水　利　学　报

2023 年 4 月　　SHUILI　XUEBAO　　第 54 卷　第 4 期

文章编号： 0559-9350(2023)04-0414-12

考虑分级防洪目标的梯级水库汛控水位调度模型及应用

朱　迪，周研来，陈　华，郭生练，王　俊

（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　430072）

摘要： 围绕中小洪水减压、大洪水保安和特大洪水降损等防洪目标，构建了面向分级防洪目标的梯级水库汛控水位优化调度模型，针对不同频率设计洪水，基于“模拟-优化”框架，采用仿生进化算法对调度模型进行了高效求解，并利用熵权法对调度方案进行了多目标评价，比选了梯级水库汛控水位方案。以金沙江中下游 6 个梯级水库和三峡水库组成的梯级水库为研究对象，研究结果表明：相比原汛限水位方案，在不降低原防洪标准的前提下，选定的方案可使梯级水库水位抬高 0.36~6.22 m，发电量增加 6.28 亿~19.26 亿kW·h，增幅为 1.18%~4.27%，经济效益显著，可为梯级水库汛控水位的规划设计提供技术支撑。

关键词： 汛控水位；模拟-优化框架；防洪调度；分级防洪目标；多目标优化

中图分类号： TV213.9　　**文献标识码：** A　　**doi：** 10.13243/j.cnki.slxb.20220360

1　引言

据水利部统计[1]，1990 年至 2020 年期间，我国洪水灾害造成累计超过 4.8 万亿元的直接经济损失，数额巨大。水库群防洪优化调度作为一项重要的防洪减灾技术，被广泛用于拦洪削峰错峰，以减轻流域防洪压力[2-4]。

目前，国内外诸多学者围绕水库群防洪优化调度建模与求解、防洪库容分配以及运行期汛期防洪控制水位(简称汛控水位)设计与调度等方面开展了相关研究。在防洪优化调度建模与求解方面，谢柳青等[5]构建了考虑洪水演进的水库群防洪优化调度模型，采用离散微分动态规划算法进行求解；Zhang 等[6]构建了考虑洪水时滞效应的水库群防洪优化调度模型，以最小化防洪控制点洪峰为目标函数，提出了 POA-SA 算法进行求解；邹强等[7]构建了以下游防洪控制点洪峰最小为目标的梯级水库防洪优化调度模型，提出了并行混沌量子粒子群算法进行求解。在防洪库容优化分配方面，Hui 等[8]构建并联水库防洪库容优化分配模型，通过简化洪水过程线，提出一种最小化下游防洪控制点洪峰流量的防洪库容分配方法；周新春等[9]定义了水库群防洪库容互用性的概念，分析了长江上游干流梯级水库群的防洪库容互用比例；顿晓晗等[10]基于长系列历史径流资料，研究梯级水库群的防洪库容频率曲线特征，为上下游水库防洪库容合理分配提高参考依据。在汛控水位设计与调度方面，郭生练等[11-13]基于运行期设计洪水，构建了水库汛控水位调度模型，并分别应用于三峡、金沙江梯级水库，表明在不降低防洪标准条件下，可增加水库发电，提高水库洪水资源利用效益。上述研究针对水库群防洪优化调度、防洪库容分配和汛控水位设计等方面进行了积极探索，为适应洪水演变的梯级水库汛控水位调度模型构建和算法选择提供了有益参考。

本文综合考虑梯级水库防洪安全和发电效益，基于水库防洪优化调度通用的最大削峰、最大防洪

收稿日期：2022-05-09；网络首发日期：2023-04-07

网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20230406.1111.001.html

基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFC3200303)

作者简介：朱迪(1995-)，博士生，主要从事水库防洪调度研究。E-mail：zhudi555@whu.edu.cn

通讯作者：周研来(1985-)，教授，主要从事水库群调度研究。E-mail：yanlai.zhou@whu.edu.cn

安全保证以及最小洪灾损失等 3 种优化准则，构建面向中小洪水、大洪水以及特大洪水的梯级水库多目标防洪优化调度模型。基于“模拟-优化”框架，采用仿生进化算法求解调度模型，优化梯级水库汛控水位控泄过程，实现中小洪水减压、大洪水保安以及特大洪水降损的分级洪水与发电调度的协同优化，并以金沙江下游控制性水库鲁地拉-观音岩-乌东德-白鹤滩-溪洛渡-向家坝与三峡水库组成的梯级水库为例，对所建模型进行验证研究。

2 模型方法

为适应洪水演变，针对不同量级洪水，构建考虑分级防洪目标的梯级水库汛控水位优化调度模型，协同优化梯级水库防洪调度与发电调度，模型构建及求解流程主要包括以下 3 个部分：

(1)模型构建。针对中小洪水、大洪水和特大洪水，分别采用最大削峰、最大防洪安全保证和最小洪灾损失准则作为防洪目标，构建面向分级防洪和发电需求的汛控水位优化调度模型。

(2)求解算法。基于“模拟-优化”框架，结合梯级水库常规防洪调度方案，将水库汛控水位和控泄流量参数化，采用带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)优化梯级水库汛控水位控泄方案，以生成帕累托(Pareto)解集。

(3)方案优选。基于 Pareto 解集，采用熵权法进行多目标评价，综合比选梯级水库汛控水位方案。

2.1 模型构建

2.1.1 *分级防洪目标* 从广义角度上看，中小洪水是水库通过正常防洪调度，可以消纳的洪水，为水库需兼顾防洪与其他兴利调度目标的洪水；大洪水量级位于中小洪水量级与特大洪水量级之间，为水库通过动用防洪库容，以保证不发生超过下游防洪标准的洪水；特大洪水是水库保障自身安全运行和下游防洪安全的洪水，为水库需全力应对以减少超额洪量的洪水。从狭义角度上看，根据《水文情报预报规范》的洪水等级划分[14]，中小洪水是重现期在 20 年及以下的洪水，大洪水是重现期在 20 年至 50 年的洪水，特大洪水是重现期在 50 年以上的洪水。本文综合考虑中小洪水、大洪水及特大洪水的广义和狭义，将防洪调度目标设定为“中小洪水减压、大洪水保安以及特大洪水降损”。设置分级防洪目标函数如下：

(1)遵循最大削峰准则，使洪峰流量得到最大程度的削减，以实现中小洪水减压调度目标。目标函数可表示为：

$$f_1=\min\sum_{n=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}[Q_n(t)]^2 \tag{1}$$

式中：N 为防洪控制点的个数；$Q_n(t)$ 为第 n 个防洪控制点的 t 时段流量，按下式计算。

$$Q_n(t)=\varphi_n[O_m(t),\ O_m(t-1),\ \cdots,\ O_m(t-\tau_n)]+\Delta q_n(t) \tag{2}$$

式中：$O_m(t)$ 为第 m 水库 t 时段的出库流量；$\varphi_n[O_m(t),\ O_m(t-1),\ \cdots,\ O_m(t-\tau_n)]$ 为第 m 水库至第 n 防洪控制点的洪水演进函数；τ_n 为洪水演进的滞时；$\Delta q_n(t)$ 为第 n 防洪控制点 t 时段区间入流。

(2)遵循最大防洪安全保证准则，通过动用较少防洪库容，以保证下游不发生超过防洪标准的洪水，实现大洪水保安调度目标。目标函数可表示为：

$$f_2=\min\left\{\frac{\sum_{m=1}^{M}\left[\frac{V_m^{\max}-V_m(1)}{V_m^f}\right]}{M}\right\}\times 100\% \tag{3}$$

式中：V_m^f 为第 m 水库的防洪库容，即水库防洪高水位至汛限水位间的水库库容；M 为水库个数；$V_m(1)$ 和 $V_m^{\max}$ 分别为第 m 水库起调水位对应的库容和调度期内达到的最高水位对应的库容，按下式计算。

$$\begin{cases}V_m(1)=f_m^{\mathrm{vz}}(Z_m^{\mathrm{xk}}+\Delta Z_m)\\ V_m^{\max}=\max[V_m(1),\ V_m(2),\ \cdots,\ V_m(t),\ \cdots,\ V_m(T)]\end{cases} \tag{4}$$

式中：$V_m(t)$为第 m 水库第 t 时段的库容；$f_m^{xz}(*)$为第 m 水库的库容曲线；Z_m^{xk}为第 m 水库汛控水位；ΔZ_m为第 m 水库汛控水位抬升幅度。

(3)遵循最小洪灾损失准则，尽可能减少下游防洪控制点的超额洪量，以实现特大洪水降损调度目标。目标函数可表示为：

$$f_3=\min\{\sum_{n=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}[\varphi(Q_n(t)-Q_{s,n})\Delta t]\} \tag{5}$$

式中：$Q_n(t)$为第 n 个防洪控制点的流量过程；$Q_{s,n}$为第 n 个防洪控制点的安全流量；Δt 为计算时段长；T 为调度的总时段数；$\varphi(*)$为超额洪量计算函数，按下式计算。

$$\varphi(Q_n(t)-Q_{s,n})=\begin{cases}Q_n(t)-Q_{s,n} & Q_n(t)>Q_{s,n}\\ 0 & Q_n(t)\leqslant Q_{s,n}\end{cases} \tag{6}$$

2.1.2 发电调度目标 在不降低原防洪标准前提下，抬高汛控水位，可以增加梯级水库防洪调度期内的发电效益。以梯级水库水电站总发电量最大为目标函数，按下式计算：

$$f_4=\max\sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}k_mQ_{fd,m}(t)H_m(t)\Delta t \tag{7}$$

式中：k_m为第 m 水库出力系数；$Q_{fd,m}(t)$为第 m 水库第 t 时段的发电流量；$H_m(t)$为第 m 水库第 t 时段的发电水头。

2.1.3 约束条件 为满足水库防洪、兴利等调度需求，需考虑以下约束条件：

(1)水库水量平衡约束：

$$[I_m(t)-O_m(t)]\Delta t=V_m(t+1)-V_m(t)\quad m=1,2,\cdots,M \tag{8}$$

式中 $I_m(t)$为第 m 水库 t 时段的入库流量。

(2)水库水位约束：

$$Z_m^{\min}\leqslant Z_m(t)\leqslant Z_m^{\max}\quad m=1,2,\cdots,M \tag{9}$$

式中：$Z_m^{\max}$和 $Z_m^{\min}$分别为第 m 水库调度期内水位的上限和下限；$Z_m(t)$为第 m 水库 t 时段水位。

(3)水库出库流量约束：

$$Q_m^{\min}(t)\leqslant O_m(t)\leqslant Q_m^{\max}[Z_m(t)]$$
$$Q_m^{\min}(t)=\max[Q_m^{eco}(t),Q_m^{nav}(t)]\quad m=1,2,\cdots,M \tag{10}$$

式中：$Q_m^{\max}[Z_m(t)]$为第 m 水库 t 时段水位达到 $Z_m(t)$时，水库最大下泄流量；$Q_m^{\min}(t)$为第 m 水库 t 时段出库流量的下限；$Q_m^{eco}(t)$和 $Q_m^{nav}(t)$分别为第 m 个水库第 t 时段生态保证流量和通航保证流量。

(4)水库调度期初水位约束：

$$Z_m(1)=Z_m^{start}\quad m=1,2,\cdots,M \tag{11}$$

式中 Z_m^{start}分别为第 m 水库的调度期初水位。

(5)水电站出力约束：

$$\begin{cases}P_m^{\min}(t)\leqslant P_m(t)\leqslant P_m^{yx}(t)\\ P_m^{yx}(t)=f_m^{yx}[H_m(t),Q_m^{fd}(t)]\end{cases}\quad m=1,2,\cdots,M \tag{12}$$

式中：$P_m(t)$为第 m 水电站 t 时段的出力值；$P_m^{\min}(t)$为第 m 水电站 t 时段的允许出力的最小值；$P_m^{yx}(t)$为第 m 水电站 t 时段的预想出力值；$Q_m^{fd}(t)$为第 m 水电站第 t 时段发电流量；$f_m^{yx}(*)$为第 m 水电站的预想出力函数。

(6)水库调度规程要求。

2.2 求解方法 本文构建的梯级水库汛控水位优化调度模型，综合考虑不同量级洪水的防洪调度与发电调度目标，为典型的多目标优化问题。本文在对比常用的多目标优化算法[15-18]后，选择 Deb 等[19]提出的 NSGA-Ⅱ算法进行求解。该算法通过引入精英策略、拥挤度和拥挤度比较算子以及快速非支配排序算法，在降低计算复杂度的同时，保证了种群多样性并提高优化结果精度。

当水库数量较多时，通过枚举法设置汛控水位方案进行优化的方式，计算量较大、求解效率较

低。例如，假设优化调度涉及水库数量为 M 个，每个水库设置 J 种汛控水位方案，每次优化计算耗时 TC，则需要优化计算 M^J 次，其计算总耗时随汛控水位方案设置数目呈指数增长，为 $M^J \times TC$。因此，为提升求解效率，本文基于“模拟-优化”框架，设置各水库汛控水位和控泄流量的上下限，基于各水库常规防洪调度规则，模拟水库水位与防洪控制点流量过程，然后采用 NSGA-Ⅱ算法，优化水库汛控水位控泄方案，仅需计算一次，相应的计算总耗时为 TC^*，显然 $TC^* \ll M^J \times TC$。基于“模拟-优化”框架的具体求解步骤如下：

(1)构建考虑分级防洪与发电调度需求的梯级水库汛控水位优化调度模型。其中，针对中小洪水，选择式(1)和式(6)作为目标函数；针对大洪水，选择式(3)和式(6)作为目标函数；针对特大洪水，选择式(4)和式(6)作为目标函数。

(2)设置各水库汛控水位和控泄流量上下限和 NSGA-Ⅱ算法的相关参数，包括：最大迭代次数为 K、交叉和变异的概率分别为 p_1 和 p_2，种群规模 NP 等。本文中，$K=500$，$p_1=0.8$，$p_2=0.2$，$NP=100$。

(3)分别针对中小洪水、大洪水以及特大洪水，令迭代次数 $k=1$，随机初始化一个父代种群 P_k，基于水库常规防洪调度规则，计算种群内不同个体的防洪和发电目标的适应度值，并将所有个体按非支配关系排序，计算其拥挤度。

(4)采用选择、交叉、变异算子产生子种群 Q_k。

(5)将父代种群与子代种群合并组成 R_k，种群规模为 $2NP$；对 R_k 进行非支配排序，产生非支配集并计算拥挤度，并生成新父种群 P_{k+1}。

(6)通过选择、交叉、变异算子产生子种群 Q_{k+1}，迭代次数 $k=k+1$。

(7)重复步骤(5)(6)，直至迭代次数达到 K，获取面向不同量级洪水的防洪与发电优化调度的 Pareto 解集，及其相应的汛控水位控泄方案。

2.3 基于熵权法的多目标评价 汛控水位方案的比选是一个多属性决策问题，除了考虑防洪、发电效益外，还需要考虑汛末水位、调度期内最高水位等多个指标的影响。本文采用水电站发电量(PGI)、防洪控制点洪峰流量(FPI)、动用防洪库容占比(FCI)、防洪控制点超额洪量(EVI)、梯级水库汛末水位回归率(FEI)以及梯级水库调度期内最高水位指标(ZMI)作为评价指标，在不降低原防洪标准的前提下，比选汛控水位方案。各指标定义如下：

(1)水电站发电量(PGI)，该指标表示水电站防洪调度期内发电总量，由式(7)变换得到。

$$PGI=\sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}k_m Q_{\mathrm{fd},m}(t)H_m(t)\Delta t \tag{13}$$

(2)防洪控制点洪峰流量(FPI)，该指标表示经防洪调度后，防洪控制点的洪峰流量值，由式(1)变换得到。

$$FPI=\max[Q_1^{\max},\ Q_2^{\max},\ \cdots,\ Q_n^{\max},\ \cdots,\ Q_N^{\max}] \tag{14}$$

式中 $Q_n^{\max}$ 为第 n 防洪控制点洪峰流量。

(3)动用防洪库容占比(FCI)，该指标表示调度期内，梯级水库动用的防洪库容占总防洪库容的比值情况，由式(3)变换得到。

$$FCI=\frac{\sum_{m=1}^{M}\left[\frac{V_m^{\max}-V_m(1)}{V_m^f}\right]}{M}\times 100\% \tag{15}$$

(4)防洪控制点超额洪量(EVI)，该指标针对特大洪水，表示调度期内防洪控制点超过安全流量的洪量，由式(5)变换得到。

$$EVI=\sum_{n=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}[\varphi(Q_n(t)-Q_{\mathrm{s},n})\Delta t] \tag{16}$$

(5)汛末水位回归率(FEI)，该指标表示调度期末梯级水库各水库水位回到汛控水位的比例，该指标越接近于 100%，说明有更多水库水位期末回到汛控水位，计算公式如下。

$$FEI=\frac{\sum_{m=1}^{M}[Z_m(T+1)/Z_m(1)]}{M}\times 100\% \tag{17}$$

(6)梯级水库调度期内最高水位指标(ZMI)，该指标表示调度期内水库达到的最高水位与所允许达到的水位上限的比值，该指标越小说明调度期内水库最高水位越低，有利于防洪安全，计算公式如下。

$$ZMI=\frac{\sum_{m=1}^{M}\{\max[Z_m(1),\ Z_m(2),\ \cdots,\ Z_m(T+1)]/Z_m^{\max}\}}{M}\times 100\% \tag{18}$$

本文选择实用性较广的熵权法[20]，基于上述多目标评价指标，比选汛控水位方案，具体步骤如下：

(1)构建评价矩阵 $\boldsymbol{R}$。

$$\boldsymbol{R}=(r_{i,j})_{m\times n}=\begin{bmatrix} r_{1,1} & \cdots & r_{1,n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{m,1} & \cdots & r_{m,n} \end{bmatrix} \tag{19}$$

式中 $r_{i,j}$为第 i 种方案下第 j 指标的数值。

(2)归一化评价矩阵。对于正向和负向指标，按式(20)处理；对于中间型指标，按式(21)处理。

$$y_{i,j}=\begin{cases} \dfrac{r_{i,j}-r_j^{\min}}{r_j^{\max}-r_j^{\min}} & \text{正向指标} \\ \dfrac{r_j^{\max}-r_{i,j}}{r_j^{\max}-r_j^{\min}} & \text{负向指标} \end{cases} \tag{20}$$

$$y_{i,j}=\begin{cases} \dfrac{r_{i,j}-r_j^{\min}}{a-r_j^{\min}} & r_{i,j}<a \\ \dfrac{r_j^{\max}-r_{i,j}}{r_j^{\max}-b} & r_{i,j}>b \\ 1 & r_{i,j}\in[a,\ b] \end{cases} \tag{21}$$

式中：$y_{i,j}$为归一化后的指标值；$r_j^{\max}$和 $r_j^{\min}$分别为第 j 指标下不同方案的最大值和最小值；$[a,\ b]$表示中间型指标的合理区间，a 和 b 分别为下限值和上限值。

(3)确定评价指标的熵值。

$$e_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}f_{i,j}\ln(f_{i,j}) \tag{22}$$

式中：$f_{i,j}=y_{i,j}\Big/\sum_{i=1}^{m}y_{i,j}$；$e_j$为第 j 指标的信息熵。

(4)利用信息熵计算指标权重。

$$W_j=\frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^{n}(1-e_j)} \tag{23}$$

式中 W_j为第 j 指标的权重。

(5)计算方案的得分。

$$S_i=\sum_{j=1}^{n}r_{i,j}W_j \tag{24}$$

式中 S_i为第 i 种方案的得分，分值最高者即为最优方案。

3 实例研究

3.1 研究对象概况 长江宜昌以上流域已建成三峡水库、乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝等一批关键性骨干工程，在调控长江流域上游洪水、减轻中下游防洪压力等方面，发挥了巨大作用[21]。本文以金沙江中下游控制性水库鲁地拉-观音岩-乌东德-白鹤滩-溪洛渡-向家坝与三峡水库组成的梯级水库为研究对象，涉及雅砻江、岷江、嘉陵江和乌江等 4 条主要支流及其控制站点桐子林、高场、北碚和武隆水文站，以及干流攀枝花、李庄、寸滩和宜昌等 4 个水文站。其中，攀枝花水文站主要受鲁地拉-观音岩水库调度影响，李庄、寸滩水文站主要受鲁地拉至向家坝之间 6 座梯级水库调度和支流岷江、嘉陵江的影响，宜昌水文站主要受三峡及以上 7 座梯级水库调度和支流来水影响，支流控制性水文站流量可代表受梯级水库调节影响后的支流来水，本文重点挖掘金沙江中下游梯级与三峡水库的联合调度潜力，其系统概化如图 1 所示。各水库工程特性参数如表 1 所示，水库的常规防洪调度规则，详见《2021 年长江流域水工程联合调度运用计划》[22]。

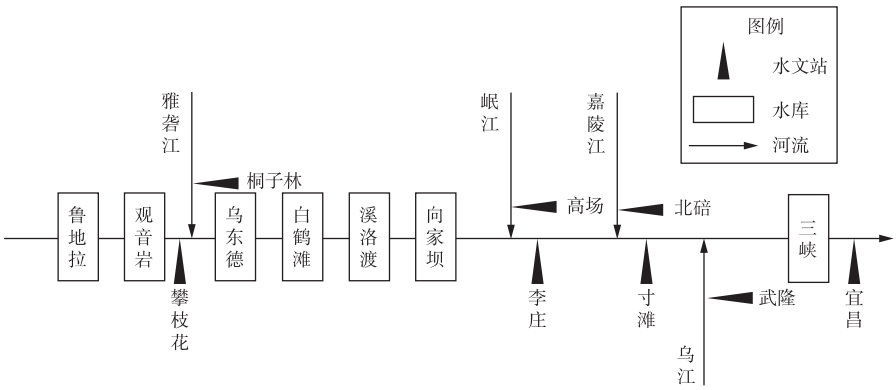

图 1 金沙江中下游与三峡梯级水库示意图

表 1 金沙江中下游与三峡梯级水库工程特性值

水库	控制流域面积/万km^2	死水位/m	汛限水位/m	防洪高水位/m	设计洪水位/m	防洪库容/亿m^3	总库容/亿m^3	装机容量/MW
鲁地拉	24.73	1216	1212	1223	1223	5.64	17.18	2160
观音岩	25.65	1122.3	1122.3[1)]	1134	1134	5.42	22.50	3000
乌东德	40.61	945	952	975	979.38	24.40	39.41	10200
白鹤滩	43.03	765	785	825	827.71	75.00	206.00	16000
溪洛渡	45.44	540	560	600	604.23	46.51	126.7	13860
向家坝	45.88	370	370	380	380.00	9.03	51.63	6400
三峡	100	145	145	166.9	175.00	221.50	393.00	22500

注：1)本文仅考虑观音岩水库主汛期汛控水位的优化调度

综合考虑全流域型和上游区域型两类实测洪水特性，本文选择 1954 年(全流域型)、1998 年(全流域型)和 1981 年(区域型)3 场典型洪水，据设计洪水计算规范[23-24]，按 $P=5\%$、$P=1\%$、$P=0.5\%$、$P=0.2\%$、$P=0.1\%$等设计频率放大上游水库及相应区间设计洪水[25]，以 6 h 为调度时段。鲁地拉配合观音岩水库的控泄流量按攀枝花站不超过 11 700 m^3/s 设置；乌东德和白鹤滩水库配合溪洛渡-向家坝梯级，分别按不超过 51 000 m^3/s 和 83 100 m^3/s 对李庄和寸滩进行补偿下泄。各水库的汛控水位和控泄流量的参数设置如表 2 所示。

3.2 常规防洪调度结果分析 本文对 1954、1981 和 1998 年等典型洪水的不同频率设计洪水，采用水库常规防洪调度规则进行防洪调度。其中，鲁地拉水库配合观音岩水库按攀枝花市 11 700 m^3/s 补偿下泄；乌东德水库和白鹤滩水库配合溪洛渡-向家坝梯级，分别按 51 000 和 83 100 m^3/s 对李庄

和寸滩进行补偿下泄。常规防洪调度下 *PGI*、*FPI*、*FEI*、*ZMI*、*FCI* 和 *EVI* 等指标统计结果，如表 3 所示。

表 2　各水库汛控水位及控泄流量参数范围设置

水库	汛控水位下限/m	汛控水位上限/m	控泄流量下限/(m^3/s)	控泄流量上限/(m^3/s)
鲁地拉	1212	1213	9700	11700
观音岩	1122.3	1124	9700	11700
乌东德	952	960	41000	51000
			53100	83100
白鹤滩	785	790	41000	51000
			53100	83100
溪洛渡	560	570	22000	25000
			41000	51000
			53100	83100
向家坝	370	373	22000	25000
			41000	51000
			53100	83100
三峡	145	149	48900	53900
			71000	76000

表 3　不同典型不同设计频率洪水常规防洪调度指标评价值

典型年	设计频率/%	*PGI*/(亿kW·h)	*FPI*/(m^3/s)	*FEI*/%	*ZMI*/%	*FCI*/%	*EVI*/亿m^3
1954	5	451.48	54242	100	95.64	5.19	0
	1	461.26	62382	100	97.25	33.12	0
	0.5	471.52	64071	100	97.65	47.62	0
	0.2	474.94	66974	99.4	98.13	64.91	27.51
	0.1	478.95	79493	99.2	98.42	77.42	35.74
1981	5	259.3	60339	100	95.96	12.94	0
	1	269.1	59726	100	97.06	47.5	0
	0.5	276.66	63960	100	97.49	58.07	0
	0.2	282.58	65973	100	97.84	66.81	0
	0.1	281.37	63241	100	97.63	69.84	0
1998	5	501.15	61019	100	95.76	7.33	0
	1	504.23	70818	100	97.03	34.55	0
	0.5	514.79	73718	100	97.55	54.44	0
	0.2	524.58	77923	99.43	98.12	68.07	0
	0.1	533.27	79205	99.04	98.46	78.72	9.97

从表 3 可知，*PGI*、*FPI*、*ZMI*、*FCI* 等指标与洪水量级呈现正相关。对于相同设计频率，由于不同典型年的差异，常规防洪调度的 *PGI*、*FEI*、*EVI* 等指标差异较大。对于 *PGI* 指标，在同一设计频率下，1998 典型年的设计洪水常规防洪调度后的 *PGI* 指标(大于 500 亿kW·h)更大，原因为该指标主要受洪水历时影响，1954、1981 和 1998 年典型洪水的调度计算时段数分别为 129、76 和 142，历时越长发电效益较高。对于 *FEI* 指标，1981 典型年的不同频率设计洪水，常规防洪调度后的 *FEI* 指标均为 100%，且并未出现超额洪量，这说明基于 1981 典型年的设计洪峰和洪量历时分配，相较其他典型年

偏防洪有利；对于各典型 $P=0.5\%$、$P=1\%$以及 $P=5\%$等设计洪水，*FEI* 指标达到 100%，而对于 1954 典型年和 1998 典型年的 $P=0.2\%$、$P=0.1\%$设计洪水，*FEI* 指标为 99.04%~99.43%。对于 *EVI* 指标，1954 典型年 $P=0.2\%$、$P=0.1\%$以及 1998 典型年 $P=0.1\%$等设计洪水调度后出现超额洪量，*EVI* 指标在 9.97 亿~35.74 亿m^3，而其他频率设计洪水调度后的防洪控制点洪峰低于相应的安全流量，并未出现超额洪量。不同典型不同设计频率洪水常规防洪调度后，*FPI* 指标为 54 242~79 493 m^3/s，低于寸滩 83 100 m^3/s 的安全泄量；*ZMI* 指标和 *FCI* 指标均低于 100%，表明防洪系统并没有动用全部防洪库容，且各水库调度期内最高水位并未达到各自的防洪高水位。

3.3 多目标优化调度结果分析 基于常规防洪调度结果(表 3)，按防洪库容占比和超额洪量，将各典型不同设计频率洪水进行划分，洪水划分结果及采用的优化准则如表 4 所示。各典型不同设计频率洪水的防洪与发电目标 Pareto 解集如图 2 所示。

从图 2 可以看出，对于不同量级洪水，随着 *PGI* 指标的增加，*FPI*、*FCI* 以及 *EVI* 等防洪相关的指标都有不同程度地增加，这说明随着发电效益的增长，防洪效益会随之减少，二者呈现出竞争关系。从图 2(a)—(c)可知，对于 $P=5\%$设计频率的中小洪水，防洪-发电目标的 Pareto 解集呈现“L”型分布，即：在一定范围内，洪峰流量并无明显变化，但由于汛控水位抬升，防洪系统发电量有较为明显的增加。从图 2(d)—(i)以及(k)和(l)可知，对于 $P=1\%$、0.5%以及 0.2%设计洪水，$P=1\%$设计洪水优化调度后的 *PGI* 和 *FCI* 变化范围相较 $P=0.5\%$和 0.2%更大。例如，对于 1998 典型年 $P=1\%$设计洪水，*PGI* 和 *FCI* 的变化范围分别为 528.48 亿~542.38 亿kW·h和 28.2%~49.63%，而对于 $P=0.2\%$设计洪水，对应指标的变化范围分别为 554.15 亿~554.81 亿kW·h和 53.9%~55.3%。从图 2(j)(m)和(o)可知，对于出现超额洪量的 1954 典型年 $P=0.2\%$、$P=0.1\%$以及 1998 典型年 $P=0.1\%$设计洪水，*EVI* 指标分布范围分别从 0~18.1 亿m^3、0~24.2 亿m^3和 0~8.35 亿m^3，均低于常规防洪调度下的数值。整体来看，优化的汛控水位控泄方案，相较常规防洪调度方案，可以显著提升梯级水库的防洪和发电效益。

表 4 洪水划分结果

洪水分级	设计频率	优化准则	优化目标
中小洪水	$P=5\%$	最大削峰准则	式(1)+式(6)
大洪水	$P=1\%$、$P=0.5\%$	最大防洪安全保证准则	式(3)+式(6)
特大洪水	$P=0.2\%$、$P=0.1\%$	最小洪灾损失准则	式(4)+式(6)

3.4 汛控水位比选结果分析 面向不同量级洪水，基于 *PGI*、*FPI*、*FCI*、*FEI*、*ZMI* 以及 *EVI* 等指标，采用熵权法比选汛控水位方案，结果如图 2 所示。熵权法计算的各指标权重和选定方案得分情况如表 5 所示，各水库汛控水位抬升幅度的最小值和最大值统计如表 6 所示。

从图 2 可知，选定的汛控水位方案对应的目标解基本分布在各自 Pareto 解集的拐点附近，随着洪水量级的增加，水库汛控水位的抬升幅度呈下降趋势。在相同设计频率下，1981 典型年的水库汛控水位抬升幅度较高，1954 典型年的水库汛控水位抬升幅度较低，1998 典型年的水库汛控水位抬升幅度居于 1981 典型年和 1954 典型年的结果之间。这主要是因为 1981 典型年的计算时段数最少，洪量最小，且其设计洪峰和洪量的历时分配相较其他典型年偏防洪有利，而 1954 典型年的情况与之相反。从表 5 可知，除了 1954 典型年 $P=0.2\%$、$P=0.1\%$以及 1998 典型年 $P=0.1\%$设计洪水外，其他典型年不同设计频率洪水调度后由于并未出现超额洪量，因此，对于此类设计洪水的调度方案评价未考虑 *EVI* 指标。整体上看，*FPI*、*FCI* 和 *ZMI* 指标权重相较其他指标更大，说明评价不同调度方案时，更关注防洪控制点洪峰流量、梯级水库动用防洪库容占比以及梯级水库调度期内最高水位等信息的影响。从表 6 可知，对于 1981 典型年，鲁地拉、观音岩、乌东德、白鹤滩、溪洛渡以及向家坝等水库的汛控水位升幅度的最小值和最大值较为接近，水库汛控水位抬升幅度较大，这是因为基于 1981 典型年的设计洪峰和洪量历时分配，相较其他典型年偏防洪有利。以表 6 中不同典型年下，为不降低原

防洪标准，以各水库汛控水位抬升后的最小值作为选定的汛控水位方案，即：鲁地拉、观音岩、乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝和三峡水库汛控水位可分别抬升 0.36、0.84、4.16、2.40、6.22、2.45 和 2.78 m。

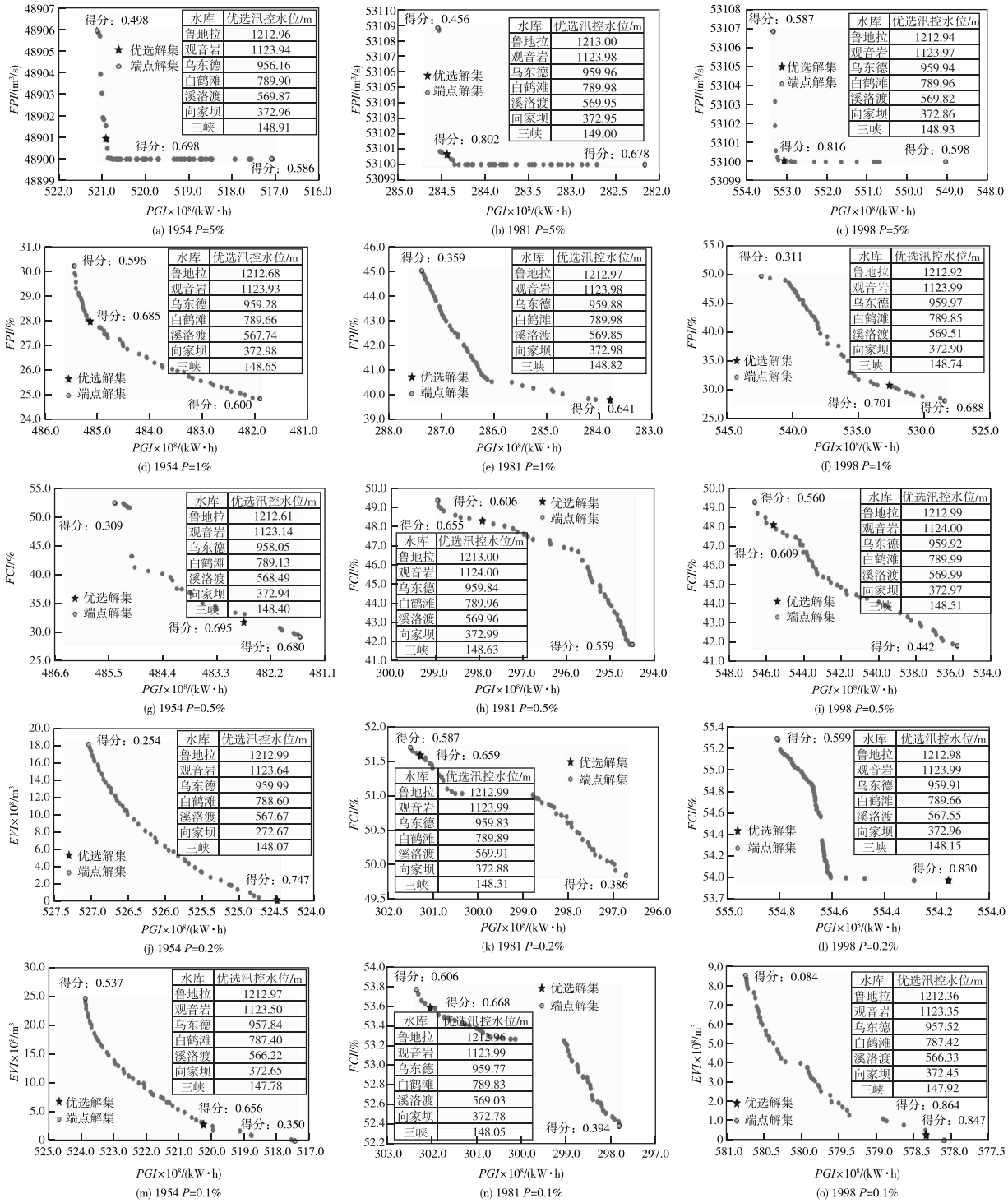

图 2　不同量级洪水下防洪-发电多目标解集分布及汛控水位方案比选结果

各水库按常规防洪调度规则进行模拟调度，统计各水库水电站增发电量情况如表 7 所示。据表 7 可知，相较原汛限水位方案，选定的汛控水位方案可使梯级水库水电站增发电量 6.28 亿~19.26 亿kW·h，相应的发电量增加率为 1.18%~4.27%，且随着洪水量级的增加，增发电量和发电增加率呈现减少趋势，这是因为洪水量级增大，导致水电站的发电水头减少，进而影响水电站发电量。

表 5　熵权法指标权重和选定方案得分

典型年	设计频率/%	指标权重						选定方案得分
		PGI	*FPI*	*FEI*	*ZMI*	*FCI*	*EVI*	
1954	5	0.116	0.062	0.108	0.482	0.232		0.698
	1	0.200	0.200	0.196	0.203	0.200		0.685
	0.5	0.191	0.106	0.141	0.282	0.280		0.695
	0.2	0.074	0.510	0.132	0.125	0.047	0.111	0.747
	0.1	0.199	0.198	0.202	0.000	0.199	0.202	0.656
1981	5	0.120	0.082	0.002	0.305	0.490		0.802
	1	0.057	0.302	0.002	0.491	0.148		0.641
	0.5	0.330	0.350	0.007	0.117	0.196		0.655
	0.2	0.197	0.359	0.093	0.182	0.170		0.659
	0.1	0.252	0.354	0.080	0.160	0.154		0.668
1998	5	0.162	0.104	0.007	0.425	0.301		0.816
	1	0.162	0.151	0.025	0.347	0.315		0.701
	0.5	0.290	0.266	0.003	0.195	0.246		0.609
	0.2	0.090	0.077	0.005	0.432	0.396		0.830
	0.1	0.029	0.801	0.068	0.002	0.041	0.060	0.864

表 6　水库汛控水位抬升幅度范围

水库	1954 典型年		1981 典型年		1998 典型年	
	最小值/m	最大值/m	最小值/m	最大值/m	最小值/m	最大值/m
观音岩	0.61	0.99	0.96	1.00	0.36	0.99
鲁地拉	0.84	1.64	1.68	1.70	1.05	1.70
乌东德	4.16	7.99	7.77	7.96	5.52	7.97
白鹤滩	2.40	4.90	4.83	4.98	2.42	4.99
溪洛渡	6.22	9.87	9.03	9.96	6.33	9.99
向家坝	2.65	2.8	2.78	2.99	2.45	2.97
三峡	2.78	3.91	3.05	4.00	2.92	3.93

表 7　不同量级洪水下水电站增发电量

典型年	设计频率/%	增发电量/(亿kW·h)	发电增长率/%
1954	5	19.26	4.27
	1	12.54	2.72
	0.5	9.27	1.97
	0.2	9.22	1.94
	0.1	8.62	1.80
1981	5	9.06	3.49
	1	7.43	2.76
	0.5	6.91	2.50
	0.2	6.59	2.33
	0.1	6.51	2.31
1998	5	14.31	2.86
	1	11.38	2.26
	0.5	8.27	1.61
	0.2	7.62	1.45
	0.1	6.28	1.18

整体来看，选定的汛控水位方案相较原汛限水位方案，在保障防洪安全前提下，可显著提高了梯级水库防洪与发电综合效益。

4 结论

本文以金沙江中下游控制性水库鲁地拉-观音岩-乌东德-白鹤滩-溪洛渡-向家坝与三峡水库组成的梯级水库为研究对象，比选了汛控水位方案。主要结论如下：

(1)不同典型和不同频率设计洪水情景下常规防洪调度方案的发电量为 259.30 亿~533.27 亿kW·h，除了 1954 典型年 $P=0.2\%$、$P=0.1\%$以及 1998 典型年 $P=0.1\%$等设计洪水的调度方案下出现了超额洪量，其他频率设计洪水的调度方案下防洪控制点洪峰流量均低于相应的安全流量。

(2)不同量级洪水下分级防洪目标和发电目标呈现明显的竞争关系，选定的汛控水位方案，可有效协同优化梯级水库的发电目标和防洪控制点洪峰流量、防洪库容占比、超额洪量等防洪目标。

(3)在不降低原防洪标准的前提下，选定的汛控水位方案可使鲁地拉、观音岩、乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝和三峡水库汛控水位分别抬升 0.36、0.84、4.16、2.40、6.22、2.45 和 2.78 m，相较原汛限水位方案，梯级水库可增发电量 6.28 亿~19.26 亿kW·h，相应增加率为 1.18%~4.27%，发电效益显著。

本研究推求的梯级水库汛控水位方案，可为汛控水位规划设计提供理论支撑。面临实际运行调度阶段，还需结合洪水预报成果开展汛期运行水位的预报预泄调度，以进一步验证模型方法的可行性。

参 考 文 献：

[1] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害防御公报 2020[R]. 北京：中华人民共和国水利部，2021.

[2] 刘宁. 大江大河防洪关键技术问题与挑战[J]. 水利学报，2018，49(1)：19-25.

[3] SIMONOVIC S. The implicit stochastic model for reservoir yield optimization[J]. Water Resources Research，1987，23(12)：2159-2165.

[4] 周建中，贾本军，王权森，等. 广域预报信息驱动的水库群实时防洪全景调度研究[J]. 水利学报，2021，52(12)：1389-1403.

[5] 谢柳青，易淑珍. 水库群防洪系统优化调度模型及应用[J]. 水利学报，2002(6)：38-42.

[6] ZHANG W，LIU P，CHEN X，et al. Optimal operation of multi-reservoir systems considering time-lags of flood routing[J]. Water Resources Management，2016，30(2)：523-540.

[7] 邹强，王学敏，李安强，等. 基于并行混沌量子粒子群算法的梯级水库群防洪优化调度研究[J]. 水利学报，2016，47(8)：967-976.

[8] HUI R，LUND J R. Flood storage allocation rules for parallel reservoirs[J]. Journal of Water Resources Planning and Management，2015，141(5)：1876-1885.

[9] 周新春，许银山，冯宝飞. 长江上游干流梯级水库群防洪库容互用性初探[J]. 水科学进展，2017，28(3)：421-428.

[10] 顿晓晗，周建中，张勇传，等. 水库实时防洪风险计算及库群防洪库容分配互用性分析[J]. 水利学报，2019，50(2)：209-217.

[11] 郭生练，熊丰，王俊，等. 三峡水库运行期设计洪水及汛控水位初探[J]. 水利学报，2019，50(11)：1311-1325.

[12] 熊丰，郭生练，陈柯兵，等. 金沙江下游梯级水库运行期设计洪水及汛控水位[J]. 水科学进展，2019，30(3)：401-410.

[13] 郭生练，陈炯宏，栗飞，等. 清江梯级水库汛限水位联合设计与运用[J]. 水力发电学报，2012，31(4)：6-11.

[14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 水文情报预报规范：GB/T 22482—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2008.

[15] 刘艳，李晓春，罗军刚. 耦合多目标优化和多属性决策的水库生态调度方法研究[J]. 西安理工大学学报，2021，37(2)：176-184.
[16] BALTAR A M，FONTANE D G. Use of multi-objective particle swarm optimization in water resources management [J]. Journal of Water Resources Planning and Management，2008，134(3)：257-265.
[17] 王学敏，周建中，欧阳硕，等. 三峡梯级生态友好型多目标发电优化调度模型及其求解算法[J]. 水利学报，2013，44(2)：154-163.
[18] YANG G，GUO S，LIU P，et al. Multiobjective cascade reservoir operation rules and uncertainty analysis based on PA-DDS algorithm[J]. Journal of Water Resources Planning and Management，2017，143(7)：04017025.
[19] DEB K，PRATAP A，AGARWAL S，et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm：NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation，2002，6(2)：182-197.
[20] 罗军刚，解建仓，阮本清. 基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型及应用[J]. 水利学报，2008，39(9)：1092-1097，1104.
[21] 张睿，李安强，丁毅. 金沙江梯级与三峡水库联合防洪调度研究[J]. 人民长江，2018，49(13)：22-26.
[22] 水利部长江水利委员会. 2021 年长江流域水工程联合调度运用计划[R]. 武汉：水利部长江水利委员会，2021.
[23] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程设计洪水计算规范：SL 44—2006[S]. 北京：中国水利水电出版社，2006.
[24] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程水文计算规范：SL/T 278—2020[S]. 北京：中国水利水电出版社，2020.
[25] 谢雨祚，熊丰，李帅，等. 金沙江下游梯级水库设计洪水复核计算[J]. 水资源研究，2021，10(6)：561-571.

An operation model of flood control water levels of cascade reservoirs considering grading flood control objectives and its application

ZHU Di，ZHOU Yanlai，CHEN Hua，GUO Shenglian，WANG Jun
(*State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science*，*Wuhan University*，*Wuhan* 430072，*China*)

Abstract：Focusing on several flood control objectives including pressure reduction for small and medium floods，security for large floods as well as loss reduction for exceeding standard floods，an optimal operation model of flood control water levels of cascade reservoirs is established for tackling the grading flood control objectives. Based on a "simulation-optimization" framework，the operation model is efficiently solved by a heuristic evolutionary algorithm considering different design flood scenarios. The entropy-based weight method is applied to evaluate the operation schemes and identify the best flood control water levels and reservoir discharge schemes. The six reservoirs located in the lower reaches of the Jinsha River and the Three Gorges Dam (seven cascade reservoirs) were selected as a case study. The results show that compared to the original flood-limited water level schemes，the best schemes could raise the flood control water levels of seven cascade reservoirs by 0.36-6.22 m，thereby increasing the power generation by 0.628-1.926 billion kW·h (improvement rates of 1.18%-4.27%) without reducing the original flood prevention standards and providing technical support for planning and designing flood control water levels of cascade reservoirs.

Keywords：flood control water level；simulation-optimization framework；flood control operation；grading flood control objective；multi-objective optimization

（责任编辑：耿庆斋）