

基于短排列相关叠加道集的面波分析软件开发

李岚波, 李红星, 朱 敏

(东华理工大学 地球物理与空间探测学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 现有国内外地震数据处理软件大部分算法不够透明、代码闭源, 且应用的多道面波分析方法(MASW)在某物理点的成像结果为中心位于该点的整个接收排列下伏地质单元综合影响的结果, 其横向分辨率存在一定限制。针对现有软件的局限性, 结合短排列相关叠加道集多道面波(SCG-MASW)分析方法, 通过提取具有共同接收位置的短排列道集进行相关运算与叠加, 形成新的短排列相关叠加道集用于面波分析。与传统 MASW 方法相比, SCG-MASW 可使速度异常边界更加清晰、横向变化特征更加突出, 在保持探测深度和频散曲线提取质量基本一致的情况下, 提高了地下横波速度结构成像的横向分辨能力。在此基础上, 利用 MATLAB 平台开发 SCG-MASW 分析软件, 设计多道面波地震数据读取、短排列道集设置、频散曲线提取、频散曲线智能优化反演与速度剖面图绘制等一体化流程, 为多道面波数据处理提供了一套便捷、高效的专用工具。

关键词: 地下空间探测; 短排列相关叠加道集; 多道面波分析方法; 软件开发

DOI: 10.11907/rjdk.251752

中图分类号: TP311.52

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(XXXX)0XX-0001-08

扫描二维码阅读全文:



Software Development for Multichannel Analysis of Surface Waves Based on Short Array Stacked Correlation Gather

LI Lanbo, LI Hongxing, ZHU Min

(School of Geophysics and Space Exploration, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Most of the existing seismic data processing software, both domestic and international, features opaque algorithms and closed-source codes. Moreover, the application of the multi-channel surface wave analysis method (MASW) results in imaging outcomes at a certain physical point that are influenced by the underlying geological units beneath the entire receiving array centered at that point, thus limiting its lateral resolution. To address the limitations of existing software, we have integrated the Short Common Gather (SCG) related stacking MASW analysis method. This involves extracting short-spread gathers with common receiving locations for correlation and stacking, forming new SCG-MASW for surface wave analysis. Compared to traditional MASW methods, SCG-MASW enhances the clarity of velocity anomaly boundaries and accentuates lateral variation characteristics. It improves the lateral resolution capability of underground shear wave velocity structure imaging while maintaining consistent detection depth and dispersion curve extraction quality. Based on this, we have developed SCG-MASW analysis software using the MATLAB platform. We have designed an integrated workflow encompassing multi-channel surface wave seismic data reading, short-spread gather setting, dispersion curve extraction, intelligent optimization inversion of dispersion curves, and velocity profile plotting. This provides a convenient and efficient specialized tool for multi-channel surface wave data processing.

Key Words: subsurface exploration; short array stacked correlation gather; multichannel analysis of surface waves; software development

0 引言

随着城市地下空间开发、工程勘察和地质灾害调查需

求的不断增加, 浅层地下结构高分辨率探测成为工程地球物理研究的重要方向。横波速度是反映地下介质力学性质的重要参数, 基于瑞雷面波频散特性的多道面波分析方法((Multi-channel Analysis of Surface-Wave, MASW)是研

收稿日期: 2025-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(42474197); 江西省自然科学基金重点项目(20242BAB26049); 赣鄱俊才支持计划—主要学科学术和技术带头人培养项目(20243BCE51012)

作者简介: 李岚波(2000-), 男, 东华理工大学地球物理与空间探测学院硕士研究生, 研究方向为起伏地形短排列多道面波分析方法研究与软件开发; 李红星(1981-), 男, 博士, 东华理工大学地球物理与空间探测学院教授、博士生导师, 研究方向为地球探测与信息技术、勘查技术。本文通讯作者: 李红星。

究地下横波速度结构最简便、最有效的方法,主要步骤包括多道面波数据采集、频散曲线提取以及横波速度结构反演^[1-3]。MASW 方法的成像点结果受到排列长度内地下介质的综合影响,故横向分辨率受到一定限制。为提高 MASW 的水平分辨率, Hayashi 等^[4]提出共中心点互相关道集多道面波分析方法(Common Midpoint Cross-Correlation Multi-channel Analysis of Surface Waves, CMPCC),通过提取具有共中心点的相关道集,将具有相同道间距的相关道叠加,按照道间距排列形成新的用于多道面波分析的道集。研究表明, CMPCC 方法能在一定程度上提高地下横波速度结构成像的横向分辨率,但在单炮记录排列长度、道数和叠加足够多时才能提高横向分辨率,当参与分析的数据量不足时,其优势并不明显^[5-6]。此外,由于参与频散分析的最大道间距仍接近原始排列长度,其水平方向平均效应并未得到根本改善^[7]。因此, Li 等^[8]提出短排列相关叠加道集多道面波分析方法(Multichannel Analysis of Surface Waves Based on Short Array Stacked Correlation Gather, SCG-MASW),该方法在保障频散曲线提取质量和探测深度的前提下获得了较高的横向分辨率。

随着面波勘探理论研究的不断深入,频散曲线提取方法、频散曲线反演方法以及高分辨率成像技术得到快速发展。为实现相关理论方法的工程化应用,国内外学者开发了多种面波数据处理与解释软件。国外传统的正反演软件多采用 Fortran 或 C++ 等环境进行开发,但这些软件的处理算法大多不够透明且代码闭源。例如,美国堪萨斯地质调查所开发的 MASW 地震数据处理软件 SurfSeis 反演过程透明度低,用户无法直接、精细地调整反演算法的核心参数,使有经验的研究人员无法根据先验地质知识进行高级调整。软件使用的 MASW 方法的探测深度取决于采集到的面波低频成分,当野外采集缺乏低频信号时, SurfSeis 在反演深层结构时很大程度上依赖于算法的外推,且用户无法自行添加新模块或算法,在特殊应用场景中的灵活性不如开源软件(如 Geopsy)或可编程平台(如基于 Python 或 MATLAB 的工具箱)。开源软件 Geopsy 具有着较高的使用自由度,但使用该软件的技术门槛较高,用户必须深刻理解波场变换(如波数变换)、反演理论、统计学等基础概念,且大量参数需要用户手动设置,如果不知道这些参数的含义和影响,几乎无法得到可靠结果。与 SurfSeis 提供的“数据导入—提取频散曲线—反演—生成剖面”的流水线不同, Geopsy 更像是一个工具箱,用户需要自己构建处理流程,如频散图像提取、反演执行等步骤均需要大量人工干预,基阶界定和频散点拾取均高度依赖用户经验,不同使用者对同一组数据可能得出差异很大的频散曲线,从而导致反演结果不一致且无法及时发现出错点。国内方面,中国石油化工集团开发的 π -Frame 平台具有较强的数据管理与处理能力,在地震数据处理与解释领域得到广泛应用,但其主要面向常规地震数据处理领域,在面波频散分析、频散曲线自动提取以及高分辨率面波成像等方面的针对性功能相对有限。

针对现有面波分析软件算法透明度不足、横向分辨率受限以及扩展性较差等问题,本文基于 MATLAB App Designer 平台设计开发了一套基于短排列相关叠加道集,兼具开放性、易用性和高分辨率成像能力的面波分析软件。软件采用模块化设计,实现了地震数据读取、频散曲线提取、频散曲线反演以及速度剖面绘制等功能,为多道面波数据处理提供了一体化解决方案。在频散分析方面,软件采用 SCG-MASW 方法,通过构建短排列相关叠加道集进行频散能谱计算,在保证频散曲线提取质量和探测深度的基础上提高了地下横波速度结构成像的横向分辨能力。同时,软件集成 f-k 变换法^[9]、 τ -p 变换法^[10]、相移法^[11]、频率分解倾斜叠加法^[12]、矢量波数变换法^[13]、改进矢量波数变换法以及改进矢量波数变换—相移联合法^[14]等多种频散曲线提取方法,以满足不同数据条件下的频散分析需求。在频散曲线反演方面,软件采用非线性全局优化算法——饥饿游戏搜索算法(Hunger Games Search, HGS)进行反演计算^[15-16]。该算法能在较大的参数空间内搜索最优模型,降低反演结果对初始模型的依赖,提高复杂地层条件下频散曲线反演的稳定性和适应性。该软件支持 MAT、SEG-Y 和 SEG-2 等常用地震数据格式,具有较好的实用性、可扩展性和可编程性,适用于工程勘察、城市地质调查、地下空间探测及地质灾害调查等应用场景。

1 软件设计

本研究使用的开发平台 MATLAB App Designer 利用事件驱动编程范式来构建交互式应用程序,主要功能模块为文件读取模块、频散曲线拾取模块、频散曲线反演模块、速度剖面图绘制模块。界面表如表 1 所示。

Table 1 UI interface list

表 1 UI 界面表

函数名称	界面
MainApp.mlapp	软件主界面
DispersionCurve.mlapp	频散曲线提取界面
Inversion.mlapp	频散曲线反演界面
Profiledraw.mlapp	绘制速度剖面图界面

首先,用户通过文件读取模块对地震数据进行提取,将提取的单炮地震数据转换到时间—空间域($t-x$)中的面波地震记录。在参数预设区,用户给单炮记录道数 Ntrace 和短排列叠加道数 Nstack 赋值,当 Ntrace=Nstack 时,选用 MASW 方法对面波数据进行分析;当 Ntrace $\neq$ Nstack 时,选用 SCG-MASW 方法对面波数据进行分析;其次,选取合适的拾取方法绘制频散能谱图,保存频散曲线数据;再次,在频散曲线反演模块,用户打开保存的频散曲线数据进行相关反演参数设置,绘制反演模型收敛曲线图、拟合图和一维反演结果图,保存反演数据;最后,在速度剖面图绘制模块,选择保存的频散曲线数据或反演结果数据进行相速度剖面图或横波速度剖面图的绘制。软件整体工作结构如图 1 所示。

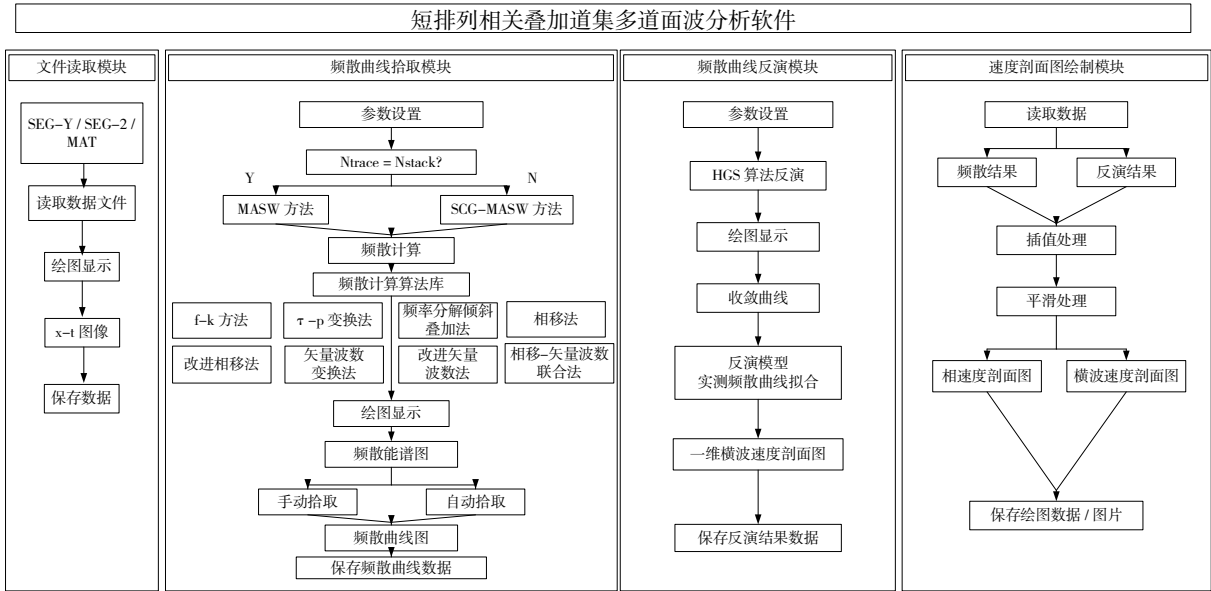


Fig. 1 Overall working structure of the software
图1 软件整体工作结构

1.1 文件读取模块

在 MATLAB 中读取 SEG-Y 格式文件,一种方法是使用 SegyMAT 工具箱,其是一组 M 文件,用于在 MATLAB 中读取和写入 SEG-Y 文件;另一种方法是在频散曲线提取界面后台编译自定义函数 segyread,跳过道头信息直接读取 SEG-Y 格式的地震数据。

1.2 频散曲线提取模块

如图 2 所示,在频散曲线提取 UI 界面中,左侧为参数预设区,包含单炮记录道数 N_{trace} 、叠加道数 N_{stack} 、速度区间低值 V_{min} 、速度区间高值 V_{max} 、频率区间低值 f_{min} 、频率区间高值 f_{max} 、频率显示间隔 df 、时间采样间隔 dt 、道间距 dx 、速度间隔 dv 、偏移距 $offset$ 。根据用户预先设置的参数,软件自动读取地震数据变量及炮集信息。SCG-MASW 与 MASW 的数据采集观测系统一致,均采用多炮多道滚动观测方式。首先对每个炮集中相同接收位置短排列道集中的每道与最小炮检距道(相关参考道)进行相关计算;其次将不同炮文件中相同位置短排列相关道集的对应道在时间域进行叠加,形成最终用于计算频散曲线的短排列相关叠加道集(SCG 道集)。叠加操作可以综合利用不同炮的短排列道集来保证频散计算精度,尤其是频散的低频部分;最后基于 MASW 的频散曲线计算方法(如 $f-k$ 变换法、相移法等),利用 SCG 道集计算频散曲线,作为短排列相关叠加道集中心位置的瑞雷面波频散结果。

在右侧控制区点击开始开关获取数据的变量名以及炮数信息,以便选择提取范围。确定提取范围后,点击绘制地震记录图,软件根据当前界面参数设置读取单炮记录道数 N_{trace} 和叠加道数 N_{stack} ,并据此判断所采用的频散分析方法。两个数值相等时绘制原始数据地震记录图,不相等时绘制叠加道数图。随后执行不同的频散曲线提取算法并绘制频散能谱图。手动拾取通过 `ginput` 函数接收用户鼠标输入,取点结束后,恢复 `HandleVisibility` 属性。



Fig. 2 Function area of dispersion curve extraction module
图2 频散曲线提取模块功能区

对于鼠标取到的点进行双重循环,一是判定点是否在 `ginput` 选择范围内;二是遍历每一列频率,寻找该列最大能量值。自动拾取使用 `createMask` 函数从用户绘制的形状中创建一个掩码定义用户选择的区域与地震数据 `app.EN` 点乘,达到仅保留用户选择区域内数据,而其他区域设置为 `NaN` 的目的。

1.3 频散曲线反演模块

如图 3 所示,在频散曲线反演 UI 界面中,参数预设区

的HGS调节参数影响搜索过程的收敛速度和质量,设置较小的值会使算法更加精细地搜索,进而提高解的精确度;而较大的值会鼓励算法在更广泛的空间搜索。 $xsLH$ 表示模型参数上下界差的比例,用于定义搜索空间的一个范围,影响算法搜索的起始点;BL表示面波波长换算深度的比例。绘图组件窗口包含绘制频散曲线拟合结果、绘制目标函数收敛曲线、绘制反演一维结果3个按键,结果计算完毕后可进行绘图。

Fig. 3 Functional area of dispersion curve inversion module

图3 频散曲线反演功能区

1.4 速度剖面图绘制模块

如图4所示,在速度剖面图绘制界面,通过菜单栏文件功能打开之前频散曲线提取或反演后的数据,在参数预设区设置插值点数、高斯平滑标准差,以便用户直观比较绘图效果。在读取数据结果面板的列表中展示道集原始数据、插值后数据、平滑后数据,需要时可导出.xlsx文件。

2 数据测试

2.1 实验设置

为深入验证软件功能,使用Tesseral波场模拟软件建立一个断层地质模型(见图5),通过有限差分数值方法模拟弹性波全波场地震记录。采用主频为35 Hz的雷克子波作为震源子波,设置24道接收排列,道间距为2 m,炮间距为2 m,采样长度为1 s,采样间隔为1 ms,获得101个单炮地震记录。所用软件版本为MATLAB 2024a, Tesseral 2D 7.0.6; CPU 配置为 Intel(R) Core(TM) i5-10300H CPU @ 2.50GHz (8 CPUs);操作系统为 Windows 10。

Fig. 4 Function area of velocity profile drawing module

图4 速度剖面绘制块功能区

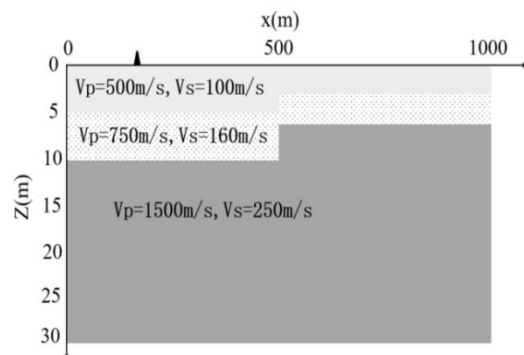


Fig. 5 Fault geological model

图5 断层地质模型

2.2 频散曲线提取

在频散曲线提取界面菜单栏文件打开建立好的断层地质模型数据,将开始开关置于on,工作日志中会实时反馈所打开文件的信息(该文件共101炮)。在提取范围窗口中,选定1~101炮,对所设模型数据进行全范围提取。本次测试以第一炮为例,点击绘制地震记录图,在参数预设区设置单炮记录道数 $Ntrace$ 、叠加道数 $Nstack$ 。其他参数设置:速度区间低值 $Vmin=50$ m/s、速度区间高值 $Vmax=300$ m/s、频率区间低值 $fmin=4$ Hz、频率区间高值 $fmax=50$ Hz、频率显示间隔 $df=0.5$ hz、时间采样间隔 $dt=0.001$ s、道间距 $dx=2$ m、速度间隔 $dv=1$ m/s、偏移距 $offset=2$ m。图6为MASW方法在 $Ntrace=Nstack=24$ 时绘制的地震记录图。图7为SCG-MASW方法在 $Ntrace=24$, $Nstack=6$ 时绘制的叠加道数图。

在频散曲线算法选择的下拉框中选择相移法绘制频散能谱图。如图8和图9所示,与MASW方法相比,SCG-MASW方法绘制的频散能谱图包含更多低频信息。这是由于MASW方法成像点的低频部分能量缺失,而SCG-MASW可综合利用不同激发点相同位置的短接收排列来获得低频部分,从而提高深部区域分辨率。

绘制频散能谱图后,在频散曲线提取方法的下拉框中

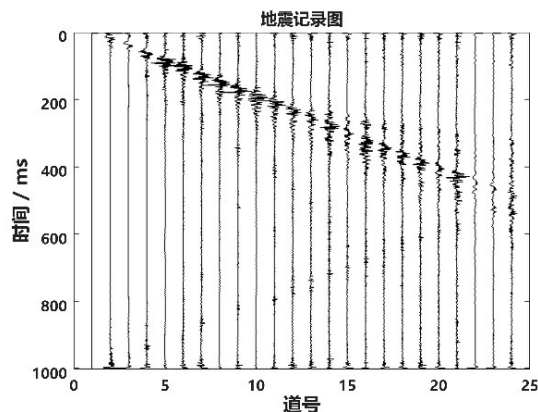


Fig. 6 Seismic record diagram plotted by MASW method

图6 MASW方法绘制的地震记录图

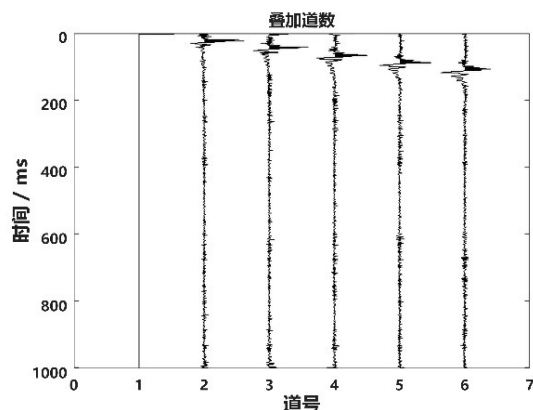


Fig. 7 Stacked trace count diagram plotted by SCG-MASW method

图7 SCG-MASW方法绘制的叠加道数图

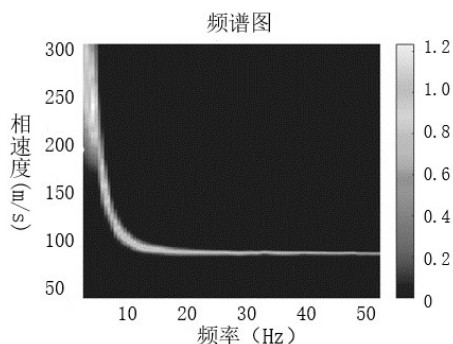


Fig. 8 Frequency dispersion energy spectrum diagram plotted by MASW method

图8 MASW方法绘制的频散能谱图

选择自动拾取矩形区域进行大范围框选,以此提取频散曲线。图10和图11分别为MASW和SCG-MASW两种方法提取的频散曲线。可以看出,与MASW方法相比,SCG-MASW方法提取的频散能谱主能量峰更加突出,能量泄漏现象有所减弱,在降低排列平均效应的同时增强了频散信号能量。

2.3 频散曲线反演

在菜单栏分别导入MASW和SCG-MASW两种方法提取的频散曲线数据文件,启动数据加载程序,软件自动读

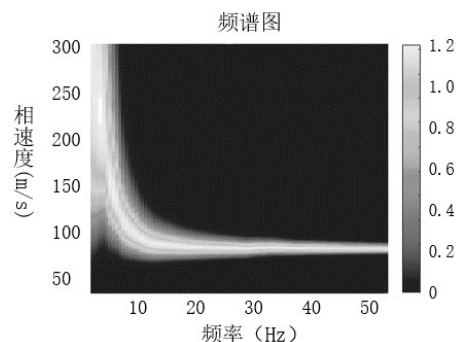


Fig. 9 Dispersion spectrum diagram plotted by SCG-MASW method

图9 SCG-MASW方法绘制的频散能谱图

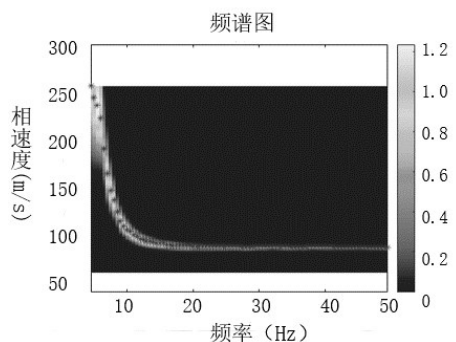


Fig. 10 Frequency dispersion curve extracted by MASW method

图10 MASW方法提取的频散曲线

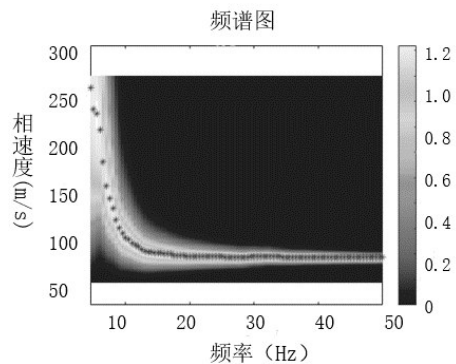


Fig. 11 Frequency dispersion curve extracted by SCG-MASW method

图11 SCG-MASW方法提取的频散曲线

取频散曲线信息,并开启多核CPU并行,随后执行反演计算,获得相应的频散曲线拟合结果、目标函数收敛曲线以及一维横波速度反演结果。相关参数设置:地层数=3,最大深度=30,HGS调节参数=0.02,种群个体数量=200,最大迭代次数=100,xsLH=0.1。模型搜索范围设置:BL=0.5,深度=0.5,横波速度=0.5。图12和图13分别为MASW和SCG-MASW绘制的目标函数收敛曲线图。两种方法得到的目标函数均随迭代次数的增加而逐渐减小,并最终趋于稳定,说明反演过程整体收敛。与MASW相比,SCG-MASW收敛后曲线波动更小,目标函数变化趋于平缓,说明反演过程稳定性较好,不易出现明显振荡或反复调整现象。

随后点击绘制一维反演结果。图14和图15分别为

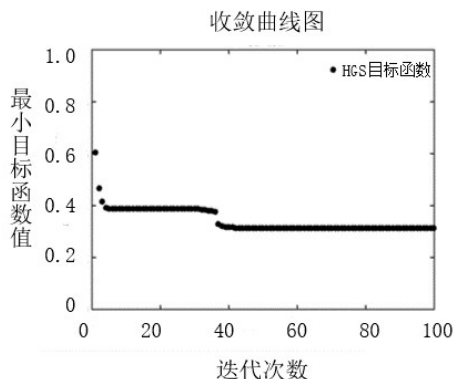


Fig. 12 Convergence curve of the objective function plotted by the MASW method

图12 MASW方法绘制的目标函数收敛曲线

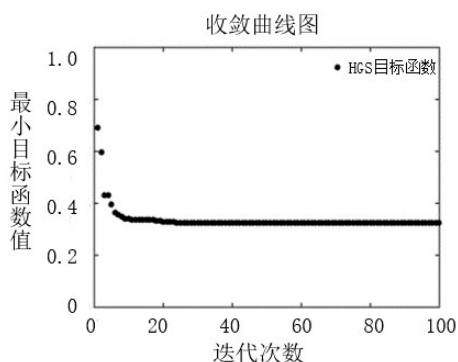


Fig. 13 Convergence curve of the objective function plotted by the SCG-MASW method

图13 SCG-MASW方法绘制的目标函数收敛曲线

MASW方法和SCG-MASW方法绘制的第一炮450 m位置的一维反演结果。MASW的HGS反演模型最优解为地层横波速度:99.968 42、156.786 5、279.497 5;深度:5.075 268、5.204 814;HGS反演最小目标函数值为0.325 73,计算耗时120 s。SCG-MASW的HGS反演模型最优解为地层横波速度:100.689 3、148.332 2、278.622 2;深度:4.746 814、5.25;HGS反演最小目标函数值为0.311 21,计算耗时为116 s。可以看出,二者均能反演出准确层厚,且SCG-MASW方法在第一层和第二层分界处能更好地还原出模型450 m处的真实横波速度。

2.4 速度剖面绘制

在菜单栏分别打开MASW方法和SCG-MASW方法提取、反演的数据文件,绘制相速度剖面图。参数设置:插值点数=160,平滑标准差=2,测区起点=450,测区终点=600,测点间隔=20。图谱选择=jet,选择平滑数据读取并绘制。图16和图17分别为MASW方法和SCG-MASW方法绘制的相速度剖面图。

随后进行横波速度绘制,参数预设:插值点数=160,平滑标准差=0,测区起点=450,测区终点=600,测点间隔=20。图谱选择=hot,并选择插值数据读取并绘制。图18和图19分别为MASW方法和SCG-MASW方法绘制的横波速度剖面图。

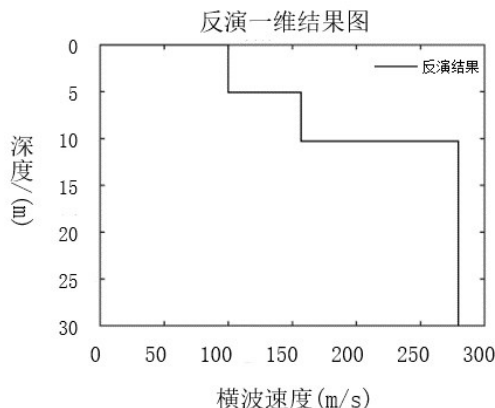


Fig. 14 One-dimensional inversion results plotted by the MASW method

图14 MASW方法绘制的一维反演结果

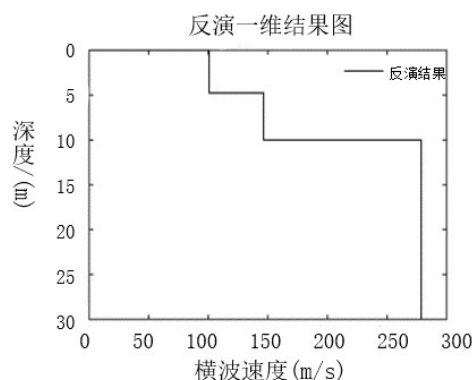


Fig. 15 One-dimensional inversion results plotted by the SCG-MASW method

图15 SCG-MASW方法绘制的一维反演结果

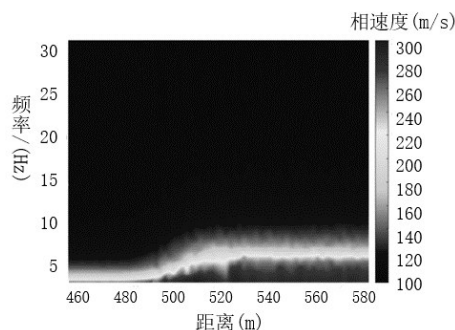


Fig. 16 Phase velocity profile plotted by MASW

图16 MASW绘制的相速度剖面图

从成像结果可以看出,两种方法绘制的面波频散剖面图、横波速度反演剖面图均可清晰反映出断层。从相速度剖面图来看,与MASW方法相比,SCG-MASW方法获得的速度异常边界更加清晰,断层位置对应的速度突变特征更加集中,横向变化界限更为明显。从横波速度反演剖面图来看,与MASW方法相比,SCG-MASW方法反演得到的断层边界更加连续清晰,地下界面更符合真实模型情况。

2.5 实测数据分析

为进一步验证本研究软件的有效性,以及MASW方法与SCG-MASW方法的差异性,选取江西省南昌市2024年

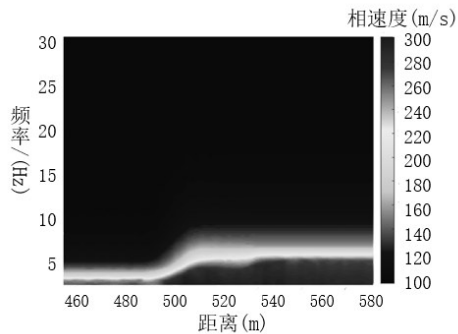


Fig. 17 Phase velocity profile plotted by SCG-MASW
图 17 SCG-MASW 绘制的相速度剖面图

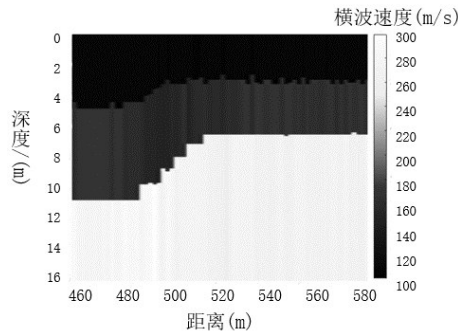


Fig. 18 Shear wave velocity profile plotted by MASW method
图 18 MASW 方法绘制的横波速度剖面图

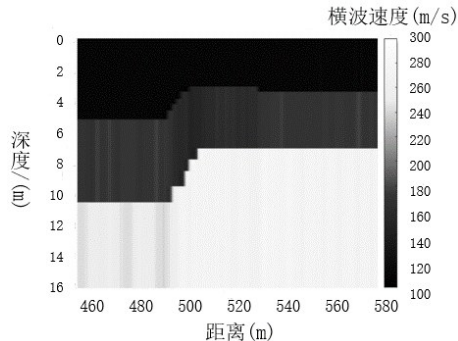


Fig. 19 Shear wave velocity profile plotted by SCG-MASW method
图 19 SCG-MASW 方法绘制的横波速度剖面图

城市地质调查新建区某路段采集到的地震数据进行实验。数据采集使用 48 个垂直分量检波器,道间距为 2 m,最小偏移距为 6 m,获得 60 个单炮地震记录。在参数预设区设置单炮记录道数 N_{trace} 、叠加道数 N_{stack} ,MASW 方法在 $N_{trace}=N_{stack}=48$ 时绘制地震记录图,SCG-MASW 方法在 $N_{trace}=48, N_{stack}=24$ 时绘制叠加道数图。

频散曲线提取界面的参数预设:速度区间低值 $V_{min}=200$ m/s、速度区间高值 $V_{max}=800$ m/s、频率区间低值 $f_{min}=5$ Hz、频率区间高值 $f_{max}=30$ Hz、频率显示间隔 $df=0.5$ s、时间采样间隔 $dt=0.000\ 25$ s、道间距 $dx=2$ m、速度间隔 $dv=1$ m/s、偏移 $offset=6$ m。在频散曲线算法选择下拉框中选择改进相移法绘制频散能谱图,MASW 方法选择自动拾取—不规则区域拾取频散曲线,SCG-MASW 方法选择自动拾取—矩形区域拾取频散曲线。

在频散曲线反演界面打开频散曲线提取的数据文件进行反演,参数设置:地层数=3,最大深度=30,HGS 调节参数=0.02,种群个体数量=200,最大迭代次数=100, $x_{sLH}=0.1$;模型搜索范围设置: $BL=0.5$,深度=0.9,横波速度=0.9。在速度剖面绘制界面打开频散曲线提取、反演文件进行绘制速度剖面图。参数预设:插值点数=500,平滑标准差=2,测区起点=1 700,测区终点=1 950,测点间隔=50。图谱选择=jet。MASW 方法与 SCG-MASW 方法绘制的横波速度剖面图分别如图 20、图 21 所示。可以看出,与 MASW 方法相比,SCG-MASW 方法绘制的横波速度异常边界更明显,横波速度突变特征更集中。

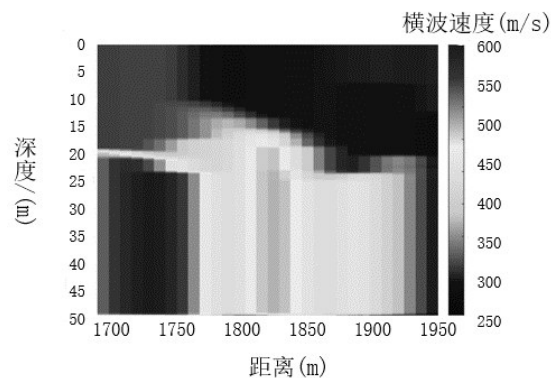


Fig. 20 Shear wave velocity profile plotted by MASW method
图 20 MASW 方法绘制的横波速度剖面图

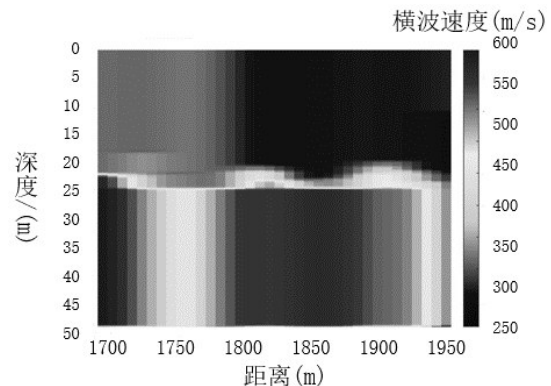


Fig. 21 Shear wave velocity profile plotted by SCG-MASW method
图 21 SCG-MASW 方法绘制的横波速度剖面图

图 22 为该路段的地质剖面图。可以看出,使用 SCG-MASW 方法绘制的横波速度剖面图与实际地质剖面图更加一致,在 22 m 左右的位置为覆盖层与基岩层的分界线。

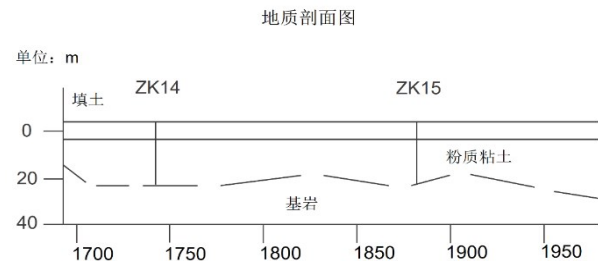


Fig. 22 Geological profile of the section
图 22 该路段地质剖面图

3 软件优势分析

本文软件具备以下优势:①频散曲线提取精度高。与传统仅应用 MASW 方法的国外软件(如 SurfSeis)相比,本研究软件应用的 SCG-MASW 方法通过叠加操作,可以综合利用不同炮的短排列道集来保证频散计算的精度,尤其是频散的低频部分,可在保障频散曲线提取质量和探测深度的前提下获得更高的横向分辨率;②便捷性、交互性强。与传统国外操作复杂、上手难度大的软件相比,本研究软件集成现有主要面波频散能量谱提取算法;在提取频散曲线功能上支持自动拾取,适应于用户对提取数据更精细、更便捷的要求。在频散曲线反演模块,软件实现了 HGS 反演算法并开启多核 CPU 并行,使得用户仅需进行一些必要参数预设,然后打开提取的频散曲线文件逐炮反演等待保存即可,即使是非专业人士或初学者也能较快上手;③容错度、自由度高。本研究软件实现了相速度和横波速度剖面图的绘制。软件内编译实现了实时反馈机制,可实时跟踪软件的工作进程并将信息反馈至工作日志窗口,以使用户即时查看数据处理与分析结果,有效提高工作效率。当发生错误时,该机制能及时通知用户,确保了软件的容错度。在拾取、反演和绘图过程中,软件允许用户自定义各种参数设置,具有高度的灵活性;④功能扩展性强。软件开发基于 MATLAB App Designer,其作为可编程平台提供了丰富的数据分析与处理工具,能轻松适应未来技术变化,无需进行代价高昂的重构或替换,从而满足科研或特殊应用的进阶需求。

4 结语

本文以 SCG-MASW 方法为理论基础,结合 MATLAB 强大的计算力、App Designer 可视化工具的易用性,进行了短排列相关叠加道集面波分析软件开发,对国内地震面波数据处理具有一定的工程应用价值。目前软件开发尚有不足之处,后续可从以下几个方面进行改进:①软件针对主动源面波数据进行分析与处理,未来可针对被动源面波数据开发相应模块;②软件针对水平地形进行反演,未来可进行起伏地形下反演功能的拓展,如利用物理信息神经网络构建更精确、更快速的反演引擎,以便更好地处理非线性问题,降低反演结果的多解性,并进行反演不确定性量化;③未来可基于深度学习模型实现自动化面波频散曲线提取,通过智能识别并提取基阶和高阶模态的频散能量团来减少人工干预,提高数据解释的效率和客观性;④由于人工智能技术优先支持 Python 且 MATLAB 的多数数学计算、信号处理等功能在 Python 中均有对应库可以读写,未来可考虑将该软件转至 Python 开发平台。

参考文献:

- [1] SONG Y Y, CASTAGNA J P, BLACK R A, et al. Sensitivity of near-surface shear-wave velocity determination from Rayleigh and Love waves[C]//

- SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1989:509-512.
- [2] XIA J, MILLER R D, PARK C B. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves[J]. Geophysics, 1999, 64(3): 691-700.
- [3] PARK C B, MILLER R D, XIA J. Multichannel analysis of surface waves[J]. Geophysics, 1999, 64:800-808.
- [4] HAYASHI K, SUZUKI H. CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data[J]. Exploration Geophysics, 2004, 35(1): 7-13.
- [5] ANUKWU G C, KHALIL A E, ABDULLAH K B. Evaluating the effectiveness of the MASW technique in a geologically complex terrain[C]//Malaysia: International Seminar on Mathematics and Physics in Sciences and Technology, 2017.
- [6] CHENG F, MI B, HU Y, et al. CMP stacking for multi-channel analysis of single-shot surface wave data[C]//Beijing: International Conference on Environmental and Engineering Geophysics, 2016.
- [7] CAI S F, HAN Y Q, HE G H. Absorption and scattering comprehensive analysis method based on CMPCC two-dimensional surface waves[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(1):287-291.
蔡少峰,韩永琦,贺光华. 基于 CMPCC 二维面波的吸收散射综合分析法[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(1):287-291.
- [8] LI H X, TAO C H, LIU C, et al. Multichannel analysis of surface waves based on short array stacked correlation gather[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 146:106747.
- [9] GABRIELS P, SNIEDER R, NOLET G. In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode Rayleigh waves[J]. Geophysical Prospecting, 1987, 35(2):187-196.
- [10] MCMECHAN G A, YEDLIN M J. Analysis of dispersive waves by wave field transformation[J]. Geophysics, 1981, 46(6): 869-874.
- [11] WU D S, SUN C Y, LIN M Y. Active seismic surface wave dispersion imaging method based on cross-correlation and phase-shifting[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(4):1693-1700.
伍敦仕,孙成禹,林美言. 基于互相关相移的主动源地震面波频散成像方法[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(4):1693-1700.
- [12] XIA J, XU Y, MILLER R D. Generating image of dispersive energy by frequency decomposition and slant stacking[J]. Pure and Applied Geophysics, 2007, 164(5):941-956.
- [13] YANG Z T, CHEN X F, PAN L, et al. Multi-channel analysis of Rayleigh waves based on the vector wavenumber transformation method (VWTM) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(1):298-305.
杨振涛,陈晓非,潘磊,等. 基于矢量波数变换法(VWTM)的多道 Rayleigh 波分析方法[J]. 地球物理学报, 2019, 62(1):298-305.
- [14] ZOU R J, LI H X, REN H L, et al. Research on multichannel surface wave dispersion curve extraction based on combination of improved vector wave number transformation and phase shift methods[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2025, 48(4): 345-354.
邹瑞杰,李红星,任弘利,等. 改进矢量波数变换-相移联合多道面波频散曲线提取方法研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2025, 48(4):345-354.
- [15] YANG Y, CHEN H, HEIDARI A A, et al. Hunger games search: visions, conception, implementation, deep analysis, perspectives, and towards performance shifts[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 177:114864.
- [16] AI H B. Full-parameter inversion of multi-mode Rayleigh wave dispersion curves for identifying glacial ice thickness and freezing extent in subglacial sediments at Midtdalsbreen using a novel global optimizer: Hunger Games Search (HGS)[M]. Nanchang: East China University of Technology, 2023.
艾寒冰. 基于多阶面波频散全参数 HGS 反演的挪威 Midtdalsbreen 冰川浅层结构研究[D]. 南昌:东华理工大学, 2023.

(责任编辑:尹晨茹)