

峡山水库汛限水位动态控制模型研究

董培冲, 徐莉娜

(潍坊市水文中心, 山东 潍坊 261061)

【摘要】为保障防洪安全这一重要前提下大力挖掘兴利潜力,切实提高峡山水库洪水资源化利用水平。本研究积极开展汛限水位动态控制模型相关研究工作,精心构建了以入库洪水预报、动态控制域计算以及联合调度为核心的技术模型体系,同时明确了一种基于预报预泄能力的动态控制域确定新方法,并将洪水预报模块与充分考虑防洪、供水等多目标的优化调度模型进行有机集成,通过运用历史洪水资料开展模拟调度,进行对比分析。结果显示,动态控制方案能够在有效维持防洪安全标准的同时,显著提升汛末蓄水位和可供水量,成功实现洪水资源的安全合理利用。该模型能够在可控风险范围之内极大增加水库综合效益,从而为水库精细化调度以及水资源高效利用提供坚实技术支撑。

【关键词】峡山水库;汛限水位;动态控制;防洪调度;洪水资源化

【中图分类号】TV697

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-08-0021-03

Study on Dynamic Control Model for Flood limit Water Level of Xiashan Reservoir

DONG Peichong, XU Lina

(Hydrology Center of Weifang Municipality, Weifang, Shandong 261061, China)

Abstract: Under the premise of ensuring flood control safety, it is essential to fully tap the beneficial potential and effectively improve the flood water resource utilization of Xiashan Reservoir. This paper conducts research on the dynamic control model for flood limit water level. A technical model system centering on inflow flood forecasting, dynamic control range calculation and joint operation is constructed. A new method for determining the dynamic control range based on forecast aided pre discharge capacity is proposed. The flood forecasting module is organically integrated with an optimal operation model that takes multiple objectives including flood control and water supply into account. Simulated operation and comparative analysis are carried out using historical flood data. The results show that the dynamic control scheme can remarkably raise the water level at the end of flood season and available water volume while maintaining flood control safety standards. Safe and rational utilization of flood water resources is realized. Within controllable risk margins, the model greatly increases comprehensive reservoir benefits and provides solid technical support for refined reservoir operation and efficient water resource utilization.

Key words: Xiashan Reservoir; Flood limit water level; Dynamic control; Flood control operation; Flood water resource utilization

峡山水库作为重要防洪与供水枢纽,在保障下游防洪安全以及支撑区域经济社会发展等方面起到关键作用,其现行的基于固定汛限水位的调度方式,虽在一定程度上能够确保防洪安全,但在应对实际雨洪过程时所体现出的灵活性以及洪水资源利用效率方面存在着明显局限,常常导致汛前过度泄水汛后蓄水不足的情况,进而对水库综合效益的发挥形成制约。随着水文气象预

报技术的进步以及水库调度理论的深化,在风险可控的前提下,实施汛限水位动态控制已成为一种有效协调防洪与兴利,提升水资源利用效率的途径。本文致力于探索一套适用于峡山水库汛限水位动态控制的方法,以为水库的安全高效运行提供技术支撑。

收稿日期: 2026-03-10

作者简介: 董培冲(1975—),男,工程师

1 动态控制模型构建

1.1 动态控制域

动态控制域定义了汛期水库水位允许实时浮动的上下边界范围,是实施动态控制的核心依据。其上边界 Z_{dt}^{max} 依据短期水文预报信息与水库预泄能力确定,核心原理是在预见期 T_f 内,将水位 Z_t 从当前起调水位预泄至防洪限制水位 Z_{max} 以下,并为预报降雨量产生的预报洪量 W_f 预留库容,动态控制域上边界计算公式表达为:

$$Z_{dt}^{max}=f(Z_t, Q_{pre}, T_f, W_f, Z_{max}) \quad (1)$$

式中: Q_{pre} 为预泄能力对应的泄流量。

下边界的确定则主要考虑下游河道的防洪安全与水库汛末蓄水需求,确保在任何调度操作下,下泄流量不超过下游安全泄量,并尽量维持水位不低于供水的死水位,其简化表达式为:

$$Z_{dt}^{min}=\max(Z_{min}, g(Q_s, D_w)) \quad (2)$$

式中: Z_{dt}^{min} 为下边界; Z_{min} 为死水位; Q_s 为入库流量; D_w 代表后续需水预测,具体数值取决于预见期精度与预泄设施能力。

1.2 入库洪水预报模型

入库洪水预报模型为动态控制提供预见期内流量过程的关键输入,其精度直接决定动态控制的安全性效益。本研究采用新安江三水源蓄满产流模型模拟峡山水库控制流域的降雨径流关系。模型将流域划分为多个单元,每个单元的计算包括蒸发、产流、分水源和汇流四个环节。其产流计算的核心公式基于蓄满产流理论:当流域张力水蓄量 W 达到蓄水容量 WM 时产生径流 R ,即:

$$R=P-E-(WM-W) \quad (3)$$

式中: P 为单元降雨, E 为蒸发。

模型利用流域历史水文资料进行率定,使用的目标函数为纳什效率系数,率定期效率系数达到 0.85 以上,验证期效率系数稳定在 0.80,表明模型具备可靠的预报能力。模型预见期长度为 24 h,其平均洪峰流量预报误差在 15% 以内,峰现时间误差在 3 h 以内。预报不确定性主要来源于定量降雨预报的误差,采用误差分布特征进行描述,作为后续风险评估的输入,流程如图 1 所示。

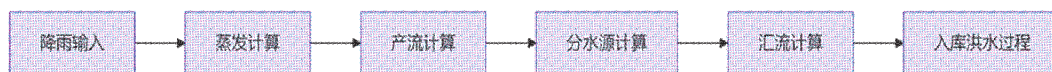


图 1 峡山水库洪水预报模型结构图

1.3 联合调度模型构建

联合调度模型是集成动态控制域与洪水预报,生成实时调度指令的决策支持核心。该模型采用多目标滚动优化框架,在每个决策时步开始时启动。其首要优化目标是极小化下游防洪控制断面的超标准洪水风险,次要目标是在确保风险可控的前提下,最大化调度期末的水库蓄水量,以提升供水与发电效益。优化过程受到一系列严格约束的限定,主要包括水库水位必须运行在由死水位和防洪高水位构成的绝对边界内,下泄流量不得超过下游安全泄量,且受限于当前水位下的闸门泄流能力曲线,还需遵循水库水量平衡的基本物理规律。模型采用带有精英保留策略的遗传算法进行求解,算法参数设置为种群规模 100,交叉概率 0.8,变异概率 0.1,进化代数 200 代。

求解引擎以动态控制域作为决策变量的搜索空间,以洪水预报结果作为未来输入条件,通过滚动优化输出当前时段的最优泄流量建议。该模型与预报模块、控制域计算模块串联,形成一个完整的“监测-预报-决策”闭环系统,其工作流程如图 2 所示。

2 实例应用与结果分析

2.1 模型应用情景设置

为验证动态控制模型实际效果,选取峡山水库 2018 年“温比亚”台风暴雨洪水与 2019 年“利奇马”台风暴雨洪水两场典型历史洪水过程进行模拟调度分析。这两场洪水汛前起调水位均为 37.40 m 的原设计汛限水位,洪峰流量分别为 2 550 m³/s 和 1 890 m³/s,洪水总量分别为

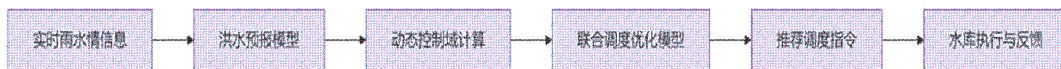


图 2 峡山水库汛限水位动态控制模型系统流程图

2.1×10⁸ m³ 和 1.7×10⁸ m³, 具有较好的代表性。模拟设置两种对比情景:情景 1 为原设计固定汛限水位方案,严格执行当水库水位达到 37.40 m 时,按防洪调度规则启用预泄或敞泄,整个汛期汛限水位保持不变。情景 2 为本文构建的动态控制方案,其核心运行规则为,在洪水预见期内,根据实时预报信息动态计算并调整允许的最高控制水位,在 37.40 m 至动态控制域上限之间进行预蓄或控泄,洪水过后则尽快回蓄至动态控制域允许的较高水位。两种情景共享相同的初始条件、入库洪水过程以及下游安全约束条件,确保结论的可靠性。

2.2 调度过程与效果分析

模拟调度结果显示,在 2018 年洪水过程中,固定方案因严格执行 37.40 m 限制,整个洪水阶段水位在 37.40~37.80 m 之间波动,最大下泄流量控制在 1 200 m³/s,削峰率为 52.9%。动态控制方案依据 24 h 预见期预报,在洪峰到来前将水位预泄至 37.15 m,为拦蓄洪尾创造了库容空间,洪水过程中最高调洪水位为 37.92 m,始终低于防洪高水位 38.20 m,最大下泄流量为 1 150 m³/s,削峰率提高至 54.9%。洪水过后,固定方案水位回落至 37.40 m,而动态控制方案利用洪尾水量将水位回蓄至 37.65 m。在 2019 年洪水过程中,动态控制方案同样表现出更优的洪水资源利用能力,汛末蓄水位达到 37.58 m。两场洪水综合评估,动态控制方案在确保防洪安全、下游最大下泄流量未超安全泄量的前提下,将汛末蓄水位平均提升了 0.23 m。具体防洪与兴利效果指标见表 1。表中数据清晰地表明了动态控制方案在维持相近防洪安全水平的同时,显著提升了水资源蓄存效益。

表 1 两种调度方案效果对比

评估指标	固定汛限 水位方案	动态控 制方案
最高调洪水位/m	37.80	37.92
平均削峰率/%	53.5	55.8
最大下泄流量/(m ³ ·s ⁻¹)	1 200	1 150
平均汛末蓄水位/m	37.40	37.63
两场洪水总计增供水量/m ³	0	8.6×10 ⁶

3 模型验证与风险效益评估

3.1 模型可靠性检验

为对所构建的预报-调度耦合模型开展系统

性的模拟检验与精度评估,采用峡山水库 2015—2022 年共计 12 场次的历史洪水过程,将模型模拟的调度结果与实际历史调度记录进行对比。这一检验方式聚焦于水位控制过程、关键下泄流量以及最终蓄水状态的吻合度等方面。分析显示,模型模拟的水位过程线和实际过程线吻合情况良好,尤其对于起调水位处于 37.00~37.40 m 这个区间范围内的洪水而言,模拟的洪水最高水位与实际值的平均绝对误差为 0.08 m,同时最大误差不超过 0.15 m,且该最大误差出现在预报误差相对较大的 2019 年“利奇马”台风所引发的洪水场次当中;在下泄流量的模拟表现上,模拟的洪峰流量与实际下泄洪峰流量的平均相对误差为 5.3%,峰现时间误差的平均值为 1.8 h;从水量平衡的角度考量,模拟计算的全场次洪水调度期末库容与实际库容的平均偏差率为 1.7%,这表明模型能够较好地遵守水量平衡原则,未产生显著的系统性偏差;综合纳什效率系数、水量平衡误差等多项指标进行评判,模型在复现历史调度决策与结果方面展现出较高的可信度与稳定性,进而验证了其用于模拟分析与方案比选的有效性,模型对 2018、2019 年重点场次的检验核心指标如表 2 所示。

表 2 模型模拟结果校验对比

洪水场次	模拟最 高水位/m	实际最 高水位/m	水位 误差/m	模拟削 峰率/%	实际削 峰率/%
2018 年 洪水	37.92	37.89	+0.03	54.9	55.2
2019 年 洪水	37.58	37.60	-0.02	56.7	57.0

3.2 防洪风险分析

实施汛限水位动态控制时,可能引入附加防洪风险。该风险的主要来源包括输入降雨预报存在误差以及流域水文模型预报具有不确定性。本文采用蒙特卡洛随机模拟方法来进行风险评估,基于历史误差统计特征生成 1 000 组纳入预报不确定性纳入考虑的“预报-实际”洪水序列对,分别输入固定方案与动态控制方案模型开展调度计算,此处的风险是以水库水位超出某一限定水位的概率表征。模拟得出结果为在动态控制方案之下水库水位于汛期超出原设计固定汛限水位 37.40 m 的概率为 100%,不过(下转第 39 页)