

基于多模态分离的面波谱分析方法

张大洲^{1,2}, 顾汉明^{1,2}, 熊章强³, 肖金红⁴

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中南大学信息物理工程学院, 湖南长沙 410083

4. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410083

摘要: 面波频谱分析法(SASW)作为一种横向分辨率较高的瑞雷面波勘探方法, 由于计算得到的基阶面波频散曲线存在较大误差以及无法获得高阶模式频散曲线而在应用中受到限制. 通过应用 Fourier 变换方法(FT法)分离提取面波各模态数据, 进而对分离后的各模态数据利用 SASW 法计算频散曲线. 通过模型实例分析得出: (1) 利用 SASW 计算基阶面波频散曲线时必须分离得到基阶面波数据, 然后计算才能得到正确的结果; (2) 基于多模态分离的 SASW 法可以计算得到面波高阶模式的频散曲线.

关键词: 瑞雷面波; Fourier 变换; SASW 法; 高阶模式; 地震勘探.

中图分类号: P631

文章编号: 1000-2383(2009)06-1012-07

收稿日期: 2008-11-20

Spectrum Analysis of Surface Wave Method Based on Multi-Mode Separation

ZHANG Da-zhou^{1,2}, GU Han-ming^{1,2}, XIONG Zhang-qiang³, XIAO Jin-hong⁴

1. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. School of Info-Physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

4. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract Spectrum analysis of surface wave (SASW) is one of the Rayleigh wave exploration methods with higher lateral resolution. Presently, there is a large error in calculating fundamental mode dispersion curve of the Rayleigh wave and the dispersion curve of the higher mode can't be calculated by the SASW method. As a result, it is limited in its application. In this paper, different modes of Rayleigh wave are separated and extracted by Fourier transform (FT method), and then, the dispersion curve will be calculated by the SASW method using the Rayleigh wave data after the separation. According to the analysis of examples, it can be concluded that: (1) when using the SASW method to calculate the fundamental mode dispersion curve, the Rayleigh wave data of fundamental mode should be separated first, and then calculated. Or else, the fundamental mode dispersion curve couldn't be right; (2) it can get higher mode dispersion curve by the SASW method based on multi-mode separation.

Key words: Rayleigh wave; Fourier transform; SASW method; higher mode; seismic prospecting.

面波谱分析法(SASW)是瑞雷波勘探众多方法中的一种(Gucunski and Woods, 1992; 赵竹占和李华, 1994; Young, 2003), 其原理是通过计算两道信号不同频率时的相位差, 从而得到该频率对应的相速度. 与多道面波分析法(MASW)相比(刘云祯和王振东, 1996; Park *et al.*, 1999; Lin *et al.*, 2004),

这种方法不会产生频散曲线的多道综合效应, 从而提高了面波勘探的横向分辨率, 能满足高精度探测的要求. 但是面波勘探采集到的地震记录中包含各种不同类型的波, 在利用 SASW 方法计算频散曲线时如果不能准确提取面波数据, 则计算结果由于受到其他类型波(诸如直达波和反射波等)的干扰而产生

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)“南海深水复杂地质结构地震采集基础理论研究 2009CB219403”.

作者简介: 张大洲(1979-), 男, 博士研究生, 主要从事面波勘探及地震偏移成像研究. E-mail: dazhou2005@163.com

生较大误差.

关于面波提取的方法前人做了相关的研究. 刘江平等(2003)用 $\tau\text{-}\rho$ 变换方式提取面波. 宋先海等(2003)在进行 $\tau\text{-}\rho$ 变换前应用 HVF 滤波方法对地震记录进行滤波, 以此来提高面波提取的精度. $\tau\text{-}\rho$ 变换是 Radon 变换的线性形式, 通常称为倾斜叠加变换(吴律, 1993). 利用 $\tau\text{-}\rho$ 变换提取到的面波在很大程度上是未发生频散的面波, 即使提取了面波的频散部分也是不完整的. 因此, 用 $\tau\text{-}\rho$ 变换提取面波来计算频散曲线是不合适的. 目前, 利用 SASW 法计算频散曲线一般都不考虑高阶模式, 计算得到的频散曲线默认为基阶面波. 但由于面波中高阶模式波(Gabriels *et al.*, 1987)的存在, 用 SASW 法计算得到的相位差是各种模式混合叠加后不同频散的相位之差(柴华友等, 2004). Tokimatsu *et al.* (1992)研究了多模式对于频散曲线的影响. Mourad Karray and Guy Lefebvre (2008)利用多重滤波的方法对面波记录中各种模式的混合叠加进行了研究, 并用时变滤波的方法提取基阶面波频散曲线. 柴华友等(2008)通过利用低阶模式产生的相位折叠的方法来计算高阶模式相位差, 计算得到所谓的“有效相速度”, 这种方式没有真正解决面波各阶模式相位叠加的问题. 因此, 如何利用 SASW 方法计算得到准确的基阶面波频散曲线十分重要, 同时如果能用 SASW 方法计算出面波的高模式频散曲线, 对于面波勘探有重要的现实意义.

本文通过利用 Fourier 变换法(简称 FT 法)分离提取各模式面波, 然后对不同模式的面波数据用 SASW 方法计算得到相应各阶模式的频散曲线. 这种基于多模态分离的 SASW 方法, 不但解决了准确计算基阶面波频散曲线的问题, 而且实现了 SASW 法计算面波高模式频散曲线的愿望, 这对利用面波的高模式频散曲线提高勘探精度具有非常重要的意义.

1 基于多模态分离的 SASW 方法原理

1.1 SASW 法计算频散曲线原理

SASW 法计算频散曲线是利用傅立叶变换得到相邻两道地震信号 $X_1(t)$ 和 $X_2(t)$ 在某一频率 f 的相位差为 $\Delta\varphi(f)$, 用公式 $V_R = 2\pi f \Delta x / \Delta\varphi$ 就可求出对应这一频率瑞雷波的相速度. 地震信号 X_1

(t)和 $X_2(t)$ 的互功率谱 $S(f)$ 可由下式求得:

$$S(f) = X_1(f) * X_2^*(f) = |X_1(f)| \circ |X_2(f)| e^{i(\varphi_2 - \varphi_1)} = |X_1(f)| \circ |X_2(f)| e^{i\Delta\varphi(f)}, \tag{1}$$

$$X_n(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X_n(t) e^{i2\pi ft} dt. \tag{2}$$

由(1)式可知两信号互功率谱中的相位谱包含了相应单频波的相位差, 因此在实际计算过程中, 先计算两信号的互功率谱, 互功率谱中每个频率对应的相位角就是两信号的相位差, 这样就可以计算得到每个频率对应的相速度. 由于面波数据是各种模式相互混合的, 这里求得的相速度称为“有效相速度”. 对于功率谱估计不随时间、空间变化的平稳场, 平均有效相速度 c 的表达式为(柴华友等, 2004):

$$\cos(2\pi f \Delta x / c) = \frac{\sum_{l=1}^N P_l \cos(2\pi f \Delta x / c_l)}{\sum_{l=1}^N P_l}. \tag{3}$$

式(3)中: c_l 为第 l 阶模式相速度, Δx 为道间距; P_l 为第 l 阶模式功率谱密度函数. 从式(3)可以看出 N 个模式响应叠加后, 面波在两道间相位差余弦与其功率谱加权平均有关. 因此, 若将面波数据中各模式进行分离后计算其两道间相位差, 就可得到不同模式面波的频散曲线.

1.2 FK 法面波多模态分离原理

面波勘探时所采集的地震记录在 $t\text{-}x$ 域中无法分辨面波的几个模式, 如果将记录进行傅立叶变换, 在频率波数域中, 由于面波各模式传播速度的差异, 在时间域中叠加在一起各模式面波信号在频率波数域中就会分开. 因此, 在频率波数域中保留所需模式的谱, 其余数据充零, 然后进行傅立叶反变换, 就可以得到相应模式的面波数据.

沿层状介质表面传播的面波的垂直位移分量可以表示如下(鲁来玉, 2004):

$$U_z(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{N(k, \omega)}{D(k, \omega)} e^{i(kx - \omega t)} dk d\omega. \tag{4}$$

式(4)中, $N(k, \omega)$ 为与震源相关的函数, $D(k, \omega) = 0$ 是瑞雷面波的频散方程, k 为波数, ω 为角频率. 对(4)式做二维傅立叶变换, 如(5)式所示,

$$\frac{N(k, \omega)}{D(k, \omega)} = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_z(x, t) e^{-i(kx - \omega t)} dx dt. \tag{5}$$

由(5)式可知, 在频率波数域中, 波场的最大值在分母 $D(k, \omega) = 0$ 附近, 而 $D(k, \omega) = 0$ 正是核函数 $N(k, \omega) / D(k, \omega)$ 的极点, 它对应的就是瑞雷面波的解. 因

此,在频率波数域中,不同波场最大值处的值就是由 $t-x$ 域中不同模式的面波变换得到的,对这些值进行反变换就可得到相应模式的面波. 这为利用 FK 法提取各阶模态的面波数据提供了理论依据.

2 理论模型算例

为了分析 FT 法在分离面波各模态后用 $SASW$ 法计算频散曲线的正确性,特设计了一个两层介质模型,模型大小为 $200\text{ m} \times 50\text{ m}$. 模型参数: 第一层,厚度 10 m , $\nu_p = 800\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\nu_s = 200\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\rho = 2.0\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 第二层, $\nu_p = 1\ 200\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\nu_s = 400\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\rho = 2.0\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. 利用高精度交错网格有限差分法对该模型进行了全波场正演模拟(熊章强等, 2008), 采样间隔为 0.1 ms , 采样长度为 1.0 s , 震源采用 25 Hz 雷克子波. 图 1 为模拟所得到的地震记录的垂直分量. 对于两层介质模型的全波场模拟在单炮记录中有直达纵波、直达横波、折射波、反射纵波、反射横波、转换波以及面波等, 其中反射波包括一次反射和多次反射. 由于波场比较复杂, 不利于分析和解释, 在 $t-x$ 域中很难分辨出面波及其各个模态.

2.1 面波各模式分离

图 2 为将模拟得到的合成地震记录利用二维傅立叶变换得到 $F-K$ 域能量谱, 图中可见, 瑞雷面波的基阶能量最强, 其余高阶模式能量较弱, 各模态能量团能清晰分辨. 在 $F-K$ 域中拾取各模态能量团峰值处的 f 和 k 值, 利用公式 $V_R = 2\pi f / k$, 就可求得频散曲线. 为了验证在 $F-K$ 域中对各模态面波分析的正确性, 利用相移法(Park *et al.*, 1998) 直接对合成地震记录进行频散曲线求取, 并与模型的理论频散曲线进行对比. 图 3 为 3 种方法计算得到的频散曲线的对比结果, 由图可见, 两种方法计算得到的频散曲线与理论值对应较好. 这表明, 在 $F-K$ 域中进行分析的瑞雷面波模式与实际情况完全相符.

图 4a、4c、4e 分别为利用 FT 法提取得到的基阶模式、一阶和二阶高模式面波记录, 利用相移法计算分离后各模式的频散曲线并与理论值的对比, 如图 4b、4d、4f 所示. 从图中可以看出, 分离后计算得到的频散曲线与理论值完全一致, 这充分说明利用 FT 法分离面波各阶模态是正确的.

2.2 各模式频散曲线的计算与分析

$SASW$ 法计算频散曲线时先通过计算两道间

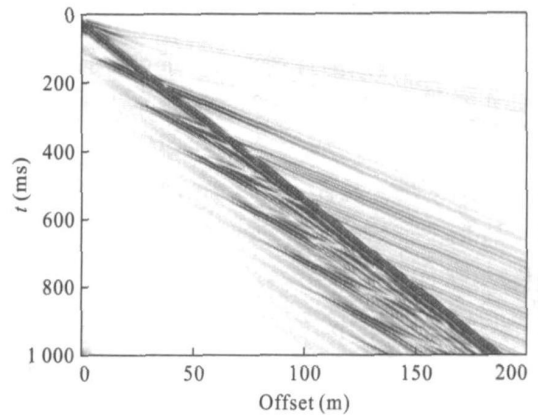


图 1 2 层介质模型合成地震记录(垂直分量)

Fig. 1 Synthetic data (vertical-component) due to a two layer model

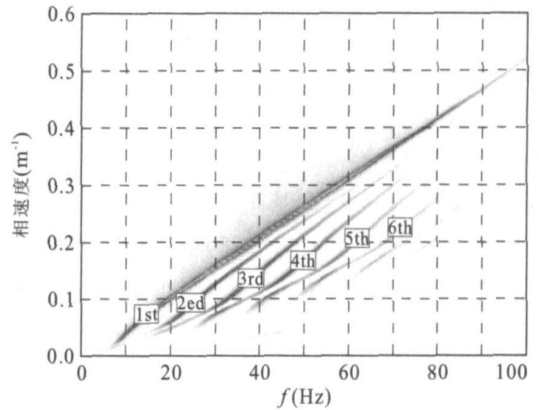


图 2 合成地震记录的频率-波数谱

Fig. 2 Frequency wave-number spectrum of synthetic data

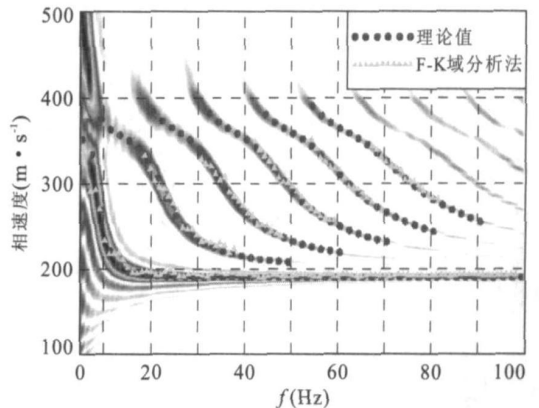


图 3 3 种方法计算得到的频散曲线对比

Fig. 3 Comparison of three kind of dispersion curve signals. The phase difference of each frequency is calculated, and then the phase velocity corresponding to each frequency is calculated. Fig. 5 is the dispersion curve of surface waves of different modes calculated from the 20 and 21 data of the surface wave data shown in Fig. 1 using the $SASW$ method. Fig. 5a is the dispersion curve calculated from the original data. As can be seen, by

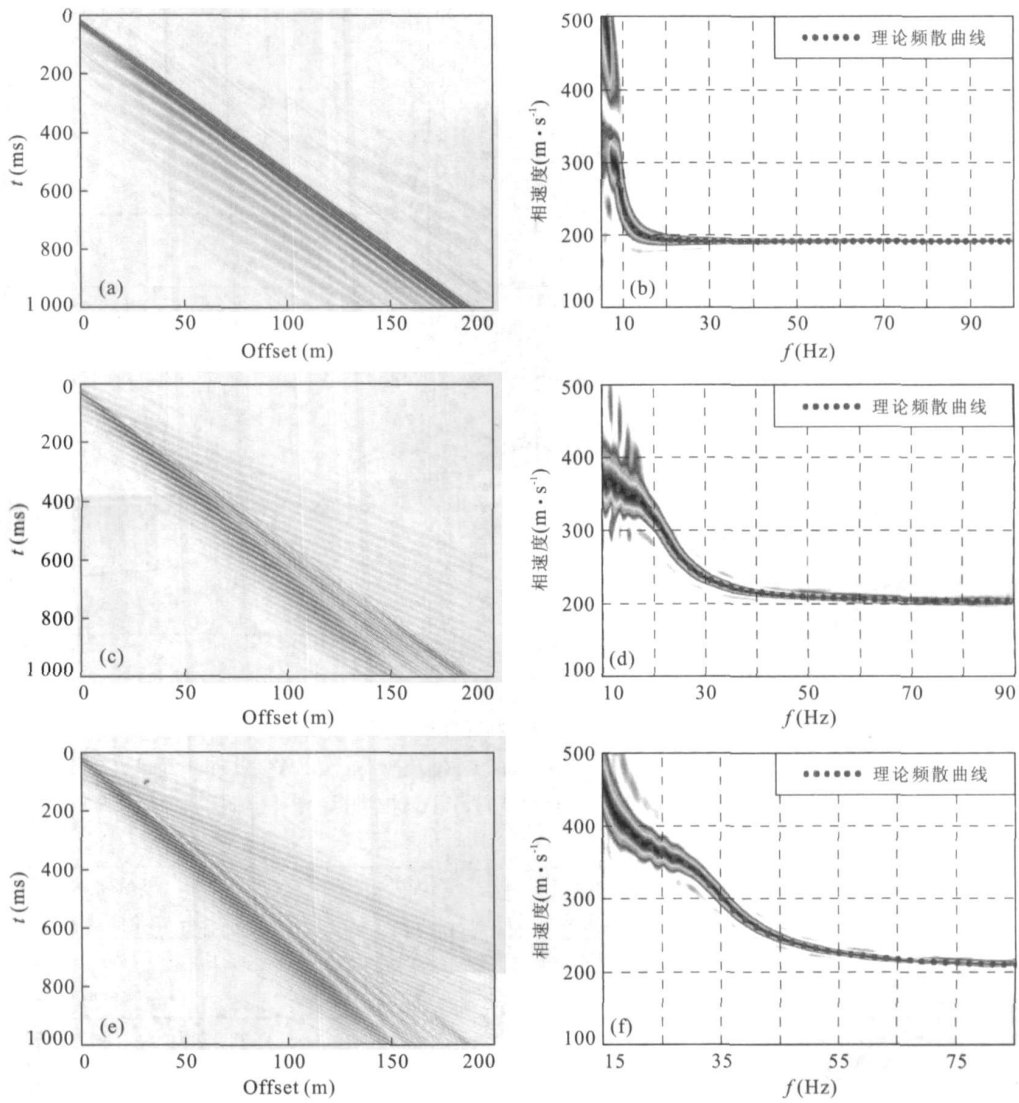


图 4 FT 法提取得到的面波记录及与理论值对比的频散曲线

Fig. 4 Record and dispersion curve of surface wave extracted by FT method

a. 基阶面波记录; b. 基阶面波频散曲线; c. 一阶高模式面波记录; d. 一阶高模式面波频散曲线; e. 二阶高模式面波记录; f. 二阶高模式面波频散曲线

于没有对面波数据进行分离, 因此, 计算得到的相位差为各种不同类型波以及面波各阶模态相互叠加的结果, 这样使得频散曲线与理论值相差较大. 图 5b、5c 和 5d 分别为采用经过分离后的基阶、一阶和二阶高模式面波数据利用 SASW 法计算得到的频散曲线. 可见, 分离后计算得到的频散曲线与理论值基本一致. 因此, 利用 SASW 法可以分离提取基阶和高阶模式面波数据, 从而可准确计算基阶与高阶模态的面波频散曲线, 而利用高模式频散曲线可以大幅提高反演精度 (Xia *et al.*, 2003; Song *et al.*, 2007). 因此, 利用 SASW 法得到的高阶模式频散曲线, 无疑可以大大提高瑞雷面波勘探的精度.

为了研究 SASW 法计算基阶频散曲线时高阶模式的影响, 分别将一阶和二阶高模式面波与基阶面波叠加后进行计算. 如果仅用分离后的基阶数据, 频散曲线与理论值完全相符, 如图 5b 所示. 但如果把分离后的基阶和一阶高模式面波数据叠加, 频散曲线在 15 ~ 40 Hz 段发生跳跃, 与理论值相差较大, 如图 6a 所示. 图 6b 为将分离后的基阶与二阶高模式面波数据叠加的计算结果, 频散曲线在 15 ~ 65 Hz 段发生跳跃, 与理论值相差较大. 与图 6a 相比, 误差较大的部分向高频方向移动, 这说明不同的高阶模式对于基阶波相速度的影响频段是不同的. 通过对以上两组数据分析可知, 当两种模式数据叠

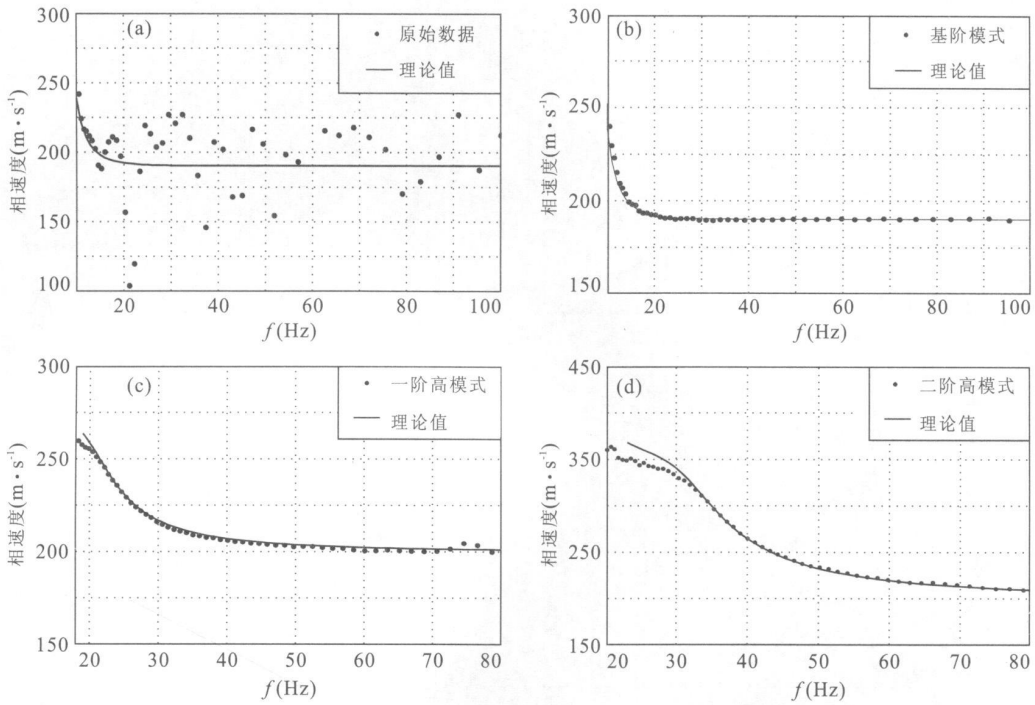


图 5 SASW 法计算得到频散曲线与理论值对比

Fig. 5 Comparison of dispersion curve of surface wave between SASW and analytical results

a. 原始面波数据频散曲线; b. 基阶面波频散曲线; c. 一阶高模式频散曲线; d. 二阶高模式面波频散曲线

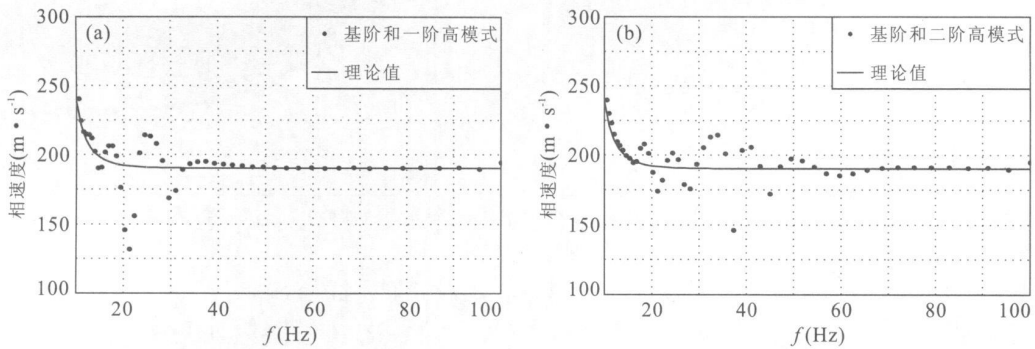


图 6 SASW 法计算基阶和高模式面波频散曲线与理论值对比

Fig. 6 Comparison of dispersion curve of fundamental and higher mode surface wave between SASW and analytical results

加时相位会产生干扰, 此时计算得到的相位差是混合相位差, 其相速度既不属于基阶模式也不属于高阶模式. 因此, 如果对原始面波数据不进行各模态分离而直接将计算得到的频散曲线作为基阶模式的传统做法显然是不正确的.

3 倾斜界面模型实例分析

为了说明 SASW 法在实际应用中的优点及各模态面波分离后计算频散曲线的效果, 特设计一倾斜界面的两层介质模型, 图 7a 所示. 模型大小为

50 m × 15 m, 模型参数如下: 第一层, 厚度 5 ~ 10 m, $v_p = 800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $v_s = 200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\rho = 2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 第二层, $v_p = 1200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $v_s = 400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\rho = 2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. 利用高精度交错网格有限差分法对该模型进行了全波场正演模拟, 采样间隔为 0.1 ms, 采样长度为 0.5 s, 震源采用 25 Hz 雷克子波. 图 7b 为模拟得到的地震合成记录. 若利用多道面波技术, 则整个剖面只能得到如图 8a 所示一条频散曲线, 最终也只能得出界面的平均深度, 对于倾斜界面探测无能为力. 若利用 SASW 方法仅用两道数据就可计算出一条频散曲线, 这样一个剖面就可以得到多条

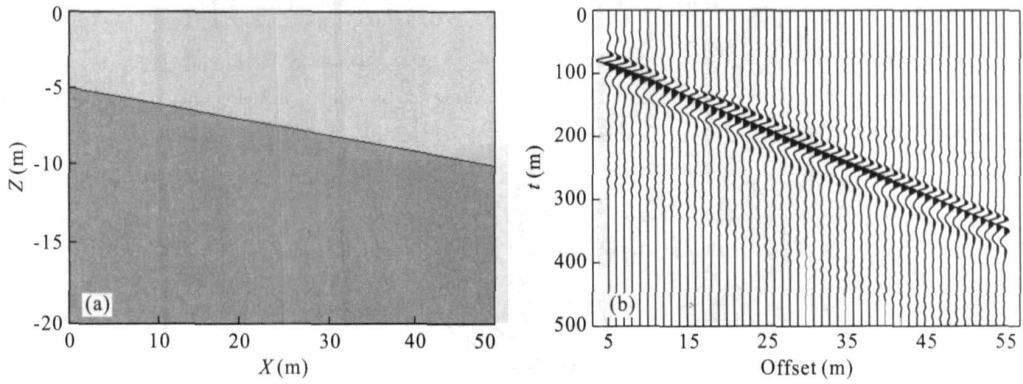


图 7 倾斜界面模型(a)及其垂直分量合成地震记录(b)

Fig. 7 Slant interface model (a) and synthetic data of its vertical-component (b)

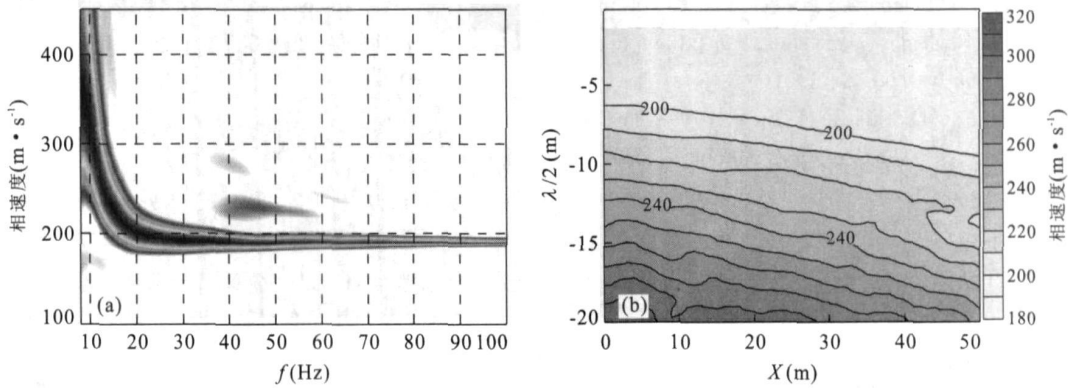


图 8 相移法计算得到的频散曲线(a)和面波分离后 SASW 法计算得到的相速度速度剖面(b)

Fig. 8 Dispersion curve calculated by phase-shift method (a) and Phase velocity profile of calculated by SASW method using separated data (b)

频散曲线, 可大大提高横向分辨率. 对图 7b 的合成记录先用 FT 法进行模态分离, 然后计算相速度, 按半波长理论, 就可得到相速度一半波长剖面, 由图 8b 可见, 倾斜界面形态非常清楚.

4 结论

(1)利用 SASW 法计算基阶频散曲线时必须对原始面波数据进行各模态分离, 然后计算其频散曲线, 这样就避免了计算相位差时高阶模式的干扰. (2)通过多模态分离后的面波数据可以计算得到高级模式频散曲线, 从而大大提高了 SASW 法勘探的精度. 这种基于多模态分离的 SASW 方法从根本上解决了计算面波频散曲线时各阶模式的影响, 同时也克服了以往无法利用 SASW 计算高阶模式频散曲线的缺点.

References

Chai, H. Y., Lu, Y. F., Liu, M. G., 2004. Influences of measuring factors on spectral analysis in surface wave testing. *Rock and Soil Mechanics*, 24(5): 347-353 (in Chinese with English abstract).

Chai, H. Y., Wei, C. F., Bai, S. W., 2008. Approximate approach to analyzing effective velocity of surface waves. *Rock and Soil Mechanics*, 29(1): 87-93 (in Chinese with English abstract).

Gabriels P., Snieder, R., Nole, G., 1987. In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode Rayleigh waves. *Geophysical Prosp.*, 35: 187-196.

Gucunski N., Woods, R. D., 1992. Numerical simulation of the SASW test. *Soil Dynamic Earthquake Engineering*, 11(3): 213-227.

Lin, C. P., Chang, C. C., Chang, T. S., 2004. The use of MASW method in the assessment of soil liquefaction potential. *Soil Dynamic Earthquake Engineering*, 24(10): 689-698.

- Liu, J. P., Hou, W. S., Xu, S. F., 2003. Adjacent-channel transient Rayleigh wave method and its application in compression strength test of water-tight wall. *Yangtze River*, 34(2): 34–37 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. Z., Wang, Z. D., 1996. Data collection and processing system of transient surface wave method and examples of its application. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 20(1): 15–18 (in Chinese with English abstract).
- Lu, L. Y., 2004. Mode analysis and inversion of parameters of Rayleigh waves in stratified media (Dissertation). Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese).
- Mourad Karray, Guy Lefebvre, 2008. Techniques for mode separation in Rayleigh wave testing. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20(1): 1–13.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J. H., et al., 1998. Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. 68th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1377–1380.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J. H., 1999. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3): 800–808.
- Song, X. H., Xiao, B. X., Zhang, X. Q., 2003. The application of improved τ - p transform algorithm to the extraction of dispersion curve of transient Rayleigh wave. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 27(4): 292–295 (in Chinese with English abstract).
- Song, X. H., Gu, H. M., Liu, J. P., et al., 2007. Estimation of shallow subsurface shear-wave velocity by inverting fundamental and higher-mode Rayleigh waves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(5): 599–607.
- Tokimatsu, K., Tamura, S., Kojima, H., 1992. Effects of multiple modes on Rayleigh wave dispersion characteristics. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 118(10): 1529–1543.
- Wu, L., 1993. τ - p transformation and application. Publishing House of Oil Industry, Beijing (in Chinese).
- Xia, J. H., Miller, R. D., Park, C. B., et al., 2003. Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes. *J. Apply Geophys.*, 52(1): 45–57.
- Xiong, Z. Q., Zhang, D. Z., Qin, Z., et al., 2008. Boundary conditions study and case analysis for numerical modeling of Rayleigh wave. *Central South University (Science and Technology)*, 39(4): 824–830 (in Chinese with English abstract).
- Young, S. C., 2003. Dispersive characteristic measurement of multi-layer cement mortar slabs using SASW method and neural network. *Computers and Structures*, 81: 2491–2499.
- Zhao, Z. Z., Li, H., 1994. The application of surface wave spectral analysis method to the evaluation of foundation treatment effects. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 18(5): 326–330 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柴华友, 卢应发, 刘明贵, 2004. 表面波谱分析影响因素研究. *岩土力学*, 24(5): 347–353.
- 柴华友, 韦昌富, 白世伟, 2008. 表面波有效相速度近似分析方法. *岩土力学*, 29(1): 87–93.
- 刘江平, 侯卫生, 许顺芳, 2003. 相邻道瑞雷波法及在防渗墙强度检测中的应用. *人民长江*, 34(2): 34–37.
- 刘云祯, 王振东, 1996. 瞬态面波法的数据采集处理系统及其应用实例. *物探与化探*, 20(1): 15–18.
- 鲁来玉, 2004. 分层介质半空间瑞雷波模式分析和介质参数反演(学位论文). 北京: 中国科学院研究生院.
- 宋先海, 肖柏勋, 张学强, 等, 2003. 用改进的 τ - p 变换算法提取瞬态瑞雷波频散曲线. *物探与化探*, 27(4): 292–295.
- 吴律, 1993. τ - p 变换及应用. 北京: 石油工业出版社.
- 熊章强, 张大洲, 秦臻, 等, 2008. 瑞雷波数值模拟中的边界条件处理及模拟实例分析. *中南大学学报(自然科学版)*, 39(4): 824–830.
- 赵竹占, 李华, 1994. 表面波谱分析法在评价地基处理效果中的应用. *物探与化探*, 18(5): 326–330.