

基于多重迭代算法的梯级水库群调度图优化方法

刘 烨¹, 钟平安^{1,3}, 郭 乐², 万新宇¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国长江三峡集团公司, 湖北 宜昌 443133;
3. 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)

摘要: 基于梯级水库群中各水库的常规调度图, 建立了以梯级水库群多年平均发电量最大为目标的梯级水库群调度图优化数学模型, 提出了基于多重迭代实现高维模型降维的求解算法, 即以轮库迭代法实现空间多水库降维, 以轮线迭代法实现单一水库多调度线降维, 以逐次优化算法实现调度线状态降维。万安溪-白沙梯级水库群的算例计算结果表明, 该优化方法能获得形态合理的优化调度图, 并能有效提高水库群发电量。

关键词: 梯级水库群; 调度图优化; 多重迭代算法; 万安溪水库; 白沙水库

中图分类号: TV737 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2015)01-0085-04

Operation chart optimization method of cascade reservoirs based on multiple iteration algorithm//LIU Ye¹, ZHONG Pingan^{1,3}, GUO Le², WAN Xinyu¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Three Gorges Corporation, Yichang 443133, China; 3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the normal operation charts of cascade reservoirs, we proposed a mathematical model of optimal operation chart aiming to reach at the maximum value of annual average electricity generation. In this regard, we suggested a solving algorithm to reduce dimensionalities based on multiple iterations as follow: reduce spatial multi-reservoir dimensionality by iteration in reservoir turns; reduce multi-curve dimensionality by iteration in rule curve turns; and reduce multi-state dimensionality of rule curve with progressive optimality algorithm. Overall, results based on experiments considering Wanaxi-Baisha cascade reservoirs as a case studies show that this optimum method provides optimal operation charts of cascade reservoirs in rational form as well as significant increases in electricity generation of the reservoir group while compared with traditional method.

Key words: cascade reservoirs; operation chart optimization; multiple iterations algorithm; Wanaxi Reservoir; Baisha Reservoir

调度图作为目前应用最广泛的水库常规调度方式,对于水电站的日常运行具有重要的指导意义。调度图上下基本调度线的常规做法通常是选取剔除破坏年份的长系列资料进行演算后取上下包线。由于常规调度图没有精确考虑水量与水头之间的协调关系,梯级水库群的调度图没有考虑各库之间的协调关系,有进一步优化的可能性。因此,研究梯级水库群调度图优化问题具有较大的理论意义和应用价值。

在水库调度图优化研究中,单库的调度图优化已相对比较成熟,水库群的联合优化调度图也受到广泛关注,尤其以基于梯级总出力调度图的优化研究最为广泛^[1-5]。李玮等^[6]结合库群补偿调度的库容效率指数方法,研究了将各单一水库调度图划分

为若干梯级总出力控制区的水库群联合调度图;刘心愿等^[7]建立了梯级水电站优化调度规则研究的双层优化模型,将优化梯级总出力调度图和出力分配模型相结合,对清江流域梯级水库调度图进行了优化。基于梯级总出力的梯级水电站联合调度图实际操作尚存在一些问题:首先是梯级总出力的确定存在困难,目前多数研究成果是以梯级总蓄能作为指示变量,通过计算某时刻的梯级总蓄能,进而利用梯级总出力调度图确定梯级总出力,由于梯级水电站之间存在复杂的水文、水力联系,精确确定总蓄能并非易事;其次是梯级总出力的空间分配复杂,由于梯级总出力必须由各个具体电站完成,所以梯级总出力在各电站之间的分配是一个重要环节,但高维

分配问题本身就是一个特别复杂的优化问题;最后是基于梯级总出力的调度图与现行电力系统调度模式不完全适应,为满足电力系统安全、稳定运行,目前绝大多数电网负荷指令是直接下达至电站实行自动发电控制的,厂网协调模式尚在探讨之中,基于梯级总出力的调度图尚难以实际应用。

综上所述,在现阶段以各库常规调度图为基础,考虑水文、水力补偿,在保证梯级设计保证率的前提下以水库群多年平均发电量最大为目标提出各库的优化调度图,对于提高梯级水电站水能利用效率仍具有重要实用价值。本文运用多重迭代思想,就梯级水库群调度图优化问题开展研究。

1 调度图优化方法的基本原理

首先,自上而下依传统方式逐级制定梯级水库群中各水库的常规调度图;然后,建立梯级水库群调度图优化模型;最后,采用多重迭代思想降维优化调度图。

1.1 调度图优化数学模型

1.1.1 目标函数

假设梯级水库群中水库总数为 N ,将水库自上而下排序为 $1 \sim N$,第 i 个水库的调度图以 Ω_i 表示, Ω_i 由 M 条调度线组成。在满足保证率要求的前提下,以水库群多年平均发电量最大为目标准则建立数学模型,目标函数如下:

$$\max E = \sum_{i=1}^N E_i(\Omega_i) \tag{1}$$

式中 $E_i(\Omega_i)$ 为第 i 个水库相应于 Ω_i 的多年平均发电量。

1.1.2 约束条件

a. 保证率约束:

$$P_i \geq P_{i,0} \quad P_z \geq P_{z,0} \tag{2}$$

式中: P_i 、 P_z 分别为相应于 Ω_i 调节计算后统计的水库 i 和水库群的保证率; $P_{i,0}$ 、 $P_{z,0}$ 分别为水库 i 和水库群的设计保证率。

b. 水量平衡约束:

$$V_{i,t+1} - V_{i,t} = (Q_{i,t}^{\text{in}} - Q_{i,t}^{\text{out}} - Q_{i,t}^{\text{lost}}) \Delta T \tag{3}$$

$$Q_{i,t}^{\text{in}} = Q_{i-1,t}^{\text{out}} + q_{i-1,i,t} - q_{i-1,i,t}^{\text{lost}} \tag{4}$$

式中: $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$ 分别为水库 i 第 t 个时段始、末的水库蓄水量; $Q_{i,t}^{\text{in}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{out}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{lost}}$ 分别为水库 i 第 t 时段的入库流量、出库流量和损失流量; ΔT 为时段长; $Q_{i-1,t}^{\text{out}}$ 为第 $i-1$ 个水库的出库流量; $q_{i-1,i,t}$ 、 $q_{i-1,i,t}^{\text{lost}}$ 分别为水库 $i-1$ 与水库 i 之间的区间流量和损失流量。

c. 调度线约束:

$$Z_{i,t}^{\text{死}} \leq Z_{i,t}^{\text{下}} \leq Z_{i,t}^{\text{上}} \leq Z_{i,t}^{\text{防弃}} \tag{5}$$

式中 $Z_{i,t}^{\text{死}}$ 、 $Z_{i,t}^{\text{下}}$ 、 $Z_{i,t}^{\text{上}}$ 、 $Z_{i,t}^{\text{防弃}}$ 分别为水库 i 的死水位线、下

基本调度线(限制出力线)、上基本调度线(防破坏线)、防弃水线。在各库的调度图优化过程中,各调度线不交叉。

1.1.3 保证率约束处理

以上约束条件中,保证率约束与多年平均发电量一样,只有在长系列调节计算结束后才能够获得结果,为此将保证率约束通过罚函数形式引入到目标函数中,后文中调度图优化采用的目标函数形式如下:

$$\begin{aligned} \max E = \sum_{i=1}^N E_i(\Omega_i) [1 - \alpha(P_i - P_{i,0})^\beta - \\ \alpha(P_z - P_{z,0})^\beta] \end{aligned} \tag{6}$$

式中 α 、 β 分别为惩罚因子和惩罚系数,根据惩罚力度取值。

1.2 模型求解方法

梯级水库群的调度图优化模型是一个时空高维的优化问题,涉及 3 个层次:第 1 层次是库与库之间的相互补偿关系;第 2 层次是单一水库各调度线之间的相互协调关系;第 3 层次是特定调度线的时程优化问题。为了降低求解难度,采用轮库迭代法^[8]降低水库群的维数,用轮线迭代法降低调度线的维数;用逐次优化算法^[9-11]优化单一调度线。

通过多次迭代最终得到梯级发电量最大的水库调度图,如图 1 所示。图 1 中 f 为轮库迭代次数, x 为单库调度图优化次数, j 为调度线序号, M 为调度线数, e 为单一调度线优化次数, m 为调度线时间序号, T 为调度线时刻数。

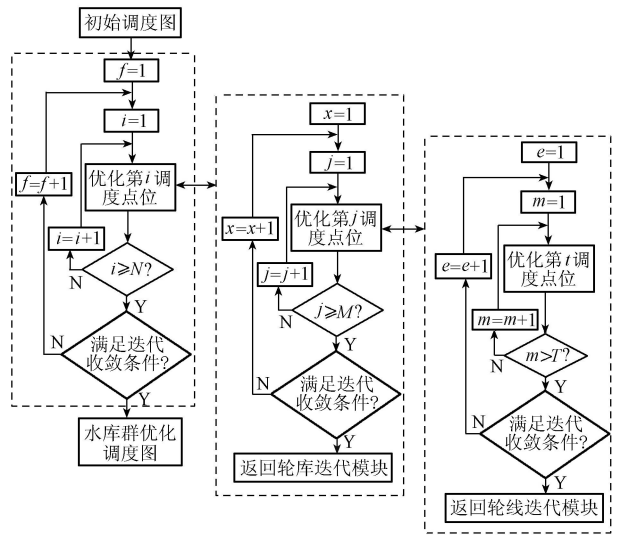


图 1 水库群调度图优化方法原理示意图

1.2.1 轮库迭代法

轮库迭代法的步骤如下:

a. 制定各库的常规调度图 $\Omega_i(i=1,2,\cdots,N)$, 计算梯级总发电量 E ;

b. 固定 $\Omega_i(i=2,3,\cdots,N)$ 不变,以式(1)为目标函数,优化第 1 个水库的调度图 Ω_1 ,具体优化方法见下文单库轮线迭代法和调度线逐次优化算法,得到第 1 个水库的阶段优化调度图 Ω_1^* 。

c. 仿步骤 b,依次对第 $k(2\leq k\leq N)$ 个水库的调度图进行优化,固定 $\Omega_i^*(i=1,2,\cdots,k-1)$ 和 $\Omega_i(i=k+1,k+2,\cdots,N)$ 不变,优化 Ω_k ,为减少计算工作量,计算目标函数值时只需计算下游关联水库的多年平均发电量(见式(7)),可得到新的 Ω_k^* 。

$$\begin{aligned} \max E &= \sum_{i=k}^N E_i(\Omega_i) [1 - \alpha(P_i - P_{i,0})^\beta - \\ &\alpha(P_z - P_{z,0})^\beta] \end{aligned} \tag{7}$$

d. 依次可得 $\Omega_i^*(i=1,2,\cdots,N)$,计算相应的梯级总发电量 E^* 。

e. 若 $|E-E^*| \leq \varepsilon$ 或达到最大迭代次数则轮库结束;否则令 $\Omega_i=\Omega_i^*(i=1,2,\cdots,N)$, $E=E^*$,并回到步骤 b。

1.2.2 单库轮线迭代法

在轮库迭代中,进入到第 k 水库时,假定调度图 Ω_k 中有 M 条调度线,将 M 条调度线从下到上排序,采用单库轮线迭代法实现第 k 水库调度图的优化。轮线迭代法的步骤如下:

a. 常规调度图 Ω_k 的初始调度线为 $L_j(j=1,2,\cdots,M)$,计算第 k 个水库和下游关联水库的总发电量 E 。

b. 固定 $L_j(j=2,3,\cdots,M)$ 不变,以式(7)为目标函数优化第 1 条调度线 L_1 ,具体优化方法见下文逐次优化算法,得到第 1 条调度线的阶段优化调度线 L_1^* 。

c. 仿步骤 b,依次对第 $l(2\leq l\leq M)$ 条调度线进行优化,固定 $L_j^*(j=1,2,\cdots,l-1)$ 和 $L_j(j=l+1,l+2,\cdots,M)$ 不变,以式(7)计算目标函数值优化 L_l ,得到新的 L_l^* 。

d. 依次可得 $L_j^*(j=1,2,\cdots,M)$,将此时第 k 水库和下游关联水库的总发电量记为 E^* 。

e. 若 $|E-E^*| \leq \varepsilon$ 或达到最大迭代次数则第 k 个水库优化结束,返回轮库迭代模块;否则令 $L_j=L_j^*(j=1,2,\cdots,M)$ 并回到步骤 b。

1.2.3 调度线逐次优化算法

在轮线迭代中,进入到第 k 个水库优化第 l 条调度线时,采用逐次优化算法实现调度线的优化。逐次优化方法的步骤如下:

a. 第 k 个水库初始调度线为 $Z_i(i=1,2,\cdots,T)$,其中 $Z_0=Z_0^*$ 和 $Z_T=Z_T^*$ 。计算第 k 个水库和下游关联水库的总发电量 E 。

b. 固定 $Z_0^*,Z_i(i=2,3,\cdots,T)$ 不变,改变 Z_1 ,得

到第 k 个水库新的调度图,按式(7)计算相应的第 k 个水库和下游关联水库的总发电量,并按电量最大原则确定阶段最优的 Z_1^* 。

c. 仿步骤 b,固定 $Z_i^*(i=0,1,\cdots,m-1)$ 和 $Z_i(i=m+1,m+2,\cdots,T)$ 不变,优化 Z_m ,得到新的 Z_m^* (变动性数字 m 的取值范围为 $2\leq m\leq T-1$)。

d. 依次可得 $Z_i^*(i=1,2,\cdots,T-1)$,计算第 k 个水库和下游关联水库的总发电量 E^* 。

e. 若 $Z_i^*(i=0,1,\cdots,T)$ 与 $Z_i(i=0,1,\cdots,T)$ 之间满足规定的精度要求,则本轮调度线优化结束,返回轮线迭代模块;否则令 $Z_i=Z_i^*(i=1,2,\cdots,T)$ 并返回步骤 b。

2 算例分析

福建省万安溪上的梯级水库群由万安溪水库和白沙水库组成,两个水库的基本情况如表 1 所示。

表 1 水库基本情况

水库名称	调节能力	死水位/m	正常蓄水位/m	装机容量/MW	保证出力/MW	设计保证率/%
万安溪水库	不完全年调节	330	365	45	11.40	90
白沙水库	不完全年调节	251	266	70	11.89	90

两水库采用 1957—2011 年径流系列资料,以旬为计算时段制定了常规调度图,依据常规调度图,按照前文的原理建立了梯级调度图优化模型,并进行求解。图 2、图 3 分别为万安溪水库和白沙水库常规调度图与优化调度图的对比。表 2 为按照常规调度图和优化调度图模拟运行的结果对照,图 4、图 5 为两库优化前后模拟调度的多年平均出力过程对比。

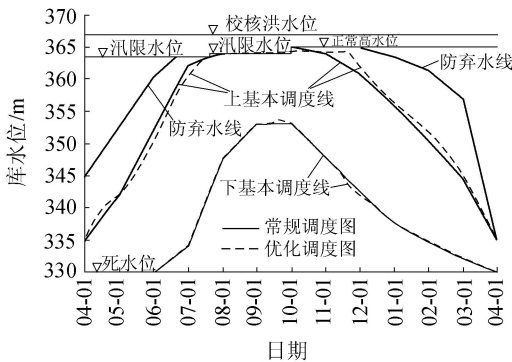


图 2 万安溪水库调度图优化前后对比

由图 2~5 和表 2 可见:①优化调度图在维持各库年保证率不变的前提下,梯级水库群多年平均年发电量增加率达 2.37%,有效增加了发电效益;②梯级水库群多年平均年发电量的增加主要来源于下库(白沙水库),其贡献率为 90.10%,图 3 表明改变上库(万安溪水库)的调度方式,下库的上基本调

表 2 梯级水库群调度图优化结果

调度对象	多年平均年发电量/ (亿 kW·h)		多年平均汛期发电量/ (亿 kW·h)		多年平均非汛期发电量/ (亿 kW·h)		年保证率/%		多年平均弃水量/ (m ³ ·s ⁻¹)	
	常规 调度图	优化 调度图	常规 调度图	优化 调度图	常规 调度图	优化 调度图	常规 调度图	优化 调度图	常规 调度图	优化 调度图
万安溪水库	1.409 1	1.416 8	0.780 1	0.789 0	0.629 0	0.627 8	90.91	90.91	1.644 0	1.572 4
白沙水库	1.876 2	1.946 3	1.055 6	1.118 8	0.820 6	0.827 5	90.91	90.91	2.094 0	2.028 8
梯级水库群	3.285 3	3.363 1	1.835 7	1.907 8	1.449 6	1.455 3	90.91	90.91	3.737 9	3.601 2

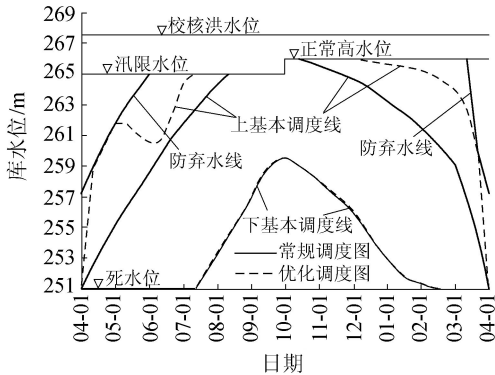


图 3 白沙水库调度图优化前后对比

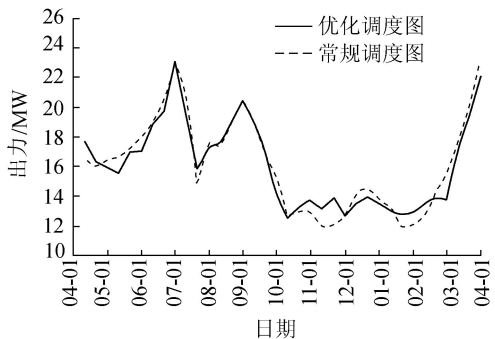


图 4 万安溪水库调度图优化前后模拟调度的
多年平均出力过程

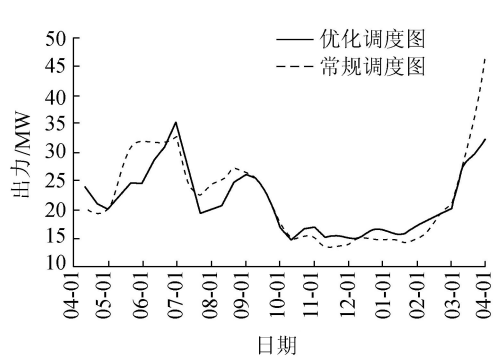


图 5 白沙水库调度图优化前后模拟调度的
多年平均出力过程

度线大幅抬升,水量与水头利用得到了较大改善;③从季节看,汛期占梯级水库群发电量增量的贡献率高达 92.67%,从图 4、图 5 可见两库按优化调度图长系列调节计算得到的汛期平均出力总体上高于常规调度图的调节计算结果;④上库(万安溪水库)汛期加大出力,可以降低水库水位,从而减少水库弃水,由表 2 可见优化调度图可减少上库弃水 4.4%。

下库(白沙水库)由于保证出力区加大,可以推迟由保证出力区转向加大出力区的时机或提前由加大出力区转入保证出力区的时机,从而较好地保持水头,增加发电量。

3 结 语

根据目前绝大多数电网负荷指令直接下达至电站的现状,以及梯级水库群联合调度的要求,本文提出了基于多重迭代算法对常规调度图进行优化的梯级水电站调度图优化方法,建立了梯级水电站调度图优化的数学模型,提出了多重迭代降维的求解方法。以万安溪-白沙梯级水库群为对象进行了模拟计算,研究结果表明采用本文提出的梯级水库群调度图优化方法可以获得形态合理的优化调度图,有效增加梯级水库群多年平均发电量。

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: Engineering Science, 2004, 37(3): 5-7. (in Chinese))
- [2] 杨子俊,王丽萍,邵琳,等. 基于粒子群算法的水电站水库发电调度图绘制[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(14):59-62. (YANG Zijun, WANG Liping, SHAO Lin, et al. Drawing of the reservoir operation chart based on the particle swarm optimization algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 59-62. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 邵琳,王丽萍,黄海涛,等. 水电站水库调度图的优化方法与应用:基于混合模拟退火遗传算法[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(12):40-43. (SHAO Lin, WANG Liping, HUANG Haitao, et al. Optimization of the reservoir operation chart of hydropower station and its application: based on hybrid genetic algorithm and simulated annealing [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 40-43. (in Chinese))

(下转第 94 页)

- [4] 苏凯,伍鹤皋,李青麒.抽水蓄能电站钢筋混凝土岔管有限元分析[J].水电能源科学,2005,23(5):51-54. (SU Kai, WU Hegao, LI Qingqi. Finite element method analysis of reinforced concrete manifold of pumped storage power station [J]. Water Resources and Power, 2005, 23 (5):51-54. (in Chinese))
- [5] 邓柏旺.地下钢筋混凝土高压岔管围岩稳定与衬砌结构分析[D].南京:河海大学,2007.
- [6] 苏凯,伍鹤皋,英鹏涛,等.断裂影响下的高压钢筋混凝土岔管结构[J].水利水电技术,2008,39(4):41-45. (SU Kai, WU Hegao, YING Pengtao, et al. Study on high-pressure reinforced concrete manifold structure under impact of fault [J]. Water Resource and Hydropower Engineering, 2008, 39(4):41-45. (in Chinese))
- [7] 任旭华,徐海奔,束加庆.地下水工隧洞围岩及钢筋混凝土岔管结构数值分析[J].四川大学学报:工程科学版,2009,41(4):8-13. (REN Xuhua, XU Haiben, SHU Jiaqing. Numerical analysis on surrounding rock and reinforced concrete bifurcation structure of undergrounding tunnels [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(4):8-13. (in Chinese))
- [8] 王明.地下钢筋混凝土岔管三维有限元分析研究[D].长沙:长沙理工大学,2009.
- [9] 张继勋,任旭华.地下钢筋混凝土岔管围岩稳定及结构数值分析[J].三峡大学学报:自然科学版,2011,33(5):2-6. (ZHANG Jixun, REN Xuhua. Numerical analysis of surrounding rock stability and lining structure of underground reinforced concrete bifurcation [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Science, 2011, 33(5):2-6. (in Chinese))
- [10] 肖明.大型地下钢筋混凝土岔管结构优化分析[J].水利学报,2001,32(12):8-13. (XIAO Ming. Optimization analysis of large-scale underground reinforced concrete branching conduit [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(12):8-13. (in Chinese))
- [11] 龚玉锋,丁旭柳.地下钢筋混凝土岔管结构优化分析[J].水电站设计,2002,18(1):26-30. (GONG Yufeng, DING Xuli. Structure optimization analysis on underground reinforced concrete branch pipe [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2002, 18(1):26-30. (in Chinese))
- [12] 徐干成,郑颖人.岩石工程中屈服准则应用的研究[J].岩土工程学报,1990,12(2):93-99. (XU Gancheng, ZHANG Yinren. Study on application of yield criterions in geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(2):93-99. (in Chinese))
- [13] 董哲仁.钢筋混凝土非线性有限元法原理与应用[M].北京:中国铁道出版社,1993.

(收稿日期:2013-11-11 编辑:骆超)

(上接第88页)

- [5] 刘攀,郭生练,郭富强,等.清江梯级水库群联合优化调度图研究[J].华中科技大学学报:自然科学版,2008,36(7):63-66. (LIU Pan, GUO Shenglian, GUO Fuqiang, et al. Derivation of the optimal operating curve rules for Qingjiang cascade reservoirs [J]. Huazhong University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2008, 36 (7):63-66. (in Chinese))
- [6] 李玮,郭生练,朱凤霞,等.清江梯级水电站联合调度图的研究与应用[J].水力发电学报,2008,27(5):10-15. (LI Wei, GUO Shenglian, ZHU Fengxia, et al. Combined reservoirs operation of Qingjiang cascade hydropower stations [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(5):10-15. (in Chinese))
- [7] 刘心愿,郭生练,刘攀,等.基于总出力调度图与出力分配模型的梯级水电站优化调度规则研究[J].水力发电学报,2009,28(3):26-31. (LIU Xinyuan, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Study on the optimal operating rules for cascade hydropower stations based on output allocation model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(3):26-31. (in Chinese))
- [8] 梁忠民,钟平安.水文水利计算[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2008:307-310.
- [9] HOWSON H R, SANCHO N G F. A new algorithm for the solution of multi-state dynamic programming problems [J]. Mathematical Programming, 1975, 8:104-116.
- [10] ANDRE T. Optimal short-term hydro scheduling from the principle of progressive optimality [J]. Water Resources Research, 1981, 17(3):81-86.
- [11] 程春田,杨凤英,武新宇,等.基于模拟逐次逼近算法的梯级水电站群优化调度图研究[J].水力发电学报,2010,29(6):71-77. (CHENG Chuntian, YANG Fengying, WU Xinyu, et al. Link the simulation with dynamic programming successive approximations to the study on optimal operation chart of cascade reservoirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6):71-77. (in Chinese))

(收稿日期:2014-03-03 编辑:骆超)

