第28卷第3期 地球科学与环境学报 Vol. 28 No. 3
2006年9月 Journal of Earth Sciences and Environment Sept. 2006

瑞雷面波勘探的过去、现在和未来

李庆春，邵广周，刘金兰，梁志强

（长安大学 地质工程与测绘工程学院，陕西 西安 710054）

[摘要] 回顾了瑞雷面波勘探发展的历史，剖析了面波频散曲线正反演的进展及存在的问题，重点指出在石油和煤炭反射地震中，应从剔除面波转变为利用面波，并借助现有石油“大炮”反射地震资料中“有害的”瑞雷面波提取浅层地质结构信息，为反射地震静校正、近地表工程地质评价等提供物性参数，把反射地震的面波干扰变为对勘探十分有利的参数提取源，实现以强干扰面波为主要数据源的浅层结构探测，以促进瑞雷面波勘探技术的进一步发展。

[关键词] 反射地震；瑞雷面波；频散曲线；近地表参数；发展趋势

[中图分类号] P631.4+2 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2006)03-0074-04

Past, Present and Future of Rayleigh Surface Wave Exploration

LI Qing-chun, SHAO Guang-zhou, LIU Jin-lan, LIANG Zhi-qiang

(*School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an* 710054, *Shaanxi, China*)

Abstract: This paper reviews the history of Rayleigh wave prospecting, analyzes the progress and existed problems in forward and inversion of dispersion curves. It is pointed out with emphases that the strategy should be changed from de-surface waves to adopting them in oil and coal reflection prospecting. From Rayleigh data in the existing petroleum reflection recording, the shallow geological structure information and physical parameters can be extracted, which will contribute to the static correction and the appraisal of near surface engineering geology. It is beneficial for reflection seismics to change the disturbing waves into the data sources for extracting parameters. The shallow structure information can be determined via using surface waves as main data source. The technique will promote further development of the surface wave exploration.

Key words: reflection seismics; rayleigh wave; dispersion curves; near surface parameters; development trend

1 瑞雷面波勘探的历史沿革

1887年英国学者瑞雷(Rayleigh)首先发现并证明均匀半空间中瑞雷面波(又称瑞雷波或地滚波)的存在[1]，为后人利用瑞雷波进行勘探揭开了新的一页。经过若干年探索研究，20世纪50年代初，发现了瑞雷面波在层状介质中的频散特性，据此展开了通过全球宽带数字地震仪台网利用天然地震记录的瑞雷波来探测地球内部结构的研究工作，并开始利用人工地震波中的瑞雷波进行工程勘察。60年代初，Hoykallen等提出面波勘探的半波长解释法，利用激振器产生的正弦波信号实测道路断面的速度分布，将稳态瑞雷面波先应用于地基勘察。70年代人工震源瑞雷波法的实验研究，率先在日本取得突破进展，从此成为工程地震勘测中引人注目的一种新方法。80年代初，日本VIC株式会社经过多年的研究推出了GR-810佐藤式全自动地下勘探系统，并将稳态瑞雷面波法用于工程勘察之中[2]。中国自1987年引进瑞雷面波法技术来，无论在理论或工程地质勘测中，均取得了一定成果。1989年，杨成林自行研制了一套稳态瑞雷波勘探系统，并将其应用于第四

[收稿日期] 2005-10-13

[基金项目] 国家863项目(2005AA615010)

[作者简介] 李庆春(1961－)，男，山东郓城人，教授，博士生导师，从事应用地球物理教学与研究。

系地层分层和地基处理效果评价[3]。1983 年，Stokoe K H 等采用锤击震源，通过两个检波器间的互谱相位信息求取面波的相速度，对瞬态瑞雷波勘探进行了初步尝试[4]。1983 年，Nazarian S 等用表面波谱分析方法（SASW）对高速公路路面及路基进行了探测[5]，为瞬态瑞雷波法在工程中的应用奠定了基础。1996 年，刘云桢等自行研制了 SWS 瞬态面波多道数据采集处理系统，并将其应用于机场工程勘察、浅层煤田勘探、地下煤巷探测等方面的工作中[6]，取得了较好的效果。该方法通过对多个检波器信号进行逐道频谱分析和相关计算，并进行迭加，从而消除了大量的随机干扰，强化了瑞雷面波，压制了纵横波。

瞬态瑞雷波法的出现，甩掉了稳态面波的一套笨重设备，受到了工程物探人员的偏爱，在最近十几年内得到了长足发展，其正反演理论、解释方法及应用等正在逐步完善，该方法不仅同时具备纵波的初至折射法、反射法的主要优点，而且勘探更加快速简捷，尤其是在土层分层、工程质量无损检测等近地表结构探测中具有广阔的应用前景。

2　频散曲线正演方法的发展及现状

对面波频散曲线计算和反演方法的研究涉及波的传播理论。1953 年，Haskell N A 在 Thromson 的基础上，通过相邻界面传递矩阵公式以及自由表面边界条件和无穷远处辐射条件导出了层状介质中平面瑞雷波的频散方程[7]。同年，Knopoff L 在 Haskell 的矩阵方法基础上，提出了一种新的求取频散曲线的方法，得出了 $4n+2$ 阶的频散方程行列式[8]。1965 年，Thrower E N 等将 δ 矩阵方法应用于瑞雷波频散方程的推导，避免了数值精度丢失的问题[9]。1970 年，Watson H T 应用简化的 δ 矩阵求解瑞雷波频散问题，减小了计算量[10]。1979 年，Abo-Zena A 通过一系列 4×4 阶反对称矩阵的循环计算得到瑞雷波的频散方程，解决了高频数值不稳定性问题[11]。1982 年，李幼铭等在 B、P、C 坐标系下将 Abo-Zena 的算法用 Haskell 矩阵本征值分解的 δ 矩阵运算，用 5 个形式简单的矩阵连乘形式重新组织了 Abo-Zena 算法，使运算步骤大量简化[12]。1996 年，牛滨华、何继善等从虚功变分原理出发，引入等效面波震源概念，用有限元方法导出了含多个非水平界面的层状介质以及垂向各项异性和粘滞性多层介质中瑞雷面波的频散方程，并进行了数值计算[13]。1998 年，张碧星等讨论了分层介质中面波的能量分布，通过数值分析发现只有当径向距离较大时，面波能量的传播速度才等于其群速度[14]。1999 年，赵东等用改进的 Cagniard-Dehoop 方法导出均匀弹性半空间表面点源激发的瑞雷波波场位移精确表达式，并由此式求得弹性半空间任意点的位移，描述了稳态和瞬态震源激发的瑞雷波波场[15]。1999 年，卓乐芳对液体-固体表面的瑞雷波和斯通利波进行了讨论[16]。2001 年，凡友华等从柱面波出发，讨论了频散函数的求取问题[17]。2002 年，Zhang S X 等对各向异性介质中瑞雷面波的频散特征进行了系统研究[18]。这些工作对面波频散曲线正反演的发展均具有重要的推动作用。

3　瑞雷波反演方法的发展及现状

瑞雷面波信号的反演，目前主要是针对层状介质理论，利用瑞雷波的频散曲线进行介质内部结构的反演（瑞雷波速度、厚度），主要有观察法、局部线性化方法、非线性方法、多模方法等。观察法是基于半波长理论的反演方法，其特点是简单、粗糙、主观性强，且用到的正演公式仅局限在均匀半空间中的瑞雷波速度推导中得到的横波速度与瑞雷波速度的近似关系，用于复杂介质还很不可靠。

1994 年，裴江云、吴永刚等用最小二乘法或阻尼最小二乘法对瑞雷波频散曲线进行反演[19]，但其是一种局部线性化方法，无法找到目标函数的全局最优解。全局最优化方法如遗传算法和人工神经网络算法，则大大降低了对初始模型选择的要求，且不易陷入局部最优解中。1995 年，石耀林、金文用遗传算法对瑞雷波频散曲线进行了反演，效果很好[20]。1996 年，Yamanaka H 和 Ishida H 用人工神经网络对瑞雷波频散曲线进行了反演，也取得了很好的效果[21]。2000 年，张碧星、肖柏勋等从完全固体层状模型出发，对瑞雷波的正反演作了深入研究，分析了“之”字形频散曲线的形成机理，并编制相应的反演软件，取得一定的效果[22]。1997 年，朱良保针对地球内部结构的横向不均匀性，利用瑞雷波走时，采用球谐函数拟合等方法对瑞雷波的区域群速度分布进行了反演[23]。该法是否可行尚待进一步研究，因为瑞雷波遇到横向不均匀结构时会发生模式转化，且体波也可能转化为瑞雷型面波。1996 年，Marquering H 和 Snieder R 提出了联合反演的思想，将各种波的勘探优点进行互补，提高

瑞雷波反演的准确性和精度[24]。这种方法对复杂介质的反演有很大优势。

总之,瑞雷面波勘探法的反演还存在大量的研究工作等待去做,且反演必须以正演为基础,以实际应用为目标,只有把瑞雷波在各种复杂介质中的正演规律弄清楚了,反演工作才会有进一步的发展。

4 面波在反射地震勘探中的应用现状

基于油气或煤炭资源勘探的反射地震法,无论在陆地还是在滩浅海(如塔里木沙丘、陕北黄土塬、环渤海海滩及浅水区),采集资料均出现低速度、低频率、强振幅、频散状的来自自由表面附近的瑞雷面波,该波组在采集中很难避开,在处理中又是重点剔除对象,花费了大量人力、物力。长期以来,人们围绕寻找油气、煤炭等任务在滩浅海、沙漠、黄土塬等地区开展了大量实际工作,取得了丰富的反射地震资料。为提高地震勘探的分辨率,在数据处理时总是千方百计地消除或压制瑞雷面波这一强干扰。为了在地表不均匀地区实现高精度地震勘探,反射地震中还要单独进行小折射地震或微测井观测,以便得到用于静校正等计算的近地表结构信息。另一方面,工程面波勘察自 20 世纪 70 年代开始应用以来,科技人员又花费大量人力、物力去采集面波,以达到勘察地下地质目标的目的。上述两方面的工作过去是分别进行的,没有做到相互取长补短、交叉利用。

近年来,人们针对石油地震勘探资料来研究面波,将它用于解决地震资料的近地表校正、Q 补偿、面波压制、反射信息提取和提高分辨率等问题,为面波的应用拓展了领域。1996 年,刘学伟等将面波进行几何扩散校正后来反演风化层的 Q 值,补偿风化层对反射波的吸收,提高了反射地震资料的分辨率[25]。1996 年,罗国安、杜世通在小波变换频道分解的基础上,通过对面波作线性时移再作正交分解或横向小波变换来提取和压制反射地震资料中的面波成分[26]。1997 年,蒋连斌等在野外采集时采用不等道间距接收方式观测系统,在室内处理时采用地震组合法来消除低频面波,从而提高地震资料的分辨率[27]。2001 年,牛滨华、吕景贵等采用了视速度变换、奇异值分解、自适应振幅均衡等方法来压制面波,取得了较好的效果[28]。2001 年,曾校丰、钱荣毅、邓新生等对深层反射地震勘探记录中面波利用的可能性及其利用价值进行了探讨,指出从“大炮”地震记录中提取面波来解决浅层地质问题前景良好[29]。2001 年,王东才提出了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[30]。2003 年,Miller Richard D 等一批学者利用多道面波技术探测基岩形态,研究近地表结构[31],进而为资源勘查提供浅部地质信息。2004 年,李庆春等利用二维小波变换迭代技术,初步研究了从反射地震中提取面波的方法[32],取得了一定效果。

总之,面波的研究和应用,目前主要集中在工程地质领域的防灾减灾、利用人工激发面波勘察工程场地的近地表速度结构以及利用天然地震记录反演地球内部结构[33]。借助石油“大炮”反射地震资料研究并利用面波的方法技术,尚未见广泛地开展。

5 面波勘探的发展趋势

中国海域辽阔,环渤海油气资源十分丰富,与美国、中东等国家、地区相比,中国的滩浅海面积很大,其近地表地质地球物理条件也异常复杂。另外,中国西部是中国重要的能源与矿产基地,新疆塔里木石油和煤炭资源勘探区的地表沙丘、西北地区黄土塬等近地表条件,给地震静校正带来很大困难。而沙漠、黄土塬、滩浅海等地区的反射地震勘探,受仪器和观测系统的限制,面波干扰已成为资料的重要部分,如何将这些干扰波变为有用信息加以利用,是今后反射地震瑞雷面波再利用研究的发展方向。这些地区复杂的近地表条件有可能成为利用面波技术探测浅层速度分布的有利因素,借用工程面波勘探的有关经验并研究新的方法技术,预期可以变害为利,提供近地表结构等信息,为反射地震静校正、近地表工程地质评价等提供可靠的依据。

因此,研究反射地震面波提取与近地表结构问题,有助于把工程瑞雷波勘探的成果和天然地震面波成像理论引入到石油地震中,把石油地震中的面波干扰变成有益于勘探的参数提取源,为高精度地震勘探提供有关校正参数,具有广阔的应用前景,有可能成为面波勘探的一大重要分支。

6 结语

从利用天然地震记录瑞雷波进行地球内部结

构探测到利用稳态瑞雷面波法进行工程勘察，再到利用瞬态瑞雷面波法进行土层分层、工程质量无损检测，瑞雷波勘探及其正反演理论、解释方法等正在逐步完善，形成了一套与反射地震勘探相互独立的勘探解释方法。而用这两种方法分别进行资料采集时，反射波和瑞雷面波都会同时出现。显然，如果用一次采集所得资料进行两种方法的勘探解释，必然会降低勘探成本，提高资料信息的利用率。而石油和煤炭反射地震又占有了物探方法绝大部分市场。

因此，利用现有石油“大炮”反射地震资料中“有害的”瑞雷面波，提取浅层地质结构信息，为反射地震静校正、近地表工程地质评价等提供物性参数，把石油反射地震中的面波干扰变成对勘探十分有利的参数提取源。实现以强干扰面波为主要数据源的浅层结构探测，直接利用已有的老资料，把石油反射地震资料的干扰面波加以利用，并赋予其浅层地质工程意义，代表着面波勘探的发展趋势。

[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: 4 - 11.

[2] 佐薇范. 用 GR-810 激振系统进行勘探[M]. 日本：VIC 株式会社，1986.

[3] 杨成林. 瑞雷波勘探[M]. 北京：地质出版社，1993.

[4] Stokoe K H, Nazarian S. Effectiveness of Ground Improvement from Spectral Analysis of Surface Waves[C]//In: Proc. 8th Euro Conf On Soil Mech and Found Engrg. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.

[5] Nazarian S, Stokoe K H, Hudson W R. Use of Spectral Analysis of Surface Waves Method for Determination of Moduli and Thicknesses of Pavement Systems[C]//In: National Research Council. Transport Research Record No. 930. Washington D C: Falmer Press, 1983.

[6] 刘云桢，王振东. 瞬态表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)：28 - 33.

[7] Haskell N A. The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media[J]. Bull Seism Soc AM, 1953, 43: 17 - 34.

[8] Knopoff L. A Matrix Method for Elastic Wave Problems [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1964, 54(1): 431 - 438.

[9] Thrower E N. The Computation of Elastic Waves in Layered Media[J]. Sound Vib, 1965, 2: 210 - 226.

[10] Waston H T. A Note on Fast Computation of Rayleigh Wave Dispersion in Multi-layered Half-space[J]. Bull Seism Soc Am, 1970, 60: 161 - 166.

[11] Abo-Zena A. Dispersion Function Computations for Unlimited Frequency Values[J]. Geophys J R Astron Soc, 1979, 58: 91 - 105.

[12] 李幼铭，束沛锰. 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.

[13] 牛滨华，何继善. 半空间非水平层状介质瑞利面波的频散方程[J]. 物探与化探，1996，21(5)：345 - 350.

[14] 张碧星，兰从庆，喻　明，等. 分层介质中面波的能量分布[J]. 声学学报，1998，23(2)：97 - 106.

[15] 赵　东，钟　和，谭海平. 点源激发瑞利波的半空间波场[J]. 物探与化探，1999，23(2)：128 - 132.

[16] 卓乐芳. 固体—液体层分界面处的 PSV 型面波[J]. 西安工程学院学报，1999，21(3)：71 - 73.

[17] 凡友华，肖柏勋，刘家琦. 层状介质中轴对称柱面瑞利面波频散函数的计算[J]. 地震工程与工程振动，2001，21(3)：1 - 5.

[18] Zhang S X, Chan L S, Xia J H, et al. Anisotropy Induced Dispersion Behaviors of Rayleigh Waves[J]. SEG Expanded Abstracts, 2002, 21: 1404 - 1407.

[19] 裴江云，吴永刚，刘英杰. 近地表低速带反演[J]. 长春地质学院学报，1994，24(3)：317 - 320.

[20] 石耀林，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.

[21] Yamanaka H, Ishida H. Application of Genetic Algorithms to an Inversion of Surface-Wave Dispersion Data[J]. Bull Seism Soc Am, 1996, 86(2): 436A44.

[22] 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.

[23] 朱良保. 区域面波群速度反演的球谐函数法[J]. 地球物理学报，1997，40(4)：503 - 511.

[24] 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.

[25] 刘学伟，郜圣宏，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.

[26] 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]. 石油地球物理勘探，1996，31(3)：337 - 349.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 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.

[30] 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.

[31] Miller R D, Xia J H, Park C B, et al. Using MASW to Map Bedrock in Olathe, Kansas[J]. SEG Expanded Abstracts, 1999, 18: 433 - 436.

[32] 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[C]//中国地球物理学会编. 中国地球物理. 西安：西安地图出版社，2004.

[33] 胥　颐，刘福田，刘建华，等. 中国大陆西北造山带及其毗邻盆地的地震层析成像[J]. 中国科学，2000，30(2)：113 - 123.