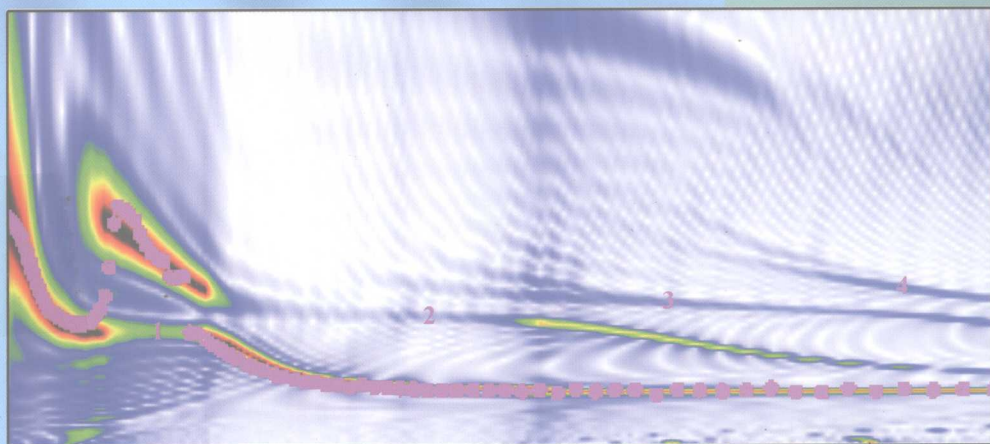
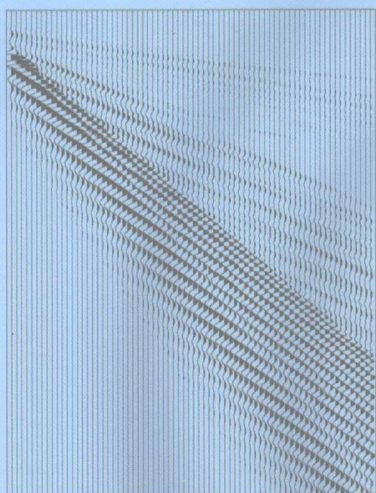


RAYLEIGH WAVES THEORY AND APPLICATIONS

瑞雷波 勘探理论及其应用

宋先海 李端有 顾汉明 唐力 著



1.4
3



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中央级公益性科研院所基本科研业务费重点基金项目（YWF0906）资助
高等学校特色专业“地球物理学”建设资助

瑞雷波 勘探理论及其应用

宋先海 李端有 顾汉明 唐力 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是一部理论与实践紧密结合的学术专著。本书系统、深入地介绍了瑞雷波勘探理论及其应用,力图概括国内外在这一学术领域的最新研究成果,力求使读者能较快掌握和应用这一先进的地球物理勘探方法。全书共7章,主要内容包括:瑞雷波勘探国内外研究现状及进展、瑞雷波频散曲线快速正演模拟、瑞雷波地震波场特征分析、瑞雷波频散曲线的提取、瑞雷波频散曲线的反演、瑞雷波实际工程应用、瑞雷波勘探今后发展方向展望。

本书可供瑞雷波勘探、地震勘探、地球物理学和最优化控制等领域从事科研、教学和工程勘察的高校师生及工程科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

瑞雷波勘探理论及其应用 / 宋先海等著. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2010. 10
ISBN 978-7-5084-7982-8

I. ①瑞… II. ①宋… III. ①表面波—地震勘探
IV. ①P631.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第201888号

书 名	瑞雷波勘探理论及其应用
作 者	宋先海 李端有 顾汉明 唐力 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 9.5印张 230千字
版 次	2010年10月第1版 2010年10月第1次印刷
印 数	0001—1800册
定 价	38.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有 侵权必究

序

瑞雷波勘探是地震勘探的一个重要分支,它最初是由英国学者 Rayleigh 于 1887 年首次提出,其本质上是由自由表面边界处的 P 波和 SV 波相长干涉叠加而形成。人们利用瑞雷波的频散特性推断地下介质结构和岩土力学参数,已在研究地球内部结构、近表面地球物理工程和超声无损检测等领域中获得了广泛应用。

尤其是对于高频瑞雷波勘探(频率 $\geq 3\text{Hz}$),由于其具有快速、无损、衰减减小、抗干扰能力强、浅层分辨率高,且不受各地层速度关系的影响等优点,因此这一先进的地球物理勘探技术目前已成为近表面地球物理工程的一个研究热点,其研究成果已渗透到环境与工程地球物理中的多个应用领域。如今在国内外许多重要的学术期刊和重要国际会议上,瑞雷波勘探已成为地球物理学中一个非常活跃的前沿性研究课题。

宋先海博士多年来一直从事瑞雷波勘探方面的研究工作,并在该领域有着丰厚的研究积累。该书是宋先海博士在其硕士学位论文《瑞雷波传播基本特性及其正反演研究》和博士学位论文《基于模式识别算法的高频瑞雷波频散曲线非线性反演研究》的工作基础上进一步完善撰写而成的,同时也吸纳了国内外许多有代表性的研究进展。

该书在系统评述了瑞雷波勘探国内外研究现状的基础上,实现了瑞雷波频散曲线快速正演模拟算法,分析了瑞雷波地震波场特征,探讨了瑞雷波频散曲线提取的关键技术,提出并研究了瑞雷波频散曲线反演的模式识别算法,给出了瑞雷波典型应用实例,展望了瑞雷波勘探今后发展方向。

为了便于读者学习和研究,该书在附录部分还给出了典型数值仿真测试函数及其 MATLAB 源程序代码。因此,该书不仅具有较高的学术价值,而且对实际工程应用也具有较好的借鉴和指导意义。

目前国内系统地介绍瑞雷波勘探的专著还比较匮乏,该书的出版在一定程度上弥补了这个不足。相信它的出版将会对瑞雷波勘探的发展和应用起到积极的推动作用。

王先海

2010 年 7 月

前言

瑞雷波勘探是一种最新发展起来的先进地震勘探技术,由于其理论的复杂性及应用的重要性,近年来已吸引了国内外众多学者和科研人员对其进行了多方面的研究和探讨。2003年,第65届EAGE(The European Association of Geoscientists and Engineers)年会专门成立了地震面波在浅层地球物理勘探的研讨会,并于2004年在国际重要专业杂志《Near Surface Geophysics》上出版了地震面波在近表面地球物理中的应用专刊。2005年,美国环境与工程地球物理协会EEGS(The Environmental and Engineering Geophysical Society)在其成立10周年之际,也以地震面波在近表面地球物理中的应用为题,于2005年在国际重要专业杂志《Journal of Environmental & Engineering Geophysics》上连续出版了两期瑞雷波勘探专刊。在其他许多重要的国际专业杂志和国际会议上,关于瑞雷波勘探研究的高水平学术论文也逐年增多,从而使这种新兴的地球物理勘探技术展现出勃勃生机,其应用领域和范围也在逐渐扩大。目前,瑞雷波勘探已成为国际地球物理勘探领域中备受关注的研究热点和前沿性课题。

本书是作者多年来在对瑞雷波勘探理论及其应用所进行的一系列深入研究的基础上撰写而成的,同时吸纳了国内外许多具有代表性的最新研究成果。全书内容取材新颖,覆盖面广,深入浅出,系统性强,注重理论联系实际,力图体现国内外在这一学术领域的最新研究进展。

全书共7章,第1章是绪论,主要评述了瑞雷波勘探国内外研究现状及最新进展;第2章介绍了多模式瑞雷波频散曲线快速矢量传递算法,分析了其高频数值稳定性,给出了多模式瑞雷波频散曲线的叠加计算方法,探讨了多模式瑞雷波叠加耦合机理及其重要的理论与实际意义;第3章实现了瑞雷波交错网格高阶有限差分正演模拟技术,并对瑞雷波地震波场特征及其意义进行了深入分析;第4章对倾斜叠加变换算法、频率波数变换算法、相移法和拉冬变换算法4种常用的瑞雷波频散曲线提取方法实现的关键技术进行了探讨;第5章提出了基于模式识别算法的瑞雷波频散曲线非线性反演策略,阐述了模式识别算法的基本原理、数学描述及反演的一般流程,探讨了其反演过程中的关键技术问题,并通过大量数值仿真测试、理论模型试算、抗噪能力检验、瑞雷波反演的几个重要方面探讨、与其他非线性全局优化算法对比和多模式瑞雷波反演检验了模式识别算法反演瑞雷波频散曲线的有效性和程序的正确性;第6章通过两个来自某高速公路路基上的典型实例检验了模式识别

算法的实用性和可靠性,演示了瑞雷波探测软土路基结构的有效性和多模式瑞雷波叠加耦合机理研究的重要性。第7章总结了本书完成的主要研究工作,展望了瑞雷波勘探今后的研究方向和发展前景。最后,还在附录部分给出了典型数值仿真测试函数及其 MATLAB 源程序代码。全书的7章内容(连同附录)基本构成了一个完整的封闭体系。

本书既可作为瑞雷波勘探、地震勘探、地球物理学、最优化控制科学等专业高年级本科生、研究生和教师的参考书,也可供理工科其他专业的师生参考,还可供利用瑞雷波进行工程勘察和无损检测的工程科研人员阅读和参考。

值此,由衷地感谢9位匿名国际审稿人对瑞雷波勘探技术和模式识别算法提出的建设性意见、建议和他们鼓舞人心的评论,这极大地改进了本书的质量,增强了作者提出选题和完成本书的信心!感谢 Lewis R M 教授、Hedar A 博士、Sambridge M 教授、Rolf Maier 博士和 Philippe Jousset 博士为作者提供的部分宝贵计算机程序和语言帮助,在通过 E-mail 交流中,他们也给予了作者很多热情的指导,并提出了许多宝贵的建议,这使作者得到了许多灵感和启迪,为本书顺利完成奠定了基础。没有他们的惠教、支持与鼓励,就不可能有本书稿的诞生。另外,在写作过程中参考了大量国内外最新文献,这里也向这些文献的作者们致以诚挚的谢意!衷心地感谢培养我的母校——中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院的领导与老师们的关怀与帮助,在攻读博士学位期间,他们为作者提供了非常优越的科研环境,作者将永远铭记这些老师,他们是:孙治定书记、徐义贤教授、刘江平教授、胡祥云教授、陈超教授、刘庆生教授、刘天佑教授、朱培民教授、邓世坤教授、张德玲老师、张学强老师、师学明老师、罗银河老师、周群峰老师、段梅英老师、曲赞老师、张三宗老师、李振宇老师等。真诚地感谢李修忠和白兴盈对本书提供的帮助!特别感谢中央级公益性科研院所基本科研业务费重点基金项目(YWF0906)和高等学校特色专业“地球物理学”建设对本书出版的资助。同时,感谢中国水利水电出版社韩月平等编辑在本书出版过程中所付出的辛勤劳动!

目前国内系统研究和介绍瑞雷波勘探的专著还十分匮乏,作者非常希望能献给大家一本既有理论又注重实践的好书,尽管罄尽全力,但限于水平,且时间仓促,书中难免存在错误和不妥。凡此,敬请各位专家和广大读者批评指正。

作者

2010年7月于武汉

目 录

序 前言

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 瑞雷波勘探国内外研究现状及进展	2
1.2.1 瑞雷波传播基本特性研究	2
1.2.2 瑞雷波频散曲线正演模拟研究	3
1.2.3 瑞雷波地震波场正演模拟研究	4
1.2.4 瑞雷波野外资料采集技术研究	5
1.2.5 瑞雷波频散曲线提取技术研究	6
1.2.6 瑞雷波频散曲线反演技术研究	8
1.2.7 瑞雷波实际工程应用技术研究	16
1.3 本书的组织结构体系	17
参考文献	19
第2章 瑞雷波频散曲线快速正演模拟	22
2.1 引言	22
2.2 多模式瑞雷波频散曲线快速矢量传递算法	22
2.2.1 轴对称柱面瑞雷波的频散方程	22
2.2.2 层状介质中瑞雷波快速矢量传递算法	24
2.3 高频数值稳定性分析	27
2.3.1 高频数值精度丢失问题	27
2.3.2 高频数值溢出问题	28
2.4 多模式瑞雷波频散曲线的叠加计算	31
2.4.1 稳态法和瞬态法震源函数的描述	31
2.4.2 稳态激振情况下各模式的位移应力及能量计算	31
2.4.3 瞬态激振情况下各模式的位移应力计算	34
2.4.4 多模式瑞雷波频散曲线的叠加计算	35
2.5 多模式瑞雷波叠加耦合机理	37
2.5.1 递增型地质模型	37
2.5.2 含低速软夹层地质模型	38
2.5.3 含高速硬夹层地质模型	39
2.5.4 多模式瑞雷波叠加耦合机理研究的意义	41
参考文献	42

第3章 瑞雷波地震波场特征分析	43
3.1 引言	43
3.2 弹性波动方程交错网格高阶有限差分	43
3.2.1 二维弹性波动方程	44
3.2.2 初始条件及震源函数	45
3.2.3 交错网格时间上 $2M$ 阶差分近似	45
3.2.4 空间导数的 $2N$ 阶差分精度展开式	46
3.2.5 交错网格高阶有限差分格式	46
3.3 高阶有限差分方程的稳定性及边界条件	47
3.3.1 高阶有限差分方程的稳定性条件	47
3.3.2 自由表面边界条件的处理	48
3.3.3 吸收边界条件的处理	49
3.4 多模式瑞雷波地震波场特征	50
3.4.1 递增型地质模型	50
3.4.2 含低速软夹层地质模型	53
3.4.3 含高速硬夹层地质模型	56
3.4.4 瑞雷波地震波场特征研究的意义	59
参考文献	59
第4章 瑞雷波频散曲线的提取	60
4.1 引言	60
4.2 倾斜叠加变换算法	60
4.2.1 传统倾斜叠加变换算法	60
4.2.2 倾斜叠加变换算法的改进	61
4.2.3 倾斜叠加变换算法在计算机上的实现	62
4.3 频率波数变换算法	63
4.3.1 瑞雷波地震记录二维傅里叶变换	63
4.3.2 瑞雷波频散曲线的提取	63
4.4 相移法	63
4.4.1 相位谱和振幅谱的产生	63
4.4.2 瑞雷波频散能量谱的产生	64
4.5 拉冬变换算法	64
4.5.1 传统拉冬变换算法	64
4.5.2 最小二乘拉冬变换算法	65
4.5.3 高分辨率线性拉冬变换算法	65
参考文献	66
第5章 瑞雷波频散曲线的反演	67
5.1 引言	67

5.2	模式识别算法基本原理	68
5.2.1	基本概念和定理	68
5.2.2	模式识别算法基本原理及实现过程	69
5.3	模式识别算法实施过程中的关键技术问题	75
5.3.1	初始网格步长和模式的选取	75
5.3.2	扩展因子和收缩因子的选取	76
5.3.3	完全预测与完全识别策略的执行	77
5.3.4	迭代终止标准	77
5.4	模式识别算法数值仿真测试	78
5.4.1	函数 Rastrigin 数值仿真测试	78
5.4.2	其他典型函数数值仿真测试	80
5.5	理论模型试算	81
5.5.1	两层模型	81
5.5.2	四层模型	85
5.5.3	五层模型	88
5.6	算法抗噪能力测试	92
5.6.1	两层模型	92
5.6.2	四层模型	94
5.6.3	五层模型	96
5.7	瑞雷波反演的几个重要方面对算法的影响	100
5.7.1	频带范围对算法的影响	100
5.7.2	纵波速度和密度中的误差对算法的影响	101
5.7.3	频点数和初始模型对算法的影响	102
5.7.4	层数和层厚度对算法的影响	103
5.8	与其他非线性全局优化算法的对比	106
5.8.1	与遗传算法的对比	106
5.8.2	与模拟退火算法的对比	107
5.9	多模式瑞雷波联合反演	108
5.9.1	多模式瑞雷波敏感性分析	108
5.9.2	多模式瑞雷波联合反演	110
	参考文献	113
第6章	瑞雷波实际工程应用	114
6.1	引言	114
6.2	一维横波速度剖面的反演	114
6.2.1	瑞雷波频散曲线的提取	114
6.2.2	瑞雷波频散曲线的反演	115
6.3	二维横波速度剖面的产生	117
6.3.1	多炮瑞雷波频散曲线提取	117

6.3.2 二维横波速度剖面的产生	118
6.4 基于叠加频散曲线的多模式瑞雷波反演	119
6.4.1 多模式瑞雷波叠加频散曲线的提取	119
6.4.2 基于基阶波频散曲线的反演	122
6.4.3 基于叠加频散曲线的反演	123
第7章 回顾与展望	125
7.1 引言	125
7.2 本书完成的主要研究工作回顾	125
7.3 瑞雷波勘探今后发展方向展望	130
附录 A 典型数值仿真测试函数	132
附录 B 数值仿真测试函数源程序代码	135

第1章 绪 论

1.1 引 言

自从1887年英国学者瑞雷(Rayleigh)在理论上首先发现瑞雷波以来,对瑞雷波的研究就一直没有间断过。在天然地震中,瑞雷波是危害性最大的一种地震波;在石油地震勘探、浅层反射及折射人工地震勘探中,瑞雷波是一种强干扰波。因此,对瑞雷波的早期研究,人们主要是根据瑞雷波的特点,采取诸多方法来减小它的危害或消除它的影响。

当人们发现了瑞雷波在层状介质中具有频散特性以后,就逐渐将其作为有效波并充分利用其频散特性来研究各种地球物理问题。尤其是1980年以后,利用瑞雷波推断地下介质结构和岩土力学参数,已在研究地球内部结构(Earth internal structure)、地壳及地幔的物质组成(Crust-mantle composition)、大地构造和地震灾害预测等区域及全球地震学(Regional & Global Seismology)领域、近表面地球物理工程(Near Surface Geophysical Engineering)和超声无损检测(Ultrasonic Nondestructive Testing)等领域中获得了广泛应用。特别是在近表面地球物理工程中,由于高频($\geq 3\text{Hz}$)瑞雷波勘探具有快速轻便(Portable)、无损(Nondestructive or Non-invasive)、衰减小(Smaller attenuation)、抗干扰能力强(Stronger immunity of interference)、浅层分辨率高(High-resolution)且不受各地层速度关系的影响等优点,已在实际生产和科研中获得了成功应用^[1]。

由于瑞雷波理论的复杂性及重要性,近10年来参与瑞雷波勘探技术研究的人越来越多,如今国内外众多学者也纷纷以瑞雷波勘探为题完成了多篇硕士和博士学位论文研究^[2],尤其是最近几年,国内外已掀起了瑞雷波勘探技术的研究热潮。2003年,第65届EAGE年会(The 65th European Association of Geoscientists and Engineers Conference & Exhibition)专门成立了地震面波在浅层地球物理勘探的研讨会,并于2004年在国际重要专业杂志《Near Surface Geophysics》上出版了地震面波在近表面地球物理中的应用专刊。2005年,美国环境与工程地球物理协会EEGS(The Environmental and Engineering Geophysical Society)在其成立10周年之际,也以地震面波在近表面地球物理中的应用为题,于2005年在国际重要专业杂志《Journal of Environmental & Engineering Geophysics》第10卷的第2期和第3期上,连续出版了两期专刊(JEEG 10th Anniversary Special Issue on Seismic Surface Waves)。在其他近20种国际重要专业杂志上(《Geophysical Journal International》、《Geophysics》、《Pure and Applied Geophysics》、《Journal of Applied Geophysics》、《Geophysical Prospecting》、《Soil Dynamics and Earthquake Engineering》、《Computers & Geosciences》、《Surveys in Geophysics》、《Canadian Geotechnical Journal》、《The Leading Edge》、《Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering》、《Journal of Geotechnical Engineering》、《Journal of Geophysics and

Engineering》、《Exploration Geophysics》、《Geotechnical Testing Journal》、《Bulletin of the Seismological Society of America》、《Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society》、《NDT&E International》、《Journal of Nondestructive Evaluation》、《Journal of Computing in Civil Engineering》), 近年来关于地震面波在浅层或超浅层地球物理研究和应用中的学术论文也越来越多。可以预料, 瑞雷波勘探将会成为 21 世纪浅层或超浅层地球物理勘察和工程质量无损检测的重要手段之一。

然而, 目前国内系统地介绍瑞雷波勘探的学术专著还比较匮乏。值此之际, 作者们谨以此书献给从事瑞雷波勘探、地球物理、地震勘探、岩土工程、计算机科学及优化控制等专业的广大高等院校师生和工程科研人员, 以期使读者们能较快地掌握和应用这一最新的地球物理勘探和无损检测技术, 更好地为科研和实际工程应用服务。

在本章中, 首先阐述了瑞雷波勘探的重要性; 然后对瑞雷波勘探技术国内外研究现状及进展进行了回顾与述评, 主要包括瑞雷波传播基本特性研究、瑞雷波频散曲线正演模拟研究、瑞雷波地震波场正演模拟研究、瑞雷波野外资料采集技术研究、瑞雷波频散曲线提取技术研究、瑞雷波频散曲线反演技术研究和瑞雷波实际工程应用技术研究; 最后给出了本书的组织结构体系。希望通过本章的回顾与述评能使广大读者更好地了解和掌握瑞雷波勘探技术目前在国内外最新的发展水平和前沿动态。

1.2 瑞雷波勘探国内外研究现状及进展

1.2.1 瑞雷波传播基本特性研究

利用瑞雷波进行地质勘察和工程质量无损检测主要是基于瑞雷波如下四个主要特性:

- (1) 在分层介质中, 瑞雷波具有频散特性, 即瑞雷波的相速度随频率的变化而变化。
- (2) 瑞雷波的勘探深度和能量主要集中在一个波长范围内; 且波长不同, 其穿透深度也不同。
- (3) 瑞雷波质点振动不同于体波的线性极化振动, 而具有椭圆极化振动特性。
- (4) 瑞雷波传播速度与横波速度具有密切相关性, 它以低于横波速度沿自由表面传播, 即纵波速度 V_P 、横波速度 V_S 和瑞雷波相速度 V_R 满足如下关系

$$\frac{V_S}{V_P} = \sqrt{\frac{1-2\sigma}{2(1-\sigma)}} \quad (1.2.1)$$

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1 + \sigma} V_S \quad (1.2.2)$$

式中: σ 为泊松比, 它是表征地下介质“软”、“硬”程度的无量纲值, 取值范围为 0~0.5。 σ 值越大, 表明物质越松软; 反之, 越坚硬。未固结的第四系地层 σ 一般为 0.35~0.48, 大多数岩石 σ 为 0.25 左右。

以上前三个特性为瑞雷波勘探提供了充分的理论依据, 后一个特性为瑞雷波勘探开拓了广阔的应用前景。为了进一步提高和增强瑞雷波的勘探能力, 使其能更好地服务于国民经济建设, 多年来众多学者对瑞雷波传播的基本特性进行了坚持不懈地研究和探讨, 并取得了可喜的研究成果。

1983 年, Nazarian 等在测试公路厚度及弹性模量 (Determination of moduli and thickness of pavement) 时提出了所谓的表面波谱分析方法 SASW (Spectral Analysis of Surface Waves), 该方法是利用两道记录的相位差来建立频散曲线, 进而通过频散曲线的反演来获取地下介质横波速度剖面^[2]。

1998 年, 张碧星等^[3]采用柱坐标系对层状固体介质中的三维声波场和瑞雷波频散特性等进行了理论和数值模拟研究。通过数值模拟分析发现, 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, 同时还探讨了频率、深度、介质层状结构等参数对能量分布的影响。随后分别在两层和三层介质情况下, 详细分析了对称点源激发的所有可能存在的导波模式传播特性以及它们与介质参数的相互关系, 研究了瑞雷波和能陷波的激发与传播机理。张碧星等研究发现, 对于速度递增的介质, 可能存在多个模式; 但对于速度递减的介质, 至多只存在一个导波模式; 对于含有低速层的介质, 存在沿低速层传播的能陷模式波, 能陷波和瑞雷波的传播特性不仅与介质参数有关, 而且还与声源频率有关。这些研究成果对三维声波场和瑞雷波能量的传播等特性分析具有重要的理论指导意义。

1999 年, 为了克服 SASW 方法中有效波难以从干扰波中分离和瑞雷波频散曲线计算精度较低的弱点, 美国堪萨斯大学堪萨斯地质调查局 KGS (Kansas Geological Survey, University of Kansas) 的 Park 等^[4,5]对瑞雷波勘探技术进行了深入研究后, 提出了表面波多道分析法 MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)。该方法充分利用了近十几年来先进的信号处理技术, 大大提高和增强了瑞雷波的勘探能力, 拓宽了其应用领域。随后, Park 等^[6]讨论了联合使用主动源和被动源 (Combined use of active and passive surface waves) 的优点及应注意的问题, 并将 MASW 法应用范围拓展为主动源法和被动源法 (Active and passive methods)。该方法是利用被动源法提高瑞雷波低频段频散数据精度, 利用主动源法提高瑞雷波高频段频散数据精度, 从而进一步丰富和完善了 MASW 法的技术内涵, 提高了瑞雷波深层勘探能力。

2003 年, Zhang 等^[7]探讨了瑞雷波视速度与基阶波相速度的关系, 随后 Zhang 等^[8]对各向异性介质中瑞雷波的频散分裂现象 (Dispersion splitting of Rayleigh waves in layered azimuthally anisotropic media) 进行了研究分析。2009 年, Xu 等^[9]探讨了截断高模式瑞雷波的近似表示方法。这些研究成果增强了人们对高模式瑞雷波和复杂介质中瑞雷波传播特性的认识。

当然, 对瑞雷波传播基本特性研究作出重要贡献的学者和科研人员远远不止这些。限于篇幅, 本书不能一一评述, 为此本书作者提前对这些学者致以歉意。

1.2.2 瑞雷波频散曲线正演模拟研究

由于瑞雷波频散曲线反演的大部分时间都将用在正演模拟 (Forward modelling) 计算上, 因此正演是反演的前提和瓶颈, 成为提高反演速度和反演精度的关键因素之一。目前在工程实践中应用较多的是水平层状介质模型, 在这种层状介质模型条件下, 大量学者进行了深入研究, 提出了各种算法并取得了较好的效果。这些算法为瑞雷波反演提供了必要的前提和理论依据, 也为研究其他复杂介质中的正演问题奠定了基础。目前主要的瑞雷波频散曲线正演模拟算法有^[1,2]: Haskell 算法、快速 Schwab-Knopoff 算法、Abo-Zena 算法、Menke 算法、快速 δ 矩阵算法和快速矢量传递算法等。

1953年, Haskell最早提出了瑞雷波频散曲线正演模拟的 Haskell 算法。该算法是在 Thomson 研究的基础上, 利用平面波理论在直角坐标系中通过相邻两界面的传递矩阵公式以及自由表面边界条件和无穷远处的辐射条件导出的层状介质中瑞雷波的频散方程。但该算法在高频范围内容易出现数值精度丢失 (Loss of numerical precision) 和数值溢出 (Numerical overflow) 等不稳定现象, 且计算速度较慢。为了解决这些问题, 许多学者从数值角度入手, 采用各种方法进行了研究。

1970年, Schwab 和 Knopoff 对 Knopoff 分解 (一种循环的 Laplace 行分解法) 在数值上进行了进一步的研究和改进, 通过一系列精巧的行列式变换 (Determinant transformation) 将某些层矩阵变形为块状对角阵形式, 使得频散函数以特别简单的代数形式表达出来, 并编制了计算量较小的程序, 从而形成了快速 Schwab - knopoff 方法。该算法在一定程度上提高了瑞雷波频散函数的高频计算范围, 加快了计算速度。

1979年, Abo - Zena 为解决瑞雷波频散方程高频数值不稳定性 (Numerical instability) 问题, 通过一系列的 4×4 阶反对称矩阵的循环计算得到了瑞雷波频散方程, 这种反对称矩阵与特征函数的乘积密切相关, 正是这一点使得该方法能够解决高频数值不稳定性问题, 该方法后来被称为 Abo - Zena 算法。同年, Menke 解释了 Abo - Zena 提出的反对称矩阵的物理含义, 并导出了新的瑞雷波频散方程, 该方法既有效地避免了高频数值不稳定性问题, 又加快了正演模拟计算速度。

1996年, 为了进一步提高瑞雷波频散函数高频数值稳定性和计算速度, Buchen 和 Ben - Hador^[10] 提出了快速 δ 矩阵算法 (Fast delta matrix algorithm), 该方法吸收了 Schwab 的变换程序, 并用 δ 矩阵理论的形式表达出来, 从而具有快速稳定的特点。

1998年, 张碧星等^[11] 在 Abo - Zena 和 Menke 研究的基础上采用柱坐标系进一步研究了层状介质中瑞雷波的频散问题。将 Menke 的 E 矢量和传递矩阵 F 分解为三个简单矩阵的乘积形式, 其中两个与频率无关, 另一个为对角阵, 从而简化了计算, 且避免了高频数值不稳定性问题。2001年, 凡友华^[12] 对上述几种算法深入研究分析后, 基于快速 δ 矩阵算法的思想在柱坐标系下给出了快速矢量传递算法 (Fast vector - transfor algorithm)。该算法不仅表达形式简单、计算速度快、易于编程实现, 而且能有效地避免高频数值精度丢失和高频数值溢出问题, 可实现超高频甚至无限频率的正演模拟计算, 从而为瑞雷波频散曲线正演模拟作出了重要贡献。

以上所有这些工作都推动了瑞雷波正演模拟技术的发展, 并为瑞雷波反演解释奠定了基础。

1.2.3 瑞雷波地震波场正演模拟研究

通过地震波场正演模拟, 有助于人们认识地震波在各种介质中传播的动力学特征和提高实测资料的反演解释精度。因有限差分正演模拟具有存储空间少、计算速度快、易于编程实现等优点, 所以在体波地震波场正演模拟中得到了广泛应用。然而, 由于瑞雷波地震波场正演模拟对自由表面边界条件要求过高, 实现起来十分困难, 为此大量专家学者对瑞雷波有限差分正演模拟进行了坚持不懈的努力和研究, 并取得了较好的研究成果。

2002年, Mitter^[13] 在前人研究基础上提出了弹性交错网格有限差分正演模拟自由表面边界条件处理方法 (Free - surface boundary conditions for elastic staggered - grid finite

- difference modeling), 从而实现了瑞雷波有限差分地震波场正演模拟, 同时还将其模拟结果与解析解 (An analytical solution) 进行了对比分析。但由于瑞雷波有限差分正演模拟对自由表面边界条件要求很高, 若边界条件处理不当将很容易出现人工边界反射 (Reflections from artificial boundaries) 和数值频散假象 (Numerical dispersion artifacts), 因此, 该算法未能有效地应用于工程实践。

2006 年, Bohlen 和 Saenger^[14] 成功实现了瑞雷波非均匀交错网格有限差分正演模拟方法 (Heterogeneous staggered - grid finite - difference modeling), 从而提供了一个研究非均匀介质中瑞雷波地震波场特征的有效手段。

2007 年, Xu 等^[15] 使用二阶交错网格、密集的空间采样和较小的时间步长并结合先进的海绵体边界条件处理方法, 成功实现了高频瑞雷波有限差分正演模拟技术。熊章强^[16] 在其博士论文中也实现了弹性介质中瑞雷面波有限差分正演模拟算法。这些模拟方法有效地克服了以往瑞雷波地震波场正演模拟中易出现的人工边界反射和数值频散假象, 增强了人们对瑞雷波传播机理的认识, 并为真正的二维瑞雷波反演奠定了基础。

1.2.4 瑞雷波野外资料采集技术研究

如何根据瑞雷波的特点采集到高信噪比的原始地震记录是瑞雷波后续数据处理成功与否的关键, 因此合理设置最优的野外采集参数极为重要。这些参数主要包括: 最小偏移距 (Minimum offset)、最大偏移距 (Maximum offset)、道间距 (Receiver spacing)、排列长度 (Length of geophone spread)、采样参数 (Sampling parameters)、检波器频率 (Natural frequency of geophone) 和震源类型 (Source) 等。最优的瑞雷波记录需要野外设置 (Field configurations) 和采集参数 (Acquisition parameters) 能更加有利于记录平面瑞雷波, 同时要尽可能避免近场效应 (Near - field effects)、远场效应 (Far - field effects) 和空间假频 (Spatial aliasing) 等。由于场地类型变化较大, 目前上述野外采集参数的选取大多还是凭经验准则 (Rules of thumb) 或半定量 (Semi - quantitative) 的方法, 还没有一个较统一的标准。野外实际资料采集时, 还需要通过现场多次试验的方法 (A trial and error method) 来最后确定其采集参数, 一般可以将最小偏移距取为最大勘探深度的 $1/3 \sim 1/2$ 、道间距取为最小层厚、检波器排列长度取为最大勘探深度的 $1 \sim 2$ 倍作为首选试验方案。近年来, 众多学者和科研人员也从不同角度对上述采集参数进行了研究和探讨, 并取得了大量可喜的研究成果, 从而对瑞雷波野外资料采集具有重要的理论和实际指导意义。

1999 年, Park 等^[4] 在提出 MASW 法时探讨了瑞雷波野外资料采集中出现的近场效应和远场效应等问题, 并给出了如何避免它们的经验准则。

2004 年, Zhang 等^[17] 基于层状地质模型提出了一个最优偏移距 A 的定量计算公式

$$A = \frac{\lambda_{\max} V_{R\min}}{4\Delta V_R} \quad (1.2.3)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 、 $V_{R\min}$ 分别为瑞雷波最大波长和最小相速度; ΔV_R 为瑞雷波最大与最小相速度之差。

同时 Zhang 等还建议了最优排列长度 L 的定量计算公式: $L = 2A$ 。

2006 年, Xu 等^[18] 基于两层地质模型提出了一个最小偏移距 x_0 的定量计算 (Quanti-

tative estimation of minimum offset) 公式

$$x_0 = \frac{2hV_s}{\sqrt{V_p^2 - V_s^2}} = \frac{2h}{\sqrt{(V_p/V_s)^2 - 1}} \quad (1.2.4)$$

式中: h 为第一个界面深度; V_p 、 V_s 分别为介质纵波速度和横波速度。

2006 年, Xia 等^[2]分析了瑞雷波激发震源通常置于地表的原因, 讨论了瑞雷波野外资料采集中常用的五个简单方程的含义, 并用实测数据评价了式 (1.2.3) 和式 (1.2.4) 的有效性及实用性。

以上这些重要研究使瑞雷波野外资料采集技术正在由经验法向半定量, 乃至定量的方向发展。

1.2.5 瑞雷波频散曲线提取技术研究

高信噪比的瑞雷波地震记录为高精度频散曲线提取提供了必要的前提条件, 而如何采取有效的信号处理技术以提高频散曲线的提取精度和可靠性, 乃是瑞雷波后续反演解释成败与否的关键因素之一。为此, 多年来大量学者对此问题进行了不懈的努力和研究, 提出了许多先进的信号处理技术和算法, 并取得了较好的应用效果。目前主要的瑞雷波频散曲线提取算法有: τ - p 变换算法 (倾斜叠加变换算法)、 f - k 变换算法 (频率波数变换算法)、相移法 (f - V_R 法)、拉冬变换算法和频率分解法等。

τ - p 变换算法 (Tau- p transformation) 又称倾斜叠加变换算法 (Slant stacking)。自 1978 年美国斯坦福大学的 Schutz 和 Clearbout 发表了 τ - p 变换的研究论文后, 该方法已在速度分析、多次波压制、纵横波分离、偏移和反演等领域得到了广泛应用^[19]。 τ - p 变换算法的基本原理可简述为: 首先对于时空域内的一个共炮点 (Common Shot Points, 简称 CSP) 道集地震记录, 利用 τ - p 正变换便可映射成 τ - p 域, 此时在时空域内相互交叉干涉的复杂波场, 变换到 τ - p 域内则各自分离, 这样便可以在 τ - p 域内根据需要进行波场分离, 提取所需的瑞雷波信号; 然后再利用 τ - p 反变换就可变换到原来的时空域; 最后对提纯的瑞雷波地震记录利用相位差法便可计算得到瑞雷波相速度。1981 年, Mc-Mechan 和 Yedlin^[20]最早成功地将 τ - p 变换算法应用到瑞雷波地震波场分离中来。2003 年, 宋先海等^[21]利用改进的 τ - p 变换算法成功提取了瞬态瑞雷波频散曲线, 探讨了瑞雷波探测低速软弱夹层路基结构的有效性。同年, 刘江平等^[22]利用 τ - p 变换进行波场分离, 并提出了相邻道瑞雷波法, 大大提高了瑞雷波的纵横向分辨率, 该方法已在防渗墙和高速公路质量无损检测中取得了很好的应用效果。

f - k 变换 (Frequency-wavenumber transformation) 也称频率波数变换, 该算法提取瑞雷波频散曲线的基本原理可简述为: 首先将时空域内的一个共炮点道集地震面波记录, 利用二维快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transformation, 简称 FFT) 将其映射成 f - k (频率-波数) 域; 然后在 f - k 域内拾取瑞雷波最大能量对应的频率 f 和波数 k ; 最后利用关系 $V_R = f/k$ 来计算每个峰值频率对应的相速度 V_R 。1987 年, Gabriels 等^[23]第一次利用 f - k 算法进行波场变换提取了多模式瑞雷波频散曲线。1996 年, 北京水电物探研究所刘云祯和王振东经过多年研究后, 成功开发了多道瞬态面波勘探 (Surface Wave Sounding, 简称 SWS) 系统, 在该系统频散曲线提取功能模块中便使用了 f - k 变换算法, 目前 SWS 系统已在国内多家生产和科研单位使用, 并取得了较好的应用效果。 f - k

变换能相对准确地把握瑞雷波能量分布的特点,在记录道数较少时也能获得较高的低频分辨率,因此在生产和科研中得到了广泛应用;但其提取的频散曲线也存在频点分布不均匀等问题,一般在高频段(浅层)频点分布密集,在低频段(深层)频点分布稀少。

相移法(Phase-shift approach)也称 $f-V_R$ (频率-速度)法,它是由 Park 等^[24]于 1998 年在美国勘探地球物理年会 SEG (Society of Exploration and Geophysics) 上首先提出的。该算法提取瑞雷波频散曲线的基本思想是:首先根据事先估计的瑞雷波相速度对时空域内的原始共炮点道集瑞雷波地震记录进行一个相位移动;然后分别对每一个有效测试频率进行叠加求和;最后便在 $f-V_R$ 域内直接产生了一个频散能量图像。由于该方法使用相对较少的道数(例如 24 道)覆盖较短的横向距离(例如 23m),也能在 $f-V_R$ 域内直接产生分辨率相对较高的多模式瑞雷波频散曲线图像,成果直观可靠,因此在 MASW 法中得到了广泛应用。2007 年, Song 和 Gu^[25]利用相移法使用 24 道实测瑞雷波地震记录直接产生了一个高分辨率的三阶多模式频散曲线图像,并通过泰勒级数展开(Taylor series expansion)取一阶近似后,提出了一个在 $f-V_R$ 域内定量评价瑞雷波频散曲线分辨率的近似计算公式

$$d \approx V_R^2 / (fL) \quad (1.2.5)$$

式中: d 为瑞雷波频散能量相邻极小之半宽度(The half-width between the neighboring minima of dispersion energy); L 为排列长度。

由式(1.2.5)可见,随着频率 f 或排列长度 L 的增大,频散曲线的分辨率都在逐渐增高(d 在减小);当频率 f 相同时,随着相速度 V_R 的增大,频散曲线的分辨率在逐渐降低(d 在增大)。这就是为什么道数越多(例如 120 道),相移法产生的频散影像分辨率就越高的原因(排列长度 L 增大了),这也是相移法产生的频散能量图像通常在低频范围内分辨率较低的内在根本原因。

拉冬变换算法(Radon transformation)最早是由 Radon 于 1917 年提出的,随后该算法在国内外纵多学者和科研人员的努力下已在气象预报、岩土工程、医学、光学、无损探测、地球物理信号处理和图像重建等领域中得到了广泛应用。传统的拉冬变换分辨率低,且会出现波场能量延伸和假频现象,结果易导致反变换后的波场相互叠加干涉,很难分离有效地震信号。为此,人们提出了最小平方拉冬变换算法,该算法是在频率域采用最小平方反演的方式来实现。尽管该方法使解的分辨率得到了一定的提高,但却增加了假频信号的能量,因此降低了解的质量,影响了体波和多模式瑞雷波的分离。2008 年, Luo 等^[26]在前人研究基础上成功地将高分辨率线性拉冬变换(Linear Radon Transform, 简称 LRT)引入到瑞雷波频散曲线提取中来,从而提高了瑞雷波频散曲线提取的精度和分辨率。

频率分解法(Frequency decomposition)是由 Xia 等^[27]于 2007 年提出的。该方法提取频散曲线由两个步骤组成:首先将时空域内的原始共炮点道集瑞雷波地震记录分解为扫频数据(Frequency-swept data);然后对产生的扫频数据进行 $\tau-p$ 变换。通过这两个简单的步骤运算后便在 $f-V_R$ 域内直接产生了一个频散能量图像。该方法的最大优点是适用于任意几何形状参数采集的地震数据,前面介绍的四种方法要求采集时检波器要在一条直线上且一般要等间隔均匀分布;而频率分解法并不要求检波器在一条直线上,也可不必