

文章编号:1671-8585(2010)01-0001-10

瑞雷面波在多尺度勘探上的研究现状与展望

赵硕九¹, 金钢燮¹, 汪利民²

(1. 朝鲜沙里院地质大学, 朝鲜民主主义共和国黄海北道沙里院市 999093; 2. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074)

摘要:近年来,瑞雷面波勘探的理论研究与实际应用技术发展迅速。根据瑞雷面波的传播特性,瑞雷面波勘探研究及应用范围广泛,从地球内部地壳和上地幔的构造研究(大尺度勘探)到石油地震勘探(中尺度勘探)再到工程勘探(小尺度勘探)以及物体内部特性变化的检查(甚小尺度调查)均有涉及且应用效果良好。因此可以说瑞雷面波法既是研究地球宏观构造的“望远镜”,又是调查物体局部特性变化的“显微镜”。对瑞雷面波勘探的理论研究以及在各尺度勘探的应用情况进行了综述,并对瑞雷面波勘探的理论研究和应用前景进行了展望。

关键词: 瑞雷面波法;频散曲线;勘查尺度;多尺度

中图分类号: P631

文献标识码: A

1887 年英国学者瑞雷(Rayleigh)首先发现并证明了均匀半空间中瑞雷面波的存在^[1]。通过若干年探索研究,20 世纪 30—50 年代,地震学家们发现了瑞雷面波在层状介质中的频散特性并开展了相应的研究工作,据此开始了利用全球地震台网记录的天然地震产生的瑞雷波来探测地球内部结构的研究。瑞雷波法主要利用瑞雷波在分层介质中传播的频散特性来估算地下介质的弹性性质。

目前瑞雷波法的应用范围大到全球尺度,小到材料缺陷的检测。根据震源类型分为天然地震瑞雷波法(大地震,常时微动)和人工震源法(主动震源法,如 SASW-single channel analysis of surface waves, MASW-mutilchannel analysis of surface waves)。根据人工震源的工作方式不同还可以将人工震源法分为瞬态面波法、稳态面波法等。表 1 列出了常见的瑞雷波法的称谓及其特点。

表 1 瑞雷波法的分类

分类	激发源	面波频带宽	面波能量	探测深度	层厚度分辨率
地球构造探测	天然地震	0.01~数 Hz	大	$n \times 10$ km	$\geq 1\ 000$ m
石油地震勘探	人工震源	1~30 Hz	中等	10~300 m	≥ 5 m
瞬态面波技术	人工震源	1~200 Hz	中等	0.1~50 m	≥ 0.1 m
稳态面波技术	人工震源	2~50 Hz	中等	1~50 m	
长微波法	天然震动	≤ 1 Hz	弱—中等	$\sim n \times 10^3$ m	
短微波法	天然常时微动	≥ 1 Hz	弱		

2004 年初,欧共体联合 9 个国家的 14 个研究机构共同启动了为期 4 年的 SPICE 计划,即复杂介质中地震波的传播与成像(SPICE, Seismic wave Propagation and Imaging in Complex media; an European network),其研究内容几乎包括从超声到全球地震波频率范围所覆盖的所有尺度。

本文简要总结了近年来面波理论的发展及其日益扩展的应用范围,并根据探测尺度的不同对有关问题进行了讨论。

1 瑞雷面波法理论研究

1.1 正演方法研究

瑞雷波正演的主要内容是根据弹性波波动力学建立起描述已知介质模型中瑞雷波速度与频率

以及其他弹性参数之间的瑞雷方程,由此了解其在特定介质模型中的频散特征。因此,瑞雷波正演方面的研究主要体现在瑞雷波在各种不同介质情况下特征方程的建立和求解两个方面。其中,特征方程的求解可分为解析法和数值解法。

1.1.1 各种介质中瑞雷波特征方程

1) 均匀各向同性介质。

结合运动微分方程、物理方程(广义胡克定律)和形变方程以及应力与位移的边界条件,可得到均匀各向同性介质中瑞雷波传播的特征方程。通过

收稿日期:2009-09-08;改回日期:2009-11-02。

第一作者简介:赵硕九(1959—),男,朝鲜民主主义共和国黄海北道沙里院市朝鲜沙里院地质大学物探系教师,主要研究方向为瑞雷面波勘探理论与应用研究。

输入原始参数(层数、厚度及介质物性参数)即可获得一个表示频率与波速关系的奇次线性方程组。20 世纪 50 年代初期, Thomson 等发现了多层介质中瑞雷波的频散特性, 并且建立了相应的频散方程^[2~5]。1964 年, Harkrider^[6]对 3 种不同震源情形下各向同性及多层介质中的瑞雷波进行了讨论, 建立了不同的特征方程。层状半空间介质中瑞雷波特征方程在 20 世纪 60 年代末期基本建立了, 其后的研究主要集中在特征方程求解方法的改进上。

2) 复杂介质。

20 世纪 50 年代 Biot 建立了流体饱和多孔介质中地震波传播理论, 它成为随后进行有关饱和多孔介质波动理论各项研究的基础。1961 年, Jones^[7]利用 Biot 理论, 在忽略固液之间的惯性差异, 设定达西系数不随频率变化的基础上, 推导了三维情形下孔弹性饱和介质中的瑞雷方程, 证明了瑞雷型波在该种条件下的存在, 但只考虑了一种压缩势, 因此不是问题的通解, 导致特征方程有误。1981 年, Chiang 等^[8]对饱和土中瑞雷波进行过研究, 但是和文献^[7]一样, 由于在压缩波势函数中只考虑一种压缩波, 所建立的特征方程仍然是错误的。1984 年, Tajuddin^[9]发表了与文献^[7]不同的结果。1994 年, 夏唐代等^[10]利用解析法和有限单元法研究了流体—固体介质中瑞雷波频散特性及位移分布规律, 得到了频散特征方程和位移计算公式。1996 年, 夏唐代等^[11]又对各向异性成层地基中瑞雷波的频散特性进行了研究。1998 年, 陈龙珠等^[12]在他已提出的饱和土弹性波动方程的基础上, 推导出了饱和和地基中波的频率特征方程, 并由此分析了瑞雷波传播速度和衰减系数随振动频率、土渗透系数等因素而变化的规律。

1.1.2 瑞雷波方程求解

1) 均匀层状介质。

根据特征方程得到频散解的方法有两种, 即传统解析法和数值解法。均匀层状介质中瑞雷波方程求解的方法主要是解析法, 如传播矩阵法。常用的传播矩阵法包括 Thomson-Haskell 法^[2,3]、Schwab-Knopoff 法^[13]、 δ 矩阵法^[5,14]、Abo-Zena 法^[15,16]、RT 矩阵法^[17]等。Knopoff, Thrower, Dunkin 均针对在求解特征方程时存在严重的高频有效数值损失问题提出了 δ 矩阵型算法。Abo-Zena 提出了另一种具有较快计算速度并可避免高频有效数值损失的新型算法, 但计算的频率上限为 20 Hz, 不能满足工程地质勘探中浅目的层和高精度的要求。Menke^[16]解释了 Abo-Zena 提出的反

对称矩阵的物理含义, 并引入了 D 矩阵和 E 向量, 导出了新的瑞雷波频散方程, 此方法既有效地避免了高频数值精度丢失问题, 又加快了计算速度。

1991 年, 陈云敏等^[18]对 Abo-Zena 算法重新进行了改进, 将该方法与 δ 矩阵型算法结合起来, 所得到的方法不仅具有 δ 矩阵型算法的优点, 且比 Abo-Zena 算法的效率高。另外, 欧阳联华等提出的一些改进的传播矩阵法使运算步骤得以简化, 提高了运算速度^[19~21]。2001 年, 凡友华等^[22]提出一种在柱坐标下快速稳定的标量传递算法, 得到了层状介质中轴对称柱面瑞雷面波的频散函数, 加快了计算速度, 并将稳定的计算频率提高到 20 kHz 左右。

2) 复杂介质。

复杂介质的瑞雷波正演较均匀层状介质更为复杂, 大多数研究工作由精确的解析解求解向近似的数值解求解转变^[23], 如边界元法、有限元法、有限差分方法、线性化散射方法和射线方法等。求解的问题不仅仅局限于面波频散方程, 还涉及到面波振幅及面波三维散射场的求解等。

数值解法中最实用的方法之一就是有限差分法(finite difference, FD), 目前该方法被认为是复杂地球物理场正演模拟的有力工具。复杂介质中波动方程 FD 法求解高速有效, 而且地质模型的复杂程度对运算速度的影响较小^[23~25]。近年来, FD 法还广泛地应用于孔弹性和粘弹性介质中的波场模拟。目前所广泛应用的 FD 法是标准交错网格法(SSG, 即 Standard Staggered Grids)^[26~30], 而最近开发的旋转 FD 法(RSG, 即 Rotated Staggered Grids)^[31~33]在模拟各向异性不均匀介质中波的传播问题上显示出更好的优越性。2006 年, Thomas^[34]分别比较了 SSG 和 RSG 法的粘弹性速度—应力二维 FD 程序的性能, 其结论是在处理不规则界面时, RSG 法比 SSG 法精度更高; 同样, FD 方法对起伏自由界面也有较好的适用性。

1.2 反演方法研究

瑞雷波反演研究目前主要是针对层状介质理论, 利用瑞雷波的频散曲线对介质内部剪切波速度参数进行反演, 主要可分为基于单模式或基于多模式联合的线性与非线性方法。

1983 年, Stokoe 等^[35]提出的面波频谱分析法(SASW), 通过分析面波的频散曲线得到近地表的 S 波速度剖面。之后, SASW 方法得到了不断地完善, 并在工程勘查中得到了广泛应用^[36~38]。全局最优化方法(如遗传算法, 神经网络法, 模拟退火法

等)大大降低对初始模型的要求,且不易陷入局部极小值。许多学者采用该类方法对瑞雷面波频散曲线进行了反演,取得了很好的效果^[39~42]。2007年,Pei等^[43]对高频基阶模式频散曲线采用模拟退火方法反演,取得了较好的效果。肖柏勋等对含低速层情况下的多模式频散曲线及其反演方法也进行了一些有意义的研究,取得了一定的成果^[44~48]。

1996年,Marquering等^[49]提出了联合反演的思想,提高了瑞雷波反演的精度,这种方法在反演复杂介质时有很大优势。其后,Xia等^[38,39]用最小二乘法对瑞雷波频散曲线的基阶模和高阶模进行联合反演,取得了良好的效果。2003年,凡友华^[50]在考虑高阶模的情况下,用牛顿搜索法研究了最大模和多阶模联合反演,也取得了良好的效果。

1999年,Park等^[51]提出的MASW法为对高频瑞雷波基阶模式和高阶模式进行联合反演提供了可行性,因此,取得了广泛的应用。

1.3 散射瑞雷面波研究

面波的散射研究对小尺度的超声成像(工业无损检测,超声医疗与诊断等)、中等尺度的近地表地球物理和岩土工程(地基基础工程,高速公路质量检测等)以及大尺度的全球和区域地震学研究(地球内部结构成像,地球动力学等),都具有重要的理论意义与实际应用价值。

地震面波的散射理论在不同尺度的应用领域都获得了广泛关注,如小尺度及微观尺度的超声散射及散射面波成像研究^[52,53],近地表尺度目标体的散射面波成像研究^[54,55],面波在混凝土结构中的传播与散射研究及在实验室内的模拟实验研究^[56,57],等等。

国内一些学者对散射地震波及尾波散射的理论问题进行了一些研究,如采用散射地震波来研究地壳的非均匀性和核幔边界的精细结构^[58],三维尾波散射理论的研究^[59],大尺度非均匀介质中地震波全弹性单次和多次散射理论的研究^[60,61],散射面波在近地表地球物理工程中的应用研究^[62],等等。

现有的地震波传播及散射研究方法,主要可分为解析法和数值法两类。其中数值法主要有有限差分法、有限单元法和伪谱法等;解析法主要有射线法、模式耦合法和边界积分法等。这些方法都有各自的适用范围,比如射线理论是一种高频渐进方法,而模式耦合方法在计算低频范围的波形时较为有用。在有些区域或波长范围,有时单独采用一种

方法并不能得到理想的结果,如利用地球的简正模型求和来计算合成地震图,若高频成分丰富,则需要计算很多模式,而且收敛速度慢,因此在某些范围内,有时也采用混合方法,如:射线理论和模式耦合理论的结合^[63,64]、谱元法和模式耦合法的结合^[65]、有限元与远场解析表示的结合^[66]等。2007年,鲁来玉^[67]利用模式耦合方法和积分方程法来研究近地表散射,从而求出3D非均质体对瑞雷面波的散射,奠定了各种尺度范围散射面波应用的理论基础。最近,Riyanti等对近地表地质体的散射波成像及3D弹性散射计算的半数值法进行了研究^[68~70]。综上所述,瑞雷面波散射理论的研究成为了改善瑞雷面波在不同尺度各向异性介质中正反演法效果的一个重要条件。

2 各尺度下瑞雷面波数据的采集与处理

2.1 人工震源法

2.1.1 稳态法

1960年,Hoykallem等首次用稳态激振器作为震源,求出了道路断面的瑞雷波速度分布,这就是稳态瑞雷波勘探的最初应用。稳态法震源用连续振动设备来依次激发不同频率,激发点位置应尽量布置于开阔的场地,排列沿直线布置在激发点的沿长线上,总道数不得少于两道。检波器和仪器通频带与激发频率一致,各信道保持幅度和相位的一致性。采样时间间隔不大于最高激发频率的半个周期,记录时间长度应不小于最大波周期,各通道间隔应小于欲探测的最小目标水平尺度,稳态激振就是通过激振频率及激振能量调整来控制激振产生的瑞雷波波长及能量^[71]。

目前采用比较广泛的稳态仪是日本VIC公司于20世纪80年代初推出的GR-810佐藤式全自动地下勘探机和90年代初推出的GR-820型勘探机,后者既可进行稳态法勘探,又可进行瞬态法勘探,还可将两种方法结合起来,具有二者的优点,即稳态法激振器以多种频率的合成波激振而不是以单一频率的正弦波激振,提高了效率。中国一些科研和生产单位在20世纪80年代后期也研制了便宜适用的稳态震动系统,并在工程上进行了应用,如RL-1型激发系统、SM98-24B系统等。在稳态瑞雷面波的数据处理方面,目前已有多种瑞雷波测试信号分析处理系统,如ES1225,SE2404,TRRALOG等^[72,73],特别是中国科学院武汉岩土力学研

究所研制的 RSM-16H 型动测仪,配有便携式微机、液晶显示屏等硬件及信号分析的专用软件,能完成频谱分析、功率谱计算、相关处理等处理。

稳态瑞雷波法勘探数据处理的主要步骤为:①原始数据预处理;②数字滤波;③计算相位差;④计算频散曲线;⑤正演计算;⑥反演计算。可根据勘探目的,结合已知的地质数据采用以上处理,并对处理结果进行合理的解释。

2.1.2 瞬态法

稳态法具有空间分辨率很高和勘查深度较大的优点^[76],但目前瑞雷波法中比较成熟的方法是瞬态法。1985年,Stokoe等采用冲击震源,通过两个检波器之间波的互谱相位信息,求出了不同频率面波的相速度,进而求出道路断面的瑞雷波速度分布,这是最初的瞬态瑞雷波勘探试验。检波器接收的是时间域中包含许多单频瑞雷波成分的信号,必须进行频谱分析才能得到瑞雷波相速度,因此该方法又叫谱分析法(SASW)。

瞬态激振包含着丰富的频率成分(数千 Hz~数千 Hz),为瑞雷波实验提供了极大的方便,而且测试简便,用手锤或落重作激振设备,用两道或多道谱分析仪作信号记录及分析,也可用其他的瞬态信号仪(如地震仪、基桩动测仪)记录信号,然后对其作一些后续处理即可。

国内还研制出了适合不同测试条件的表面波测试专用仪器,如北京水电物探研究所研制的 SWS 系列瞬态多道瑞雷波勘探仪器,被广泛用于地基场地土类型和建筑场地类别的划分,地基加固效果评价,洞穴探测等^[74~76];煤炭科学研究总院西安分院研制可用于煤矿井下使用的防爆型 MRD 系列瑞雷波探测仪,被用来对掘进过程中前方含气、水等异常构造进行动态监测和跟踪测量以及巷道前方、侧壁和顶、底板的地质构造探测,包括裂隙、断层、破碎、窟窿等。它还可以用于厚煤层掘进及分层开采中剩余煤层厚度的探测^[77]。吉林大学工程技术研究所开发了 Geopen 系列综合工程探测仪,可用于反射波法勘探和折射波法勘探外,还可用于瑞雷波法勘探。河北地球物理勘查院研发了 SM98 系列,不仅可用于稳态测试,还可用于瞬态测试,该仪器已用于公路路基压实度、混凝土结构强度和厚度以及软土地基加固效果评价^[78]。国外也有众多类似的仪器,如 Geovision 表面波系统,既可做瞬态测试又可做稳态表面波测试;最近开发出来的 MASW 系统以及 Geometrics Strata View 已被广泛应用于工程勘察,它们具有 48 或

60 通道,提高了勘探的效率与精度。

野外数据采集技术的关键是得到高信噪比的面波资料,因此如何根据勘探要求和野外环境设定最佳工作状态及参数是一个实践性很强的问题,需要大量的经验积累。现在最有代表性的技术是 MASW 法野外数据采集及处理技术。Xia 等通过实验研究及经验来确定各种近地表勘查目的及环境的 MASW 法数据采集的最佳参数,并提出了一些效果很好的处理及解释方法^[79~81]。

为了提高资料信噪比,必须进行滤波处理,目前采用的滤波方法主要可以分为 4 类,分别根据瑞雷波在速度、频率、能量和极化上的特征进行分离。对于不同深度不同情况下的瑞雷波勘探,应该选择合理的滤波方法,具有代表性的滤波方法有:获取频散曲线的交互性处理程序^[82],研究面波折射的方位角偏离技术^[83],探测和识别地震信号中的面波信号的自动算法^[84],相匹配滤波方法和 MFT 以及 p-w 叠加^[85,86]利用 τ -p 变换法的瑞雷面波提取与识别技术^[87],利用三分量法的极化滤波器^[88]等是也具有代表性的滤波方法。

2.2 天然震源法

2.2.1 微动法

地球表层时刻存在着的非地震引起的微弱振动噪声称为微动,通常把周期小于 1 s 的短周期微动信号称为常时微动或地脉动,主要是近距离的人为振动(交通运输、机械振动和人员活动)激发产生的。周期大于 1 s 的长周期微动信号主要是由海浪、风、气候等自然现象的变化引起的地面振动,目前可利用该微动能进行深度到 3 km 左右的地质及地热勘查。微动中携带着与地表介质密切相关的面波信息,常时微动是面波的短周期微动,它能反映浅部地层的特性。

微动观测技术分别根据其观测方法分为单台及台阵技术,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地球物理勘探界的新研究热点之一^[89~93]。长周期微动信号十分微弱,其幅度一般只有几微米,因此要求探测仪器必须频带宽、灵敏度高、噪声低才能采集到高保真的有效波形。现在已有的微动观测仪器有:OYO1600A 微动观测仪(日本)、MD-1 微动台阵仪器系统(中国)等。微动台阵观测资料的相速度提取常用空间自相关(Spatial autocorrelation 简称 SAC)和 F-K 两种不同的分析方法。代表性微动台阵探测数据处理流程是:野外观测资料-预处理、频谱分析-窄带通数字滤波-计算空间自相关系数-方位平均-频散曲线

提取-反演。微动台阵探测法不需要专门震源,具有勘探成本低、勘探深度大、应用范围广泛的优点。

2.2.2 天然地震测量及处理技术

利用地震面波研究地壳上地幔结构可追溯到 20 世纪 50 年代,但由于当时资料及反演方法的限制,只能获得大范围的水平层状结构。到 20 世纪 80 年代中期,随着全球数字地震台网的建立,极大地拓展了面波研究地球结构的深度和精度,而地震波层析成像技术的引进与发展,则使我们进入了用面波研究地球三维结构的时期^[94~97]。

天然地震记录中面波的群速度和相速度是面波研究的两个重要参数。群速度的测量主要有单台法和双台法^[98]两种方法,相速度的测量主要采用三台法^[99,100]。为了提高计算速度和精度,目前相速度和群速度的计算大多采用数值计算方法。群速度的计算方法有移动窗法、半余弦平方窗、余弦尖端窗和高斯函数窗等。相速度的数值计算方法较简单,在已知震源产生的初相和仪器的相位移的条件下,利用单台记录可以求得震源与地震台间的相速度^[101]。

利用地震面波频散研究地球内部结构和构造的方法技术均发展很快,现在用得较多的是时频分析与网格频散反演技术^[102]和利用地震面波频散反演岩石圈结构的奇异值分解算法^[103]等。

3 瑞雷面波法在多尺度勘探上的应用

3.1 天然地震中瑞雷波的应用

3.1.1 天然地震面波的应用^[94~96]

1) 地球内部构造研究。地球内部构造研究从 20 世纪 50 年代开始,现已进入了全地球及区域内部构造的高分辨率 3D 层析成像研究阶段。

2) 地壳上地幔的物质组成研究。利用定量反演解释,可以得到地球深部不同层位的弹性波传播速度,速度的大小与物质的弹性性质密切相关,从而可对不同层的物质组成或状态进行分析。

3) 大地构造研究。不同时代和不同岩性的岩石中弹性波传播速度存在较大的差异,因此研究不同区域的瑞雷波传播速度差异可以划分大地构造。

4) 地震灾害的研究。瑞雷波是地震中危害最大的一种弹性波,通过对天然地震中的瑞雷波传播机制、振幅、频率和历时的调查,可以研究分析地震的破坏模式,以便采取相应措施来减轻震害的程度。

3.1.2 天然微动中瑞雷波应用^[91,104]

1) 利用常时微动可以获得对地基的弹性性质、构造和振动特性的信息,从而可以通过常时微动的分析研究来划分场地土的类型,了解场地土动态变化特征及其与建筑物的关系,为工程抗震设计提供依据。

2) 利用长周期(1 s 以上)微动进行到 10~3 000 m 的地质构造及地热资源勘查。

3.2 人工激发的瑞雷波应用

3.2.1 近地表勘查中的应用^[105~114]

1) 工程地质勘察。主要是分类第四纪地层,确定地基持力层,确定低速度带存在、埋深及其范围。

2) 地基加固处理效果评价。通过实测地基加固前后的波速差异,得到地基的物理力学性质的改善程度,同时可方便地对处理后场地在水平方向的均匀性做出评价,以及确定加固所影响的深度和范围。

3) 岩石的物理力学参数原位测试。通过对实测资料的反演拟合解释,可以得到岩、土层的横波速度、纵波速度和密度等参数。

4) 地下空洞及掩埋物探测。当瑞雷波的勘探深度与这些物体的深度相当时,频散曲线就会出现异常跳跃,据此可以确定其埋深及范围。

5) 公路、机场跑道质量无损检测。可以分别测出路面、路基的波速,进而计算出路面的抗折、抗压强度、路基的载荷能力以及各结构层的厚度。该方法用于机场跑道和高等级公路的另一个意义是实现质量随年代变化的连续监控。

6) 饱和砂土层的液化判别。根据一定场地内的饱和砂土层的埋深,地下水位的深浅等地质条件,可以计算出该饱和砂土层的液化临界波速值。实测波速大于该临界值,则为非液化层,小于该临界值则为液化层。

7) 其他方面的应用。可有效地用于基岩的完整性评价,场地土类型、类别划分,滑坡调查,堤坝危险预测,桩基入土深度探测,混凝土厚度及裂缝测试等等。

3.2.2 石油地震勘探中的应用

1) 压制反射地震记录中面波提高记录的分辨率,现用的方法主要有:进行面波的几何扩散校正后,反演风化层的 Q 值,补偿风化层对反射波的吸收,提高反射地震资料的分辨率的方法^[115];利用小波变换频谱分解、线性时移及正交分解提取或压制反射地震资料中面波成分的方法^[116];使用不等

道间距接收方式观测系统和地震组合法来消除低频面波,提高地震资料的分辨率的方法^[117];采用视速度变换、奇异值分解、自适应振幅均衡等方法来压制面波的方法^[118]等。

2) 用于提取深层反射地震记录中面波来解决浅层地质问题。从“大炮”地震记录中提取面波来解决浅层地质问题^[119],主要利用 2D 小波的面波采集技术^[120]。

3) 用于基岩形态、近地表结构、复杂地表静校正的研究。如利用多道面波技术可以勘查基岩形态及近地表结构^[40],还可以综合利用地质雷达和瞬态瑞雷波法来进行复杂地表静校正的研究^[121]等。

3.2.3 散射面波的应用研究

1) 地球内部构造及各种尺度的地震区划中的应用。利用面波的激化异常推断地球介质的非均匀性和各向异性,是散射面波在探测深部地球结构方面的另一个应用。由非均匀体或者地球介质的各向异性引起的面波的散射会造成面波极化的异常。从地震区划及小区划的角度来看,地震时出现异常反应的区域往往是地形地质上较为特殊的区域,而且城市的地下交通管线对沿线的场地地震反应也有不可忽视的影响^[122,123]。目前,估计局部不规则地形以及地下异常体对地震地面运动的影响的研究工作一直是地震学、地震工程学中令人关注的课题之一。

2) 介质随时间变化方面尾波和尾波干涉的应用。尾波被广泛应用于许多地震地球物理领域,如震级预测、地震预报、火山监视测量、近地表区域介质的时间变化监测、群发地震的位置确定等;另外利用尾波的幅度信息,分析其变化,监测地下应力的变化,进行尾波 Q 值的层析成像等。利用尾波相位信息(尾波干涉),有助于地震预报^[124~127]。

3) 近地表地球物理及岩土工程尺度中的应用。利用散射面波对局部不规则构造及结构如凹陷地形、沉积河谷、地下空洞及近地表尺度(0.5~30.0 m)目标体和非均质体进行成像,对混凝土结构、道路、桥梁工程等进行质量检测^[61,128]。

4 瑞雷面波法的研究展望

4.1 理论研究

瑞雷面波法从采用大地震波的大尺度到采用超声波的微小尺度其应用前景十分广阔。从地球物理研究和石油地震及工程勘探的尺度,我们可以

对今后瑞雷波法的研究展望如下:

1) 复杂介质中波动方程与其解法的研究。研究特殊条件下面波的传播特性及其特性方程和数学-物理模型,发展各种数值解法,是研究复杂介质中瑞雷面波传播特性的一种有效手段。另外三维复杂介质中面波的散射问题研究也是将来面波研究的一个方向,其中包括了面波在各向异性介质或非均匀介质中的散射正演(如模式耦合方法)和由密度、弹性常数的扰动引起的面波散射的正演(如积分方程法)等,另外一个重要方面就是高阶模式面波的正演方法研究。

2) 改进面波的反演方法,提高频散曲线解释的分辨率、精度和速度,结合局部与全局搜索方法,发展多模式与高模式面波频散曲线的反演技术,三维面波成像技术和面波与折射波等的结合解释法等将是今后面波反演方法的发展方向。

4.2 资料采集与信号处理技术

1) 改进野外数据采集技术,得到高信噪比的一次资料。消除干扰波,研究可能出现影响的补偿方法,发展多道线、多成分面波勘探技术。

2) 配合好各种滤波方法与优秀局部化方法,如时间-频率局部化。

4.3 主要应用研究前景

1) 天然地震面波法:发展地震资料采集中多分量地震观测技术;S 波速度反演中利用并行算法提高计算速度;实现地震面波资料处理的完全自动化,提高工作效率;实现更高分辨率的全球、大陆及局部成像化;发展宽频带,高敏感度的微动台阵观测技术。

2) 人工地震瑞雷面波法:发展高频面波技术,如 f-k 域与小波域中利用更高分辨率影像提高相速度提取的精度,从群速度与阻尼曲线中提取 S 波速度,建立分层介质、非均匀体结构的数值-物理模型,提高 S 波速度的垂直分辨率和水平分辨率;发展近地表三维成像技术;发展散射地震波的尾波技术。此外,配合好瞬态技术与稳态技术的优点,扩展近地表面波技术的应用范围也相当重要。

3) 石油勘探中面波信息的应用研究:更加深入石油勘探资料采集中全波采集技术与纯面波采集技术的研究;改进小折射波观测方式,利用折射波的初至波与面波的联合反演发展表层勘查技术;发展最佳野外资料采集参数的选择技术;研究面波的地形起伏校正问题,三层(中间层为低速带的情况)频散正反演技术;结合地壳构造研究中的面波成像技术与工程勘探中的面波法成果,发展石油勘

探面波技术;发展地震面波勘探理论与方法的同时要研制出更加简单,分辨率与精度更高的面波勘探仪器。

目前中国已有许多面波勘探生产单位和研究单位在从事各种尺度的面波法研究及应用工作,并已研制出一些采用多功能微机控制系统集合了采集及处理的高精度仪器和设备。因此,虽然中国的面波法研究和勘探工作比西方起步较晚,但其发展速度很快,预计不久将达世界水平。

本文在编写过程中得到了中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院徐义贤教授的悉心指导,在此表示感谢!

参 考 文 献

- 1 Rayleigh L. On waves propagated along the plane surface of an elastic solid[J]. Proceedings of the London Mathematic Society, 1887, 17(1): 4~11
- 2 Thomson W T. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium[J]. Journal of Applied Physics, 1950, 21(2): 89~93
- 3 Haskell N A. The dispersion of surface waves on multilayered media[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1953, 43(1): 17~34
- 4 Rosebaum J H. A note on the computation of Rayleigh wave dispersion curves for layered elastic media[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1964, 53(3): 1 013~1 019
- 5 Thrower E N. The computation of the dispersion of elastic waves in layered media[J]. Journal of Sound and Vibration, 1965, 2(3): 210~226
- 6 Harkrider D G. Surface waves in multilayered elastic media[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1964, 52(2): 627~679
- 7 Jones J P. Rayleigh waves in a porous, elastic, saturated solid[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1961, 33(7): 959~962
- 8 Mei C C, Foda M A. Wave-induced responses in a fluid-filled poro-elastic solid with a free surface boundary layer theory[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1981, 66(3): 597~631
- 9 Tajuddin M. Rayleigh waves in a poroelastic half space [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1984, 75(3): 682~684
- 10 夏唐代, 吴世明. 流体—固体介质中瑞利波特性[J]. 水利学报, 1994(1): 67~75
- 11 夏唐代, 蔡袁强, 吴世明, 等. 各向异性成层地基 Rayleigh 波的弥散特性[J]. 振动工程学报, 1996, 9(2): 191~196
- 12 陈龙珠, 黄秋菊, 夏唐代. 饱和地基中瑞利波的弥散特性[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 6~9
- 13 Knopoff L. A matrix method for elastic wave problems [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1964, 54(1): 431~438
- 14 Waston H T. A note on fast computation of Rayleigh wave dispersion in the multilayered elastic half-space [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1970, 60(1): 161~166
- 15 Anas A-Z. Dispersion function computation for unlimited frequency values[J]. Geophysical Journal International, 1979, 58(1): 91~105
- 16 Menke W. Comment on 'Dispersion function computation for unlimited frequency values' by Anas-Zena[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1979, 59(2): 315~323
- 17 Kennett B L N. Reflection rays and reverberations[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1974, 64(6): 1 685~1 696
- 18 陈云敏, 吴世明. 成层地基的 Rayleigh 波特征方程的解法[J]. 浙江大学学报, 1991, 25(1): 40~52
- 19 欧阳联华, 王家林. 一种高频面波频散函数的快速算法——改进的 Abo-Zena 法[J]. 物探化探计算技术, 2002, 24(3): 204~214
- 20 李幼铭, 束沛镒. 层状介质中地震面波频散函数和体波广义反射系数的计算[J]. 地球物理学报, 1982, 25(2): 130~139
- 21 张碧星, 喻明, 熊伟, 等. 层状介质中的声波场及面波研究[J]. 声学学报, 1997, 22(3): 230~241
- 22 凡友华, 刘家琦. 层状介质中瑞雷面波的频散研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(5): 577~581
- 23 Alterman Z, Karak F C. Propagation of elastic wave in layered media by finite-difference methods[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(1): 367~398
- 24 Boore D M. Finite-difference methods for seismic wave propagation in heterogeneous materials[A]. In: Bolt B. Methods of computational physics[C]. New York: Academic Press, 1972. 1~37
- 25 Alford R M, Kelly K R, Boore D M. Accuracy of finite-difference methods modeling of the acoustic wave equation[J]. Geophysics, 1974, 39(6): 834~842
- 26 Virieux J. P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method[J]. Geophysics, 1986, 51(4): 889~901
- 27 Levander A. Fourth-order finite-difference P-SV seismograms[J]. Geophysics, 1988, 53(11): 1 425~1 436
- 28 Robertsson J O A, Blanch J O, Symes W W. Viscoelastic finite-difference modeling[J]. Geophysics, 1994, 59(11): 1 444~1 456
- 29 Graves R W. Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 86(4): 1 091~1 106

- 30 Bohlen T. Parallel 3-D viscoelastic finite-difference seismic modeling[J]. *Computers & geosciences*, 2002, 28(8):887~899
- 31 Gold N, Shapiro S A, Burr E. Modeling of high contrasts in elastic media using a modified finite difference scheme[J]. *Expanded Abstracts of 68th Annual International SEG Meeting*, 1997, ST 14. 6
- 32 Saenger E H, Gold N, Shapiro S A. Modeling the propagation of elastic waves using a modified finite-difference grid[J]. *Wave Motion*, 2000, 31(1):77~92
- 33 Saenger E H, Bohlen T. Finite-difference modeling of viscoelastic and anisotropic wave propagation using the rotated staggered grid[J]. *Geophysics*, 2004, 69(2):583~591
- 34 Bohlen T, Saenger E H. Accuracy of heterogeneous staggered-grid finite-difference modeling of Rayleigh waves[J]. *Geophysics*, 2006, 71(4):T109~T115
- 35 Stokoe II K H, Nazarian S. Effectiveness of ground improvement from spectral analysis of surface waves [A]. *Proceedings of the Eighth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. 91~95
- 36 Nazarian S, Stokoe II K H. Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems[A]. In: National Research Council. *Transport Research Record No 930* [C]. Washington D C: Falmer Press, 1983. 38~45
- 37 Stokoe II K H, Wright S G, Roesset J M. Characterization of geo-technical sites by SASW method[A]. In: Woods R D. *Geophysical characterization of sites* [C]. New Delhi: Oxford & IBH publidshers, 1994. 15~25
- 38 Xia Jinghai, 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
- 39 Xia Jinghai, Miller R D, Park C B. Advantage of calculating shear-wave velocity from surface waves with higher modes[J]. *Expanded Abstracts of 70th Annual International SEG Meeting*, 2000, 1 295~1 298
- 40 Miller R D, Xia J, Park C B, et al. Using MASW to map bedrock in Olathe, Kansas [J]. *Expanded Abstracts of 69th Annual International SEG Meeting*, 1999, 433~436
- 41 Li Qingchun, Chen Jianwei, Wu Peng, et al. High resolution radon transformation and wave field separation [A]. In: ICEEG. *Geophysical Solutions for Environment and Engineering* [C]. USA: Science Press USA, 2006. 190~195
- 42 曹小林, 洪学海, 曹俊兴. 面波波形反演中的模拟退火法[J]. *成都理工学院学报*, 2000, 27(3):296~301
- 43 Pei Donghong, Louie J N, Pullammanappallil S K. Application of simulated annealing inversion on high-frequency fundamental-mode Rayleigh wave dispersion curves[J]. *Geophysics*, 2007, 72(5):77~85
- 44 肖柏勋. 高模式瑞雷面波及其正反演研究[D]. 长沙: 中南大学, 2000
- 45 张碧星, 肖柏勋, 杨文杰, 等. 瑞雷波勘探中“之”字型频散曲线的形成机理及反演研究[J]. *地球物理学报*, 2000, 43(4):557~567
- 46 张碧星, 鲁来玉, 鲍光淑. 瑞雷波勘探中“之”字型频散曲线研究[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(2):263~273
- 47 杨天春. 瑞利波“之”字形频散与道路结构频散曲线的正演研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004
- 48 陈祥, 孙进忠, 刘景儒. 瑞雷波“之”字型速度—深度曲线的成因[J]. *地球物理学进展*, 2004, 19(4):860~863
- 49 Marquering H, Snieder R. Shear-wave velocity structure beneath Europe, the Northeastern Atlantic and Western Asia from waveform inversions including surface-wave mode coupling[J]. *Geophysical Journal International*, 1996, 127(2):283~304
- 50 凡友华. 考虑高阶模的 Rayleigh 波勘探应用研究[D]. 北京: 北京大学, 2003
- 51 Park C B, Miller R D, Xia J. Multichannel analysis of surface waves(MAWS) [J]. *Geophysics*, 1999, 64(3):800~808
- 52 van Wijk K, Haney M M, Scales J A. LD energy transport in a strongly scattering laboratory model [J]. *Physical review E*, 2004, 69(2):036611
- 53 van Wijk K, Haney M M, Scales J A. Analysis of strong scattering at the micro-scale[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, 115(3):1 006~1 011
- 54 Herman G C, Huggins R J, Milligan P A. Imaging shallow objects and heterogeneities with scattered guided waves[J]. *Geophysics*, 2000, 65(1):247~252
- 55 Campman X H, van Wijk K V, Riyanti C D, et al. Imaging scattered seismic Surface waves[J]. *Near Surface Geophysics*, 2004, 2(4):223~230
- 56 Bodet L, van Wijk K, Bitri A, et al. Surface-wave inversion limitations from laser-doppler physical modeling [J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2005, 10(2):151~162
- 57 吴如山, 安艺敬一编. 地震波的散射与衰减[M]. 李裕澈译. 北京: 地震出版社, 1993. 325
- 58 Bataille K, Wu R S, Flatte S M. Inhomogeneities near the core-mantle boundary evidenced from scattered waves: A review[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1990, 132(1-2):151~173
- 59 聂永安, 曾健, 冯德益. 三维尾波散射问题的理论研究[J]. *地震学报*, 1995, 17(1):68~71
- 60 李小凡. 大延伸非均匀介质中地震波全弹性散射理论及弹性波单次散射理论[J]. *力学学报*, 2002, 34(4):559~568
- 61 李小凡. 大延伸非均匀介质中地震波全弹性散射理论及弹性波多次散射理论[J]. *力学学报*, 2002, 34(5):

- 743~755
- 62 李万杰. 局部不规则场地对 Rayleigh 波的散射[D]. 天津:天津大学建筑工程院,2005
- 63 Felsen L B. Hybrid ray-mode fields in inhomogeneous wave guides and ducts[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,1981,69(2):352~361
- 64 Felsen L B. Progressing and oscillatory waves for hybrid synthesis of source-excited propagation in layered media[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society,1984,79(1):11~33
- 65 Capdeville Y, Chaljub E, Vilotte J P, et al. Coupling the spectral element method with a modal solution for elastic wave propagation in global earth models[J]. Geophysical Journal International,2002,152(1):34~67
- 66 Mal A, Chang Z. A semi-numerical method for elastic wave scattering calculations[J]. Geophysical Journal International,2000,143(2):328~334
- 67 鲁来玉. 近地表面波的散射研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所,2007
- 68 Riyanti C D, Herman G C. Three-dimensional elastic scattering by near-surface heterogeneities [J]. Geophysical Journal International,2005,160(2):609~620
- 69 Sato H, Fehle M C. Seismic wave propagation and scattering in the heterogenous earth [M]. New York: Springer-Verlag New York Inc,1998. 164
- 70 Vrettos C. In - plane vibration of soil deposits with variable shear modulus: I. Surface wave[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,1990,14(3):209~222
- 71 Vrettos C. Dispersive SH - surface waves in soil deposits of variable shear modulus[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,1990,9(5):255~264
- 72 李玉堂. 稳态瑞雷波法数据处理与解释技术研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2006
- 73 刘云祯,王振东. 瞬态面波法的数据采集处理系统及其应用实例[J]. 物探与化探,1996,20(1):15~18
- 74 杨成林. 应用瑞利波等方法对公路质量进行无损检测[J]. 物探与化探,1996,20(2):104~115
- 75 林胜天. 多波列浅层地震勘探新技术在岩土工程勘察中的应用[A]. 见:中国建筑学会工程勘察学术委员会主编. 全国地下目的物探测方法技术研讨会论文集[C]. 北京:中国纺织大学出版社,1996. 16~25
- 76 张忠良,王峰. 浅谈运用物探手段来寻找地下空洞[A]. 见:中国建筑学会工程勘察学术委员会主编. 全国地下目的物探测方法技术研讨会论文集[C]. 北京:中国纺织大学出版社,1996. 43~52
- 77 李锦飞,李人厚. 瑞利波勘探技术的发展与应用[J]. 煤炭学报,1997,22(2):23~126
- 78 杨成林,葛宝来,王炎. SM98 瑞利波仪测试原理及应用效果分析[J]. 物探与化探,2000,24(5):332~338
- 79 Xia Jianghai, Xu Yixian, Chen Chao, et al. Simple equation guide high-frequency surface-wave investigation techniques[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2006,26(5):395~403
- 80 Park C B, Miller R D, Miura H. Optimum field parameters of an MASW survey[EB/OL]. [2002-03-22]. <http://www.kgs.ku.edu/Geophysics2/Expo%20Update/Pubs/Pubs/PAR-02-03.pdf>
- 81 Xu Yixian, Xia Jianghai, Miller R D. Quantitative estimation of minimum offset from multichannel surface - wave survey with actively exciting source[J]. Journal of Applied Geophysics,2006,59(2):117~125
- 82 Dean E A, Keller G R. Interactive processing to obtain interstation surface wave disperasion [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1991, 81 (3): 931~947
- 83 Pollitz F F, Hennen C G. Analysis of Rayleigh wave refraction from three-compenent seismic spectra[J]. Geophysical Journal International, 1993, 113 (3): 629~650
- 84 Chael E P. An automated Rayleigh wave detection algorithm[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,1997,87(1):157~163
- 85 胡家富,段永康,胡毅力,等. 利用 Rayleigh 波反演浅土层的剪切波速度结构[J]. 地球物理学报,1999,42(3):393~400
- 86 胡家富. Rayleigh 波在工程勘察中的解释方法探讨[J]. 岩土工程学报,1999,21(5):599~602
- 87 包军强,张学强,刘江平,等. 浅层多波的分离识别与提取[J]. 物探与化探,1998,22(5):336~376
- 88 李锦飞. TRES-1 型多分量瑞雷波勘探仪的研究及应用[J]. 物探与化探,1998,22(2):129~133
- 89 Hiroshi A, Koji T. S-wave velocity profiling by inversion of Microtremors H/V spectru[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,2004,94(1):53~63
- 90 陶夏新,刘曾武,郭明珠,等. 工程场地条件评定中的地脉动研究[J]. 地震工程与工程振动,2001,21(4):18~23
- 91 何正勤,丁志峰,贾辉,等. 用微动中的面波信息探测地壳浅部的速度结构[J]. 地球物理学报,2007,50(2):492~498
- 92 Satoh T, Kawase H, Iwata T, et al. S-wave velocity structure of the Taichung Basin, Taiwan, estimated from array and single-station records of micro-tremors [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001,91(5):1 267~1 282
- 93 Scherbaum F, Hinzen K G, Ohrnberger M. Determination of shallow Shear wave velocity profiles in the Cologne, Germany area using ambient vibrations[J]. Geophysical Journal International,2003,152(2):597~612
- 94 Zhao D A. Tomographic study of seismic velocity structure in the Japan Islands[D]. Sendai: Tohoku University, 1991
- 95 张智. 川滇地区地壳及上地幔结构面波层析成像[D].

- 长春:吉林大学,2007
- 96 赵晓艾. 欧亚大陆及西太平洋面波层析成像数据库[D]. 成都:成都理工大学,2006
- 97 宣瑞卿. 中国及邻区地壳上地幔面波频散层析成像[D]. 成都:成都理工大学,2005
- 98 Wu F T, Levshin A L. Surface-wave group velocity tomography of East Asia[J]. *Physics of the Earth and Planetary interiors*, 1994, 84(1—3): 59~77
- 99 Everdren J F. Determination of crustal structure from phase velocity of rayleigh waves, part II; San Francisco Bay region[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1957, 47(2): 87~88
- 100 Press F. Determination of crust structure from phase velocity of Rayleigh Waves, Part I; Southern, California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1956, 67(12): 1 647~1 658
- 101 Sato Y. Analysis of dispersed surface waves by means of Fourier transform. I[J]. *Bull Earthq Res Inst*, 1956, 33(1): 33~47
- 102 胡家富, 滕吉文, 庄真. 频时分析与网格频散反演技术[A]. 见: 阚荣举编. 云南地球物理文集[C]. 昆明: 云南大学出版社, 1992. 125~131
- 103 胡家富, 温一波, 谢应文. 利用地震面波频散反演岩石圈结构的奇异值分解算法[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(2): 211~217
- 104 樊广利. 常时微动、面波、检层法在场地土测试中的综合应用[J]. *水电站设计*, 2006, 22(4): 64~72
- 105 Al-Hunaidi M O. Difficulties with phase spectrum unwrapping in spectral analysis of surface wave nondestructive testing of pavements[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, 29(3): 506~511
- 106 吴成元, 邹桂高. 瑞利波法在挤密土桩复合地基检测中的应用[J]. *军工勘探*, 1995(2): 31~35
- 107 杨成林. 应用瑞利波等方法对公路质量进行无损检测[J]. *物探与化探*, 1996, 20(2): 104~115
- 108 张学强. 瑞利波法在地基工程质量检测中若干问题的研究[J]. *物探与化探*, 2000, 24(5): 346~351
- 109 成锁, 田钢, Xia Jianghai, 等. 多道面波分析技术在沙漠低降速带调查中的应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2005, 35(1): 113~117
- 110 Luke B, Stokoe II K H. Application of SASW method underwater[J]. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 1998, 124(6): 523~532
- 111 Cho Young S, Lin Fengbao. Integrity analysis of single and multi-layer thin cement mortar slab structures using the spectral analysis of surface wave NDT method[J]. *Construction and Building Materials*, 2000, 14(8): 387~395
- 112 Kim D S, Shin M K, Park H C. Evaluation of density in layer compaction using SASW method[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001, 21(1): 29~46
- 113 Cho Young S. NDT response of spectral analysis of surface wave method to multi-layer thin high strength concrete structures[J]. *Ultrasonics*, 2002, 40(1—8): 227~230
- 114 Xia J, Chen C, Li P H, et al. Delineation of a collapse feature in anisotropic environment using a multichannel surface wave technique[J]. *Geotechnique*, 2004, 54(1): 17~27
- 115 刘学伟, 郝圣宏, 何樵登. 用面波反演风化层 Q 值—补偿风化层吸收提高分辨率[J]. *石油物探*, 1996, 35(2): 89~95
- 116 罗国安, 杜世通. 小波变换及信号重建在压制面波中的应用[J]. *石油地球物探*, 1996, 31(3): 337~349
- 117 蒋连斌, 陈道宏, 高振山, 等. 一种去面波的新方法[J]. *石油地球物理勘探*, 1997, 32(3): 103~106
- 118 牛滨华, 吕景贵, 孙春岩, 等. 叠前面波干扰压制方法的研究与应用[J]. *现代地质*, 2001, 15(3): 326~332
- 119 曾校丰, 钱荣毅, 邓新生, 等. 油气反射波地震勘探记录中面波信息的提取[J]. *物探与化探*, 2001, 25(6): 443~446
- 120 李媛媛, 李庆春, 丁梁波, 等. 二维小波变换迭代法去除地震面波[A]. 见: 中国地球物理学会编. 中国地球物理[C]. 西安: 西安地图出版社, 2004. 51~52
- 121 王东才. 综合利用地质雷达和瞬态瑞利波法进行地表静校正[J]. *物探装备*, 2001, 11(2): 84~88
- 122 Lee V W, Karl J. Diffraction of SV waves by underground, circular, cylindrical cavities[J]. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1993, 11(8): 445~456
- 123 Liang Jianwen, Zhang Hao, Lee V W. A series solution for surface motion amplification due to underground twin tunnels SV waves[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, 2(2): 289~298
- 124 Fehler M, Roberts P. A temporal change in coda wave attenuation observed during an eruption of Mount St. Helens[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 93(10): 4 367~4 373
- 125 Robinson R. Temporal variations in coda duration of local earthquakes in the Wellington region, New Zealand[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1987, 125(4): 125~130
- 126 Snieder R, Vrijlandt M. Constraining the source separation with coda wave interferometry: Theory and application to earthquake doublets in the Hayward fault, California[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(B4): B04301
- 127 Snieder R. The theory of coda wave interferometry[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2006, 163(2—3): 455~473
- 128 陈丙午. 不规则地形对地震动及震害的影响[J]. *地震工程与工程振动*, 1982, 2(1): 12~20