

The Optimizing Drawing of Cascade Reservoirs Operation Chart Based on the Routine Operation*

Yuanyuan Yang, Qiang Huang, Yimin Wang

Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an
Email: 362367714@qq.com

Received: Jul. 27th, 2012; revised: Aug. 18th, 2012; accepted: Sep. 1st, 2012

Abstract: Reservoir operation chart has been a hot topic of the reservoir operation study as a basis for the guidance of the efficient and safe operation of the hydropower station. However, existing studies are mostly studying on the optimizing drawing of single reservoir, or research on the drawing of cascade reservoirs operation chart using a long-term power optimization scheduling model. Single reservoir optimized operation chart is hard to meet the cascade scheduling requirements, while the latter theory is mature, widely used, but has its flaws. For this, this paper puts forward a drawing way of cascade reservoirs optimal operation charts, using the combination technology of simulation and optimization, through the direct optimization of the cascade reservoirs conventional operation curves. For the cascade hydropower stations on the Wujiang River, simulation scheduling results show considerably increase on the cascade long-term generation benefit. Thus verify the reliability and validity of the method, so as to provide a new idea to draw the cascade reservoirs operation chart.

Keywords: Cascade Reservoirs; Operation Chart; Optimization; Discrete Differential Dynamic Programming

基于梯级水库常规调度图的优化绘制*

杨元园, 黄 强, 王义民

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, 西安
Email: 362367714@qq.com

收稿日期: 2012年7月27日; 修回日期: 2012年8月18日; 录用日期: 2012年9月1日

摘 要: 水库调度图作为指导水电站安全高效运行的依据, 一直是水库调度研究的热点, 然而现有研究大多以单库调度图为对象进行优化, 或是基于中长期发电优化调度模型绘制梯级水库调度图。单库优化调度图较难满足梯级调度要求, 而后者虽然理论成熟、应用广泛, 但存在建模、求解复杂, 步骤繁琐, 误差较大等的缺点。鉴此, 本文提出了一种采用模拟与优化相结合的技术绘制梯级水库优化调度图的实用方法。该法通过直接优化梯级水库常规调度图的调度线, 从而获得优化调度图。以乌江流域4座调节性能较好的水库构成的梯级水库为研究对象进行实例分析, 模拟调度结果表明较大地提高了梯级长期发电效益, 验证了该法的可靠性和有效性, 从而为梯级水库优化调度图的绘制提供了新思路。

关键词: 梯级水库; 调度图; 优化; 离散微分动态规划

*基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2011CB403306), 国家自然科学基金重大项目(51190093)。
作者简介: 杨元园(1989-), 男, 湖北宜昌人, 硕士生, 研究方向为水资源配置及水库优化调度。

1. 引言

水库调度图能准确表示水库调度中决策变量(水位、出力、下泄流量等)与状态变量(水位、蓄能等)之间的关系, 根据某一时刻状态变量数值大小及其在调度图中的工作区域, 就可确定水库运行调度方式, 具有简单、直观、方便实际操作的优点。目前我国绝大多数水库采用的是单库调度图, 国内外研究热点也都集中在对单库调度图的优化, 但由于梯级水库之间不仅存在着水量联系, 往往还存在着水力联系、电力联系, 即使是单库优化调度图也很难满足梯级水库控制运用要求, 因此需要制定梯级水库优化调度图以发挥联合调度优势。国内外学者在梯级水库优化调度图领域取得较多成果, 主要有两类: 一类是验证梯级水库联合调度图的应用效果^[1,2]。二是通过梯级水库中长期优化调度模型以及优化算法, 最终得到统一优化下的单库调度图^[3-7], 该法具有思路清晰直观、可获得单库调度函数等优点, 但存在步骤繁杂、工作量大的缺点, 同时在确定性优化调度、统计分析以及生成调度图的过程中, 各步骤的系统误差会累积。

针对上述问题, 本文提出了基于梯级水库常规调度图的优化绘制方法, 核心思路是首先通过长系列法或典型年法绘制梯级水库常规调度图, 从中提取调度线以作为初始可行解, 然后综合考虑各种约束条件, 采用长系列资料结合优化算法进行系统模拟, 再根据指标函数对调度图不断优选, 最终获得满足精度要求的梯级水库优化调度图。与基于中长期发电优化调度模型绘制梯级水库优化调度图的方法相比, 在应用到由调节性能较好的水库组成的梯级水库时, 具有明显优势, 该法不仅能获得系统最优解, 而且步骤简单、计算快速、结果可靠。本文最后以乌江流域4座调节性能较好的水库为对象进行了实例研究, 阐述了基于离散微分动态规划算法(DDDP)优化梯级水库常规调度图的方法和具体步骤以及使用效果, 验证了该方法的应用效果和推广价值。

2. 初始化调度图

水库调度线分为基本调度线和附加调度线, 前者包括防破坏线和限制出力线, 后者包括加大出力线和降低出力线。梯级水库联合调度图采用梯级蓄能~出力形式, 一般要划出梯级水库总保证出力区的界限

线, 以及总加大出力区与总降低出力区的界限线。初始化调度图就是采用补偿调节的方法绘制梯级水库联合调度图。其基本步骤^[8]包括: 1) 对梯级水库进行等出力顺时序补偿调节计算, 根据补偿结果求得各时段梯级蓄能。蓄能计算公式见式(1)。2) 以梯级蓄能为纵坐标、时间为横坐标构建十字坐标系, 将同一等出力值所对应的各时段梯级蓄能点绘在该图上, 取各时段最大值(或最小值), 将其用光滑曲线相连。3) 绘制一组不同等出力对应的具有控制意义的过程线。这些过程线与横坐标、纵坐标一起即组成了梯级水库常规调度图。

$$E_{\text{蓄能}}(t) = \sum_{m=1}^M [V(m-1, t) - V_{\text{dead}}] \times \sum_{i=m}^M k_i h'_i \quad (1)$$

初始化调度图的目的就是提供初始可行解, 在此基础上通过对调度线逐步优化, 获得最终的优化调度图。提取初始试验轨迹的方法如下: 设调度线有 L 条, 年内有 T 个计算时段, 则调度图由 $L \times T$ 个控制点组成, 对于第 l 条调度线 t 时段的控制点表示为 $F[l][t]$, ($l=1, 2; t=1, 2, \dots, 12$)。则初始试验轨迹为 $V_{l,t}^0 = \{F[l][1], F[l][2], \dots, F[l][t], \dots, F[l][T]\}$ 。

3. 调度线的优化

动态规划算法适合求解多阶段决策问题, 经常应用于解决水库调度中涉及“时序”的问题。本文采用离散微分动态规划算法^[9,10](Discrete Differential Dynamic Programming, DDDP 法)的思想对初始调度线进行优化, 如图1所示。该方法的实质是通过试验状态与决策的迭代以寻求系统的最优目标。

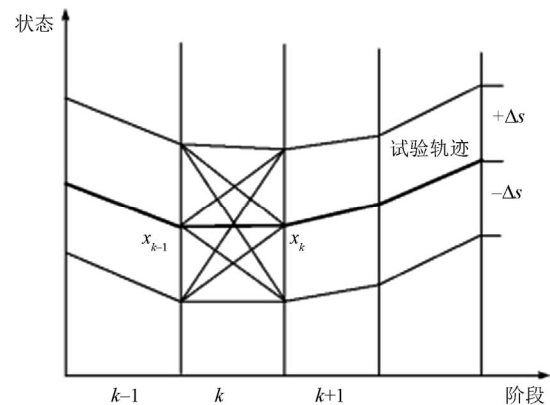


Figure 1. Sketch map of DDDP
图1. DDDP 法示意图

基于初始化调度图的调度线优化绘制步骤如下:

3.1. 计算目标函数

一般根据梯级水库的综合利用要求及调度基本准则确定梯级水库优化调度的目标函数, 如调度期内的总发电量、兼顾保证出力的发电量、发电效益、梯级蓄能等, 再确定相应的目标函数。本文以调度期内兼顾保证出力的梯级发电量 E 最大为目标, 确定的目标函数为:

$$\text{Max} E = \sum_t^T \left(\sum_m^M N(m,t) - w \sigma_t \left(N_p - \sum_m^M N(m,t) \right)^\alpha \right) \Delta t \quad (2)$$

式中: m ——电站序号; t ——时段序号;
 M ——梯级电站总数;
 T ——分别为和时段总数;
 $N(m,t)$ —— m 电站 t 时段的平均出力, MW;
 N_p ——梯级保证出力, MW;
 ω ——模型参数, $\omega > 0$, 经大量试算确定;
 α ——模型参数, 通常取 1 或 2;
 σ_t ——0~1 变量, 取值如下:

$$\sigma_t = \begin{cases} 1 & \sum_{m=1}^M N(m,t) < N_p \\ 0 & \sum_{m=1}^M N(m,t) \geq N_p \end{cases} \quad (3)$$

3.2. 离散状态变量

在状态的可行域内, 设定初始离散分数 λ , 在初始试验轨迹周围形成“廊道”。所谓的状态可行域就是要求满足一定的约束条件。约束条件分为基本约束和调度线约束。

1) 基本约束

单库水量平衡约束:

$$V(m,t) = V(m,t-1) + [Q(m,t) - q(m,t) - \tilde{q}(m,t)] \times \Delta t$$

梯级流量平衡约束: $Q(m,t) = q(m,t) + \tilde{q}(m,t)$

发电流量约束: $\underline{q}(m) \leq q(m,t) \leq \bar{q}(m)$

水库水位(库容)约束: $\underline{Z}(m,t) \leq Z(m,t) \leq \bar{Z}(m,t)$

水电站出力约束: $\underline{N}(m,t) \leq N(m,t) \leq \bar{N}(m,t)$

式中, $V(m,t)$ 为 m 电站 t 时段的末库容, m^3 ; $Q(m,t)$, $q(m,t)$, $\tilde{q}(m,t)$ 分别为 m 电站 t 时段的入库流量、发

电流量、弃水流量, m^3/s ; $\underline{q}(m)$, $\bar{q}(m)$ 分别为 m 电站最小、最大过流能力, m^3/s ; $\underline{Z}(m,t)$, $Z(m,t)$, $\bar{Z}(m,t)$ 分别为 m 电站 t 时段的最低、最高水位, m ; $\underline{N}(m,t)$, $N(m,t)$, $\bar{N}(m,t)$ 分别为 m 电站 t 时段的最小、最大限制出力。

2) 调度线约束

调度线约束指调度线之间不交叉, 即优化每个控制点时, 其取值以其所在调度线上下其他两条调度线同时段控制点为限; 对于最高、最低调度线离散时, 可参考相邻调度线位置。

3.3. DDDP 法优化调度线

DDDP 法优化调度线的流程如图 2 所示, 具体步骤包括: 1) 初始化 $l=1, t=1$, 将 $Z_{l,t}^k$ 的取值上下限按 λ 等量离散。2) 分别以离散点替代 $Z_{l,t}^k$, 固定其他控制点, 由此得到 λ 个新的调度图。3) 对每个新调度图模拟实际调度过程, 计算目标函数 E 。4) 用最优指标对应的离散点 $Z_{l,t}^{k+1}$ 代替 $Z_{l,t}^k$, 同时记录下目标函数值 $\text{Max} E$ 。5) 优化当前调度线的下一控制点, 直到

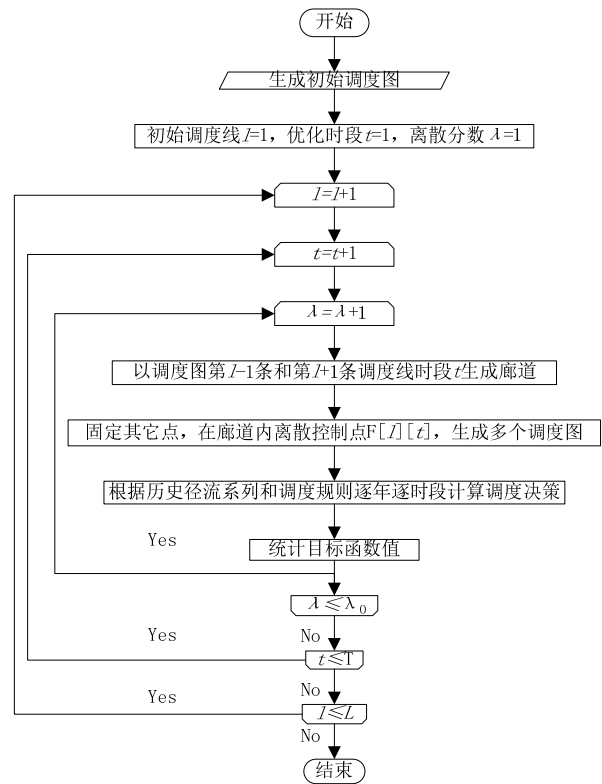


Figure 2. The flow chart of optimizing the routine operation drawing of cascade reservoirs
 图 2. 基于梯级水库常规调度图的优化绘制流程图

Table 1. Characteristic parameters of the Wujiang cascade reservoirs
表 1. 洪-构梯级水库特征参数

水库	水库特性(m)			调节性能	电站特性		
	正常高水位	汛限水位	死水位		保证出力(MW)	出力系数	设计年发电量(亿 kW·h)
洪家渡	1140	1138	1076	多年	159.10	8.50	15.59
东风	970	970	936	不完全年	236.00	8.35	29.58
乌江渡	760	760	720	不完全年	254.00	8.30	41.40
构皮滩	630	626.24*	585	多年	746.40	8.25	96.82

*626.24 m 为构皮滩水库在 6、7 月的汛限水位, 其 8 月的汛限水位为 628.12 m。

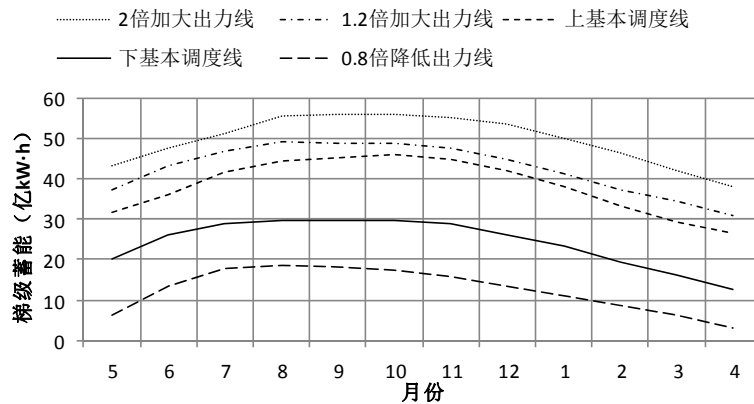


Figure 3. The optimal operation chart of Hongjiadu-Goupitan cascade reservoirs
图 3. 洪-构梯级水库优化调度图

求得当前调度线所有时段的最优控制点。6) 增大 l , 对下一调度线寻优。直到统计指标满足收敛条件, 即 $|E^{(n+1)} - E^{(n)}| \leq \delta$, 整个迭代程序结束。

4. 应用实例

乌江是长江上游南岸最大的支流, 落差达 2124 m, 多年径流量 534 亿 m^3 。流域总规划 11 座水电站, 目前上游 6 座水电站已投入运行, 其中索风营、思林两座日调节水库的调节能力较差, 因此本文以洪家渡、东风、乌江渡、构皮滩 4 座水库组成的梯级水库为研究对象, 其特征参数如表 1 所示。

根据上文所述方法, 以乌江流域水文年(5月初至次年 4 月末)为调度周期, 以月为计算时段, 采用 1951~2007 共 56 年长系列径流资料进行调节计算, 确定梯级水库设计枯水年组为 1987 年 5 月~1991 年 4 月。所得洪-构梯级水库优化调度图如图 3 所示。

该调度图使用原则: 1) 当状态值位于两相邻调度线间时, 取调度线对应出力值的平均值运行; 2) 当状态值位于最高调度线以上时, 按最高调度线对应的加大出力运行; 3) 当状态值位于最低调度线以下时, 按

最低调度线对应的降低出力运行。在此基础上, 根据梯级水电站负荷分配规律对各水电站的出力进行分配。

为了验证上述调度图是否合理、可靠, 按照调度图所指示的调度规则, 对 1951.5~2007.4 长系列径流资料进行模拟计算, 梯级多年平均发电量为 184.7 亿 $kW \cdot h$, 相比梯级设计年发电量增加了 1.32 亿 $kW \cdot h$, 增幅为 0.7%。由此说明按照本文提出的直接优化梯级联合调度图的方法合理有效、可行可靠, 能很好地指导梯级水库联合调度运行。

5. 结论

通过实例研究表明基于梯级水库常规调度图优化得到的梯级水库优化调度图简单实用, 应用效果较好, 从而验证了基于梯级水库常规调度图的优化绘制方法的实用性和推广价值, 同时从侧面也证明了梯级水库联合调度图在梯级水库调度工作中的应用效果。然而, 本文为了重点突出本方法的有效性, 避免计算问题过于复杂, 只以梯级蓄能最大为目标函数进行了研究, 此举未能充分考虑面临时段径流预报对水库运

行方式的影响, 因此在后续研究中应作深入研究。

参考文献 (References)

- [1] 杨凤英. 梯级水电站群优化调度图研究及应用[D]. 大连理工大学, 2009.
YANG Fengying. The study and application for optimal operation chart of cascade reservoirs. Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [2] 谢维, 纪昌明, 李克飞, 等. 金沙江梯级水电站群联合发电运行三种常规调度方法研究[J]. 水力发电, 2011, 8: 81-84.
XIE Wei, JI Changming, LI Kefei, et al. Study on three conventional scheduling methods for power generation of cascade hydropower stations. Water Power, 2011, 8: 81-84. (in Chinese)
- [3] 黄强, 张洪波, 原文林, 等. 基于模拟差分演化算法的梯级水库优化调度图研究[J]. 水力发电学报, 2008, 6: 13-17.
HUANG Qiang, ZHANG Hongbo, YUAN Wenlin, et al. Study of optimal operation chart of cascade reservoirs based on linking simulation with differential evolution algorithm. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 6: 13-17. (in Chinese)
- [4] 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, 5: 10-15.
LI Wei, GUO Shenglian, ZHU Fengxia, et al. Combined reservoirs operation of Qingjiang cascade hydropower stations. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 5: 10-15. (in Chinese)
- [5] 张双虎, 黄强, 黄文政, 等. 基于模拟遗传混合算法的梯级水库优化调度图制定[J]. 西安理工大学学报, 2006, 3: 229-233.
ZHANG Shuanghu, HUANG Qiang, HUAGN Wenzheng, et al. Linking simulation with genetic algorithm to establish optimal operation chart of cascade reservoirs. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 3: 229-233. (in Chinese)
- [6] 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, 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. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 6: 71-77. (in Chinese)
- [7] 黄春雷, 吴洪寿, 丁杰, 等. 基于总保证出力协调的梯级水库联合调度图研究[J]. 水电能源科学, 2012, 2: 49-52.
HUANG Chunlei, WU Hongtao, DING Jie, et al. Joint operation chart of cascade reservoirs based on total firm power coordinating. Water Resources and Power, 2012, 2: 49-52. (in Chinese)
- [8] 张双虎. 梯级水库群发电优化调度的理论与实践[D]. 西安理工大学, 2007.
ZHANG Shuanghu. The theory and practise of cascade reservoirs power generation optimized operation. Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [9] 刘攀, 郭生练, 雒征, 等. 求解水库优化调度问题的动态规划——遗传算法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 5: 1-6.
LIU Pan, GUO Shenglian, LUO Zheng, et al. Optimization of reservoir operation by using dynamic programming-genetic algorithm. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 5: 1-6. (in Chinese)
- [10] XUAN, Y., MEI, Y. and XU, J. Research of hydropower stations optimal operation based on the discrete differential dynamic programming—Progressive optimization algorithm combination method. Proceedings of the Seventh ACIS International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications, SERA, Haikou, 2-4 December 2009.