

# 相关滤波在微地震数据处理中的应用

朱卫星

(中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东东营 257061)

**摘要:** 由于微地震事件的频率高, 持续时间短, 能量小, 随机噪声甚至可以淹没有用的微地震信号。在确定震源的位置、发震时刻和震源强度之前必须进行滤波处理。而常规的滤波方法在消除噪声, 提高信噪比方面难以胜任。提出一种基于统计规律的多道互相关滤波方法, 在消除微地震信号噪声方面取得了良好的效果。

**关键词:** 微地震; 相关滤波; 互相关函数

**中图分类号:** P631.443

**文献标识码:** A

微地震监测<sup>[1]</sup>是通过观测、分析生产活动中所产生的微小地震事件来监测生产活动的影响、效果及地下状态的地球物理技术<sup>[2]</sup>, 其基础是声发射学和地震学。声发射是指材料内部应变能量快速释放而产生的瞬态弹性波现象。由于大多数微地震事件持续时间小于 1 s, 通常微震能量介于里氏 -3 到 +1 级, 其信号很容易受其周围噪声的影响或遮蔽<sup>[3]</sup>。虽然震源的位置、发震时刻和震源强度都不确定<sup>[4]</sup>, 但微地震信号具有某些统计的规律性, 而且它们与随机干扰不同, 同一个震源发出的微地震信号在不同检波器上接收到的信号具有依附性<sup>[5]</sup>, 它们的相关函数可取得较大的数值, 而随机干扰的相关函数值则为 0。因此, 本文基于相关滤波<sup>[6~8]</sup>来达到压制干扰和突出微地震信号的目的。

## 1 微地震道信号的特点

微地震事件发生在裂隙之类的断面上, 裂隙范围通常只有 1~10 m。由于地层内地应力呈各向异性分布, 因此剪切应力聚集在断面上。通常情况下这些断裂面是稳定的<sup>[1]</sup>, 但当原来的应力受到生产活动干扰时, 岩石中原来存在的或新产生的裂缝周围地区就会出现应力集中, 应变能增高; 当外力增加到一定程度时, 原有裂缝的缺陷地区就会发生微观屈服或变形, 裂缝扩展, 从而使应力松弛, 储藏能量的一部分以弹性波(声波)的形式释放出来, 产生小的地震, 即所谓微地震。注入作业期间引发的微地震事件在空间和时间上的分布是复杂的, 但不是随机的, 可以在 1 km 范围内用适当的灵敏仪器检测到。大多数微地震事件频率范围介于 200~1 500 Hz 之间, 持续时间小于 1 s, 通常能量介于里氏 -3 到 +1 级。在地震记录上微地震事件一般表现为清晰的脉冲, 越弱的微地震事件, 其频率越高,

持续时间越短, 能量越小, 破裂的长度也就越短。因此微地震信号很容易受其周围噪声的影响或遮蔽。另一方面在传播当中由于岩石介质吸收以及不同的地质环境, 也会使能量受到影响。

基于微震信号的以上特点, 识别微地震事件, 区分微地震信号、噪声和随机干扰, 寻找微地震事件的波的到达时及其质点振动方向是其处理的关键。多级接收系统可以帮助我们有效地完成这一作业, 因为微地震事件在多级系统上都有反映, 且具有一定的规律性。在确定震源前必须先做滤波处理, 以提高地震剖面的信噪比, 为后续的工作做准备。常规的滤波处理针对的是反射地震波的处理, 并不能很好地适应微地震波的滤波处理要求。本文根据相关滤波原理开发的滤波方法, 在微地震信号的滤波处理中显示出了明显的效果。

## 2 基本原理

### 2.1 两道微地震信号的互相关

如  $f_1(x)$  和  $f_2(x)$  是有限区间上的离散信号, 则互相关函数定义为

$$R_{12}(\tau) = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^U f_1(x_j) \cdot f_2(x_j - \tau) \\ \sum_{j=1}^U f_1(x_j + \tau) \cdot f_2(x_j) \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中:  $f_1(x)$  和  $f_2(x)$  仅有  $U$  个离散值,  $U$  代表参与互相关计算的地震道的总采样点数;  $j$  代表微地震信号的采样点。

由于微地震信号和随机干扰, 以及随机干扰之

收稿日期: 2006-09-04; 改回日期: 2006-12-14。

作者简介: 朱卫星(1982—), 男, 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院在读研究生, 主要从事地震资料解释和储层预测方面的研究工作, 现正参与微地震检测技术的研究工作。

间不相似,所以它们间的互相关值趋于零,只有相邻道的微地震信号的互相关值不为零,且存在最大值。所以相邻道实测值的互相关函数  $R_{i, i+1}(\tau)^{[9,10]}$  (第  $i$  道与第  $i+1$  道实测值的互相关函数), 近似等于该道上微地震信号的互相关函数  $R_{S_i S_{i+1}}(\tau)$  (第  $i$  道与第  $i+1$  道微地震信号的互相关函数), 其中不包含或只包含较少的随机干扰因素<sup>[8]</sup>, 因而能达到清除或压制干扰和突出地震信号的目的<sup>[11, 12]</sup>。

## 2.2 多道地震信号的互相关处理

应该指出,式(1)是由统计规律得出来的,只有当参与计算的点数  $U$  足够多时,才能压制掉随机干扰。为了增加参与计算的总点数,突出微地震信号,可以对相邻的多道微地震信号作互相关处理<sup>[13]</sup>。

仿照两道地震信号互相关函数的计算公式(1),可以定义第  $i$  道前后相邻的  $p$  道(共  $v = 2p+1$ )微地震信号的互相关函数为

$$R_{f_i}^{(v)}(\tau) = \sum_{j=1}^U \sum_{\substack{d_1=p-1 \\ d_2=p \\ d_1=-p \\ d_2=d_1+1}} \left[ f_{i+d_1}(x_j - d_1\tau) \cdot f_{i+d_2}(x_j - d_2\tau) \right] \quad (2)$$

利用和式的平方公式,可将上式变换为易于计算的形式

$$R_{f_i}^{(v)}(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^U \left\{ \left[ \sum_{d_1=-p}^p f_{i+d_1}(x_j - d_1 \cdot \tau) \right]^2 - \sum_{d_2=-p}^p [f_{i+d_2}(x_j - d_2 \cdot \tau)]^2 \right\} \quad (3)$$

经过推导可得到

$$R_{f_i}^{(v)}(\tau) \approx R_{S_i}^{(v)}(\tau) \quad (4)$$

即实测参数  $f_i(x)$  多道地震信号(共  $v$  条)的互相关函数  $R_{f_i}^{(v)}(\tau)$ , 也近似等于相应地震道有效信号  $s_i(x)$  的互相关函数  $R_{S_i}^{(v)}(\tau)$ , 为此我们简洁的表示为  $R(\tau)$ 。所以多道地震信号的互相关处理也是压制随机干扰的一种手段,并且由于参与计算的微地震道数和总测点数较多,因而可以达到压制随机干扰和突出地震信号的效果,比相邻两道地震信号的互相关处理效果更好。

多道地震信号互相关函数  $R(\tau)$  是  $\tau$  的函数(图 1)。图 2 是随机噪声和微地震信号的互相关函数曲线,从图上可以看出,微地震信号的互相关函数有最大值,而随机噪声和微地震信号的互相关性趋于零值,即它们最不相关。表明相似信号最相关,地震信号和随机噪声最不相关。因而可以利用相关滤波来达到消除噪声<sup>[14]</sup>、突出有效微地震信号和提高信噪比的目的。

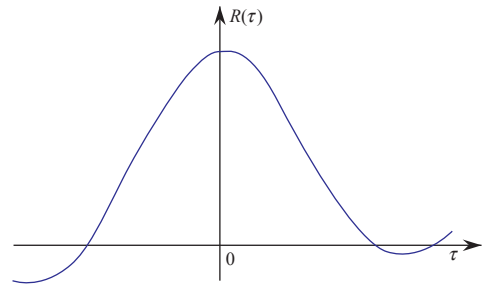


图 1 地震信号互相关函数图像

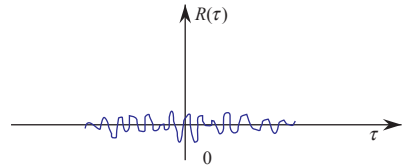


图 2 随机噪声的互相关函数图像

## 2.3 分段互相关处理<sup>[15]</sup>

原则上讲,为使互相关处理的结果  $R(\tau)$  具有统计特征,  $U$  应选取为尽可能大的数值。比如可将整道地震信号的实测值与相邻道作互相关处理。但这样做至少可能会遇到 2 个问题: 首先,测区内可能存在 2 个或多个不同方向的同相轴,在这种情况下,若对整道地震信号作互相关处理,则所得互相关函数  $R(\tau)$  将是各个同相轴的综合反映<sup>[16]</sup>, 它随  $\tau$  的变化关系可能是具有平缓极值或多个极值的函数,这样将难以根据  $\tau^0$  判断同相轴的走向; 其次,对整个地震道作互相关处理所得的结果不能指示同相轴的位置和相对强度,更不能显示同相轴的形态,而这些恰恰是我们最希望得到的结果。

为了避免以上弊病,我们采用逐点分段处理方法: 即每次只将  $U = 2L + 1$  个测点所组成的测线段,与其相邻若干地震道上的相应测线段作互相关处理; 然后逐点推移作处理的测线段,直至遍及整个测区。我们将每次作互相关处理的测线段长度(或测点数)  $U$  作为相关步长,通常把它选为约等于相邻地震道接收到的微地震信号的时移长度<sup>[17, 18]</sup>。逐点分段处理的步骤如下。

1) 以给定的测点(比如,第  $i$  道的第  $j$  个测点,记为  $[i, j]$ ) 为中心,按相关步长  $U = 2L + 1$ , 作  $V = 2P + 1$  个地震道的互相关处理。即对不同的  $\tau$  值( $W = 2Q + 1$  个整数  $\tau: \tau = \pm Q, \pm(Q-1), \dots, \pm 2, \pm 1, 0$ ), 计算互相关函数  $R(\tau)$ 。计算公式可由式(3)稍加变形而得

$$R(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{e=-L}^L \left\{ \left[ \sum_{d=-p}^p f_{i+d}(x_j + e - d \cdot \tau) \right]^2 - \sum_{d=-p}^p [f_{i+d}(x_j + e - d \cdot \tau)]^2 \right\} \quad (5)$$

2) 根据所得的  $R(\tau)$ , 用二次插值法确定  $R(\tau)$  的极大值(记为  $R^0$ )及其相应的  $\tau$  值(记为  $\tau^0$ )。具体做法如下:①比较计算所得的  $R(\tau)$  值, 选出其中的最大值及其对应的  $\tau$  值, 分别记为  $R(k)$  和  $k$ ; ②利用  $R(k-1)$ ,  $R(k)$  和  $R(k+1)$  作二次插值, 确定  $R^0$  和  $\tau^0$ 。设在  $R(k-1) \sim R(k+1)$  范围内,  $R(\tau)$  为  $\tau$  的二次函数

$$R(\tau) = a\tau^2 + b\tau + c \quad (6)$$

式中:系数  $a, b, c$  可由  $R(k-1)$ ,  $R(k)$ ,  $R(k+1)$  和  $k$  表示

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{1}{2}[R(k+1) + R(k-1) - R(k)] \\ b &= \frac{1}{2}[R(k+1) + R(k-1) - 2aR] \\ c &= R(k) - ak^2 - bk \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

将式(6)对  $\tau$  求一阶导数, 并令其值为零

$$\frac{dR(\tau)}{d\tau} = 2a\tau + b = 0$$

由此可求得  $R(\tau)$  取极大值时的  $\tau$  值

$$\tau^0 = -\frac{b}{2a} \quad (8)$$

将其代入式(6)可得到  $R(\tau)$  的极大值

$$R^0 = -\frac{b}{4a} + c \quad (9)$$

这样, 将  $R(k-1)$ ,  $R(k)$ ,  $R(k+1)$  和  $k$  代入式(7), 算出  $a, b, c$  以后, 便可由式(8)和式(9)得到  $R^0$  和  $\tau^0$ 。计算的结果记录在参与互相关处理的逐道测线段所在测区的中心测点  $[i, j]$  上, 故可进一步注以脚标  $ij$ , 记为  $\tau_{ij}^0$  和  $R_{ij}^0$ 。

3) 依次对测区内所有可作计算的测点, 重复上述步骤, 算出各个测点  $[i, j]$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ;  $j=p+1, p+2, \dots, M-p$ ) 的最大互相关函数值 ( $R_{ij}^0$ ) 和对应的  $\tau$  值 ( $\tau_{ij}^0$ )。然后, 绘制  $R_{ij}^0$  的剖面图或平面等值线图。与实测参数  $f$  相比,  $R_{ij}^0$  与有用的微地震信号  $S$  关系更密切, 而较少受随机干扰的影响, 基本上反映了同相轴的位置和形态。

## 2.4 关于互相关处理中的参数取值问题

互相关处理中的相关步长  $U$ 、互相关道数  $V$  和时移  $\tau$  的个数  $W$  选取的好坏直接影响处理效果。相关步长  $U=2L+1$  宜选为略小于相邻道的半个时移值。 $U$  值太小, 在其范围内的随机干扰不具备统计学特征, 相关处理对它不能起到有效的压制作用, 甚至可能被突出, 形成假同相轴;  $U$  值太大, 会使  $R^0$  的峰值变得很宽, 不能正确地反映有用同相轴的形态和范围, 同时还会使相邻的同相轴相互迭合, 形成一个宽缓的  $R^0$  峰值, 降低对微地

震信号同相轴的分辨能力。

互相关道数  $V=2P+1$  的选值与同相轴的走向长度和沿走向的稳定性有关。对于走向长度较大、并且走向比较稳定的异常, 可选用较大的  $V$  值(即作较多地震道的互相关处理), 这时, 由于参加互相关处理的测点数较多, 故对随机干扰的压制效果较好。但若同相轴本身的走向长度不大或走向变化较大, 则不宜将  $V$  选得太大, 否则, 将会使同相轴的变化被“圆滑”, 降低同相轴走向变化的分辨能力。因此, 在参加互相关的地震道数较少时, 对随机干扰的压制能力较弱。通常,  $V$  可选 3, 5 或 7。

$\tau$  的个数  $W=2Q+1$  取决于同相轴与测线的夹角  $\varphi$ 。若  $\varphi$  接近于零, 即同相轴近于水平, 这时可少取几个(比如 5 个)  $\tau$  值; 若  $\varphi$  较大, 则需多取一些(比如 11~15)  $\tau$  值。

选取  $U, V$  和  $W$ , 除上述各点之外, 还要考虑对计算量的影响。 $U, V$  和  $W$  值越大, 作互相关处理的计算量越大。所以在不影响处理效果的前提下, 应尽量选用较小的  $U, V$  和  $W$  值。

## 3 实际资料处理

### 3.1 滤波处理结果

图 3 是原始 VSP 地震信号与相关滤波后结果的对比图。图 3a 是经过校正处理后的原始零偏 VSP 数据, 图 3b 是经过滤波后的结果。图 4a 是通过在井中射孔激发微地震得到的微地震原始资料, 图 4a 数据的采集方式如图 5 所示。在压裂井中通过连续注水射孔, 压裂地下岩石, 破碎的岩石产生的应力迅速释放, 产生连续微地震波, 在检测井中布置三分量检波器接收微地震信号。假如没有随机噪声干扰, 接收到的微地震波应该是直的同相轴。图 4b 是滤波结果图, 从图中可以看出, 同相轴显示清晰, 而且信噪比也得到了明显的提高。同时, 同相轴的位置和方向也可以很明确。

作互相关处理的地震道数  $V$  和相关步长  $U$  的下限决定随机干扰的强弱, 而上限取决于微地震信号的延续时长以及相邻道的间隔。在干扰较强时, 应采用较大的  $U$  和  $V$  值, 在能可靠地压制随机干扰的前提下, 应尽量选用较小的  $U$  和  $V$  值, 以使  $R^0$  曲线尽可能地接近于微震信号同相轴的分布和形状, 并减少计算。在随机干扰较强而不能根据实测参数判断同相轴的形态和范围的情况下, 可以选择不同的  $U$  和  $V$  值作互相关处理, 从中得到最佳

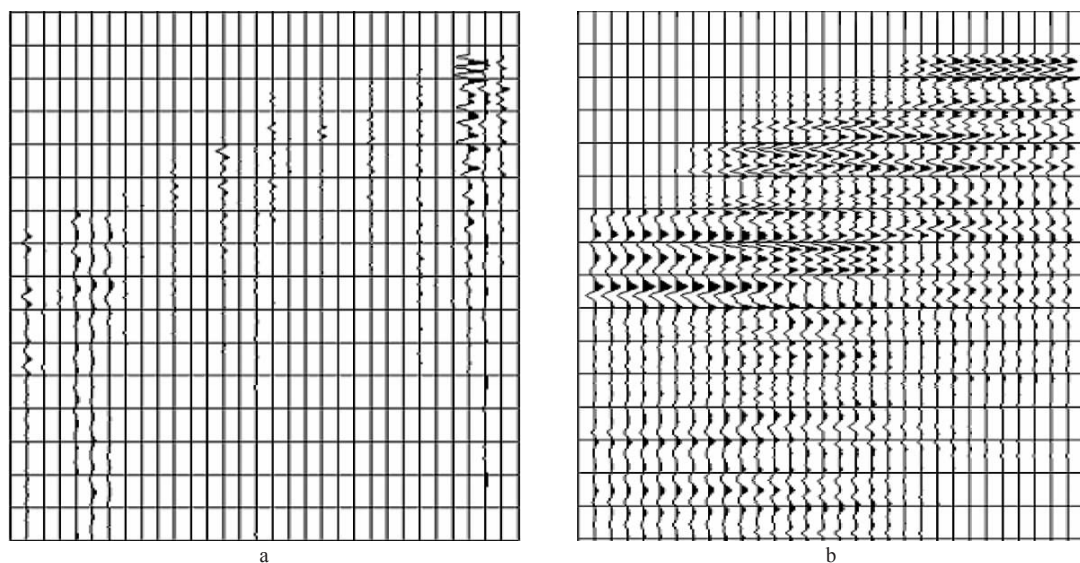


图3 检测井原始资料(a)和相关滤波处理后(b)结果对比

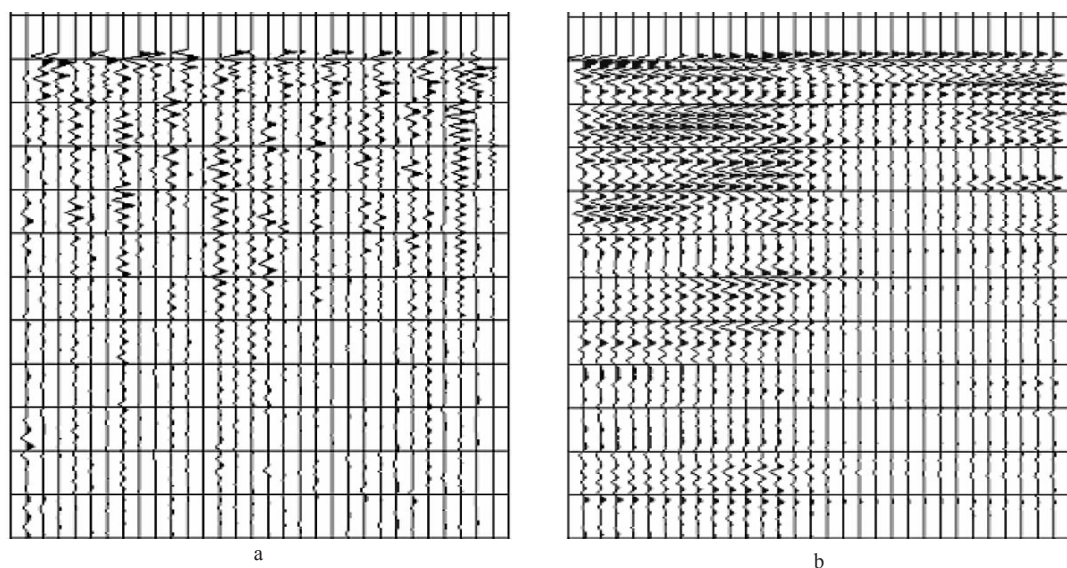


图4 微地震的原始记录(a)和相关滤波结果(b)对比

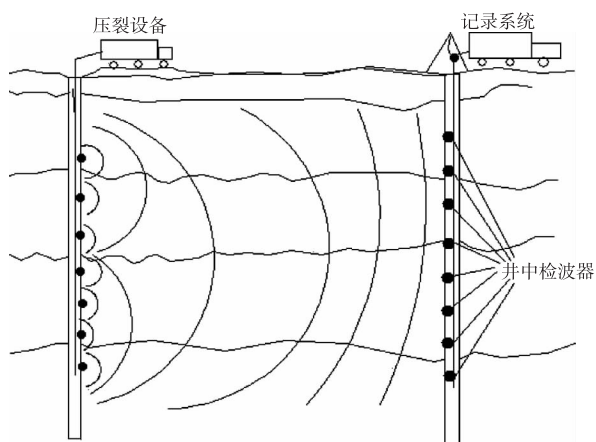


图5 微地震检测数据的采集方式

结果。图6是针对图4取不同的参数后的相关滤波地震剖面图。图6a中的 $U$ 和 $V$ 取值比较合适,从图中可以看出,该图比较真实地确定了同相轴的方向、位置以及强度等;而图6b中由于 $U$ 和 $V$ 值选取得不合适,造成滤波结果出现假象,不能真实地反应出同相轴的方向、位置以及强度等。

### 3.2 频谱分析

图7是单道微地震信号滤波前后的频谱分析结果。从图中可以看出,经过相关滤波后,低频的随机干扰已被压制掉,还剩下高频的微弱微地震信号。因此相关滤波能对微地震信号的信噪比起到很好的改善作用。

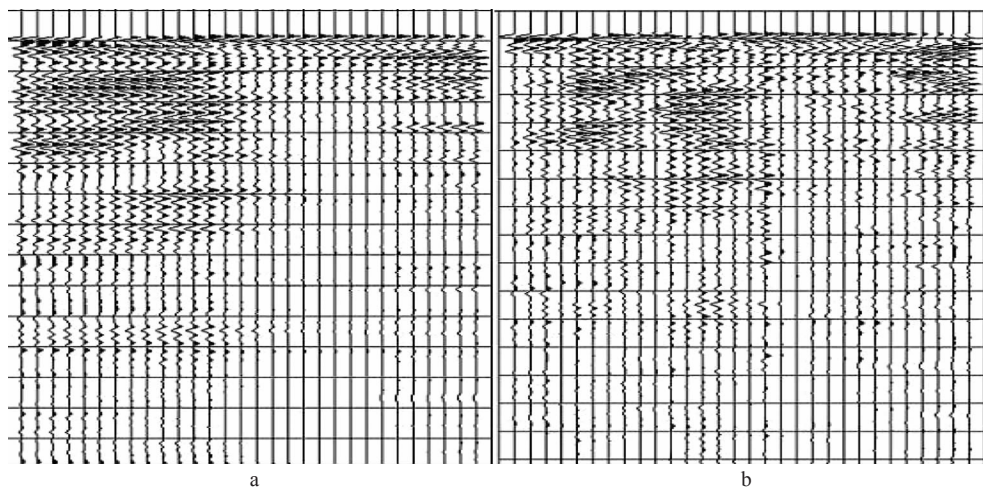


图6 取 $U=13$ 和 $V=5$ 时(a)及取 $U=20$ 和 $V=7$ 时(b)的相关滤波结果

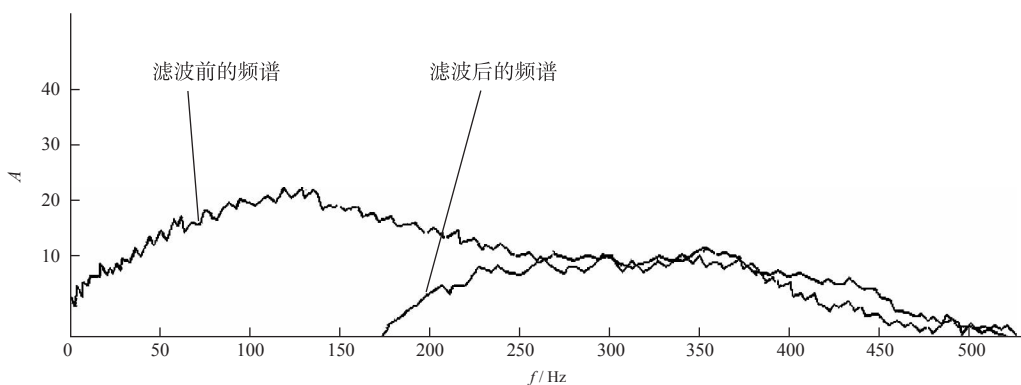


图7 单道微地震信号滤波前后的频谱对比

## 4 结束语

本文介绍的多道微地震信号互相关处理方法是在随机干扰背景上突现微地震信号同相轴的有效方法。根据实测微地震信号的情况(包括微地震信号的幅度和分布情况及随机干扰强弱等)合理选择互相关处理的参数,可以达到清晰地显示同相轴、确定同相轴的位置以及震源的强度和同相轴分辨率的效果。

### 参 考 文 献

- 1 董世泰,高红霞. 微地震监测技术及其在油田开发中的应用[J]. 石油仪器, 2004, 18(5): 5~8
- 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 Lee S K, White P R. The enhancement of impulsive noise and vibration signals for fault detection in rotating and reciprocating machinery[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 217(3): 485~505
- 4 Rutledge J T, Phillips W S, House L S, et al. Microseismic mapping of a Cotton Valley Hydraulic fracture

using decimated downhole arrays[J]. Expanded Abstracts of 68<sup>th</sup> Annual International SEG Meeting, 1998, 338~341

- 5 Maxwell S C, Urbancic T I, Prince M, et al. Identifying fracture patterns in microseismic data sets[J]. CSPG/CSEG Joint Convention, 2003, 2~6
- 6 Milkereit B, Bohlen T, Adam E, et al. Reservoir imaging monitoring: A modeling study[J]. EAGE 64<sup>th</sup> Conference & Exhibition-Florence, Italy, 2002, 27~30
- 7 Brie A, Pampuri F, Marsala A F, et al. Shear sonic interpretation in gas-bearing sands [J]. SPE, 1995, 30595
- 8 Linville A F, Meek R A. A procedure for optimally removing localized coherent noise [J]. Geophysics, 1995, 60(1): 191~203
- 9 Reiter R C, Toksoz M N, Purdy G M. A semblance guided median filter [J]. Geophysical Prospecting, 1993, 41: 15~41
- 10 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现[M]. 第2版. 北京:清华大学出版社, 2003. 460~524
- 11 Liu Xuewei. Ground roll suppression using the Karhunen-Loeve transform[J]. Geophysics, 1999, 64(2): 564~566

(下转第139页)