

乐昌峡水库汛末提前蓄水优化调度研究

谢雨祚¹, 何志鹏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: yuzuo@whu.edu.cn, *slguo@whu.edu.cn

收稿日期: 2021年7月12日; 录用日期: 2021年8月16日; 发布日期: 2021年8月26日

摘要

乐昌峡水库原设计从10月1日开始蓄水, 导致水库蓄满率很低。本文根据水库蓄水调度控制线, 计算蓄水期分期设计洪水和防洪控制水位, 建立多目标水库优化蓄水调度模型, 并采用NSGA-II算法求解。结果表明: 在防洪限制水位的约束下, 蓄水时间越提前, 水库的综合利用效益越大。与原设计方案相比, 8月1日和9月1日起蓄方案蓄水期发电量分别提高了21.62%和13.49%, 蓄满率分别提高了10.40%和9.96%, 多年平均蓄水量分别增加了4979和3647万m³。在确保防洪安全的前提下确定关键时间节点及对应水位, 可为提前蓄水调度提供技术参考。

关键词

提前蓄水, 防洪风险, 多目标调度, NSGA-II算法, 乐昌峡水库

Advance Impoundment and Optimal Operation of Lechang Reservoir in the End of Flood Season

Yuzuo Xie¹, Zhipeng He², 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: yuzuo@whu.edu.cn, *slguo@whu.edu.cn

作者简介: 谢雨祚(1998-), 男, 湖北宣城人, 硕士研究生, 主要从事水文分析计算研究。

*通讯作者。

文章引用: 谢雨祚, 何志鹏, 李娜, 龙三文, 虞云飞, 郑友南, 曾德程, 郭生练. 乐昌峡水库汛末提前蓄水优化调度研究[J]. 水资源研究, 2021, 10(4): 381-390. DOI: 10.12677/jwrr.2021.104041

Abstract

The designed impoundment scheme of Lechang reservoir was started in October 1, which results in a low impoundment efficiency. In this study, the seasonal design floods and flood control limited water level during the impounding period were calculated. Based on the reservoir impoundment operation lines, a multi-objective operation model was established and solved by the NSGA-II algorithm. Compared with the designed impoundment scheme, the advance impoundment scheme for August 1 (or September 1) can increase 21.62% (or 13.49%) power generation, 10.40% (or 9.96%) total impoundment efficiency, and 4979 (or 3647) million m³ water resources, respectively. Determining key time nodes and corresponding water levels can provide technical reference for advance impoundment operation on the premise of ensuring flood control safety.

Keywords

Advance Impoundment, Flood Control Risk, Multi-Objective Operation, NSGA-II Algorithm, Lechang 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

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 km²,约占武江流域 70%,坝址处多年平均流量为 138 m³/s。工程以防洪为主,结合发电,兼顾航运和灌溉。设计洪水标准为 100 年一遇,校核洪水标准为 200 年一遇,设计洪水水位为 162.20 m,正常蓄水位为 154.50 m,防洪限制水位为 144.50 m,其它工程概况见文献[1]。

近年来,随着北江流域经济社会的快速发展,流域用水需求持续增加,水资源供需矛盾加剧,水环境和河流生态受到潜在威胁。据乐昌峡水库多年平均径流资料显示,10 月至次年 1 月的降雨量和月平均径流量偏小,每年 10 月至次年 1 月应为水库供水期。然而原设计方案以 10 月 1 日为蓄水期起蓄时间,从汛限水位 144.5 m 逐步蓄至正常蓄水位 154.5 m,水库蓄水和供水相矛盾、蓄满率低。

针对单一水库汛末提前蓄水优化调度问题,众多学者从不同研究角度进行了一系列研究。刘心愿[2]采用三峡水库汛期分期方案,将蓄水时间提前至汛末期,并建立了多目标蓄水调度模型求解优化蓄水方案,既确保防洪安全又最大限度发挥兴利效益。李雨[3]选择 1952 和 1964 年为典型年,分别推求三峡水库分期设计洪水过程线,拟定 6 组提前蓄水方案并开展提前蓄水的防洪风险和效益分析计算。汪芸[4]开展丹江口水库提前蓄水的可行性分析研究,建立并求解了以年均蓄水率最大为目标函数的提前蓄水调度模型,并在此基础上提出了分阶段提前蓄水方案。陈柯兵[5]基于聚类-预报-优化的预报调度模式,以年均发电量最大和年均蓄水位最高为目标,采用 NSGA-II 算法优化三峡水库蓄水调度线。

为进一步发掘水库兴利、发电、生态等综合效益,充分发挥水库蓄丰补枯作用,本文以乐昌峡水利枢纽为研究对象,开展汛末提前蓄水优化调度研究;根据蓄水期流量过程计算分期设计洪水和防洪控制水位;建立多目标提前蓄水优化调度模型,采用 NSGA-II 算法求解;并给出建议提前蓄水方案,为乐昌峡水利枢纽提前蓄水

调度提供决策参考。

2. 乐昌峡水库提前蓄水优化调度模型

2.1. 水库蓄水调度控制线

将水库的开始蓄水时间提前至后汛期，必须考虑后汛期的防洪安全问题。水库调度图一般设置有预想出力线、加大出力线、保证出力线和降低出力线等，将其划分为若干出力区等，这类调度图对于发电调度十分有效，但由于调洪流量一般远大于电站预想出力所对应的流量，对于洪水调度这类调度图的作用就受到了很大的限制。本研究利用蓄水调度线作为调度规则，指导水库蓄水调度。蓄水调度线能明确起蓄时间和蓄水进程，通过设置汛末控制水位满足防洪的要求，对充分发挥水库枯水期的综合利用效益，具有重要的理论价值和现实意义[6]。

2.2. 水库优化蓄水调度模型

水库蓄水优化调度模型由目标函数及约束条件组成，本研究中蓄水模型优化对象为蓄水调度线各时间点水位。

2.2.1. 目标函数

对于综合利用水利枢纽来说，水库常常发挥如防洪、发电、生态、供水等多方面的功能，且不同功能目标之间可能并不一致，无法同时保证各目标都达到最优，因此，需要在各个目标函数之间进行权衡。本文构建的水库蓄水优化调度模型采用发电量最大和蓄满率最大两个目标函数，其表达式如下：

1) 水库多年平均发电量最大：

$$f_1 = \max_{x \in X} \left\{ \sum_{i=1}^M E_i \right\} \quad (1)$$

式中： E_i 表示水库第*i*年蓄水期的发电量。

2) 水库蓄满率最大：

$$f_2 = \max_{x \in X} \left\{ \sum_{i=1}^M \frac{V_{(i,high)} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \right\} \quad (2)$$

式中： $V_{(i,high)}$ 表示水库第*i*年蓄水期末水库达到最高水位时对应的库容； V_{max} 表示水库正常蓄水位对应的库容； V_{min} 表示水库死水位对应的库容。

2.2.2. 约束条件

确定模型的目标函数之后，考虑梯级水库联合蓄水调度模型的约束条件：

1) 水量平衡约束：

$$V_t = V_{t-1} + (I_t - Q_t) \cdot \Delta t \quad (3)$$

式中， V_t 、 V_{t-1} 分别表示水库在*t*时段和*t-1*时段初水库的库容； I_t 为水库第*t*时段的入库流量； Q_t 为水库第*t*时段的出库流量； Δt 为计算时间步长。

2) 水位上下限约束及水位变幅约束：

$$\begin{cases} ZL_t \leq Z_t \leq ZU_t \\ |Z_t - Z_{t+1}| \leq \Delta Z_t \end{cases} \quad (4)$$

式中： ZL_t 、 ZU_t 分别为水库第*t*时段允许的最小、最大蓄水量，分别取为第*t*时段水库设计蓄水调度线和分期防洪控制水位线对应的库容； ΔZ_t 为*t*时段库水位允许变幅。

3) 出库流量约束及流量变幅约束：

$$\begin{cases} QL_t \leq Q_{i,t} \leq QU_t \\ |Q_t - Q_{t+1}| \leq \Delta Q_t \end{cases} \quad (5)$$

式中： QL_t 、 QU_t 分别为水库第 t 时段允许的最小下泄流量(即生态流量)和最大下泄流量； ΔQ_t 为 t 时段水库允许出库流量变幅。

4) 电站出力约束：

$$PL_t \leq P_t \leq PU_t \quad (6)$$

式中： PL_t 为水库第 t 时段的保证出力， PU_t 为水库第 t 时段的额定出力。

5) 蓄水调度线形状约束：各蓄水调度线不交叉且尽可能光滑，确保水位不出现大幅波动。

2.2.3. 优化算法

采用非支配排序遗传算法(NSGA-II)优化蓄水调度模型。该算法克服了初代NSGA算法计算复杂、效率不高的局限性，充分利用了非支配排序方法的优点，提高了算法的计算效率，使得该算法能够快速收敛至目标解集。同时，NSGA-II算法在产生下一代时，选择将父代和子代进行合并后，再从中选取表现优秀的个体，能够最大限度地保留优良个体。NSGA-II算法还引入了精英策略，确保表现优秀的个体在自然选择的过程中不会丢失。目前NSGA-II算法已经广泛应用于多目标水库调度模型优化中[5][7][8]。本研究中，设定NSGA-II算法交叉、变异的概率分别为0.7和0.2，种群数量为60，进化代数为500。

3. 蓄水期设计洪水与防洪控制水位

由于水库蓄水调度线的优化空间为水库分期防洪控制水位和水库设计蓄水调度线所围成的区域。水库分期防洪控制水位可以通过在选定的时间节点，假定水库遭遇相应设计标准的洪水时，在不增加防洪风险的前提下，水库允许的最高防洪控制水位来确定。本研究通过设置防洪控制节点来确定分期防洪控制水位，以满足防洪和兴利蓄水要求。

拟定各蓄水方案起止时间如表1所示。原起蓄时间方案以10月1日之后的枯水期作为蓄水区间，以12月31日为蓄水期末；为了推求合适的蓄水时间，分别拟定8月1日和9月1日作为起蓄时间的蓄水方案，蓄满时间为12月31日，将起蓄时间至12月31日作为整个蓄水期。

Table 1. Start and end time of each impoundment scheme of Lechang reservoir

表 1. 乐昌峡水利枢纽各蓄水方案起止时间

方案	起蓄时间	止蓄时间
原设计方案(10月1日起蓄)	10月1日	12月31日
8月1日起蓄方案	8月1日	12月31日
9月1日起蓄方案	9月1日	12月31日

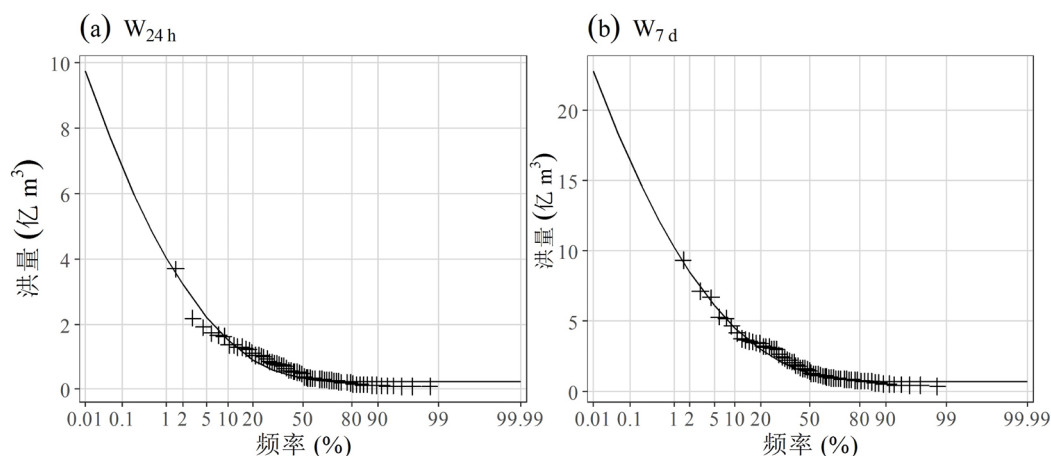
3.1. 蓄水期分期设计洪水

在1955~2020年共66年蓄水期(8月1日至12月31日)的乐昌峡水库坝址日径流系列中，分别按分期最大取 W_{24h} 、 W_{3d} 、 W_{7d} 洪量系列由于2002年蓄水期 W_{7d} 最大，从对防洪调度最不利影响考虑，选择“2002.08”场次洪水为典型洪水过程。同样采用分期最大取样方法，分别得到9月1日，10月1日开始蓄水的 W_{24h} 、 W_{3d} 、 W_{7d} 系列，选择“2002.10”场次洪水为典型洪水过程。

采用皮尔逊III型曲线拟合各个分期最大日流量序列，分析计算乐昌峡水利枢纽不同蓄水期分期最大 W_{24h} 、 W_{3d} 、 W_{7d} 成果，如表2所示。以8月1日起蓄方案为例，需推求蓄水期即8月1日至12月31日的分期设计洪水，其设计 W_{24h} 和 W_{7d} 洪量频率曲线如图1所示。

Table 2. Seasonal maximum W_{24h} , W_{3d} , W_{7d} of each impounding time (Unit: 10^8 m^3 ; $Cs/Cv = 3.0$)**表 2.** 各起蓄时间分期最大 W_{24h} , W_{3d} , W_{7d} 成果表(单位: 亿 m^3 ; $Cs/Cv = 3.0$)

时间	洪量	统计参数		P = %								
		均值	Cv	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20
8月1日	W24h	0.663	1.12	7.02	6.25	5.48	4.49	3.75	3.03	2.13	1.49	0.92
	W3d	1.380	1.06	13.64	12.17	10.71	8.82	7.41	6.04	4.30	3.06	1.94
	W7d	2.079	0.98	18.33	16.42	14.54	12.08	10.25	8.45	6.15	4.50	2.96
9月1日	W24h	0.496	1.26	6.21	5.49	4.78	3.86	3.18	2.52	1.71	1.15	0.66
	W3d	1.030	1.07	10.31	9.19	8.09	6.65	5.59	4.55	3.23	2.29	1.45
	W7d	1.030	0.97	13.63	12.22	10.82	8.99	7.63	6.29	4.58	3.35	2.21
10月1日	W24h	0.330	1.36	5.65	4.93	4.22	3.32	2.66	2.03	1.27	0.77	0.39
	W3d	0.709	1.38	10.17	8.93	7.72	6.16	5.02	3.92	2.57	1.66	0.90
	W7d	1.092	1.22	13.06	11.56	10.08	8.17	6.76	5.40	3.69	2.51	1.48

**Figure 1.** Frequency curves of seasonal maximum (a) W_{24h} and (b) W_{7d} design flood after August 1**图 1.** 8月1日以后分期最大(a) W_{24h} 和(b) W_{7d} 设计洪量频率曲线

3.2. 蓄水期防洪控制水位

分别从大坝设计洪水(蓄水期 100 年一遇)和临时淹没风险(蓄水期 20 年一遇)两个角度, 推求和论证蓄水期的防洪控制水位:

1) 分期设计洪水的设计标准不低于全年设计标准。结合实际调度经验和其他的约束要求, 以乐昌峡水利枢纽蓄水期 100 年一遇分期设计洪水为依据、以设计洪水位 162.2 m 为调洪最高水位、以初设防洪调度方案为准则, 推求蓄水期各个时间段的分期防洪控制水位如表 3 所示。以 8 月 1 日以后 100 年一遇分期设计洪水为例, 其洪水过程线如图 2(a)所示。

2) 分期设计洪水的临时淹没风险不低于全年临时淹没风险。乐昌峡水利枢纽的土地征用线是由建库后 5 年一遇洪水的水面线和坝前段正常蓄水位, 加 0.5 m 的水平线组成的外包线。人口迁移线是由建库后 20 年一遇洪水的水面线和坝前段正常蓄水位, 加 1.0 m 的水平线组成的外包线。因此, 结合实际调度经验和其他的约束要求, 以乐昌峡水利枢纽蓄水期 20 年一遇分期设计洪水为依据、以分期防洪控制水位(表 3)为起调水位、以中小洪水调度方案为准则, 论证蓄水期 20 年一遇分期设计洪水的最高调洪水位是否高于正常蓄水位, 结果如表 3 所示。以 8 月 1 日 20 年一遇分期设计洪水为例, 其洪水过程线如图 2(b)所示。

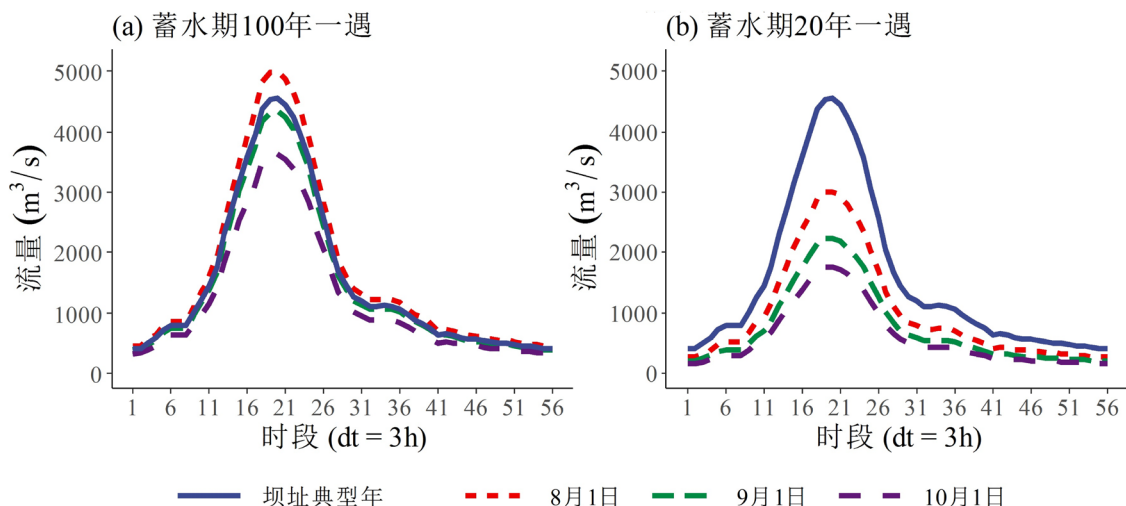


Figure 2. 100-year and 20-year design flood hydrographs in impoundment period amplified by “2002.08” typical year
图 2. “2002.08” 典型年同频率放大蓄水期 100 年一遇和 20 年一遇分期设计洪水过程线

Table 3. The derived and demonstrated flood control water level at variant time nodes during impounding period
表 3. 推求和论证水库蓄水期不同时间节点的防洪控制水位

蓄水期关键时间点	100 年一遇防洪控制水位(m)	20 年一遇最高调洪水位(m)
8 月 1 日	147.7	150.5
9 月 1 日	152.9	153.0
10 月 1 日	154.5	154.5

如表 3 所示，以关键时间节点 8 月 1 日的分期设计洪水为例，若 8 月 1 日库水位不高于 147.7 m，可以保证当发生蓄水期(8 月 1 日至 12 月 31 日) 100 年一遇分期设计洪水时，经初设防洪调度调洪，最高库水位不超过设计洪水位 162.2 m；发生蓄水期 20 年一遇分期设计洪水时，经中小洪水调度方案调洪，最高库水位不超过正常蓄水位 154.5 m。9 月 1 日和 10 月 1 日蓄水期 20 年一遇最高调洪水位同样不高于正常蓄水位，论证了当遇到后汛期 20 年一遇洪水时，经中小洪水调度方案调洪，从所推求的防洪控制水位开始起调不会产生临时淹没风险。

根据表 3 所推求的蓄水期 100 年一遇防洪控制水位，经内插求得蓄水期不同时期防洪控制水位如表 4 所示。

Table 4. Flood control water levels during impounding period
表 4. 蓄水期防洪控制水位

蓄水期时段	防洪控制水位(m)
8 月上旬	147.7
8 月中旬	149.4
8 月下旬	151.2
9 月上旬	152.9
9 月中旬	153.4
9 月下旬	154.0
10 月至 12 月	154.5

4. 提前蓄水优化调度结果分析

4.1. 调度结果分析

优化蓄水调度以水库蓄满率为主要指标。以蓄满率最大的非劣解为例，表 5 汇总了原设计方案和提前蓄水方案的调度结果，其中多年平均发电量统计时间范围均为 8 月 1 日至 12 月 31 日。由表可知，相对原设计方案，8 月 1 日和 9 月 1 日起蓄方案，最快蓄满时长分别为 65 d 和 70 d，发电量分别提高了 1170 和 730 万 kW·h，相比原设计方案提高了 21.62% 和 13.49%，蓄满率分别提高了 10.40% 和 9.96%，蓄水期多年平均超过汛限水位对应库容的蓄水量分别增加了 4979 和 3647 万 m³。从结果比较可以看出，在防洪控制水位的约束下，蓄水时间越提前，水库综合效益越大。

Table 5. Comparison of operation results between the designed scheme and the advance impoundment schemes during the impounding period (August 1~December 31)

表 5. 计算时段(8 月 1 日~12 月 31 日)原设计和提前蓄水方案的调度结果比较

统计参数	原设计	8 月 1 日起蓄	9 月 1 日起蓄
起蓄时间	10 月 1 日	8 月 1 日	9 月 1 日
最快蓄满时间	12 月 31 日	10 月 7 日	10 月 12 日
最快蓄满天数(d)	122	65	70
蓄满率(%)	89.37	99.77	99.33
总发电量(万 kW·h)	5410	6580	6140
增发发电量(万 kW·h)	/	1170	730
总蓄水量(万 m ³)	2194	7173	5841
增加蓄水量(万 m ³)	/	4979	3647

4.2. 典型年调度实例分析

为了更直观地展示提前蓄水优化方案和原蓄水方案的水位流量过程，根据多年蓄水期的来水情况，分别根据来水较丰(1997 年)、来水较平(2007 年)和来水较枯(1983 年)选择典型年，根据优化蓄水模型进行水库模拟蓄水调度计算，得到乐昌峡水利枢纽在不同典型年各蓄水方案的蓄水调度过程，如图 3~5 所示。

由典型年模拟调度蓄水过程(图 3~5)可知，提前蓄水方案在丰、平和枯水年都能将水库蓄满，且水库采用三种提前蓄水方案均未产生防洪风险；而原蓄水方案在平、枯水年蓄水期末达不到正常蓄水位。虽然 8 月 1 日和 9 月 1 日起蓄方案在 9 月 10 日之前的水位相差较大，但是由于关键时间节点对应的防洪控制水位约束，各提前蓄水方案在蓄水期中后期趋于相近的水位，说明以关键时间节点及其防洪控制水位为指导的提前蓄水方案能较好地控制库水位以降低防洪风险，总体而言提前蓄水方案均具有良好的蓄水效果。

4.3. 建议蓄水关键节点

考虑到防洪安全以及不同年份的来水状况，建议以多个典型枯水年各关键时间点的优化蓄水水位下包线为指导，实施分阶段蓄水调度。各提前蓄水方案的关键控制节点列于表 6，实际调度中，建议采用 8 月 1 日起蓄方案以获取更优效益。

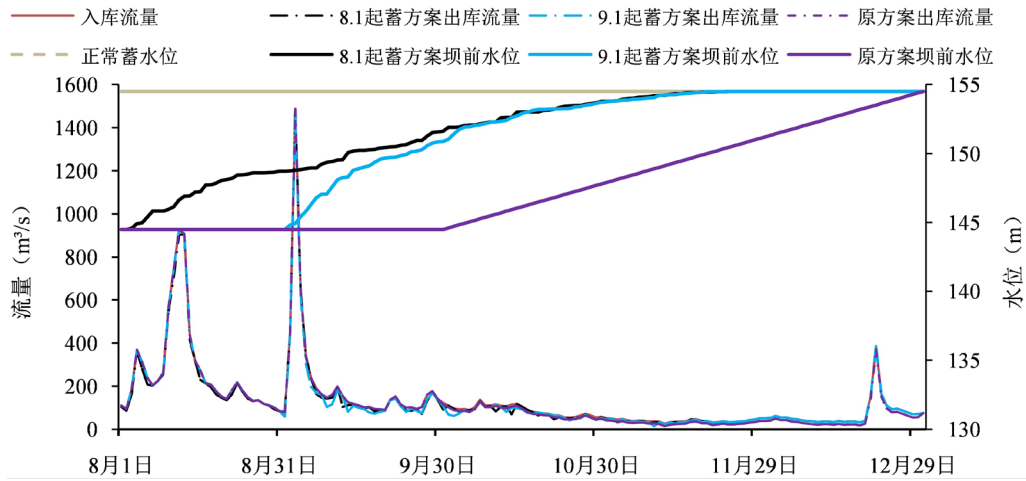


Figure 3. The simulation processes of impoundment operation of three schemes in wet year (1997)
 图 3. 丰水年(1997年)三种方案模拟调度蓄水过程

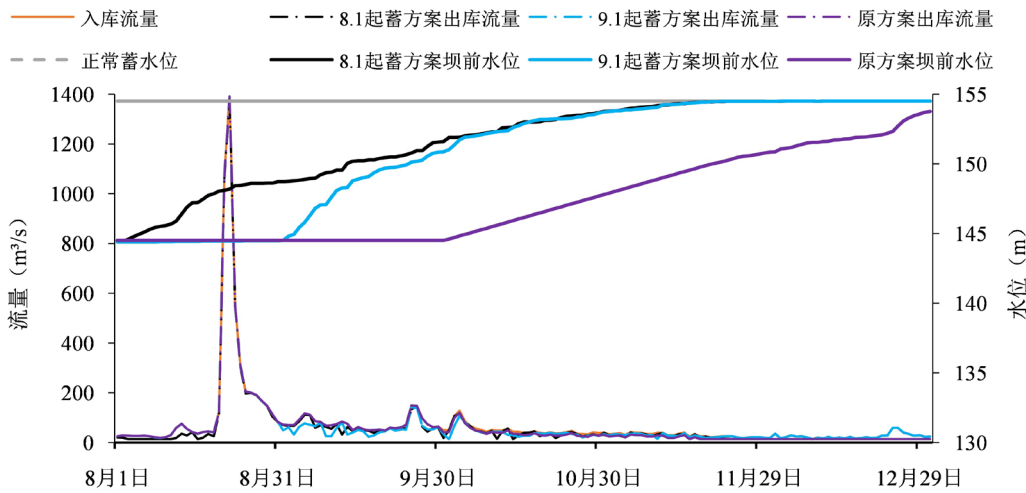


Figure 4. The simulation processes of impoundment operation of three schemes in normal year (2007)
 图 4. 平水年(2007年)三种方案模拟调度蓄水过程

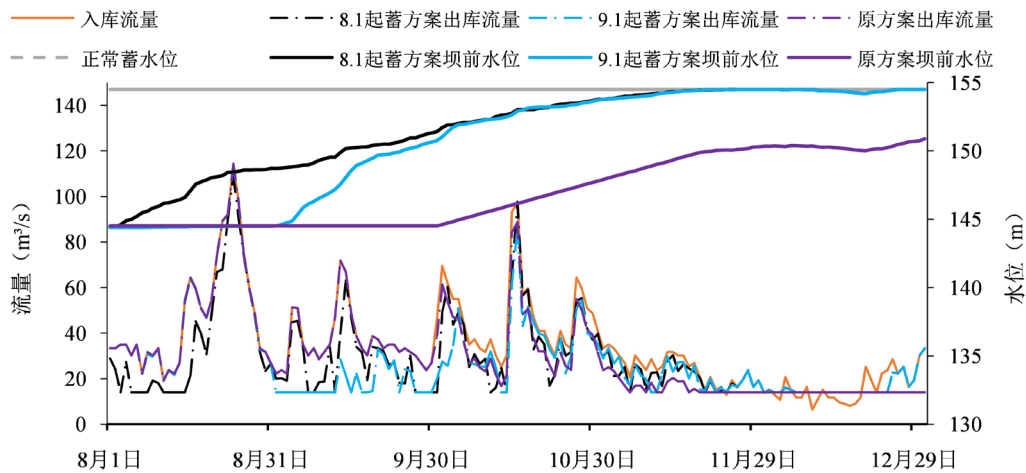


Figure 5. The simulation processes of impoundment operation of three schemes in dry year (1983)
 图 5. 枯水年(1983年)三种方案模拟调度蓄水过程

Table 6. Key node water levels of Lechang Reservoir in advance impoundment scheme (Unit: m)
表 6. 乐昌峡水库提前蓄水方案关键控制节点水位(单位: m)

日期	8月1日起蓄	9月1日起蓄
8月1日	144.50	/
8月10日	145.95	/
8月20日	148.05	/
9月1日	148.73	144.50
9月10日	149.41	147.59
9月20日	150.45	149.68
10月1日	151.61	150.87
10月10日	152.81	152.73
10月20日	153.78	153.77
10月31日	154.50	154.50

5. 结论

本文以乐昌峡水利枢纽为研究对象,开展了汛末提前蓄水优化调度研究,建立蓄水调度模型并采用 NSGA-II 算法优化,根据系列优化过程线给出蓄水关键节点相应的建议水位,结论如下:

1) 分别从大坝设计洪水和临时淹没风险两个角度,推求和论证了蓄水期的防洪控制水位。当蓄水期水位从所推求的防洪控制水位起调时,最高调洪水位不超过正常蓄水位,在确保原设计防洪标准不变的同时规避了下游淹没风险。

2) 以蓄水期防洪限制水位为水库运行上界,蓄水时间越提前,水库综合效益越大。相比原设计方案,8月1日和9月1日起蓄方案的蓄水期发电量分别提高了 21.62%和 13.49%,蓄满率分别提高了 10.40%和 9.96%,蓄水期多年平均蓄水量分别增加了 4979 和 3647 万 m^3 。

此外根据优化调度结果确定了蓄水调度的建议时间节点以及相应水位,为乐昌峡水库汛末分阶段蓄水调度提供决策参考。

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] 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)
- [2] 刘心愿, 郭生练, 刘攀, 李响. 考虑综合利用要求的三峡水库提前蓄水方案[J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 851-856.
LIU Xinyuan, GUO Shenglian, LIU Pan and LI Xiang. Scheme of impounding in advance for the Three Gorges Reservoir by considering the comprehensive utilization benefits. Advances in Water Science, 2009, 20(6): 851-856. (in Chinese)
- [3] 李雨, 郭生练, 郭海晋, 张洪刚, 丁胜祥. 三峡水库提前蓄水的防洪风险与效益分析[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(1): 8-14.
LI Yu, GUO Shenglian, GUO Haijin, ZHANG Honggang and DING Shengxiang. Flood control risk and benefit of impounding water in advance for the Three Gorges Reservoir. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(1): 8-14. (in Chinese)
- [4] 汪芸, 郭生练, 李天元. 丹江口水库提前蓄水方案[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(4): 433-439.
WANG Yun, GUO Shenglian and LI Tianyuan. Study of scheme of impounding in advance for Danjiangkou reservoir. Engi-

- neering Journal of Wuhan University, 2014, 47(4): 433-439. (in Chinese)
- [5] 陈柯兵, 郭生练, 何绍坤, 尹家波, 杨光. 基于月径流预报的三峡水库优化蓄水方案[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(2): 112-117.
CHEN Kebing, GUO Shenglian, HE Shaokun, YIN Jiabo and YANG Guang. Optimal impounding operation of Three Gorges Reservoir based on monthly runoff forecasting. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(2): 112-117. (in Chinese)
- [6] 何绍坤, 郭生练, 刘攀, 陈柯兵, 熊丰, 张剑亭. 金沙江梯级与三峡水库群联合蓄水优化调度[J]. 水力发电学报, 2019, 38(8): 27-36.
HE Shaokun, GUO Shenglian, LIU Pan, CHEN Kebing, XIONG Feng and ZHANG Jianting. Joint and optimal impoundment operation of Jinsha River's cascade reservoirs and Three Gorges Reservoir. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(8): 27-36. (in Chinese)
- [7] 谢雨祚, 尹家波, 李千珣, 郭生练, 何绍坤, 熊丰, 何志鹏, 邓乐乐, 张文选, 温岩. 考虑生态流量的清江梯级水库优化调度研究[J]. 水资源研究, 2021, 10(1): 1-10.
XIE Yuzuo, YIN Jiabo, LI Qianxun, GUO Shenglian, HE Shaokun, XIONG Feng, HE Zhipeng, DENG Lele, ZHANG Wenxuan and WEN Yan. Optimal operation cascade reservoirs in the Qing River considering ecological flow. Journal of Water Resources Research, 2021, 10(1): 1-10. (in Chinese)
- [8] 郭生练, 熊丰, 涂圣勤, 李娜, 张文选, 温岩. 清江梯级水库提前蓄水多目标联合优化调度[J]. 水资源研究, 2021, 10(2): 125-136.
GUO Shenglian, XIONG Feng, TU Shengqin, LI Na, ZHANG Wenxuan and WEN Yan. Multi-object early impound operation for cascade reservoirs in Qing river. Journal of Water Resources Research, 2021, 10(2): 125-136. (in Chinese)