

基于廊道约束的水库调度图优化遗传算法

张阳¹, 钟平安^{1,2}, 徐斌¹, 刘焯¹, 胡晓勇³

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098;
3. 三峡水利枢纽梯级调度通信中心, 湖北 宜昌 443133)

摘要:为解决水库常规调度图制作经验性强、未考虑水量和水头的最佳协调问题,对常规调度图中的调度线进行进一步优化。通过编码、迭代和数学评价指标建立了调度图逐线寻优方法,以解决调度图优化中多线、多时段导致的高维问题;通过小可行域迭代计算,建立基于廊道约束的遗传算法,减少了调度图优化的工作量,缓解了调度线形态畸变问题。实例模拟表明,对于年保证率允许降低的电站,通过适当降低年保证率,可以提高多年平均发电量。

关键词:水库调度图优化;廊道约束;遗传算法;设计保证率

中图分类号:TV697 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)06-0013-05

Optimization of reservoir operation chart based on genetic algorithm using constraint of grid//ZHANG Yang¹, ZHONG Ping'an^{1,2}, XU Bin¹, LIU Ye¹, HU Xiaoyong³ (1. Collage of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing 210098, China; 3. Three Gorges Cascade Dispatching and Communication Center, Yichang 443133, China)

Abstract: The traditional reservoir operation chart is generally designed depending on the subjective experience of decision makers. As a result, it does not incorporate the coordination between water volume and water head. Thus, a further optimization for operation curves in the chart can boost the average electricity generation, which is of great importance to full utilize hydropower resources. To handle the high-dimensional problem due to the multi-line and multi-period factors in a reservoir operation chart optimization, this paper proposes the grid-based genetic algorithm through coding, iteration, and the index of mathematical evaluation. The method proposed reduces the workload of optimizing the operation chart by the introducing iterative calculation within small feasible zone. Further, it also relieves the problem of shape distortion in operation curves. The study case investigates the relationship between the constraint of assurance rate and the average power generation, and then it shows that the constraint of assurance rate has a practical important effect on production.

Key words: optimization of reservoir operation chart; constraint of grid; genetic algorithm; designed assurance rate

水电站水库调度图对确定水库运行参数、指导水库长期运行具有重要作用^[1]。常规的调度图假定过去的径流资料反映未来水文情势,采用长系列蓄水(或水位)过程线取上包或下包的方式得到水库调度线,包容性强,能够满足保证率和保证出力的要求,并通过设置加大出力线在一定程度上考虑了水量的利用问题。但是在取外包的过程中人为性强,没有统筹水量和水头的最佳协调。因此,在满足保证率与保证出力的前提下,对常规调度图中重要的调度线进行优化,对于提高水库多年平均发电量具有实用价值。

目前关于水库调度图优化的研究,主要集中在

两方面:①研究不同优化算法在调度图优化中的应用;②研究调度图优化过程中出现问题的处理方法。在算法研究中,主要有数学规划方法^[2]、启发算法^[3]和搜索算法等^[4-5];Chen等^[6-7]将遗传算法用于单库调度图制定中;尹正杰等^[8]分析了常规方法求解综合利用水库调度图存在的问题,建立了基于遗传算法的调度图优化求解模型,对单库供水调度图进行了优化。在特殊问题的处理上,刘攀等^[9]在优化计算中运用了关键点,可避免调度线的反复振荡;杨延伟等^[10]引入廊道约束,缩小了搜索空间,并使初始种群能较多地满足各种约束条件,避免早熟,收敛于全局最优解,为水库调度图优化求解方法提供

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB036406);国家自然科学基金(51179044)
作者简介:张阳(1989—),女,江苏淮安人,硕士研究生,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail:zhangyang19891008@126.com
通信作者:钟平安(1962—),男,安徽无为,人,教授,博士,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail:pazhong@hhu.edu.cn

了新思路。

本文根据调度图优化模型的特点,以多年平均发电量最大为目标,提出基于廊道约束的水库调度图优化遗传算法,并用该模型分析了设计年保证率约束对水库发电效益的影响。

1 水库调度图优化模型

年调节水库的常规调度图一般由 4 条调度线组成,分别为上基本调度线(防破坏线)、下基本调度线(限制出力线)、防弃水线、防洪调度线(图 1)。4 条调度线将水电站水库调度图分为 5 个调度区:保证出力区、降低出力区、加大出力区、装机工作区、防洪操作区。其中,加大出力区和降低出力区还可以根据需要分别绘制细化辅助线。

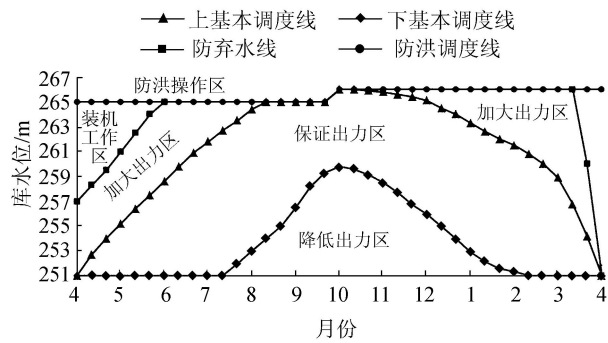


图 1 年调节水库的常规调度示意图

本文水库调度图优化以常规调度图为基础,通过调整常规调度图中的调度线实现在满足保证率与保证出力的前提下,增加多年平均发电量。

1.1 目标函数

优化调度图的目标为多年平均发电量最大:

$$E = \max \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T N_{n,t} \Delta t \right\} \quad (1)$$

式中: N 为径流资料年数; T 为年末时序或年内时段数; $N_{n,t}$ 为第 n 年 第 t 时段的发电出力; Δt 为时段长。

1.2 约束条件

1.2.1 水量平衡约束

水量平衡约束公式为

$$V_{t+1} = V_t + (Q_t - q_t) \Delta t \quad (2)$$

式中: V_t 、 V_{t+1} 分别为第 t 时段初、末水库蓄水量; Q_t 为第 t 时段的入库流量; q_t 为第 t 时段的出库流量。

1.2.2 相邻调度线关系约束

不同类别调度线不交叉,优化过程中保持各调度线的相对关系不变,本文从下到上进行编码,即对第 i 条调度线优化时,应满足:

$$Z_{i-1,t} \leq Z_{i,t} \leq Z_{i+1,t} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

式中: $Z_{i,t}$ 为第 i 条调度线第 t 时段的坐标; $Z_{i-1,t}$ 为第

t 时段下相邻调度线的坐标,其下限受死水位限制; $Z_{i+1,t}$ 为第 t 时段上相邻调度线的坐标,其上限受防洪限制水位和正常高水位限制; m 为需要优化的调度线条数。

1.2.3 调度规则限制

优化过程中计算多年平均发电量的调度规则与原始调度图相同,即

$$N_t = N(Z_t) \quad (4)$$

式中: N_t 为第 t 时段平均出力; $N(Z_t)$ 为库水位 Z_t 在调度图上的指示出力,在发电量计算中考虑装机容量限制。

1.2.4 年保证率约束

调度图优化中,每一个调度图优化方案都必须满足保证率要求:

$$P_k \geq P_0 \quad (5)$$

式中: P_k 为第 k 个调度图优化方案计算的年保证率; P_0 为设计年保证率。

2 基于廊道约束的水库调度图优化遗传算法原理

2.1 调度图优化基本思路

由于调度图上有多个调度线,每条调度线又有多个时段,整体优化是一个复杂的高维优化问题。本文采用逐线寻优法降维,具体步骤如下:①将调度图中需要优化的调度线由下而上编序, $i = 1, 2, \dots, m$;②以常规调度图中的调度线 $Z_{i,t}^0$ ($i = 1, 2, \dots, m$; $t = 1, 2, \dots, T$) 作为初始值,其多年平均发电量为 E^0 ;③固定 $Z_{2,t}^0, Z_{3,t}^0, \dots, Z_{m,t}^0$,对第 1 条调度线采用遗传算法优化得到 $Z_{1,t}^*$;④固定 $Z_{1,t}^*, Z_{2,t}^*, \dots, Z_{k-1,t}^*, Z_{k+1,t}^0, \dots, Z_{m,t}^0$,对第 k 条调度线采用遗传算法优化得到 $Z_{k,t}^*$;⑤以此类推,得到调度图 $Z_{i,t}^*$ ($i = 1, 2, \dots, m$; $t = 1, 2, \dots, T$),相应的多年平均发电量为 E^* ;⑥若 $|E^* - E^0| < \varepsilon$ 成立(ε 为收敛精度),计算结束,否则 $Z_{i,t}^*$ 设为 $Z_{i,t}^0$, E^* 设为 E^0 转步骤③。

2.2 单线优化廊道构建

受工程设计条件的限制,优化调度线与常规调度线之间调整的幅度有限。例如受设计年保证率约束的调度图优化,上下基本调度线的调整幅度是有限的,其可行域远小于保证出力区和限制出力区,在优化过程中设置动态廊道缩小寻优区间,不仅可以减少计算工作量,而且可以避免调度线形态畸变。在进行单一调度线优化时,按照邻线不交叉原则,以初始线为中心构造优化廊道,并以廊道为可行域得到优化调度线,优化调度线不触及廊道边界则优化结束,否则以优化调度线为中心构造新廊道,继续新一轮优化。具体步骤如下:①第 i 条调度线初始坐

标系列为 $Z_{i,1}^0, Z_{i,2}^0, \dots, Z_{i,t}^0, \dots, Z_{i,T}^0$; ②通过 $Z_{i,t}^0 \pm dz$ 构建廊道, 形成优化可行域 $[Z_{i,t}^0 - dz, Z_{i,t}^0 + dz]$; ③在廊道中优化, 得到优化调度线 $Z_{i,1}^*, Z_{i,2}^*, \dots, Z_{i,t}^*, \dots, Z_{i,T}^*$; ④若优化后的调度线不触及廊道边界, 计算结束, 否则 $Z_{i,t}^*$ 设为 $Z_{i,t}^0$ 转步骤②。

2.3 单线优化遗传算法

对于逐线寻优法中某一条调度线的优化, 采用遗传算法^[11-13], 适应度函数对应于多年平均发电量, 基因对应于水位, 个体对应于调度线, 种群对应于调度线解集。

2.3.1 初始种群的生成

随机生成初始种群, 设置种群规模 M 、进化代数计数器 c 和最大进化代数 D 。在廊道中, 依据时段数, 随机生成 T 个水位, 水位连接起来即为一条调度线, 即一个个体, 重复 M 次即随机生成 M 条调度线, 这 M 个个体组成的种群, 即为初始种群。个体生成模式为

$$Z_{i,t} = (Z_{i,t}^0 - dz) + 2dz \frac{U}{M} \quad (i = 1, 2, \dots, M; t = 1, 2, \dots, T) \quad (6)$$

其中 $U = \text{Rnd}(0, M + 1)$

式中: $Z_{i,t}^0$ 为第 i 条调度线第 t 时段的初始调度线坐标 (廊道中心线坐标); $2dz$ 为廊道宽度; U 为 0 到 M 的均匀随机整数。

2.3.2 个体评价

群体中每个个体表示一条水库调度线, 每个个体与其他调度线组成一张完整的调度图, 按调度规则, 长系列计算得出相应的多年平均发电量, 即个体 (调度线) 的适应度, 并据此评价个体的优劣。

2.3.3 选择模式

采用精英选择模式, 根据设定好的精英选择率^[14], 将适应度排在前面的个体保留, 并保存最优个体。

2.3.4 交叉模式

采用单点交叉方式, 从通过选择算子的保留个体中随机挑选一对个体, 其编号为 K_1 和 K_2 ; 根据随机生成第 2 到 $T-1$ 个点区间内的某一点 S_1 , 交换它们的右半部分, 即

$$S_1 = \text{Rnd}(2, T) \quad (7)$$

$$Z_{K_1,t} = \begin{cases} Z_{K_1,t}^0 & t \leq S_1 \\ Z_{K_2,t}^0 & t > S_1 \end{cases} \quad (8)$$

$$Z_{K_2,t} = \begin{cases} Z_{K_2,t}^0 & t \leq S_1 \\ Z_{K_1,t}^0 & t > S_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: S_1 为交叉断点的个体编码中的位置; $\text{Rnd}(2,$

$T)$ 为 2 到 $T-1$ 的均匀随机整数; $Z_{K_1,t}^0$ 与 $Z_{K_2,t}^0$ 为原个体; $Z_{K_1,t}$ 与 $Z_{K_2,t}$ 为交叉后的新个体。

2.3.5 变异模式

随机挑选个体, 并随机生成第 1 到 T 个点区间内的某一点 S_2 , 对该个体的 S_2 点进行变异, 变异点的基因值根据式 (6) 随机生成。

2.3.6 终止条件

群体经过了选择、交叉、变异运算后得到下一代种群。如果 c 小于 D , 转到选择模式, 否则循环结束并输出最大适应度的个体, 作为最优解^[15]。

2.3.7 约束条件的处理

当第 i 个体的年保证率 P_k 偏离设计年保证率 P_0 , 采用罚函数的方法对适应度函数进行改造:

$$E = E_i - |P_i - P_0| \eta (D - c) / D \quad (10)$$

式中: E 为第 i 个体惩罚后的适应度函数值, 也即优化模型的目标函数值; E_i 为第 i 个体的多年平均发电量; η 为反映惩罚力度的系数。在进化代数较小时, 该罚函数对低于年保证率下限的个体惩罚较大, 可以起到前期出现较多可行解、后期加快局部搜索的作用。

3 实例验证

某水库位于东南沿海, 属季风区, 汛期为 4—9 月。水库具有年调节能力, 兴利库容 1.0043 亿 m^3 , 库容系数 0.1630; 径流系列有 55 年逐旬资料, 多年平均流量 42.8 m^3/s ; 机组综合出力系数 8.61, 设计年保证率 90%, 保证出力 12051 kW。

逐线优化中, 廊道宽 $2dz = 1 \text{ m}$, $\varepsilon = 0.001$ 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。单线优化遗传算法参数: 精英选择率为 0.5, 最大允许进化代数 $D = 300$ 代, 种群规模 $M = 500$, 反映惩罚力度的系数 $\eta = 10$ 。为降低算法随机性, 对每种方案都进行 10 次独立计算, 并选取其中最优解作为最终解。

3.1 基于廊道约束优化的效果

为了评价构建廊道的效果, 以下做一些比较研究, 对照策略是在优化某条调度线时, 可行域取其上下相邻调度线之间的区域, 图 2 是有无廊道约束条件下, 下基本调度线的优化调度线形态图, 无廊道约

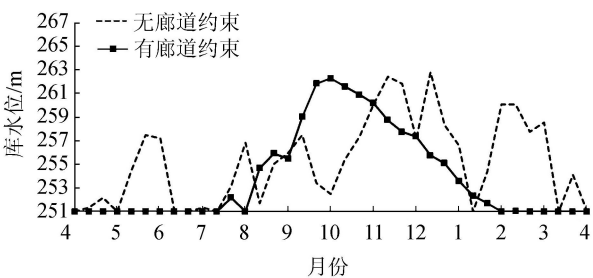


图 2 有无廊道约束优化下基本调度线对照

束和有廊道约束多年平均发电量试验结果见表 1。

表 1 有无廊道约束下多年平均发电量试验结果

约束情况	不同试验次数的多年平均发电量/亿 kW·h									
	1 次	2 次	3 次	4 次	5 次	6 次	7 次	8 次	9 次	10 次
无廊道约束	1.901	1.898	1.895	1.89	1.907	1.874	1.902	1.882	1.902	1.894
有廊道约束	1.905	1.905	1.907	1.904	1.906	1.901	1.907	1.905	1.907	1.903

由图 2 可见,无廊道约束的下基本调度线存在明显的锯齿性波动,升降无序,形态杂乱,而有廊道约束的下基本调度线呈现出规律性的先升后降,保持了常规调度线的基本形态。

由表 1 可知,在 10 次独立试验中,廊道约束下的调度图求解出的多年平均发电量数值比无廊道约束稳定,其最终采用的多年平均发电量都是 1.907 亿 kW·h。同时,10 次独立试验有廊道约束计算时间平均约比没有廊道约束的计算时间缩短 3 h,主要是因为有廊道约束的优化在逐线寻优过程中需要相对较少的迭代次数就可以满足收敛条件,以最优解都为 1.907 亿 kW·h 的试验为例,迭代过程中的最优解见图 3。可见无论是为避免调度线畸变,还是为提高求解效率,基于廊道约束的遗传算法都优于无廊道约束的遗传算法。

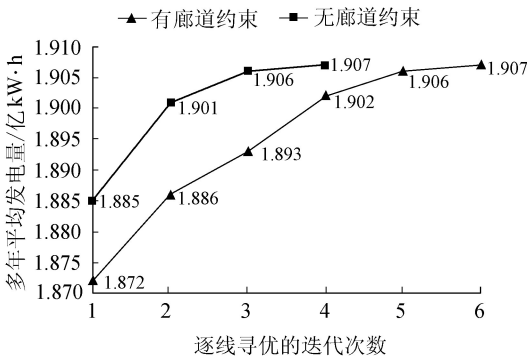


图 3 有无廊道约束下逐线寻优法迭代过程中的最优解

3.2 调度图优化效益

表 2 为依据原始常规调度图与优化调度图长系列水能计算的主要结果,图 4 为常规调度图与优化调度图对照。由表 2 可知,在维持年保证率不变的条件下,优化调度图比原始调度图的多年平均发电量增加了 2.1%。2 种调度图多年平均弃水量没有变化,但多年平均发电水头有较显著的提高,说明水头是提高多年平均发电量的主要原因。由图 4 可见优化后的上基本调度线整体抬高,通过缩小加大处理区降低加大出力的机会,保证了水头的增益。

3.3 保证率对优化效益的影响

保证率是影响多年平均发电量的重要因素之一,在当前电力系统电源点越来越多的情形下,单个

表 2 原始调度图和优化调度图指标对比

调度图	多年平均发电量/亿 kW·h	年保证率/%	历时保证率/%	多年平均弃水流量/(m³·s⁻¹)	多年平均发电水头/m
原始调度	1.868	90.91	97.73	1.27	61.20
优化调度	1.907	90.91	97.88	1.27	61.69

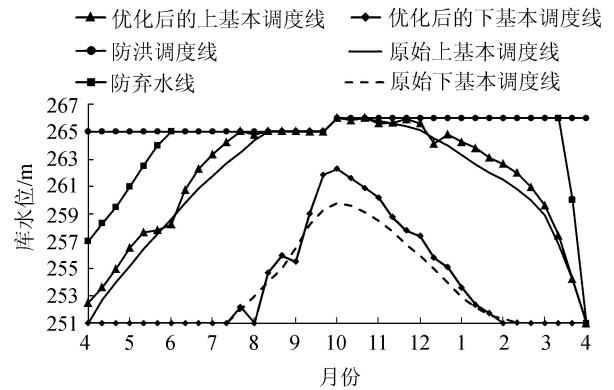


图 4 优化后的基本调度线和原始调度线对照

水电站特别是小水电站的保证出力重要性显得越来越小,当中小水电站放宽保证率约束可以获得可观的发电量时,在运行阶段可以考虑采用低保证率的调度图。为此,本文拟定了 3 个设计年保证率方案加以比较,表 3 为不同设计年保证率 P_0 约束下优化调度图长系列水能计算统计指标,表 4 为不同 P_0 约束下多年平均逐月发电水头对比。

表 3 不同 P_0 束缚下优化调度图指标对比

P_0 /%	多年平均发电量/亿 kW·h	年保证率/%	历时保证率/%	多年平均弃水流量/(m³·s⁻¹)	多年平均发电水头/m
90	1.907	90.91	97.88	1.27	61.69
85	1.920	85.45	97.53	1.27	62.10
80	1.927	80.00	97.32	1.27	62.12

表 4 不同 P_0 约束下多年平均逐月发电水头对比

月份	多年平均月发电水头/m		
	$P_0=90\%$	$P_0=85\%$	$P_0=80\%$
1	62.57	63.34	63.33
2	60.45	61.51	61.46
3	57.08	57.70	57.72
4	54.23	54.35	54.43
5	57.53	57.70	57.78
6	61.07	61.25	61.27
7	63.93	64.14	64.16
8	64.45	64.64	64.64
9	64.62	64.89	64.89
10	65.35	65.70	65.70
11	65.00	65.45	65.44
12	64.00	64.56	64.55
平均	61.69	62.10	62.12

由表 3、表 4 可见:①随着 P_0 的减小,多年平均发电量呈增大趋势,这得益于放宽 P_0 指标的约束使水库水头效益更合理的发挥;②从平均发电水头月

过程可以发现,随着 P_0 的降低,各月的平均发电水头都有所抬高,汛期 4—9 月平均抬高 0.21 m,而非汛期则平均抬高 0.63 m,其中非汛期最多一月被抬高 1.06 m。可见,非汛期维持高水头发电是该水库发电量提高的关键。

4 结 语

以常规调度图为对象,研究了调度图优化方法和保证率对多年平均发电量的影响,建立了调度图逐线寻优方法,以降低调度图优化的维数;通过建立基于廊道约束的遗传算法,减小了计算工作量,减轻了调度线形态畸变;论证了设计保证率约束对多年平均发电量的影响。

参考文献:

- [1] 张铭,王丽萍,安有贵,等. 水库调度图优化研究[J]. 武汉大学学报:工学版,2004,37(3):5-7. (ZHANG Ming, WANG Liping, AN Yougui, et al. Optimizing study on reservoir operation chart [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2004, 37(3): 5-7. (in Chinese))
- [2] 王旭,庞金城,雷晓辉,等. 水库调度图优化方法研究评述[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5): 71-75. (WANG Xu, PANG Jincheng, LEI Xiaohui, et al. Overview of reservoir operation chart optimization [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(5): 71-75. (in Chinese))
- [3] 熊红云,鲁五一,温红艳. 铁路空车调配问题的遗传启发算法[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(4): 120-123. (XIONG Hongyun, LU Wuyi, WEN Hongyan. Hereditary heuristic algorithm for empty car distribution in railway transportation[J]. China Railway Science, 2002, 23(4): 120-123. (in Chinese))
- [4] 刘攀,郭生练,李玮,等. 遗传算法在水库调度中的应用综述[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(4): 78-83. (LIU Pan, GUO Shenglian, LI Wei, et al. A review of application of genetic algorithm to reservoir operation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(4): 78-83. (in Chinese))
- [5] 周念来,纪昌明. 基于蚁群算法的水库调度图优化研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(5): 61-64. (ZHOU Nianlai, JI Changming. Optimal reservoir rule curve based on ant colony optimization [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(5): 61-64. (in Chinese))
- [6] CHEN L. A study of optimizing the rule curve of reservoir using object oriented genetic algorithms [D]. Taipei: National Taiwan University, 1995.
- [7] OLIVEIRA R, LOCKS D P. Operating rules for multireservoir systems [J]. Water Resource Research, 1997, 33(4): 839-852.
- [8] 尹正杰,胡铁松,吴运卿. 基于多目标遗传算法的综合利用水库优化调度图求解[J]. 武汉大学学报:工学版, 2005, 38(6): 40-44. (YIN Zhengjie, HU Tiesong, WU Yunqing. Deriving multipurpose reservoir operating rule curves using multi-objective genetic algorithms [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38(6): 40-44. (in Chinese))
- [9] 刘攀,张文选,李天元. 考虑发电风险率的水库优化调度图编制[J]. 水力发电学报, 2013, 32(4): 252-259. (LIU Pan, ZHANG Wenxuan, LI Tianyuan. Derivations of risk-based reservoir operation rule curves [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(4): 252-259. (in Chinese))
- [10] 杨延伟,陈森林,黄旭,等. 考虑光滑性约束的水库发电调度图优化方法研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(8): 133-136. (YANG Yanwei, CHEN Senlin, HUANG Kui, et al. Study on optimal reservoir operation rule curves considering smooth constraint [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(8): 133-136. (in Chinese))
- [11] 吴学文,索丽生,王志坚. 水电站水库优化调度的改进混沌遗传算法[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(2): 53-57. (WU Xuewen, SUO Lisheng, WANG Zhijian. Improved chaotic genetic algorithm for optimal operation of hydropower reservoirs [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(2): 53-57. (in Chinese))
- [12] 杨薇,南军,孙德智,等. 遗传算法在水资源与水环境研究中的应用综述[J]. 水资源保护, 2007, 23(1): 13-16. (YANG Wei, NAN Jun, SUN Dezhi, et al. Application of genetic algorithm in the fields of water resources and water environment [J]. Water Resources Protection, 2007, 23(1): 13-16. (in Chinese))
- [13] 陈夺峰,黄岁樑. 改进遗传算法确定水资源优化配置模型经济效益系数[J]. 水资源保护, 2008, 24(2): 6-9. (CHEN Duofeng, HUANG Suiliang. Application of improved genetic algorithm to determination of economic profit coefficients of optimal allocation of water resources [J]. Water Resources Protection, 2008, 24(2): 6-9. (in Chinese))
- [14] 钟平安,徐斌,张金花. 水电站发电优化调度遗传算法的改进[J]. 水力发电学报, 2011, 30(5): 55-60. (ZHONG Ping'an, XU Bin, ZHANG Jinhua. Improvement of genetic algorithm for its application to optimal operation of hydropower station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(5): 55-60. (in Chinese))
- [15] 冯迅,王金文,权先璋,等. 遗传算法在水电站优化调度中的实用研究[J]. 华中电力, 2005, 18(3): 12-15. (FENG Xun, WANG Jinwen, QUAN Xianzhang, et al. Study on the reservoir operation using an improved GA [J]. Central China Electric Power, 2005, 18(3): 12-15. (in Chinese))

(收稿日期:2013-08-31 编辑:刘晓艳)