

# 混沌粒子群混合算法估计各向异性含水层参数

王媛英<sup>1</sup>, 刘元会<sup>1</sup>, 郭建青<sup>2</sup>, 高雄飞<sup>1</sup>, 刘向南<sup>3</sup>

(1. 长安大学 理学院, 西安 710064; 2. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710051;  
3. 蒲城清洁能源化工责任有限公司, 陕西 渭南 715500)

**摘要:** 通过用粒子群算法代替混沌序列优化算法的细搜索, 可以提高算法的收敛速度及精度。将混沌粒子群混合算法用于分析抽水试验数据, 估计各向异性含水层参数, 可以有效解决各向异性函数优化问题。与其他算法比较, 混沌粒子群混合算法其具有计算精度高、与实测数据拟合效果好及寻优率高等优点。为估计各向异性含水层参数及建立相应的预测和评估模型提供了操作简单、高效且准确的方法。

**关键词:** 各向异性; 含水层参数; 参数估计; 混沌粒子群混合算法

**中图分类号:** TV211 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)01-0087-04

## Estimation of anisotropic aquifer parameters based on chaos particle swarm algorithm

WANG Yuan ying<sup>1</sup>, LIU Yuan hui<sup>1</sup>, GUO Jian qing<sup>2</sup>, GAO Xiong fei<sup>1</sup>, LIU Xiang nan<sup>3</sup>

(1. College of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Environmental Science & Engineering, Chang'an University, Xi'an 710051, China;

3. Pucheng Clean Energy Chemical Company Ltd, Weinan 715500, China)

**Abstract:** Using the particle swarm algorithm can increase the convergence speed and precision of the algorithm compared with the optimization search of chaos sequence. The chaos particle swarm algorithm was used to analyze the pumping test data and to estimate the anisotropic aquifer parameters, which can resolve the optimization problems of anisotropy function. Compared with other algorithms, the chaos particle swarm algorithm has high calculation precision, fit well with the measured results, and has high optimization rate. This method proves to be simple, efficient, and accurate to estimate anisotropic aquifer parameters and to develop a corresponding prediction and evaluation model.

**Key words:** anisotropy; aquifer parameters; parameter estimation; chaos particle swarm algorithm

水文地质参数是建立河流水质数学模型, 预报河流水质变化的基本数据。获取水文地质参数最常用的方法是对抽水试验数据进行分析。但是, 冲洪积形成的含水层的导水性大多表现出各向异性。近半个世纪以来, 许多学者对于利用抽水试验确定各向异性含水层参数问题展开深入的研究, Hantush 给出了有越流径向各向异性含水层中非完整井流三维问题的数学模型和相应的计算公式<sup>[1]</sup>; Papadopoulos 导出了径向各向异性主值与两个水平方向主渗透系数大小和方向之间的关系式<sup>[2]</sup>; Way 在 Hantush 和 Papadopoulos 研究的基础上提出了通过现场抽水试验确定径向各向异性渗透系数主值的方法<sup>[3]</sup>。此外, 人们还采用标准曲线配线法和 Cooper Jacob 直线图解法<sup>[4]</sup>分析非稳定流抽水试验数据, 来计算含水层参数。然而这些方法在实际应用中都有一定的

局限性, 比如标准配线法存在人为的随意性、Cooper Jacob 直线图解法要满足观测井与主井间距离比较小或者抽水时间比较长等。为了克服上述方法的局限性, 近年来越来越多的学者致力于智能优化算法应用的研究, 如人工神经网络、模拟退火与遗传算法等<sup>[5-7]</sup>。

本文将粒子群算法<sup>[8]</sup>与混沌序列优化算法<sup>[9]</sup>结合, 构成一种混合优化算法, 并用该算法分析抽水试验数据, 进一步估计各向异性含水层参数。

## 1 混沌粒子群混合算法

### 1.1 混沌序列优化算法

混沌序列优化算法是利用混沌运动特征进行的优化搜

收稿日期: 2014-02-25 修回日期: 2014-10-24 网络出版时间: 2014-12-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1405.030.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11171043)

作者简介: 王媛英(1988-), 女, 陕西渭南人, 主要从事最优化理论与方法研究。E-mail: wangyy0921@yeah.net

通信作者: 刘元会(1964-), 男, 陕西咸阳市人, 教授, 主要从事水文地质的数学方法研究。E-mail: chdlyh@126.com

索, 整个搜索过程分为粗搜索和细搜索两个阶段。粗搜索阶段是利用确定性迭代方式产生的遍历性轨道对整个解空间进行的考察, 当满足终止条件时, 认为粗搜索阶段发现的最佳状态已经接近问题的最优解, 以此作为细搜索的起点; 细搜索是以粗搜索得到的结果为中心, 通过附加混沌变量的小幅度扰动进一步进行局部搜索, 直到满足算法的终止条件。

混沌序列优化算法中利用了著名的 Logistic 映射, 具体形式及定义如下。

$$y_{n+1} = \nu y_n (1 - y_n) \quad y_n \in (0, 1) \quad n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中:  $y_n$  为  $y$  第  $n$  次迭代产生的数值;  $\nu$  为系数扰动的参数, 已证明  $\nu = 4$  时是“单片”混沌。  $y_n$  几乎遍历  $(0, 1)$  的所有状态, 由于混沌变量对初值非常敏感, 赋予式 (1) 不同的初值就可以得到不同的混沌变量。

### 1.2 粒子群优化算法

粒子群优化算法 (PSO) 源于对鸟群捕食行为的研究。在 PSO 中每个问题的优化解都是搜索空间的一个粒子, 每个粒子都对应一个适应度值, 每个粒子都有自己的速度决定他们飞翔的方向和距离。粒子追随当前的最优粒子在解空间搜索到最优解, 在每次迭代过程中, 粒子通过追踪两个“极值”来更新自己, 第一个是粒子的个体最优解, 第二个是粒子群的全局最优解。

在迭代过程中,  $X_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,d})$  为第  $i$  个粒子, 其中  $d$  是粒子的维数;  $P_b = (P_{i,1}, P_{i,2}, \dots, P_{i,d})$  为粒子经历过的最好位置;  $V_i = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,d})$  为粒子  $i$  的速度; 整个粒子群经历过的最好位置为  $g_b = (P_{g,1}, P_{g,2}, \dots, P_{g,d})$ ;  $w$  为惯性权重,  $random()$  是  $(0, 1)$  之间的随机数;  $c_1, c_2$  为学习因子,  $j = 1, 2, \dots, d$ 。粒子通过式 (2) 来更新自身的位置和速度<sup>[10-11]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} v_{i,j} &= w \times v_{i,j} + c_1 \times random() \times (P_{i,j} - x_{i,j}) + c_2 \times \\ &random() \times (P_{g,j} - x_{i,j}) \\ x_{i,j} &= x_{i,j} + v_{i,j} \end{aligned} \right\} (2)$$

### 1.3 混沌粒子群混合算法

混沌序列优化算法具有遍历性, 几乎可以遍历初始取值范围的所有可能解。混沌算法的优化结果与搜索空间有很大关系, 当搜索空间很大时, 由于搜索时间的限制, 往往不能得到问题的满意解。粒子群算法具有通用性并且受控参数少、操作简单等优点, 但是粒子群算法的搜索能力对参数具有一定的依赖性。为了搜索到满意的解, 本文将混沌序列优化算法与粒子群算法结合形成混沌粒子群混合算法。基本思路是用粒子群算法代替混沌序列优化算法中的细搜索, 具体步骤如下:

步骤 1 初始化混沌粒子群混合算法的相关参数;

步骤 2 令  $n = 1$ , 对 Logistic 映射, 即  $y_{m+1} = 4y_m(1 - y_m)$  中的  $y_m$  分别赋予  $d$  个具有微小差异的初值, 得到  $d$  个轨迹不同的混沌变量  $y_{m+1,d}$ , 其中  $d$  为待估参数个数,  $m+1$  为混沌序列长度;

步骤 3 用载波的方法将选定的混沌变量转换为用于优化的混沌优化变量;

步骤 4 利用混沌优化变量进行迭代搜索; 计算混沌变量对应的适应度值, 如果适应度值小于最小值, 则更新最优值及最优解, 否则迭代次数  $k = k + 1$ ;

步骤 5 如果满足终止条件, 则粗搜索停止, 输出搜索到的最优值  $dg$  及最优解  $X_1$ , 否则返回步骤 2;

步骤 6 在  $X_1$  周围初始化粒子群, 对粒子群的变量进行判断修正, 计算对应的适应度值, 更新个体最优值和全局最优值  $dg$  及对应的最优解;

步骤 7 利用公式 (1) 更新粒子的速度和位置;

步骤 8 更新粒子个体最优值和  $dg$ ;

步骤 9 如果满足终止条件, 则输出及最优解  $X_1$ , 否则返回步骤 7。混沌粒子群混合算法流程见图 1。

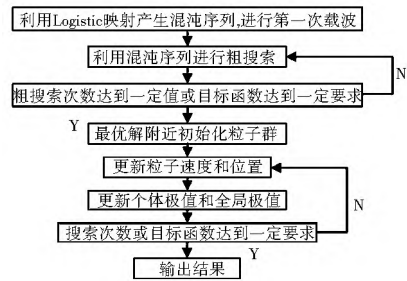


图 1 混沌粒子群混合算法流程

Fig. 1 Flow chart of cChaos particle swarm algorithm

## 2 目标函数的构造

### 2.1 泰斯公式在各向异性下的解析表达式

设在无限延伸的承压含水层中, 以定流量  $Q$  进行抽水, 如果初始水头水平, 则可以利用如下各向异性解析表达式<sup>[12]</sup> 计算含水层中任一点任一时刻的水头降深  $s$ 。

$$s = \frac{Q}{4\pi T_e} W(u_{xy}) \quad (3)$$

$$T_e = \frac{\sqrt{T_{xx} T_{yy} - T_{xy}^2}}{T_e} \quad (4)$$

$$u_{xy} = \frac{\mu}{4t} \left( \frac{T_{xx} y^2 + T_{yy} x^2 - 2T_{xy} xy}{T_e^2} \right) \quad (5)$$

式中:  $s$  为水头降深 (m);  $Q$  为水井的抽水流量 ( $m^3/s$ );  $T_e$  是含水层的等效导水系数 ( $m^2/s$ );  $T_{xx}, T_{yy}, T_{xy}$  分别为导水系数在当地坐标系的张量分量 ( $m^2/s$ );  $x, y$  为当地坐标系下的坐标分量 (m);  $W(u_{xy})$  采用与泰斯公式形式相同的井函数<sup>[13]</sup>, 其中  $\mu$  为含水层弹性释水系数。

### 2.2 目标函数的构成

应用混沌粒子群混合算法时, 要求欲估参数值能使下式表示的目标函数值达到极小, 即

$$\varphi(\delta) = \left( \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (s(i, j) - s_0(i, j))^2 \right) \Rightarrow \min \quad (6)$$

式中:  $\delta = (\mu, T_{xx}, T_{yy}, T_{xy})$  为欲估参数;  $M$  为抽水井总数;  $N$  为时间序列总数;  $s_0(i, j)$  为第  $i$  个观测孔在第  $j$  时刻观测到的实际水位降深 (m);  $s(i, j)$  为第  $i$  个观测孔在第  $j$  时刻计算得到的水位降深 (m)。

## 3 数值试验

### 3.1 试验数据及试验条件

#### 3.1.1 试验数据

采用文献[12]的抽水试验算例进行数值实验, 来验证混沌粒子群混合算法的可靠性, 算例假设: 渗透主值与全局坐标不一致, 在某全局正交各向异性含水层中, 有一完整井以

定流量  $Q=0.01257\text{ m}^3/\text{s}$  进行非稳定流抽水试验。以抽水井为坐标原点, 正东方向为  $x$  轴正向, 正北方向为  $y$  轴正向。抽水井附近有三个观测孔 ow1、ow2、ow3, 其位置坐标分别

为  $(28.3, 0)$ 、 $(9.0, 33.5)$ 、 $(-19.3, -5.2)$ 。抽水试验开始后, 三个观测孔中观测到的实际水头降深随时间的变化情况见表 1。

表 1 不同时间下的水头降深数据

Tab. 1 Head draw down data under at different time

观测孔	时间 $t/\text{s}$											
	$3 \times 10$	$6 \times 10$	$1.2 \times 10^2$	$1.8 \times 10^2$	$2.4 \times 10^2$	$3.6 \times 10^2$	$4.8 \times 10^2$	$6 \times 10^2$	$9 \times 10^2$	$1.2 \times 10^3$	$1.8 \times 10^3$	$2.4 \times 10^3$
ow1	0.335	0.591	0.911	1.082	1.215	1.405	1.549	1.653	1.853	2.019	2.203	2.344
ow2	0.153	0.343	0.611	0.762	0.911	1.089	1.225	1.329	1.531	1.677	1.853	2.019
ow3	0.492	0.762	1.089	1.284	1.419	1.609	1.757	1.853	2.071	2.210	2.416	2.555

观测孔	时间 $t/\text{s}$											
	$3 \times 10^3$	$3.6 \times 10^3$	$5.4 \times 10^3$	$7.2 \times 10^3$	$9 \times 10^3$	$1.08 \times 10^4$	$1.44 \times 10^4$	$1.8 \times 10^4$	$2.16 \times 10^4$	$2.88 \times 10^4$	$4.32 \times 10^4$	
ow1	2.450	2.541	2.750	2.901	2.998	3.075	3.235	3.351	3.438	3.587	3.784	
ow2	2.123	2.210	2.416	2.555	2.670	2.750	2.901	2.998	3.118	3.247	3.425	
ow3	2.670	2.750	2.963	3.118	3.218	3.310	3.455	3.565	3.649	3.802	3.996	

### 3.1.2 试验条件

根据算法流程, 编写程序进行数值实验。以目标函数的绝对值小于  $5 \times 10^{-3}$  作为算法的终止条件。如果迭代次数超过最大迭代次数且目标函数值的绝对值大于  $5 \times 10^{-3}$  则认为寻优失败。种群数目  $N$  取 100, 粗搜索次数  $L1$  取 300, 粒子群的最大搜索次数  $\text{max}z$  取 200, 弹性释水系数  $\mu$  取值范围为  $0 \sim 1$ ,  $T_{xx}$  取值范围为  $0 \sim 600$ ,  $T_{yy}$  取值范围为  $0 \sim 600$ ,  $T_{xy}$  取值范围为  $-600 \sim 0$ 。

### 3.2 计算结果分析

#### 3.2.1 算法可靠性分析

表 2 给出了利用混沌粒子群混合算法和采用其他参考文献方法分析抽水试验数据得到的计算结果。混沌粒子群混合算法计算的结果与 Papadopulos 方法<sup>[14]</sup>的结果十分接近, 且所得目标函数值更小, 说明混沌粒子群混合算法的计算结果是可靠的并且计算精度高。

为了进一步验证混沌粒子群混合算法的可靠性, 将表 2 中混沌粒子群混合算法计算的参数值代入式 (3), 计算不同时刻的水位降深, 结果显示, 利用混沌粒子群混合算法计算

的水位降深与观测水位降深十分逼近(图 2), 进一步说明了混沌粒子群混合算法的可靠性。

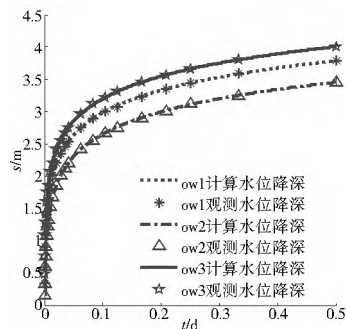


图 2 观测水位降深与计算水位降深拟合

Fig. 2 Fitting diagram between observed and calculated draw down

#### 3.2.2 算法的优越性

为了对比分析混沌粒子群混合算法与混沌序列优化算法的优越性, 根据参考文献[14]所得结果, 将参数的初始取值扩大 2、5、50、100, 粗搜索次数取 300, 粒子群搜索次数取 200; 编写程序, 使算法运行 100 次, 求其结果的平均值; 以  $5 \times 10^{-3}$

表 2 不同方法的计算结果

Tab. 2 Calculated results using different methods

方法	含水层参数及目标函数值				
	$\mu / (\times 10^4)$	$T_{xx} / (\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$	$T_{yy} / (\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$	$T_{xy} / (\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$	$\varphi$
混沌粒子群混合算法	1.008 5	214.458 7	215.519 0	-128.172 6	0.003 7
Papadopulos 方法	1	215	220.467 2	-129	0.004 2
直线图解法 <sup>[15]</sup>	0.860	225.417 6	216	-155.520 0	0.020 6

为精度要求, 在 100 次计算结果中如果目标函数绝对值小于  $5 \times 10^{-3}$  则认为寻优成功, 否则寻优失败。比较混沌粒子群混合算法与混沌序列优化算法的计算结果(表 3)可知, 混沌序列优化算法的计算结果受初值影响比较大, 当参数的初始取值范围扩大倍数大于 10 后寻优率为零。而混沌粒子群混合算法却受初始取值范围影响不大, 即使扩大 100 倍, 其寻优率也高达 70%, 且平均最优值比较小。

### 4 结语

本文将混沌序列优化算法与粒子群算法结合形成混沌

粒子群混合算法, 据此进行含水层参数估算。实际算例的计算结果表明, 混沌粒子群混合算法能够有效地估计各向异性含水层层数, 解决各向异性含水层函数优化问题, 计算精度和可靠性明显优于其他方法, 而且在不同的参数初始取值范围内, 混沌粒子群混合算法的计算结果的平均值和寻优率优于混沌序列优化算法。因此, 可以利用混沌粒子群混合算法分析各向异性抽水数据、估计各向异性含水层参数。

需要说明的是, 混沌优化算法采用的是随机搜索的方法, 本身具有不确定性, 因此今后仍需在搜索过程尽快地收敛到全局最优方面进行进一步的研究, 进而优化混沌粒子群

表 3 不同初始取值范围内 CPSO 与 Chaos 计算结果比较

Tab. 3 Comparison of calculation results of CPSO and Chaos with different initial values

含水层参数	算法							
	2 倍		5 倍		50 倍		100 倍	
	CPSO	Chaos	CPSO	Chaos	CPSO	Chaos	CPSO	Chaos
$\mu/10^5$	9.6615	8.9597	9.532	7.6502	9.8136	12.290	9.3632	13.38
$T_{xx}/(m^2 \cdot d^1)$	230.9304	235.8414	225.2244	262.9349	222.4673	195.4512	231.2238	190.2064
$T_{yy}/(m^2 \cdot d^1)$	234.5455	242.9722	228.3218	275.9751	224.5988	184.1976	236.8117	174.7713
$T_{xy}/(m^2 \cdot d^1)$	-149.4892	-163.3837	-145.2161	-205.7448	-138.7502	-80.0549	-153.8224	-623.549
最优值的平均的值/ $m^2$	0.0047	0.0060	0.0049	0.0095	0.0057	0.0191	0.0063	0.0393
寻优率(%)	97	67	85	25	72	5	70	0

混合算法,同时也可以尝试采用混沌粒子群混合算法解决水科学其他方面的优化问题。

#### 参考文献(References):

- [1] HANTUSH M S. Analysis of data from pumping tests in anisotropic aquifers[J]. Journal of Geophysical Research, 1966(71): 421-426.
- [2] PAPADOPULOS I S. No steady flow to a well in an infinite anisotropic aquifer. Intern Assoc Sci Hydrol, Proc Dubrovnik' Symposium on the Hydrology of fractured rocks, 1965: 21-31.
- [3] WAY S C, MCKEE R. In situ determination of three dimensional aquifer permeabilities[J]. Ground Water, 1982, 20(5).
- [4] 陈崇希,林敏.地下水动力学[M].武汉:中国地质大学出版社,1999: 70-122. (CHEN Chong xi, LIN Min. Groundwater dynamics[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999: 70-122. (in Chinese))
- [5] TUNG Cheng Pin, CHOU Chu. An application of tabu search to ground water parameter zonation[J]. Journal of the American Water Resource Association, 2002, 38(4): 1115-1125.
- [6] PAN L H, WU L S. A hybrid global optimization method for inverse estimation of hydraulic parameters: Annealing Simplex method[A]. WR972418, Department of Soil & Environmental Science, University of California, Riverside. 1997: 87-196.
- [7] 刘毅,陈吉宁,杜鹏飞.环境参数优化参数的比较[J].环境科学,2002,23(2): 1-6. (LIU Yi, CHEN Ji ning, DU Peng fei. Comparison of parameters optimization parameters[J]. Environmental science, 2002, 23 (2): 1-6. (in Chinese))
- [8] 郭建青,李彦,王洪胜,等.粒子群优化算法在确定含水层参数中的应用[J].中国农村水利水电,2008(4): 4-7. (GUO Jian qing, LI Yan, WANG Hong sheng, et al. Particle swarm optimization algorithm to determine aquifer parameters[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(4): 4-7. (in Chinese))
- [9] 郭建青,李彦,王洪胜,等.确定含水层参数的混沌序列优化算法[J].中国农村水利水电,2006(12): 26-29. (GUO Jian qing, LI Yan, WANG Hong sheng, et al. Chaotic sequence to determine aquifer parameters optimization algorithm[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(12): 26-29. (in Chinese))
- [10] Shi Y, Eberhart R C. A modified particle swarm optimizer[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998(5): 69-73.
- [11] SHI Y, EBERHART R C. Parameter selection in particle swarm optimization[J]. Lecture Notes in Computer Science, 1998(1447): 591-600.
- [12] VEDAT B, PHD, P E. Aquifer hydraulics: A comprehensive guide to hydrogeologic data analysis[J]. A Wiley-Interscience Publication, 1998: 206-223.
- [13] SRIVASTAVA R. Implications of using approximation expressions for well function [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1995, 121(6): 459-462.
- [14] KRUSEMAN GP, RIDDER NA, VERWEIJ JM. Analysis and evaluation of pumping test data. Second Edition [M]. The Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1994: 133-145.
- [15] 刘燕,辛璐君,郭建青,等.抽水实验确定各向异性含水层参数的实例讨论[J].勘察科学技术,2012(6): 5-9. (GAO Jian qing, LIU Yan, et al. Pumping experiment example of anisotropy aquifer parameters discussion[J]. Investigation of science and technology, 2012(6): 5-9. (in Chinese))