

文章编号: 1000-7598 (2009) 05-1527-05

基于粒子群支持向量机的三维 含水层渗流参数反馈识别

姜谟男^{1,2}, 梁 冰³(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2.大连海事大学 道桥所, 大连 116026;
3.辽宁工程技术大学 力学与工程科学系, 阜新 123000)

摘 要: 实际岩土体含水层渗流一般是三维、空间各向异性的。针对三维渗流参数识别的数值正算时间过长, 易限于局部最优解的问题, 提出了一种基于支持向量机和粒子群优化算法的含水层渗流参数反馈识别方法。采用正交试验设计和有限元程序生成学习样本, 利用支持向量机高度非线性映射能力, 建立水头与渗流参数之间的映射关系, 进而以识别误差目标函数为适应值, 通过粒子群优化算法反馈搜索得到渗流参数。该方法可直接利用现有大规模渗流有限元程序进行三维含水层渗流参数识别。算例表明, 该方法具有良好的效率和精度。

关 键 词: 三维渗流; 参数识别; 支持向量机; 粒子群优化

中图分类号: TU 452; TB 115

文献标识码: A

Feedback identifying seepage parameters of 3D aquifer based on particle swarm optimization and support vector machine

JIANG An-nan^{1,2}, LIANG Bing³(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Bridge and highway research institute, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
3. Department of Mechanics and Engineering Sciences, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: For actual engineering, the aquifers are generally three dimensional anisotropic problems, aiming at the computing time too long and local optimization limitation of conventional method, a new method of three dimensional seepage parameters identification based on support vector machine and particle swarm optimization is proposed. Adopting orthogonal experimental design and finite element program producing training samples, using SVM mapping, the nonlinear relation between water heads and seepage parameters is established. Then taking error objective function as the fitness value of particle swarm optimization, the seepage parameters should be identified by PSO. The method can directly utilize the large scale seepage finite element program. The computing example is given to prove that the method has favorable efficiency and precision.

Key words: three dimensional seepage; parameter identification; support vector machine; particle swarm optimization

1 引 言

渗流是岩土工程领域的重要力学现象, 合理地识别渗流参数是进行岩土体渗流计算的基础和关键。一般说来, 渗流参数识别方法可分为理论解析法、试验法和反分析法。理论解析法基于太多的假设条件, 很难适用于实际结构复杂的岩土体; 试验法需要消耗较大的人力和物力, 并且采样数量不够或采样缺乏代表性也会影响识别精度。现场原位水

头观测充分包含了实际工程的物性信息, 利用观测信息进行岩土体渗流参数识别具有很强的适应性, 因此, 反分析法引起了国内外学者的高度重视。

早在 1986 年, 国外就有关于渗流反分析的数值解法的研究^[1], Tsurumi^[2]研究了基于有限元方法进行稳态含水层的识别, Zijlstra^[3]建立了基于梯度搜索的含水层参数识别方法。国内何光渝等^[4]对渗流力学问题中的数值反演解进行了比较详细的推导, 刘杰等^[5]研究了改进遗传算法在渗流参数反演

收稿日期: 2007-09-30

基金项目: 中国科学院武汉岩土力学研究所重点实验室资助课题 (No. Z110605); 国家自然科学基金 (No. 50508007)。

第一作者简介: 姜谟男, 男, 1971 年生, 博士后, 副教授, 主要从事地下工程反馈分析研究。E-mail: jiangannan@163.com

中的应用,刘先珊等^[6]研究了渗流参数反分析的交替迭代的神经网络方法,李守巨等^[7]提出并研究了基于蚁群算法的含水层参数识别的方法。

岩土体渗流参数的反馈识别本质上是优化问题,实际渗流工程问题大多是三维各向异性的。相比二维问题,三维渗流参数识别的困难主要在于:随着计算规模的增大和渗流参数的增多,正算时间消耗太多,且参数的快速收敛性不容易保证。针对上述问题,本文在已有的研究基础上,引入全局优化的群体智能算法——粒子群算法和基于统计学习理论的支持向量机方法,结合正交试验设计和三维渗流有限元,建立一种含水层渗透系数的三维数值识别方法,并以大连某地区的三维含水层作为算例,验证方法的有效性。

2 渗透系数三维数值反馈识别

2.1 渗透系数反馈识别优化问题的提法

渗透系数的反馈识别基本思想是先假设1组渗透系数作为初值,用数值法计算水头,求出水头计算值与实测值之间的误差,不断反馈修改渗透系数并计算水头,直到水头计算值和实测值很好拟合时为止,此时的渗透系数即为所求。根据模型参数的特定物理意义,可设定上下限,如果区域内有 m 个观测值,渗透系数识别构造有约束的优化问题为

$$\min E(p_1, p_2, \dots, p_n) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [H_i^0 - H_i(p_1, p_2, \dots, p_n)]^2, \quad (1)$$

$$p_i^a \leq p_i \leq p_i^b, \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

式中: H_i^0 为实测水头值, $H_i(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 为计算水头值; H_i^0 与 H_i 具有相同时间和空间坐标; p_1 、 p_2 、 \dots 、 p_n 均为参数; m 为观测值的个数; n 为参数的个数; p_i^a 和 p_i^b 为 p_i 的上、下限。

对于某水头测点 $h = h(x, y, z, t)$,假设在区域 Ω 内符合达西定律的非均质各向异性可压缩土体的三维空间非稳定渗流的水头函数所满足的基本方程式为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (\text{在 } \Omega \text{ 内}) \quad (2)$$

式中: k_x 、 k_y 、 k_z 是以 x 、 y 、 z 轴为主轴方向的渗透系数,相当于式(1)的 p_i ; S_s 为单位贮水量或贮水率; Ω 为渗流区域。如果忽略土体压缩性,则式(2)等号右侧为0。式(1)的 $H_i(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 可以通过式(2)计算获得,但式(2)为复杂的隐

式微分方程,一般可根据变分原理推导出如下的离散形式的有限元方程求解:

$$[K]\{h\} = \{F\} \quad (3)$$

式中:[K]为导水矩阵; $\{h\}$ 为水头; $\{F\}$ 为自由项。

2.2 基于支持向量机的三维渗流响应面函数

渗流参数识别需要反复正算,三维有限元计算需要消耗大量时间,给识别带来时间上的困难。响应面法^[8]是近年发展的解决数值计算时间过长的方法,采用多项式函数或神经网络等非线性模型拟合逼近功能函数,而近年出现的支持向量机(SVM)是建立在VC维理论和结构风险最小(SRM)原理基础上的机器学习工具,较好地解决了小样本、非线性、高维数等实际问题,能以任意精度逼近任意函数,克服了神经网络过学习问题,为响应面函数模型提供了新的选择^[9-10]。支持向量机理论如下:

考虑用线性回归函数 $f(x) = wx + b$ 拟合数据 $\{x_i, y_i\}$, $i = 1, \dots, n$, $x_i \in \mathbb{R}^d$, $y_i \in \mathbb{R}$ 的问题,并假设所有训练数据都可以在精度 ε 下无误差地用线性函数拟合,考虑到允许拟合误差的情况,引入松弛因子 $\xi_i \geq 0$ 和 $\xi_i^* \geq 0$,优化目标为最小化 $\frac{1}{2} \|w\|^2 + c \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*)$,常数 $c > 0$,称为惩罚因子。求解其对偶问题,即对Lagrange因子 α_i 、 α_i^* 求解目标函数的最大值,得回归函数为

$$f(x) = (wx) + b = \sum_{i=1}^n (\alpha_i^* - \alpha_i)(x_i x) + b^* \quad (4)$$

式中:Lagrange因子 α_i 、 α_i^* 对应的样本就是支持向量; b^* 为分类阈值; $x_i x$ 为内积运算。本文采用径向基高斯核函数作为式(4)中的内积运算来实现非线性函数拟合:

$$k(x, x_i) = \exp \left\{ -\frac{|x - x_i|^2}{\sigma^2} \right\} \quad (5)$$

通过对一定范围内渗流参数组合正交设计方案进行三维有限元计算,获得渗流参数与测点水头对应关系的数据样本,利用这些样本训练支持向量机,从而建立三维渗流的支持向量机响应面函数。渗流参数与其计算水头之间的支持向量机模型为

$$\left. \begin{aligned} \text{SVM}(P): \mathbb{R}^n &\rightarrow \mathbb{R} \\ H &= \text{SVM}(P) \\ P &= (p_1, p_2, \dots, p_n) \\ H &= (H_1, H_2, \dots, H_m) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: P 为渗流区域的参数; n 为参数的个数; H 为

观测点水头， m 为观测水头的个数。将学习训练获得的 SVM 模型用来计算水头的求解，极大地提高计算速度。研究表明^[9]，惩罚因子 c 和核参数 σ 的选取不同，对应着不同的支持向量，对 SVM 拟合精度有较大影响，这些参数选取也可看作优化问题。

2.3 基于粒子群的优化求解

如前所述，渗流参数求解以及 SVM 惩罚因子 c 和核参数 σ 的选取都是优化问题，传统优化方法存在如下问题：①容易限于局部最优；②由于目标函数不是显式，求导困难，算法无法实施。随着计算智能的发展，粒子群优化算法（PSO）以其算法设计简单、全局收敛和计算快速的优点引起人们关注。粒子群优化算法源自模拟鸟群捕食行为，基本思想是：优化问题的每一个解称为粒子，定义适应值函数来衡量每个粒子的优越程度。每个粒子根据自己和其他粒子的“飞行经验”群游达到从全空间搜索最优解的目的^[11-12]。

在第 k 次迭代步中，每个粒子在解空间同时向 2 个点接近，第一个点是整个粒子群中所有粒子在历代搜索过程中所达到的最优解，即全局最优解 $gbest$ ，另一个点则是每个粒子在历代搜索过程中自身所达到的最优解，即个体最优解 $pbest$ 。迭代公式如下：

$$v_{id}^k = w_i v_{id}^{k-1} + c_1 rand_1(pbest_i - x_{id}^{k-1}) + c_2 rand_2(gbest - x_{id}^{k-1}) \quad (7)$$

$$x_{id}^k = x_{id}^{k-1} + v_{id}^k, \quad (i=1,2,\dots,m; d=1,2,\dots,n) \quad (8)$$

式中： m 为粒子的群体规模； n 为粒子的维数； v^k 为第 k 迭代步时粒子移动的速度； x^k 为迭代步为 k 时粒子空间位置，即解向量； c_1 和 c_2 分别为正常数； $rand_1$ 和 $rand_2$ 为独立的介于 $[0, 1]$ 之间的随机数； w_i 为动量项系数，影响搜索能力的强弱。

将粒子群用于渗流参数的识别以及支持向量机模型的惩罚因子 c 和核参数 σ 的选取，从而建立基于粒子群支持向量机的渗透系数三维数值反馈识别的算法，步骤如下：

(1) 根据工程实际问题，确定岩土体渗透系数的取值范围，并依据正交试验设计原理构造参数组合的计算方案；

(2) 采用三维渗流有限元方法对构造的每一个方案进行计算，获得每个方案对应观测点的水头，并将每个计算方案与对应的水头计算值构成一组学习样本；

(3) 基于上述样本，采用粒子群算法搜索最佳

的支持向量机惩罚因子 c 和核参数 σ ；

(4) 用获得的最佳支持向量机参数，对上面样本学习训练，建立待反演的渗透系数与水头之间的非线性支持向量机模型，代替渗流有限元求解；

(5) 依据待反演的渗透系数与水头之间的向量机模型，以观测水头与计算水头的误差为目标函数，采用粒子群算法搜索待反演的渗透系数。

3 算例研究

采用一个忽略土体压缩性的三维含水层算例进行研究。模型长为 200 m，上游宽、高各为 60 m，下游宽、高各为 50 m，顶板沿上下游方向有坡降，而底板水平。含水层由 2 种介质组成，渗透系数取值范围假定最小为 5×10^{-7} m/s，最大为 80×10^{-7} m/s。渗流场计算的边界条件为：上游边界水头 $h_0 = 80$ m，下游边界流量为 $Q = -6 \times 10^{-6}$ m³/s。均匀布置在含水层高程中间 6 个水头观测点，模型如图 1 所示。

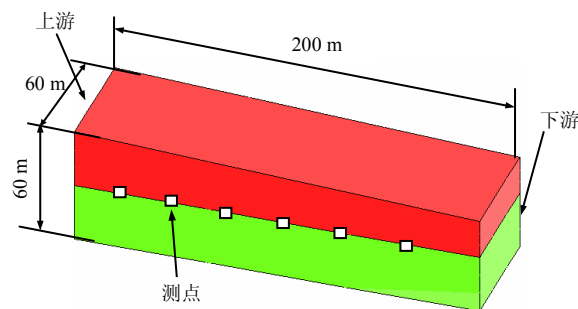


图 1 含水层模型和测点

Fig.1 The aquifer model and measure points

2 种介质的渗透系数在三维空间共有 6 个变量因素，每个因素考虑 5 个水平取值，这些因素水平见表 1。根据正交设计原则，将表 1 的因素水平组合构造 25 个正交设计方案，通过三维渗流软件 FEMWATER 数值计算获得数据样本，表 2 列出了部分样本。通过计算正交样本对支持向量机训练，分别获得 6 个测点的三维渗流响应面 SVM 模型。

表 1 正交设计的渗透系数因素水平

Table 1 The orthogonal experimental design schemes of permeability coefficients

水平	渗透系数/(10 ⁻⁶ m/s)					
	k_{1x}	k_{1y}	k_{1z}	k_{2x}	k_{2y}	k_{2z}
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
3	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
4	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
5	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0

表2 数值计算的部分正交样本

Table 2 Part orthogonal samples by numerical simulation

试验组数	测点计算水头/m					
	1	2	3	4	5	6
1	72.58	64.99	57.11	48.68	38.66	25.10
2	72.97	65.74	58.25	50.63	41.55	29.24
3	73.01	65.82	58.37	50.86	42.26	30.75
4	73.21	65.23	58.99	51.75	43.77	32.12
5	73.34	65.50	59.41	52.32	44.71	33.99
11	73.11	65.02	58.70	51.17	42.78	31.77
12	74.30	68.46	62.39	55.11	49.20	37.92
13	73.76	67.35	60.74	54.13	47.37	38.33
14	72.64	65.12	57.29	48.93	39.46	28.59
15	72.80	65.42	57.78	49.77	40.68	29.44
21	73.38	65.58	59.59	52.47	44.80	34.78
22	72.37	64.58	55.46	47.79	38.16	27.62
23	73.91	67.75	61.43	54.69	45.86	34.78
24	73.60	67.08	60.34	53.21	44.90	32.56
25	73.42	65.70	59.81	52.86	45.52	35.06

6个测点的水头观测值如表3所示,为检验方法的有效性,同时考虑到观测水头总会有误差的影响,在观测值基础上加入2%观测误差的随机噪声。

采用本文的粒子群支持向量机方法,设置粒子群参数,群体规模为50,迭代次数为20,动量项系数为0.375,进行含水层参数识别,获得的识别与观测值见表4。由表4可以看出,观测值与识别值比较接近。粒子群算法在渗流参数识别过程中具有良好的快速收敛性能,图2给出了粒子群算法的适应值随着迭代步数的变化过程。

表3 不同测点的水头值

Table 3 The Simulation observation hydraulic heads

测点编号	1	2	3	4	5	6
水头/m	73.57	65.95	60.09	53.15	45.63	34.84

表4 含水层参数识别值

Table 4 The identification value of aquifer parameter

参数值	渗透系数/(10^{-6} m/s)					
	k_{1x}	k_{1y}	k_{1z}	k_{2x}	k_{2y}	k_{2z}
观测值	2.48	5.56	7.24	4.15	1.22	4.15
识别值	2.56	5.73	7.05	4.27	1.19	4.28

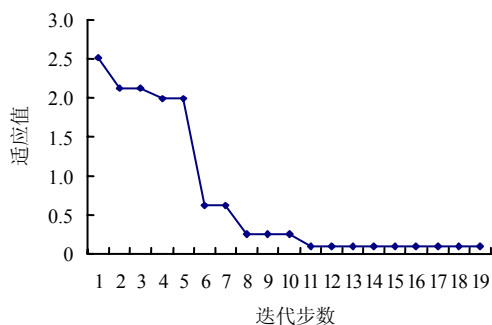


图2 粒子群适应值随迭代收敛过程

Fig.2 PSO fitness value converging following the iteration

4 结论

由于实际渗流问题大多有三维和空间各向异性的特点,三维渗流数值计算规模增大,导致消耗大量时间,传统的方法进行渗流参数识别比较困难。支持向量机较好地解决了小样本、非线性、高维数等实际问题,能以任意精度逼近任意函数,并克服神经网络过学习问题。通过支持向量机对正交试验设计的数值计算样本进行学习,可以在保证映射精度的前提下,代替三维有限元渗流计算,大幅度地提高了计算效率。

将粒子群算法和支持向量机模型相结合,建立的三维含水层渗透系数反馈识别方法,克服了传统优化方法因为三维数值正算的时间长而无法应用以及容易限于局部最优的缺点。由于支持向量机基于结构风险最小化原则及粒子群的快速全局收敛性,很好地保证了参数识别的合理性。

工程算例表明,提出的三维含水层参数识别算法是可行的,具有很快的收敛速度,参数识别精度符合工程要求。该方法可利用现有的三维渗流商用计算软件,进行大规模复杂的三维数值模型计算,能够相应地提高工作效率和解题质量,具有较好的实用价值。

参考文献

- [1] YEH WILLIAM W G. Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology[J]. *Water Resources Research*, 1986, 22(2): 85-108.
- [2] TSURUMI N, UTSUGIDA Y, KAWAHARA M. Parameter identification for steady-state groundwater flow[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 1995, 20(4): 233-252.
- [3] ZIJLSTRA J, DANE J H. Identification of hydraulic parameters in layered soils based on a quasi-Newton method[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 181(1): 233-250.
- [4] 何光渝, 郑书英. 渗流力学问题中的数值反演解[J]. *应用力学学报*, 1994, 14(1): 113-118.
HE Guang-yu, ZHENG Shu-ying. Numerical inversion of Laplace transform solutions in dynamics of porous flow[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 1994, 14(1): 113-118.
- [5] 刘杰, 王媛. 改进的遗传算法及其在渗流参数反演中的应用[J]. *岩土力学*, 2003, 24(2): 237-241.
LIU Jie, WANG Yuan. Improved genetic algorithm in back analysis for seepage parameters of fissured rock

- masses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(2): 237—241.
- [6] 刘先珊, 余成学, 张立君. 渗流反分析中交替迭代算法神经网络研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1470—1475.
- LIU Xian-shan, SHE Cheng-xue, ZHANG Li-jun. Back analysis of seepage with ANN based on alternative and interative algorithm[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(9): 1470—1475.
- [7] 李守巨, 刘迎曦, 孙慧玲. 基于蚁群算法的含水层参数识别方法[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1049—1052.
- LI Shou-ju, LIU Ying-xi, SUN Hui-ling. Estimation of aquifer parameters using ant colony optimization[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(7): 1049—1052.
- [8] WONG F S. Slope reliability and response surface method[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1985, 111(1): 32—53.
- [9] 赵洪波, 冯夏庭. 位移反分析的进化支持向量机研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1618—1622.
- ZHAO Hong-bo, FENG Xia-ting. Study on genetic-support vector machine in displacement back analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(10): 1618—1622.
- [10] VAPNIK V. The nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer-Verlag, 1995: 36—43.
- [11] ANGELINE P J. Evolutionary optimization versus particle swarm optimization: philosophy and performance differences[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Evolutionary Programming (EP '98). San Diego: Springer, 1998: 601—610.
- [12] 宋志宇, 李俊杰. 基于微粒群算法的大坝材料参数反分析研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 991—994.
- SONG Zhi-yu, LI Jun-jie. Study of inverse method for dam parameters based on particle swarm optimization algorithm[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(5): 991—994.

第8届海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会第1号征文通知

兹经大陆方面岩石力学与工程学会地下工程分会、土木工程学会隧道及地下工程分会和台湾方面隧道协会共同商定,定于2009年11月18~19日在台湾高雄市召开第八届海峡两岸隧道与地下工程学术及技术研讨会。现发出会议的第1号征文通知。

一、主办单位: 隧道协会(台湾); 岩石力学与工程学会地下工程分会(大陆); 土木工程学会隧道及地下工程分会(大陆)

二、会议时间和地点: 台湾高雄市科学工艺博物馆 2009年11月18日~19日

三、会议主题: 隧道工程与环境保护

四、会议议题: ①隧道与地下工程于公共工程的角色及功能(功能); ②隧道与地下工程的规划与调查(研究); ③隧道与地下工程的设计与分析(设计); ④隧道与地下工程的营建管理(管理); ⑤隧道与地下工程的机械化施工与管理(施工); ⑥隧道与地下工程的监测与安全检测; ⑦隧道与地下工程面临的地下水环境课题与对策(环境); ⑧隧道工程的土方资源运用与环境保护; ⑨隧道与地下工程的风险管理; ⑩长隧道的营运、管理与防灾(防灾); ⑪地下空间利用的回顾与展望(展望); ⑫规划及执行中隧道面临的挑战(工程介绍)。

五、论文要求: 会议论文将由台湾方面出版社出版, 论文版面控制在6页以内。

六、重要日程: ①2009年5月31日前提供论文全文(电子版); ②2009年6月30日前发出论文录用通知及修改意见(限于论文被采用者); ③2009年7月31日前提供修改后的论文全文(电子版)。论文全文请发至大会秘书处 dxgcfh@yahoo.com.cn。

七、大陆方面会议秘书处

(1) 岩石力学与工程学会地下工程分会(山东大学岩土中心)

秘书长: 张强勇 0531-88395559, 13969168296; 联系人: 安妮

电话: 0531-88395428, 13953196602; 传真: 0531-88395984

E-mail: dxgcfh@yahoo.com.cn; 网址: www.geo.sdu.edu.cn

(2) 土木工程学会隧道及地下工程分会

秘书长: 常翔; 电话: 0379-62632097, 13373777970; E-mail: crtgcx@163.com

(中国岩石力学与工程学会地下工程分会)