

doi: 10.11720/wtyht.2019.1026
何幼娟, 乔玉雷, 侯丽娟, 等. 一种变网格差分的快速行进法[J]. 物探与化探, 2019, 43(1): 199-208. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1026>
He Y J, Qiao Y L, Hou L J, et al. A grid-variable finite-difference fast marching method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(1): 199-208. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1026>

一种变网格差分的快速行进法

何幼娟¹, 乔玉雷², 侯丽娟³, 竺俊⁴, 高刚¹, 王鹏¹

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100; 2. 中石化胜利油田勘探开发研究院, 山东 东营 257000; 3. 中国石油青海油田 采油一厂, 青海 海西 816400; 4. 中石化西北油田分公司 采油一厂, 新疆 轮台 841600)

摘要: 地震波旅行时精度直接影响着地震反演、叠前偏移成像、层析成像等各领域研究成果的可靠性, 因此, 研究如何提高地震波旅行时精度是很有意义的。在双重网格技术的基础上, 引入一种基于变网格差分格式的快速行进法(FMM)计算地震波旅行时, 通过正演模拟均匀模型、存在高速异常体模型、Marmousi 模型来分析变网格 FMM 的优势及适用性。研究结果表明: 均匀模型背景下, 变网格 FMM 与双重网格 FMM 优势相当, 但是在存在高速异常体模型背景下, 双重网格 FMM 可能违背波前扩展的规律, 从而导致较大的误差, 而变网格 FMM 则不存在这样的问题; Marmousi 模型试算验证了变网格 FMM 能适应各种复杂模型。因此, 该方法是一种有效提高走时计算精度和效率的方法, 不仅增强了 FMM 法的适用性, 而且扩展了变网格技术的应用范围。

关键词: 变网格; 双重网格; 有限差分; 快速行进法; 旅行时; 正演模拟

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2019)01-0199-10

0 引言

地震波旅行时是研究地震波传播的一个关键属性参数, 在地震波反演、叠前偏移、层析成像等研究领域发挥着重要的作用, 旅行时的计算精度、效率、稳定性直接影响着以上各个领域的研究效果、效率及应用范围^[1]。因此, 研究如何提高地震波旅行时精度具有重大的意义。

计算地震波旅行时通常采用射线追踪法, 而有关射线追踪的方法有很多种, 其中主要包括传统的射线追踪法(打靶法和弯曲法)、最短路径法、有限差分法等等。传统的射线追踪法缺陷在于计算量大, 存在盲区, 且全局最小值难确定^[2]; 最短路径法虽然避免了传统方法的一些缺陷, 计算精度高, 但非常耗时且需要巨大的储存空间^[3]; Vidale 提出的基于程函方程的有限差分法^[4]开辟了地震波旅行时计算的新道路, 与之前的方法相比最显著的优势是

计算速度快, 但算法不稳定, 也不符合波前传播的规律^[5]。基于有限差分法的缺陷, 后人对其进行了大量的研究和改进, Sethian 等提出了具有迎风差分格式的快速行进法(FMM)^[6], 它具有无条件稳定、易于编程实现等优点, 且满足波前传播的规律^[7], 被当今地震波初至计算广泛应用。

FMM 受差分算法自身缺陷的影响, 其精度主要受限于网格剖分大小和差分格式阶数。对于这两个因素, 许多学者对其进行了研究与改进: Rawlinson 等比较了一阶、二阶、三阶差分格式的计算精度和效率, 指出一阶精度最低, 而计算效率最高, 二阶、三阶精度相当, 但二阶的计算效率远远高于三阶^[8]; 张风雪等根据时间场梯度大小对射线路径求取的影响, 引入了方向参数^[9], 能够有效控制解的精度, 同时也控制网格计算量; 孙章庆研究复杂地表条件下的旅行时, 发现 FMM 计算相对误差集中在震源附近, 且误差分布具有方向性, 据此提出了改进的一阶 FMM, 提高了旅行时计算精度和效率^[10]; 李永博等

收稿日期: 2018-01-17; 修回日期: 2018-10-12
基金项目: 中国石油集团工程专项“随钻电磁波成像与测录井解释支持系统研发”(2013E-3809)
作者简介: 何幼娟(1990-), 女, 湖北荆州人, 在读博士, 主要从事地震数据处理方法研究工作。Email: pomelo_he@163.com

在孙章庆研究的基础上,提出了多种 FMM 改进措施,其中引入了角点因素及双重网格^[11]。本文在前人研究成果的基础上,进一步改进 FMM 的精度,提出了变网格 FMM。首先阐述 FMM 基本原理、变网格差分格式、窄带技术原理;其次建立均匀正演模型,比较常规一阶、二阶 FMM、变网格一阶、二阶 FMM、双重网格一阶 FMM 计算地震波旅行时的精度,指出变网格 FMM 的优势;再次,建立存在高速异常体的正演模型,指出变网格 FMM 较双重网格 FMM 的优势;最后,应用复杂的 Marmousi 模型说明变网格 FMM 的适应性。该方法不仅提高了地震旅行时的精度,还大大缩短了计算时间,为地震波反演、叠前偏移、层析成像等研究成果的可靠性奠定了基础。

1 基本原理

1.1 FMM 基本原理

FMM 是一种满足“熵守恒”的迎风差分格式和窄带技术相结合的非迭代算法。在二维情况下,地震波旅行时满足程函方程,具体表达式为:

$$\left[\frac{\partial t(x, z)}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial t(x, z)}{\partial z} \right]^2 = s^2(x, z), \quad (1)$$

式中: t 为地震初至波旅行时, s 为介质慢度。

计算地震波旅行时时,采用迎风差分格式对式(1)进行离散,其表达式^[12]为:

$$[\max(D_{i,j}^{-x}t, -D_{i,j}^{+x}, 0)^2 + \max(D_{i,j}^{-z}t, -D_{i,j}^{+z}, 0)^2]^{1/2} = s_{i,j} \quad (2)$$

式中: $D_{i,j}^{-x}t, D_{i,j}^{+x}, D_{i,j}^{-z}, D_{i,j}^{+z}$ 分别为点 (i, j) 处的地震波旅行时沿 x 方向和 y 方向的差分格式。

1.2 变网格 FMM 差分格式

变网格^[13-14] FMM 采用不均匀网格剖分形式,在旅行时梯度大的区域采用小网格剖分,其他区域采用大网格剖分。这样的剖分形式不仅减少了计算量和节约了储存空间,还能处理大小网格的衔接问题^[15]。以图 1 为例,来说明变网格 FMM 的一阶、二阶迎风差分格式,其中大网格在 x 方向的网格间距为 Δx ,在 z 方向的网格间距为 Δz ;小网格在 x 方向的网格间距为 Δx_1 ,在 z 方向的网格间距为 Δx_1 。

1) 地震波旅行时对 x 方向的一阶差分格式如下:

图 1a 中区域①②内点的差分格式:

$$D_{i,j}^{-x}t = \frac{t_{i,j} - t_{i-1,j}}{dx}, \quad D_{i,j}^{+x}t = \frac{t_{i+1,j} - t_{i,j}}{dx},$$

式中:当计算点在区域①时, $dx = \Delta x$;当计算点在区域②时, $dx = \Delta x_1$ 。

图 1a 中红线 1 位置点的差分格式:

$$D_{i,j}^{-x}t = \frac{t_{i,j} - t_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad D_{i,j}^{+x}t = \frac{t_{i+1,j} - t_{i,j}}{\Delta x_1}。$$

图 1a 中红线 2 位置点的差分格式:

$$D_{i,j}^{-x}t = \frac{t_{i,j} - t_{i-1,j}}{\Delta x_1}, \quad D_{i,j}^{+x}t = \frac{t_{i+1,j} - t_{i,j}}{\Delta x}。$$

2) 地震波旅行时对 x 方向的二阶差分格式如下:

图 1c 中区域①②内点的差分格式:

$$D_{i,j}^{-x}t = \frac{3t_{i,j} - 4t_{i-1,j} + t_{i-2,j}}{2dx},$$

$$D_{i,j}^{+x}t = \frac{3t_{i,j} - 4t_{i+1,j} + t_{i+2,j}}{2dx}。$$

式中:当计算点在区域①时, $dx = \Delta x$;当计算点在区域②时, $dx = \Delta x_1$ 。

图 1c 中红线 1 位置点的差分格式:

$$D_{i,j}^{-x}t = \frac{3t_{i,j} - 4t_{i-1,j} + t_{i-2,j}}{2\Delta x},$$

$$D_{i,j}^{+x}t = \frac{\Delta x_1(2\Delta x + \Delta x_1)t_{i,j} - (\Delta x + \Delta x_1)^2 t_{i+1,j} + \Delta x^2 t_{i+2,j}}{(\Delta x + \Delta x_1)\Delta x\Delta x_1}。$$

图 1c 中红线 2 位置点的差分格式:

$$D_{i,j}^{-x}t = \frac{3t_{i,j} - 4t_{i-1,j} + t_{i-2,j}}{2\Delta x},$$

$$D_{i,j}^{+x}t = -\frac{3t_{i,j} - 4t_{i+1,j} + t_{i+2,j}}{2\Delta x_1}。$$

图 1c 中红线 3 位置点的差分格式:

$$D_{i,j}^{-x}t = \frac{\Delta x(\Delta x + 2\Delta x_1)t_{i,j} - (\Delta x + \Delta x_1)^2 t_{i-1,j} + \Delta x_1^2 t_{i-2,j}}{(\Delta x + \Delta x_1)\Delta x\Delta x_1},$$

$$D_{i,j}^{+x}t = -\frac{3t_{i,j} - 4t_{i+1,j} + t_{i+2,j}}{2\Delta x_1}。$$

图 1c 中红线 4 位置点的差分格式:

$$D_{i,j}^{-x}t = \frac{3t_{i,j} - 4t_{i-1,j} + t_{i-2,j}}{2\Delta x_1},$$

$$D_{i,j}^{+x}t = \frac{\Delta x(\Delta x + 2\Delta x_1)t_{i,j} - (\Delta x + \Delta x_1)^2 t_{i-1,j} + \Delta x_1^2 t_{i-2,j}}{(\Delta x + \Delta x_1)\Delta x\Delta x_1}。$$

图 1c 中红线 5 位置点的差分格式:

$$D_{i,j}^{-x}t = \frac{3t_{i,j} - 4t_{i-1,j} + t_{i-2,j}}{2\Delta x_1},$$

$$D_{i,j}^{+x}t = -\frac{3t_{i,j} - 4t_{i+1,j} + t_{i+2,j}}{2\Delta x}。$$

图 1c 中红线 6 位置点的差分格式:

$$D_{i,j}^{-x}t = \frac{\Delta x_1(2\Delta x + \Delta x_1)t_{i,j} - (\Delta x + \Delta x_1)^2 t_{i+1,j} + \Delta x^2 t_{i+2,j}}{(\Delta x + \Delta x_1)\Delta x\Delta x_1},$$

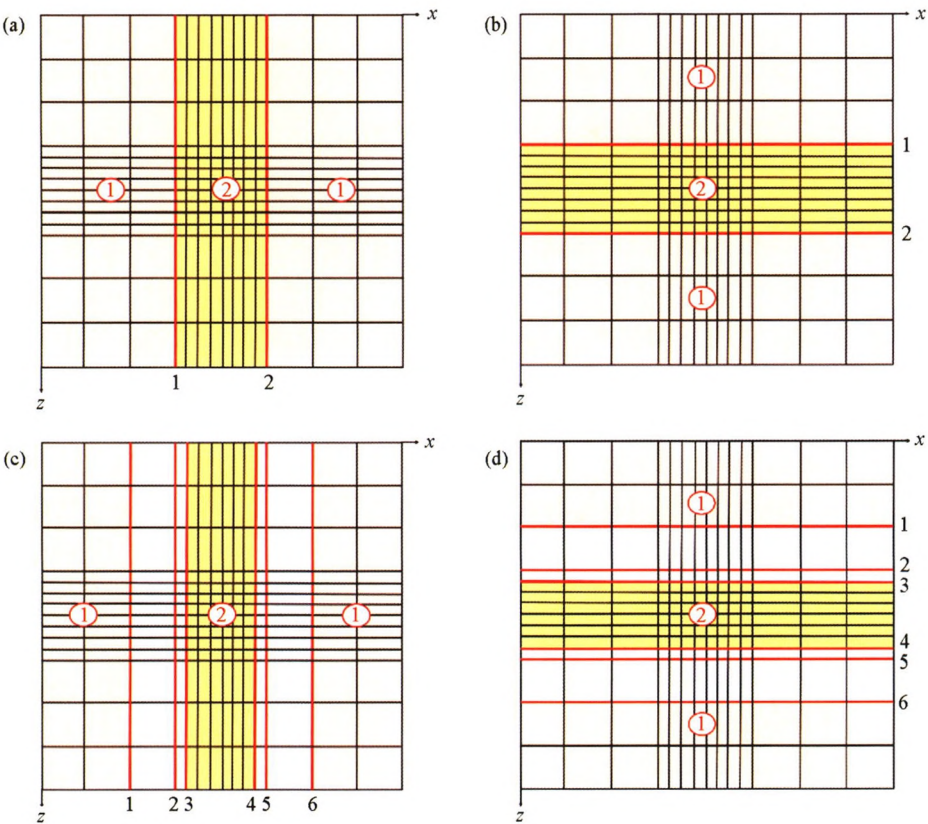


图 1 变网格 FMM 剖分方式
Fig.1 Split mode of variable grid FMM

$$D_{i,j}^{+x}t = -\frac{3t_{i,j} - 4t_{i-1,j} + t_{i-2,j}}{2\Delta x}。$$

同理,地震波旅行时对 z 方向的一阶、二阶差分格式形式与 x 方向上的一致,用相同的方式求取即可。

1.3 窄带技术原理

如图 2a 所示,窄带技术将所有计算网点分为三种类型:第一类为接收点,即地震波旅行时已知的点;第二类为窄带点,即地震波旅行时已计算,但还待更新的点;第三类为远离点,即地震波旅行时未计

算的点^[16]。图 2b 为窄带技术扩展原理图,首先在窄带条中寻找地震波旅行时最小点,将该点从窄带点中去除,加入到接收点中;其次将该点上下左右的点纳入窄带点中,若 4 个点中有接收点,则不改变该接收点的类型;最后计算剩余点的旅行时,若剩余点旅行时已计算过,则比较新旧两个旅行时的大小,保留小值,待更新,若剩余点旅行时未计算过,则保留当前值,待更新。重复上述工作,直至整个计算区域的点都为接收点时停止。

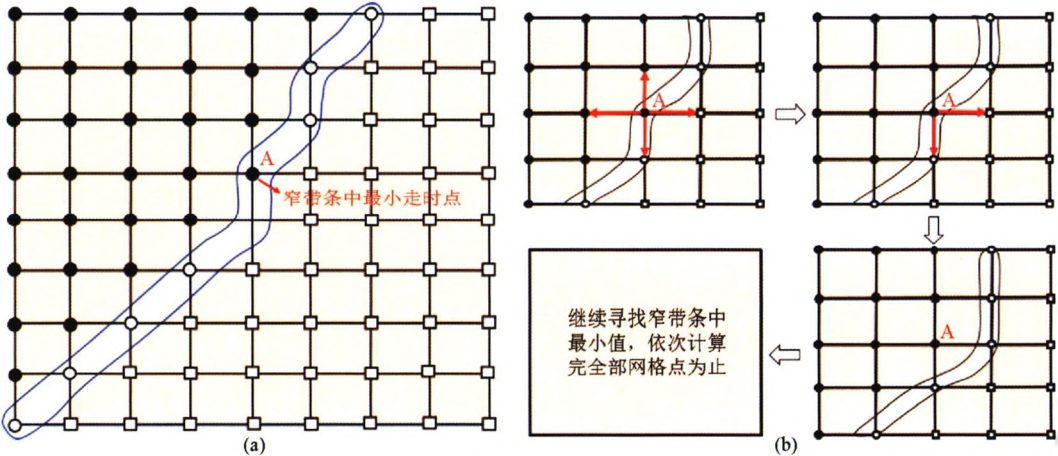


图 2 窄带技术示意
Fig.2 Schematic diagram of narrowband technology

2 正演模拟与精度分析

FMM 计算地震波旅行时的精度主要受限于网格大小和差分格式阶数。由前人的研究发现在网格大小及差分格式阶数一定的情况下,地震波旅行时误差较大的区域主要来源于震源附近^[10]。因此,本文采用变网格剖分形式,加密震源附近的网格密度,并通过正演模拟均匀模型,存在异常高速体模型及 Marmousi 模型,研究变网格 FMM 的优势及适用性。

2.1 均匀模型

建立二维均匀正演模型,模型的速度为 2 000 m/s,垂直厚度为 1 980 m,水平宽度为 1 980 m,炮点设置在均匀模型的正中心(990 m,990 m)处,大网格剖分间距为 12 m,小网格的剖分间距为 4 m。采用常规一阶、二阶 FMM、变网格一阶、二阶 FMM、双重网格一阶 FMM 计算地震波旅行时,并且还分别考虑加角点及不加角点的情况。

对比图 3、图 4、图 5、图 6、图 7 的 a、b 发现,加入角点因素后,地震旅行时相对误差减小,主要体现在以下两个方面:第一,无论一阶还是二阶差分格式,震源附近的相对误差都明显减小;第二,对于一阶差分格式,计算区域中相对误差大于 1% 的分布范围大大缩小,但是对于二阶差分格式,效果不明显。

对比图 3、图 5、图 7 发现,无论是否考虑角点因素,变网格一阶 FMM 与双重网格一阶 FMM 的旅行时精度都要比常规一阶 FMM 的精度高,说明震源附近加密网格,能够有效地提高计算精度;而变网格一阶 FMM 与双重网一阶 FMM 的精度相当,说明在

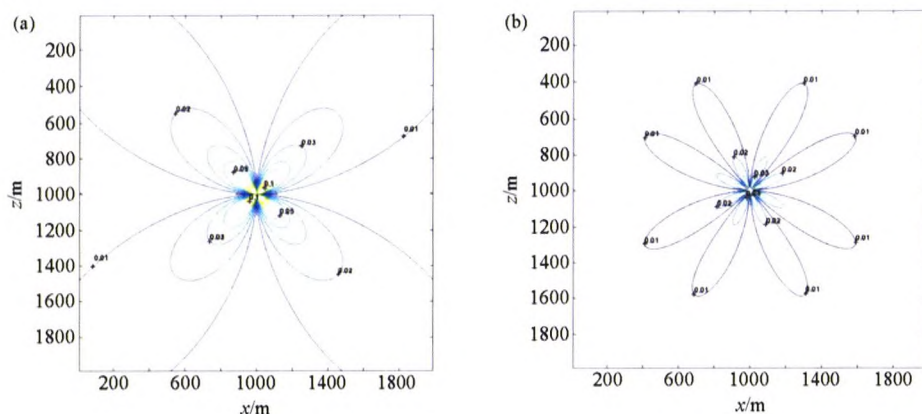
均匀模型下,两种方法都可行,但是在复杂情况下,双重网格 FMM 可能不满足波前传播的规律,需另作考虑。

对比图 4、图 6 发现,变网格二阶 FMM 旅行时精度比常规二阶 FMM 的精度高,前者在不加角点计算下,震源附近的精度已达到了后者加角点的精度,且在加入角点计算后,全区的相对误差控制在 2% 以内;两种方法的相对误差大于 1% 的分布范围都很小,但是前者的范围更小,几乎只集聚在震源周围。由此说明变网格二阶 FMM 的计算精度很高,基本上接近解析解。

对比图 4b、图 5b、图 7b 发现,变网格一阶 FMM 与双重网格一阶 FMM 的走时精度及相对误差大于 1% 的分布范围都与常规二阶 FMM 相接近,这说明加密震源附近网格,可达到增加差分阶数的效果。如果在计算效率能接受的范围内,可增加网格数量,降低差分阶数,减少程序复杂性而导致的错误。

对比表 1、图 8 中不同网格间距所需计算的网格点数发现,网格间距越小,网格计算量成指数增加,即大大降低了计算效率。图 9 为几种剖分形式所对应的计算时间对比,常规一阶差分耗时最少,但是二阶耗时却大大增加,变网格和双重网格计算耗时相对增加缓慢。结合前面叙述的各种方法的计算精度,采用两种网格间距的剖分形式可大量减少计算量及耗时,且有效地提高了计算精度。

综上所述,在均匀模型背景下,综合考虑计算精度和效率,变网格 FMM 和双重网格 FMM 的优势相当;在保证计算精度和效率的情况下,为降低编程程序的复杂性,提高程序运行成功率,可考虑使用这两种方法的一阶差分代替常规 FMM 法的二阶差分。



a—不加角点;b—加角点;图 4~7 同

a—no angular point;b—add angular point;Fig.4~Fig.7 the same

图 3 常规一阶 FMM 走时计算相对误差

Fig.3 Relative error calculated by conventional first-order FMM traveltime

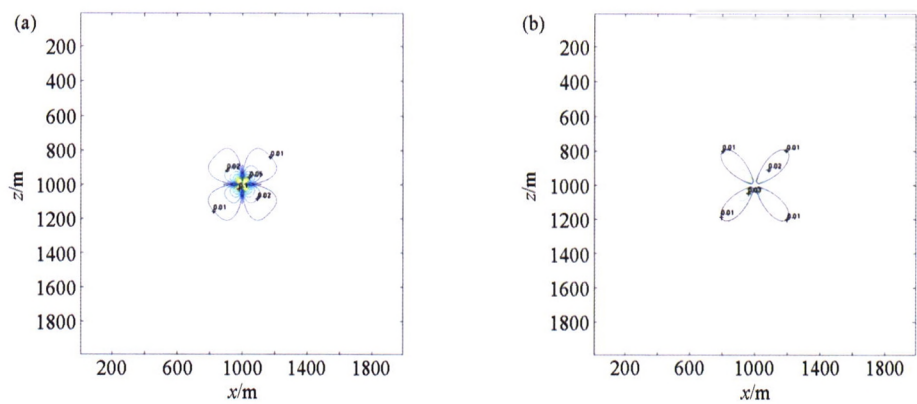


图 4 常规二阶 FMM 走时计算相对误差

Fig.4 Relative error calculated by conventional second-order FMM traveltimes

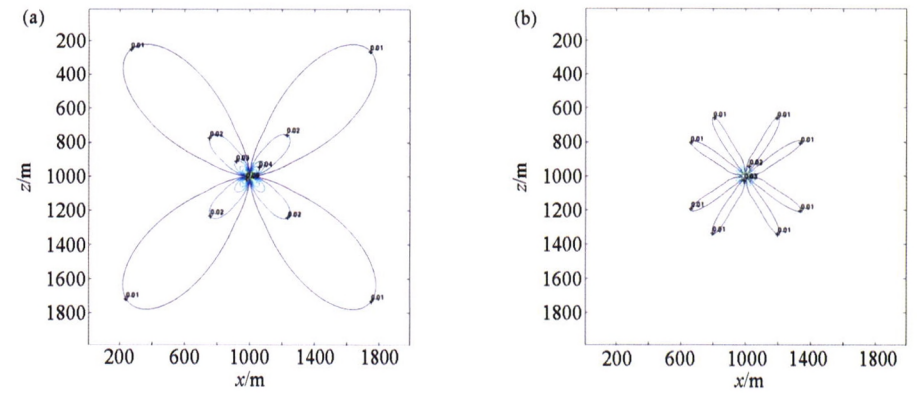


图 5 变网格一阶 FMM 走时计算相对误差

Fig.5 Relative error calculated by grid-variable first-order FMM traveltimes

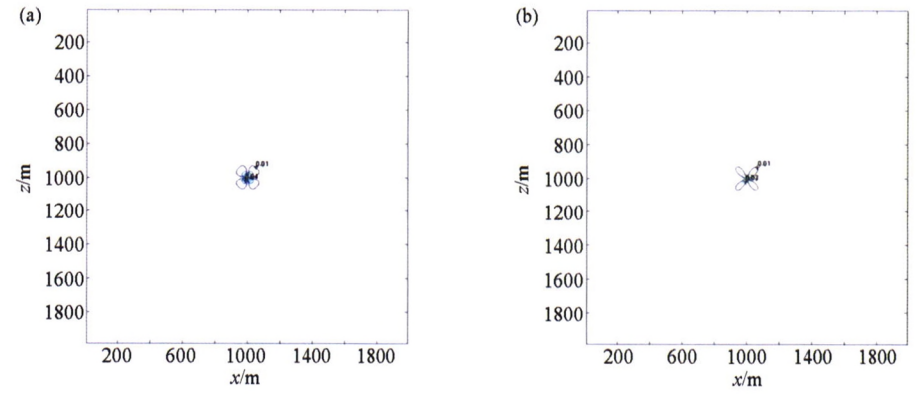


图 6 变网格二阶 FMM 走时计算相对误差

Fig.6 Relative error calculated by grid-variable second-order FMM traveltimes

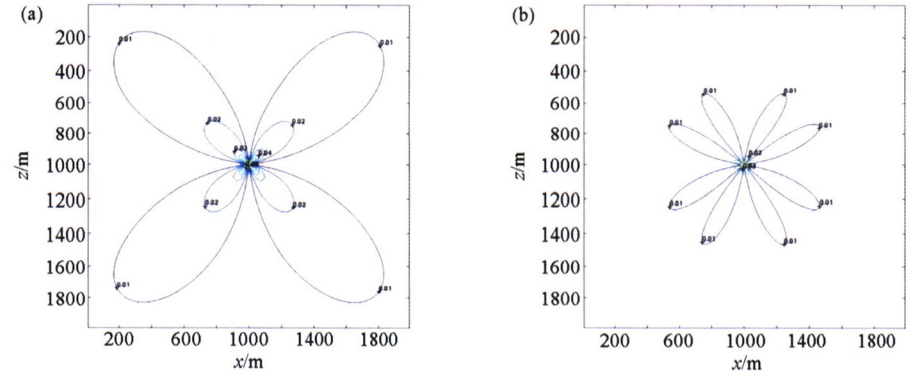


图 7 双重网格一阶 FMM 走时计算相对误差

Fig.7 Relative error calculated by double grid first-order FMM traveltimes

表 1 不同网格间距对应的网格点数

Table 1 Number of Grid points corresponding to different grid spacing

网格类型	网格间距	网格点数
常规网格	12 m	166×166(27556)
常规网格	6 m	331×331(109561)
常网规格	4 m	496×496(246016)
常网规格	3 m	661×661(436921)
常规网格	2 m	991×991(982081)
变网格	大网 12 m,小网 6 m	184×184(33856)
变网格	大网 12 m,小网 4 m	202×202(40894)
变网格	大网 12 m,小网 3 m	220×220(48400)
变网格	大网 12 m,小网 2 m	256×256(65536)
双重网格	大网 12 m,小网 6 m	28564
双重网格	大网 12 m,小网 4 m	30220
双重网格	大网 12 m,小网 3 m	32524
双重网格	大网 12 m,小网 2 m	39076

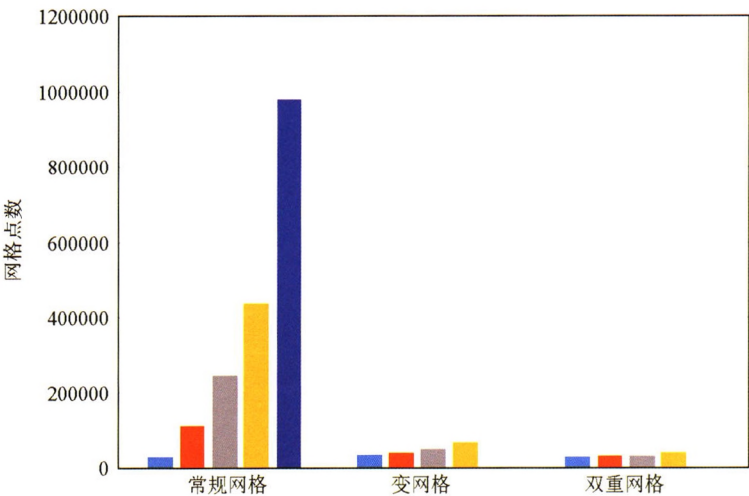


图 8 不同网格间距对应的网格点数

Fig.8 Number of grid points corresponding to different grid spacing

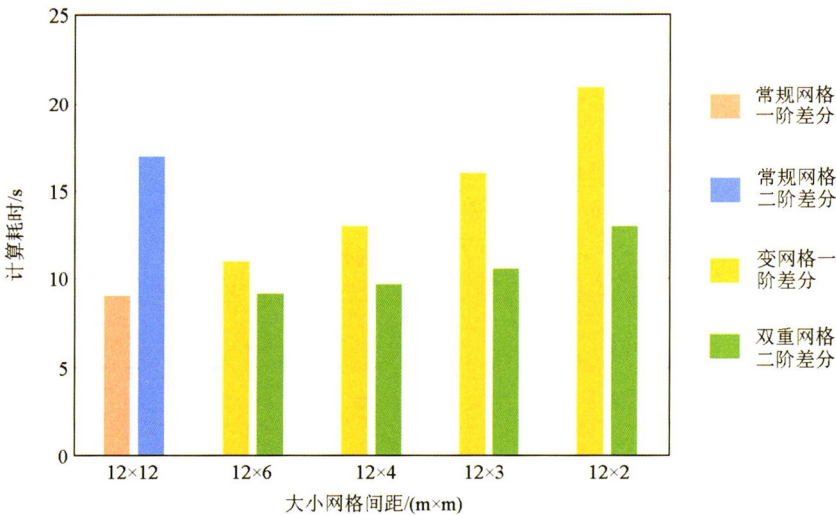


图 9 几种计算耗时对比

Fig.9 Time comparison about several calculations

2.2 存在高速异常体模型

建立二维的、存在高速异常体的正演模型(如图 10),模型的背景速度为 2 000 m/s,垂直厚度为 1 980 m,水平宽度为 1 980 m。炮点设置在均匀模型的正中心(990 m,990 m)处,大网格剖分间距为 12 m,小网格的剖分间距为 4 m。高速异常体设置在震源的上方,与网格加密区域紧密相连,形状为正方

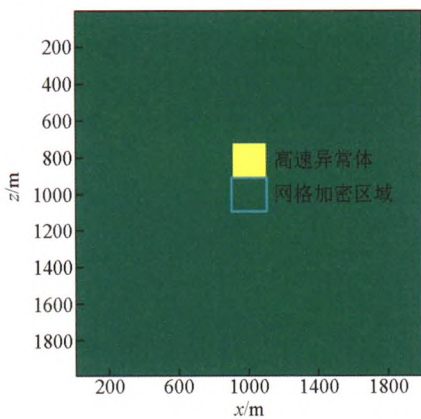


图 10 存在高速异常体的正演模型
Fig.10 Forward modeling with high-speed anomalous bodies

形,厚为 216 m,宽为 216 m,速度设置在 2 000~3 000 m/s 范围内。采用变网格一阶 FMM、双重网格 FMM 计算地震波旅行时,并分析旅行时对异常体的响应。与此同时,加密上述模型网格,使得网格间距全区域为 2 m,采用常规二阶 FMM 计算旅行时作为该研究的对照时间(由图 6 可知,加密局部网格精度已接近解析解,说明加密全区域后计算出的旅行时作为解析解参照是可行的)。

从全区域看(图 11a),三种方法对高速异常体的等时线响应是一致的,都是遇到高速异常体后等时线向外凸出;从局部看(图 11b),即放大高速异常体区域,变网格 FMM 旅行时等时线与常规二阶 FMM 一致,而双重网格 FMM 在红线区域内出现异常,出现这种现象的主要原因是双重网格 FMM 违反了波前扩展的规律,即如图 12 所示,当地震波波前扩展到 A 点时,下一时刻波前应该传至 C 点,然后再传至 B 点,而不是如双重网格 FMM 直接由 A 点传至 B 点,再传至 C 点。因此,对于复杂介质,采用双重网格计算旅行时,需提前了解异常体与变网

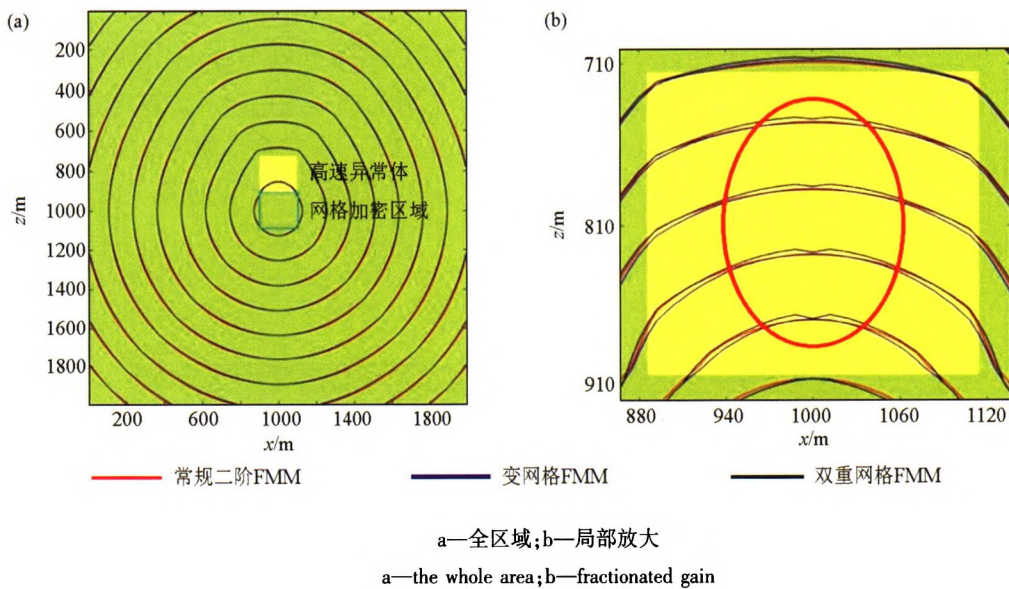


图 11 三种方法地震走时等时线
Fig.11 Three methods isochronal line for traveltime

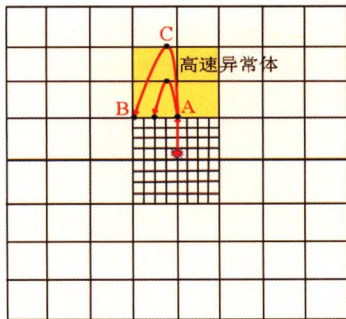


图 12 波前扩展规律
Fig.12 Expanding wavefronts law

格之间的位置关系,否则可能造成异常体区域误差较大,而采用变网格 FMM 可以避免这样的问题。

图 13、14、15 分别考虑异常体与围岩速度的差异,对两种网格剖分形式计算走时的影响,当异常体速度为 2 300 m/s 时,两种剖分形式计算走时相差不大,随着速度的不断增加,在异常体区域走时出现明显差异,由此可知,异常体与围岩差异速度越大,双重网格剖分形式计算走时误差越大。

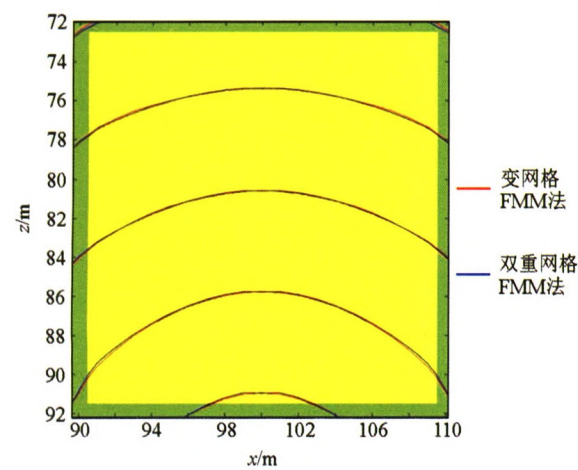


图 13 异常体速度为 2 300 m/s
Fig.13 The abnormal body speed is 2300 m/s

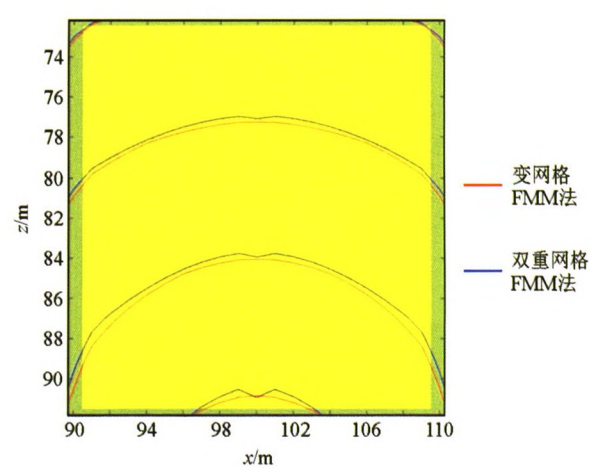


图 15 异常体速度为 3 000 m/s
Fig.15 The abnormal body speed is 3000 m/s

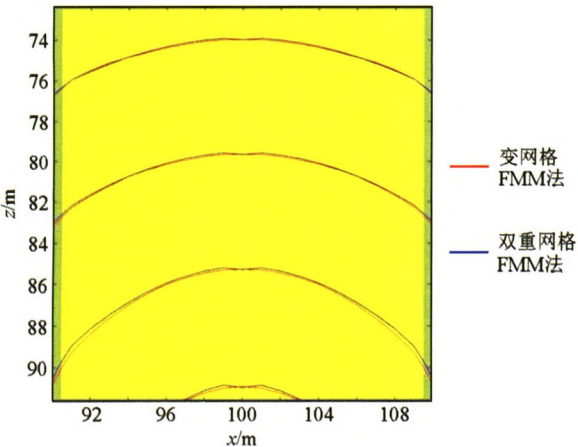


图 14 异常体速度为 2 500 m/s
Fig.14 The abnormal body speed is 2500 m/s

2.3 Marmousi 模型

建立 Marmousi 模型,验证变网格 FMM 对复杂模型的适应性。Marmousi 模型的区域范围为 720 m ×2 976 m,炮点设置在模型的底部(720 m,1488 m)处,大网格间距为 6 m,小网格间距为 2 m,小网格布置在震源附近。

由图 16 可以看出,地震波波前总是寻找所需旅行时最小的路径传播,在高速异常区域,旅行时等时线向外凸出,而在低速异常区域,旅行时等时线向内凹进,这样的特征是符合地震波波前传播的规律的,说明采用变网格 FMM 计算地震走时是可行的,且能够适应各种复杂模型。

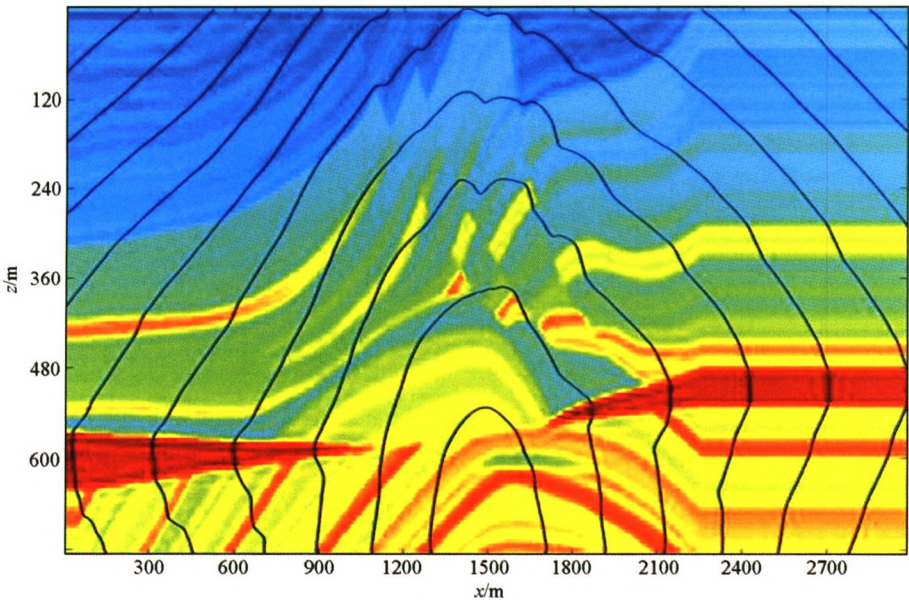


图 16 Marmousi 模型走时等时线
Fig.16 Traveltime isochron of Marmousi model

3 结论与展望

通过对均匀模型、存在高速异常体模型、Marmousi 模型正演模拟,得出以下结论:

1) 对于均匀介质,变网格 FMM 和双重网格 FMM 优势相当,既有效降低计算精度,又大大提高计算效率。

2) 对于存在高速异常体的介质,双重网格 FMM 需要考虑异常体与变网格的位置关系,否则双重网格 FMM 可能违背波前传播的规律,造成大的计算误差,而变网格 FMM 不需考虑这样的问题。

3) 经 Marmousi 模型试算,变网格 FMM 对复杂模型的适应能力较强。

综上所述,变网格 FMM 用于计算地震旅行时,较常规网格剖分具有一定的优势,不仅能提高计算精度,也能提高计算效率。另外,变网格 FMM 还有较大的研究空间,除对震源区域采用小网格剖分外,还可以考虑对速度梯度变化较大的区域进行小网格剖分,从而提高复杂模型的成像精度;还可以将固定形式的变网格直接改进为自适应形式的变网格,对全区误差大于阈值的区域进行网格加密,进一步提高旅行时计算的精度。

参考文献: (References)

- [1] 王乾龙.基于快速推进法的三维随机介质地震波走时计算[D].长春:吉林大学,2017.
Wang Q L.The calculation of seismic traveltime based on FMM in 3-D random medium[D].Changchun:Jilin University,2017.
- [2] Červený V.Seismic ray theory[M].Cambridge:Cambridge University Press,2001.
- [3] Zhao A H,Zhang Z J,Teng J W.Minimum traveltime tree algorithm for seismic ray tracing:improvement in efficiency[J].J. Geophys. Eng.,2004(1):245-251.
- [4] Vidale J E.Finite-difference calculations of traveltimes[J].Bull Seism Soc Am,1988,78:2062-2076.
- [5] 王飞,曲昕馨,刘四新,等.一种新的基于多模板快速推进算法和最速下降法的射线追踪方法[J].石油地球物理勘探,2014,49(6):1106-1114.
Wang F,Qu X X,Liu S X,et al.A new ray tracing approach based on both multistencils fast marching and the steepest descent[J].Oil Geophysical Prospecting,2014,49(6):1106-1114.
- [6] Sethian J A,Popovici A M.3-D traveltime computation using the fast marching method[J].Geophysics,1999,64(2):516-523.
- [7] 张双杰,朱培民,赵仁基,等.快速推进法计算精度分析及改进[J].工程地球物理学报,2009,6(3):254-265.
Zhang S J,Zhu P M,Zhao R J,et al.Analysis on calculation accuracy of fast marching method and its improvement[J].Chinese Journal of Engineering Geophysics,2009,6(3):254-265.
- [8] Rawlinson N, Sambridge M. Multiple reflection and transmission phases in complex layered media using a multistage fast marching method[J].Geophysics,2004,69:1338-1350.
- [9] 张风雪,吴庆举,李永华,等.FMM 射线追踪方法在地震学正演和反演中的应用[J].地球物理学进展,2010,25(4):1197-1205.
Zhang F X,Wu Q J,Li Y H,et al.Application of FMM ray tracing to forward and inverse problems of seismology[J].Progress in Geophysics,2010,25(4):1197-1205.
- [10] 孙章庆.复杂地表条件下地震波走时计算方法研究[D].长春:吉林大学,2007.
Sun Z Q.Study on the computation method of seismic traveltimes including surface topography[D].Changchun:Jilin University,2007.
- [11] 李永博,李庆春,吴琼.快速行进法射线追踪提高旅行时计算精度和效率的改进措施[J].石油地球物理勘探,2016,51(3):467-473.
Li Y B,Li Q C,Wu Q.Improved fast marching method for higher calculation accuracy and efficiency of traveltime[J].Oil Geophysical Prospecting,2016,51(3):467-473.
- [12] 孙章庆,孙建国,韩复兴.针对复杂地形的三种地震波走时算法及对比[J].地球物理学报,2012,55(2):560-568.
Sun Z Q,Sun J G,Han F X.The comparison of three schemes for computing seismic wave traveltimes in complex topographical conditions[J].Chinese Journal of Geophysics,2012,55(2):560-568.
- [13] 朱生旺,曲寿利,魏修成,等.变网格有限差分弹性波方程数值模拟方法[J].石油地球物理勘探,2012,55(2):560-568.
Zhu S W,Qu S L,Wei X C,et al.Numeric simulation by grid various finite difference elastic wave equation[J].Oil Geophysical Prospecting,2007,42(6):634-639.
- [14] 张志禹,侯文婷,苗永康.步长自适应的有限差分复杂地表波场数值模拟[J].地球物理学进展,2017,32(3):1321-1330.
Zhang Z Y,Hou W T,Miao Y K.Seismic wave simulation method based on variable grid step[J].Progress in Geophysics,2017,32(3):1321-1330.
- [15] 李振春,张慧,张华.一阶弹性波方程的变网格高阶有限差分数值模拟[J].石油地球物理勘探,2008,43(6):711-716.
Li Z C,Zhang H,Zhang H.Variable-grid high-order finite-difference numeric simulation of first-order elastic wave equation[J].Oil Geophysical Prospecting,2008,43(6):711-716.
- [16] 孙章庆.起伏地表条件下的地震波走时与射线路径计算[D].长春:吉林大学,2011.
Sun Z Q.The seismic traveltimes and raypath computation under undulating earth's surface condition[D].Changchun:Jilin University,2011.

A grid-variable finite-difference fast marching method

HE You-Juan¹, QIAO Yu-Lei², HOU Li-Juan³, ZHU Jun⁴, GAO Gang¹, WANG Peng¹

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources (Yangtze University), Ministry of Education, Wuhan 430100, China; 2. Shengli Oil Field Exploration and Development Research Institute, SINOPEC, Dongying 257000, China; 3. No. 1 Oil Production Plant, Qinghai Oil Field, PetroChina, Haixi 816400, China; 4. No. 1 Oil Production Plant, Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Luntai 841600, China)

Abstract: The accuracy of seismic wave traveltimes directly affects the reliability of research results in such fields as seismic inversion, pre-stack migration imaging and tomography. Therefore, it is of great significance to study the improvement of the accuracy of seismic wave traveltimes. Based on the double grid technology, this paper comes up with a fast marching method (FMM) based on the grid-various finite-difference scheme to calculate the traveltimes of seismic wave. It analyzes the advantages and applicability of the grid-various finite-difference FMM by the forward simulation of uniform model as well as the existence of high-speed anomalous body model, Marmousi model. The results show that the corner points need to be included in the calculation when the traveltimes are calculated by using Eikonal equation so as to reduce the error. Under the background of uniform model, the grid-variable finite-difference FMM has the same advantages as the double grid FMM. Nevertheless, under the background of the existence of high-speed anomalous body model, the double grid FMM may violate the law of wavefront expansion to cause a greater error. The grid-variable finite-difference FMM does not have such a problem, and its advantage is remarkable. Therefore, this method is an effective way to improve the accuracy and efficiency of traveltime calculation, which not only enhances the applicability of the FMM but also expands the application range of grid-various technology.

Key words: grid-various; double grid; finite-difference; fast marching method; traveltime; forward modeling

(本文编辑:叶佩)