

文章编号: 1000-7598-(2006)11-2015-05

基于改进遗传算法的地下空区边坡稳定性分析

万 文^{1,2}, 曹 平², 冯 涛¹, 袁海平²

(1. 湖南科技大学 岩土工程研究所, 湘潭 411201 2. 中南大学 岩土力学研究所, 长沙 410083;)

摘 要: 以边坡稳定性计算的非圆弧滑动面条分法为基础, 提出一种改进的遗传算法。在无需对边坡最危险滑动面的几何形状进行假设的前提下, 自由搜索最危险滑动面及其对应的最小安全系数。通过工程实例, 将改进方法与其他方法进行对比分析, 结果表明: 该方法不仅准确可靠, 而且总能搜索到全局最优解。该实例也表明: 在其他条件不变的情况下, 地下空区是导致边坡失稳的主要因素。

关 键 词: 条分法; 最危险非圆弧滑动面; 最小安全系数; 改进的遗传算法; 地下空区

中图分类号: TB 115 **文献标识码:** A

Analysis of slope stability for underground vacant areas based on improved genetic algorithm

WAN Wen^{1,2}, CAO Ping², FENG Tao¹, YUAN Hai-ping²

(1. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Based on the non-circular failure surface analysis method for the calculation of integral stability of slope, an improved genetic algorithm is presented; it can freely search for the most dangerous failure surface of slope and corresponding minimum safety factor without supposing the geometric shape of the most dangerous failure surface. The analytical results of some slopes by the proposed method and the comparisons between the proposed method and other ones show that the proposed method is accurate, reliable and able to find out the global optimal solution. At the same time, the underground vacant areas are the primary factors, if the other conditions are invariable.

Key words: slice method; most dangerous non-circular failure surface; minimum safety factor; improved genetic algorithm; underground vacant areas

1 引 言

地下空区主要是指人类活动(如矿产资源的采掘)在地表以下留下的各种形态、规模和不同分布的空洞, 而它们的存在会对边坡的稳定性造成不同程度的影响。在我国许多露天矿中, 受利益驱使, 大量的非法开采所形成的采空塌陷区对露天矿边坡的稳定性造成了严重的影响, 有的甚至干扰了矿山的正常生产秩序, 如: 甘肃白银有色金属公司的厂坝铅锌矿和中铝河南公司夹沟铝矿等。地下空区按其稳定程度(自稳能力)可分为 3 种状态: 第 1 种是安全稳定状态; 第 2 种是极限稳定状态; 第 3 种是塌陷失稳状态。本文主要是针对第 1 种状态下的地下空区进行研究, 即不考虑地下空区的变形对边

坡稳定性的影响。

边坡稳定性问题通常采用极限平衡理论分析其稳定性^[1,2], 其中关键问题是确定最危险滑动面(潜在最危险滑动面)和边坡的安全系数。在工程上, 国内外一般是采用先假定边坡滑移模式, 然后近似确定最危险滑动面, 再采用近似地求边坡安全系数的方法来分析边坡的稳定性, 如 Bishop 法、瑞典条分法以及它们的改进方法等^[3]。但影响边坡稳定性的因素众多, 对于千变万化的复杂岩(土)体边坡, 假定的边坡滑移模式(如圆弧滑动面或简单折线滑动面等)难以反映边坡滑移的实际状态。自 20 世纪 80 年代以来, 国内外很多研究者致力于边坡最危险滑动面的搜索技术, 提出了不同的方法, 归纳起来大致有以下 5 类: 变分法、固定模式搜索法、数学

收稿日期: 2005-02-21

修改稿收到日期: 2005-07-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.50274074); 中南大学博士研究生创新工程项目(No.040110); 湖南省教育厅资助项目(No.04C239)。

作者简介: 万文, 男, 1968 年生, 博士研究生, 副教授, 主要从事岩土工程的科研教学工作。E-mail: yenwanwen@sohu.com

规划方法、随机搜索方法和人工智能方法等^[4]。但由于岩(土)体具有时空上的变异性,边坡临界滑动面的搜索已演变成为复杂的、非线性的、非凸规划问题。而传统的优化方法,因易于陷入局部最优解,难以搜索到真正的最危险滑动面,遗传算法^[5,6]模拟了生物遗传进化过程,克服了传统方法容易陷入局部极小值的缺点,是一种全局优化算法,文献[7]验证了其优越性,是一种值得推广的方法。利用遗传算法搜索最危险滑动面的方法一般是先假定滑动面的形状为圆弧形,再利用简单或者加速遗传算法搜索其圆心和半径^[7,8],得到的最小安全系数对应的圆心及其半径所控制的圆弧为最危险滑动面曲线。由于假定的局限性以及简单遗传算法对各种实际问题搜索空间的大小变化适应能力较差,计算量大,容易出现早熟现象(局部极小值),为此笔者提出一种改进的遗传算法,在无需对边坡最危险滑动面的几何形状进行假设的前提下,自由搜索最危险滑动面并确定其对应的最小安全系数,并用以分析地下空区对边坡稳定性的影响,取得了较好的效果。

2 非圆弧滑动面条分法

2.1 基本假设

(1) 条块分割时为垂直条分;(2) 不考虑分条间垂直剪力的作用;(3) 作用于条块上的重力、反力通过条块底面的中点;(4) 最危险滑动面通过坡脚。

2.2 力学分析及公式推导^[9]

由图 1 可知,条块上作用力有:分块的重量 W_i ,作用在分块上的地面荷载 Q_i ,作用在分块上的水平作用力(如地震力) Q_{Ai} ,条间作用力的水平分力 X_i ,条间作用力的垂直力 Y_i ,条块底面的抗剪力(抗滑力) τ_i ,条块底面的法向力 N_i ,孔隙水压力 u_i 。

在图 1(a)中, H 为边坡的高度, q 为外荷载, θ 为边坡的倾角。

如图 1(b),根据垂直方向力平衡 $\sum Y=0$, 得

$$W_i + Q_i - N_i \cos \alpha_i - \tau_i \sin \alpha_i + Y_i - Y_{i+1} = 0 \quad (1)$$

式中 α_i 为分块滑面相于水平面的夹角; i 为分析条块序数,由水平方向力平衡 $\sum X=0$, 得

$$X_i + Q_{Ai} - N_i \sin \alpha_i - \tau_i \cos \alpha_i - X_{i+1} = 0 \quad (2)$$

由库伦破坏准则可得

$$\tau_i = \frac{1}{F} [c_i l_i + (N_i - u_i l_i) \tan \phi_i] \quad (3)$$

式中 F 为安全系数; l_i 为分块滑面长度, $l_i \approx$

$b_i / \cos \alpha_i$; b_i 为岩土条分块宽度; c_i 为滑体分块滑动面上的黏结力; ϕ_i 为滑面岩土的内摩擦角。

联立式 (1) ~ (3), 可得

$$F = \frac{\sum \frac{1}{n_{\alpha_i}} \{c_i b_i + [(W_i + Q_i - u_i b_i) + (Y_i - Y_{i+1})] \tan \phi_i\}}{\sum \{[W_i + (Y_i - Y_{i+1}) + Q_i] \tan \alpha_i + Q_{Ai}\}} \quad (4)$$

$$n_{\alpha_i} = \cos^2 \alpha_i (1 + \tan \alpha_i \tan \phi_i / F) \quad (5)$$

由假定可知 $Y_i - Y_{i+1} = 0$, 则式 (4) 变为

$$F = \frac{\sum \frac{1}{n_{\alpha_i}} \{c_i b_i + [(W_i + Q_i - u_i b_i)]\}}{\sum \{[W_i + Q_i] \tan \alpha_i + Q_{Ai}\}} \quad (6)$$

式中 n 为分块数。

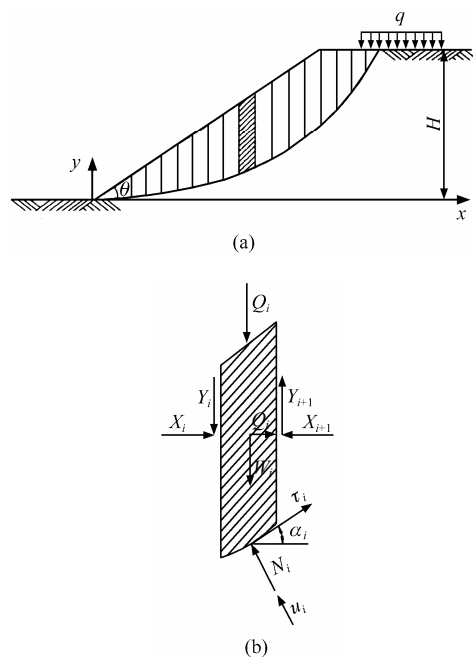


图 1 条分法计算简图

Fig.1 Sketch of slice method

2.3 对地下空区的简化处理

在本文研究中,不考虑地下空区变形的影响,通过以上分析可知,滑移线以外的地下空区对边坡的稳定性影响不大。而对于滑移线以内的地下空区,根据式 (5) 和式 (6),只要对地下空区进行如下的简单处理即可:

(1) 对于有地下空区的条块,将地下空区所占面积的重量设置为 0,重新计算该条块的重量 W_i ;

(2) 当地下空区穿过滑移面时,通过对地下空区的长度与分块滑面长度 l_i 的比较,然后求出 c_i 和 ϕ_i 的加权平均值。

3 搜索最危险非圆弧滑动面

利用简单遗传算法搜索最危险圆弧滑动面时, 初始解种群的确定较为简单, 一般是通过圆心和半径两个变量来确定最危险滑动面的位置^[7]。而非圆弧滑动面的确定显然没有那么简单, 它所需要控制的因素更多, 本文的思路是: 通过控制任意形状的非圆弧滑动面曲线上(二维条件下)的若干点来确定最危险滑动面曲线的位置(将这些点及坡脚点用光滑的曲线连起来模拟最危险滑动面曲线), 即用这些点的纵、横坐标作为控制变量。因此, 关于稳定系数最小化的问题, 实际上已经转化为由控制点(纵、横坐标)作为控制变量的优化问题。但是, 由此产生的控制变量较多, 如: 选定 $n+1$ 个点(包括坡脚点)作为决定滑动面曲线的控制点, 那么控制变量就有 $2n$ 个。然而控制变量越多, 则运算的效率就越低。因此, 如何合理、高效地选取控制变量, 同时对简单遗传算法进行改进就显得极为重要。

3.1 控制变量的选取

由以上的分析可知, 为达到计算的精度, 首先要合理、高效地选取控制变量, 即用尽可能少的控制变量来达到自由搜索最危险非圆弧滑动面的目的。受条分法的启发, 本文根据经验将滑动面曲线所在的区域用等间距的垂直直线进行平分(以坡脚点为起点, 最后一个的间距会与前面的有出入)(如图 2 所示)。在一些特殊情况下也可以用水平直线代替垂直直线, 关键是这些直线的位置必须是确定的, 也就是说控制变量的横坐标或纵坐标是一定的, 这样控制变量的个数就大大减少(与文献[10]相比), 为下一步较好地利用改进的遗传算法进行任意形状的最危险滑动面搜索奠定了坚实的基础。

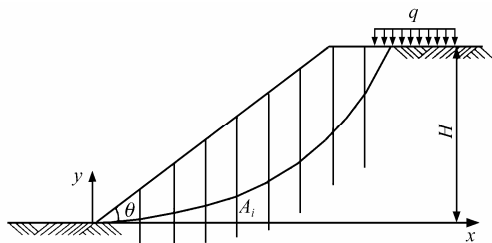


图 2 边坡非圆弧滑动面的确定

Fig.2 Decision of non-circular failure surface

3.2 改进的遗传算法

由于利用遗传算法搜索任意形状的最危险滑动面所要求的控制变量较多, 利用简单的遗传算法进

行计算时, 对于这种大规模的多变量优化问题, 其候选解数字串过长势必会影响算法的收敛性。本文根据该问题的特殊性, 对简单的遗传算法进行了改进, 具体的操作过程如下:

(1) 编码方法: 采用自然数编码, 该方式可在解的表现型上直接进行遗传操作, 从而便于引入所求问题最优解相关的启发式信息, 增加算法导向性, 提高了算法的收敛性和收敛速度。

(2) 适应度函数的确定: 这里的适应度函数 f 就是目标函数 F (由式 (5) 和式 (6) 给出) 的倒数, 即用安全系数的大小反映可行解的适应性。为寻找最小安全系数, F 值越小, 适应性能越好。

(3) 初始解种群的确定: 根据经验初步拟定出一批滑裂面。滑裂面由点序列 $A_i(y_i)$ ($i=1, \dots, n$) 表示。将点序列 A_i 的纵坐标 (y_i) 依次排列成 $y_1, y_2, \dots, y_n$ 的形式(若该点的纵坐标已知的话, 对应的横坐标设为 x_i), 经自然数编码成一条染色体。对于拟定的滑裂面形状, 其对应的安全系数用式 (5)、式 (6) 进行试算。

(4) 改进的选择复制: 采用随机复制算法, 该方法是一种基于个体适应度大小关系的复制方法。其基本操作是每次随机选取 N 个个体中适应度最高的一个个体遗传到下一代群体中, 然后将上述过程重复 M 次, 就可得到下一代群体中的 M 个个体。

(5) 交叉算子的选择: 采用均匀杂交法, 该方法不同于传统的杂交方法, 是一种改进的杂交方式。具体操作如下: 给出交换概率 P_c , 将所有种群的 N 个个体随机两两匹配。设 P_1, P_2 为匹配产生的双亲; C_1, C_2 为该双亲交换基因后产生的子女; L 为串长。交换方法是: 生成 L 个 $[0,1]$ 之间的随机数 R_i , $i \in [0, L]$ 。对于满足 $R_i < P_c$ 的双亲基因位进行交换, 产生两个新个体, 作为它们的子女。交换可以重新组合父代中的基因, 产生更为优异的个体, 但交换不会产生新的基因。

(6) 变异算子的选择: 选为随机变异(随机生成一个新个体, 并以某概率代替原个体)。进行变异操作时, 在每个基因位都生成一个随机数 R_i , 对于满足 $R_i < P_m$ 的基因位进行变异, 在控制变量的取值范围内随机地选取一个值取代该基因。

(7) 遗传算法的核心是遗传操作, 而遗传操作的核心又是交叉和变异操作, 交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 是交叉和变异操作的关键参数, 它们的选取直接影响遗传算法优化的效果。目前, P_c 和 P_m 的选取基本上还是靠经验取得, 不同的情况需经反复试

验确定。为克服这个缺点,本文采用交叉概率和变异概率,根据解的适应度值而变化。其数学表达式如下:

$$P_c = \frac{k_1(f_{\max} - f_m)}{f_{\max} - f_0} \quad (f_m \geq f_0, f_m \neq f_{\max}) \quad (7)$$

$$P_c = k_2 \quad (f_m < f_0) \quad (8)$$

$$P_m = \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_0} P'_m \quad (f_m \geq f_0, f \neq f_{\max}) \quad (9)$$

$$P_m = P'_m \quad (f < f_0) \quad (10)$$

式中 $f_{\max}$ 为当前种群最大适应度值; f_m 为待交叉父代个体适应度较大值; f 为某个体适应度; f_0 为种群平均适应度; P'_m 为随机数。 $k_1, k_2 \in (0, 1)$, 为可调参数。

(8) 终止条件: 本文采用最大遗传代数法, 即固定一个遗传代数, 迭代代数达到时计算就停止。

对于子代群体重复步骤 (4) ~ (7) 的操作, 直至达到迭代终止条件, 则计算结束, 由 f 最大所对应的点以及坡脚点来确定任意非圆弧状的最危险滑动面曲线。

按上述思想和运算步骤, 本文基于 MATLAB 编制了改进遗传算法的计算程序 (MIGA), 对任意形状的边坡滑动面进行搜索, 用于边坡稳定性分析和评价。

4 算 例

4.1 工程概况^[11]

中国铝业河南分公司矿山公司下属的夹沟铝矿从 1993 年以来, 由于非法开采留下大量的采空区, 现以该矿南面边坡为例, 取一个有采空区的剖面进行分析, 其几何参数如图 3, 该图为 2001 年 10 月开采的边坡现状图。根据地质勘察资料, 该剖面主要地层由上至下分别为: (1) 第四系黄土层, 为结构松散、垂直节理比较发育的土色~黄色黄土, 属于强透水层; (2) 砂质黏土岩层组, 岩性松散, 节理发育, 由砂质黏土层和页岩等构成; (3) 石炭系太原灰岩组, 为杂色含砂质、铁质页岩和黏土岩互层, 岩性松散, 层理和节理发育, 易风化; (4) 铝土矿石层, 为灰黄色的蜂窝状及深灰色致密状铝土矿, 岩性比较坚硬。整个边坡岩土层都是呈层状, 与水平方向的夹角在 10° 左右。通过现场和室内岩土力学试验得到了各岩土层的物理力学参数, 经过工程折减处理得出的边坡各层岩土体物理力学参数值如表 1。岩(矿)体结构面的抗剪强度参数见表 2。

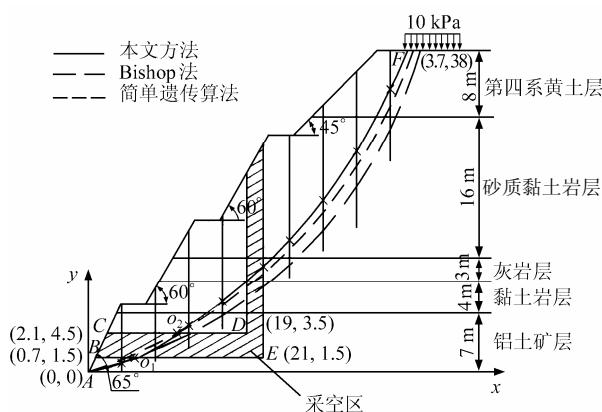


图 3 三种计算方法所得边坡最危险滑动面比较图
Fig.3 Comparison of the most dangerous failure surfaces calculated by 3 methods

表 1 岩土层物理力学参数表

Table 1 Physico-mechanical parameters of soils

地层	重度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	凝聚力/ kPa	内摩擦角/ $(^\circ)$
第四系黄土	19	35	24
黏土岩	22	8	29
灰岩	27	530	34
铝土矿	28	630	41

表 2 岩(矿)体结构面的抗剪强度参数表

Table 2 Shear resistance parameters of rock & mine structure surfaces

灰岩		铝土矿	
凝聚力/ kPa	内摩擦角/ $(^\circ)$	凝聚力/ kPa	内摩擦角/ $(^\circ)$
270	29	340	36

4.2 采空区的设置

采空区的设置如图 3 所示, 它是根据地质雷达勘测及现场勘探之后简化得到的, 采空区由两部分组成, 竖向为竖井, 规格为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, 另一部分为矿石采空区, 其采高为 3 m 。

4.3 计算方法

分两种情况进行计算, 第 1 种情况就是不考虑采空区的影响, 即假设没有地下空区; 第 2 种情况就是考虑地下采空区的影响。分别采用 Bishop 法^[12]、简单遗传算法^[7]及本文方法对该边坡的临界滑动面进行了搜索, 并计算相应的最小安全系数 (整体稳定性)。其中 Bishop 法采用陈祖煜教授开发的 Stab95 软件搜索临界滑动面。在计算中, 地震设防烈度设为 VII 度, 同时考虑爆破的影响; 由于坡顶有一公路通过, 超载设为 10 kPa ; 考虑岩土体为一般含水条件下的状态。

在运用本文方法时, 用于作控制变量的直线为 10 条, 它们之间的间距为 4 m (由于采空区的影响, 将竖井的一条边作为其中的一条控制变量的直线。

由于第 2 条控制变量直线搜索不到滑移线，而由图中的 BE 和 CD 两线段来代替，滑移线分别与 BE 和 CD 交于 O_1 和 O_2 两点。由图可知，这些控制变量直线的空间关系是全部已知的。在其他方面，为方便比较，本文方法中的一些遗传算法参数设计如下：其种群规模也为 30，进化代数数为 30 代（简单遗传算法为 300 代）， $k_1=0.9$ ， $k_2=0.65$ 。

4.4 计算结果及分析

安全系数(整体稳定性)计算结果列于表 3，考虑采空区的计算所得的最危险滑动面绘于图 3 中。

(1) 在实际生产中，2001 年 10 月该矿南部边坡开挖到图 3 所示的位置时发生了滑坡，现场观测的地面张裂缝开口位置距坡顶为 3.6~4.0 m，本文方法搜索到的 F 点 (3.7, 38) 与之很吻合。在清理过程中发现 O_1 和 O_2 两点的位置与本文方法搜索到的两者较为吻合，只是坡脚点有一点出入（实际滑移线低于坡脚点 0.5~0.8 m），这主要是由于本文的假定造成的。比较这 3 种方法的安全系数可知，本文方法最小，说明该方法可以得到全局最优解，而比较它们的曲线形式，本文方法更接近实际。

(2) 通过分析表明，采空区对边坡稳定性的影响非常明显。由表 3 可知，在不考虑采空区的影响时，该边坡的稳定系数大于 1；而在考虑采空区的影响时，边坡的稳定系数小于 1。由此说明，在其他条件不发生变化时，采空区是影响边坡稳定性的主要因素，也是导致该次滑坡的主要因素。

表 3 安全系数(整体稳定性)计算结果表
Table 3 Calculation results

是否考虑采空区	安全系数 F		
	Bishop 法	简单遗传算法	本文方法
不考虑	1.128	1.124	1.118
考虑	0.937	0.925	0.914

5 结 语

本文介绍了一种改进的遗传算法自由搜索任意形状的最危险滑动面及对应的最小安全系数。通过一实例，将该种改进遗传算法与 Bishop 法、简单遗传算法进行了比较，说明该种改进的遗传算法有较强的适应能力、较快的计算速度及全局优化特性，取得了令人满意的结果。同时，通过计算表明，在其他条件不发生变化时，采空区是影响边坡稳定性的主要因素，也是导致滑坡的主要因素，这与实际情况较为吻合。

参 考 文 献

- [1] 夏元友, 李梅. 边坡稳定性评价方法研究及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1 087—1 091.
XIA Yuan-you, LI Mei. Evaluation method research of slope stability and its developing trend[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(7): 1 087—1 091.
- [2] 郑颖人, 赵尚毅, 时卫民, 等. 边坡稳定分析的一些进展[J]. 地下空间, 2001, 21(4): 262—271.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, SHI Wei-ming, et al. Progress in analysis of slope stability[J]. *Underground Space*, 2001, 21(4): 262—271.
- [3] Fredlund D G. Analytical methods for slope stability analysis[C]. *Proceedings of the Fourth Int. Symposium on Landslides*, 1984. 229—250.
- [4] 王成华, 夏绪勇. 边坡稳定分析中的临界滑动面搜索方法述评[J]. 四川建筑科学研究, 2002, 28(3): 34—39.
WANG Cheng-hua, XIA Xu-yong. Method for rearching critical slip surface in slope stability analysis[J]. *Building Science Research of Sichuan*, 2002, 28(3): 34—39.
- [5] Holland J H. *Adaptation in Natural and Artificial System* [M]. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975.
- [6] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [7] 肖专文, 张奇志, 梁力, 等. 遗传进化算法在边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 44—46.
XIAO Zhuan-wen, ZHANG Qi-zhi, LIANG Li, et al. Application of genetic evolutionary algorithm to slope stability analysis[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(1): 44—46.
- [8] Goh A T C. Genetic algorithm search for critical slip surface in multiple-wedge stability analysis[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36(2): 382—391.
- [9] 孙君实. 条分法的数值分析[J]. 岩土工程学报, 1984, 6(2): 1—12.
SUN Jun-shi. Numerical analysis of slice method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1984, 6(2): 1—12.
- [10] 弥宏亮, 陈祖煜. 遗传算法在确定边坡稳定最小安全系数中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 671—675.
MI Hong-liang, CHEN Zu-yu. Genetic algorithm used in determining the global minimum factor of safety of slopes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(6): 671—675.
- [11] 曹平, 万文, 王军, 等. 夹沟矿群采空区对边坡稳定性影响分析及滑坡治理研究[R]. 长沙: 中南大学, 2004.
- [12] Bishop A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. *Geotechnique*, 1955, (1): 7—17.