

小波域爬山拟合法消除面波

夏洪瑞*^{①②} 吕秋玲^① 陈胜红^① 邹少峰^① 宋林^①

(^①中国石油化工股份有限公司石油物探技术研究院,江苏南京 210014;

^②中国石油化工股份有限公司江汉石油管理局物探处物探研究中心,湖北潜江 433100)

夏洪瑞,吕秋玲,陈胜红,邹少峰,宋林. 小波域爬山拟合法消除面波. 石油地球物理勘探, 2013, 48(3): 345~350

摘要 针对现行面波消除技术中傅氏变换的负作用、小波变换去噪中阈值不易准确求取及呈拟双曲线面波顶点及其局部区域面波无法消除问题,提出小波域爬山拟合法消除面波技术。该项技术利用经小波变换后的小波系数上面波特征更为突出的特点,采用爬山法搜索相邻道的相似波形,并求其均值,若该均值满足给定的三个面波判别准则,则从原始小波系数中减去,最后通过重构得到去除面波的记录。理论模型及实际资料处理结果表明:该方法克服了现有消除面波技术中存在的缺点,达到了较好的面波消除效果。

关键词 消除面波 小波域 爬山法

中图分类号:P631 **文献标识码**:A

1 引言

面波是陆上地震勘探中最常见的一种强干扰波,在常规地震资料处理中,通常对含面波的区域进行切除处理,这是一种最彻底的面波消除技术,但以损失包含于面波区域内其他所有信息为代价。随后,人们又采用频域切除滤波的办法,可保证面波区域内,除去面波所在频带以内的信息。这种方法是对时间域切除的一个进步。随着二维傅氏变换引入到地震资料处理中, $f-k$ 视速度滤波消除面波方法逐渐广泛应用,目前仍为各种商业处理系统中消除面波的主要手段^[1]。这项技术的主要缺陷在于:①切除区的有效信号同时被切除,即损失了相同频率一波数域的有效信号。为克服这一缺陷,人们提出了在局部频率一波数域拟合面波然后再减去面波的办法。此法虽减少了切除过程中对该频率一波数域中有效信号的损害,但傅氏变换的负作用仍无法避免。尽管这一缺陷明显存在,但由于它采用了拟合减去法去噪,使去噪过程中对有效信号的损失最小。②傅氏变换的负作用,主要表现在应用二维傅氏变换“炕席”状的相干噪声。在三维资料中,随着

排列逐渐远离炮点,近炮检距道上的面波形态逐渐由扫帚状变为近似双曲线状,与有效波形状十分接近,因此无法用视速度加以区分,进而无法准确消除。实际上,该局部区域的信息变换到频率一波数域之后,无法准确确定面波拟合的扇形窗的扇形限,过小则无法完整拟合该区域的面波,过大又损失在这个扇形窗内的有效信息。更为严重的是,由于傅氏变换刻画的是整个炮集的频率一波数特征,扇形限的变化将影响整个炮集的去噪效果。

由于面波视速度随排列变化而呈现的时一空变特点,对准确提供处理参数带来困难,并可能造成去噪不彻底或在去噪的同时损害了面波区域的有效信号。因此,刘法启等^[2]提出联合应用小波变换与 $f-k$ 滤波压制面波;罗国安等^[3]联合应用小波变换与 $K-L$ 变换成功地压制面波;李卫忠等^[4]通过利用小波变换分离面波与有效波,然后对波场进行信号重构,得到消除面波的波场;张华等^[5~7]通过小波变换得到不同频段、不同波数的小波系数,对以面波为主的小波系数进行充零处理,然后重构消除面波的记录,这种方法的缺陷是损害与面波频率一波数相同的有效信号;孙学文等^[8]提出了离散小波变换阈值联合二维物理小波标架去噪的压制面波的方法,进

* 湖北省潜江市江汉石油管理局物探处物探研究中心,433100。Email:geoxhr555@163.com

本文于2011年6月29日收到,最终修改稿于2013年3月4日收到。

而缓解了小波变换阈值去噪技术中由于阈值不易准确求取而导致的“过扼杀”或“过保留”现象;Zhang等^[9]利用逆向阈值去噪的思想实现了面波的压制;陈文超等^[10]采用连续小波变换,并考虑了面波随炮检距变化的规律,自适应衰减面波。

本文在上述研究成果的基础上,应用小波域爬山拟合减去法达到消除面波的目的。

2 方法实现

鉴于面波具有频带窄、相邻道相干性强的特点,本文试图在小波域应用爬山法拟合面波,再从原始记录中减去,达到消除面波的目的。拟合减去法去噪通常采用分频处理,可使噪声的拟合更为准确并减小噪声对有效信号的损害^[11],本文也采用类似的方法。地震面波的频带一般为4~18Hz,采用二进小波可得到面波所在的低频尺度的小波系数^[12],至于二进小波变换的分解与重构算法在此不再赘述。

2.1 小波域爬山法拟合面波

面波的拟合基于以下思路:对于所需拟合的某道上的某一具体波形,相邻道上的相应部分的相同信息为面波,不同信息视为随机信息,采用叠加方法去除随机信息得到所需拟合面波。依上所述,准确的拟合取决于在相邻道上正确选取参与拟合的信息。由于相邻道面波有极强的相似性,且这些具有相似性的波形位置局部呈拟线性排齐。因此采用最简单的寻优算法——爬山法便可在相邻道上搜索出参于拟合的信息。

面波方向的搜索及其拟合过程是在存有面波的小波尺度上进行。以下所述各记录道指的是这些尺度下的各道小波系数。为方便拟合,本文定义在一道记录上两次过零点部分称为一完整波形。拟合过程是以一个波形为单位进行。

图1为爬山法搜索示意图。设 $S_{j,i}$ 为某一小波尺度下第 j 道上的第 i 个波形,称之为最初的搜索参照波形, $S_j(t_i)$ 为该波形的峰值所在时间的小波系数, t_i 为该波形的峰值所在时间,该波形能量以面波为主。采用爬山法搜索方式,总可以在其左、右相邻道上向上、向下搜索到相邻道上的与该波形时差最小的波形。本文采用的爬山法搜索具体步骤为:

(1)对于以 $S_{j,i}$ 为参照波形的搜索是先向左(或右)然后再向右(或左)进行。以先向左搜索为例叙述爬山法搜索过程。在第 $j-1$ 道上,沿时间 t_i 向下搜索总可以找到一个波形 S_{j-1,l_1} ,在 $S_{j-1,l_1}(t_i) \times S_{j,i}(t_i) > 0$ 的条件下,使 $t_{l_1} - t_i$ 为最小正数, l_1 为第 $j-1$ 道中的波形顺序号, $l_1 = 1, 2, \dots, L_1 - 1, L_1$; L_1 为第 $j-1$ 道中的波形个数。然后以波形 S_{j-1,l_1} 为新的搜索参照波形,在第 $j-2$ 道上开始新的搜索。

(2)按上述方法搜索出以波形 $S_{j,i}$ 为中心的波形 $S_{j,I}$, $J = j-n, j-n+1, \dots, j+n-1, j+n$; $2n+1$ 为拟合面波的道数; $I = i_{j-n}, i_{j-n-1}, \dots, i_n$ 为相应各道相应波形的波形顺序号。基于前文中的假设:相邻道中每道中面波的形态及能量相同,故所求取的波形 $S_{j,I}$ 中相同部分为面波成分,而不同部分为包含有效信息的其他成分。叠加并求其均值,有

$$\bar{S}_{j,i}(t) = \sum_{I=i-n}^{i+n} S_{j,I}(t) / (2n+1) \quad (1)$$

式中: $t \in (T_{i1}, T_{i2})$, T_{i1}, T_{i2} 为第 j 道第 i 个波形的起止时间。此时求取的波形 $\bar{S}_{j,i}$ 称为波形 $S_{j,i}$ 的拟合波形。

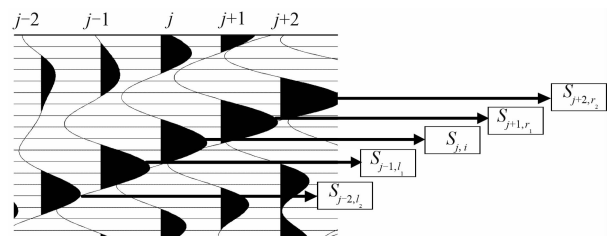


图1 爬山法搜索示意图

$S_{j,i}$ 为参照波形,向左搜索出 S_{j-1,l_1}, S_{j-2,l_2} ;向右搜索出 S_{j+1,r_1}, S_{j+2,r_2} , r_n 为第 $j+n$ 道中的波形顺序号

拟合面波就是逐个对波形进行拟合,然后根据面波判别条件,判定所拟合波形是否为面波,是,则从原始信息减去,再进行下一波形处理;否,直接进行下一波形处理。

图2是不同尺度一维小波变换后单炮记录。其中图2a是原始单炮记录,图2b为第7个尺度小波分解的结果;图2c、图2d、图2e及图2f分别为第6~第3尺度下的小波分解结果。由图可见:面波主要集中在大的小波尺度上,且通过小波变换分频处理后,具有面波的小波尺度上相邻道上面波特征更为清晰,这无疑为采用爬山法拟合面波打下了良好的基础。显然,对该单炮记录而言,去噪过程仅需在第5~第7小波尺度下进行。

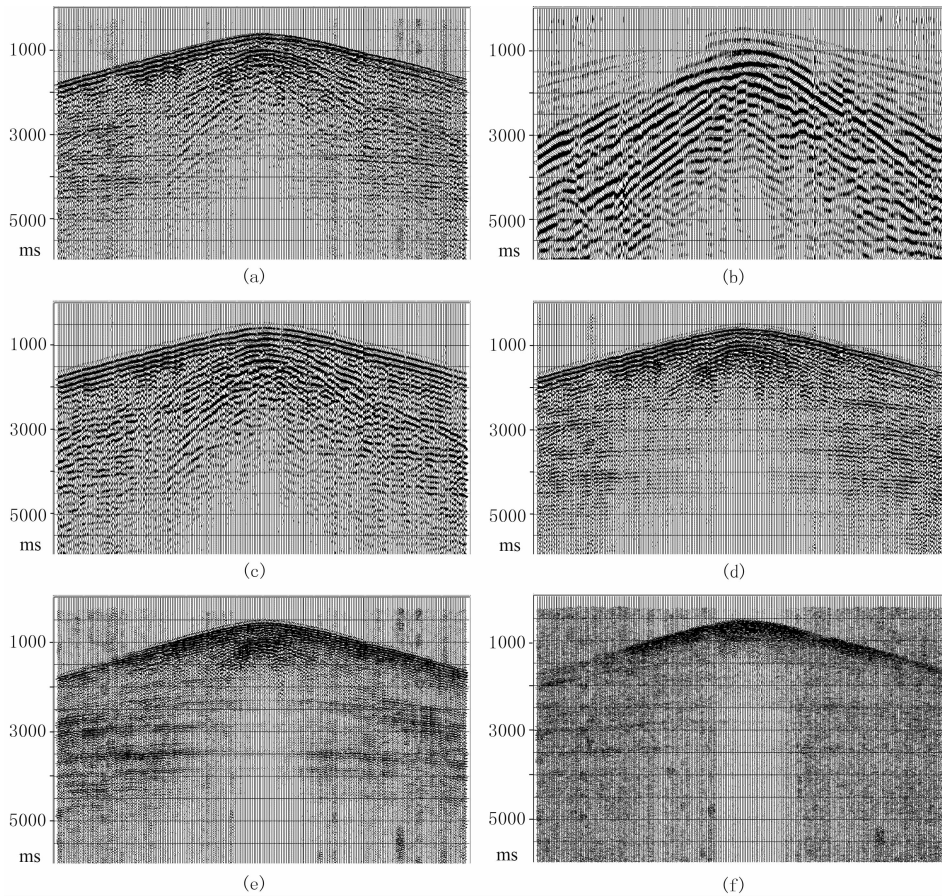


图 2 不同尺度小波变换后单炮记录

(a)原始单炮记录; (b)~(f)第 7~第 3 尺度下小波分解结果; 面波主要出现在第 7~第 5 尺度上,且各尺度上面波特征更为清晰

2.2 面波判别准则

按上述办法求取的拟合波形,包括所有应拟合的面波,但由于爬山法的贪婪算法,拟合波形不一定全为面波。故拟合波形 $\bar{S}_{j,i}$ 是否为面波还有待进一步检测。基于面波的视速度明显不同于有效波,相邻道面波具有较强的相似性和能量强且能量相近的特点,本文采用以下方式进行检测。

2.2.1 时差准则

在地震记录上可十分明显地观测到面波与有效信号的差异:面波的视速度小于有效波的视速度,且在两者之间存有明显的界定——初至波视速度,即面波视速度小于初至波视速度而有效信号视速度大于面波视速度,就是说,视速度小于初至波视速度的同相轴为面波(或其他相干干扰)。

显然,通过判别面波与有效信号的相邻道时差 T ,搜索出的波形 $S_{j,i}$,则在 $J = j - n, j - n + 1, \dots, j + n$ 中,若

$$0 < T < t_l - t_{l-1} \tag{2-1}$$

或

$$0 < T < t_{l-1} - t_l \tag{2-2}$$

成立,那么 $\bar{S}_{j,i}$ 则可能为面波波形。式中 t_{l-1}, t_l 为在相邻道上搜索出的波形的峰、谷值时间。

2.2.2 波形准则

若 $S_{j,i}$ 为含有面波的波形,根据相邻道面波相似的假定, $S_{j,i}$ 和 $\bar{S}_{j,i}$ 应相似,求两者的相似系数,即

$$C_i = \frac{\sum_{t=T_{i1}}^{T_{i2}} S_{j,i}(t) \times \bar{S}_{j,i}(t)}{\sqrt{\sum_{t=T_{i1}}^{T_{i2}} S_{j,i}^2(t) \times \sum_{t=T_{i1}}^{T_{i2}} \bar{S}_{j,i}^2(t)}} \tag{3}$$

式中: $S_{j,i}, \bar{S}_{j,i}$ 分别为原始波形和拟合波形; T_{i1}, T_{i2} 为计算互相关的起止时间。若求出的相似系数 C_i 大于某一阈值,则拟合波形为求取的面波。

2.2.3 能量准则

若拟合出波形为面波,根据相邻道面波能量相近的特点,则上述两波形的能量比接近于 1。若

$$\alpha_1 \leq \frac{\sum_{t=T_{i1}}^{T_{i2}} S_{j,i}^2(t)}{\sum_{t=T_{i1}}^{T_{i2}} (\bar{S}_{j,i}(t))^2} \quad (4)$$

成立,则拟合波形为面波。式中 α_1 为给定的阈值。式(4)为式(3)的补充。

经过上述三种方式的检测,就可以判定拟合波形是否为面波。拟合出面波之后,在拟合面波的小波尺度下减去所拟合的面波,然后通过小波重构就得到消除面波的去噪结果。

2.3 近炮检距记录道及其邻域面波的拟合

在近炮检距记录道上面波与有效信号的斜率相近的情况下,傅氏变换或小波变换均难以使两者彻底分离。若根据时差准则,则无法检测出面波。为此,可采用沿层追踪的方法实现对该局部区域的拟合。

假定某炮为中间放炮,设左右各 N 道为近炮检距区域内的记录道。在这个局部区域内采用与上述

方法相同的办法进行搜索。所不同的是减小时差判别条件,即减小时差阈值,极端时取为0。这个过程正是沿层追踪过程。再根据波形准则和能量准则,判定拟合波形是否为面波。

3 理论模型测试和实际资料处理

图3为理论模型消除面波效果分析图。图3a为由全波场正演模拟软件生成的原始单炮记录,道长为5000ms,采样率为2ms。由图可见,图中有明显的面波干扰(图3a);图3b为本文方法拟合出的面波。对比图3a和图3b可见,图3b拟合出的面波更为准确;由图3a减去图3b后,得到消除面波结果(图3c)。可见图3a中的面波得到了有效消除。

图4为应用不同消除面波软件对A工区单炮

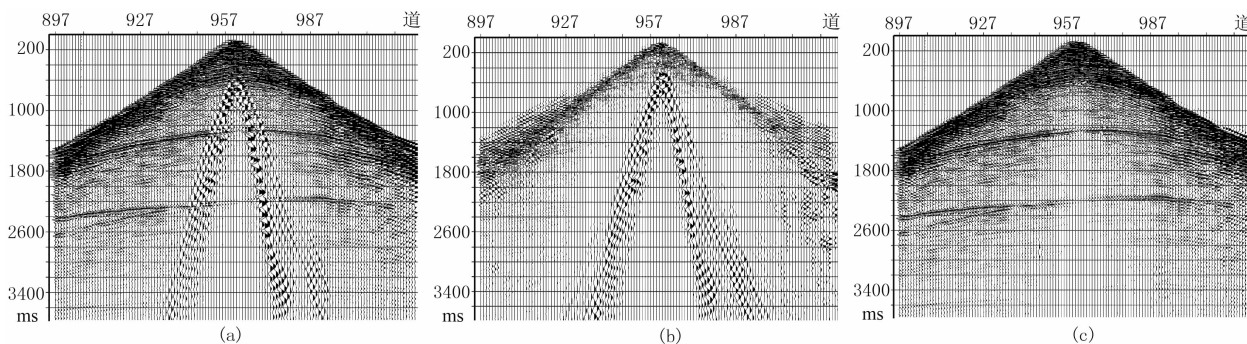


图3 理论模型消除面波结果

(a)原始单炮记录;(b)本文方法拟合的面波记录;(c)消除面波结果

记录进行面波消除效果对比。其中图4a为含有面波的原始单炮;图4b、图4c为基于 $f-k$ 视速度滤波原理不同软件处理结果;而在图4d中由于采用了二维小波变换,克服了傅氏变换易产生“炕席”的负作用现象;图4e为本文方法处理结果;图4f为本文方法拟合的面波。由图4b和图4c可见,由于商业软件通常采用二维傅氏变换,故去除面波剖面上傅氏变换的负作用很明显,去噪结果上出现了新的相干噪声。

另外,在图4b、图4c和图4d中椭圆框中所示部分为面波的顶点及其面波斜率大于初至斜率的局部区域,由于在该区域中,单独的傅氏变换或小波变换已无法突出面波的变化规律,故该区域的面波消除效果较差。而图4e为本文方法去除面波结果,既无傅氏变换的负作用,又很好地消除了面波顶点及

其附近的面波。由图4f可见,无论从整体特征,还是具体细节,拟合出的面波特征与原始单炮记录的面波特征极其相似。此现象说明,常用的一些去面波商业软件对具有双曲顶点的面波无能为力,而本文方法能很好地克服这一缺点。

图5为道长为6000ms、采样率为1ms的转换波单炮记录消除面波效果对比图。由图5a可见,图中有较严重的面波干扰。图5b为应用二维小波变换切除法去除面波的结果。由图可见,面波所在的低频—高波数的小波系数被置零,即有一部分频率—波数内的全部信息被切除,故整个剖面显得呆板。图5c为应用本方法拟合的面波记录,对比图5a,面波拟合十分准确。图5d为利用本文方法消除的面波结果,图中面波得到了有效消除,且波形自然、灵活。

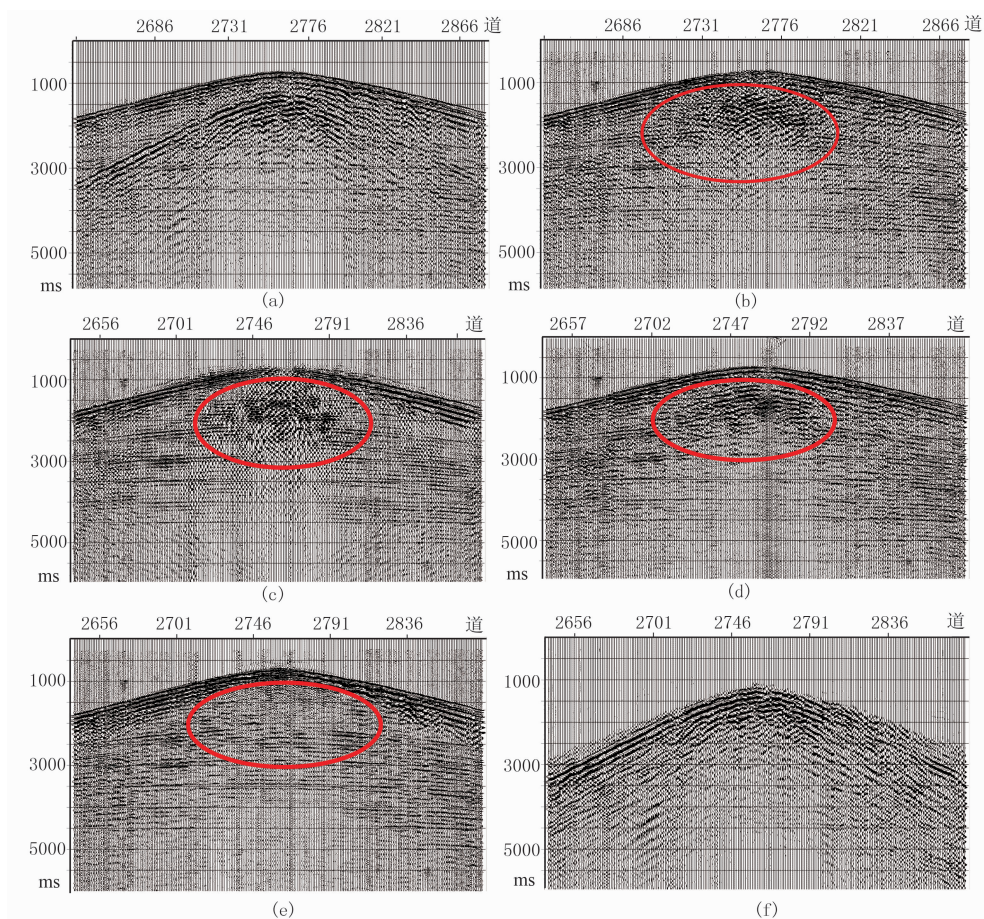


图 4 实际资料去噪效果分析

(a)原始单炮记录;(b)、(c)基于 $f-k$ 视速度滤波原理的不同软件去除面波记录;
 (d)二维小波变换去除面波结果;(e)本文方法处理结果;(f)本文方法拟合的面波

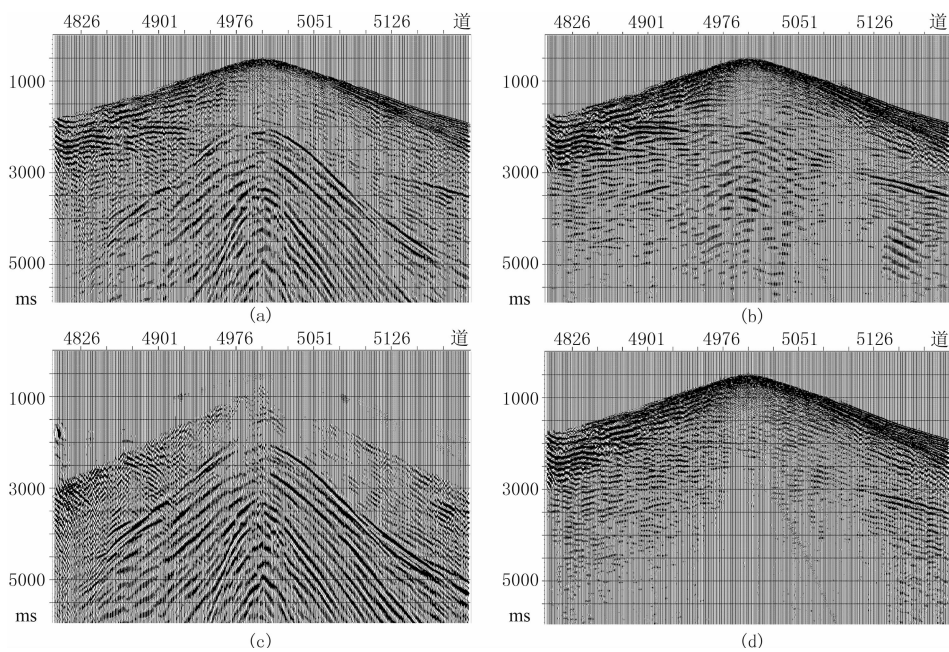


图 5 转换波单炮记录消除面波效果对比

(a)原始单炮记录;(b)二维小波变换切除法消除面波记录;(c)本文方法拟合的面波记录;(d)本文方法消除面波结果

4 结束语

拟合减去法是消除相干噪声的有效技术,而这一技术的核心在于强调相邻道面波的波形相似及能量相近才能对噪声准确拟合。本文利用二维小波变换,将含有面波的单炮记录变换到时间—空间—频率—波数域。这种变换,使得面波的特征在局部时间—空间—频率—波数域更为突出,进而为准确拟合面波创造了条件。通过爬山法搜索面波及拟合面波的正确性检测方法保证了快速简洁拟合面波。理论模型测试结果表明了该方法的正确性,而实际资料的对比处理结果表明:该方法既克服了二维傅氏变换的负作用,又成功地消除了包含面波顶点在内局部区域的面波。

参考文献

- [1] Saatçilar R and Nezihi Canitez N. A method of ground roll elimination. *Geophysics*, 1988, 53(7): 894~902
- [2] 刘法启, 张关泉. 小波变换与 $F-K$ 算法在滤波中的应用. 石油地球物理勘探, 1996, 31(6): 782~791
Liu Faqi and Zhang Guanquan. Application of wavelet transform and $F-K$ algorithm in filtering. *OGP*, 1996, 31(6): 782~791
- [3] 罗国安, 杜世通. 小波变换及信号重建在压制面波中的应用. 石油地球物理勘探, 1996, 31(3): 337~349
Luo Guoan; Du Shitong. Application of wavelet transform and signal reconstruction in surface wave elimination. *OGP*, 1996, 31(3): 337~349
- [4] 李卫忠, 张明振, 王成礼等. 压制面波的波场分离方法. 石油地球物理勘探, 1998, 33(5): 679~690
Li Weizhong, Zhang Mingzhen, Wang Chengli et al. Wave field separation method for suppressing surface wave. *OGP*, 1998, 33(5): 679~690
- [5] 张华, 潘冬明, 张兴岩. 二维小波变换在去除面波干扰中的应用. 石油物探, 2007, 46(2): 147~150
Zhang Hua, Pan Dongming, Zhang Xingyan. Application of 2-D wavelet transformation in eliminating surface wave interference. *GPP*, 2007, 46(2): 147~150
- [6] 刘财等. 二维小波变换在地震勘探面波消除中的应用. 地球物理学进展, 2003, 18(4): 711~714
Liu Cai et al. Apply of 2-D wavelet transforms in surface wave eliminations of seismic exploration. *Progress in Geophysics*, 2003, 18(4): 711~714
- [7] 詹毅等. 二维离散小波变换压制强相干干扰. 石油天然气学报, 2007, 29(2): 54~57
Zhan Yi et al. On compressive strong coherent interference of two dimensional discrete wavelet transform. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2007, 29(2): 54~57
- [8] 孙学文, 陈文超, 高静怀等. 小波域强面波衰减方法研究. 石油地球物理勘探, 2008, 43(1): 22~28
Sun Xuewen, Chen Wenchao, Gao Jinghuai et al. Study on attenuation of strong surface wave in wavelet domain. *OGP*, 2008, 43(1): 22~28
- [9] Zhang Rongfeng, Trad D, Ulrych T et al. Wavelet transform based, noise attenuation. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 2005, 12(1): 91~98
- [10] 陈文超, 高静怀, 包乾宗. 基于连续小波变换的自适应面波压制方法. 地球物理学报, 2009, 52(11): 2854~2861
Chen Wenchao, Gao Jinghuai, Bao Qianzong. Adaptive attenuation of ground roll via continuous wavelet transform. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(11): 2854~2861
- [11] 夏洪瑞等. 均值加权消除相干干扰. 石油物探, 2000, 39(2): 77~82
Xia Hongrui et al. Removing coherent disturbance by mean value weighting. *GPP*, 2000, 39(2): 77~82
- [12] 夏洪瑞, 朱勇, 周开明. 小波变换及其在去噪中的应用. 石油地球物理勘探, 1994, 29(3): 274~285
Xia Hongrui, Zhu Yong, Zhou Kaiming. Wavelet transform and its application to noise elimination. *OGP*, 1994, 29(3): 274~285

(本文编辑:金文昱)