

基于未确知均值分类理论的岩爆发生和分级预测方法

王兴明¹, 董陇军², 付玉华^{1,2}

1. 江西理工大学应用科学学院, 江西赣州 341000

2. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 为解决岩爆预测中的不确定性问题, 将未确知均值分类理论应用于岩爆综合评判中, 建立了岩爆发生和分级预测的未确知均值分类理论分析模型。模型选用最大切应力、单轴抗压强度、单轴抗拉强度和弹性能量指数 4 个指标作为岩爆发生和分级预测的判别因子。将岩爆烈度分为 4 个等级并作为未确知均值分类理论分析的 4 个类别。以国内外岩爆工程实测数据作为建立分类标准和模型的样本, 以各等级的指标均值作为分类标准, 求取未确知测度函数。采用信息熵确定权重, 用置信度识别准则进行等级判定。将本研究建立的模型应用到隧道和矿山工程的岩爆预测中, 结果表明, 未确知均值分类分级预测方法预测结果与实际情况吻合较好, 预测精度高, 因而是岩爆发生和分级预测的一种有效方法, 可在岩爆工程判别中应用和推广。

关键词 岩石力学; 岩爆; 未确知均值分类方法

中图分类号 TD76

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)18-0078-04

Prediction of Possibility and the Level of Rockburst Based on Uncertain Average Graded Analysis Method

WANG Xingming¹, DONG Longjun², FU Yuhua^{1,2}

1. School of Application Sciences, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi Province, China

2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract To solve the uncertain problems in rockburst prediction, uncertain average graded analysis method is applied to predict the level of rockburst. Uncertain average graded analysis model is first established for the prediction of possibility and the level of rockburst. Four indexes such as the maximum tangential stress of the cavern wall, uniaxial compressive strength, uniaxial tensile strength, and the elastic energy index are selected as the factors for synthetic evaluation of rockburst. The indexes criteria are

determined by averages of each graded sample. The intensity of rockburst is divided into four grades that are considered as four normal populations in uncertain average graded analysis. Uncertain functions are obtained by indexes criteria. Uncertain average graded analysis model were obtained through training a series of underground rock projects both at home and abroad. The faith judgment criterion is used to judge which grade the evaluating sample belongs to. The processes of the proposed method are given. The proposed model is verified by the back substitution method. Results show that the back-test-correct rate is high. The proposed model is applied to two practical projects of tunnel and mine. Cases study shows that calculation results are consistent with actual conditions. The proposed model could be used widely in practical engineering.

Keywords rock mechanics; rock burst; uncertain average classification method

0 引言

岩爆的主要表现形式有围岩的爆裂、松脱、剥离、弹射甚至抛掷等, 是地下岩体工程开挖过程中, 围岩在高应力等众多因素作用下发生脆性破坏而突然释放弹性应变能所造成的一种动力失稳现象, 直接威胁地下岩体工程施工人员、设

收稿日期: 2009-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(50774093)

作者简介: 王兴明, 副教授, 研究方向为采矿工程, 电子信箱: wxm9999@simasc.jc.cn; 董陇军(通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: S330730375A), 研究方向为采矿与岩土工程, 电子信箱: csudlj@163.com

备和建筑的安全,鉴于此,对岩爆的预测是采矿、水电、交通等地下工程中的一个重要课题。由于岩爆是多因素综合作用的结果,其预测较为复杂和困难。尽管国内外专家学者在这方面做了大量研究,取得了一定成果,但是基于岩爆理论和岩爆破坏机制而提出的各种理论预测方法,在实际工程应用中还存在困难;而在生产实践中,又要求有一些有效、可行的岩爆预测预报方法^[1]。已有研究从强度、刚度、能量、稳定、断裂、损伤、分形和突变等方面对岩爆现象进行了分析,提出各种假设和判据^[2],综合多个因素对岩爆进行分级和预报,防止了仅考虑个别因素而导致的片面性和局限性,提出了模糊综合评判法^[2]、神经网络法^[3]、支持向量机法^[4]、物元可拓综合评判法^[5]、灰色归类法^[6]等理论和方法。这些方法从不同侧面反映了影响岩爆预测的不确定因素,但其用于岩爆综合评价的准确性与实际情况仍有一定差距。因此,对于岩爆发生和分级预测这类复杂问题的求解,重点在于将许多不确定因素的信息考虑在内并进行分析,未确知数学理论为此提供了一种比较好的途径。

未确知信息理论最早由王光远^[7]于1990年提出,是一种不同于模糊信息、随机信息、灰色信息的不确定性信息,近年来在矿业与岩土工程领域得到了较好的应用和发展^[8-11]。本研究借鉴未确知测度的理论和思想,提出一种基于未确知均值分类理论的岩爆发生和分级预测方法。

1 未确知均值分级方法计算理论

1.1 确定待预测事物的分类模式系统

设 $R_1, R_2, \dots, R_n$ 为待分类(或已经分类)的 n 个对象,则分类对象空间 $R=\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ 。对 $R_i \in R (i \leq n)$,有 m 个评判指标 $x^1, x^2, \dots, x^m$,则评判指标空间 $X=\{x^1, x^2, \dots, x^m\}$,于是 R_i 可以表示为 m 维向量 $R_i=\{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^m\}$ 。其中, x_i^j 表示研究对象 R_i 关于测量指标 x^j 的测量值;对每个 x_i^j ,有 K 个分类等级 $C_1, C_2, \dots, C_K$,分类空间记为 $\Omega, \Omega=\{C_1, C_2, \dots, C_K\}$ 。设 C_k 标示分类等级,则 k 级高于 $k+1$ 级,记作 $C_1 > C_2 > \dots > C_K$,若 $\{C_1, C_2, \dots, C_K\}$ 满足 $C_1 > C_2 > \dots > C_K$ 或 $C_1 < C_2 < \dots < C_K$,则称 $\{C_1, C_2, \dots, C_K\}$ 是分类对象空间 $R=\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ 的一个有序分割类^[12-13]。分类矩阵可以表示为

$$\begin{matrix} & C_1 & C_2 & \cdots & C_K \\ \begin{matrix} x^1 \\ x^2 \\ \vdots \\ x^m \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1K} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2K} \\ & & \ddots & \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mK} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

其中 $a_{jp} (1 \leq j \leq m, 1 \leq p \leq K)$ 为分类指标的平均值,作为分类标准,要求满足 $a_{j1} > a_{j2} > \dots > a_{jK}$ 或 $a_{j1} < a_{j2} < \dots < a_{jK}$ 。

1.2 未确知均值分级方法的主要步骤

- 1) 求取各分类总体指标的平均值,可得分类矩阵^[8]。
- 2) 根据分类矩阵求各指标的未确知测度函数,具体方法可参考文献^{[8]~[13]}。
- 3) 指标权重确定。用 w_j 表示测量指标 x_j 与其他指标相

比具有的相对重要程度,要求 w_j 满足 $0 \leq w_j \leq 1$,且 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$,称 w_j 为 x_i 的权重, $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 称为指标权重向量。设由未确知测度 μ_{ik}^j 所确定的信息熵为

$$H_j = \sum_{i=1}^K \mu_{ik}^j \lg \mu_{ik}^j \quad (2)$$

令

$$v_j = 1 + \frac{1}{\lg K} \sum_{k=1}^K \mu_{ik}^j \lg \mu_{ik}^j \quad (3)$$

$$w_j = v_j / \sum_{i=1}^n v_i \quad (4)$$

则 w_j 体现 x_i 的重要程度,且 $0 \leq w_j \leq 1$, $\sum_{j=1}^n w_j = 1$,故 w_j 可作为 x_j 的权重^[13]。

4) 多指标加权综合测度分类向量和结果识别。令 $\mu_{ik} = \mu(\mu_i \in C_k)$ 表示样本 R_i 属于第 k 个评价类 C_k 的程度,则有

$$\mu_{ik} = \sum_{j=1}^m w_j w_i \mu_{ik}^j \quad (5)$$

由于 $0 \leq \mu_{ik} \leq 1$, 且 $\sum_{i=1}^K \mu_{ik} = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ik}^j = \sum_{j=1}^m \left| \sum_{i=1}^K \mu_{ik}^j \right| w_j = \sum_{j=1}^m w_j = 1$,故 μ_{ik} 是未确知测度。

称 $(\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{iK})$ 为样本 R_i 的多指标加权综合测度分类向量。若 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$,引入置信度识别准则^[12]如下。

设 λ 为置信度 ($\lambda \geq 0.5$, 常取 0.6 或 0.7),若 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$,令

$$k_0 = \min \left\{ k: \sum_{i=1}^k \mu_{ik} > \lambda, k=1, 2, \dots, p \right\} \quad (6)$$

则认为评价因素 R 属于第 k_0 个评价类 C_{k_0} 。

2 岩爆发生和分级预测的未确知均值分级预测方法

2.1 岩爆影响因素与判据

很多岩爆研究者认为,岩爆的发生与地下工程围岩应力密切相关^[2],其烈度与岩石的单轴抗压强度、单轴抗拉强度等岩性及弹性能量指数有关^[2]。因而,采用文献^{[2]、[14]~[17]}提供的国内外岩爆分级数据,选用最大切应力 σ_θ 、单轴抗压强度 σ_c 、单轴抗拉强度 σ_t 、弹性能量指数 W_{et} 等作为岩爆发生和分级预测的主要参数。这些参数既考虑了围岩特性 ($\sigma_c, \sigma_t, W_{et}$),又考虑了围岩中初始地应力水平 (σ_θ 既可反映围岩中初始地应力水平,又可反映地下空间形状和尺度的影响)。本研究综合这些因素并将其作为岩爆发生和分级预测的判别因子,将岩爆烈度分为 4 个等级:I 级(强岩爆)、II 级(中岩爆)、III 级(弱或轻微岩爆)、IV 级(无岩爆)。本研究不采用通过分级指标来判别岩爆等级,而是通过对历史岩爆数据根据求取各分类总体指标的平均值,可得分类矩阵,进而借助未确知测度的理论实现对待预测样本的测试。

以文献^[2]提供的国内外若干工程岩爆分析数据资料(表 1)作为训练样本,建立未确知均值分类模型。

2) 结合多元统计数学知识,以未确知均值分类理论分析方法建立岩爆综合评判的数学模型,为岩爆发生与分级的预测提供了数量化和定量化的途径。

3) 在岩爆的实际工程评判中,应根据具体情况,广泛收集岩爆工程实例资料,增大训练样本的容量,提高其代表性和准确性,以增强该模型的工程适用性。

需要指出的是,岩爆烈度的综合预测是一个复杂的问题,本研究将未确知均值分级方法初步应用的岩爆烈度的预测领域,取得了较好的效果,但是如何选取更合理的指标,扩充构建均值分类矩阵的样本尚需要进一步研究,以增强该方法的可推广性和适用性。

参考文献 (References)

- [1] 姜智繁, 向晓东, 朱东升. 国内外岩爆预测的研究现状与发展趋势[J]. 工业安全与环保, 2003, 29(8): 19-22.
Jiang Zhifan, Xiang Xiaodong, Zhu Dongsheng. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2003, 29(8): 19-22.
- [2] 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 Yuanhan, Li Wodong, Lee P K K, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(5): 493-501.
- [3] 丁向东, 吴继敏, 李健, 等. 岩爆分类的人工神经网络预测方法 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2003, 31(4): 424-427.
Ding Xiangdong, Wu Jimin, Li Jian, et al. *Journal of Hohai University: Natural Sciences Edition*, 2003, 31(4): 424-427.
- [4] 赵洪波. 岩爆分类的支持向量机方法[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 642-644.
Zhao Hongbo. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(4): 642-644.
- [5] 杨望春, 诸静. 物元模型及其在岩爆分级预报中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(8): 125-129.
Yang Yingchun, Zhu Jing. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2001, 21(8): 125-129.
- [6] 刘金海, 冯涛, 袁坚. 基于非线性灰色归类模型的岩爆预测方法[J]. 地下空间与工程学报, 2005(6): 821-824.
Liu Jinhai, Feng Tao, Yuan Jian. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2005(6): 821-824.
- [7] 王光远. 论未确知性信息及其数学处理[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1990, 23(4): 52-58.
Wang Guangyuan. *Journal of Harbin Architecture and Engineering Institute*, 1990, 23(4): 52-58.
- [8] 董陇军, 李夕兵, 宫凤强. 膨胀土胀缩等级分类的未确知均值聚类方法及应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(5): 1075-1080.
Dong Longjun, Li Xibing, Gong Fengqiang. *Journal of Central South University: Science and Technology Edition*, 2008, 39(5): 1075-1080.
- [9] 董陇军, 李夕兵, 宫凤强. 开采地面沉降预测的未确知聚类预测模型 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(2): 95-99.
Dong Longjun, Li Xibing, Gong Fengqiang. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2008, 19(2): 95-99.
- [10] 董陇军, 王飞跃. 基于未确知测度的边坡地震稳定性综合评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(4): 74-78.
Dong Longjun, Wang Feiyue. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2007, 18(4): 74-78.
- [11] Dong Longjun, Peng Gangjian, Fu Yuhua, et al. *Journal of Coal Science & Engineering*, 2008, 14(2): 221-224.

- [12] 刘开第, 庞彦军, 孙光勇, 等. 城市环境质量的未确知测度评价[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(12): 52-58.
Liu Kaidi, Pang Yanjun, Sun Guangyong, et al. *Systems Engineering Theory & Practice*, 1999, 19(12): 52-58.
- [13] 曹庆奎, 刘开第, 张博文. 用熵计算客观型指标权重的方法 [J]. 河北建筑科技学院学报, 2000, 17(3): 40-42.
Cao Qingkui, Liu Kaizhan, Zhang Bowen. *Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology*, 2000, 17(3): 40-42.
- [14] 陈海军, 郇能惠, 聂德新, 等. 岩爆预测的人工神经网络模型[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 229-232.
Chen Haijun, Lin Nenghui, Nie Dexin, et al. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(2): 229-232.
- [15] 蔡嗣经, 张禄华, 周文略. 深埋硬岩矿山岩爆预测研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2005(5): 17-20.
Cai Sijing, Zhang Luhua, Zhou Wenlue. *Journal of Safety Science and Technology*, 2005(5): 17-20.
- [16] 祝方才, 潘长良, 曹平, 等. 冬瓜山矿床岩爆发生机制分析[J]. 金属矿山, 2002, 24(2): 20-21.
Zhu Fangcai, Pan Changliang, Cao Ping, et al. *Metal Mine*, 2002, 24(2): 20-21.
- [17] 宫凤强, 李夕兵. 岩爆发生和烈度分级预测的距离判别方法及应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1012-1018.
Gong Fengqiang, Li Xibing. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 1012-1018.

(责任编辑 陈广仁)

学术动态



“第4届全国地球物理技术学术研讨会”征文

两年一届中国地球物理学会主办的“第4届全国地球物理技术学术研讨会”定于2010年第2季度在北京召开。会议宗旨:加强地球物理技术领域的相互交流,促进国内仪器的自主研发和国外技术的合理引进。会议主题是:深部资源探测和各种地球物理场的监测研究。

会议征文内容包括:资源探测的各种自主研发的地球物理仪器设备,信号处理技术和探测研究方法;与环境灾害相关的地球物理监测仪器设备,数据处理技术及观测研究方法;地球物理技术范畴的观测、探测、实验仪器,信号及数据分析处理技术,以及研究方法。

征稿截止日期:2009年11月30日, 收稿信箱: cgtsc@126.com。

联系方式:中国北京市海淀区民族学院南路5号 (100081); 电话:010-68729347, 82998257; 传真: 010-68460283。