



献给中国地质大学建校60周年

地大人

# 地球物理科学研究十年进展

——地球物理与空间信息学院校庆60周年

## 论文集

主 编 姚 姚  
副主编 徐义贤



中国地质大学出版社有限责任公司  
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

地 大 人

# 地球物理科学研究十年进展

——地球物理与空间信息学院校庆60周年论文集

主 编 姚 姚  
副主编 徐义贤



中国地质大学出版社有限责任公司

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

## 内 容 简 介

为庆祝中国地质大学建校、地球物理与空间信息学院建院 60 周年,弘扬校风、院风,交流学术成果,促进学科发展,地球物理与空间信息学院组编出版了本文集。

全文集共 23 篇文章。前 6 篇为本院校友的文章,内容包括面波勘探、古地磁学、中国冰川均衡调整及海洋磁学等方面的最新研究成果以及区域地球物理调查在国土资源大调查中的作用、现状和发展。后 17 篇为本院教师的文章,对学院近十年来的主要科学研究成果进行了梳理和总结,内容既有地球物理正反演理论与方法,应用地球物理方法与技术,地球物理在资源与能源、近地表及地球动力学等方面的应用等,也有地球信息技术、地球物理在海洋与月球上的应用等科研成果。

本文集可供广大地质和地球物理工作者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

地大人地球物理科学研究十年进展——地球物理与空间信息学院校庆 60 周年论文集/姚姚主编,徐义贤副主编. —武汉:中国地质大学出版社有限责任公司,2012.9

ISBN 978 - 7 - 5625 - 2904 - 0

I. 地…

II. ①姚…②徐…

III. 地球物理学 - 文集

IV. P3 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 216946 号

地大人地球物理科学研究十年进展

——地球物理与空间信息学院校庆 60 周年论文集

姚 姚 主 编

徐义贤 副主编

责任编辑:王凤林

选题策划:张晓红

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社有限责任公司(武汉市洪山区鲁磨路 388 号) 邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传 真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:510 千字 印张:19.75

版次:2012 年 9 月第 1 版

印次:2012 年 9 月第 1 次印刷

印刷:武汉中远印务有限公司

印数:1—3 500 册

ISBN 978 - 7 - 5625 - 2904 - 0

定价:168.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

# 序

2012年11月7日是中国地质大学(原武汉地质学院、湖北地质学院、北京地质学院)建校60周年纪念日。

1952年,在傅承义、薛琴舫、顾功叙、秦馨菱、曾融生、谭承泽、刘光鼎等一批地球物理学家的努力下,在北京地质学院创办了地球物理探矿系,1953年开始招收地球物理探矿专业和地球物理探矿专修科学生。从建校以来,中国地质大学一直是我国地球物理学科重要的人才培养和科学研究基地。经过几代人的辛勤耕耘,为国家培养10 000多名本科毕业生和1 000多名研究生,为我国的地球物理事业做出了重要的贡献。

“甲子积淀,世纪腾飞”。值此隆重庆祝中国地质大学建校60周年之际,中国地质大学(武汉)编辑出版了著作《地大人地球物理科学研究十年进展》。该书对近十年来地大人在地球物理领域所作的主要科学研究成果进行了梳理和总结,内容涵盖地矿、石油、工程与环境、地球动力学、地球信息技术等诸多方面,反映了地大人“勇于创新,追求卓越”的科学品质。

我很高兴地看到学校的地球物理学科在过去的十年发展迅速,在勘查地球物理、固体地球物理及地球信息技术三个方面取得了高水平成果。作为一位曾经在校任教十余年、迄今仍在校兼职的地球物理工作者,我很高兴为该书作序,并以此祝愿学校前程似锦,续写辉煌!



2012年7月8日



# 前 言

到 2012 年 11 月 7 日,中国地质大学(原北京地质学院、武汉地质学院、湖北地质学院)建校已经 60 周年,地球物理与空间信息学院(原地球物理探矿系、勘探地球物理系、应用地球物理系、地球物理系)与学校同龄,也建院 60 周年。为庆祝建校、建院 60 周年,地球物理与空间信息学院组编出版了本文集,以弘扬校风、院风,交流学术成果,促进学科发展,并对我院近十年来的主要科学研究成果进行了梳理和总结。

我们有幸收到 5 位我院优秀校友的 6 篇文章。旅居美国 25 年、在国际近地表地球物理界享有盛誉的夏江海博士现为国家“千人计划”特聘专家、我院教授,他在面波勘探方面有很深的造诣。本文集的前两篇文章是夏江海博士及其团队在面波勘探方面的研究成果。黄宝春、汪汉胜、刘青松都是我院的优秀校友,先后获得国家自然科学基金委杰出青年基金资助,他们的文章分别介绍了近年来其研究团队在古地磁学、中国冰川均衡调整及海洋磁学等方面的最新研究成果。贺颖也是我院的优秀校友,现为中国地质调查局基础部物化遥处负责人,他的文章对区域地球物理调查在国土资源大调查中的作用、现状和发展进行了总结。

由地球物理探矿系到地球物理与空间信息学院,我们走过了 60 年的行程。60 年风雨兼程,我院的学科结构几经调整,形成了目前以应用地球物理为主要特色、固体地球物理和地球信息技术展现良好发展势头的学科格局;广大教师不仅在学术水平上有很大的提高,在研究内容上也有极大的拓展,本文集收录的学院教师们的 17 篇文章充分反映了这一发展趋势。文集的内容不仅涵盖了我院教师在传统优势研究方向上的发展,如地球物理正反演理论与方法(昌彦君、姚姚、师学明、刘天佑等的文章),应用地球物理方法与技术(徐义贤、胡祥云、张胜业等的文章),地球物理在资源与能源、近地表及地球动力学等方面的应用(潘和平、邓世

坤、王传雷、张玉芬、刘庆生、朱培民等的文章)等;还包括了新拓展的地球信息技术(牛瑞卿的文章),地球物理在海洋与月球上的应用(王书明、陈超等的文章)等内容。这些与时俱进、内容广泛、持续创新的科研成果是我院从建校以来一直得以保存下来并不断发展的最关键因素。

为了表示对校友的尊重,我们将校友的文章安排在文集的最前面;至于本院教师的文章,由于涉及的领域多而且方法技术面广,难以进行简单的分类安排,只能按照各位教师投稿的先后次序安排文集中的排序,特此说明。

在本文集的组编过程中,地球物理与空间信息学院的校友和教师们表现出了极大的热情,踊跃投稿,反复修改;学院院长徐义贤和书记孙治定对文集的出版极为关心。这些都是本文集得以在校庆、院庆前顺利完成的有力保证。由于编者水平所限,文集中难免有很多疏漏、不当之处,敬请读者见谅,欢迎批评指正。

谨向文章的作者、审稿者和关心、支持本文集出版的各位同志表示衷心的感谢!

谨以此文集献给中国地质大学校庆、地球物理与空间信息学院院庆 60 周年!

主编 姚 姚

2012 年 9 月 3 日于武汉

# 目 录

高频瑞利波方法的研究进展	
..... 夏江海, Miller R D, 徐义贤, 罗银河, 陈超, 刘江平, Julian Ivanov, 曾冲(1)	
利用勒夫波多道分析方法(MALW)估计近地表横波速度	
..... 夏江海, Miller R D, Recep Cakir, 罗银河, 徐义贤, Chong Zeng(17)	
海洋磁学研究进展与展望	..... 段宗奇, 刘青松, 石学法(30)
印度与亚洲大陆初始碰撞时限的古地磁学研究进展	..... 易治宇, 唐祥德, 黄宝春(42)
中国冰川均衡调整(GIA)研究的十年进展	..... 汪汉胜(57)
区域地球物理调查在新一轮国土资源大调查中的应用概况	..... 贺 颖(65)
地球物理资料模拟原子跃迁非线性反演法	..... 师学明, 王家映(70)
非均匀介质地震正演数值模拟与应用	
..... 姚 姚, 奚先, 唐文榜, 许云, 黄廷诘, 吴俊峰, 秦臻, 周玉冰, 董桥梁, 董雪华(80)	
海洋可控源电磁勘探(MCSEM)空气波效应及消除方法	..... 王书明, Zhdanov M S(95)
长江流域沉积物磁组构特征及其应用	..... 张玉芬, 闫桂林, 李永涛, 陈亮, 董雪华, 周元涛, 周耀, 罗昊, 江华军, 熊友亮, 熊德强(101)
长江流域第四纪地质中的环境磁学	..... 张玉芬, 李永涛, 严玲琴, 康春国, 韩晓飞, 周耀, 张勇, 周稠, 何禹, 汪华军, 高梦秋, 郭洁(116)
CSAMT法在地下电性结构勘探中的应用	
..... 胡祥云, 吴桂桔, 周晓晨, 彭荣华, 黄一凡, 韩 波(130)	
地质与环境过程的磁响应	..... 刘庆生, 杨涛, 刘青松, 曾庆理, 邱宁, 刘振东, 郑建平, 金振民, 高 山, 刘勇胜, 李海侠, 吴其反, 姜月华, 陈龙生(136)
鄱阳湖老爷庙水域磁法考古调查	..... 王传雷, 肖发标, 祁明松(159)
基于多源数据融合的三峡库区滑坡灾害调查与评估	..... 牛瑞卿, 叶润青, 彭令(167)
重磁异常反演方法及应用	..... 刘天佑, 杨宇山, 李媛媛(184)

地球物理测井在油气储层评价中的应用·····	潘和平,樊政军,常文会(199)
大地电磁观测与方法研究进展·····	徐义贤,蒋礼,岳瑞永,杨波,刘营,张秉政,孔亚丽(217)
谱激电法的一些理论与实验研究·····	张胜业,孟永良,黄理善,石砚斌,王长春,曾歌明(239)
探地雷达技术在工程勘察中的应用进展·····	邓世坤(257)
带地形的瞬变电磁 2.5 维有限元数值模拟研究·····	昌彦君,肖明顺,孟永良,罗延钟(267)
三维煤层槽波与初至波联合层析成像·····	徐智勇,赵娜,朱培民(279)
卫星重力与磁测资料在地学中的应用 ·····	陈超,梁青,陈波,杜劲松,王秋革,王林松,胡正旺(291)

# 高频瑞利波方法的研究进展

夏江海<sup>1,2</sup>, Miller R D<sup>1</sup>, 徐义贤<sup>2</sup>, 罗银河<sup>2</sup>, 陈超<sup>2</sup>, 刘江平<sup>2</sup>, Julian Ivanov<sup>1</sup>, 曾冲<sup>1</sup>

(1. 堪萨斯大学堪萨斯地质调查所, 美国堪萨斯州劳伦斯市, 66047;

2. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 武汉, 430074) ①②

**摘要:**自 20 世纪 80 年代初以来, 在近地表地球物理的研究中, 通常用多道记录系统来获得高频率 ( $\geq 2$  Hz) 瑞利波 (Rayleigh-wave) 数据来确定横波速度。本文概括性地讨论了堪萨斯大学地质调查所和中国地质大学 (武汉) 在近 15 年里关于高频面波技术的主要研究成果。面波多道分析方法 (multichannel analysis of surface waves—MASW method) 是一种用非侵入性的声波法来估计近地表横波速度的方法。面波多道分析方法的结果和直接钻井测量结果相比有 15% 的差异。研究表明高阶模式波和基阶模式波的联合反演可提高反演结果的分辨率和勘查深度。也可以通过面波多道分析的方法反演瑞利波的衰减系数, 从而预测地震特性的品质因子  $Q$ 。最小二乘法获得的反演模型 (横波速度或  $Q$ ) 可用一个合适的阻尼因子向量来评价, 这个阻尼因子向量是由模型领域内反映模型分辨率矩阵和模型协方差矩阵间关系的目标函数决定的。目前研究取得的进展包括近地表介质中瑞利波的模拟, 这种方法是时间-偏移域中瑞利波反演的基础。在频率-速度域内, 利用任意的检波器和震源的排列可以获取高分辨率的瑞利波频散能量图像, 这打开了三维近地表面波勘探技术的大门, 成功地分离了面波的模式, 为实现高横向分辨率的横波测量提供了一个有价值的工具。

**关键词:** 瑞利波, 频散, 高阶模式, 模式分离, 地震模拟, 模型评价

## 1 引言

面波具有导向性和频散性。瑞利波是一种沿自由界面 (例如, 固体地球-空气界面或固体地球-水界面) 传播的面波, 同时这种面波具有低速度、低频率和高振幅的特性。瑞利波是纵波和横波垂直分量的干涉波。在一个均匀介质中, 如果波从左向右传播, 它的基阶模式的粒子运动的振动轨迹为逆时针方向旋转的椭圆; 随着深度的增加, 粒子运动的振动轨迹逐渐变为顺时针方向旋转的椭圆。在一个均匀介质的半空间中, 瑞利波不具有频散性, 当泊松比等于 0.25 时, 它以接近  $0.9194v_s$  的速度传播 ( $v_s$  代表半空间中横波的速度); 然而在一个二层介质 (水平层在均匀半空间上) 中, 当瑞利波波长是层厚度的 1~30 倍时, 瑞利波是频散的。对于一定的模式, 较长波长的地震波穿透深度较大, 一般具有较高的相速度, 因此得出较长波长的波对深层弹性介质有较高的敏感性; 相反地, 较短波长的波对表面层的介质具有较高的敏感

① 夏江海曾为武汉地质学院地球物理探矿系教员, 现为国家“千人计划”A 类特聘专家。

② 本文由尹晓菲同学译自 Xia J, Miller R D, Xu Y, Luo Y, *et al.* High-frequency Rayleigh-wave Method. *Journal of Earth Science*, 2009, 20(3): 563-579.

性。在一个特殊的面波模式中,唯一的波长对应唯一的相速度,这使得面波具有频散性。

横波速度可以用反演面波(瑞利波或勒夫波)的频散相速度来获得。近地表的横波速度可以通过反演高频率瑞利波来获取,若干种地震波方法均利用了瑞利波频散的特性来确定近地表介质中的横波速度。Stokoe 和 Nazarian 等在 1983 年提出了一种面波方法——面波谱分析法(spectral analysis of surface waves (SASW))<sup>[1]</sup>,该方法是利用频散曲线确定横波速度剖面。1996 年,Matthews 等总结了面波谱分析方法和连续的面波方法[continuous surface wave (CSW) method]<sup>[2]</sup>。在过去的 15 年里,堪萨斯大学堪萨斯地质调查所研发了面波多道分析方法(MASW),此方法可追溯到 Song 等 1989 年的工作<sup>[3]</sup>。这个方法包括高频率( $\geq 2\text{Hz}$ )宽频段的瑞利波的获得、瑞利波的频散曲线的提取、瑞利波的频散曲线的反演以及近地表横波速度的获得。由于面波多道分析方法可以解决一系列近地表地球物理和地质问题,该方法已获得了近地表地球物理界日益增长的关注。这种方法的非破坏性、非侵入性、低成本和较高精确度的特点,使它成为近地表地质、环境和工程中获得横波速度的主要工具。

在地下水、环境工程、石油勘探中,近地表的弹性介质和地震波效应都是最基本的研究对象。横波速度也是建筑工程上的重要参数。例如,Imai 和 Tonouchi 曾在一个堤岸冲击层、洪积层以及古近纪、新近纪沉积层中研究纵波和横波速度,他们证明了横波速度与  $N$  值的相关性<sup>[4]</sup>, $N$  值是土壤机理和基础工程的地层硬度指数。横波速度也是评估浅层界面动力学特征的一个重要参数<sup>[5]</sup>。再举一个例子,通用建筑准则(uniform building code,简称 UBC)和欧盟规范(Eurocode 8,简称 EC8)均利用了  $v_{s30}$ (地表到地下 30m 的平均横波速度),根据地震工程用地类型设计的目的,对场地进行分类。在石油勘探方面,近地表的介质具有滤波器的作用,会模糊深部反射的信息,因此获得精确的近地表速度对消除模糊效应是十分重要的。正如 Xia 等所讨论的,一种成功确定近地表横波速度的方法是面波多道分析方法<sup>[6,7]</sup>。

堪萨斯大学的研究人员利用面波多道分析方法解决了大量的地质、环境工程的问题,分析了反演高阶模式波的效果和探测深度,通过反演瑞利波衰减系数预测了近地表的品质因子  $Q$ ,利用数据分辨率矩阵和模型分辨率矩阵评价了反演模型的优劣。在过去的 5 年里,通过中国地质大学地球物理和空间信息学院和堪萨斯大学的研究人员的联合工作,开发了正演模拟技术  $f-v$  域中生成高分辨率图像的模式分离技术以及提高面波横向分辨率的技术。基于这两支团队的研究,本文重点介绍关于面波多道分析方法的基本原理和取得的最新进展。

## 2 近地表地震特性

瑞利波是沿自由界面传播的表面波,常以低速度、低频率、高振幅为特点,其最主要的特征是具有频散性。这表明它们的速度随着频率的改变而变化,这种改变主要受横波速度的影响。1989 年,Song 等提出用多道采集系统来估计近地表横波速度的方法<sup>[3]</sup>。20 世纪 90 年代初,堪萨斯大学开始了利用面波多道分析方法(MASW)确定近地表横波速度的系统研究。面波多道分析法能够较容易地识别面波(基阶模式和高阶模式波)和消除体波能量,确定面波的相速度,以及获得精确的横波速度。衡量近地表介质地震特性的参数包括纵波和横波速度、纵波的品质因子  $Q_p$  和横波的品质因子  $Q_s$ 。在下面的段落里,我们将讨论利用面波多道分析方法的主要步骤(图 1),即从一个炮集获得一个横波速度剖面图(横波速度与深度的关系图)的过程,以及利用面波振幅确定  $Q_s$  的方法。

首先得到多道包括增强的瑞利波信号的原始数据。然后将原始数据变换到频率 - 速度( $f-v$ )域提取瑞利波的相速度。最终,通过反演相速度得到横波速度随深度变化的剖面。

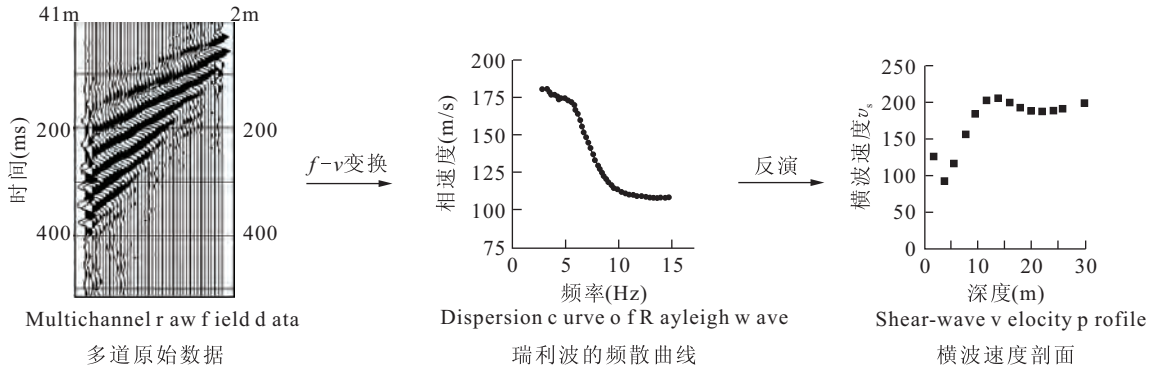


图1 面波的多道分析方法示意图

### 2.1 采集面波数据

获得面波数据使用的仪器设备与浅层反射方法中的几乎相同。为了记录宽频带的面波,应用低频检波器(通常为4.5Hz)对地下30m深度范围进行探测;6kg左右的锤子垂直下落和可控振荡器都是面波研究中较好的非侵入性地震震源;利用24、48、60记录道的地震仪记录,可得到合适的面波数据。

为了得到最佳的瑞利波记录,要求数据采集设备的排列和数据记录参数符合瑞利波的记录。根据给定的勘探深度,一定波长的瑞利波需要一定的时间变为平面波。在通常情况下,面波以平面波的形式传播,发生在最小偏移距(从震源到第一个检波点的距离)大于所需面波最长波长的一半以上的位置。学者们在大量的文献中讨论了以实验为依据获得最佳数据参数的方法<sup>[8-13]</sup>。瑞利波在一个均匀介质中的最大穿透深度约为一个波长。目前通常将最大穿透深度看作最长波长的一半<sup>[14]</sup>。然而高阶模式波可穿透的深度比一个波长还要长<sup>[15]</sup>。最小偏移距应该选为期望的探测深度。高频面波随着远离震源而衰减,体波就会抑制远偏移距的检波器记录面波数据<sup>[16]</sup>。为了能在远偏移距的检波器获得高频面波,远偏移距(从震源到最远检波器的距离)可以定为探测深度的2倍。在频率-速度( $f-v$ )域中,频散能量图像的分辨率直接与检波器排列长度(第一个到最后一个检波器之间的距离)和频率有关(Forbriger, 2003年提出: $d = 1/fC$ ,其中 $d$ 是在 $f-1/v$ 域中,对于一个给定的频率的频散能量一半幅度内的长度; $f$ 是频率; $C$ 是检波距)<sup>[17]</sup>。一般而言,检波器排列越长,频散图像的分辨率越高。为了避免空间的假频现象,检波器的间隔应小于测量的最短波长的一半。一般来说,已知特定问题的探测深度后,就可确定数据采集参数,包括最近检波距( $A$ )、相邻检波器的间隔( $B$ )以及检波器排列长度( $C$ ),如图2所示。

很多团队一直从事着高效获得面波数据方法的研究。1999年Miller等用实际资料证明用拖缆获得的数据几乎等同于埋设检波器获得的数据<sup>[18]</sup>。Tian等发现利用面波多道分析方法和检波器自动安置的结合可以进行特定的资料采集和地下成像<sup>[19]</sup>。

### 2.2 提取频散曲线

在 $f-v$ 域内制作一个可靠的频散能量图像,是面波多道分析方法中最关键的一步。Xia

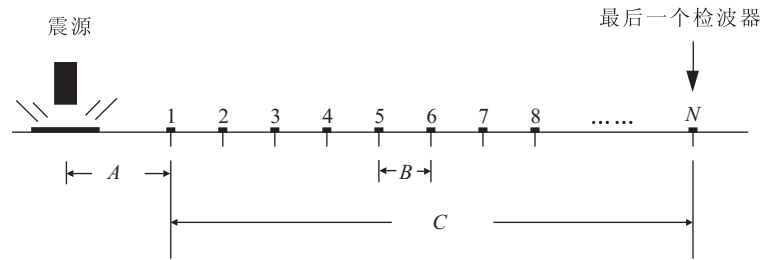


图2 面波数据采集的3个参数<sup>[8,9]</sup>

$A$  代表最小偏移距 (nearest source-receiver offset), 约等于最大勘探深度;  $B$  代表相邻检波器的距离 (receiver spacing), 层状模型中的最小厚度;  $C$  代表检波器排列长度 (从第一个检波器到最后一个检波器的距离, receiver spread), 约为最大勘探深度的 2 倍

等提出了一个算法, 利用任意检波器和震源排列采集数据, 制作频散能量图像<sup>[20,21]</sup>。该算法分两个步骤: ①对频率进行分解, 通过一个卷积公式  $X(d, t) = S(t) * x(d, t)$  拉伸多通道脉冲数据  $x(d, t)$  (其中  $d$  是偏移距), 变为伪可控振动信号或频率-扫频数据  $X(d, t)$ <sup>[22]</sup>,  $S(t)$  为一个线性或非线性的扫频, 包括实际数据的频率范围; ②获得倾斜叠加扫频数据<sup>[23]</sup>。由于对检波器的排列没有任何要求, 这种方法实际是一个三维近地表面波勘探技术的算法。Luo 等<sup>[24,25]</sup> 提出利用高分辨率线性拉冬变换 (LRT) 制作瑞利波频散能量图像。首先将数据从时间域变换到频率域, 然后利用一个加权的预条件化的共轭梯度算法生成高分辨瑞利波频散能量图像。在 Xia 等<sup>[20,21]</sup> 和 Luo 等<sup>[24,25]</sup> 的研究以前, 计算高频率频散能量图像有 3 种算法: F—K 变换 (如 Yilmaz, 1987)<sup>[23]</sup>、 $\tau$ — $p$  变换 (McMechan 和 Yedlin, 1981)<sup>[26]</sup> 及相速度变换 (Park 等, 1998)<sup>[27]</sup>。Moro 等评价了基于 F—K 变换、 $\tau$ — $p$  变换、及相速度变换 3 种计算方法的效果<sup>[28]</sup>, 他们认为当考虑到有限记录道时, 相位移法对数据处理的过程不敏感, 但效果较好。

能量图像峰值的分辨率是获得精确频散曲线的关键。理论模型和实例数据证明了由高分辨 LRT 产生的频散图像的分辨率比其他方法得到的分辨率高 50% (Luo 等, 2008)<sup>[24,25]</sup>。在  $f$ — $v$  域中, 频散能量的峰值随频率变化的轨迹使我们可以提取频散曲线。

### 2.3 反演频散曲线

通常用水平地层层状模型解决一维问题。水平地层模型的瑞利波相速度是一个包含频率和 4 组模型特性参数的函数。模型特性参数包括纵波速度、横波速度、地层密度和地层厚度。对雅克比 (Jacobian) 矩阵的分析提供了判断频散曲线对地球特性参数的敏感性的评价方法<sup>[6]</sup>。高频 ( $\geq 2\text{Hz}$ ) 频散曲线的主要影响因素是横波速度, 因此频散曲线反演中, 只有横波的速度是未知的。一般, 在高频率范围内利用马奎特<sup>[29]</sup>法对一个加权方程进行迭代求解是有效的<sup>[6]</sup>。通过对初始模型和马奎特法中的阻尼因子的选择, 该迭代算法的收敛过程是有保证的和稳定的。

目前近地表地球物理中, 可压缩的吉布森 (Gibson) 半空间是唯一的连续地球模型, 其剪切模量在非均匀弹性半空间中随深度呈线性变化<sup>[10,11]</sup>。在一个可压缩的吉布森半空间中, 瑞利波的频散曲线函数可表示为代数形式<sup>[30]</sup>, 这使得我们的反演过程更加简单和快捷<sup>[10,11]</sup>。实践中, 这个模型是非常有用的。例如在工程建设 (如水坝和河堤) 中, 可利用的频散能量可能只在一个有限的频率范围内或某些频率点上存在, 研究吉布森模型瑞利波反演是十分有意义的。

这个模型可以为其他迭代类算法确定一个良好的初始模型。

对于一个存在地下高速夹层 (high-velocity layer, 简称 HVL) 或低速夹层 (low-velocity layer, 简称 LVL) 的模型需要特殊的处理方法。Calderon-Macias 和 Luke 探讨了如何选择一个合适的初始模型代表含高速夹层的模型, 以期获得一个有意义的反演模型<sup>[31]</sup>。Lu 等证明了在地面获得的资料中频率模式的急剧变化会引起频散曲线明显的不连续性<sup>[32]</sup>。一个面波模式从记录的波场中消失, 另一个却出现, 这表明了反演中需要考虑面波模式在资料中的位移, 尤其是在含低速夹层的介质中。模拟结果也说明了瑞利波的相速度对低速层以下的地层灵敏度最低<sup>[33]</sup>。

## 2.4 验证反演结果

系统地验证反演瑞利波获得横波速度模型的精度, 可以追溯到 20 世纪 90 年代后期。在堪萨斯州<sup>[8,9]</sup>, 从面波多道分析方法中获得的横波速度毫不逊色于直接钻井测量的结果。在堪萨斯州劳伦斯市测试反演的横波速度, 研究内容有总的记录通道的改变、采样间隔、偏移距及相邻检波器间隔间的关系。总体来看, 面波多道分析方法计算的横波速度  $v_s$  与钻井测量的横波速度  $v_s$  之间存在差异。在加拿大温哥华沿 Eraser 河边的 8 口井进行实验, 两者的横波速度差异小于 15%; 其中一口反演验证是在没有任何先验资料的条件下进行的, 其面波多道分析方法与钻井测量计算的结果只相差 9%。从 8 口井中获得的  $v_s$  值来看, 两种方法之间没有系统差异。

在怀俄明州进行的 SH 折射波法的调查, 未能得到可信的近地表横波速度, 但因此收集了面波数据 (图 3)<sup>[34]</sup>。其中, 多道记录是将震源置于剖面两端获得的 [图 3(a)]; 从图 3 左边炮集获得一个频散图像 [图 3(b)], 它是用高分辨拉冬变换产生的<sup>[35,36]</sup>。  $f-v$  域中基阶模式的瑞利波能量占主导地位, 因此可容易地确定相速度。初始的横波速度由频散曲线用 Xia 等给出的公式来确定<sup>[6]</sup>。由面波多道分析方法得到的横波速度, 可用一个原始钻井结果来验证。在深度为 0~6m 的范围内, 从面波多道分析方法得到的横波速度和那些钻井的实测结果相比, 有 15% 的差异。如果用 5 点窗口的滑动滤波器对钻井结果的数据进行滤波来减少测量噪

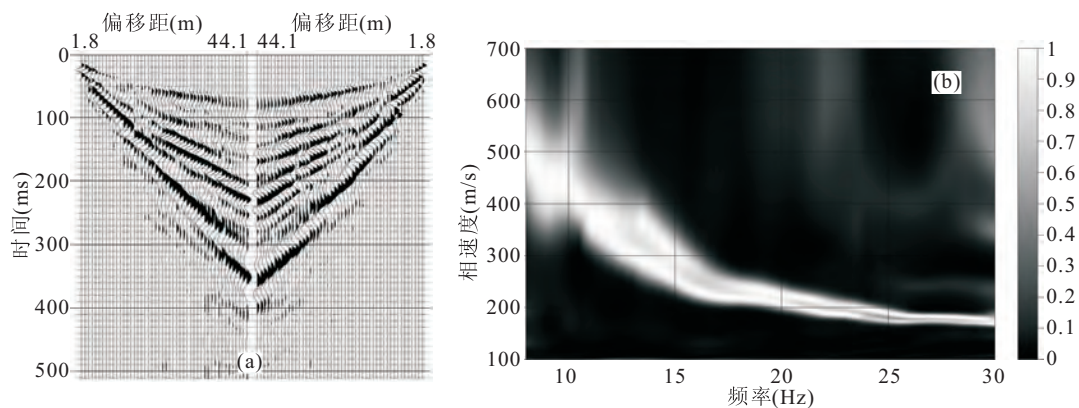


图 3 怀俄明州 SH 波的实例

(a) 将震源置于剖面两端并使用 8Hz 垂直分量检波器得到的 48 道面波数据<sup>[34]</sup>, 最小偏移距为 1.8m, 相邻检波器间隔为 0.9m, 震源是由一个 6.3kg 的锤子垂直撞击一个金属平板产生的; (b) 是从 (a) 的左边炮集 (震源在左边) 得到的在  $f-v$  域中的频散图像

音,在深度为 6 ~ 14m 的范围,两组数据随深度线性增加的总趋势是相同的。在 SH 折射波调查中,实线(图 4)表示横波速度,显而易见,从折射波中获得的横波速度比钻井结果高许多。Xia 等证实了在补做了纵波折射的调查后,由 SH 折射波确定的横波速度实际上是纵波速度的转换<sup>[37]</sup>。

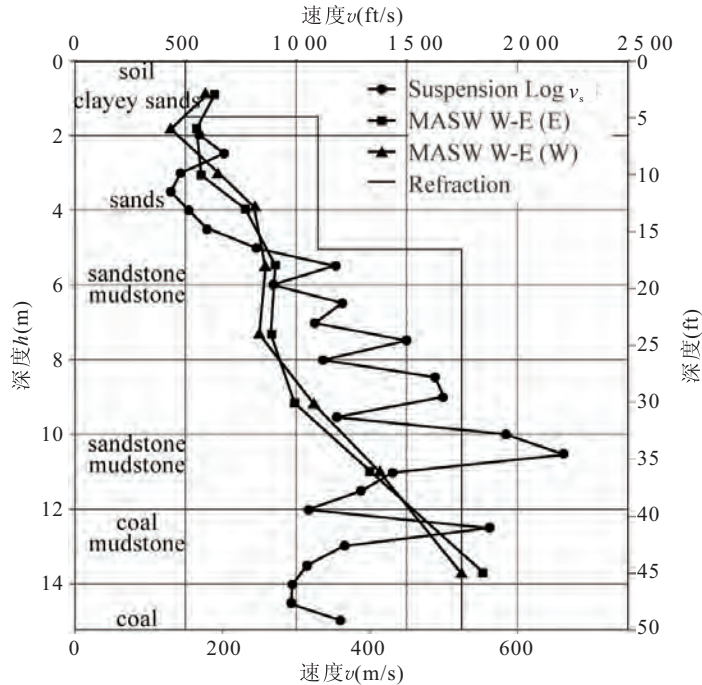


图 4 横波速度比较

Suspension Log  $v_s$ : 钻井的实测结果;面波多道分析法得到的横波速度;MASW W - E (E) 震源在东, MASW W - E (W) 震源在西; refraction: 从 SH 反射波观测中获得的三层模型 (实线)。注: 1ft = 0.304 8m

### 2.5 近地表品质因子 $Q$

品质因子  $Q$  是一个深度的函数,它直接与介质的阻尼比  $D$  ( $=0.5Q^{-1}$ ) 有关<sup>[38]</sup>。  $D$  是地质工程、地下水和环境研究的基础,同时也在石油勘探和地震学上有广泛的应用。随着地震波在地球介质中的传播,观察地震波振幅衰减,我们可以更好地理解地球衰减特性。模拟的结果表明:当  $v_s/v_p$  达到 0.45 时,可获得地球层状模型中的纵波品质因子  $Q_p$  和横波品质因子  $Q_s$ <sup>[34]</sup>。当  $v_s/v_p$  小于 0.45 时,从瑞利波衰减系数中,仅仅可以获得  $Q_s$  值。灵敏性的分析表明,反演的品质因子的误差可以达到衰减系数误差的 1 ~ 1.5 倍。对比反演瑞利波相速度的系统(面波的相速度 10% 的误差将导致横波速度 6% 的误差)<sup>[6]</sup>,发现求品质因子  $Q$  的反演系统是不稳定的。因此,精确计算瑞利波衰减系数显得尤为重要。另外,在过去 20 年石油勘探工业的研究和实践中,发现相比 AVO(振幅相对偏移距间的变化, amplitude versus offset) 反演系统,求品质因子  $Q$  的反演系统具有更高的稳定性。在 AVO 分析中, 10% 的数据误差(入射角)可以导致反演结果(反射系数)40% 的误差<sup>[39]</sup>。Xia 等(2002)<sup>[34]</sup> 讨论了利用瑞利波的衰减系数和改进阻尼因子的算法<sup>[40]</sup> 求解  $Q_p$  和/或  $Q_s$  的可行性。

亚利桑那州沙漠的数据是一个成功的例子[图 5(a)]。假定纵波速度已知,利用面波多

道分析方法得到一个十层模型的横波速度[图 5(b)]。依据振幅衰减计算出瑞利波的衰减系数[图 5(c), Measured 的标记]。反演瑞利波的衰减系数获得从地表到深度为 20m 的品质因子  $Q_s$ [图 5(d)], 它的变化范围是 7~25。  $Q_p$  可以看作是  $Q_s$  的 2 倍。模拟的瑞利波衰减系数[图 5(c), Final 的标记]与实测衰减系数吻合很好。

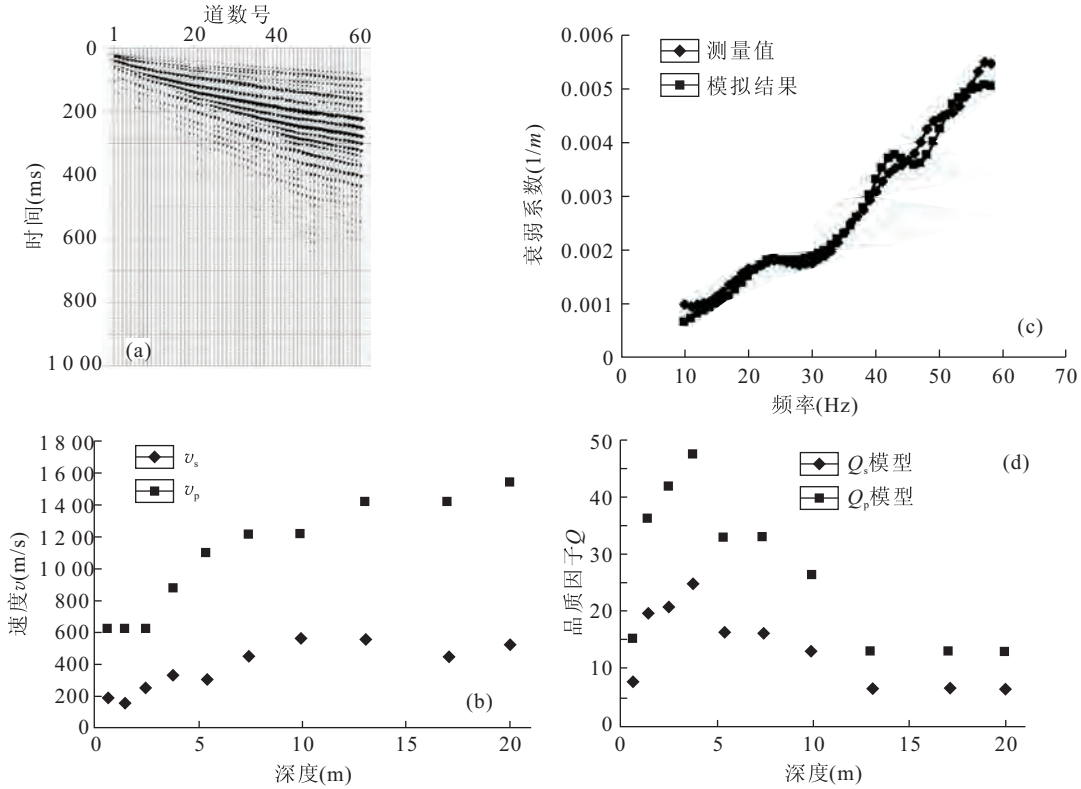


图 5 亚利桑那州沙漠的例子( Xia 等,2002)

(a) 利用 4.5Hz 的垂直检波器获得的 60 道面波数据,其中相邻检波器间距为 1.2m、最小偏移距为 4.8m,震源是一个由堪萨斯大学设计的重物下落机;(b) 利用面波多道分析方法得到的一个 10 层模型的横波速度和已知的纵波速度;(c) 瑞利波的衰减系数的测量和模拟结果;(d) 反演瑞利波的衰减系数而获得的  $Q_s$  模型和  $Q_p$  模型

### 3 横波速度模型的改进和评价

研究表明,横波速度可以通过同时反演基阶模式和高阶模式的数据获得,且可以利用模型分辨矩阵和模型协方差矩阵之间的折衷值计算横波速度的误差限。

#### 3.1 高阶模式

一系列不同频率的瑞利波有相同的波速,因此对于一个给定模式的相速度,存在不同频率的瑞利波,其以不同数量的水平节点的平面为特点(层位中没有粒子位移的平面,1979, Garland)<sup>[41]</sup>。换句话说,给定一个频率可以获得多个瑞利波相速度,因为这些波可以在给定频率中具有不同的速度。给定一个频率,最低的速度称作基阶模式(或第一模式)速度;比基阶模式相速度高的速度为第二模式速度,依次类推。

大多数面波研究者也意识到横波速度可以通过反演高阶模式数据得到。并能提高反演的横波速度的精确性(Liang 等,2008<sup>[33]</sup>; Luo 等,2007<sup>[42]</sup>; Xia 等<sup>[15]</sup>,2003; Beaty 等,2002<sup>[43]</sup>)。Xia 等通过对雅克比矩阵的分析(与高频瑞利波数据有关),认识到两个高阶模式具有的重要特性<sup>[15,44]</sup>。第一,具有相同波长的基阶和高阶模式瑞利波数据,高阶模式瑞利波的调查深度可以比基阶模式瑞利波更深;第二,高阶模式数据可以增加反演的横波速度模型的分辨率。另外,他们的模拟结果证明了纵波速度对高阶模式的影响小于其对基阶模式的影响,这为高阶模式的反演获得更精确的横波速度提供了依据。

为确定近地表 10m 深度以内的横波速度,在加利福尼亚的圣向塞一个工区采集了高频率面波数据[图 6(a)],在  $f-v$  域中生成频散能量图[图 6(b)](由图可见,高阶模式较明显)。二阶模式的频率为 20~50Hz,三阶模式的频率从 35Hz 开始出现。他们对 3 组数据进行反演。第一组数据仅仅是基阶模式的面波数据,其可从图 6(b)用 SurfSeis<sup>®</sup>(堪萨斯大学研发的一个商业软件包)自动地提取。第二组数据是频率在 13~19Hz 的范围内有意加入噪声的基阶模式数据,该噪声是来自体波或高阶模式的干扰。根据他们的经验,第二组数据的图像在实际中是常见的。第一和第二组数据之间的标准偏差仅有 16 m/s。第三组数据包含了第二组数据(有噪声的数据)和二阶模式面波的数据。他们选择了一个层厚度 1m 的 14 层模式进行测试。

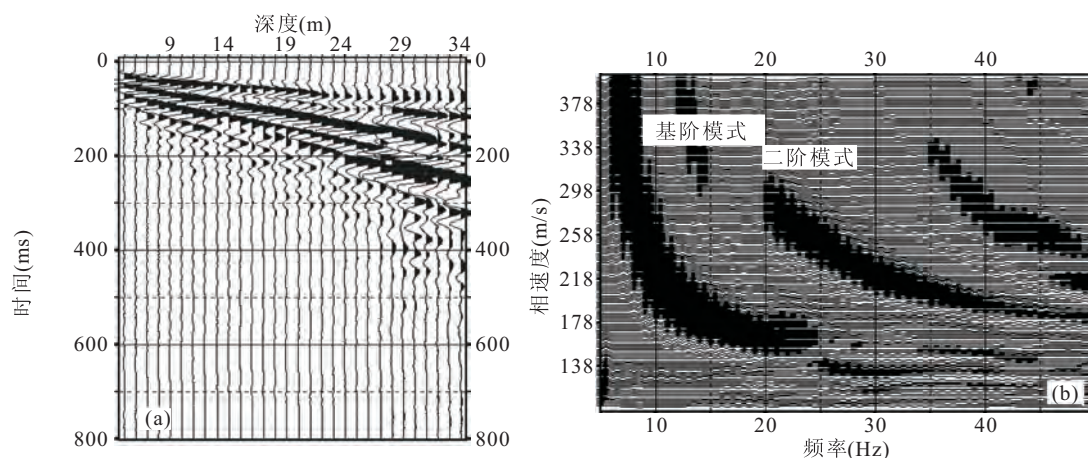


图 6 来自加利福尼亚的圣向塞的例子(Xia 等,2003)

(a) 利用 30 个 4.5Hz 频率的垂直检波器获得原始的面波数据,其中相邻检波器间隔 1m、最小偏移距是 4m,震源是一个 6.3kg 的锤子,用其垂直撞击一个金属平板;(b)  $f-v$  域的数据图像

图 7(a) 表示反演 3 组数据得到的横波速度,每一个横波速度模型测量的频散曲线与理论计算的频散曲线之间存在 5 m/s 的均方根误差。因为基阶模式的数据(第一组数据)是从图 6(b)精确获得,反演的横波速度[图 7(a)中方形]从浅层到深层,平滑地逐渐增加,这在地质上是可接受的。然而当反演第二组数据时,曲线的平滑性消失,横波速度模型[图 7(a)中带菱形的实线]在深度 3~7m 时大幅度的变化,反演模型为了拟合噪声,变得极不稳定。

实际中,测量值的误差常常会使反演的模型进入不合理的空间。当处理实际数据时,我们也经历过很多类似这样情况。同时反演高阶模式面波(第三组数据)与基阶模式数据,可以获得较好的结果[图 7(a)中三角形]。因为突变的横波速度模型对二阶模式数据会产生较高均方根误差,为剔除反演第二组数据获得的模型[图 7(a)的实线]提供了条件。反演第三组