

改进粒子群算法在确定含水层参数中的应用

杨陈东¹, 常安定², 李文胜¹, 张明¹

(1. 西安航空学院 理学院, 陕西 西安 710077; 2. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 通过分析抽水试验数据,为估计含水层参数提供新的方法。在粒子多样性方面对粒子群算法进行改进,提高了算法的收敛速度和精度。将改进的粒子群优化算法应用到含水层参数估计中,计算结果与其他方法进行对比,并对不同初始值范围内参数估计值进行分析探讨。结果表明:改进粒子群算法估计结果相对误差(7.3%和4.5%)小于其他方法,且目标函数值相对更小,达到 0.335×10^{-5} ;对于不同初始参数范围,利用此算法均能达到满意结果且寻优率高。基于抽水试验数据估计含水层参数的改进粒子群优化算法计算结果有效且可靠,算法收敛速度快,寻优能力强,稳定性好。

关键词: 含水层参数; 粒子群算法; 参数估计; 抽水试验

中图分类号: TV138

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)01-0100-04

Applications of the improved particle swarm algorithm to estimate aquifer parameters

YANG Chendong¹, CHANG Anding², LI Wensheng¹, ZHANG Ming¹

(1. School of Science, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China;

2. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: To analyze pumping test data can supply a new method for estimating aquifer parameters. The particle swarm algorithm improved in terms of particle diversity increased convergence speed and accuracy of the algorithm. The improved particle swarm optimization algorithm was applied to estimate the aquifer parameters. The calculated results were compared with the other methods, and the estimated values of parameters under different initial scopes were analyzed and discussed. The results showed that, the relative errors of improved particle swarm algorithm (which were 7.3% and 4.5%, respectively) were smaller than the relative errors of the other methods, and the objective function value was also relatively smaller, reaching 0.335×10^{-5} ; For different initial parameter ranges, the improved algorithm obtained a satisfactory parameter estimation result and maintained a high rate of optimization search. Based on pumping test data, the results of improved particle swarm optimization algorithm for estimating aquifer parameters were more effective and reliable with fast convergence speed, strong optimization ability and good stability.

Key words: aquifer parameter; particle swarm optimization; parameter estimation; pumping test

导水系数和储水系数等参数是非常重要的含水层参数,也是地下水资源开发和评价的基本数据,分析非稳定流抽水试验数据是确定含水层参数的重要途径, Su shil K. S. 方法^[1]及直线图解法^[2]等传统方法自身具有不精确、求解过程繁琐等局限性,对此,人们尝试用不同的方法进行改进^[3-4],其中一些学者在含水层参数确定中引入智能优化算法,表现出一定优越性^[5-8]。作为一种典型的群智能优化算法,标准粒子群(PSO)由于其思想简单、参数少、容

易实现等优点,被广泛应用到各个领域^[9-10]。然而,PSO算法不能以概率1收敛到全局最优,甚至是局部最优^[11],在迭代后期收敛缓慢。鉴于此,本文研究改进粒子群优化算法的寻优性能,并将改进的粒子群优化算法应用于含水层参数的确定。

1 改进粒子群优化算法

1.1 算法思想

针对 PSO 算法容易陷入局部最优解的缺点,许

收稿日期:2016-09-08; 修回日期:2016-11-24

基金项目:陕西省教育厅科研计划项目(16JK1394)

作者简介:杨陈东(1990-),男,山西平顺人,助教,硕士,主要从事最优化理论与方法方面研究。

多学者尝试对其改进,主要集中在三个方面:一是参数的取值方法;二是保持粒子或粒子群的多样性;三是与其他智能优化算法结合。本文基于第二方面的研究,对标准粒子群优化算法进行改进,改进后未增加粒子群算法的计算难度。

1998 年,Shi 和 Eberhart 将惯性权重 w 引入粒子群优化算法中,用于更新粒子速度^[12],更新方程为(1)式:

$$V_i^{k+1} = wV_i^k + c_1r_1(P_i^k - X_i^k) + c_2r_2(Pg^k - X_i^k) \quad (1)$$

式中: P_i^k 为第 i 个粒子,第 k 代的历史最优位置; Pg^k 为第 k 代粒子全局最优位置。当 $c_1 = 0$ 时,有利于算法改变搜索空间,提高收敛速度,但更容易陷入局部极值^[13]。考虑产生变异粒子: $Xv_i^k = X_i^k + rV_i^k$,其中 r 为收缩因子。比较当前粒子 X_i^k 的适应度 $f^k(i)$ 与变异粒子 Xv_i^k 的适应度 $fv^k(i)$,根据进化思想,如果 $fv^k(i)$ 优于 $f^k(i)$,则把当前粒子淘汰,把变异粒子作为下一代个体。

子群数量影响种群多样性和算法收敛速度^[14]。一般而言,子群数量越多则多样性越好,但是收敛越慢。为均衡算法性能,设置 3 个子群。由于惯性权重 w 越大,局部搜索能力增强,有助于算法收敛; w 越小,局部搜索能力减弱,但有利于扩展搜索区域,避免陷入局部最优。目前常用 Shi Yuhui 等^[15] 提出的线性递减权值策略,即 $w^k = (w_2 - w_1)(k_{\max} - k)/k_{\max} + w_1$ 更新 w ,有助于增加种群多样性。文中 3 个子群分别采用 w_1 、 w_2 和线性递减权值策略作为惯性系数进行进化。所有子群共用唯一的全局最优位置 Pg ,同时,各子群间可通过 Pg 进行信息交流,从而达到较好的进化效果。

1.2 算法实现

改进粒子群算法步骤如下:

步骤 1:将粒子群大致等分为 3 个子群,对粒子群在搜索空间随机产生初始解 X ;随机产生较小的初始速度 V ;计算各粒子的适应度 $f(i)$,并确定全局最优位置 Pg ,及最优适应度 fg ;设置计数 $k = 1$;

步骤 2:计算 $w_3^k = (w_2 - w_1)(k_{\max} - k)/k_{\max} + w_1$,根据各粒子归属的不同子群,分别将 w_1 、 w_2 、 w_3 代入公式: $V_i^{k+1} = w_j^k V_i^k + c \cdot rand(Pg^k - X_i^k)$, ($j = 1, 2, 3$) 更新各粒子速度。计算收缩因子 $r = (w_1 + w_2 + w_3)/3$,确定变异粒子位置 $Xv_i^k = X_i^k + rV_i^k$ 。

步骤 3:检查新粒子是否超出搜索范围。若是,用搜索空间的随机向量代替原粒子位置,并计算适应度 $fv^k(i)$ 。

步骤 4:对第 i 个粒子判断 $fv^k(i)$ 是否优于 $f^k(i)$ 。若是,更新粒子位置 $X_i^{k+1} = Xv_i^k$,同时更新适应度 $f^{k+1}(i) = fv^k(i)$,进而确定全局最优位置 Pg^{k+1} 及其适应度 fg^{k+1} ;否则,粒子位置不变。

步骤 5:更新 $k = k + 1$,判断是否满足终止条件 ($k > k_{\max}$ or $fg^{k+1} < \varepsilon$),若是,将结果输出;否则转向步骤 2。

2 泰斯公式与目标函数

2.1 泰斯公式

在含水层为均质、各向同性和无延伸的条件下,以固定流量进行抽水,在抽水开始 t 时刻,在含水层中距抽水井距离为 r 处的水位降深可以表示为:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (2)$$

式中: Q 为抽水流量, m^3/s ; s 为水位降深, m ; T 为含水层导水系数, m^2/s ; $W(u)$ 为泰斯井函数,其表达式为(3)式:

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (3)$$

式中: u 为无量纲时间,其表达式为(4)式:

$$u = \frac{r^2 \mu_e}{4Tt} \quad (4)$$

式中: μ_e 为含水层的弹性释水系数,无量纲。

(3) 式中需要计算广义积分数值,利用 Strivastava R 给出的近似表达式进行计算^[6]:

$$W(u) = \begin{cases} -\ln u + a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3 + a_4 u^4 + a_5 u^5, & u \leq 1 \\ \frac{1}{ue^u} \frac{b_0 + b_1 u + b_2 u^2 + b_3 u^3 + u^4}{c_0 + c_1 u + c_2 u^2 + c_3 u^3 + u^4}, & u \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

其中常数分别为:

$$\begin{aligned} a_0 &= -0.57722; a_1 = 0.99999; a_2 = -0.24991; \\ a_3 &= 0.05519; a_4 = -0.00976; a_5 = 0.00108; \\ b_0 &= 0.26777; b_1 = 8.63476; b_2 = 18.05902; \\ b_3 &= 8.57333; c_0 = 3.95850; c_1 = 21.09965; \\ c_2 &= 25.63296; c_3 = 9.57332。 \end{aligned}$$

使用上述参数及公式相对误差将保持在 0.001% 以内^[6]。

2.2 建立目标函数

在应用改进粒子群算法时,要求参数能使最小二乘目标函数达到最小:

$$\varphi(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i^e - s_i^o)^2 \quad (6)$$

式中： s_i^e 为第 i 时刻观测孔的水位降深的仿真值, m;
 s_i^o 为第 i 时刻观测孔的水位降深实测值, m; θ 为待
估参数向量。

3 数值实验

3.1 实验数据和实验条件

在 Matlab 语言环境下, 引用文献[2]中抽水实
验数据进行数值实验, 原始数据见表 1。实验中的
抽水流量为 $0.073\text{ m}^3/\text{s}$, 抽水持续 800 min , 观察孔

表 1 抽水试验水位随时间降深原始数据

抽水时间/min	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	180	240	300	360	420	480	540	600	660	720	800
水位降深/mm	24	66	99	123	150	165	198	219	240	258	276	288	300	312	321	372	405	435	456	477	495	513	519	531	543	558

3.2 实验结果与分析

3.2.1 算法可靠性 表 2 给出了本文算法及其他
方法分析该抽水实验数据的计算结果。从表 2 中可
以观察到, 文中所提改进粒子群算法所得含水层参
数值与其他方法接近, 与差异最大的直线图解法估
计参数值相对误差分别为 7.3% 和 4.5%, 小于已有
方法最大相对误差 8% 和 10% (均相对于直线图解
法所求参数结果)。所求目标函数 $\varphi(\theta)$ 优于其他
方法, 由此可知, 改进粒子群算法计算结果是可靠
的, 并且具有更高精度。

表 2 不同方法计算结果比较

方法	$T/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1})$	μ	$\varphi(\theta)/10^{-5}$
文中算法	2.78	0.064	0.335
混沌粒子群算法 ^[4]	2.80	0.064	0.698
粒子群算法 ^[3]	2.88	0.060	4.108
Su shil K. S. 方法 ^[1]	2.76	0.060	8.530
直线图解法 ^[2]	3.00	0.067	54.748

距离主井 30.48 m。粒子个数分别取 30 和 60; 学习
因子 $c = 1.759$; 迭代次数达到最大迭代次数 120 或
者目标函数小于 1×10^5 作为算法终止条件; $w_1 =$
 0.4 、 $w_2 = 0.9$; 实验中, 初始状态下储水系数下限值
取 0, 上限值为 0.5, 导水系数下限值取 0, 上限值分
别取文献[2]所求结果的 100、200、500 倍。相同条
件下, 运行 100 次所得目标函数值取平均, 作为平均
最优值。如果目标函数精度小于 1×10^{-5} , 认为算
法寻优成功, 计算寻优率。

3.2.2 算法稳定性 图 1 给出了在导水系数上限
取文献[2]中所得结果的 100 倍, 粒子个数取 60, 改
进粒子群算法执行 100 次过程中, 目标函数分布情
况。由图 1 可知, 算法执行 100 次过程中, 有 100 次
寻优成功, 寻优率为 100%, 平均运行时间为
 0.49252 s 。由此知道, 改进粒子群算法运行时间较
短, 寻优效率高。

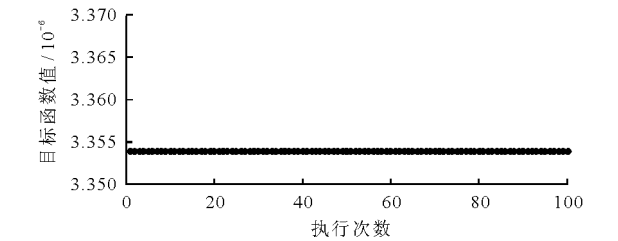


图 1 改进粒子群算法执行目标函数分布

表 3 为导水系数上限值分别取文献[2]中所求
结果的 100、200、500 倍, 粒子数目为 30、60 的条
件下, 计算得到的寻优率和平均最优值。

表 3 各算法寻优结果比较

粒子数	待估参数 倍数	文中算法		混沌粒子群算法		粒子群算法	
		寻优率/%	平均最优值/ 10^{-5}	寻优率/%	平均最优值/ 10^{-5}	寻优率/%	平均最优值/ 10^{-5}
$N = 30$	100	99	0.53	81	0.84	62	33.8
	200	93	0.46	80	0.80	26	65.4
	500	87	2.92	79	0.96	4	450
$N = 60$	100	100	0.34	99	0.69	96	0.7
	200	99	0.39	98	0.70	55	11.2
	500	97	0.47	97	0.71	15	150

由表 3 可知, 随着初始状态参数范围不断扩大,
改进粒子群算法均能达到较好寻优效果, 这表明改
进粒子群算法受到初始值选取的影响较小。改进粒

子群算法寻优率高, 保持了较好的稳定性。
3.2.3 算法收敛性 图 2 为导水系数上限值取文
献[2]中所求结果的 100 倍、粒子数目取 60 条件

下,粒子群算法(PSO)与改进粒子群算法收敛曲线。由图 2 可知,改进粒子群算法在迭代前期能够迅速收敛,当迭代 16 次时,改进算法目标函数精度达到 1×10^{-5} ,迭代 19 次时,改进算法收敛到最小值 0.335×10^{-5} 。

迭代 16 次时模拟水位降深数据如表 4 所示,表 4 中模拟数据与实测数据已经十分接近。由此可知,改进粒子群算法在保证达到好收敛效果的前提下,具有更快的收敛速度。

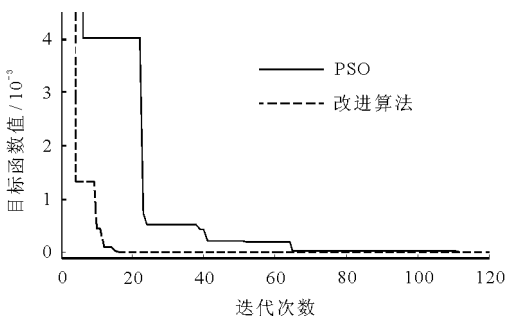


图 2 粒子群算法与改进算法收敛曲线比较

表 4 迭代 16 次时模拟水位降深数据

抽水时间/min	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
水位降深/mm	25	65	98	124	146	165	196	221	241	259	275	289	301
抽水时间/min	110	120	180	240	300	360	420	480	540	600	660	720	800
水位降深/mm	313	323	372	407	434	457	476	492	507	520	532	543	556

4 结 论

鉴于含水层参数估计的复杂性,本文尝试将改进的粒子群优化算法应用到各参数估计中。根据实验结果,利用改进的粒子群优化算法可以成功确定含水层参数,并且计算结果可靠稳定。该结果表明:

- (1)改进粒子群算法估计含水层参数时,精确度高并且有较好的寻优率;
- (2)改进算法对各参数初始范围不敏感,能够在较大初始范围得到令人满意的结果,并且仍然保持较高寻优率。
- (3)改进算法收敛速度更快,事实上改进算法计算复杂度与粒子群算法相差不大。

参考文献:

[1] Singh S K. Confined aquifer parameters from temporal derivative of drawdowns[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127 (6): 466 - 470.

[2] Department of the Interior U. S. (USDI). Groundwater Manual[M]. Bureau of Reclamation. Supt. of Documents , U. S. Govt . Printing Office , Washington ,D. C. ,1977.

[3] 赵瑞平,常安定,郭建青,等. 基于水位恢复试验数据估计含水层参数的模糊线性回归法[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2013, 41(2):210 - 214.

[4] 廖梓龙,魏永富,郭中小,等. 一种基于 MATLAB 的渗透系数确定方法[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(2): 175 - 178.

[5] 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.

[6] 周秀秀,常安定,郭建青,等. 混沌粒子群优化算法在确定含水层参数中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2013,24(1):96 - 99.

[7] 袁华,刘方,刘元会. 等. 确定含水层参数的单纯形 - 混沌优化算法[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(5):77 - 79.

[8] 王晓晨,常安定,王静云,等. 各向异性含水层参数估计的差分进化算法[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2015, 43(4):223 - 228.

[9] 杨菊香. 基于改进粒子群算法的水库优化调度研究与应用[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(4):164 - 167.

[10] 孙艳,刀海娅. 自适应变异粒子群算法与支持向量机在农业用水预测中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015,26(2):231 - 240.

[11] Bergh FVD. An analysis of particle swarm optimizers [D]. Pretoria: Faculty of Natural and Agricultural Science, University of Pretoria, 2001.

[12] Shi Y, Eberhart R. A Modified Particle Swarm Optimizer [C]//. In: IEEE World Congress on Computational Intelligence, Anchorage, AK, USA, 1998.

[13] 俞智慧,吴烈阳,吴文欢,等. 一种新的基于三种进化模型的粒子群优化算法[J]. 微计算机应用, 2011, 32 (12):9 - 13.

[14] Ebethart R C, Shi Yuhui. Comparison between genetic algorithm and particle swarm optimization[J]. Lecture Notes in Computer Science (Evolutionary Programming VII), 2005,1447:611 - 616.

[15] Shi Yuhui, Eberhart R C. Parameter selection in particle swarm optimization[J]. Lecture Notes in Computer Science (Evolutionary Programming VII), 2005,1447:591 - 600.