自适应遗传算法及其在渗流参数反演中的应用

邓祥辉^{1,2}, 柴军瑞^{1,3,4}, 李康宏¹

(1 西安理工大学 水电学院,陕西 西安 710048;2 西安工业大学 建工系,陕西 西安 710032;

3 三峡大学 土木水电学院, 湖北 宜昌 443002; 4 四川大学 水电学院, 四川 成都 610065)

[摘 要] 利用水头实测资料,以渗透系数为待反演的参数,在采用基本遗传算法进行参数反演研究的基础 上,针对简单遗传算法难以确定交叉率和变异率的最佳值及计算量较大,易早熟等缺点,提出以自适应遗传算法来 解决工程中的这类反演问题;为力求使改进的遗传算法计算量更小,收敛性更强,同时结合简单的二稳定渗流有限 元算例,在相同的情况下分别用简单遗传算法和自适应遗传算法进行了反演计算。结果表明,自适应遗传算法在保 持简单遗传算法优点的同时,有效地提高了算法的收敛性,并在一定程度上克服了简单遗传算法的早熟问题。因 此,自适应遗传算法为渗流领域求解反演问题提供了新的途径。

[关键词] 参数反演; 渗透参数; 简单遗传算法; 自适应遗传算法 [中图分类号] O 357. 3 [**文献标识码**] A

由于岩土工程材料的非均质 非线性 不连续等 因素的影响,企图用解析法进行求解得到相关参数 几乎是不可能的[1-3]。随着计算机技术及岩石力学的 发展和广泛应用,将反分析方法应用于岩土工程中 已取得了很多成果^[4-6]。然而,以传统优化方法为核 心的反演方法,其反演结果严重依赖于参数的初值, 寻优过程极易陷入局部最优点,优化过程数值稳定 性差,特别是当待求参数数目增加时,计算效率呈级 数倍降低,甚至会导致搜索不收敛,近年来新兴的遗 传算法,以其特有的优点在位移反分析领域得到了 广泛的应用[7-8]。以遗传算法为核心的智能化反分析 方法也受到了工程界的广泛重视,为解决裂隙岩体 渗流反分析提供了新的途径^[9]。本文在采用简单遗 传算法进行参数反演研究的基础上,针对岩土体中 渗流反演问题提出了自适应遗传算法,以期为渗流 领域求解反演问题提供参考。

1 遗传算法及其自适应遗传算法

遗传算法(Genetic A lgorithm, GA)是一种全局 最优方法,特别适用于多极点的优化问题。该法模拟 了自然界生物进化过程中的"优胜劣汰,适者生存" 的法则,将复制、杂交、变异等概念引入到算法中,通 过构造一组可行解群体,并对其进行遗传进化操作, 使其逐渐移向最优解。遗传算法克服了传统优化方 法易陷入局部最优解的缺点,同时其搜索具有隐含 并行性,可以较快地搜索到全局最优解,并且对目标 函数的形态无具体要求,因而优于传统的优化方法。

[文章编号] 1671-9387(2006)07-0147-04

但是,在传统遗传算法中,交叉概率 P_a 和变异 概率 Pm 的选择是影响遗传算法行为和性能的关 键,直接影响算法的收敛性。P。越大,新个体产生的 速度就越快。然而, 当 P_e 过大时遗传模式被破坏的 可能性也越大,使得具有高适应度的个体结构很快 会被破坏: 但是如果 P_{e} 过小, 会使搜索过程缓慢, 甚 至停滞不前。对于变异概率 Pm 而言, 如果 Pm 过小, 就不易产生新的个体结构;如果 Pm 过大, 那么遗传 算法就变成纯粹的随机搜索算法。因此、针对不同的 优化问题, 需要反复试验来确定 P_{a} 和 P_{m} 。Srinvivas 等^[10]提出一种自适应遗传算法 (A dap tive Genetic A lgorithm, A GA), 在该算法中, P_a 和 P_m 均能随适 应度自动改变。当群体各个体适应度趋于一致或者 趋于局部最优时,使 P 和 Pm 增加;而当群体各个 体适应度比较分散时,使P。和Pm减少。同时,对于 适应度值高于群体平均适应度值的个体,对应较低 的 P 。 和 P ..., 使该解得以保护进入下——代; 而低于群 体平均适应度值的个体,对应较高的 P_e 和 P_m ,使该 解被淘汰。因此,适应度的 P_c 和 P_m 能够提供相对 某个解的最佳 P_c 和 P_m ,其在保持群体多样性的同

2

^{* [}收稿日期] 2005-09-14

[[]基金项目] 国家自然科学基金项目(10202015); 三峡大学湖北省"楚天学者计划"特聘教授项目(8096); 国家自然科学基金委员会、二 滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(50579092) [作者简介] 邓祥辉(1976-), 男, 四川德阳人, 在读博士, 主要从事水工结构工程研究。

时,也保证遗传算法的收敛性。

但也应该看到, 当适应度值越接近最大适应度 值时, 交叉率和变异率就越小; 当等于最大适应度值 时, 交叉率和变异率值为 0。这种调整方法对群体处 于进化后期比较合适, 而对进化初期则不利, 因为进 化初期群体中的较优个体几乎处于一种未发生变化 的状态, 而此时的优良个体不一定是优化的全局最 优解, 这容易使进化走向局部最优解的可能性增加。 为此, 可以做进一步的改进, 使群体中最大适应度值 个体的交叉率和变异率值不为 0, 分别提高到 *P*₋₂和 *P*_{m2}^[11], 这就相应地提高了群体中表现优良个体的 交叉率和变导率, 使其不会处于一种近似停滞不前 的状态; 另外, 为了保证每一代的优良个体不被破 坏, 采用精英选择策略, 使其直接复制到下一代中。

经过上述改进, P. 和 P. 的计算表达式如下:

$$P_{c} = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f & f_{avg} \\ P_{c1} & f & f_{avg} \end{cases}$$
(1)

$$P_{m} = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f_{max} - f)}{f_{max} - f_{avg}} & f & f_{avg} \\ P_{m1} & f < f_{avg} \end{cases}$$
(2)

式中, f_{max} 为群体最大适应度值; f_{avg} 为每代群体的平均适应度值; f 为交叉两个个体中的较大适应度值; f 为变异个体的适应度值。一般式(1)和(2)中 P_{c1} 取 0 9, P_{c2} 取 0 6, P_{m1} 取 0 1, P_{m2} 取 0 001^[11]。

2 岩土体中渗透系数的反演模型

根据研究渗流区域内若干已知坐标位置的测点 水头实测值与计算值之间的误差,以最小误差*E*(*k*_i) 作为目标函数,则有

$$E(k_{i}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left[\frac{h_{i} - h_{i}}{h_{i}}\right]^{2}}$$
(3)

式中, ki 为渗透系数; n 为测点数; hi 为第 i 测点的水 头计算值; hi 为第 i 测点的水头实测值。式(3)中的 目标函数采用了水头的相对值, 使目标函数成为无 量纲的数值函数, 从而可以避免优化过程中因量纲 而引发其他问题, 也便于判断算法是否收敛。

3 自适应遗传算法的实现

3.1 具体方法

7

(1) 编码。GA 的第一步就是将待优化参数编码, 每一个参数均被表示成字符串形式。本文把*x*,

Y 2 个方向渗透系数 kx, ky, 分别做成编码串。

(2) 群体初始化。依据初始区间随机产生若干个 符合约束条件的初始染色体,形成初始群体。

(3) 目标函数值计算。依据上一代解集, 通过子程 序, 即二维稳定渗流有限元数值计算程序, 计算测点 水头值以及相应的目标函数值 *E*(*k*_i)。

(4)适值函数。适值函数能有效指导搜索沿着面向参数优化的方向进行,以逼近最佳参数组合。适值函数的选取是算法优劣的关键,其选取原则为:保证适值非负,且朝着最大化方向发展。本文选择的适值函数为:

$$f(\mathbf{\Theta}) = \frac{N}{N} \frac{1}{\left(e(k_i)\right)^2} = \frac{N}{E(k_i)}$$
(4)

式中, *e*(*ki*)为某点反演结果的计算误差; *N*为计算 样点的个数。

(5) 遗传进化操作。为保证搜索到的最优个体不 会因遗传操作而被破坏,将父代群体中适应度值最大 的 10 % 优良个体直接传递到子代中,成为子代个体; 将父代群体中剩余的 90 % 个体放入匹配池,然后对 匹配池里的个体进行随机交叉操作和变异操作。

3.2 具体步骤

(1) 编码。对反演参数用前述方法进行二进制编码。

(2)产生初始群体。在各参数的取值范围内,随 机产生N 个初始解字符串,形成初始解群。

(3) 计算目标函数值。初始解群进入二维稳定渗流 有限元数值计算程序,得到与实测信息相对应的结果。

(4)适值评价。把上一步得到的误差返回到主程 序,按前述适值函数计算个体的适应度值,并计算群 体平均适应度值。

(5) 收敛判断。以种群中最大适应度值与平均适 应度值之差应小于 1 × 10⁻⁵作为判据, 并以最大进 化代数小于M axgenaration 辅助判断, "是"则算法 结束; "否"则继续运行。

(6)遗传进化操作。按前述选择算子进行选择操 作,选出群体中 10 % 的个体直接传递到子代中,其 余个体放入匹配池中,以自适应概率对匹配池中的 个体进行交叉及变异操作,完成后把这些个体送回 子代,形成子代群体。

(7)返回第(3)步循环进行。

4 算例分析

本文以简单的二维三角形单元为例, 该例采用 二维稳定渗流计算数学模型^[12], 其模型如下:

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

 $[K]{h} = {F}$ (5)

式中, [K]为总渗透系数矩阵; {h}为未知节点水头; {F}为已知常数项, 可由已知水头结点得出。利用数 学模型, 通过二维稳定渗流有限元数值计算程序得 到相应的自由面测点水头值, 然后比较计算水头值 与实测水头值来反求各方向的渗透系数。







m, $H_{co} = 3.0 \text{ m}$ 。设X方向的渗透系数为 k_x , Y方向 的渗透系数为 k_y , k_x 和 k_y 均为待反演参数。本例计 算的渗流区域共有 16 个节点, 18 个单元。5, 9, 13 结 点为水力学法粗算的渗流自由面, 这 3 个自由面测 点的实测水头值与计算水头值如表 1 所示。

表1 不同自由面实测水头值和计算水头值的比较

Table 1 Comparison of measured values of water

heads and computation values of water heads m

自由面测点号 M easuring points of free surface	实测水头值 M easured values of w ater heads	计算水头值 Computation values of water heads	
5	3 721	3 718	
9	3. 353	3. 354	
13	3. 025	3. 033	

计算时, kx, ky 在程序中随机产生若干个初始群体数, 经过计算, 自由面测点水头值的误差目标函数 值如表 2 所示。由表 2 可见, 在最大进化代数为 200 代的情况下, 从收敛过程看, 自适应遗传算法 (A GA)较简单遗传算法(SGA)收敛速度快; 从计算 结果看, 在进化 100 代时, 自适应遗传算法已经收 敛, 而简单遗传算法出现早熟, 无法搜索到最优解。 所以从结果上看前者也要优于后者。

Table 2	Comparison	of computation	results with	different (GA methods
---------	------------	----------------	--------------	-------------	------------

遗传算法 GA	进化代数 Evolution generation			
	1	50	100	200
 简单遗传算法 Sinple GA	0 163 100	0 075 12	0 052 2	0 044 2
自适应遗传算法计 A dap tive GA	0 182 190	0 034 05	0 023 6	0 023 6

在最大进化代数同为 100 代而群体数不等的情 况下,采用自适应遗传算法计算的自由面测点水头 值与实测水头值的误差目标函数值最小时,反演出

kx, *ky* 的值如表 3 所示。

表 3 自适应遗传算法与简单遗传算法反演结果的比较

Table 3 Back analysis of results of adaptive GA and simple GA

会 光 5	简单遗传算	自适应遗传算法	
参叙 Parameter	群体数= 80 Population size= 80	群体数= 200 Population size= 200	(#14 & X = 80) A dap tive GA (population size= 80)
k_x	0 000 036 8	0 000 032 5	0 000 031 6
k_y	0 000 022 7	0 000 021 1	0 000 021 9
目标函数值 Function value	0 044 2	0 035 9	0 023 6

从表 3 可以看出, 在群体规模较小时, 简单遗传 算法不能搜索到反演最优解。事实上, 群体数为 80 个时, 简单遗传算法计算的反演解是局部最优解, 究 其原因是简单遗传算法出现早熟。但当简单遗传算 法的群体数增加到 200 时, 算法有所改善, 但仍与理 论解有一定的差距。同时, 增大群体数必将带来巨大 的计算量, 这在实际应用中也是不现实的。 表 3 还表明, 采用自适应遗传算法后, 其计算效 率和计算精度明显提高, 在群体规模较小的情况下, 也能搜索到较高精度的最优解, 这也使自适应遗传 算法最终应用于工程实践成为可能。

5 结 语

本文将自适应遗传算法用于求解渗透系数的反

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

演问题, 克服了以传统优化算法进行反演时反演结 果严重依赖于初始值的不足。而且将自适应遗传算 法与简单遗传算法进行对比表明, 自适应遗传算法 在早熟问题上较简单遗传算法有一定的改进, 同时 其计算效率以及收敛精度都有较大的提高。从算例 可以看出,自适应遗传算法应用于渗流参数及其他 参数的反演均是可行的。

[参考文献]

- [1] 王芝银 岩石力学位移反演分析回顾及进展[J] 力学进展, 1998, 28(4): 488-498
- [2] 赵新铭, 刘 宁. 岩土力学反分析的数值反演方法[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23 (2): 55-58
- [3] 杨林德,朱合华,黄 伟,等 岩土工程问题的反演理论与工程实践M] 北京:科学出版社, 1996
- [4] 高 玮, 郑颖人 基于遗传算法的岩土本构模型识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 23(1): 9-12
- [5] 周志芳. 裂隙双重介质地下水运动参数反演分析[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(6): 742-747.
- [6] 刘先珊, 周创兵, 张立君 基于模拟退火的 Gauss-New ton 算法的神经网络在渗流反分析中的应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 404-406.
- [7] 高 玮, 郑颖人, 岩体参数的进化反演[J]. 水利学报, 2000(8): 1-5.
- [8] 朱合华, 刘学增基于遗传算法的混合优化反分析及比较研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 197-202.
- [9] 刘 杰, 王 媛 改进的遗传算法及其在渗流参数反演中的应用[1], 岩土力学, 2003, 24(2): 237-241.
- [10] Srinivas M, Patnaik L M. A daptive probability of crossover and mutation in genetic algorithms [J]. IEEE Trans on SMC, 1994, 24(4): 656-667.
- [11] 毕义明,李景文 遗传算法及其军事应用[M] 西安: 第二炮兵工程学院出版社, 1998
- [12] 仵彦卿,张倬元 岩体水力学导论[M]. 成都:西南交通大学出版社, 1995.

A daptive genetic algorithm in back analysis for seepage parameter of earth-rockfill dam

DENG Xiang-hui^{1, 2}, CHA I Jun-rui^{1, 3, 4}, L I Kang-hong¹

(1 College of Hydroelectric Engineering, Xi an University of Technology, Xi an, Shanxi 710048, China;
2 Department of Civil Engineering, Xi an Technological University, Xi an, Shanxi 710032, China;
3 College of Civil and Hydroelectric Engineering, Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;
4 College of Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract Seepage coefficient of earth-rockfill dam is analyzed as the back analysis parameters by the real water head Considering the parameter of inverse problems on seepage flow such as high computational cost, the optimization probability of crossover and mutation determ inated difficultly, premature convergent, adaptive genetic algorithm is proposed to overcome the limitation of simple genetic algorithm. At the same time, simple genetic algorithm and adaptive genetic algorithm are used to analyze the parameter of the simple two dimension fracture network under the same condition. The result shows that the method is effective in improving the computational convergence and overcoming the premature of simple genetic algorithm partly. So adaptive genetic algorithm is efficient and feasible in back analysis for seepage coefficient of earth-rockfill dam.

Key words: back analysis of parameter; seepage coefficient; simple genetic algorithm; adaptive genetic algorithm