

# 多次波压制组合技术在海洋地震资料处理中的应用

陈见伟, 庄锡进, 胡冰, 张金陵, 王兆旗

(中国石油杭州地质研究院)

**摘要** 海洋地震资料中的噪声主要是多次波,消除多次波一直是资料处理的核心环节,已有的方法很多,但目前主要采用单一的方法,没有一种能达到较好的效果。人们已经注意到用若干种方法加以组合来达到消除多次波的目的,但还未有较理想的组合方法。在分析了海洋多次波的类型和特征、揭示多次波与一次波区别的基础上,针对多次波的不同特征合理地选取了压制多次波的方法,形成了一套海洋地震多次波的组合压制技术。在南海西部对发育反射多次波和绕射多次波的两种地震资料采用 SRME、Radon 变换、分频处理以及中值滤波方法的组合,两类多次波均得到了有效压制,结果比较理想。实际资料的处理实践表明,采用所述的四种技术组合来消除海洋多次波是切实有效的。

**关键词** 海洋地震勘探; 多次反射波; 压制技术; SRME; Radon 变换; 分频处理; 中值滤波

**中图分类号**: P631.44      **文献标识码**: A

多次波干扰是地震波场中常见的规则干扰之一,特别是海洋地震资料,多次波异常发育。多次波消除效果的好坏严重影响地震成像的品质。地震勘探的精度要求与日俱增,尤其是叠前偏移技术的应用已经成熟,在叠前处理中消除多次波干扰、提高地震波场的信噪比,已成为海洋地震资料处理中极其重要的环节<sup>[1]</sup>。因此,建立一套适用于海洋地震多次波压制的技术方案,已成为提高海洋地震成像品质的当务之急。

目前,国内外多次波压制方法的研究一直在不断进行,从最初的褶积类,到速度滤波类,再到目前的波动方程类,已有几十种之多<sup>[2]</sup>。这些方法都有各自的特点和应用条件,任何单一的方法都不能适应海上发育的所有多次波的压制。近几年出现的多次波压制方法主要是对不同多次波压制方法的组合,相比单一方法,这种组合更能起到好的压制效果。已出现采用 F-K 滤波与 Radon 变换的组合方法,它对于有规律的多次波在中远道压制效果明显,但是对近道多次波没有效果;后来又出现了 SRME 和

Radon 变换相结合的组合方法,它针对有规律的反射多次波有效,但很难压制绕射多次波以及复合多次波。

本文针对海上反射多次波和绕射多次波的特点,选取了四种压制多次波的方法,并对它们进行合理的组合,以此来逐步衰减多次波,最终使多次波得到充分压制,取得了比前人<sup>[3]</sup>更为理想的效果。

## 1 海洋多次波的特点

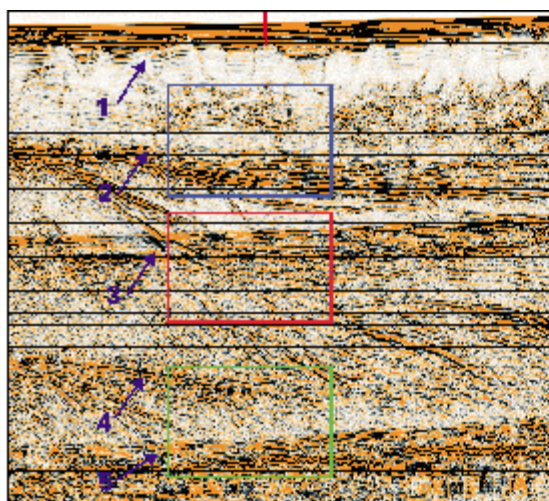
海水层和空气之间的波阻抗差,形成了稳定的反射界面,容易在海底与海水表面之间形成多次波;另外,强波阻抗界面也容易产生多次波。海洋地震发育的多次波归纳起来主要分为两类:(1) 反射多次波,即由平缓海底或平缓强波阻抗界面与海水面之间产生的一次和/或多次反射多次波;(2) 绕射多次波,即由崎岖海底或起伏大的强波阻抗界面产生的绕射多次波。

图 1a 展示的是叠加剖面上反射多次波的特征,其中编号 1 为海底,2 为强波阻抗界面,编号 3 和 5

收稿日期: 2010-07-09

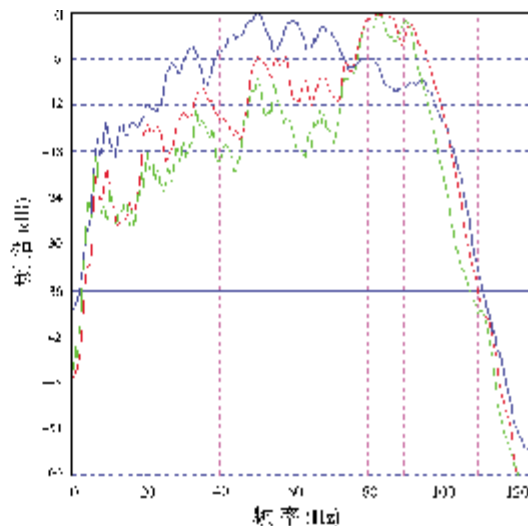
陈建伟: 1979 年生,工程师,硕士。2002 年本科毕业于长安大学,2005 年长安大学硕士研究生毕业。主要从事地震资料处理及方法研究。通讯地址: 310023 浙江省杭州市西溪路 920 号; 电话: (0571)85226181

分别为海底的一次和多次反射多次波,编号4为强波阻抗界面的一次反射多次波。这两组多次波的特点是能量强、记录时间成倍增加。



(a) 反射多次波在叠加剖面上的特征

图 1b 是图 1a 中对应颜色方框内地震资料的频谱,可以明显看出,深层资料主频由于多次波的存在比浅中层还高,主要是多次波的影响。



(b) 不同层位中对应颜色方框内地震资料的频谱

图 1 反射多次波在叠加剖面上的特征及对应的频谱图

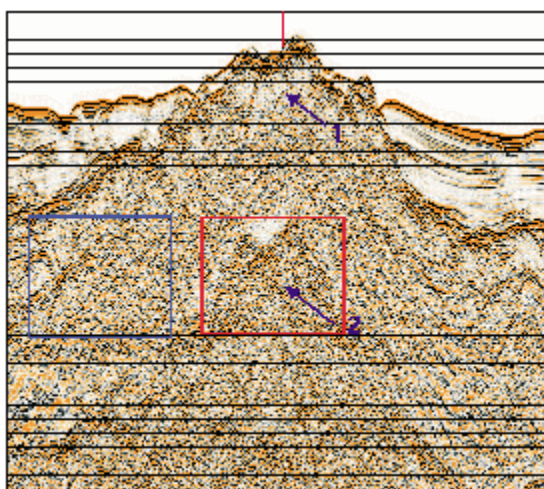
1 海底; 2 强波阻抗界面; 3 一次反射多次波; 4 强波阻抗界面一次反射多次波; 5 多次反射多次波

图 2a 叠加剖面上,编号 2 为崎岖海底(编号 1)的绕射一次多次波,能量强。图 2b 为图 2a 对应颜色框内地震资料的频谱图。从频谱图上可以明显看出,右框内资料主频明显高于左框内资料主频,主要是受发育多次波的影响。

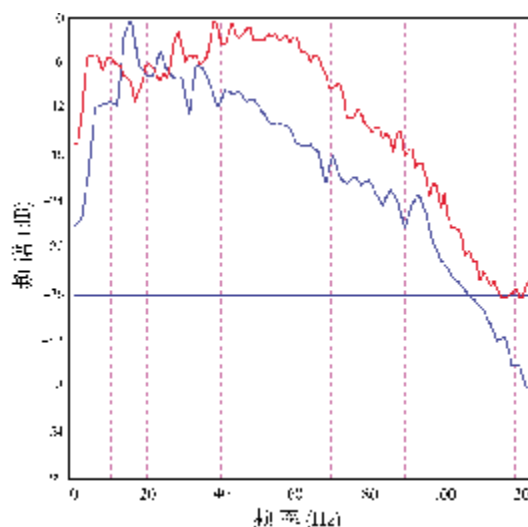
图 3 为图 1a 剖面中间点(红线标示位置)对应

的 CMP 道集,显示多次波能量强,严重掩盖了有效反射波,反射路径相对简单,为明显的双曲线或抛物线。图 4 为图 2a 剖面中间点(红线标示位置)对应的 CMP 道集,显示绕射多次波路径相对复杂,不呈现简单的双曲线或抛物线特征。

归纳起来,反射多次波和绕射多次波的主要特



(a) 绕射多次波在叠加剖面上的特征



(b) 不同层位中对应颜色方框内地震资料的频谱

图 2 绕射多次波在叠加剖面上的特征及对应的频谱图

1 崎岖海底; 2 崎岖海底的绕射一次多次波



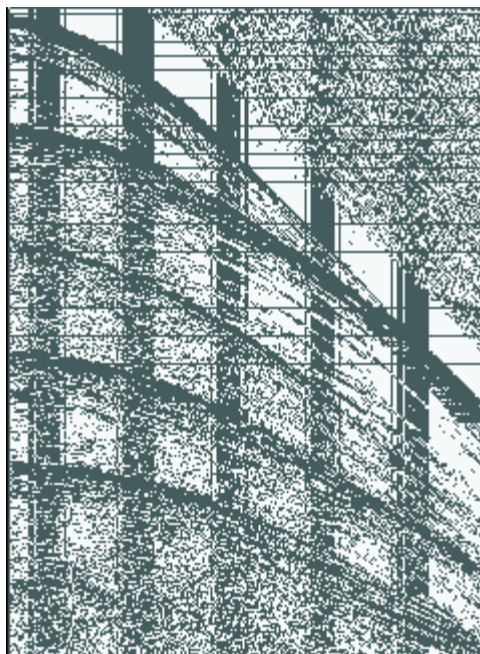


图3 图1a剖面中间点(红色线段所示)对应的CMP道集

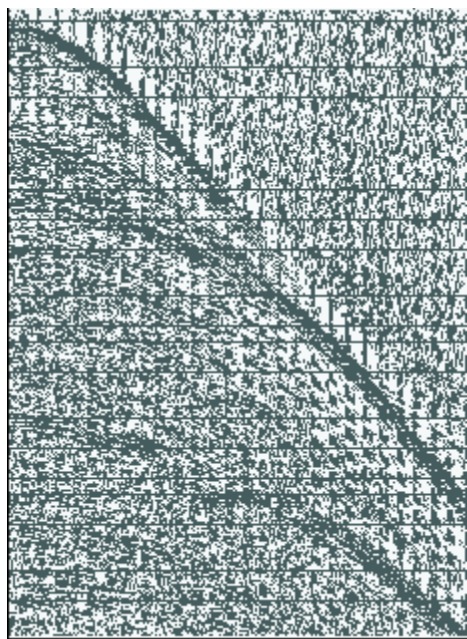


图4 图2a剖面中间点(红色线段所示)对应的CMP道集

征为:(1)反射多次波,其路径为双曲线或抛物线,多次波频率范围宽,能量强;(2)绕射多次波,其路径相对复杂,双曲线或抛物线特征不明显,多次波频率和能量高于同时间的有效波。

## 2 多次波压制技术分析

海洋地震资料在一定的条件下容易产生一次

和/或多次反射多次波和绕射多次波,给地震处理带来很大的困难。因此,能否压制好多次波直接影响着海洋地震资料处理成果的品质。

可用的压制多次波的方法技术较多,但由于海上资料多次波普遍规律性好,因此其中的F-K滤波、预测反褶积、Radon变换法以及基于波动理论的多次波模型减去法等少数几种成了目前压制海上多次波的主要方法。

F-K滤波要求多次波与有效反射时差不能太小,对于海底全程多次波有好的效果;预测反褶积主要用来处理波场响应为抛物线或双曲线,对于复杂介质压制效果减弱;基于波动理论的多次波模型减去法对地震资料品质要求高,同时对于复杂介质中多次波模拟困难较大,因此实际处理效果并不理想;Radon变换法根据多次波与有效波速度的差异进行分离,同时在分离的过程中,根据速度平方的差异进行分离,因此能够分离速度差较小的多次波,能够适应压制复杂构造多次波<sup>[4]</sup>。

尽管压制多次波的方法种类很多,但是对于复杂的深海介质,多次波特别是绕射多次波显得比较复杂,只用任何一种多次波压制方法,都不能获得好的效果。而且在实际资料处理中可能遇到的问题往往比理论假设要复杂得多,难以满足方法本身所要求的条件,所以仅采用一种手段很难较好地压制各种类型的多次波。

通过探索和实践,笔者认为采用SRME(自由表面多次波衰减)、Radon变换、分频处理以及中值滤波相结合的组合压制方法,是一种行之有效的手段。笔者采用这种组合方法在南海中部地区作了尝试,所得到的处理效果令人满意。

### 2.1 SRME

SRME称自由表面多次波衰减,是利用地震数据自身进行时空褶积来预测多次波<sup>[5]</sup>。地震数据所记录的多次波必定经过上行波场在自由表面处向下反射,并在地下介质中经过透射和反射,然后以多次波的形式被记录下来。每个多次波可被分解为若干个初至反射波(子反射)。因此,对于地震记录中的任何一个反射轴,可以看作为数据中自由表面多次波的某个子反射。通过将原始数据(有效波和多次波)之间进行时空域褶积,所有的子反射就“被褶积”在一起,从而就可预测出所有的自由表面多次波<sup>[6-7]</sup>。

SRME 主要是衰减与自由表面相关的多次波,由于一次多次波与自由表面形态最为相近,因此能够得到很好的衰减。二次或二次以上的多次波,其路径往往会发生变化,只有近道路径与自由表面相似度高,因此,对于二次或二次以上的多次波,SRME 只能衰减其近道部分的能量。

实际处理中主要分为两步。

(1) 建立多次波模型 由于此方法完全不需要地下信息,要正确地预测多次波,就必须保证所有所需的子反射均有记录或估计。如果某些子反射缺失或者有误差,那么就不可能正确预测包含这些子反射的自由表面多次波。实际资料处理中,必须除了填补所缺失的偏移距外,为了保证有完整的偏移距信息,还需要外推一定的负偏移距数据,以使多次波模型更准确。

(2) 匹配相减 预测出多次波后,便可以在原始地震记录上减去计算出来的多次波模型,得到去除多次波以后的地震记录。相减过程分为两步:(a) 能量匹配,主要是把多次波模型的能量与原始地震记录能量匹配为一致;(b) 在能量一致的情况下再进行相减。为了达到好的效果,需要试验选择相减数据窗口的大小。

## 2.2 高分辨率去假频 Radon 变换

Radon 变换利用了一次波和多次波之间速度或时间差异来实现多次波的衰减,为了有效区别多次波和有效波,在动校正后的道集上来进行处理<sup>[8]</sup>。因为在动校正道集上,一次波被拉平,而多次波由于校正的速度过大变成了抛物线,通过 Radon 正变换,一次波的 P 值很小,而多次波的 P 值则很大,有利于将两者区分开来,以此很容易把 Radon 域中含多次波的部分去除掉,留下有效波的部分进行 Radon 反变换,即得到多次波衰减后的结果。由于中远道多次波与一次波的时差较大,因此,这一方法压制中远道多次波特别有效<sup>[9-10]</sup>。

实际处理中主要包括两步:

(1) 一次波速度要尽量求准,特别是多次波和一次波速度接近时,要达到理想的效果,一次波速度尽量要准;

(2) 试验一次波和多次波最大偏移距的时间差,根据时间差,算出两者的 P 值差距,从而在不损伤有效波的前提下,尽量压制多次波。

## 2.3 分频处理

绕射多次波主要是由于地形起伏变化大而产生的,与反射多次波明显不同的是,绕射多次波路径既不为双曲线也不为抛物线,所以采用 SRME 和 Radon 变换来压制多次波的效果并不明显,但与同时段的有效波相比,绕射多次波无论是频率还是能量上都高得多。因此,采用分频处理和中值滤波来压制绕射多次波反而更为有效。

实际处理中,首先,要分析绕射多次波的频率以及有效波的频率,从而确定分频处理的频带范围以及分频的步长;其次,试验在同一频段内对高频能量的衰减级别,求取衰减系数,在不影响有效波的情况下,尽量衰减高频多次波的能量,最终达到对高频绕射多次波衰减的目的<sup>[11]</sup>。

## 2.4 加权中值滤波

经过 SRME、Radon 变换以及分频处理后,绝大部分多次波被衰减,但仍有一些能量强的复合多次波残余,此类复合波波在 NMO 道集上显示为畸变、能量强、无明显规律的多次波。因此,在 NMO 道集上进行加权中值滤波,并最终实现多次波被完全衰减。

实际处理中,要试验中值滤波的窗口大小,包括道数和时间;其次是试验中值滤波的阈值,以便很好地衰减剩余多次波<sup>[12-13]</sup>。

## 3 多次波压制组合技术应用实例

根据南海西部实际地震资料中多次波的特征,通过采取针对性较强的技术措施,即在叠前的不同处理环节,笔者采用上述多次波压制组合技术,取得了较好的处理效果。

### 3.1 反射多次波压制

图 5 为一组对反射多次波进行逐步压制的处理效果分析图。

图 5a 为发育反射多次波而未经压制处理的原始叠加剖面,图 5b—5e 分别为采用 SRME 处理,再先后叠加 Radon 变换、分频处理以及中值滤波压制等技术处理后的叠加剖面。从图 5b 可以看出,经过 SRME 衰减多次后,一次反射多次波衰减最为明显;图 5c 为经过 SRME 衰减多次后再经 Radon 变换后



的叠加剖面,其中的大部分多次波已被衰减,但还残余了部分多次波;再经过分频处理后,残余的高频多次波又得到了很好的衰减(图 5d);最后经过中值滤波

波后,畸变的多次波得到完全衰减,有效波凸现出来且无畸变,波组特征合理,连续性得到了改善,整体变化形态更加合理(图 5e)。

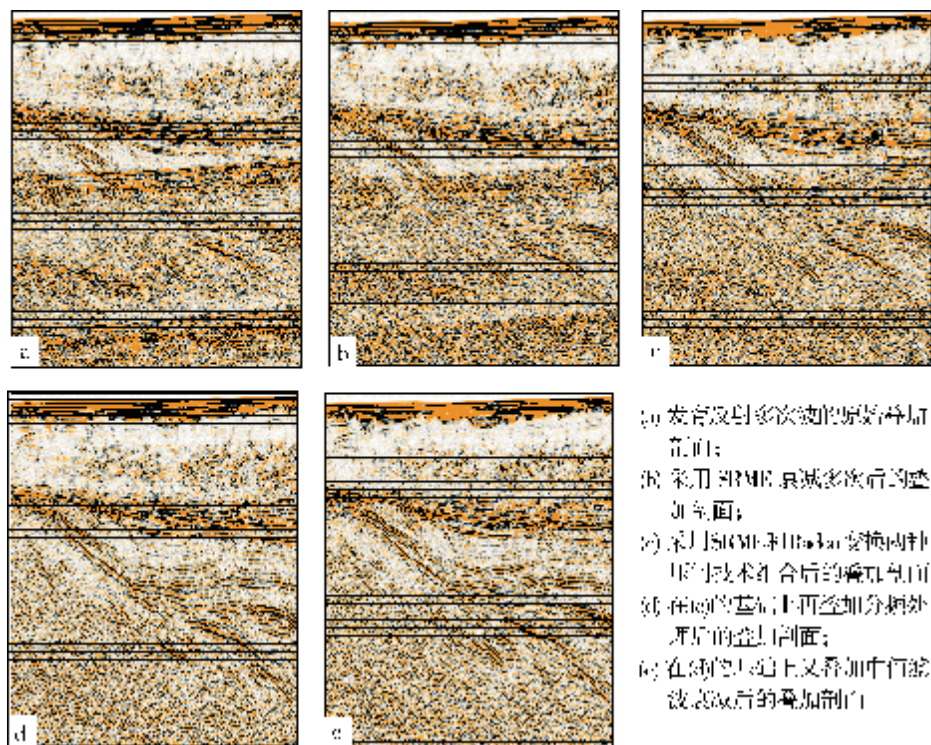


图5 南海某二维测线地震剖面反射多次波逐步压制处理效果分析图

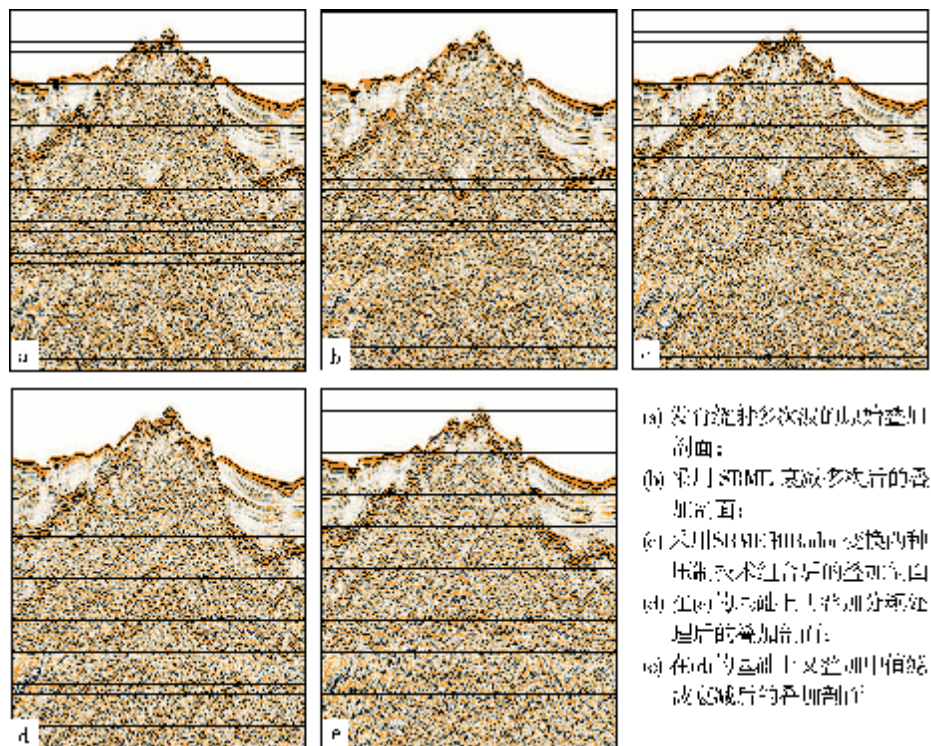


图6 南海某二维测线地震剖面绕射多次波逐步压制处理效果分析图

### 3.2 绕射多次波压制

图 6 为一组对绕射多次波进行逐步压制的处理效果分析图,所用的压制技术及技术组合步骤与图 5 完全一样。从图 6b 和图 6c 可以看到,SRME 和 Radon 变换对绕射多次波的衰减效果不明显。而分频去噪对多次波衰减的效果则非常明显(图 6d),经过中值滤波后残余多次波得到了很好的衰减。通过这一整套的多次波压制技术的组合应用,绕射多次波也得到了完全压制。

## 4 结 论

海洋多次波随着海底和地下地质构造的变化而变化,主要发育为反射多次波和绕射多次波。反射多次波规律性好,主要依据它与有效波在速度和时间上的差异来压制;而绕射多次波路径复杂,但频率和能量与同时段有效波存在差异,因此主要依靠与反射波的频率和能量上的差异来压制。采用 SRME、Radon 变换、分频处理以及中值滤波这四种技术的组合来压制这两类多次波,均可以取得较为理想的效果。

### 参 考 文 献

- [1] 李振勇,姜浩,李东升. 海洋地震数据处理技术探讨[J]. 石油地球物理勘探,2007,42(增刊):8-13.
- [2] 李鹏,刘伊克,常旭. 多次波问题的研究进展[J]. 地球物理学进展,2006,21(3): 888-897.
- [3] 徐文君,於文辉,卞爱飞. 地震资料多次波处理[J]. 工程地球物理学报,2005,2(6): 417-424.
- [4] 王建立,王真理,张洪宙,等. 海上多次波的联合衰减法[J]. 地球物理学进展,2009,(6):2070-2078.
- [5] 马继涛,陈小宏. SRME 方法压制多次波方法研究[J]. 中国地球物理,2006:135.
- [6] 赵秀莲,陈茂根,龚定康,等. SRME 技术在澳大利亚 Timer Sea 地区的应用[J]. 海洋石油,2009,(4):48-52.
- [7] 王维红,崔宝文,刘洪. 表面多次波衰减的研究现状与进展[J]. 地球物理学进展,2007 22(1):156-164.
- [8] 赵保宗,孙永清,李学聪. 基于波动方程的多次波压制方法应用研究[J]. 地球物理学进展,2010,(1):272-281.
- [9] 刘喜武,刘洪,李幼铭. 高分辨率 Radon 变换方法及其在地震信号处理中的应用[J]. 地球物理学进展,2004,19(1): 8-15.
- [10] 罗小佳,朱仕军,刘二军,等. 最优化相似加权 Radon 变换压制多次波[J]. 勘探地球物理进展,2009,32(3):186-188.
- [11] 李琳,邓央,茅金根. 利用小波变换实现地震资料分频去噪处理[J]. 西北油气勘探,2006,18(2):60-63.
- [12] 冯恒,刘财,杨宝俊,等. 中值滤波对信号相位和形状影响的研究[J]. 石油物探,2002,41(9):37-41.
- [13] 李振春,张成玉,王清振. 基于小波变换与多级中值滤波的联合去噪方法[J]. 石油物探,2009,(5):470-474.

编辑:吴厚松

## Application of the Combination Method to Multiple Attenuation in Marine Seismic Data Processing

Chen Jianwei, Zhuang Xijin, Hu Bing, Zhang Jinling, Wang Zhaoqi

**Abstract:** Multiple reflection is the most common noise in marine seismic data. The existence of multiple reflection degrades the signal/noise ratio, and further impacts on the reality and reliability of seismic imaging, and definitely it will affect the dependability of seismic interpretation. Multiple suppression has been a key procedure in marine seismic data processing for a long time. The forming condition and various types of multiple reflection wave were first discussed and then the difference of multiple and primary reflection wave was stated. How to select a reasonable multiple eliminating method that is applicable to marine seismic data processing was put forward. At last, a study case of a survey, which is collected from the west part of South China Sea, indicates that a hybrid method of SRME, Radon transformation, decomposition and median filter suppressed multiples significantly.

**Key words:** Marine seismic survey; Multiple reflection wave; SRME; Radon transformation; Median filter

Chen Jianwei: male, Engineer. Add: PetroChina Hangzhou Institute of Geology, Hangzhou, Zhejiang, 310023 China