

doi: 10.11720/wtyht.2022.1618

徐强,徐爽,王炜,等.基于格林函数的层间多次波预测[J].物探与化探,2022,46(6):1512—1517. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1618>
Xu Q, Xu S, Wang W, et al. Prediction of interbed multiples based on the Green's function[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(6):1512—1517. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1618>

基于格林函数的层间多次波预测

徐强¹,徐爽²,王炜¹,王海昆¹

(1. 中海油田服务股份有限公司 物探事业部研究院,天津 300451;2. 中国石油集团 东方地球物理公司研究院,河北 涿州 072750)

摘 要: 对于海洋地震资料的多次波的预测通常会采用 SRME(surface related multiple elimination)方法,但是对于地震资料中的强反射层之间形成的层间多次波,SRME 方法则无法实现预测。本文基于惠更斯原理,利用采集接收到的已知地震波场通过格林函数的方法来推测在强反射层之间传播的层间多次波场。首先计算各接收点在强反射层之间传播的格林函数,将接收到的波场(即当前炮集的所有接收点接收到的原始地震数据)与格林函数褶积,将得到的结果相加作为当前接收点的层间多次波的模型。进而再从原始数据中利用自适应减法减去该多次波模型,这样便完成层间多次波的预测和衰减。通过模拟数据和实际数据测试,该方法能够较好地衰减层间多次波能量。

关键词: 层间多次波;SRME 格林函数;自由表面多次波

中图分类号: P **文献标识码:** A **文章编号:** 1000—8918(2022)06—1512—06

0 引言

多次波问题一直是海洋地震资料处理的难点,尤其是层间多次波。多次波会降低地震成像的真实性和可靠性。多次波压制对于精准的偏移速度分析、复杂地质构造成像、波组特征精细刻画以及小断层成像都至关重要^[1-4]。

目前多次波的压制方法主要有以下几种:第一种是预测反褶积,主要用来压制水层鸣震等短周期多次波。第二种是基于多次波与一次波的速度属性差异,较为常见的是 Radon 域和 $F-K$ 域的多次波压制方法。对于周期较短的层间多次波,与一次波的速度差异并不明显,偏移距越小速度差异越小,因此,近偏移距压制效果不好。第三种是基于多次波的可预测性的方法,当前主要是应用 SRME 方法^[5-8]和基于格林函数的方法。二维和三维 SRME 技术被广泛应用于各海域实际资料处理中,主要用于自由表面即水面相关的多次波的预测和压制。基

于格林函数的方法在浅水海底相关多次波预测方面得到应用^[9]。由于层间多次波产生过程复杂,其预测和压制更加困难,常规数据褶积反馈模型的算法无法实现层间多次波预测和压制。

为实现层间多次波的预测,发展了反向迭代 SRME 方法^[10-11],在常规步骤中对自由表面多次波进行预测压制的同时,利用共聚焦技术重建基准算子,将激发和接收界面反向延拓至产生层间多次波的界面,该界面就可以等效作为层间多次波的“自由界面”,从而将 SRME 算法扩展至层间多次波,完成层间多次波的压制。在实际数据的应用中该方法的效果得到了较好的验证。这种方法还可以进一步扩展,通过定义一个伪边界,预测穿过这一伪边界的层间多次波^[12]。

另一种压制层间多次波的主要方法是基于点散射物理模型的逆散射级数方法^[13-14],该方法首先是基于地表数据,不需要任何速度等先验信息,通过虚同相轴的构建巧妙地将地下的散射点从地下移到了地表面,进而利用表面的散射点来预测其对应层间

收稿日期:2021-12-25;修回日期:2022-09-27

基金项目:中国海洋石油集团有限公司科研项目(E-23212002)

第一作者:徐强(1985—),男,高级工程师,2007年毕业于中国石油大学(华东)勘查技术与工程专业,2018年获中国石油大学(华东)地质工程硕士学位;现主要从事地震数据处理方法和技术研究工作。Email:xuqiangshidai@163.com

多次波,但该方法是基于自激自收数据,当存在偏移距时,预测的多次波存在不准确的情况。

基于稀疏反演方法压制层间多次波也得到了一定的发展,这种方法是将层间多次波的消除作为全波形反演的过程,多次波的预测效果较好。缺点是计算量大,效率较低。

本文提出了一种算法较为简易地在炮集域进行层间多次波预测方法,通过构建层间多次波响应的格林函数,并将其与地震炮集数据褶积,即利用已知的地震波场近似推测层间多次波的地震波场,这样实现层间多次波的预测及压制。通过对模拟数据和实际资料的应用,验证了本文方法可以较好的压制层间多次波。

1 方法原理

在一个单炮记录内实现预测层间多次波模型,可以是拖缆单缆、拖缆多缆数据或者海底电缆数据。利用已经接收到的地震数据作为已知的波场,通过在强反射层之间传播的格林函数推算层间多次波波场。根据格林函数 G 在时间域表达式:

$$G = \frac{1}{r} \delta\left(\frac{r}{v} - t\right), \tag{1}$$

其中 v 为层速度, $t > 0$ 。其意义在于在 $t = 0$ 时,在 $r = 0$ 位置开始激发一个单位脉冲。由此产生球面波进行扩散。在 t 时,波场传播为半径为 $v \times t$ 的球面上,振幅按 $1/r$ 进行比例衰减。

在一个炮集记录内,如图 1 所示,要计算 i 检波点的层间多次波模型,利用已知单炮内所有检波点 j 地震波场(即接收到的地震数据)与 C 、 D 两点之间的格林函数褶积,所得结果之和就是 i 检波器的层间多次波模型。根据格林函数,首先需要计算各接收点在强反射层之间传播的距离。假设地下为水平层状介质,首先需要在地震剖面上拾取产生层间多次波的层位 t_1 和 t_2 ,将单炮各检波器(j 点)接收的地震波场近似当作 C 点地震波场。需要计算多次波模型的当前 i 点地震波场近似当作 D 点地震波场。

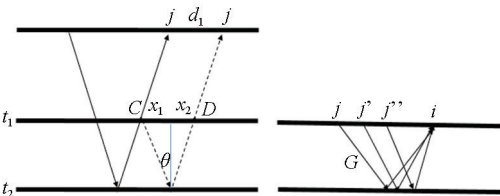


图 1 层间多次波传播示意图

Fig. 1 Interlayer multiples propagation diagram

地震波场在 t_1 和 t_2 两层之间从 C 点传播到 D 点的距离为 L_{ij} :

$$L_{ij} = 2 \sqrt{(d_{ij}/2)^2 + [(\Delta t_i \times v_0 + \Delta t_j \times v_0)/2]^2}, \tag{2}$$

其中 Δt 为地震波在 t_1 和 t_2 两层之间垂向传播的单程旅行时,即 $\Delta t = (t_2 - t_1)/2$ 。 d_{ij} 为检波器 i 和检波器 j 之间的距离。

然后求出单炮记录里各检波点到当前检波点在 t_1 和 t_2 两层之间的传播时间双程旅行时 t_{0ij} :

$$t_{0ij} = L_{ij} / v_0, \tag{3}$$

其中 v_0 为 t_1 和 t_2 层位之间的层速度(可以通过速度谱根据 dix 公式转换估算或者根据经验估算给一个常数)。

一个单炮记录作为已知地震波场,计算第 i 道在 t 时刻的层间多次波模型,首先计算本单炮的所有接收点 j 经过在强反射层之间传播道 i 点的格林函数 $1/t_{0ij}$,再与 j 接收点 $t - t_{0ij}$ 时刻地震数据 $D_{j,t-t_{0ij}}$ 相乘,单炮内每个接收点 j 都会得到一个结果,然后将所有结果相加,即得到层间多次波第 i 道在 t 时刻的模型 M_i 可以表示为:

$$M_{i,t} = \sum_j -R_1 R_2 / t_{0ij} \times D_{j,t-t_{0ij}}, \tag{4}$$

其中 D_{jt} 为第 j 道的在 t 时刻的地震记录炮集数据。 R_1 和 R_2 分别为 t_1 和 t_2 界面的反射系数(因为此方法重点是多次波走时预测,反射系数可以假设都为 0.5)。

根据克希霍夫衍射理论,加入反射角的影响,多次波的模型 M 可以表示为:

$$M_{i,t} = \sum_j -R_1 R_2 / t_{0ij} \times D_{j,t-t_{0ij}} \cos^2 \theta, \tag{5}$$

因为假设条件是水平介质,在实际地震资料处理时,参与计算的 j 道的地震数据,可以选取较小范围孔径内的数据,减少地层倾角变化带来的预测误差。

利用式(5)求得多次波模型 M ,然后可以在共炮检距域或 CDP 域,利用自适应方法减去多次波,此减去法同 SRME 方法类似,即

$$P = D - f \otimes M, \tag{6}$$

式中, f 为自适应调整算子。

这就是基于格林函数的层间多次波预测的基本方法。该方法主要针对强反射层之间产生的层间多次波。可以与其他多次波衰减方法(例如反褶积、部分 SRME、拉东变换等)组合使用。

2 模型测试

通过建立一个正演模型来检验该方法的有效

性。使用波动方程方法正演了一个具有强反射地层的剖面,子波主频 30 Hz,拖缆采集,速度模型如图 2 所示。强反射层顶底界面分别为 t_1 和 t_2 ,文章所有地震记录的道间距均为 12.5 m。如图 3a 所示为包含层间多次波的正演地震炮集记录,可以看到图中箭头所指位置是 t_1 和 t_2 两个反射界面产生的层间多次波。经过本文基于格林函数的层间多次波压制之后,如图 3b,层间多次波压制效果明显。从图 3c 可以看出预测的多次波模型的时间位置也非常准确。图 4 是正演叠加剖面效果图,从图 4b 可以看到 t_1 和 t_2 两个反射界面产生的层间多次波得到很好的压制,同时我们看到压制前后叠加剖面相减, t_1 和 t_2 两个有效地层同向轴几乎没有损失,如图 4c 所示。

层间多次波的预测对于 t_1 和 t_2 之间地层层速度敏感程度进行测试,如图 5 所示。 t_1 和 t_2 之间地层速度是 3 500 m/s,从图中可以看出,速度偏差

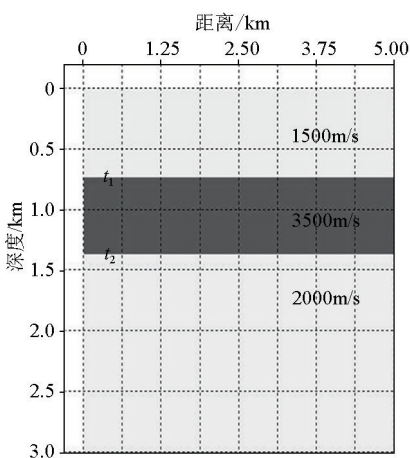
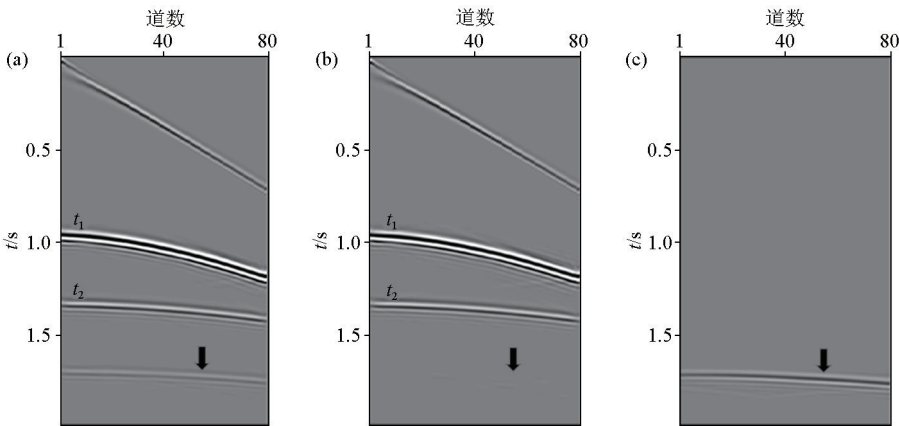


图 2 正演速度模型

Fig. 2 Forward velocity model

500 m/s 时,预测的层间多次波位置出现轻微偏差。速度偏差 1 000 m/s 时,预测的层间多次波在远道位置才会出现超过一个波长偏差。总体来说,本方法对给定的层速度参数的敏感度较低。

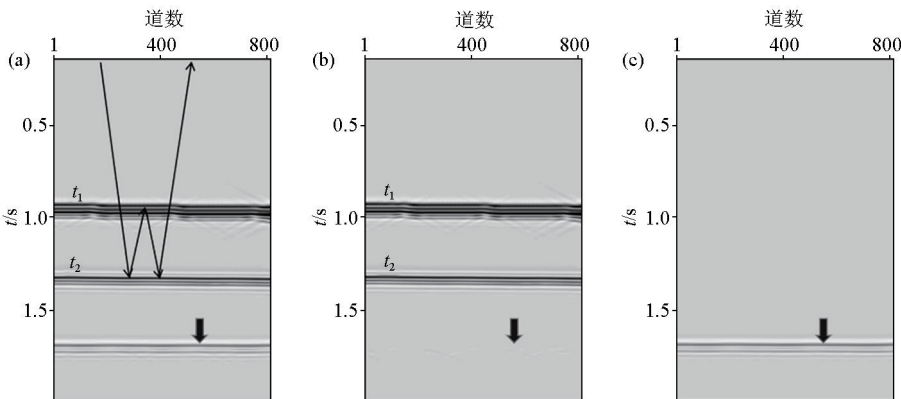


a—正演炮集记录;b—本文方法压制层间多次波后;c—预测的多次波模型

a—forward shot record;b—after suppressing interlayer multiples;c—predicted multiple model

图 3 层间多次波压制前后的正演炮集

Fig. 3 Forward shot before and after interlayer multiple suppression



a—正演地震剖面;b—本文方法压制层间多次波后;c—图 a 与 b 相减的差

a—forward stack record;b—after suppressing interlayer multiples;c—difference of subtraction between fig. a and fig. b

图 4 层间多次波压制前后的正演叠加剖面

Fig. 4 Forward stackbefore and after interlayer multiple suppression

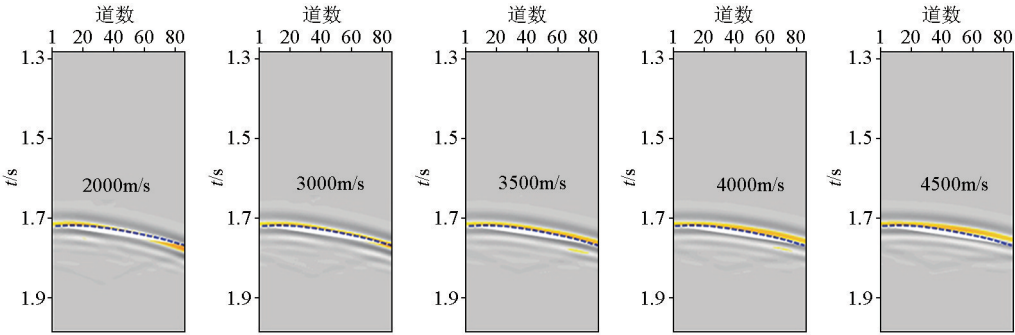


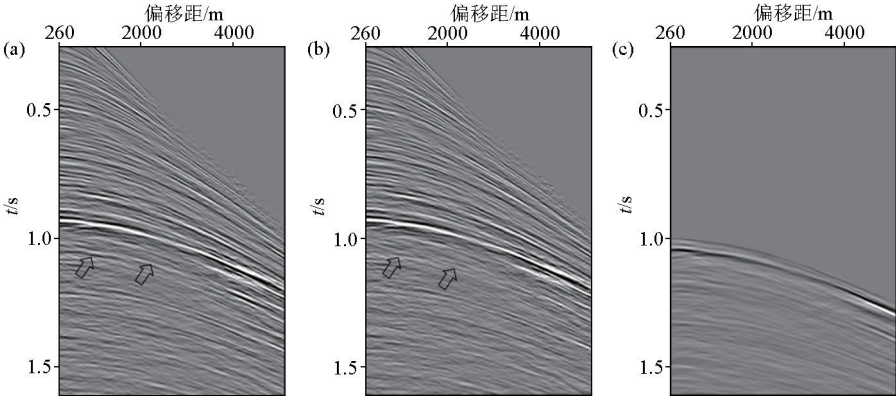
图 5 使用不同层速度层间多次波预测模型正演炮集对比

Fig. 5 Comparison of multiple prediction models using different layer velocities

3 实际资料应用

以中国某海域的实际资料处理为例,整个工区为浅水环境,深约 30~40 m,基底是强反射层,基底和上覆强层产生的层间多次波十分发育。如图 7a 所示,虚线表示强层之间层间多次波传播路径。

从原始资料的炮集(图 6a)和叠加剖面(图 7a)可以看出,基底(h_2 层)与上覆地层(h_1 层)存在较强的层间多次波,图中箭头位置。从图 6c 炮集模型可以看出基于格林函数的层间多次波预测模型较为准确,经过本文方法压制后,在炮集(图 6b)和叠加剖面(图 7b)上层间多次波得到明显的衰减(箭头位置)。

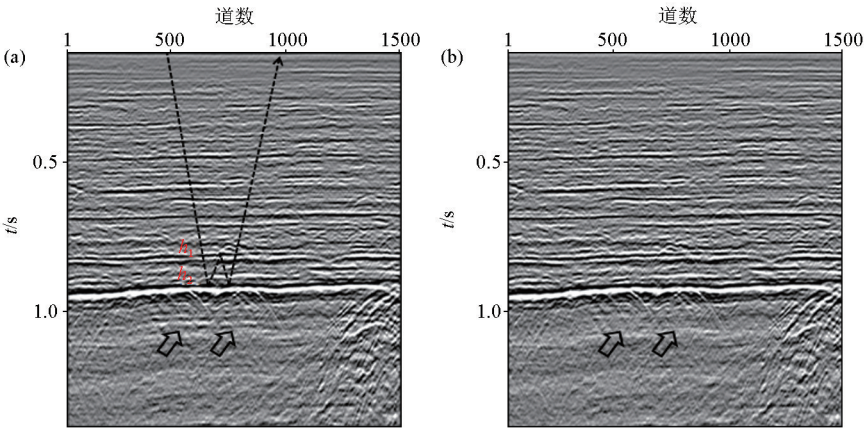


a—原始炮集记录;b—层间多次波压制后;c—预测的层间多次模型

a—original shot record;b—after interlayer multiple suppression;c—interlayer multiple prediction mode

图 6 层间多次波压制前后实际炮集数据

Fig. 6 Shot before and after interlayer multiple suppression



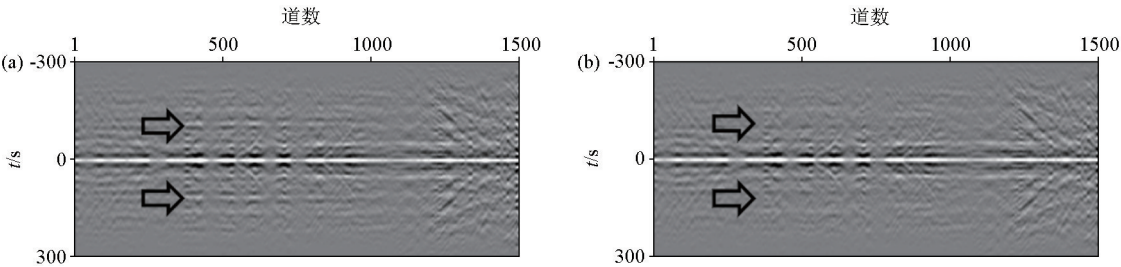
a—原始叠加剖面;b—层间多次波压制后叠加剖面

a—original stack section;b—stack after the attenuation of interlayer multiples

图 7 海洋地震数据层间多次波压制前后叠加剖面对比

Fig. 7 Comparison of stack before and after multiple suppression of marine seismic data

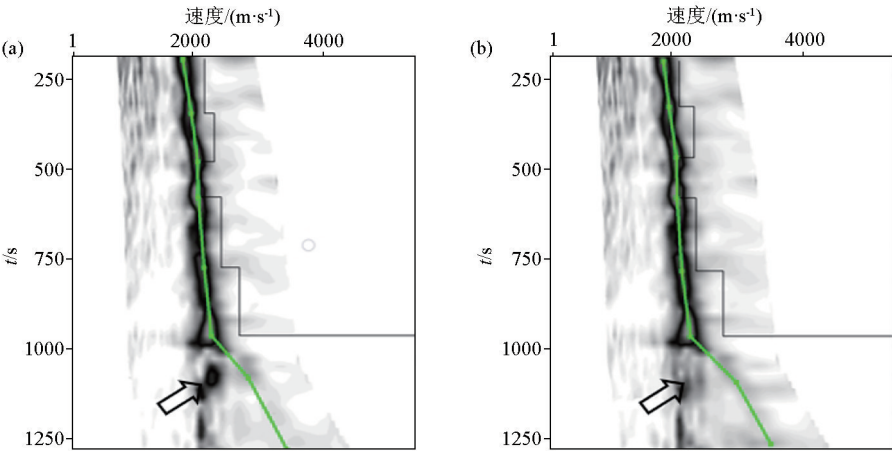
图 8 为图 7 的叠加剖面对应的多次波处理前、后的自相关谱。从自相关上可以看出使用基于格林函数的方法压制后层间多次波得到明显衰减(箭头位置)。



a—原始叠加剖面自相关;b—层间多次波压制后叠加剖面自相关
a—autocorrelation of original stack section;b—stack profile autocorrelation after interlayer multiples suppression

图 8 层间多次波压制前后叠加剖面自相关

Fig. 8 Autocorrelation of stack section before and after multiple suppression



a—原始数据速度谱;b—层间多次波压制后速度谱
a—raw data velocity spectrum;b—velocity spectrum after interlayer multiples suppression

图 9 层间多次波压制前后速度谱

Fig. 9 Velocity spectrum of stack section before and after multiple suppression

4 结论

笔者利用格林函数的方法来构建层间多次波模型,通过在地震剖面上拾取强反射层的层位信息和速度信息,实现层间多次波的预测与压制。

使用基于格林函数的层间多次波预测方法优点是方法流程简单,易于实际资料应用,对于近似水平层的特定层位的强反射层产生层间多次波可以较好地压制。缺点是要需要人工拾取地震层位信息。对于构造复杂的、无法判断产生层间多次波的准确层位的层间多次波,则压制效果不理想。

对海洋地震资料进行多次波衰减处理时,如果存在比较明确的强反射地层,层间多次波能量较强,有效反射同相轴较弱的情况,则可以采用本文方法。建议可以在浅水多次波、SRME、预测反褶积等其他

图 9 为多次波处理前、后的速度谱。图 9a 箭头位置为 h_1 和 h_2 两层的层间多次波能量团,从图 9b 可以看出使用基于格林函数的方法压制后层间多次波能量团得到明显衰减(箭头位置)。

多次波压制方法之后使用,作为补充来进一步压制剩余的层间多次波。

参考文献 (References):

[1] Berkhout A J, Verschuur D J. Focal transformation, an imaging concept for signal restoration and noise removal [J]. Geophysics, 2006, 71(6): A55—A59.

[2] Berkhout A J. Seismic processing in the inverse data space[J]. Geophysics, 2006, 71(4): A29—A33.

[3] Berkhout A J, Verschuur D J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion; Part 1. Theoretical considerations [J]. Geophysics, 1997, 62(5): 1586—1595.

[4] 徐强,王征,史增园,等. 浅水多次波衰减[J]. 石油地球物理探, 2015, 50(2): 238—242.

Xu Q, Wang Z, Shi Z Y, et al. Shallow water multiple attenuation [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(2): 238—242.

[5] Berkhout A J, Verschuur D J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, part I: theoretical considerations [J]. Ge-

ophysics,1997,62(5): 1586—1595.

[6] Hung B,Yang K L,Zhou J,et al. Surface multiple attenuation in seabeach-shallow water,case study on data from the Bohai Sea[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts,1949: 4453.

[7] Berkhout A J,Verschuur D J. Removal of internal multiples with the common-focus-point (CFP) approach;Part 1—Explanation of the theory[J]. Geophysics,2005,70(3):V45—V60.

[8] 金明霞,易淑昌,王征. 多次波正演与 SRME 技术影响因素分析及应用[J]. 物探与化探,2014,38(3):566—570.
Jin M X,Yi S C,Wang Z. The analysis and application of multiple wave forward modeling and the influencing factors of SRME technology[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2014,38(3):566—570.

[9] 徐强. 基于格林函数的多次波预测方法[J]. 中国造船,2019,60(4):155—160.
Xu Q. Multiple prediction method based on Green Function [J]. Shipbuilding of China,2019,60(4):155—160.

[10] Berkhout A J,Verschuur D J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, Part I: Theoretical considerations[J]. Geophysics,1997,62(5):1586—1595.

[11] Song J W,Verschuur E,Chen X H. Comparing three feedback internal multiple elimination methods[J]. Journal of Applied Geophysics,2013,95:66—75.

[12] Borselen R V. Data-driven interbed multiple removal; Strategies and examples [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts,1999:2106.

[13] Ikelle L T,Erez I,Yang X. Scattering diagrams in seismic imaging;More insights into the construction of virtual events and internal multiples[J]. Journal of Applied Geophysics,2009,67(2):150—170.

[14] Ypma F,Verschuur D J. Estimating primaries by sparse inversion, a generalized approach [J]. Geophysical Prospecting, 2013,61(s1):94—108.

Prediction of interbed multiples based on the Green’s function

XU Qiang¹,XU Shuang²,WANG Wei¹,WANG Hai-Kun¹

(1. Geophysical R&D institute,COSL,Tianjin 300451,China ;2. BGP Geological Research Center,CNPC,Zhuozhou 072750,China)

Abstract: The surface-related multiple elimination (SRME) method is usually used to predict the multiples of marine seismic data. However,it cannot be used to predict the interbed multiples formed between strong reflection interfaces in seismic data. This study,based on the Huygens principle and the received known seismic wave fields,inferred the interbed multiples propagating between the strong reflection interfaces using Green’s function. First,the Green’s function propagating between the strong reflection interfaces at each receiver was calculated;then the obtained Green’s function was convoluted with the received wave field(the original seismic data received by all receivers of the current shot gather);finally,the sum of the results was taken as the model of the interbed multiples of the current receiver. Subsequently,subtracting the multiple model from the original data through adaptive subtraction achieved the prediction and attenuation of interbed multiples. The tests based on simulation data and actual data indicate that the method proposed in this study can effectively attenuate interbed multiples.

Key words: interbed multiple;SRME;Green’s function;surface-related multiple

(本文编辑:叶佩)