

基于同相轴优化追踪的多次波匹配衰减方法

谭 军^{1,2,3}, 李金山^{1,2,3}, 宋 鹏^{1,2,3}, 王 磊¹, 张晓波¹, 钟梦轩¹

(1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266100; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071; 3. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东青岛 266100)

摘要:提出基于同相轴优化追踪的多次波匹配衰减方法,首先利用 SRME 预测得到的多次波记录生成多次波速度谱,然后应用同相轴追踪技术提取多次波同相轴旅行时信息,再通过同相轴优化追踪实现对多次波预测误差的校正,最后应用短时窗的 FK 滤波对多次波予以压制。该方法仅根据多次波同相轴旅行时信息进行匹配衰减,降低对多次波预测精度的要求,并且能够显著提高多次波压制的精度。理论模型实验与野外资料处理实验结果均表明,该方法的多次波剔除效果明显优于常规的多道维纳滤波方法与抛物线拉冬域蒙版滤波法。

关键词:多次波匹配衰减; 同相轴优化追踪; 短时窗 FK 滤波; 维纳滤波; 抛物线拉冬域蒙版滤波

中图分类号:P 631.4 **文献标志码:**A

引用格式:谭军,李金山,宋鹏,等. 基于同相轴优化追踪的多次波匹配衰减方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(6):40-49.

TAN Jun, LI Jinshan, SONG Peng, et al. Multiple matching attenuation method based on optimized event tracing[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(6):40-49.

Multiple matching attenuation method based on optimized event tracing

TAN Jun^{1,2,3}, LI Jinshan^{1,2,3}, SONG Peng^{1,2,3}, WANG Lei¹, ZHANG Xiaobo¹, ZHONG Mengxuan¹

(1. College of Marine Geo-sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;

3. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The paper introduces a multiple matching attenuation method based on optimized event tracing. Firstly, the method uses multiple data predicted by SRME to generate multiple velocity spectrum, then gets travel time information of multiple event by event tracing technique. An optimized tracing is used to correct the errors of predicted multiples and then a short-time FK fan filtering is applied to attenuate the multiples. The matching attenuation is based only on travel time information of multiple, thus it can lower the requirement in the multiple prediction precision to a certain extent. Meanwhile, optimized event tracing can significantly improve the accuracy of multiple elimination. Model simulations and field tests show that the method has better multiple eliminating effect than conventional multi-channel Wiener filter methods and the mask filtering methods in parabola Radon domain.

Keywords: multiple matching attenuation; event optimized tracing; short-time window FK filtering; Wiener filtering; mask filtering in parabola Radon domain

海上地震勘探资料中绝大多数的多次波为强自由界面多次波,其严重影响了地震成像的真实性与

收稿日期:2016-01-06

基金项目:国家自然科学基金项目(41574105)

作者简介:谭军(1982-),男,讲师,博士,研究方向为多次波压制与地震偏移成像。E-mail:tanjun0532@ouc.edu.cn。

通讯作者:李金山(1963-),男,教授级高工,硕士,研究方向为地震资料数据处理。E-mail:ljs@ouc.edu.cn。

可靠性。自由界面多次波衰减方法^[1-3] (SRME) 现已成为实际生产中多次波压制的主要技术手段,匹配衰减为 SRME 方法实现多次波压制的关键环节,其主要包括维纳滤波类方法和基于数学变换域的匹配衰减法。Verschuur 等^[1] 首先根据最小平方准则成功消除了预测的自由界面多次波,Wang^[4] 提出了伪多道匹配滤波和扩展多道匹配滤波法^[5],另有学者提出了均衡拟多道匹配滤波法^[6]、 L_1 范数约束下均衡多道多次波匹配衰减方法^[7] 和扩展伪多道匹配滤波方法^[8]。在数学变换域进行多次波匹配衰减亦可得到良好效果,Zhou 等^[9] 提出了抛物线拉冬域的多次波匹配衰减方法,随后发展到双曲拉冬域^[10-11],Herrmann 等^[12] 提出了曲波域的一次波和多次波分离方法,董烈乾等^[13] 实现了基于复曲波变换的多次波匹配衰减。除此之外,人们还提出了基于模式的匹配相减技术^[14]、基于独立变量分析的匹配衰减技术^[15]、基于多维预测误差滤波的匹配相减技术^[16]、非平稳回归匹配相减技术^[17]、逆子波域去除所预测多次波的方法^[18] 以及基于多道卷积信号盲分离的多次波匹配相减方法^[19] 等。上述方法对多次波的预测精度均有很高的要求,在实际资料处理中,由于积分孔径的有限性^[20]、二维侧面反射效应及野外观测误差等因素,预测的多次波往往存在明显的旅行时或信号波形误差,从而影响传统匹配衰减方法的效果。为消除多次波预测误差的影响,笔者提出一种仅基于多次波旅行时信息进行匹配衰减的方法,其首先利用同相轴追踪技术提取多次波同相轴的旅行时信息,然后借助同相轴优化追踪过程校正旅行时误差,最后通过短时窗的 FK 滤波进行多次波压制。

1 基于同相轴优化追踪的多次波匹配衰减

野外地震记录中的反射信号具有时变、空变特性,导致 SRME 方法预测的多次波存在明显的波形与振幅差异,但多次波同相轴的旅行时信息仍然与原始记录中的基本一致^[21],因此可基于该多次波记录创建高分辨率的叠加速度谱,然后利用同相轴追踪技术提取多次波同相轴,再通过短时窗的 FK 滤波对其予以压制。在实际处理中为消除多次波叠加能量的差异对压制效果的影响,采用迭代的多次波同相轴追踪与衰减方式,从而形成了基于同相轴优化追踪的多次波匹配衰减方法(下文中简称为“同相轴优化追踪法”)。

1.1 多次波的同相轴追踪

在 CMP 域中,双曲同相轴与叠加速度谱中的能量团有一一对应关系,利用等值线追踪方法确定速度谱内的能量团,可获得 CMP 记录中相应双曲同相轴的旅行时信息,此即为同相轴追踪^[22]。同理,基于 SRME 方法预测的多次波记录创建仅含有多次波叠加能量的速度谱,然后利用同相轴追踪技术获得多次波同相轴的旅行时信息,从而可确定出多次波同相轴。

实现同相轴追踪的前提条件是创建高分辨率的速度谱^[23-24],将 CMP 域多次波记录 $m(x, t)$ 以系列速度进行动校正和叠加处理,得到横向坐标为叠加速度 v 、纵坐标为零偏移距时 τ 的记录,然后对其取绝对值可得多次波叠加速度谱($E_m(v, \tau)$),其相应的计算公式为

$$E_m(v, \tau) = \left| \sum_{n=1}^N m \left(x_n, t = \sqrt{\tau^2 + \frac{x_n^2}{v^2}} \right) \right|. \quad (1)$$

式中, $n(1 \leq n \leq N)$ 为道号; x_n 为第 n 道记录的偏移距。

由于时间和空间上的截断效应,速度谱 E_m 中各同相轴叠加能量形态并非团状,而是呈现“剪刀”状(包含水平以及倾斜的两条长尾)^[25]畸变,该畸变既降低了速度谱的分辨率,又影响着后续同相轴追踪的准确性。为压制速度叠加变换过程的截断效应,对初步计算的多次波叠加速度谱引入同相加权处理,加权因子^[26]的计算公式为

$$b(v, \tau) = \frac{\sum_{l=-L/2}^{l=L/2} \left[\sum_{n=1}^N m \left(x_n, t = \sqrt{\tau^2 + \frac{x_n^2}{v^2}} \right) \right]^\lambda}{\sum_{l=-L/2}^{l=L/2} \left[\sum_{n=1}^N \left| m^\lambda \left(x_n, t = \sqrt{\tau^2 + \frac{x_n^2}{v^2}} \right) \right| \right] + C}. \quad (2)$$

式中, $\lambda (\lambda \geq 2)$ 为阶数(λ 值越大则加权因子的分辨率愈高); L 为决定时窗的样点数; C 为常数(保证分母不为零,一般取平均振幅的 0.01 ~ 0.001 倍)。

将同相加权过程引入到多次波速度谱的计算过程中,则公式(1)即可表示为

$$E_m(v, \tau) = \left| b(v, \tau) \sum_{n=1}^N m \left(x_n, t = \sqrt{\tau^2 + \frac{x_n^2}{v^2}} \right) \right|. \quad (3)$$

对式(3)中的 $E_m(v, \tau)$ 进行适度平滑后, $m(x, t)$ 中叠加速度值 v_0 、零偏移距时 τ_0 的双曲线同相轴将在谱 $E_m(v, \tau)$ 中形成以 (v_0, τ_0) 为中心极值的团状结构能量。应用等值线追踪方法求出该能量团的分布范围,并搜索出其极值点位置,则可根据该点的

坐标 (v_0, τ_0) 拟合出时空域中的相应同相轴,即其所经各道的旅行时 t_n 为

$$t_n = \sqrt{\tau_0^2 + x_n^2 / v_0^2} \quad (4)$$

图1基于理论记录给出了多次波同相轴的追踪过程。理论模型的4套水平地层的速度与厚度为:1500 m/s,230 m;1700 m/s,300 m;1950 m/s,332.5 m;2200 m/s,400 m。以主频为35 Hz的雷克子波为震源,使用有限差分方法模拟一套含有多次波的地震记录(该记录共500炮、每炮160道、炮间距与道

间距均为10 m、最小偏移距为0),图1(a)所示为模拟炮集所对应的第500个CMP记录。应用SRME方法预测多次波记录(图1(b))并创建多次波速度谱,其中各能量团呈明显的“剪刀”状(图1(c)),对该谱进行同相加权与适度平滑后得到的速度谱(图1(d))。在此基础上,利用等值线追踪方法获得多次波同相轴叠加能量团的范围(图1(d)的“等值线”),进而确定出原始记录中的多次波同相轴(图1(e)“彩色曲线①~③”)。

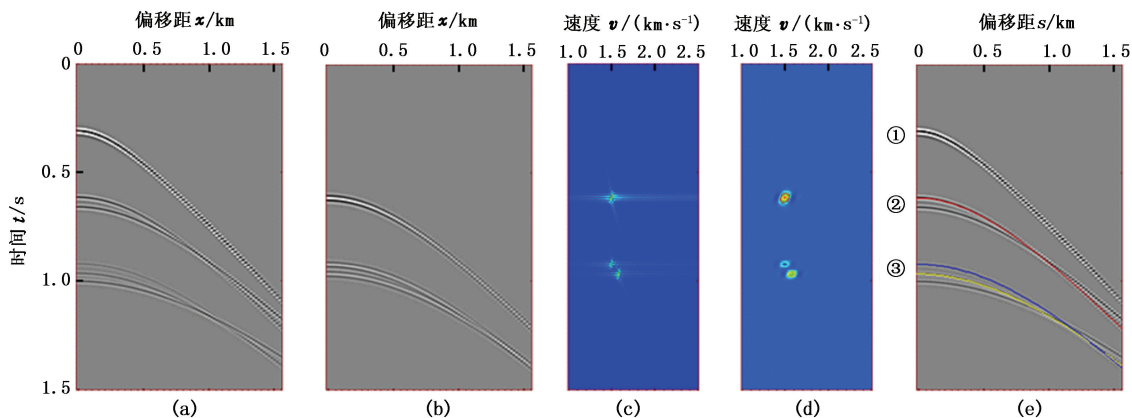


图1 基于多次波记录的同相轴追踪过程

Fig.1 Event tracing process based on multiple record

1.2 多次波同相轴的旅行时误差校正

在地震资料处理中,SRME方法预测的多次波可能在旅行时上具有一定误差(在中、远偏移距道中尤为明显),这是导致传统多次波匹配衰减方法失效的主要原因,消除该旅行时误差的影响是实现多次波精确追踪的关键问题。多次波同相轴的旅行时误差在叠加速度谱中体现为参量 v_0 与 τ_0 的差异,从而可根据其在原始记录中的真实参量值进行校正。

基于式(2)与式(3)创建了原始记录 $d(x, t)$ 的叠加速度谱 $E_d(v, \tau)$,为了消除谱中一次波能量对优化追踪过程的干扰,需要通过蒙版滤波方法^[9](将两速度谱 $E_d(v, \tau)$ 与 $E_m(v, \tau)$ 重叠,后者作为类似于印刷分色的“蒙版”来屏蔽前者中相应位置的信号)获得原始记录的多次波速度谱 $E_{dm}(v, \tau)$ 。消除一次波能量的滤波因子为

$$f(v, \tau) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{B(v, \tau)}{\varepsilon A(v, \tau)} \right]^\eta}} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} A(v, \tau) = \sum_{i=v-\Delta v}^{v+\Delta v} \sum_{j=\tau-\Delta t}^{\tau+\Delta t} E_d(i, j), \\ B(v, \tau) = \sum_{i=v-\Delta v}^{v+\Delta v} \sum_{j=\tau-\Delta t}^{\tau+\Delta t} E_m(i, j). \end{cases}$$

式中, ε 为均衡 $E_m(v, \tau)$ 和 $E_d(v, \tau)$ 之间能量所取的系数; η 为控制蒙版滤波的平滑系数; Δv 与 Δt 分别为速度和时间的统计窗长度。

利用式(5)的滤波因子求取原始记录多次波速度谱 $E_{dm}(v, \tau)$ 的计算公式为

$$E_{dm}(v, \tau) = E_d(v, \tau) f(v, \tau) \quad (6)$$

通过对速度谱 $E_{dm}(v, \tau)$ 的局部追踪消除多次波同相轴旅行时误差的过程可描述为:对初步追踪的多次波同相轴,在速度谱 $E_{dm}(v, \tau)$ 内以其原参量 (v_0, τ_0) 为中心,根据一定的速度与时间范围搜索极值,利用该极值的坐标确定出其准确参量 τ'_0 与 v'_0 。

图2给出了多次波同相轴旅行时误差校正的过程示例。首先对图2(a)所示多次波记录的同相轴进行时移与旋转,得到具有显著旅行时误差的多次波记录(图2(b))。然后基于误差多次波记录与原始记录分别创建多次波速度谱 $E_m(v, \tau)$ (图2(c))与原始速度谱 $E_d(v, \tau)$,并通过蒙版滤波得到只含有多次波叠加能量的速度谱 $E_{dm}(v, \tau)$ (图2(d))。将基于多次波速度谱 $E_m(v, \tau)$ 追踪的等值线显示在速度谱 $E_{dm}(v, \tau)$ 中,其存在明显的误差(图2(d)中“等值线”),最后通过在谱 $E_{dm}(v, \tau)$ 中的优化分析将该误差消除获得准确的多次波同相轴

(见图 2(e) 中“彩色线① ~ ③”)。

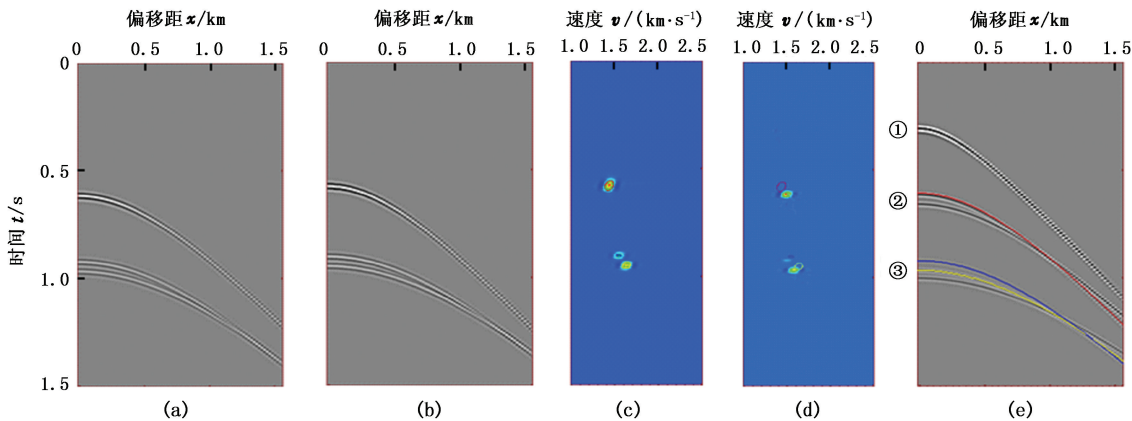


图 2 误差多次波同相轴的优化追踪过程

Fig. 2 Optimized tracing process of error multiple events

1.3 基于旅行时的多次波匹配衰减

利用上述的同相轴优化追踪过程确定多次波同相轴,按照多次波同相轴叠加能量极值的强弱顺序,依次将目标同相轴截取出来并借助 FK 滤波予以衰减,从而使相交多次波同相轴能够得到完全压制。具体对每个多次波同相轴的滤波过程为:

①以多次波同相轴所经各道的旅行时 t_n (式 (4)) 为中心截取给定的一个短时窗长度的记录段,使各记录段沿起点位置对齐,从而将目标同相轴校正为水平。

②将截取的多道记录段作为输入,通过 FK 扇

形滤波法衰减已被校正为水平的同相轴。

③将消除多次波的多道记录段放回各地震道的原时窗位置。

图 3 展示了多次波同相轴的衰减过程。其中,图 3(a) 中的彩色曲线① ~ ③ 表示在原始记录中追踪出的多次波同相轴。图 3(b) 为多次波同相轴的压制过程。首先截取同相轴①,对其实施短时窗 FK 视速度滤波处理后放回原记录,然后依序截取多次波同相轴②、③ 进行相同的处理步骤。最终的滤波结果如图 3(c) 所示,原始记录中的多次波同相轴已被完全消除,而一次波信号并未受损伤。

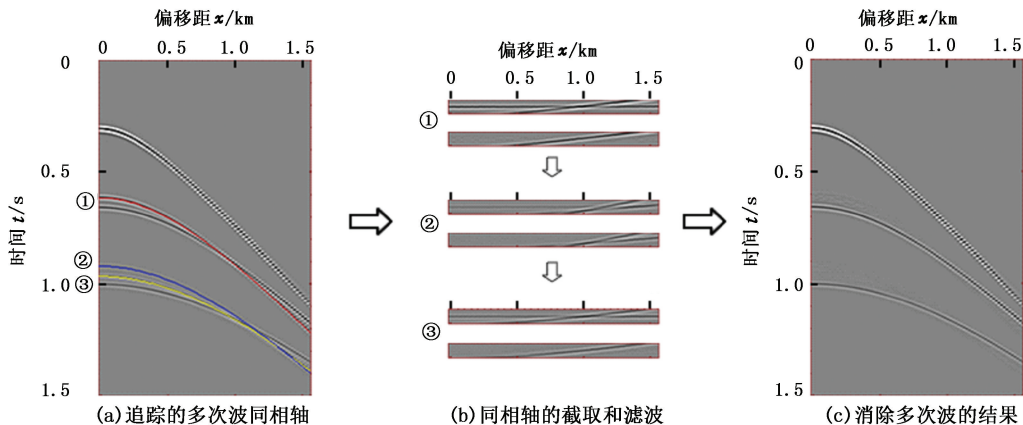


图 3 多次波同相轴的匹配衰减过程

Fig. 3 Process of multiple event matching attenuation

1.4 多次波的迭代衰减

在原始地震记录中多次波同相轴的叠加能量强度具有明显差异,通过一次性的追踪匹配衰减难以消除其中的所有多次波,可采用迭代的方法对其进行同相轴追踪与衰减,流程图见图 4。其基本步骤如下:

(1) 为保证同相轴追踪过程的稳定性,需要确定同相轴密度 N_m 与谱能量阈值 E_0 ,前者为单位长

度时窗内多次波同相轴数的平均值,后者表示是否进行再次追踪压制的多次波同相轴叠加能量阈值。可通过对地震记录与叠加速度谱的观察分析给定 N_m 与 E_0 的值。

(2) 进行多次迭代的同相轴优化追踪与衰减处理,对于第 n ($n \geq 1$) 次迭代,基于多次波剩余记录 $m^{n-1}(x, t)$ 创建叠加速度谱 $E_m^n(v, \tau)$,若此谱中振幅

极值 $E_{\max}$ 不小于 E_0 , 表示记录中仍存在较强的多次波同相轴, 则进行追踪衰减

$$\begin{cases} d^n(x, t) = d^{n-1}(x, t) \sim d_m^n(x, t), \\ m^n(x, t) = m^{n-1}(x, t) \sim m_h^n(x, t). \end{cases} \quad (9)$$

式中, 符号“ $\sim$ ”表示针对各同相轴的短时窗 FK 滤波过程; $d^n(x, t)$ 与 $m^n(x, t)$ 为第 n 次迭代后去除追踪同相轴后的记录, $d_m^n(x, t)$ 与 $m_h^n(x, t)$ 为第 n 次迭代所去掉的多次波同相轴; 第一次迭代 ($n=1$) 时 $d^0(x, t)$ 与 $m^0(x, t)$ 分别为原始记录 $d(x, t)$ 与多次波记录 $m(x, t)$ 。

(3) 重复步骤 (2), 直至剩余速度谱中的极值 $E_{\max}$ 小于阈值 E_0 为止。

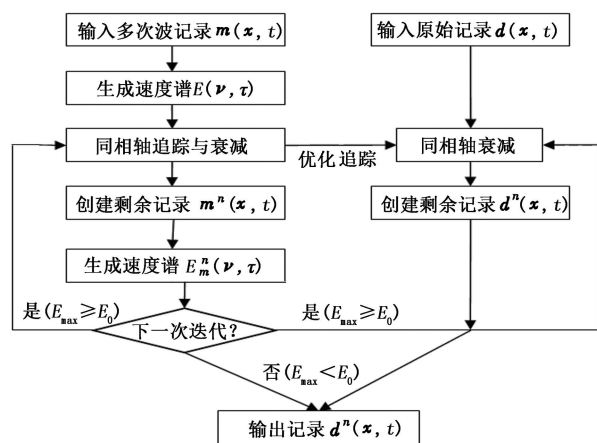


图4 多次迭代的多次波同相轴追踪与衰减流程

Fig. 4 Processing flow chart of multiple event tracing and attenuation by iterative algorithm

2 理论模型记录的处理实验

应用模型数据检验对多次波的衰减效果是最直观的验证方法。本文中给出了应用同相轴优化追踪法、多道维纳滤波法^[4-5]及高精度抛物线拉冬域的蒙版滤波法^[5,9]3种方法对水平层状模型记录和 Pluto 模型记录的多次波匹配衰减实验结果。

2.1 基于简单模型记录的多次波预测与衰减

2.1.1 基于准确多次波记录的模型匹配衰减

基于准确的多次波记录(图1(a))进行多次波的匹配衰减实验, 检验当多次波与一次反射波同相轴相交(或相近)时的处理效果, 上述3种方法处理后所得结果分别如图5(a)、(b)和(c)所示, 为避免动校拉伸效应影响高精度抛物线变换的精度切除了相应记录远道的信号。对比处理结果可知: 同相轴优化追踪法可以有效压制与一次反射波相交(或相近)的多次波同相轴, 同时较好地保持一次反射波信息; 多道维纳滤波法会损伤一次反射波信息(图5(b)“椭圆”内); 高精度抛物线拉冬域的蒙版滤波法虽可分离一次波与多次波, 但会因损伤前者而导致一次波记录振幅偏弱(图5(c))。图5(d)、(e)和(f)显示了3种方法减掉的多次波成分, 从中可以看出: 同相轴优化追踪法衰减掉的多次波记录中无一次波信息(图5(d)); 多道维纳滤波法与高精度抛物线拉冬域的蒙版滤波法去掉的多次波成分中存在明显的一次波信息(图5(e)、(f)中“箭头”位置)。

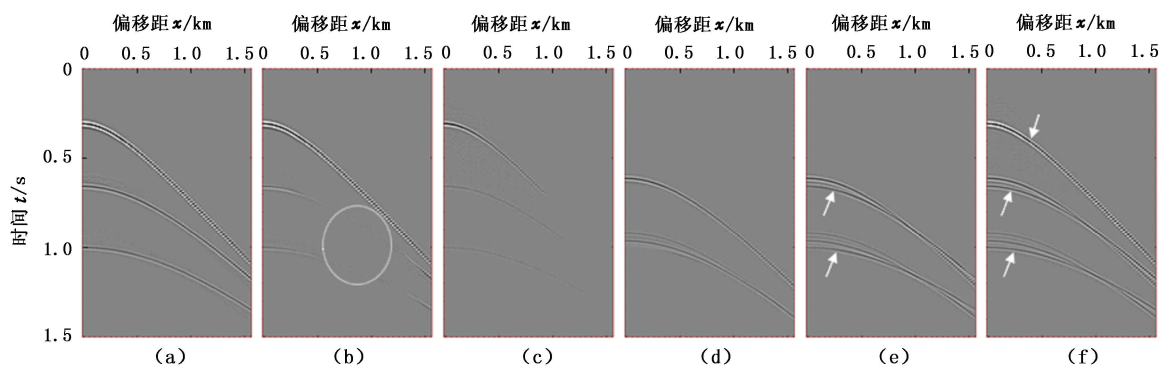


图5 基于准确多次波记录的模型匹配衰减实验结果

Fig. 5 Experimental results of multiple matching attenuation on accurate multiple record

2.1.2 基于误差多次波记录的多次波匹配衰减

多次波匹配衰减方法的“容差”能力决定着该方法的应用前景, 笔者基于误差多次波记录(图2(b))针对原始记录(图1(a))利用同相轴优化追踪法、多道维纳滤波法以及高精度抛物线拉冬域的蒙版滤波法进行多次波压制处理, 处理后结果分别如图6(a)、(b)和(c)所示, 上述3种方法减掉的多次

波成分见图6(d)、(e)和(f)。

对比分析上述结果可得出如下结论: 同相轴优化追踪法可在较好地保持一次波信息的同时(图6(a))有效压制存在显著误差的多次波(图6(d)); 多道维纳滤波法对一次波有损伤(图6(b)“椭圆”内与图6(e)“箭头”处), 且有残余多次波存在(图6(b)“箭头”处); 高精度抛物线拉冬域的蒙版滤波法衰减的记

录中存在明显的多次波残余(图 6(c)“箭头”处),且 一次波损伤较严重(图 6(f)“箭头”处)。

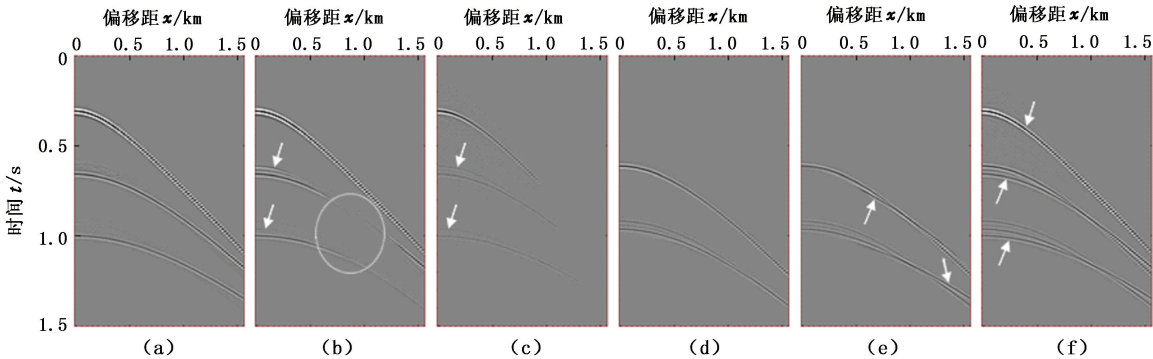


图 6 基于误差多次波记录的多次波匹配衰减实验结果

Fig. 6 Experimental results of multiple matching attenuation error on multiple record

2.2 基于 Pluto 模型记录的多次波预测与衰减

Pluto 模型是用于检验自由界面多次波预测与衰减效果的国际标准模型。该模型海底由浅到深变化剧烈,中部有速度较高的盐丘构造,致使大部分波阻抗界面扭曲,并形成多套断层,而且在盐丘下部的地

层受挤压作用形成一系列褶皱构造。图 7(a)为 Pluto 模型的第 841 个原始 CMP 记录,图 7(b)为其对应的多次波记录(经自由界面多次波预测方法预测得到)的 CMP 道集,图中箭头指向的分别为 2~3 阶的海底全程多次波与 2~4 阶的盐丘顶面地震多次波。

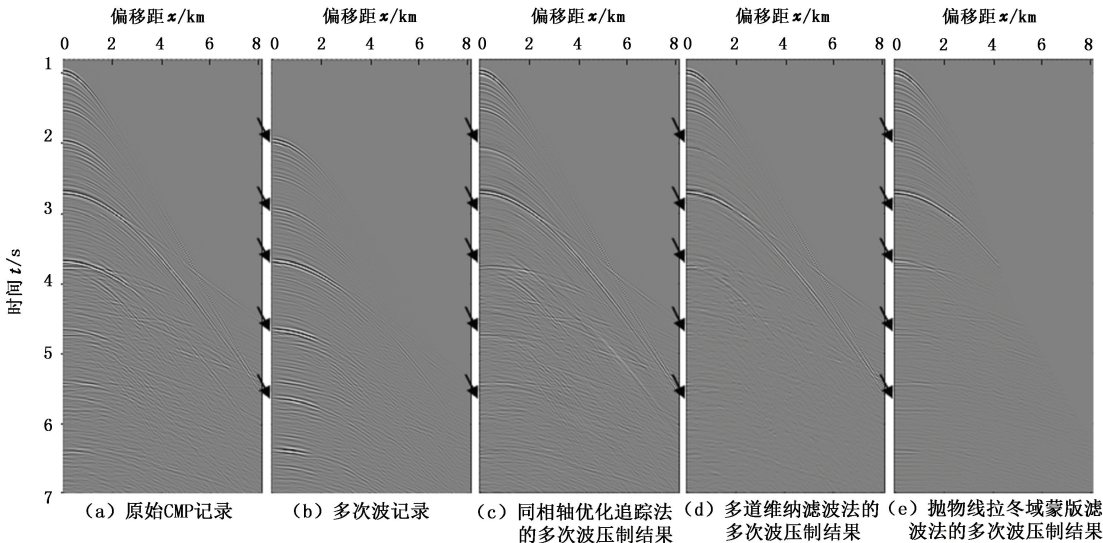


图 7 基于 Pluto 模型记录的多次波压制结果

Fig. 7 Demultiple results based on Pluto model record

应用同相轴优化追踪法、传统多道维纳滤波法以及高精度抛物线拉冬域的蒙版滤波法分别对原始记录进行多次波衰减处理,所得结果分别如图 7(c)、(d)和(e)所示。经过同相轴优化追踪法衰减处理后,原始记录中箭头指向的复杂多次波已被消除,并且其一次波信息几乎未受损伤(图 7(c));传统多道维纳滤波法处理后的地震记录中,中、深部的反射信号振幅明显偏弱,部分一次波反射同相轴受到严重损伤(如图 7(d)中“箭头”位置);而在拉冬域蒙版滤波法处理后的地震记录中,因时差较小其近炮检距道中仍然存在明显的多次波残余(图 7(e)中“箭头”位置)。

基于原始地震记录及衰减多次波后的地震记录进行逆时偏移成像,相应的深度剖面见图 8。在原始偏移剖面中,箭头指向的为多次波成像的同相轴(图 8(a)),其干扰了对有效构造的解释分析。图 8(b)为经同相轴优化追踪方法处理后的逆时偏移剖面,其多次波同相轴已被完全消除;而通过常规多道维纳滤波法与高精度抛物线拉冬域的蒙版滤波法处理后的偏移剖面中仍有残余多次波成像(图 8(c)、(d)“箭头”位置)。此外,图 8(c)部分盐丘顶界面反射同相轴发生畸变(图中椭圆范围所示),而图 8(c)、(d)的深部位置构造成像能量明显弱于图 8(b),该现象均说明常规多道维纳滤波法与高精度

抛物线拉冬域的蒙版滤波法在剔除多次波的同时严重损伤了一次波反射信号,而同相轴优化追踪法则

可在有效剔除各类多次波的同时较好地保持一次波信息。

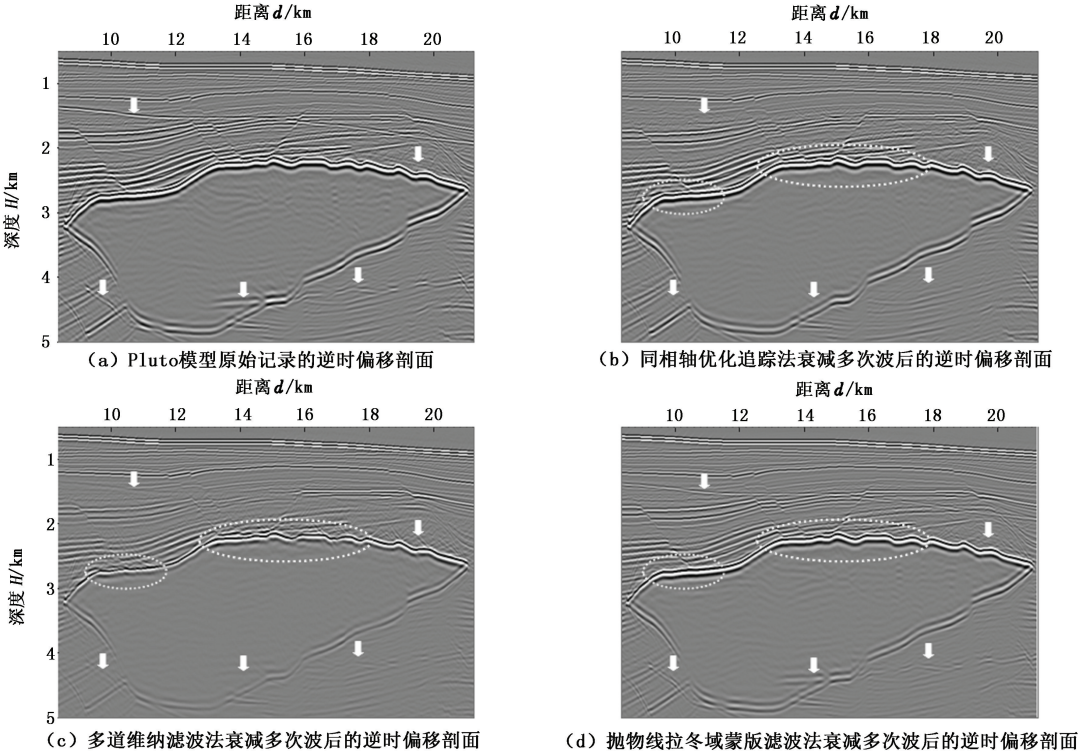


图 8 逆时偏移剖面的多次波匹配衰减效果对比

Fig. 8 Comparison of multiple matching attenuation effect of reverse-time migration sections

3 实际地震资料处理实验

实际地震测线资料选自具有坚硬海底的区域,其沿观测方向水深由 150 m 增加至 1 100 m,相应的原始炮集记录中发育有强自由界面多次波,且在海底陡坡位置多次波特征尤为复杂。该测线的野外采集参数为:原始记录共 2 699 炮,每炮 240 道接收,道间隔及炮间隔均为 25 m,最小偏移距为 100 m。

首先,对原始炮集进行以下步骤的预处理:①切除各炮记录中的直达波干扰;②通过带通滤波消除原始地震记录中小于 5 Hz 的低频信号;③利用球面扩散补偿增强炮集记录中深部较弱的反射信息。经预处理后的第 1 126 炮记录如图 9(a)所示,箭头指向的为与海底有关的 3 阶自由界面多次波同相轴,其与同时段的低频一次波同相轴相交。其次,通过 SRME 方法预测得到了多次波记录(第 1 126 炮见图 9(b)),与原始记录中比较,两者的多次波存在明显误差(“椭圆”内)。再分别应用同相轴优化追踪法、多道维纳滤波法与抛物线拉冬域蒙版滤波法消除多次波,图 10(a)、(b)与(c)分别给出了相应的炮集记录。

通过对比图 10(a)、(b)和(c)可知,图 10(a)中的多次波已被完全消除,而多道维纳滤波法与抛物

线拉冬域蒙版滤波法衰减多次波的炮集记录中均存在较强的多次波残余(图 10(b)、(c)中“箭头”位置和“椭圆”区域)。

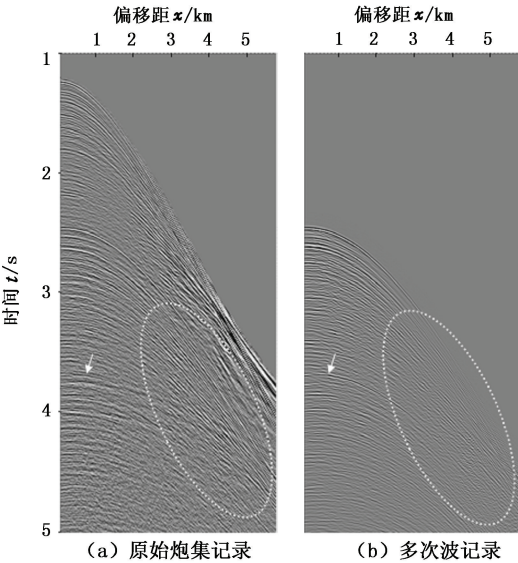


图 9 原始炮集记录与预测的多次波记录示例

Fig. 9 Examples of original shot gather record and predicted multiple record

最后,应用原始炮集记录和 3 种方法压制多次波的炮集记录,分别进行克希霍夫积分叠前时间偏

移处理,得到的剖面如图 11 所示。

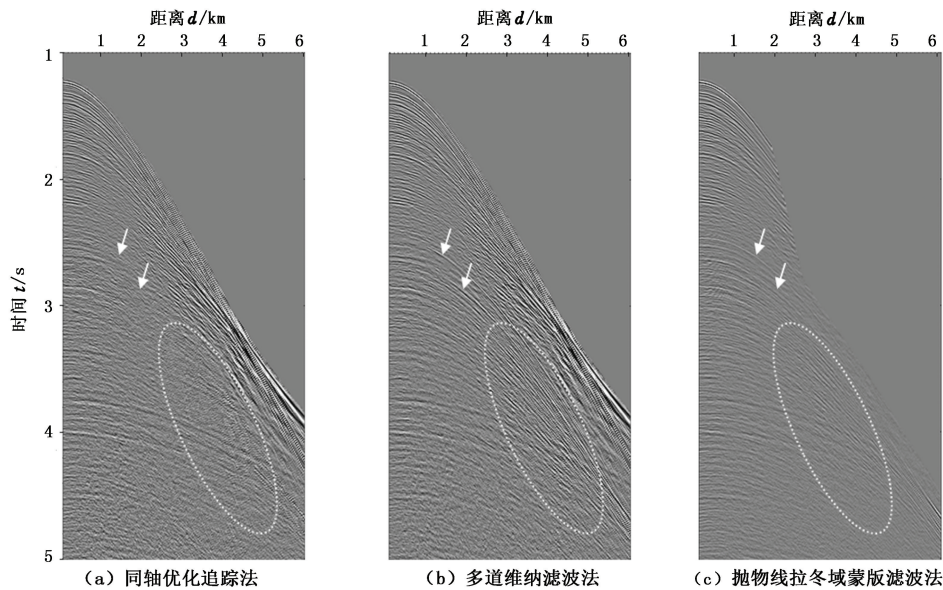


图 10 炮集记录的多次波匹配衰减效果对比

Fig. 10 Comparison of multiple matching attenuation effect of shot gathers

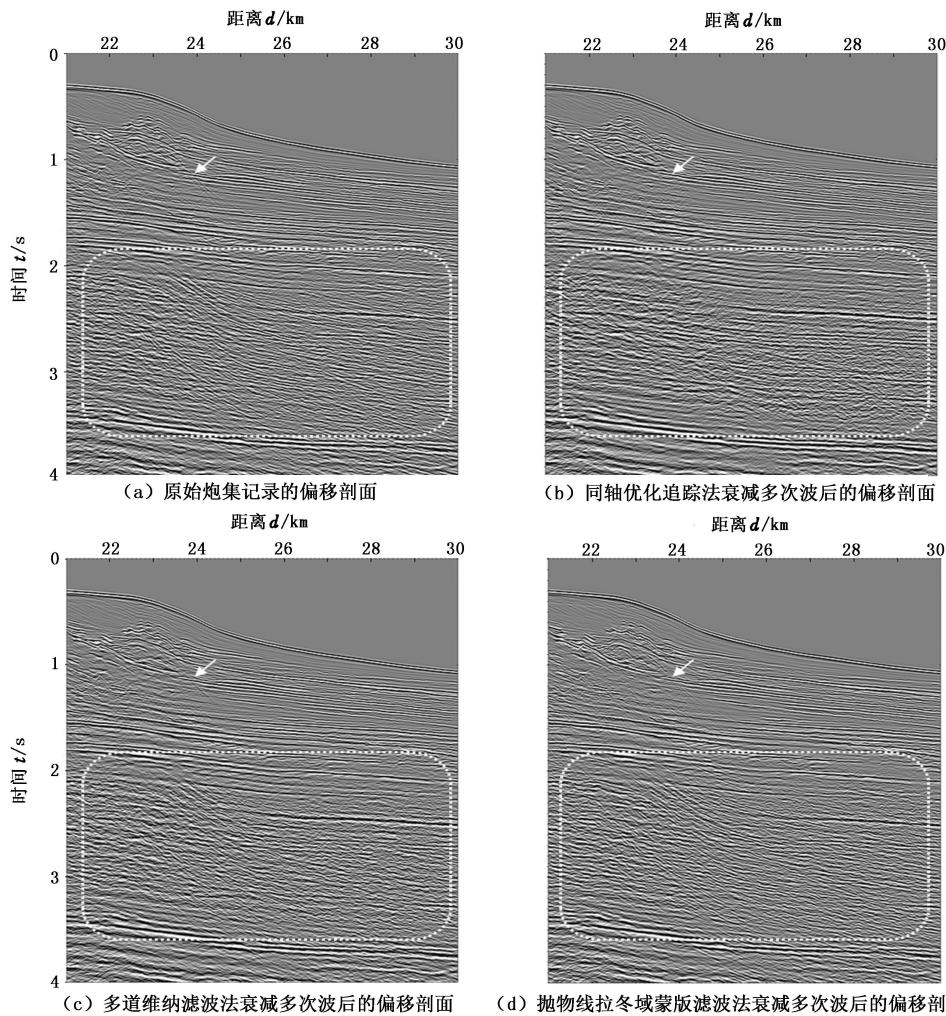


图 11 叠前时间偏移剖面的多次波匹配衰减效果对比

Fig. 11 Comparison of multiple matching attenuation effect of pre-stack time migration sections

原始炮集记录形成的剖面中,存在着较强的倾斜多次波同相轴(图11(a)中“箭头”位置和“椭圆”区域);同相轴优化追踪法较好地消除了上述的多次波干扰(图11(b));多道维纳滤波法与抛物线拉冬域蒙版滤波法压制多次波后的偏移剖面中均存在着较明显的多次波残余(图11(c)、(d)中“箭头”位置和“椭圆”区域)。

实际勘探地震资料的处理实验结果表明:在海底起伏多次波复杂且多次波预测存在显著误差的情况下,同相轴优化追踪的多次波匹配衰减方法与传统的多道维纳滤波法与抛物线拉冬域蒙版滤波法相比,仍可在保持一次波信息的前提下,显著改善对多次波的衰减效果。

4 结 论

同相轴优化追踪法仅根据多次波同相轴旅行时信息进行匹配衰减,不受所预测多次波信号振幅差异与波形变化的影响,在一定程度上降低了对多次波预测精度的要求。由于可通过同相轴优化追踪实现对多次波预测误差的校正,能够显著提高多次波(尤其是中、远偏移距道中的多次波)的匹配衰减效果。理论模型与实际地震资料的处理实验结果均证明了同相轴优化追踪法的多次波衰减效果明显优于多道维纳滤波法与抛物线拉冬域蒙版滤波法,更加适应于复杂构造区域的多次波处理。

参考文献:

- [1] VERSCHUUR D J, BERKHOUT A J, WAPENAAR C P A. Surface-related multiple elimination in the presence of near-surface anomalies [J]. Seg Technical Program Expanded Abstracts, 1999, 9(1): 1622.
- [2] BERKHOUT A J, VERSCHUUR D J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, part I: theoretical considerations [J]. Geophysics, 2012, 62(1): 1586-1595.
- [3] VERSCHUUR D J, BERKHOUT A J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, part II: practical aspects and examples [J]. Geophysics, 2012, 62(5): 1596-1611.
- [4] WANG Y. Multiple subtraction using an expanded multi-channel matching filter [J]. Geophysics, 2003, 68(1): 346-354.
- [5] TREITEL S. Principles of digital multichannel filtering [J]. Geophysics, 1970, 35(5): 785-811.
- [6] 李鹏, 刘伊克, 常旭, 等. 均衡拟多道匹配滤波法在波动方程法压制多次波中的应用[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1844-1853.

2007, 50(6): 1844-1853.

- LI Peng, LIU Yike, CHANG Xu, et al. Application of the equipoise pseudomultichannel matching filter in multiple elimination using wave-equation method [J]. Chinese J Geophys (in Chinese), 2007, 50(6): 1844-1853.
- [7] 李学聪, 刘伊克, 常旭, 等. 均衡多道 1 范数匹配多次波衰减的方法与应用研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 963-973.
- LI Xuecong, LIU Yike, CHANG Xu, et al. The adaptive subtraction of multiple using the equipoise multichannel L1-norm matching [J]. Chinese J Geophys (in Chinese), 2010, 53(4): 963-973.
- [8] 李振春, 刘建辉, 郭朝斌, 等. 基于扩展伪多道匹配的保幅型多次波压制方法[J]. 石油地球物理勘探, 2011(2): 207-210.
- LI Zhenchun, LIU Jianhui, GUO Chaobin, et al. Amplitude-preserved multiple suppression based on expanded pseudo-multi-channel matching [J]. OGP, 2011(2): 207-210.
- [9] ZHOU B, STEWART G. Multiple suppression by 2D filtering in the parabolic τ - p domain: a wave-equation-based method [J]. Geophysical Prospecting, 1996, 44(3): 375-401.
- [10] 石颖, 王维红. 基于波动方程预测和双曲 Radon 变换联合压制表面多次波[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 3115-3125.
- SHI Ying, WANG Weihong. Surface-related multiple suppression approach by combining wave equation prediction and hyperbolic Radon transform [J]. Chinese J Geophys (in Chinese), 2012, 55(9): 3115-3125.
- [11] 薛亚茹, 杨静, 钱步仁. 基于高价稀疏 Radon 变换的预测多次波自适应相减方法 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(1): 43-49.
- XUE Yaru, YANG Jing, QIAN Buren. Multiples prediction and adaptive subtraction with high-order sparse Radon transform [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(1): 43-49.
- [12] HERRMANN F J, WANG D, VERSCHUUR D J. Adaptive curvelet-domain primary-multiple separation [J]. Society of Exploration Geophysicists, 2008, 73(3): A17.
- [13] 董烈乾, 李培明, 张奎, 等. 基于复曲波变换的一次波和多次波分离方法 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(10): 3783-3790.
- DONG Lieqian, LI Peiming, ZHANG Kui, et al. Primary and multiple separation method based on complex curvelet transform [J]. Chinese J Geophys (in Chi-

- nese), 2015, 58(10):3783-3790.
- [14] SPITZ S. Pattern recognition, spatial predictability, and subtraction of multiple events [J]. *Leading Edge*, 1999, 18(1):55-58.
- [15] LU W K, LIU L, LI Y D. Adaptive multiple subtraction based on constrained independent component analysis [J]. *Seg Technical Program Expanded Abstracts*, 2008, 74(26):1-7.
- [16] GUITTON A. Multiple attenuation in complex geology with a pattern-based approach [J]. *Geophysics*, 2005, 70(4):V97-V107.
- [17] FOMEL S. Adaptive multiple subtraction using regularized nonstationary regression [J]. *Geophysics*, 2009, 74(1):3639.
- [18] 金德刚, 常旭, 刘伊克. 逆子波域消除多次波方法研究[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(1):250-259.
JIN Degang, CHANG Xu, LIU Yike. Research of multiple elimination method in inverse wavelet domain [J]. *Chinese J Geophys (in Chinese)*, 2008, 51(1):250-259.
- [19] 李钟晓, 陆文凯, 庞廷华, 等. 基于多道卷积信号盲分离的多次波自适应相减方法[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(4):1325-1334.
LI Zhongxiao, LU Wenkai, PANG Tinghua, et al. Adaptive multiple subtraction based on multi-traces convolutional signal blind separation [J]. *Chinese J Geophys (in Chinese)*, 2012, 55(4):1325-1334.
- [20] DRAGOSSET W H, JERICEVIC Z. Some remarks on surface multiple attenuation [J]. *Geophysics*, 1998, 63(2):772-789.
- [21] 谭军. 自由界面多次波的预测与衰减[D]. 青岛:中国海洋大学, 2011.
TAN Jun. The prediction and attenuation of Surface-related multiple [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [22] 谭军, 王修田. 基于同相轴追踪的多次波衰减[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(6):99-106.
TAN Jun, WANG Xiutian. Multiple attenuation based on event tracing [J]. *Periodical of Ocean University of China (Edition of Natural Science)*, 2012, 42(6):99-106.
- [23] THORSON J R. Velocity-stack and slant-stack stochastic inversion[J]. *Geophysics*, 1985, 50(12):2727.
- [24] 谢玉洪, 陈殿远, 刘爱群, 等. 高精度叠前时间域速度分析方法研究及应用[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(2):38-43.
XIE Yuhong, CHEN Dianyuan, LIU Aiqun, et al. High-precision velocity analysis method in prestack time domain and its application [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, 38(2):38-43.
- [25] WANG Y H. Multiple attenuation: coping with the spatial truncation effect in the Radon transform domain[J]. *Geophysical Prospecting*, 2003, 51:75-87.
- [26] STOFFA P L, BUHL P, DIEBOLD J B, et al. Direct mapping of seismic data to the domain of intercept time and ray parameter—a plane-wave decomposition[J]. *Geophysics*, 1981, 46(3):255.

(编辑 修荣荣)