

# 基于可行空间搜索遗传算法的梯级水库群调度规则

王旭, 郭旭宁, 雷晓辉, 蒋云钟

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 以梯级水库群系统多年平均发电量和旬出力保证率最大为目标函数, 以梯级水库群内各水库拐点式调度图为决策变量, 建立梯级水库群联合发电调度模型, 并采用可行空间搜索遗传算法进行求解。为了避免模型求解过程中对不可行解的过多处理, 有针对性地对可行解进行优化。最后, 以汉江流域梯级水库群为例, 对模型和算法的有效性进行了验证。

**关键词:** 梯级水库群; 发电调度; 改进遗传算法; 汉江流域

**中图分类号:** TV 697 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 1683(2014) 04-0173-04

## Joint Operation Policy for Cascade Reservoirs using Genetic Algorithms Searching in Feasible Region

WANG Xu, GUO Xur ning, LEI Xiaohui, JIANG Yurzhong

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 10038, China)

**Abstract:** In this study, an optimization model of hydropower generation was built for joint operation of cascade reservoirs with the objective function to maximize the annual average amount of hydropower generation and guarantee ratio of ten day hydropower generation and with the operation chart of each reservoir as the decision variable. The model was solved using the generic algorithms searching in feasible region, which can avoid extra efforts on the infeasible solution search and improve the optimization effectively. The model was applied to the cascade reservoirs in the Hanjiang River Basin to verify the efficiency of the model and algorithm.

**Key words:** multi reservoir system in series; hydropower generation operation; improved Genetic Algorithm; Hanjiang River Basin

流域梯级水电站群间具有紧密的水力联系和电力联系, 各级水电站发电效益受上、下游水电站的影响较大。因此, 实行流域梯级水电站群的联合调度, 可充分利用流域水资源和水电能源, 对梯级水库群联合调度规则进行研究具有重要意义。最初, 人们关注于水库群联合调度函数的研究: Jay<sup>[1]</sup>对以发电为主的混联水库调度函数进行了推导; 黄永皓等<sup>[2]</sup>采用约束微分动态规划对水库进行确定性优化调度, 并在此基础上采用最小二乘回归分析的方法求得梯级水库中各水库各时段的调度函数; 陈洋波等<sup>[3]</sup>以水库群聚合分解法为基础, 对梯级水库群隐随机优化调度函数的方法进行了探讨。近年来, 逐渐有人采用水库优化调度图的方法来进行水库群联合调度研究, 即以梯级水库群整体效益最大为目标, 对所有水库进行统一优化, 从而得到各个水库优化调度图, 例如, Tu<sup>[4]</sup>在分析初始水位对多目标梯级水库群规则影响的基础上, 采用混合整数线性规划方法对梯级水库的一组调度曲线

进行优化; 黄强<sup>[5]</sup>、张双虎<sup>[6]</sup>在乌江渡水库群优化调度中, 分别采用差分演化算法和遗传算法构建以梯级发电量最大为目标的模型, 在给出最优化决策的同时给出了梯级总调度图及各电站的优化调度图; 刘心愿等<sup>[7]</sup>采用多目标遗传算法 NS-GA II 对清江流域梯级水库调度图进行了优化; 邵琳等采用混合模拟退火遗传算法对 3 级梯级水库调度图进行了优化。

尽管国内外在梯级水库群调度图优化方面取得了一系列丰硕的成果, 但依然存在以下问题: (1) 在以时段水位为变量的调度图优化模型中, 虽然变量约束关系相对简化, 但规模大幅增加, 同时生成的调度图由于线型起伏震荡而无法直接指导水库调度运行; (2) 在以时间与水位组成的拐点为变量的调度图优化模型中, 虽然有效地减少了变量规模, 但由于变量约束关系非常复杂, 致使可行域呈狭窄或不规则的形状, 增加了求解难度; (3) 在梯级调度图优化研究中, 随着梯级中具有季调节以上能力水库的增加, 调度图优化模型的变量

收稿日期: 2013-12-10 修回日期: 2014-04-14 网络出版时间: 2014-06-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.04.001.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题“雅砻江流域数字化平台建设及示范应用”(2011BAZ03221B05)

作者简介: 王旭(1985-), 男, 辽宁营口人, 博士, 主要从事梯级水库群优化调度研究。E-mail: wangxur04@126.com

将成倍增长,从而进一步放大了上述求解困难。王旭等<sup>[9]</sup>针对前两点问题,提出了解决复杂约束优化问题的可行空间搜索遗传算法,并在此基础上构建了水库调度图优化模型,解决了单库调度优化可行解搜索困难的问题,提高了单库调度图优化的计算效率及优化效果。因此,本文拟在基于可行空间搜索遗传算法的调度图优化模型基础上,引入梯级水库群模拟调度技术,构建基于可行空间搜索遗传算法的梯级调度图优化模型,试图解决梯级水库群调度图优化中可行解搜索困难的问题,并以汉江流域梯级水库群为例,验证模型的有效性。

## 1 梯级水库群联合优化调度模型与求解

### 1.1 梯级水库群联合优化调度模型

基于规则的水库调度模型是以水库调度规则为指导,以水库工程参数为约束边界,采用模拟方法进行逐时段的调度模拟;以通过模拟模型统计得到的相应调度指标的某种函数形式作为目标函数,再通过某种优化算法对调度模型进行求解。在梯级水库群发电调度模型中,一般以满足一定发电保证率要求的发电量最大为目标函数,以某种形式下的水库群发电调度规则为决策变量。而水库群发电调度优化模型的约束包括水库水量平衡约束、库容上下限约束、出力上下限约束以及流量上下限约束。在考虑供水情况下还包括供水约束。

(1) 水库水量平衡约束。

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (Q_{inf,i,t} - Q_{i,t}) \Delta t \quad (1)$$

式中: $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$ 分别为水库在时段初、末蓄水量; $Q_{inf,i,t}$ 为水库时段入流; $Q_{i,t}$ 为水库*i*在*t*时段出库流量,包括发电放水、供水、弃水等。

(2) 水位约束。

$$Z_{i,t,\min} \leq Z_{i,t} \leq Z_{i,t,\max} \quad (2)$$

式中: $Z_{i,t,\max}$ 、 $Z_{i,t,\min}$ 分别表示水库在时段水位上限、下限值; $Z_{i,t}$ 表示水库*i*在*t*时段水位值。

(3) 流量约束。

$$Q_{i,t,\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,t,\max} \quad (3)$$

式中: $Q_{i,t,\max}$ 、 $Q_{i,t,\min}$ 、 $Q_{i,t}$ 分别表示水库*i*在*t*时段最大、最小允许出库流量和实际出库流量。

(4) 出力约束。

$$N_{i,t} \leq N_{i,t,\max} \quad (4)$$

式中: $N_{i,t,\max}$ 表示水库*i*在*t*时段机组相应水头下的最大出力; $N_{i,t}$ 表示水库*i*在*t*时段的出力。

(5) 水位库容关系曲线。

$$Z_{i,t} = f(V_{i,t}) \quad V_{i,t} = f(Z_{i,t}) \quad (5)$$

式中符号含义同式(1)、式(2)。

(6) 尾水位流量关系曲线。

$$Q_{i,t} = f(Z_{dr,i,t}) \quad Z_{dr,i,t} = f(Q_{i,t}) \quad (6)$$

式中: $Z_{dr,i,t}$ 表示水库*i*在*t*时段尾水位,其余符号含义同式(3)。

(7) 供水约束。

$$W_{s,j,t} \leq W_{d,j,t} \quad (7)$$

式中: $W_{s,j,t}$ 、 $W_{d,j,t}$ 表示需求单元*j*在*t*时段的水库群供水量及需水量。

### 1.2 求解算法

本文采用拐点式调度图作为梯级水库群联合发电调度规则的表达式,即采用时间、水位二维变量组合表示调度图的关键点,采用优化算法对其进行优化确定。拐点式调度图直接以拐点时段位置为决策变量,这样一来拐点的时段位置不再通过人为主观划定,使调度图的确定更加客观合理。

调度图优化问题是典型的约束优化问题,根据约束优化问题的数学定义,调度图优化问题的目标函数可认为是由调度图模拟模块与结果统计模块组成的,而约束条件就是调度图自身所反映的线与线、点与点之间的相互制约关系。这种制约关系很难采用表达式的方式进行描述,因此增大了罚函数法等通用方法的求解难度。同时,调度线之间的相对关系构成了一种强约束,采用传统遗传算法求解,会产生大量不可行解,原因在于在传统遗传算法的体系下,调度图优化问题的解的可行域占搜索域的比重极小,导致优化过程中必须浪费大量的计算时间在不可行解的生成和处理上,而没有真正用于搜索最优解。

基于此,本文采用可行空间搜索遗传算法(Feasible Range Searching Technique based on Genetic Algorithm, FRSGA),对梯级水库群联合调度图优化模型进行求解详见文献[9]。与传统遗传算法不同的是,FRSGA算法能够考虑到决策变量之间复杂的相关性,结合生物学中碱基、基因、基因组的分层概念,并通过引入信息进入交互机制,从而形成了一套有效针对特定复杂约束优化问题的实用性算法。在梯级调度图优化这个问题中,基于射线搜索方式设计的FRSGA算法能够有效解决单库调度图优化可行解搜索困难的问题,同时在梯级层面,通过引入考虑上下游水力联系的梯级水库群联合调度模拟技术,从而实现了梯级水库发电调度规则的优化。

## 2 实例分析

### 2.1 汉江流域梯级水库群系统概况

汉江流域梯级水库群共包括陡岭子、松树岭、鄂坪、潘口、黄龙滩、丹江口、王甫洲、三里坪、寺坪、崔家营10座水电站(图1)。

干流上的丹江口水电站加高前属不完全年调节电站,加高后属多年调节电站;王甫洲和崔家营调节性能较小,属日调节电站。

支流金钱河上的陡岭子水库处于全梯级最上端,是一个具有年调节性能的单一电站,其出库流量与干流第一级丹江口形成水力联系。

支流堵河与上游汇湾河、官渡河呈“丫”型河系,潘口、黄龙滩位于堵河干流上,鄂坪和松树岭分别为于汇湾河和官渡河,自身形成一个小混联水库群,鄂坪与松树岭的并联出流汇入堵河,形成潘口的入库流量。其中,潘口和鄂坪具有年调节性能,黄龙滩和松树岭具有不完全年调节性能。

另一支流南河于王甫洲和崔家营之间汇入汉江干流,寺坪和三里坪水库组成了南河上的串联梯级水库,是具有年调节性能的电站。

在梯级优化的过程中,王甫洲和崔家营不参与全局优化,仅进行径流式调节计算。汉江梯级水库群网络关系见图1。

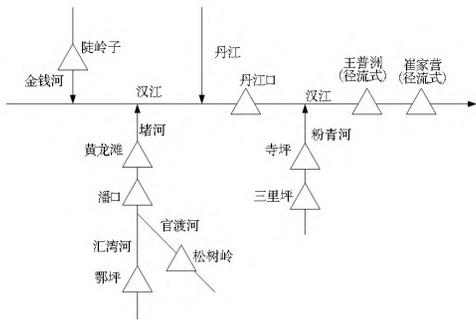


图 1 汉江梯级水库群网络关系概化图

Fig. 1 Schematic diagram of cascade reservoirs in Hanjiang River Basin

### 2.2 汉江流域梯级水库群联合调度模型

考虑梯级各电站之间联系及水电站的各项边界约束条件,以水库群 30 年长系列的历史水文资料为模型输入资料,以多年平均梯级发电量和旬出力保证率最大为目标函数(见式(8)),采用可行空间搜索遗传算法,通过调整目标函数中的权重系数,对汉江梯级水库群进行多目标优化调度,并确定一组平衡解对应下的水库群联合调度规则。汉江流域梯级水库群联合调度模型的约束条件见式(1)至(7)。目标函数中,多年平均发电量是指所选取的计算系列的多年平均梯级总发电量,旬发电保证率是指梯级各水库按保证出力进行发电的旬的个数占计算时段所有旬的个数的比率。

$$\max M = \omega_1 E + \omega_2 P \quad (8)$$

式中: $E$  为多年平均梯级发电量; $P$  为旬出力保证率; $\omega_1$ 、 $\omega_2$  为权重。

### 2.3 汉江流域梯级水库群联合优化调度结果分析

为了对汉江流域梯级水库群联合优化调度结果进行分析,本文根据梯级水库群的设计调度图对系统的调度运行过程进行模拟。通过调整目标函数中的权重系数,采用遗传算法迭代计算可以得到一系列优化的调度图组,每组调度图有对应的目标函数值,以多年平均发电量最大、旬发电保证率最大为优化目标 Pareto 前沿见图 2。将这些目标函数值与根据设计调度图计算得到的目标函数值对比,多目标优化 Pareto 前沿完全对模拟结果的多目标点进行支配。

以旬发电保证率不低于设计调度图模拟结果而多年平均发电量尽可能大为标准,选取一组平衡解作为推荐调度方

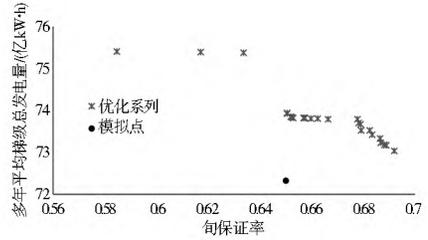


图 2 多年平均发电量最大、旬发电保证率最大两目标 Pareto 前沿

Fig. 2 Pareto front of objective function with maximal annual average power generation and maximal guarantee ratio

案。由 FRSGA 求解得到的推荐调度方案下的梯级多年平均发电量与设计调度图模拟结果对比见表 1。

表 1 FRSGA 算法与设计调度图模拟多年平均发电量对比

Table 1 Comparison of average power generation between FRSGA algorithm and design operation chart simulation

水库	调度图模拟 /(亿 kW·h)	FRSGA /(亿 kW·h)	增发电量 /(亿 kW·h)	增发比率 (%)
陡岭子	1.754	1.731	- 0.023	- 1.323
松树岭	1.591	1.427	- 0.164	- 10.289
鄂坪	2.443	2.272	- 0.172	- 7.02
潘口	10.113	9.737	- 0.376	- 3.714
黄龙滩	9.741	9.005	- 0.736	- 7.556
丹江口	34.14	35.958	1.818	5.324
王甫洲	4.573	5.304	0.731	15.994
三里坪	2.003	1.996	- 0.007	- 0.359
寺坪	1.704	1.649	- 0.055	- 3.257
崔家营	4.265	4.841	0.576	13.496
总计	72.328	73.934	1.605	2.22

从表 1 可以看出,FRSGA 算法多年平均总发电量 73 934 亿 kW·h,比设计调度图模拟高出 1 605 亿 kW·h,增发率 2 220%,优化效果显著。其中,参与梯级优化的电站中,王甫洲电站在梯级联合调度中优化结果最明显,增发了 15 994%,而陡岭子、松树岭、鄂坪、潘口、黄龙滩、三里坪、寺坪电站在梯级联合优化中则减少发电量,这是由于考虑梯级效益最大而水库发电量发生亏损。采用可行空间搜索遗传算法优化得到的梯级水库群中各水库的调度图见图 3。

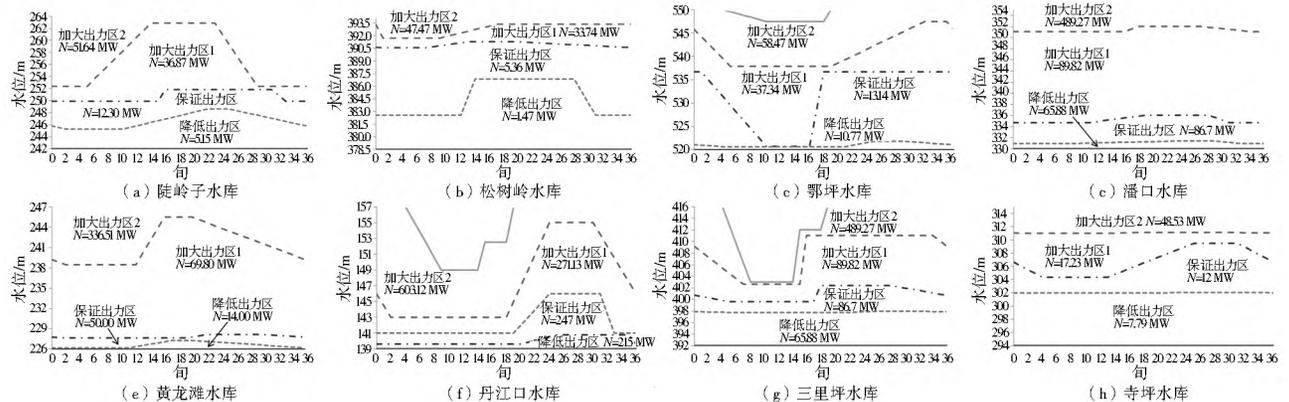


图 3 梯级水库群中各水库的优化调度图

Fig. 3 Optimal operation charts of each reservoir in cascade reservoirs

通过对以上优化调度图的分析,可以得出以下结论。

(1) 对调节能力大、装机容量大的水库,加大出力区空间相对较大,而保证出力区与降低出力区空间相对有所压缩,从而提高了发电效益和发电保证率。

(2) 对调节能力大、装机容量小的水库,各分区均匀分布,从而提高了发电效益和发电保证率。

(3) 对调节能力小、装机容量大的水库,加大出力区空间较大,而极大地压缩了保证出力区与降低出力区空间,从而能够减少弃水,充分利用装机容量大的优势加大发电。

(4) 对调节能力小、装机容量小的水库,保证出力区与降低出力区空间较大,而极大地压缩了加大出力区的空间,从而能够维持较高水头发电,在提高出力保证率的同时也增加了发电效益。

### 3 结语

随着我国大批水库群相继建设并完工,这些大型水利工程逐渐由建设期转入管理期,因此对流域梯级水库群开展调度研究具有重要意义。本文以梯级水库群系统整体效益最大为目标函数,建立梯级水库群联合发电调度模型。在模型求解过程中,为了减少对不可行解浪费过多时间,有针对性地对可行解进行优化,进而提高优化效率,本文采用可行空间搜索遗传算法对调度模型进行求解,并以汉江流域梯级水库群为例,进行了实例研究。

#### 参考文献(References):

[1] JAY R L. Derived Power Production and Energy Drawdown Rules for Reservoirs[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2000, 126(2): 108-114.

[2] 黄永皓,张勇传.微分动态规划及回归分析在水库群优化调度中的应用[J].水电能源科学,1986,4(4):315-322. HUANG Yonghao, ZHANG Yongchuan. Application of Differential Dynamic Programming and Regression Analysis in Reservoir Optimization Dispatching[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 1986, 4(4): 315-322.

[3] 陈洋波,陈惠源.水电站库群隐随机优化调度函数初探[J].水电能源科学,1990,8(3):216-223. CHEN Yangbo, CHEN

Huiyuan. The Preliminary Approach of Implicit Stochastic Optimal Dispatching Function for the Hydro Power Station. [J] International Journal Hydroelectric energy. 1990, 8(3): 216-223.

[4] Tu M Y, Hsu N S, Yeh W W G. Optimization of Reservoir Management and Operation with Hedging Rule[J]. Journal of Water Resource sPlanning and Management, 2003, 129(2): 86-97.

[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,2006,22(3):229-233. ZHANG Shuanghu, HUANG Qiang, HUANG Weizheng, et al. Linking Simulation with Genetic Algorithm to Establish Optimal Operation Chart of Cascade Reservoirs[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 22(3): 229-233.

[6] 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,2008,27(6):13-17. HUANG Qiang, ZHANG Hongbo, YUAN Weilin, et al. Study of Optimal Operation Chart of Cascade Reservoirs Based on Linking Simulation with Differential Evolution Algorithm [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(6): 13-17.

[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,2009,6(3):26-31. LIU Xiruan, 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, 6(3): 26-31.

[8] 邵琳,王丽萍,黄海涛,等.梯级水电站调度图优化的混合模拟退火遗传算法[J].人民长江,2010,41(3):34-37. SHAO Lin WANG Liping, HUANG Haitao, et al. Optimization of Operation Chart of Cascade Hydropower Stations Based on Hybrid Genetic Algorithm and Simulated Annealing[J]. Yangtze River, 2010, 41(3): 34-37.

[9] 王旭,雷晓辉,蒋云钟,等.基于可行空间搜索遗传算法的水库调度图优化[J].水利学报,2013,44(1):26-34. WANG Xu, LEI Xiaohui, JIANG Yunzhong, et al. Reservoir Operation Chart Optimization Searching in Feasible Region Based on Genetic Algorithms[J]. Journal of Hydraulic engineering, 2013, 44(1): 26-34.

(上接第 168 页)

CHEN Yuanjin, et al. The "6·06" Disaster Characteristics and Forming Mechanism of Debris Flow in Wangmo, Guizhou[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 5(30): 599-606. (in Chinese)

[5] 王涛,余斌,元星,等.贵州望谟县田坝沟泥石流灾害特征及防治建议[J].中国地质灾害与防治学报,2012,1(23):6-11. (WANG Tao, YU Bin, QI Xing, et al. Characteristics and Prevention of Debris Flow in Tianba Gully of Wangmo County in Guizhou[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 1(23): 6-11. (in Chinese))

[6] 伦国星,周斌.地形地貌对兰州市泥石流灾害形成影响分析[J].甘肃地质,2011,4(20):65-70. (LUN Guoxing, ZHOU Bin. Analysis of the Influence of Topography on the Formation of Debris Flow Disaster in Lanzhou City[J]. Gansu Journal of

Geology, 2011, 4(20): 65-70. (in Chinese))

[7] 余斌.根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究[J].沉积学报,2008,26(5):789-796. (YU Bin. Research On The Calculating Density By The Deposit Of Debris Flows[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(5): 789-796. (in Chinese))

[8] 余斌.黏性泥石流的平均运动速度研究[J].地球科学进展,2008,23(5):524-532. (YU Bin. Study on The Mean Velocity of Viscous Debris Flows[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(5): 524-532. (in Chinese))

[9] 王士革.山坡型泥石流的危害与防治[J].中国地质灾害与防治学报,1999,10(3):45-48. (WANG Shirge. Hazard of Debris Flow on Slope and its Control[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1999, 10(3): 45-48. (in Chinese))