

场次洪水优化调度增发电量的计算方法

李树山¹, 李崇浩¹, 程春田², 钟儒鸿², 吴慧军¹

¹中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州

²大连理工大学水电与水信息研究所, 辽宁 大连

收稿日期: 2021年11月4日; 录用日期: 2021年12月9日; 发布日期: 2021年12月24日

摘要

汛期洪水资源利用一直是我国水库及水电站运行的研究热点, 由于洪水形态各异、洪水过程难以刻画等难题, 生产实际中洪水优化调度增发电量缺少有效的计算方法。本文通过运用洪前预泄腾库、洪中汛限水位动态控制、洪后拦蓄洪尾技术, 建立了洪水优化调度实施全过程模型, 将场次洪水过程分为洪前、洪中、洪后三个阶段计算理论发电量。结合实际工程案例说明了方法的可操作性和应用效果, 对促进提高洪水优化调度水平有重要的指导和借鉴意义。

关键词

水电站, 场次洪水, 优化调度, 增发电量

Increasing Hydropower Generation Method by Optimal Operation of Flood Events

Shushan Li¹, Chonghao Li¹, Chuntian Cheng², Ruhong Zhong², Huijun Wu¹

¹China Southern Power Grid Power Dispatching and Control Center, Guangzhou Guangdong

²Institute of Hydropower & Hydroinformatics, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

Received: Nov. 4th, 2021; accepted: Dec. 9th, 2021; published: Dec. 24th, 2021

Abstract

The utilization of flood resources in flood season has always been a research hotspot in the reservoirs or hydropower plants operation in China. Due to the flood with the characteristic of variable patterns and difficult description, there are few effective and practical methods for the calculation of increasing power generation. In this paper, the whole process model of flood optimal operation is established by utilizing

作者简介: 李树山, 男, 出生于 1985 年, 博士研究生, 高级工程师, 从事水电调度运行工作, Email: sslee.scu.2004@163.com

文章引用: 李树山, 李崇浩, 程春田, 钟儒鸿, 吴慧军. 场次洪水优化调度增发电量的计算方法[J]. 水资源研究, 2021, 10(6): 623-630. DOI: 10.12677/jwrr.2021.106068

flood discharge in advance, dynamic control of limited water level in middle flood process and storing flood tailwater. The stage flood process can be divided into three stages: pre-flood, mid-flood and post-flood event to calculate the theoretical power generation. The maneuverability and effectiveness of the model are verified with practical cases, which has important guidance and reference significance for improving the hydropower scheduling plan.

Keywords

Hydropower Plan, Flood Events, Optimal Dispatching, Increased Electricity

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

我国江河径流量 60% 以上集中在汛期[1], 这给承担发电、防洪等综合利用的水电站调度带来很多困难。如何合理利用洪水资源, 一直是最近二十多年来我国水电及水电站调度运行的难点和热点问题[2] [3] [4]。为了提高洪水资源利用, 预泄调度、拦蓄洪尾、汛限水位动态控制等技术得到了广泛研究和应用[5] [6] [7] [8] [9], 为解决发电与防洪问题提供了理论和政策依据。但对具体场次洪水, 如何进行精细化调度增发发电量, 却面临洪水形态不一、洪水调度过程难以刻画描述等困难, 需要研究构建行之有效的模型及计算方法。

南方电网是我国水电装机规模最大区域电网, 截至 2020 年底统调水电装机容量 1.2 亿 kW, 近 5 年年平均发电量 3765 亿 kWh, 其中汛期(6~10 月)发电量占比接近 60%。如何利用洪水资源, 提高汛期水电发电量, 一直是电网的核心重要任务。本文结合南方电网水电调度实践, 根据场次洪水特点, 提出了洪前、洪中、洪后水电站优化调度增发发电量计算方法, 并将此方法有机地集成到南方电网新一代水调系统平台, 开展全网水电优化调度成效分析评价, 实际应用取得很好效果。

2. 场次洪水优化调度增发发电量问题

2.1. 问题描述

洪前预泄腾库[10] [11]、洪末拦蓄洪尾[12] [13], 动态控制汛限水位[14] [15]是业界实施洪水优化调度增发发电量常用的措施和方法。洪前预泄腾库是指通过水文预报在洪水到来前加大水电站发电, 提前降低水库水位、腾出库容, 减少或避免洪水过程电站溢流的优化措施; 拦蓄洪尾是指在保证水库防洪安全前提下, 通过水文预报及时合理拦蓄洪水退水段的水量, 提升洪末水库蓄能, 增加后期发电量的优化措施; 动态控制汛限水位是指洪水期间在确保防洪安全的前提下, 经防汛部门许可, 通过动态调整水库汛限水位, 利用防洪库容蓄水增发发电量的优化措施。

2.2. 增发发电量定义

场次洪水优化增发发电量定义为: 单一洪水过程, 采用预泄腾库、拦蓄洪尾、汛限水位动态控制等调度方法所额外增加的发电量。计算表达式如式(1)所示。

$$E_i = E_{i,t}^s - E_{i,t}^l - E_{i,t}^q \quad (1)$$

式中: E_i 为水电站 i 场次洪水优化增发发电量; $E_{i,t}^s$ 为水电站 i 在 t 时段的实际发电量; $E_{i,t}^l$ 为水电站 i 在 t 时段不

采取洪水优化调度措施的理论发电量； $E_{i,t}^q$ 为水电站 i 在 t 时段产生的弃水电量。

2.3. 约束条件

1) 水量平衡方程

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (Q_{i,t}^I - Q_{i,t}^O) \times T_t \quad (2)$$

$$Q_{i,t}^O = Q_{i,t}^P + Q_{i,t}^A \quad (3)$$

式中： $V_{i,t}$ 为水电站 i 在 t 时段库容； $Q_{i,t}^I$ 、 $Q_{i,t}^O$ 、 $Q_{i,t}^P$ 、 $Q_{i,t}^A$ 分别为水电站 i 在 t 时段的入库流量、出库流量、发电流量、弃水流量； T_t 为 t 时段对应的时间。

2) 水库水位约束

$$Z_i^{\min} \leq Z_{i,t} \leq Z_i^{\max} \quad (4)$$

$$V_{i,t} = f(Z_{i,t}) \quad (5)$$

式中： $Z_{i,t}$ 为水电站 i 在 t 时段的水位； Z_i^{\min} 、 Z_i^{\max} 分别为水电站 i 的坝上水位下限、汛限水位； $f(Z_{i,t})$ 为水电站 i 的水位 - 库容函数。

3) 电站出力约束

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

$$N_{i,t}^{\max} = f(H_{i,t}) \quad (7)$$

$$H_{i,t} = (Z_{i,t-1} + Z_{i,t}) / 2 - D_{i,t} - \varepsilon_{i,t} \quad (8)$$

$$D_{i,t} = f(Q_{i,t}^O) \quad (9)$$

式中： $N_{i,t}$ 为水电站 i 在 t 时段的出力； N_i^{\min} 、 $N_{i,t}^{\max}$ 分别为水电站 i 在 t 时段的出力下限、上限； $H_{i,t}$ 为水电站 i 在 t 时段水头； $f(H_{i,t})$ 为水电站 i 的水头 - 预想出力函数； $D_{i,t}$ 、 $\varepsilon_{i,t}$ 分别为水电站 i 在 t 时段的尾水位、水头损失，m； $f(Q_{i,t}^O)$ 为水电站 i 的尾水位 - 出库流量函数。

4) 电站出库流量约束

$$Q_i^{\min} \leq Q_{i,t}^O \leq Q_i^{\max} \quad (10)$$

式中： Q_i^{\min} 、 Q_i^{\max} 为水电站 i 在 t 时段的出库流量下限、上限。

2.4. 场次洪水调度过程概念描述

洪水增发电量涉及到洪前腾库、洪末拦尾两个关键过程及动态水位汛限控制运用关键要素。定义以下水位描述场次洪水优化调度过程，见图 1。

起始水位：洪水来临前，采取预泄腾库措施时刻(图 1 中 t_1 时刻)的水库水位。

起蓄水位：洪水到来后，水电站入库流量大于满发流量时刻(图 1 中 t_2 时刻)的水库水位。

起降水位：洪水趋于结束，水电站入库流量小于满发流量时刻(图 1 中 t_3 时刻)的水库水位。

终止水位：洪水结束后，水库水位下降至与起始水位相等时刻(图 1 中 t_4 时刻)的水库水位。

水电站从起始水位到终止水位之间的发电运行过程为场次洪水优化调度过程。若未采取预泄腾库措施，则起始水位与起蓄水位重合；若未采取拦蓄洪尾、汛限水位动态控制措施，则起降水位与汛限水位重合，即水库运行水位不会超过汛限水位。

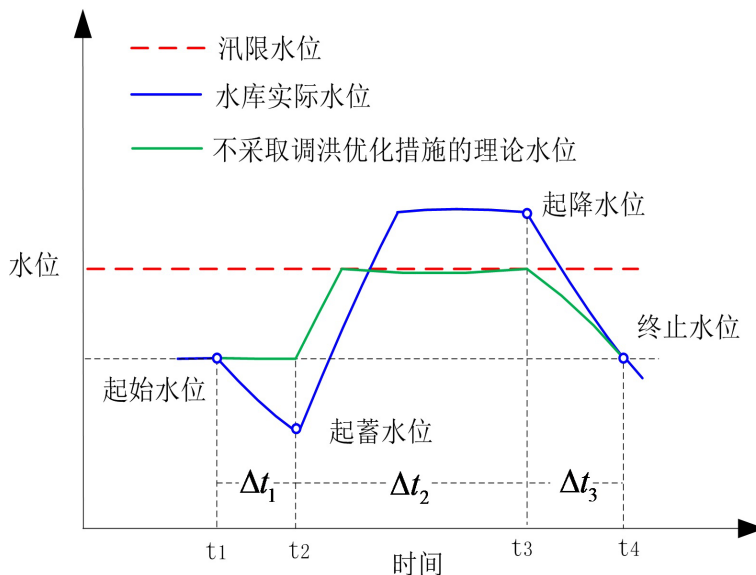


Figure 1. Schematic diagram of flood event optimal regulation
图 1. 场次洪水优化调度过程示意图

3. 场次洪水优化调度增发电量计算方法

3.1. 优化调度增发电量产生条件

洪水优化调度增发电量产生是有条件的，如果洪水量级小、持续时间短，而水库待蓄库容超过水电站满发后的多余水量，则将无法产生增发电量效益。判断条件如式(11)所示。

$$(\bar{Q}_i^{fwo} - Q_i^m) \times \Delta t_2 > W_i^x - W_i^q \tag{11}$$

式中： \bar{Q}_i^{fwo} 、 Q_i^m 分别为水电站 i 在计算时段 Δt_2 内平均入库流量、满发流量； W_i^x 、 W_i^q 分别为水电站汛限水位、起始水位对应的库容。

3.2. 理论发电量计算方法

式(11)成立的条件下，本文提出不采取洪水优化调度措施的理论发电量三阶段计算方法。

阶段一：计算起始水位时刻至起蓄水位时刻之间(Δt_1)的理论发电量。该阶段不采取预泄腾库措施，水电站按来水发电，维持出入库平衡，理论发电量采用“以水定电”方法计算，如式(12)所示。

$$E_i^{one} = \sum_{t \in \Delta t_1} W_{i,t}^I / r_{i,t} \tag{12}$$

式中： E_i^{one} 为水电站 i 在阶段一的理论发电量； $W_{i,t}^I$ 、 $r_{i,t}$ 分别为水电站 i 在 t 时段的入库水量、发电耗水率。

阶段二：计算起蓄水位时刻至起降水位时刻之间(Δt_2)的理论发电量。该阶段入库流量大于满发流量，按水电站最大能力发电计算理论发电量，如式(13)所示。其中，水库水位采用“以电定水”方法计算，水位上限为汛限水位。

$$E_i^{two} = \sum_{t \in \Delta t_2} N_{i,t}^{\max} \times T_t \tag{13}$$

式中： E_i^{two} 为水电站 i 在阶段二的理论发电量； $N_{i,t}^{\max}$ 为水电站在 t 时段的出力上限； T_t 为 t 时段对应的时间。

阶段三：计算起降水位时刻至终止水位时刻之间(Δt_3)的理论发电量。该阶段理论发电量由两部分构成，分别为入库水量可产生的电量、汛限水位至终止水位之间的库容可产生的电量，采用“以水定电”方法计算，如

式(14)所示。

$$E_i^{three} = \sum_{t \in \Delta t_3} Q_{i,t}^P \times T_t / r_{i,t} \quad (14)$$

$$Q_{i,t}^P = Q_{i,t}^I + (W_i^x - W_i^z) / \Delta t_3 \quad (15)$$

式中： E_i^{three} 为水电站 i 在阶段三的理论发电量； $Q_{i,t}^P$ 、 $r_{i,t}$ 、 T_t 分别为水电站 i 在 t 时段的发电流量、发电耗水率、 T_t 为 t 时段对应的时间； W_i^x 、 W_i^z 分别为水电站 i 汛限水位、终止水位对应的库容。

综上，场次洪水过程不采取优化措施水电站的理论发电量由式(16)计算。

$$E_{i,t}^s = E_i^{one} + E_i^{two} + E_i^{three} \quad (16)$$

3.3. 弃水电量计算方法

弃水电量是指水电站溢流时段无法按其最大能力发电而产生的电量损失。水电站在满发的情况下，如有溢流则不产生弃水电量。弃水电量采用式(17)计算。

$$E_{i,t}^q = \sum_{t \in (t_1, t_4)} \min \left(\frac{W_{i,t}^q}{r_{i,t}}, (N_{i,t}^{\max} \times T_t - E_{i,t}^s) \right) \quad (17)$$

式中： $E_{i,t}^q$ 、 $W_{i,t}^q$ 、 $r_{i,t}$ 、 $N_{i,t}^{\max}$ 、 $E_{i,t}^s$ 分别为水电站 i 在 t 时段的弃水电量、溢流量、发电耗水率、出力上限、实际发电量， T_t 为 t 时段对应的时间。

4. 实例分析

4.1. 工程背景

以汛期乌江流域思林水电站实际应用案例，验证本文方法的有效性。思林电站装机容量 1050 MW (全天满发电量 2520 万 kWh)，额定满发流量 1700 m³/s，水库为日调节性能，正常蓄水位 440 m，汛限水位 435 m。汛期综合考虑运行经济性和弃水风险，无洪水情况下水库水位保持在 434 m 附近运行。7 月份，流域出现洪水过程，水库调度人员通过水文预报，采用预泄腾库措施，提前加大发电降低水位。并在实际调度运行中，经防汛部门批准，水库汛限水位动态调整至 438 m。实际调度运行数据如表 1 所示。应用本文方法计算本次洪水过程中产生的调优优化增发发电量，有关结果见图 2、图 3。

4.2. 结果分析

首先根据本文方法确定场次洪水优化调度过程，结合表 1、图 2、图 3 进行说明。思林电站 7 月 8 日入库流量 1905 m³/s，超过额定满发流量，7 月 4 日至 7 日采用预泄腾库措施，水库水位由 433.99 m 下降至 431.41 m (腾出库容 0.9 亿 m³)，则 7 月 3 日为场次洪水优化调度起始时刻、7 月 7 日为起蓄时刻。7 月 23 日思林入库流量 1600 m³/s，小于满发流量，7 月 30 日水库水位下降至起始水位以下，则 7 月 23 日为洪水优化调度起降时刻、7 月 30 日为终止时刻。

分析计算三阶段理论发电量。阶段一为 7 月 3 日至 7 日，思林平均入库流量 1459 m³/s，按照以水定电方法计算理论发电量为 10,435 万 kWh；阶段二为 7 月 8 日至 22 日，思林入库流量超过满发流量，按装机容量满发计算理论发电量为 37,800 万 kWh；阶段三为 7 月 23 日至 30 日，思林平均入库流量 1415 m³/s，从汛限水位降至终止水位库容为 0.36 亿 m³，按以水定电方法计算理论发电量为 17,815 万 kWh。本轮洪水过程不采取优化调度措施的理论发电量为三阶段之和 66,050 万 kWh。

分析计算弃水电量。实际运行过程中，7 月 16 日思林蓄到允许的水位上限 438 m 附近后，开始开闸泄洪，7 月 16 日至 22 日泄洪期间思林按装机容量满发运行，因此整个过程无弃水电量产生，弃水流量为超过水电站

运用能力的溢流量。

综上，采用预泄腾库、汛限水位动态控制措施共为思林产生的洪水优化增发电量为实际发电量减去理论发电量，共计为 $68,800 - 66,050 = 2750$ 万 kWh。按上网电价 0.35 元/kWh 测算，本场洪水优化增发电量产生经济效益 962.5 万元。

Table 1. Practical operation process of hydropower plant Silin

表 1. 思林水电站实际调度运行过程

日期	入库流量(m ³ /s)	出库流量(m ³ /s)	发电流量(m ³ /s)	弃水流量(m ³ /s)	发电耗水率(m ³ /kWh)	实际发电量(万 kWh)	日末水位(m)
7/3	1450	1400	1400	0	6.05	2000	433.99
7/4	1466	1488	1488	0	6.12	2100	433.94
7/5	1386	1783	1783	0	6.21	2480	432.96
7/6	1434	1814	1814	0	6.32	2480	432.02
7/7	1561	1808	1808	0	6.30	2480	431.41
7/8	1905	1737	1737	0	6.05	2480	431.83
7/9	2379	1773	1773	0	6.08	2520	433.32
7/10	2112	1759	1759	0	6.03	2520	434.19
7/11	2059	1741	1741	0	5.97	2520	434.98
7/12	2001	1695	1695	0	5.81	2520	435.74
7/13	1963	1668	1668	0	5.72	2520	436.46
7/14	1963	1660	1660	0	5.69	2520	437.21
7/15	1918	1642	1642	0	5.63	2520	437.89
7/16	1920	1809	1636	173	5.61	2520	437.62
7/17	2100	2051	1654	398	5.67	2520	437.50
7/18	2130	2171	1695	476	5.81	2520	437.60
7/19	2115	2127	1703	424	5.84	2520	437.63
7/20	2017	2025	1677	348	5.75	2520	437.65
7/21	1913	1925	1657	268	5.68	2520	437.68
7/22	1837	1882	1648	234	5.65	2520	437.79
7/23	1600	1654	1654	0	5.67	2520	437.66
7/24	1590	1665	1665	0	5.71	2520	437.47
7/25	1573	1642	1642	0	5.63	2520	437.30
7/26	1430	1648	1648	0	5.65	2520	436.76
7/27	1330	1639	1639	0	5.62	2520	436.00
7/28	1366	1589	1589	0	5.72	2400	435.45
7/29	1200	1579	1579	0	5.93	2300	434.51
7/30	1230	1515	1515	0	5.95	2200	433.81
合计	1748	1746	1663	83	5.85	68,800	435.66

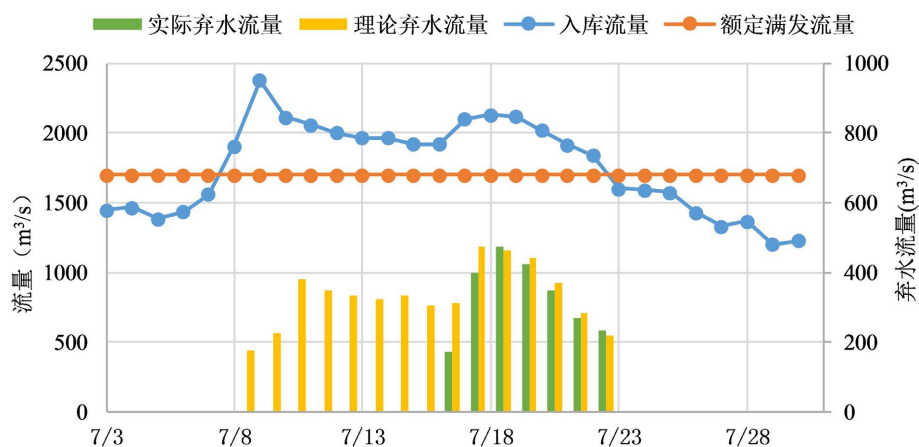


Figure 2. Process diagram of inflow and abandoned water flow of hydropower plant Silin
图 2. 思林电站入库流量及弃水流量过程图

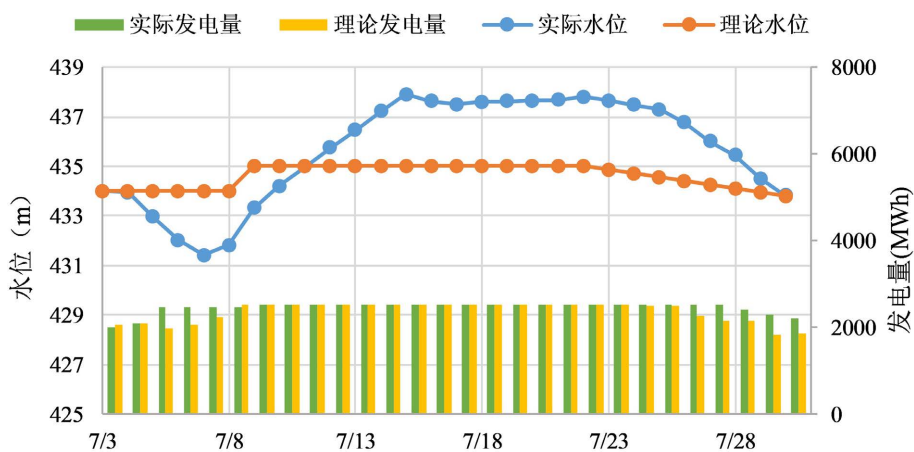


Figure 3. Diagram of water level and generating of hydropower plant A
图 3. 思林电站水位及发电量过程图

5. 结论

利用洪水资源增加水电站发电量具有显著效益, 本文结合水电调度生产实践, 建立洪前预泄腾库、洪中汛限水位动态控制、洪后拦蓄洪尾的洪水优化调度实施全过程模型, 提出场次洪水优化调度增发电量的三阶段计算方法, 用于分析评价水电优化调度工作成效。该方法原理清晰、可操作性强, 在南方电网的实际应用证明了其有效性, 对提高水电调度技术水平具有指导意义。

参考文献

- [1] 刘建卫, 许士国, 张柏良. 流域洪水资源利用的现状与潜力评估方法[J]. 水利学报, 2007, 38(4): 492-497.
LIU Jianwei, XU Shiguo, and ZHANG Bailiang. Study on utilization of regional flood water. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(4): 492-497. (in Chinese)
- [2] 王宗志, 王银堂, 胡四一, 等. 流域洪水资源利用的理论框架探讨 I: 定量解析[J]. 水利学报, 2017, 48(8): 833-891.
WANG Zongzhi, LIU Kelin, HU Siyi, et al. Theoretical framework of floodwater resources utilization in a basin I: Quantitative interpretation. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(8): 833-891. (in Chinese)
- [3] 王宗志, 刘克琳, 程亮, 等. 流域洪水资源利用的理论框架探讨 II: 应用实例[J]. 水利学报, 2017, 48(9): 1089-1097.
WANG Zongzhi, LIU Kelin, CHENG Liang, et al. Theoretical framework of floodwater resources utilization in a basin II: Cases study. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(9): 1089-1097. (in Chinese)

- [4] 曹永强, 倪广恒, 胡和平, 等. 优化调度理论与技术在洪水资源利用中的应用[J]. 水力发电学报, 2005, 24(5): 17-21.
CAO Yongqiang, NI Guangheng, HU Heping, et al. Optimization dispatching theory and its application of floodwater utilization. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(5): 17-21. (in Chinese)
- [5] 朱迪, 梅亚东, 许新发, 等. 复杂防洪系统优化调度的三层并行逐步优化算法[J]. 水利学报, 2020, 51(10): 1199-1211.
ZHU Di, MEI Yadong, XU Xinfu, et al. Triple parallel progressive optimality algorithm for optimal operation of the complicated floodcontrol system. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(10): 1199-1211. (in Chinese)
- [6] 陈森林, 张亚文, 李丹. 水库防洪优化调度的恒定出流模型及应用[J]. 水科学进展, 2021, 32(5): 483-493.
CHEN Senlin, ZHANG Yawen, and LI Dan. Study on constant outflow model for reservoir flood control operation and its application. Advances in Water Science, 2021, 32(5): 483-493. (in Chinese)
- [7] 陈森林, 孙亚婷, 黄宇昊. 水库防洪等蓄量优化调度模型及应用[J]. 水科学进展, 2018, 29(3): 374-380.
CHEN Senlin, SUN Yating, and HUANG Yuhao. Development and application of an equal volume of storage optimization model for reservoir flood-control. Advances in Water Science, 2018, 29(3): 374-380. (in Chinese)
- [8] 乐华, 马光文, 杨庚鑫. 梯级水库群超标洪水的协同应急调度研究[J]. 水利学报, 2019, 50(3): 356-362.
YUE Hua, MA Guangwen, and YANG Gengxin. Research on collaborative emergency dispatch of the excessive flood of cascade reservoirs. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(3): 356-362. (in Chinese)
- [9] 熊金和, 汤成友, 姜利玲, 等. 乌江流域梯级水库洪水调度预报模式[J]. 人民长江, 2020, 51(11): 87-91.
XIONG Jinhe, TANG Youcheng, JIANG Liling, et al. Flood dispatching and forecasting model for cascade reservoirs in Wujiang River Basin. Yangtze River, 2020, 51(11): 87-91. (in Chinese)
- [10] 金新. 基于分级预降回蓄法的两河口水库汛期发电调度方案研究[J]. 水力发电, 2021, 47(4): 97-100.
JIN Xin. Dispatching scheme during flood period for Lianghekou reservoir based on graded pre-descending and pre-ascending by degrees. Water Power, 2021, 47(4): 97-100. (in Chinese)
- [11] 张晓星. 金沙江中游梯级水电站联合预泄调度效益分析[J]. 中国水运, 2016, 16(11): 228-229.
ZHANG Xiaoxing. Benefit analysis of combined pre-discharge operation of cascade hydropower stations in the middle reaches of Jinsha River. Chinese Water Transport, 2016, 16(11): 228-229. (in Chinese)
- [12] 席秋义, 黄强, 赵雪花. 石泉水库主汛期拦蓄洪尾超蓄运用的风险分析[J]. 水力发电学报, 2004, 23(6): 108-110.
XI Qiuyi, HUANG Qiang, and ZHAO Xuehua. Risk analysis of intercepting and storing flood tail for Shiquan reservoir in main flood season. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(6): 108-110. (in Chinese)
- [13] 江浩, 柯丰华, 左振鲁. 动态拦蓄洪尾风险调度模型初探[J]. 水电自动化与大坝监测, 2005, 29(6): 69-72.
JIANG Hao, KE Fenghua, and ZUO Zhenlu. Dynamic risk dispatching model for intercepting and storing flood tail. Hydro-power Automation and Dam Monitoring, 2005, 29(6): 69-72. (in Chinese)
- [14] 王俊, 郭生练. 三峡水库汛期控制水位及运用条件[J]. 水科学进展, 2020, 31(4): 473-478.
WANG Jun, GUO Shenglian. On Three Gorges Reservoir control water level and operating conditions in flood season. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 31(4): 473-478. (in Chinese)
- [15] 冯平, 陈根福. 超汛限水位蓄水的风险效益分析[J]. 水利学报, 1996(6): 29-33.
FENG Ping, CHEN Genfu. Analysis of risk benefits for water storage exceeding limit level during flood season. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(6): 29-33. (in Chinese)