

[文章编号] 1004-0609(2002)01-0155-06

矿震系统的胞映射-突变预测模型^①

周 辉¹, 冯夏庭^{1, 3}, 谭云亮², 王泳嘉³

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 岩土力学重点实验室, 武汉 430071; 2. 山东科技大学, 泰安 271019;
3. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110004)

[摘 要] 针对传统矿震预测理论和方法存在的问题及矿震本身的非线性动力学特征, 基于胞映射理论和突变理论提出了“矿震系统的胞映射-突变预测模型”。该模型既考虑了矿震系统的非线性动力学本质, 又利用胞映射理论消除了初值的随机性和矿震系统本身的内在随机性对预测结果的影响。分析实例表明, 该模型可以更精确而客观地识别和预测矿震演化过程中的突变行为。

[关键词] 矿震; 非线性动力学; 胞映射-突变预测模型

[中图分类号] TD 324

[文献标识码] A

矿震包括岩爆、煤爆和冲击地压等多种表现形式, 是一种对矿井生产具有重大危害的岩体动力现象。目前, 我国许多矿井的开采活动逐步向深部延伸, 这种危害性就愈突出。长期以来, 广大学者和工程技术人员从不同侧面提出了一系列矿震的预测预报理论^[1, 2]。但是, 传统理论大都基于定性的、表象的或静态的观点, 没有反映出矿震孕育过程中的非线性动力学本质。因此, 到目前为止, 在应用传统理论进行的矿震预测预报研究中, 很少有成功的范例。近年来, 一些学者将非线性动力学方法应用于岩爆等岩体动力灾害的预测预报中, 得到了一些较满意的结果^[3~6], 对于矿震的预测预报, 这些理论和方法不失为一些很有前途的研究方向。

突发性是矿震的典型特征, 这种突发性的岩体动力行为可以用突变理论来描述。另外, 最新的研究成果表明, 矿震系统是一个典型的混沌系统^[7, 8]。对于混沌系统而言, 系统的内在随机性会导致其对观测初值的极端敏感性, 即观测初值稍有误差, 就会导致预测结果的完全不同; 而由于矿井工作面的生产条件非常复杂, 矿震系统变量观测中的误差是难免的。如何消除观测初值的随机性和系统内在随机性的影响是传统的预测理论没有解决的难题。传统的非线性预测理论对于矿震混沌系统的预测结果采用的是确定性的表达方式, 即“矿震系统在未来某时刻将处于某一确定状态或在未来某时刻将发生突变”。本文作者认为, 采用这种方式来

表述矿震的预测结果本身就是不科学的。因为初值观测的随机性和系统的内在随机性决定了对矿震所作出的预测中必然包含有一定的随机成分, 因此, 矿震混沌系统的预测不应当是确定性问题, 而是一个概率问题。显然, 传统的非线性预测理论并没有提供解决这一问题的方法。为了解决上述问题, 本文作者基于突变理论和胞映射理论提出了一种新的矿震系统的非线性预测模型——胞映射-突变预测模型, 从而更准确地识别矿震演化过程中的突变行为。

1 胞映射理论及时间序列灰色-尖点突变模型的基本原理

1.1 胞映射理论的基本原理

胞映射理论由 Hsu 提出^[9, 10], 是对非线性动力系统, 特别是对强混沌性系统进行全局分析的一种有效工具。胞映射将点到点的映射转化为胞到胞的映射, 可以“平滑”并削弱观测初值的随机性和系统的内在随机性对系统动力学模式的影响。其基本原理如下:

设 N 维动力系统的非线性动力学方程可以表示为

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_N; \alpha_i) \quad (1)$$

式中 x_i 为系统的状态变量, α_i 为控制变量。

把 N 维状态空间的每个坐标都分成许多小段,

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50179034); 国家自然科学基金资助项目(59804005)

[收稿日期] 2001-01-09; [修订日期] 2001-06-25

[作者简介] 周 辉(1972-), 男, 博士研究生。

每段用一个整数 Z_i 表示, 离散化状态空间的 N 维有限单元称为胞, 以 N 个整数 $Z_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 构成向量 Z (称为胞向量) 来表征。

将系统的动力学行为(从 n 时刻到 $n+1$ 时刻)用胞对胞的映射 c 表示为离散化的整数方程

$$Z(n+1) = cZ(n) \quad (2)$$

若每个胞都只有一个相应的映射胞, 即称为狭义胞映射; 若每个胞对应多个映射胞, 则称为广义胞映射。对于广义胞映射, 需要计算出每个胞在下一时刻映射到多个胞 i 中的概率, 记为 ξ_i 。把这些概率汇总成胞概率向量, 记为 $\xi(t)$ (t 为时间)。在实际计算中, $\xi(t)$ 可按下面的方法进行计算:

将第 j 个胞离散细化为若干个子胞, 设第 k 个子胞的中心点状态向量为 $X^d(n)$, 则其一次映射后的状态向量可由式(1)经差分运算求得

$$X^d(n+1) = F(X^d(n)) \quad (3)$$

记胞 j 的所有子胞经上述映射后落入胞 i 的个数为 M_{ij} , 则从胞 j 到胞 i 的一次转移概率为

$$P_{ij} = M_{ij} / N_s \quad (4)$$

式中 N_s 为一个胞内子胞的总数。

由 P_{ij} 构成 Markov 一次转移概率矩阵 P , 则系统的动力学行为可用概率方程表示为

$$\xi(n+1) = P\xi(n) \quad (5)$$

利用上式, 可以分析非线性动力系统的各种演化特性。

1.2 时间序列的灰色-尖点突变预测模型

为了弱化矿震系统变量观测信息的随机性, 可采用灰色建模理论的思想, 首先对原始观测数据进行累加。令 $x^{(0)}$ 为原始观测序列, $x^{(1)}$ 为其一次累加生成(AGO)序列, 即

$$x^{(1)}(k) = \sum_{j=1}^k x^{(0)}(j) \quad (j, k \leq m) \quad (6)$$

若视时间序列 $x^{(1)}$ 为来自于时间的连续函数 $\hat{x}^{(1)}(t)$ 的一组离散解, 则可进行 Taylor 展开, 并截取至 5 次项, 从而将 $\hat{x}^{(1)}(t)$ 近似表示为

$$\hat{x}^{(1)}(t) = A_0 + A_1 t + A_2 t^2 + A_3 t^3 + A_4 t^4 + A_5 t^5 \quad (7)$$

对上式求导, 即可得到还原后的模型表达式

$$\dot{\hat{x}}^{(1)}(t) = \frac{d\hat{x}^{(1)}(t)}{dt} = A_1 + 2A_2 t + 3A_3 t^2 + 4A_4 t^3 + 5A_5 t^4 \quad (8)$$

令

$$y = \dot{\hat{x}}^{(1)}(t), \quad a_0 = A_1, \quad a_1 = 2A_2, \quad a_2 = 3A_3, \quad a_3 = 4A_4, \quad a_4 = 5A_5 \quad (9)$$

则式(8)可简化为

$$y = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 \quad (10)$$

对上式进行 Tschirnhaus 变换^[11], 即令

$$x = t - A, \quad A = \frac{a_3}{4a_4} \quad (11)$$

则式(10)可化为

$$y = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_4 x^4 \quad (12)$$

作进一步代换, 令

$$x = \sqrt[4]{\frac{1}{4b_4}} z \quad (b_4 > 0) \text{ 或} \\ x = \sqrt[4]{-\frac{1}{4b_4}} z \quad (b_4 < 0) \quad (13)$$

这里仅就 $b_4 > 0$ 的情况进行讨论(对于 $b_4 < 0$ 的情况, 可将方程的两端同乘以 -1 , 从而化成与 $b_4 > 0$ 相同的方程形式)。合并式(12)和(13)得

$$y = \frac{1}{4} z^4 + \frac{1}{2} a z^2 + b z + c \quad (14)$$

式中 $a = \frac{b_2}{\sqrt{4b_4}}$, $b = \frac{b_1}{\sqrt{4b_4}}$; 略去与突变无关的 c ,

式(14)即为尖点突变的标准形式。

由突变理论可知, 式(14)的平衡曲面方程和相应的分叉集方程分别为

$$z^3 + az + b = 0 \quad (15)$$

$$4a^3 + 27b^2 = 0 \quad (16)$$

分叉集方程是稳定平衡状态区与非稳定平衡状态区的分界线, 系统的演化只有越过这个分界线才有可能从一个平衡状态突变到另一个平衡状态。

如图 1 所示, 分叉集将控制变量空间划分成两部分: 在区域 E , $4a^3 + 27b^2 > 0$, 系统是稳定的; 在区域 J , $4a^3 + 27b^2 < 0$, 系统有 3 个平衡点, 其中位于平衡状态曲面的上、下叶的平衡点是稳定的, 而位于中叶的平衡点是不稳定的, 且不稳定平衡点满足

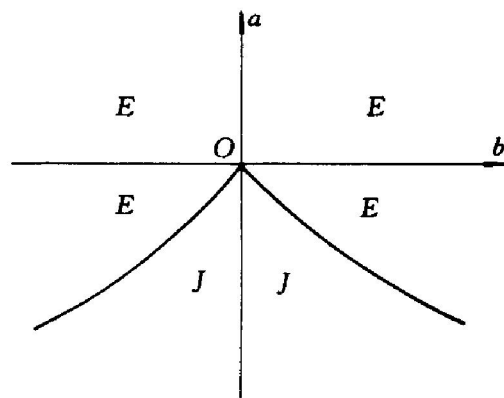


图 1 分叉集与平衡状态空间的划分

Fig. 1 Partition of bifurcation group and equilibrium state space

$$\frac{d^2y}{dz^2} = 3z^2 + a < 0 \quad (17)$$

由平衡曲面方程(15)求解 z : ① $a = 0$ 时, $z_1 = z_2 = z_3 = 0$; ② $a < 0$ 时, 方程有 3 个实根:

$$z_1 = 2(-\frac{a}{3})^{\frac{1}{2}}, z_2 = z_3 = -(-\frac{a}{3})^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

式中 解 z_1 位于上叶(或下叶), 解 z_2 和 z_3 合并于中叶与下叶(或上叶)的交线(分叉集的一枝)上, 解 z_2 和 z_3 所处的点即为系统状态在分叉集上发生突变的位置(如图 2 所示)。由图 2 和式(18)可求得 Δz 为

$$\Delta z = z_1 - z_2 = 3(-\frac{a}{3})^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

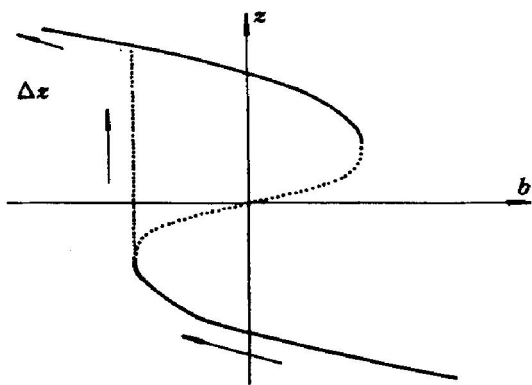


图 2 状态变量突变示意图

Fig. 2 Schematic diagram of state variable catastrophe

还原状态变量 z 和控制变量 a , 可得到由临界点到发生突变的时间差为:

$$\Delta t = \Delta z (4b_4)^{-\frac{1}{4}} = (-3a)^{\frac{1}{2}} (4b_4)^{-\frac{1}{4}} \quad (20)$$

利用式(20), 即可对系统的突变时间进行确定性预测。

2 矿震系统的胞映射-突变预测模型及实现步骤

由式(20)对系统所作的突变预测是确定性的, 考察灰色-尖点突变模型的理论基础和混沌系统的动力学特征可以看出, 方法本身存在如下不足: 1) 没有考虑观测数据中存在的随机误差以及混沌系统本身具有的内在随机性, 预测结果受观测误差的影响甚大; 2) 灰色-尖点突变模型只能分别对单个变量进行突变预测, 这显然不能从系统整体上反映系统演化直至突变的动力学本质。针对灰色-尖点突变预测模型的上述缺点, 本文作者提出矿震系统的胞映射-突变预测模型和实现步骤如下:

1) 利用灰色-尖点突变模型对时间序列进行突变预测, 初步判定系统在时刻 t 是否处于临界状态以及相应的系统突变时间。

2) 利用观测数据反演系统的非线性动力学方程(反演方法见文献[7]); 应用反演的动力学方程和临界时刻 t 的状态向量进行若干次差分迭代(迭代次数视变量的演化速率而定), 从而确定在临界点以后一定时间内系统可能的状态空间; 划分状态空间为胞空间, 并应用胞映射理论计算一次转移概率矩阵。

3) 以临界时刻 t 的系统状态所对应的胞向量为初始胞向量, 与一次转移概率矩阵迭代一次即得到 $t+1$ 时刻的胞向量(预测值)。

4) $t+1$ 时刻的预测胞向量及其与系统突变特性的关系: ①在 $t+1$ 时刻的胞向量反映了在临界点后第一时刻系统状态的概率分布, 但这种概率向量描述方式比直接差分迭代所给出的确定值表达方式更客观; ②系统的演化是一个动态过程, 因此其突变特性也是一个随时间和内、外界影响因素而变化的动态演化过程; ③在临界时刻 t 后的系统突变特性的演化趋向由 $t+1$ 时刻的系统状态(胞向量)决定, 且系统在 $t+1$ 时刻的预测胞向量“表象”而客观地描述了系统在 $t+1$ 时刻的状态分布, 所以可以用系统 $t+1$ 时刻的预测胞向量来讨论系统在临界时刻后的突变特性和演化趋势; 同时, 由于随着时间的增加, 预测胞向量会逐渐“忘记”初始信息而趋于极限状态概率分布, 且由 $t+1$ 时刻的状态概率分布能够足以精确地反映系统在临界时刻 t 后的短期演化趋势, 因此无论是从精度方面考虑, 还是从对系统短期演化描述的充分性方面考虑, 用 $t+1$ 时刻的预测胞向量来讨论系统在临界时刻后的突变特性都是必要的和可行的。

5) 设由观测数据和式(20)预测得到系统在 t 时刻处于临界状态, 且相应地在 t_1 时刻将发生突变, 则这一预测结果与以下 4 种可能情况相对应:

①若在 $t+1$ 时刻, 预测得到系统仍处于临界或失稳状态, 且相应的预测突变发生时间较 t_1 提前, 则说明在 t 时刻系统因某种因素的作用而正在加速“奔向”突变状态。在这种情况下, 系统的突变将较预测时间 t_1 提前发生。

②若在 $t+1$ 时刻, 预测得到系统仍处于临界或失稳状态, 且相应的预测突变发生时间较 t_1 滞后, 则说明在 t 时刻系统正在减速“奔向”突变状态。在这种情况下, 系统的突变将较预测时间 t_1 滞后发生。

③若在 $t+1$ 时刻, 预测得到系统仍处于临界或失稳状态, 且相应的预测突变发生时间与 t_1 相同或差别不大, 则说明在 t 时刻系统正等速“奔向”突变状态。在这种情况下, 系统的突变将在预测时间 t_1 附近发生。

④若在 $t+1$ 时刻, 预测得到系统不处于临界或失稳状态, 则说明系统在预测突变时刻 t_1 不会发生突变。因为 $t+1$ 时刻的系统状态决定了系统突变行为的演化特性, 所以也可以利用 $t+1$ 时刻的预测胞向量定量地评价 t 时刻系统处于以上 4 种情况的可能性, 从而计算在临界点预测突变提前、滞后、准时发生和不发生的概率。方法如下:

在由观测数据预测得到系统在 t 时刻处于临界状态且相应地在 t_1 时刻将发生突变的前提下, 设事件 A 为“发生突变”, 事件 B 为“提前发生突变”, 事件 C 为“准时发生突变”, 事件 D 为“滞后发生突变”, 事件 E 为“不发生突变”, 事件 $F(i)$ 表示系统状态在 $t+1$ 时刻处于胞 i , $P(\cdot)$ 为事件 $(\cdot)$ 发生的概率, 则

$$\left. \begin{aligned} P(B) &= \sum_{i=1}^n P(F(i))P(B/F(i)) \\ P(C) &= \sum_{i=1}^n P(F(i))P(C/F(i)) \\ P(D) &= \sum_{i=1}^n P(F(i))P(D/F(i)) \\ P(A) &= \sum_{i=1}^n P(F(i))P(A/F(i)) \\ &= P(B) + P(C) + P(D) \\ P(E) &= 1 - P(A) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中 n 为胞的总个数; $P(F(i))$ 由 $t+1$ 时刻的预测胞向量计算得到。

$P(B/F(i))$, $P(C/F(i))$ 和 $P(D/F(i))$ 由样本法求得, 即在胞 i 中均匀地取 m 个状态样本点, 利用灰色-尖点突变模型分别判别在 $t+1$ 时刻系统处于样本点 j ($j=1 \sim m$) 的突变特性。若胞 i 中有 m' 个样本点使事件 B 发生, 则

$$P(B/F(i)) = \frac{m'}{m} \quad (22)$$

同理也可计算出 $P(C/F(i))$ 和 $P(D/F(i))$ 。

上述计算过程包含了系统的非线性动力学方程反演、胞映射分析、灰色-尖点突变分析等理论和算法, 作者编制了计算程序完成上述复杂的计算过程。

3 矿震系统胞映射-突变预测模型的应用实例

表 1 所示为门头沟矿某工作面矿震系统变量的观测数据, 其中 X_0 为声发射频度, X_1 为声发射能率, X_2 为光弹应变差。利用本文建立的胞映射-突变预测模型对表 1 中的变量 X_0 进行预测(见表 2 所列)(虽然仅对单个变量 X_0 进行了评价, 但由上文的分析可知, 胞映射的一次转移概率矩阵是由系统的非线性动力学方程得到的, 因此, 预测结果可以体现系统整体的动力学特性)。对比表 2 中的预测结果与现场实录可以发现:

①在第 10 日, 监测到数次大的顶板振动, 并记录到“一次巨响”; “ Y_3 孔前方待采煤体应力集中程度较大, 并波及到 Y_1 , Y_2 监测孔附近的煤体”; 自 10 日起, “ Y_1 , Y_2 及 Y_3 各孔的监测值同时或交替出现跃变, 预示工作面可能出现某些变动”。而预测结果显示在第 10.79 日和第 11.96 日分别将以 100% 的概率发生突变, 且提前发生的概率为 100%。可见, 预测结果与现场实际记录基本吻合。

②在第 9 日预测到系统将以 12.32% 的概率在第 15.36 日发生突变, 且提前发生的概率为 12.32%。可见, 虽然预测表明在 15 日前后将有可能发生突变, 但这种可能性却较小。而实际情况是, “ Y_3 孔从 6 月 15 日至 17 日连续出现监测值跃升, …… Y_1 , Y_2 孔亦于 6 月 16 日出现较大峰值”。但总的来看, 在 6 月 15 日前后并没有发生明显的突发性矿压显现和矿震。因此, 预测结果与实际情况是一致的。

③在 6 月 10, 14 和 15 日预测到系统将分别以

表 1 门头沟矿某工作面矿震系统变量的观测数据

Table 1 Variable data of a mine quake system in Mentougou Mine

Date	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
X_0	13	119	18	10	24	30	28	3	32.2	35	391	349	3.6	21	224
X_1	856	6 294	1 283	454	2 068	2 220	1 742	45	176	2 900	4 129	1 265	229	404	2 313
X_2	9	17	0	36	5	5	55	37	-19	-18	23	41	29	-19	-10

表 2 矿震系统的胞映射-突变预测结果

Table 2 Forecasting results of mine quake system with cell-catastrophic theory						
Forecasting items			Forecasting results			
Critical points	6	7	9	10	14	15
Forecasting catastrophic date	10. 79	11. 96	15. 36	21. 77	23. 82	24. 65
Probability ahead of forecasting	100%	100%	12. 32%	0	1. 18%	0
Probability on time	0	0	0	0	0	0
Probability delaying	0	0	0	0	0	0
Total probability of occurrence	100%	100%	12. 32%	0	1. 18%	0
Probability without occurrence	0	0	87. 68%	100%	98. 82%	100%

0, 1. 18% 和 0 的概率于第 21. 77, 23. 82 和 24. 65 日发生突变, 仅由预测结果就可以判定工作面在上述预测突变日期发生突变的可能性很小。而实际上, 尽管工作面自 6 月 18 日开始出现较明显的矿压显现, 但这些显现都是渐进发生的, 未发生显著的突发性和灾害性动力现象, 与预测评价结果基本一致。

尽管工作面实际上并没有发生明显的灾害性矿震, 但由预测结果可以看出, 本模型可以非常精确地识别矿震孕育过程中的突变信息, 所作出的预测是客观、准确和符合实际情况的。另外, 本模型也适用于对其它岩体动力行为(如山体滑坡、边坡失稳等)的预测评价。

4 结论

利用胞映射理论和突变理论建立了矿震系统的胞映射-突变预测模型, 该模型充分考虑了系统的非线性动力学本质及多变量的整体综合作用, 并利用胞映射理论巧妙地消除了观测初值的随机性和矿震系统本身的内在随机性对预测结果的影响, 因此更客观地描述了矿震演化的动力学机制。预测实例表明, 本文所建立的胞映射-突变预测模型可以非常精确地识别矿震演化过程中的突变信息。另外, 本模型也可以用来预测其它突发性的岩体动力行为。

[REFERENCES]

[1] 张万斌, 王淑坤, 滕学军. 我国冲击地压研究与防治进展 [J]. 煤炭学报, 1992(3): 27- 35.
ZHANG Wan-bin, WANG Shu-kun, TENG Xue-jun. Progress of research for prevention of rockbursts in China [J]. Journal of China Coal Society, 1992(3): 27- 35.

[2] 章梦涛. 冲击地压失稳理论及数值计算 [J]. 岩石力学与工程学报, 1987(3): 51- 61.
ZHANG Meng-tao. Instability theory and mathematical model for coal/ rock bursts [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1987(3): 51- 61.
[3] 李造鼎, 宋纳新, 贾立宏, 等. 岩土动态开挖的灰色尖点突变建模 [J]. 岩石力学与工程学报, 1997(16): 252- 257.
LI Zao-ding, SONG Na-xin, JIA Li-hong, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997(16): 252- 257.
[4] 秦四清, 张倬元, 王士天, 等. 非线性工程地质学导引 [M]. 成都: , 1993. 96- 101.
QIN Si-qing, ZHANG Zhuo-yuan, WANG Shi-tian, et al. An Introduction to Nonlinear Engineering Geology [M]. Chengdu: Southwestern Traffic University Press, 1993. 96- 101.
[5] 刁心宏, 冯夏庭, 于培言, 等. 空场采矿法采场顶板破坏模式识别专家系统 [J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(1): 157- 161.
DIAO Xin-hong, FENG Xia-ting, YU Pei-yan, et al. Expert system in identifying failure mode of handing wall of room-and-pillar mining [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(1): 157- 161.
[6] 冯夏庭, 王泳嘉. 采矿工程智能系统 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
FENG Xia-ting, WANG Yong-jia. Intelligent System for Mining Engineering [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.
[7] 周 辉. 矿震孕育过程中的混沌性及非线性预测理论研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2000. 31- 56.
ZHOU Hui. Chaos and Nonlinear Forecasting Theory in the Process of Mine Quake [M]. Shenyang: Northeastern University, 2000. 31- 56.
[8] XIE H, Pariseau W G. Fractal character and mechanism of rock bursts [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1993, 30 (4): 343- 350.

- [9] HSU C S. A theory of cell-to-cell mapping dynamics systems [J]. ASME J Appl Mech, 1980(47): 931–939.
- [10] HSU C S, Guttalu R S. An untravelling algorithm for global analysis of dynamical systems: an application of cell-to-cell mappings [J]. ASME Jour Appl Mech, 1980(47): 940–948.
- [11] 周 辉, 翟德元, 王泳嘉. 薄隔水层井筒底板突水的突变模型 [J]. 中国安全科学学报, 1999, 9(3): 44–48.
- ZHOU Hui, ZHAI De-yuan, WANG Yong-jia. The catastrophic model of water outburst at vertical shaft floor of thin water-resisting layer [J]. The Chinese Safety Science Journal, 1999, 9(3): 44–48.

Cell-mapping catastrophic forecasting model of mine quake system

ZHOU Hui¹, FENG Xia-ting^{1,3}, TAN Yun-liang², WANG Yong-jia³

(1. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics,
The Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China;

2. Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China;

3. School of Resource and Civil Engineering, Northeastern University,
Shenyang 110004, China)

[Abstract] Mine quake is a dynamic phenomenon of rock mass which is very harmful to mining. In allusion to the disadvantages of traditional forecasting theories and the nonlinear dynamic features of mine quake, “cell-mapping-catastrophic forecasting model of mine quake” is set up based on the cell-mapping theory and catastrophic theory. The nonlinear dynamic essences of mine quake is considered by the model, and the influences of random of initialized values of variables and the internal randomness of mine quake on forecasting results are subtly eliminated with the cell-mapping theory. The example shows that the model can distinguish and forecast the catastrophic behaviors of the evolution of mine quake more accurately and objectively.

[Key words] mine quake; nonlinear dynamics; cell-mapping-catastrophic forecasting model

(编辑 何学锋)