

双重网格井间地震层析成像技术

马德堂¹, 朱光明², 张文波²

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

[摘要] 提出了一种不同于常规的井间地震层析成像技术, 即在较细的网格上进行射线追踪, 以提高射线路径和旅行时的计算精度, 在较粗的网格上进行层析反演成像, 使网格像素上射线覆盖的最低次数达到一定要求, 以提高成像质量。分析了采用这种双重网格地震层析成像技术的必要性, 模型实验证实了此技术实用性和有效性。

[关键词] 双重网格; 井间地震层析成像; 线性插值射线追踪; 联合迭代法; 初至波

[中图分类号] P315.3+1 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2005)04-0083-04

[作者简介] 马德堂(1965-), 男, 陕西旬阳人, 讲师, 博士研究生, 从事数学和波动方程正反演以及地震层析成像研究。

0 引言

基于射线理论的地震层析成像, 除须从实际地震资料中准确地拾取旅行时^[1]外, 还有两个关键的方面, 一是在初始(或修改后的)速度模型中进行射线追踪, 求取射线路径和旅行时及其与实际旅行时的差值; 二是根据所求出的射线路径和旅行时差值, 利用层析成像反演算法求取模型速度(或慢度)的修正量, 从而得到新的初始速度模型。国内外的学者们在这些方面作了大量的工作^[2~8], 使得射线追踪方法和层析成像反演算法都比较成熟。通常采用基于网格划分的射线追踪方法, 如有限差分求解程函方程方法和旅行时线性插值方法等。层析成像反演算法一般也基于网格划分。理论上讲, 网格划分越细, 计算出的射线路径和旅行时误差越小, 层析成像的分辨率也越高; 然而层析成像质量的优劣与每个网格像素上射线覆盖次数有密切的关系, 当某些网格像素上没有射线穿过或穿过的射线太少时, 层析成像质量不可能高。实际应用中, 由于野外工作量的限制, 得到的记录道数(对应炮点—检波点对的数目或射线条数)是有限的, 要想

得到成像质量相对高的结果, 网格划分不能太细, 否则, 某些网格像素上的射线覆盖次数会过低甚至为零。可见, 从射线路径和旅行时的精度考虑, 网格划分的越细越好, 而从实际炮检对数目及其分布情况考虑, 网格划分的细度不得低于某一下限。常规的地震层析成像方法是在统一的网格划分下进行射线追踪正演和层析成像反演, 这样做不能克服这一客观存在的矛盾。为缓解这一矛盾, 文献[8]提出了并行化交错网格地震层析成像方法, 此方法采用不同尺度的成像网格和射线追踪网格, 并通过双曲线插和回代过程实现网格节点上速度的关联。笔者提出的双重网格地震层析成像技术是指将用于射线追踪的网格划分和用于层析反演的网格划分分离, 在较细的网格上进行射线追踪, 以提高射线路径和旅行时的计算精度, 在使网格像素上射线覆盖最低次数达到一定要求的较粗的网格上进行层析反演, 并将成像网格内的速度直接遗传给其内的射线追踪网格。与文献[8]提出的并行化交错网格地震层析成像方法相比, 笔者提出的双重网格地震层析成像技术具有简单、容易实现、计算量小等特点。笔者以井间地震层析成像为例, 从网格划分的大小对射线追踪正演和层析成像反演的影响方面, 说明了采用双重网格的必要性, 用实例证实了这种双重网格地震层析成像技术的实用性和有效性。

[收稿日期] 2005 01 15

[基金项目] 国家 863 项目(2002AA615050)

1 射线追踪的网格大小对旅行时和射线路径的计算精度的影响

就旅行时线性插值射线追踪方法^[3]而言, 网格越小, 模型结构的模拟越精细, 旅行时的计算精度越高, 射线路径越准确。为说明这一点, 而给出了一个含 5 层的井间地震模型, 井间距为 430 m, 目标范围从 1 800 ~ 2 300 m, 自上而下各层的速度分别为 2 300 m/s, 2 900 m/s, 2 600 m/s, 2 400 m/s, 2 700 m/s。当炮点在左边井的 2 180 m 深处, 接收排列在右边井时, 图 1 绘出了 2 m×2 m 与 10 m×10 m 网格划分下的初至波旅行时差曲线, 可以看到最大差值达到近 2 ms。图 2 绘出了相应的射线路径(其中也显示了模型界面及其形态), 可以看到在细网格划分下的射线路径在炮点一侧是分散开的, 且发生折射的点与界面重合很好; 而在粗网格划分下的射线路径在炮点一侧分散不开, 且发生折射的点与界面重合的不好。不同网格划分下的旅行时差值和射线路径差异是由以下的原因引起的。

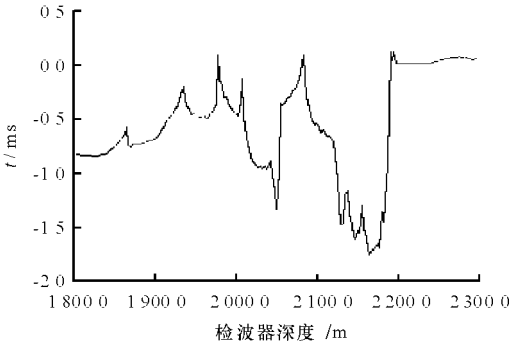


图 1 10 m×10 m 和 2 m×2 m 网格划分下的旅行时误差曲线

Fig. 1 Curve of the Error of the Traveing Times Under 10 m×10 m and 2 m×2 m Mesh

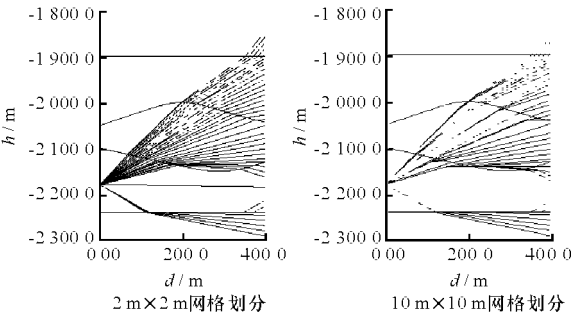


图 2 射线追踪路径

Fig. 2 Ray Path Under 2 m×2 m Mesh and 10 m×10 m

(1) 由粗网格拟合而成的模型与由细网格拟合而成的模型严格意义上讲是不等同的, 因为粗网格不能很好的拟合复杂模型界面的形态和位置, 从而不能很好的拟合复杂模型的速度结构, 而细网格却能更逼真地拟合复杂模型界面的形态、位置以及速度结构。

(2) 网格越细, 旅行时线性插值射线追踪方法本身产生误差越小, 得到的旅行时和射线路径越准确。

由此可见, 就射线追踪正演而言, 网格越细越好。当然射线追踪网格也不能过细, 因为当模型的大小一定时, 网格越细, 网格的数目就越大, 射线追踪时, 占用的内存也就越大, 所需机时也越长。

2 成像网格大小对成像质量的影响

影响地震层析成像分辨率的因素主要有反演算法、观测系统、震源频率、目标体的形态及性质(高速体还是低速体)等方面。观测系统决定可利用的初至波射线的条数; 震源频率影响初至拾取的精度等; 因高速体对射线有“吸引”作用, 而低速体对射线有“排斥”作用, 因此, 地质目标(或模型)的形态及性质决定射线的散开程度和分布的均匀程度。当观测系统、震源频率、目标体(或模型)的形态及性质一定时, 要提高地震层析成像的质量, 只能设法改进地震层析成像中的正反演算法。

一般而言, 地震层析成像中的正反演算法都与网格划分有关。网格划分的越细, 射线追踪正演部分计算出的射线路径和旅行时误差越小。当然, 从反演角度讲, 网格划分的细, 才能反映目标体(或模型)结构的细节, 提高层析成像的分辨率; 然而, 层析成像质量的优劣与每个网格像素上射线覆盖次数有密切的关系, 当某些网格像素上没有射线穿过或穿过的射线太少时, 成像质量会反而变差。实际应用时, 由于野外工作量的限制, 得到的记录道数是有限的, 要想得到成像质量相对高的结果, 网格划分不能太细, 否则某些网格像素上的射线覆盖次数会过低甚至为零。

为说明这一点, 按上面提到的模型, 采用左边放炮右边接收和右边放炮左边接收的双边排列方式, 每边各设置 21 个炮点和 201 个接收点, 炮距为 25 m, 道距为 2.5 m。图 3a 为在 2 m×2 m 网格下的射线覆盖次数为零的单元(用白色表示)分布图, 图 3b 为在 10 m×2 m 划分下的射线覆盖次数为零的单

元(用白色表示)分布图。图 3a 与图 3b 相比可以看到,除同样有上下两块射线盲区外,图 3a 中还有位于曲面附近的射线覆盖次数为零的单元(图中的两串白色亮点),这是由相对于给定的排列和模型速度结构网格划分太小引起。在层析反演迭代中,这些零覆盖次数单元的速度不可能收敛于其真实速度,从而影响总整层析成像的质量。图 3b 对应的网格划分与图 3a 对应的网格划分相比,只是加大了网格横向上的长度,这样做虽然降低了层析成像的横向分辨率,但由于消除了曲面附近的射线覆盖次数为零的单元,总整层析成像效果却要好一些。

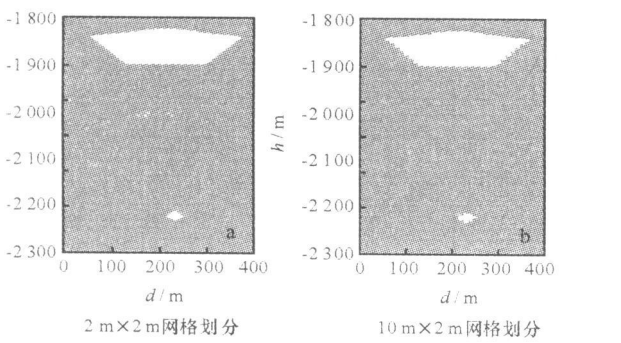


图 3 不同网格划分时的射线覆盖次数为零的单元分布
Fig.3 Distribution of the Element with No Ray Passing Through Under Different Mesh

为同时满足射线追踪网格要划分的较细,而成像网格要划分的较粗的要求,采用如下双重网格地震层析成像技术,以提高层析成像的质量。

3 双重网格地震层析成像技术原理

基于射线理论的地震层析成像方法,包括在初始速度模型中进行射线追踪和层析成像反演两个关键环节。双重网格地震层析成像技术是指在较细的网格上进行射线追踪,以提高射线路径和旅行时的计算精度,在较粗的网格上进行层析反演成像,使网格像素上射线覆盖最低次数达到一定要求,以提高成像质量。

图 4 中实线网格表示成像网格,虚线网格表示射线追踪网格。为计算方便,要求成像网格尺寸大小是射线追踪网格尺寸大小的若干倍,使得每个射线追踪网格单元完全落在某个成像网格单元之内。笔者采用旅行时线性插值(LTI)方法^[3]进行射线追踪,采用同时迭代重建(SIRT)算法^[2]进行层析反演。这就要求每个成像网格单元内的速度和每个射线追踪网格单元内的速度都是常值,为此,当给定或修正

每个成像网格单元内的速度后,将成像网格单元内的速度遗传给其内的所有射线追踪网格单元。

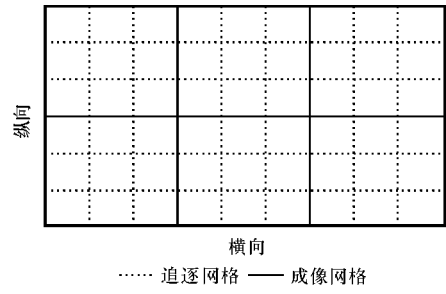


图 4 射线追踪网格和成像网格划分
Fig. 4 Retracing Mesh and Tomography Mesh

4 双重网格地震层析成像技术改善成像质量的模型实例

采用 1 给出的模型和 2 给出的炮点和检波点排列方式,先用旅行时线性插值(LTI)方法进行射线追踪正演,得到各个炮检对对应的初至波旅行时。再以此初至时间作为输入,采用同时迭代重建(SIRT)算法在 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的网格划分下进行层析反演。反演的初始速度模型是将正演模型各层速度统一提高 $1\,000\text{ m}$ 而得到的模型。图 5a 是正演模型的速度曲面。图 5b 是在射线追踪网格为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 、成像网格为 $10\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的双重网格划分下,层析反演迭代 9 次后的成像速度曲面。图 5c 是在射线追踪网格为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 、成像网格也为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的统一网格划分下,层析反演迭代 9 次后的成像速度曲面。可以看到在层析反演迭代次数相同情况下,成像网格较大时的成像结果(图 5b)要好于成像网格较小时的成像结果(图 5c),这是因为成像网格较大时的单元射线覆盖次数比成像网格较小时的单元射线覆盖次数要均匀,缓解了由于单元射线覆盖次数过高引起的过量校正和由于单元射线覆盖次数过低引起的欠量校正量问题,同时由于采用了双重网格层析成像技术(成像网格虽然较大,但射线追踪网格较小),保证了旅行时和射线路径的计算精度。

值得注意的是,单元射线覆盖次数极不均匀引起过量校正和欠量校正,使得成像速度在即使相邻的网格间也会有较大的起伏,这是井间地震层析成像中最为突出的问题之一,可以通过加阻尼约束或平滑约束等技术来部分地克服这一问题。为了说明双重网格地震层析成像技术对成像质量的改善作用,本例中没有采用这些技术手段。

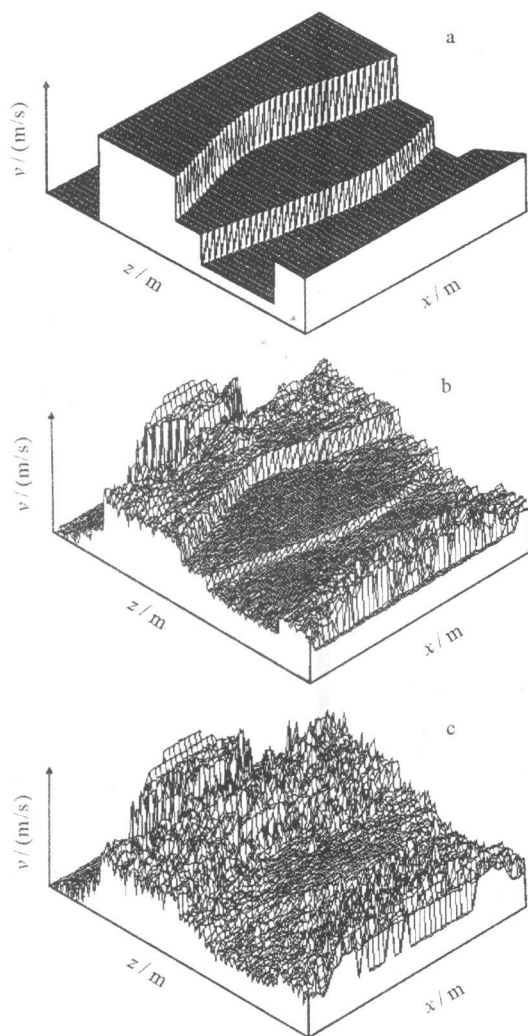


图 5 模型速度曲面和层析成像速度曲面图

Fig. 5 Velocity of Model and Image

5 结论

以井间地震层析成像为例, 分析了网格划分的大小对射线追逐正演和层析成像反演两个方面的影响, 说明了采用双重网格的必要性, 给出了双重网格地震层析成像技术, 通过模型实例证实这种双重网格地震层析成像技术的实用性和有效性。

[参 考 文 献]

- [1] 李庆忠, 王建华. 井间地震勘探误区及出路[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(1): 1 - 11.
- [2] 吴律. 层析基础及其在井间地震中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [3] Asakawa Eiichi, Kawanaka Taku. Seismic ray tracing using linear travelt ime interpolation[J]. Geophysical Prospecting, 1993, 41(1): 99 - 112.
- [4] 裴正林, 牟永光, 狄帮让, 等. 复杂介质小波多尺度井间地震层析成像方法研究[J]. 地球物理学报, 2003, 46(1): 113 - 117.
- [5] 严又生, 宜明理, 魏新, 等. 井间地震测量数据的反射波成像及解释[J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(1): 26 - 41.
- [6] 谢海兵, 马在田, 王燕琨. 一种新程函方程差分法层析成像[J]. 石油地球物理勘探, 1997, 32(5): 623 - 627.
- [7] 宿淑春, 王守东, 吴律. 井间层析成像的平滑 SIRT 算法[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2001, 25(6): 29 - 31.
- [8] 赵连锋, 朱介寿, 曹俊兴. 并行化交错网格法地震层析成像[J]. 石油物探, 2003, 42(1): 6 - 8.
- [9] 杨正华, 朱光明. 井地联合地震勘探在陕北油田开发中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(1): 65 - 68.

Cross Hole Seismic Tomography with Double Grid

MA De tang¹, ZHU Guang ming², ZHANG Wen bo²

(1. School of Sciences, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract This paper presents a kind of cross hole seismic tomography technique different from the traditional ones. That method traces the ray path and calculate the first arrival between each source and every receiver on the fine grid to improve the computing precision, and then, applies the inversion algorithms on the coarse grid in order to guarantee every image element having enough rays passed through to improve imaging effect. The model tests show that this double grid cross hole seismic tomography strategy is necessary and efficient, and the image results demonstrate that the method is superior to the conventional ones.

Key words: double grid; cross hole seismic tomography; seismic ray tracing using linear travelt ime interpolation; simultaneous iterative reconstruction; first arrival travelt ime

[英文审定: 李庆春]