

基于流域生物资源保护的水库生态调度

许可, 周建中, 顾然, 覃辉

(华中科技大学水电与数字化工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 阐述了流域水电开发对流域生物资源的影响途径: 通道阻隔、水库淹没、径流调节、水温变化等, 探讨了流域水电开发对河流连续性、河道洪枯过程、库区生境等生态功能的影响方式。结合三峡水利枢纽工程实例, 针对宜昌断面基于流域生物资源保护的流量要求, 建立了以水电站发电效益最大为目标的长期优化调度模型, 并采用差分进化法进行优化求解, 获得了相应的水电站水库调度出流过程, 并在此基础上采取人造洪峰、提高下泄水温等生态修复方式保护流域生物资源。建议水库运行调度应在考虑工程功能的同时, 兼顾下游及水库的生态功能, 以达到流域水资源开发与保护流域健康的生态系统相协调的目的。

关键词: 三峡水库; 生境变化; 生物资源; 生态调度

中图分类号: X143, Q142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2009)02-0134-05

水利工程在满足经济社会发展对防洪、灌溉、发电、供水等方面要求的同时, 改变了河流天然径流的时空分配, 对河流的大规模改造引起了自然河流的渠道化和非连续化, 造成了对河流生态系统的胁迫。因此水利工程既要开发利用水资源又要保护生态环境, 修复和保护生态环境逐渐成为水库调度的关键要素。

在水库生态调度过程中, 生物资源的保护是重要的目标, 通过生态调度控制各种生态因子变幅, 使之满足流域水生生物学过程需求, 从而实现下游河流的生物资源的有效保护。

1 水电开发对长江流域生物资源的影响

水电开发对生物的影响是一个长期和复杂的过程, 生态系统中任何生物的存在都有其特定的地位和作用, 不同生物之间相互依存, 一个生物的消亡, 会影响到其它生物的存亡和整个生态系统的完整性。水库在建成后, 将直接或间接影响河流重要生物资源的栖息水域, 即生物的生境, 若生境条件突然改变且超过生物的自我调节适应能力, 物种将面临新的自然选择, 大部分物种面临衰退、濒危和绝迹的威胁, 从而影响到生物的多样性。

水库对生境的改变, 主要包括河流水沙输移过程、水体的连续性、流态、流速、水温、溶解氧和透明度等环境要素的变化。以鱼类为例, 生物受水库的影响主要在以下几方面。

1.1 河流的连续性被破坏

河流的连续性遭到破坏, 使鱼类及其它生物的迁徙和繁衍过程受阻, 也将对鱼类等生物组成的完整性产生不利影响, 一些种类可能会因为生境的缺乏而消失, 一些重要的生态过程也将受阻, 水域生态完整性将遭到巨大破坏(陈进等, 2005; 祝兴祥等, 2004)。

洄游鱼类是水生态系统中重要指标生物之一, 它的消亡将影响整个生态系统的结构和完整性。长江上游是许多洄游鱼类的重要栖息地, 洄游鱼类需要“三场一通道(繁殖场、育肥场、产卵场, 洄游通道)”, 梯级水库的建设造成洄游鱼类等水生生物的生命通道被阻断, 一些洄游鱼类由于失去了原有生境可能灭绝。例如, 岷江上游建设了大量引水式水电站, 虽然没有建高坝大库, 但造成相当长的河段在枯季完全脱流, 全部河水都从压力管道流过, 对洄游鱼类等水生生物有致命打击, 比如珍稀鱼类虎嘉鱼已经基本消失(程根伟, 2004)。

1.2 河流的洪枯过程减弱

河道周而复始的洪枯演替引起了河流水位、水温、水量、含沙量和消落带等的变化, 这也是维持河流自然生境的需要, 是维系河流生物多样性的基础。河流开发后, 在汛期利用水库调蓄洪水、削减洪峰, 控制下泄流量和水位; 在非汛期则利用库容, 根据发电、供水、灌溉等用途进行水资源分配, 显著提高了

收稿日期: 2009-02-24

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(200701008); 自然科学基金重大项目(30490234)。

通讯作者: 周建中, 1959年生, 男, 湖北武汉人, 教授, 博导, 研究方向为人工智能与水电能源复杂系统分析。

作者简介: 许可, 1984年生, 男, 江苏扬州人, 博士, 研究方向为面向生态调度的水电站优化运行。

人类对水资源的利用率,但同时也改变了自然水文情势的年内丰枯周期规律,自然河道的洪枯过程减弱,甚至消失(李吉顺等,2001)。

一些鱼的产卵和幼体的生长只有遇洪水或激流刺激才能进行,河流洪水过程的减弱,会导致鱼类产卵和迁徙激发因素的中断。在这种情况下,鱼类较难进入湿地或回水区,改变了水生生物的食物网结构,使岸边植被复原能力降低。其结果导致水生生物摄食、生长、繁殖的环境遭到破坏,鱼类繁殖所需的生态水文条件得不到满足,从而对鱼类资源造成严重影响。

1.3 库区生境变化巨大

水库的建设对库区生境影响巨大。库区水流速度减小,水体纳污能力和自净能力下降。特别是在水库支叉区域,水体污染物很难扩散;而且水库水体深度较大,水温会产生分层,水库下泄的低温水对下游水生生物和农田灌溉都会产生不利影响(蔡其华,2006)。

上述原因导致水质恶化、水体富营养化、甚至爆发水华的可能性增大。2003年三峡水库蓄水后,三峡库区部分支流出现了多次不同程度的“水华”现象,2006年仅2~3月份就累计发生10余起;库区会产生水温分层的现象,水温的改变,对水域生态系统的影响是巨大的。春夏季节水库下泄的低温水,对鱼类的直接影响是导致繁殖季节推迟、当年幼鱼的生长期缩短、生长速度减缓。长江流域中一些大型水利枢纽是季调节、年调节、甚至多年调节的,当这些梯级水库的影响进行叠加时,对下游水温的影响将是很大的;水流变缓,库尾、库区大量的泥沙沉积,不仅影响水库的使用寿命,而且将使河床发生改变,生境多样性丧失,底栖动物减少,对生态环境造成影响。

2 基于流域生物资源保护的水库调度要素

现行的水库调度对水库下游生物资源的保护重视不够,在进行防洪和兴利调度的同时,没有考虑其对下游生态的影响,以至长期累积下来的生态环境的反作用以各种方式显现出来。因此,基于保护流域生物资源目标的水库调度可以考虑以下要素。

2.1 生态需水量

以前没有考虑河流生态情况下,水库一般考虑防洪、发电和航运等优化调度目标。如果要考虑河流生态的要求,还要使河流径流过程落在适宜生态径流过程区间上,不允许各个时段的下泄径流量小

于适宜的生态径流量。

根据国内外对河道生态需水目标的研究和本例特点(Dunbar M J et al,1998;杨志峰等,2003),共设置了3种控制模式,形成5种流量控制方案。

(1)未专门提出下游生态需水要求的调度

方案 A_1 : 流量约束为: $Q_t \geq 0$ 。

(2)满足最小生态需水要求的调度

方案 A_2 : Q_t 采用 Tennant 法设定。非汛期(11月~5月) Q_t 取年平均流量的40%,汛期(6月~10月) Q_t 取年平均流量的60%。

方案 A_3 : Q_t 采用逐月频率计算法,取各月95%保证率下的流量值。

方案 A_4 : Q_t 同样采用逐月频率计算法,但取各月90%保证率下的流量值。

(3)尽量维持径流天然水文特征的调度

方案 A_5 : Q_t 大于 t 时段天然流量序列中最低值,小于 t 时段天然流量序列中最高值。

本文根据三峡水库下游主汛期为7~9月份、副汛期为4~6月份和10~12月份(分别与四大家鱼的产卵期和中华鲟的产卵期相对应)、枯水期为1~3月份的实际情况,在枯水期和主汛期采取 Tennant 法计算河流适宜的生态需水量,在副汛期采取流速-流量关系法计算河流适宜的生态需水量,计算断面选用宜昌站。

因为长江干流四大家鱼产卵的平均流速为0.95~1.3 m/s(易伯鲁等,1988),中华鲟产卵期的适宜流速范围是1.00~1.66 m/s(危起伟,2003),故计算副汛期适宜生态需水量时,相应的流速可取为1.0 m/s。

根据宜昌站断面的基本水文资料,建立宜昌站流速流量关系为: $Q_1 = 8154.7V^{1.594}$,故宜昌站副汛期的生态需水量为 $8154 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

宜昌站下游的生态需水量计算结果如表1。

表1 长江中下游河道适宜生态需水量计算结果

Tab.1 The calculate result of suitable environmental flow at the Yichang downstream

断面名称	生态水文季节	月份	适宜生态需水量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
宜昌	枯水期	1~3	5 782
宜昌	汛期	7~9	23 625
宜昌	副汛期	4~6、10~12	8 154

2.2 生态洪水

水库的径流调节使坝下河流自然涨落过程弱化,一些对水位涨落过程要求较高的漂流性产卵鱼类繁殖受到影响。宜昌站为三峡大坝控制下的第一

个水文站,研究表明,三峡坝下的宜昌站每年5~6月份的总涨水日数与宜都江段四大家鱼苗发江量的相关系数达到0.72。统计1945~1976年中4月1日~6月10日的天然情况下32年宜昌水文站的洪水脉冲,在这71d内平均有27d涨水,占天数的38%,最多47d左右,最少为15d。涨水形式有2种:有78%的为从发生小洪水脉冲开始,峰量逐渐增大,最后发生的洪水脉冲最大,这种涨水形式简称从小至大型;另一种为在汛前涨水期中发生洪水脉冲较大,而在开始和结束时发生较小的洪水脉冲形式,这种涨水形式简称小大类型。这些洪水脉冲发生对刺激四大家鱼的产卵有非常重要的生态学意义(余文公,2007)。

2.3 生态因子

生态调度要控制各种生态因子变幅,使之落在天然状况的变化范围之内。如温度,它直接或间接影响生物的生长、发育、繁殖、形态、行为和分布等(刘建康,1995)。在水生生态系统中,环境温度是鱼类生长发育最重要的气候因子,各种鱼类一般都有自己的最适生长温度,例如四大家鱼的最适温度为23~28℃。由于水库一般都有水温分层现象,水库放水方式要考虑是深层取水还是表层取水,不同的取水方式对水温有很大的影响,而鱼类的繁殖对水温的要求非常严格,如:四大家鱼产卵的温度在18~26℃,主要在21~24℃水温条件下产卵(蔡为武,2001)。因此水库调度就要在重要鱼类生长、繁殖季节注意放水时取水方式。此外还有其他单项的生态因子如营养盐、溶解氧、pH值、透明度等。

3 基于流域生物资源保护的水库调度方案

水库的常规调度中,并没有考虑上述面向流域生物资源保护的要素,本文考虑这些生物资源保护要素作为约束条件,建立长期优化模型并利用差分进化算法(DE)对其进行求解。

3.1 目标函数

水电站优化调度主要有2类优化准则:一是发电量或发电效益最大,二是总蓄能最大。本文采用总发电量最大作为优化准则,其目标函数描述如下:

$$E = \max \sum_{i=1}^{S_{\text{num}}} \sum_{t=1}^T K_i \cdot H_{i,t} \cdot Q_{i,t}^f \cdot \Delta t \quad (1)$$

其中, E 为总发电量, S_{num} 为电站数目, T 为时段数, K_i 为第*i*个电站的出力系数, $H_{i,t}$ 为*i*电站*t*时段水头, $Q_{i,t}^f$ 为*i*电站*t*时段发电引用流量, Δt 为时段长度。

3.2 约束条件

$$(1) \text{ 水位(库容)约束: } \underline{Z}_{i,t} \leq Z_{i,t} \leq \bar{Z}_{i,t}$$

$$(2) \text{ 出力约束: } \underline{N}_{i,t} \leq N_{i,t} \leq \bar{N}_{i,t}$$

$$(3) \text{ 流量约束: } \underline{Q}_{i,t} \leq Q_{i,t} \leq \bar{Q}_{i,t}$$

$$(4) \text{ 水量平衡方程: } V_{i,t+1} = V_{i,t} + (I_{i,t} - Q_{i,t}) \cdot \Delta t$$

$$(5) \text{ 水库间的水力联系: } I_{i,t} = Q_{i-1,t-\tau_{i-1}} + q_{i,t}$$

$$(6) \text{ 生态约束: } Q_{i,t} \leq Q_{i,t}^s$$

其中, $\underline{Z}_{i,t}$ 、 $\bar{Z}_{i,t}$ 、 $\underline{N}_{i,t}$ 、 $\bar{N}_{i,t}$ 、 $\underline{Q}_{i,t}$ 和 $\bar{Q}_{i,t}$ 为水位、出力、流量的上下限; $V_{i,t}$ 和 $V_{i,t+1}$ 分别为第*i*个电站第*t*时段的初始库容和末库容; $I_{i,t}$ 和 $Q_{i,t}$ 分别为第*i*个电站第*t*时段的入库流量和出库流量,出库流量 $Q_{i,t}$ 为发电引用流量 $Q_{i,t}^f$ 和弃水流量 $Q_{i,t}^s$ 之和; $Q_{i-1,t-\tau_{i-1}}$ 为上游电站的出库流量, τ_{i-1} 为第*i-1*个电站到第*i*个电站的水流流达时间, $q_{i,t}$ 为电站*i*在时段*t*的区间入流。

为实现流域的生物资源保护,调度方案将按照适宜生态需水量的要求进行流量约束,对应表达式为 $Q_{i,t} \geq Q_{i,t}^s$, $Q_{i,t}^s$ 为适宜生态需水量。

根据上文计算所得宜昌站下游的适宜生态需水量,在枯水期的1~3月份,出库流量不能小于5782 m³/s;在汛期的7~9月份,出库流量 $Q_{i,t}$ 不能小于23625 m³/s;在副汛期的4~6月份和10~12月份,出库流量 $Q_{i,t}$ 不能小于8154 m³/s。

3.3 差分进化算法(DE)

DE以实数编码,包括变异、交叉和选择3种基本操作。DE通过对个体叠加差分矢量来生成新的个体,具体而言,通过式(2)对第*g*代的每一个个体 x_i^g 实施变异操作,得到与其相对应的变异个体 ν_i^{g+1} 。设种群规模为 NP ,个体决策变量维数为 N (S Rainer et al, 1997)。

$$\nu_i^{g+1} = x_{r_1}^g + F(x_{r_2}^g - x_{r_3}^g) \quad i = 1, 2, \dots, NP \quad (2)$$

其中: r_1, r_2, r_3 为1~ NP 之间的3个互不相同且不等于*i*的随机整数, $x_{r_i}^g$ 为父代基向量, $\nabla = x_{r_2}^g - x_{r_3}^g$ 为父代差分向量, F 为差分比例因子。若变异个体某一维变量值越界,则将其取值定为边界值。

进行变异操作后,采用式(3)对父代群体中的个体和新生成的变异个体进行交叉操作,生成试验个体 u_i^{g+1} :

$$u_{i,j}^{g+1} = \begin{cases} \nu_{i,j}^{g+1}, & \text{if } (\text{random}() \leq CR) \text{ or} \\ & j = \text{randomRange}(1, N); \\ x_{i,j}^g, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\text{random}()$ 为[0,1]之间的均匀随机数, CR

$\in [0, 1]$ 为交叉概率, $\text{randomRange}(1, N)$ 为 $[1, N]$ 的随机整数。由上式可以看出, 试验个体至少有 1 位由变异个体贡献, 其他位则是按概率 CR 确定其来自变异个体还是父代个体。

DE 采用“贪婪”策略来决定父代个体还是试验个体被保留: 父代个体与试验个体进行比较, 较优者进入下一代种群。描述为:

$$x_i^{g+1} = \begin{cases} u_i^{g+1} & \text{if } u_i^{g+1} \text{ is better than } x_i^g \\ x_i^g & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

采用三峡水库 1959 ~ 2000 年的入库径流系列,

表 2 常规调度和生态调度的下泄流量

Tab. 2 Flow between ecological operation and conventional operation

调度方式	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
常规调度	5 418	5 613	5 883	5 977	16 100	18 300	29 500	27 300	25 500	10 530	10 300	5 950
生态调度	5 783	5 783	6 001	8 155	13 352	18 300	29 500	27 300	25 500	10 530	10 300	5 950

m^3/s

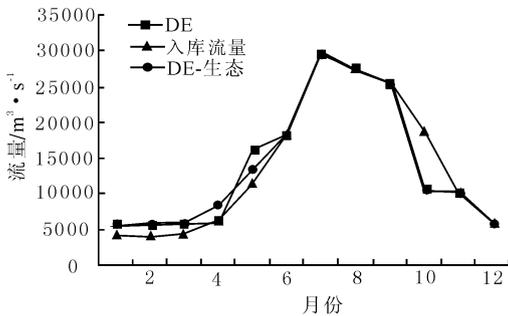


图 1 生态调度和常规调度的下泄流量对比

Fig. 1 Comparison of flow between ecological operation and conventional operation

在此基础上还要在综合发电、航运调度的要求下仿天然洪水过程进行“人造洪水”, 按照洪水脉冲发生特征和往年 4 ~ 5 月最大流量统计特征值造出一定的洪水过程。本文认为比较可行的方法是模拟从小至大型的涨水形式, 即保证三峡水库调度的坝下每年 4 月 1 日 ~ 6 月 10 日的总涨水日数应维持在 27 d 之上。

对于水库运行时出现的下泄低温水, 可采取分层泄水, 增加表层水的下泄, 以提高下泄水温; 对于水库泄水导致下游气体过饱和和对鱼类的影响, 水库调度应考虑在防洪安全的条件下, 延长泄流时段, 降低泄流强度, 并可根据保护目标的要求, 合理组合泄洪, 兼顾消能与防止气体过饱和。

4 结语

水库调度是关系到全流域、尤其是坝下区域生态的重大事件, 应该符合保护流域生物资源的需要。本文基于保护流域生物资源的目标, 针对长江中下

游梯级水库长期优化调度问题, 建立了考虑生态需水量、生态洪水等要素的水库优化调度模型, 通过优化计算, 获得了各种控泄方案下的出库流量过程, 实现了流域的生态目标。但本文的方法还无法从根本上解决水温异常、水体气体过饱和等问题, 故为了更全面的实现流域生物资源的保护, 还必须结合其它生态修复技术。

以月为时段, 选取来水频率为 50%, 把考虑生物资源的生态流量作为约束条件, 利用差分进化算法 (DE) 对三峡水库长期优化模型进行求解, 得出相应的各月下泄流量与常规调度的下泄流量的对比见表 2、图 1。

通过图 1 可以看出, 在 1 ~ 5 月份, 采取考虑生物资源保护的生态调度的下泄流量和常规调度的下泄流量的差别是比较明显的, 调整后的下泄流量可以有利于长江流域鱼类的产卵等其他生物功能的实现。

通过图 1 可以看出, 在 1 ~ 5 月份, 采取考虑生物资源保护的生态调度的下泄流量和常规调度的下泄流量的差别是比较明显的, 调整后的下泄流量可以有利于长江流域鱼类的产卵等其他生物功能的实现。

参考文献:

- 蔡为武. 2001. 水库及下游河道的水温分析[J]. 水利水电科技进展, 21(5): 20 - 23.
- 蔡其华. 2006. 考虑河流生态系统保护因素完善水库调度方式[J]. 中国水利, (2): 14 - 17.
- 陈进, 黄薇. 2005. 梯级水库对长江水沙过程影响初探[J]. 长江流域资源与环境, 14(6): 786 - 791.
- 程根伟. 2004. 西南江河梯级水电开发对河流水环境的影响及对策[J]. 中国科学院院刊, 19(6): 433 - 437.
- 李吉顺, 陈家田. 2001. 长江流域的生态环境保护面临更加严峻的形势[M]. 北京: 气象出版社: 175 - 178.
- 刘建康. 1995. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社.
- 危起伟. 2003. 中华鲟繁殖行为生态学与资源评估[D]. 北京: 中国科学院研究生院. 75 - 76.
- 杨志峰, 崔保山, 刘静玲, 等. 2003. 生态环境需水量理论、方法与实践[M]. 北京: 科学出版社.
- 易伯鲁, 余志堂, 等. 1988. 长江干流草、青、鲢、鳙四大家鱼产卵场的分布、规模和自然条件[M]// 易伯鲁, 等. 葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼. 武汉: 湖北科学技术出版社: 11 - 17.
- 余文公. 2007. 三峡水库生态径流调度措施与方案研究[D]. 南京: 河海大学.
- 祝兴祥, 常仲农. 2004. 中国水电环境保护现状与对策[J]. 环境经济杂志, (11): 24 - 27.

Dunbar M J, Gustard A, Acreman M C, et al. 1998. Overseas approaches to setting River Flow Objectives[R]. R&D Technical Report W6 - 161, Environment Agency and NERC.

S Rainer, K Price. 1997. Differential evolution - a simple and ef-

ficient heuristic for global optimization over Continuous Spaces[J]. J of Global Optimization, 11(4): 341 - 359.

(责任编辑 张俊友)

The Effect of Different Reservoir Operating on Biological Resource in the Basin

XU Ke, ZHOU Jian-zhong, GU Ran, QIN Hui

(College of Hydroelectric and Digitalization Engineering,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper expounds many man-made changes over different kinds of circulation patterns and impacts on the ecosystem function of the river systems when the large dam constructed across river, ecological function changes on the continuity of river process between the wet and dry seasons and habitats of the reservoir area are analysed. Combined with practices of Three Gorge Project, with respect to the ecological requirement of the Yichang Section, a long-term optimal operation model, which is to maximize the total output of power generation of the reservoir, is established and is solved by using differential evolution method. The reservoir release discharge process are obtained. Based on the research, we may take artificial flood-peak and water temperature increasement and other biological reconstruction. It is proposed that the large dams ecological dispatch measures to ease the ecological impact of water resource development.

Key words: Three Gorges Reservoir; variation of habitats; biological resource; ecological operation