

# 控制性水库对梯级水电站群性能影响及补偿效益量化研究

程贤良<sup>1</sup>, 吴慧军<sup>1</sup>, 李崇浩<sup>1</sup>, 李树山<sup>1</sup>, 黄巍<sup>1</sup>, 宋毅桐<sup>2</sup>, 张玺<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州

<sup>2</sup>大连理工大学水电与水信息研究所, 辽宁 大连

收稿日期: 2022年10月4日; 录用日期: 2022年12月1日; 发布日期: 2022年12月31日

## 摘要

随着我国水电发展的逐步深入, 未来将会形成大量以大型水库为控制电站的一库多级或多库多级式梯级水库群, 然而控制性水库的综合开发将会产生巨额成本。梯级水电站群长期优化调度是一个标准的多维度、多阶段、非线性、非凸优化问题, 求解难度极大, 实践中在保证水电系统蓄丰补枯的同时如何提高发电效益成为一大问题。本文以西南某流域11座梯级电站群作为研究对象, 提出了一个以多年平均发电量最大为目标的水电站群长期优化调度模型, 使用多项式拟合方法处理非线性约束, 建立了混合整数非线性规划模型(MINLP)。分析了控制性水库投产前后对整个流域梯级的效益和性能的影响, 结果表明, 单主体控制性水库的投产运行不论在时间、还是空间上都会对整个梯级产生积极的补偿效益。

## 关键词

MINLP模型, 控制性水库, 性能影响, 补偿效益量化

# Performance Impact and Quantification Study of Compensation Benefit of Control Reservoir on Cascade Hydropower Stations

Xianliang Cheng<sup>1</sup>, Huijun Wu<sup>1</sup>, Chonghao Li<sup>1</sup>, Shushan Li<sup>1</sup>, Wei Huang<sup>1</sup>, Yitong Song<sup>2</sup>, Xi Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>China Southern Power Grid Power Dispatching and Control Center, Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>Institute of Hydropower & Hydroinformatics, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

Received: Oct. 4<sup>th</sup>, 2022; accepted: Dec. 1<sup>st</sup>, 2022; published: Dec. 31<sup>st</sup>, 2022

作者简介: 程贤良, 男, 出生于1995年, 硕士, 高级工程师, 从事水电系统经济运行工作, Email: justcxl@hotmail.com

文章引用: 程贤良, 吴慧军, 李崇浩, 李树山, 黄巍, 宋毅桐, 张玺. 控制性水库对梯级水电站群性能影响及补偿效益量化研究[J]. 水资源研究, 2022, 11(6): 600-611. DOI: 10.12677/jwrr.2022.116065

## Abstract

With the gradual development of hydro-power in China, there will be a large number of “one reservoir multi-cascade hydropower stations” or “multi-reservoirs with multi-cascade hydropower stations” with large reservoirs as control power stations. However, its comprehensive development will produce a huge cost. The long-term optimal operation of cascade hydropower stations is a standard multi-dimensional, multi-stage, nonlinear and non-convex optimization problem, which is extremely difficult to solve. In practice, how to improve the power generation of cascade hydropower stations while ensuring the ability of hydro-power to store abundance and replenish drought has become a big problem. Taking 11 cascade hydropower stations in a large hydropower base in Southwest China as the research object, this paper developed a long-term optimal operation model of cascade hydropower stations aiming at the maximum annual average power generation, which used the polynomial fitting method to deal with nonlinear constraints, and established the mixed integer nonlinear programming (MINLP) model. Meanwhile, the effects of the control reservoirs on the benefit and performance of the entire basin terrace before and after commissioning are analyzed. The results show that the commissioning and operation of a single main control reservoir will have positive compensatory benefits on the entire terrace, both in time and in space.

## Keywords

MINLP Model, Control Reservoir, Performance Impact, Compensation Benefit Quantification

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/>



## 1. 引言

控制性水库因其具备大范围的枯汛期电量调节能力及优化整个梯级流域的发电效益具有重要的作用[1]。然而控制性水库的综合开发将会产生巨额的成本，因此有必要对含有控制型水库的梯级水电站群的性能影响及补偿效益量化进行研究，有利于发挥控制性水库及整个梯级电站的综合价值，提高水资源动态时空优化水平，实现水电资源的高效利用。

梯级水电站群长期优化调度模型的目标主要有两大种，一是发电量最大模型[2]，二是最小出力最大模型[3]。如何协调两者之间的关系，在保证水电调峰能力的同时，提高水电站群发电水平，是实践中的一个重要问题。国内外有关梯级水电站群优化调度求解以及补偿效益量化方面的研究一直是热点课题，也是难点课题之一。在梯级水电站群补偿效益量化方面国内外研究已相对成熟：周彬彬[4]以澜沧江中下游已投产的“两库五级”梯级水电站群为实例，采用确定性优化模型，分别按照多个发电主体下规划期和运行期、单一发电主体下规划期三种情况进行了补偿效益量化。唐海华等[5]以发电量最大或保证出力最大为目标建立了长江上游水电系统优化模型，并分别按梯级和库群2个层次构建了4个长序列优化调度方案，根据各方案优化结果分析了主要控制型梯级水库的联合补偿规律及补偿效益。白涛等[6]以黄河干流梯级水库群为例，建立了满足流域要求的黄河干流梯级水库群优化调度模型，提出了基于系统辨识的自迭代模拟优化算法，计算和量化了龙羊峡、刘家峡水库的发电、供水补偿效益，对发电补偿效益和供水补偿效益进行了分配，分析了龙羊峡、刘家峡等调控性能好的水库对黄河干流梯级水库群所做的贡献。目前使用较多的是动态规划[7][8]及其改进算法[9][10]、混合整数线性规划[11][12]算法、遗传算法[13][14]和粒子群算法[15][16]。其中动态规划应用于多个水库时容易产生维数灾问题，

其改进算法虽能缓解动态规划算法中的维数灾问题，在实践中却很难找到可行的初始可行解，且容易陷入局部最优；混合整数线性规划具有编写简单、求解速度快等优点，但受限于水电系统非线性特性，对非线性约束线性化势必会对结果精度造成损耗；此外遗传算法和粒子群算法由于算法参数选择的随机性，得到的计算结果往往是不稳定的，难以运用到实践方案的制作中。因此从水电调度实际出发，选取混合整数非线性规划(MINLP) [17] 进行建模求解。

因此，基于以上问题的分析，本文针对单一控制性水库对梯级水电站群性能影响及补偿效益量化问题，开发了一个以多年平均发电量最大为目标的梯级水电站群长期优化调度模型，同时利用商业求解器 Lingo 编程建立 MINLP，将西南某流域 11 座梯级水电站群作为研究对象进行计算，验证了模型算法的有效性。

## 2. 多目标联合优化调度模型

### 2.1. 目标函数

针对同一个主体下的梯级水库群补偿效益问题，构建了梯级水电站群长期优化调度常用的发电量最大模型，同时考虑在枯水期给电网提高尽可能大且稳定的出力。为简化模型求解，本文采用约束法，将最小出力最大的目标转化为约束条件，则转化后的目标函数为[18]：

$$E = \max \sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^n N_{i,t} - \sigma_t \lambda \cdot |\varepsilon - N_{i,t}| \right) \Delta t = \max \sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^n \eta_i Q_{i,t} H_{i,t} - \sigma_t \lambda \cdot |\varepsilon - \eta_i Q_{i,t} H_{i,t}| \right) \Delta t \quad (1)$$

式中， $E$  周期总发电量， $10^8 \text{ KW}\cdot\text{h}$ ； $T$  为优化总时段数； $t$  为时段变量； $i$  为水电站编号； $n$  为水电站总数； $N_{i,t}$  表示第  $i$  个水库在时段  $t$  的出力， $\text{KW}$ ； $\sigma_t$  是评判时段最大化最小出力约束条件被破坏的状态变量，值为 1 的时候，证明本时段最大化最小出力约束条件被破坏，值为 0 的时候证明在原本设置的约束条件内； $\lambda$  为惩罚常数， $\lambda = 1000$ ； $\varepsilon$  为设置的最大化最小出力值； $\Delta t$  为时段步长，取 1 月； $\eta_i$  为第  $i$  个水库综合平均出力系数； $Q_{i,t}$  为第  $i$  个水库在时段  $t$  的平均发电流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ； $H_{i,t}$  为第  $i$  个水库在时段  $t$  的净水头， $\text{m}$ 。

$\sigma_t$  的计算式为：

$$\sigma_t = \begin{cases} 1 & \sum_{i=1}^n N_{i,t} < \varepsilon \\ 0 & \sum_{i=1}^n N_{i,t} \geq \varepsilon \end{cases} \quad (2)$$

### 2.2. 约束条件

1) 水量平衡约束

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + 3600 \times (I_{i,t} - Q_{i,t} - S_{i,t}) \Delta t \quad (3)$$

其中

$$I_{i,t} = q_{i,t} + Q_{i-1,t} + S_{i-1,t} \quad (4)$$

式中， $V_{i,t}$  表示第  $i$  个水库在时段  $t$  的库容， $\text{m}^3$ ； $I_{i,t}$ 、 $S_{i,t}$ 、 $q_{i,t}$  分别是第  $i$  个水电站  $t$  时的入库流量、弃水流量和区间流量， $\text{m}^3/\text{s}$ 。

2) 始末水位约束

$$Z_{i,0} = Z_{beg} \quad (5)$$

$$Z_{i,T} = Z_{end} \quad (6)$$

式中,  $Z_{i,0}$ 、 $Z_{\text{beg}}$  分别为第  $i$  个水库的初始水位和初始水位的给定值(m),  $Z_{i,T}$ 、 $Z_{\text{end}}$  分别为第  $i$  个水库的调度期末水位和末水位的给定值(m)。

3) 水库水位约束

$$\underline{Z}_i \leq Z_{i,t} \leq \bar{Z}_i \quad (7)$$

式中,  $\bar{Z}_i$ 、 $\underline{Z}_i$  分别为第  $i$  个水库的水位上下限。

4) 发电流量约束

$$Z_{\text{down}i,t} = f_i^{Z_{\text{down}Q}}(Q_{i,t} + S_{i,t}) \quad \bar{Q}_i \leq Q_{i,t} \leq \underline{Q}_i \quad (8)$$

式中,  $\bar{Q}_i$ 、 $\underline{Q}_i$  分别为第  $i$  个水库时段  $t$  的发电流量上下限。

5) 出库流量约束

$$\underline{Q}_{\text{out}i} \leq Q_{i,t} + S_{i,t} \leq \overline{Q}_{\text{out}i} \quad (9)$$

式中,  $\overline{Q}_{\text{out}i}$ 、 $\underline{Q}_{\text{out}i}$  分别为第  $i$  个水库的出库流量上下限。

6) 电站出力约束

$$\bar{N}_i \leq N_{i,t} \leq \underline{N}_i \quad (10)$$

式中,  $\bar{N}_i$ 、 $\underline{N}_i$  分别为第  $i$  个水库的出力上、下限。

7) 水位库容曲线

$$Z_{i,t} = f_i^{ZV}(V_{i,t}) \quad (11)$$

式中,  $f_i^{ZV}$  为水位和库容关系曲线。

8) 尾水位泄量曲线

$$Z_{\text{down}i,t} = f_i^{Z_{\text{down}Q}}(Q_{i,t} + S_{i,t}) \quad (12)$$

式中,  $f_i^{Z_{\text{down}Q}}$  为尾水位和出库泄量关系曲线。

### 3. 模型求解

#### 3.1. 数据输入

本次模型输入的数据是电站 A 的 2006 年 1 月~2015 年 12 月共 10 年的径流数据以及电站 B 至电站 K 共 10 座水电站 2006 年 1 月~2015 年 12 月区间流量数据, 整体采用以水定电的方法并基于多目标联合优化调度模型求得该流域共 11 级电站的包括发电量、最小出力在内的性能指标。

#### 3.2. 方法步骤

1) 多项式拟合

非线性约束的处理方法一般有三种: 分段线性化法(Piecewise Linearization Method) [19]、三角插值法(Trigonometric Interpolation) [20]和多项式曲线拟合法(Polynomial Curve Fitting) [21]。分段线性化法与三角插值法是线性化方法, 使用较为简单, 但是均需要引入大量的 0~1 变量, 离散区间或三角形剖分个数常依靠人工经验确定, 且随着精度要求越高, 求解效率则越低。而多项式曲线拟合法可精确描述非线性关系, 降低人为影响因素, 模型处理的实际操作更为简捷。因此, 本文采用多项式拟合技术, 构建 MINLP 模型, 具体约束处理方式如下:

梯级水电站的水位与库容关系, 尾水位与下泄流量关系, 这里选用四次多项式拟合, 表示为:

$$Z_{i,t} = a_{5,i}(V_{i,t})^4 + a_{4,i}(V_{i,t})^3 + a_{3,i}(V_{i,t})^2 + a_{2,i}(V_{i,t}) + a_{1,i} \quad (13)$$

$$Z_{\text{down},i,t} = b_{5,i}(Q_{i,t} + S_{i,t})^4 + b_{4,i}(Q_{i,t} + S_{i,t})^3 + b_{3,i}(Q_{i,t} + S_{i,t})^2 + b_{2,i}(Q_{i,t} + S_{i,t}) + b_{1,i} \quad (14)$$

式中,  $Z_{i,t}$  表示第  $i$  个水库时段  $t$  的水位,  $a_{1\sim 5,i}$  表示第  $i$  个水库的水位库容曲线参数。  $Z_{\text{down},i,t}$  表示第  $i$  个水库时段  $t$  的尾水位,  $b_{1\sim 5,i}$  表示第  $i$  个水库的尾水位下泄流量曲线参数。

2) 求解步骤

优化调度模型的具体流程如图 1 所示, 结合图 1 求解步骤可简要描述为:

- 步骤 1: 将最小出力最大目标函数转化为约束条件。
- 步骤 2: 设置梯级水电站群的约束条件。
- 步骤 3: 利用多项式拟合对非线性约束进行相应的处理。
- 步骤 4: 构建相应的目标函数的 MINLP 模型。
- 步骤 5: 使用 Lingo 语言进行模型构建并求解, 得到梯级各个电站的水位流量过程。

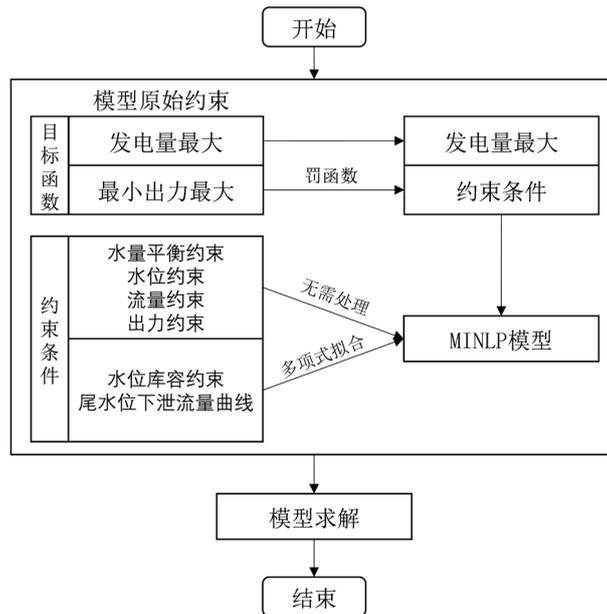


Figure 1. The solution flow of multi-objective joint optimal scheduling model

图 1. 多目标联合优化调度模型求解流程

## 4. 算例研究

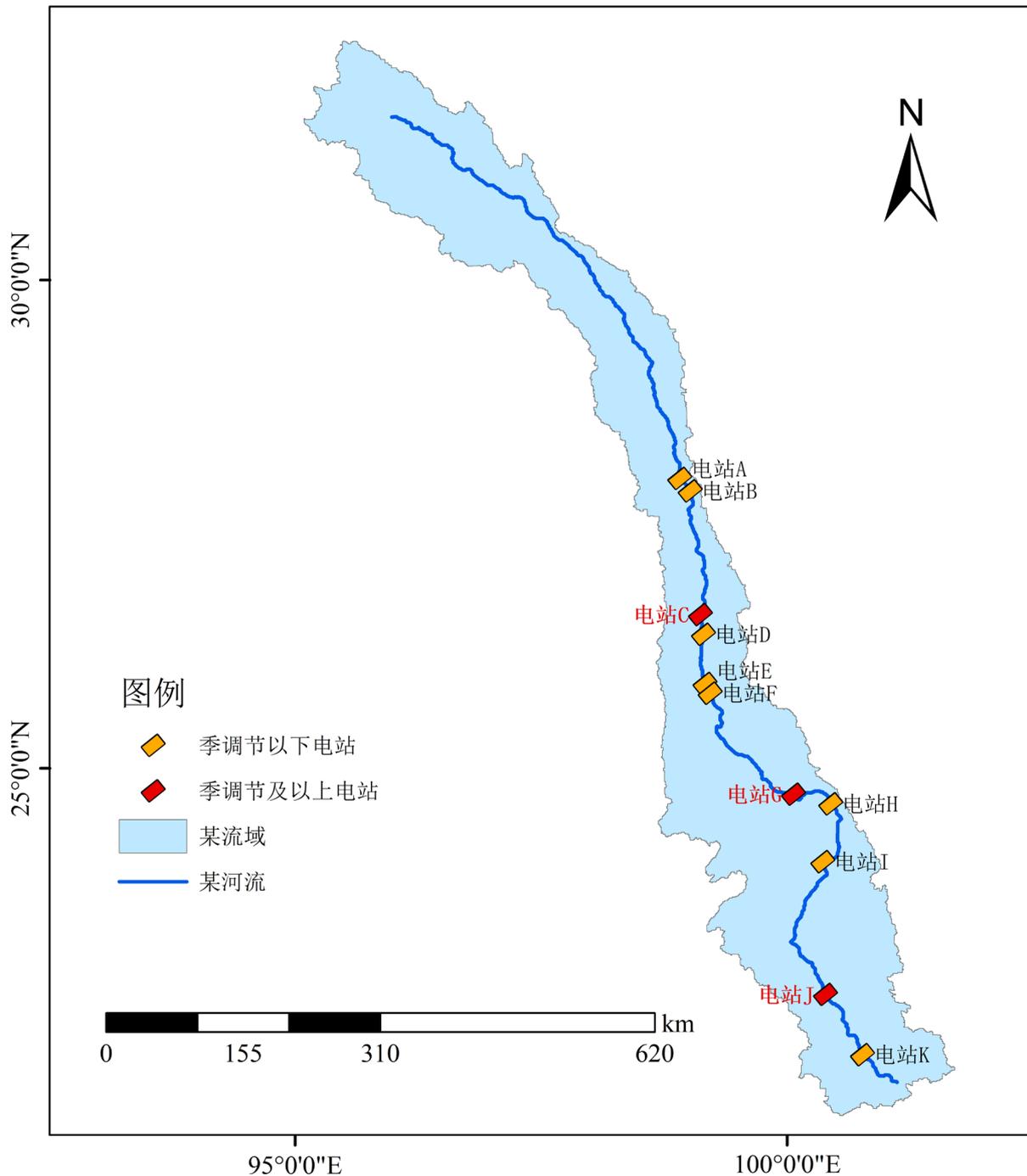
### 4.1. 工程背景与参数设置

西南某流域已建成共 11 级电站, 总装机容量约 2135 万千瓦, 电站 C、电站 G、电站 J 为季调节及以上水库, 其余电站为季调节以下电站, 流域分布如图 2 所示。电站 C 位于该流域梯级上游位置, 且该电站上下游均为调节性能较差的电站, 因此, 对于电站 C 是否投产对整个梯级流域的时空补偿效益具有重要的意义, 各水电站的特征参数如表 1 所示。

调度计算时输入流量数据, 建立梯级多年平均发电量最大和最小出力最大为目标的多目标梯级优化调度模型, 调度期分为丰(6 月上旬~10 月下旬)、平(5、11 月)、枯(12 月上旬~翌年 4 月下旬)三个时间段。为讨论控制型水库建设运行对各水电站的性能影响以及整个水电站群蓄丰补枯能力影响, 设置电站 C 未投产为 Model 1,

电站 C 投产为 Model 2。在计算出不同时期下总发电量基础上开展控制性水库电站 C 投产对该流域梯级电站补偿效益的研究，以电站 G 平水期的电价系数作为基数，设其平水期的电价系数为 1，剩余水电站平水期的电价系数如表 2 所示，各电站的枯、丰水期的电价系数采用下列原则计算：

- 1) 枯水期电价系数 = 平水期电价系数\*(1 + 0.2)
- 2) 丰水期电价系数 = 平水期电价系数\*(1 - 0.18)



**Figure 2.** Geographic distribution of the cascade hydropower stations in the basin  
**图 2.** 流域梯级水电群地理位置图

**Table 1.** Feature parameters of cascade hydropower stations in basin  
**表 1.** 流域梯级水电站特征参数

电站	调节性能	死水位/m	正常高水位/m	总库容/亿 m <sup>3</sup>	兴利库容/亿 m <sup>3</sup>	装机容量/MW
电站 A	日	1901	1906	2.84	0.37	990
电站 B	日	1814	1818	0.75	0.14	420
电站 C	季	1586	1619	16.70	8.28	1900
电站 D	日	1472	1477	2.93	0.41	920
电站 E	周	1398	1408	7.48	1.65	1400
电站 F	日	1303	1307	3.49	0.49	900
电站 G	不完全多年	1166	1240	149.14	98.95	4200
电站 H	不完全季	988	994	5.02	1.26	1670
电站 I	不完全季	887	899	9.40	2.43	1350
电站 J	多年	765	812	237.03	113.64	5850
电站 K	周	591	602	11.39	3.09	1750

**Table 2.** The electricity price coefficient of cascade hydropower stations in basin during normal water period  
**表 2.** 流域梯级水电站平水期电价系数

电站	电站 A	电站 B	电站 C	电站 D	电站 E	电站 F	电站 G	电站 H	电站 I	电站 J	电站 K
平水期电价系数	0.62	0.52	0.86	0.60	0.70	0.55	1.00	0.57	0.73	0.88	0.82

## 4.2. 控制型水库建设运行对下游电站性能影响分析

### 1) 空间变化 - 动能指标

基于模型计算得到各水电站的最小出力、发电量和弃水量如下表 3 所示，电站 C 投产后，其下游电站中调节性能较弱的电站最小出力增加了 102.16 MW，增长率为 6.40%；发电量增加了 23.33 亿 KW·h，增长率为 6.29%；弃水流量减少了 131.16 亿 m<sup>3</sup>，降低率为 7.88%。电站 C 投产后，整个梯级最小出力增加了 502.95 MW，增长率为 14.98%；多年平均年发电量增加了 122.45 亿 KW·h，增长率为 17.36%；弃水流量减少了 30.67 亿 m<sup>3</sup>，降低率为 1.84%。电站 G 和电站 J 两个多年调节的水电站最小出力分别增加 152.17 和 0.46 MW (增长率分别为 18.15% 和 0.05%)；年发电量分别增加 12.11 和 9.77 亿千瓦时(增长率分别为 7.96%和 5.36%)。综上分析可知，电站 C 建设充分发挥了大水电的调节能力，从而有效提高电站 C 下游梯级水库群的年发电量和最小出力，并减少弃水。

**Table 3.** The performance indexes of each power station in different periods  
**表 3.** 不同时期各电站性能指标

性能指标	最小出力/MW		出力差值(比)	发电量/亿 KW·h		发电量差值(比)	弃水流量/亿 m <sup>3</sup>		弃水流量差值(比)
	Model 1	Model 2		Model 1	Model 2		Model 1	Model 2	
电站 A	128.22	128.22	0	42.39	42.39	0	545.48	545.48	0
电站 B	59.13	59.13	0	18.43	18.42	-0.01	553.02	548.67	-4.35
电站 C	-	<b>248.16</b>	-	-	<b>77.25</b>	-	-	<b>100.49</b>	-
电站 D	118.19	135.07	16.88	38.08	41.56	3.48	289.06	265.84	-23.22
电站 E	163.1	163.58	0.48	53.59	58.87	5.28	135.42	90.58	-44.84

Continued

电站 F	113.09	111.36	-1.73	35.16	38.35	3.19	142	83.25	-58.75
电站 G	838.55	990.72	152.17 (18.15%)	152.17	164.28	12.11 (7.96%)	0	0	0
电站 H	360.1	405.45	45.35	62.61	67.17	4.56	0	0	0
电站 I	363.82	405	41.18	60.17	63.92	3.75	0	0	0
电站 J	924.2	924.66	0.46 (0.05%)	182.39	192.16	9.77 (5.36%)	0	0	0
电站 K	289.39	289.39	0	60.48	63.55	3.07	0	0	0
调节性能较弱的电站	1595.04	1697.2	102.16 (6.40%)	370.91	394.23	23.33 (6.29%)	1664.98	1533.82	-131.16 (-7.88%)
电站总计	3357.79	3860.74	502.95 (14.98%)	705.47	827.92	122.45 (17.36%)	1664.98	1634.31	-30.67 (-1.84%)

### 2) 时间变化 - 汛枯比

分别统计丰、平、枯水期的电量指标，然后计算各个水库的枯丰日电量比，如表 4 所示。电站 C 投产后，电站 D、电站 E、电站 F 丰水期电量分别增加 6.37%、7.67%、6.77%，枯水期分别增加 18.11%、17.65%、16.70%；电站 G、电站 H、电站 I、电站 G、电站 K 丰水期电量分别增加 9.94%、7.78%、8.87%、5.02%和 6.54%，枯水期电量分别增加 6.63%、8.27%、2.50%、8.86%和 2.72%。分析可知电站 C 建设运行后，电站 D、电站 E、电站 F 枯水期的电量有效提高。电站 C 与已建成的龙头电站——电站 G、电站 J 的共同作用，充分发挥了大水电的蓄丰补枯能力，从而实现电站 C 下游调节性能较弱的水电站群丰水期电能向枯水期转移。

Table 4. The power generation of electric warfare in three periods of wet, low and dry

表 4. 各电站丰、平、枯三个时期的发电量

电站	模型	总电量 (亿 KW·h)	丰水期 (亿 KW·h)	电站 C 投产后 电量增长比	平水期 (亿 KW·h)	枯水期 (亿 KW·h)	电站 C 投产后 电量增长比	枯丰日 电量比
电站 A	Model 1	42.39	29.91	0%	5.65	6.83	0%	0.23
	Model 2	42.39	29.91		5.65	6.83		0.23
电站 B	Model 1	18.43	12.80	0%	2.54	3.09	0%	0.24
	Model 2	18.42	12.80		2.54	3.09		0.24
电站 C	Model 1	-	-	-	-	-	-	-
	Model 2	77.25	53.41		10.42	13.42		0.25
电站 D	Model 1	38.08	26.67	6.37%	5.17	6.24	18.11%	0.23
	Model 2	41.56	28.37		5.81	7.37		0.26
电站 E	Model 1	53.59	38.05	7.67%	7.03	8.50	17.65%	0.22
	Model 2	58.87	40.97		7.90	10.00		0.24
电站 F	Model 1	35.16	24.83	6.77%	4.58	5.75	16.70%	0.23
	Model 2	38.35	26.51		5.13	6.71		0.25
电站 G	Model 1	152.17	91.17	9.94%	18.78	42.22	6.63%	0.46
	Model 2	164.28	100.23		19.03	45.02		0.43
电站 H	Model 1	62.61	36.90	7.78%	7.93	17.78	8.27%	0.48
	Model 2	67.17	39.77		8.15	19.25		0.45

Continued								
电站 I	Model 1	60.17	35.29	<b>8.87%</b>	7.66	17.21	<b>2.50%</b>	0.49
	Model 2	63.92	38.42		7.86	17.64		0.46
电站 J	Model 1	182.39	108.33	<b>5.02%</b>	24.64	49.42	<b>8.86%</b>	0.46
	Model 2	192.16	113.77		24.60	53.80		0.44
电站 K	Model 1	60.48	35.64	<b>6.54%</b>	8.26	16.57	<b>2.72%</b>	0.46
	Model 2	63.55	37.97		8.57	17.02		0.45
调节性能较弱 电站总计	Model 1	370.89	240.10	6.08%	48.82	81.97	7.26%	<b>0.34</b>
	Model 2	394.23	254.71		51.61	87.92		<b>0.35</b>
梯级总计	Model 1	705.45	439.60	6.62%	92.24	173.61	7.56%	<b>0.39</b>
	Model 2	750.68	468.71		95.23	186.73		<b>0.40</b>

### 4.3. 控制型水库建设运行对水电站群补偿效益分析

分别对 Model 1 和 Model 2 梯级水电站群实施联合优化调度计算, 探索控制型电站 C 的投产对下游水电站群产生的补偿效益。假设电站 G 平水期电价为 0.3 元/千瓦时, 乘以对应系数可求得其他水电站电价, 电站 C 投产前后对梯级产生的效益及补偿效益如表 5 所示。电站 C 的建设运行能提高整个梯级的发电收入。随着电站 C 的投产, 梯级整体的发电收入提高了 28.33 亿元(增长率提高了 18.03%)。其中, 电站 C 下游电站整体的发电收入增加了 10.18 亿元(提高了 6.49%); 电站 G 和电站 J 两个多年调节的水电站发电效益分别提升了 3.31 和 2.56 亿元(增长率提高了 7.65%和 5.61%)。分析可知电站 C 建设运行后与已建成的龙头电站——电站 G、电站 J 的共同作用, 充分发挥了大水电的调节能力, 提高整个梯级的发电收入, 可补偿电站 C 一定的开发成本。

**Table 5.** The benefits and compensation benefits of cascade before and after the operation of controlled reservoir (Station C)

**表 5.** 控制性水库: 电站 C 投产前后对梯级产生的效益及补偿效益

电站	电站 C 投产前	电站 C 投产后	补偿效益/亿元	电站 C 投产后提升的效率占比(%)
电站 A	7.14	7.14	0	0.00%
电站 B	2.61	2.61	0	0.00%
电站 C	-	18.14	-	-
电站 D	6.22	6.83	0.61	9.81%
电站 E	10.17	11.23	1.06	10.42%
电站 F	5.25	5.76	0.51	9.71%
电站 G	43.26	46.57	3.31	<b>7.65%</b>
电站 H	10.18	10.92	0.74	7.27%
电站 I	12.54	13.26	0.72	5.74%
电站 J	45.61	48.17	2.56	<b>5.61%</b>
电站 K	14.11	14.79	0.68	4.82%
调节性能较弱电站总计	68.22	72.54	4.32	6.33%
梯级总计	157.09	185.42	28.33	<b>18.03%</b>

#### 4.4. 最大化的最小出力值取值对性能指标影响分析

既定的最大化的最小出力值分别取 0.2、0.25、0.3、0.35 和 0.4 倍的最大出力( $\bar{N}_i$ )来验证最大化的最小出力值取值对动能指标的影响, 结果如图 3 所示。最大化的最小出力值取 0.3 倍的最大出力动能指标预较其他四种取值有显著提高, 其中弃水、调节性能较弱的电站发电量和发电总量总体上接近, 调节性能较弱的电站最小出力总计和汛枯比有显著提高。具体动能指标如表 6 所示。

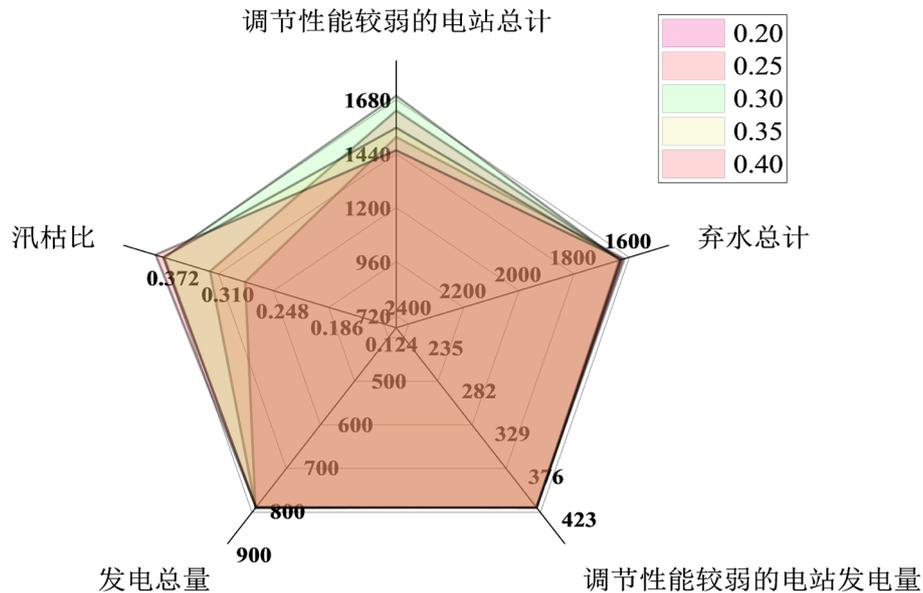


Figure 3. Radar chart of the performance indexes of cascade hydropower stations under different maximized minimum output values

图 3. 不同最大化的最小出力值取值下的梯级水电站的性能指标雷达图

Table 6. The performance indexes values of cascade hydropower stations under different maximized minimum output values

表 6. 不同最大化的最小出力值取值下的梯级水电站的性能指标值

既定的最大化的最小出力取值	$0.2 \bar{N}_i$	$0.25 \bar{N}_i$	$0.3 \bar{N}_i$	$0.4 \bar{N}_i$	$0.5 \bar{N}_i$
调节性能较弱的电站最小出力总计/MW	1513.59	1631.00	1697.20	1555.21	1454.85
弃水总计/亿 $m^3$	1616.92	1630.49	1634.32	1629.83	1624.08
调节性能较弱的电站发电量/亿 KW·h	393.72	393.98	394.23	394.45	394.48
发电总量/亿 KW·h	829.55	828.78	827.93	827.45	827.49
汛枯比	0.29	0.33	0.38	0.38	0.39

## 5. 结论

本文研究了单主体下的梯级水电站群补偿效益, 通过构建多目标梯级长期优化调度模型, 对比分析控制性水库建设运行前后的梯级各水电站的特点, 指出了单主体下电站 C 投产后的梯级水电站群的补偿规律。通过对西南某流域梯级水电站群的研究可以发现: 电站 C 建设运行后与已建成的龙头电站——电站 G、电站 K 共同作用, 充分发挥了大水电的蓄丰补枯能力和调节能力, 从空间变化角度分析: 电站 C 的投产可以增加使整个梯级水电站群最小出力增加 502.95 MW, 多年平均年发电量增加了 122.45 亿 KW·h, 同时弃水流量减少了 30.67 亿  $m^3$ 。从时间变化角度分析, 电站 C 的投产可以实现其下游调节性能较弱的电站丰水期电量向枯水期转移。从补偿效益上看电站 C 水库的建设运行能对其下游和整个梯级产生显著的补偿效益; 从最大化的最小出力值取值分

析,最大化的最小出力值取 0.3 倍的最大出力梯级整体动能指标最优。

## 参考文献

- [1] 申建建, 张秀飞, 王健, 等. 求解水电站日负荷优化分配的混合整数非线性规划模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 34-40.  
SHEN Jianjian, ZHANG Xiufei, WANG Jian, et al. Mixed-integer nonlinear programming model for daily load optimization of hydropower plant. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 34-40. (in Chinese)
- [2] 王金文, 石琦, 伍永刚, 等. 水电系统长期发电优化调度模型及其求解[J]. 电力系统自动化, 2002(24): 22-25.  
WANG Jinwen, SHI Qi, WU Yonggang, et al. Long-term optimal dispatch model of hydropower system and its solution. Automation of Electric Power Systems, 2002(24): 22-25. (in Chinese)
- [3] 刘宁. 三峡-清江梯级电站联合优化调度研究[J]. 水利学报, 2008(3): 264-271.  
LIU Ning. Research on joint optimal dispatching of Three Gorges-Qingjiang River step power station. Journal of Hydraulic Engineering, 2008(3): 264-271. (in Chinese)
- [4] 周彬彬. 两库多级梯级水电站群补偿调度研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2016.  
ZHOU Binbin. Research on the compensation scheduling of two reservoirs and multi-stage step hydropower plant group. Master's Thesis, Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [5] 唐海华, 胡挺, 梅亚东, 王建军, 刘俊伟. 长江上游控制型梯级水库群联合补偿效益分析[J]. 水电自动化与大坝监测, 2012, 36(3): 61-65+80.  
TANG Haihua, HU Ting, MEI Yadong, WANG Jianjun and LIU Junwei. Analysis of the joint compensation benefits of a controlled group of graded reservoirs in the upper Yangtze River. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2012, 36(3): 61-65+80. (in Chinese)
- [6] 白涛, 黄强, 陈广圣, 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, 41(5): 189-195.  
BAI Tao, HUANG Qiang, CHEN Guangsheng, et al. Analysis of the compensation benefits of the Yellow River main stream gradient based on the optimal scheduling of reservoir group. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2013, 41(5): 189-195. (in Chinese)
- [7] 赵国杰, 杨敏. 基于动态规划的梯级水电站长期优化调度研究[J]. 水利水电工程设计, 2006(4): 44-46+49.  
ZHAO Guojie, YANG Min. Research on long-term optimal scheduling of step hydropower station based on dynamic planning. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2006(4): 44-46+49. (in Chinese)
- [8] 赵宏焯, 廖胜利, 李刚, 等. 一洞多机引水式水电站短期负荷分配方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 80-86.  
ZHAO Hongye, LIAO Shengli, LI Gang, et al. Short-term load distribution method for diversion hydropower plant with multiple turbines in one tunnel. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 80-86. (in Chinese)
- [9] 周东清, 彭世玉, 程春田, 等. 梯级水电站群长期优化调度云计算随机动态规划算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3437-3448+3671.  
ZHOU Dongqing, PENG Shiyu, CHENG Chuntian, et al. Cloud computing stochastic dynamic planning algorithm for long-term optimal scheduling of a cluster of terraced hydropower plants. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3437-3448+3671. (in Chinese)
- [10] 赵志鹏, 廖胜利, 程春田, 等. 梯级水电站群中长期优化调度的离散梯度逐步优化算法[J]. 水利学报, 2018, 49(10): 1243-1253.  
ZHAO Zhipeng, LIAO Shengli, CHENG Chuntian, et al. Discrete gradient stepwise optimization algorithm for medium- and long-term optimal scheduling of a cluster of graded hydropower plants. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(10): 1243-1253. (in Chinese)
- [11] 张政, 武新宇, 程春田, 等. 复杂约束下梯级水电站短期厂网协调多目标 MILP 模型[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 197-205.  
ZHANG Zheng, WU Xinyu, CHENG Chuntian, et al. Multi-objective mixed-integer linear programming model for short-term coordination of power plants and power grid in cascaded hydropower station under complex constraints. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 197-205. (in Chinese)
- [12] 赵志鹏, 刘杰, 程春田, 等. 考虑回水顶托影响的梯级库群日前调峰 MILP 模型[J]. 水利学报, 2019, 50(8): 925-935.  
ZHAO Zhipeng, LIU Jie, CHENG Chuntian, et al. A MILP model for day-ahead peak regulation in a group of terrace reservoirs considering the effect of backwater top support. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(8): 925-935. (in Chinese)
- [13] 范金骥. 基于改进模拟退火遗传算法的梯级水电站长期优化调度[J]. 分布式能源, 2017, 2(4): 20-28.  
FAN Jinji. Long-term optimal scheduling of terraced hydropower plants based on improved simulated annealing genetic algorithm. Distributed Energy, 2017, 2(4): 20-28. (in Chinese)
- [14] 张俊涛, 申建建, 程春田, 等. 耦合目标接近度和边际分析原理的梯级水电站多目标优化调度方法[J]. 中国电机工程学

- 报, 2019, 39(5): 1268-1277.  
ZHANG Juntao, SHEN Jianjian, CHENG Chuntian, et al. Multi-objective optimal operation of cascade hydropower stations based on objective adjacent scale and marginal analysis principle. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1268-1277. (in Chinese)
- [15] 张宇航, 唐超, 姚李孝. 基于改进粒子群算法的梯级水电站长期优化调度研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(6): 59-63.  
ZHANG Yuhang, TANG Chao and YAO Lixiao. Research on long-term optimal scheduling of terrace hydropower plants based on improved particle swarm algorithm. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(6): 59-63. (in Chinese)
- [16] 张艳华, 黄静梅, 黄景光, 等. 基于改进粒子群算法的梯级水风光短期调峰优化调度[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(12): 4993-5000.  
ZHANG Yanhua, HUANG Jingmei, HUANG Jingguang, et al. Optimal scheduling of cascaded hydro-wind-photovoltaic short term peak shaving based on improved particle swarm optimization algorithm. Science Technology and Engineering, 2022, 22(12): 4993-5000. (in Chinese)
- [17] 林越峰, 蒋达, 杜文莉. 一种求解混合整数非线性规划问题的混合优化方法[J]. 计算机与应用化学, 2014, 31(12): 1447-1451.  
LIN Yuefeng, JIANG Da and DU Wenli. A hybrid optimization method for solving mixed integer nonlinear programming problems. Computers and Applied Chemistry, 2014, 31(12): 1447-1451. (in Chinese)
- [18] 江方利, 湛洋, 刘刚, 等. 基于改进花粉算法的梯级水电站多目标优化[J]. 水力发电, 2018, 44(1): 90-93.  
JIANG Fangli, ZHAN Yang, LIU Gang, et al. Multi-objective optimization of terrace hydro-power plants based on improved pollen algorithm. Water Power, 2018, 44(1): 90-93. (in Chinese)
- [19] 叶凌箭, 钟伟红, 宋执环. 基于分段线性化法的改进自主优化控制[J]. 自动化学报, 2013, 39(8): 1231-1237.  
YE Lingjian, ZHONG Weihong and SONG Zhihuan. Improved autonomous optimal control based on segmental linearization method. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(8): 1231-1237. (in Chinese)
- [20] 陈东, 刘振华. 求解点堆中子动力学方程的三角插值法[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(10): 1195-1200.  
CHEN Dong, LIU Zhenhua. Triangular interpolation method for solving the neutron dynamics equations of point stacks. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(10): 1195-1200. (in Chinese)
- [21] 文畅平. 公路平面线形设计的多项式曲线拟合法[J]. 勘察科学技术, 2007(3): 30-32.  
WEN Changping. Polynomial curve fitting method for highway plan alignment design. Site Investigation Science and Technology, 2007(3): 30-32. (in Chinese)