

试论水库安全调度和应对策略

努尔买买提·阿不来提

新疆维吾尔自治区塔里木河流域吉音水利枢纽管理中心 新疆 和田 848000

摘要：水库安全调度需平衡防洪与兴利、生态与可持续利用等多维目标，面临洪水、干旱、工程隐患等风险。通过构建实时监测与预警系统、动态调度模型、多目标优化调度方法等技术体系，结合风险分级响应、跨部门协同、极端事件应对及工程非工程结合等策略，可提升调度科学性与可靠性，保障水库及下游安全。

关键词：水库安全调度；风险识别；动态调度模型；多目标优化；应对策略

引言：水库作为重要水利工程，在防洪、供水、发电等方面发挥关键作用。然而，其安全调度面临复杂挑战，需在多重目标间寻求平衡，应对各类风险。随着气候变化与人类活动影响加剧，水库安全调度的重要性愈发凸显。本文将深入探讨水库安全调度的核心要素、技术体系及应对策略，为提升水库安全管理水平提供理论参考。

1 水库安全调度的核心要素

1.1 调度目标的多维平衡

水库安全调度需在防洪安全与兴利效益间构建动态权衡机制。防洪期来临前，水库要预留足够防洪库容，通过控制泄洪流量削减洪峰，减轻下游河道行洪压力。但这种防洪策略必然限制蓄水空间，影响发电、灌溉等兴利功能。枯水期为保障供水发电而提高蓄水位，又会压缩防洪库容，增加洪水期风险。这要求调度方案随水文年型变化调整，依据中长期天气预报、历史洪水规律，在防洪与兴利目标间寻找平衡点。生态流量保障与水资源可持续利用构成另一组关键目标。水库运行改变天然河道水文节律，导致下游河道断流、湿地退化、鱼类洄游通道受阻。维持生态流量能缓解这些负面影响，保障水生生物栖息地。在水资源利用方面，需统筹协调生活、生产用水需求，平衡上下游用水权益。过度满足上游用水会导致下游水资源短缺，影响区域生态与经济发展。通过制定生态流量泄放规则，结合用水优先级分配机制，实现水资源在不同用途间的合理配置，保障长期可持续利用。

1.2 风险识别与评估体系

洪水、干旱、工程隐患是水库调度面临的主要风险源。流域内强降雨叠加汇流条件，可能引发超标准洪水，威胁大坝安全。干旱则表现为来水持续低于预期，导致水库蓄水量不足，无法满足供水、发电需求^[1]。工程隐患涉及大坝结构缺陷、基础渗漏、闸门设备故障

等问题，这些隐患在正常工况下可能不明显，但极端水文条件下会加速恶化，酿成溃坝等严重事故。风险耦合效应与级联影响机制加剧调度复杂性。洪水对大坝产生超常压力，可能诱发或加剧工程隐患，使渗流异常问题恶化。干旱期间水库低水位运行，暴露大坝基础薄弱部位，降低结构稳定性。不同风险相互作用形成连锁反应，一个风险事件的发生可能触发其他风险，扩大灾害影响范围。这种风险网络需要全面识别与分析，通过建立风险传导模型，模拟风险组合产生的复合影响，为调度决策提供依据。

1.3 调度决策的约束条件

工程安全阈值为调度决策划定底线。水位阈值明确水库运行的上限与下限，过高水位可能导致大坝漫顶或结构破坏，过低水位则影响兴利效益并威胁大坝基础稳定。库容阈值根据防洪标准与兴利需求设定，防洪库容用于拦截洪水，兴利库容保障供水发电，两者需在不同时期动态分配。渗流阈值反映大坝防渗性能，渗流量异常增加预示着可能存在渗漏通道，需及时调整调度方案并采取工程措施。下游承灾能力与应急响应阈值同样制约调度决策。下游地区地形地貌、人口分布、经济活动决定其承受洪水的能力。河道行洪能力限制水库泄洪流量，超过这一阈值将引发下游洪水泛滥。应急响应阈值基于水库安全监测指标设定，当水位、渗流、位移等参数达到临界值时，需立即启动应急调度程序，采取加大泄洪、限制蓄水等措施，防止险情扩大，保障水库及下游安全。

2 水库安全调度的技术体系

2.1 实时监测与预警系统

水库安全调度的技术支撑始于实时监测与预警系统的构建，其核心在于整合多源数据并建立科学的风险预警机制。多源数据融合涵盖气象、水文、工程监测等多个维度。气象数据包括流域内的降水分布、风速风向、

气温等要素,这些数据通过气象卫星、地面观测站等渠道实时采集,为洪水预报提供基础输入;水文数据则涉及入库流量、出库流量、河道水位等参数,通过水文站、雷达测流等设备进行实时监测,反映水库及流域的水情变化;工程监测数据包括大坝的位移、渗流、应力应变等指标,借助布设的传感器网络,实现对大坝安全状态的实时感知。各类数据通过通信网络传输至调度中心,经数据清洗、格式统一等预处理后,形成综合数据库,为调度决策提供全面的数据支撑。风险预警模型与阈值设定是实时监测系统发挥作用的关键环节。风险预警模型基于历史数据和理论分析构建,能够根据实时监测数据预测未来水情变化及工程安全状态。例如,洪水预警模型利用流域产汇流理论,结合实时降水数据,预测入库洪水过程;大坝安全预警模型则通过分析位移、渗流等监测数据的变化趋势,判断大坝是否出现异常。阈值设定是将模型输出转化为预警信号的关键步骤,需根据水库的工程特性、防洪标准、生态需求等因素,科学确定各类风险指标的预警阈值。当监测数据超过相应阈值时,系统自动发出预警信号,提示调度人员采取相应措施,实现风险的早期识别与防控。

2.2 动态调度模型构建

动态调度模型的构建是实现水库安全高效调度的核心技术,其重点在于建立水文-水力-工程耦合模型,并发展不确定性条件下的鲁棒调度策略。水文-水力-工程耦合模型将流域水文过程、河道水力演进与水库工程特性有机结合,形成一个完整的系统模型^[2]。水文模型模拟流域内降水到径流的转化过程,预测入库流量;水力模型则计算河道内水流的运动规律,模拟洪水在河道中的演进过程;工程模型则考虑水库大坝、泄洪设施等工程结构的物理特性,分析水库调度对工程安全的影响。通过耦合这三类模型,能够更准确地模拟水库调度过程中水文要素、水力条件及工程状态的动态变化,为调度决策提供更真实的模拟场景。不确定性是水库调度面临的固有挑战,因此需要构建不确定性条件下的鲁棒调度策略。水库调度的不确定性主要来源于水文预报误差、气候变化、工程参数波动等因素。鲁棒调度策略旨在在这些不确定性因素影响下,确保调度方案仍能满足安全约束并实现优化目标。例如,在洪水调度中,考虑到降水预报存在误差,鲁棒调度策略会基于预报误差的概率分布,设计多个可能的洪水场景,然后寻找在所有场景下都能保证大坝安全且性能较优的调度方案。这种策略通过引入安全裕度和优化目标的折中,提高调度方案的适应性和可靠性,避免因预报误差导致调度决策失误。

2.3 多目标优化调度方法

水库安全调度往往面临多个相互关联又可能冲突的目标,因此需要发展科学的多目标优化调度方法。防洪、发电、灌溉等目标的冲突与协同是多目标优化的核心问题。在防洪目标下,水库需要在汛期预留库容,这可能减少发电和灌溉可用水量;而发电和灌溉目标则希望水库保持较高水位,这又会影响防洪安全。解决这类冲突需要从系统角度出发,分析各目标之间的相互作用机制,寻找能够平衡各方需求的调度方案。例如,在汛期采用分期调度策略,根据不同时期洪水风险的差异,动态调整汛限水位,在保证防洪安全的前提下,尽量满足发电和灌溉需求。动态权重调整与实时决策支持是多目标优化调度方法的关键环节。动态权重调整是指根据不同时期、不同工况下各目标的重要性差异,灵活调整目标权重,使调度方案更具针对性。例如,在洪水来临前,防洪目标的权重显著提高;而在旱季,供水目标的权重则相应增加。这种动态调整需要结合流域水情、工程状态、社会需求等因素综合判断。实时决策支持系统则基于多目标优化模型和实时监测数据,为调度人员提供决策建议。系统能够快速生成多个可行调度方案,并对各方案的目标达成情况、风险水平等进行评估,辅助调度人员做出科学决策。通过动态权重调整与实时决策支持的结合,实现多目标优化调度的动态化和智能化,提高水库调度的效率和科学性。

3 水库安全调度的应对策略

3.1 风险分级响应机制

风险分级响应机制是水库安全调度的核心保障,通过预警等级划分与应急预案联动实现风险的精准管控。预警等级通常依据风险类型和严重程度分为蓝色、黄色、橙色、红色四级。蓝色预警意味着可能出现轻度风险,此时需加强监测;红色预警对应极端情况,需立即启动最高级应急响应。每个预警等级均配套相应应急预案,明确调度操作流程、人员职责及资源调配方案,如橙色预警触发时,需执行限制发电、降低水位等预泄措施;红色预警则直接启动最大泄洪能力,并向受影响区域发布撤离指令^[3]。分级调度规则与权限分配保障响应机制高效运行。根据风险等级制定差异化调度规则,低风险等级时调度决策侧重兴利目标,高风险等级时优先保障防洪安全。权限分配遵循“逐级授权、紧急授权”原则,常规调度由水库管理部门执行,极端情况可越级授权至流域管理机构,确保决策及时有效。这种分级管理模式既能避免低风险场景下的过度响应,又能在高风险事件中实现快速决策,提升调度系统整体可靠性。

3.2 跨部门协同与信息共享

跨部门协同与信息共享是破解水库调度复杂性的关键路径。流域管理机构与地方政府需构建协同框架,明确各方职责。流域机构负责统筹全局水量调度,地方政府承担下游防洪、人员疏散等属地管理责任。该协同框架通过联席会议制度、联合办公机制等形式落实,定期沟通流域水情、工程状态及社会需求,以此避免决策冲突。在制定调度方案时,流域机构综合地方政府提供的下游河道行洪能力、居民区分布等信息,确保调度方案既能满足工程安全要求,又能兼顾社会安全。实时数据共享平台与决策支持系统为协同调度提供技术支撑。数据平台整合气象、水文、工程监测等多源信息,借助统一接口实现跨部门实时共享。决策支持系统基于共享数据,模拟不同调度方案的影响范围和效果,辅助各方达成共识。系统可直观展示泄洪对下游城镇水位的影响,为地方政府制定防洪措施提供依据;结合水库工程参数,评估调度操作对大坝安全的影响,为流域机构提供决策参考。这种技术赋能的协同模式,显著提升调度决策的科学性和跨部门协作效率。

3.3 极端事件应对策略

极端事件应对策略聚焦超标准洪水与长期干旱等非常规工况,通过灵活调度和资源优化降低风险。在超标准洪水情况下,需采用非常规调度手段,其中预泄是于洪水来临前主动降低水库水位,预留更大调洪库容;滞洪则依靠控制泄洪流量,延缓洪水下泄过程,从而减轻下游压力。这些调度措施需结合洪水演进模型与下游河道承载能力进行动态调整,根据实时监测的上游来水速度,对泄洪阀门开度作出相应调节,在保障大坝安全的同时,将下游淹没损失控制在最小范围^[4]。面对长期干旱,水资源优化配置需突破常规调度逻辑。优先保障生活用水需求,采取削减农业灌溉配额、限制高耗水工业用水等措施,将水资源集中用于民生领域。同时对水库间的联合调度加以优化,运用跨流域调水、错峰供水等策略,提升水资源利用效率。协调上下游水库交替供

水,避免单一水源过度消耗;借助水库群蓄水差异,实现水资源的空间再分配,最大限度延长供水保障时间。

3.4 工程与非工程措施结合

工程与非工程措施结合为水库安全调度提供双重保障。工程加固与调度规则优化相互协同,对大坝进行防渗处理、升级泄洪设施等工程措施,能够提升水库抵御风险的能力;同时优化调度规则,调整汛限水位、完善泄洪流程,可充分发挥工程改造的效能。比如大坝加高后,需要重新评估防洪标准,并相应调整调度方案中的水位控制阈值,以此确保工程安全与兴利目标达成平衡。公众参与与风险沟通机制属于不可或缺的非工程手段。借助科普宣传、社区培训等方式,能够提升公众对水库调度规则和风险的认知,减少因信息不对称产生的误解或恐慌。风险沟通贯穿调度全过程,在预警发布时,及时向受影响区域解释调度决策的必要性;调度实施后,公开水位变化、泄洪安排等信息,主动接受社会监督。这种双向沟通模式增强了公众对调度决策的信任度,为水库安全运行营造良好的社会环境。

结束语

水库安全调度是一项复杂的系统工程,涉及多目标平衡、风险识别、技术支撑及策略应对等多个方面。通过构建科学的技术体系,实施有效的应对策略,可提升水库调度的科学性与可靠性,保障水库及下游安全。未来,需进一步加强技术创新与协同合作,不断完善水库安全调度机制,以适应日益复杂的水文条件与社会需求。

参考文献

- [1]武剑威.水库防洪调度优化策略的数字化探索与分析[J].张江科技评论,2024(5):40-42.
- [2]刘舸晗,张秀菊,赵艳红.基于CAGA-SA的水库防洪优化调度研究[J].水力发电,2025,51(5):91-97.
- [3]王黎杰.水库调度管理对洪水风险的影响研究[J].建筑工程与设计,2024,3(10):200-201.
- [4]程熙.基于风险评估的小型水库安全调度策略研究[J].水电能源科学,2022,37(5):89-92.