

供水水库多目标生态调度研究

金鑫¹, 郝彩莲², 王刚³, 王凌河⁴

(1. 辽宁省水文局, 沈阳 110003; 2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038;
3. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037; 4. 珠江水利科学研究院, 广州 510611)

摘要: 根据我国北方地区径流特征及供水水库调度的实际需求, 构建了供水水库多目标生态调度模型。模型将下游生态需水过程分为最小生态需水及适宜生态需水两个等级, 要求枯水期水库放水过程能够满足河流最小生态需水要求, 确保下游生态不退化; 丰水期放水过程贴近适宜生态需水过程, 为下游提供良好生境。基于该模型, 采用自适应遗传算法, 对承德双峰寺水库生态调度问题进行了优化求解, 结果表明该模型能够对北方供水水库生态调度决策提供支持。

关键词: 供水水库; 生态需水, 多目标生态调度; 自适应遗传算法

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0463-05

Multi-objective ecological operation of water supply reservoir

JIN Xin¹, HAO Cai lian², WANG Gang³, WANG Ling he⁴

(1. Hydrological Bureau of Liaoning Province, Shenyang 110003, China; 2. China Institute of Water resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 4. The Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510611, China)

Abstract: A multi-objective ecological operation model of water supply reservoir was developed according to the runoff characteristics and practical demand of reservoir operation in North China. The ecological water requirement of the downstream river was divided into two levels in the model: minimum ecological water requirement and suitable ecological water requirement. The discharge process of reservoir in the low flow period should meet the minimum ecological water requirement in order to sustain the ecological environment in the downstream, and the discharge process of reservoir in the high flow period should meet the suitable ecological water requirement in order to provide suitable habitat in the downstream. The multi-objective ecological operation model was applied to optimize the ecological operation in the Shuangfengsi Reservoir using adaptive genetic algorithm. The results showed that the model can provide technical support for the ecological operation of water supply reservoir in North China.

Key words: water supply reservoir; ecological water demand, multi-objective ecological operation; adaptive genetic algorithm

水库的修建运用将改变库区及下游河流水文情势, 对河流生态系统造成影响及胁迫^[1-3]。近年来, 水库调度的生态效应越来越为人们关注^[1-3], 生态调度逐渐成为水资源学、生态学领域的研究热点。与传统的调度方式相比, 生态调度将生态目标纳入水库调度中来, 调度过程综合考虑防洪、供水、灌溉、发电、航运、生态环境等多方面因素, 在兴水利、除水害的同时维护或改善河流健康, 实现河流水资源的可持续利用。国外对水库生态效应的系统研究始于20世纪70年代^[4]; 我国生态调度的研究起步较晚, 但也有许多成果, 如康玲等选择水文典型年对丹江口水库生态调度方案进行了优化^[5]; 许可、郭文献等采用差分进化算法、遗传

算法对三峡水库生态调度问题进行了研究^[6,7]; 陈瑞等采用改进遗传算法对锦屏梯级水库生态调度方案进行了求解^[8]; 金鑫等对面向河流生态健康的水库群调度规则进行了研究^[9]; 尹心安等以唐河水库为例, 对生态调度优化模型进行研究等^[10]。

整体来看, 现阶段我国生态调度研究多集中于南方水量充沛地区的发电水库、综合利用水库, 北方地区供水水库生态调度的相关研究不多。本文从北方河流径流特征及供水水库调度实践需求出发, 构建生态调度多目标优化模型, 并以河北省承德市双峰寺水库为例进行实证研究, 以期能够为北方地区供水水库生态调度提供理论与技术支持。

1 供水水库生态调度问题识别

水库生态调度的核心是社会经济效益与生态环境效益间的协调,通常需要放弃部分经济效益,以维系或改善库区及下游河流生态环境。在现行调度方式下,由于水资源短缺等原因,北方地区供水水库调度过程中往往社会经济用水挤占生态环境用水,导致下游部分河段的生态需水要求长期得不到满足,生态系统退化。与南方水量充沛地区相比,北方供水水库生态调度面临以下突出问题。

(1) 供水水库承担的主要任务是生产、生活供水,为保障社会稳定及经济发展,调度过程中不能牺牲过多兴利供水,特别是当枯水年份,应优先满足生活用水。如何在保障生活用水的基础上协调生产用水及生态用水,是供水水库生态调度研究的核心问题。

(2) 北方地区径流年内及年际分布极不均衡,丰、枯水年径流量相差悬殊,且来水多集中于汛期的几个月份。受库容所限,供水水库运用过程中缺水与弃水时常交替出现。如何合理利用水库弃水改善下游生态环境,是北方供水水库生态调度研究中的一个重要内容。

近年来,随着河流生态问题日益突出,河流健康、生态调度得到各方面的广泛重视。在水库规划设计各阶段,需通过专门的环境影响评价来避免或减缓建库的负面生态效应;同时,南水北调工程等一系列跨区域调水工程运行后,北方部分地区缺水问题也将得到一定程度的缓解,为北方供水水库生态调度实践提供了基础。

生态需水是确定水库生态调度方案的前提及依据^[1+13],目前国内外关于河流生态需水的相关研究较多,已形成水文学法、水力学法、栖息地模拟法、综合法等诸多计算方法^[1+15],生态需水评估技术的成熟为水库生态调度研究提供了支撑。

2 生态调度模型构建

2.1 模型构建

根据国内外相关成果及供水水库调度实践需求^[16+17],将生态用水作为水库的一个供水目标,以水库各时段的总供水量为决策变量构建供水水库多目标生态调度模型。考虑到我国北方地区水资源短缺,社会经济与生态环境用水矛盾突出,若在调度过程中过于强调水库调度的生态效益,则可能造成工业、农业、生活等供水要求得不到满足。针对此,研究将生态需水划分为最小生态需水、适宜生态需水两级,其中最小生态需水为维持下游基本生境需求,保障下游生态系统不退化所需要的最小流量过程;适宜生态需水为维持下游适宜生境,保障下游各物种正常生存、繁衍所需要的适宜流量过程。水库调度过程中,要求枯水时段按最小生态需水放水,保障下游生态系统不退化;丰水时段依据适宜生态需水放水,为下游生态系统提供良好的生境条件。

2.1.1 目标函数

(1) 基本供水目标。供水水库调度的基本目标是调度运行期内缺水损失总和最小。本文以各时段总缺水量的平方和最小为优化目标。

$$\min Z = \sum_{t=1}^T (R_t - \sum_{n=1}^4 D_{i,t})^2 \quad (1)$$

式中: R_t 为水库在时段 t 的总供水量; $D_{i,t}$ 为时段 t 第 i 项的需水量,其中 $i=1,2,3,4$,分别代表工业、农业、生活、生态。若时段供水总量不足,则按照农业、工业、生态、生活的顺序限制供水。

(2) 适宜生态需水供水目标。在保证基本供水目标的基础上,若水量尚有结余,应尽量满足适宜生态需水要求。

$$\min Z_1 = \sum_{t=1}^T (R_t - \sum_{n=1}^3 D_{i,t} - D_{4,t}^f)^2 \quad (2)$$

式中: $D_{4,t}^f$ 为时段 t 的适宜生态需水量。

(3) 发电目标。在保证基本供水目标及生态需水供水目标的基础上,为充分利用河流水能资源,应使水电站机组尽可能维持高出力运行,提高水库发电量。

$$\max P = \sum_{t=1}^T N_t \Delta t \quad (3)$$

式中: N_t 为水电站机组在时段 t 的出力; Δt 为时间步长。

2.1.2 约束条件

(1) 水量平衡约束。

$$V_{t+1} = V_t + I_t - R_t - L_t \quad (4)$$

式中: V_t, V_{t+1} 分别为 $t, t+1$ 时段末水库蓄水量; I_t 为时段 t 水库入库水量; L_t 为时段 t 水库库损。

(2) 库容约束。

$$\underline{V}_t \leq V_t \leq \bar{V}_t \quad (5)$$

式中: \underline{V}_t 为 t 时段水库的蓄水量下限值,通常是水库的死库容; \bar{V}_t 为 t 时段水库的蓄水量上限,汛期时为汛限水位对应的库容,非汛期时为正常高水位对应的库容。

(3) 出力约束。

$$\underline{N}_t \leq N_t \leq \bar{N}_t \quad (6)$$

式中: $\underline{N}_t, \bar{N}_t$ 分别为水电站 t 时段出力的上、下限,其中 \bar{N}_t 通常为装机容量。对于无最低出力限制的水库,该约束条件只有右侧项。

(4) 调度期初、末蓄水量约束。

$$\begin{cases} V_1 = V_1^0 \\ V_T = V_T^0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: V_1, V_T 分别为调度期初、末的水库蓄水量; V_1^0, V_T^0 分别为调度期初、末的水库实际蓄水量。

(5) 非负约束: 上述各变量非负。

2.2 模型求解技术

水库多目标优化调度模型的求解方法较多,如动态规划(DP)、遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)等。本文选用目前已较为成熟的自适应遗传算法^[18+19]作为求解工具。

2.2.1 编码方式

采用实数编码方式对各时段水库蓄水量进行编码。每一个基因即为水库蓄水量的真值,即:

$$V_t = V_{t,\min} + N_{rand} \times (V_{t,\max} - V_{t,\min}) \quad (8)$$

式中: $V_{t,\max}, V_{t,\min}$ 分别为时段 t 水库蓄水量的最大、最小值; N_{rand} 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

2.2.2 适应度函数

本文构建的供水水库生态调度模型中各目标间的关系随水库承担任务的不同而有所差异。根据北方供水水库调

度需求,采用如下原则对各优化目标进行协调:(1) 优先考虑水库基本供水目标,即首先保证水库调度运行期内总缺水平方和最小;(2) 在总缺水平方和相同的情况下,优先考虑下游适宜生态需水要求,即保证适宜生态需水缺水平方和最小;(3) 在上述两项相同的条件下,要求水电站机组维持高出力运行,提高水库发电量。

遗传算法寻优过程中,对生成种群的每一染色体分别计算总缺水平方和、适宜生态需水缺水平方和及总发电量,并按照上述原则进行排序。若第 i 条染色体的序号为 $order(i)$, 则其适应度为

$$F(i) = N + 1 - order(i) \quad (9)$$

2.2.3 选择、交叉、变异

采用赌盘选择、均匀交叉遗传算子^[20]; 为保障遗传算法在较高进化代数的局部搜索能力,采用非均匀变异遗传算子如下:

$$V'_t = \begin{cases} V_t + \Delta(g, V_{t, \max} - V_t) \\ V_t + \Delta(g, V_t - V_{t, \min}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $V_{t, \max}$ 、 $V_{t, \min}$ 分别为时段 t 水库蓄水量最大值、最小值; g 为进化代数; Δ 为进化代数的函数, 本文采用下式:

$$\Delta(g, y) = y(1 - r^{(1 - \frac{g}{gen})^b}) \quad (11)$$

式中: gen 为最大进化代数; r 为 $[0, 1]$ 范围内的随机数; b 为系统参数。

2.2.4 自适应过程

参照相关研究^[21], 采用下式对遗传算法控制参数 P_c 、 P_m 进行自适应调整:

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - f_{avg})}{(f_{max} - f_{avg})} & f' \geq f_{avg} \\ P_{c1} & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (12)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f_{avg} - f')}{(f_{max} - f_{avg})} & f' \geq f_{avg} \\ P_{m1} & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{c1} = 0.9$; $P_{c2} = 0.6$; $P_{m1} = 0.1$; $P_{m2} = 0.01$; f_{avg} 为本代种群适应度平均值; f_{max} 为种群最大适应度值; f' 为要交叉的两个个体中较大的适应度值; f 为要变异个体的适应度值。

2.2.5 精英保存策略

经选择、交叉、变异运算后,子代个体的最大适应度可能小于父代个体的最大适应度,即父代的优良个体没有遗传到下一代。对此,研究中采用稳态精英保存策略,各代适应度最大的 N_e 个染色体不参加遗传运算,直接复制到下一代。

3 应用实例

3.1 双峰寺水库概况

为了验证模型的有效性,以承德双峰寺大(II)型水库为例进行模型应用。该水库位于滦河的一级支流武烈河之上。武烈河流域面积 2 580 km², 天然径流过程丰枯变化显著,最大年径流量是最小年径流量的 73 倍,年内 70%~80% 的径流量集中在 6 月-9 月。双峰寺水库工程以防洪为主,保障供水,兼顾发电及生态环境供水,电站厂房共设有 3 台水轮发电机组,装机容量合计 1 270 kW。水库按设计标准供水时,每年向承德市供水 5 600 万 m³, 其中 4 800 万 m³ 用于承

德市生产生活, 800 万 m³ 用于下游橡胶坝与避暑山庄湖区补水。为保障下游生态环境用水安全, 水库供水全部放入下游河道, 并通过下游沿河水源、河口水源地取水^[22-23]。

双峰寺水库总库容为 1.373 亿 m³, 死水位 382.0 m, 汛限水位 387.0 m, 正常高水位 389.0 m。7 月 1 日-8 月 15 日为主汛期。水库设计标准年(2025 年)正常供水过程及可行性研究阶段兴利调节计算采用的供水过程见表 1。

表 1 双峰寺水库供水过程

月份	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
设计供水过程 / 万 m ³	575	575	575	521	366	366	366	366	472	472	472	472
兴利调算中供水过程 / 万 m ³	500	500	500	500	400	400	400	400	500	500	500	500

3.2 下游河流生态需水过程

武烈河干流分布有鱼类 26 种、底栖动物 18 种(属)、浮游动物 28 种(属)、浮游植物 7 门 44 个种(属)以上。为保障坝址以下河流生态健康, 双峰寺水库建成运行后, 宜维持一定放水过程以满足下游生态系统需水要求。以承德水文站径流资料为基础, 采用 Tennant 法中的“最小”标准推求最小生态需水过程, 并以 Tennant 法的“中”标准计算适宜生态需水过程(表 2)。

表 2 下游生态需水过程及水库放水控制流量

项目	生态需水过程 / (m ³ · s ⁻¹)		水库放水控制流量 / (m ³ · s ⁻¹)	
	4 月-9 月	10 月-3 月	4 月-9 月	10 月-3 月
最小值	0.76	0.76	0.76	0.76
适宜值	2.28	0.76	2.95	0.76

双峰寺水库供水全部放入下游河道, 通过沿河水源(2 100 万 m³/a)、河口水源地(2 700 万 m³/a)取水。考虑到各水源地设计取水量及实际取水能力, 当水库按照设计标准供水时, 下游全河段最小生态需水均能得到满足(10 月至次年 3 月也可满足适宜生态需水要求); 若水库放水量低于设计供水量时, 可通过缩减沿河水源并取水来保证生态需水要求。此外, 为满足 4 月-9 月份适宜生态需水要求, 期间水库放水量应为下游适宜生态需水量与沿河水源地设计取水量之和。水库按照不同生态需水等级供水时, 其放水流量见表 2。

3.3 水库生态调度方案及分析

选用丰、平、枯($P=10\%、50\%、90\%$) 典型年为代表, 采用上述模型及算法对双峰寺水库生态调度过程进行优化求解, 并将之与可行性研究阶段的兴利调算过程^[23] 对比, 识别不同调度方案的兴利、生态环境效应。

由于双峰寺水库装机容量较低, 遗传算法寻优过程中可能出现部分时段水库未蓄满而放水“超量”的情况, 故规定水库未蓄满时, 水库放水不能超过机组最大出力对应值。此外, 为便于对比分析, 初、末水库蓄水量等边界条件亦采用可行性研究报告成果。优化调度结果见表 3, 水库放水流量过程见图 1。

表 3 双峰寺水库生态调度过程

Tab. 3 Ecological operation process of the Shuangfengsi Reservoir

万 m³

时段	丰水年			平水年			枯水年		
	来水量	水库蓄水量		来水量	水库蓄水量		来水量	水库蓄水量	
		优化前	优化后		优化前	优化后		优化前	优化后
起调		4 710	4 710		1 610	1 610		1 980	1 980
7 月	8 260	4 490	4 490	220	1 690	1 690	280	1 730	1 873
8 月上	2 350	4 490	4 490	840	2 260	1 690	40	1 690	1 797
8 月下	1 820	6 000	5 244	5 530	6 000	6 000	70	1 690	1 750
9 月	3 240	6 000	6 000	2 200	6 000	6 000	460	1 690	1 823
10 月	2 140	6 000	6 000	1 020	6 000	6 000	730	1 900	2 177
11 月	1 330	6 000	6 000	570	6 000	6 000	500	1 990	2 411
12 月	670	6 000	6 000	270	5 840	5 850	350	1 940	2 495
1 月	300	5 880	5 880	150	5 580	5 580	260	1 790	2 488
2 月	300	5 770	5 760	170	5 320	5 330	270	1 690	2 491
3 月	600	5 840	5 560	420	5 220	5 220	320	1 690	2 444
4 月	530	5 810	4 080	190	4 850	4 850	240	1 690	2 296
5 月	60	5 280	1 690	0	4 280	4 280	20	1 670	1 918
6 月	12 010	6 000	6 000	0	3 720	3 720	170	1 690	1 690

注: 遗传算法参数: $p_{op} = 100, N_s = 2, gen = 700$ 。

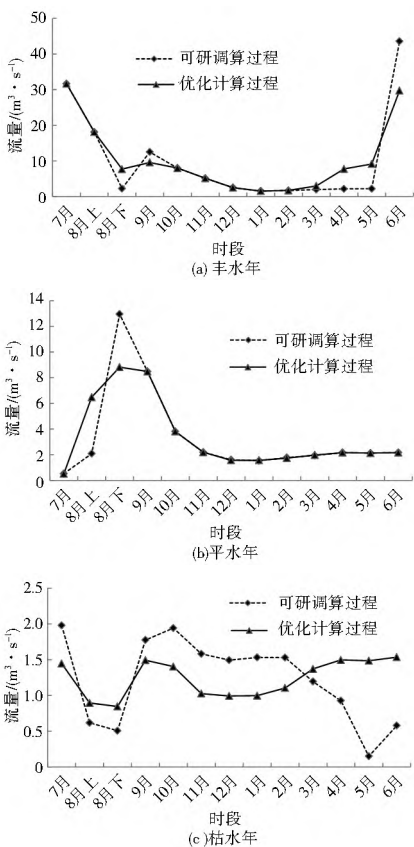


图 1 各典型年水库放水流量过程

Fig. 1 Discharge processes of the reservoir in high, normal, and low flow periods

由表 3、图 1 可知,生态调度方案与可行性研究阶段的调算方案相比调度过程有所差异,但不同典型年的差别程度不同。其中,受库容及边界条件的限制,平水年汛后调度过程基本没有改变;枯水年生态调度方案与可研调算方案差别较大,为保证生态用水,生态调度方案的放水过程趋于均一化。

从承德市的有效供水量来看(表 4),可行性研究阶段的调算方案与生态调度方案相差不大。其中,丰水年、平水年承德市供水要求均能得到满足,而在枯水年,受水资源条件限制,两种方案均不能满足承德市供水要求,需适当限制供水。

表 4 不同调度方案指标比较

Tab. 4 Comparison of indicators for different operation schemes

典型年	方案	有效供水 水量 /万 m ³	年发电量 /(万 kW·h)	最小生态 需水满足 月数	适宜生态 需水满足 月数
丰水年	可研设计方案	5 600	643.34	12	9
	生态调度方案	5 600	828.25	12	12
平水年	可研设计方案	5 600	382.31	11	7
	生态调度方案	5 600	401.52	11	8
枯水年	可研设计方案	3 930	133.24	9	6
	生态调度方案	4 000	139.09	12	6

从年发电量角度分析,丰、平、枯水年生态调度方案年发电量均较可研方案均有所增加,其原因为优化方案在汛期或汛后加大了放水量以提高水电站出力。考虑到库容及装机容量较小,前期增加放水提高出力不会对后期发电造成影响。

从下游生态需水角度分析,除个别月份外,生态调度方案在各个典型年均能满足下游最小生态需水要求,优于可研调算方案。特别是在丰水年,生态调度方案可以利用弃水来改善下泄过程,按照适宜生态需水控泄,为下游提供适宜的生境条件。

4 结语

本文构建的供水水库多目标生态调度模型,以各时段总供水量为决策变量,将生态用水作为水库的一个供水项,与工业、生活等供水目标联合求解。考虑到我国北方河流径流

规律及供水水库调度实践需求,模型将下游河流生态需水过程划分为最小生态需水及适宜生态需水两个等级,要求枯水期水库放水过程满足河流最小生态需水要求,维持下游生态系统不发生退化;丰水期水库放水过程尽可能贴近适宜生态需水标准,为下游提供良好生境。

不过,目前对生态调度的研究尚不完善,理论方法还存在不足之处,如最小生态需水、适宜生态需水的计算方法,以及水库兴利效益与生态效益间协调方式等均需进一步研究。近年来,部分学者提出了“生态水库”的概念,即在传统兴利库容的基础上设置“生态库容”以保障下游生态安全,也是供水水库生态调度研究中的一个可行方向。

参考文献(References):

- [1] YI Yur jun, WANG Zhao yin, YANG Zhi feng. Impact of the Gezhouba and Three Gorges Dams on habitat suitability of carps in the Yangtze River[J]. Journal of Hydrology, 2010, 387(3/4): 283-291.
- [2] 蒋晓辉, 赵卫华, 张文鸽. 小浪底水库运行对黄河鲤鱼栖息地的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(18): 4940-4947. (JIANG Xiaohui, ZHAO Weihua, ZHANG Wenge. The impact of Xiaolangdi Dam operation on the habitat of Yellow River Carp[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(18): 4940-4947. (in Chinese))
- [3] 王俊娜, 李翀, 廖文根. 三峡葛洲坝梯级水库调度对坝下河流的生态水文影响[J]. 水力发电学报, 2011, 30(2): 84-90. (WANG Junna, LI Chong, LIAO Wen gen. Impacts of the regulation of Three Gorges-Gezhouba cascaded reservoirs on downstream ecohydrology[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(2): 84-90. (in Chinese))
- [4] 徐杨, 常福宣, 陈进, 等. 水库生态调度研究综述[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(6): 32-37. (XU Yang, CHANG Fuxuan, CHEN Jin, et al. Review of research on ecological operation of reservoir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(6): 32-37. (in Chinese))
- [5] 康玲, 黄云燕, 杨正祥, 等. 水库生态调度模型及其应用[J]. 水利学报, 2010, 41(2): 134-141. (KANG Ling, HUANG Yunyan, YANG Zhengxiang, et al. Reservoir ecological operation model and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(2): 134-141. (in Chinese))
- [6] 许可, 周建中, 顾然, 等. 基于流域生物资源保护的水库生态调度[J]. 水生态学杂志, 2009, 2(2): 134-138. (XU Ke, ZHOU Jianzhong, GU Ran, et al. The effect of different reservoir operating on biological resource in the basin[J]. Journal of Hydroecology, 2009, 2(2): 134-138. (in Chinese))
- [7] 郭文献. 基于河流健康的水库生态调度模式研究[D]. 南京: 淮海大学, 2008. (GUO Wenxian. Research on reservoir ecological operation model for river health[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [8] 陈端, 陈求稳, 陈进. 基于改进遗传算法的生态友好型水库调度[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(3): 1-6, 12. (CHEN Rui, CHEN Qiwen, CHEN Jin. Reservoir operation in an ecofriendly manner based on adaptive genetic algorithm[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(3): 1-6, 12 (in Chinese))
- [9] 金鑫. 面向河流生态健康的供水水库群联合调度研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012. (JIN Xin. Study on joint operation of feeding reservoir group for river ecosystem health[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [10] Yin Xir an, Yang Zhi feng, Yang Wei. Optimized reservoir operation to balance human and riverine ecosystem needs: model development, and a case study for the Tanghe reservoir, Tang river basin, China[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(4): 461-471.
- [11] 马真臻, 王忠静, 郑航, 等. 基于低风险生态流量的黄河生态用水调度研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 63-70. (MA Zhen zhen, WANG Zhongjing, ZHENG Hang, et al. Study on ecological water use scheduling in the Yellow River based on low-risk environmental flow[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 63-70. (in Chinese))
- [12] 尹正杰, 杨春花, 许继军. 考虑不同生态流量约束的梯级水库生态调度初步研究[J]. 水力发电学报, 2013: 32(3): 66-70, 81. (YIN Zhengjie, YANG Chunhua, XU Jijun. Ecological regulation of cascade dams in the lower Jinsha river under different ecological flow constraints[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013: 32(3): 66-70, 81. (in Chinese))
- [13] 雍婷, 许银山, 梅亚东. 基于生态流量要求的调度图优化及生态库容研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 89-95. (YONG Ting, XU Yirshan, MEI Yandong. Study on optimization of operation curve and ecological storage based on ecological flow demand[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(1): 89-95. (in Chinese))
- [14] 崔瑛, 张强, 陈晓宏, 等. 生态需水理论与方法研究进展[J]. 湖泊科学, 2010, 22(4): 465-480. (CUI Ying, ZHANG Qiang, CHEN Xiaohong, et al. Advances in the theories and calculation methods of ecological water requirement[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(4): 465-480. (in Chinese))
- [15] 孙甲崧, 雷晓辉, 蒋云钟, 等. 河流生态需水量研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(1): 112-115. (SUN Jiashan, LEI Xiaohui, JIANG Yunzhong, et al. Review of research on river ecological water demand[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(1): 112-115. (in Chinese))
- [16] 郭旭宁, 胡铁松, 黄兵, 等. 基于模拟优化模式的供水水库群联合调度规则研究[J]. 水利学报, 2011, 42(6): 705-712. (GU O Xuning, HU Tiesong, HUANG Bing, et al. Joint operation rules for multi-reservoir water supply system based on the model of simulation and optimization[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(6): 705-712. (in Chinese))
- [17] 张皓天. 受水区供水水库(群)优化调度方法研究及应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2013. (ZHANG Haotian. Research and application on optimal Scheduling method of Feeding Reservoir (s) in Intake Area[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [18] 王少波, 解建仓, 孔珂. 自适应遗传算法在水库优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 480-485. (WANG Shaobo, XIE Jiancang, KONG Ke. Application of adaptive genetic algorithm in optimization of reservoir operation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(4): 480-485. (in Chinese))
- [19] 邹进. 自适应逐次逼近遗传算法及其在水库群长期调度中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(1): 267-272. (ZOU Jin. Adaptive genetic algorithm successive approximation and its application to long term reservoirs operation[J]. System Engineering Theory & Practice, 2013, 33(1): 267-272. (in Chinese))

(下转第492页)

圆弧与基岩连接,不仅可以大大减小坝踵处应力集中的程度,同时对增加坝体的抗滑稳定性也是有利的。

参考文献(References):

- [1] SL 203- 97, 中国水利水电科学研究院. 水工建筑物抗震设计规范[S]. (SL 203- 97, Specification for Seismic Design of the Hydraulic Structures[S]. (in Chinese))
- [2] SL 25- 2006, 砌石坝设计规范[S]. (SL 25- 2006, Design Specification for Masonry Gravity Dams[S]. (in Chinese))
- [3] 顾淦臣. 土石坝地震工程[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989. (GU Gan chen. Embankment Dam on Earthquake Engineering [M]. Nanjing: Hohai University Press, 1989. (in Chinese))
- [4] 裴滨. Hardfill 坝地震动力响应的比较分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(2): 85-88. (PEI Bin. Comparative analysis of seismic dynamic response of Hardfill Dam [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(2): 85-88. (in Chinese))
- [5] 林泉, 陈健云. 混凝土大坝的抗震安全评价[J]. 水利学报, 2001, 2(2): 8-15. (LIN Gao, CHEN Jianyun. Seismic safety evaluation of large concrete dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 2(2): 8-15. (in Chinese))
- [6] 王燕, 沈振中, 李怡芬. 马堵山溢流坝段应力变形及强度储备系数分析[J]. 水电能源科学, 2009(2): 100-103. (WANG Yan, SHEN Zhenzhong, LI Yifan. Stress deformation and strength reserve coefficient analysis on overflow of Madushan gravity dam[J]. Water Resources and Power, 2009(2): 100-103. (in Chinese))
- [7] 郝文化, 叶裕明. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (HAO Weirhua, YE Yuming. ANSYS Instances of Civil Engineering Application[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))
- [8] 张腾蛟, 沈振中, 梁亮, 等. 浩口混凝土重力坝非溢流坝段抗震安全评价[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 10(6): 18-22. (ZHANG Tengjiao, SHEN Zhenzhong, et al. Earthquake resistance safety evaluation of nonoverflow section of Haokou concrete gravity dam[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 10(6): 18-22. (in Chinese))
- [9] 甘磊, 沈振中, 凌春海等. 马堵山重力坝动力响应分析及安全评价[J]. 水电能源科学, 2011, 28(7): 78-81. (GAN Lei, SHEN Zhenzhong, LING Chunhai, et al. Dynamic response analysis and safety evaluation of Madushan gravity dam[J]. Water Resources and Power, 2011, 28(7): 78-81. (in Chinese))
- [10] 位敏. 高地震烈度下碾压混凝土重力坝动力特性及抗震安全分析研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005. (WEI Min. Dynamic analysis and seismic safety of RCC gravity dam in high earthquake intensity [D]. Wuhan: Wuhan university, 2005. (in Chinese))
- [11] 邹辉. 复杂地基上混凝土拱坝抗震分析的理论与方法[D]. 南京: 河海大学, 2006. (ZOU Hui. Anti seismic analytic theories and methods of concrete arch dam on complicated foundation [D]. Nanjing: Hohai university, 2006. (in Chinese))
- [12] 张传国. Ansys 在混凝土重力坝振型分解反应谱分析中的应用[J]. 云南水力发电, 2009, 25(6): 24-27. (ZHANG Chuan guo. Application of ansys to analysis of vibration type decomposition response spectrum of a concrete gravity dam [J]. Yunnan water power, 2009, 25(6): 24-27. (in Chinese))
- [13] 张晓燕, 任旭华, 邵勇. 碾压混凝土重力坝陡峭建基面的动力稳定分析[J]. 红水河, 2008, 26(4): 35-38. (ZHANG Xiaoyan, REN Xuhua, et al. Dynamic stability analysis on steep foundation base of RCC gravity dam [J]. Hongshui River, 2008, 26(4): 35-38. (in Chinese))
- [14] 黄宜胜, 李建林, 常晓林. 基于振型分解反应谱法重力坝抗震安全评价[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2011, 32(6): 11-16. (HUANG Yisheng, LI Jianlin, CHANG Xiaolin. Seismic safety evaluation of gravity dam based on the mode decomposition response spectrum method [J]. Journal of China Three Gorges University, 2011, 32(6): 11-16. (in Chinese))
- [15] 焦爱萍, 刘宪亮, 许新勇. 宝泉浆砌石重力坝三维有限元动力分析[J]. 水利水电工程学报, 2007(1): 36-40. (JIAO Aiping, LIU Xianliang, XU Xinyong. Three dimension finite element dynamic analysis of Baoquan masonry gravity dam [J]. Hydroscience and Engineering, 2007(1): 36-40. (in Chinese))
- [16] 中华人民共和国水利部. 混凝土重力坝设计规范(SL 319-2005)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Design Specification for Concrete Gravity Dams (SL 319-2005) [S]. Beijing: China Water Press, 2005. (in Chinese))
- [17] 河南省博爱县青天河水库大坝安全评价报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2012. (Safety assessment report of Qingtianhe reservoir dam of Boaixian in Henan Province [R]. Nanjing: Jiangsu Hydraulic Research Institute, 2012. (in Chinese))
- [20] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 国防工业出版社, 1996. (ZHOU Ming, SUN Shudong. Genetic algorithms theory and Applications [M]. National Defence Industry Press, 1996. (in Chinese))
- [21] 张忠波, 张双虎, 蒋云钟, 等. 改进的遗传算法在水库调度中的应用[J]. 人民黄河, 2012, 34(8): 54-56. (ZHANG Zhongbo, ZHANG Shuanghu, JIANG Yunzhong, et al. Application of improved genetic algorithm in reservoir optimal operation [J]. Yellow River, 2012, 34(8): 54-56. (in Chinese))
- [22] 郝彩莲, 金鑫, 严登华, 等. 基于分布式水文模型的水库生态调度方案修正研究——以双峰寺水库为例[J]. 水利水电技术, 2013, 44(12): 88-91. (HAO Cailian, JIN Xin, YAN Denghua, et al. Distributed hydrological model based study on revision of reservoir operation scheme: A case study on Shuangfengsi Reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(12): 88-91. (in Chinese))
- [23] 河北省水利水电勘测设计研究院. 双峰寺水库工程项目可行性研究报告[R]. 2009. (Hebei Research Institute of Investigation & Design of Water Conservancy & Hydropower. The feasibility study report of Shuangfengsi Reservoir project [R]. 2009. (in Chinese))

(上接第 467 页)