

# 遗传算法在边坡数值计算中的应用

安关峰,殷坤龙,唐辉明

(中国地质大学工程学院,湖北武汉 430074)

**摘要:** 改进了进化方向的遗传算法与有限元数值法,结合并研制了相应的软件.应用该软件对多类型岩土边坡进行弹性模量、内聚力、内摩擦角等参数反演分析,显示误差很小,收敛速度也很快,这说明改进进化方向遗传算法这种新型的优化算法在多类型岩土参数优化估计中具有独特的优势.

**关键词:** 有限元数值法;遗传算法;反分析.

中图分类号: P642.1 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2002)02-0177-04

**作者简介:** 安关峰(1970-),男,博士后,主要从事岩土工程数值研究工作.

在岩土工程问题的分析中,合理地选用岩土的本构模型以及较为精确地确定模型参数具有重要意义<sup>[1~15]</sup>.由于岩土的复杂性,目前对岩土参数的比较精确的估计还存在很多困难.为了提高预测精度,根据现场量测数据反分析岩土参数越来越受到重视.反分析研究方法可分成以下 3 类:逆分析法、直接分析法和概率统计法.由于直接分析法具有较强的适应性,能处理各种类型的反分析问题,因此得到广泛应用<sup>[1]</sup>.它是将数值分析方法和优化算法结合起来,通过不断修正岩土的未知参数,使得一些现场实测值与相应的数值分析的计算值之差达到最小.我国的研究者在反分析方面也开展了部分工作<sup>[3,8]</sup>.

遗传算法是近年来开始得到广泛关注的一种新型优化算法,具有智能性搜索、并行式计算和全局优化等优点<sup>[9]</sup>,没有传统的建立在梯度计算基础上优化算法的缺点,特别适合于求解目标函数的多极值点问题.本文将改进的遗传算法与有限元数值分析方法相结合,作为反演岩土参数的一个新方法.

## 1 遗传算法和有限元数值方法

### 1.1 遗传算法

遗传算法是由美国的 Holland<sup>[8]</sup>教授创立的,而后吸引了众多的研究者和探索者,相继发展和深

化了该算法,其中以 Goldberg<sup>[9]</sup>的贡献最为卓越,他在 1989 年推出一本专著,全面、系统地介绍了遗传算法,使这一技术得到普及和推广.

遗传算法是一种更为宏观意义下的仿生算法,它模仿的机制是一切生命与智能的产生与进化过程.它通过模拟达尔文“优胜劣汰、适者生存”的原理激励好的结构;通过模拟孟德尔遗传变异理论在迭代过程中保持已有的结构,同时寻找更好的结构.简单遗传算法(SGA)是由戈德贝格提出来的,它是一个反复迭代过程,在多次迭代中都保留一组候选解,通过杂交和变异算子对其进行运算,产生新一代的一组候选解,重复这个过程直至满足某种收敛条件.SGA 在优化复杂空间较多参数或参数范围很宽的情况下有时收敛很慢、收敛结果不理想,为此需要对其进行改进.本文根据 Yamamoto<sup>[11]</sup>提出的新的进化方向思想,对遗传算法作了改进.雅玛莫托进化操作可描述为:SGA 所产生的“子代”,仅作为中间过程,而真正的子代由父代与“子代”的个体和适应度来确定.

设一个个体可表示为由  $n$  个参数  $C_p$  ( $p=1,2,\dots,n$ ) 组成,即表示为

$$\{C_1, C_2, \dots, C_n\}.$$

而  $C_p \in [C_{\min}, C_{\max}]$ ,  $C_{\min}$ ,  $C_{\max}$  分别为参数  $C_p$  的上、下界.

现输入:

父代 1:  $\{C_{o11}, C_{o12}, \dots, C_{o1n}\}$ , 适应度为  $f_{o1}$ ;

父代 2:  $\{C_{o21}, C_{o22}, \dots, C_{o2n}\}$ , 适应度为  $f_{o2}$ ;

输出:

子代:  $\{C_{f1}, C_{f2}, \dots, C_{fn}\}$ , 适应度为  $f_f$ ;

真子代:  $\{C_{t1}, C_{t2}, \dots, C_{tn}\}$ , 适应度为  $f_t$ .

在上面表达式中

$$C_{tp} = \max[\min(C_p^*, C_{\max}), C_{\min}], \quad (1)$$

$$C_p^* = C_{fp} - S \cdot (C_{fp} - C_{o1p}) \cdot \text{sign}[1, (f_f - f_{o1})] - T \cdot (C_{fp} - C_{o2p}) \cdot \text{sign}[1, (f_f - f_{o2})]. \quad (2)$$

式中: 下标  $p=1, 2, \dots, n$ ;  $S, T \in [0, 1]$ ,  $S, T$  为随机参数.  $\text{sign}(a, b)$  是一个符号函数, 表示取  $b$  的符号, 取  $a$  的绝对值, 如  $\text{sign}(5, -1) = -5$ . 这样, 向一个真子代个体的进化有 2 个方向可供参考, 即由父代 1、父代 2 指向子代个体的 2 个方向, 这 2 个方向对真子代个体产生的贡献分别由前一公式的后 2 项表示, 随机参数  $S$  和  $T$  确定这 2 个方向贡献的幅度, 其中符号函数表征父代个体沿该方向是进化(适应度减小), 还是退化(适应度增加).

根据上述原理, 改进进化方向的遗传算法的基本步骤如下: (1) 产生初始群体; (2) 计算个体的适应度值; (3) 评价是否满足收敛条件, 若满足则输出最优解并停机; (4) 进行选择操作; (5) 以概率  $P_c$  进行杂交操作; (6) 以概率  $P_m$  进行变异操作; (7) 以概率  $P_v$  进行进化方向操作; (8) 转到步骤 (2).

## 1.2 有限元数值方法

有限元法基本原理在文献[13]中有详尽介绍, 这里不再赘述, 仅提出所用破坏准则. 在计算中采用的岩体强度判据是 Drucker-Pracker 准则, 用于判定岩体单元的屈服,

$$F = \beta I_1 + J_2^{1/2} - K = 0, \quad (3)$$

式中:  $\beta = \frac{\sin\varphi}{(9+3\sin^2\varphi)^{1/2}}$ ,  $K = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot \cos\varphi}{\sqrt{3+\sin^2\varphi}}$ ,  $J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2]$  为应力偏量第二不变量,  $c, \varphi$  分别为材料内聚力、内摩擦角.

对于安全度, 采用局部安全系数, 应力位于屈服面内, 安全系数  $F_s < 1$ , 否则  $F_s > 1$ .

$$F_s = \frac{3c + I_1 \tan\varphi}{\sqrt{(9+12\tan^2\varphi)J_2}}. \quad (4)$$

本文为方便起见选用了各向同性的弹塑性本构模型, 则有限元计算需要的岩土参数有弹性模量  $E$ , 泊松比  $\nu, c, \varphi$ , 土的重度  $\gamma$ . 在反演分析中, 由于岩土弹性模量、内聚力、内摩擦角对边坡的位移影响较大, 故反演参数选用以上 3 个.

## 1.3 目标函数

本文采用直接分析法, 即通过遗传算法中的目标函数将二维有限元程序与主程序遗传算法相衔接, 目标函数选定为

$$J = \sum_{i=1}^m \left(1 - \frac{S_i}{S_i^*}\right)^2. \quad (5)$$

式中:  $m$  为实测值总数;  $S_i^*$  为第  $i$  点实测值, 如位移等;  $S_i$  为相应的数值分析计算值.

根据 Arai<sup>[14]</sup> 的研究, 用位移量测值来反分析土性参数是合适的, 因此本文拟采用位移值反演. 值得指出的是本文在反算时是以确定的参数计算出的部分节点位移值为实测值, 给出不同岩土参数的取值范围进行反演分析.

## 2 基本算例

本文以湖北巴东黄土坡滑坡为例, 考虑到巴东组地层组成软硬相间特点与重力作用下斜坡变形特点, 抽取地质模型时主要考虑黄土坡滑坡在重力、荷载和库水作用下水位作用下其稳定情况, 同时考虑到河谷的对称性和构造所形成的巴东断裂影响, 我们以河谷中心线为对称轴, 取黄土坡滑坡所在的右岸为研究取区(图 1)进行重力场作用下的模拟. 左右边界取水平向约束, 底边界取垂向约束. 考虑到黄土坡滑坡岩性和构造特点, 将研究区(2 460 m × 1 131 m)剖分为 504 个节点, 487 个单元. 需要指出的是对于断裂带和滑带均处理为有厚度的实体单元.

根据黄土坡滑坡区特点, 将其划分成 8 种材料, 实际计算时选用各材料参数及反演参数的区间值范围列于表 1. 遗传算法设置种群规模为 100, 最大迭代(进化)次数为 200, 杂交概率  $P_c$  为 0.90, 变异概率  $P_m$  为 0.20, 进化方向概率  $P_v$  为 0.30; 反演参数 24 个, 将以上参数输入到程序反演计算得到表 2 结果.

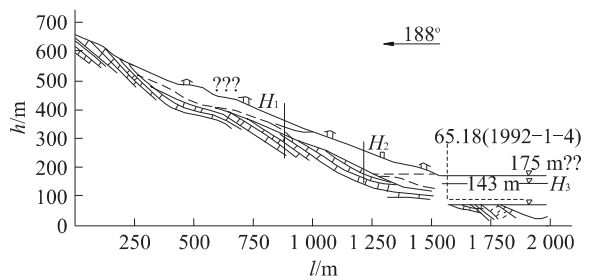


图 1 黄土坡滑坡地质模型

Fig. 1 Geological model of Huangtupo landslide

表 1 岩土物理力学性质参数及反演参数的取值范围

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils and rocks and parameter's values by back-analysis

岩性	物性参数						反演参数取值范围					
	$\gamma / (\text{MN} \cdot \text{m}^{-3})$	$E / \text{MPa}$	$\nu$	$\sigma_{mt} / \text{MPa}$	$c / \text{MPa}$	$\varphi / (^{\circ})$	$E / \text{MPa}$		$c / \text{MPa}$		$\varphi / (^{\circ})$	
							上限	下限	上限	下限	上限	下限
$T_1j^3$ 灰岩	0.027	51 012	0.21	3.060	0.700	54.0	52 000.0	50 000.0	0.80	0.50	56	50
$T_2b^1$ 泥灰岩	0.026	37 670	0.21	2.200	0.420	48.0	40 000.0	36 000.0	0.45	0.40	48	45
$T_2b^{2-1}$ 泥质粉砂岩	0.027	19 804	0.30	0.984	1.300	46.9	21 000.0	18 000.0	1.40	1.00	48	45
$T_2b^{2-2}$ 粉砂泥质岩	0.027	16 345	0.31	0.704	0.984	44.2	17 000.0	14 000.0	1.10	0.80	46	44
$T_2b^3$ 泥灰岩	0.025	12 976	0.22	0.590	0.780	45.7	13 000.0	10 000.0	0.90	0.50	48	44
滑带	0.022	16.66	0.40	0.000	0.037	16.5	18.0	15.0	0.04	0.03	18	15
断裂带	0.026	7 490	0.25	0.000	0.023	15.0	7 500.0	7 000.0	0.03	0.02	16	13
粘土夹碎石	0.026	2 000	0.26	0.000	2.000	42.0	2 200.0	1 800.0	2.20	1.80	45	40

表 2 改进的遗传算法反分析结果

Table 2 Result from the approved genetic algorithm

岩性	$E / \text{MPa}$	$E$ 反演值 / $\text{MPa}$	$\Delta E / \%$	$c / \text{MPa}$	$c$ 反演值 / $\text{MPa}$	$\Delta c / \%$	$\varphi / (^{\circ})$	$\varphi$ 反演值 / $(^{\circ})$	$\Delta \varphi / \%$	迭代次数	$J$
$T_1j^3$ 灰岩	51 012	50 942.27	0.137	0.700	0.667 762	4.61	54.0	52.949 68	1.95	30	$3.6 \times 10^{-5}$
$T_2b^1$ 泥灰岩	37 670	37 558.74	0.295	0.420	0.424 041	0.96	48.0	45.374 49	5.47		
$T_2b^{2-1}$ 泥质粉砂岩	19 804	18 692.74	5.610	1.300	1.383 863	6.45	46.9	45.143 96	3.74		
$T_2b^{2-2}$ 粉砂泥质岩	16 345	16 988.92	3.940	0.984	1.027 222	4.39	44.2	45.001 90	1.81		
$T_2b^3$ 泥灰岩	12 976	12 252.86	5.570	0.780	0.692 614	11.20	45.7	45.731 32	0.07		
滑带	16.66	17.023 36	2.180	0.037	0.033 981	8.16	16.5	15.971 15	3.21		
断裂带	7 490	7 384.59	1.410	0.023	0.027 097	17.80	15.0	14.784 94	1.43		
粘土夹碎石	2 000	1 922.13	3.890	2.000	1.909 018	4.55	42.0	41.864 06	0.32		

结果表明,用改进的遗传算法得到的参数与实际参数比较接近,总体而言弹性模量相差较小,内摩擦角次之,内聚力相差较大。但是从最小目标函数值来看总体是可以接受的。

### 3 结论

本文用改进的遗传算法与边坡有限元数值方法进行结合,对多类型岩土体的多参数进行了反演分析,结果显示误差相当小,收敛速度也很快,这说明改进的遗传算法这一新型的优化算法在岩土参数优化估计中具有精度高、反演快的优越性,因此值得在岩土工程领域参数优化中推广。

#### 参考文献:

[1] 朱百里,沈珠江. 计算土力学[M]. 上海:上海科学技术出版社,1990. 340.  
 ZHU B L, SHEN Z J. Numerical soil mechanics [M]. Shanghai: Shanghai Publishing House of Science and Technology, 1990. 340.

[2] 安关峰,李红,施建华. 软土地基上填土桥坡工后沉降三

维有限元研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, 26(6): 638—642.

AN G F, LI H, SHI J H. 3D FEM research on post construction subsidence of fill bridge slope on soft clay basement [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2001, 26(6): 638—642.

[3] 孙钧,黄伟. 岩石力学参数弹塑性反演问题的优化方法[J]. 岩石力学与工程学报,1992, 11(3): 221—229.  
 SUN J, HUANG W. An optimization method for the e-lastoplastic inversion of parameters in rock mechanics [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1992, 11(3): 221—229.

[4] 刘迎曦,吴立军,韩国城. 边坡地层参数的优化反演[J]. 岩土工程学报,2001, 23(3): 315—318.  
 LIU Y X, WU L J, HAN G C. Optimization inversion for identifying ground parameters of slope [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(3): 315—318.

[5] 朱全宝,刘加龙. 芜湖长江大桥地质综合勘探模式研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2001, 26(4): 343—346.  
 ZHU Q B, LIU J L. Study on comprehensive geological exploration model in Wuhu Yangtze bridge [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences,

- 2001, 26(4): 343—346.
- [6] 晏鄂川,王晋,何森. 浅析山区高等级公路中的边坡工程岩体[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, 26(4): 347—351.  
YAN E C, WANG J, HE M. Study on slope engineering rock mass of highway in mountainous area [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2001, 26(4): 347—351.
- [7] 胡新丽,唐辉明,陈建平. 高速公路顺层路堑边坡优化设计方法[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, 26(4): 373—376.  
HU X L, TANG H M, CHEN J P. Optimum design method for bedding slope of expressway [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2001, 26(4): 373—376.
- [8] Holland J H. Adaptation in nature and artificial system [M]. Cambridge: MIT Press, 1992. 230.
- [9] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning [M]. Baltimore: Addison-Wesley, 1989. 180.
- [10] 方灯明. 南京长江二桥南汊桥塔基主要工程地质问题与力学参数的确定[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, 26(4): 406—409.  
FANG D M. Main problems and determination of foundation strength of pier of the second Nanjing bridge [J]. Earth Science — Journal of China of University of Geosciences, 2001, 26(4): 406—409.
- [11] Yamamoto K. New evolutionary direction operator for genetic algorithms [J]. AIAA, 1996, 33(10): 132—134.
- [12] 晏鄂川,唐辉明,杨裕云,等. 陆浑水库坝基断层破碎带渗透稳定性评价[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, 26(1): 88—92.  
YAN E C, TANG H M, YANG Y Y, et al. A systemic evaluation of seepage stability for fracture zone in Luhun dam foundation [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2001, 26(1): 88—92.
- [13] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. 304—343.  
ZHU B F. Finite element theory and application [M]. 2 edition. Beijing: China Hydro-Electric Publishing House, 1998. 304—343.
- [14] Arai K. Application of back-analysis to several test embankments on soft clay deposits [J]. Soils and Foundations, 1986, 26(2): 60—72.
- [15] 周萃英. 土体微观结构研究与土力学的发展方向——若干进展与思考[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25(2): 215—220.  
ZHOU C Y. Research into soil mass microstructure and some progresses on soil mechanics [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(2): 215—220.

## Application of Genetic Algorithm in Numerical Simulation of Slope Stability Analysis

AN Guan-feng, YIN Kun-long, TANG Hui-ming

(Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The approved genetic algorithm was combined with finite element method in developing relevant software. The software was applied to make back analysis of elastic module, cohesion, friction angle for the slope with different soil types. The results show that the error is quite small and convergence rate fast. It is proved this algorithm is of obvious priority in rock-soil parameter estimation.

**Key words:** finite element method; genetic algorithm; back analysis.