

# Optimal Daily Operation of Cascade Hydropower Stations

Liping Li, Shenglian Guo, Yanlai Zhou, Guang Yang

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resource Security, Wuhan  
Email: [liliping@whu.edu.cn](mailto:liliping@whu.edu.cn)

Received: Jun. 20<sup>th</sup>, 2014; revised: Jun. 27<sup>th</sup>, 2014; accepted: Jul. 14<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Daily operation models for cascade hydropower stations were proposed and developed in this paper. The dynamic programming (DP) was used to solve daily optimal operation for two deterministic models with the goal of maximizing the hydropower generation and minimizing turbine discharge of the cascade hydropower stations, respectively. The inflow (from July to December in 2013) and corresponding real-time hydropower record data were used. The optimal result showed that hydropower generation can be increased from 0.581 billion kW·h to 0.648 billion kW·h (or an increase 11.54%) and turbine discharge of the cascade hydropower stations can be decreased from 2.92 billion m<sup>3</sup> to 2.89 billion m<sup>3</sup> (or a decrease of 0.89%) compared with current operation method. The assurance rate of firm output can be increased from 92% to 100%.

## Keywords

Reservoir, Cascade Hydropower Station, Dynamic Programming, Daily Optimal Operation

---

# 梯级水电站群日优化调度模型及应用

李立平, 郭生练, 周研来, 杨光

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉  
Email: [liliping@whu.edu.cn](mailto:liliping@whu.edu.cn)

作者简介: 李立平(1988-), 男, 博士研究生, 研究方向为水资源开发利用。

收稿日期：2014年6月20日；修回日期：2014年6月27日；录用日期：2014年7月14日

## 摘要

采用以水定电和以电定水两种运行方式，分别以发电量最大和总耗水量最小为目标函数，建立了梯级水电站群日优化调度模型，并采用动态规划方法进行求解。使用梯级水电站群日发电资料和径流资料(2013年7月~12月)的应用检验结果表明，优化调度较实际调度提高发电量约0.67亿kW·h(增加11.54%)和减少耗水量0.26亿m<sup>3</sup>(减少-0.89%)，发电保证率由92%提高到100%，显著提高了水电站群的发电效益。

## 关键词

水库，梯级水电站，动态规划，日优化调度

## 1. 引言

小水电作为清洁可再生能源，已成为我国水利事业近几十年的发展热点，我国小水电可开发量占全国水电资源可开发量的23%，开发应用前景广阔[1][2]。然而小水电机组效率低、自动化程度不高，需要深入研究小水电短期优化运行理论，以提高管理水平、运行可靠性和增加发电效益。短期日优化调度运行具有典型意义，是短期优化调度中的关键环节[3]。通常日优化运行主要分为以下两种方式：1) 以电定水模式：即在给定水电站群日负荷图的条件下，使水电站群中某些有调节能力水电站日耗用水量最小。2) 以水定电模式：在满足电力系统调峰基本要求及给定某些有调节能力水电站日用水量的条件下，使水电站群日发电量(或发电效益)最大。梯级水电站群短期优化调度是一个多维、多约束、动态、非线性优化问题，是水电系统运行中的一个国际难题。对于该问题，国内外学者通常使用等微增率法[4]、经典动态规划及其改进算法[4][5](如POA、DDDP、DPSA算法)以及近期出现的人工智能算法[6](如GA、ANN、PSO)等。但是这些方法都存在一些局限性，没有形成一种通用的算法，实际应用中只能根据具体研究内容，选择适合的算法进行改进求解。

本文采用以水定电和以电定水两种运行方式，分别以发电量最大和总耗水量最小为目标函数，建立确定性梯级水电站群日优化调度模型，采用动态规划算法进行模型求解，最后对优化结果同常规调度结果进行对比分析，以验证两种运行方式的合理性和可行性。

## 2. 短期优化调度数学模型

### 2.1. 以水定电模式(I)

以水定电运行模式是梯级电站制定计划上报电网的过程，在考虑水库蓄水位、电厂出力、下泄流量等约束前提下，给定梯级水库的发电可用水量，制定各梯级电站的发电计划，合理调整梯级之间的蓄放水次序，利用有限的水能发挥最大的经济效益。对于小水电来说，一般不用考虑供水、航运等目标，目标函数通常选取发电量最大或者发电效益最大即可。

#### 2.1.1. 目标函数

发电量最大的调度模型为：

$$\max J = \sum_{t=1}^T E_t = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^M P_{kt} \cdot \Delta t \quad (1)$$

在电力市场机制下，发电企业不能简单只考虑发电量最大，综合考虑水电上网电价，尽量多发高价电量，少发低价电量，追求控制期内发电效益最大更适合电力市场当前发展形式的需要，发电效益最大的调度模型如下：

$$\max B = \sum_{t=1}^T C_t \cdot E_t \quad (2)$$

式中， $J$  是总发电量， $B$  是总发电效益， $T$  为总调度时段， $M$  为水电站数目， $E_t$  是系统第  $t$  时段的发电量， $P_{kt}$  是第  $k$  个电站在  $t$  时段的出力， $\Delta t$  是时段长； $C_t$  是第  $t$  时段的电价或反映电能价值的系数。

### 2.1.2. 约束条件

1) 水库日用水量约束

$$\sum_{t=1}^T Q_{k,t} \cdot \Delta t = W_k \quad (3)$$

式中， $Q_{k,t}$  是第  $k$  电站在  $t$  时段的发电引用流量， $W_k$  是第  $k$  电站一天内的计划用水量。

2) 水库水量平衡方程

$$V_{k,t+1} = V_{k,t} + (I_{k,t} - Q_{k,t} - QW_{k,t}) \Delta t \quad (4)$$

式中， $V_{k,t}, V_{k,t+1}$  分别是第  $k$  电站在  $t$  时段始末蓄水量， $I_{k,t}, Q_{k,t}, QW_{k,t}$  分别是第  $k$  电站在第  $t$  时段入库流量、发电用水流量和其他用水流量，在这里暂不考虑弃水变化。

3) 梯级电站间水流联系

$$I_{k,t} = IL_{k,t} + Q_{k,t} \quad (5)$$

式中， $IL_{k,t}$  是第  $k$  电站在第  $t$  时段区间入流。

4) 电站出力约束

$$PMIN_{k,t} \leq P_{k,t} \leq PMAX_{k,t} \quad (6)$$

式中， $PMIN_{k,t}$  是允许最小出力(取决于水轮机的种类和特性)， $PMAX_{k,t}$  是在  $t$  时刻某水头下的电站发电能力。

5) 机组最大过水能力约束

$$Q_{k,j} \leq Q^*(N, H) \quad (7)$$

式中， $Q^*(N, H)$  是水头为  $H$  时水轮机的最大过水能力。

6) 水库库容约束

$$V_{k,\min} \leq V_{k,t} \leq V_{k,\max} \quad k = 1, \dots, N \quad (8)$$

式中， $V_{k,\min}$  是  $t$  时段应保证的水库最小蓄水量， $V_{k,\max}$  是  $t$  时段允许的水库最大蓄水量，如汛期防洪限制等。

7) 水库下泄流量约束

$$Q_{\min} \leq Q_k \leq Q_{\max} \quad (9)$$

式中， $Q_{\min}$  是  $t$  时段保证下游综合用水要求的最小下泄流量， $Q_{\max}$  为  $t$  时段允许的电站最大下泄流量。

8) 全厂最优流量特性

$$Q_{k,j}^* = Q(P_{k,j}, H_{k,j}) \quad k = 1, \dots, N \quad j = 1, \dots, n \quad (10)$$

式中,  $Q_{k,j}^*$  是第  $k$  电站的第  $j$  台机组在一定水头  $H_{k,j}$  和出力  $P_{k,j}$  条件下最优的发电流量。

## 2.2. 以电定水模式(II)

以电定水运行模式是电网以电厂上报的发电计划为依据, 在系统用电负荷平衡前提下, 给电站下发的实际发电指令。电厂按照给定的电力负荷图, 选择恰当的调度模型进行厂间负荷分配, 追求梯级电站耗水量少、耗能量少以及期末蓄能大等目标。对于小水电来说, 通常选取梯级电站耗水量最小准则即可。

### 2.2.1. 目标函数

系统耗水量最小的调度模型为:

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^M Q_k(P_{kt}) \cdot \Delta t \quad (11)$$

式中,  $F$  是梯级总耗水量,  $Q_k(P_{kt})$  是第  $k$  电站在  $t$  时段出力为  $P_{k,t}$  时的发电流量。

### 2.2.2. 约束条件

约束条件同以水定电模式相似, 除了上述约束外还有:

1) 系统负荷平衡约束

$$\sum_{k=1}^N P_{k,t} = P_t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (12)$$

式中,  $P_t$  是第  $t$  时段给定梯级负荷,  $P_{k,t}$  是第  $k$  电站在第  $t$  时段出力。

2) 梯级电站出力限制

$$P_{kD,t} \leq P_{k,t} \leq P_{kU,t} \quad k = 1, \dots, N \quad t = 1, \dots, T \quad (13)$$

式中,  $P_{kD,t}$  是第  $k$  电站在第  $t$  时段出力下限,  $P_{kU,t}$  是第  $k$  电站在第  $t$  时段出力上限, 它们是综合考虑保证出力, 气蚀振动区限制以及电站在不同水头下最大出力等因素的基础上确立的。

## 2.3. 模型求解

对于多阶段决策的水电站群优化调度问题, 通常采用动态规划方法求解[4]-[7]。为避免计算中会出现的“维数灾”问题, 可采用动态规划的改进算法进行求解, 如离散微分动态规划法(DDDP)、动态规划逐次渐进法(DPSA)以及逐次优化方法(POA)等优化方法求解。文献[8] [9]表明: 对于水库数目较少时(3~5个水库), 使用动态规划方法即可得到理论最优值。

本文采用以水定电和以电定水两种运行方式, 分别以梯级水电站群发电量最大和耗水量最小为目标, 加入发电保证率约束, 采用动态规划方法进行模型求解, 求解步骤参照文献[4]和文献[5]。

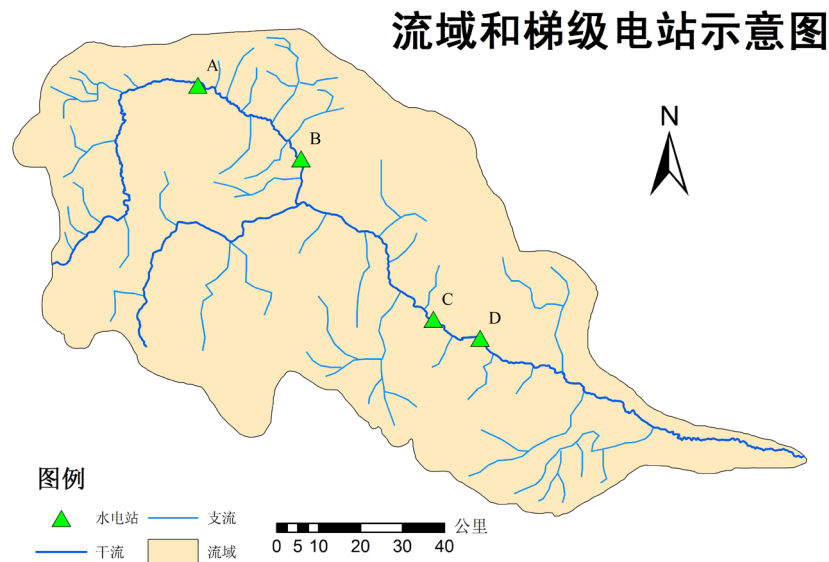
## 3. 实例研究

### 3.1. 研究区域概况

本文以中国南方某梯级水电站群为例, 该流域采用“一库四级”开发方案, 从上至下依次为 A、B、C、D 四个电站。梯级总装机容量为 369 MW, 年均发电量 15.71 亿 kW·h, 上游龙头 A 电站具有年调节能力, 汛期为 5~9 月, 一般在 10 月底蓄至正常蓄水位 2370 m, 11 月水库开始进入枯水期, 直至 4 月末水库水位消落到死水位。A 水库无防洪、航运、供水、灌溉等综合利用要求, 为满足闸址下游减水河段的生态用水要求, 常年保持下泄生态流量 1.8 m<sup>3</sup>/s。B、C、D 电站只具有日调节能力, 各个水电站的详细设计参数如表 1 所示, 梯级水电站相对位置示意图如图 1 所示。

**Table 1.** Design parameters of the cascade hydropower stations  
**表 1.** 梯级水电站群参数表

电站	A	B	C	D
集水面积(km <sup>2</sup> )	1311	2501	4408	5127
调节库容(万 m <sup>3</sup> )	4915	52.9	7.48	7.8
正常高水位(m)	2370	1782	1377.5	1272
死水位(m)	2320	1775	1376	1270.5
装机容量(MW)	100	86	81	102
保证出力(MW)	26	25.5	20.5	22.8
年均发电量(亿 kW·h)	3.947	3.98	3.515	4.266
调节性能	年调节	日调节	日调节	日调节



**Figure 1.** Location of the four hydropower reservoir systems  
**图 1.** 流域和四个梯级电站示意图

### 3.2. 计算结果分析

根据已有的梯级水电站群日实测发电资料和径流资料(2013年7月~12月),建立确定性日优化调度模型,分别采用以水定电和以电定水模式方式对该梯级水电站群进行优化调度。确定性优化调度是在对来水完全已知的条件下计算得出,因此可以作为理论最优调度结果,作为决策参考的依据。以水定电和以电定水计算的统计结果如表2和表3所示。1)以水定电模式:梯级水电站群保证出力取100MW,按照以水定电模式进行优化计算,由于实际发电资料较短,以发电量最大和发电效益最大优化结果相同,梯级水电站群实际总发电量为5.81亿kW·h,优化模型发电量为6.48亿kW·h,增发0.67亿kW·h,增幅为11.54%,梯级发电保证率由92%提高到100%,整体水量利用率达到93.07%,显示较大的优化潜力。2)以电定水:以耗水量最小为目标函数,按照以电定水模式对各个水电站进行优化计算。该梯级水电站总耗水量为29.17亿m<sup>3</sup>,优化后耗水为28.91亿m<sup>3</sup>,节约用水量0.26亿m<sup>3</sup>,变幅为-0.89%。

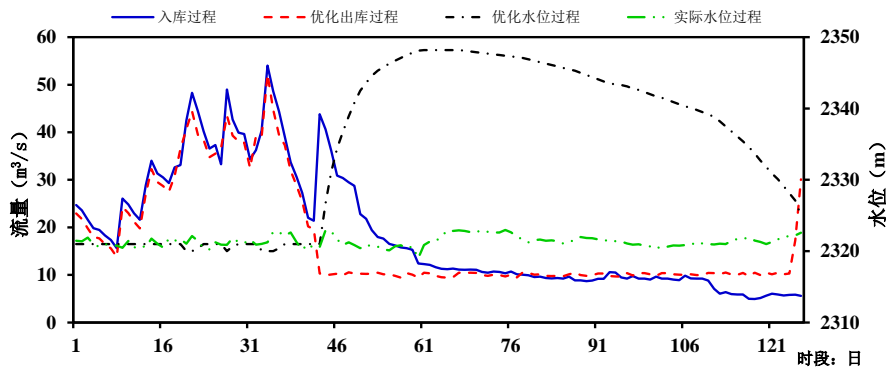
A水库以水定电和以电定水的逐日实际水位运行过程和优化水位运行过程分别如图2和图3所示。

**Table 2.** Comparison of operation results for hydropower generation  
**表 2.** 梯级水电站群以水定电模式实际和优化结果统计表

电站	A	B	C	D	合计	
电量指标	实际发电量(亿 kW·h)	1.30	1.39	1.42	1.70	5.81
	优化发电量(亿 kW·h)	1.34	1.52	1.66	1.96	6.48
	增幅(%)	3.14	9.75	17.09	14.88	<b>11.54</b>
经济指标	实际发电效益(亿元)	0.31	0.33	0.35	0.42	1.41
	优化发电效益(亿元)	0.33	0.38	0.42	0.49	1.61
	增幅(%)	8.60	12.94	18.54	15.63	<b>14.57</b>
水量指标	耗水量(亿 m <sup>3</sup> )	1.84	3.13	6.52	7.70	19.19
	弃水量(亿 m <sup>3</sup> )	0.02	0.59	0.35	0.46	1.43
	水量利用率(%)	98.68	84.17	94.87	94.33	<b>93.07</b>

**Table 3.** Comparison of operation results for turbine discharge of cascade hydropower stations  
**表 3.** 梯级水电站群以电定水模式实际和优化结果统计表

电站	A	B	C	D	合计
实际耗水量(亿 m <sup>3</sup> )	1.80	5.44	9.95	11.98	<b>29.17</b>
优化耗水量(亿 m <sup>3</sup> )	1.66	5.39	9.9	11.96	<b>28.91</b>
变幅(%)	-7.45	-1.08	-0.55	-0.19	<b>-0.89</b>



**Figure 2.** Comparison of water levels of Reservoir A using model (II)  
**图 2.** A 水库以水定电模式实际水位运行过程与优化调度过程对比图

从图 2 中可以看出在优化调度过程中 A 水库在汛期适当减小出流，抬高水位，这样可以避免下游电站弃水，增加非汛期发电水头；在非汛期加大出流，增大枯期的平均出力。以发电量最大模型和发电效益最大模型计算结果相同的原因在于：调度期相对较短，只能反映了丰枯电价之间的差别，汛期按照汛限水位运行，没有优化空间。若将时段再缩短至小时或者 15 分钟，可以进一步体现出峰谷电价的差别。在以电定水模式中，从图 3 中可以看出，通过梯级水电站间优化分配负荷，可以减少梯级发电总耗水量，优化水位运行过程可以适当的提高。

#### 4. 结语

本文建立了梯级水电站群优化调度模型，采用以水定电和以电定水两种运行方式，分别以发电量最

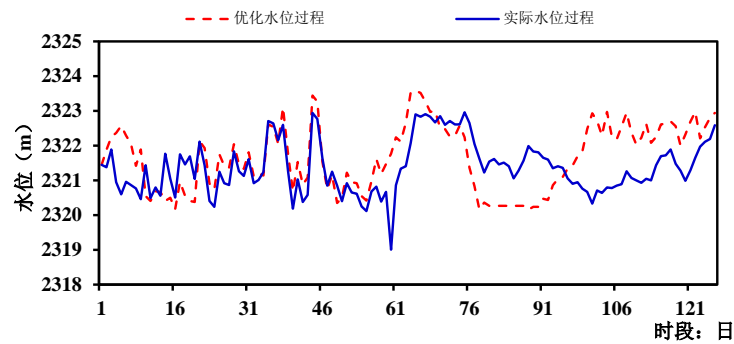


Figure 3. Comparison of water levels of Reservoir A using model (II)

图 3. A 水库以电定水模式实际水位过程与优化水位过程对比图

大和总耗水量最小为目标函数，进行梯级水电站群日优化调度。研究表明，开展梯级水电站群日优化调度，可以显著增加发电量，减少耗水量及提高发电保证率。日优化调度结果为梯级水电站的短期运行提供了基础，具有重要的现实意义。

### 参考文献 (References)

- [1] 陆佑楣. 我国水电开发与可持续发展[J]. 水力发电, 2010, (117): 1-4.  
LU Youmei. Chinese hydropower and sustained development. *Hydroelectric power*, 2010, (117): 1-4. (in Chinese)
- [2] 姜富华, 杜孝忠. 我国小水电发展现状及存在的问题[J]. 中国农村水利水电, 2004, (3): 82-86.  
JIANG Fuhua, DU Xiaozhong. Current situation and existing problems of small-scale hydropower plant in China. *China Rural Water and Hydropower*, 2004, (3): 82-86. (in Chinese)
- [3] 郭生练. 水库调度综合自动化系统[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000.  
GUO Shenglian. *Integrated automatic system for reservoir operation*. Wuhan: Wuhan University of Hydraulic and Electrical Engineering Press, 2000. (in Chinese)
- [4] 陈森林. 水电站水库运行与调度[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.  
CHEN Senlin. *Operation for hydropower plant and reservoir*. Beijing: China Electric Power Press, 2008. (in Chinese)
- [5] 刘攀, 郭生练, 柳晓甘, 等. 南津渡引水式径流电站日优化运行调度研究[J]. 水电能源科学, 2003, 21(1): 38-41.  
LIU Pan, GUO Shenglian, LIU Xiaogan, et al. Daily optimal and economic operation for the Nanjindu Hydropower Plant. *Water Resources and Power*, 2003, 21(1): 38-41. (in Chinese)
- [6] 贾嵘, 李阳, 丁建河, 等. 改进遗传算法在水电站日优化运行模型中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 77-80.  
JIA Rong, LI Yang, DING Jianhe, et al. Application of improved genetic algorithm in daily optimal operation model for hydropower stations. *Power System Technology*, 2005, 29(14): 77-80. (in Chinese)
- [7] 郭生练, 陈炯宏, 刘攀, 等. 水库群联合优化调度研究进展与展望[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 85-92.  
GUO Shenglian, CHEN Jionghong, LIU Pan, et al. State-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4): 85-92. (in Chinese)
- [8] TURGEON, A. Optimal short-term hydro scheduling from the principle of progressive optimality. *Water Resources Research*, 1981, 17(3): 481-486.
- [9] LABADIE, J. W. Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2004, 130(2): 93-111.