

叶月明, 任浩然, 徐志诚, 等. 海洋单阶次表面多次波分离方法研究[J]. CT 理论与应用研究, 2021, 30(2): 139-147. DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.02.01.
YE Y M, REN H R, XU Z C, et al. Separation of single order marine surface-related multiples[J]. CT Theory and Applications, 2021, 30(2): 139-147. DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.02.01. (in Chinese).

海洋单阶次表面多次波分离方法研究

叶月明¹✉, 任浩然², 徐志诚¹, 李立胜¹, 王力宝¹, 杨存¹

1. 中国石油杭州地质研究院, 杭州 310023
2. 浙江大学地球科学学院, 杭州 310027

摘要: 海洋地震资料普遍发育强能量表面多次波, 传统表面多次波压制技术 (SRME) 能够预测出所有阶次表面多次波, 但是各阶次表面多次波相互混叠。为了能够单独利用不同阶次的表面多次波成像, 降低干涉假象对多次波成像的影响, 需要将不同阶次的表面多次波分离出来。本文提出一种基于扩展 SRME 的海洋单阶次表面多次波分离方法。首先, 应用 SRME 技术预测出混叠的所有表面多次波; 其次, 修改常规 SRME 技术的边界输入条件, 将上一步求得的所有多次波进行升阶次处理; 再次, 预测出混叠的所有表面多次波与其升阶次后的表面多次波匹配相减求得单阶次多次波。以此类推, 能够逐步分离出不同阶次的表面多次波。数值模型和某深海实际资料测试表明本方法的有效性, 不同阶次表面多次波被有效分离, 为后期多次波的利用奠定了基础。

关键词: 单阶次多次波; 多次波分离; 表面相关多次波衰减; 多次波成像

DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.02.01 中图分类号: O 242; P 315 文献标志码: A

海域地区蕴藏着大量的油气资源, 随着我国老区油气产量增长减缓, 面向海洋领域的石油勘探越来越重要。通过野外采集的地震数据处理是目前获取地下构造成像的重要途径, 海洋多次波成像技术是近年来发展起来的一项针对海域地震资料处理的新技术, 对于提高海洋地震资料处理精度有着巨大的潜在应用价值, 而单阶次多次波分离技术是海洋多次波成像技术的前提, 也是多次波成像技术中降低干涉假象的重要手段, 但是, 目前单阶次多次波的分离方法比较匮乏。

多次波处理贯穿着海洋地震资料处理的整个过程, 多次波压制方法与多次波预测方法是相伴而生。传统多次波衰减需要两个步骤, 多次波预测和匹配相减过程。Berkhout^[1]开展了早期的多次波压制方法研究, 提出了反馈模型的概念, 是基于迭代法的表面多次波衰减技术的基础; Verschuur 等^[2]提出了自由表面多次波衰减技术并给出了该技术的实现策略, 这种方法就是目前工业界应用最为普遍的表面多次波压制技术 (surface related multiples elimination, SRME)。随着计算机技术的快速发展, 三维的 SRME 也推向了生产应用^[3]; SRME 技术的假设条件是观测系统规则分布, 而实际的观测系统经常由于障碍物和地质条件等因素的影响不能够满足这种假设, 导致多次波预测不准确。三维广义表面多次波预测技术 (General surface multiple prediction, GSMP) 基于震源与检波点的真实坐

收稿日期: 2021-01-07。

基金项目: 国家自然科学基金 (41874164); 国家科技重大专项 (2017ZX05026-006)。

标,能够准确地预测出非规则观测系统情况下的表面多次波,包括绕射和散射等多次波能量^[4];马继涛等^[5]研究了三维表面多次波压制方法,克服了三维情形下震源和检波器在横测线方向分布过于稀疏的弊端;方云峰等^[6]针对三维 SRME 方法的计算效率偏低的问题,通过优化多次波贡献道集求和的孔径范围内压制表面多次波方法,节省了计算资源;刘伊克等^[7]对一次波成像既波路径偏移方法压制层间多次波进行了研究。逆散射级数法压制层间多次波是由 Weglein^[8]提出的,根据层间多次波具有“低-高-低”的关系,可以模拟出所有层间多次波反射波,其缺点是计算效率非常低;共聚焦点技术也能够压制表面多次波和层间多次波,前提是需要准确的速度场,是一种基于模型驱动的多次波压制方法^[9];Jakubowic^[10]基于地震干涉理论,通过波场间的褶积与相关运算构建层间多次波,Ikelle^[11]建立了一种通过虚同相轴的方式预测层间多次波反射波,避免了每层预测的困难;刘璐等^[12]进一步应用虚同相轴方法对实际资料进行了分析处理。Liu 等^[13]提出了可控阶次多次波逆时偏移技术,在偏移之前通过降阶次的方式分离出单阶次多次波;Li 等^[14-15]利用聚焦变换和 SRME 进行不同阶次多次波分离,但是该方法中的多次正反聚焦变换计算相对耗时。

目前多次波预测方法多数是同时预测出混叠在一块的各阶次多次波,为了能够单独利用不同阶次的表面多次波成像,降低干涉假象对多次波成像的影响,本文主要研究不同阶次的表面多次波的分离方法,基于地震干涉测量理论,修改 SRME 边界条件,通过扩展的 SRME 技术和多次波降阶次的思路,分离出不同阶次的表面多次波。通过 3 层模型和某探区深海实际资料测试表明了本方法的有效性,不同阶次表面多次波被合理有效的分离。

1 SRME 方法基本原理

SRME 方法目前在工业界被广泛应用,尤其是在海洋地震资料处理中是必不可少的去噪环节。SRME 方法在本质上是基于地震干涉理论的一种表面相关多次波预测方法,干涉理论认为两个波场的褶积是其传播路径的和,而两个波场的相关运算则是两个波场传播路径的差。SRME 技术就是通过地震数据间的褶积运算来预测表面相关多次波,是纯数据驱动型多次波压制方法,不需要已知速度场信息。

一阶次多次反射波的传播如图 1 所示,波场在地下经过了两次反射后在地表被接收到,也可以认为是由两个一次反射波的传播路径构成,可以通过这种射线路径关系构建地表和层间多次波,这也就是 SRME 技术的基本原理。

图 2 所示的是 SRME 原理图,从图中可以看出一阶表面相关多次波由一个共炮点道集数据 P 和一个一次反射共检波点道集 X_0 的组合构成。其中 x_s 是震源, x_k 代表一次反射波, x_r 是地下多次反射后的多次波。从图 2 中可以看出,多次波的传播路径是从 x_k 位置在地表反射后又在地下传播,最终在地表 x_r 处被接收到。也可以认为多次波是由两个地表接收到的波场组合而成,即 x_s 传播至 x_k 的波场 $P(x_k, x_s, w)$ 和 x_k 传播至 x_r 的波场 $X_0(x_r, x_k, w)$ 。对于二维情况,考虑到所有地表接收信息的可能性, x_s 传播至 x_r 的表面相关多次波可以表示为下式:

$$\mathbf{M}_{1 \rightarrow N}(x_r, x_s, w) = \int_{x_k}^{x_r} \mathbf{X}_0(x_r, x_k, w) \mathbf{P}(x_k, x_s, w) dx_k, \quad (1)$$

其中, x_r 和 x_s 分别是震源和检波点位置; x_k 是求和的横向位置坐标。 X_0 和 P 分别表示波场的传播路径,沿地表坐标位置 x_k 求和就可以得到所有炮点和检波点间产生的多次反射波,也就是求取了所有震源 x_s 位置激发,检波器 x_r 处接收到的所有阶次多次反射波 $\mathbf{M}_{1 \rightarrow N}(x_r, x_s, w)$ 。

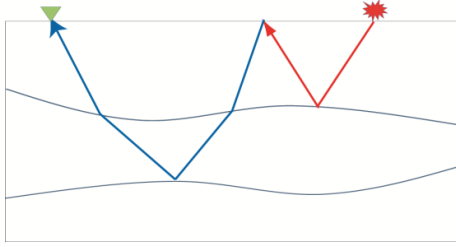


图 1 一阶表面相关多次波的构成

Fig.1 First order surface related multiple

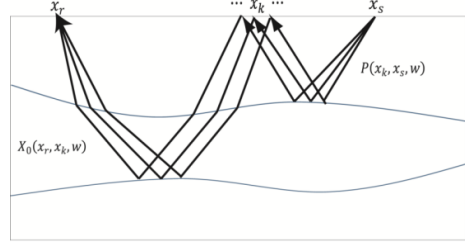


图 2 SRME 方法原理图

Fig.2 Schematic diagram of SRME

对于所有的震源和检波点对，式 (1) 可以表示为矩阵相乘的形式，即

$$\mathbf{M}_{1 \rightarrow N} = \mathbf{X}_0 \cdot \mathbf{P}, \tag{2}$$

其中， \mathbf{P} 代表了所有一次反射波， $\mathbf{M}_{1 \rightarrow N}$ 代表了所有阶次多次反射波，其中包含了 1 阶表面相关多次波 \mathbf{M}_1 至 N 阶自由表面相关多次波 \mathbf{M}_N ，

$$\mathbf{M}_{1 \rightarrow N} = \mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2 + \dots + \mathbf{M}_N, \tag{3}$$

实际地震资料处理过程中，最开始的 \mathbf{X}_0 和 \mathbf{P} 是不知道的，一般是利用包含一次反射波和所有阶次表面多次波的数据 $\mathbf{D} = \mathbf{P} + \mathbf{M}_{1 \rightarrow N}$ 来替代 \mathbf{X}_0 和 \mathbf{P} ，工业生产中的 SRME 表示为式 (4)

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{1 \rightarrow N} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{D} \\ \mathbf{P} = \mathbf{D} - \alpha \cdot \mathbf{M}_{1 \rightarrow N} \end{cases}, \tag{4}$$

其中， α 是相减运算中的自适应的匹配因子，通过 (4) 式可以计算出所有阶的自由表面相关多次波 $\mathbf{M}_{1 \rightarrow N}$ 和一次反射波 \mathbf{P} ，这就是 SRME 方法中的预测相减过程，在实际应用过程中的 SRME 技术通过迭代的方式来实现，可以表示为式 (5)：

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{1 \rightarrow N} = \mathbf{D}^i \cdot \mathbf{D}^i \\ \mathbf{D}^{i+1} = \mathbf{D} - \alpha \cdot \mathbf{M}_{1 \rightarrow N} \end{cases}, \tag{5}$$

其中， i 表示迭代计算次数，多次迭代后的 \mathbf{D}^{i+1} 就是一次反射波场 \mathbf{P} ，SRME 技术中的多次波预测与相减过程可以表示为图 3 所示，每一次的迭代都包含了表面多次波预测与自适应匹配相减的过程。

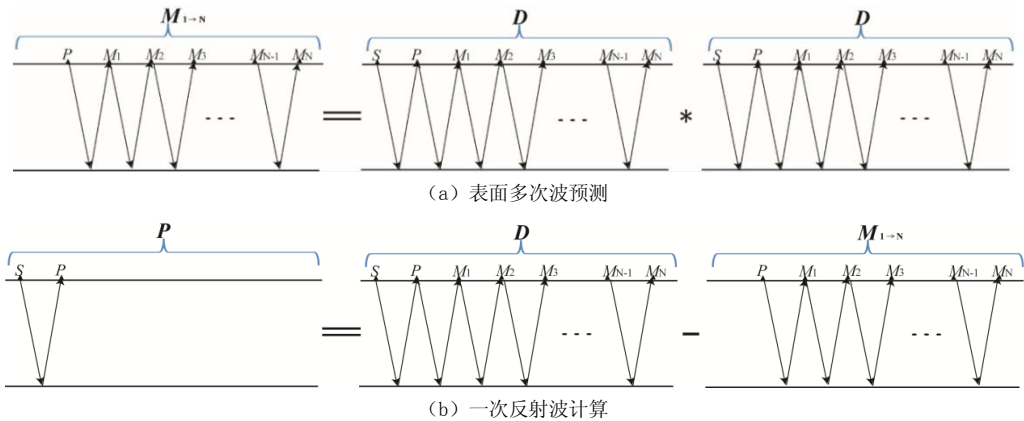


图 3 SRME 实现过程

Fig.3 Implementation of SRME

2 单阶次表面多次波分离技术

通过式 (4) 的 SRME 技术预测出混叠在一块的所有阶次表面相关多次波 $M_{1 \rightarrow N}$ ，在此基础上进行不同阶次的多次波分离。本文修改 SRME 技术的边界条件，也就是 SRME 技术的输入，将预测出的 1 阶至 N 阶表面多次波 $M_{1 \rightarrow N}$ 与一次反射波 P 设定为 SRME 方法第一步的输入，预测出 2 阶至 N 阶表面相关多次反射波 $M_{2 \rightarrow N}$ ，再利用 $M_{1 \rightarrow N}$ 与 $M_{2 \rightarrow N}$ 的匹配相减，求得第 1 阶的表面相关多次 M_1 ，如方程 (6) 所示：

$$\begin{cases} M_{2 \rightarrow N} = M_{1 \rightarrow N} \cdot P \\ M_1 = M_{1 \rightarrow N} - \alpha \cdot M_{2 \rightarrow N} \end{cases} \quad (6)$$

按照类似的方法，第 2 阶自由表面相关多次反射波的预测表达式如下：

$$\begin{cases} M_{3 \rightarrow N} = M_{2 \rightarrow N} \cdot P \\ M_2 = M_{2 \rightarrow N} - \alpha \cdot M_{3 \rightarrow N} \end{cases}, \quad (7)$$

其中， $M_{3 \rightarrow N}$ 为混叠在一块的第 3 阶至第 N 阶的表面相关多次波。第 $N-2$ 阶表面相关多次反射波的求取表示为：

$$\begin{cases} M_{N-1} = M_{(N-2) \rightarrow N} \cdot P \\ M_{N-2} = M_{(N-2) \rightarrow N} - \alpha \cdot M_{(N-1) \rightarrow N} \end{cases} \quad (8)$$

通过以上步骤可以逐步预测出不同阶次的表面相关多次波，单阶表面相关多次反射波的预测方法与 SRME 技术类似，不需要已知速度场，并且都是纯数据来驱动，适合于实际地震资料的处理，如图 4 和图 5 分别是第 1 阶和第 2 阶自由表面相关多次波的分离过程。

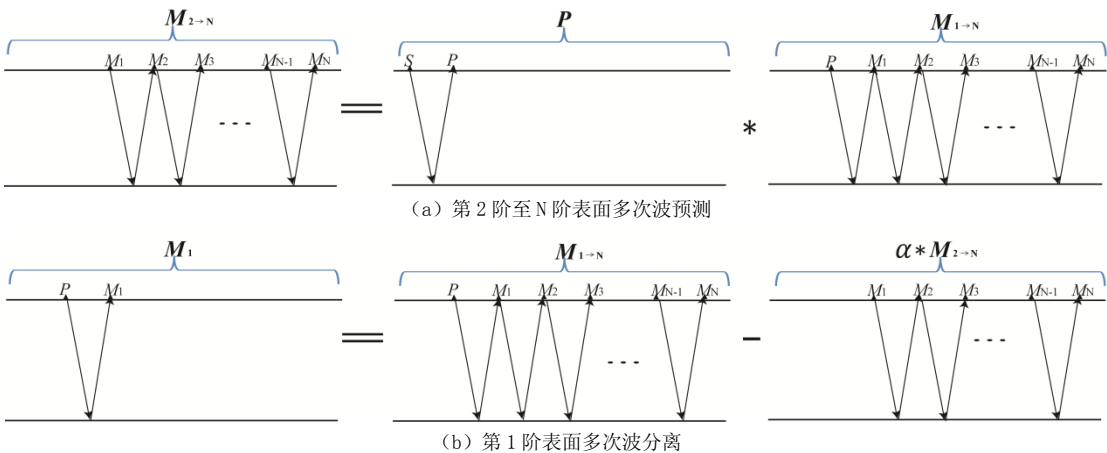


图 4 自由表面相关多次波 (1 阶) 预测方法示意图

Fig.4 Predication of first order surface related multiple

3 平层模型测试

为了验证本方法的有效性，对单个平层数值模型开展了测试处理，该模型共包含两层，第 1 层和第 2 层的速度分别是 1 500 m/s 和 2 500 m/s。模型横向长度是 4 km，最大深度是 2.5 km。

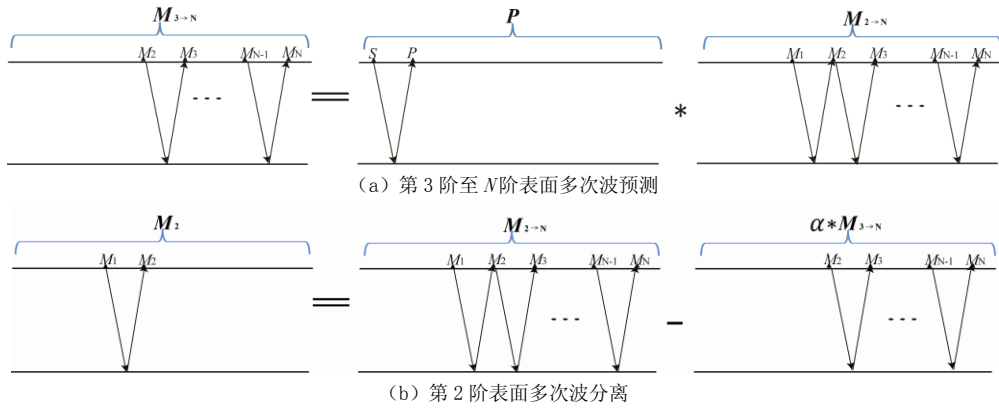


图5 自由表面相关多次波(2阶)预测方法示意图

Fig.5 Predication of second order surface related multiple

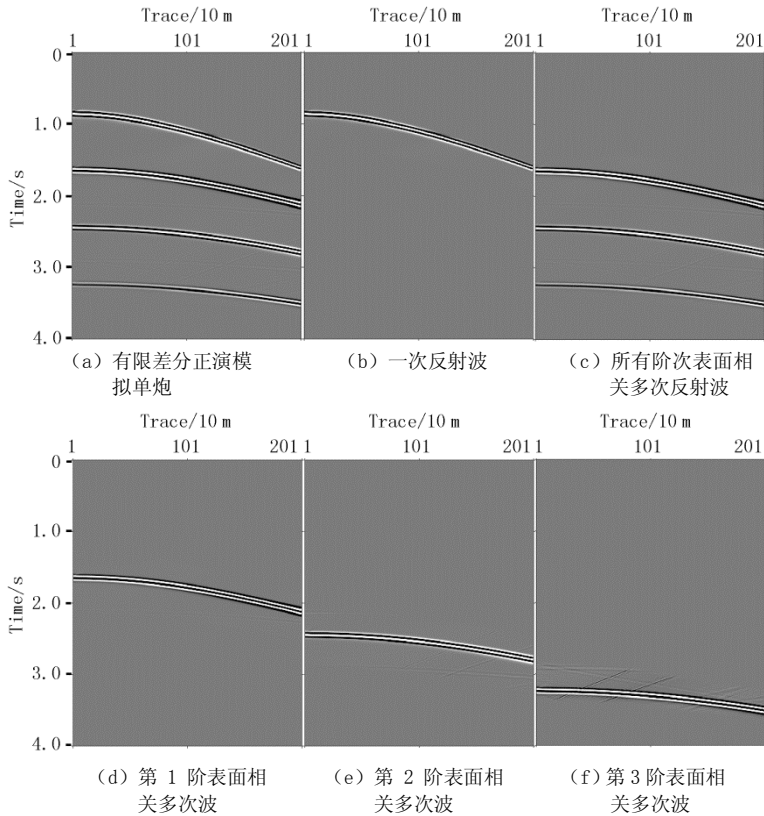


图6 单层模型测试

Fig.6 Single layer model test

共 200 炮，每炮 201 道接收，炮间距和道间距都是 10m。应用有限差分的正演模拟，正演出包含一次反射波和所有阶次的多次反射波的单炮数据（图 6 (a)），4ms 采样，记录时间为 4s，一次反射波的零偏移距在 0.8s 位置处，第 1 阶自由表面相关多次波零偏移距位置在 1.6s 的时间，第 2 阶表面相关的多次反射波在 2.4s 位置处，第 3 阶的表面相关多次反射波在 3.2s 位置。

通过 SRME 技术能够分离出一次波 (图 6 (b)) 和所有阶次表面相关的多次反射波 (图 6 (c))。基于本文方法, 分离出第 1 阶、第 2 阶和第 3 阶自由表面相关多次反射波如图 6 (d) ~图 6 (f) 所示, 不同阶次的表面相关多次波都得到了准确地分离。

4 三层模型测试

上节两层模型测试处理验证了多次波分离方法的正确性, 为了进一步测试其对复杂模型的适用性, 也就是当一次反射波与多次反射波混合的情况。建立了有 3 个层界面的数值模型, 各地层的速度分别为 2 000 m/s, 2 200 m/s, 2 400 m/s 和 2 800 m/s。

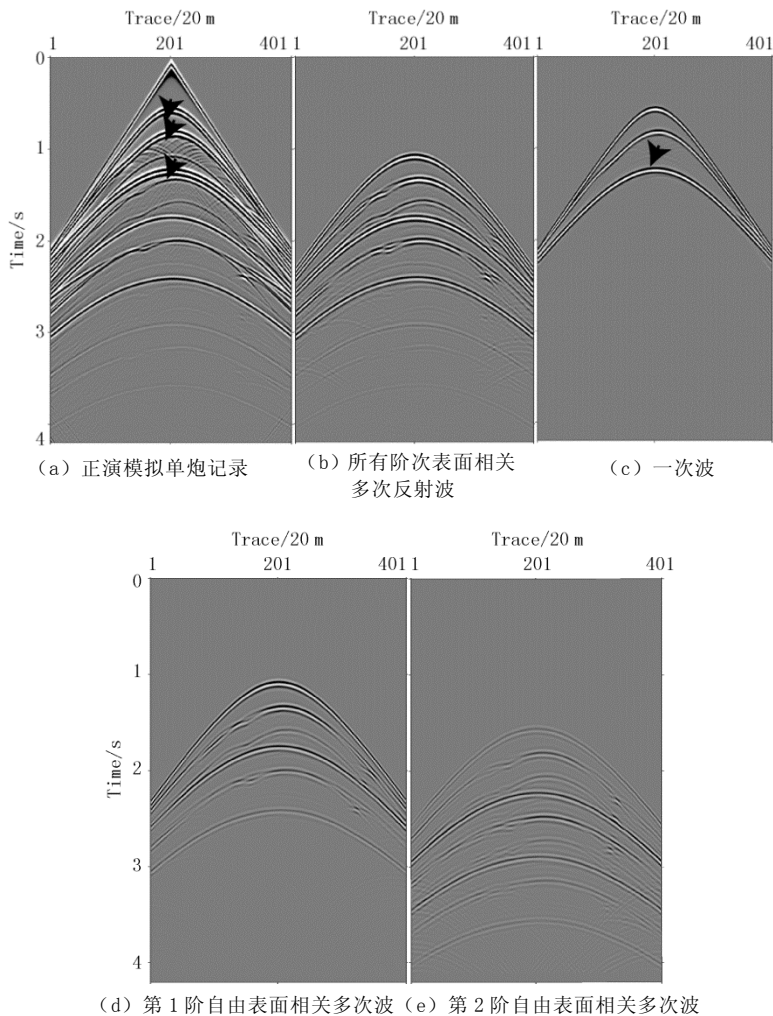


图 7 三层模型测试

Fig.7 Three layers model test

有限差分正演模拟得到单炮记录如图 7 (a) 所示, 记录时间是 4.2 s, 采样率是 4 ms, 每炮 401 道接收, 道间距和炮间距都是 20 m, 总共 301 炮。图 7 (a) 中箭头所指的是 3 个反射界面的一次波, 剩余的是直达波和多次反射波, 通过 SRME 技术预测出表面多次波如

图 7 (b) 所示，随着传播的距离变远，多次波能量也在减弱。图 7 (c) 是匹配相减后求得的一次波，其中仍然有部分多次波残留 (图 7 (c) 箭头所示)，这也会导致在后期应用 1 阶次表面多次波时会产生误差，图 7 (d) 和图 7 (e) 分别是分离出的第 1 阶次和第 2 阶次表面相关多次波，该 3 层模型测试表明本文方法也能够较好的分离出复杂模型条件下的单阶次表面相关多次波。

5 深海实际资料处理

模型测试验证了本文单阶次表面相关多次反射波分离方法的正确性，而对于实际地震资料的处理来说，由于受到实际构造情况和采集因素等影响，情况更为复杂，为了进一步测试实际处理效果，对某深海探区的实际数据进行了试处理。

该工区位于我国的深海水域，区域油气资源丰富，是我国海域油气勘探的重要区域。处理过程中，选取海底较为稳定的反射段试处理，该局部范围内海洋多次波能量较强，近距离强反射层之间产生多路径的层间多次反射波，该海域地震资料存在强海底反射的长周期表面相关多次反射波，适用于本方法。该区海底深度大约 1 km 左右。

图 8 (a) 是压制涌浪与异常振幅后的单炮记录，其中既含有一次反射波 P，也包含第 1 阶、第 2 阶和第 3 阶表面相关的多次反射波，如图 8 (a) 中的 M_1 ， M_2 和 M_3 所示。图 8 (b) 和图 8 (c) 是利用 SRME 方法预测得到的一次反射波和所有阶次的多次反射波，与图 8 (a) 中的原始单炮对比可以看出，预测出的第 1

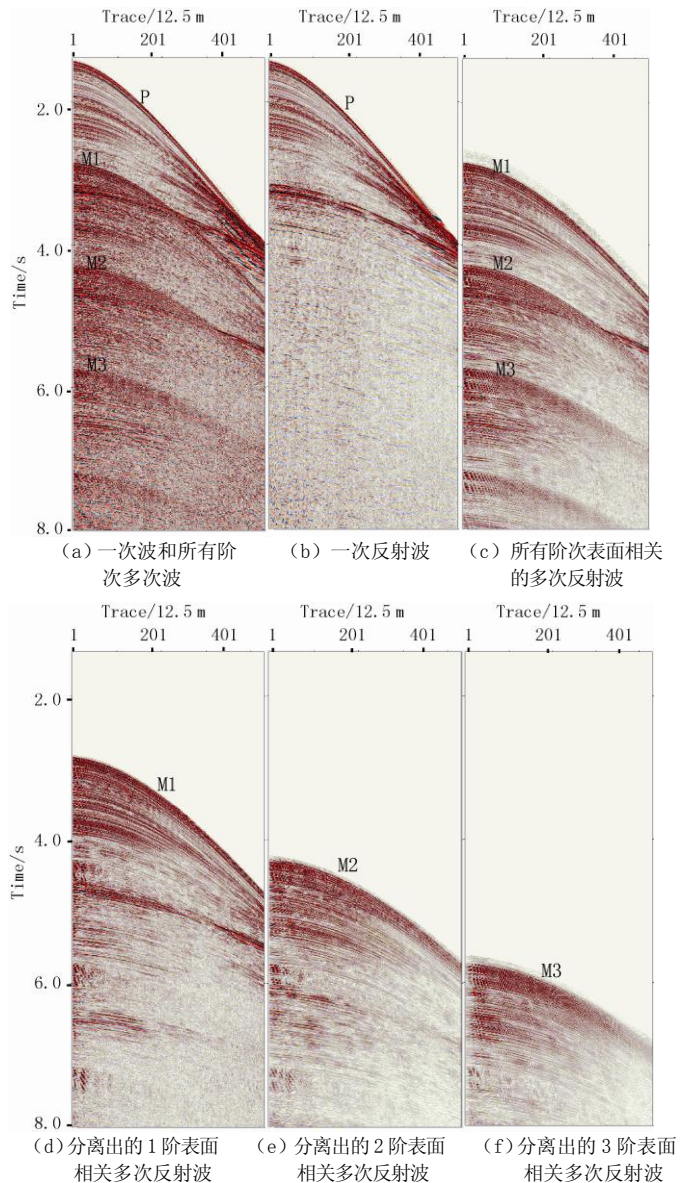


图 8 海洋地震资料处理测试

Fig.8 Marine seismic data test

阶多次波 M_1 ，二阶多次波 M_2 和三阶多次波 M_3 是一致的。图 8 (d) ~ 图 8 (f) 分别是利用本文方法分离得到的 1 阶、2 阶和 3 阶表面相关的多次反射波，各单阶次表面多次波都能够被准确地从原始炮集数据中分离，该实际资料测试处理也表明了该方法对于实际资料的适用性。

6 结论

多次波广泛的存在于海域地震资料中，利用好多次波所携带的反射信息对于提高海洋地震资料处理品质有着巨大的潜在价值。单阶次表面多次波分离技术是多次波应用的前提，合理有效的多次波分离技术为多次波的利用奠定基础，尤其是支撑了分阶次多次波成像方法的应用，降低了多次波成像技术中的假象影响。

本文通过修改传统 SRME 技术的边界条件，利用扩展 SRME 方法，从原始单炮中逐级分离出了不同阶次的表面多次波。在模型和某探区深海实际资料处理中都能够准确地将单阶次多次波分离，与 SRME 技术类似，属于纯数据驱动型，具有较强的稳定性和实用性，对于海域地震资料处理有着间接的应用价值。

参考文献

- [1] BERKHOUT A J. Seismic migration, imaging of acoustic energy by wave field extrapolation, Part A: Theoretical aspects[M]. Amsterdam: Elsevier, 1982.
- [2] VERSCHUUR D J, BERKHOUT A J, WAPENAAR C P A. Adaptive surface-related multiple elimination[J]. Geophysics, 1992, 57(9): 1166-1177.
- [3] 石颖, 王维红, 李莹, 等. 基于波动方程三维表面多次波预测方法研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(6): 2023-2032.
SHI Y, WANG W H, LI Y, et al. 3D surface-related multiple prediction approach investigation based on wave equation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(6): 2023-2032. (in Chinese).
- [4] DRAGOSSET B, YU M, ZHAO W. 3D general surface multiple prediction: An algorithm for all surveys[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2008: 2426-2430.
- [5] 马继涛, 陈小宏, 薛亚茹. 三维表面多次波压制方法[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(1): 33-40.
MA J T, CHEN X H, XUE Y R. 3D surface-related multiple elimination[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(1): 33-40. (in Chinese).
- [6] 方云峰, 柯本喜, 李鹏, 等. 优化多次波贡献道集求和孔径压制三维表面多次波[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(5): 848-853.
FANG Y F, KE B X, LI P, et al. A fast 3D surface related multiple elimination approach based on aperture optimization[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(5): 848-853. (in Chinese).
- [7] 刘伊克, 常旭, 王辉, 等. 波路径偏移压制层间多次波的理论与应用[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 589-595.
LIU Y K, CHANG X, WANG H, et al. Internal multiple removal and its application by wavepath migration[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(2): 589-595. (in Chinese).
- [8] WEGLEIN A B, GASPAROOTO F A, CARVALHO P M, et al. An inverse-scattering series method for attenuation multiples in seismic reflection data[J]. Geophysics, 1997, 62(6): 1975-1989
- [9] 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.
- [10] JAKUBOWIC Z H. Wave equation prediction and removal of interbed multiple[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1998: 1527-1530.
- [11] IKELLE L T. A construct of internal multiples from surface data only: The concept of virtual seismic events[J]. Geophysical Journal International, 2006, 164(2): 383-393.

- [12] 刘璐, 胡天跃, 安圣培, 等. 虚同相轴法预测地震层间多次波在实际应用中的可行性分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017, 53(1): 26-36.
LIU L, HU T Y, AN S P, et al. Feasibility analysis on practical application of virtual events method in predicting seismic interbed multiples[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2017, 53(1): 26-36. (in Chinese).
- [13] LIU Y K, LIU X J, OSEN A, et al. Least-squares reverse time migration using controlled-order multiple reflections[J]. Geophysics, 2016, 81(5): S347-S357.
- [14] LI Z N, LI Z C, WANG P, et al. Reverse time migration of multiples based on different-order multiple separation[J]. Geophysics, 2017, 82(1): S19-S29.
- [15] LI Z N, LI Z C, WANG P. Separation of primaries and different-order multiples based on focal transform and SRME[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2015: 4590-4593.

Separation of Single Order Marine Surface-related Multiples

YE Yueming¹✉, REN Haoran², XU Zhicheng¹,
LI Lisheng¹, WANG Libao¹, YANG Cun¹

1.PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, China

2.School of Earth Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract: High energy surface multiples are commonly developed in marine seismic data. Traditional surface multiples suppression (SRME) can predict all order surface multiples, but surface multiples were stack together. In order to utilize different order surface multiple independently to image subsurface structure and reduce the influence of interference, it is necessary to separate different order surface multiples. In this paper, we proposed a way of separating single order surface related multiple based on extended SRME. First, all order surface related multiples were predicted by SRME. Second, the boundary conditions of conventional SRME were modified, and the predicted surface multiples from the first step were updated. Third, single order surface multiple can be obtained by the adaptive subtraction between multiples from the first step and the second step by which surface multiples of different orders can be separated gradually. Numerical model and a deep-sea real data test show the effectiveness of this method. Different order multiples were separated effectively, which supports the application of multiples imaging technology.

Keywords: single order multiple; multiples separation; SRME; multiples imaging



作者简介: 叶月明[✉] (1982—), 博士, 中国石油杭州地质研究院高级工程师, 主要从事海洋地震资料处理方法研究工作, E-mail: yeym_hz@163.com。