

水利枢纽工程防洪调度优化设计探析

邓卓方 梁 晔

广西珠委南宁勘测设计院有限公司 广西 南宁 530007

摘 要：针对水利枢纽传统防洪调度方案固化、预判精度低、库容利用率不均及应急调度滞后等问题，本文基于水量平衡与洪水调节核心理论，结合流域水文与工程运行特征，构建多目标、多约束防洪调度优化模型。通过改进灰狼算法优化模型求解方式，依托多类洪水工况完成仿真验证。结果表明，优化方案可有效削减洪峰、均衡库容利用，提升工程防洪安全性与综合运行效益，可为流域防洪调度智能化落地提供技术参考。

关键词：水利枢纽工程；防洪调度；优化设计

引言：水利枢纽是流域防洪减灾体系的核心设施，其科学调度是抵御洪涝灾害、保障下游安全的关键。当前极端天气频发，流域洪水呈现突发性、高强度特征，传统固定调度模式存在明显短板，难以适配复杂洪水工况。为破解调度精度不足、效益偏低等难题，本文结合工程实际与水文特性，开展防洪调度优化设计研究，通过构建智能化优化调度模型、仿真验证方案效果，旨在提升枢纽防洪调控能力，兼顾安全与水资源综合利用效益。

1 水利枢纽工程防洪调度基础理论与现状分析

1.1 防洪调度核心基础理论

(1) 水量平衡原理：该原理是水利枢纽防洪调度的核心基础，核心是构建入库水量、出库水量与水库库容变化的动态平衡关系。在洪水演进过程中，入库洪水总量、下泄水量与时段内库容蓄变水量始终保持守恒，精准量化三者关联，可为调度模型参数设定、水量演算及动态调度计算提供核心理论支撑。(2) 洪水调节原理：依托水利枢纽的调蓄库容实现洪水过程调控，通过拦蓄、滞蓄洪水，削减河道洪峰流量、分摊洪水总量，改变天然洪水时空分布特征。该机制是防洪调度的核心逻辑，可有效降低下游河道洪水水位，规避集中洪水带来的洪涝风险。(3) 防洪调度约束准则：调度工作需遵循多重约束准则，主要包括工程安全约束、下游防洪标准约束及生态水量约束。同时兼顾汛期运行极限、设备安全阈值、下游防护区防洪等级及河道基础生态流量，保障调度方案科学合规、兼顾安全与生态效益。

1.2 水利枢纽工程概况

(1) 工程基本参数：枢纽核心参数包含总库容、防洪库容、设计及校核防洪标准、各类泄洪设施参数、流域控制面积等，各项参数决定了枢纽洪水调蓄能力、泄洪效率及防洪承载上限，是调度工作的基础依据。(2) 流域水文特性：流域降水存在明显时空分布规律，汛期

降水集中且强度大，洪水具有暴涨暴落的特征。洪水时空分布不均，不同重现期洪水过程差异显著，典型洪水过程线可直观反映洪水演进规律，为调度研判提供水文支撑。(3) 防洪调度任务：枢纽核心任务为保护下游城镇居民区、连片农田、交通及水利基础设施，通过科学调度管控洪水过程，严格把控下泄流量，规避漫堤、溃坝及洪涝灾害，保障下游区域生产生活安全与稳定。

1.3 现行防洪调度模式与存在问题

(1) 现行调度方案：当前枢纽调度分为常规、汛期及应急调度三类。常规调度维持日常水位与生态流量；汛期依据预设方案管控库容与泄量；应急调度针对超标洪水、突发险情开展紧急处置，形成常态化调度管控体系。(2) 调度现存问题：现有调度体系存在明显短板，调度方案固化、灵活性不足，洪峰流量与洪水过程预判精度偏低，水库库容利用率不均衡，汛期应急调度响应流程繁琐、处置滞后，难以适配极端洪水工况^[1]。(3) 问题成因分析：核心成因集中在三方面，技术上传统预报模型精度有限、智能化程度不足；机制上调度机制僵化，动态调整机制缺失；数据上水文监测数据更新滞后、数据覆盖面不足，难以支撑精准高效调度。

2 水利枢纽工程防洪调度优化模型构建

2.1 优化调度模型构建原则与思路

(1) 构建原则：本次模型构建严格遵循四大核心原则，首要坚持安全性优先原则，将工程主体安全、下游区域防洪安全作为模型构建的底线要求，杜绝超标准调度风险。其次遵循效益最优原则，在保障防洪安全的前提下，统筹水资源利用、工程运维等综合效益，实现调度效益最大化。同时兼顾适配性原则，模型参数与结构适配流域水文特性、枢纽工程参数及当地防洪管控要求。最后坚守可操作性原则，简化冗余计算逻辑，贴合实际工程调度流程，保证模型可落地、可应用。(2) 整体构

建思路:模型以破解传统调度固化、精度不足、库容利用率低等问题为出发点,以降低流域洪水风险、提升整体防洪效益为核心目标。依托流域长系列水文监测数据、枢纽工程运行参数及防洪约束标准,整合洪水演进规律与工程调蓄特性,打破固定调度模式局限。通过设定多维度目标函数、界定多重约束条件、优选优化求解算法,搭建适配多场景、多洪水工况的智能化防洪优化调度体系,实现洪水动态精准调度。

2.2 优化调度目标函数设定

(1) 核心防洪目标:模型将防洪安全作为首要目标,重点实现下游最大下泄流量最小化,有效削减河道洪峰,避免下游河道超阈值行洪。同时以洪峰削减效果最优为辅助核心指标,精准调控水库泄洪节奏,错峰、削峰化解集中洪水冲击风险,有效降低下游城镇、农田及基础设施的洪涝淹没与损毁风险,筑牢区域防洪安全底线。(2) 综合效益目标:在满足防洪安全的基础上,设置多项综合效益优化目标。通过优化调度时段泄量组合,提升水库防洪库容与兴利库容的利用效率,避免库容闲置或过度空置。兼顾汛期水资源合理留存,平衡防洪安全与水资源储备需求,为枯水期供水、灌溉、生态补水提供保障。同时最小化工程运行损耗,合理控制泄洪设备启停频次与运行负荷,降低枢纽长期运维成本^[2]。

2.3 模型约束条件界定

(1) 水量平衡约束:基于基础水量平衡原理,设定全时段水量平衡约束条件,明确各调度时段内入库洪水总量、出库泄洪总量与水库库容蓄变水量的动态守恒关系。精准考量区间入流、蒸发、渗漏等微量水量损耗,量化各时段水量转换规律,保障模型水量演算的准确性与合理性,为调度计算提供基础约束依据。(2) 工程运行约束:结合枢纽工程设计标准与运行规范,设定严格的工程运行约束。限定水库汛期最高防洪水位与最低安全运行水位,避免超水位运行引发坝体安全隐患。同时界定溢洪道、泄洪洞等各类泄洪设施的最大、最小泄流能力,规范泄洪设备运行区间,杜绝超荷载运行、空泄等不合理调度行为,保障工程稳定运行。(3) 防洪安全约束:严格契合下游既定防洪标准,匹配河道行洪能力与防护区承载阈值。设定下游控制断面安全行洪流量上限,严控下泄洪水流量超出河道承载能力。明确洪水淹没范围、淹没深度等阈值约束,确保调度方案实施后,下游防护区域不会出现超标洪涝灾害,全面满足区域防洪管控要求。

2.4 模型求解算法选取与优化

(1) 主流求解算法对比:针对多目标、多约束的防

洪调度模型,对比三类主流智能算法。动态规划算法逻辑简单、计算精度高,但面对复杂多维调度场景易出现维数灾问题,计算效率较低。遗传算法全局搜索能力较强,适配多目标优化问题,但局部搜索精度不足,易出现早熟收敛现象。灰狼算法收敛速度快、稳定性强,全局与局部搜索均衡性更好,更适配复杂洪水调度的非线性求解场景。(2) 改进算法设计:结合本次模型多约束、多目标、非线性的求解特征,对传统灰狼算法进行参数优化与机制改进。调整算法收敛因子与权重系数,优化种群更新策略,提升算法对局部最优解的精准捕捉能力。针对水量、水位、泄流等多重约束,引入约束修正机制,规避无效解、劣解迭代,提升算法适配防洪调度场景的求解精度与稳定性^[3]。(3) 模型求解流程:构建标准化全流程求解体系,首先完成水文数据、工程参数、约束阈值、目标权重等基础数据录入与预处理;其次通过改进算法开展迭代计算,不断优化泄洪时序与库容调度方案;随后对求解结果进行安全校验与效益核验,剔除违规、低效调度方案;最终输出兼顾防洪安全与综合效益的最优调度方案,完成模型完整求解。

3 优化调度方案仿真验证与效果分析

3.1 仿真计算基础条件

(1) 典型洪水工况选取:为全面检验优化调度模型的适应性与可靠性,本次仿真选取多类代表性洪水工况,涵盖平水年常规洪水、丰水年偏大洪水及极端暴雨突发洪水三种典型场景。不同工况分别对应日常汛期、高风险汛期及超标应急汛期,能够覆盖枢纽运行过程中绝大多数洪水工况,可全方位验证优化方案在常态与极端条件下的调度性能。(2) 基础数据预处理:仿真计算前对各类基础数据进行系统整理与校验修正,主要包括流域长系列逐日降水、洪水过程、区间入流等水文数据,以及水库各级水位、泄流能力、库容曲线等工程运行参数。同时统一调度边界条件,剔除异常数据、补齐缺失数据,修正数据偏差,保障输入数据的准确性、一致性,为仿真模拟提供可靠数据基础。(3) 评价指标体系构建:结合防洪安全与综合运行效益,构建多维度综合评价指标体系。核心指标包含洪峰削减率、下泄流量平稳度、库容有效利用率、洪水调控时长、下游洪涝灾害损失率等,兼顾防洪安全性、水资源利用效率与工程运行稳定性,实现量化、客观、全面的调度效果评估。

3.2 优化调度方案仿真计算

(1) 常规工况调度仿真:以平水年典型洪水过程为输入条件,开展常规汛期调度仿真模拟。基于优化模型的目标函数与约束条件,动态模拟水库水位变化、库容

蓄泄过程、逐时段下泄流量变化情况,完整复现优化调度方案在常规洪水下的调度流程,记录各项运行指标,获取常态工况下的调度结果。(2)极端工况调度仿真:选取极端暴雨形成的超标洪水过程,模拟高风险、高强度洪水冲击下的优化应急调度过程。通过模型动态迭代计算,验证方案在洪量集中、洪峰偏高的极端场景中能否快速调整蓄泄策略,实现错峰削峰、严控下泄流量上限,检验优化模型的应急调度能力与安全防护水平^[4]。(3)不同方案对比仿真:在完全一致的水文输入与工程边界条件下,同步开展现行传统调度方案与优化调度方案的仿真计算。统一数据统计口径,记录两种方案在不同工况下的水位过程、泄流过程、库容利用状态及防洪成效,形成完整、可对比的仿真样本数据,为后续效果分析提供数据支撑。

3.3 调度效果对比分析

(1)防洪安全效果对比:对比结果表明,优化调度方案可显著提升洪峰削减效果,有效压低下游控制断面峰值流量,避免河道出现超标准行洪状态。相较于传统固化调度模式,优化方案可根据洪水演进动态调整泄洪节奏,缩短高水位持续时长,降低下游淹没风险与堤防出险概率,整体防洪安全稳定性大幅提升。(2)工程运行效益对比:在工程运行层面,优化方案有效改善了传统调度库容闲置、蓄泄不合理的问题,显著提升防洪库容与兴利库容综合利用率。在保障防洪安全前提下合理留存水资源,提升汛期水资源利用效率,同时平稳控制设备运行负荷,减少频繁启闭与超负荷运行情况,增强枢纽整体运行稳定性与经济性。(3)方案优势与适配性分析:优化调度方案核心优势在于动态自适应调控、多目标协同优化与风险可控性强,突破了传统方案固化死板、预判滞后的短板。该方案适配多数常规洪水与极端突发洪水工况,实用性较强,但在超校核标准的特大洪水极限工况下,仍需结合人工应急干预,存在一定适用边界。

3.4 优化调度实施保障措施

(1)技术保障:完善流域水文监测网络,提升雨量、

水位、流量数据的实时采集与传输精度,优化洪水预报预警模型,提升洪水过程预判准确率。搭建智能化调度平台,接入优化调度算法模块,实现洪水演算、方案生成、风险研判一体化智能调度,为方案落地提供技术支撑。(2)管理保障:健全汛期防洪调度管理制度,细化不同洪水等级的调度流程、审批程序与处置规范,明确调度、值守、研判各岗位职责。建立汛期会商机制与应急响应机制,规范突发险情处置流程,保障优化调度方案能够快速、规范、精准落地执行^[5]。(3)运维保障:定期开展泄洪闸、泄洪洞、监测仪器、水位传感设备的常态化检修与校准,及时排查设备故障与运行隐患。建立设备运维台账,落实定期巡检、养护、更新机制,保障各类设备工况稳定、数据可靠,为优化调度常态化应用提供硬件保障。

结束语

本文完成水利枢纽防洪调度优化模型构建、仿真验证与效果分析,优化方案有效弥补了传统调度的诸多缺陷,显著提升洪峰削减效果与库容利用率,强化工程应急调度能力。研究明确了优化调度的技术、管理与运维保障体系,可为同类水利工程防洪调度优化提供借鉴。后续可进一步优化算法性能,完善特大洪水极限工况调度策略,持续提升调度方案的全域适配性与智能化水平。

参考文献

- [1]李强.大型水利枢纽工程防洪调度优化研究[J].水利科技与经济,2022,28(2):123-128.
- [2]王刚.多目标优化在水利工程防洪调度中的应用[J].水利科技进展,2021,31(4):87-92.
- [3]骆寒菁,黄清烜,叶斌彬,等.数字孪生九龙江北溪流域防洪“四预”应用[J].水利信息化,2024,11(5):98-105.
- [4]蔡勇.数字孪生峡江水利枢纽工程建设探索实践[J].水利发展研究,2024,24(9):38-43.
- [5]李晓东.平寨水库防洪预报调度专业化服务质量优化的探讨[J].水利科学与寒区工程,2023,6(6):100-103.