

三角网格参数化在反射地震走时层析成像中的应用^{*}

成 谷¹, 张宝金²

(1 中山大学地球科学系, 广东 广州 510275;
2 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760)

摘 要: 矩形网格参数化是反射地震走时层析成像中的传统参数化方式, 然而这种参数化方式本身的缺点 (如剖分的灵活性差, 对速度界面的描述精度差) 却在层析成像的正反演过程中产生了很多不利因素: 正演模拟和层析反演时存储量大、计算量大、计算耗时久, 层析反演的方程性态差、求解难度高等。鉴于矩形网格参数化层析成像的上述缺点, 将三角网格参数化应用到反射地震走时层析成像中, 研究发现三角网格参数化本身的优点 (如剖分的灵活性强, 对速度界面的描述精度高) 在层析成像的正反演过程中产生了诸多有利因素, 大大减少了网格的数目, 在正演模拟和层析反演时大大减少了存储量、计算量和计算时间, 并改善了层析反演的方程性态, 降低了解难度。因此, 三角网格参数化与矩形网格参数化相比在反射地震走时层析成像中更有优越性, 模型试验表明两种参数化方式得到的层析反演结果具有可比性。

关键词: 反射地震走时层析成像; 三角网格参数化; 矩形网格参数化

中图分类号: P315. 3⁺或 P315. 63 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529 6579 (2006) 05 0128 05

反射地震走时层析成像是地震勘探中求取速度的重要方法, 由正演模拟和层析反演两部分组成, 在这两部分中均需对速度进行参数化, 传统的方式是采用矩形网格参数化, 但这种参数化方式对层析成像中正演模拟和层析反演均有很多不利因素, 本文将三角网格参数化方式引入到反射地震走时层析成像中来, 与矩形网格参数化方式相比, 具有很多优势。

1 反射地震走时层析成像及其参数化问题

1.1 反射地震走时层析成像

反射地震走时层析成像的理论基础^[1]是 Radon 变换: $u(\rho, \theta) = \int_L f(x, y) ds$, 其中 $f(x, y)$ 称为图象函数, $u(\rho, \theta)$ 称为投影函数。 θ 为入射波方向, ρ 为观测点位置。 1917 年数学家 Radon 证明: 已知所有入射角 θ 的投影函数 $u(\rho, \theta)$ 可以唯一地恢复图象函数 $f(x, y)$ 。

反射地震走时层析成像最终可以写成^[2-3]:

$$b = Au \tag{1}$$

投影函数取走时的扰动量 b 为 m 维矢量, m 为射线的个数, 图象函数取实际波慢 (速度的倒数) 在参考波慢上的扰动量 u 为 n 维矢量, n 为未知

参数的个数, 积分路径取为射线路径 A , 为 $m \times n$ 维矩阵, 称灵敏度矩阵, 其元素 a_{ij} 表示第 i 条射线在第 j 个网格内的射线长度。

从式 (1) 看, 层析方程组是一个线性问题, 但实际上却是一个非线性问题, 因为射线路径依赖于介质中的慢度分布。在此情况下, 通常针对某个参考模型进行线性化, 并采用线性迭代解来逐渐逼近非线性解。

此外, 上式中的灵敏度矩阵具有稀疏和病态的特点。稀疏主要是因为一条射线实际经过的网格数目很少。病态主要是因为反射地震走时层析成像问题的先天不足。此外, 如果层析要求解的未知参数很多, 灵敏度矩阵还具有大型的特征, 因为更多的未知参数要求更多的射线覆盖。

综上所述, 层析问题的非线性特征决定了方程需要迭代求解, 而灵敏度矩阵的大型特征决定了求解时的存储量和计算量很大, 方程的病态决定了求解时需要加入各种正则化条件, 详细讨论见文献^[4-6]。因此, 反射地震走时层析成像中的存储量、计算量和求解难度应该是值得注意的问题。本文在比较两种参数化方式对正演模拟和层析反演的影响时, 也主要是从这三方面进行比较。

由于问题的非线性, 反射地震走时层析成像的

^{*} 收稿日期: 2005 09 21
基金项目: 广东省博士科研启动基金资助项目; 中山大学青年教师科研启动基金资助项目
作者简介: 成谷 (1975 年生), 女, 博士, 讲师; E-mail: cgyulanda@163.com
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基本步骤为: 首先假定一速度模型, 利用该速度模型进行正演模拟, 正演模拟的走时与实测走时的结果进行比较, 如果两者的误差在允许的限度内, 则该速度模型即为认定的地下介质的真实速度模型。否则采用一定的准则更新速度模型, 重复上一步骤, 其中速度更新量利用反演方式求得。在正演模拟和层析反演中都要对速度进行参数化, 因此速度参数化的方式对正演模拟和层析反演都会产生影响, 这正是本文要讨论的。

1.2 速度剖面的参数化方式

速度剖面参数化是地震资料处理过程中经常会遇到的问题。在速度剖面参数化的历史上, 主要有这样几种方式: 均匀速度模型 (也称块体模型、宏观模型)、拟合函数模型和像素模型。其中块体模型计算难度小, 但模型对地下介质的描述过于粗糙; 拟合函数模型与块体模型相比, 对介质描述的精度更高, 但计算上的难度更大; 像素模型对介质描述的精度最高, 但在计算上的难度也最大。其中前两种参数化方式主要用于地震资料处理水平的初级阶段, 随着计算机技术的飞速发展和地震资料处理水平的提高, 像素模型已经成为主流的参数化方式。一直以来, 矩形网格参数化是像素模型参数化方式中的传统模式, 但近年来三角网格参数化方式也逐渐引起人们的重视^[7-8]。

2 矩形网格参数化反射地震走时层析成像的缺点

为计算简单, 采用矩形网格参数化时网格大小和形状通常是相同的, 即棋盘格式的划分方式。这样可使得网格间检索和数据点定位简单易行: 网格边界与坐标轴平行, 给定某区域的起始坐标、横向网格大小和垂向网格大小、横向网格数目和垂向网格数目, 则可知任意网格所分布的区域。根据区域内任意一点的坐标, 也可以很方便地计算出该点位于哪一网格内。

但这样的处理方式也有很多缺点, 如会给随后的层析成像正反演过程带来了很多不利因素。

2.1 矩形网格参数化方式的缺点

- (1) 模型剖分的灵活性差
矩形网格大小和形状的规则性决定了其不能根据地质构造的复杂程度进行区别对待, 为迁就对复杂构造区域的采样精度, 矩形网格的尺度需要很小, 而网格剖分的均一性要求在构造简单区域必须以同样的尺度划分, 增大了剖分网格的数目。
- (2) 对速度界面的描述精度差, 速度模型和界面模型不一致

界面与网格边界不重合, 在用速度值的相对大小表征界面的位置时只能用锯齿状的分布来逼近平滑变化的界面。为了保证逼近的精度, 则网格的尺寸必须很小, 因而导致网格的数目很多。

2.2 层析成像正反演过程带来的不利因素

- (1) 正演模拟时存储量大、计算时间长
模型剖分的灵活性差导致剖分网格的数目很多, 与正演模拟结合时, 由于在 Fréchet 微商计算中要计算射线在每个网格内的出射点和射线长度, 尽管矩形网格剖分形式就单网格计算而言, 计算效率高, 需要的记录运算少, 但由于网格数目众多, 因此在总体上存储量大、计算耗时久。

- (2) 正演模拟难度增大、误差增大、效率降低

对速度界面的描述精度差, 即速度模型和界面模型的不一致导致在正演模拟时需根据网格的位置和界面位置的相对关系判断网格内是否有反射界面存在, 增大了正演模拟的难度, 降低了效率, 当网格内有反射界面时, 则网格内的速度及其梯度受界面影响较大, 增大了正反演计算时的误差。

- (3) 用于层析反演时存储量大、计算时间长、方程性态差、求解困难

矩形网格参数化与层析反演相结合时, 更多的网格意味着更多的未知参数, 因此需要更多的射线, 则待求解方程组的维数大大增加。此外更多的未知参数意味着参数矢量中欠定的和位于零空间的分量数目更多, 性态大大变坏, 层析反演的难度增加, 通常需要加入正则化约束改变方程组的性态。而正则化约束的加入又增加了存储量和计算量。

3 三角网格参数化反射地震走时层析成像的优点

三角网格参数化方式网格大小和形状都是变化的, 其本身具有很多优点, 并给随后的层析成像正反演过程带来了很多有利因素。

3.1 三角网格参数化方式的优点

- (1) 模型剖分的灵活性强
剖分方式非常灵活, 网格大小和形状都可变, 可根据地下不同区域构造的复杂程度, 在构造简单区域采用大网格剖分, 在构造复杂区域采用小网格剖分, 总体上网格数目少。
- (2) 对速度界面的描述精度高, 速度模型和界面模型具有一致性
三角网格的弯曲边界和界面的延伸方向完全一致, 界面位于三角网格间的分界面上, 对速度界面的描述精度高。

3.2 给层析成像正反演过程带来的有利因素

(1) 正演模拟存储量小、计算时间少

就单网格计算而言, 三角网格剖分由于网格大小和形状的不规则性, 需增加一些记录运算, 在计算上效率相对较差, 但由于网格数目相对少得多, 因此总体上所需的存储量小、计算量和计算时间少。

(2) 正演模拟难度降低、误差减少、效率提高

在参数化的过程中可以给出反射线段的界面编号, 射线在界面上的入射点直接位于三角网格的弧形边界上, 不需根据网格的位置和界面位置的相对关系判断网格内是否有反射界面存在, 因此在正演模拟时降低了难度、减少了误差、提高了效率。

(3) 用于层析反演时存储量小、计算时间少、方程性态好、求解容易

与层析反演相结合时, 未知参数个数少, 因此需要较少的射线数, 待求解方程组的维数大大减小, 在总体上减少了反演的存储量。同时变网格剖分特性本身就具有一种正则化效应, 地下介质模型的边界处由于射线覆盖不足, 通常处于模型分量的欠定空间或零空间, 而三角网格的变网格剖分方式可通过增大边界处网格的大小调整数据对边界区域的控制程度, 使方程组的性态相对变好, 位于欠定空间和零空间的分量相对减少, 层析反演的难度和对正则化的需求相对降低。这在本质上相当于一种正则化作用。

比较而言, 三角网格参数化由于网格大小和形状的不规则性, 网格间检索和数据点定位不如矩形网格参数化方式方便。由于网格大小和形状的不规则性, 各种正则化方式加入时没有矩形网格参数化方式方便。但相对于三角网格参数化方式对层析成像正反演过程带来的各种便利而言, 这点不便我们还是愿意接受的。

4 两种参数化方式反射地震走时层析成像模型比较

利用一个简单的模型可以表明两种参数化方式的优缺点。模型的横向范围为 10 000 m, 垂向范围为 2 000 m, 采用两种参数化方式进行剖分。可以想象, 如果采用矩形网格参数化方式剖分, 则真实的弯曲层间界面必定穿矩形网格而过, 在界面上下速度是不同的 (突变的), 而矩形网格参数化方式网格内速度是常数或具有渐变的梯度, 这便是矩形网格参数化方式中速度模型和界面模型的不一致性。要降低这种不一致性, 只能减小矩形网格的大

小, 势必将增多网格的数目。而在三角网格剖分中, 三角网格独特的弧形边界正好选在层间界面上^[7-8], 因此不存在速度模型和界面模型的不一致性, 而且可以选择层间界面上曲线变化的控制点作为三角网格的端点, 实现根据模型的复杂程度剖分的功能, 如在层界面曲率小的地方, 控制点取稀疏些, 在层界面曲率大的地方, 控制点取密些。对于文中的层内匀速速度模型, 可以直接选择层的上界面和层的下界面上的点作为三角网格的端点, 这样的剖分功能可大大减少剖分网格的数目。图 1 和图 2 分别是同一速度模型两种参数化方式剖分的结果。速度模型为一 6 层叠瓦状构造, 层内速度均匀, 第一层速度为 2 000 m/s, 第二层速度为 2 500 m/s, 第三层速度为 3 000 m/s, 第四层速度为 2 000 m/s, 第五层速度为 4 000 m/s, 第六层速度为 4 500 m/s。图 1 为矩形网格剖分, 从中可以看出, 尽管网格已经很小, 为 10 m×10 m, 但在界面处仍可以看出锯齿形痕迹, 而在图 2 (三角网格剖分) 中, 界面处的速度场非常光滑。两种剖分方式产生的参数的个数也大不相同, 矩形网格剖分方式中参数个数为 200 000 个, 而从图 2 中可以看出, 三角网格剖分方式参数个数只有 49 个。非常悬殊的比较。在正演模拟中, 在每个网格内计算射

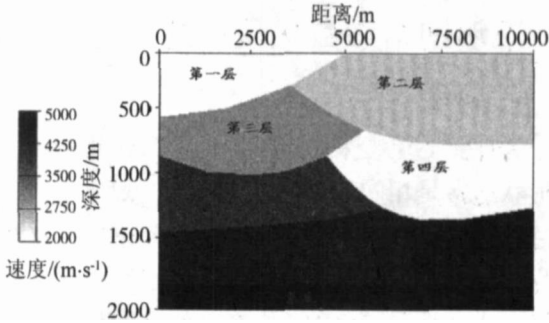


图 1 矩形网格剖分的速度场

Fig. 1 Velocity section obtained by rectangle cell parameterization

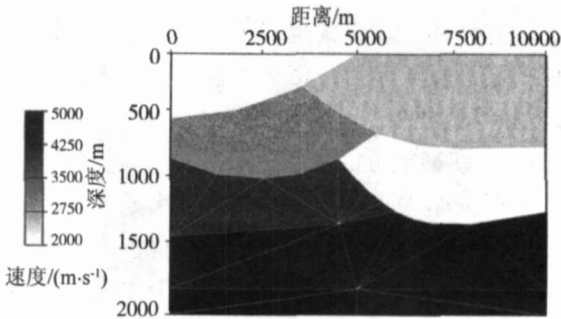


图 2 三角网格剖分的速度场

Fig. 2 Velocity section obtained by triangle cell parameterization

线的出射点和 frechet 微商, 在层析反演中, 要反演每个网格内的慢度增量。再加上方法本身对迭代和正则化的需求, 这两种参数化方式的存储量、计算量和计算效率的优劣是非常明显的。

以图 1 和图 2 所示为真实的速度模型, 针对这样的模型进行三角网格参数化反射地震走时层析成像和矩形网格参数化反射地震走时层析成像。正演模拟利用射线方程计算走时和灵敏度矩阵^[9-12], 反演时采用从上到下逐层反演的策略 (从第一层到第六层逐层反演), 在反演过程中采用了 0 阶和 1 阶导数正则化方式^[13-14], 具体过程略。由于正则化方式的使用, 在模型边界等处于欠定和零空间区域的参数受到超定空间分量的约束而与超定空间分量的值趋同。考虑到反射层析速度和界面深度的耦合性, 对每一层本文采取偏移和层析迭代应用的方法 (首先给定初始速度, 进行叠前深度偏移, 在偏移后的剖面上拾取反射界面, 在拾取的反射界面和初始速度基础上利用层析成像求取慢度增量, 进行速度更新, 更新后的速度作为初始速度, 重复上面的过程直到预测旅行时与实测旅行时之差在允许的误差范围内), 层间界面控制点从偏移后的剖面上拾取, 因而在三角网格参数化层析结果图 (图 3) 中界面控制点的分布与图 2 中不同 (图 2 是为显示三角网格剖分的效果直接给出的控制点)。

图 3 是三角网格参数化层析反演结果, 从中可以看出: 界面形态大致得到了恢复, 层内各网格间的速度差别非常小, 由于高速层的存在, 因而在色度上难以分辨。第一层的真速度为 2000 m/s, 层析速度平均为 2003 m/s; 第二层的真速度为 2500 m/s, 层析速度平均为 2505 m/s; 第三层的真速度为 3000 m/s, 层析速度平均为 2996 m/s; 第四层的真速度为 2000 m/s, 层析速度平均为 1998 m/s; 第五层的真速度为 4000 m/s, 层析速度平均为 4001 m/s; 第六层的真速度为 4500 m/s, 层析速度平均为 4505 m/s。图 4 是矩形网格参数化层析反演结果, 界面形态大致得到了恢复, 层内各网格间的速度差别非常小, 由于高速层的存在, 因而在色度上难以分辨。第一层的真速度为 2000 m/s, 层析速度平均为 2004 m/s; 第二层的真速度为 2500 m/s, 层析速度平均为 2508 m/s; 第三层的真速度为 3000 m/s, 层析速度平均为 2992 m/s; 第四层的真速度为 2000 m/s, 层析速度平均为 1990 m/s; 第五层的真速度为 4000 m/s, 层析速度平均为 4008 m/s; 第六层的真速度为 4500 m/s, 层析速度平均为 4510 m/s。比较两图可以看出, 两种参数化方式得到的结果基本相同, 具有可比性。

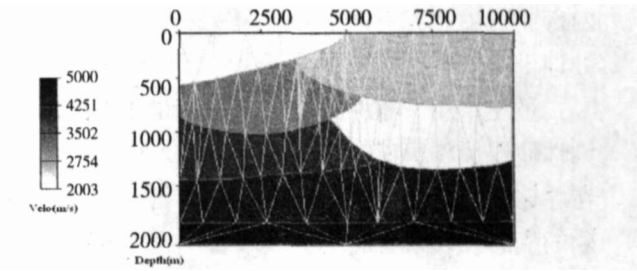


图 3 三角网格参数化层析反演结果
Fig. 3 Result of tomography obtained by triangle cell parameterization

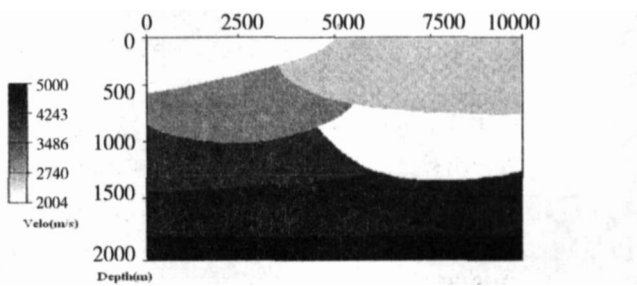


图 4 矩形网格参数化层析反演结果
Fig. 4 Results of tomography obtained by rectangle cell parameterization

5 结 论

本文研究发现传统的矩形网格参数化方式在反射地震走时层析成像的正反演过程中具有如下缺点: 大小和形状规则的矩形网格剖分方式, 灵活性差, 网格数目众多, 增大了正演模拟和层析反演的存储量和计算时间, 也增大了层析反演问题的病态程度和求解的难度。矩形网格参数化在对界面的描述上速度模型和界面模型不一致, 只能用锯齿状的分布来表征界面上下的速度变化, 在对界面的处理上增加了难度和引入了误差。

因此, 本文将三角网格参数化方式应用到反射地震走时层析成像中来, 发现其具有很多优势: 大小和形状都不规则的三角网格剖分方式, 灵活性强, 可适应地下不同区域构造的复杂程度, 在构造简单区域采用大网格剖分, 在构造复杂区域采用小网格剖分, 减少了未知参数的数目, 在正演模拟和层析反演时降低了计算量和计算时间, 同时改善了层析反演时问题的性态, 降低了问题的难度。此外, 这种剖分方式本身还具有一定程度的正则化效应, 对层析反演边界处射线覆盖不足的区域 (这一区域处于欠定或零空间), 三角网格参数化方式可以增大射线覆盖不足处网格的大小, 通过调整数据信息的分布使数据对每一模型参数的控制程度近似相同。在对界面的描述上也具有优势, 三角网格

的弯曲边界和界面的延伸方向完全一致, 在界面的处理上降低了难度、减少了误差。

虽然采用三角网格参数化方式时, 网格的不规则性使得层析反演的正则化方式加入略显繁琐, 但在存储量、计算时间方面的效率相当可观, 对反问题的病态性质也有相当大的改善。模型试验表明采用两种参数化方式得到的反射地震走时层析成像的结果基本相同。

参考文献:

- [1] 马在田, 曹景忠, 王加林, 等. 计算地球物理学概论 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1997. 1-10, 254-284, 294-308.
- [2] GUUST NOLET. 地震层析技术 [M]. 冯锐等译. 北京: 地质出版社, 1994. 58-97, 115-142, 276-303.
- [3] 艾伯特·塔兰托拉. 反演理论—数据拟合和模型参数估算方法 [M]. 张先康译. 北京: 学术书刊出版社, 1989. 352-444.
- [4] 成谷, 马在田, 张宝金. 反射地震走时层析成像中存在的主要问题及应对策略 [J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 512-518.
- [5] 成谷, 马在田, 耿建华. 反射地震走时层析成像发展回顾 [J]. 勘探地球物理进展, 2002, 25(3): 6-12.
- [6] 成谷. 地震反射走时层析理论与应用研究 [D]. 上海:

同济大学, 2004.

- [7] MENG Z B. Tetrahedral based earth models ray tracing in tetrahedral models and analytical migration velocity analysis [D/OL]. Colorado School of mines 1999. <http://www.cup.mines.edu/documents/cup-296T.pdf>
- [8] RUGER A. Dynamic ray tracing and its application in triangulated media [D/OL]. USA: Colorado School of mine. <http://www.cup.mines.edu/documents/cup-139T.pdf>
- [9] ČERVENÝ V. Ray tracing in a vicinity of a central ray SEP 28-39-48 [D/OL]. <http://sepwww.stanford.edu/oldreports/sep28/28-06.pdf>
- [10] ČERVENÝ V. Dynamic ray tracing in 2 D media SEP 28-21-30 [D/OL]. <http://sepwww.stanford.edu/oldreports/sep28/28-04.pdf>
- [11] ČERVENÝ V. Dynamic ray tracing across curved interfaces SEP 28-61-74 [D/OL]. <http://sepwww.stanford.edu/oldreports/sep28/28-08.pdf>
- [12] ČERVENÝ V. Determination of second derivatives of travel time field by dynamic ray tracing SEP 28-31-38 [D/OL]. <http://sepwww.stanford.edu/oldreports/sep28/28-05.pdf>
- [13] 杨文采. 地球物理反演和反射地震走时层析成像 [M]. 北京: 地质出版社, 1989. 113-235.
- [14] 杨文采, 李幼铭. 应用反射地震走时层析成像 [M]. 北京: 地质出版社, 1993. 142-160.

Application of Triangle Cell Parameterization in Travel time Tomography of Reflection Seismic Data

CHENG Gu¹, ZHANG Bao-jin²

(1. Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University Guangzhou 510275, China

2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China)

Abstract The rectangle cell parameterization is a traditional cell parameterization style in travel time tomography of reflection seismic data, which shows many shortcomings, such as poor dividing flexibility and low accuracy in describing the reflection interface. It can cause large storage and calculation amount, long calculation time, poor equation status and increased difficulty in solving the equation to use this method in modeling and inversion process. The triangle cell parameterization has many merits compared to rectangle cell parameterization. It shows strong dividing flexibility, high accuracy in describing the reflection interface and decreased amount of cells, and can reduce storage and calculation amount, shorten calculation time in modeling and inversion process, and modified equation status and decreased solving difficulty in inversion process. Thus the triangle cell parameterization is better than the rectangle cell parameterization for travel time tomography of reflection seismic data. Model test shows that the results obtained by two parameterization styles are comparable.

Key words travel time tomography of reflection seismic data; triangle cell parameterization; rectangle cell parameterization