

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2019.01.018

噪声互相关成像方法在浅层结构勘查 研究现状及展望

罗磊^{1,2,3}, 梁锋^{2,3}, 付光明^{1,2,3}, 罗凡^{1,2,3}, 陶鑫^{1,2,3}

(1. 东华理工大学地球物理与测控技术学院, 南昌 330013;

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

3. 中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037)

摘要: 近年来随着背景噪声成像方法逐渐趋于成熟, 随着研究理论的深入, 被众多学者应用于地球深部速度结构研究中, 且已取得较好的研究成果。在浅层结构研究中, 获得更多的浅表物性信息将极大的提升对浅层结构的认识。噪声互相关成像方法所获得横波速度信息, 对地下断层、空洞、溶洞等速度差异较大的地下结构有效识别, 将有助于我们对地震等地质灾害做出合理的预防。本文意在通过噪声成像近年来的研究现状, 尤其是浅层结构勘查应用(如城市地下结构、矿产、断层等), 介绍噪声成像的发展背景, 数据处理特点, 综述其在浅层结构勘查方面的应用及可靠性, 探讨其技术方法的完善, 以获得浅层精细 3D 或 4D 结构图。

关键词: 背景噪声成像; 互相关; 横波速度; 浅层结构; 城市地下结构

中图分类号: P315.01; P631.414 **文献标识码:** A

0 引言

地震仪器记录的背景噪声是一段连续的杂乱记录, 由多种不同的、空间分布互不相关的连续源产生, 其过程平稳随机, 没有确定的相谱^[1]。近年来伴随交叉学科的兴起, 最初科学家当作干扰信息的背景噪声, 发现其中包含了大量的有用信息, 目前有许多学者利用噪声数据研究地下结构。

Aki 于 1957 年从地震学理论方面论述了背景噪声可以用来获得台阵下方的面波传播速度^[2]。2001 年, Weaver 和 Lobkis 在实验中发现, 一个铝块上两点记录到的热噪声的互相关函数与这两点间的格林函数几乎完全相同, 它清晰地反映了铝块的

结构^[3]。2004 年, Shapiro 和 Campillo 利用不到 30 天的背景噪声连续波形数据, 通过互相关叠加提取出台站对间的频散曲线, 表明背景噪声中可提取出可靠的面波信息^[4]。2007 年, Bensen 等提出了一套比较完整灵活、适应性好的自动化处理方法, 此后多数噪声层析成像研究基本上都参照了该方法^[5]。噪声成像技术是研究地下速度结构的有效手段之一, 其原理是通过台站记录的噪声数据对其进行互相关计算与叠加, 而后得到台站间的经验格林函数, 提取相(或群)速度频散曲线, 反演横波速度, 层析成像得到地下速度结构。随着理论研究的深入, 噪声成像互相关技术广泛应用于各类尺度的地壳地幔结构研究中, 便于我们了解地下的速度结构或认识深部物质的运动过程, 其通过背景噪声互相关提取 Rayleigh 波和 Love 波中的群(或相)速度频散曲线, 进

收稿日期: 2018-10-22; 改回日期: 2018-11-23; 责任编辑: 王传泰

基金项目: “上海济南等典型城市地下空间开发利用综合地质调查”项目(编号:DD20179611)、“雄安新区深部三维地质结构探测”项目(编号:DD20189132)、国家重点研发计划课题(编号:2016YFC0600209)、中国地质科学院基本科研业务项目(编号:K1616)联合资助。

作者简介: 罗磊(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事背景噪声层析成像方法研究。通信地址: 江西省南昌市经济开发区广兰大道 418 号, 东华理工大学地球物理与测控技术学院; 邮政编码: 330013; E-mail: Luolei9341@163.com

通信作者: 梁锋(1982—), 男, 博士, 主要从事地震波场成像和地壳结构研究。通信地址: 北京西城区百万庄大街 26 号, 中国地质科学院地球深部探测中心; 邮政编码: 100037; E-mail: imr_liangfeng@cags.ac.cn

而研究该地区的三维S波速度结构、以各向异性研究大陆动力学、波速变化研究地震的可预测性等。

建立从地表到基岩之间岩土物性(比如:速度、衰减、密度等)和界面结构的分布是浅层结构的研究重点^[6]。浅层探测主要用于地震场地作用评估和地震模拟建模中,但对浅层地质体结构研究较少。不论是主动源探测还是钻孔方法,其探测深度受限,且相对比较昂贵。

城市区域特殊的地理环境,实施某些地球物理方法都会受到极大的干扰和阻碍,而噪声成像互相关方法巧妙的避开的一些物性干扰,便可获得浅层速度信息,利于开展城市地质调查及地下结构研究。本文将概要地介绍目前背景噪声数据处理特点及其在浅层结构研究进展;通过浅层结构勘查的应用,分析未来背景噪声方法的改进方面,讨论及展望其未来的研究重点方向。

1 噪声成像数据处理特点

利用地震噪声数据提取地下速度信息,有以下几种方法:1)倾斜叠加方法,它使用了主动观测体系,可以实现主动和被动相互结合的探测方式,可用于一维及二维的观测台阵;2)F-K方法,主要应用于二维台阵观测,布设相对自由,探测最大深度为1.5倍最大台站间距;3)空间自相关方法,可用较小的台间距获得更低频的频散曲线,该方法也在渐渐完善中,以提高其探测深度;4)噪声干涉方法,具有更深的探测能力,利用得到的台站对间的频散曲线反演出台阵下方二维或三维的速度结构较为可靠;5)噪声水平-垂直向谱比法,利用单台三分量地震仪进行短时间的观测,应用于地震场地研究及盆地结构研究^[6]。

地震仪记录的噪声数据,利用互相关方法^[4,7-8]得到台站间的经验格林函数并提取出频散曲线,后反演出地下速度结构。该方法大多应用于深部结构的探测,例如,国内研究大多集中在华北、青藏高原及地震多发地带区域,许多研究者利用噪声互相关成像方法来研究地壳速度结构、以各向异性研究大陆动力学、研究地震前后的波速差异以推测地震的可预测性等。

Bensen等^[5]总结了由背景噪声数据中得到面波频散曲线的处理方法。背景噪声成像的主要处理方法分为以下5步:①单台数据预处理,②提取格林

函数,③频散曲线的测量,④质量控制,⑤面波层析成像。其中,杨志高等^[9]采用S变换加权叠加,对四川台网2009年1月至2011年12月为期两年的连续地震波形数据进行互相关叠加处理,与传统的线性叠加相比,其让信号更加清晰,信号窗口之外的噪声干扰降低,有效的压制了干扰,将相干信号增强,突出有用信号。姚华建等^[10]提出了基于图像分析的双台面波相速度频散曲线快速提取方法,其通过Matlab交互式图型界面,对台站间的群(或相)速度进行选择提取;其能够清晰的展示频散曲线,且能大批量的处理噪声数据,此方法目前已被许多研究人员采用。肖翔等^[11]提出了自动追踪求根算法,使频散曲线的计算变得高效、准确。朱良保等^[12]对频散曲线的提取中的移动窗分析法、多重滤波法、残差频散测量法、时间变量滤波法从数学公式方面做了阐述,其得出提高信噪比对于相速度测量尤为重要。小区域进行浅层结构研究时,需考虑介质的各向异性,实际射线路径是沿着速度最快的路径传播的^[13-15]。利用Fang et al的三维横波速度结构反演方法^[16],以及Rawlinson and Sambridge的基于频率相关的射线追踪技术^[17]能获得更为精准的横波速度信息,其不需要产生二维群速度图,而是直接将所有频率相关和路径相关的面波旅行时测量结果转换成深层横波速度结构信息。

背景噪声数据处理流程相对比较统一,个别学者只是在某个处理环节进行改进,如互相关方法的改进以提高数据信噪比;频散曲线提取方法的选取,以提取精确的相(或群)速度;反演方法的选择,初始模型的精准建立,都是为反演地下结构能得到更准确的速度图像。

2 噪声成像在浅层结构勘查中的研究现状

2.1 浅层结构研究目标及意义

浅层结构是评估场地作用、进行场地分类、预防和减轻地震灾害的重要环节^[6]。对浅层结构的研究就是要建立从地表到基岩之间岩土物性(如:速度、衰减、密度等)和界面结构的分布。

钻孔测并能给出最准确的介质物性参数如波速、密度等;反射地震勘探可以给出比较精细的界面分布和P波速度结构;但是两者都相对昂贵且破坏研究区环境。传统的主动源面波勘探方法,虽然能

获得 S 波速度结构,但是其探测深度一般只有几米到十几米之间,探测深度较浅。

背景噪声成像是一种无源成像方法,其通过将台阵采集的数据,经互相关叠加得到台站间的经验格林函数,从中提取出频散曲线,进而反演地下的速度结构。浅层结构的横向变化而产生场地作用,S 波速度结构是造成地震灾害的关键参数,而噪声成像技术是不需要破坏地表环境且勘探深度取决于台站间距的一种无源勘探方法,利用台站提取的瑞雷波和勒夫波群(或相)速度进而研究浅层地质结构的 S 波速度结构。利用噪声研究浅层结构很大程度上弥补了其它传统方法的不足。

2.2 噪声成像在浅层结构勘查中的应用

Kang T S 等^[18]得到了 2~4 s 的 Rayleigh 波群速度图像;Pilz M 等^[19]利用人工噪声源获得浅层 25 m 的 S 波速度结构;Saygin E 等^[20]利用基阶瑞利波群速度反演得到地下横波速度结构,对印度尼西亚雅加达盆地研究发现一个厚的盆地覆盖了城市大部分区域,深度 1.5 km。

Lin F C 等^[21]对加利福尼亚州长滩进行了密集台站噪声成像,研究 1 km 的三维剪切波速度结构,3D 模型与已知地质特征具有相关性。噪声成像的浅层结构约束能力为传统的勘探地震学提供了一种低成本的补充方法。

Koulakov I 等^[22]对位于堪察加半岛区域的火山进行了噪声成像研究,其中对 Avachinsky 和 Koryaksky 两座活火山进行了重点研究,得到 2D 群速度(2~8 s),与前人的重力及大地电磁所取得结果相关性较好。

Huang Y C 等^[23]对台湾地区进行了 0.5~3 s 周期的互相关背景噪声成像,其比以往台站间距更短(约 5 km),以获得高频的背景噪声。其横向分辨率受台站间距及台阵布置的几何形状的影响。其通过对浅层速度的差异推断断层的位置,及将短周期速度结构与地震发生地带对比,发现其具有一定的关联性。

Li C 等^[24]对合肥盆地地区进行了短周期背景噪声成像研究,其对采集的两周的背景噪声数据进行处理,得到 0.5~2 s 周期的速度结构,反演出两条剖面横波速度,且与钻孔资料相结合对比分析后发现噪声成像技术较能真实的反映浅层地下的速度结构。

王爽等^[25]利用密集台网高频噪声对新丰江水库浅层结构进行研究,对断裂的展布形态有清晰的

显示,利用噪声成像所获得速度模型对研究精细断层结构提供了新方法。

噪声成像方法已实现对地震、火山、断层的检测。众多学者以将噪声成像方法应用到地壳地幔速度、各向异性研究中,已取得较好的成果;已有学者尝试将其应用到城市地下结构、矿产等勘查研究中。

2.3 技术分析

通过互相关方法提取经验格林函数已在地震学中被广泛使用。背景噪声成像其利用背景噪声数据进行面波层析成像,该方法摆脱了对天然地震源发布的依赖,可在无地震发生区域进行结构成像;台站的分布及射线覆盖程度,可有效获得高分辨率的成像结构。

地震数据类型的不同可能反映不同的地下结构。体波频率高、波长短,而面波频率低、波长长,它们两者对波速结构异常有不同的分辨率;面波中高阶面波通常比基阶面波含有更丰富的深部结构信息,基阶面波频散曲线和高阶面波波群对不同深度的波速结构有不同的分辨率^[26]。研究浅层结构时,台站的部署要尽量满足均匀部署的原则,当台站间有较好的地震射线分布(交叉)时,层析成像结果的分辨率也更加优质些。面波层析成像的观测数据为噪声信号互相关函数,再从中提取面波频散曲线,不同的滤波器参数也将影响频散曲线的形态,这些都会带来观测误差。

由于地球的地下结构非常复杂,而面波的射线追踪是基于结构简化后模型来进行的;面波中利用大圆距离假设和利用面波射线追踪建立的数学模型存在差异。虽然地震波观测是地震波传播路径上结构异常的积分,需要将研究区离散化为许多细小的单元网格并用各单元网格异常的叠加来代替积分。上述这些将可能导致最后层析成像结果的细小变化。

目前使用噪声互相关成像方法研究地下浅层结构技术流程相对较为统一,大多数研究者研究的多为基阶面波。对浅层高阶面波将是下一个浅层结构研究重点;高信噪比的频散曲线,能提取出更丰富的速度信息,有助于研究浅层精细结构。

3 讨论与展望

当前利用噪声成像互相关技术的研究领域主要集中在地球深部结构研究,浅层结构虽复杂多变的

物性变化,但大量研究证明利用噪声成像互相关技术研究浅层结构是可行的,其能获得丰富的物性资料,但是需对现有的噪声成像互相关方法改进,以适用于浅层结构的研究;获得精细的速度信息,将对认识浅层地质结构有更好的进展。

噪声互相关成像方法是地球物理学中研究浅层结构重点研究方向之一,该方法的应用拓宽了传统面波勘探方法,其不依赖主动源和天然源的发生,便可以得到短周期面波频散曲线,其分辨率主要取决于面波波长及射线密度。当研究区域台站分布均匀合理及射线分布密集,能得到高质量的面波频散曲线,后经反演得到研究区域精细的速度特征。

利用噪声层析成像技术研究浅层结构时,有些研究区域地表的起伏、高程差较大是否也需考虑地形校正。噪声互相关方法相对于其他利用噪声研究地下结构的方法,其提高了探测深度,所获得的速度信息也更为准确,更加立体研究地下结构,对于速度结构差异较大的地质体有较好的展现,研究区域三维分辨率受地下结构及台阵布设影响。

对研究浅层结构的短周期地震仪,提高其采样率及连续采集时间,以获得丰富的噪声数据。利用噪声互相关成像技术进行长期研究地下速度结构变化的较少,如大型水库蓄水前后周边地下结构速度的变化,台风及地震等对某一区域短期或长期地下结构所带来的变化,对地震带区域 10 km 以浅的研究甚少。地震灾害将对人民生命财产造成重大损失,中国幅员辽阔城市众多由其是大型城市,对城市浅层结构较好的认识,将有助于我们防治地震灾害发生所带来的损伤。未来对城市地下结构及地区浅层结构将是研究重点。在城市里合理的布设短周期地震仪器,将采集的高频噪声数据进行噪声互相关计算提取格林函数,从中提取频散曲线,后经反演得到横波速度,有助于我们分析城市地下浅层结构。搭建城市地下速度模型,进行数值模拟分析,将指导我们科学的开发建设城市及预防潜在的地质灾害。

短周期密集台阵探测技术已被更多的应用于城市地下结构探测及活断层探测中,这要求噪声成像互相关技术能提取高频范围可靠的经验格林函数,消除噪声源的影响、选取合适的反演方法、进行高阶面波成像、从噪声数据中提取出其他除面波的有用信息将是未来数据处理研究的重点方向。浅层结构探测研究需发展以噪声互相关技术为基础被动源成像技术,结合其他主动源探测,构建浅层三维精细速度模型,对研究区提供精细的浅层结构信息。

参考文献:

- [1] 齐诚,陈棋福,陈颢. 利用背景噪声进行地震成像的新方法[J]. 地球物理学进展, 2007(3): 771-777.
- [2] Aki K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors[J]. Bull Earthq Res Inst, 1957, 35: 415-456.
- [3] Weaver R L, Lobkis O L. Ultrasonics without a source: thermal fluctuation correlations at M Hz frequencies [J]. Physical Review Letters, 2001, 87(13): 134301.
- [4] Shapiro N M, Campillo M. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise [J]. Geophys Res Lett, 2004, 31(L07614): 1-7.
- [5] Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, et al. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements [J]. Geophysical Journal International, 2007, 169(3): 1239-1260.
- [6] 王伟君,陈棋福,陈凌. 松散浅层结构的地震噪声探测综述[J]. 中国地震, 2012, 28(4): 335-350.
- [7] Campillo M, Paul A. Long-range correlations in the diffuse seismic coda [J]. Science, 2003, 299(5606): 547-549.
- [8] Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, et al. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise [J]. Science, 2005, 307(5715): 1615-1618.
- [9] 杨志高,张雪梅,史海霞. 变换在地动噪声互相关叠加中的初步尝试[J]. 国际地震动态, 2016(10): 22-25.
- [10] 姚华建,徐果明,肖翔,等. 基于图像分析的双台面波相速度频散曲线快速提取方法[J]. 地震地磁观测与研究, 2004, 25(1): 1-8.
- [11] 肖翔,徐果明,朱良保. 面波频散曲线快速追踪算法[J]. 地震地磁观测与研究, 2004, 25(3): 1-7.
- [12] 朱良保,王清东. 地震背景噪声互相关函数的面波理论表达形式[J]. 地球物理学报, 2011, 54(7): 1835-1841.
- [13] Lin F C, Ritzwoller M H, Snieder R. Eikonal tomography: surface wave tomography by phase front tracking across a regional broad-band seismic array [J]. Geophysical Journal International, 2009, 177(3): 1091-1110.
- [14] Young M K, Rawlinson N, Arroucau P, et al. High-frequency ambient noise tomography of southeast Australia: New constraints on Tasmania's tectonic past [J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(13): 1-6.
- [15] Gouedard P, Yao H J, Ernst F, et al. Surface wave eikonal tomography in heterogeneous media using exploration data [J]. Geophysical Journal International, 2012, 191(2): 781-788.
- [16] FANG H J, YAO H J, ZHANG H J, et al. Direct inversion of surface wave dispersion for three-dimensional shallow crustal structure based on ray tracing: methodology and application [J]. Geophysical Journal International, 2015, 201(3): 1251-1263.
- [17] Rawlinson N, Sambridge M. Wave front evolution in strongly heterogeneous layered media using the fast marching method

- [J]. *Geophysical Journal International*, 2004, 156(3): 631 – 647.
- [18] Kang T S, Shin J S, Surface-wave tomography from ambient seismic noise of accelerograph networks in southern Korea [J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33(L17303): 1 – 5.
- [19] Pilz M, Parolai S, Picozzi M, et al. Three-dimensional shear wave velocity imaging by ambient seismic noise tomography [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 189(1): 501 – 512.
- [20] Saygin E, Cummins P R, Cipta A, et al. Imaging architecture of the Jakarta Basin, Indonesia with transdimensional inversion of seismic noise [J]. *Geophysical Journal International*, 2016, 204(2): 918 – 931.
- [21] Lin F C, Li D, Clayton R W, et al. High-resolution 3D shallow crustal structure in Long Beach, California: Application of ambient noise tomography on a dense seismic array [J]. *Geophysics*, 2013, 78(4): 45 – 56.
- [22] Koulakov I, Jaxybulatov K, Shapiro N M, et al. Asymmetric caldera-related structures in the area of the Avacha group of volcanoes in Kamchatka as revealed by ambient noise tomography and deep seismic sounding [J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 2014, 285: 36 – 46.
- [23] Huang Y C, Yao H, Huang B S, et al. Phase Velocity Variation at Periods of 0.5 ~ 3 Seconds in the Taipei Basin of Taiwan from Correlation of Ambient Seismic Noise [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010, 100(5A): 2250 – 2263.
- [24] Li C, Yao H, Fang H, et al. 3D Near-Surface Shear-Wave Velocity Structure from Ambient-Noise Tomography and Borehole Data in the Hefei Urban Area, China [J]. *Seismological Research Letters*, 2016, 87(4): 882 – 892.
- [25] 王爽, 孙新蕾, 秦加岭, 等. 利用密集地震台网高频环境噪声研究广东新丰江库区浅层地下结构 [J]. *地球物理学报*, 2018, 61(2): 593 – 603.
- [26] 冯梅, 安美建, Suzan van der Lee. 利用面波波形模拟探测中国大陆地壳和上地幔波速结构的分区特征 [J]. *地震学报*, 2008, 30(2): 114 – 122.

Current status and prospects of noise correlation imaging method in shallow structure exploration

LUO Lei^{1,2,3}, LIANG Feng^{2,3}, FU Guangming^{1,2,3}, LUO Fan^{1,2,3}, TAO Xin^{1,2,3}

(1. School of Geophysics and Measurement-control Technology, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3. China Deep Exploration Center, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: In recent years background noise imaging methods have gradually matured. With the deepening of research theories many scholars have applied them to study of the deep velocity structure of the Earth, and have achieved good results. More shallow physical information obtained in the study of shallow structures will greatly enhance the understanding of shallow structures. The shear wave velocity information obtained by the noise cross-correlation imaging method can effectively identify underground structures with large differences in velocity such as underground faults, voids and caves, which will help us to prevent the geological disasters such as earthquakes. This paper intends to introduce the research status of noise imaging in recent years, especially shallow structure exploration applications (such as urban underground structures, minerals, faults, etc.), introduce the development background of noise imaging, data processing characteristics, and summarize its exploration in shallow structure. Application and reliability, explore the perfection of the technical methods to obtain shallow fine 3D or 4D structural drawings.

Key Words: ambient seismic noise; cross-correlation; shear wave velocity; shallow structure; urban underground structure