doi: 10.11720/wtyht.2026.1363
刘军, 邢修举, 李德山, 等. 基于奇异值分解的岩溶区微动面波成像方法[J]. 物探与化探, 2026, 50(2): 270-276. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1363
Liu J, Xing X J, Li D S, et al. A microtremor surface wave imaging method for Karst areas based on singular value decomposition[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(2): 270-276. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1363

基于奇异值分解的岩溶区微动面波成像方法

刘军, 邢修举, 李德山, 连晨光
(中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

摘 要: 在岩溶发育区采集的微动面波受复杂近地表条件影响, 往往存在信噪比低、数据质量差的问题, 制约了探测精度。为此, 提出一种基于奇异值分解(SVD)的微动面波成像方法。该方法首先对互相关获取的单道虚源经验格林函数进行 SVD 重建, 提取大奇异值信号重波场, 有效压制噪声并提升面波信噪比; 进而利用高信噪比重建信号构建虚源多道记录, 通过 F-K 变换得到频散能量谱, 其面波频散条带的分辨率和连续性得到显著改善; 随后, 从优化后的频散谱中提取频散曲线, 并采用遗传算法与阻尼最小二乘联合反演策略, 兼顾全局最优解与收敛效率, 进一步提高成像精度; 最终, 整合研究区内所有测点的反演结果, 构建二维横波速度剖面, 揭示研究区地下结构特征及岩溶发育的空间展布规律。在某岩溶区的应用实例表明, 该方法有效提升了岩溶区复杂近地表条件下的成像质量, 为岩溶发育区的精细结构探测和地质解释提供了可靠的技术支撑。

关键词: 微动; 奇异值分解; 面波成像; 频散曲线; 岩溶
中图分类号: P631.4; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)02-0270-07

0 引言

微动面波技术近年来得到了快速发展, 该方法利用自然环境中的微弱振动及背景噪声信号, 从连续采集的微动信号中提取地震面波信息, 实现了高效、低成本的近地表结构成像[1-2]。相较于传统人工源面波方法, 微动技术摆脱了对震源的依赖, 具有持续监测的能力。然而, 微动信号固有的低信噪比特性、复杂噪声环境以及多源混合效应, 也严重制约了面波频散曲线的提取精度与反演的准确性[3-4]。

利用微动面波对地下进行成像通常可采用圆环形阵列或直线型排列台阵[5], 圆环形阵列需要在地表二维空间展开, 在野外施工时易受地表条件的限制; 直线型排列台阵(线性台阵)观测系统相对而言布置便捷, 在岩土勘察[6]、地层划分[7]、岩溶空洞探测[8]、采空区探测[9-10] 等地下结构探测中已获得广泛应用。线性台阵微动面波在处理时, 首先通过互相关技术获取虚震源的单炮记录(虚源炮集), 进而基于 F-K 变换、tau-p 变换、相移等方法提取频散曲线, 利用频散曲线反演横波速度结构来实现对地下介质的成像[11]。然而, 由于微动信号的特性, 从微动中得到的面波信号往往信噪比不高, 因此常规的波场变换方法生成的频散能量谱分辨率较差, 导致频散曲线提取的精度不高, 严重影响反演及成像质量[12]。因此, 提高微动虚源炮集的信噪比, 增强炮集中面波信号成分并压制其他类型波场, 对提高微动面波的成像质量十分关键[13]。

微动虚源炮集中的各道可视为一个单独的地震记录, 利用奇异值分解技术提取各道记录中的主要能量成分, 能为提升微动面波信噪比和频散曲线的计算精度提供支持。本研究拟引入地震信号处理领域中的奇异值分解技术[14-15], 对虚源炮集中的各道信号进行分析, 将单道记录构建为二维矩阵, 进而计算奇异值矩阵所代表的信号道的各成分信息。通过保留主成分的方式重建单道信号, 实现面波能量的增强和噪声的压制。对虚源炮集中的每一道数据进行奇异值分解及重建, 即改善了微动面波的有效信号

收稿日期: 2025-09-30; **修回日期**: 2025-12-29
基金项目: 陕西省自然科学基础研究计划项目“起伏地形多分量噪声面波有限频衰减成像与 Q 值反演研究”(2025JC-YBMS-282)
第一作者: 刘军(1993-), 男, 助理研究员, 主要从事矿井电法勘探及微动面波勘探应用及研究工作。Email: liujun@cctegxian.com

质量, 在频散曲线提取中获得更高的精度。

本文首先介绍奇异值分解方法的原理及微动面波处理流程, 进而结合某岩溶区的实测微动数据进行分析, 以 F-K 变换[16] 为工具, 计算原始微动数据与重建后的微动数据的频散能量谱, 通过对比验证方法的有效性, 并提高频散曲线的测量精度; 最后, 利用频散曲线进行反演, 建立研究区的二维横波速度剖面, 实现对地下结构的高精度成像。

1　方法原理

1.1　奇异值分解

奇异值分解是将大小为 $m\times n(m\geqslant n)$的矩阵 $\boldsymbol{X}$ 分解为正交矩阵:

$$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}, \tag{1}$$

式中: $\boldsymbol{U}$为 $m\times m$ 的酉矩阵, 是 $\boldsymbol{X}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}$列特征向量的矩阵; $\boldsymbol{V}$ 为大小为 $n\times n$ 的酉矩阵, 是 $\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}$行特征向量的矩阵; $\boldsymbol{\Sigma}$是由降序排列的 $\boldsymbol{X}$ 的奇异值σ_1、σ_2、⋯、$\sigma_{\mathrm{rank}(X)}$组成的对角矩阵, rank($\boldsymbol{X}$) 表示矩阵 $\boldsymbol{X}$ 的秩, 则 $\boldsymbol{\Sigma}$可表示为

$$\boldsymbol{\Sigma}=\begin{bmatrix}\sigma_1 & & & & \\ & \sigma_2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \sigma_{\mathrm{rank}(\boldsymbol{X})-1} & \\ & & & & \sigma_{\mathrm{rank}(\boldsymbol{X})}\end{bmatrix}。 \tag{2}$$

奇异值分解的重要特性是将信号中的不同成分能量分层, 大奇异值对应信号的主成分, 因此$\boldsymbol{\Sigma}$中前几位甚至首位的奇异值包含了 $\boldsymbol{X}$ 中信号的绝大部分有效信息, 若设定 $\boldsymbol{X}$ 的有效秩为 h, 则选取前 h 个奇异值σ_1、σ_2、⋯、σ_h重构矩阵$\widehat{\boldsymbol{X}}$, 就实现了有效信号的增强与噪声压制。

设微动的虚源炮集记为$d(x_j,t)$, 其中 j 为道序号, t 为时间序列, L 为序列长度(即各道采样点数)。以第 j 道为例, 将该道 L 个采样记录分为 n 段, 每段的长度为 m, 并令 $m>n$, 然后将每一段数据写入矩阵 $\boldsymbol{X}$ 的一列, 如第一列为该道信号的第 1 至第m个采样点, 第二列为该道信号的第$m+1$至第$2m$个采样点⋯⋯以此类推, 则可将该道数据表示为 $m\times n$ 的矩阵 $\boldsymbol{X}$:

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}d(x_j,t_1) & d(x_j,t_{m+1}) & \cdots & d(x_j,t_{(n-1)m+1}) \\ d(x_j,t_2) & d(x_j,t_{m+2}) & \cdots & d(x_j,t_{(n-1)m+2}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d(x_j,t_m) & d(x_j,t_{2m}) & \cdots & d(x_j,t_L)\end{bmatrix}。 \tag{3}$$

对 $\boldsymbol{X}$ 进行奇异值分解, 可写为如下形式:

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{U}_s & \boldsymbol{U}_b & \boldsymbol{U}_n\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Sigma}_s & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{\Sigma}_b & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{\Sigma}_n\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{V}_s \\ \boldsymbol{V}_b \\ \boldsymbol{V}_n\end{bmatrix}。 \tag{4}$$

由于微动虚源炮集中的面波能量最强, 分解后其对应大奇异值, 其余波场及噪声干扰能量弱, 分解后的奇异值较小, 因此$\boldsymbol{U}_s$、$\boldsymbol{U}_b$、$\boldsymbol{U}_n$可分别视为表征微动面波、干扰波及噪声的列特征向量, $\boldsymbol{V}_s$、$\boldsymbol{V}_b$、$\boldsymbol{V}_n$可分别视为表征面波、干扰波及噪声的行特征向量, 奇异值矩阵$\boldsymbol{\Sigma}$则可视为由表征面波的奇异值子矩阵$\boldsymbol{\Sigma}_s$、表征干扰波的子矩阵$\boldsymbol{\Sigma}_b$和表征噪声的子矩阵$\boldsymbol{\Sigma}_n$三部分构成。通过将$\boldsymbol{\Sigma}_b$、$\boldsymbol{\Sigma}_n$置零, 可获得仅包括面波的奇异值矩阵$\boldsymbol{\Sigma}'$:

$$\boldsymbol{\Sigma}'=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Sigma}_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}。 \tag{5}$$

将式(5)代入式(4), 则可得到重建后的信号矩阵$\hat{\boldsymbol{X}}$。将$\hat{\boldsymbol{X}}$按列展开, 逐列恢复至单道记录分段前对应的位置, 即得到了重建的微动虚源炮集单道记录; 该记录中微动面波成分得到保留, 其余干扰波场及噪声被压制。对虚炮集中的每一道记录进行上述奇异值分解与重建的运算, 就得到了高质量的微动面波炮集。

1.2　频散谱计算

对于线性排列采集的微动信号, 将排列端点的首个台站视为虚源, 利用常规背景噪声处理方法[17], 依次计算虚源台站与排列上其他各台站之间的经验格林函数(empirical Green's function, EGF), 并按炮检距大小, 组合排列各道的经验格林函数, 即可得到微动面波的虚源炮集, 记为$d(x,t)$。

利用奇异值分解方法对$d(x,t)$的各道记录进行分解与重建, 就获得了高质量的微动面波炮集$\hat{d}(x,t)$。通过 F-K 变换法对$\hat{d}(x,t)$进行处理, 则有:

$$D(k,f)=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\hat{d}(x,t)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}2\pi(kx+ft)}\mathrm{d}x\mathrm{d}t, \tag{6}$$

式中: $D(k,f)$表示变换后得到的微动虚源炮集的频率−波数谱; k 为波数; f 为频率。由于波数与频率满足$k=f/v$(v 表示地震波速度), 因此可将 f-k 域的频率波数谱$D(k,f)$变换为 f−v(频率−速度) 域的频散能量谱$D(v,f)$, 进而提取微动面波频散曲线。

由上所述, 基于奇异值分解的微动面波处理方法可总结为如下步骤: ①微动数据预处理及虚源炮集$d(x,t)$计算; ②虚源炮集单道记录分段并构建矩阵; ③对单道记录构造的矩阵进行奇异值分解; ④截断奇异值矩阵中的小值, 保留主要奇异值并重构表征面波的单道信号; ⑤重复步骤②~④, 获得各道重建后的微动虚源炮集$\hat{d}(x,t)$; ⑥计算频散能量谱并提取频散曲线; ⑦反演频散曲线获得横波速度结构, 对地下介质成像。

该面波处理方法由于引入奇异值分解技术, 对

微动虚源炮集进行了分解，并对大奇异值分量进行重建，因此获得的微动面波频散能量谱的分辨率会显著改善，这是提高频散曲线测量精度的关键。

2　实际微动数据算例

以岩溶发育区的实际微动数据为例，在处理中引入奇异值分解技术，以提高微动面波的信噪比及频散能量谱的分辨率。研究区位于江西省西南部，区内地貌复杂，山地、丘陵与盆地错综分布，区域构造格架总体表现为 NE 向的复式向斜构造，向斜核部由白垩系红层组成，与下伏地层呈不整合接触关系。区内出露地层时代跨度大，自新元古界青白口系至新生界第四系均有分布。其中，青白口系、震旦系、二叠系、三叠系、白垩系为主要出露地层单元，泥盆系、石炭系、侏罗系地层呈零星分布，第四系主要沿 NE、NNE 及 NW 向等狭窄沟谷展布。

测线所在研究区地表出露地层为第四系全新统联圩组（Qh*l*），岩性组合为亚砂土、灰黄色黏土，底部发育砾岩、砂砾岩层。砾岩组分中砾石以灰岩为主，胶结物为钙质及钙泥质，胶结程度较为松散。受地下水溶滤作用影响，普遍发育溶蚀孔洞构造。

研究区微动数据通过直测线排列布置的 42 台节点地震仪采集得到，采样率 500 Hz，采集时长 60 min，测线上相邻节点地震仪的间距为 5 m。处理时以 13 个台的数据为一组，以组内首个台站为虚源，利用常规的噪声处理方法进行去趋势、去均值、时域归一化、谱白化及滤波等预处理，然后分段互相关运算，叠加各段结果获得虚源与其他台站的经验格林函数，形成虚源炮集。利用上述方法沿测线抽取台站组合滚动处理，获得近 30 个测点的虚源炮集记录。

以测线上某组的 13 个台站获得的虚源炮集为例，由于以第一个台站作为虚源，因此道集中共有 12 道信号，该道集各道采样点数为 1 000 个，采样长度 2 s。图 1a 为该虚源炮集的记录，图 1b 为 F-K 变换法算得的频散能量谱。由于虚源炮集中除面波外，也存在其他波场及噪声的干扰，故频散谱中存在其他干扰波能量团，造成面波的频散能量条带连续性较差，分辨率不高。为此，引入奇异值分解技术对每道信号进行处理。

图 2a 为首道信号，图中蓝色虚线表示对其进行分段，设定分段数为 10 段，每段采样点数 100 个，然后将每段作为一列，构建二维矩阵 $\boldsymbol{X}$。

对 $\boldsymbol{X}$ 进行奇异值分解，得到特征值矩阵 $\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{V}$ 和

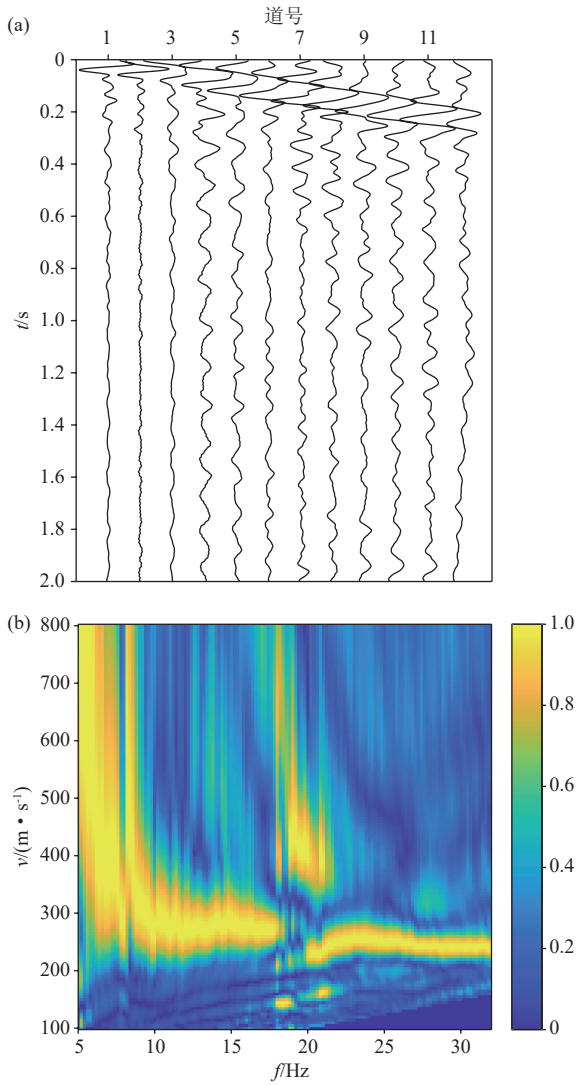


图 1　微动虚源炮集（a）及其频散能量谱（b）

Fig. 1　Microtremor virtual source shot-gather (a) and its dispersion energy spectrum (b)

奇异值矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$。$\boldsymbol{\Sigma}$ 为对角矩阵，对角线上的元素即为信号不同成分对应的奇异值 σ，依次为：3.385 1、0.715 9、0.471 5、0.377 1、0.217 5、0.091 4、0.062 8、0.051 6、0.035 5。其中最大奇异值 σ_1 对应信号的第一主成分（图 2b），该成分在信号中的占比 E_{σ_1} 可由下式估算：

$$E_{\sigma_1}=\frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2+\ldots+\sigma_{10}^2}, \tag{7}$$

式中：分母为所有奇异值的平方和，计算可得第一主成分占比约为 92.34%。将该成分视为虚源炮集中的面波，因此在奇异值矩阵中保留最大奇异值 σ_1，并将其他小值截断置零，则得到新的奇异值矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}'$：

$$\boldsymbol{\Sigma}'=\begin{bmatrix}3.385\,1 & \cdots & 0\\ \vdots & & \vdots\\ 0 & \cdots & 0\end{bmatrix}。 \tag{8}$$

该矩阵中仅有对角线上的首个元素为非零值。

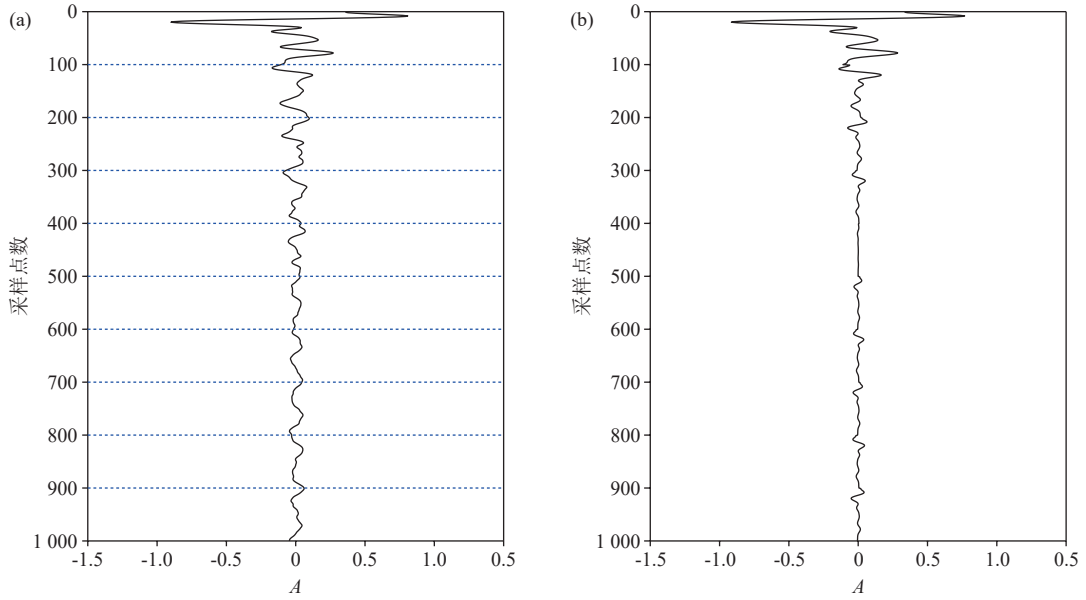


图 2　原始单道信号(a)及其最大奇异值重建信号(b)

Fig. 2　Original single-channel signal (a) and its maximum singular value reconstructed signal (b)

利用 $\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{V}$ 和 $\boldsymbol{\Sigma}'$ 重建信号, 所得结果如图 3a 所示。与图 1a 的原始信号对比可见, 在重建后的道集中, 噪声受到压制, 面波成分占主导, 在虚源多道记录中可见清晰的面波波形。

利用 F-K 变换法对该多道记录进行处理。处理时对各道信号施加汉明窗, 以面波峰值点所在位置为窗口中心, 200~250 采样点为窗口宽度, 获得的频散能量谱如图 3b 所示。相较于图 1b, 频散谱中的面波能量条带的连续性和收敛性都得到了显著提高。在频散曲线提取时, 为提高效率, 采用了基于连通域分析的频散曲线自动提取方法[1], 图 3b 中的黑色曲线即为自动提取的频散曲线。

获得频散曲线后, 本研究利用遗传(genetic algorithm, GA)−阻尼最小二乘(damped least squares, DLS)联合反演方法[18], 计算测点下方的横波速度结构。在该算法中, 首先根据实测的频散曲线估计地下横波速度和地层厚度的变化区间, 然后在估计区间内均匀生成遗传算法的初始模型群体, 对初始模型群体实施遗传选择与交叉运算生成新的群体, 并依据残差从中筛选表现最优的 20% 模型作为子种群; 对筛选出的子种群中的每个模型进行阻尼最小二乘反演, 驱动整个子群体向其附近的全局(局部)最优解演进; 检查是否有达到预设拟合精度的模型个体出现, 如有则终止迭代, 否则将当前子群体作为新一代初始模型群体, 重复上述步骤, 直至达到拟合精度要求或迭代次数上限。

在对实测频散曲线反演时, 本研究将初始模型群体个数设为 50 个。图 4b 中的蓝色虚线表示初始

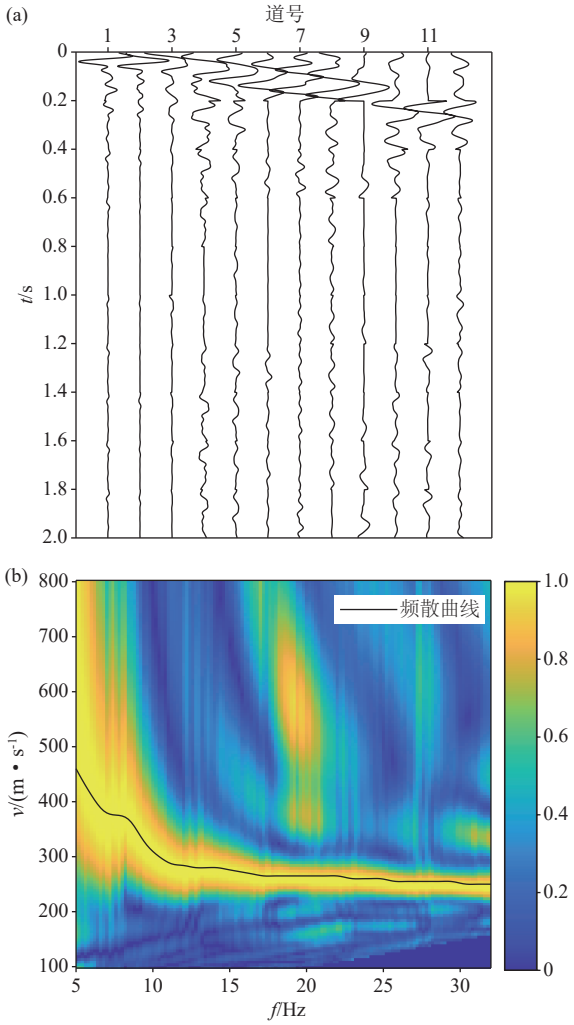


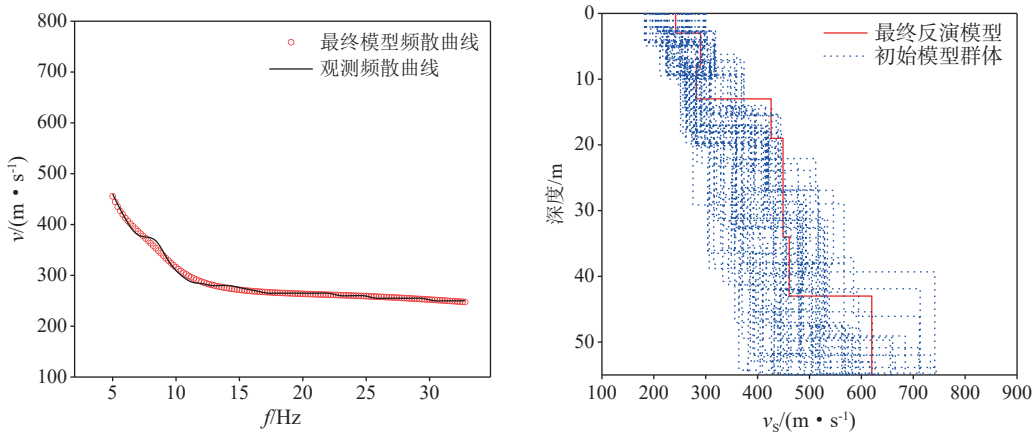
图 3　奇异值分解后重建的微动虚源炮集(a)及其频散能量谱(b)

Fig. 3　Microtremor virtual source shot-gather reconstructed by SVD (a) and its dispersion energy spectrum (b)

模型，经过 20 次反演迭代后，得到的反演模型频散曲线如图 4a 中的红色圆点构成的曲线所示，其与图 3b 中提取的黑色频散曲线吻合很好。最终的反演结果由图 4b 中的红色实线表示，其代表了测点下方地层的横波速度（v_S）结构。

获得该测点的横波速度结构后，滚动向前处理测线上其他测点的微动数据，通过奇异值分解与重建提高微动面波的信噪比，进而准确提取各测点的频散曲线并反演横波速度结构。将所有测点的反演结果联合，建立研究区的二维横波速度成像剖面（图 5）。

由二维横波速度剖面可知，研究区近地表 15 m 深度内，横波速度 v_S<300 m/s，主要由松散砂土等构成松散覆盖层；在 25 m 深度以下，v_S>500 m/s，推测为较硬的基岩地层。在横坐标 10~25 m 范围内，地下出现低速异常体并延伸至 50 m 深处，推测此处发育岩溶塌陷柱；在横坐标 35~85 m 范围内，地下 20~40 m 同样出现大面积低速区，研究区前期钻孔及地质资料表明在该深度区内发育灰岩夹杂方解石薄层及全充填型溶洞，推测该低速区为塌陷后形成的充填型溶洞所引起。



(a) 观测频散曲线与最终反演模型的频散曲线　　(b) 初始模型群体与最终反演模型

图 4　反演模型及频散曲线拟合结果

Fig. 4　Inversion model and dispersion curve fitting results

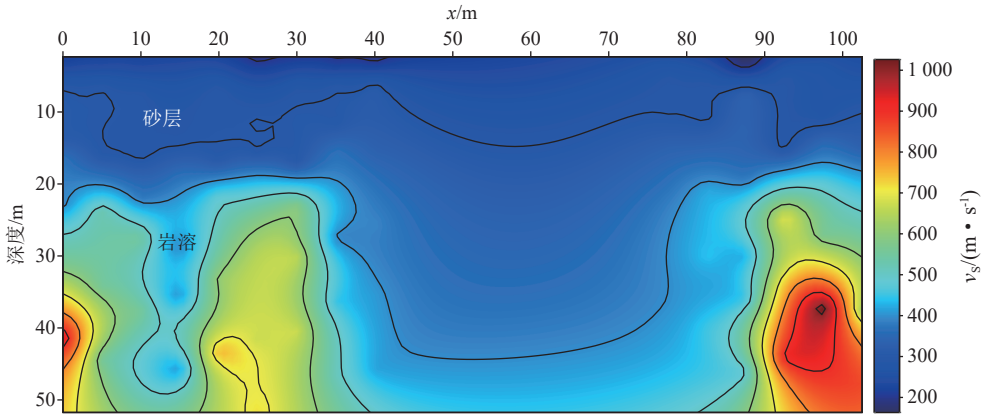


图 5　研究区二维横波速度成像剖面

Fig. 5　2D shear wave velocity imaging profile in the study area

3　结论

本研究提出了一种基于奇异值分解的微动面波成像方法，旨在解决岩溶区复杂近地表环境下微动面波信噪比低、数据质量差的问题。该方法首先通过互相关计算获取单道虚源微动面波经验格林函数，随后应用奇异值分解并重建，提取对应大奇异值的信号成分，有效提升面波信噪比并抑制噪声干扰。基于重建后的高信噪比信号构建虚源多道面波记录，采用 F-K 变换计算频散能量谱，显著改善了频散谱中面波频散条带的连续性、收敛性和分辨率，为频散曲线精确拾取奠定基础。

在频散曲线反演阶段，引入遗传算法与阻尼最小二乘联合反演策略，兼顾全局优化空间的充分搜索和局部邻域最优解的精确寻优。通过反演获取研

究区测线上各测点下方的横波速度结构模型, 经空间插值后建立二维横波速度剖面。该剖面清晰揭示了区内地层结构特征和岩溶发育位置, 为后续地质勘查和解释工作提供了关键依据。

研究成果表明, 基于奇异值分解的微动面波成像方法, 有效提升了岩溶区复杂近地表条件下的成像质量, 为岩溶发育区的精细结构探测和地质解释提供了可靠的技术支撑。

参考文献(References):

[1] 李欣欣, 郑晓慧, 宋同, 等. 应用连通域分析的微动面波频散曲线自动提取方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2025, 60(3): 679−688.
Li X X, Zheng X H, Song T, et al. Automatic extraction method of microtremor surface wave dispersion curve based on connected domain analysis[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2025, 60(3): 679−688.

[2] 李雪燕, 陈晓非, 杨振涛, 等. 城市微动高阶面波在浅层勘探中的应用: 以苏州河地区为例 [J]. 地球物理学报, 2020, 63(1): 247−255.
Li X Y, Chen X F, Yang Z T, et al. Application of high-order surface waves in shallow exploration: An example of the Suzhou river, Shanghai[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(1): 247−255.

[3] 姚金, 徐佩芬, 凌甦群, 等. 地铁线路采空区微动剖面法探测研究——以广州地铁 14 号线二期为例 [J]. 地球物理学报, 2023, 66(10): 4279−4289.
Yao J, Xu P F, Ling S Q, et al. Research on microtremor profile method to detection of goaf along subway line: A case study in the second phase of subway line 14[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(10): 4279−4289.

[4] 张学亮, 谢涛, 周炜, 等. 等值反磁通瞬变电磁和微动勘探在浅部岩溶探测中的应用 [J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(12): 157−166.
Zhang X L, Xie T, Zhou W, et al. The application of the opposing coils transient electromagnetic method and microtremor survey method in shallow karst detection[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(12): 157−166.

[5] 高级, 张海江, 查华胜, 等. 台阵和噪声源分布对微动成像的影响及其在盐矿溶腔探测中的应用 [J]. 地球物理学报, 2023, 66(6): 2489−2506.
Gao J, Zhang H J, Zha H S, et al. The effect of different arrays and noise source distribution on microtremor imaging and its application in solute salt mine cavity detection[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(6): 2489−2506.

[6] 李巧灵, 张辉, 雷晓东, 等. 综合利用多道瞬态面波和微动探测分析斜坡内部结构 [J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 258−267.
Li Q L, Zhang H, Lei X D, et al. Analyses of internal structure of slopes using multi-channel transient surface wave exploration and microtremor survey[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 258−267.

[7] 陈基炜, 赵东东, 宗全兵, 等. 基于线形台阵的高精度微动技术在城区岩性地层精细划分中的应用 [J]. 物探与化探, 2021, 45(2): 536−545.
Chen J W, Zhao D D, Zong Q B, et al. High precision microtremor technology based on linear array and its application to the fine division of lithostratigraphy[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(2): 536−545.

[8] 张中, 冯文成, 林杨. 微动探测技术在盾构隧道穿越城区岩溶地层中的应用 [J]. 物探与化探, 2025, 49(2): 520−528.
Zhang Z, Feng W C, Lin Y. Application of microtremor survey technology in shield tunnels passing through urban karst formations [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(2): 520−528.

[9] 武欣, 潘冬明, 于景邨. 煤矿采空区地球物理探测方法综述 [J]. 地球物理学进展, 2022, 37(3): 1197−1206.
Wu X, Pan D M, Yu J C. Review in the geophysical methods for coalmine goaf prospecting[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(3): 1197−1206.

[10] 孔繁良, 徐超, 艾斯卡尔·吐尔逊, 等. 急倾斜煤层采空区综合物探勘查应用研究: 以乌鲁木齐市西山地区关闭煤矿为例 [J]. 西北地质, 2025, 58(3): 143−153.
Kong F L, Xu C, Aisikar T, et al. Application of integrated geophysical prospecting method in steep seam goaf: A case study ofThe closed coal mine in Xishan area, Urumqi[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 143−153.

[11] Li X X, Li Q C, Lei Y H, et al. Active and passive source Rayleigh wave joint imaging of the shallow structure in the Caotan Camp area, southwestern Ordos Basin[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 130: 105986.

[12] 万志, 田仁飞, 刘俊杰. 一种改进的相移法在面波频散曲线提取中的应用 [J]. 物探化探计算技术, 2025, 47(2): 200−208.
Wan Z, Tian R F, Liu J J. Application of the improved phase shift method in extracting surface wave dispersion curve[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 47(2): 200−208.

[13] 姜文龙, 涂善波, 何效周, 等. 基于车辆振动噪声的城市面波观测方法研究及其应用 [J]. 地球物理学进展, 2020, 35(4): 1557−1564.
Jiang W L, Tu S B, He X Z, et al. Research and application of passive source surface wave observation method based on vehicle vibration noise[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(4): 1557−1564.

[14] 孙超, 林朋, 刘育林, 等. 基于压缩奇异值分解的高效地震数据随机噪声压制 [J]. 矿业科学学报, 2025, 10(1): 105−115.
Sun C, Lin P, Liu Y L, et al. Accelerated random noise suppression of seismic data using compressed singular-value decomposition[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(1): 105−115.

[15] 魏巍, 高鸿, 刘忠岩. 奇异值分解技术在绕射波分离成像中的应用研究 [J]. 石油物探, 2020, 59(2): 236−241.
Wei W, Gao H, Liu Z Y. Separation and imaging of seismic diffractions using singular value decomposition[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(2): 236−241.

[16] Li X X, Li Q C, Shen H Y. Rayleigh-wave imaging of the loess sediments in the southern margin of the Ordos Basin by improved frequency-wavenumber transform[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2019, 16(1): 77−84.

[17] Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, et al. Processing seis-

mic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements[J]. Geophysical Journal International, 2007, 169(3): 1239−1260.

[18] Lei Y H, Shen H Y, Li X X, et al. Inversion of Rayleigh wave dispersion curves *via* adaptive GA and nested DLS[J]. Geophysical Journal International, 2019, 218(1): 547−559.

A microtremor surface wave imaging method for Karst areas based on singular value decomposition

LIU Jun, XING Xiu-Ju, LI De-Shan, LIAN Chen-Guang

(*CCTEG Xi'an Research Institute* (*Group*) *Co.*, *Ltd.*, *Xi'an* 710077, *China*)

Abstract: The microtremor surface waves collected from karst areas, where near-surface conditions are complex, often show low signal-to-noise ratios (SNRs) and poor data quality, thus restricting the detection accuracy. Hence, this study proposed a microtremor surface wave imaging method based on singular value decomposition (SVD). First, the single-trace virtual-source empirical Green's function obtained by cross-correlation was reconstructed through SVD. The signal components corresponding to large singular values were extracted to reconstruct the wave field, thereby effectively suppressing the noise and improving the SNRs of surface waves. Second, the virtual-source multi-trace records were constructed using the reconstructed signal with high SNRs. The dispersion energy spectrum was derived through the F-K transform, obtaining significantly improved surface wave dispersion bands in terms of resolution and continuity. Third, the frequency dispersion curves were extracted from the optimized dispersion energy spectrum. The joint inversion strategy employing the genetic algorithm and damped least squares was used to further improve the imaging accuracy, considering the globally optimal solution and convergence efficiency. Fourth, by integrating the inversion results of all survey points in the study area, a two-dimensional shear wave velocity profile was constructed to reveal the underground structural characteristics and the spatial distribution of karsts in the study area. The practical application in a karst area demonstrates that the proposed method can effectively improve the imaging quality of the karst area with complex near-surface conditions, providing reliable technical support for the fine-scale structure detection and geological interpretation in karst areas.

Key words: microtremor; singular value decomposition (SVD); surface wave imaging; frequency dispersion curve; Karst

（本文编辑：叶佩，沈效群）