

微震震源定位可靠性综合评价模型

李楠^{1,2}, 王恩元^{1,2}, GE Maochen³, 刘晓斐^{1,2}, 孙珍玉^{1,2}

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. Mining Engineering and Nuclear Engineering Department, Missouri University of Science and Technology, Rolla MO 65409, USA)

摘要: 微震震源定位受定位方法、微震台网布置、波速模型和到时等因素的影响, 单一指标很难对震源定位结果进行全面评价, 因此提出了一种包含事件残差指标、敏感度指标和触发序列指标的震源定位可靠性综合评价方法。采用改进的 L1 范数统计准则计算微震事件残差, 并根据事件残差的取值范围确定了可评价震源定位精度的事件残差指标; 根据给定波速误差后震源定位结果之间差值的大小, 提出了敏感度指标, 主要对定位稳定性进行评价; 基于观测触发序列和计算触发序列匹配度, 并结合微震台网布置和有效传感器数量, 提出了触发序列指标, 该指标能够同时反映定位精度和稳定性; 综合以上 3 种评价指标, 建立了微震震源定位可靠性综合评价模型。通过现场试验验证, 表明该模型能够对定位精度和稳定性进行全面有效评价, 评价结果可以作为衡量微震监测系统定位可靠性的实用依据。

关键词: 微震; 定位可靠性; 综合评价模型; 事件残差指标; 敏感度指标; 触发序列指标

中图分类号: P315.3 **文献标志码:** A

A comprehensive evaluation model for microseismic source location reliability

LI Nan^{1,2}, WANG En-yuan^{1,2}, GE Mao-chen³, LIU Xiao-fei^{1,2}, SUN Zhen-yu^{1,2}

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Mining Engineering and Nuclear Engineering Department, Missouri University of Science and Technology, Rolla 65409, USA)

Abstract: Microseismic source location is mainly affected by source location methods, microseismic network, velocity model and arrival times, therefore, a single index may not get a comprehensive evaluation of the source location results. This paper presented a comprehensive evaluation model, which contains event residual index, sensitivity index and hit sequence index, to evaluate the microseismic source location reliability. First, the improved L1 norm statistical standard for source location was used to calculate the event residual. According to the ranges of the event residuals, the event residual index and its rating standard were determined, which can estimate the source location accuracy. Second, the stability of a solution was analyzed by the sensitivity index which was defined as the distance between a located source and its associated position by assuming different velocities. Third, based on the matching degree of the observed hit sequence and the calculated hit sequence, together with the microseismic network and the number of microseismic sensors, the hit sequence index was put forward. It can reflect not only the location accuracy but also the solution stability. Finally, the comprehensive evaluation model was built up by considering the above three evaluation indexes. In the end, the comprehensive evaluation model was checked by the field test. The results show that this model can evaluate the source location accuracy and stability comprehensively and effectively. The result of assessment can be used as a practical basis for the source location reliability of microseismic monitoring systems.

Key words: microseismic; source location reliability; comprehensive evaluation model; event residual index; sensitivity index; hit sequence index

收稿日期: 2013-08-09 责任编辑: 常琛

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAK04B07, 2012BAK09B01); 江苏省研究生培养创新工程资助项目(CXZZ12_0956)

作者简介: 李楠(1986—), 男, 河北石家庄人, 博士研究生。E-mail: cumtlinan@126.com。通讯作者: 王恩元(1968—), 男, 内蒙古卓资人, 教授, 博士生导师。E-mail: weytan@cumt.edu.cn

微震监测技术是指利用岩体破裂过程中产生的微震信号来研究和评价岩土工程中岩体稳定性的一种地球物理实时监测技术^[1-3]。该技术最早被用来研究硬岩矿井中的岩爆问题^[4-5],近年来,微震监测技术在矿井、隧道、地热工程、核工程等地下工程和边坡、路基、堤坝等露天工程中岩体结构稳定性的监测监控与评价等领域得到了广泛的应用^[1-2,6-10]。

一直以来,微震震源定位方法都是微震监测技术研究的重要内容之一,国内外学者对微震震源定位方法进行了大量卓有成效的研究,提出了各种不同的震源定位方法,例如 USBM 震源定位方法、Geiger 法、Powell 直接搜索法、震源定位遗传算法、单纯形法、粒子群算法以及其他震源定位方法^[11-16]。同时,为了进一步提高震源定位精度,大量学者对微震台网进行了一系列研究,Kijko^[17-18]对微震台网优化进行了深入研究,认为微震台网布置对震源定位精度具有重要影响;巩思园等^[19]采用 D 值优化理论,建立了适合大规模台网组合规划问题的遗传算法求解模型;唐礼忠和贾宝新等^[20-21]分别对深部金属矿井和煤矿微震监测台网优化布置进行了研究。此外,在初始到时拾取和波速模型方面,国内外学者也做了大量卓有成效的研究,取得了很多有价值的成果^[16,22-24]。然而在震源定位可靠性评价方面的研究相对较少,由于震源定位受到震源定位方法、微震台网、波速模型和到时等因素的影响,震源定位可靠性评价不仅应包括定位精度评价,还应包含定位稳定性评价。很多情况下由于真实震源未知,定位误差并不能直接求出^[1-21];而目前常用的残差分析^[13-14,25]主要根据到时参数来反映震源定位误差,并不能对定位结果进行全面评价。

针对上述存在的问题,笔者提出评价震源定位可靠性的事件残差指标、敏感度指标和触发序列指标,在此基础上,建立震源定位可靠性综合评价模型,并对该模型进行现场试验验证。研究成果对全面评价微震震源定位精度和稳定性具有重要的理论和现实意义,另外评价结果还可以为进一步提高定位精度和稳定性提供参考。

1 震源定位可靠性评价指标

理想情况下,震源定位误差是指计算震源与真实震源之间的差值,但是实际中很多情况下微震事件的真实位置未知,因此震源定位误差几乎都是通过与震源相关的其他参数间接表示的。

1.1 事件残差指标

在微震震源定位中,将台站的观测到时和计算到时之间的差值记为台站残差,用下式表示:

$$\gamma_i = t_i - t_{ci} \quad (1)$$

式中 γ_i 、 t_i 和 t_{ci} 分别为第 i 个台站残差、观测到时和计算到时, t_{ci} 可以用下式表示:

$$t_{ci} = t'_i + t \quad (2)$$

式中 t'_i 为第 i 个台站的计算走时; t 为震源发震时刻。

将式(2)代入式(1)得各台站的残差^[1,13]为

$$\gamma_i = t_i - (t'_i + t) \quad (3)$$

采用 L1 范数统计准则(最小绝对值法)进行震源定位计算时,震源发震时刻的最佳估计是所有 $(t_i - t'_i)$ 的中位数,记为 t_m 。采用 L1 范数统计准则的台站残差可以用下式进行计算:

$$\gamma_i = t_i - t'_i - t_m \quad (4)$$

事件残差考虑了微震监测系统中所有台站对定位结果的影响,能够在一定程度上反映定位精度的高低。基于最小二乘法的事件残差是通过寻找台站残差的平方和最小来求解的,即采用的是事件残差的 L2 范数统计准则。L2 范数统计准则适用于误差服从正态分布,或与正态分布差异不大的情况,当输入数据中存在个别误差较大的离群点或有效台站较少时,往往很难满足服从正态分布的要求^[1,25]。

L1 范数统计准则将观测到时和计算到时差值的中位数作为震源发震时刻的最佳估计,消除了个别较大台站残差对定位结果的影响,根据式(4)得到改进的事件残差的 L1 范数统计准则:

$$E = \frac{1}{n - q} \sum_{i=1}^m |t_i - t'_i - t_m| \quad (5)$$

式中 n 为方程数,即有效传感器的个数; q 为自由度,即未知数的个数。

将事件残差作为微震震源定位可靠性综合评价模型的一个指标,根据其大小,确定事件残差指标 R 的评分标准。由于不同微震监测系统、监测区域和监测方案事件残差取值的差异性,引入事件残差系数 α 对事件残差的取值范围进行修正。事件残差指标 R 的评分标准详见表 1。

1.2 敏感度指标

在震源求解过程中,对初值的依赖越小,表明该求解系统越稳定。另外,稳定的震源定位结果对输入数据误差应该具有一定的抵抗能力。基于上述考虑,提出评价震源定位稳定性的敏感度指标 S 。震源定位敏感度指的是当波速 v 降低或增加 10% 后,在采用相同震源定位方法的情况下,重定位结果 $F'(x, y, z)$ 与原定位结果 $F(x, y, z)$ 之间的差值,记为 D_{RL} ,可用下式表示:

$$D_{RL} = F'(x, y, z) \big|_{v'=v \pm 10\% v} - F(x, y, z) \quad (6)$$

表 1 微震事件残差指标评分标准

Table 1 Microseismic event residual index rating standard

事件残差 E 取值范围($\alpha > 0$) / ms	事件残差 指标 R	含义
$E < 1.0\alpha$	8	极好
$1.0\alpha \leq E < 2.0\alpha$	7	
$2.0\alpha \leq E < 3.0\alpha$	6	
$3.0\alpha \leq E < 4.0\alpha$	5	非常好
$4.0\alpha \leq E < 5.0\alpha$	4	
$5.0\alpha \leq E < 6.0\alpha$	3	
$6.0\alpha \leq E < 7.0\alpha$	2	一般
$7.0\alpha \leq E < 8.0\alpha$	1	
$8.0\alpha \leq E < 9.0\alpha$	0	
$9.0\alpha \leq E < 10.0\alpha$	-1	非常差
$10.0\alpha \leq E < 11.0\alpha$	-2	
$11.0\alpha \leq E < 12.0\alpha$	-3	
$12.0\alpha \leq E < 13.0\alpha$	-4	
$E \geq 13.0\alpha$	-5	

根据上述分析可知: D_{RL} 的值越小表明震源定位越稳定, 此时敏感度指标 S 的得分将越高, 反之亦然。通过对大量微震事件进行分析发现当定位结果远远偏离真实值, 而且波速不是造成定位误差的主要原因时, 也可能得到很小的 D_{RL} , 因此敏感度指标对定位精度的反映较差, 它主要对定位稳定性进行评价, 由此确定敏感度指标得分最高为 0 分, 不能取正值, 并将敏感度指标的得分范围确定为 -15 到 0。当 D_{RL} 小于 15 m 时, 将敏感度指标分值确定为 0, 而且该值每增加 5 m, 则敏感度指标的得分下降 1 分。考虑到不同微震监测系统、监测区域和监测方案的相同敏感度可能具有不同 D_{RL} 值, 引入敏感度系数 β 对 D_{RL} 的取值范围进行修正。敏感度指标与 D_{RL} 值的对应关系见表 2。

1.3 触发序列指标

微震系统各台站传感器的触发序列既包含到时信息也包含微震台网的信息, 是影响震源定位结果的重要因素。观测触发序列和计算触发序列之间的不匹配程度直接反映定位结果的好坏, 因此对观测触发序列和计算触发序列进行对比分析, 不仅可以对定位精度进行评价, 还可以对定位稳定性进行评价。

观测触发序列指的是各台站按照观测到时进行排序得到的触发序列; 计算触发序列指的是各台站按照计算到时进行排序得到的触发序列。观测触发序列与计算触发序列越接近表明定位精度越高、定位结果越稳定。当观测触发序列和计算触发序列完全相同时称为一个完美的触发序列, 将观测触发序列变换

成计算触发序列所需的最少次数称为触发序列的错配指数, 记为 f 。

表 2 微震事件敏感度指标评分标准

Table 2 Microseismic event sensitivity index rating standard

重定位误差 D_{RL} 取值范围($\beta > 0$) / m	敏感度指标 S 得分
$D_{RL} < 15\beta$	0
$15\beta \leq D_{RL} < 20\beta$	-1
$20\beta \leq D_{RL} < 25\beta$	-2
$25\beta \leq D_{RL} < 30\beta$	-3
$30\beta \leq D_{RL} < 35\beta$	-4
$35\beta \leq D_{RL} < 40\beta$	-5
$40\beta \leq D_{RL} < 45\beta$	-6
$45\beta \leq D_{RL} < 50\beta$	-7
$50\beta \leq D_{RL} < 55\beta$	-8
$55\beta \leq D_{RL} < 60\beta$	-9
$60\beta \leq D_{RL} < 65\beta$	-10
$65\beta \leq D_{RL} < 70\beta$	-11
$70\beta \leq D_{RL} < 75\beta$	-12
$75\beta \leq D_{RL} < 80\beta$	-13
$80\beta \leq D_{RL} < 85\beta$	-14
$D_{RL} \geq 85.0\beta$	-15

震源定位可靠性不仅与错配指数有关, 还与两错配传感器之间观测到时差值(D_{OA})的大小密切相关。例如案例 1: 传感器 T_1 的观测到时比 T_4 的观测到时早 0.1 ms, 即 $t_1 - t_4 = 0.1$ ms; 案例 2: 传感器 T_1 的观测到时比 T_4 的观测到时早 10 ms, 即 $t_1 - t_4 = 10$ ms。此时案例 1 明显比案例 2 更容易造成错配, 但是当触发序列只存在 T_1 和 T_4 错配时, 两个案例的错配指数都是 1, 因此在触发序列分析中, 除错配指数外, 还应结合观测到时差值分析, 才能更加客观真实地对震源定位结果进行评价。根据上述, 引入触发序列错配系数 k 对错配传感器的 D_{OA} 大小进行评价, 错配系数 k 与 D_{OA} 之间的具体对应关系见表 3, 其中 ε 是触发序列指标系数, 它根据微震监测系统和监测区域的实际情况选取。

根据触发序列错配指数和错配系数, 建立触发序列指标 H 的划分标准, 见表 4。

上述评价标准反映的是观测触发序列和计算触发序列之间的不吻合程度, 但是它并不直接参与震源定位结果的综合评价, 这主要是因为当微震监测区域很大, 传感器数量很少而且各传感器之间的距离较大时, 很容易就能够得到一个相对稳定的触发序列, 但这并不表明震源定位的可靠性较高, 因此还应结合微

震监测系统中有效传感器的数量,从而形成完整的触发序列评价指标,具体情况见表 5。

表 3 触发序列错配系数与 D_{0A} 的对应关系
Table 3 Relationship between observed arrival times and mismatches coefficient

错配系数 k	D_{0A} 的取值	错配状态描述
	范围($\varepsilon > 0$) /ms	
1	$0 \leq D_{0A} < 0.2\varepsilon$	可忽略的错配
2	$0.2\varepsilon \leq D_{0A} < 1.0\varepsilon$	小的错配
3	$1.0\varepsilon \leq D_{0A} < 2.5\varepsilon$	大的错配
4	$D_{0A} \geq 2.5\varepsilon$	不可接受的错配

表 4 触发序列等级划分标准
Table 4 Hit sequence indexrank standard

触发序列等级	具体描述
完美(F)	无错配或存在可忽略的错配
极好(M)	不多于 2 个小错配
好(G)	不多于 5 个小错配或者 2 个大错配
差(P)	多于 5 个小错配或者 2 个大错配
极差(R)	至少存在 1 个不可接受错配或者多于 4 个大错配

表 5 触发序列指标评分系统
Table 5 Hit sequence index rating system

传感器数量	触发序列等级				
	F	M	G	P	R
≥ 9	5	4	3	2	0
8	4	3	2	1	0
7	3	2	1	0	0
6	2	1	0	0	0
5	1	0	0	0	0

2 微震震源定位可靠性综合评价模型

通过对 3 种评价指标的分析可知:事件残差指标是评价震源定位精度的重要依据,采用改进的 L1 范数统计准则对台站残差和事件残差进行分析,可以对定位精度进行初步评价;敏感度指标主要对定位稳定性进行评价;触发序列指标不仅包含到时信息而且包含微震台网和有效传感器数量信息,因此能够同时对定位精度和稳定性进行评价。综合上述 3 种评价指标,引入微震震源定位综合评价指标 I ,并令 $I = R + S + H$,从而建立微震震源定位可靠性综合评价模型,如图 1 所示。

根据综合评价指标 I 将震源定位结果划分为 5 个等级,分别为 A、B、C、D、E,其具体划分标准见表 6。

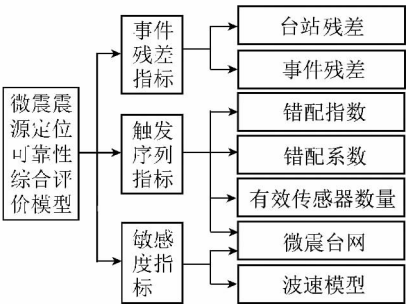


图 1 微震震源定位可靠性综合评价模型
Fig. 1 Comprehensive evaluation model for source location reliability

表 6 震源定位可靠性综合评价指标评分系统
Table 6 Comprehensive evaluation index rating system

综合评分指标 I	划分等级	震源定位评价
$8 \leq I \leq 12$	A	定位精度高,稳定性好
$4 \leq I \leq 7$	B	定位精度可接受,稳定性较好
$-4 \leq I \leq 3$	C	定位精度较低,稳定性较差
$-8 \leq I \leq -3$	D	定位精度低,稳定性差
$-20 \leq I \leq -9$	E	定位精度和稳定性极差,定位结果无意义

3 现场试验验证

3.1 试验方案

某煤矿为深部开采矿井,冲击地压灾害严重,为实现对冲击地压的连续监测,安装了微震监测系统,该系统共装有 16 个微震传感器,微震台网布置如图 2 所示。在现场进行爆破试验,采用可靠性综合评价模型对其震源定位精度和稳定性进行分析,并将评价结果与实际定位误差进行对比分析。分别选取 3 次爆破事件,各传感器空间坐标和 3 次爆破事件的相对观测到时见表 7。

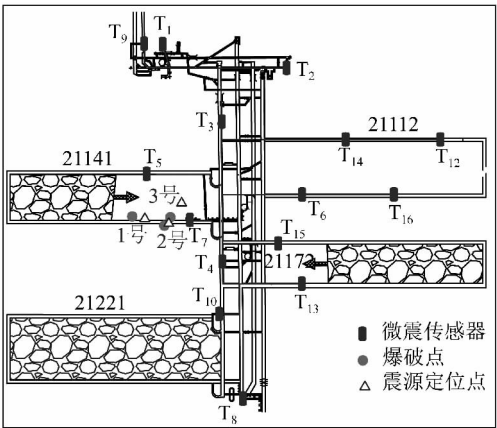


图 2 微震台网和爆破事件定位分布
Fig. 2 Microseismic network layout and the blasting events location

表 7 微震传感器空间坐标与观测到时
Table 7 Microseismic sensor coordinates and observed arrival times

传感器编号	传感器空间坐标/m			爆破观测到时/ms		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	1 月 6 日	1 月 11 日	1 月 15 日
T ₁	4 088. 2	3 548. 6	61. 6	192. 5	212. 5	194. 5
T ₂	4 661. 4	3 370. 0	66. 4	166. 4	140. 4	186. 5
T ₃	4 413. 1	3 057. 4	- 2. 2	70. 2	60. 4	62. 2
T ₄	4 451. 3	2 716. 6	- 87. 5	60. 1	28. 1	28. 1
T ₅	4 137. 6	2 964. 1	- 44. 0	72. 2	60. 1	64. 2
T ₆	4 798. 0	2 904. 0	- 52. 4	138. 3	100. 3	102. 3
T ₇	4 280. 9	2 834. 0	- 83. 9	0	0	0
T ₈	4 569. 8	2 183. 0	- 199. 3	192. 6	160. 4	204. 5
T ₁₀	4 501. 0	2 442. 5	- 147. 5	130. 3	106. 3	112. 3
T ₁₂	4 717. 6	4 791. 2	137. 0	310. 8	298. 7	282. 7
T ₁₄	4 970. 4	3 086. 4	- 1. 2	184. 5	154. 4	156. 4
T ₁₅	4 580. 0	2 696. 8	- 100. 0	96. 2	60. 1	70. 2
T ₁₆	5 181. 3	2 942. 3	- 21. 2	234. 6	204. 5	204. 5

3.2 试验结果分析

对 3 次爆破试验进行震源定位 ,震源定位结果和残差分析如图 2 和表 8 所示。

将波速降低 10% ,对爆破事件进行重定位 ,确定微震事件敏感度指标 ,具体结果见表 9。

表 8 震源定位结果与事件残差分析
Table 8 Source location results and event residual analysis

爆破事件	震源定位结果/m			定位误差/m	事件残差/ms	残差系数 α	残差指标 <i>R</i>
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>				
1 号	4 253. 4	2 858. 9	- 48. 0	52. 9	23. 4	10	6
2 号	4 345. 3	2 836. 3	- 61. 6	15. 1	27. 3	10	6
3 号	4 280. 9	2 834. 0	- 83. 9	74. 2	33. 6	10	5

根据表 8 的定位结果 ,求得各传感器的计算到时 ,确定 3 次爆破事件的观测触发序列和计算触发序列 ,见表 10。

从表 10 可知前两次事件的错配指数都是 3 ,但是通过对错配系数进行分析发现 1 号的触发序列存在 2 个大错配和 1 个小错配 ,而 2 号的触发序列存在 1 个大错配和 2 个小错配 ,因此 1 号和 2 号的触发序列等级分别为 P 和 G; 3 号的错配指数达到了 7 ,而且

表 9 重定位结果与敏感度指标
Table 9 Relocation results and sensitivity index point

爆破事件	波速模型	震源定位结果/m			<i>D_{RL}</i> /m	敏感度指标系数 β	敏感度指标 <i>S</i>
		<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>			
1 号	原始波速	4 253. 4	2 858. 9	- 48. 0	52. 4	2	- 2
	降低后	4 270. 8	2 854. 8	- 97. 3			
2 号	原始波速	4 345. 3	2 836. 3	- 61. 6	34. 6	2	- 1
	降低后	4 372. 0	2 849. 3	- 79. 3			
3 号	原始波速	4 280. 9	2 834. 0	- 83. 9	44. 3	2	- 2
	降低后	4 312. 4	2 838. 7	- 53. 2			

表 10 观测触发序列和计算触发序列
Table 10 Observed hit sequence and calculated hit sequence

爆破事件	触发序列	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₁₀	T ₁₂	T ₁₄	T ₁₅	T ₁₆
1 号	观测触发序列	10	8	3	2	4	7	1	11	6	13	9	5	12
	计算触发序列	9	8	4	3	2	7	1	11	6	13	14	5	12
2 号	观测触发序列	12	8	3	2	5	6	1	10	7	13	9	4	11
	计算触发序列	11	8	3	2	4	7	1	10	6	13	9	5	12
3 号	观测触发序列	10	9	3	2	4	6	1	12	7	13	8	5	11
	计算触发序列	11	8	4	3	2	7	1	9	6	13	10	5	12

存在两个不可接受的错配,其触发序列等级为 R。3 次爆破事件中有效传感器的数量都是 13,因此 3 次事件的触发序列指标得分见表 11。

表 11 触发序列指标得分
Table 11 Hit sequence index point

爆破事件	触发序列等级	传感器数量	触发序列指标 H
1 号	P	13 > 9	2
2 号	G	13 > 9	3
3 号	R	13 > 9	0

综合以上 3 种震源定位评价指标,得到 3 次爆破事件的震源定位综合评价指标分别为

$$I_1 = 6 + (-2) + 2 = 6$$

$$I_2 = 6 + (-1) + 3 = 8$$

$$I_3 = 5 + (-2) + 0 = 3$$

根据震源定位综合评价模型,1 号震源定位结果属于 B 级,即震源定位精度在可接受的范围内,定位稳定性较好;2 号震源定位结果属于 A 级,即震源定位精度高、稳定性好;3 号震源定位结果属于 C 级,表明这次事件的定位精度较低、稳定性较差,不能满足微震监测的要求。对其进行深入分析可以发现:3 号的敏感度指标和触发序列指标得分较低,尤其是触发序列指标中的错配指数达到了 7 个,而且出现不可接受的错配,不仅说明这次事件的定位精度较差,而且表明观测到时数据中存在误差较大的离群点,甚至存在某些台站被干扰信号触发的可能,应进行深入分析剔除观测到时误差大的台站,从而提高震源定位精度和稳定性。

从表 8 可知 3 次爆破的事件残差分别为 23.4, 27.3 和 33.6 ms,如果仅仅根据事件残差对定位结果进行评价,将得出 1 号的震源定位效果最好、精度最高,2 号次之,3 号最差;而且单从事件残差来看,2 号和 3 号的定位精度应较为接近。但 3 次事件的实际定位误差分别为 52.9, 15.1 和 74.2 m,可以看出 2 号的定位结果最好,1 号次之,而 3 号的最差。这表明仅仅根据残差分析并不能对震源定位结果做出正确评价,而震源定位综合评价模型得出的评价结果与实际情况相符,表明该模型能够对定位结果进行全面有效的评价。

4 结 论

(1) 提出了评价震源定位结果的事件残差指标、敏感度指标和触发序列指标,根据各指标在定位过程中的作用,确定了其评分标准。采用改进的 L1 范数统计准则计算事件残差,可以在一定程度上反映震源

定位精度;敏感度指标根据不同波速时定位结果之间的误差水平,实现了对定位稳定性的评价;触发序列指标不仅反映观测到时和计算到时的不匹配程度,而且考虑了微震台网布置和有效传感器数量对定位结果的影响,可以同时评价震源定位精度和稳定性。

(2) 综合事件残差指标、敏感度指标和触发序列指标,提出了微震震源定位综合评价指标,建立了微震震源定位可靠性综合评价模型;该模型将震源定位结果划分为 5 级,分别对应 5 种不同可靠级别的震源定位结果,实现了震源定位精度和稳定性的综合评价。

(3) 现场试验表明震源定位可靠性综合评价模型对震源定位结果的评价是有效可行的,能够全面反映定位精度和稳定性,符合实际情况。

参考文献

- [1] Hardy R. Acoustic emission/microseismic activity: Volume 1 [M]. Lisse, Netherlands: A. A. Balkema Publishers, 2003.
- [2] Ge Maochen. Efficient mine microseismic monitoring [J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 64(8): 44–56.
- [3] 陈 颢. 声发射技术在岩石力学研究中的应用 [J]. 地球物理学报, 1977, 20(4): 312–322.
Chen Yong. Application of acoustic emission techniques to rock mechanics research [J]. Acta Geophysica Sinica, 1977, 20(4): 312–322.
- [4] Obert L. The microseismic method: discovery and early history [A]. Proc. 1st Conference of Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geological Structures and Materials [C]. Clausthal-Zellerfeld: Trans. Tech. Publications, 1975: 11–12.
- [5] Cook N G W. The application of seismic techniques to problems in rock mechanics [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1964, 1(2): 169–179.
- [6] Mendecki A J. Seismic monitoring in mines [M]. London: Chapman and Hall Press, 1997.
- [7] 姜福兴, 杨淑华, 成云海, 等. 煤矿冲击地压的微地震监测研究 [J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1511–1516.
Jiang Fuxing, Yang Shuhua, Cheng Yunhai, et al. A study on microseismic monitoring of rock burst in coal mine [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1511–1516.
- [8] Hirata A, Kameoka Y, Hirano T. Safety management based on detection of possible rock bursts by AE monitoring during tunnel excavation [J]. Rock. Mech. Rock. Eng., 2007, 40(6): 563–576.
- [9] 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. Discussion on microseismic monitoring technology and its application to underground project [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 122–128.
- [10] 徐奴文, 唐春安, 周 钟, 等. 岩石边坡潜在失稳区域微震识别

- 方法[J]. 岩石力学与工程学报 2011 30(5): 893–900.
- Xu Nuwen, Tang Chun'an, Zhou Zhong, et al. Identification method of potential failure regions of rock slope using microseismic monitoring technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2011 30(5): 893–900.
- [11] Ge Maochen. Analysis of source location algorithms: Part I. Overview and non-iterative methods[J]. Journal of Acoustic Emission, 2003 21: 14–28.
- [12] Ge Maochen. Analysis of source location algorithms: Part II. Iterative methods[J]. Journal of Acoustic Emission 2003 21: 29–51.
- [13] 田 玥, 陈晓非. 地震定位研究综述[J]. 地球物理学进展, 2002 17(1): 147–155.
- Tian Yue, Chen Xiaofei. Review of seismic location study[J]. Progress in Geophysics 2002 17(1): 147–155.
- [14] 陈炳瑞, 冯夏庭, 李庶林, 等. 基于粒子群算法的岩体微震源分层定位方法[J]. 岩石力学与工程学报 2008 28(4): 740–749.
- Chen Bingrui, Feng Xiating, Li Shulin, et al. Microseismic sources location with hierarchical strategy based on particle swarm optimization[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009 28(4): 740–749.
- [15] 李会义, 姜福兴, 杨淑华. 基于 Matlab 的岩层微地震破裂定位求解及其应用[J]. 煤炭学报 2006 31(2): 154–158.
- Li Huiyi, Jiang Fuxing, Yang Shuhua. Research and application of Microseismic monitoring location of strata fracturing based on Matlab[J]. Journal of China Coal Society 2006 31(2): 154–158.
- [16] 董陇军, 李夕兵, 唐礼忠, 等. 无需预先测速的微震震源定位的数学形式及震源参数确定[J]. 岩石力学与工程学报 2011 30(10): 2057–2067.
- Dong Longjun, Li Xibing, Tang Lizhong, et al. Mathematical functions and parameters for microseismic source location without pre-measuring speed[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2011 30(10): 2057–2067.
- [17] Kijko A. An algorithm for the optimum distribution of a regional seismic network-I [J]. Pure and Applied Geophysics 1977 115(4): 999–1009.
- [18] Kijko A. An algorithm for the optimum distribution of a regional seismic network-II: an analysis of the accuracy of location of local earthquakes depending on the number of seismic stations [J]. Pure and Applied Geophysics 1977 115(4): 1011–1021.
- [19] 巩思园, 窦林名, 马小平, 等. 提高煤矿微震定位精度的台网优化布置算法[J]. 岩石力学与工程学报 2012 31(1): 8–17.
- Gong Siyuan, Dou Linming, Ma Xiaoping, et al. Optimization algorithm of network configuration for improving location accuracy of microseism in coal mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2012 32(1): 7–17.
- [20] 唐礼忠, 杨承祥, 潘长良. 大规模深井开采微震监测系统站网布置优化[J]. 岩石力学与工程学报 2006 25(10): 2036–2042.
- Tang Lizhong, Yang Chengxiang, Pan Changliang. Optimization of microseismic monitoring network for large-scale deep well mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2006 25(10): 2036–2042.
- [21] 贾宝新, 李国臻. 矿山地震监测台站的空间分布研究与应用[J]. 煤炭学报 2010 35(12): 2045–2048.
- Jia Baoxin, Li Guozhen. The research and application for spatial distribution of mines seismic monitoring stations [J]. Journal of China Coal Society 2010 35(12): 2045–2048.
- [22] Ooninx P J. A wavelet method for detection S-wave in seismic data [J]. Computational Geoscience 1999(3): 111–134.
- [23] 朱权洁, 姜福兴, 王存文, 等. 微震波自动拾取与多通道联合定位优化[J]. 煤炭学报 2013 38(3): 397–403.
- Zhu Quanjie, Jiang Fuxing, Wang Cunwen, et al. Automated microseismic event arrival picking and multichannel recognition and location [J]. Journal of China Coal Society 2013 38(3): 397–403.
- [24] 王进强, 姜福兴, 吕文生, 等. 地震波传播速度原位试验及计算[J]. 煤炭学报 2010 35(12): 2059–2063.
- Wang Jinqiang, Jiang Fuxing, Lü Wensheng, et al. Microseismic wave propagation velocity in situ experiment and calculation [J]. Journal of China Coal Society 2010 35(12): 2059–2063.
- [25] Ge Maochen. Source location error analysis and optimization methods [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2012 4(1): 1–10.