

Research Status and Progress of Surface Wave Exploration Technology

Guangwen Wang^{1,2*}, Haiyan Wang^{1,2#}, Hongqiang Li³, Hongshuang Zhang^{1,2}, Wenhui Li^{1,2}, Xiaowei Zhang¹

¹Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing

²Deep Earth Dynamics Key Lab of Ministry of Natural Resources, Beijing

³Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing

Email: 1175712161@qq.com, #hyanwhy@126.com

Received: Sep. 5th, 2019; accepted: Sep. 19th, 2019; published: Sep. 26th, 2019

Abstract

Surface wave exploration technology has the characteristics of high detection accuracy, convenient construction and low cost. It has developed rapidly in recent decades and is widely used in shallow surface exploration. At present, there are many reviews of surface wave articles published at home and abroad, and different reviews focus on different points. This paper focuses on the Rayleigh surface wave exploration methods, domestic research status and application fields. Firstly, this paper introduces the basic process of surface wave exploration and several common surface wave exploration methods, and makes a brief comment on the advantages and disadvantages of each method. Secondly, according to the different sources, it focuses on the development process and current research status of surface wave. Then, according to the latest research progress and encounters of surface wave exploration, the possible development trend of surface wave exploration technology and some noticeable directions are discussed.

Keywords

Surface Wave Exploration, Method Principle, Application Status, Progress

面波勘探技术的研究现状及进展

王光文^{1,2*}, 王海燕^{1,2#}, 李洪强³, 张洪双^{1,2}, 李文辉^{1,2}, 张晓卫¹

¹中国地质科学院地质研究所, 北京

²深地动力学重点实验室(自然资源部), 北京

³中国地质科学院, 北京

Email: 1175712161@qq.com, #hyanwhy@126.com

收稿日期: 2019年9月5日; 录用日期: 2019年9月19日; 发布日期: 2019年9月26日

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王光文, 王海燕, 李洪强, 张洪双, 李文辉, 张晓卫. 面波勘探技术的研究现状及进展[J]. 地球科学前沿, 2019, 9(9): 799-815. DOI: 10.12677/ag.2019.99086

摘要

面波勘探技术具有探测精度高、施工方便、成本低等特点,近几十年发展迅速,并广泛应用于浅地表勘查。目前,关于面波文章的综述,国内外发表的都比较多,不同的综述侧重点不一样。本文重点介绍瑞雷面波的勘探方法、国内研究现状及应用领域。文中首先介绍了面波勘探的基本流程和几种常见的面波勘探方法,并对每一种方法的优缺点进行了简单的评述;然后根据源的不同,重点介绍了面波的发展历程及目前的研究现状;再根据面波勘探最新研究的进展情况以及遇到的问题,讨论了面波勘探技术以后可能的发展趋势及一些值得关注的方向。

关键词

面波勘探, 方法原理, 应用现状, 进展

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人们的生活离不开浅地表,它是支撑人类各种活动的基础,因此,浅地表的开发及利用对人类活动至关重要,而浅地表最关键的地震参数之一是横波速度,它是浅层土动力学特征评价的重要参数,且可以为地震区划提供依据,因此如何精确获得浅地表的横波速度一直是地球物理学家研究的重要方向[1] [2]。目前,浅地表勘探方法主要有地质雷达、高密度电法、浅层折射法以及面波勘探等。地质雷达探测精度高,但倘若地表存在低阻层是,他的探测深度以及有效波的识别会受到一定的影响;高密度电法在滑动面较湿的情况下探测效果较好,但容易受体积效应的影响;地震浅层折射法,探测深度范围广,折射波易识别,但不能探测高速层下异常,存在折射盲区;面波勘探作为近几十年新兴物探方法之一,由于其具有分辨率高、分层能力强、施工方便、不受高速层影响等优点,目前,在浅层地表勘探中应用广泛。

面波主要是集中于距离自由地表约一个波长范围内的弹性波,它是体波与自由界面相互作用的产物,具有能量强、频率低、频散等特点[3]。依据质点震动的方式可以分为瑞雷波和勒夫波,由于勒夫波不及瑞雷波容易激发,因此实际工程应用较少,本文重点介绍瑞雷面波探测的相关内容,包括瑞雷面波勘探的基本流程、目前国内外几种常用方法的基本原理和优缺点、面波勘探的发展历程及研究现状。并在此基础上简单评述了面波勘探技术几个值得关注的热门方向及发展趋势。

2. 面波勘探的基本流程

面波勘探主要是应用其频散特性,即在均匀水平层状介质中,其速度会随着频率变化,频率越低,传播的速度就会受到越深的地层介质的影响。其基本流程包括3方面(图1):通过野外观测获得不同频率的面波数据;再利用一定的处理方法提取频散曲线;最后经过反演方法获得二维横波速度结构,从而得到不同深度的介质属性[4] [5] [6]。

2.1. 面波数据采集

原始数据采集时要根据勘探深度及目的来设定,主动源面波勘探主要以线型为主(图2),道间距要小

于最小勘探深度；偏移距一般根据地层波速来设定；最大源检距采集到的面波要保证能被记录到[7] [8]；最佳激振方式(锤击、炸药)要根据勘探深度和薄层厚度来确定。而被动源数据采集一般要布设台阵(图 3)，台间距的 3~5 倍为有效探测深度[9]。同时，台阵有方向选择性，对于平行于排列方向的波的分辨力最好，因此目前圆形台阵与三角形台阵在实际应用中比较常见。

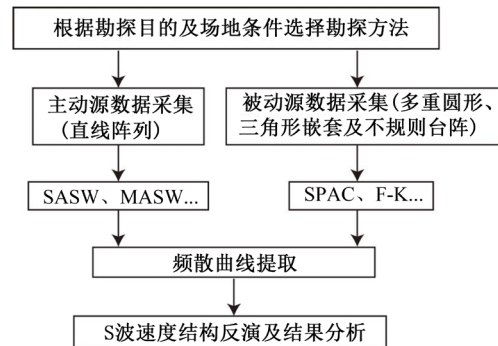


Figure 1. Flow chart of surface wave exploration
图 1. 面波勘探流程图

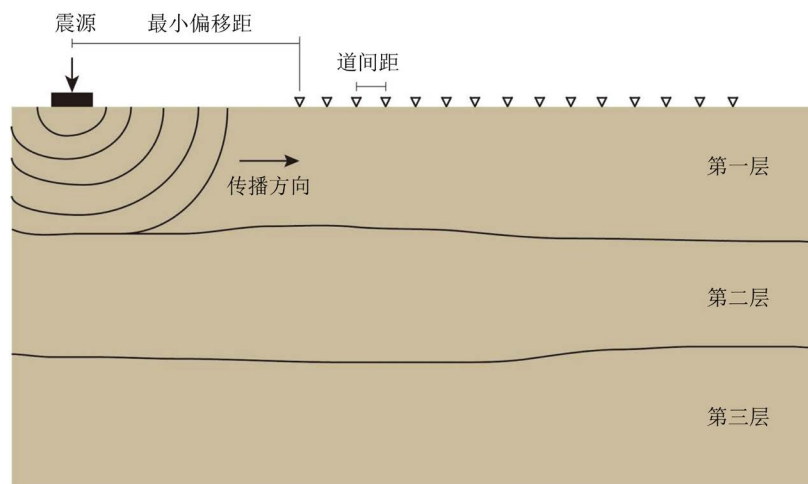


Figure 2. Schematic diagram of active source surface wave acquisition
图 2. 主动源面波数据采集示意图

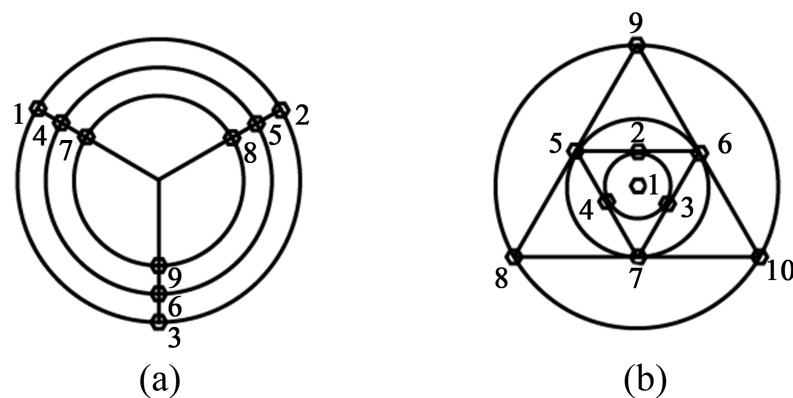


Figure 3. Layout of spatial autocorrelation normal array
图 3. 空间自相关法台阵布设

2.2. 频散曲线提取

频散曲线的提取是面波勘探最关键的一步,其精度的高低将直接影响后面的反演[10]。目前主动源面波频散曲线提取的方法比较多,但每一种方法有自己的优缺点,比如 τ - p 法对高阶模态的提取效果较好,而相移法对基阶模态的提取效果较好,实际应用中两者可以优势互补[11]。F-K法对高阶面波敏感程度更高[12]。倾斜叠加法可为三维面波勘探提供方法技术支持[13]。高分辨率线性拉东变换可以降低噪声模型的数据限制,提高能量谱的分辨率[14][15]。被动源面波中SPAC法应用的较多,这主要是因为它对低频段信息分辨率高,而且频率范围宽;F-K法能够区分高阶面波,但要求的接收点较多,而且当信号来自各个方向时,分辨率会显著降低。HV谱比法采集相对方便,能适应各种的地形,但不能完全定量的反演地下横波速度结构。

2.3. 横波速度反演

最早面波反演用的是半波长经验法,这种方法算出的结果一般误差较大,后来发展为通过建立正演模型不断进行拟合,调整与实际频散曲线的误差,得出反演结果的方式。随着近些年最优化理论的发展,目前反演方法主要分为最小二程法和全局搜索算法,前者对初始模型要求比较高,后者较低,但收敛速度会变慢[16][17]。实际应用时应根据工区的地质情况和勘探目的,合理的选择反演方法[18]。

3. 面波勘探主要技术方法

面波勘探的研究始于上世纪60年代。经过几十年的发展,面波勘探技术已经相当成熟,处理方法经过不断地改进也日趋完善。主动源面波勘探由稳态发展到瞬态,再由瞬态的表面波谱方法发展到多道瞬态面波勘探方法,勘探精度及勘探效率也在逐渐提高,应用的领域也越来越广泛。与主动源不同,被动源方法在工程应用方面起步较晚,但发展速度较快,方法也越来越成熟[19],包括空间自相关法[20]、频率波数法[21]、HV谱比法[22]等。

3.1. 主动源面波勘探方法

3.1.1. 稳态面波法

稳态面波的应用相对较早,它主要是通过激振器发出某一频率的正弦波,然后使接收点的距离等于激发频率对应的波长,此时示波器将显示相同相位的波形。将检波器移动到 n 倍波长时, n 个测点连成的时距曲线的斜率就是对应频率的面波速度。通过激发不同频率的信号,然后将这一系列频散点连接起来即为频散曲线[23]。在得到频散曲线后,根据瑞雷波与剪切波的速度关系,以及面波反演中的半波长法,就可以得到二维横波速度剖面。该方法由于采用的是经验法得到的横波速度结构,因此存在一定的误差[5][24]。由于稳态面波法设备笨重,在地形复杂地区很难操作,给施工带来一定的麻烦,后来这种方法的应用逐渐减少。

3.1.2. 表面波谱分析方法(SASW)

表面波谱分析法通过震源激发地震波信号以后,将会产生一较宽频带的信号,然后利用两个检波器进行接收,并根据两个检波器的距离以及单一频率的相位差,可求得此频率的相速度,进而得到频散曲线[25][26][27]。SASW方法可以同时检测多层介质中各层的厚度及速度,测量速度快,精度相对较高。但由于工区噪声、信号衰减、以及空间假频和近场效应的影响,一般测得的数据频带范围宽。为了提高频带的分辨率,实际数据采集过程中,要调整近源检波器与源的距离,使其和道间距相等[23]。表面波谱法相对于稳态法而言,施工简便,更能适应地形的复杂多变,但是由于一直沿用2个垂直分量检波器接收,道数较少,在干扰波复杂的地区很难达到较好的勘探效果。

3.1.3. 频率波数法(F-K)

频率波数法是通过二维傅里叶变换将频率空间域的信号转化成频率波数域, 然后得到一个炮集记录的能量分布情况, 再根据振幅能量最大的特点提取频散曲线[28]。但传统的频率波数法存在一定的缺陷, 对高阶的能量分辨率较差, 进入 21 世纪以后, 在传统方法的基础上对其进行了改进优化: 将传统的频率-波数域波数形式改造成频率-速度域形式, 然后引入多重信号分类算法将空间谱相关矩阵分解为信号子空间和噪声子空间两个部分, 最后利用噪声子空间部分生成最终的面波频散图像, 大大提高了精度。经过改进后的频率波束法, 可以提高高阶面波的分辨率, 但是由于对于检波器的要求比较高, 采集过程中检波器必须沿着测线等间距分布, 中间不能有空道, 否则就会影响其成像精度。

3.1.4. τ - p 法

τ - p 法是一种离散化的线性拉东变换。它将时间和空间域的地震数据按照不同的截距时间 τ 和斜率 p 作切割线, 然后倾斜叠加投影到 τ - p 域, 接着进行一维傅里叶变换, 将 τ - p 域结果映射到 f - p 域, 再根据速度与慢度的关系, 将 f - p 域的结果映射到 f - v 域, 就可以看到面波能量的频散现象, 并根据能量团最大的特点提取频散曲线[29] [30] [31]。 τ - p 法对面波高阶的分辨率较高, 并且经过改进之后, 对于提取瞬态瑞雷波频散曲线具有失真小、可靠性高、压制假频和端点效应好等优点。

3.1.5. 相移法

该方法可以说是频率波数法的改进, 它的不同在于未变换到波数域而直接利用了空间相位信息来计算相速度[32] [33]。具体做法是把变换到频率域后的面波记录表示成振幅与相位的乘积, 然后将振幅项进行归一化处理[34], 此时会形成单炮的频散能量图, 依据能谱提取频散曲线。相移法对基阶面波频散曲线的提取效果较好, 并且经过伍敦仕改进之后的互相关相移法, 提高了常规相移法在面波频散成像方面的品质, 更加能适应对基阶面波的分辨。

3.1.6. 倾斜叠加法

倾斜叠加法只和偏移距有关, 与检波器的排列方式无关, 该方法利用频率扫描函数与炮集记录进行卷积将频率分解, 把时间变为频率, 接着用倾斜叠加的方式得到每个速度的叠加能量值, 使瑞雷波频散曲线的精度得到较大幅度的提高。倾斜叠加法为三维面波勘探的理论打下了基础, 未来更加能够适应三维面波勘探任务[13]。

3.1.7. 其他方法

面波频散曲线的提取方法还有很多, 比如: 高分辨率线性拉东变换[14]、小波变换[15] [35]等, 这里只是介绍了几种常见的方法。其他的方法也各有自身的优缺点, 以及自身的应用范围, 它们的应用会给面波勘探提供更好的约束[12] [23]。

3.2. 被动源面波勘探方法

3.2.1. 空间自相关法(SPAC)

空间自相关法关键在于计算自相关系数, 然后根据系数计算相速度[20] [36], 目前主要分为时域计算和频域计算两种方式。时域计算首先是将连续记录的数据进行截取, 分成若干的道集记录; 然后对每一道数据进行窄带滤波, 计算不同频率时圆心与圆周上各点的空间自相关系数, 并且进行方位平均; 最后使用不同观测半径的自相关系数计算相速度[23] [37]。频率域的计算过程是去掉了窄带滤波这个过程, 只进行一次傅里叶变换就可以在时域里进行计算, 大大提高了计算效率[8]。SPAC 方法只需较少的接收点就能反映较宽的频率范围, 特别是对低频段的信息分辨率较高, 但很难分辨高阶面波。

3.2.2. 频率波数法(F-K)

F-K 法相对于传统 SPAC 法, 台阵布设比较灵活, 十字型、L 型、圆形等都可以。传统的频率波数法是利用中心频率不同的窄带滤波器, 提取相似性较好的各数据段中不同频率的 F-K 功率谱, 根据功率谱上最大的峰值坐标, 计算得到不同频率的相速度值[21] [24]。由于被动源波场一般都比较复杂, F-K 频散谱上经常会出现多个峰值, 使得分辨率降低, 给提取频散曲线带来一定的困难。后来在此基础上对传统的方法进行了改进, 主要是将各个方向上的 F-K 频散谱叠加, 然后在叠加后的频散谱上提取频散曲线。具体的做法是将连续记录的数据截取成记录长度一样的道集记录, 然后经过二维波场变换生成频散谱, 再将所有方向上的频散谱叠加合成新的频散谱[38]。F-K 法能分辨高阶面波, 但采集过程中需要较多的接收点, 而且当信号来自各个方向时, 分辨率会显著降低。

3.2.3. HV 谱比法(HVSR)

HVSR 法主要是在自相关分析的基础上, 计算同一观测点水平分量和垂直分量的谱比, 并依据谱比估算地下横波速度特征, 同时可以根据谱比峰值对应的卓越频率推测地层地下构造, 是一有效的半定量的地震场地评价方法[39] [40]。HV 谱比法相对于其他方法, 采集相对方便, 能适应各种的地形, 但是不能完全定量的反演地下横波速度结构, 目前国内外的应用还比较少, 大多用在区域地质构造调查中[41] [42]。

4. 面波勘探技术国内外发展历程及现状

4.1. 主动源面波

4.1.1. 国外发展历程及现状

主动源面波最早的应用是稳态法, 60 年代由美国人提出, 并将此方法应用于地基勘察。上世纪 80 年代, 日本经过多年的研究试验, 发明了 GR-810 佐藤式全自动地下勘探机, 其原理就是基于稳态面波勘探的方法, 但由于仪器极为笨重, 不利于搬运, 因而限制了其使用范围。到了 80 年代中期, 英国人成功研制了轻便灵活的 GDS 连续表面波系统, 为稳态面波法勘探提供了较好的设备支撑[43]。进入 90 年代以后, 由于稳态面波勘探自身的不足, 瞬态勘探应运而生, 最早应用的瞬态方法是表面波谱方法, 由 Stokoe 提出, 他通过试验并利用 2 个检波器之间波的相位关系求得了面波的相速度[25]。同年, Nazarian S 等用 SASW 法对高速公路路面及路基进行了探测, 为瞬态面波在工程中的应用奠定了基础[26] [27]。但是此方法由于检波器的数量较少, 使得干扰波较多, 给后期的处理带来一定的麻烦。20 世纪 90 年代初, 多道瞬态瑞雷面波勘探由美国堪萨斯大学提出并开始应用, 相对于表面波谱法, 它能很好地将噪声压制, 目前此方法也是主动源面波勘探最常用的方法之一, 广泛应用于工程的各个领域。如: Yilmaz 等利用多道瑞雷面波勘探技术反演得到土耳其 Izmit 市浅层横波速度(图 4), 并且利用横波速度对此地区进行了地震区划划分[44]。Beaty 等利用多道瞬态瑞雷面波勘探方法, 对加拿大 Alberta Edmonton 大学周边的地区进行了二维横波速度勘探, 并研究了不同方法对提取频散曲线的影响[45]。Ivanov 等利用美国亚利桑那州一个沙漠采集到的数据, 进行面波和折射波联合分析, 利用面波反演得到的速度信息约束折射波的走时, 可以降低多解性问题, 为工程勘探提供可靠的参数支持[46]。伴随着多道瞬态面波勘探方法的日趋成熟, 一些提取频散曲线的方法也在实际应用中得到了验证及改进, 如: Gabriesls 提出频率波数法以后, 用于提取多模态的面波频散曲线, 并得到了较好的勘探效果[47]。Park 等提出的相移法是在频率波数法上进行改进, 不同之处在于直接利用了空间相位信息来计算相速度, 在实际工程应用中提高了计算效率[33]。此外还有 τ - p 法、倾斜叠加法等不同频散曲线提取方法在实际的应用研究中被提出[12], 这些处理技术的出现及提升, 推动了面波勘探技术向着解决更加复杂地质问题、提高勘探精度的方向发展。

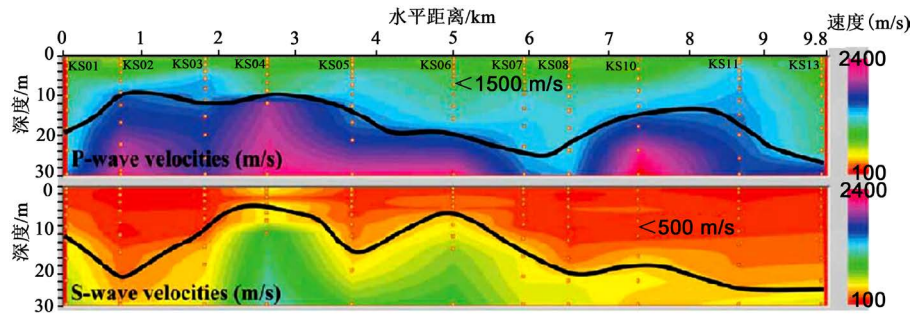


Figure 4. Comparison of Shallow S-wave Velocity and P-wave Velocity in Izmit, Turkey (Yilmaz *et al.*, 2006)

图 4. 土耳其 Izmit 市浅层 S 波速度与 P 波速度对比(Yilmaz *et al.*, 2006)

4.1.2. 国内发展历程及现状

我国工程界在上世纪 70 年代初开始对稳态面波进行测试试验研究,由于当时的技术条件不太成熟,无法对地基土进行分层,因此,对这种方法的研究沉寂了一段时间[48]。到了 80 年代后期,稳态面波法试验研究在我国悄然兴起,杨成林等研制了一套稳态瑞雷波勘探系统,并将其应用在岩土工程勘察和地基地层划分[3]。此后,各个研究院及高校均开展了应用开发研究。由于稳态法自身的限制,到了 90 年代初,我国开始对瞬态面波勘探中的表面波谱法进行试验研究。如:任青文等对表面波谱方法的基本原理进行了讨论,并且对此方法的应用前景进行了评价[49]。浙江大学陈云敏等利用表面波谱方法检测了公路结构层的刚度,判断了设计施工是否满足要求[50]。赵占竹等用表面波谱分析方法评价了地基下的暗塘,并得到了钻井较好的验证[51]。虽然此方法 90 年代在工程上应用较多,但是由于数据采集一直沿用 2 个垂直分量检波器接收,道数较少,干扰波相对较多,使勘探精度及深度受到了限制。到了 21 世纪初,表面波谱法在工程中的应用逐渐减少,多道瞬态面波勘探应用逐渐增多。我国刘云祯和王振东是最早对多道瞬态瑞雷面波勘探法研究及应用的学者,并成功研制出 SWS 瞬态面波勘探仪,此仪器对推动我国瞬态面波勘探技术的发展及应用起到了至关重要的作用。借助 SWS 瞬态面波勘探仪,任健等对山西某引水工程进行了第四季地层划分及寻找基岩面的研究,探测到基岩面风化线的位置剖面,分辨率较高,并且得到了钻井资料的验证[52]。向晓松等利用多道瞬态瑞雷面波勘探技术,对北京通州某建筑场地液化程度进行判别,并且通过面波速度计算标准贯入锤击数,达到定量评价地基液化状况和处理效果的目的[53]。张淑婷等利用多道瞬态面波勘探技术,并采用频率波数法对余山水库坝体基底面进行了探测(图 5),划分了坝基底部风化层和含水层的位置[54],为后面的施工处理提供较好的参数支持。

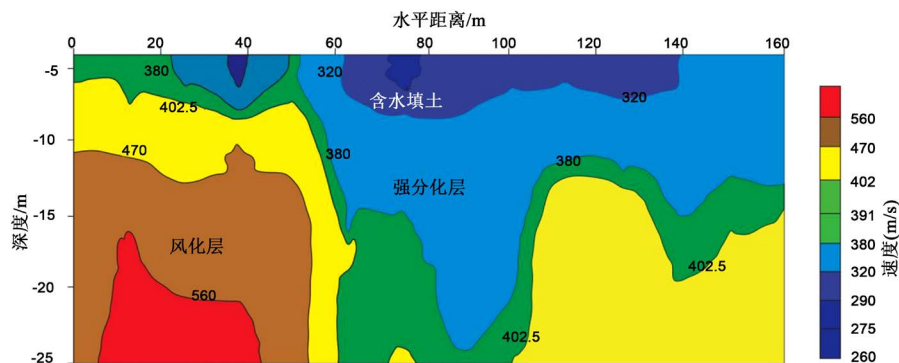


Figure 5. Surface wave exploration profile of Yushan reservoir dam foundation (Zhang *et al.*, 2013)

图 5. 余山水库坝基面波勘探剖面图(张淑婷等, 2013)

多道瞬态瑞雷面波勘探技术除了以上在不同工程领域的应用之外, 近些年我国对各种处理方法的应用及改进也做了很多的研究。如: 李欣欣等对能谱上的振幅值求 n 次幂, 增强了次峰的振幅, 提高了 F-K 法对高阶面波的分辨能力[55] (图 6)。伍敦仕等将传统的频率 - 波数域波数形式改造成频率-速度域形式, 然后引入多重信号分类算法将空间谱相关矩阵分解为信号子空间和噪声子空间两个部分, 最后利用噪声子空间部分生成最终的面波频散图像, 通过理论数据原始数据的对比分析, 可以得到较高精度的相速度图像[56]。同年, 伍敦仕等根据传统的相移法提出一种新的方法-互相关相移法, 该方法通过将互相关引入, 提高了面波成像质量[57]。宋先海等对 τ - p 法进行了改进, 相对于传统的 τ - p 法, 改进后的 τ - p 法对于提取瞬态瑞雷波频散曲线具有失真小、可靠性高、压制假频和端点效应好等优点[58]。伴随着不同方法的改进及优化, 并且有实际工程钻井资料的验证, 经过这些年的发展, 使得多道瞬态瑞雷面波有了一套较为成熟的勘探系统, 为我国工程勘探领域做出了巨大的贡献。

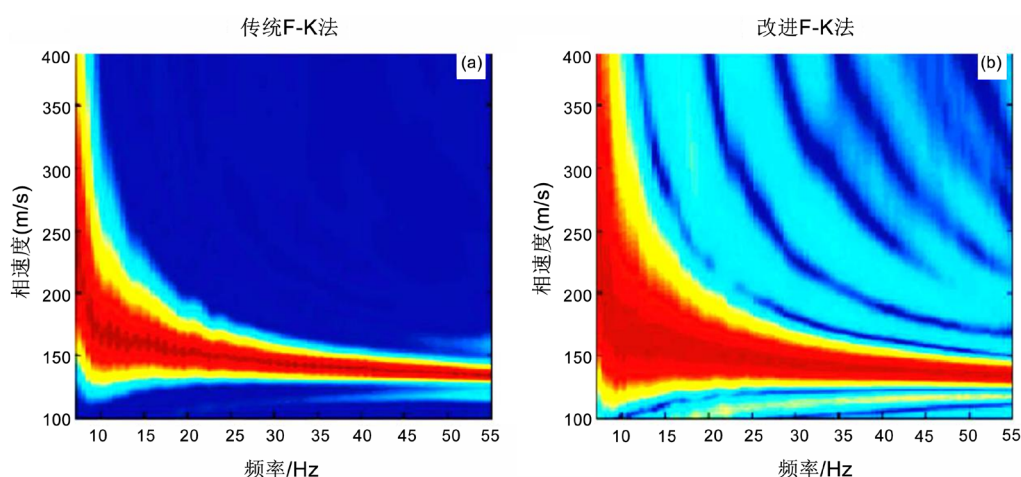


Figure 6. Comparison of traditional F-K method (a) and improved F-K method (b) in actual single gun energy diagram (Li *et al.*, 2017)

图 6. 传统 F-K 法(a)与改进 F-K 法(b)在实际单炮能量图中的对比(李欣欣等, 2017)

4.2. 被动源面波

4.2.1. 国外发展历程及现状

被动源面波勘探除了采集方式与主动源方法不同以外, 其处理流程与主动源基本一致[59] [60]。被动源方法最早由 Aki 提出, 并在之后做了系统的研究。上世纪 60 年代, 利用被动源面波反演地壳或上地幔横波速度结构的理论方法被提出, 并在之后的研究中得到广泛应用, 如: Forsyth 等利用单台法中 76 条路径所得到的面波群速度和相速度, 研究太平洋东部地区洋壳的演化史[61]。Wiggins 等通过研究面波与地球自由震荡的一般线性反演问题时, 发现只利用瑞雷波或勒夫波的一种时几乎不能得到关于地球密度结构的信息, 除非两者同时利用[62]。Burkhard 等研究了面波反演与上地幔密度的关系, 发现上地幔的密度很难确定, 并且对面波的反演影响很大[63]。松岛健等利用长周期面波对日本的石狩平野及十胜平野地区进行 S 波速度反演, 推断了深层地基构造特点[64]。被动源面波的研究在国外一直就没有间断过, 到了 90 年代开始用于浅层勘探, 特别是日本, 较早的就开展了利用天然源面波探测阪神地区浅地表结构的研究, 并在之后的工程勘查中取得了较好的勘探效果。进入 21 世纪以后, 被动源面波勘探技术已经相当的成熟, 并广泛应用于浅地表工程勘探, 如: Hiroshi 等利用 HV 法对三分量微动记录资料进行反演, 得到浅地表的 S 波速度结构后, 与测井资料进行对比, 其误差小于 0.1 km/s [65]。Scherbaum 等利用单台和台阵采集的微动资料测定了德国 Cologne 市附近的浅部横波速度剖面[66]。Estrella 等用通过空间自相关

法对微动数据进行处理,反演得到了墨西哥城一所大学场址 2 km 深度范围内的浅层速度结构,与 F-K 方法探测的结果基本一致[67]。Javad 等通过对不同环境噪声与地面震动所产生的被动源面波研究,发现被动源实测结果和主动源勘探结果有很大的相关性[68] (图 7)。目前,被动源面波勘探在工程的安全评价、施工规范设计中发挥了不可替代的作用,它突破了源的限制,使得在嘈杂的城市环境中也能发挥较好的勘探效果,不会受到其他噪音的干扰,让城市勘探变得更加容易。

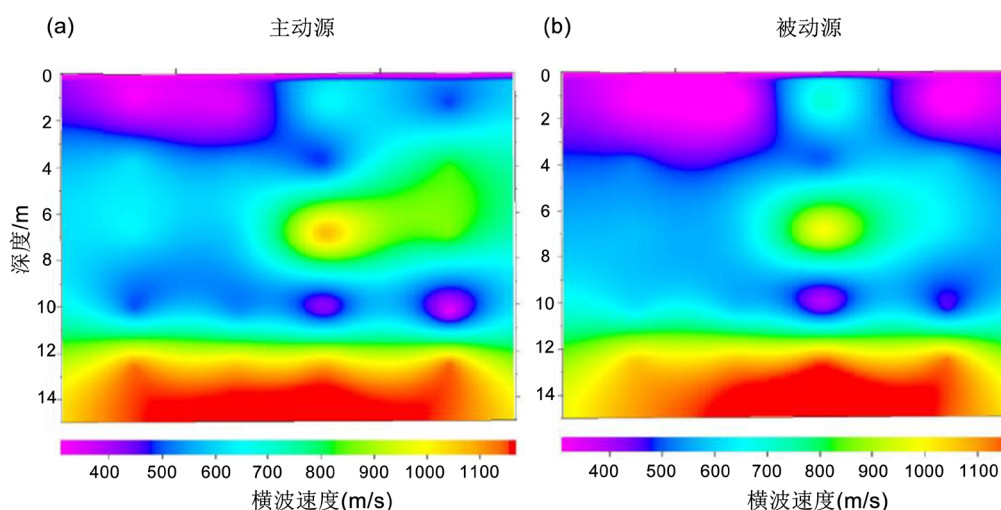


Figure 7. Comparison of active and passive source surface wave inversion (Javad *et al.*, 2018)

图 7. 主动源与被动源面波反演对比图(Javad *et al.*, 2018)

4.2.2. 国内发展历程及现状

我国对被动源面波的研究也相对较早,20 世纪 60 年代初,宋仲和等就利用了面波的群速度对我国的地壳厚度进行研究[69],之后石耀林等利用勒夫波频散曲线反演地壳结构[70],以及现在赵建忠等利用背景噪声成像技术反演南壳幔结构的研究,利用被动源面波对地球结构的研究就从来没有间断过[71]。在 20 世纪 90 年代初,我国开始对被动源面波勘探技术进行研究,并且当时在工程上也出了一些成功的应用,如对北京某地区地热探井进行了地层层位预测[72]。进入 21 世纪以后,由于主动源炸药震源的限制,近几年国内对被动源方法的应用在逐渐增多,如:刘宏岳等利用微动技术探测了福州地铁一号线地下孤石的分布情况,为前期的施工准备提供了数据支撑[73]。李翀等利用被动源面波勘探的方法对南昌某研究区进行了地层的划分,并结合相关资料推测了古河道的大体位置[74]。赵东等利用被动源空间自相关方法调查了煤炭采工区,并通过反演的横波速度划分低速区,精确地得到了采空区的位置[38]。丰赞等利用被动源与主动源面波联合勘探技术,对西南某水电站坝址场地进行反演,得到横波速度并根据不同岩层与速度的对应关系进行地质分层[75] (图 8)。我国被动源面波勘探不仅工程上有成功的应用,在硬件设施的研究以及方法技术的改进中都有了一些突破。如:刘云祯团队经过几年的软硬件开发及程序的调试,研究开发出一套具有自主知识产权的天然源智能采集系统-WD 智能勘探仪,目前在很多勘探领域推广及应用,并得到了钻井资料的验证[72]。程浩等改进了传统的被动源数据稀疏反演一次波估计问题的求解方法,将被动源稀疏反演一次波估计求解问题转化为双凸 L1 范数约束的最优化求解问题,使得成像质量得到改善,反演结果更加可靠[76]。李欣欣等通过改进 F-K 方法,提高了频散曲线的频带宽度,并且增加了对高阶面波拾取的精度[55]。于东凯等通过改进蜂群算法,提高了在迭代过程中快速收敛到全局最优解的速度,使得反演的结果更加可靠[77]。近几年来利用微动台阵观测技术测定地层速度结构已成为我国地球物理勘探研究热点之一,相关的研究成果也不断涌现[78] [79],给工程勘探带来了巨大的效益。

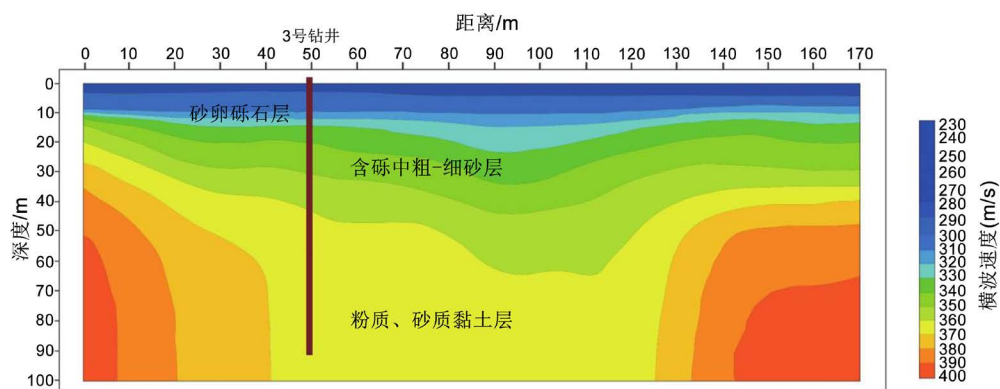


Figure 8. S-wave velocity profile (Feng *et al.*, 2018)

图 8. 横波速度剖面图(丰贇等, 2018)

4.3. 主动及被动源面波勘探国内外的继承性及差异性

4.3.1. 继承性

国内面波勘探技术很多延续并利用了国外的技术及方法。1) 在主动源面波勘探方面, 我国继承了国外面波勘探发展过程中从稳态到瞬态, 从表面波谱法发展到多道瞬态的过程。稳态面波技术在国外发展十年左右之后, 我国开始引进稳态面波勘探技术, 在原来的基础上研究了一套稳态面波勘探系统, 并广泛应用于浅地表土层划分。到了 20 世纪 90 年代, 伴随着瞬态表面波法的兴起, 我国开始对瞬态面波勘探中的表面波谱法进行试验研究, 并将此方法应用于公路、地基等地下结构探测。在多道瞬态面波勘探技术兴起以后, 多种提取面波频散曲线的方法被提出, 包括频率波束法、相移法、 τ - p 法等, 后来这些方法逐渐被国内引入, 并且部分方法在此基础上进行了改进, 如李欣欣改进了频率波束法, 提高了高阶面波的分辨率。2) 被动源面波的研究国内外起步时间差不多, 主要依据的是 Aki 的理论。和国外的研究过程相似, 我国最早利用面波研究壳幔结构。到 90 年代以后, 我国开始利用被动源面波研究浅地表结构并用于工程勘探, 研究开发出一套具有自主知识产权的天然源智能采集系统。

4.3.2. 差异性

国内外对于面波勘探的研究虽然顺序基本是一样的, 但仍然存在较多的差异。1) 国内对于面波的研究普遍比国外要晚, 很多理论方法大多是在国外被提出, 然后被引进国内, 经过实践应用, 不断的完善并达到勘探以及科研的目的。2) 在目前应用较多的主动源多道瞬态面波勘探技术中, 国内外的研究基本上是同时起步的, 但处理方法却不一样。国外以美国堪萨斯大学为首, 并提出相移法, 研究出一套自己的多道瞬态瑞雷面波勘探系统。而我国则以刘云祯和王振东学者为首, 研制出 SWS 多道瞬态面波采集系统, 广泛应用于工程勘探。3) 在主动源面波频散曲线的提取方法中, 我国相对于国外做出了很多改进, 大大提高了频散曲线的提取精度, 并且对于高阶面波的提取精度也有较大的改善。4) 国内外对于被动源面波的研究起步基本相同, 但是相对于国外而言, 我国大多是利用被动源面波研究地壳结构, 对于浅地表地层结构的探测应用较少, 近几年随着仪器灵敏度、精度等方面的提高, 利用被动源面波进行浅地表勘探已经在工程上得到成功的应用并推广开来。

5. 面波勘探技术的应用

5.1. 工程勘察中的应用

随着工程建设场地复杂程度以及施工难度的提高, 岩土工程的施工与设计对地下层位的厚度、横波

速度、岩石物理学参数提出了更高的精度要求。面波勘探具有干扰小，对浅层成像精度更高，土层划分较精细等优点被广泛应用于岩土工程勘察。

5.1.1. 划分土层

面波勘探最终所测得的横波速度与地下介质的密度或者松散程度有关，在划分地层方面有较好的分辨能力，特别是对于寻找基岩面或者密实度差异较大的第四季土层的划分，能够取得较好的结果。目前岩土工程勘察中用于划分土层的实例较多，如北京水电研究院的杜正涛等利用瑞雷面波勘探技术对太原市某工区的第四季土层进行了划分，砂层、粉砂层以及卵石层与实际钻井资料对比的较好[80]。相对于其他方法，面波勘探可以解决速度倒转、薄层等问题，并且可以找出软弱夹层以及硬层，因此在划分土层方面相对其他方法具有得天独厚的优势[4]。

5.1.2. 工程无损检测

近些年，瑞雷面波勘探在工程无损检测中取得了长足的发展，由于面波可以反映地基土的密实性变化，并且可以估算出土层的大致承载力范围，其方法快速简单、经济便捷，在工程无损检测中得到了长足的发展[81][82]。目前，可用于大面积地基处理效果的检测，公路、机场无损跑道检测，饱和沙土层的液化判别等

5.2. 空洞探测的应用

地下空洞或者掩埋物若在面波勘探的范围内时，面波提取的频散曲线会出现异常值，根据异常值的大小可以判断空洞的埋深以及大小范围。目前对地下煤炭采空区，以及溶洞的探测应用较多。章哲辉通过瑞雷面波频散曲线是否出现无规则跳动，以及频散点连线后是否出现锯齿状来判断探测区的空洞位置，并与钻孔对应较好[83]。面波勘探可以准确的得到地下空洞的探测范围以及埋深，为后期工程施工提供安全保障。

5.3. 地质灾害勘察的应用

面波在地质灾害中具有较强的破坏力，但利用其特点也可以进行地质灾害勘察[81]。如在滑坡体勘察中，瞬态面波法可以确定滑坡体的软弱带、滑动面以及不同层位的深度等信息[82]，为滑坡的治理提供重要的参考资料(图 9)；在地表断裂带探测中，利用瞬态瑞雷面波数据可以进行分析绘图，以此对断裂带的岩土体力学性质进行初步判断。

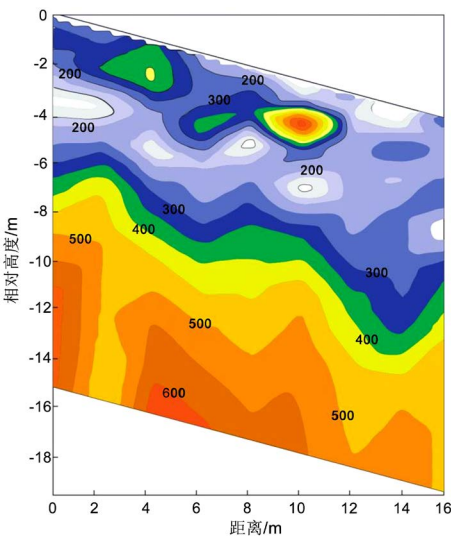


Figure 9. Two-dimensional S-wave velocity profile of a landslide in Zhouzhi County, Xi'an City (Xu *et al.*, 2016)
图 9. 西安市周至县某滑坡体二维横波速度剖面(许新刚等, 2016)

5.4. 地壳深层结构探测的应用

利用瑞雷面波对地壳结构探测的应用始于 20 世纪 50 年代, 目前已经进入全球以及区域构造 3D 高分辨率层析成像的阶段。通过定量反演可以得到地壳不同层位结构的弹性波速度, 并根据速度的大小分析物质的组成及性质状态。最近, 有人利用瑞雷面波对大西洋的各向异性和横向不均匀性进行了研究, 并且在对全球结构进行探测的过程中使用了长周期面波[71]。利用瑞雷面波对地球结构探测的研究虽然比不上 P 波以及 S 波, 但其探测方法具有自己的优势, 对地球结构的探测起到了不可替代的作用。

5.5. 隧道超前预报的应用

隧道开挖之前要对前方围岩可能存在的地质灾害提出预警预报, 并提出有效规避风险的合理措施和建议, 否则可能在开挖过程中会出现塌方、塌陷、涌水等现象, 给工程施工带来不必要的麻烦。面波勘探作为一种新兴的隧道超前预报手段, 具有施工方便以及勘探精度高等特点[84] [85] [86]。目前广泛应用于隧道超前预报, 包括探测断层及断层影响带的位置、规模及性质, 软弱夹层及岩溶的位置、规模及性质, 含水构造的位置, 工程地质灾害可能发生的位置等方面。

5.6. 其他方面的应用

面波勘探的应用领域非常的广泛, 除了以上常用的方面外。它在地下管线探测、岩石物理力学参数原位测试、场地土类别划分、堤坝危险测试, 桩基础完整性测试, 混凝土厚度以及是否存在裂缝等方面也有应用。随着面波采集仪器以及处理方法的提升, 面波在其他方面的应用也将会越来越广泛。

6. 探讨及展望

面波勘探技术经过这几十年的发展, 不论是从采集仪器上, 还是处理技术上, 形成了一套较为系统的地球物理勘探及处理方法。但也面临着地质条件越来越复杂、勘探精度要求越来越高的挑战。以下几个方面是目前面波勘探探讨的几个热点问题, 这也可能将是以后面波勘探技术发展的方向。

6.1. 勒夫波浅层勘探

由于勒夫波的采集相对于瑞雷波麻烦, 因此到目前为止, 对勒夫波的研究仅应用在探测地壳结构, 例如: 庄真等利用勒夫波群速度频散来研究太平洋上地幔三维构造[87]。房立华等利用勒夫波噪声层析成像技术研究了华北地区地壳结构速度变化[88]。张永久等利用勒夫波群速度成像, 初步得到对应中国大陆地质构造块体的群速度频散特性, 为进一步分析中国大陆地壳、上地幔结构提供了基础资料[89]。但是勒夫波相对于瑞雷波而言少了一个 P 波参数的约束, 其能量图像通常更清晰, 分辨更高。从而更加容易提取高基阶频散曲线, 并且勒夫波反演对初始模型要求更低, 因此利用勒夫波进行浅层勘探更具优势。但目前基本没有在工程上的应用, 多是以正演模型做理论研究, 如: 夏江海等[1]对勒夫波波形反演进行了试验研究, 通过最优化算法获得地下介质 S 波速度分布情况, 并且依据模型对不同波长勒夫波探测深度进行了研究探讨。罗银河等通过建立四层的地质模型模型, 模拟出高频勒夫波, 研究勒夫波在低高速模型中频散曲线的特点[14]。勒夫波工程上的应用一直是需要弥补的空白, 但随着数字地震仪及检波器灵敏度的提高, 勒夫波的研究必将成为面波勘探的一个热点, 在工程中的应用也将会越来越广泛。

6.2. 高基阶面波联合勘探

目前工程面波勘探中, 频散曲线的提取应用多是在基阶面波中, 这对于地下速度递增模型而言会取得较好的反演结果, 但地下介质复杂多变, 有可能存在低速层或者高速层, 这时如果按照最高能量提取基阶频散曲线, 可能会出现“之”字形问题, 这是由于高阶模态的占优势所造成的现象。因此如果仅仅

依靠基阶面波频散曲线进行反演,在某些研究区可能取得的效果较差,这时需要基高阶联合反演[90],高阶模态面波携带丰富的地层信息可以更好的提供约束,获得精度较高的浅表横波速度结构[91]。

近些年经过研究发现,对于速度递增的模型而言,基阶能量始终占优势,频散曲线不存在突变点,因此利用基阶频散曲线反演,可以获得相对比较准确的结果。而在高速模型或低速模型中,基阶模态与高阶模态很容易混杂在一起,引起模式的误判,降低反演的精度[92] [93] [94]。因此利用基高阶联合反演可以相互约束,提高勘探精度。目前,杨振涛等基于多道瞬态瑞雷面波勘探的采集方式提出了一种新的面波多道分析方法-矢量波数转换法(图 10),此方法对高阶模态具有更高的分辨率及成像质量,对高阶面波频散曲线的提取更加有效,可为基阶、高阶面波频散联合反演提供丰富的高阶模态频散信息[95]。未来基高阶联合反演也必将成为工程应用的热点之一。

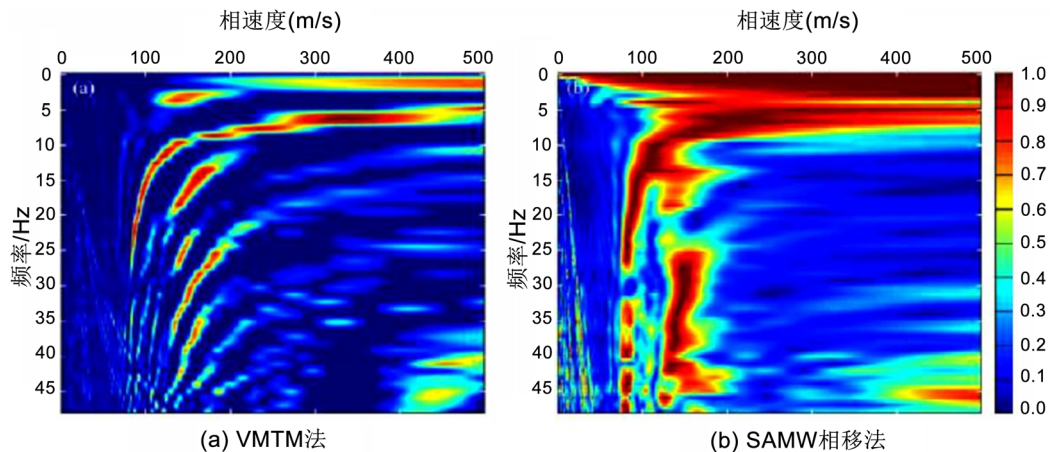


Figure 10. Vector wavenumber method versus phase shift method (Yang *et al.*, 2019)

图 10. 矢量波数法与相移法对比图(杨振涛等, 2019)

6.3. 反演粘弹性介质中的衰减(品质因子)

面波勘探方法目前都是基于弹性层状模型而言的,而要将弹性介质扩展到粘弹性介质并对介质的衰减(品质因子)进行反演,就需要获得精确的相位及振幅信息,而且还要考虑复杂介质引起的散射和几何扩散。国外对反演粘弹性介质品质因子的研究相对较早, Mitchell 等在研究北美地壳结构的品质因子时,利用瑞雷面波振幅信息并反演衰减系数而获得一个品质因子的层状模型[96]。Johnston 等通过实验研究发现,在一定频带宽度范围内,品质因子与频率没有相关性[97]。Prieto 等基于背景噪声干涉理论,修正了二维弹性情形下的微震空间相关系数表达式,并在大尺度上用于美国西部的衰减成像[98] [99]。我国学者夏江海等基于层状地球模型和品质因子与频率无关的假设,利用瑞雷面波的振幅信息讨论了获取浅地表介质品质因子的可能性,并且利用高频瑞雷面波反演衰减系数估算了浅地表品质因子。并且张学涛等通过建立正演模型,证明黏弹性对面波的频散特性有显著影响,实际勘探中有必要考虑黏弹性因素的影响[100]。目前对于品质因子的反演主要集中在大尺度的地球结构反演研究中,小尺度(浅层)范围内的研究较少,在工程上更是少见,并且反演的品质因子精度一般差别很大,如何提高计算精度将是以后面波发展的一个挑战。

6.4. 三维反演方法及面波的散射

主动源面波勘探目前多是线性排列,采集到数据以后,经过提取频散曲线并反演得到地下二维横波速度结构。基于微动技术的 SPAC 方法基本和主动源类似,通过移动阵列获得地下二维横波速度。但是

不管是哪种方式,基本都是基于射线理论的假设,没有考虑到面波的散射效应,倘若遇到地下结构比较复杂的情况时,反演得到的速度,很难和地下实际速度相一致。因此,要想研究地下真实三维速度情况,必须考虑到波动理论,研究面波在三维地质构造情况下的散射情况。近些年也有一些相关的研究:鲁来玉等通过研究发现传统的面波勘探理论反演地下三维速度结构,需要考虑三维体的扰动引起的面波相位或幅度的灵敏度核,除了多模性问题,额外增加了计算量[101]。最近,米晓利等利用传统的面波勘探理论反演得到了研究区浅地表三维结构剖面[102]。但目前面波散射研究仅仅在大尺度成像方面有些应用研究,浅表地区,特别是在工程上基本没有研究及应用。

7. 结束语

面波勘探技术经过这几十年的发展,在主动源勘探方面已经相当成熟,被动源在工程中的应用虽然起步晚一些,但目前的发展速度较快,很多理论方法在实际工程中也逐渐得到了应用,并且得到了钻井的验证。但不管是主动源还是被动源勘探,每一种提取频散曲线的方法也各有利弊,实际工程应用时要根据勘探目的择优选择。面波勘探技术虽然目前广泛应用于工程勘察的各个领域,但是仍然存在一些缺陷及问题仍需继续研究,比如勒夫波频散曲线反演、粘弹性介质面波的反演,频散曲线模式误判等。但随着科技的进步,采集仪器精度的提高,这些方面终将会被突破,面波勘探技术也将成为浅地表探测的重要手段,为工程探测提供重要的地下介质信息。

致 谢

感谢中国地质科学院地质研究所李秋生研究员、卢占武研究员以及韩如冰博士和吴庆宇博士的细心指导,并提出宝贵的意见。并且在专业软件的学习中也给与了关键性的帮助与指导。也感谢评审专家给出的宝贵意见及修改建议。

基金项目

国家重点研发计划(2017YFC0601301)和国家自然科学基金项目(41574094)联合资助。

参考文献

- [1] 夏江海,高玲利,潘雨迪,等.高频面波方法的若干新进展[J].地球物理学报,2015,58(8):2591-2605.
- [2] 尹晓菲,胥鸿睿,夏江海,等.一种基于层析成像技术提高浅地表面波勘探水平分辨率的方法[J].地球物理学报,2018,61(6):2380-2395.
- [3] 杨成林.瑞雷面波勘探原理及其应用[J].物探与化探,1989,13(6):465-468.
- [4] 肖柏勋,李长征.瑞雷面波勘探技术研究述评[J].工程地球物理学报,2004,1(1):38-47.
- [5] 李庆春,邵广周,刘金兰,等.瑞雷面波勘探的过去、现在和未来[J].地球科学与环境学报,2006,28(3):74-77.
- [6] 万建华.面波勘探技术在浅层地震勘探中的应用及问题[J].今日科苑,2007(16):123.
- [7] 王鑫文.瞬态面波勘探技术在岩土工程勘察中的应用[J].中国水运(下半月),2017,17(11):233-234.
- [8] 王振东.面波勘探技术要点与最新进展[J].物探与化探,2006,30(1):1-6.
- [9] 李娜,何正勤,叶太兰,等.天然源面波勘探阵列对比试验[J].地震报,2015,37(2):323-334.
- [10] 夏学礼,仇恒永,孙秀容,等.多道瞬态面波勘探频散曲线唯一性问题[J].物探与化探,2008,32(2):168-170.
- [11] 邵广周,李庆春.联合应用 τ - p 变换法和相移法提取面波频散曲线[J].石油地球物理勘探,2010,45(6):836-840.
- [12] 金聪,杨文海,罗登贵,等.面波频散曲线提取方法对比分析[J].地球物理学进展,2016,31(6):2735-2742.
- [13] Xia, J.H., Xu, Y.X. and Miller, R.D. (2007) Generating an Image of Dispersive Energy by Frequency Decomposition and Slant Stacking. *Pure and Applied Geophysics*, 164, 941-956. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0204-9>
- [14] 罗银河,夏江海,刘江平,等.基阶与高阶瑞利波联合反演研究[J].地球物理学报,2008,51(1):242-249.

- [15] 陈义群, 刘江平. 多分量地震数据提取瑞雷面波频散曲线研究[J]. 人民长江, 2013, 44(19): 52-55.
- [16] 曹旭, 熊章强, 张大洲. 基于 BP 神经网络的瑞雷面波智能优化反演[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(4): 514-519.
- [17] 蔡伟, 宋先海, 袁士川, 等. 利用粒子群优化算法快速、稳定反演瑞雷波频散曲线[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(1): 25-34.
- [18] 蒋婵君, 周竹生, 敬荣中, 等. 遗传算法在瑞雷面波勘探中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2010, 32(5): 508-513.
- [19] 宫胜家. 瞬态面波的勘探及应用[J]. 中国煤炭地质, 2008, 20(S1): 84-86.
- [20] Aki, K. (1957) Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors. *Earthquake Research Institute*, **35**, 415-425.
- [21] Capon, J. (1970) Application of Detection and Estimation Theory to Large Array Seismology. *Proceedings of the IEEE*, **58**, 760-770. <https://doi.org/10.1109/PROC.1970.7730>
- [22] Nakamura, Y. (2008) On the H/V Spectrum. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing. 12-17 October 2008, 22-27.
- [23] 刘庆华, 鲁来玉, 王凯明. 主动源和被动源面波浅勘方法综述[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(6): 2906-2922.
- [24] 李凯. 面波勘探技术在工程勘察中的应用进展[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(1): 97-104.
- [25] Stokoe, K.H. and Nazarian, S. (1983) Effectiveness of Ground Improvement from Spectral Analysis of Surface Waves. In: *8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [26] Nazarian, S. and Stokoe, K.H. (1986) *In Situ* Determination of Elastic Moduli of Pavement Systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method (Practical Aspects). Research Report 01419314, Center for Transportation Research, the University of Texas at Austin, Austin.
- [27] Nazarian, S. and Stokoe, K.H. (1986) *In Situ* Determination of Elastic Moduli of Pavement Systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method (Practical Aspects). Research Report 00473174, Center for Transportation Research, the University of Texas at Austin, Austin.
- [28] Yilmaz (1987) Seismic Data Processing. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 25, 319-330.
- [29] McMechan, G.A. and Yedlin, M.J. (1981) Analysis of Dispersive Waves by Wave Field Transformation. *Geophysics*, **46**, 869-874. <https://doi.org/10.1190/1.1441225>
- [30] 包军强, 张学强, 刘江平, 等. 浅层多波的分离识别[J]. 物探与化探, 1998, 22(5): 336-376.
- [31] 钟韬. τ -P 变换在面波勘探中的应用[J]. 水力发电, 2017, 43(11): 43-47.
- [32] Park, C.B., Miller, R.D. and Xia, J. (1998) Imaging Dispersion Curves of Surface Waves on Multi-Channel Record. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, **17**, 1377-1380. <https://doi.org/10.1190/1.1820161>
- [33] Park, C.B., Miller, R.D. and Xia, J.H. (1999) Multichannel Analysis of Surface Wave. *Geophysics*, **64**, 800-808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- [34] Ryden, N., Park, C.B., Ulriksen, P., et al. (2004) Multimodal Approach to Seismic Pavement Testing. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130**, 636-645. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:6\(636\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:6(636))
- [35] 彭文, 王亮. 瑞雷面波频散特征的时频分析方法及应用[J]. 物探化探计算技术, 2006, 28(3): 233-239.
- [36] 李玲利, 王伟涛, 朱良保, 等. 从背景噪声提取瑞利面波频散曲线——方法与应用实例[J]. 地震, 2014, 34(3): 108-116.
- [37] 王振东. 微动的空间自相关法及其实用技术[J]. 物探与化探, 1986(2): 123-133.
- [38] 赵东. 被动源面波勘探方法与应用[J]. 物探与化探, 2010, 34(6): 759-764.
- [39] Nakamura, Y. (1989) A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface. *Quarterly Reports of the Railway Technical Research Institute Tokyo*, **30**, 25-33.
- [40] 刘争平, 张立, 阎胜. 局部非均质体的瑞利面波动力学响应数值模拟研究[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(S1): 1-3.
- [41] 谢晓峰, 赵伯明, 柴焱章, 等. 用 HV 谱比法推测银川市城区沉积层基底分布特征[J]. 中国地震, 2007(4): 359-365.
- [42] 杨奎. 微动面波 H/V 谱探测浅部地层横波速度结构的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2011.
- [43] 雷旭友, 李正文, 黄宇. 稳态面波在软土勘察中的应用[J]. 工程勘察, 2008(3): 45-48.
- [44] Yilmaz, E.M. and Berilgen, M. (2006) A Case Study of Seismic Zonation in Municipal Areas. *The Leading Edge*, **25**, 319-330. <https://doi.org/10.1190/1.2184100>

- [45] Beaty, K.S. and Schmitt, D.R. (2003) Repeatability of Multimode Rayleigh Wave Dispersion Studies. *Geophysics*, **68**, 782-790. <https://doi.org/10.1190/1.1581031>
- [46] Ivanov, J., Miller, R.D., Lacombe, P., *et al.* (2006) Delineating a Shallow Fault Zone and Dipping Bedrock Strata Using Multichannel Analysis of Surface Waves with a Land Streamer. *Geophysics*, **71**, 39-42. <https://doi.org/10.1190/1.2227521>
- [47] Gabriels, P., Snieder, R. and Nolet, G. (1987) *In Situ* Measurements of Shear-Wave Velocity in Sediments with Higher-Mode Rayleigh Wave. *Geophysical Prospecting*, **35**, 187-196. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1987.tb00812.x>
- [48] 关小平, 黄嘉正, 周鸿秋. 工程勘察中稳态瑞利面波法解释理论的探讨[J]. 地球物理学报, 1993, 36(1): 96-105.
- [49] 任青文. 表面谱分析方法及其在工程中的应用[J]. 河海科技进展, 1994(2): 7-14.
- [50] 陈云敏, 蔡袁强. 用表面波谱分析法检测道路质量[J]. 建筑技术, 1991(12): 45-46.
- [51] 赵竹占, 李华. 表面波谱分析法在评价地基处理效果中的应用[J]. 物探与化探, 1994, 18(5): 326-330.
- [52] 任健. 多道瞬态面波法检测技术在工程勘察中的应用[J]. 陕西水利水电技术, 1999, 23(1): 45-51.
- [53] 向晓松, 贾继标, 李士祥. 面波勘探在地基液化判别中的应用与探讨[J]. 矿产勘查, 2011, 2(1): 97-101.
- [54] 张淑婷, 高振兵. 瑞利面波勘探在坝体隐患探测中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(4): 555-559.
- [55] 李欣欣, 李庆春. 利用改进的 F-K 变换法提取瑞雷波的频散曲线[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 191-197.
- [56] 伍敦仕, 孙成禹, 林美言. 基于频率-速度域多重信号分类的面波高分辨率频散成像方法[J]. 石油物探, 2017, 56(1): 141-149.
- [57] 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.
- [58] 宋先海, 肖柏勋, 张学强, 等. 用改进的 τ - p 变换算法提取瞬态瑞雷波频散曲线[J]. 物探与化探, 2003, 27(4): 292-295.
- [59] 周晨. 利用背景噪声研究地下介质速度变化及其进展[J]. 防灾减灾学报, 2018, 34(2): 28-34.
- [60] 罗磊, 梁锋, 付光明, 等. 噪声互相关成像方法在浅层结构勘查研究现状及展望[J]. 地质找矿论丛, 2019, 34(1): 140-144.
- [61] Forsyth, D.W. (1975) The Early Structural Evolution and Anisotropy of the Oceanic Upper Mantle. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **43**, 103-162. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1975.tb00630.x>
- [62] Wiggins, R.A. (1972) The General Linear Inverse Problems: Implication of Surface Waves and Free Oscillations for Earth Structure. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **10**, 251-285. <https://doi.org/10.1029/RG010i001p00251>
- [63] Burkhard, N.R. and Jackson, D.D. (1976) Density and Surface Wave Inversion. *Geophysical Research Letters*, **3**, 637-638. <https://doi.org/10.1029/GL003i011p00637>
- [64] 松岛健, 岡田広. 利用长周期脉动推定深层地基构造[J]. 世界地震工程, 1991, 7(4): 62-67.
- [65] Hiroshi, A. and Koji, T.S. (2004) Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor HV Spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94**, 53-63. <https://doi.org/10.1785/0120030028>
- [66] Scherbaum, F., Hinzen, K.G. and Ohrnberger, M. (2003) Determination of Shallow Shear Wave Velocity Profiles in the Cologne, Germany Area Using Ambient Vibrations. *Geophysical Journal International*, **152**, 597-612. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01856.x>
- [67] Estrella, H.F. and Gonzalez, J.A. (2003) SPAC: An Alternative Method to Estimate Earthquake Site Effects in Mexico City. *Geofísica Internacional*, **42**, 227-236.
- [68] Khoshnavaz, J., Urosovic, M., *et al.* (2018) Feasibility Study of Near-Surface Dispersion Imaging Using Passive Seismic Data. *ASEG Extended Abstracts*, **2018**, 1-4. https://doi.org/10.1071/ASEG2018abM2_2H
- [69] 宋仲和, 谭承业. 用瑞雷和乐夫面波群速度确定我国地壳厚度[J]. 地球物理学报, 1965, 14(1): 33-44.
- [70] 石耀霖, 金文. 面波频散反演地球内部构造的遗传算法[J]. 地球物理学报, 1995, 38(2): 189-198.
- [71] 赵建忠, 李志伟, 林建民, 等. 南海地区地震背景噪声成像与壳幔深部结构[J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2070-2087.
- [72] 刘云祯, 梅汝吾, 叶佩, 等. WD 智能天然源面波数据采集处理系统及其应用试验[J]. 物探与化探, 2016, 40(5): 1007-1015.
- [73] 刘宏岳, 黄佳坤, 孙智勇, 等. 微动探测方法在城市地铁盾构施工“孤石”探测中的应用——以福州地铁 1 号线为例[J]. 隧道建设, 2016, 36(12): 1500-1506.
- [74] 李翀. 被动源面波勘探在地层分层中的应用研究[J]. 西部探矿工程, 2017, 29(11): 177-181.

- [75] 丰贇, 沙椿. 面波联合勘探在深厚覆盖层地区应用实例分析[J]. 物探与化探, 2018, 42(2): 392-397.
- [76] 程浩, 王德利, 冯飞, 等. L1 范数约束被动源数据稀疏反演一次波估计[J]. 地球物理学报, 2015, 58(2): 674-684.
- [77] 于东凯, 宋先海, 江东威, 等. 改进蜂群算法及其在面波频散曲线反演中的应用[J]. 地球物理学报, 2018, 61(4): 1482-1495.
- [78] 王伟涛, 倪四道, 王宝善. 地球背景噪声干涉应用研究的新进展[J]. 中国地震, 2011, 27(1): 1-13.
- [79] 孙进, 高原. 中国大陆背景噪声成像研究及应用前景[J]. 国际地震动态, 2011(3): 12-17.
- [80] 杜正涛, 刘丽敏, 程道伟. 瑞雷面波勘探技术在第四系分层方面的应用[J]. 物探与化探, 1999, 23(4): 38-43.
- [81] 赵硕九, 金钢, 汪利民. 瑞雷面波在多尺度勘探上的研究现状与展望[J]. 勘探地球物理进展, 2010, 33(1): 1-10.
- [82] 李海, 张驰, 柴子贺. 高速铁路工程质量无损检测技术及应用[J]. 铁道建筑技术, 2015(10): 122-125.
- [83] 章哲辉. 瑞雷面波勘探在空洞探测中的应用[J]. 湖南水利水电, 2003(1): 19-20.
- [84] 宋先海, 顾汉明, 肖柏勋. 我国隧道地质超前预报技术述评[J]. 地球物理学进展, 2006, 6(2): 605-613.
- [85] 刘云祯. TGP 隧道地震波预报系统与技术[J]. 物探与化探, 2009, 33(2): 170-177.
- [86] 赵永贵, 蒋辉. 隧道地震超前预报技术现状分析与新进展[J]. 公路隧道, 2010(1): 1-7.
- [87] 庄真, 邓大量. 勒夫波群速度频散与太平洋地壳及上地幔三维构造[J]. 地球物理学报, 1987(3): 246-260.
- [88] 房立华, 吴建平, 王未来, 等. 华北地区勒夫波噪声层析成像研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2268-2279.
- [89] 张永久, 王善恩. 中国大陆勒夫(LOVE)波群速度成像[J]. 四川地震, 2000(3): 22-31.
- [90] 梁志强, 邓道静. 基于多阶模式的面波技术应用探讨[J]. 勘探地球物理进展, 2008(4): 253-258.
- [91] 杨奎. 面波多模频散曲线的敏感性及其特征分析[J]. 物探化探计算技术, 2012, 34(4): 436-443.
- [92] 单娜琳, 刘占兴. 分离高阶模态面波的 τ - p 变换方法[J]. 桂林理工大学学报, 2013, 33(3): 413-419.
- [93] 单娜琳, 丁彦礼. 浅层地震多阶模态瑞利面波的位移幅度特征[J]. 桂林工学院学报, 2007, 27(2): 170-177.
- [94] 单娜琳, 程志平. 高阶模态面波在软弱薄层探测中的应用[J]. 桂林工学院学报, 2004, 24(2): 155-158.
- [95] 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.
- [96] Mitchell, B.J. (1975) Regional Rayleigh Wave Attenuation in North America. *Journal of Geophysical Research*, **80**, 4904-4916. <https://doi.org/10.1029/JB080i035p04904>
- [97] Johnston, D.H., Toksoz, M.N. and Timur, A. (1979) Attenuation of Sismic Waves in Dry and Saturated Rocks: II. Mechanisms. *Geophysics*, **44**, 691-711. <https://doi.org/10.1190/1.1440970>
- [98] Prieto, G.A., Lawrence, J.F. and Beroza, G.C. (2009) Anelastic Earth Structure from the Coherency of the Ambient Seismic Field. *Journal of Geophysical Research*, **114**, B07303. <https://doi.org/10.1029/2008JB006067>
- [99] Prieto, G.A., Denolle, M., Lawrence, J.F., *et al.* (2011) On Amplitude Information Carried by the Ambient Seismic Field. *Comptes Rendus Geoscience*, **343**, 600-614. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2011.03.006>
- [100] 张学涛, 田坤, 黄建平. 黏弹性介质中瑞雷面波正演模拟及频散特征分析[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(2): 861-868.
- [101] 鲁来玉, 丁志峰, 何正勤. 浅层有限频率面波成像中的 3D 灵敏度核分析[J]. 地球物理学报, 2011, 54(1): 55-66.
- [102] 米晓利, 李培明, 张树旺, 等. 从三维地震数据中的面波获得浅地表面波速度结构[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(6): 786-795.