

水文地质参数识别的连续禁忌搜索改进算法

王 佩¹, 朱国荣¹, 江思珉²

(1. 南京大学水科学系, 南京 210093; 2. 同济大学水利工程系, 上海 200092)

摘要: 水文地质参数的正确与否是构建地下水数值模型的根本, 而参数寻优结果很大程度上取决于优化算法的选择。禁忌搜索算法是一种广泛应用于组合优化问题的启发式全局寻优算法, 但在连续函数优化领域应用比较少。基于上述考虑, 本文首先引入求解连续函数优化问题的连续禁忌搜索算法并对其进行改进, 进而提出一种连续禁忌搜索改进算法 (ICTS), 最后将其与地下水模型耦合进行水文地质参数识别。算例研究表明, ICTS 算法较其他算法 (CTS, SGA, Micro-GA, PSO) 求解效率提高 1.87 ~ 4.64 倍, 求解精度提高 1.08 ~ 12.86 倍。因此 ICTS 算法在参数反演计算中求解精度高、收敛速度快、寻优性能强, 是一种值得推广的水文地质参数识别方法。

关键词: 连续禁忌搜索算法; 水文地质参数; 参数识别; 地下水模拟

中图分类号: P641.2; P641.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2010)06-0017-05

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。常用的求解方法有逐个修正法、单纯形法、共轭梯度法等。上述方法均属于局部邻域搜索算法, 因而易陷入局部最优而难于获得全局最优解^[1]。近年来, 能搜索到全局最优解的启发式搜索算法 (遗传算法、微粒群算法等) 正受到人们越来越多的青睐, 并相继应用于水文地质领域^[2-3]。

本文涉及到的禁忌搜索算法是一种亚启发式 (meta-heuristic) 搜索算法。Zheng 等首次采用禁忌搜索算法 (Tabu Search, 简称 TS) 求解一维地下水模型的水文地质参数分区优化问题, 并指出 TS 算法可同时识别参数结构与参数值^[4]。Tung 等将 TS 算法推广应用于二维地下水模型的水文地质参数分区优化问题^[5]。陈静等利用 TS 算法进行三维地下水模型的水文地质参数反演^[6]。Tan 等将分区方法与 TS 算法相结合, 提出一种优化算法, 对渗透系数场的空间分布特征进行识别^[7]。上述研究包括水文地质参数结构识别与数值优化两种情况, 其中参数结构识别是一种组合优化问题, 组合优化禁忌搜索算法在此领域已取得显著效果。但对于水文地质参数数值优化问题, 其本身属于连续函数优化问题。基于此考虑, 本文将连续禁忌搜索算法 (Continuous tabu search, 简称 CTS) 引入水文地质参数数值求解问题中, 旨在为水文地质逆问题求解

提供一种新方法。

1 连续禁忌搜索改进算法

禁忌搜索算法已成功应用于多种组合优化问题, 却鲜有研究将其应用于连续优化问题。Hu 首次将禁忌搜索算法应用于连续优化问题, 但算法结构有别于 Glover 的禁忌搜索算法^[8]。Siarry 等在 Glover 的禁忌搜索算法的基础上提出连续禁忌搜索算法^[9]。Chelouah 等分别采用多样化搜索与局部搜索相结合的方式, 以及单纯形方法与连续禁忌搜索算法相耦合的方式对连续禁忌搜索算法进行了改进^[10-13]。本文根据水文地质参数优化问题的特点, 对 Siarry 等的 CTS 算法进行适当修改, 提出一种连续禁忌搜索改进算法 (Improved continuous tabu search, 简称 ICTS)。

文中提出的 ICTS 算法主要包括标准化求解空间、初始解、邻域解、循环初始解、禁忌列表、特赦准则以及终止条件等几个方面。

1.1 标准化求解空间

水文地质参数数值往往存在数量级上的差异, 若直接对原始参数空间进行离散, 势必增加剖分难度, 影响求解效率和精度。

为解决上述问题, 本文引入 Chelouah 等的标准化 [0, 1] 空间离散技术, 并根据式 (1) 得到参数实际值, 进而计算目标函数值。

$$q = p \times (q_{ub} - q_{lb}) + q_{lb} \quad (1)$$

式中: p ——在标准化 [0, 1] 空间按照均匀分布生成的

随机数;

q ——参数实际值;

收稿日期: 2009-11-02; 修订日期: 2010-03-21

作者简介: 王佩 (1986-), 女, 博士研究生, 从事地下水数值模拟技术研究。

2.1.1 数学模型

当满足一定假设条件,取地下水流动方向为 x 轴的正向,取示踪剂注入点为坐标原点,上述实验可用如下数学模型表示:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad 0 < x < +\infty, t > 0 \quad (6)$$

$$C(x, 0) = 0, \quad 0 \leq x < +\infty \quad (7)$$

$$C(0, t) = C_0, \quad t > 0 \quad (8)$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} C(x, t) = 0, \quad t > 0 \quad (9)$$

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)。

上述数学模型在距离原点 x 处的示踪剂相对浓度 C_R 的解析解为:

$$C_R = \frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x-vt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left(\frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x+vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (10)$$

2.1.2 优化模型

文中采用最小化平均误差绝对值建立如下优化模型:

$$\min E(v, D) = \sum_{i=1}^m |C_i(v, D) - C_i^0| / m \quad (11)$$

$$v^a \leq v \leq v^b \quad (12)$$

$$D^a \leq D \leq D^b \quad (13)$$

式中: $E(v, D)$ ——目标误差函数;
 $[v^a, v^b]$ —— v 的取值区间;
 $[D^a, D^b]$ —— 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,由解析解公式计算得出。

2.1.3 模拟优化结果

李竞生等^[14]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 1 000, 种群数为 50, 地下水流速 v 取值区间为 $(0, 1\,000)$ m/d, 弥散系数 D 取值区间为 $(0, 0.1)$ m²/d。文中使用 CTS、ICTS 算法在 CPU 主频为 2.19GHz 的计算机上进行参数寻优计算,邻域解个数均取为 4,参数取值区间

与 SGA 中的一致。上述三种算法的计算结果对比见表 1。

从表 1 可以得出:ICTS 算法较 CTS 算法,目标误差函数数值显著减小,求解效率提高近 5 倍。ICTS 与 SGA 算法相比,求解精度提高接近 1 倍。根据图 2 可知,使用 ICTS 算法得到的优化参数进行正演计算时,计算结果与观测数据拟合效果好,明显优于 CTS 算法和 SGA 算法求解的拟合效果。由此知 ICTS 算法可以有效解决水文地质参数识别问题。

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)	消耗 CPU 时间 (s)	误差函数值
SGA	34.034 62	0.059 161	—	0.031 694 8
CTS	33.831 21	0.100 000	37.953	0.056 637 3
ICTS	33.571 82	0.055 494	6.719 0	0.015 165 6

(SGA 计算中没有消耗 CPU 时间这一项,因此使用“—”表示。)

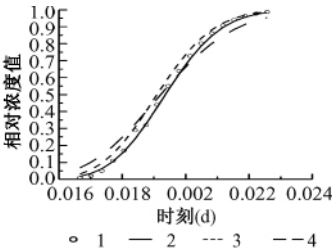


图 2 计算曲线与实测数据拟合图

Fig. 2 Fitting chart of the calculated curve and observation data

1—观测结果; 2—ICTS; 3—SGA; 4—CTS

2.2 实例 2: 二维承压水流问题参数反演

2.2.1 模型假设

设计一个二维非均质各向同性承压含水层水流模型来讨论如何利用 ICTS 算法来反求水文地质参数。含水层为边长 2000m 的正方形区域,南北为定水头边界,东西为隔水边界;区域内存在两个非均质分区,抽水井(变流量抽水)和观测孔的位置如图 3 所示,两个参数分区分别为 ABCD 和 DCEF。为方便研究,首先假设了导水系数 T 和贮水系数 S_s (见表 2),正演出 6 个计算时段末所有结点水头分布,将其中 5 个结点的水头值作为假设的观测水头。

2.2.2 优化模型

根据最小二乘法的原理,采用最小化误差平方和作为目标函数,建立如下优化模型

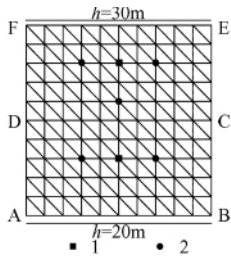


图 3 理想模型参数分区及有限元剖分

Fig.3 Parameter zonation and finite element subdivision of an ideal model

1—抽水井;2—观测井

$$\min E(T_1, T_2, S_{s1}, S_{s2}) = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^5 [H_j(t_i) - H_j^{ob}(t_i)]^2 \quad (14)$$

$$\text{Subject to } T_{\min} \leq T_i \leq T_{\max} \quad (i = 1, 2) \quad (15)$$

$$S_{s\min} \leq S_{si} \leq S_{s\max} \quad (i = 1, 2) \quad (16)$$

式中: $E(T_1, T_2, S_{s1}, S_{s2})$ ——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;

表 2 参数识别结果及误差分析

Table 2 Parameter identification results and Error estimation analysis

算法	消耗 CPU 时间 (s)	误差函数值	分区 1		分区 2	
			T_1 (m ² /d)	S_{s1} (×10 ⁻⁴)	T_2 (m ² /d)	S_{s2} (×10 ⁻⁴)
			真值 300	真值 4.00	真值 70	真值 1.00
Micro-GA	2min28.781	0.20589	317.45098	5.10	69.56863	0.60
PSO	2min44.593	0.34382	500.0000	5.80	78.02363	0.50
CTS	4min0.6	263.17890	314.3522	0.10	364.60550	0.10
ICTS	51.750	0.02480	299.9981	3.93	69.00958	1.19

根据表 2,分析比较消耗 CPU 时间可知:ICTS 算法在最短的时间 51.750s 内即可达到预期目标,求解效率明显优于其他三种算法。同时,ICTS 算法的求解精度较 Micro-GA 算法和 PSO 算法提高了 12.86 倍;使用 CTS 算法求解精度最低,究其原因是在算例中优化参数之间相差接近 8 个数量级,而 CTS 算法中邻域剖分时未进行标准化处理,这样增加了参数寻优困难,最终影响了求解精度。实例 2 的优化结果表明,ICTS 算法在求解连续多参数的水文地质参数反演问题中有着很高的效率和求解精度。

3 结论

ICTS 算法是求解多极值多参数连续函数优化问题的有力工具。本文根据水文地质参数优化问题的特点,重点介绍了 ICTS 算法的基本原理和具体实现,并

$H_j^{ob}(t_i)$ —— t_i 时刻节点 j 的观测水头值。

2.2.3 模拟优化结果

为了进一步验证 ICTS 算法的可靠性并且分析其优化效果,对该二维承压含水层水文地质参数反演问题分别采用 ICTS 算法、CTS 算法,小生境遗传算法 (micro-GA)和微粒群算法 (PSO)进行参数优化计算。在反演计算时,两个区域导水系数 T 的取值范围均为 (10~500)m²/d,贮水系数 S_s 的取值范围均为 (1.0E-7~1.0E-3)。ICTS 算法与 CTS 算法中邻域解个数均为 6。CTS 算法中最大搜索半径为 1,最小搜索半径为 0.001,其他半径根据几何剖分原则计算。micro-GA 采用二进制编码形式,种群数为 5,每个参数对应的编码长度为 8,交叉概率为 0.5,变异概率为 0.02,小生境相对距离极限值为 0.1。PSO 算法中粒子群数为 10,惯性权重从 0.8 线性下降到 0.4,个体加速系数和群体加速系数均为 2。在 CPU 主频为 2.19Ghz 的计算机上分别使用 ICTS、CTS、Micro-GA、PSO 算法进行计算,其优化结果对比见表 2。

将其应用于水文地质参数识别这一类连续优化问题中。应用研究模拟优化结果可靠,满足计算精度。与其他智能优化算法 (CTS,SGA,micro-GA,PSO 等)相比,ICTS 算法具有收敛速度快,以更少的 CPU 消耗时间获得更高的求解精度等优势,特别是对于多变量参数优化问题,只需对邻域解数量进行相应调整,操作简单,易于实现。此外 ICTS 算法本身适合并行计算求解,对于大型复杂问题可以通过算法并行化研究提高参数寻优速度。因此 ICTS 算法可以有效求解多参数大型复杂水文地质逆问题。

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.
[2] 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.
- [3] 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.
- [4] Zheng C, Wang P. Parameter structure identification using tabu search and simulated annealing [J]. Advance in Water Resource, 1996, 19 (4): 215 – 224.
- [5] Tung C P, Chou C A. Application of tabu search to ground water parameter zonation [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2002, 38 (4): 1115 – 1125.
- [6] 陈静, 周志芳, 周玉新. 基于 tabu 搜索法的水文地质参数反演 [J]. 金属矿山, 2005 (3): 46 – 48.
- [7] Tan C C, Tung C P, Tsai F T-C. Applying zonation methods and tabu search to improve the ground-water modeling [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44 (1): 107 – 120.
- [8] Hu, N. Tabu search method with random moves for globally optimal design [J]. International journal for numerical methods in engineering, 1992, 35: 1055 – 1070.
- [9] Siarry P, Berthiau G. Fitting of tabu search to optimize functions of continuous variables [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1997, 40: 2449 – 2457.
- [10] Chelouah R, Siarry P. Tabu Search applied to global optimization [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 123: 256 – 270.
- [11] Chelouah R, Siarry P. A hybrid method combining continuous tabu search and Nelder – Mead simplex algorithms for the global optimization of multimimima functions [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 161: 636 – 654.
- [12] 江思珉, 朱国荣, 孙振波, 等. 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 – 5.
- [13] 孙振波, 朱国荣, 江思珉, 等. 地下水模型的快速自适应组合网格求解方法 [J]. 水文地质工程地质, 2010, 37 (1): 19 – 21.
- [14] 李竞生, 姚磊华. 含水层参数识别方法 [M]. 北京: 地质出版社, 2003.

Improved continuous tabu search algorithm for hydrogeology parameters identification

WANG Pei¹, ZHU Guo-rong¹, JIANG Si-min²

(1. Department of Hydro-sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Parameter identification is the fundamental stage to build a groundwater numerical model, and the reliable hydrogeological parameters are very important. To a great extent, the final optimal results for hydrogeological parameters lie on the optimization methods. Tabu search method is a meta-heuristic global optimization procedure which has been widely used to solve various combinational optimization problems. However, only a few works have adopted the tabu search method to the continuous variables functional optimization. Thus, this article introduces a continuous tabu search algorithm to solve these problems. Furthermore, a new continuous tabu search algorithm (ICTS) is proposed based on several betterments and amendments. Finally, the research applies ICTS to the hydrogeological parameters identification issues. The case study indicates that the efficiency of ICTS is improved and is 1.87–4.64 times more than that of the other algorithms (SGA, Micro-GA, PSO, CTS), and the accuracy increases. ICTS is of strong ability to obtain global minima with fast convergence speed and the high robustness. It is worth to be popularized in the realm of hydrogeology research.

Key words: continuous tabu search algorithm; hydrogeological parameters; parameter identification; groundwater modeling