

基于 3E 决策的崆峒水库优化调度

肖大太¹, 张永明^{1,2}, 郑健¹, 王鹏全¹, 石占涛¹

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省水利厅, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 传统的水库调度以兴利和除害为主要目的, 而基于 3E 决策的水库调度则实现了水库经济、社会和生态的多目标优化调度。首先采用逐月最小和频率计算方法计算最小生态流量和适宜生态流量, 选定适宜于崆峒水库的生态流量; 然后建立 3E 模型, 采用二元比较模糊决策分析方法确定各个目标的不同权重, 将多目标单一化; 最后采用粒子群算法对模型进行求解。求解结果表明: 使水库供水效益最大的供水量为 $4.622 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其中农业总供水量为 $3.630 \times 10^4 \text{ m}^3$, 工业和生活总供水量 $992 \times 10^4 \text{ m}^3$, 而维持生态基流的生态用水量为 $2.311 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。这可为水库的后期调度提供决策依据, 也为水库的供水矛盾体提出了加强水利改革的建议。

关键词: 优化调度; 3E 决策; 生态流量; 供水效益; 崆峒水库

中图分类号: TV697.11; TV213.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)06-0158-04

Kongtong reservoir optimal operation based on 3E decision

XIAO Datai¹, ZHANG Yongming^{1,2}, ZHENG Jian¹, WANG Pengquan¹, SHI Zhantao¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Water Conservancy of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The traditional reservoir operation mainly meet the demand of water supply and flood control, while the purpose of the reservoir operation based on 3E decision realized economically, socially and ecologically multi-objective reservoir optimal operation achieving. First, the monthly minimum and frequency calculation methods were used to calculate the minimum and the optimal ecological flows, and the best ecological flow suitable for Kongtong reservoir was selected; then, a 3E model was established, the weights of different goals were determined using the binary comparison of fuzzy decision analysis method to simplify multi-objectives; Finally, the model was solved using the particle swarm optimization algorithm. The results showed that: the reservoir water supply which had the maximum benefit was 46.22 million m^3 , of which the agricultural total water supply was 36.3 million m^3 , total industrial and domestic water supply was 9.92 million m^3 , while the ecological water utilization for maintaining ecological base flow was 23.11 million m^3 . This not only provides the basis for decision of the reservoir in the future operation, but also proposes suggestions of strengthen water conservancy for solving the contradiction of water reservoir.

Key words: optimal operation; 3E decision; ecological flow; water supply efficiency; Kongtong reservoir

权衡经济社会发展和生态效益的关系, 就是在经济发展 (Economy)、社会公平 (Equity) 和保护生态 (Ecology) 这 3E 间寻求平衡, 达到综合效益最大。

水库的调度应用除了考虑防洪、灌溉、供水、发电、航运等各项功能外, 还要利用水库具有灵活调控水位、流量的特点, 实施以保护和改善环境及生态为目的的调度运行, 消除或缓解兴建水库对生态和环

境带来的不利影响^[1]。以往, 水库的调度只是强调兴利和除害目标, 而对水库下流生态保护和库区水环境保护重视不够, 大多数的水库调度方案没有考虑水库坝下游生态保护和库区水环境保护的要求^[2]。国外考虑生态效应的水库调度研究始于 20 世纪 70 年代^[3], 1970-1972 年南非潘勾拉水库制造人造洪峰创造鱼类产卵条件^[4]; 国内对水库的生

收稿日期: 2016-07-13; 修回日期: 2016-08-31

基金项目: 流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究项目 (IWHR-SKL-2013)

作者简介: 肖大太 (1990-) 男, 甘肃武威人, 硕士研究生, 主要从事水资源管理与优化配置方面的研究。

态调度研究起步较晚,董哲仁^[5]于2003年提出了人与自然和谐共处的生态水工学;康玲等^[6]选择水文典型年对丹江口水库的生态调度方案进行了研究;金鑫等^[7]考虑供水、发电和生态需水这3个目标的前提下进行了水库的多目标调度研究。这些研究或是单一的生态调度研究,或是只考虑经济和生态效益的水库优化调度。如何协调经济、社会和生态效益是水库优化调度要解决的关键问题。基于3E决策的水库生态调度就是在考虑水库经济效益和社会效益的前提下,将生态目标纳入其中,作为3大目标之一,贯穿于水库的调度中来。

1 工程概况

泾河属黄河流域,是黄河支流渭河最大的支流,发源于六盘山东麓。流域属温带半湿润气候半干旱区,平均降水量680 mm,主要集中在6-9月,占年降水量的69.5%。流域径流主要来源于大气降水,暴雨是河流的主要补给形式,且径流年际变化大,变差系数0.5。

崆峒水库是平凉市崆峒区唯一的调蓄水库,坝址位于平凉市西郊约12 km的泾河干流上。工程于1971年10月开工建设,1980年完工并投入使用。主要由拦河坝、泄洪洞、输水洞、溢洪道及坝后水电站和灌区引水枢纽等部分组成。控制集水面积602 km²,多年平均流量3.59 m³/s,多年平均径流量1.132 × 10⁸ m³。水库总库容2 970 × 10⁴ m³,兴利库容2 230 × 10⁴ m³,死库容600 × 10⁴ m³。水库为不完全年调节水库,现状任务以灌溉为主,兼顾城区生活及平凉电厂供水,不同任务其设计保证率和用水要求均不同。

基于崆峒水库的供水任务,水库供水保证率分为三级,城镇生活用水、火电工业用水设计保证率为95%,滴灌用水设计保证率为90%,管灌用水设计保证率为50%。近期崆峒水库改扩建项目已获批,改扩建后最大坝高97 m,改扩建增加坝高15 m;库

容0.52 × 10⁸ m³,增加库容0.22 × 10⁸ m³,总供水量0.46 × 10⁸ m³。

2 崆峒水库需水计算

2.1 社会经济需水预测

崆峒水库的供水范围为泾河灌区、城区生活和平凉电厂用水。现状年2013年崆峒水库总供水量为6 000 × 10⁴ m³,其中农业供水5 280 × 10⁴ m³,生活供水420 × 10⁴ m³,工业供水300 × 10⁴ m³。预计到2020年,供水范围各行业总需水量将达到6 762 × 10⁴ m³,其中城市生活需水1 587 × 10⁴ m³,平凉电厂需水1 545 × 10⁴ m³,农业需水3 630 × 10⁴ m³。

2.2 崆峒水库下游河道生态需水计算

对于流域生态需水量的计算多将其分为河道内生态需水和河道外生态需水。河道内生态需水指保障河道水文过程完整、维持水生和岸栖生物生存、维持河道一定稀释净化能力、保持河道水流泥沙冲淤平衡所需的最小水量^[8];河道外生态需水指维持陆地生态系统功能所需水量,有降雨直接补给和水利工程提供。本次研究生态需水专指河道内生态需水。

目前河道内生态需水的计算方法很多,大体可以分为:水文学法、水力学法^[9]、生境模拟法、整体分析法^[10]、变动范围法等。以Tennant(Montana)方法为代表的水文学方法往往只给出河道内生态需水的一个量值,未对流量过程进行具体的要求,这与“河流生态系统的生物组成、结构和功能依赖于河流水文情势^[11]”这一认识不相符。因此在计算生态流量时,应充分体现河流水文过程的丰枯变化特征,考虑不同时期生态系统的不同需求。本文采用逐月最小和频率计算方法计算最小生态流量和适宜生态流量。并用Tennant法^[12]对计算结果进行评价。

利用崆峒水库建设前崆峒峡水文站和建库后库水位观测资料及实测出库站的水文资料的还原数据,采用逐月最小流量法和逐月频率算法分别计算最小生态流量和适宜生态流量。计算结果见表1。

表1 崆峒水库生态流量计算结果

计算方法	m ³ /s											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
最小生态流量	0.57	0.19	0.17	0.6	0.87	1.18	1.09	1.47	1.17	0.79	0.62	0.19
适宜生态流量 <i>p</i> = 50%	2.11	1.78	1.82	2.20	2.47	1.67	3.29	7.09	2.92	5.35	3.94	3.76
适宜生态流量 <i>p</i> = 75%	1.07	1.32	1.35	1.51	1.51	1.26	2.60	7.54	3.41	2.37	1.90	1.32

利用Tennant法对栖息地质量和流量关系的描述,对最小生态流量和适宜生态流量进行评价,评价

结果表明:平水年(*p* = 50%)的逐月平均流量作为适宜生态流量较为理想,但考虑到崆峒水库实际调

度状况和供水矛盾的日益突出,本研究以最小生态流量作为水库生态基流的下限,并以此实施调度。

3 优化调度模型建立

3.1 目标函数

基于3E决策的水库优化调度就是以水库产生的经济效益、社会效益和生态效益的综合效益最大为目标函数。经济效益包括发电、灌溉、供水等效益;社会效益包括防洪、供水安全等效益;生态效益包括保持河道不断流、满足特定断面稀释净化水量等要求。

(1) 总目标函数

$$W = E_1\lambda_1 + E_2\lambda_2 + E_3\lambda_3 \quad (1)$$

式中: E_1 、 E_2 、 E_3 分别为经济效益、社会效益和生态效益; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为其所对应的权重。

(2) 经济效益最大函数

崆峒水库的主要功能是提供农业灌溉用水和城镇居民及工业用水,故以水库供水的综合经济效益最大为经济目标函数:

$$E_1 = \max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \alpha_{it} x_{it} \tau_i \quad (2)$$

式中: α_{it} 第 i 个用水户第 t 时段的用水效益系数; x_{it} 为水库向第 i 个用水户第 t 时段的供水量 m^3/s ; τ_i 为第 t 时段的总时长 s ; N 为水库的利用项数; T 为水库调度期总时段数。

(3) 社会效益最大函数

以防洪效益最大为目标,对于供水型水库,除承担供水的任务外,还要承担防洪的重任。要满足在汛期库区防洪安全及下游防洪控制断面安全泄量等要求,这里以出库流量最大为目标函数,即超标水量和最小。

$$E_2 = \min \sum_{t=1}^T (q_t - q_0) \tau_t \quad (3)$$

式中: q_t 为水库在 t 时段的总下泄流量 m^3/s ; q_0 为水库的安全下泄流量 m^3/s 。

(4) 生态效益最大函数

以模仿河道天然流量情势为目标,即调节后径流越接近天然流量模式,对河流生态系统越有利^[13]。所以采用标准差反映调节后径流与天然径流的波动程度。因为径流在汛期完全可以满足生态需水要求,只在非汛期与天然径流相差很大,所以只要要求河道流量在非汛期与天然径流的波动程度最小,故生态效益的最大函数为:

$$E_3 = \min \sum_{t=1}^T (q_t - \bar{q}_t) \quad (4)$$

式中: q_t 为水库下游控制断面第 t 时段的下泄流量, m^3/s ; \bar{q}_t 为水库控制断面第 t 时段的多年平均流量, m^3/s 。

3.2 约束条件

(1) 水量平衡约束

$$V_{t+1} = V_t + (I_t - Q_t - S_t) \Delta t \quad (5)$$

式中: V_{t+1} 和 V_t 分别为崆峒水库第 t 时段末和 t 时段初的下泄流量 m^3/s ; I_t 为 t 时段的入库流量 m^3/s ; Q_t 为 t 时段的出库流量 m^3/s ; S_t 为 t 时段的弃水量, m^3/s ; Δt 为第 t 时段末与第 t 时段初的间隔时间。

(2) 崆峒水库蓄水位约束

$$Z_{\min} \leq Z_t \leq Z_{\max} \quad (6)$$

式中: Z_t 为水库 t 时段的蓄水位, Z_{\min} 和 Z_{\max} 为水库 t 时段允许的最低水位和最高水位, m 。其中汛期允许的最高水位为防洪限制水位 1 522.5 m,非汛期允许的最高水位为正常蓄水位 1 523.2 m,最低水位均为死水位 1 495.3 m。

(3) 水库库容约束

$$V_{\min} \leq V_t \leq V_{\max} \quad (7)$$

式中: V_{\min} 为水库 t 时段所允许的最小库容 600 m^3 ; V_{\max} 为水库 t 时段所允许的最大库容 $2 970 \text{ m}^3$; V_t 为水库在 t 时段的库容 m^3 。

(4) 水库生态下泄流量约束。要求水库的下泄流量满足最小生态流量值。

(5) 非负约束:所有的决策变量均非负。

3.3 模型参数确定

(1) 权重系数。利用参考文献[14]中的二元比较模糊决策分析方法确定目标函数权重,目标集: $P = \{p_1, p_2, p_3\}$, p_1, p_2, p_3 分别代表经济目标,社会目标和生态目标。

二元比较的标度矩阵:

$$E = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

二元比较矩阵:

$$\beta = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.65 & 0.7 \\ 0.35 & 0.5 & 0.6 \\ 0.3 & 0.4 & 0.5 \end{bmatrix}$$

最后得出目标集函数的权重:

$$\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (0.45, 0.32, 0.23)$$

所以经济目标、社会目标和生态目标的权重系

数分别为 0.45、0.32 和 0.23。

(2) 效益系数。水库供水效益系数的确定可参考文献 [15]: 农业与工业的供水效益系数采用其经济产值与用水量的比值确定; 由于生活用水和生态用水的效益不易量化, 考虑其重要性赋予其较大值。故崆峒水库的生活和生态供水效益系数都为 400 元/m³, 工业供水效益系数为 210 元/m³, 农业供水效益系数为 10 元/m³。

3.4 优化算法及模型求解

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, 简称 PSO)是一种通用的启发式搜索技术, 源于对鸟类捕食行为的研究^[16]。它是从随机解出发, 通过迭代寻找最优解, 也是通过适应度来评价解的品质, 但比遗传算法规则更简单, 它没有遗传算法的“交叉”和“变异”操作, 通过追随当前搜索到的最优值来寻找全局最优。这种算法以其实现容易、精度高、收敛快等优点引起了学术界的重视, 并且在解决实际问题中展示了其优越性。粒子群算法流程图见图 1。

本文以 2013 年为调度年, 按月求解多目标优化问题, 即以月份为供水时段单位, $t = 1, 2, \dots, 12$ 。在采用粒子群算法求解时, 参数设置为: 惯性权重 w 为

0.8, 加速因子 c_1 和 c_2 都为 2, 种群规模 N 为 100, 迭代次数 M 为 1000, 粒子维数 D 为 3。崆峒水库优化调度结果见表 2。

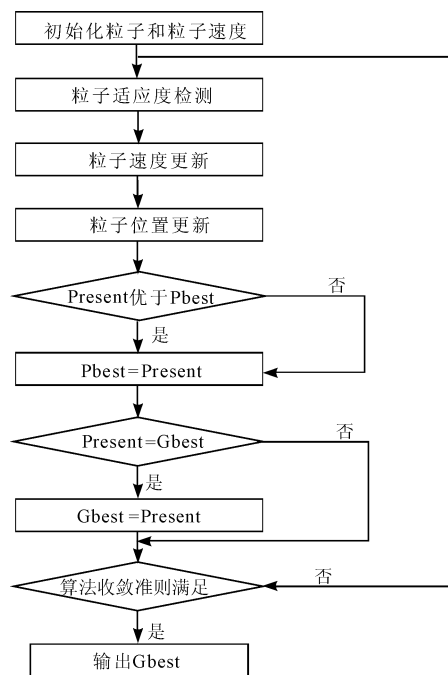


图 1 粒子群算法流程图

表 2 崆峒水库调度成果表

10⁴ m³

月份	生活供水		工业供水		滴灌		管灌		生态基流	
	常规	优化	常规	优化	常规	优化	常规	优化	常规	优化
1 月	35	40	25	44	0	0	0	0	35	148
2 月	35	40	25	36	0	0	0	0	31	49
3 月	35	40	25	44	0	0	759	594	35	44
4 月	35	40	25	42	0	0	485	286	34	156
5 月	35	40	25	44	0	0	901	704	35	226
6 月	35	40	25	42	0	0	855	633	34	306
7 月	35	40	25	44	0	0	790	585	35	283
8 月	35	40	25	44	0	0	492	130	35	381
9 月	35	40	25	42	0	0	0	0	34	303
10 月	35	40	25	44	43	43	0	0	35	205
11 月	35	40	25	42	143	143	664	364	34	161
12 月	35	40	25	44	148	148	0	0	35	49

求解结果表明: 在考虑水库的最小生态流量和泄洪安全的前提下, 使水库供水效益最大的供水量为 $4.622 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其中农业总供水量 $3.630 \times 10^4 \text{ m}^3$, 工业和生活总供水量 $992 \times 10^4 \text{ m}^3$, 而维持生态基流的生态用水量为 $2.311 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。与常规调度相比, 农业供水量减少 $1.650 \times 10^4 \text{ m}^3$, 工业和生活

供水量增加 $272 \times 10^4 \text{ m}^3$, 生态供水量增加明显, 增加 $1.899 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

4 结 论

- (1) 本文针对 3E 决策建立了水库的多目标优 (下转第 168 页)

- [63] Calayir Y, Karaton M. Seismic fracture analysis of concrete gravity dams including dam - reservoir interaction [J]. Computers & Structures, 2005, 83(19-20): 1595 - 1606.
- [64] 潘坚文, 张楚汉, 金峰. 基于扩展有限元法的含纵向裂缝重力坝破坏分析[J]. 水力发电学报, 2011, 30(3): 138 - 144.
- [65] Wang Bosheng, He Zongcheng. Crack detection of arch dam using statistical neural network based on the reductions of natural frequencies [J] Journal of Sound and Vibration, 2007, 302(4-5): 1037 - 1047.
- [66] 王柏生, 何宗成, 袁野. 混凝土拱坝裂缝损伤检测振动法的试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(4): 738 - 742.
- [67] 王少伟, 包腾飞, 徐波. 裂缝影响下碾压混凝土拱坝整体安全度评价[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(4): 1479 - 1486.
- [68] 严成斌, 向贤镜. 坝体裂缝对拱坝承载力的影响[J]. 东北水利水电, 2011, 29(6): 7 - 8 + 11.
- [69] 王怀智. 存在水平裂缝的回龙混凝土坝安全性和稳定性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [70] 梁月英. 混凝土坝裂缝危害性分析方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [71] 郑瑾莹. 混凝土坝中各种接触面的数值模拟方法及工程应用[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2006.
- [72] 刘耀儒, 王峻, 杨强, 等. 小湾拱坝坝体裂缝对拱坝受力和稳定的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1132 - 1139.
- [73] 邢林生. 佛子岭连拱坝耐久性分析[J]. 水力发电, 2006, 32(10): 98 - 101.
- [74] 邢林生, 周建波. 在役混凝土坝耐久性研探[J]. 大坝与安全, 2012, 24(2): 9 - 18.
- [75] 张志敏, 龙建辉, 周子东. 某RCC坝体廊道大量白色异物析出成因及对坝体的危害分析[J]. 太原理工大学学报, 2013, 44(6): 776 - 780.

(上接第161页)

化调度模型, 并采用粒子群算法对模型进行求解。经优化调度后的供水量能够满足生活、工业和生态用水, 也可以满足50%保证率下的农业用水, 并使经济、社会和生态的综合效益达到最大, 实现全面协调可持续发展。这为崆峒水库未来的运行调度提供了指导依据。

(2) 本文的优化调度是在径流平水年的前提下得出的结果, 没有针对丰、平、枯三个系列做逐一比对, 得出的结果只是一个平均水平。要应对以后出现的特殊情况, 就需要在供水量最大的农业和生态之间进行权衡抉择, 原则还是统筹考虑区域的长远可持续发展。因此, 崆峒区须加强水生态文明建设、积极培育水权水市场、加大农业种植结构的调整, 以实现水资源的高效利用和区域经济社会的长足发展。

参考文献:

- [1] 钮新强, 谭培伦. 三峡工程生态调度的若干探讨[J]. 中国水利, 2006(14): 8 - 10.
- [2] 蔡其华. 充分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, 2006(2): 14 - 17.
- [3] 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): 33 - 37.
- [4] 方子云. 中美水库水资源调度策略的研究和进展[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(1): 1 - 5.
- [5] 董哲仁. 生态水工学 - 人与自然和谐的工程学[J]. 水利水电技术, 2003, 34(1): 14 - 16.
- [6] 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.
- [7] 金鑫, 郝彩莲, 王刚, 等. 供水水库多目标生态调度研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(3): 463 - 467.
- [8] Lumbroso D. Handbook for the assessment of catchment water demand and use [M]. Oxon: HR Wallingford, 2003: 20 - 41.
- [9] 王西琴, 刘昌明, 杨志峰. 生态及环境需水量研究进展与前瞻[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 507 - 514.
- [10] Hughes M F. A decision support system for an initial "low confidence" estimate of the quantity component for the re-serve of rivers [M]. South Africa: Rhodes University, 1999: 5 - 45.
- [11] 舒畅, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 基于变异性范围法(RVA)的河流生态流量估算[J]. 生态环境学报, 2010, 19(5): 1151 - 1155.
- [12] 郭利丹, 夏自强, 林虹, 等. 生态径流评价中的Tennant法应用[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1787 - 1792.
- [13] 张成凤, 蔡焕杰. 基于遗传算法的榆林水资源多目标优化配置(I)[J]. 人民长江, 2008, 39(12): 56 - 57.
- [14] 王战平. 宁夏引黄灌区水资源优化配置研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2014.
- [15] 邓坤, 张璇, 谭炳卿, 等. 多目标规划法在南四湖流域水资源优化配置中的应用[J]. 水科学与工程, 2010, 5(5): 14 - 18.
- [16] 朱记伟, 张洪波, 辛琛, 等. 水库调度PSO优化模型及求解方法[J]. 系统工程, 2010(1): 105 - 112.