

基于双差层析成像技术的煤矿越界 开采实时动态监测技术

冯海军^{1†}, 刘梁², 郭文浩¹, 杨志立¹, 王奎辉¹, 吕占魁¹

(1. 山西华宁焦煤有限责任公司, 山西 临汾 041000; 2. 江西省地质局第五地质大队, 江西 新余 338000)

摘要:采矿权的边界直接关系到采矿权人利益,也是最容易出现问题、引发混乱的重要环节,为此研究了基于双差层析成像技术的煤矿越界开采实时动态监测技术。该技术使用光纤微震传感器采集煤炭开采过程中采煤机产生的震动信号后,对光纤微震信号进行解调并增强处理,以其为基础,通过双差层析成像技术获得震动体波的相对位置和绝对位置,依据该位置结合煤矿开采权属界线位置,得到当前煤炭开采行为是否存在越界情况。实验结果表明:该方法可有效采集采煤机产生的震动信,并可有效对其进行增强处理,同时可生成震动信号的双差层析成像和实现煤矿越界开采实时动态监测,其具备较强的应用性。

关键词:双差层析成像;越界开采;动态监测;反演成像;信号增强

中图分类号:TD76

文献标识码:A

Real Time Dynamic Monitoring Technology for Coal Mine Cross Boundary Mining Based on Double Difference Tomography Technology

FENG Haijun^{1†}, LIU Liang², GUO Wenhao¹, YANG Zhili¹, WANG Kuihui¹, LV Zhankui¹

(1. Shanxi Huaning Coking Coal Co., Ltd., Linfen, Shanxi 041000, China;

2. The fifth Geological Brigade of Jiangxi Geological Bureau, Xinyu, Jiangxi 338000, China)

Abstract: The boundaries of mining rights are directly related to the interests of mining rights holders, and are also the most prone to problems and chaos. Therefore, a real-time dynamic monitoring technology for coal mine cross-border mining based on double difference tomography technology is studied. This technology uses fiber optic microseismic sensors to collect the vibration signals generated by the coal mining machine during the coal mining process, demodulates and enhances the fiber optic microseismic signals. Based on this, the relative and absolute positions of the vibration body waves are obtained through double difference tomography technology. Based on this position, combined with the position of the coal mining ownership boundary, the current coal mining behavior is determined to determine whether there is a boundary violation. The experimental results show that this method can effectively collect and enhance the vibration signals generated by the coal mining machine. At the same time, it can generate double difference tomography imaging of the vibration signals and achieve real-time dynamic monitoring of coal mining beyond the boundary. It has strong applicability.

Key words: double difference tomography; cross border mining; dynamic monitoring; inversion imaging; signal enhancement

一些矿山企业在追求最大利益的过程中,往往会出现超层、越界等违法开采行为^[1],这些行为不仅危及人民的生命和财产安全,也严重影响了矿产行业健康有序的发展。因此,对于矿山的开采进行严格的监管和监测是至关重要的。在矿产资源的勘查和开采过程中,采矿权的边界和开采标高是直接关系到采矿权人利益和最容易出现问题、引发混乱的重要环节^[2,3]。因此,对于采矿权拐点坐标和开采标高的测量是采矿权众多基本数据中最为重要和关键的基本数据之一。需要采用高效、高精度的测量方法和技术手段来确保数据的准确性和可靠性。现有的技术和方法对于采矿权边界和开采标高的测量主要采用传统的实地勘测和开采标高测量方法^[4]。这些方法虽然可以获得较为准确的数据,但是需要耗费大量的人力和物力资源,并且存在一定的时间和空间局限性,难以实现对于矿山开采的实时动态监测。双差层析成像技术是一种改进的地震层析成像方法,它通过改善地震波传播路径的差异和介质速度结构的非均匀性,有效地约束了地震的空间位置^[5],因此可获得更精确的地震定位结果。本文以双差层析成像技术为基础,研究基于双差层析成像技术的煤矿越界开采实时动态监测技术,为矿产资源勘查和开采过程中的采矿权边界和开采标高的测量提供更为准确、可靠的数据支持,同时为矿山开采的实时动态监测提供必要的支持和帮助。

1 煤矿越界开采实时动态监测

1.1 光纤微震信号解调

煤矿使用采煤机开采煤炭时,会在地下产生震动信号^[6],利用光纤微震传感器采集该煤矿采煤机运行时产生的震动信号后,需对信号进行解调处理。

令 U_0 表示光纤微震传感器输出的光功率,其光纤光栅波长为 $\Delta\lambda$, Δs 表示光纤的反射变化率,则光纤微震传感器输出信号表达式如下:

$$U_s = \zeta_1 U_0 (RzA + \beta\Delta\lambda zA) \quad (1)$$

式中, U_s 表示光纤微震传感器输出信号; ζ_1 表示光纤弹性系数; z 表示光学耦合产生的噪声; A 表示质量块面积; R 表示光栅在 -3 dB 时的反射率; β 表示调节参数。

令 U_r 表示震动信号的参考信号,其表达式

如下:

$$U_r = \zeta_2 zAU_0 \quad (2)$$

式中, ζ_2 表示结构弹性系数。

将公式(1)和(2)相除后,则有:

$$\frac{U_s}{U_r} = R\zeta + \zeta\beta\Delta\lambda \quad (3)$$

式中, ζ 表示总弹性系数。

在实际中使用光纤微震传感器采集煤矿采煤机运行时产生的震动信号时,受光纤弯折以及信号耦合等因素影响^[7],返回到传感器内的信号会产生不同程度的衰减情况,在此使用具备大动态范围特性的对数放大器获取光电流信号,再通过转换函数,即可得到光纤微震传感器采集信号与参考信号的归一化信号,其表达式如下:

$$U_n = \zeta \log_{10} R + \zeta \log_{10} (\beta\Delta\lambda) \quad (4)$$

式中, $\log$ 表示对数运算; U_n 表示光纤微震传感器采集信号与参考信号的归一化信号。

经过上述步骤,采集到煤矿采煤机运行时产生的震动信号。

1.2 基于经验模态分解的震动信号增强处理

由于利用光纤微震传感器采集煤矿采煤机运行时产生的震动信号时,传感器对光纤信号进行耦合时会产生系统噪声,会对震动信号强度产生影响^[8,9],进而影响煤矿越界开采实时动态监测结果。因此需要对震动信号进行增强处理^[10],在此使用经验模态分解算法来实现,其详细过程如下。

令 $x'(t)$ 表示光纤微震传感器采集到的原始震动信号,其表达式如下:

$$x'(t) = x(t) + \epsilon n_j(t) \quad (5)$$

式中, $x(t)$ 表示不含噪声的震动信号; $n_j(t)$ 表示系统噪声信号; ϵ 表示噪声系数; t 表示时间。

对公式(5)进行 I 次经验模态分解后,通过集成方式得到第一个 IMF 分量,该分量和残差分量表达式如下:

$$\text{IMF}_1(t) = \frac{\sum_{i=1}^1 \text{IMF}_{i1}(t)}{I} \quad (6)$$

$$g_1(t) = x'(t) - \text{IMF}_1(t) \quad (7)$$

式中, $\text{IMF}_1(t)$ 、 $g_1(t)$ 表示第一个 IMF 分量和残差分量。

令 $\text{EMD}_j(\cdot)$ 表示震动信号的第 j 个模态函数,则对原始震动信号再次进行 I 次分解后,得到第二个 IMF 分量,其表达式如下:

$$\text{IMF}_2(t) = \frac{\text{EMD}_1\{g_1(t) + \epsilon \text{EMD}_1[n_i(t)]\}}{I} \quad (8)$$

式中, $\text{IMF}_2(t)$ 表示第二个 IMF 分量。

令 k 表示阶数, 计算 k 阶残差分量, 表达式如下:

$$g_k(t) = g_{k-1}(t) - \text{IMF}_k(t) \quad (9)$$

从 $\{g_1(t) + \epsilon \text{EMD}_1[n_i(t)]\}$ 内可提取到第一个 IMF 分量, 进而可得到 $\text{IMF}_{k+1}(t)$ 分量:

$$\text{IMF}_{k+1}(t) = \frac{\sum_{i=1}^1 \text{IMD}_k\{g_k(t) + \epsilon \text{EMD}_k[n_k(t)]\}}{I} \quad (10)$$

重复上述步骤后, 即可得到不含噪声增强后的震动信号, 其表达式如下:

$$x(t) = g(t) + \sum_{k=1}^K \text{IMD}_k(t) \quad (11)$$

式中, K 表示分解总阶数; $g(t)$ 表示总残差分量。

1.3 煤矿越界开采实时动态监测

双差层析成像技术可获取三维速度结构以及震源的相对位置和绝对位置, 而在煤矿开采过程中^[11,12], 采煤机运作会在地下产生震源形成地震波, 利用双差层析成像技术可对采煤机震源进行定位, 依据定位位置可分析出当前采煤工作是否发生越界现象。利用双差层析成像技术定位采煤机工作震源位置详细流程如下。

按照射线原理, 当采煤机工作并发生震动时, 震动体波的走时方程可由公式(12)表示:

$$F_q^i = t^i + \int_i^q l \, ds \quad (12)$$

式中, F_q^i 表示采煤机工作时发生第 i 次震动时的震动体波走时; q 表示记录到该震动体波的监测点; t^i 表示采煤机第 i 次发生震动体波的发震时刻; l 表示慢度矢量; ds 表示震动体波的路径积分元; $\int_i^q l \, ds$ 表示震动体波从采煤机震源到监测点接收到该体波的时间。

对公式(12)进行泰勒展开处理, 同时使用三维网格速度模型离散介质后, 可得到震动体波的线性方程^[13], 令 r_i^q 表示监测点 q 获得的第 i 次震动体波实际到理论和理论到时的差值, 表达式如下:

$$r_i^q = \sum_{l=1}^3 \frac{\partial F_q^i}{\partial x_l^i} (\Delta x_l^i + \Delta t)^i +$$

$$\Delta s_m \sum_{m=1}^{M_{iq}} \sum_{n=1}^N w_{nm} \Delta l_n \quad (13)$$

式中, M_{iq} 表示第 i 次震动体波到监测点 q 的分段路径; ∂ 表示偏导函数; m 、 n 均表示三维网格节点; w_{nm} 表示以第 m 个节点为中心的第 n 个网格节点差值加权系数; l 表示震源参数数量; x_l^i 表示震源参数; Δt^i 表示震动时刻扰动项; Δs_m 、 Δl_n 分别表示节点 m 和 n 的慢度扰动。

以公式(13)为基础, 第 j 次和第 i 次监测点观测震动体波到时之差和理论之差的计算式如下:

$$\begin{aligned} r_j^q - r_i^q = & \sum_{l=1}^3 \frac{\partial F_q^j}{\partial x_l^j} (\Delta x_l^j + \Delta t^j) + \\ & \Delta s_m \sum_{m=1}^{M_{jq}} \sum_{n=1}^N w_{nm} \Delta l_n - \\ & \left[\sum_{l=1}^3 \frac{\partial F_q^i}{\partial x_l^i} (\Delta x_l^i + \Delta t^i) + \Delta s_m \sum_{m=1}^{M_{iq}} \sum_{n=1}^N w_{nm} \Delta l_n \right] \end{aligned} \quad (14)$$

公式(14)结果即为双差, 也就是采煤机工作震源 j 和 i 的观测到时残差。对公式(14)进行简化处理, 则有:

$$r_j^q - r_i^q = (F_q^j - F_q^i)^{\text{obs}} - (F_q^j - F_q^i)^{\text{cal}} \quad (15)$$

上述公式中, $(F_q^j - F_q^i)^{\text{obs}}$ 和 $(F_q^j - F_q^i)^{\text{cal}}$ 分别表示观测到时和实际到时的差值。

当采煤机在运行时, 其会源源不断产生地震波^[14,15], 因此每次都会产生 N_p 个震动体波以及 N_p 个震动体波到时, 则利用矩阵方式描述震动体波的线性方程, 其表达式如下:

$$\mathbf{D}_p \Delta \mathbf{E}_p + \mathbf{C}_p \Delta \mathbf{M} = \Delta \mathbf{F}_p \quad (16)$$

式中, $\mathbf{D}_p$ 表示震源参数和产生震动体波时刻的偏微分矩阵; $\Delta \mathbf{E}_p$ 、 $\Delta \mathbf{M}$ 、 $\Delta \mathbf{F}_p$ 分别表示扰动量矢量、慢度扰动量矢量和到时残差矢量^[16]; $\mathbf{C}_p$ 表示偏微分矩阵。

利用 LSQR 方法求解公式(16)后, 以其为基础, 利用公式(15)计算双差并反复推演, 即可得到震动体波的相对位置和绝对位置, 依据该位置结合煤矿开采权属界线位置, 即可得知当前煤矿开采是否发生越界开采现象, 实现煤矿越界开采实时动态监测。

2 实验分析

以某煤矿为实验对象, 该煤矿属于特大型现代化高产高效矿井, 也是最早建成的井工矿之一。该

矿区拥有两井,井田面积约为 189.9 平方公里,煤炭地质储量约 23.2 亿吨,可采储量约 15.3 亿吨。其年产量在 2 千万吨以上。利用 LE2182 型号光纤微震传感器采集该煤矿采煤机运行时产生的震动信号,该传感器技术指标如表 1 所示。

表 1 LE2182 型号光纤微震传感器技术指标

技术项目	技术参数
工作电源	24V±6V DC
工作电流	20 mA
测量范围	±0.5 g
频率范围	0.1~10 Hz
防护等级	IP55
输出电压	0~10 V
工作温度	-30~70℃
尺寸	80 mm×75 mm×57 mm

在该矿山的南翼和北翼分别使用 17 个和 21 个光纤微震传感器采集采煤机工作时的震动体波,其中南翼光纤微震传感器之间间隔距离为 110 m 左右,形成长约 1870 m,宽约 350 m 的传感器网络,北翼传感器距离约为 240 m,形成长约 5040 m,宽约 600 m 的传感器网络。光纤微震传感器装置具备深孔安装锚爪,借助灌浆实现稳固安装,确保传感器与岩体实现充分耦合。这种方法降低了背景噪声,使微震波记录质量得到有效提升。利用光纤微震传感器采集采煤机工作时的震动体波后,对其进行双差层析成像,测试本文技术对煤矿越界开采的实时动态监测能力。

由于本文技术采用 LSQR 方法求解震动体波线性方程的矩阵,该方法通过光滑因子和阻尼因子约束慢度和位置的变化量,选择合适的光滑因子和阻尼因子可使双差层析成像的反演效果更佳。利用 L 曲线方式选择合适的光滑因子和阻尼因子,结果如图 1 所示。

图 1 内 A1 表示慢度变化量归一化范数,其为光滑因子;A2 表示位置量归一化范数,其为阻尼因子分析图 1 可知,慢度变化量归一化范数和位置量归一化范数呈现迅速下降趋势,在光滑因子为 20,而阻尼因子为 60 时,残差方差数值约为 0.04 左右,因此选择光滑因子为 20,阻尼因子为 60,依据该参数,对采煤机工作时的震动体波进行反演。

以该煤矿 3 条巷道作为实验对象,使用本文技术采集该 3 条巷道 30 天内采煤机运行时产生的震动信号,采集结果如图 2 所示。

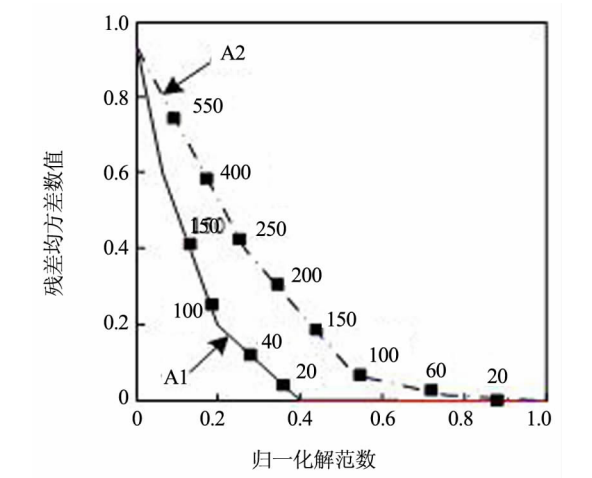


图 1 光滑因子和阻尼因子选择

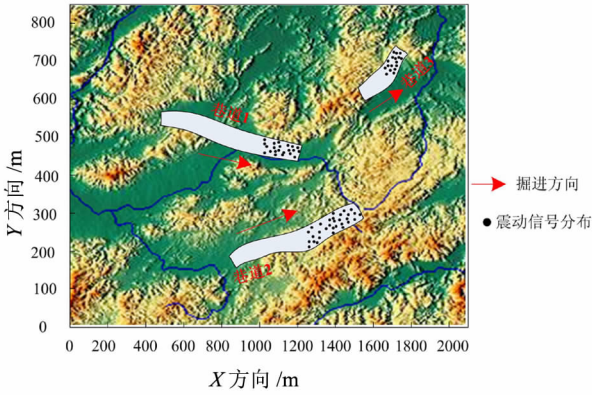


图 2 震动信号采集结果

从图 2 中的震动信号的分布来看,这三个采煤巷道都在进行煤炭挖掘工作。这表明该方法可以准确地检测和区分采煤机在不同巷道内的运行状态,并且可以及时地掌握采煤生产的进度和状况,综上所述,本文技术采集采煤机运行时产生的震动信号能力较强。

进一步验证本文技术采集采煤机运行时采集震动信号能力,将采集值与标准值之间进行拟合处理,分析其拟合曲线情况,结果如图 3 所示。

分析图 3 可知,本文技术采集到的采煤机运行时采集震动信号数值与其标准值曲线几乎完全重合,虽然个别采集值与标准值曲线存在偏差,但偏差数值极小,整体拟合曲线呈现上升状态。上述结果说明:本文技术采集采煤机运行时采集震动信号精度较高,可有效为后续煤矿越界开采实时动态监测提供数据支持。

验证本文技术对采煤机运行时产生的震动信号的增强能力,以任意 1 组震动信号作为实验对

象,使用本文技术对其进行增强处理,测试结果如图 4 所示。

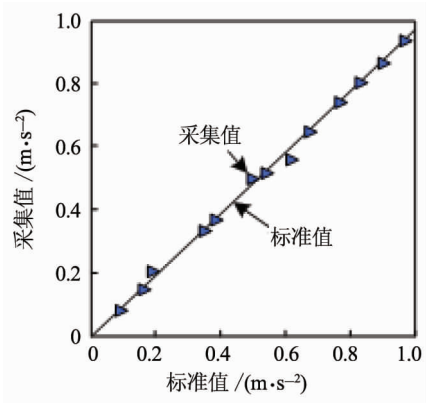


图 3 震动信号采集值拟合曲线

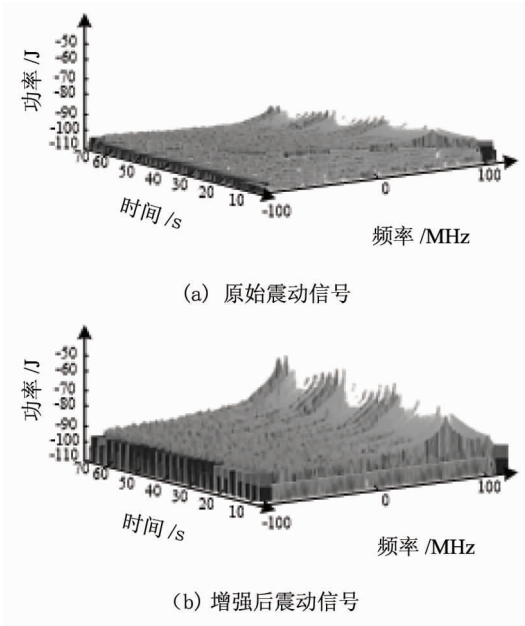


图 4 震动信号增强效果

分析图 4 可知,利用本文技术对该震动信号进行增强后,其功率的峰值得到明显的提升,说明本文技术可有效对震动信号进行增强。

以某组采煤机运行时震动信号作为实验对象,使用本文技术对该信号进行双层差分成像,分析本文技术的双层差分成像能力,结果如图 5 所示。

分析图 5 可知,利用本文技术可有效获得该震动信号在不同深度、X 方向和 Y 方向上的剖面,并对其进行叠加后,可得到该震动信号的双差层析成像,从呈现结果中可清楚观察到该震动信号的传播速度,从而得到信号源位置。

以该煤矿某个区域为实验对象,使用本文技术对该区域煤矿开采越界进行实时动态监测,结果如图 6 所示。

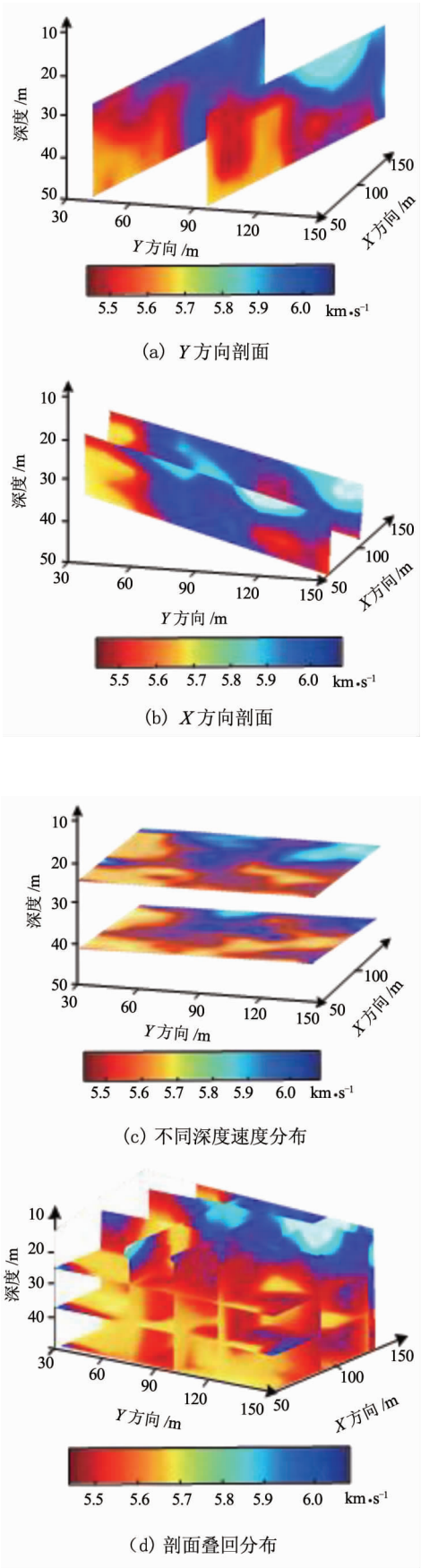


图 5 双差层析成像反演结果

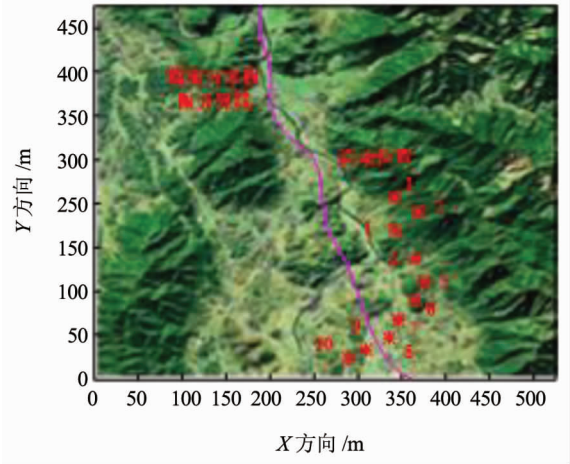


图 6 煤矿开采越界实时动态监测

分析图 6 可知,本文技术不仅可有效获得煤矿开采过程中的震动位置,还可从其位置和煤炭开采权限分界线的分布情况中可看出编码为 9 和 10 震动位置已经存在开采越界行为,该结果说明本文技术具备较好的煤矿开采越界实时动态监测能力。

3 结 论

基于双差层析成像技术的煤矿越界开采实时动态监测技术对于保障煤矿安全生产具有重要意义。该技术基于利用双差层析成像原理,能够实时监测煤矿开采过程中的越界情况,并及时采取相应的控制措施,从而有效避免安全事故的发生。在实验过程中,选择了某煤矿进行实地测试。在实验过程中,采集了大量的传感器数据,并采用专业软件对这些数据进行分析 and 处理。实验结果表明,该技术能够准确监测出煤矿开采过程中的越界情况,其监测结果可以为煤矿安全生产提供有力的数据支持,有助于保障矿工的生命安全和企业的正常生产。

参考文献

[1] 刘承雨,张正帅,李国一. 沂沭断裂带及邻区双差层析成像[J]. 大地测量与地球动力学,2022,42(2):176—181.

[2] 杨峰. 滇西北地区主要断裂带及邻区三维 P 波速度结构的双差地震层析成像[J]. 地震,2021,41(3):42—58.

[3] 罗开,陈亮,梁巍,等. 基于稀疏表示的滤波反投影超声层析成像重建算法[J]. 计算机应用,2023,43(3):903—908.

[4] 赵玉灵,杨金中,孙娅琴,等. 油气矿山越界开采遥感监测方法探索[J]. 自然资源遥感,2022,34(2):30—36.

[5] 范涛,李萍,赵兆,等. 钻孔瞬变电磁方法探测越界开采采空区的应用[J]. 煤田地质与勘探,2022,50(1):20—24.

[6] 杨晓东,高强,吴宇鹏. 基于无线动态监测传感器的矿山压力监控系统研究及应用[J]. 中国煤炭,2022,48(z1):33—37.

[7] 张玮. 基于 RTK 测量的矿山超层越界开采动态监测[J]. 能源技术与管理,2023,48(1):163—165.

[8] 程刚,王振雪,施斌,等. DFOS 在矿山工程安全开采监测中的研究进展[J]. 煤炭学报,2022,47(8):2923—2949.

[9] 周大伟,安士凯,吴侃,等. 矿山开采损害 InSAR/UAV 融合监测关键技术及应用[J]. 煤炭科学技术,2022,50(10):121—134.

[10] 孟梦. 北方地区复杂地形下的煤矿采空区地质稳定性建模分析[J]. 矿冶,2022,31(5):7—13.

[11] 李杨,杨天鸿,郝耐,等. 基于应力释放率与微震监测的高强度开采工作面推进速度效应分析[J]. 采矿与安全工程学报,2021,38(2):295—303.

[12] 张达,戴锐,曾志毅,等. BSN 矿山微震监测技术及其应用[J]. 中国地震,2021,37(2):332—348.

[13] 南敏. 基于无人机遥感技术的煤矿地表监测与分析[J]. 越野世界,2022,17(4):226—228.

[14] 周少贤,薛梅. 利用双差层析成像方法反演阿拉斯加地区岩石圈速度结构[J]. 地震学报,2022,44(3):374—387.

[15] DI H, SBEIH A, SHIBLY F H A. Predicting safety hazards and safety behavior of underground coal mines[J]. Soft Computing: A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications,2023,27(2):1207.

[16] 梁冰,刘香江,孙维吉,等. 超声层析成像技术在页岩天然缺陷定位中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2021,40(1):1—6.