

乐昌峡水库汛期运行水位动态控制研究

何志鹏¹, 谢雨祚¹, 李娜¹, 龙三文², 虞云飞², 郑友南³, 曾德程³, 郭生练^{1*}

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

²广东省水利厅北江流域管理局, 广东 清远

³广东粤海飞来峡水力发电有限公司乐昌峡分公司, 广东 乐昌

Email: zhipenghe@whu.edu.cn, *slguo@whu.edu.cn

收稿日期: 2021年7月10日; 录用日期: 2021年8月12日; 发布日期: 2021年8月23日

摘要

乐昌峡水库为季调节水库, 汛限水位为144.5 m, 汛期调度可使用的库容仅0.18亿m³, 造成水库大量弃水。考虑气象水文预报信息及其来水起涨过程的不确定性, 建立乐昌峡水库预报预泄调度和风险分析模型, 推求6 h和12 h预报信息相对应的汛期运行水位动态控制上限, 分别为145.7 m和147.5 m。实现乐昌峡水库汛期运行水位动态控制, 多年平均可增发电量1190万kW·h, 减小弃水量5410万m³, 经济社会效益显著。

关键词

水位, 动态控制, 预报预泄, 风险控制, 乐昌峡水库

Dynamic Control of Operating Water Level in Flood Season at Lechangxia Reservoir

Zhipeng He¹, Yuzuo Xie¹, Na Li¹, Sanwen Long², Yunfei Yu², Younan Zheng³,
Decheng Zeng³, Shenglian Guo^{1*}

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

²Beijiang Basin Administration Bureau, Water Resources Department of Guangdong Province, Qingyuan Guangdong

³Lechangxia Branch of Guangdong Yuehai Feilaixia Hydropower Limited Company, Lechang Guangdong

Email: zhipenghe@whu.edu.cn, *slguo@whu.edu.cn

Received: Jul. 10th, 2021; accepted: Aug. 12th, 2021; published: Aug. 23rd, 2021

Abstract

The Lechangxia reservoir is seasonally regulated and affected by the flood limit water level of 144.5 m,

作者简介: 何志鹏(1999-), 男, 江西抚州人, 硕士研究生, 主要从事水文及水资源开发利用研究。

*通讯作者。

文章引用: 何志鹏, 谢雨祚, 李娜, 龙三文, 虞云飞, 郑友南, 曾德程, 郭生练. 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. DOI: 10.12677/jwrr.2021.104040

and the adjustable storage capacity is only 18 million m^3 which wastes flood resources in flood season. Considering the meteorological and hydrological forecasting information and the inflow uncertainty of rising process, a pre-discharge scheme and risk analysis model was established. Based on 6 h and 12 h inflow forecasts, the dynamic control upper bounds of water level in flood season were 145.7 m and 147.5 m, respectively. Compared with the designed scheme, the dynamic control of operating water level scheme can generate 11.90 million $\text{kW}\cdot\text{h}$ more hydropower and reduce 54.1 million m^3 discharged water annually, which has significantly social and economic benefits.

Keywords

Water Level, Dynamic Control, Forecasting and Pre-Discharge, Risk Analysis, Lechangxia Reservoir

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

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

传统的水库汛期运行调度往往按设计的调度图运行,水库未遭遇洪水时控制水库运行水位不超过汛限水位。水库汛期运行调度控制方法主要经过了三个阶段:单一固定水位控制、分期固定水位控制和汛期运行水位动态控制。随着水文气象预报理论水平、技术方法的发展,水文实时技术预见期及精度都得到了相应的提高,这也为实时水库汛期运行水位动态控制的实现提供了基础[1]。

水库运行水位动态控制技术已经在三峡、丹江口、清江梯级等水库中得到成果应用。刘攀等[2]考虑来水起涨、退水过程的不确定性,分别推求预泄末和回充末水位的经验频率分布,由此建立风险分析模型,解决水库防洪标准不降低和退水阶段能回充等问题。李响等[3]考虑入库洪水预报和入库径流不确定性,使用 Monte-Carlo 模拟方法推求三峡水库汛限水位动态控制域。陈炯宏等[4]结合洪水预报及梯级水库防洪调度信息,建立了梯级水库汛限水位的联合运用模型,寻求了综合利用效益最大的梯级水库汛限水位的联合动态控制方案,并在清江梯级水库得到应用。郭生练等[5]利用 1~5 d 有效预见期信息,由风险分析法推求丹江口水库汛期运行水位动态控制域上限。任明磊等[6]在对水库流域短期降雨预报信息可利用性进行统计分析的基础上,采用改进预泄能力约束法研究了汛限水位分期动态控制域。

为进一步发掘水库兴利、发电、生态等综合效益,充分发挥水库削峰滞洪作用,本文以乐昌峡水库为研究对象,在不降低乐昌峡水库自身防洪标准、不影响乐昌峡水库发挥防洪作用的情况下,开展汛期运行水位动态控制研究,研究汛期乐昌峡水库水位提高运行的条件,进一步提高乐昌峡水库的综合效益。

2. 乐昌峡水库概况

乐昌峡水利枢纽位于广东省韶关市内、北江支流武江乐昌峡河段,下距乐昌市约 14 km,距韶关市区 81.4 km,坝址以上集水面积 4988 km^2 ,约占武江流域 70%,坝址处多年平均流量为 138 m^3/s ,与浈江在韶关市沙洲尾汇合注入北江[7]。乐昌峡水库为北江上游防洪控制性工程,以防洪为主,结合发电,兼顾航运和灌溉等综合利用,为季调节水库。汛期分为前汛期(4~6月)及后汛期(7~9月)。降雨年内分配不均匀,汛期 4~9月的降雨量占全年的 74%,枯水期 10~3月的降雨量仅占全年的 26%。武江属山区性河流,洪枯比大,洪水陡涨陡落,洪水历时一般三天。根据对历年最大洪峰出现时间进行的统计,出现次数最多的是 5、6月份,其次是 4、7月份,前汛期 4~6月出现最大洪峰的次数占了 73%。水库的主要设计参数如表 1 所示。

乐昌峡水库兴利库容为 1.04 亿 m^3 ，但汛期(4~9 月)受汛限水位 144.5 m 影响，可使用的库容仅 0.18 亿 m^3 。前汛期(4~6 月)降雨主要受季风影响，洪水历时一般为 3 天，因受汛期限制水位严格管控，往往会导致大量弃水的发生，不利于发挥乐昌峡水库削峰滞洪作用和提高水库的水资源利用效率；后汛期(7~9 月)降雨主要受台风影响，因水库地处粤北山区，洪水遭遇概率小且经常遭遇干旱，往往出现后汛期来水明显减少提前进入干旱，汛末蓄水困难的情况，严重影响乐昌峡水库在枯水期的抗旱调度和对下游的供水安全。通过近几年的工程实际运用发现，汛期运行水位按不超过汛限水位 144.5 m 运行，常导致水库在汛期不敢蓄水，在汛后无水可蓄大大降低了水库的兴利效益。

Table 1. Characteristic parameters of the Lechangxia Reservoir

表 1. 乐昌峡水库特征参数表

死水位(m)	正常蓄水位(m)	汛限水位(m)	设计洪水水位(m)	校核洪水水位(m)	总库容(亿 m^3)	兴利库容(亿 m^3)	防洪库容(亿 m^3)
141.50	154.50	144.50	162.20	163.00	3.44	1.04	2.11

3. 乐昌峡水库汛期运算水位动态控制模型

3.1. 预报预泄模型

预报预泄法在洪水调度中充分考虑降雨及洪水预报信息，提前泄流，为即将入库的洪水腾出防洪库容，其基本思想是：在洪水预见期内有多大泄流能力就将汛期运行水位向上浮动多少。以汛限水位为下限水位，建立预报预泄模型，求得汛期运行水位动态控制域的上限水位。

1) 目标函数：

$$\max Z'_u = Z_d + \Delta Z_1 \quad (1)$$

$$\Delta Z_1 \leq f[(q_{ck} - Q_{rk}) \times t_y] \quad (2)$$

式中： Z'_u 为预报预泄法推求的动态控制域上限； ΔZ_1 为确定的汛期运行水位 Z_d 以上浮动增值； $f(*)$ 为水库水位库容转换函数； t_y 为有效预见期； Q_{rk} 是 t_y 时期内平均入库流量，重点考虑从发布气象预报到洪水入库时期内的平均入库流量； q_{ck} 为 t_y 时期内平均泄流能力或泄流量。

2) 有效预泄时间内入库水量：

$$w' = \sum_{t=t_1}^{t_2} Q(t) \Delta t \quad (3)$$

式中： $Q(t)$ 为有效预泄时间内的入库流量过程； Δt 为作业预报的计算时段。

3) 预泄期内允许泄量：预泄期内的允许泄量，一般可按下游最低一级防洪目标的允许泄量确定。

4) 预泄水量计算

$$w = t_y q - w' \quad (4)$$

式中： w 为预泄水量； q 为下游允许的安全泄量； w' 为有效预泄时间内入库水量。

在满足下游防护目标防洪标准的前提下，采用预报预泄法，进一步检验和确定汛期运行水位在提高后的方案是否满足武江发生大水时的防洪需要。

3.2. 风险分析控制模型

水库汛期运行水位动态控制属于实时调度范畴，本质是以不降低水库的防洪标准为前提的风险调度。如图 1 所示，将整个动态控制划分为涨水阶段预泄、次洪中原定防洪规则调洪以及退水阶段回充三个阶段，其中防

洪规则调度阶段采用原调度规则，因而关键在于涨水阶段的预泄调度(确定上限)和退水阶段的回充可能性(确定下限)。涨水阶段的预泄调度为：假定当前时刻为 t_1 ，预见到时刻 t_2 将发生超过下游安全泄量 O_c 的入库洪水，立即开始以安全泄量 O_c 进行预泄，至 $t_2 - 1$ 时刻将水库水位降低到 Z_e 。退水阶段的回充调度为：如果当前时刻为 t_3 ，预见 $t_3 \sim t_4$ 的入库流量都在 O_c 以下，则可以在满足发电航运等其他效益的基础上进行水库回充。

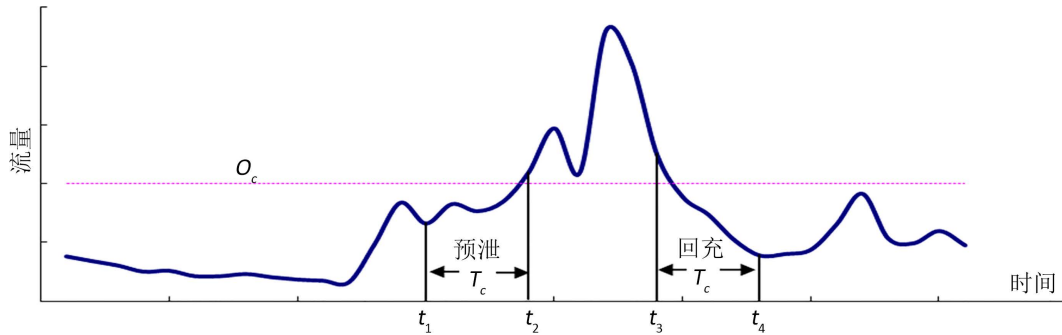


Figure 1. Sketch map of the pre-discharge and refill operation of reservoir
图 1. 水库预泄和回充示意图

在预泄调度中，如果预报误差可忽略，一旦预见发生超过安全泄量 O_c 的入库流量，立即按照安全流量 O_c 下泄(由于预报准确，不会造成人造洪峰)，此时在预见期长度 T_c 的时间内可预泄至固定汛限水位以下，考虑调度末水位的不确定性，采用概率方式描述。该水位是后续调度的起调水位，对应防洪风险率可采用固定汛限水位的调洪方式获得。

假定水库下游安全泄量为 O_c ，有效预见期长度为 T_c ，根据预泄能力控制法，可知在有效预见期内水库可由上限水位对应的库容 V_u 可降低至调度末库容 V_e ：

$$V_e = V_u + \int_{t_1}^{t_2} I_i dt - O_c \cdot T_c = V_u + \sum_{i=1}^{t+T_c} I_i \cdot \Delta t - O_c \cdot T_c \quad (5)$$

式中： I_i 表示第 i 时段的入库流量， Δt 为时段长度。由式(1)可知洪水的起涨规律对预泄能力控制法确定动态控制域上限影响很大，因此考虑其不确定性，给定某一 V_u ，分别计算各次历史实测洪水条件下的水库预泄末库容 V_e ，对其进行排序，然后进行经验频率分析，可得到以 V_u 为上限时的水库预泄调度末库容 V_e 经验频率曲线 $P(V_e)$ 。

假定预泄调度末发生标准洪水，即由调度末库容 V_e 起调，在假定调度末水位与发生标准洪水相互独立的情形下，设此时水库由调度末库容 V_e 起调遇频率 P 洪水的风险率为 $R_p(V_e)$ ，由于预泄过程可能已经包括标准洪水的部分，因此该估计偏于保守和安全，则相应的防洪风险率为：

$$R_p = \int R_p(V_e) P(V_e) dV_e = \sum_{i=1}^n R_p(V_{e,i}) P(V_{e,i}) \quad (6)$$

式中： $V_{e,i}$ 为实测洪水的第 i 次调度末库容， n 为场次洪水个数。设原设计汛限水位遇频率 P 洪水的风险率为 R_p^0 ，以不降低水库防洪标准的条件，可得：

$$R_p \leq R_p^0 \quad (7)$$

式(7)即为水库汛期运行水位上限的约束方程，可保证对于各防洪标准，其防洪风险率的期望值不降低。以式(7)为控制条件，可采用试算法确定水库汛期运行水位动态控制域上限，并把汛限水位作为动态控制域下限。

本文采用预报预泄模型求得的动态控制域上限 Z'_u 作为边界条件，对 $[Z'_d, Z'_u]$ 范围内的水位进行离散，从风险分析的角度建立动态控制域上限寻优模型。

4. 计算结果分析

4.1. 不同预见期动态控制域上限计算

乐昌峡水库汛期按单一汛限水位控制，从而导致汛期弃水过多，水头偏低，并可能造成汛末蓄水不足的局面，严重制约了水库综合效益的发挥。下游防护对象韶关以 4~6 月洪水为主，7~9 月明显小于前汛期，说明洪水基本上以 4~6 月为主，考虑防洪目标主要为韶关市，从安全的角度出发，前汛期、后汛期均采用年最大设计洪水值。经分期洪水计算，乐昌峡水库前汛期及后汛期汛限水位保持一致，维持 144.5 m 不变。

乐昌峡水库流域雨量预警预报系统提供定量降水实况估测、0~3 h 定量降水预报、24~72 h 短期预报、中长期预报等不同时效的降水天气预报产品。2018~2020 年乐昌峡水利枢纽的短期洪水预报，入库洪峰预报预见期为 5~12 h。两年一遇以上洪水共预报 6 场，洪峰预报平均误差为 155 m³/s，平均相对误差为 6.28%。乐昌峡水利枢纽 2018~2020 年 6 h 预见期的洪水过程预报误差为 11.10%，12 h 预见期的洪水过程预报误差为 18.80%。近 5 年强降雨正确率为 61.1%、空报率为 32.1%、漏报率为 6.8%。综上所述，乐昌峡水库短期洪水预报具有较高精度，精度随洪水量级的增大而增加，随预见期延长而减小。

乐昌峡水库实施汛期运行水位动态控制，需要维持下游防护对象的防洪安全。下游乐昌市堤防二期加固目前由于各种原因无法进行达标加固，乐昌市城区堤防河道安全泄量为 2690 m³/s，相当于 5 年一遇的防洪标准。按照乐昌峡水库中小洪水调度方案，入库流量达到 2200 m³/s 时进入防洪调度，在预报入库流量达到 2200 m³/s 时，需要将水位回落至汛限水位 144.50 m，因此不会增加防洪风险。此外，乐昌峡水库出库流量大于 1690 m³/s 时，可能导致乐昌市区河道水位超警戒水位，并且下游武江沿途部分低洼滩地可能受淹。故可根据相关情况分级控制乐昌峡水库预泄流量不超过下游防护对象的安全泄量。根据上述分析，乐昌峡水库汛期运行水位动态控制条件如表 2 所示。

Table 2. Dynamic control constraints of operating water level at the Lechangxia Reservoir

表 2. 乐昌峡水库汛期运行水位动态控制实施条件

当前时刻入库流量(m ³ /s)	T_t 预见期内预报最大入库流量(m ³ /s)	调度决策	水库最大预泄流量(m ³ /s)	水库最小下泄流量(m ³ /s)
$Q_{tc} < 1690$	$1690 \leq \hat{Q}_t^{\max} < 2200$	预泄	1690	/
$1690 \leq Q_{tc} < 2200$	$1690 \leq \hat{Q}_t^{\max} < 2200$	预泄	\hat{Q}_t^{\max}	/
$1690 \leq Q_{tc} < 2200$	$2200 \leq \hat{Q}_t^{\max}$	预泄	2200	/
/	$\hat{Q}_t^{\max} < 1690$	回充	/	3 台机组满发流量

乐昌峡水利枢纽 6~12 h 的洪水预报可用于乐昌峡水利枢纽中小洪水调度，若结合降水预报，可制定有一定可靠性的 24~48 h 短期洪水预报，为调度提供趋势参考。故设定洪水预报有效预见期为 3 h、6 h、9 h、12 h、24 h，以降低原年最大设计标准为原则，在预见期内能预泄至汛限水位为条件，计算汛期运行水位动态控制域上限。以年防洪标准特征值为基础，推求不同分期的汛期运行水位与防洪风险率之间的关系。

由于水库汛期运行水位动态控制主要利用中小洪水资源，根据乐昌峡水利枢纽实际情况，选取年最大设计洪水频率为 2%、5% 及 10%。根据年设计值推求的设计洪水过程线，进行调洪演算，求得调洪高水位和最大下泄流量。最终得到需研究的防洪标准及原设计值为：1) 超 2% 洪水水位 162.20 m 的风险率，原设计为 2%，相应最大下泄流量为 3291 m³/s；2) 超 5% 洪水水位 157.2 m 的风险率，原设计为 5%，相应最大下泄流量为 2600 m³/s；3) 超 10% 洪水水位 150.5 m 的风险率，原设计为 10%，相应最大下泄流量为 2600 m³/s。

选取不同起调水位，对各设计洪水进行调洪演算，以不超过年防洪设计标准为依据，可建立汛期运行水位~防洪风险率关系。汛期运行水位超 2% 年防洪标准的风险率如图 2 所示，选取起调水位 144.5~150.5 m，分别以

最高水位和最大流量不超过年防洪标准 2% 设计值为条件，得到各起调水位超 2% 年防洪标准的风险率。可以看出随着起调水位增加，防洪风险率呈递增关系。

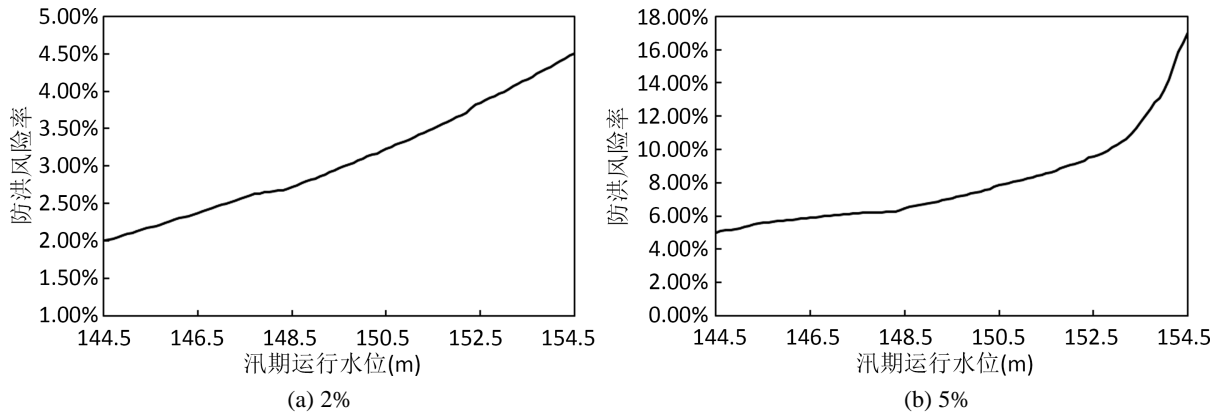


Figure 2. The relationship between operating water level and risk of maximal water level than (a) 2% and (b) 5%
图 2. 汛期运行水位超年防洪标准(a) 2%和(b) 5%的防洪风险率关系

采用乐昌峡水利枢纽 1964~2020 年洪水过程资料，选择不同的汛期运行水位动态控制上限，建立风险分析控制模型，通过试算确定汛期运行水位动态控制上限。有效预见期为 6 h 及 12 h 的运行水位动态控制域上限计算结果如表 3 及表 4 所示。

Table 3. Dynamic control bounds of water level during flood seasons by using 6 h forecast period

表 3. 6 h 预见期汛期运行水位动态控制结果

方案	上限(m)	下限(m)	超 2% 标准风险率(%)	超 5% 标准风险率(%)	超 10% 标准风险率(%)
设计方案	144.5	144.5	2	5	10
1	144.9	144.5	2	5	10
2	145.7	144.5	2	5	10
3	146.5	144.5	2.1038	5.2932	10.2524
4	147.5	144.5	2.3008	5.7630	10.8872
5	148.5	144.5	2.5099	6.0558	11.4609

Table 4. Dynamic control bounds of water level during flood seasons by using 12 h forecast period

表 4. 12 h 预见期汛期运行水位动态控制结果

方案	上限(m)	下限(m)	超 2% 标准风险率(%)	超 5% 标准风险率(%)	超 10% 标准风险率(%)
设计方案	144.5	144.5	2	5	10
1	145.5	144.5	2	5	10
2	147.5	144.5	2	5	10
3	148.5	144.5	2.1577	5.5013	10.4438
4	149.5	144.5	2.3386	5.8405	11.0612
5	150.5	144.5	2.5596	6.1288	11.5837

利用 6 h 有效预见期，取汛期运行水位动态控制上限为 145.7 m，可以 100% 预泄至汛限水位 144.5 m；上限若为 146.0 m，预泄至 144.5 m 的概率为 96.7%，预泄末水位低于 144.8 m 的概率为 100%。根据风险控制的条件

要求, 6 h 有效预见期的动态控制域上限取 145.7 m。同理可取洪水有效预见期长度为 3 h、6 h、9 h、12 h 和 24 h, 以降低原设计防洪标准为原则, 得到综合的乐昌峡水库汛期运行水位动态控制域上限, 如表 5 所示。

Table 5. Dynamic control upper bounds of water level during flood season at the Lechangxia Reservoir
表 5. 有效预见期汛期运行水位动态控制上限

汛期运行水位下限(m)	有效预见期(h)	汛期运行水位上限(m)
144.5	3	144.9
	6	145.7
	9	146.6
	12	147.5
	24	151.1

4.2. 汛期运行水位动态控制

考虑到乐昌峡水库分期洪水形成原因不同, 前汛期及 7 月降雨主要为锋面雨及季风雨, 结合洪水及降雨预报精度分析, 且 7 月发生过历史大洪水, 考虑防洪安全因素, 4~7 月预见期取为 6 h。后汛期 8 月 1 日~9 月 30 日主要为台风雨, 台风预见期长且较准确, 考虑预见期取 12 h。

在动态控制范围内, 根据气象水文预报进行预泄调度。选用 1994 年 6 月及 2006 年 7 月汛期洪水典型进行同频率放大, 并选取 5 场量级为 5 年一遇至 20 年一遇洪水, 分别在各种频率(考虑 20%、10%、5%)设计洪水和选取的实测洪水的情况下, 进行各场次洪水模拟调度, 结果如表 6 及表 7 所示。乐昌峡水库在洪水预报预见期内能够从汛期运行水位动态控制的上限回落至 144.5 m, 水库最大下泄流量没有超过原方案结果, 动态控制方案没有增加乐昌峡水利枢纽的防洪风险, 可满足防洪要求。

Table 6. Comparison of flood regulation results by the dynamic control water level and original scheme for different design frequencies
表 6. 不同设计频率汛期运行水位动态控制与原设计方案的调洪结果比较

线型	设计频率	原设计方案		6 h 预见期动态控制方案			12h 预见期动态控制方案		
		最大泄流量(m ³ /s)	坝前最高水位(m)	最大泄流量(m ³ /s)	预泄最低水位(m)	坝前最高水位(m)	最大泄流量(m ³ /s)	预泄最低水位(m)	坝前最高水位(m)
94.6	20%	2200	146.1	2200	143.68	145.70	2200	143.04	147.50
	10%	2600	150.5	2600	143.65	150.09	2600	143.51	150.00
	5%	2600	157.2	2600	143.78	155.03	2600	143.62	154.95
06.7	20%	2200	146.2	2200	143.48	145.70	2200	142.81	147.50
	10%	2600	150.3	2600	143.94	149.95	2600	143.76	149.99
	5%	2600	156.7	2600	144.36	154.89	2600	143.74	154.55

对于 4 月至 7 月, 预见期为 6 h, 运行水位动态控制上限为 145.7 m; 对于 8 月至 9 月, 取预见期为 12 h, 运行水位动态控制上限为 147.5 m。为了利用降雨信息, 采用乐昌峡水库实测降雨及逐小时入库洪水资料, 分别以 2018、2014、2019 年作为枯水、平水以及丰水年, 采用 2013~2020 年乐昌峡水利枢纽实测降雨及逐小时入库洪水资料作为长系列资料。对汛期(4~9 月)进行调度演算, 起调水位为汛限水位 144.5 m, 电价为 0.4038 元/kW·h, 比较原调度方案和运行水位动态控制方案的发电效益, 结果如表 8 所示。乐昌峡水库在不同典型年动态控制方案的模拟调度过程, 如图 3~5 所示。

Table 7. Comparison of flood regulation results by the dynamic control water level and original scheme for typical years
表 7. 典型年汛期运行水位动态控制与原设计方案的调洪结果比较

典型年	最大入库流量(m ³ /s)	原方案		6 h 预见期动态控制方案			12 h 预见期动态控制方案		
		最大泄流量(m ³ /s)	坝前最高水位(m)	最大泄流量(m ³ /s)	预泄最低水位(m)	坝前最高水位(m)	最大泄流量(m ³ /s)	预泄最低水位(m)	坝前最高水位(m)
2013.8	2680	2200	147.23	2200	142.86	145.87	2200	142.49	147.62
2016.3	3600	2600	150.54	2600	143.79	150.04	2600	143.55	149.88
2019.3	2900	2600	148.52	2600	143.61	146.37	2200	143.31	147.63
2019.6	3650	2600	151.45	2600	143.54	150.81	2600	143.65	150.89
2020.4	3120	2600	149.34	2600	143.57	148.10	2600	143.57	148.65

分析计算结果可知,汛期运行水位动态控制可年均增加发电量 1190 万 kW·h,折算发电效益 481.9 万元,减小弃水量 5410 万 m³。平水年及枯水年动态控制方案的增发电量相对较多,丰水年、平水年、枯水年的弃水相对减少量依次增加。说明通过汛期运行水位动态控制,可更充分地利用中小洪水资源。

Table 8. Comparison results between the original design and the dynamic control water level schemes during flood season
表 8. 汛期原方案和动态控制方案的调度结果比较

分类	原方案		动态控制方案		减少弃水量(万 m ³)	增发电量(万 kW·h)	增加效益(万 ¥)
	发电量(亿 kW·h)	弃水量(亿 m ³)	发电量(亿 kW·h)	弃水量(亿 m ³)			
丰水年	3.366	11.007	3.513	10.390	6170 (-5.60%)	1460 (+4.35%)	591.2
平水年	2.384	1.926	2.502	1.329	5980 (-31.03%)	1180 (+4.95%)	476.2
枯水年	1.917	1.126	2.011	0.645	4810 (-42.72%)	940 (+4.89%)	378.9
长系列	2.636	6.348	2.756	5.807	5410 (-8.52%)	1190 (+4.53%)	481.9

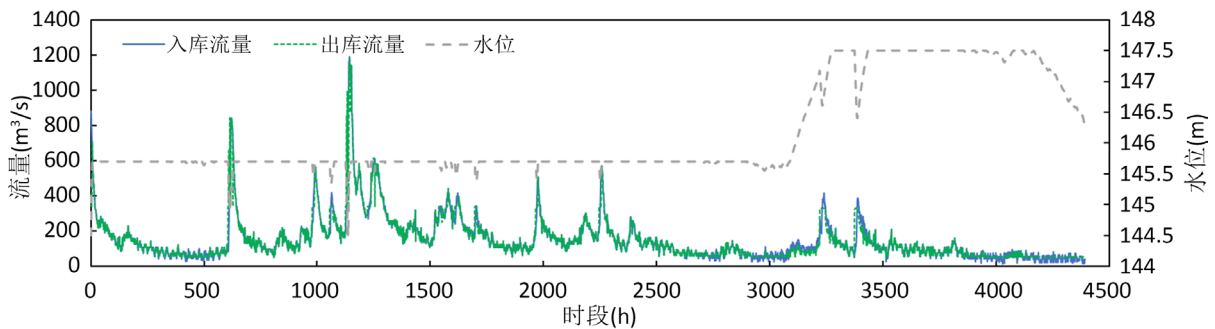


Figure 3. The simulation processes of dynamic control water level scheme in dry year (2018)

图 3. 枯水年(2018 年)动态控制方案模拟过程

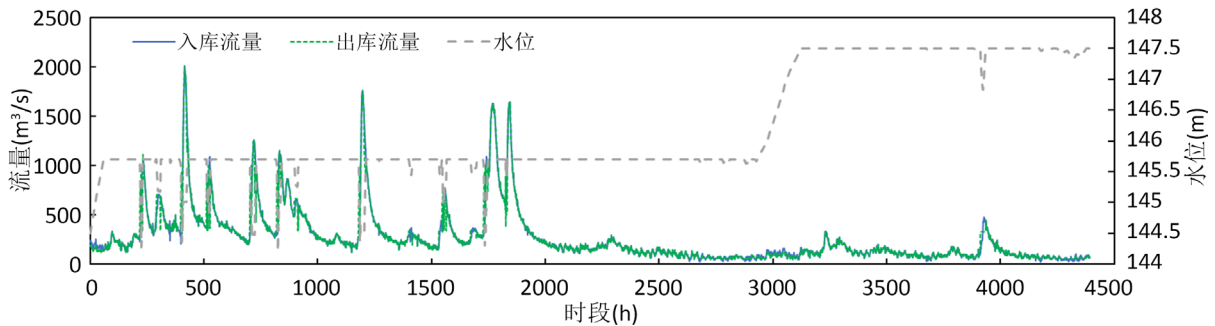


Figure 4. The simulation processes of dynamic control water level schemes in normal year (2014)

图 4. 平水年(2014 年)动态控制方案模拟过程

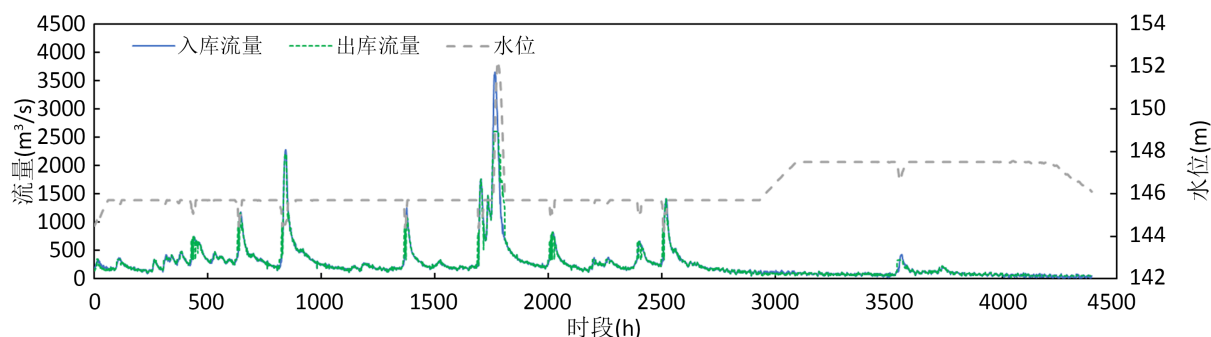


Figure 5. The simulation processes of dynamic control water level schemes in wet year (2019)

图 5. 丰水年(2019 年)动态控制方案模拟过程

由典型年模拟动态控制方案调度过程(图 3~5)可知,乐昌峡水库汛期运行水位动态控制方案提高了水库在汛期的运行水位,提高了水库汛末蓄水量。在遭遇量级较大的洪水时,可以提前将水库水位预泄至汛限水位。同时也能够及时拦蓄洪水尾水以回充水位,有效利用洪水资源,提高汛期发电效益。总体而言动态控制方案考虑防洪与兴利的矛盾,在不增加防洪风险的前提下提高洪水资源的利用率。

5. 结论

本文以乐昌峡水利枢纽为研究对象,开展了汛期运行水位动态控制研究。采用预报预泄和风险分析方法确定乐昌峡水库汛期运行水位动态控制上限,主要研究结论如下:

- 1) 选取坝前最高水位为控制指标,依据分级预泄方案,以降低原设计防洪标准为原则,计算得到 6 h、12 h 和 24 h 有效预见期对应的汛期运行水位动态控制域上限分别为 145.7 m、147.5 m 和 151.1 m。
- 2) 开展汛期运行水位动态控制,在预报洪水来临前能够提前泄流,预留防洪库容,保证防洪标准不降低;同时能够及时拦蓄洪水尾水回充水位,有效利用洪水资源,提高汛期发电效益。汛期多年平均增发电量 1190 万 kW·h,减小弃水量 5410 万 m³。

基金项目

广东粤海飞来峡水力发电有限公司乐昌峡分公司科研项目(GDHLCX-CG-2104)。

参考文献

- [1] 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.
GUO Shenglian, ZHONG Yixuan, WU Xushu and LIU Zhangjun. Reservoir flood probability forecasting and dynamic control of water level during flood season. China Flood & Drought Management, 2019, 29(6): 1-4. (in Chinese)
- [2] 刘攀,郭生练,李响,陈炯宏,李雨. 基于风险分析确定水库汛限水位动态控制约束域研究[J]. 水文, 2009, 29(4): 1-5.
LIU Pan, GUO Shenglian, LI Xiang, CHEN Jionghong and LI Yu. Deriving the interval of reservoir dynamic flood control water level based on risk analysis. Journal of China Hydrology, 2009, 29(4): 1-5. (in Chinese)
- [3] 李响,郭生练,刘攀,万民,刘心愿. 考虑入库洪水不确定性的三峡水库汛限水位动态控制域研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(3): 49-55.
LI Xiang, GUO Shenglian, LIU Pan, WAN Min and LIU Xinyuan. The dynamic control bound of flood limited water level considering inflow uncertainty in Three Gorges Reservoir. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(3): 49-55. (in Chinese)
- [4] 陈炯宏,郭生练,刘攀,等. 梯级水库汛限水位联合运用和动态控制研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(6): 55-61.
CHEN Jionghong, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Joint operation and dynamic control of flood limited water levels for cascade reservoirs. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(6): 55-61. (in Chinese)
- [5] 郭生练,汪芸,周研来,尹家波. 丹江口水库洪水资源调控技术研究[J]. 水资源研究, 2015(4): 1-8.
GUO Shenglian, WANG Yun, ZHOU Yanlai and YIN Jiabo. Optimal control of flood water resources for the Danjiangkou

Reservoir. *Journal of Water Resources Research*, 2015(4): 1-8. (in Chinese)

- [6] 任明磊, 何晓燕, 丁留谦, 王海军, 李辉, 谭亚男. 基于改进预泄能力约束法的水库汛限水位分期动态控制域确定及应用[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2018, 16(1): 16-22.
REN Minglei, HE Xiaoyan, DING Liuqian, WANG Haijun, LI Hui and TAN Yanan. Research and application of staged dynamic controlling domain of limited reservoir water level in flood season based on the improved pre-discharge capacity constrained method. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2018(1): 16-22. (in Chinese)
- [7] 李海彬, 黄东, 练伟航, 刘画眉. 乐昌峡水库动库容特性及防洪优化调度[J]. *广东水利水电*, 2013(6): 6-8+12.
LI Haibin, HUANG Dong, LIAN Weihang and LIU Huamei. Dynamic storage capacity characteristics and flood control optimal operation of Lechangxia Reservoir. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2013(6): 6-8+12. (in Chinese)