

基于遗传算法的岩土本构模型辨识

高 玮 郑颖人

(后勤工程学院土木工程系 重庆 400016)

摘要 通过对岩土本构模型辨识机理的分析,提出了基于遗传算法的本构模型辨识方法,并用两个工程实例对该法进行了验证。

关键词 遗传算法,本构模型,系统辨识

分类号 TU 452

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2002)01-0009-04

1 引言

在岩土力学研究中,本构模型的确定一直是学科发展的“瓶颈”问题。尽管岩土本构模型的理论研究成果丰富^[1,2],但在具体应用中,却存在从众多理论中优选的问题,即本构模型的辨识问题。自从1977年 L. Junna 等提出由现场观测信息反分析辨识岩土本构模型的方法以来,已有不少人进行了这方面的研究^[3~5]。这些研究都是从系统辨识角度出发进行的,其基本方法为:先设定辨识模型类,进而选择待辨识模型的参数,然后采用解析、数值等方法进行理论计算,最后采用优化方法以实测为基准进行模型辨识。

该方法虽已取得了一些成果,但也存在一些为题(1)辨识强烈依赖于特定模型;(2)辨识依赖于初值,且易陷入局部极值;(3)过程不具有鲁棒性。

近年来,遗传算法(genetic algorithms—GA)已在系统辨识中得到了应用^[6,7]。研究表明,用GA进行非线性系统的辨识有独到之处,它具有解决非线性系统问题的鲁棒性,不依赖于问题的特定模型,并能进行全局搜索等优点。岩土本构模型辨识问题已被证明是一个典型的非线性系统辨识问题^[3~5],因此,采用遗传算法进行岩土本构模型辨识是合理有效的。

2 遗传算法简介^[8,9]

GA 是基于生物进化的仿生算法的一种,它基于达尔文生物进化的“物竞天择,适者生存”的基本原理之上,是一种迭代自适应概率性优化搜索算法。其基本思想由美国 Holland 教授提出,目前已成为多种交叉学科中的一个热门课题。GA 的搜索结合了达尔文适者生存及随机信息交换的思想,既消除了解中的不适应因素,又利用了原有解中的知识,从而加快了搜索过程。

GA 借鉴了物种进化的思想,将欲求解问题的解编码,每个可能的解均表示成字符串的形式。初始化随机生成一个解群,选择合适的适值函数对解群中每个个体进行评估,在此基础上进行选择、交叉及变异等遗传操作。适值函数相当于自然选择的力量。选择算子实行由父代中个体适应度的大小进行的选择及淘汰操作,此算子保证了算法的最优搜索方向。交叉算子模拟基因重组及随机信息交换操作,它保证了GA的搜索范围。变异算子以概率进行基因突变,保证了GA的全局搜索能力。GA的搜索能力主要由选择及交叉赋予,变异保证了算法能搜索到问题解空间中的每一点,从而使算法具有全局最优,进一步增强了GA的能力。

3 岩土本构模型辨识的遗传算法

具体采用GA进行本构模型辨识时,一般有两种方案:第一种是根据先验知识确定本构模型的结构,

2000年1月10日收到初稿,2000年3月6日收到修改稿。

作者高 玮 简介:男,1971年生,1995年毕业于中国矿业大学,现为后勤工程学院博士研究生,主要从事岩石力学、地下工程围岩稳定性分析方面的研究工作。

再用 GA 优化模型参数，得到合理的本构模型；第二种是用 GA 来优选几种由先验知识得到的本构模型结构，并同时估计其参数。本文作为初步研究，采用第一种方案。

3.1 GA 本构模型辨识的具体方法

(1) 编码 GA 实施时，应先进行参数编码。本文采用常用的二进制编码方式，具体方法为：如待编码参数 $X \in [X_{\min}, X_{\max}]$ ，将其变换成无符号整数 $U \in [0, 2^L]$ ，可采用下式进行：

$$X = X_{\min} + U \times \Gamma$$

式中： $\Gamma = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2^L - 1}$ ， L 为串长。

如待优化参数有多个，采用多参数级联定点映射编码方式，即将各参数独立变换的码串级联成一个串。

(2) 适值函数 它能有效指导搜索的方向，以逼近最佳参数组合，其选取是算法优劣的关键。这里选择如下形式的适值函数：

$$f = \frac{Num}{\sum_{k=1}^{Num} (e_k)^2}$$

式中： e_k 为辨识模型的计算误差， Num 为计算样本点个数。

这种适值函数为均方差的倒数，它很好地包含了优化信息，引导搜索向最优方向发展。

选择了适值函数后，为保持群内位串多样性及串间竞争机制，可进行适值调整，这里采用线性调整法，具体调整方法可参见文[7]。

(3) 选择算子 这里采用适值比例选择法，种群中第 j 个个体被选中的概率 P_s 为

$$P_s = f_j / \sum f_j$$

式中： f_j 为第 j 个个体适值， $\sum f_j$ 为群中个体适值之和。

为防止高适值个体被淘汰，这里采用最优保留策略进行。

(4) 交叉及变异算子 交叉及变异概率 (P_c 及 P_m) 对 GA 影响极大。 P_c 控制交叉操作的频率， P_c 太小，搜索会停止不前； P_c 太大，高适值解易被破坏。 P_m 为增加种群多样性的一个因素， P_m 太小，无法产生新解； P_m 太大，又会破坏有用模式而使解远离最优。为了加快 GA 的效率并有效防止陷入局部最优，这里采用 P_c, P_m 自适应调整的方法进行[10]。

(5) 收敛条件 GA 作为一个迭代过程，其收敛条件对其性能有很大影响，这里采用种群中最大适值与平均适值之差小于一个小正数 ϵ 及最大迭代次

数的限制作为判定条件。

3.2 GA 本构模型辨识的具体步骤

(1) 编码 采用前述方法对待辨识模型的参数作二进制编码。串长由待辨识精度确定，具体方法为：如模型 n 个参数分布在 $[-2^{l-1}, +2^{l-1}]$ 之间，要求辨识精度小于 2^{-d} ，则每个参数串长为 $l + d$ ，一个解的串长 $L = n(l + d)$ 。

(2) 产生群体 种群初始化，随机生成设定种群规模 $N = 100$ 个参数字符串，形成初始解群。

(3) 系统模型计算 根据初始解群，采用有限元数值计算方法得到与实测信息相对应的系统预测输出结果。

(4) 适值评价 按前适值函数计算个体的性能，并计算整体平均性能。

(5) 收敛判断 这里由小参数 $\epsilon = 1 \times 10^{-5}$ 来判断收敛，或由迭代次数是否达到最大，两个条件判定辨识是否结束。

(6) 适值调整判断 由适值函数计算的个体性能进行适值规范化：

$$f_j = f_j / \text{ave}(f)$$

式中： f_j 为第 j 个个体适值， $\text{ave}(f)$ 为种群平均适值。

检测每一代适值规范化后无子女个体占总数的百分比，如超过 20%，则认为非成熟收敛，此时应进行适值调整。

(7) 选择操作 按前述选择算子以规范适值或调整适值进行选择，在父代中由选择概率选出 N 个个体作为子代(子代中个体有重复)群体。返回(6)进行适值调整判断。

(8) 交叉及变异操作 以自适应交叉及变异概率对子代中的个体分别进行交叉及变异操作。

(9) 子代总体判断 查看父代中最优秀个体是否保留在子代中，若没有，则采用最优保留策略，取代子代中最差个体，将父代中最优秀个体无遗传保留。

(10) 把遗传操作产生的子代群体作为父代初始解群，返回(3)循环进行。

4 工程实例验证

为了验证 GA 在岩土本构模型辨识中应用的实际效果，这里采用两个工程实例进行研究。

4.1 实例 [3]

为评定洞室围岩稳定情况，天生桥一级电站工程的右岸导流洞中进行了收敛量测及深部多点位移

量测。为辨识围岩的本构模型，这里采用多点位移量测成果，工程实测的基本情况可参见文[3]，实测绝对位移见表 1。

表 1 多点位移计实测绝对位移成果表^[3]

Table 1 Measured results of multi-points displacement meter^[3]

断面	孔号	测 点 号							
		0	1	2	3	4	5	6	
I	I-1	测点深	0.2	2.0	2.5	5.1	6.0	7.1	10.88
		位移	8.622	1.10	-1.37		1.65	0	
	I-3	测点深	0.0	0.5	1.95	3.4	4.85	7.3	
		位移	6.89	5.94		2.19	0		
II	II-1	测点深	0.2	2.04	2.5	3.5	5.5	10.2	12.26
		位移	6.32	0.68	0.49	0.74	1.69	0.61	0
	II-2	测点深	0	1.5	2.4	4.3	6.22	9.5	
		位移	1.24	1.45	1.07	0.66	0.59	0	
II	II-3	测点深	0	1.5	2.4	4.3	5.82	8.7	
		位移	2.12	0.53	0.41	0.21	0.01	0	
	II-4	测点深	0	1.5	2.4	4.3	5.82	8.7	
		位移	3.24	1.88	2.22	0.27	0.37	0	
II-5	测点深	0.2	1.60	2.30	3.50	5.0	10.0	13.1	
	位移	2.00		-0.36	-0.46	0.78	0		

注：测点深以 m 为单位；位移以 mm 为单位(下同)

本次研究为了与文献比较，也采用文[3]中同样情况处理，即由量测位移来辨识模型的塑性屈服模型参数，也就是辨识围岩的理想弹塑性模型，从而待辨识参数为 P_1, P_2, P_3 及 P_4 (具体含义见文[3])。计算中设定岩性参数取值如下： $E = 2.0 \text{ GPa}$ ， $\mu = 0.5$ ， $c = 0.1 \text{ MPa}$ ， $\varphi = 30^\circ$ 。

地应力参数取值为： $\sigma_x = 2.12 \text{ MPa}$ ， $\sigma_y = 0.91 \text{ MPa}$ ， $\tau_{xy} = -0.53 \text{ MPa}$ 。

辨识前，设定待辨识参数取值范围分别为： $P_1, P_2, P_4 \in [-16.0, 16.0]$ ， $P_3 \in [-2.0, 2.0]$ 。再由辨识精度小于 1×10^{-5} 可由前述方法得到串长。但为了辨识更精确，这里对每个参数均采用 20 位二进制码串表示，则表示参数集的位串长 $L = 4 \times 20 = 80$ 。本次研究只采用断面 II 的量测值进行。为了与文献结果比较，研究中也采用了不同测值及人为固定不同初值进行分析。经过多次迭代计算，可得到的辨识结果如表 2。

由计算结果可见，GA 进行模型辨识不依赖于初始值并与已知观测信息关系不大，它总能收敛到一

表 2 辨识结果

Table 2 Results of the model identification

特征参数	文 [3] 方法				本 文 方 法			
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_1	P_2	P_3	P_4
初始值	0.16	1.0	0.5	0.08	随机生成			
1~5 测线	0.159 993 8	1.0	0.5	0.079 999 1	0.169 90	1.002 71	0.500 1	0.091 72
1, 3, 5 测线	0.165 938 3	1.000 190 7	0.5	0.079 999 0	0.169 91	1.002 73	0.5	0.091 70
1, 5 测线	0.160 003 4	1.000 189 8	0.5	0.799 991	0.169 93	1.002 75	0.438 9	0.916 7
初始值	0.108 60	2.67	0.389 52	0.059 04	0.108 60	2.67	0.389 52	0.059 04
结 果	0.169 90	1.003 98	0.5	0.071 98	0.169 90	1.002 71	0.500 1	0.091 72
初始值	1.068 80	7.60	0.551	0.001 9	1.068 80	7.60	0.551	0.001 9
结 果	0.169 90	1.009 0	0.5	0.099 8	0.169 90	1.002 71	0.500 1	0.917 2

个稳定的值。

为了检验辨识模型的合理性，用所得模型对断面 I 进行有限元计算，其结果如表 3。

表 3 有限元计算结果

Table 3 The calculated results of finite element method

孔号	测点号							
	0	1	2	3	4	5	6	
I-1	测点深	0.2	2.0	2.5	5.1	6.0	7.1	10.83
	实测位移	8.622	1.10	-1.37		1.65	0	
	计算位移	7.021	0.920	-1.30		1.72	0.02	
I-2	测点深	0.0	0.5	1.95	3.4	4.85	7.3	
	实测位移	6.89	5.94		2.19	0		
	计算位移	5.92	5.44		2.07	1.16	0.07	

可见，计算值与实测值并不十分吻合，但大致规律仍相符，说明辨识的模型是可信的。

4.2 实例 2

某矿在一巷道中进行收敛观测，具体断面布置及实测数据见文[4]。本次研究也采用文[4]中类似情况，即只辨识围岩弹粘塑性本构模型的 N, γ 两个参数。

设定辨识参数范围为 $[-2, +2]$ ，辨识精度小于 1×10^{-5} ，种群数 $N = 100$ ，同理对每个参数用 20 位串表示，则参数集总长 $L = 2 \times 20 = 40$ ，经过迭代计算，辨识结果为： $N = 1.204$ ， $\gamma = 0.002 008$ 。

而文[4]结果为： $N = 1.2$ ， $\gamma = 0.001 842$ 。

可见，对该问题 GA 辨识是可行的。

5 结 论

GA 是一种独特的优化方法,它应用于岩土本构模型辨识有以下优点:

(1) GA 不依赖于初值选取,在模型辨识中易得到稳定的满意解。

(2) GA 采用全局概率搜索寻优策略,特别适合于岩土本构模型辨识这类复杂的非线性系统优化问题。

本文只是此方面的一个初步研究,更深入的研究目前正在进行之中,其结果将另文专述。

参 考 文 献

1 郑颖人,龚晓南. 岩土塑性力学基础 [M]. 北京: 中国建筑工业

出版社,1989

2 郑颖人,沈珠江. 岩土塑性力学原理 [M]. 重庆: 后勤工程学院出版社,1998

3 孙 钧,蒋树屏,袁 勇等. 岩土力学反演问题的随机理论与方法 [M]. 汕头: 汕头大学出版社,1996

4 刘保国. 岩体粘弹、粘塑性本构模型辨识及工程应用[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学,1997

5 薛 琳. 圆形隧道围岩蠕变柔量的确定及粘弹性力学模型的识别 [J]. 岩石力学与工程学报,1993,13(4): 338~344

6 Kristinssonk, Gug A D. System identification and control using GA [J]. IEEE Trans. on SMC., 1992, 22(5): 1033~1046

7 徐丽娜,李琳琳. 遗传算法在非线性系统辨识中的应用研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报,1999,31(2): 39~42

8 席裕庚,柴天佑,恽为民. 遗传算法综述 [J]. 控制理论与应用, 1996, 13(6): 697~708

9 陈建安,郭大伟,徐乃平等. 遗传算法理论研究综述 [J]. 西安电子科技大学学报,1998,25(3): 363~368

10 Srinivas M, Datnaik L M. Adaptive probability of crossover and mutation in GA [J]. IEEE Trans. on SMC., 1994, 24(4): 656~667

IDENTIFICATION OF THE GEOMATERIAL CONSTITUTIVE MODEL BASED ON GENETIC ALOGRITHM

Gao Wei, Zheng Yingren

(Department of Civil Engineering, Logistical Engineering Institute, Chongqing 400016 China)

Abstract Through analyzing the identification mechanism of the geomaterial constitutive model, some problems of the existing identification methods based on the traditional system identification theories are revealed. And the new system identification theory —— genetic algorithm (GA) is applied to solve this complicated nonlinear system identification problem of the geomaterial constitutive model. Accordingly, a new algorithm to identify the constitutive model based on genetic algorithm is proposed. As an initial study, the identification of the constitutive model is only researched for given model category. At last, this algorithm is verified with two engineering examples. And the results show that this algorithm is very valuable for identification of the geomaterial constitutive model.

Key words genetic algorithm, constitutive model, system identification