



李翔,徐奴文. 2020. 微震震源定位研究现状及展望. 地球物理学进展, 35(2):0598-0607, doi:10.6038/pg2020DD0105.

LI Xiang, XU Nu-wen. 2020. Research developments and prospects on microseismic source location. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 35(2):0598-0607, doi:10.6038/pg2020DD0105.

## 微震震源定位研究现状及展望

## Research developments and prospects on microseismic source location

李翔,徐奴文

LI Xiang, XU Nu-wen

四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,成都 610065

State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China

**摘要** 微震震源定位研究是微震监测技术研究的重点之一,定位精度的高低直接影响着微震分析的结果。随着微震监测技术的广泛应用,出现了大量新的微震震源定位方法,针对不同的工程研究,这些方法各有千秋。首先,通过收集并分析近20年来国内外比较盛行的微震震源定位方法,其包括混合优化法、震源扫描算法、波速模型法和无预先测速法。然后,讨论这些方法的优缺点及适用条件,并主要分析微震检波器分布、首次到时拾取、波速模型和定位算法对微震震源定位的影响。最后,讨论地球物理学、声学、军事学等领域已有的先进定位方法在微震震源定位研究的意义。结果表明:(1)优化传感器的布置,必须协调自动到时拾取、波速模型和定位算法之间的关系;(2)减小波速模型和首次到达时间对震源位置的影响是微震监测未来发展的必然要求;(3)采用射线追踪理论、逆时偏移成像和被动时间反转镜技术可对速度结构模型进行优化;(4)利用双波定位、信息融合技术可进一步提高定位精度;(5)其他领域的先进定位方法在微震震源定位研究上具有潜在价值,可以达到微震震源定位更快、更准、更稳定的目的。

**关键词** 震源定位;影响因素;首波到时时间;波速模型;信息融合;发展前景

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2020DD0105

**Abstract** The research of microseismic source location is one of the emphases of microseismic monitoring technology. With the wide application of microseismic monitoring technology, a large number of new microseismic source location methods appear. Firstly, the popular microseismic source localization methods at home and abroad in recent 20 years, including hybrid optimization method, Source Scanning Algorithm (SSA), wave velocity model method and no pre-measured velocity method, are collected and analyzed. Then, the advantages, disadvantages and applicable conditions of these methods are discussed, and the influence of microseismic detector distribution, first time pickup, wave velocity model and location algorithm on microseismic source location is analyzed. Finally, the significance of advanced localization methods in geophysics, acoustics, military science and other fields in the study of microseismic source localization is discussed. The results show that: (1) to optimize the sensor layout, it is necessary to coordinate the relationship between the automatic time pickup, wave velocity model and positioning algorithm; (2) reducing the influence of the wave velocity model and the first arrival time on the source location is an inevitable requirement for the future development of microseismic monitoring; (3) the velocity structure model can be optimized by using ray tracing theory, inverse time-offset imaging and passive time-reversal mirror technology; (4) dual-wave positioning and information fusion technology can further improve positioning accuracy; (5) advanced positioning methods in other fields have potential value in the study of microseismic source positioning, which can achieve the purpose of faster, more accurate and more stable microseismic source positioning.

**Keywords** Microseismic source location; Influence factor; First wave arrival time; Wave velocity model; Information fusion; Prospects for development

## 0 引言

微震监测技术是指利用岩体受载破裂过程中产生的微震信号来研究岩体变形破裂及其稳定性等问题研究的一种地球物理学方法,该技术起源于20世纪60年代,最早被南非和美国用来研究硬岩矿井中岩爆和煤矿中的冲击地压问题。近年来,微震监测技术在岩土工程中得到了广泛应用,在采矿工程(李楠等,2017)、水电洞室(李彪等,2014)、隧道工

程(陈炳瑞等,2011)、岩质边坡(徐奴文等,2014)等工程中结构的稳定性进行监测与评价。

微震源定位是微震监测中的核心部分,震源时空数据是微震监测技术研究的重要参数。对微震源定位方法、准确性和提高定位精度的研究,一直是微震监测技术研究的重点。微震信号具有与自然地震信号类似的震源机制和信号特征,因此微震源定位方法多引至地震学。在实际工程监测中,多数震源离传感器比较近,微震监测检测到大部分S波信号并

收稿日期 2019-05-16; 修回日期 2019-12-23.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 国家重点研发计划(2017YFC1501100)和国家自然科学基金(51679158)联合资助。

第一作者简介 李翔,男,1997年生,在读硕士生,主要从事岩石工程微震监测与预警研究。E-mail:civil201402@126.com

不明显,此外,直达S波很容易被P波的随后尾波干扰,所以主要利用P波信号来震源定位.微震定位方法很多,主要包括几何定位法、相对定位法、空间域定位法、线性定位法和非线性定位法等.

根据定位原理的不同,可以分为基于三轴传感器的定位和基于到时不同理论的定位(Ge, 2003a, b).基于到时不同理论的震源定位原理如图1所示,S和 $T_i$ 分别表示微震源和第 $i$ 个传感器,其中 $x_0, y_0, z_0$ 和 $x_i, y_i, z_i$ 分别表示震源和传感器的坐标, $t_0$ 和 $t_i$ 分别表示震源发震时间和第 $i$ 个传感器的震动波初至观测到时.基于三轴传感器方法的几何结构如图2所示,三轴传感器TR的位置是已知的,源S是待定的相对距 $d$ ,其方位为 $(\alpha, \beta, \gamma)$ .

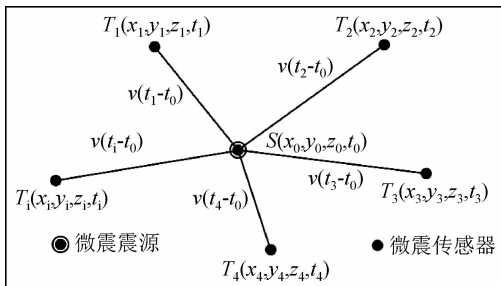


图1 到时不同震源定位原理示意图(李楠等,2017)

Fig. 1 Schematic of source location based on the arrival-time-difference approach (Li N *et al.*, 2017)

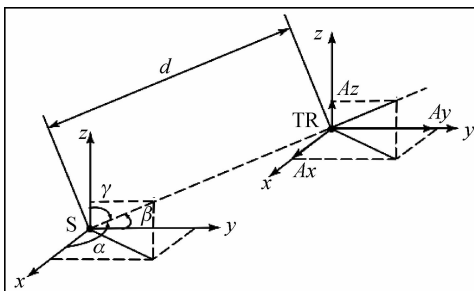


图2 三轴传感器定位原理图(Ge, 2003a, b)

Fig. 2 The geometry associated with triaxial sensor approach (Ge, 2003a, b)

Geiger(1912)提出了一种经典的震源定位方法,其实质是将非线性方程组线性化,并通过最小二乘原理求解,该方法需要求解偏导数和逆矩阵,计算量很大.直到20世纪70年代,随着计算机的兴起,Geiger的思想得到了广泛的应用.各种联合反演法(Crosson, 1976)、相对定位法(Spence, 1980)、台偶时差法(Romney, 1957)、单纯形法(Thurber, 1985)、双重残差法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)、Powll法(唐国兴, 1979)等,促进了震源定位研究的发展.这些方法根据参与求解的参数的不同可分为2类(王志刚, 2017):一类是已知波速模型,求解发震时间和微震源位置的定位方法,简称经典法;另一类是微震源位置、发震时间和波速模型一起求解的方法,简称联合法.经典法在地震领域、采矿工程中应用最为广泛,波速模型给不准是该方法的最大不足,虽

然学者对波速模型做了许多研究,但仍是影响定位算法稳定性和定位精度最大因素;联合法较好地解决了波速模型给不准的问题,很大程度上提高了微震源定位精度,但微震源位置、发震时间和介质速度这些参数不是相互独立的,解不唯一,给参数的选取带来了困难.

因此,为了进一步提高微震源定位精度,国内外学者做了大量研究(Smith, 1976; Anderson, 1982; Kennett *et al.*, 1992; Xie *et al.*, 1996; 林峰等, 2010; 董陇军等, 2011; Bisrat *et al.*, 2012; 李楠等, 2014; 朱权洁等, 2014).随着各学科的相互交流与渗透,其他领域的优化方法得以借鉴,如遗传算法、粒子群算法、模拟退火法等(陈炳瑞等, 2008; 吕进国等, 2013; 王泉栋等, 2015),因而微震源定位方法得到了从传统的“数学模型”到典型的“仿生模型”的迅猛发展.

本文通过分析近20年来微震源定位方法的现有研究,提出影响震源定位的关键影响因素.基于微震监测系统的特征以及监测目的,提出一些实现微震源高精度定位的措施以及未来的发展方向.

## 1 震源定位研究进展

虽然,基于Geiger思想的定位方法及其改进的线性定位方法等在工程微震源定位应用广泛(田玥和陈晓非, 2002),但是针对微震信号弱、信噪比低、波速模型难以确定、到时选取难等问题,自从进入新千年以来,微震源定位就在不断优化和改进.下面主要阐述近20年来具有代表性的定位方法,学者把优化定位求解算法、克服首波到时拾取、提出符合实际的波速模型、速度作为未知数的无预先测速模型等研究作为近年来的一个研究思路.

### 1.1 混合优化法

混合优化算法(Hybrid Optimum Slgorithm, HOA)是指结合两种或两种以上的定位方法,利用其优点弥补对方缺点的过程.如线性定位和Geiger定位结合、模拟退火-单纯形法、基于L1范数统计的单纯形法等.

面临经典法对波速模型的确定难、联合定位法存在震源时空参数及波速之间相互关联、求解不唯一等问题,提出了一种微震源定位分层处理方法(陈炳瑞等, 2008).其先利用粒子群算法确定波速模型和震源位置参数,然后求解发震时间的微震源分层智能定位方法.该研究较好地解决了经典法波速模型给不准和联合法解不唯一的问题,并提高了算法的收敛速度和收敛精度,且具有较好的鲁棒性.但是对台网区域外的定位效果不好,不能避免震源位置与速度之间的相关性,算法在特殊条件下具有一定的关联性.

线性定位方法计算快速方便,无需进行迭代,只需求解一组线性方程组,将其解作为Geiger定位方法的初始解,加快了迭代法的收敛速度,避免了局部收敛问题.为此提出了线性定位和Geiger定位方法相结合的组合定位方法(林峰等, 2010).其研究发现联合定位方法解决了线性定位求解精度低的问题,同时优化了常规Geiger定位方法初值选择,并提高了迭代求解效率,避免了Geiger定位方法求解中出现的奇异矩阵和迭代初值不准确造成定位误差较大等问题.但是针对震源离传感器较远时,迭代初值选择不佳会影响定位精度甚至无法定位.

基于稳健模拟退火-单纯形混合算法属于典型的混合优化法之一,下面进行对该方法的实际应用简要分析.单纯形法具有快速搜索的优点和模拟退火法具有全局收敛性的特征,所以以两种方法相结合的形式来达到微震震源定位的目的(吕进国等,2013).吕进国等把该方法应用于柿竹园矿井,对比模拟退火法、模拟退火法-单纯形法、稳健模拟退火法-

单纯形法三种定位求解方法的空间绝对定位误差和目标函数误差,比较结果如图3所示,显然,稳健模拟退火法-单纯形法最优,求解过程稳定.通过稳健模拟退火方法预先估算发震时刻,直接减少对发震时刻的搜索,可以利用较少的检波器进行微震定位,且基本不受初始波速选取的影响,从而大大减少搜索步数,有效地提高定位精度及收敛速度.

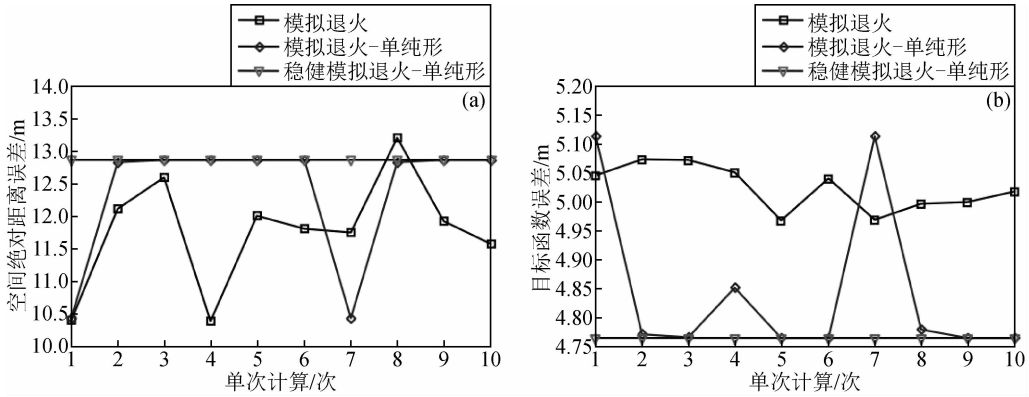


图3 三种不同方法的距离绝对误差与目标函数误差(吕进国等,2013)

Fig. 3 Absolute distance error and objective function error of three different positioning algorithms(Lü J G et al. , 2013)

由此可见,混合优化算法研究是一个可行的方法,可以不断提高定位速度、精度和稳定性.但是,混合优化算法只是减弱了定位求解算法的影响,即时稳健模拟退火法-单纯形法受到初始速度的选取较小,混合优化算法仍然受速度模型、首波到时拾取等影响.

1.2 震源扫描法

震源扫描算法(Source-Scanning Algorithm, SSA),最早由Kao等提出.SSA法应用于天然地震的定位,并定义了反映震源位置和发震时刻的亮度函数(Kao and Shan,2004).SSA方法避免了微震走时的识别和拾取,同样不需要预先知道断层产状和规模,利用地面低信噪比微震资料进行微震定位,但是在增强微震信号的同时,也增加了噪声,导致定位结果误差较大.

利用SSA方法对地震定位和地震破裂面进行研究(李文军和陈棋福,2006),其方法充分利用了数字地震波形资料,在不用精确拾取到时和计算理论地震图的情况下达到比较理想的定位效果.该研究证明了SSA的很强的分辨能力,SSA是普通微小地震定位的一种好工具.

基于微震极化的变化现象和亮度函数存在的缺点,改进了震源扫描定位方法,引入发射层析成像方法的能量函数作为震源扫描的亮度函数(Tchebotareva et al. ,2000;何勇等,2016),其具有更强的抗噪能力和震源分辨能力.但是,实际震源处的岩石破裂机制会导致地面不同区域接收到的震源波极性存在正负之分(ZOU,2015),为此在亮度函数的基础上引入了微震波极性的矫正项.由于地面微震记录信噪比低,难以直接从微震记录中判断出微震波形的极性.因此,提出了对震源机制进行扫描,避免人工判断带来的困难与误差.

震源扫描法作为一种克服首波到时拾取的典型方法,其原理如图4所示.显然,SSA方法实质是忽略了首波到时拾

取的影响,将SSA于其他方法相结合未尝不可.SSA方法虽然避免了到时拾取等问题,但是在多事件、多参数反演中,其反演效率受到严重制约.于此,有学者提出基于DIRECT算法的微震快速网格震源搜索定位方法,即在求解震源扫描算法目标函数最优解时,采用DIRECT搜索策略,无需划分网格大小,直接搜索目标函数最优解.其研究发现,此方法比传统的震源扫描算法搜索次数少、计算耗时短、计算精度高,尤其适合大空间内多事件、多参数的震源反演(王云宏,2016).

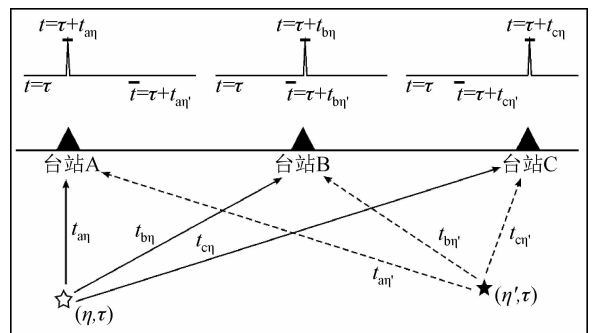


图4 震源扫描算法原理示意图(李文军和陈棋福,2006)  
Fig. 4 The sketch map of Source Scanning Algorithm(SSA)(Li and Chen, 2006)

1.3 波速模型法

为了更加符合微震信号在实际岩层中的传播,复杂的波速模型建立便成为一个难题.在这里把主要针对波速模型研究的定位方法定义为波速模型法.考虑到煤矿上覆岩层层状赋存和离层带的特点,构建了矿井尺度的微震监测系统“异向波速模型”,以到时残差最小为目标和震源定位误差最小为目标的两种求解模型(巩思园等,2012).利用具有全局寻

优特性的遗传算法与 CMEAS 算法结合的混合算法求解. 其研究结合爆破实验发现, 与传统的简化波速模型相比, 震源定位误差得到极大的降低.

在“异向波速模型”的基础上, 根据速度分层岩体中应力波传播特征, 如图 5 所示. 对垂向上的应力波按岩体波速值大小作分段区别, 推导震源应力波走时关系式, 建立分层速度定位目标函数, 基于此提出了一种由参数准备、层速度反演、微震定位三个模块组成的分层速度定位模型 SV, 并采用遗传算法进行优化求解(戴峰等, 2016). 其研究结合实际工程验证, 证明了定位模型在波速分层的区域岩体微震定位应用中比单一速度定位模型更加合理可靠. 然而, 在实际工程中存在带有空洞和速度分区的复杂波速岩体, 引入速度快、精度高和对复杂模型适应性强的多模板快速行进法(Multi-Stencils Fast Marching Methods, MSFM)用于初至波走时正演计算(Hassouna and Farag, 2007; 郭亮等, 2017). 其研究基于 MSFM 优化算法对实际工程应用发现, MSFM 算法作为走时正演方法具有很好的应用价值, 能够有效地提高震源定位精度.

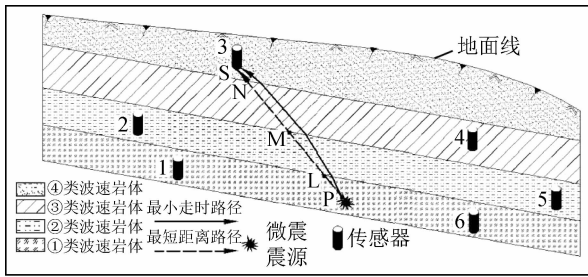


图 5 速度分层岩体中应力波传播特征(戴峰等, 2016)

Fig. 5 Propagation characteristics of stress waves in rock mass with stratified velocities(Dai F *et al.*, 2016)

基于异向波速模型的方法作为波速模型的典型方法之一, 实质是根据工程地质实际条件确定初始波速, 模拟波在岩体的传播路径和不同岩石中传播的速度, 类似于光在不同介质中的传播. 戴峰等基于白鹤滩岩质边坡的微震监测和边坡的实际岩层, 发现微震信号在岩体中的规律, 结合波的传播性质, 理论推导出应用于白鹤滩岩质边坡的微震震源定位方法. 显然, 此方法能够准确定位, 可应用于类似岩层的震源定位. 可见, 能够知道微震信号在岩体中的传播实际路径和在不同介质(岩石)中的传播速度, 那么将提高定位的精度. 因此, 波速模型法研究是最有效的, 也是最难的一种, 结合实际工程应用研究具有更高价值.

#### 1.4 无预先测速法

波速模型确认难, 这是困扰工程师已久的实际问题. 董陇军团队首次提出的无需预先测速的定位方法, 在国内外得到了高度认可. 他们把多数的定位方法归结为基于因变量为到时或因变量为到时差的平均速度定位模型(SST 和 STD), 将波速模型中的已知速度  $c_{com}$  作为未知速度  $c$  进行多参数迭代运算(董陇军等, 2011). 其研究按提出了因变量为到时、到时差、到时商依次为 TT、TD 和 TDQ 法, 结合工程应用与传统的 SST 和 STD 法比较表明, 比较结果如图 6 所示. TD 法具有

较高的定位精度, 定位中只要传感器坐标和时间差. 基于无预先测量波速在声发射和微震源定位方法的理论和实验研究(Dong *et al.*, 2017), 再次证明了该方法的可行性与优越性. 该方法虽然克服了初始速度的选取, 极大的提高了定位精度. 但是, 对于实际信号在岩体中的传播路径直线化和传播速度单一化, 增大了速度误差, 与实际情况存在一定差异.

在综合分析传统单纯形法和目前微地震定位算法选用的各类波速模型及其相关误差的基础上, 以及针对无预先测速的定位方法中迭代求解速度  $c$  时, 实际上也增大了速度误差等问题, 提出了一种无需测速和反演的波速模型(李健等, 2014). 考虑到单纯形法易陷入局部最优问题进行改进研究, 充分发挥单纯形法易收敛的优势. 其研究结合实际工程应用发现, 不仅极大的提高了检波器内的震源定位精度, 而且针对检波器外的震源定位也有显著提高.

## 2 震源定位主要影响因素

震源定位是一项高技术、信息化的技术, 容易受到诸多因素影响, 监测台网布置、震源定位算法、波速模型、到时拾取、震源定位与成像、震源机制、波型特征都是影响因素. 因此, 如何提高一个监测台网的定位能力, 即提高其对微震事件的定位精度、降低定位误差, 增大其有效监测面积, 提高定位结果的稳定性, 进而改善其整体的定位效果就变得十分困难. 本文主要针对台网布置、到时拾取、波速模型和定位算法这四个方面的影响简要分析.

### 2.1 台网布置

微震监测中检波器的空间分布是震源定位的关键环节, 因为检波器分布方式的不同, 对定位精度有着不同程度影响. 在微震监测技术中, 研究微震检波器的分布方案是最重要的研究项目之一, 合理的分布方式, 可以提高震源位置的精度和可靠性.

在优化微震地震检波器分布时, 应该参考关于地震网络最优分布的理论. 这些理论包括 Sato 等提出的蒙特卡洛算法进行地震台网监测能力的数值计算和 Kijko 与 Mendecki 等) 分别基于  $D$  值和  $C$  值最优设计理论提出了设计微震台网的方法(Sato and Skoko, 1965; Kijko, 1977a, b).  $D$  值最优设计理论认为检波器位置的优化取决于源参数协方差矩阵.  $C$  值最优设计理论从影响非线性系统稳健性的角度分析了台网布设与所形成方程组条件数的关系.

基于  $D$  值最优设计理论, 巩思园等研究了地震台网的最优配置问题. 在  $D$  值最优设计理论的指导下, 利用遗传算法可以快速确定煤矿微震网络的低成本设计(巩思园等, 2010). 后来, 针对大规模台网布置组合优化问题, 建立台网优化布置目标函数(巩思园等, 2012).

为了更加符合实际工程环境, 基于  $D$  值最优设计理论, 引入微震事件发生的概率、区域监测的重要性、网络部署的可行性等因素来构建目标函数(高永涛等, 2013), 其研究结合实际工程应用提出了微震监测台网动态优化布置原则. 为磷矿矿中的微震监测网络制定了最佳方案.

### 2.2 到时拾取

微震波到时的拾取精确主要取决于信噪比、波形信号的频率范围以及到时拾取算法等因素. 受微震监测环境、不连

续传播介质以及背景噪声的影响,微震波形的识别和到时拾取研究更为复杂. Kenneth 等在 1982 年率先使用丢弃特殊数据的方法来处理数据,以提高解决方案的精度.

对微地震信号的自动拾取技术主要借鉴于天然地震中的自动拾取方法,地震信号自动拾取或震相识别方法有:能量比法、AIC 算法、神经网络法、分形分维法、极化分析法以及卡尔曼估计等方法 (Warpinski *et al.*, 1998). 其中能量比法是最为快捷、最为广泛应用的一种自动拾取方法 (Rutledge *et al.*, 2004; Chen Zuolin, 2005). 该方法的缺陷是受短时窗的影响不能准确拾取初至,难以在高振幅噪声中分辨出地震信号.

为提高工程噪声环境中低信噪比微震信号的自动识别率及其 P 波自动拾取准确率,李贤等结合 Allen 算法能快速自动拾取震动信号的优点及 Bear 算法善于拾取低信噪比震动信号 P 波初至的优势 (ALLEN, 1978; BAER and Kradolfer, 1987; 李贤等, 2017), 在 Allen 算法的基础上,引入 Bear 算法的加权因子和特征函数,对 Allen 算法进行改进,提出了适用于工程尺度的微震信号及 P 波初至自动识别的 AB (Allen coupled with Bear algorithm) 算法.

通过不同信号的频带能量分布差异,姜鹏等利用 S 变换 (S Transform, ST) 分析地下厂房岩石破裂、爆破振动信号的频率特征,通过频带能量分布比例对其进行量化研究,并作为信号特征,建立基于遗传算法优化的 BP 神经网络模型,实现信号的准确分类 (姜鹏等, 2015). Ge 和 Kaiser (1992) 提出了一种基于事件的动态波速模型,可以通过首次到达时间选择来检测 P、S 和错误波,从而达到选取有效信号的目的.

### 2.3 波速模型

准确的波速模型是微震源定位的先决条件,合适的波速模型对于提高震源定位精度至关重要,同时也是较难精确确定的震源定位输入参数之一. 理想情况下,波速模型应该反映岩体介质的真实波速场. 实际应用中,很难建立完全反映煤岩介质真实情况的波速模型. 微震源定位通常采用经过一定简化的波速模型. 目前常用的主要有单一波速模型、分层波速模型和实测波速模型.

单一波速模型比较容易获取,单一波速模型是微震定位中使用最多的模型. 该模型假设监测范围内的介质为均匀、连续、各向同性,然而实际的微震波速并不是恒定不变的. 微震事件发射出来的弹性波在岩体中传播会穿过不同的岩层,在不同的岩层里传播的速度不同,分层波速模型认为波速跟传播路径有关. 虽然分层波速模型较好的反映了真实的波速场,但是分层波速模型没有反映出波在岩层界面的反射、折射和反射现象. 实测波速模型直接采用原位实验测试监测区域内的震动波速度,一般情况下,在微震监测系统安装后,可以采用已知震源的爆破实验确定波速模型参数,实测波速模型在微震源定位中得到了良好的效果,目前大多数现场微震监测都采用实测波速模型.

针对实测波速模型中波速在“空间”和“时间”上都不能较好反映微震事件的实际波速. 董陇军等分析影响微震定位的因素和总结微震定位的方法原理,从而提出了一种无预先测速的微震定位方法,较好的克服了波速模型带来的定位误差 (董陇军等, 2013). Fish AM 考虑时间和空间的变化,根据

微震数据评估波速模型使用图像域波形层析成像方法更新了波速模型 (Fish, 2012).

针对复杂的地质单元,赋予每个单元不同的属性,提出了一种波速模型,其波速模型可以配置为包含可以充满空气,填充盐水或回填的水泥浆的空间 (Collins *et al.*, 2014). 考虑到岩体的各向异性参数应包括在最终的波速模型中以便产生更准确的事件位置,提出了一种新的波速模型 (Van *et al.*, 2011). Michael 等使用各向异性波速模型进行微震事件定位精度增强 (Jones *et al.*, 2010). Gesret 等将适当的波速模型整合到概率地震位置的公式中,提出了一种新的贝叶斯公式,它们在概率框架中将波速模型不确定性传播到地震事件位置,这有助于获得更可靠的源位置 (Gesret *et al.*, 2014).

### 2.4 定位算法

一直以来,震源定位算法都是微震监测技术研究的重要内容. 当微震台网、波速模型和到时参数确定后,此时如何选取最合适的微震源定位求解方法显得尤为关键. 目前,实际过程中主要应用的方法还是基于 Geiger 的经典方法以及在此基础上建立的各种线性方法. 但是这些方法的求解过于依赖初始值的选取,若是选取不当,极有可能结果不收敛导致的无解.

如果将计算初值用  $\theta_0$  表示,设定的迭代值用准  $\varphi(\theta_0)$  表示,在拟合迭代过程中会有很多局部最小点出现,如  $\theta_1$  和  $\theta_2$ ; 如果在局部最小时结束计算,由于没有找到全局最优值往往会造成很大的定位误差,如图 7 所示. 针对迭代方法易陷入局部问题,渐渐演化而来的各种拟合优算法 (Horst *et al.*, 2000; Deep and Dipti, 2008) 用在工程实践中. 董陇军等基于各种优化算法做了大量比较,建议在微震源定位中,优先使用自组织群移法 (Self Organizing Migrating Algorithms, SOMA) 定位 (董陇军等, 2013).

## 3 展望

虽然学者建立了各种优化的台网布置方案、到时选取技术、波速模型、求解方法等有利于微震监测技术的方法,但是在实际工程中,到时选取、波速模型等的确定都是工程师面临的较大难题. 因此必须开发新的方法进一步提高微震定位的精度.

### 3.1 双波定位

目前大多数微震定位方法利用 P 波信号进行定位,实际上检波器接收到的信号还有 S 波和其他复杂波,事实上,不管是声发射/微震事件还是地震事件,超过 90% 的能量由 S 波携带, S 波的振幅较 P 波要大,即 S 波信号要强于 P 波信号. 而实际中,很多情况下,很多传感器,由于震动波长距离的传播和衰减等原因,往往接收不到 P 波,只能接收到 S 波,有时甚至只能接收到杂波. 此时,如果只应用 P 波,定位误差就会大幅增加,甚至得到完全错误的定位结果.

王志刚揭示了双波定位方法原理,即同时应用 P 波到时和 S 波到时进行震源定位的机理 (王志刚, 2017). 对于三角形的声发射/微震监测台网,其对应的双曲面和球面场如图 8 所示,其中只有一个传感器利用了两种波,其他两个传感器仅应用了 P 波. 任意两个双曲面的交线,再与球面相交的交点,即为计算到得的相应的震源位置. 采用数值模拟和现



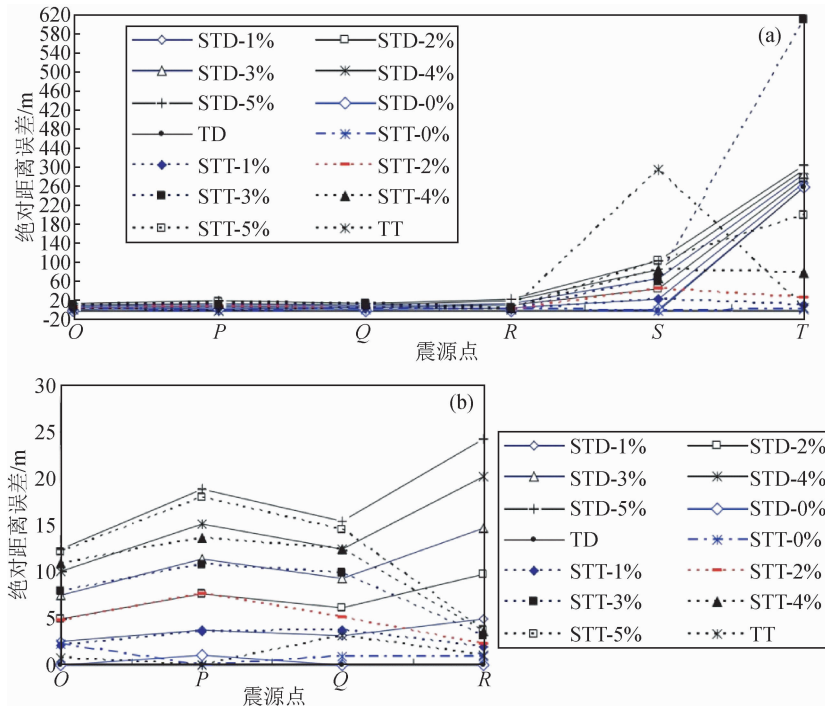


图6 各种新方法与传统方法定位绝对距离误差比较曲线(董陇军等,2011)

Fig. 6 Comparison curves of positioning absolute distance error by new method and traditional method(Dong L J et al. , 2011)

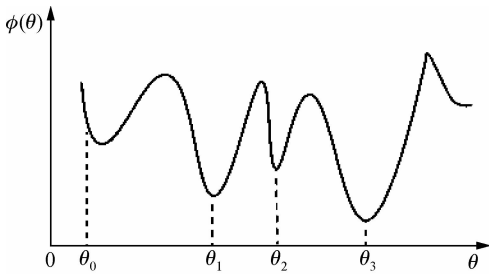


图7 局部最优与全局最优示意图(董陇军等,2013)

Fig. 7 Schematic diagram of local and global optimization (DONG,2013)

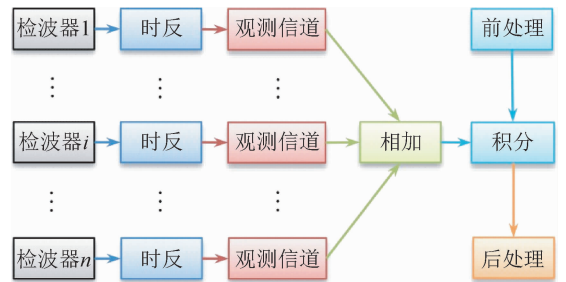


图9 基于空间匹配滤波的多元阵时间反转镜定位原理框图(马敬广,2007)

Fig. 9 Passive localization principle frame based on space matched-filter(Ma J G,2007)



图8 三维空间三角形分布监测台网对应的双曲面场和球场(王志刚,2017)

Fig. 8 The field of circles and hyperbolic associated with a triangular sensor array(Wang Z G,2017)

场试验分别在二维模型条件和三维空间下比较双波定位和P波定的定位效果,并揭示了速度误差和到时误差对双波定位的影响规律.

### 3.2 射线追踪

射线追踪技术避免了对高阶偏微分波动方程的直接求解,是一种快速有效的地震波场数值模拟手段,在层析成像、叠前深度偏移及正演模拟等研究领域均占据重要地位(赵爱华,2018).对于大多数震源定位的方法而言,三维复杂波速模型定位的主要困难在于走时或波形的正演模拟,但对于交切法则不只如此.交切法使用震源轨迹确定震中或震源位置,具有稳健直观的优点,在地震台网中有广泛的应用(Pujol,2004).

针对交切法难以表达震源轨迹的解析形式,基于最小走

时树射线追踪方法对三维复杂波速模型具有良好的稳健性,提出了一种三维复杂波速模型中地震事件震源轨迹的数值方法(赵爱华,2018).其研究表明,计算的震源轨迹不仅精细而且较完整,可用于高精度的震源定位、定位效果评估以及波速模型等因数的影响分析.射线追踪技术在地震定位的还有其他方法,如有限差分法、走时插值法、最短路径法以及波前构建法等.

### 3.3 逆时偏移成像

逆时偏移成像技术(许力生等,2013)基于双程波波动方程进行波场逆时外推,并应用成像条件提取成像值,可以得到逆时偏移数据体,成像结果可以用于地震定位,包括震源机制的相关信息.该技术不需要地震相识别或到达时间选取,它是一种实用的地震源探测和自动同步定位方法.

许力生等提出了一种逆时成像技术的地震定位的非线性方法.该方法采用直达波信号构建包络信号和互相关技术测量观测到时,因此观测到时的准确性和客观性得到了提升(许力生等,2013).针对最小二乘法易受到奇异点的影响,采用波形聚束方法直接建立观测到时和震源位置的非线性关系.但是逆时定位成像技术的计算效率不高,需要进一步提高计算效率.传统的源定位算法依赖于到达时间,不能实现高精度的自动源定位而没有高精度的到达时间选择.基于长时窗和短时窗判别频率估计算法对微地震事件进行提取,以便区分微震事件和干扰信号(吴建光等,2017).当采用振幅叠加法和时间反转偏移法来定位微震事件时,没有必要准确地选取首波到时.

### 3.4 时间反转镜

时间反转镜是一种阵列信号处理技术(马敬广,2007),它可以把从波源处发射出来的波(电磁波或机械波均可)重新聚焦到波源处.该技术引用光学中的相位共扼镜的方法,由多个收发合置的传感器组成的基阵,对入射波进行时反和再发射,可以使非均匀介质中的入射波在原波发射位置形成聚焦,以达到对其定位的目的.

时间反转镜分为主动时间反转镜和被动时间反转镜两种方法(马敬广,2007).主动时间反转镜方法的波源已知的发射源,检测器与发射源之间的距离是通过走时计算.被动时间反转镜方法的概念跟主动时间反转镜相反,是根据监测数据逆变参数的计算过程.被动时间反转镜定位是主动时间反转镜的扩展和引申,声场的互易原理是时间反转镜技术的物理基础.因为时间反转镜还处于初级研究阶段,相关研究成果较少.

考虑到海洋声场是矢量场,目标信息除声压外,还有质点的振速、加速度等有用信息,通过矢量水听器工具与被动时间反转镜定位技术相结合对被动时间反转镜方法进行了初步的研究(马敬广,2007).时间反转镜信号处理是一种空间匹配滤波的过程,其采用波动理论,它与射线理论互为补充.匹配滤波不是对发射信号进行,而是对声波的传输信道进行匹配,并且这一匹配只在原声源的位置处达到,使时反后的信号能量聚焦.对于多元垂直阵时间反转镜的宽带匹配场处理方法的原理如图9所示.

### 3.5 信息融合

信息融合技术(李绍红等,2018)是利用计算机技术对

按时序获得的若干传感器的观测信息在一定准

则下加以自动分析、综合处理,以完成所需的决策和估计任务而进行的信息处理过程.它包括多类型、多源、多平台传感器所获得的各种情报信息(如数据、照片、视频图像等信息)进行采集、传输、汇集、分析、过滤、综合、相关及合成,快速进行情报处理和自动图形标绘.

当使用多个分布在不同位置上的传感器对运动目标进行观测时,各传感器在不同时间和不同空间的观测值将不同,从而形成一个观测值集合.从这些观测值得出对目标运动状态的综合估计,可以进行时间融合或空间融合.时间融合是按时间先后对目标在不同时间的观测值进行融合,主要用于单传感器的信息融合;空间融合是对同一时刻不同位置传感器的观测值进行融合,适用于多传感器信息的一次融合处理.但在实际应用中,为获得目标状态,通常两种融合联合使用.李绍红等利用6个独立的检波器坐标和到时数据推导了考虑非均匀性的微震源解析解,通过随机模拟的方法给出各方向波速,并结合粗大误差判别准则和聚类分析方法两种信息融合方法获取最终结果(李绍红等,2018).

## 4 结论

(1)近20年来,随着微震检测技术在工程中被广泛应用,微震源定位研究得到了长足发展.虽然大家提出了许多微震源定位方法,但是针对不同的工程应用以及工程环境下,微震源定位还没有一个适合所有条件的方法,多数情况下微震源定位精度较小、稳定性不高.

(2)微震源定位方法主要基于波速模型和到时拾取来展开研究,不同的波速模型和应用条件所带来的定位精度迥异,波速模型仍是微震源定位的研究重点.根据学者已研究成果,可以把波速模型归纳为单一波速模型、复杂波速模型和无预先测速模型这三种,无论哪一种波速模型都离不开到时选取和定位方法带来的影响.针对这一问题,震源扫描法较好的回避了到时选取,它很适合低信噪比的数据处理.目前,虽然有大量的定位方法和到时选取方法用于微震源定位研究,但是更快、更准、更稳定的定位方法和到时选取方法需要大量的探索.台网布置直接影响监测数据的优劣和最后的微震源定位精度,为了实现较好的台网布置,需要考虑不同工程尺度,协调波速模型和定位方法之间的关系.因此,如何在实际应用中减弱微震源定位中台网布置、到时拾取、波速模型和定位方法带来的影响,这仍然需要进一步深入研究.

(3)微震监测主要将接收到的P波信号进行处理分析后应用到微震源定位.基于P波所携带的主要信息等特点所到的震源信息可以通过S波信号加以修正.目前,双波定位的机制还不够成熟,需要学者的深入研究.学科之间的相互交流推动着各领域的交叉学习,来至声学、地球物理学、军事等领域的定位研究将推动微震源定位的快速发展.如声学领域的声呐定位技术衍生出来的被动时间反转镜技术、军事方面对危险目标进行实时定位和威胁性评价所采用的信息融合技术、地球物理领域的可以较好还原地震波在介质中的传播路径的射线追踪技术等,把这些领域的先进技术引用到微震源定位是可行的、有意义的.因此,基于其他学科的相互交流,微震源定位研究将得到更大的发展空间.

(4)为了实际工程需要,微震源定位选择合理的台网布置方案、有效的到时拾取方法、合理的波速模型和更快、更准、更稳定的定位方法是微震源定位研究的必然结果。

**致 谢** 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

## References

- Allen R V. 1978. Automatic earthquake recognition and timing from single traces [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 68(5): 1521-1532.
- Anderson K R. 1982. Robust earthquake location using M-estimates [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 30(2-3): 119-130, doi: 10.1016/0031-9201(82)90096-6.
- Baer M, Kradolfer U. 1987. An automatic phase picker for local and teleseismic events [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(4): 1437-1445.
- Bisrat S, DeShon H R, Rowe C. 2012. Microseismic swarm activity in the New Madrid seismic zone [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(3): 1167-1178, doi: 10.1785/0120100315.
- Chen B R, Feng X T, Li S L, *et al.* 2008. Microseism source location with hierarchical strategy based on particle swarm optimization [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese)*, 28(04): 740-749.
- Chen B R, Feng X T, Zeng X H, *et al.* 2011. Real-time microseismic monitoring and its characteristic analysis during TBM tunneling in deep-buried tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese)*, 30(2): 275-283.
- Chen Z L. 2005. A multi-window algorithm for automatic picking of microseismic events on 3-C data [C]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 24: 1288-1291.
- Collins D S, Toya Y, Pinnock I, *et al.* 2014. 3D velocity model with complex geology and voids for microseismic location and mechanism [C]// *Proceedings of the 7th International Conference on Deep and High Stress Mining*, September, Sudbury. 681-688.
- Crosson R S. 1976. Crustal structure modeling of earthquake data 1. Simultaneous least squares estimation of hypocenter and velocity parameters [J]. *Journal of Geophysical Research*, 81(17): 3036-3046.
- DAI F, GUO L, XU N W, *et al.* 2016. Improvement of microseismic location based on an anisotropic velocity model [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 59(9): 3291-3301, doi: 10.6038/cjg20160914.
- Deep K, Dipti. 2008. A self-organizing migrating genetic algorithm for constrained optimization [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 198(1): 237-250, doi: 10.1016/j.amc.2007.08.032.
- Dong L, Sun D, Li X, *et al.* 2017. Theoretical and experimental studies of localization methodology for AE and microseismic sources without pre-measured wave velocity in mines [J]. *IEEE Access*, 5: 16818-16828, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2743115.
- Dong L J, Li X B, Tang L Z, *et al.* 2011. Mathematical functions and parameters for microseismic source location without pre-measuring speed [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese)*, 30(10): 2057-2067.
- Dong L J, Li X B, Tang L Z, *et al.* 2013. Main influencing factors for the accuracy of microseismic source location [J]. *Science & Technology Review (in Chinese)*, 31(24): 26-32, doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.24.003.
- Fish A M. 2012. Microseismic velocity inversion and event location using reverse time imaging [D]. *Colorado School of Mines*.
- Gao Y T, Wu Q L, Wu S C, *et al.* 2013. Optimization of microseismic monitoring networks based on the theory of D-optimal design [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing (in Chinese)*, (12): 1538-1545, doi: 10.13374/j.issn1001-053x.2013.12.005.
- Ge M. 2003a. Analysis of source location algorithms: Part I. Overview and non-iterative methods [J]. *Journal of Acoustic Emission*, 21(1): 14-28.
- Ge M. 2003b. Analysis of source location algorithms: Part II. Iterative methods [J]. *Journal of Acoustic Emission*, 21(1): 29-51.
- Ge M, Kaiser P K. 1992. Practical application of an innovative microseismic source location procedure [J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 10(3): 163-184.
- Geiger L. 1912. Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only [J]. *Bull. St. Louis Univ*, 8(1): 56-71.
- Gesret A, Desassis N, Noble M, *et al.* 2014. Propagation of the velocity model uncertainties to the seismic event location [J]. *Geophysical Journal International*, 200(1): 52-66, doi: 10.1093/gji/ggu374.
- Gong S Y, Dou L M, Cao A Y, *et al.* 2010. Study on optimal configuration of seismological observation network for coal mine [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 53(2): 457-465, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.02.025.
- Gong S Y, Dou L M, Ma X P, *et al.* 2012. Optimization algorithm of network configuration for improving location accuracy of microseism in coal mine [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese)*, 31(1): 8-17, doi: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.01.002.
- Gong S Y, Dou L Y, Ma X P, *et al.* 2012. Study on the construction and solution technique of anisotropic velocity model in the location of coal mine tremor [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 55(5): 1757-1763, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.033.
- Guo L, Dai F, Xu N W, *et al.* 2017. Research on MSFM-based microseismic source location of rock mass with complex velocities [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese)*, (02): 394-406, doi: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0425.
- Hassouna M S, Farag A A. 2007. Multistencils fast marching methods: A highly accurate solution to the eikonal equation on cartesian domains [J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 29(9): 1563-1574, doi: 10.1109/TPAMI.2007.1154.
- HE Y, ZHANG J Z, LI T Y. 2016. Improved source-scanning algorithm for microseismic location [J]. *China Sciencepaper (in Chinese)*, 11(21): 2450-2455.
- Horst R, Pardalos P M, Van Thoai N. 2000. Introduction to global optimization [M]. *Springer Science & Business Media*.
- Jiang P, Dai F, Xu N W, *et al.* 2015. Identification of microseismic signal in underground powerhouse based on ST time-frequency analysis [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese)*, (s2): 4071-4079, doi: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0702.
- Jones M, Parker R, Maxwell S. 2010. Microseismic event location accuracy enhancement using anisotropic velocity models [J]. *CSEG. Abstract*, 1-4.
- Kao H, Shan S J. 2004. The source-scanning algorithm: Mapping the distribution of seismic sources in time and space [J]. *Geophysical Journal International*, 157(2): 589-594, doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02276.x.
- Kennett B L N, Sambridge M S. 1992. Earthquake location—genetic algorithms for teleseisms [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 75(1-3): 103-110, doi: 10.1016/0031-9201(92)90121-B.
- Kijko A. 1977a. An algorithm for the optimum distribution of a regional seismic network—I [J]. *pure and applied geophysics*, 115(4): 999-1009.
- Kijko A. 1977b. 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*, 115(4): 1011-1021.
- Li B, Dai F, Xu N W, *et al.* 2014. Microseismic monitoring system and its engineering applications of deep-buried underground powerhouse



- [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese), 33(s1): 3375-3383.
- Li J, Gao Y T, XIE Y L, *et al.* 2014. Improvement of microseism locating based on simplex method without velocity measuring [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese), 33(7): 1336-1346.
- Li N, Wang E Y, GE M C. 2017. Microseismic monitoring technique and its applications at coal mines: present status and future prospects [J]. Journal of China Coal Society (in Chinese), 42(s1): 83-96, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0852.
- Li N, Wang E Y, Sun Z Y, *et al.* 2014. Simplex microseismic source location method based on L1 norm statistical standard [J]. Journal of China Coal Society (in Chinese), 39(12): 2431-2438, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1855.
- Li S H, Zhu J D, BAI L Y, *et al.* 2018. Study on micro-seismic source location with information fusion and analytical methods [J]. Journal of China Coal Society (in Chinese), 43(4): 1065-1071, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.0956.
- Li W J, Chen Q F. 2006. Source scanning algorithm is used to locate microseismic [J]. Earthquake (in Chinese), 26(3): 107-115.
- Li X, Wang W J, Chen B R. 2017. The AB algorithm suitable for identifying microseismic signal and P wave first time automatically under the project scale [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese), 36(03): 681-689, doi: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0178.
- Lin F, Li S L, Xue Y L, *et al.* 2010. Microseismic sources location methods based on different initial values [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese), 29(5): 996-1002.
- Lü J G, Jiang Y D, Zhao Y X, *et al.* 2013. Study of microseismic positioning based on steady simulated annealing-simplex hybrid algorithm [J]. Rock and Soil Mechanics (in Chinese), 34(8): 2195-2203, doi: 10.16285/j.rsm.2013.08.024.
- Ma J G. 2007. Research on time reversal mirror passive localization [Ph. D. thesis]. Harbin: Harbin Engineering University.
- Pujol J. 2004. Earthquake location tutorial: graphical approach and approximate epicentral location techniques [J]. Seismological Research Letters, 75(1): 63-74, doi: 10.1785/gssrl.75.1.63.
- Romney C. 1957. Seismic waves from the Dixie Valley-Fairview Peak earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 47(4): 301-319.
- Rutledge J T, Phillips W S, Mayerhofer M J. 2004. Faulting induced by forced fluid injection and fluid flow forced by faulting: An interpretation of hydraulic-fracture microseismicity, Carthage Cotton Valley Gas Field, Texas [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 94(5): 1817-1830, doi: 10.1785/012003257.
- Sato Y, Skoko D. 1965. Optimum distribution of seismic observation points II [J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, 43: 451-457.
- Smith E G C. 1976. Scaling the equations of condition to improve conditioning [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 66(6): 2075-2076.
- Spence W. 1980. Relative epicenter determination using P-wave arrival-time differences [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 70(1): 171-183.
- Tang G X. 1979. A general method for determining earthquake parameters by computer [J]. Acta Seismologica Sinica (in Chinese), 1(2): 186-196.
- Tchebotareva I I, Nikolaev A V, Sato H. 2000. Seismic emission activity of Earth's crust in Northern Kanto, Japan [J]. Physics of the Earth & Planetary Interiors, 120(3): 167-182, doi: 10.1016/S0031-9201(99)00163-6.
- Thurber C H. 1985. Nonlinear earthquake location: Theory and examples [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 75(3): 779-790.
- Tian Y, Chen X F. 2002. Review of research on seismic localization [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 17(1): 147-155, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2002.01.022.
- Van Dok R, Fuller B, Engelbrecht L, *et al.* 2011. Seismic anisotropy in microseismic event location analysis [J]. The Leading Edge, 30(7): 766-770, doi: 10.1190/1.3609091.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 90(6): 1353-1368, doi: 10.1785/0120000006.
- WANG Quan-dong, LI Guo-he, WU Wei-jiang, *et al.* 2015. Application of multiple population genetic algorithm in micro-seismic source location [J]. Computer Measurement and Control (in Chinese), 23(4): 1285-1288.
- WANG Yun-hong. 2016. Grid-search method on micro-seismic source fast location based on DIRECT algorithm [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 31(4): 1700-1708, doi: 10.6038/pg20160439.
- WANG Zhi-gang. 2017. The mechanism and effect analysis of using dual waves in source location [Ph. D. thesis]. Beijing: China University of Mining and Technology.
- Warpinko N R, Branagan P T, Peterson R E, *et al.* 1998. Mapping hydraulic fracture growth and geometry using microseismic events detected by a wire line retrievable accelerometer array [C]. Proceeding SPE Gas Technology Symposium, 34(3): 23-29.
- Wu J G, Zhang P, Lü H, *et al.* 2017. Application of Microseismic Event Location Using Amplitude Summation in Surface Monitoring [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) (in Chinese), 47(1): 255-264, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.201701305.
- Xie Z, Spencer T W, Rabinowitz P D, *et al.* 1996. A new regional hypocenter location method [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 86(4): 946-958.
- Xu L S, Du H L, Yan C, *et al.* 2013. A method for determination of earthquake hypocentroid: time-reversal imaging technique I—Principle and numerical tests [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56(4): 1190-1206, doi: 10.6038/cjg20130414.
- Xu N W, Liang Z Z, Tang C A, *et al.* 2014. Three-dimensional feedback analysis of rock slope stability based on microseismic monitoring [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese), 33(S1): 3093-3104, doi: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.s1.071.
- Zhao A H. 2018. Calculation of hypocentral loci of seismic events in a 3-D complex velocity model [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 61(10): 3994-4006, doi: 10.6038/cjg201810681.
- Zhu Q J, Jiang F X, MIAO H X, *et al.* 2014. Quadratic optimization of mining microseismic source positioning based on cluster analysis [J]. Journal of Mining and Safety Engineering (in Chinese), 31(2): 196-202, doi: 10.13545/j.issn1673-3363.2014.02.005.
- Zou Z, Zhou H W, Bian A, *et al.* 2015. An evaluation of reverse-time imaging of clustering earthquakes [J]. Journal of Earth Science, 26(4): 548-555, doi: 10.1007/s12583-015-0563-6.

## 附中文参考文献

- 陈炳瑞, 冯夏庭, 李庶林, 等. 2008. 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, 28(04): 740-749.
- 陈炳瑞, 冯夏庭, 曾雄辉, 等. 2011. 深埋隧洞 TBM 掘进微震实时监测与特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 30(2): 275-283.
- 戴峰, 郭亮, 徐奴文, 等. 2016. 基于异向波速模型的微震定位改进[J]. 地球物理学报, 59(9): 3291-3301, doi: 10.6038/cjg20160914.
- 董隹军, 李夕兵, 唐礼忠, 等. 2011. 无需预先测速的微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, 30(10): 2057-2067.
- 董隹军, 李夕兵, 唐礼忠. 2013. 影响微震震源定位精度的主要因素分析[J]. 科技导报, 31(24): 26-32, doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.24.003.
- 高永涛, 吴庆良, 吴顺川, 等. 2013. 基于 D 值理论的微震监测台网优化布设[J]. 北京科技大学学报, (12): 1538-1545, doi: 10.

- 13374/j. issn1001-053x. 2013. 12. 005.
- 巩思园, 窦林名, 曹安业, 等. 2010. 煤矿微震监测台网优化布设研究[J]. 地球物理学报, 53(2): 457-465, doi: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2010. 02. 025.
- 巩思园, 窦林名, 马小平, 等. 2012. 煤矿震定位中异向波速模型的构建与求解[J]. 地球物理学报, 55(5): 1757-1763, doi: 10.6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 05. 033.
- 巩思园, 窦林名, 马小平, 等. 2012. 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, 31(1): 8-17.
- 郭亮, 戴峰, 徐奴文, 等. 2017. 基于MSFM的复杂速度岩体微震定位研究[J]. 岩石力学与工程学报, (02): 394-406, doi: 10.13722/j. cnki. jrme. 2016. 0425.
- 何勇, 张建中, 李同宇. 2016. 改进的震源扫描定位方法[J]. 中国科技论文, 11(21): 2450-2455.
- 姜鹏, 戴峰, 徐奴文, 等. 2015. 基于ST时频分析的地下厂房微震信号识别研究[J]. 岩石力学与工程学报, (s2): 4071-4079, doi: 10.13722/j. cnki. jrme. 2015. 0702.
- 李彪, 戴峰, 徐奴文, 等. 2014. 深埋地下厂房微震监测系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 33(s1): 3375-3383.
- 李健, 高永涛, 谢玉玲, 等. 2014. 基于无需测速的单纯形法微地震定位改进研究[J]. 岩石力学与工程学报, 33(7): 1336-1346.
- 李楠, 王恩元, GE Mao-chen. 2017. 微震监测技术及其在煤矿的应用现状与展望[J]. 煤炭学报, 42(s1): 83-96, doi: 10.13225/j. cnki. jccs. 2016. 0852.
- 李楠, 王恩元, 孙珍玉, 等. 2014. 基于L1范数统计的单纯形微震震源定位方法[J]. 煤炭学报, 39(12): 2431-2438, doi: 10.13225/j. cnki. jccs. 2013. 1855.
- 李绍红, 朱建东, 白兰英, 等. 2018. 联合信息融合和解析方法的微震源定位研究[J]. 煤炭学报, 43(4): 1065-1071, doi: 10.13225/j. cnki. jccs. 2017. 0956.
- 李文军, 陈棋福. 2006. 用震源扫描算法(SSA)进行微震的定位[J]. 地震, 26(3): 107-115.
- 李贤, 王文杰, 陈炳瑞. 2017. 工程尺度下微震信号及P波初至自动识别AB算法[J]. 岩石力学与工程学报, 36(03): 681-689, doi: 10.13722/j. cnki. jrme. 2016. 0178.
- 林峰, 李庶林, 薛云亮, 等. 2010. 基于不同初值的微震源定位方法[J]. 岩石力学与工程学报, 29(5): 996-1002.
- 吕进国, 姜耀东, 赵毅鑫, 等. 2013. 基于稳健模拟退火-单纯形混合算法的微震定位研究[J]. 岩土力学, 34(08): 2195-2203, doi: 10.16285/j. rsm. 2013. 08. 024.
- 马敬广. 2007. 时间反转镜被动定位技术研究[学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学.
- 唐国兴. 1979. 用计算机确定地震参数的一个通用方法[J]. 地震学报, 1(2): 186-196.
- 田玥, 陈晓非. 2002. 地震定位研究综述[J]. 地球物理学进展, 17(1): 147-155, doi: 10.3969/j. issn. 1004-2903. 2002. 01. 022.
- 王泉栋, 李国和, 吴卫江, 等. 2015. 多种群遗传算法在微震震源定位中的应用[J]. 计算机测量与控制, 23(4): 1285-1288.
- 王云宏. 2016. 基于DIRECT算法的微震震源快速网格搜索定位方法研究[J]. 地球物理学进展, 31(4): 1700-1708, doi: 10.6038/pg20160439.
- 王志刚. 2017. 双波定位原理及其效果分析[学位论文]. 北京: 中国矿业大学.
- 吴建光, 张平, 吕昊, 等. 2017. 基于震幅叠加的微地震事件定位在地面监测中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 47(1): 255-264, doi: 10.13278/j. cnki. jjuese. 201701305.
- 许力生, 杜海林, 严川, 等. 2013. 一种确定震源中心的方法: 逆时成像技术(一)—原理与数值实验[J]. 地球物理学报, 56(4): 1190-1206, doi: 10.6038/cjg20130414.
- 徐奴文, 梁正召, 唐春安, 等. 2014. 基于微震监测的岩质边坡稳定性三维反馈分析[J]. 岩石力学与工程学报, 33(S1): 3093-3104, doi: 10.13722/j. cnki. jrme. 2014. s1. 071.
- 赵爱华. 2018. 三维复杂速度模型中地震事件震源轨迹的计算[J]. 地球物理学报, 61(10): 3994-4006, doi: 10.6038/cjg201810681.
- 朱权洁, 姜福兴, 缪华祥, 等. 2014. 基于聚类分析的微震定位二次优化研究[J]. 采矿与安全工程学报, 31(2): 196-202, doi: 10.13545/j. issn1673-3363. 2014. 02. 005.