

数据驱动型层间多次波预测方法研究

叶月明*^① 赵昌奎^{①②} 姚根顺^①
胡冰^① 庄锡进^① 章学刚^③

①中国石化杭州地质研究院, 浙江杭州 310023; ②中国石化勘探开发研究院, 北京 100083;

③长江大学工程技术学院, 湖北荆州 434000

叶月明, 赵昌奎, 姚根顺, 胡冰, 庄锡进, 章学刚. 数据驱动型层间多次波预测方法研究. 石油地球物理勘探, 2014, 49(2): 244-251.

摘要 采用表面相关的多次波预测算法(SRME)时,对于层间多次波,是将表面接收到的波场利用基准面重建或CFP算子延拓到产生层间多次波的界面,然后利用SRME方法预测,该方法的缺陷是需要知道产生多次波层界面以上的速度模型。而数据驱动型层间多次波预测(IMP)算法是将层间多次波分解为三个波场分量,即无层间多次波的一次反射波,产生层间多次波界面的一次反射波,及该层界面以下的总反射,此三个波场通过互相关和褶积即可预测出层间多次波。第二个分量和第三个分量均可通过简单的切除得到,第一个分量可通过类似于SRME的基于最小平方能量准则的自适应迭代算法得到,其初始值与第三个分量相同,因此该方法是完全数据驱动的。模型数据试验表明,该方法可有效地预测层间多次波。

关键词 数据驱动 IMP 层间多次波 SRME 多次波预测

中图分类号: P631 **文献标识码**: A

1 引言

多次波是以一次反射为主导的地震勘探中难以去除的干扰^[1],海上地震勘探尤为明显。与表面相关的多次波衰减方法发展非常迅速,如基于周期差异去水底鸣震的预测反褶积;根据一次反射波与多次反射波速度差等处理方法,如 $f-k$ 滤波, Radon滤波, $\tau-p$ 域反褶积,聚束滤波等;基于波场外推的水底相关多次波预测相减法。已广泛用于实际地震资料处理的基于反馈环的SRME方法^[2],以及如今正在发展的逆散射级数方法^[3,4]等。对于层间多次波而言,相比表面多次波在剖面上更不易识别,反射路径也更为复杂。随着勘探目标朝着更精细的方向发展,只要在表面以下存在两个较强的反射界面,就会产生能量不容忽视的层间多次波,如海洋资料中海底与海底下盐丘顶部^[5],陆上资料中表层或浅层火成岩之间,层间多次波均会与有效波相干涉,产生假的构造和解释假象。

现今实际地震资料处理中层间多次波的去方法主要包括基于周期差异的预测反褶积法和基于速度差异的 $f-k$ 滤波或Radon域滤波法,前者对有效波损伤较大,后者无法衰减近道层间多次波,实际应用效果并不明显。Berkhout和Verschuur^[6-9]将SRME方法推广到层间多次波预测,包括两类:一类是基于层界面的层间多次波预测方法,即将震源波场和检波点波场延拓到产生层间多次波的界面,或利用CFP算子半重建基准面,然后再利用SRME方法预测层间多次波;另一类是基于层的层间多次波预测方法,该方法不需要指定具体产生多次波的层界面,而只需指定该界面以下任一深度,除需要CFP道集外,还需要在该深度进行完全基准面重建,重建数据的反因果部分用来预测该层内部多次波的向上反射。这两种方法均需准确的CFP算子或者波场延拓所需的速度-深度模型,虽然可通过基于等时原理和差异分析(DTS)更新技术得到CFP算子,但人为干预因素过多,因此还是属于模型驱动的。Wegleign等^[10]提出完全数据驱动的一

* 浙江省杭州市西溪路920号中国石化杭州地质研究院, 310023. Email: yeym_hz@petrochina.com.cn

本文于2012年7月24日收到,最终修改稿于2013年12月25日收到。

层(即产生层间多次波界面)的一次波波场 $\overline{S'R'}$ 。三者之间的关系可以用类似 SRME 波场褶积表示,这样就可以将运动学中的时间求和变为褶积,将相减变为互相关,同时考虑震源子波项,可消除波场 $\overline{S'R'}$ 的影响,从而直接预测与 k 层相关的层间多次波。频率域层间多次波预测表达式为

$$M(k) = P_{oj}[s_0]^{-1} P'_{ok}[s'_0]^{-1} P_{ol} \quad (2)$$

式中: $M(k)$ 为与 k 层相关的一阶层间多次波; P_{oj} 与 P_{ol} 是 j 层和 l 层(图 2 中 $l=j$) 界面的一次反射; P'_{ok} 为第 k 层一次反射波的复共轭; 与 SRME 的表面因子对应的是 $[s_0]^{-1}$ 与 $[s'_0]^{-1}$, 此处是反子波与反子波的共轭, 二者也能合成一项, 即子波自相关的逆。

对于 N 层反射界面, 同时有多阶层间多次波, 该式可扩展为

$$M(k) = \sum_{j>k}^N P_{oj}[s_0]^{-1} P'_{ok}[s'_0]^{-1} \sum_{l>k}^N P_l \quad (3)$$

式中: P_l 为 k 层界面以下总的记录波场; 此时 $M(k)$ 表示的是总的与 k 界面相关的层间多次波。当 $k=0$ 时, $P'_{ok} = P'_0 = r_0 s_0$, 该式变为

$$M(0) = P_0[s_0]^{-1} r_0 P \quad (4)$$

式中: P 为原始记录波场; 显然, 式(4)变为自由表面多次波预测公式, 因此式(3)层间多次波预测是 SRME 方法的扩展形式, 且是完全数据驱动的。

3 IMP 自适应算法实现

根据式(3)预测层间多次波, 需要在原始数据中提取对应的波场项, 由于无法直接得到第一项的一次波波场, 类比 SRME 自适应迭代算法, 也可利用式(3)给定初始一次波波场, 然后根据最小平方准则进行自适应迭代实现。不考虑震源子波的方向特性, 在频率域反子波为一常数, 将该比例因子提出, 则

式(3)可简化为频率域三个波场矩阵相乘的形式, 即

$$M_k^{(i)} = \overline{P_k^{(i-1)}} [\Delta P_k]^H \overline{P_{k-1}} \quad (5)$$

当 $i=1$ 时, 式(5)取 $\overline{P_k^{(i-1)}} = \overline{P_{k-1}}$; 当 $i>1$ 时, $\overline{P_k^{(i-1)}} = \overline{P_{k-1}} - M_k^{-1}$ 。式中: 上标 i 表示第 i 次迭代; M_k 表示与 k 层相关的层间多次波矩阵, 与式(3)左边等价; $\overline{P_k}$ 表示相对 k 层的一次波波场矩阵, 且包含 k 层以上的反射均已切除, 与式(3)中右边第一个一次波场项对应; $[\Delta P_k]^H$ 表示第 k 层对应的一次反射波波场在频率域的复共轭转置矩阵, 与式(3)第二波场项即层界面一次波波场对应; $\overline{P_{k-1}}$ 为第 $k-1$ 层界面以上的多次波已消除的总波场, 同时包含 $k-1$ 层以上的反射均已切除, 与式(3)第三波场项即层界面以下总波场对应。

图 3 为 IMP 层间多次波预测矩阵示意图。图 3 表明: 炮检点空间中任意一点多次波的预测, 需要该点的共炮点道集, 共检波点道集, 以及产生层间多次波的界面上所有点的一次反射波参与运算, 计算时间约为表面多次波预测时间的 N 倍(N 为矩阵维数)。图 2b 的射线路径与图 3 的矩阵描述是相对应的。 \overline{SR} 层间多次波的路径是不确定的, 因此需要把所有可能的路径寻找出来, 然后求和得到相干加强的多次波预测结果, 当要预测(S, R)点的层间多次波时, $\overline{S'R'}$ 的空间位置是未知的, 运算过程中先固定 R' , 使 S' 变化, 让 $\overline{S'R'}$ 与 \overline{SR} 互相关, 然后再使 R' 变化, 将前两项互相关的结果与对应的 \overline{SR} 褶积, 最后得到层间多次波的预测结果。

预测结果需要与预测之前的数据进行匹配, 即需要对预测后的多次波比例化, 根据最小平方能量准则, 利用最小二乘算法计算出比例因子, 然后从原始数据中减去比例后的多次波, 即得到无 k 层相关的层间多次波记录, 其数学描述为

$$P_k^{(i)} = P_{k-1} - a_k(\omega) M_k^{(i)} \quad (6)$$

式中: $P_k^{(i)}$ 表示第 i 次迭代后无 k 层相关层间多次

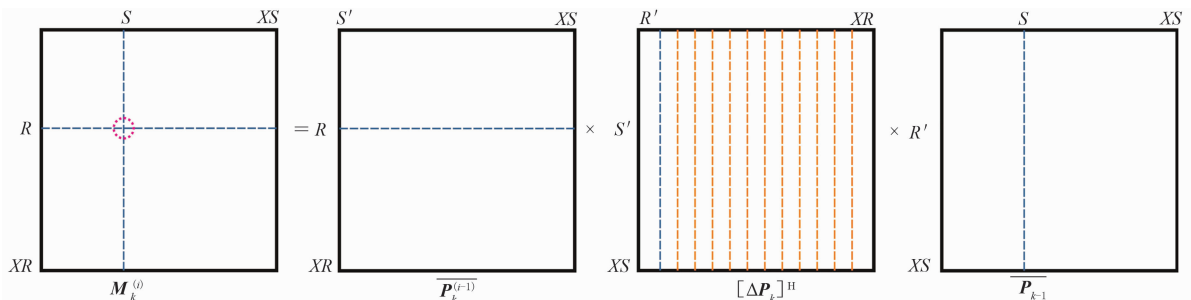


图 3 频率域 IMP 层间多次波预测算法矩阵示意图

波记录; P_{k-1} 表示无 $k-1$ 层相关层间多次波记录; $a_k(\omega)$ 为比例因子, 频率域为常数; $M_k^{(i)}$ 为第 i 次迭代后的多次波。

此算法的核心在于产生层间多次波界面反射波的识别与切除, 通常情况下, 产生有意义层间多次波界面的反射相对较强, 可通过动校正选取时窗, 然后反动校后得到切除多次波后的层界面一次波。

4 理论模型层间多次波衰减

4.1 简单层状模型

基于强反射界面间会产生可识别的层间多次波这一认识, 建立如图 4a 所示的理论模型, 该模型第二层为一高速层, 速度为 4000m/s, 层间多次波主要由该层顶界面与其下反射层产生, 采用二阶声波有限差分模拟合成记录, 子波主频为 20Hz, 每炮 201

道接收, 道间距为 20m, 中间放炮, 炮间距为 20m, 共模拟单炮记录 101 炮; 图 4b 为 2000m 处激发的合成单炮记录, 椭圆框内的反射轴均为箭头所指层相关的层间多次波。为突出层间多次波, 模拟时在表面加吸收边界, 不考虑自由表面多次波的影响。

由于高速层的影响, 直达波和折射波与反射波产生干扰, 为防止对预测结果造成影响, 对炮记录进行切除直达波和折射波处理(图 5a)。为防止直接切除损伤部分有效波, 先将炮集记录抽成 CMP 道集, 动校正后选择矩形窗切除, 然后将反动校数据抽成炮集记录, 即可获得所需要的两类波场; 图 5b 是层间多次波相关界面的一次反射波在时间域的共轭(时间取反), 对应第二波场项。将该界面以上所有反射波切除后的波场如图 5c 所示, 对应第三波场项, 同时也作为第一次迭代时的第一波场项。

三个波场对应的数据准备好后, 经傅里叶变换

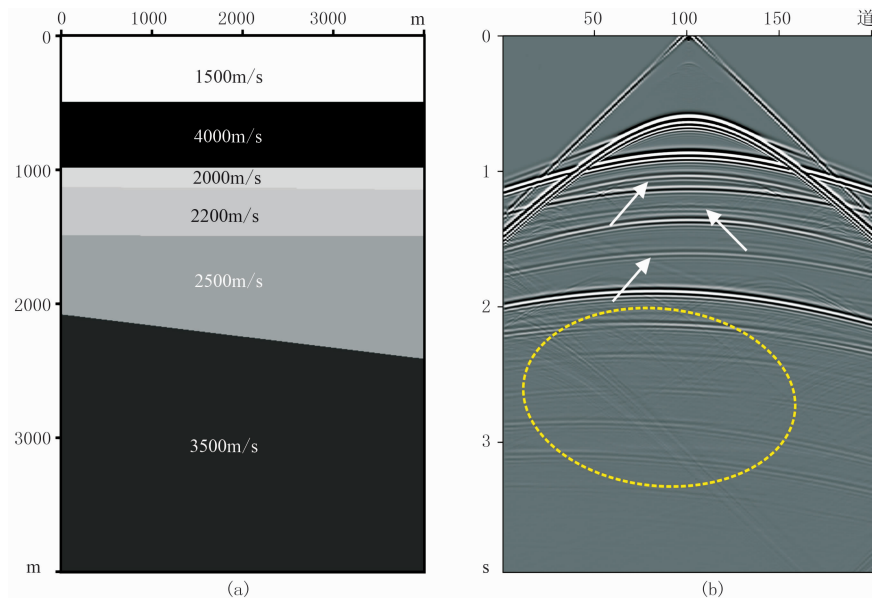


图 4 层状速度模型(a)及炮点在 2000m 处的合成记录(b)

到频率域, 对每一个频率片构造式(5)对应的矩阵, 对三者进行矩阵相乘, 最后经反傅里叶变换到时间域, 即可预测出与高速层顶界面相关的层间多次波(图 6c), 然后根据最小能量准则将预测出的多次波比例后从原数据中减去, 即可消除与该高速层顶界面相关层间多次波(图 6b), 为便于比较, 图 6a 与图 5a 相同。箭头所指层间多次波均被预测出来, 并得到了有效压制。

图 7 为图 4 数据层间多次波去除前、后分裂步傅里叶法(SSF)叠前深度偏移剖面对比。由图可

见, 去除高速层顶界面相关的层间多次波后, 假的同相轴基本消失, 尤其是倾斜层下能量相对较强的层间多次波(倾斜层下箭头所指)消除效果较为明显。

4.2 复杂断层模型

图 8a 所示复杂断层模型在浅层存在两套高速薄层, 此类特征在陆上火成岩覆盖区较为常见。由图 8b 可以看出, 两个浅层高速体产生的层间多次波干扰非常严重, 部分多次波与断层绕射波相干涉(图中箭头处)。

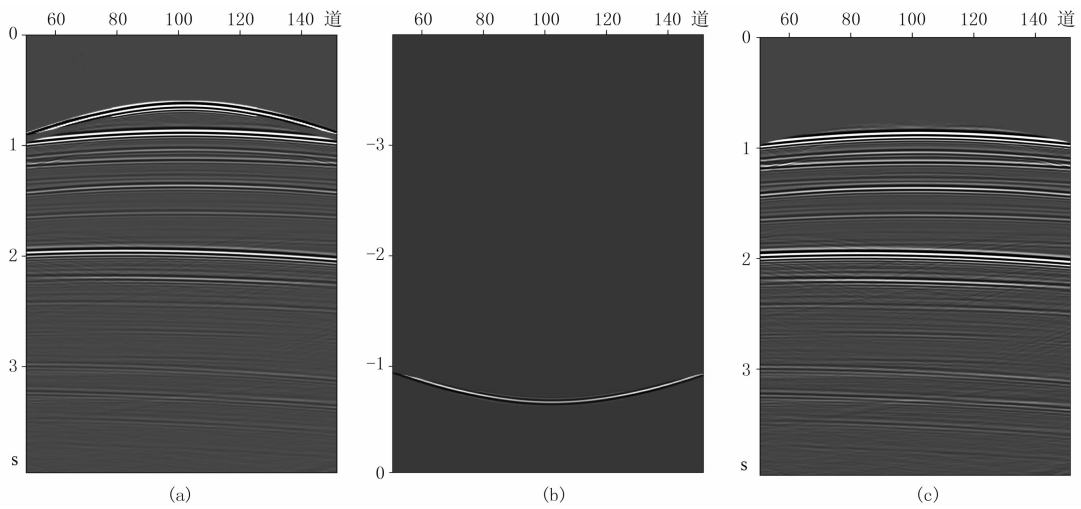


图 5 图 4 数据 IMP 波场分解结果

(a) 初至切除仅保留反射波的数据; (b) 层间多次波相关界面一次反射波的共轭, 即第二波场项; (c) 切除层间多次波相关界面上所有反射的波场, 即第三波场项, 同时作为初始迭代的第一波场项

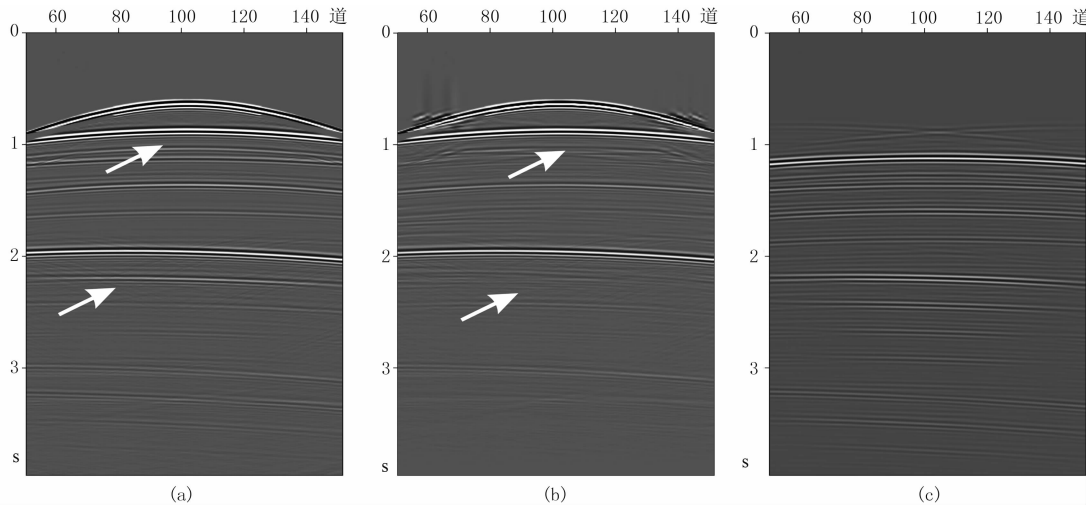


图 6 图 5 单炮记录 IMP 效果

(a) 同图 5a; (b) 多次波相减结果; (c) 预测的层间多次波

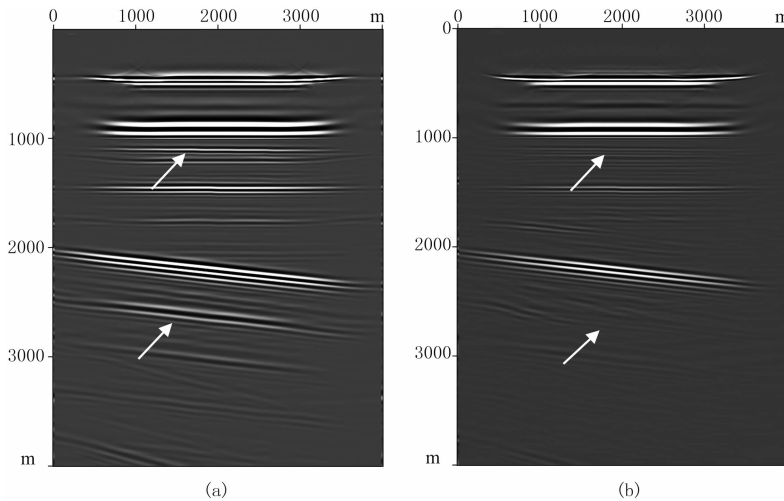


图 7 图 4 数据层间多次波去除前(a)、后(b)SSF 叠前深度偏移剖面对比

首先将原始记录中的非反射波部分切除,如直达波和折射波,然后将第一个高速层对应的一次反射通过动校、反动校提取出来作为第二波场项,剩下的记录作为一、三波场项。图 9 为复杂断层模型 IMP 层间多次波预测结果,采用 IMP 算法预测与该高速层对应的层间多次波(图 9a、图 9b 中椭圆及箭头处)。最后采用最小平方能量计算出多次波的匹配因子并从记录中减去(图 9b),与断层反射和绕射

相干的多次波均得到了较好的消除(箭头处)。图 10 为复杂断层模型层间多次波去除前、后 SSF 叠前深度偏移剖面对比。由图可明显看出,多次波产生的假同相轴以及与实际地层反射波干涉的同相轴均得到了压制(箭头处)。但是仍有部分残余多次波未消除,这主要与多次波相减算法有关。但从浅、中、深层多次波衰减结果看,尤其是中、深层的层间多次波压制效果较好。

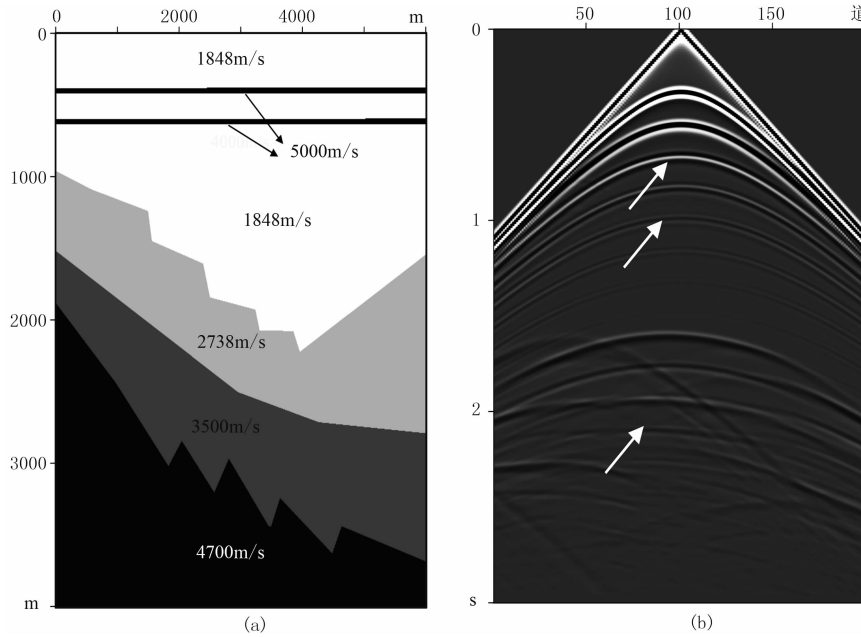


图 8 复杂断层速度模型(a)及炮点在 3000m 处的合成记录(b)

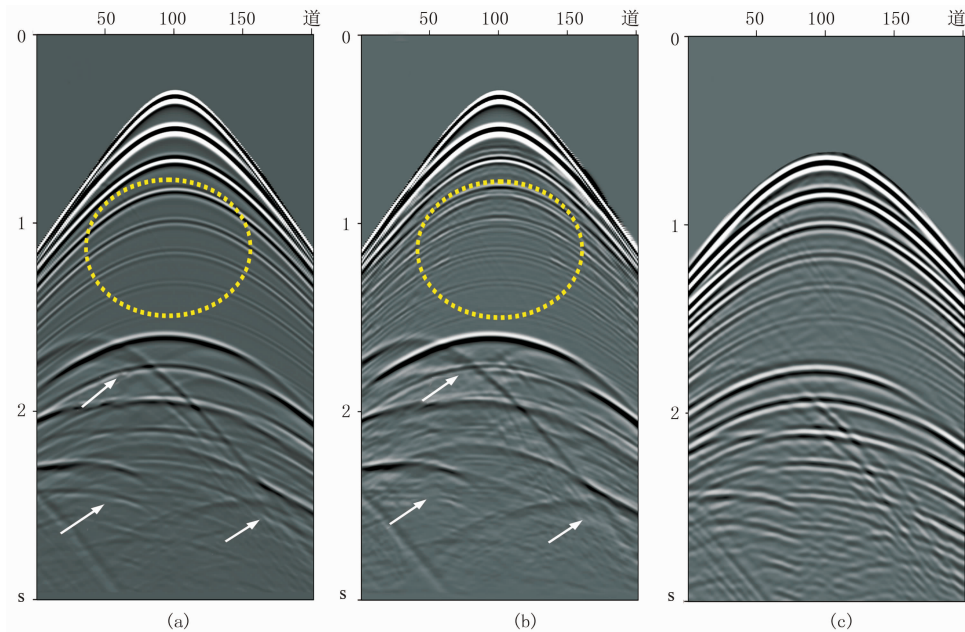


图 9 复杂断层模型 IMP 层间多次波预测结果

(a)直达波切除后的记录; (b)多次波相减结果; (c)预测的层间多次波

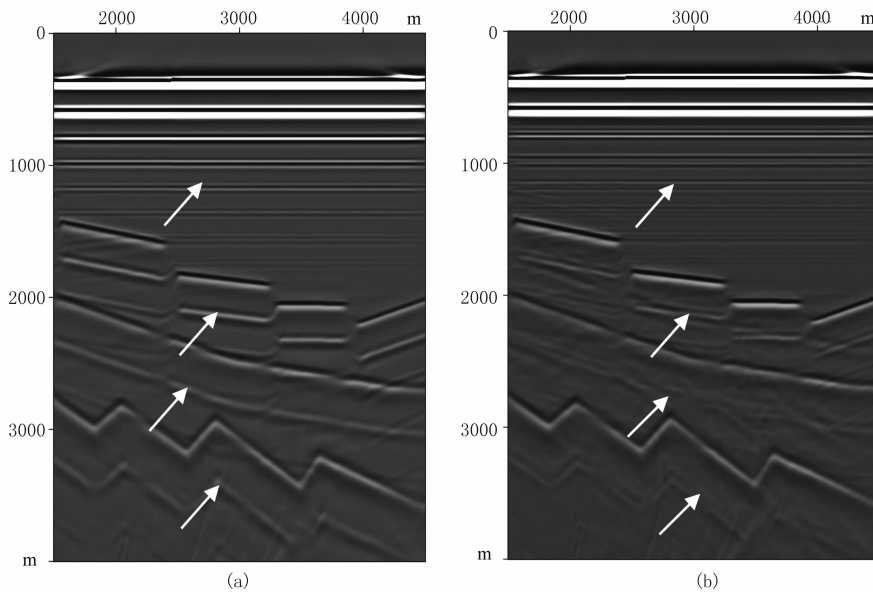


图 10 复杂断层模型层间多次波去除前(a)、后(b)SSF 叠前深度偏移剖面对比

5 结论和认识

本文对数据驱动型 IMP 层间多次波预测的基本原理进行了详细分析,说明其本质是 SRME 算法的扩展,然后对算法的实现过程进行了阐述,最后应用模型数据对该算法进行了测试。测试结果表明,该算法可以准确预测与某一特定层相关的层间多次波。同时有如下几点认识。

(1)简单层状模型和复杂断层模型的层间多次波预测结果说明,IMP 方法与地下介质构造复杂程度无关,不需要提供产生多次波界面以上的速度—深度信息,因此是完全数据驱动的。唯一的难点在于提取产生层间多次波的第一个界面的反射波,利用该算法预测层间多次波,需要自顶向下逐层预测。一般有意义的层间多次波来源于强波阻抗界面,此界面的一次反射可通过动校正,限定时窗切除,然后反动校得到。因此利用该算法预测层间多次波的核心是产生层间多次波界面的识别问题,可通过 VSP 记录和钻井等资料辅助识别。

(2)本文采用分时窗最小平方能量求取局部匹配因子的方法衰减多次波,当一次波与多次波非正交,即波场发生干涉时,或者匹配因子的长度不合适,该相减方法会损伤有效波。因此多次波相减方法的研究至关重要。

(3)本文给出的是二维层间多次波的预测算法,

但很容易扩展到三维,当扩展到三维时,式(5)中的矩阵元素变为向量,其物理意义可以理解为,第二波场项对应的可能的炮检点在平面上对应一系列的网格,对应的射线路径是全方位的。要预测空间某一道的层间多次波,需要对全方位的路径进行三个波场的分解、褶积和互相关,相当于每预测一道的层间多次波,整个工区产生层间多次波界面的一次反射都要参与运算,其运行效率会大大降低。为此,可根据构造的复杂情况选择不同的预测孔径,以减少计算量。另外,算法是分频率计算的,因此该算法可改为并行,以提高计算效率。

(4)因 IMP 方法与 SRME 方法类似,是应用地震记录本身作为预测算子预测层间多次波,因此要求该算子是由反射波(一次和多次)构成,即要求记录中无直达波,折射波或其他的非线性干扰,因此在将实际记录作为算子前,需要对其切除直达波和折射波,去面波或线性干扰,以及消除异常振幅,衰减随机噪声等一系列的预处理,注意该过程的去噪力度可以比常规处理大一些,才能得到较好的预测算子。

参考文献

- [1] 李鹏,刘伊克,常旭等. 多次波问题的研究进展,地球物理学进展,2006,21(3):888-897.
Li Peng, Liu Yike, Chang Xu et al. Progress on the multiple problems. Progress in geophysics, 2006, 21(3):888-897.
- [2] Verschuur D J, Berkhout A J and Wapenaar C P A.

- Adaptive surface-related multiple elimination. *Geophysics*, 1992, 57(9):1166-1177.
- [3] Weglein A B, Shih-Ying Hsu et al. Multiple attenuation; Recent advances and the road ahead. *The Leading Edge*, 2011, 30(8):864-875.
- [4] Luo Yi, Kelamis P G et al. Elimination of land internal multiples based on the inverse scattering series. *The Leading Edge*, 2011, 30(8): 884-888.
- [5] Verschuur D J. *Seismic Multiple Removal Techniques*. Netherlands: EAGE, 2006:7~18.
- [6] Berkhout A J and Verschuur D J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion; Part I - Theoretical considerations. *Geophysics*, 1997, 62(5): 1586-1589.
- [7] Verschuur D J and Berkhout A J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion; Part II-Practical aspects and examples. *Geophysics*, 1997, 62(5): 1596-1611.
- [8] Berkhout A J and Verschuur D J. Removal of internal multiples with the common-focus-point (CFP) approach; Part I - Explanation of the theory. *Geophysics*, 2005, 70(3):V45-V60.
- [9] Verschuur D J and Berkhout A J. Removal of internal multiples with the common-focus-point (CFP) approach; Part II - Application strategies and data examples. *Geophysics*, 2005, 70(3): V61-V72.
- [10] Weglein A B, Gasparotto F A et al. An inverse-scattering series method for attenuating multiples in seismic reflection data. *Geophysics*, 1997, 62(6): 1975-1989.
- [11] 金德刚,常旭,刘伊克. 逆散射级数法预测层间多次波的算法改进及其策略. *地球物理学报*, 2008, 51(4): 1209-1217.
Jin Degang, Chang Xu, Liu Yike. Algorithm improvement and strategy of internal multiples prediction based on inverse scattering series method. *Chinese J Geophys*, 2008, 51(4): 1209-1217.
- [12] Jakubowicz H. Wave equation prediction and removal of interbed multiple. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1998, 17: 1527-1530.
- [13] Wu Zhiming and Dragoset B. Robust internal multiple prediction algorithm. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2011, 30: 3541-3545.
- [14] El-Emam A and Al-Deen K S et al. Advances in interbed multiples prediction and attenuation; Case study from onshore Kuwait. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2011, 30: 3546-3550.
- [15] Roald van Borselen. Data-driven interbed multiple removal; Strategies and examples. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2002, 21: 2106-2109.
- [16] David B. Case studies in 3D interbed multiple attenuation. *The Leading Edge*, 2011, 30(8): 914-918.
- [17] Griffiths M, Hembd J and Prigent H. Applications of interbed multiple attenuation. *The Leading Edge*, 2011, 30(8): 906-912.
- [18] Landa E, Keydar S and Belfer I. Multiple prediction and attenuation using wavefront characteristics of multiple-generating primaries. *The Leading Edge*, 1999, 18(1):60-64.

(本文编辑:金文昱)

作者简介



叶月明 工程师, 1982 年生; 2004 年毕业于中国石油大学(华东)勘查技术与工程专业, 获学士学位; 2008~2009 年在美国加州大学圣克鲁兹分校做访问学者, 主要从事起伏地表情况下的照明补偿方法研究; 2010 年毕业于中国石油大学(华东), 获博士学位, 研究方向是起伏地表情况下的保幅叠前深度偏移成像方法研究; 2010 年起在中国石油杭州地质研究院从事地震资料处理和偏移成像方法研究。

(上接第 243 页)

- Liu Jinjun, Wang Xiutian, Xu Shizhe. A wavelet extraction method based on scanning the phase spectrum of wavelet. *Marine Science*, 2000, 24(6):4-7.
- [9] 张广智,刘洪,印兴耀. 井道旁地震子波精细提取方法. *石油地球物理勘探*, 2005, 40(2):158-163.
Zhang Guangzhi, Liu Hong, Yin Xingyao. Refined wavelet extraction method from near well seismic traces. *OGP*, 2005, 40(2):158-163.
- [10] 孙成禹. 空变地震子波提取方法研究. *石油大学学报(自然科学版)*, 2000, 24(1):77-84.
Sun Chengyu. The study of variation wavelet extraction. *Journal of the University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2000, 24(1):77-84.
- [11] Wiggins. Minimum entropy deconvolution. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 1980, 19(2):14-25.
- [12] 徐伯勋,白旭滨,傅孝毅. 信号处理中的数学变换和估计方法. 北京:清华大学出版社, 2004, 36-38
- [13] 姜丹. 信息论与编码. 安徽合肥:中国科学技术大学出版社, 2001, 188-196

(本文编辑:金文昱)

作者简介



徐刚 助理工程师, 1981 年生; 2013 年毕业于长江大学地质工程专业, 获得硕士学位; 一直在东方地球物理公司新兴物探开发处从事地震资料采集、处理方法研究及野外采集施工设计。