

面向极端气候的水利枢纽韧性提升设计方法

杨 刚

北京工业大学 北京

【摘要】 极端气候引发的洪水、干旱、风暴等灾害，对水利枢纽的结构安全与功能稳定性构成严峻挑战。面向极端气候的水利枢纽韧性提升设计方法，以增强系统抵抗、适应及快速恢复能力为核心，通过多尺度气候情景模拟识别风险阈值，结合结构动态响应分析优化枢纽关键部位的抗灾性能。该方法整合智能监测预警技术与弹性调度机制，实现灾害前的风险预判、灾害中的损失控制及灾后的高效恢复。其突破传统静态设计局限，可根据气候变异特征动态调整设计参数，为水利枢纽应对不确定性灾害提供系统性解决方案，对保障流域水资源安全与社会经济稳定具有重要价值。

【关键词】 极端气候；水利枢纽；韧性提升；设计方法；灾害响应

【收稿日期】 2025 年 6 月 13 日

【出刊日期】 2025 年 7 月 11 日

【DOI】 10.12208/j.jer.20250326

Design method for resilience improvement of water conservancy hubs against extreme climates

Gang Yang

Beijing Institute of Technology, Beijing

【Abstract】 Disasters such as floods, droughts, and storms caused by extreme climates pose severe challenges to the structural safety and functional stability of water conservancy hubs. The design method for improving the resilience of water conservancy hubs against extreme climates focuses on enhancing the system's ability to resist, adapt, and recover quickly. It identifies risk thresholds through multi-scale climate scenario simulations and optimizes the disaster resistance performance of key parts of the hub by analyzing structural dynamic responses. This method integrates intelligent monitoring and early warning technologies with flexible scheduling mechanisms to realize risk prediction before disasters, loss control during disasters, and efficient recovery after disasters. Breaking through the limitations of traditional static design, it can dynamically adjust design parameters according to climate variation characteristics, providing a systematic solution for water conservancy hubs to cope with uncertain disasters and holding significant value for ensuring basin water resource security and social-economic stability.

【Keywords】 Extreme climates; Water conservancy hubs; Resilience improvement; Design methods; Disaster response

引言

全球气候变暖导致极端天气事件频发，水利枢纽作为水旱灾害防御与水资源调控的核心工程，其在极端气候下的韧性表现愈发关键。传统设计多基于历史数据，难以应对超标准灾害的冲击，常出现结构损毁、功能失效等问题。如何通过创新设计提升水利枢纽的抗风险与自我修复能力，成为水利工程领域的迫切需求，而面向极端气候的韧性提升设计方法正是应对这一挑战的重要探索。

1 极端气候下水利枢纽的失效机理与传统设计的适配缺陷

极端气候条件下，水利枢纽的失效呈现多维度耦合特征，其机理涉及结构力学、水文动力学与材料科学的交叉作用^[1]。在极端洪水冲击下，坝体迎水面承受的动水压力远超常规设计阈值，水流脉动产生的周期性荷载会引发坝体共振，导致坝基防渗体出现疲劳开裂，渗透路径的形成进一步加剧结构失稳。同时，高含沙水流对泄洪建筑物的磨蚀作用呈非线性增强，过流表面的混凝土保护层在高速沙粒冲击下发生剥蚀，暴露的钢筋骨架因锈蚀加速结构劣化。干旱与高温复合作用则从另一维度破坏枢纽功能。长期低水位运行使坝体防渗帷幕处于干缩状态，黏土心墙因失水产生裂隙，降

低坝体抗渗性能；高温环境导致混凝土表面温度梯度剧变，温控措施失效时易产生贯穿性裂缝，削弱结构整体性。风暴潮引发的超标准水位会使挡水结构承受反向水压，岸坡防护工程在波浪往复作用下发生淘刷，坡体失稳可能引发连锁性坍塌。

传统设计方法在极端气候场景下暴露出显著适配缺陷。其基于历史气候数据的静态设计范式，难以覆盖极端事件的概率分布尾部特征，设计荷载取值保守性不足，如防洪标准仅考虑百年一遇洪水，对千年一遇极端洪水的抵御能力严重缺失。结构设计采用确定性安全系数法，未纳入气候变异的不确定性参数，无法量化极端情景下的失效概率，导致安全储备与实际风险需求错配^[2]。在功能韧性方面，传统设计侧重单一灾害防御，缺乏多灾种协同应对机制。防洪体系与抗旱设施的设计相互割裂，洪水调度方案未预留干旱期生态基流保障空间，极端气候交替出现时易引发功能冲突。监测系统布局沿用常规工况需求，传感器布设密度与监测频率不足，难以捕捉极端气候下的突变信号，导致预警滞后于灾害演进速度^[3]。

材料选择与耐久性设计同样存在局限。传统混凝土材料在极端温度波动下的抗裂性能不足，未采用纤维增强或自修复技术提升材料韧性；金属结构防腐涂层在高湿度、强紫外线环境下老化加速，防护周期与极端气候作用周期不匹配，维护更新频率难以应对灾害频发态势。这些缺陷共同导致水利枢纽在极端气候冲击下，从结构损伤到功能失效的演化速度远超设计预期，凸显传统设计方法的适应性短板。

2 面向极端气候的水利枢纽韧性提升设计方法的核心框架

面向极端气候的水利枢纽韧性提升设计方法构建“风险感知-结构优化-智能调度-恢复重建”的闭环核心框架，通过多维度协同实现韧性性能的系统性提升。该框架以动态风险评估为基础，整合气候学、结构工程与智能控制技术，形成覆盖灾害全生命周期的应对体系。

风险感知层采用多源数据融合技术构建全域监测网络，部署在坝体、泄洪道、岸坡等关键部位的光纤传感阵列与微波雷达，可实时捕捉结构应变、渗流量、水位变化等参数。结合气象卫星数据与区域气候模型，生成极端洪水、干旱、风暴潮的多尺度情景模拟，通过蒙特卡洛算法计算不同情景下的风险概率与影响范围，识别枢纽的脆弱性节点^[4]。风险阈值动态调整机制能根据气候变异趋势更新预警指标，确保感知系统对新型

极端事件的敏感性。结构优化层聚焦抗灾性能的多目标提升，采用性能化设计理念替代传统安全系数法。针对坝体结构，引入拓扑优化算法优化坝型曲线，在重力坝坝踵设置强化锚固系统，利用碳纤维复合材料增强防渗帷幕的抗裂与自愈能力；泄洪建筑物过流表面采用超高性能混凝土与耐磨涂层复合体系，通过流体动力学仿真优化体型设计，降低高含沙水流的磨蚀速率^[5]。岸坡防护工程采用加筋土与生态袋组合结构，结合植被固坡技术提升抗淘刷能力与生态韧性，实现结构安全与生态功能的协同。智能调度层构建弹性决策系统，基于数字孪生技术搭建枢纽全要素虚拟映射模型，将实时监测数据与情景模拟结果导入强化学习算法，生成动态调度方案。洪水期间，通过闸门群协同控制算法实现错峰泄洪，结合下游河道行洪能力自适应调整下泄流量；干旱时期，启动多水源联合调度机制，优先保障生态基流与民生用水，利用水库群优化调度模型平衡蓄水与发电需求。调度系统具备自学习能力，可根据历史应对数据持续优化决策参数，提升极端情景下的响应速度。恢复重建层设计分级响应机制，针对不同灾害等级预设修复路径与资源配置方案。轻微损伤时，启用结构自修复材料的活性成分，通过微胶囊破裂释放粘结剂实现裂缝自主愈合；中度损伤情况下，依托模块化预制构件库快速更换受损部件，采用3D打印技术现场制作异形构件缩短修复周期。建立跨区域应急资源调度平台，整合施工机械、材料储备与技术团队信息，通过GIS系统实现资源的最优调配。恢复效果评估模块采用韧性指数量化修复后的功能恢复度，为后续优化提供数据支撑。

各层级通过标准化数据接口实现无缝衔接，风险感知层的监测数据为结构优化提供实测参数，智能调度方案根据结构承载能力动态调整，恢复重建过程中的损伤数据反哺风险评估模型。这种协同机制使框架具备动态进化能力，可随着气候特征与工程状态变化持续优化设计策略，形成适应极端气候的韧性提升闭环。

3 水利枢纽韧性提升设计方法的实践应用与效能优化

水利枢纽韧性提升设计方法的实践应用需结合区域极端气候特征，形成差异化技术路径。在台风高发区的水利枢纽，设计方法通过风险感知层构建的风暴潮监测网络，实现波浪荷载与坝体振动的实时关联分析^[6]。结构优化阶段采用新型复合材料增强坝体迎水面抗冲击性能，通过流体动力学仿真优化消能工体型，削弱

极端波浪对坝体的冲击力。实际应用中,该设计使枢纽在强台风过境时保持结构完整性,泄洪系统未因波浪冲击出现功能性障碍,验证了抗风浪设计策略的有效性。干旱与高温频发区的综合水利枢纽应用该方法时,智能调度层依托多源气象数据构建的预测模型,实现水资源的动态分配。通过优化水库群联合调度规则,在枯水期优先保障生态基流与民生用水,同时采用防渗加固技术减少输水过程中的蒸发与渗漏损失。实践表明,这种设计能在长期干旱条件下维持枢纽的基本功能,灌溉与发电系统的协调运行能力显著提升,避免了传统调度方式下的功能冲突。高海拔寒冷地区的水利枢纽实践中,设计方法针对极端低温与冰塞现象,在结构优化层采用抗冻混凝土与温控措施,减少坝体因温度应力产生的裂缝。风险感知层部署的冰层厚度监测系统与冻融循环传感器,可实时捕捉冰压力变化,为闸门启闭调度提供依据。在极端低温天气下,枢纽的泄洪与输水系统未因冻胀发生堵塞,验证了寒区韧性设计的适用性。效能优化需建立基于全生命周期的动态调整机制,通过实际运行数据反哺设计参数。风险感知层的优化聚焦监测网络的覆盖密度与响应速度,采用分布式光纤传感技术实现坝体内部应力的全域监测,结合边缘计算技术缩短数据处理周期,提升极端情景下的预警时效性^[7]。

结构优化层的效能提升依赖于材料性能与结构形式的协同改进。通过长期跟踪枢纽结构的损伤演化规律,优化复合材料的配比与铺设方式,增强关键部位的抗疲劳与耐腐蚀能力。在混凝土构件设计中引入自修复技术,利用微胶囊材料在裂缝产生时自动释放修复剂,延缓结构劣化速度。同时,根据极端气候作用下的结构响应数据,调整抗震与抗滑稳定计算参数,使安全储备与实际风险需求更匹配。智能调度层的优化通过算法迭代与数据积累实现,将历史极端事件的应对经验纳入强化学习模型,提升调度方案的适应性。采用数字孪生技术模拟不同气候情景下的枢纽运行状态,预演调度策略的实施效果,减少实际应用中的试错成本。针对多目标优化冲突问题,引入动态权重调整机制,在防洪、供水、发电等功能间实现弹性平衡^[8]。恢复重建层的效能优化侧重应急响应与资源调配效率,建立跨区域的预制构件储备体系与技术团队协作机制,确保

灾后修复能快速启动。根据枢纽的功能重要性分级制定恢复方案,优先保障关键系统的修复,同时采用模块化施工技术缩短重建周期。通过构建韧性评估指标体系,量化不同修复方案的效能,为后续设计优化提供量化依据。

4 结语

面向极端气候的水利枢纽韧性提升设计方法,通过动态风险评估与系统优化,有效增强了枢纽应对极端灾害的能力。实践表明,该方法能显著降低灾害损失并加速恢复进程。未来需结合气候预测精度提升与新材料技术应用,持续完善设计体系,为水利枢纽的长期安全运行提供更可靠的技术支撑,助力构建气候适应性强的水利基础设施网络。

参考文献

- [1] 彭远皓,吴晓峰.水利枢纽规划勘测设计中的主要问题分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(04):163-165.
- [2] 吴徐燕,邓英姿,吴玉霜,等.大藤峡水利枢纽短时强降雨天气分型与环境参量分析[J].农业与技术,2023,43(19):79-85.
- [3] 柳文兵,翟艳军,梁进计,等.百色水利枢纽2022年暴雨洪水及防洪调度分析应用[J].中国水利,2022,(22):58-61.
- [4] 由星莹,王祖卿,吴铮,等.特殊干旱年兴隆水利枢纽通航应急调度研究[J].水电能源科学,2025,43(03):60-64.
- [5] 叶芳.提高飞来峡水利枢纽水文预报精度的探讨[J].内蒙古水利,2020,(03):36-37.
- [6] 刘松.水利枢纽工程除险加固建筑体系的设计探析[J].四川建材,2024,50(11):225-226+229.
- [7] 宋亮亮,张劲松,杜建波,等.基于云模型的水利工程运行安全韧性评价[J].水资源保护,2023,39(02):208-214.
- [8] 年夫喜.湖北姚家平水利枢纽工程木贡滑坡稳定性分析及加固建议[J].土工基础,2022,36(03):340-343.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

