

# 基于 Matlab 遗传算法工具箱的 梯级水电站优化调度

施展武<sup>1</sup>,罗云霞<sup>2</sup>,邱家驹<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;

2. 浙江水利水电专科学校,浙江 杭州 310018)

**摘要:**遗传算法因其简单、通用、适于并行处理而用于解决非线性复杂问题。在研究了基于 Matlab 遗传算法工具箱 (GAOT) 的基础上,提出把水电站水库看作一个系统,把系统的各元素、输入/输出参数等简化和假设后建立简化通用的数学模型。用该数学模型讨论了实现梯级水电站的优化调度问题,详细分析了算法设计中遗传算法控制参数的确定、编码、随机生成初始母体群、适应度计算、选择、交叉、变异、停止准则判断等。以某梯级水电站为例,利用提出的优化调度模型计算了比较简单情况,表明是可行的,对较复杂的情况也同样适用。

**关键词:**遗传算法;水电站;Matlab;优化调度

**中图分类号:**TM 73;TP 311.56

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-6047(2005)11-0030-04

遗传算法 GAs (Genetic Algorithms) 是 20 世纪 70 年代由美国密歇根大学的 John.H.Holland 借鉴生物界自然选择和进化机制发展起来的高度随机自适应搜索算法<sup>[1]</sup>。经过 30 多年的发展,遗传算法已经在优化、生产调度、智能控制、模式识别、图像处理、机器学习等领域取得了令人鼓舞的成就<sup>[2-4]</sup>。

目前,国内外已有采用遗传算法实现水电站的优化调度,文献 [5] 研究了基于遗传算法的水电站短期优化调度问题。文献 [6,7] 利用遗传算法实现水电站的优化,但是采用二进制编码,计算比较复杂。文献 [8] 采用十进制编码,一定程度上避免了二进制编码的冗余,但是只是针对单个水库水电站的优化调度问题。由于水电站群优化调度问题的复杂性,目前尚无统一公认的数学模型和求解方法。本文用一个简化的数学模型,采用 Matlab 遗传算法工具箱求解梯级水电站的优化调度问题。

## 1 Matlab 遗传算法工具箱简介

MathWorks 公司的 Matlab 是目前主流的数值计算软件之一,擅长数值和符号计算,系统建模、仿真和开发等。Matlab 的功能强大之处还在于它开发了可应用于不同领域的工具箱,其中的遗传算法优化工具箱就是一个可用于优化设计的工具箱,文献 [9] 对遗传算法工具箱作了详尽的介绍。

### 1.1 gam 函数

gam 函数是 Matlab 遗传算法工具箱和外部的接口,在实际优化过程中,编写好目标函数,设定参数,调用 gam,便可实现优化。

### 1.2 算子函数

算子函数包括交叉算子和变异算子,算子函数提供了遗传算法的搜索机制,通过算子函数,在原来种群的基础上产生新的种群。

a. 交叉算子 `function [child1,child2]=crossover (parent1,parent2,bounds,params)`

b. 变异算子 `function [child1]=mutation (parent1,bounds,params)`

所不同的是交叉算子由 2 个父代产生 2 个新的子代,而变异算子则是由 1 个父代产生 1 个新的子代。

### 1.3 选择函数

选择函数决定哪些个体进入下一代。

选择函数 `Function [newPop]=selectFunction (oldPop,options)`

其中 newPop 是被选择的新种群,oldPop 是当前种群,options 是其他可选参数向量。

遗传算法工具箱给出了 roulette.m, normGeomSelect.m, tourn.m 等 3 个选择函数。

### 1.4 初始化函数和终止函数

遗传算法工具箱给出了 initializega.m, initializeoga.m 2 个种群初始化函数和 maxGenTerm.m, optMaxGenTerm 2 个终止函数。

遗传算法工具箱已经在多维变量优化、非线性规划、参数优化和动态系统最优控制等一系列领域有了很好的应用。

## 2 数学模型

把水电站水库群看作一个系统,把系统的各元素及输入/输出等通过一定的简化和假设后,建立数学模型,再对数学模型求解,得到最优调度的方案。

梯级水电站优化调度的数学模型如下:

$$\max \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^m E_{tj}(V_{tj}, Q_{tj}) \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} V_{t+1,j} = V_{tj} + [Q_{r,tj} - Q_{tj}(V_{tj})] t \\ Z_{j,\min} \leq Z_{tj} \leq Z_{j,\max} \\ \text{或 } V_{j,\min} \leq V_{tj} \leq V_{j,\max} \\ Q_{tj,\min} \leq Q_{tj} \leq Q_{tj,\max} \end{cases} \tag{2}$$

$$E^*(V_{11}, V_{12}, \dots, V_{1m}) = \max \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^m E_{tj}(V_{tj}, Q_{tj}) \tag{3}$$

式 (3) 为在调度期初状态  $[V_{11}, V_{12}, \dots, V_{1m}]$  下, 整个调度周期的发电量的最优值;  $E_{tj}$  为  $j$  水库在任一时刻  $t$  的发电量。

$$E_{tj} = E_{tj}(V_{tj}, Q_{tj}) \tag{4}$$

以上各式中,  $V_{tj}$  为  $t$  时段初  $j$  水库的蓄水状态;  $V_{t+1,j}$  为  $t$  时段末、即  $t+1$  时段初  $j$  水库的蓄水状态;  $Q_{tj}(V_{tj})$  为水电站发电引用流量;  $Q_{r,tj}$  为  $t$  时段  $j$  水库的入库流量;  $t$  为时段秒数;  $t$  为阶段变量; 将调度期按月或旬划分为  $T$  个阶段, 以  $t$  代表则  $t=1, 2, \dots, T$ ;  $j$  为水库编号,  $j=1, 2, \dots, m$ 。

3 算法设计

3.1 确定遗传算法的控制参数

遗传算法的控制参数如下:

- a. 种群中染色体的个数  $N$ ;
- b. 选择概率  $P_s$ , 交叉概率  $P_c$ , 变异概率  $P_m$ 。

3.2 编码

选择水电站的发电引用流量  $Q_{tj}$  作为个体的编码变量, 将引用流量  $Q_{tj}$  的可行范围等间隔离散, 设间隔距离为  $\Delta$ , 则应把变量取值区域划分为  $m$  等分:

$$m = (Q_{tj,\max} - Q_{tj,\min}) / \Delta \tag{5}$$

从染色体基因转换到引用流量的解码公式为

$$Q_{tj} = Q_{tj,\min} + (n - 1) (Q_{tj,\max} - Q_{tj,\min}) / m \tag{6}$$

$t=n$

3.3 随机生成初始母体群

水库发电引用流量  $Q_{tj}$  的取值范围为  $(Q_{tj,\min}, Q_{tj,\max})$ , 把它分为  $m$  等份。随机选取  $N$  组水库运行过程中发电引用流量值的序列作为母体, 即

$$\begin{aligned} & (Q_{11}^1, Q_{21}^1, \dots, Q_{T1}^1, Q_{12}^1, Q_{22}^1, \dots, Q_{T2}^1, \dots, Q_{1m}^1, Q_{2m}^1, \dots, Q_{Tm}^1) \\ & (Q_{11}^2, Q_{21}^2, \dots, Q_{T1}^2, Q_{12}^2, Q_{22}^2, \dots, Q_{T2}^2, \dots, Q_{1m}^2, Q_{2m}^2, \dots, Q_{Tm}^2) \\ & \vdots \\ & (Q_{11}^N, Q_{21}^N, \dots, Q_{T1}^N, Q_{12}^N, Q_{22}^N, \dots, Q_{T2}^N, \dots, Q_{1m}^N, Q_{2m}^N, \dots, Q_{Tm}^N) \end{aligned}$$

3.4 适应度计算

适应度函数的计算公式为

$$f = P + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^m H_{tj} Q_{tj} - k_1 Q - k_2 V \tag{7}$$

$$Q = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^m \max \{Q_{tj} - Q_{tj,\max}, 0, Q_{tj,\min} - Q_{tj}\} \tag{8}$$

$$V = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^m \max \{ (V_{tj} - V_{j,\max}), \max(0, V_{j,\min} - V_{tj}) \} \tag{9}$$

式中  $P$  为保证  $f$  为正的整数。

3.5 选择

采用适应度函数值比例选择方法 (又称轮转法) 确定个体  $i$  被选择复制的概率为

$$P_{si} = f_i / \sum_{i=1}^N f_i \quad i=1, 2, \dots, N \tag{10}$$

式中  $f_i$  为个体  $i$  的适应度函数,  $N$  为个体数目。

按转轮法选择  $P_s \times N$  个染色体, 保留最佳个体。

3.6 交叉

遗传算法中种群的进化主要来自交叉操作的贡献。随机选取  $P_c \times N$  个染色体进行交叉运算, 将种群进行随机两两配对。

3.7 变异

在选择交叉后的母体中, 随机选取  $P_m \times N$  个染色体进行变异运算后形成新一代群体, 即子代群体。

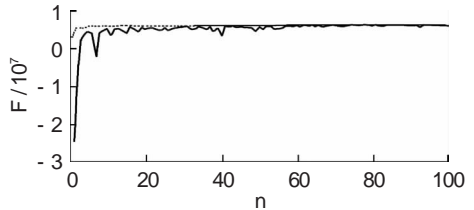
3.8 停止准则判断

判断是否满足收敛条件, 是则结束, 输出最优染色体, 否则再次进行遗传操作。

4 算例

某梯级水电站一级水库位于二级水库上游 20 km 处, 水库以供水、灌溉和有限防洪为主, 结合发电。供水和灌溉均通过二级水库放水实施。水库基本情况: 发电库水位范围 255~272 m, 尾水位 191.35 m, 与流量几乎无关。发电机组单机额定流量 9.15 m<sup>3</sup>/s, 装机容量 2 × 5 000 kW。下游梯级电站: 是水库坝后式电站, 最高库水位 120.3 m, 尾水位 (即下游水位) 95~96 m, 单机额定流量 9.78 m<sup>3</sup>/s, 装机 3 × 1 800 kW。

从图 1~5 (图中  $F$  为适应度函数,  $n$  为迭代次数;  $h$  为水位变化量,  $W$  为发电量) 可以看出, 利用 Matlab 遗传算法工具箱进行优化以后, 梯级水库发电量有了显著的提高。遗传算法是一种全局搜索算法, 它同时搜索解空间的多个点, 而不是 1 个点, 可以在占用较少内存的情况下找到全局最优。



— 解的变化    ---- 种群平均值的变化

图 1 适应度函数值 / 迭代次数曲线  
Fig.1 The fitness/generation curve

表 1、2 分别为一级、二级水库优化前、后数据 (表中  $q_v$  为入库流量,  $q_{vg}$  为发电流量,  $c_b$  为库容,  $W_r$  为实际发电量,  $W_a$  为优化后发电量)。

从表 1、2 可以发现, 利用遗传算法工具箱实现

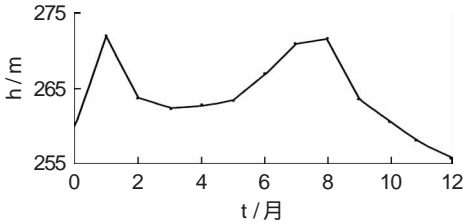


图2 一级水库的水位变化曲线  
Fig.2 The water level curve of primary reservoir

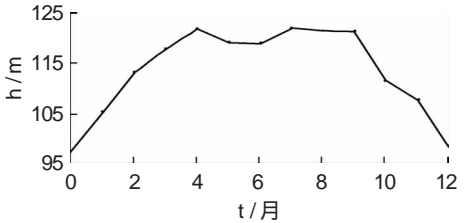


图3 二级水库的水位变化曲线  
Fig.3 The water level curve of secondary reservoir

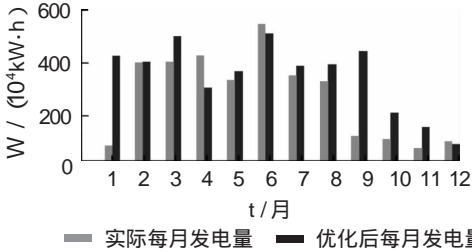


图4 一级水库的实际发电量和优化后发电量  
Fig.4 The actual and optimized generations of primary reservoir

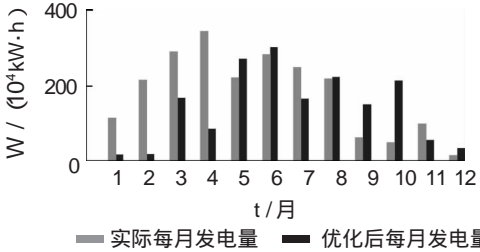


图5 二级水库的实际发电量和优化后发电量  
Fig.5 The actual and optimized generations of secondary reservoir

表1 一级水库优化前后数据  
Tab.1 The data of primary reservoir before and after optimization

月份	$q_v / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$q_{vg} / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$c_b / (10^4 \text{m}^3)$	$W_f / (10^4 \text{kW} \cdot \text{h})$	$W_a / (10^4 \text{kW} \cdot \text{h})$
1	18.15	7.60	5 453.0	52.2	345.1
2	0.77	8.09	8 184.2	324.8	327.2
3	8.98	10.18	6 286.3	328.2	410.1
4	6.25	6.00	5 974.7	348.4	241.3
5	7.92	7.26	6 040.2	268.2	294.7
6	12.92	9.85	6 211.5	451.9	418.3
7	10.50	6.89	7 008.5	282.8	312.0
8	7.62	7.02	7 942.0	264.6	318.4
9	1.79	8.90	8 099.8	84.9	359.9
10	1.37	4.01	6 258.3	73.5	158.7
11	0.42	2.87	5 574.8	44.4	109.9
12	0	1.53	4 939.3	67.1	56.6

表2 二级水库优化前后数据  
Tab.2 The data of secondary reservoir before and after optimization

月份	$q_v / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$q_{vg} / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$c_b / (10^4 \text{m}^3)$	$W_f / (10^4 \text{kW} \cdot \text{h})$	$W_a / (10^4 \text{kW} \cdot \text{h})$
1	2.35	4.73	370	115.6	15.6
2	1.01	1.82	1 727.8	216.4	14.2
3	10.67	14.93	3 613.8	291.3	168.4
4	6.52	6.31	5 148.5	346.2	86.5
5	7.83	19.32	6 756.0	222.5	272.1
6	12.69	22.96	5 548.8	285.1	303.9
7	9.82	11.87	5 548.7	249.4	166.6
8	7.23	15.17	6 805.2	219.7	223.9
9	1.26	10.38	6 565.4	62.7	151.0
10	1.24	18.20	6 509.7	49.8	214.5
11	0.70	7.10	3 152.7	101.0	56.8
12	0	8.37	2 240.0	16.4	34.9

梯级水库的优化调度问题时,收敛速度很快,大大节省了计算机内存,有望为解决水库群联合优化调度的“维数灾”问题提供一条新的路径。

5 结语

本文采用 Matlab 遗传算法工具箱求解梯级水电站的优化调度问题,将约束条件转化为惩罚函数法处理,整个计算过程相对比较简单。算例计算的是比较简单的问题,但是可以推广到较为复杂的情况。

Matlab 遗传算法工具箱保留了遗传算法原有的优点,而且使用方便、灵活,对于实际优化问题具有较好的应用前景。

参考文献:

[1] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems [M]. [s.l.]: MIT Press, 1975.  
[2] GOLDBERG D E. Genetic algorithms in search optimization

tion, and machine learning [M]. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.  
[3] KARR C L. Genetic algorithms for fuzzy controllers [J]. AI Expert, 1991, 6(2): 26-33.  
[4] BHANDARKAR S M, ZHANG Hui. Image segmentation using evolutionary computation [J]. IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 1999, 3(1): 1-21.  
[5] HULSEMAN M, MULLER H, WETZLINGER H. Economic short term scheduling for a run-of-river-plant chain by combined LP and genetic optimization [A]. Fourth International Conference on Power System Control and Management [C]. London: [s.n.], 1996. 42-46.  
[6] HUANG Shyh-jier. Application of genetic based fuzzy systems to hydroelectric generation scheduling [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1999, 14(3): 724-730.  
[7] 马光文, 王黎. 遗传算法在水电站优化调度中的应用 [J]. 水科学进展, 1997, (3): 275-280.  
MA Guang-wen, WANG Li. Application of a genetic algo-

rithm to optimal operation of hydropower station [J]. Advances in Water Science,1997,(3) 275- 280.

[8] 畅建霞,黄 强,王义民. 基于改进遗传算法的水电站水库优化调度 [J]. 水力发电学报,2001,(3) 85- 90.

CHANG Jian-xia ,HUANG Qiang ,WANG Yi-min. Optimal operation of hydropower station reservoir by using improved genetic algorithm [J]. Journal of Hydroelectric Engineering 2001,(3) 85- 90.

[9] HOUCK C R,JOINES J A,KAY M G. A genetic algorithm for function optimization :A matlab implementation [EB/OL]. <http://www.ie.ncsu.edu/mirage/GAToolBox/gatc>,2005- 02- 18.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:  
施展武(1980- ),男,浙江余姚人,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制(E-mail:st.szw@163.com);  
罗云霞(1965- ),女,浙江象山人,博士研究生,主要研究方向为小水电自动化及优化调度(E-mail:luoyunxia@hotmail.com);  
邱家驹(1944- ),男,浙江温州人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统运行与控制方面的研究工作(E-mail:ee\_qiu@public.zju.edu.cn)。

Optimal dispatch of cascaded hydropower stations using  
Matlab genetic algorithm toolbox  
SHI Zhan-wu<sup>1</sup>,LUO Yun-xia<sup>2</sup>,QIU Jia-ju<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering Zhejiang University ,Hangzhou 310027 ,China ;  
2. Zhejiang College of Water Conservancy and Hydropower ,Hangzhou 310018 ,China)

Abstract : Because of its simplicity ,generality and parallelism ,GA (Genetic Algorithm) is effective for complex and nonlinear problems. The genetic algorithm toolbox of Matlab ,named GAOT ,is introduced. Regarding the reservoir of hydropower stations as a system and making some simplifications and assumptions for its elements and input / output parameters ,a simplified mathematical model is built up for the optimal dispatch of cascaded hydropower stations. The GA applied in it is discussed on control parameter determination ,coding ,random generation of initial parent group ,fitness calculation ,selection ,crossover ,mutation and end rules. With a cascaded hydropower station as an example ,the proposed model for optimal dispatch is applied to a simple condition ,result shows that it is feasible and also works in complex conditions.

Key words : genetic algorithm ; hydropower station ; Matlab ; optimal dispatch

(上接第 14 页 continued from page 14)

[8] 穆 钢,王华伟,韩学山. 基于费用流法的输电网节点电力成本分析 [J]. 中国电机工程学报,2002,22(12) 36- 40.

MU Gang ,WANG Hua-wei ,HAN Xue-shan. Determining bus electricity cost of transmission system by the cost flow method [J]. Proceedings of the CSEE ,2002 ,22(12) 36- 40.

刘洪波(1973- ),女,吉林辽源人,博士研究生,研究方向为电力系统运行与控制(E-mail:liuhb@mail.neiep.edu.cn);  
穆 钢(1957- ),男,辽宁大连人,教授,博士研究生导师,从事电力系统分析与控制方面的研究和教学工作;  
刘 明(1979- ),男,吉林蛟河人,硕士,主要从事电力市场方面的研究;  
于 游(1975- ),男,辽宁大连人,硕士,从事电力系统运行与控制的研究;  
曹建军(1977- ),男,北京人,硕士,主要从事电力市场方面的研究。

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

Comparison of accounting theory-based methods for transmission  
payment calculation in electric power market  
LIU Hong-bo<sup>1</sup>,MU Gang<sup>2</sup>,LIU Ming<sup>2</sup>,YU You<sup>2</sup>,CAO Jian-jun<sup>2</sup>  
(1. North China Electric Power University ,Baoding 071003 ,China ;  
2. Northeast China Institute of Electric Power Engineering ,Jilin 132012 ,China)

Abstract : In electric power marker it 's popular to allocate transmission payment according to the influence degree of users. Several methods to calculate transmission payment based on the accounting theory are introduced and analyzed ,such as post stamp method ,contract route method ,distribution factor method ,flow tracing method and so on. The Bialek 's flow tracing method and cost flow method are compared theoretically ,which are applied in a five-bus system to calculate the transmission payment to generators. Results show that the cost flow method is simple and effective with less steps and small cumulative error.

Key words : electric market ; transmission payment ; distribution factor ; flow tracing ; cost flow