

# 基于声发射的岩石损伤三维成像传感器动态优化方法研究

李雅哲

华北理工大学理学院, 河北 唐山

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月18日; 发布日期: 2026年5月28日

## 摘要

针对传统岩石损伤探测中传感器静态布设带来的信息不全、难以获取三维空间精细损伤分布的问题, 本文提出了一种基于声发射技术的动态优化布设与三维损伤成像方法。具体来说, 先利用初至波走时反演构建初始波场矩阵, 再通过KD树聚类把损伤区域划分出来。对于每个聚类出来的损伤子区, 融合RANSAC和HOUGH变换两种算法去拟合出概率较高的损伤路径, 然后动态调整传感器的位置, 做第二次探测, 并把新得到的波速场矩阵和初始矩阵合并到一起。最后用克里金插值算法生成完整的波速场矩阵, 进而反演出岩石内部损伤的三维分布情况。总的来说, 这套方法为岩石内部损伤的精细化探测提供了一种动态优化传感器布设的新思路。通过分区聚焦探测加上多源数据融合, 有望在降低探测成本的同时, 提高成像的完整性和定位精度, 也能为地质工程中的灾害预警提供一些实用的技术参考。

## 关键词

声发射, KD树聚类, RANSAC算法, HOUGH变换, 克里金插值

# Research on Dynamic Optimization Method of Sensors for Rock Damage 3D Imaging Based on Acoustic Emission

Yazhe Li

College of Science, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

Received: April 25, 2026; accepted: May 18, 2026; published: May 28, 2026

## Abstract

Aiming at the problem of incomplete information and difficulty in obtaining fine damage distribution

文章引用: 李雅哲. 基于声发射的岩石损伤三维成像传感器动态优化方法研究[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(3): 527-536. DOI: 10.12677/jsta.2026.143053

in three-dimensional space caused by static layout of sensors in traditional rock damage detection, this paper proposes a dynamic optimization layout and three-dimensional damage imaging method based on acoustic emission technology. Specifically, the initial wave field matrix is constructed by using the first arrival travel time inversion, and then the damage area is divided by KD tree clustering. For each clustered damage sub-region, the two algorithms of RANSAC and HOUGH transform are fused to fit the damage path with higher probability, and then the position of the sensor is dynamically adjusted for the second detection, and the newly obtained wave velocity field matrix and the initial matrix are merged together. Finally, the Kriging interpolation algorithm is used to generate a complete wave velocity field matrix, and then the three-dimensional distribution of rock internal damage is inverted. In general, this method provides a new idea for dynamic optimization of sensor layout for fine detection of rock internal damage. Through the partition focusing detection combined with multi-source data fusion, it is expected to improve the integrity and positioning accuracy of imaging while reducing the detection cost, and also provide some practical technical reference for disaster warning in geological engineering.

## Keywords

Acoustic Emission, KD-Tree Clustering, RANSAC Algorithm, HOUGH Transform, Kriging Interpolation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

岩体探测是矿产资源勘探、地下工程建设和地质灾害防治的基础。随着资源需求不断增长,工程活动逐步向深部复杂地质条件推进,岩石探测技术的重要性也越发突出。声发射技术能实时、无损地采集岩石内部微破裂产生的弹性波信号,从而反演出损伤演化过程,现在已经是岩石力学领域里一种常用的探测手段[1][2]。

传感器怎么布置,直接影响声发射探测的数据质量和成像精度。近几年,波速场成像技术通过反演弹性波走时数据来重构介质速度场,为岩石损伤表征提供了有力工具[3]。张艳博等人就用波速成像实现了岩石破裂过程中损伤区域的三维可视化,清楚看到了损伤局部化的现象[4]。

不过,目前的研究还是有一些问题没解决好。传统的波速场重构大多采用传感器均匀布设的方案,没有针对损伤区域的空间分布做专门设计。实际上,岩石破坏过程中损伤往往集中在某些局部区域,声发射事件也多在这些地方密集发生。均匀布设虽然能覆盖整个监测区域,但关键损伤区域常常落在传感器阵列的“盲区”或者边缘,导致射线覆盖不够密,成像精度明显下降。

传感器布设方案对探测成本和精度的影响,也一直没有得到足够重视。传统做法是用固定传感器一次性采集数据,这种“被动采集”的模式不能根据初步探测结果动态调整观测系统,结果就是射线路径冗余、关键区域覆盖不足,很难在有限传感器数量下达到最优成像效果。现在大多数研究还是集中在探测技术本身,至于传感器位置优化这个探测前期的关键环节,讨论得还远远不够。

波速场成像精度受限于射线路径的空间覆盖均匀性,传统方法对低速异常区域的识别能力有限,近些年来,研究者尝试借助联合初至波与尾波信息提升成像精度[5],但传感器位置对射线覆盖的决定性作用仍未得到充分挖掘。传感器优化布局作为连接探测技术与成像质量的桥梁,对于提升岩石损伤三维成像的精度与效率具有关键意义。

近几年,岩石力学实验和工程监测对传感布局的要求越来越高,相关优化方法也逐渐系统起来。在众多优化思路中,基于克拉美罗下界(CRLB)的框架用得比较广泛。芮艺超[6]等人在中南大学学位论文相关工作中,针对波速未知的情况,利用CRLB构建了传感器网络布局的优化函数,再用改进的遗传算法求解,最终得到最优的布设方案。这套方法通过了模拟和声发射实验的检验,可行性得到了验证,系统地解决了波速未知条件下的布网难题,具备较好的通用性和计算效率。

动态布设和自适应优化是这一领域较新的探索方向。在专利方面已出现基于概率密度分布场的微震定位与传感器布局优化方案[7],其做法是先建立微震事件的概率密度分布场,从而将误差的空间分布量化出来,提前圈定高风险区,再据此刻画传感器的最佳安放位置并给出布局调整建议。这种方法已经有了“动态调整”的雏形,即靠微震事件的概率密度分布来引导传感器布局的变动。但它所依赖的是先验统计信息,而不是实时探测反馈,并且优化的落脚点依然是源定位精度。

针对上述问题,本文提出一种基于声发射技术的传感器动态优化布设与三维损伤成像方法,该方法首先借助初至波走时反演构建初始波速场,通过KD树聚类识别潜在损伤区域;其次,融合RANSAC与HOUGH变换算法拟合高概率损伤路径,动态调整传感器布设位置以实施二次探测,最后,基于克里金插值构建完整波速场矩阵,反演岩石内部损伤三维分布。本文旨在通过传感器布局的动态优化,实现从“被动采集”到“主动优化”的技术转变,为岩石损伤高精度成像提供新的技术路径。

已有研究主要关注传感器布局对震源定位精度的影响及优化方法,本文则将目标从定位精度拓展到波速场成像质量。在策略上,已有工作多采用一次性固定布设,传感器位置一旦定下就不再变化。本文提出动态优化,形成“初探→识别→优化→重探→成像”的闭环,让观测系统能根据初步结果自动调整。从技术体系看,以往讨论大多停留在单一环节,要么聚焦优化算法(如CRLB结合遗传算法、PSO网格搜索),要么分析布局因素对定位或成像精度的影响。本文构建了覆盖全流程的闭环框架,把传感器布局从探测前的静态设计,变成贯穿整个探测过程的动态变量,实现了观测系统与损伤演化过程的自适应匹配。总体而言,本文在已有基础上,通过优化目标从定位精度转向成像质量、策略从固定布设转向动态优化、体系从单一环节转向闭环框架,为岩石损伤高精度成像提供了新思路,也推动了从“被动采集”到“主动优化”的技术转换。

## 2. 传感器初始部署与数据采集

### 2.1. 传感器布置

对于传感器的初始布置,采取一般的布置方案,在探测物体任意两个相对的表面上均匀布置传感器,发射与接收传感器相对放置且一一对应,见图1。初始布置应尽可能覆盖大部分物体,为数据采集工作做好前期准备。为了方便进行后续工作,对传感器进行编号,将发射传感器记为奇数标号(1, 3, 5...),接收传感器记为偶数标号(2, 4, 6...)。把探测物体置于三维坐标系中,每个传感器都对应于一个三维点记为 $Sensor(x, y, z)$ 。

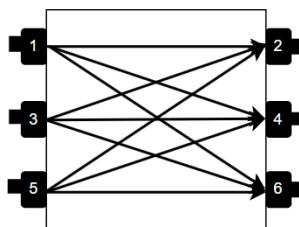


Figure 1. Layout diagram of acoustic emission sensors

图 1. 声发射传感器布设示意图

## 2.2. 传感器距离测量和时间收集

### 2.2.1. 距离测量

每个发射传感器与所有的接收传感器之间都存在信号传递, 假设有  $n$  对传感器(发射与接收传感器各  $n$  个), 共有  $n*n$  个信号路径, 所以需要测量  $n*n$  个传感器距离。对于任意一对发射传感器

$Sensor_{2n-1}(x_{2n-1}, y_{2n-1}, z_{2n-1})$ , 接收传感器  $Sensor_{2n}(x_{2n}, y_{2n}, z_{2n})$  之间的距离  $d_{2n-1}^{2n}$  测量, 采用空间中两点间的距离公式

$$d_{2n-1}^{2n} = \sqrt{(x_{2n-1} - x_{2n})^2 + (y_{2n-1} - y_{2n})^2 + (z_{2n-1} - z_{2n})^2} \quad (1)$$

计算每对传感器间的距离。

### 2.2.2. 时间收集

采用声发射技术, 就是利用信号传播的时间差来体现岩石内部的结构。发射, 接收传感器间的时间差用  $t_{2n-1}^{2n}$  来表示, 收集所有信号路径的时间, 为速度计算做准备。

## 3. 三维速度场构建

### 3.1. 网格离散化

一个长方体尽可能包裹物体, 将其置于三维坐标系中, 使其紧靠着坐标轴。将长方体的长宽高离散到坐标轴上, 传感器的布置位置就对应坐标轴中。把岩石内部的结构都离散到三维网格上, 将复杂的内部特点转换为研究三维空间中点的速度值。

### 3.2. 信号路径速度处理

每条信号路径都有对应的传播距离和时间, 通过公式

$$v_{2n-1}^{2n} = \frac{d_{2n-1}^{2n}}{t_{2n-1}^{2n}} \quad (2)$$

计算路径速度。假设每条路径经过的点的速度相同, 对于多次经过的点取速度的最大值, 因为这一点有多个速度且值不同, 这就表示多个路径速度不同的原因不是这一点引起的, 所以取最好的情况, 也就是最大值。

空间中两点确定一直线, 在这里用路径两端的传感器坐标来构成直线, 表示成参数形式, 便于遍历直线上的每个不同的点。直线的方向、初始点和参数方程如下:

$$n_{2n-1}^{2n} = (x_{2n} - x_{2n-1}, y_{2n} - y_{2n-1}, z_{2n} - z_{2n-1}) \quad (3)$$

$$o_{2n-1}^{2n} = (x_{2n-1}, y_{2n-1}, z_{2n-1}) \quad (4)$$

$$l_{2n-1}^{2n} = o_{2n-1}^{2n} + t_{2n-1}^{2n} \cdot n_{2n-1}^{2n} \quad (5)$$

当参数  $t_{2n-1}^{2n}$  在 0~1 上取值时, 相应的参数方程也会取直线上始末两点间的点。特别的, 当  $t_{2n-1}^{2n}$  为 0 时, 遍历点为发射传感器坐标  $Sensor_{2n-1}(x_{2n-1}, y_{2n-1}, z_{2n-1})$ , 当  $t_{2n-1}^{2n}$  为 1 时, 遍历点为接收传感器坐标  $Sensor_{2n}(x_{2n}, y_{2n}, z_{2n})$ 。将直线的速度赋值给直线上的每个点, 假如点上已经有值就取两者的最大值, 所有直线没有遍历过的点速度值不变(保持为 0)。通过上述方法可以将三维速度场初步完善, 为后续方法做基础的数据准备。

## 4. 异常区域检测

### 4.1. 异常点识别

基于三维速度场，选取异常速度阈值  $v_T$ ，根据速度的最大值和最小值，将其差的 30% 或 40% 与最小值加和作为异常速度的临界值。之所以选速度较小的值，是因为岩石内部可能存在裂隙，而声发射技术发射的声波在空气介质中的传播速度没有在岩层介质中大，经过裂隙的信号路径的速度就会偏小。根据速度阈值遍历三维速度矩阵，标记速度值小于阈值的三维点为异常点  $V_A(x_A, y_A, z_A)$ ，同时将异常点周围三维空间 26 领域内的点也标记为异常点。

### 4.2. 异常点聚类

#### 4.2.1. KD 树加速搜索

KD树是一种用于快速检索  $k$  维空间数据的树形结构，常用于范围搜索和最近邻搜索。它通过空间划分实现高效搜索，可视为二叉搜索树在多维空间的扩展。

本文利用三维KD树加速异常点聚类。构建时，按维度轮流划分：第一层以  $x$  轴划分，取中位数点为根节点，小于  $x$  坐标的点入左子树，大于的入右子树；第二层对左右子树按  $y$  轴划分，同样取中位数点作为子树的根节点，并递归划分子树；第三层按  $z$  轴划分；后续层重复  $x \rightarrow y \rightarrow z$  的顺序，直至每个子区域仅剩一个点(叶子节点)，最终形成由速度异常点构成的三维KD树。

#### 4.2.2. 聚类划分区域

根据异常点空间位置和速度信息通过KD树进行聚类。选择每个异常点作为聚类中心，计算周围异常点到聚类中心  $(x_C, y_C, z_C)$  的距离

$$d_{cluster} = \sqrt{(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 + (z_A - z_C)^2} \quad (6)$$

以及两点间速度差的绝对值

$$v_{cluster} = |v_A - v_C| \quad (7)$$

计算进行聚类的判断因子

$$u_{cluster} = u_1 \cdot d_{cluster} + u_2 \cdot v_{cluster} \quad (8)$$

$u_1$  和  $u_2$  一般取 1 和 2，本发明主要依据速度值是否相近来进行聚类划分，也可根据具体情况调整相关的系数。给定一聚类中心和相关的聚类阈值  $u_T$ ，根据KD树快速定位聚类中心在树中的位置，利用树的性质搜索聚类中心周围的异常点，比较其判断因子与聚类阈值的关系，将小于阈值的异常点归为一类。经过多次的异常点聚类，可以将异常区域进行划分。

## 5. 直线拟合与精细化搜索

### 5.1. RANSAC 算法拟合直线

针对每个聚类随机选择两个异常点  $V_{A1}(x_{A1}, y_{A1}, z_{A1})$ ， $V_{A2}(x_{A2}, y_{A2}, z_{A2})$  拟合直线，直线的方向向量和参数方程如下：

$$\begin{aligned} n_R &= (x_{A1} - x_{A2}, y_{A1} - y_{A2}, z_{A1} - z_{A2}) \\ l_R &= V_{A1} + t_R \cdot n_R \end{aligned} \quad (9)$$

利用  $V_{A1}$  指向  $V_{A2}$  的向量  $f_R$ ，计算其他异常点  $V_A(x_A, y_A, z_A)$  到直线的距离，

$$f_R = (x_A - x_{A1}, y_A - y_{A1}, z_A - z_{A1})$$

$$d_R = \frac{\|f_R \times n_R\|}{\|n_R\|} \quad (10)$$

$\|\cdot\|$ 表示向量的模长。给定距离阈值  $d_T$ ，将距离小于阈值的异常点视为直线的内点同时统计内点的个数。根据公式估计RANSAC算法随机采样的次数  $k$ ：

$$k = \frac{\log(1-p)}{\log(1-\omega^q)} \quad (11)$$

其中： $p$ 是算法期望的成功概率，通常设为0.99（即99%的置信度）； $\omega$ 是数据集中内点的比例（例如，0.5表示50%的内点），实际应用中，内点比例  $\omega$  通常是未知的，可以初始估计一个值，然后根据每次迭代的内点数量动态调整； $q$ 是拟合模型所需的最小数据点数（例如，直线拟合需要2个点，平面拟合需要3个点）。本文取  $q=2$ ，进行直线拟合， $k$ 值有时也会设置一个最大迭代次数作为上限，避免计算时间过长。

经过  $k$ 次直线拟合后，可近似得到内点最多的直线。计算内点的重心  $V_w(x_w, y_w, z_w)$ ，

$$\begin{cases} x_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \\ y_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \\ z_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \end{cases} \quad (12)$$

其中  $N$ 为内点的个数，利用重心  $V_w(x_w, y_w, z_w)$ 和直线的方向向量  $n_R$ 重新拟合损伤路径，

$$l_s = V_w + t_s \cdot n_R \quad (13)$$

将其内点的异常标记取消，针对聚类内剩余的异常点重新进行直线拟合。对于每个聚类都进行相应的操作，选取内点个数较多的直线并重新拟合损伤路径。

## 5.2. HOUGH 变换细化投票

将损伤路径从笛卡尔坐标系变换到球面坐标系。在球面坐标系中可以借助向量与  $z$ 轴的夹角  $\varphi \in [0, \pi]$ ，向量在  $xoy$  平面的投影与  $x$ 轴的夹角  $\theta \in [0, 2\pi]$ ，原点到直线的距离  $r$  以及直线上的一点来确定直线在空间中的位置。计算损伤路径的相关参数  $\varphi_s, \theta_s, r_s$ ，扩大参数搜索范围  $\varphi \in [\varphi_s - 10^\circ, \varphi_s + 10^\circ]$ ， $\theta \in [\theta_s - 10^\circ, \theta_s + 10^\circ]$ ， $r \in [r_s - 2, r_s + 2]$ 。根据范围内的每个参数结合损伤路径的重心  $V_w$  确定新的三维直线，统计直线经过的异常点个数，进行精细化投票。选择票数最高的直线作为最优的损伤路径。

## 6. 传感器位置优化与速度场更新

### 6.1. 传感器位置优化

将得到的最优损伤路径向直线两端延长，直至与离散后的长方体表面相交，并计算交点。若两交点分别位于发射界面和接收界面，即处于传感器布置的初始界面上，则将其标记为可用于传感器位置优化的坐标；否则，因交点不在初始界面，后续优化可能导致布置困难、成本增加等问题，故予以剔除。由于单次探测所得速度矩阵不完整，依据标记的优化坐标重新布设传感器（总数不变），进行第二次三维速度测量，构建新的速度矩阵。

### 6.2. 速度场更新

通过二次速度矩阵与初始速度矩阵的融合，将第二次探测中高分辨率的三维异常点速度数据直接替

换初始速度矩阵相应位置的数据，构建更加完整的速度矩阵。基于融合后的三维速度矩阵，利用已知速度点通过克里金插值预测未知点速度。克里金插值的核心在于：两点属性值的差异与距离在一定范围内正相关，因此未知点可根据周围已知点的属性值推算得出。空间内某未知点  $V_0(x_0, y_0, z_0)$  速度估计值  $v'_0$  是部分已知点速度值的加权和

$$v'_0 = \sum_{i=1}^m v_i w_i \quad (14)$$

其中  $m$  是可以决定该点速度值的点数量(一般取该点周边一定数量的已知点)， $v_i$  代表第  $i$  个已知点的速度值， $w_i$  代表第  $i$  个已知点的权重。

为得到尽可能准确的结果， $w_i$  应使得点  $V_0(x_0, y_0, z_0)$  处估计值  $v'_0$  与真实值  $v_0$  之差最小，

$$E(v'_0 - v_0) = 0 \quad (15)$$

同时希望估计值  $v'_0$  与真实值  $v_0$  之差的方差尽可能小，即

$$\min(Var(v'_0 - v_0)) \quad (16)$$

因为空间是平稳的，空间任意一点处的速度值  $v = v(x, y, z)$  由区域平均值  $c$  和随机偏差  $R(x, y, z)$  组成，其中偏差的方差均为常数，即

$$\begin{aligned} v(x, y, z) &= R(x, y, z) + c \\ Var[R(x, y, z)] &= \sigma^2 \end{aligned} \quad (17)$$

写成期望形式则有

$$E(v) = c \quad (18)$$

由此可以推导出权重  $w_i$  的计算公式，

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_m \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{m1} & \cdots & \gamma_{mm} \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{m0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

对于  $v_i = v(x_i, y_i, z_i)$ ， $v_j = v(x_j, y_j, z_j)$ ，其半方差为：

$$\gamma_{ij} = \frac{(v_i - v_j)^2}{2} \quad (20)$$

其中  $\gamma_{ij}$  表示第  $i, j$  个邻域点间的半方差， $\lambda$  是常数，第 0 个领域点表示待求点本身。 $v_1, \dots, v_m$  已知， $\gamma_{11}, \dots, \gamma_{mm}$  可得。

利用已知的  $m \times m$  组距离 - 半方差关系： $(d_{11}, \gamma_{11}), \dots, (d_{mm}, \gamma_{mm})$  其中  $d_{ij}$  表示点  $i, j$  之间的距离，选择合适的函数形式，拟合函数  $\gamma = \gamma(d)$ 。在一定距离范围内，两点的差异性随两点的距离增大而增大，借助球形模型来拟合函数：

$$\gamma(d) = \begin{cases} C_0 + C_1 [1.5d/a - 0.5(d/a)^3], & 0 \leq d \leq a \\ C_0 + C_1, & d > a \end{cases} \quad (21)$$

其中  $C_0, C_1$  是待求参数， $a$  为作用的最大距离。为了得到更精准的结果，采用先分组再拟合的方法，按照

距离大小排序这  $m * m$  组关系, 再分组得到  $s$  个距离 - 半方差关系组  $g_1, g_2, \dots, g_s$ , 计算每组的平均距离和平均半方差  $d_{g_1}, \dots, d_{g_s}, \gamma_{g_1}, \dots, \gamma_{g_s}$ , 根据每组的平均距离和平均半方差拟合  $\gamma = \gamma(d)$ 。

利用拟合的函数和已知的距离  $d_{10}, \dots, d_{m0}$ , 计算出  $\gamma_{10}, \dots, \gamma_{m0}$  并代入到公式(19), 求得  $w_1, \dots, w_m$  的值。最后利用  $w_1, \dots, w_m$  和已知点的速度值  $v_1, \dots, v_m$ , 根据公式(14)计算未知点的速度估计值。针对三维速度矩阵的每一个未知点都进行相应的操作, 得到没有空值的速度矩阵。根据完整的三维速度矩阵来描述岩石内部的损伤情况。

## 7. 关键参数说明

关键参数主要包括速度阈值  $v_T$ 、距离阈值  $d_T$ 、随机采样次数  $k$ 、公式(19)中参数  $\lambda$  以及公式(21)中的参数  $a$ 。速度阈值  $v_T$  的选取一般根据速度矩阵中速度的最大值与最小值, 将其差的 30% 或 40% 与速度的最小值加和后得到。距离阈值  $d_T$  的选取要根据具体的异常点数据来决定, 如果异常点整体分布较密集, 可适当调低参数; 如果较稀疏就适当调高参数。随机采样次数  $k$  根据公式(11)得到, 其中  $p$  是算法期望的成功概率, 通常设为 0.99 (即 99% 的置信度);  $\omega$  是数据集中内点的比例, 一般取 0.5 或 0.6;  $q$  是拟合模型所需的最小数据点数, 本文用于直线拟合, 一般取  $q=2$  即可。参数  $\lambda$  是数学辅助量, 保证计算得到的权重和始终为 1。参数  $a$  是由球形模型拟合得到的空间自相关性的临界距离, 保证克里金插值的无偏性和精度。

## 8. 结果

本文基于理论分析与数值模拟, 从三维波速场反演、异常区域识别、损伤路径拟合到传感器动态优化进行系统推演, 未开展室内实验或现场实测, 得到以下结果。

### 8.1. 初始波速场构建结果

先对岩石模型做三维网格划分, 传感器按初始均匀位置布设, 再通过初至波走时反演出初始波速场矩阵。结果显示, 这种布设方式能拿到岩石整体的大致速度分布, 但对低速异常区域反映比较模糊, 射线覆盖也不够均匀, 很难真实刻画损伤集中的地方。这一步为后续异常识别和优化提供了基础数据。

### 8.2. 异常区域识别与聚类结果

按速度阈值标记异常点, 再用三维 KD 树做快速搜索和空间聚类。结果表明, 该方法能有效把岩石内部的低速异常区域分离出来, 聚类结果跟实际损伤分布比较吻合, 把零散的异常点归成几个损伤子区, 为下一步拟合损伤路径找准了目标。

### 8.3. 损伤路径拟合结果

针对每个损伤子区, 联合 RANSAC 算法和 HOUGH 变换进行拟合, 得到高概率的三维损伤路径。联合算法明显提升了路径识别的稳定性, 减少了噪声点的干扰, 能比较准确地反映裂隙的延伸方向, 也为后续传感器布设优化给出了明确依据。

### 8.4. 传感器动态优化与波速场更新结果

以损伤路径延伸的交点作为目标坐标, 在不增加传感器总数的情况下做二次布设, 然后更新速度场。把初始矩阵和二次矩阵融合起来, 再用克里金插值估计全场的速度。结果发现, 动态优化后射线覆盖更集中在损伤区域, 异常区识别更清晰, 三维波速场的连续性和整体性更强, 能更精细地反演出岩石内部的损伤分布。

## 8.5. 本章小结

本章通过理论推演和数值计算，完整展示了从初始波速场构建、异常聚类、损伤路径拟合到动态优化及速度场更新的全过程。对比后可以看出，所提方法在不增加传感器数量的前提下，明显提高了损伤区域的射线覆盖率和成像精度，为岩石损伤三维精细化成像提供了可靠的结果支撑。

## 9. 讨论

传统岩石损伤声发射探测有个老问题：传感器固定在一个位置不动，损伤区域的射线覆盖往往不够，三维损伤分布也很难精细刻画。针对这个，我们提出了一套传感器动态优化布设与三维损伤成像的方法，把探测模式从“被动等信号”变成了“主动去优化”。

跟传统的均匀布设或靠经验做静态优化不同，我们的方法不加传感器数量，而是分四步走：先用初至波走时反演建一个初始波速场；再用KD树聚类把损伤区域划分出来；接着联合RANSAC和HOUGH变换，把高概率的损伤路径拟合出来；最后沿着这条路径动态调整传感器位置，做二次聚焦探测，再通过克里金插值重构完整的波速场。相比遗传算法那种离线静态优化，我们的方法完全靠实测数据来调整布设，不需要复杂的先验假设，现场操作起来更方便。

这种方法比较适合室内岩石力学单轴或三轴加载试验中损伤演化的精细监测，也适合隧道掌子面、巷道围岩这类近场工程的局部损伤探测，特别是脆性岩石出现局部化破裂时的三维成像场景，可以为深部地下工程灾害预警提供量化依据。

当然，方法也有几个不太完善的地方。第一，得做二次探测和数据融合，像岩爆那种超快速破裂过程，来不及实时监测。第二，我们假设损伤路径是直的，但真实岩石破裂往往是网状或曲面形态，这里会有误差；另外速度阈值、聚类参数还得人工调，换了岩石类型通用性就差一些。第三，目前只用到了初至波的走时信息，没把振幅、频率等声发射的多特征参数融合进来，在复杂地质环境下的抗干扰能力还得加强。后续我们会重点研究实时在线自适应布设优化、针对复杂破裂形态的三维拟合、多源数据融合成像，也会做工程尺度的现场验证和优化，争取让这个更标准、更好用。

## 致 谢

本论文的顺利完成，离不开各位师长、同学和亲友的支持与帮助。首先，感谢我的指导老师，在论文的选题、研究思路与撰写过程中给予了悉心指导与宝贵建议。感谢实验室的同学们在研究过程中的交流与协作，为我提供了许多思路启发。同时，感谢家人与朋友的理解与支持，让我能够专注于研究工作。最后，向所有给予我帮助与鼓励的人致以诚挚的谢意！

## 参考文献

- [1] 姚旭龙, 张艳博, 孙林, 杨震, 刘祥鑫, 梁鹏. 基于区域相关性的岩石损伤声发射探测与成像方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2113-2123.
- [2] 王聚贤, 梁鹏, 张艳博, 姚旭龙, 于光远, 郭斌. 基于声发射 RA-AF 值与 kneedle 算法的岩石拉剪破裂分类研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S1): 3267-3279.
- [3] 张艳博, 王科学, 姚旭龙, 黄艳利, 孙林, 梁鹏, 田宝柱, 梁精龙. 基于波速场成像技术的岩石损伤评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(12): 2404-2417.
- [4] 张艳博, 姚旭龙, 梁鹏, 王科学, 孙林, 田宝柱, 刘祥鑫, 王善勇. 基于波速成像技术的岩石破裂演化及损伤局部化效应研究[J]. 中南大学学报(英文版), 2021, 28(9): 2752-2769.
- [5] Zhou, J., Liu, L., Zhao, Y., et al. (2024) An Improved Method for Calculating Wave Velocity Fields in Fractured Rock Based on Wave Propagation Probability. *Mathematics*, 12, Article No. 2177. <https://doi.org/10.3390/math12142177>

- [6] 芮艺超. 传感器网络布局优化与消减波速和异常到时误差影响的微震源定位方法的研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2022.
- [7] 徐奴文, 孙悦鹏, 肖培伟, 李彪, 夏勇, 李怀良, 刘军, 高峰, 杨静熙, 肖华波, 孙志强, 薄雾, 毛浩宇, 李鑫, 李壮. 基于概率密度分布场的微震定位与传感器布局优化方法及装置[P]. 中国: CN119355804A, 2025-01-24.