doi: 10.11720/wtyht.2026.2487
胡俊华, 谢孝军, 田坤, 等. 单程波成像研究综述[J]. 物探与化探, 2026, 50(4): 615-626. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.2487
Hu J H, Xie X J, Tian K, et al. Research on one-way wave migration imaging: A review[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(4): 615-626. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.2487

单程波成像研究综述

胡俊华[1], 谢孝军[2,3], 田坤[1], 步长城[1], 秦宁[1], 刘畅[1], 郭琛[1], 仇瀚之[1]
(1. 中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营 257000; 2. 中石化石油工程地球物理有限公司胜利分公司, 山东 东营 257000; 3. 中石化胜利油田分公司油气勘探管理中心, 山东 东营 257000)

摘 要: 在地震波场延拓中, 傅里叶方法因计算效率高而得到广泛应用, 但难以处理横向变速介质; 而分步傅里叶、傅里叶有限差分和广义屏偏移等方法, 通过结合频率—波数域与空间域延拓, 有效提升了波场模拟与成像的精度。单程波成像方法在继承傅里叶方法高效性的基础上, 进一步优化了算法设计与数值实现, 显著提高了对复杂介质的适应性和成像质量, 具有重要的应用价值。本文系统综述了单程波成像的基本原理与研究现状, 从 6 个方面归纳其进展, 并展望未来发展趋势, 以期为地震成像技术的进一步研究与应用提供参考。

关键词: 地震成像; 单程波; 偏移成像; 傅里叶有限差分偏移; 广义屏偏移
中图分类号: P631.4; P311 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)04-0615-12

0 引言

在纵波勘探中, 声波方程常用于模拟地震波传播。基于单程波方程, 通过从震源向下延拓波场可重建地下波场, 并结合成像条件实现高效偏移成像。相比双程波方法, 单程波方程计算效率更高、对速度误差不敏感, 且能生成高信噪比合成记录。早期 Stolt[1] 提出基于傅里叶变换的偏移方法以抑制频散; Gazdag 等[2-3] 发展了相移法, 适用于横向均匀介质; 其后相移加插值法被推广至横向变速情形。分步傅里叶法[4-6] 通过参考慢度分解波场, 适用于缓变介质与小角度构造。高斯束方法利用射线束叠加实现波场延拓, 兼具物理解释能力与横向速度适应性。傅里叶有限差分法[7] 联合相移与有限差分算子, 提升了对陡倾构造与强变速介质的成像能力。基于 De Wolf 近似和相位屏传播的方法[8-9] 通过双域策略区分正向与逆向散射步长, 兼顾效率与精度。广义 Bremmer 级数[10-11] 为单程波表示反射波场提供了理论框架。广角屏、改进局部波恩傅里叶偏移等方法进一步扩展了对强扰动、宽角散射及振幅效应的处理能力, 显著提升了复杂介质中波场模拟与偏移的精度与适应性。

本文在回顾纵波地震勘探发展历程的基础上, 选取单程声波方程偏移成像这一传统方法与高斯束、傅里叶有限差分、扩展局部波恩傅里叶等新型混合算法为例, 浅析基于单程波方程的地震波场延拓技术现状、存在问题与未来展望, 可助力一线人员深化对高效、高信噪比成像方法的理解与认识, 更好地服务深层—复杂构造的地震勘探需求。

1 傅里叶有限差分偏移延拓算子

相移法在频率—波数域中对地震波场进行外推, 要求速度恒定, 因此, 通常将垂直方向划分为多个分层, 在每个外推步长内保持速度在水平与垂直方向上均不变, 从而实现波场延拓。相移法偏移延拓算子因其计算简便而广泛应用, 在频率—波数域中具有较高计算效率, 对速度变化较为敏感。该方法适用于速度变化较小的水平层状介质, 例如海洋勘探或规则地层成像等横向变速不显著的情景, 成像精度高、计算速度快, 但无法直接用于速度梯度较

收稿日期: 2025-06-26; **修回日期**: 2026-05-18
第一作者: 胡俊华(1998-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事地震资料处理的研究工作

大的区域。

当介质速度存在横向变化时,傅里叶变换在空间域的适用性受到限制,相移法在处理明显横向速度梯度时精度下降。为克服这一局限,裂步傅里叶法提出了基于速度场分裂理念的波场延拓算子。该方法将介质速度分解为常速背景场和变速扰动场两部分:常速部分仍采用相移算子延拓,而变速部分则通过时移校正进行处理。裂步傅里叶法能够同时处理速度的纵向与横向变化,在相移法基础上提高了对变速介质的适应性,适用于陆地勘探或倾斜层状介质等场景。其缺点是计算效率相对较低,对强速度梯度区域的处理效果有限,并且对反射界面倾角存在一定约束。

傅里叶有限差分法偏移在裂步傅里叶法的基础上,引入关于二阶速度扰动的补偿项,该补偿项通过F-X域中的有限差分计算实现。FFD法延拓算子结构简单,理论及实际应用较为成熟,可用于复杂地质结构成像。然而,该方法计算量大于相移法,数值稳定性受有限差分格式影响,同样对反射界面倾角有一定限制,并要求等间距网格剖分,因此在非规则网格应用中存在局限。

经过上述分析,可得出:①在计算效率方面,相移法偏移延拓展算子计算效率最高,裂步傅里叶法偏移延拓展算子次之,傅里叶有限差分偏移延拓展算子最低;②在成像精度方面,傅里叶有限差分法在处理强横向变速介质时精度最高,裂步傅里叶法次之,相移法在横向速度变化较弱时仍具有较高精度;③在适用条件方面,相移法适用于横向速度变化较弱的介质,裂步傅里叶法适用于具有一定横向速度梯度的介质,傅里叶有限差分法适用于强横向速度变化的复杂地质条件。通过对比这3种算子,可以根据具体的地质条件和成像需求选择合适的单程波成像方法,以提高成像效率和精度。

2 单程波成像的研究现状

相较于双程波方程,单程波方程通过忽略多次波和反向传播波场,大幅降低计算资源消耗,适用于大规模三维数据体的快速处理。单程波在横向变速介质中的稳定性也使其在陆上、海洋等复杂勘探场景中更具实用性,由于其高效的计算效率和较高的成像精度,在地球物理勘探成像领域得到了广泛应用。有关单程波的研究分类也十分繁杂。本文将单程波的研究进展分为以下几个方面:起伏地表及垂直地震剖面观测系统、平面波/曲面波及坐标变换、保幅成像方法、最小二乘偏移成像方法、单程波优化多次波成像方法、复杂介质成像方法、单程波算子优化方法。这几方面主要包含了单程波在不同观测系统、不同坐标系下的应用,提高成像效果的保幅性,完善对不同类型的地震波和地下介质的适用性。

2.1 起伏地表及垂直地震剖面观测系统

Xiong等[12]利用一组虚拟数字检波器接收地下的一次地震反射波,接收器可以放置在任何不规则的观测面上,利用单向声波方程高效快速地成像和外推地震反射数据。采用数值正演模拟计算了平坦地表和不规则地表两种模型,以及一个复杂正断层模型的高信噪比共炮点道集,并针对起伏地表,采用叠前深度偏移重建了正断层模型。李振春等[13]利用高阶广义屏算子结合直接下延方法,成功实现了在不平整地表情况下的高阶广义屏算子深度偏移。为确保算法稳定性,计算过程中采用了一系列近似方法来规避奇异点。通过采用稳定的Born近似算子、二阶广义屏算子和三阶广义屏算子进行计算和对比(图1),显而易见,随着阶数的增加,偏移效果逐渐提升,特别是使用三阶广义屏算子时,构造出的图像更为清晰,目标层信息更加丰富,尤其是黄框内所示部分。

在优化常规单程波波动方程延拓算子的起伏地表叠前深度偏移算法的基础上,卢宝坤等[14]采用了同步边界处理策略和深度误差校正策略,提出了基于频域波动方程深度延拓算子的起伏地表深度偏移方法。雷秀丽等[15]提出了一种新的叠前深度偏移方法,在波场延拓过程中利用复Pade逼近方法对声波方程中的平方根项进行近似处理,通过推导得到基于复Pade逼近的傅里叶有限差分算子,并结合波场“直接下延”法,成功实现了在起伏地表条件下的叠前深度偏移。

单程波方程可近似降低计算复杂度,适合大规模数据处理,通过引入时移成像条件与低频补偿,提升深层弱信号成像质量。但是,陡坡地形可能导致相位误差,起伏地表引起的多次反射波也需额外处理,以避免影响薄层分辨率,且地形校正需高精度近地表速度模型,模型误差会累积至深层。为了满足陆上复杂地表三维勘探区海量地震数据的成像需求,段心标等[16]结合了单程波偏移的相位校正方法以及偏移距域道集并行提取技术,开发了基于GPU平台的三维起伏地表裂步傅里叶叠前深度偏移技术。沈铭成等[17]采用基于正交方向加插值的傅里叶有限差分算子,实现了三维垂直地震剖面(VSP)正演模拟。这种方法克服了三维算子进行双程正交分裂

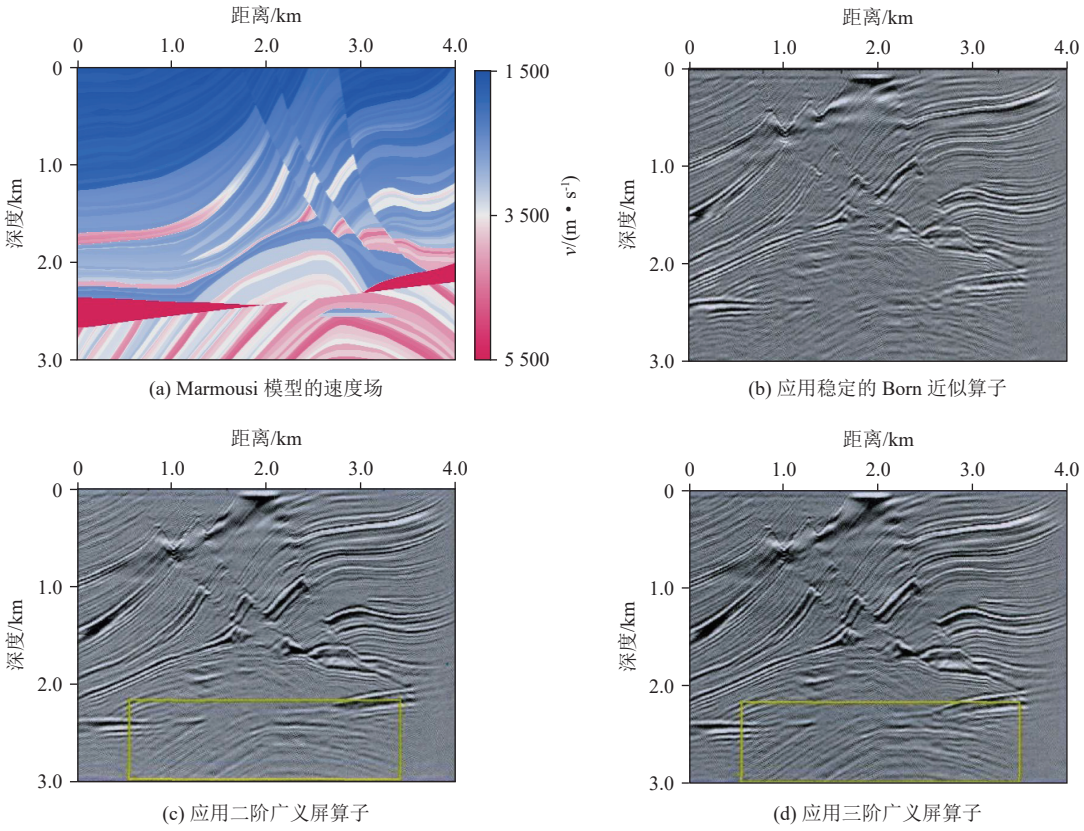


图 1　Marmousi 模型的高阶广义屏算子叠前深度偏移结果[13]

Fig. 1　Results of the pre-stack depth offset of the higher order generalised screen operator for the Marmousi model[13]

时导致的方位各向异性误差, 确保了模拟的准确性, 提高了计算效率。段晓梦等[18] 使用基于单程波方程波场延拓的方法进行 VSP 模拟, 能够根据需要模拟出上下行波, 同时生成清晰的地震反射波, 避免了多次波、直达波和其他干扰波的出现。

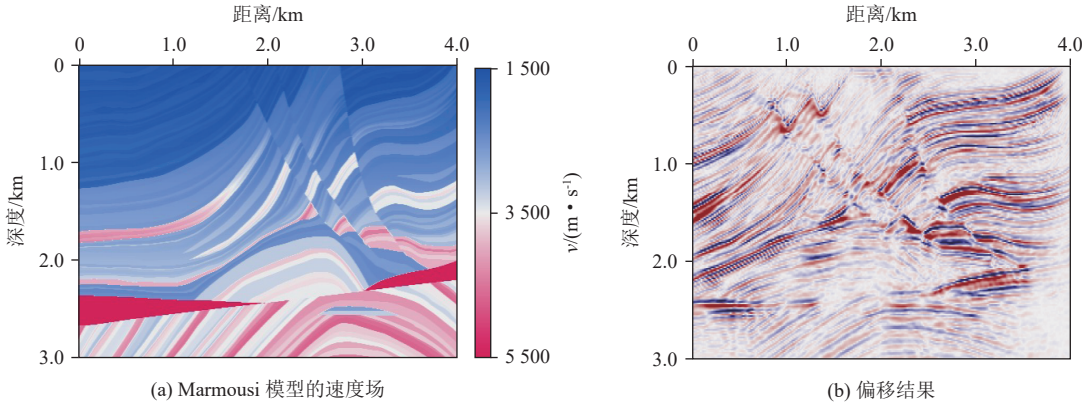
任意广角波动方程(AWWE)只包含二阶偏导数项, 易于进行数值实现, 并具有更大的成像倾角。范廷恩等[19] 将 AWWE 这种高精度的空间域单程波波动方程引入到 VSP 数据成像中, 实现了高角度单程波方程偏移。

单程波波动方程适应 VSP 观测系统中的局部速度变化, 通过捕捉细微反射特征来改善复杂介质下的成像效果, 但在井口附近及地表起伏区域, 由于边界条件较复杂, 单程波外推过程可能引入额外不确定性。因此, 可将其与全波方法、数据融合、人工智能等现代技术结合, 为深部成像提供新的研究方向。

2.2　平面波/曲面波及坐标变换

孙鲁平等[20] 考虑了振幅随入射角度变化这一特点, 提出了一种适用于模拟复杂介质的平面波算法, 可在地层倾角水平条件下准确模拟振幅随入射角度变化的关系。薛花等[21] 研究了平面波的传播特点、地震数据局部分解和成像的方法, 并通过验证表明, 射线参数的选择范围和间隔是影响平面波成像质量的主要因素, 因为不同入射角度的平面波对成像结果的影响是不同的。图 2 显示, 平面波偏移剖面展示了良好的同向轴连续性, 没有出现抖动现象; 浅层断层面的成像清晰, 同时深部目标体也呈现出清晰的成像效果, 特别是在 Marmousi 模型中得到了较好的成像效果。

通过引入振幅补偿项, 叶月明等[22] 提出了一种基于单程波方程的平面波保幅偏移方法。平面波方法在计算上较为高效, 适用于局部平缓区域, 但在强横向非均匀或者极复杂构造中, 平面波或局部曲面波假设不够准确, 且在处理大倾角或回转波时, 传统单程波方法存在 90°传播倾角限制。为了应对深度偏移计算量巨大的挑战, 李慧杰等[23] 提出了曲面波裂步傅里叶偏移方法, 该方法结合了曲面波技术和裂步傅里叶算子, 首先利用专为波场理论设计的曲面波算子生成曲面波数据, 然后利用适用于炮域的裂步傅里叶波场延拓算子对曲面波波场进行延拓成像。程磊磊等[24] 提出了射线中心坐标系下傍轴单程波方程, 能准确描述局部波场。这一方法综合了射线的灵活性, 描述局部射线束内的波场, 可以解决复杂构造成像难和层析速度估计差的问题。在平缓变



(a) Marmousi 模型的速度场　　(b) 偏移结果

图 2　共炮点道集倾斜叠加 p=[-200,200] 时偏移结果[21]

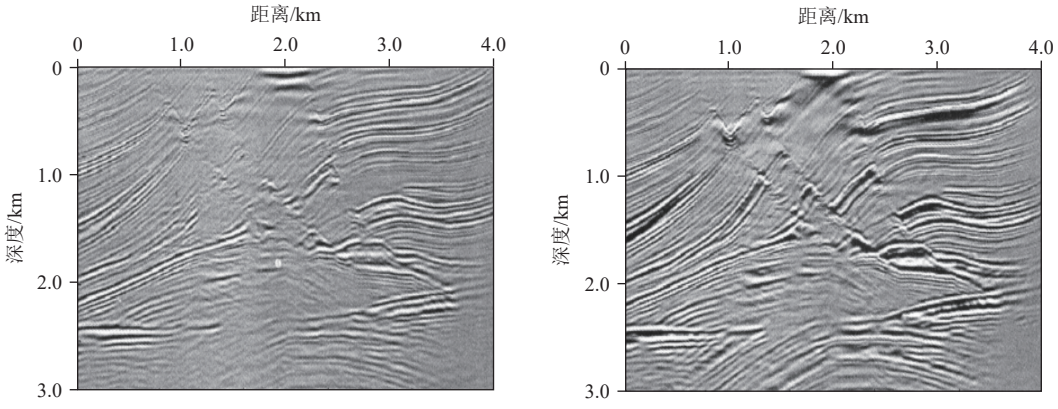
Fig. 2　Slant stack migration of common-shot gathers at p from -200 to 200[21]

化的垂直介质中，保幅单程波动方程外推波场可简化为 2 个可分离且可交换的因子的乘积。基于这种特性，Vivas 等[25] 在混合域中发展了保幅单程波偏移算法。Naghadeh 等[26] 将单程波动方程发展到对数极坐标系中，并减小了单程波动方程偏移中波场外推轴与地震波传播方向之间的夹角。在对数极坐标系中，外推算子可以轻松地适用于高阶有限差分方案。因此，使用阶数较低的算子，对数极坐标系中的波动方程偏移也能够清晰地成像复杂地质结构中的各种(水平和垂直)地质构造。

平面波或曲面波分解结合坐标变换技术，方法简单、计算高效且能较好地保留振幅信息，但对速度模型依赖较高，且在极复杂区域需要引入其他的波动描述。

2.3　保幅成像方法

解建建等[27] 通过将单程波保幅方程与分步傅里叶算子相结合，提出了基于单程波保幅的分步傅里叶叠前深度偏移方法。该方法综合了保幅算法和分步傅里叶算法的优点，从而能够有效处理横向速度变化等复杂情况。在准确的速度模型下，图 3 展示了使用 2 种叠前深度偏移方法得到的成像结果，整体来看，相较于传统的 SSF 偏移算子，真振幅 SSF 偏移算子展现出了更大的优势，得到的剖面展现出高质量的成像效果。



(a) SSF 偏移成像结果　　(b) 真振幅 SSF 偏移成像结果

图 3　Marmousi 模型 2 种方法的偏移成像结果[27]

Fig. 3　Migration imaging results of two methods of Marmousi[27]

叶月明等[28] 将单程波保幅偏移技术用于处理中国南方某勘探区的碳酸盐岩地震资料，有效地补偿了深层能量，为 AVO(amplitude versus offset) 异常测定提供了优质的 CMP(common image point) 道集。基于保幅单程波动方程的非稳态相移公式和扰动理论，刘定进等[29] 提出了一种稳定的保幅高阶广义屏叠前深度偏移算子，通过单平方根算子的逐步近似，推导出了保幅叠前深度偏移方程的高阶广义屏形式。何润等[30] 从传统保幅单程声波方程出发，通过引入粒子群算法和高斯窗函数，分别优化广义屏算子和反褶积成像条件，这既提高了振幅保真效果，又提高了计算稳定性。

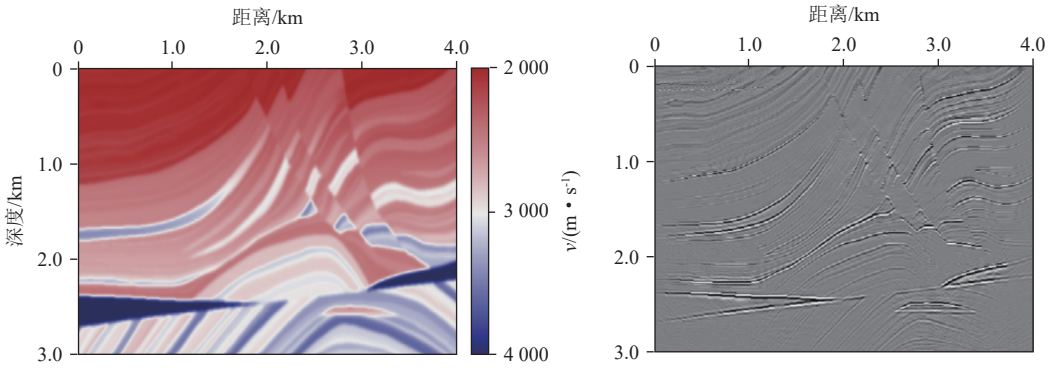
Pleshkevich 等[31] 提出了一种基于单向波动方程求解的地震成像并行算法。该算法通过并行化数据

流处理来提高计算效率, 具体方法是同时处理多个震源/接收器对的数据, 波场外推采用伪谱方法, 并通过快速傅里叶变换实现每个数据集由一个 MPI 进程单独处理, 以节约计算资源并获得高质量且振幅保持完好的成像结果。Zhang 等[32] 详细介绍了保幅单程波偏移算子, 并通过数值试算证明了偏移结果的保幅性。在共成像角道集中, 每个角度对应一个特定的道集, 反映了该角度的地下介质对地震波的反射、折射等作用。Zhang 等[33] 提出了一种改进的双平方根单程波动方程, 以生成保幅的共成像角道集。

单程波保幅成像方法将传统单程波外推与振幅补偿、成像条件设计结合, 实现地下反射系数的定量成像, 振幅保真性和计算效率上具有优势。但由于该方法建立在高频渐近或抛物线近似条件下, 对于低频或波动较强的复杂区域有近似误差, 存在对速度模型依赖较强和近似条件限制等不足。

2.4　最小二乘偏移成像方法

考虑了速度分界面产生的透射效应, 周华敏等[34] 采用单极震源替代传统的偶极震源进行偏移, 提出了一种新的单程波最小二乘偏移方法。在优化问题的迭代求解过程中, 利用地震波场的地下照明强度作为预条件算子, 以提高迭代的收敛速度。高国超等[35] 将单平方根分步傅里叶算子引入最小二乘框架, 实现了基于单平方根算子的叠前最小二乘分步傅里叶偏移算法; 同时, 为了抑制离散傅里叶变换引起的周期性伪波场, 在偏移算法中引入了余弦衰减边界。朱峰等[36] 采用 VTI 介质高阶傅里叶有限差分波场延拓算子进行反演成像, 实现基于 VTI 介质的最小二乘 FFD 叠前深度偏移; 为了提高计算效率, 采用了平面波编码策略来压缩地震数据, 在迭代过程中, 提取了 CIG 道集, 并在该道集上应用平面波构造滤波算子, 以减少成像噪声, 提高成像信噪比。叶月明等[37] 提出了基于单程波算子的全波场最小二乘偏移方法, 突破了波场一次反射假设的限制, 利用全波场信息提高成像质量。研究者首先推导了基于单程波算子闭循环延拓的全波场正演算子, 其次在二范数意义下求解 FW-LSM 的误差泛函和梯度项表达式, 最后构建了基于反演框架的全波场最小二乘偏移方法。图 4 为基于最小二乘傅里叶有限差分偏移方法得出的 Marmousi 模型的偏移结果。



(a) Marmousi 模型的平滑速度场　　(b) 最小二乘傅里叶有限差分偏移成像结果

图 4　Marmousi 模型偏移结果[37]

Fig. 4　Migration of Marmousi[37]

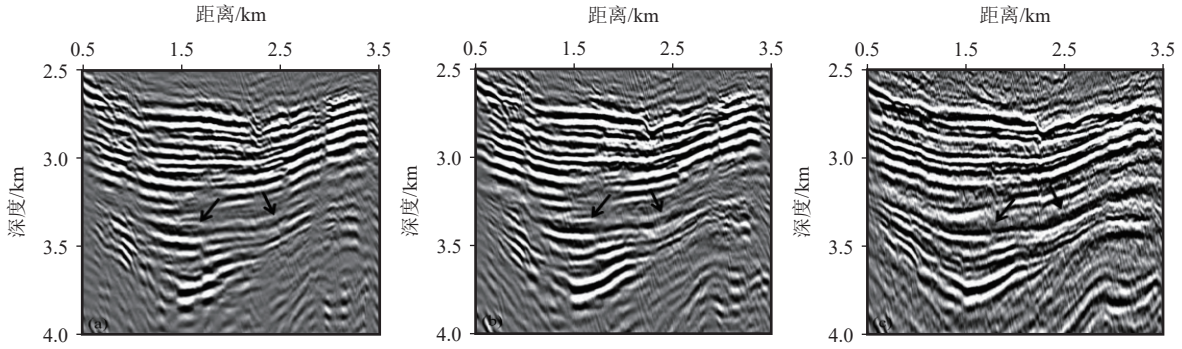
单程波类最小二乘偏移方法又可具体分为最小二乘分步傅里叶偏移、最小二乘傅里叶有限差分偏移和最小二乘广义屏偏移。最小二乘偏移方法的正则化项和迭代优化过程有助于抑制噪声和数据不足引起的非唯一性问题, 成像结果更加平滑稳定, 但对背景速度模型较为敏感, 若初始速度模型偏差较大会导致收敛缓慢或成像失真, 且正则化项的权重因子的选择, 需要在数据拟合与模型平滑之间进行权衡, 不同参数选取可能对成像结果产生较大影响。

2.5　单程波优化多次波成像方法

通过研究多次波在单程波叠前深度偏移中引起的假象问题, 叶月明等[38] 提出了修改边界条件的方法, 以实现基于单程波叠前深度偏移的多次波成像。通过二范式最小能量差匹配因子, 将多次波成像结果与一次波成像结果进行匹配叠加, 以弥补一次波成像的不足。郑忆康等[39] 提出了消除单程波多次波偏移假象方法: 首先提取角度域共成像点道集, 其次对道集应用高分辨率的抛物线型 Radon 变换并切除噪声, 再次反变换回角度域, 最后将各个角度成分叠加在一起输出偏移结果。

在成像过程中, 同相轴仅根据它们的传播时间进行匹配。无关同相轴的互相关导致严重的串扰, 并在多次成像中引入噪声。为了克服这一缺点, Li 等[40] 引入了用于估计反射面的局部斜率的平面

波解析函数和用于多次单程波波动方程偏移的立体成像条件。叶月明等[41] 提出了不同阶次自由表面相关多次波预测与成像方法，基于单程波偏移算子和“面炮”偏移策略，以一次反射波或第 *N*-1 阶自由表面相关多次波为下行波场正向延拓，以第一阶多次或第 *N* 阶多次波为上行波场逆向延拓，并在每一层互相关成像得到第一阶或 *N* 阶多次波单独成像。一阶多次波成像信息比二阶更加丰富，也就是说随着多次波阶次变高，本资料的多次波成像能力会越强。与常规一次波成像相比，一阶与二阶多次波成像具有较高信噪比和振幅均衡度（图 5），箭头所指处的地层成像得到了明显改善，同相轴更易于追踪，提高了垂向成像分辨率。



(a) 一阶自由表面相关多次波　(b) 二阶自由表面相关多次波　(c) 常规一次波

图 5　海洋实际资料叠前深度偏移成像对比[41]

Fig. 5　Comparison of pre-stack depth offset imaging of actual oceanographic data[41]

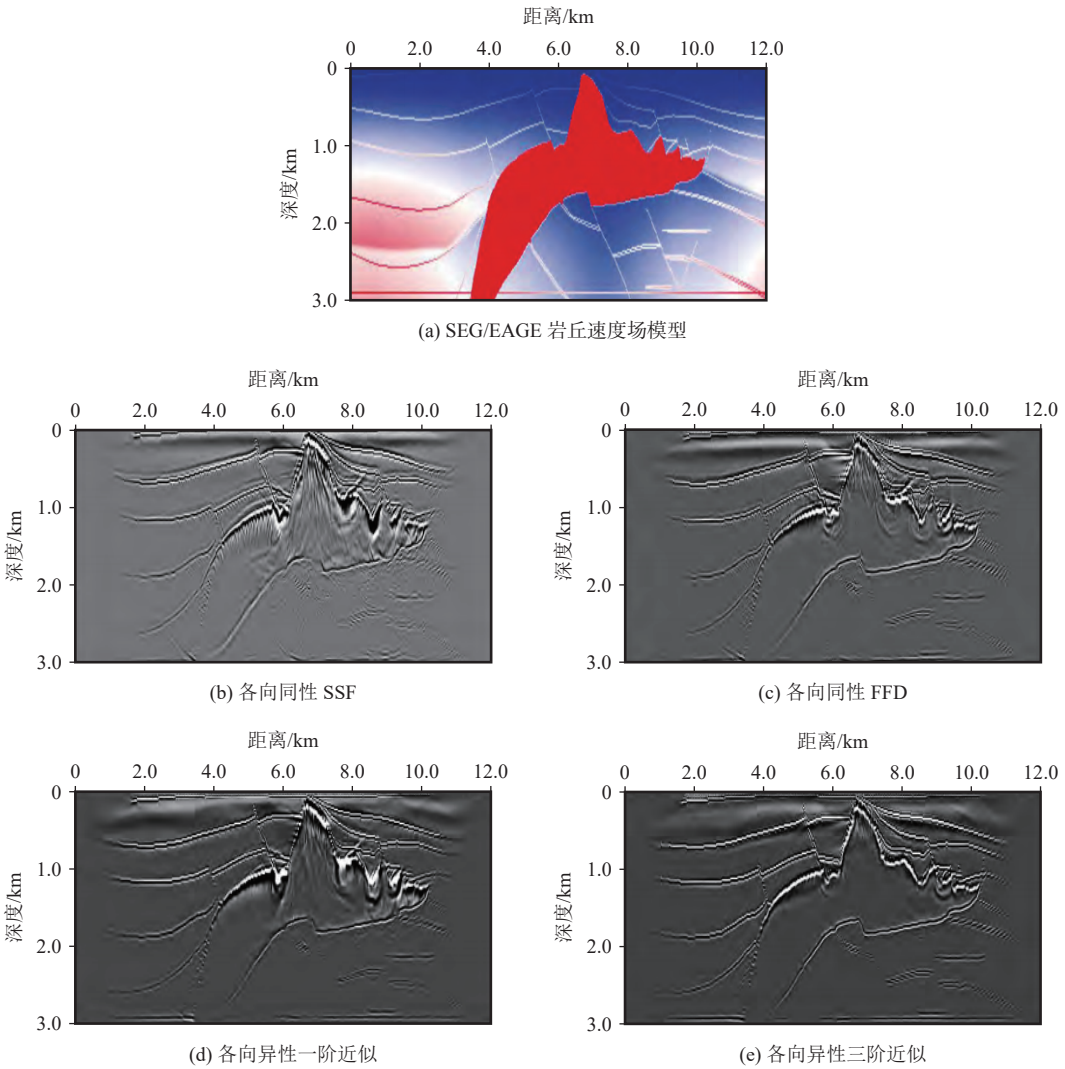
针对复杂海底情况，如崎岖海底多次波路径复杂、绕射波及绕射多次波发育等的挑战，黎孝璋等[42] 提出了一种新的多次波预测方法。该方法结合了单程波方程延拓、SRME、自适应匹配相减方法，利用岩石物理模型对炮记录进行波场延拓，从而获得预测的多次波模型。黄建东等[43] 提出了一种新的层间多次波成像方法，该方法利用层间多次波作为输入数据，利用波场处理技术获取上下行波场，对不同阶数的层间多次波进行成像。基于相移加差值的单程波方法，在频率波数域中同时延拓包含自由表面多次波和反射波的地震数据，王智瑞[44] 利用互相关成像条件在波阻抗界面实现二者的联合偏移成像。井洪亮等[45] 提出了一种基于单程波方程的水层多次波预测方法，通过单程波的数值模拟，实现了高信噪比的水层多次波波场生成，为适应复杂海底地形，采用截断 sinc 插值方法，以校正实际海底曲面与波场延拓网格之间的深度差。

单程成像方法在计算上比全波逆时偏移更节省资源，同时在某些区域能较好地分离出多次波信息。利用单程波分解技术，将球面波场分解为一系列具有不同传播方向的单程波分量，其中既包含主要反射波信息，也含有多次波信息。引入振幅补偿和衰减校正对每个分量向下外推，以抵消由于几何扩散及介质吸收带来的振幅衰减，并应用最小二乘或其他正则化方法，使成像振幅与地下反射系数挂钩以实现保振幅成像。该方法既可以得到主要反射的成像，也能单独提取出多次波成像道集。对多次波成像道集可以结合常规的反演方法，利用多次波中反映的不同传播路径信息，改善速度模型和地下介质参数的估计。

2.6　复杂介质成像方法

考虑到地球呈现垂直各向同性，Pedersen 等[46] 推导了准 P 波和准 SV 波的相速度表达式，并将其代入单程波动方程偏移算子中。陈雪等[47] 利用改良的单程波动方程数值模拟方法，对粘弹性 VTI 介质模型进行了 qP 波的正演模拟，并对点震源以及不同角度入射平面波震源的照明度进行了分析。利用 VTI 介质中 qP 波的频散关系方程，黄建平等[48] 推导出了不同精度的傅里叶有限差分波场延拓算子，包含了频率—波数域相移项、频率—空间域时移项和有限差分补偿项三部分。为了验证 qP 波 FFD 延拓算子在偏移成像中的应用效果，对 2DSEG/EAGE 岩丘模型进行了叠前深度偏移成像测试（图 6），发现各向同性 SSF 和各向同性三阶近似 FFD 偏移剖面因未考虑介质各向异性影响，成像效果较差，而各向异性三阶近似 FFD 的成像效果得到明显改善。

Stanton 等[49] 发展了针对各向同性介质中弹性波场的单程波动方程最小二乘偏移，采用了扩展成像条件，在共同成像点的深度—角度轴上应用平滑滤波来约束反演，以减少串扰噪声的影响。Shen 等[50] 使用基于单程波波动方程的 Q 层析成像来量化地下介质中的衰减效应，为油气藏创建一种精确的横向



(a) SEG/EAGE 岩丘速度场模型

(b) 各向同性 SSF　　(c) 各向同性 FFD

(d) 各向异性一阶近似　　(e) 各向异性三阶近似

图 6　采用 4 种延拓算子所得的 SEG/EAGE 岩丘模型单程波叠前深度偏移剖面[48]

Fig. 6　One-way wave pre-stack depth offset profiles of the SEG/EAGE[48]

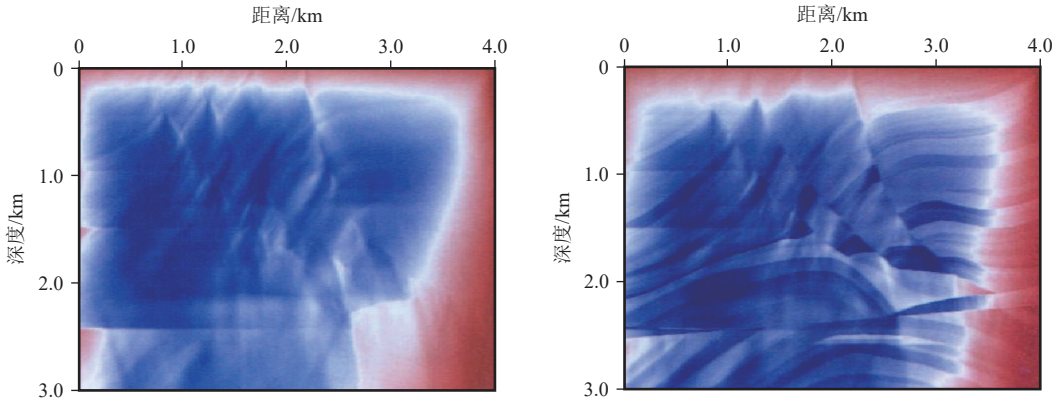
和纵向变化的品质因子 Q 模型。Shen 等[51] 对 3D 北海地震数据应用基于单程波波动方程的 Q 分析技术来反演 Q 模型, 反演得到的 Q 模型检测出了气体和通道的形状和位置。Q 层析成像技术能够定量反演地下介质的衰减效应, 进而生成高分辨率的 Q 模型。

复杂介质中单程波成像方法通过引入各向异性校正、改良的傅里叶有限差分外推算子以及最小二乘及扩展成像条件, 实现高精度、保振幅的深度偏移成像, 且能够在多次波和噪声干扰严重的环境中提取出有用构造信息。

2.7　单程波算子优化方法

传统的裂步傅里叶叠前深度偏移无法展现地震波传播的动力学特征, 导致地震数据无法实现保幅成像。李斐等[52] 在传统裂步法的基础上引入保幅校正算子, 对传统偏移算子进行校正, 实现保幅成像。图 7 展示了所有 240 个炮点照明度分析的累加结果, 可明显看出: 基于真振幅的分数傅里叶延拓算子的照明累加结果能够很好地展示 Marmousi 模型浅层的 3 个大断层以及中深层的背斜和低速体等结构形态, 生动描绘了波场随速度变化的细节, 而基于传统分数傅里叶延拓算子的照明累加结果中, 浅层的 3 个大断层显示模糊, 其他构造形态和细节也不够清晰, 无法准确反映波场随速度变化的趋势。

方伍宝等[53] 发展了类似于逆时偏移的基于单程波外推的二次反射波成像算子, 首先进行炮点下行波和检波点上行波的波场延拓, 然后进一步对检波点进行下行波延拓, 再通过对延拓的 3 个波场进行上、下行波的交叉相关, 实现上、下行波场的成像。由于单程波方法无法准确获取入射角信息, 通常使用垂直入射的反射系数, 导致模拟波场的振幅特征与实际地层不符。因此, 首皓等[54] 发展了一种改进的单程波算子, 结合了频率—波数域反射系数近似公式和相移插值技术, 以便更准确地模拟地下地



(a) 传统裂步傅里叶延拓算子　　(b) 真振幅裂步傅里叶延拓算子

图 7　传统延拓算子和真振幅延拓算子的照明度分析结果[52]

Fig. 7　Results of illumination analysis for traditional and true-amplitude continuation operators[52]

层。孙伟家等[55] 基于单程波近似和波动积分方程的变量分离近似，推导出耦合反射/透射系数的单程波传播算子。张廉萍等[56] 深入研究了单平方根算子李代数深度积分中存在的问题，通过对单平方根算子进行大步长延拓，得到了地震波走时的解析表达式，改进后的方法收敛速度更快并提高了计算精度。吴娟等[57] 提出了一种基于 Padé近似的频率—波数域高精度单程波场延拓算子，提高了对传播角度大和横向速度变化强的适应能力。

Dreamlet 单程波算子在进行波场深度延拓时，能够引导地震数据沿着特定方向在时间轴上传播，随着深度增加，会舍弃部分浅层结构的数据，以缩短记录时间并减少计算量。观测系统沉降法偏移会在每一步将所有数据向下延拓，生成反映目标深度数据位置的波场。为了最大化利用这一特性，吴帮玉等[58] 结合了 Dreamlet 单程波算子和观测系统沉降法偏移的理论和方法。Dreamlet 单程波算子观测系统沉降过程会仅保留对地质结构有贡献的有效数据，舍弃对下部成像没有帮助的信号。

单程波动方程偏移的一个优点是计算成本低。然而，受限于波场传播角度，单程波动方程偏移有振幅不准确和偏移假象等问题，因此难以对具有大倾角结构的目标进行高精度成像。此外，当模型具有较大的水平速度差异时，单程波传播算子很难计算准确的波场相位。基于双程波传播算子的逆时偏移（RTM）具有较高的分辨率，但在实际应用中也具有较高的计算成本。Yu 等[59] 开发了一个卷积神经网络（CNN）应用模式，通过从另一个偏移方法中学习来改进一个偏移方法，并设计了一个结构类似于 U-net 的 CNN，结合了两种偏移方法的优点。CNN 的标签是 RTM 结果，相应的输入是使用广义屏蔽传播子（GSP）进行单程波动方程偏移的结果。经过训练的 CNN 改善了单程波动方程偏移中的振幅，并消除了横向速度扰动引起的错误。CNN 允许在单程波动方程偏移结果中对陡峭结构进行高分辨率成像，使得单程波动方程偏移结果的准确性接近于 RTM 结果。

在传统裂步傅里叶叠前深度偏移基础上引入保幅校正算子，实现保振幅成像的一种改进策略，同时也衍生出基于单程波外推的二次反射成像和改进的频率—波数域延拓算子，当复杂介质的模型具有较大的水平速度差异时，单程波传播算子难以计算出准确的波场相位，增加局部改进措施效果提升明显，但也增加了复杂性和参数调控难度。

2.8　单程波与双程波的对比

2.8.1　理论基础与物理模型

单程波成像基于单程波方程（如 Claerbout 方程），仅模拟波场的单向传播（如向下或向上传播），忽略多次波、绕射波和反向散射波，仅考虑一次反射波。其物理模型采用高频近似假设，适用于横向变速介质，但忽略了复杂波场相互作用。

双程波成像基于完整的波动方程（双程波方程），同时包含正向和反向传播波场，完整保留所有波场成分（包括多次波、转换波和绕射波），无高频近似，更严格满足波动方程的物理规律，适用于任意复杂介质。

2.8.2　计算效率与资源消耗

单程波成像的计算复杂度较低，适合大规模数据处理。其算法易于并行化（如分炮点或分频率域处理），适合 GPU/CPU 异构加速，实际应用中处理千米级三维数据仅需小时级。

双程波成像的算法复杂度较高，计算资源需求大。由于其波场全局耦合性强，并行化难度高，内存占用大，处理同等规模数据可能需要数天至数周。

2.8.3　成像精度与适用场景

单程波成像在陡倾角构造成像方面存在一定限制(通常<60°),需通过高阶算法(如广义屏方法)扩展其能力,其振幅保真性需通过保幅偏移算法修正,但对多次波和噪声较为敏感。尽管如此,单程波成像在横向变速介质中表现良好,适用于常规油气勘探、区域构造解释和快速预成像。

双程波成像无倾角限制,可精确成像近垂直断层、盐体侧翼等复杂构造,天然保幅性强,尤其在多次波发育区域(如海洋勘探)更具优势。双程波成像在强各向异性、盐下构造及裂缝型储层中表现更优,适用于复杂构造勘探(如盐丘、逆冲断层)和高精度储层描述。

2.8.4　技术挑战与局限性

单程波成像的主要技术挑战在于陡倾角成像精度不足,各向异性建模需额外修正。但其对数据频带和信噪比要求较低,适合实际勘探数据,且可通过常规集群实现高效计算。

双程波成像的算法瓶颈在于计算成本高,难以处理超大规模数据,低频缺失还可能导致反演不唯一。此外,双程波成像依赖宽频带、高信噪比数据,硬件投入成本高,严重依赖超算或 GPU 集群。

3　结论与展望

单程波方程通过简化全波场模拟过程,显著降低了计算复杂度,使其在横向变速介质中仍能保持稳定的成像效果,结合保幅偏移算法,可有效消除地震记录的相位扰动,保留振幅随深度的自然衰减特征,从而增强成像的物理真实性。此外,角度域成像技术通过多尺度分析入射角信息,能够揭示复杂地质构造(如断层、裂缝系统)的细节,弥补传统时间域或深度域成像的不足。随着常规油气资源开发趋于饱和,深层及复杂构造(如盐下构造、页岩储层)的勘探需求日益迫切。单程波成像技术的高效性和适应性使其成为此类场景的核心工具,尤其在陡倾角构造和各向异性介质中表现突出,为资源定位与储量评估提供高分辨率数据支持。单程波成像算法的优化与智能化升级(如 AI 加速建模)可减少对国外商业软件的依赖,促进国产勘探装备和软件的研发,为我国能源安全与可持续发展奠定技术基础。

未来的发展方向有以下几点:

1)高精度数值算法与混合求解技术。需突破现有有限差分法(如一阶、二阶格式)的精度限制,发展高阶有限差分或混合算法(如有限差分—谱方法结合),以解决陡倾角构造的成像模糊问题,优化并行计算架构,实现超大规模数据的高效处理。

2)各向异性介质与智能化建模技术融合。针对页岩、裂缝性储层等各向异性介质,需将各向异性理论融入单程波方程,构建更精确的速度模型,结合机器学习技术,利用数据驱动方法优化模型参数,实现自适应反演流程,减少人工干预。

3)实时处理与多模态数据整合。结合异构计算(如 GPU/TPU 加速)和边缘计算技术,推动成像流程的实时化,探索单程波成像与多物理场数据(如电磁、重力数据)的联合反演,提升地下结构解释的全面性。

4)保幅与角度域成像的工程化验证。通过实际勘探数据(如海上宽频地震数据)验证算法的鲁棒性,建立保幅偏移与角度域成像的质量评价体系,推动技术从理论研究向工业应用的转化。

5)发展混合算法。单程波用于快速初始建模,双程波用于局部高精度反演,AI 代理模型有望替代双程波核心计算模块,兼顾精度与效率。此外,单/双程波与电磁、重力数据的联合反演将提升复杂介质的综合解释能力,推动地震勘探技术向更高精度、更智能化的方向发展。

参考文献(References):

[1] Stolt R H. Migration by Fourier transform[J]. Geophysics, 1978, 43(1): 23−48.

[2] Gazdag J. Wave equation migration with the phase-shift method[J]. Geophysics, 1978, 43(7): 1342−1351.

[3] Gazdag J, Sguazzero P. Migration of seismic data by phase shift plus interpolation[J]. Geophysics, 1984, 49(2): 124−131.

[4] Stoffa P L, Fokkema J T, de Luna Freire R M, et al. Split-step Fourier migration[J]. Geophysics, 1990, 55(4): 410−421.

[5] Hill N R. Gaussian beam migration[J]. Geophysics, 1990, 55(11): 1416−1428.

[6] Ristow D, Rühl T. Fourier finite-difference migration[J]. Geophysics, 1994, 59(12): 1882−1893.

[7] Wu R S, Huang L J, Xie X B. Backscattered wave calculation using the De Wolf approximation and a phase-screen propagator[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 1995, Society of Exploration Geophysicists, 1995: 1293−1296.

[8] Wapenaar C P A. One-way representations of seismic data[J]. Geophysical Journal International, 1996, 127(1): 178−188.

[9] Wu R S, de Hoop M V. Accuracy analysis and numerical tests of screen propagators for wave extrapolation[C]//Proceedings of SPIE Conference on Mathematical Methods in Geophysical Imaging IV, 1996: 196.

[10] de Hoop M V, Le Rousseau J H, Wu R S. Generalization of the phase-screen approximation for the scattering of acoustic waves[J]. Wave Motion, 2000, 31(1): 43−70.

[11] Huang L J, Fehler M C, Wu R S. Extended local Born Fourier migration method[J]. Geophysics, 1999, 64(5): 1524−1534.

[12] Xiong X J, He Z H, Huang D J. One-way wave equation seismic prestack forward modeling with irregular surfaces[J]. Applied Geophysics, 2006, 3(1): 13−17.

[13] 李振春, 叶月明, 仝兆岐. 起伏地表下基于高阶广义屏算子的叠前深度偏移 [J]. 勘探地球物理进展, 2007, 30(5): 377−381.
Li Z C, Ye Y M, Tong Z Q. High order generalized screen propagator prestack depth migration for irregular toppgraphy[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2007, 30(5): 377−381.

[14] 卢宝坤, 时维成, 王立业. 基于单程波波动方程的起伏地表叠前深度偏移技术 [J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(6): 71−74, 78.
Lu B K, Shi W C, Wang L Y. One-way wave equation pre-stack depth migration from irregular surface[J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(6): 71−74, 78.

[15] 雷秀丽, 李振春, 孔雪, 等. 起伏地表条件下基于复 Pade 逼近的叠前深度偏移 [J]. 地球物理学进展, 2012, 27(5): 2100−2106.
Lei X L, Li Z C, Kong X, et al. Prestack depth migration using complex Pade approximations for irregular surfaces[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(5): 2100−2106.

[16] 段心标, 王华忠, 白英哲, 等. 基于 GPU 的三维起伏地表单程波叠前深度偏移 [J]. 石油物探, 2016, 55(2): 223−230.
Duan X B, Wang H Z, Bai Y Z, et al. 3D one-way wave equation prestack depth migration from topography based on the acceleration of GPU[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(2): 223−230.

[17] 沈铭成, 李录明, 刘明洋, 等. 基于 ADIPI 的单程波三维 VSP 正演模拟方法 [J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(5): 59−62.
Shen M C, Li L M, Liu M Y, et al. 3D VSP one-way wave forward modeling based on ADIPI[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(5): 59−62.

[18] 段晓梦, 王涛. 基于单程波方程的 VSP 模拟方法研究 [J]. 内江科技, 2015, 36(2): 112−113, 153.
Duan X M, Wang T. Research on VSP simulation method based on one-way wave equation[J]. Nei Jiang Science & Technology, 2015, 36(2): 112−113, 153.

[19] 范廷恩, 黄旭日, 马淑芳. VSP 时空域高角度单程波方程偏移及其应用研究 [J]. 地球物理学报, 2016, 59(9): 3459−3469.
Fan T E, Huang X R, Ma S F. VSP migration based on high angle one-way wave equation in time-space domain and its applications [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(9): 3459−3469.

[20] 孙鲁平, 曹宏, 姚逢昌, 等. 复杂介质中平面波模拟的单程波方法 [J]. 地震学报, 2010, 32(2): 167−174.
Sun L P, Cao H, Yao F C, et al. Plane wave modeling with one-way wave equation in complex media[J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(2): 167−174.

[21] 薛花, 张恩嘉, 赵宪生, 等. 基于单程波动方程平面波叠前深度偏移 [J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(6): 62−65.
Xue H, Zhang E J, Zhao X S, et al. Plane wave pre-stack depth migration based on wave equation[J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38(6): 62−65.

[22] 叶月明, 庄锡进, 胡冰, 等. 基于单程波方程的合成平面波保幅偏移 [J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(5): 711−716, 670-671, 854.
Ye Y M, Zhuang X J, Hu B, et al. Synthesized plane wave preserved amplitude prestack depth migration based one-way wave equation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(5): 711−716, 670-671, 854.

[23] 李慧杰, 陈秀梅. 基于单程波动方程的曲面波裂步傅里叶叠前深度偏移 [J]. 电子设计工程, 2016, 24(9): 72−75.
Li H J, Chen X M. Curved-wave SSF prestack depth migration based on one-way wave equation[J]. Electronic Design Engineering, 2016, 24(9): 72−75.

[24] 程磊磊, 王华忠, 刘少勇. 射线中心坐标系中傍轴单程波方程数值模拟与偏移成像 [J]. 石油物探, 2012, 51(4): 338−342.
Cheng L L, Wang H Z, Liu S Y. Simulation and imaging with paraxial one-way wave equation in ray-centered coordinates[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51(4): 338−342.

[25] Vivas F A, Pestana R C. True-amplitude one-way wave equation migration in the mixed domain[J]. Geophysics, 2010, 75(5): S199−S209.

[26] Naghadeh D H, Ali Riahi M. One-way wave-equation migration in log-polar coordinates[J]. Geophysics, 2013, 78(2): S59−S67.

[27] 解建建, 王绪本. 基于单程波真振幅分步傅里叶叠前深度偏移方法 [J]. 物探化探计算技术, 2011, 33(1): 36−39.
Xie J J, Wang X B. A true amplitude split-step Fourier pre-stack depth migration based on one-way wave equation[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 33(1): 36−39.

[28] 叶月明, 李振春, 庄锡进, 等. 碳酸盐岩区单程波方程保幅叠前深度偏移 [J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(5): 715−719, 836+661.
Ye Y M, Li Z C, Zhuang X J, et al. Depth offset before amplitude preserving stacking of one-way wave equation in carbonate zone[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(5): 715−719, 836+661.

[29] 刘定进, 杨瑞娟, 罗申玥, 等. 稳定的保幅高阶广义屏地震偏移成像方法研究 [J]. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2402−2411.
Liu D J, Yang R J, Luo S Y, et al. The method of preserved-amplitude seismic migration imaging with stable generalized high order screen[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(7): 2402−2411.

[30] 何润, 杨午阳, 王恩利, 等. 基于粒子群优化和保幅成像条件的广义屏偏移 [J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(4): 814−825, 724.
He R, Yang W Y, Wang E L, et al. Generalized screen propagator migration based on particle swarm optimization and amplitude-preserved imaging conditions[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(4): 814−825, 724.

[31] Pleshkevich A, Vishnevsky D, Lisitsa V, et al. Parallel algorithm for one-way wave equation based migration for seismic imaging[C]// Supercomputing. Cham: Springer, 2019: 125−135.

[32] Zhang Y, Zhang G Q, Bleistein N. Theory of true-amplitude one-way wave equations and true-amplitude common-shot migration[J]. Geophysics, 2005, 70(4): E1−E10.

[33] Zhang Y, Xu S, Bleistein N, et al. True-amplitude, angle-domain, common-image gathers from one-way wave-equation migrations[J]. Geophysics, 2007, 72(1): S49−S58.

[34] 周华敏, 陈生昌, 任浩然, 等. 基于照明补偿的单程波最小二乘偏移 [J]. 地球物理学报, 2014, 57(8): 2644−2655.

Zhou H M, Chen S C, Ren H R, et al. One-way wave equation least-squares migration based on illumination compensation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(8): 2644−2655.

[35] 高国超, 黄建平, 李振春. 基于单平方根算子的叠前最小二乘分步傅里叶偏移方法 [J]. 地球物理学进展, 2016, 31(1): 177−184.
Gao G C, Huang J P, Li Z C. Prestack least-squares split-step Fourier migration based on single square root propagator[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(1): 177−184.

[36] 朱峰, 黄建平, 李振春, 等. 基于构造滤波的 VTI 介质平面波最小二乘 FFD 叠前深度偏移 [J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(5): 932−944.
Zhu F, Huang J P, Li Z C, et al. Structure-constrained plane-wave least-squares FFD prestack depth migration for VTI media[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(5): 932−944.

[37] 叶月明, 钟世超, 范国章, 等. 基于单程波算子的全波场最小二乘偏移方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(5): 1142−1151.
Ye Y M, Zhong S C, Fan G Z, et al. A full-wavefield least-squares offset method based on one-way wave operator[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(5): 1142−1151.

[38] 叶月明, 赵昌垒, 庄锡进, 等. 基于单程波偏移算子的地表相关多次波成像 [J]. 地球物理学报, 2014, 57(4): 1241−1250.
Ye Y M, Zhao C L, Zhuang X J, et al. Migration of surface correlated multiples based on one-way wave equation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(4): 1241−1250.

[39] 郑忆康, 王一博, 常旭, 等. 单程波角度域内压制多次波偏移假象 [J]. 地球物理学报, 2016, 59(12): 4584−4593.
Zheng Y K, Wang Y B, Chang X, et al. Eliminating migration artifacts in angle domain based on one-way wave equation migration of multiples[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(12): 4584−4593.

[40] Li Z N, Li Z C, Wang P, et al. One-way wave-equation migration of multiples based on stereographic imaging condition[J]. Geophysics, 2017, 82(6): S479−S488.

[41] 叶月明, 郭庆新, 庄锡进, 等. 不同阶次自由表面相关多次波预测与成像方法 [J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2237−2248.
Ye Y M, Guo Q X, Zhuang X J, et al. Prediction and migration of different order surface-related multiples[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(6): 2237−2248.

[42] 黎孝璋, 邓勇, 赫建伟, 等. 复杂海底自由表面多次波预测方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(1): 64−70, 6.
Li X Z, Deng Y, He J W, et al. Free-surface-related multiple prediction for complex seafloor[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(1): 64−70, 6.

[43] 黄建东, 胡天跃, 王尚旭. 层间多次波傅里叶有限差分偏移成像 [J]. 地球物理学报, 2022, 65(11): 4394−4403.
Huang J D, Hu T Y, Wang S X. Fourier finite-difference migration of internal multiples[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(11): 4394−4403.

[44] 王智瑞. 基于单程波理论的自由表面多次波偏移成像方法 [J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(3): 304−309.
Wang Z R. Multiple migration imaging method based on one-way wave[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2022, 19(3): 304−309.

[45] 井洪亮, 孙鹏远, 陈小宏, 等. 基于单程波方程的水层多次波预测方法 [J]. 地球物理学进展, 2024, 39(6): 2452−2462.
Jing H L, Sun P Y, Chen X H, et al. Water-layer multiple prediction method based on one-way wave equation[J]. Progress in Geophysics, 2024, 39(6): 2452−2462.

[46] Pedersen Ø, Ursin B, Helgesen H K. One-way wave-equation migration of compressional and converted waves in a VTI medium[J]. Geophysics, 2010, 75(6): S237−S248.

[47] 陈雪, 韩立国, 杨贺龙, 等. 粘弹 VTI 介质单程波正演模拟与照明分析 [J]. 石油物探, 2015, 54(6): 643−651.
Chen X, Han L G, Yang H L, et al. One-way wave equation forward modeling and illumination analysis in viscoelastic VTI media[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(6): 643−651.

[48] 黄建平, 朱峰, 李振春, 等. VTI 介质 FFD 叠前深度偏移成像方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(3): 491−501.
Huang J P, Zhu F, Li Z C, et al. Depth offset imaging method for FFD pre-stacking in VTI media[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(3): 491−501.

[49] Stanton A, Sacchi M D. Elastic least-squares one-way wave-equation migration[J]. Geophysics, 2017, 82(4): S293−S305.

[50] Shen Y, Biondi B, Clapp R. Q-model building using one-way wave-equation migration Q Analysis-Part 1: Theory and synthetic test[J]. Geophysics, 2018, 83(2): S93−S109.

[51] Shen Y, Biondi B, Clapp R. Q-model building using one-way wave-equation migration Q analysis: Part 2: 3D field-data test[J]. Geophysics, 2018, 83(2): S111−S126.

[52] 李斐, 吕彬, 王宇超, 等. 裂步傅里叶真振幅叠前深度偏移 [J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(4): 387−390.
Li F, Lyu B, Wang Y C, et al. Split-step Fourier true amplitude prestack depth offset[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2008, 43(4): 387−390.

[53] 方伍宝, 张兵. 单程波外推高陡倾角反射成像技术的应用研究 [J]. 石油物探, 2009, 48(5): 487−493.
Fang W B, Zhang B. Application of one-way wave extrapolated high steep dip reflection imaging technique[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2009, 48(5): 487−493.

[54] 首皓, 孙鲁平, 刘红伟, 等. 复杂介质地震波场模拟的单程波方法 [J]. 石油物探, 2009, 48(5): 479−482.
Shou H, Sun L P, Liu H W, et al. One-way wave method for simulation of seismic wave field in complex media[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2009, 48(5): 479−482.

[55] 孙伟家, 符力耘, 姚振兴. 基于耦合反射/透射系数单程波传播算子的地震波模拟研究 [J]. 地球物理学报, 2009, 52(10): 2558−2565.
Sun W J, Fu L W, Yao Z X. Simulation of seismic waves based on coupled reflection/transmission coefficient one-way wave propagation operator[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(10): 2558−2565.

[56] 张廉萍, 刘洪, 李幼铭. 单程波李代数深度积分的精度分析和算法改进 [J]. 地球物理学报, 2010, 53(11): 2739−2746.
Zhang L P, Liu H, Li Y M. Accuracy analysis and algorithm improvement of one-way Lie algebra depth integration[J]. Chinese

Journal of Geophysics, 2010, 53(11): 2739−2746.

[57] 吴娟, 郭发明, 熊晓军. 频率-波数域高精度单程波场延拓算子研究 [J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2010, 32(4): 229−232.
Wu J, Guo F M, Xiong X J. Research on high-precision one-way wavefield extension operator in frequency-wave number domain[J]. Journal of Oil and Gas (Journal of Jianghan Petroleum Institute), 2010, 32(4): 229−232.

[58] 吴帮玉, 吴如山, 高静怀, 等. 基于时空局域化 dreamlet 单程波算子的观测系统沉降法偏移 [J]. 地球物理学报, 2017, 60(9): 3505−3517.
Wu B Y, Wu R S, Gao J H, et al. Sedimentation law offset for observing systems based on spatio-temporally localized dreamlet one-way wave operator[J]. Chinese Journal of Geophysical, 2017, 60(9): 3505−3517.

[59] Yu Y W, Li Y X, Wu X M, et al. Enhancing one-way wave equation-based migration with deep learning[J]. Geophysics, 2023, 88(1): WA105−WA114.

Research on one-way wave migration imaging: A review

HU Jun-Hua [1], XIE Xiao-Jun [2, 3], TIAN Kun [1], BU Chang-Cheng [1], QIN Ning [1], LIU Chang [1], GUO Chen [1], QIU Han-Zhi [1]

(1. *Geophysical Research Institute*, *Shengli Oilfield Company*, *SINOPEC*, *Dongying* 257000, *China*; 2. *Shengli Branch*, *Geophysical Corporation*, *SINOPEC*, *Dongying* 257000, *China*; 3. *Oil and Gas Exploration Management Center*, *Shengli Oilfield Company*, *SINOPEC*, *Dongying* 257000, *China*)

Abstract: Fourier methods have found wide application in seismic wavefield continuation due to their high computational efficiency. However, these methods are insufficient to deal with media with lateral velocity variations. In contrast, the split-step Fourier, Fourier finite-difference, and generalized-screen migration can significantly improve the accuracy of wavefield simulation and imaging by combining the continuation in the frequency-wavenumber and spatial domains. By inheriting the high computational efficiency of Fourier methods, the one-way wave migration imaging method further optimizes the algorithm design and numerical implementation. This method significantly enhances the adaptability and imaging quality of complex media, suggesting significant application value. This study systematically reviews the fundamental principles and research status of one-way wave migration imaging, summarizes its research progress from six perspectives, and proseses its development trends. The purpose is to provide a reference for further research and application of seismic imaging technology.

Key words: seismic imaging; one-way wave; migration imaging; Fourier finite-difference migration; generalized-screen migration

(本文编辑: 叶佩, 沈效群)