

文章编号: 1001-4179(2012)03-0001-04

三峡梯级水电工程生态调度准则框架研究

祝雪萍^{1,2}, 王浩², 殷峻暹², 张丽丽²

(1. 大连理工大学 水利学院 辽宁 大连 116024; 2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所 北京 100038)

摘要: 在分析梯级水电工程生态调度准则内涵的基础上, 综合考虑不同水文情势条件下, 长江中下游社会经济和生态环境目标之间以及多种生态环境保护目标之间的相互协调原则, 提出了三峡梯级水电工程生态调度准则研究框架。包括: 针对生态环境的刚性需求——最小环境流量的常规生态调度准则; 针对生态环境的柔性需求——特定生物的繁殖期需求以及生态环境敏感区的脆弱期需求的相机生态调度准则。研究结论将为三峡梯级水电工程生态调度运行准则提供理论支持, 并为梯级枢纽生态补偿进一步研究奠定基础。

关键词: 梯级水电工程; 生态调度准则; 常规补偿; 相机补偿; 三峡工程

中图分类号: TV697.11 文献标志码: A

随着筑坝河流生态环境问题的日益凸显, 生态补偿成为国内外研究的热点^[1-7]。目前生态补偿研究多集中于经济补偿机制及管理措施保障^[4-7]。经济补偿是缓解对生态进一步破坏的辅助措施, 但由于尚无一个公认的制度体系, 实践过程中阻力较大。因此, 本文将基于目前操作性更强的工程措施^[8-11], 在梯级枢纽调节能力允许的基础上, 综合考虑不同水文情势条件下, 社会经济和生态环境目标之间以及多种生态环境保护目标之间的相互协调原则, 以调整水利工程调度的方式, 提出梯级枢纽生态调度准则, 为下游最大限度地提供生态所需流量及流量过程的保障, 对下游河流生态系统进行补偿。

梯级水电工程生态调度准则的内涵是让梯级水库合理地承担由于其修建导致的生态环境影响的责任, 其责任大小应该与梯级水电工程造成的影响呈比例, 即梯级水电工程给河流生态环境造成的负面影响越大, 其承担的责任也应该越大, 反之亦然。因此, 在设

计梯级水电工程联合调度的生态补偿准则时, 首先需要考虑梯级水电工程对生态环境的影响, 在影响评价的基础上, 设定生态调度补偿目标。在此基础上, 提出工程调度准则以约束其实时调度, 合理安排梯级水电工程联合调度方式, 切实达到减轻或改善河流生态系统的目的。

笔者参加了“十一五”国家重点科技支撑计划三峡梯级枢纽生态补偿技术研究, 比较系统地识别与分析了三峡梯级枢纽的生态环境保护目标, 并提出了具体的调控需求。本文在该研究的基础上, 重点研究如何制定三峡梯级枢纽的生态调度准则, 约束三峡梯级枢纽的调度行为, 满足生态环境保护的需要。

1 生态调度准则框架

目前, 三峡及上游梯级水电工程以防洪、发电、航运等为主要目标, 这些目标可以带来直接或间接的社会经济效益。而实现生态目标带来的生态环境效益很

收稿日期: 2011-09-30

基金项目: “十一五”国家重点科技支撑计划课题(2008BAB29B08)

作者简介: 祝雪萍, 女, 博士研究生, 主要从事水文水资源及生态调度研究。E-mail: zxp198682@163.com

通讯作者: 王浩, 男, 教授级高级工程师, 中国工程院院士, 主要从事水文水资源及生态保护研究。E-mail: wanghao@iwhr.com

通讯作者: 殷峻暹, 男, 高级工程师, 主要从事水文及生态调度方面的研究。E-mail: yinjax@iwhr.com

难用经济价值直接衡量,一旦在调度中考虑生态目标,将会形成社会经济效益与生态环境效益的转换。安全、经济、合理的效益转移将有助于梯级水利工程综合效益的全面发挥,因此制定合理的梯级水电工程运行的生态补偿调度准则,促进社会经济和生态环境综合效益的最大化,是本次研究的落脚点。

在分析评估长江中下游生态环境保护目标的基础上,协调其与社会经济目标的关系,需要考虑不同水文情势,在梯级枢纽调节能力范围之内,制定合理的补偿准则,促进综合效益最大化。因此,合理的梯级水电工程运行的生态调度准则需要综合考虑不同水文情势条件下,社会经济和生态环境目标之间以及多种生态环境保护目标之间的相互协调原则,其总体框架如图1所示。

从生态保护需求对社会经济调度的约束强度来看,分为刚性需求和柔性需求,长江中下游的最小环境流量要求是刚性需求,而其他生态调度目标则属于柔性需求;从不同生态环境保护目标之间的关系来看,包括相容性关系和竞争性关系;从不同调度期的生态调度任务来看,除洪水期外,其他调度期基本上不同生态调度目标之间可以相容;从不同社会经济调度目标的重要性来看,生态调度需要服从防洪调度,发电和航运调度要满足生态环境的刚性需要,兼顾其他需要。

其中,刚性约束是梯级枢纽工程在常规调度中就必须满足的生态需求,通过控制一定人类活动保障河流生态环境的最低目标;柔性需求是梯级枢纽在调度中需要最大限度满足的生态需求,是保障特定需求应尽量达到的目标,需要根据水文情势的具体情况相机补偿河流生态环境需求。

2 生态刚性约束下的常规生态调度准则

长江中下游最小环境流量作为长江三峡及上游梯级电站生态环境调度的刚性要求,其约束作用的发挥主要在枯水年的蓄水期和枯水期,由于上游来水减少,在水资源总量不足的情况下,如何协调各个梯级电站之间的生态环境保护任务,在保障生态环境用水条件下尽量减少社会经济代价,是制定基于生态环境刚性需求的生态调度准则的核心问题。

2.1 生态环境缺水梯级联合调度准则

长江流域中下游的生态环境缺水发生的时期主要在上游梯级水电工程的蓄水期和枯水期,尤其是枯水年的蓄水期,社会经济用水与生态环境用水矛盾集中表现,冲突严重,需要基于责权对等、风险共担的原则,针对梯级水电工程明确责任,制定刚性约束准则,确保长江中下游的生态环境用水不被挤占,避免由于生态环境责任不明晰,导致梯级水电工程的生态环境责任落实不到位,无法追查和问责。

对于三峡梯级枢纽工程,其联合调度准则遵循的基本原则是责权对等原则,具体落实到各个主要梯级水电工程就是在生态环境缺水期,按调蓄能力同比例削减社会经济用水供水量,即同比例削减准则。

2.2 避免生态环境缺水的梯级错期蓄水准则

由于水文预测水平的限制和长江流域水文情势复杂多变的特点,对长江流域中下游生态环境缺水的出现时间和地点的预估和判定具有事先不确定和补救措施滞后的特点。从未雨绸缪的角度出发,需要合理安排长江流域上游梯级水电工程蓄放水次序,避免由于



图1 梯级水电工程运行的生态调度准则框架

集中蓄水引发或加重生态环境缺水问题。

基于风险共担的原则,需要将可能导致生态环境缺水的长江流域上游梯级水电工程蓄水期进行合理安排,减缓集中蓄水暴露的河道内环境流量骤降现象。目前,葛洲坝以上6个梯级水电工程的蓄水时间分别为:乌东德与白鹤滩为8月份,溪洛渡和向家坝为9月份,三峡为10月份,已经较好地安排了蓄放水次序,这在保障社会经济利益正常发挥的同时,也为避免生态环境用水集中短缺提供了有利条件。而且,三峡工程运行后,由于蓄水期下游河道内环境流量减少明显,已经引起了中下游众多生态环境问题。目前,通过对三峡水库的优化调度研究,2009年已经将三峡水库的蓄水时间提前至9月15日,在2010年进一步提前至9月10日。上述措施的实施,不仅为三峡水库在2010年蓄满提供了保障作用,也为缓解长江中下游生态环境用水瓶颈提供了有利条件。

3 生态柔性约束下的相机生态调度准则

特定保护生物和敏感环境的用水需求,具有随流域水文情势波动而相应变化的特点,需要结合水文情势条件,相机解决,才能达到充分利用水电工程调节能力,使水电工程补水效果最佳的目的。因此,生态环境针对性需求下的相机调度准则的设定需要首先明确生态环境的特定需求,根据需求的特点及所处梯级水电工程的调度期特点,结合长江流域的水文情势和工程状况,设定相机补偿的启动条件和执行准则。

3.1 保护鱼类繁殖期环境流量相机调度准则

(1) “四大家鱼”繁殖期相机启动条件和运行准则。影响四大家鱼产卵繁殖除了流量指标之外,还有水位、水温、水体透明度^[12]、含沙量、流速紊乱度及涨水过程,其中,涨水过程包括涨水次数、历时、涨水率等。四大家鱼产卵繁殖是产卵场条件及水文水力条件共同作用的结果。根据文献[13]及[14]研究结果,四大家鱼在江水起涨后0.5~2d开始产卵,产卵高峰期为5月中旬至6月下旬,水位日均涨水率为0.12~0.36m/d,涨水量为0.73~5.28m,涨水持续时间4d以上。长江流域四大家鱼产卵繁殖环境流需求指标为:繁殖期为4~7月,环境流量8000~15000m³/s,水温大于18℃,涨水率1400~3000m³/s,持续时间3~8d。

鱼类在繁殖季节需要一定流量的涨水过程刺激产卵,但涨水过程刺激产卵的效果与产卵场的水温条件密切相关,应监测产卵场的水温,当水温在18℃以上,启动人造涨水过程,刺激四大家鱼产卵。人造涨水过

程的持续时间应在4d以上,日涨水率在1400m³/s以上。

(2) 中华鲟繁殖期相机启动条件和运行准则。影响中华鲟产卵繁殖除了流量指标之外,还有水温、含沙量、流速、水位等因素,中华鲟产卵繁殖是产卵场条件及水文水力条件共同作用的结果。根据文献[13]及[15]研究结果,中华鲟产卵繁殖期为10~11月,适合于繁殖的水温是18.0℃~20.0℃,水位是42~45m,含沙量是0.2~0.3kg/m³,底层流速是1.0~1.7m/s。

中华鲟产卵期为10月上旬至11月中旬^[16],这期间水库已处于蓄水阶段,下游河段生态流量的补偿与水库蓄水之间产生矛盾,为协调二者,建议将水库蓄水时间提前,尽量将蓄水过程放缓,一方面保证在10月能够相机补水保证中华鲟的产卵;另一方面在保证防洪目标的基础上使水库蓄足够水量度过非汛期。在协调好水电工程蓄水期生态环境最小环境流约束的基础上,应监测中华鲟产卵场(主要在葛洲坝以下约7km范围内)的水温,当水温在18.0℃~20.0℃之间,含沙量在0.2~0.3kg/m³之间,可以结合上游来水情况,相机启动生态调度,在确保最小环境流量8000m³/s的基础上,加大梯级水电工程的泄量,尽量维持葛洲坝出流在10000m³/s以上,为中华鲟产卵提供适宜的环境水流条件。

3.2 敏感区脆弱期补水启动条件和运行准则

(1) 洞庭湖蓄水期生态补水相机启动条件和运行准则。洞庭湖是我国南方最大、保存最完整的河湖湿地,被誉为“拯救世界濒危珍稀鸟类的主要栖息地”,洞庭湖鸟类资源主要集中在东洞庭湖自然保护区、南洞庭湖自然保护区、西洞庭湖自然保护区的洲滩、河汊和内湖湿地,根据文献[13]相关研究成果,为洞庭湖越冬候鸟提供栖息地的最低生态水位为25m(以岳城为参考站)。

当岳城水位在候鸟越冬期接近25m时,结合洞庭湖上游来水情况和长江干流水位(以城陵矶为参考水位)对湖区出流的顶托作用,并考虑三峡及上游梯级水电工程的蓄水情况和未来一段时间的来水情况,及时加大宜昌断面的环境流量,并同时观测洞庭湖区水位变化情况,结合发电和航运要求,调整梯级水电工程的调度方式,兼顾洞庭湖生态水位要求。

(2) 鄱阳湖蓄水期生态补水相机启动条件和运行准则。鄱阳湖是长江流域最大的通江湖泊,驰名中外的候鸟栖息地。鄱阳湖自然保护区及周边大面积的湖洲草滩、水面、岗丘、沙山、森林以及农田,构成了湖区独特而复杂的生态系统,加上湖区独特的渔业生产方

式吸引着众多的鸟类来此栖息。三峡水库建成运行后,每年10月份为水库蓄水期,下泄水量减少,导致长江对鄱阳湖顶托作用减弱,鄱阳湖出流加快,水位比建库前同期有不同程度的下降。根据文献[13]相关研究成果,鄱阳湖的适宜生态水位为13.50 m(以吴城站为参考站)。将鄱阳湖越冬候鸟栖息入冬适宜水位(以11月吴城站为参考站)换算到10月份,得到吴城站10月份适宜于白鹤等越冬候鸟栖息的生态水位区间为15.06~15.53 m。将吴城站10月生态控制水位换算到湖口站,得到湖口站10月份适宜于白鹤栖息的生态水位区间为14.29~14.65 m。

当吴城站10月份水位接近15.5 m,湖口水位接近14.6 m时,结合鄱阳湖上游来水情况和长江干流水位(以湖口水位为参考水位)对鄱阳湖区出流的顶托作用,并考虑三峡及上游梯级水电工程的蓄水情况和未来一段时间的来水情况,及时加大宜昌断面的环境流量,并同步观测鄱阳湖区水位变化情况,结合发电和航运要求,调整梯级水电工程的调度方式,兼顾鄱阳湖生态水位要求。

(3) 河口压咸期生态补水相机启动条件和运行准则。三峡水库汛末10月蓄水期,水位逐步升高到正常蓄水位175 m,如遇枯水年,蓄水过程延续到11月,在这期间,大通站流量约减少5 400~8 400 m³/s,受淡水流量减少影响,长江口10~11月份发生咸水上溯,影响沿江取水。根据文献[13]关于生态水位控制要求的研究成果,大通站控制流量10月份宜在21 000 m³/s以上,11月份控制流量宜在15 000 m³/s以上,相应的宜昌控制断面10月份流量宜在10 500 m³/s以上,11月份宜在7 500 m³/s以上。

根据大通站10月份和11月份的流量监测值,当其低于环境控制流量时,综合考虑宜昌至大通区间的来水情况,三峡及上游梯级水库的蓄水情况,合理安排蓄水速率和下泄流量,提高宜昌流量,10月份按接近10 000 m³/s,11月份按接近7 500 m³/s控制。

4 结 语

对于筑坝河流进行生态补偿,进而在一定程度上避免或减轻大坝对于河流生态系统的胁迫性,不仅需要经济管理体制的允许,还需要工程措施的保障。目前来看,经济管理体制研究尚处于初级阶段,而工程措施在短期内更为可行和有效。

本文即从工程措施角度,综合考虑不同水文情势条件下,社会经济和生态环境目标之间以及多种生态环境保护目标之间的相互协调原则,通过调整常规调度规则、制定相机调度规则,均衡协调生态目标及其他

调度目标之间的关系,以期达到综合效益最大。

基于长江中下游生态保护目标,针对生态环境的刚性需求、特定生物的繁殖期需求以及生态环境敏感区的脆弱期需求,制定了相应的生态调度准则及补偿措施。生态环境刚性需求下的生态调度准则包括:①基于责权对等原则的生态环境缺水梯级水电工程联合调度准则;②基于风险共担原则的避免生态环境集中缺水的梯级水电工程错峰蓄水准则。生态环境针对性需求下的相机调度准则,包括保护鱼类繁殖期环境流量相机调度准则和敏感区脆弱期生态环境补水相机启动条件和运行准则。结论将为三峡梯级水电工程生态调度运行准则提供理论支持,并为梯级枢纽生态补偿进一步研究奠定基础。

参考文献:

- [1] Ana V, Jordi P. Ecological compensation and Environmental Impact Assessment in Spain [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2010, 30(3): 357-362.
- [2] Runderantz K, Skärback E. Environmental compensation in planning: a review of five different countries with major emphasis on the German system [J]. Eur. Environ. 2003, 13(1): 204-226.
- [3] Wilding S, Raemaekers J. Environmental compensation for Greenfield development: is the devil in the detail [J]. Plan Pract. Res. 2000, 15(3): 211-231.
- [4] 杨芳,王孟,叶闽. 南水北调中线工程水源区生态补偿机制研究 [J]. 人民长江, 2010, 41(24): 101-104.
- [5] 刘玉龙,胡鹏. 基于帕累托最优的新安江流域生态补偿标准 [J]. 水利学报, 2009, 40(6): 703-708.
- [6] 董正举,严岩,段靖,等. 国内外流域生态补偿机制比较研究 [J]. 人民长江, 2010, 41(8): 36-39.
- [7] 阮本清,许凤冉,张春玲. 流域生态补偿研究进展和实践经验 [J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1220-1225.
- [8] Petts G E. Impounded rivers [M]. New York: Wiley, Chichester, 1984.
- [9] Hartd D, Poff N L. A special section on dam removal and river restoration [J]. Bioscience, 2002, 52(8): 653-655.
- [10] 殷峻,黄德刚. 水库生态调度准则研究 [C] // 第三届全国水电站水库运行调度研讨会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [11] 吕新华. 大型水利工程的生态调度 [J]. 科技进步与对策, 2006, (7): 129-131.
- [12] 李丹. 长江四大家鱼产卵场流场特性及其鱼卵漂移研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2009.
- [13] 中国水利水电科学研究院. 基于生态安全的梯级水电工程补偿技术研究 [R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2011.
- [14] 郭文献. 基于河流健康水库生态调度模式研究 [D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [15] 郭文献,夏自强,王远坤,等. 三峡水库生态调度目标研究 [J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 554-559.
- [16] 曹文宣,常剑波,乔晔,等. 长江鱼类早期资源 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.

(编辑: 常汉生)

(下转第8页)

(2) 通过建立的 Copula 联合分布函数计算出来的概率分布与统计方法的结果基本吻合,证明了联合分布函数的合理性。通过 Copula 函数可以真实反映三峡工程供水期各样本之间的丰枯遭遇情况。

(3) 对于不同的运行策略,三峡水库在供水期中处于不同运行状态,导致水库运行调度具有不确定性。通过贝叶斯后验推理分析可知,已知前一月份为枯水的情况下,后一月份为枯水的概率较大,分析结果为制定合理的调度方案提供了参考^[4]。充分利用推理信息制定水库调度方案,在一定程度上减少了来水不确定性的影响,为水库能够发挥综合效益提供了可靠保

障。

参考文献:

- [1] 熊其玲,何小聪,康玲.基于 Copula 函数的南水北调中线降水丰枯遭遇分析[J].水电能源科学,2009,27(6):9-11.
- [2] 林士敏,田凤占,陆玉昌.贝叶斯网络的建造及其在数据挖掘中的应用[J].清华大学学报:自然科学版,2001,41(1):49-52.
- [3] 康玲,何小聪,熊其玲.基于贝叶斯网络理论的南水北调中线工程水源区与受水区降水丰枯遭遇风险分析[J].水利学报,2010,41(8):908-913.
- [4] 蔡治国,曹广昆,郝瑛.梯级水电站经济运行评估新方法研究与应用[J].水力发电学报,2011,30(2):15-19.

(编辑:常汉生)

Analysis of wetness - dryness encounter in TGP water supply period based on Copula function

ZHANG Zhongbo¹, ZHANG Shuanghu², WANG Hao^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In view of the influence of wetness - dryness encounter on operation scheme of TGP in water supply period and shortcomings of statistic method, Copula combination function is proposed, which can reflect the wetness - dryness connection of two adjacent periods in water supply period. The calculation result of Copula combination function is basically in agreement with that of statistical method, proving its rationality. Based on Copula function, a Bayesian network model is established and used to analyze the wetness - dryness encounter state by prior probability and posterior inference respectively. The analysis result shows that the unfavorable operation probability is smaller by prior probability while unfavorable operation probability is larger by posterior inference. Through comprehensive consideration, the effective utilization of information by posterior inference can reduce the adverse influence of inflow uncertainties on water supply, and improve the comprehensive benefit of TGP during water supply period.

Key words: Copula function; wetness - dryness encounter; Bayesian network; water supply operation; TGP

(上接 4 页)

Research on framework of ecological operation standards of Three Gorges cascade hydropower project

ZHU Xueping^{1,2}, WANG Hao², YIN Junxian², ZHANG Lili²

(1. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on analysis of the connotation of ecological operation standards of cascade hydropower projects, and with consideration of the social economic and eco - environmental objectives of middle and lower Yangtze River, also coordination of various eco - environmental protection targets, we put forward a research framework of ecological operation standards of Three Gorges cascade hydropower project as follows: for the rigid eco - environmental demands, namely the minimum environmental flow, regular operation standards are prepared; for the flexible demands of eco - environment, namely biological reproductive period of special species and vulnerable period of sensitive areas, corresponding operation standards are made; and the startup conditions and operation principles of right time compensation for four major Chinese carps and Chinese sturgeon, Dongting Lake, Poyang Lake and salinity control in estuaries. The conclusions will provide a theoretical support for ecological operation of the Three Gorges cascade hydropower project, and lay a foundation for further ecological compensation research.

Key words: cascade hydropower project; ecological operation standards; regular compensation; compensation in need; the Three Gorges project