

# 基于三分量节点仪监测的微地震定位精度提升方法研究

舒望红<sup>1</sup>, 许佳鑫<sup>2</sup>, 熊文婷<sup>2</sup>, 钟菊芬<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中石化石油工程地球物理有限公司江汉分公司, 湖北 武汉

<sup>2</sup>中石化江汉油田油气产能建设管理中心, 重庆

收稿日期: 2025年3月28日; 录用日期: 2025年5月16日; 发布日期: 2025年5月29日

## 摘要

微地震定位方法一般可分为S波和P波旅行时差法、震源空间扫描法、相对旅行时法、逆时偏移成像法等。S波和P波旅行时差法一般用于S波和P波初至都比较清晰的情况, 比如天然微地震监测和井中微地震监测; 震源空间扫描法一般用于地震信号非常微弱的情况。三分量节点仪同时采集XYZ三个方向的数据信号, 用于分析定位微地震事件。根据不同的目的层岩性及埋深优选最佳观测系统, 从而提高微地震事件定位的准确性, 并为储层改造评价提供依据。

## 关键词

三分量节点仪, 震源扫描算法, 观测系统优化, 定位精度

# Research on the Enhancement of Microseismic Localization Accuracy Based on Three-Component Nodal Array Monitoring

Wanghong Shu<sup>1</sup>, Jiaxin Xu<sup>2</sup>, Wenting Xiong<sup>2</sup>, Jufen Zhong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sinopec Oilfield Service Corporation Geophysical Company Jiangnan Branch, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>Sinopec Jiangnan Oilfield Oil & Gas Production Capacity Construction Management Center, Chongqing

Received: Mar. 28<sup>th</sup>, 2025; accepted: May 16<sup>th</sup>, 2025; published: May 29<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

The methodologies for microseismic localization can generally be categorized into the S-wave and

文章引用: 舒望红, 许佳鑫, 熊文婷, 钟菊芬. 基于三分量节点仪监测的微地震定位精度提升方法研究[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(5): 766-772. DOI: 10.12677/ag.2025.155074

**P-wave travel-time difference method, the source-scanning algorithm, the relative travel-time method, and the reverse-time migration imaging method, among others. The S-wave and P-wave travel-time difference method is typically employed in scenarios where the first arrivals of both S-waves and P-waves are distinctly identifiable, such as in the monitoring of natural microseisms and downhole microseismic events. The source-scanning algorithm is usually applied when the seismic signals are exceedingly weak. A three-component nodal array captures data signals in the X, Y, and Z directions simultaneously, which are then utilized to analyze and locate microseismic events. By optimizing the observation system according to the lithology and depth of the target formation, the accuracy of microseismic event localization can be enhanced, thereby providing a foundation for the evaluation of reservoir stimulation.**

## Keywords

**Three-Component Nodal Array, Source-Scanning Algorithm, Observation System Optimization, Localization Accuracy**

Copyright © 2025 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

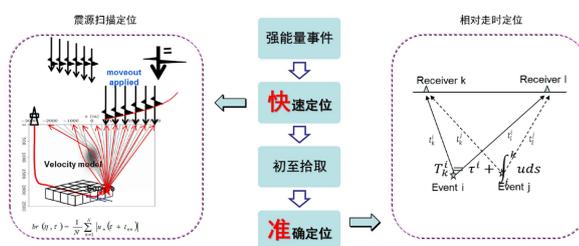
## 1. 引言

在非常规油气资源开发中,水力压裂微地震监测技术是评估储层改造效果的核心手段[1][2]。监测系统的布设方案作为影响定位精度的关键变量,直接决定了裂缝网络解释的可靠性[3],并最终作用于压裂工艺优化及产能预测。现阶段,地面节点仪阵列的布设模式(如放射状、网状、补丁状等)、空间覆盖范围及道间距参数的选择,需综合考虑地质条件、压裂工艺特征及经济性约束[4],其科学性与合理性亟待系统性研究。

基于震源扫描算法(Source-Scanning Algorithm, SSA)的定位原理[5][6],本文通过实例优化观测系统参数,通过量化评估了不同监测系统对微地震事件的定位误差分布特征。研究表明:节点仪布设模式对波场覆盖密度与方位均匀性具有显著影响。而对于直井或斜井压裂井,放射状系统(10线,36°间隔)因其更优的垂向波场采样能力,垂向定位精度较传统网状系统提升至 $\pm 9.5$  m,尤其适用于裂缝垂向扩展特征的精准刻画。

## 2. 微地震事件定位基本原理

地面微地震监测事件的定位采用震源扫描定位与相对走时定位相结合的方法进行(如图1)。先用震源扫描法快速计算查找出事件,再用相对走时法准确计算,锁定事件位置[7]。



**Figure 1.** Microseismic monitoring and event localization methods for ground surface

**图 1.** 地面微地震监测事件定位方法

震源扫描定位法是 Kao 和 Shan 于 2004 年提出的, 其基本思路是将目标区域网格化, 将每个网格作为震源点, 计算激发点到每个检波点的走时, 沿走时曲线对微地震资料进行叠加, 振幅能量最大值对应的网格为震源位置。其运算公式如下:

$$br(\eta, \tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |u_n(\tau + t_{\eta n})|$$

其中,  $\eta$  表示空间网格,  $\tau$  为震源激发时间,  $N$  为接收点数,  $u_n$  表示第  $n$  个接收点的微地震记录,  $t_{\eta n}$  表示激发点到每个检波点的走时。

### 3. 三分量采集数据事件拾取

在微地震监测中, 三分量节点仪微地震监测相较于传统大排列采集系统具有显著优势, 每个节点仪相对独立, 数据量小, 自带 GPS 信息和网络传输系统, 可实现数据实时便捷传输, 便于快速交互处理。

通过对三分量数据的分析发现, 大部分微地震事件的纵波(P 波)能量较强, 而横波(S 波)能量较弱且难以识别。纵波叠加后的能量明显高于横波叠加能量, 因此采用纵波能量叠加定位方法能够有效识别更多弱信号。相比之下, 若采用纵横波联合定位方法, 由于横波分量能量较弱, 难以有效叠加, 导致定位精度降低。因此, 在实际微地震事件拾取和定位过程中, 主要依赖纵波定位方法。事件的判定依据主要包括能量聚焦集中(信噪比高, 如图 2)或道集叠加清晰(能量强, 如图 3)。

在对三分量节点仪采集到的信号进行微地震事件识别流程中, 有效去除环境噪声是提高资料信噪比的关键[8], 尤其对弱能量事件的识别至关重要。原始监测数据通常表现为道集能量微弱, 有效信号被环境噪声淹没, 震源成像图中能量难以聚焦。经过去噪处理后, 道集同相轴及叠加能量显著增强, 多数道集能够清晰监测到, 动校正拉平效果良好, 波形叠加清晰, 震源成像图上的能量团聚焦效果明显改善, 便于识别。监测过程中发现, 大部分信号以纵波能量为主, 尤其在垂直分量(Z 分量)上纵波能量表现尤为突出。

在三分量微地震监测中, 纵波定位方法因其能量叠加优势成为主要手段, 而提高信噪比和优化去噪算法对弱信号的识别和精确定位至关重要。

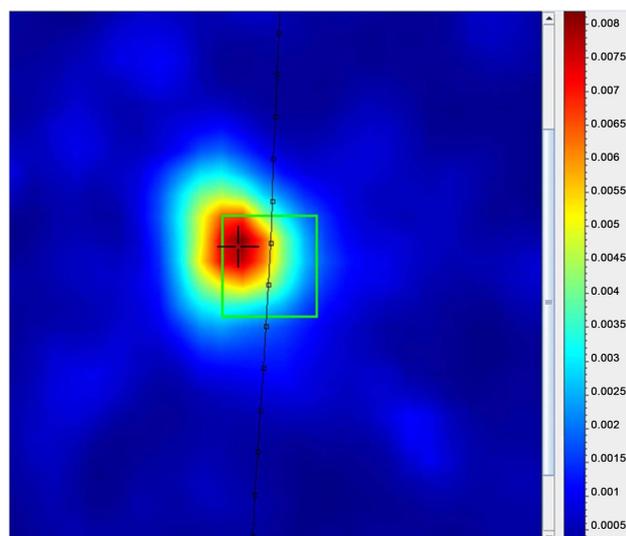


Figure 2. Microseismic source imaging map

图 2. 微地震信号震源成像图

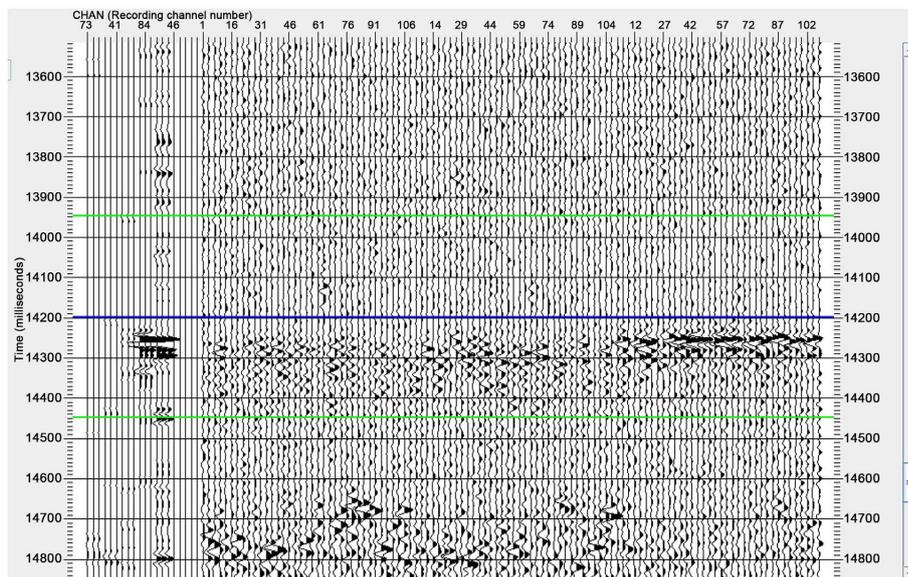


Figure 3. Microseismic signal gather display

图 3. 微地震信号道集显示图

## 4. 三分量节点仪观测系统主要参数

### 4.1. 有效观测范围

在地面微地震监测中, 为了优化三分量节点仪的布设方案, 需结合地质分层和地层速度建立简化地质模型, 并通过正演模拟确定不会产生全反射的观测范围。同时, 为确保 P 波和 S 波联合定位的精度, 节点仪的入射角应控制在 45 度以内, 避免因 P 波能量衰减导致定位误差增大。综合考虑上述因素, 可以确定节点仪的有效观测范围, 并将其作为地面三分量节点仪布设的重要依据之一。

具体而言, 正演模拟有助于分析地震波在不同地层中的传播特性, 避免因临界角反射导致信号损失。此外, 入射角限制可确保 P 波能量足够强, 提高联合定位的可靠性。因此, 在布设节点仪时, 需综合考虑地质模型、波场特征及定位需求, 以优化监测效果。

### 4.2. 观测布设方式

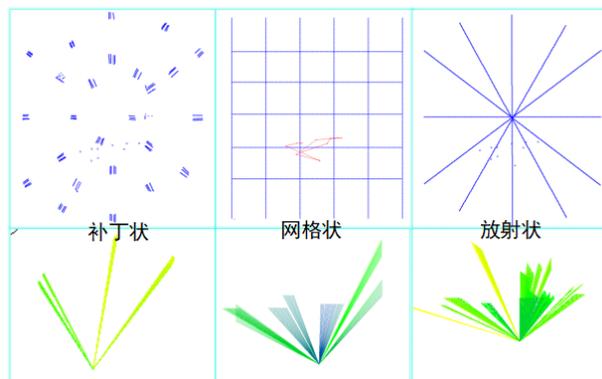
微地震监测观测系统的布设方式主要包括补丁状、网格状和放射状三种(如图 4)。补丁状布设方法主要针对重点区域进行分散式、分层次监测, 观测方位不均匀, 视角范围有限, 设备利用率不高。网格状布设方法规则性强, 观测方位均匀、视角范围宽, 但所需设备多, 施工效率低。在相同节点仪数量的情况下, 放射状观测系统相比网格状观测系统具有明显优势, 其对监测区域的接收范围更广, 角度分布更加均匀, 施工效率高, 设备利用率适中, 是一种兼顾科学性、经济性和高效性的观测系统设计方法。

放射状布设方法通过中心向外辐射的方式提高有效信号的接收率, 能够优化波场采样, 提高不同方位地震波的记录能力, 能够提高微地震事件的定位精度[9]。因此, 在实际监测中, 放射状观测系统更适用于需要高精度定位和高效数据采集的微地震监测任务。

## 5. 三分量节点仪微地震监测实例

在实际微地震监测项目设计中, 观测范围和布设方式需根据目的层埋深、地质构造特征及压裂工艺要求进行系统性优化[3][7]。以四川威远地区某页岩气井压裂微地震监测为例, 该井试气目的层为龙马溪

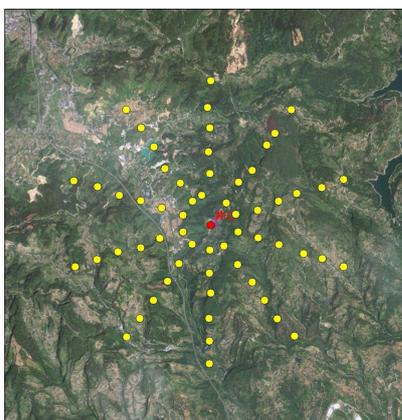
组页岩气层,埋深适中(1819.5 m~1867.5 m),总压裂段长 48 m,采用 2 段式压裂工艺,平均单段长度 24.0 m。基于这一工程地质条件,结合威远地区特有的页岩储层特性,在监测系统设计时实施了以下针对性优化方案。



**Figure 4.** Schematic diagram of three node instrument layout methods  
**图 4.** 三种节点仪布设方式示意图

首先,针对页岩气压裂过程中产生的微地震信号普遍较弱的特点,重点加强了水平井段正上方区域的节点仪布设密度,通过加密观测网络提升弱信号的信噪比和可识别性。其次,采用以井口为中心的放射状观测系统设计,这种创新性布置方式不仅符合该地区的地震波传播规律,更能有效提高不同方位角的地震波接收能力,确保三维空间内的信号采集完整性。具体布设参数经过精确计算后确定为:道间距 300 m (兼顾信号接收质量与施工经济性),共布设 10 条辐射状测线(覆盖 360°全方位),每条测线上均匀分布 6 个监测点(图 5),形成空间分布合理的立体观测网络。

这种经过科学设计的观测系统具有多重优势:既保证了整个压裂影响区域的监测覆盖范围,又通过重点区域加密布设显著提升了弱信号识别率;既考虑了施工成本控制,又确保了监测数据质量。特别值得注意的是,放射状布设方式相比传统网格状布置,在相同仪器数量下可获得更好的方位角覆盖效果,其空间采样密度更符合微地震波场特征,能够更准确地刻画压裂裂缝的扩展形态和空间展布特征[10],从而为压裂效果评估和储层改造优化提供更可靠的地球物理依据。



**Figure 5.** Distribution map of microseismic monitoring node instruments in a certain well  
**图 5.** 某井微地震监测节点仪分布图

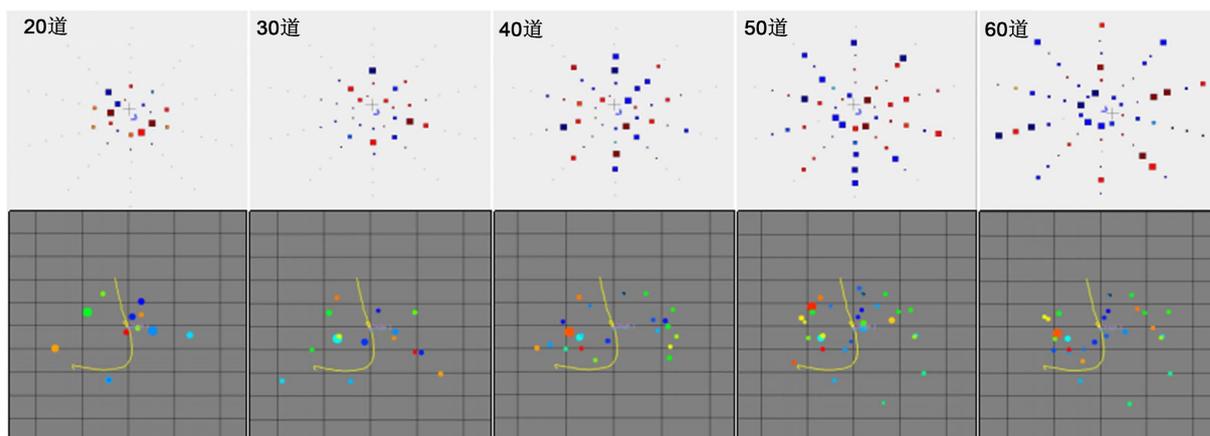
通过对采集数据进行观测系统退化试验分析, 选取 20 道、30 道、40 道、50 道和 60 道五组数据进行对比处理, 事件定位结果分别见表 1 和图 6。通过分析, 微地震信号的特征表现为 20 道接收时强能量事件的初始信号可清晰追踪; 30 道接收时道集出现明显噪音干扰; 信噪比模拟显示 20~50 道区间事件识别能量呈递减趋势; 超过 50 道后能量变化趋于稳定。事件定位精度特征为定位误差在 50 道接收后趋于稳定; 有效接收道数占比是影响定位精度的关键因素有效接收道数占比越高, 定位结果越稳定。

该研究为观测系统优化提供了重要依据, 建议实际监测中采用 50 道以上的接收系统, 在保证信号质量的同时提高定位精确度。

**Table 1.** Comparative analysis of monitoring results at different observation distances

**表 1.** 不同观测距离监测结果对比分析

接收道数	微地震事件识别个数	定位误差 $\Delta X$	定位误差 $\Delta Y$	定位误差 $\Delta Z$
60 道	31	8.7	8.6	9.5
50 道	29	9.52	8.51	9.80
40 道	20	12.8	14.8	13.1
30 道	15	14.01	13.5	13.17
20 道	11	19.88	17.31	24.32



**Figure 6.** Microseismic event distribution maps for five groups of degradation tests of the observation system

**图 6.** 五组观测系统退化试验的微地事件分布图

## 6. 结论

根据以上分析研究可以得出以下几点节点仪测系统的优化设计原则:

1) 节点仪数目相同时, 放射状布设方式的定位效果要优于网格状, 原因是放射布设方式经济高效地扩大了节点仪的布设范围;

2) 若已知震源分布的大致区域, 应当增加节点仪在该区域上方的分布密度;

3) 在一定范围内, 适当增大检波点距、增大节点仪的布设范围、增加检波线数, 可以在节约成本的前提下得到更好的定位效果。扩大节点仪的布设范围虽然在一定程度增大了水平几何误差, 但也能有效减小垂向几何误差和水平旅行时误差, 且大部分节点仪的震中距都小于震源深度, 误差主要集中在垂直方向。所以, 整体而言, 扩大监测系统的布设范围能够有效提高定位精度;

4) 监测系统设计应考虑震源深度合理布置。一般来说, 水平覆盖半径约等于震源深度即可。布设范围太小, 垂直误差可能会更大; 布设范围太大, 增加经济成本。

### 参考文献

- [1] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与发, 2007, 34(4): 392-400.
- [2] 张山, 刘清林, 赵群, 等. 微地震监测技术在油田开发中的应用[J]. 石油物探, 2002, 41(2): 226-231.
- [3] 余洋洋, 梁春涛, 康亮, 尹陈, 巫芙蓉. 微地震地面监测系统的优化设计[J]. 石油地球物理勘探. 2017, 52(5): 974-983.
- [4] 徐刚, 李德旗, 王适择, 等. 微地震监测在地震地质工程一体化中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(z2): 115-123.
- [5] 赵博雄, 王忠仁, 刘瑞, 等. 国内外微地震监测技术综述[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(4): 1882-1888.
- [6] 邵晓光, 董宏丽, 代丽艳. 微地震监测技术综述[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2018, 36(1): 55-61.
- [7] 宋慧娟, 李硕, 李云迪, 等. 微地震监测技术在页岩气开发过程中的应用——以四川泸州地区为例[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2022, 45(5): 509-514.
- [8] 刁瑞, 吴国忱, 尚新民, 等. 地面阵列式微地震数据盲源分离去噪方法[J]. 物探与化探, 2017, 41(3): 521-526.
- [9] 何柯, 周丽萍, 于宝利, 等. 基于补偿阈值的曲波变换地面微地震弱信号检测方法[J]. 物探与化探, 2016, 40(1): 55-60.
- [10] 杨瑞召, 李德伟, 庞海玲, 等. 页岩气压裂微地震监测中的裂缝成像方法[J]. 天然气工业, 2017, 37(5): 31-37.