐患采取锚杆支护、抗滑桩等措施，结合排水系统优化，提高基础承载能力与稳定性；

金属结构改造：对锈蚀严重的闸门、启闭设备等进行除锈防腐处理或更换，采用不锈钢复合板等新型材料，提升金属结构的抗腐蚀能力与使用寿命。

2.2.2 设备节能与更新技术

动力设备升级：更换老化低效的发电机组、水泵等核心设备，选用高效节能型产品，提升能源利用效率，降低运行能耗；

电气系统改造：更新老旧电气设备与输电线路，采用SF6气体绝缘开关柜、智能保护装置等，优化配电系统，提高供电可靠性与安全性；

启闭系统智能化：将传统手动或半自动启闭设备改造为液压或电动智能控制系统，实现闸门启闭的自动化、精准化控制，提升运行效率与操作安全性。

2.2.3 智能监测与预警系统建设

感知层部署：在坝体、溢洪道、泄洪洞等关键部位布设振弦式渗压计、测斜仪、超声波水位计等监测设备，实现结构变形、渗流、水位等参数的实时采集；

网络层构建：采用4G/5G无线网络与光纤通信相结合的方式，建立高速稳定的数据传输通道，确保监测数据实时上传；

应用层开发：基于数字孪生技术构建水利枢纽虚拟仿真模型，集成水文、气象、监测数据，开发预报、预警、预演、预案“四预”功能模块，实现风险的早期识别与快速响应。

2.2.4 生态修复与功能优化技术

水质改善工程：实施库区清淤、生态护岸建设，设置水生植物净化带，配套建设污水处理设施，降低水体富营养化程度；

生态流量保障：优化调度方案，设置生态流量下泄通道，安装流量监测与调控设备，确保下游生态基流稳定；

生态栖息地修复：在库区周边与下游河道构建多样化水生生物栖息地，种植乡土植被，改善生态环境，提升生物多样性。

2.3 更新实施流程

2.3.1 前期准备阶段

基于安全评估结果，明确更新改造的重点任务与技术难点，开展可行性研究与方案设计。组织专业团队进行现场勘查，收集详细的工程地质、水文气象、设备运行等资料，结合行业标准与区域需求，编制科学合理的更新改造方案，并完成审批手续。

2.3.2 施工实施阶段

采用“分区施工、平行作业”的组织模式，优化施工流程，减少对水利枢纽正常运行的影响。结构加固、设备更新、信息化建设等关键工序实行“三检制+第三方检测”，严格控制施工质量。落实安全生产与环境保护措施，加强施工现场管理，确保施工安全与生态安全。

2.3.3 验收与试运行阶段

施工完成后，按照《水利水电工程单元工程施工质量验收标准》等行业规范开展全面验收，包括工程质量、设备性能、系统功能等方面的检测与评估。验收合格后进入3-6个月的试运行阶段，持续监测运行参数与安全状况，及时发现并解决存在的问题。

2.3.4 后期管护阶段

建立长效管护机制，制定完善的维护保养制度，定期开展设备巡检与系统维护。加强运行人员培训，提升专业技能与应急处置能力。基于智能监测系统数据，开展常态化风险评估，为后续维护与升级提供依据，实现水利枢纽的良性运行。

3 老旧水利枢纽设施更新实施保障措施

3.1 政策与法规保障

完善老旧水利枢纽更新改造相关法律法规与行业标准，明确评估要求、更新标准、责任主体等内容，确保更新工作有法可依、有章可循。出台财政补贴、税收优惠等激励政策，鼓励地方政府与社会资本参与更新改造项目。加强政策执行监督，建立健全考核评价机制，确保各项政策措施落到实处^[4]。

3.2 资金保障机制

构建“中央财政引导+地方财政配套+社会资本参与”的多元化资金投入机制。中央财政加大对重点区域、重大隐患老旧水利枢纽更新改造的支持力度，地方财政落实配套资金，保障项目顺利实施。通过特许经营、PPP等模式吸引社会资本参与，拓宽资金来源渠道。建立资金使用监管制度，实行专款专用，提高资金使用效率。

3.3 技术与人才支撑

加强产学研合作，联合高校、科研院所与企业开展

关键技术研发，推广应用新材料、新技术、新工艺。建立老旧水利枢纽更新改造技术库，为项目实施提供技术支撑。加强专业人才培养，开展技术培训与交流活动，提升工程设计、施工、管理等相关人员的专业素养与技术能力。建立专家咨询机制，为更新方案制定、技术选型等提供专业指导^[5]。

3.4 管理与监督机制

落实项目法人责任制、建设监理制、招标投标制和合同管理制，规范更新改造项目管理流程。建立健全质量终身负责制，明确各参与方的质量责任。加强施工过程监督，定期开展质量与安全检查，及时发现并整改问题。完善竣工验收制度，确保工程质量符合标准。建立建后管护长效机制，明确管护责任主体，落实管护经费，保障更新改造效果的长期稳定。

4 结论

本文针对老旧水利枢纽设施老化引发的安全风险突出、更新方案缺乏系统性的问题，开展专项研究并得出核心结论。构建的“结构完整性-运行可靠性-生态适应性”三维安全评估体系，通过定性与定量结合的方法，实现了对设施安全状况的全面精准研判。提出的“结构加固-设备升级-智能赋能-生态协同”综合更新方案，配套全流程实施步骤与政策、资金、技术、管理四维保障机制，兼具科学性与可操作性。研究成果有效填补了传统评估与更新工作的短板，为老旧水利枢纽安全管控、效能提升提供了科学支撑，对推动水利基础设施高质量发展、保障水安全具有重要现实意义。

参考文献

- [1] 谢军. 老旧水利灌区土渠改建矩形钢混渠道施工技术[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(05): 297-300.
- [2] 谢军. 老旧水利灌区土渠改建矩形钢混渠道施工技术[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(04): 192-194+204.
- [3] 刘继峰. 灌区节水改造工程实践与优化方案[J]. 陕西水利, 2025, (03): 94-96.
- [4] 张巧荣. 高标准农田建设中老旧灌区农田水利工程优化改造[J]. 农业工程技术, 2025, 45(02): 31-33.
- [5] 赵宝山, 刘宗国. 老旧水利工程档案管理存在的问题与对策[J]. 山东水利, 2024, (07): 39-42.

作者简介：吕晓荟（1989.10.05-），女，汉族，籍贯：吉林松原，职务/职称：工程师，学历：本科，研究方向：水利工程管理。