

唐小平,白超英.最短路径算法下三维层状介质中多次波追踪.地球物理学报,2009,52(10):2635~2643,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.024

Tang X P, Bai C Y. Multiple ray tracing within 3-D layered media with the shortest path method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(10):2635~2643,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.024

最短路径算法下三维层状介质中多次波追踪

唐小平¹,白超英^{1,2}

1 长安大学地质工程与测绘学院地球物理系,西安 710054

2 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,西安 710054

摘 要 本文使用改进后的最短路径算法(MSPM)结合分区多步计算技术实现了三维复杂层状起伏介质中的多次透射、反射及转换波波前传播的数值模拟,以及相应走时和射线路径的跟踪计算.其原理是将三维复杂层状模型按速度界面分成若干个独立的计算区域,采用分步计算技术进行多次波的跟踪计算.基于多次波是通过速度界面简单的人射、透射、反射及转换波按一定规律及原理的不同组合,因此可实施分区多步计算技术.数值模拟实例及误差分析表明分区多步计算技术具有单步最短路径算法中的诸多优点:算法简单、数值计算稳健、计算精度高、速度快及全球解等,因此是解决多次波跟踪计算行之有效的方法.

关键词 MSPM 算法,分区多步计算,多波波前传播模拟,多次波追踪

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.024

中图分类号 P631

收稿日期 2008-11-03,2009-01-05 收修定稿

Multiple ray tracing within 3-D layered media with the shortest path method

TANG Xiao-Ping¹, BAI Chao-Ying^{1,2}

1 Department of Geophysics, College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geology Engineering, Ministry of Education of China, Xi'an 710054, China

Abstract The purpose of this study is to introduce a multistage scheme incorporating the modified shortest-path method (MSPM) for tracking multiple arrivals and simulating wavefront evolutions composed of any kind of combinations of transmissions, conversions and reflections in complex 3-D layered media. The principle is first to divide the layered model into several different computational domains, and then to use the multistage technique to trace the multiple arrivals. It is possible to realize the multiple arrival tracking with the multistage technique because the multiple arrivals are different combinations or conjugations of the simple incident, transmitted and reflected waves at the velocity boundaries (or discontinuities). Numerical tests and error analysis indicate that the multistage MSPM method retains the basic characteristics of the single-stage MSPM approach, that is algorithm simplicity, numerical stability, high computational accuracy, fast, global solution and etc. Therefore it is a practical algorithm to track the multiple arrivals.

Keywords MSPM algorithm, Multistage scheme, Multiple wavefront simulation, Multiple arrival tracing

基金项目 国家自然科学基金项目(40774020),教育部重点项目(107137)和国家自然科学基金重点项目(40534021)联合资助.

作者简介 唐小平,男,1981年生,长安大学地质工程与测绘学院地球物理系固体地球物理学专业毕业,现为在读硕士研究生.

E-mail: xiaopingtang@126.com

1 引言

最短路径射线追踪(SPM)是一种基于网格的算法。基于网格的算法有很多,如波场构造法(WC)^[1]、有限差分(FD)解程函(Eikonal)方程法^[2~13]和最短路径方法(SPM)^[14~30]。与传统的射线追踪算法(如打靶法、弯曲法等)相比而言,基于网格的算法具有四大优点^[13]:(1)可利用波振面向外扩展传播的原理一次性计算出速度模型中所有网格节点的射线走时及相应的路径,并能正确地追踪检波器位于射线阴影区的衍射波射线^[2];(2)算法数值计算稳定,所得到的解总是全局最佳射线路径及相应最小时; (3)多炮多道接收时表现得更为高效,精度也比传统射线追踪方法要高;(4)在连续介质中网格算法始终能找到初至波走时,而传统射线方法则只能找出唯一走时,且很难判别这个走时是属于初至波的还是后续波的。

有限差分解程函方程法是一种很好的射线追踪方法,它以计算速度快,能适应复杂模型而倍受人们的青睐^[2,3],此算法也被不断地改进和完善。Vidale等人应用有限差分算法求解程函方程,起初还仅限于初至波的跟踪计算^[2~8];随后,Podvin和Lecomte^[9]、Riahi和Juhlin^[10]以炮点和检波器为震源,反射点为接收器,分别计算出到达这些反射点的射线和走时,再利用费马原理挑出炮点-反射点-检波器间最小时及相应射线作为该炮与检波器的反射波的走时和射线路径。2004年Rawlinson和Sambridge运用分区多步计算技术(Multistage scheme + different computational domains)和快速行进方法(Fast Marching Method),实现了二维层状介质中多次透射、反射波的追踪和波前数值模拟^[12];2006年De Kool等又对上述分区多步计算方法进行了推广,实现了三维不均匀介质中多次反射波的追踪计算^[13]。

最短路径方法以计算精度高、数值计算稳健而著称。1986年Nakanishi和Yamaguchi提出了最短路径算法^[14];1991年Moser将该法首次用于地震射线追踪,并运用访问模型中特定点的方法来模拟反射地震波^[15];1993年Cao和Greenhalgh提出了最小走时树方法(The minimum travelttime tree algorithm),在局部走时计算中利用斯奈尔定律减少计算量,因而提高了计算速度^[16];1994年Klimeš和Kvasnička提出了三维常规网格最短路径算法并用来模拟初至波射线及相应走时,同时给出了计算

误差上限^[17]。2000年王辉和常旭提出了基于图形结构的三维射线追踪,实现了Bresenham画线算法,提高了最短路径算法的计算精度^[19];2002年赵爱华等把最短路径方法运用于非均匀介质中的射线模拟^[20];2004年赵爱华和张中杰运用最短路径方法对转换波进行了跟踪计算^[21]。2004年张建中等通过对某边界上已知节点的走时进行线性插值,并利用Fermat原理即时求出从该边界到达其他边界节点的最小走时及其子震源位置和射线路径,提出了相应的动态网络算法^[22]。2005年赵爱华等提出宽角反射地震波走时模拟的双重网格法^[23];2006年张美根等采用桶排列的方法对最短路径方法进行了优化,大大地节约了计算时间^[24];2004年Bai等提出了三维改进后的最短路径算法(Modified SPM, MSPM),在保证相同计算精度的前提下大大提高了计算速度^[25,26]。

最短路径射线追踪算法已成功地用于地震定位^[31,32]、地震偏移成像^[33]和地震层析成像^[34~36]。然而在多波地震勘探、地震的精确定位、多波偏移成像以及多震相走时层析成像中,后续波的信息至关重要。因此,如何解决多次透射、转换及反射波的射线追踪计算问题也变得越来越重要。

本文主要是运用MSPM算法,采用分区多步技术模拟复杂三维层状介质中的多次透射、转换及反射波。这种分区多步技术的要点是:首先对速度模型分区,再进行分区多步计算,在此基础上应用斯奈尔定律,按射线类型的要求将这些分区计算的结果连接起来,从而实现多次透射、转换及反射波的射线追踪和波前模拟。事实证明,MSPM算法与分区多步计算技术有机的结合,可以很好地实现复杂介质情况下各种类型多次波的追踪,特别是在三维情况下,更能显现出最短路径算法稳健性强的特点。

2 基本原理及实现

分区多步计算技术是一种很好的方法。Rawlinson和Sambridge运用这种方法与快速行进法相结合,成功实现了二维层状介质中多次透射及反射波的模拟^[12]。在随后的三维推广中,De Kool等运用此法实现了反射及折射波射线的模拟^[13]。在上述两种方法研究后,吸纳和优化并成功地与MSPM法结合,用于研究三维复杂介质中多次透射、转换和反射波的模拟。首先,根据MSPM算法的特点:8个主节点所固定的六面单元体中(图2b),在

每个面上插入密集的等间隔的次级节点^[25,26],对速度界面采样时,其采样密度等于或高于次级节点的密度,因而甩掉了文献[13]中在速度界面处进行快速行进处理的麻烦.同时,对文献[13]所述的三维射线追踪方法进行改进和优化,提出适用于 MSPM 算法模拟三维复杂(连续或层状起伏)介质中多次波的方法.

2.1 MSPM 简述

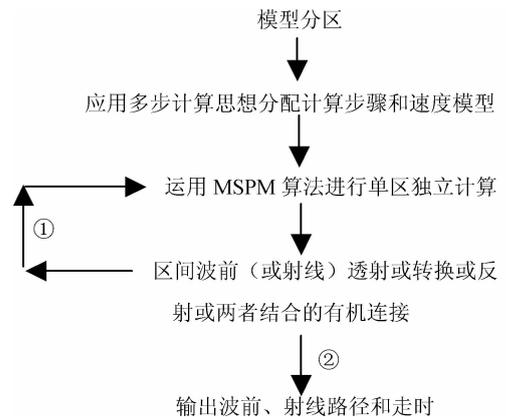
常规最短路经方法(RSPM)是1994年 Klimeš 和 Kvasnička 首先提出的^[17],为了解决射线角度的覆盖问题,这种方法在波前点的计算时,需要外扩大量的单元网格来确保射线角度的覆盖率,计算起来相对耗时^[20].如果需要较高精度,就会需要大量的外扩单元网格,否则射线计算精度就会降低.为了更好地平衡射线计算精度与计算时间之间的矛盾,Bai 等提出了改进后的最短路经方法(MSPM)^[25,26].MSPM 与 RSPM 在算法上是不同的,它通过在单元面上插入次级节点的方法,可有效地解决射线角度的覆盖问题.同时,这种方法还可以有效地减少网格单元总数,从而适应较大速度模型;在进行射线追踪时以单元内部计算代替外扩多单元同时计算,因而有效地节省了时间.另外,次级节点、炮点和检波器(如果其与主节点不重合)所在点的速度是由主节点上定义的速度值通过拉格朗日三次线性插值而得到,可更好地适应复杂介质(限于篇幅,具体算法详见文献[25,26]).

2.2 模型分区和多步计算的实现

所谓模型分区是指按照模型的边界条件和速度界面将速度模型分成不同的相对独立的层状(或起伏层状)区域.模型分区是独立分区计算的基础.所谓分区多步计算是指在每个分区内进行单独计算,然后将这些独立分区的计算结果通过速度界面有机(遵从费马原理、斯奈尔定律及惠更斯原理)的连接起来实现多次波的跟踪计算.具体步骤是:在波前扩展过程中从炮点所在的区域开始,沿着目标射线将要通过的区域,波前(遵从费马原理)逐区进行扫描.等当前区域的波前扫描计算结束时,波前停止在该区的速度界面(或边界)上,同时保存速度界面(或边界)上各点的走时及射线路径.随后根据进入新区所追射线的类型(如反射、透射、转换波及两者组合),调用相邻区域的速度模型(注意:新调区域必须与原来区域相邻,在追踪反射波或反射转换波时,此时新调区域就是原来区域),并在速度界面(或边界)上加入限定条件(斯奈尔定律),进入新区时波前从速度

界面离散点(或边界节点)中走时最小的点(惠更斯原理,视为波振面上新的震源)开始向新区扩展,继续波前扫描和射线追踪.重复上述过程直至所有类型的多次波追踪完毕为止.需要特别说明的是,最短路经算法中射线追踪和波前扫描是同时进行的.

简而言之,独立分区计算和区间波前(或射线)的有机连接则是分区多步计算的基础.分区多步计算的原理就是根据所追踪的射线类型,设计调用独立区域的先后顺序和相应的速度模型,达到运用简单组合完成三维复杂模型中多次波射线追踪的目的.对于任何一条射线而言,始终是沿着以下步骤去做:



如果射线的追踪步骤没有结束,则执行①步,继续调用 MSPM 进行波前扫描和射线追踪,直到此类射线追踪结束后则执行②步.该种类型射线追踪完成后,就可进行下一类型射线的追踪.从思路上来讲,分区多步计算方法实现三维多次波的模拟是很灵活的,真正达到了运用简单组合式的方法,实现对各种复杂类型多次波的追踪和走时场模拟.

图1给出了波前扩展模拟的一个例子,从炮点所在的区域(有效区域)开始进行下行波计算(即P波入射情形),当有效区域节点全部计算完成后,波前就会停留在离散边界面上等待下一步的命令,如果下一步命令是计算下行透射P波(或下行透射转换PS波),则波前在离散边界面上经过约束处理后进入等待区域,即由离散速度界面上走时最小的点开始(这点很重要)进行透射P波(或透射转换PS波)波前模拟和射线追踪(注:在进行下行透射转换PS波计算时要调用S波速度模型);如果命令是计算上行反射PP波(或上行反射转换PS波),则也要进行相应的约束处理后返回到有效区域中来,由离散速度界面中走时最小的点开始进行上行反射PP波(或上行反射转换PS波)波前模拟和射线追踪

(注:在进行上行反射转换 PS 波计算时要调用 S 波速度模型). 这样无论类型组合多么复杂的多次波均可用上述方法逐一计算(详见模拟实例).

3 模拟实例

MSPM 算法可进行层状(或离散连续)速度介质中多次波的跟踪计算(也可考虑低、高速夹层的情形),因此选取了两种速度模型(模型 1 和模型 2). 模型 1 为层状起伏模型(图 2a),模型的长、宽均为 100.0 km,深度为 50.0 km. 模型中有两个起伏速度

界面,深度分别为 25 km 和 45 km,起伏为 ± 4 km. 自地表至第一起伏速度界面区域的速度是 4.0 km/s,第一起伏速度界面至第二起伏速度界面区域的速度是 5.0 km/s,大于第二起伏速度界面区域的速度是 6.0 km/s. 模型 2 是离散连续速度模型,模拟实际地壳速度分布. 模型的长、宽均为 200.0 km,深度为 50.0 km. 速度由地面的 4.0 km/s 向下线性增加至 8.0 km/s. 在 20.0 km 和 40.0 km 深度加入两个水平界面,前者模拟上、下地壳的康氏速度界面(Conrad discontinuity),而后者模拟地壳与地幔的莫氏速度界面(Moho discontinuity).

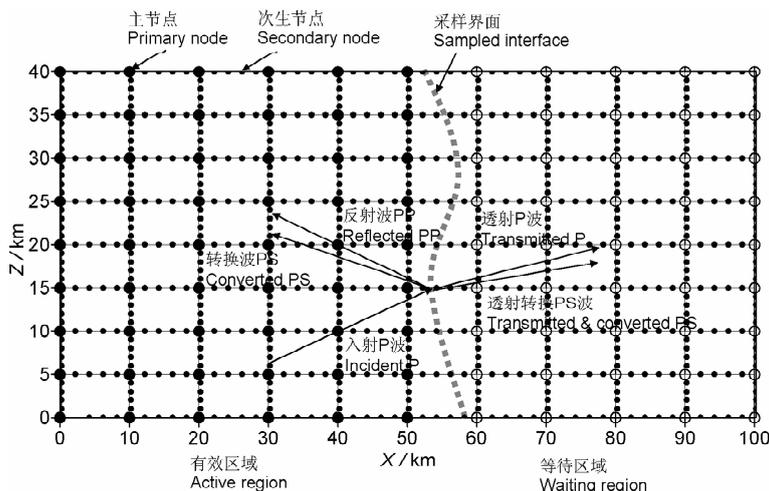


图 1 分区多步 MSPM 算法计算反射、透射和转换波示意图

Fig. 1 A diagrammatic explanation for computing the transmitted, converted and reflected arrivals with the multistage MSPM

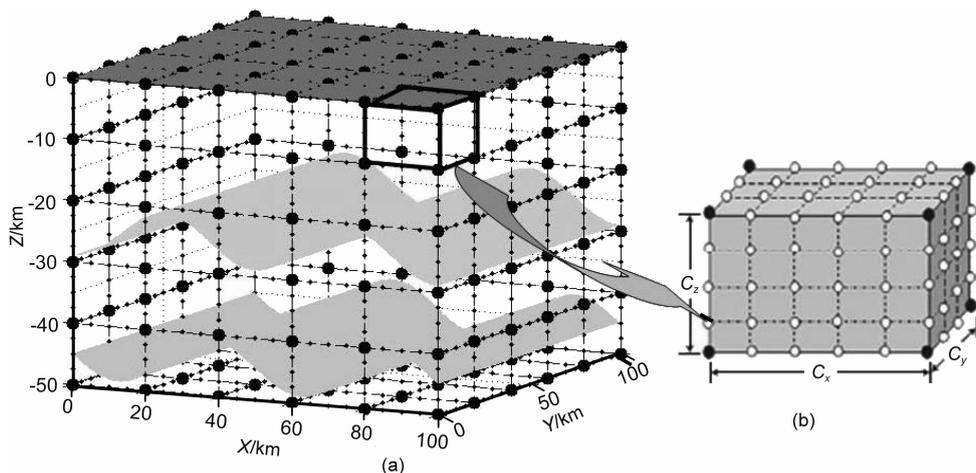


图 2 (a)速度模型 1 中节点分布和速度界面分布图(注:单元面上的次级节点未标出,详见图 2b);

(b)模型中某单元的示意图,其中黑球表示主节点,白球表示所加入的次级节点.

Fig. 2 (a) Distribution of nodes and velocity interfaces in Model 1 (Note that the secondary nodes on cell surfaces are not shown, for details see Fig. 2b); (b) Primary and secondary node distributions in one cell.

The black circles are the primary nodes and the white circles are the secondary nodes.

3.1 地震入射及反射波波前模拟

模型 2 参数化时采用的长方体单元的长度分别为 $5.0 \text{ km} \times 5.0 \text{ km} \times 2.0 \text{ km}$, 单元面上各方向所加入次级节点的个数 $M=9$. 将炮点放在模型 $X-Z$ 面上一点 ($X=100.0 \text{ km}, Y=0.0 \text{ km}, Z=-5.0 \text{ km}$), 模拟三维介质中地震波波前扩展和传播的情况. 图 3a 为炮点激发出的下行 P 波波前在模型 2 中传播至第二速度界面的情形(从顶面及侧面观测到的波前等振面的传播和扩展), 而图 3b 则为由第二速度界面反射回的上行 P 波波前传播至地表时的情形(从顶面及侧面观测到的波前等振面的传播和扩展). 从图 3 中可以看出下行 P 波波前在速度随深度线性增加的介质中的传播是近似于椭球形状向外扩展的(椭球长轴指向速度梯度增减方向), 在地表(或在侧面)观测时波前呈同心椭圆状分布. 由于反射界面是

水平的, 则上行反射 P 波波振面也呈近似于椭球形状向外扩展传播, 而在地表(或侧面)观测时也呈同心椭圆状分布(但方向相反, 见图 3a 和图 3b 中 $X-Z$ 剖面).

3.2 多次透射及反射波射线跟踪

在多波勘探也被大量使用的今天, 三维多次透射及反射波的模拟也很有必要. 但以往研究较多的是一次反射波. 作为一个例子, 图 4 给出了模型 1 中 5 种不同的多次透射及反射波的射线路径. 炮点和检波器坐标分别置于 ($X=100.0 \text{ km}, Y=50.0 \text{ km}, Z=0.0 \text{ km}$) 和 ($X=0.0 \text{ km}, Y=0.0 \text{ km}, Z=0.0 \text{ km}$). 从图中可以看出, 5 条射线所穿过的区域是不尽相同的, 反射点也不同. 为了简明起见, 图中地震各震相的约定是这样的: 0 表示地面, 1, 2 分别表示第一、二起伏界面(忽略透射只记反射). 如: 震相 $P_{1-0-2}P$ 表示三次反射透射波, 即自炮点发出的下行 P 波至第

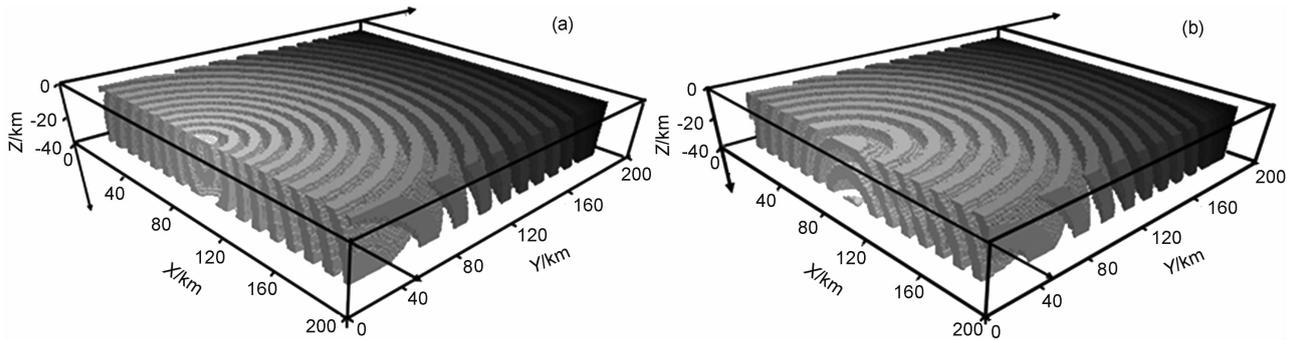


图 3 (a)模型 2 中从炮点发出的下行 P 波波前传播至第二速度界面时, 从地表及侧面观测到的波前传播及扩展; (b)自第二速度界面反射回的上行 P 波波前传播至地表时, 由地面及侧面观测到的波前传播及扩展
波前宽度为 1.0 s, 间隔时间为 2.0 s.

Fig. 3 (a) The downwind wavefront propagation from source to the secondary velocity interface observed from surface and lateral views in Model 2; (b) Reflected upwind wavefront propagation from the secondary velocity interface to the earth surface observed from surface and lateral views
Wavefront width is 1.0 s and interval is 2.0 s.

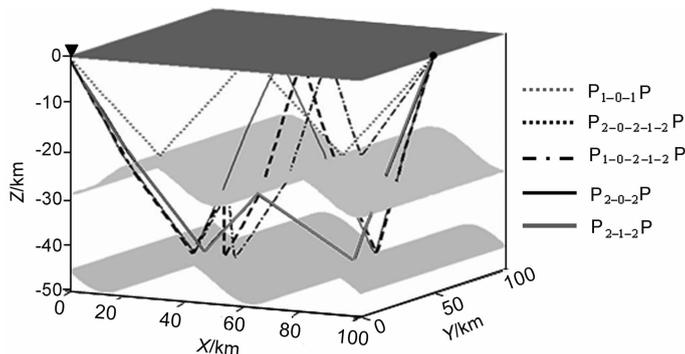


图 4 5 种不同类型多次透射反射波的射线路径及透射反射波类型

其中下标 0 表示地面, 1, 2 分别表示第一、二起伏界面. 图 4, 5 和 6 中黑色圆为炮点, 黑色三角为检波器.

Fig. 4 Ray paths for 5 different kinds of multiple transmitted reflections and the corresponding wave types
In diagram subscripts 0, 1 and 2 indicate earth surface, the first and secondary undulated interfaces respectively. In Figs. 4, 5 and 6 the black circle is the source and black triangle is receiver.

一速度界面后反射上行至地面,再由地面反射下行至第二速度界面,最后由第二速度界面反射上行至检波器。

3.3 多次透射、转换及反射波射线跟踪

在实际地壳中由于存在康氏和莫氏速度不连续界面,因而震相也就较复杂.图5给出几种常见的地方震震相的射线路径.炮点和检波器坐标分别置于($X=0.0\text{ km}, Y=100.0\text{ km}, Z=-5.0\text{ km}$)和($X=200.0\text{ km}, Y=0.0\text{ km}, Z=0.0\text{ km}$).这6种震相分别是:直达波P;康氏面的反射波 P_1P (临界角后变为 P_{n1});莫氏面的反射波 P_2P (临界角后变为 P_{n2});地面与康氏面的反射转换波 sP_1P (临界角后变为 sP_{n1});地面与莫氏面的反射转换波 sP_2P (临界角后变为 sP_{n2});经康氏面转换、莫氏面反射、再经康氏面转换的波 $S_1P_2S_2P_1$ (临界角后变为 $S_1P_{n2}S_2P_1$),在这一震相中为了与前面的震相相区别,采用了这样的约定:上、下标分别表示上、下行波。

为了详细了解上述各种地震震相的细节,图6给出了一炮多道接收的情形.图6a为直达P(或 P_g)波,随着震中距的增加,其射线穿透深度也随之加深.图6b为康氏和莫氏面上的反射波(P_1P 和 P_2P),随着震中距超过临界反射距离后则相应变为宽角折射波(P_{n1} 和 P_{n2}).图6c则为地面与康氏(或莫氏)面间的反射转换波(sP_1P 和 sP_2P),即炮点产生的S波上行至地面反射转换后下行至康氏(或莫氏)面后再次反射上行至检波器.同样随着震中距超过临界反射距离后则相应变为二次宽角转换折射波($sP_{n1}P$ 和 $sP_{n2}P$).图6d给出了一个多次透射转换、莫氏面反射波的例子(震相 $S_1P_2S_2P_1$),随着震中距

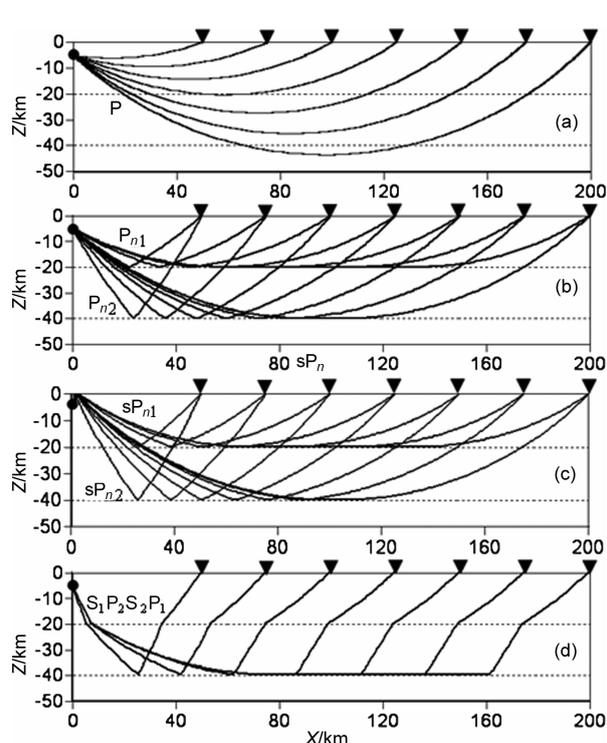


图6 一炮多道接收时6种不同类型多次透射、转换及反射波的射线路径

(a)直达波;(b)康氏和莫氏面反射波;(c)地面与康氏或莫氏面的反射转换波;(d)莫氏面的多次透射、转换反射波.图中虚线为康氏(上)和莫氏面(下)。

Fig. 6 The raypaths of 6 different kinds of multiply transmitted, converted reflections on the common source point gathers

(a) Direct wave; (b) Reflected wave from Conrad and Moho discontinuity; (c) Converted reflection between earth surface and Conrad or Moho discontinuity; (d) Multiply transmitted, converted reflection from Moho discontinuity. In figure the dot lines are the Conrad (upper) and Moho (lower) discontinuity.

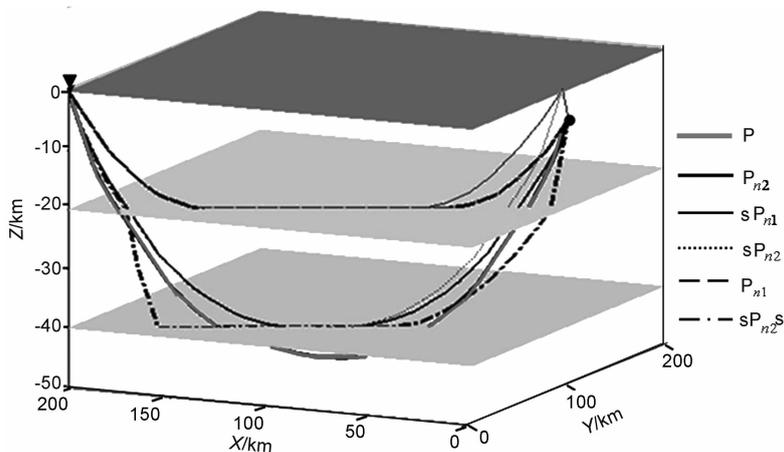


图5 6种不同类型多次透射、转换及反射波的射线路径及相应射线类型
下标1,2分别表示康氏面和莫氏面。

Fig. 5 Ray paths for 6 different kinds of multiply transmitted, converted reflections and the corresponding wave types
The subscripts 1, 2 indicate the Conrad and Moho interfaces, respectively.

超过临界反射距离后则变为多次透射转换、莫氏面上折射波震相 $S_1P_{n2}S^2P^1$. 它实际上是经莫氏面反射的多次透射转换波, 由于信号较弱, 很难分辨.

4 计算误差分析

有关 MSPM 算法计算地震初至波的误差分析已在文献[25,26]中有过详细的讨论, 并得到了理论计算误差上限. 这里主要分析 MSPM 算法在计算多次波时的误差. 理论上, 如果在速度界面离散化过程中采样充分, 则使用分区多步的 MSPM 算法计算多次波的精度应与整区单步 MSPM 算法计算初至波的精度相当. 这里给出分区多步 MSPM 算法计算反射波误差分析的一个例子. 对模型 1 进行修改, 即将层状速度模型改为均匀(或速度随深度线性增加)模型, 并将两个起伏速度界面变成水平面(此时可认为界面上的反射仅仅是由介质密度差异引起的). 将炮点置于地面 X 轴中心点($X=50.0$ km, $Y=0.0$ km, $Z=0.0$ km), 将 441 个检波器均匀地放在地面, 模型参数化时单元尺度及所加次级节点的个数同图 3. 这样可得到自炮点发出的下行 P 波经第一、二界面反射后上行至各检波器的反射波 P_1P 和 P_2P 走时, 然后与解析解(理论走时)相比较. 图 7 给出了数值解相对于解析解的相对误差. 从误差分布图中可看出: 首先误差分布是关于炮点对称; 其次来自第二界面的反射波计算误差与来自第一界面的反射波计算误差均属同一量级, 这说明计算误差不随射线的

长度或震相转换次数的增加而显著增大(这方面的模拟实验已做, 限于篇幅不再单独给出结果), 即计算误差的传播是收敛的; 再者计算精度可达到 0.1%, 要想进一步提高计算精度可同时缩小单元尺度和增加次级节点的个数(一般可将计算精度提高至 0.05%).

5 结 论

最短路经方法由于计算简单、稳健性高、计算精度高、运行速度快、全球解等诸多的优点, 已成为一种流行的射线追踪方法, 被大量运用于地震定位、偏移成像以及走时反演成像. 但以往仅停留在初至波(或单次反射或单次转换波)的追踪, 而多次波的射线追踪和波前模拟一直没有实现. 本文运用 MSPM 算法, 结合分区多步计算技术实现了三维层状介质(含起伏不规则界面)中多次透射、反射及转换波的跟踪计算. 不但能够进行多波波前传播的数值模拟, 而且可以同时给出相应种类波的走时及射线路径, 并保留了 MSPM 算法在计算初至波时的各种优点, 即: 计算精度高、误差收敛、数值稳定、速度快、全球解等. 若能结合振幅衰减特征与速度界面的反射、透射及转换系数, 则可进行偏移、多波成像以及走时和振幅衰减的联合成像. 另外, 多参数的射线追踪, 特别是各向异性介质中的射线追踪等, 将是今后值得研究的重要方向.

致 谢 对两位匿名审稿人提出的宝贵修改意见表示由衷的感谢.

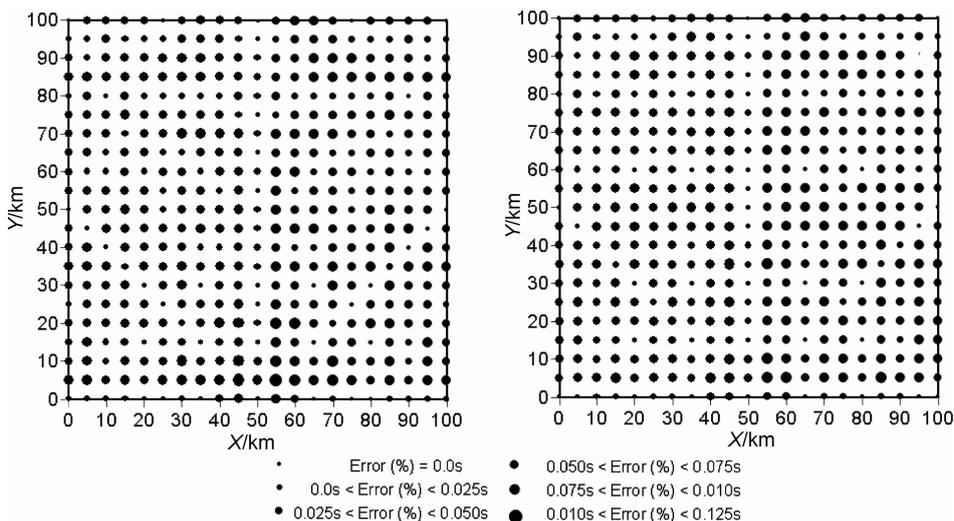


图 7 来自不同反射界面的相对误差分布图

(a) 来自第一界面; (b) 来自第二界面.

Fig. 7 The distributions of relative travel time errors reflected from different subsurface interfaces

(a) From the first interface; (b) From the second interface.

参考文献(References)

- [1] Vinje V, Iversen E, Gjøystdal H. Traveltime and amplitude estimation using wavefront construction. *Geophysics*, 1993, **58**:1157~1166
- [2] Vidale J E. Finite-difference calculation of travel times. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1988, **78**:2062~2076
- [3] Vidale J E. Finite-difference calculation of travel time in three dimensions. *Geophysics*, 1990, **55**:521~526
- [4] Van Trier J, Symes W W. Upwind finite-difference calculation of traveltimes. *Geophysics*, 1991, **56**:812~821
- [5] Cao S, Greenhalgh S. Finite difference solution of the eikonal equation using an efficient, first arrival wavefront tracing scheme. *Geophysics*, 1994, **59**:632~643
- [6] Schneider Jr W A. Robust and efficient upwind finite-difference traveltime calculations in three dimensions. *Geophysics*, 1995, **60**:1108~1117
- [7] Afnimar Koketsu K. Finite difference traveltime calculation for head waves traveling along an irregular interface. *Geophys. J. Int.*, 2000, **143**:729~734
- [8] Qian J, Symes W W. An adaptive finite-difference method for traveltimes and amplitudes. *Geophysics*, 2002, **67**:167~176
- [9] Podvin P, Lecomte I. Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models; a massively parallel approach and its associated tools. *Geophys. J. Int.*, 1991, **105**:271~284
- [10] Riahi M A, Juhlin C. 3-D interpretation of reflected arrival times by finite-difference techniques. *Geophysics*, 1994, **59**:844~849
- [11] Hole J A, Zelt B C. 3-D finite-difference reflection travel times. *Geophys. J. Int.*, 1995, **121**:427~434
- [12] Rawlinson N, Sambridge M. Multiple reflection and transmission phases in complex layered media using multistage fast marching method. *Geophysics*, 2004, **69**:1338~1350
- [13] De Kool M, Rawlinson N, Sambridge M. A practical grid-based method for tracking multiple refraction and reflection phases in three-dimensional heterogeneous media. *Geophys. J. Int.*, 2006, **167**:253~270
- [14] Nakanishi L, Yamaguchi K. A numerical experiment on nonlinear image reconstruction from first-arrival time for two-dimensional island arc structure. *J. Phys. Earth*, 1986, **34**:195~201
- [15] Moser T J. Shortest path calculation of seismic rays. *Geophysics*, 1991, **56**:59~67
- [16] Cao S, Greenhalgh S. Calculation of the seismic first-break time field and its ray path distribution using a minimum traveltime tree algorithm. *Geophys. J. Int.*, 1993, **114**:593~600
- [17] Klimeš L, Kvasnička M. 3-D network ray tracing. *Geophys. J. Int.*, 1994, **116**:726~738
- [18] Cheng N, House L. Minimum traveltime calculations in 3-D graph theory. *Geophysics*, 1996, **61**:1895~1898
- [19] 王辉,常旭. 基于网格图形结构的三维射线追踪. 地球物理学报, 2000, **43**(4):534~541
- [20] 赵爱华,张中杰,王光杰. 非均匀介质中地震波走时与射线路径快速计算技术. 地震学报, 2002, **22**(2):151~157
- [21] 赵爱华,张中杰. 三维复杂介质中转换波走时快速计算. 地球物理学报, 2004, **47**(4):702~707
- [22] 张建中,陈世军,徐初伟. 动态网络最短路径射线追踪. 地球物理学报, 2004, **47**(5):899~904
- [23] 赵爱华,丁志峰. 宽角反射地震波走时模拟的双重网格法. 地球物理学报, 2005, **48**(5):1141~1147
- [24] 张美根,程冰洁,李小凡等. 一种最短路径射线追踪的快速算法. 地球物理学报, 2006, **49**(5):1467~1474
- [25] Bai C Y. Three-dimensional seismic kinematic inversion with application to reconstruction of the velocity structure of Rabaul volcano [Ph. D. thesis]. Adelaide: Adelaide University, 2004
- [26] Bai C Y, Greenhalgh S, Zhou B. 3D ray tracing with a modified shortest path method. *Geophysics*, 2007, **72**:T27~T36
- [27] Kim S. 3-D eikonal solvers: first-arrival traveltimes. *Geophysics*, 2002, **67**:1225~1231
- [28] Gruber T, Greenhalgh S. Short note: precision analysis of first-break times in grid models. *Geophysics*, 1998, **63**:1062~1065
- [29] Zhang J, Toksoz M N. Nonlinear refraction traveltime tomography. *Geophysics*, 1998, **63**:1726~1737
- [30] Van Avendonk H J A, Harding A J, Orcutt J A, et al. Hybrid shortest path and ray bending method for traveltime and raypath calculation. *Geophysics*, 2001, **60**:648~653
- [31] Moser T J, Van Eck T, Nolet G. Hypocenter determination in strongly heterogeneous earth models using the shortest path method. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**:6563~6572
- [32] Bai C Y, Greenhalgh S A. 3D local earthquake hypocenter determination with an irregular shortest path method. *Bull.*

- Seim. Soc. Am.*, 2006, **96**:2257~2268
- [33] Moser T J. Migration using the shortest-path method. *Geophysics*, 1994, **59**:1110~1120
- [34] Bai C Y, Greenhalgh S A. 3-D non-linear travel time tomography: imaging high contrast velocity anomalies. *Pure and Applied Geophysics*, 2005, **162**:2029~2049
- [35] Bai C Y, Greenhalgh S A. 3-D multi-step travel time tomography: imaging the local, deep velocity structure of Rabaul volcano, Papua New Guinea. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2005, **151**:259~275
- [36] Bai C Y, Peng J B, Greenhalgh S. 3-D P-wave velocity structure of the crust beneath the Loess Plateau and surrounding regions of China. *Tectonophysics*, 2008, **460**:278~287

(本文编辑 何 燕)

欢迎订阅《地球物理学报》

《地球物理学报》创刊于 1948 年,是中国科学院地质与地球物理研究所、中国地球物理学会联合主办的有关地球物理科学的综合性学术刊物。主要刊载固体地球物理、应用地球物理、地磁和空间物理、大气和海洋地球物理,以及与地球物理密切相关的交叉学科研究成果的高质量论文。SCI 等国际著名检索系统收录,国内外公开发行人。2010 年《地球物理学报》为月刊,每期定价 70 元,全年定价 840 元(含邮资)。国内邮发代号 2-571。也可直接从编辑部订购,保证快捷准时。

订阅地址:北京 9825 信箱《地球物理学报》编辑部 邮编:100029

电话:010-82998105 传真:010-82998107

电子邮件:prog@mail.igcas.ac.cn xtq@mail.igcas.ac.cn

联系人:刘少华 肖台琴

开户行:中国农业银行北京健德支行

银行帐号:190901040000456

收款单位:中国科学院地质与地球物理研究所

(务必在注释行写上:购《地球物理学报》款,同时写上您的姓名和联系地址及发票单位)