

基于优化理论的权重反分析方法研究

邱道宏, 张乐文, 李术才, 林春金

(山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘要: 综合评判法应用的关键问题是影响因素权重的合理取值, 取值的不同对最终的评判结果有着很大的影响。目前, 尽管确定权重的方法很多, 但各有一定的不足。针对这一问题, 提出了一种基于优化理论的权重反分析方法, 把直接给权重问题转化为通过实际工程样本反求各影响因素权重问题。并推导了基于可拓学和遗传算法的权重反分析的数学优化模型, 编制了相应的计算程序。该权重反分析方法是一种通用方法, 可用于任何求解权重的问题, 为权重的求解提供了一种新思路, 其求解过程完全由实际样本驱动, 不需先知经验, 特别是在没有专家经验的情况下具有很强的可操作性。最后将该模型应用于实际工程问题, 分析计算结果表明该方法的计算结果是可靠的。

关键词: 权重; 反分析; 可拓学; 遗传算法; 岩爆

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)02-0259-06

作者简介: 邱道宏(1980-), 男, 四川成都人, 讲师, 从事岩石力学与地质灾害方面的研究。E-mail: qiudaohong@yahoo.com.cn。

Weight back analysis method based on optimization theory

QIU Dao-hong, ZHANG Le-wen, LI Shu-cai, LIN Chun-jin

(Geotechnical and Structural Engineering Research Center, School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The key point of using the comprehensive evaluation method is the reasonable values of weights of the influencing factor, and different weights have great influence on the final evaluation results. Although there are currently a lot of methods to confirm weights of influencing factors, these methods have some deficiencies. In order to overcome these deficiencies, a new study of weight back analysis method based on the optimization theory is suggested, which changes the directly given weight methods to the problem of back-analyzing the weights of the influencing factors according to engineering samples. A mathematical optimization model of the weight back analysis method is derived based on the extension theory and genetic algorithm, and the corresponding calculation program is compiled. This method is universal, shows a new idea and can be used in any weight problems. The solving process of the method is fully driven by engineering samples, and no experience is necessary, and it is very useful especially in the absence of expertise. Finally, the results of this method in practical engineering show that this method is reliable.

Key words: weight; back analysis; extenics; genetic algorithm; rock burst

0 前 言

在岩土工程领域中, 多因素综合评判法是一种常用的等级判定方法, 其主要是利用几个影响评判目标的影响因素通过一定的算法来确定最终的评价等级。目前常用的综合评判方法有模糊综合评判法、可拓评判法、灰色聚类法等。应用综合评判法进行多因素综合评判的关键问题在于影响因素权重的合理选取上, 各影响因素权重取值的不同对最终的评判结果有着很大的影响。权重反应了各评价指标间的相对重要性, 其在很大程度上影响着最终的评价结果, 各属性的权重发生轻微的变化, 其结果就有可能发生较大的变化。

所以在进行综合评判之前就要先了解各评价结果对各评价指标的依赖程度和敏感程度即各指标的权重。目前, 计算权重常用的方法主要有层次分析法、灰色关联度法、神经网络法、粗糙集理论等。虽然这些方法在一定程度上解决了权重选取的问题, 避免了人为确定权重的盲目性, 但其在实际工程应用中仍存在着一定的不足之处, 得出的权重可靠性不高。

本文提出了一种基于优化理论的权重反分析方

基金项目: 中国博士后科学基金(20090461203); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB724607); 山东省自然科学基金面上项目(Y2007F53)

收稿日期: 2008-12-10

法,把直接给权重问题转化为通过实际工程样本反求各影响因素权重问题,即通过建立评价等级和权重的函数关系式,利用优化算法求取各评价指标的权重值。根据这一思路,本文推导了基于遗传算法和可拓学的权重反分析方法的数学优化模型,并在 matlab 的平台上编制了相应的计算程序,最后将该模型应用于实际工程问题,得出了一些有意义的结论。

1 基于优化理论的权重反分析方法

假设评价等级向量为 $G=(g_1, g_2, \mathbf{L}, g_m)$, 等级个数为 m , 评价指标向量为 $C=(c_1, c_2, \mathbf{L}, c_n)$, 评价指标的个数为 n , 评价指标的权重向量为 $W=(w_1, w_2, \mathbf{L}, w_n)$, 且 $\sum_{i=1}^n w_i=1$, 评价指标和评价等级之间的映射关系为 f , 则有:

$$G=f(C, W) \quad (1)$$

式(1)的含义为由评价指标及其权重根据一定的综合评判算法 f 即可求出最终的评价等级。这里的综合评判的方法根据实际情况而定,可采用可拓评判法、模糊综合评判法等。对于式(1)由评价指标、评价指标的权重及函数关系 f 求评价等级为正问题,而已知评价等级求取评价指标、评价指标的权重及函数关系 f 的问题为反问题。基于优化理论的权重反分析方法就是在已知评价等级、评价指标及函数关系 f 的前提下,依据一定的优化算法来求取评价指标的权重^[1-2]。若已知样本集 $S=(s_1, s_2, \mathbf{L}, s_k)$ (样本由评价指标值和评价等级组成),则由样本集 S 求取各评价指标的权重的数学表达式为(这里样本集 S 的样本个数 k 应不小于所求权重的个数 n):

$$\left. \begin{aligned} \min \sum_{i=1}^k (g_i - g_{f_i(C, W)})^2, \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^n w_i = 1, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, g_i 是第 i 个样本的实际等级值, $g_{f_i(C, W)}$ 是第 i 个样本由综合评判方法所得的等级值, w_i 是第 i 个评价指标的权重。

上面的数学问题是一个优化问题,即在约束条件为 $\sum_{i=1}^n w_i=1$ 的情况下,求解使 $\sum_{i=1}^k (g_i - g_{f_i(C, W)})^2$ 最小时的 w_i 。所选的优化算法,可根据实际情况而定,如遗传算法、粒子群算法、混沌优化算法等。

2 可拓学和遗传算法的权重反分析模型

2.1 模型参数选择

由上面的分析,权重反分析模型的参数主要是指

综合评判方法的选择和优化算法的选择。综合评判方法中的可拓评判法,其从可拓集合理论出发,通过建立多指标性能参数的质量评价模型来确定最终的评价等级^[3]。同时,由式(2)可以得出优化算法的目标是使 $\sum_{i=1}^k (g_i - g_{f_i(C, W)})^2$ 最小,而综合评判得出的等级值为一个离散的值,实际的等级也是一个离散值,这样势必会使优化问题陷入局部最小,无法得出正确的结果,故为提高优化算法的可靠度,应采用连续的等级值来代替离散的等级值。可拓评判法中的等级变量特征值为一个连续变量,其不但可以反应出等级值,而且还可以反应出偏向另一类的程度,这比仅仅给出类别描述更能反应实际的等级情况。鉴于可拓评判方法的以上优点,所以这里采用可拓评判来建立评价指标和评价等级之间的函数映射关系。

对于优化算法的选择,考虑到遗传算法具有隐含的并行性和强大全局搜索能力,可以在很短的时间内搜索到全局最优点等优点,故这里采用遗传算法作为模型的优化算法。由于遗传算法是一种较为成熟的优化算法,这里对其优化过程不进行详细说明,具体优化过程可参考文献[4, 5]。

2.2 可拓评判建模过程

可拓学是蔡文教授创立的一门新学科,具体的评价过程有如下的6个步骤^[6]。

(1) 确定经典域

$$R_{0j}=(N_{0j}, C, V_{0ji})=\begin{bmatrix} N_{0j} & c_1 & V_{0j1} \\ & c_2 & V_{0j2} \\ & \dots & \dots \\ & c_n & V_{0jn} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中, N_{0j} 表示所划分的第 j 个质量等级($j=1, 2, 3, \dots, m$)。 V_{0ji} 为 N_{0j} 关于因素 c_i 所确定的量值范围——经典域。

(2) 确定节域

$$R_p=(P, C, V_p)=\begin{bmatrix} P & c_1 & V_{p1} \\ & c_2 & V_{p2} \\ & \dots & \dots \\ & c_n & V_{pn} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} N_{0j} & c_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \dots & \dots \\ & c_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中, P 为质量等级的全体 $V_{pi} = \langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$, 为 P 关于因素 i 所取量值的范围, 即 P 的节域。

(3) 确定待评物元

对于待评对象 P , 把所收集到的数据或分析结果用物元表示, 即得到待评物元,

$$R = (P, C, v_i) = \begin{bmatrix} P & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \dots & \dots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

(4) 确定各评价指标关于各类别等级的关联度
各待评对象的单项评价指标 v_i 关于各等级 j 的关联度为

$$K_{0j}(v_i) = \begin{cases} \frac{r(v_i, V_{0ji})}{r(v_i, V_{pi}) - r(v_i, V_{0ji})} & (r(v_i, V_{pi}) - r(v_i, V_{0ji}) \neq 0) \\ -r(v_i, V_{0ji}) - 1 & (r(v_i, V_{pi}) - r(v_i, V_{0ji}) = 0) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $r(v_i, V_{0ji}) = \left| v_i - \frac{a_{0ji} + b_{0ji}}{2} \right| - \frac{b_{0ji} - a_{0ji}}{2}$, $r(v_i,$

$$V_{pi}) = \left| v_i - \frac{a_{pi} + b_{pi}}{2} \right| - \frac{b_{pi} - a_{pi}}{2}$$

(5) 计算待评物元关于各类别等级的关联度
待评对象 p 关于质量等级 j 的关联度为

$$K_{0j}(P) = \sum_{i=1}^m w_i K_{0j}(v_i) \quad (7)$$

式中, w_i 为指标 c_i 的权系数, 且 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。

这里指标 c_i 的权系数就是文中要通过反分析方法来求解的权重值。

(6) 可拓评判等级

若 $K_{j\max}(P) = \max_{j \in \{1, 2, 3, \dots, m\}} K_{0j}(p)$, 则评定 p 属于等级 j 。令

$$\left. \begin{aligned} \bar{K}_{0j}(P) &= \frac{K_{0j}(p) - \min_j K_{0j}(p)}{\max_j K_{0j}(p) - \min_j K_{0j}(p)} \\ j^* &= \frac{\sum_{j=1}^m j \bar{K}_{0j}(p)}{\sum_{j=1}^m \bar{K}_{0j}(p)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

则称 j^* 为 p 的级别变量特征值, 从 j^* 中可看出偏向另

一类的程度。

2.3 基于遗传算法和可拓学的权重反分析模型

在确定了综合评判方法和优化算法后就可以依据其数学表达式来推导相应的优化模型。由可拓评判的优化过程可推导出如下的优化问题:

$$\left. \begin{aligned} \min \sum_{i=1}^s g_i - \left[\frac{\sum_{j=1}^m \frac{\sum_{i=1}^m w_i K_{0j}(v_i) - \min_j \sum_{i=1}^m w_i K_{0j}(v_i)}{\max_j \sum_{i=1}^m w_i K_{0j}(v_i) - \min_j \sum_{i=1}^m w_i K_{0j}(v_i)}}{\sum_{j=1}^m \frac{\sum_{i=1}^m w_i K_{0j}(v_i) - \min_j \sum_{i=1}^m w_i K_{0j}(v_i)}{\max_j \sum_{i=1}^m w_i K_{0j}(v_i) - \min_j \sum_{i=1}^m w_i K_{0j}(v_i)}} \right]^2 \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^n w_i = 1 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中, g_i 是样本实际等级值, w_i 是第 i 个评价指标的权重, 其它参数的含义与 2.2 节所示相同。依据上面的数学优化模型, 本文在 matlab 的平台上编制了相应的计算程序 WeightCal.m。

3 实例对比

文献[7]中选取的洞室最大切向应力与岩石抗压强度的比值 s_q/s_c 、岩石抗压强度与抗拉强度的比值 s_c/s_t 和弹性能量指数 W_{et} 这 3 个指标的作为岩爆预测的评价因子, 将岩爆等级分为无岩爆、轻微岩爆、中等岩爆和强烈岩爆 4 个类别, 并提供了 18 个国内外的岩爆工程实例, 采用模糊综合评判的方法对这 18 个岩爆工程进行了岩爆等级预测, 并与实际岩爆发生情况进行了比较。

王元汉等^[7]对这 3 个岩爆因子的权重值采用专家经验法确定, 分别为 {0.4, 0.3, 0.3}, 该权重确定方法过于依赖专家的经验, 特别在没有专家经验的情况下该方法应用起来具有很大的局限性。本文以这 18 个典型的岩爆实例为学习样本, 利用上面的建立的权重反分析模型及程序, 计算这 3 个评判因子 s_q/s_c 、 s_c/s_t 和 W_{et} 在该岩爆评价模型中的权重, 过程如下。

原始的数据样本如表 1 所示, 并将岩爆等级无岩爆、轻微岩爆、中等岩爆和强烈岩爆离散为 1, 2, 3, 4。依据王元汉的论文中给出的岩爆烈度与各主控因子的关系(表 2), 可以构建可拓分类标准及各指标隶属度, 如表 3 所示。其中各指标的隶属度采用线性函数的方法来确定, 对于指标值越大岩爆等级越高的指标:

表1 原始数据表
Table 1 Original data

分类号	工程名称	s_q/s_c	s_c/s_t	W_{et}	岩爆等级 (离散值)
1	天生桥二级水电站引水隧洞	0.300	24.000	6.600	中(3)
2	二滩水电站2号支洞	0.410	29.700	7.300	轻微(2)
3	龙羊峡水电站地下洞室	0.106	31.200	7.400	无(1)
4	鲁布革水电站地下洞室	0.227	27.800	7.800	无(1)
5	渔子溪水电站引水隧洞	0.530	14.800	9.000	中(3)
6	太平驿水电站地下洞室	0.380	17.500	9.000	轻微(2)
7	李家峡水电站地下洞室	0.096	23.000	5.700	无(1)
8	瀑布沟水电站地下洞室	0.360	24.600	5.000	轻微(2)
9	锦屏二级水电站引水隧洞	0.820	18.500	3.800	中(3)
10	拉西瓦水电站地下厂房	0.315	24.100	9.300	中(3)
11	挪威Sima水电站地下厂房	0.270	21.700	5.000	中(3)
12	挪威Heggura公路隧道	0.370	24.100	5.000	中(3)
13	挪威Sewage隧道	0.420	21.700	5.000	中(3)
14	瑞典Forsmark核电站冷却水隧洞	0.380	21.700	5.000	中(3)
15	瑞典Vistas水电站引水隧洞	0.440	26.700	5.500	轻微(2)
16	苏联Rasvumchorr矿井巷	0.317	21.700	5.000	中(3)
17	日本关越隧道	0.377	22.100	5.000	中(3)
18	意大利Raibl铅硫化锌矿井巷	0.774	17.500	5.500	强(4)

$$y = \begin{cases} 1 & (x \geq x_{max}) \\ \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} & (x_{min} < x < x_{max}) \\ 0 & (x \leq x_{min}) \end{cases}; \quad (10)$$

对于指标值越小岩爆等级越高的指标:

$$y = \begin{cases} 1 & (x \leq x_{min}) \\ \frac{x_{max} - x}{x_{max} - x_{min}} & (x_{min} < x < x_{max}) \\ 0 & (x \geq x_{max}) \end{cases}。 \quad (11)$$

式中 y 为指标隶属度; x 为有量纲指标实际值; x_{max} 为有量纲指标最大值; x_{min} 为有量纲指标最小值。

表2 单因素指标分类表

Table 2 Classification of single parameter

岩爆等级	s_q/s_c	s_c/s_t	W_{et}
无岩爆	<0.300	>40.000	<2.000
轻微岩爆	0.300~0.500	40.000~26.700	2.000~3.500
中等岩爆	0.500~0.700	26.700~14.500	3.500~5.000
强烈岩爆	>0.700	<14.500	>5.000

表3 可拓分类标准

Table 3 Standard of extenics evaluation for indexes

隶属度	s_q/s_c	s_c/s_t	W_{et}
无岩爆	0~0.300	0.800~1.000	0~0.200
轻微岩爆	0.300~0.500	0.534~0.800	0.200~0.3500
中等岩爆	0.500~0.700	0.290~0.534	0.3500~0.500
强烈岩爆	0.7~1.000	0~0.2900	0.500~1.000

将岩爆等级即无岩爆、轻微岩爆、中等岩爆和强烈岩爆分别记为 I_1, I_2, I_3, I_4 。将 s_q/s_c 、 s_c/s_t 和 W_{et} 分记为 C_1, C_2 和 C_3 。则由表 3 就可构造出岩爆各等级的经典物元:

$$R_{01} = \begin{bmatrix} I_1 & C_1 & \langle 0.00, 0.30 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.80, 1.00 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.00, 0.20 \rangle \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$R_{02} = \begin{bmatrix} I_2 & C_1 & \langle 0.30, 0.50 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.534, 0.80 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.20, 0.35 \rangle \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$R_{03} = \begin{bmatrix} I_3 & C_1 & \langle 0.50, 0.70 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.29, 0.534 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.35, 0.50 \rangle \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$R_{04} = \begin{bmatrix} I_4 & C_1 & \langle 0.70, 1.00 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.00, 0.29 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.50, 1.00 \rangle \end{bmatrix}, \quad (15)$$

节域物元为

$$R_p = \begin{bmatrix} P & C_1 & \langle 0.00, 1.00 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.00, 1.00 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.00, 1.00 \rangle \end{bmatrix}。 \quad (16)$$

在构建完各等级的经典物元和节域物元, 就可以

利用程序 WeightCal.m 及表 1 中的数据来计算各岩爆影响因素的权重值, 计算结果如表 4 所示。

表 4 计算结果比较

Table 4 Comparison of results

权重值	s_q/s_c	s_c/s_t	W_{et}
文献[7]	0.400	0.300	0.300
本文方法	0.390	0.320	0.290

从表 4 的分析结果可以看出, 评价指标 s_q/s_c 较其它两个评价指标有较大的权重值。从目前对岩爆机理的研究来看, 在岩爆的众多影响因素中应力因素和岩性因素是两个最重要的方面, 而评价指标 s_q/s_c 同时兼顾了应力和岩性两个方面, 所以其有较大的权重也较为合理。评价指标 s_c/s_t 和 W_{et} 只是从岩性方面来衡量岩爆的等级, 不免有些片面性, 所以其有较小的权重值也较为合理。同时文中方法计算的结果和文献 [7] 经验法给出的权重值也较为吻合, 鉴于文献 [7] 等给出的权重值是通过国内外大量岩爆实例进行统计分析得到的, 故其给出的权重值具有较高的可靠性的。可见本文方法确定的权重同实际情况和专家经验法给出的权重都是较为吻合的, 故该方法得出的权重具有较高的可靠性, 特别是在没有专家经验的情况下, 该方法具有很强的可操作性。

4 工程应用

江边水电站位于四川省甘孜藏族自治州东南部, 地处九龙县境内的雅砻江左岸一级支流九龙河下游河段上。电站采用有坝引水式方案, 电站总库容为 $133 \times 10^4 \text{ m}^3$, 装机容量 330 MW。引水隧洞由进水口至调压井段, 洞线长度约 8.5 km, 开挖洞径 8.4 m, 隧洞埋深 100~1694 m。引水隧洞白龙庙滑坡体下游穿越山脊, 埋深较大, 一般为 300~1694 m, 全线埋深 >300 m 的洞段长 4824 m, 占总长度的 53%, 属深埋隧洞。目前引水隧洞已进入大埋深作业区, 地层岩性为黑云母石英片岩, 埋深超过 700 m, 还余约 3500 m 的大埋深洞段尚未开挖。从前期开挖的情况来看, 当洞室埋深超过 550 m 时, 就已进入中等岩爆区, 岩爆现象频发。目前受岩爆影响, 开挖工作已受到严重影响。图 1 为拱顶的片状或块状的岩爆剥离掉块。图 2 为边墙由于高地应力作用而引起的开裂和剥落。

下面对引水隧道部分洞段采用上面建立的岩爆评价模型和文中方法得出的各评价指标权重进行岩爆强度预测。对于 s_c/s_t 和 W_{et} 采用现场取样, 再进行室内实验的方法确定, 对于 s_q 采用有限元计算的方法确定。各评价洞段的可拓评判结果和实际岩爆情况如表

5 所示。由评价结果可知, 评价等级和实际岩爆情况一致, 可见, 本文提出的这种权重计算方法是可靠的。



图 1 拱顶掉块

Fig. 1 Rockfall of arch crown



图 2 边墙开裂

Fig. 2 Cracked surfaces of side wall

表 5 岩爆评价结果和实际岩爆等级

Table 5 Evaluation results of rock burst and practical grade

桩号	s_q/s_c	s_c/s_t	W_{et}	评价等级 (特征值)	实际等级
引4+300	0.470	18.240	2.460	轻微岩爆 (2.45)	轻微岩爆
引+400	0.520	17.660	2.860	中等岩爆 (2.69)	中等岩爆
引+500	0.540	17.230	2.940	中等岩爆 (2.76)	中等岩爆
引+600	0.580	16.570	3.050	中等岩爆 (2.87)	中等岩爆

5 结 论

(1) 提出了一种基于优化理论的权重反分析方法, 把直接给权重问题转化为通过实际工程样本反求各影响因素权重问题。该方法是一种有意义的尝试, 并具有一定的实际应用价值, 求解过程完全由实际样本驱动, 不需先知经验, 特别是在没有专家经验的情况下, 该方法具有很强的可操作性。

(2) 该方法得出的这 3 个岩爆指标的权重值只适

用该岩爆评价模型,对于其它岩爆评价模型这几个指标的权重值将会不同,应重新计算,但是该方法得出的各指标间的相对重要性,在其它评价模型中是一致的,所以该次反分析结果对其它岩爆模型权重值的确定有一定的参考价值。

(3) 该方法计算出的权重值,在很大程度上取决于学习样本的选择,如果数据非常少且不具有代表性,则会出现随着样本的增加,优化的权重值也会发生波动的情况,所以在原始样本数据的选择上要选择有代表性的样本,并尽可能的要覆盖到所有可能的影响因素的组合。

(4) 岩爆强度等级是一个逐渐过度的过程,其类别值实际上是一个连续变量,而非离散值,用连续变量来描述岩爆强度类别更能反应实际情况。

参考文献:

- [1] 冯夏庭,周辉,李邵军,等. 岩石力学与工程综合集成智能反馈分析方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(9): 1737 - 1744. (FENG Xia-ting, ZHOU Hui, LI Shao-jun, et al. Integrated intelligent feedback analysis of rock mechanics and engineering problems and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(9): 1737 - 1744. (in Chinese))
- [2] 董志宏,丁秀丽,卢波,等. 大型地下洞室考虑开挖卸荷效应的位移反分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(6): 1562 - 1568. (DONG Zhi-hong, DING Xiu-li, LU Bo, et al. Displacement back analysis of rock mechanical parameters of large-scale underground powerhouse with unloading surrounding rockmass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(6): 1562 - 1568. (in Chinese))
- [3] 贾超,肖树芳,刘宁. 可拓学理论在洞室岩体质量评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(5): 751 - 756. (JIA Chao, XIAO Shu-fang, LIU Ning. Application of extenics theory to evaluation of tunnel rock quality[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(5): 751 - 756. (in Chinese))
- [4] 吕文杰,李晓军,朱合华. 基于遗传算法的边坡稳定分析通用算法[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(5): 595 - 599. (LÜ Wen-jie, LI Xiao-jun, ZHU He-hua. GA-based generalized slope stability analysis method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(5): 595 - 599. (in Chinese))
- [5] 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. (ZHU He-hua, LIU Xue-zeng. Comparison study of mixed optimal methods based on genetic algorithm in back analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(2): 197 - 202. (in Chinese))
- [6] 汪明武,金菊良,李丽. 可拓学在膨胀土胀缩等级评判中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(6): 754 - 757. (WANG Ming-wu, JIN Ju-liang, LI Li. Application of extension method to the evaluation of the grade of shrinkage and expansion for the expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(6): 754 - 757. (in Chinese))
- [7] 王元汉,李卧东,李启光,等. 岩爆预测的模糊数学综合评判方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, **17**(5): 493 - 501. (WANG Yuan-han, LI Wo-dong, LEE P K K, et al. Method of fuzzy comprehensive evaluations for rockburst prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, **17**(5): 493 - 501. (in Chinese))