

文章编号:0559-9350(2019)07-0881-13

## 基于全微分法的多主体梯级水电站群联合调度增益归因及分配

马昱斐<sup>1</sup>, 钟平安<sup>1</sup>, 徐斌<sup>1,2</sup>, 芦璐<sup>3</sup>, 李昆朋<sup>4</sup>

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院 水文水资源研究所, 江苏 南京 210029;  
3. 黄河水利委员会 水文局, 河南 郑州 450004; 4. 南京市水利规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210022)

**摘要:** 公平、高效、合理的增益分配是开展多主体水库群联合优化调度的机制保障。以往基于水库库容、装机容量、发电量等单一指标或综合指标构建的按比例分摊方法, 未能反映联合增益形成机制和径流变化对增益结果的影响。针对上述不足, 本文将联合调度增益依照独立调度和联合调度情景下的效益差异进行逐项定量分解, 提出基于全微分法的增益归因-分配模型: 建立联合调度增益与时段弃水量、时段蓄量差、累积蓄量差的关系, 采用全微分公式定量分解各水库增益贡献。实例结果表明: (1)全微分法可定量解构各水库各时段增益贡献及其物理成因机制, 可得到满足增益分配基本原则的分配结果。(2)该方法综合考虑来水条件、水库参数、库群拓扑结构等因素对联合增益的综合影响, 弥补了单一指标评价片面性的缺陷, 避免了综合指标法中权重系数的确定问题及难以反映增益形成机理的问题。研究为多利益主体梯级水电站群增量效益分配问题提供了一种新的解决途径。

**关键词:** 水库群调度; 多利益主体; 增益分配; 全微分法; 归因分析

**中图分类号:** TV697

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20181127

## 1 研究背景

梯级水电站群是目前我国水能资源开发利用的主要方式。通过梯级开发、集中管理的方式可以充分利用上下游水库调节性能及水文、水利、电力条件的差异实现互补, 产生联合增益, 提升水电能源开发利用效率。在市场化环境下, 不少梯级水电已逐步形成多主体共同投资开发的格局。当上下游水库分属于不同投资主体开发运营时, 部分主体常因实施联合调度而偏离自身最优调度策略而导致利益受损, 即联合调度效益增值常以部分主体的效益损失为代价, 若因经济效益分配不当或多主体管理体制制约导致梯级水电站各自独立运行<sup>[1-3]</sup>, 将使水电系统运行的安全性、经济性、稳定性大幅降低<sup>[4-6]</sup>。为破除多利益主体管理机制的制约, 促成系统整体联合调度运营, 应建立一种公平、合理、高效的增益分配机制, 将系统整体的联合调度增益作为公共效益在施益、受益主体间进行分配, 实现多赢。

一种典型的增益分配方法是依据各电站主体在联合调度增益中的贡献比例进行分配, 关键在于如何衡量增益贡献。目前, 已有相关研究就贡献评价指标及评价方法展开讨论, 主要包括单指标法与综合指标法<sup>[7]</sup>, 刘涵等<sup>[8]</sup>分别采用年均发电量、装机容量、兴利库容三种单指标法来分配黄河干流梯级水库群的发电补偿效益; 赵先进<sup>[9]</sup>针对以发电为主要目标的流域梯级水库群提出投资的水头分摊法, 以各梯级水库各库净水头之比作为梯级水库投资费用的分摊指标。单指标法原理简单, 计算快捷, 但对联合增益贡献的评价往往具有片面性, 难以综合反映联合增益受发电水

收稿日期: 2018-12-23; 网络首发时间: 2019-07-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20190718.1708.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405604); 国家自然科学基金项目(51609062); 中央高校基本科研业务费专项资金(2018B10514); 中国博士后特别资助项目(2018T110525)

作者简介: 马昱斐(1996-), 硕士生, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: hhumyf@163.com

通讯作者: 徐斌(1986-), 教授, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: xubin\_hhu@hhu.edu.cn

量、水头、工程能力和水文条件等诸多因素影响的特征；针对该问题，相关研究探讨了综合指标分配方法：薛小杰等<sup>[10]</sup>选取水库兴利库容、平均净水头、电站装机容量、保证出力和年发电量作为效益分摊指标；分别采用单指标法、综合分析法和模糊综合指标法对汉江支流岚河梯级补偿效益进行分摊，结果表明单指标法计算简单，但每种分摊方法的分配结果相差较大，认为综合分析法适用于以发电或灌溉效益等为主的水电站，而综合利用水电站选用综合评判法更为合理。赵麦换等<sup>[11]</sup>在文献[10]的基础上提出离差平方法对岚河梯级补偿效益进行分配，结果表明，相较于综合分析法、模糊综合指标法和离差平方法的分配结果与各单指标分摊法的总体趋势更为接近。钟平安等<sup>[12]</sup>提出了梯级水电站实时补偿增益的多因素综合分配方法，在考虑了龙头水库的期望损失和回蓄风险，少数电站的负效益以及为实施补偿调度而额外增加的成本后，对剩余增益进行再分配。综合指标法往往需要通过主观或客观赋权的方式进行指标综合计算，尽管弥补了单一指标评价片面性的不足，但目前综合性评价指标与增益贡献的物理机制关系尚未探明，在不同来水年型条件、水库特征、水库群梯级拓扑结构下，各作用因素对增益的影响机制及权重均可能发生变化，难以构造具有普适性的综合性指标。

考虑到增益及水电站效益贡献评估与水电站群调度运行方式有关，具有一定系统性和复杂性，采用单一或综合指标法均难以全面反映增益受水库调度运行策略差异变化对应的影响。所以，本文首先建立基于独立、联合调度模式下的优化模型<sup>[13-14]</sup>并评估增益大小<sup>[15]</sup>，采用全微分公式<sup>[16-18]</sup>分解各水库因联合调度对系统其余水库的增益产生的贡献，明晰水库群联合调度增益形成机制及各水库对联合调度增益的贡献值，以贡献大小作为增益分配的依据，通过实例分析验证模型结果。

## 2 多主体梯级水电站群联合调度增益计算及分配原则

**2.1 增益计算模型** 在水文补偿、库容补偿、水力补偿和电力补偿作用下，梯级水电站群系统实施联合调度相较于独立调度可显著提高系统总发电效益。本文定义增益为水电站水库群联合调度下相较于独立调度模式下的系统总发电效益的增加值：

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

式中： $m$ 为水电站总数目，假定各库分属于不同主体管理，即 $m$ 也是利益主体总数目； $T$ 为调度期内时段数； $\Delta B$ 为增益值； $B_{i,t}^{(1)}$ 、 $B_{i,t}^{(0)}$ 分别为水电站 $i$ 在联合优化调度、独立优化调度模式下第 $t$ 时段的发电效益。

独立优化调度模式下各库调度决策者拥有独立调度权，系统内各库自上游至下游逐级优化，以各库自身的发电效益最大为目标；联合优化调度模式下梯级水电站群系统由调度集控中心进行统一调度，以系统总发电效益最大为目标。两模型均考虑水量平衡约束、水位约束、流量约束、出力公式等约束条件，具体模型见文献[15]。

**2.2 增益分配原则** 增益的分配应满足公平、合理、高效的原则：(1)公平性原则：各主体分配所得增益额度应与各水库对增益的贡献大小成正比；(2)合理性原则：各主体最终所得发电效益值应不低于其在独立调度模式下的效益值；(3)高效性原则：所有主体分配所得增益之和等于系统联合调度总增量效益值。

## 3 基于全微分法的联合调度增益贡献归因及分配

依据定义可知，联合调度增益 $(\Delta B_{i,t})$ 实质上是由水库群系统中各库在独立调度、联合调度模式下调度决策的差异产生的效益差，即从受益水库总发电效益中补偿各施益水库效益损失之后的系统净得利益。该效益差归因于两种调度策略下在空间( $i$ )、时程( $t$ )两维度上各水库发电水量差以

及水头差的影响：例如，在空间维度上，通过上游高调节性能水库减少丰水段出库的方式既有利于减少下游低调节性能水库的弃水，从而增加发电水量；又有利于降低下游水库尾水位，提升发电水头。因此，在梯级水库群间水力联系作用下，上游水库对下游水库联合增益产生可能存在贡献，可归因为水量贡献与水头贡献；在时程维度上，水量、水头差的影响因水量平衡关系具有时程累积效应：例如水库在前期时段适当减少出库有利于抬高自身发电水头，该方式不仅影响当前时段调度效益，同时还影响后续时段效益，本文将水量、水头效益贡献进一步分解为当前时段蓄量差、累积蓄量差、时段弃水量的影响。图1为梯级水电站群联合调度增益贡献归因及分配流程图。

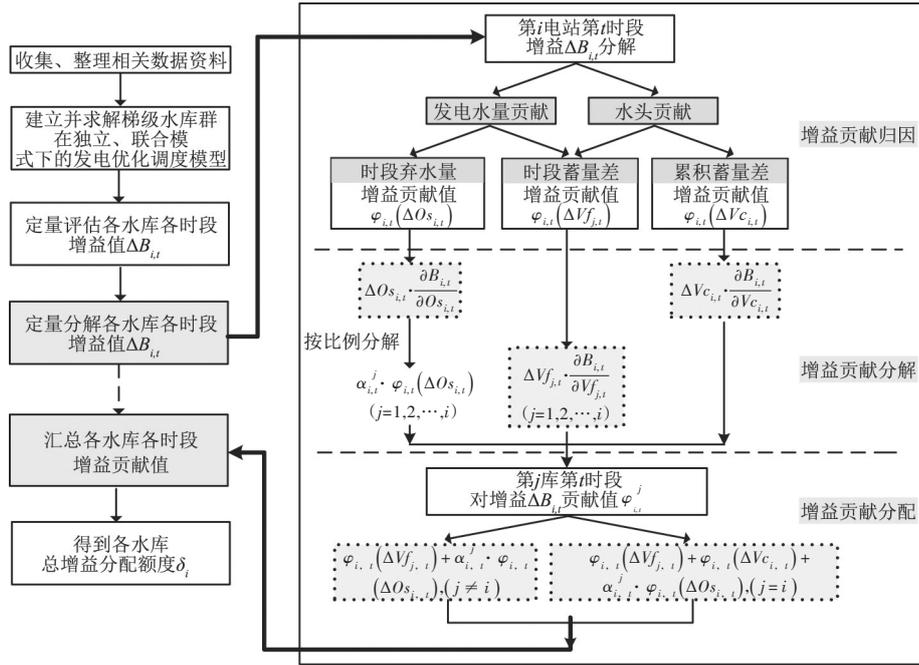


图1 梯级水电站群联合调度增益贡献归因及分配流程

3.1 增益贡献归因 各水电站各时段的发电效益计算公式如下：

$$\begin{cases} B_{i,t} = P_i \cdot E_{i,t} = P_i \cdot K_i \cdot W_{i,t} \cdot H_{i,t} \\ H_{i,t} = Z_{\text{上}i,t} - Z_{\text{下}i,t} \\ Z_{\text{上}i,t} = f_1 \left( \frac{V_{i,t} + V_{i,t+1}}{2} \right) \\ Z_{\text{下}i,t} = f_2(q_{i,t}) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $E_{i,t}$ 为第*i*电站第*t*时段的发电量； $P_i$ 为第*i*电站的售电单价； $K_i$ 为第*i*电站出力系数； $W_{i,t}$ 为第*i*库第*t*时段的发电水量； $H_{i,t}$ 为第*i*库第*t*时段的发电水头，即为上游水位 $Z_{\text{上}i,t}$ 与下游水位 $Z_{\text{下}i,t}$ 之差，上游水位为水库蓄水量函数，下游水位为水库出库流量的函数； $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$ 分别为第*i*库第*t*时段初、末的蓄水量； $q_{i,t}$ 为第*i*库第*t*时段的出库流量。

(1)发电水量贡献项。依据式(1)、式(2)可知，第*i*库第*t*时段的增益 $\Delta B_{i,t}$ 是由水库*i*第*t*时段的发电水量、水头在联合调度与独立调度情景下的变化量 $\Delta W_{i,t}$ 、 $\Delta H_{i,t}$ 产生，根据水量平衡关系式与梯级水库群间的水力联系：

$$\begin{cases} V_{i,t+1} = V_{i,t} + (Q_{i,t} - q_{i,t}) \cdot \Delta t \\ q_{i,t} = Qr_{i,t} + Qs_{i,t} \\ Q_{i,t} = Qu_{i,t} + q_{i-1,t} \end{cases} \quad (i=1, \dots, m; t=1, \dots, T) \quad (3)$$

式中： $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$ 分别为第*i*库第*t*时段初、末的蓄水量； $Q_{i,t}$ 、 $q_{i,t}$ 、 $Qr_{i,t}$ 、 $Qs_{i,t}$ 、 $Qu_{i,t}$ 分别为第*i*库

第  $t$  时段的入库流量、出库流量、发电流量、弃水流量、第  $i-1$  库与第  $i$  库的区间入流量，其中，当  $i=1$  时， $Q_{1,t}=Qu_{1,t}$ 。

依据式(3)可将各水库各时段发电水量( $W_{i,t}$ )转化为时段蓄量差、时段弃水量的函数：

$$W_{i,t} = \sum_{j=1}^i Qu_{j,t} \cdot \Delta t - \sum_{j=1}^i Vf_{j,t} - Os_{i,t} \quad (4)$$

式中： $j=1, 2, \dots, i$ ，即为第  $i$  库自身或其上游水库； $Vf_{i,t}=V_{i,t+1}-V_{i,t}$ ，为第  $i$  库第  $t$  时段末、初的时段变化蓄量，定义为时段蓄量差； $Os_{i,t}$  为第  $i$  库第  $t$  时段的弃水量。即两种调度情景下影响  $W_{i,t}$  的两项因素。

(2)发电水头贡献项。同样地，依据水力联系及水量平衡方程，将式(3)代入式(2)，各水库各时段水头( $H_{i,t}$ )可以转化如下函数：

$$\begin{aligned} H_{i,t} &= f_1\left(\frac{V_{i,t} + V_{i,t+1}}{2}\right) - f_2(q_{i,t}) \\ &= f_1\left(V_{i,t+1} + Vc_{i,t} + \frac{Vf_{i,t}}{2}\right) - f_2\left(\sum_{j=1}^i Qu_{j,t} - \sum_{j=1}^i Vf_{j,t} / \Delta t\right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $Vc_{i,t}=V_{i,t}-V_{i-1}$ ，为第  $i$  库第  $t$  时段初、第 1 时段初的时段变化蓄量，称为累积蓄量差。即  $H_{i,t}$  为累积蓄量差  $Vc_{i,t}$ 、时段蓄量差  $Vf_{i,t}$  的函数。

图 2 为水电站群系统内第  $i$  电站第  $t$  时段增益  $\Delta B_{i,t}$  的产生机制示意图。图中上标(0)表示独立优化调度模式；上标(1)表示联合优化调度模式； $\Delta Vf_{j,t}=Vf_{j,t}^{(1)}-Vf_{j,t}^{(0)}$  ( $j=1, 2, \dots, i$ )，为两种调度模式下第  $j$  库第  $t$  时段的时段蓄量差的变幅； $\Delta Os_{i,t}=Os_{i,t}^{(1)}-Os_{i,t}^{(0)}$  为两种调度模式下第  $i$  库第  $t$  时段弃水量变幅； $\Delta Vc_{i,t}=Vc_{i,t}^{(1)}-Vc_{i,t}^{(0)}$  为两种调度模式下第  $i$  库的累积蓄量差的变幅。

由图 2 可知，增益是由梯级水库群系统内各水库在独立调度、联合调度两种模式下的时段弃水量、时段蓄量差、累积蓄量差的变幅所引起的效益差，具体表现为：第  $i$  库第  $t$  时段产生的增益  $\Delta B_{i,t}$  归因于第  $i$  库自身及其上游水库的时段蓄量差的变幅  $\Delta Vf_{j,t}$  ( $j=1, 2, \dots, i$ )、第  $i$  库的累积蓄量差的变幅  $\Delta Vc_{i,t}$ 、第  $i$  库的时段弃水量变幅  $\Delta Os_{i,t}$ 。

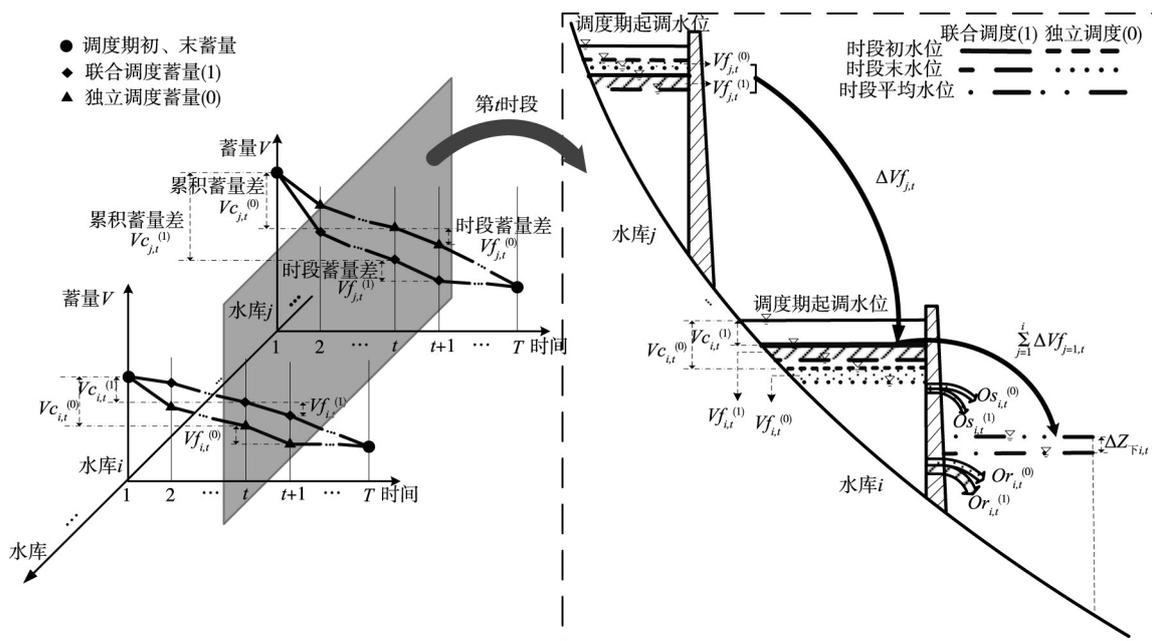


图 2 梯级水电站群联合调度增益产生机制

第*i*库上游水库的时段蓄量差的变幅 $\Delta V_{f_{j,t}}$  ( $j=1, 2, \dots, i$ )同时影响*i*库的发电水量差与水头差。例如,相较于独立调度模式的结果,水库*j* ( $j=1, 2, \dots, i$ )第*t*时段的时段蓄量差增加( $\Delta V_{f_{j,t}} \geq 0$ )表示联合调度策略下水库*j*在*t*时段的蓄水量增加,依据式(4)、式(5)可知这可能导致第*i*库在第*t*时段发电水量减少( $\Delta W_{i,t} \leq 0$ )、下游水位降低( $\Delta f_2 \leq 0$ ),当*j=i*时第*i*库自身时段蓄量差增加还将抬高其上游水位( $\Delta f_1 \geq 0$ );依据式(5)可知,第*i*库的累积蓄量差的变幅 $\Delta V_{c_{i,t}}$ 主要影响第*i*库的水头差,即第*i*库的累积蓄量差增加( $\Delta V_{c_{i,t}} \geq 0$ )会使其上游水位抬高( $\Delta f_1 \geq 0$ );而第*i*库的时段弃水量的增加( $\Delta O_{s_{i,t}} \geq 0$ )将导致其发电水量减少( $\Delta W_{i,t} \leq 0$ )。可见,联合调度增量效益影响机制复杂,必须逐项定量分解并进行系统分析。

**3.2 增益全微分分解** 通过对梯级水库群增量效益产生机制的剖析,可将增益贡献归因于两种调度模式下时段弃水量、时段蓄量差及累积蓄量差的差异;因而各水电站各时段的发电效益计算公式(式(2))可转化为:

$$\begin{aligned} B_{i,t} &= P_i \cdot E_{i,t} = P_i \cdot K_i \cdot W_{i,t} \cdot H_{i,t} \\ &= P_i \cdot K_i \cdot \left( \sum_{j=1}^i Q_{u_{j,t}} \cdot \Delta t - \sum_{j=1}^i V_{f_{j,t}} - O_{s_{i,t}} \right) \cdot \left[ f_1 \left( V_{i,t} + V_{c_{i,t}} + \frac{V_{f_{i,t}}}{2} \right) - f_2 \left( \sum_{j=1}^i Q_{u_{j,t}} - \sum_{j=1}^i V_{f_{j,t}} / \Delta t \right) \right] \quad (6) \\ & \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, \dots, i) \end{aligned}$$

而第*i*库第*t*时段的增益 $\Delta B_{i,t}$ 即为发电效益计算函数 $B_{i,t}(\cdot)$ 在独立调度模式下( $V_{f_{j,t}}^{(0)}$ 、 $V_{c_{i,t}}^{(0)}$ 、 $O_{s_{i,t}}^{(0)}$ )对应 $\Delta V_{f_{j,t}}$ 、 $\Delta V_{c_{i,t}}$ 、 $\Delta O_{s_{i,t}}$ 的全增量( $j=1, 2, \dots, i$ )。为定量分解各水库各时段的增益贡献值,依据两种调度模式下调度方案计算结果,采用全微分公式展开各水库各时段的变量差异( $\Delta V_{f_{j,t}}$ 、 $\Delta V_{c_{i,t}}$ 、 $\Delta O_{s_{i,t}}$ )产生的增益贡献值。即:

$$\begin{aligned} \Delta B_{i,t} &\approx \Delta V_{f_{j,t}} \cdot \sum_{j=1}^i \left. \frac{\partial B_{i,t}}{\partial V_{f_{j,t}}} \right|_{V_{f_{j,t}}=V_{f_{j,t}}^{(0)}} + \Delta V_{c_{i,t}} \cdot \left. \frac{\partial B_{i,t}}{\partial V_{c_{i,t}}} \right|_{V_{c_{i,t}}=V_{c_{i,t}}^{(0)}} + \Delta O_{s_{i,t}} \cdot \left. \frac{\partial B_{i,t}}{\partial O_{s_{i,t}}} \right|_{O_{s_{i,t}}=O_{s_{i,t}}^{(0)}} \quad (7) \\ & \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, \dots, i) \end{aligned}$$

式中:微分项 $\partial B_{i,t} / \partial V_{f_{j,t}}$ 为第*j*库( $j=1, 2, \dots, i$ )第*t*时段蓄量差的单位变幅所引起的第*i*库第*t*时段的增益值; $\partial B_{i,t} / \partial V_{c_{i,t}}$ 为第*i*库累积蓄量差的单位变幅所引起的第*i*库增益变化; $\partial B_{i,t} / \partial O_{s_{i,t}}$ 为第*i*库第*t*时段弃水量的单位变幅所引起的第*i*库增益变化,分别采用如下方式计算:

(1)当*j*≠*i*时:

$$\frac{\partial B_{i,t}}{\partial V_{f_{j,t}}} = P_i \cdot K_i \cdot \left[ -W_{i,t} \cdot \frac{f_2(V_{f_{j,t}})}{V_{f_{j,t}}} - f_1 \left( \frac{V_{i,t} + V_{i,t+1}}{2} \right) + f_2(q_{i,t}) \right] \quad (8)$$

式中: $\partial f_2(V_{f_{j,t}}) / \partial V_{f_{j,t}}$ 为水库*i*下游水位流量函数 $f_2(\cdot)$ 对 $V_{f_{j,t}}$ 的偏导,即第*j*库( $j=1, 2, \dots, i-1$ )时段蓄量差的单位变幅所引起的第*i*库第*t*时段的下游水位变化。

(2)当*j*=*i*时:

$$\frac{\partial B_{i,t}}{\partial V_{f_{i,t}}} = P_i \cdot K_i \cdot \left[ W_{i,t} \cdot \frac{\partial f_1(V_{f_{i,t}})}{\partial V_{f_{i,t}}} - W_{i,t} \cdot \frac{\partial f_2(V_{f_{i,t}})}{\partial V_{f_{i,t}}} - f_1 \left( \frac{V_{i,t} + V_{i,t+1}}{2} \right) + f_2(q_{i,t}) \right] \quad (9)$$

$$\frac{\partial B_{i,t}}{\partial V_{c_{i,t}}} = P_i \cdot K_i \cdot W_{i,t} \cdot \frac{\partial f_1(V_{c_{i,t}})}{\partial V_{c_{i,t}}} \quad (10)$$

$$\frac{\partial B_{i,t}}{\partial O_{s_{i,t}}} = -P_i \cdot K_i \cdot \left[ f_1 \left( \frac{V_{i,t} + V_{i,t+1}}{2} \right) - f_2(q_{i,t}) \right] \quad (11)$$

式中: $\partial f_1(V_{f_{i,t}}) / \partial V_{f_{i,t}}$ 、 $\partial f_1(V_{c_{i,t}}) / \partial V_{c_{i,t}}$ 分别为水库*i*上游水位库容函数 $f_1(\cdot)$ 对 $V_{f_{i,t}}$ 、 $V_{c_{i,t}}$ 的偏导,即第*i*库时段蓄量差、累积蓄量差的单位变幅分别引起的第*i*库第*t*时段的上游水位变化。

在实践中,由于水电站特征曲线通常具有显著的单调变化及边际变化特征,大量研究<sup>[19-20]</sup>将水库的水位库容关系 $f_1(\cdot)$ 与下游水位流量关系 $f_2(\cdot)$ 多拟合为多项式函数,即水库*i*上游水位库容函数

对  $Vf_{i,t}$ 、 $Vc_{i,t}$  的偏导  $\partial f_1(Vf_{i,t})/\partial Vf_{i,t}$ 、 $\partial f_1(Vc_{i,t})/\partial Vc_{i,t}$  存在且连续；同理，水库  $i$  下游水位流量函数对  $Vf_{j,t}$  的偏导  $\partial f_2(Vf_{j,t})/\partial Vf_{j,t}$  ( $j=1, 2, \dots, i$ ) 也存在且连续，说明发电效益计算函数  $B_{i,t}(\cdot)$  是可微的。

所以，时段蓄量差、累积蓄量差、时段弃水量对增益  $\Delta B_{i,t}$  的贡献值  $\varphi_{i,t}(\cdot)$  分别为：

$$\begin{cases} \varphi_{i,t}(\Delta Vf_{j,t}) = \Delta Vf_{j,t} \cdot \frac{\partial B_{i,t}}{\partial Vf_{j,t}} \Big|_{Vf_{j,t}=Vf_{j,t}^{(0)}} \\ \varphi_{i,t}(\Delta Vc_{i,t}) = \Delta Vc_{i,t} \cdot \frac{\partial B_{i,t}}{\partial Vc_{i,t}} \Big|_{Vc_{i,t}=Vc_{i,t}^{(0)}} \\ \varphi_{i,t}(\Delta Os_{i,t}) = \Delta Os_{i,t} \cdot \frac{\partial B_{i,t}}{\partial Os_{i,t}} \Big|_{Os_{i,t}=Os_{i,t}^{(0)}} \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, i) \quad (12)$$

式中： $\varphi_{i,t}(\Delta Vf_{j,t})$  为第  $j$  库 ( $j=1, 2, \dots, i$ ) 第  $t$  时段蓄量差的变幅对第  $i$  库第  $t$  时段增益的贡献值； $\varphi_{i,t}(\Delta Vc_{i,t})$ 、 $\varphi_{i,t}(\Delta Os_{i,t})$  分别为第  $i$  库累积蓄量差的变幅、时段弃水量的变幅对第  $i$  库第  $t$  时段增益的贡献值。

考虑到水库出现弃水的时段往往出力已达装机容量，第  $i$  库弃水量的变幅  $\Delta Os_{i,t}$  取决于第  $i$  库的出库水量差与水头差，而第  $i$  库及其上游水库的时段蓄量差的变幅  $\Delta Vf_{j,t}$  ( $j=1, 2, \dots, i$ ) 同时影响第  $i$  库的发电水量差与水头差，例如，水库 ( $j=1, 2, \dots, i$ ) 第  $t$  时段的时段蓄量差增加 ( $\Delta Vf_{j,t} \geq 0$ ) 将导致第  $i$  库出库水量的减少、水头的增加，进而造成弃水量的减少 ( $\Delta Os_{i,t} \leq 0$ )。故以时段蓄量差对增益  $\Delta B_{i,t}$  的贡献值  $\varphi_{i,t}(\Delta Vf_{j,t})$  为依据构造比例系数  $\alpha_{i,t}^j$  ( $j=1, 2, \dots, i$ )，将第  $i$  库因时段弃水量的变幅  $\Delta Os_{i,t}$  产生的增益贡献在第  $i$  库自身及其上游水库中进行分摊，即：

$$\alpha_{i,t}^j = \frac{\varphi_{i,t}(\Delta Vf_{j,t})}{\sum_{k=1}^i \varphi_{i,t}(\Delta Vf_{k,t})} \times 100\%, \quad (j=1, 2, \dots, i) \quad (13)$$

式中： $\alpha_{i,t}^j$  为水库  $j$  ( $j=1, 2, \dots, i$ ) 对第  $i$  库第  $t$  时段因时段弃水量的变幅  $\Delta Os_{i,t}$  产生的增益贡献占比。

**3.3 增益分配** 通过对第  $i$  库第  $t$  时段增量效益  $\Delta B_{i,t}$  的全微分分解，得到第  $t$  时段水库  $j$  ( $j=1, 2, \dots, i$ ) 对增量效益  $\Delta B_{i,t}$  的贡献值  $\varphi_{i,t}^j$  分别为：

$$\varphi_{i,t}^j = \begin{cases} \varphi_{i,t}(\Delta Vf_{j,t}) + \alpha_{i,t}^j \varphi_{i,t}(\Delta Os_{i,t}), & (j \neq i) \\ \varphi_{i,t}(\Delta Vf_{j,t}) + \varphi_{i,t}(\Delta Vc_{i,t}) + \alpha_{i,t}^j \varphi_{i,t}(\Delta Os_{i,t}), & (j=i) \end{cases} \quad (14)$$

式中： $\varphi_{i,t}^j$  的上标为增益的贡献水库  $j$ ，下标为产生增益的水库  $i$  及增益产生的时段  $t$ ； $\varphi_{i,t}(\cdot)$  为水库  $j$  ( $j=1, 2, \dots, i$ ) 各因子(时段蓄量差、累积蓄量差、时段弃水量)对第  $i$  库第  $t$  时段增量效益  $\Delta B_{i,t}$  的贡献值； $\alpha_{i,t}^j$  为水库 ( $j=1, 2, \dots, i$ ) 对第  $i$  库因时段弃水量的变幅  $\Delta Os_{i,t}$  产生的增益贡献占比。

汇总各水库各时段对自身及其下游水库的增益贡献值，作为该水库的效益贡献，依各水库在联合调度增益中的增益贡献比例可得各库的增益分配额度  $\delta_i$  及最终发电效益值  $B_i$  分别为：

$$\delta_i = \sum_{t=1}^T \sum_{k=i}^m \left( \frac{\varphi_{k,t}^i}{\sum_{j=1}^k \varphi_{k,t}^j} \Delta B_{k,t} \right), \quad \delta_i \geq 0 \quad (15)$$

$$B_i = B_i^{(0)} + \delta_i \quad (16)$$

式中： $m$  为水库总数目； $T$  为调度期内时段数； $\delta_i$  为第  $i$  库的总增益分配额度； $\varphi_{k,t}^i$  为第  $t$  时段第  $i$  库对第  $k$  库产生的增益  $\Delta B_{k,t}$  贡献值；其中  $k=i, i+1, \dots, m$ ，即表示第  $i$  库自身及其下游水库； $j=1, 2, \dots, k$ ，即表示第  $k$  库自身及其上游水库； $B_i$  为第  $i$  库最终所得发电效益值； $B_i^{(0)}$  为第  $i$  库在独立调度模式下的发电效益值。

式(15)中,按贡献比例分配增益体现公平性原则;各库分配额度总和即增益总额度,体现高效性原则;此外,  $\delta_i \geq 0$  表示各库增益分配额度非负,从式(16)中可知经增益分配保障了各库既得利益不低于独立调度利益,体现合理性原则。

## 4 实例研究

**4.1 联合调度增益评价** 本文以长江干流某四库(分别记为 A、B、C、D)梯级水电站水库群系统为例验证模型结果。以消落期(12月1日至次年6月30日)优化调度为例进行探讨。其中 A、C 水库具有不完全年调节能力, B、D 水库具有日调节能力,表 1 为各水电站水库调度的主要参数。假设四库隶属于不同的发电集团运营管理。从 1940—2013 年共 74 年长系列实测资料中按来水频率分为丰水年组、平水年组、枯水年组 3 组来水系列,在给定初始条件、边界条件下采用非线性规划软件 LINGO 计算梯级四库水电站水库群分别在独立、联合优化调度模式下各库的发电效益及联合调度增益。为充分考虑调度期内不同时期径流时程变差特征及其对弃水量、发电量计算的影响,本次采用变时段长计算:12 月到次年 4 月内径流变幅较小,以月为时段,5 月 1 日到 6 月 11 日月内径流变幅增大,以侯为时段,6 月 12 日到 6 月 30 日月内径流变化剧烈,以日为时段。从 3 组来水系列中各选取一个代表年,其在独立、联合调度模式下的发电效益如表 2 所示。

表 1 各水电站水库调度的主要参数

水库	正常高水位/m	汛限水位/m	兴利库容/亿 m <sup>3</sup>	最小下泄流量/(m <sup>3</sup> /s)	装机容量/万 kW	售电单价/(元/(kW·h))
A	600	560	64.6	1600	1260	0.34
B	380	370	9.03	1600	600	0.34
C	175	146.5	165	6000/5700	2250	0.25
D	66		0.84	6000/5700	295	0.20

表 2 不同来水情况下各水电站在独立、联合调度模式下的发电效益 (单位:亿元)

电站	丰水代表年		平水代表年		枯水代表年	
	独立调度	联合调度	独立调度	联合调度	独立调度	联合调度
A	83.02	81.89	86.44	85.31	59.07	58.30
B	42.46	43.93	44.22	45.62	32.66	33.90
C	94.64	94.35	97.38	97.11	88.37	87.97
D	16.41	17.32	16.99	17.71	16.09	16.97
总发电效益	236.53	237.49	245.03	245.75	196.19	197.14
增益		0.96		0.72		0.95

由表 2 可知,在不同来水情况下(丰水年、平水年、枯水年),若实施联合优化调度,较独立优化调度模式下的系统总发电效益将分别提高 0.96 亿、0.72 亿和 0.95 亿元,增益占比分别为 0.40%、0.29% 和 0.48%。其中,发电效益的增量主要产生在 B、D 水电站;实施系统联合优化调度,将导致 A、C 水电站的发电效益较独立调度对应效益减少。本例中平水代表年的总发电效益值大于丰水代表年下的发电效益值,主要因为该平水代表年的来水分配过程更均匀,而丰水年型主要在近汛期段来水较丰,导致更多弃水电能损失。

图 3 为系统内四库在 3 个代表来水年型下增益  $(\Delta B_{i,t} = B_{i,t}^{(1)} - B_{i,t}^{(0)})$  逐月逐库变化情况,由图 3 可知,该梯级四库联合调度增益主要产生在 5 月份,而 6 月份实施联合调度的发电效益将低于独立调度模式下的效益值。

**4.2 水库增益贡献分解** 基于全微分法的多主体水库群联合调度增益分配方法,其核心为通过水库

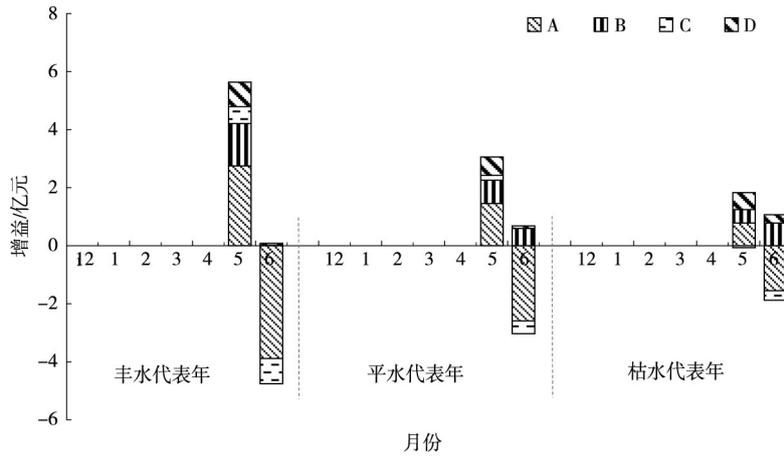


图3 梯级四库消落期联合调度增益逐月逐库分布

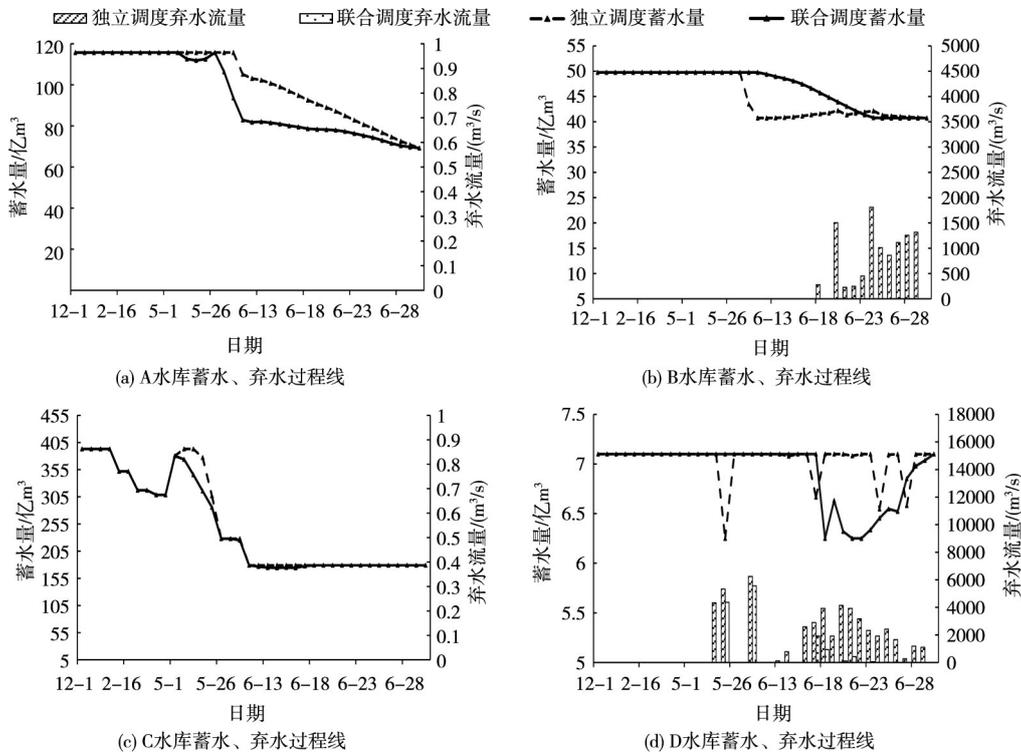


图4 梯级四库两种调度模式下消落期蓄水、弃水流量过程线

群优化调度模型，模拟计算联合调度模式下相较于独立调度模式下各水库各时段的增益值、时段蓄量差的变幅、累积蓄量差的变幅及弃水量变幅，采用全微分公式将水电站联合调度各库各时段增益 ( $\Delta B_{i,t}$ ) 分解为时段蓄量差 ( $Vf_{j,t}$ ,  $j=1, 2, \dots, i$ )、累积蓄量差 ( $Vc_{i,t}$ ) 和弃水量 ( $Os_{i,t}$ ) 三项变化引起的效益增值之和；汇总各水库各时段的增益贡献值，即可求解各水库的增益分配额度。图4为平水代表年下，各库的蓄水、弃水过程线。

由图4可知，不完全年调节水库A在12月一次年4月蓄水量(水位)不变，C库的蓄水量呈拟线性减少趋势，在两种调度模式下，A库在该时期的最优策略为按天然来水(此时A库天然来水高于最小下泄流量)下泄；C库12月至次年2月按天然来水过程下泄，维持蓄量不变，2月至4月按航运、生态的最小下泄流量需求下泄，此举可保证系统在消落期前期的发电水头最优，使消落期后期发电效率提升；B、D两水库在该时期均按天然来水量下泄，由于四库的调度策略在12月份至次年4月份无差异，而在5、6月具有较大差异，因而增益产生在5—6月。消落期水库水位运行控制域中限定C水库

6月份水位运行上限不超过146.5 m，在此条件下，两种模式下优化调度策略均为依水位(蓄量)上边界运行，因而蓄量过程对应无变化。B水库为日调节水库，调节能力和满发流量较小，其弃水及发电量结果受A库调度策略影响剧烈。在独立调度模式下，A库在5月26日抬升水位消落可提高本库发电水头，进而增发A库电量，此举使A、B库丰沛的区间入流与A库集中性下泄水量相遭遇，导致B库产生弃水。在联合调度模式下，A库在6月初即提前将蓄量消落至94亿m<sup>3</sup>，在A、B库区间来水较低的6月份提前将A库部分水量下泄，从而降低了6月份B库入库来水以及弃水量。所以，联合调度对于B库而言水量增发效益突出。

表3 平水年6月上旬(t=7、8)梯级四库各时段调度决策差异及增益贡献分解计算

时间 段	增益 产生 水库 <i>i</i>	调度决策差异/亿m <sup>3</sup>			增益贡献水库 <i>j</i>									增益 总值 /亿元				
		$\Delta V_{f,j,t}$	$\Delta V_{c,i,t}$	$\Delta O_{s,i,t}$	A			B			C				D			
					$\Delta V_{f,j,t}$	$\Delta V_{c,i,t}$	$\Delta O_{s,i,t}$	$\Delta V_{f,j,t}$	$\Delta V_{c,i,t}$	$\Delta O_{s,i,t}$	$\Delta V_{f,j,t}$	$\Delta V_{c,i,t}$	$\Delta O_{s,i,t}$		$\Delta V_{f,j,t}$	$\Delta V_{c,i,t}$	$\Delta O_{s,i,t}$	
1—5 日 ( <i>t</i> =7)	A	-12.69	-9.36	0	2.02	-0.13	0											1.89
	B	6.27	0	0	1.04		0	-0.45	0	0								0.59
	C	-2.92	0	0	0.64		0	-0.32		0	0.14	0	0					0.46
	D	0	0	0	0.09		0	-0.05		0	0.21		0	0	0	0	0	0.25
增益贡献值/亿元				3.66			-0.82			0.35				0				2.19
6— 10日 ( <i>t</i> =8)	A	-0.22	-22.05	0	0.03	-0.42	0											-0.39
	B	2.75	6.27	0	0.02		0	-0.18	0.16	0								0
	C	2.92	-2.92	0	0.01		0	-0.13		0	-0.12	-0.03	0					-0.27
	D	0	0	-2.96	0		0	-0.01		0.01	-0.13		0.01	0	0	0	0	-0.12
增益贡献值/亿元				-0.36			-0.15			-0.27				0				-0.78

表4 平水代表年消落期梯级四库增益贡献逐月汇总

(单位:亿元)

月份	增益产生 水库 <i>i</i>	增益贡献水库 <i>j</i>									增益 总值							
		A			B			C				D						
		$\Delta V_{f,j,t}$	$\Delta V_{c,i,t}$	$\Delta O_{s,i,t}$	$\Delta V_{f,j,t}$	$\Delta V_{c,i,t}$	$\Delta O_{s,i,t}$	$\Delta V_{f,j,t}$	$\Delta V_{c,i,t}$	$\Delta O_{s,i,t}$		$\Delta V_{f,j,t}$	$\Delta V_{c,i,t}$	$\Delta O_{s,i,t}$				
5月	A	1.54	-0.08	0														1.46
	B	0.80		0	0	0	0											0.80
	C	0.51		0	0		0	0.53	-0.87	0								0.17
	D	0.09		0.01	0		0	0.23		0.23	-0.01	0.12	-0.04					0.63
5月增益贡献值		2.87				0		0.12			0.07							3.06
6月	A	-1.14	-1.45	0														-2.59
	B	-0.61		0.80	0.04	0.48	-0.12											0.59
	C	-0.36		0	-0.04		0	0.02	-0.06	0								-0.44
	D	-0.03		0.37	-0.01		-0.29	0.02		0.04	0	-0.14	0.14					0.10
6月增益贡献值		-2.42			0.06			0.02			0							-2.34
总增益贡献值		0.45			0.06			0.14			0.07							0.72

该梯级四库消落期的联合调度增益贡献产生机制为：A、C水库主要通过加快消落在消落期5月初至6月中旬增加B、D水库发电水量、减少B、D水库弃水量进而增加下游水库的发电效益。

表3中的 $\Delta V_{f,j,t}$ 项表示 $\varphi_{i,t}(\Delta V_{f,j,t})$ ，即第*t*时段第*j*库(*j*=1, 2, ..., *i*)的时段蓄量差的变幅对第*i*库的增益贡献值； $\Delta V_{c,i,t}$ 项表示 $\varphi_{i,t}(\Delta V_{c,i,t})$ ，即第*t*时段第*j*库(*j*=*i*)的累积蓄量差的变幅对第*i*库的增益贡献； $\Delta O_{s,i,t}$ 项表示 $\alpha_{i,t}^j \varphi_{i,t}(\Delta O_{s,i,t})$ ；即第*t*时段第*j*库(*j*=1, 2, ..., *i*)对第*i*库因时段弃水量而产生的增

益的贡献值。表4中的 $\Delta V_f$ 、 $\Delta V_c$ 、 $\Delta O_s$ 项分别为5、6月份各时段的汇总值。

平水年6月上旬,各水库各时段( $t=7、8$ )的具体调度指标差异及计算过程如表3所示:以6月1日至5日(第7时段)为例,相较于独立优化调度,A水库增益贡献值为3.66亿元,源自于本时段增加发电水量12.69亿 $m^3$ ( $\Delta V_{f_{1,7}}=-12.69$ 亿 $m^3$ )对自身及下游B、C、D水库产生的2.02亿、1.04亿、0.64亿和0.09亿元的增益、以及累积增加出库水量9.36亿 $m^3$ ( $\Delta V_{c_{1,7}}=-9.36$ 亿 $m^3$ )导致发电水头降低而对自身产生的增益-0.13亿元( $\varphi_{1,7}(\Delta V_{c_{1,7}})$ );B水库对应时段增益贡献值为-0.82亿元,源自于B库该时段减少发电水量6.27亿 $m^3$ 对自身及下游C、D水库产生的增益-0.45亿、-0.32亿和-0.05亿元。C水库在该时段的增益贡献值为0.35亿元,源自于本库增加出库水量2.92亿 $m^3$ 对自身及下游D库产生的0.14亿和0.21亿元增益。D水库该时段的调度决策相较于独立调度没有变化,未对自身产生增益贡献。按此方法,计算各水库各时段因调度决策差异产生的增益贡献值( $\varphi_{i,t}(\Delta V_{f_{j,t}})$ 、 $\varphi_{i,t}(\Delta V_{c_{j,t}})$ 、 $\alpha_{i,t}^j \varphi_{i,t}(\Delta O_{s_{j,t}})$ ),汇总得到各库消落期增益产生时段(5、6月份)内的增益贡献情况见表4。由表3还可以看出,联合调度增益的产生具有时程上的置换机制。相较于独立调度,联合调度模式下第7时段的增益贡献主要来源于A、C水库增加发电水量( $\Delta V_{f_{1,7}}=-12.69$ 亿 $m^3$ 、 $\Delta V_{f_{3,7}}=-2.92$ 亿 $m^3$ ),使得梯级系统产生2.19亿元的增益;而第8时段初由于A、C水库的水位降低( $\Delta V_{c_{1,8}}=-22.05$ 亿 $m^3$ 、 $\Delta V_{c_{3,8}}=-2.92$ 亿 $m^3$ ),产生-0.78亿元的增益贡献。通过第7时段A、C水库的加快消落降低了第8时段B、D水库的弃水及弃水电能损失。因此,在联合调度模式下第7、8时段系统累计产生1.41亿元的净效益。

表5 梯级四库消落期联合调度增益贡献 (单位:亿元)

年型	增益产生水库 <i>i</i>	增益贡献水库 <i>j</i>				增益产生值
		A	B	C	D	
丰水代表年	A	-1.13				-1.13
	B	1.30	0.17			1.47
	C	0.15	-0.02	-0.42		-0.29
	D	0.09	-0.01	0.67	0.16	0.91
	增益贡献值	0.41	0.14	0.25	0.16	0.96
平水代表年	A	-1.13				-1.13
	B	0.99	0.40			1.39
	C	0.15	-0.04	-0.38		-0.27
	D	0.44	-0.30	0.52	0.07	0.73
	增益贡献值	0.45	0.06	0.14	0.07	0.72
枯水代表年	A	-0.77				-0.77
	B	1.15	0.09			1.24
	C	0.05	0.01	-0.46		-0.40
	D	0.08	0.07	0.66	0.07	0.88
	增益贡献值	0.51	0.17	0.20	0.07	0.95

**4.3 增益分配结果分析** 通过逐库逐时段解构时段蓄量差、累积蓄量差、弃水量的变幅产生的增益,即可分解各水库各时段对自身及剩余水库的增益贡献。表5为3个代表来水年梯级四库消落期增益贡献情况。

可见,平水代表年下,因联合调度水库A消落期增益为-1.13亿元,但因A库调节作用使B库消落期增加发电效益0.99亿元,使C库增加发电效益0.15亿元,D库增加0.44亿元,因此,A库对系统增益的累积贡献值为0.45亿元,其余水库对应分配结果可依次求得。

由该表可知,A、C水库的增益贡献整体大于B、D水库,且相较于独立优化调度,联合优化调

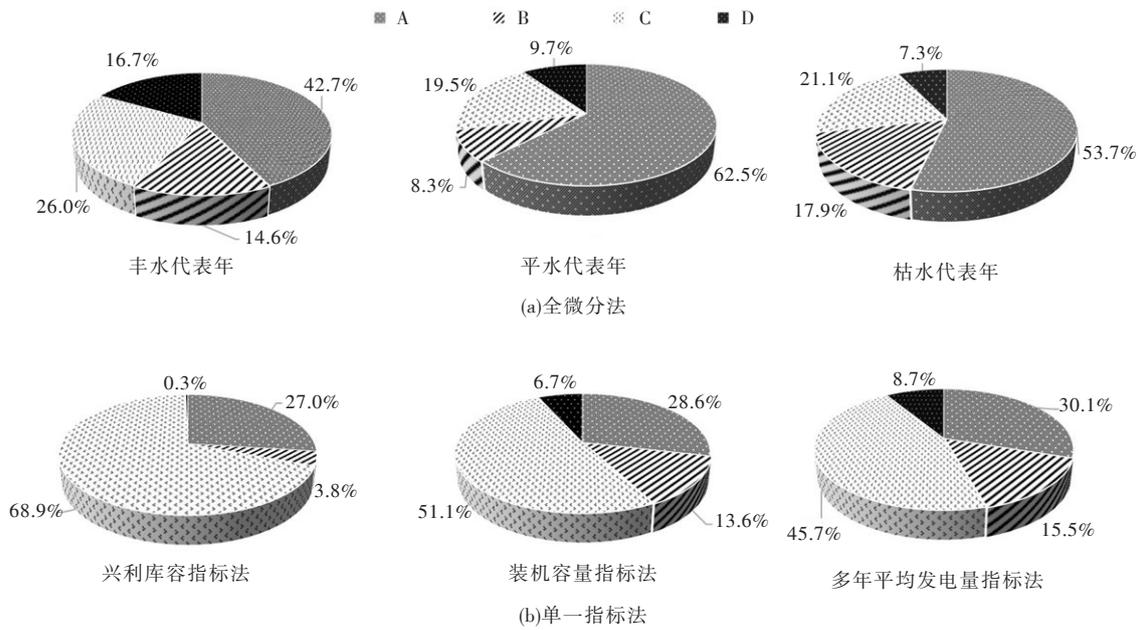


图5 不同方法中各水电站增量效益分配占比

度主要以 A、C 水库效益置换 B、D 水库效益，因而明晰水库增量效益产生的来源，解构各水库的增量效益贡献十分必要。B、D 水库主要对自身产生增益贡献，其主要增益产生源自于上游 A、C 水库调节补偿作用。

图 5 为采用全微分法以及分别以兴利库容、装机容量、多年平均发电量来构建比例系数的单一指标法计算的增量效益分配占比。

由图 5 可以得出如下结论：

(1) 全微分法考虑了不同来水年型下径流变化对增量效益产生物理机制的影响。相较于其余单一指标分配方法，该法实际上给出了考虑来水条件、库容大小、装机容量和发电效率等诸多因素影响的综合结果。总体而言，该方法的增益分配占比大小为  $A > C > B(D)$ ，主要因为 A、C 水库均具有不完全全年调节能力，A 水库作为“龙头水库”的调节作用对梯级系统内所有水库均有贡献，而 C 水库主要对 D 库增益产生贡献，所以 A 水库的增益占比高于 C 水库；B、D 水库均为日调节水库，主要通过抬高水头、减少弃水来增加自身的发电效益，对其余水库的增益贡献甚微，所以 B、D 水库的增益贡献较小且受来水条件影响较大。

(2) 单指标法分别选用不同的指标(兴利库容、装机容量、多年平均发电量)构造比例系数，其增益分配占比大小均为  $C > A > B > D$ 。实际上，在不同来水年型下，各指标的影响大小不尽相同：例如，装机容量指标主要影响弃水电量大小，因而在丰水年型下增量效益的影响一般高于枯水年型。此外，单一指标法中若按各水库的兴利库容为分摊依据，D 电站的增益分配占比仅为 0.3%，该分配结果显然弱化了低调节、径流式水电站的贡献。采用单指标法，C 电站的增益分配占比均高于 A 电站，而全微分法的分配结果与之相反，主要因为单一指标或综合指标均难以反映水库拓扑位置关系对联合增益的影响；在该水库群系统中，A 水库的库容、机组成装机容量等参数条件虽然不如 C 水库，但由于 A 水库位于上游，属龙头电站，其在联合调度运行过程中往往发挥主导作用。所以，单指标法的分配结果还可能会弱化上游龙头电站的增益贡献。

## 5 结论

为促进多利益主体水电站水库群开展联合优化调度，提高水能资源利用效率，实现多方共

赢, 需要建立一种公平、合理、高效的联合调度增益分配机制。本文采用全微分公式解构各水库各时段联合调度增益的贡献值; 明晰水库群联合调度增益形成机制; 提出了基于全微分法的增益分配模型。以长江干流某四库梯级水库群系统为例验证了模型结果, 并与几种单一指标法的分配方案进行比较。得出以下结论: (1)全微分法采用全微分公式将水电站群联合调度增益分解为时段蓄量差、累积蓄量差和弃水流量三项目的变化引起的增益之和, 并通过解构各水库的时段增益贡献, 将其在水库群系统内按贡献大小进行再分配, 满足增益分配实践需求的三条原则。(2)全微分法以增益产生的物理机理作为增益分配的主要依据, 综合考虑了来水条件、水库参数及水库群拓扑结构等因素对增益形成机理的动态影响, 弥补了单一指标法对增益成因机理解析存在的不足, 并避免了综合指标法中权重系数、综合方法的确定问题, 保证了分配结果的客观性。

本模型主要考虑联合调度对梯级电站发电部门的财务效益影响及形成机制, 在后续研究中可通过逐一量化水库各服务目标综合效益的方式将模型扩展应用于多目标调度情景。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] YUAN P, WANG W S, DONG J . Analysis in statistical properties of maximum annual water levels of reservoirs in China[J] . International Journal Hydroelectricity Energy, 2002, 4(6): 102-107 .
- [ 2 ] MOLDEN D, SAKTHIVADIVEL A . Water according to assess use and productivity of water[J] . Water Resources Development, 1999, 15(1/2): 55-71 .
- [ 3 ] BISWAS A K . Water for Sustainable Development in the 21st Century[M] . Oxford: Oxford University Press, 1993 .
- [ 4 ] 王浩, 王旭, 雷晓辉, 等 . 梯级水库群联合调度关键技术发展历程与展望[J] . 水利学报, 2019, 50(1): 25-37 .
- [ 5 ] 赵懿旗, 葛文研 . 水电站水库群联合补偿调度[J] . 淮海大学学报(自然科学版), 1991, 19(1): 53-58 .
- [ 6 ] 朱艳军, 马光文, 江拴丑, 等 . 中小流域梯级水电站联合调度管理模式研究[J] . 华东电力, 2010(4): 577-579 .
- [ 7 ] 王金龙, 黄炜斌, 马光文, 等 . 市场环境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, 48(3): 79-86 .
- [ 8 ] 刘涵, 黄强, 赵麦换 . 黄河干流供水发电补偿效益及其分配方案研究[J] . 水力发电学报, 2003, 22(2): 24-30 .
- [ 9 ] 赵先进 . 河流梯级调节水库投资的水头分摊法[J] . 贵州水力发电, 1994(4): 59-61 .
- [ 10 ] 薛小杰, 黄强, 田峰巍, 等 . 梯级水电站补偿效益分摊方法研究[J] . 中国农村水利水电, 2001(4): 45-47 .
- [ 11 ] 赵麦换, 徐晨光, 黄强, 等 . 离差平方法在梯级水库补偿效益和综合水利工程费用分摊中的应用[J] . 水力发电学报, 2004, 23(6): 1-4 .
- [ 12 ] 钟平安, 曹静, 蔡杰 . 梯级水电站实时补偿增益多因素综合分配方法探讨[J] . 水力发电学报, 2008, 27(6): 22-26 .
- [ 13 ] XU B, ZHONG P, ZAMBON R C, et al . Scenario tree reduction in stochastic programming with recourse for hydropower operations[J] . Water Resources Research, 2015, 51(8): 6359-6380 .
- [ 14 ] 陈悦云, 梅亚东, 蔡昊, 等 . 面向发电、供水、生态要求的赣江流域水库群优化调度研究[J] . 水利学报, 2018, 49(5): 628-638 .
- [ 15 ] 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 .
- [ 16 ] FREDERICK K D, MAJOR D C . Climate change and water resources[J] . Climatic Change, 1997, 37(1): 7-23 .
- [ 17 ] 张树磊, 杨大文, 杨汉波, 等 . 1960—2010年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J] . 水科学进展, 2015, 26(5): 605-613 .
- [ 18 ] 徐斌, 马昱斐, 储晨雪, 等 . 多主体水库群联合调度增益分配讨价还价模型[J] . 水力发电学报, 2018, 37

(5): 247-257.

- [ 19 ] 李想, 魏加华, 司源, 等. 权衡供水与发电目标的水库调度建模及优化[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(5): 973-979.
- [ 20 ] 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, 42(12): 90-93.

## An attribution and allocation method of synergistic benefit from joint operations of multi-stakeholder cascade hydropower station system based on total differential method

MA Yufei<sup>1</sup>, ZHONG Ping'an<sup>1</sup>, XU Bin<sup>1, 2</sup>, LU Lu<sup>3</sup>, LI Kunpeng<sup>4</sup>

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

2. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. Hydrological Bureau of YRCC, Zhengzhou 450004, China;

4. Nanjing Water Conservancy Planning Design Institute CO., LTD, Nanjing 210022, China)

**Abstract:** A fair, efficient and reasonable allocation is a mechanism guarantee of joint optimal operations of a multi-stakeholder cascade reservoirs system. The proportional allocation method, such as single index or comprehensive index based on reservoir storage capacity, installed capacity and annual power generation, is not able to analyze the physical mechanism of synergistic benefit and the influence of variable runoff conditions. In view of the above shortcomings, the synergistic benefit is quantitatively decomposed by terms according to the difference between the results under independent and joint operations model scenarios, and a synergistic benefit allocation model is developed in this study using the total differential equation. This model establishes the relationship between the incremental benefit and the volume of spillage during the period, the difference in the storage during the current period and cumulated difference in storage. The results show that the total differential method deconstructs the synergistic benefit contribution of each reservoir during each time period and verify its physical genetic mechanism, which satisfies the basic principles of synergistic benefit allocation. Moreover, this method considers the inflow conditions, reservoir characteristics, and the topological structure of the reservoirs system together, which overcomes the shortage of the single-index allocating model, and avoids the problem of determining the weight coefficient. Compared with the allocation method based on cooperative game models, this method only involves the calculation of single and joint operation model results of reservoir system, it reduces computational efforts for enumerating the synergistic benefit contribution under all coalition model scenarios. It provides a new way to solve the synergistic benefit allocation problem of a multi-stakeholder cascade hydropower stations.

**Keywords:** operation of reservoir group; multi-stakeholder; synergistic benefit allocation; total differential method; attribution analysis

(责任编辑: 王成丽)