

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

邵琳¹, 王丽萍¹, 黄海涛², 杨子俊¹, 喻杉¹

(1. 华北电力大学水资源与水利水电工程研究所, 北京 102206;
2. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051)

摘要: 按常规方法绘制的水库调度图相对保守, 难以达到可靠性与效益的优化组合, 使得水库调度图还存在一定的优化空间。提出了一种优化常规调度图的新方法——混合模拟退火遗传算法, 以实现水库调度图的计算机程序式自动优化修正。该方法综合了遗传算法的全局搜索能力和模拟退火算法的局部搜索能力, 提高了计算精度, 避免了手工修正调度图的随意性。通过在实际生产项目中的应用与检验, 证明该方法对水电站水库调度图的优化确实可靠, 在满足可靠性指标以及水库综合利用要求约束的条件下, 取得了可观的经济效益, 为水电站实现经济运行提供了一条可行途径。

关键词: 水库调度图; 水电站经济运行; 混合模拟退火遗传算法

Optimization of the reservoir operation chart of hydropower station and its application ——based on hybrid genetic algorithm and simulated annealing

SHAO Lin¹, WANG Li-ping¹, HUANG Hai-tao², YANG Zi-jun¹, YU Shan¹

(1. Research Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Kunming Hydropower Investigation Design and Research Institute of CHECC, Kunming 650051, China)

Abstract: Drawing of the reservoir operation chart according to conventional methods is relatively conservative, and it is difficult to achieve the balance of reliability and efficiency, which means that it can be furtherly optimized. This paper puts forward a new method for optimizing routine operation chart——genetic algorithm simulated annealing algorithm, in order to achieve the computer-automatic optimization of the chart. By mixing the ability of the global search of genetic algorithm and that of local search of simulated annealing algorithm, the calculation accuracy is improved and the haphazardry of manual correction of the chart is avoided. The application of this method in practical project proves that this algorithm is reliable and effective for the optimization of operation chart which can obtain considerable economic benefit. In the meanwhile, it provides a feasible way for realizing the economical operation of hydropower station.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50609007).

Key words: reservoir operation chart; economical operation of hydropower station; hybrid genetic algorithm and simulated annealing

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)12-0040-04

0 引言

水电站水库运行能否很好地满足电力系统可靠性和经济性要求, 关系着水电站整体的运行效益。调度图是实现水库合理运行的重要手段之一。调度图中上、下基本调度线是在各种设计枯水年的来水条件下, 水电站按保证出力工作时, 水库在年内各时刻的最高和最低蓄水指示线, 是水电站及水库合理运行的基本依据; 加大出力区与降低出力区也分

别考虑到了丰、特丰以及枯、特枯水年的情况。所以在常规调度中调度图既简明实用又对指导水库长期合理、安全、有效的运行具有极其重要的意义。

目前, 按常规计算方法绘制的水库调度图仍然是指导水电站运行最基本的可靠工具, 在生产中被广泛采用。由于常规方法在绘制水库调度图中的局限性, 编制出来的调度图往往达不到可靠性指标和效益(发电量)指标的优化组合, 在实际生产运行中通常还需要对水库调度图进行反复的、经验性的检验和修正, 才能得到较好的图线位置。

近年来, 遗传算法(GA)和模拟退火算法(SA)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50609007)

已成为应用十分广泛的两种智能优化算法。遗传算法的全局搜索能力强, 但却存在易早熟、局部搜索能力不足等缺点; 而全局搜索能力较弱的模拟退火算法, 其良好的局部搜索能力可以弥补遗传算法的不足, 提高最优解的可靠性, 有利于得到全局最优解。所以, 针对常规方法绘制的水库调度图存在的弱点, 本文将遗传算法和模拟退火算法结合起来, 建立了适用于水库调度图优化的混合模拟退火遗传算法(SAGA), 对常规调度图的各调度线进行优化修正, 在满足水电站设计保证率和水库综合利用要求下, 使发电量尽可能大, 达到了改善水库调度图、提高水电站运行效益的目标。

1 思路及模型

水电站水库调度图的绘制采用等出力计算模型, 并要求满足各种严格的边界约束条件。在水库具有年/季调节能力的情况下, 以月为单位划分时段, 同时假设水库除发电外还必须兼顾灌溉防洪等任务。首先遵循行业规范, 按照常规水能计算方法绘制出初始调度图^[1], 以该初始调度图为依据, 以多年平均发电量最大为目标, 满足各种严格的边界约束条件, 采用 SAGA 算法对各调度线进行优化计算和修正。根据多年径流资料进行模拟运行, 比较调度图优化前后指导水库运行达到的保证率及发电量情况, 验证 SAGA 算法对优化调度图的有效性。

优化调度图的模型如下:

目标函数:

$$\begin{cases} \text{发电量: } E = \max \sum_{t=1}^M N_t T \\ \text{出力: } N_t = K Q_{引t} H_t \end{cases}$$

其中: E 为年发电量; N_t 为时段平均出力; M 为划分的时段总数; K 为水电站综合出力系数; $Q_{引t}$ 为 t 时段水电站发电引用流量; H_t 为 t 时段发电水头; T 为时段计算时长。

完全约束条件:

$$\begin{cases} \text{非负约束: 以下所有变量均为非负} \\ \text{水量平衡约束: } V_{t+1} - V_t = (Q_t - q_t) \times T - W_t \\ \text{水位约束: } Z_{\min} \leq Z_t \leq Z_{\max} \\ \text{出力约束: } N_{\min} \leq N_t \leq N_{\text{预}} \\ \text{下泄流量约束: } q_{\min} \leq q_t \leq q_{\max} \end{cases}$$

其中: Z_t 为 t 时段的初水位; Z_{\min} 、 Z_{\max} 分别为对应时段的最低和最高控制水位; N_t 为 t 时段的出力; N_{\min} 、 $N_{\text{预}}$ 分别为对应时段的最低限制出力和预想出力; T 为时段的时间长度; V_t 、 Q_t 、 q_t 和 W_t 分别对

应 t 时段的初库容、入库流量、下泄流量和损失水量; q_{\min} 、 q_{\max} 分别为允许最小和最大下泄流量。

不完全约束条件:

$$\text{保证率约束: } p' \geq p$$

其中: p' 为时段达到的保证率; p 为设计保证率。

2 算法分析

2.1 遗传算法

遗传算法(GA)是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的高度并行、随机、自适应搜索算法, 隐含并行性和对全局信息的有效利用能力是遗传算法的两大显著特点^[2]。

遗传算法仿照生物染色体, 对优化问题的解进行编码, 作为优化问题解的表现形式。后按照优化问题的目标函数构造适应函数, 并以适应函数值的大小确定编码的优劣。根据自然选择规律以一定概率淘汰较差的编码, 留下适应值较高的编码, 组成新的种群进行下一代繁衍。繁衍的过程同样仿照生物染色体的遗传方法, 采用交叉、变异等方式以获取新的编码, 即优化问题的新解。如此反复, 直至达到一定的代数或找到问题的最优解。

2.2 模拟退火算法

模拟退火算法(SA)是一种模仿金属物理退火过程的特殊局部搜索算法。不同于一般局部搜索, 它以一定概率接受领域中的较差解, 利于跳出局部最优, 从理论上来说, 可以称其为一种全局最优算法。具有描述简单、使用灵活、运用广泛、运行效率高和较少受初始条件限制等优点^[3]。

模拟退火算法, 模拟了金属温度缓慢降低, 由高能无序状态转变为低能有序状态的过程。算法首先任选初始解, 并设定初始高温, 在初始解邻域内随机产生邻域解。根据目标函数比较两者的函数值, 若随机产生的新解优于初始解, 则无条件接受新解; 若新解的函数值小于初始解, 则以一定概率接受新解, 也就是不完全抛弃差解^[4]。如此循环, 直至达到热平衡, 即达到设定的循环次数。降低温度, 重复以上循环, 使函数在逐渐下降的每一个温度下都达到平衡。当温度下降到终止温度时, 全部循环结束, 得到最终的冷却状态, 即目标函数的解。

2.3 混合模拟退火遗传算法

基于模拟退火局部寻优的遗传算法, 是在传统遗传算法的基础上, 将模拟退火方式作为遗传算法除交叉、变异外的另一算子。以遗传算法流程为主体, 融入模拟退火算法, 提高算法整体优化能力。SAGA 算法的基本思想是: 首先随机产生一个初始

群体，通过选择、交叉、变异等遗传算子对群体中的个体进行遗传操作，得到一组新的个体，此为遗传算法，侧重于全局搜索。再设定初始高温，对这些个体分别进行模拟退火操作，降温至终止温度，产生一组新的优良的个体，即下一代群体的初始种群。此为模拟退火算法，侧重局部搜索。循环迭代计算，直至到达终止条件，或达到设定的最后一代，整个计算结束。

算法的流程图如图 1。

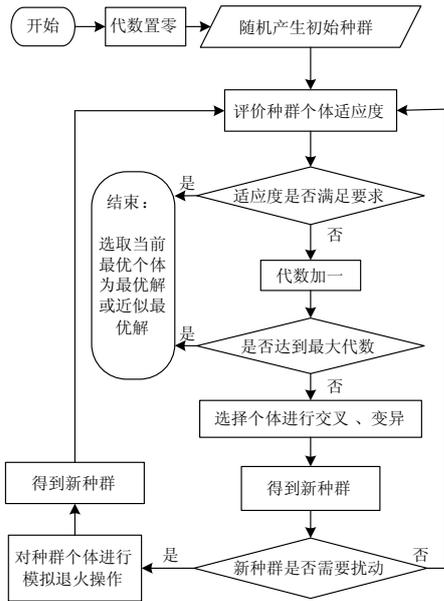


图 1 SAGA 算法流程图

Fig.1 Flowchart of SAGA algorithm

3 优化水库调度图的算法设计

本文涉及变量均采用实数编码，以双精度浮点数表示。一条染色体代表一条调度线，染色体 (V_n) 上的各基因 (Z_n) 表示水库水位，每条染色体含 12 个基因位，即水库一个水文年内 12 个月水位变化序列 $V_n (Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_{12})$ ，在解空间内随机生成^[5]。整个遗传空间为问题空间，染色体空间为解空间。在模拟退火操作时，将染色体的单个基因视为金属的高能状态，降温后，变为低能状态，即由初始水位解，经退火操作，得到更优的水位值。

取常规方法绘制的调度图各阶段各调度线的标点值为初始值。优化步骤如下：

(1) 参数初始化。确定种群大小 popSize，交叉率 p_c ，变异率 p_m ，遗传代数 g ，初始温度 T_0 ，终止温度 T_f 。

(2) 选择最上方调度线为优化目标。固定其他调度线，随机产生 popSize 条染色体，每条含 12 个

基因位，形成一个初始种群。各基因的取值范围在目标调度线的上、下另外两调度线对应标点值之间，最下方调度线取值不得小于死水位，最上方调度线取值不得大于正常蓄水位。另外，由于调度图含有多条调度过程线，在初始化种群时，需针对每条调度线随机产生 popSize 个染色体。

(3) 令每条染色体分别与其他固定的调度线构成新的调度图，指导水库运行，求出每条染色体的适应度，标记适应度最大的个体。本文以惩罚函数求解染色体适应度。以是否满足设计出力保证率为依据，满足则不惩罚，不满足则惩罚。其表达式可以表示为：

$$aimN_{V_i} = \sum_{i=0}^n N_i - M(p - p')^\alpha$$

其中： $aimN_{V_i}$ 为染色体 V_i 作为某调度线时，全部资料年运行后的适应度； n 为有径流资料的总年数； p 为保证出力； p' 为以调度图指导 n 年水库运行达到的出力保证率； M 为惩罚因子； α 为惩罚系数。当 $p' \geq p$ 时不惩罚， M 与 α 均取 0；否则， M 根据惩罚力度取值， α 取 1。

(4) 对种群进行遗传操作。以轮盘赌的方式选择个体，以凸组合方式^[6]按概率 p_c 对染色体两两交叉，并以 p_m 概率选择个体变异。为简化计算，进行交叉的个体，不再被选择变异；已变异的个体，也不再被选择交叉。形成新种群后，评价种群全部个体，令第 (3) 步标记的最大个体，取代新种群适应度最小的个体。同时再次标记适应度最大的个体，并对其每个基因进行模拟退火操作。

(5) 视初始基因为模拟退火的初始高能状态，通过模拟退火操作，得到较低能量状态，即较优解。依次对该染色体的各个基因进行模拟退火操作，得到新的染色体。降温过程依靠 T_0 和 T_f 来控制。由 Metropolis 准则 $\exp(-f/T_0) \approx 1$ 可知初温 T_0 要足够大才能在合理的时间里搜索尽可能大的解空间^[7]；终止温度 T_f 要足够小才有可能得出高质量的最终解，本文采用 $T_f = T_0 k^N$ 来控制，其中 k 为降温系数，为缓慢降温一般取 0.9~0.99， N 为总迭代次数。等温过程的迭代次数为 C/T_k 取整，其中 C 为常数； T_k 为降温过程温度 $T_k = T_0 k^n$ ； n 为第 n 次降温。该方式下温度越低迭代次数越多，可以弥补退火过程中低温粒子不易被接受的缺点。由于模拟退火会以一定概率接受差解，因此，在整个过程中应标记出现的最好解，以便最后返回最优解。

(6) 将退火得到染色体返回给整个种群，取代种群中适应度最小的染色体。

(7) 对新的种群重复 (3)~(6) 过程，直到达

到迭代次数。标记适应度最大的染色体, 作为所选目标调度线优化后的解, 取代原有调度线, 形成新的调度图。

(8) 向下选择第二条调度线, 固定其他调度线, 包括已优化的调度线。重复(1)~(7)过程, 直到所有调度线均得到优化, 形成新的调度图。

(9) 重复以上步骤, 顺次对每一条调度线进行循环优化, 直到达到迭代次数。循环结束, 得到最终优化调度图^[8]。

4 实际应用与有效性分析

本文建立的水库调度图优化方法已经成功地应用于某水库的调度图优化计算中。该水库为年调节水库, 以发电为主, 兼有防洪、供水和灌溉任务。水库的正常蓄水位为 627 m, 死水位为 555 m, 装机容量为 300 MW, 保证出力为 150.3 MW, 出力系数为 8.3。同时, 已知该水库的水位~库容关系曲线、下游水位~流量关系曲线、水头~预想出力曲线, 以及 50 年逐月平均入库流量实测资料。

参数的选取是通过多次尝试, 反复运算, 最终确定为 $popSize=50, p_c=0.75, p_m=0.02, T_0=1\ 000\ 000, T_f=10\ 000, k=0.9, C=1\ 000\ 000$, 整个调度图迭代次数 20 次, 每条调度线迭代 10 次。遗传代数 g 采用变动方式确定, 即当两代之间适应值相差小于某固定值时, 迭代停止。

用 C++ 语言编程求解各过程。采用常规画法绘制的初始调度图如图 2。采用混合遗传模拟退火算法优化的调度图如图 3。圆点线为下基本调度线, 实线为上基本调度线, 虚线为加大出力线。

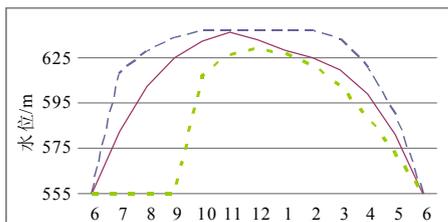


图 2 初始调度图

Fig.2 Initial operation chart

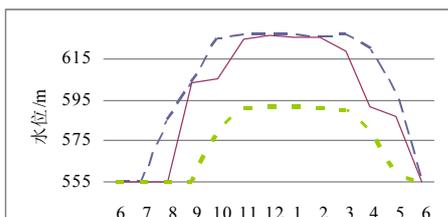


图 3 优化调度图

Fig.3 Operation chart after optimizing

将水库 50 年实际入库流量分别按优化前和优化后的调度图指导其运行, 计算结果对比分析见表 1。

表 1 调度图优化前后数据对比

Tab.1 Comparison of the two charts

各项指标	单位	初始调度图	优化调度图
年平均发电量	$10^8 kWh$	18.187	18.582
年均弃水流量	m^3/s	129.55	106.76
水量利用率	%	86.56	88.92
保证率	%	94.33	95.83
保证出力	$10^4 kW$	15.03	15.03

由表 1 可以看出, 采用混合遗传模拟退火方法优化的调度图指导水库运行, 年平均发电量提高了近 4 千万 kWh, 升幅达 2.17%, 效益显著; 出力保证率提高了 1.5 个百分点, 达到水库运行出力保证率 95% 的要求; 同时弃水量也有一定幅度的减少, 水量利用率得到了提高。由此可见, 本文建立的适用于水库调度图优化的混合模拟退火遗传算法 (SAGA), 对整个调度图的优化是有效的。

5 结语

本文基于遗传算法与模拟退火算法, 建立了适用于水库调度图优化的混合模拟退火遗传算法 (SAGA), 对常规水库调度图直接进行优化修正, 效果显著。经过实际生产检验, 证明该算法对水库调度图的优化是可行有效的。

在当前确定性优化方法难以直接用于指导水电站实际运行, 而随机性优化方法由于其使用的复杂性也难以被生产部门广泛采用的现实情况下, 对常规水库调度图的优化修正, 不失为一种简单明了, 即保留了调度图的实用方便与可靠的优点, 又在很大程度上溶入了优化方法的先进性, 值得在生产实践中推广的思路和方法。

参考文献

- [1] 万俊, 高仕春, 艾学山. 水资源开发利用[M]. 二版. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.
- [2] 刘勇, 康立山, 陈毓屏. 非数值并行算法(2)-遗传算法[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [3] 康立山. 数值并行算法(1)-模拟退火算法[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [4] Kirkpatrick S, Gelatt Jr C D, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 220: 671-680.
- [5] Robin Wardlaw, Mohd Sharif. Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1999(12): 25-33.

(下转第 49 页 continued on page 49)

表 5 故障处经过渡电阻接地
Tab.5 Fault spot ground via transition resistance

电流峰值差	模最大值		L1	L2	L3	sum	线路长度	过渡电阻
A 中性点不接地系统经过渡电阻接地								
3.53	1.09	L1	1.00	0.70	0.24	1.94	20	100
5.02	1.09	L2	1.42	1.00	0.34	2.76	25	100
7.48	2.18	L3	4.24	2.98	1.00	8.22	15	100
5.61	1.04	L1	1.00	1.83	0.43	3.26	40	100
3.47	0.92	L2	0.55	1.00	0.23	1.78	25	100
6.96	1.97	L3	2.35	4.30	1.00	7.65	20	100
B 中性点经消弧线圈接地系统经过渡电阻接地								
0.26	1.20	L1	1.00	0.22	-0.13	1.09	20	100
0.85	1.67	L2	4.57	1.00	-0.60	4.97	25	100
-1.00	2.35	L3	-7.57	-1.65	1.00	-8.22	15	100
0.44	0.81	L1	1.00	0.92	-0.31	1.61	30	100
0.09	1.01	L2	1.09	1.00	-0.33	1.76	25	100
-0.6	1.66	L3	-3.26	-2.99	1.00	-5.25	15	100

5 总结

分析了信号经小波变换之后主要特征体现在模极大值上, 使零序电流第一个最大值点的数值之差与模极大值相乘, 相当于模极大值是一个权重, 增加选线信号的强度, 最后提出了自己的选线判据与选线步骤。

通过对中性点不接地系统发生金属性接地和经过渡电阻接地、中性点经消弧线圈接地系统发生金属性接地和经过渡电阻接地各种情况进行仿真的结果分析, 可以看出, 此方法可避免线路长度、发生故障时的相角以及过渡电阻对其造成的影响。因此, 针对中性点不接地系统和经消弧线圈接地系统所形成的此选线判据是正确的。

参考文献

- [1] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 三版. 北京: 中国电力出版社, 1994.
- [2] 吴玲, 孙莹. 连续小波变换在小电流接地系统单相接

地故障选线中的应用[J]. 继电器, 2003, 31(11): 20-24.
WU Ling, SUN Ying. Application of continuous wavelet transform to select the fault line of single-phase earth faults in non-solid earthed power system[J]. Relay, 2003, 31(11): 20-24.

- [3] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [4] 陈基明. 小波分析基础[M]. 上海: 上海大学出版社, 2002.

收稿日期: 2009-12-17; 修回日期: 2010-03-22

作者简介:

鲁改凤(1963-), 女, 副教授, 本科, 主要从事电力系统安全运行与保护教学、研究及电力设计等; E-mail: lugaifeng@yahoo.com.cn

化雨(1989-), 男, 主要研究方向为电气工程及其自动化;

金小兵(1984-), 男, 助工, 研究生, 硕士, 主要从事电力系统安全运行与保护工作及研究。

(上接第 43 页 continued from page 43)

- [6] 汪定伟, 王俊伟, 王洪峰, 等. 智能优化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [7] 彭东海. 基于模拟退火的混合遗传算法[J]. 湖南工程学院学报, 2005, 15(3).
PENG Dong-hai. A mixed genetic algorithm based on simulated annealing[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering, 2005, 15(3).
- [8] 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).

ZHANG Ming, WANG Li-ping, AN You-gui, et al. Optimizing study on reservoir operation chart[J]. Journal of Wuhan University: Engineering Edition, 2004, 37(3).

收稿日期: 2009-08-14; 修回日期: 2009-10-09

作者简介:

邵琳(1984-), 女, 硕士研究生, 主要从事水(火)电调度自动化方面的研究。E-mail: ner7@163.com