

煤层水力压裂微震信号 P 波初至的自动拾取方法

朱权洁¹, 姜福兴², 魏全德^{3,4}, 王 博², 刘金海¹, 刘晓辉¹

(1. 华北科技学院 安全工程学院, 北京 101601; 2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 3. 北京安科兴业科技股份有限公司, 北京 100083; 4. 北京安科兴业矿山安全技术研究院有限公司, 北京 102299)

摘要: 水力压裂技术是矿山领域防冲、消突以及瓦斯抽采等的绿色技术, 煤层水力压裂过程的微震监测可实现对压裂裂缝追踪和效果评价。为了实现煤层水力压裂微震信号 P 波初至到时的精确拾取, 针对水力压裂微震信号的频域特性, 提出一种基于改进小波包阈值去噪(MWPT)和改进 AIC 法(IAIC)的初至到时精确拾取方法。该方法首先提出对原有 WPT 去噪模型进行改造, 建立基于多去噪规则的多阈值去噪方法; 然后对原 AIC 算法进行改进, 提出构建联合快速搜索和精确拾取两大模块的 IAIC 快速、精确拾取算法。以典型煤层压裂微震数据为例, 以人工拾取结果为参照, 利用 IAIC, ER, MER, WFM 以及 PAI-S/K 五种算法对该数据进行处理, 结果表明: MWPT 算法适用于背景干扰少、频率范围集中的煤层水力压裂信号, 信噪比提升至 12.67 dB, 信号能量特征保留高达 97.15%; 在到时拾取方面, 除 PAI-S/K 外其余 4 种算法在去噪后的到时拾取精度均得到有效提高, 其中尤以 IAIC 法最为明显, 到时平均误差由 34.17 ms 锐减至 7.08 ms; ER, MER, WFM 算法对波形的起伏较为敏感, 但由于时窗因素影响, 其到时往往滞后于手动拾取值。总而言之, IAIC 法对去噪结果更为敏感, 在 12 通道波形的拾取精度(约 7.08 ms)和速度(约 0.124 s)远优于人工拾取和其他 4 类方法, 误差分布方面也较理想(-10~10 ms 误差范围内可达 62.5%, -20~20 ms 范围高达 100%)。所提出方法一定程度上提升了煤层水力压裂微震信号 P 波初至的拾取效率和精度, 可为后续的微震自动、高精定位计算提供借鉴。

关键词: 采矿工程; 水力压裂; 微震; 小波包; 改进 AIC 法; 到时拾取

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)10 - 2319 - 15

An automatic method determining arrival times of microseismic P-phase in hydraulic fracturing of coal seam

ZHU Quanjie¹, JIANG Fuxing², WEI Quande^{3,4}, WANG Bo², LIU Jinhai¹, LIU Xiaohui¹

(1. Safety Engineering College, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China; 2. Civil and Resources Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Beijing Anke Xingye Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China; 4. Beijing Anke Xingye Research Institute of Mine Safety Co., Ltd., Beijing 102299, China)

Abstract: In recent years, hydraulic fracturing is an important technique widely used in mining fields for methane exploitation in coal bed, gas drainage and rock burst preventions. In order to improve the speed and accuracy of arrival picks of microseismic P-phase in hydraulic fracturing of coal seam, a new method which combines a multi-threshold wavelet packet transform(MWPT) and an improved Hilbert-Huang transform(IAIC) was

收稿日期: 2018 - 05 - 14; **修回日期:** 2018 - 07 - 12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51604115, 51504096); 中央高校基本科研业务费(3142017002)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51604115 and 51504096) and Fundamental Research Funds for the Central University(Grant No. 3142017002)

作者简介: 朱权洁(1984 -), 男, 2014 年于北京科技大学矿业工程专业获博士学位, 现任高级工程师, 主要从事微震监测技术、煤岩动力灾害的监测与防治等方面的研究工作。E-mail: youyicun2008@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0467

developed. The MWPT module has the multi-rules for different frequency bands based on wavelet packet transform method. The IAIC module is applied for speediness and precise determination of P-phase arrival time with two steps: rapid searching and accurate picking. Taking a typical microseismic event with 12 channels as an example, the methods of IAIC, ER, MER, WFM and PAI-S/K were used to pick up the first arrival time and compared to the manual picking results. MWPT method was proved to be applicable for microseismic signals from hydraulic fracturing of coal seam. The SNR has been advanced about 12.67 dB with reserved signal energy eigenvalue of 97.15%. Four methods except PAI-S/K method had the high accuracy in picking microseismic P-phase arrival, especially the IAIC method reduced the error from 34.17 ms to 7.08 ms. Although the methods of ER, MER, WFM are in the same time-window system, and sensitive to the waveform fluctuation, they still lag behind the manual result attributing to selective time-window. Compared to the manual method, IAIC method is more sensitive to signal denoising by MWPT method, with computation cost(0.124 s) and precision(7.08 ms), the picking error between -10 ms and 10 ms is even up to 62.5%, between -20 ms and 20 ms is up to 100%.

Key words: mining engineering; hydraulic fracturing; microseismic; wavelet packet transform; improved Hilbert-Huang transform(IAIC); arrival time picking

1 引言

冲击地压灾害是严重威胁我国矿山安全生产的煤岩动力灾害之一,具有突发性强、过程短暂、破坏力强等特点。利用水力压裂技术开展煤层的冲击地压防治工作是当前防冲技术的一个热门方向。水力压裂技术来源于油、气开采领域,并已发展为当前炙手可热的技术。在采矿领域,水力压裂技术是防治煤矿瓦斯突出、冲击地压等问题的重要手段,是具有弱化岩体强度、稀释瓦斯、降尘、降温的绿色开采技术。目前该技术已广泛应用于地应力测量、煤层卸压与消突、瓦斯抽采等领域。将该技术应用于冲击地压防治的原理是,利用高压水流冲刷煤体,导致煤体起裂形成裂缝,弱化煤体强度,同时水流自身也可软化煤体,达到减小煤层应力集中程度的目的。但该技术的应用尚处于初步阶段,主要是受制于压裂效果的量化评估和预测,进而影响了压裂工艺和参数的确立。对于煤层区域压裂而言,上述背景最终归结到一个关键问题——如何有效表征和评价水力压裂的效果,这直接关系到现场压裂工艺参数的确立和最终的压裂效率。在油气领域多用微震技术进行监测,并用于最终的压裂效果评价。为此,笔者所在团队为了研究煤层水力压裂效果分析与定量评价,开展了超高压煤层注水压裂防冲技术研究,借鉴油气领域的微地震监测评价技术,通过对微弱震动信号的联系监测、分析和处理,试图建立基于微震属性的煤层压裂形态表征,为压裂效果评价和预测奠定基础。

为了实现这一目标首先需要提取出“干净”的

微震信号、并获取准确的初至到时时刻。煤层压裂微震信号不同于相对大尺度的采场微震动,相对而言,水力压裂微震信号具有“弱能量、高频率、瞬态非平稳”的特点,且其传播介质相对单一,常规的微震信号处理方法难以提取满意的有效信号和准确的到时时刻。此外,不同于常规的机械振动信号,工程现场的干扰信号种类繁多、特点各异,不仅有现场施工设备影响、人工干扰,还有微震系统自身的传输干扰,同时,传播介质的不均质也会带来干扰,这些背景干扰的存在,使得微震信号内含成分复杂,并非单一的、周期性的。理论方法在理想信号或高信噪比信号中能去的较好效果,但在低信噪比信号中具有一定难度,识别精度有待提高。因此,对于此类信号如何去除噪声,得到干净的有效信号部分,计算求取精确的到时时刻,是后期进行信号分析处理的关键,更是进行定位计算、特征挖掘的前提。

国内外专家为此开展了大量研究,目前,针对矿山微震信号成分复杂、瞬态非平稳等特点,目前常规的震相初至自动识别检测方法可归纳总结为时域方法、频域方法、时频域方法以及综合方法^[1]四类。其中,时频域分析方法包括短时傅里叶变换、Wigner-Ville分布、S变换、小波变换、小波包变换、HHT方法以及后来发展的多种方法融合去噪方法等^[2-5]。该类方法对于非平稳信号的特征分析与去噪具有良好效果。

在时域方法中,以R. V. Allen^[6]提出的长短时窗能量比值法(short and long time average ratio, STA/LTA)应用最为广泛。该方法通过设定长、短两类时窗,滑移计算两时窗内信号的能量比值来获取初至到时的位置。STA/LTA具有模型简单、运行速

度快等优点,但其准确性取决于时窗大小的选择。在 STA/LTA 法的基础上,通过不断修正和提出新的特征函数,由此衍生了大量到时拾取方法^[7],如修正能量比法(modified energy ratio, MER)^[8], modified Coppers' method(MCM)^[9], 这些特征函数组成的拾取方法在对不同特点信号的处理上具有各自优势。

除了时域方面的算法,基于频域、时频域方面的算法也相继被提出^[10]。如时间-频率域能量比^[11]、时频分析^[12]等。此外,运用分形理论^[13-14]、互相关^[15]、神经网络^[16]、数字图像^[17]等技术进行地震波的初至到时拾取。通过对波形数据的统计分析,获取信号的偏斜度和峰度,进而拾取初至到时,这类方法被称为 PAI-S/K^[18-19],该方法可以获得较为准确的初至时刻。AIC 信息准则(akaike information criterion)^[20]是现今应用较为广泛的一种到时拾取方法,该算法具有运算速率快、拾取精度高的特点。

此外,利用上述几种方法相融合可形成新的到时拾取方法^[21],即综合方法,同样被应用于工程现场,并取得良好效果。张唤兰等^[22]提出利用时窗能量比和 AIC 算法,分两步自动求取微震初至到时;田优平和赵爱华^[23]利用小波包变换和 AIC 法构建了一种“小波包-峰度 AIC”综合方法;贾瑞生等^[24]提出了一种联合希尔伯特变换(HHT)和 AIC 法的震相初至自动拾取方法;朱梦博等^[25]融合 STA/LTA 和 MFV 两类准则,提出一种 PAI-k-MFV 的改进算法。综合拾取法的特点是综合利用多种方法进行微震波初至检测,可以兼顾多种算法的优势,消弱单独算法的劣势。

考虑到微震数据更易受到工况环境的影响,信号成分复杂、频率趋向高频,且触发的各类数据数量大,加之现场对微震数据处理时效性和定位精度要求,这给现场工程人员的处理和分析带来了很大难度。基于这一背景,以微震数据的自动化、高精度处理为目的,结合煤层水力压裂微震监测的工程实践,本文提出了基于小波包多层阈值法(预处理)和 IAIC(精确拾取)的煤层水力压裂微震波 P 波初至到时联合拾取方法,拟通过上述研究实现初至到时的快速、精确拾取,为后续的高精度定位计算奠定基础。

2 煤层水力压裂的微震动态响应

本文数据来源于山东华丰矿 1412 综放工作面,该工作面开采的四层煤走向长度 2 200 m, 倾斜长度

157 m,煤层均厚 6.2 m,煤层倾角 30°~34°,硬度系数 $f = 1.5 \sim 2.5$,单向抗压强度 10.8~25.5 MPa,属较稳定煤层。由于矿井开采深度的逐年增加,冲击地压威胁愈发严重,该矿四层煤自 1992 年首次发生冲击地压以来,已累计发生百余次灾害性冲击事故,导致了严重的经济损失和人员伤亡。在此背景下,在该矿开展了基于煤层分段水力压裂的防冲机理研究,并尝试利用微震数据的对水力压裂效果进行解释和评价。

2.1 水力压裂微震动信号

在水力压裂实验场所布置有高精度微震传感器,微震设备的监测参数为:采样频率 1 000 Hz,连续采集缓存(连续采集长度 15 min),后续采用 STA/LTA 进行事件的拾取与截取;传感器选用速度型,频率特性为 50~5 kHz,灵敏度为 30 V/g。采集的频率范围为 0~1 000 Hz。为了完好地采集煤岩体破裂的微震信号,将微震传感器埋设于煤层内部(距孔口 20~45 m)。图 1 为 1412 工作面煤层水力压裂试验过程中采集到的微震信号,其中 CH1~CH12 表示通道号。

从图 1 中可以看出,煤层水力压裂微震信号大多振幅较低(20~50 mV),部分通道内信号受背景噪声影响较大,这将对后期的到时拾取和特征挖掘造成较大困难。如何有效压制底噪影响,并实现微震信号初至到时的自动、准确拾取是本文研究的重点。

2.2 时频特征分析

煤层水力压裂微震信号由高压水流破坏煤层所致,由于目标对象所在区域较小、传播路径基本处于煤层内部,相比采动诱发类微震动而言,其传播介质相对单一,受外界干扰较少。如图 2(a)和(b)中①所示,分别为典型的高信噪比、低信噪比煤层水力压裂微震信号,前者振幅高达 131.8 mV(持续时间 200 ms),后者为 13.6 mV(时长 150 ms)并含有大量振幅约为 3 mV 的底噪。现场实测过程中发现,水力压裂微震信号以低信噪比出现最为频繁。

为了观察水力压裂信号中的频谱成分,分别对图 2(a)和(b)中两类压裂信号(上部①所示)进行傅里叶变换,得到图 2 中②,③所示结果,其中②为①波形前部的傅里叶变换(FFT)结果、③为后部 FFT 结果,有效波形处于后半部分之中。从图 2 中可以看出,以底噪为主的②中频谱成分较为复杂,在高频(>300 Hz)和较高频段(150~200 Hz)有集中频率分布,而在低频(<100 Hz)分布较为零散;高信噪比图 2(a)中③频谱在 138 Hz 处有集中体现, $S = 1.1$;

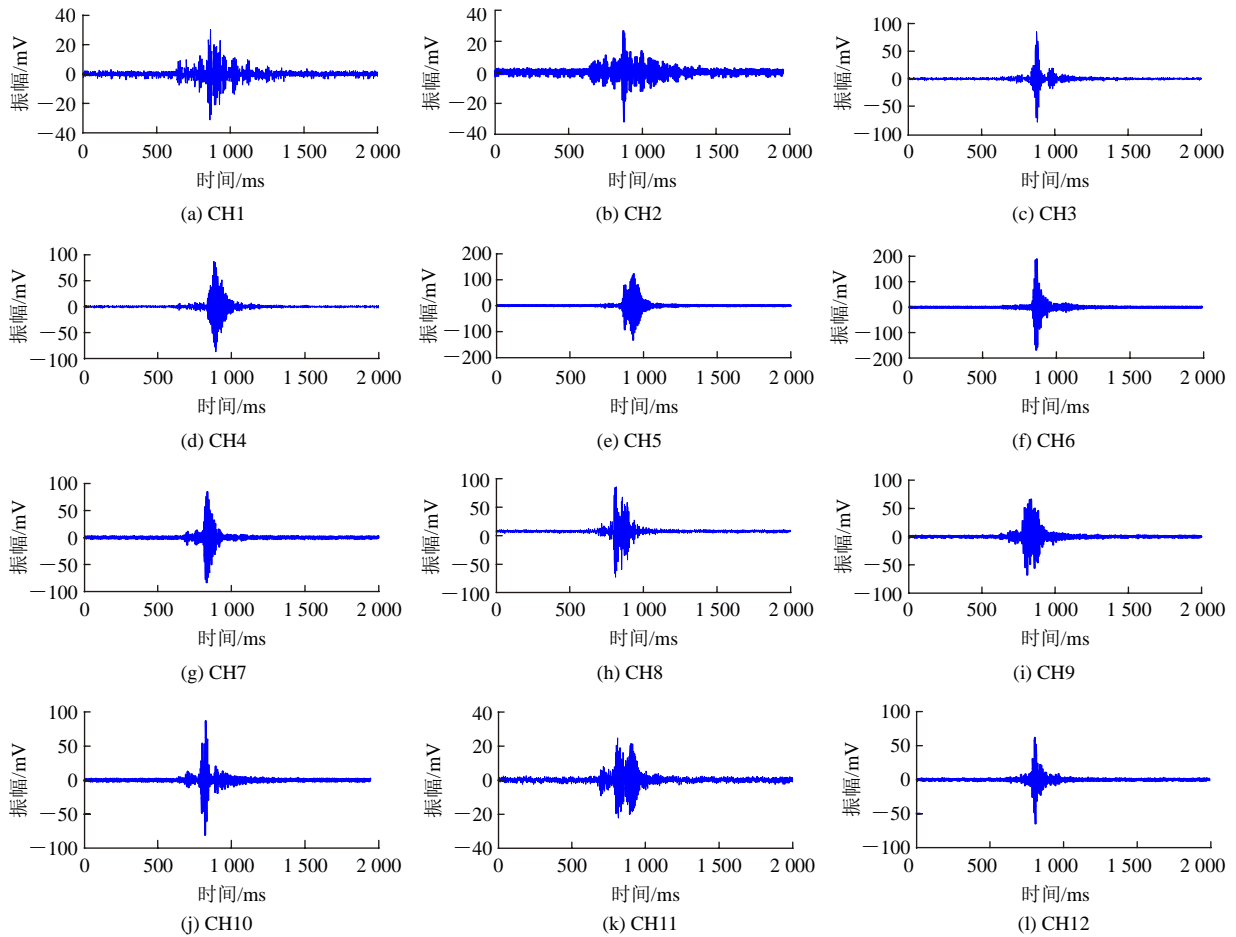


图1 1412工作面煤层水力压裂试验的微震信号(部分通道)

Fig.1 Typical microseismic signals of coal seam hydraulic fracturing in 1412 working face

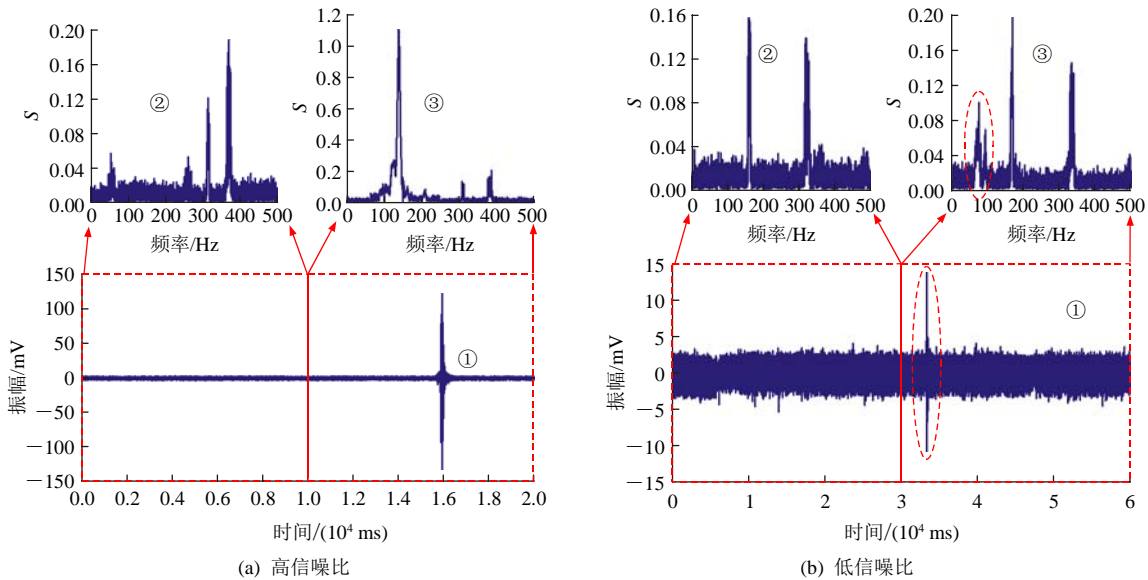


图2 不同信噪比煤层水力压裂信号的时频对比分析

Fig.2 Comparison of time-frequency characteristics of hydraulic fracturing microseismic signals with different SNR

低信噪比图 2(b)中③，仍然保留有底噪信号中的两处峰值(169.6, 334.2 Hz)，同时在低频 74.8 Hz 新出现了一个峰值，S 值仅为 0.1。因此，结合对现场环境的勘察和对信号的分析可以推测，煤体压裂诱发

的微震信号主频应分布于 30~200 Hz 范围。而现场的干扰可以归为两大类：一类如图中有两处“脉冲式”主频的干扰成分为外部干扰噪声，推断可能由管路内的脉动式水流等诱发，这类干扰成分集中；

一类为底噪干扰，底噪部分波形振幅小于 5 mV 的成分，为典型的背景干扰噪声，频率分布于 30 Hz 以内。

为了证明这一情况，选取了 6 组现场压裂数据进行对比分析。这些波形计算得到的频谱结果如图 3 所示，其中“红色”线条为含有有效波形的信号的频率分布情况，而“蓝色”为不含有有效波形的信号的频率分布情况。含有有效波形的信号其主频普遍分布于频率范围 30~200 Hz，在 90~200 Hz 表现的尤为集中；而相对而言，不含有有效波形的信号，主频普遍分布于 280~430 Hz，部分信号的局部频率特征在 100 Hz 左右有集中表现。

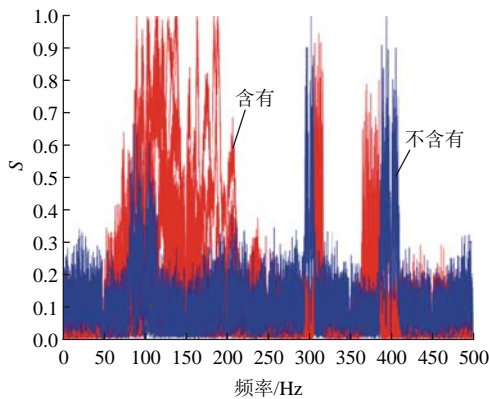


图 3 水力压裂信号频率分布统计对比

Fig.3 Frequency distribution of hydraulic fracturing microseismic signals with different SNR

通过上述分析可知，煤层水力压力微震信号属于典型的非平稳、瞬态信号，具有“低能量、短持续时长、频域范围集中”的特点，同时，干扰成分分布较为集中、分布范围易于确定，这为信号的去噪提供了依据。因此，针对该类信号低振幅(低能量)的特点，有效信号往往淹没在背景噪声之中(细节信息隐藏在噪声之中)，对该类信号的预处理既要有效提取出清晰、“干净”信号，又要有效保留信号的细节特征，这为信号的预处理提出了高要求。基于上述分析，对煤层水力压裂微震信号的去噪处理应充分考虑其频域特性，为此，本文在综合考虑小波包去噪的“放大镜”特性后，提出构建一种适用于煤层水力压裂微震信号的“小波包多阈值”去噪方法，用于去除信号的背景噪声、保留信号细节成分，为后续的初至到时精确拾取奠定基础。

3 MWPT 多层阈值去噪

煤层压裂微震信号不同于相对大尺度的采场微震动，相对而言，水力压裂微震信号具有“弱能量、

高频率、瞬态非平稳”的特点，且其传播介质相对单一，常规的微震信号处理方法难以提取满意的有效信号。对于此类信号如何去除噪声，得到干净的有效信号部分，是后期进行信号分析处理的关键，更是进行定位计算、特征挖掘的前提。考虑到矿山微震信号的频率范围相对集中^[26]这一特点，本文尝试对小波包去噪法(wavelet packet transform denoising method, WPT)进行改进，提出一种小波包多阈值去噪法(multithreshold wavelet packet transform denoising method, MWPT)。

3.1 小波包快速去噪

使用常规的手段还不足以完整、正确地分析微震信号复杂的变化。小波包方法是目前较为常用的一种地震信号分析方法，它在小波变换的基础上进行了改进，弥补了小波变换在高频段频率分辨率低的不足，并能根据信号的特性选择相应的频带，使之与信号的频谱相匹配，提高了时频分辨率，对于处理突变信号或具有孤立奇异性的函数效果较为显著。

假设 $\{h_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ ， $\{g_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ 分别为正交尺度函数 $\phi(t)$ 和正交小波函数 $\varphi(t)$ 对应的低通实系数滤波器和高通滤波器，且 $g_n = (-1)^n h_{1-n}$ ，则满足尺度方程和小波方程。标准化的尺度函数与小波函数可表述^[4]为

$$\left. \begin{aligned} \phi_{j,k}(t) &= \sqrt{2^j} \phi(2^j t - k) \\ \varphi_{j,k}(t) &= \sqrt{2^j} \varphi(2^j t - k) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

令 $u_0(t) = \phi(t)$ ， $u_1(t) = \varphi(t)$ ，转换为一般形式：

$$\left. \begin{aligned} u_0(t) &= 2 \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k u_0(2t - k) \\ u_1(t) &= 2 \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k u_0(2t - k) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

经递推计算后，小波包的分解公式可表述为

$$\left. \begin{aligned} d_l^{j, 2n} &= \sum_k h_{k-2l} d_l^{j+1, n} \\ d_l^{j, 2n+1} &= \sum_k g_{k-2l} d_l^{j+1, n} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

小波包重构算法为

$$d_l^{j+1, 2n} = \sum_k [h_{l-2k} d_k^{j, 2n} + g_{l-2k} d_k^{j, 2n+1}] \quad (4)$$

式中： h 与 g 均为滤波器系数， d_l 和 d_k 均为小波包系数， j 为层数， n 为节点。

3.2 多层阈值去噪法

利用小波包进行消噪处理，其实质是抑制信号中的噪声成分，增强信号中的有效部分。借助 MATLAB 软件编制了相应的去噪模块，该软件提供了小波包软件包，包括小波包分解函数、去噪函数 `ddencmp()`，其基本使用规则为：

[thr, sorh, keepapp, crit] = ddencmp('den', 'wp', data);

xwpd = wpdencmp(data, sorh, wplev, wname, crit, thr, keepapp)。

在上述规则中，ddencmp 函数计算出噪模块 wpdencmp 所需参数，如 SORH 软硬阈值类型，阈值参数 PAR、熵 CRIT，KEEPAPP 阈值量化判断。这其中，thr 为一个关键参数，它是函数去噪的准则模式。小波包去噪阈值准则包括 4 种模式，分别是固定形式阈值 sqtwolog、自适应阈值 rigrsure、启发式阈值 heursure 以及极小化极大阈值 minimaxi。

传统小波包去噪方法只是单纯选用，忽略了信号自身的多变特性，如固定阈值 sqtwolog 易造成信号过度失真；rigrsure 阈值具有一定自适应特性，但对于低信噪比信号去噪效果不佳。总而言之，单独的阈值去噪很难兼顾多个阈值的特性。如图 4 所示，对 CH5 通道内信号进行 4 层小波包分解，分别提取第 3, 5, 9 子频带信号(图 4 中①, ②, ③分属不同频率范围时的波形特征)，信号的傅里叶变换结果如图 4 所示。因此，本文在确立煤层水力压裂微震信号有效成分主频特征的基础上，对常规小波包去噪方式进行改进，提出基于多层小波包阈值的联合去噪方法，流程图如图 5 所示。

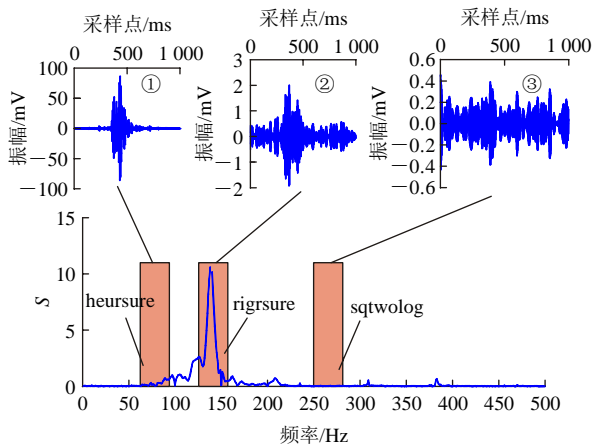


图 4 小波包多阈值去噪方法原理
Fig.4 Diagram of MWPT method

MWPT 算法的原理可以概述为：(1) 对信号 S 进行傅里叶变换，确立有效压裂信号的主频分布、噪声分布频段和范围；(2) 按照步骤(1)信号的主频特点，确立小波包分解尺度和小波基函数，并进行小波包分解，得到相应的小波包系数序列；(3) 分别采用不同的去噪阈值准则对不同频段的小波包系数进行去噪处理。(4) 重新组合去噪后的小波包系数，并进行重构，得到预处理后的信号。

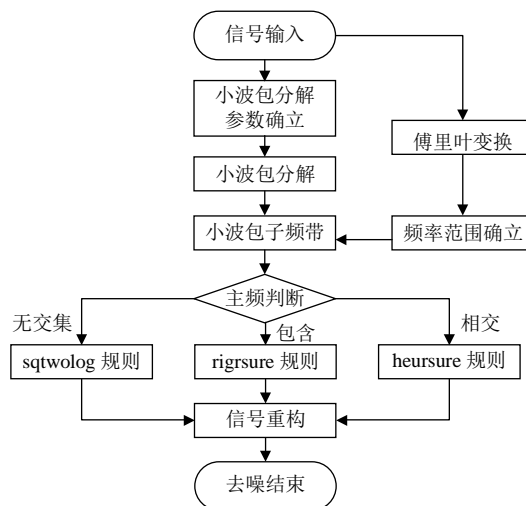


图 5 小波包多阈值去噪流程
Fig.5 Flow chart of the MWPT method

需要说明的是，在步骤(3)中当频带完全属于上述区间，则采用 rigrsure 自适应去噪规则；当频带与上述区间相交部分，选用 heursure 规则；完全不相交时，则采用 sqtwolog 规则去噪。以水力压裂微震信号为例，多阈值准则选取标准可参考下式：

$$f = \begin{cases} 0 \sim 30 \text{ Hz} & (\text{heursure}) \\ 30 \sim 200 \text{ Hz} & (\text{rigrsure}) \\ > 200 \text{ Hz} & (\text{sqtwolog}) \end{cases} \quad (5)$$

如 30~200 Hz 为压裂信号有效成分聚集频段范围，该区域可采用保守的 rigrsure 模式，保证细节信息不易丢失；>200 Hz 信号为干扰成分区域，利用 sqtwolog 规则强制去噪；0~30 Hz 范围为底噪成分分布频段，但又包含部分有效成分，因此，该频带可使用 heursure 模式。

4 AIC 算法及其改进

目前，地震、石油以及岩土、矿山等领域的震动波形到时拾取方法主要包括 STA/LTA, MER, MCM, PAI-K, S/L-Kurt 以及 AIC 等。其中，AIC 和 MER 法在拾取精度和计算速度上表现较为突出^[27]。基于上述原因，后文将以 AIC 作为微震信号 P 波初至精确拾取的主要方法，并以实例验证 AIC, MER 等方法的拾取效果。

4.1 AIC 算法

赤池信息量准则 AIC(Akaike information criterion) 是日本统计学家赤池弘次创立和发展的。AR-AIC 算法是一种基于 AIC 信息准则的到时拾取方法，该方法基于微震信号的非平稳特性，将信号划分为多个固定长度的波形段，然后进行自回归 AR 处理，求

取 AR 模型的阶数和系数，这是整个到时拾取算法的前提^[28]。

该方法的计算过程实际是求取微震信号 AIC 函数局部最小值的过程，AR-AIC 算法可描述为

$$AIC(i) = (i - k) \lg(\sigma_{1, \max}^2) + (N - i - k) \cdot \lg(\sigma_{2, \max}^2) + C \quad (6)$$

式中： N 为微震数据长度(采样点数)， k 为 AR 过程阶数， i 为 2 个局部统计时段的分界点， $\sigma_{1, \max}^2$ 和 $\sigma_{2, \max}^2$ 为 2 个局部统计时段的拟合误差， C 为常数。

N. Maeda^[29]在此基础上对模型进行了改进，去掉了利用自回归模型计算自回归系数这一过程。该模型可表达为

$$AIC(i) = i \lg[\text{var}(x[1, i])] + (N - i - k) \lg[\text{var}(x[i + 1, N])] + C \quad (7)$$

式中： N 为微震数据长度， $x[1, i]$ 为波形数据 x 中序号 1~ i 的一组振幅值， var 表示求取方差， k 为数据窗口内的所有采样点。

4.2 特征函数选取

在式(7)中， $x(j)$ 称之为 AIC 自动拾取算法中的特征函数(characteristic function, CF)，该特征函数选取的好坏直接影响初至拾取效果。目前，常用的特征函数 CF 主要包括 4 种，如表 1 所示。

表 1 特征函数模型及响应特性

Table 1 Comparison of different characteristic functions and its response characteristics

编号	计算公式	响应特性	
		幅度	频率
CF1	$ S(i) $	有响应	无响应
CF2	$ S(i) ^2$	响应灵敏	无响应
CF3	$ S(i) - S(i-1) $	有响应	有响应
CF4	$ S(i) ^2 - S(i-1)S(i+1)$	响应灵敏	响应灵敏

以 CH3 通道波形为例，进行 AIC 到时拾取处理，结果如图 6 所示，可以看出，特征函数 CF1，CF2 对幅度响应灵敏，对于突然增长的振幅可以敏感起跳；CF3，CF4 在频域上表现的更为突出，但时域角度表现的不如 CF1，CF2 敏感。考虑到水力压裂信号的多震相特点和计算速率，选择使用 CF1

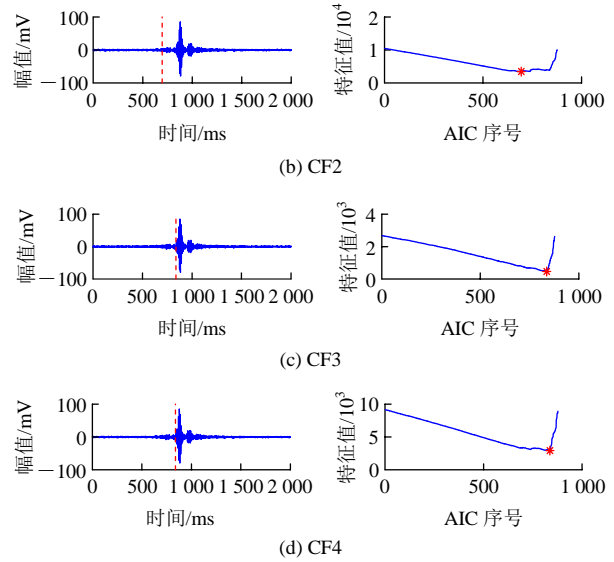
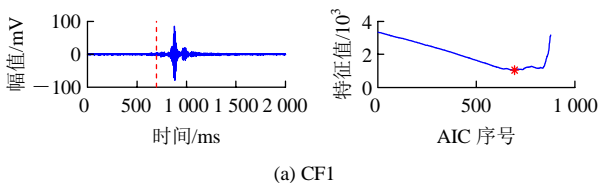


图 6 不同 AIC 特征函数到时拾取结果

Fig.6 Results of first arrival picking using different characteristic function

作为 AIC 的特征函数。

4.3 IAIC 模型构建与实现

水力压裂微震监测不同于常规工作面微震监测，考虑到现场压裂特点，采用连续记录方式存储微震数据，触发后的微震数据长度一般为几十秒甚至十几分钟。如果采用常规方法拾取，常规到时拾取方法存在耗时、精度不高等缺陷，面对现场大量微震数据，无法及时进行分析处理，这势必会影响突发问题的应急响应。因此，对于这样的多采样点数据，需要从拾取精度和运算速度两方面考虑。由此提出一种新算法 IAIC(improved AIC)，该算法包括快速搜索、精确拾取两大模块。

在常规 AIC 计算中，利用 AIC 求取一系列特征值，再在特征值内搜索极小值点，以此位置作为初至到时位置。但在实际计算过程中，存在如所示情况。因此，需要对原有拾取算法进行改进，保证拾取位置为正确的初至到时位置^[30]。IAIC 初至拾取算法的步骤可以概述为：

(1) 全局搜索。利用峰值法和 STA/LTA 法进行全局搜索，确立初至到时和终止时刻大致位置(时窗)。以 STA/LTA 特征值峰值位置向前后各推移 1 000 ms，以此确立初至时刻所在区域。若后(前)方不足 1 000 ms，则以起(终)点与特征峰值间范围作为区间。

(2) 局部识别。利用 AIC 法对上述区间进行计算，将 AIC 特征峰值两侧划分为 2 个区间 A，B，再分别在这 2 个区间内进行搜索，最终获得 2 个区间内的极小值，分别为微震波形的初至时刻(A 局部

极小值)和终止时刻(B 全局极小值)。为利用 AIC 法拾取微震波的初至、终止到时刻。该方法的优点在于计算速度快、拾取准确。IAIC 计算初至波到时原理如图 7 所示。

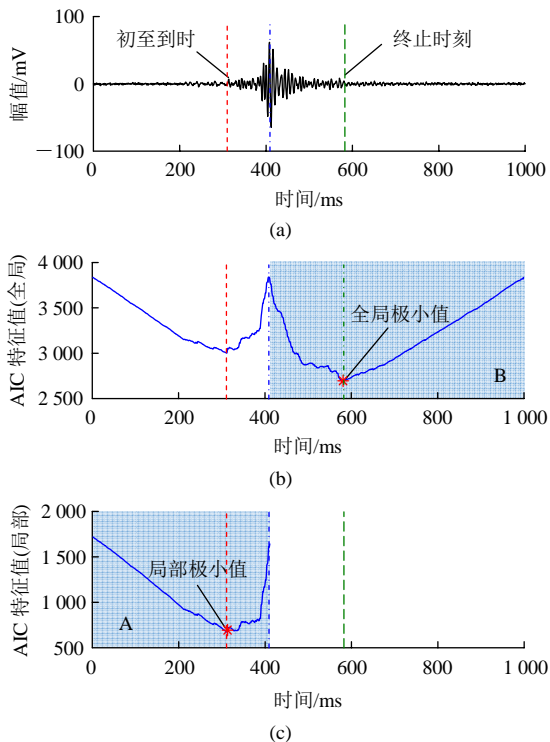


图 7 IAIC 计算初至波到时原理
Fig.7 Principle of IAIC method

为了实现初始到时的快速、精确拾取，在前文叙述拾取算法的基础之上，提出了一套集微震信号去噪、精确拾取到时刻等于一体的算法，其工作流程如图 8 所示。

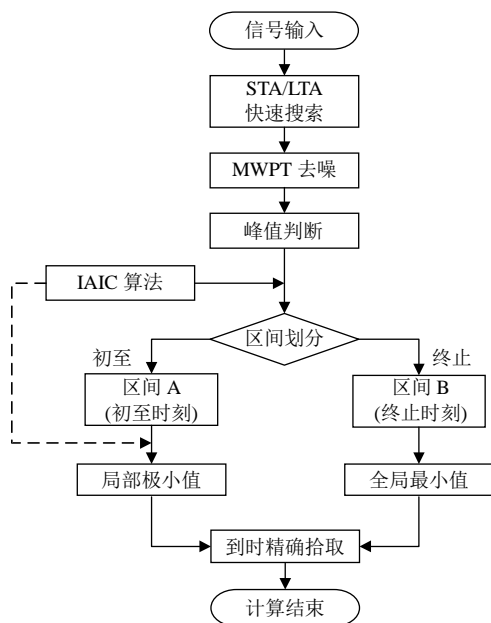


图 8 IAIC 算法计算流程
Fig.8 Flowchart of IAIC method

4.4 改进前后效果对比

为了验证 AIC 法改进前、后的效果，选取了 265 个微震数据进行分析，单个波形信号的数据长度为 1 000~5 000 ms(采样频率 1 000 Hz)，分别从初至到时刻拾取的精度和运算的速度 2 个方面进行对比分析，其结果如表 2 所示。

表 2 AIC 与 IAIC 法拾取效果对比
Table 2 Comparison of AIC and IAIC methods in terms of speed and accuracy

算法名称	平均拾取误差/ms	计算耗时/s
AIC	23.5	4.812 7
IAIC	10.3	2.294 9

由此可以看出，IAIC 算法与改进之前的 AIC 法有很大改观，这主要体现在以下几个方面：

(1) 加快了运算速度，缩短了计算时间。利用 STA/LTA 和峰值进行快速搜索，无需对全局进行精细搜索(AIC 运算)，减少了到时刻拾取的计算量，缩短了计算总耗时。

(2) 减少拾取误差，提高了到时刻拾取精度。通过对局部数据的精细识别，并设立相应的判断准则，大大减小了误识别到时刻的可能性，有效提高了初至到时刻识别精度。

5 现场数据分析与应用

为了对本文分级检测与拾取算法的实际应用效果进行评判，选取矿山现场微震事件，分别从到时刻拾取和定位计算结果 2 个方面进行对比分析。

5.1 MWPT 预处理

由节 2.2 可知，煤层水力压裂微震信号的频率多分布于 30~200 Hz(基于现场监测环境和目标监测信号分析)，首先利用 MWPT 方法对微震信号进行去噪预处理。已知现场微震监测系统的采样频率 $f = 1\ 000\ \text{Hz}$ (奈奎斯特采样频率 1 000 Hz)，频率范围为 0~500 Hz，确立小波包分解参数为，参数设定为 $wlev = 5$, $wname = 'sym6'$ [31]，由此得到 $2^5 = 32$ 个子频带信号，记为 $si(i = 0, 1, 2, \dots, 31)$ ，每个子频带的带宽为 15.625 Hz。

根据煤层水力压裂信号的特点，取[30, 200]区间为信号的主频区间，利用循环判断对信号进行去噪处理，最后将去噪后的各子频带进行重构形成去噪后的新信号。以 CH3 通道为例，其去噪前后的波形和频率图，如图 9 所示。从图 9(a)和(b)可以看出，

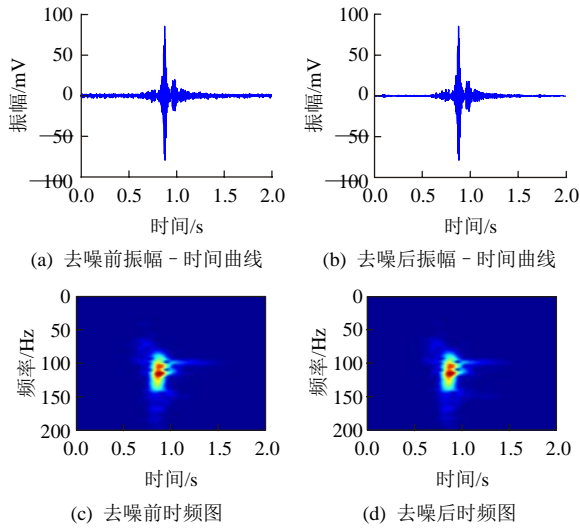


图 9 MWPT 去噪结果对比

Fig.9 Comparison of results before and after MWPT denoising

去噪后底部噪声得到有效压制，信号曲线变得更为平滑；从图 9(c)和(d)可以看出，去噪后的频率、能量分布与原有信号相近，表明去噪保留了原有信号的频谱特征，没有造成信号的失真和主要成分的丢失。

为说明去噪前后的效果，利用李成武等^[32]提出的信噪比 R_{sn} 和能量百分比 $E_{sn}/\%$ 对降噪前后信号进行比较。原始信号的信噪比默认为 0 dB，对比结果表明，降噪后的新信号保留了原始信号的能量特征，最大值高达 99.65%，最小值也达到 90.93%，与原始信号能量持平。在信噪比方面，受噪声干扰严重的 CH1, CH2 和 CH11 的信噪比分别达到 7.73, 0.81 和 18.38 dB；而较“干净”的 CH5, CH6 和 CH12 三通道的信噪比达到 27.23, 41.35 和 27.68 dB，分别对应的能量百分比为 99.62%，99.65% 和 97.18%。由此可以看出，经过 MWPT 预处理的微震信号具有较高的信噪比(均约 12.67 dB)和能量百分比(均约 97.15%)，既保留了原始信号的能量特征，同时实现了有效降噪，这为下一步的初至时刻精确拾取提供了帮助。MWPT 降噪效果对比如表 3 所示。

5.2 初至到时拾取

根据节 4.3 提出的 IAIC 到时计算模型，对图 1 中 CH1~CH12 通道内微震波形的初至到时进行拾取。为了检验 IAIC 算法，同时利用常用的 ER(长短时窗能量比法)、MER(改进时窗能量比法^[33])、WFM(改进时窗能量比法^[34])和 PAI-S/K(波形斜度、峰度拾取法，二者取最优结果)4 种到时拾取算法对上述波形进行了处理，各算法拾取的参数如表 4 所示。

表 3 MWPT 降噪效果对比
Table 3 Comparison of denoising results using MWPT method

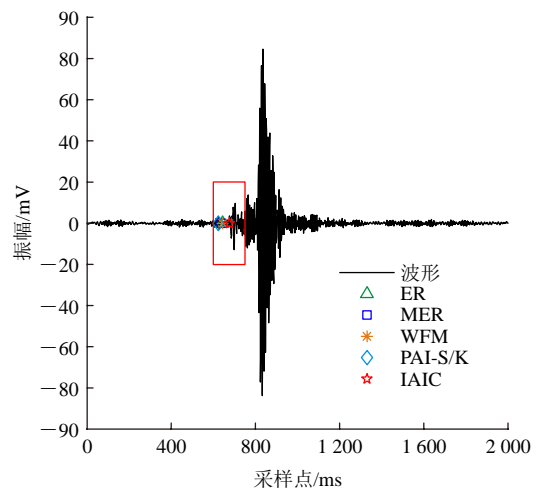
编号	信噪比 R_{sn}/dB		能量百分比 $E_{sn}/\%$
	降噪前	降噪后	
CH1	0.00	7.73	92.92
CH2	0.00	0.81	90.93
CH3	0.00	3.36	98.47
CH4	0.00	3.40	99.21
CH5	0.00	27.23	99.62
CH6	0.00	41.35	99.65
CH7	0.00	1.96	98.55
CH8	0.00	9.63	98.76
CH9	0.00	5.49	98.66
CH10	0.00	4.97	98.10
CH11	0.00	18.38	93.69
CH12	0.00	27.68	97.18

表 4 到时拾取方法及其参数

Table 4 First arrival picking methods and parameter values

编号	算法名称	参数设置
1	ER	长时窗长度 $Nlta = 120$ ms、短时窗长度 $Nsta = 50$ ms, 起跳触发阈值 $\lambda = 2$
2	MER	长时窗长度 $Nlta = 120$ ms、短时窗长度 $Nsta = 50$ ms, 起跳触发阈值 $\lambda = 2$
3	WFM	长时窗长度 $Nlta = 200$ ms、短时窗长度 $Nsta = 100$ ms, 起跳触发阈值 $\lambda = 2$
4	PAI-S/K	信号长度 $m = 60$ ms
5	AIC	特征函数选取表 1 中 CF1
6	IAIC	(1) 预先采用 STA/LTA 全局搜索参数为： $Nlta = 200$ ms, $Nsta = 100$ ms, $\lambda_1 = 1.3$ 和 $\lambda_2 = 0.7$
		(2) 局部识别采用 AIC 法参数为：特征函数为 CF1

以 CH7 通道为例(见图 10)，图中曲线为该次事件的振幅 - 时间曲线，各类标志符号分别代表 5 种



(a) 初至拾取结果

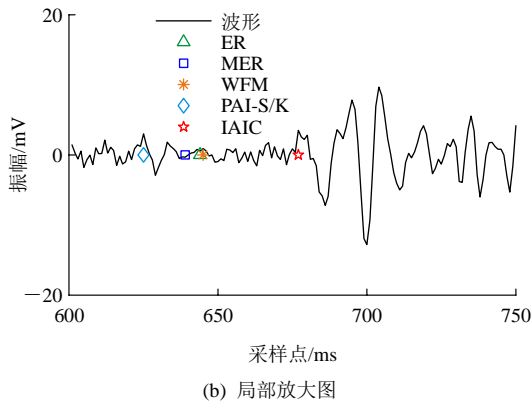
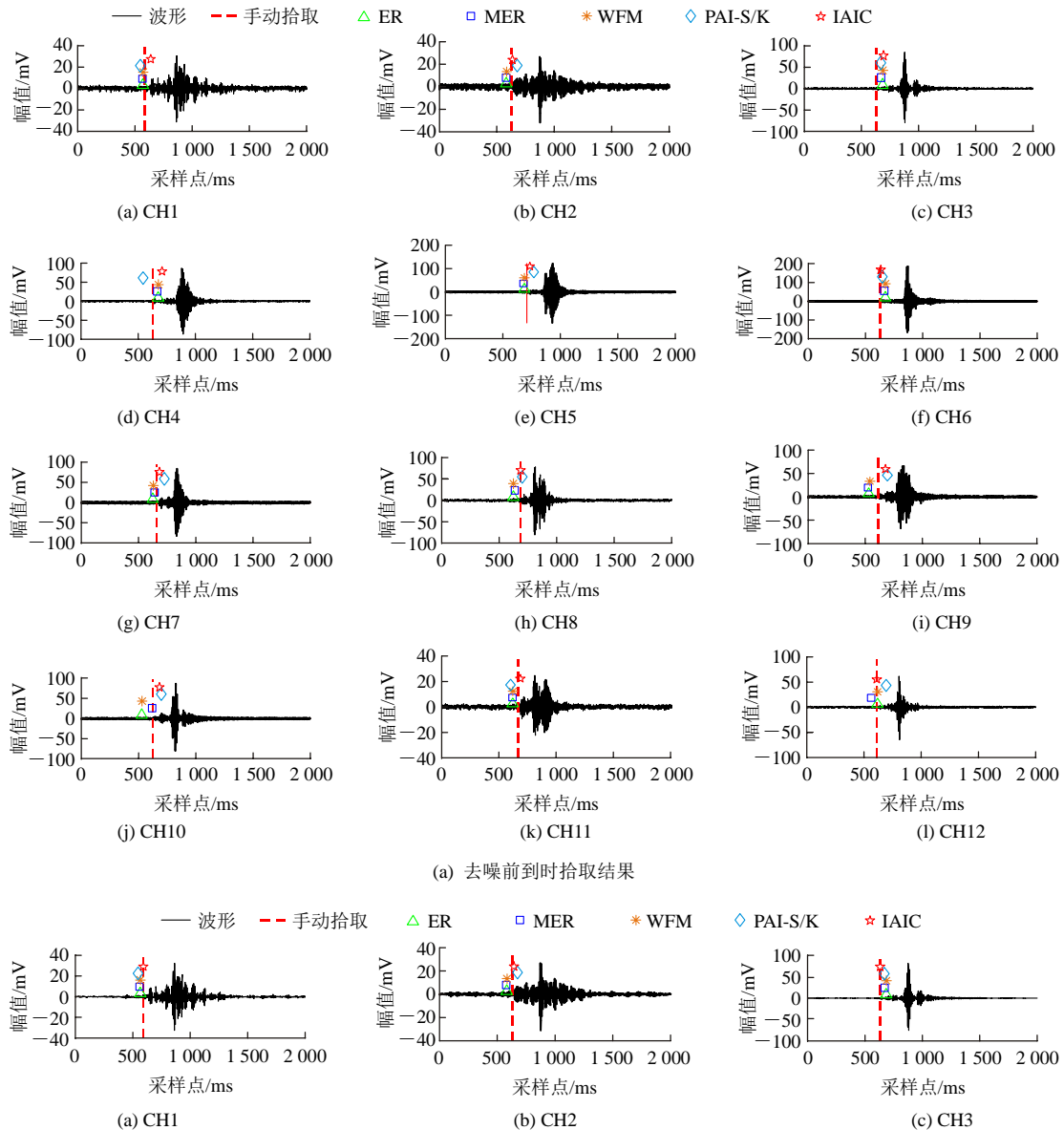


图 10 CH7 通道初至拾取结果示意图

Fig.10 First arrival pick of microseismic signals from channel 7

方法所拾取得到的初至到时时刻。从图 10(b)中可以看出, IAIC 法拾取精度更高, 另外 4 种方法具有一定的滞后性。

所有通道的最终计算结果如图 11 所示, 从图中可以看出, 水力压裂微震波形的振幅普遍较低 (<200 mV), 普遍分布于 -100~100 mV 范围, 信号信噪比不高, 同时由于监测范围较小, P 波、S 波混叠, 这些都增大了初至到时的精确拾取难度。利用时窗比类的拾取方法(ER 算法等), 其结果受振幅影响较大, 该类方法在 P 波位置触发较为迟钝, 在 S 波起跳位置更为灵敏, 其拾取结果往往滞后于真实到时。另一方面, 信号的信噪比对不同拾取算法影响不同。在初至时刻起跳明显时, 五类算法均能准确拾取, 但当起跳时刻不明显或背景噪声较大时, 这些算法往往不能准确判断到时。图 11(a), (b) 中结果显示, 去噪前后各算法的拾取结果均有变化。从最终结果来看, 5 种算法的拾取结果分布于手动拾取结果的周围, 但总体而言, 以本文方法所取得效果最佳。



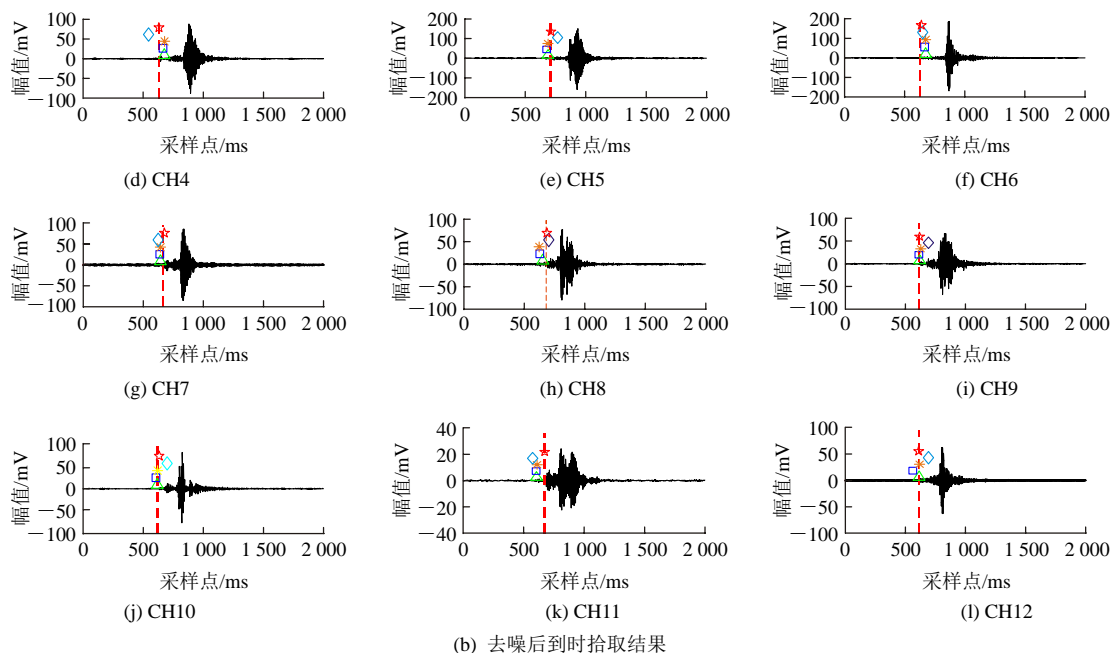


图 11 典型微震事件各通道波形及到时拾取结果

Fig.11 Typical hydraulic fracturing microseismic waveforms and results of first arrival picks

5.3 误差对比分析

为了更清晰地观察各方法拾取的结果及误差大小, 将人工手动拾取与自动拾取的结果进行对比, 最终结果如表 5 和 6 所示(为便于观察, 所有通道数据均为截取的 2 000 采样点数据)。从表中可以看出, 在去噪前各通道内的平均误差值达到了 44.32 ms。从“横向”通道内误差来看, 各通道内均大于 20 ms, 其中 CH3, CH4, CH9, CH10, CH11 这些通道内的平均误差较高(>40 ms), 最高为 CH9 通道的 77.2 ms; 而去噪后, 信号自身发生较大变化, 信噪比得

到提高, 通道内平均误差降低为 32.5 ms, CH9 和 CH10 通道误差分别由 77.2, 64.6 ms 降至 22.4, 21.8 ms, 得到显著降低。

从纵向上看, 去噪前 IAIC 误差最小, 为 34.17 ms; ER, MER, WFM 三种方法拾取误差接近, 分别为 46.75, 38.75 和 44.58 ms; PAI-S/K 的误差最大, 达到 57.33 ms。而去噪后, 除 PAI-S/K 算法外, 其余 4 种算法拾取精度均有所提高。其中, ER, MER, WFM 三种算法依然稳健, 且到时拾取精度有所提高, 三者拾取误差的平均值分别由 46.75,

表 5 人工拾取与自动方法拾取结果对比(去噪前)

Table 5 Comparison between manual and automatic picks(not denoising)

编号	人工手动拾取	ER		MER		WFM		PAI-S/K		IAIC		通道内误差/ms
		到时/ms	误差/ms	到时/ms	误差/ms	到时/ms	误差/ms	到时/ms	误差/ms	到时/ms	误差/ms	
CH1	587	569	18.00	566	21.00	572	15.00	546	41.00	638	51.00	29.20
CH2	628	582	46.00	582	46.00	588	40.00	677	49.00	646	18.00	39.80
CH3	635	687	52.00	673	38.00	689	54.00	670	35.00	695	60.00	47.80
CH4	630	676	46.00	666	36.00	679	49.00	544	86.00	710	80.00	59.40
CH5	709	688	21.00	681	28.00	688	21.00	769	60.00	735	26.00	31.20
CH6	628	676	48.00	666	38.00	676	48.00	650	22.00	635	7.00	32.60
CH7	662	624	38.00	640	22.00	630	32.00	725	63.00	683	21.00	35.20
CH8	682	623	59.00	636	46.00	624	58.00	702	20.00	687	5.00	37.60
CH9	613	532	81.00	525	88.00	542	71.00	694	81.00	678	65.00	77.20
CH10	621	528	93.00	620	1.00	532	89.00	699	78.00	683	62.00	64.60
CH11	670	618	52.00	617	53.00	620	50.00	599	71.00	684	14.00	48.00
CH12	612	619	7.00	564	48.00	620	8.00	694	82.00	613	1.00	29.20
平均误差	-	-	46.75	-	38.75	-	44.58	-	57.33	-	34.17	44.32

表 6 人工拾取与本文方法拾取结果对比(去噪后)
Table 6 Comparison between manual and automatic picks(denoising)

编号	人工手动拾取	ER		MER		WFM		PAI-S/K		IAIC		通道内误差/ms
		到时/ms	误差/ms	到时/ms	误差/ms	到时/ms	误差/ms	到时/ms	误差/ms	到时/ms	误差/ms	
CH1	587	565	22.00	559	28.00	566	21.00	546	41.00	592	5.00	23.40
CH2	628	582	46.00	577	51.00	585	43.00	677	49.00	645	17.00	41.20
CH3	635	686	51.00	673	38.00	688	53.00	670	35.00	633	2.00	35.80
CH4	630	676	46.00	666	36.00	679	49.00	545	85.00	632	2.00	43.60
CH5	709	688	21.00	679	30.00	688	21.00	769	60.00	713	4.00	27.20
CH6	628	676	48.00	666	38.00	676	48.00	650	22.00	639	11.00	33.40
CH7	662	644	18.00	639	23.00	645	17.00	625	37.00	677	15.00	22.00
CH8	682	653	29.00	628	54.00	624	58.00	702	20.00	687	5.00	33.20
CH9	613	621	8.00	613	0.00	629	16.00	694	81.00	620	7.00	22.40
CH10	621	618	3.00	606	15.00	621	0.00	699	78.00	634	13.00	21.80
CH11	670	608	62.00	603	67.00	611	59.00	575	95.00	674	4.00	57.40
CH12	612	616	4.00	562	50.00	620	8.00	694	82.00	612	0.00	28.80
平均误差	-	-	29.83	-	35.83	-	32.75	-	57.08	-	7.08	32.52

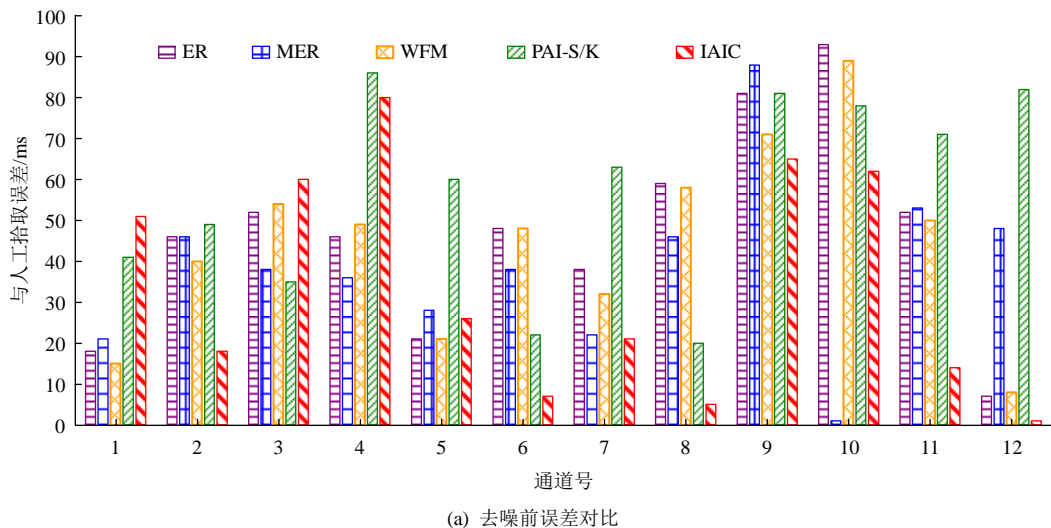
44.58 和 34.17 ms 减小至 29.83, 32.75 和 7.08 ms; 而 PAI-S/K 算法在去噪前后拾取的到时变化不大, 平均误差由 57.33 ms 降为 57.08 ms; IAIC 是 5 种算法中精度最高的, 去噪前后的误差值由 34.17 ms 降低至 7.08, 表明本文提出的 MWPT 去噪法对 IAIC 的影响较为明显, IAIC 法对信噪比变化较为敏感, 信噪比的提高使拾取的到时更逼近真实值。

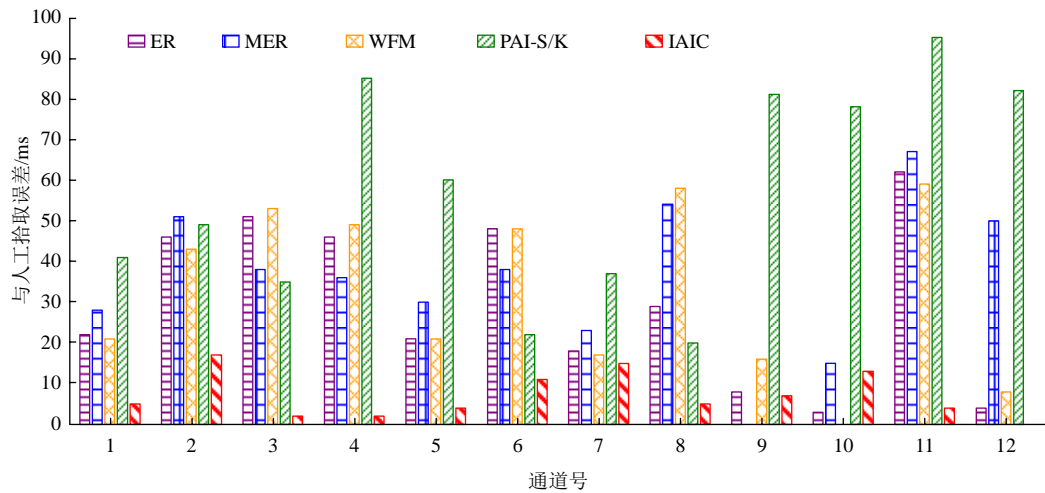
将表 5 和 6 中的关键数据进行对比, 并以直方图方式进行展示, 其结果如图 12 和 13 所示。将各通道去噪前、后自动定位结果与手动拾取结果误差进行对比, 结果如图 12(a)和(b)所示, 分别为去噪前、后初至自动与手动拾取结果的误差分布直方图。

经过图 12(a)和(b)对比可以看出, PAI-S/K 算法相对稳定, 受去噪影响较小, 去噪后平均误差变化

不断(由 57.33 ms 降低为 57.08 ms), 大部分通道误差仍在 40 ms 以上。除去 PAI-S/K 算法以外, 其他算法去噪前后变化较大, 如 CH4, CH9, CH10 通道, 这些通道的自动拾取误差大于 40 ms 甚至 60 ms, 而去噪后各通道误差有所减少, 尤其是 CH9, CH10 通道锐减到 20 ms 以内。

从图 13 可以看出, 去噪后各算法的误差平均值有所变化, 除了 PAI-S/K 算法拾取到时平均误差由 57.33 ms 降低至 57.08 ms, 这也从侧面表明, PAI-S/K 算法稳定强健, 不易受到信号信噪比高低影响; 而其他算法的拾取精度均有所提高, 这其中 IAIC 法尤为明显, 其拾取平均误差由 34.17 ms 降低至 7.08 ms, 这表明 IAIC 法抗干扰能力较弱, 在高信噪比条件拾取精度更高。





(b) 去噪后误差对比

图 12 人工拾取与本文方法拾取误差分布图

Fig.12 Histogram of the comparison between manual and automatic picks

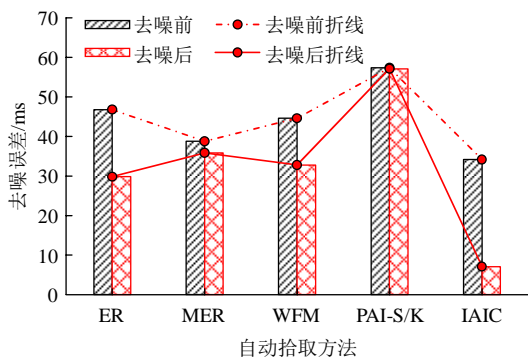


图 13 去噪前后自动拾取算法误差对比

Fig.13 Comparison between manual and automatic picks

为了说明 IAIC 法在信噪比因素下的影响，将去噪前后的误差及信噪比关系进行对比分析，结果如图 14 所示。可以看出，与其他方法相比，IAIC 受信号信噪比影响较大，这由去噪后平均误差减少了约 4/5 可以充分体现。联合表 3 中的信噪比变化特点，可以看出去噪后信号信噪比大于 4 dB 时，到时

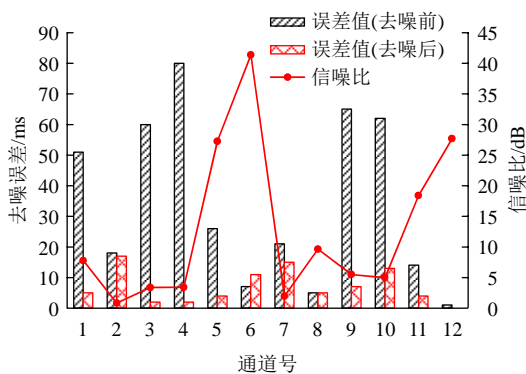


图 14 IAIC 法去噪前后误差对比图

Fig.14 Comparison between before and after denoising using IAIC method

拾取误差变化幅度普遍较大；而当信噪比小于 4 dB 时，误差变化幅度较小。由此得出结论，在信噪比得到大幅提升之后，信号的初至到时时刻误差得到有效降低，这与“信号的信噪比越高拾取的精度越高”的结论基本吻合。从 IAIC 算法误差的分布区间来看，IAIC 自动拾取与人工拾取的误差值分布较为集中(12 个通道内误差分布在 -20~20 ms 范围)，其中 -5~5 ms 误差间隔内有 7 个(占比 58.33%)，10 ms 间隔内 8 个(占比 66.67%)，10~20 ms 范围内 4 个。这表明，IAIC 自动拾取到时的精度基本满足现场需求。

总体而言，去噪后 IAIC 算法效果最佳，而其他算法相对影响较小，这与拾取算法自身的计算模式有关。ER, MER, WEM 算法属于同一类型算法体系(时窗算法)，其拾取精度与时窗选择、判断阈值大小密切相关，虽然特征值计算不同会影响最终计算速度，但三者计算精度上十分接近，可以看出 STA/LTA 体系算法的优点是稳定可靠，缺陷是拾取初至到时的时滞一般滞后于实际时刻。PAI-S/K 算法的精度对信号划分长度的要求较高，不同划分长度得到的拾取结果不同。

5.4 性能分析

为了定量对比几种方法的性能，笔者对上述 12 通道内触发的完整数据进行分析，并以手动拾取到时作为参照，将本文方法及其他几种方法与其进行对比分析，计算得出各算法的耗时和拾取精度。到时拾取计算的计算机环境为：操作系统 Windows 10 专业版，处理器 Interl(R) Core(TM) i7 - 7700K，CPU 4.20 GHz，内存 16 GB；MATLAB 的版本号为 R2017a。二者的最终对比结果如表 7 所示。

表7 人工拾取与本文方法拾取结果对比

Table 7 Comparison of picking method in terms of speed and accuracy

编号	拾取精度/ms	计算耗时/s	编号	拾取精度/ms	计算耗时/s
ER	29.83	0.278	PAI-S/K	57.08	14.006
MER	35.83	29.751	AIC	23.62	10.534
WFM	32.75	4.181	IAIC	7.08	0.124

由于现场采用连续采集方式进行, 触发微震数据长度为 40 428 采样点(即 40 428 ms), 12 个通道数据共 485 136 采样点(12 个数据文件)。整个到时拾取过程包括信号去噪和到时拾取 2 个步骤, 因此, 运算速度受到去噪计算和到时拾取计算影响。经过对比可以看出, ER 算法运算速度相对较快, 但拾取到时的精度还有待提高; MER 算法耗时最多, 高达 29.751 s, 这与算法中的平方计算有关; PAI-S/K 算法耗时次之(14.006 s), 其主要缺陷在于到时拾取精度不高。AIC 法在改进前后, 拾取模型的运算速度也有较大变化。在改进前, AIC 算法运算速度为 10.534 s, 而利用 STA/LTA 进行全局搜索后的改进 IAIC 法仅需 0.124 s, 高于 ER 的 0.278 s。由此可见, IAIC 法不仅精度高于上述算法, 计算速度同样出众。

利用本文所提出方法, 一定程度上提高了矿山微震波初至到时拾取的精度和自动化程度, 这为后续的微震自动定位计算奠定了基础。但要实现真正意义上的无人值守、快速预警, 仍有大量工作需要进一步开展, 如提高微震信号分辨率、有效波形的识别以及外场微震事件到时的选取与判断问题等。这也将是笔者未来研究的内容之一。

6 结 论

(1) 煤层水力压裂信号具有“低能量、短持续时长、频域范围集中”的特性, 利用 MWPT 多阈值去噪法可以对信号不同频段采用不同去噪规则进行去噪处理。实践结果表明, 该方法在提高微震信号的信噪比的同时, 保留了信号的能量特征, 这为初至到时的精确拾取奠定基础。

(2) 改进的 IAIC 到时拾取算法增加了快速搜索模块(利用最大峰值和 STA/LTA 快速判断可以快速搜寻微震信号的初至时刻)和精确拾取模块(区间划分、局部与全局拾取), 解决了 AIC 特征值出现多个波谷难以确立初至的难题。相比常规 AIC 算法, IAIC 拾取误差由 23.62 ms 锐减至 7.08 ms, 并且大大减少了数据处理的计算量和时间(由 10.534 s 减少至

0.124 s)。

(3) 利用 ER, MER, WFM, PAI-S/K 以及本文方法 IAIC, 对煤层水力压裂微震波形进行到时拾取处理。结果表明, PAI-S/K 法相对稳定, 但受限于信号划分长度; 时窗体系算法(ER, MER 和 WFM)对时窗要求较高, 其拾取误差往往滞后于真实到时; IAIC 法在拾取精度和时间上有较大改进。

(4) MWPT 法和 IAIC 法联合拾取初至到时, 两种方法相辅相成, 有效提高了到时拾取的精度和速度。通过对人工拾取和 IAIC 自动拾取两类方法的对比分析, 结果表明, 利用本文方法拾取结果平均误差在 $-10 \sim 10$ ms 范围的占比 66.67%, $-20 \sim 20$ ms 范围的占比 100%, 此外, 本文所提出方法算法耗时为 0.124 s, 远远快于人工拾取。由此可见, 本文方法基本满足现场需求。

参考文献(References):

- [1] 王彩霞, 白超英, 王 馨. 地震震相初至自动检测技术综述[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(5): 2 363 - 2 375.(WANG Caixia, BAI Chaoying, WANG Xin. Review of automatic onset time picking for seismic arrivals[J]. Progress in Geophys, 2013, 28(5): 2 363 - 2 375. (in Chinese))
- [2] TAWFIEK A M, TAN G, HAFEZ A G, et al. Automatic identification of fake patterns caused by short-width wavelets in seismic data[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(11): 1 - 7.
- [3] XUE Y, CAO J, TIAN R, et al. Wavelet-based cepstrum decomposition of seismic data and its application in hydrocarbon detection[J]. Geophysical Prospecting, 2016, 64(6): 1 441 - 1 453.
- [4] LIU G, ZONG T, ZHANG K, et al. Improving both seismic signal-noise ratio and resolution by vertical wavelet package transform and lateral polynomial fitting[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1995, 30(5): 584 - 592.
- [5] LI W, LIU Y K, LIU B J. Downhole microseismic signal recognition and extraction based on sparse distribution features[J]. Chinese Journal Geophysics, 2016, 59(10): 3 869 - 3 882.
- [6] ALLEN R V. Automatic earthquake recognition and timing from single traces[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1978, 68(5): 1 521 - 1 532.
- [7] 刘 晗, 张建中. 微震信号自动检测的 STA/LTA 算法及其改进分析[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(4): 1 708 - 1 714.(LIU Han, ZHANG Jianzhong. STA/LTA algorithm analysis and improvement of Microseismic signal automatic detection[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(4): 1 708 - 1 714.(in Chinese))
- [8] ZHU Q, FENG Y, CAI M, et al. Interpretation of the extent of hydraulic fracturing for rockburst prevention using microseismic monitoring data[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 38: 107 - 119.
- [9] SABBIONE J I, VELIS D. Automatic first-breaks picking: New strategies and algorithms[J]. Geophysics, 2010, 75(4): 67 - 76.
- [10] GOU X, LI Z, NA Q, et al. Adaptive picking of microseismic event

- arrival using a power spectrum envelope[J]. *Computers and Geosciences*, 2011, 37(2): 158 - 164.
- [11] GIBBONS S J, RINGDAL F, KVÆRNA T. Detection and characterization of seismic phases using continuous spectral estimation on incoherent and partially coherent arrays[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 2008, 172(1): 405 - 421.
- [12] ZHAO Y, LIU Y, LI X, et al. Time-frequency domain SNR estimation and its application in seismic data processing[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2014, 107(4): 25 - 35.
- [13] BOSCHETTI F. A fractal-based algorithm for detecting first arrivals on seismic traces[J]. *Geophysics*, 1996, 61(4): 1 095 - 1 102.
- [14] 常旭, 刘伊克. Hausdorff 分数维识别地震道初至走时[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(6): 826 - 832.(CHANG Xu, LIU Yike. Distinguishing seismic first break by means of Hausdorff fractal dimension[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1998, 41(6): 826 - 832.(in Chinese))
- [15] MOLYNEUX J B, SCHMITT D R. First-break timing: Arrival onset times by direct correlation[J]. *Geophysics*, 1999, 64(5): 1 492 - 1 501.
- [16] MCCORMACK M D, ZAUCHA D E, DUSHEK D W. First-break refraction event picking and seismic data trace editing using neural networks[J]. *Geophysics(United States)*, 1993, 58(1): 67.
- [17] 潘树林, 高磊, 邹强, 等. 一种实现初至波自动拾取的方法[J]. *石油物探*, 2005, 44(2): 163 - 166.(PAN Shulin, GAO lei, ZOU Qiang, et al. An automatic method to pick up the first break time[J]. *GPP*, 2005, 44(2): 163 - 166.(in Chinese))
- [18] YUNG S K, IKELLE L T. An example of seismic time picking by third-order bicoherence[J]. *Geophysics*, 1997, 62(6): 1 947 - 1 952.
- [19] SARAGIOTIS C D, HADJILEONTIADIS L J, PANAS S M. PAI-S/K: A robust automatic seismic P phase arrival identification scheme[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(6): 1 395 - 1 404.
- [20] TAKANAMI T, KITAGAWA G. Estimation of the arrival times of seismic waves by multivariate time series model[J]. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 1991, 43(3): 407 - 433.
- [21] 刘劲松, 王赟, 姚振兴. 微地震信号到时自动拾取方法[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(5): 1 660 - 1 666.(LIU Jinsong, WANG Yun, YAO Zhenxing. On micro-seismic first arrival identification: A case study[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(5): 1 660 - 1 666. (in Chinese))
- [22] 张唤兰, 朱光明, 王云宏. 基于时窗能量比和 AIC 的两步法微震初至自动拾取[J]. *物探与化探*, 2013, 37(2): 269 - 273.(ZHANG Huanlan, ZHU Guangming, WANG Yunhong. Automatic microseismic event detection and picking method[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2013, 37(2): 269 - 273.(in Chinese))
- [23] 田优平, 赵爱华. 基于小波包和峰度赤池信息量准则的 P 波震相自动识别方法[J]. *地震学报*, 2016, 38(1): 71 - 85.(TIAN Youping, ZHAO Aihua. Automatic identification of P-phase based on wavelet packet and Kurtosis-AIC method[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2016, 38(1): 71 - 85.(in Chinese))
- [24] 贾瑞生, 谭云亮, 孙红梅, 等. 低信噪比微震 P 波震相初至自动拾取方法[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(8): 1 845 - 1 852.(JIA Ruisheng, TAN Yunliang, SUN Hongmei, et al. Method of automatic detection on micro-seismic P-arrival time under low signal to noise ratio[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(8): 1 845 - 1 852.(in Chinese))
- [25] 朱梦博, 王李管, 彭平安, 等. 微震 P 波到时拾取的 PAI-k-MFV 算法改进及应用[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(10): 2 698 - 2 705.(ZHU Mengbo, WANG Liguang, PENG Ping'an, et al. Modified PAI-k-MFV picker of picking microseismic P-wave arrival time and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(10): 2 698 - 2 705.(in Chinese))
- [26] 朱权洁, 姜福兴, 于正兴, 等. 爆破震动与岩石破裂微震信号能量分布特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(4): 723 - 730.(ZHU Quanjie, JIANG Fuxing, YU Zhengxing, et al. Study on energy distribution characters about blasting vibration and rock fracture microseismic signal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(4): 723 - 730.(in Chinese))
- [27] KALKAN E. An automatic P-phase arrival-time picker[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, 106(3): 971 - 986.
- [28] ZHANG H. Automatic P-Wave arrival detection and picking with multiscale wavelet analysis for single-component recordings[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93(5): 1 904 - 1 912.
- [29] MAEDA N. A method for reading and checking phase times in autoprocessing system of seismic data[J]. *Zisin*, 1985, 38(3): 365 - 380.
- [30] LI H, TUO X, SHEN T, et al. A new first break picking for three-component VSP data using gesture sensor and polarization analysis[J]. *Sensors*, 2017, 17(9): 2 150 - 2 163.
- [31] ABIABDALLAH D, CHAUVET E, BOUCHETFAKRI L, et al. Reference signal extraction from corrupted ECG using wavelet decomposition for MRI sequence triggering: application to small animals[J]. *BioMedical Engineering on Line*, 2006, 5(1): 11 - 23.
- [32] 李成武, 解北京, 杨威, 等. 基于 HHT 法的煤冲击破坏 SHPB 测试信号去噪[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(11): 1 796 - 1 802.(LI Chengwu, XIE Beijing, YANG Wei, et al. Coal impact damage SHPB testing signal de-noising based on HHT method[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(11): 1 796 - 1 802.(in Chinese))
- [33] LI H, WONG J, BANCROFT J. Time picking and random noise reduction on microseismic data[J]. *CREWES Research Report*, 2009, 21: 1 - 13.
- [34] 朱权洁, 姜福兴, 王存文, 等. 微震波自动拾取与多通道联合定位优化[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(3): 397 - 403.(ZHU Quanjie, JIANG Fuxing, WANG Cunwen, et al. Automated microseismic event arrival picking and multi-channel recognition and location[J]. *Journal of China Society*, 2013, 38(3): 397 - 403.(in Chinese))