

DOI:10.11720/wtyht.2014.3.23
林丹丹,熊章强,张大洲.基于多模式分离的 S 变换与小波变换提取面波频散曲线对比分析[J].物探与化探,2014,38(3):544-551.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.3.23>
Lin Dandan, Xiong Zhangqiang, Zhang Dazhou.A comparative study of surface wave dispersion curves extracted from S transform and wavelet transform based on multi-mode separation[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2014,38(3):544-551.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.3.23>

基于多模式分离的 S 变换与小波变换提取面波频散曲线对比分析

林丹丹,熊章强,张大洲
(中南大学 地球科学与信息物理学院,湖南 长沙 410083)

摘 要: 为了对比分析小波变换和 S 变换在计算瑞雷波频散曲线时的精度,通过设计两层介质和六层介质模型,采用交错网格高阶有限差分方法对两个模型进行正演模拟,利用 F-K 法分离出时间—空间域不同模态的瑞雷波记录,再采用小波变换和 S 变换计算出不同模态的瑞雷波频散曲线,分别与理论值进行对比分析,最后利用两种方法对实际资料进行处理。结果表明:利用小波变换计算得到的频散曲线在低频段误差相对较大,S 变换计算得到的频散曲线精度总体高于小波变换。
关键词: 瑞雷面波;S 变换;小波变换;频散曲线
中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2014)03-0544-08

瑞雷面波在层状介质中所具有的频散特性使得可以利用其频散曲线获得地下地质结构分布,这种物探方法由于分辨率高、受场地影响小、检测设备简单等优点,近年来被广泛应用于浅地表岩土工程勘察、地质灾害调查和无损检测等领域^[1-2]。随着研究的不断深入和应用范围的不断扩大,瑞雷面波法在探测地下地质结构时不但要求在垂向上有较高的分辨率,在横向上也同样要求有较高的分辨率。目前瑞雷面波应用最为广泛的是多道面波分析方法,这种方法在垂向上的分辨率较高,但其横向分辨率受到较大限制。而与多道面波分析法相对应的两道面波分析法在横向上具有较高的分辨率,但其垂向分辨率则相对较低。张大洲等^[3]通过采用 F-K 分离法对不同模式的瑞雷波进行分离后再计算两道间频散曲线,不但提高了频散曲线的计算精度,而且通过两道数据计算得到了高阶频散曲线。两道面波分析法计算频散曲线最常用的有互谱法和时频分析法,互谱法由于受傅里叶变换本身的限制,其相位变化范围为 $[-\pi, \pi]$,这使得计算的相位差与实际值可能相差 2π 的整数倍,从而导致计算的相速度有

误。另外由于互谱法对相位差较为敏感,在计算相位差时所出现的小误差会使得相速度出现较大变化,因此对于复杂地质条件下准确计算相速度难度较大。时频分析方法是通过在频率域计算两道信号的相同频率能量极值所对应的时间差,然后计算出该频率对应的相速度。由于时频分析法避免了对相位差的求取,从而提高了频散曲线的计算精度。时频分析法目前通常采用 S 变换和小波变换两种方法。1995 年 K. Kishimoto 等^[4]和 H. Inoue 等^[5]利用小波变换提取了弹性波在梁中传播的频散曲线;2002 年 Dong Soo Kim 等^[6]利用谐波小波提取了窄频带频散波的频散曲线;2008 年 Shuchin Aero 等^[7]将连续小波变换应用于油田钻孔声波的频散特性分析中,并提出了一种基于 EPRT 的提取频散曲线的新方法;2010 年马见青等^[8]将 S 变换应用于提取瑞利面波频散曲线。

为了对比两种时频分析方法计算频散曲线的精度,笔者通过对两层和六层介质模型的正演模拟记录经过 F-K 法多模式分离后,分别采用 S 变换和小波变换计算频散曲线,并与理论值进行对比分析。

1 基本原理

1.1 小波变换

小波变换是一种时频局部化分析方法,在变换过程中窗口大小固定不变,但形状、时间窗和频率窗都可改变,这种方法具有多分辨率的特点。其正变换表达式为

$$C_w(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \bar{w}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

其中: a 为伸缩尺度, b 为平移因子, $w(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \bar{w}\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为满足条件的母小波函数。连续小波变换的反变换为

$$x(t) = \frac{1}{c} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} C_w(a,b) w\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{da db}{a^2 \sqrt{a}}, \quad (2)$$

其中: $c = 2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|w(\omega)|^2}{\omega} d\omega$ 。

小波变换计算得到时间—尺度域数据,其尺度与对应中心频率的关系为

$$F_a = \frac{\Delta \cdot F_c}{a}, \quad (3)$$

其中: a 为尺度, Δ 为采样间隔, F_c 为小波的中心频率, F_a 为个尺度的频率。因此可以计算得到瑞雷波在时间—频率域的结果^[9-11]。

1.2 S 变换

S 变换是短时傅立叶变换和小波变换的结合,这种方法克服了短时傅立叶变换不能调节分析时窗大小的缺点,同时引入了小波变换的多分辨率分析,并与傅立叶频谱保持直接的联系^[12-14]。其一维连续正变换为

$$S(\tau,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-j2\pi ft} dt, \quad (4)$$

式中: f 、 τ 分别表示频率和时间,均为实数, τ 可表示时间轴上高斯窗的位置。其反变换为

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau,f) d\tau \right) e^{j2\pi ft} df. \quad (5)$$

1.3 时频分析法提取频散曲线

对 F-K 分离后的每道地震信号分别作时频变换,可得到时间—频率域的能谱图。对于任意两道间距为 d 的地震信号,分别在能谱图中可以找到频率为 f 时的能量极值点所对应的时间 t_1 和 t_2 ,从而得到时间差 $\Delta t = |t_1 - t_2|$,根据公式 $v_g = d/\Delta t$ 就可计算出群速度。利用相速度 v_R 与群速度 v_g 的关系

$\frac{1}{v_R(f)} = \frac{1}{\omega} \left(\int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \frac{1}{v_g(f)} d\omega + C \right)$ 就可计算得到不同频率下的瑞雷波相速度,从而计算得到两道间瑞雷波频散曲线。

2 理论模型试算

2.1 雷克子波模型

为了讨论如何用小波变换和 S 变换来计算相速度,在此特别设计了两道雷克子波信号,两道信号的间距 $\Delta d = 0.5$ m,时间间隔 $\Delta t = 0.1$ s,如图 1 所示。

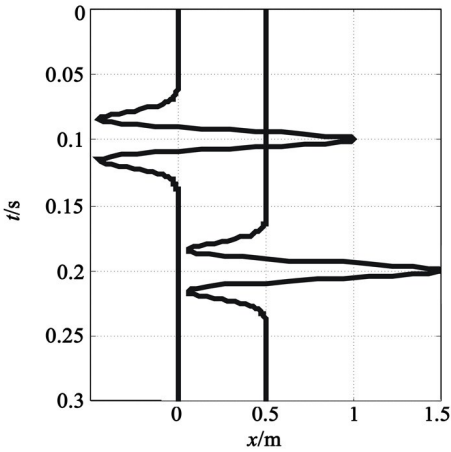
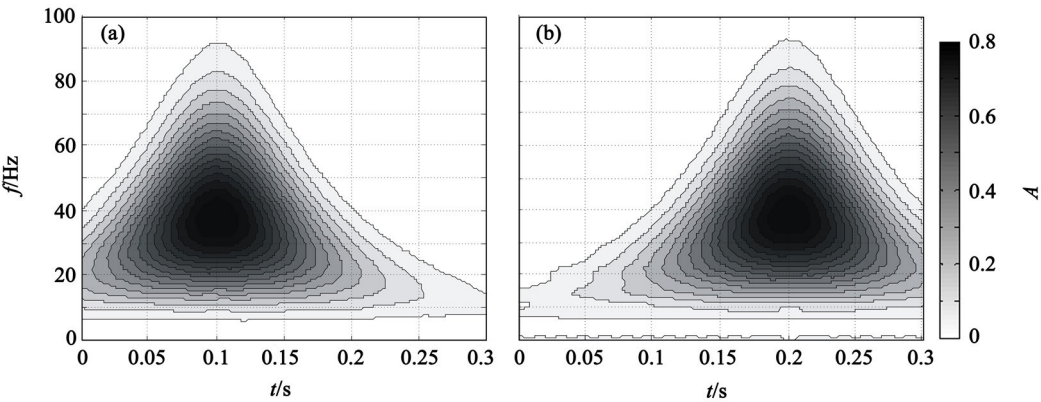


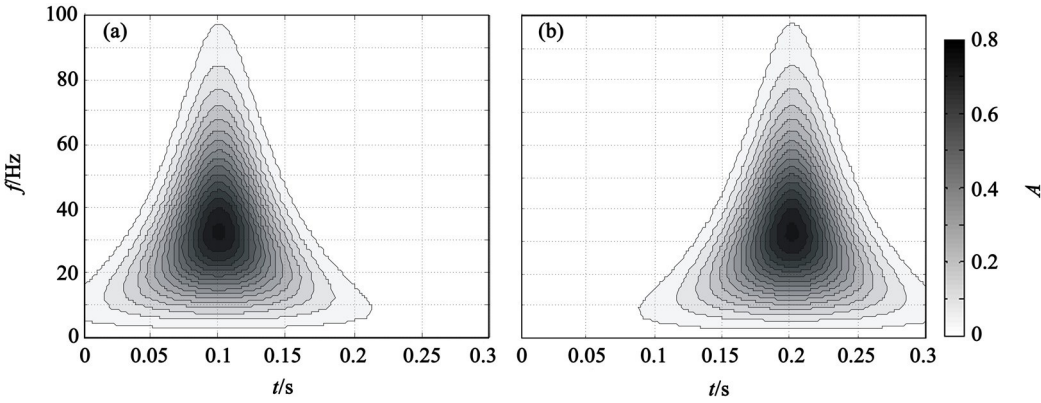
图 1 两道雷克子波信号

对两道雷克子波记录分别进行小波变换和 S 变换,其频谱图如图 2 和图 3 所示。从图中可以看出,随着频率的增加,两种时频分析方法的时间分辨率都不断得到提高。为了进一步分析对比两种方法的分辨率高低,特提取了第一道雷克子波在频率为 10、40、70 Hz 时两种变换的时域波形图,如图 4 所示。时域波形图中曲线的波峰越窄代表其时间分辨率越高,在图 4a 中 S 变换后曲线的波峰明显比小波变换的窄,随着频率的增加,在图 4c 中,两种方法获得的波峰宽度相近。这一变化说明在频率较低时 S 变换的时间分辨率要高于小波变换,而在频率较高时,两种方法的时间分辨率相当。

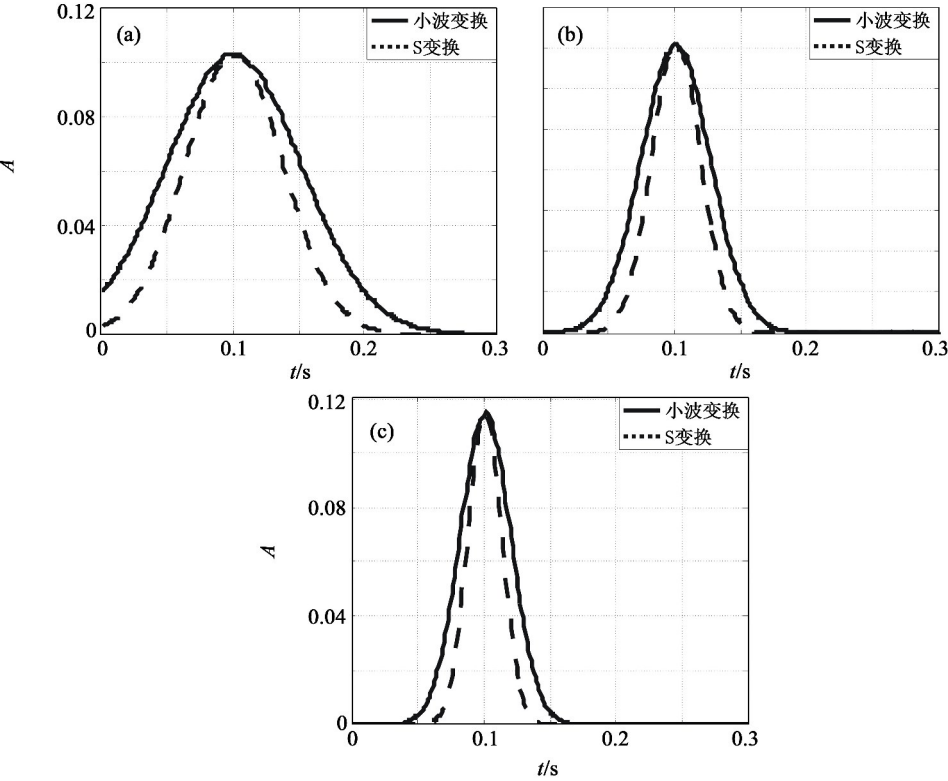
再进一步计算两道雷克子波的相速度,如图 5 所示。根据模型设计可知,对于两道雷克子波计算出的相速度在不同频率时都为 5 m/s,即没有频散现象。从图 5 中可以看出,S 变换计算得到的相速度曲线与理论值完全吻合,而小波变换计算得到的相速度曲线在 10~100 Hz 的最大误差为 0.99%,但在 1~10 Hz 的最大误差达到 26.44%。分析其原因主要有以下两方面:①小波变换虽然能够反映出能量分布,但得到的直接结果是时间与尺度的对应关系,在尺度—频率的转换过程中可能会出现能量错



a—第 1 道;b—第 2 道
图 2 雷克子波小波变换频谱



a—第 1 道;b—第 2 道
图 3 雷克子波 S 变换频谱



a—10 Hz;a—40 Hz;a—70 Hz
图 4 第一道雷克子波不同频率时域波形

位^[9];②在式(1)中,小波变换通过 a 和 b 两个因子来调节时窗,针对低频用宽时窗,高频用窄时窗,因此低频部分的时间分辨率较低,这就导致最终计算得到的相速度误差较大。而 S 变化则克服了小波变换的以上两点缺陷,因此能够计算得到较为准确的相速度。

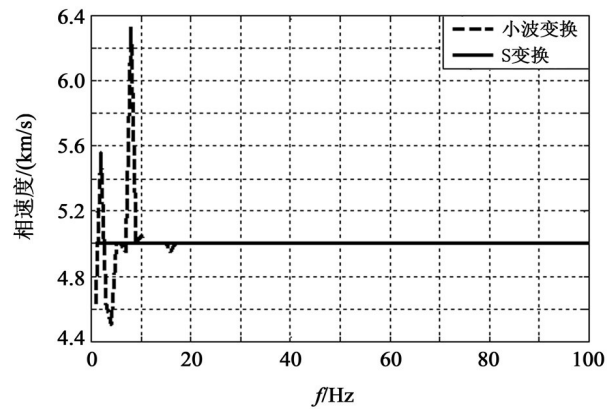


图 5 两道雷克子波计算得到的频率—相速度

2.2 两层层状介质模型

为了对比分析小波变换和 S 变换提取频散曲线的精度,特设计一个 50 m×50 m 的两层层状介质模型,模型参数如表 1 所示。

表 1 两层层状介质模型参数

层号	1	2
厚度/m	10	∞
横波速度/(m/s)	200	400
纵波速度/(m/s)	800	1200
物质密度/(g/cm ³)	2.0	2.0

利用高精度交错网格有限差分法对该模型进行正演模拟^[15-16],得到如图 6 所示的地震记录。地震记录中包含直达波、折射波、反射波、面波等,各种不同类型地震波的混合使得时空域中面波的各种阶模态难以分辨。利用 F-K 法将地震记录转换到频率—波数域中,如图 7 所示,从图中可以看出各阶能量团已明显分开,通过保留所需模态波谱,再将其余波谱置零,然后将所需模态波作傅立叶反变换,就可得到空间域中分离后的地震记录。

在完成了瑞雷波模态分离后,对记录的第 5 道和第 6 道利用小波变换和 S 变换分别计算其频散曲线,再与理论频散曲线进行对比,如图 8 所示。图 8a、8c、8e 分别是 F-K 分离后提取得到的基阶模式、一阶模式和二阶模式的面波记录,图 8b、8d、8f 分别是基阶模式、一阶模式和二阶模式的 S 变换频散曲线、小波变换频散曲线和理论频散曲线的对比图。

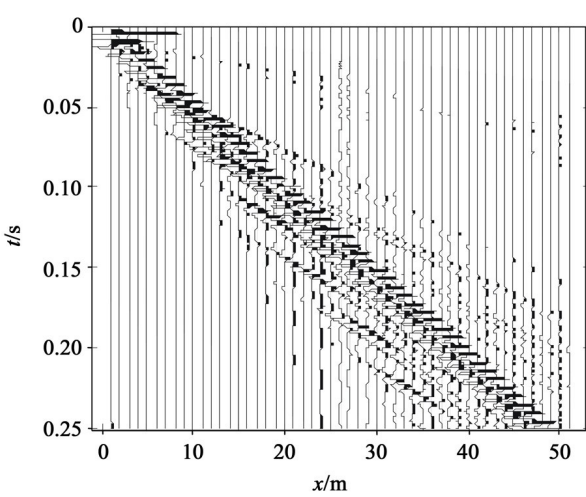


图 6 两层介质模型地震记录

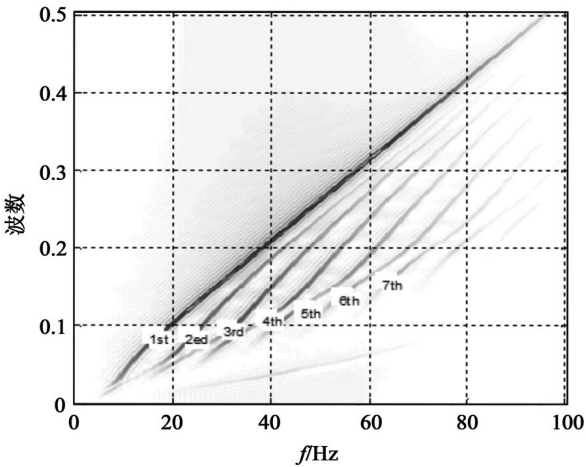
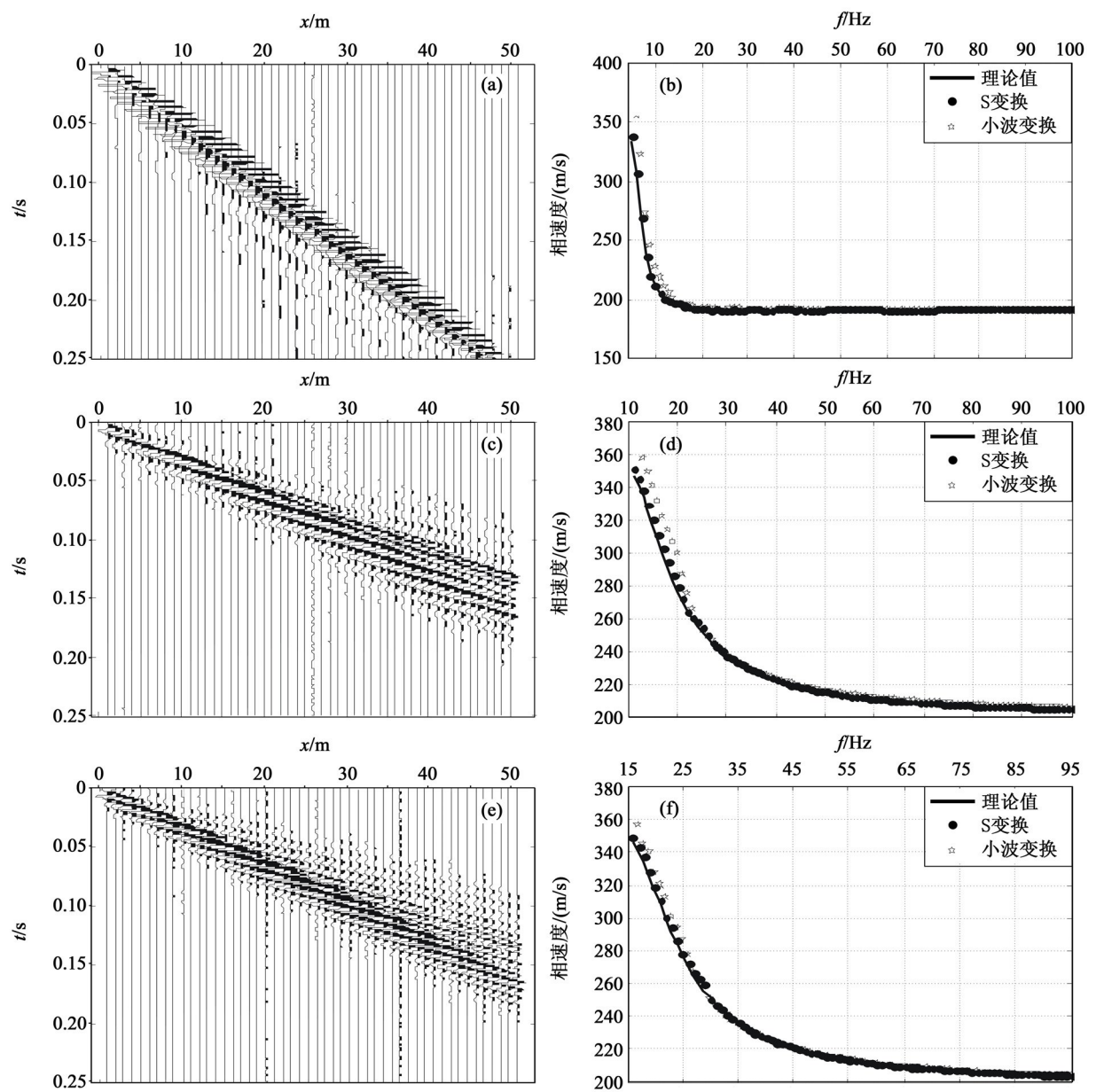


图 7 两层介质模型地震记录的频率—波数谱

从图 8b 中基阶模式频散曲线对比分析可以看出:频率在 6~20 Hz 时,S 变换的误差范围在 0.42%~1.09%,小波变换的误差范围在 5%~19.7%;频率在 21~100 Hz 时,S 变换的误差范围在 0.01%~0.42%,小波变换的误差范围在 2.34%~5%。从图 8d 中一阶高模式频散曲线对比分析可以看出:频率在 10~18 Hz 时,S 变换的误差范围在 0.66%~1.47%,小波变换的误差范围在 5%~8.32%;频率在 19~100 Hz 时,S 变换的误差范围在 0.38%~0.66%,小波变换的误差范围在 2.31%~5%。从图 8f 中二阶高模式频散曲线对比分析可以看出:频率在 15~27 Hz 时,S 变换的误差范围在 0.47%~1.57%,小波变换的误差范围在 3.00%~4.91%;频率在 28~95 Hz 时,S 变换的误差范围在 0.20%~0.47%,小波变换的误差范围为 0.23%~3.00%。通过以上数据对比分析可以看出:S 变换计算得到的频散曲线与理论频散曲线吻合得较好,而小波变换得到的频散曲线在低频部分的误差较大。



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

图 8 两层模型 F-K 法分离后不同模式面波记录及与频散曲线

2.3 六层层状模型

为了进一步对比分析两种时频方法计算频散曲线的精度,设计一个复杂的六层层状介质模型,模型大小为 60 m×50 m,模型参数如表 2。

表 2 六层层状模型参数

层号	层厚	横波速度	纵波速度	物质密度
	m	m/s	m/s	g/cm ³
1	2.5	200	650	1.82
2	2.0	270	750	1.86
3	2.0	367	1400	1.91
4	2.0	485	1800	1.96
5	3.5	603	2150	2.02
半空间	∞	740	2800	2.09

利用高精度交错网格有限差分法对该模型进行正演模拟,得到如图 9 所示的地震记录。经过模式分离后得到基阶和一阶高模式面波记录,如图 10a 和图 10c 所示。同样,对记录的第 5 道和第 6 道分别用 S 变换和小波变换计算频散曲线,并与理论频散值进行对比,如图 10b 和图 10d 所示。从图 10b 中可以看出:频率在 6~15 Hz 时,S 变换的误差范围在 0.23%~0.42%,小波变换的误差范围在 5%~21.42%;频率在 16~100 Hz 时,S 变换的误差范围在 0.006%~0.23%,小波变换的误差范围在 0.012%~5.00%。从图 10d 中可以看出:频率在 10~15 Hz 时,S 变换的误差范围在 1.32%~2.16%,小波变换

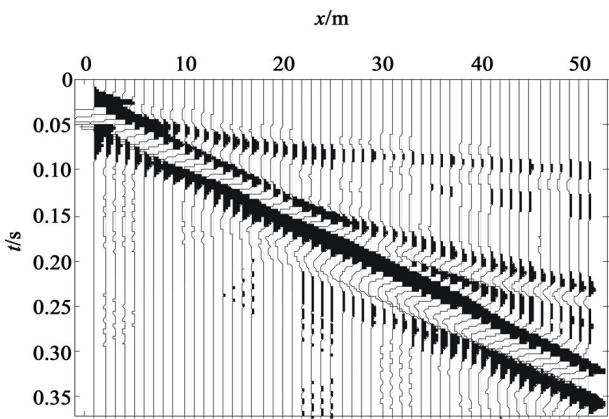
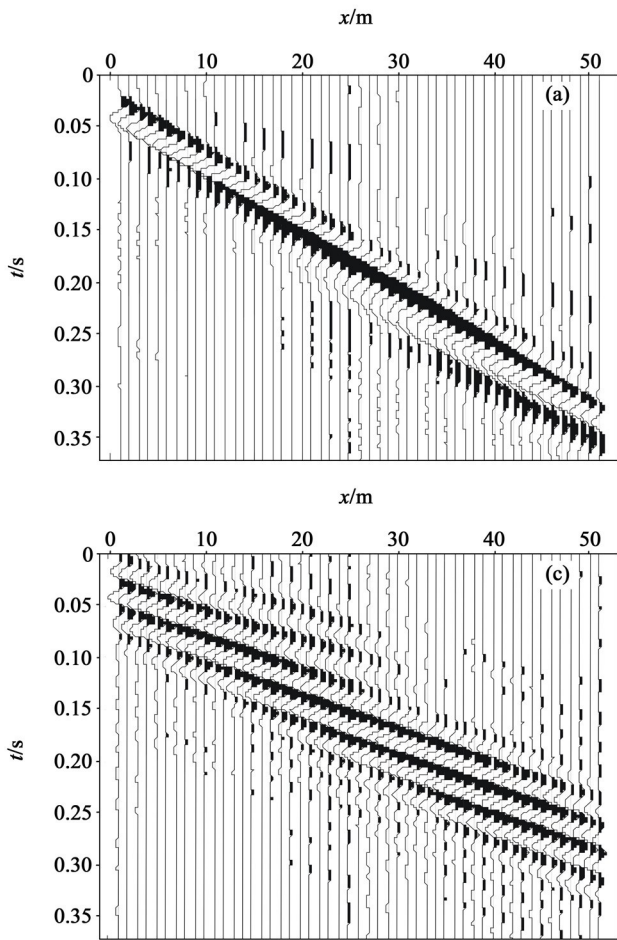


图 9 六层介质模型地震记录



a—基阶面波记录;b—基阶面波频散曲线对比;c——一阶高模式面波记录;d——一阶高模式面波频散曲线对比

图 10 六层模型 F-K 法分离后不同模式面波记录及与频散曲线

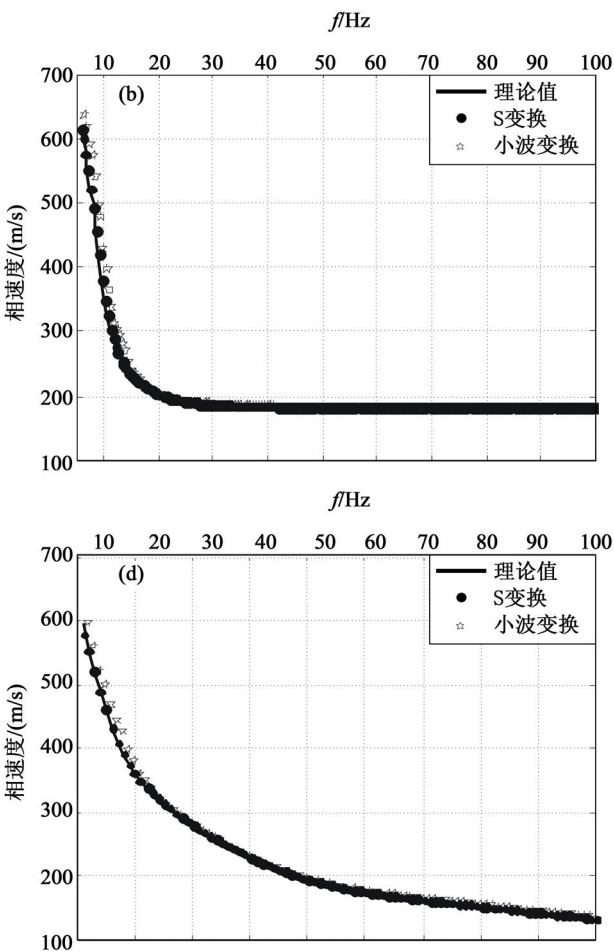
比较简单,在 0~8.0 m 为第四系残坡积层(0~1.5 m 主要为砂质黏土和岩石碎块,1.5~8.0 m 为浅褐棕色砂质黏土),8.0~50 m 为泥岩。图 12 为利用 F-K 分离后的基阶面波记录。

对分离后的基阶面波的第 15 道与第 16 道和第 25 道与第 26 道分别采用小波变换和 S 变换计算频

的误差范围在 5.00%~7.35%;频率在 15~90 Hz 时, S 变换的误差范围在 0.38%~1.32%,小波变换的误差范围在 0.95%~5.00%。从以上分析可以看出:S 变换提取得到的频散曲线与理论曲线吻合较好,而小波变换计算得到的频散曲线在低频段误差较大,高频段误差相对较小。

3 实际资料分析

为了对比分析小波变换和 S 变换对实际面波记录提取频散曲线的效果,对一个试验场地采集的面波记录进行处理。图 11 是某场地采集的原始面波地震记录,采集参数为:道间距为 1 m,采样间隔 0.1 ms,偏移距 8 m。根据钻孔资料,该场地地层情况



散曲线,计算结果如图 13 所示。从图 13 中可以看出,两种时频方法计算得到的频散曲线在高频段吻合较好,在 25~50 Hz 段,小波变换最大差值为 34 m/s,S 变换最大差值为 25 m/s。但在低频段 15~25 Hz 差值较大,小波变换最大差值为 96 m/s,S 变换最大差值为 43 m/s。进一步对低频段两条频散曲

线在同一频率不同方法计算得到的相速度进行对比分析,频率为 16 Hz 时,小波变换的相速度分别是 838 m/s 和 934 m/s,变化幅度是 11.5%,而 S 变换的相速度分别是 727 m/s 和 761 m/s,变化幅度是 4.7%;频率为 18 Hz 时,小波变换的相速度分别是 541 m/s 和 630 m/s,变化幅度是 16.5%,而 S 变换的相速度分别是 500 m/s 和 529 m/s,变化幅度是

5.8%;频率为 20 Hz 时,小波变换的相速度分别是 426 m/s 和 457 m/s,变化幅度是 7.3%,而 S 变换的相速度分别是 408 m/s 和 426 m/s,变化幅度是 4.4%。由于该场地的 8.0~50 m 为泥岩,实际地层的相速度变化较小,因此,相对于小波变换,S 变换计算得到的相速度更加符合实际情况。

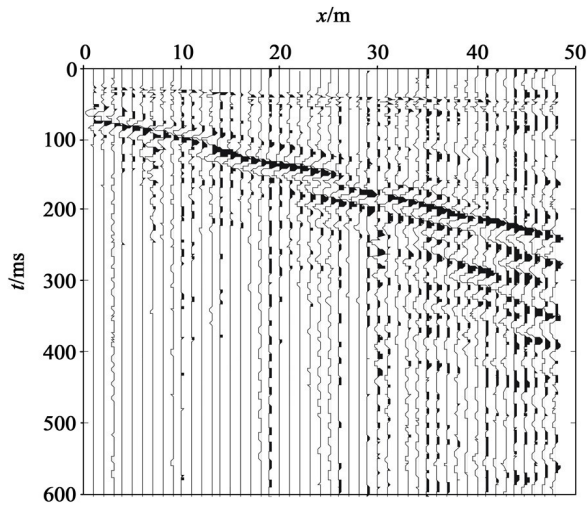


图 11 原始面波地震记录

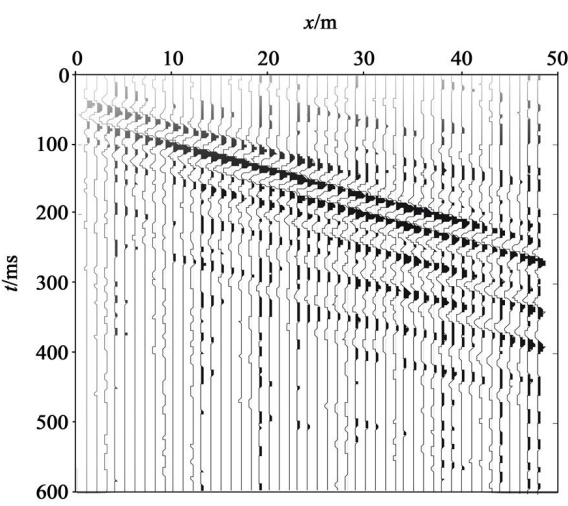
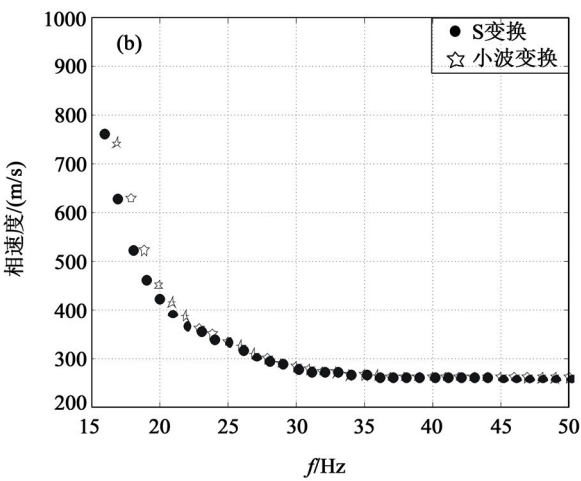
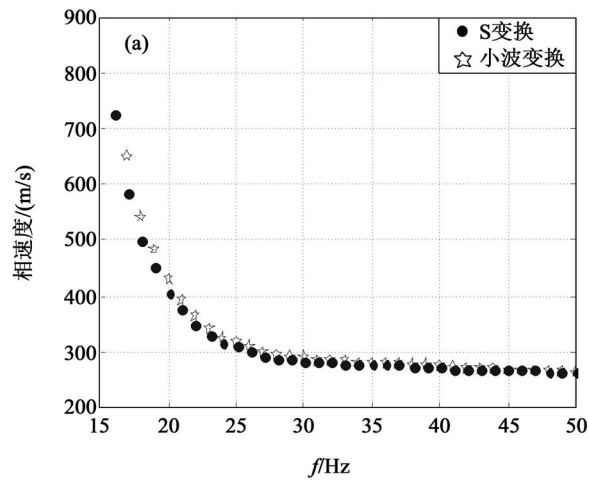


图 12 利用 F-K 分离后的基阶面波记录



a—第 15 道与第 16 道;b—第 25 道与第 26 道

图 13 S 变换与小波变换频散曲线对比

4 结论

通过以上进行多模式分离的时频分析方法提取面波频散曲线的对比,可以得出如下结论。

(1) 利用小波变换和 S 变换都可以计算得到不同模式的瑞雷波频散曲线,由于两种时频分析方法在时频转换时的原理不同,因此计算得到的瑞雷波频散曲线的精确度也有所不同。

(2) 由于小波变换在时窗调节时低频段采用宽时窗,高频段采用窄时窗,因此使得在时间—频率域中低频部分的时间分辨率较低,从而计算得到的频散曲线在低频段误差较大。而 S 变换克服了小波变换在时窗调解过程中的缺陷,因此在低频段计算得到的频散曲线误差相对较小。

(3) S 变换计算得到的频散曲线精度总体高于小波变换。

参考文献:

[1] 蒋婵娟.瑞雷面波资料处理方法研究[D].长沙:中南大学,2009.

[2] 陈艳艳.瑞雷波频散曲线提取及快速反演分析应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

[3] 张大洲,顾汉明,熊章强,等.基于多模态分离的面波谱分析方法[J].地球科学:中国地质大学学报,2009,34(6):1012-1018.

[4] Kishimoto K, Inoue H, Hamada M, et al. Time frequency analysis of dispersive waves by means of wavelet transform [J]. ASME Trans. J. Appl. Mech., 1995, 62(4): 841-846.

[5] Inoue H, Kishimoto K, Shibuya T. Experimental wavelet analysis of flexural waves in beams [J]. Experimental Mechanics, 1996, 36(3): 212-217.

[6] Kim D S, Park H C. Determination of dispersive phase velocities for SASW method using Harmonic wavelet transform [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(8): 675-685.

[7] Aero S, Bose S, Valero H P. Automatic dispersion extraction using continuous wavelet transform [C]//ICASSP, 2008: 2045-2058.

[8] 马见青,李庆春,樊金生,等.基于 S 变换的瑞利面波频散分析[J].地球科学与环境学报,2010,32(3):319-323.

[9] 王佳文.小波变换与广义 S 变换在瑞利波频散曲线提取中的应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.

[10] 郭彤颖,吴成东,曲道奎.小波变换理论应用进展[J].信息与控制,2004,3(1):67-71.

[11] 刘崇春,裴正定,杜锡钰.小波变换理论及其在信号处理中的应用[J].北方交通大学学报,1997,21(1):20-27.

[12] Stockwell R G, Mansinha L P, Lowe R. Localization of the complex spectrum; the S transform [J]. IEEE transactions on signal processing, 1996, 44(4): 998-1001.

[13] 刘振明,顾汉明,詹凤林.变换时频分析在隧道岩溶地震勘探解释中的应用[J].工程地球物理学报,2010,7(1):50-54.

[14] 陈雨红,杨长春,曹齐放,等.几种时频分析方法比较[J].地球物理学报,2006,21(4):1180-1185.

[15] 张大洲,熊章强,秦臻.基于 Fourier 变换的瑞雷面波分离提取及实例分析[J].中南大学学报:地球科学版,2010,41(2):643-648.

[16] 凡有华,刘家琦,肖柏勋.计算瑞利波频散曲线的快速矢量传递算法[J].湖南大学学报,2002,29(5):25-30.

A comparative study of surface wave dispersion curves extracted from S transform and wavelet transform based on multi-mode separation

Lin Dandan, Xiong Zhangqiang, Zhang Dazhou

(School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: To compare and analyze the dispersion accuracy of Rayleigh wave calculated by wavelet transform and S transform, the authors applied staggered grid high-order finite difference method to two-layer model and six-layer model designed by the authors, then the Rayleigh wave records of different modes in time-space domain were isolated by using F-K method, and Rayleigh wave dispersion curves of different modes were calculated by using wavelet transform and S transform in comparison with the theoretical values. Finally, the two methods were used to deal with real data. The results shows that the error in the low frequency of the dispersion curve calculated by wavelet transform is relatively large and the accuracy of the dispersion curve calculated by S transform is higher than that calculated by wavelet transform on the whole.

Key words: Rayleigh wave; S transform; wavelet transform; dispersion curve

作者简介: 林丹丹(1990-),女,中南大学硕士研究生,研究方向为面波勘探数据处理。