
基于蒙特卡洛模拟的微震源定位研究

摘要

本文旨在研究不同条件下，对矿山微震源进行定位的问题。

针对问题一，首先，对附件 1 数据进行数据处理，绘制出矿山甲各个探测器的空间分布图像。鉴于波速是恒常量，构造微震源可能存在的空间曲面，引入震源定位偏离度的概念，建立混合整数非线性规划模型，使用多重搜索算法进行求解，解微震源空间位置坐标的近似求解为(8824.2m,6543.2m,417.988m)。

针对问题二，首先，对附件 2 数据进行数据处理，考虑到波速在岩体传播过程中不为恒定常量，该问题可分为地震波速非恒定条件下单微震源和多微震源空间位置求解两种情况分别研究；若在同一立体空间，同一时间点存在多个微震源，对于建立的微震源反演模型的定位效果肯定会有负面影响，所以我们认为：该多微震源空间位置求解的“多微震源”可理解为：各个微震源都在某一个时刻点单独存在，只不过这些时刻点之间的间隔都特别小。那么，多微震源空间位置求解问题便可转化为到时参数不同的单微震源空间位置问题求解。其次，我们发现：矿山乙各探测器的到时数据大小都处于 0.0123ms~0.0642ms 之间，由质点运动学中时间间隔趋于 0 时，平均速率等于瞬时速率，推出波速和微震源空间坐标以及探测器到时参数的数学关系。最后，建立无波速参数的地震波速非恒定条件下单微震源反演数学模型，使用牛顿迭代法进行求解，求解得微震源空间坐标为(4968.06m, 8082.831m, -336.96m)。同理，可建得无波速参数的地震波速非恒定条件下多微震源反演数学模型，求解方法与单微震源反演数学模型一致。

针对问题三，首先，考虑到微震源位置等参数是自定的，出于对建立的微震源定位方法模型的有效性和普适性，使用蒙特卡洛模拟的方法对各个参数进行仿真处理，接着，通过问题一提出的“震源定位偏离度(m)”作为衡量正演基础上的反演误差的量化指标，最后，通过绘制蒙特卡洛过程中微震源偏离度的图像，评价该定位方法（数学模型）的稳健性。

关键词： 多重搜索算法 蒙特卡洛模拟 震源定位偏离度 非线性规划 牛顿迭代法

一、 问题重述

1.1 问题的背景

随着矿山数字化、信息化的发展，微震监测系统和微震检测技术在生产领域的应用越来越广泛。其中，微震源定位为微震检测技术的核心技术问题。通过正演或反演的方法建立数学模型，研究不同条件下微震源的空间位置坐标和发震时刻和包括却不仅限于波速、发震时刻等物理和数学参数的关系。

1.2 问题的提出

(1) 在假设地震波速恒定为 5km/s 即速度的大小和方向均保持不变且只存在一个微震源的条件下，根据表 1 提供的相关数据，建立数学模型，对微震源位置进行近似求解。

(2) 若波速在传播时为变量，根据表 2，建立无波速参数的数学模型对微震源进行近似定位。

(3) 若震源位置等参数自定（需为三维定常量），建立数学模型，对震源进行正演仿真探索并在正演基础上使反演误差尽可能小且定位结果较稳健。

二、 问题分析

2.1 问题一的分析

问题一要求在地震波速恒定且只存在一个微震源的条件下，根据题目表 1 所给的数据，建立相关的数学模型，进行微震源空间位置的近似求解。我们认为，地震波速恒定，其“恒定”可以理解为：“地震波速在任意时刻其大小和方向都是不变的，即物理学上对速度恒定的通俗解释”。因为在三维立体空间中寻找微震源位置，使其在微震时间发生后，发出的地震波到 8 个探测器的距离都与表 1 中各个探测器探测到的微震时间到与地震波速大小乘积完全相同，其运算量是十分庞大的，空间位置等物理参数也难以确定，且在模型的运算空间中不一定存在极其精确的解，所以我们必须根据表 1 提供的数据进行处理，进而确定问题 1 中数学模型参数的值。所以问题一的本质是：通过对表 1 数据进行处理，从而确定微震源反演数学模型的相关参数，对模型进行求解，得到微震源空间位置的近似求解。

2.2 问题二的分析

问题二要求假设波速在岩体传播过程中不为恒定常量的条件下，建立无波速参数的反演数学模型，对微震源进行近似定位。经思考，发现：该问题可分为地震波速非恒定条件下单微震源和多微震源空间位置求解两种情况分别研究；通过查阅相关文献资料，从题目所给数据和实际生活中微震探测的角度出发，我们认为研究在三维立体空间中的某一时刻同时存在多个微震源的空间位置求解是没有实际意义的，原因如下：

1. 实际生产中，微震持续时间很短，一般只有零点几秒左右，在同一个立体空间中某一时刻同时存在多个微震源的可能性很小，即使存在，也可以看成是一个等效的单微震源，其基本参数如：空间位置参数，波速参数等为各个微震源的对应参数的矢量和或者标量和。对等效微震源进行空间的近似求解对于微震探测没有太大的实际应用意义。

2. 若在同一立体空间中某一时刻同时存在多个微震源，那么每个微震源产生的地震波会在传播过程中发生干涉等现象（波速在岩体传播过程中不为常量），因此当某一时刻同时存在微震源的个数过多时，根据表 2 建立出来的无波速参数的数学反演模型对震源的空间坐标位置求解效果就会变得特别差，那么该模型没有太大的应用性和实际意义。

因此，我们认为：多微震源空间位置求解的“多微震源”可理解为：各个微震源都在某一个时刻点单独存在，只不过这些时刻点之间的间隔都特别小。那么，多微震源空间位置求解问题便可转化为到时参数不同的单微震源空间位置问题求解。

对于单微震源空间位置求解，通过表 2 所给数据，建立波速与微震源到探测器距离以及到时的物理数学关系，建立无波速参数的数学反演模型，使用牛顿法对微震源空间坐标进行近似求解。

对于多微震源空间位置求解，即对单微震源的情况下建立的数学模型中的到时参数进行调整，修改即可。

2.3 问题三的分析

问题三要求进行微震源正演仿真探索，在任意参数都自定（须为三维常向量）的情况下，建立数学模型并寻找一种合适的定位方法，确保在正演基础上的反演误差尽可能小以及使定位较稳健。

所谓正演，即在震源已知的条件下，剖析地震波从震源到探测器之间单向传播特性的数学或物理过程，与反演相对。为了让本题提出的定位方法（数学模型）具有普适性，首先采用蒙特卡洛模拟的方法确定微震源位置，探测器个数，探测器位置，波速等参数的取值（须为三维常向量），对微震监测过程进行仿真，接着通过问题一提出的“震源定位偏离度(m)”作为衡量正演基础上的反演误差的量化指标，最后，通过绘制蒙特卡洛过程中微震源偏离度的图像，评价该定位方法（数学模型）的稳健性。

三、 问题假设

- (1) 假设一：探测器和微震源都为均匀的质点。
- (2) 假设二：任意微震源从产生地震波到探测器接收到信号这个过程中，都不存在地震、地表振动等对地震波的传播有影响的事件发生。
- (3) 假设三：探测器所处的地质环境的介质，如岩层等空间分布是均匀的。

四、 符号假设

| 符号 | 含义 |
|----|----------------|
| td | 探测器接收到波动时的到时参数 |

五、 模型的建立与求解

5.1 问题一：单震源且地震波速恒定条件下微震源空间位置求解

问题一要求在假设地震波速恒定为 5km/s 且只存在一个微震源的条件下，选择合适的参数，建立微震源反演数学模型，对微震源空间位置进行近似求解。我们认为：结合相关条件，该问题可具象化为在一个三维立体空间中寻找一个震源点，当地震发生后，使其发出的地震波到 8 个探测器（T1~T8）的距离与表 1 中各个探测器探测到的微震时间到时与地震波速大小乘积大致相同，该震源点的空间坐标即为微震源空间位置的近似求解。

5.1.1 数据预处理

对于题目所给的表 1 数据，使用 MATLAB 绘制出矿山甲的探测器空间分布的图像：

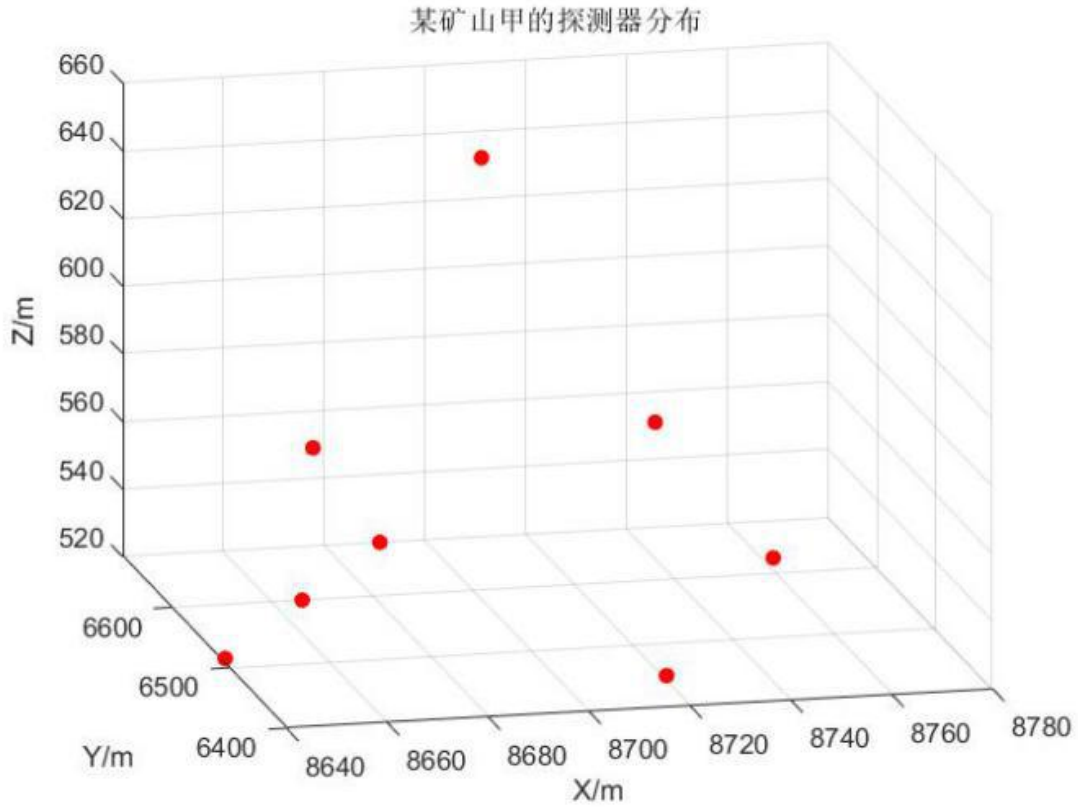


图 1 矿山甲探测器空间分布图像

从图像可得到如下描述性统计信息：

1. 探测器 T3、T5、T6、T7 的 Z 坐标是相等的，都是 520m，即这四个探测器相对水平高度是一致的。
2. 这 8 个探测器的 X, Y, Z 坐标都分别位于 [8641m, 8761m]，[6449m, 6684m]，[520m, 647m] 的范围内。
3. 从震动发生开始到探测器检测到信号，地震波传播距离最长达 250m，最短达 174.5m

5.1.2 微震源反演数学模型相关参数的确定

因需要根据表 1 所给的数据建立与微震源位置的反演数学模型，所以需要确定如地震波速，岩层稳定性，微震源空间范围等参数。从问题一可知地震波速是恒定不变的，则可视为发生震动时，波在传播过程中方向，大小是不变的，亦可推测出岩层稳定性等参数都基本不变，且不会对后续建立的反演数学模型产生影响。但是，鉴于在无穷域中求解数学模型是十分复杂的，因此需要确定微震源空间位置参数，即确定微震源空间坐标 x_0 ， y_0 ， z_0 的取值区间 XLocation、YLocation、ZLocation。

因微震源定位原理基于公式：

$$\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} = v \cdot (t_i - t_0)$$

上式中，探测器 $i(i=1,2,\dots,n)$ 的坐标为 (x_i, y_i, z_i) 地震波速度为 v ， t_i 为第 i 个探测器的到时数据， (x_0, y_0, z_0) 为微震源空间位置， t_0 为微震事件发生时刻。

结合表 1 数据可得：上式探测器的到时数据与微震事件发生时刻的差值即为表 1 所记录的到时数据。以探测器的空间坐标为球心，地震波速大小与到时数据的乘积为半径，

使用 MATLAB 绘制出 8 个球面，如图所示：

问题1微震源可能出现的区域

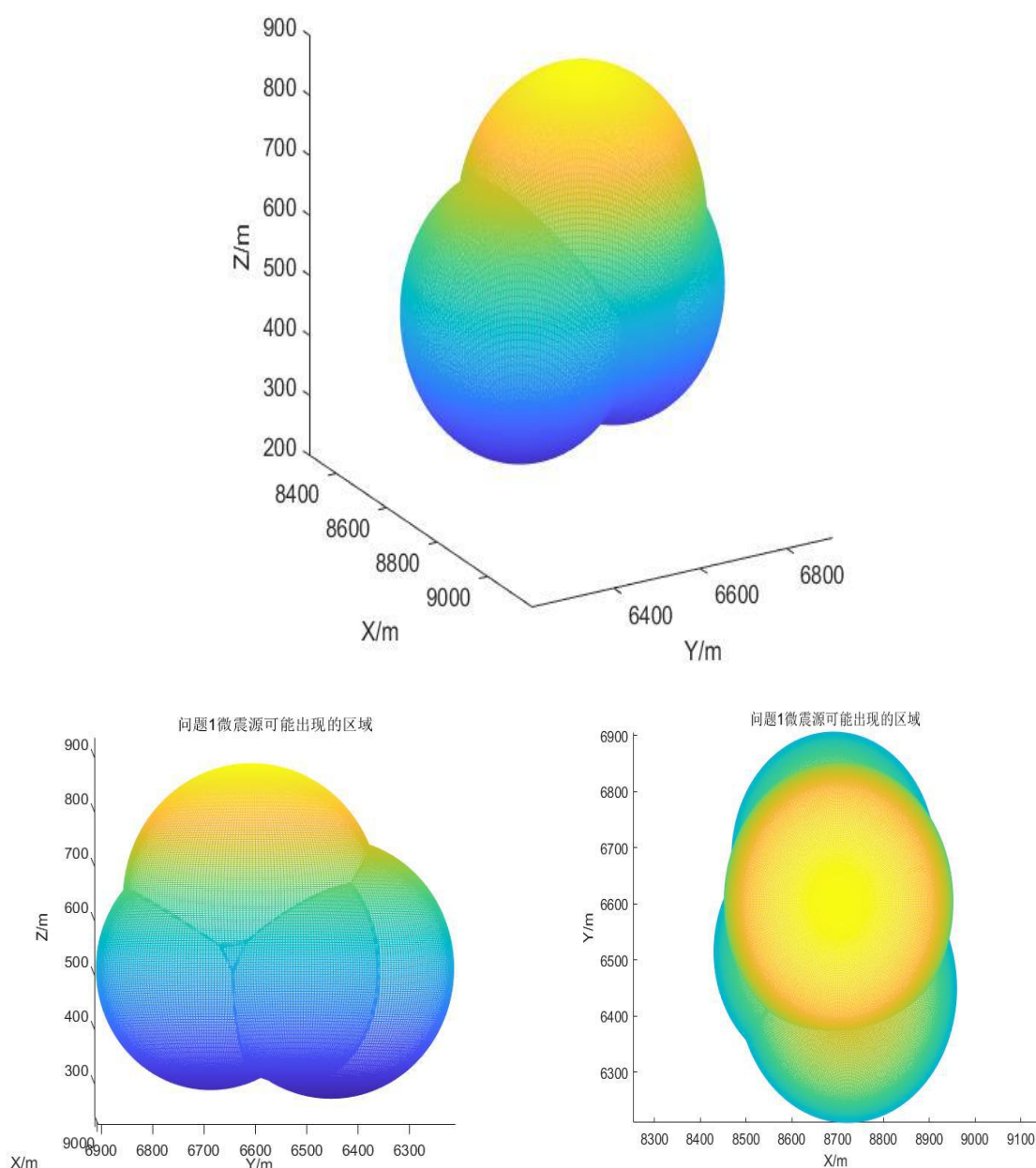


图 2 微震源可能出现的区域以及球面截面图

从立体几何意义易知：球面代表与探测器距离为地震波速大小与到时数据的乘积大小的点集合，很明显，微震源空间位置坐标 (x_0, y_0, z_0) 就在这 8 个球面上，为了使建立的模型最大程度上契合表 1 所给的空间位置坐标等数据以及提升后续建立模型的性能，降低算法的时间复杂度，我们分别选择球面相交的平面的 X, Y, Z 坐标的最大值和最小值作为 XLocation、YLocation、ZLocation 的区间边界值，通过 MATLAB 计算球面相交平面坐标得到微震源空间位置参数：

XLocation=[8453.16m, 8939.78m], YLocation=[6359.21m, 6755.98m], ZLocation=[321.48m, 750.48m]

5.1.3 单震源且地震波速恒定条件下微震源反演模型的建立以及求解

结合前两小节所得，给出**震源定位偏离度**（单位为 m）定义：

$$JIN = \sum_{i=1}^8 \left(\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - v \cdot td \right)$$

该式中 (x, y, z) 为微震源空间坐标的可能取值， td 为探测器的到时参数与**微震事件发生时刻**（可理解为 $t_0=0$ ）的差值。明显地，空间坐标的震源定位偏离度越大，说明该坐标在问题一的条件下，在数值上越偏离微震源空间位置坐标 (x_0, y_0, z_0) 的精确值；反之，空间坐标的震源定位偏离度越小，说明该坐标在数值上越接近微震源空间位置坐标 (x_0, y_0, z_0) 的精确取值。

微震源空间位置坐标的求解便可转化成在设置微震源空间参数 XLocation、YLocation、ZLocation 的条件下，计算震源定位偏离度极小值（不一定为最小值），从而得到微震源空间位置坐标 (x_0, y_0, z_0) 的近似求解的问题。

建立单震源且地震波速恒定条件下微震源反演模型（实质上是一个**混合整数非线性规划模型**）：

$$\begin{cases} \min JIN = \sum_{i=1}^8 \left| \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - 5 \cdot td \right| \\ s.t. \begin{cases} 8453.16 \leq x \leq 8939.78 \\ 6359.21 \leq y \leq 6755.98 \\ 321.488 \leq z \leq 750.594 \end{cases} \end{cases}$$

使用**多重搜索算法**，出于对模型的简易型和求解精确度的综合考量，以步长为 0.5m 进行迭代运算，得到微震源空间位置坐标的近似求解为**(8824.2m, 6543.2m, 417.988m)**，此时该坐标的震源定位偏离度为**136.1886m**。

5.2 问题二：地震波速非恒定条件下微震源空间位置求解

问题二要求假设波速在岩体传播过程中不为恒常量的条件下，建立无波速参数的反演数学模型，对微震源进行近似定位。根据表 2 所给数据，建立波速与微震源到探测器距离以及到时的物理数学关系，建立无波速参数的单微震源数学反演模型，使用牛顿法进行迭代运算，对微震源空间坐标进行近似求解，并对建立的模型进行到时参数的修改，得到无波速参数的多微震源数学反演模型。

5.2.1 数据预处理

对于本题所给的表 2 数据，使用 MATLAB 绘制出矿山乙的探测器空间分布的图像：

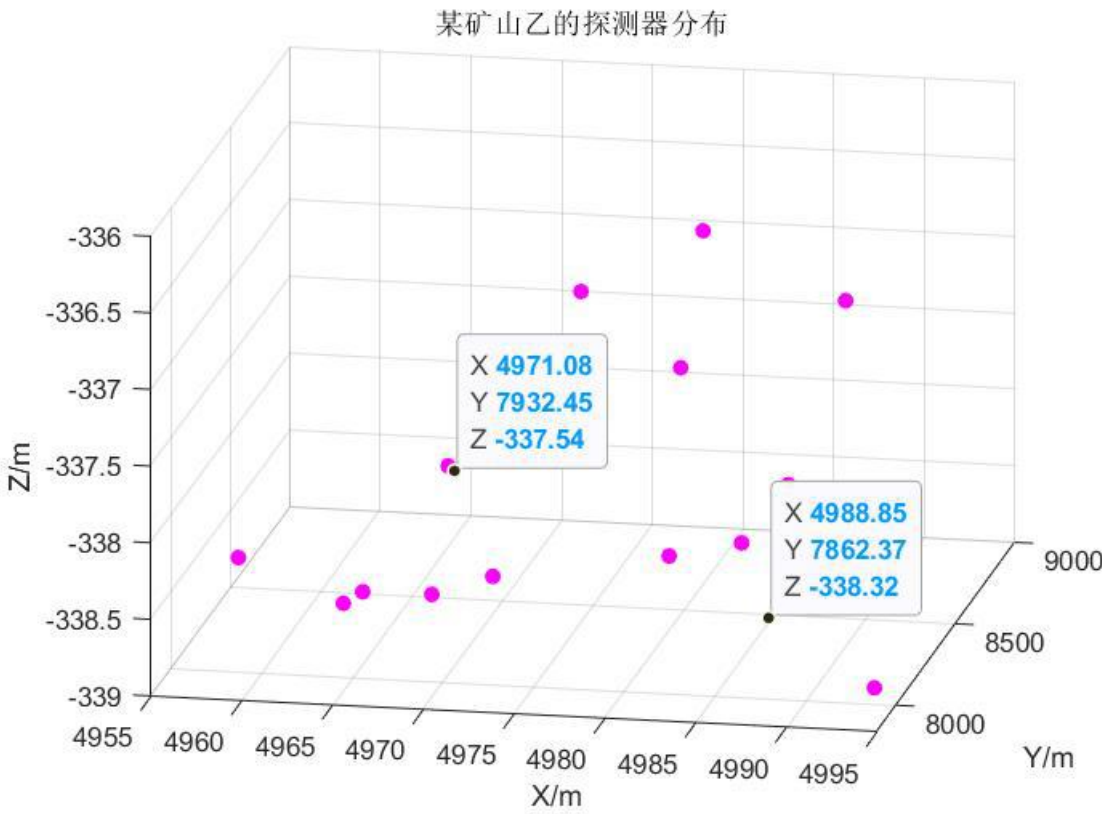


图 3 矿山乙探测器空间分布图像

从图像可得到如下描述性统计信息：

- 1. 这 16 个探测器（S1~S16）的 X, Y, Z 坐标都分别位于[4959.441m, 4994.81m]，[7835.331m, 8847.443m]，[-338.72m, -336.21m]的范围内。
- 2. 这 16 个探测器的到时最大可达 64.2ms（S10，已在图 3 标出），最小可达 12.3ms（S3，已在图 3 标出），大部分探测器的到时集中分布在 20ms~25ms。

5.2.2 非恒定地震波速的参数表达

问题二要求在波速不为常恒量的条件下，建立反演数学模型，对微震源空间坐标进行近似求解。设 $t_0=0$ 时，微震源开始发出地震波，其波面如图所示：

$t_0=0$ 时，微震源发出地震波的波面

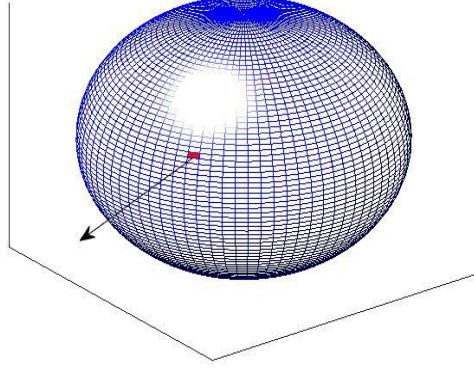


图 4 微震源地震波初始波面示意图

微震源产生的地震波波面上取一单位面积元，记为 P （如图 4 红色区域面积所示）。从微震源产生震动，微震源与探测器之间连线方向上的速度矢量记为 \mathbf{VT} ，其方向为从微震源到探测器（ \mathbf{VT} 可具象化如图 4 黑色箭头，箭头表示方向，线段长度表示大小），其大小推导如下：

设面积元 P 在时间 $t=0$ 时的位移大小为 0（通俗地理解，就是微震源刚刚发生产生地震波），在时间 $t=\Delta t$ 时，面积元代表的波动信号已经被探测器检测到，那么在时间间隔 Δt 内，其速度大小可表示为：

$$|\mathbf{VT}| = \frac{|\Delta r|}{|\Delta t - 0|}$$

上式中 $|\mathbf{VT}|$ 为单位面积元 P 从产生到被探测器检测到的时间段内，其速度矢量的大小的平均值。 Δr 为单位面积元 P 在 $t_0=0$ 时到 $t=\Delta t$ 这段时间间隔内，其位置矢量。

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，有：

$$|\mathbf{VT1}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta r|}{|\Delta t - 0|}$$

$|\mathbf{VT1}|$ 为单位面积元 P 的速度矢量大小的瞬时值。

实际生产中，微震持续时间很短，因此，可认为单位面积元 P 从产生到被探测器检测到的时间段内，其速度矢量的大小的瞬时值近似等于平均值，即：

$$|\mathbf{VT1}| \approx |\mathbf{VT}|$$

代入题目所给的探测器相关数据，得：

$$|\mathbf{VT}|_i = \frac{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}}{m_i}$$

其中， $i=1,2,\dots,16$ ，分别对应矿山乙探测器的编号（ $S1 \sim S16$ ）。 m_i 为各探测器探测到的到时数据， $|\mathbf{VT}|_i$ 为以各探测器与其对应地震波波面上单位面积元连线为方向的速度

矢量的数值大小，如下所示：



图 5 探测器对应速度矢量示意图

微震源从产生地震波到探测器捕捉到波动的过程中，地震波的波速会因为岩层的密度等性质的变化而发生大小或者方向的改变。而上面方向为波面单位面积元与对应探测器连线上，大小为平均速度的速度矢量的研究，可以很好地解决波从产生到被探测器捕捉到这个过程中波速的大小和方向的确定的问题。

5.2.3 地震波速非恒定条件下单微震源定位模型的建立和求解

问题二要求建立无波速参数的反演数学模型，并进行微震源近似定位，波速与到时等参数的数学物理关系已在前一节给出。

根据表 2 给出的数据，设探测器空间坐标与其到时参数的关系为：

$$f(x_i, y_i, z_i) = m_i$$

类比地，易得：

$$f(x_0, y_0, z_0) = 0$$

该表达式的物理意义可通俗地阐述为：微震源产生的地震波的波面到它自身的距离为 0。地震波速非恒定条件下单微震源空间坐标求解便可转化为在已知三元函数多个函数值及其自变量的取值的条件下，求解 $f(x, y, z)$ 的零点。

建立无波速参数的地震波速非恒定条件下单微震源反演数学模型：

$$\begin{cases} f(x_0, y_0, z_0) = 0 \\ f(x_1, y_1, z_1) = m_1 \\ f(x_2, y_2, z_2) = m_2 \\ \vdots \\ f(x_{16}, y_{16}, z_{16}) = m_{16} \\ |VT|_i = \frac{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}}{m_i}, i = 1, 2, \dots, 16 \end{cases}$$

使用牛顿迭代法对模型进行求解，其主要步骤如下图所示：

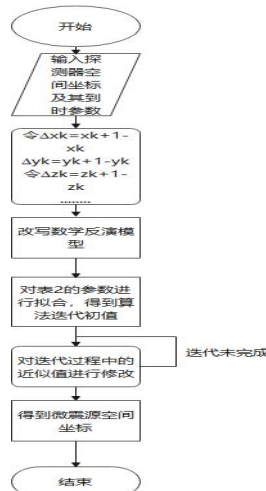


图 6 牛顿迭代法求解反演模型过程

在牛顿迭代法的一般性过程中，总是需要知道目标方程组或者目标模型的一个零点近似值，而本题因为各个到时参数数值都较小，接近于 0，使用 EXCEL 对表 2 数据进行拟合，得到到时参数最接近于 0 的一对空间坐标取值，并以此为算法的输入初值，选择合适的迭代次数和迭代精度对微震源进行反演，达到相对程度上较精确的求解。

观察模型的结构，取牛顿法最大迭代次数为 10 次，迭代精度为 0.001，使用 MATLAB 编写算法，求解得微震源空间坐标为(4968.06m, 8082.831m, -336.96m)。

5.2.4 地震波速非恒定条件下多微震源定位模型的建立和求解

引入发时 t_{begin} 和收时 t_{overi} ，其定义分别为：各微震源发生波动时时间点的绝对数值大小和探测器 i（编号）接收到波动信号时时间点的绝对数值大小，那么地震波从产生到被探测器接收到的这段时间间隔可表示为：

$$T = t_{overi} - t_{begin}$$

若在同一个立体空间中某一时刻同时存在多个微震源，那么每个微震源产生的地震波会在传播过程中发生干涉等现象（波速在岩体传播过程中不为常量），因此当某一时刻同时存在微震源的个数过多时，根据表 2 建立出来的无波速参数的数学反演模型对震源的空间坐标位置求解效果就会变得特别差，那么该模型没有太大的应用性和实际意义。

因此，我们认为：多微震源空间位置求解的“多微震源”可理解为：各个微震源都在某一个时刻点单独存在，只不过这些时刻点之间的间隔都特别小。那么，多微震源空间位置求解问题便可转化为发时和收时取值不同的单微震源空间位置求解问题。

那么结合前面小节所得，不难得到无波速参数的地震波速非恒定条件下多微震源反演数学模型：

$$\begin{cases} f(x_0, y_0, z_0) = t_{begin} \\ f(x_1, y_1, z_1) = t_{over1} - t_{begin} \\ \dots\dots\dots \\ f(x_i, y_i, z_i) = t_{overi} - t_{begin} \\ |VT|_i = \frac{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}}{t_{overi} - t_{begin}} \end{cases}$$

上式中 i 的大小取决于接收到微震源发出的地震波的信号的探测器的数量，若 $i=0$ ，则说明不存在对目标微震源定位的探测器。

该模型的求解方法与无波速参数的地震波速非恒定条件下单微震源反演数学模型一致，在此不再陈述。

5.3 问题三：微震源正演仿真探索及定位方法评价

问题三要求进行微震源正演仿真探索，在参数自定的条件下，寻找一种定位方法（建立数学模型），使得正演基础上的反演定位误差尽可能小以及使定位结果较稳健。

出于对定位方法的普适性的考虑，使用蒙特卡洛模拟的方法对微震监测过程进行仿真，并且根据问题一提出的“震源定位偏离度(m)”等概念提出定位方法（建立数学模型），绘制出蒙特卡洛过程中不同参数下震源定位偏离度的图像，对定位方法的稳健性进行评价。

5.3.1 微震源正演仿真探索准备

为了对定位方法的效果进行合理、准确地评价，建立目标空间 SP，使仿真过程中探测器和微震源的空间坐标都落入该三维空间中，使用 GeoGebra 绘制出图像，如下图

所示：

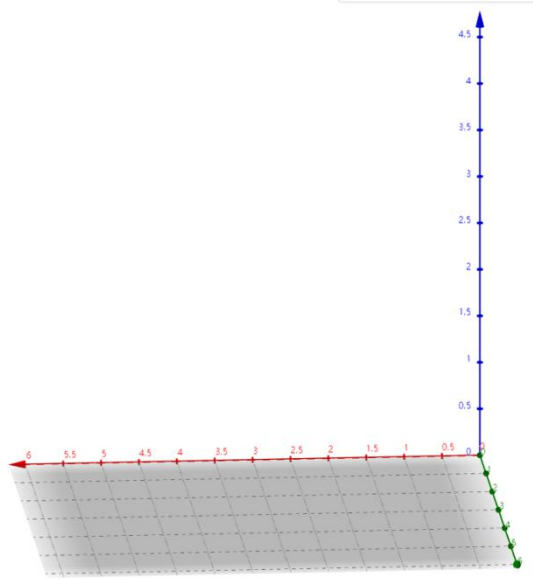


图 7 目标空间 SP 示意图

规定三个方向的坐标轴的初始刻度取值都从 0 开始，即接下来的蒙特卡洛模拟的过程中，探测器和微震源的空间坐标都为大于或等于 0 的数，使得定位方法正演基础上的反演误差便于计算。

5.3.2 基于蒙特卡洛模拟仿真的微震源定位方法模型的建立和求解

鉴于定位方法对实际生产应用的普适性和真实性，使用蒙特卡洛模拟的方法对微震监测的过程进行仿真。使用问题一提出的“震源定位偏离度(m)”的概念来度量定位方法模型在正演基础上的反演误差，若“震源定位偏离度 (m)”的数值越小，则说明定位方法的效果越好。

于是，给出蒙特卡洛模拟仿真的微震源定位方法模型（实质上是一个混合非整数规划模型）：

$$\begin{cases} \min JIN = \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - v_m \cdot (t_{over i} - t_{begin}) \right) \\ s.t \begin{cases} \min(x_1 - v_m \cdot (t_{over1} - t_{begin}), \dots, x_n - v_m \cdot (t_{overn} - t_{begin})) \leq x \leq \max(x_1 + v_m \cdot (t_{over1} - t_{begin}), \dots, x_n + v_m \cdot (t_{overn} - t_{begin})) \\ \min(y_1 - v_m \cdot (t_{over1} - t_{begin}), \dots, y_n - v_m \cdot (t_{overn} - t_{begin})) \leq y \leq \max(y_1 + v_m \cdot (t_{over1} - t_{begin}), \dots, y_n + v_m \cdot (t_{overn} - t_{begin})) \\ \min(z_1 - v_m \cdot (t_{over1} - t_{begin}), \dots, z_n - v_m \cdot (t_{overn} - t_{begin})) \leq z \leq \max(z_1 + v_m \cdot (t_{over1} - t_{begin}), \dots, z_n + v_m \cdot (t_{overn} - t_{begin})) \end{cases} \end{cases}$$

上式子中 n 代表探测器的个数， v_m 代表空间波速，此模型所有的变量取值大小都由蒙特卡洛过程的模拟随机数决定，使得建立的微震源定位方法模型具有普适性和合理性。

使用 MATLAB 编写程序，设定迭代次数为 10000 次，实现基于蒙特卡洛模拟的微震监测仿真过程。

结合多重搜索算法，令步长为 0.5，对定位方法模型进行求解，其结果在支撑材料中的问题 3 仿真结果.xlsx 进行展示。

至于定位结果的稳健性以及模型的评价，将在第六部分的模型的检验与灵敏度分析

中给出。

六、模型的检验与灵敏度分析

对于问题三建立的微震源定位方法模型，使用 MATLAB 绘制出迭代次数为 10000 次的蒙特卡洛模拟过程中微震源实际位置点及其对应反演位置点的空间分布：

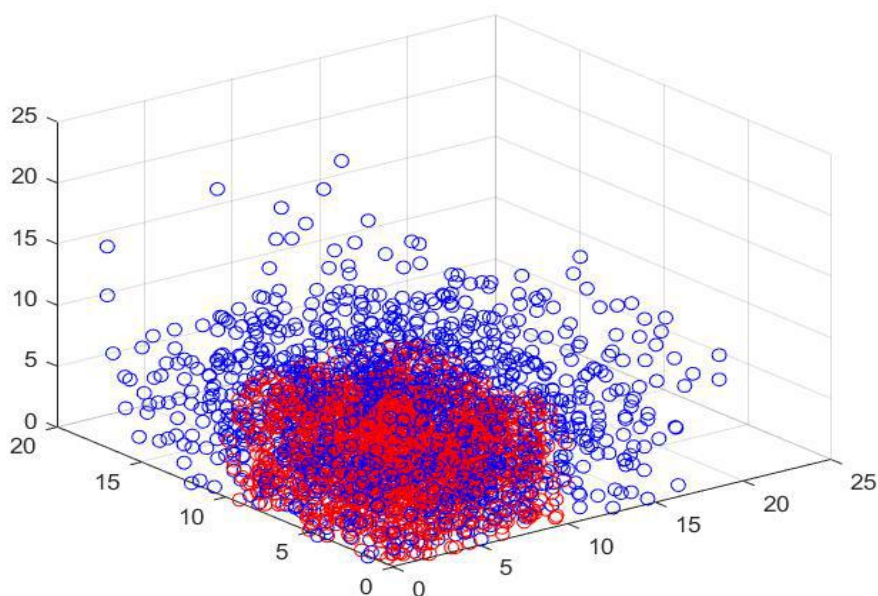


图 8 微震源实际位置点与反演位置点空间分布示意图

从上图我们可以看到，红色代表的微震源实际位置点与蓝色代表的微震源反演位置点在空间中的分布较为相似，说明问题三建立的微震源定位方法模型是具有一定的合理性和普适性的。

对于定位结果的稳健性，我们使用相对应的微震源实际位置点与微震源反演位置点的空间距离作为量化指标，使用 MATLAB 绘制出蒙特卡洛模拟过程中不同微震源与其反演位置的空间距离的图像：

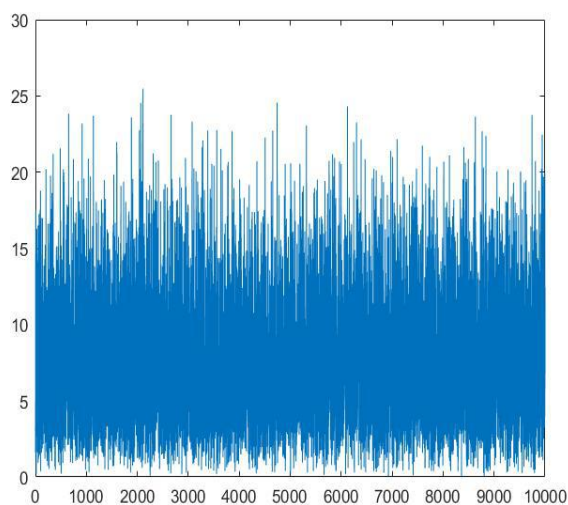


图 9 蒙特卡洛模拟过程中不同微震源与其反演位置的空间距离示意图

从上图可以看出蒙特卡洛模拟过程中定位方法模型对不同微震源与其反演位置的空间距离的变化是平稳的。若把这组空间距离看作一段时间序列，使用 R 语言自带的 `ndiff()` 函数，可检验的该序列是平稳的，是不需要再进行差分处理的。这也是说明了定位效果是稳健的。

七、 模型的评价

7.1 模型的优点

具有一定的普适性和合理性，通过蒙特卡洛模拟的方法对微震探测进行合理真实的模拟，建立的模型和得出的结果具有一定的合理性。

7.2 模型的缺点

对于地震波在实际传播过程中的微小变化的研究不够，且对该问题使用的多重搜索算法得出来的解只是全局最优解的近似值，随着的迭代步长的变化，解的精确度也会改变。

7.3 模型的推广

本文主要运用到混合整数非线性规划，蒙特卡洛模拟等方法建立相关模型解决问题。蒙特卡洛模拟在工程技术和大数据技术等领域有着广泛的应用；混合整数非线性规划对于实际生产中的宏观经济，管理决策等方面都有着极强的应用性。本文建立的模型可推广到日常生活中需要综合考量多因素的数学反演问题和工程问题等等，具有很强的推广意义。

八、 参考文献

- [1] 姜福兴, 叶根喜, 王存文,等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(009):1932-1938.
- [2] 姜启源, 谢金星.数学模型（第五版）[M].北京：高等教育出版社，2011.1.
- [3] 谢金星, 薛毅. 优化建模与 LINDO/LINGO 软件 [M].北京：清华大学出版社,2011.
- [4] 唐礼忠, 杨承祥, 潘长良. OPTIMIZATION OF MICROSEISMIC MONITORING NETWORK FOR LARGE-SCALE DEEP WELL MINING 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(010):2036-2042.
- [5] Chengxiang Y, Zhouquan L, Lizhong T, et al. STUDY ON RULE OF GEOSTATIC ACTIVITY BASED ON MICROSEISMIC MONITORING TECHNIQUE IN DEEP MINING 基于微震监测技术的深井开采地压活动规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4):818-824.
- [6] 张庆庆, 王云宏, 吴海. 基于 DIRECT 算法的井地联合微震监测定位方法研究 [C]// 中国地球物理学会 中国地质学会 中国地震学会 中国力学学会 中国岩石力学与工程学会. 中国地球物理学会 中国地质学会 中国地震学会 中国力学学会 中国岩石力学与工程学会, 2017.

附录

一、支撑材料清单：

- (1) distance.xlsx
- (2) drawsphere.m
- (3) Part6.m
- (4) Part6.R
- (5) Part6section2.m
- (6) Question1Location.m
- (7) Question1Location2.m
- (8) Question1SolveingAnswer.m
- (9) Question2Ball.m
- (10) Question2Location.m
- (11) Question2Newton.m
- (12) Question3Solveproblem.m
- (13) 表 1 数据处理.xlsx
- (14) 表 2 数据处理.xlsx
- (15) 问题 2 牛顿法数据.xlsx
- (16) 问题 3 仿真结果.xlsx

二、主要程序及代码

(1) drawsphere.m

介绍：基于 MATLAB 的绘制微震源发出的地震波波面(恒定波速)的函数

```
function drawsphere(a, b, c, R)
%% 绘制球面
% 以(a, b, c)为球心, R 为半径

% 生成数据
[x, y, z] = sphere(250);

% 调整半径
x = R*x;
y = R*y;
z = R*z;

% 调整球心
x = x+a;
y = y+b;
z = z+c;

% 使用 mesh 绘制
axis equal;
mesh(x, y, z);
end
```

(2) Part6.m

介绍：基于 MATLAB 的蒙特卡洛模拟过程中微震源实际坐标和其对应反演坐标的空间分布可视化程序

```
%% 模型的检验和灵敏度分析 %%
clc;
clear;
%% 导入仿真结果 %%
X=xlsread("问题3 仿真结果.xlsx");
A=[X(:, 1), X(:, 2), X(:, 3)];
B=[X(:, 4), X(:, 5), X(:, 6)];
for i=1:10000
    scatter3(A(i, 1), A(i, 2), A(i, 3), 'r');
    scatter3(B(i, 1), B(i, 2), B(i, 3), 'b');
    hold on;
end
```

(3) Part6.R

介绍：基于 RStudio 的对以微震源实际坐标和对应反演坐标空间距离为数据集的时间序列对象的平稳性检验程序

```
library(readxl)
distance <- read_excel("distance.xlsx")
View(distance)
library(forecast)
distance1<-ts(distance,frequency = 10000)
ndiffs(distance1)
```

(4) Part6section2.m

介绍：基于 matlab 的蒙特卡洛过程中微震源实际坐标和对应反演坐标空间距离的折线图绘图程序

```
%% 模型的检验和灵敏度分析 %%
clc;
clear;
%% 导入仿真结果 %%
X=xlsread("问题 3 仿真结果.xlsx");
A=[X(:,1),X(:,2),X(:,3)];
B=[X(:,4),X(:,5),X(:,6)];
C=zeros(10000,1);
for i=1:10000
    C(i,1)=sqrt((A(i,1)-B(i,1))^2+(A(i,2)-B(i,2))^2+(A(i,3)-B(i,3))^2);
end
figure(1);
plot(1:10000,C)
```

(5) Question1Location.m

介绍：基于 MATLAB 的表 1 数据的预处理程序

```
clc;
clear;
%% 读入数据 %%
X=xlsread("表 1 数据处理.xlsx", 'B2:B9');
Y=xlsread("表 1 数据处理.xlsx", 'C2:C9');
Z=xlsread("表 1 数据处理.xlsx", 'D2:D9');
T=xlsread("表 1 数据处理.xlsx", 'E2:E9');
%% 基本信息获取 %%
max(Z)
max(Y)
max(X)
min(X)
min(Z)
min(Y)
%% 图像可视化 %%
scatter3(X,Y,Z, 'filled', 'r')
xlabel("X/m");
ylabel("Y/m");
zlabel("Z/m");
title("某矿山甲的探测器分布");
```

(6) Question1Location2.m

介绍：基于 MATLAB 的问题一的微震源可能出现的位置的空间分布的绘图程序

```
clc;
clear;
%% 读入数据 %%
X=xlsread("表 1 数据处理.xlsx", 'B2:B9');
Y=xlsread("表 1 数据处理.xlsx", 'C2:C9');
Z=xlsread("表 1 数据处理.xlsx", 'D2:D9');
T=xlsread("表 1 数据处理.xlsx", 'E2:E9');
R=T.*5; %获取球体的半径
title("问题 1 微震源可能出现的区域");
xlabel("X/m");
ylabel("Y/m");
zlabel("Z/m");
hold on;
for i=1:8
    drawsphere(X(i),Y(i),Z(i),R(i));
end
```

(7) Question1SolveingAnswer.m

介绍：基于 MATLAB 的问题一的求解模型的多重搜索算法

```
clc;
clear;
%% 读入数据 %%
X=xlsread("表 1 数据处理.xlsx",'B2:B9');
Y=xlsread("表 1 数据处理.xlsx",'C2:C9');
Z=xlsread("表 1 数据处理.xlsx",'D2:D9');
T=xlsread("表 1 数据处理.xlsx",'E2:E9');
R=T.*5; %获取球体的半径
%% 在可行域里进行蒙特卡洛算法 %%
steps=input("请输入迭代步长(m):");
min=1000000; %设定储存最小值
xlocation=0;
ylocation=0;
zlocation=0;
for x=8453.16:steps:8939.78
    for y=6359.21:steps:6755.98
        for z=321.488:steps:750.594
            count=0; %设定求解的最小值
            for i=1:8
                count=count+abs(sqrt((X(i)-x)^2+(Y(i)-y)^2+(Z(i)-z)^2)-R(i));
            end
            if(count<=min)
                min=count;
                xlocation=x;
                ylocation=y;
                zlocation=z;
            end
        end
    end
end
end
```

(8) Question2Newton.m

介绍：基于 MATLAB 的对问题二模型进行求解的牛顿迭代法的算法程序

```
%% 问题二求解微震源空间的牛顿迭代法 %%
clc;
clear;
%% 读入相关数据 %%
X=xlsread("表 2 数据处理.xlsx","B3:B18");
Y=xlsread("表 2 数据处理.xlsx","C3:C18");
Z=xlsread("表 2 数据处理.xlsx","D3:D18");
T=xlsread("表 2 数据处理.xlsx","E3:E18");
%% 写入矩阵 %%
da=[X,Y,Z,T];
x0=4968.060257;    %以拟合参数为牛顿法的迭代初值
y0=8082.831093;
z0=-336.9626618;
t0=0.002;
%% 牛顿迭代法的相关参数设定 %%
tol=0.001;    %迭代精度
steps=10;    %迭代次数
J=zeros(16,4);
for n=1:steps
    g=zeros(1,16);
    for p=1:16
        J(p,1)=2*(x0-da(p,1));
        J(p,2)=2*(y0-da(p,2));
        J(p,3)=2*(z0-da(p,3));
        J(p,4)=-2*(sqrt((da(p,1)-x0)^2+(da(p,2)-y0)^2+(da(p,3)-z0)^2)/abs(da(p,4)-t0))^2*(t0-da(p,4));
    %逼近零点
        g(p)=(x0-da(p,1))^2+(y0-da(p,2))^2+(z0-da(p,3))^2-(t0-da(p,4))^2*(sqrt(((da(p,1)-x0)^2+(da(p,2)-y0)^2+(da(p,3)-z0)^2)/abs(da(p,4)-t0))^2);
    end
    ds=-J\g';
    x0=x0+ds(1);
    y0=y0+ds(2);
    z0=z0+ds(3);
    t0=t0+ds(4);
    if(abs(ds(1))<tol&&abs(ds(2))<tol&&abs(ds(3))<tol&&abs(ds(4))<tol)
        sprintf('n=%12.4e, x=%12.4e, y=%12.4e, z=%12.4e, t=%12.4e\n', n, x0, y0, z0, t0)
        break;
    end
end
end
```

(9) Question3Solveproblem.m

介绍：基于 MATLAB 的问题三的正演仿真探索，蒙特卡洛模拟仿真算法以及定位方法模型的求解

```
%% 问题三蒙特卡洛模拟仿真%%
clc;
clear;
%% 输入迭代次数 %%
times=input("请问要迭代的次数：");
%% 正演数据 %%
true=zeros(times,3); %定义蒙特卡洛模拟中存放微震源真实坐标的数组(正演基础)
%% 预测值 %%
oppo=zeros(times,3); %定义蒙特卡洛模拟中存放定位方法求解得出微震源坐标的数组
%% 正演基础上的反演误差 %%
wucha=zeros(times,1); %存放每一次微震源坐标真实值与预测值的相差值
%% 模拟开始 %%
for i=1:times
    min=10000000; %用于存放最小震源定位偏离度
    tanceqi=randi(1); %随机生成探测器个数
    v=3+4.7*rand(1); %随机生成波速大小(查阅资料得到的速度范围，使仿真具合理性)
    for j=1:tanceqi
        xtrue=10*rand(1); %模拟微震源的空间坐标
        ytrue=10*rand(1);
        ztrue=10*rand(1);
        tanceqix=10*rand(1); %定义探测器的空间坐标
        tanceqiy=10*rand(1);
        tanceqiz=10*rand(1);
        td=sqrt((xtrue-tanceqix)^2+(ytrue-tanceqiy)^2+(ztrue-tanceqiz)^2)/v;
        r=v*td;
        xmin=tanceqix-r;
        ymin=tanceqiy-r;
        zmin=tanceqiz-r;
        xmax=tanceqix+r;
        ymax=tanceqiy+r;
        zmax=tanceqiz+r;
        if(xmin<0) xmin=0; end %防止模拟仿真的随机数据违法
        if(ymin<0) ymin=0; end
        if(zmin<0) zmin=0; end
        if(xmax<=0 || ymax<=0 || zmax<=0)
            break;
        end
        steps=0.5; %定义多重搜索算法的迭代步长
        xpro=0;
        ypro=0;
        zpro=0;
        for x=xmin:steps:xmax
            for y=ymin:steps:ymax
                for z=zmin:steps:zmax
                    count=0;
                    for d=1:tanceqi
count=count+abs(sqrt((tanceqix-x)^2+(tanceqiy-y)^2+(tanceqiz-z)^2)-v*td);
                        end
                        if(count<=min)
                            min=count;
                            xpro=x;
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
```

```

                                ypro=y;
                                zpro=z;
                                end
                                end
                                end
                                end
                                end
                                true(i,1)=xtrue;
                                true(i,2)=ytrue;
                                true(i,3)=ztrue;
                                oppo(i,1)=xpro;
                                oppo(i,2)=ypro;
                                oppo(i,3)=zpro;

wucha(i,1)=sqrt((true(i,1)-oppo(i,1))^2+(true(i,2)-oppo(i,2))^2+(true(i,3)-oppo(i,3))^2);
end
end

```