

基于量化正交免疫克隆粒子群算法的水电站水库优化调度研究

马玉新,解建仓,罗军刚

(西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室,陕西 西安 710048)

【摘要】【目的】解决传统粒子群算法在求解水库优化调度问题中存在的早熟、收敛速度慢和易陷入局部最优的问题。【方法】基于抗体克隆选择学说理论,提出了一种量化正交免疫克隆粒子群算法(OICPSO/Q)。采用正交交叉策略来增强子代个体解分布的均匀性;通过接种疫苗和计算亲合度等操作,对算法的进化过程进行有目的、有选择地指导,使得算法快速收敛,同时保持一定的多样性,抑制了早熟现象。提出一种自学习算子,避免个体邻域内最优解的丢失。建立了基于量化正交免疫克隆粒子群算法的水库优化调度数学模型,并给出其具体的求解步骤。最后应用该方法与标准粒子群算法(PSO)及动态规划方法进行比较。【结果】与 PSO 算法和动态规划方法计算结果相比,OICPSO/Q 算法计算时间明显降低,但发电量明显增加,说明 OICPSO/Q 算法可提高解的精度,加快其收敛速度,其性能优于标准粒子群算法和动态规划方法。【结论】OICPSO/Q 算法为求解水库优化调度问题提供了一条新的有效求解途径。

【关键词】 水库;粒子群优化;克隆选择;正交设计;优化调度

【中图分类号】 TV697.1

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2009)07-0229-06

Orthogonal immune clone particle swarm optimization algorithm and its application in hydropower station reservoir optimal operation

MA Yu-xin, XIE Jian-cang, LUO Jun-gang

(Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE at XAUT, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: 【Objective】 The study was done in order to overcome the disadvantages of classical particle swarm optimization algorithm used to solve reservoir optimal operation problems, such as premature convergence, poor convergence, and easy to fall in local optima. 【Method】 Based on the binary particle swarm optimization and clone selection theory, an orthogonal immune clone particle swarm algorithm with quantization (OICPSO/Q) was presented in this paper. The orthogonal crossover strategy was used in immune gene operation to increase the solution's uniformity. The improved method adopted the operation of vaccine inoculation to accelerate the optimization searching speed. And a self-learning operator was presented to avoid better solution around individuals losing. The mathematical model and the procedures for solving the optimized reservoir operation optimization by using OICPSO/Q were proposed in detail. The performance of OICPSO/Q was compared with the standard particle swarm optimization (PSO) and dynamic programming method. 【Result】 Study results show that this method has better performance in stabilization and convergence than PSO and dynamic programming method. 【Conclusion】 OICPSO/Q algorithm will be a new and valid method for reservoir operation optimization.

Key words: reservoir; particle swarm optimization; clone selection; orthogonal design; optimal operation

* [收稿日期] 2008-12-26

[基金项目] 国家“863”计划项目(2006AA01A126);国家自然科学基金项目(50279041);陕西省重点实验室重点基金项目(05JS37)

[作者简介] 马玉新(1969—),男,陕西西安人,博士,主要从事函数优化、水资源调度管理研究。

水库优化调度问题是一类复杂的组合优化问题,具有非线性、离散性等特点^[1]。传统的调度方法采用动态规划方法^[2],该方法编程简单,但是状态离散点数目多,容易造成“维数灾”^[1,3-4]。20 世纪 90 年代初出现的粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)^[5],以其算法的简洁性,易于实现,需要调整的参数较少,且不需要梯度信息的优点,广泛地应用于函数优化、神经网络、模糊系统控制等科学和工程领域。近几年来,许多学者致力于粒子群算法的研究,并将其应用在水库优化调度中,取得了一定的研究成果^[6-9]。但是,与其他全局优化算法一样,粒子群算法同样存在早熟收敛现象,并且易于陷入局部极值点^[10-12],尤其是在比较复杂的多峰优化搜索问题中。目前,解决这一问题的主要方法是增加粒子群的规模,虽然对算法性能有一定改善,但同样存在缺陷:一是不能从根本上克服早熟问题;二是会大大增加算法的运算量。

为此,本研究提出了基于量化正交免疫克隆粒子群算法(Orthogonal Immune Clone Particle Swarm Optimization Algorithm with Quantization, OICPSO/Q),拟解决 PSO 算法存在的早熟和运算量过大等问题,并将其应用于水电站水库的优化调度中。研究中引入了一种量化正交子空间初始化方法,使初始种群分布均匀;通过免疫克隆原理中的免疫记忆与自我调节机制来保持,并使各适应度层次的粒子维持一定的浓度,进而保证种群的多样性;采用接种疫苗和计算亲合度等操作,对算法的进化过程进行有目的、有选择地指导,使算法快速收敛,同时保持一定的多样性,抑制算法早熟。最后,通过一个具体的实例来验证 OICPSO/Q 算法在求解水电站水库优化调度问题的有效性。

1 量化正交免疫克隆粒子群算法

考虑全局优化问题,有

$$\min\{f(x):x\in\Omega\subset R^n\}, f,\Omega\subset R^n. \quad (1)$$

则上述问题的多个可行解的 1 个集合称为 1 个种群,种群中的每个元素称为 1 个粒子,粒子的个数称为种群规模。

1.1 量化正交初始化

在解决优化问题前,对问题的全局优化点的位置一无所知,如果随机产生初始种群,则个体可能不具有代表性,算法容易陷入局部最优,不利于搜索到全局最优解。在初始化中,期望初始个体尽可能地均匀分散在整个可行解空间上,使算法能够在整个

可行解空间上进行均匀搜索,从而能容易地搜索到全局最优解。本文采用量化正交试验设计产生具有代表性的初始种群,不仅可以使试验数目减小,而且能够使这些初始点均匀地分布在整个可行解空间上。

将 $a=(a_1,a_2,\dots,a_n)$ 看作一个粒子, a_i 定义为第 i 个因子,这样每个粒子就由 n 个因子组成。由于这些因子是连续的,而正交设计仅适用于离散的因子,因此首先必须将每个连续因子离散化为有限个数值。为此,将 a_i 所在的区间 $[l_i,u_i]$ 量化为 Q 个水平,即 $b_i=(b_{i,1},b_{i,2},\dots,b_{i,Q})$,其中 Q 为奇数,而 $b_{i,j}$ 由下式给出:

$$b_{i,j}=\begin{cases} l_i, & j=1; \\ l_i+(j-1)(\frac{u_i-l_i}{Q-1}), & 2\leq j\leq Q-1; \\ u_i, & j=Q. \end{cases} \quad (2)$$

称 $b_{i,j}$ 为第 i 个因子的第 j 个水平。量化后因子 a_i 就有 Q 个不同水平,所以可行解空间就包含 Q^n 个不同的点。如果将这 Q^n 个点作为初始粒子群,虽然能够保证初始种群均匀分布在可行解空间上,但由于微粒个体数目庞大,导致运算量剧增,算法复杂度加大。应用正交设计可以从 Q^n 中选择少数的点而不影响分布的均匀性,同时又能使计算量减少并保证试验的最优性。因此,需要构造正交表 $L_M(Q^n)$,其中 $M=Q^J$, J 是满足 $(Q^J-1)/(Q-1)\geq n$ 的最小正整数。正交设计阵列 $L_M(Q^n)$ 的构造算法如下。

算法 1 正交设计阵列 $L_M(Q^n)$ 的构造。

Step1: 选择满足 $(Q^J-1)/(Q-1)\geq n$ 的最小正整数 J ;

Step2: 如果 $(Q^J-1)/(Q-1)=n$, 则置 $n'=n$; 否则, 置 $n'=(Q^J-1)/(Q-1)$;

Step3: 构造正交设计阵列 $L_M(Q^{n'})$, 其中 $M=Q^J$;

Step4: 将 $L_M(Q^{n'})$ 的最后 $n'-n$ 列删去, 得到 $L_M(Q^n)$ 。

构造出 $L_M(Q^n)$ 后, 从 Q^n 个组合中选择 M 个组合, 构成 M 个微粒。当可行解空间很大时, 期望产生较多具有代表性的初始种群, 以便能够较好地覆盖可行解空间。然而, M 的取值依赖于优化问题的维数 n 和每个因子的水平数 Q , 因此不能任意增大。为了解决这个问题, 将可行解空间分割成 S 个子空间。对于每一个子空间应用 $L_M(Q^n)$ 来产生 M 个个体, 然后从中选取 S_{size} 个适应度较好的个体, 对于 S 个子空间则选择出 $S\times S_{\text{size}}$ 个个体。最后从 $S\times S_{\text{size}}$

个个体中选出适应度最好的 S_{size} 个个体作为初始种群。正交初始粒子群的建立方法概括如下。

算法2 子空间分割方法产生正交初始粒子群。

Step1:将可行解空间 $[l, u]$ 分割成 S 个子空间 $[l(1), u(1)], [l(2), u(2)], \dots, [l(S), u(S)]$;

Step2:将每一个子空间进行量化,应用正交表 $L_M(Q^n)$ 产生 M 个个体,从中选出最好的 S_{size} 个个体;

Step3:从 S 个子空间选择出的 $S \times S_{\text{size}}$ 个个体中选出最好的 S_{size} 个个体作为初始种群。

1.2 免疫克隆粒子群算子

受生物免疫系统和克隆机理启发,针对函数优化问题,本文提出了一种正交免疫克隆粒子群算法用于求解水电站水库优化调度问题。首先,令 $A(k) = \{a_1(k), a_2(k), \dots, a_{S_{\text{size}}}(k)\}$ 表示第 k 代粒子种群, S_{size} 表示粒子群的规模,每个粒子通过克隆选择操作来实现粒子群的更新,下面给出相应的算子。

1.2.1 免疫克隆算子^[13] 对于第 k 代粒子群 $A(k)$ 中的任意一个抗体 $a_i = a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,n}, i=1, 2, \dots, S_{\text{size}}$ 进行规模为 q_i 的克隆操作,称为抗体 a_i 的 q_i 克隆。对抗体 a_i 的 q_i 克隆操作定义为: $\bar{a} = I_i \times a_i$, 其中 $\bar{a}$ 是 a_i 克隆操作后的抗体组, I_i 为元素为 1 的 q_i 维行向量。对于第 k 代粒子群 $A(k)$ 中的任一抗体, $q_i(k)$ 为第 i 个抗体的克隆规模。一般取:

$$q_i(k) = \text{Int} \left[n_c \times \frac{f(a_i)}{\sum_{j=1}^{S_{\text{size}}} f(a_j)} \times \Theta_i \right], i=1, 2, \dots, S_{\text{size}}. \quad (3)$$

式中, n_c 为抗体种群克隆规模, $n_c > S_{\text{size}}$; $\text{Int}(\cdot)$ 表示向上取整函数; $f(a_i)$ 为抗体 a_i 的亲合度; $f(a_j)$ 为抗体 a_j 的亲合度; a_j 为粒子群 $A(k)$ 中的第 j 个抗体; Θ_i 反映了抗体 a_i 与其他粒子的亲和力, 定义为:

$$\Theta_i = \min\{D_{ij}\} \min\{\exp(\|a_i - a_j\|)\}, i \neq j, i, j=1, 2, \dots, S_{\text{size}}. \quad (4)$$

其中, $\|\cdot\|$ 为任意范数, 本文采用欧式距离。显然, 抗体亲和力越大(相似程度越高, 反映了抗体间的抑制作用越强), Θ_i 值越小。特别的, 当抗体亲和力为 0 时, $\Theta_i = 1$ 。进一步, 记 $D = (D_{ij})_{S_{\text{size}} \times S_{\text{size}}}$ 为微粒之间的亲和力矩阵。 D 是一对称矩阵, 反映了种群的多样性。

克隆操作中考虑了抗体和抗体之间的亲和力, 这是人工免疫方法与遗传算法的重要区别之一^[14]。

遗传算法强调个体间的竞争, 而忽视了个体间的相互作用导致了种群多样性的下降, 免疫克隆选择算法在克隆规模的定义中引入了抗体间亲和力的概念, 体现了种群中个体的合作对进化的影响, 更有效地保持了种群的多样性。

1.2.2 免疫基因操作 免疫基因操作主要包括基因重组和基因变异, 为了促进个体之间有用信息的交流, 提高子代个体解的均匀性, 本文采用正交重组算子^[15], 对克隆后的个体以概率 1 进行重组操作。

(1) 基因重组操作。设基因重组算子为 P^c , $C(k) = \{c^1(k), c^2(k), \dots, c^{S_{\text{size}}}(k)\}$ 为重组后的种群, 即有:

$$c_j^i(k) = P^c(\bar{a}_j(k), a_i(k)), \bar{a}_j(k) \in \bar{a}(k), j=1, 2, \dots, q_i, i, t=1, 2, \dots, S_{\text{size}}, i \neq t). \quad (5)$$

由于通常情况下并不知道所求问题最优解的位置信息, 为了促进个体间有用信息的交流, 本文采用正交矩阵对个体间的有用信息进行有效采样, 这样不仅可以得到均匀采样的有效个体, 而且不会丢失有效的最优个体, 最终可以获得少量的具有代表性的子代个体。

考虑 2 个父代粒子, $b_1 = (b_{1,1}, b_{1,2}, \dots, b_{1,n})$ 和 $b_2 = (b_{2,1}, b_{2,2}, \dots, b_{2,n})$, 其按照如下方式确定了一个子空间 $[l, u]$, 这里

$$\begin{cases} l = [\min(b_{1,1}, b_{2,1}), \min(b_{1,2}, b_{2,2}), \dots, \min(b_{1,n}, b_{2,n})], \\ u = [\max(b_{1,1}, b_{2,1}), \max(b_{1,2}, b_{2,2}), \dots, \max(b_{1,n}, b_{2,n})]. \end{cases} \quad (6)$$

首先, 将空间 $[l, u]$ 的每个区域量化为 Q 个水平, 并使得相邻 2 个水平的差是相同的。定义 $\beta_i = (\beta_{i,1}, \beta_{i,2}, \dots, \beta_{i,Q})$, 有:

$$\beta_{i,j} = \begin{cases} \min(l_i, u_i), j=1, \\ \min(l_i, u_i) + (j-1) \times \left(\frac{|l_i - u_i|}{Q-1} \right), 2 \leq j \leq Q-1, \\ \min(l_i, u_i), j=Q. \end{cases} \quad (7)$$

随机产生 $F-1$ 个整数 $k_1, k_2, \dots, k_{F-1}$, 并满足 $1 < k_1 < k_2 < \dots < k_{F-1} < n$, 然后对任意的粒子 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 产生如下 F 个因素:

$$\begin{aligned} f_1 &= (x_1, \dots, x_{k_1}), f_2 = (x_{k_1+1}, \dots, x_{k_2}), \dots, \\ f_F &= (x_{k_{F-1}+1}, \dots, x_{k_n}). \end{aligned} \quad (8)$$

因素 f_i 的 Q 个级别为:

$$\begin{cases} f_i(1) = (\beta_{k_{i-1}+1,1}, \beta_{k_{i-1}+2,1}, \dots, \beta_{k_i,1}), \\ f_i(2) = (\beta_{k_{i-1}+1,2}, \beta_{k_{i-1}+2,2}, \dots, \beta_{k_i,2}), \\ \vdots \\ f_i(Q) = (\beta_{k_{i-1}+1,Q}, \beta_{k_{i-1}+2,Q}, \dots, \beta_{k_i,Q}). \end{cases} \quad (9)$$

用正交矩阵 $L_M(Q^F)=[r_{i,j}]_{M_2 \times F}$, 产生如下的 M 个粒子:

$$\begin{cases} f_1(r_{1,1}), f_2(r_{1,2}), \dots, f_F(r_{1,F}), \\ f_1(r_{2,1}), f_2(r_{2,2}), \dots, f_F(r_{2,F}), \\ \vdots \\ f_1(r_{M,1}), f_2(r_{M,2}), \dots, f_F(r_{M,F}). \end{cases} \quad (10)$$

最后, 从 M 个微粒中选出一个最优的粒子作为克隆子代个体。考虑到计算量, 本文令 Q, F 和 M 分别为 3, 4 和 9, 记正交矩阵为 $L_9(3^4)$ 。

(2) 基因变异操作。采用 AEA 变异策略, 令 $D(k)=\{d^1(k), d^2(k), \dots, d^{\text{Size}}(k)\}$ 为变异后的种群, 即

$$d_j^i = c_j^i - \frac{(\text{fix}(c_j^i \times 10^t)) \bmod(10) - \text{rand}(10)}{10^t}, \quad i=1, 2, \dots, S_{\text{size}}; j=1, 2, \dots, q_i. \quad (11)$$

$$p_s^k(a_i(k+1)=d_i'(k))=$$

$$\begin{cases} 1, f(a_i(k)) > f(d_i'(k)); \\ \exp(-\frac{f(a_i(k)) - f(d_i'(k))}{\alpha}), f(a_i(k)) \leq f(d_i'(k)) \text{ 且 } a_i(k) \text{ 不是目前种群的最优抗体}; \\ 0, f(a_i(k)) \leq f(d_i'(k)) \text{ 且 } a_i(k) \text{ 是目前种群的最优抗体}. \end{cases} \quad (13)$$

$\alpha > 0$, 是一个与粒子群多样性有关的值, 一般地, 多样性越好, α 取值越大, 反之越小。显然, 抗体保持不变的概率为 $p_s^k(a_i(k+1)=a_i(k))=1-p_s^k(a_i(k+1)=d_i'(k))$ 。

2 水库优化调度的免疫克隆粒子群优化算法设计

2.1 目标函数

对于水电站水库一般以发电量最大为优化目标, 目标函数为

$$E = \max \sum_{t=1}^n (N_t \cdot \Delta t). \quad (14)$$

式中: N_t 为水库 t 时段的平均出力, $N_t = K \cdot QD_t \cdot H_t$, 其中 K 为出力系数, QD_t 为水库 t 时段的发电流量, H_t 为水库 t 时段的发电水头; n 为计算时段总数; Δt 为时段长度。

2.2 约束条件

(1) 水量平衡约束。

$$V_{t+1} = V_t + (QV_t - QY_t - QD_t - QS_t) \cdot \Delta t. \quad (15)$$

式中: V_{t+1} 为水库第 t 时段末的库容, V_t 为水库第 t 时段初的库容, QV_t, QY_t, QD_t, QS_t 分别为水库第 t 时段的入库流量、库区引水流量、发电流量和弃水流量。

(2) 出力约束。

$$N_t^{\min} \leq N_t \leq N_t^{\max}. \quad (16)$$

式中: t 为 $0 \sim 15$ 的随机数; $\text{fix}(\cdot)$ 为向下取整函数; $\bmod$ 为取余函数, 这里 $\text{fix}(c_j^i \times 10^t)$ 表示除 10 的余数; $\text{rand}(10)$ 为小于 10 的随机整数。另外, 变异概率一般较小, 特别是对于高维函数优化, 一般取为函数维数的倒数。

1.2.3 克隆选择算子 与进化计算中的选择操作不同, 克隆选择算子是从粒子各自克隆后的子代中选择出优秀个体, 从而形成新的种群。具体地, $\forall i=1, 2, \dots, S_{\text{size}}$, 记:

$$d_i'(k) = \{d_j^i(k) \mid \min f(d_j^i(k)), j=1, 2, \dots, q_i\}. \quad (12)$$

则对概率 $p_s^k(d_i'(k) \cup a_i(k) \rightarrow a_i(k+1))$, 有

式中: $N_t, V_t^{\min}, V_t^{\max}$ 分别为水电站 t 时段的出力、最小允许出力(一般为保证出力)、最大出力(一般为装机容量)。

(3) 库容约束。

$$V_t^{\min} \leq V_t \leq V_t^{\max}. \quad (17)$$

式中: $V_t, V_t^{\min}, V_t^{\max}$ 分别为水库第 t 时段初的库容和最小、最大允许库容。

(4) 放水量约束。

$$QC_t^{\min} \leq QC_t \leq QC_t^{\max}. \quad (18)$$

式中: QC_t 为水库第 t 时段的放水量, $QC_t^{\min}$ 为水库向下游放水的最小流量, $QC_t^{\max}$ 为保证下游防洪安全所允许的最大流量。

2.3 算法求解步骤

步骤 1: 在水库水位的可行范围内, 利用量化正交方法初始化粒子群 $A(k)$, 令 $k=0$, 并计算每个粒子的适应度;

步骤 2: 判断适应度大小并与终止条件相比较, 若满足终止条件则停止运行并输出结果; 否则, 转步骤 3;

步骤 3: 利用上述的速度更新算子对粒子群 $A(k)$ 进行更新, 得到 $A^*(k)$;

步骤 4: 将粒子群 $A^*(k)$ 中较差的 T 个个体用 T 个较好个体代替, 并 $A(k) \leftarrow A^*(k)$;

步骤 5: 对粒子群 $A(k)$ 进行克隆操作, 得到

$\bar{A}(k)$;
步骤 6:对 $\bar{A}(k)$ 进行免疫基因操作,包括基因重组和基因变异,得到 $D(k)$;
步骤 7:对 $D(k)$ 进行克隆选择操作,得到 $A'(k)$;
步骤 8:令 $A(k+1) \leftarrow A'(k), k \leftarrow k+1$,转步骤 2,依次类推直至满足终止条件。

3 算 例

为验证算法的有效性,本文采用某水电站水库为应用算例,选用标准粒子群算法和动态规划方法作对比测试。测试使用 P4-2.4G PC 机,内存 512 M,

操作系统为 Windows XP,开发工具为 Visual C++ 6.0 及 MS SQL Server 2000。
已知该水电站水库的水位库容关系曲线、下游水位与流量关系曲线及设计中水年流量过程线,水库正常蓄水位为 1 735 m,死水位为 1 696 m,电站出力系数为 8.3,装机容量为 135 万 kW。防洪要求水库在洪水期蓄水位不超过 1 726 m,3 月凌汛期要求下泄流量不得大于 500 m³/s;流域水调要求 1~2 月下泄流量应小于 600 m³/s,5~6 月下泄流量分别不小于 1 000 m³/s 和 900 m³/s。采用量化正交免疫克隆粒子群算法进行水库优化调度,其结果见表 1。

表 1 OICPSO/Q 算法的优化调度结果
Table 1 Results of reservoir optimal operation by OICPSO/Q algorithm

月份 Month	月初水位/m Water level at the beginning of the month	入库流量/ (m ³ · s ⁻¹) Inflow	发电流量/ (m ³ · s ⁻¹) Power flow	电站出力/ 万 kW Output of power station	月发电量/ 万 kW · h Energy output
7	1 696.0	914	615.5	40.5	30 132
8	1 710.1	1 030	536.8	42.3	31 471
9	1 725.3	1 065	1 018.7	86.1	61 992
10	1 725.9	1 124	691.3	61.6	45 830
11	1 735.0	819	819.0	75.9	54 648
12	1 735.0	616	616.0	57.1	42 482
1	1 735.0	525	525.0	48.6	36 158
2	1 735.0	315	463.4	42.5	28 560
3	1 732.2	364	462.9	41.7	31 025
4	1 729.7	546	496.5	43.8	31 536
5	1 730.1	657	1 024.9	87.3	64 951
6	1 722.6	645	1 350.0	98.9	71 208

为了说明算法的有效性,本研究从平均年发电量和平均计算时间 2 个方面,对量化正交免疫克隆粒子群算法(OICPSO/Q)的性能与标准粒子群算法

(SPSO)及动态规划方法(DP)进行了比较,各方法分别独立求解 10 次,计算结果见表 2。

表 2 OICPSO/Q、SPSO 和 DP 算法性能的比较
Table 2 Comparison of performances to OICPSO/Q,SPSO and DP algorithm

评价指标 Evaluation index	平均年发电量/(万 kW · h) Average annual energy output	平均计算时间/s Average time used
量化正交免疫克隆粒子群算法 Orthogonal immune clone particle swarm optimization algorithm with quantization(OICPSO/Q)	529 940	4
标准粒子群算法 Standard particle swarm optimization algorithm(SPSO)	529 861	11
动态规划方法(100 离散点) Dynamic programming(100 discrete points)(DP)	527 949	75

从表 2 可以看出,与 SPSO 算法计算结果相比,OICPSO/Q 算法计算时间明显降低,但发电量增长了 79 万 kW · h,其原因在于 OICPSO/Q 算法在原有 SPSO 基础上引入了免疫克隆选择策略,并将正交交叉方法用于免疫基因操作中,以增加个体的均匀性,避免了早熟收敛,大大加快了收敛速度;与动态规划方法相比,OICPSO/Q 算法求解结果不仅发

电量增加更多,而且计算时间仅是动态规划方法的 1/18,其原因在于 OICPSO/Q 算法求解水库调度问题时,不用对决策变量进行离散,可以在领域内任何点进行搜索,提高了计算精度;OICPSO/Q 算法搜寻原理简单,且在寻优过程中不需要存储过多的状态点,从而节省了计算所需内存,提高了计算速度。求解水库优化调度问题,OICPSO/Q 算法无论在计

算精度上还是速度上,都明显优于PSO和动态规划方法。

4 结 论

本文将粒子群算法与免疫克隆选择算法相结合,提出了量化正交免疫克隆粒子群算法(OICP-SO),并将其应用到水库优化调度研究中。该方法引入了免疫克隆选择策略,并将正交交叉方法用于免疫基因操作中,以增加个体的均匀性,避免了早熟收敛,大大加快了收敛速度。通过实例研究说明:(1)将免疫克隆策略引入到PSO算法中,利用免疫记忆与自我调节机制来保持各适应度层次的粒子维持一定的浓度,进而可以保证种群的多样性;(2)通过接种疫苗和计算亲合度等操作,对算法的进化过程进行有目的、有选择地指导,使算法快速收敛,同时保持一定的多样性,抑制了早熟现象,大大加快了收敛速度;(3)实例研究表明,OICPSO/Q算法通过正交初始化,克隆选择的局部搜索,使粒子群能够更好的适应环境,最终达到全局优化的目的,而且当问题越复杂时,其性能优越性越明显,为多目标、高维水库群的优化调度研究提供了一种新的途径。

[参考文献]

- [1] 徐 刚,马光文,梁武湖,等. 蚁群算法在水库优化调度中的应用[J]. 水科学进展,2005,16(3):397-400.
Xu G, Ma G W, Liang W H, et al. Application of ant colony algorithm to reservoir optimal operation [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 397-400. (in Chinese)
- [2] Lyra C, Roberto L. A multi-objective approach to the short-term scheduling of a hydroelectric power system [J]. IEEE Transactions PAS, 1995, 10(4): 1750-1754.
- [3] 胡国强,贺仁睦. 基于协调粒子群算法的水电站水库优化调度[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(5): 15-18.
Hu G Q, He R M. Optimal scheduling of hydroelectric station based on coordinated particle swarm optimization [J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33(5): 15-18. (in Chinese)
- [4] 和 吉,胡西林,邱 林,等. 粒子群优化算法在水库调度中的应用[J]. 中州大学学报, 2007, 24(1): 110-122.
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): 110-122. (in Chinese)
- [5] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C]//Simula O, Piscataway N J. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, Australia: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [6] 王少波,解建仓,汪 妮. 基于改进粒子群算法的水电站水库优化调度研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(3): 12-15.
Wang S B, Xie J C, Wang N. Modified particle swarm optimization algorithm and its application in optimal operation of hydro-power station reservoir [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(3): 12-15. (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] 李安强,王丽萍,蔺伟民,等. 免疫粒子群算法在梯级电站短期优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 426-432.
Li A Q, Wang L P, Lin W M, et al. Application of immune particle swarm optimization algorithm to short-term optimal dispatch of cascade hydropower stations [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 426-432. (in Chinese)
- [9] Wang N, Wang S B, Xie J C. Modified particle swarm optimization algorithm and its application on optimal operation of hydropower station [C]//Tse G T, Teo J. Third International Conference on Natural Computation. Haikou, China: IEEE, 2007: 549-553.
- [10] Pakr J B, Lee K S, Shin J R, et al. Economic load dispatch for non-smooth cost functions using particle swarm optimization [C]//Balsillie J, Boecker A. IEEE Power Engineering Society General Meeting. Toronto, Canada: IEEE, 2003: 938-943.
- [11] Gaing Z L. Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(3): 1187-1195.
- [12] 向 波,纪昌明. 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. Immune particle swarm optimization algorithm and its application in reservoir operation optimization [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(2): 198-202. (in Chinese)
- [13] 丛 琳,焦李成,沙宇恒. 正交免疫克隆粒子群多目标优化算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(10): 2320-2324.
Cong L, Jiao L C, Sha Y H. Orthogonal immune clone particle swarm algorithm on multi-objective optimization [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(10): 2320-2324. (in Chinese)
- [14] 陈 颖,徐晓晖,李志全. 基于免疫克隆原理的改进粒子群优化算法的研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(6): 1471-1474.
Cheng Y, Xu X H, Li Z Q. Study of modified particle swarm optimization algorithm based on immune clone principle [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(6): 1471-1474. (in Chinese)
- [15] Zhang Q, Leung Y W. An orthogonal genetic algorithm for multimedia multicast routing [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3(1): 53-62.