

基于小生境和交叉选择粒子群算法的水库优化调度研究

陈田庆^{1a,2}, 解建仓^{1a}, 张 刚^{1a}, 李建勋^{1a,1b}, 岳新利^{1a,1b}

(1 西安理工大学 a 水资源研究所, b 经济与管理学院, 陕西 西安 710048;

2 陕西省地产开发服务总公司, 陕西 西安 710075)

【摘 要】 【目的】针对传统优化方法在水库优化调度计算中存在的“维数灾”和早熟等问题,建立新的优化算法模型。【方法】在 PSO 算法的基础之上,引入小生境和交叉选择算子,对寻优过程中的个体历史最好位置进行多样化处理,提出基于小生境和交叉选择算子的粒子群(NCSPSO)算法,建立基于 NCSPSO 算法的水库优化调度模型,并给出具体求解步骤,最后将该方法和基本 PSO 算法对比应用于具体水库的调度计算中。【结果】实例优化调度计算表明,NCSPSO 算法计算时间较短,寻优能力强,用其进行的水库优化调度决策可以有效提高水库的总发电量。【结论】NCSPSO 算法为水库优化调度提供了一条新途径。

【关键词】 水库调度;粒子群;小生境;交叉选择

【中图分类号】 TV697.1⁺1

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2011)07-0201-06

Study on optimal operation of reservoir based on the niche and cross-selection operators' particle swarm optimization algorithm

CHEN Tian-Qing^{1a,2} XIE Jian-Cang^{1a}, ZHANG Gang^{1a},

LI Jian-Xun^{1a,1b}, YUE Xin-Li^{1a,1b}

(1 a Water Resources Research Institute, b Faculty of Economics and Management, Xi'an University of

Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2 Shaanxi Company of Real Estate Service, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: 【Objective】 Aiming at the disadvantages of classical optimization algorithm for reservoir optimal operation like curse of dimensionality and early maturity, a new optimization model was established. 【Method】 Particle swarm optimization algorithm based on the niche, crossover and selection operators (NCSPSO), which carry out diversification treatment with best position of particle in history in the process of optimization, was presented in this paper. The mathematical model and procedures for reservoir optimal operation by using NCSPSO were proposed in detail. The mathematical model was applied to specific reservoir. 【Result】 Example calculations show that this optimal method has higher efficiency and performance and the method to process the optimal operation of reservoirs decision-making can improve the total generating capacity of the reservoir enhanced energy. 【Conclusion】 NCSPSO will be a new method to solve the problem of reservoir optimal operation.

Key words: reservoir operation; particle swarm; niche; cross-selection

* [收稿日期] 2010-11-26

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50979088, 51079120); 国家“863”计划项目(2006AA01A126); 陕西省国际合作重点项目(2008KW-32)

[作者简介] 陈田庆(1979—), 男, 陕西富平人, 在读博士, 主要从事水资源管理及水利信息化研究。

E-mail: chentianqing2002@sohu.com

水库优化调度是一个非常复杂的非线性函数求解问题。传统水库调度往往采用水库调度图求解,水库调度图求解虽然很方便,然而其精度不是很高^[1]。随着计算机及信息处理技术的迅速发展,动态规划被引入到求解水库优化调度问题中,大大提高了了解的精度,然而随着数据量的增多和精度要求的提高,动态规划会产生“维数灾”问题^[2-4]。近几年,粒子群等优化算法被引入该领域来求解水库优化调度问题,实践证明,粒子群算法对低维函数全局搜索能力强,寻优速度快。然而,随着函数维数的增多且多峰时,该法容易陷入局部最优而产生早熟现象^[5-6]。为此,诸多学者提出了各种改进的粒子群算法^[7-11],其中文献[7-8]对算法的参数选择进行了改进,提高了算法的效率,文献[9-11]分别引进免疫算子对粒子群进行改进,大大提高了计算效率和搜索能力。虽然上述研究在某种程度上确实提高了粒子群算法的搜索能力,但对于多维函数而言,解的搜索能力还不是很好。因此,建立新的水库优化调度计算模型具有重要的实际意义。

针对以上问题,本研究提出一种基于小生境和交叉选择的粒子群优化算法,其通过在传统粒子群算法中构造小生境拓扑,将种群分成若干个子种群,动态地形成相对独立的搜索空间,实现对多个极值区域的同步搜索,同时加入交叉和选择算子,不仅增加了多样性,且保留较好个体,从而可以避免算法在求解多峰函数优化问题时出现早熟收敛现象,并利用实例进行了计算与比较,以期对水库优化调度决策提供参考。

1 NCSPSO 算法

粒子群优化(Particle swarm optimization,简称 PSO)算法是由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出的。PSO 算法对于低维函数的全局搜索能力强,寻优速度快^[12]。但是当函数为高维且多峰时,容易陷入局部最优,并出现早熟的现象,使得粒子趋同化。

采用小生境技术对 PSO 算法进行改进是当前遗传算法的发展方向之一。小生境是模拟生态平衡的一种仿生技术,适用于多峰函数和多目标函数的优化。例如,在 PSO 算法中,通过构造小生境拓扑,将种群分成若干个子种群,动态地形成相对独立的搜索空间,实现对多个极值区域的同步搜索,从而可以避免算法在求解多峰函数优化问题时出现早熟收敛现象^[13-14]。此外,在迭代计算中通过比较小生境

数,确定关于多目标函数优化的非劣解集中的孤立点^[15],并将该点作为 PSO 算法的全局最优位置,则可以改善非劣解集分布的均匀性。

交叉和选择算子作为进化算法的重要组成部分,前者可以有效增加种群的多样性,后者则可以保留较好的个体进入子代群体;而差分进化(Differential evolution,简称 DE)算法中关于这 2 个算子的定义适用于各种类型的参数,因此可以在进行相关算法设计时灵活地加以运用。

1.1 标准 PSO 算法

在 PSO 算法中,待求问题的解为搜索空间中的粒子。假设在 D 维空间中投放 N 个粒子,其中,第 i 个粒子的位置为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$,其速度为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 。该粒子所经历的历史最好位置为 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$,对应的函数值为 $P_{best i}$;整个粒子群所经历的历史最好位置表示为 $G = (g_1, g_2, \dots, g_D)$,对应的函数值为 G_{best} 。

粒子群根据如下的公式更新其速度和位置:

$$V_i^{t+1} = \omega \cdot V_i^t + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_i^t - X_i^t) + c_2 \cdot r_2 \cdot (G - X_i^t), \quad (1)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1}. \quad (2)$$

式中: V_i^{t+1} 、 X_i^{t+1} 为 i 个粒子更新后的速率和位置, V_i^t 、 X_i^t 为第 i 个粒子更新前的速率和位置, P_i^t 为第 i 个粒子更新前的历史最好位置, r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数, c_1 、 c_2 为加速常数, ω 为惯性权重。

式(1)右侧的第①项为粒子先前的速度,表示粒子当前的状态;第②项为“认知”部分,表示粒子自身的思考;第③项为“社会”部分,表示粒子之间的信息共享与相互合作。

此外,为使粒子速度不致过大,可以设定速度上限为 V_{max} 。当 $V > V_{max}$ 时, $V = V_{max}$; 当 $V < -V_{max}$ 时, $V = -V_{max}$ 。

1.2 基于小生境和交叉选择的 NCSPSO 算法

根据式(1)可知,在标准 PSO 算法中,粒子主要依靠 2 个最优位置(即个体历史最好位置和全局历史最好位置)指导其在搜索空间的飞行。在搜索过程中,如果个体历史最好位置聚集在搜索空间的局部最优解区域时,就会导致群体多样性的缺失,可能使所有粒子迅速地靠近该区域,从而陷入局部最优,并出现早熟收敛或搜索停滞现象。为了克服上述缺点,本研究引入了 NCSPSO 算法,通过引入小生境技术和交叉选择算子,对寻优过程中粒子的个体历史最好位置进行多样化处理。

首先,根据小生境数确立孤立点。假设当前代

个体历史最好的集合为 $CP = \{P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}) | i=1, 2, \dots, N\}$, 计算该集合所有元素之间的距离为:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^D (p_{ik} - p_{jk})^2} \quad (3)$$

式中: p_{ik} 和 p_{jk} 分别为 k 维下第 i 和第 j 个粒子的历史最好位置, $i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, N$, 且 $i \neq j$ 。

相应的共享函数值为:

$$S(d_{ij}) = \begin{cases} 1 - \frac{d_{ij}}{\sigma_{\text{share}}}, & d_{ij} < \sigma_{\text{share}}; \\ 0, & d_{ij} \geq \sigma_{\text{share}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ_{share} 为给定的小生境半径。在此基础上, 计算每个元素的小生境数, 可得:

$$\text{niche}(i) = \sum_{j=1}^N S(d_{ij}) \quad (5)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, N$, 且 $i \neq j$ 。

经过比较, 小生境数最小的元素就是当代个体历史最好位置中的孤立点, 即 $Q = (q_1, q_2, \dots, q_D)$ 。

然后, 将所有个体历史最好值劣于孤立点值的粒子分别与孤立点进行交叉操作, 产生临时位置 $P'_l = (p'_{l1}, p'_{l2}, \dots, p'_{lD})$, 则:

$$p'_{lk} = \begin{cases} q_k, & \text{if}(\text{rand}(k) \leq CR); \\ x_{lk}, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $k=1, 2, \dots, D; l=1, 2, \dots, M$ 。 M 为个体历史最好值劣于孤立点值的粒子数, 显然 $M < N$; $\text{rand}(k)$ 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; CR 为交叉概率, 且 $CR \in [0, 1]$ 。

最后, 对所有的临时位置 P'_l 及相应的个体历史最好位置 P_l 进行选择操作。关于最小化问题, 选择算子的定义如下:

$$P_l = \begin{cases} P'_l, & \text{if}(F(P'_l) \leq F(P_l)); \\ P_l, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $l=1, 2, \dots, M; F$ 为求解问题的目标函数。

在 NCSPSO 算法的每一步迭代过程中, 通过与相对孤立的个体历史最好位置的交叉选择操作, 有效地实现了关于当前代个体历史最好位置的多样性分布, 图 1 即为这种多样化处理效果的示意图。图 1 中的函数等值线分布说明该搜索空间至少存在 2 个极值区域; 1~4 号 4 个圆形粒子显示了当前代个体历史最好位置的空间分布, 其中的粒子 2 同时也代表全局历史最好位置。可以看出, 由于粒子 1~3 比较靠近搜索空间上方的局部极值区域, 如果使用标准 PSO 算法, 就可能出现早熟收敛现象。然而, NCSPSO 算法却能够充分利用粒子 4 这个孤立点的信息, 并采用交叉选择算子对粒子 1 和 3 分别进

行更新, 使得当前代个体历史最好位置的分布更趋合理。

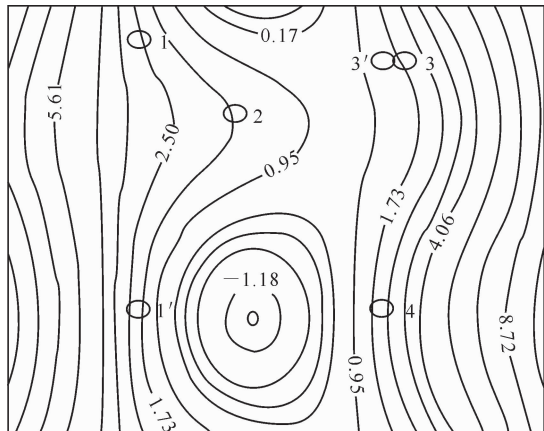


图 1 NCSPSO 算法多样化处理效果

Fig.1 Effect of diversified NCSPSO treatment

2 NCSPSO 算法和标准 PSO 算法性能的测试

为了说明本研究提出的 NCSPSO 算法的优越性, 现用 2 个标准测试函数^[5] 分别对 NCSPSO 和 PSO 算法的性能进行比较研究。

2.1 Quadric 函数

Quadric 函数表达式为:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^D (\sum_{j=1}^i x_j)^2, |x_i| \leq 50. \quad (8)$$

式中: D 为函数的维数。该函数的全局最优点是 $(0, 0, \dots, 0)$, 最优值为 0。

2.2 Rastrigin 函数

Rastrigin 函数的表达式为:

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^D (x_i^2 - 10 \cdot \cos(2\pi x_i) + 10). \quad (9)$$

式中: $|x_i| \leq 5.12$ 。

该函数的全局最优点是 $(0, 0, \dots, 0)$, 最优值为 0。

在进行算法测试时, 设定群体规模 $n=40$, 维数 D 分别设定为 10 和 20 共 2 种情况, 最大迭代次数为 2 000, 交叉概率 $CR=0.8$ 。对每个测试函数, 分别使用标准 PSO 算法和 NCSPSO 算法运行 100 次后, 得到关于评价最优函数值和标准差的结果如表 1 所示。从表 1 可以看出, 当 2 个测试函数的维数 $D=10$ 时, 标准 PSO 算法和 NCSPSO 算法基本都可以找到真值, 但 NCSPSO 精度更高; 当 $D=20$ 时, 对于函数 f_1 , 标准 PSO 算法已经无法找到真值, 而 NCSPSO 算法能够找到真值; 对于函数 f_2 , 标准

PSO 算法的精度远低于 NCSPSO 算法。测试结果表明,对于多维函数,NCSPSO 有更好的搜索能力,能够找到全局最优解,而标准 PSO 算法不能找到全局最优解。

表 1 标准 PSO 算法和 NCSPSO 算法关于测试函数的比较

Table 1 Comparison between PSO and NCSPSO about test function

函数 Function	D	标准 PSO Standard PSO		NCSPSO	
		平均最优值 Average optimal value	标准差 Standard deviation	平均最优值 Average optimal value	标准差 Standard deviation
f_1	10	25.000 0	175.881 6	$7.145\ 4\times10^{-16}$	$3.950\ 6\times10^{-15}$
	20	1 321.515 2	1 232.237 6	$2.648\ 3\times10^{-1}$	$2.847\ 5\times10^{-1}$
f_2	10	1.853 9	1.047 3	$7.042\ 9\times10^{-2}$	$2.550\ 4\times10^{-1}$
	20	18.197 6	13.499 7	2.241 0	1.857 7

3 基于 NCSPSO 算法的水库优化调度模型

3.1 水库优化调度模型

3.1.1 目标函数 水库优化调度模型的目标函数为:

$$E=\max\sum_{i=1}^T AQ_i H_i M_i。$$
 (10)

式中: E 为电站年发电量(万 kW·h), A 为电站综合出力系数, Q_t 为电站在 t 时段的发电流量(m^3/s), H_t 为电站在 t 时段的平均发电净水头(m), T 为年内计算总时段数(计算时段以月计, $T=12$), M_t 为第 t 时段的小时数。

3.1.2 约束条件 水库优化调度模型的约束条件有水量平衡约束、水库蓄水量约束、水库下泄流量约束和电站出力约束。

1)水量平衡约束。

$$V_{t+1}=V_t+q_t-Q_t-S_t。$$
 (11)

式中: V_{t+1} 为第 t 时段末的水库蓄水量(m^3), V_t 为水电站第 t 时段初的水库蓄水量(m^3), q_t 为第 t 时段的平均入库流量(m^3/s), Q_t 为电站在 t 时段的发电流量(m^3/s), S_t 为水库在 t 时段的弃水流量(m^3/s)。

2)水库蓄水量约束。

$$V_{t,\min}\leqslant V_t\leqslant V_{t,\max}。$$
 (12)

式中: $V_{t,\min}$ 为电站第 t 时段应保证的水库最小蓄水量(m^3), V_t 为电站第 t 时段的水库蓄水量(m^3), $V_{t,\max}$ 为电站第 t 时段允许的水库最大蓄水量(m^3)。

3)水库下泄流量约束。

$$Q_{t,\min}\leqslant Q_t\leqslant Q_{t,\max},S_t\geqslant 0。$$
 (13)

式中: $Q_{t,\min}$ 为电站第 t 时段应保证的最小下泄流量(m^3/s), Q_t 为电站第 t 时段的下泄流量(m^3/s), $Q_{t,\max}$ 为电站第 t 时段允许的最大下泄流量(m^3/s), S_t 为水库在 t 时段的弃水流量(m^3/s)。

4)电站出力约束。

$$N_{\min}\leqslant AQ_t H_t\leqslant N_{\max}。$$
 (14)

式中: $N_{\min}$ 为电站保证出力(万 kW), A 为电站综合出力系数, Q_t 为电站在 t 时段发电流量(m^3/s), H_t 为电站在 t 时段平均发电净水头(m), $N_{\max}$ 为电站的装机容量(万 kW)。

3.2 水库优化调度的 NCSPSO 算法实现

在分析水库优化调度问题复杂性的基础上,本研究提出水库优化调度的 NCSPSO 算法,解决了水库优化调度的“维数灾”及解的“多维多峰”问题。水库优化调度的 NCSPSO 算法流程如下:

Step1:在搜索空间内,初始化粒子的位置和速度,令计数器 $t=0$;

Step2:计数器 $t=t+1$;

Step3:计算所有粒子的目标函数值;

Step4:更新个体历史最好位置 $P_i=(P_{i1},P_{i2},\cdots,P_{id})$ 和全局最优位置 $G=(g_1,g_2,\cdots,g_D)$;

Step5:根据式(1)和(2)更新粒子的速度和位置;

Step6:根据式(3)~(5)确定个体历史最好位置中的孤立点 $Q=(q_1,q_2,\cdots,q_D)$;

Step7:根据式(6)和(7)进行交叉选择;

Step8:如果计数器 t 大于某一给定值停止计算,否则转置 Step2。

4 实例应用

为验证本研究提出的 NCSPSO 算法的优越性,选用碧口水电站某代表年的数据进行计算,并与传统 PSO 算法的计算结果进行比较。已知水电站水位-库容关系曲线、下游水位-流量关系曲线及设计中水年的流量过程线。该水库正常蓄水位 704 m,死水位 685 m,电站出力系数 8.5,保证出力 7.8 万 kW,装机容量 30 万 kW,要求水库在洪水期(6—10 月)水位不超过 695 m。

若不计水头损失,以年发电量最大为准则,分别采用 PSO 算法和 NCSPSO 算法进行优化调度。为了便于比较,2 种算法设定同一参数:初始种群规模

$n=80$,迭代次数为 300 次,惯性权重 $\omega \in (0.4, 0.9)$,加速常数 $c_1=c_2=2$,交叉概率 $CR=0.8$,每种算法运行 5 次,取其最优值,所得结果见表 2。

表 2 基于 PSO 算法和 NCSPSO 算法的碧口水电站调度过程的比较

Table 2 Comparison of best operation course of Bikou hydropower station based on PSO and NCSPSO

月份 Month	PSO						NCSPSO				
	入库流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) Inflow	月初 水位/m Water level at the beginning of the month	月末 水位/m Water level at the end of the month	发电流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) Power flow	弃水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) Surplus water	出力/ 万 kW Output of power	月初 水位/m Water level at the beginning of the month	月末 水位/m Water level at the end of the month	发电流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) Power flow	弃水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) Surplus water	出力/ 万 kW Output of power
5	290	685.00	694.99	251.63	0.00	15.718 3	685.00	695.00	251.60	0.00	15.717 2
6	319	694.99	685.01	357.35	0.00	22.186 0	695.00	685.00	357.40	0.00	22.189 5
7	553	685.01	695.00	487.28	27.34	30.000 0	685.00	695.00	487.30	27.29	30.000 0
8	364	695.00	694.94	364.21	0.00	24.021 9	695.00	695.00	364.00	0.00	24.016 9
9	411	694.94	695.00	410.80	0.00	27.031 4	695.00	695.00	411.00	0.00	27.054 5
10	338	695.00	704.00	292.37	0.00	20.514 0	695.00	704.00	292.37	0.00	20.514 8
11	208	704.00	703.95	208.25	0.00	15.464 4	704.00	704.00	208.00	0.00	15.450 0
12	139	703.95	704.00	138.75	0.00	10.355 2	704.00	704.00	139.00	0.00	10.376 7
1	117	704.00	704.00	117.00	0.00	8.748 4	704.00	704.00	117.00	0.00	8.748 5
2	105	704.00	703.99	105.05	0.00	7.862 2	704.00	704.00	105.00	0.00	7.859 2
3	103	703.99	703.32	106.82	0.00	7.962 7	704.00	703.76	104.34	0.00	7.800 0
4	150	703.32	685.00	230.15	0.00	15.392 9	703.76	685.00	232.69	0.00	15.625 1

从表 2 可以计算得出,在入库流量相同的情况下,PSO 算法得到的年最大发电量为 14.983 8 万 kW · h,NCSPSO 算法得到的年最大发电量为 14.990 7 万 kW · h,其结果优于 PSO 得到的年最大发电量值。同时,NCSPSO 算法计算的弃水量也小于或等于 PSO 算法的弃水量。以上两方面因素均可以说明,在用优化算法求解水库调度问题时,NCSPSO 算法较 PSO 算法更为优越,是解决水库优化调度问题的一种实用且精度更高的优化算法。

5 结 论

本研究在传统 PSO 算法的基础上,提出并建立了一种基于小生境和交叉选择粒子群算法的水库优化调度运算模型。本研究表明,基于标准 PSO 算法,构造小生境拓扑,同时加入交叉和选择算子,可以增加种群的多样性,且能够保留较优秀的个体,避免了算法在求解多峰函数优化问题时出现的早熟现象。实例计算结果表明,该算法优于 PSO 算法,用该算法进行水库调度是实际可行的。

[参考文献]

[1] 黄 强. 水能利用 [M]. 北京:中国水利水电出版社,1996.
Huang Q. Hydrologic forecast [M]. Beijing:China Water Power Press,1996. (in Chinese)

[2] 向 波,纪昌明,彭 杨,等. 基于免疫粒子群算法的水沙调度模型研究 [J]. 水力发电学报,2010,29(1):97-101.
Xiang B, Ji C M, Peng Y, et al. Study of water-sediment operating model based on immune particle swarm algorithm [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1): 97-101. (in Chinese)

[3] 朱记伟,张洪波,辛 琛,等. 水库调度 PSO 优化模型及求解方法 [J]. 系统工程,2010,28(1):105-112.
Zhu J W, Zhang H B, Xin C, et al. PSO model and calculation method to reservoir optimal operation [J]. Systems Engineering, 2010, 28(1): 105-112. (in Chinese)

[4] 向 波,纪昌明,罗庆松. 免疫粒子群算法及其在水库优化调度中的应用 [J]. 河海大学学报:自然科学版,2008,36(2):198-202.
Xiang B, Ji C M, Luo Q S. Immune particle swarm optimization algorithm and its application in reservoir operation optimization [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences Edition, 2008, 36(2): 198-202. (in Chinese)

[5] 武 斌,任海霞. 基于粒子群算法的水库优化调度模型 [J]. 东北水利水电,2007,25(5):43-46.
Wu B, Ren H X. Optimization operation model of reservoir based on particle group algorithm [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2007, 25(5): 43-46. (in Chinese)

[6] 和 吉,胡西林,邱 林,等. 粒子群优化算法在水库优化调度中的应用 [J]. 中州大学学报,2007,24(1):110-112.
He J, Hu X L, Qiu L, et al. Application of particle swarm optimization in reservoir regulation [J]. Journal of Zhongzhou University, 2007, 24(1): 110-112. (in Chinese)

[7] 张双虎,黄 强,吴洪寿,等. 水电站水库优化调度的改进粒子群算法 [J]. 水力发电学报,2007,26(1):1-5.
Zhang S H,Huang Q,Wu H S,et al. A modified particle swarm optimizer for optimal operation of hydropower station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2007,26(1):1-5. (in Chinese)

[8] 黎晓峰,薛宝菊,李维乾. 基于改进粒子群算法的水库优化调度研究 [J]. 水力发电,2008,34(11):107-109.
Li X F,Xue B J,Li W Q. Improved particle swarm optimization algorithm and its application in optimal operation of reservoir [J]. Water Power,2008,34(11):107-109. (in Chinese)

[9] 万 芳,原文林,黄 强,等. 基于免疫进化算法的粒子群算法在梯级水库优化调度中的应用 [J]. 水力发电学报,2010,29(1):202-206.
Wan F,Yuan W L,Huang Q,et al. Application of particle swarm optimization and immune evolutionary algorithm to optimal operation of cascade reservoirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2010,29(1):202-206. (in Chinese)

[10] 马玉新,解建仓,罗军刚. 基于组织进化粒子群算法的水电站水库优化调度研究 [J]. 西安理工大学学报,2009,25(3):256-263.
Ma Y X,Xie J C,Luo J G. Study on optimum operation based on organizational evolutionary particle swarm algorithm for hydropower station reservoir [J]. Journal of Xi'an University of Technology,2009,25(3):256-263. (in Chinese)

[11] 阳春华,莫志勋,李勇刚. 基于改进粒子群优化算法的约束多目标优化 [J]. 计算机工程,2010,36(20):203-205.
Yang C H,Mo Z X,Li Y G. Constrained multi-objective optimization based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Computer Engineering,2010,36(20):203-205. (in Chinese)

[12] 黄辉先,陈资槟. 一种改进的粒子群优化算法 [J]. 系统仿真学报,2007,19(21):4922-4925.
Huang H X,Chen Z B. Novel arithmetic based on particle swarm optimization [J]. Journal of System Simulation,2007,19(21):4922-4925. (in Chinese)

[13] 向长城,黄席越,杨祖元,等. 小生境粒子群优化算法 [J]. 计算机工程与应用,2007,43(15):41-43.
Xiang C C,Huang X Y,Yang Z Y,et al. Niche particle swarm optimization algorithm [J]. Computer Engineering and Applications,2007,43(15):41-43. (in Chinese)

[14] 潘希姣,章 军. 一种新颖的串行小生境粒子群算法 [J]. 安徽工程科技学院学报:自然科学版,2007,22(1):63-66.
Pan X J,Zhang J. A novel adaptive sequential niche particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Anhui University of Technology and Science:Natural Science Edition,2007,22(1):63-66. (in Chinese)

[15] 贾东立,张家树. 基于混沌变异的小生境粒子群算法 [J]. 控制与决策,2007,22(1):120-122.
Jia D L,Zhang J S. Niche particle swarm optimization combined with chaotic mutation [J]. Control and Decision,2007,22(1):120-122. (in Chinese)