

文章编号: 1001-1749(2023)03-0344-07

基于逆散射级数的自由表面多次波压制方法及其应用

杨金龙, 蔡杰雄, 张广利

(中石化 石油物探技术研究院有限公司, 南京 211103)

摘要: 由于海平面的存在, 海洋勘探中自由表面多次波非常发育且能量强, 掩盖了有效信号, 严重影响速度的准确拾取及地层成像质量。多次波的压制一直是海洋地震资料处理的重点和难点, 也是海洋地震勘探成功的关键因素之一。因此针对自由表面多次波发育特点, 这里推导了逆散射级数法自由表面多次波压制方法, 并改进了原有的自由表面多次波压制流程, 在逆散射级数法预测自由表面多次波前后消除子波的影响, 来提高多次波的预测精度, 从而降低对自适应相减的依赖, 实现多次波的精确压制。模型和实际资料应用效果表明了方法的有效性和适用性。

关键词: 逆散射级数; 自由表面多次波; 子波; 海洋资料; 多次波压制

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.03.08

0 引言

多次波是海洋资料的主要噪声之一, 是困扰海上资料处理和成像的最大问题。多次波的存在降低地震资料的分辨率, 造成了构造假象, 严重影响地震资料成像的真实性及可靠性。因此有效地消除或压制多次波是海洋地震资料处理的一个关键环节。现有的多次波压制方法可分为两大类^[1]: ①基于多次波和一次波之间特性差异的滤波法, 在不同变换域中用滤波法将多次波滤除, 从而压制多次波, 包括预测反褶积法、拉东变换法、F-K 滤波法等^[2], 这类方法计算量小, 效率高, 易于实现, 但不适用于复杂的地下构造, 且易损伤有效波; ②基于波动理论的预测相减法, 这类方法通过反演或模拟来预测的多次波模型, 然后把预测的多次波模型从原始资料中利用自适应相减法去除, 以达到压制多次波的目的, 主要包括反馈迭代法^[3]、逆散射级数法^[4], 这类方法几乎不需要先验估计, 适应任意复杂的地下结构, 但计

算量大, 对数据预处理要求高。

针对自由表面多次波压制, 反馈迭代法由于没有去除震源鬼波, 仅可以预测出多次波准确的时间和近似的振幅, 而逆散射级数法完全数据驱动, 可以预测出多次波准确的时间和振幅, 然后通过直接相减压制多次波。逆散射级数法从 Carvalho 等^[5]提出以来得到了迅速的发展; Matson 等^[6]在海洋资料应用中取得了较好的效果; Zhang 等^[7]研究了鬼波对逆散射级数法预测自由表面多次波的影响; 李翔等^[8]分析了逆散射级数法在实际应用中的子波估计和近道波场恢复问题; Yang 等^[9]和 Zhao 等^[10]分析了震源子波和辐射方向模式对自由表面多次波预测的影响, 改进了逆散射级数法多次波预测的精确度; Araujo 等^[11]把逆散射级数法推广到层间多次波的压制; Wu 等^[12]验证了在衰减地震介质中逆散射级数法层间多次波预测的有效性; 杨金龙等^[13]通过分析震源子波和辐射方向模式对层间多次波预测的影响, 提高了逆散射级数法层间多次波预测的精度; 李东庆等^[14]进一步讨论了在复杂陆地地震资料中逆

收稿日期: 2022-11-10

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金(U19B6003)

第一作者: 杨金龙(1981-), 男, 博士后, 副研究员, 主要从事地震资料处理中的鬼波和多次波压制方面的研究, E-mail: yangjl.swty@sinopec.com.

散射级数法的有效应用; Wapenaar 等^[15]首次利用 Marchenko 算法压制多次波; Slob 等^[16]给出一种利用 Marchenko 算法一步压制自由表面多次波和层间多次波的策略; 宋欢等^[17]和 Li 等^[18]基于深度神经网络进行了多次波初步压制测试。

笔者从逆散射级数出发, 从中选取只与自由表面多次波相关的子级数, 推导出逆散射级数法自由表面多次波压制方法, 并改进了原有的自由表面多次波压制流程, 在多次波预测前、后消除子波的影响, 来提高多次波的预测精度, 从而降低对自适应相减的依赖, 实现多次波的精确压制。最后通过模型和实际数据对算法的有效性和适用性进行了验证。

1 基本原理

逆散射级数在地球物理勘探中的应用由 Weglein^[4-5]提出:

$$D = G_0 V_1 G_0 \quad (1)$$

$$0 = G_0 V_2 G_0 + G_0 V_1 G_0 V_1 G_0 \quad (2)$$

$$0 = G_0 V_3 G_0 + G_0 V_1 G_0 V_2 G_0 + G_0 V_2 G_0 V_1 G_0 + G_0 V_1 G_0 V_1 G_0 V_1 G_0 \quad (3)$$

⋮

其中: D 采集数据; G_0 为背景介质中的格林函数; V_n 为数据 D 的 n 阶方程式。

我们从逆散射级数中分析提取只与自由表面多次波相关的子级数。自由表面多次波是指地震波至少在自由表面(即海平面)发生一次下行反射的波, 下行反射的次数为多次波的阶数。在正演的过程中如果某一项产生特定的信号, 那么在反演的过程中这一项将会去除这些特定信号(例如如果没有海平面, 那么在海洋地震资料中就不会有鬼波和自由表面多次波)。在参考介质中的格林函数 G_0 可以分为两项: ①从震源直接传播到接收器 G_0^d ; ②从震源向上传播, 然后经过海平面反射到接收器 G_0^{FS} , 如图 1 所示。因此在反演中 G_0^{FS} 关系着鬼波和多次波的去除。首先, 从数据 D 中去除鬼波, 在波数-频率域中公式(1)除以 G_0 再乘上 G_0^d 可得式(4)。

$$D'_1 = G_0^d V_1 G_0^d \quad (4)$$

然后, 从去除鬼波后的数据 D'_1 出发, 根据二阶逆散射级数(公式(2))可以得到由于海平面存在产生的一阶自由表面多次波为式(5)。

$$D'_1 = G_0^d V'_2 G_0^d = -G_0^d V_1 G_0^{FS} V_1 G_0^d \quad (5)$$

其中, V'_2 由于海平面引起的 V_2 的一部分。以此类推, 可以通过高阶逆散射级数得到相应的高阶自

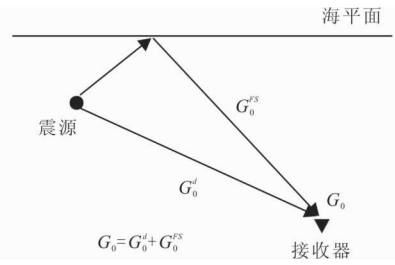


图 1 海平面存在时的格林函数示意图

Fig. 1 Green's function in the present of sea surface

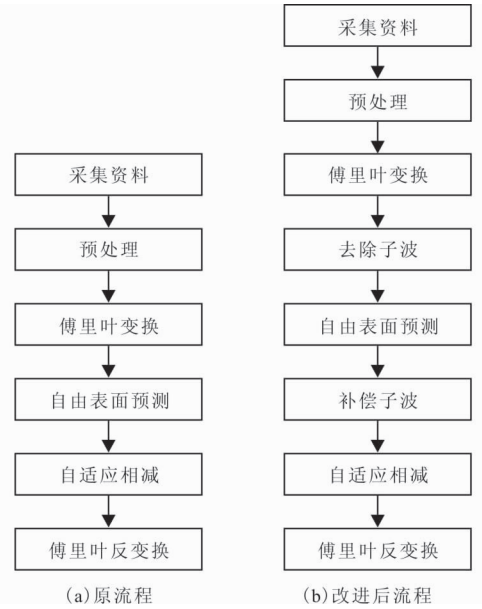


图 2 逆散射级数自由表面多次波压制处理流程

Fig. 2 Original and modified of processing flow of inverse scattering series free-surface multiple removal

由表面多次波, 归纳可得

$$D'_n = G_0^d V'_n G_0^d = -G_0^d V_1 G_0^{FS} V'_{n-1} G_0^d \quad (6)$$

$$n \geq 2$$

最后, 去除鬼波和全部自由表面多次波后数据为式(7)。

$$D' = \sum_{n=1}^{\infty} D'_n \quad (7)$$

公式(6)的展开表达式为式(8)。

$$D'_n(k_g, k_s, \omega) = \frac{1}{i\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk_q e^{iq(\epsilon_g + \epsilon_s)} D'_1(k_g, k, \omega) \cdot D'_{n-1}(k, k_s, \omega) \quad (8)$$

$$n \geq 2$$

其中: k_s 和 k_g 为震源和检波器的水平波数; q 为垂向波数; ϵ_s 和 ϵ_g 为震源和检波器的深度。只需要输入震源子波和鬼波压制后的地震数据, 逆散射级数法即可预测出自由表面多次波, 无需地下结构信息和速度模型。

在自由表面多次波预测过程中有两个子波进行褶积,所以预测的层间多次波波形和振幅发生了很大变化,使同相轴变“胖”并使能量差异变大,因此子波的存在对自由表面多次波预测的准确性有很大影响。笔者进一步改进自由表面多次波处理流程,如图 2 所示,在自由表面多次波预测前后消除子波的影响来提高预测的准确性。因此在自由表面多次波预测前首先对数据消除子波影响,

$$D'_1(\omega) = D(\omega)/A(\omega) \quad (9)$$

其中, $A(\omega)$ 为震源子波,进一步消除鬼波影响得到 D'_1 。带入到公式(8)预测多次波后,再补偿子波得到最终的多次波预测结果,

$$M_n(k_g, k_s, \omega) = A(\omega)D'_n(k_g, k_s, \omega) \quad (10)$$

逆散射级数法预测自由表面多次波的优点在于:①数据驱动;②无需已知地下介质信息和速度模型,适用于各种复杂的地形和地质情形;③理论上可以预测出自由表面多次波准确的时间和振幅,这在实际生产中可以减少对自适应相减法的依赖。

2 实例分析

2.1 模型数据应用

首先利用一个简单层状模型验证和分析逆散射级数法自由表面多次波压制算法。该模型(图 3)有一个反射界面在 300 m,震源在 7 m,检波器在 9 m,震源采用主频 25 Hz 的雷克子波,共 1 601 道,道间距为 3 m,采样间隔为 0.004 s,记录时间为 2 s。

图 4(a)为模拟数据,包含一个一次波和一阶、二阶自由表面多次波。图 4(b)为利用原有 ISS 处理流程预测的自由表面多次波,原有流程忽略了子波的影响,预测的自由表面多次波走时准确,但是振幅和波形差异较大,如图 5(b)所示。通过直接相减后无法消除多次波干扰如图 4(c)所示,必须通过自适应相减才能尽量压制多次波。图 4(d)为改进的 ISS 处理流程预测的自由表面多次波,可以看出,预测的自由表面多次波走时和振幅完全准确(图 5(c)),可以通过直接相减消除多次波干扰,如图 4(e)所示。图 5(a)为从模拟数据图 4(a)中抽取的中间道的自由表面多次波(0.75 s~1.05 s),图 5(b)和图 5(c)分别为从原有(图 4(b))和改进(图 4(d))的流程预测的自由表面多次波单道数据。可以看出,改进的流程可以预测准确的多次波模型,通过直接相减即可消除多次波干扰,而原有的流程必须依赖自适应相减消除多次波。在实际资料中,改进的流程也可以尽量减少对自适应相减法的依赖。在测

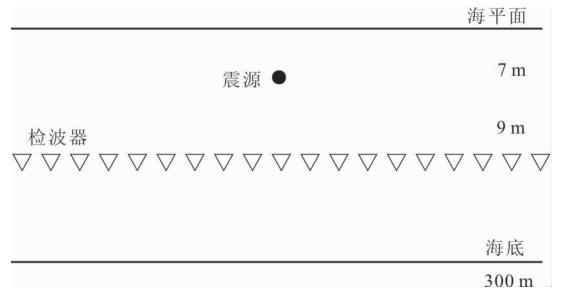


图 3 简单层状变速度模型

Fig. 3 Layered variable velocity model

试过程中,只需输入模拟数据,无需已知地下结构和速度模型,因此该方法完全数据驱动。模型数据测试验证了逆散射级数法的有效性,提高了多次波预测的准确性。

2.2 实际数据应用

进一步通过实际地震数据对改进的流程进行验证。海洋某工区数据,震源和拖缆深度分别为 7 m 和 9 m,水深为 400 m,采样间隔为 2 ms,记录长度为 8 s,每炮 480 道,道间距为 12.5 m,拖缆长为 6 km,最小偏移距为 100 m。该工区海底较为平缓,偶有起伏,自由表面多次波非常发育,主要发育在 1 s~3 s 之间,能量强,与一次波混叠在一起,湮没了中层、深层的有效反射波。本工区发育有两组能量非常强的一阶自由表面多次波,影响了地层成像品质,造成综合解释的困难。

图 6(a)为多次波压制前 CPM 道集,一次波校正后,可以看到下弯的较强自由表面多次波。图 6(b)和图 6(c)分别是通过原有和改进的流程多次波压制后单炮,可以看出,利用原有流程压制后,多次波还有部分残留,而用改进的流程压制后,多次波基本得到消除。图 7(a)为多次波压制前速度谱,图 7(b)和图 7(c)分别是通过原有和改进的流程多次波压制后速度谱。从速度谱上看,原有流程压制后,黑色方框内的多次波能量得到大部分压制,还有少量残余,而用改进的流程压制后,黑色方框内的多次波能量基本得到消除。图 8(a)为多次波压制前叠加剖面,图 8(b)和图 8(c)分别是通过原有和改进的流程多次波压制后叠加剖面。原有和改进的流程都有效消除红色方框内多次波干扰,而在红色箭头处改进的流程多次波压制更彻底,有效改进了目的层成像质量。总之,通过模型和实际数据的处理,验证了改进的逆散射级数法流程对自由表面多次波预测和压制的有效性,提高了地震资料目标区的分辨率和成像品质,提高了解释的可靠性。

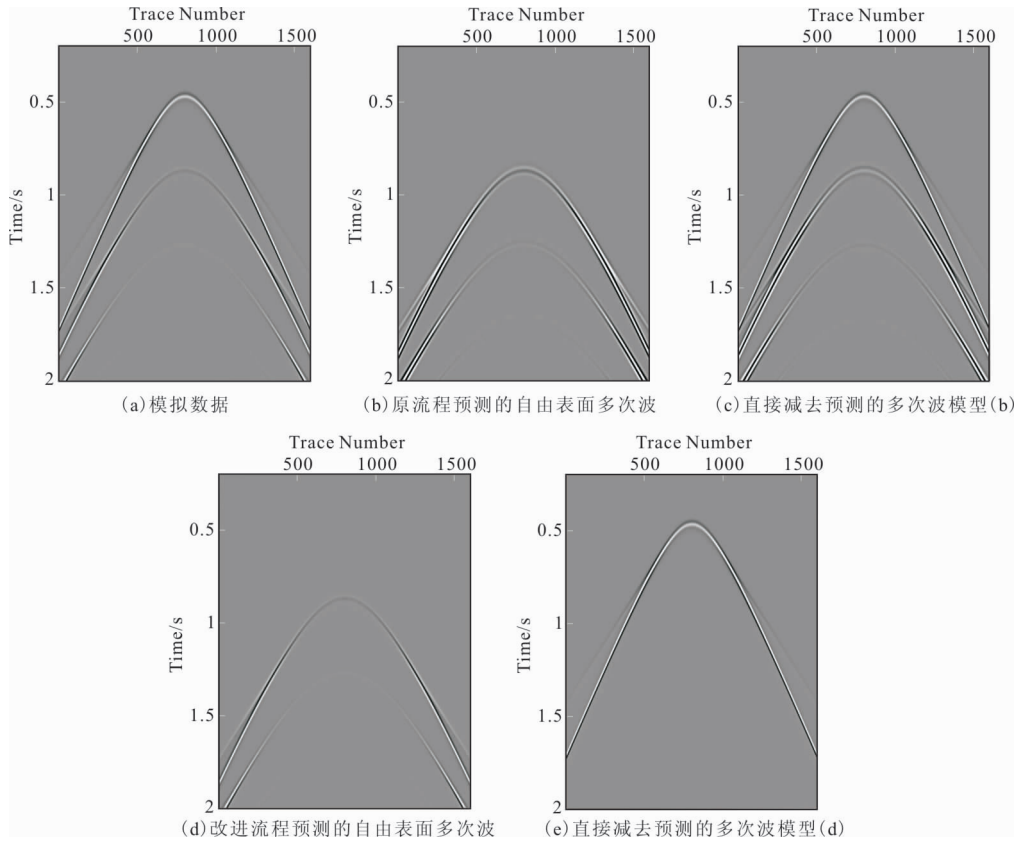


图 4 模型数据应用效果

Fig. 4 Application result on layered model

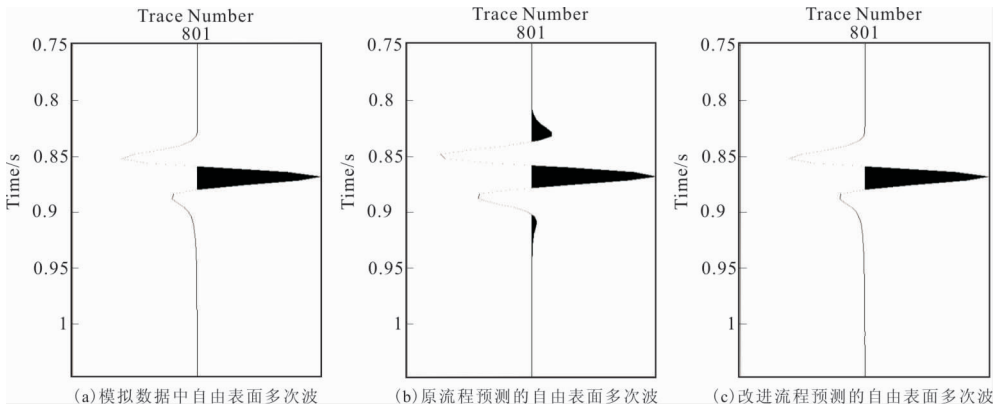


图 5 模型数据单道对比

Fig. 5 Trace comparison on synthetic data

3 结论和认识

逆散射级数法自应用到地球物理多次波处理领域以来,一直是多次波研究的重点方法,笔者针对自由表面多次波的压制问题,得到逆散射级数自由表面多次波压制方法,进一步通过改进原有的多次波处理流程提高多次波的预测精度,从而降低对自适

应相减法的依赖,实现了多次波的有效压制。模型和实际资料的测试结果表明,改进流程能有效压制自由表面多次波,改善地层成像质量,从而为综合解释和目标评价提供更可靠的资料保障。

多次波的处理一直是地震资料处理中难点和关键步骤,数据驱动的方法对数据质量的要求越来越高,对品质差的数据,精细的预处理必不可少,但是压制效果仍有待提高,因此有必要进一步提高算法

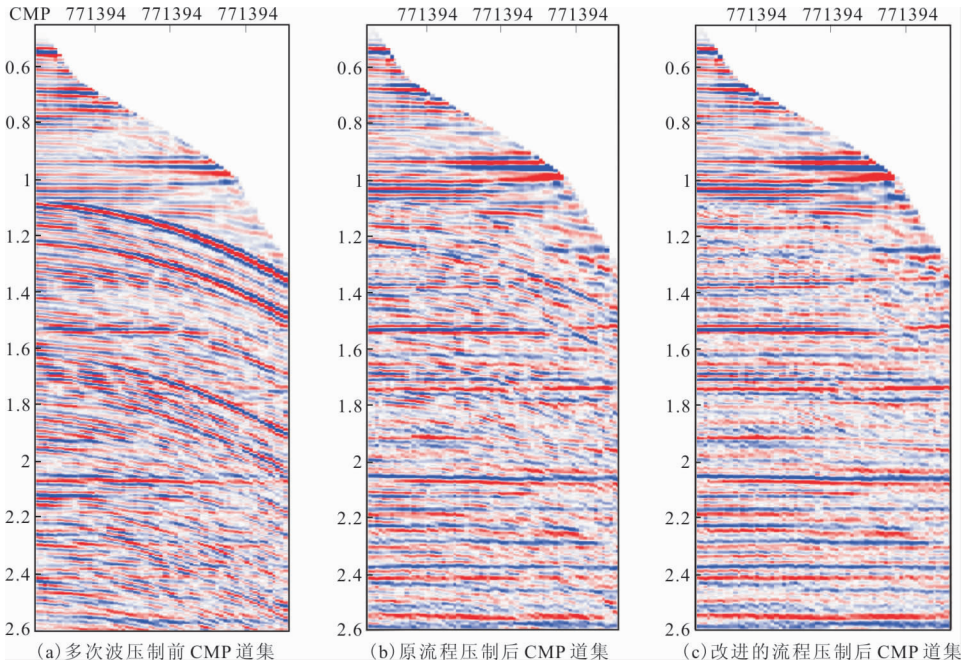


图 6 实际数据 CMP 道集应用效果
 Fig. 6 Application result on CMP gathers in field data

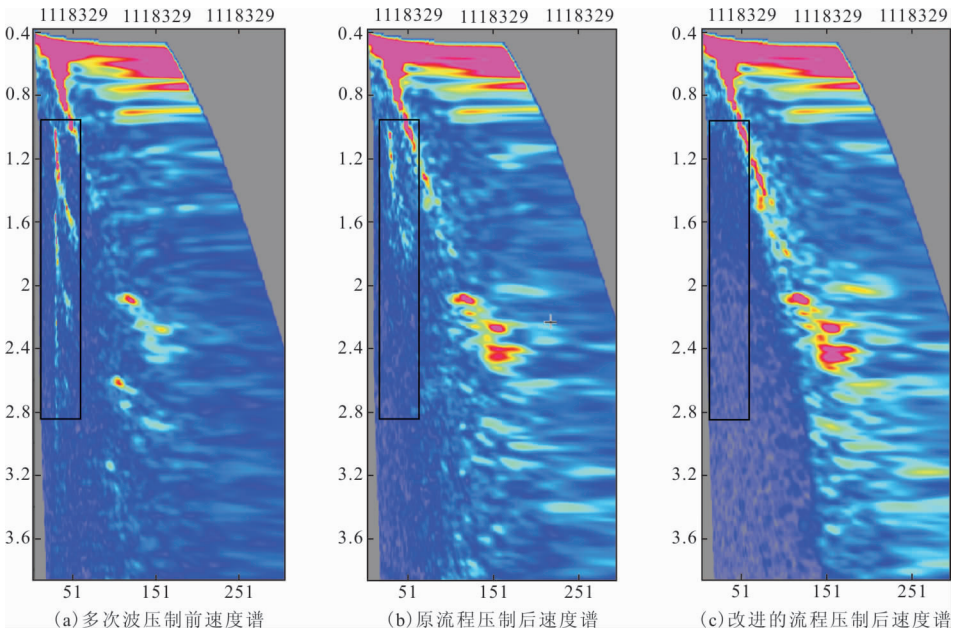


图 7 实际数据速度谱应用效果
 Fig. 7 Application result on velocity spectra in field data

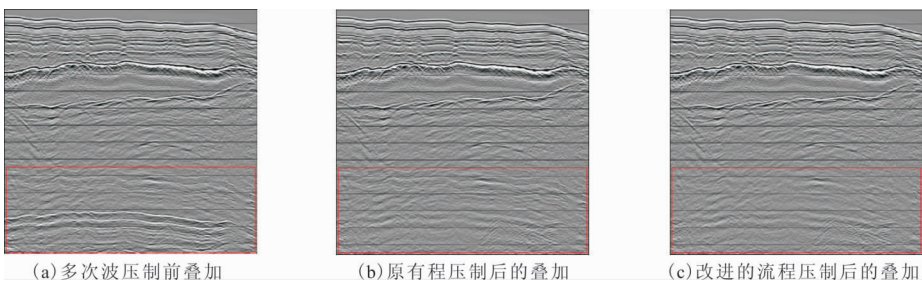


图 8 实际数据叠加剖面应用效果
 Fig. 8 Application result on stack sessions in field data

的适用性; 当多次波与一次波重叠时, 相减非常困难, 因此不同域的多次波相减法研究也很有必要; 多次波携带完整的地下信息, 因此利用多次波直接成像可以提高成像照明度, 也是未来发展的一种趋势。

参考文献:

- [1] 宋家文, D. J. VERSCHUUR, 陈小宏. 多次波压制的研究现状与进展[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(01): 240—247.
SONG J W, D. J. VERSCHUUR, CHEN X H. Research status and progress in multiple elimination[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(1): 240—247. (In Chinese)
- [2] 李鹏, 刘伊克, 常旭, 等. 多次波问题的研究进展[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(03): 888—897.
LI P, LIU Y K, CHANG X, et al. Progress on the multiple problems[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(3): 888—897. (In Chinese)
- [3] VERSCHUUR D., BERKHOUT A., WAPENAAR C. Adaptive surface - related multiple elimination [J]. Geophysics, 1992, 57(9): 1166—1177.
- [4] WEGLEIN A, F. ARAÚJO, P. CARVALHO, et al. Inverse scattering series and seismic exploration [J]. Inverse Problems, 2003, 19(6): R27—R83.
- [5] CARVALHO F M, WEGLEIN A B, STOLT R H. Examples of a nonlinear inversion method based on the T matrix of scattering theory: application to multiple suppression [J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1991, 10(1): 1319.
- [6] MATSON, K., D. CORRIGAN, A. WEGLEIN, et al. Inverse scattering internal multiple attenuation: results from complex synthetic and field data examples [J]. SEG Expanded Abstracts, 1999, 1060—1063.
- [7] ZHANG, J., A. B. WEGLEIN. Extinction theorem deghosting method using towed streamer pressure data: Analysis of the receiver array effect on deghosting and subsequent free-surface multiple removal [J]. International Annual Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2005, 75: 2095—2100.
- [8] 李翔, 胡天跃. 逆散射级数法去除自由表面多次波 [J]. 地球物理学报, 2009, 52(6): 1633—1640.
LI X, HU T Y. Surface - related multiple removal with inverse scattering series method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(6): 1633—1640. (In Chinese)
- [9] YANG, J. A. B. WEGLEIN. The impact of prerequisites (ghosts, source wavelet and radiation pattern) on the inverse scattering series free - surface multiple elimination algorithm [J]. International Annual Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2016 (86): 4596—4601.
- [10] ZHAO, L., J. YANG A. B. WEGLEIN, Extending the inverse scattering series free - surface multiple - elimination algorithm by accommodating the source property on data with interfering or proximal seismic events [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2017, 14(6): 1349—1357.
- [11] ARAUJO, F., A. WEGLEIN, P. CARVALHO, et al. Inverse scattering series for multiple attenuation: An example with surface and internal multiples [J]. SEG Expanded Abstracts, 1994, 1039—1042.
- [12] WU, J., A. WEGLEIN. The first test and evaluation of the inverse scattering series internal multiple attenuation algorithm for an attenuating medium [J]. SEG Expanded Abstracts, 2014: 4130—4134.
- [13] 杨金龙, 朱立华. 逆散射级数层间多次波压制方法及其应用 [J]. 石油物探, 2018, 57(6): 63—71.
YANG J L, ZHU L H. Inverse scattering series internal multiple attenuation method and its application. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(6): 853—861. (In Chinese)
- [14] 李东庆, 袁刚, 杨金龙, 等. 逆散射级数和抛物线 Radon 变换联合的层间多次波压制策略 [J]. 石油物探, 2021, 60(2): 295—303.
LI D Q, YUAN G, YANG J L, et al. Suppression of internal multiples by combining inverse scattering series and the Radon transform [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(2): 295—303. (In Chinese)
- [15] WAPENAAR K, BROGGINI F, SLOB E, et al. Three - Dimensional single - sided marchenko inverse scattering, data - driven focusing, green's function retrieval, and their mutual relations [J]. Physical Review Letters, 2013, 110(8): 084301(1—5).
- [16] SLOB E, WAPENAAR K, BROGGINI F, et al. Seismic reflector imaging using internal multiples with Marchenko - type equations [J]. Geophysics, 2014, 79(2): S63—S76.
- [17] 宋欢, 毛伟建, 唐欢欢. 基于深层神经网络压制多次波 [J]. 地球物理学报, 2021, 64(08): 2795—2808.
SONG H, MAO W J, TANG H H. Application of

deep neural networks for multiples attenuation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(8): 2795–2808. (In Chinese)

traction based on U-net for removing seismic multiples[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(11): 9796–9812.

[18] LI Z X, SUN N N, GAO H T, et al. Adaptive sub-

Free-surface multiple removal based on inverse scattering series and its application

YANG Jinlong, CAI Jiexiong, ZHANG Guangli

(Sinopec Geophysical Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: In marine seismic exploration, free-surface multiples are generated strongly and affect the effective signals due to the presence of the sea surface. They have severe effects on the accurate acquisition of velocity and imaging quality. Hence, multiple removal have always been the focus and difficulty of marine seismic data processing and one of the critical factors for successful marine seismic exploration. The inverse scattering series (ISS) free-surface multiple elimination method is proposed and derived according to the characteristics of free-surface multiples. Moreover, the processing flow is modified by removing the source wavelet effect to improve the accuracy of multiple predictions and reduce the dependence on adaptive subtraction. Synthetic and field data tests show the validity and applicability of the ISS free-surface multiple elimination method.

Keywords: inverse scattering series; free-surface multiple; wavelet; marine data; multiple removal