

堵河流域水库群汛末蓄水方式研究

王伟¹, 张欣², 余蔚卿³, 顾绍峰⁴

¹汉江水利水电(集团)有限责任公司, 湖北 武汉

²国能长源十堰水电开发有限公司, 湖北 十堰

³长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉

⁴湖北省电力有限公司黄龙滩水力发电厂, 湖北 十堰

收稿日期: 2022年11月7日; 录用日期: 2022年11月20日; 发布日期: 2022年12月31日

摘要

随着堵河流域水库群完建并进入正常运行期运用, 堵河流域形成了以潘口水库为核心的控制性水库群。为减少堵河流域水电站在汛末蓄水期无效弃水, 提高水资源综合利用率和兴利效益, 本文开展了水库汛末蓄水调度方式优化研究。首先采用K判别系数法, 分析了流域梯级水库蓄水次序; 进而针对来水较枯、潘口水库汛后无法蓄满的年份, 提出了基于改进K判别系数法的梯级水库蓄水次序优化模型; 并以蓄满率和发电指标对蓄水方案进行了评价。研究表明, 改进后的梯级水库联合蓄水方案, 可有效增加总发电效益约0.266亿kW·h。

关键词

梯级水库, 汛末蓄水, K判别系数, 堵河流域

Study on Impounding Method of Reservoir Group in Duhe River Basin at the End of Flooding Season

Wei Wang¹, Xin Zhang², Weiqing Yu³, Shaofeng Gu⁴

¹Hanjiang Water Resources & Hydropower Group Co., Ltd., Wuhan Hubei

²National Energy Changyuan Shiyuan Hydropower Development Co., Ltd., Shiyuan Hubei

³Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan Hubei

⁴Hubei Electric Power Co., Ltd. Huanglongtan Hydropower Plant, Shiyuan Hubei

Received: Nov. 7th, 2022; accepted: Nov. 20th, 2022; published: Dec. 31st, 2022

Abstract

With the completion and being in practice of Duhe reservoir group, the operation of the key reservoirs

作者简介: 王伟, 男, 工程师, 大学本科学历, 主要从事水库调度管理及水利信息化建设工作, 研究方向为流域水文气象预报模型、梯级水库优化调度、智慧水利应用研发, Email: heidirac@163.com

文章引用: 王伟, 张欣, 余蔚卿, 顾绍峰. 堵河流域水库群汛末蓄水方式研究[J]. 水资源研究, 2022, 11(6): 657-662.

DOI: 10.12677/jwrr.2022.116071

represented by Pankou has begun to take shape. In order to reduce the ineffective water abandonment of cascade hydropower stations at the end of flood season and improve the comprehensive utilization rate of water resources, the optimal operation model of cascade reservoirs at the end of flood season is established. Firstly, the storage inlet order of cascade reservoirs is analyzed by K discrimination coefficient method. Then, for years when the incoming water flow is relatively less and Pankou Reservoir cannot be fully filled after flood season, the water storage sequence of cascade reservoirs is improved based on the K discrimination coefficient method, and the impound scheme is evaluated according to the full storage rate and power generation index. The joint operation of reservoir group can increase 26.6 million kW·h power generation annually.

Keywords

Cascade Reservoirs, Impounding at the End of Flooding Season, K Discrimination Coefficient, Duhe River Basin

Copyright © 2022 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

堵河流域位于鄂西北汉江右岸，为汉江一级支流，干流全长约 354 km，流域面积约 12,430 km²。随着堵河梯级水库完工并进入正常运行期，水库上下游之间、干支流之间径流特性处于动态变化；由于潘口水库汛后需蓄水容量较大，汛末蓄水压力大，特别是遇流域枯水年份，需采用梯级联合优化调度方式提高梯级水库汛末有效蓄水。

许多学者对汛末梯级水库蓄水方式开展了大量研究。易灵等[1]在分析汛末洪水特性的基础上，通过预泄能力约束和库容补偿调度，建立了基于“库容高低配”策略的水库群汛末蓄水调度模型。李海英等[2]以汛末蓄水、下游补水和梯级发电为目标，构建了梯级联合多目标蓄水调度模型。归力佳等[3]构建梯级汛末蓄水方案多目标决策模型，利用组合赋权-理想点法对非劣解集进行综合评价，得出协同优化各目标的最佳蓄水方案。上述调度模型大多较为复杂，多运用于大型串联梯级水库蓄供水调度。

K 判别系数法[4]建立在对梯级水库群中各水库水量的“价值”评估基础上[5]，它以梯级水库群调度期内整体水能损失最小为基本原则，从而推求上下游各水库的蓄、供水次序，其判别条件简单；在梯级联合调度时，充分考虑当前时段下各电站的水位、库容和径流等因素，且每个电站均考虑下游各电站的状态，选择水能利用最高效率方式运行[6]，可充分满足发电、防洪等综合利用需求；然而 K 判别系数法也存在不可忽视的缺点，忽略了各水库有限库容量及汛末蓄水任务等因素，容易导致一部分水库蓄满后弃水，而其他水库汛末无法蓄满的问题。本文提出了基于 K 判别系数法改进的堵河流域梯级水库蓄水次序，供流域梯级调度参考。

2. 基础数据与研究方法

2.1. 研究区概况与基础数据

堵河干支流已建成主要水库 16 座，总库容约 50 亿 m³、总调节库容约 23 亿 m³；包括干流泗河河段的鄂坪、汇湾、白果坪，干流两河口以下的潘口、小漩、黄龙滩；支流官渡河龙背湾、松树岭，支流杨家河石庙子水库，支流潭口河的冯家湾水库，支流竹溪河水库，支流谭家河水库，支流泉河红岩一级、大峡、白沙河，支流霍河上的霍河水库。综合考虑梯级水库防洪任务及现有水文资料情况，本文重点讨论汛期预留有防洪库容或库容较大的鄂坪、龙背湾、潘口、霍河、黄龙滩水库的汛后蓄水方式。堵河流域水库群示意图见图 1。

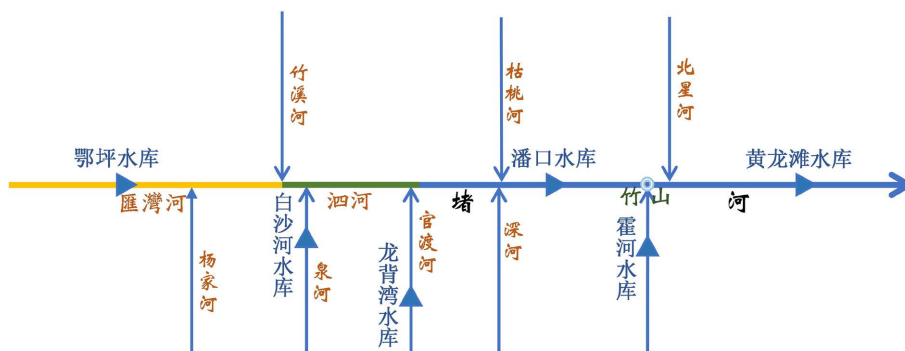


Figure 1. Schematic diagram of the reservoir group in the Duhe River basin
图 1. 堵河流域水库群示意图

本次研究采用 1956~2018 年长系列旬径流资料，梯级水库主要调度参数及调度图采用设计阶段成果。堵河流域梯级水库防洪库容释放时间为：潘口防洪库容释放时间为 8 月 21 日。黄龙滩虽然没有预留防洪库容，但是在实际运行中，汛期结合预报预泄提前将水位预泄至 243 m 迎洪，结合上游潘口防洪库容释放时机，本文假设黄龙滩 8 月 21 日可以开始蓄水。

2.2. 研究方法

2.2.1. 建立梯级水库联合调度计算模型

1) 目标函数

在满足综合利用要求的基础上，以梯级电站发电效益最大为目标。

2) 约束条件

以水库坝前水位、入库流量等为输入条件，以最下一级水库的下泄流量或者蓄水量作为约束条件。

上下游水库之间水量平衡计算公式：

$$Q_{in,t}^{i+1} = Q_{out,t}^i + Q_t^{i,i+1} \quad (1)$$

$$Q_{out,t}^i = f(h_t^i, Q_{in,t}^i) \quad (2)$$

$$W_t^{i+1} = f_2^{i+1}(h_t^{i+1}) \quad (3)$$

$$W_{t+1}^{i+1} = W_t^{i+1} + (Q_{in,t}^{i+1} - Q_{s,t}^{i+1}) \cdot \Delta t \quad (4)$$

$$h_{t+1}^{i+1} = f_3^{i+1}(W_{t+1}^{i+1}) \quad (5)$$

式中： $Q_{in,t}^{i+1}$ 为 t 时段下游水库的平均入库流量； $Q_{out,t}^i$ 为 t 时段上游水库的平均出库流量； $Q_t^{i,i+1}$ 为 t 时段上游水库和下游水库之间的平均区间流量； $f(h_t^i, Q_{in,t}^i)$ 为水库 i 应用调度图计算出库流量函数； W_t^{i+1} 为下游水库时段初的库容； f_2^{i+1} 为下游水库的水位库容计算函数，由水位计算库容； h_t^{i+1} 为下游水库 t 时段初的坝前水位； W_{t+1}^{i+1} 为下游水库 $t+1$ 时段初(即 t 时段末)的库容； Δt 为计算时段； $Q_{s,t}^{i+1}$ 为下游水库 t 时段的下泄流量，根据蓄水调度需求计算下泄流量； f_3^{i+1} 为下游水库的水位库容计算函数，由库容计算水位； h_{t+1}^{i+1} 为下游水库 $t+1$ 时段初的坝前水位。

3) 决策变量

堵河梯级水库中，鄂坪位于最上一级，黄龙滩位于干流最后一级，龙背湾、霍河等水库均位于支流。根据梯级水库位置关系，比较有相互水力联系水库的 K 值，选择 K 值大的水库 i_{max} 为当前计算时段的蓄水库。

K 值计算公式：

$$K_i = \frac{W_i + \sum V_i}{F_i \sum H_i} \quad (6)$$

式中, W_i 表示梯级水库群中第 i 个水库的入库总水量; $\sum V_i$ 为第 i 个水库及其上游梯级各水库可供发电的总蓄水量; F_i 表示第 i 个水库的水面面积; $\sum H_i$ 表示第 i 个水库及其所有下游水库的总水头。

2.2.2. 调度模型的优化

堵河梯级水库是典型的山区型水库, 发电水头是影响发电效益敏感性因素, 因此尽量提高水库蓄满率, 是提高梯级发电效益的手段之一。按设计方案调度梯级水库长系列蓄水过程显示, 一般情况下, 黄龙滩水库汛末基本上都可以蓄满。对于枯水年份, 由于蓄水期 9~11 月天然来水偏少, 导致在这些年份潘口、鄂坪、龙背湾三个水库均有汛后无法蓄满的情况发生。

为此, 针对来水较枯, 梯级水库汛后无法蓄满的年份, 开展提高梯级水库汛后蓄满率的调度方式研究。采用 K 判别系数法判别堵河梯级汛末蓄水方式, 并结合对潘口、黄龙滩水库蓄水条件加以约束的尝试, 寻求更有利的汛末梯级水库蓄水方式。不同蓄水条件约束方案见表 1。

Table 1. Optimization scheme of water storage at the end of flood season for Duhe reservoir group

表 1. 堵河梯级水库汛末蓄水优化方案

	黄龙滩	潘口	鄂坪、龙背湾	霍河
方案 1	K 值最大	K 值最大, 或 $H_{黄} \geq 246.0$ m	K 值最大	K 值最大
方案 2	K 值最大	K 值最大, 或 $H_{黄} \geq 246.5$ m	K 值最大, 或 $H_{潘} \geq 354.5$ m	K 值最大
方案 3	K 值最大	K 值最大, 或 $H_{黄} \geq 246.0$ m	K 值最大, 或 $H_{潘} \geq 354.0$ m	K 值最大
方案 4	K 值最大	K 值最大, 或 $H_{黄} \geq 245.0$ m	K 值最大, 或 $H_{潘} \geq 354.5$ m	K 值最大

注: 表中 $H_{黄}$ 、 $H_{潘}$ 分别为当前时段黄龙滩、潘口水库坝前水位。

3. 成果分析

研究结果显示, K 判别系数法判别堵河梯级汛末蓄水方式, 基本上没有发生由于 K 值较大的水库因过多承担蓄水储能任务, 而导致水库可能提前达到正常蓄水位, 产生弃水的情况, 提高了梯级水库汛末蓄满率。尤其是对于来水较枯、潘口水库汛后无法蓄满的年份, 潘口库水位抬高的较为明显。这主要是因为梯级水库单独调度时, 仅从当前时段自身水库来水和库水位来判断电站运行方式; K 判别系数法则结合梯级水库蓄水情势, 当

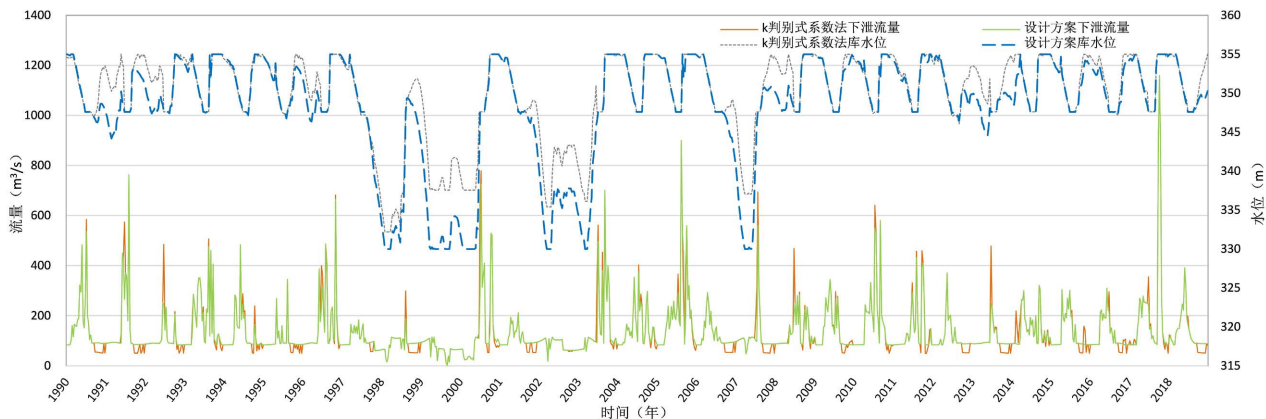


Figure 2. Schematic diagram of the operation process of Pankou Reservoir

图 2. 潘口水库运行过程示意图

下游水库蓄至较高水位时，上游水库可以提前减小出力蓄水，这样既可以提高上游水库运行水位，增加发电水头；也可以尽量避免下游水库提前达到正常蓄水位而产生无效弃水的情况。

以枯水年份较多的 1990~2018 年为例，绘出潘口水库运行过程示意图见图 2。

K 判别系数法汛后蓄水较快，对汛后发电略有影响，但水库一旦蓄满，后期运行水位抬高，发电效益相应抬高；总体来看，汛末按 K 判别式法蓄水增加了梯级电站的发电效益，并且主要增加的是枯水期发电效益，对于来水偏枯、年发电量小于平均值的年份，K 判别系数法对发电量的增加尤为明显。梯级水库汛末蓄水情况统计见表 2，梯级水库旬发电效益对比示意图见图 3，潘口水库年发电效益对比示意图见图 4。

与设计阶段拟定的各电站调度方式发电效益相比，梯级水库蓄满率增加 1.6%~36.5%，尤其是潘口和霍河水库蓄满率增加明显；梯级总发电效益增加 0.240~0.266 亿 kW·h。随着潘口水库汛末蓄水条件放宽，潘口水库的蓄满率和发电效益随之提高；虽然方案 3 潘口水库蓄满率和发电效益较方案 1、方案 4 略有下降，从梯级水库联合运行总发电效益来看，方案 3 优于其他几个方案。因此，本次研究推荐方案 3 为堵河梯级水库汛末蓄水方式。

Table 2. End of flood season storage rate and average annual power generation of Duhe cascade reservoir

表 2. 堵河梯级水库汛末蓄满率和年均发电量统计

电站	鄂坪	龙背湾	潘口	霍河	黄龙滩	合计
设计阶段方案	蓄满率	69.80%	60.30%	63.50%	47.60%	96.80%
	年均发电量(亿 kW·h)	2.01	3.39	9.65	0.46	9.74
K 判别系数法	蓄满率	73%	66.70%	88.90%	84.10%	98.40%
	年均发电量(亿 kW·h)	2.07	3.4	9.69	0.46	9.86
优化方案 1	蓄满率	74.60%	66.70%	93.70%	84.10%	98.40%
	年均发电量(亿 kW·h)	2.08	3.4	9.7	0.46	9.87
优化方案 2	蓄满率	74.60%	66.70%	85.70%	84.10%	98.40%
	年均发电量(亿 kW·h)	2.08	3.4	9.69	0.46	9.86
优化方案 3	蓄满率	74.60%	68.30%	92.10%	84.10%	98.40%
	年均发电量(亿 kW·h)	2.08	3.4	9.7	0.46	9.87
优化方案 4	蓄满率	74.60%	68.30%	93.70%	84.10%	98.40%
	年均发电量(亿 kW·h)	2.08	3.4	9.7	0.46	9.87

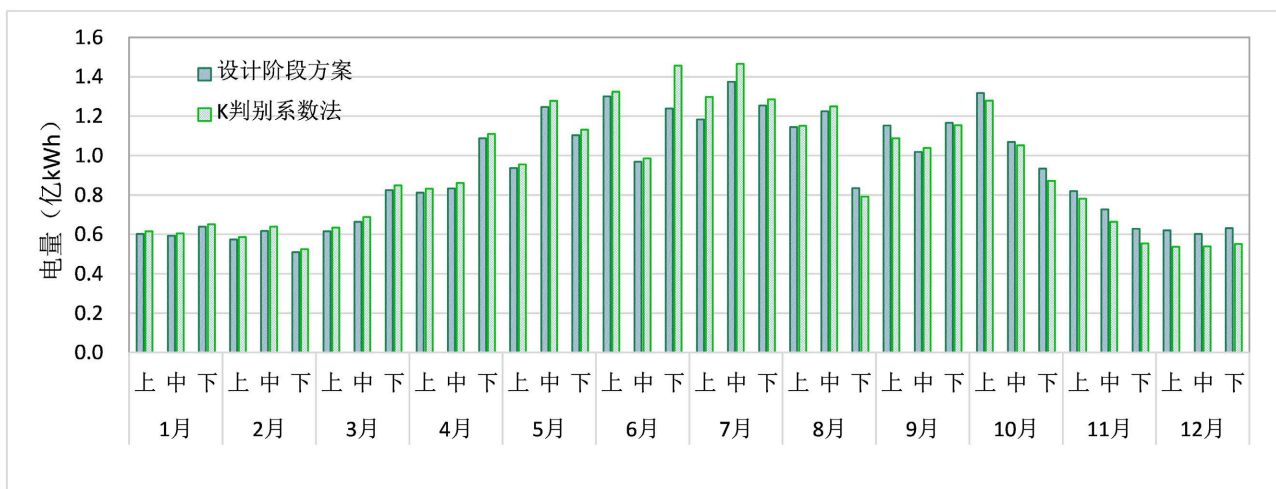


Figure 3. Schematic diagram of ten-day power generation benefit comparison of cascade power station

图 3. 梯级电站旬发电效益对比示意图

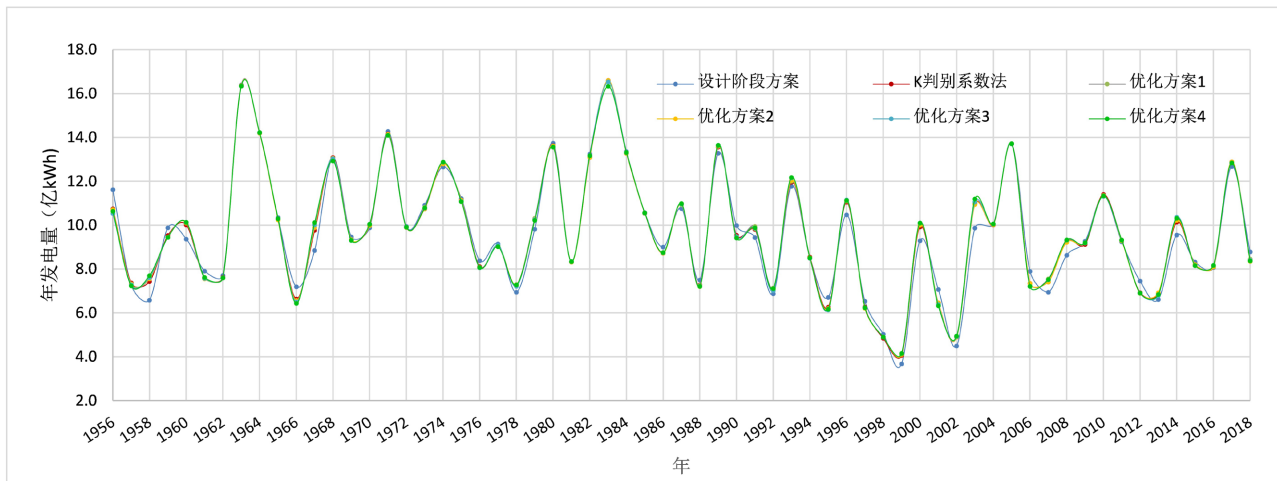


Figure 4. Schematic diagram of annual power generation benefit comparison of Pankou Reservoir
图 4. 潘口水库年发电效益对比示意图

4. 结论

本文以梯级水库发电量最大化为目标，对堵河流域联合调度汛末蓄水方式进行初步探索，提出了基于 K 判别系数法结合潘口、黄龙滩水库蓄水位的堵河梯级汛末蓄水次序判别方式。主要结论如下：

- 1) 基本上没有发生由于 K 值较大的水库因过多承担蓄水储能任务，而导致水库可能提前达到正常蓄水位，产生弃水的情况，可减少无效弃水；
- 2) 提高了梯级水库汛末蓄满率，尤其是对于来水较枯、潘口水库汛后无法蓄满的年份，潘口水库汛末水位抬高较为明显；
- 3) 增加梯级电站枯水期发电量，年均增加梯级电站发电量约 0.266 亿 kW·h；
- 4) 判别条件简单，适用于堵河梯级水库汛后蓄水次序判别。

参考文献

- [1] 易灵, 卢治文, 黄锋, 侯贵兵. 红水河龙滩、岩滩梯级水库汛末优化调度策略[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(4): 303-309.
YI Ling, LU Zhiwen, HUANG Feng and HOU Guibing. Optimal dispatching strategy of Longtan and Yantan cascade reservoirs in Hongshui River at the end of flood season. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(4): 303-309. (in Chinese)
- [2] 李英海, 董晓华, 郭家力. 三峡梯级水电站汛末联合多目标蓄水调度研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(9): 61-64.
LI Yinghai, DONG Xiaohua and GUO Jiali. Study on Three Gorges cascade power station's joint multi-objective impounding operation in flood recession period. Water Resources and Power, 2015, 33(9): 61-64. (in Chinese)
- [3] 归力佳, 顾圣平, 林乐曼, 咸京, 李江林. 基于组合赋权-理想点法的梯级水库蓄水研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(5): 44-48.
GUI Lijia, GU Shengping, LIN Leman, XIAN Jing and LI Jianglin. Multi-objective decision of impounding time of cascade reservoir based on combination weight-idea point method. Yellow River, 2018, 40(5): 44-48. (in Chinese)
- [4] 张勇传. 水电站水库调度[M]. 北京: 中国工业出版社, 1963.
ZHANG Yongchuan. Reservoir dispatching of hydropower station. Beijing: China Industry Press, 1963. (in Chinese)
- [5] 谢先庭. 适应负荷要求的水库调度[J]. 水力发电, 2005, 31(9): 75-80.
XIE Xianting. Reservoir dispatching adapting to load requirements. Water Power, 2005, 31(9): 75-80. (in Chinese)
- [6] 罗斌, 钱凯霞, 李安强. 乌江梯级水库联合优化调度方案研究[J]. 人民长江, 2010, 41(22): 8-11.
LUO Bin, QIAN Kaixia and LI Anqiang. Research on the joint optimization and dispatching scheme of Wujiang cascade reservoirs. Yangtze River, 2010, 41(22): 8-11. (in Chinese)