

梯级水电站优化调度的模糊自适应粒子群算法

常文平, 罗先觉

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对粒子群算法容易早熟和易于陷入局部极值的缺点, 提出一种梯级水电站优化调度的模糊自适应粒子群算法. 在该算法中将惯性权值表示为粒子群进化速度因子和群体适应度方差的模糊函数, 在每次迭代过程中动态改变惯性权值, 以适应非线性优化搜索过程. 针对违反约束的粒子, 设计了一种动态空间调整策略来修复约束要求. 为了验证算法的性能, 用2个测试函数和拥有4个水电站的系统进行了测试, 在求解精度和速度上与标准粒子群算法和改进惯性权值线性递减粒子群算法进行了对比, 结果表明模糊自适应粒子群算法收敛速度快、精度高.

关键词: 梯级水电站; 粒子群算法; 模糊; 自适应

中图分类号: TV697.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)06-0093-06

Fuzzy Adaptive Particle Swarm Optimization for Optimal Operation of Cascaded Hydropower Station

CHANG Wenping, LUO Xianjue

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A fuzzy adaptive particle swarm optimization (FAPSO) for optimal operation of cascaded hydropower station is presented to solve the shortcomings of premature and easily getting into local optimum in standard particle swarm optimization (PSO). The fuzzy adaptive criterion is applied for inertia weight based on the evolution speed factor and fitness variance of the swarm. In each iteration process, the inertia weight is dynamically changed following the fuzzy rules to adapt to the nonlinear optimization process. In order to deal with the constraints, a dynamic search-space adjustment strategy is devised to accelerate the optimization process. The performance of FAPSO is demonstrated on two testing functions and a cascaded hydropower station with 4 reservoirs, and comparison is drawn among PSO, LDWPSO (linearly decreasing weight particle swarm optimization) and FAPSO in terms of the solution quality and computational efficiency. The simulation shows that FAPSO has higher convergence rate and accuracy in global search.

Keywords: cascaded hydropower station; particle swarm optimization; fuzzy; adaptability

梯级水电站优化调度的目的是在满足各种约束前提下, 使整个水电系统的水资源发挥最大的经济效益. 比较典型的优化方法有线性规划法^[1]、网络流法^[2]、拉格朗日松弛法^[3]、遗传算法^[4]、动态规划法^[5]等. 这些方法各有优缺点: 线性规划由于对目标函数甚至约束条件进行线性化处理, 不能够获得原问题的最优解; 网络流法计算速度较快, 但对约束条件的结构要求较严; 拉格朗日松弛法能够处理各种

复杂约束, 由于对偶间隙的存在, 制约了其使用的范围; 遗传算法对目标函数没有特殊要求, 但存在早熟收敛、处理约束比较困难等缺点; 动态规划法的原理简单易懂、方法灵活, 对目标函数和约束的处理方便, 但是针对求解复杂问题容易产生“维数灾”的问题.

粒子群优化算法(PSO)是一种基于群体智能理论的全局优化方法^[6], 通过群体中粒子间的合作与

竞争产生的群体智能指导优化搜索. PSO 算法不依赖所求问题的具体领域,适用于求解非线性、不可微的复杂的优化问题,已经成功用于多个领域.但是,PSO 存在早熟和易于陷入局部最优解的缺点.针对这些问题,国内外学者做了大量工作,提出了各种改进算法^[7-9],其中改进惯性权值线性递减粒子群(LDWPSO)算法较固定惯性权重取值法取得了明显的效果,但是依然不能反映非线性的优化搜索过程.本文提出一种模糊自适应粒子群算法(FAPSO),并将其应用到梯级水电站优化调度中.仿真计算表明,该方法计算速度快、收敛性能好.

1 梯级水电站优化调度模型

1.1 目标函数

水电系统的优化调度目标是使得水系的有限水资源发挥最大效益,根据实际工程运行的要求,选择梯级水电站在整个调度期内总发电效益和灌溉效益最大作为优化调度的目标函数,其表达式如下

$$\max J = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (b_i(t)P_i(t) + c_i(t)R_i(t)) \quad (1)$$

式中: N 表示水库个数; T 表示调度期内时段数; $b_i(t)$ 为第 i 个电站在第 t 时段的电价; $P_i(t)$ 为第 i 个电站在第 t 时段的输出功率; $c_i(t)$ 为第 i 个电站在第 t 时段的灌溉收益率; $R_i(t)$ 为第 i 个电站在第 t 时段的放水量.

1.2 约束条件

(1) 水量平衡方程

$$v_{i,t+1} = v_{it} + I_{it} + \sum_{j \in \Omega_i} q_j(t - \tau_j) - q_{it} \quad (2)$$

式中: $v_{i,t+1}$ 表示水库 i 在 $t+1$ 时段初的库容; I_{it} 表示水库 i 在 t 时段的直接天然入流量; $q_j(t - \tau_j)$ 表示和水库 i 有水力联系的上游水库 j 在第 t 时段对水库 i 的出库流量,其中 τ_j 为水库 j 出库水流到达下游水库 i 的延迟时间; q_{it} 表示水库 i 的泄流量; Ω_i 表示与水库 i 有水力联系的上游水库集合.

(2) 库容约束

$$V_{i,\min} \leq V_{it} \leq V_{i,\max} \quad (3)$$

式中: V_{it} 为水库 i 第 t 时的库容; $V_{i,\min}$ 为第 t 时段水库 i 最小库容,一般对应死水位库容; $V_{i,\max}$ 为水库 i 最大库容蓄水位,一般在非汛期为正常库容,在汛期为汛限库容.

(3) 泄流量限制

$$q_{i,\min} \leq q_{it} \leq q_{i,\max} \quad (4)$$

式中: $q_{i,t}$ 为水库 i 第 t 时段泄流量; $q_{i,\min}$ 为水库 i 最

小泄流量; $q_{i,\max}$ 为水库 i 最大泄流量; $q_{i,\min}$ 和 $q_{i,\max}$ 一般由发电用水、灌溉、航运和防汛用水等要求确定.

(4) 水电站输出功率限制

$$N_{i,\min} \leq P_{it} \leq N_{i,\max} \quad (5)$$

式中: p_{it} 为水库 i 第 t 时段发电输出功率; $N_{i,\min}$ 为水库 i 最小发电输出功率; $N_{i,\max}$ 为水库 i 最大发电输出功率; $N_{i,\min}$ 和 $N_{i,\max}$ 在综合考虑机组额定输出功率、机组检修状态、振动区及调峰要求等后确定.

(5) 水库蓄水量边界条件

$$V_{i0} = V_{i,\text{begin}}; V_{iT} = V_{i,\text{end}} \quad (6)$$

式中: $V_{i,\text{begin}}$ 为水库 i 在调度初期的库容; $V_{i,\text{end}}$ 为水库 i 在调度末期的库容.

2 模糊自适应粒子群算法

2.1 粒子群算法

粒子群优化算法是对鸟类群体行为的模拟,采用速度-位移搜索解的空间,每个粒子在搜索过程中不断更新自己的状态,操作简单、方便.在基本 PSO 算法中,粒子通过以下公式来不断更新自己的速度和位置

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{\text{best}}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (g_{\text{best}}^k - x_{id}^k) \quad (7)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (8)$$

式中: v_{id}^k 是粒子 i 在第 k 次迭代中的 d 维速度; ω 是惯性权值因子; c_1 和 c_2 分别称为认识学习因子和社会学习因子; r_1 和 r_2 是在 $[0,1]$ 区间均匀分布的随机数; x_{id}^k 是粒子 i 在第 k 次迭代中的 d 维位置; p_{best}^k 是粒子 i 到第 k 次迭代中个体极值点的位置; g_{best}^k 是整个粒子群到第 k 次迭代中的全局极值点的位置.

2.2 粒子群的进化速度和平均适应度方差

粒子群算法的全局最优值取决于个体最优值的变化,同时反映了所有粒子运动的效果.根据 PSO 寻优过程中,当前全局最优解 p_g^k 对应的适应度 F_g^k 要优于或等于上次迭代的全局最优解对应的适应度 F_g^{k-1} ,这里取适应度等于优化调度目标函数值,于是有 $F_g^k \geq F_g^{k-1}$. 定义粒子群的进化速度为

$$h = F_g^{k-1} / F_g^k \quad (9)$$

可知 $0 < h \leq 1$,其反映了粒子群的进化速度, h 越大进化速度越慢, h 越小进化速度越快,当 $h=1$ 时,算法停滞或找到最优解.

影响 PSO 算法早熟收敛和收敛速度的另一个因素是种群的多样性,若种群多样性随代数增加下降过快,有可能收敛不到全局最优解.为了反映种群的多样性,引入粒子群平均适应度方差

$$\sigma = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{F_i^k - F_{\text{mean}}^k}{\max\{F_g^k - F_{\text{mean}}^k, F_{\text{mean}}^k - F_b^k\}} \right]^2 \right)^{1/2} \quad (10)$$

式中: n 表示种群的数量; F_i^k 表示第 k 次迭代中第 i 个粒子群的适应度; F_{mean}^k 表示第 k 次迭代中粒子群的平均适应度; F_g^k 表示第 k 次迭代中最优粒子群的适应度; F_b^k 表示第 k 次迭代中最差粒子群的适应度。

显然, $0 \leq \sigma \leq 1$, σ 越大,种群的多样性越多,反之,种群的多样性越少。

2.3 模糊自适应粒子群算法

在 PSO 算法中,当惯性权重因子 w 较大时,粒子具有较强的全局搜索能力,而局部搜索能力较弱。当惯性权重因子 w 较小时,粒子具有较强的局部搜索能力,而搜索新空间能力减弱。针对 PSO 算法的这一特性,采用模糊控制调整惯性权重因子,将惯性权重因子变量表示为反映粒子群进化快慢的进化速度与反映粒子种群多样性的平均适应度方差的模糊函数。

模糊化时输入和输出均选择三角形隶属函数,把输入、输出变量的模糊语言划分为 3 个语言变量值,即小(S)、中(M)、大(L),其形状如图 1 所示。

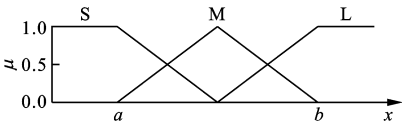


图 1 三角形隶属度函数

相应的隶属度函数方程分成 3 部分,具体如下:
左三角隶属度函数方程

$$\mu_1 = \begin{cases} 1 & x < a \\ \frac{b-x}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases} \quad (11)$$

三角形隶属度函数方程

$$\mu_2 = \begin{cases} 0 & x < a \\ 2 \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2 \frac{b-x}{b-a} & \frac{a+b}{2} < x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases} \quad (12)$$

右三角隶属度函数方程

$$\mu_1 = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & x > b \end{cases} \quad (13)$$

粒子群的进化速度 h 、粒子群平均适应度方差 σ 和惯性权重因子变化量 Δw 的隶属度函数形状和图 1 相似,模糊化控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

模糊规则	h	σ	Δw
1	S	S	M
2	S	M	S
3	S	L	S
4	M	S	L
5	M	M	M
6	M	L	S
7	L	S	L
8	L	M	L
9	L	L	S

根据每次粒子群的进化速度 h 、粒子群平均适应度方差 σ 的模糊量,由表 1 获得惯性权重因子变化量 Δw 的模糊量,通过去模糊化获得惯性权重因子变化量 Δw 的精确量,然后调整 w 的数值。每个隶属度函数 a 、 b 的取值十分关键,根据大量计算表明,进化速度 h 的适应度函数取值为:左三角函数的 a 、 b 分别为 0 和 0.6;三角形函数的 a 、 b 分别为 0.3 和 0.9;右三角函数的 a 、 b 分别为 0.6 和 0.9。平均适应度方差 σ 的适应度函数取值为:左三角函数的 a 、 b 分别为 0 和 0.2;三角形函数的 a 、 b 分别为 0.1 和 0.3;右三角函数的 a 、 b 分别为 0.2 和 0.3。惯性权重因子变化量 Δw 的适应度函数取值为:左三角函数的 a 、 b 分别为 -0.1 和 0;三角形函数的 a 、 b 分别为 -0.04 和 0.04;右三角函数的 a 、 b 分别为 0 和 0.04。

2.4 约束处理机制

在梯级水电站优化调度过程中涉及到许多约束,采用 PSO 算法会产生很多违反约束的粒子,为了避免产生不可行解,本文采取一些生成和修复措施。

2.4.1 水位的初始化和修复 本文将水库群各水库库容作为决策变量,为了保证库容在产生和更新过程中满足水位要求,其生成和更新过程中修复的方程分别为

$$x_{ij}^0 = x_{ij\min} + r(x_{ij\max} - x_{ij\min}) \quad (14)$$

$$x_{ij}^{k+1} = \begin{cases} x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} & x_{ij\min} \leq x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \leq x_{ij\max} \\ x_{ij\min} & x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} < x_{ij\min} \\ x_{ij\max} & x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} > x_{ij\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中: r 是在 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机数。

2.4.2 泻流量计算和违反约束修复 考虑水库调度初期、末期的库容以及各水库间的水力联系,按照水库先上游后下游的顺序,计算逐个水库逐个时段的泄流量,同时对泄流量约束进行校验,并对违反泄流量约束的相应库容进行修正,完成泄流量的修复。计算泄流量的方程如下

$$q_{ij} = \begin{cases} V_{i, \text{begin}} - x_{i1} + I_{ij} + \sum_{j \in \Omega} q_j(t - \tau_i) & j = 1 \\ x_{i, j-1} - x_{ij} + I_{ij} + \sum_{j \in \Omega} q_j(t - \tau_i) & 1 < j < T \\ x_{i, j-1} - V_{i, \text{end}} + I_{ij} + \sum_{j \in \Omega} q_j(t - \tau_i) & j = T \end{cases} \quad (16)$$

根据约束条件判断泄流量是否满足约束条件,如果违反约束条件,采用如下修复方法。

如果 $q_{ij} < q_{i, \min}$, 减小该时段的水库库容, 同时校验该时段的库容约束, 如果库容减小到 $V_{i, \min}$ 依然不能满足泄流量约束, 则增加上一时段的水库库容, 同时校验上一时段的库容约束, 如果上一时段库容增加到 $V_{i, \max}$ 依然不能满足泄流量约束, 则通过下面的惩罚函数调整该粒子的适应度函数值

$$F_i^k = F_i^k - \sum_{i=1}^N \xi_i |W_i| \quad (17)$$

式中: ξ_i 为第 i 个水库的惩罚值; W_i 为第 i 个水库泄流量的最大越限值。

如果 $q_{ij} > q_{i, \max}$, 增加该时段的水库库容, 同时校验该时段的库容约束, 如果库容增加到 $V_{i, \max}$ 依然不能满足泄流量约束, 则减小上一时段的水库库容, 同时校验上一时段的库容约束, 如果上一时段库容减小到 $V_{i, \min}$ 依然不能满足泄流量约束, 则通过式(17)调整适应度函数值。

2.5 FAPSO 的计算步骤

定义数组 $\text{ISOK}(m)$ 记录第 m 个粒子在迭代过程中是否满足泄流量约束条件 ($\text{ISOK}(m) = 1$ 表示满足约束条件, $\text{ISOK}(m) = 0$ 表示不满足约束条件), 初始化时置 $\text{ISOK}(m) = 1$, 如果违反泄流量约束置 $\text{ISOK}(m) = 0$ 。FAPSO 算法流程见图 2。

(1) 设定粒子群的规模、最大迭代次数、粒子最大移动速度。

(2) 初始化粒子种群, 随机产生粒子的位置向量和速度向量, 置 $\text{ISOK}(m) = 1, h = 1$, 计算泄流量的数值并修正违反约束的水库库容。

(3) 计算粒子的适应度、全局最优值和个体最优

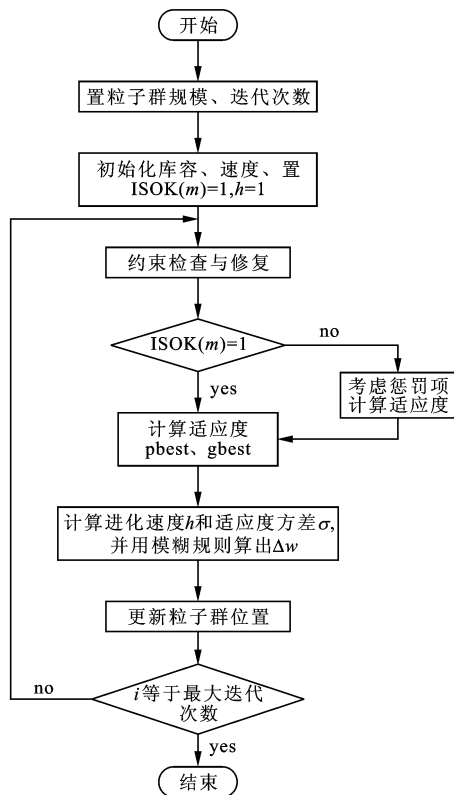


图2 FAPSO 算法流程图

值, 对于违反约束的粒子用式(17)修正粒子的适应度。

(4) 如果满足算法收敛条件或达到最大迭代次数, 执行步骤 8, 否则执行步骤 5。

(5) 计算粒子群的进化速度和平均适应度方差, 进一步计算其对应的隶属度, 根据模糊规则计算 Δw , 更新粒子的速度, 并确保每一个粒子的速度在最小速度和最大速度的范围内, 如果 $v > v_{\max}$ 或 $v < v_{\min}$, 则使 $v = v_{\max}$ 或 $v = v_{\min}$, 然后更新粒子的位置。

(6) 按照式(15)和式(16)计算更新粒子的位置和泄流量, 并用 2.4.2 小节的方法修复违反约束。

(7) 将迭代次数加 1, 并转步骤 3。

(8) 输出粒子的全局最优值, 算法结束。

3 算例

3.1 数学算例

本文采用两个典型数学测试函数, 比较 PSO、LDWPSO 和 FAPSO 的搜索能力, 数学函数如下

$$f_1(x) = 20 + x_1^2 + x_2^2 - 10[\cos(2\pi x_1) + \cos(2\pi x_2)]$$

$$x_1, x_2 \in [-10, 10]$$

$$f_2(x) = 0.5 - \frac{\sin^2(x_1^2 + x_2^2)^{1/2} - 0.5}{(1 + 0.001(x_1^2 + x_2^2))^2}$$

$$x_1, x_2 \in [-100, 100]$$

以上两个函数都有多个局部极值点,一般算法难以获得全局最优值.取粒子群规模为 30,最大迭代次数为 200,分别获得用 PSO、LDWPSO 和 FAPSO 算法的解,10 次计算的平均结果如表 2 所示.

表 2 PSO、LDWPSO 和 FAPSO 的计算结果

计算方法	$f_1(x)$		$f_2(x)$	
	$\min f_1(x)$	平均计算时间/s	$\max f_2(x)$	平均计算时间/s
PSO	$9.158\ 8\times 10^{-4}$	0.205	0.990\ 3	0.133
LDWPSO	$2.823\ 8\times 10^{-4}$	0.218	0.997\ 2	0.344
FAPSO	$2.017\ 9\times 10^{-12}$	0.102	0.997\ 6	0.084

从表 2 可以发现,FAPSO 算法在收敛速度和搜索能力上都要好于 PSO 和 LDWPSO 算法,体现了 FAPSO 算法的优越性.

3.2 工程算例

算例采用 Matlab 语言,在内存为 256M 的 P4-1.8 GHz 的个人计算机上实现.测试对象为 2 条河流上有串、并联水电站 4 座和 1 个灌区的水资源系统,见图 3.确定其 24 h 的最优运行方式,该系统的具体参数见文献[10].

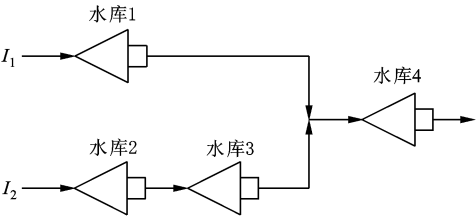


图 3 梯级水电站系统图

用 FAPSO 算法对该水资源系统进行优化调度计算.求解时,设定种群规模为 30,最大迭代次数为 200,粒子群惯性权值最大值为 0.95,最小值为 0.3, $c_1=c_2=2$,共计算 20 次,计算结果见表 3.

为进一步对比 PSO、LDWPSO 和 FAPSO 算法的进化过程,进化曲线如图 4 所示.

表 3 不同算法寻优结果对比

计算方法	PSO	LDWPSO	FAPSO
最大目标函数值	398.4	398.4	401.3
最长计算时间/s	117.027 6	72.031 0	28.615 6
最短计算时间/s	113.651 0	68.499 0	26.596 8
平均计算时间/s	115.366 9	70.683 1	27.435 0

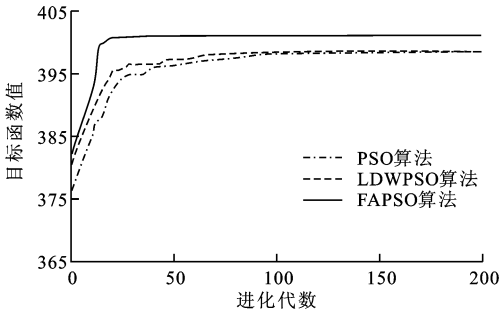


图 4 PSO、LDWPSO 和 FAPSO 算法进化曲线

从表 3 中可以看出,LDWPSO 算法和 PSO 算法获得了相同的目标函数,但是 LDWPSO 算法的计算时间仅是 PSO 算法的 60.3%,FAPSO 算法与 LDWPSO、PSO 算法相比,FAPSO 算法获得的目标函数值是后者的 100.7%,FAPSO 算法的平均计算时间比 LDWPSO 算法又有明显减少,是 LDWPSO 算法的 38.8%,从图 4 中也可以更清楚地看出,FAPSO 比 LDWPSO、PSO 算法改善明显.

总之,3 种算法在求解梯级水电站优化调度时,FAPSO 算法无论在速度和精度上都存在一定的优势,为梯级水电站优化调度提供了一种新途径.

4 结 论

针对粒子群算法中惯性权值的变化对收敛速度和精度影响较大的特点,本文提出一种模糊自适应粒子群算法.该算法将惯性权值的变化描述成算法的进化速度和粒子群平均适应度方差的模糊函数,使得惯性权值的变化随着算法运行状态的变化自适应调整,从而改善算法的全局和局部搜索能力,同时采用一种动态空间调整策略来修复违反约束的粒子.与 PSO 和 LDWPSO 算法相比,FAPSO 算法收敛速度和精度得到了改善和提高.

参考文献:

[1] PIEKUTOWSKI M R, LITWINOWICZ T, FROWD R J. Optimal short-term scheduling for a large-scale hydro system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2):805-811.

[2] FRANCO P E C, CARVALHO M F, SOARES S. A network flow model for short-term hydro-dominated hydro thermal scheduling problems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2):1016-1022.

[3] 郭三刚,管晓宏,翟桥柱,等.获得爬升约束机组组合问题可行解的新的系统方法[J].西安交通大学学报,2005,39(10):1101-1105.

- GUO Sangang, GUAN Xiaohong, ZHAI Qiaozhu, et al. New systematic method for obtaining feasible solutions to unit commitment problem considering ramp rate constraints[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(10):1101-1105.
- [4] WARDLAW R, SHARIF M. Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation[J]. Water Resource Planning and Management, 1999, 125(1):25-33.
- [5] YAKOWITZ S. Dynamic programming applications in water resources[J]. Water Resources Research, 1982, 18(4):673-696.
- [6] EBERHART R C, KENNEY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]// Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995:39-43.
- [7] EBERHART R C, SHI Y. Particle swarm optimization: developments, applications and resources [C]// Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, Piscataway, NJ: IEEE, 2001:81-86.
- [8] 张选平, 杜玉平, 秦国强, 等. 一种动态改变惯性权的自适应粒子群算法[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(10):1039-1042.
- ZHANG Xuanping, DU Yuping, QING Guoqiang, et al. Adaptive swarm algorithm with dynamically changing inertia weight [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(10):1039-1042.
- [9] SHI Y, EBERHART R C. Fuzzy adaptive particle swarm optimization[C]// Proceedings of International Conference on Evolutionary Computation, Seoul, South Korea; [s. n.], 2001.
- [10] KUMAR D N, BALIARSINGH F. Folded dynamic programming for optimal operation of multi-reservoir system[J]. Water Resources Management, 2003, 17: 337-353.

(编辑 杜秀杰)