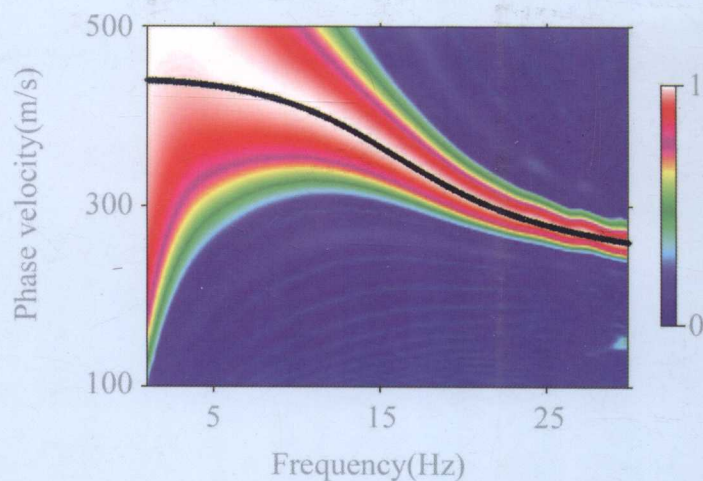


# 面波技术与 地球内部成像

MIANBO JISHU YU DIQIU NEIBU CHENGXIANG

徐义贤 主编



中国地质大学出版社  
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

# 面波技术与 地球内部成像

MIANBO JISHU YU DIQIU NEIBU CHENGXIANG

徐义贤 主编



中国地质大学出版社  
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

## 图书在版编目(CIP)数据

面波技术与地球内部成像/徐义贤主编. —武汉:中国地质大学出版社, 2015. 6

ISBN 978-7-5625-3662-8

- I. ①面…  
II. ①徐…  
III. ①面波-应用-地球内部-地震层析成像-文集  
IV. ①P183.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 136136 号



## 面波技术与地球内部成像

徐义贤 主编

责任编辑:段连秀

策划编辑:张 华

责任校对：张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社(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 $\times$ 1 092 毫米 1/16

字数:180 千字      印张:7

版次:2015年6月第1版

印次:2015年6月第1次印刷

印刷:武汉中远印务有限公司

印数:1—500 册

ISBN 978-7-5625-3662-8

定价: 98.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

# 前言

随着一些革命性的面波新方法的提出及发展,人们越来越广泛地将面波信号应用于各类地球内部成像问题。无论是人工源面波方法、天然地震面波方法,还是背景噪声面波方法,都为地球科学家在不同时空尺度上精细刻画地球内部结构提供了有效手段。

为进一步加强面波成像领域的最新学术成果交流,湖北省地球内部多尺度成像重点实验室暨中国地质大学(武汉)地球物理成像中心针对近年来面波成像的新方法和新技术,召开了面波成像创新团队学术研讨会,旨在为多尺度面波成像领域提供一个广泛的高水平学术交流平台。

本论文集收录了包括主动源面波方法、天然地震面波方法、背景噪声面波方法三大类面波研究方法的论文共 22 篇。所收录的论文涵盖了面波研究的多种方向及领域,既有面波的数值模拟、处理方法、反演方法的研究,也有从实际数据上对面波方法的实用性进行的探讨。会上所报告的论文内容,大多是近两年来已发表或已投稿在国际 SCI 期刊的论文,体现了本论文集所收录论文在面波勘探方法研究上的国际性及前沿性。

按照主动源面波方法、天然地震面波方法、背景噪声面波方法等分类,本论文集可分为三大部分。第一部分主要收录的为主动源面波方法的研究论文,第二部分主要收录的为天然地震面波方法的研究论文,第三部分主要收录的为背景噪声面波方法的研究论文。

本论文集可作为湖北省地球内部多尺度成像重点实验室暨地球物理成像中心在面波勘探方法研究及地球结构成像研究方面的部分成果总结,也可为致力于或有兴趣于面波领域开展科学研究的科研人员提供参考。

在本论文集的组编过程中,地球物理与空间信息学院给予了极大的支持。本论文集收录的研究成果得到中国自然科学基金会(项目编号:41274142、41374079、41374059、41374060)、中国地质调查局工作项目“西准噶尔克拉玛依后山地区深部地质调查(项目编号:1212011220245)”和高等学校学科创新引智计划(项目编号:B14031)的支持。

谨向论文的作者和关心、支持本文集出版的各位同仁表示衷心的感谢。谨以此文集献给中华人民共和国“一带一路”的发展战略构想。

湖北省地球内部多尺度成像重点实验室  
暨中国地质大学(武汉)地球物理成像中心

2015 年 6 月 1 日

# 目 录

## 主动源面波方法

|                                    |     |     |     |          |
|------------------------------------|-----|-----|-----|----------|
| 基于 CPU - GPU 的瑞雷波有限差分正演模拟 .....    | 高玲利 | 夏江海 | 潘雨迪 | (1)      |
| 瑞雷波波形削平对提取频散曲线的影响 .....            | 高玲利 | 夏江海 | 潘雨迪 | (6)      |
| 关于面波提取与压制中道间距选取的讨论 .....           | 胡 悦 | 夏江海 | 罗银河 | 沈 超等(11) |
| MASW 方法水平分辨率理论研究 .....             | 宓彬彬 | 夏江海 | 沈 超 | 胡 悦(16)  |
| 反演勒夫波波形获取地下剪切波速度 .....             | 潘雨迪 | 夏江海 | 高玲利 | 徐宗博(21)  |
| 利用改进真空格式的有限差分算法模拟含起伏地表的勒夫波传播 ..... | 潘雨迪 | 夏江海 | 高玲利 | (25)     |
| 含低速夹层模型的面波相速度计算 .....              | 沈 超 | 夏江海 | 王 昇 | 尹晓菲(30)  |
| 起伏地形对高频瑞雷波传播影响研究 .....             | 汪利民 | 夏江海 | 徐义贤 | 罗银河(35)  |
| 高频瑞雷波与拉夫波勘探深度的对比分析 .....           | 尹晓菲 | 夏江海 |     | (41)     |
| 巴里坤盆地坡积物浅层面波勘探研究 .....             | 张理蒙 | 林 静 | 罗银河 | (45)     |

## 天然地震面波方法

|                                            |     |     |     |         |
|--------------------------------------------|-----|-----|-----|---------|
| 利用面波频散和接收函数联合反演中下扬子及周边地区岩石圈速度结构 .....      | 黄 荣 | 徐义贤 | 朱露培 | 姜小欢(50) |
| 盆山结合带地区地壳结构的接收函数 CCP 成像研究——以西准噶尔地区为例 ..... | 姜小欢 | 徐义贤 | 朱露培 | 黄 荣(55) |

## 背景噪声面波方法

|                                            |                      |
|--------------------------------------------|----------------------|
| 基于互相关算法的路边被动源方法研究 .....                    | 程 逢 夏江海 徐宗博 汪利民(59)  |
| 影响路边被动源面波方法结果的因素研究 .....                   | 刘若飞 夏江海 程 逢(63)      |
| SPAC 方法提取面波有效波长范围研究 .....                  | 罗 松 罗银河 朱露培(67)      |
| 西准噶尔地区低频背景噪声源分析 .....                      | 王 昇 徐义贤 吴树成 沈 超(72)  |
| 非均匀噪声源分布条件下引起的相速度偏差校正 .....                | 王 凯 饶 豪 罗银河 杨英杰(77)  |
| 西准噶尔地区基于地震背景噪声的横波速度结构研究 .....              | 吴树成 徐义贤(81)          |
| 背景噪声程函方程层析成像在包古图地区的应用 .....                | 胥鸿睿 罗银河(86)          |
| 背景噪声中勒夫波数值模拟 .....                         | 徐宗博 夏江海 程 逢 潘雨迪(91)  |
| 基于遗传算法的大地电磁与面波频散数据反演与联合解释——以西准噶尔Ⅳ线为例 ..... | 张亮亮 李德华 徐义贤(95)      |
| 有限频背景噪声层析成像分辨率测试 .....                     | 赵凯锋 杨英杰 罗银河 谢 军(100) |
| 湖北省地球内部多尺度成像重点实验室暨地球物理成像中心 .....           | (104)                |

• 主动源面波方法(一) •

# 基于 CPU-GPU 的瑞雷波有限差分正演模拟

高玲利\* 夏江海 潘雨迪

地球内部成像与探测实验室 中国地质大学(武汉)地空学院 湖北武汉 430074

**摘 要:**瑞雷波多道分析方法(MASW)通过反演瑞雷波相速度可以确定浅地表剪切波速度。在过去的 20 年中,由于该方法具有非侵入性、无损、高效及价格低的特点,受到了浅地表地球物理和地质工程学界的重视,被视为未来最有希望的技术之一。瑞雷波的数值模拟可以研究地震波在地下介质中的传播规律,合成地震记录以便于分析和研究。有限差分方法是最常用的一种正演模拟方法。为了有效地减少数值频散造成的影响,需要增大网格规模。同时,有限差分方法的计算时间也会大幅度提高。近年来,有 NVIDIA 公司开发的基于 GPU 的平台 CUDA 可以实现大规模的并行计算。

**关键词:**瑞雷波 全波形反演 GPU

## 1 引 言

瑞雷波是一种无损条件下获得浅地表地下速度结构的地球物理勘探方法,现在已经被广泛地应用于解决各类浅地表地质与地球物理问题中<sup>[1]</sup>。瑞雷波的数值模拟是通过数值计算获得地震波场各个分量,为研究瑞雷波的波场特性和传播规律提供了一个基础。瑞雷波的数值模拟方法主要有有限差分法、有限元法、谱元法等。在利用有限差分算法进行瑞雷波数值模拟时,我们希望尽可能提高模拟精度以及计算速度。在微分方程中,采用差分方程近似,如果差分精度太低或者网格离散不合理,会造成波场畸变,这就是数值频散现象。数值频散现象是有限差分的固有特征,是无法消除的,只能尽可能地减弱这种频散。研究表明<sup>[2]</sup>,通过提高有限差分方程在空间和时间上的阶数,加密网格或者缩短离散时间间隔可以改善数值频散造成的影响。然而,网格剖分越细,则数值模拟过程所需的内存会增加,计算时间也会延长。

近年来,计算机图像处理器(Graphics Processing Unit, GPU)迅猛发展,并且可以参与到 CPU 的计算任务中去。在大规模的运算程序中, GPU 的运算能力远远超过了 CPU 的计算能力。随着 GPU 硬件和 CUDA 环境的不断开发和完善, GPU 已经成为了高性能计算的研究热点之一。CUDA 的编程模型是基于 GPU 与 CPU 协同工作的思想,将 CPU 作为主机端(host), GPU 作为设备端(device)运行一些可以被高度并行化的程序。在时域有限差分中,大

\* E-mail: gaoll1990@126.com

量空间网格点上计算波场值是相互独立的运算,因此,非常有利于程序的并行化,使得基于CPU-GPU的瑞雷波有限差分算法成为可能。

## 2 理论基础

有限差分法是基于差分原理的一种数值计算方法。它的原理是:将地下介质离散为许多小网格,利用差分原理,用差商来近似地代替微商,对波动方程进行离散化求解。与其他数值计算的方法相比,有限差分法在地震学以及地震勘探的应用具有较大的优越性。有限差分法计算速度快,占用内存小,其在地震领域的应用研究已经非常成熟。

交错网格在波动方程差分解法中是一种较为先进的差分格式,由 Madariaga 在 1976 年提出。与常规的网格相比,在相同计算工作量和存储空间的情况下,交错网格的优点是可以明显提高数值模拟的计算精度和收敛速度。交错网格中,应力、速度的各分量在不同的网格点取值,同时在不同的时间点取值。速度分量、应力分量在交错网格中的位置设置见图 1。在时域有限差分算法中,大量的空间网格点上的波场值的计算都是相互独立的,因此存在着很大的并行性。

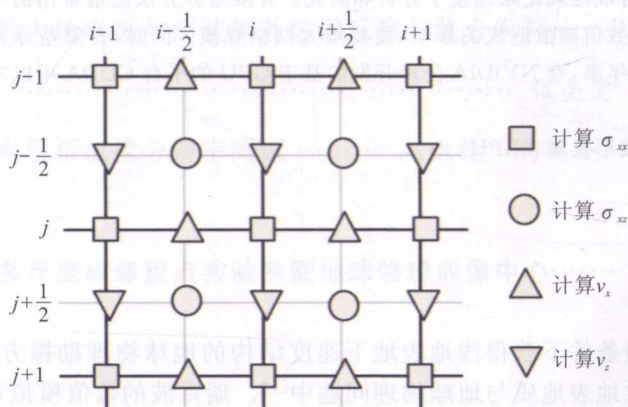


图 1 交错网格差分示意图

在 CUDA 中,CPU 作为主机端,GPU 作为设备端,在设备端执行核函数(kernel)。一个 kernel 的组织形式是线程网格(Grid),每个线程网格由若干个线程块(block)组成,每一个线程块又是若干个线程(thread)组成(图 2)。通过将 GPU 多线程并行计算技术与有限差分算法有效结合,能显著改善弹性波弹性模拟的计算效率。通常在把有限差分计算区域中的数据拷贝到 GPU(cudaMemcpyHostToDevice)进行计算。我们把计算区域划分为多个区块,对应 GPU 中的线程块,在这些区块中再细分用于单个网格场分量计算的单元,即对应 GPU 中的线程数(threads)。

在 GPU 上完成数据并行处理的几个主要包括:

- (1)有限差分程序初始化(变量声明、数组的声明)、分配 GPU 中波场分量的显存空间。
- (2)CPU 上的分量波场数据拷贝到 GPU(cudaMemcpyHostToDevice)。
- (3)在 GPU 上进行有限差分计算,每一个线程计算一个离散网格的波场数值。
- (4)GPU 数据拷贝到 CPU 中(cudaMemcpyDeviceToHost)。

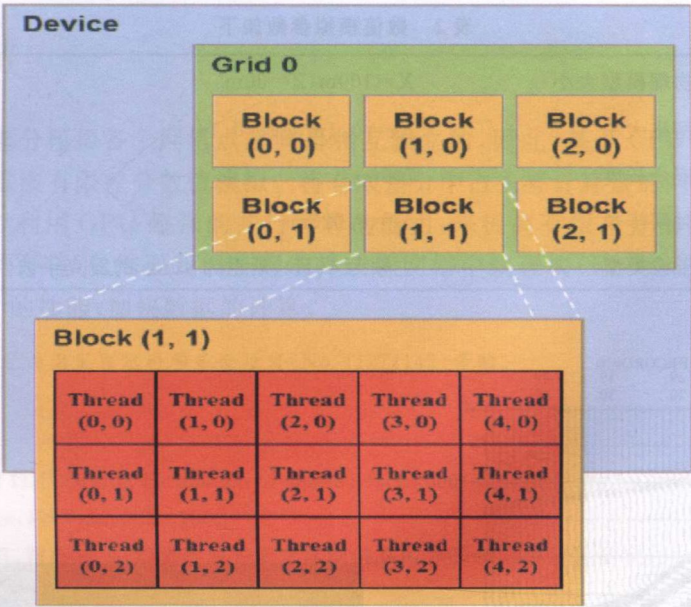


图 2 GPU 网格、线程块、线程

Kernel 部分的计算是在时间域的 for 循环内完成,即需要不断重复步骤(3)、(4)。

3 数值模拟及优化效果分析

本文中硬件环境为:CPU 配置为 Interl(R) Core(TM) i3 - 2120,主频为 3.3GHz,内存为 8 GB。GPU 显卡型号为 NVIDIA GeForce GTX 750,拥有 768 个处理核心,显存为 1GB,处理器时钟频率为 1.08GHz。软件环境为 Window 7 64 位操作系统,Visual Studio 2010 编译软件平台,CUDA 驱动版本型号为 5.5。我们使用一个两层模型(表 1)来进行有限差分数值模拟<sup>[3]</sup>。数值模拟的参数如表 2 所示。我们记录了一个 48 道的瑞雷波地震记录[图 3(a)]。为了验证数值模拟结果的正确性,将瑞雷波地震记录的基阶和高阶的频散能量和理论相速度进行对比,发现两者基本重合[图 3(b)]。这一结果验证了数值模拟结果的正确性。此外,我们也对比了串行(CPU)情况的瑞雷波数值模拟的结果和并行(GPU+CPU)情况下的数值模拟结果[图 3(c)],从图中可以看到,并行计算并没有改变数值模拟的数值。串行计算对于上述模型总的运行时间为 9 500ms,而并行计算对于上述模型总的运行时间为 96ms,速度提高了将近 100 倍。由此可见,基于 CPU 和 GPU 的瑞雷波有限差分并行计算是可行的。

表 1 两层模型参数

|   | $V_P$ (m/s) | $V_S$ (m/s) | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $h$ (m)  |
|---|-------------|-------------|-----------------------------|----------|
| 1 | 600         | 150         | 1.82                        | 10       |
| 2 | 1000        | 450         | 2.09                        | $\infty$ |

表 2 数值模拟参数如下

|        |                                              |
|--------|----------------------------------------------|
| 物理模型大小 | $X=100\text{m}, Z=30\text{m}$                |
| 网格大小   | $\Delta x=0.1\text{m}, \Delta z=0.1\text{m}$ |
| 记录长度   | 700ms                                        |
| 时间步长   | $\Delta t=0.025\text{ms}$                    |
| 子波类型   | 主频为 30Hz, 延迟为 40ms 的雷克子波                     |

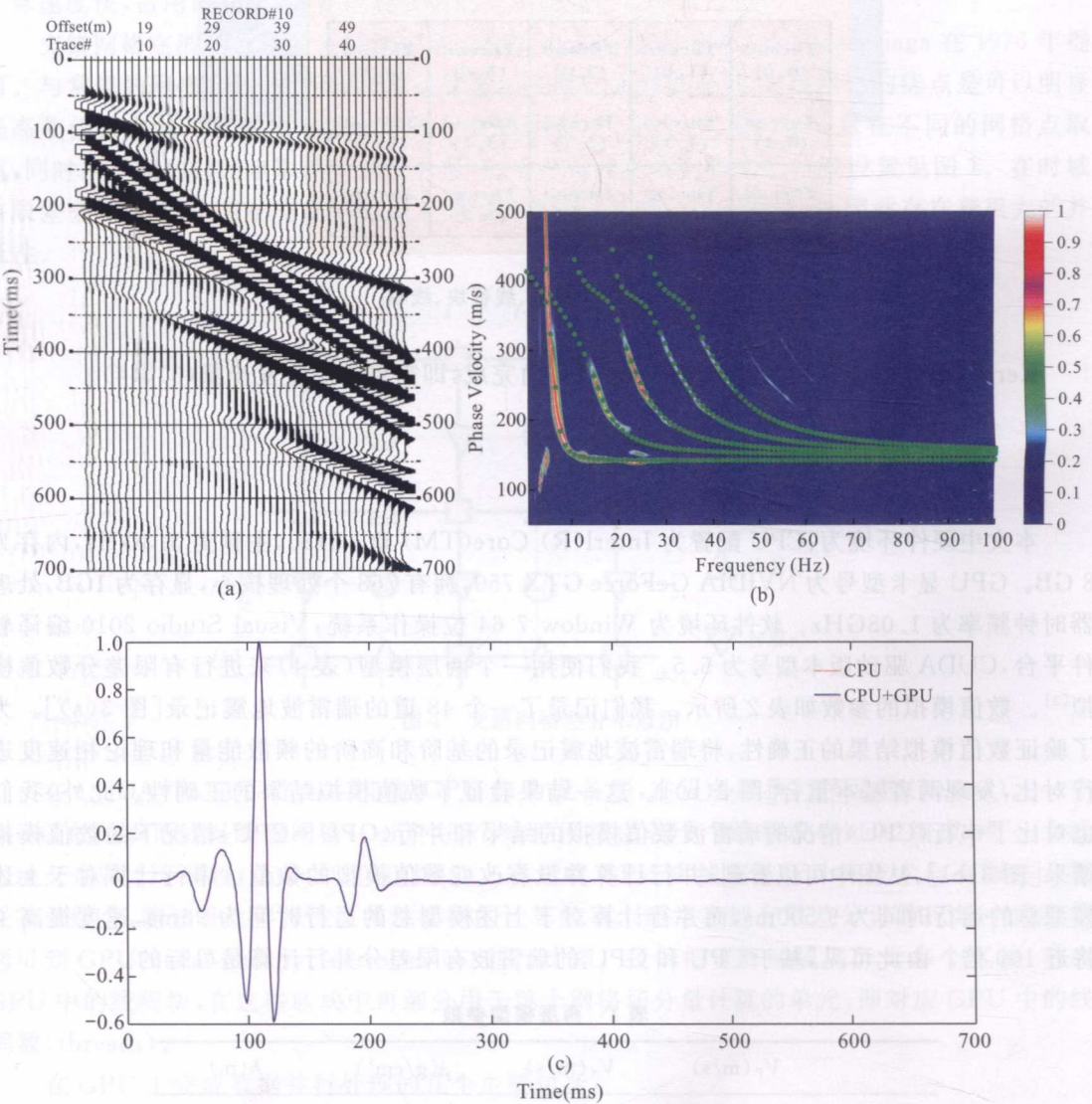


图 3 (a)基于 GPU 和 CPU 的两层模型数值模拟结果;(b)利用高分辨率线性拉东变换<sup>[4]</sup>提取得到的频散能量图(绿色圆点表示计算得到的理论相速度);(c)串行和并行两种计算方法得到的瑞雷波地震记录(蓝线和红线分别表示串行和并行算法得到的结果)

## 4 总 结

瑞雷波有限差分模拟各个网格点之间是相互独立的,因此,基于 CPU 和 GPU 的异构的编程可以加速瑞雷波有限差分数值模拟。将有限差分中占主要计算量的网格差分计算转移到 GPU 上执行,可以利用 GPU 超强的并行计算的能力,来提高有限差分数值模拟的效率。在 CPU 和 GPU 异构环境下,需要我们合理选择线程网格中线程块(block)的维度与规模,可以高效地利用 GPU 的性能,加快数据的计算。

资金资助:本研究由国家自然科学基金项目(No. 41274142)资助。

### 参考文献:

[1] Xia J, Miller R D, Park C B. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave [J]. Geophysics, 1999, 64: 691 - 700.

[2] 董良国, 马在田, 曹景忠. 一阶弹性波方程交错网格高阶差分解法稳定性研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(6): 856 - 864.

[3] Zeng C, Xia J, Miller R D, et al. Application of the multi-axial perfectly matched layer(M-PML) to near-surface seismic modeling with Rayleigh waves[J]. Geophysics, 2011, 76(3): T43 - T52.

[4] Luo Y, Xia J, Miller R D, et al. Rayleigh-wave dispersive energy imaging by high-resolution linear Radon transform[J]. Pure and Applied Geophysics, 2008, 165(5): 903 - 922.

## • 主动源面波方法(二) •

## 瑞雷波波形削平对提取频散曲线的影响

高玲利\* 夏江海 潘雨迪

地球内部成像与探测实验室 中国地质大学(武汉)地空学院 湖北武汉 430074

**摘 要:**瑞雷波多道分析方法(MASW)通过反演瑞雷波相速度来确定浅地表剪切波速度。在过去的 20 年中,由于该方法具有非侵入性、无损、高效及价格低的特点,受到了浅地表地球物理和地质工程学界的重视,被视为未来最有希望的技术之一。在瑞雷波勘探过程中,通过设定的野外排列获取瑞雷波数据时,靠近震源的地震道在数据输出时由于仪器的动态范围限制,导致瑞雷波波形被削平,出现类似方波的地震波形。研究发现,削平的瑞雷波记录在提取频散曲线时会对低频段和高频段的频散能量产生扰动。数值模拟实验发现,不同程度的波形削平会影响扰动的程度。因此,当野外采集的瑞雷波地震数据中含有被削平的瑞雷波数据时,需要剔除这部分地震道集,然后提取频散能量。野外实例为该研究提供了支撑。

**关键词:**瑞雷波勘探 方波 频散能量 扰动

## 1 引言

瑞雷波是一种沿地球与空气的分界面、地球与水层分界面等自由界面进行传播的面波,它是纵波( $P$ 波)和横波( $S_v$ 波)的干涉波。不同波长的瑞雷波是浅地表不同深度地质信息的响应。它具有无损、高效、非侵入性以及层状介质频散的特点,使其被广泛地用于地质工程勘察和无损检测中。通过反演瑞雷波相速度可以获得较准确的浅地表剪切波速度<sup>[1]</sup>。

在瑞雷波勘探过程中,长柄大锤、起重器、振动器都可用作无损震源,用垂向检波器进行数据采集。瑞雷波野外数据采集时,将震源和第一个检波器之间的距离定义为最小偏移距。很多实地实验发现,当通过使用较小的铁锤敲击置于地表面的平板来激发垂向震源时,震源和第一道之间的距离一般选择较短。在近炮检距位置,当输出的地震数据超过仪器的动态范围时,会出现瑞雷波波峰(谷)被削的现象(图 1),造成数据的缺失。我们将这种波峰、波谷被削的现象称作削顶、削底。在以往的数据采集中,并没有对这类被削平的瑞雷波记录进行研究和讨论。本文主要针对削平后瑞雷波直接提取频散能量时会产生影响进行讨论和研究。通过数值模拟研究我们发现,在面波数据采集过程中,被削平的面波数据在提取频散能量时会影响低频和高频带的能量分布,从而影响频散相速度的拾取。野外勘探实例也证明了在提取频散能

\* E-mail: gaoll1990@126.com

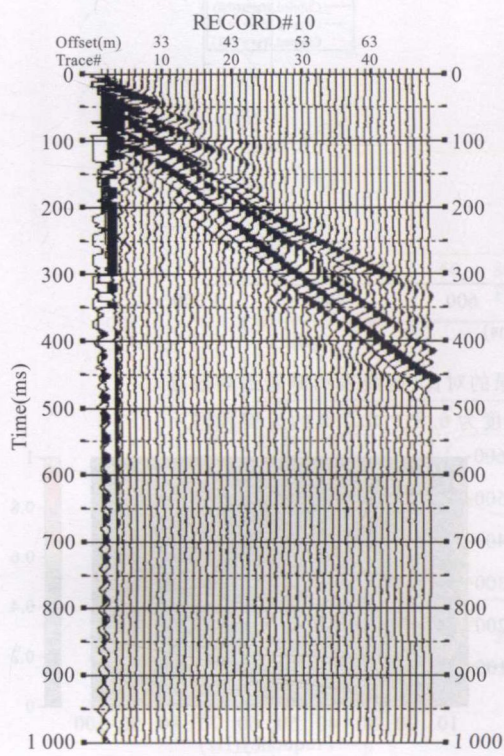


图 1 南通野外数据

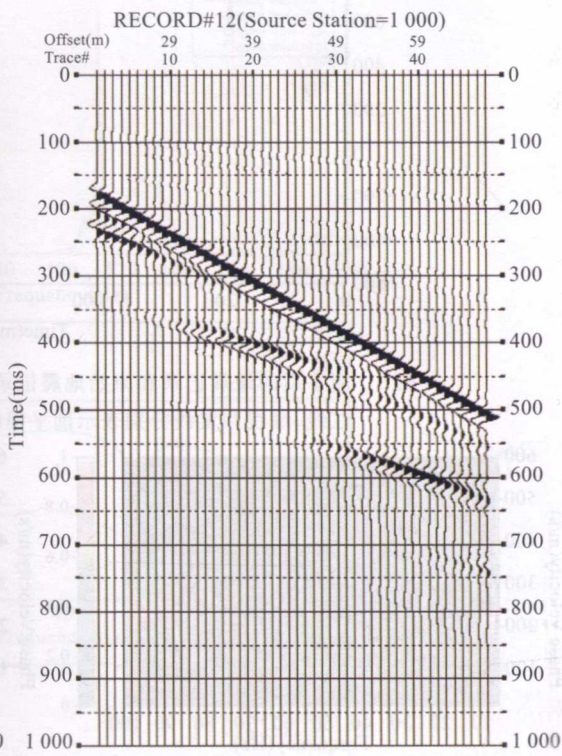


图 2 两层模型数值模拟记录

量时,应该对地震道进行适当的筛选来获得更加可靠的频散能量图。

## 2 数值模拟

为了便于分析,我们利用一个两层模型(表 1)讨论瑞雷波波峰(谷)不同程度削平对频散能量造成的影响。我们采用基于 MPML 的有限差分方法获得一个 48 道地震记录<sup>[2]</sup>。对该地震记录(图 2),我们将前 5 道地震记录设置了三种不同程度的削平来模拟仪器输出的动态范围限制(图 3)。当瑞雷波削平较多时(红线,图 3),频散能量图中的低频段(5~15 Hz)[图 4 (a)]和理论相速度拟合程度不高,同时高频范围处,能量分布所受影响出现较大的扰动。随着削平的程度减小(绿线、黄线,图 3),频散能量图中低频段(5~15 Hz)[图 4 (b)和(c)]受到的影响越来越小,高频段的能量扰动也消失了,和理论相速度值拟合较好。

表 1 两层模型参数

|   | $V_P$ (m/s) | $V_S$ (m/s) | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $h$ (m)  |
|---|-------------|-------------|-----------------------------|----------|
| 1 | 480         | 150         | 1.82                        | 10       |
| 2 | 900         | 450         | 2.09                        | $\infty$ |

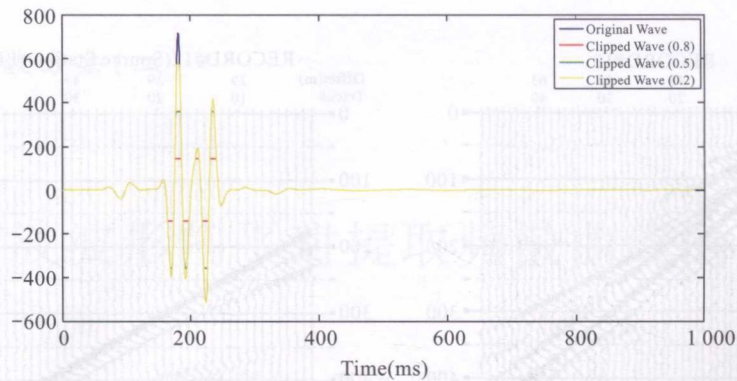


图 3 削平后的地震记录和原始地震记录的对比(蓝线表示原始地震数据, 红线、绿线和黄线分别表示削平程度为 0.8、0.5、0.2 的地震数据)

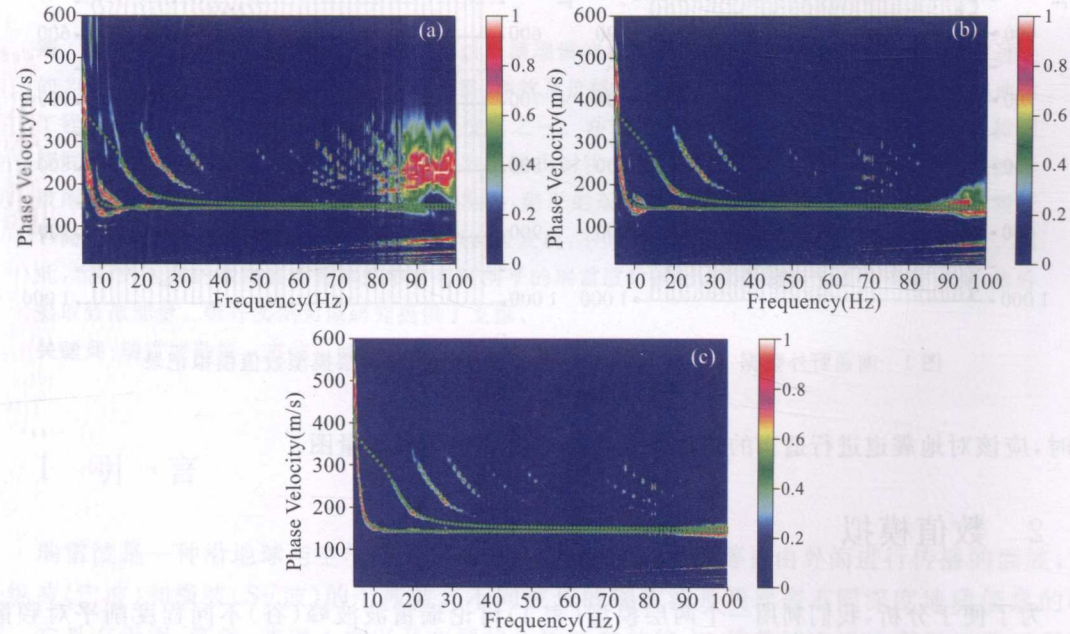


图 4 (a~c)分别对应不同削平程度(图 3)的瑞雷波地震记录所提取的频散能量图 (绿色圆点表示基阶和一阶高阶的理论相速度值)

地震波波形的变化都可以认为是对原始地震记录进行了滤波。如果不对地震数据做任何变化,则滤波的频谱值(削平后的地震记录的频谱/原始地震记录的频谱)在整个频带范围均为 1(蓝线)[图 5(a)和(b)]。以第一道为例,我们绘制不同削平程度瑞雷波记录所对应的滤波的频谱(红线、绿线和黄色)[图 5(a)]。在图 5(a)中,我们可以明显地看到高频部分( $>100\text{Hz}$ )出现了不同程度振荡,且数值远大于 1,表明削平后的瑞雷波记录的频谱相对于原始记录应该增大。红色点线框中(B)[图 5(c)]的振荡正好印证了这点。图 5(b)显示了  $10\sim70\text{Hz}$  频带范围内的滤波的频谱,其数值均小于 1,因此被削平的瑞雷波记录的频谱应小于原始地震记录的频谱(A)[图 5(c)]。数值越接近 1(黄线)[图 5(b)],则削平的瑞雷波的频谱越接近原始地震记录的频谱[图 5(c)]。

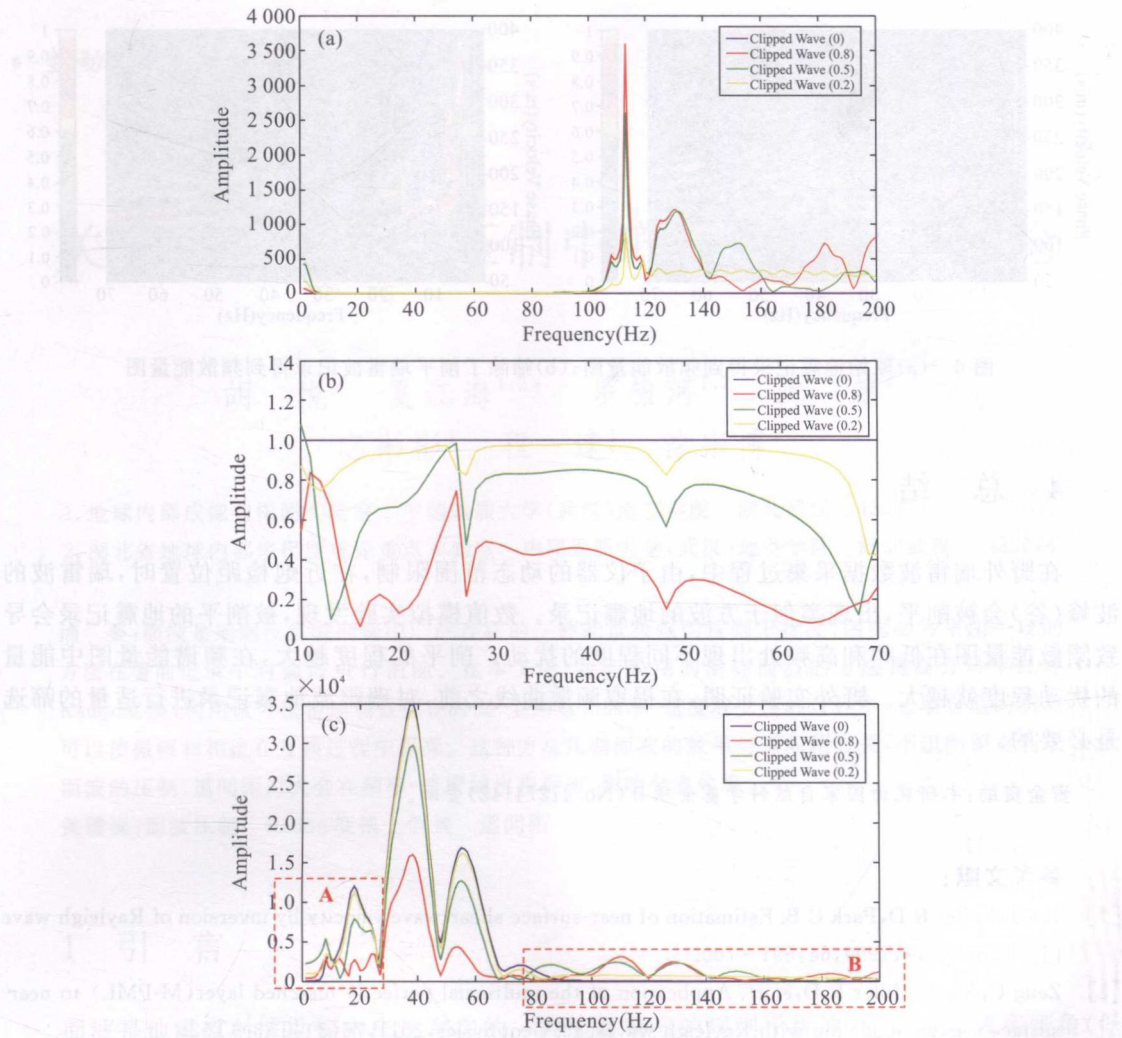


图 5 (a)滤波的频谱(频谱范围为 0~200Hz);(b)表示滤波的频谱(频带范围为 10~70Hz);(c)表示不同削平程度的瑞雷波记录的频谱和原始地震记录的频谱(红色点线框 A 表示低频部分,红色点线框 B 表示高频部分,蓝色线表示削平幅度为 0,即原始数据,红色、绿色和黄色分别表示削平幅度为 0.8、0.5 和 0.2)

3 实 例

如图 1 所示为 2014 年 12 月在南通地区所采集的 48 道瑞雷波地震记录。在近炮检距位置,我们可以清楚地看到被削平的瑞雷波。我们直接对该地震记录用高分辨率线性拉东变换提取频散能量[图 6(a)],我们可以看到,瑞雷波基阶的相速度拾取频带范围大约 10~50Hz,高频带信息较为复杂,低频带信息缺失。图 6(b)是筛除了含有被削平的瑞雷波数据的地震道集(前 12 道)以后提取的频散能量图。从图中可以看到,瑞雷波基阶的低频和高温处的频散曲线更加完整连贯,有效的可拾取的频散范围大约为 5~70Hz。

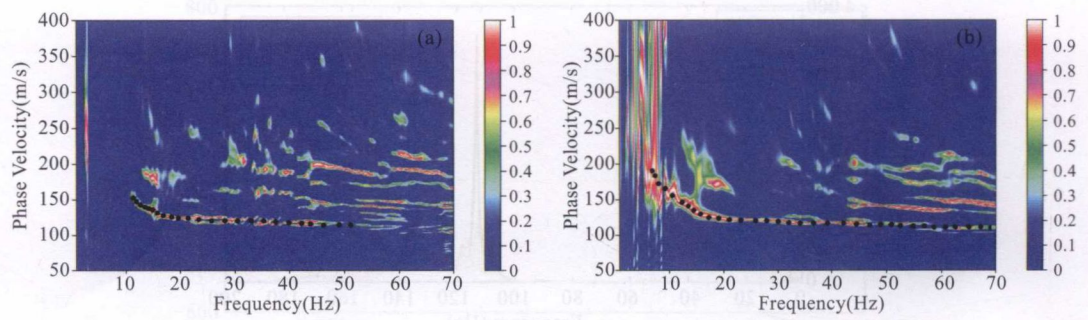


图6 (a)原始地震记录得到频散能量图;(b)筛选了削平瑞雷波记录得到频散能量图

4 总 结

在野外瑞雷波数据采集过程中,由于仪器的动态范围限制,在近炮检距位置时,瑞雷波的波峰(谷)会被削平,出现类似于方波的地震记录。数值模拟实验发现,被削平的地震记录会导致频散能量图在低频和高频处出现不同程度的扰动。削平的程度越大,在频谱能量图中能量的扰动程度就越大。野外实验证明,在提取频散曲线之前,对瑞雷波地震记录进行适量的筛选是必要的。

资金资助:本研究由国家自然科学基金项目(No. 41274142)资助。

参考文献:

[1] Xia J, Miller R D, Park C B. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave [J]. Geophysics, 1999, 64: 691 - 700.

[2] Zeng C, Xia J, Miller R D, et al. Application of the multiaxial perfectly matched layer(M-PML) to near-surface seismic modeling with Rayleigh waves[J]. Geophysics, 2011, 76(3): T43 - T52.