

doi:10.11720/wtyht.2015.2.18
张书杰,薛霆琥.叠前逆时偏移去噪波场分离法与其他方法的比较[J].物探与化探,2015,39(2):322-326.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.2.18
Zhang S J,Xue T X.The wave field separation method in comparison with other methods in prestack reverse-time migration denoising[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2015,39(2):322-326.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.2.18

叠前逆时偏移去噪波场分离法与其他方法的比较

张书杰^{1,2},薛霆琥^{*1,3,4}

(1.桂林理工大学 地球科学学院,广西 桂林 541004;2.江西省地质矿产勘查开发局 赣东北大队,江西 上饶 334000;3.桂林理工大学 广西矿冶与环境科学实验中心,广西 桂林 541004;4.桂林理工大学 广西地质工程中心区重点实验室,广西 桂林 541004)

摘 要:基于双程波动方程的逆时偏移(RTM)具有原理简单、无倾角限制、具有可以适用于速度任意变化的模型,对各类波正确成像等优点,但采用互相关成像条件会产生严重的低频噪声问题。笔者分析低频噪声的产生机制后提供了一个有效的波场分离去噪方法,将震源和检波点波场分离成不同方向的单成波分量,只对有效路径上的分量进行互相关成像,从而达到去除噪声的目的。并通过模型测试对比了坡印廷矢量滤波、拉普拉斯滤波、波场分离滤波这三种方法的去噪效果,结果表明基于波场分离的去噪方法效果更好。

关键词:叠前逆时偏移;去噪方法;波场分离;坡印廷矢量滤波;拉普拉斯滤波

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2015)02-0322-05

地震偏移成像技术一般分为基于波场延拓的波动方程偏移方法和基于射线理论的 Kirchhoff 偏移方法^[1]两类。波动方程偏移方法是对波动方程的进行分解,能较好地适应速度模型的横向变化,但由于采用单程波的近似方程,在波场传播方向受到倾角限制,对陡倾角构造成像能力较差,尤其对于盐丘下的回折波成像存在很大的困难。Kirchhoff 偏移方法有很高的计算效率和实用性,在当前实际生产中广泛应用,但 Kirchhoff 偏移方法的分辨率会随着深度增加变差且缺乏相应的振幅信息。随着油气勘探难度的增大和目标复杂性的增加,这时迫切需要发展一种新的偏移方法来弥补这些不足。

由于大规模计算能力和工业界对地震成像精度要求的提高,各种与波场延拓有关的计算方法与技术得到了不断地发展。这时基于双程波方程的逆时偏移重新进入了人们的视野。逆时偏移方法使用双程波动方程来进行波场延拓,不需要在波场方向进行上、下行波的分解,无倾角限制,可以使用全波场的信息,能对回转波、多次波等各种特殊波成像,理论上在给定的速度场足够准确的情况下能对任意复

杂介质精准成像,是目前较好的偏移方法之一。特别是随着逆时偏移方法在墨西哥海湾地区中的成功应用,使得该方法再次登上了历史的舞台。

1 逆时偏移噪声的产生机制

逆时偏移方法是基于双程波波动方程,通过对波场正向和反向延拓来实现偏移。逆时偏移是较 Kirchhoff 偏移方法而言能有效利用全波场信息,较单程波偏移方法而言,无传播方向限制,不需要对波场进行上、下行波的分离,而且不受倾角限制,并能较好的成像回转波、多次波,理论上在给定的速度场足够准确的情况下能对任意复杂介质精准成像,是一种具有极高成像精度的偏移方法^[2]。

但逆时偏移有着与生俱来的三大缺陷:计算量大、存储量大和存在虚假成像^[3]。如何有效压制虚假的噪声是获得正确逆时偏移成像结果的关键所在。根据互相关成像条件公式^[4]

$$I(x,z)=\int\limits_0^{t_{\max}}S(x,z,t_1)R(x,z,t-t_2)dt,\quad (1)$$

$t=t_1+t_2。$

只要满足:震源正向延拓波场的旅行时间 t_1 与检波点反向延拓波场的旅行时间 t_2 之和,等于在从震源出发至检波点的总旅行时间 t ,就满足互相关成像条件,因此都可以成像。如图 1 所示的两条射线的路径上,任何一点的走时之和都是等于 t 的,因此在这两条射线的每个点上,都满足互相关成像条件,在偏移时都会成像,而真实的成像点只在反射界面处,这就是低频噪声产生的原因。

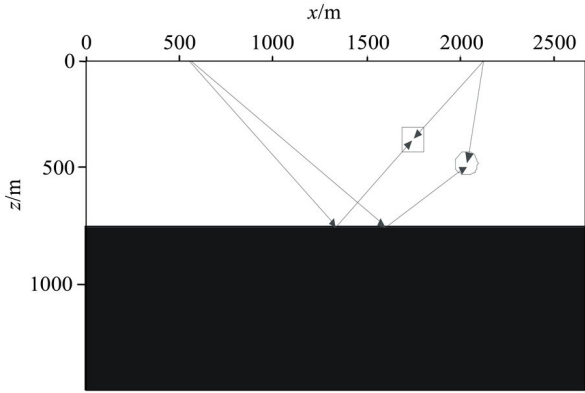


图 1 逆时偏移低频噪声产生的原因

图 1 中方框处是震源正向延拓波场的与检波点反向延拓波场夹角等于 180° 的成像噪声产生的位置,圆圈处是震源正向延拓波场的与检波点反向延拓波场夹角小于 180° 的成像噪声产生的位置^[5]。因此低频噪声分为两只种:第一种是波场夹角等于 180° 的成像噪声,为图 2 白色箭头所指的位置,这种噪声振幅最强,干扰严重。第二种是波场夹角小于 180° 的成像噪声,为图 2 黑色箭头所指的位置,这种噪声振幅较弱,一般有两条。

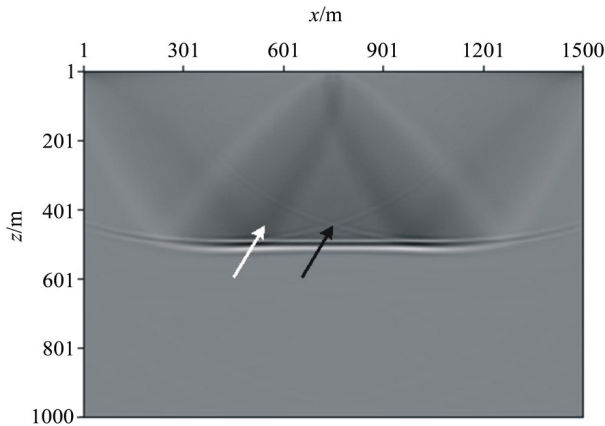


图 2 水平模型逆时偏移结果

2 基于波场分离的逆时偏移去噪方法

去除低频噪声的方法主要可以分为两类^[6]。第一类是滤波,针对噪声低频的特点直接成像后进

行滤波处理,如高通滤波^[7],拉普拉斯滤波^[8],角度滤波^[9-11]等,杨仁虎等^[12]提出了一种振幅补偿滤波方法,在滤波前后,尽可能保持有效振幅。Guitton^[13]比较了几种滤波方法,提出最小平方滤波方法。第二类是控制方向成像。只在正确的成像点处有选择性的进行成像,如 Baysal^[14]和 Etgen^[15]假设波阻抗为常数推导出了无反射波动方程; Fletcher^[16]指出无反射波动方程只有当入射波垂直入射时,其反射能量才为零,在波动方程中加入方向衰减因子,压制反向的反射;Yoon^[17]利用坡印廷矢量判断波场方向,只对相反方向的波场进行成像,压制了大角度的虚假成像。文中重点分析了波场分离滤波方法并比较了坡印廷矢量滤波方法和拉普拉斯滤波方法三种滤波方法的去噪效果。

Liu^[18]提出通过一种波场分离的方法,其主要思路是将波场拆分成不同方向的单成波分量,在成像时对波场分量进行人工选择,提取所需要的波场分量,只在有效路径上进行互相关成像,从而达到去除噪声的目的。

在逆时偏移中使用的是双程波动方程,它包含了上行波和下行波两个组成部分,如果在 z 方向进行上、下行波的分解,则震源波场和检波点波场可分解为

$$S(x,t) = S_{z+}(x,t) + S_{z-}(x,t), \tag{2}$$

$$R(x,t) = R_{z+}(x,t) + R_{z-}(x,t)。 \tag{3}$$

其中:“+”号代表下行波场,“-”号代表上行波场。将式(2)、式(3)代入互相关成像条件式(1)中,得到新的成像条件

$$\begin{aligned} I(x,t) = & \int_0^{t_{\max}} S_{z+}(x,t) R_{z-}(x,t) dt + \int_0^{t_{\max}} S_{z-}(x,t) R_{z+}(x,t) dt + \\ & \int_0^{t_{\max}} S_{z+}(x,t) R_{z+}(x,t) dt + \int_0^{t_{\max}} S_{z-}(x,t) R_{z-}(x,t) dt = \\ & I_{z1} + I_{z2} + I_{z3} + I_{z4}。 \end{aligned} \tag{4}$$

经过真实的反射界面时,入射波场和反射波场的传播方向在界面的法线方向会发生变化。因此震源波场和检波点波场在反射界面上都会产生相对于界面向上传播的波和相对于界面向下传播的波。按照震源波场和检波点波场的传播方向,将其波场分离成其各自的传播方向不同的波场,只有两者传播方向相反的波场才会在成像时产生真实的成像点。也就是说,只需要 I_{z1} 和 I_{z2} 这两项就可以实现正确的逆时偏移成像。在相同传播方向所成的像是虚假的成像点,因此 I_{z3} 和 I_{z4} 这两项其成像结果是低频噪

声,所以应该将其删去。这样就从成因上消除了低频噪声。

因此可以将式(4)改写成新的成像条件

$$I(x, z) = \int_0^{t_{\max}} S_{z+}(x, z, t) R_{z-}(x, z, t) dt + \int_0^{t_{\max}} S_{z-}(x, z, t) R_{z+}(x, z, t) dt \quad (5)$$

为了成功的应用这个成像条件,需要将震源波场和检波点波场拆分成上行波场分量和下行波场分量。文中采用的是二维傅里叶变换方法,先将震源和检波点波场转换到频率波数域,再对其进行上、下行波分离,然后反变换到时间域,这样就可以成功的利用波场分离的方法来压制逆时偏移噪声。

图3是应用波场分离法去噪后的成像效果图。波场分离方法去噪彻底,绝大部分噪声得到了压制,去噪之后图像界面清晰。波场分离方法从成因上消除了虚假噪声,因此完全可以压制波场夹角等于 180° 的噪声。但是两条“弧形噪声”只得到了部分压制,这些对于波场夹角小于 180° 的噪声无法完全去除,因为这些波场的传播路径会和一些有效波场一样,如果强行去除反而还会破坏真实成像信息。

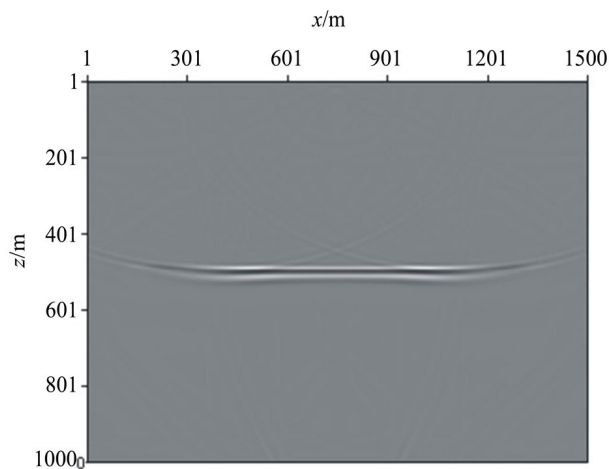


图3 波场分离法去噪后成像效果

3 模型测试

只进行水平模型的计算,缺乏实用价值,无法充分说明逆时偏移的效果,还需要对标准模型进行测试。但是复杂标准模型的偏移一般需要进行几百炮集以上的计算,传统的串行计算肯定无法满足需求,因此需要选用高效率的计算方法。本文采用的是基于消息传递接口(MPI)的并行计算方案^[19]。

文中选用的 Marmousi2 模型总网格大小为 972×701 ,空间网格横向步长为 8 m,纵向网格步长均为

5 m,时间步长为 4 ms,模型最小速度为 1 028 m/s,最大速度为 4 700 m/s,密度都为 1 g/cm^3 ,选取的参数满足有限差分计算所需的稳定性条件。交错网格有限差分的差分精度为时间二阶、空间十阶。采用右端放炮、左端排列接收的观测方式,每炮的计算区域大小为 240×701 ,检波器分布在整個计算区域表面,最小偏移距为 0 m,每炮接收 240 道记录,道间距为 8 m,炮点在模型的(240,1)处开始右移,炮间距为 24 m。选用主频 25 Hz 的零相位雷克子波在地表激发,最大接收时间为 3 s,按照此观测方式可以得到 240 个地面检波点炮集记录。

如果用串行计算(CPU 为 AMD FX-8320,主频 3.50 GHz),一个炮集的偏移时间为 100 min,如果使用串行计算,则需要花 17 d 的时间。为了减少计算时间,文中应用多核计算机(CPU 为 AMD FX-8320 八核处理器,主频 3.50 GHz)进行计算,使用其中 7 核 MPI 并行计算(留出 1 核计算空间处理系统资源),只需要 55 h 就可以完成全部 240 炮的偏移。如果采用更高端的并行机计算,时间可以进一步缩短。

图4为去噪前 Marmousi2 模型逆时偏移成像结果,低频噪声基本覆盖整个模型,尤其模型上部高振幅的假象最为严重,遮掩了下部构造,影响了成像质量。

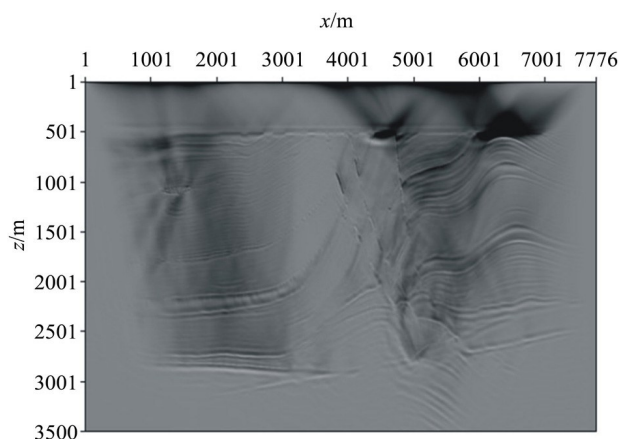
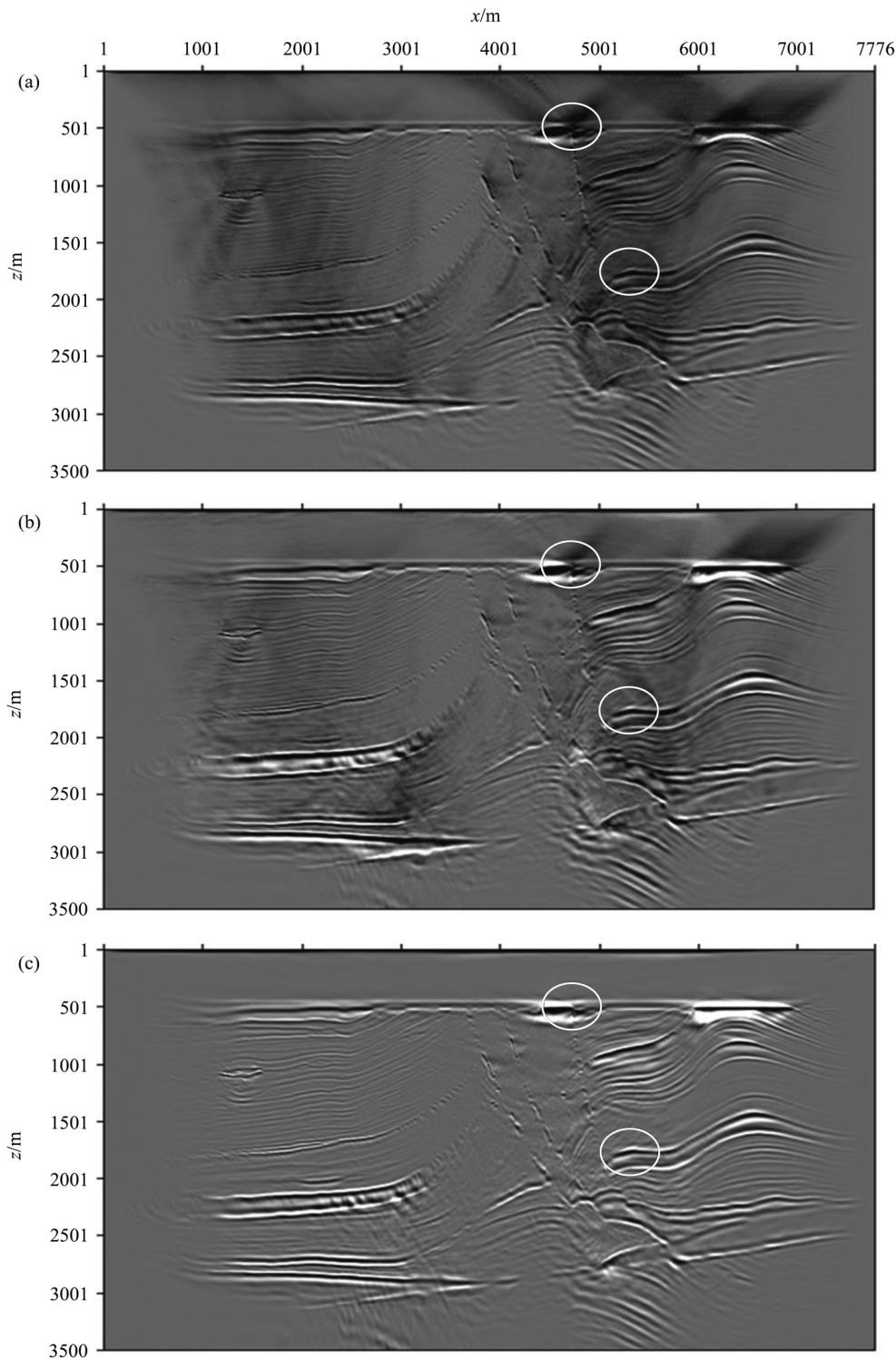


图4 去噪前 Marmousi2 模型成像结果

图5是用了三种不同方法去噪结果。通过细节对比,用坡印廷方法和拉普拉斯方法去噪后,噪声去只得到了一定程度上的压制,反射界面上的噪声还有残留。而使用波场分离方法后成像噪声压制情况良好,波场夹角等于 180° 的噪声完全得到了压制,低频噪声的影响基本消除。可以看到,坡印廷方法、拉普拉斯方法、波场分离法的去噪效果越来越好(注意图5中三种方法圆圈处的噪声压制之比较)。经过波场分离方法去噪之后,地层反射界面显示更



a—波印廷方法去噪后成像结果;b—拉普拉斯去噪后成像结果;c—波场分离法去噪后成像结果

图 5 三种不同去噪方法后成像结果对比

准确,含气透镜体模型、三条大的断层和下部的高速的横向侵入岩更清晰,地层特征细节更为明显,成像质量得到了明显的改善。

4 结论

基于波场分离的逆时偏移去噪方法从成因上消

除了虚假噪声,在成像时可以完全压制波场夹角等于 180°的噪声。通过波场分离方法在 Marmousi2 标准模型上的测试,证明了这种方法的有效性,对比其他去噪方法表明在噪声的压制效果上该方法更具优势。不过要运用两次二维傅里叶变换一定程度上也增加了计算量和存储量,但是采用并行计算或

CPU/GPU 计算平台可以满足计算需求。

在陡倾角复杂的地区如果只分离上、下行波,可能无法有效的将真实反射点与虚假成像点分离开,这时需要在 x 和 z 方向上进行两次傅里叶变换,将波场分离成上、下、左、右行波。

参考文献:

- [1] Bevc D. Imaging complex structure with semirecursive Kirchhoff migration[J]. *Geophysics*, 1997, 62: 577–588
- [2] 丁亮, 刘洋. 逆时偏移成像技术研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(3): 1085–1100.
- [3] 许璐, 孟小红, 刘国峰. 逆时偏移去噪方法研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(4): 1548–1556.
- [4] Claerbout J F, Doherty S M. Downward continuation of move out corrected seismograms[J]. *Geophysics*, 1972, 37: 741–768.
- [5] 刘红伟, 刘洪, 邹振. 地震叠前逆时偏移中的去噪与存储[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(9): 2171–2180.
- [6] 康玮, 程玖兵. 叠前逆时偏移假象去除方法[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(3): 1163–1172.
- [7] Mulder W A, Plessix R E. One-way and two-way wave equation migration [C]//73rd Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts, 2003: 1292–1295.
- [8] Zhang Y, Sun J. Practical issues in reverse time migration: true amplitude gathers noise removal and harmonic source encoding[J]. *First break volume*, 2009, 1(27): 53–59.
- [9] Save P C, Fomel S. Angle domain common image gathers by wave-

field continuation methods[J]. *Geophysics*, 2003, 68(3): 1065–1074.

- [10] Sun J, Zhang Y. Practical issues of reverse time migration: true-amplitude gathers noise removal and harmonic-source encoding[J]. *ASEG Extended Abstracts*, 2009, 1: 1–5.
- [11] Zhang Y, Sun J, Gray S. Reverse time migration: amplitude and implementation issues [J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2007, 26: 2145–2149.
- [12] 杨仁虎, 常旭. 叠前逆时偏移影响因素分析[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(8): 1902–1913.
- [13] Guitton A, Kaelin B. Least-square Attenuation of Reverse Time Migration Artifacts [C]//76th Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts, 2006: 2348–2352.
- [14] Baysal E, Kosloff D D, Sherwood J W C. A two way nonreflecting wave equation[J]. *Geophysics*, 1984, 49(2): 132–141.
- [15] Etgen J T. Prestack reverse time migration of shot profiles[R]. *SEP Report*, 1986, 50: 151–169.
- [16] Fletcher R P, Fowler P J, Kitchenside P. Suppressing unwanted internal reflections in prestack reverse time migration[J]. *Geophysics*, 2006, 71(6): 79–82.
- [17] Yoon K, Marfurt K J. Reverse time migration using the Poynting vector[J]. *Exploration Geophysics*, 2006, 37(1): 102–107.
- [18] Liu F Q, Zhang G Q, Morton S A, et al. Reverse time migration using one-way wave field imaging condition [C]//77th Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts, 2007: 2170–2173.
- [19] 何兵寿, 张会星, 韩月. 双程声波方程叠前逆时深度偏移及其并行算法[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(3): 458–462.

The wave field separation method in comparison with other methods in prestack reverse-time migration denoising

ZHANG Shu-Jie^{1,2}, XUE Ting-Xiao^{1,3,4}

(1. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Geological Party of Northeastern Jiangxi Province, Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources, Shangrao 334000, China; 3. Guangxi Scientific Experiment Center of Mining, Metallurgy and Environment, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 4. Key Laboratory of Geological Engineering Center of Guangxi, Guilin 541004, China)

Abstract: Two-way wave equation based on reverse time migration (RTM) has such advantages as simple principle, no angle restrictions, suitability for the model of arbitrary speed changes, and correct imaging for all kinds of waves. Nevertheless, the adoption of the cross-correlation imaging condition can produce low-frequency noise problems. Based on analyzing the mechanism of the low frequency noise, the authors put forward an effective wave field separation denoising method, in which the source and the receiver wave field are separated into different directions of one way wave component, and only cross-correlation imaging is conducted on the effective path of the component, so as to achieve the purpose of removing noise. The results of the model test and comparative study of the denoising effects of Poynting vector filtering, Laplace filtering and wave field separation show that the wave field separation method is relatively effective in these three methods.

Key words: prestack reverse time migration; denoising method; wave field separation; Poynting vector filtering; Laplace filtering

作者简介: 张书杰 (1987–), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 地震波传播及成像。

通讯作者: 薛霆彪, 桂林理工大学, 副教授, xuetx@mail.ustc.edu.cn。