

基于集对分析法的岩爆烈度分级预测研究

陈红江¹, 李夕兵¹, 张毅²

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 杭州市地铁集团有限责任公司, 浙江 杭州 311261)

摘 要:集对分析方法是一种处理不确定性问题的系统分析方法,该方法数学表达简单,物理意义明确,所含意义深远.基于集对分析理论,选取影响岩爆的主要因素如最大切向应力 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} 和岩石的脆性指数 I_s ,并把 σ_θ/σ_c 、 σ_c/σ_t 、 W_{et} 和 I_s 作为岩爆预测的主控因子,建立了岩爆预测的集对分析模型,对各个工程岩爆烈度级别进行预测.结合国内外一些典型深埋长大隧道工程实例进行分析计算,通过实际预测分析对比表明,集对分析法简便易行,评价结果准确,在隧道岩爆烈度级别的评判中具有广泛的实用价值.

关键词:隧道工程;岩爆预测;集对分析;主控因子

中图分类号:TD713

文献标识码:A

Study on Application of Set Pair Analysis Method to Prediction of Rockburst

CHEN Hong-jiang¹, LI Xi-bing¹, ZHANG Yi²

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. Hangzhou Metro Co. Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311261, China)

Abstract: Set pair analysis is the system analysis method to deal with uncertain problems, and it has been applied in engineering field widely. Based on the principle of set pair analysis, a model to predict the classification of rockburst is established. The main control factors of rockburst, such as values of in-situ stresses σ_θ , uniaxial compressive strength σ_c and uniaxial tensile strength σ_t of rock, elastic energy index of rock W_{et} , brittleness index of rock I_s are chosen in the analysis. Four factors including σ_θ/σ_c , σ_c/σ_t , W_{et} and I_s are regarded as the control factors. A series of underground rock projects in domestic and abroad are evaluated with the proposed model, and the results conform to reality very well, which show that the set pair analysis method is easy to operate and its assessing results are accurate and the practical value is extensive.

Key words: Tunnel engineering; Forecast of rockburst; Set pair analysis; Control factors

收稿日期:2008-10-23

基金项目:国家973基金资助项目(2007CB209402);湖南省研究生学位创新项目(1343-74236000013);湖南省自然科学基金资助项目(08JJ4014)

作者简介:陈红江(1983-),男,河北衡水人,中南大学博士研究生.主要研究方向:采矿工程,岩土工程.

随着经济建设的发展,地下空间开发不断走向深部.如山岭长大隧道,穿越阿尔卑斯山的圣各达隧道埋深达 2 500 m;水电工程埋深逾千米,如锦屏电站最大埋深 2 600 m 等.所有这些地下空间工程施工和设计,都遇到一些共同的工程技术问题:必须解决高地应力和高温条件下深部岩体的变形、破坏及岩爆等工程问题.钱七虎院士认为,深部地下空间开发是区别于浅部地下空间开发的,在于这些工程位于地壳的岩石圈内,伴随着深部岩体工程响应发生了一系列新的特征科学现象,这些特征科学现象与浅部岩体工程响应相比具有迥异的特点,而且用传统的连续介质力学理论无法圆满地解释,因此引起了国际上岩石力学工程领域专家学者的极大关注,成为近几年该领域研究的热点,正在形成岩石力学新的分支—深部非线性岩体力学.深部非线性岩体力学的任务与内容就是定性阐明和定量分析这些特征科学现象,研究其发生发展的规律^[1-3].

到目前为止,众多专家学者已经提出了诸多岩爆烈度等级评判的方法,如王元汉等^[4]采用模糊数学综合评判方法,选取影响岩爆的主要因素,对岩爆的发生与否及烈度大小进行了预测.杨莹春^[5]和熊孝波等^[6]采用可拓评判方法,根据影响岩爆的一些主要因素,应用物元概念和关联函数,建立了岩爆分级预测的物元模型.陈海军等^[7]、白明洲等^[8]、杨涛和李国维^[9]、冯夏庭等^[10-12]、朱宝龙等^[13]采用人工神经网络理论,建立神经网络模型对岩爆发生及其烈度分级进行预测.姜彤等^[14]在灰色关联分析和模糊模式识别原理的基础上,应用最小二乘法构造目标函数,建立岩爆预测数学模型,并提出了动态权重计算方法和综合评判指数的概念.赵洪波等^[15-16]对岩爆预测问题,提出了基于支持向量机的预测方法,并采用该方法对岩爆的烈度进行分级预测.李夕兵和宫凤强^[17]基于距离判别分析理论,建立岩爆发生和烈度分级预测的距离判别分析模型,为深部地下工程岩爆发生可能性及其烈度分级预测提供一种新思路.以上所述方法有其自身的特点,同时也存在一定的局限性.针对不同情况,如何从方法上扬长避短,发挥各自的优势,实现对矿井突水水源的准确判别是值得研究的课题.

鉴于上述情形,文章提出了基于集对分析理论的隧道岩爆烈度级别预测的新方法,并将其应用到工程实践中,与实际情况符合良好,为岩爆预测问题的研究提供了一条新思路.

1 隧道岩爆评价指标与评价标准

众多的工程岩爆资料显示,岩爆总是发生在地应力环境下的坚硬岩体中,且现场调查资料表明,这些岩体多是新鲜、干燥、完整的,没有或很少有裂隙.室内试验表明,这些岩体均为脆性岩石,强度高,线弹性特征明显,峰值后强度迅速降低,均具有冲击倾向性,而且发生岩爆的岩体中应力水平较高,且岩爆的烈度与应力集中程度密切相关^[7,17].

考虑影响岩爆发生与否及其烈度大小的主要因素,主要有四类不同的判别准则^[6]:① σ_θ/σ_c ,岩爆的产生与硐室应力有关, σ_θ 为硐室的最大切向应力, σ_c 为岩石单轴抗压强度,比值越大发生岩爆的可能性越大.② σ_c/σ_t ,岩爆的产生与岩性有关, σ_t 为岩石单轴抗拉强度,比值较小时发生岩爆的烈度较大.③ W_e ,岩爆的产生与能量有关. W_e 为弹性能量指数,其值越大,破坏时释放的能量也越多,反映了岩爆的存在及其烈度.④ I_s ,岩石达到峰值强度后岩石急剧断裂,可用岩石的脆性度表示,岩石的脆性指数是岩石峰值强度前的总变形与永久变形之比 I_s ,比值越大,脆性越高.综合这四类岩爆判据,得到岩爆烈度与各主控因子的关系,如表 1 所示.

表 1 隧道岩爆烈度与各评价指标的关系
Table 1 Relation between rockburst and the control factors

稳定类别	σ_θ/σ_c	σ_c/σ_t	W_e	I_s
I	<0.3	>40	<2.0	<3.5
II	0.3~0.5	26.7~40	2.0~3.5	3.5~5.5
III	0.5~0.7	14.5~26.7	3.5~5.0	5.5~7.0
IV	>0.7	<14.5	>5.0	>7.0

2 隧道岩爆烈度预测的集对分析模型

2.1 集对分析方法的基本思想

集对分析法^[18-19]是一种处理不确定性问题的系统分析方法,其实质是按照辩证法的思想,认为任何一个不确定系统都含有确定与不确定因子,而且它们之间存在一定的联系,具有相同因子属性的视为一集合,把互有联系的 2 个集合看成是集对,2 个集合对其共有属性的相同、相异、相反程度称为联系度.集对分析法就是研究这 2 个集合的联系度,联系度可以用表示为:

$$\mu = a + bi + cj \tag{1}$$

在式(1)中, μ 表示联系度; a 表示2个集合的同一程度,称为同一度; b 表示2个集合的差异程度,称为差异度; c 表示2个集合的对立程度,称为对立度。 i 为差异度系数,在 $[-1,1]$ 中取值,并且 i 在 $-1 \sim 1$ 间变化,体现了确定性与不确定性之间的相互转化,随着 $i \rightarrow 0$,不确定性明显增加, i 取 -1 或者 1 时都是确定的; j 为对立系数,运算时恒取 -1 。

2.2 隧道岩爆烈度预测集对分析方法分析

隧道岩爆烈度与诸多因素有关,具有确定性与不确定性^[20-21]。因此,隧道岩爆烈度的预测实质上就是一个具有确定性的评价指标和评价标准与具有不确定性的评价因子及其含量变化相结合的分析过程。将集对分析方法用于隧道岩爆烈度评价中,可以将影响待预测隧道岩爆的某项指标和其标准分为2个集合,这2个集合就构成一个集对,若该指标处于评价级别中,则认为是同一;若处于相隔的评价级别中,则认为是对立;若指标在相邻的评价级别中,则认为是异;取差异系数 i 在 $-1 \sim 1$ 之间变化,越接近所要评价的级别, i 越接近 1 ;越接近相隔的评价级别, i 越接近 -1 。根据集对分析联系度表达式中的同一度、差异不确定度、对立度数值及其相互间的联系、制约、转化关系进行隧道岩爆烈度等级的评价。

在影响隧道岩爆烈度等级的诸多因素中,只能选择性地选取一些影响岩爆的主要参数进行评价,选择主要参数时要视研究区域的具体情况而定,尽可能从不同方面、不同角度选取真实客观地反映隧道岩爆的指标。对某一隧道工程岩爆烈度级别进行评价时,假定有 N 个评价指标,其中 X 个评价指标优于标准,有 Y 个评价指标介于标准与非标准之间,有 Z 个评价指标较差于标准。运用集对分析方法进行隧道岩爆烈度等级评价时,应将评价对象的各个指标与评价标准构筑成一个集对,则该区域的联系度表达式为:

$$\mu = \frac{X}{N} + \frac{Y}{N}i + \frac{Z}{N}j \quad (2)$$

式(2)中, $a = \frac{X}{N}$, $b = \frac{Y}{N}$, $c = \frac{Z}{N}$,分别为同一度、差异度和对立度标记。

2.3 联系度的确定

假定隧道工程岩爆烈度级别分为四大类,即:无岩爆(I)、弱岩爆(II)、中岩爆(III)、强岩爆(IV),那么岩爆烈度等级差异度系数 i 可由下述方法确定:

1) 岩爆烈度等级差异度系数 i 处于I级时,

$$\mu_{i1} = \begin{cases} 1 & x \in [0, S_{i(1)}] \\ 1 - \left| \frac{2(x - S_{i(1)})}{S_{i(2)} - S_{i(1)}} \right| & x \in [S_{i(1)}, S_{i(2)}] \\ -1 & x \in [S_{i(2)}, +\infty) \end{cases} \quad (3)$$

2) 岩爆烈度等级差异度系数 i 处于II级时,

$$\mu_{i2} = \begin{cases} 1 - \left| \frac{2(S_{i(1)} - x)}{S_{i(1)} - 0} \right| & x \in [0, S_{i(1)}] \\ 1 & x \in [S_{i(1)}, S_{i(2)}] \\ 1 - \left| \frac{2(x - S_{i(2)})}{S_{i(3)} - S_{i(2)}} \right| & x \in [S_{i(2)}, S_{i(3)}] \\ -1 & x \in [S_{i(3)}, +\infty) \end{cases} \quad (4)$$

3) 岩爆烈度等级差异度系数 i 处于III级时,

$$\mu_{i3} = \begin{cases} 1 - \left| \frac{2(S_{i(2)} - x)}{S_{i(2)} - S_{i(1)}} \right| & x \in [S_{i(1)}, S_{i(2)}] \\ 1 & x \in [S_{i(2)}, S_{i(3)}] \\ 1 - \left| \frac{2(x - S_{i(3)})}{S_{i(4)} - S_{i(3)}} \right| & x \in [S_{i(3)}, S_{i(4)}] \\ -1 & x \in [0, S_{i(1)}] \text{ or } [S_{i(4)}, +\infty) \end{cases} \quad (5)$$

4) 岩爆烈度等级差异度系数 i 处于IV级时,

$$\mu_{i4} = \begin{cases} 1 & x \in [S_{i(3)}, S_{i(4)}] \\ 1 - \left| \frac{2(S_{i(3)} - x)}{S_{i(3)} - S_{i(2)}} \right| & x \in [S_{i(2)}, S_{i(3)}] \\ -1 & x \in [0, S_{i(2)}] \text{ or } [S_{i(4)}, +\infty) \end{cases} \quad (6)$$

式(3)~式(6)中, μ_{i1} 、 μ_{i2} 、 μ_{i3} 、 μ_{i4} 分别为各隧道岩爆烈度等级评价指标对评价标准的联系度; $S_{i(1)}$ 、 $S_{i(2)}$ 、 $S_{i(3)}$ 、 $S_{i(4)}$ 分别为各岩爆烈度等级评价指标评价级别的限值; x 为岩爆烈度等级评价指标的实测指标。

2.4 求平均联系度

平均联系度是通过求得各个指标相对于各个级别的联系度后,把它们相加并取其算术平均值。它反映了各评价对象与各质量级别之间的亲疏关系。平均联系度的计算公式如下:

$$\bar{\mu}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_{ij} \quad (7)$$

式(7)中: $\bar{\mu}_j$ —评价对象关于级别 j 的平均联系度。

2.5 按最大原则确定评价对象属于何类

对某一评价对象而言,平均联系度最大者所对应的岩爆烈度等级,即为该对象的最终岩爆烈度等级。其计算公式如下:

$$\lambda_i = \max \{ \mu_i \}$$

式(8)中: λ_i —评价对象所属质量级别。

(8) 国内外一些大型岩石地下工程实例的相关数据 (包括地下洞室围岩应力、岩石单轴抗压强度与抗拉强度、岩石弹性能量指数) 进行分析,这些数据主要取自文献[4]。选取国内外岩爆工地工程实例共计 15 个进行预测,见表 2,结果见表 3。

3 岩爆评价预测实例

为了验证上述集对分析模型的有效性,针对

表 2 国内外若干工程岩爆分析资料
Table 2 Data of the engineering rockburst around the world

序号	工程名称	指标				实际情况
		σ_θ/σ_c	σ_c/σ_t	W_a	I_s	
1	天生桥	0.30	24.0	6.6	5.73	中级岩爆
2	二滩	0.41	29.7	7.3	7.26	轻微岩爆
3	鲁布革	0.23	27.8	7.8	3.26	无岩爆,但钻孔时出现煤饼
4	鱼子溪	0.53	14.8	9.0	7.0	中、强级岩爆
5	太平驿	0.38	12.6	9.0	5.3	400 多例岩爆 规模不等
6	锦屏	0.82	18.5	3.8	11.2	中、弱级岩爆 局部有强岩爆
7	二郎山	0.52	21.2	5.5	6.8	中级岩爆
8	秦岭	0.65	28.6	6.8	8.4	强级岩爆
9	福建	0.52	24.6	7.3	6.3	中或强级岩爆
10	挪威	0.37	24.1	5.0	9.6	中级岩爆
11	瑞典	0.44	26.7	5.5	3.6	弱级岩爆
12	日本	0.39	22.3	5.0	10.7	中或强级岩爆
13	苍岭	0.32	21.3	5.3	7.2	中级岩爆
14	通渝	0.75	14.8	6.0	7.8	弱级岩爆
15	太平峰	0.38	17.3	7.6	7.5	中级岩爆

表 3 各工程岩爆的平均联系度计算结果及评价结果
Table 3 The analysis results and average connection degree of the engineering rockburst

序号	工程名称	平均联系度				平均等级	实际等级	可拓方法
		I	II	III	IV			
1	天生桥	-0.500	0.031	0.046	-0.313	III	III	III
2	二滩	-0.662	0.003	-0.338	0.000	II	II	II
3	鲁布革	0.041	0.349	-0.541	-0.500	II	I 或 II	I
4	鱼子溪	-1.000	-0.563	0.500	0.563	III 或 IV	III	III
5	太平驿	-0.650	0.000	-0.350	0.000	规模不定	规模不定	规模不定
6	锦屏	-1.000	-0.436	0.000	0.436	IV	III 或 IV	III 或 IV
7	二郎山	-1.000	-0.209	0.500	0.209	III	III	III
8	秦岭	-0.929	-0.375	-0.071	0.375	IV	IV	IV
9	福建	-1.000	-0.097	0.500	0.097	III 或 IV	III 或 IV	III 或 IV
10	挪威	-0.675	-0.107	-0.325	0.107	IV	III	III
11	瑞典	-0.375	0.500	-0.125	-0.500	II	II	II
12	日本	-0.725	-0.180	-0.275	0.180	IV	III 或 IV	III
13	苍岭	-0.550	-0.221	-0.450	0.221	IV	III	III
14	通渝	-1.000	0.988	-0.500	-0.988	II	II	II
15	太平峰	-0.700	-0.385	-0.300	0.385	IV	III	III

从表3的预测结果来看,15个工程岩爆样本的评价结果中除个别工程岩爆等级判高外,其余与实际情况、可拓方法^[6]的评价结果基本一致,而其在实际的工程中,评价结果判高从安全角度来讲是允许的.并且集对分析方法与其他方法相比具有理论性强、判别速度快、计算简便、成功率高等优点.

4 结论

1)集对分析法是一种分析不确定性问题的有效方法,它采用“宽域式”的函数结果建模,模型中重视信息处理的相对性和模糊性.计算步骤简洁,评价原理直观、全面,评价结果准确可靠,评价过程中对信息的利用率高.

2)本文结合国内外应用实例,介绍了集对分析方法在岩爆预测中的初步应用,结果表明该方法适用于岩爆预测的.但影响岩爆的因素非常多,选用 $\frac{\sigma_\theta}{\sigma_c}$ 、 $\frac{\sigma_c}{\sigma_t}$ 、 W_a 和 I_s 四个指标来评判预测岩爆,带有一定的片面性和局限性.并且该模型是建立在有限的工程实例原始数据资料基础之上的,受到原始资料数据代表性、准确性的影响.因此在实际应用中,可根据具体情况,广泛收集工程实例资料,建立相应的样本数据库,对模型进行训练,增强该模型的适用性.

参考文献:

- [1] 古德生,李夕兵.现代金属矿床开采科学技术[M].北京:冶金工业出版社,2006.
- [2] 钱七虎.深部地下空间开发中的关键科学问题[C]//钱七虎院士论文集.北京:科学出版社,2007:549-568.
- [3] 王明洋,周泽平,钱七虎.深部岩体的构造和变形与破坏问题[J].岩石力学与工程学报,2006,25(3):448-455.
- [4] 王元汉,李卧东,李启光,等.岩爆顶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.
- [5] 杨荣春,诸静.一种新的岩爆分级预报模型及其应用[J].煤炭学报,2000,25(2):169-172.
- [6] 熊孝波,桂国庆,郑明新,等.基于可拓方法的深埋长大隧道岩爆预测研究[C]//第十届全国岩石力学与工程学术大会论文集.北京:中国电力出版社,2008:403-411.
- [7] 陈海军,邴能惠,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.
- [8] 白明洲,王连俊,许兆义.岩爆危险性预测的神经网络模型及应用研究[J].中国安全科学学报,2002,12(4):65-69.
- [9] 杨涛,李国维.基于先验知识的岩爆顶测研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(4):429-431.
- [10] 冯夏庭.智能岩石力学导论[M].北京:科学出版社,2000.
- [11] Feng X T, Wang L N. Rockburst prediction based on neural networks[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 1994, 4(1): 7-14.
- [12] Feng X T, Webber S, Ozbay M U, et al. Neural network assessment of rockburst risks for deep gold mines in South Africa[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 1998, 8(2): 335-341.
- [13] 朱宝龙,陈强,胡厚田.基于人工神经网络的岩爆预测方法[J].地质灾害与环境保护,2002,13(3):56-59.
- [14] 姜彤,黄志全,赵彦彦,等.灰色系统最优归类模型在岩爆预测中的应用[J].华北水利水电学院学报,2003,24(2):37-40.
- [15] 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.
- [16] 冯夏庭,赵洪波.岩爆预测的支持向量机[J].东北大学学报,2002,23(1):57-59.
- [17] 官凤强,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.
- [18] 赵克勤,宣爱理.集对论——一种新的不确定性理论方法与应用[J].系统工程,1996,14(1):18-23.
- [19] 赵克勤.集对分析及其初步应用[J].大自然探索,1994,13(1):67-72.
- [20] 王其胜,李夕兵.采场顶板稳定性评价的集对分析模型与应用[C]//第十届全国岩石力学与工程学术大会论文集.北京:中国电力出版社,2008:274-279.
- [21] 陆洲,马涛.地下水环境质显评价的一种新方法——集对分析法[J].环境保护科学,2005,31(131):53-55.
- [22] 吴文淮,张玉峰.集对分析法在地下水质量综合评价中的应用[J].能源与环境,2007,4:79-80.