

地下工程围岩稳定性分类的突变级数法研究

宫凤强^{1,2}, 李夕兵^{1,2}, 高科^{1,2}

1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 中南大学 深部金属矿产开发与灾害控制湖南省重点实验室, 湖南 长沙, 410083)

摘要: 提出基于突变级数理论的地下工程围岩稳定性分类的评价方法。根据突变级数理论, 对影响地下工程围岩稳定性的因素(包括岩石质量指标、岩石单轴饱和抗压强度、完整性系数、结构面强度系数和地下水渗水量)进行多层次分解, 对数据进行归一化处理, 结合突变理论与模糊数学理论, 进行综合量化运算, 得到最后的评价类别。利用广州抽水蓄能电站一期工程的12个实测数据和插值法得到的18个学习样本, 建立地下工程围岩稳定性分级的突变级数模型, 并用于电站二期工程22处围岩的稳定性分类中。研究结果表明, 突变级数法的判别结果比较符合实际, 并与人工神经网络法、支持向量机法判别结果较一致, 为地下工程围岩稳定性分类提供了一种新方法。

关键词: 突变级数法; 地下工程; 围岩; 稳定性分类

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2008)05-1081-06

Catastrophe progression method for stability classification of underground engineering surrounding rock

GONG Feng-qiang^{1,2}, LI Xi-bing^{1,2}, GAO Ke^{1,2}

1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Hunan Key Laboratory of Resources Exploitation and Hazard Control for Deep Metal Mines, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Based on the catastrophe progression theory, an integrative evaluation method for the stability classification of surrounding rock was presented. Five control factors, i.e. rock quality designation, uniaxial compressive strength, integrality coefficient, strength coefficient of structural plane and seepage measurement of groundwater, were selected in the analysis of multi-level objective decomposition. According to the catastrophe theory and the fuzzy member function, the data were normalized and the catastrophic affiliated functional value was calculated, then a catastrophe progression model was obtained to classify the stability classification of surrounding rock. 12 samples of the first stage project in Guangzhou pump accumulator electricity station and 18 samples produced by the interpolation method were taken as the training samples. 22 samples of the second stage project were selected to verify this method. Compared with the artificial neural network (ANN) method and support vector machine (SVM) method, the results show the catastrophe progression method has excellent performance and high prediction accuracy, and can be used to evaluate the stability of surrounding rock in underground engineering.

Key words: catastrophe progression method; underground engineering; surrounding rocks; stability classification

收稿日期: 2007-10-25; 修回日期: 2008-01-05

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(50490274); 教育部高校博士点专项基金资助项目(20060533011); 中南大学研究生学位论文创新选题资助项目(1343-77238)

通信作者: 宫凤强(1979-), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 从事岩土工程稳定性、可靠性分析及其应用方面的研究; 电话: 13327311551; E-mail: fengqiang@126.com

地下工程围岩稳定性分类是评定围岩性质、判断地下工程稳定性的前提, 是进行工程设计和制定相应工程措施的重要依据。然而, 目前由于地下工程地质条件的复杂性及地质勘察手段有限, 尚不能获得准确判定围岩级别的全部数据, 因此, 传统的围岩级别判别只能靠经验、定性方法。近年来, 很多新方法不断涌现^[1-8], 其中, 研究得较多的分级方法主要有灰色优化理论^[1]、模糊数学^[2]、人工神经网络^[3-4]、支持向量机^[5]、距离判别分析理论^[6-7]等, 这些方法虽然在围岩稳定性分级中取得了许多成果, 但还存在一些不足^[9]: 模糊理论存在着隶属度、权重难以确定等缺陷; 而灰色理论的准确性和使用的简便性不够; 专家系统则因专家知识往往是琐碎的、不精确的和不确定的, 并且获取和表达专家知识又是一项非常繁重、困难的工作, 导致应用专家系统时出现许多问题; 神经网络方法本身亦存在着难以克服的缺陷, 在学习样本数量有限时, 精度难以保证, 当学习样本数量很多时, 泛化性能不高。因此, 围岩稳定性评价有待进一步研究。

突变级数法 (Catastrophe progression method, CPM) 是在突变理论基础上发展起来的一种综合评价方法。该方法考虑了各评价指标的相对重要性, 定性和定量相结合, 从而减少了主观性又不失科学性、合理性, 计算过程简单, 计算结果准确^[10]。在此, 本文作者借鉴突变级数法的思想, 建立计算模型对围岩稳定性进行综合评价, 得出围岩稳定性较准确的分级结果, 并通过工程实例验证该模型的可行性和有效性。

1 突变级数法的思想和评价步骤

突变级数法的思想是将所研究系统的评价模型分解为若干个指标, 由底层指标向高层指标逐层综合, 再把各层的控制变量代入相应的突变模型中进行归一化计算, 对于同一评价对象采取“舍大取小”原则或取平均值, 得到各层次的突变级数^[11]。该理论和地下工程围岩稳定性的评价思想基本一致。其具体评价步骤如下^[10-14]。

1.1 建立递阶层次结构模型

首先, 对评价总指标进行多层次分主次分解, 排列成树状目标层次结构, 由评价总指标到下层指标, 逐渐分解到最下层次子指标, 分解到一般可以计量的子指标时即可停止, 每层的分解形式如图 1 所示。

1.2 确立评价体系各层次的突变系统类型

突变系统基本类型有 7 种, 其中最常见 4 种类型见图 1, 其数学模型如下。

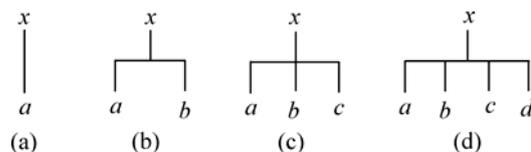
折叠突变: $f(x) = x^3 + ax$;

尖点突变: $f(x) = x^4 + ax^2 + bx$;

燕尾突变: $f(x) = x^5 + ax^3 + bx^2 + cx$;

蝴蝶突变: $f(x) = x^6 + dx^4 + ax^3 + bx^2 + cx$ 。

其中: x 为突变系统中的 1 个状态变量; $f(x)$ 为状态变量 x 的势函数; a , b , c 和 d 为状态变量的控制变量。



(a) 折叠突变; (b) 尖点突变; (c) 燕尾突变; (d) 蝴蝶突变

图 1 几种典型的突变模型系统示意图

Fig.1 Several catastrophe model systems

1.3 评价指标的无量纲化处理

由于评价指标具有不同的量纲, 导致指标之间缺乏公度性, 运用极差变换法对评价指标进行无量纲化处理, 得到初始模糊隶属函数值。其中评价指标按其作用不同, 可以分为正向指标和逆向指标。正向指标是指那些数值越大越好的评价指标, 逆向指标则是指其数值越小越好的评价指标。

a. 对于正向指标, 令

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min(j)}}{x_{\max(j)} - x_{\min(j)}}; \quad (1)$$

b. 对于逆向指标, 令:

$$y_{ij} = \frac{x_{\max(j)} - x_{ij}}{x_{\max(j)} - x_{\min(j)}}。 \quad (2)$$

式中: x_{ij} 表示第 i 个评价样本的第 j 项指标原始数据; $x_{\min(j)} = \min_i \{x_{ij}\}$; $x_{\max(j)} = \max_i \{x_{ij}\}$; y_{ij} 为极差变换后初始模糊隶属函数值。

若控制变量值在 $[0, 1]$ 范围内, 则不需对数据进行处理, 可直接用于突变级数的计算。

1.4 由突变系统的分歧方程导出归一公式

突变系统的势函数为 $f(x)$, 根据突变理论, 将它的所有临界点集合成平衡曲面, 其方程通过对 $f(x)$ 求一阶导数即 $f'(x) = 0$ 而得。它的奇点集通过对 $f(x)$ 求二阶导数而得, 即通过 $f''(x) = 0$ 消去 x , 得到突变系统的分歧点集方程。分歧点集方程表明, 当诸控制变

量满足此方程时, 系统就会发生突变。通过分解形式的分歧点集方程导出归一公式, 由归一公式将系统内诸控制变量不同的质态化为同一质态, 即化为由状态变量表示的质态。

尖点突变系统分解形式的分歧点集方程为

$$a = -6x^2, \quad b = 8x^3。$$

其归一公式为:

$$x_a = \sqrt{|a|}, \quad x_b = \sqrt[3]{|b|}。 \quad (3)$$

燕尾突变系统分解形式的分歧点集方程为

$$a = -6x^2, \quad b = 8x^3, \quad c = -3x^4。$$

其归一公式为:

$$x_a = \sqrt{|a|}, \quad x_b = \sqrt[3]{|b|}, \quad x_c = \sqrt[4]{|c|}。 \quad (4)$$

蝴蝶突变系统分解形式的分歧点集方程为

$$a = -10x^2, \quad b = 20x^3, \quad c = -15x^4, \quad d = 4x^5。$$

其归一公式为:

$$x_a = \sqrt{|a|}, \quad x_b = \sqrt[3]{|b|}, \quad x_c = \sqrt[4]{|c|}, \quad x_d = \sqrt[5]{|d|}。 \quad (5)$$

式中: x_a, x_b, x_c 和 x_d 分别表示各式中对应 a, b, c 和 d 的 x 值。

1.5 利用归一公式进行综合评价

利用归一公式对同一控制对象各个控制变量(指标)计算出的 x 值采用“互补”与“非互补”原则, 求取系统的总突变隶属函数值。“互补”原则是指一个系统各控制变量(如 a, b, c 和 d)之间可以互相弥补其不足, 以相应的 x 达到较高的平均值, 即 $x = (x_a + x_b + x_c + x_d) / 4$ 。“非互补”原则是指一个系统的控制变量之间不可互相弥补其不足, 因而, 按归一公式求得系统状态变量 x 的值时, 要从各控制变量相对应的 x_a, x_b, x_c 和 x_d 等中取最小的一个作为整个系统的 x 值。同理, 经过逐层递阶运算, 即可得到总突变隶属函数值。

2 突变级数法在地下工程围岩稳定性评价中的应用

2.1 地下工程围岩稳定性指标体系的建立

考虑影响围岩稳定性因素指标之间的相关性及其指标数据测试的难易性, 选用岩石质量指标 R_{QD} 、岩石单轴饱和抗压强度 R_w 、完整性系数 K_v 、结构面强度系

数 K_f 和地下水渗流量 ω 5 个指标作为分类影响因素^[1]。按照突变级数法, 将上述因素分解, 由下层指标向上逐层综合, 指标体系如图 2 所示。

2.2 地下工程稳定性影响因素分类标准

根据相关行业规范及国外分级经验, 采用 5 级分类, 选取 R_{QD}, R_w, K_v 和 K_f 和 ω 作为具体分类指标, 各单因素分类指标标准见表 1。

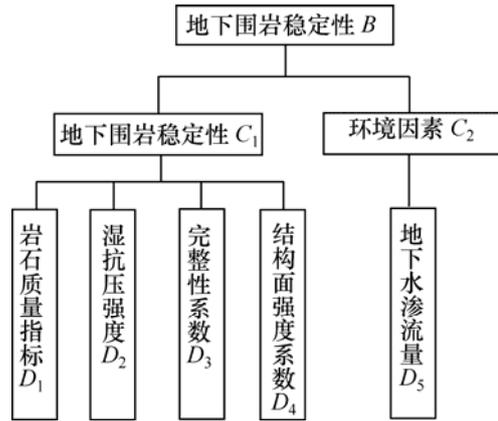


图 2 地下围岩稳定性分级指标体系

Fig.2 Assessment indicator system for stability classification of surrounding rocks

表 1 围岩稳定性分类标准

Table 1 Stability classification standards for surrounding rock

类别	$R_{QD}/\%$	R_w/MPa	K_v	K_f	$\omega/[\text{L} \cdot (\text{min} \cdot 10\text{m})^{-1}]$
I	100~90	200~120	1.0~0.75	1.0~0.8	0~5
II	90~75	120~60	0.75~0.45	0.8~0.6	5~10
III	75~50	60~30	0.45~0.30	0.6~0.4	10~25
IV	50~25	30~15	0.30~0.20	0.4~0.2	25~125
V	25~0	15~0	0.20~0	0.2~0	125~300

2.3 地下工程稳定性评价的突变级数模型

选取广州抽水蓄能电站的围岩作为工程对象。广州抽水蓄能电站是中国第 1 座也是目前世界上最大的抽水蓄能电站, 电站主要由上、下水库, 2 个地下厂房和 30 km 的地下各种通道构成, 分 2 期建成。第 1 期和第 2 期电站分别设 1 条引水隧洞, 采用独立地下厂房和开关站。表 2 中部分数据为广州抽水蓄能电站一期工程的实测围岩参数^[4]。另外, 考虑到样本须具有代表性和均匀性, 采用插值法构造一个学习样本集^[3]。

利用极差变换方法对上述数据进行无量纲化处理。由于岩石质量指标 R_{QD} 、单轴饱和抗压强度 R_w 、完整性系数 K_v 、结构面强度系数 K_f 为越大越好型, 选

择式(1), 地下水渗水量 ω 为越小越小型, 选择式(2), 进行数据的归一化处理。其中各评价指标的最大值和最小值分别取围岩分类标准中相应的区间极值。由图 1 可知, D_1, D_2, D_3 和 D_4 构成蝴蝶突变模型; D_5 构成折叠突变模型; C_1 和 C_2 构成尖点突变模型。并根据突变级数原理计算各围岩的突变级数。

表 2 来自一期工程的突变级数学习样本参数

Table 2 Parameters of training samples from the first stage project

序号	$R_{QD}/\%$	R_w/MPa	K_v	K_f	$\omega/[\text{L}\cdot(\text{min}\cdot 10\text{ m})^{-1}]$	CPM 结果	围岩类别
1	71.8	90.1	0.57	0.45	0.0	0.956 6	II
2	51.0	40.2	0.38	0.55	10.5	0.925 1	III
3	52.0	25.0	0.22	0.52	12.0	0.910 3	III
4	68.0	90.0	0.38	0.38	21.0	0.935 3	III
5	28.0	40.0	0.32	0.30	18.5	0.896 6	IV
6	51.0	45.0	0.15	0.30	5.0	0.910 3	III
7	76.0	95.0	0.70	0.55	12.0	0.957 9	II
8	87.0	95.0	0.70	0.50	9.8	0.962 1	II
9	76.0	90.0	0.57	0.50	11.0	0.953 3	II
10	50.0	35.0	0.32	0.35	20.0	0.909 1	III
11	68.0	90.0	0.57	0.35	18.5	0.941 6	III
12	82.0	95.0	0.70	0.35	0.0	0.961 7	II
13*	100	200	1.00	1.00	0.0	1.000 0	I
14*	97.5	180.0	0.94	0.95	1.3	0.994 7	I
15*	95.0	160.0	0.88	0.90	2.5	0.989 2	I
16*	86.3	105	0.68	0.75	6.3	0.970 0	II
17*	82.5	90.0	0.60	0.70	7.5	0.962 6	II
18*	78.8	75.0	0.53	0.65	8.8	0.954 6	II
19*	75.0	60.0	0.45	0.70	7.5	0.949 0	III
20*	68.8	52.5	0.41	0.55	13.8	0.936 4	III
21*	62.5	45.0	0.38	0.5	17.5	0.927 0	III
22*	56.3	37.5	0.34	0.45	21.3	0.916 4	III
23*	43.8	26.3	0.28	0.35	50.6	0.881 6	IV
24*	50.0	30.0	0.30	0.40	25.0	0.904 9	III
25*	37.5	22.5	0.25	0.30	75.0	0.856 5	IV
26*	31.3	18.8	0.23	0.25	100	0.829 3	IV
27*	18.8	11.3	0.15	0.15	168.8	0.743 9	V
28*	25.0	15.0	0.20	0.20	125.0	0.798 2	V
29*	12.5	7.5	0.10	0.10	212.5	0.674 5	V
30*	6.3	0.8	0.05	0.05	256.3	0.562 2	V

注: 带“*”者为插值法得到的样本数据。

为了说明突变级数法的具体运用, 以来自第 1 期工程的第 1 个学习样本为例进行具体计算。

对 D_1, D_2, D_3 和 D_4 , 有

$$x_{D1} = \sqrt{0.718} = 0.847\ 3; \quad x_{D2} = \sqrt[3]{0.450\ 5} = 0.766\ 6; \\ x_{D3} = \sqrt[4]{0.57} = 0.868\ 9; \quad x_{D4} = \sqrt[5]{0.45} = 0.852\ 4.$$

根据“互补”原则, 可得到如下计算结果:

$$C_1 = (0.847\ 3 + 0.766\ 6 + 0.868\ 9 + 0.852\ 4) / 4 = 0.833\ 8$$

对 D_5 , 有

$$C_2 = x_{D5} = 1.000\ 0.$$

对 C_1 与 C_2 , 有

$$x_{C1} = \sqrt{0.833\ 8} = 0.913\ 1; \quad x_{C2} = \sqrt[3]{1.000\ 0} = 1.000\ 0.$$

按“互补”原则, 可以得出地下围岩突变级数 B 为 0.956 6。同理, 对其他样本进行计算, 结果见表 2 中 7 列。

根据学习样本的分级与突变级数, 可将围岩稳定性分为 5 类:

第 I 级, $0.980\ 0 \leq B \leq 1.000\ 0$;

第 II 级, $0.950\ 0 \leq B < 0.980\ 0$;

第 III 级, $0.900\ 0 \leq B < 0.950\ 0$;

第 IV 级, $0.800\ 0 \leq B < 0.900\ 0$;

第 V 级, $0 \leq B < 0.800\ 0$ 。

2.4 模型检验

为了检验突变级数法在围岩稳定性评价中的有效性, 用第 1 期工程中已知分类结果的样本与突变级数法分类结果相比较, 结果见表 3, 表中同时列出了利用人工神经网络(ANN)法的预测结果^[4]。可以看出, 突变级数法的判别结果和 ANN 法结果一致, 与实际结果比较相符。只有第 4 个样本把 V 级判为 IV 级, 其原因可能是把介于两级围岩之间的样本判为其中一级。

3 工程应用

为了考察突变级数法对地下工程围岩稳定性判别的适用性和准确性, 对广州抽水蓄能电站第 2 期工程部分工厂与引水系统(隧洞 1 洞段)围岩进行分类, 并与 BP 神经网络法^[4]、支持向量机法^[5]的判别结果进行比较, 结果见表 4。突变级数法输出的结果与人工神经网络法(ANN)、支持向量机法(SVM)输出的结果基本相符, 说明突变级数法在地下工程围岩稳定性评价

中的适用性强。

表 3 检验样本判别结果对比

Table 3 Comparison results of several methods for testing sample data

序号	$R_{QD}/\%$	R_w/MPa	K_v	K_f	$\omega/[\text{L}\cdot(\text{min}\cdot 10\text{ m})^{-1}]$	CPM 结果	判别类别	实际类别	ANN 判别结果
1	75.0	87.3	0.30	0.63	0.0	0.952 5	II	II	II
2	52.5	70.5	0.60	0.40	15.0	0.934 8	III	III	III
3	78.0	130.5	0.75	0.50	10.0	0.965 5	II	II	II
4	30.2	8.4	0.18	0.18	50.0	0.846 2	IV	V	IV
5	52.5	28.6	0.38	0.16	23.0	0.899 6	IV	IV	IV

表 4 第 2 期工程突变级数法围岩分类结果

Table 4 Results of surrounding rocks classification of the second stage project using catastrophe progression method

进尺	风化蚀变情况	$R_{QD}/\%$	R_w/MPa	K_v	K_f	$\omega/[\text{L}\cdot(\text{min}\cdot 10\text{ m})^{-1}]$	CPM 结果	判别类别		
								突变级数法	ANN 法	SVM 法
0+000~0+067	中—弱风化 断层蚀变带	26.0	36.0	0.22	0.35	5.0	0.898 0	IV	IV	IV
		50.0	40.2	0.50	0.50	10.0	0.933 0	III	III	III
0+067~0+130	弱风化	52.0	25.0	0.20	0.50	5.0	0.912 6	III	III	III
		71.0	90.0	0.35	0.30	18.0	0.934 5	III	III	III
0+130~0+198	微风化	75.0	95.0	0.70	0.50	0.0	0.963 1	II	II	II
		77.5	90.0	0.57	0.45	10.0	0.953 2	II	II	II
0+198~0+297	断层蚀变带	50.0	70.0	0.50	0.25	5.0	0.931 0	III	III	III
		50.9	34.0	0.32	0.35	21.0	0.908 6	III	III	III
		31.5	20.0	0.23	0.25	46.0	0.866 4	IV	IV	IV
		50.6	26.0	0.26	0.35	20.0	0.905 5	III	III	III
0+297~0+406	微风化	75.5	90.0	0.45	0.52	8.0	0.951 8	II	II	II
		85.5	94.0	0.65	0.55	0.0	0.966 9	II	II	II
0+406~0+426	断层蚀变带	80.0	95.0	0.50	0.45	0.0	0.958 8	II	II	II
		35.0	70.5	0.35	0.30	10.0	0.916 7	III	IV	III
0+426~0+560	微风化	50.0	90.0	0.50	0.25	5.0	0.935 4	III	III	III
		85.0	93.0	0.60	0.50	0.0	0.964 2	II	II	II
0+560~0+622	断层蚀变带	78.5	92.0	0.55	0.50	6.0	0.956 9	II	II	II
		30.2	70.0	0.40	0.20	10.0	0.910 8	III	IV	III
0+622~0+686	微风化	85.0	92.0	0.70	0.50	10.0	0.960 7	II	II	II
0+727~0+828	微风化	51.0	35.0	0.32	0.35	15.0	0.912 6	III	III	III
厂房区	微风化	87.0	95.0	0.50	0.45	0.0	0.961 4	II	II	II
		82.0	96.0	0.75	0.35	0.0	0.963 0	II	II	II

4 结 论

a. 把突变级数法运用于地下工程围岩分类评价中。选用岩石质量指标、岩石单轴饱和抗压强度、完整性系数、结构面强度系数和地下水渗水量 5 个指标

作为分类影响因素，按照突变级数法，建立了一种地下工程围岩围岩分类评价方法。并利用实际工程的学习样本建立了围岩分类评价的突变分析模型。经过检验和实际工程的应用，证明该模型预测结果比较准确，为地下工程围岩分类评价的研究开辟了一条新的途径。

b. 突变级数法与经验方法和传统方法相比，操作

性与实用性较强, 并且不使用权重, 在很大程度上避免了赋权的主观性。该方法简便易行, 可以在地下工程中应用。

参考文献:

- [1] 冯玉国. 灰色优化理论模型在地下工程围岩稳定性分类中的应用[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 62-66.
FENG Yu-guo. Application of grey optimal theory model in the stability classification of adjoining rock of underground construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(3): 62-66.
- [2] 许传华, 任青文. 地下工程围岩稳定性的模糊综合评判法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1852-1855.
XU Chuan-hua, REN Qing-wen. Fuzzy-synthetic evaluation on stability of surrounding rockmasses of underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1852-1855.
- [3] 杨朝晖, 刘浩吾. 地下工程围岩稳定性分类的人工神经网络模型[J]. 四川联合大学学报: 工程科学版, 1999, 3(4): 66-72.
YANG Chao-hui, LIU Hao-wu. Artificial neural network model for the stability classification of adjoining rock of underground construction[J]. Journal of Sichuan Union University: Engineering Science Edition, 1999, 3(4): 66-72.
- [4] 蔡广奎. 围岩稳定性分类的BP网络模型的研究[D]. 南京: 河海大学土木工程学院, 2001.
CAI Guang-kui. Study of the BP neural network on the stability classification of surrounding rocks[D]. Nanjing: School of Civil Engineering, Hohai University, 2001.
- [5] 赖永标. 支持向量机在地下工程中的应用研究[D]. 青岛: 山东科技大学资源与环境工程学院, 2004.
LAI Yong-biao. Application and study of support vector machine in the underground engineering[D]. Qingdao: College of Resource and Environment Engineering, Shandong University of Science and Technology, 2004.
- [6] 宫凤强, 李夕兵. 距离判别分析法在岩体质量等级分类中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 190-194.
GONG Feng-qiang, LI Xi-bing. Application of distance discriminant analysis method to classification of engineering quality of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 190-194.
- [7] ZHANG Wei, LI Xi-bing, GONG Feng-qiang. Stability classification model of mine-lane surrounding rock based on distance discriminant analysis method[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(1): 117-120.
- [8] 谢本贤, 陈沅江, 史秀志. 深部岩体工程围岩质量评价的IRMR法研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(5): 987-992.
XI Ben-xian, CHEN Yuan-jiang, SHI Xiu-zhi. IRMR method for evaluation of surrounding rock quality in deep rock mass engineering[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(5): 987-992.
- [9] 于德海, 彭建兵. 地下工程围岩分类的神经网络可视化评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(4): 116-119.
YU De-hai, PENG Jian-bing. Visual evaluation of neural network on classification of surrounding rocks for underground engineering[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(4): 116-119.
- [10] 黄奕龙. 突变级数法在水资源持续利用评价中的应用[J]. 干旱环境监测, 2001, 15(3): 167-170.
HUANG Yi-long. Application of catastrophe progression method to evaluation of sustainable usage of water resource[J]. Arid Environmental Monitoring, 2001, 15(3): 167-170.
- [11] 李思平, 孙连英. 基于非线性理论的边坡稳定性评价模型[J]. 水文地质工程地质, 2002(2): 11-14.
LI Si-ping, SUN Lian-ying. The assessment model of slope stability based on non-linear theory[J]. Engineering Geology & Hydrological Geology, 2002(2): 11-14.
- [12] 朱顺泉, 徐国祥. 上市公司财务状况的突变级数评价模型及其实证研究[J]. 统计与信息论坛, 2003, 18(3): 11-14.
ZHU Shun-quan, XU Guo-xiang. Catastrophe progression evaluation model and research of financial condition of listed companies[J]. Statistics and Information Tribune, 2003, 18(3): 11-14.
- [13] 李燕, 陈晓宏, 张鹏飞. 突变级数法在区域生态系统健康评价中的应用[J]. 中国人口, 资源与环境, 2007, 17(3): 50-54.
LI Yan, CHEN Xiao-hong, ZHANG Peng-fei. Application of catastrophe progression method to evaluation of regional ecosystem health[J]. China Population, Resources and Environment, 2007, 17(3): 50-54.
- [14] 蒋军成. 突变理论及其在安全工程中的应用[J]. 南京化工大学学报, 1999, 21(1): 24-28.
JIANG Jun-cheng. Catastrophe theory and application in the safety engineering[J]. Journal of Nanjing University of Chemical Technology, 1999, 21(1): 24-28.