

高关水库优化设计及运行水位动态调控研究

向鑫¹, 郭生练¹, 贺俊², 朱明华², 胡金林², 朱涛², 袁全文², 郑琨², 柯贤昕²

¹武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉

²湖北省高关水库管理局, 湖北 荆门

收稿日期: 2025年6月4日; 录用日期: 2025年7月1日; 发布日期: 2025年8月26日

摘要

高关水库的原设计洪水偏大导致蓄满率偏低, 防洪与兴利矛盾突出。本文基于复核设计洪水成果, 采用调洪演算法推求汛限水位等特征值, 评估汛限水位调整对供水和发电效益的提升作用。在确保防洪标准不变的前提下, 主汛期和前后汛期的汛限水位可调整为119.50 m和120.50 m。采用1972~2023年日流量系列进行模拟调度, 年均弃水量和发电量分别减少了1196万m³和增发117万kW·h。在实际运行调度中, 依据水文气象预报信息, 若预报无雨或小雨, 汛限水位可上浮水位0.50 m, 梅雨结束后进入后汛期水位运行, 实现水库运行水位动态调控和提前蓄水。高关水库年均可增加约2000万m³蓄水量。

关键词

设计洪水, 汛限水位, 动态控制, 提前蓄水, 效益分析, 高关水库

Optimal Design and Dynamic Control of Water Level in Gaoguan Reservoir

Xin Xiang¹, Shenglian Guo¹, Jun He², Minghua Zhu², Jinlin Hu², Tao Zhu², Quanwen Yuan², Kun Zheng², Xianxin Ke²

¹State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan Hubei

²Bureau of Gaoguan Reservoir Management of Hubei Province, Jingmen Hubei

Received: Jun. 4th, 2025; accepted: Jul. 1st, 2025; published: Aug. 26th, 2025

Abstract

The original design floods are overestimated which resulted in lower refill rate, and the contradiction between flood control and water resources utilization is very serious in Gaoguan Reservoir. Based on the rechecked design floods, this study employs flood routing method to determine flood limited water level

作者简介: 向鑫, 男, 博士研究生, 研究方向: 水文水资源, Email: Xiangxin97@whu.edu.cn

文章引用: 向鑫, 郭生练, 贺俊, 朱明华, 胡金林, 朱涛, 袁全文, 郑琨, 柯贤昕. 高关水库优化设计及运行水位动态调控研究[J]. 水资源研究, 2025, 14(4): 341-349. DOI: 10.12677/jwrr.2025.144037

(FLWL) and evaluates the benefits of adjusting the FLWL in terms of water supply and power generation. Under the condition of maintaining the original flood control standard, the FLWL in the main flood season and the pre-/post-flood seasons can be adjusted on 119.50 m and 120.50 m, respectively. The operation simulation results using daily data series from 1972 to 2023 show that the average annual water abandonment and power generation has reduced by 11.96 million m^3 and increased by approximately 1.17 million $\text{kW}\cdot\text{h}$, respectively. Based on hydrometeorological forecasting information, the FLWL could be raised by 0.5 m if no rainfall or only light rain is predicted, the operation in the main flood season can be changed to the post-flood season after the end of plum rain season for dynamic operation of water level and early refill. This study is expected to increase about 20 million m^3 storage water annually.

Keywords

Design Flood, Flood Limited Water Level, Dynamic Control, Refill Advance, Benefit Analysis, Gaoguan Reservoir

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

高关水库是一座以供水和灌溉为主,兼具防洪、生态保护、发电及旅游等综合效益的大(II)型水库。水库于1970年7月开工建设,1973年12月建成蓄水[1]。工程按100年一遇洪水标准设计,2000年一遇洪水标准进行校核。主要特征水位包括:正常蓄水位121.50 m,汛限水位118.00 m,防洪高水位121.46 m,设计洪水位121.72 m,校核洪水位123.19 m。

高关水库运行以来,呈现出显著的季节性水资源供需矛盾:汛期弃水量均为设计库容的23%,而枯水期有效蓄水量仅能满足设计需求的37%。特别值得关注的是,在2011~2015年持续干旱期间,年均入库径流量比多年均值锐减63%,导致供水保障率下降至62%,引发8万人口饮水安全危机和5000吨粮食减产,暴露出当前设计和调度规程在极端气候条件下的脆弱性。由于原设计洪水偏大,导致推求的汛限水位(主汛期118.00 m/后汛期119.00 m)偏低,导致防洪库容与兴利库容的时空错配,统计显示30%的年份最低水位已逼近死水位(100.50 m);设计效益与实际运行效果存在的巨大落差,工程运行50多年来从未达到正常蓄水位。

郭生练等[2]论述了开展中长期降雨预报和洪水概率预报,水库汛期分期和运行水位动态控制,可以显著提高洪水资源利用率。何志鹏等[3]考虑气象水文预报信息及其来水起涨过程的不确定性,建立了乐昌峡水库预报预泄调度和风险分析模型,实现了乐昌峡水库汛期运行水位动态控制,多年平均可减小弃水量5410万 m^3 ,经济社会效益显著。郭生练等综述了汛限水位动态控制研究进展和试点工作,再次阐述了开展汛期水位动态控制的必要性和可行性[4]。

2024年高关水库除险加固和溢洪道扩建后,泄流能力大幅度提高。现行的汛限水位和调度规程已无法满足新时期防洪与兴利的需求。本文基于高关水库设计洪水复核成果,采用调洪演算方法重新计算确定汛限水位。在保证防洪标准不变的前提下,评估汛限水位调整方案对供水与发电效益的提升效果,实现水库运行水位动态控制和提前蓄水。研究成果将为高关水库修编调度规程、指导水库运行管理提供理论依据和技术指导,实现水资源高效利用。

2. 流域概况及数据资料

2.1. 高关水库流域概况

高关水库位于湖北省京山市北部的大富水河上游,坝址设于宋河镇高关村,水库控制流域面积为303 km^2 ,

总库容为 2.01 亿 m^3 。高关水库流域概况见图 1。水库所在流域属亚热带季风气候区，四季分明，冬季寒冷，夏季炎热，年降水丰沛。多年平均降雨量为 1004 mm，年均蒸发量为 738 mm。降水年内分布不均，主要集中在 4 月至 8 月的汛期，占全年降雨量的 70% 左右；9 月至 12 月降雨显著减少，12 月为全年最枯月。空间分布上，降雨量在海拔较高的西北部相对较多，而在地势较低的东南部相对较少，呈现一定的地形分异特征。

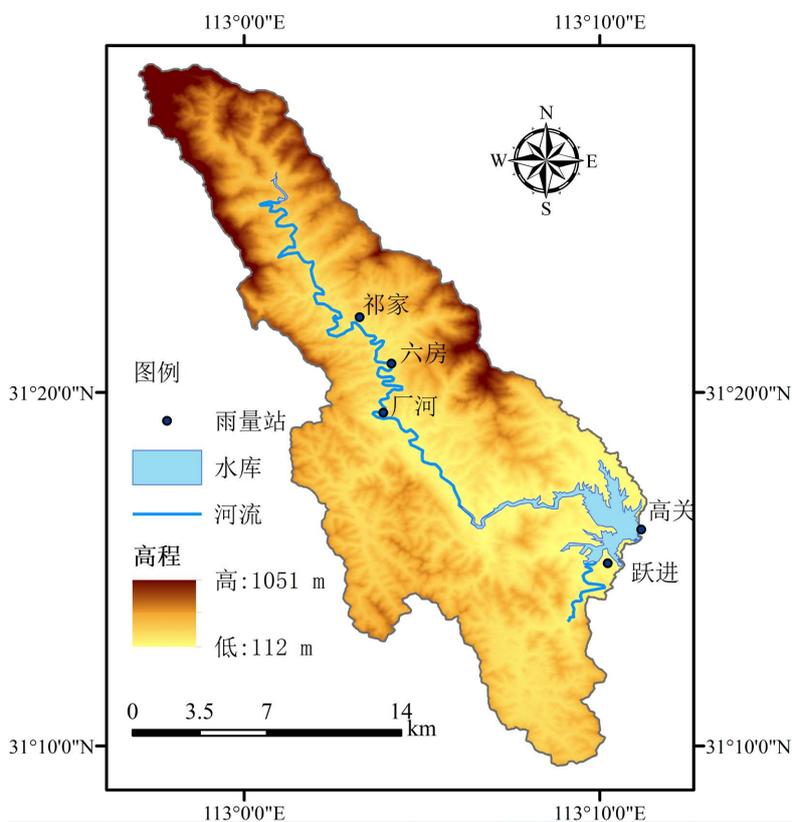


图 1. 高关水库流域概况图

2.2. 数据资料

本次复核计算将流量和降雨资料系列延长至 2023 年，分别采用流量途径和暴雨途径(设计暴雨和经验瞬时单位线法)推求高关水库设计洪水，综合得出洪峰、12 h、1 d 和 3 d 洪量的设计洪水成果，并选择典型年按照同频率放大法推求年最大设计洪水过程线[5]。选用年最大日流量资料系列和长江中下游梅雨系列资料[6]，采用数理统计和成因分析方法，开展高关流域汛期分期研究。确定前汛期 5 月 1 日至 6 月 10 日、主汛期 6 月 11 日至 8 月 10 日、后汛期 8 月 11 日至 9 月 30 日。

1) 主汛期设计洪水过程线

选取对水库防洪最不利的两场洪水过程，即 2007 年 7 月 12~15 日和 2016 年 7 月 19~22 日，分别选择洪峰流量及 12 h、1 d、3 d 洪量设计值为控制，采用同频率放大法推求，得出高关水库 100 年一遇和 2000 年一遇的年最大设计洪水过程线。

2) 后汛期设计洪水过程线

选取对防洪不利的后汛期两场洪水过程，2005 年 8 月 1~4 日和 2008 年 8 月 28~31 日，分别选择洪峰流量及 12 h、1 d、3 d 洪量设计值为控制，采用同频率放大法推求，得出高关水库不同重现期后汛期最大设计洪水过程线。

3) 高关水库 1972~2023 年调度运行资料

包括逐日平均库水位、入库流量与出库流量，弃水量，灌溉和供水量等。

3. 高关水库汛限水位复核计算

3.1. 防洪目标和任务

根据《高关水库 2023 年调度运用方案》¹，高关水库防洪标准为 100 年一遇洪水设计，2000 年一遇洪水校核，下游防洪标准为 20 年一遇，河道安全泄量为 450 m³/s。当发生 20 年一遇及以下洪水时，在确保工程安全的前提下，拦蓄全部或部分洪水，下泄流量原则上按不超过下游河道安全泄量进行控制。保证下游地区防洪安全。当发生 20 年一遇以上洪水时，且当水库水位超过防洪高水位 121.46 m，为确保大坝安全为主进行调度运用，逐步加大泄洪流量。

3.2. 防洪调度规则

在确保水库大坝安全的前提下，充分利用水库的防洪库容，最大限度地发挥水库的调蓄作用。当水库泄洪与下游河道防洪发生矛盾时，下游河道行洪应服从水库安全度汛。即：防洪限制水位以上以泄为主，泄洪设施逐步投入的原则。

1) 当水库水位低于汛限水位时，可通过发电调节水库水位。

2) 当水库水位超过汛限水位时，开启溢洪道闸门泄洪。入库流量小于下游河道安全泄量 450 m³/s 时，按来量下泄；入库流量大于下游河道安全泄量 450 m³/s 时，按入库流量的 60% 下泄，同时下泄流量不超过敞泄流量，直至库水位达到防洪高水位 121.46 m。

3) 当库水位超过防洪高水位 121.46 m 时，水库视入库流量的增减幅度合理下泄，直至闸门全开敞泄。

$$Q_{out,t} = \min \left\{ \max \left\{ Q_{out,t-1} - k \times (Q_{in,t-1} - Q_{in,t}), Q_{in,t} \right\}, Q_{out,max} \right\} \quad (1)$$

式中： $Q_{out,t}$ 和 $Q_{in,t}$ 分别为第 t 时刻出库和入库流量， $Q_{out,max}$ 为敞泄出库流量，单位均为 m³/s， k 为调整系数。

4) 当水库水位超过设计洪水位 121.72 m 时，且水库的预报水位将继续上涨时，以保证水库安全为主，闸门敞开泄洪。

5) 在入库洪峰已过且出现了最高库水位，消落阶段在不影响水库坝坡稳定的前提下，合理安排水库下泄流量，尽快使水库水位降到汛限水位以下。

6) 当水库水位超过校核洪水位 123.19 m，且预报水位将继续上涨时，报请上级批准启动《高关水库防汛抢险应急预案》，并做好爆破 4#副坝进行泄洪，以确保主坝安全。

7) 约束条件：

流量变幅约束

$$|Q_{out,t} - Q_{out,t-1}| \leq \Delta Q \quad (2)$$

最大出库流量约束

$$Q_{out,t} \leq Q_{out,max} \quad (3)$$

式中： ΔQ 为相邻时段允许的流量变幅，单位为 m³/s。

3.3. 调洪演算方法

调洪演算的核心在于联立水量平衡方程与水库蓄泄关系，逐步求解非线性方程组[7] [8]。对任一时段 Δt ，水量平衡方程可表示为：

¹湖北省高关水库管理局。湖北省高关水库 2023 年调度运用方案[R]，2023 年。

$$\frac{Q_{in,t-1} + Q_{in,t}}{2} \Delta t - \frac{Q_{out,t-1} + Q_{out,t}}{2} \Delta t = V_t - V_{t-1} \quad (4)$$

其中, $Q_{in,t-1}$ 、 $Q_{in,t}$ 分别为该时段起末入库流量, $Q_{out,t-1}$ 、 $Q_{out,t}$ 为起末出库流量, V_{t-1} 、 V_t 为起末库容, Δt 是时段长短, 在本研究中为 1 h。当已知入库流程 $Q_{in,t-1}$ 、 $Q_{in,t}$, 并以前一时段的 V_{t-1} 、 $Q_{out,t-1}$ 作为初始条件后, 方程中仅剩 $Q_{out,t}$ 与 V_t 两个未知数; 此时再引入水库蓄泄特性曲线方程

$$Q_{out} = f(V) \quad (5)$$

该方程可结合当前时刻水库库容以及具体的防洪调度规则, 确定出库流量的数值。联立上述方程组, 即可得到本时段的 V_t 与 $Q_{out,t}$ 。随后, 将其作为下一时段的初始值, 不断迭代, 直至模拟出完整的下泄流量过程线、最大下泄流量以及水库最高水位。

3.4. 结果分析

依据 2007 年和 2016 年典型洪水放大推求的设计洪水过程线, 分别采用不同的起调水位, 按照高关水库现行防洪调度规程进行调洪演算。

1) 100 年一遇设计洪水调洪演算结果

图 2 分别绘出 2 个典型年 119.50 m 起调的 100 年一遇($P = 1\%$)设计洪水调洪演算结果, 其最高库水位均未超过原设计的设计洪水水位 121.53 m。

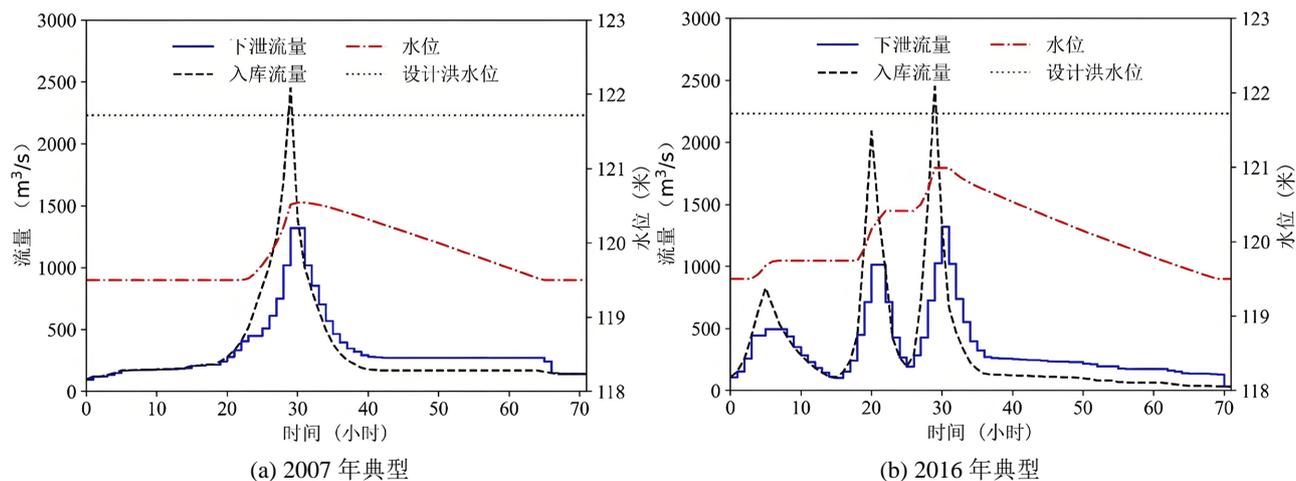


图 2. 119.50 m 起调 100 年一遇设计洪水调洪演算结果

2) 2000 年一遇校核洪水调洪演算结果

图 3 分别绘出 2 个典型年 119.50 m 起调的 2000 年一遇($P = 0.05\%$)校核洪水调洪演算结果, 其最高库水位均未超过原设计的校核洪水水位 123.19 m。

3) 20 年一遇设计洪水调洪演算结果

依据 2007 年和 2016 年两次典型洪水过程, 推求了 20 年一遇设计洪水过程线。在起调水位为 119.50 m 的条件下, 计算得到的最大出库流量分别为 $350 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $364 \text{ m}^3/\text{s}$, 均未超过下游河道的安全泄量 $450 \text{ m}^3/\text{s}$; 对应的防洪高水位分别为 120.63 m 和 120.91 m, 均低于原设计防洪水位 121.46 m, 满足防洪安全要求。

综合以上调洪演算结果, 高关水库主汛期的汛限水位推荐采用 119.50 m, 与原设计的汛限水位 118.00 m 相比, 抬高了 1.50 m (相应库容差 1598 万 m^3)。按照同样的调洪演算方法, 前后汛期的汛限水位推荐采用 120.50 m。图 4 为汛限水位抬升后的高关水库调度图。

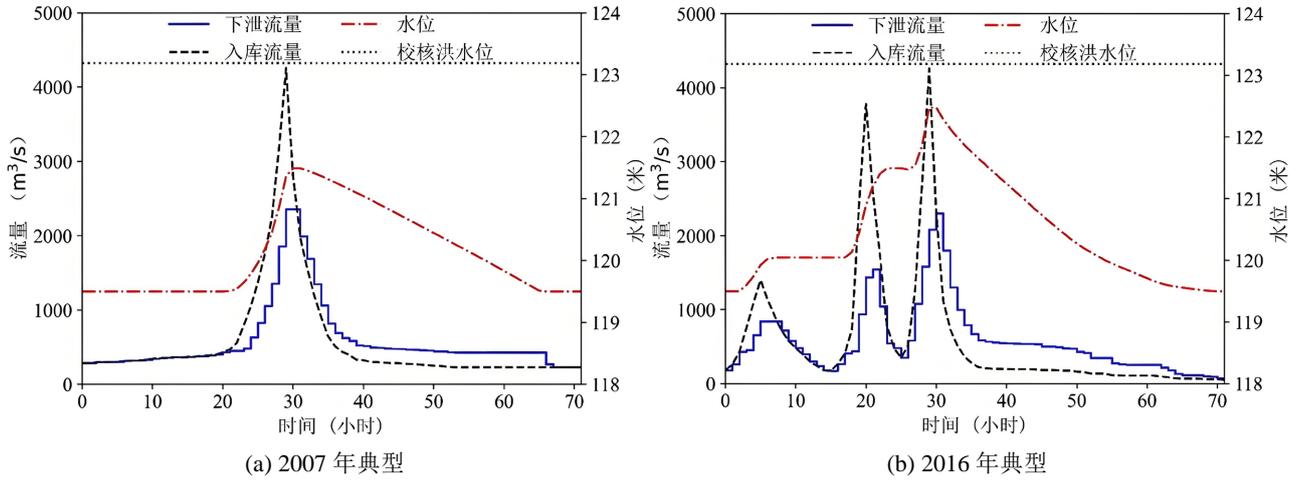


图 3. 119.50 m 起调 2000 年一遇校核洪水调洪演算结果

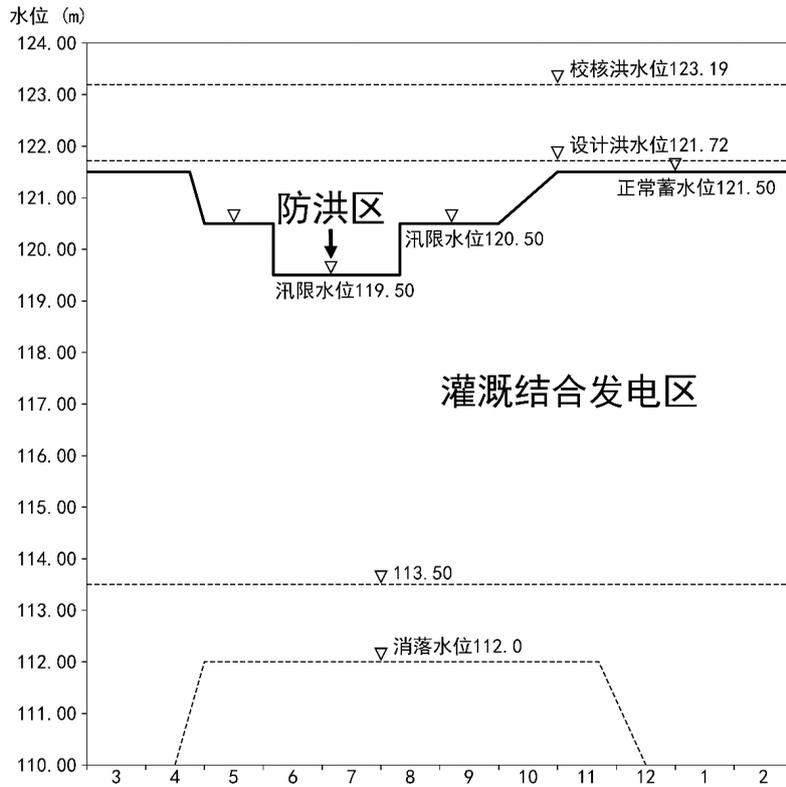


图 4. 高关水库调度图

4. 模拟调度与效益分析

4.1. 兴利调度规则

根据《高关水库调度规程》²，高关水库兴利调度规则如下：

1、村镇供水调度

1) 京山高关农村安全饮水中心供水保证水位 102.00 m，目前设计日供水 1.60 万 t，年均供水量 584 万 m³。

²湖北省高关水库管理局.湖北省高关水库调度规程[R], 2013 年。

当水库水位低于 102.00 m 时, 应确保村镇供水, 不得灌溉供水。当水库水位至死水位 100.50 m 及以下, 需抽取死水时, 必须报省水利厅批准后执行。

2) 严格执行计划用水。由高关水库管理局根据灌区、农村安全饮水及生活用水发展趋势, 结合水库蓄水和年来水预测情况, 制定用水计划, 并严格按计划用水。

3) 坚持合同供水。水库管理单位按供水计划与各用水单位签订供水合同, 明确双方的权利、义务, 按合同条款履行双方职责。

2、农业灌溉供水调度

1) 水库总干渠输水隧洞进口高程 100.50 m, 总干渠渠首设计流量 30 m³/s, 多年平均实际灌溉用水量为 3485.32 万 m³, 灌溉保证率 73%。

2) 严格执行计划用水。由省高关水库管理局制定用水计划, 并依据实时来水、用水情况进行修正。

3) 坚持合同供水。省高关水库管理局与各用水乡镇(部门)签订供水合同。

4) 灌溉用水调度应充分发挥灌区内中小型水利设施的调蓄作用, 宜先由塘堰供水, 再由中小型水库供水, 最后由高关水库供水。

3、发电调度

发电调度应服从防洪调度, 在保证村镇供水和农业灌溉供水的前提下, 充分发挥电站的发电效益。电站发电死水位 112.00 m。当水库水位在 113.50 m 以下时水电站不得发电, 以满足农村安全饮水和农业灌溉用水的需要, 冬季最低消落水位为 112.0 m。

1) 当水库水位在 113.50 m 至 115.50 m 时, 1~3 月份利用 3#、4#小机组发电, 4~5 月份结合灌溉适量发电。当水库水位在 115.50 m 以上时, 可利用 1#、2#大机组调洪发电。

2) 当灌溉供水时, 利用一级电站 1#、2#、3#机组进行发电; 当水库需要调节库容时, 利用一级电站 1#、2#、3#机组和二级电站 4#机组进行调蓄发电; 当水库需要泄洪时, 可利用 1#、2#、3#、4#机组进行调洪发电, 同时根据需要将正常溢洪道开闸泄洪。

3) 水电站 3#、4#机组为村镇供水保障电源, 3#机组为防汛备用电源。在汛期, 当电力不足或电网停电时, 3#机组充当备用电源, 应首先保障防汛用电要求。

4.2. 模拟调度结果分析

依据高关水库的兴利调度规则以及修改后的调度图(图 4), 模拟汛限水位调整前后 1972~2023 年系列的调度情况, 并将模拟结果与实际运行结果进行对比分析。汛限水位抬升后, 高关水库非汛期的多年平均库容从 12,575 万 m³ 增加到 14,191 万 m³, 增加了 1616 万 m³; 多年平均蓄满率从 68% 提高到 77%, 提升了 9%; 多年平均弃水量从 1716 万 m³ 减少到 520 万 m³, 减少了 1196 万 m³。汛限水位调整抬高后显著地提高了水资源的利用效率。

图 5 绘出高关水库 2016 年汛限水位抬升后的调度运行情况。从图 5 可见, 高关水库非汛期的入库流量很小, 而维持生态流量的出库仍大于入库, 导致水库处于净出流状态, 从而引起水位下降。

4.3. 供水效益分析

1、多年平均可增加供水量

水库供水效益与多年平均增加的蓄水量呈正相关关系。为简便起见, 通常采用丰水年比例估算法来计算多年平均增加供水量。该方法操作简便, 且无需大量资料支撑。根据水库模拟调度结果, 可计算出抬高汛限水位后增加的多年平均蓄水量。然而, 在汛后期来水充沛的丰水年份, 即便不提高汛期运行水位, 水库也能蓄至正常高水位, 此时提升水位不仅无助于增加供水, 反而可能增加洪灾风险。因此, 提高汛期运行水位所带来的多年平均供水增量, 并不等同于相应的蓄水增量。为此, 需扣除那些在不提高汛限水位的情况下也能完成蓄水任务的丰水年份所占比例。按下式计算提高汛期运行水位所能实际增加的年均供水量。

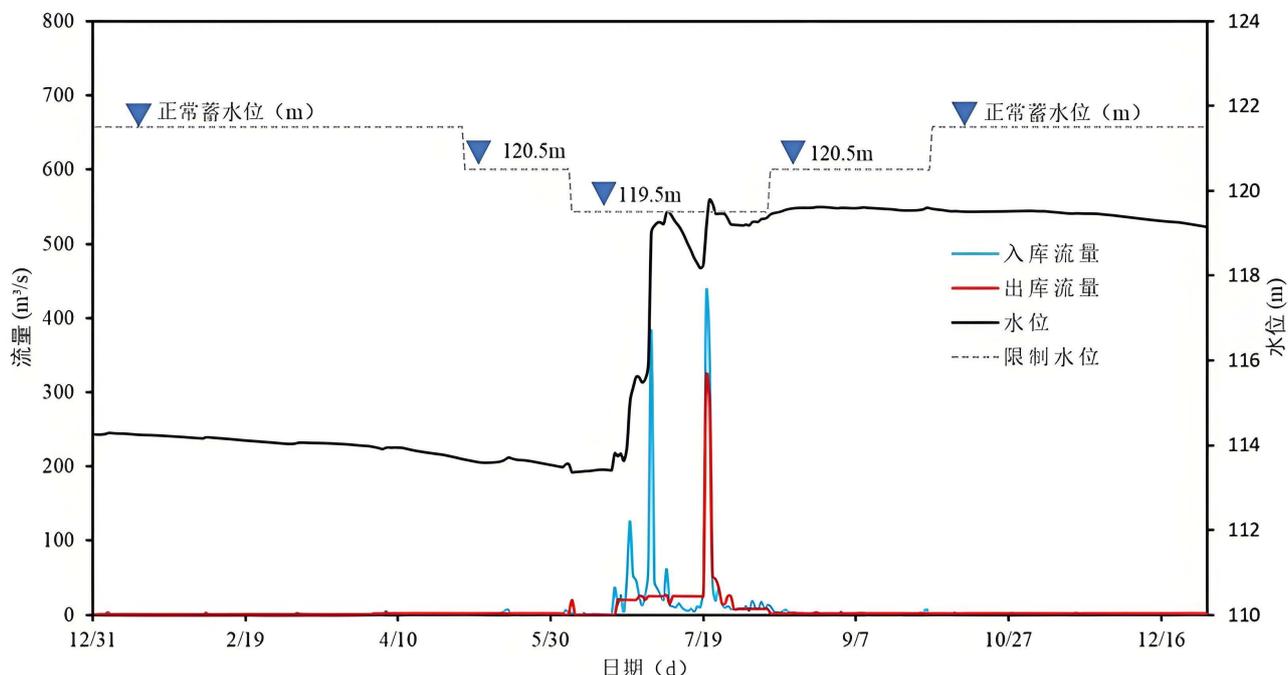


图 5. 高关水库汛限水位抬升后 2016 年流量与运行水位过程

$$\Delta V_2 = \Delta V_1 \times (1 - \eta) \quad (6)$$

式中： ΔV_2 为水库可增加供水量； ΔV_1 为水库可增加蓄水量； η 为不提高汛期运行水位也可完成蓄水任务的丰水年份比例。

2、供水效益计算

高关水库目前执行的汛限水位为主汛期 118.50 m，前后汛期 119.50 m。为评估抬高汛限水位的效益，将主汛期和前后汛期汛限水位分别调整为 119.50 m 和 120.50 m，计算新方案较现有方案增加的供水量。

1) 由 η 的定义“不提高汛期运行水位也可完成蓄水任务的丰水年份比例”出发，根据高关水库管理局提供的 1972~2023 年《高关水库蓄泄洪过程表》及高关水库历年用水情况表(1972~2023)，高关水库 1998 年达到最高水位 120.94 m，而水库的正常蓄水位为 121.50 m，即水库运行以来从未蓄满。考虑到在大洪水年份，水库的弃水量较大，若将其中一部分洪水拦蓄，也有可能将水库蓄满，因此在计算中将 η 估值为 5%³。

2) 根据估算的 η 值、采用式(6)计算增加的年均蓄水量，得到汛限水位抬高后所增加的年均供水量为 1535 万 m^3 。由于汛期运行水位抬升，增加了水库在汛期的兴利库容，从而增加了水库供水量，在一定程度上缓解了下游灌区需水及城区生产生活用水的紧缺局面，具有显著的经济效益和社会效益。

4.4. 发电效益分析

1) 多年平均可增加发电量

多年平均发电量是指水电站在多年运行期内年均发电量，反映其长期发电效益，是衡量水电站动能利用效率的重要指标。由于调整水库汛期运行水位会影响发电水头等关键参数，因此汛期运行水位的变化也会导致多年平均发电量的相应变化。多年平均发电量的计算方法多样，包括设计中水年法、三个代表年法、设计平水系列法、全系列法等。考虑到资料条件及高关水库的实际情况，本次计算采用单位电能耗水率法，计算公式如下：

$$\overline{E}_{增} = \Delta V / \varphi \quad (7)$$

³ 武汉大学水利水电学院.湖北省高关水库汛限水位动态管理研究[R], 2015 年。

式中： $\overline{E_{增}}$ 为可增加的发电量； ΔV 为水库可增加的蓄水量； φ 为单位电能耗水率。由于资料的限制，本次计算的可增加发电量值是将多蓄的水全部用来发电所带来的额外增加的发电量，没有扣除供水等其他用途。

2) 发电效益计算

根据高关水库 1972 年~2023 年的运行数据，其多年发电水量为 5580 万 m^3 ，此外，高关水电站增效扩容改造后的多年平均发电量为 403 万 $kW\cdot h$ 。由此可得单位电能耗水率的平均值为 $13.85m^3/kW\cdot h$ ，根据上述增加的多年平均蓄水量(1616 万 m^3)和单位电能耗水率计算公式，多年平均增发发电量为 117 万 $kW\cdot h$ 。

5. 结论

本文基于高关水库设计洪水复核成果，采用逐时段调洪演算方法重新确定汛限水位，在确保防洪安全的前提下，评估汛限水位调整的供水与发电效益，主要结论如下：

1) 基于重新复核计算的设计洪水过程线，按照水库调度规则进行调洪演算，推荐主汛期(6 月 11 日至 8 月 10 日)汛限水位为 119.50 m，前汛期(5 月 1 日至 6 月 10 日)和后汛期(8 月 11 日至 9 月 30 日)汛限水位为 120.50 m。

2) 依据现有调度规程和实际运行资料系列，汛期运行水位调整抬高后，年均弃水量减少约 1196 万 m^3 ，水库平均蓄满率提高了 9%，年均增发发电量 117 万 $kW\cdot h$ 。

3) 若气象预报无雨或小雨，则可将水库汛限水位上浮 0.50 m 运行，当预报长江中下游梅雨结束后，可提前将主汛期运行水位蓄至后汛期汛限水位。

综上，高关水库溢洪道改扩建后，大幅度地提高了泄洪能力。通过优化设计和调整汛限水位、开展运行水位动态控制，初步估算年均可增加 2000 万 m^3 蓄水量，社会经济效益显著。

基金项目

国家自然科学基金长江联合基金(U2340205)和高关水库管理局技术开发项目。

参考文献

- [1] 刘佳明, 王玉才, 吴汉青, 等. 高关水库汛限水位动态控制方法应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(10): 78-82.
- [2] 郭生练, 钟逸轩, 吴旭树, 刘章君. 水库洪水概率预报和汛期运行水位动态控制[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29(6): 1-4.
- [3] 何志鹏, 谢雨祚, 李娜, 等. 乐昌峡水库汛期运行水位动态控制研究[J]. 水资源研究, 2021, 10(4): 371-380.
- [4] 郭生练, 刘攀, 王俊, 等. 再论水库汛期水位动态控制的必要性和可行性[J]. 水利学报, 2023, 54(1): 1-12.
- [5] 王孟悦, 郭生练, 贺俊, 等. 高关水库设计洪水复核计算和对比研究[J]. 水资源研究, 2024, 13(4): 363-371.
- [6] 郭生练, 李娜, 王俊, 等. 华西秋雨与梅雨对三峡水库蓄水调度影响分析[J]. 人民长江, 2023, 54(7): 69-74.
- [7] 周全, 候建国. 小流域水库设计洪水计算与调洪演算[J]. 中国农村水利水电, 2014(5): 42-44.
- [8] 王东升, 胡关东, 李波. 调洪演算法在德泽水库施工期水文预报中的应用[J]. 人民长江, 2013, 44(S1): 26-27.