

基于D-S证据理论的岩爆预测方法研究

高永涛¹, 朱强¹, 吴顺川^{1,2}, 王勇兵³

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

3. 云南驰宏锌锗股份有限公司, 云南 曲靖 655000)

摘要: 为了有效预测岩爆, 提出基于D-S证据理论的岩爆预测方法. 首先, 选取与岩爆发生相关的6个指标因素作为证据体, 并通过模糊物元框架和正态型隶属度函数构建证据体的基本概率分配. 然后, 利用K均值将证据体分类, 并提出簇内证据用传统方式融合而簇间证据用权重方式融合的组合融合规则, 以减轻高冲突证据融合的不利影响. 最后, 将模型应用在秦岭终南山公路隧道2号竖井工程, 且与经验方法对比. 为了分析预测过程的不确定性和估计岩爆发生概率, 采用蒙特卡洛模拟进行抽样仿真, 并通过Spearman秩相关系数衡量输入指标的全局敏感性. 研究表明: 输入指标在不同的岩爆案例的影响程度差异较大且方向不同; 5个岩爆案例的发生概率在40.8%~70.1%之间. 该模型表现出优异的预测分类性能, 可为深埋地下工程岩爆预测提供参考.

关键词: 岩石力学; 岩爆预测; D-S证据理论; 模糊物元; K均值

中图分类号: TD 05 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)02-0244-08

A Study of Rockburst Prediction Method Based on D-S Evidence Theory

GAO Yong-tao¹, ZHU Qiang¹, WU Shun-chuan^{1,2}, WANG Yong-bing³

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 3. Yunnan Chihong Zinc and Germanium Co., Ltd., Qujing 655000, China. Corresponding author: ZHU Qiang, E-mail: qiangzhus@163.com)

Abstract: To effectively predict rockburst, a rockburst prediction method based on D-S evidence theory is proposed. Firstly, six indicator factors related to rockburst occurrence are selected as evidence, and the basic probability assignment of evidence is constructed through fuzzy matter-element framework and normal type degree of membership function. Then, the evidence is classified using K-means and a combined fusion rule of fusing evidence within clusters in classical Dempster's rule while fusing evidence between clusters in the weighted way is proposed to reduce the adverse effects of high conflict evidence fusion. Finally, the model is applied to the No. 2 shaft project of the Qinling Zhongnanshan highway tunnel and compared with the empirical method. To address the uncertainty in the prediction process and to estimate the probability of rockburst occurrence, Monte Carlo simulation is used to perform sampling simulations and the global sensitivity of the input indicators is measured by Spearman's rank correlation coefficient. The results show that the influence of the input indicators varies widely and in different directions for different rockburst cases; the probability of occurrence of the five rockburst cases ranges from 40.8% to 70.1%. The model shows outstanding predictive classification performance and can provide reference for rockburst prediction in deeply buried underground projects.

Key words: rock mechanics; rockburst prediction; D-S evidence theory; fuzzy matter-element; K-means

岩爆是深埋地下工程中常见的动力灾害,易发生在完整硬脆性岩体区域^[1]。岩爆发生具有不确定性且难以控制,并伴随着能量的猛烈释放,严重威胁到人员和设备安全^[2-3]。近年来,随着我国大量的基础设施工程向深部进军,施工人员面临更为复杂的作业环境,岩爆发生的可能性也逐渐增大,岩爆灾害已成为深部地下工程的严峻挑战。而经验表明,在安全管理中应该强调预防,而不是事故后采取措施。岩爆预测可为预防和控制岩爆灾害提供前瞻性的信息,寻找有效的岩爆预测方法是极其重要的。

各国学者在岩爆预测领域开展了大量的研究,并取得了一定成果^[4-6]。目前,岩爆预测方法可归纳为2类:第1类是基于岩爆机理的经验判据,如 Russense 判据^[7]、Barton 判据^[8]、Hoek 判据^[9]、二郎山判据^[10]等;第2类是基于数学和机器学习的综合预测方法,如模糊综合评判法^[11]、灰色系统理论^[12]、多维云模型^[13]、支持向量机^[14]、随机森林^[15]、概率神经网络^[16]等。上述预测方法提升了岩爆预测的准确率,但仍存在不能同时处理指标信息冲突性和模糊性的缺点。同时,岩爆预测也是一个具有不确定性的多因素耦合决策问题。而D-S证据理论作为一种不确定性推理方法,为模糊信息的表征和多源信息的处理提供了有效的途径。贾义鹏等^[17]将D-S证据理论应用于岩爆预测,通过粗糙集理论构建证据体的概率分配,建立基于D-S证据理论的岩爆预测模型,并取得较好的预测效果。当证据体高度冲突时,应用D-S证据理论会得到与实际不符的结果。为了克服这个问题,汪明武等^[18]提出将联系云与D-S证据理论耦合来构建岩爆预测模型,并与其他方法对比,结果表明该模型是有效可行的。

然而D-S证据理论仍存在不足,不能较好处理证据冲突的情况和构建基本概率分配的不确定性。因此,本文在前人研究的基础上,将模糊物元和K均值与D-S证据理论相结合,引入蒙特卡洛模拟方法,旨在解决上述不足和开发一种有效的数学模型解决岩爆预测难题。同时,也期望为D-S证据理论在岩爆预测领域的研究提供新的思路。

1 基本原理

1.1 D-S证据理论

D-S证据理论是由 Dempster 和 Shafer 创建

的不确定性推理方法^[19](也称广义贝叶斯理论),可融合多个证据的信息源来提高决策准确度,基本原理如下:

定义一组互斥且穷举事件可能结果的有限非空集为识别框架 $\Theta = \{A_1, A_2, \dots, A_M\}$;基本概率分配(basic probability assignment, BPA)函数(即 mass 函数)定义为映射 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$,并满足:

$$\left. \begin{aligned} m(\emptyset) &= 0, \\ m(A) &> 0, \\ \sum_{A \in \Theta} m(A) &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: A 为识别框架 Θ 的任意子集; $m(A)$ 为命题 A 被信任的程度。

假设在识别框架 Θ 下存在两个证据体 E_1 和 E_2 ,且对应的 mass 函数分别为 $m_1(A)$ 和 $m_2(A)$,那么可通过 Dempster 证据组合规则(式(2))得到新的融合证据。

$$\left. \begin{aligned} m_{1,2}(A) &= \frac{\sum_{A_i \cap A_j = A} m_1(A_i) m_2(A_j)}{1 - K_{1,2}}, \\ K_{1,2} &= \sum_{A_i \cap A_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(A_j). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $m_{1,2}(A)$ 为融合后的新证据体的 mass 函数; $K_{1,2}$ 为冲突系数,表示证据间的冲突程度; $1/(1 - K_{1,2})$ 为归一化系数,用于确保新证据中空集 \emptyset 的信任度为零。

当存在 N 个($N > 2$)证据体(E_1, E_2, \dots, E_N)时,则需要利用式(2)迭代计算 $N - 1$ 次。为了简化计算,推导出 N 个证据体的合成公式来一次性融合所有证据体。

$$\left. \begin{aligned} m(A) &= \frac{\sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_k = A} m_1(A_1) m_2(A_2) \dots m_N(A_k)}{1 - K}, \\ K &= \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_k = \emptyset} m_1(A_1) m_2(A_2) \dots m_N(A_k). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, K 为多个证据之间的总体冲突。

1.2 模糊物元

物元理论^[20]是一种研究不相容问题的理论框架,可将问题形式化并建立相应的物元模型来解决多准则决策(MCDM)问题。物元模型 S 由3个基本部分组成,即物元 A ,特征 C 和特征量值 X 。假设物元被离散为 m 个单独的状态(例如,在岩爆预测中,可将岩爆烈度在“Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ和Ⅳ”级内分类预测),且不同状态下的 X 具有模糊性,那么 $S_{n \times m}$ 为 n 维模糊复合物元,具体形式如下:

$$S_{n \times m} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \cdots & A_m \\ C_1 & f_{11}(X_1) & f_{12}(X_1) & \cdots & f_{1m}(X_1) \\ C_2 & f_{21}(X_2) & f_{22}(X_2) & \cdots & f_{2m}(X_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n & f_{n1}(X_n) & f_{n2}(X_n) & \cdots & f_{nm}(X_n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： A_i 为物元的第*i*个状态； C_i 为物元的第*i*个特征； $f_{ij}(X_i)$ 为第*j*个状态中第*i*个特征量值 X_i 的模糊隶属度。

1.3 K均值

K均值(K-means)是用于求解聚类问题的无监督学习算法^[21]。该算法可将数据集按照给定的标准划分为*k*个簇,并使得簇内样本的相似度较高,而簇间样本的相似度较低。假设存在一个*n*×*m*数据集*Y*,其中*n*和*m*分别为样本量和特征数量,则算法的步骤如下:

1) 在确定*k*的取值后,从*Y*中随机选取*k*个样本作为初始的簇中心 $Z^0 = \{z_1^0, z_2^0, \dots, z_k^0\}$ 。

2) 通过式(5)求出每个样本到*k*个簇中心的欧氏距离,并将其归为最小欧氏距离所对应的簇来组成*k*个初始的聚类簇。

$$d(y_i, z_j) = \sqrt{\sum_{p=1}^m (y_{i,p} - z_{j,p})^2} \quad (5)$$

式中, $d(y_i, z_j)$ 为样本 y_i 和簇中心 z_j 间的欧氏距离。

3) 利用式(6)求出*k*个簇中所有样本的均值,并将其作为新的质心向量。

$$z_j = \frac{1}{n_j} \sum_{y \in z_j} y \quad (6)$$

式中, n_j 为第*j*个簇的样本数量。

4) 重复步骤2)和3)直到*k*个质心向量不再发生变化或达到最大迭代次数。

2 基于D-S证据理论岩爆预测模型

基于D-S证据理论岩爆预测模型由5部分组成(见图1)组成:①选取岩爆评价指标,并确定评价指标在各岩爆烈度的分级标准;②通过模糊物元理论和正态型隶属度函数建立每个证据体的mass函数,并分别进行概率分配;③采取K均值的方法对证据体进行分类;④对簇内的证据采用传统组合规则进行融合,得到的新证据用权重组合规则进行融合;⑤依据“最大隶属度原则”,确定待预测样本的岩爆烈度。

2.1 评价指标选取

岩爆发生是极其复杂的非线性过程,受地应

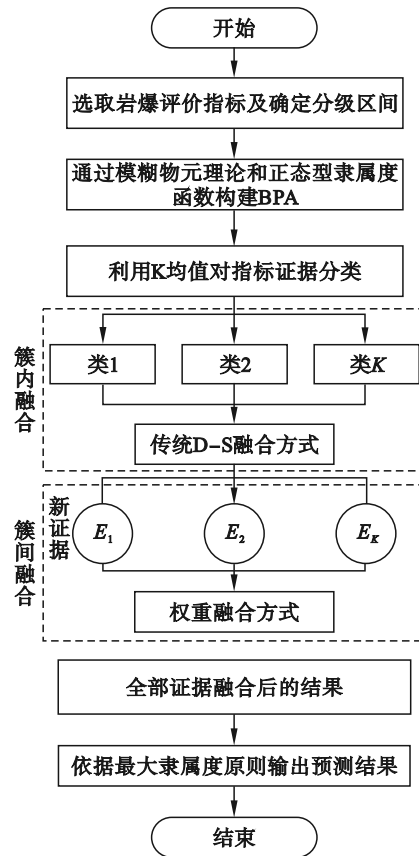


图1 改进D-S证据理论模型流程图

Fig. 1 Flow chart for improving the D-S evidence theory model

力、岩石力学性质、施工方法等内外因素共同作用,且各因素间关联影响^[22-23]。目前岩爆的定义已基本明确,即由于人员开挖扰动导致积聚高弹性应变能的围岩发生岩块弹射现象的动力灾害^[24]。由岩爆定义可知,岩爆发生需要满足2个基本条件:①岩体具有较好的储能能力(内因);②处在高地应力环境下(外因)。在选取评价指标的过程中,除了要考虑指标能否反映岩爆影响因素外,还要考虑指标获取的难易程度。依据上述两个选取准则,本文选取了最大切向应力 σ_θ ,单轴抗压强度 σ_c ,单轴抗拉强度 σ_t ,应力系数 σ_θ/σ_c ,脆性系数 σ_c/σ_t 和弹性能量指数 W_{et} 共6个指标作为岩爆预测的多源证据。其中 σ_θ 和 σ_θ/σ_c 反映了围岩应力集中和硐室形状等外因;而 $\sigma_c, \sigma_t, \sigma_c/\sigma_t$ 和 W_{et} 反映了岩石的力学特性和储能能力等内因。同时,参考吴顺川等^[16]研究成果,将岩爆烈度分为无岩爆(I)、轻微岩爆(II)、中等岩爆(III)和强烈岩爆(IV)4个等级(即岩爆预测识别框架)。证据体在各岩爆等级的区间关系,如表1所示。

2.2 BPA函数构造

在D-S证据理论中,构建BPA函数一直是需

表 1 岩爆评价指标的分类标准^[16]

Table 1 Classification criteria for rockburst evaluation indicators

| 评价 指标 | 无岩爆 (I) | 轻微岩爆 (II) | 中等岩爆 (III) | 强烈岩爆 (IV) |
|---------------------|------------|--------------|---------------|--------------|
| σ_0 | 0~24 | 24~60 | 60~126 | 126~200 |
| σ_c | 0~80 | 80~120 | 120~180 | 180~320 |
| σ_t | 0~5 | 5~7 | 7~9 | 9~14 |
| σ_0/σ_c | 0~0.3 | 0.3~0.5 | 0.5~0.7 | 0.7~1 |
| σ_0/σ_t | 40~55 | 26.7~40 | 14.5~26.7 | 0~14.5 |
| W_{et} | 0~2 | 2~4 | 4~6 | 6~10 |

要解决的问题. 因 FME 能够表达知识获取和推理中的模糊性和不相容性信息, 所以本文通过 FME 来构建 BPA 函数. 在确定岩爆评价指标(即证据体)后, 建立相应的模糊复合物元模型 $S_{n \times m}$. 该框架下的物元 A 为岩爆预测等级, 即 $\{A_I, A_{II}, A_{III}, A_{IV}\}$; 特征 C 为选取的岩爆评价指标, 即 $\{\sigma_0, \sigma_c, \sigma_t, \sigma_0/\sigma_c, \sigma_0/\sigma_t, W_{et}\}$; 特征量值 X 为上述特征的实测值. 由于岩爆评价指标的实测值可被离散为各岩爆等级状态, 故可通过正态型隶属度函数将证据体的特征量值转化成对应岩爆等级的隶属度作为 BPA 进行知识推理. 指标证据体各离散状态区间与正态型隶属度函数之间的关系如下:

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{L_{ij} + U_{ij}}{2}, \\ b &\leq \frac{U_{ij} - L_{ij}}{1.665}, \\ f_{ij}(x_i) &= -\left(\frac{x_i - a}{b}\right)^2. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: U_{ij} 和 L_{ij} 分别为第 i 个证据属于第 j 个状态区间边界; a 和 b 为常数; x_i 为第 i 证据的实际值; $f_{ij}(x_i)$ 为 x_i 属于第 j 个状态的隶属度.

$$\left. \begin{aligned} m_i(A_j) &= f_{ij}(x_i), \\ m_i(\Theta) &= 1 - \sum_{j=1}^m m_i(A_j). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $m_i(A_j)$ 为第 i 个证据属于第 j 个状态的信息; $m_i(\Theta)$ 代表不确定性.

然而, 通过式(7)将特征量值转化成对应岩爆等级的隶属度求和后, 可能会出现大于 1 的情况, 这在 D-S 证据理论中是绝不允许存在的. 因此, 如果出现隶属度求和后大于 1 的情况, 则需要对其进行归一化处理构建 BPA:

$$\left. \begin{aligned} m_i(A_j) &= f_{ij}(x_i) / \sum_{j=1}^m f_{ij}(x_i), \\ m_i(\Theta) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

2.3 证据体分类和融合规则

D-S 证据理论在处理存在强冲突证据体的问题时, 易导致决策结果与实际情况不符. 为了使传统的 D-S 证据理论能够更好地处理强冲突证据体融合, 本文通过 K 均值将指标证据划分为 k 个子集(即冲突性较小证据聚成一类). 并在证据融合的过程中, 采取分步融合的方式, 即簇内证据体, 利用式(2)或式(3)融合; 融合后得到的新证据体, 采用权重融合的方式(式(10)和式(11))进行融合. 最后, 依据“最大隶属度原则”输出预测结果.

$$m(A) = \sum_{n=1}^N w_n m_n(A), \quad (10)$$

$$w_n = \begin{cases} 1/D_n, & D_n = 0, \\ \frac{1/D_n}{\sum_{n=1}^N 1/D_n}, & D_n \neq 0. \end{cases} \quad (11)$$

式中: w_n 为第 n 个证据的权重; D_n 为第 n 个证据与其他证据的欧氏距离之和.

3 工程实例应用

秦岭终南山公路隧道穿越我国秦岭北部山区, 全长 18.02 km, 穿越区域的主要岩性有混合片麻岩、混合花岗岩和片麻岩残留体等, 且岩体完整^[25]. 该工程的 2 号竖井(进、回风合一)是规模最大的竖井工程, 内径和最大开挖外径分别为 11.2 和 13.32 m, 井深达到 661 m. 在埋深大的地段, 测得最大水平主应力为 21.04 MPa, 方向为西北向 28°, 属于高地应力水平, 岩爆发生的可能性较大. 该隧道竖井工程岩爆采集的实测岩体力学参数, 如表 2 所示.

表 2 岩爆实测数据与真实等级^[25]

Table 2 Rockburst actual data with true levels

| 序号 | σ_0 | σ_c | σ_t | σ_0/σ_c | σ_0/σ_t | W_{et} | 岩爆 烈度 |
|----|------------|------------|------------|---------------------|---------------------|----------|----------|
| 1 | 43.1 | 122 | 5.38 | 0.35 | 22.7 | 3.31 | II |
| 2 | 87.5 | 121 | 8.73 | 0.72 | 13.9 | 9.05 | IV |
| 3 | 79.1 | 124 | 8.64 | 0.64 | 14.4 | 7.74 | IV |
| 4 | 56.2 | 119 | 7.21 | 0.47 | 16.5 | 5.52 | III |
| 5 | 62.8 | 120 | 6.45 | 0.52 | 18.6 | 4.16 | III |

3.1 模型预测过程

首先依据各指标证据的分级区间(见表 1)和表 2 列出的指标实测值, 利用式(7)~式(9)计算各指标证据的基本概率分配, 结果如表 3 所示.

表 3 岩爆案例的基本概率分配
Table 3 Basic probability assignment for rockburst cases

| 序号 | 指标 | BPA | | | | |
|----|--------------------------|----------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| | | $m(A_I)$ | $m(A_{II})$ | $m(A_{III})$ | $m(A_{IV})$ | $m(\theta)$ |
| 1 | σ_θ | 0.007 8 | 0.821 5 | 0.170 0 | 0.000 7 | 0.000 0 |
| | σ_c | 0.047 9 | 0.380 8 | 0.481 6 | 0.089 7 | 0.000 0 |
| | σ_t | 0.334 1 | 0.642 1 | 0.008 4 | 0.015 5 | 0.000 0 |
| | σ_θ/σ_c | 0.254 1 | 0.732 5 | 0.013 0 | 0.000 5 | 0.000 0 |
| | σ_θ/σ_t | 0.000 4 | 0.148 6 | 0.809 7 | 0.041 2 | 0.000 0 |
| | W_{et} | 0.022 1 | 0.833 3 | 0.123 0 | 0.021 6 | 0.000 0 |
| 2 | σ_θ | 0.000 0 | 0.011 4 | 0.935 4 | 0.053 2 | 0.000 0 |
| | σ_c | 0.050 8 | 0.406 1 | 0.456 3 | 0.086 8 | 0.000 0 |
| | σ_t | 0.011 9 | 0.005 0 | 0.607 7 | 0.375 4 | 0.000 0 |
| | σ_θ/σ_c | 0.000 0 | 0.000 8 | 0.368 6 | 0.594 2 | 0.036 3 |
| | σ_θ/σ_t | 0.000 0 | 0.002 7 | 0.433 4 | 0.558 2 | 0.005 8 |
| | W_{et} | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.826 1 | 0.173 9 |
| 3 | σ_θ | 0.000 0 | 0.052 6 | 0.884 3 | 0.028 3 | 0.034 7 |
| | σ_c | 0.042 1 | 0.330 1 | 0.532 1 | 0.095 7 | 0.000 0 |
| | σ_t | 0.013 0 | 0.006 8 | 0.638 1 | 0.342 2 | 0.000 0 |
| | σ_θ/σ_c | 0.000 5 | 0.015 8 | 0.764 2 | 0.219 5 | 0.000 0 |
| | σ_θ/σ_t | 0.000 0 | 0.003 6 | 0.487 8 | 0.508 6 | 0.000 0 |
| | W_{et} | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.005 5 | 0.988 4 | 0.006 1 |
| 4 | σ_θ | 0.000 1 | 0.604 1 | 0.392 7 | 0.003 1 | 0.000 0 |
| | σ_c | 0.057 0 | 0.455 6 | 0.406 3 | 0.081 1 | 0.000 0 |
| | σ_t | 0.068 9 | 0.292 5 | 0.523 6 | 0.115 0 | 0.000 0 |
| | σ_θ/σ_c | 0.039 6 | 0.661 0 | 0.287 8 | 0.011 6 | 0.000 0 |
| | σ_θ/σ_t | 0.000 0 | 0.011 0 | 0.685 6 | 0.303 4 | 0.000 0 |
| | W_{et} | 0.000 0 | 0.010 3 | 0.699 2 | 0.290 5 | 0.000 0 |
| 5 | σ_θ | 0.000 0 | 0.396 4 | 0.559 7 | 0.006 2 | 0.037 8 |
| | σ_c | 0.053 9 | 0.431 1 | 0.431 1 | 0.083 9 | 0.000 0 |
| | σ_t | 0.134 5 | 0.659 5 | 0.150 2 | 0.055 8 | 0.000 0 |
| | σ_θ/σ_c | 0.013 9 | 0.347 4 | 0.604 9 | 0.033 8 | 0.000 0 |
| | σ_θ/σ_t | 0.000 0 | 0.028 9 | 0.811 2 | 0.159 9 | 0.000 0 |
| | W_{et} | 0.000 9 | 0.362 4 | 0.564 6 | 0.072 1 | 0.000 0 |

然后,将表 3 中的基本概率分配代入 K 均值算法对 5 个岩爆案例的证据体分别进行分类. 为了减少计算过程的复杂度,本文统一将岩爆预测体系中的 6 个证据分成 3 类. 根据 5 个岩爆案例的证据分类结果(见表 4),可以发现每个岩爆案例的证据分类结果一致.

之后,将每个岩爆案例的证据分类结果按照上述提出分步融合的方式,利用式(3),式(10)和式(11)对证据进行融合. 根据融合后的最终结果(见表 5)可知,5 个岩爆案例全部预测正确,这表明改进后的 D-S 证据理论有优异的预测分类能力.

3.2 与经验方法对比

为了进一步验证基于 D-S 证据理论岩爆预

表 4 岩爆案例的证据分类
Table 4 Classification of evidence in rockburst cases

| 序号 | 类 1 | 类 2 | 类 3 |
|----|--|-----------------|------------|
| 1 | $\sigma_t, \sigma_\theta/\sigma_c, \sigma_\theta/\sigma_t, W_{et}$ | σ_θ | σ_c |
| 2 | $\sigma_t, \sigma_\theta/\sigma_c, \sigma_\theta/\sigma_t, W_{et}$ | σ_θ | σ_c |
| 3 | $\sigma_t, \sigma_\theta/\sigma_c, \sigma_\theta/\sigma_t, W_{et}$ | σ_θ | σ_c |
| 4 | $\sigma_t, \sigma_\theta/\sigma_c, \sigma_\theta/\sigma_t, W_{et}$ | σ_θ | σ_c |
| 5 | $\sigma_t, \sigma_\theta/\sigma_c, \sigma_\theta/\sigma_t, W_{et}$ | σ_θ | σ_c |

测模型的有效性,将其与经验方法进行对比(见表 6). 结果表明,该模型表现出更好的预测分类效果,且优于除 W_{et} 之外的经验方法.

表 5 证据融合及岩爆预测结果

Table 5 Results of evidence fusion and rockburst prediction

| 序号 | $m(A_I)$ | $m(A_{II})$ | $m(A_{III})$ | $m(A_{IV})$ | $m(\Theta)$ |
|----|----------|----------------|----------------|----------------|-------------|
| 1 | 0.020 2 | 0.738 4 | 0.203 5 | 0.037 9 | 0.000 0 |
| 2 | 0.014 7 | 0.117 0 | 0.219 3 | 0.649 0 | 0.000 0 |
| 3 | 0.011 5 | 0.090 2 | 0.194 8 | 0.703 5 | 0.000 0 |
| 4 | 0.014 9 | 0.118 9 | 0.843 8 | 0.022 3 | 0.000 0 |
| 5 | 0.016 5 | 0.169 6 | 0.787 9 | 0.026 0 | 0.000 0 |

注:加粗项为预测结果的置信度。

表 6 与经验方法对比结果

Table 6 Comparison of results with empirical methods

| 序号 | σ_θ | σ_c | σ_t | σ_θ/σ_c | σ_θ/σ_t | W_{et} | 本文方法 |
|----|-----------------|------------|------------|--------------------------|--------------------------|------------|------------|
| 1 | II | III | II | II | III | II | II |
| 2 | III | III | III | IV | IV | IV | IV |
| 3 | III | III | III | III | IV | IV | IV |
| 4 | II | II | III | II | III | III | III |
| 5 | III | III | II | III | III | III | III |

注:加粗项为预测正确案例。

4 讨论与分析

4.1 不确定性分析

由于人为因素或测量误差,指标证据体的观

测数据会存在不可避免的偏差(即随机不确定性).增加实验次数并不能消除这类偏差,但可以更准确描绘出结果变异的概率分布和直观地了解可能发生的情况及其发生的概率.因此,本文通过蒙特卡洛模拟技术来描述和减少证据体在测量过程中的不确定性.当随机变量的分布未知时,假设其呈正态分布是合理的.本文假设6个证据体服从正态分布,并建立对应的概率密度函数(PDF),如式(12)所示.然后,通过建立的PDF抽样1000次,得到描述6个证据体不确定性的数据集.该数据集经过上述计算过程后得到对应岩爆案例预测结果的不确定性描述:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$

式中: x 为证据的采样值; μ 和 σ 分别代表均值和标准差,其中 μ 被定义为证据的观测值,而 σ 被定义为观测值的5%(5%是可以接受的测量偏差).

在1000次迭代后,每个岩爆案例在各岩爆烈度的BPA分布如图2所示,图中, \square 代表无岩爆、 \circ 代表轻微岩爆、 \triangle 代表中等岩爆、 ∇ 代表强烈岩爆.从图2可以看出,每个岩爆案例抽样计算的BPA结果在中间都比较分散,表现出较大的不确定性.

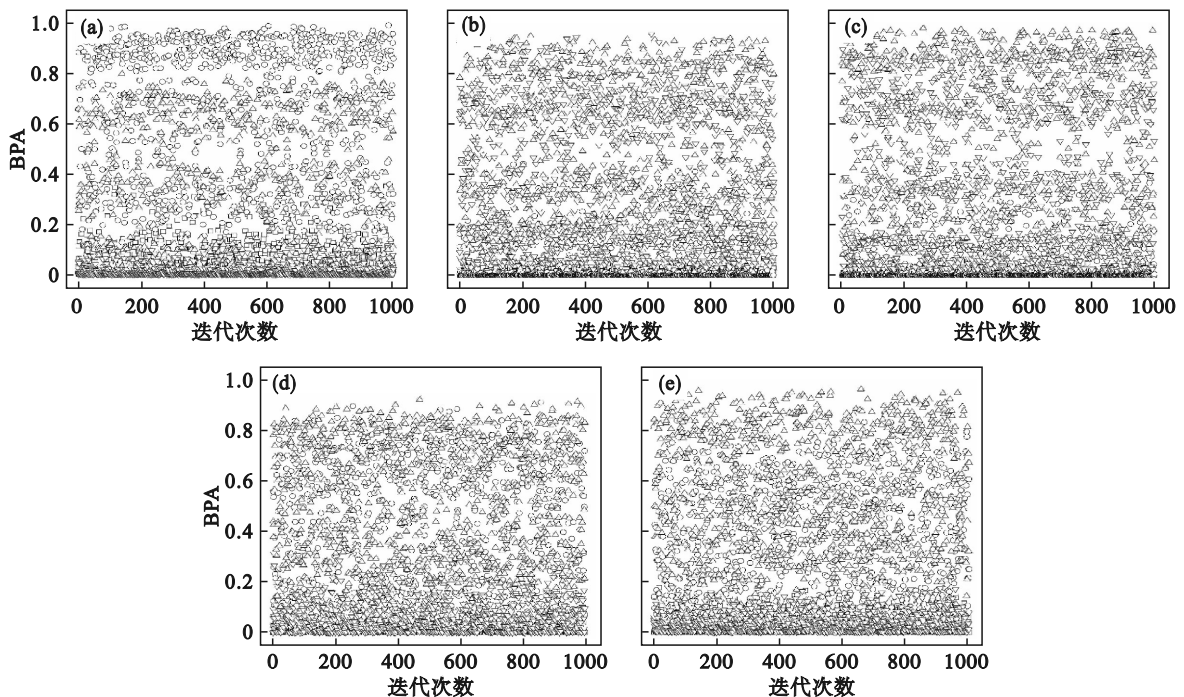


图 2 5个案例在1000次迭代后的BPA分布

Fig. 2 BPA distribution of 5 cases after 1000 iterations

(a)—案例1; (b)—案例2; (c)—案例3; (d)—案例4; (e)—案例5.

根据图 2 的 BPA 分布可得到每个案例 1 000 次迭代的预测结果(见图 3),从中可以看出案例 1 发生轻微岩爆的概率为 69.8%;案例 2 发生强烈

岩爆的概率为 70.1%;案例 3 发生强烈岩爆的概率为 40.8%;案例 4 发生中等岩爆的概率为 53.3%;案例 5 发生中等岩爆的概率为 63.7%。

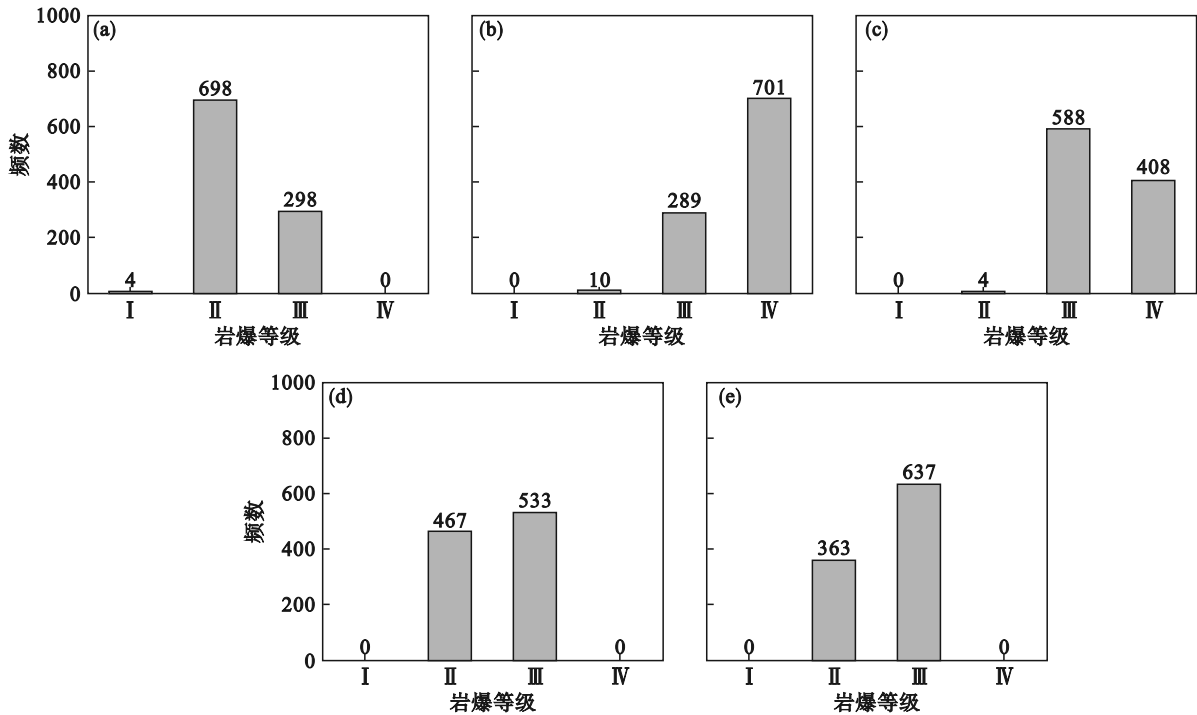


图 3 5 个岩爆案例在 1 000 次迭代后的预测结果

Fig. 3 Prediction results for 5 rockburst cases after 1 000 iterations

(a)—案例 1; (b)—案例 2; (c)—案例 3; (d)—案例 4; (e)—案例 5.

4.2 指标敏感性分析

为了揭示不同指标证据微小变化对预测结果的影响程度,本文对每个岩爆案例进行全局敏感性分析. Spearman 秩相关系数是一种常用的度量方式,计算如下:

$$R_s = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (13)$$

式中: x_i 为输入值在输入数据中的秩, \bar{x}_i 为 x_i 的平均值; y_i 为输出值在输出结果中的秩; \bar{y} 为 y_i 的平均值.

将 4.1 节中每个案例抽取的 1 000 个样本及对应的预测结果代入式(13)中,计算对应的 Spearman 秩相关系数,计算结果如图 4 所示. 从图 4 中可以发现,在不同的岩爆案例中,输入指标对岩爆预测的全局敏感性差异较大,其主要原因是不同岩爆案例的现场情况有所不同(指标实测值不同),导致相同指标构建的 BPA 在不同岩爆等级的分布情况有差异. 在案例 1, 4 和 5 中, σ_i 是最敏感的输入指标;在案例 2 中, σ_0/σ_c 是最敏感的输入指标;在案例 3 中 σ_c 是最敏感的输入指标. 而且,相同的输入指标在不同案例中表现出不同

方向的全局敏感性.

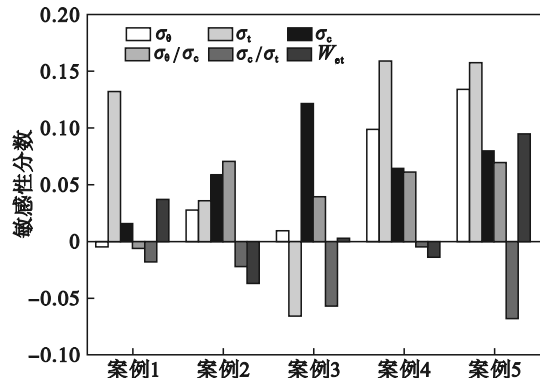


图 4 5 个岩爆案例的 6 个输入因素的全局敏感性

Fig. 4 Global sensitivity of 6 input factors for 5 rockburst cases

5 结 论

1) 由模糊物元框架和正态型隶属度函数构建证据指标的 BPA;并通过 K 均值对证据体分类,以及提出一种簇内和簇间证据应用不同融合方式的组合规则,以减小融合过程中高冲突证据的影响.

2) 在秦岭终南山公路隧道 2 号竖井工程的 5

个岩爆案例中,该方法的预测结果与岩爆实际等级完全吻合.同时将其与经验方法对比,再次证明了模型的有效性和实用性,且优于经验方法.

3)通过不确定分析及蒙特卡洛仿真,得出5个岩爆案例的发生概率分别是69.8%,70.1%,40.8%,53.3%和63.7%.对每个案例的输入指标进行敏感性分析,发现 σ_c 、 σ_t 和 σ_0/σ_c 是5个岩爆案例中最敏感的输入指标证据.

参考文献:

- [1] 钱七虎.岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型[J].岩土力学,2014,35(1):7-12.
(Qian Qi-hu. Definition, mechanism, classification and quantitative forecast model for rockburst and pressure bump [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(1): 7-12.)
- [2] Wang J A, Park H D. Comprehensive prediction of rockburst based on analysis of strain energy in rocks [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, 16(1): 49-57.
- [3] Cai M F, Brown E T. Challenges in the mining and utilization of deep mineral resources [J]. *Engineering*, 2017, 3(4): 432-433.
- [4] Qiao C, Guo Y H, Li C H. Study on rock burst prediction of deep buried tunnel based on cusp catastrophe theory [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021, 39(1): 1101-1115.
- [5] Askaripour M, Saedi A, Rouleau A, et al. Rockburst in underground excavations: a review of mechanism, classification, and prediction methods [J]. *Underground Space*, 2022, 7(4): 577-607.
- [6] Zhou J, Li X B, Mitri H S. Evaluation method of rockburst: state-of-the-art literature review [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 81: 632-659.
- [7] Gong F Q, Wang Y L, Luo S. Rockburst proneness criteria for rock materials: review and new insights [J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(10): 2793-2821.
- [8] Xu L, Gong F Q, Liu Z X. Experiments on rockburst proneness of pre-heated granite at different temperatures: insights from energy storage, dissipation and surplus [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 14(5): 1343-1355.
- [9] Hoek E, Brown E T. *Underground excavations in rock* [M]. London: CRC Press, 1980.
- [10] 梁伟章,赵国彦.深部硬岩长期岩爆风险评估研究综述[J].岩石力学与工程学报,2022,41(1):19-39.
(Liang Wei-zhang, Zhao Guo-yan. A review of long-term and short-term rockburst risk evaluations in deep hard rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(1): 19-39.)
- [11] Cai W, Dou L M, Zhang M, et al. A fuzzy comprehensive evaluation methodology for rock burst forecasting using microseismic monitoring [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 80: 232-245.
- [12] 裴启涛,李海波,刘亚群,等.基于改进的灰评估模型在岩爆中的预测研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(10): 2088-2093.
(Pei Qi-tao, Li Hai-bo, Liu Ya-qun, et al. Rockburst prediction based on a modified grey evaluation model [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(10): 2088-2093.)
- [13] Guo J, Zhang W X, Zhao Y. A multidimensional cloud model for rockburst prediction [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(5): 1199-1206.
- [14] Pu Y Y, Apel D B, Xu H W. Rockburst prediction in kimberlite with unsupervised learning method and support vector classifier [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 90: 12-18.
- [15] Sun Y T, Li G C, Zhang J F, et al. Rockburst intensity evaluation by a novel systematic and evolved approach: machine learning booster and application [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 11: 8385-8395.
- [16] 吴顺川,张晨曦,成子桥.基于PCA-PNN原理的岩爆烈度分级预测方法[J].煤炭学报,2019,44(9):2767-2776.
(Wu Shun-chuan, Zhang Chen-xi, Cheng Zi-qiao. Prediction of intensity classification of rockburst based on PCA-PNN principle [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(9): 2767-2776.)
- [17] 贾义鹏,吕庆,尚岳全,等.基于证据理论的岩爆预测[J].岩土工程学报,2014,36(6):1079-1086.
(Jia Yi-peng, Lü Qing, Shang Yue-quan, et al. Rockburst prediction based on evidence theory [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(6): 1079-1086.)
- [18] 汪明武,董昊,叶晖,等.基于联系云-证据理论的岩爆烈度预测模型[J].应用数学和力学,2018,39(9):1021-1029.
(Wang Ming-wu, Dong Hao, Ye Hui, et al. A connection cloud-evidence theory coupling model for prediction of rockburst intensity [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2018, 39(9): 1021-1029.)
- [19] Zhang L M, Ding L Y, Wu X G, et al. An improved Dempster-Shafer approach to construction safety risk perception [J]. *Knowledge-based Systems*, 2017, 132: 30-46.
- [20] 蔡文.物元模型及其应用[M].北京:科学技术文献出版社,1994.
(Cai Wen. Matter element model and its application [M]. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 1994.)
- [21] 郭婧,耿海军,吴勇.基于菌群优化的K均值聚类算法研究[J].南京理工大学学报(自然科学版),2021,45(3):314-319.
(Guo Jing, Geng Hai-jun, Wu Yong. K-means clustering algorithm based on bacteria foraging optimization [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2021, 45(3): 314-319.)
- [22] Si X F, Huang L Q, Li X B, et al. Mechanical properties and rockburst proneness of phyllite under uniaxial compression [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2021, 31(12): 3862-3878.
- [23] Zhai S B, Su G S, Yin S D, et al. Rockburst characteristics of several hard brittle rocks: a true triaxial experimental study [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, 12(2): 279-296.
- [24] 魏新江,陈涛涛,王霄,等.岩爆灾害研究与进展[J].现代隧道技术,2020,57(2):1-12.
(Wei Xin-jiang, Chen Tao-tao, Wang Xiao, et al. Progress in research of the rockburst hazard [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2020, 57(2): 1-12.)
- [25] 郭志强.秦岭终南山特长公路隧道岩爆特征与施工对策[J].现代隧道技术,2003,40(6):58-62.
(Guo Zhi-qiang. Rockbursts and countermeasures in Qinling Zhongnanshan highway tunnel [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2003, 40(6): 58-62.)