

水文序列变异对水库调度运行的影响研究

武连洲, 白涛, 哈燕萍, 黄强

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

摘要:以安康水库为研究对象,探讨水文序列变异对水库调度运行结果的影响。利用 Mann-Kendall 秩次检验法、有序聚类和累积距平 3 种方法诊断 1950-2014 年安康入库径流序列,并确定变异点;同时,建立发电量最大模型,利用遗传算法优化求解变异前、后径流序列的调度结果。结果表明:安康水库入库径流在 1984 年处发生变异,变异后序列径流呈现减小的趋势;对比变异前,电站在变异后运行过程中多年平均发电量和整体运行水位都呈现降低的趋势,桃汛期内水库水位是上升的趋势。该研究在水电站设计、水库运行等方面具有重要的应用价值。

关键词: 水库调度规律; 变异诊断; Mann-Kendall; 优化调度

中图分类号: TV697.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)04-0088-05

Effect of hydrological sequence variation on operation reservoir

WU Lianzhou, BAI Tao, HA Yanping, HUANG Qiang

(State Key Lab Cultivation Base of Northwest Arid Ecology and Hydraulic Engineering,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Taking Ankang reservoir as the research object, this paper investigated the effects of hydrological sequence variation on the results of reservoir operation. It used 3 methods such as Mann-Kendall rank test method, sequential clustering and the anomalies accumulate method to diagnosis the runoff series in Ankang reservoir from 1950 to 2014 so as to determine the aberrance point and established the model of energy maximization, used Genetic Algorithm optimization to solve the reservoir operation results of two inflow runoff series before the aberrance point (serious 1) and after aberrance point (serious 2). The results show that: the runoff in Ankang reservoir occurred variation in 1984, and then water yield of the variation sequences showed a decreasing trend; compared with the serious 1, the average electricity generation and the overall water level of Ankang reservoir has a decreasing trend in serious 2, but the water level is opposite in peach flood season. The result has great practical value for the design of hydropower station and the operation of reservoir and so on.

Key words: reservoir operation rule; variation diagnosis; Mann-Kendall; optimal operation

水文序列是一定时期内气候条件以及人类活动等综合作用的产物,其本身受多种因素的影响,诸如人为气候变化,资源的开发利用以及植被覆盖情况等,众多不确定的因素影响了降雨的形成过程以及径流的产流、汇流过程,在某种程度上来讲,部分观测到的径流量实际上已经不是天然的过程,而是经过人为干扰之后径流过程^[1]。因此随着时间的推移,流域内水文序列的一致性也有可能遭到破坏,即径流序列可能发生变异。目前,国内外学者针对水

文变异的研究主要集中在诊断变异方法方面以及各个流域上的诊断应用。常用的方法包括相关系数法, Spearman 秩次相关法,有序聚类法, Mann-Kendall 秩次检验法,累积距平法等^[2]。我国的学者在黄河、渭河^[3-6]等流域进行了大量的变异诊断研究,集中在变异类型判定以及变换环境下水文序列的一致性研究方面,但是,径流序列作为水库调度运行设计的重要基础资料,针对径流序列变异与水库调度之间的响应关系仍缺乏研究。

收稿日期: 2016-05-15; 修回日期: 2016-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409210, 51179149, 51190093); 水利公益性行业科研专项经费项目(201501058)

作者简介: 武连洲(1990-), 男, 山东枣庄人, 在读硕士研究生, 主要从事水库调度研究。

通讯作者: 白涛(1983-), 男, 陕西扶风人, 博士后, 讲师, 主要从事水资源系统工程研究。

因此,本文以安康水电站为研究对象,诊断其入库径流序列,同时建立发电量最大模型,利用径流变异前后长系列和典型年调度结果,分析水库调度规律的变化,探究径流序列变异与水库调度之间响应关系。该研究可丰富水文变异的理论体系,了解变异对水资源系统工程的影响,合理规划水库的设计特征参数,充分挖掘调度潜力,同时通过估算发电量变化而引起的经济损失进一步认清保护、还原生态的必要性。

1 变异诊断方法

本文选取的诊断方法包括:累积距平法^[7]、有序聚类法^[8-9]和 Mann - Kendall 秩次检验法^[10-13], 3种诊断结果互相验证,确保结果合理、可靠。

(1) 累积距平。累积距平法是由曲线直观判断序列变化趋势。设水文序列为 (x_1, x_2, \dots, x_n) , t 时刻的累积距平值为:

$$\hat{x}_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad (t = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中: \bar{x} 为水文序列的平均值。

计算各个时刻的累积距平值并绘制累积距平曲线。若累积距平曲线呈上升趋势,表示距平值增加,原始水文序列有上升的趋势,反之则为下降的趋势,累积距平曲线上升与下降的转折点就是水文序列的潜在变异点。

(2) 有序聚类法。有序聚类法是通过有序分类来寻求序列最优分割点,使得同类之间的离差平方和较小,不同类之间的离差平方和较大。设水文序列为 (x_1, x_2, \dots, x_n) , 其可能存在的分割点为 τ , 则分割点前后的离差平方和可表示为:

$$V_\tau = \sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x}_\tau)^2 \quad (2)$$

$$V_{n-\tau} = \sum_{i=\tau+1}^n (x_i - \bar{x}_{n-\tau})^2 \quad (3)$$

式中: $\bar{x}_\tau, \bar{x}_{n-\tau}$ 分别代表分割点 τ 前后径流序列的均值。

总离差平方和为:

$$S_n(\tau) = V_\tau + V_{n-\tau} \quad (4)$$

当 $S = \min_{2 \leq \tau \leq n-1} \{S_n(\tau)\}$ 时,认为最优分割点为 τ , 最优分割点也是该序列的潜在变异点。

(3) Mann - Kendall 秩次检验法。Mann - Kendall 秩次检验法(以下简称 MK 法)是世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法。在 MK 检验中,设 H_0 为水文序列 (x_1, x_2, \dots, x_n) 是 n 个独立的随机变量同分布的样本;备择假设 H_1 是双边检

验,对于所有的 $k, j \leq n$, 且 $k \neq j$, x_k 和 x_j 的分布是不相同的。定义秩序列 S_k , 统计量 UF_k 和 UB_k , 计算公式如下:

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=i}^{i-1} \alpha_{ij} \quad (5)$$

$$(k = 2, 3, 4, \dots, n, \quad 1 \leq j \leq i)$$

$$UF_k = \frac{|S_k - E(S_k)|}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (6)$$

$$(k = 1, 2, 3, \dots, n)$$

式中:若 $x_i > x_j$, 则 $\alpha_{ij} = 1$, 反之 $\alpha_{ij} = 0$ 。 $E(S_k)$ 和 $\text{Var}(S_k)$ 分别为序列 S_k 的均值和方差, $E(S_k) = k(k+1)/4$, $\text{Var}(S_k) = k(k-1)(2k+5)/72$ 。

UF_k 为标准正态分布, 给定显著性水平 α , 若 $|UF_k| > U_{\alpha/2}$, 则表明序列存在明显的趋势变化。若 $UF_k > 0$, 表明序列有上升的趋势, 反之为下降的趋势。将时间序列 x 按逆序排列, 再按照上式计算, 同时使 $UB_k = UF_k (k = n, n-1, \dots, 2, 1)$, $UB_1 = 0$, 绘制 UF_k, UB_k 曲线和临界值直线图。若 UF_k 曲线超过临界直线时, 表明上升或下降趋势显著。如果 UF_k, UB_k 两条曲线在临界直线之间出现交点, 则交点就是水文序列的潜在变异点。

2 水库发电优化调度模型

本文选取发电量作为主要评价指标, 即通过发电量的变化来判定径流变异对水库调度规律的影响, 因此建立发电量最大调度模型, 模型的目标函数和约束条件如下。

(1) 目标函数:

$$E = \max \sum_{i=1}^T N_i \cdot \Delta t \quad t \in T \quad (7)$$

(2) 约束条件

水量平衡约束

$$V_{t+1} = V_t + (QI_t - QO_t) \cdot \Delta t \quad (8)$$

水库库容、流量、水位约束

$$V_{\min, t} \leq V_t \leq V_{\max, t} \quad (9)$$

$$Q_{\min, t} \leq QO_t \leq Q_{\max, t} \quad (10)$$

$$Z_{\min, t} \leq Z_t \leq Z_{\max, t} \quad (11)$$

电站出力约束

$$N_{\min, t} \leq N_t \leq N_{\max, t} \quad (12)$$

式中: E 为调度期内的总发电量, $10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$; N_i 为第 i 时刻水库平均出力, MW ; Δt 为时段长, s ; T 为时段数目。 V_{t+1}, V_t 分别表示第 $t+1$ 和 t 时刻的库容, 10^8 m^3 ; QI_t, QO_t 分别表示第 t 时刻的水库入库流量和出库流量, m^3/s 。 $V_{\max, t}, V_{\min, t}$ 分别表示第 t 时刻水

库库容的上、下限, 10^8 m^3 ; $Q_{\max,t}$ 、 $Q_{\min,t}$ 分别表示第 t 时刻水库下泄流量的上、下限, m^3/s ; $Z_{\min,t}$ 、 $Z_{\max,t}$ 分别表示第 t 时刻水库水位的上、下限, m 。 $Q_{\min,t}$ 要结合下游综合用水等条件确定, $Z_{\min,t}$ 一般取死水位, $Q_{\max,t}$ 、 $Z_{\max,t}$ 要综合防洪要求确定。 $N_{\max,t}$ 、 $N_{\min,t}$ 分别表示第 t 时刻水库电站出力的上、下限, MW ; $N_{\max,t}$ 取电站装机容量, $N_{\min,t}$ 取保证出力。

本文选取遗传算法^[14-15]求解上述模型,其中决策变量为各个时段内水库的水位,求解过程如图1所示。

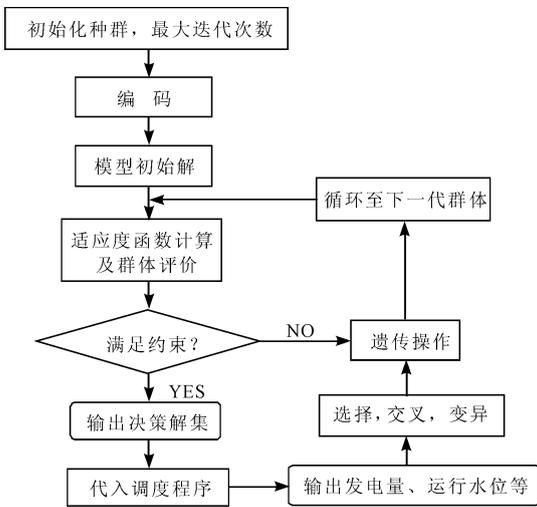


图1 遗传算法求解流程图

3 案例分析

3.1 问题描述

近年来,受气候变化和人类活动的影响,汉江流域的径流量总体呈减少的趋势,因此,本文选择安康水电站为研究对象。安康水库位于陕西省境内汉江上游,是一座以发电为主,兼顾防洪、航运等综合利用的大型水利枢纽。安康水库为不完全年调节水库,总库容为 $32 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中死库容为 $11.13 \times 10^8 \text{ m}^3$;水库死水位为 305 m ,正常蓄水位 330 m ,防洪限制水位为 325 m ,汛期主要是7,8,9月份;装机容量为 $85 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$,保证出力 $17.5 \times 10^4 \text{ kW}$,多年平均设计发电量 $28 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,电站出力系数为 8.4 ,发电保证率为 95% ,是陕西电网的主要调峰电站,其自投产运行以来,多年平均实际发电量为 $22.21 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

结合前文理论方法,采用1950年7月-2015年6月共计65年以月为时段的长系列径流序列,探讨水文变异对水电站调度规律的影响。

3.2 变异诊断分析

(1) 累积距平结果分析。经计算,1950-2015

年安康水库入库径流累积距平曲线如图2所示。由图2可知,1950-1979年间,曲线有轻微波动,径流是呈现弱增长的趋势;1979-1984年间,曲线呈显著上升趋势,距平值增加,则说明径流是显著增长趋势;1984-2015年间,曲线呈下降趋势,距平值减小,则说明径流是减小的发展趋势。通过三段时期曲线的变起伏化可以初步得知,该水文序列的潜在变异年份在1979年和1984年。

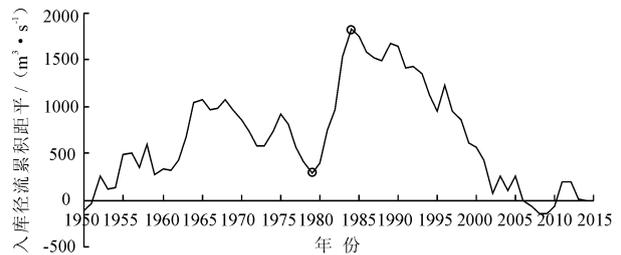


图2 1950-2015年安康水库入库径流累积距平曲线

(2) 有序聚类结果分析。经计算,1950-2015年安康水库入库径流有序聚类曲线如图3所示。由图3可知,在1984年处, S_n 取得最小值,进一步认定为1984年该水文序列的变异点。

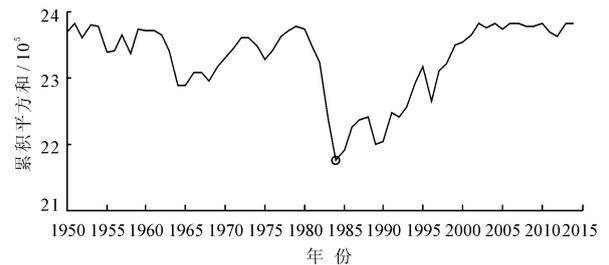


图3 1950-2015年安康水库入库径流有序聚类分析 S_n 进程图

(3) MK秩次检验结果分析。在进行MK检验时,设定置信度 $\alpha = 98\%$,计算得统计变量 $Z = -3.2157$,由 $|Z| > 1.96$,说明通过了置信度检验,即该水文序列变化趋势显著;同时,由 $Z < 0$,可知该水文序列是呈现减小的趋势,同累积距平得出的结论一致。

利用MK检验进一步确定变异点的位置,计算统计量 UF_k 和 UB_k ,检验曲线如图4所示。由图4可知,在上下临界线以内, UF_k 和 UB_k 曲线共出现5个交点,分别是1970年、1973年、1975年、1980年和1984年。

综合以上3种诊断方法,发现诊断出的变异点均含有1984年。查阅资料可知,在20世纪80年代初期,众多的人类活动影响了汉江流域的生态环境。

因此,该水文序列就分成了变异前序列(序列 1):1950 年 7 月-1984 年 6 月和变异后序列(序列 2):1984 年 7 月-2015 年 7 月。序列 1、2 的流量均值分别为 611.97 和 $522.45 \text{ m}^3/\text{s}$,二者变差系数均为 0.34 ,说明两个序列的相对波动起伏是一样的。

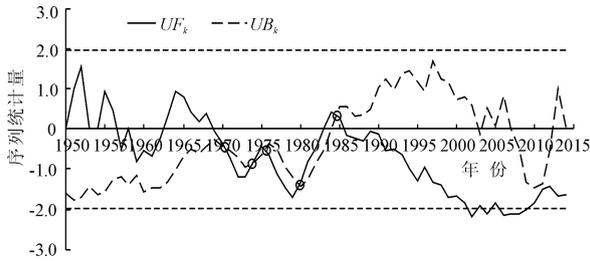


图 4 1950-2015 年安康水库入库径流 Mann-Kendall 检验曲线图

3.3 优化调度模型计算

安康水电站入库径流存在 2 个汛期,主汛期为每年 6-8 月,桃汛期为每年 3-5 月,根据安康水电站调度规则规定,在桃汛期开始和结束时均将水位控制在 305 m ,主汛期水位需控制在汛限水位(325 m)以下,并且各月下游综合用水平均流量为 $80 \text{ m}^3/\text{s}$,以

保证电站与下游河道稳定运行。以典型年各月水位为约束条件,结合以上约束,采用遗传算法,分别对发电量最大模型进行长系列和典型年优化计算。

安康水库入库径流各月分布不均匀,主汛期流量最大,桃汛期次之,根据径流量频率分析曲线选取典型年,结果如表 1 所示。

表 1 典型年选取结果

序列	丰水年(95%)	平水年(50%)	枯水年(5%)
1	1964	1956	1977
2	1996	1985	2002

在典型年和长系列计算中,均设置起调水位为 330 m ,选择操作采用轮盘赌法,交叉操作概率 0.3 ,变异操作概率 0.1 。典型年计算中种群大小为 30 ,进化终止代数数为 200 代;鉴于长系列水位优化变量过多容易陷入“维数灾”,本文选用局部寻优,即每 10 年一个时段进行寻优求解,种群大小为 150 ,进化终止代数数为 400 代。长系列和典型年发电量、水位计算结果表 2 所示,变异前后典型年水库水位变化如图 5~7 所示。

表 2 长系列以及典型年水位、发电量计算结果

序列	长系列						典型年		
	最高水位/m	最低水位/m	多年平均水位/m	年最大发电量/ $10^8(\text{kW}\cdot\text{h})$	年最小发电量/ $10^8(\text{kW}\cdot\text{h})$	多年平均发电量/ $10^8(\text{kW}\cdot\text{h})$	丰水年发电量/ $10^8(\text{kW}\cdot\text{h})$	平水年发电量/ $10^8(\text{kW}\cdot\text{h})$	枯水年发电量/ $10^8(\text{kW}\cdot\text{h})$
1	328.92	305	317.19	39.04	13.04	27.87	31.48	27.40	19.27
2	326.47	305	313.41	34.68	10.47	23.09	26.51	24.98	17.89

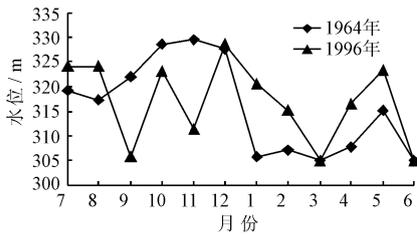


图 5 发电量最大模型变异前后丰水年各月水位变化

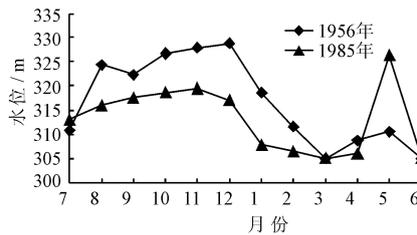


图 6 发电量最大模型变异前后平水年各月水位变化

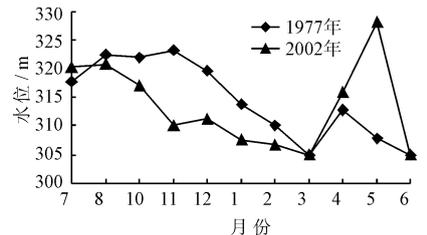


图 7 发电量最大模型变异前后枯水年各月水位变化

由表 2,图 5~7 可以看出:

(1)序列 1 中多年平均径流量比序列 2 大了 $89.52 \text{ m}^3/\text{s}$,来水量的大小导致在调度期内,序列 1 的最高水位以及多年平均水位均高于序列 2。来水量和水位共同影响机组发电量,所以,长系列结果显示序列 1 的多年平均发电量比序列 2 高了 $4.78 \times 10^8 \text{ kW}\cdot\text{h}$,按照 $0.15 \text{ 元}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 计算,则损失发电效益 $0.717 \times 10^8 \text{ 元}$ 。

(2)通过对比可以发现,多年平均发电量的设计值近似等于序列 1 的计算结果,实际运行值与序列 2 的计算结果相近,主要原因是安康水电站水库调度的设计资料序列是 1954-1990 年,设计序列主要是集中在变异前,通过调度模型的计算结果验证了序列发生了变异。

(3)通过实际运行发电量情况分析,电站多年平均运行发电量比多年平均设计发电量低了 $5.79 \times$

$10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,进一步验证了水文序列发生变异影响了水库的调度运行,导致发电量向减小的趋势发展。

(4)整体而言,序列1的平均水位高于序列2;各典型年桃汛期内,序列1的运行水位低于序列2,其他大部分月份均高于序列2。出现这种现象的主要原因是:第一,变异后径流量的减少致使电站的整体运行水位降低,同时也验证了发电量减少的趋势;第二,安康水电站位于秦岭以南,在3月底安康流域受北亚热带季风影响产生降雨,气候变化和人类活动致使季风性增强,导致在桃汛期内,序列2的平均入库径流大于序列1。因此,从水位的对比变化图可以看出,水文发生变异后,整体年均径流量减小,但桃汛期的径流量却是呈现相对增加的趋势,水文变异对安康水电站调度的影响集中在桃汛期内。

4 结 论

(1)本文采用3种方法诊断安康水库入库径流序列发生变异,并确认安康水库入库径流的变异点为1984年。水文发生变异后,整体年均径流量减小,减幅为 $89.52 \text{ m}^3/\text{s}$,但桃汛期的径流量却是呈现相对增加的趋势。

(2)通过建立发电量最大模型并利用遗传算法进行优化计算,得出变异后电站多年平均发电量减小了 $4.78 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

(3)在典型年中,变异后的水位整体高于变异前,但是,在桃汛期内变异后的运行水位高于变异前。主要原因是气候变化和人类活动致使季风性增强,导致安康流域在3月底受北亚热带季风影响产生相对较多的降雨,桃汛期内水库入库径流增加,运行水位抬高。

长时间的生态干扰破坏了流域内水文的一致性,径流序列发生变异后一定程度上降低了水电站的发电效益,由此可见保护、还原生态环境的紧迫性与必要性。本次研究仅以发电量为主要评价指标,模型目标过于单一,在下一步的研究中,计划立足于从单目标扩展至多目标,从供水、发电和灌溉等多方面来考究水文变异对水库调度规律的影响。

参考文献:

- [1] 刘春葵,占车生,夏军,等.关于气候变化与人类活动对径流影响研究的评述[J].水利学报,2014,45(4):379-385+393.
- [2] 谢平,陈广才,雷红富,等.水文变异诊断系统[J].水力发电学报,2010,29(1):85-91.
- [3] 燕爱玲,达良俊,崔易舫.渭河流域水文过程变异诊断[J].人民黄河,2015,37(9):8-10.
- [4] Galat D L, Lipkin R. Restoring ecological integrity of great rivers: historical hydrographs aid in defining reference conditions for the Missouri River[J]. Hydrobiologia, 2000, 422/423(4):29-48.
- [5] 许斌.变化环境下区域水资源变异与评价方法不确定性[D].武汉:武汉大学,2013.
- [6] 何睿,庞博,张兰影.基于水文变异诊断系统的黑河流域上中游径流序列变异[J].生态学杂志,2015,34(7):1937-1942.
- [7] 拜存有,苏莹,郭旭新.流域水文过程变点分析研究综述[J].水资源与水工程学报,2010,21(1):83-86.
- [8] 雷红富,谢平,陈广才,等.水文序列变异点检验方法的性能比较分析[J].水电能源科学,2007,25(4):36-40.
- [9] 邹悦,张勃,戴声佩,等.黑河流域莺落峡站水文过程变异点的识别与分析[J].资源科学,2011,33(7):1264-1271.
- [10] 贾宪,沈冰.近61年西安市主要气象因素变化趋势研究[J].水资源与水工程学报,2014,25(1):48-51.
- [11] 于延胜,陈兴伟.基于Mann-Kendall法的水文序列趋势成分比重研究[J].自然资源学报,2011,26(9):1585-1591.
- [12] 刘亚龙,王庆,毕景芝,等.基于Mann-Kendall方法的胶东半岛海岸带归一化植被指数趋势分析[J].海洋学报(中文版),2010,32(3):79-87.
- [13] Tao Xin'e, Chen Hua, Xu Chongyu, et al. Analysis and prediction of reference evapotranspiration with climate change in Xiangjiang River Basin, China[J]. Water Science and Engineering, 2015, 8(4):273-281.
- [14] 王万良,周慕逊,管秋,等.基于遗传算法的小水电站优化调度方法的研究与实践[J].水力发电学报,2005,24(3):6-11.
- [15] 白涛,黄强.蜂群遗传算法及在水库群优化调度中的应用[J].水电自动化与大坝监测,2009,33(1):1-4.