

Comparative Study on Extraction Accuracy of Rayleigh Wave Dispersion Curves in Different Conversion Domains

Haifu Sun¹ Zhansheng Zhu² Dong Zhao³

1. Hengda Century (Beijing) Geophysics Technology Co., Ltd., Beijing, 100020, China
2. Beijing Huan'an Engineering Inspection & Test Co., Ltd, Beijing, 100082, China
3. Geogiga Technology Corp, Calgary, Canada

Abstract

The present dispersive curve extraction is mainly done in F-K, F-P, F-V domains in the active surface wave prospecting. The basic computing principles of F-K, F-P and F-V domains firstly are discussed. Then the forward modeling computation using on shot gathering with 24channels and the dispersive curves from low frequency to high frequency in F-K, F-P and F-V domains is done too. The conclusion is provided that the dispersive curve picking accuracy is higher in the F-V domain compared with F-K and F-P domains. The conclusion is again verified by the real field active surface wave data by picking the dispersive curves in F-K, F-P and F-V domains. That is because that the tinny changed of K and P will cause the changes of V very much.

Keywords

Rayleigh wave; frequency-wavenumber domain; frequency-velocity domain; frequency-velocity

不同转换域瑞雷面波频散曲线提取精度对比研究

孙海福¹ 朱占升² 赵东³

1. 恒达新创(北京)地球物理技术有限公司, 中国·北京 100020
2. 北京环安工程检测有限责任公司, 中国·北京 100082
3. 加拿大骄佳技术公司, 加拿大·卡尔加里

摘要

主动源面波勘探频散曲线的提取目前主要在F-K、F-P和F-V域内拾取,文章从F-K、F-P和F-V域变换计算公式推导出发,通过对正演的单炮24道地震记录在F-K、F-P和F-V域变换所得的频散谱及手动拾取从高频到低频的频散曲线的对比分析,得出在F-V域拾取频散曲线的精度相对较高的结论,然后使用真实的主动源面波数据在F-K、F-P、F-V域做频散谱计算及手动拾取频散曲线,验证了在F-V域拾取频散曲线的精度相对较高的结论。因为在频率-波数域和频率-慢度域低频段的波数和慢度的微小变化都会造成速度的剧烈变动,造成拾取频散曲线精度不高的问题。

关键词

瑞雷面波; 频率-波数域; 频率-慢度域; 频率-速度域

1 引言

主动源面波勘探分为稳态法面波勘探和瞬态法面波勘探。传统的主动源面波勘探是通过相邻两道的频散分析来获取相速度的^{[1][3]}。面波包含两种,一种是瑞雷波,由英国学者瑞雷(Rayleigh)在1885年发现,瑞雷波是一种存在于半无限空间介质与空气自由界面的一种椭圆极化的体波,在多层介质或非均匀介质中具有频散现象;另一种是拉夫波(Love Wave),1911年由Augustus Edward Hough Love(A.E.H.Love)从数学上证明了拉夫波的存在理论,拉夫波是在弹性半空间

上覆盖一有限厚度的介质层的情况下存在的SH型面波^[2]。目前工程地球物理勘探领域^[4]及地震台阵面波研究^[5]主要集中在瑞雷波频散曲线提取和反演精度研究上。而拉夫波在观测采集、波动方程理论及数据分析上存在一些困难,目前国际仍然处于研究阶段^[6]。

通过对主动源面波在F-K域、F-P域与F-V域频散曲线提取原理计算公式的推导,从原理上得出在F-V域拾取频散曲线的精度要高于在F-K域和F-P域拾取频散曲线的精度,又通过对人工模拟的地震数据的频散曲线拾取及野外实际采集数据在F-K域、F-P域与F-V域频散曲线的提取对比,

论证了在 F-V 域拾取频散曲线的精度要高于在 F-K 域和 F-P 域拾取频散曲线精度的结论。

2 基本理论

2.1 瞬态瑞雷波勘探

瞬态面波法是使用锤击或炸药等脉冲震源瞬时激发地震脉冲波，在地面上沿波的传播方向，以一定的道间距 Δx 设置 $N+1$ 个检波器，就可以检测到瑞雷波在 $N\Delta x$ 长度范围内的传播过程。瑞雷波在非均匀介质传播过程中会出现频散现象，利用检波器的道间时差或相位差和道间距，就可以计算出瑞雷波在地表传播方向以下不同深度对应的瑞雷波速度。在检波器的测量区域内计算出不同频率的瑞雷波对应的瑞雷波速度，就可以得到频率 - 速度域频散曲线，目前提取频散曲线的常用方法是在 F-K (频率 - 波数域)、F-P (频率 - 慢度域) 和 F-V (频率 - 速度域)。理论分析表明，瑞雷波的大部分能量损失在 $1/2\lambda$ 的深度内，这一事实说明，瑞雷波某一波长的波速主要与深度小于 $1/2\lambda$ 的地层物性相关。

2.2 F-K (频率 - 波数域) 变换

F-K (频率 - 波数域转换) 法是对原始单炮记录 $a(x, t)$ 在偏移距方向上进行波数变换，在时间记录轴上进行频率域变换处理，实际上是对单炮记录 $a(x, t)$ 进行两个方向的一维傅里叶变换，单炮记录 $a(x, t)$ 的二维傅里叶变换如下：

$$A(x, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(x, t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

经过公式 (1) 的变换，单炮记录 $a(x, t)$ 就从时间域变换到频率域。然后再对 $A(x, f)$ 对偏移距 x 再进行一次傅里叶变换，变换后如下：

$$A(k, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(x, f) e^{-i2\pi kx} dx \quad (2)$$

单炮记录 $a(x, t)$ 经过二维傅里叶变换之后就转换成频率 - 波数域 (F-K)，其中 f 和 k 分别代表频率和波数，频率和波数之间存在如下关系式：

$$k = \frac{f}{v} \quad (3)$$

其中， v 表示相速度，通过公式 (3) 把频率 - 波数域以及空间插值的方法转换成瑞雷波的频率 - 速度域的频散能量谱，进而通过人机交互拾取频率 - 速度域的频散能量谱的主峰值进行拾取，从而可以从浅层瞬态瑞雷波勘探中提取出

频散曲线。

2.3 F-P (频率 - 慢度域) 变换

频率 - 速度域变换实际上是对单炮各阶模态面波进行 τ - p 变换，该方法是将空间时间域单炮记录 $a(x, t)$ 按照不同斜率 p 和截距时间 τ 作切线，然后倾斜叠加投影到 τ - p 域中按照能量峰值提取频散曲线。

$$M(\tau, p) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(x, \tau + px) dx \quad (4)$$

其中， p 为相速度 v 的倒数称为慢度。上式表示 τ - p 为沿着直线 $t = \tau + px$ 将信号的振幅进行积分，这条直线上的所有能量叠加到 τ - p 域的某点 (τ_0, p_0) 上。实际野外记录的数据无论在时间域还是空间域都是离散的，故对单炮面波记录做 τ - p 变换时，需要通过离散 τ - p 变换实现。频率域的离散 τ - p 反变换可表示为：

$$a(x_j, f) = \sum_{k=1}^M m(p_k, f) \exp(2\pi i f p_k x_j) \quad (5)$$

分别对每个频率 f 单独处理，则上式可表示成以下形式：

$$a(f) = Q(f)m(f) \quad (6)$$

上式中， a 为一个 N 维向量； m 为一个 M 维向量，包含了频率 f 的幅值信息；公式如下：

$$Q = \begin{bmatrix} e^{i2\pi f p_1 x_1} \dots e^{i2\pi f p_M x_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{i2\pi f p_1 x_N} \dots e^{i2\pi f p_M x_N} \end{bmatrix} \quad (7)$$

系数矩阵 Q 求解矩阵过程中采用最小二乘法求解目标函数。对瞬态瑞雷波要研究的频段范围内对每个频率分别计算 m 就可以得到整个剖面的 f - p 剖面，将谱上能量连续的极值点连线就可以得到连续的频散曲线。

2.4 F-V (频率 - 速度域) 变换

频率 - 速度域变换实际上是在就频率 - 慢度域变换完成之后，对慢度取倒数，然后在频率 - 速度域能量谱上把能量连续的极值点连接起来获得连续的频散曲线。

3 正演模拟

为了证明在 F-V 域拾取的频散曲线较为合适，通过对

24道单炮模拟记录(如图1,道间距5米,偏移距5米)做F-K、F-P、F-V域变换,并在F-K域、F-P域、F-V域(如图2)拾取频散曲线,正演所用的有限差分算法利用交错网格的差分方式,并使用PML边界条件^[7]。

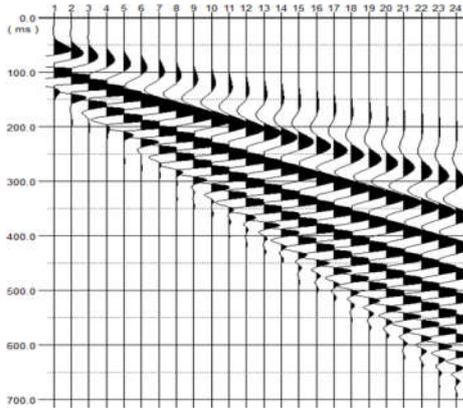


图1 单炮24道正演计算面波记录图

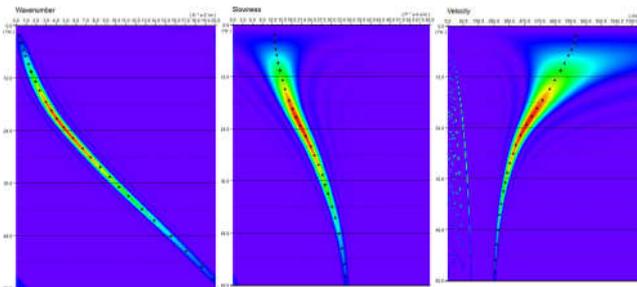


图2 F-K、F-P、F-V域提取频散曲线

由图2频散曲线提取我们可以发现以下的特点:

(1) 在F-K域、F-P域、F-V域24~60Hz高频段能量相对比较集中,随着频率的降低,能量逐渐发散,在这个频段范围内,拾取频散曲线的分辨率相差不大;

(2) 在F-K域、F-P域、F-V域小于24Hz频带范围内,相比F-K域和F-P域而言,F-V域频散谱的低频段能量相对发散的较快,在这个频段范围内,F-V域频散曲线拾取的分辨率似乎是比较低,但实际上,这种直觉是错误的,那是因为K、P和V之间的关系是非线性的关系(如公式8和9),当P的数值逐渐趋于零时,V的数值近似于无穷大,在低频区域P的微小变化会造成速度V的强烈抖动,如图3所示。

$$V = \frac{1}{P} \Rightarrow dV = -\frac{1}{P^2} dP \quad (8)$$

$$V = \frac{f}{k} \Rightarrow dV = -\frac{f}{k^2} dk \quad (9)$$

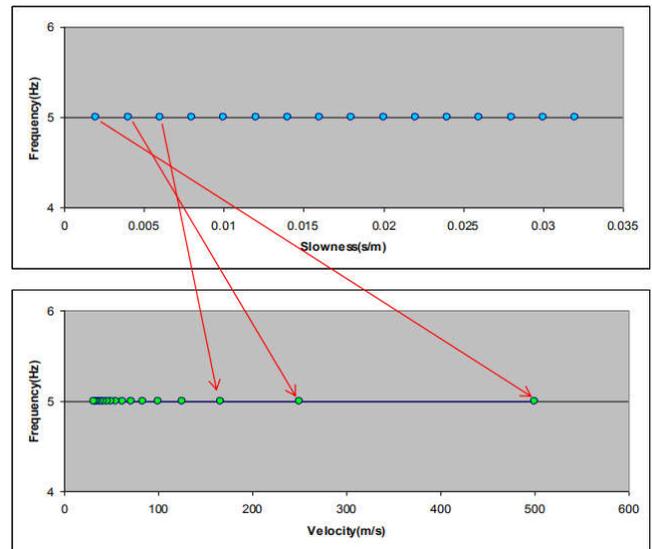


图3 慢度P与速度V变化对应直观图

4 野外数据分析

图4是使用加拿大GEOGIGA软件对同一个单炮24道地震记录(5米道间距,5米偏移距,锤击震源)经F-K域、F-P域和F-V域计算转换所得的频散谱及手动拾取的频散曲线,在拾取频散曲线时,20~48Hz的频散谱能量在F-K域、F-P域、F-V域相对都比较集中,而在小于20Hz低频区域,F-V域相对于F-K域和F-P域而言,频散谱能量比较发散,分辨率看似较低,但事实是在F-V域拾取频散曲线精确度和可靠度都相对较高。

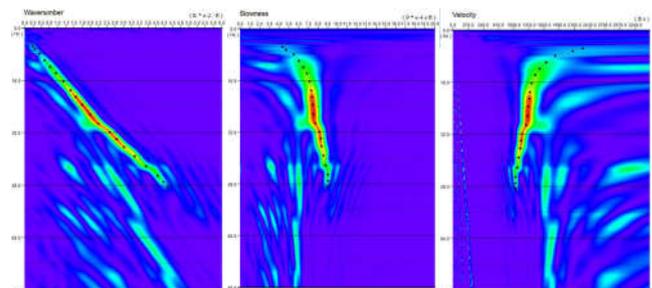


图4 F-K、F-P、F-V域频散曲线拾取

5 结语

在对单炮地震记录中的面波记录部分做频散计算的时候,要把地震记录转换到F-V域拾取要相对准确,因为在F-K和F-P域,K和P的微小变换都会使得速度产生剧烈的变动,由于人工拾取频散曲线存在手工上的误差,不同人在F-K或F-P域低频段拾取的频散曲线的微小变动都会对低频段速度产生

很大变化,所以在低频段拾取频散曲线要在 $F-V$ 域拾取要准确些。

参考文献

- [1] 宋先海等编著.《瑞雷波勘探理论》.北京:中国水利水电出版社,2010.
- [2] Dziewonski,AM.,and Hales,A.L.,1972,Numerical analysis of dispersed waves,in methods in computational physica,v.11,p.39-85,New York,Academic Press.
- [3] 许新刚,岳建华,李娟娟,等.2016.面波勘查技术及在滑坡地质调查中的应用研究.地球物理学进展,31(3):1367-1372.
- [4] 徐佩芬,李传金,凌甦群等.利用微动勘察方法探测煤矿陷落柱.地球物理学报,2009,52(7):1923-1930.
- [5] 徐佩芬,李世豪,凌甦群等.利用 SPAC 法估算地壳 S 波速度结构.地球物理学报,2013,56(11):3846-3854.
- [6] 夏江海,高玲利,潘雨迪等.2015.高频面波方法的若干新进展.地球物理学报,58(8):2591-2605.
- [7] 王祥春,据长辉,王伟等.2015.基于起伏地形的瑞利面波有限差分数值模拟.东华理工大学学报(自然科学版),38(3):1674-3504.