

水文地质参数识别的快速和谐搜索算法

骆乾坤, 王佩, 朱国荣

(南京大学地球科学与工程学院水科学系, 南京 210093)

摘要: 将一种新的启发式和谐搜索算法(harmony search algorithm, HS)引入到水文地质领域。在对其音节调整步骤进行改进的基础上, 提出快速和谐搜索算法(Fast harmony search algorithm, FHS), 并将 FHS 算法与 MODFLOW 结合, 用于水文地质问题的参数识别。算例研究表明, FHS 算法较其他多种算法具有更强的全局搜索能力、更快的收敛速度及求解精度, 可用于地下水数值模型的参数反演。

关键词: 快速和谐搜索算法; 参数识别; 地下水数值模型

中图分类号: X143

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2011)04-0014-06

水文地质参数识别又称水文地质逆问题求解, 是建立地下水数值模型的关键步骤。一般说来, 通过野外试验直接获取水文地质参数费时费力, 高效的水文地质参数识别方法不仅可以加快建模速度, 同时也可以减少不必要的野外工作量。长期以来应用于水文地质参数识别的方法(如单纯形法、最速下降法、共轭梯度法、高斯-牛顿法等)对初始解有很强的依赖性, 且易陷入局部最优而无法获得全局最优值。此外, 对于大部分水文地质数学模型, 其水位的解析解表达式很难获得, 因此计算水位关于参数的一阶偏导数存在一定困难, 进而使梯度方法的应用受到限制^[1-2]。近年来, 各种启发式人工智能算法^[3-7], 因其强大的全局搜索能力受到人们的青睐, 并逐渐应用于水文地质参数识别领域。

和谐搜索算法(harmony search algorithm, HS)是一种全新的启发式搜索算法, 由 geem 于 2001 年首次提出^[8]。迄今为止, 和谐搜索算法已经成功应用于多个领域: 如结构设计^[9]、生态保持^[10]、地下水资源管理^[11]、热电联产的经济调度^[12]、管道网络设计^[13]等。上述应用研究均表明 HS 算法对初始参数值敏感度低, 具有很强的全局寻优能力及较高的寻优精度。尤其是对于复杂参数识别问题, HS 算法具有良好的可靠性及灵活性。然而, HS 算法中某些控制参数取值没有

一定规律可循, 这在一定程度上影响算法的求解效率及精度。因此, 本文针对上述不足, 在 Mahdavi 等人^[14]基础上对算法音节调整步骤进行进一步改进, 提出快速和谐搜索算法(Fast harmony search algorithm, 简称 FHS)。最后文中将 FHS 算法应用于两个研究算例中, 并与遗传算法(GA)、微粒群算法(PSO)、改进和谐搜索算法(IHS)进行比较。算例研究表明 FHS 算法具有很高的求解效率及精度, 可以有效解决水文地质逆问题。

1 快速和谐搜索算法

HS 算法以自然的音乐表演过程为基础, 是一种模拟音乐人即兴创作过程的智能算法。与传统的优化算法相比, HS 算法不依赖变量的初始值, 是一种随机搜索算法。此外, 每次迭代中, 新的解向量均从所有解向量中产生, 算法具有良好的遍历性^[15]。因此, HS 算法是一种全局优化随机算法。

HS 算法通过参数和谐记忆存储率(harmony memory considering rate, HMCR), 音节调整率(pitch adjusting rate, PAR)和带宽(bandwidth, bw)来控制算法的全局搜索、局部搜索以及微调能力。其中参数 PAR 和 bw 精确调整最优解向量的生成, 并影响 HS 算法的收敛速度。当 PAR 取较小值, bw 取较大值时, 虽然可以增加解的多样性, 但同时会降低算法的收敛速度; 当 PAR 取较大值, bw 取较小值时, 算法迭代过程的微调作用增强, 解向量更加接近全局最优值。虽然较小的 bw 值在迭代后期会加强对解向量的微调作用, 但是在迭代早期为保证解向量的多样性, bw 取值要足够大。然而, 传统 HS 算法中 PAR 值和 bw 值在整个迭代过程中保持不变, 这样会极大地降低算法的

收稿日期: 2010-09-29; 修订日期: 2010-12-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目“华北平原地下水演变机制与调控”(2010CB428803)

作者简介: 骆乾坤(1984-), 女, 博士研究生, 从事地下水模拟与优化管理研究。

E-mail: luojiankun.kun@163.com

收敛速度甚至导致算法不收敛^[14,16]。

Mahdavi 等人^[14] 提出一种改进和谐搜索算法 (improved harmony search algorithm, IHS)。IHS 算法将原始 HS 算法中作为常数的 PAR 和 bw 值设定为以迭代步数为自变量的函数,在保证迭代初期解的多样性的同时,又不影响迭代后期解的精度,在一定程度上提高了算法的收敛速度和寻优精度^[14]。然而,实际问题中,如何确定参数 bw 的取值并没有一定规律可循,参数值确定受人为主观影响仍然很大。针对以往算法的不足,本文在 Mahdavi 等人研究基础上,对 HS、IHS 算法音阶调整步骤做了进一步改进。改进后的算法不再需要预先设定 bw 取值,而是以前一次迭代中获得的最优解向量为基础进行更新。这样能够更快地找到全局最优解所在的范围,并不断逼近全局最优解。因改进后的算法具有更高的寻优性能,故称其为快速和谐搜索算法(FHS)。

FHS 算法主要包括初始化设置,产生新的解向量,更新和谐记忆矩阵,终止准则等步骤。具体过程如下:

(1) 初始化设置

FHS 算法在迭代计算之前,需要设置初始和谐记忆矩阵。该矩阵由随机产生的和谐记忆向量及相应的目标函数值构成,如式 1 所示:

$$\begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{N-1}^1 & x_N^1 & f(x^1) \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{N-1}^2 & x_N^2 & f(x^2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMS-1} & x_2^{HMS-1} & \dots & x_{N-1}^{HMS-1} & x_N^{HMS-1} & f(x^{HMS-1}) \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_{N-1}^{HMS} & x_N^{HMS} & f(x^{HMS}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $x = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ ——和谐记忆向量,代表一组决策变量;

N ——决策变量的个数;

HMS ——和谐记忆规模,表示和谐矩阵中解向量的个数;

$f(x)$ —— x 相应的目标函数值。

(2) 产生新的解向量

新解向量 $x' = (x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_N)$ 的生成需要符合以下三个准则:①和谐记忆存储准则(harmony memory consideration),即新的解向量直接在和谐记忆矩阵中选择生成;②音阶调整准则(pitch adjustment),即用一个接近现有决策变量的值进行替换生成新的解向量;③随机生成准则(random selection),即新的解向量在参数取值范围内随机生成。

如图 1,首先依据和谐记忆存储准则(式 2)形成新的解向量,若新的解向量是在和谐记忆矩阵中产生,则需要根据改进后的音阶调整准则(式 3)对新解向量进行进一步调整。

$$\begin{aligned} & \text{If } rand(0, 1) < HMCR \quad (2) \\ & x'_i \leftarrow x_i \in \{x_i^1, x_i^2, x_i^3, \dots, x_i^{HMS}\} \\ & \text{Else} \\ & x'_i \leftarrow x'_i \in rand[x_{i, \min}, x_{i, \max}] \\ & \text{End If} \\ & \text{If } rand(0, 1) < PAR(gn) \quad (3) \\ & x'_i \leftarrow x_i^{best} + r_1 * (x_i^{best} - x_i) \\ & \text{Else} \\ & x'_i \leftarrow x'_i \\ & \text{End If} \end{aligned}$$

式中: gn ——当前迭代步数;

x_i^{best} ——当前迭代步数的最优解向量;

x_i ——随机选取的解向量 $r_1 \in rand(0, 1)$ 。

(3) 更新和谐记忆矩阵

将新的解向量所对应的目标函数值与和谐记忆矩阵中最差的目标函数值进行比较,如果新的目标函数值优于和谐记忆中最差的目标函数值,则用新形成的解向量替换最差的目标函数值所对应的解向量。

(4) 终止准则

终止准则包括:达到算法设置的最大迭代次数;达到算法给定的精度限制;达到算法当前最优解没有改进的最大允许迭代步数等。若不满足终止准则,则算法在第(2)步到第(4)步之间循环,否则输出优化结果,终止程序。

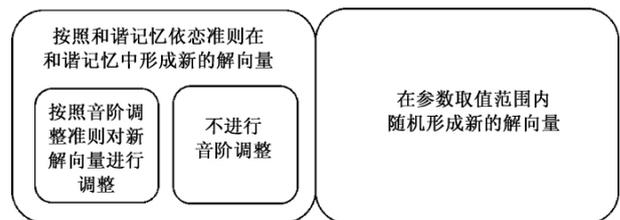


图 1 新解向量的产生过程(根据文献[17])

Fig. 1 New solution vector improvisation process (adapted from [17])

2 算例研究

2.1 算例 1: 一维水动力弥散问题的参数反演

在水平密封的圆筒砂柱中连续注入示踪剂,在距注入孔 0.65m 的观测孔得到不同时刻溶液的相对浓度值^[17]。文中分别使用 FHS、IHS、PSO 算法对水动力

弥散系数 D 和 水流速度 V 进行优化。

2.1.1 数学模型

在一定的假设条件下,取水流动方向为 x 轴的正向,取示踪剂注入点为坐标原点,上述实验可以使用如下数学模型表示^[17]。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \\ 0 < x < +\infty, t > 0 \\ C(x, 0) &= 0, 0 \leq x < +\infty \\ C(0, t) &= C_0, t > 0 \\ \lim_{x \rightarrow +\infty} C(x, t) &= 0, t > 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: C ——示踪剂平均浓度 (M/L^3);
 D ——弥散系数 (L^2/T);
 V ——地下水流速 (L/T);
 T ——时间 (T);
 X ——距离 (L);
 C_0 ——砂柱入口处示踪剂浓度 (M/L^3)。

$$C_R = \frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - vt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left(\frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (5)$$

2.1.2 优化模型

文中根据最小化平均误差绝对值建立优化模型^[17]:

$$\begin{aligned} \min E(v, D) &= \sum_{i=1}^m |C_i(v, D) - C_i^0| / m \\ v^a \leq v \leq v^b \\ D^a \leq D \leq D^b \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $E(v, D)$ ——目标误差函数;
 $[D^a, D^b]$ —— D 的取值区间;
 m ——观测时刻数;
 C_i^0 ——时空某点的地下水中示踪剂相对浓度观测值;
 $C_i(v, D)$ ——时空某点的地下水中示踪剂相对浓度的计算值,由公式(8)计算得出。

2.1.3 优化结果

李竞生等^[18]使用简单遗传算法(SGA)对上述模型进行水文地质参数反演。算法中遗传代数为1000,种群数为50,地下水流速 v 的取值区间为(0,1000) m/d,弥散系数 D 的取值区间为(0,0.1) m²/d。文中在 CPU 主频为 1.80GHz 的计算机上分别使用 FHS 算法、IHS 算法、PSO 算法进行参数寻优计算。FHS 算法中, HMS 取为 20, HMCR 取为 0.7, PAR 的最大值和最小值分别为 0.99 和 0.15; IHS 算法中, HMS 取为 20, HMCR 取为 0.95, PAR 的最大值和最小值分别为 0.99 和 0.1, bw 的最大值和最小值分别为 0.5 和 0.005; PSO 算法中,种群数为 50,个体加速系数和群体加速系数均为 2,惯性权重的最大值为 0.8。三种算法中,参数 V 、 D 取值区间与 SGA 算法中的相同。四种算法的寻优计算结果对比见表 1。

小值分别为 0.99 和 0.15; IHS 算法中, HMS 取为 20, HMCR 取为 0.95, PAR 的最大值和最小值分别为 0.99 和 0.1, bw 的最大值和最小值分别为 0.5 和 0.005; PSO 算法中,种群数为 50,个体加速系数和群体加速系数均为 2,惯性权重的最大值为 0.8。三种算法中,参数 V 、 D 取值区间与 SGA 算法中的相同。四种算法的寻优计算结果对比见表 1。

表 1 算法计算结果对比

Table 1 Comparison of the results from different algorithms

算法	V (m/d)	D (m ² /d)	目标函数	达到最优解时目标函数调用次数	CPU 消耗时间 (s)
SGA	34.034 618	0.059 161	0.032 126	50 000	—
PSO	33.676 720	0.0539 686	0.006 153	9 078	1.609 374
IHS	33.943 601	0.057 966	0.023 876	985	0.140 625
FHS	33.676 700	0.053 968	0.006 152	389	0.109 375

注: SGA 算法未收敛,表中所列只是迭代末次的数据;

SGA 算法迭代 1000 次后仍未收敛^[17]。根据表 1, FHS 算法较 SGA 算法、IHS 算法精度提高约 4.22 倍,同时 CPU 消耗时间减少了约 0.29 倍。FHS 算法较 PSO 算法,虽然计算精度没有明显高,但 CPU 消耗时间却减少了 13.7 倍。因此, FHS 算法求解水文地质参数具有更快更精确的寻优性能。

2.2 算例 2: 承压含水层水文地质参数识别

为进一步检验 FHS 算法的寻优性能,分别使用 FHS 算法、GA 算法、IHS 算法、PSO 算法对某一理想承压含水层水文地质参数进行识别。

2.2.1 模型概况

设计一承压含水层,该含水层为边长 400m 的正方形,四个边界均为隔水边界。整个含水层的贮水系数为 0.001,根据导水系数对含水层进行参数分区。抽水井和注水井的分布以及区域剖分见图 2。对该含水层进行抽/注水及水位恢复试验,首先调用 MODFLOW 软件进行正演计算,得到各观测井的计算降深,并将计算降深值作为观测资料用于导水系数的识别。

2.2.2 优化模型

采用最小化误差平方和的均方根作为目标函数,建立如下优化模型:

$$\begin{aligned} \min E(T_1, T_2, T_3, T_4) \\ = \operatorname{sqr}t \left(\sum_{i=1}^{15} \sum_{j=1}^{10} [H_j(t_i) - H_j^{ob}(t_i)]^2 / N \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Subject to $T_{\min} \leq T_j \leq T_{\max} \quad j = (1, 2, 3, 4)$

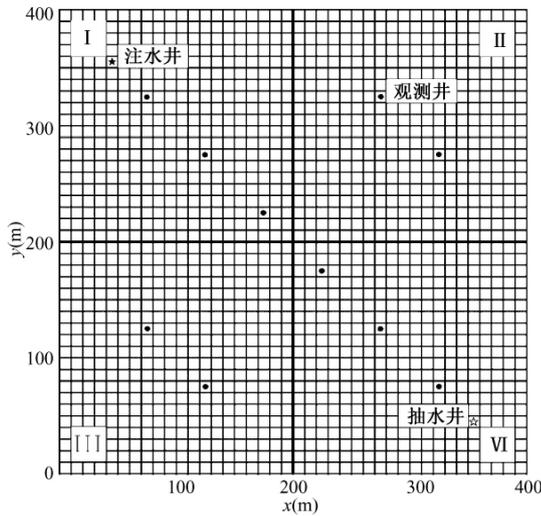


图 2 地下水流模型剖分和参数分区
Fig. 2 Discretization and parameter sub-division for the groundwater model

式中: $E(t)$ ——目标函数;

$H_j(t_i)$ —— t_i 时刻节点 j 的计算水头值,通过调用水流模型计算得到;

$H_j^{ob}(t_i)$ —— t_i 时刻节点 j 的观测水头值;

N ——观测井数与观测频率之积,在此为 150。

2.2.3 优化结果

文中使用 FHS 算法、GA 算法、IHS 算法、PSO 算法在 CPU 主频为 1.80GHz 的计算机上进行参数寻优计算。FHS 算法中, HMS 为 20, HMCR 为 0.7, PAR 最大值和最小值分别为 0.99 和 0.1, 最大迭代次数为 3 000; GA 算法中遗传代数设为 100, 种群数为 50; IHS 算法中, HMS 为 20, HMCR 为 0.7, PAR 最大值和最小值分别为 0.99 和 0.1, b_w 的最大值和最小值分别为 20 和 10, 最大迭代次数为 10 000; PSO 算法中, 种群数为 50, 个体加速系数和群体加速系数均为 2, 惯性权重最大取值为 0.8, 计算代数为 100。四种算法中, 参数 T 的取值区间均为 $(0 \sim 300) \text{ m}^2/\text{d}$, 计算对比结果见表 2。

表 2 参数识别结果及误差分析

Table 2 Parameter identification results and error analyses

算法	优化参数值				目标函数	达到最优解时目标函数调用次数	CPU 消耗时间 (min)
	$T1(\text{ m}^2/\text{d})$	$T2(\text{ m}^2/\text{d})$	$T3(\text{ m}^2/\text{d})$	$T4(\text{ m}^2/\text{d})$			
	真值(100)	真值(50)	真值(200)	真值(150)			
GA	102.136 300	49.989 319	199.957 274	150.086 978	0.001 835	4595	22.620 6
PSO	99.420 044 2	50.433 991	203.706 768	150.318 579	0.003 404	495 0	35.490 1
IHS	100.167 000	47.688 000	207.123 000	150.600 000	0.025 481	5 065	58.991 9
FHS	99.971 400	50.025 90	200.198 700	149.914 200	0.001 419	2985	20.687 0

根据表 2, FHS 算法在最小的 CPU 消耗时间内 (20.687 0min) 获得最高的计算精度。通过比较最小目标函数, FHS 算法较 GA、PSO、IHS 三种算法精度提高了 0.29 ~ 16.95 倍。此外, 通过比较消耗 CPU 时间, 其求解速度提高了 0.09 ~ 1.85 倍。

各个分区分别选择一口观测井, 进行正演水头与观测水头误差绝对值对比, 见图 3。根据图 3, FHS 算法正演水头值均与观测值基本吻合, 明显优于其他三种方法所得结果。另外, GA、PSO、IHS 三种算法正演水头误差值受抽水时段影响明显, 而 FHS 算法所得结果基本不受抽水时间及水位恢复时间长短的影响, 充分证明 FHS 算法可以高效准确地求解复杂水文地质参数识别问题。

3 讨论

HS 算法是一种全新的启发式搜索算法。文章针对 HS 算法在控制参数难以确定这方面的弱点, 在 IHS

算法的基础上, 对音阶调整步骤做了进一步改进, 提出快速和谐搜索算法 (FHS) 并将其应用于水文地质参数识别领域, 研究结果表明 FHS 算法以最快的求解效率获得最高的精度。此外, FHS 算法较其它智能算法受外界人为因素 (如抽水时间等) 影响较小, 具有更可靠的寻优性能。

在各种实际问题中, 如何更好设置 FHS 算法的控制参数, 进一步提高算法的寻优效率仍是一个难点。此外, 水文地质过程的数值模拟结果中隐含着许多不确定性, 对于模拟本身来说, 即使模拟结果与预测值相一致, 也不能就此证实其正确性, 因为很可能把前提、假设加以变换后, 同样能得出相同结果, 即模拟结果不存在唯一性, 这就需要通过实际水文地质条件的具体分析, 选出最符合实际情况的一组解。

文章首次将 FHS 算法应用于水文地质参数识别领域。此外, 它还可以应用于地下水疏干优化、水质评价等。算法从单目标到多目标的拓展以及与其他算法

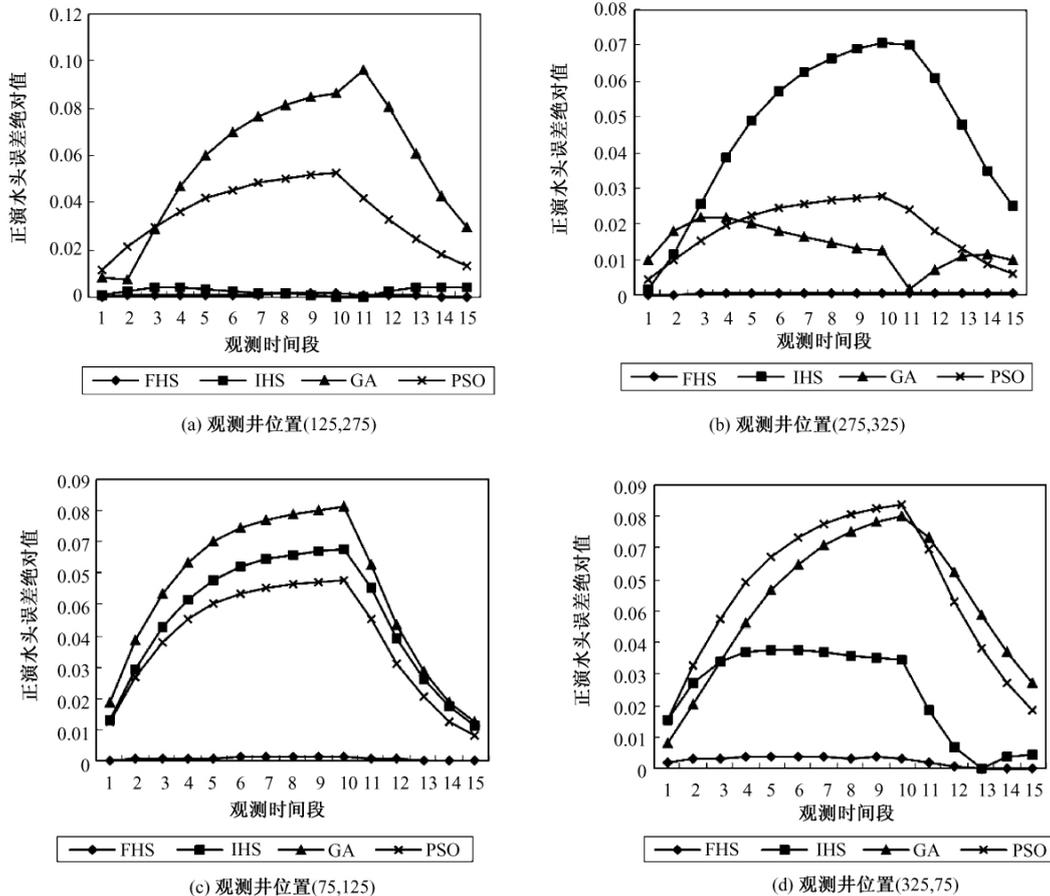


图3 正演水头误差绝对值对比曲线

Fig. 3 Forward-head comparison curves of the absolute error

的耦合也是有待改进和研究的方向。

参考文献:

[1] 薛禹群,谢春红. 地下水数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 383 - 401. [XUE Y Q, XIE C H. Numerical Simulation for Groundwater [M]. Beijing: Science Press, 2007: 384 - 401. (in Chinese)]

[2] Yeh W W-G. Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: The inverse problem [J]. Water Resource Research, 1986, 22 (1): 95 - 108.

[3] 吴剑锋,钱家忠,朱学愚,等. 基于连续不确定区域的遗传算法求解水文地质逆问题[J]. 水利学报, 2002(10): 27 - 32. [WU J F, QIAN J Z, ZHU X Y, et al. Genetic algorithm based on continuous uncertainty region for inverse problem of hydrogeology [J]. Journal of Hydraulic Engineering. 2002(10): 27 - 32. (in Chinese)]

[4] Pan L, Wu L. A hybrid global optimization method for inverse estimation of hydraulic parameters: Annealing-

simplex method [J]. Water Resource Research, 1998, 34(9): 2261 - 2269.

[5] 江思珉,朱国荣,孙振波. 基于连续不确定区域的蚁群算法求解水文地质逆问题[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(3): 1 - 4. [JIANG S M, ZHU G R, SUN Z B. Ant colony algorithm based on continuous uncertainty region for inverse problem of hydrogeology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34 (3): 1 - 4. (in Chinese)]

[6] 闵望,朱国荣,江思珉. 微粒群算法在反求水文地质参数中的运用[J]. 勘察科学技术, 2007(5): 50 - 54. [MIN W, ZHU G R, JIANG S M. The application of PSO in reverse problem of hydrogeological parameters [J]. Investigation Science and Technology, 2007(5): 50 - 54. (in Chinese)]

[7] 孙振波,朱国荣,江思珉,等. 地下水模型的快速自适应组合网络求解方法[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(1): 19 - 21. [SUN Z B, ZHU G R, JIANG S M, et al. Solving methods of groundwater model with fast adaptive composite grids [J]. Hydrogeology

- & Engineering Geology , 2010 ,37 (1) : 19 - 21. (in Chinese)]
- [8] Y Xin-She. Harmony Search as a Metaheuristic algorithm [J]. SCI , 2009 , 191: 1 - 14.
- [9] Degertekin S O. Optimum design of steel frames using harmony search algorithm [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization , 2008 , 36(4) : 393 - 401.
- [10] Williams , Z W G A. Harmony Search and Ecological Optimization [J]. International Journal of Energy and Environment , 2007 , 1(2) : 150 - 153.
- [11] M Tamer Ayvaz. Application of Harmony Search algorithm to the solution of groundwater management models [J]. Advance in Water Resources , 2009 , 32: 916 - 924.
- [12] Vasebi A , M Fesanghary , S Bathaee. Combined heat and power economic dispatch by harmony search algorithm [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems , 2007 , 29 (10) : 713 - 719.
- [13] Geem Z W. Optimal cost design of water distribution networks using harmony search [J]. Engineering Optimization , 2006 , 38(3) : 259 - 280.
- [14] Mahdavi M , M Fesanghary , E Damangir. An improved harmony search algorithm for sloving optimization problems [J]. Applied Mathematics and Computation , 2007 , 188: 1567 - 1579.
- [15] Lee K S , Z W Geem. A new structural optimization method based on the harmony search algorithm [J]. Computers and Structures , 2004 , 82(9/10) : 781 - 798.
- [16] Omran , M , M Mahdavi. Global-best harmony search [J]. Applied Mathematics and Computation , 2008 , 198(2) : 643 - 656.
- [17] Lee K S , Geem ZW. A New meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice [J]. Comput Meth Appl Mech Eng , 2005 , 195: 3902 - 3933.
- [18] 李竞生 , 姚磊华. 含水层参数识别方法 [M]. 北京: 地质出版社, 2003. [LI J S , YAO L H. Aquifer parameter identification method [M]. Beijing: The Geological Publishing House , 2003. (in Chinese)]

Fast harmony search algorithm and its application to hydrogeological parameters identification

LUO Qian-kun , WANG Pei , ZHU Guo-rong

(Department of Hydrosiences , Nanjing University , Nanjing 210093 , China)

Abstract: In this article a new metaheuristic algorithm-harmony search algorithm (HS) is introduced into hydrogeological fields. Based on the improvement of the pitch adjustment step , we firstly put forward the fast harmony search algorithm (FHS) . The proposed method greatly enhances the efficiency of the algorithm and accuracy of the solution. FHS is combined with MODFLOW to solve the problem of hydrogeological parameters identification. Examples of studies have shown that FHS algorithm has a strong global search ability and fast convergence rate for solving the problems of complex groundwater model parameter identification. In comparison with three other algorithms , namely simple genetic algorithm (SGA) , particle swarm optimization (PSO) and improved harmony search (IHS) , FHS presented in this study can provide reliable hydrogeological parameters for numerical groundwater models.

Key words: fast harmony search algorithm; hydrogeological parameters; parameter identification

责任编辑: 张若琳