

· 研究进展 ·

复杂结构空区辨识与震源定位

董陇军* 张义涵 胡清纯 陶 晴

中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083

[摘 要] 地下工程岩体结构复杂, 多中段多采场并存交错, 水体、断层、高应力集中等特殊地质区域广泛分布。工程扰动下岩体波速动态变化、分布区域差异明显, 给地下工程震源定位和异常结构区域辨识造成了诸多不确定性。本文系统介绍了复杂结构空区辨识与震源定位两方面的工作。在震源定位方面, 充分考虑波速和传播路径动态变化的影响, 基于改进后网格节点多层搜索的 A^* 算法和无需预先测速的定位思想, 提出了适用于复杂结构体的二维和三维震源定位方法, 相较于传统方法, 定位误差明显降低。在异常结构体辨识方面, 采用了一种改进的协同主被动震源的层析成像方法, 对 7 种因素影响下成像结果开展了定量分析, 基于量化结果的最优输入参数可以显著提高反演精度。针对层析成像方法中受限于各种参数影响且波速差不能过大的问题, 提出一种全域搜索的二维复杂结构空区辨识方法, 仿真模拟和试验结果证明了该方法在空区辨识中的可靠性和有效性。上述工作为探明地下潜在危险区域提供了理论基础和技术手段, 对于防控工程灾害具有重要意义。

[关键词] 声发射; 微震; 震源定位; 层析成像; 空区辨识

自然资源和地下空间的开发利用正在向地球深部有序推进, 复杂的地质环境给地下工程的施工运行带来了巨大挑战。地下空间中广泛分布着人为开挖的工程结构和岩体破碎、结构脆弱的特殊地质结构。高地应力和强构造应力致使岩体集聚了大量弹性势能, 上述区域在频繁的工程扰动下成为了先聚应力释放的理想场所, 诱发的岩爆、断层滑移等工程灾害造成了极大的损失^[1-3]。同时, 异常地质体中堆积的有毒气体、可燃矿物和水体, 形成潜在的次生隐患, 诸如突水、涌泥等各类工程灾害频发^[4-6]。

微震监测技术目前广泛应用于矿山开采、深埋隧道、核废料处置等地下工程, 是工程灾害防控的重要组成部分^[7, 8]。震源定位可以实时捕捉和预测潜在的危險区域孕育发展过程, 为地下工程高应力区域能量调控、潜在失稳灾害预警等防控手段实施提供支撑。震源定位技术在更新迭代过程中取得了长足进步, 基于不同的定位思想逐渐发展出了 Geiger^[9]、Thueber 方法^[10]、单纯形法^[11]、数值解析



董陇军 中南大学资源与安全工程学院教授、博士生导师, 获国家自然科学基金优秀青年科学基金资助, 湖南省科技创新领军人才。致力于采矿诱发岩体失稳灾害监测与防控、金属矿残矿安全回采、安全人机工程等领域相关研究工作。获湖南省技术发明一等奖等省部级奖励 10 余项, 发表 SCI 论文 93 篇 (ESI Top 1% 高被

引论文 11 篇), 授权国家发明专利 42 项, 主持撰写行业、团体标准 3 项。

协同定位^[12]、FastWay^[13]、三角时差定位方法^[14]等经典震源定位方法, 逐渐应用于更为复杂的实验室和工程场景, 震源定位精度和效率得到不断提高。其中, 将波速作为未知量的定位思想突破了以往震源定位需预先测速的思维定势, 董陇军等^[15]给出了无需预先测速的震源定位的数学形式, 有效提高了定位精度。在此基础上, 进一步建立了未知波速系统的三维震源定位的控制方程, 求得该系统下的解析解^[16]。杨道学等^[17]利用粒子群优化算法求解未知波速的定位目标函数的全局最优解。考虑到岩石

收稿日期: 2021-06-02; 修回日期: 2021-12-17

* 通信作者, Email: lj.dong@csu.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(51822407)的资助。

的高度非均质性,地震波最小走时面法^[18]、基于斯奈尔定律及布谷鸟算法^[19]等定位方法也被相继提出,以解决层状岩体中的震源定位问题。通常,定位方法的精度与原始定位资料的质量密切相关,这些影响因素包括了到时点拾取的准确性、噪声的去除、监测网络的布置方式、传感器的选择等^[20, 21]。震源定位方法在未来发展中将继续聚焦于3方面的问题:(1)实际波速分布的区域差异和时间变化性;(2)假定传播路径与弹性波实际传播路径的匹配;(3)含空区复杂结构人工智能定位方法的相结合。

实现岩土工程地质构造、水源和空区等异常区域探测,将“不可视”地下岩土工程结构内部“可视化”,对于排除工程实际中安全隐患具有重要意义。根据地质探测原理的不同,划分出地震波^[22, 23]、电磁^[24]、电阻率^[25]、核磁共振^[26]等地球物理方法。地震波探测方法依据弹性波在各类地质体中的传播特性,反演数百米区域内异常地质体的分布、几何形态和构造特征,对地质界面具有较好的识别效果^[27, 28]。实验室尺度下,对岩石受载过程进行速度场结构层析成像,能够对岩石应力集中和主破裂区域进行反演,确定损伤区域的空间位置,表征裂纹未来发育方向^[29, 30]。然而,实际工程异常结构潜伏性强、空间分布不均,加之易受工程活动影响,探测精确度难以满足工程需求。特别是地震法中代表性的走时层析、波形层析技术,需要大量数据迭代,求解稳定性差,不可避免地引入先验模型,反演效果受多种因素和参数影响大,制约着实际应用中可靠性和适应性^[31, 32]。

本文围绕基于改进A*路径搜索和无需预先测速的复杂结构体震源定位方法、协同主被动震源三维层析成像影响因素量化研究、全域搜索复杂结构空区探测技术,介绍了在地下工程潜在风险区域定位和辨识领域的研究进展,这些研究对于防控工程灾害具有重要意义。

1 复杂结构震源定位

1.1 二维含孔洞结构的无需测速震源定位方法(ALM)

在包括蚁群算法^[33]、快速探索的随机树算法^[34]和人工势场方法^[35]在内的诸多类似智能算法中,A*算法在确定全局最优路径的同时,具有较强的鲁棒性。由此,依据改进的A*搜索算法和无需预先测速思想构建了ALM定位方法,来确定声发射/微震的震源位置。该定位方法包括四个部分:

确定初始环境。将复杂结构进行网格划分,并

分别用1和0表示空区内外部的网格节点来构建二维矩阵,形成定位模型;

采集到时数据。在网格节点上最少布置4个传感器以满足构建声发射定位方程需要;二维定位模型中包括了波速 C 、声发射源坐标 (x_0, y_0) 、产生时间 t_0 在内的4个未知量,以及传感器坐标 (x_k, y_k) 、到达时间 t_0^k 3个已知量;到时差定位方程中需确定任意两个传感器之间实际到达差 Δt_0^{lm} ;

搜索最快波形路径。使用改进后A*算法搜索各个传感器与网格点之间的最快波形路径;为了减少传统A*算法中使用中心节点搜索路径所产生的误差,选取网格点与相邻4层网格节点建立联系,将原有的8条搜索方向增加至48条,有效提高搜索路径的精准性(图1a)。搜索方向 $z(k)$ 与相邻层数 k 的关系如下:

$$z(k) = (2k + 1)^2 - 1 \quad (1)$$

震源定位。基于最小二乘原理,引入偏差量 D 来描述潜在声发射源和网格点的偏差程度,计算每个网格节点的偏差量,最小值所在节点对应于声发射源的位置。

$$D_{ij} = \sum (\Delta t_{ij}^{lm} - \Delta t_0^{lm})^2 \quad (2)$$

通过模拟定位试验对比分析了ALM和FastWay在波速波动误差下的定位精度。在 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的方形二维平面上设置三个空区,通过将二维平面划分为 20×20 个网格单元,得到了400个网格单元和441个网格节点(图1b)。在给定实际速度下,使用网格节点的ALM相比使用中心节点搜索的FastWay定位方法,路径搜索更为准确且定位精度更高。在添加波速浮动误差的情况下,ALM同样得到了更好的计算结果,FastWay定位误差随速度浮动误差的增大而增大,最大定位误差达到了3.0 m。

为了进一步验证ALM定位方法的精度,在总尺寸为 $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ 的大理石试样中切割出圆形、长圆形和三角形的空区开展断铅实验。试样表面被划分出 60×60 的二维网格,用于确定传感器和断铅点坐标,并构建ALM定位模型。根据到时数据,分别使用ALM、FastWay、无需预先测速的时差定位法(TD)^[15]和Geiger法(TM)^[9]4种方法计算了声发射源的空间位置,在现有网格密度下,ALM的最大定位误差为2.2 cm,而FastWay、TD和TM的最大定位误差分别为3.6 cm、4.6 cm和7.6 cm;ALM的平均定位误差为1.4 cm,而FastWay、TD和TM的平均定位误差分别为1.9 cm、2.4 cm和2.6 cm

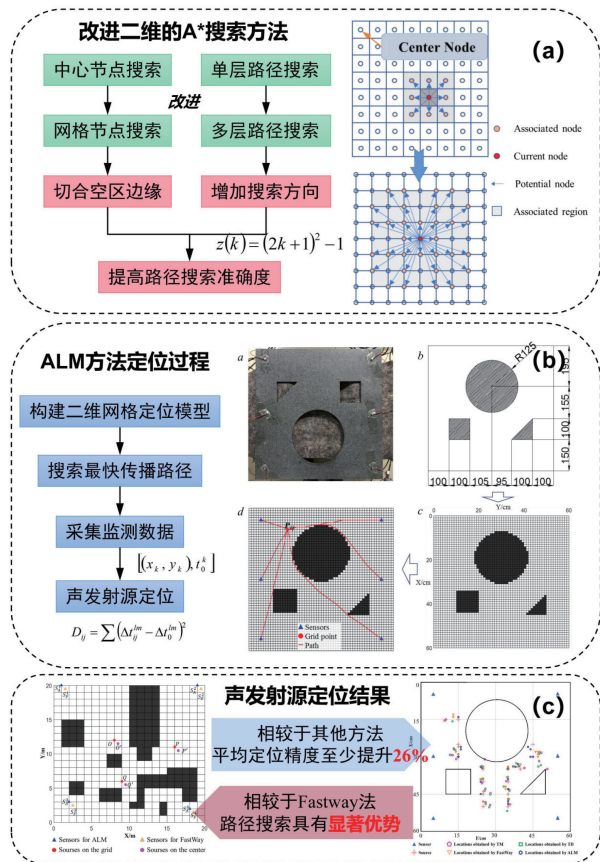


图 1 二维含孔洞结构的无需测速震源定位方法 (ALM)^[36]

(图 1c)。ALM 法相较于其他定位方法,在复杂结构中具有更高的定位精度。同时,在对 4 种定位方法试验结果的分析中得到了一致性结论:(1) 位于传感器矩阵内部的震源定位精度明显高于分布在矩阵外的震源;(2) 室内试验中声发射系统采集门阈值的设定对震源定位精度具有显著影响。

1.2 三维含孔洞结构的无需测速震源定位方法 (VFH)

VFH 的定位思想与 ALM 相一致,进一步地扩展到三维复杂结构的定位环境中,该方法可分为四个部分:

确定初始环境。将三维复杂结构进行网格划分,并分别用 1 和 0 表示空区内外部的网格节点来构建三维矩阵,形成定位模型;根据空区的情况和定位的精度要求,确定单位立方体网格的尺寸大小。一般来说,定位精度和计算量随着网格密度的增加而提升,当网格密度达到一定阈值时,定位精度将不会有明显变化。

采集到时数据。在网格节点上最少布置 5 个传感器以满足构建声发射定位方程需要;三维定位模型中包括了波速 C 、声发射源坐标 (x_0, y_0, z_0) 、产生时

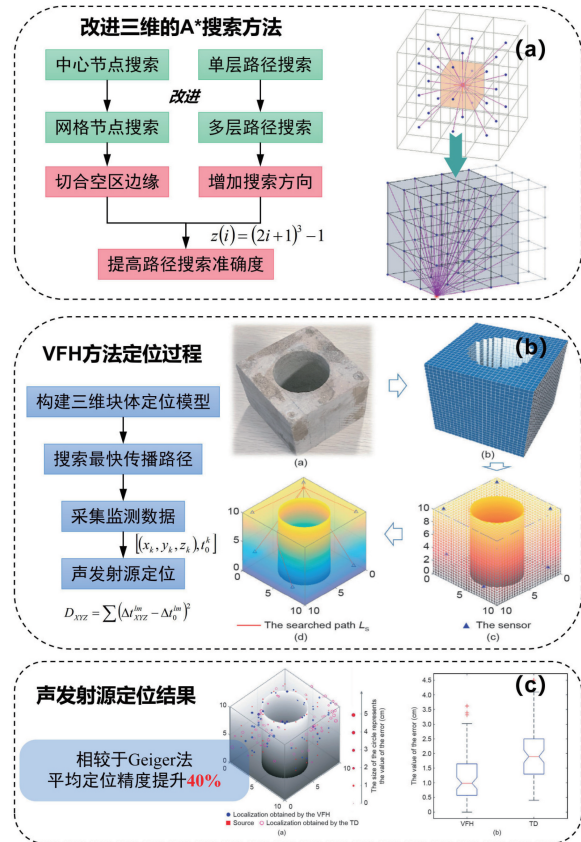


图 2 三维含孔洞结构的无需测速震源定位方法 (VFH)^[37]

间 t_0 在内的 5 个未知量,以及传感器坐标 (x_k, y_k, z_k) 、到达时间 t_0^k 4 个已知量;到时差定位方程中需计算任意两个传感器 S_l 和 S_m 之间的实际到时差 Δt_0^{lm} ;

搜索最快波形路径。使用改进后 A* 算法搜索各个传感器与网格点之间的最快波形路径;三维结构中,传统 A* 算法的当前网格节点向相邻一层拓展,只能提供 26 个方向选择,改进后的 A* 算法减少了路径搜索误差,当前网格节点可以向相邻两层的 124 个节点方向拓展或向相邻三层的 342 个节点方向拓展(图 2a),搜索方向 $z(i)$ 与相邻层数 i 的关系如下:

$$z(i) = (2i + 1)^3 - 1 \quad (3)$$

震源定位。基于最小二乘原理,引入偏差量 D 来描述潜在声发射源和网格点的偏差程度,计算每个网格节点的偏差量,最小值所在网格节点对应于声发射源的位置。对于空区内部的网格点,令 $D_{XYZ} = \infty$

$$D_{XYZ} = \sum (\Delta t_{xyz}^{lm} - \Delta t_0^{lm})^2 \quad (4)$$

在含有 $\Phi 6 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 的圆柱体孔洞的 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 立方体砂浆件上开展了断铅实验,与 Geiger 法的定位结果进行了比对,验证了 VFH 方法在三维结构震源定位方面的显著优势。试验中,在试样各个侧面预先设置的共计 34 个断铅点上

分别断铅 2 次,采集传感器的到时数据分别利用 Geiger 法和 VFH 法计算震源的空间位置,其中, VFH 法按照 $25 \times 25 \times 25$ 的立方体小网格方块划分试样并构建定位模型,同时将三维矩阵中空区所在位置赋值为 1,视为应力波无法通过(图 2b)。Geiger 法的 78 次定位结果的误差最大值、中位数和平均值分别为 4.5 cm、1.9 cm、2.02 cm,而 VFH 法的定位误差最大值、中位数和平均值分别为 3.6 cm、1.0 cm、1.2 cm,平均定位精度提高了近 40%,与 Geiger 法的定位结果相比较,新方法的定位精度明显提高(图 2c)。

2 复杂结构异常区域成像影响因素量化研究

2.1 复杂结构异常区域波速场成像

为探测地下波速结构异常区域,在 FaATSO^[38] 的基础上,提出一种改进的基于快速行进法和最小二乘拟牛顿法的主被动声发射源三维层析成像方法,改进的 FaATSO 程序算法运行步骤可分为五个部分(图 3):

第一步,确定初始环境,根据反演精度要求,确定网格尺寸并划分网格节点;假定非异常区域 P 波波速为定值。

第二步,设置输入的先验模型,根据待反演区域的有限已知信息给定先验模型。

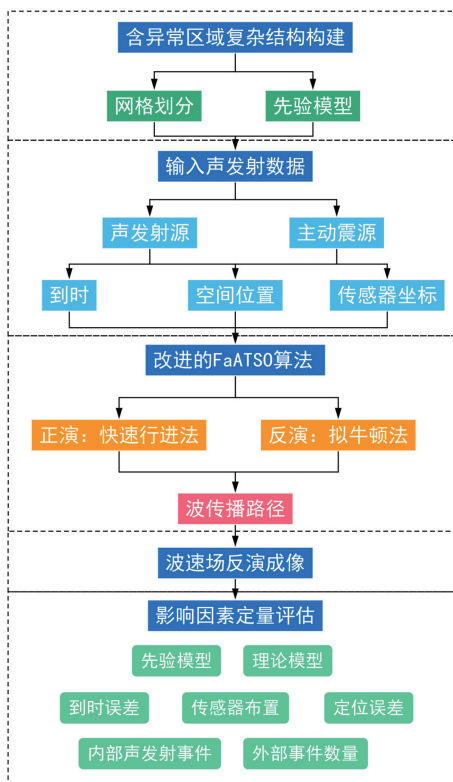


图 3 协同主被动震源成像反演及影响因素定量评估^[39]

第三步,采集声发射数据,在结构体上布置具备主动脉冲功能的声发射传感器,形成声发射监测阵列;声发射信号源包括主动脉冲和声发射事件两种,主动脉冲震源位置已知且可控可调,声发射事件分布范围广需定位空间位置。

第四步,建立结构波速数据库,输入先验模型、传感器坐标、声发射数据,采用快速推进法和拟牛顿法求解结构波速;

第五步,得到异常区域反演识别结果,绘制各网格节点波速值,利用颜色条表示速度差异,判断异常结构的大小和位置。

2.2 成像影响因素量化研究

通过仿真模拟构建了三维含水空间结构, $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的花岗岩立方体结构内部存在 1 个直径为 60 mm 的圆柱体含水区域。整个立方体结构四周布置了 36 个传感器构成声发射监测阵列,用于发射和接收脉冲信号,并监测在结构内部随机生成的若干声发射事件。采用改进的成像方法定量研究了先验模型、传感器布置、内部声发射事件、理论模型、外部事件数量、事件定位误差、事件到时误差 7 种因素对反演结果的影响,得到了如下结论:

基于量化结果的最优输入参数可以显著提高异常区域的检测可靠性。在所有影响因素中,理论模型对反演成像结果的影响最为显著。在局部异常区域和整体环境波速差过大时,反演结果往往不够理想,这也是声发射波速成像的共性问题。先验模型异常区域信息与实际偏差过大的前提下,现有参数设定下难以准确地探测异常区域波速。声发射事件定位误差控制在可接受范围内,可以得到较为理想的波速场反演结果,同时,合理剔除和筛选声发射事件,有利于提高反演精度。

3 复杂结构异常区域声发射辨识方法(EIM)

波速成像反演方法受限于数据处理量大、程序运算时间长,且各参数设定、反演区域波速差异都会对结果产生明显影响。为此,我们提出了一种二维复杂结构空区识别的新方法,利用改进的 A* 搜索算法搜索最短的波路径,并与潜在的空区匹配以估计其大小和位置。包括以下 4 个步骤:

环境构建(图 4a)。在待测复杂结构上划分网格并设置相对应的网络节点,以确定空区所有潜在分布情况的集合;其中,对于圆形空区结构,圆心 (x, y) 遍历待测区域内的网格节点,圆形半径 r

依次取单位网格长度的整数倍；对于方形空区结构，长方形中心 (x, y) 遍历待测区域内部的网格节点，长方形长和宽分别取单位网格长度的整数倍；最终，得到整个区域内部潜在空区模型的集合 P ：

$$P = p(x, y, r) + p(x, y, l, m) \quad (5)$$

采集 P 波到时。布置传感器监测矩阵，传感器依次发射主动脉冲，传感器数量越多，辨识精度越高。对于二维复杂结构空区辨识，未知量包括空区信息 $[(x, y, r), (x, y, l, m)]$ 、波速 V_p ；已知量包括主动震源坐标 (x_l, y_l) 、传感器坐标 (x_k, y_k) 、脉冲发射时间 t_0^l 和传感器接收到时 t_0^k 。

构建结构空区路径数据库(图 4b)。在空区模型数据库的基础上，利用改进的 A^* 算法确定任一主动震源 S_l 和任一传感器 S_k 之间应力波的最短传播路径，形成路径数据库 L_p^k ；其中， (x, y) 遍历所有节点， (r, w, l) 取所有可能值；路径搜索还可以考虑其他路径搜索方法模拟应力波的传播情况。

空区结构辨识(图 4d)。对于任一空区模型，存在理论到时差 Δt_p^{lk} 和实际到时差 Δt_0^{lk} ，引入 D_p 以描述该空区模型与潜在空区的偏离程度：

$$D_p = \sum_{l,k} (\Delta t_p^{lk} - \Delta t_0^{lk})^2 \quad (6)$$

最小二乘求解可以得到最小值 D_p 对应的空区信息 (x, y, r) 或 (x, y, l, m) 。

在数值算例中，构建了 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 的搜索区域，该区域两侧设置 18 个脉冲收发传感器，划定为 20×20 的网格用于确定最优路径数据库。模拟过程中改变待测区域孔洞大小、孔洞位置和孔洞形状，依据实际到时差的偏差值 D 最小确定结构空区，搜索结果与算例中设置的圆心坐标及半径完全一致，验证了该二维复杂结构空洞搜索方法的有效性。另一方面，在到时差数据上附加随机误差后，搜索结果仍然准确，证明了该方法的可靠性。

室内试验选取了 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ 花岗岩板，在岩样中心分别构建直径为 20 cm、30 cm、40 cm 共 3 种圆形空区(图 4c)。试样表面按照 $2.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ 的单位正方形划分网格方块，并在左右两侧布置共 30 个传感器，试验中使用的声发射采集系统具备主动脉冲功能。通过将主动脉冲发射后的实际到时差与构建的结构空洞时差数据库匹配，辨识得到 3 种空区的搜索结果与真实空区的圆心和半径偏差不超过 1 个网格宽度(最小误差由网格密度决定)，选择直径更小的传感器和加密网格可以提高结果精度。

4 结 论

(1) 将传统 A^* 搜索算法的中心节点搜索改进为网格节点搜索，单层网格搜索拓展为多层网格搜索，丰富了节点搜索方向，有效提高了路径搜索的准确度。在无需预先测速定位思想的基础上，结合改进的 A^* 搜索算法，分别提出了适用于二维和三维复杂空间结构的 ALM 和 VFH 定位方法。与传统定位方法相比，考虑了波速和传播路径的动态变化，消除了预先测定波速和假定波传播为直线对定位结果的影响，定位精度得到显著提高。

(2) 提出一种改进的基于快速行进法和最小二乘拟牛顿法的主被动声发射源三维层析成像方法。通过开展 37 次仿真试验比较，量化分析了先验模型、传感器配置、内部声发射事件、理论模型、外部声发射事件、事件定位误差、事件到时误差 7 种因素对反演结果的影响。结果证明该方法能有效反演含水空区的三维复杂结构，不同参数对成像结果的影响

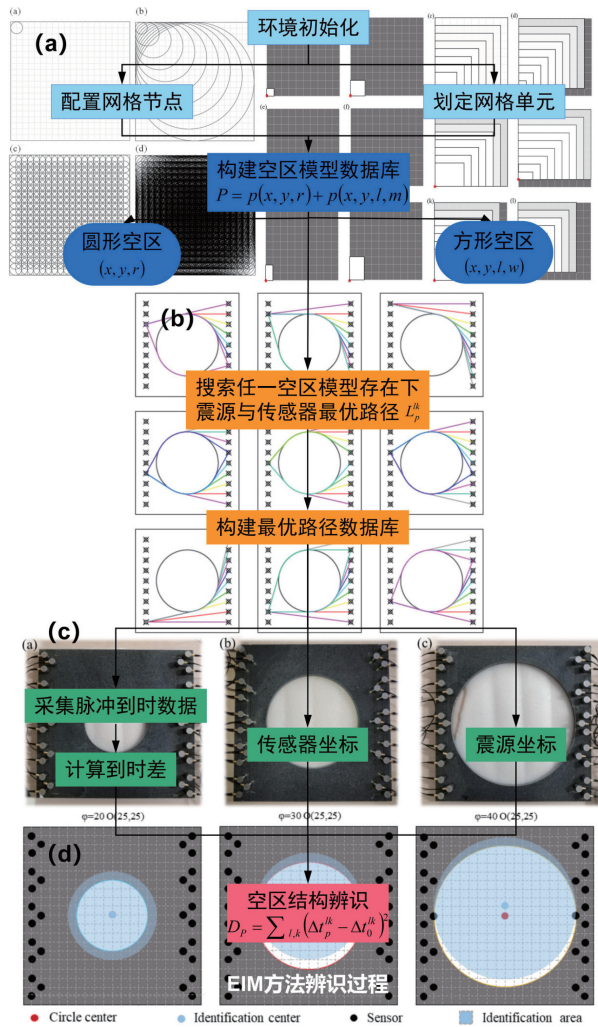


图 4 二维复杂结构异常区域声发射辨识方法(EIM)^[40]

程度不同,基于量化结果的最优输入参数可以显著提高异常区域的检测可靠性。

(3) 提出一种潜在异常结构全域搜索的方法。通过在仿真模拟试验中改变空区大小、形状和位置并增加一定的到时数据误差,搜索结果准确辨识了预设空区,室内试验中空区辨识结果与实际空区的位置偏差不超过一个基本单元网格宽度,试验验证了该方法的有效性和可靠性。该方法避免了大量数据的重复计算,并适用于内外波速差较大的复杂结构,可与层析成像方法形成良好的互补。

参 考 文 献

- [1] 钱七虎. 岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型. *岩土力学*, 2014, 35(1): 1—6.
- [2] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论进展. *煤炭学报*, 2019, 44(5): 1283—1305.
- [3] 董陇军, 张义涵, 孙道元, 等. 花岗岩破裂的声发射阶段特征及裂纹不稳定扩展状态识别. (2021-10-15)/[2021-11-05]. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2021.0637>.
- [4] Giorgi L, Leucci G. Detection of hazardous cavities below a road using combined geophysical methods. *Surveys in Geophysics*, 2014, 35(4): 1003—1021.
- [5] Coli M, Pinzani A. Tunnelling and hydrogeological issues: a short review of the current state of the art. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(3): 839—851.
- [6] 李术才, 许振浩, 黄鑫, 等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(5): 1041—1069.
- [7] 董陇军, 唐正, 李夕兵, 等. 基于卷积神经网络与原始波形的微震与爆破事件辨识方法(英文). *Journal of Central South University*, 2020, 27(10): 3078—3089.
- [8] 李立民. 秦岭输水隧洞微震活动特征研究. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(5): 1622—1629.
- [9] Geiger L. Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only. *Bull. St. Louis Univ*, 1912, 8(1): 56—71.
- [10] Thurber CH. Nonlinear earthquake location: theory and examples. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75(3): 779—790.
- [11] Prugger AF, Gendzwil DJ. Microearthquake location: a nonlinear approach that makes use of a simplex stepping procedure. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1988, 78(2): 799—815.
- [12] Dong L, Zou W, Li X, et al. Collaborative localization method using analytical and iterative solutions for microseismic/acoustic emission sources in the rockmass structure for underground mining. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 210: 95—112.
- [13] Gollob S, Kocur GK, Schumacher T, et al. A novel multi-segment path analysis based on a heterogeneous velocity model for the localization of acoustic emission sources in complex propagation media. *Ultrasonics*, 2017, 74: 48—61.
- [14] 吴顺川, 张光, 张诗淮, 等. 二维非测速条件下声发射震源定位方法试验研究. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(1): 28—39.
- [15] 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. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(10): 2057—2067.
- [16] 董陇军, 李夕兵, 马举, 等. 未知波速系统中声发射与微震震源三维解析综合定位方法及工程应用. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(1): 186—197.
- [17] 杨道学, 赵奎, 曾鹏, 等. 基于粒子群优化算法的未知波速声发射定位数值模拟. *岩土力学*, 2019, 40(S1): 494—502.
- [18] 徐港, 薛传荣, 王鑫科, 等. 考虑地震波折射的层状介质微震源定位方法. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(8): 1654—1663.
- [19] 张晓平, 朱航凯, 刘泉声, 等. 基于斯奈尔定律及布谷鸟算法的层状岩体微震定位研究. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(7): 1383—1391.
- [20] 吴顺川, 郭超, 高永涛, 等. 岩体破裂震源定位问题探讨与展望. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(5): 874—891.
- [21] 许江, 李树春, 唐晓军, 等. 单轴压缩下岩石声发射定位实验的影响因素分析. *岩石力学与工程学报*, 2008(4): 765—772.
- [22] Alimoradi A, Moradzadeh A, Naderi R, et al. Prediction of geological hazardous zones in front of a tunnel face using TSP-203 and artificial neural networks. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, 23(6): 711—717.
- [23] Aben FM, Brantut N, Mitchell TM, et al. Rupture energetics in crustal rock from laboratory-scale seismic tomography. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(13): 7337—7344.
- [24] Xue GQ, Yan YJ, Li X, et al. Transient electromagnetic S-inversion in tunnel prediction. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(18): L18403.
- [25] Chambers JE, Wilkinson PB, Wardrop D, et al. Bedrock detection beneath river terrace deposits using three-dimensional electrical resistivity tomography. *Geomorphology*, 2012, 177: 17—25.
- [26] Legchenko A, Baltassat JM, Beauce A, et al. Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists. *Journal of Applied Geophysics*, 2002, 50(1/2): 21—46.
- [27] Colombero C, Comina C, Vinciguerra S, et al. Microseismicity of an unstable rock mass: from field monitoring to laboratory testing. *Journal of Geophysical Research*, 2018, 123(2): 1673—1693.
- [28] Otto R, Button EA, Brettenebner H, et al. The application of TRT-true reflection tomography-at the unterwald tunnel. *Geophysics*, 2002; 20(2), 51—56.
- [29] 郑强强, 徐颖, 胡浩, 等. 单轴荷载作用下砂岩的破裂与速度结构层析成像. *岩土工程学报*, 2021, 43(6): 1069—1077.
- [30] 张艳博, 王科学, 姚旭龙, 等. 基于波速场成像技术的岩石损伤评价研究. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(12): 2404—2417.
- [31] Qian JW, Zhang HJ, Westman E. New time-lapse seismic tomographic scheme based on double-difference tomography and its application in monitoring temporal velocity variations caused by underground coal mining. *Geophysical Journal International*, 2018, 215(3): 2093—2104.
- [32] 袁兴赋, 熊长青, 喻兵良, 等. 复杂条件下金属矿山采空区三维地震探测研究. *工程地球物理学报*, 2019, 16(3): 314—320.

- [33] Liu G, Li T, Peng Y, et al. The ant algorithm for solving robot path planning problem// International conference on information technology and applications. 2005; 2, 25—27.
- [34] Kothari M, Postethwaite I. A probabilistically robust path planning algorithm for UAVs using rapidly-exploring random trees. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2013, 71(2): 231—253.
- [35] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The International Journal of Robotics Research* 1986, 5(1): 90—98.
- [36] Hu Q, Dong L. Acoustic emission source location and experimental verification for two-dimensional irregular complex structure. *Ieee Sensors Journal*, 2020, 20(5): 2679—2691.
- [37] Dong L, Hu Q, Tong X, et al. Velocity-free MS/AE source location method for three-dimensional hole-containing structures. *Engineering*, 2020, 6(7): 827—834.
- [38] Brantut N. Time-resolved tomography using acoustic emissions in the laboratory, and application to sandstone compaction. *Geophysical Journal International*, 2018, 213(3): 2177—2192.
- [39] Dong L, Tong X, Ma J. Quantitative investigation of tomographic effects in abnormal regions of complex structures. *Engineering*, 2020, 7(7): 1011—1022.
- [40] Dong L, Tong X, Hu Q, et al. Empty region identification method and experimental verification for the two-dimensional complex structure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 147: 104885.

Empty Region Identification and Source Location for Complex Structure

Dong Longjun* Zhang Yihan Hu Qingchun Tao Qing

The School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083

Abstract The structure of underground rock mass is complex, with multiple middle sections and multiple stopes coexisting, as well as special geological areas such as water bodies, faults, and high-stress concentrations are widely distributed. The dynamic changes and spatial differences of the rock wave velocity are obvious under engineering disturbances. This has caused many uncertainties in the location of the seismic source and the identification of abnormal structures in underground engineering. This paper systematically introduces the author's work on empty region identification and source location for complex structure during presiding over the National Science Fund for Excellent Young Scholars. In terms of source location, we proposed A^* localization methods without pre-measured velocity for complex structures, which introduces A^* search algorithm and uses grid points to accommodate complex structures with irregular holes. It also takes advantage of the velocity-free source location method. Compared with the traditional method, the source location method shows higher accuracy. In terms of empty region identification, we adopted an improved three-dimensional (3D) tomography method combining passive acoustic emission acquisition and active ultrasonic measurements. The imaging results under the influence of 7 factors are quantitatively analyzed. The optimal input parameters based on the quantitative results can significantly improve the inversion accuracy. Furthermore, in view of the problem that the tomography methods are greatly affected by various parameters and limited by wave velocity difference, we propose a new method for empty region identification in the two-dimensional complex structure. The simulation and test results verify the availability and feasibility of the method. The above work provides a theoretical basis and technical means for the detection of potential underground dangerous area, and is of great significance for the prevention and control of engineering disasters.

Keywords acoustic emission; microseismic; source location; tomography; empty region identification

(责任编辑 魏鹏飞)

* Corresponding Author, Email: lj.dong@csu.edu.cn