

基于衰减层析的地下浅层震动能量场重建方法^{*}马明星^{1,2} 李 剑^{1,2} 臧丹枫^{1,2} 曾 援^{1,2} 郭陈莉^{1,2}

(1. 中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室 太原 030051;

2. 中北大学信息探测与处理山西省重点实验室 太原 030051)

摘 要: 针对地下浅层震动能量场重建过程中高精度、各向异性的需求,提出一种基于衰减层析的地下浅层震动能量场重建方法。首先,根据速度场模型通过射线追踪计算出地下震动波的传播路径;其次,使用对数谱比法对地下介质的品质因子进行反演;然后,求出震动波在不同传播距离情况下的吸收衰减系数;最后,对震动波进行吸收衰减及几何扩散衰减得到地下浅层震动能量场。仿真结果表明,重建的震动能量场与正演结果的均方根误差为 7.653,单个网格的重建能量值与正演结果的最大相对误差为 15.3%,平均相对误差 3.4%,提出的方法相较于传统方法能够提升地下浅层震动能量场重建精度,对地下浅层震动能量场重建具有一定的应用参考价值。

关键词: 射线追踪;衰减层析成像;衰减系数;浅层能量场

中图分类号: TP305 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Method for reconstructing the energy field of shallow ground vibration based on attenuation tomography

Ma Mingxing^{1,2} Li Jian^{1,2} Zang Danfeng^{1,2} Zeng Yuan^{1,2} Guo Chenli^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Dynamic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Information Detection and Processing of Shanxi Province, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A method based on attenuation tomography is proposed for the high-precision and anisotropic reconstruction of underground shallow seismic energy field in response to the demand for high accuracy and anisotropy in the process. Firstly, the propagation path of underground seismic waves is calculated through ray tracing based on the velocity field model; Secondly, the logarithmic spectral ratio method is used to invert the quality factor of underground media; Then, the absorption and attenuation coefficients of seismic waves at different propagation distances are calculated; Finally, the absorption attenuation and geometric diffusion attenuation of seismic waves are used to obtain the energy field of shallow underground vibrations. The simulation results show that the root mean square error between the reconstructed vibration energy field and the forward result is 7.653, and the maximum relative error between the reconstructed energy value of a single grid and the forward result is 15.3%, with an average relative error of 3.4%. The proposed method can achieve the reconstruction of the shallow underground vibration energy field, and has certain application reference value for the reconstruction of the shallow underground vibration energy field.

Keywords: ray tracing; attenuation tomography; attenuation coefficient; shallow energy field

0 引 言

地下爆炸 P 波震动能量场重建是利用有限节点获取的 P 波震动信号,以反演的方式重建爆炸震动载荷在测试区域的强度分布,以及随时间的分布。该技术是分析爆炸能量传导模式、评估目标结构易损性的重要手段。由于地下浅层爆炸产生了非球形、不对称毁伤,同时考虑到地下浅层介质本构特

性复杂,地下工事内部存在界面间的强反射效应,爆炸震动波场群波混叠严重,造成 P 波震动能量场重建精度难以保证。

目前地下爆炸震动能量场重建主要借鉴地球物理探测的方法,主要有插值法、数值模拟法、衰减层析法等^[1],近年来国内外多位学者对上述方法进行了研究。Wang 等^[2]利用黏弹性波动方程规律对进行地下震动能量场进行插值;Fabien 等^[3]使用并行加速设备实现对黏弹性波动方程时域

数值模拟;殷厚成等^[4]分析了利用波动方程进行正演照明时不同信噪比参数对照明效果的影响;赵东风等^[6]利用震动波频谱的一致性构建衰减层析模型,并使用粒子群算法解算震动波在地下传播过程中的能量衰减;庞珂等^[6]利用互易原理实现对震动能量场重建;杨招伟等^[7]利用实测爆破震动信号分析了P波岩体中传播的吸收衰减特性;Liu等^[8-9]改进对数谱比法计算震动波传播的能量耗散情况;Yang等^[10]使用深度学习模型拟合震动波的传播规律;王小亮^[11]、辛伟瑶等^[12]和李剑等^[13]从能量场重建的角度利用深度学习提升了定位精度;闫昕蕾等^[14]结合压缩感知解决了层析成像中稀疏模型重建不准确的问题。以上研究者在地下爆炸震动能量重建方面都取得了较大进展,但仍无法适用测点稀疏、介质复杂条件下的场重建。数值模拟法可以模拟出震源在地下爆炸的过程,但网格密度、状态方程等参数的选择对其结果有较大影响,因此其重建精度较低;利用拟合插值法来重建地下爆炸震动能量场,其重建精度严重依赖测试点数量;衰减层析法能够有效重建地下爆炸震动波的能量吸收耗散情况,但不同于地下深层,浅层介质复杂会影响其重建精度。

针对传统衰减层析成像方法在地下浅层介质复杂情况下重建不精确,无法实现各向异性重建的问题,本文提出了一种基于衰减层析成像的地下浅层震动能量场重建方法,联合走时层析建立的速度模型,利用射线追踪方法准确计算震动波传播路径,然后对地下品质因子进行反演,进而实现地下爆炸震动能量场重建。射线追踪算法能够准确计算地下浅层复杂介质中震动波传播路径,建立更精确的层析模型,提升重建精度。

1 地下衰减层析成像基本原理

根据 Futterman 吸收衰减模型可知^[15],粘弹性介质对震动波传播存在吸收衰减作用,设震动波在参考点的振幅为 A_0 ,震动波因吸收衰减作用传播 x m 后振幅衰减为 A ,且有:

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad (1)$$

其中, α 为衰减系数。设频率为 f , 速度为 v , 品质因子为 Q , 则衰减系数 α 可由式(2)计算:

$$\alpha = \frac{\pi f}{Qv} \quad (2)$$

将测试区域网格化后的层析模型示意图如图1所示,设共有 M 个传感器, N 个网格,第 i 条射线穿过 j 个网格,则结合式(1)和(2),可得第 i 个传感器的信号振幅谱为:

$$A_i(f) = A_0(f) \prod_{j=1}^N \exp\left(-\frac{\pi f t_{ij}}{Q_j}\right) \quad (3)$$

式中: t_{ij} 是第 i 条射线在第 j 个网格中的旅行时。对式(3)两边同时取对数可得:

$$\ln\left(\frac{A_i}{A_0}\right) = \sum_{j=1}^N \left(\frac{1}{Q_j}\right) \cdot (-\pi f t_{ij}) \quad (4)$$

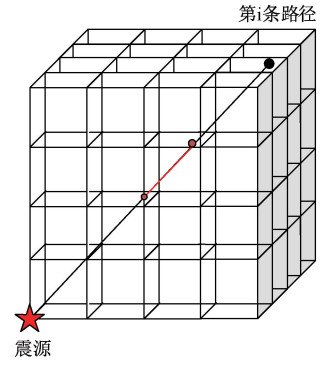


图1 层析模型示意图

谱比法通过在有效频率范围内拟合对数谱比与频率的线性关系建立层析方程组:

$$k'_i = \arg\min_k (L_i(f) - kf - b)^2 \quad (5)$$

$$L_i(f) = \ln\left(\frac{A_i}{A_0}\right) \quad (6)$$

其中, k, b 分别为待拟合直线的真实斜率和截距, k'_i 为第 i 个传感器与参考信号的对数谱比在有效频率范围内拟合直线的斜率,则衰减层析方程组为:

$$k'_i = \sum_{j=1}^N q_j l_{ij} \quad (7)$$

$$l_{ij} = -\pi \left(\frac{r_{ij}}{v_{ij}}\right) \quad (8)$$

$$q_j = \frac{1}{Q_j} \quad (9)$$

其中, l_{ij} 为第 i 条射线在第 j 个网格的衰减旅行时, r_{ij} 为第 i 条射线穿过第 j 个网格距离, q_j 为第 j 个网格的品质因子的倒数,将式(7)进一步写成矩阵形式,构成衰减层析模型:

$$\mathbf{Lq} = \mathbf{K}' \quad (10)$$

其中, $\mathbf{L} = (l_{ij})_{(M-1) \times N}$ 称作衰减层析核函数矩阵, $\mathbf{q} = (q_j)_{N \times 1}$ 为衰减特征向量, $\mathbf{K}' = (k'_i)_{(M-1) \times 1}$ 为对数能量比特征向量, \mathbf{L} 矩阵中的元素与震源和传感器之间的传播射线穿过网格的距离有关,并非所有的网格都有射线穿过,所以式(10)是一个大型欠定方程组,通过迭代算法对式(10)求解,进而得到衰减系数 α 。

2 基于衰减层析成像的地下P波震动能量场重建方法

2.1 构建复杂介质下层析核函数矩阵

快速扫描法的主要思想是基于因果关系将走时场传播的方向分成有限个组,对于每一组分别利用高斯-赛德尔迭代方法求解逆风差分格式离散化后的非线性方程组,三维情况下离散后的程函方程如式(11)所示。

$$[(t_{i,j,k}^h - t_{x\min}^h)^+]^2 + [(t_{i,j,k}^h - t_{y\min}^h)^+]^2 + [(t_{i,j,k}^h - t_{z\min}^h)^+]^2 = s_{i,j,k}^2 h^2$$

$$(f)^+ = \begin{cases} f, & f > 0 \\ 0, & f \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中, $s_{i,j,k}$ 表示在 x, y, z 三轴索引为 i, j, k 时网格的慢度值, h 表示网格的长度大小, $t_{x\min}^h = \min(t_{i-1,j,k}^h, t_{i+1,j,k}^h)$ 表示 x 轴相邻网格节点的最小走时; $t_{y\min}^h = \min(t_{i,j-1,k}^h, t_{i,j+1,k}^h)$ 表示 y 轴相邻网格节点的最小走时; $t_{z\min}^h = \min(t_{i,j,k-1}^h, t_{i,j,k+1}^h)$ 表示 z 轴相邻网格节点的最小走时。每一次高斯-赛德尔迭代也称为一次扫描, 每次扫描按一定的方向求解沿该方向传播的走时场, 完成所有方向扫描及求解出走时场。

层析核函数矩阵 $\mathbf{L} = (l_{ij})_{(M-1) \times N}$ 的求取关键在于求取第 i 条传播射线在穿过第 j 个网格的距离 r_{ij} 。本文结合射线方向向量, 确定各向异性介质中有射线穿过网格的索引, 图 2 展示了 4 种射线方向向量不同的情况。

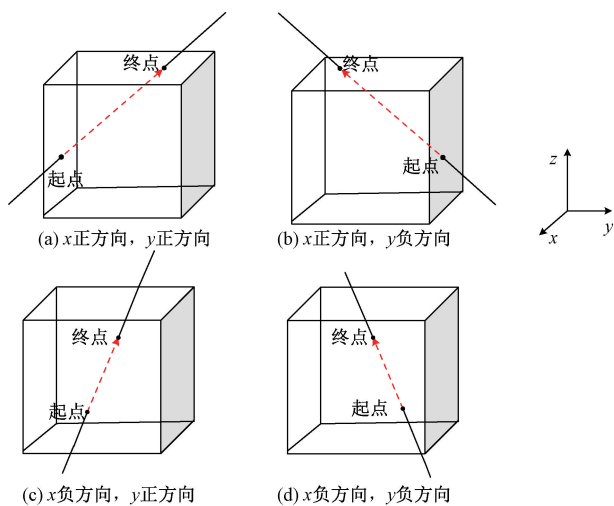


图 2 射线穿过网格的基本情况

穿过网格的射线距离 r_{ij} 求取步骤如下:

- 1) 建立网格索引坐标系;
- 2) 根据射线与网格的交点计算网格内线段的方向向量;
- 3) 根据方向向量判断射线的网格的索引;
- 4) 计算两交点的距离, 并根据步骤三求出的网格索引排列距离值, 代入式(8)得到层析核函数矩阵。

2.2 建立对数能量比特特征向量

地下爆炸震动信号通常认为是一宽频谱信号, 对数能量比向量是反映地下爆炸震动波衰减的特征参数。对数能量比特特征向量通过拟合对数谱与频率的直线关系提取层对信号的吸收衰减特征。具体步骤如下:

- 1) 求取所有非参考信号的振幅谱;
- 2) 根据信号特征选择有效频段;
- 3) 最小二乘法拟合对数振幅谱与有效频段的直线关系, 获取直线斜率。

2.3 反演能量场衰减系数分布

能量场衰减特征反演即为求衰减层析模型式(10), 在

实际反演重建中, 层析核函数矩阵通常是欠定矩阵, 方程难以在高维待求向量空间中收敛至准确解, 需采用数值逼近的方法。本文使用联合代数重建算法(simultaneous algebraic reconstruction technique, SART)解算方程组, SART算法的迭代公式如式(12)所示。

$$q_j^{k+1} = q_j^k + \frac{\lambda}{\sum_{i \in I_\phi} l_{ij}} \cdot \frac{\sum_{i \in I_\phi} l_{ij} \cdot (k_i' - \sum_{j=1}^J l_{ij} q_j^k)}{\sum_{j=1}^J l_{ij}} \quad (12)$$

其中, λ 为松弛因子, I_ϕ 为投影集合, q_j^{k+1}, q_j^k 为第 $k+1$ 次和第 k 次迭代时第 j 个网格中 q 值, 迭代完成之后, 得到向量 \mathbf{q} 之后代入式(2)求解衰减系数。

2.4 重建 P 波震动能场

地下震动波在传播过程中, 除了考虑因介质材料的不完全弹性导致的衰减以外, 还应考虑在传播过程中波阵面增大导致的几何衰减, 建立能量场重建计算模型:

$$A_j = x^{-n} A_0 \prod_{j=1}^N e^{-a_j x_j} = x^{-n} A_0 \prod_{j=1}^N \exp\left(\frac{2\pi f t_j}{Q_j}\right) \quad (13)$$

其中, A_j 表示第 j 个网格的信号幅度谱, $j = 1, 2, \dots, N, t_j$ 和 Q_j 分别表示第 j 个网格中的旅行时以及 Q 值, 同时引入几何阻尼 x^{-n} (其中 $n = 0, n = 0.5, n = 1$, 分别代表平面波、柱面波和球面波) 对震动波进行几何衰减。

3 实验方案

3.1 地下浅层介质结构

本文设置建模区域长 60 m、宽 60 m、深 60 m, 选取正东方向为 x 轴正方向, 正北方向为 y 轴正方向, 设定地下 60 m 所在的平面为 $z = 0$ 的平面, z 轴正方向自下向上。

为模拟地下浅层层状介质中的随机性, 本文选取高斯椭圆自相关函数作为自相关函数, 三轴自相关长度均设为 1 m, 即 $a = 1, b = 1, c = 1$ 。设三层层状介质分别为背景速度为 1 000、2 000、3 000 m/s, 随机扰动标准差设为 0.05, 密度 ρ 设为 2 000 kg/m³ 生成 60×60×60 数据体, 离散网格长宽高皆为 1 m, 地下浅层介质速度场建模可视化如图 3 所示。

3.2 震源及传感器位置标定

在建立的坐标系中, 设置震源坐标为 (30, 30, 5), 传感器布设在 $z = 55$ 上, x 轴方向以 $x = 5$ 为起点, 10 m 为间隔等间距排列传感器 6 个, y 轴方向以相同方式排列传感器, 组成共由 36 个传感器形成正方形面阵, 震源及传感器布设如图 4 所示。

3.3 谱比斜率拟合

震源使用 40 Hz 的雷克子波, 并使子波的最小相位延时时为 0.2 s, 传感器采样率设置为 2 ksp/s, 采样 1 s 的数据, 信号使用褶积模型生成^[16], 并向生成信号中加入信噪比为 20 dB 的高斯白噪声。通过傅里叶变换求信号幅度谱, 频率分辨率为 1 Hz, 使用最先收到信号的传感器信号作为参

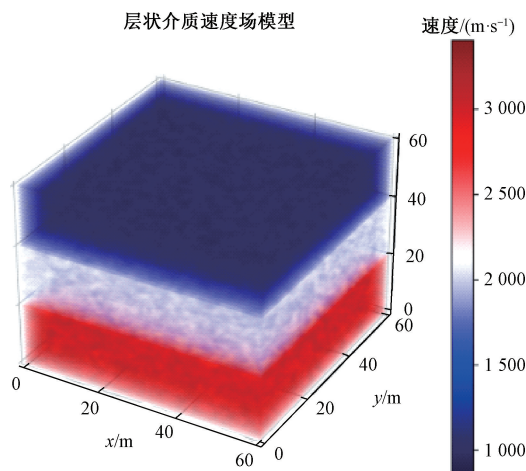


图 3 地下浅层介质速度场

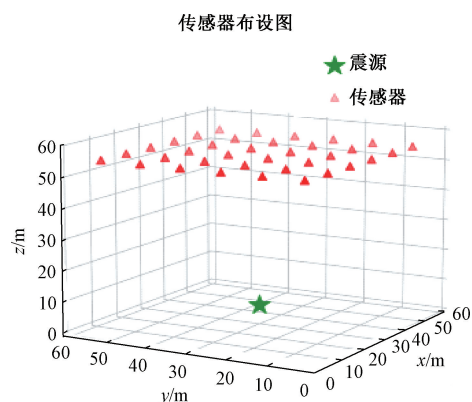


图 4 传感器布设图

考信号,频率选取 10 Hz 到 80 Hz 的频带范围进行对数谱比拟合。

图 5 展示了仿真生成的含噪震动信号,由图 6 可以看出对数谱比与频率拟合的直线的斜率反映了震动波传播过

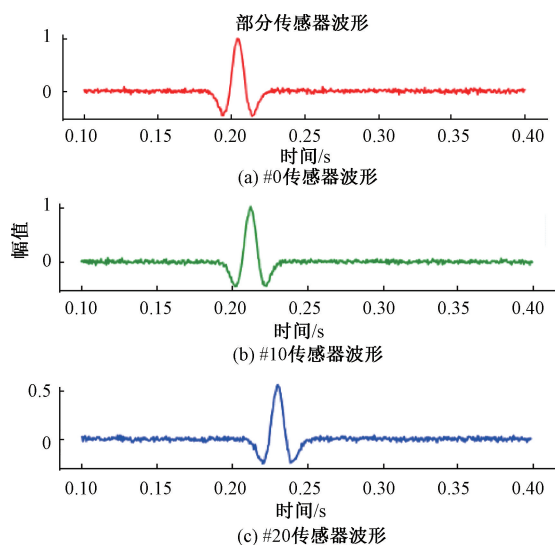


图 5 仿真生成传感器信号

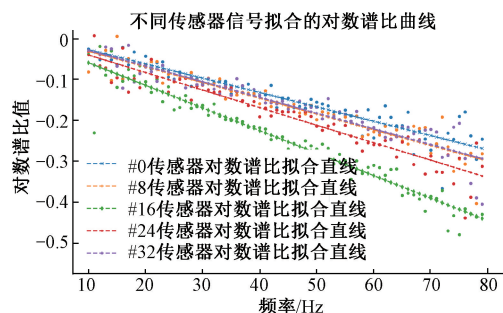


图 6 对数谱比斜率拟合

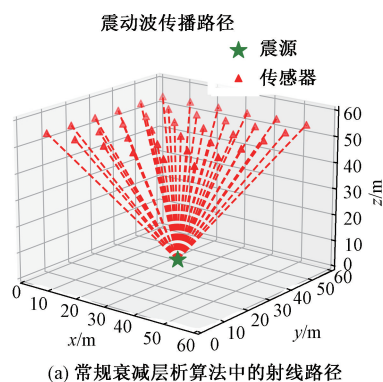
程中的吸收衰减信息;同时,信号的信噪比严重影响拟合斜率的准确性,选择合适的频段拟合有助于提高求解的准确性。

4 实验结果

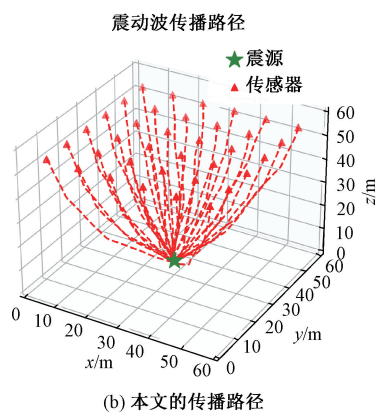
4.1 震动波传播路径计算

为减小边界效应对计算的影响,在建模区域的 6 个表面分别设置 5 m 厚的缓冲区,根据震源位置坐标、传感器位置坐标及速度场模型到时信息,根据费曼原理搜索射线路径,得到射线网格交点的坐标及每个传感器采集到的震动信号的旅行时信息。

图 7 射线表示震源到传感器之间震动波的传播路径,常规衰减层析成像中认为震动波传播路径为直线,如图 7(a)所示,但由于浅层介质本构关系复杂,常规方法中



(a) 常规衰减层析算法中的射线路径



(b) 本文的传播路径

图 7 两种方法震动波传播路径

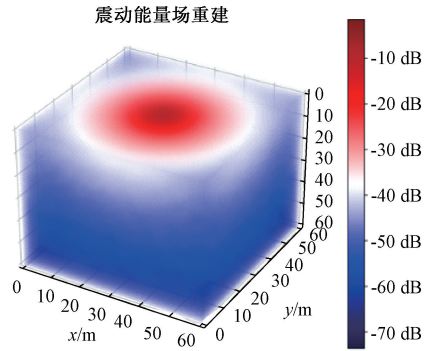
的直线传播理论不能描述震动波传播过程中出现折射、反射等现象。图 7(b)展示了本文方法的射线路径,可以看出地下浅层层状介质的复杂性导致层状介质间发生明显折射现象,层状介质内射线出现“抖动”现象,更符合地下浅层介质中震动波传播模型。

4.2 层析模型解算

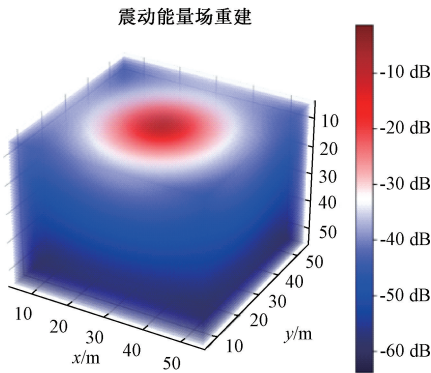
本文使用 SART 算法解算层析成像模型,算法迭代次数设置为 50 次,算法松弛因子 λ 通过对均值为 0.5 方差为 1 的高斯分布进行采样得到,大型欠定方程在解算时,解的初始值的设定对方程解的准确性至关重要,初始值与准确解差距过大会造成方程数值解难以收敛的问题。本文在已知速度模型的基础上对方程解进行初始化,对于未被射线约束的值使用李氏经验公式约束。

4.3 能量场重建

本文通过衰减层析成像反演得到的衰减系数,进而计算吸收衰减导致的震动波能量变化,取式(13) $n = 1$ 对震动波做几何衰减^[17]。图 8 为震动能量场重建结果。



(a) 常规衰减层析成像方法重建结果



(b) 本文方法重建结果

图 8 震动能量场重建结果

图 8 结合了几何扩散衰减与吸收衰减两方面因素,展示了震源幅度的相对能量衰减,图 8(a)图为常规衰减层析成像方法的重建结果,图 8(b)为本文方法的重建结果,能看出由于常规方法将震动波路径当作直线,相比本文方法将震动波传播路径当作折线传播路径更短,导致震动能量场重建结果比本文方法偏大。

4.4 评价指标

为客观评估重建的准确性,选取均方根误差 RMSE、相对误差 RE 作为评判标准, RMSE 能反映重建区域的整体误差,最大相对误差 RE_{\max} 反映单个网格重建的最大误差。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (y_j - \hat{y}_j)^2} \tag{14}$$

$$RE = \frac{|\hat{y}_j - y_j|}{y_j} \times 100\% \tag{15}$$

其中, \hat{y}_j 为第 j 个网格的重建后的能量值, y_j 为第 j 个网格通过黏弹性波动方程正演得到的能量值, J 为重建区域的总网格数。

图 9 展示了两种方法重建能量场相较于黏弹性波动方程正演得到的能量场最大相对误差 RE_{\max} 为 15.31%,该指标说明两种方法重建结果的误差的上限;平均相对误差 3.4%。

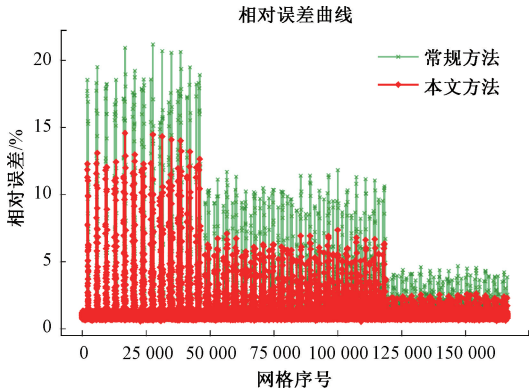


图 9 能量场重建相对误差曲线

由表 1 同样可以看出,本文提出的方法不论是反映整体误差大小的 RMSE,还是反映局部误差大小的最大相对 RE_{\max} 都在较低水平。

表 1 震动能量场重建精度评价

评价指标	RMSE	$RE_{\max}/\%$	平均相对误差/ $\%$
常规方法	11.757	22.26	8.9
本文方法	7.653	15.31	3.4

综上,本文提出的重建方法相较于黏弹性波动方程正演得到的能量场能够实现 RMSE 值为 7.653,最大相对误差 RE_{\max} 为 15.31%的水平,相较于常规方法重建效果有明显提升,说明本文提出的方法能够有效提升地下浅层震动能量场重建精度。

5 结 论

本文提出了一种基于衰减层析的地下浅层震动能量场重建方法。该方法首先进行射线追踪计算出震动波传播路径,然后利用地质勘探领域中衰减层析的方法计算震动波在地下的吸收衰减;最后利用几何衰减因子对吸收衰减后

的震动波进行几何衰减得到震动能量场。

通过仿真实验得到,本文提出的方法重建的能量场与仿真正演得到的能量场之间的均方根误差和最大相对误差都保持在较低水平,相较于传统方法,在地下浅层震动能量场重建精度上得到提升,验证了本文提出的方法的可行性,对地下浅层复杂空间震动能量场重建具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] PROVENZANO G, BROSSIER R, METIVIER L. Robust and efficient waveform-based velocity-model building by optimal transport in the pseudotime domain: Methodology[J]. *Geophysics: Journal of the Society of Exploration Geophysicists*, 2023.
- [2] WANG Y, HU X, HARRIS J M, et al. Crosswell seismic imaging using Q-compensated viscoelastic reverse time migration with explicit stabilization[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-11.
- [3] FABIEN O G, GLOAGUEN E, GIROUX B. Time-domain seismic modeling in viscoelastic media for full waveform inversion on heterogeneous computing platforms with OpenCL[J]. *Computers & Geosciences*, 2017, 100: 142-155.
- [4] 殷厚成,彭代平,郑军.地震信噪比照明分析研究及应用[J]. *石油物探*, 2020, 59(6): 844-850, 926.
- [5] 赵东风,梁伽福,马雄,等.频谱一致性Q因子反演方法[J]. *石油物探*, 2023, 62(1): 95-104.
- [6] 庞珂,李剑,苏新彦,等.地下震源能量场快速扫描定位算法[J]. *探测与控制学报*, 2023, 45(2): 92-98.
- [7] 杨招伟,卢文波,陈明,等.基于实测爆破振动计算岩体介质P波品质因子[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(6):

105-114.

- [8] LIU N, WEI S, YANG Y, et al. Seismic attenuation estimation using an enhanced log spectral ratio method[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19(8025405): 1-5.
- [9] LIU N, ZHANG B, GAO J H, et al. Seismic anelastic attenuation estimation using prestack seismic gathers[J]. *Geophysics*, 2019, 84(6): M37-M49.
- [10] YANG F, MA J. Deep-learning inversion: A next generation seismic velocity-model building method[J]. *Geophysics*, 2019: 1-133.
- [11] 王小亮. 基于深度学习的地下浅层震源扫描定位方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2021.
- [12] 辛伟瑶, 李剑, 王小亮, 等. 基于深度学习的地下浅层震源定位方法[J]. *计算机工程*, 2020, 46(9): 292-297.
- [13] 李剑, 贺铭, 韩焱, 等. 基于走时-偏振角度信息的地下震源定位方法[J]. *探测与控制学报*, 2020, 42(1): 29-34.
- [14] 闫昕蕾, 李剑, 孔慧华, 等. 基于压缩感知的冲击波超压场重建方法[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(2): 84-90.
- [15] FUTTERMAN W I. Dispersive body waves [J]. *Geophys. Res.*, 1962, 67(13): 5279-5291.
- [16] 贾宝新, 刘国昱, 周琳力. 基于褶积原理和改进广义S变换的震动波衰减补偿试验研究[J]. *地震学报*, 2023, 45(1): 116-125.
- [17] 吴微微, 苏金蓉, 魏娅玲, 等. 四川地区介质衰减、场地响应与震级测定的讨论[J]. *地震地质*, 2016, 38(4): 1005-1018.

作者简介

李剑, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为多维信号获取系统嵌入式开发、阵列化信号处理与重建等。

E-mail: lijian@nuc.edu.cn