

刘志强,李钢柱,黄磊,等. 基于正交贴体网格的 VTI 介质地震波数值模拟[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(2): 168-178.

LIU Zhi-qiang, LI Gang-zhu, HUANG Lei, et al. Numerical Simulation of Seismic Wave in VTI Media Based on Orthogonal Body-fitted Grid[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(2): 168-178.

DOI: 10. 19814/j. jese. 2022. 10024

•《地球科学与环境学报》更名二十周年纪念专辑•

基于正交贴体网格的 VTI 介质地震波数值模拟

刘志强, 李钢柱*, 黄磊, 许磊, 李文宝

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要:为了解决规则网格有限差分法在处理起伏地表自由边界条件时需进行复杂坐标转换和插值运算的问题,以及对起伏地表进行阶梯状离散近似所产生的虚假散射波问题,将计算流体力学中的正交贴体网格生成技术引入到起伏地表下 VTI 介质的网格剖分中,采用基于同位网格的 DRP/opt MacCormack 有限差分法模拟起伏地表下 VTI 介质中的地震波场。网格的正交性使实施自由边界条件时无需做复杂的坐标转换和插值运算。数值算例表明,本文提出的网格剖分法能够有效消除阶梯状网格产生的虚假散射波,从而提高起伏地表下 VTI 介质地震波数值模拟精度。

关键词:正交贴体网格; VTI 介质; 地震波; 数值模拟; 起伏地表; 自由边界条件; 有限差分法; 阶梯状网格

中图分类号: P315. 3⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2023)02-0168-11

Numerical Simulation of Seismic Wave in VTI Media Based on Orthogonal Body-fitted Grid

LIU Zhi-qiang, LI Gang-zhu*, HUANG Lei, XU Lei, LI Wen-bao

(Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to solve the complex coordinate transformation and interpolation operations when the regular grid finite difference method deals with the free boundary conditions of irregular surface, as well as the false scattered waves generated by the stepped discrete approximation of irregular surface, the orthogonal body-fitted grid generation technique in computational fluid mechanics was introduced into the mesh generation of VTI media under irregular surface. The DRP/opt MacCormack finite difference method based on the collocated grid was used to simulate seismic waves in VTI media under the irregular surface. The orthogonality of the grid eliminates the need for complex coordinate transformation and interpolation operations in the implementation of free boundary conditions. Numerical examples show that the proposed grid generation method can effectively eliminate the false scattered waves generated by the stepped grid, thus improve the accuracy of seismic numerical simulation in VTI media under the irregular surface.

Key words: orthogonal body-fitted grid; VTI media; seismic wave; numerical simulation;

收稿日期: 2022-10-12; 修回日期: 2022-12-08 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目(NJZZ19042); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2021BS04007, 2021MS04024); 内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0076)

作者简介: 刘志强(1987-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 讲师, 工学博士, E-mail: liuzhiqiang@imau.edu.cn.

* 通讯作者: 李钢柱(1975-), 男, 内蒙古武川人, 教授, 理学博士, E-mail: gli@imau.edu.cn.

irregular surface; free boundary condition; finite difference method; stepped grid

0 引言

地震波数值模拟是勘探地震学的重要组成部分,可以揭示地震波传播规律,有效指导地震数据的采集、处理和解释^[1-2]。受硬件条件和计算方法的限制,早期的地震波数值模拟对地下介质进行了大量假设和近似,如水平地表、横向均匀、各向同性等。而真实的地下介质异常复杂,尤其是靠近地表和陆缘深水区,不仅其几何形态复杂,而且存在各种复杂介质,如黏弹性介质、随机介质、各向异性介质等^[3]。在各向异性条件下,如果忽略速度各向异性,将会导致提取速度不准确,影响时深转换精度,特别是造成地下成像不准确、断层面等陡倾角反射界面成像质量差,严重影响在各向同性假设条件下反射地震波数据的处理和反演。另外,具有复杂物理性质的介质往往是与剧烈起伏的地形并存共生的^[4]。因此,模拟研究起伏地表下各向异性介质中地震波传播规律,对地震勘探中的数据处理和反演都具有重要的理论和实际意义。

地下介质的各向异性主要由定向裂隙和薄互层引起^[5],如沉积岩石的内部结构、周期性的薄互层和平行排列的微裂缝等导致的各向异性都可以用具有垂直对称轴的横向各向同性(VTI)介质来描述,因此,VTI介质是一种非常重要的各向异性模型。很多专家学者对VTI介质中的地震波场进行了模拟研究。2014年,Ping等利用有限元法模拟了VTI介质中的地震波传播^[6];2018年,Lin等利用伪普法对VTI介质中的2.5D波动方程进行了数值模拟^[7];2018年,徐世刚等利用有限差分法模拟了地震波在三维VTI介质中的传播,并分析了波场特征^[8]。同时,各向异性地震波数值模拟也被应用在实际生产中,并取得了一定的效果。2020年,张丽艳等对大庆长垣地区进行方位速度的动校正,校正各向异性引起的走时差,提高了成像质量^[9];2021年,高雪等在VTI介质中使用自适应聚焦束偏移,校正了走时信息,对实际资料的处理效果具有一定提升作用^[10];2022年,李春梅等在各向异性基础上进行叠前深度偏移,提高了陡倾地层的成像品质,减小了构造成像误差,提高了钻探成功率^[11]。但是,有关起伏地表下VTI介质中的地震波传播规律的模拟和研究还比较少。

在众多地震波数值模拟方法中,有限差分法因

其方法原理简单、编程易实现、计算效率高、对内存需求相对较小等特点,已成为地震波数值模拟中使用最广泛的方法^[12-14]。常规的有限差分法地震波模拟采用笛卡尔坐标系下的规则网格,在模拟起伏地表下的地震波场时必然会出现阶梯状的边界,从而引起人为虚假散射波。为了减弱这种虚假散射波,必须采用精细网格,而这将导致计算存储量的增加和计算量的增大。为此,前人发展了可变网格和不规则网格地震波数值模拟方法。Hayashi等采用空间变网格法来加密起伏地表附近的网格,从而尽量消除阶梯状网格带来的误差,同时减小计算量^[15];Opršal等给出了非均匀介质中二阶波动方程的矩形不规则网格差分法^[16];Tessmer等提出利用一定的映射函数将原有的不规则地表变换到规则的矩形网格上,并在变换后的矩形网格上进行波动方程的模拟^[17-18];董良国等利用纵向坐标变换思路,将起伏边界变换为水平边界,然后在变换后的矩形网格中采用有限差分法求解地震波方程^[19-20]。但是这几种方法只适用于地形起伏比较缓的情况,在地形起伏比较大时容易出现不稳定现象。近年来,Lan等在贴体网格的基础上使用同位网格有限差分法求解波动方程,取得了较高的计算精度^[21-22]。该方法能够适应任意起伏形状的地表,但是为了满足自由边界条件需要做复杂的坐标转换和插值运算。为此,丘磊等提出采用正交贴体网格模拟起伏地表下各向同性介质中的地震波场^[23-26]。

综上所述,正交贴体网格是较为合理的一种处理起伏地表问题的网格剖分形式。基于此,本文将流体力学中的Ryskin and Leal(RL)正交贴体网格生成技术^[27]引入到起伏地表下VTI介质的网格剖分中,采用基于同位网格的DRP/opt MacCormack有限差分法和低频散、低存储的Runge-Kutta(R-K)算法模拟起伏地表下VTI介质中的地震波场,为地震勘探中的数据处理和反演提供新的思路。

1 正交贴体网格的生成

正交贴体网格的生成实际上是一个数学变换过程,即由任意形状的物理域 (x, z) 变换到直角四边形的计算域 (ξ, η) (图1)。在这个变换中,点与点之间存在一一对应关系,在数学上可以表示为

$$\begin{cases} \xi = \xi(x, z) \\ \eta = \eta(x, z) \end{cases} \quad (1)$$

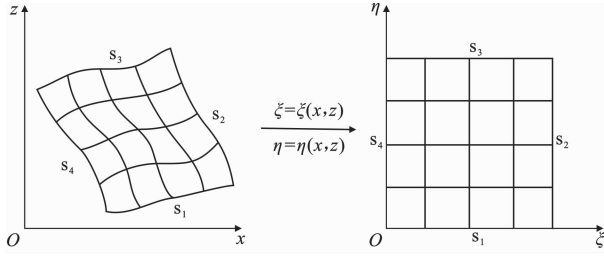


图 1 网格映射示意图

Fig. 1 Diagrams of Grid Mapping

RL 正交贴体网格生成方法取 xOz 平面上的一对 Laplace 方程。其表达式为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(f \frac{\partial x}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{1}{f} \frac{\partial x}{\partial \eta} \right) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(f \frac{\partial z}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{1}{f} \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$f = \frac{h_\eta}{h_\xi} = \left(\frac{x_\eta^2 + z_\eta^2}{x_\xi^2 + z_\xi^2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$\begin{cases} h_\xi = g_\xi^{1/2} \\ h_\eta = g_\eta^{1/2} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} g_\xi = x_\xi^2 + z_\xi^2 \\ g_\eta = x_\eta^2 + z_\eta^2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_\xi = \frac{\partial x}{\partial \xi}, x_\eta = \frac{\partial x}{\partial \eta} \\ z_\xi = \frac{\partial z}{\partial \xi}, z_\eta = \frac{\partial z}{\partial \eta} \end{cases} \quad (6)$$

式中: f 为畸变函数, 由 ξ 和 η 方向上的刻度因子给出; h_ξ 和 h_η 分别为 ξ 和 η 方向上的正交刻度因子; g_ξ 和 g_η 为度量张量的协变分量。

如果 $f=1$, 式(2)就变成保角变换, 则 $f=1$ 称为完全光滑条件。对于地表起伏不大的模型, 通过式(2)生成的网格基本可以保证较好的正交性和光滑性。但是, 当地表起伏比较大时, 为了保证正交性, 往往会造成内部网格点的严重畸变[图 2(a)]。为此, 引入 ξ 、 η 方向上的光滑刻度因子 $(\bar{h}_\xi)_i$ 和 $(\bar{h}_\eta)_j$, 并通过与正交刻度因子加权平均得到改进的畸变函数 $\bar{f}_{i,j}$ 。其表达式为

$$\bar{f}_{i,j} = \frac{(\bar{h}_\eta)_j \cdot r_\eta + (h_\eta)_{i,j} \cdot (1-r_\eta)}{(\bar{h}_\xi)_i \cdot r_\xi + (h_\xi)_{i,j} \cdot (1-r_\xi)} \quad (7)$$

$$\begin{cases} (\bar{h}_\xi)_i = \frac{1}{N_j - 2} \sum_{j=2}^{N_j-1} (h_\xi)_{i,j} \\ (\bar{h}_\eta)_j = \frac{1}{N_i - 2} \sum_{i=2}^{N_i-1} (h_\eta)_{i,j} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} [r_\xi]_{i,j} = \frac{|(h_\xi)_{i,j} - (\bar{h}_\xi)_i|}{|(h_\xi)_{i,j} + (\bar{h}_\xi)_i|} \\ [r_\eta]_{i,j} = \frac{|(h_\eta)_{i,j} - (\bar{h}_\eta)_j|}{|(h_\eta)_{i,j} + (\bar{h}_\eta)_j|} \end{cases} \quad (9)$$

式中: i 和 j 分别为 ξ 和 η 方向上的网格线; N_i 和 N_j 分别为 ξ 和 η 方向上的网格线总数; $(h_\xi)_{i,j}$ 和 $(h_\eta)_{i,j}$ 分别为点 (i,j) 在 ξ 和 η 方向上的正交刻度因子; r_ξ 和 r_η 为经验参数, 可以取常数, 也可以取 $[r_\xi]_{i,j}$ 和 $[r_\eta]_{i,j}$ 。

利用改进的正交贴体网格生成方法算法兼顾了网格剖分的正交性和光滑性, 避免了起伏地表附近网格点的畸变[图 2(b)]。

2 曲线坐标系下的数值模拟方法

2.1 曲线坐标系下的 VTI 介质波动方程

利用链式法则和笛卡尔坐标系下的速度-应力方程, 可以推导出曲线坐标系下 2D VTI 介质的一阶速度-应力波动方程。为了公式书写方便简洁, 引入符号 $u_{,\xi} \equiv \frac{\partial u}{\partial \xi}$ 来表示变量 u 对 ξ 的偏导数, 其他类似形式依此类推, 则矩阵形式的波动方程可表示为

$$\mathbf{U}_{,t} = \mathbf{A}\mathbf{U}_{,\xi} + \mathbf{B}\mathbf{U}_{,\eta} \quad (10)$$

$$\mathbf{U} = [v_x, v_z, \tau_{xx}, \tau_{zz}, \tau_{xz}]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\xi_{,x}}{\rho} & 0 & \frac{\xi_{,z}}{\rho} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\xi_{,z}}{\rho} & \frac{\xi_{,x}}{\rho} \\ c_{11}\xi_{,x} & c_{13}\xi_{,z} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13}\xi_{,x} & c_{33}\xi_{,z} & 0 & 0 & 0 \\ c_{55}\xi_{,z} & c_{55}\xi_{,x} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\eta_{,x}}{\rho} & 0 & \frac{\eta_{,z}}{\rho} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\eta_{,z}}{\rho} & \frac{\eta_{,x}}{\rho} \\ c_{11}\eta_{,x} & c_{13}\eta_{,z} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13}\eta_{,x} & c_{33}\eta_{,z} & 0 & 0 & 0 \\ c_{55}\eta_{,z} & c_{55}\eta_{,x} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: t 为时间; \mathbf{U} 为速度和应力组成的列矩阵; \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 为系数矩阵; v_x 、 v_z 分别为质点速度的水平分量和垂直分量; τ_{xx} 、 τ_{zz} 、 τ_{xz} 分别为 x 方向上的正应力、 z 方向上的正应力和切应力; ρ 为密度; c_{11} 、 c_{13} 、 c_{33} 、 c_{55} 为弹性系数。

2.2 波动方程的离散求解

本文采用基于同位网格的 DRP/opt MacCormack 有限差分法, 对式(10)中的空间导数进行离散计算。DRP/opt MacCormack 格式为向前差分 and 向后差分两个偏心差分格式, 通过一个偏心差分格式对波场进行预估, 然后再用另一个偏心差分格式对其校正, 以恢复为一个中心差分格式。7 点同

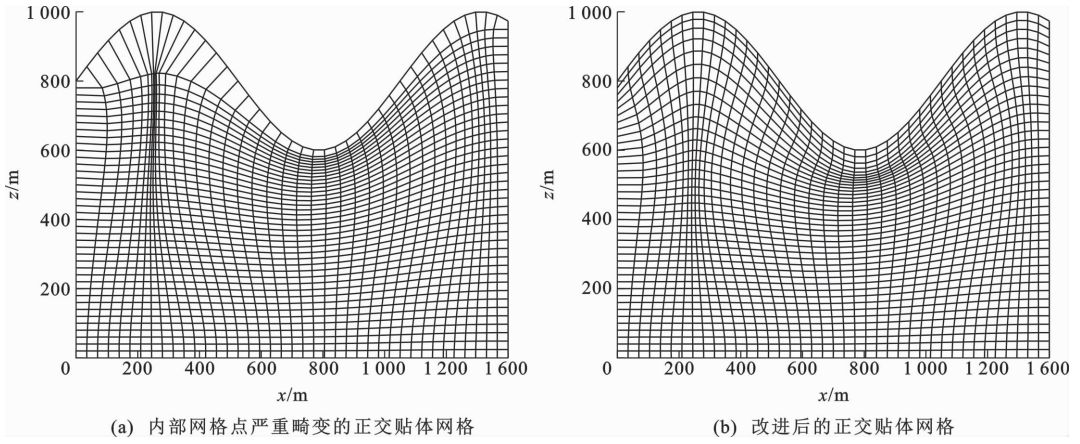


图 2 正交贴体网格剖分示意图

Fig. 2 Diagrams of Orthogonal Body-fitted Grid Generation

位网格 DRP/opt MacCormack 格式^[28]的两个偏心差分格式分别为

$$\begin{cases} L_{\xi}^F(\mathbf{U})_k = \frac{1}{\Delta\xi} \sum_{m=-1}^3 a_m \mathbf{U}_{k+m} \\ L_{\xi}^B(\mathbf{U})_k = \frac{1}{\Delta\xi} \sum_{m=-1}^3 -a_m \mathbf{U}_{k-m} \end{cases} \quad (14)$$

式中: L_{ξ}^F 和 L_{ξ}^B 分别为 ξ 方向上的向前和向后差分算子; k 为空间网格点位置; $\Delta\xi$ 为水平方向上的网格步长; \mathbf{U}_{k+m} 和 \mathbf{U}_{k-m} 分别为 $k+m$ 处和 $k-m$ 处速度和应力组成的列矩阵; a_m 为差分系数, $a_{-1} = 0.30874$, $a_0 = -0.63260$, $a_1 = 1.23300$, $a_2 = -0.33340$, $a_3 = 0.04168$ 。

利用式(14)中的向前差分和向后差分离散化式(10)中的空间导数,可得

$$\begin{cases} \hat{L}^{FF} = \mathbf{A} L_{\xi}^F(\mathbf{U}) + \mathbf{B} L_{\eta}^F(\mathbf{U}) \\ \hat{L}^{BB} = \mathbf{A} L_{\xi}^B(\mathbf{U}) + \mathbf{B} L_{\eta}^B(\mathbf{U}) \end{cases} \quad (15)$$

式中: \hat{L} 上标 FF 表示 ξ 和 η 方向上的向前差分; \hat{L} 上标 BB 表示 ξ 和 η 方向上的向后差分; L_{η}^F 和 L_{η}^B 分别为 η 方向上的向前和向后差分算子。

将式(10)进一步改写为

$$\mathbf{U}_t = \mathbf{F}(t, \mathbf{U}) \quad (16)$$

式中: \mathbf{F} 由式(10)的右端项组成,即 \mathbf{F} 是 \mathbf{U} 中各物理量关于空间求导后的线性组合。

令 $\mathbf{U}^n = \mathbf{U}(n\Delta t)$, 则求解时间导数的 p 步低频散、低存储的 R-K 算法^[29-30]为

$$\begin{cases} \mathbf{U}^0 = \mathbf{U}^n \\ \mathbf{U}^l = \mathbf{U}^n + \alpha_l \Delta t \mathbf{L}(\mathbf{U}^{l-1}) \quad l=1, 2, \dots, p \\ \mathbf{U}^{n+1} = \mathbf{U}^p \end{cases} \quad (17)$$

式中: l 为迭代步数; Δt 为时间迭代步长; α_l 为 R-K 算法的系数。

若令 $p=6$, 则有六步 R-K 算法的系数 $\alpha_1 = 1$,

$\alpha_2 = 0.5$, $\alpha_3 = 0.16591977$, $\alpha_4 = 0.04091973$, $\alpha_5 = 0.00755570$, $\alpha_6 = 0.00089142$ 。为了避免数值计算偏向误差,在 R-K 算法中交替使用式(15)的向前和向后差分。

2.3 边界条件的实施

在正交贴体网格下,由于地表处的法向量与地表正交,可以直接采用水平界面时的自由边界条件。如图 3 所示,将自由界面设在 $j=n$ 处,根据自由边界条件,地表一层网格点上的法向应力为 0,则

$$\begin{cases} \tau_{zz}|_n = 0 \\ \tau_{xz}|_n = 0 \end{cases} \quad (18)$$

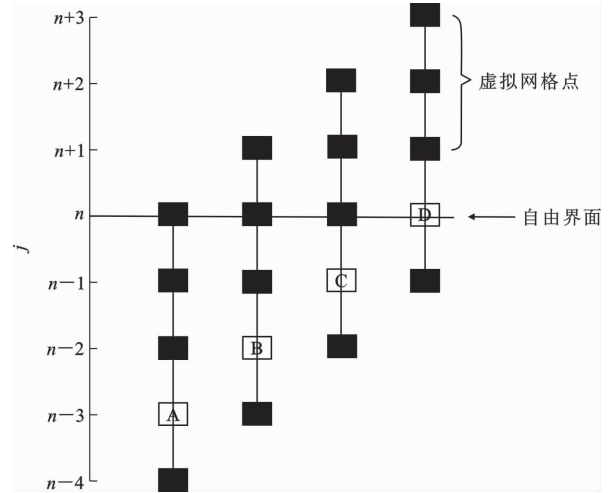


图 3 自由界面处有限差分格式示意图

Fig. 3 View of Finite Difference Scheme at Free Boundary

自由地表以上虚拟网格点上的应力则可以根据应力镜像法求得,其计算公式为

$$\begin{cases} \tau_{zz}|_{n+j} = -\tau_{zz}|_{n-j} \\ \tau_{xz}|_{n+j} = -\tau_{xz}|_{n-j} \end{cases} \quad (19)$$

在自由地表处对式(10)中的应力分量 τ_{zz} 进行求解时,需要用到速度分量在 η 方向上的导数。对

式(18)关于时间求偏导,并带入到式(10)可得速度自由边界条件为

$$\begin{bmatrix} v_{x,\eta} \\ v_{z,\eta} \end{bmatrix} = -\mathbf{X}^{-1}\mathbf{Z}\begin{bmatrix} v_{x,\xi} \\ v_{z,\xi} \end{bmatrix}$$

(20)

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} c_{13}\eta_{,x} & c_{33}\eta_{,z} \\ c_{55}\eta_{,x} & c_{55}\eta_{,z} \end{bmatrix}$$

(21)

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} c_{13}\xi_{,x} & c_{33}\xi_{,z} \\ c_{55}\xi_{,x} & c_{55}\xi_{,z} \end{bmatrix}$$

(22)

式中: $v_{x,\xi}$ 和 $v_{x,\eta}$ 分别为水平方向上的速度分量 v_x 对 ξ 和 η 的偏导数; $v_{z,\xi}$ 和 $v_{z,\eta}$ 分别为垂直方向上的速度分量 v_z 对 ξ 和 η 的偏导数。

由式(20)可以求出 v_x 和 v_z 在 η 方向的导数。因此,利用式(18)~(22)就可以完整地实施自由边界条件。

地震波数值模拟过程中,选取的有限计算区域会产生边界反射,干扰模拟效果,因此,需要引入人工边界条件降低边界反射的影响^[31-32]。本文采用Martin等提出的基于辅助微分方程的完美匹配层(ADE-PML)吸收边界条件,消除边界反射^[33]。

3 数值算例

3.1 起伏地表均匀模型

为了验证方法的有效性,设计一个如图4(a)所示的起伏地表均匀模型。模型大小为1 000 m×1 000 m,模型参数见表1。分别采用本文提出的网格剖分法和规则网格有限差分法对模型进行试算。数值模拟在计算域中的空间网格步长为 $\Delta\xi=\Delta\eta=10$ m($\Delta\eta$ 为垂直方向上的网格步长),震源激发点位于(500 m,10 m),采用主频为100 Hz的雷克子波。

图4(b)为利用本文提出的网格剖分法得到的正交贴体网格。从图4(b)可以看出,本文提出的网格剖分法不仅能够很好地描述起伏地表,而且在边界上具有很好的正交性和光滑性。图5(a)和图6(a)为利用本文提出的网格剖分法得到的0.1 s时刻的波场快照水平分量和垂直分量。从图5(a)和图6(a)能够观察到横波的三分叉现象。图5(b)和图6(b)为利用规则网格有限差分法得到的0.1 s时刻的波场快照水平分量和垂直分量。对比两种方法得到的波场快照可以看出,本文提出的网格剖分法能够有效压制阶梯状网格引起的虚假散射频散波。

表 1 起伏地表均匀模型参数

Table 1 Parameters of Homogeneous Model with Irregular Surface

层数	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	c_{11}/GPa	c_{13}/GPa	c_{33}/GPa	c_{55}/GPa
第1层	6 000	15.5	5.4	6.5	4.0

3.2 起伏地表双层模型

为了验证本文提出的网格剖分法在起伏地表模型中的适用性,设计如图7(a)所示的起伏地表双层模型。模型大小为1 000 m×1 000 m,模型参数见表2。采用本文提出的网格剖分法对模型进行正交贴体网格剖分,结果如图7(b)所示。数值模拟在计算域中的空间网格步长为 $\Delta\xi=\Delta\eta=10$ m,震源激发点位于(500 m,10 m),采用主频为100 Hz的雷克子波。图8~10为不同时刻的模拟波场快照,图11为模拟地震记录。从模拟波场快照和模拟地震记录可以观察到:地震波传播到山峰和山谷的拐点时都会产生强烈的散射波和绕射波,而且发生面波和体波之间的相互转化,其散射面波的能量要强于散射

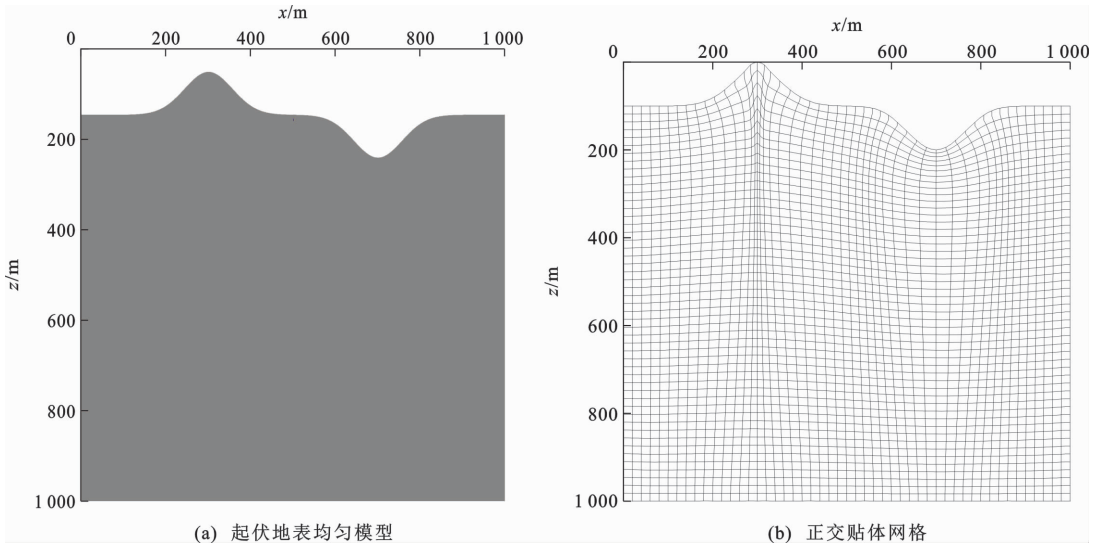


图 4 起伏地表均匀模型与网格剖分示意图

Fig. 4 Homogeneous Model with Irregular Surface and Diagram of Grid Generation

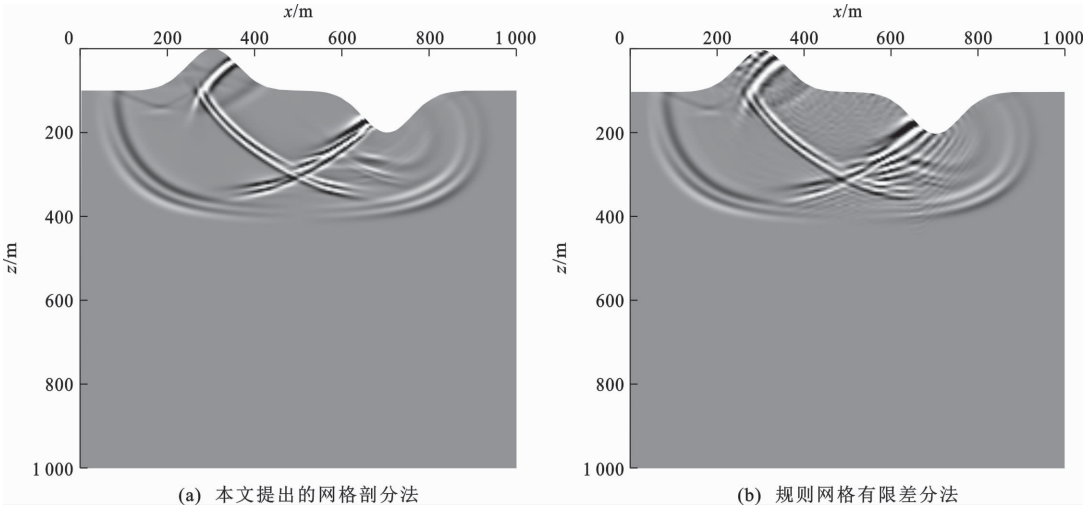


图 5 起伏地表均匀模型 0.1 s 时刻的模拟波场快照水平分量

Fig. 5 Horizontal Components of Simulated Wavefield Snapshots at 0.1 s Based on Homogeneous Model with Irregular Surface

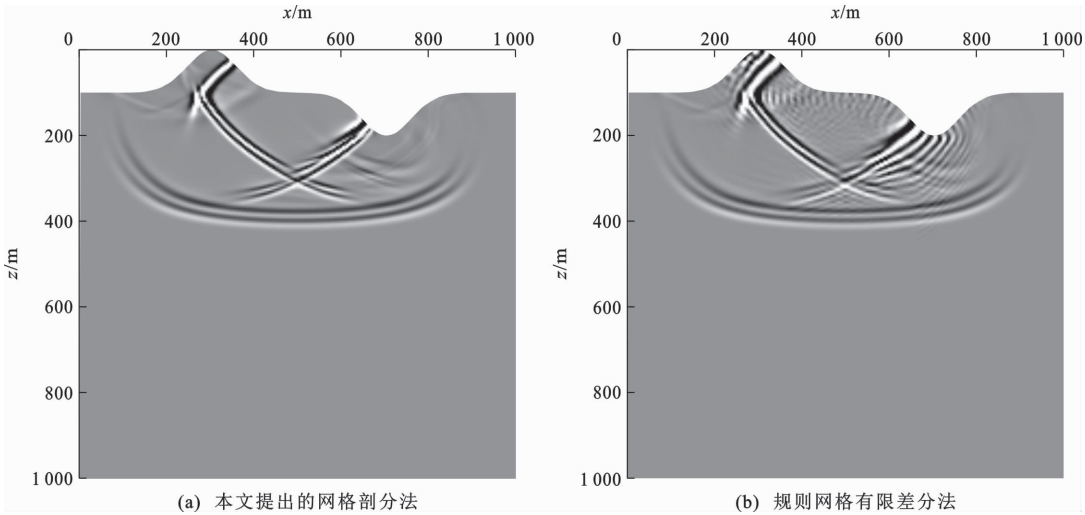


图 6 起伏地表均匀模型 0.1 s 时刻的模拟波场快照垂直分量

Fig. 6 Vertical Components of Simulated Wavefield Snapshots at 0.1 s Based on Homogeneous Model with Irregular Surface

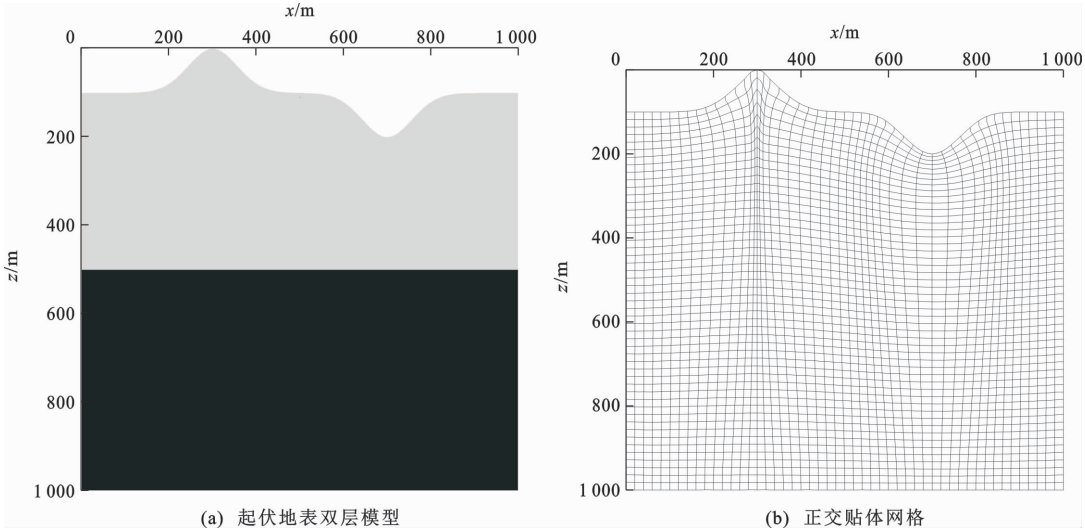


图 7 起伏地表双层模型与网格剖分示意图

Fig. 7 Two-layer Model with Irregular Surface and Diagram of Grid Generation

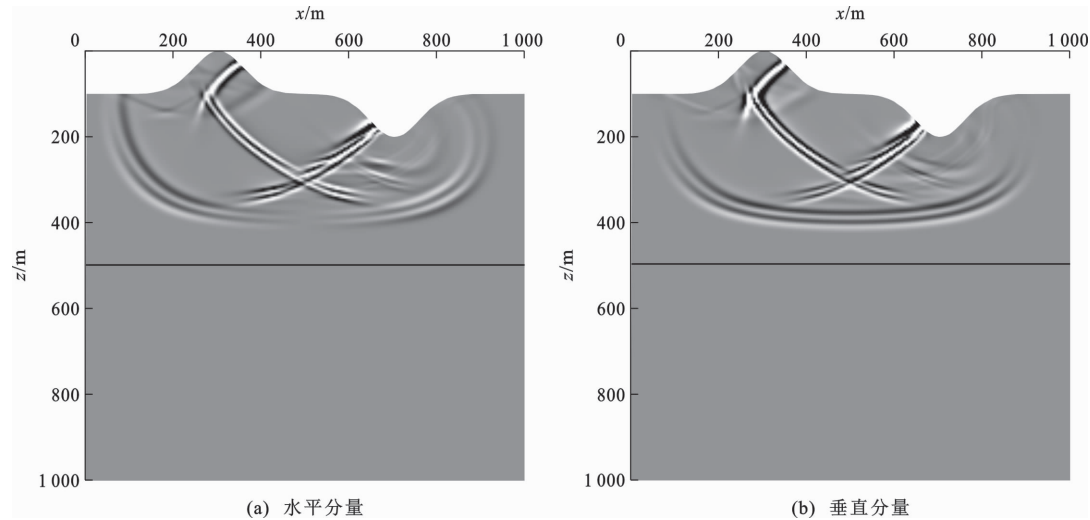


图 8 起伏地表双层模型 0.1 s 时刻的模拟波场快照

Fig. 8 Simulated Wavefield Snapshots at 0.1 s Based on Two-layer Model with Irregular Surface

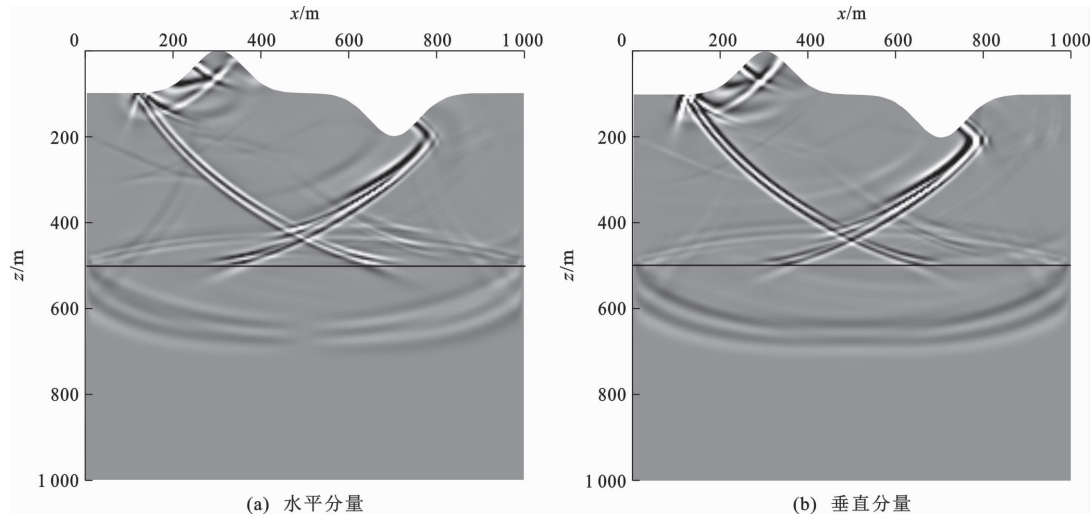


图 9 起伏地表双层模型 0.16 s 时刻的模拟波场快照

Fig. 9 Simulated Wavefield Snapshots at 0.16 s Based on Two-layer Model with Irregular Surface

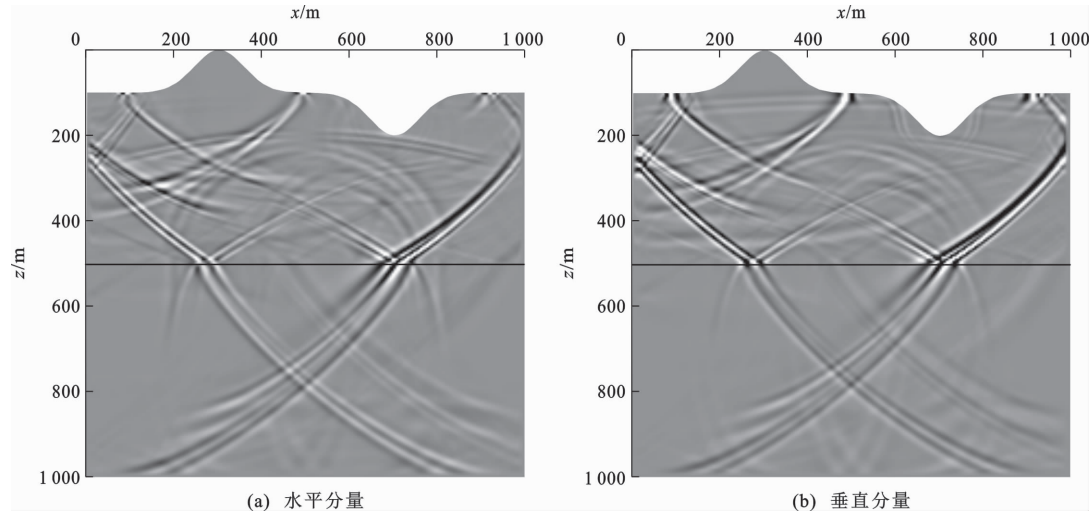


图 10 起伏地表双层模型 0.25 s 时刻的模拟波场快照

Fig. 10 Simulated Wavefield Snapshots at 0.25 s Based on Two-layer Model with Irregular Surface

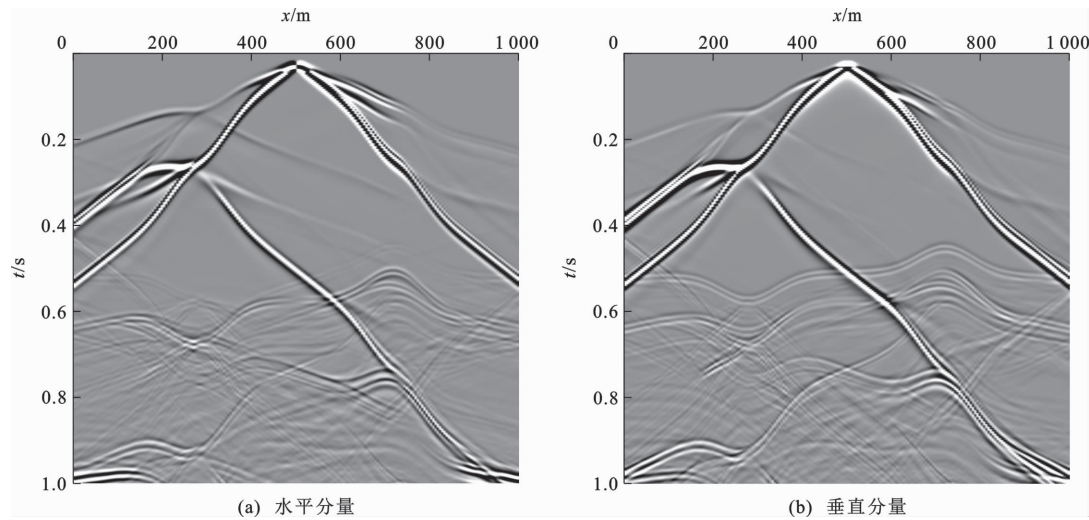


图 11 起伏地表双层模型模拟地震记录

Fig. 11 Simulated Seismic Records Based on Two-layer Model with Irregular Surface

表 2 起伏地表双层模型参数

表 3 起伏地表复杂模型参数

Table 2 Parameters of Two-layer Model with Irregular Surface

Table 3 Parameters of Complex Model with Irregular Surface

层数	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	c_{11}/GPa	c_{13}/GPa	c_{33}/GPa	c_{55}/GPa
第 1 层	6 000	15.5	5.4	6.5	4.0
第 2 层	7 000	15.5	5.4	26.5	24.0

层数	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	c_{11}/GPa	c_{13}/GPa	c_{33}/GPa	c_{55}/GPa
第 1 层	4 000	15.5	5.4	6.5	4.0
第 2 层	5 000	15.5	5.4	16.5	14.0
第 3 层	6 000	15.5	5.4	30.0	24.0

体波;当地震波传播至界面上时会产生反射波、透射波和转换波。

3.3 起伏地表复杂模型

为了进一步验证本文提出的网格剖分法在复杂模型中的适用性,设计如图 12(a)所示的起伏地表复杂模型。模型大小为 2 000 m×2 000 m,模型参数见表 3。采用本文提出的网格剖分法对模型进行正交贴体网格剖分,结果如图 12(b)所示。数值模拟在计算域中的空间网格步长为 $\Delta\xi=\Delta\eta=10\text{ m}$,震

源激发点位于(1 000 m,10 m),采用主频为100 Hz的雷克子波。图 13 为 0.4 s 时刻的模拟波场快照,图 14 为模拟地震记录。从模拟波场快照和模拟地震记录可以看出,本文提出的网格剖分法对起伏地表复杂模型同样有很强的适用性。

4 结 语

波动方程数值模拟是研究各向异性介质中地震

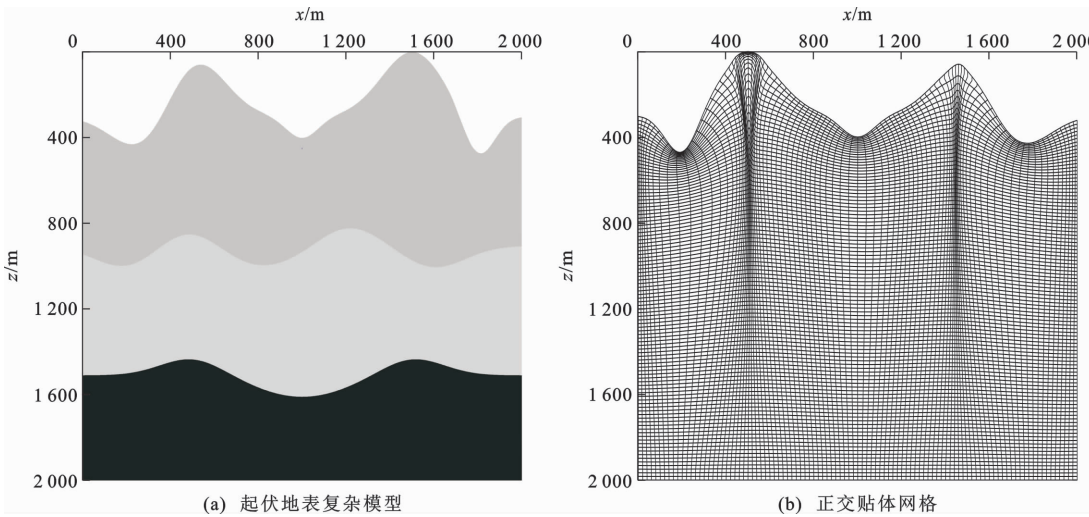


图 12 起伏地表复杂模型与网格剖分示意图

Fig. 12 Complex Model with Irregular Surface and Diagram of Grid Generation

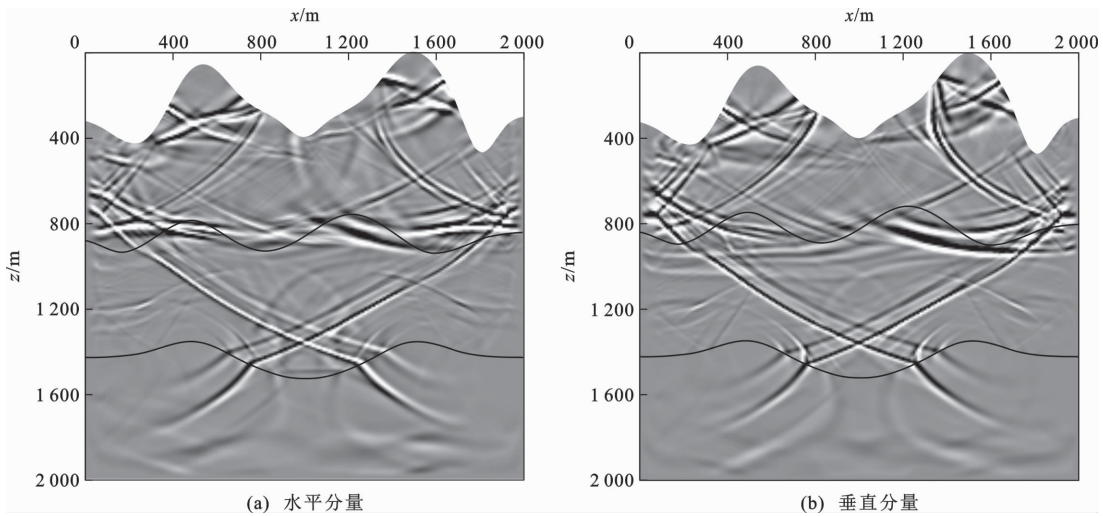


图 13 起伏地表复杂模型 0.4 s 时刻的模拟波场快照

Fig. 13 Simulated Wavefield Snapshots at 0.4 s Based on Complex Model with Irregular Surface

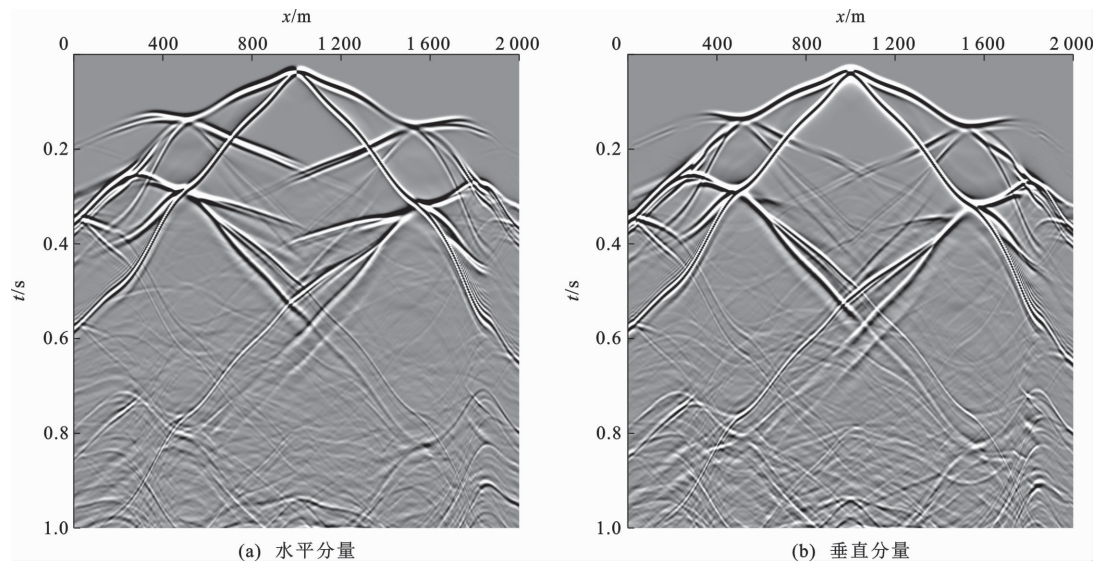


图 14 起伏地表复杂模型模拟地震记录

Fig. 14 Simulated Seismic Records Based on Complex Model with Irregular Surface

波传播规律的有效方法。本文采用改进的 RL 正交贴体网格生成方法对起伏地表下的 VTI 介质进行网格剖分,并结合 DRP/opt MacCormack 有限差分法和优化的 R-K 算法计算曲线坐标系下的一阶速度-应力方程。数值算例表明:(1)改进的 RL 正交贴体网格生成方法能够对起伏地表模型进行精确的正交贴体网格剖分,从而有效消除阶梯状网格引起的虚假散射波;(2)网格的正交性使得在实施自由边界条件时无需做复杂的坐标转换和插值运算,从而有效提高计算精度;(3)因为二维和三维使用的是相同的差分格式,所以本文提出的网格剖分法很容易向三维模拟推广。

李钢柱:《地球科学与环境学报》在主编彭建兵院士的带领下,在学报全体编辑老师的共同努力下,

不断迈上新台阶,特别是最近聚焦科学前沿与工程技术难点问题以及传承科学精神,策划出版诸如“电磁法勘探专辑”“庆祝长安大学建校七十周年专辑”“纪念刘国昌先生诞辰 110 周年专辑”等,大幅提升学报学术影响力!值此《地球科学与环境学报》迎来更名二十周年之际,衷心祝愿学报办刊质量和学术影响力不断提高,取得新的更大成就!

参考文献:

References:

[1] 孙 辉,岳玉波,李 猛. 基于 Born 散射理论的二维黏声介质高斯波束正演[J]. 地球物理学报,2021,64(2):637-644.
SUN Hui, YUE Yu-bo, LI Meng. 2D Born Forward Modeling for Visco-acoustic Media Using Gaussian

- Beam[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(2):637-644.
- [2] YUE Y, SUN H, WU R, et al. Gaussian Beam Born Modeling for Single-scattering Waves in Visco-acoustic Media [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 18(8):1486-1490.
- [3] HUANG X G, GREENHALGH S, HAN L, et al. Generalized Effective Biot Theory and Seismic Wave Propagation in Anisotropic Poroviscoelastic Media [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2022, 127(3):e2021JB023590.
- [4] 孙建国. 复杂地表条件下地球物理场数值模拟方法评述[J]. 世界地质, 2007, 26(3):345-362.
SUN Jian-guo. Methods for Numerical Modeling of Geophysical Fields Under Complex Topographical Conditions: A Critical Review [J]. Global Geology, 2007, 26(3):345-362.
- [5] LI X, ZHANG Z, REN Q, et al. Numerical Simulation of Seismic Wave in Elastic and Viscoelastic TTI Media[J]. Earthquake Science, 2020, 33(3):116-129.
- [6] PING P, XU Y X, ZHANG Y, et al. Seismic Wave Modeling in Viscoelastic VTI Media Using Spectral Element Method [J]. Earthquake Science, 2014, 27(5):553-565.
- [7] LIN B, ZHOU B. Subdomain Chebyshev Spectral Method for 2.5-D Seismic Wave Modelling in VTI Media [C]//HAO H M, MA J W, ZHAO B L. International Geophysical Conference, Beijing, China. Beijing: Society of Exploration Geophysicists, 2018:973-976.
- [8] 徐世刚, 刘洋. 基于优化有限差分 and 混合吸收边界条件的三维 VTI 介质声波和弹性波数值模拟[J]. 地球物理学报, 2018, 61(7):2950-2968.
XU Shi-gang, LIU Yang. 3D Acoustic and Elastic VTI Modeling with Optimal Finite-difference Schemes and Hybrid Absorbing Boundary Conditions[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(7):2950-2968.
- [9] 张丽艳, 李昂, 刘建颖, 等. 宽方位地震资料方位各向异性处理:以大庆长垣三分量地震数据为例[J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(2):292-301, 310.
ZHANG Li-yan, LI Ang, LIU Jian-ying, et al. Azimuth Anisotropic Wide-azimuth Seismic Data Processing: A Case Study of Three-component Data from Daqing Placanticline[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(2):292-301, 310.
- [10] 高雪, 黄建平, 李振春, 等. 时间域黏声 VTI 介质自适应聚焦束偏移[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(4):771-781.
GAO Xue, HUANG Jian-ping, LI Zhen-chun, et al. Time-domain Adaptive Focused Beam Migration for Viscous, and VTI Media[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(4):771-781.
- [11] 李春梅, 彭才, 张旋, 等. 叠前深度偏移及储层精细预测技术在钻井轨迹调整中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(3):656-665.
LI Chun-mei, PENG Cai, ZHANG Xuan, et al. Application of Pre-stack Depth Migration and Fine Reservoir Prediction Technology in Well Trajectory Adjustment During Drilling[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(3):656-665.
- [12] 刘志强, 孙建国, 孙辉, 等. 基于自适应网格的仿真型有限差分地震波数值模拟[J]. 地球物理学报, 2016, 59(12):4654-4665.
LIU Zhi-qiang, SUN Jian-guo, SUN Hui, et al. Mimetic Finite-difference Numerical Simulation of Seismic Wave Based on the Adaptive Grid[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(12):4654-4665.
- [13] 彭更新, 刘威, 郭念民, 等. 基于时空域交错网格有限差分法的应力速度声波方程数值模拟[J]. 石油物探, 2022, 61(1):156-165, 173.
PENG Geng-xin, LIU Wei, GUO Nian-min, et al. A Time-space Domain Dispersion-relationship-based Staggered-grid Finite-difference Scheme Modeling the Stress-velocity Acoustic Wave Equation[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(1):156-165, 173.
- [14] 王静, 刘洋, 周泓宇. 时间-空间高阶精度矩形交错网格隐式有限差分声波正演模拟[J]. 地球物理学报, 2023, 66(1):368-382.
WANG Jing, LIU Yang, ZHOU Hong-yu. Temporal and Spatial High-order Accuracy Implicit Finite-difference Method for Modeling Acoustic Wave on Rectangular Staggered-grid[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(1):368-382.
- [15] HAYASHI K, BURNS D R, TOKSÖZ M N. Discontinuous-grid Finite-difference Seismic Modeling Including Surface Topography[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91(6):1750-1764.
- [16] OPRŠAL I, ZAHRADNIK J. Elastic Finite-difference Method for Irregular Grids[J]. Geophysics, 1999, 64(1):240-250.
- [17] TESSMER E, KOSLOFF D, BEHLE A. Elastic Wave Propagation Simulation in the Presence of Surface Topography [J]. Geophysical Journal International, 1992, 108(2):621-632.
- [18] HESTHOLM S, RUUD B. 2D Finite-difference Elas-

- tic Wave Modelling Including Surface Topography[J]. *Geophysical Prospecting*, 1994, 42(5): 371-390.
- [19] 董良国. 复杂地表条件下地震波传播数值模拟[J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28(3): 187-194.
DONG Liang-guo. Numerical Simulation of Seismic Wave Propagation Under Complex near Surface Conditions[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2005, 28(3): 187-194.
- [20] TARRASS I, GIRAUD L, THORE P. New Curvilinear Scheme for Elastic Wave Propagation in Presence of Curved Topography[J]. *Geophysical Prospecting*, 2011, 59(5): 889-906.
- [21] LAN H Q, ZHANG Z J. Comparative Study of the Free-surface Boundary Condition in Two-dimensional Finite-Difference Elastic Wave Field Simulation[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2011, 8(2): 275-286.
- [22] SUN Y C, ZHANG W, CHEN X F. Seismic-wave Modeling in the Presence of Surface Topography in 2D General Anisotropic Media by a Curvilinear Grid Finite-difference Method[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, 106(3): 1036-1054.
- [23] 丘磊, 田钢, 石战结, 等. 起伏地表条件下有限差分地震波数值模拟: 基于广义正交曲线坐标系[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(10): 1923-1931.
QIU Lei, TIAN Gang, SHI Zhan-jie, et al. Finite-difference Method for Seismic Wave Numerical Simulation in Presence of Topography: In Generally Orthogonal Curvilinear Coordinate System[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2012, 46(10): 1923-1931.
- [24] 李庆洋, 黄建平, 李振春, 等. 起伏地表贴体全交错网格仿真型有限差分正演模拟[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(4): 633-642.
LI Qing-yang, HUANG Jian-ping, LI Zhen-chun, et al. Undulating Surface Body-fitted Grid Seismic Modeling Based on Fully Staggered-grid Mimetic Finite Difference[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2015, 50(4): 633-642.
- [25] 刘志强. 复杂地质条件下基于正交曲线网格的地震波数值模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
LIU Zhi-qiang. Study on Seismic Wave Simulation Based on Orthogonal Curvilinear Mesh Under the Complex Geological Conditions[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [26] 刘志强, 孙建国, 孙辉, 等. 曲线坐标系下的完全匹配层吸收边界条件[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(6): 1875-1884.
LIU Zhi-qiang, SUN Jian-guo, SUN Hui, et al. A Perfectly Matched Layer Absorbing Boundary Condition Under the Curvilinear Coordinate System[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, 47(6): 1875-1884.
- [27] ZHANG Y X, JIA Y F, WANG S S Y. 2D Nearly Orthogonal Mesh Generation with Controls on Distortion Function[J]. *Journal of Computational Physics*, 2006, 218(2): 549-571.
- [28] HIXON R, TURKEL E. Compact Implicit MacCormack-type Schemes with High Accuracy[J]. *Journal of Computational Physics*, 2000, 158(1): 51-70.
- [29] BOGEY C, BAILLY C. A Family of Low Dispersive and Low Dissipative Explicit Schemes for Flow and Noise Computations[J]. *Journal of Computational Physics*, 2004, 194(1): 194-214.
- [30] 刘志强, 黄磊, 李钢柱, 等. 崎岖海底对下伏水平地层反射波特征的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(1): 274-282.
LIU Zhi-qiang, HUANG Lei, LI Gang-zhu, et al. Effect of Rugged Seabed on Reflection Wave Characters of Underlying Horizontal Strata[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(1): 274-282.
- [31] 韩复兴, 王若雯, 孙章庆, 等. 地震声波数值模拟中人工边界条件的差别与组合[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(1): 261-269.
HAN Fu-xing, WANG Ruo-wen, SUN Zhang-qing, et al. Difference and Combination of Artificial Boundary Conditions in Seismic Acoustic Numerical Simulation[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(1): 261-269.
- [32] 吴悠, 吴国忱, 李青阳, 等. 频率-空间域非均质声波有限差分模拟[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(2): 342-356.
WU You, WU Guo-chen, LI Qing-yang, et al. A Finite-difference Scheme in Frequency-space Domain to Solve Heterogeneous Acoustic Wave Equation[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2022, 57(2): 342-356.
- [33] MARTIN R, KOMATITSCH D. An Unsplit Convolutional Perfectly Matched Layer Technique Improved at Grazing Incidence for the Viscoelastic Wave Equation[J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 179(1): 333-344.