

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtj.20180029

徐斌, 姚弘祎, 储晨雪, 等. 金沙江下游至三峡-葛洲坝梯级水库群发电联合调度增益机制分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 195-202. XU B, YAO H Y, CHU C X, et al. Study on the gain mechanism of joint power generation operation of cascade reservoirs system between downstream Jinsha River and Three Gorges-Gezhou Dam[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 195-202. (in Chinese)

# 金沙江下游至三峡-葛洲坝梯级水库群 发电联合调度增益机制分析

徐斌<sup>1,2</sup>, 姚弘祎<sup>1</sup>, 储晨雪<sup>3</sup>, 钟平安<sup>1</sup>

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院 水文水资源研究所, 南京 210098;  
3. 河海大学 外国语学院, 南京 210098)

**摘要:**金沙江下游溪洛渡、向家坝至三峡、葛洲坝四库梯级为长江流域水能资源调控重点枢纽工程,开展四库发电联合优化调度效益显著。研究建立四库系统独立发电、联合两种模式下优化调度模型,采用长系列径流系列计算发电效益增益,统计增益的时间、年型、空间分布特征。提出基于全微分法的增益占比析因方法辨识发电增益受发电水量、水头影响贡献占比,归纳增益产生机制。结果表明:(1)消落期发电增益集中产生在5月份;向家坝、葛洲坝为主要受益水库。(2)联合增益的产生原因在于联合调度过程中溪洛渡、三峡均化了5月、6月放水过程,降低向家坝、葛洲坝的弃水量,抬升两库水头,增加发电效益。(3)向家坝的补偿增益受发电水量、水头贡献占比相当,葛洲坝的补偿增益主要以发电水头抬升的水头效益为主,溪洛渡、三峡的效益变化主要受联合调度过程中水头变化影响。

**关键词:** 水库调度; 梯级水电站群; 联合调度增益; 统计分析

**中图分类号:** TV 697 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0195-08

## Study on the gain mechanism of joint power-generation operation of cascade reservoirs system between downstream Jinsha River and Three Gorges-Gezhou Dam

XU Bin<sup>1,2</sup>, YAO Hongyi<sup>1</sup>, CHU Chenxue<sup>3</sup>, ZHONG Pingan<sup>1</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China;

3. College of International Languages and Cultures, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Located at the lower reaches of Jinsha River and middle reaches of Yangtze River, the cascade reservoirs system of Xiluodu, Xiangjia Dam, Three Gorges, and Gezhou Dam is an important hydrologic project in the Yangtze river basin. Joint operation of the reservoirs system has significant benefits. In this study, we established two optimized operation models for independent and joint power generation of the reservoirs system. Long inflow time series were used to calculate the gain of power generation benefit and to analyze the distribution of the gain in time, year type, and space. Moreover, we quantified the contribution percentages of released water and water head to the gain using the total differential equation. The results showed that: (1) the gain during the draw down season mainly occurred in May, and was mostly in Gezhou Dam and Xiangjia Dam. (2) The gain was generated because Xiluodu and Three Gorges evened the water release process in May and June and reduced the discarded water volume of Xiangjia Dam and Gezhou Dam, thus increasing the water head of these two reservoirs. (3) The released water and water head contributed nearly equally to the gain generated in Xiangjia Dam. The main contribution factor to the gain in Gezhou

收稿日期: 2017-06-13 修回日期: 2017-09-26 网络出版时间: 2018-01-19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180118.1034.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51609062; 51579068); 国家重点研发计划(2016YFC0400909); 中央高校基本科研业务费专项资金(2015B28414); 中国博士后科学基金(2017M611864)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51609062; 51579068); National Key Research and Development Plan (2016YFC0400909); Special Funds for Basic Scientific Research Services in Central Colleges and Universities (2015B28414); China Postdoctoral Science Foundation (2017M611864)

作者简介: 徐斌(1986), 男, 湖南长沙人, 博士, 讲师, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: xubin\_hhu@hhu.edu.cn

Dam was water head. The variation of the gain generated in Xiluodu and Three Gorges was mainly influenced by the variation of water head during the joint operation.

**Key words:** reservoir operation; cascade hydropower stations system; gain from joint operation; statistical analysis

金沙江下游至长江中游段是长江流域水能“富矿”区。随着我国“西电东送”骨干电源点—金沙江下游溪洛渡、向家坝水库的建成投产,由金沙江下游溪洛渡、向家坝至三峡、葛洲坝的四库梯级形成长江流域骨干型水能、水资源调控工程群,在增强长江中下游防洪能力<sup>[1-2]</sup>的同时,提高了对华东、华中、华南等区域经济发展的用电、用水保障能力<sup>[3-4]</sup>。对于以发电为主要显效目标的水电站水库群系统而言,消落期是开展水库群联合优化调度的重要时间窗和关键增效期:水库经历由兴利为主转向防洪为主的调度目标过渡阶段,需通过协调水库水位有序消落至汛限水位以预留防洪库容,优化各库水位消落时机、方式以减少集中消落造成的弃水损失,提高水量效益,同时兼济水头水量的组合方式,保障水头效益。新工程建成投产后改变了原三峡、葛洲坝梯级的入库径流条件,进而改变了系统联合调度效益的增效机制。因此,通过研究梯级四库发电联合优化调度增益机制挖掘联合优化调度的增益潜力、辨析增量效益的实现机理,有利于将优化调度理论技术付诸实践,具有重要理论意义与实践价值<sup>[5-6]</sup>。

目前,关于水电站水库群联合优化调度模型<sup>[7-14]</sup>、求解方法<sup>[15,16]</sup>已有丰硕成果:张睿<sup>[17]</sup>等研究建立包括乌东德至向家坝梯级库群多目标优化调度模型,分析发电目标与航运目标的矛盾置换关系。此外,还针对该四库消落期消落深度、消落方案优化运行方式进行了探讨;欧阳硕等<sup>[18]</sup>针对梯级水库群汛末竞争性蓄水问题,采用蓄水优先次序判别式法分析水库最优蓄水次序决策方式;符芳明<sup>[19]</sup>等建立金沙江下游与三峡水库群的消落期随机联合优化调度模型,在考虑来水不确定性条件下分析水库群协同消落策略。然而,鲜有研究探讨水电站群联合优化调度的效益增发机制,从各库发电量、发电水头的增发角度揭示增量效益机理成因。针对水电站工程建设投产的补偿效益评估问题,翁文林等<sup>[20]</sup>以龙盘水电站为例,比较分析不同工程规模下龙头水库对下游梯级的补偿效益差异。白涛等<sup>[21]</sup>建模分析了黄河梯级水库群联合优化运行方式,采用“抽站法”对系统中各库进行逐一抽站,比较分析多情景下系统中各库对联合优化补偿增益的贡献。Zhao等<sup>[22]</sup>以单一水电站多时段发电效益最大为目标构建

优化调度模型,采用解析方式推导了枯水条件下发电水量分配的最优时程分配规律,得出无弃水条件下水电站应通过蓄存富余水量抬高水头以最大化水头效益,但未讨论有弃水条件下水量、水头的最优组合方式以及适用于水库群系统结构下的调度规则。

由于决策者往往难以直观地从优化调度策略的数值结果中提炼联合调度效益增优的机理成因,未能明晰联合调度的增益产生机制一定程度上限制了<sup>[13]</sup>优化调度决策理论在实践中的应用。实际上,水电站群联合优化调度决策主要关注发电联合调度增益的实现机制<sup>[25]</sup>,即通过库群系统中施益电站的补偿作用使受益电站水量、水头达到最优组合的补偿机理。针对该问题,本文以金沙江下游至三峡-葛洲坝梯级水库群为例,结合优化调度理论、数理统计方法、微分理论求解联合调度增益结果,统计联合增益量级基本特征,剖析各库发电量、发电水头因联合调度作用对增益产生的贡献,为开展发电联合优化调度实践提供理论支撑。

## 1 梯级水电站群联合调度增益计算模型

### 1.1 联合调度增益定义

梯级水电站群系统中,由于各电站水文条件、调节能力、供电对象往往不完全一致,库群系统间可能存在水文补偿、库容补偿、电力补偿机制。在三大补偿机制作用下,开展水电站群联合优化调度可使库群系统总效益较独立调度情景下增加,即产生联合调度增益:

$$\Delta B = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \Delta B_{i,t} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (B_{i,t}^{(1)} - B_{i,t}^{(0)}) \quad (1)$$

式中: $n$ 为水电站数目; $T$ 为调度期内时段数; $B_{i,t}^{(1)}$ 、 $B_{i,t}^{(0)}$ 分别为时段 $t$ 电站 $i$ 在联合优化调度情景(上标为(1))、独立优化调度情景(上标为(0))下的发电效益(元); $\Delta B_{i,t}$ 为电站 $i$ 在时段 $t$ 联合调度增益(元); $\Delta B$ 为系统调度期内联合调度总增益(元)。

由式(1)可知,总增益取决于系统中各库在各时段由于联合优化调度的增益结果。分别建立联合优化调度、独立优化调度两种优化模型,应用长系列径流资料作为模型输入,对模型进行求解得各径流条件下联合调度增益的样本,通过样本统计分析增益的时、空分布规律及机理成因。

## 1.2 独立、联合优化调度模型

### 1.2.1 目标函数

(1) 独立优化调度模式。

独立优化调度模式下各库调度决策者具有独立调度权,且熟知其他库均相应采用独立调度策略作为最优响应。在该模式下,各库均仅以本库发电效益最高为目标,对应结果是:系统内各库自上游至下游进行逐级优化:

$$\text{Max } B_i = \sum_{t=1}^T N_{i,t}^{(0)} \cdot \Delta t \cdot P_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中:  $N_{i,t}^{(0)}$  为第  $i$  水电站第  $t$  时段在独立调度模式下的发电出力(kW);  $\Delta t$  为  $t$  时段的小时数;  $P_i$  为  $i$  电站售电单价(元/kW·h)。

(2) 联合优化调度模式。

联合优化调度模式下,梯级水电站群系统由梯级调度中心或其余管辖机构统一调度,通过调度指令协调系统内各库调度方式,以调度期内系统整体发电效益最大为目标:

$$\text{Max } B' = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T N_{i,t}^{(1)} \cdot \Delta t \cdot P_i \quad (3)$$

### 1.2.2 约束条件

两模型均考虑如下约束条件:

(1) 水量平衡约束。

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (Q_{i,t} - q_{i,t} - J_{i,t} - S_{i,t}) \cdot \Delta t, i = 1$$

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (Qu_{i,t} - q_{i-1,t} - J_{i-1,t} - q_{i,t} - J_{i,t} - S_{i,t}) \cdot \Delta t, i = 2, \dots, n \quad (4)$$

式中:  $V_{i,t}$ ,  $V_{i,t+1}$  为第  $i$  库第  $t$  时段初、末水库蓄水量( $\text{m}^3$ );  $Q_{i,t}$ ,  $Qu_{i,t}$ ,  $q_{i,t}$ ,  $J_{i,t}$ ,  $S_{i,t}$  分别为第  $i$  库第  $t$  时段入库流量、发电流量、弃水流量、损失流量、第  $i-1$  库至  $i$  库区间流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )。其中,  $Q_{1,t} = Qu_{1,t}$ 。该式表明,除龙头水库以外,下游各级水库来水均为其上一级水库放水及区间来水之和。

(2) 水位约束。

$$\underline{Z}_{i,t} \leq Z_{i,t} \leq \overline{Z}_{i,t} \quad (5)$$

式中:  $Z_{i,t}$ ,  $\underline{Z}_{i,t}$ ,  $\overline{Z}_{i,t}$  分别为第  $i$  库第  $t$  时刻水位、下限水位、上限水位(m)。

(3) 流量约束。

$$\underline{q}_{i,t} \leq q_{i,t} \leq \overline{q}_{i,t} \quad (6)$$

式中:  $\overline{q}_{i,t}$  为第  $i$  库水轮机最大过水能力( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $\underline{q}_{i,t}$  为第  $i$  库满足第  $t$  时段的最小下泄流量,表征下游航运、生态、供水等综合利用要求( $\text{m}^3/\text{s}$ )。

(4) 出力公式。

$$N_{i,t} = 3600q_{i,t}/k_i(H_{i,t}) \quad (7)$$

式中:  $H_{i,t}$  为第  $i$  库第  $t$  时段平均水头(m);  $k_i(H_{i,t})$  为第  $i$  库  $t$  时段单耗( $\text{m}^3/(\text{kW} \cdot \text{h})$ )。

(5) 出力约束。

$$N_{i,t} \leq NH_{i,t} \quad (8)$$

式中:  $NH_{i,t}$  为  $i$  库第  $t$  时段预想出力(kW)。

(6) 调度期末水位控制。

$$Z_{i,T} = ZE_i \quad (9)$$

式中:  $Z_{i,T}$  为第  $i$  库调度期末水位(m);  $ZE_i$  为第  $i$  库调度期末控制水位(m)。

(7) 水位变幅约束。

$$|Z_{i,t} - Z_{i,t-1}| \leq \Delta Z_{i,t} \quad (10)$$

式中:  $\Delta Z_{i,t}$  为第  $i$  库  $t$  时段水位允许变幅,根据库区水库涨落安全限制确定。

## 2 增益贡献占比分析

联合优化调度主要通过改变系统内各水库发电水量、水头组合关系使发电效益增加。对于受益水库而言,在联合调度作用下平均发电水头或发电水量的增加均可增加发电效益<sup>[22]</sup>;反之,对于施益水库而言,联合优化调度可能降低(相对于独立优化调度下的结果)其发电水头或水量,使其效益受损。但总体而言,施益库因联合调度受损的效益低于受益库因联合调度增加的效益,从而使系统总发电效益增加。为进一步辨识各库发电增益受自身水量、水头作用的贡献占比,分析增益的产生机制,本文提出基于全微分公式的贡献占比分析方法,具体步骤如下。

(1) 由式(1)至式(3)可知,联合调度增益即各库由于调度策略(水量、水头)改变而产生的效益增量。对于水库  $i$  而言,即:

$$\Delta B_{i,t} = B_{i,t}^{(1)} - B_{i,t}^{(0)} = N_{i,t}^{(1)} \cdot \Delta t \cdot P_t - N_{i,t}^{(0)} \cdot \Delta t \cdot P_t = (N_{i,t}^{(1)} - N_{i,t}^{(0)}) \cdot \Delta t \cdot P_t = \Delta N_{i,t} \cdot \Delta t \cdot P_t \quad (11)$$

式中:  $\Delta N_{i,t}$  为时段  $t$  水库  $i$  在独立、联合调度两种模式下出力差(kW)。

(2) 由式(11)可知,增益只受两种调度模式下水库出力差异影响。又由式(7)可知出力差异  $\Delta N_{i,t}$  受发电流量差异  $\Delta q_{i,t} = q_{i,t}^{(1)} - q_{i,t}^{(0)}$  与发电水头差异  $\Delta H_{i,t} = H_{i,t}^{(1)} - H_{i,t}^{(0)}$  共同影响。因此,采用全微分公式对  $\Delta N_{i,t}$  在两项因素处进行微分展开,有:

$$\Delta N_{i,t} = \Delta q_{i,t} \cdot \left. \frac{\partial N_{i,t}}{\partial q_{i,t}} \right|_{q_{i,t}=q_{i,t}^{(0)}} + \Delta H_{i,t} \cdot \left. \frac{\partial N_{i,t}}{\partial H_{i,t}} \right|_{H_{i,t}=H_{i,t}^{(0)}} \quad (12)$$

即出力差分增量  $\Delta N_{i,t}$  为两种调度模式下发电流量差异导致的出力增量  $\Delta q_{i,t} \cdot \left. \frac{\partial N_{i,t}}{\partial q_{i,t}} \right|_{q_{i,t}=q_{i,t}^{(0)}}$  与发电水头差异对应的出力增量  $\Delta H_{i,t} \cdot \left. \frac{\partial N_{i,t}}{\partial H_{i,t}} \right|_{H_{i,t}=H_{i,t}^{(0)}}$  之和。其中两项微分项分别采用如下公式计算:

$$\frac{\partial N_{i,t}}{\partial q_{i,t}} = 3600 \cdot \frac{1}{k_i(H_{i,t})}$$

$$\frac{\partial N_{i,t}}{\partial H_{i,t}} = \frac{\partial N_{i,t}}{\partial k_i(H_{i,t})} \cdot \frac{\partial k_i(H_{i,t})}{\partial H_{i,t}} = (-1) \cdot 3600 \cdot q_{i,t} \cdot \frac{1}{k_i^2(H_{i,t})} \cdot k'_i(H_{i,t}) \quad (13)$$

式中： $k'_i(H_{i,t}) = \frac{dk_i(H_{i,t})}{dH_{i,t}}$  即水库  $i$  单耗的微分，为单耗曲线在水头  $H_{i,t}$  处的斜率。

所以，水量、水头对出力差异影响的贡献占比分别为：

$$\begin{aligned} \Upsilon(q_{i,t}) &= \left\{ \frac{\Delta q_{i,t} \cdot \frac{\partial N_{i,t}}{\partial q_{i,t}} \Big|_{q_{i,t}=q_{i,t}^{(0)}}}{\Delta N_{i,t}} \right\} \cdot 100\% \\ \Upsilon(H_{i,t}) &= \left\{ \frac{\Delta H_{i,t} \cdot \frac{\partial N_{i,t}}{\partial H_{i,t}} \Big|_{H_{i,t}=H_{i,t}^{(0)}}}{\Delta N_{i,t}} \right\} \cdot 100\% \quad (14) \end{aligned}$$

式中： $\Upsilon(q_{i,t})$ 、 $\Upsilon(H_{i,t})$  分别为水量、水头影响贡献占比。

### 3 联合增益统计规律及机制分析

位于长江上游玉树至宜宾段的金沙江是长江流域水能资源最富集的河段，技术可开发装机容量达

8 891 kW · h，年发电量 5 041 亿 kW · h，为我国最大的水电基地<sup>[26]</sup>。金沙江下游段目前已建成的溪洛渡、向家坝水电站枢纽分别于 2012 年、2013 年初期蓄水，两水库的建成投产显著增强了流域洪水调控与水资源时空调蓄能力，同时也改变了下游三峡、葛洲坝梯级的水文条件。为充分发挥梯级水库群间补偿作用，提高综合调度效益，目前四库梯级的联合优化调度研究与实践正在积极开展。

金沙江下游至三峡四库梯级消落期为 12 月 1 日至次年 6 月 30 日。在需综合考虑航运、下游供水、生态等用水需求条件下，消落期系统联合调度以系统总发电效益最大为目标。假定消落期初各库均处于蓄满状态，消落期末依据现行消落水位要求控制期末水位。表 1 为各库消落期水库调度主要参数。为反映来水丰枯对联合调度效益及机制的影响，将 1940–2013 年共 74 年长系列实测径流资料按三峡消落期入库流量排频分为丰水年组、平水年组和枯水年组三组来水系列。逐年计算不同优化调度模型中各库各时段相应发电量、发电效益结果。

表 1 各库消落期水库调度参数

Tab. 1 Reservoir operation parameters during the draw down season

水库	正常高水位/m	汛限水位/m	死水位/m	装机容量/MW	水位日变幅/(m·d <sup>-1</sup> )	最小流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	售电价/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]
溪洛渡	600	560	540	12600	2.0	1600	0.34
向家坝	380	370	370	6000	1.0	1600	0.34
三峡	175	146.5		22500	0.6	6000/5700	0.25
葛洲坝	66		63	2950	3.0	6000/5700	0.2

在给定初始条件、边界条件以及径流条件下，采用非线性规划软件 LINGO 对两种优化模型分别计算，并对 74 年逐年计算结果进行统计分析，分析系统消落期联合调度增益的时间、空间以及主要影响因素的规律。

#### 3.1 联合调度增益的时间、年型统计特征

表 2 为四库梯级系统在独立、联合优化调度两种模式下系统总发电收益及对应增益。结果表明，在不同来水条件下，联合优化调度均能使发电调度效益实现不同程度增加。系统总增益多年平均达 1.03 亿元，约占联合优化调度总效益的 0.44%。丰

水年组、平水年组、枯水年组总增益平均值分别为 1.07 亿元、0.98 亿元、1.04 亿元，以丰水年平均增幅最大，平水年平均增幅最低。

图 1 为系统四库总增益( $\sum_{i=1}^4 \Delta B_{i,t} = \sum_{i=1}^4 \Delta B_{i,t}^{(1)} - B_{i,t}^{(0)}$ )， $t = 1, 2, \dots, T$ ) 在不同来水年型下各月对应的结果。

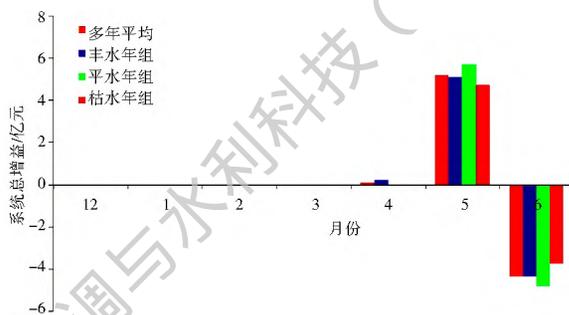


图 1 四库梯级联合调度增益逐月分布

Fig. 1 Temporal distribution of the gain from joint operation of the cascade reservoirs

由上述结果可知：梯级四库联合调度增益主要产生在 5 月份。12 月至 4 月期间系统总效益在联合优化调度与独立优化模式下几乎一致。在汛前集

表 2 四库梯级系统在两种调度模式下调度效益结果

Tab. 2 Benefits of the cascade reservoirs system under two operation models

项目	多年平均 / 亿元	丰水年 / 亿元	平水年 / 亿元	枯水年 / 亿元
独立优化调度	232.77	249.66	233.74	214.92
联合优化调度	233.80	250.73	234.72	215.96
总增益	1.03	1.07	0.98	1.04

中消落段 6 月份联合调度效益反而低于独立调度效益,说明联合调度增益具有时程上的效益置换机制,即以牺牲系统 6 月份发电效益为代价置换 5 月份发电效益。联合调度增益的时间段分布规律受来水年型变化影响不大。

### 3.2 各库增益统计特征分析

图 2 为联合优化调度模式下系统各库在不同年型中消落期发电增益( $\Delta B_{i,t} = \sum_{t=1}^{\tau} (B_{i,t}^{(1)} - B_{i,t}^{(0)})$ ,  $i=1, 2, 3, 4$ )结果,表 3 为联合增益主要产生时段(5、6 月份)系统各库在不同年型下发电增益( $\Delta B_{i,5}$ ,  $\Delta B_{i,6}$ )

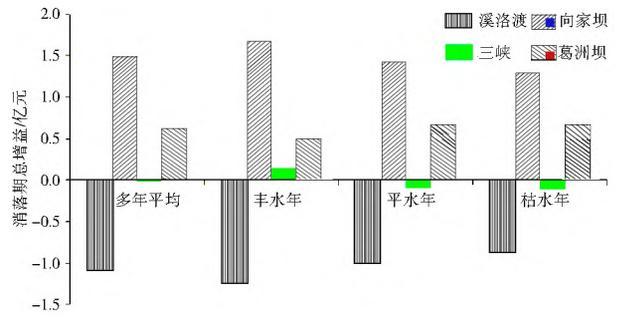


图 2 各库消落期联合增益随年型变化结果  
Fig. 2 Variation of the gain from joint operation of the reservoirs system during drawdown season in different year types

表 3 消落期 5、6 月系统各库联合增益结果统计

Tab. 3 Gain from joint operation in different reservoirs during May and June

水库	5 月				6 月			
	多年平均	丰水年	平水年	枯水年	多年平均	丰水年	平水年	枯水年
溪洛渡	2.11	2.10	2.48	1.58	-3.18	-3.36	-3.49	-2.46
向家坝	1.17	1.37	1.22	0.80	0.32	0.31	0.20	0.49
三峡	0.49	0.63	0.49	0.25	-0.51	-0.53	-0.59	-0.37
葛洲坝	0.57	0.49	0.63	0.61	0.05	0.01	0.04	0.13
梯级	4.34	4.60	4.82	3.25	-3.32	-3.58	-3.83	-2.20

亿元

由图 2 及表 3 可知如下结果。

(1) 多年平均条件下,各库联合调度增益分别为 -1.07 亿元、1.49 亿元、-0.01 亿元、0.62 亿元,说明联合优化调度主要是通过适量降低溪洛渡效益置换向家坝、葛洲坝增益,且以向家坝增益最高。溪洛渡作为位于最上游的龙头水库,在联合调度中通过改变自身效益最优的蓄放水方式,以改变下游水库发电水量、发电水头过程进而提高受益水库发电效益。此外,在联合优化调度中,三峡水库在平水年、枯水年的补偿作用使葛洲坝发电效益实现一定程度增加。

(2) 在不同来水年型下,各库增益变化规律不尽相同。随来水量逐步减少,溪洛渡、葛洲坝增益呈增加趋势而向家坝、三峡增益呈减少趋势。在丰水年条

件下,相较于独立优化调度,联合优化调度可使三峡发电收益提高 0.14 亿元;在其余来水年型下,联合优化调度均使三峡发电收益降低以置换葛洲坝效益。

### 3.3 增益析因分析

采用式(14)分别计算各库所有时段联合增益受水量、水头影响贡献占比的平均值。由上述分析可知,各库联合调度增益受水量、水头影响作用机制与来水年型及水库特征关系密切,为具体辨析发电增益与消落策略的关系,将平水年组中所有年份下的统计结果分析各库在独立、联合优化调度模式下对应指标差异。表 4 为该平水年各库在 5、6 月份总发电水量、平均水头及其对联合增益的贡献结果,各库在该年组中两种调度模式下的关键指标平均值过程线如图 3-图 6 所示。

表 4 平水年独立、联合调度模式下发电水量、发电水头差异及其对发电效益影响

Tab. 4 The contribution percentages of released water and water head to power generation benefits in normal flow years under the two models

水库	总发电水量差异 $\Delta q_{i,t} \cdot \Delta t / \text{亿 m}^3$	平均发电水头 差异/m	联合增 益/亿元	发电水量变化导致 效益差异/亿元	发电水头变化导致 效益差异/亿元	发电水量 贡献占比(%)	发电水头贡 献占比(%)
溪洛渡	0.00	-5.43	-1.26	0.00	-1.26	0	100
向家坝	9.68	3.09	1.50	0.86	0.64	57	43
三峡	0.00	-0.20	-0.15	0.00	-0.15	0	100
葛洲坝	23.89	1.22	0.89	0.21	0.68	24	76

由上述分析可知如下结果。

(1) 相较于各库独立优化调度,联合优化调度以 5 月初溪洛渡、三峡的加快消落为驱动。联合优化调度使 5 月份溪洛渡、三峡出库流量均高于其独立优化调度情景下的出库流量;使 6 月份溪洛渡、三峡

出库流量均低于其独立优化调度情景下的出库流量,即一定程度上均化了 5、6 月出库流量过程。因此,6 月份向家坝、葛洲坝的来水集中程度降低,进而降低两库弃水量并提高了发电水头,导致发电效益增加。然而,加快消落使两库对应时段发电水

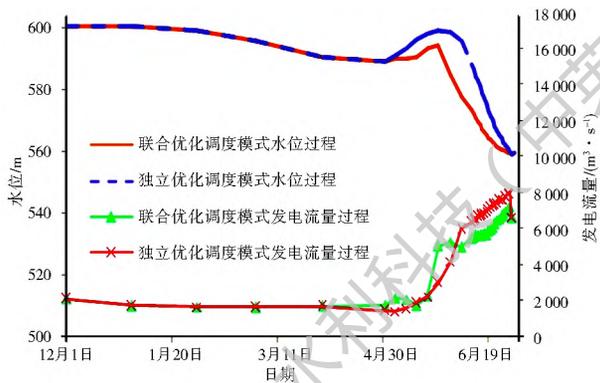


图 3 溪洛渡水位、发电流量调度过程线

Fig. 3 Water level and power release trajectories of Xiluodu

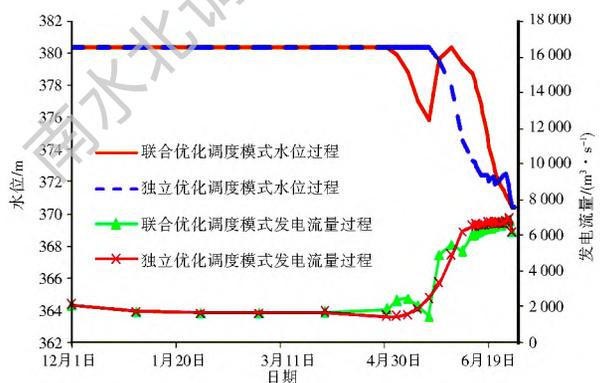


图 4 向家坝水位、发电流量调度过程线

Fig. 4 Water level and power release trajectories of Xiangjia Dam

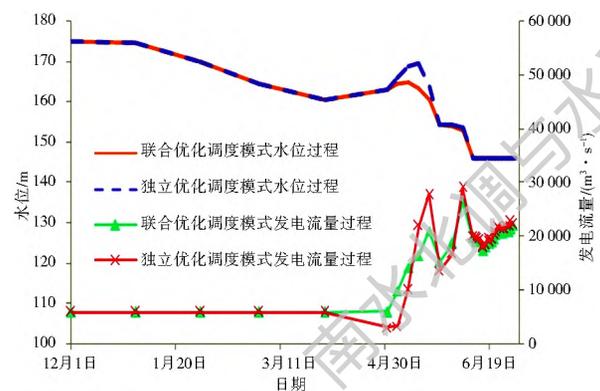


图 5 三峡水位、发电流量调度过程线

Fig. 5 Water level and power release trajectories of the Three Gorges project

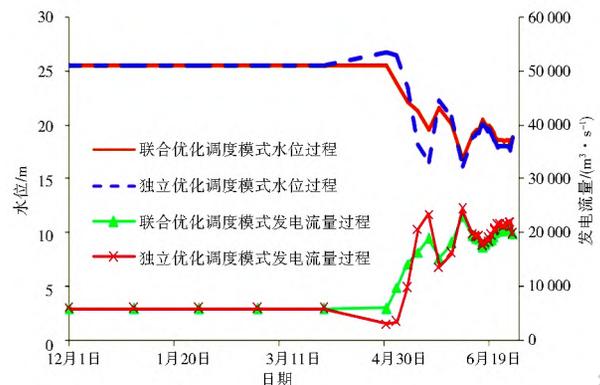


图 6 葛洲坝水头、发电流量调度过程线

Fig. 6 Water head and power release trajectories of Gezhou Dam

头均不同程度降低并造成其发电效益损失: 溪洛渡、三峡发电水头分别降低 5.43、0.2 m, 对应效益损失分别为 1.26、0.15 亿元。溪洛渡、三峡的效益损失(联合增益)全部因为水头降低所造成, 故水头贡献率均为 100%。

(2) 受益于联合调度过程中溪洛渡、三峡的加快消落, 向家坝、葛洲坝的发电效益均增加, 但两库效益增发的主要贡献因子各异。由于联合优化调度使向家坝发电水量增加 9.68 亿  $m^3$ , 水头抬升 3.09 m, 分别增加发电效益 0.86、0.64 亿元(总增益 1.5 亿元)。向家坝增量效益的主要贡献因子为水量, 贡献占比达 57%。

葛洲坝在联合调度模式下发电水量增加 23.89 亿  $m^3$ , 水头增加 1.22 m, 对应发电效益增益分别为 0.21、0.68 亿元(总增益 0.89 亿元)。葛洲坝增量效益主要贡献因子为水头, 贡献占比达 76%。

为分析不同来水年型下向家坝、葛洲坝联合增量效益贡献机制的差异, 按来水年组分组统计贡献占比的平均值, 结果见表 5。

表 5 消落期向家坝、葛洲坝增益受水量、水头影响贡献占比统计

Tab. 5 The contribution percentages of released water and water head to the gain in different reservoirs during drawdown season (%)

水库	水量贡献占比				水头贡献占比			
	多年平均	丰水年	平水年	枯水年	多年平均	丰水年	平水年	枯水年
向家坝	50	53	49	49	50	47	51	51
葛洲坝	33	27	31	46	67	73	69	54

由表 5 可知, 在溪洛渡的补偿作用下, 向家坝 5、6 月的发电水量、发电水头增加, 两因素对向家坝发电增益的贡献率基本相当, 且平均占比受来水年型变化影响较小; 葛洲坝在联合调度模式下产生的增益同样主要以水头增益为主, 多年平均条件下水头对增益贡献占比为 67%。影响增益贡献占比变化的原因诸多, 可能与各水库发电参数条件密切关联, 对于高水头(消落期平均水头约 101 m), 低单耗(平均单耗  $3.8 m^3 / (kW \cdot h)$ ) 的向家坝水库而言, 增量效益的水量、水头作用贡献基本相当, 因而在联合调度中使其降低弃水与维持高水头对于该库增发电量的作用处于同等地位; 对于低水头(平均水头约 20 m), 高单耗(平均单耗  $23 m^3 / (kW \cdot h)$ ) 的葛洲坝水库而言, 水头对发电效益的影响往往比水量的影响更高, 因而在联合调度中应尽量使葛洲坝维持高水头运行。

图 7、图 8 分别为向家坝、葛洲坝在各来水年型下贡献占比箱线图。

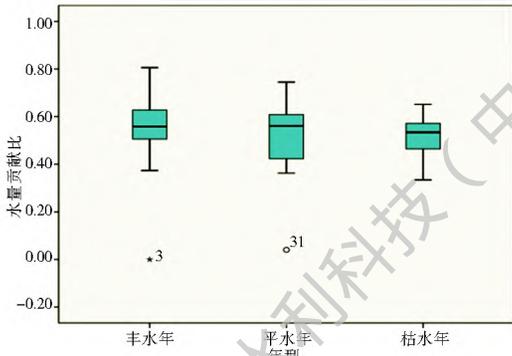


图7 发电水量对向家坝发电增益贡献占比箱线图

Fig. 7 Box plot of released water's contribution percentage to the gain in Xiangjia Dam

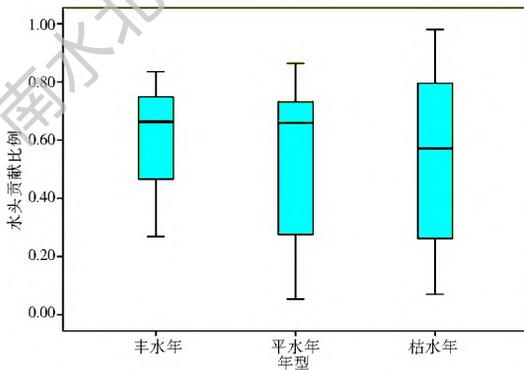


图8 水头对葛洲坝发电增益贡献占比箱线图

Fig. 8 Box plot of water head's contribution percentage to the gain in Gezhou Dam

由图7、图8可知,年组内来水变化对发电增益因子的贡献占比结果影响较大:向家坝、葛洲坝的水量、水头对各库增益贡献占比结果受来水影响而剧烈变化。其中,葛洲坝水头贡献占比在三种来水年组下变幅程度均高于向家坝水量贡献占比变幅程度,且其变幅区间随来水量减少而增大。该结果可能与水库库容调节能力的差异有关。向家坝、葛洲坝库容系数分别为0.63%、0.019%,由于向家坝具有更好的库容调节能力,因而具备更好的调节性能缓冲来水变化对其调度策略以及增量效益机制的影响。

## 4 结论

本文主要分析研究金沙江下游至三峡四库梯级水电站群消落期发电联合优化调度增益的统计特征以及产生机制。分别建立独立、联合两种模式下的优化调度模型,模拟计算长系列来水条件下两种模式中各库发电调度策略及发电效益,对发电增益的时间、空间、年型分布等特征分别进行统计分析,并提出基于全微分公式的增益贡献占比计算方法对增益受发电水量、水头影响贡献比进行析因分析,辨识增益的产生机制。主要结论如下。

(1) 消落期四库开展联合优化调度效益显著,相

对于独立优化调度,多年平均总增益可达1.03亿元。5月份为联合调度增益的主要产生时期,以向家坝、葛洲坝主要受益水库。增益的时程分配与空间分布占比随来水年型变化影响较小。

(2) 联合调度增益的产生主要归因于溪洛渡在5月初的提前消落以及三峡在相应时段对葛洲坝发电水量的调蓄。溪洛渡的提前消落降低了自身的发电水头,产生效益损失,但其置换下游水库的水量、水头效益高于其效益损失,使系统总发电效益增加。

(3) 在联合调度模式下,向家坝的补偿增益主要归因于水量、水头效益增加,葛洲坝的补偿增益主要以发电水头抬升的水头效益为主,溪洛渡、三峡的效益变化主要受联合调度过程中水头变化影响。

## 参考文献(References):

- [1] 李雨,郭生练,郭海晋,等.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(1):8-14. (LI Y, GUO S L, GUO H J, et al. Flood control risk and benefit of impounding water in advance for the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013(1), 8-14. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2013.01.002.
- [2] 闫宝伟,郭生练,陈璐,等.长江和清江洪水遭遇风险分析[J].水利学报,2010(5):553-559. (YAN B W, GUO S L, CHEN L, et al. Flood encountering risk analysis for the Yangtze River and Qingjiang River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010(5):553-559. (in Chinese))
- [3] 刘丹雅,纪国强,安有贵.三峡水库综合利用调度关键技术研究与实践[J].中国工程科学,2011(7):66-69. (LIU D Y, JI G Q, AN Y G. The research and practice for key techniques of comprehensive utilization and regulation for Three Gorges Reservoir[J]. Engineering Sciences, 2011(7):66-69. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2011.07.011.
- [4] 卢有麟,周建中,王浩,等.三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型及其求解方法[J].水科学进展,2011(6):780-788. (LU Y L, ZHOU J Z, WANG H, et al. Multi-objective optimization model for ecological operation in Three Gorges cascade hydropower stations and its algorithms[J]. Advances in Water Science, 2011(6):780-788. (in Chinese)) DOI: 32.1309.P.20110911.1132.010
- [5] 郭乐,徐斌.三峡梯级水库群联合优化调度增发电量分析[J].水力发电,2016(12):90-93. (GUO L, XU B. Analysis on power generation increasing by joint optimal operation of Three Gorges Cascade Reservoirs[J]. Water Power, 2016(12):90-93. (in Chinese))
- [6] 鲍正风,徐杨,徐涛.溪洛渡、向家坝与三峡梯级水库联合调度[J].水电厂自动化,2014(4):56-58. (BAO Z F, XU Y, XU T. Joint operation of Xiluodu, Xiangjiaba and Three Gorges cascade reservoirs[J]. Hydropower Plant Automation, 2014(4):56-58. (in Chinese))
- [7] 刘强,钟平安,徐斌,等.三峡及金沙江下游梯级水库群蓄水期联合调度策略[J].南水北调与水利科技,2016(5):62-70. (LIU Q, ZHONG P A, XU B, et al. Joint operation strategy of

- water impoundment period of Three Gorges Jinsha River lower reach cascade reservoirs[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016(5): 62-70. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.05.010.
- [8] XU B, BOYCE S, ZHANG Y, et al. Stochastic programming with a joint chance constraint model for reservoir refill operation considering flood risk[J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2016: 4016067-4016067.
- [9] XU B, ZHONG P, STANKO Z, et al. A multiobjective short-term optimal operation model for a cascade system of reservoirs considering the impact on long-term energy production[J]. Water Resources Research, 2015, 51(5): 3353-3369. DOI: 10.1002/2014WR015964.
- [10] 黄草, 王忠静, 李书飞, 等. 长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究: 模型原理及求解[J]. 水利学报, 2014(9): 1009-1018. (HUANG C, WANG Z J, LI S G, et al. A multi-reservoir operation optimization model and application in the upper Yangtze River Basin I. Principle and solution of the model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014(9): 1009-1018. (in Chinese) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.09.001)
- [11] 黄草, 王忠静, 鲁军, 等. 长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究 II: 水库群调度规则及蓄放次序[J]. 水利学报, 2014(10): 1175-1183. (HUANG C, WANG Z J, LU J, et al. A multi-reservoir operation optimization model and application in the upper Yangtze River Basin II. Operation rules and water releasing/storing sequences[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014(10): 1175-1183. (in Chinese) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.10.005.
- [12] 周研来, 郭生练, 陈进. 溪洛渡-向家坝三峡梯级水库联合蓄水方案与多目标决策研究[J]. 水利学报, 2015(10): 1135-1144. (ZHOU Y L, GUO S L, CHEN J. Multi-objective decision and joint refill schemes of Xiluodu Xiangjiaba Three Gorges cascade reservoirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015(10): 1135-1144. (in Chinese) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20141294.
- [13] LABADIE J W. Optimal operation of multi-reservoir systems: state of the art review[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2004, 130(2): 93-111.
- [14] YEH W W. Reservoir management and operations models: a state of the art review[J]. Water Resources Research, 1985, 21(12): 1797-1818. DOI: 10.1029/WR021i012p01797.
- [15] 钟平安, 徐斌, 张金花. 水电站发电优化调度遗传算法的改进[J]. 水力发电学报, 2011(5): 55-60. (ZHONG P A, XU B, ZHANG J H. Improvement of genetic algorithm for its application to optimal operation of hydropower station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011(5): 55-60. (in Chinese))
- [16] XU B, ZHONG P, WAN X, et al. Dynamic feasible region genetic algorithm for optimal operation of a multi-reservoir system[J]. Energies, 2012, 5(12): 2894-2910. DOI: 10.3390/en5082894.
- [17] 张睿, 张利升, 王学敏, 等. 金沙江下游梯级水库群多目标兴利调度模型及应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016(4): 32-37. (ZHANG R, ZHANG L S, WANG X M, et al. Model and application of multi-objective beneficial dispatch for cascade reservoirs in Jinsha River[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2016(4): 32-37. (in Chinese) DOI: 10.15961/j.jsuese.2016.04.005.
- [18] 欧阳硕, 周建中, 周超, 等. 金沙江下游梯级与三峡梯级枢纽联合蓄放水调度研究[J]. 水利学报, 2013(4): 435-443. (OUYANG S, ZHOU J Z, ZHOU C, et al. Research on impounding dispatch for the lower cascade reservoir in Jinsha River and Three Gorges cascade[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013(4): 435-443. (in Chinese))
- [19] 符芳明, 钟平安, 徐斌, 等. 金沙江下游与三峡梯级水库群协同消落方式研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016(4): 29-35. (FU F M, ZHONG P A, XU B, et al. Synergetic method of dry season operation in downstream Jinsha River and Three Gorges cascade reservoirs[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016(4): 29-35. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.04.005)
- [20] 翁文林, 王浩, 张超然, 等. 基于梯级水电站群联合调度的长江干流“龙头水库”综合效益分析[J]. 水力发电学报, 2014(6): 53-60. (WENG W L, WANG H, ZHANG C R, et al. Analysis on comprehensive benefits of leading reservoir on Yangtze River in joint operation of cascaded hydropower stations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014(6): 53-60. (in Chinese))
- [21] 白涛, 黄强, 陈广全, 等. 基于水库群优化调度的黄河干流梯级补偿效益分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013(5): 189-195. (BAI T, HUANG Q, CHEN G S, et al. Reservoirs optimal operation based analysis of cascade compensation benefits in main stream of the Yellow river[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2013(5): 189-195. (in Chinese))
- [22] ZHAO T, ZHAO J, LIU P, et al. Evaluating the marginal utility principle for long term hydropower scheduling[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 106: 213-223. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.09.032
- [23] 张睿, 周建中, 袁柳, 等. 金沙江梯级水库消落运用方式研究[J]. 水利学报, 2013(12): 1399-1408. (ZHANG R, ZHOU J Z, YUAN L, et al. Study on dry season operation of cascade reservoir in Jinsha River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013(12): 1399-1408. (in Chinese))
- [24] 付湘, 刘庆红, 吴世东. 水库调度性能风险评价方法研究[J]. 水利学报, 2012(8): 987-990. (FU X, LIU Q H, WU S D. Risk assessment approach for reservoir operation performance[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012(8): 987-990. (in Chinese))
- [25] 王金龙, 黄炜斌, 马光文, 等. 市场环境下梯级水电站间发电补偿效益研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016(3): 79-86. (WANG J L, HUANG W B, MA G W, et al. Research on the Compensation benefit of cascade hydro plants in power market[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2016(4): 32-37. (in Chinese) DOI: 10.15961/j.jsuese.2016.03.010.
- [26] 张睿. 流域大规模梯级电站群协同发电优化调度研究[D]. 华中科技大学, 2014. (ZHANG R. Hydropower Generation Scheduling of Large Scale Cascaded Hydropower Stations [D]. Huazhong University of Science and Technology, 2014. (in Chinese))