DOI：10.3724/1000-6915.jrme.2025.0501

基于时窗信号能量和时频特征的微震信号时间定位拾取方法

周琳力[1, 2, 3*]，韦米香[1]，韩 军[2]，贾宝新[1, 4]，卜 继[1]，崔博源[1]

（1. 辽宁工程技术大学 土木工程学院，辽宁 阜新 123000；2. 辽宁工程技术大学 矿业学院，辽宁 阜新 123000；3. 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室，安徽 淮南 232001；4. 辽宁工程技术大学 辽宁省废弃矿区生态修复技术重点实验室，辽宁 阜新 123000）

摘要：为准确解译微震事件，防止因背景噪声滤波导致的时间定位偏移，在保留背景噪声条件下提高微震信号时间定位拾取精度。通过计算时窗信号能量快速定位信号起止时刻，以及分析信号时频特征捕捉瞬时频率突变点，实现信号时间定位精确拾取，提出基于时窗信号能量（time window energy，TWE）和时频特征（time frequency characteristics，TFC）联合（TWE-TFC）的时间定位拾取方法。采用模拟信号、模型试验信号和现场监测信号验证方法性能，并与长短时窗（STA/LTA）法、赤池信息准则（AIC）法及 2 个独立方法 TWE 法和 TFC 法进行对比。研究结果表明：（1）矿震信号到达和离开检波器前后，在信号能量和瞬时频率 2 个参数上表现出明显的突变特征，是实现时间定位拾取的关键；（2）在单一时域或频域内，不能完全展现矿震信号起始和终止时刻的特征，需联合时频域特征参数提升时间定位精度；（3）TWE-TFC 法较 STA/LTA 和 AIC 法对信号起始点的拾取精度提高了 67.76%以上，并补充了对信号终止时刻的拾取能力；（4）TWE-TFC 法较单独的 TWE 法和 TFC 法，时间定位拾取平均误差减少了 68.11%以上。

关键词：采矿工程；微震监测；时窗信号能量；时频特征；时间定位；背景噪声

中图分类号：TD 76 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－6915(2026)03－0875－17

***通信作者**：周琳力（1995－），现任讲师，主要从事矿山微震监测信号处理与工程解译方面的研究工作。E-mail：larryzll@163.com

Time localization picking method for microseismic signals based on time window energy and time frequency characteristics

ZHOU Linli[1, 2, 3*], WEI Mixiang[1], HAN Jun[2], JIA Baoxin[1, 4], BU Ji[1], CUI Boyuan[1]

(1. *School of Civil Engineering*, *Liaoning Technical University*, *Fuxin*, *Liaoning* 123000, *China*; 2. *College of Mining*, *Liaoning Technical University*, *Fuxin*, *Liaoning* 123000, *China*; 3. *Key Laboratory of Safe and Effective Coal Mining*, *Ministry of Education*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan*, *Anhui* 232001, *China*; 4. *Liaoning Key Laboratory of Ecological Restoration Technology in Abandoned Mining Area*, *Liaoning Technical University*, *Fuxin*, *Liaoning* 123000, *China*)

Abstract: To accurately interpret microseismic events and alleviate time localization deviations caused by background noise filtering, this study improves the time localization picking accuracy of microseismic signals is enhanced while preserving the background noise. The time window energy is calculated to quickly locate the arrival and end times of the signal, and the time-frequency characteristics of the signal are analyzed to identify instantaneous

收稿日期：2025－07－14；**修回日期**：2025－10－25

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目（52404082）；辽宁省教育厅高校基本科研项目青年项目（LJ212510147045）；煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室开放基金项目（JYBSYS202308）

Supported by the Young Scientists Fund of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52404082), Youth Project of Basic Scientific Research Project for Universities of Educational Department of Liaoning Province (Grant No. LJ212510147045) and Open Foundation of Key Laboratory of Safe and Effective Coal Mining, Ministry of Education (Grant No. JYBSYS202308)

frequency mutation points, thus achieving precise time localization of the signal. We propose a time localization picking method (TWE-TFC) based on the joint integration of time window energy (TWE) and time-frequency characteristics (TFC). The performance of this method is validated using simulated signals, model test signals, and field monitoring signals, and it is compared with the STA/LTA method, the AIC method, and the two independent methods—the TWE and TFC methods. The research findings indicate that: (1) Distinct mutation characteristics in signal energy and instantaneous frequency are exhibited when mine seismic signals arrive at and depart from the geophone, which are crucial for achieving accurate time localization picking; (2) Characteristics of the arrival and end times of the mine seismic signals cannot be fully represented in a single time or frequency domain, which requires integrating time-frequency domain characteristic parameters to improve time localization accuracy; (3) Compared to the STA/LTA method and the AIC method, the proposed TWE-TFC method improves the picking accuracy of the signal arrival time by more than 67.76% and improves the capability to pick signal end time; (4) In comparison to the standalone TWE and TFC methods, the average time localization picking error of the TWE-TFC method is reduced by more than 68.11%.

Key words: mining engineering; microseismic monitoring; time window energy; time frequency characteristics; time localization; background noise

***Corresponding author:** ZHOU Linli (1995－), assistnat professor, is engaged in microseismic monitoring signal processing and engineering interpretation. E-mail: larryzll@163.com

1　引　言

微震监测技术作为矿山工程安全预警与稳定性评估的核心手段，是智慧矿山建设中不可或缺的基础保障技术[1-3]。该技术已在煤矿开采、隧道建设以及油气田开发等多个领域实现了广泛应用[4-5]。通过捕捉和分析地下微震信号，能够对矿井和隧道工程中的煤岩体破裂源进行定位，并对潜在灾害风险进行预测与评估[6]。C. Zhang 等[7]利用微震监测技术对煤矿岛式工作面的岩爆进行预测。H. Jia 等[8]通过分析微震信号特征，提前识别采空区的潜在失稳风险，为矿山开采过程中的灾害预防提供依据。樊　鑫等[9]指出，通过实时监测顶板的微震活动，可以有效地预测和防治顶板水害，从而保障矿井的安全运行。李天斌等[10]利用深度学习算法对微震数据进行分析，提高了岩爆预警的准确性和实时性。许延春和黄　磊[11]通过综合分析微震数据和地质信息，提出了一种基于微震监测的工作面底板突水全时空预警方法。可见，微震监测技术在矿山工程安全预警方面已取得一定的成效，但是微震监测在震源定位、信号时间定位[12](本文指起始时刻和终止时刻)等应用过程中仍面临一些难题，如微震信号易受到环境噪声的干扰，导致监测信号解译受到影响[13]。

微震源定位是微震监测的核心，而信号到时拾取精度是确保定位结果准确可靠的关键因素之一。准确地拾取微震信号的起止时刻能够为定位算法提供更可靠的时间参数，从而减少定位误差[14-15]。随着信号处理技术、机器学习和计算能力的快速发展，微震信号的时间参数拾取方法取得了显著进展。然而，微震处理软件的拾取功能仍难以满足工程应用需求[16]。微震信号本身具有复杂多变的特性，其波形、能量、频率和幅度等特征会因地质条件、检波器性能以及噪声干扰等因素的不同而产生显著差异。这些差异使得到时拾取面临诸多挑战，噪声与微震信号的混合导致难以准确拾取信号的起始点和结束点，进而无法确定微震信号的持续时间。为保证时间参数的拾取精度，通常需要对微震信号进行降噪处理。然而，这不可避免地造成有效信号损失，进而影响到拾取的可靠性[17]。例如，基于小波变换的去噪方法虽然可以有效分离有效信号与噪声，但也可能在去噪过程中丢失部分微震信号特征[18]。因此，如何在去噪与保留信号特征之间取得平衡是微震监测技术中需要解决的问题。

微震信号的起始时刻、终止时刻及持续时间等的拾取方法通常依赖于信号的多域特征，而单一的时域或频域特征往往难以满足复杂微震信号的识别需求。近年来，研究者普遍致力于改进传统拾取方法，以提升微震信号到时拾取的准确性与可靠性。例如，赵扬锋等[19]提出了一种结合质量寻优和归一化长短时窗法(Short Time Average over Long Time Average，STA/LTA)的方法。贾宝新等[20]提出了一种基于时频分析的联合到时拾取方法，能够同时拾取微震信号的 P 波和 S 波到时。X. Shang 等[21]提出了

一种改进的 P 波到时拾取方法，该方法在高信噪比条件下效果显著，但当信号质量较差、信噪比较低时，拾取的准确性下降。因此，孟 娟等[22]通过改进长短时窗比值并结合优化变分模态分解，进一步提升了 STA/LTA 法的性能，在复杂的信号环境下表现出较好的抗噪性。Z. Zhou 等[23]提出了一种基于离散小波变换、修正能量比和 AIC(赤池信息准则，Akaike Information Criterion)的联合方法。A. Cheng 等[24]结合了时域短时能量、倒谱域和统计域峰度，再进行 K-means 聚类，以实现精确地拾取微震信号起始时刻。这些方法精确拾取含噪声信号的起始时刻，但由于拾取方法计算量的增加，可能导致在实时监测系统中部署受到限制。刘晓佳等[25]结合了时窗熵和冲击波到时提取技术，提出了一种新的起始时刻拾取方法，但对于非冲击波信号拾取表现仍需进一步验证。肖晓春等[26]提出了一种结合 P 波到时拾取的分析法和遗传算法的联合定位方法，但为了提高信号质量，对微震信号进行去噪处理，造成了有效信号的丢失。此外，普遍拾取方法未关注微震信号终止时刻，不能进一步确定微震事件持续时间，进而难以定量计算事件信号能量，限制了对微震事件响应的评估。

上述研究方法通常基于单一维度(如仅依赖信号能量或时域特征)进行到时拾取，并对阈值设定具有较强依赖性，从而限制了其在复杂噪声环境中的适用性。因此，本研究针对含背景噪声的微震信号，提出了一种基于时窗信号能量(time window energy，TWE)和时频特征(time frequency characteristics，TFC)的联合拾取方法(TWE-TFC)。通过信号能量法快速锁定微震信号起止时刻范围，再利用瞬时频率精确定位拾取时刻。该拾取方法克服了单一维度分析的局限性，降低了对阈值设定的依赖性，并在复杂噪声环境下展现出更高的拾取精度和鲁棒性，还可对微震信号终止时刻进行精确拾取，进而确定其持续时间。为实现微震事件响应的“时间、空间、能量”三域评估以及矿井动力灾害的预测和防治提供关键的参考数据。

2　基于时窗信号能量和时频特征的联合时间定位拾取方法

微震监测信号是由岩石破裂、爆破振动、机械振动等各种震源发出的震波，经岩土介质传播后被微震检波器接收获取。微震波到达时，表现为信号幅值、能量和频率等参数的突变。微震波离开后，检波器再次回落到背景噪声水平。因此，在时域上，微震信号的起始时刻是指首次表现出明显振幅突变的时刻，而信号的终止时刻可定义为幅值最后一个显著偏离点对应的时刻[27]。在时频域上，微震到达前后，瞬时频率由“剧烈起伏”骤变为“相对平稳”(或变化相反)，形成突变拐点。微震波离开前后，瞬时频率变化与微震波到达时相反。综上，本文将起始(终止)时刻定义为信号超过(恢复)背景噪声平均信号能量水平和瞬时频率突变拐点时刻。

工程现场采集的微震信号不可避免地混杂着周围环境噪声。受背景噪声的干扰，微震信号被淹没其中，时域振幅突变无法标定微震信号的起止时刻。因此，多数研究通过滤波处理提高信号信噪比，便于提取幅值突变点的时刻。但滤除背景噪声势必会导致有效微震信号的损失，进而可能导致信号起始时刻滞后和终止时刻提前，并会在震源定位、持续时间获取和能量计算等后续微震事件分析中引入误差。此外，对于现场微震监测而言，由于检波器分布于不同位置，背景噪声存在一定差异，较难统一滤波标准。因此，为了防止背景噪声过滤不足或过量，并出于保留有效信号的考虑，建立针对含背景噪声的原始信号起始和终止时刻的提取方法。利用时域上信号能量的突变和时频域上瞬时频率的突变特征[28]，来确定信号的起始时刻和终止时刻，可避免因信噪比低、背景噪声差异和有效信号丢失导致的拾取误差，进而提高对微震信号的时间定位精度。

2.1　基于时窗信号能量的时间定位拾取方法

由于在含背景噪声条件下，单纯提取振幅突变比较困难，因此考虑将反映波形整体特征的信号能量作为到时识别参数。信号与系统分析领域信号能量的计算通常基于无限积分时间如下：

$$E_{\mathrm{S}}=\lim_{T_{\mathrm{S}}\to\infty}\int_{-T_{\mathrm{S}}}^{T_{\mathrm{S}}}|f(t)|^2\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：E_{S} 为信号能量；$-T_{\mathrm{S}}$，T_{S} 分别为积分下限和上限；$f(t)$为信号函数。

而微震信号是一种时变且非周期的有限持续时间震动信号。因此，在计算微震信号能量时，只需在包含震动信号的有限时间区间$[t_1,\ t_2]$内进行积分：

$$E_{\mathrm{ms}}=\int_{t_1}^{t_2}|s(t)|^2\mathrm{d}t \tag{2}$$

式中：E_{ms} 为微震信号能量；$s(t)$为微震信号函数；t_1，t_2 分别为时间区间下限和上限。

此外，由于检波器采集的数据是离散时间序列，式(2)的积分形式可以离散化为

$$E_{\mathrm{ms}}=\sum_{m=1}^{M}s^2(m)\Delta t \tag{3}$$

式中：m 为采样点序号，M 为采样数量。

基于微震信号能量的时间定位拾取方法主要依赖于时窗比较原理。起始时刻拾取的核心思想主要是将微震信号到达前的背景噪声信号的平均能量作为到时阈值。当某一时窗信号能量达到该阈值时，即可确定为微震信号的起始时刻。TWE 法的具体步骤如下：

(1) 设含背景噪声的微震波 *MS* 的零时刻至 *MS* 在时域峰值时刻 T_{P} 的一半处 T_{bn} 的信号段为背景噪声信号 S_{bn}，并计算背景噪声信号能量 E_{bn} 和平均值 $\bar{E}_{\mathrm{bn}}=E_{\mathrm{bn}}/L_{\mathrm{bn}}$（$L_{\mathrm{bn}}$ 为背景噪声的总长度)。

(2) 对 *MS* 进行傅里叶变换，提取其全频段特征，将信号在频域中幅值峰值处对应的频率值作为该信号的中心频率 f_{cen}。根据中心频率设定时窗长度 $TW=1/(4f_{\mathrm{cen}})\times(1/f_{\mathrm{s}})$。其中，$f_{\mathrm{s}}$ 为信号采样频率。

(3) 时窗计数从 $i=0$ 开始，以峰值到时 T_{P} 作为首个信号时窗结束的位置，时窗结束时刻为 T_2，以时窗长度 *TW* 向后截取信号，信号时窗开始时刻为 T_1，时窗移动每次循环以采样间隔 $1/f_{\mathrm{s}}$ 逐步向后移动时窗，计算时间窗[T_1，T_2]内的信号能量 ES_{TW} 和平均值 $\overline{ES}_{\mathrm{TW}}=ES_{\mathrm{TW}}/L_{\mathrm{TW}}$（$L_{\mathrm{TW}}$ 为时窗 *TW* 内信号的总长度)。

(4) 将 TWE 的平均值 $\overline{ES}_{\mathrm{TW}}$ 与背景噪声信号能量的平均值 $\bar{E}_{\mathrm{bn}}$ 进行比较。当 $\overline{ES}_{\mathrm{TW}}<\bar{E}_{\mathrm{bn}}$ 时，将该时窗的结束时刻 T_2 确定为微震信号的起始时刻 T_{a1}。

TWE 法微震信号起始时刻拾取流程，见图 1 左侧所示。对于终止时刻拾取与起始时刻拾取方法大同小异，其中步骤(3)中，以峰值到时 T_{p} 为首个时窗起点，即时窗开始时刻为 T_1，以时窗长度 *TW* 向前截取信号，信号时窗结束时刻记为 T_2，时窗移动每次循环以采样间隔 $1/f_{\mathrm{s}}$ 向前移动，并计算每次时窗内信号能量 ES_{TW} 及其平均值 $\overline{ES}_{\mathrm{TW}}$。其他与起始点的拾取一致，当 $\overline{ES}_{\mathrm{TW}}<\bar{E}_{\mathrm{bn}}$ 时，将该时窗的结束时刻 T_2 确定为微震信号的终止时刻 T_{e1}。

2.2　基于时频特征的时间定位拾取方法

由于背景噪声的影响，当微震信号信噪比较低或信号类型为非冲击型振幅突变时，其信号起始时刻和终止时刻在时域上变化特征不明显，即微震信号被背景噪声掩盖，从而导致前述基于 TWE 法对信号起始点和结束点拾取失效。由于微震波到达和离开检波器前后，在时频域上表现出瞬时频率突变特征：震波到达前，信号瞬时频率波动较大(或平稳)，频带范围较宽但功率密度较低；震波到达后，瞬时频率趋于稳定(或波动大)，频带变窄但功率密度显著提高。因此，利用微震信号瞬时频率作为时间定位拾取的依据，提取时域波形峰值处之前的信号计算其瞬时频率，确定瞬时频率变化最大的时刻作为微震信号的起始时刻。具体 TFC 法的步骤如下：

(1) 采用经验模态分解(EMD)和希尔伯特－黄变换(HHT)对提取信号进行处理，计算信号的时频功率谱和瞬时频率估计值 f_{inst}。

(2) 计算每个采样间隔 $L_{\mathrm{MS}}/526\times(1/f_{\mathrm{s}})$ 的瞬时频率的差值 *DF*。

(3) 确定 Max(|*DF*|)对应的时刻为起始点 T_{a2}。

基于时频功率谱的起始时刻拾取流程，如图 1 右侧所示。

微震波离开检波器前后的瞬时频率变化与到达前后瞬时频率的变化相反。因此，定义终止时刻 T_{e2} 为时域峰值后对应瞬时频率变化最大的时刻。其他步骤与起始点拾取步骤一致，此处不再赘述。

2.3　基于 TWE 和 TFC 的联合时间定位拾取方法

综合 2 种不同域下的时间定位拾取方法优缺点，提出了一种联合的时间定位拾取方法——基于 TWE 和 TFC 的微震信号时间定位拾取方法(TWE-TFC)。首先通过 TWE 法识别能量突变，快速筛选出潜在的起始时刻和终止时刻；再利用 TFC 法获得时频谱，捕捉信号的瞬时频率突变，进一步精确信号的起止时刻，从而提高含背景噪声的低信噪比微震信号时间定位拾取精度。TWE-TFC 法时间定位拾取步骤如下：

(1) 获取含背景噪声的微震信号 *MS* 的峰值到时 T_{P}。

(2) 预设背景噪声范围上限 $T_{\mathrm{bn}}=T_{\mathrm{P}}/2$。

(3) 截取 *MS* 时间段[0，T_{bn}]作为微震波到达检波器位置前的背景噪声信号 S_{bn}。

(4) 判断计数变量 $k>0$ 时进行 TWE 到时拾取。获取起始点 T_{a1}。

(5) 设 $3/4\,T_{\mathrm{a1}}$ 时刻为 T，截取时间段[T，T_{P}]的微震信号段 MS_{a}，进行 TFC 法拾取流程，获取起始点 T_{a2}。

(6) 更新 $T_{\mathrm{bn}}=0.9\,T_{\mathrm{a2}}$，$k=k-1$，重复步骤(3)，此过程为自修正部分，最终获取 T_{a2} 作为本文方法最终拾取结果。

在拾取终止时刻时，步骤(5)中取 $T=T_{\mathrm{e1}}+(1/10\times L_{\mathrm{MS}})\times(1/f_{\mathrm{s}})$，当 $T>L_{\mathrm{MS}}\times(1/f_{\mathrm{s}})$ 时，令 $T=L_{\mathrm{MS}}\times(1/f_{\mathrm{s}})$，其中 T_{e1} 为步骤 4 对终止点的拾取结果；L_{MS}

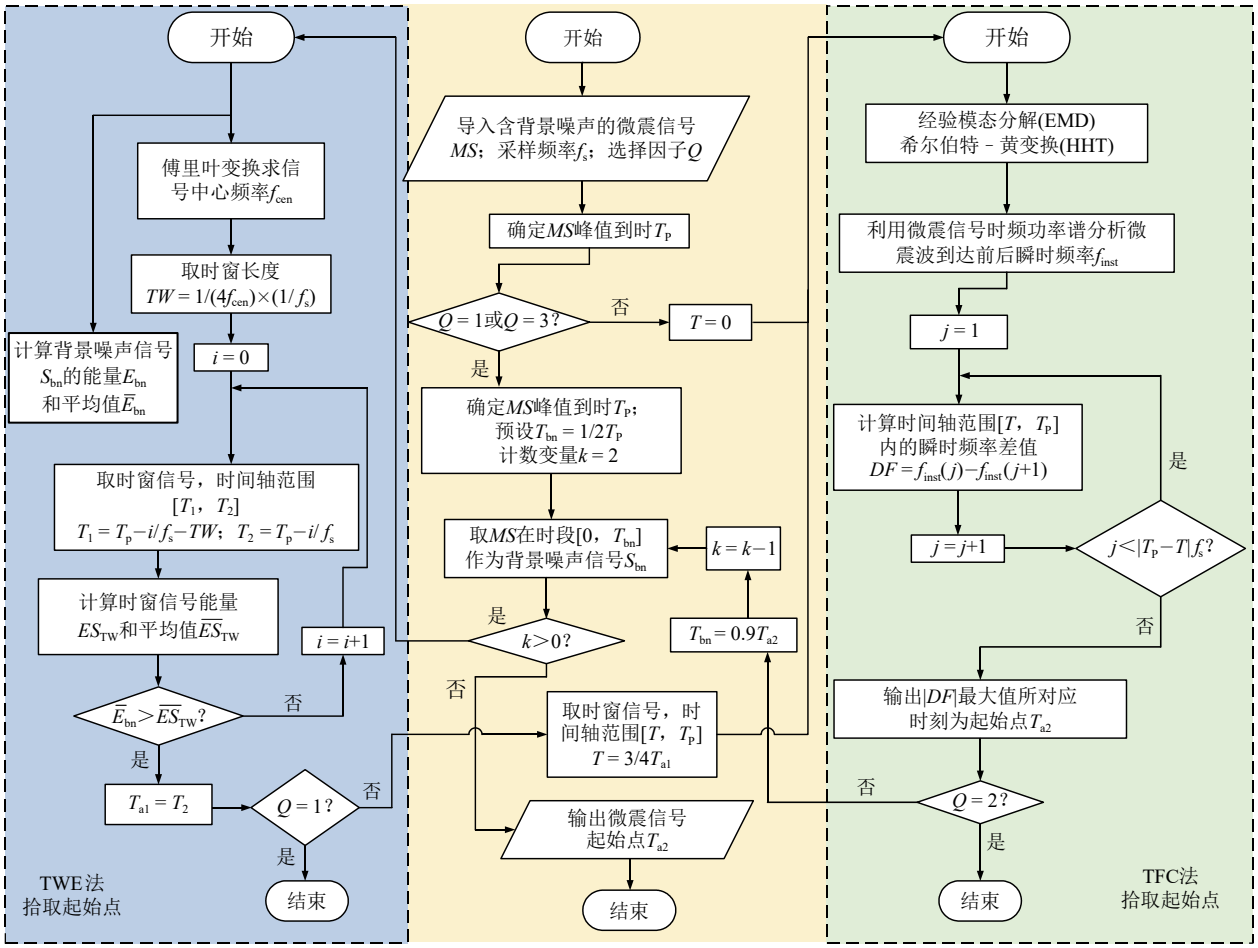


图 1　基于时窗信号能量和时频特征的微震信号起始时刻拾取方法流程图

Fig.1　Flowchart of arrive time picking method for microseismic signals based on time window energy and time frequency characteristics

为 MS 的长度)，截取时间段[T_P，T]的微震信号 MS_e，采用经验模态分解(empirical mode decomposition，EMD)和希尔伯特－黄变换(Hilbert-Huang transform，HHT)对其进行处理，提取信号的时频功率谱和瞬时频率估计值 f_{inst}。其他步骤与起始点步骤一样，最终拾取到终止时刻 T_{e2}。

如图 1 所示，选择因子 Q 为选择拾取方法的参数，其取值为 1，2 和 3，分别对应 TWE 法($Q=1$)、TFC 法($Q=2$)和 TWE-TFC 法($Q=3$)。

3　信号时间定位拾取对比分析

为进行算法的验证分析，采用模拟信号、模型试验信号和现场监测信号分别进行对比，通过傅里叶变换得到：模拟信号中心频率范围为 12.5～40 Hz，模型试验信号中心频率范围为 12.4～27.2 Hz，现场信号中心频率范围为 13.7～21.4 Hz。从频域范围来看，选用的模拟信号和模型试验信号涵盖了现场监测信号核心频段，具备反映现场信号时频特征的能力。

3.1　模拟信号时间定位拾取

利用计算机软件生成在某种程度上可代表微震信号的模拟信号。为了生成与实际微震信号更符合的模拟信号，通过改变幅度、相位等参数的正余弦波，并与脉冲噪声、白噪声等叠加来模拟非平稳信号[29]。基于如下表达式建立 4 种未加入噪声的模拟信号：

$$x_1(t)=\begin{cases}\dfrac{\sin[\pi f(t-1)]}{\pi(t-1)} & (t\neq 1)\\ 1 & (t=1)\end{cases} \tag{4}$$

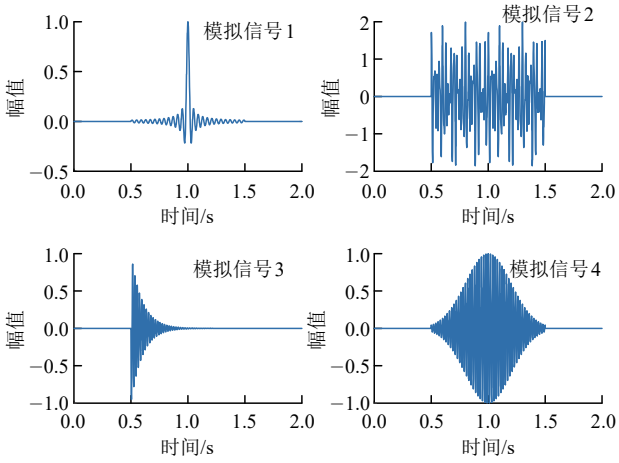
$$x_2(t)=0.5\sin(130\pi t)+0.8\cos(80\pi t)+0.7\cos(60\pi t) \tag{5}$$

$$x_3(t)=\mathrm{e}^{-10(t-0.5)}\cos\left[2\pi f(t-0.5)+\frac{\pi}{2}\right] \tag{6}$$

$$x_4(t)=\mathrm{e}^{-(t-1)^2/(2\sigma^2)}\sin\left(2\pi ft+\frac{\pi}{2}\right) \tag{7}$$

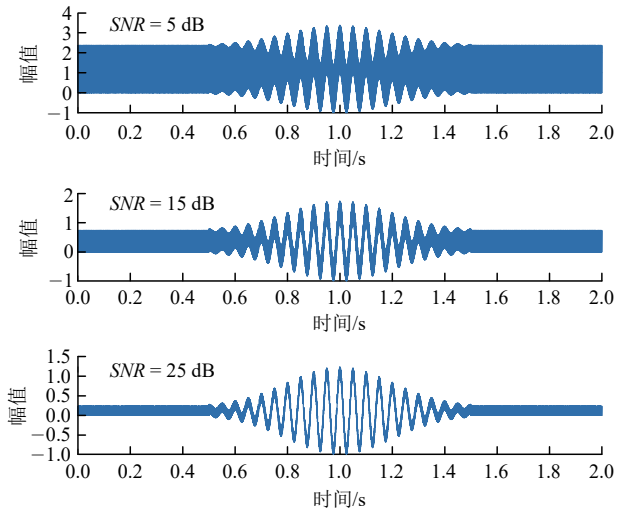
式中：f为频率；t 为时间变量；$x(t)$为因变量，即有效信号。

未加入噪声时的 4 种模拟信号如图 2(a)所示。为了模拟微震信号的无序背景噪声环境，分别引入脉冲噪声、高斯白噪声和工频噪声到上述 4 种模拟信号中，叠加产生不同信噪比的 36 条模拟信号，如图 2(b)所示，以脉冲噪声叠加模拟信号 4 为例。其中，脉冲噪声是一种持续且时间极短的突变干扰，单个脉冲噪声呈现出尖锐的尖峰状信号特征，这种噪声可能来源于监测设备的突发故障或者是外部的瞬时机械冲击等因素。高斯白噪声呈现出正态分布特征，会自然地叠加在真实的微震信号之上，对真实的微震信号造成干扰。工频噪声的产生机制与电力系统紧密相关，微震监测设备在运行过程中，由于电力供应系统中的交流电频率固定(通常为 50 Hz)，会在设备周围形成交变电磁场。当微震信号的传输线路和检波器处于这样的电磁场环境中时，就会感应出电动势，从而使得工频噪声混入微震信号之中，对信号的质量和后续的分析处理产生不利影响。



(a) 未加入噪声的 4 种模拟信号

(a) Four simulated signals without added noise



(b) 加入不同信噪比脉冲噪声的模拟信号 4

(b) Simulated Signal 4 with impulse noise of different signal-to-noise ratios

图 2　加噪前后模拟信号示例

Fig.2　Example of simulated signals before and after noise addition

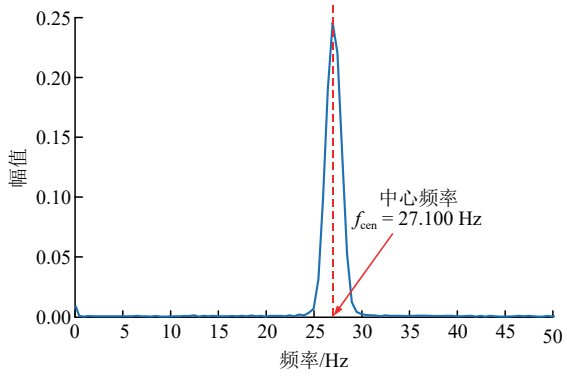
在添加各类噪声时先确定噪声功率，以确定含噪信号的信噪比(signal-to-noise ratio，SNR)。信噪比是衡量噪声水平的常用指标[30]。信噪比越高，说明信号相对于噪声越强，信号质量越好；反之，信噪比越低，说明噪声对信号的干扰越严重。信噪比的计算公式如下：

$$SNR=10\lg\left(\frac{P_\mathrm{s}}{P_\mathrm{n}}\right) \tag{8}$$

式中：SNR 为信噪比，P_s为信号功率，P_n为噪声功率。

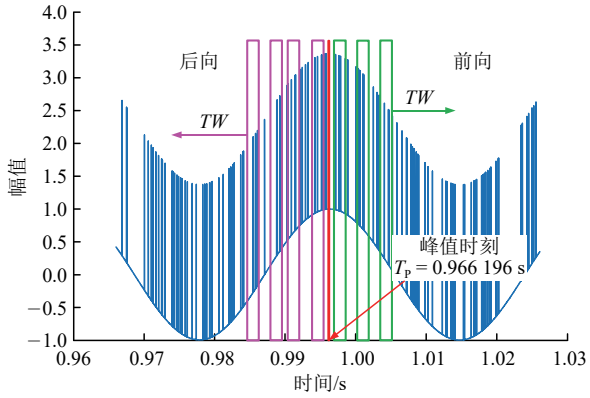
为了模拟不同监测场景所收集到的实际微震信号，根据噪声分级标准，对模拟信号分别加入信噪比为 5，15，25 dB 的不同噪声级别。以噪声类型英文首字母(高斯白噪声 G、工频噪声 P、脉冲噪声 I)，模拟信号(1～4)，信噪比(5，15，25)命名模拟信号，如加入信噪比为 5 dB 的脉冲噪声到模拟信号 4 命名为“I－4－5”。

4 种模拟信号都是在 t = 0.50 s 时刻开始产生，在 t = 1.50 s 结束，持续时间共计 1 s。采用 TWE-TFC 法对模拟信号进行时间定位拾取，以信号 I－4－5 为例。首先确定峰值所处位置，通过傅里叶变换取得中心频率 f_cen(见图 3(a))，信号能量时窗大小是中心频率倒数的 1/4 倍，对于起始点 T_a1 拾取以 T_p 为时窗终点向后移动，而结束点 T_e1 的拾取时窗以 T_p 为起点向前移动(见图 3(b))。



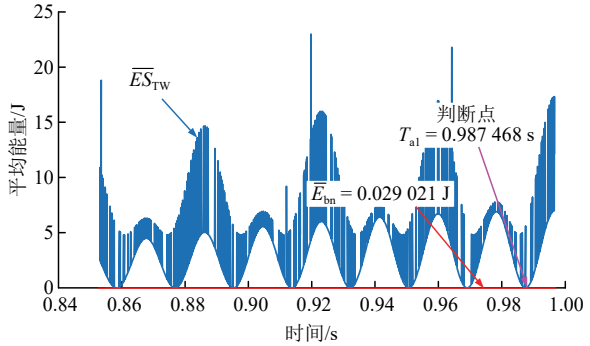
(a) 中心频率

(a) Center frequency



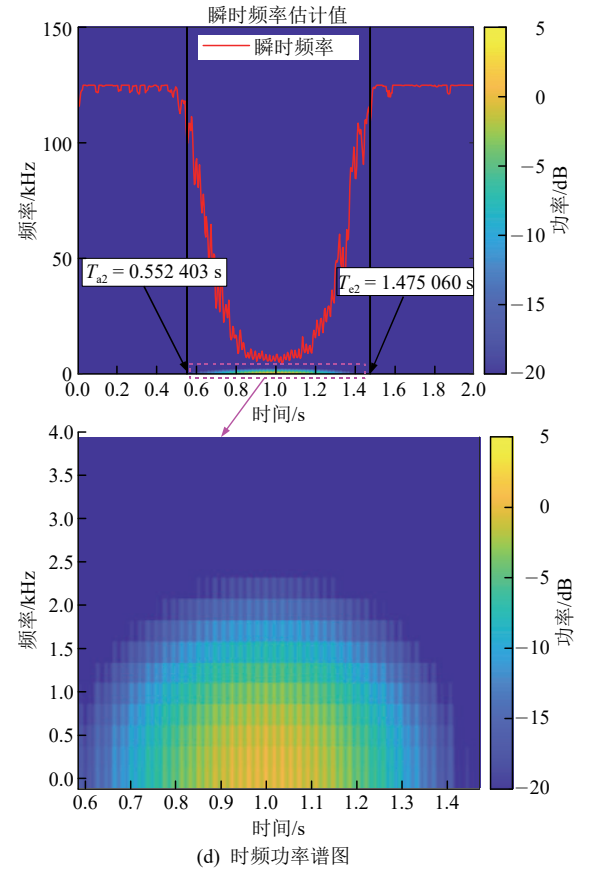
(b) 时窗移动示意图

(b) Time window sliding schematic



(c) 时窗信号平均能量

(c) Time window average energy



(d) 时频功率谱图

(d) Time frequency power spectrum

图 3　TWE-TFC 法的时间定位拾取过程(以模拟信号 I - 4 - 5 为例)

Fig.3　Time localization picking process of the TWE-TFC method (taking simulated signal I - 4 - 5 as an example)

通过比较背景噪声平均能量值 $\overline{E}_{bn}$ 和时窗 TW 内的平均能量值 $\overline{ES}_{TW}$，最终确定 TWE 法的起始点 T_{a1} = 0.987 468 s(见图 3(c))，同理，拾得终止点 T_{e1} = 1.005 174 s。显然，拾取结果与实际设置起止点差异较大，可见单独采用 TWE 法未能满足拾取需求。

所提 TWE-TFC 方法第二阶段是在第一阶段基础上，取 T_{a1} (或 T_{e1})的附近范围进行时频特征分析的联合起始点 T_{a2} (或结束点 T_{e2})拾取，以提高时间定位精度。根据时频功率谱图(见图 3(d))分析，在模拟信号起始时刻和终止时刻，瞬时频率和功率发生的突变可以捕捉到具体的时间点。接近 0.5 s 之前，瞬时频率在 115～125 kHz 范围内波动。在 0.5～1.5 s 范围内，瞬时频率曲线总体趋势为“U”形变化趋势，即先减后增的趋势。在 1.5 s 后，瞬时频率变化规律与 0.5 s 之前相似。最终确定模拟信号 4(加入脉冲噪声，SNR = 5 dB)的起始点 T_{a2} 为 0.552 403 s，终止点 T_{e2} 为 1.475 060 s。

对于微震信号来说，AIC 法利用微震信号到达前后统计特性的差异来拾取微震信号的起始时刻。STA/LTA 法通过比较短时窗(STA)和长时间窗(LTA)内的信号特征函数的平均值，来检测微震信号的起始时刻。然而这 2 种方法都无法用于对微震信号终止时刻的拾取。

下面采用 AIC 法、STA/LTA 法、TWE 法、TFC 法对上述 36 条模拟信号进行时间定位，并与 TWE-TFC 方法的拾取结果对比。对于 AIC 法而言，基于自回归分析，利用信号到达前后统计特性的差异来检测起始点，其拾取的精度也依赖于滑动时窗长度的大小。时窗长度一般可为 600～1 000 个采样点[31]。经过反复测试，本文取 1 000 个采样点作为 AIC 法滑动时窗长度，即取滑动时窗长度 L_{AIC} = 0.002 s。在 STA/LTA 法中，短时窗和长时窗的大小对微震信号起始点拾取的精度有重要影响，若时窗设置不合理，可能会导致误判或错判。在实际处理微震信号过程中，一般会根据信噪比的大小、信号的周期等设置时窗的大小。通常短时窗长度为 2～3 倍的微震信号主周期，长时窗为短时窗的 5～10 倍[32]。利用上述傅里叶变换计算出的信号中心频率 f_{cen} = 27.10 Hz，已知 4 种模拟信号采样频率 f_s = 500 000 Hz，通过反复测试，本文设置短时窗长度 L_{STA} = 0.092 250 s(L_{STA} = 5/($2f_{cen}$))，则设长时窗的长度 L_{LTA} 为 5 倍的 L_{STA}，即 L_{LTA} = 0.461 25 s。不同拾取方法的拾取部分结果

见表 1。

为了直观比较各拾取方法与真实值的差异，采用三维误差带状图形式展示 36 个模拟信号的拾取结果，如图 4 所示。图中，带宽(上下边界距离)反映与真实值的误差，便于观察各方法的偏离程度。对于起始点的拾取而言，可以看出 STA/LTA 法、AIC 法和 TWE 法在某些信号下误差较大，且波动大，不具有稳定性，不适用于这些特定的模拟信号分析场景。而 TFC 法在拾取模拟信号起始点的准确率高达 89%，但从带状图来看，对于某些模拟信号的误差波动较大。由于瞬时频率拾取起始点大多是固定值，这不排除是模拟信号频率成分较单一而导致的结

表 1　各方法对模拟信号的拾取结果

Table 1　Picking results of different methods for simulated signals

模拟信号编号 (simulated signals No.)	起始点拾取值(results of arrival time picking)/s					结束点拾取值(results of end time picking)/s		
	STA/LTA 法 (STA/LTA method)	AIC 法 (AIC method)	TWE 法 (TWE method)	TFC 法 (TFC method)	TWE-TFC 法 (TWE-TFC method)	TWE 法 (TWE method)	TFC 法 (TFC method)	TWE-TFC 法 (TWE-TFC method)
G－1－5	1.060 740	0.927 830	0.966 620	0.926 839	0.452 384	1.034 356	1.721 059	1.435 487
G－1－15	1.025 778	1.909 886	0.964 024	0.745 303	0.448 410	1.035 956	1.857 211	1.446 554
G－1－25	1.023 442	0.591 402	0.963 200	0.491 909	0.503 255	1.036 866	1.902 595	1.504 767
P－1－5	0.562 498	1.286 126	1.063 944	0.491 909	0.503 255	1.234 298	1.845 865	1.503 042
P－1－15	0.562 490	1.940 598	0.480 868	0.491 909	0.503 255	0.805 892	1.547 087	1.504 070
P－1－25	0.562 494	1.911 274	1.294 546	0.491 909	0.503 255	1.529 316	1.584 907	1.502 926
I－1－5	0.590 984	1.987 508	0.488 912	0.491 909	0.503 255	0.536 878	1.218 053	1.502 190
I－1－15	0.590 580	1.700 260	0.510 026	0.491 909	0.507 037	0.536 980	1.955 543	1.501 419
I－1－25	0.592 296	1.939 580	0.489 666	0.491 909	0.503 255	0.518 478	1.316 385	1.501 207
G－2－5	0.884 848	0.396 804	0.931 812	0.620 497	0.466 622	0.950 714	1.581 125	1.401 278
G－2－15	0.775 032	1.682 442	0.987 112	0.491 909	0.503 255	1.023 918	1.826 955	1.429 155
G－2－25	0.664 156	1.615 974	0.802 556	0.491 909	0.503 255	1.005 514	1.641 637	1.503 711
P－2－5	1.024 382	1.156 518	0.963 594	0.491 909	0.518 383	1.036 554	1.505 485	1.504 544
P－2－15	1.023 124	1.345 008	0.963 170	0.491 909	0.518 383	1.036 702	1.505 485	1.505 113
P－2－25	1.023 200	1.972 938	0.963 172	0.491 909	0.518 383	1.036 912	1.505 485	1.505 117
I－2－5	0.562 502	1.285 018	1.179 120	0.491 909	0.488 127	1.190 444	1.505 485	1.504 087
I－2－15	0.562 502	0.612 054	0.794 154	0.491 909	0.488 127	0.805 714	1.505 485	1.504 102
I－2－25	0.562 502	1.932 132	1.294 542	0.491 909	0.518 383	1.306 192	1.505 485	1.503 041
G－3－5	0.592 704	0.881 728	0.520 074	0.495 691	0.510 819	0.518 360	1.010 043	1.471 230
G－3－15	0.592 594	1.028 990	0.472 938	0.495 691	0.510 819	0.518 454	1.070 555	1.486 746
G－3－25	0.592 594	1.025 676	0.520 000	0.495 691	0.510 819	0.518 438	1.202 925	1.506 616
P－3－5	0.755 580	0.644 344	1.006 064	0.491 909	0.487 934	1.023 576	1.505 485	1.504 802
P－3－15	0.679 496	0.573 826	0.968 772	0.491 909	0.518 383	0.987 020	1.505 485	1.504 812
P－3－25	0.592 592	1.745 900	0.987 140	0.491 909	0.488 127	1.005 494	1.505 485	1.505 105
I－3－5	1.031 388	0.005 044	0.964 418	0.919 275	0.620 940	1.035 536	1.728 623	1.510 701
I－3－15	1.026 574	0.005 044	0.963 526	0.745 303	0.451 722	1.036 464	1.728 623	1.506 021
I－3－25	1.023 648	0.005 044	0.963 236	0.491 909	0.503 255	1.036 766	1.728 623	1.504 825
G－4－5	0.562 508	0.002 654	1.294 660	0.491 909	0.503 255	1.305 996	1.683 239	1.503 035
G－4－15	0.562 208	0.002 654	1.294 590	0.491 909	0.503 255	1.306 144	1.683 239	1.503 035
G－4－25	0.562 208	0.002 654	1.294 582	0.491 909	0.503 255	1.306 190	1.683 239	1.503 035
P－4－5	0.590 122	0.001 714	0.518 620	0.491 909	0.503 255	0.536 710	1.025 171	1.473 592
P－4－15	0.590 122	0.001 714	0.518 492	0.491 909	0.503 255	0.536 844	1.138 631	1.481 224
P－4－25	0.590 122	0.001 714	0.510 018	0.491 909	0.503 255	0.518 430	1.282 347	1.494 640
I－4－5	0.901 194	0.002 192	0.987 468	0.692 355	0.522 420	1.005 174	1.932 851	1.475 060
I－4－15	0.778 434	0.002 192	0.987 208	0.544 857	0.556 203	1.005 428	1.932 851	1.429 066
I－4－25	0.665 582	0.002 192	0.987 126	0.491 909	0.503 255	1.005 508	1.932 851	1.503 088

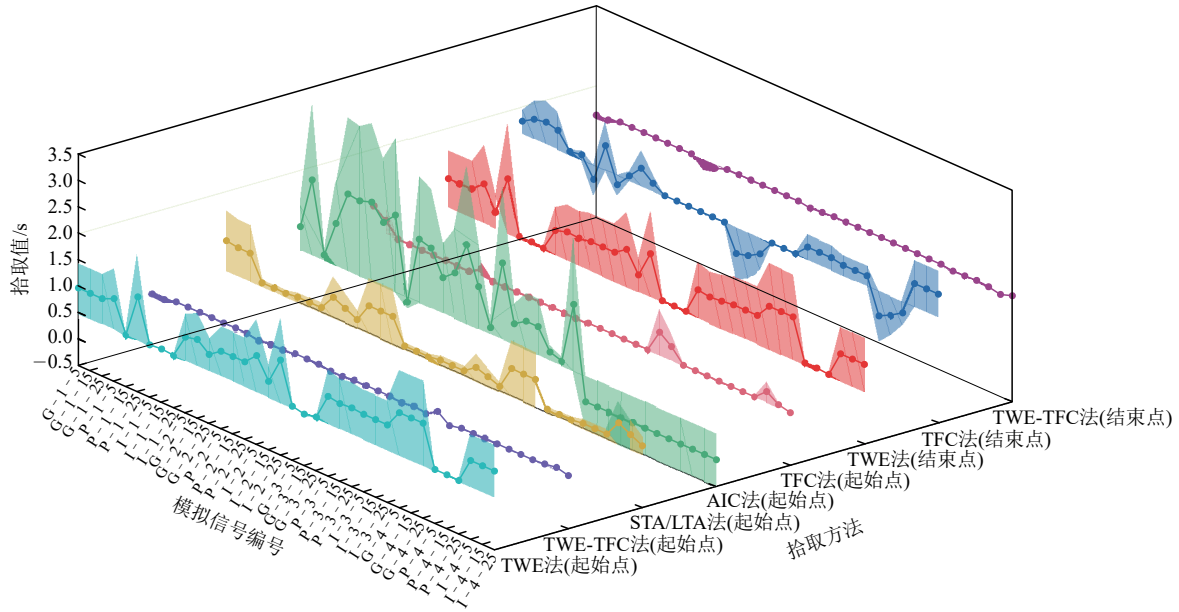


图 4　各方法对模拟信号时间定位拾取的误差带状图

Fig.4　Error band diagram of time localization picking for simulated signals via different methods

果。而 TWE-TFC 法拾取起始点误差波动较小，拾取效果总体优于对比方法。对于结束点拾取而言，TWE-TFC 法也显著优于 TWE 法和 TFC 法，且 STA/LTA 法和 AIC 法无法用于信号结束点的拾取。另外，各方法对不同类型和不同信噪比下的拾取结果存在差异，说明噪声类型和噪声水平在一定程度上影响时间定位拾取的精确度。

标准差 σ 是衡量数据波动大小和稳定性的指标，标准差越大表示数据的波动越大，稳定性越差；反之标准差越小，数据波动越小，稳定性越好。相对误差 ε 可以客观地反映测量的准确程度，评估测量的相对精度。标准差和相对误差计算公式分别如下：

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\mu)^2} \tag{9}$$

$$\varepsilon=\frac{|x_i-x_0|}{x_0} \tag{10}$$

式中：N 为样本数量，x_0 为人工设定的真实值，x_i 为第 i 个样本数据，μ 为样本均值。

对各方法的误差分析见表 2。从标准差来看，STA/LTA 法、AIC 法、TWE 法、TFC 法和 TWE-TFC 法最终拾取起始点的标准差分别是 0.194 232，0.773 476，0.270 817，0.116 313 和 0.028 699 s。TWE-TFC 法对起始点和结束点拾取结果标准差均小于 0.03 s，表明此方法拾取起始点和结束点时均较为稳定，且不同模拟信号结束点和起始点拾取结果的平均误差均小于 0.017 s，与 4 种对比方法的拾取结果相比，所提方法具有更高的准确性。综上所述，TWE-TFC 法在模拟信号起始点和结束点拾取结果均优于对比方法，拾取结果符合预期目标。

表 2　各方法对模拟信号时间定位拾取的平均误差

Table 2　Average time localization picking error of simulated signals via different methods

拾取方法 (picking method)	标准差 (standard deviation)/s	平均误差 (average error)/s
STA/LTA 法(起始点)	0.194 232	0.231 756
AIC 法(起始点)	0.773 476	0.729 594
TWE 法(起始点)	0.270 817	0.388 756
TFC 法(起始点)	0.116 313	0.053 271
TWE-TFC 法(起始点)	0.028 699	0.016 989
TWE 法(结束点)	0.279 216	0.440 784
TFC 法(结束点)	0.267 768	0.216 205
TWE-TFC 法(结束点)	0.027 363	0.016 122

3.2　模型试验信号时间定位拾取

模型试验信号采用摆锤和转子马达在相似材料模型中激振产生的振动监测信号。摆锤和转子马达激振信号分别以冲击波和基频谐波为主，用于模拟矿山微震监测信号中常伴随的爆破信号和机械振动信号。其中，摆锤冲击信号在时域内通常表现为一个具有明显峰值的脉冲波形。当摆锤与模型表面接触瞬间，会产生一次较大的冲击，对应于信号波形上表现为瞬间升高的主峰值。随后，信号振幅逐渐减小，直至趋于稳定。一般情况下，摆锤冲击信号的持续时间相对较短。模型试验中，摆锤冲击信号持续时间约为 0.6 s。本文选取了 1 次摆锤冲击试验

下在 6 个检波器监测到的信号进行到时拾取。摆锤冲击试验的原信号见图 5(图中，信号幅值直接采用设备采样值计算，单位为字(word)，下同)。可见不同监测位置处采集的信号背景噪声存在差异。

对上述摆锤冲击原信号使用 TWE-TFC 法进行时间定位拾取，以摆锤冲击原信号 1 和摆锤冲击原信号 5 为例。通过傅里叶变换拾取中心频率，摆锤冲击信号 1 和信号 5 的中心频率分别为 12.401，27.164 Hz。取时窗 $TW=1/(4f_{cen})\times(1/f_s)$，TWE 法的起始点拾取，将时窗 TW 向后移，而结束点拾取时窗 TW 向前移动(见图 6(a))。取摆锤冲击原信号 0 时刻至 $T_P/2$ 时刻的平均能量值作为起止时刻预触发阈值。TWE 法拾得起始点 T_{a1}(或结束点 T_{e1})的附近范围进行时频特征分析的联合起始点 T_{a2}(或结束点 T_{e2})拾取。

摆锤冲击原信号 1 的时频功率谱见图 6(b)所示，在 $t\approx0.59$ s 时，功率呈现出明显切面状态。瞬时频率在时间轴 0～0.59，1.1～1.6 s 上反复在 0.2～1.5

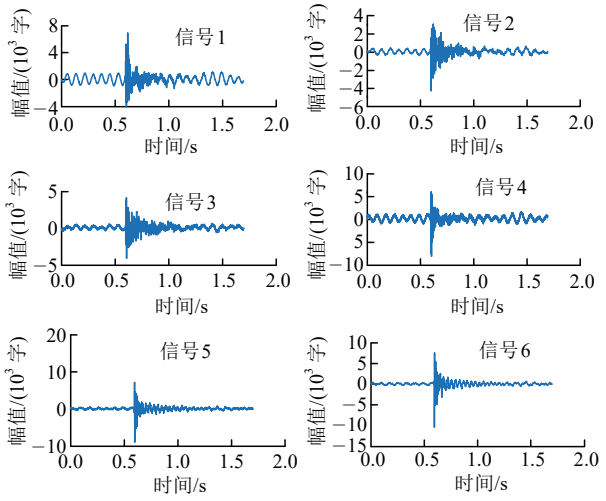
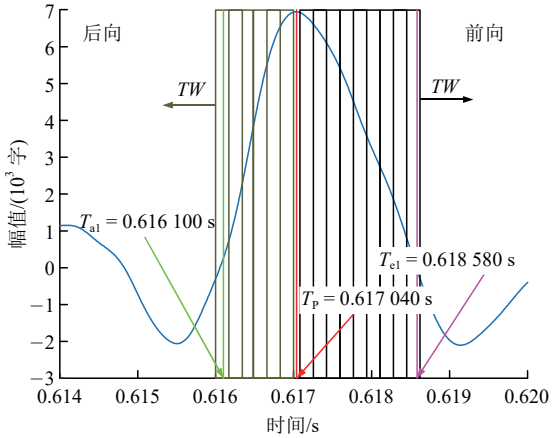


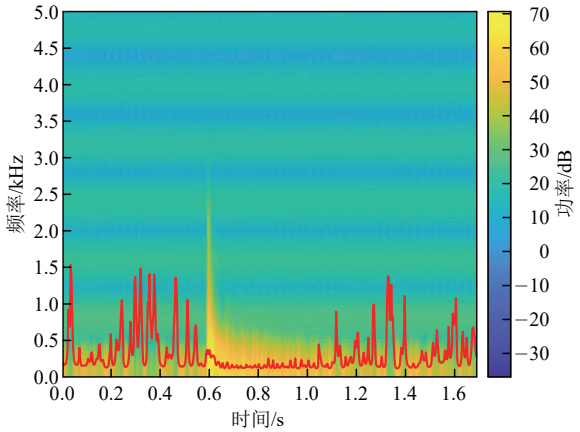
图 5　摆锤冲击试验监测的原信号

Fig.5　Original signals monitored by the pendulum impact test



(a)　摆锤冲击信号 1 的时窗移动图

(a) Time window sliding schematic of pendulum impact signal 1



(b)　摆锤冲击信号 1 的时频功率谱

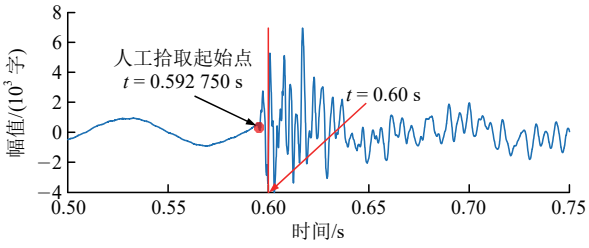
(b) Time frequency power spectrum of pendulum impact signal 1

图 6　摆锤冲击信号 1 时间定位拾取过程

Fig.6　Time localization picking process of pendulum impact signal 1

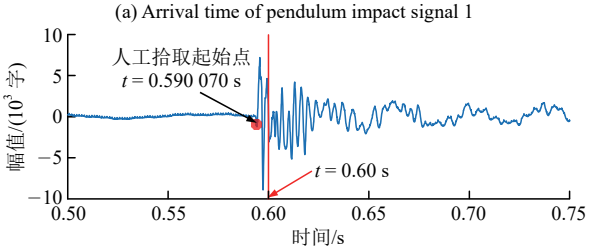
kHz 内上下波动，在时间轴 0.59～1.1 s 上瞬时频率在 0.2～0.4 kHz 范围内波动，相较于前 2 种情况，瞬时频率在时间轴 0.59～1.1 s 上变化较稳定。通过分析信号的瞬时频率和功率谱最终确定起始点 T_{a2} 和结束点 T_{e2} 分别为 0.588 587 和 1.216 925 s。

为了检验本文方法对摆锤冲击信号的时间定位拾取的适用性，以人工拾取方法为标准，与 STA/LTA 法、AIC 法、TWE 法和 TFC 法比较。从摆锤冲击信号的时域来看，起始点从图 7 中明显看出信号起始点位于 0.6 s 左侧，人工拾取方法对摆锤冲击原信号 1 和 5 起始点的拾取结果分别为 0.592 75 和 0.590 07 s。对比方法和本文方法对上述摆锤冲击信号起始点和结束点的拾取结果如表 3 所示。



(a)　摆锤冲击信号 1 起始点

(a) Arrival time of pendulum impact signal 1



(b)　摆锤冲击信号 5 起始点

(b) Arrival time of pendulum impact signal 5

图 7　人工拾取摆锤冲击信号起始点示例

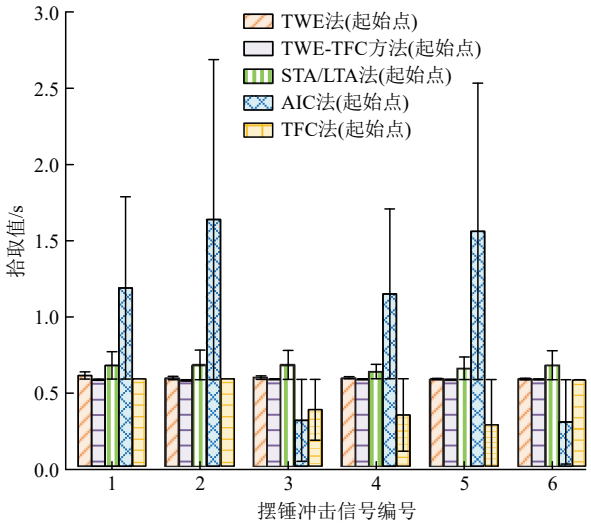
Fig.7　Example of manual picking for the arrive time of pendulum impact signals

表 3　各方法对 6 条摆锤冲击信号的时间定位拾取结果

Table 3　Time localization picking results of different methods for six pendulum impact signals

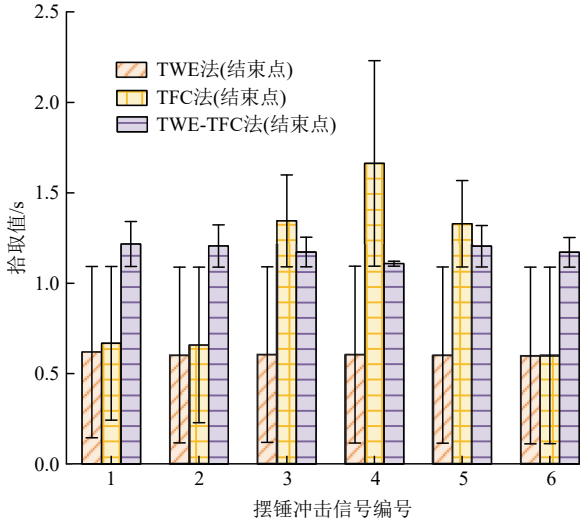
摆锤冲击信号编号 (pendulum impact signals No.)	起始点拾取值(results of arrival time picking)/s						结束点拾取值(results of end time picking)/s			
	人工拾取 (manually pick)	STA/LTA 法 (STA/LTA method)	AIC 法 (AIC method)	TWE 法 (TWE method)	TFC 法 (TFC method)	TWE-TFC 法 (TWE-TFC method)	人工拾取 (manually pick)	TWE 法 (TWE method)	TFC 法 (TFC method)	TWE-TFC 法 (TWE-TFC method)
1	0.592 750	0.682 530	1.190 050	0.616 110	0.594 045	0.588 587	1.092 800	0.618 580	0.667 875	1.216 925
2	0.589 240	0.686 090	1.638 590	0.600 130	0.590 835	0.585 437	1.089 200	0.602 390	0.658 245	1.206 060
3	0.591 190	0.686 050	0.322 070	0.602 720	0.391 815	0.593 002	1.091 200	0.604 770	1.345 185	1.172 770
4	0.594 790	0.642 290	1.151 440	0.601 710	0.356 505	0.592 412	1.094 800	0.605 070	1.662 975	1.108 180
5	0.590 070	0.663 630	1.561 950	0.593 680	0.292 305	0.589 977	1.090 100	0.602 140	1.329 135	1.204 872
6	0.589 140	0.683 830	0.311 940	0.593 760	0.587 625	0.591 787	1.089 100	0.599 740	0.600 465	1.170 990

为了更直观地分析不同方法拾取结果的稳定性和准确性，绘制了对比方法和 TWE-TFC 法的带误差棒的柱状图，如图 8 所示，其中误差棒表示与人工拾取方法的误差。由图 8(a)可见，TFC 法对摆锤冲击类信号起始点的拾取明显劣于对模拟信号的拾取，且误差波动较大。由此可知，单独的 TFC 法不适用于多峰频谱信号。而使用 TWE 法拾取起始时刻明显优于其他对比方法，主要由于信号能量突变呈现切面状态，其误差控制在 0.024 s 内。当通过与 TFC 法联合优化后，拾取起始点的误差降至 0.004 s 以内。由图 8(b)可见，TWE-TFC 法拾取此信号的结束点优于单独的 TWE 法和 TFC 法。但误差却达到 0.124 s，显著劣于拾取起始点，主要由于信号的结束点位于尾波段，且信号幅值衰减至与背景噪声同一量级，导致从时域上结束点被噪声掩盖，信号能量突变点拾取失效；从频域上尾波频率与噪声水平趋同，在一定程度上抑制了频率突变的拾取，从而导致终止时刻拾取精度劣化。但通过瞬时频率突变仍能实现终止时刻拾取。综上，TWE-TFC 法拾取摆锤冲击信号起始时刻更优。



(a) 起始点拾取结果

(a) Results of arrival time picking



(b) 结束点拾取结果

(b) Results of end time picking

图 8　各方法对摆锤冲击信号拾取值的带误差棒柱状图

Fig.8　Bar chart with error bars of picking results for pendulum impact signals by different methods

转子马达信号是在模型中预先埋置的小型马达通电激振产生的，试验中通电时间控制在 1 s 左右，因此监测信号持续时间也在 1 s。试验中，微震监测采集到的转子马达振动信号如图 9 所示，转子马达原始信号 1～6 分别由布置于试验模型表面的检波器采集。取一次激振下 6 个不同检波器采集到的监测信号。在时域中，转子马达信号表现为一系列周期性的脉冲，脉冲周期即马达转子的旋转周期。由图 9 可见，转子马达信号存在噪声干扰。从时频功率谱图(见图 10)可以分析转子马达振动信号的频率成分。在此情况下分别使用对比方法与 TWE-TFC

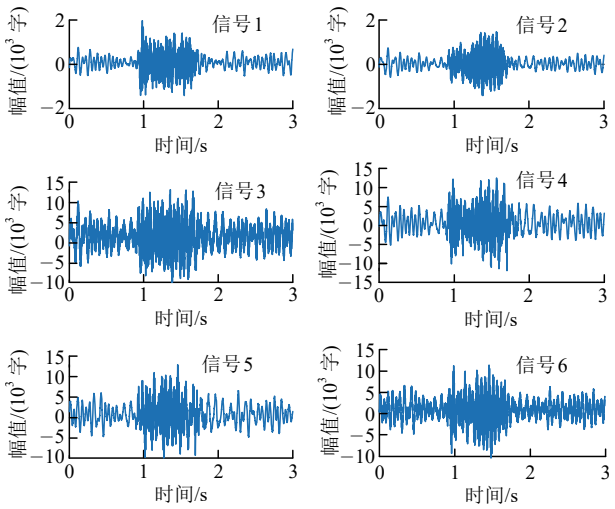


图 9　微震监测采集到的转子马达振动信号

Fig.9　Vibration signals of rotor motors collected via microseismic monitoring

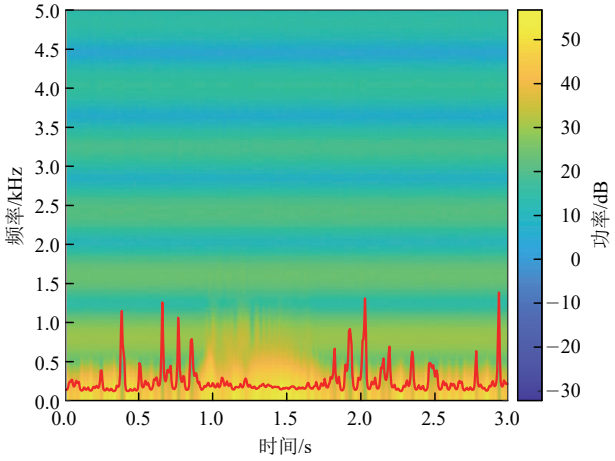


图 10　转子马达信号 6 时频功率谱图

Fig.10　Time frequency power spectrum of rotor motor signal 6

法拾取起始和终止时刻，以人工拾取方法为标准。以转子马达信号 6 的时频功率谱(见图 10)为例，从左往右看，功率在 0.9 s 左右突增，且瞬时频率降低，在 1.7 s 左右功率突减，瞬时频率增高，可见瞬时频率与功率变化相反。各方法拾取结果如表 4 所示。

以人工拾取方法为标准，绘制对比方法和本文方法带误差棒的柱状图，并分析其拾取方法准确性和稳定性，如图 11(a)所示。AIC 法对试验信号起始点的拾取误差较大且不稳定，这是由于 AIC 法在处理低信噪比信号时受到背景噪声的干扰，导致拾取结果出现较大误差。STA/LTA 法在本次试验中总体上优于 TWE 法，TFC 法和 AIC 法的起始点拾取。将 TWE 法与 TFC 法联合优化后，起始点的拾取结果得到显著提升，优于 STA/LTA 法和 AIC 法。图 11(b)中的误差棒所示，TWE-TFC 法拾取转子马达信号 1～6 结束点误差均小于 TWE 法和 TFC 法。综上，所提 TWE-TFC 法对此类转子马达信号的拾取结果与实际情况较为吻合，降低了低信噪比信号的强噪干扰，减小了拾取算法参数设置对拾取精度的影响，保证了微震信号时间定位的稳定拾取。

3.3　现场监测信号时间定位拾取

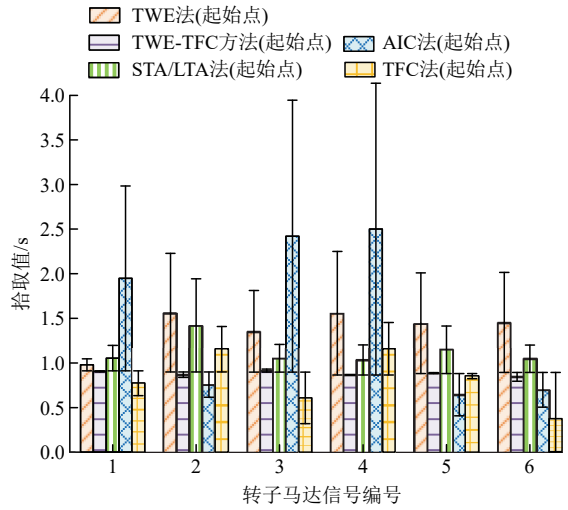
矿山微震事件的监测和判识是矿震研究和动力灾害防治的一项重要内容。矿震事件的到时和持续时间等参数获取关系到矿震事件定位和矿震能量计算的准确性。本节选取了红阳三矿地面微震监测在 4 个不同测点采集到的 2 个矿震事件，事件原始信号如图 12 所示。其中，信号以“F－事件编号－监测点”方式命名，如“F－1－4”代表现场第 1 次矿震事件的第 4 监测点采集的信号。

根据现场信号 F－1－1 的时频功率谱(见图 13(a))可知，此矿震事件信号在时间轴 0～1.2 s 上的瞬时频率在 1.2～2.9 kHz 范围内上下波动，而功率处于 0～30 dB 范围；在 1.2 s 左右，瞬时频率由 2.5 kHz 水平突然减弱至 0.05 kHz 水平，功率突然增大至 60 dB 以上，且在 1.2～5.8 s 内的瞬时频率在 0～0.25 kHz 范围内波动，变化较稳定。而 5.8 s 之后瞬时频率突然增大至 1.4 kHz 水平，并在 0～1.75 kHz 范围内波动，其功率突然减弱至 40～50 dB。根据信

表 4　各方法对转子马达信号的时间定位拾取结果

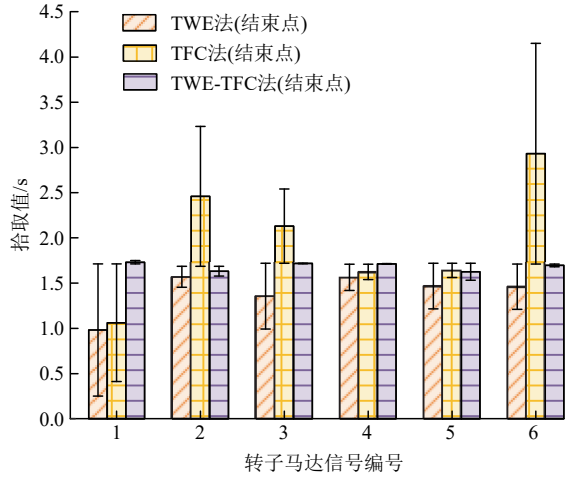
Table 4　Time localization picking results of different methods for rotor motor signals

转子马达信号编号 (rotor motor signals No.)	起始点拾取值(results of arrival time picking)/s						结束点拾取值(results of end time picking)/s			
	人工拾取 (manually pick)	STA/LTA 法 (STA/LTA method)	AIC 法 (AIC method)	TWE 法 (TWE method)	TFC 法 (TFC method)	TWE-TFC 法 (TWE-TFC method)	人工拾取 (manually pick)	TWE 法 (TWE method)	TFC 法 (TFC method)	TWE-TFC 法 (TWE-TFC method)
1	0.911 98	1.053 810	1.948 010	0.978 790	0.772 840	0.905 751	1.712 47	0.981 570	1.062 520	1.730 790
2	0.899 53	1.420 900	0.757 240	1.563 390	1.153 400	0.868 588	1.685 36	1.569 430	2.459 800	1.631 620
3	0.896 93	1.051 860	2.420 850	1.354 190	0.608 120	0.914 145	1.720 44	1.357 120	2.130 360	1.717 750
4	0.865 60	1.033 800	2.500 320	1.557 290	1.159 080	0.868 120	1.709 68	1.564 210	1.624 840	1.712 950
5	0.881 73	1.147 840	0.644 270	1.445 580	0.852 360	0.886 433	1.720 43	1.467 850	1.641 880	1.626 045
6	0.894 41	1.047 610	0.699 370	1.454 440	0.375 240	0.845 013	1.711 29	1.461 080	2.931 240	1.696 505



(a) 起始点拾取值

(a) Results of arrival time picking



(b) 结束点拾取值

(b) Results of end time picking

图 11　各方法对转子马达信号拾取结果的带误差棒柱状图

Fig.11　Bar chart with error bars of picking results for rotor motor signals via different methods

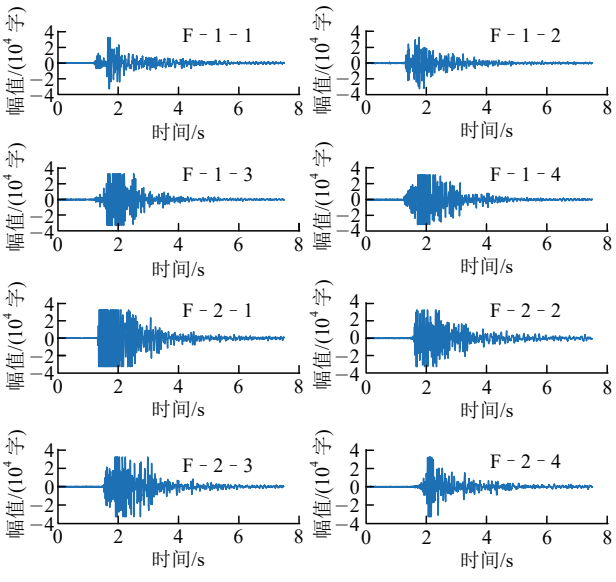
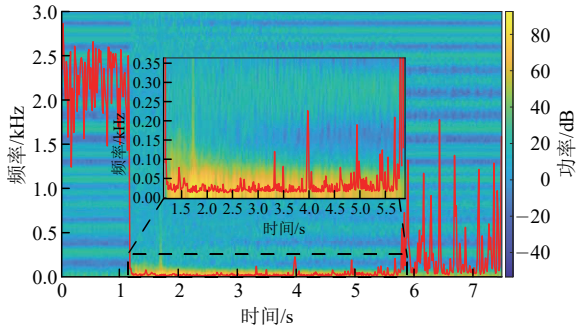
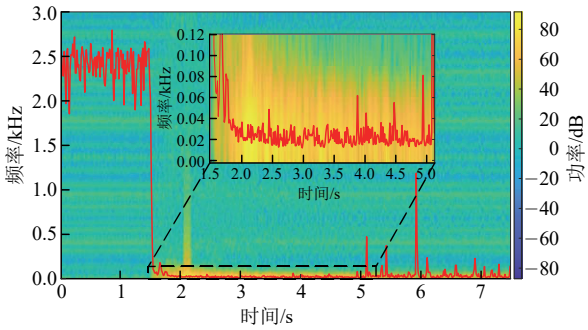


图 12　矿山微震事件原始信号

Fig.12　Original signals of mine microseismic events



(a) F－1－1



(b) F－2－4

图 13　现场信号时频功率谱图

Fig.13　Time frequency power spectrum of field signals

号功率谱和瞬时频率突变，从波动转为稳定(或稳定转为波动)的转折，确定信号起始点 T_{a2}(或结束点 T_{e2})。矿震事件 2 时频功率谱见图 13(b)所示，以监测点 4 采集信号为例，其瞬时频率与时频功率谱变化与矿震事件 1 类似，在此不做赘述。各方法对矿震事件各监测点的拾取结果如表 5 所示。

对不同方法时间定位拾取结果绘制三维误差带状图，可根据误差带宽波动来分析各种方法拾取的准确性和稳定性(见图 14)。AIC 法在对 2 次矿震事件的 8 条现场微震信号起始点拾取过程中，误差在 0.2～1.4 s 范围。相较于本文提出的方法，AIC 法的拾取误差明显较大，且曲线波动剧烈，这表明其对起始时刻拾取的稳定性欠佳。而 STA/LTA 法在图中表现出较为稳定的起始点到时拾取结果，但其平均误差仍维持在 0.23 s 左右，对于微震信号的起始点拾取精度而言，仍存在一定的不足。单独的 TWE 法和 TFC 法拾取起始时刻和终止时刻的结果波动较大。本文所提出的 TWE-TFC 法在时间定位拾取结果上显著优于单独方法，通过放大 TWE-TFC 法对起始点和结束点拾取的误差带图(见图 14)可见，其拾取起始点误差均控制在 0.0216 s 以内，且误差带宽波动小，拾取方法稳定。而 TWE-TFC 法拾取结束点的误差控制在 0.264 0 s 以内，这与模型试验信号结束点拾取误差增大产生的原因一致，因波形尾

表 5　各方法对现场信号的时间定位拾取结果

Table 5　Time localization picking results of different methods for field signals

现场信号编号 (field signals No.)	起始点拾取值(results of arrival time picking)/s						结束点拾取值(results of end time picking)/s			
	人工拾取 (manually pick)	STA/LTA 法 (STA/LTA method)	AIC 法 (AIC method)	TWE 法 (TWE method)	TFC 法 (TFC method)	TWE-TFC 法 (TWE-TFC method)	人工拾取 (manually pick)	TWE 法 (TWE method)	TFC 法 (TFC method)	TWE-TFC 法 (TWE-TFC method)
F－1－1	1.198 800	1.374 600	0.080 000	1.452 400	1.165 300	1.177 170	5.730 500	1.695 200	6.433 500	5.839 200
F－1－2	1.276 600	1.454 000	0.418 400	1.650 700	0.469 500	1.282 420	5.642 400	1.772 300	6.745 900	5.620 150
F－1－3	1.214 400	1.401 100	0.407 800	1.502 200	0.086 100	1.203 765	5.415 200	1.636 600	6.362 500	5.460 450
F－1－4	1.221 300	1.410 400	0.777 100	1.248 200	0.426 900	1.210 670	5.430 700	1.710 200	6.887 900	5.174 050
F－2－1	1.314 400	1.508 100	1.099 500	1.240 700	0.043 500	1.335 700	5.030 700	1.351 900	7.484 300	5.003 350
F－2－2	1.499 400	1.729 700	0.744 800	1.273 400	0.270 700	1.506 100	4.786 400	1.667 000	6.845 300	4.522 550
F－2－3	1.474 300	1.643 900	0.141 800	1.356 200	1.009 100	1.477 700	4.730 200	1.913 800	6.660 700	4.763 960
F－2－4	1.586 300	2.102 200	0.266 800	1.846 900	1.506 100	1.591 600	5.246 400	2.061 500	5.922 300	5.349 870

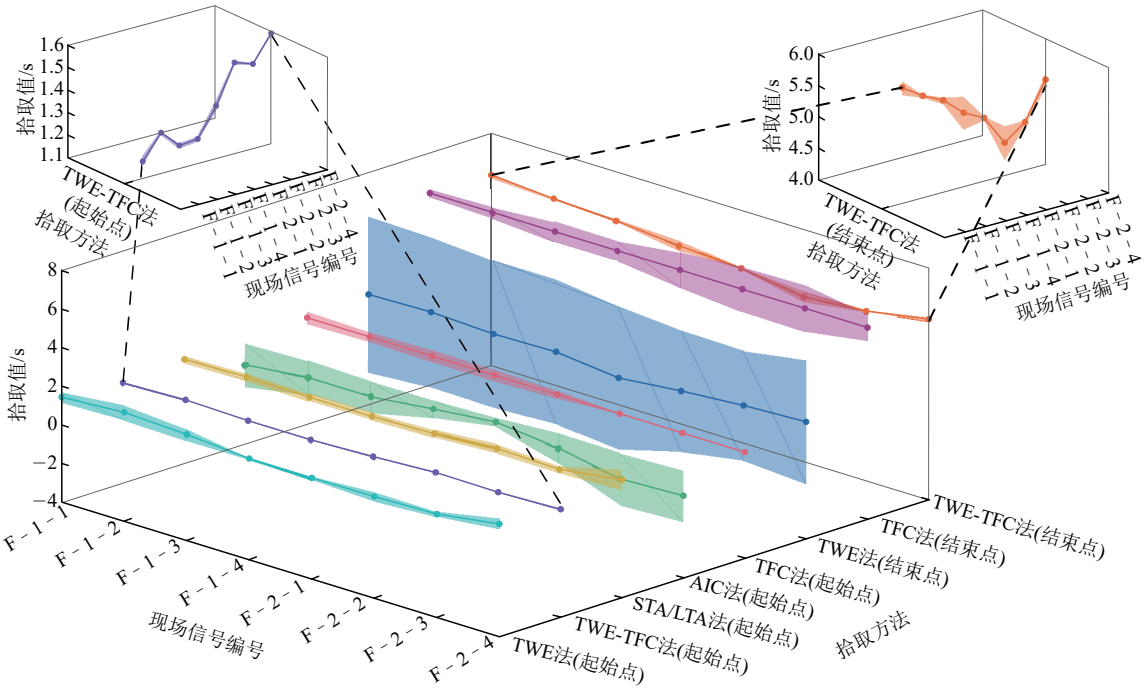


图 14　各方法对现场信号时间定位拾取的误差带状图

Fig.14　Error band diagram of time localization picking for field signals by different methods

部信号幅值衰减及频率趋同至背景噪声水平所致。综上，TWE-TFC 法对现场信号时间定位拾取具备准确性。

4　讨　论

当矿山现场微震信号出现密集的时间序列时，仅凭起始时刻拾取难以准确区分各事件对应波形段。因此，在精确拾取微震信号起始时刻的同时，还应提取信号的终止时刻。这样既能完善信号时间定位拾取方法，又对确定震波持续时间、精确计算震源能量和准确解译微震信号内蕴含的矿震信息至关重要。

本文所提 TWE-TFC 法在实际应用中可通过优化滑动窗口机制，将运行时间控制在可接受范围内。本文所有算法计算均在 Windows 11(64 位)操作系统环境下进行，硬件配置为 Intel core^{TM} i9－14900 HX、32G 内存和 NVIDIA GeForce RTX 4060 显卡，软件环境采用 Matlab R2024a。表 6 展示了各拾取方法的运行时间。由此可见，所提方法并未降低计算效率。此外，STA/LTA 法的时间复杂度为 $O_{STA/LTA}(N)$，而 AIC 算法的时间复杂度为 $O_{AIC}(N^2)$，但运行时间却接近于 STA/LTA 法，这是由于长短时窗和滑动窗口大小的选取造成的。TWE-TFC 法的时间复杂度为 $O_{TWE\text{-}TFC}(N+M)$，M 为 TWE-TFC 法在时频分析部分的循环次数。当 $M=N$ 时，所提方法的时间复杂度可表示为 $O_{TWE\text{-}TFC}(N)$。其中，时间复杂度 $O(N)$是求解问题规模 N(样本数)的函数，表示随 N

表 6　拾取方法运行时间

Table 6　Running time of picking methods

信号类型 (signal type)	运行时间(running time)/s		
	AIC 法 (AIC method)	STA/LTA 法 (STA/LTA method)	TWE-TFC 法 (TWE-TFC method)
模拟信号	17.472	16.915	8.516
试验信号	0.266	5.174	0.165
现场信号	0.115	0.226	0.031

的增大，算法执行时间的增长率[33]，描述最坏情况下算法复杂度的上界(即增长趋势)。可见从时间复杂度方面，TWE-TFC 方法并未增大，足以适用于实时监测系统。

对比其他拾取方法，赵扬锋等[19]提出了基于质量寻优与归一化 STA/LTA 方法对信噪比指数大于 0.4 的微震信号进行 P 波到时拾取，误差保持在 3 ms 以内。贾宝新等[20]提出基于时频分析的下山比较法对红阳三矿的 6 个监测点的微震信号进行 P 波拾取，精确到时最大时差为 0.025 380 s。孟 娟等[22]改进 STA/LTA 方法对模拟微震信号拾取中，雷克子波主频为 20 Hz，采样频率为 1 000 Hz。加入信噪比为－5～20 dB 的随机噪声，最终拾取误差为 0.06 s。邱 磊和李彩华[34]改进的 STA/LTA 方法对“谛听”数据集中信噪比为 8～20 dB，与人工拾取为准的误差小 0.4 s 的起始时刻拾取率在 60%左右。由此可见，TWE-TFC 法对微震信号起始时刻的拾取精度已达现有标准，但在终止时刻的拾取精度上还需优化提高。此外，微震波形识别是实现矿山微震自动定位的基础[27]，同样对实时监测预警至关重要。后续，将继续优化终止时刻的拾取精度，提升微震事件自动识别准确性，以达到实时微震监测系统的工程需求。

5　结　论

为了防止因背景噪声滤波导致的有效信号丢失而引入时间定位误差，本文建立了基于 TWE 和 TFC 的联合时间定位拾取方法(TWE-TFC 法)，对模拟信号、模型试验信号和现场监测信号进行起始和终止时刻拾取，并与 STA/LTA 法、AIC 法及单独的 TWE 法和 TFC 法进行对比。主要结论如下：

(1) 矿震波到达检波器后，其信号能量跃迁、瞬时频率骤降、功率升高；离开检波器时则呈现相反特征，且均表现出突变特性，这些是实现时间定位拾取的关键参数。

(2) 通过计算含背景噪声微震信号的时窗信号能量，预先捕捉信号起始时刻和终止时刻，再利用瞬时频率和功率谱实现信号时间定位精确拾取。该方法联合了时频域特征，克服了单一域中信号时间定位的局限性。

(3) TWE-TFC 方法能够有效提取不同环境、不同种类信号的时频域特征，降低背景噪声干扰，实现高精度的时间定位拾取。在模拟、模型试验与现场监测三类信号中，起始时刻拾取误差分别控制在 0.121，0.049，0.022 s 以内，终止时刻误差分别为 0.099，0.124，0.264 s 以内。

(4) 对现场信号的时间定位拾取，TWE-TFC 方法起始时刻拾取平均误差为 0.011 s，较 STA/LTA，AIC 及 TWE 和 TFC 独立方法的拾取精度分别提升了 94.48%，97.78%，88.74%，90.36%；终止时刻拾取平均误差为 0.108 s，较 TWE 和 TFC 独立方法的拾取精度分别提升了 96.87%，91.43%。

通过不同信噪比模拟信号、模型试验信号及真实矿震事件信号验证了 TWE-TFC 法在低信噪比和噪声环境差异下对非平稳信号同时拾取起止时刻的有效性。目前，TWE-TFC 法可自适应对现场各测点含噪微震信号进行单一事件时间参数的测定。未来将进一步应用 TWE-TFC 法，实现从连续实时监测信号中提取独立事件，并通过事件特征的时序变化规律，获取矿山微震事件前兆信息，从而提升矿山动力灾害监测预警能力。

参考文献(References)：

[1] 李　楠，王恩元，GE Maochen. 微震监测技术及其在煤矿的应用现状与展望[J]. 煤炭学报，2017，42(增 1)：83－96.(LI Nan，WANG Enyuan，GE Maochen. Microseismic monitoring technique and its applications at coal mines：present status and future prospects[J]. Journal of China Coal Society，2017，42(Supp.1)：83－96.(in Chinese))

[2] LIU J，SI Y，WEI D，et al. Developments and prospects of microseismic monitoring technology in underground metal mines in China[J]. Journal of Central South University，2021，28(10)：30743098.

[3] 柳云龙，田　有，冯　昭，等. 微震技术与应用研究综述[J].地球物理学进展，2013，28(4)：1 801－1 808.(LIU Yunlong，TIAN You，FENG Xuan，et al. Review of microseism technology and its application[J]. Progress in Geophysics，2013，28(4)：1 801－1 808.(in Chinese))

[4] 王　强，肖亚勋，姚志宾，等. 特长深埋隧道无线微震监测技术[J]. 实验室研究与探索，2021，40(2)：80－84.(WANG Qiang，XIAO Yaxun，YAO Zhibin，et al. Research on wireless microseismic monitoring

technology of super long and deep buried tunnel[J]. Research and Exploration in Laboratory，2021，40(2)：80－84.(in Chinese))

[5] LI H，WU J，WANG W. Automatic picking method of p-wave initial time of microseismic in coal mine[J]. Engineering Letters，2025，33(2)：312－319.

[6] 卢新明，阚淑婷. 煤矿动力灾害本源预警方法关键技术与展望[J]. 煤炭学报，2020，45(增 1)：128－139.(LU Xinming，KAN Shuting. Key technology and prospect of the original source early warning method for coal mine dynamic disaster[J]. Journal of China Coal Society，2020，45(Supp.1)：128－139.(in Chinese))

[7] ZHANG C，JIN G，LIU C，et al. Prediction of rockbursts in a typical island working face of a coal mine through microseismic monitoring technology[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research，2021，113：103972.

[8] JIA H，YAN B，YANG Z，et al. Identification of goaf instability under blasting disturbance using microseismic monitoring technology[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources，2023，9(1)：142.

[9] 樊　鑫，程建远，栗　升，等. 煤矿微震监测系统在回采工作面顶板水害防治中的应用[J]. 煤田地质与勘探，2024，52(6)：115－127.(FAN Xin，CHENG Jianyuan，LI Sheng，et al. Application of microseismic monitoring system for coal mines to the prevention and control of water disasters on working face roofs[J]. Coal Geology and Exploration，2024，52(6)：115－127.(in Chinese))

[10] 李天斌，许韦豪，马春驰，等. 基于深度学习的隧道微震监测及岩爆预警技术与系统研究[J]. 岩石力学与工程学报，2024，43(5)：1 041－1 063.(LI Tianbin，XU Weihao，MA Chunchi，et al. Research of technology and system of tunnel microseismic monitoring and rockburst early warning based on deep learning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2024，43(5)：1 041－1 063.(in Chinese))

[11] 许延春，黄　磊. 基于微震监测的工作面底板突水全时空预警方法[J]. 煤炭科学技术，2023，51(1)：369－382.(XU Yanchun，HUANG Lei. Full-time and space early-warning method for floor water inrush in working face based on microseismic monitoring[J]. Coal Science and Technology，2023，51(1)：369－382.(in Chinese))

[12] 陈　畅，王　赟，郭高源，等. 几种旋转地震仪在深部地下巷道的观测对比[J]. 地球物理学报，2022，65(12)：4 569－4 582.(CHEN Chang，WANG Yun，GUO Gaoyuan，et al. Deep underground observation comparison of rotational seismometers[J]. Chinese Journal of Geophysics，2022，65(12)：4 569－4 582.(in Chinese))

[13] 曹安业，杨　旭，王常彬，等. 基于深度迁移学习的矿山微震到时精确拾取与自动定位策略[J]. 煤炭学报，2023，48(12)：4 393－4 405.(CAO Anye，YANG Xu，WANG Changbin，et al. High-precision phase picking and automatic source locating method for seismicity in mines based on deep transfer learning[J]. Journal of China Coal Society，2023，48(12)：4 393－4 405.(in Chinese))

[14] ZHAN K，WANG X，WEN X，et al. Bayesian microseismic localization method based on the maximum entropy hamiltonian monte carlo markov chain approach[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2025，58(3)：3 353 － 3 369.

[15] 姚彦吉，柳林涛，盛敏汉，等. 利用标准时频变换方法在强噪声环境下无偏拾取地震 P 波、S 波到时[J]. 地球物理学报，2022，65(1)：227－243.(YAO Yanji，LIU Lintao，SHENG Minhan，et al. Unbiased picking onset time of P and S phases by Normal Time-Frequency Transform method under a strong noise environment[J]. Chinese Journal of Geophysics，2022，65(1)：227－243.(in Chinese))

[16] 易思梦，唐东林，赵云亮，等. 基于人工智能的地震初至拾取方法研究进展[J]. 石油地球物理勘探，2024，59(4)：899－914.(YI Simeng，TANG Donglin，ZHAO Yunliang，et al. A review of artificial intelligence-based seismic first break picking methods[J]. Oil Geophysical Prospecting，2024，59(4)：899－914.(in Chinese))

[17] 谢学斌，叶永飞，高　山，等. 一种基于波形包络趋势变化的 AE 信号到时拾取方法[J]. 矿冶工程，2021，41(3)：6－10.(XIE Xuebin，YE Yongfei，GAO Shan，et al. An arrival-time pickup method for AE signal based on trend change in waveform envelope[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2021，41(3)：6－10.(in Chinese))

[18] 唐　佩，李青锋，朱川曲，等. 基于小波变换的微震阈值去噪方法[J]. 湖南科技大学学报：自然科学版，2021，36(4)：1－7.(TANG Pei，LI Qingfeng，ZHU Chuanqu，et al. Microseism threshold denoising method based on wavelet transform[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology：Natural Science，2021，36(4)：1－7.(in Chinese))

[19] 赵扬锋，王进铭，潘一山，等. 基于质量寻优与归一化 STA/LTA 方法的微震 P 波到时拾取技术研究[J]. 岩石力学与工程学报，2022，41(8)：1 610－1 625.(ZHAO Yangfeng，WANG Jinming，PAN Yishan，et al. Study on determining arrival times of microseismic P-wave based on quality optimization and normalized STA/LTA method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2022，41(8)：1 610－1 625.(in Chinese))

[20] 贾宝新，李　峰，周琳力，等. 基于时频分析的微震 P 波和 S 波到时联合拾取方法[J]. 岩土力学，2021，42(5)：1 253－1 265.(JIA Baoxin，LI Feng，ZHOU Linli，et al. Joint arrival-time picking method of microseismic P-wave and S-wave based on time-frequency analysis[J]. Rock and Soil Mechanics，2021，42(5)：1 253－1 265.(in Chinese))

[21] SHANG X，LI X，MORALES-ESTEBAN A，et al. An improved P-phase arrival picking method S/L-K-A with an application to the

Yongshaba mine in China[J]. Pure and Applied Geophysics，2018，175(6)：2 121－2 139.

[22] 孟　娟，吴燕雄，李亚南. 基于改进长短时窗比值及优化变分模态分解的微震初至拾取算法[J]. 地震学报，2022，44(3)：388－400.(MENG Juan，WU Yanxiong，LI Yanan. First arrival time picking algorithm of micro-seismic based on improved STA/LTA and adaptive VMD[J]. Acta Seismologica Sinica，2022，44(3)：388－400.(in Chinese))

[23] ZHOU Z，CHENG R，CHEN L，et al. An improved joint method for onset picking of acoustic emission signals with noise[J]. Journal of Central South University，2019，26(10)：2 878－2 890.

[24] CHENG A，XU E，YAO P，et al. An automatic arrival time picking algorithm of P-wave based on adaptive characteristic function[J]. Computers and Geosciences，2024，185：105544.

[25] 刘晓佳，李　剑，刘代劲，等. 基于时窗熵的冲击波到时提取方法研究[J]. 计算机测量与控制，2023，31(3)：281－286.(LIU Xiaojia，LI Jian，LIU Daijin，et al. Research on shock wave arrival time extraction method based on time window entropy[J]. Computer Measurement and Control，2023，31(3)：281－286.(in Chinese))

[26] 肖晓春，丁　振，丁　鑫，等. 基于 P 波到时拾取的分析法与遗传算法联合定位方法与应用[J]. 岩土力学，2024，45(7)：2 195－2 207.(XIAO Xiaochun，DING Zhen，DING Xin，et al. Joint positioning method of P-wave arrival time picking based analysis-genetic algorithm and its application[J]. Rock and Soil Mechanics，2024，45(7)：2 195－2 207.(in Chinese))

[27] 姜福兴，尹永明，朱权洁，等. 单事件多通道微震波形的特征提取与联合识别研究[J]. 煤炭学报，2014，39(2)：229－237.(JIANG Fuxing，YIN Yongming，ZHU Quanjie，et al. Feature extraction and classification of mining microseismic waveforms via multi-channels analysis[J]. Journal of China Coal Society，2014，39(2)：229－237.(in Chinese))

[28] 张艳博，周　浩，梁　鹏，等. 基于到时精确拾取与智能优化算法结合的岩石声发射定位方法研究[J]. 岩土力学，2025，46(5)：1 643－1 656.(ZHANG Yanbo，ZHOU Hao，LIANG Peng，et al. Acoustic emission location method of rock based on time precise picking and intelligent optimization algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics，2025，46(5)：1 643－1 656. (in Chinese))

[29] 王婷婷，王威华，陈建玲，等. 基于改进 VMD 的岩石破裂声发射信号滤波算法[J]. 噪声与振动控制，2023，43(2)：104－111.(WANG Tingting，WANG Weihua，CHEN Jianling，et al. The filtering algorithm for rock fracture signal based on improved VMD[J]. Noise and Vibration Control，2023，43(2)：104－111.(in Chinese))

[30] 彭平安，王李管，裴安磊. 微震信号无参数自动去噪 PD 算法实现及应用[J]. 岩石力学与工程学报，2019，38(增 1)：3 061－3 069.(PENG Ping′an，WANG Liguan，PEI Anlei. Non-parametric automatic microseismic data denoising via PD method and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2019，38(Supp.1)：3 061－3 069.(in Chinese))

[31] 赵震华，张杏莉，卢新明. 微震信号初至拾取的 AIC 算法及其分析[J]. 山东科技大学学报：自然科学版，2022，41(1)：44－53.(ZHAO Zhenhua，ZHANG Xingli，LU Xinming. AIC algorithm and its analysis for initial picking of micro-seismic signals[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology：Natural Science，2022，41(1)：44－53.(in Chinese))

[32] 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))

[33] 严蔚敏，吴伟民. 数据结构(C 语言版)[M]. 北京：清华大学出版社，2007：13－15.(YAN Weimin，WU Weimin. Data structure(C language edition)[M]. Beijing：Tsinghua University Press，2007：13－15.(in Chinese))

[34] 邱　磊，李彩华. STA/LTA 方法拾取天然地震波初至及其改进分析[J]. 地球物理学进展，2023，38(4)：1 497－1 506.(QIU Lei，LI Caihua. STA/LTA method for picking up the first arrival of natura seismic waves and its improvement analysis[J]. Progress in Geophysics，2023，38(4)：1 497－1 506.(in Chinese))