

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.01.016

考虑天然水流模式的多目标水库优化调度模型及应用

杨娜¹,梅亚东²,于乐江¹

(1. 南京信息工程大学水文气象学院,江苏 南京 210044; 2. 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)

摘要:充分考虑水流条件对河流生态环境的重要性,将水流模式作为河流生态要求的重要目标进行量化。根据水流模式与常规水库兴利要求对水流的不同利用方式,从天然水流模式和水库的配水方式2个方面设立目标函数,建立兼顾水库兴利要求和河流生态环境要求的多目标水库调度模型。将该模型应用于丹江口水库中,采用非劣解分类遗传算法(NSGA-II)进行优化求解。结果表明:对河流水流模式进行仿天然性优化后,可以有效改善水文模式中变化较大的指标,使其值尽量贴近天然流量的变化范围,进而降低河流生态环境所受水库调蓄作用的负面影响。优化结果对水库兴利功能的影响程度不大,偏好于生态环境目标的调度方式更有利于南水北调实施调水。

关键词: 水库调度;天然水流模式;河流生态目标;多目标优化算法

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2013)01-0085-05

Multi-objective reservoir optimal operation model considering natural flow regime and its application

YANG Na¹, MEI Yadong², YU Lejiang¹

(1. College of Hydrometeorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With full consideration of the influences of flow conditions on river ecological environment, the flow regime, which is regarded as an important objective of river ecological requirements, was quantified. According to different flow utilization requirements of flow regimes and reservoirs, a multi-objective reservoir operation model with its objective function set up in terms of the natural flow model and water allocation pattern was established. It takes both river ecological requirements and reservoir utilization requirements into consideration. This model was applied to the Danjiangkou Reservoir and the NSGA-II algorithm was used to solve the optimization problem. The results show that the imitation of a natural river flow regime can effectively improve highly-affected hydrological indicators, making their variations close to natural values, and can reduce the negative effect of reservoir regulation on river ecosystems. The optimized scheduling result exerted an insignificant effect on reservoir utilization functions, and the scheduling method preferable to considering the ecological environment objective was more favorable to the South-to-North Water Diversion.

Key words: reservoir operation; natural flow regime; river ecological objective; multi-objective optimization algorithm

水库调度通过对河流天然水流过程的调蓄,产生规划目标的社会经济效益,但同时也改变了河流的天然水流模式,在一定程度上加剧了河流的生态危机,如河道断流、河流生态系统功能退化等^[1]。径流作为河流

收稿日期:2012-01-05

基金项目:南京信息工程大学科研启动项目(S8111038001);水利部公益性行业专项(201101033);江苏省高校自然科学基金基础研究项目(11KJB170008)

作者简介:杨娜(1983—),女,河南驻马店人,讲师,博士,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: yangna_leafage@yahoo.cn

生态系统中的一个决定性因素,仅仅通过满足河流的最小生态需水量来改善河流生态环境是不够的,还需要进一步考虑河流的天然水流模式(natural flow regime),以塑造更为适宜的流量环境,满足河流生物和栖息地对各种水流条件的需求^[2]。根据国际上较为认同的观点,河流天然水流模式主要由等级、频率、历时、变化率及发生时间这5类水文指标进行描述^[2-3]。这5个特征决定并影响着河流生态系统的重要方面,如河流的物质循环、能量过程、物种的存亡、物理栖息地状况以及生物之间的相互作用,建立了河流水流模式与河流生态完整性关系,本文以这5类水文指标为基础,建立考虑天然水流模式的水库多目标优化调度模型。

1 目标函数的建立

在常规中长期水库调度模型中很少有对水库下泄水流模式进行控制的,这是因为:(a)描述水流模式的水文指标种类和数量都较多^[4],缺乏统一的选择标准;(b)各水文指标量纲不一,属性也不相同,难以量化;(c)各水文指标的时间尺度与中长期水库调度的时间尺度不一致,难以耦合。因此,需要建立能与中长期水库调度目标耦合的河流天然水流模式的目标函数。

水库的兴利任务如供水、航运、发电等均依赖于水库调节流量的大小,而下游河道的天然水流模式则要求水库调节流量在等级、频率、历时、变化率及发生时间5个方面与天然水流过程接近。2种调度目标对水流的分配形式不同,前者是对水量在丰枯水期的分布进行调配;后者是对天然水流模式的模拟。两者之间存在着一定的用水矛盾。而通常采用的考虑河流生态需水量的方法,与水库的兴利要求本质上都是对水量的配置^[5],因此可以直接纳入一个目标中进行均衡优化。本文根据2种目标对水流的不同利用规则,分别从水库的水量配置和下游河道天然水流模式模拟2个方面设立目标函数,建立兼顾水库兴利要求和河流生态环境要求的多目标水库调度模型^[6]。

1.1 水量配置目标

$$Z_1 = \sum_{i=1}^N \omega_i f_i \tag{1}$$

式中: f_i ——与水量分配有关的子目标,一般考虑水库各种兴利要求的目标,如供水、发电、调水等; ω_i ——各子目标的权重。根据水库不同的兴利要求,特别地还要考虑河道的生态需水量^[7]。

1.2 天然水流模式目标

天然水流模式是由表征各种水流形态的水文指标综合反映的,指标数量较多,均列为水库调度的控制优化目标显然是无法实现的。因此,天然水流模式目标需要由选定的水文指标组成。参照 Richter 提出的 IHA 指标体系,利用改进的 RVA 方法^[8]对水库所在河流建坝前后的水文模式变化程度进行评价(即计算出所有水文指标的变化度),并划分为高、中、低3个等级。变化度参数反映了河流水流受水利工程建设及运行的影响程度。对建坝后水文变化测度绝对值高的水文指标值进行控制,通过调整水库运行方式使出库后的水流尽量贴近天然水文模式下的水文指标值,可以有效地修复河流的生态环境。

对水库的下泄水流模式进行调控,使水库的下泄水流尽量贴近河流的天然水流模式。从量化的角度上讲,即下泄水流的各项水文指标值与河流建坝前的水文指标值尽量贴近。用公式表示如下^[9]:

$$\eta(R_i) = \exp\left[\frac{-(R_i - \bar{\alpha}_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] \tag{2}$$

式中: $\eta(R_i)$ ——水文指标 R_i 对河流环境的隶属度,即指标 R_i 的隶属函数; $\bar{\alpha}_i$ ——各指标建坝前的多年平均值,代表天然水流模式; σ_i ——各指标建坝前的标准方差。式(2)可以较好地反应各水文指标对环境友好的隶属性:当指标 R_i 的水文测度值越贴近于天然条件下的历史平均水平,对环境越有利,越远离历史平均水平,对环境越不利。进一步得出总的天然水流模式目标:

$$Z_2 = \sum_{j=1}^M \mu_j \eta_j \tag{3}$$

式中: η_j ——天然水流模式目标中各水文指标的隶属度函数; μ_j ——各水文指标的权重。

2 实例研究

2.1 模型的建立

以丹江口水库为研究对象,全面考虑丹江口水库的社会经济要求。兴利目标中考虑水库下游河道外社

会经济用水、库区调水和发电效益;天然水流模式目标以丹江口水库下游襄阳断面的水流模式变化为控制点,通过改进 RVA 方法的评价,得出变化度最高的 6 个水文指标:水文逆转次数、水流上升幅度、高脉冲洪峰数、1 月平均流量、最小 30 日流量和 2 月平均流量,建立天然水流模式目标。同时考虑丹江口下游的时段生态需水量要求,以襄阳断面的鱼类需水和仙桃断面的自净需水为生态需水要求,分别采用 Tennant^[10]和湿周法^[11]进行计算,综合得出丹江口下游河道的旬生态需水量。根据用水模式,建立丹江口水库兼顾兴利目标和天然水流模式目标的多目标水库优化调度模型。

水量分配目标:

$$\max E_{\text{human}} = \sum_{i=1}^4 \omega_i \frac{k_x \bar{W}_x}{W_y} \tag{4}$$

水流模式目标:

$$\max E_{\text{eco}} = \sum_{j=1}^6 \mu_j \exp \left[\left(\frac{-(R_j - \bar{R}_{\text{pre},j})}{2\sigma_{\text{pre},j}} \right)^2 \right] \tag{5}$$

根据丹江口水库各个任务的优先级别,采用层次分析法求得 4 个子目标的权重:

$$W_i = (0.574\ 1, 0.241\ 0, 0.132\ 0, 0.056) \tag{6}$$

式中: E_{human} ——水量分配形式的用水函数,包括下游河道生态需水量、下游河道外供水量、库区调水和发电要求 4 个子目标; E_{eco} ——考虑河流天然水流模式的目标函数,为 6 个高度变化的水文指标隶属函数的加权和; ω_i ——各个兴利子目标的权重; k_x ——模拟运行中水量分配目标各个用水子目标的历时保证率; $\bar{W}_x$ ——模拟运行各子目标多年平均用水量(发电子目标表示多年平均发电量); W_y ——各子目标年规划需水总量(发电子目标表示规划发电量); R_j ——模拟运行后各水文指标的多年平均值, $\bar{R}_{\text{pre},j}$ ——各水文指标建坝前的均值; $\sigma_{\text{pre},j}$ ——各水文指标建坝前的方差; μ_i ——各个水文指标的权重,均设为 1/6。

根据襄阳断面 1947—2007 年的径流资料,以丹江口水库的运行时间 1974 年为界,分别计算建坝前(1947—1973 年)和建坝后(1974—2007 年)的 6 个高度变化水文指标的参数值。表 1 为各水文指标建坝前的参数值,其中,高脉冲次数为流量从小到大排序后,高于 75% 的流量发生的次数;上涨率为每一上涨流量事件发生时从波谷到波峰的上涨幅度;逆转次数指流量从下降到上涨为一次逆转,反映了流量的频率特征。

表 1 各水文指标参数值
Table 1 Values of hydrological indicators

统计参数		1 月平均流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	2 月平均流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	最小 30 日流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	高脉冲 洪峰数	旬水流上升幅度/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水文逆转 次数
建坝前	均值	355	371	312	3.5	859	16.0
	方差	76	113	77	2.5	291	2.3
天然水流模式	下界	279	258	235	1	568	13.7
变化范围	上界	431	484	389	6	1 150	18.3

约束条件集合包括:(a)水量平衡方程;(b)水库水位限制;(c)水库出库流量限制;(d)电站出力限制,等。其中水库水位限制严格按照丹江口水库汛期(包括前汛期和后汛期)和非汛期要求执行,具体见图 1;水库出库流量限制放水量下线由下游综合利用要求(如灌溉、航运、生态环境等)提出。

2.2 调度规则

在案例研究中,丹江口水库各时段的调水量 $W_{\text{ds},t}$ 由水库的调水调度图(图 1)得到。图 1 以旬为时段,用 4 条调度线隔出了加大供水区、保证供水区、2 个降低供水区和限制供水区等 5 个供水区。

a. 当 t 时段来水量 I_t 与此时水库蓄水量 V_t 之和,即总水量 W_t 均不能满足该时段生态需水量的要求,则将全部来水以及库容作为丹江口水库决策生态供水量下泄,此时丹江口水库决策调水量 $D_{\text{ds},t}$ 、决策下游河道外供水量 $D_{\text{gs},t}$ 均为 0。 t 时段丹江口水库决策总下泄流量 Q_t 等于 t 时段平均来水量与 V_t 的时段平均流量之

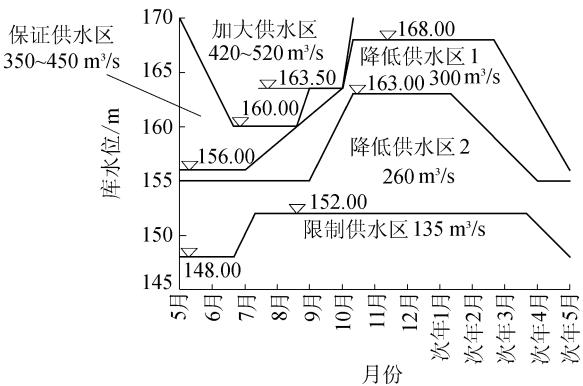


图 1 丹江口水库调水量调度图

Fig. 1 Scheduling diagram for water transfer amount of Danjiangkou Reservoir

和。时段发电引用流量 $D_{p,t}$ 等于决策生态供水量 $D_{st,t}$, 时段末的水库蓄水量为零。

b. 当 W_t 小于生态需水量、下游河道外需水量和上游需调水量的总量要求时, 则 t 时段水库 $D_{st,t}$ 按生态需水量下泄, 此时将 W_t 减去 $D_{st,t}$ 剩下的部分, 根据任务优先级按比例分别分派给丹江口水库下游河道外供水和上游调水。若指定的分配额大于下游河道外需水量 $W_{gs,t}$, 则按下需水量下泄, 剩余的水量全部供给上游调水。时段发电引用流量 $D_{p,t}$ 等于 $D_{st,t}$ 与 $D_{gs,t}$ 之和, 时段决策弃水量 Dq_t 为 0, 时段末的水库蓄水量为零。

c. 当 t 时段 W_t 能完全满足所有用水要求时, 水库 $D_{st,t}$ 按时段生态需水量下泄, 决策下游河道外供水量 $D_{ds,t}$ 按该时段下游河道外需水量供水, $D_{ds,t}$ 按该时段需调水量 $W_{ds,t}$ 调水。此时如果来水过大导致计算得到的 V_{t+1} 大于该时段的限制库容 Vu_t , 则强制令时段末水库蓄水量等于该时段 Vu_t 。若此时仍未达到水库的出力上限 PZ_t , 则多余水量可并入发电引用流量, 直到水库的 PZ_t 为止, 此时若仍存在多余水量, 则作为该时段决策弃水量排入下游。 Q_t 等于 t 时段 $D_{st,t}, D_{gs,t}, Dq_t$ 三者之和的时段平均流量。

3 结果分析

对图 1 进行优化。根据丹江口水库 1961—1997 年的入库流量资料, 以旬为时段进行调度计算。采用 NSGA-II 方法对多目标模型进行求解^[12-13], 设置种群规模为 500, 最大进化代数为 600。经过优化计算, 得出模型的 perato 最优前沿, 对比分析天然水流模式和水库的配水方式 2 个目标分别最优时各决策变量的变化情况。

3.1 下泄流量水流模式

随着天然水流模式目标值的提高, 其 6 个水文指标中有 4 个指标的隶属函数值增加, 这 4 个指标分别是 1 月平均流量、2 月平均流量、最小 30 日流量和水文逆转次数, 意味着这 4 个水文指标通过优化与不考虑河流生态要求时相比得到了改善, 见表 2。但受到水库兴利以及防洪要求的影响, 各个水文指标改善程度不同。

其中 1 月平均流量指标和 2 月平均流量指标的改善率最高, 最小 30 日流量指标的隶属度最好, 越来越接近于 1, 而这 3 个水文指标表征的是天然水流模式中低流量事件的量级特征, 说明多目标优化模型的出流过程较好地满足低流量事件的量级要求。但由于水库枯水期供水调度, 1 月平均流量指标和 2 月平均流量指标的隶属度仍然较低, 这也进一步说明了水库兴利要求下的水量分配对天然水流模式的影响。

在对天然水流模式进行优化时, 高脉冲洪峰数和水流上升幅度 2 个水文指标反而变差, 这 2 个指标是表征高流量事件频率特征的参数, 其值偏低与水库下游需水过程(生态需水和河道外社会经济需水) 各年内分布一致有关。

3.2 天然水流模式对社会经济目标的影响

随着天然水流模式目标值的增大, 水量分配目标各个决策变量表现为: 各个配水子目标的缺水量逐渐增大, 发电量逐渐减小; 各个配水子目标的保证率逐渐降低(表 3)。即水库所有兴利任务在考虑河流水流模式天然性要求时, 均呈现减小趋势, 只是受影响程度不同。与水量分配目标最大时各兴利子目标的值相比, 下游河道生态供水减小率仅为 0.87%, 下游河道外供水减小率为 2%, 发电量减小率为 1.7%, 调水量增加了 3.4%。可见, 各兴利目标受影响程度并不大, 而且由于下泄流量的减少, 库区向上游地区的总调水量反而增加。

表 2 2 个目标分别最优时水流模式对比
Table 2 Comparison between two extreme cases of
Pareto front of outflow regime

指标	隶属度		改善率/%
	水量分配 目标最大	水流模式 目标最大	
1 月平均流量	0.041 2	0.103 0	150.00
2 月平均流量	0.435 4	0.642 2	47.50
最小 30 日流量	0.959 9	0.994 2	3.57
高脉冲洪峰数	0.361 2	0.350 2	-3.05
水流上升幅度	0.427 2	0.399 4	-6.51
水文逆转次数	0.690 6	0.704 9	2.07
生态目标值	0.487 0	0.541 0	

表 3 非劣解集中 2 个目标分别最优时的各子目标参数值

Table 3 Indicators of two sub-objectives of two extreme cases of Pareto front

项目	子目标	河道内生态 需水量/亿 m ³	下游河道外 需水量/亿 m ³	调水量/ 亿 m ³	发电量/ (亿 kW·h)
决策值	需求量	106.40	117.69	95.00	33.78
	水量分配目标	103.04	102.40	60.61	33.86
	水流模式目标	102.05	100.29	62.67	33.29
保证率	水量分配目标	0.93	0.81	0.78	0.82
	水流模式目标	0.90	0.78	0.65	0.79

4 结 语

对丹江口综合利用水库建模优化的结果表明:以水量分配为主要用水模式的常规调度手段对河流天然水流模式的影响较大,通过建立兼顾河流天然水流要求的调度模型,对水库下泄流量过程进行仿天然模拟,可以较为有效改善水文模式中变化较大的指标,使其尽量贴近天然水流的变化范围,进而降低河流生态环境所受水库调蓄作用的负面影响。

在模型中加入天然水流模式目标进行多目标优化后,对水库下游兴利功能均会产生一些影响,通过分析发现影响程度并不大。由于模型中要求尺度的统一,因此在现有资料情况下,下泄流量模式是以旬为时间尺度进行计算的,出流过程不够具体。

参考文献:

[1] 刘兰芬. 河流水电开发的环境效益及主要环境问题研究[J]. 水利学报,2002,33(8):121-128. (LIU Lanfen. Impacts of hydropower development on river basin environment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33 (8): 121-128. (in Chinese))

[2] RICHTER B D,BAUMGARTNER J V,WIGINGTON R,et al. How much water does a river need[J]. Freshwater Biology,1997, 37:231-249.

[3] RICHTER B D,BAUMGARTNER J V,POWELL J,et al. A Method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. Conservation Biology,1996,10 (4):1163-1174.

[4] 吴阿娜,杨凯,车越,等. 河流健康状况的表征及其评价[J]. 水科学进展,2005,16(4):602-608. (WU Enuo,YANG Kai,CHE Yue,et al. Characterization of rivers health status and its assessment[J]. Advances in Water Science, 2005,16(4):602-608. (in Chinese))

[5] MADDOCK I P,BICKERTON M A,SPENCE R,et al. Reallocation of compensation releases to restore river flows and improve instream habitat availability in the Upper Derwent catchment,Derbyshire[J]. UK,Regulated Rivers Research & Management, 2001,17:417-441.

[6] 杨娜,梅亚东,李娜. 生态友好型水库调度及其研究进展[J]. 水利水电科技进展,2008,28(5):91-94. (YANG Na, MEI Yadong,LI Nai. Operation of eco-friendly reservoirs and its research progress[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2008,28(5):91-94. (in Chinese))

[7] 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. (GUO Wenxian, XIA Ziqiang,WANG Yuankun,et al. Ecological operation goals for Three Gorges Reservoir[J]. Advances in Water Science, 2009,20 (4):554-559. (in Chinese))

[8] 杨娜,梅亚东,尹志伟. 坝坝对下游河道水文情势影响 RVA 评价方法的改进[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(5):560-565. (YANG Na,MEI Yadong,YIN Zhiwei. Impact assessment of dams on the flow regime of lower river by improved RVA[J]. Resources and Environment in the Yangtze River,2010,19(5):560-565. (in Chinese))

[9] SUEN J P,WAYLAND E J. Reservoir management to balance ecosystem and human needs:incorporating the paradigm of the ecological flow regime[J]. Water Resources Research,2006,42:W03417.

[10] TENNANT D L. Instream flow regiments for fish,wildlife,recreation and related environmental resources[J]. Fisheries,1976,1 (4):6-10.

[11] MATTHEWS R C,BAO Y. The texas method of preliminary instream flow determination[J]. Rivers,1991,2(4):295-310.

[12] CHEN L,MCPHEE M,WILLIAN W G,et al. A diversified multiobjective GA for optimizing reservoir rule curves[J]. Advances in Water Resources,2007,30:1082-1093.

[13] REED P,MINSKER B S,GOLDBERG D E. Simplifying multiobjective optimization:an automated design methodology for the nondominated sorted genetic algorithm- II [J]. Water Resources Research,2003,39(7):1196.