

“十二五”国家重点图书出版规划项目

有色金属文库

NON-FERROUS METALS LIBRARY

层状介质中瑞利波频散特性

RAYLEIGH WAVE DISPERSION CHARACTERISTICS FOR LAYERED MEDIA

杨天春 何继善◎著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

“十二五”国家重点图书出版规划项目
有色金属文库

层状介质中瑞利波 频散特性

Rayleigh Wave Dispersion Characteristics for Layered Media

杨天春 何继善 著
Yang Tianchun He Jishan



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

层状介质中瑞利波频散特性/杨天春,何继善著.

—长沙:中南大学出版社,2013.3

ISBN 978-7-5487-0812-4

I. 层... II. ①杨...②何... III. 面波频散-应用-地球物理
勘探-研究 IV. P631

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第036108号

层状介质中瑞利波频散特性

杨天春 何继善 著

☐责任编辑 刘石年

☐责任印制 周颖

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印装 长沙瑞和印务有限公司

☐开本 720×1000 B5 ☐印张 17.75 ☐字数 228千字

☐版次 2013年2月第1版 ☐2013年2月第1次印刷

☐书号 ISBN 978-7-5487-0812-4

☐定价 48.00元

图书出现印装问题,请与出版社调换

湖南科技大学学术著作出版基金资助

内容简介

Introduction

瑞利面波法是近年来在岩土工程领域应用较广泛的一种地球物理勘探新技术新方法，其实测资料的反演都是基于水平层状介质地质地球物理模型。本书以层状弹性半空间中瑞利波频散理论为基础，通过传递矩阵法研究层状介质中瑞利波的频散特性。利用数值模拟的方法研究二层、三层和多层介质中瑞利导波的相速度、群速度以及导波位移的变化特征；针对道路结构这种特殊的层状介质模型，提出道路结构瑞利波频散曲线求取的新方法——附加层法；根据二分法计算的特点，从计算机编程的角度解决传递矩阵法计算中的高频数值溢出问题；从瑞利波相速度、多导波模式的位移、泄漏模式波等方面分析实测瑞利波频散曲线中“之”字形现象的成因；利用神经网络的方法研究瑞利波频散曲线的反演和路基压实度的反演等。

本书数据翔实、内容丰富，可作为地球物理、岩土工程等专业领域的科技人员、高等院校相关专业师生的参考资料。

作者简介

About the Authors

杨天春，汉族，1968 年 3 月出生于湖南省津市市，中共党员，副教授，博士后。杨天春主要从事勘探地球物理、工程物探和土木工程方面的教学和科研工作，在瑞利面波、电磁波、工程检测等理论和应用方面有深入的钻研。

杨天春 1991 年毕业于桂林冶金地质学院，获工学学士学位；1991 年 7 月—1998 年 8 月于湖南有色地质勘查局二四七队从事资源勘查工作；1998 年 9 月—2004 年 5 月就读于中南大学，先后获得工学硕士和博士学位；2004 年 6 月—2006 年 3 月于湖南大学土木工程博士后流动站从事博士后研究工作；2006 年 3 月至今于湖南科技大学地质系从事教学和科研工作。现为湖南省地球物理学会理事，硕士生导师。

主持和参与国家自然科学基金、湖南省自然科学基金、湖南省教育厅优秀青年等纵向科研项目 10 余项，主持“怀通高速公路隧道初期支护及锚杆质量检测”、“湖南省常吉高速公路 21 标沅水沿河段 $K169 + 200 \sim K171 + 900$ 段边(滑)坡变形监测及稳定性分析”等横向科研项目 10 余项。在《煤炭学报》、《振动工程学报》等公开刊物上以第一作者发表学术论文 40 余篇，其中 EI、ISTP 收录 6 篇。

何继善，1934年9月出生于湖南省浏阳县，中共党员。国际著名应用地球物理学家，1994年当选为中国工程院首批院士。

何继善1960年毕业于长春地质学院。曾任中南工业大学校长，中国工程院主席团成员、能源与矿业工程学部主任，中国地球物理学会副理事长。现为中国工程院主席团成员、工程管理学部常委，湖南省科协名誉主席，美国勘探地球物理学家协会 (SEG) 终身会员，中南大学教授、博士生导师。

何继善院士创建了我国第一个以地电场与观测系统为特色的国家级重点学科，创立并发展了以“双频激电法”、“伪随机信号电法”和“广域电磁法”等系列地电场理论，发明了一系列具有国际先进水平和中国特色的地电场观测仪器和设备。其中双频激电仪在全国应用，据专家鉴定按已探明储量计算，价值超过1300多亿元。创立“拟合流场法”探测堤防、大坝、矿山、建筑物等的隐蔽渗漏，在全国得到推广应用。何继善院士的成就得到了国内外同行专家的高度评价。如美国权威地球物理学家莫利松教授写道“何继善以他在勘探地球物理方面的众多成就尤其是在激电和电磁法方面的卓越贡献，得到全世界同行的公认。”何继善教授多年来进行非常规天然气，特别是页岩气的研究。他通过各种努力，推进湖南省页岩气的勘探与开发，取得了十分明显的成效，被誉为“湖南页岩气之父”。

前言

Foreword

瑞利面波勘探是一种新兴的岩土原位测试、浅层地震勘探方法。该方法具有操作简便、成本低等优点,它能迅速获得反映地层地质结构情况的瑞利波频散曲线,且在浅层勘探方面具有较高的探测精度,因此,该方法近几年来得到长足发展,已被广泛应用于浅层岩土工程领域。编写本书是为了进一步推动瑞利面波法的应用与发展,书中论述的绝大部分内容均是近年来编著者的最新研究成果,供读者参考。

瑞利面波法主要是利用瑞利波的两种特性:一是瑞利波传播速度与介质物理力学性质的密切相关性;二是瑞利波在分层介质中传播时的频散特性。瑞利面波法的反演都是基于层状介质地质模型,本书在前人研究成果的基础上进一步对层状半空间介质中瑞利波的频散特性开展研究,具有重大的理论意义和现实意义。

本书以层状介质中瑞利波传播的频散理论为基础,利用传递矩阵法研究二层、三层和多层介质中瑞利波频散特性,模拟计算各种地质模型的瑞利波相速度频散曲线、群速度频散曲线以及各导波模式在地表的垂直位移大小;并根据相速度频散特性和导波模式位移变化特征来讨论瑞利波法勘探中“之”字形频散的成因。针对道路结构这种特殊的层状介质模型,作者提出自己的独特求解方法——附加层法;与国外的垂直柔性系数法(**Vertical Flexibility Coefficient Method**)相比,附加层法将复数域的求解问题转化到实数域,求解方法方便,大大节省了正演计算的时间。采用附加层法研究瑞利波的泄漏模式,根据泄漏模式波的频散特性进一步研究瑞利波“之”字形现象的成因。针对瑞利波频散曲线计算中的数值溢出问题,作者根据二分法计算的特点,在计算机编程计算过程中用一个有限的值(如+1或-1)替代一个很大(甚至无限大)的频散函数值,有效地避免了传递矩阵法计算中的高频数值溢出,使计算频率在理论上可达到无限大。利用神经网络的方法研究瑞利波频散曲线的反演和路基压实度的反演问题。另

外,对含流体介质夹层时频散曲线的完整求解开展研究,提出 0 阶模式的存在可能是判断流体夹层介质存在的标志;还对含固体软弱夹层介质模型频散曲线的合并化问题、两类不同传递矩阵法的模拟计算速度和精度的对比问题进行研究。在本书的理论模拟研究中,穿插有实践应用的实例,使理论研究与实际应用紧密结合,充分印证模拟研究成果的可靠性。本书即是对上述研究成果的总结。希望本书的出版能够丰富瑞利面波法勘探理论,促进该方法的进一步应用与发展,为从事瑞利面波法理论研究和实践应用的广大科技工作者提供参考。

本书的研究工作曾得到国家自然科学基金项目(50378034)、湖南省自然科学基金项目(12JJ3035)、湖南省教育厅优秀青年项目(06B030)、湖南科技大学博士基金等的资助;本书的出版得到了湖南科技大学学术著作出版基金的资助。

本书的总体框架和研究思路由何继善和杨天春提出,撰写分工如下:第一章~第五章由何继善和杨天春执笔,第六章~第九章由杨天春执笔。全书最后由杨天春统稿。

本书的研究工作及编写得到了湖南科技大学社会科学处、科技处和土木工程学院、中南大学地球科学与信息物理学院师生的支持。研究工作曾得到湖南大学土木工程学院易伟建教授、加拿大 **Waterloo** 大学 **G. Cascante** 教授和访问学者吕绍林教授、中国科学院声学研究所张碧星研究员、中南大学熊章强教授、中国地震局地球物理研究所鲁来玉副研究员、湖南有色地质勘查局沈长明高级工程师、湖南省水利水电勘测设计研究院吴奇高级工程师等专家的帮助和指导。作者在此对上述单位及专家表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,文中欠妥之处,敬请读者批评指正。

何继善

2012 年 12 月谨识

目录

Contents

第 1 章 绪 论	1
1.1 发展历史概况	1
1.2 研究和应用概况	3
1.2.1 国外研究及应用现状	3
1.2.2 国内研究及应用现状	6
1.3 对“之”字形频散曲线的研究	13
第 2 章 层状介质中瑞利波传播的基本理论	16
2.1 各向同性介质中的波动方程	16
2.1.1 应变	16
2.1.2 应力及其与应变的关系	18
2.1.3 波动方程的推导	19
2.2 瑞利波的频散方程	22
2.2.1 B, P, C 坐标系和位移应力矢量	22
2.2.2 传递矩阵	24
2.2.3 瑞利波的频散方程	25
2.2.4 频散方程的求解	26
2.3 均匀半空间介质中的瑞利波	30
2.3.1 均匀半空间介质中的瑞利波	30
2.3.2 弹性波速度与弹性参数的关系在 TSP 中的应用	34
2.4 导波的位移分量	36
2.4.1 声源函数	36
2.4.2 导波的位移	37
第 3 章 层状介质中瑞利波的相速度与群速度	43
3.1 瑞利波的频散和群速度	43

3.2 二层介质中的导波特征	45
3.2.1 横波速度随深度增加而增大的模型	45
3.2.2 横波速度随深度增加而减小的模型	48
3.3 三层介质中的导波特征	50
3.3.1 横波速度随深度增加而增大或减小的模型	50
3.3.2 含低速夹层的模型	52
3.3.3 含液体夹层的模型	57
3.3.4 含高速夹层的模型	67
3.4 相速度频散特征与“之”字形现象	71

第4章 多导波模式的位移特征及“之”字形曲线 74

4.1 层状介质中多导波模式的位移特征	74
4.1.1 两层介质中多导波模式的位移	74
4.1.2 三层介质中多导波模式的位移	75
4.2 声源频率对导波位移的影响	78
4.3 位移特征与“之”字形现象	80
4.4 “之”字形的正演	80
4.5 与实测资料的对比分析	83

第5章 道路结构瑞利波频散特性 89

5.1 道路结构的地球物理模型	89
5.1.1 道路结构及其材料	89
5.1.2 物理模型与瑞利波法的应用前提	90
5.2 前人对道路结构模型的正演研究	91
5.2.1 问题的提出	92
5.2.2 刚度矩阵法	92
5.2.3 有限单元法	94
5.3 求解道路结构瑞利波频散曲线的新方法	97
5.3.1 研究思路	97
5.3.2 正演计算及结果对比	99
5.4 道路结构的“之”字形频散	103

第6章 瑞利波泄漏模式与“之”字形频散 105

6.1 瑞利波法应用中频散曲线的正演计算	105
6.2 泄漏模式波的模拟研究思路	109

6.3 泄漏模式波及“之”字形的模拟计算	111
6.3.1 泄漏模式波的模拟计算	111
6.3.2 “之”字形频散曲线的进一步研究	117
第7章 频散曲线的合并化与多层介质的瑞利波频散	120
7.1 软夹层介质瑞利波频散曲线的合并化	120
7.2 多层介质瑞利波的频散特性	125
7.2.1 两类软夹层模型的模拟计算	125
7.2.2 正常地基模型的模拟计算	131
第8章 传递矩阵法对比与高频数值溢出的处理	134
8.1 快速标量传递矩阵法	134
8.2 两类传递矩阵法的模拟对比	137
8.3 高频区域数值溢出问题分析及处理思路	141
8.4 解决溢出问题的数值模拟验证	143
第9章 瑞利波频散曲线的神经网络反演	145
9.1 介质参数对频散曲线的影响	145
9.2 波长深度转换系数法	146
9.3 BP神经网络学习算法	152
9.4 频散曲线的BP神经网络反演	155
9.4.1 反演方案设计	155
9.4.2 反演网络的训练	155
9.4.3 频散曲线的反演	159
9.5 瑞利波法在路基压实度检测中的应用	161
9.5.1 理论分析	161
9.5.2 实践应用与神经网络反演	162
参考文献	166

第1章 绪论

自从英国数学物理学家 Rayleigh 发现瑞利波之后,国内外大量的学者对瑞利波在各种介质中的传播理论开展了广泛而深入的研究。瑞利波勘探技术(Rayleigh Wave Exploration Technique)近几年来在工程领域中的应用得到了很大发展,应用范围也逐渐扩大,如在地质分层、地层物理力学参数计算和密实情况判断、寻找地下空洞、探测地下目标物体、检测灰土及强夯地基密实情况、公路路基及强化路面检测、滑坡调查等方面都取得了较好的应用效果。另外,瑞利波的传播不受各层介质电导率、电磁噪声和地下金属管线等的影响,所以瑞利波法具有良好的场地适应性,能够应用于其他某些地球物理方法不适用的许多地区。总体而言,瑞利波勘探法目前已成为浅层或超浅层地球物理勘探和工程岩体勘察及施工质量检测的主要勘探手段之一。

1.1 发展历史概况

波是扰动沿空间的传播。在无限固体介质中能够传播的波有纵波(又称 P 波)和横波(又称 S 波)两种体波,它们在介质内部独立传播,当遇到弹性分界面时会发生反射、折射和透射现象。当介质中存在弹性分界面时,体波在一定条件下相互干涉并叠加产生次生波,这类次生波被称为面波(surface wave)。面波与弹性分界面有关,它主要沿着介质的分界面传播,其能量随着与界面距离的增加而迅速衰减。面波有两种类型:一种是质点在波的传播方向垂直平面内振动,质点的振动轨迹为逆时针方向转动的椭圆,且振幅随深度呈指数规律急剧衰减,其传播速度略小于横波传播速度,Rayleigh 于 1887 年从理论上对该类型的波给予了证明^[1],所以称之为瑞利波(瑞雷波、Rayleigh wave 或 R 波);另一种是质点在垂直于波传播方向的水平面内振动,它是由 Love 发现的,称为拉夫波(勒夫波或 Love wave)。

面波勘探(又称弹性波频率测深)是一种新兴的岩土原位测试、浅层地震勘探方法。其主要有两种类型:瑞利面波勘探和勒夫面波勘探。在岩土工程测试中以瑞利面波在振动波组中能量最强,振幅最大,频率最低,容易识别也易于测量,所以面波勘探以瑞利波勘探为主。它同其他物探方法一样,可分为人工源和天然源两大类^[2]。

在传统的地震勘探中,一般是利用 P 波与 S 波的信息,而瑞利波通常被认为是干扰波。后来,人们发现利用面波频散特性可研究地壳和上地幔结构。因此,从 20 世纪 50 年代起,人们开始利用天然地震中的面波来解析地球内部构造^[3];从 20 世纪 60 年代起,又利用微动中的面波信息来推断地球浅部构造^[4]。前者主要依赖地震台站的天然地震记录,有时间和空间上的局限性;后者因为微动信息在地球上无时不有,无处不在,所以天然源面波勘探首推后者。

人工源面波勘探方法也有两种,即瞬态面波勘探和稳态面波勘探。瞬态法与稳态法的区别在于震源不同,前者是在地面上产生一瞬时冲击力,产生一定频率范围的瑞利波,不同频率的瑞利波叠加在一起,以脉冲的形式向前传播;后者则产生单一频率的瑞利波,可以测得单一频率波的传播速度。所以,瞬态记录的信号要经过频谱分析,把各个频率的瑞利波分离开来,从而得到一条波速—频率($v_R - f$)曲线或波速—波长($v_R - \lambda_R$)曲线,以此推断地下介质的信息。

1960 年,美国人霍伊克罗姆(Hoykallem)和福斯特首次用稳态激振器作为振源,求出了道路断面的瑞利波速度分布,这就是稳态面波勘探的最初应用。同年,美国密西西比陆军工程队水路试验所也开始研究稳态面波勘探技术,但由于当时技术条件的限制而未能成功。

瞬态法又称瑞利波谱分析法(Spectral Analysis of Surface Wave,简称 SASW 法),是由美国得克萨斯大学首先提出的^[5]。20 世纪 70 年代,美国人奇恩(F. K. Chang)和巴尔莱德(R. F. Ballard)进行了一次瞬态面波勘探试验,并在第 42 届 SEG 年会上报告了他们的成果,但当时未引起人们的关注。

1985 年,斯托克(Stokoe)和纳扎利安(Nazarian)采用冲击振源,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利波速度分布,这是最初的瞬态面波勘探试验,从而也引发了瞬态面波勘探方法的真正兴起。而使稳态面波勘探实现实用化、商品化的是日本人,使瞬态面波勘探真正商品化的则是中国人。

日本人每雄辉记(Mellon)和佐藤长范(Zoton)等经过八年左右的艰辛研究,于 1982 年左右推出 GR-810 稳态面波测试系统,从而使稳态面波勘探步入了实用化、商品化阶段。1984 年 VIC 株式会社将此设备推广到中国,引起了我国地质工作者的极大兴趣。由于该设备昂贵,我国引进该设备较少,迄今为止仅有两个单位购置了此设备。我国学者采用一边引进一边研究的方法,经过三四年的实践,基本上掌握了该项技术,并生产出了自己的设备,地矿部河北地球物理勘察院于 1987 年就使用国产设备将稳态面波勘探技术用于地基改良评价和公路工程质量无损检测。

由于稳态瑞利波所用的设备笨重,激发能量、频率范围有限,我国于 1990 年左右又开始了对瞬态面波勘探技术的研究试验。最初的数据采集一直利用两个竖

直分量检波器接收方式,数据的信噪比较低,数据处理也不完善,探测深度和精度都有限。1993年,刘云祯等利用自己设计的地震仪,在数据采集上采用展开排列多道接收,在数据处理上则通过多道面波记录和专用处理软件来处理面波速度变化曲线,再经反演拟合计算进行速度分层解释,把锤击振源的面波探测深度由10 m左右提高到约30 m,条件好的情况可达50 m以上,基本能满足岩土工程勘察的需要,从而使瞬态面波勘探技术上上了一个新台阶,实现了瞬态面波勘探的实用化、商品化。1995年,北京市水电物探研究所自行研制出SWS瞬态面波勘探系统,经过与日本稳态面波仪对比可知,使用24磅大锤做振源的SWS系统,在软弱地层勘察方面优于使用350 kg激振器的日本稳态面波系统^[5]。

纵观整个瑞利波的发展历史,对瑞利波勘探法的研究总体上是一个从天然场源法到人工场源法,从稳态法到瞬态法(即所探测的介质尺度由大到小,所利用的面波频段也对应由低到高),从理论研究逐渐走向了试验和实践阶段的发展过程。

1.2 研究和应用概况

1887年,Rayleigh首先发现瑞利波的存在,并揭示了它在半空间介质中的传播特性。此后,国内外大量学者对瑞利波在各种介质中的传播理论及实践应用开展了深入的研究工作。

1.2.1 国外研究及应用现状

瑞利波从理论上被发现之后,人们首先从天然地震的记录中证实了面波的存在。20世纪50年代初,人们又发现了瑞利面波在层状介质中具有频散特性,当时Haskell首先用矩阵方法计算了层状介质中瑞利波的频散曲线,这是后来人们利用瑞利面波了解地层结构的基础。于是,人们最初主要根据频散特性广泛地利用天然地震记录的瑞利波来研究地球内部构造。例如日本的吉田满、川崎一郎就曾利用瑞利波频散测定了西太平洋上地幔的密度结构;2000年,Wolfgang Friederich、Stefanie Hunzinger等利用多模式波场,探讨是否可用Helmholtz方程来提高地震面波对大地结构解释的精度^[6]。

1. 理论研究

20世纪50年代初期,Thomson(1950)、Haskell(1953)等先后发现了多层介质中瑞利波的频散特性,并且建立了频散方程。1964年,David G. Harkrider对三种不同震源情形下各向同性多层介质中的瑞利波进行讨论,并建立了该情形下的特征方程。在20世纪60年代末期,基本建立起了层状半空间瑞利波特征方程,接着主要探讨特征方程的求解方法和各种改进方法,这主要体现在对频散方程的形

式进行改进,避免数值计算中的数值溢出。

另外,对于饱和土中瑞利波特征方程的建立,学者们也做过不少工作。20 世纪 50 年代, Biot 建立了流体饱和多孔介质传播理论。1961 年, John P. Jones 利用 Biot 理论推导了三维情形下,孔状、弹性饱和介质中的瑞利波方程,但方程当时只考虑一种压缩波。1984 年, M. Tajuddin 对半空间多孔弹性介质中的瑞利波进行研究,发表了与 Jones(1961) 不同的看法^[7]。

瑞利波的频散方程建立后,接下来的研究重点就是方程的求解问题。根据特征方程求瑞利波频散曲线的方法可分为两种:一种是传统的解析法,一种是数值方法。

20 世纪 60 年代后,随着高速数字计算机被广泛地应用于地球物理学的各个领域,对瑞利波的研究也有很大的发展,其主要标志是出现了瑞利波频散曲线的快速计算。大量外国学者对层状介质中瑞利波频散函数的计算进行了研究,提出了各种求解方法,其中主要有 Thomson-Haskell 法^[8, 9]、Schwab-Knopoff 法^[10]、 δ 矩阵法^[11, 12]、Abo-Zena 法^[13, 14]、RT 矩阵法^[15]等。

实际上, Thomson-Haskell 法与 Schwab-Knopoff 法都属于传递矩阵法, Freeman Gilbert 和 George E. Backus^[16]所采用的频散曲线计算方法就是这两种方法的综合;此外, Dunkin(1965)^[17]、Thrower(1965)^[11]、Watson(1970)^[12]等人在频散曲线的计算上都做过不少的工作,但他们所采用的方法都存在高频范围内精度丢失的问题。

1979 年, Anas Abo-Zena 对传递矩阵进行修改,很好地解决了高频精度部分丢失的问题,但计算结果的频率上限还只为 20 Hz。Harvey(1981)进一步对 Abo-Zena 算法进行了改进,明显提高了计算速度,但为了避免数值的不稳定性,在计算中要求引入一系列的假定地层^[18]。后来, Harvey(1981)和 Cormier、Mandal、Harvey(1991)表示——通过全面综合考虑后,假定地层可以去除掉^[19, 20]。1984 年 Schwab 在 Knopoff 快速算法的基础上,提出了归一化和对某一层进行细分的方法,将频率计算的频率上限提高到了 800 Hz^[21]。

1972 年, Takeuchi 和 Saito 还提出了数值积分的方法^[22],他们的方法对于计算一般的层状地层模型的频散曲线比较方便,但在处理高频数值问题时具有不稳定性。

Kennett 和 Kerry 等人提出的 RT 矩阵法是一种计算频散曲线的有效方法^[15, 23, 24],该方法是建立在反射系数和透射系数基础上的,它不仅有效地解决了面波的频散曲线问题,而且明确地解释了面波的形成机理,即相长干涉。1993 年, Xiaofei Chen 又对该方法进行了改进和提高,提出了广义反射—透射系数方法^[25]。2008 年, Pei 等人改进了 Chen 的广义反射—透射系数计算方法,可以不必计算反射—透射系数而直接计算广义反射—透射系数,从而减少了计算量^[26]。

2007年, Wilson Chung 等利用 FLAC 软件对实验模型进行了瑞利波传播特性的模拟分析^[27], 这实际上采用的是一种有限差分的数值计算方法。

这些对面波频散曲线正演计算方法的研究, 对面波的应用起到了极大的促进作用。

2. 实践应用研究

1938年德国土力学协会首次尝试用稳态振动来检测岩土的各种弹性力学参数。

20世纪60年代, 美国人提出面波的半波长解释方法, 并将稳态法首先用于地基勘察, 据报道有四个测点的探测深度曾超过10 m, 这揭开了面波勘探的序幕。

真正利用人工激发的高频率瑞利面波来解决浅层工程地质问题是20世纪70年代后的事情, 这是由于计算机技术的飞速发展和大量工程建设迫切需求的结果, 但最初开展的工作主要是在基础块上进行稳态面波测试试验。

1973年, 前面提到的 F. K. Chang 和 R. F. Ballard 等人在第42届 SEG 年会上专题报道了他们开展瞬态面波勘探试验的研究成果, 但受当时技术条件的限制, 这种应用未能成功。这次尝试和研究却揭开了浅层地震波勘探的新篇章, 引起了许多地球物理学者的注意, 他们开始了对瑞利波理论及方法技术的深入研究, 试图将其有效地应用到工程地质勘探诸多领域中。

20世纪80年代初, 面波工程勘探有了突破性进展。1982年, 日本 VIC 株式会社研制出稳态法的 GR-810 系统, 用以解决工程地质勘察问题。VIC 公司于20世纪90年代初又推出 GR-820 瑞利波勘探系统, 与 GR-810 相比其改进之处是该仪器既可进行稳态法勘探, 也可用于瞬态法勘探, 还可将两种方法结合使用, 具有二者的优点^[28]。

1983年, Stokoe 和 Nazarian 等提出所谓的面波频谱分析方法(SASW)^[29], 通过分析面波的频散曲线建立近地表的 S 波速度剖面。随后, SASW 方法得到不断改进, 并在许多工程中得到应用^[30~32]。

1990年, M. I. Todorovska 和 V. W. Lee 探讨冲积峡谷地层浅部的瑞利波响应特征^[33]。1993年, 笠博义等人做了瑞利波法的超前探测试验^[34]。1995年, Chih-Hsiung Chang、Gerald H. F. Gardner 等采用试验的办法, 观测了面波在横向均匀介质中的传播特性^[35]。1996年, N. Gucunski、V. Ganji、M. H. Maher 等利用面波频谱试验的方法, 研究了地下障碍物对瑞利波频散特性的影响^[36]。1997年, Ryoji Sakurada 等应用瑞利波方法研究了道路冻胀破坏区层状土的效应^[37]。

2000年, Damien M. Leslie 等人研究了石油勘探中低速夹层存在时的能量传播。以往在地震勘探中, 一般将地震反射记录中的导波能量看成噪声并把它丢弃, 但他们研究后发现导波的主波长与低速层的物理性质存在相关关系, 由此可