

基于时差定位线性算法和 Geiger 迭代算法的 某铁矿声发射源定位精度分析

瞿 靖¹, 陈俊智¹, 李 云²

(1. 昆明理工大学, 昆明 650032; 2. 新平鲁电矿业有限公司自走铁矿, 云南 玉溪 653401)

摘 要:随着矿山开采逐渐向深部化发展, 地压活动对开采的影响日益显著。声发射源定位技术的应用可以有效的实时监测地压, 为安全生产提供指导。定位精度又是声发射源定位的重中之重。时差定位算法应用较为普遍, 时差线性定位算法主要构建线性方程组进行代数方法求解, 该法较为简单, 缺点是方程组可能会出现无解导致定位计算失败。Geiger 迭代定位算法在选取了合适迭代初值的基础上进行多次迭代得到定位结果, 原理上比时差线性定位算法更精确, 对时差定位中的线性定位和 Geiger 迭代定位两种算法结合云南某大型铁矿的声发射监测系统监测到的声发射事件进行了分析, 通过两种定位算法得到的定位结果误差对比分析来具体说明两种方法对于工程实际的适用性和精确度。

关键词:声发射; 时差线性定位; Geiger 迭代定位

中图分类号:TD326

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2020)02-0097-05

Accuracy analysis of acoustic emission source of an iron mine based on linear time difference algorithm and Geiger iterative algorithm

QU Jing¹, CHEN Junzhi¹, LI Yun²

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650032, China;

2. Zizou Iron Mine, Xinping Ludian Mining Co., Ltd., Yuxi Yunnan 653401, China)

Abstract: As mining progresses to deeper development, the impact of ground pressure activities on mining is becoming more and more significant. The application of acoustic emission source localization technology can effectively monitor the ground pressure in real time and provide guidance for safe production. Positioning accuracy is also the top priority of acoustic emission source positioning. The time difference positioning algorithm is more common. The time difference linear positioning algorithm mainly constructs linear equations for algebraic method, which the method is simple, while the disadvantage is that the equations may have no solution and the positioning calculation fails. The Geiger iterative localization algorithm performs multiple iterations on the basis of selecting the appropriate iteration initial value to obtain the positioning result. In principle, the linear positioning algorithm is more accurate than the time difference linear positioning algorithm. In this paper, the linear positioning and Geiger iterative positioning algorithm in time difference positioning were combined with the acoustic emission events in Yunnan monitored by the acoustic emission monitoring system of large iron ore and analyzed. The error analysis of the positioning results obtained by the two positioning algorithms was used to specify the applicability and accuracy of the two methods for engineering practice.

Key words: acoustic emission; time-difference linear positioning; Geiger iterative positioning

声发射源定位是通过声发射监测手段对矿山岩土体灾害监测预警的关键步骤, 矿山的灾害预警对

于现实生产过程起着越来越重大的现实意义。声发射监测信号中包含众多的岩土体内部变化的信息, 对于这些信息的有效处理和运用可以帮助工程中了解岩土体内部能量的变化、结构的变化、位置等信息并以此来更好地指导安全生产。很显然此项技术运用的效果很大部分取决于对于接收到的信息处理运

作者简介: 瞿 靖(1995—), 男, 硕士研究生, 矿业工程专业, 主要从事岩石力学方向的学习与研究。

通信作者: 陈俊智(1974—), 男, 副教授, 主要从事矿山信息化研究方向。

用的准确程度。而声发射源定位算法和精度方面的工作一直以来就是热门的研究内容。

MOGI^[1]早在1962年就开始了二维声发射源定位的研究;SCHOLZ^[2]在1968年采用一组声发射探头阵列做了三维声发射源定位的研究。随后国内外众多学者对此方面进行了大量的研究工作,BY-ERLEE等^[3]开始采用迭代算法进行源定位求解并就此算法提出相关的标准。何先龙,康玉梅等^[4-5]分别就基于小波变换方法和花岗岩巷道岩爆声发射信号研究了信号时间差时的定位来提高定位精度。

1 时差线性定位和 Geiger 迭代定位算法原理

1.1 声发射源时差线性定位算法原理

时差线性算法是一种代数方法的求解,基于声发射事件中待求解参数构建线性方程组。此方法的优点是求解过程较为方便,可使用计算机辅助计算,求解思路易理解。缺点是线性方程组的求解结果可能会是无解,此时在此基础再使用其他数学计算方法可能就会出现误差,从而影响定位结果。

采用最小二乘法来构造残差平方和,设第 i 个传感器坐标 (x_i, y_i, z_i) ($i = 1, 2, \dots, n$), 声发射源坐标 (x_0, y_0, z_0) , 第 i 个传感器接收到声发射源信号时间 T_i , 此地地质条件下速度设为恒定 v , 根据时差线性定位原理可得到如下:

$$T_i = \frac{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}}{v} \quad (1)$$

用 T_i, T_{i+1} 线性运算可得参数 $\theta(t_0, x_0, y_0, z_0)$ 是下一组 $n-1$ 个线性方程的最小二乘解, 即:

$$A\theta = r \quad (2)$$

$$\text{其中, } \{A_{ij}\} = \begin{cases} -2(t_{i+1} - t_i)v^2 & (j=1) \\ 2(x_{i+1} - x_i) & (j=2) \\ 2(y_{i+1} - y_i) & (j=3) \\ 2(z_{i+1} - z_i) & (j=4) \end{cases}; \{r\} =$$

$$(x_{i+1}^2 - x_i^2) + (y_{i+1}^2 - y_i^2) + (z_{i+1}^2 - z_i^2) + (t_{i+1}^2 - t_i^2)v^2; i = 1, 2, \dots, n.$$

线性定位法在获得的数据准确性较高、数据误差较小的前提下算是一种比较可靠有效的定位方法。但在工程实际应用中,可能会因为数据存在误差而影响求解精度。

1.2 Geiger 迭代定位算法原理

Geiger 迭代定位算法作为定位算法的一种,在地震学领域数据分析有广泛应用。方法原理是通过

对选取的初始迭代值进行多次迭代最后收敛逼近我们所要得到的最后结果。每次的迭代都是通过最小二乘法求取修正量 $\Delta\theta = (\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t)^T$ 加至前一次的迭代结果,得到新的迭代值,多次迭代直到最后结果满足精度要求即为要求的定位结果。相比于时差定位方法实际情况中参数选取理想化对定位结果的影响,Geiger 迭代算法能更好地减小误差。

迭代结果由方程式(1)-(3)推导而来

$$[(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2] \frac{1}{2} = v(t_i - t) \quad (3)$$

式中: (x, y, z) 为声发射源位置坐标, (x_i, y_i, z_i) 为第 i 个传感器位置坐标, v 为波速, t_i 为第 i 个传感器接收到声发射信号的延迟时间, t 为事件发生的时间。

可以通过对试验点传感器接收到信号的时间微分偏导求解来求取信号到达每个传感器的时间。

$$t_{oi} = t_{ci} + \frac{\partial t_i}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial t_i}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial t_i}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial t_i}{\partial t} \Delta t \quad (4)$$

式中: t_{ci} 为实验点信号到第 i 个传感器的时间差值。

式(4)各未知参数计算如下:

$$\frac{\partial t_i}{\partial x} = \frac{x_i - x}{vR}, \frac{\partial t_i}{\partial y} = \frac{y_i - y}{vR}, \frac{\partial t_i}{\partial z} = \frac{z_i - z}{vR}, \frac{\partial t_i}{\partial t} = 1$$

$$R = [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中: R 表示信号源到各传感器距离。

对于多个传感器,列出矩阵的方程为:

$$A\Delta\theta = B$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_1}{\partial x} & \frac{\partial t_1}{\partial y} & \frac{\partial t_1}{\partial z} & 1 \\ \frac{\partial t_2}{\partial x} & \frac{\partial t_2}{\partial y} & \frac{\partial t_2}{\partial z} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial t_n}{\partial x} & \frac{\partial t_n}{\partial y} & \frac{\partial t_n}{\partial z} & 1 \end{bmatrix}, \Delta\theta = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} t_{01} - t_{c1} \\ t_{02} - t_{c2} \\ \vdots \\ t_{0n} - t_{cn} \end{bmatrix}$$

求解此矩阵可得:

$$A^T A \Delta\theta = A^T B$$

$$\Delta\theta = (A^T A)^{-1} A^T B$$

以此步骤多次迭代直至得到满足要求的定位结果即可。

2 工程现场实例分析

为验证时差线性定位和 Geiger 迭代定位两种方法的效果,特结合云南某铁矿的地压监测系统采集的 2019 年 5 月的数据进行对比分析和误差分析。该套地压监测采用加拿大 ESG 公司的地压监测系统,传感器类型为加速度传感器,地压监测系统包含监测软件,波形可视化功能,事件定位功能,波形数据分析处理等功能。

本文就地压活动较为活跃的一个月内选取监测数据进行分析。因为井下环境较为复杂,人员设备车辆等等都会对信号的识别接收产生影响,因此从所有传感器接收到的数据中选择了受影响较小,数据较为完整的 8 组传感器数据作为分析使用,为描述方便,此处编号为 1—8 号传感器。表 1 为此 8 组传感器坐标。

因为声发射事件的随机性,上面 8 组传感器监测到的数据每天从几组到几百组不等,从试验的随机性和结果的代表性考虑,从当月随机抽取十天每天随机抽取一组数据进行分析研究。

声发射信号在岩体之中的传播类似于地震波,

表 1 传感器位置坐标

Table 1 Sensor position coordinates

传感器编号	N(北向)/m	E(东向)/m	Z(高程)/m
1 号	65 624	65 535	387
2 号	66 157	65 187	406
3 号	65 306	65 230	376
4 号	65 435	65 962	403
5 号	66 198	65 334	403
6 号	66 226	65 036	401
7 号	65 374	65 141	384
8 号	66 275	65 273	385

里面包含 P 波和 S 波,其中 P 波的传播速度更快,波形信号损失较小,也更容易被传感器识别到。所以选择 P 波作为信号分析的研究对象,因此时差线性算法和迭代算法中的波速也以 P 波为准,信号到达时间依据小波变换的算法来换算。

2.1 时差线性定位实例应用

时差线性定位的计算原理和过程较为简单,将所需参数输入后即可带入求解定位结果,见表 2。根据矿山地质资料和地压监测系统布置情况,所需参数 P 波波速、P 波到达时间和传感器位置坐标,波速设为 6 000,P 波到达时间见表 3。

相关参数带入计算得到定位结果如下表:

表 2 时差线性定位计算结果

Table 2 Calculation results of time difference linear positioning

日期	事件编号	输入变量(信号到达各传感器到达时间/ms)	输出结果(坐标/m)
2019.5.6	145 [#]	$t=[45.6\ 43.8\ 27.4\ 48.8\ 30.6\ 21.4\ 19.8\ 42.8]*1e-3$	(64 231,65 854,396)
2019.5.7	59 [#]	$t=[49.2\ 38.6\ 29.6\ 49.4\ 30.0\ 25.8\ 19.6\ 39.8]*1e-3$	(64 125,65 215,384)
2019.5.10	5 [#]	$t=[28.0\ 38.6\ 16.4\ 28.4\ 40.8\ 38.0\ 42.2\ 11.6]*1e-3$	(64 628,65 470,474)
2019.5.12	32 [#]	$t=[40.6\ 40.2\ 25.8\ 50.4\ 36.8\ 50.4\ 43.6\ 40.2]*1e-3$	(64 822,65 032,473)
2019.5.15	15 [#]	$t=[22.6\ 28.6\ 13.8\ 45.6\ 37.4\ 32.0\ 51.4\ 25.6]*1e-3$	(64 226,65 164,526)
2019.5.16	188 [#]	$t=[41.0\ 45.6\ 31.2\ 50.0\ 21.6\ 22.2\ 34.8\ 35.0]*1e-3$	(64 138,65 773,465)
2019.5.18	214 [#]	$t=[48.8\ 41.6\ 12.6\ 50.2\ 30.8\ 30.6\ 25.2\ 33.0]*1e-3$	(64 226,65 491,422)
2019.5.20	26 [#]	$t=[39.8\ 38.2\ 21.6\ 49.6\ 40.8\ 50.2\ 48.0\ 30.8]*1e-3$	(64 325,65 799,385)
2019.5.23	205 [#]	$t=[52.6\ 45.2\ 30.8\ 44.6\ 26.6\ 20.0\ 15.4\ 39.8]*1e-3$	(64 336,65 108,423)
2019.5.27	78 [#]	$t=[24.6\ 29.8\ 23.2\ 39.8\ 22.8\ 34.2\ 50.0\ 21.8]*1e-3$	(64 378,65 806,403)

表 3 声发射事件定位坐标和到达时间表

Table 3 Acoustic emission event positioning coordinates and arrival schedule

日期	事件编号	声源坐标/m (N,E,Z)	P 波到达时间/ms							
			1 [#] 传感器	2 [#] 传感器	3 [#] 传感器	4 [#] 传感器	5 [#] 传感器	6 [#] 传感器	7 [#] 传感器	8 [#] 传感器
2019.5.6	145 [#]	(65 901,65 221,378)	45.6	43.8	27.4	48.8	30.6	21.4	19.8	42.8
2019.5.7	59 [#]	(66 524,65 363,377)	49.2	38.6	29.6	49.4	30.0	25.8	19.6	39.8
2019.5.10	5 [#]	(66 845,65 985,401)	28.0	38.6	16.4	28.4	40.8	38.0	42.2	11.6
2019.5.12	32 [#]	(65 223,65 423,392)	40.6	40.2	25.8	50.4	36.8	50.4	43.6	40.2
2019.5.15	15 [#]	(66 746,65 257,531)	22.6	28.6	13.8	45.6	37.4	32.0	51.4	25.6
2019.5.16	188 [#]	(65 712,66 146,608)	41.0	45.6	31.2	50.0	21.6	22.2	34.8	35.0
2019.5.18	214 [#]	(66 354,65 872,403)	48.8	41.6	12.6	50.2	30.8	30.6	25.2	33.0
2019.5.20	26 [#]	(66 702,65 195,403)	39.8	38.2	21.6	49.6	40.8	50.2	48.0	30.8
2019.5.23	205 [#]	(66 506,65 312,389)	52.6	45.2	30.8	44.6	26.6	20.0	15.4	39.8
2019.5.27	78 [#]	(66 454,65 194,396)	24.6	29.8	23.2	39.8	22.8	34.2	50.0	21.8

2.2 基于时差定位选取迭代初值的 Geiger 迭代定位实例应用

Geiger 迭代定位算法的一个关键点是初始迭代点的选取,该方法是在一个合适的迭代初始点基础上一步一步地迭代直至找到满足条件的结果。所以,初始迭代点的选取将会影响后面整个过程,选取不合适可能会造成迭代求解过程的无法继续甚至

错误。

因此,尽管时差线性定位算法中参数选取会理想化考虑处理,定位结果有一定的偏差,但是时差线性的结果并不是无效的,因此采用时差线性定位的结果作为初始迭代点进行后续的迭代计算。迭代过程输入为传感器接收到信号的时间差,初始迭代点坐标,最后输出结果,见表 4。

表 4 Geiger 迭代定位计算结果

Table 4 Geiger iterative positioning calculation results

日期	事件编号	输入变量(信号到达各传感器到达时间/ms)	初始迭代点(坐标/m)	输出结果(定位坐标/m)
2019.5.6	145 [#]	$t=1e-3 * [45.6 \ 43.8 \ 27.4 \ 48.8 \ 30.6 \ 21.4 \ 19.8 \ 42.8]'$	(64 231,65 854,396)	(64 231,65 855,399)
2019.5.7	59 [#]	$t=1e-3 * [49.2 \ 38.6 \ 29.6 \ 49.4 \ 30.0 \ 25.8 \ 19.6 \ 39.8]'$	(64 125,65 215,384)	(64 124,65 215,385)
2019.5.10	5 [#]	$t=1e-3 * [28.0 \ 38.6 \ 16.4 \ 28.4 \ 40.8 \ 38.0 \ 42.2 \ 11.6]'$	(64 628,65 470,474)	(64 630,65 470,475)
2019.5.12	32 [#]	$t=1e-3 * [40.6 \ 40.2 \ 25.8 \ 50.4 \ 36.8 \ 50.4 \ 43.6 \ 40.2]'$	(64 822,65 032,473)	(64 822,65 032,468)
2019.5.15	15 [#]	$t=1e-3 * [22.6 \ 28.6 \ 13.8 \ 45.6 \ 37.4 \ 32.0 \ 51.4 \ 25.6]'$	(64 226,65 164,526)	(64 224,65 166,526)
2019.5.16	188 [#]	$t=1e-3 * [41.0 \ 45.6 \ 31.2 \ 50.0 \ 21.6 \ 22.2 \ 34.8 \ 35.0]'$	(64 138,65 773,465)	(64 138,65 770,462)
2019.5.18	214 [#]	$t=1e-3 * [48.8 \ 41.6 \ 12.6 \ 50.2 \ 30.8 \ 30.6 \ 25.2 \ 33.0]'$	(64 226,65 491,422)	(64 226,65 490,431)
2019.5.20	26 [#]	$t=1e-3 * [39.8 \ 38.2 \ 21.6 \ 49.6 \ 40.8 \ 50.2 \ 48.0 \ 30.8]'$	(64 325,65 799,385)	(64 323,65 800,385)
2019.5.23	205 [#]	$t=1e-3 * [52.6 \ 45.2 \ 30.8 \ 44.6 \ 26.6 \ 20.0 \ 15.4 \ 39.8]'$	(64 336,65 108,423)	(64 338,65 110,443)
2019.5.27	78 [#]	$t=1e-3 * [24.6 \ 29.8 \ 23.2 \ 39.8 \ 22.8 \ 34.2 \ 50.0 \ 21.8]'$	(64 378,65 806,403)	(64 378,65 805,418)

2.3 定位结果对比及误差分析

在通过两种定位算法分别计算得出定位结果

后,可以把两种方法的定位结果和原始坐标进行对比来评判两种方法的效果,见表 5。

表 5 时差线性定位与 Geiger 迭代定位结果对比

Table 5 Comparison of time difference linear positioning and Geiger iterative positioning results

日期	事件编号	系统事件坐标 (N,E,Z)/m	定位方法	定位结果坐标 (N,E,Z)/m	定位绝对误差 (N,E,Z)/m	定位平均 误差/m
2019.5.6	145 [#]	(64 232,65 855,398)	时差线性定位	(64 231,65 854,396)	(1,1,2)	2.45
			Geiger 迭代定位	(64 231,65 855,399)	(1,0,1)	1.41
2019.5.7	59 [#]	(64 124,65 215,386)	时差线性定位	(64 125,65 215,384)	(1,0,2)	2.24
			Geiger 迭代定位	(64 124,65 215,385)	(0,0,1)	1.00
2019.5.10	5 [#]	(64 629,65 471,475)	时差线性定位	(64 628,65 470,474)	(1,1,1)	1.73
			Geiger 迭代定位	(64 630,65 470,475)	(1,1,0)	1.41
2019.5.12	32 [#]	(64 822,65 032,460)	时差线性定位	(64 822,65 032,473)	(0,0,13)	13.00
			Geiger 迭代定位	(64 822,65 032,468)	(0,0,8)	8.00
2019.5.15	15 [#]	(64 223,665 166,526)	时差线性定位	(64 226,65 164,526)	(3,2,0)	3.61
			Geiger 迭代定位	(64 224,65 166,526)	(1,0,0)	1.00
2019.5.16	188 [#]	(64 138,65 770,403)	时差线性定位	(64 138,65 773,465)	(0,3,2)	3.61
			Geiger 迭代定位	(64 138,65 770,462)	(0,0,1)	1.00
2019.5.18	214 [#]	(64 226,65 489,430)	时差线性定位	(64 226,65 491,422)	(0,2,8)	8.25
			Geiger 迭代定位	(64 226,65 490,431)	(0,1,1)	1.41
2019.5.20	26 [#]	(64 323,65 800,383)	时差线性定位	(64 325,65 799,385)	(2,1,2)	3.00
			Geiger 迭代定位	(64 323,65 800,385)	(0,0,2)	2.00
2019.5.23	205 [#]	(64 337,65 110,441)	时差线性定位	(64 336,65 108,423)	(1,2,18)	6.67
			Geiger 迭代定位	(64 338,65 110,443)	(1,0,2)	2.24
2019.5.27	78 [#]	(64 376,65 805,415)	时差线性定位	(64 378,65 806,403)	(2,1,12)	12.21
			Geiger 迭代定位	(64 378,65 805,418)	(2,0,3)	3.61

通过对两种方法结合实际工程情况的应用,最后对比两种定位方法的定位结果和误差分析,可以得知,时差线性定位和 Geiger 迭代定位都能有效地

进行声发射事件的定位,但都与实际声发射源位置有不同程度的误差,时差线性定位平均误差为 5.57 m, Geiger 迭代定位平均误差为 2.3 m。

3 结论

1)两种定位方法定位结果对比,明显 Geiger 迭代定位比时差线性定位的精准度更高,误差相对而言更小。

2)时差线性算法简单类似于“一步到位”可能会出现无解的情况,而 Geiger 迭代算法每次引入修正量则类似于一步步地探索前行,直至结果满足允许误差范围才停止。

3)时差线性定位虽然易出现较大误差,但是其结果可作为一个理想的 Geiger 迭代定位的迭代初值。

参 考 文 献

- [1] MOGI K. Study of elastic shocks caused by the fracture of betterogeneous material and its relation to earthquake phenomena[J]. Bull of the Earthquake Res Inst, 1962, 40: 168-180.
- [2] SCHOLZ C H. Experimental study of the fracturing process in brittle rock[J]. Journal of Geophysical Research, 1968, 73(4): 1447-1454.
- [3] BYERLEE JD, LOCKNER D A. Acoustic emission during fluid injection into rock[C]//Hardy H R, Leighton F W ed. Proceedings of First. 1993, 98(12): 22231-22243.
- [4] 何先龙, 赵立珍. 基于多重互相关函数分析剪切波速[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2541-2545, 2552.
HE Xianlong, ZHAO Lizhen. Analysis of shear wave velocity based on multiple cross correlation function[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2541-2545, 2552.
- [5] 康玉梅, 朱万成, 陈耕野, 等. 基于小波变换的岩石声发射信号互相关分析及延迟估计[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2079-2084.
KANG Yumei, ZHU Wancheng, CHEN Gengye, et al. Reciprocal correlation analysis and time delay estimation of acoustic emission signals of rock based on wavelet transform[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2079-2084.
- [6] 黄晓红, 张艳博, 田宝柱, 等. 基于相位差时延估计法的岩石声发射源定位研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 381-386, 522.
HUANG Xiaohong, ZHANG Yanbo, TIAN Baozhu, et al. Study on the location of rock acoustic emission source based on phase difference time delay estimation method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 381-386, 522.
- [7] 黄晓红, 孙国庆, 张凯月. 全相位与 Geiger 算法的岩石声发射源定位方法[J]. 传感技术学报, 2016, 29(11): 1705-1710.
HUANG Xiaohong, SUN Guoqing, ZHANG Kaiyue. A method of rock acoustic emission source localization based on all phase and Geiger algorithm[J]. Journal of Transduction Technology, 2016, 29(11): 1705-1710.
- [8] 李庶林. 试论微震监测技术在地下工程中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 122-128.
LI Shulin. On the application of microseismic monitoring technology in underground engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 122-128.
- [9] 刘建坡, 王洪勇, 杨宇江, 等. 不同岩石声发射定位算法及其实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(8): 1193-1196.
LIU Jianpo, WANG Hongyong, YANG Yujiang, et al. Acoustic emission localization algorithm for different rocks and its experimental research[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2009, 30(8): 1193-1196.
- [10] 纪松林. 工程岩体损伤声发射源定位优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
JI Songlin. Study on optimization of acoustic emission source location for engineering rock mass damage [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [11] 陈为夫, 陈俊智, 瞿靖, 等. 不同含水状态下花岗岩失稳破坏特性研究[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(4): 170-171, 173.
CHEN Weifu, CHEN Junzhi, QU Jing, et al. Study on instability and failure characteristics of granite under different water-bearing conditions[J]. China Water Transport (2nd half month), 2019, 19(4): 170-171, 173.
- [12] 胡凡, 陈俊智, 李春义. 加载速率效应下圆形硐室岩爆特征模拟试验研究[J]. 矿冶, 2019, 28(4): 7-13, 23.
HU Fan, CHEN Junzhi, LI Chunyi. Study on simulation experiment of rock burst in circular chamber under loading rate effect[J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28(4): 7-13, 23.
- [13] 龙恩林, 陈俊智. 花岗岩颗粒流模型循环压缩作用下裂纹特征分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(4): 39-44.
LONG Enlin, CHEN Junzhi. Analysis of crack characteristics under cyclic compression of granite particle flow model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(4): 39-44.
- [14] 陈园园. 声发射信号处理及源定位方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
CHEN Yuanyuan. Research on acoustic emission signal processing and source localization method [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [15] 席婷. 岩石类材料声发射源定位方法的研究[D]. 唐山: 河北联合大学, 2014.
XI Ting. Research on localization method of acoustic emission source for rock materials[D]. Tangshan: Hebei United University, 2014.