Construction of a Natural Disaster Assessment Model for Hydropower Stations During Flood Season and Multi-Objective Optimization Adjustment

Guozhu Zhou

Yunnan Dianheng Asset Appraisal Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650032, China

Abstract

Against the backdrop of deepening global warming, the flood safety risks of hydropower projects in China are becoming increasingly complex. The frequent occurrence of rainstorms, the cascading effects of mountain torrents and geological disasters, and the drastic changes in watershed hydrological conditions pose severe threats to power station operations. In response to the current inadequacy of disaster forecasting capabilities under changing weather conditions—particularly the lack of multi-source information integration and reflection of disaster chain responses—it is urgently necessary to establish a comprehensive disaster warning and assessment system capable of reflecting interconnected disaster response characteristics. Under these circumstances, developing a scientific and precise disaster assessment model, along with coordinating and regulating multiple indicators, serves as a crucial pathway to enhancing the flood safety standards of hydropower projects in China.

Keywords

hydropower station flood season; natural disaster assessment model construction; multi-objective optimization

水电站汛期自然灾害评估模型构建与多目标优化调整

周国柱

云南滇恒资产评估有限公司，中国 · 云南 昆明 650032

摘　要

在全球变暖趋势不断加深的背景下，中国水电工程的防洪安全风险日趋复杂。频繁发生的暴雨、山洪地质灾害的级联作用和流域水文条件的急剧变化，给电站运行带来了严重的威胁。针对目前天气变化下，多源信息相结合、反映灾害链式响应特征的灾害预报能力不足的问题，迫切需要构建一套完整的、可反映灾害联动响应特征的灾害预警评估系统。在这种情况下，如何建立一种科学、精确的灾害评估模式，并对其进行多个指标的协调与调控，是提高中国水电工程防洪安全水平的重要途径。

关键词

水电站汛期；自然灾害评估模型构建；多目标优化

1 引言

水电站汛期自然灾害评估是一项涉及水文气象、工程结构和调度等多个领域的综合性系统工程，具有重要的理论和现实意义。当前的水电工程运行，既要注重对传统的水文要素进行监控和预警，又要考虑地质、气象等多因素的影响机理。在此基础上，从洪水演化、边坡稳定和设备防护等多个层面，研究基于多尺度的风险评估方法。但在防洪、发电、生态流量等方面，需要考虑防洪安全、发电与生态流量等多种目标，对模型进行了动态响应与协调优化，以满足不同水文情景与风险水平下的调控需要。

【作者简介】周国柱（1982–），男，中国陕西富平人，本科，工程师，从事水利项目风险管理研究。

2 水电站汛期自然灾害评估现存问题

2.1 风险评估体系不完善

针对目前中国水电站汛期自然灾害评估方法不够完善的现状，提出了一种基于遗传算法的洪水灾害风险评估方法。在评估手段方面，大部分水电厂仍然采用单一灾害单独评估模型，对洪水、滑坡和泥石流等灾害单独进行统计，忽略了各种灾害间的联动机理。具体体现在：现有研究中，只针对暴雨 - 产流关系进行了研究，没有同时考虑暴雨导致的库岸滑坡失稳及其对水库蓄水与泄量的二次作用。这样分割的评估方法，不能对极端气候环境下的致灾连锁反应进行精确的预报。在资料运用上，极端事件的危险性评估过分依靠过去的历史资料，而忽略了极端事件在全球变化条件下的非一致性特征。目前在评估中所采用的防洪成果多是以站点历

史数据为基础，缺乏对流域下断面状况及人为因素的响应。在建模层次上，已有的洪水评估方法主要是基于静态的参数系统，不能针对洪水的实际情况进行动态地调整评估指标及权重。在特大洪涝灾害面前，传统的评估方法很难准确把握洪涝灾害的演化规律，造成灾害风险评估与灾害损失之间存在较大的偏差 [1]。

2.2 监测预警能力不足

针对中国水电站汛期自然灾害的特点，提出一种基于模糊综合评判的洪水风险评估方法。在流域尺度上，多数水电站的流域雨量站和水文站分布密度偏低，尤其是在沟谷型小流域，其观测区域存在极大的盲点。该地区是暴雨洪水、地质灾害易发区，因缺少相应的监控设备，无法对暴雨过程进行实时、准确地把握。在监测因素上，已有的研究多集中于传统的水文、气象指标，而对于滑坡等地质灾害的早期预警，如岸坡稳定和边坡变形等，缺乏有效的监测方法。目前，针对水库潜滑体的检测，主要是通过手工巡视及简单的定位桩法进行，其自动化水平不高，很难做到全天时、长时间的持续监控。在数据传送方面，一些监测站仍然使用常规的 UUV 通讯模式，在恶劣气象环境下容易受到干扰，造成重要警报消息的传递延时甚至中断。在信息处理上，多个监控系统缺少信息的整合机制，水、工情、灾情等信息分散在各个管控平台上，很难构建一个完备的态势地图。目前，中国气象灾害的早期预警指标大都是设定一个固定的数值，没有根据前期降雨和土壤水分等情况进行实时的动态调节，导致了预警时间的不确定性，有时会产生虚警，有时会漏报 [2]。

2.3 调度决策协同困难

在水电站汛期运行管理中，存在着多个不同的目标不能高效协调的问题。从洪水调控角度看，库区需同时满足上游和下游的防洪要求，但由于缺少精确的调控措施，使得库区面临困境。比如，为了保证洪水的安全储备，过分排放会造成大量的水资源浪费，从而降低了以后的电力收益；但为了保证电站的发电收益，保持高位运行，会使调节洪水的能力减弱，从而加大了工程的危险性。在信息分享方面，气象、水文和电力调度等多个领域的信息屏障还没有被彻底打通，使得重要的政策信息无法有效地流通。由于气象预测结果与调度决策体系的联系不密切，且预测时间和反应时间有较大的滞后。在面对突发的洪涝灾害时，时间滞后问题会极大地限制电网的实时性。在灾害调度上，已有的方案大都仅限于理论上的指导性，缺少对不同尺度洪水和不同灾害类型的详细作业过程。由于职能划分不明确，协同工作不完善，导致应急指挥混乱，响应缓慢。缺乏多个指标间的矛盾和协同机理，是制约水库防洪安全运行的重要因素之一。

3 水电站汛期灾害评估与优化策略

3.1 完善风险评估体系

现有的水电站汛期自然灾害评估系统具有明显的缺陷，现有的评估方法多以单个灾种为研究对象，没有对灾害链串级影响进行综合评估。在现有评估体系中，洪水、滑坡和泥石流等灾害是独立的，评估模型只关注单个灾害对灾害的直接作用，忽略了多灾害之间的交互作用和级联机理。这样的简单方法使得灾害危险性评估与灾害损失之间有很大的偏离，很难真正体现出水电厂在复杂天气环境下的整体危险性。需要进一步完善和完善风险评估体系。当前的评估方法主要依靠历史灾情信息记录不全和标准化程度不高，尤其是对极端自然灾害的信息收集不系统。目前，中国对气象、水文、地质调查、工程运营等多个领域的数据还没有进行有效地融合，且不同类型数据间还面临着空间尺度不匹配、格式标准不一致等问题。这一状况已成为风险评估中所需资料的品质和完备程度的限制，并将直接关系到评估结果的可信度 [3]。

评估模式对环境的动态适应能力较差。已有的研究大多采用静态的、固定的门槛值进行评估，很难适应全球变暖下的极端天气新特点。模式中的参数更新相对较慢，不能实时地揭示下垫面变化、工程设施状态演化等动力因子对其灾害程度的影响。目前，该模式对短时强降水、局地强对流等极端事件的反应机制还不够完善，对突发性强降水、局地强对流等短期极端事件的预报和预报能力还不够强。在时间和空间上，应进一步扩展风险评估的范围。在空间尺度，已有研究主要集中在水库枢纽区，而对上游流域和下游影响区域的风险传导研究较少。在时空尺度上，现有的研究主要针对洪季这一具体时期，缺乏对“前一年”（如“后旱后暴雨”）的灾害演化过程的研究。由于其在时间和空间上的局限，使得其在全流域和全汛期的风险评估中很难支撑其整体的风险管理。灾难评估中的不确定因素需要进一步深入研究。目前对模型参数、模型结构以及输入数据的不确定性还没有进行全面的定量描述，缺少有效的不确定性传输分析手段。这不仅给评估结果的可信性带来困难，而且也会对建立在风险评估基础上的项目的可靠性造成一定的影响。尤其是在极限运行条件下，多个不确定因子的相互影响会极大地加剧真实的危险程度，但目前的评估方法尚不完善。

3.2 提升监测预警能力

提高中国水电站汛期自然灾害的监控与预警水平，必须建设一套完整的天空、地面、空中三维监控系统。在重点地区设置雨量站、水位观测站及视频监测装置，构成一条涵盖各重要支流的完整的监测链。要充分利用水文地质条件，对水文地质条件进行观测，以获取可能发生山洪灾害的预警信息为依据。在弯道和陡坡地段加大监控强度，并在边坡上设置能够进行远距离传递的振动传感器，实现边坡稳定状态的实时检测。要实现对监控资料的收集和传递，必须构建多渠道的支持体系。为了保证恶劣气象环境下通讯线路的可靠运行，提出了基于北斗系统和地基光缆相互备份的新方法。在监控结果超出预先设定的阈值时，系统会将取样频率提高，并经过一定的压缩、封装，经由优先信道传送至指挥部。

本项目拟采用高精度的多普勒测速仪、超声测高仪等先进仪器，通过对进水口进行分米级的观测，实现对进水过程的精确监测。

在产生早期预警信息时，要经历一个多层次的检查过程。在对已有的观测资料进行品质管理与离群点去除的基础上，将其输入到已有的灾情资料中。该方法通过将实际观测资料与过去灾情的相似性进行比较，从而得出本次灾情的可能性。在发生的可能性超出报警范围时，该装置将根据气象预报和地质情况等资料，提出报警草稿。经审核后的警报，根据受灾面积及危急情况，将其划分为不同等级，并经特殊渠道向有关主管单位及各单位发出。在发出警报后进行追踪和评估，形成了一个封闭的管理循环。通过对各预警区内的水文、天气状况进行实时监控，并对其等级及受灾面积进行实时更新。在此基础上，构建了基于实时监测数据的预警效应评估体系，并根据实际情况对预测结果进行修正。在每一次预警完成之后，专家组都会回顾预警的准确性、时效性以及处理结果，并把得到的经验作为改进的基础。该研究将为下垫面及气候特性演化对区域水文过程的影响提供科学依据[4]。

3.3 创新调度决策机制

针对当前中国水电站汛期自然灾害与发电效益与生态效益协调发展的现状，亟需打破以往单指标最优解的限制，建立兼顾防洪安全与发电效益与生态效益的多维协调决策体系。该机理的关键是构建基于水文气象信息的多个水文要素综合评估和多个指标综合评估方法，实现对水文气象条件的实时监测，实现对水库调度方案的动态调控。在此基础上，建立一个由水文预测、灾情评估、最优决策三个模块组成的集成系统，并利用各个模块间的数据界面进行实时互动和反馈校正。提出了一种多层次的优化方案。第一个层次是以流域内的短时径流预报为基础，精确预估水库入库的洪涝过程，并与大坝附近的地质灾害观测资料相融合，评估各尺度洪涝的综合危险程度。第二层次，构建多目标规划模型，以最小化洪水风险、最大发电效益及最小化生态效应三个关键问题，利用带有最优决策思想的无劣排序基因算法求解 Pareto 最优解集合。将群体大小设定为 100 个，采用 500 个迭代周期，利用交叉突变等方法对求解的品质进行持续的优化，从而获得一系列的非劣解，从而构建 Pareto 前沿。

在建立 DSS 时，必须对各种不确定因素进行综合分析。在此基础上，将降雨预报误差、模型参数不确定性等多种不确定性因素融入最优模型中，构建多个可能的水文情景。在各作业周期内，将会产生多种可供选择的作业计划，并对作业计划的风险与收益作出全面的评估。在进行方案比较时，利用模糊数学方法对每一种方案进行了防洪安全度、发电保障度和生态友好度的评定，并提出了相应的优化调控方案。计划执行过程中，必须有健全的动态调节机制。通过对实际观测资料和预测资料的比较和分析，发现与预测值有很大差异时，及时进行方案再评估。在水库水位、下泄流量等重要参数逼近某一临界点时，通过设定分级报警门限，实现应急方案的调整。在项目实施中，通过对 24 h 内 24 h 内的运行规划进行动态调整，以保证实时动态的水雨况。要使该新型排产决策机制高效运作，必须制定相关的技术规范。在此基础上，提出了从数据获取到设计过程的规范化工作过程。构建电网运行方案后评估体系，通过回顾和剖析历史运行工况，对模型参数及运行规律进行动态调整，实现电网运行的科学与自适应。

4 结语

综上所述，水电站汛期自然灾害评估模型构建与多目标优化调整，将有助于提高中国水电企业应对极端气候变化的应对能力，为保障中国水利系统的安全、高效运行奠定基础。基于多源信息的高精度的新方法，通过构建数字孪生平台，完善预报预警体系，创新优化算法，促进中国水库防洪减灾工作整体水平的提高，对维护中国水资源和能源安全具有重要意义。

参考文献

[1] 宋华等.某水电站机组汛期超出力潜力研究分析[J].水电站机电技术, 2024, 47 (11): 26-28+65.

[2] 叶飞武.西津水电站汛期控制运行水位调整方案研究[J].红水河, 2023, 42 (06): 9-13.

[3] 张验科等.中小水电站水库汛期运行调度多目标风险分析[J].水电能源科学, 2023, 41 (12): 58-62.

[4] 张应超,周伟鹏.高泥沙河流径流式水电站汛期避沙运行技术及措施[J].水电站机电技术, 2023, 46 (08): 109-112+139.