

微震监测传感器布设方案评价模型及应用

张楚旋¹, 李夕兵¹, 董陇军¹, 姚金蕊²

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 贵州开磷集团, 贵州 贵阳 550300)

摘 要: 为了弥补微震监测传感器布设方案仅依靠经验进行比选的不足, 基于逼近理想解的排序法(TOPSIS)的基本思想建立了传感器布设方案评价模型. 首先, 从技术条件、经济条件、工程条件三方面选取对传感器布设方案影响最大的指标构建评价指标体系. 其次, 考虑指标处于边缘状态时对权重的影响采用变权计算得到各方案的指标权重. 最后, 利用逼近理想解的排序法计算各方案综合优劣度. 用该评价方法评估用沙坝矿微震监测传感器布设方案, 得出各方案优劣程度, 为微震监测传感器布设多方案比选提供了一个较好的途径.

关 键 词: 微震监测; 传感器布设; 方案评价; 逼近理想解的排序法; 变权重理论

中图分类号: TD 32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)04-0594-06

Evaluation Model of Microseismic Monitoring Sensor Layout Scheme and Its Application

ZHANG Chu-xuan¹, LI Xi-bing¹, DONG Long-jun¹, YAO Jin-rui²

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Guizhou Kailin Group Co. Ltd., Guiyang 550300, China. Corresponding author: ZHANG Chu-xuan, E-mail: zhangchuxuan24@csu.edu.cn)

Abstract: A sensor layout evaluation model based on the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) was established to make up the layout deficiencies of empirical design. First, the indices which had great impacts on the choice of sensor-layout programs were selected according to the technical conditions, economic conditions and engineering conditions to build evaluation index system. Second, considering the influence of the indices at the edge state on the weight, the variable weight calculation method was used to get the index weights of all schemes. Finally, comprehensive advantages and disadvantages of each scheme were calculated by TOPSIS. This method was used to evaluate microseismic monitoring sensor layout programs to obtain the good and bad of each program. This model provides a good way for the layout of microseismic monitoring sensors.

Key words: microseismic monitoring; sensor layout; scheme evaluation; TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution); variable weights theory

随着浅部矿产资源逐渐耗尽, 矿山开采不断走向深部, 导致采深大的金属矿山岩爆事故剧增^[1-2]. 微震监测技术是一种通过对岩体受力变形和破坏过程中释放出的弹性波进行实时监测来评价岩体稳定性的技术方法^[3], 以实时无间断、立体式监测、空间预测精准等优势而被广泛应用于国内外岩爆风险性较高的工程领域^[4]. 微震监

测技术研究包括站网优化布置、微震波形识别、P波 S 波到时拾取、震源定位、震源机制分析、矿山微震活动预测^[5].

站网优化布置是指针对有岩爆倾向区域布置一个技术上可行、经济上合理, 且能符合监测精度要求的传感器安装方案. 传感器布设工作在微震监测中起到决定全局的重要作用, 是影响微震监

收稿日期: 2015-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272304, 11472311); 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室开放课题(201203).

作者简介: 张楚旋(1988-), 女, 江苏连云港人, 中南大学博士研究生; 李夕兵(1964-), 男, 湖南宁乡人, 中南大学长江学者特聘教授, 博士生导师.

测数据可靠性和有效性的关键因素,需要从以下三个方面进行重点考虑:技术可行,即岩爆风险性高的区域在监测范围之内并保证一定的监测精度;造价合理,设备购置及安装产生的费用越少越好,包括设备造价、掘进监测硐室及钻孔产生的施工成本;负面影响小,安装简便,安装之后对采矿的干扰小。

国外研究人员在站网优化方面开展了较多的研究,Kijko等^[6-7]提出传感器测站位置的优化取决于台站坐标 \mathbf{X} 的协方差矩阵 \mathbf{C}_x ,即沿用至今的 D 值优化准则;Rabinowitz等^[8]提出了采用 DETMAX 算法寻找最优台网布置方案;Mendecki^[9]基于 C -optimality 最优设计理论建立了台网优化布置方案优劣的评价目标函数。国内关于微震台网优化的研究起步较晚,主要是借鉴国外的研究成果并应用^[10]。

以上研究较好地解决了微震监测传感器布设时监测范围和监测精度计算的问题,但在进行传感器布设时仅从技术层面进行考虑是远远不够的,一般要进行多个技术方案的比选。迄今为止,科研人员在进行传感器布设多方案比选时仍依靠经验进行取舍。然而微震监测传感器布设方案的选择是一个涉及多层次、多因素、多目标的决策过程,影响因素复杂且各因素相互关联、彼此耦合,仅依靠专家经验进行方案取舍不能完全满足实际生产的需要。

鉴于此,本文基于 AHP 法与逼近理想解的排序法^[11]构建微震监测传感器布设方案综合评判模型,从技术条件、经济条件、工程条件考虑选取设备购置费(X_1),安装费用(X_2),监测有效性(X_3),水平方向定位误差(X_4),竖直方向定位误差(X_5),灵敏度(X_6),施工安装难易程度(X_7),对采矿施工的干扰(X_8)8个评价指标建立微震监测传感器布设方案评价模型。先运用 AHP 法确定各评判指标权重,再运用理想点法对各个微震监测传感器布设方案的优劣度进行评价,得到各方案最佳综合优劣度。

1 评价模型

1.1 评价指标体系

影响传感器布设方案选择的因素种类多、差异大,在保证对方案描述有效性的前提下,应选取影响性较大且可以直接获取的指标进行分析,同时所选指标应不相关或线性相关性较低。微震监测研究一般是多方科研人员共同完成,业主方较

为关心的是经济条件和工程条件,而科研方较为关心技术条件。结合开阳磷矿微震监测传感器安装过程中遇到的具体情况,提出如下微震传感器布设方案综合评价(O)指标体系(即目标层),包括经济条件、技术条件、工程条件3个准则层。经济条件(P_1)从设备购置费(x_1)及安装费用(x_2)2个指标进行分析;技术指标(P_2)从监测有效性(x_3)、水平方向定位误差(x_4)、竖直方向定位误差(x_5)及灵敏度(x_6)4个指标进行分析;工程条件(P_3)从施工安装难易程度(x_7)及对采矿施工的干扰(x_8)2个指标进行考虑,以上评价指标亦可根据待评对象具体情况而增减。

1.2 指标权重

为了最大程度避免权重确定得过于片面导致分析结果错误,本决策先用较为成熟的 AHP 方法计算各指标常权重,再采用变权计算对各方案指标权重进行细化,得到各指标具体状态值下的权重。

决策者在计算常权向量之后根据变权理论的基本定义^[12],若因素状态向量 $\mathbf{X} = (x_1, \dots, x_n)$ 满足归一性、连续性、单调性的变权映射 $w_j (j = 1, \dots, n), [0, 1]^n \rightarrow [0, 1], (x_1, \dots, x_n) \rightarrow w_j(x_1, \dots, x_n)$, 则 $\mathbf{W}(\mathbf{X}) = (w_1(\mathbf{X}), w_2(\mathbf{X}), \dots, w_n(\mathbf{X}))$ 称作一组变权向量,其 n 维惩罚型状态变权向量满足

$$x_i \geq x_j \Rightarrow S_i(\mathbf{X}) \leq S_j(\mathbf{X}); \quad (1)$$

式中 $S_j(\mathbf{X})$ 对每个变元连续($j = 1, \dots, n$)。

变权向量 $\mathbf{W}(\mathbf{X})$ 满足

$$\mathbf{W} \cdot \mathbf{S}(\mathbf{X}) = \mathbf{W}(\mathbf{X}) \cdot \sum_{j=1}^n (w_j S_j(\mathbf{X})), \quad (2)$$

则映射 $\mathbf{S}: [0, 1]^n \rightarrow [0, 1]^n, \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{S}(\mathbf{X}) = (S_1(\mathbf{X}), \dots, S_n(\mathbf{X}))$ 为其 n 维惩罚型状态变权向量。

将式(1)修改为 $x_i \geq x_j \Rightarrow S_i(\mathbf{X}) \geq S_j(\mathbf{X})$, 可定义激励型状态变权向量。

m 维实函数的状态变权向量可由具有连续偏导数的均衡函数求得。针对变权向量的两种类型,惩罚(激励)型均衡函数可根据实际情况,先确定均衡函数的形态及各指标权重与其状态值之间的变化关系,再选取调整因子进行构造。

由此可构造状态变权向量:

$$S_j(x) = S(x_1, \dots, x_n) = \frac{\partial B(x)}{\partial x_j}. \quad (3)$$

再由式(2)可计算出变权向量 \mathbf{W} 。

1.3 基于 TOPSIS 的方案评价

TOPSIS 评判主要涉及指标集 \mathbf{X} 、方案集 \mathbf{A} 、加权标准化决策矩阵 \mathbf{C} 和权重 \mathbf{W} 四大要素,根据

这 4 个要素可计算出虚拟的最优解和最劣解,最后由各待评价方案和最优解的距离来评判方案综合优越度^[11].

1) 初始评价矩阵. 设传感器布设方案个数为 m , 每个待评方案都有 n 项指标, 据此建立初始评判矩阵:

$$A = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

2) 决策矩阵的归一化. 决策矩阵中各数据有不同的量纲和单位, 应对矩阵进行归一化处理以保证因素之间的可比性. 构造标准化决策矩阵 $B = (b_{ij})_{m \times n}$.

效益型指标:

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}. \quad (5)$$

成本型指标:

$$b_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}. \quad (6)$$

3) 加权标准化决策矩阵. 由矩阵 B 和权重 W 的相应项相乘得到加权标准化决策矩阵:

$$C = \begin{bmatrix} w_1 b_{11} & w_2 b_{12} & \cdots & w_n b_{1n} \\ w_1 b_{21} & w_2 b_{22} & \cdots & w_n b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_1 b_{m1} & w_2 b_{m2} & \cdots & w_n b_{mn} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

4) 综合优越度计算. 正、负理想解:

$$\left. \begin{aligned} C^+ &= \{(\max_j c_{ij} | x_j \in J_1), (\min_j c_{ij} | x_j \in J_2)\}, \\ C^- &= \{(\min_j c_{ij} | x_j \in J_1), (\max_j c_{ij} | x_j \in J_2)\}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: C^+ 和 C^- 分别表示正、负理想解; J_1 和 J_2 分别表示越大越优型指标集和越小越优型指标集.

计算评判对象与最优理想解的距离:

$$\left. \begin{aligned} d_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^+)^2}, \\ d_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^-)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: d_i^+ 和 d_i^- 分别表示评判对象与最优解和最劣解的距离; c_j^+ 和 c_j^- 分别表示最优解和最劣解中相对应的元素.

方案贴近度:

$$e_i^+ = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \quad 0 \leq e_i^+ \leq 1. \quad (10)$$

e_i^+ 即方案贴近度, 越接近于 1 表明该方案和理想解集越接近.

2 工程应用实例

开阳磷矿用沙坝矿段是贵州开磷矿业有限责任公司的主要生产矿山, 地表标高 +1 400 ~ 1 700 m, 已探明储量 4 000 多万 t, 近一半的矿体赋存于既有金阳公路下方. 该矿矿体呈稳定的层状产出, 形态简单且厚度稳定, 沿走向和倾向连续性较好, 产状变化不大, 倾角 $10^\circ \sim 55^\circ$. 该矿矿区内已查明较大断层 20 条, 其中有 6 条水平断距大于 10 m, 部分断层地表出露, 使得多个采场顶板极不稳定, 采用人工假顶下开采亦无法阻止冒顶事故的发生.

由于该矿山在 20 世纪 70 年代被疯狂盗采留下无数的未知空区, 且首采矿段采用房柱法开采, 开采结束之后未对采空区进行有效处理. 随着开采工作往深部推进, 多个采场已经出现严重的应力集中, 存在岩爆的可能, 严重威胁到矿山的安全生产. 用沙坝矿开采风险区域示意图见图 1.

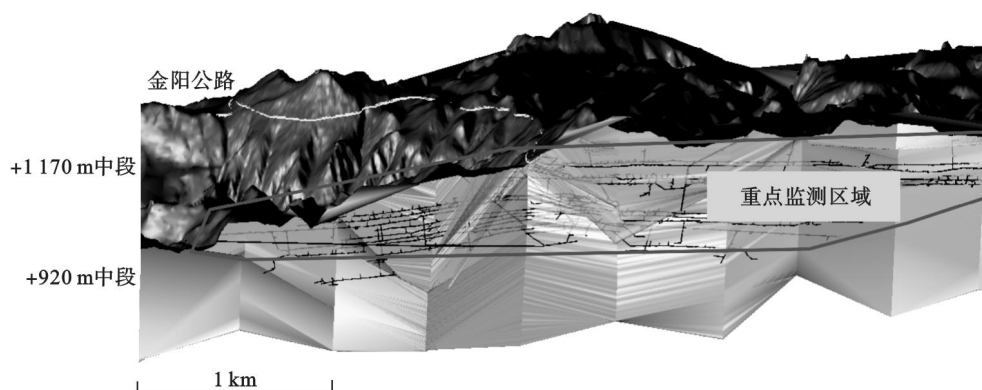


图 1 用沙坝矿开采风险区域示意图

Fig. 1 Sketch of risk areas in Yongshaba mine

出于安全性原则考虑,用沙坝矿拟与中南大学合作引进澳大利亚 IMS 微震监测系统对高风险区进行监测,对可能发生的岩体失稳进行预测预报. 根据现场勘察,微震研究人员通过计算提出 5 个可行的微震监测传感器布设方案,各方案对应指标取值见表 1^[13].

表 1 微震传感器布设方案评价指标
Table 1 Evaluation indicis of sensor layout schemes

| 准则层 | 指标层 | 方案 I | 方案 II | 方案 III | 方案 IV | 方案 V |
|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| P_1 | x_1 /万元 | 155 | 158 | 120 | 252 | 256 |
| | x_2 /万元 | 21. 45 | 25. 35 | 20. 47 | 40. 95 | 47. 77 |
| P_2 | x_3 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| | x_4 /m | 16 | 14 | 26 | 13 | 14 |
| | x_5 /m | 16 | 17 | 30 | 14 | 14 |
| | x_6 | -1. 2 | -1. 4 | -1. 0 | -1. 3 | -1. 5 |
| P_3 | x_7 | 2 | 3 | 1 | 4 | 4 |
| | x_8 | 2 | 3 | 2 | 4 | 4 |

2. 1 指标权重确定

1) 计算指标常权重. 用沙坝矿、中南大学双方代表根据 AHP 法基本原理^[14]共同构造权重判断矩阵:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5/7 & 5/6 & 5/6 & 5/7 & 5 & 3 \\ 1/3 & 1 & 1/4 & 1/5 & 1/5 & 1/5 & 2 & 1 \\ 7/5 & 4 & 1 & 8/5 & 8/5 & 1 & 6 & 3 \\ 6/5 & 5 & 5/8 & 1 & 1 & 1 & 3 & 2 \\ 6/5 & 5 & 5/8 & 1 & 1 & 1 & 3 & 2 \\ 7/5 & 5 & 1 & 1 & 1 & 1 & 4 & 2 \\ 1/5 & 1/2 & 1/6 & 1/3 & 1/3 & 1/4 & 1 & 2/3 \\ 1/3 & 1 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 3/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

参考层次分析法的计算过程,得出各指标常权重:

$$W = \{0.147, 0.058, 0.195, 0.153, 0.153, 0.168, 0.050, 0.076\}.$$

2) 构造状态变权向量. 本次研究采用指数型状态变权向量并借鉴变权理论有关研究成果,构造状态变权向量 $S(X_i) = (S_1(X_i), S_2(X_i), \cdots, S_n(X_i))$:

$$S_j(X_i) = \begin{cases} e^{-\alpha(x_{ij}-\beta)}, & x_{ij} \leq \beta; \\ 1, & x_{ij} > \beta. \end{cases} \quad (12)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.734 & 0.964 & 0.500 & 0.769 & 0.875 & 0.400 & 0.667 & 1.000 \\ 0.721 & 0.821 & 0.500 & 0.923 & 0.813 & 0.800 & 0.333 & 0.500 \\ 1.000 & 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.029 & 0.250 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.600 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.923 & 1.000 & 1.000 & 0.000 & 0.000 \end{bmatrix} \quad (13)$$

2) 计算加权标准化决策矩阵. 根据各方案指标权重及归一化决策矩阵 B ,由式(12)计算出加

式中: $j=1, \cdots, n; \alpha \geq 0; 0 < \beta \leq 1. \beta$ 为否定水平,在第 j 项指标状态值 x_{ij} 小于 β 时,通过实施变权计算增大其权重; α 为惩罚水平,反映决策对因素均衡性要求的强弱. 实际应用中,决策者可根据研究对象的决策要求选定 α, β 值.

3) 计算变权向量. 根据矩阵 B ,认为归一化之后小于 0.5 的指标处于边缘状态,故取否定水平 $\beta=0.5$,惩罚水平 $\alpha=0.5$,结合式(2),式(11)及常权向量 W ,可以求得各组方案指标变权重为 $W_I = \{0.147, 0.058, 0.195, 0.153, 0.153, 0.168, 0.050, 0.076\}$, $W_{II} = \{0.143, 0.056, 0.189, 0.148, 0.148, 0.189, 0.053, 0.074\}$, $W_{III} = \{0.129, 0.051, 0.219, 0.172, 0.172, 0.147, 0.044, 0.067\}$, $W_{IV} = \{0.170, 0.060, 0.179, 0.140, 0.140, 0.162, 0.059, 0.089\}$, $W_V = \{0.165, 0.065, 0.171, 0.134, 0.134, 0.189, 0.056, 0.085\}$.

2. 2 传感器布设方案评价

1) 建立决策矩阵. 由表 1 可建立多属性决策矩阵,再进行无量纲处理,得出归一化决策矩阵:

权标准化决策矩阵 C :

$$C = \begin{bmatrix} 0.109 & 0.056 & 0.098 & 0.118 & 0.134 & 0.067 & 0.033 & 0.076 \\ 0.103 & 0.046 & 0.095 & 0.137 & 0.120 & 0.151 & 0.018 & 0.037 \\ 0.129 & 0.051 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.044 & 0.067 \\ 0.005 & 0.015 & 0.179 & 0.140 & 0.140 & 0.097 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.171 & 0.124 & 0.134 & 0.189 & 0.000 & 0.000 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

3) 计算理想解. 在该评判指标体系中, 各项解和负理想解分别为
指标均为成本型指标. 根据式(7)可得到正理想

$$\begin{aligned} C^+ &= (0.129, 0.056, 0.179, 0.140, 0.140, 0.189, 0.044, 0.076), \\ C^- &= (0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000). \end{aligned} \quad (15)$$

4) 计算各方案与正理想解距离. 根据式(8), 计算 5 个传感器布设方案与正、负理想解的距离分别为

$$\begin{aligned} d_1^+ &= 0.023, \quad d_2^+ = 0.012, \quad d_3^+ = 0.107, \quad d_4^+ = 0.033, \quad d_5^+ = 0.028, \\ d_1^- &= 0.068; \quad d_2^- = 0.079; \quad d_3^- = 0.026; \quad d_4^- = 0.081; \quad d_5^- = 0.098. \end{aligned}$$

5) 各方案综合优越度. 根据公式(9)计算出各方案与正理想解的贴近度 $E^+ = (0.750, 0.869, 0.193, 0.709, 0.779)$.

用沙坝矿微震监测传感器布设方案的综合优越度: 方案 I 为 75.0%, 方案 II 为 86.9%, 方案 III 为 9.3%, 方案 IV 为 70.9%, 方案 V 为 77.9%. 方案的优劣次序为 II > V > I > IV > III.

对比常权重与变权重, 各方案指标取值趋于边缘状态时, 该指标的权重受到激励或惩罚, 有较为明显的变化, 这样取得的权重分析结果更贴近工程实际.

6) 从评判结果中可以看出, 一味追求降低造价的方案 III 并不可取; 方案 II 的技术条件不如方案 IV 与 V, 但是节约了 120 万元左右的投资, 是一个技术和投资较为均衡的方案. 经过该矿山两年多的生产实践, 按照方案 II 布设的微震监测系统有效, 监测成本较低, 取得较好的效果. 表明这种微震传感器布设方案评价方法具有可行性.

3 结 论

1) 根据 AHP 法的基本原理, 从经济条件、技术条件和工程条件 3 个方面考虑 8 项对微震监测传感器布设方案决策影响最大的指标, 建立了微震传感器布设方案评价指标体系.

2) 基于 TOPSIS 建立微震监测传感器布设方案评价模型, 克服了以往仅依靠专家意见进行方案取舍的局限性.

3) 将评价模型应用于用沙坝矿微震传感器布设方案选择中, 确定方案 II 为最优方案, 为矿山微震监测传感器布设方案选择提供了理论依据.

参考文献:

- [1] Li X, Dong L J. An efficient closed-form solution for acoustic emission source location in three-dimensional structures[J]. *AIP Advances*, 2014, 4(2): 7110–7116.
- [2] Dong L, Li X, Zhou Z, et al. Three-dimensional analytical solution of acoustic emission source location for cuboid monitoring network without pre-measured wave velocity[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(1): 293–302.
- [3] Vinoth S, Kumar L A. Applying real time seismic monitoring technology for slope stability assessment—an Indian opencast coal mine perspective[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2014, 24(1): 75–80.
- [4] Maxwell S C, Rutledge J, Jones R, et al. Petroleum reservoir characterization using downhole microseismic monitoring[J]. *Geophysics*, 2010, 75(5): 129–137.
- [5] 张楚旋, 李夕兵, 董陇军, 等. 三函数四指标矿震信号 S 波到时拾取方法及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(4): 1–10.
(Zhang Chu-xuan, Li Xi-bing, Dong Long-jun, et al. The three functions four indicators S-wave phase picking method and application for microseismic signal in mines[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(4): 1–10.)
- [6] Kijko A. An algorithm for the optimum distribution of a regional seismic network[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1977, 115(4): 999–1009.
- [7] Kijko A, Sciocatti M. Optimal spatial distribution of seismic stations in mines [C]//*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Pergamon, 1995: 607–615.
- [8] Rabinowitz N, Steinberg D M. Optimal configuration of a seismographic network; a statistical approach[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1990, 80(1): 187–196.
- [9] Mendecki A J. *Seismic monitoring in mines* [M]. New York: Springer Science & Business Media, 1997.

(下转第 608 页)