

Storage Allocation Strategy for Flood Control of Cascade Reservoirs*

Jionghong Chen^{1,2}, Shenglian Guo², Yi Ding¹

¹Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan

²State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

Email: whucjh@139.com

Received: Mar. 16th, 2012; revised: Apr. 3rd, 2012; accepted: Apr. 12th, 2012

Abstract: Due to the changes of flood control task and boundary condition of cascade reservoirs, a mathematical model was established to allocate cascade reservoir flood prevention storage. Coupled hydropower generation with flood control operation objections, progressive optimality algorithm was used to obtain Pareto non-inferior solutions of maximum hydropower generation under the minimum flood prevention storage constrains for cascade reservoirs. The Qingjiang basin was selected as case study, the optimal storage allocation strategy for the Shuibuya and Geheyan reservoirs was given. If the Shuibuya reservoir keeps 500 million m³ and Geheyan reservoir remains not less than 150 million m³ flood prevention storages, the maximum regulation water level of the Geheyan reservoir will not over 200 m when 100-year flood occurs, which can assurance flood control safety. The proposed method might provide a new approach for cascade reservoir storage allocation.

Keywords: Cascade Reservoirs; Flood Prevention Safety; Storage Allocation; Multi-Objection Optimization

梯级水库防洪库容分配策略研究*

陈炯宏^{1,2}, 郭生练², 丁毅¹

¹长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 武汉

²武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室, 武汉

Email: whucjh@139.com

收稿日期: 2012年3月16日; 修回日期: 2012年4月3日; 录用日期: 2012年4月12日

摘要: 针对梯级水库防洪任务和边界条件发生的变化, 建立了一种确定梯级水库防洪库容分配的数学模型, 耦合水库电力调度优化、防洪效益优化等多种目标, 把梯级水库预留的防洪库容最小作为约束条件, 采用逐次优化算法求解出使梯级水库发电效益最大的非劣解集。以清江干流梯级水库为例, 确定水布垭和隔河岩水库防洪库容的最优分配策略。在水布垭预留 5 亿 m³ 和隔河岩预留不小于 1.5 亿 m³ 防洪库容的前提下, 若发生 100 年一遇的洪水时, 隔河岩水库的最高调洪水位不会超过 200 m, 可以满足防洪安全。该研究为梯级水库防洪库容分配提供了一种新的探讨思路。

关键词: 梯级水库; 防洪安全; 库容分配; 多目标优化

1. 引言

*基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2009BAC56B04-1; 2009BAC56B02)。

作者简介: 陈炯宏(1984-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 工程师, 主要从事水库调度及水资源开发方面工作。

自毗邻清江流域的三峡水库于 2008 年投入试验性蓄水以来, 清江流域干流梯级水库调度运用的边界条件发生了很大改变。清江流域上游已规划和建成了一批小水电站, 有一定的滞洪库容; 三峡水库

的建成和运行, 大幅度提高了荆江河段的防洪标准, 清江流域梯级水库的防洪任务、地位都在发生改变^[1,2]。清江梯级水库除了承担流域自身防洪任务外, 还为长江错峰预留 10 亿 m^3 的防洪库容来保障长江中下游的防洪安全^[3]。本文以长江中游的清江流域为例, 建立梯级水库防洪库容分配模型, 耦合水库电力调度优化、防洪效益优化等多重目标, 研究清江干流梯级水库的防洪库容分配策略, 在保障防洪安全的前提下, 提高梯级水库的经济效益, 实现防洪和兴利矛盾的统一。

2. 库容分配模型

模型的总体目标是在清江梯级水库为长江预留不低于 10 亿 m^3 防洪库容的前提下, 确定各水库的主汛期预留防洪库容方案, 在不增加梯级水库防洪风险前提下, 尽可能大的提高梯级水库的洪水资源利用率。这里主要存在两个目标, 一个为在调度期内使梯级的发电效益最大, 另一个是使清江梯级预留防洪库容最大。这两个目标是一对矛盾的问题, 若预留的防洪库容越大, 则水库的汛限水位就越低, 越不利于水库汛末蓄水; 反之亦然。

2.1. 目标函数

目标函数 1: 计算周期内梯级水库发电量最大

$$\text{Max } F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M E(i, t) \quad (1)$$

目标函数 2: 水布垭水库预留防洪库容最大

$$\text{Max } F_2 = V_{s,f}(i) \quad (2)$$

目标函数 3: 隔河岩水库预留防洪库容最大

$$\text{Max } F_3 = V_{G,f}(i) \quad (3)$$

2.2. 约束条件

1) 水量平衡约束

$$V(i, t) = V(i, t-1) + I(i, t) - q(i, t) \quad (4)$$

式中: $V(i, t)$ 和 $V(i, t)$ 分别是第 i 个水库调度期 t 和 $t-1$ 的库容; $I(i, t)$ 和 $q(i, t)$ 分别为水库 i 调度期 t 的入库流量和出库流量。

2) 库水位(或库蓄水量)约束

$$\begin{cases} Z_{\min}(i, t) \leq Z(i, t) \leq Z_{\max}(i, t) \\ V_{\min}(i, t) \leq V(i, t) \leq V_{\max}(i, t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $Z_{\min}(i, t)$, $Z_{\max}(i, t)$, $V_{\min}(i, t)$ 和 $V_{\max}(i, t)$ 分别为 i 水库在 t 调度期内的水位下限和上限, 蓄水量下限和上限, $Z_{\min}(i, t)$ 即为死水位, $Z_{\max}(i, t)$ 为方案中 i 水库的允许的最高起调水位。

3) 电站出力约束

$$N_{\min}(i, t) \leq N(i, t) \leq N_{\max}(i, t) \quad (6)$$

式中: $N_{\min}(i, t)$ 和 $N_{\max}(i, t)$ 分别为 i 电站调度期 t 内的最小和最大出力约束。

4) 水库泄流约束

$$\begin{cases} q(i, t) \leq q_{\max}(i, t) \\ q(i, t) \leq q_{\max,F} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $q_{\max}(i, t)$ 为 i 水库的调度期 t 内的泄流能力; $q_{\max,F}$ 为水库在满足防洪条件时的允许最大下泄流量。此外, 还有库容曲线约束, 电站水头约束和下游水位流量关系等约束。

2.3. 求解技术

目标优化问题中, 往往存在多个既“不可公度”又常常相互矛盾的目标, 因此不存在对于所有目标都达到最优的解, 得到的往往是无法直接相互比较的一组非劣解, 因此多目标问题的优化求解十分困难^[4]。由于发电量最大和防洪库容最大两个目标的量纲具有“不可公度”性, 因此无法求解出使两个目标同时都最优的解, 只能得到满足上述问题的非劣解集。因此, 为了便于计算, 这里将多目标问题转化为单目标问题进行优化求解, 将预留防洪库容最大这个目标函数转化为约束条件, 即

$$V_K \leq V_{s,f}(i) \leq V_P \quad (8)$$

$$V_K \leq V_{G,f}(i) \leq V_P \quad (9)$$

式中: $V_{s,f}(i)$ 为水布垭水库在 i 时段预留的防洪库容, $V_{G,f}(i)$ 为水布垭水库在 i 时段预留的防洪库容, V_P 为原设计条件下的预留防洪库容; V_K 为梯级水库预留的最小防洪库容, $V_K \in (0, 5)$ 。

针对梯级水库预留的最小防洪库容约束问题, 求解出使梯级水库发电效益最大的非劣解集, 可直接采

用求解单目标优化问题的逐次优化方法对该问题进行求解。采用较为成熟的 POA 算法进行优化计算。逐次优化方法 POA(Progressive Optimality Algorithm) 是一种求解多阶段决策问题的计算方法。由于篇幅所限, 详见参考文献[5]。

3. 计算结果

根据 1951~2009 年径流资料, 采用 POA 算法进行优化计算, 得到清江梯级多目标联合优化调度的非劣解集。分别在保持隔河岩水库预留防洪库容不变(优化目标 1)和保持水布垭水库预留防洪库容不变(优化目标 2)这两种条件下, 优化梯级水库预留防洪库容最大和梯级水库发电量最大这两个目标, 图 1(a)和图 1(b)为上述两种优化目标下的最优 Pareto 非劣解集。

为了分析比较最优非劣解中不同频率设计洪水的最高调洪水位与预留防洪库容之间的关系, 以水布垭 - 隔河岩同频率为洪水地区组成方式为例, 选择 1%、2%、5%和 10%这四种频率的设计洪水过程, 并进行梯级水库调洪计算, 得到的各水库的最优非劣解最高调洪水位与预留防洪库容的变化关系, 如图 2 和图 3 所示。

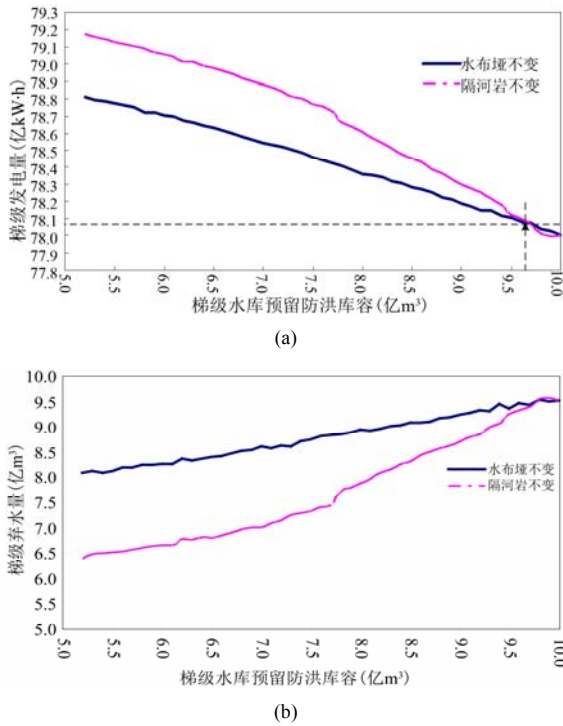


Figure 1. A set of Pareto non-inferior solutions of two goals: (a) Relation of hydropower generation and flood control storage; (b) Relation of water spilled and flood control storage
图 1. 两种目标的最优 Pareto 非劣解集: (a) 梯级发电量 - 预留防洪库容; (b) 梯级弃水量 - 预留防洪库容

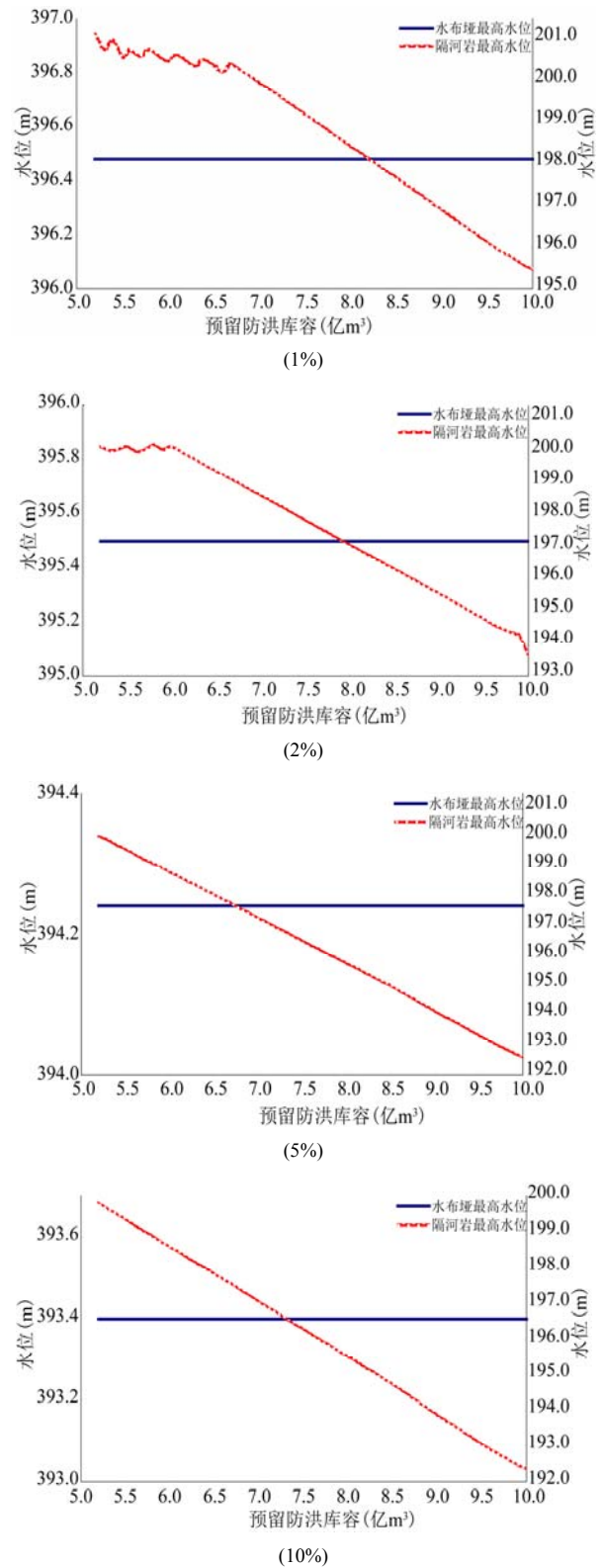


Figure 2. Relationship of the maximum water level and flood control storage by non-inferior solutions of one goal (Shuibuya reservoir flood control storage is unchanged)
图 2. 最优 Pareto 非劣解最高调洪水位与预留防洪库容关系(水布垭不变)

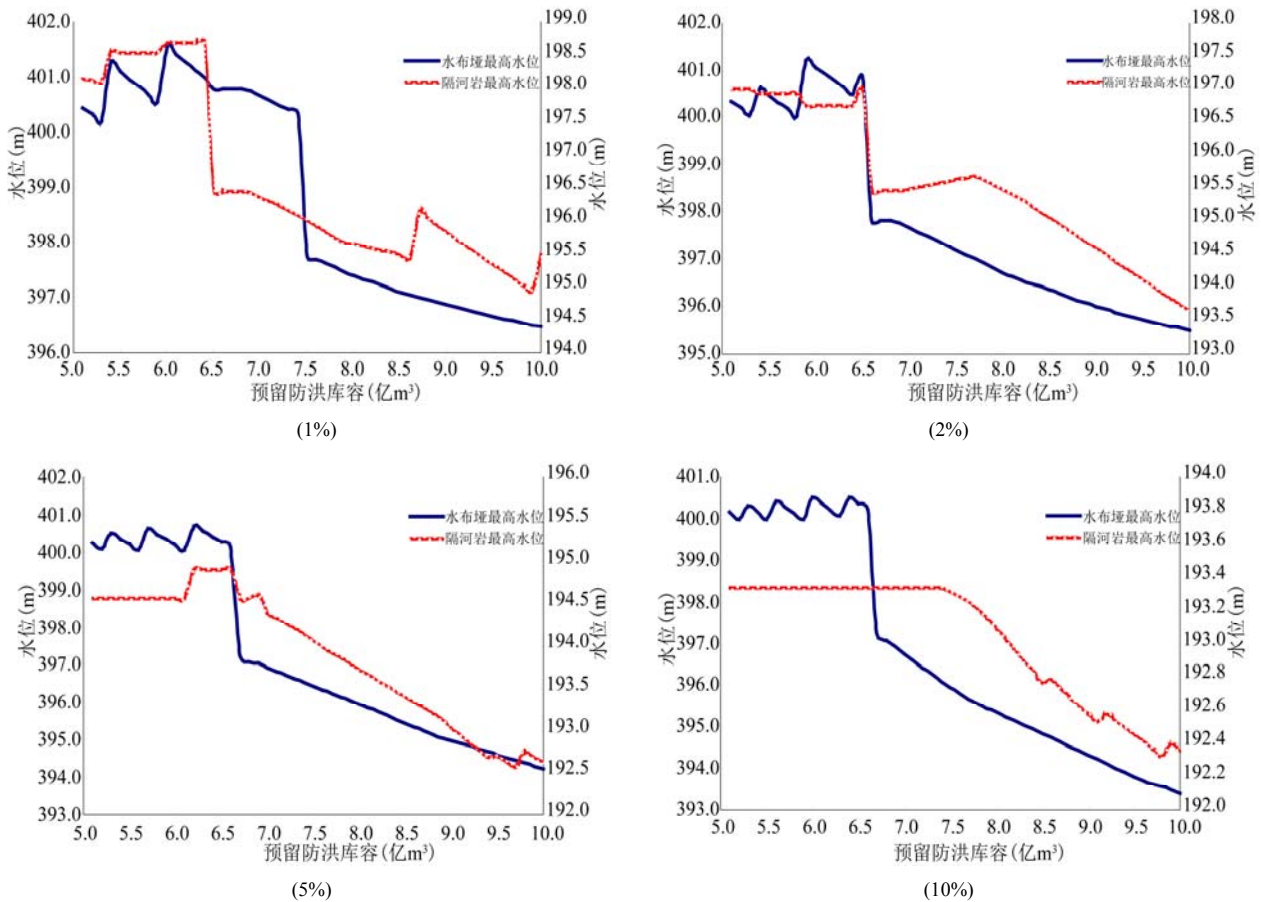


Figure 3. Relationship of the maximum water level and flood control storage by non-inferior solutions of one goal (Gehewan reservoir flood control storage is unchanged)

图 3. 最优 Pareto 非劣解最高调洪水位与预留防洪库容关系(隔河岩不变)

4. 结果分析

由图 1(a)可知, 梯级水库预留防洪库容最大与梯级水库发电量最大具有不可“公度性”, 预留防洪库容越大, 梯级水库的发电量越小。比较两种目标下的最优 Pareto 前沿可以发现, 在梯级预留相同的防洪库容的情况下, 当梯级水库预留防洪库容超过 9.65 亿 m^3 时, 隔河岩水库的最优非劣解好于水布垭水库的最优非劣解; 当梯级水库预留防洪库容低于 9.65 亿 m^3 时, 水布垭水库的最优 Pareto 解好于隔河岩水库的最优 Pareto 解。图 1(b)反映了在两种目标下梯级水库弃水量的最优 Pareto 非劣解与预留防洪库容关系, 同样验证了上述规律。

分析图 2 可知, 在水布垭水库预留防洪库容不变的情况下, 隔河岩水库的调洪最高水位呈现一定的规律性, 当隔河岩水库出现超 100 年一遇的大洪水时, 最优 Pareto 解调洪最高水位与预留防洪库容呈现一种

非单调递减关系, 调洪最高水位不一定随着隔河岩水库预留的防洪库容的增加而单调减少, 而是呈锯齿状非单调性波动; 当隔河岩水库出现 100 年一遇的洪水时, 最优 Pareto 解的调洪最高水位与预留防洪库容呈现一种单调递减关系, 调洪最高水位随隔河岩水库预留的防洪库容的增加而单调递减, 且在梯级水库预留防洪库容超过 6.5 亿 m^3 时, 即隔河岩水库预留不小于 1.5 亿 m^3 , 隔河岩水库的最高调洪水位不超过 200 m。

同样由图 3 可知, 在隔河岩水库预留防洪库容不变的情况下, 当梯级水库预留的防洪库容小于 6.5 亿 m^3 时, 即水布垭水库预留防洪库容不大于 1.5 亿 m^3 , 最优 Pareto 非劣解下的水布垭水库的最高调洪水位呈现非稳定性波动, 水位较高且振幅较大, 在出现 20 年一遇洪水时, 最高调洪水位基本处在 400 m 左右波动, 隔河岩水库最高调洪水位均未超过 195 m, 梯级水库的防洪风险较小; 当梯级水库预留的防洪库容大

于 7.5 亿 m^3 时, 即水布垭水库预留不小于 2.5 亿 m^3 , 水布垭水库的最高调洪水位基本稳定, 在出现 100 年一遇洪水时, 最高调洪水位不超过 400 m, 隔河岩的最高调洪水位不超过 196 m, 不低于原设计方案防洪标准, 梯级水库的防洪风险较小。

5. 结论

本文建立了梯级水库防洪库容分配模型, 以清江梯级为例开展研究, 主要得出如下结论:

1) 在清江梯级预留相同的防洪库容的情况下, 当预留防洪库容超过 9.65 亿 m^3 时, 隔河岩水库的最优 Pareto 非劣解要好于水布垭水库; 当预留防洪库容低于 9.65 亿 m^3 时, 水布垭水库的最优 Pareto 非劣解要好于隔河岩水库。

2) 在水布垭水库预留 5 亿 m^3 防洪库容不变的情况下, 若隔河岩水库预留防洪库容不小于 1.5 亿 m^3 , 当隔河岩水库发生 100 年一遇的洪水时, 则最高调洪水位不会超过 200 m, 可以满足防洪安全。

3) 在隔河岩水库预留 5 亿 m^3 防洪库容不变的情况下, 当水布垭水库预留防洪库容不小于 2.5 亿 m^3 , 水布垭水库的最高调洪水位基本稳定。当发生 100 年一遇洪水时, 最高调洪水位不超过 400 m, 隔河岩的

最高调洪水位不超过 200 m, 不低于原设计方案防洪标准。

参考文献 (References)

- [1] 曹广晶. 以科学为杠杆, 撬动三峡工程的潜力[J]. 水力发电学报, 2011, 30(1): 1-4.
CAO Guangjin. Use sciences to lever the potential of Three Gorges project. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(1): 1-4. (in Chinese)
- [2] 郑守仁. 三峡工程优化调度与洪水资源利用问题的思考[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(5): 545-549.
ZHENG Shouren. Some considerations on optimal scheduling and flood resources utilization of Three Gorges project. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2009, 42(5): 545-549. (in Chinese)
- [3] 长江水利委员会. 长江流域防洪规划[R], 2008.
Changjiang Water Resources Commission. Flood control plan of Changjiang basin, 2008. (in Chinese)
- [4] 秦晖, 周建中, 王光谦. 基于多目标差分进化算法的水库多目标防洪调度研究[J]. 水利学报, 2009, 39(5): 513-519.
QIN Hui, ZHOU Jianzhou and WANG Guangqian. Multi-objective optimization of reservoir flood dispatch based on multi-objective differential evolution algorithm. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 39(5): 513-519. (in Chinese)
- [5] 陈炯宏, 郭生练, 刘攀, 等. 三峡梯级和清江梯级水电站群联合调度研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(6): 78-84.
CHEN Jionghong, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Joint operation of the Three Gorges cascade reservoirs and the Qingjiang cascade reservoirs. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6): 78-84. (in Chinese)