

# 雅砻江下游梯级水库生态友好型优化调度

梅亚东<sup>1</sup>, 杨 娜<sup>1</sup>, 翟丽妮<sup>2</sup>

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 湖北省水利水电科学研究所, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 根据雅砻江下游梯级水库水电站的布置和河道生态环境要求, 分别设置了两个流量控制断面: 锦屏二级电站引水闸址下减水河段、二滩电站坝址下游河段。针对这两个控制断面河道流量的要求, 提出了 25 组生态流量控泄方案, 建立了以梯级水电站群发电量最大为目标的长期优化调度模型, 并采用动态规划法进行求解, 获得各个方案下梯级水电站群多年平均发电量及水库调度出流过程。比较分析了减水河段生态流量及二滩水库泄流控制方案对发电量的影响, 定义并计算了生态需水电能损失指标。对梯级水库调度出流过程进行了初步评价。结果表明: 二滩水库出流维持天然径流模式, 将限制水库调节能力和减少梯级电站发电效益。

**关 键 词:** 水库; 发电; 生态友好型调度; 优化技术; 雅砻江

**中图分类号:** TV122      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2009)05-0721-05

为治理和开发利用河流, 在河流上筑坝建库调节径流, 在产生巨大的经济与社会效益同时, 严重影响了河流及相关区域生态的环境状况。近年来, 通过优化水库调度方式, 协调水库兴利要求和生态环境要求, 实现水库调度经济社会目标和生态目标的均衡, 即实现生态友好型水库调度开始得到重视<sup>[1-5]</sup>。如文献[1]基于居中干扰假设, 提出了生态流量过程的范式并以此构建了水库调度管理的生态目标, 然后与其它经济目标一起进行多目标优化; 文献[5]建立了基于生态流量过程线的水库优化调度模型并分析了生态环境目标对发电效益的影响。但是上述研究对象都是单库, 没有涉及梯级水库群调度问题。雅砻江下游河段共规划建设 5 个梯级水电站, 分别是锦屏一级、锦屏二级、官地、二滩、桐子林, 其中锦屏一级和二滩是年调节水库, 官地、桐子林仅有日调节能力, 锦屏二级则是一个引水式电站。锦屏二级电站引水后, 将在其引水闸址至发电厂址之间形成长达 119 km 的减水河段<sup>[6]</sup>。梯级水电站建成联合运行后, 可取得巨大的发电效益, 但也将改变雅砻江河道天然水流情势, 并对周围的生态环境造成一定的影响, 特别是减水河段, 流量减少后, 将导致该河段水深、流速、湿周减小, 水流形态、水温发生变化, 直接影响水生生物的生存环境<sup>[7]</sup>。因此, 开展生态友好型梯级水库调度研究很有必要。

## 1 耦合生态需水的梯级水库群长期优化调度模型

雅砻江下游梯级水库以发电为主, 其调度问题可以描述为: 给定调度控制期内径流过程, 在满足约束条件(包括生态需水要求)下使调度期内总发电量最大。设以月为单位将调度期划分为  $T$  个时段, 由于引水式电站、日调节电站的调节性能差, 建模时一般不考虑其调节流量作用, 本文研究对象为 2 个串联水库 5 个电站的长期调度问题。

以考虑梯级保证出力要求的梯级发电量最大为目标函数, 其表达式为

$$\max E = \sum_{t=1}^T [P_t - A(P_b - P_t)^K] t_t \quad (1)$$

收稿日期: 2008-07-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50779049)

作者简介: 梅亚东(1963-), 男, 湖北黄梅人, 教授, 主要从事水资源系统规划与管理研究。E-mail: ydmei@whu.edu.cn



为基准,各方案发电量减少百分比 0.78%~3.36%,保证率减少 0.2~6.9 个百分点,说明生态需水对梯级发电效益有一定影响,但程度有所不同。

表 1 各方案的年均发电量和历时保证率

Table 1 Mean annual power generation and the guarantee rate in each scheme

| 方案 | 减水河段流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) |       |            |       |            |       |            |       |            |       |
|----|---|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
|    | 36  |       | 45         |       | 60         |       | 85         |       | 120        |       |
|    | 发电量/(GW·h)                                  | 保证率/% | 发电量/(GW·h) | 保证率/% | 发电量/(GW·h) | 保证率/% | 发电量/(GW·h) | 保证率/% | 发电量/(GW·h) | 保证率/% |
| A1 | 78302.7                                     | 99.59 | 78147.7    | 98.78 | 77886.4    | 98.78 | 77446.9    | 98.17 | 76827.4    | 98.17 |
| A2 | 78299.7                                     | 99.59 | 78144.8    | 98.78 | 77883.5    | 98.78 | 77444.0    | 98.17 | 76824.5    | 98.17 |
| A3 | 78146.0                                     | 99.39 | 77989.6    | 98.78 | 77725.2    | 98.99 | 77280.8    | 97.36 | 76651.7    | 97.16 |
| A4 | 77948.3                                     | 97.97 | 77789.1    | 97.97 | 77521.9    | 97.57 | 77069.0    | 96.76 | 76426.8    | 95.74 |
| A5 | 77778.2                                     | 98.99 | 77620.4    | 98.17 | 77355.8    | 98.17 | 76911.0    | 97.36 | 76266.2    | 92.90 |

在减水河段生态需水相同时,二滩控泄方案从 A1 到 A5,总发电量逐渐减少,但方案 A2(对应 Tenant 法)是个拐点。说明二滩出流下限按 Tenant 法确定,对总发电量影响比较小。对每个二滩控泄方案,减水河段生态流量增加,总发电量减少。为量化其影响,定义一个生态需水电能损失量指标:

$$r_{ab} = \frac{E}{Q_c} = \frac{E_b - E_a}{Q_{ca} - Q_{cb}} \quad (4)$$

式中  $E_a$ 、 $E_b$  分别为方案  $a$ 、 $b$  的发电量;  $Q_{ca}$ 、 $Q_{cb}$  分别为方案  $a$ 、 $b$  的生态流量。

将基本方案记为 0,减水河段生态需水 36, 45, 60, 85 和 120  $\text{m}^3/\text{s}$  方案分别记为 1, 2, 3, 4 和 5, 计算各方案生态需水电能损失量指标,列入表 2。从表 2 可见,除 A1 方案外,二滩 A2~A5 方案减水河段生态流量 45  $\text{m}^3/\text{s}$  时,生态需水电能损失量指标达到极小值。

计算结果还表明,各个电站的发电量受流量控泄方案的影响明显不同。锦屏二级受影响最大,二滩次之,锦屏一级稍微受影响,桐子林和官地几乎不受影响。这与各个电站位置和调节能力有关。由于锦屏二级引水流量大小直接与减水河段流量有关,因此其多年平均发电量随减水河段生态流量增加而明显减少,且与二滩控泄方案无关。而二滩电站由于下游河道生态需水要求对调度方式限制,导致发电量变化。此外,各方案下锦屏一级水库调度方式几乎没有变化,说明其下游的生态需水对其以发电为主的调度方式影响甚小。

表 2 各方案生态需水电能损失量指标

Table 2 Comparison of power losses to ecological flow needs

| 方案 | 电能损失指标   |          |          |          |          |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|
|    | $r_{10}$ | $r_{21}$ | $r_{32}$ | $r_{43}$ | $r_{54}$ |
| A1 | 0.1720   | 0.1722   | 0.1742   | 0.1758   | 0.1770   |
| A2 | 0.1728   | 0.1721   | 0.1742   | 0.1758   | 0.1770   |
| A3 | 0.2155   | 0.1738   | 0.1763   | 0.1778   | 0.1797   |
| A4 | 0.2704   | 0.1769   | 0.1781   | 0.1812   | 0.1835   |
| A5 | 0.3177   | 0.1753   | 0.1764   | 0.1779   | 0.1842   |

#### 4 梯级水库调节后出流过程初步评价

本文采用月流量的多年平均值、均方差及月流量最大值、最小值进行梯级水库调节后出流过程与天然流量过程的比较分析。图 1 表示减水河段生态流量 45  $\text{m}^3/\text{s}$  下二滩 A2、A5 方案下出流过程的均值及均方差及其与天然状况(N)的比较(方案 B、A1、A3、A4 与方案 A2 基本相同)。

从图 1 可见,受二滩水库调节影响,二滩出流过程与天然状况下有明显不同,在 6~10 月流量均值及均方差都较天然状况小,而均值在 1~5 月则较天然状况大。此外,在 1~5 月方案 A5 与其它方案比较,差异较为明显。为进一步比较各调控方案下调节后泄流过程的变异程度,以天然径流过程为理想模式<sup>[8]</sup>,采用理想点距离法,直观地刻画调度后泄流过程与天然径流过程之间的差异。各方案下二滩水库泄流过程与天然流量过程的距离  $\mu_j$  为

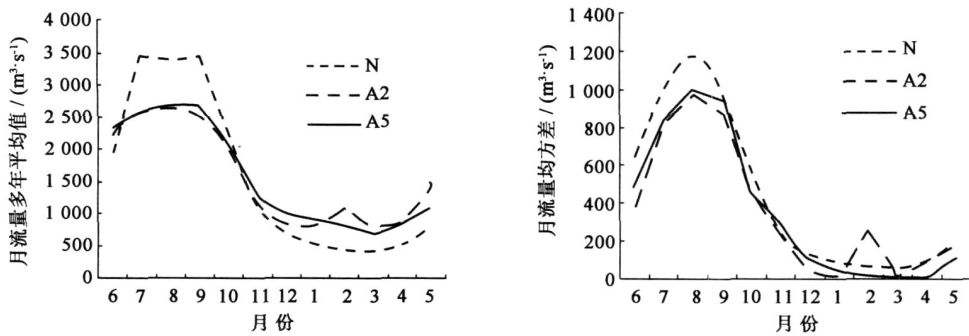


图1 二滩出流过程均值、均方差与天然状况的比较

Fig. 1 Comparison of mean value and standard deviation of the regulated discharge and the natural flow at Ertang

$$\mu_j = \sqrt{\sum_{t=1}^N (x_{jt} - x_t^*)^2} \quad (5)$$

式中  $x_{jt}$  为第  $j$  个方案第  $t$  时段流量值;  $x_t^*$  为天然状况下第  $t$  时段流量值;  $N$  为总时段数。

为方便比较, 采用下式对各个  $\mu_j$  值进行归一化,  $r_j$  越大表示与天然流量过程越接近。

$$r_j = \frac{\mu_{\max} - \mu_j}{\mu_{\max} - \mu_{\min}} \quad (6)$$

式中  $\mu_{\max} = \max\{\mu_j, j=1, 2, \dots, K\}$ ;  $\mu_{\min} = \min\{\mu_j, j=1, 2, \dots, K\}$ 。

各方案  $r_j$  列于表3。从表3可见, 减水河段生态流量  $120 \text{ m}^3/\text{s}$ 、二滩 A5 方案, 相应梯级出流过程与天然流量过程最为接近。方案 A5 与方案 A1 至 A4 的差异明显。事实上, 对于方案 A1 至 A4, 其在 2 月至 5 月的流量均值都超过天然流量最大值, 而方案 A5 则不可能出现这种情形。另外, 减水河段生态流量对梯级出流影响相对而言不太明显。

A5 方案要求二滩水库出流控制在天然流量最大值最小值之间, 这种控泄方式限制了水库在枯水期的调节作用, 对发电效益影响甚大, 表1结果说明了这点。

## 5 结 论

研究表明考虑二滩下游生态流量要求时, 按照生态需水电能损失量指标, 减水河段生态流量设定为  $45 \text{ m}^3/\text{s}$  有利。该结论是在比较发电效益损失基础上作出的, 与文献[9]根据 R2Cross 得出的结论一致。对二滩出流过程分析还表明, 尽管 A5 方案的出流过程与天然流量过程最为接近, 但梯级发电效益受影响最大。这说明二滩水库出流如维持天然流量模式, 将限制水库调节能力和发电效益的发挥。

### 参考文献:

- [1] SUEN J P, EHEART J W. Reservoir management to balance ecosystem and human needs: Incorporating the paradigm of the ecological flow regime[J]. Water Resources Research, 2006, 42(3): 1-9.
- [2] SHIAU J T, WU F C. Compromise programming methodology for determining instream flow under multiobjective water allocation criteria[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2006, 42(5): 1179-1191.

表3 各方案出流与天然状况接近程度评价指标

| 生态流量 / ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) | A1     | A2     | A3     | A4     | A5     |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| 36                                     | 0.0692 | 0.0908 | 0.2203 | 0.4880 | 0.9236 |
| 45                                     | 0.0810 | 0.0898 | 0.2358 | 0.4952 | 0.9666 |
| 60                                     | 0.0716 | 0      | 0.2324 | 0.4430 | 0.9696 |
| 85                                     | 0.0597 | 0.0790 | 0.3022 | 0.4937 | 0.9807 |
| 120                                    | 0.1861 | 0.2080 | 0.3221 | 0.4622 | 1      |

- [3] 陈敏建, 丰华丽, 王立群, 等. 生态标准河流和调度管理研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 631-636. (CHEN Min-jian, FENG Hua-li, WANG Li-qun, et al. Scientific regulation and management based on ecological flow regime[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 631-636. (in Chinese))
- [4] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇. 水库多目标生态调度[J]. 水利水电技术, 2007, 38(1): 28-32. (DONG Zhe-ren, SUN Dong-ya, ZHAO Jin-yong. Multiobjective ecological operation of reservoirs[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(1): 28-32. (in Chinese))
- [5] 胡和平, 刘登峰, 田富强, 等. 基于生态流量过程线的水库生态调度方法研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 325-332. (HU He-ping, LIU Deng-feng, TIAN Fu-qiang, et al. A method of ecological reservoir operation based on ecological flow regime[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 325-332. (in Chinese))
- [6] 王玉蓉, 李嘉, 李克锋, 等. 雅砻江锦屏二级水电站减水河段生态需水量研究[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 81-85. (WANG Yu-rong, LI Jia, LI Ke-feng, et al. Ecological water demand of reducing reach of Yalong River downstream of Jinping waterpower station stage II[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(1): 81-85. (in Chinese))
- [7] 王玉蓉, 李嘉, 李克锋, 等. 水电站减水河段鱼类生境需求的水力参数[J]. 水利学报, 2007, 38(1): 107-111. (WANG Yu-rong, LI Jia, LI Ke-feng, et al. Hydraulic parameters of habitat requirement for fish in water reduced river reach due to diversion of hydropower station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(1): 107-111. (in Chinese))
- [8] POFF N L, ALLEN J D, BAIN M B, et al. The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration[J]. Bioscience, 1997, 47: 769-784.

## Optimal ecological sound operation of the cascade reservoirs in the lower Yalongjiang River<sup>\*</sup>

MEI Ya-dong<sup>1</sup>, YANG Na<sup>1</sup>, ZHAI Li-ni<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The paper investigates the ecological sound operation of the cascade reservoirs in the Lower reach of Yalongjiang River. Based on the type and arrangement of the cascade hydropower stations, two flow control cross-sections are proposed: one is at the downstream location of the division sluice for the Jinping-II station, the another is at the backward position of the Ertan dam. 25 flow variation control schemes are presented with respective to the ecological requirement of these two flow control points. Then, a long-term optimal operation model, which is to maximize the total output of power generation of the cascade reservoirs, is established and solved by using the dynamic programming method. The total power generation amount and reservoir release discharge process corresponding to each flow variation control scheme are obtained. These influences on total power generation amount of different ecological flow values at the downstream division sluice and flow variation limits on the release discharge of the Ertan reservoir are analyzed, the indicators of power losses to ecological flow needs are defined and their values are calculated. Lastly the fitness of the Ertan reservoir release discharge processes to the natural flow regime is evaluated. The result shows that the total power generation amount of the cascade reservoirs will decrease while the release discharge process of the Ertan reservoir approaches the natural flow regime.

**Key words:** reservoirs; power generation; ecological sound operation; optimization technique; Yalongjiang River

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50779049).