

doi: 10.11720/wtyht.2020.1243

刘畅,李振春,曲英铭,等.地震层析成像方法综述[J].物探与化探,2020,44(2):227-234.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1243

Liu C, Li Z C, Qu Y M, et al. A review of seismic tomography methods[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(2): 227-234. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1243

地震层析成像方法综述

刘畅¹, 李振春¹, 曲英铭¹, 徐夷鹏¹, 赵伟洁²

(1. 中国石油大学(华东)地震波传播与成像实验室, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油化工集团有限公司 胜利油田分公司海洋采油厂, 山东 东营 257237)

摘 要: 地震层析成像作为一种有效还原地下介质速度模型的方法, 为全波形反演提供了可靠的初始速度模型, 从原始的射线层析到相移旅行时层析和瞬时旅行时层析, 实现了地震波传播的有限频特性; 从声波方程到弹性波方程, 从各向同性介质到 VTI, TTI 介质, 实现了对真实地下介质情况的模拟。减缓层析反演的病态性也一直是研究热点, 常用的方法有正则化, 用高斯束层析的敏感核代替传统的射线层析敏感核等。此外, 为了避免使成像结果的精度依赖于共成像道集上反射位的真实深度, 角度域双差分反射层析可以稳定有效地收敛到精确的偏移速度模型。如今, 层析成像逐步向各向异性介质过渡, 使用的数据从 VSP 到 WVSP, 从单一波形到多种波形联合反演发展, 然而, 分辨率和计算效率的相关问题仍然需要得到关注。

关键词: 走时层析; 波动层析; 声波波动方程; 弹性波波动方程; 联合反演

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2020)02-0227-08



0 引言

地震层析成像自 1977 至今已有 40 多年的发展, 现已成为探测地下速度结构的重要研究手段。早期由于计算机水平的限制, 基于高频近似射线理论的走时层析成像占据主流地位。随着计算机水平的逐步提高, 有限频层析成像理论得到发展。由于科研目标越来越具体, 研究介质越来越复杂, 层析成像也从各向同性走向各向异性。输入数据也从单一波形走向多种波形联合反演。在提高分辨率方面, 层析成像不仅在算法上有持续的更新, 在观测角度, 成像领域, 使用数据上也与时俱进, 具体表现在以下方面: VSP 数据, WVSP 数据, 多尺度反演, 多分量反演, 宽方位角观测。

1 基于高频近似射线理论走时层析成像

1.1 传统走时层析成像方法

射线走时层析和基于程函方程数值解走时层析

成像构成了传统的走时层析。前者主要有试射法、弯曲法、最短路径法、模拟退火法。后者差分计算的扩展方式有盒式扩展法和波前扩展法。下面做简单的原理介绍。

在斯奈尔定理上发展起来的试射法^[1-3]依赖于激发点处给定的一系列初始射线参数值。选取在接收点附近最接近的两条射线通过内插得到符合精度要求的结果。该算法的优势主要体现在全局搜索能力和复杂模型的适应力。但缺点也比较明显: 存在阴影区, 计算效率较低。

选定起始点和终点后根据射线旅行方程, 结合“旅行时最小”条件可写出弯曲法^[4]的迭代走时修正量。与试射法一样, 最后通过多次迭代使初始猜测的射线逐渐收敛到正确的射线路径。相比于试射法, 弯曲法的计算效率得到了明显提升, 但缺点就是算法容易陷入局部收敛导致得到的解是局部最优。

波前法^[5-7]首先需要将介质分割为许多网格节点, 并且要求射线必须经过这些网格点。从激发点出发依次连接下一个最小走时点直到接收点, 由于每次选取的都是最小走时, 所以得出的射线路径即

是最小走时射线路径。该算法的优点是即使增加接收点的数量,射线追踪计算量也不会增加,缺点是节点数目的微小增加会导致计算量的剧增。

最短路径射线追踪法^[8-9]是基于网络最短路径理论和费马原理发展起来的。按照费马原理,把旅行时最小的路径近似为地震射线,其射线追踪过程可归纳为:划分介质模型,在单元边界上设置节点、速度参数;将节点与彼此相邻的节点连接以此形成节点网络;每条射线的旅行时等于所有相邻节点之间的连接权之和。

模拟退火算法所受的启发来源于 Kirkpatrick 等^[10-11]将热力学中的退火思想引入组合优化领域。模拟退火法射线追踪大致分为:退火过程、冷却时间表的选取、初始温度和退火速率的确定。模拟退火算法的优点是计算效率高、精度高、对初始模型的要求很低、可模拟多种波形的射线路径。下一步可以研究自适应修正退火速率参数并把模拟退火法推广到各向异性介质和三维非均匀介质。

射线追踪方法的不足之处在于计算速度慢,存在阴影区(复杂速度模型中存在射线很难穿过的计算区域,导致该区域计算不到),在三维情况下和激发点、接收点较多时,计算时间过长。

20 世纪 80 年代,Vidale^[12]提出了基于网格的程函方程有限差分法,该算法不存在传统射线路径追踪方法的阴影区问题并且计算速度得到大幅的提升。在扩展方式上,Qin^[13]不再使用盒式扩展方法,而是使用了波前扩展方法进行了扩展计算。不仅扩展方式有所发展,其他方面也皆有发展:Vidale^[14]在解决了二维情况下的初至走时计算问题后,又将该方法推广到了三维;随着研究的速度介质逐步复杂化,为了使基于网格的程函方程有限差分法更适应复杂的速度介质,Hole^[15]和 Afnimar^[16]提高了盒式扩展方法的稳定性;Podvin^[17]将惠更斯原理、反向延拓算法融入到了有限差分近似过程中,考虑了体波、首波和散射波的存在,不仅提高了算法的稳定性,还保留了算法快速、精确的优点;Van^[18]将迎风有限差分算子应用到有限差分中,提高了算法的稳定性;Kim^[19]提出了二阶迎风有限差分法;William^[20]给出了球坐标系下的三维迎风有限差分法;Qian^[21]使用了加权的 ENO 方案并动态控制 Runge-Kutta method 的计算步长,作为一种优化的迎风有限差分方法达到了自适应计算精度的目的。

波前扩展方法中的快速推进法不仅无条件稳定,还计算速度快,这一特点使得快速推进法的发展备受关注。快速推进法的另一个特点是可以通过调

整迎风有限差分算子来控制算法的精度。Sethian^[22]给出了三维介质中的地震波走时的快速推进方法,高阶快速匹配算法^[23]并把它应用于反射地震数据成像。Alkhalifah^[24]将笛卡尔坐标系下的一阶快速推进方法和球坐标系下的一阶快速推进方法进行了对比。黄兴国等^[25]将 L-BFGS 最优化理论引入分离的复程函方程中用于求取等效虚慢度,获得一种精度高且更为高效的复走时计算方法。

1.2 无射线路径走时层析成像方法

伴随状态法初至波走时层析不必进行射线追踪,因此可节省大量计算时间。梯度的获取并不繁琐,两次正演的计算量便可得到。反演之前,先将走时差替换为定值,再进行反演便可以得到类似于射线密度的矩阵。预条件也是通过求该矩阵的逆进行的。因此具有计算效率高、内存占用小等优点。

1974 年,Chavent^[26]将控制理论中发展的伴随状态法应用于反演问题中。2009 年,Taillandier^[27]将波形反演中的伴随状态法应用于走时层析中,衍生出了伴随状态法走时层析成像方法。具有以下特点:①不需要进行射线追踪;②计算量依赖于模型大小;③单炮检对的梯度不是射线而是具有一定的宽度,形态上类似于菲涅尔带层析的核函数。2016 年,Waheed^[28]应用伴随状态法实现了各向同性与各向异性的近地表速度层析成像。但该方法的一阶求解还存在两个重要问题,二阶方向可以解决这两个问题,但是求解过程十分繁琐不经济。2017 年,李勇德^[29]提出一种新的预条件伴随状态法初至波走时层析。在改进的散射积分法的实现框架下,通过将走时残差置为定值,再次进行反演即可获得类似于射线密度的矩阵,并以此矩阵的逆作为层析的预条件,使得梯度分布更加合理,反演结果更加稳定。2018 年,高飞等^[30]为提高无线层析成像算法在多径环境下对运动目标的跟踪精度,降低多径效应对信号变化的影响,引入指数移动平均作为无线层析成像中衡量信号变化的参量。

2 有限频层析成像方法

基于地震学发展和实际勘探开发的经济需要,克服射线理论的局限性已经被提上日程。同时,随着地震波正演算法的不断完善和计算机运算水平的提升,基于波动理论的层析成像方法逐步发展起来,主要包括波动方程有限频层析成像和全波形反演。

有限频率层析成像方法利用不同频率的地震波

走时信息完成地震层析成像。在理论和方法两个层面得到了提升和发展。为了考虑地震波这一有限频率特性,2000年,Dahlen等^[31]利用弹性波方程,借助于一阶Born近似讨论了简单介质模型中的有限频率敏感核的计算。2001年,Spetzler等^[32]推导出2D和3D下灵敏度核会随位置的不同而有不同的值。2005年,de Hoop等^[33]解释了地震波走时对射线路径上的敏感核是由多种原因共同造成的。2004年,Baig^[34]对有限频层析成像与射线层析成像的分辨能力做了数值化研究,得出前者的分辨率最多可是后者的5倍。2006年,Zhao^[35]提出了全波形有限频层析成像方法。2007年,Zhang^[36]提出了首波有限频层析成像方法;Sieminski^[37]运用伴随矩阵法发展了各向异性速度结构中面波和体波有限频灵敏度核的求取方法。2009年,徐小明,史大年,李信富^[38]针对有限频层析成像的正、反演问题的算法做了总结与归纳。2017年,Liu等^[39]提出一种初至波相位—旅行时层析方法,与传统的射线旅行时层析成像相比,该方法考虑了地震波传播时的有限频特性,反演使用的是频率相关的旅行时,而不是初至波旅行时;实验证明,该方法的反演结果比传统的层析成像更准确。2018年,Liu等^[40]相移旅行时层析(PT)和瞬时旅行时层析(IT)理论应用到初至波旅行时层析中。与传统的射线层析(RT)相比,前两者考虑了地震波传播的有限频特性,并且使用随频率变化的旅行时,而不是射线旅行时作为反演内容。

3 多波联合层析成像

层析成像中不同类型的波也有不同的用处。常见的有初至波、反射波、折射波。初至波容易识别、追踪,稳定性较好。利用反射波的好处是能准确地反演出地层界面形态,因此,反射波的引入对探讨地下介质的速度分层具有重要意义。原因有以下几点:①反射波能够清晰直观地反映地下介质的参数分布情况;②实际勘探中,从经济角度考虑,由于反射波的激发和接收位置均在地表,无需打孔,所以反射波也是不错的选择^[41]。2015年,付翠^[42]将初至波与反射波联合反演应用到井间地震中。2017年,俞岱^[43]实现了初至波层析成像并行运算。折射波对初始速度模型的依赖性小同时也不容易陷入局部极值且具有较高的计算效率^[44]。2019年,Liu和Zhao^[45]通过最新收集的大量高质量的地方震和远震事件的到时数据进行联合反演,确定了日本俯冲带约700 km深度的P波和S波速度层析成像。

Bishop^[46]通过实例计算验证了速度和界面联合反演的精确性。为了避免反演的多解性,查树贵^[47]通过对反射波走时信息加约束条件提高成像的分辨率。Wang^[48]利用反射波振幅信息对模型速度的空间分布进行反演计算。为了提高解的稳定性,Kosloff^[49]在反演时增加最大偏移深度来减弱耦合现象。

速度与深度的耦合问题是反射波层析成像的一大特点。第一种方法是把界面深度视为已知量,先求解模型速度然后对界面进行偏移。这种方法的缺点是对模型的先验信息和误差要求很高。另一类方法需要同时求解介质速度和界面深度。这种方法的缺点是不同参数的导数量纲不同,因此使用时需要对不同的导数进行加权归一。

在实际生产中,我们无法只利用单一波形就对研究区域进行精确成像,以往的实际经验也证明联合反演的计算精度高于单一波形的精度。因此层析成像发展趋势之一包含多波联合反演研究^[50]。

4 层析成像反演

针对不同的目的,利用不同的数据,层析成像的研究方向是多样的,目前主要有以下几种:立体层析、斜率层析、多尺度波形层析、广角反射数据层析、初至层析、波形层析、菲涅尔体层析、旅行时层析。层析成像中,反演占有重要的地位。地震反演包括两大部分:速度分析和反演方法。反演理论可以诠释速度分析的思路,即通过反复迭代使最终结果能够尽可能接近真实的模型。

目前,速度分析主要有:叠加速度分析、偏移速度分析;反演方法主要有:层析速度反演和全波形反演。层析成像中使用的共成像点道集从偏移距走向角度域;从偏移扫描技术走向深度聚焦分析。2015年,白雪等^[51]提出了基于井数据约束的高精度层析速度反演方法。2017年,任芳等^[52]利用角度域共成像点道集建立目标泛函对速度的准确性进行判定。2018年,Santos等^[53]提出了一个适合FWT的初始模型建立方法。2019年,梁生贤等^[54]以加入不同噪声的两个合成模型数据为实验对象,比较分析了Tikhonov正则化与LSQR法求解结果,显示直接利用LSQR法求解场反问题能够得到满意的正则化解。

基于剩余曲率分析的射线层析一直是研究热点,其成像效果从方位角、介质性质、分辨率均得到提升。在复杂地质环境下,波动方程层析提供了更准确的反演方法。2005年,Sava^[55]在偏移域共

成像点道集的基础上推出了角度域共成像点道集,这样使得波动方程层析的反问题也可以在成像域实现,并且成像域的效果更好。因为在数据域目标函数法中,处理实际资料有一定的困难,这也推动了成像域的发展。在提高精度方面,2011年,Tang^[56]利用 Born 波场模拟来更好地实现叠前正演模拟,可以模拟更小的反射数据体。2016年,刘瑞合等^[57]进一步分析了分裂完全匹配层的衰减机制,通过波动方程模拟,分析了震源主频、空间网格间距、介质速度等参数对 SPML 边界吸收衰减特征的影响。2017年,肖艳玲等^[58]验证了网格层析速度反演在复杂构造区叠前深度偏移中的有效性和实用性;薛花等^[59]应用高精度网格层析速度反演方法优化叠前深度偏移速度模型。

由于地层是弹性介质,所以仅仅利用声波数据成像无法较好地反映弹性波在地下介质中的传播规律。相比之下,将 S 波成像和 P 波成像相结合能够得到更加精确的介质描述。在经过波场分离后的 PS 波角度分解方面,偏移速度分析具有较大的计算成本,且不可避免地包含由于多路径问题导致的假象^[60]。不产生假象是双平方根偏移^[61]抽取的角度域共成像点道集的优点。既然 ADCIGs 具有没有假象的优点^[62],那么基于 ADCIGs 的偏移速度分析^[63-64]也得到专家学者的关注。

19 世纪末地震学主要使用的还是走时信息^[65],直到 20 世纪 80 年代才开始利用振幅信息,这才能计算出准确的合成地震记录。传统的两步流程是:首先建立速度模型,其次用不同类型的偏移方法进行振幅映射。虽然一系列模型重构的方法被提出,但是这些方法仍受限于反射数据的固有缺点:对中长波长的敏感度低。Lailly^[66]提出了意在求取模型数据与观测数据误差泛函的最小二乘解的思想。波形拟合即使是在 2D 情况下也仍然是一个十分耗时的过程^[67],时间主要用在正演模拟上。Beylkin^[68]、Bleistein^[69]、Tarantola^[70]提出了节省计算资源的方法,主要目的是将 Radon 变换替换成迭代最小二乘优化。强非线性导致 FWI 在大偏移距数据中稳健性不佳^[71],因此需要利用透射数据来重构地下中长波长构造。

5 各向异性和三维模型

1982 年,捷克地球物理学家 Cerveny 等^[72]运用各向异性介质程函方程求解压缩纵波(qP 波)和两类剪切波(qSV 波和 qSH 波)特征向量,推导出地震

走时反演的扰动方程。1984 年,Hiraharak^[73]实现了利用 qP 波的走时来反演模型空间内的波速异常。1988 年,Jech^[74]对三维非均匀介质各向异性进行了走时层析。1989 年,Jech^[75]克服了剪切波特征向量的奇异值问题。1992 年,Chapman^[76]提出一种各向异性介质的地震走时层析的线性化方法。2008 年,Zhou^[77]研发了各向异性介质中求解弹性参数的非线性算法。2016 年,黄国娇^[78]讨论了相速度敏感性与反演结果的关系。2018 年,何雷宇^[79]在各向异性介质中实现了分区多步最短路径射线追踪算法;黄杰等^[80]对 TTI 介质中的地震波场进行了高阶有限差分数值模拟。2019 年,贾源源和董森^[81]为解决当前地震波各向异性走时层析成像方法中存在的成像准确性差、耗时长的问题,提出基于有限元的地震波各向异性走时层析成像方法。

1954 年,Hagedoorn^[82]给出了“地震射线束”的概念。1977 年,Tikhonov^[83]指出层析矩阵非常稀疏,存在较大的零空间,从而影响了反演的精度。1996 年,王宏伟^[84]提出第一菲涅尔带内的所有绕射点的相长干涉构成了接受点的能量。1999 年,Marquering 等^[85]推导出体波互相关走时三维灵敏度核函数。2000 年,Dahlen 等^[86]最先提出基于有限频理论的层析成像方法。2003 年,C.Gélis^[87]最先在最小二乘意义及 Born/Rytov 近似的基础上实现了二维频率域弹性波波场反演。2004 年,Spezler^[88]推导出二维速度模型下第一菲涅尔带的宽度可近似表示为 λL 。2007 年,Zhang 等^[89]推导了有限频地震波走时异常对剪切波速度的三维灵敏度核。2009 年,杨国辉等^[90]通过研究第一菲涅尔带与地震波走时的关系,提出了利用旅行时与半主周期确定第一菲涅尔带范围的筛选法。2013 年,Xia^[91]提出了通过更新角度域灵敏度内核的菲涅尔带走时层析成像方法;Zhang^[92]提出了基于频率域有限差分数值模拟的菲涅尔带层析敏感核函数计算方法,消除了高阶菲涅尔带带来的成像假象。2014 年,Xie^[93]引入了基于高斯计算有限频率灵敏度核函数。2017 年,王高成^[94]在分析二维高斯束角道集的实现方法的基础上,提出了一种利用二维角道集的算法实现三维角道集生成的方法;袁茂林等^[95]利用高斯束传播算子表征格林函数,推导得到基于地下慢度扰动的一次反射波场理论公式。2018 年,宋振东等^[96]总结出三维层状介质模型的最佳网格划分方式;黄国娇等^[97]在三维 TI 介质中实现了多次透射、反射以及转换波的追踪计算。

6 结论与展望

地震层析成像方法主要分为正演和反演两大部分。正演一般分为射线追踪方法和波场的数值模拟,当构造比较复杂时,或者存在间断面时,后者的精度优势就得到了明显的体现。未来怎样提高波场数值模拟的运算速度,值得更深层次的研究。例如,成谷^[98]在正演时利用行索引方式压缩存储灵敏度矩阵;在反演过程中利用压缩后的矩阵进行求解,这样可以大幅度降低存储量和计算量。

基于模型的完全非线性反演方法的计算速度偏慢,算法自身应用到地震层析成像中存在固有的问题。因此如何联合其他资料为反演提供一个较好的初始模型的先验约束是以后的研究方向。例如,段心标^[99]提出了利用原始数学模型的正演旅行时资料生成节点初始速度模型。

空间域参数化方法需要较多的人为控制。相比之下,频率域参数化方法可有效减少人为因素。李贞^[100]通过 Frechet 导数在不同尺度上的分解相对自动地调节扰动的分配。特别是稀疏表示的小波域参数化方法能适应不同数据分布,满足实际生产中不同分辨率要求。因此,小波域多尺度稀疏表示的参数化方法是未来参数化发展的方向。李红立^[101]指出国内对论述复杂观测系统对层析成像效果影响程度的相关文献较少,因此复杂观测系统对层析成像收敛性的定量研究也是未来的研究方向之一。

参考文献 (References):

- [1] Langan R T, Lerche I, Cutler R T. Tracing of rays through heterogeneous media: An accurate and efficient procedure[J]. *Geophysics*, 1985, 50(9): 1456 – 1465.
- [2] Virieux J, Farra V. Ray tracing in 3-D complex isotropic media: An analysis of the problem [J]. *Geophysics*, 1991, 56(12): 2057 – 2069.
- [3] Rawlinson N, Hauser J, Sambridge M. Seismic ray tracing and wavefront tracking in laterally heterogeneous media [J]. *Advances in Geophysics*, 2008(49): 203 – 273.
- [4] Um J, Thurber C. A fast algorithm for two-point ray tracing [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1987, 77(3): 972 – 986.
- [5] Vinje V, Iversen E, Gjoystdal H. Traveltime and amplitude estimation using wavefront construction [J]. *Geophysics*, 1993, 58(8): 1157 – 1166.
- [6] Vinje V, Iversen E, Astebol K, et al. Estimation of multivalued arrivals in 3D models using wavefront construction-Part I [J]. *Geophysical Processing*, 1996, 44(5): 819 – 842.
- [7] Vinje V, Iversen E, Astebol K, et al. Estimation of multivalued arrivals in 3D models using wavefront construction-Part II [J]. *Geophysical Processing*, 1996, 44(5): 843 – 858.
- [8] Bai C Y, Greenhalgh S A. 3-D local earthquake hypocenter determination with an “irregular” shortest-path method [J]. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2006, 96(6): 2257 – 2268.
- [9] Zhou B, Greenhalgh S A. “Shortest path” ray tracing for most general 2D/3D anisotropic media [J]. *Journal of Geophysics & Engineering*, 2005, 2(1): 54 – 63.
- [10] Bona A, Slawinski M A, Smith P. Ray tracing by simulated annealing: Bending method [J]. *Geophysics*, 2009, 74(2): 25 – 32.
- [11] Kirkpatrick S, Jr Gelatt C D, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing [J]. *Science*, 1983, 220(11): 650 – 671.
- [12] Vidale J E. Finite difference traveltime calculation [J]. *Seismics*, 1988(78): 2062 – 2076.
- [13] Qin F H, Luo Y, Olsen K B, et al. Finite difference solution of the eikonal equation along expanding wavefronts [J]. *Geophysics*, 1992, 57(3): 478 – 487.
- [14] Vidale J E. Finite difference calculation of traveltimes in three dimensions [J]. *Geophysics*, 1990, 55(3): 521 – 526.
- [15] Hole J A, Zelt B C. 3-D finite difference reflection traveltimes [J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 121(2): 427 – 434.
- [16] Afnimar, Koketsu K. Finite difference traveltime calculation for head waves travelling along an irregular interface [J]. *Geophysics*, 2000(143): 729 – 734.
- [17] Podvin P, Lecomte I. Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools [J]. *Geophysical Journal International*, 1991, 105(1): 271 – 284.
- [18] Van T J, Symes W W. Upwind finite difference calculation of traveltimes [J]. *Geophysics*, 1991, 56(6): 812 – 821.
- [19] Kim S, Cook R. 3-D traveltime computation using second order ENO scheme [J]. *Geophysics*, 1999(64): 1867 – 1876.
- [20] William A, Schneider J. Robust and efficient upwind finite difference traveltime calculations in three dimensions [J]. *Geophysics*, 1995, 60(4): 1108 – 1117.
- [21] Qian J L, Symes W W. A adaptive finite difference method for traveltimes and amplitudes [J]. *Geophysics*, 1999, 64(1): 167 – 176.
- [22] Popovici A M, Sethian J A. Three-dimensional travel-time computation using the Fast marching method [J]. *Geophysics*, 1999, 64(3): 516 – 523.
- [23] Popovici A M, Sethian J A. 3-D imaging using higher order fast marching traveltimes [J]. *Geophysics*, 2002, 67(10): 604 – 609.
- [24] Alkhalifah T, Fomel S. Implementing the fast marching eikonal solver: spherical Versus Cartesian coordinates [J]. *Geophysical Prospecting*, 2001, 49(2): 165 – 178.
- [25] 黄兴国, 孙建国, 孙章庆, 等. 基于 L-BFGS 理论求解复程函方程的地震波复走时计算方法 [J]. *物探与化探*, 2016, 40(5): 961 – 967.
- [26] Huang X G, Sun J G, Sun Z Q, et al. A method for calculating complex travel time of seismic waves based on L-BFGS theory [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 40(5): 961 – 967.
- [27] Chavent G. Identification of functional parameters in partial differential equations [J]. *Joint Automatic Control Conference*, 1974

- (12):155–156.
- [27] Taillandier C, Noble M, Chauris H, et al. First-arrival traveltime tomography based on the adjoint-state method [J]. *Geophysics*, 2009, 74(6):1–10.
- [28] Waheed U, Flagg G, Yarman C E. First-arrival traveltime tomography for anisotropic media using the adjoint-state method [J]. *Geophysics*, 2016, 81(4):147–155.
- [29] 李勇德. 一种新的预条件伴随状态法初至波走时层析[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(10):3934–3941.
- Li Y D. A new preconditioned adjoint state method for travel time chromatography of first arrival waves [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(10):3934–3941.
- [30] 高飞, 王继勇, 孙成. 基于指数移动平均的无线层析成像算法 [J]. *北京理工大学学报*, 2018, 38(11):1141–1148.
- Gao F, Wang J Y, Sun C. Wireless tomography algorithm based on exponential moving average [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(11):1141–1148.
- [31] Dahlen F A, Hung S H, Nolet G. Fréchet kernels for finite-frequency traveltimes—I. Theory [J]. *Geophysical Journal International*, 2000, 141(1):157–174.
- [32] Spetzler J, Snieder R. The formation of caustics in two and three dimensional media [J]. *Geophys. J. Int.*, 2001, 144(1):175–182.
- [33] Van der Hilst R D, de Hoop M V. Banana-doughnut kernels and mantle tomography [J]. *Geophys. J. Int.*, 2005, 148(6):956–961.
- [34] Baig A, Dahlen F A. Statistics of traveltimes and amplitudes in random media [J]. *Geophys. J. Int.*, 2015, 158(1):187–210.
- [35] Zhao L, Jordan T H. Structural sensitivities of finite-frequency seismic waves: a full-wave approach [J]. *Geophys. J. Int.*, 2006, 165(3):981–990.
- [36] Zhang Z G, Shen Y, Zhao L. Finite-frequency sensitivity kernels for head waves [J]. *Geophys. J. Int.*, 2007, 171(2):847–856.
- [37] Sieminski A, Liu Q Y, Trampert J, et al. Finite-frequency sensitivity of surface waves to anisotropy based upon adjoint methods [J]. *Geophys. J. Int.*, 2007, 168(3):1153–1174.
- [38] 徐小明, 史大年, 李信富. 有限频层析成像方法研究进展 [J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(2):432–438.
- Xu X M, Shi D N, Li X F. Research progress of finite frequency tomography [J]. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(2):432–438.
- [39] Liu Y Z, Wu Z, Geng Z C. First-arrival phase-traveltime tomography [C]//SEG 2017 Workshop: Full-waveform Inversion and Beyond, 2017:83–86.
- [40] Liu Y Z, Wu Z. Which traveltime tomography should be used in near-surface velocity inversion [C]//SEG International Exposition and 88th Annual Meeting, 2018:2617–2620.
- [41] 张晓辉. 直达波与反射波联合层析成像方法研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- Zhang X H. Study on direct wave and reflected wave tomography [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [42] 付翠. 井间地震初至波与反射波旅行时联合层析反演 [D]. 西安: 长安大学, 2014.
- Fu C. Combined tomographic inversion of the first and reflected waves traveling between Wells [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [43] 俞岱, 孙渊, 路婧, 等. 浅层初至波旅行时层析并行算法及在裂缝调查中的应用 [J]. *物探与化探*, 2017, 41(5):977–985.
- Yu D, Sun Y, Lu J, et al. Parallel tomographic algorithm and its application in ground fracture investigation during shallow initial wave travel [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(5):977–985.
- [44] 黄光南. 基于射线理论的地震速度层析成像方法研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2013.
- Huang G N. Research on seismic velocity tomography based on ray theory [D]. Peking: China University of Petroleum, 2013.
- [45] 张晓曼. 译. 利用地方震、远震走时和面波数据联合反演日本俯冲带 P 波和 S 波层析成像 [J]. *世界地震译丛*, 2019, 50(1):35–63.
- Zhang X M. Translate. The p-wave and s-wave tomography of the subduction zone in Japan is inverted by using local seismic, remote seismic travel time and surface wave data [J]. *World Earthquake Translation*, 2019, 50(1):35–63.
- [46] Bishop T N, Bube K P, Cutler R T, et al. Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media [J]. *Geophysics*, 2012, 50(6):903–923.
- [47] 查树贵. 约束条件下的反射层析成像方法 [J]. *江汉石油科技*, 1994, 4(3):39–44.
- Cha S G. Reflection tomography under constraint conditions [J]. *Jiangnan petroleum technology*, 1994, 4(3):39–44.
- [48] Wang Y, Houseman G A. Tomographic inversion of reflection seismic amplitude data for velocity variation [J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 123(2):355–372.
- [49] Kosloff D D, Sudman Y. Uncertainty in determining interval velocities from surface reflection seismic data [J]. *Geophysics*, 2002, 67(3):952–963.
- [50] 喻振华. 地震波速与吸收系数综合层析成像 [J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(4):1338–1341.
- Yu Z H. Comprehensive tomography of seismic wave velocity and absorption coefficient [J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(4):1338–1341.
- [51] 白雪, 李振春, 张凯, 等. 基于井数据约束的高精度层析速度反演 [J]. *物探与化探*, 2015, 39(4):805–811.
- Bai X, Li Z C, Zhang K, et al. High precision tomographic velocity inversion based on well data constraints [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(4):805–811.
- [52] 任芳, 李振春, 张敏, 等. 基于角度域共成像点道集的微分相似优化法偏移速度分析 [J]. *物探与化探*, 2017, 41(5):872–880.
- Ren F, Li Z C, Zhang M, et al. Migration velocity analysis by differential similarity optimization method based on common image point trace set in Angle domain [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(5):872–880.
- [53] 张荣忠, 高彩霞. 全波形层析成像中建立初始模型的稳健时间域偏移速度分析法 [J]. *油气地球物理*, 2018, 16(1):63–66.
- Zhang R Z, Gao C X. Robust time domain migration velocity analysis for establishing initial model in full waveform tomography [J]. *Petroleum Geophysics*, 2018, 16(1):63–66.
- [54] 梁生贤, 王桥, 焦彦杰, 等. LSQR 法在位场反演中的分析与评价 [J]. *物探与化探*, 2019, 43(2):359–366.

- Liang S X, Wang Q, Jiao Y J, et al. Analysis and Evaluation of LSQR Method in Position Field Inversion[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(2): 359–366.
- [55] Sava P, Fomel S. Coordinate-independent angle-gathers for wave equation migration [C]//SEG Expanded Abstracts, 2005: 1850–1853.
- [56] Tang Y, Biondi B. Target oriented wavefield tomography using synthesized Born data[J]. *Geophysics*, 2011, 76(5): 191–207.
- [57] 刘瑞合, 印兴耀, 浦义涛. 波动方程模拟 PML 吸收影响因素分析[J]. *物探与化探*, 2016, 40(4): 757–762.
- Liu R H, Yin X Y, Pu Y T. Analysis of factors affecting PML absorption by wave equation[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 40(4): 757–762.
- [58] 肖艳玲, 范旭, 王晓涛, 等. 网格层析速度反演技术在齐古背斜叠前深度偏移中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2017, 52(2): 98–105.
- Xiao Y L, Fan X, Wang X T, et al. Application of grid tomography velocity inversion technique in depth migration of Qigu anticline prestack[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2017, 52(2): 98–105.
- [59] 薛花, 杜民, 文鹏飞, 等. 网格层析速度反演方法在准三维西沙水合物中的应用[J]. *物探与化探*, 2017, 41(5): 846–851.
- Xue H, Du M, Wen P F, et al. Application of grid tomography velocity inversion method in quasi-three-dimensional Xisha hydrate [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(5): 846–851.
- [60] Nolan C J, Symes W W. Imaging and coherency in complex structure [C]//SEG Expanded Abstracts, 1996: 359–363.
- [61] Nolan C J, Symes W W. Global solution of a linearized inverse problem for the wave equation[J]. *Communications in Partial Differential Equations*, 1997, 22(1): 127–149.
- [62] Kroode A P E, Smit D J, Verdel A R. Amicrolocal analysis of migration[J]. *Wave Motion*, 1998, 28(1): 149–172.
- [63] Xu S, Chauris H, Lambare G, et al. Common angle image gather: A new strategy for imaging complex media [C]//SEG Expanded Abstracts, 1998: 1538–1541.
- [64] Prucha M L, Biondi B, Symes W. Angle domain common image gathers by Wave equation migration [C]//SEG Expanded Abstracts, 1999: 824–827.
- [65] Lehmann I. Publications du Bureau central seismologique international [M]. Bureau, 1936.
- [66] Lailly P. The seismic inverse problem as a sequence of before stack migrations; Conference on Inverse Scattering, Theory and Application [C]//Society for Industrial and Applied Mathematics, Expanded Abstracts, 1983: 206–220.
- [67] Gauthier O, Virieux J, Tarantola A. Two dimensional nonlinear inversion of seismic waveforms; Numerical results [J]. *Geophysics*, 1986, 51(2): 1387–1403.
- [68] Beylkin G. Imaging of discontinuities in the inverse scattering problem by inversion of a causal generalized Radon transform[J]. *Journal of Mathematical Physics*, 1985, 26(1): 99–108.
- [69] Bleistein N. On the imaging of reflectors in the earth [J]. *Geophysics*, 1987, 52(4): 931–942.
- [70] Tarantola A. Inverse problem theory: Method for data fitting and model parameter estimation [M]. Elsevier Science Publ. Co. Inc., 1987.
- [71] Mora P. Nonlinear 2-D elastic inversion of multi-offset seismic data [J]. *Geophysics*, 1987, 52(7): 1200–1228.
- [72] Cerveny V. Direct and inverse kinematic problems for inhomogeneous anisotropic media—linearization approach [J]. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci*, 1982(13): 127–133.
- [73] Hiraharak, Ishikaway. Travel time inversion for three-dimensional P-wave velocity anisotropy [J]. *Journal of Physics of the Earth*, 1984, 32(3): 197–218.
- [74] Jech J., Pšenčík I. Three dimensional inversion problem for inhomogeneous transversely Isotropic media [J]. *Studia Geophysica et Geodetica*, 1988, 32(3): 136–143.
- [75] Jech J, Psencik I. First order perturbation method for anisotropic media [J]. *Geophysical J. Int.*, 1989, 99(2): 369–376.
- [76] Chapman C H, Pratt R G. Traveltime tomography in anisotropic media-I. Theory [J]. *Geophysical J. Int.*, 1992, 109(1): 1–19.
- [77] Zhou B, Greenhalgh S. Nonlinear traveltime inversion for 3D seismic tomography in strongly anisotropic media [J]. *Geophysical J. Int.*, 2008, 172(1): 383–394.
- [78] 黄国娇, 白超英, 钱卫. 一般 TI 介质中多震相走时层析成像——以井间成像为例 [J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(1): 115–126.
- Huang G J, Bai C Y, Qian W. Multi-seismic traveltime tomography in general TI media — taking interwell imaging as an example [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(1): 115–126.
- [79] 何雷宇. 井间各向异性多波走时联合层析成像——以波场模拟拾取走时为例 [J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(5): 1796–1806.
- He L Y. Cross-well anisotropic multi-wave traveltime tomography — taking wave field simulation picking and taking time as an example [J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(5): 1796–1806.
- [80] 黄杰, 杨国权, 李振春, 等. TTI 介质拟声波方程数值模拟 [J]. *物探与化探*, 2018, 42(1): 134–143.
- Huang J, Yang G Q, Li Z C, et al. Numerical simulation of pseudo-acoustic wave equation in TTI medium [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(1): 134–143.
- [81] 贾源源, 董森. 地震波各向异性走时层析成像有限元模型仿真 [J]. *计算机仿真*, 2019, 36(3): 216–219.
- Jia Y Y, Dong M. Finite element model simulation of seismic wave anisotropic traveltime tomography [J]. *Computer Simulation*, 2019, 36(3): 216–219.
- [82] Hagedoorn J G. A process of seismic reflection interpretation [J]. *Geophysical Processing*, 1954(2): 85–127.
- [83] Tikhonov A N, Arsenin V Y. Solution of ill-posed Problems [J]. New York: John Wiley, 1977(25): 11–23.
- [84] 王宏伟. 涅菲尔带地震层析 [J]. *石油地球物理勘探*, 1996, 31(3): 309–326.
- Wang H W. Fresnel zone seismic tomography [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1996, 31(3): 309–326.
- [85] Marquering H, Dahlen F A, Nolet G. Three dimensional sensitivity kernels for finite frequency traveltimes; the banana doughnut paradox [J]. *Geophysical J. L.*, 1999, 137(3): 805–815.
- [86] Dahlen F A. Finite frequency sensitivity kernels for boundary topog-

- raphy Perturbations[J]. *Geophysical J. Int.*, 2005, 162(2): 525 – 540.
- [87] Gelis C, Virieux J, Grandjean G. 2D elastic waveform inversion using Born and Rytov formulations in the frequency domain[J]. *Geophysical J. Int.*, 2007, 168(2): 605 – 633.
- [88] Spetzler G, Snieder R. The effect of small scale heterogeneity on the arrival time of waves[J]. *Geophysical J. Int.*, 2001, 145(3): 768 – 796.
- [89] Zhang Z G, Shen Y, Zhao L. Finite frequency sensitivity kernels for head waves[J]. *Geophysical J. Int.*, 2007, 171(3): 847 – 856.
- [90] 杨国辉. 菲涅尔带旅行时层析成像方法及应用研究[M]. 厦门: 厦门大学, 2009.
- Yang G H. Study on the method and application of tone imaging in Fresnel zone[M]. Xiamen: Xiamen University, 2009.
- [91] Xia F, Jin S. Angle domain wave equation tomography using RTM image gathers[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2013: 4822 – 4826.
- [92] Zhang K, Yin Z, Li Z C, et al. Wave equation tomographic velocity inversion method based on the Born/Rytov approximation[J]. *Applied Geophysics*, 2013, 10(3): 314 – 322.
- [93] Xie X B, Geng Y. Gaussian beam based finite frequency turing wave tomography[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2014, 109: 71 – 79.
- [94] 王高成. 基于三维角道集的多分量层析速度反演方法在胜利地区的应用[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(4): 1659 – 1664.
- Wang G C. Application of multi-component tomographic velocity inversion method based on three-dimensional angular gathers in Shengli area[J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(4): 1659 – 1664.
- [95] 袁茂林, 蒋福友, 杨鸿飞, 等. 高斯束线性正演模拟方法研究[J]. *物探与化探*, 2017, 41(5): 881 – 889.
- Yuan M L, Jiang F Y, Yang H F, et al. Research on Gaussian beam linear forward modeling method[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(5): 881 – 889.
- [96] 宋振东, 蒋正红, 魏成武, 等. 基于三维层状介质模型地震层析成像正演网格研究[J]. *CT理论与应用研究*, 2018, 27(1): 1 – 8.
- Song Z D, Jiang Z H, Wei C W, et al. Research on forward modeling of seismic tomography based on three-dimensional layered medium model[J]. *Computerized Tomography Theory and Applications*, 2018, 27(1): 1 – 8.
- [97] 黄国娇, 孙江兵, 白超英, 等. 三维 TI 介质中多波走时层析成像[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(1): 63 – 73.
- Huang G J, Sun J B, Bai C Y, et al. Multi-wave traveltime tomography in 3D TI media[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(1): 63 – 73.
- [98] 成谷. 反射地震走时层析成像中的大型稀疏矩阵压缩存储和求解[J]. *地球物理学进展*, 2008, 23(3): 676 – 678.
- Cheng G. Large-scale sparse matrix compression storage and solution in reflection seismic traveltime tomography[J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(3): 676 – 678.
- [99] 段心标, 金维浚. 井间地震层析成像初始速度模型[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(6): 1831 – 1835.
- Duan X B, Jin W J. Initial velocity model of crosswell seismic tomography[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(6): 1831 – 1835.
- [100] 李贞. 地震层析成像中模型参数化研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(4): 1616 – 1624.
- Li Z. Research progress on model parameterization in seismic tomography[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(4): 1616 – 1624.
- [101] 李红立. 观测系统对速度层析成像的影响及其收敛性分析[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(6): 2374 – 2382.
- Li H L. Influence of observing system on velocity tomography and its convergence analysis[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(6): 2374 – 2382.

A review of seismic tomography methods

LIU Chang¹, LI Zhen-Chun¹, QU Ying-Ming¹, XU Yi-Peng¹, ZHAO Wei-Jie²

(1. SWPI, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2. Ocean Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company, China Petrochemical Group Co. Ltd., Dongying 257237, China)

Abstract: As a method for effectively reducing the velocity model of the subsurface media, seismic tomography provides a reliable initial velocity model for full waveform inversion. The finite frequency characteristics of seismic wave propagation are realized from primitive ray toe to phase shift travel time tomography and instantaneous travel time tomography. From the acoustic wave equation to the elastic wave equation and from the isotropic medium to the VTI, TTI media, the simulation of the real underground medium is realized. The morbidity of mitigating tomographic inversion has also been a research hotspot. The commonly used methods have regularization, and the sensitive nucleus of Gaussian beam tomography has replaced the traditional ray-sensitive nucleus. Furthermore, in order to avoid the dependence of the accuracy of the imaging results on the true depth of the reflection bits on the common imaging gather, the angular domain double differential reflection tomography can converge stably and efficiently to the accurate migration velocity model. At present, tomography is gradually transitional to anisotropic media, data used are transitional from VSP to WVSP, and a single waveform is developed into multiple waveforms combined inversion. However, problems related to resolution and computational efficiency still require attention.

Key words: travel time tomography; wave tomography; acoustic wave equation; elastic wave equation; joint inversion

(本文编辑: 叶佩)