



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.02.009

焦钰, 王建群, 贾洋洋. 基于狼群算法的水电站优化调度模型参数优选[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 58-64. JIAO Yu, WANG Jianqun, JIA Yangyang. Parameter analysis of wolf pack search algorithm applied to optimal operation of hydropower station[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 58-64. (in Chinese)

# 基于狼群算法的水电站优化调度模型参数优选

焦钰, 王建群, 贾洋洋

(河海大学 水文水资源学院, 南京 210098)

**摘要:**以典型水电站优化调度模型为基础, 先采用单因素分析法对狼群算法单参数的敏感性进行了分析评价, 以算法寻优效果达到最优为目标, 得出了参数的有效取值范围; 再采用正交实验与极差分析方法, 对狼群算法多参数的敏感性进行了综合分析, 同理得出了参数变化的敏感性主次序和参数最佳取值组合。实例的验证结果表明, 研究选取的参数取值范围和最佳取值组合有效地提升了算法的优化性能, 为狼群算法应用于水电站优化调度提供了参数选择依据。

**关键词:** 狼群算法; 群体智能算法; 水电站; 优化调度; 参数

中图分类号: TV11 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)02-0058-07

## Parameter analysis of wolf pack search algorithm applied to optimal operation of hydropower station

JIAO Yu, WANG Jianqun, JIA Yangyang

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Using the single factor analysis method, we analyzed and evaluated the influence of each parameter of wolf pack search algorithm on the optimization effects of the optimal operation model for hydropower stations, and obtained the effective value range of the parameters. The orthogonal test and range analysis method were used to comprehensively analyze the susceptibility of multiple parameters of wolf pack search algorithm, and to obtain the sensitivity rankings and optimal value combination of the parameters. Simulation results in the cases showed that the effective value range and optimal value combination of the parameters have a positive effect on the optimization performance of the proposed algorithm, and can provide basis for parameter selection for the wolf pack search algorithm applied to optimal operation of hydropower station.

**Key words:** wolf pack search algorithm; swarm intelligence algorithm; hydropower station; optimal operation; parameter

狼群算法(Wolf pack search algorithm, WPS)是仿生狼群捕食行为和猎物分配方式而提出的一种具有局部与全局精细搜索能力、搜索能力强的群体智能算法。WPS的思想最早由Yang, Tu等<sup>[1]</sup>于2007年提出。2011年, Liu, Yan等<sup>[2]</sup>提出了狼群算法主体框架为狼群游猎竞争、围攻猎物、狼群竞争更新3个主要过程。2013年, 周强和周永权<sup>[3]</sup>提出了

一种基于领导者策略的狼群搜索算法, 同年, 吴虎胜、张凤鸣等<sup>[4]</sup>提出了基于相同原理不同算法的狼群算法。此后, WPS算法被广泛的应用于各种复杂的非线性问题。2014年, Li, Du等<sup>[5]</sup>将狼群算法用来优化支持向量机模型参数并应用于糖尿病患者外周血管闭塞估计问题; 同年, 伊廷华、王传伟等<sup>[6,7]</sup>对狼群算法进行了等级划分和分组改进并用于3维

收稿日期: 2016-01-05 修回日期: 2016-07-06 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371047)

Funds: National Natural Science Foundation of China(41371047)

作者简介: 焦钰(1991-), 女, 河北衡水人, 主要从事水文水资源研究。E-mail: jiaoyuhhu@163.com

通讯作者: 王建群(1960-), 男, 江苏句容人, 教授, 博士, 主要从事水资源系统分析研究。E-mail: wangjq@hhu.edu.cn

传感器优化布置。2015年,王建群、贾洋洋等<sup>[8]</sup>对狼群算法加以研究改进,并对其在水电站优化调度应用方面展开了实验分析,给出了狼群算法求解上述问题时的设计方法及步骤;研究证明,WPS计算精度高于粒子群算法(PSO)、基本遗传算法(SGA)及动态规划(DP)。

尽管WPS作为新颖的群体智能优化算法,在求解水电站优化调度问题方面展现出了一定优势,但该算法的参数众多,其有效范围及特性有待进一步研究。本文将采用单因素分析与正交实验结合的研究策略,对水电站优化调度的狼群算法的参数展开分析,以期给出狼群算法应用于上述问题时有关参数的参考取值范围及最佳值,为其实际应用时参数的选取提供参考依据。

## 1 水电站优化调度 WPS 设计

### 1.1 水电站优化调度模型

考虑水库发电优化调度问题,目标函数为年发电量最大化:

$$\max \sum_{i=1}^T K \cdot q_i \cdot H_i \cdot \Delta t_i \quad (1)$$

式中:  $K$  为综合出力系数;  $q_i$  为第  $i$  时段(月)发电流量;  $H_i$  为第  $i$  时段平均水头;  $\Delta t_i$  为第  $i$  时段的长;  $T=12$  为时段数。

约束条件包括发电流量、出力、库水位等约束。

考虑到约束条件的复杂性,采用罚函数法将优化模型(1)转化为无约束优化模型(2)求解。

$$\max \sum_{i=1}^T (K q_i H_i - \Phi) \Delta t_i \quad (2)$$

式中:  $\Phi$  表示第  $i$  时段对应的综合罚函数,当约束条件全部满足时  $\Phi=0$ , 否则  $\Phi>0$ 。综合罚函数的具体形式如下:

$$\Phi = \alpha(\beta\Phi_q + \Phi_N) \quad (3)$$

式中:  $\Phi$  表示第时段对应综合罚函数;  $\alpha$  为罚系数;  $\beta$  为平衡量级系数;  $\Phi_q$ 、 $\Phi_N$  分别表示第  $i$  时段发电流量约束与出力约束对应罚函数,其求解方式如下。

流量约束罚函数:

$$\Phi_q = \begin{cases} q_{i\min} - q_i & q_i < q_{i\min} \\ q_i - q_{i\max} & q_i > q_{i\max} \\ 0 & q_{i\min} \leq q_i \leq q_{i\max} \end{cases} \quad (4)$$

出力约束罚函数:

$$\Phi_N = \begin{cases} N_{i\min} - N_i & N_i < N_{i\min} \\ N_i - N_{i\max} & N_i > N_{i\max} \\ 0 & N_{i\min} \leq N_i \leq N_{i\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $q_{i\min}$ 、 $q_{i\max}$  分别表示第  $i$  时段要求的最小发电流量与最大允许发电流量;  $N_{i\min}$ 、 $N_{i\max}$  分别表示第  $i$  时段的最小与最大允许出力。

### 1.2 算法设计

利用 WPS 求解上述模型的具体过程如下<sup>[8]</sup>。

Step1. 初始化。选取各时段末的水库蓄水位  $z_i$ ,  $i=1, 2, \dots, T$  作为问题(2)的决策变量,即将  $T$  维决策空间中个体狼所处位置  $Z=(z_1, z_2, \dots, z_T)$  选取为各时段末的水库蓄水位。设狼群的规模为  $N$ , 对第  $j$  匹狼的位置按式(6)进行初始赋值:

$$z_{ji} = z_{i\min} + \text{rand}(0, 1) (z_{i\max} - z_{i\min}) \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, T; j = 1, 2, \dots, N$$

式中:  $\text{rand}(0, 1)$  表示均匀分布于  $[0, 1]$  区间上的随机数;  $z_{i\min}$ 、 $z_{i\max}$  分别为第  $i$  个时段的水位下限和上限。令迭代次数  $t=1$ 。

Step2. 游猎竞争。根据式(7)检测  $N$  匹狼适应值

$$f = f(z_1, z_2, \dots, z_T) = \sum_{i=1}^T (K q_i H_i - \Phi) \Delta t_i \quad (7)$$

适应值越大说明寻优效果越好、狼所处位置越优越。选择位置较优越的  $L$  匹狼为竞选狼,根据式(8)展开游猎搜索行为,同时各狼匹根据适应值大小竞争领导者狼:

$$z_{ji}^k = z_{ji} + \text{rand}(-1, 1) \cdot \text{step}a \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, T; k = 1, 2, \dots, h; j = 1, 2, \dots, L$$

式中:  $\text{rand}(-1, 1)$  表示均匀分布于  $[-1, 1]$  内的随机数;  $z_j = (z_{j1}, z_{j2}, \dots, z_{jT})$  是第  $j$  只竞选狼的当前位置;  $\text{step}a$  是游猎搜索步长。

Step3. 召唤奔袭。其它狼匹根据式(9)展开奔袭搜索行为,向领导者狼奔袭。当第  $j$  匹狼搜索到的新位置优于当前位置时,对其位置加以变更,否则保持不动:

$$z'_{ji} = z_{ji} + \text{rand}(-1, 1) \cdot \text{step}b \cdot (z_{li} - z_{ji}) \quad (9)$$

$$i = 1, 2, \dots, T$$

式中:  $z'_{ji} = (z'_{j1}, z'_{j2}, \dots, z'_{jT})$  表示第  $j$  匹狼搜索更新的位置;  $z_{ji} = (z_{j1}, z_{j2}, \dots, z_{jT})$  表示第  $j$  匹狼当前位置;  $z_{li} = (z_{l1}, z_{l2}, \dots, z_{lT})$  表示领导者狼的位置;  $\text{step}b$  是奔袭步长。

Step4. 围攻猎物。在领导者狼的召唤下,其它狼按式(10)对猎物展开围攻,当第  $j$  匹狼围攻过程中搜索到的位置优于当前位置时,对该匹狼位置加以变更,否则保持不动:

$$z_{ji}^{t+1} = \begin{cases} Z_{ji}^t & \text{rand}(0, 1) \leq \theta \\ z_{li} + \text{rand}(-1, 1) \cdot \text{step}c & \text{rand}(0, 1) > \theta \end{cases} \quad (10)$$

$$i = 1, 2, \dots, T$$

式中:  $z_k = (z_{11}, z_{12}, \dots, z_{1r})$  为领导者的位置;  $Z_{ji} = (z_{j1}^i, z_{j2}^i, \dots, z_{jr}^i)$  表示第  $j$  只狼匹经  $t$  次迭代后所处位置;  $\theta$  为一个设定好的阈值;  $stepc$  为围攻步长, 由式(11)生成:

$$stepc = stepc_{\min}(z_{i_{\max}} - z_{i_{\min}}) \cdot \exp\left(\frac{\ln(stepc_{\min}/stepc_{\max})t}{t_{\max}}\right) \quad (11)$$

式中:  $t$  为当前迭代次数;  $t_{\max}$  为最大迭代次数;  $stepc_{\max}$  和  $stepc_{\min}$  分别为最大、最小围攻步长。根据式(10)狼匹更新的位置可能会越出决策空间, 应加以限制越界措施。

Step5. 终止条件判断。若循环迭代次数达到最大或满足收敛条件, 则终止, 输出最佳值; 否则令  $t = t + 1$ , 转 Step6。

Step6. 竞争更新。根据优胜劣汰原则, 随机产生  $m$  匹狼代替原  $m$  匹适应值最差的淘汰狼, 竞争更新狼群, 转 Step2。

## 2 狼群算法参数仿真实验分析

### 2.1 典型案例选取

为便于对基于狼群算法的水电站优化调度模型参数进行详细的仿真实验分析, 文章以某年调节综合利用水库为研究实例: 正常蓄水位 160 m, 死水位 136 m, 5 月初至 8 月底为汛期, 防洪限制水位 155 m; 保证出力 12.5 万 kW, 装机容量 32 万 kW, 综合出力系数 8.5。已知未来一年的预报入库径流, 试调节各月的水库水位使得水电站的年发电量最大。

### 2.2 参数单因素分析

为初步研究基于狼群算法的水电站优化调度模型参数的合理取值范围, 首先采用单因素分析方法<sup>[9]</sup>对 WPS 算法的游猎搜索步长  $stepa$ 、奔袭步长  $stepb$ 、围攻算法阈值  $\theta$ 、最大围攻步长  $stepc_{\max}$ 、最小围攻步长  $stepc_{\min}$  等 5 个参数依次进行单因素仿真实验分析, 确定其有效的参数取值范围。参数初始经验值设置为<sup>[3]</sup>:  $N = 100$ ,  $L = 5$ ,  $h = 4$ ,  $stepa = 0.5$ ,  $h_{\max} = 15$ ,  $stepb = 0.9$ ,  $\theta = 0.2$ ,  $stepc_{\max} = 100000$ ,  $stepc_{\min} = 0.5$ ,  $m = 5$ 。

以各实验方案对应的 30 次测试成果的最优值 (MAX)、平均值 (AVERAGE)、标准差 (STDEV) 为评价指标评价算法的优化效果。鉴于最优值与平均值在此处为正向评价指标 (即数值越大代表着算法寻优效果越好), 而标准差为反向评价指标 (即数值越小代表着算法寻优效果越好), 本文将根据式(12)、式(13)对上述三项指标进行统一规范修正, 并根据式(14)进一步对修正值加权求和,

以综合加权值  $F$  (正向评价指标) 为综合评价指标, 以便于观察。

正向指标规范化:

$$f_i^j = \frac{f_i^j - f_{\min}^j}{f_{\max}^j - f_{\min}^j} \quad (12)$$

反向指标规范化:

$$f_i^j = \frac{f_{\max}^j - f_i^j}{f_{\max}^j - f_{\min}^j} \quad (13)$$

式中:  $f_i^j$  表示相应参数在第  $i$  种取值情况下第  $j$  ( $j = 1, 2, 3$  分别代表最优值、平均值、标准差) 项评价指标的修正值;  $f_i^j$  表示相应参数在第  $i$  种取值情况下第  $j$  项评价指标的测试值;  $f_{\max}^j$  表示相应参数的第  $j$  项评价指标测试出的最大值;  $f_{\min}^j$  表示相应参数的第  $j$  项评价指标测试出的最小值。

综合评价指标:

$$F_i = \sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot f_i^j \quad (14)$$

式中:  $F_i$  表示所测试参数在第  $i$  种取值情况下的综合加权值 (无量纲);  $\omega_j$  表示第  $j$  项评价指标对应权重, 采用变异系数法<sup>[10-11]</sup>来设定:

$$\omega_j = \frac{\sigma_j}{f_j}; \quad \omega_j = \frac{\bar{v}_j}{\sum_{j=1}^3 \bar{v}_j} \quad (15)$$

式中:  $\sigma_j$  表示所测试参数第  $j$  项评价指标修正值的标准差;  $f_j$  表示所测试参数第  $j$  项评价指标修正值的平均值;  $\bar{v}_j$  表示所测试参数第  $j$  项评价指标修正值的变异系数。

各参数单因素仿真实验成果见表 1。各参数单因素仿真实验综合评价指标变化趋势见图 1。

由综合评价指标  $F$  求解原理可知, 该指标越接近于 1, 表示对应算法的性能越好, 故结合表 1 及图 1 可以得出如下结果。

(1)  $F$  随着参数  $stepa$  的增大而减小, 且当  $stepa > 0.9$  时  $F$  增小的幅度加大并出现震荡, 因此建议该参数的取值范围为:  $stepa \in [0.1, 0.9]$ 。

(2) 当  $stepb \geq 1.3$  后,  $F$  值接近最优值 1 并平稳波动, 因此建议该参数的取值范围为:  $stepb \in [1.3, 2.5]$ 。

(3) 当  $\theta > 0.4$  后,  $F$  值迅速减小并出现较大波动, 因此建议该参数的取值范围为:  $\theta \in [0.1, 0.4]$ 。

(4)  $stepc_{\max}$  在  $10^4 \sim 10^5$  范围内,  $F$  值相对较大且变化较平稳, 因此建议该参数的取值范围为:  $stepc_{\max} \in [10^4, 10^5]$ 。

(5) 当  $stepc_{\min}$  介于 0.3 至 1.3 之间时,  $F$  值开始有所提升且保持平稳, 因此建议该参数的取值范围为:  $stepc_{\min} \in [0.3, 1.3]$ 。

表 1 参数敏感性分析

Tab. 1 Parameter sensitivity analysis

step a		step b		$\theta$		step c <sub>min</sub>		step c <sub>max</sub>	
参数取值	F	参数取值	F	参数取值	F	参数取值	F	参数取值	F
0.1	8.94E-01	0.1	1.94E-01	0.1	7.80E-01	0.1	1.25E-01	100	1.91E-01
0.3	8.60E-01	0.3	7.95E-01	0.2	9.43E-01	0.3	7.80E-01	500	1.52E-01
0.5	9.10E-01	0.5	8.66E-01	0.3	7.61E-01	0.5	8.98E-01	1000	2.16E-01
0.7	9.23E-01	0.7	8.34E-01	0.4	8.75E-01	0.7	9.57E-01	5000	3.53E-01
0.9	8.74E-01	0.9	6.15E-01	0.5	4.35E-01	0.9	9.47E-01	10000	7.62E-01
1.1	3.90E-01	1.1	4.44E-01	0.6	3.81E-01	1.1	9.39E-01	50000	7.81E-01
1.3	6.60E-01	1.3	1.00E+00	0.7	4.48E-01	1.3	8.78E-01	100000	7.92E-01
1.5	2.30E-01	1.5	1.00E+00	0.8	1.87E-01	1.5	5.76E-01	500000	9.78E-01
1.7	1.99E-01	1.7	1.00E+00	0.9	4.79E-01	1.7	2.14E-01	1000000	5.20E-01
1.9	4.44E-02	1.9	9.99E-01			1.9	9.10E-02	5000000	7.10E-01
		2.1	9.99E-01						
		2.3	9.98E-01						
		2.5	9.98E-01						
		2.7	9.45E-01						

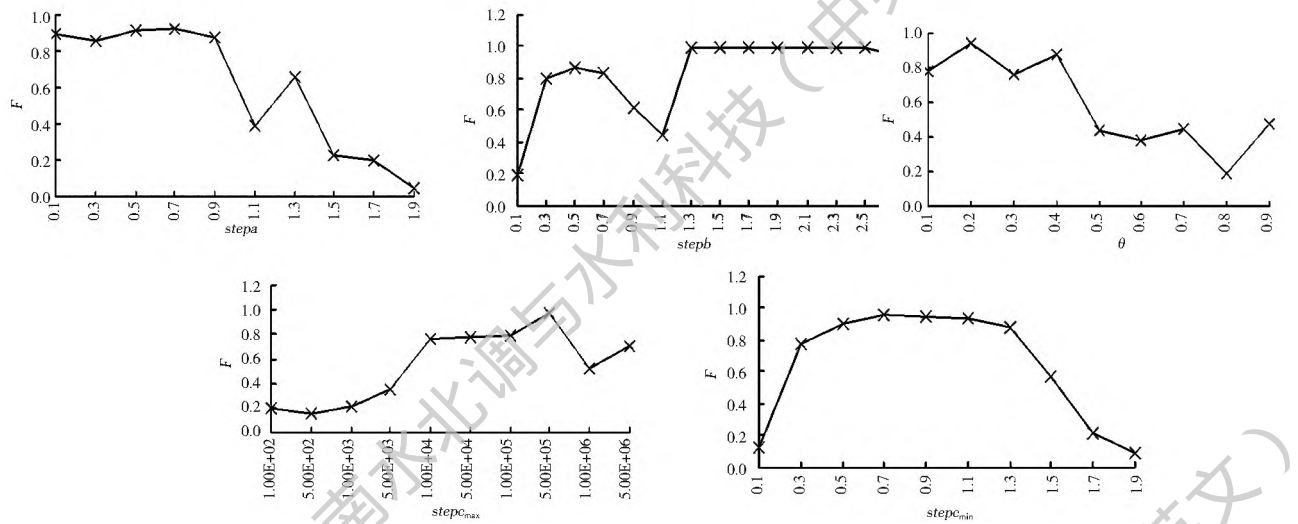


图 1 综合评价指标变化趋势

Fig. 1 Trend chart of comprehensive evaluation index

### 2.3 参数正交实验

以上对狼群算法的单个参数进行单因素分析时,其余参数取值是固定不变的。实际上,狼群算法的每个参数的取值对应的算法的寻优效果不排除是相互影响、相互制约的。为了分析以上给出了取值范围的 5 个参数对算法寻优效果的敏感性及其主次关系,进一步分析出参数设置值的最佳组合,采用正交实验方法<sup>[12]</sup>对水电站优化调度问题进行仿真实验。

狼群算法所包含的每个参数称之为因素,每个参数的取值状态称之为水平<sup>[13-14]</sup>。正交实验因素水平表及所采用的正交表  $L_{16}(4^5)$  见表 2、表 3。

表 2 因素水平

Tab. 2 Factors level table

水平序	step a	step b	$\theta$	step c <sub>max</sub>	step c <sub>min</sub>
1	0.5	1.0	0.1	10000	0.3
2	1.0	1.5	0.2	50000	0.5
3	1.5	2.0	0.3	100000	1.0
4	2.0	2.5	0.4	1000000	2.0

在实验的过程中,考虑到正交实验结果的偶然误差,对表 7 中的各实验方案分别进行 30 次独立重复计算,对计算结果加以极差分析<sup>[15,26]</sup>。

以各实验方案对应的 30 次测试成果的最优值、平均值、标准差为评价指标评价算法的优化效果,评

表 3 正交实验

Tab. 3 Orthogonal test table

实验次序	step a	step b	$\theta$	step c <sub>max</sub>	step c <sub>min</sub>
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

价指标测试成果见表 4- 表 6。

采用式(16)评价参数的综合影响次序及综合优水平:

$$K^j = \sum_{i=1}^4 \omega_i \cdot k_i^j \quad j = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (16)$$

式中:  $K^j$  为第  $j$  个参数的综合影响次序(或综合优水平);  $\omega_i$  为第  $j$  个参数第  $i$  项评价指标对应权重;  $k_i^j$  为第  $j$  个参数第  $i$  项评价指标对应的主次序(或优水平)。

根据式(16)计算所得各参数(因素)的综合影响次序,及综合考虑选取的优水平组合见表 7。

由表 4 至表 7 可以看出,对狼群算法性能的影响由大到小依次排序为 step b、step c<sub>min</sub>、step a、step c<sub>max</sub>、 $\theta$  参数的最佳组合为 step a= 0.5、step b= 1.5、 $\theta$ = 0.2、step c<sub>max</sub>= 10<sup>5</sup>、step c<sub>min</sub>= 0.3。

### 3 检验

为进一步对本文建议的最佳组合参数 WPS 算

表 4 最优值极差分析

Tab. 4 Optimal value range analysis

MAX	step a	step b	$\theta$	step c <sub>max</sub>	step c <sub>min</sub>
水平 1/ 万(kW·h)	183 650.69	183 639.98	183 650.30	183 649.83	183 650.84
水平 2/ 万(kW·h)	183 650.84	183 651.25	183 650.25	183 646.24	183 644.92
水平 3/ 万(kW·h)	183 643.83	183 650.47	183 645.00	183 650.93	183 645.89
水平 4/ 万(kW·h)	183 646.73	183 650.39	183 646.53	183 645.09	183 650.44
极差	7.01	11.27	5.3	5.84	5.92
主次序	2	1	5	4	3
优水平	2	2	1	3	1

表 5 平均值极差分析

Tab. 5 Average value range analysis

AVERAGE	step a	step b	$\theta$	step c <sub>max</sub>	step c <sub>min</sub>
水平 1/ 万(kW·h)	183 631.00	183 561.50	183 630.43	183 628.94	183 631.35
水平 2/ 万(kW·h)	183 628.38	183 651.07	183 626.88	183 621.35	183 632.35
水平 3/ 万(kW·h)	183 630.01	183 649.84	183 632.40	183 628.55	183 620.24
水平 4/ 万(kW·h)	183 622.05	183 649.04	183 621.74	183 632.60	183 627.51
极差	8.95	89.57	10.66	11.25	12.11
主次序	5	1	4	3	2
优水平	1	2	3	4	2

表 6 标准差极差分析

Tab. 6 Standard deviation range analysis

STDEV	step a	step b	$\theta$	step c <sub>max</sub>	step c <sub>min</sub>
水平 1/ 万(kW·h)	1.11E- 03	5.53E- 03	1.11E- 03	1.19E- 03	1.09E- 03
水平 2/ 万(kW·h)	1.25E- 03	2.20E- 05	1.30E- 03	1.84E- 03	1.41E- 03
水平 3/ 万(kW·h)	1.49E- 03	4.10E- 05	1.42E- 03	1.24E- 03	1.89E- 03
水平 4/ 万(kW·h)	1.84E- 03	8.50E- 05	1.84E- 03	1.41E- 03	1.29E- 03
极差	7.31E- 04	5.51E- 03	7.24E- 04	6.57E- 04	7.98E- 04
主次序	3	1	4	5	2
优水平	1	2	1	1	1

表 7 极差综合分析

Tab. 7 Comprehensive range analysis

综合评价	step a	step b	$\theta$	step c <sub>max</sub>	step c <sub>min</sub>
主次序	3	1	5	4	2
优水平	1	2	2	3	1

法的寻优效果进行检验,对前述年调节综合利用水库进行发电优化调度仿真计算,并与经验参数 WPS 算法、基本粒子群算法(PSO)<sup>[17,18]</sup>、动态规划法(DP)<sup>[19,20]</sup>进行对比。WPS 算法最佳组合参数取值为 step a = 0.5、step b = 1.5、 $\theta = 0.2$ 、step c<sub>max</sub> = 10<sup>5</sup>、step c<sub>min</sub> = 0.3; WPS 算法参数经验值设置为<sup>[3]</sup>: step a = 1.5、step b = 0.9、 $\theta = 0.2$ 、step c<sub>max</sub> = 10<sup>5</sup>、step c<sub>min</sub> = 0.5。PSO 算法的参数设置为<sup>[8]</sup>: 最大与最小惯性权重分别为  $\omega_{\max} = 0.9$ 、 $\omega_{\min} = 0.4$ , 学习因子  $C_1 = C_2 = 2$ ; DP 将水位离散成 1 000 点。以各自 30 次独立重复优化结果的最优值、平均值、标准差对比各算法的优化精度及稳定性能,实验结果见表 8。

表 8 算法对比

Tab. 8 Algorithm contrast

算法	最优值 /万(kW·h)	平均值 /万(kW·h)	标准差
DP	183 626.2	-	-
PSO	183 391.4	183 061.1	4.95E-02
WPS(经验参数值)	183 647.2	183 581.8	5.10E-03
WPS(最佳参数值)	183 651.3	183 651.3	7.02E-07

由表 8 数据可以看出: WPS 算法(最佳参数值)相比 WPS 算法(经验参数值)、PSO 算法、DP 算法,最优值、平均值和标准差均较优;在本文所建议的最佳参数取值情况下 WPS 算法寻优结果的均值相对经验参数取值情况下 WPS 算法提升了约 69.5 万(kW·h),标准差也较优,充分接近 0。由此可见,本文对 WPS 算法参数所做的敏感性分析及取值改进有效地提高了该算法求解水电站优化调度问题时的优化性能。

## 4 结论

WPS 算法参数的设置对其解决水电站优化调度问题时的寻优性能及稳定性能有着显著的影响,各参数对其性能影响能力由大到小为: step b、step c<sub>min</sub>、step a、step c<sub>max</sub>、 $\theta$ ; 建议参数取值范围为: step a  $\in [0.1, 0.9]$ 、step b  $\in [1.3, 2.5]$ 、 $\theta \in [0.1, 0.4]$ 、step c<sub>max</sub>  $\in [10^4, 10^5]$ 、step c<sub>min</sub>  $\in [0.3, 1.3]$ ; 参数最佳组合为: step a = 0.5、step b = 1.5、 $\theta = 0.2$ 、step c<sub>max</sub> = 10<sup>5</sup>、step c<sub>min</sub> = 0.3。本文的研究结论为

WPS 应用于单一水电站优化调度提供了参数选择依据,进一步提高了算法的优化性能。但针对梯级水电站群优化调度问题, WPS 算法及其参数取值问题仍需深入研究。

## 参考文献(References):

- [1] YANG C G, TU X Y, CHEN J. Algorithm of marriage in honey bees optimization based on the wolf pack search[C]. Proc of international conference on intelligent pervasive computing. Jeju island, Korea, Oct. 11-13, 2007: 462-467.
- [2] LIU C A, YAN X H, LIN C Y, et al. The wolf colony algorithm and its application[J]. Chinese journal of electronics, 2011, 20(2): 212-216.
- [3] 周强, 周永权. 一种基于领导者策略的狼群搜索算法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(9): 2629-2632. (ZHOU Qiang, ZHOU Yongquan. Wolf colony search algorithm based on leader strategy[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(9): 2629-2632. (in Chinese)). DOI: 10.3969/j.issn.1001-3695.2013.09.018.
- [4] 吴虎胜, 张凤鸣, 吴庐山. 一种新的群体智能算法——狼群算法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(11): 2430-2438. (WU Husheng, ZHANG Fengming, WU Lushan. A new swarm intelligence algorithm—wolf pack algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(11): 2430-2438. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2013.11.33
- [5] Li C M, Du Y C, Wu J X, et al. Synchronizing chaotification with support vector machine and wolf pack search algorithm for estimation of peripheral vascular occlusion in diabetes mellitus[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2014, 9: 45-55.
- [6] 伊廷华, 王传伟, 李宏男. 基于等级划分狼群算法的三维传感器优化布置方法研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 223-229. (YI Tinghua, WANG Chuawei, LI Hongnan. Hierarchical wolf algorithm for optimal triaxial sensor placement[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(4): 223-229. (in Chinese))
- [7] 伊廷华, 王传伟, 李宏男. 利用分布式狼群算法进行三维传感器优化布置的方法研究[J]. 振动工程学报, 2014, 27(5): 669-675. (YI Tinghua, WANG Chuawei, LI Hongnan. Optimal triaxial sensor placement using distributed wolf algorithm[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(5): 669-675. (in Chinese)) DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2014.04.041.
- [8] 王建群, 贾洋洋, 肖庆元. 狼群算法在水电站水库优化调度中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(3): 1-4. (WANG Jianqun, JIA Yangyang, XIAO Qingyuan. Application of wolf pack search algorithm to optimal operation of hydropower station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(3): 1-4. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2015.03.001.
- [9] 于立民, 丁国勇. 单因素试验中数据的统计学处理[J]. 电子测量技术, 1992: 30-33. (YU Limin, DING Guoyong. The statistical processing of data in single factor experiment[J]. Electronic Measurement Technology, 1992: 30-33. (in Chinese))

- [10] 赵薇, 林建, 王树芳, 等. 变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1277-1283. (ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu fang, et al. Influence of human activities on groundwater environment based on coefficient variation method[J]. Environmental Science, 2013, 34(4): 1277-1283. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hjks.2013.04.040.
- [11] 张超, 李哲敏, 董晓霞, 等. 金砖国家农业发展水平分析—基于熵权法和变异系数法的比较研究[J]. 科技与经济, 2014, 27(162): 42-46. (ZHANG Chao, LI Zhe min, DONG Xiao xia, et al. Analysis on agricultural development level of brics—comparative study based on entropy weight method and variation coefficient method[J]. Science & Technology and Economy, 2014, 27(162): 42-46. (in Chinese)) DOI: 10.14059/j.cnki.cn32-1276n.2014.06.009.
- [12] 胡建军, 周冀衡, 柴家荣, 等. 多指标正交试验数据的优化分析及应用[J]. 中国烟草学报, 2008, 14(2): 9-14. (HU Jian jun, ZHOU Ji heng, CHAI Jia rong, et al. Analysis and optimization of data from orthogonal experiments[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2008, 14(2): 9-14. (in Chinese))
- [13] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52-55. (LIU Rui jiang, ZHANG Ye wang, WEN Chong wei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52-55. (in Chinese)).
- [14] 魏效玲, 薛冰军, 赵强. 基于正交试验设计的多指标优化方法研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2010, 27(3): 95-99. (WEI Xiaoling, XUE Bing jun, ZHAO Qiang. Optimization design of the stability for the plunger assembly of oil pumps based on multi-target orthogonal test design[J]. Journal of Hebei University of Engineering: natural science edition, 2010, 27(3): 95-99. (in Chinese))
- [15] 张建方. 混合位级正交试验设计的极差分析方法[J]. 数学统计与管理, 1998, 17(6): 31-37. (ZHANG Jian fang. Methods of range analysis in orthogonal experimental design of mixed levels[J]. Application of Statistics and Management, 1998, 17(6): 31-37. (in Chinese)) DOI: 10.13860/j.cnki.slj.1998.06.007.
- [16] 洪坤, 赵梦琦, 钟登华, 等. 基于极差分析法的引水隧洞施工工期多因素灵敏度分析[J]. 水利水电技术, 2015, 46(1): 65-75. (HONG Kun, ZHAO Meng qi, ZHONG Deng hua, et al. Range analysis based multi-parameters sensitivity analysis on construction period of diversion tunnel[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(1): 65-75. (in Chinese))
- [17] 国海涛, 刘性泉, 岳峻, 等. 水电站水库优化调度混沌粒子群算法[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(6): 181-183. (GUO Hai tao, LIU Xing quan, YUE Jun, et al. Chaotic particle swarm optimization algorithm for operation of hydropower station[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(6): 65-75. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2014.06.041.
- [18] 卢峰, 高立群. 基于改进粒子群算法的优化策略[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2011, 32(9): 1221-1224. (LU Feng, GAO Li qun. Novel optimization mechanism based on improved particle swarm optimization[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science. 2011, 32(9): 1221-1224. (in Chinese))
- [19] 孙平, 王丽萍, 蒋志强, 等. 两种多维动态规划算法在梯级水库优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2014, 45(11): 1327-1335. (SUN Ping, WANG Li ping, JIANG Zhi qiang, et al. Application of two multi-dimensional dynamic programming algorithms in optimization of cascade reservoirs operation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(11): 1327-1335. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.11.008
- [20] 李文斌, 吴稀西, 黄进, 等. 基于随机动态规划的混合式抽水蓄能电站水库中长期优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 86-93. (LI Wen bin, WU Xi xi, HUANG Jin, et al. Mid-long term optimization of reservoir operation for hybrid pumped storage power station based on stochastic dynamic programming[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 86-93. (in Chinese))