

文章编号: 1001- 4179(2009) 11- 0057- 03

频率域速度谱中提取面波的多模频散曲线方法

秦 臻^{1, 2} 姚 姚² 张 才¹ 宋建勇¹

(1 中国石油勘探开发研究院 物探所, 北京 100083; 2 中国地质大学(武汉) 地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 从面波记录中提取出多模频散曲线更加有利于分析和解释瑞利面波的频散特征。常用方法有 $F \sim K$ 分析法 和 $\tau \sim p$ 变换法, 前者提取精度较低而 后者实现过程复杂, 另外两者的结果还受频率带宽影响。针对上述 两种方法存在的不足, 提出了一种在频率域速度谱中提取面波多模频散曲线的方法。结果表明: 该方法最直 接、提取的精度高、分析的频率范围更宽。

关 键 词: 面波; 多模; 特征; 频散曲线

中图分类号: P631. 3 文献标识码: A

1 概 述

传统的面波频散曲线提取方法主要是利用傅立叶变换, 得到两信号的自功率谱和互功率谱、传递函数和相干函数, 由互功率谱可以得到两信号由于波传播过程中的时间滞后所产生的相位差, 进而求得实测的频散曲线。多层介质中的面波频散特征存在着多个模式, 该方法求得的频散曲线实际上是多个模式面波共同作用的结果。对于横波速度随地层递增的剖面, 在所有的模式中基阶模式能量占优势, 此时可认为提取的频散特征为基阶模式的频散特征。对于不规则的速度剖面, 提取的频散特征将不再与理论的频散特征相吻合。另外, 两道记录互相关法还存在着相位跳跃现象。这些都影响了频散曲线的正确提取, 使用这样的结果进行解释将得出错误信息。因此, 提取和分析多个模式的面波频散特征显得非常重要。

从多道面波记录中可以提取和分析瑞雷面波多个模式的频散特征。1996年, 刘云祯等人提出通过多道分析选择最佳观测时窗, 利用 $F \sim K$ 变换提取瑞雷波频散曲线^[1]。2000年, 陈淑珍、刘怀林发表了基于 $\tau \sim p$ 变换的频散曲线及其算法实现^[2]。2003年, 宋先海等人对 $\tau \sim p$ 变换做了改进^[3]。2004年, 王运生等提出了一种面波计算新方法, 将传统的两道互相关方法推广到多道^[4]。2005年张碧星、鲁来玉使用频率一波数法分析了瑞雷面波多个模式的频散曲线^[5]。

在上面多模式频散曲线分析方法中, $\tau \sim p$ 变换分析法提取频散曲线过程比较复杂, $F \sim K$ 法拾取精度比较低。另外, 由于地震子波的带宽限制, 上述两种方法提取的相速度曲线频率范围都不高, 表现为低频成份和高频成份不能有效地被提取出来。

针对上述两种方法存在的不足, 本文提出一种在频率域速度谱中实现的面波多模频散曲线提取方法, 并充分利用快速离

散傅立叶变换技术来提高计算效率, 同时使用扩频技术来提高待分析的频率范围, 最后基于两层介质模型, 对几种提取多模频散曲线的方法做了对比分析。

2 算法实现

2.1 基本原理

对于时空域的一个共炮点面波记录, 其 $\tau \sim p$ 变换为:

$$m(\tau, p) = \int u(x, t = px + \tau) dx \quad (1)$$

其中 $u(x, t)$ 为时空域的输入数据; p 为慢度(或射线参数); τ 为截距时间; x 为炮检距; $m(\tau, p)$ 为 $\tau \sim p$ 域的输出数据。将式(1)的结果对 τ 做傅立叶变换, 就可以得到频率慢度域数据, 然后从能量团上拾取频率慢度曲线, 最后利用慢度和速度的倒数关系, 就可以进一步得到面波的频率相速曲线。这就是 $\tau \sim p$ 变换分析法。离散实现的时候, 由于慢度、截距时间、炮检距以及时间 4 个变量坐标都需要离散化, 导致沿炮检距方向求和的时候对应的时间坐标一般不会落在离散网格点上, 这样就需要对原始的地震数据进行插值。插值不可避免地会引入误差。另外慢度变量和速度变量进行倒数的转换也会导致精度降低。

也可以利用二维傅立叶变换将原始数据变换到频率一波数域, 然后在能量团上拾取斜率曲线并进行转换, 就可以得到频率域的相速度曲线。这就是 $F \sim K$ 分析法。 $F \sim K$ 分析法由于使用了快速二维傅立叶变换, 计算效率非常高。但是由于利用了斜率关系间接地拾取频散曲线, 对拾取精度有影响。下面我们将提出一种新的方法。

如果对式(1)两边同时做一维傅立叶变换, 有:

$$M(f, p) = \int m(\tau, p) \exp(-i2\pi f\tau) d\tau \quad (2)$$

收稿日期: 2009- 01- 12

基金项目: 国家发改委重大产业技术开发专项“复杂构造三维地震逆散射成像技术开发”(发改办高技[2005]2372号)

作者简介: 秦 臻, 男, 中国石油勘探开发研究院物探所, 工程师; 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 博士。

利用速度和慢度的倒数关系, 上式可以进一步写作:

$$M(f, v) = \int (f, x) \exp(-\frac{i2\pi fx}{v}) dx \quad (3)$$

式(3)为本文方法面波速度谱计算公式。可以发现, 该方法最直接, 速度曲线本身就对应着面波的频率-相速度曲线。在 $\tau \sim p$ 变换分析法中, 慢度变量为等间距采样, 进行倒数转换后得出的速度变量必然是不等间距采样, 而倒数对误差是比较敏感的; 在 $F \sim K$ 分析法中, 斜率对应着慢度或速度变量, 由于波数和频率变量为等间距采样, 其斜率必然为不等间距采样。因此, 传统的方法离散实现的时候, 得到的是一种不等间距的相速度曲线, 而新方法直接对速度变量等间距采样, 得到的是一种等间距的速度曲线。

2.2 快速离散实现

对式(3)进行数值离散, 有:

$$M(n_f \Delta f, n_v \Delta v) = \Delta x \sum_{n_x=x_1}^{x_{nx}} U(n_f \Delta f, n_x \Delta x) \exp(-i2\pi \frac{n_f n_x}{n_v} \frac{\Delta f \Delta x}{\Delta v}) \quad (4)$$

其中 Δf 、 Δv 和 Δx 分别为频率变量、速度变量和炮检距变量的采样间隔, n_v 、 n_x 和 n_f 分别为速度变量、炮检距变量和频率变量离散总采样点数。实际计算时, 可以先固定速度变量。令 $\alpha = \frac{\pi \Delta x \Delta f}{n_v \Delta v}$, 省略掉采样间隔和常量, 重写式(4)有:

$$M(n_f) = \Delta x \sum_{n_x=x_1}^{x_{nx}} U(n_f, n_x) \exp(-i\alpha \cdot 2n_f n_x) \quad (5)$$

由于 $-2n_f n_x = (n_f - n_x)^2 - n_f^2 - n_x^2$, 代入到式(5)并整理, 有:

$$M(n_f) = V(n_f) \sum_{n_x=x_1}^{x_{nx}} W(n_f, n_x) R(n_x) \quad (6)$$

其中 $R(n_x) = \exp(-i\alpha n_x^2)$; $V(n_f) = \Delta x \exp(-i\alpha n_f^2)$; $W(n_f, n_x) = U(n_f, n_x) \exp[i\alpha(n_f - n_x)^2]$ 。

式(6)右端的求和实际上对应着卷积运算, 因此可以通过离散傅立叶变换技术来快速计算卷积。

结合式(5)和式(6)进行分析, 可以得出计算完所有的频点所需要复乘次数约为:

$$3 \times (n_x + n_f - 1) \lg_2(n_x + n_f - 1) + n_f$$

一般来说, 这个值要比直接计算式(4)所需要的复乘次数 $n_f \times n_x$ 要小得多。例如当 $n_f = 500$, $n_x = 500$, 后者计算量大约为前者计算量的 8 倍。该快速离散实现方案在计算方面的优势得到了充分体现。

2.3 扩频处理

由于地震子波具有一定的带宽, 直接实现式(3)的所述方法, 获取的频率-相速度剖面频带将比较窄。如果已知地震子波, 最好的方法就是通过反褶积来提高面波记录频谱宽度。实际上, 面波记录上的子波是时空变化的, 很难得到一个稳定的子波, 而且子波的提取本身就比较复杂。由于最终的目的是提取频散曲线, 只要能提高频带的宽度就可。因此, 可以使用简单的扩频方法, 来提高低频成份和高频成份的能量。

对式(3)的频率空间域结果按频率道进行道均衡(或正则规范化), 有:

$$M(f, v) = \frac{\int U(f, x)}{\|U(f, x)\|_p} \exp(-\frac{i2\pi fx}{v}) dx \quad (7)$$

$\|\cdot\|_p$ 为 L_p 范数。

3 实例分析

为了说明本文方法在提取面波频散曲线方面的优势, 设计了一个两层介质模型, 具体参数见表 1, 然后使用高精度有限差分对该模型进行了全波场正演模拟, 所得的面波记录共有 263 道, 采样长度为 0.63 s(见图 1)。可以看出, 该面波记录上的频散现象非常明显, 同相轴非常复杂, 不利于分析与解释, 因此得首先从面波记录中提取出频散曲线。

表 1 两层水平层状介质参数

层号	层厚 /m	$V_p /(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_s /(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho /(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
第 1 层	10	800	200	2 0
第 2 层	∞	1200	400	2 0

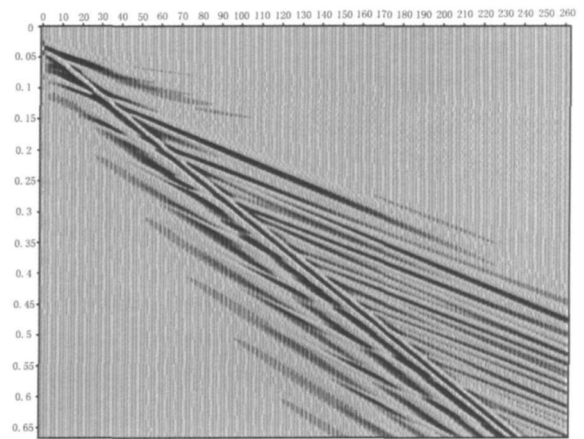


图 1 两层介质模型的面波记录

对图 1 中的地震记录, 使用常规的 $F \sim K$ 分析法提取了频散曲线。为了得到更好的显示和方便提取, 对原始的地震记录沿时间轴和炮检距方向补充了大量的零值。在 $F \sim K$ 谱(见图 2)上拾取频散曲线时, 面波多个模式频散特征的能量团非常狭窄, 面波主要集中在一个三角形的区域里, 不利于提取。同时, 频散特征分辨率比较低, 只能识别 5 条频散曲线; 频带比较有限, 有效最高频率约为 60 Hz。图 3 是拾取频散曲线与理论的频散曲线的对比, 离散的小黑点为提取的频散曲线点, 实心的连续曲线为理论的频散曲线。总体上两者比较一致, 但是拾取的频散曲线有跳动现象, 拾取的点分布不均匀, 拾取的最高频率大约在 60 Hz 附近。

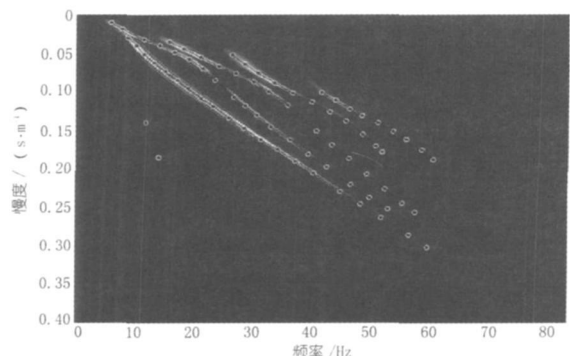


图 2 $F \sim K$ 谱中的频散曲线

对图 1 中的地震记录, 也用 $\tau \sim p$ 变换分析法从面波记录中拾取了频散曲线, 面波频散特征的提取是在频率—慢度域实现的 (图 4)。相对于 $F \sim K$ 分析法来说, 面波的频散能量主要分布在一个矩形区域内而不是三角形区域内, 比较有利于拾取频散曲线。低模式的能量团比较强而高模式的能量比较弱, 最高的有效拾取频率也为 60 Hz。利用慢度和速度的倒数关系, 最终变可以得到面波的多个模式频率—相速度曲线 (图 5)。与 $F \sim K$ 分析法相比, 提取的频散曲线与理论的频散曲线吻合得要好些, 但仍然有些误差, 可能是慢度与速度之间倒数的转换引起的。

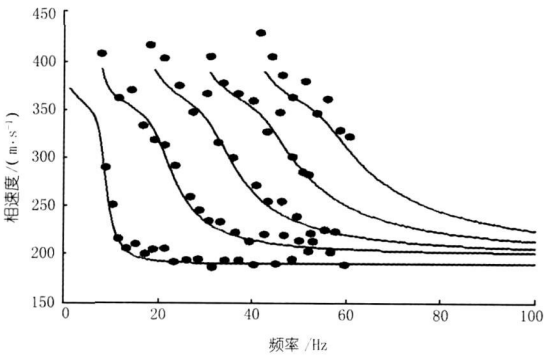


图 3 $F \sim K$ 法与理论解的比较

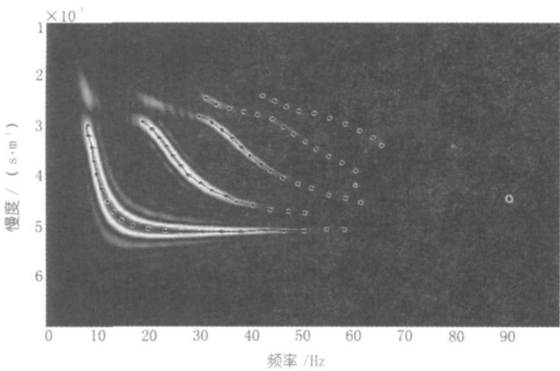


图 4 $F \sim p$ 谱中的频散曲线

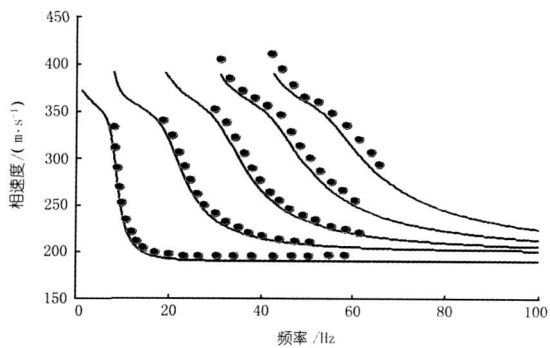


图 5 $\tau \sim p$ 法与理论解的比较

最后, 使用本文所提到的方法, 从图 1 的面波记录中计算了面波的频率域速度谱, 并对该谱做了扩频处理 (图 6)。其中高频部分得到了增强, 能够有效分辨的最高频率从原来的 60 Hz 变为 90 Hz。与前两种方法相比, 各个模式频散曲线的能量分

布比较均匀; 从低频到高频的能量分布也比较均匀; 能够明显识别的频散曲线由 5 条上升为 8 条; 拾取的结果无须做其它变换。可见, 通过扩频处理技术, 大大提高了频率分析的范围, 增加了多阶模式频散曲线的个数, 改善了频散曲线拾取的分辨能力。图 7 是从图 6 中拾取的多模频散曲线, 将其中的 5 条频散曲线与理论的频散曲线做了对比, 发现两者几乎完全吻合。

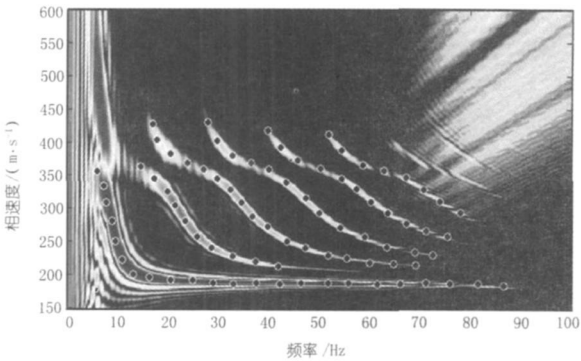


图 6 $F \sim v$ 谱中的频散曲线

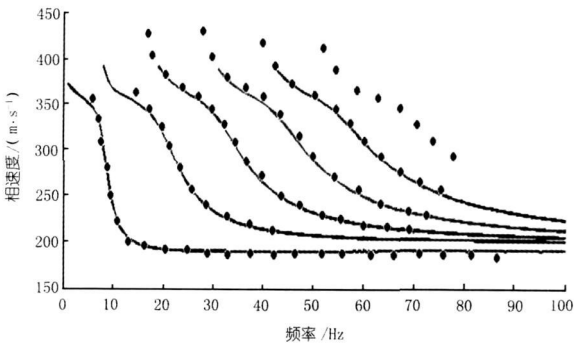


图 7 $F \sim v$ 法与理论解的比较

4 结语

通过与常规的 $F \sim K$ 分析法和 $\tau \sim p$ 变换分析法提取的多模频散曲线结果比较, 发现本文方法在算法实现上是最直接的, 它可以在频率域速度谱中直接提取面波的多模频散曲线; 提取的频散曲线精度更高, 不涉及到斜率计算和倒数转换, 能够分辨出更多模式的频散曲线; 提取的频率范围更宽。因此, 对于多道面波记录的多模频散曲线提取, 本文方法是最合适的, 值得推广。

参考文献:

[1] 刘云祯, 王振东. 瞬态面波法的数据采集处理及其应用实例. 物探与化探, 1996, 20(1).

[2] 陈淑珍, 刘怀林. 基于 $\tau \sim p$ 变换的频散曲线及其算法实现. 武汉大学学报(自然科学版), 2000, 46(1): 123-126.

[3] 宋先海, 肖伯勋等. 用改进的 $\tau \sim p$ 变换算法提取瞬态瑞雷波频散曲线. 物探与化探, 2003, 27(4): 292-295.

[4] 王运生, 王家映等. 实测面波频散曲线计算方法研究与应用实例. 工程勘察, 2004, 20(6): 60-63.

[5] 张碧星, 鲁来玉等. 用频率—波数法分析瑞利波频散曲线. 工程地球物理学报, 2005, 2(4): 245-255.

(编辑: 赵凤超)