

doi: 10.11720/wtyht.2018.0308

吴华,李庆春,邵广周.瑞利波波形反演的发展现状及展望[J].物探与化探,2018,42(6):1103-1111.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.0308>

Wu H, Li Q C, Shao G Z. Development status and prospect of Rayleigh waveform inversion[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(6): 1103-1111. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.0308>

瑞利波波形反演的发展现状及展望

吴华¹, 李庆春², 邵广周²

(1. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 常规多道面波分析技术反演过程需要计算基于水平层状介质假设基础上的理论频散曲线, 从而导致该方法的水平分辨率无法满足横向不均匀复杂介质的要求。而目前已成为人们研究热点的全波形反演技术, 其反演过程基于波动方程求解, 对瑞利波而言, 无需根据频散方程计算频散曲线, 理论上克服了常规多道面波分析技术横向分辨能力的“先天不足”。因此, 瑞利波波形反演是瑞利波勘探领域中一个重要的发展方向。论文回顾了全波形反演的发展历史, 剖析了瑞利波波形反演的发展现状及存在问题, 指出了瑞利波波形反演需要进一步研究的问题和发展趋势, 为瑞利波波形反演研究提供了一定的研究思路。

关键词: 瑞利波; 波形反演; 多道面波分析技术

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2018)06-1103-09

0 引言

自 1887 年 Rayleigh^[1] 首先发现瑞利波以来, 其频散特性的应用不断得到关注和拓展。1953 年, Haskell^[2] 提出了计算面波频散曲线的 Haskell 矩阵法, 为人们利用频散曲线反演探测地球内部结构奠定了算法基础。1962 年, Dorman 等^[3] 首次根据瑞利波频散数据反演得到了纽约—宾夕法尼亚地区的壳—幔结构。1983 年, Nazarian 等^[4] 提出了表面波谱分析法 (SASW), 用于探测路基厚度及其弹性模量。1999 年, Parker 等^[5] 提出了多道面波分析法 (MASW), 该方法与 SASW 方法相比, 具有数据采集速度快、高阶面波易识别等优点。夏江海等^[6-7] 通过与钻孔资料对比发现 MASW 方法获得的横波速度与钻孔测量基本一致。近年来, MASW 方法已被广泛应用到近地表地球物理勘探中, 如基岩面^[8]、地面塌陷^[9]、地下空洞^[10]、近地表品质因子提取^[11] 以及其他工程与环境地球物理问题^[12]。

虽然 MASW 方法在工程领域的应用越来越广泛, 但 MASW 方法应用的理论假设是水平层状介

质, 通过单炮记录频散曲线反演得到的一维速度结构反映的是排列中点位置上整个排列范围内的平均横波速度。而二维速度剖面则是通过多个一维速度剖面插值得到。因此, 二维速度剖面的横向分辨率与介质的横向不均匀程度以及排列长度密切相关。如果介质横向变化剧烈 (如断层、空洞等), 则不满足水平层状介质假设, 从而严重影响频散曲线的反演精度, 也就是说该方法在横向速度结构变化剧烈区域的应用受到了一定的限制。Lin 等^[13] 的研究表明, 当地下横向速度存在剧烈变化时, MASW 方法存在将横向速度变化误判为垂直方向速度的变化, 导致错误的结果, 降低了反演结果的横向分辨率。为了改善横向分辨率问题, 研究人员尝试采用横向小排列或多窗口叠加技术来加密横向上一维横波速度剖面的个数^[14-16]。虽然这些方法在一定程度上提高了二维速度剖面的横向分辨能力, 但仍然无法跳出 MASW 方法的理论假设限制。

近年来, 已成为地震勘探领域研究热点的全波形反演技术, 为瑞利波技术避开频散曲线反演直接进行波形反演提供了很好的研究思路和理论基础。全波形反演与旅行时层析成像不同, 它对波的传播

收稿日期: 2018-08-30; 修回日期: 2018-09-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41874123, 41004043); 陕西省自然科学基金项目 (2016JM4003); 长安大学中央高校基金项目 (300102268402)

作者简介: 吴华 (1982-), 女, 讲师, 主要从事地震波场模拟及全波形反演研究工作。Email: wuhua@chd.edu.cn

过程几乎没有做任何数学处理或近似,且同时利用了所有波至的振幅和相位信息,理论上可以提供比旅行时层析、地震偏移等成像方法更为精确的地下结构信息。瑞利波波形反演过程基于波动方程求解,不要求模型为水平层状介质,适合复杂介质的波场计算,理论上避开了频散曲线的计算,是解决 MASW 方法水平层状介质假设限制的首选方法,具有广阔的应用前景。

1 全波形反演的国内外研究现状

自 20 世纪 80 年代 Lailly^[17] 和 Tarantola^[18-19] 等人提出全波形反演方法以来,该方法在时间域和频率域均得到了长足的发展。其最初的应用是从时间域开始的,Gauthier 等^[20] 通过三个简单的二维声波模型给出了第一个时间域全波形反演的测试案例。随后 Mora^[21]、Cruse 等^[22] 将时间域全波形反演应用到二维弹性介质模型。早期,由于其计算成本高昂,人们只能在有限迭代次数的情况下对短排列采集数据进行反演。数据中长波长及中间波长成分的缺失造成了反演过程的高度非线性。

1995 年,Bunks 等^[23] 提出了一种时间域多尺度全波形反演算法。该方法由一系列频率重叠的反演过程组成,最初的数据只包含起始频率,下一组反演由一个更高频率的数据叠加在前一次迭代所使用的数据之上,反演由低频到高频逐步叠加完成,数据中的高频成分随着迭代次数的增加而增多。由于低频数据对周期跳跃不敏感,所以多尺度反演策略降低了反演过程的非线性程度。影响全波形反演计算效率的因素主要有波场正演和反演算法两个方面。在提高波场正演计算效率方面,1986 年,Virieux^[24] 提出了速度—应力交错网格有限差分法进行波场计算。1988 年,Levander^[25] 采用空间四阶、时间二阶二维有限差分交错网格算法提高了波场模拟的效率和精度,满足全波形反演计算的要求,被后人广泛采用。另一方面,伪谱法^[26-27] 和有限元法^[28] 在全波形反演发展过程中也得到了充分的发展和应用。很多学者对时间域全波形反演的应用研究进行过不同的尝试。1990 年,Cruse 等^[22] 采用梯度迭代算法对多炮非转换 P 波实际地震数据进行时间域反演,反演时采用双曲正切准则进行目标函数误差拟合,且假设长波长速度为已知,反演结果对短波长的 P 波及 S 波波阻抗都能够较好地分辨。2002 年,Shipp 等^[29] 利用 12 km 长的海上拖揽广角地震数据在时间域进行二维有限差分弹性波全波形反演,得到了

地下二维 P 波速度结构。2008 年,Sears 等^[30] 利用广角多分量海底电缆数据进行时间域全波形反演,成功获取了地下 P 波和 S 波的速度结构。2012 年,Kohn 等^[31] 用 Marmousi 模型不同频段的模拟数据进行时间域全波形反演,得到了 Marmous 模型的纵波速度、横波速度及密度,结果发现低频数据对密度参数重建非常敏感。因此,反演中使用了接近 0 Hz 的低频段数据。2015 年,Yang Di 等^[32-33] 将双差分波形反演应用于时延地震来监测油气藏的变化。Wu 和 Alkhalifah^[34] 在对墨西哥湾的地震数据进行全波形反演时,采用同时反演背景速度和扰动项的办法取得了一定的反演效果。2016 年,Zhu 等^[35] 采用自适应匹配滤波算子对目标函数进行平滑滤波,以便得到一个更好的初始模型。Li 和 Demanet^[36] 采用将高频数据进行频率外推的办法,来恢复数据的低频成分,得到了合理的低波数速度模型。Cheng 等^[37] 实现了 VTI 介质的多参数全波形反演,并由此得到了更好的偏移图像。Wang 等^[38] 通过波场分解的办法将全波形反演梯度公式分解为四项,分别选择对应的短波长和长波长分量进行反演,利用有限偏移距范围内的数据恢复速度模型的长波长信息,取得了良好的效果。

在频率域全波形反演研究方面,1990 年,Pratt 等^[39-40] 提出了一种基于声波和弹性波波动方程的反演理论,并将其应用于多源井间跨孔地震数据,经过一次迭代就可以成功分辨出纵波及横波速度。与基于波动方程高频近似的初至波层析成像方法仅利用波场的初至信息不同,该方法利用了波场的全部信息,获得了比层析成像更好的反演结果。在波场正演计算时,直接将有限差分法应用于频率域波动方程,大大降低了计算成本。在后续的研究中,Pratt 等^[41] 对频率域全波形反演作了进一步的改进,根据炮检互易原理导出了获取误差函数梯度的快速算法,为频率域全波形反演进入实用化奠定了基础。同时,频率域地震波正演计算也在不断进步,进一步促进了频率域全波形反演的发展。2007 年,Operto 等^[42] 提出了一种基于大规模并行求解的频率域三维黏弹声波有限差分算法,采用 27 点加权平均算子提高了网格节点上的计算精度,并指出如果利用大规模机群对密集采集的全偏移距地震数据进行频率域三维全波形反演,可为中—长波长的地下结构成像提供可靠的工具。2008 年,Brossier 等^[43] 提出了一种求解二维弹性波方程的频率域省时有体积法,其网格剖分与有限元法类似,采用三角形网格单元,通过省时策略的应用,应力分量被从离散方程中

消除,三角形单元中只剩下速度未知,极大地降低了内存需求,提高了计算效率。2010年,Etienne等^[44]提出了一种适用于大尺度三维弹性介质地震波模拟的不连续伽里金有限单元法,该方法采用非结构化四面体网格,可以自适应地根据介质的局部属性进行细化,网格之间的插值阶数也可以根据适当的标准自适应地变化,大大减少了计算成本。频率域全波形反演一个非常重要的优点就是可以在频率域对反问题进行直接求解,且只用有限个频率就可以获得高精度的地下结构图像。对于某道地震记录来讲,也就是用几个傅里叶级数代替时间域中整个时间序列,大大节省了计算成本。另一方面,在频率域进行反演时,前一次较低频率的反演结果可作为下一次较高频率反演的初始模型。因此,在频率域,多尺度反演算法更容易实现^[45]。

近年来,频率域全波形反演的应用研究受到广泛关注。2006年,Xu等^[46]对震源特征估计、标准道归一化、道均值归一化等几种频率域全波形反演方法进行了对比分析,各方法对同一个二维井间弹性模型的重建结果表明,在震源子波未知的情况下,震源特征估计反演方法的成像效果优于另外两种方法。2007年,Gelis等^[47]采用预条件后的梯度法,根据波恩(Born)-莱托夫(Rytov)公式计算 Frechet 偏导数,实现了二维频率域弹性波全波形反演,获得了测试模型纵横波速度结构。2008年,Choi等^[48]提出一种声波—弹性波耦合反演算法,正演采用频率域有限元算法,反演采用逆时偏移技术进行误差回传,避开了波场偏导数的直接计算,得到了比纯声波反演更好的速度结构。2009年,Brossier等^[49]提出了一种大规模并行二维弹性波频率域全波形反演算法,并用陆上 SEG/EAGE 逆掩模型进行测试,他们认为对于陆上数据由于转换波和面波的出现以及缺乏低频数据都会加重反演的非线性程度,必须进行必要的预条件处理和选定合适频带宽度的数据组合来抑制目标函数的周期跳跃问题。2012年,Abubakar等^[50]利用正则化高斯-牛顿法在频率域求解弹性波全波形反演问题,通过在内循环计算雅可比矩阵的办法加速了高斯-牛顿反演过程,减少了计算量和内存需求。Jeong等^[51]提出一种分步反演策略,主要思路为先假定密度为定值,反演得到纵横波速度,将反演结果作为初始模型再对速度和密度进行同时反演,重建了 Marmousi2 模型和 SEG/EAGE 盐丘模型的纵横波速度及密度,其中密度参数的反演结果得到了明显改善。上述方法虽然对理论模型数据取得了较好的反演结果,但对于实际地震数据

来讲,要得到理想的反演结果还存在较大的困难,这是因为低频数据对反演结果至关重要,例如 Choi等^[48]以及 Jeong等^[51]在进行模型测试时所采用的数据都包含非常低的频率成分(如 0.167 Hz),而野外实际数据很难采集到如此低的频率成分。因此,在全波形反演的实际应用中遇到的最大困难是低频数据的缺失,这使得常规建模方法很难满足初始模型与低频数据耦合的需求,不管在时间域还是在频率域,都会造成反演过程的错误收敛^[52]。

在全波形反演研究中,除了时间域和频率域全波形反演之外,还涌现出众多不同的研究思路。Sirgue等人^[53]以及 Etienne等^[54]提出了波场正演在时间域进行,而目标函数及误差梯度的计算在频率域进行的办法。该方法的优点是在时间域采用有限差分法或有限单元进行波场正演比频率域正演具有更高的效率,这是因为在频率域进行迭代计算时,迭代次数会随频率个数的增加而线性增加。另一方面,时间域正演可方便地通过变时窗的办法去除记录中的强干扰(如直达波或面波)来减小反演过程的非线性,然后,在每个时间步长上利用离散傅里叶变换提取该时刻的频率域波场。也就是说,该方法可以在循环周期内以最小的额外成本提取任意数量的频率。同样,对于目标函数的周期跳跃问题可用由低频到高频的多尺度反演来降低。Shin等^[55-57]提出了拉普拉斯域全波形反演方法,他们的研究表明拉普拉斯域全波形反演对数据的频率成分不敏感,数据的频率滤波等效于拉普拉斯域波场与一个常数的乘积,在一定程度上可以缓解数据低频成分缺失的问题。拉普拉斯域全波形反演的主要缺点是其探测深度取决于偏移距的大小以及拉普拉斯阻尼常数的选取,虽然能够在一定程度上恢复模型的长波长信息,但其反演精度还有待进一步提高。2013年,Kim等^[58]提出了频率域、拉普拉斯域联合反演的方法,进一步改善了全波形反演的精度。2015年,Ha等^[59]基于时间域有限差分技术,利用一个低频震源子波和较大的剖分网格实现了拉普拉斯域三维全波形反演,提高了计算效率。2017年,Kwon等^[60]研究了拉普拉斯常数对目标函数梯度的影响,给出了合理选取拉普拉斯常数的办法。

国内的全波形反演研究起步相对较晚,与国外相比还存在一定差距,目前还没有见到成功的实际应用案例^[52],但国内学者仍然在全波形反演研究方面做了很多卓有成效的工作。卞爱飞^[61]、杨午阳^[62]、杨勤勇^[52]、黄金^[63]等学者先后对全波形反演进行了现状综述和分析。2003年,刘玉柱等^[64]通

过数值模拟实验探讨了反射地震波形反演对长波长、中长波长以及短波长信息的恢复能力。宋海斌等^[65]将走时反演和全波形反演应用于海底结构探测,得到了标志天然气水合物指示特征的似海底速度结构。2004年,许琨、王妙月等^[66-67]采用频率域有限元法和矩阵压缩技术进行了波动方程参数反演。2005~2007年,吴国忱等^[68-69]、梁锴^[70]、殷文等^[71]在频率—空间域有限差分波场模拟中采用25点优化差分算子克服了常规差分算子的数值频散,为频率域全波形反演提供了高精度的正演算法。2007年,丁继才等^[72]采用波动方程走时反演与波形反演相结合的办法对井间地震资料进行了快速反演。2009年,龙桂华等^[73]基于黏弹介质声波方程,通过稀疏矩阵LU分解法进行波场正演,在频率域进行了全波形逐频多尺度反演。高静怀等^[74]提出了一种时域自适应波形反演法,并应用于零偏VSP资料反演介质的品质因子及层速度,取得了较好的反演结果。2010年,石玉梅等^[75]基于纵波方程进行全波形反演,提高了地层密度及孔隙度的反演精度。霍元媛等^[76]通过遗传算法旅行时反演得到的背景速度模型作为初始模型,再采用共轭梯度法进行全波形反演,得到了分辨率较高的似海底反射层的速度结构。2012年,刘国峰等^[77]开展了任意尺度条件下频率域全波形反演研究,对比分析了频带范围、频点间隔、初始频带等因素对反演结果的影响。2013年,董良国等^[78]对声波全波形反演中密度、速度等物性参数的摄动尺度以及地震数据的偏移距、频率等数据子集对目标函数的影响开展了详细研究,为多尺度全波形反演目标函数及反演策略的选取提供了参考依据。2014年,魏哲枫等^[79]在时间域采用自适应非规则三角网格剖分进行波场正演,采用L-BFGS优化算法进行分频段多尺度反演,通过模型测试取得了较好的反演效果。刘玉柱等^[80]提出了一种只利用初至波形信息进行反演的波形反演方法,该方法的反演精度略低于全波形反演,但明显优于初至波走时反演。曹书红等^[81]提出了一种复频率+频率域全波形反演方法,在数据缺乏低频成分时,该方法也可得到较好的反演效果。成景旺等^[82]提出了一种基于柯西分布的频率域全波形反演方法,他们假设数据噪声服从柯西分布,进而构造目标函数,测试结果表明,当数据包含噪声时也能够得到较好的反演效果。2015年,迟本鑫、董良国等^[83]提出了一种基于互相关的反射波全波形反演方法,来估计地下速度模型的低波数分量,改善了目标函数的非线性和对数据低频成分的依赖性。

刘财等^[84]将Memoryless quasi-Newton法用于声波全波形反演,验证了该反演算法的稳定性和有效性。2016年,郑忆康、常旭等^[85]利用伪海森矩阵对陆上数据进行反演,改善了反演算法的局部极值问题和周期跳跃现象。张庆臣、周辉等^[86]对参考道施加一个新的时间窗来抑制震源子波对反演结果的影响,取得了一定的效果。综上所述,目前较为成熟的时间域或频率域全波形反演方法多数是基于局部最小二乘最优化思想进行的,目的是寻求能够使得观测记录与模拟记录之间的残差取极小的最优模型。但由于实际数据中常常缺少低频成分(<1 Hz),使得目前的反演方法很难得到可靠的反演结果。因此,在全波形反演的实际应用中遇到的最大困难是低频数据的缺失,这使得常规建模方法很难满足初始模型与低频数据耦合的需求,不管在时间域还是在频率域,都会造成反演过程的错误收敛。对于高频地震数据,全波形反演能够在多大程度上得到有效应用,仍需要在全波形反演对初始模型的精度、数据噪声以及振幅精度的敏感性方面进行更为深入的定量研究。

在最优化搜索策略方面是否需要通过更复杂、更耗时的全局搜索策略来降低反问题的非线性影响?目前常用的做法是以减少参数模型的维度或牺牲计算精度为代价来提高反演计算速度,这些策略仅仅是寻求反问题全局极小解的一种简化模式,而真正的多维、多参数全局最优化反演策略仍需要进一步研究。

在应用方面,虽然三维大规模弹性波全波形反演仍然超出了目前的技术能力,但目前大规模三维地震数据采集及偏移成像技术已比较成熟,相信三维大规模弹性波全波形反演在不久的将来一定能够实现。另一方面,四维时延地震成像技术的发展,为全波形反演技术在地下流体追踪、岩石弹性参数变化检测等方面的应用提供了新的机遇和挑战。

在全波形反演方面还有很多学者都开展了卓有成效的研究,为全波形反演进一步进入实用化阶段做出了贡献,本文不再一一赘述。

2 瑞利波波形反演的研究现状

上述研究和应用主要集中在反射波或初至波波形反演的研究和应用方面,而面波在反演中通常被认为是干扰波,反演之前应予以去除。但是在浅层速度结构探测中,瑞利波的能量在波场总能量中占主导地位^[87,7]。也就是说,瑞利波列是近地表波场

记录中最显著的波列。由瑞利波形成机制可知,这些波列携带了地下结构的横波速度信息,为我们利用瑞利波波形来反演地下结构的横波速度提供了理论基础。关于瑞利波波形反演的研究起初是从全球或区域大尺度地球结构反演开始的。1983年,Lerner-Lam 和 Jordan^[88]率先利用面波相位信息反演得到了地下 200 km 深度范围的横波速度结构。1987年,Yomogida 和 Aki^[89]通过瑞利波波形反演获得了太平洋盆地的速度异常,反演中同时利用了面波的振幅和相位信息。1988年,Snieder^[90]提出了一种利用直达瑞利波的相位和振幅重建地下横向不均匀性的大尺度波形反演方法。2002年,Du^[91]基于面波射线近似理论^[92]提出了一种适用于强横向不均匀性结构重建的多模式面波波形反演方法,可用于大陆边缘、地堑、板块不连续分界等构造成像。以上方法主要应用于大尺度的构造成像,对于浅层小尺度结构成像来讲并不适用,这是因为所使用的面波波长远远大于浅层结构体的尺寸,以至于很难对其进行分辨。但随着研究的不断深入,适用于浅层结构成像的面波波形反演方法也随之出现。2011年,Zeng 等^[93]证明了瑞利波波形反演用于浅层速度结构探测的可行性。2012年,Tran 和 McVay^[94]采用基于高斯-牛顿法的弹性波时间域全波形反演方法成功重建了地下 20 m 以上的横波速度结构,模型及野外实际数据测试表明,该方法的反演结果优于常规的频散反演,对速度递减和低速夹层都有较好地反映。2014年,Groos 等^[95]开展了介质黏弹性对瑞利波波形反演结果的影响,结果表明黏弹介质波形反演时需给品质因子的先验信息才能得到理想的反演结果。Perez^[96]和 Masoni^[97]等分别对面波波形反演的目标函数进行了改进,取得了一定的反演效果。2015年,Bohlen 等^[98]将浅层弹性瑞利波波形反演方法应用于两套实际数据,反演重建了一个河道沉积结构和一个横向变化剧烈的地下模型,对于河道沉积构造,反演数据的频率可高达 70 Hz,而对于横向变化剧烈的地层反演数据的频率低于 20 Hz,更高的频率会造成反演失败。2016年,潘雨迪、夏江海、徐义贤等^[99]实现了时间域 Love 波波形反演。Wittkamp 等^[100]的研究则表明瑞利波波形和 Love 波波形的联合反演能够有效改善浅地表的成像效果。2017年,Ridder 等^[101]提出了一种利用背景面波噪声进行频率域全波形反演的方法。Groos 等^[102]尝试了浅层瑞利波弹性全波形反演,通过模型测试得到了合理的反演结果。Wang 等^[103]利用基于模式分离技术的增强成像聚焦方法来抑制全波形反演中

的人为影响。2018年,Borisov 等^[104]利用基于包络的目标函数来反演浅层大尺度的不均匀特性,证明了包络目标函数能有效减弱周波跳跃问题,且面波波形反演可对复杂近地表特征进行有效地成像。

当然,面波波形反演中存在的问题与体波波形反演中存在的问题类似,在此不再重复列举,接下来仅根据瑞利波波形反演的特点对一些影响反演精度的关键问题进行总结。

3 瑞利波波形反演需要进一步研究的问题和发展趋势

上述研究表明,体波全波形反演研究取得了长足的进展,得到的关注也最为广泛。而瑞利波波形反演虽然被证明在地下二维速度结构成像方面具有巨大的发展潜力,但仍处于研究的初级阶段,常规的体波波形反演技术并不能直接应用于瑞利波波形反演,还需进一步开展研究。其原因主要体现在如下几个方面:

1) 浅地表复杂介质的瑞利波波场模拟问题。横向变化复杂的近地表介质,在面波波场模拟的可靠性上提出了比常规体波模拟更大的挑战。当遇到强不均匀介质时,如空洞、裂隙等波阻抗差较大的界面时,常规的交错网格有其不足之处,波场模拟所得到的地震波场是不稳定的,甚至是不正确的。当模拟各向异性介质时,因为要对弹性参数和密度作近似平均处理,普通交错网格所得地震记录存在精度方面的问题。因此,复杂介质的瑞利波场模拟是瑞利波波形反演的关键问题之一。

2) 反演策略。常规基于目标函数梯度法的全波形反演的目标函数往往是高度非线性的,具有多个局部极值,如何构造一个合适的目标函数及初始模型,避免反演结果陷入局部极值,是瑞利波全波形反演的另外一个关键问题,仍需进一步研究。

3) 高效的并行计算策略。全波形反演的难点之一就是海量计算,海量计算主要由多震源的正演模拟导致,瑞利波波场模拟需要比常规体波模拟更精细的网格剖分,其计算量较常规体波全波形反演更为庞大。因此,采用并行化设计,加速正演模拟的计算效率,仍需开展进一步的研究工作。

4) 震源子波的影响。全波形反演的目标函数可理解为寻求正演模拟数据与实测数据的最佳匹配,正演模拟时,不同的地震子波对反演结果有很大的影响。对于反演成功应用的先决条件是地震子波已知或者地震子波的某种特性已知。面波采集时通

常采用锤击震源,因此,如何寻求一个与锤击震源近似的震源子波以及如何去除观测数据与模拟数据波形残差中震源子波的影响,也是一个亟待解决的问题。

5)在浅层瑞利波勘探中,尤其是在我国西部复杂黄土覆盖地区,介质的黏弹性影响是非常显著的,导致高频信号衰减严重。因此,如何提取一个可靠的品质因子也是一个非常关键的问题。

当然,目前的研究主要集中于二维速度结构成像方面,而实际数据采集时,即使人们只按二维测线进行数据采集,但波场实际上是在三维空间中产生的,瑞利波传播过程中遇到测线旁侧的异常体会发生侧反射,这部分侧反射被记录到地震数据中,而反演时被看作是经过测线的异常体的反射,肯定会影响反演精度。另一方面,野外观测数据都是在一定的地形条件下采集的,反演中应考虑地形的影响。因此,开展三维带地形波形反演,是瑞利波波形反演未来的一个发展方向。

4 结论

论文针对全波形反演技术的反演过程基于波动方程求解,相对于常规瑞利波勘探而言,无需根据频散方程计算频散曲线,理论上克服了常规多道面波分析技术横向分辨能力“先天不足”这一现状,认为瑞利波波形反演是瑞利波勘探领域中一个重要的发展方向。

在瑞利波波形反演中需要重点关注如下几个问题:①浅地表复杂介质的瑞利波波场模拟问题;②多维多参数全局最优化反演策略问题;③高效的并行计算问题;④震源子波对反演结果的影响问题;⑤浅层介质的黏弹性对反演结果的影响问题。

参考文献:

- [1] Rayleigh L. On waves propagated along the plane surface of an elastic solid [J]. Proceedings of the London Mathematical Society, 1887, 17: 4-11.
- [2] Haskell N A. The dispersion of surface waves on multilayered media [M]. American Geophysical Union, 1953: 86-103.
- [3] Dorman J, Ewing M. Numerical inversion of seismic surface wave dispersion data and crust-mantle structure in the New York-Pennsylvania area [J]. Journal of Geophysical Research, 1962, 67(13): 5227-5241.
- [4] Nazarian S, Stokoe K H, Hudson W R. Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems [J]. Transportation Research Record, 1983, 930: 38-45.
- [5] Park C B, Miller R D, Xia J. Multi-channel analysis of surface waves [J]. Geophysics, 1999, 64(3): 800-808.
- [6] Xia J, Miller R D, Park C B, et al. Comparing shear-wave velocity profiles from MASW with borehole measurements in unconsolidated sediments [J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2000, 5(3): 1-13.
- [7] Xia J, Miller R D, Park C B, et al. Comparing shear-wave velocity profiles from multichannel analysis of surface wave with borehole measurements [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(3): 181-190.
- [8] Miller R D, Xia J, Park C B, et al. Multichannel analysis of surface waves to map bedrock [J]. The Leading Edge, 1999, 18(12): 1392-1396.
- [9] Xia J, Chen C, Li P H, et al. Delineation of a collapse feature in a noisy environment using a multichannel surface wave technique [J]. Geotechnique, 2004, 54(1): 17-27.
- [10] Xu C, Butt S D. Evaluation of MASW techniques to image steeply dipping cavities in laterally inhomogeneous terrain [J]. Journal of Applied Geophysics, 2006, 59(2): 106-116.
- [11] Xia J, Miller R D, Park C B, et al. Determining Q of near-surface materials from Rayleigh waves [J]. Journal of Applied Geophysics, 2002, 51(2): 121-129.
- [12] Xia J, Xu Y, Miller R D, et al. Estimation of elastic moduli in a compressible Gibson half-space by inverting Rayleigh wave phase velocity [J]. Surveys in Geophysics, 2006, 27(1): 1-17.
- [13] Lin C, Lin C. Effect of lateral heterogeneity on surface wave testing: Numerical simulations and a countermeasure [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(6): 541-552.
- [14] Park C, Miller R, Xia J. Imaging dispersion curves of surface waves on a multichannel record [C]//68th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1998: 1377-1380.
- [15] Xia J, Miller R, Park C. Estimation of near-surface shear wave velocity by inversion of Rayleigh waves [J]. Geophysics, 1999, 64(3): 691-700.
- [16] Grandjean G, Bitri A. 2M-SASW: Multifold multichannel seismic inversion of local dispersion of Rayleigh waves in laterally heterogeneous subsurfaces: Application to the Super-Sauze earthflow, France [J]. Near Surface Geophysics, 2006, 4(6): 367-375.
- [17] Lailly P. The seismic inverse problem as a sequence of before stack migrations [C]//Conference on Inverse Scattering, Theory and Application, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia (ed. R. Bednar and Weglein), 1983: 206-220.
- [18] Tarantola A. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation [J]. Geophysics, 1984, 49(8): 1259-1266.
- [19] Tarantola A. A strategy for nonlinear elastic inversion of seismic reflection data [J]. Geophysics, 1986, 51(10): 1893-1903.
- [20] Gauthier O, Virieux J, Tarantola A. Two-dimensional nonlinear inversion of seismic waveforms: numerical results [J]. Geophysics, 1986, 51(7): 1387-1403.
- [21] Mora P R. Nonlinear two-dimensional elastic inversion of multi-offset seismic data [J]. Geophysics, 1987, 52(9): 1211-1228.
- [22] Crase E, Pica A, Noble M, et al. Robust elastic nonlinear waveform inversion: Application to real data [J]. Geophysics, 1990, 55(5):

- 527–538.
- [23] Bunks C, Salek F M, Zaleski S, et al. Multiscale seismic waveform inversion [J]. *Geophysics*, 1995, 60(5): 1457–1473.
- [24] Virieux J. P-SV wave propagation in heterogeneous media; velocity-stress finite-difference method [J]. *Geophysics*, 1986, 51(4): 889–901.
- [25] Levander A R. Fourth-order finite-difference P-SV seismograms [J]. *Geophysics*, 1988, 53(11): 1425–1436.
- [26] Kosloff D, Baysalt E. Forward modeling by a Fourier method [J]. *Geophysics*, 1982, 47(10): 1402–1412.
- [27] Kosloff D, Reshef M, Loewenthal D. Elastic wave calculation by the Fourier method [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1982, 74(3): 875–891.
- [28] Marfurt K. Accuracy of finite-difference and finite-elements modeling of the scalar and elastic wave equation [J]. *Geophysics*, 1984, 49(5): 533–549.
- [29] Shipp R M, Singh S C. Two-dimensional full wavefield inversion of wide aperture marine seismic streamer data [J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 151(2): 325–344.
- [30] Sears T J, Singh S C, Barton P J. Elastic full waveform inversion of multi-component OBC seismic data [J]. *Geophysical Prospecting*, 2008, 56(6): 843–862.
- [31] Kohn D, Nil D D, Kurzmann A, et al. On the influence of model parametrization in elastic full waveform tomography [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 191(1): 325–345.
- [32] Yang D, Meadows M, Inderwiesen P, et al. Double-difference waveform inversion: Feasibility and robustness study with pressure data [J]. *Geophysics*, 2015, 80(6): M129–M141.
- [33] Yang D, Liu F, Morton S, et al. Time-lapse full-waveform inversion with ocean-bottom-cable data: Application on Valhall field [J]. *Geophysics*, 2016, 81(4): R225–R235.
- [34] Wu Z, Alkhalifah T. Simultaneous inversion of the background velocity and the perturbation in full-waveform inversion [J]. *Geophysics*, 2015, 80(6): R317–R329.
- [35] Zhu H, Fomel S. Building good starting models for full-waveform inversion using adaptive matching filtering misfit [J]. *Geophysics*, 2016, 81(5): U61–U72.
- [36] Li Y E, Demanet L. Full-waveform inversion with extrapolated low-frequency data [J]. *Geophysics*, 2016, 81(6): R339–R348.
- [37] Cheng X, Jiao K, Sun D, et al. Multiparameter estimation with acoustic vertical transverse isotropic full-waveform inversion of surface seismic data [J]. *Interpretation*, 2016, 4(4): SU1–SU16.
- [38] Wang F, Donno D, Chauris H, et al. Waveform inversion based on wavefield decomposition [J]. *Geophysics*, 2016, 81(6): R457–R470.
- [39] Pratt R G. Inverse theory applied to multi-source cross-hole tomography. part II: elastic wave-equation method [J]. *Geophysical Prospecting*, 1990, 38(3): 311–329.
- [40] Pratt R G, Worthington M H. Inverse theory applied to multi-source cross-hole tomography. Part I: acoustic wave-equation method [J]. *Geophysical Prospecting*, 1990, 38(3): 287–310.
- [41] Pratt R G, Shin C, Hicks G J. Gauss-Newton and full Newton methods in frequency-space seismic waveform inversion [J]. *Geophysical Journal International*, 1998, 133(2): 341–362.
- [42] Operto S, Virieux J, Amestoy P, et al. 3D finite-difference frequency-domain modeling of viscoacoustic wave propagation using a massively parallel direct solver: A feasibility study [J]. *Geophysics*, 2007, 72(5): SM195–SM211.
- [43] Brossier R, Virieux J, Operto S. Parsimonious finite-volume frequency-domain method for 2D P-SV wave modelling [J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 175(2): 541–559.
- [44] Etienne V, Chaljub E, Virieux J, et al. An hp-adaptive discontinuous Galerkin finite-element method for 3D elastic wave modeling [J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 183(2): 941–962.
- [45] Hu G H. Three-dimensional acoustic full waveform inversion; method, algorithm and application to Valhall petroleum field [D]. Grenoble: Université de Josph Fourier, 2012.
- [46] Xu K, Greenhalgh S A, Wang M Y. Comparison of source-independent methods of elastic waveform inversion [J]. *Geophysics*, 2006, 71(6): R91–R100.
- [47] Gelis C, Virieux J, Grandjean G. 2D elastic waveform inversion using Born and Rytov approximations in the frequency domain [J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 168(2): 605–633.
- [48] Choi Y, Min D, Shin C. Two-dimensional waveform inversion of multicomponent data in acoustic-elastic coupled media [J]. *Geophysical Prospecting*, 2008, 56(6): 863–881.
- [49] Brossier R, Operto S, Virieux J. Seismic imaging of complex onshore structures by 2D elastic frequency-domain full-waveform inversion [J]. *Geophysics*, 2009, 74(6): WCC105–WCC118.
- [50] Abubakar A, Li M, Lin Y, et al. Compressed implicit jacobian scheme for elastic full-waveform inversion [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 189(3): 1626–1634.
- [51] Jeong W, Lee H, Min D. Full waveform inversion strategy for density in the frequency domain [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 188(3): 1221–1242.
- [52] 杨勤勇, 胡光辉, 王立歆. 全波形反演研究现状及发展趋势 [J]. *石油物探*, 2014, 53(1): 77–83.
- [53] Sirgue L, Etgen J T, Albertin U. 3D frequency domain waveform inversion using time domain finite difference methods [C] // 70th Conference Technical Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, 2008, F022.
- [54] Etienne V, Virieux J, Operto S, et al. Computational issues and strategies related to full waveform inversion in 3D elastic media; methodological developments [C] // 81st Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2010: 1050–1054.
- [55] Shin C, Cha Y H. Waveform inversion in the Laplace domain [J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 173(3): 922–931.
- [56] Shin C, Cha Y H. Waveform inversion in the Laplace-Fourier domain [J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 177(3): 1067–1079.
- [57] Ha W, Shin C. Laplace-domain full-waveform inversion of seismic data lacking low-frequency information [J]. *Geophysics*, 2012, 77(5): 199–206.
- [58] Kim Y, Shin C, Calandra H, et al. An algorithm for 3D acoustic time-Laplace-Fourier-domain hybrid full waveform inversion [J]. *Geophysics*, 2013, 78(4): R151–R166.

- [59] Ha W, Kang S G, Shin C. 3D Laplace-domain waveform inversion using a low-frequency time-domain modeling algorithm [J]. *Geophysics*, 2015, 80(1): R1-R13.
- [60] Kwon J, Jin H, Calandra H, et al. Interrelation between Laplace constants and the gradient distortion effect in Laplace-domain waveform inversion [J]. *Geophysics*, 2017, 82(2): R31-R47.
- [61] 卞爱飞, 於文辉, 周华伟. 频率域全波形反演方法研究进展 [J]. *地球物理学进展*, 2010, 25(3): 982-993.
- [62] 杨午阳, 王西文, 雍学善, 等. 地震全波形反演方法研究综述 [J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(2): 766-776.
- [63] 黄金, 高星, 王伟. 地震勘探全波形反演的应用与发展分析 [J]. *地球信息科学学报*, 2014, 16(3): 396-401.
- [64] 刘玉柱, 董良国. 反射地震波形反演能力数值实验研究 [C]//南京: 2003 年中国地球物理年会论文集, 南京师范大学出版社, 2003.
- [65] 宋海斌, Osamu M, Shin'ichi K. 天然气水合物似海底反射层的全波形反演 [J]. *地球物理学报*, 2003, 46(1): 42-46.
- [66] 许琨, 王妙月. 声波方程频率域有限元参数反演 [J]. *地球物理学报*, 2001, 44(6): 582-864.
- [67] 许琨, 王妙月. 利用地质规则块体建模方法的频率域有限元弹性波速度反演 [J]. *地球物理学报*, 2004, 47(4): 708-717.
- [68] 吴国忱, 梁锴. VTI 介质频率—空间域准 P 波正演模拟 [J]. *石油地球物理勘探*, 2005, 40(5): 535-545.
- [69] 吴国忱, 梁锴. VTI 介质准 P 波频率空间域组合边界条件研究 [J]. *石油物探*, 2005, 44(4): 301-307.
- [70] 梁锴, 吴国忱, 印兴耀. TTI 介质 qP 波方程频率—空间域加权平均有限差分算子 [J]. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(5): 516-525.
- [71] 殷文, 印兴耀, 吴国忱, 等. 高精度频率域弹性波方程有限差分方法及波场模拟 [J]. *地球物理学报*, 2006, 49(2): 561-568.
- [72] 丁继才, 常旭, 刘伊克, 等. 基于声波方程的井间地震数据快速 WTW 反演方法 [J]. *地球物理学报*, 2007, 50(5): 1527-1533.
- [73] 龙桂华, 李小凡, 张美根, 等. 频率域黏弹性声波透射波形速度反演 [J]. *地震学报*, 2009, 31(1): 32-41.
- [74] 高静怀, 汪超, 赵伟. 用于零偏移距 VSP 资料的自适应波形反演方法研究 [J]. *地球物理学报*, 2009, 52(12): 3091-3100.
- [75] 石玉梅, 姚逢昌, 孙虎生, 等. 地震密度反演及地层孔隙度估计 [J]. *地球物理学报*, 2010, 53(1): 197-204.
- [76] 霍元媛, 张明. 南海北部似海底反射层速度结构全波形反演 [J]. *物探化探计算技术*, 2010, 32(2): 182-187.
- [77] 刘国峰, 刘洪, 孟小红, 等. 频率域波形反演中与频率相关的影响因素分析 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55(4): 1345-1353.
- [78] 董良国, 迟本鑫, 陶纪霞, 等. 声波全波形反演目标函数性态 [J]. *地球物理学报*, 2013, 56(10): 3445-3460.
- [79] 魏哲枫, 高红伟, 张剑锋. 基于非规则网格声波正演的时间域全波形反演 [J]. *地球物理学报*, 2014, 57(2): 586-594.
- [80] 刘玉柱, 谢春, 杨积忠. 基于 Born 波路径的高斯束初至波波形反演 [J]. *地球物理学报*, 2014, 57(9): 2900-2909.
- [81] 曹书红, 陈景波. 频率域全波形反演中关于复频率的研究 [J]. *地球物理学报*, 2014, 57(7): 2302-2313.
- [82] 成景旺, 吕晓春, 顾汉明, 等. 基于柯西分布的频率域全波形反演 [J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(5): 940-945.
- [83] Chi B, Dong L, Liu Y. Correlation-based reflection full-waveform inversion [J]. *Geophysics*, 2015, 80(4): R189-R202.
- [84] Liu C, Gao F, Feng X, et al. Memoryless quasi-Newton (MLQN) method for 2D acoustic full waveform inversion [J]. *Exploration Geophysics*, 2015, 46(2): 168-177.
- [85] Zheng Y, Zhang W, Wang Y, et al. An application of full-waveform inversion to land data using the pseudo-Hessian matrix [J]. *Interpretation*, 2016, 4(4): T627-T635.
- [86] Zhang Q, Zhou H, Li Q, Chen H, et al. Robust source-independent elastic full-waveform inversion in the time domain [J]. *Geophysics*, 2016, 81(2): R29-R44.
- [87] Saenger E H, Bohlen T. Finite-difference modeling of viscoelastic and anisotropic wave propagation using the rotated staggered grid [J]. *Geophysics*, 2004, 69(2): 583-591.
- [88] Lerner-Lam A L, Jordan T J. Earth structure from fundamental and higher-mode waveform analysis [J]. *Geophysical Journal international*, 1983, 75(3): 759-797.
- [89] Yomogida K, Aki K. Amplitude and phase data inversion for phase velocity anomalies in the Pacific Ocean basin [J]. *Geophysical Journal international*, 1987, 88(1): 161-204.
- [90] Snieder R. Large-scale waveform inversions of surface waves for lateral heterogeneity 1. theory and numerical examples [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93(B10): 12055-12065.
- [91] Du Z. Waveform inversion for lateral heterogeneities using multimode surface waves [J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 149(2): 300-312.
- [92] Levshin A L. Effects of lateral inhomogeneities on surface waves amplitude measurements [J]. *Annual Geophysics*, 1985, 3(4): 511-518.
- [93] Zeng C, Xia J, Miller R D, et al. Feasibility of waveform inversion of rayleigh waves for shallow shear-wave velocity using genetic algorithm [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2011, 75(2011): 648-655.
- [94] Tran K T, McVay M. Site characterization using Gauss-Newton inversion of 2-D full seismic waveform in the time domain [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 43(2012): 16-24.
- [95] Groos L, Schiffer M, Forbriger T, et al. The role of attenuation in 2D full-waveform inversion of shallow-seismic body and Rayleigh waves [J]. *Geophysics*, 2014, 79(6): R247 - R261.
- [96] Perez Solano C A, Donno D, Chauris H. Alternative waveform inversion for surface wave analysis in 2-D media [J]. *Geophys Journal International*, 2014, 198(3): 1359-1372.
- [97] Masoni I, Brossier R, Boelle J L. Robust full waveform inversion of Surface waves [C]//SEG Technical Program Expanded Abstract, 2014: 1126-1130.
- [98] Bohlen T, Forbriger T, Groos L, et al. Applications of elastic full waveform inversion to shallow seismic surface waves [C]//EGU General Assembly Conference, EGU General Assembly Conference Abstracts, 2015.
- [99] Pan Y, Xia J, Xu Y, et al. Love-wave waveform inversion in time domain for shallow shear-wave velocity [J]. *Geophysics*, 2016, 81(1): R1-R14.
- [100] Wittkamp F, Bohlen T. Field data application of individual and joint 2-D elastic full waveform inversion of rayleigh and love waves

[C]//Near Surface Geoscience 2016,European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics,2016.

[101] Sjoerd de Ridder, Curtis A, Maddision J. Frequency domain full wave field inversion for ambient seismic surface wave noise[C]//SEG International Exposition and 87th Annual Meeting,2017.

[102] Groos L, Schafer M, Forbriger T, et al. Application of a complete workflow for 2D elastic full-waveform inversion to recorded shallow-seismic Rayleigh waves [J]. Geophysics, 2017, 82 (2) : R109 – R117.

[103] Yao Wang, Richard D. A focusing study of near surface full-waveform inversion based on wave mode separation[C]//SEG International Exposition and 87th Annual Meeting,2017.

[104] Borisov D, Modrak R, Gao F, et al. 3D elastic full-waveform inversion of surface waves in the presence of irregular topography using an envelope-based misfit function [J]. Geophysics, 2018, 83 (1) : R1–R11.

Development status and prospect of Rayleigh waveform inversion

WU Hua¹, LI Qing-Chun², SHAO Guang-Zhou²

(1.School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2.School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The theoretical dispersion curves based on the assumption of horizontal layered-elastic media is needed to be calculated in the inversion for the conventional multichannel analysis technique of surface waves (MASW). As a result, the horizontal resolution of this method can not meet the requirements of the lateral inhomogeneous complex media. At present, full-waveform inversion technology has become a research hotspot, whose inversion process is based on the solution of wave equation. For Rayleigh waveform inversion, it is unnecessary to calculate the dispersion curves according to the dispersion equation. In theory, it overcomes the ‘inborn deficiency’ of the conventional MASW method in the lateral resolution ability. Therefore, Rayleigh waveform inversion is an important development direction in Rayleigh wave exploration field. The development history of full waveform inversion is fully reviewed in this paper. And the development status and the existing problems in Rayleigh wave inversion are also analyzed. Furthermore, the problems needed to be studied further and the development trends of Rayleigh wave inversion are pointed out. It provides some research ideas for the study of Rayleigh waveform inversion. The research achievements have certain reference significance.

Key words: Rayleigh wave; waveform inversion; multichannel analysis technique of surface waves

(本文编辑:叶佩)