

# 基于仿生算法的滑坡危险滑动面反演(1) ——滑动面搜索

高 玮<sup>1,2</sup>, 冯夏庭<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 后勤工程学院 土木工程系, 重庆 400041)

**摘要:** 滑坡稳定性分析中一个非常重要的问题就是其潜在危险滑动面搜索的问题。为了更好地进行滑动面搜索研究, 这里以滑动面上的若干关键点作为搜索目标, 从而使问题变成了一个搜索关键点坐标的问题。由于实际滑坡性质的复杂性, 此优化问题非常复杂, 采用常规优化技术常常不能奏效。为了有效地解决这个问题, 这里以效率更高、效果更佳的仿生算法——免疫进化规划作为优化工具, 以滑动面上关键点坐标作为优化参数, 以滑坡稳定性安全系数作为优化目标进行研究, 提出了一种进行任意滑动面搜索的新方法。最后, 通过一个典型算例及一个边坡工程实例验证了方法的有效性。

**关键词:** 工程地质; 危险滑动面; 搜索; 优化问题; 仿生算法; 免疫进化规划

**中图分类号:** P 642.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)13-2237-05

## BACK ANALYSIS OF CRITICAL FAILURE SURFACE OF SLOPE BASED ON BIONICS ALGORITHM(1)—LOCATION OF CRITICAL FAILURE SURFACE

GAO Wei<sup>1,2</sup>, FENG Xia-ting<sup>1</sup>

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Department of Civil Engineering, Logistical Engineering Institute, Chongqing 400041, China)

**Abstract:** Location of critical failure surface and identification of its parameters are two very important problems in slope stability analysis. At first, location of critical failure surface is studied. Here, the coordinates of some reference points are taken as searching objectives, so the problem of location of critical failure surface is transformed to a typical complicated optimization problem that can not be solved by traditional optimization methods. To solve this problem, the new global optimization method that is called bionics algorithm-immunized evolutionary programming is introduced. So, taking the coordinate of reference points as optimization parameters and safety factor as optimization objective, a new method to search critical failure surface is proposed. At last, through a typical numerical example and an engineering example, this new method is verified. The results show that this new method can solve the problem of location of critical failure surface very well and can be applied to engineering practice. But only to locate the critical failure surface with supposed parameters can not get the suitable safety factor of slope, the better way is to search the critical failure surface and its parameters at the same

**收稿日期:** 2004-03-17; **修回日期:** 2004-06-17

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412708); 国家自然科学基金资助项目(50309014)

**作者简介:** 高 玮(1971-), 男, 博士, 1995年毕业于中国矿业大学采矿工程专业, 现任副教授, 主要从事岩土力学、岩土工程稳定性分析及仿生计算理论及应用等方面的教学与研究工作。E-mail: wgaowh@hotmail.com.

time. This problem can be solved in the second part of this paper.

**Key words :** engineering geology ; critical failure surface ; search ; optimization problem ; bionics algorithm ; immunized evolutionary programming

# 1 引言

滑坡灾害是一种危害极大的地质灾害，其发生常常会造成大量人身伤亡及严重的财产损失，为了防止这种灾害的发生，进行滑坡稳定性分析研究具有非常重大的现实意义<sup>[1]</sup>。滑坡稳定性研究中一个非常重要，甚至至关重要的问题就是滑坡潜在危险滑动面确定的问题，因为只有确定了滑坡的危险滑动面，人们才能根据其进行滑坡稳定性安全系数的计算。因此，一直以来，人们就非常重视滑坡滑动面搜索的研究，目前已提出了大量进行滑坡潜在滑动面搜索的方法<sup>[2-5]</sup>，但这些方法大多是针对圆弧滑动面进行的研究，而任意滑动面搜索方面的研究还不多。其主要原因是，圆弧滑动面搜索可以简化成一个典型的三参数优化问题，而任意滑动面搜索的研究则非常复杂。由于滑动面的确定可以由滑动面上关键点坐标来实现，而搜索关键点的坐标可以转化为一个典型的连续优化问题。关于这种思路，尽管目前已有人进行了研究<sup>[6,7]</sup>，但其研究深度尚不够。为了提高解决问题的能力，这里以优化效率更高、效果更佳的仿生算法——免疫进化规划作为优化工具，以滑动面上关键点坐标作为优化参数，以滑坡稳定性安全系数作为优化目标进行研究，提出了一种进行任意滑动面搜索的新方法。

# 2 滑动面搜索的计算模型

计算一个滑坡的稳定性，实际上就是在确定的滑动面基础上，计算其安全系数。而滑动面搜索的目的就是搜索使安全系数取最小值的滑动面。很显然，这是一个典型的优化问题。事实上，滑坡的潜在危险滑动面是一个空间上的复杂曲面，为了简化研究并具有研究的代表性，这里进行二维研究，从而滑动面变成了平面上的一条复杂曲线。因此，问题变成了确定使安全系数取最小值的平面曲线，其计算模型如图 1 所示。

其中，函数  $y = f(x)$  代表假定的滑动面曲线， $y = g(x)$  代表任意地表面曲线。设滑动面上的关键点为  $A_1, A_2, A_3, A_4$  这 4 个点，其坐标分别为

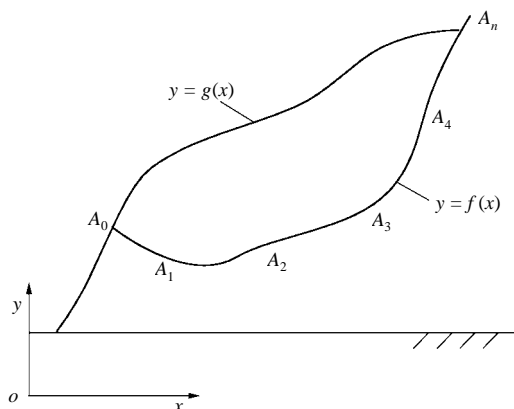


图 1 计算模型示意图

Fig.1 Basic flow chart of CACA

$(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$ ，滑动面的 2 个端点  $A_0, A_n$  的坐标分别为  $(x_0, y_0)$  及  $(x_n, y_n)$ ，整个滑动面可以由这 6 个点唯一确定，从而滑动面的搜索可以转换成上述 6 个点坐标的搜索过程。又由于根据滑坡面函数形式  $y = g(x)$  可以由  $x_0$  及  $x_n$  确定出  $y_0$  及  $y_n$ ，因此，滑动面搜索问题将变成安全系数关于 6 个控制点坐标的函数优化问题，即

$$L = \min F(x_0, x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4, x_n)$$

其中，各点的坐标必须处于有效搜索空间之内，且能形成有效的滑裂面，因此，上述各优化变量参数的约束条件如下：

$$\begin{matrix} x_0 & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_n \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & & \end{matrix}$$

当然，如果有下赋硬地层，则  $y_1$  必须大于硬层的纵坐标  $y_y$ ，这样滑坡滑动面搜索问题可表示为如下的优化问题：

$$\begin{aligned} &\min F(\mathbf{X}) \\ &\mathbf{X} = (x_0, x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4, x_n) \\ &\mathbf{X} \in \Omega \\ &\Omega = \begin{cases} x_0 & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_n \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & & \\ y_1 & y_y & & & & \end{cases} \end{aligned}$$

因此，滑动面搜索问题是一个典型的复杂约束优化问题，这里采用优化性能良好的仿生算法——免疫进化规划对该问题进行求解。

### 3 滑动面搜索的免疫进化规划法

#### 3.1 免疫进化规划简介

免疫进化规划是一种融合人工免疫算法原理与进化规划基本思想于一体而提出的一种进行复杂连续函数优化的新型仿生算法。

免疫进化规划根据人工免疫系统的基本原理,把待求解的问题对应为抗原,而问题的解对应为抗体,在进化规划的一般流程——变异及选择中加入免疫原理的一些处理方法,如免疫调节及浓度选择等机制,有效地改进了传统进化规划的计算环节,使两种算法取长补短,得到了一种新的计算模型。关于免疫进化规划的具体描述可参见文[8],这里不再赘述,免疫进化规划流程框图如图2所示。

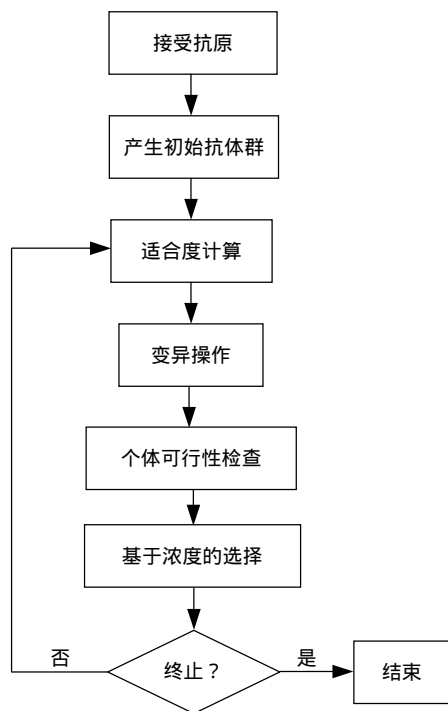


图2 免疫进化规划流程框图

Fig.2 Basic flow chart of IEP

算法首先针对一个特定问题(抗原),随机产生一组初始进化个体(抗体),计算每一抗体的适合度,对抗体进行自适应柯西变异,再通过基于浓度的选择操作得到下一代抗体群,直到满足终止条件,算法结束。

#### 3.2 滑动面搜索的免疫进化规划实现

首先,针对滑动面搜索的问题采用小区间生成法产生以向量  $X = (x_0, x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4,$

$y_4, x_n)$  为优化处理对象的一组初始群体。

由于这个问题是一个约束优化问题,因此,应该对初始群体进行约束条件的检验。这里,采用一种较简单的非可行剔除的方式,具体方法如下,判断随机生成的个体是否满足约束条件,如果不满足,则从新生成一个新个体,再判断直到满足为止。

采用滑坡稳定计算中的 Spencer 法进行候选滑动面下滑坡稳定安全系数的计算,并以计算得到的安全系数作为优化目标,为了适合于免疫进化规划对个体适合度的限制,这里取适合度函数形式如下:

$$FUN(i) = \frac{1.0}{1.0 + F(i)} \quad (1)$$

式中:  $FUN(i)$  为个体的适合度,  $F(i)$  为个体的安全系数。

变异操作面采用变异程度可以自适应变化的自适应柯西变异方式,采用这种变异方式,可以有效地保证变异程度随进化程度的自适应变化,在进化初期,变异程度较大,有利于扩大搜索范围,而进化后期,变异程度减少,保证了搜索的局部细化。

由于这个问题是一个约束优化问题,因此,变异完成后也应该进行约束条件的检验。这里,也可采用非可行剔除的方式,具体方法如下:

在每个个体  $X_i$  变异后应进行约束条件检验,如果变异后得到的个体  $X'_i$  不满足约束条件,则采用满足  $X_i$  约束条件的一个随机数作为  $X'_i$ ,并以经过检验的个体  $X'_i$  作为新个体。

选择操作采用基于浓度调节的选择方式,采用这种选择方式可以使各个体被选择的概率随着它的适合度及其浓度进行调整,从而保证高适合度个体在低浓度时选择概率较大,避免高适合度个体迅速蔓延,造成早熟。

以上操作的一些具体过程可以参见文[8]。

### 4 算 例

为了验证本文算法,这里采用一典型的标准算例——澳大利亚计算机应用协会的边坡计算考题<sup>[9]</sup>进行研究。

由于计算边坡稳定性的程序非常众多,为了对各个程序的计算情况进行比较,1987年澳大利亚计算机应用协会(ACADS)对当时澳大利亚所使用的所有边坡计算程序进行了一次全面的调查,并委托国际著名的边坡专家 B. Donald 教授等主持这项工作。

为了使调查的结果具有代表性，他们设计了 10 个计算题目作为计算目标。为了使调查的结果可靠，调查总共向 120 个不同单位发出了邀请。为了对不同结果进行判断，B. Donald 教授还邀请国际上在边坡程序研究方面做了较多工作的研究者提供“裁判程序”答案。这项调查历时 1 a 多，取得了大量成果。由于这次调查的规模较大，计算结果相对比较可靠，因此调查的考题也以其代表性被很多学者引用。这里，取其中一个考题作为算法的验证算例。图 3 为算例示意图。

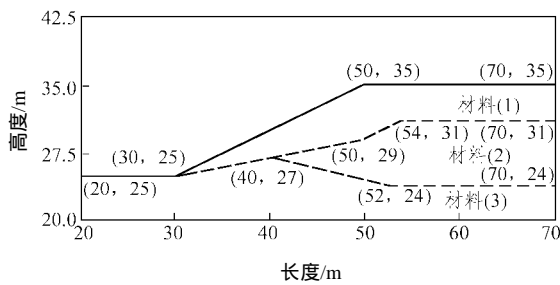


图 3 算例示意图

Fig.3 Sketch of example

该算例是一个非均质的边坡，边坡体由 3 种地层材料组成，各材料的物理力学参数见表 1。

表 1 地层材料的物性参数表

Table 1 Physico-mechanical parameters of ground soils

材料号	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\text{kPa}$	$\nu$	$K_0$
(1)	0.0	38.0	19.5	$1.0 \times 10^4$	0.25	0.65
(2)	5.3	23.0	19.5	$1.0 \times 10^4$	0.25	0.65
(3)	7.2	20.0	19.5	$1.0 \times 10^4$	0.25	0.65

为了计算这个问题，根据问题的特点，选取了 5 个滑动面特征控制点，坡面上的 2 个点假设只沿水平坡面移动，硬层纵坐标取计算考题边界。采用 Spencer 法进行滑坡安全系数计算，从而可得到这个问题的典型优化模型。

把上述已知条件代入依据本文算法编制的程序，最终的滑动面搜索结果见图 4。

为了比较本文算法计算的有效性，图 4 中也列出了考题中假设的实际滑动面。由图 4 可以看出，本文算法计算得到的滑动面同考题中假设的实际滑动面非常接近，说明本文算法可以搜索到比较合理的潜在滑动面。

另外，原考题中给出的合理安全系数为 1.344，而本文算法搜索得到的滑动面的安全系数为 1.340。

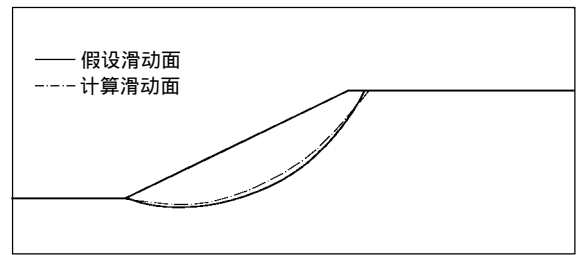


图 4 滑动面搜索结果

Fig.4 Result of searching critical failure surface

这说明本文算法搜索得到的滑动面的确是一个潜在最危险的滑动面；同时，也说明本文算法可以搜索到最危险的滑动面。

## 5 工程实例

为了验证本文算法的工程应用效果，这里采用一个高速公路边坡的工程实例<sup>[10]</sup>进行研究。

该边坡地处滨海滩涂地貌，地形起伏较大，滑坡区位于白垩世火山喷发盆地东南沿，地层主要分布为坡积成因的碎石土、残积成因的残积土以及下伏石帽山群下组下段英安质晶质屑凝灰岩，局部为凝灰岩。

为了进行研究并使研究具有典型的代表性，这里取其中一个典型的地质剖面进行研究。根据现场地质勘探结果，经过适当的简化处理，进行计算，可以得到该高速公路边坡计算结果如图 5 所示。

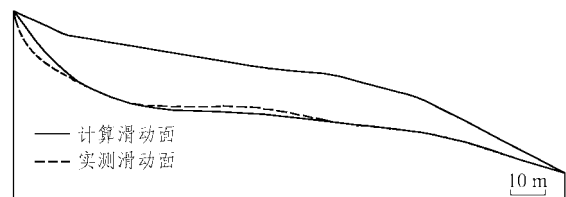


图 5 高速公路边坡计算结果

Fig.5 Computational result of an expressway slope

由图 5 可以看出，本文算法计算得到的滑动面同现场实测得到的滑动面非常吻合，说明本文算法计算效果良好，利用该算法可以搜索到比较合理的潜在滑动面。

采用搜索得到的滑动面及这里取的地层材料参数，计算得到的安全系数为 1.31，可以发现滑坡应该比较稳定，而实际现场观察到滑坡已有不稳定迹象，说明这里计算得到的安全系数偏大，同实际并不吻合。这种现象发生的原因主要由于滑动面参数

同材料参数值应该是不相同, 而这里计算所取的滑动面参数同材料参数一致, 这实际上是不正确的。

可见, 在滑坡稳定计算中滑动面参数的确定也具有非常重大的意义, 如果滑动面参数不准, 滑动面搜索再准确也很难得到符合实际的滑坡稳定计算结果。

关于滑动面参数确定的研究, 拟采用反分析的方法加以解决, 这部分的研究, 将在本文的第二部分中进行介绍。

## 6 结 论

(1) 滑坡稳定性计算中两个最重要的问题就是滑动面的搜索及其滑动面参数的确定。

(2) 滑坡潜在滑动面的搜索是滑坡稳定计算中的第一个重要任务, 通过对滑动面上控制点坐标的搜索确定, 滑动面搜索问题可以转换为一个标准的连续函数优化问题。

(3) 免疫进化规划是一种融合人工免疫算法与进化规划计算机制的新型仿生算法, 是进行连续函数优化问题的一种良好的工具。本文采用这个工具解决滑坡滑动面搜索这个典型的复杂函数优化问题, 从而提出了一种进行滑坡滑动面搜索的新算法。

(4) 本文提出滑动面搜索算法仅能解决一个方面的问题, 关于滑动面参数反演确定问题, 将是本文第二部分应做的工作。

### 参考文献(References) :

[1] 黄润秋, 许 强, 陶连金, 等. 地质灾害过程控制与过程模拟研究[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(Huang Runqiu, Xu Qiang, Tao Lianjin, et al. Study on Control and Simulation of Geological Disaster[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))

[2] Cheng Y M. Location of critical failure surface and some further studies on slope stability analysis[J]. Computers and Geotechnics,

2003, 30: 255-267.

- [3] Paul M, Philip W. The use of the simple genetic algorithm in finding the critical factor of safety in slope stability analysis[J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29: 699-714.
- [4] 邹广电. 边坡稳定分析条分法的一个全局优化算法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 309-312.(Zou Guangdian. A global optimization method of the slice method for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 309-312.(in Chinese))
- [5] 莫海鸿, 唐超宏, 刘少跃. 应用模式搜索法寻找最危险滑动圆弧[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 696-699.(Mo Haihong, Tang Chaohong, Liu Shaoyue. Determination of the most dangerous slip surface with pattern search method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 696-699.(in Chinese))
- [6] 曹文贵, 方祖烈. 边坡稳定性的动态规划研究及其工程应用实例[J]. 矿冶工程, 1996, 16(4): 10-13.(Cao Wengui, Fang Zulie. Dynamic programming of slope stability and its applications in Daxin manganese mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1996, 16(4): 10-13.(in Chinese))
- [7] 陈祖煜, 邵长明. 最优化方法在确定边坡最小安全系数方面的应用[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(4): 1-13.(Chen Zuyu, Shao Changming. The use of the method of optimization for minimizing safety factors in slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(4): 1-13.(in Chinese))
- [8] 高 玮, 郑颖人. 一种新的岩土工程进化反分析算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 192-196.(Gao Wei, Zheng Yingren. New evolutionary back analysis algorithm in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 192-196.(in Chinese))
- [9] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.(Chen Zuyu. Soil Slope Stability Analysis—Theory, Methods and Programs[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002.(in Chinese))
- [10] Li S J, Feng X T, Wu W P. Long-term monitoring and dynamic remedial measures in a large scale landslide[A]. In: Int. Conf. on Slide Engineering[C]. [s. l.]: [s. n.], 2003. 262-267.