

几种典型面波时域信号的特征分析

赖思静, 杨 伟, 李海平
(重庆交通科研设计院, 重庆 400067)

摘要: 面波技术在工程勘察及岩土工程检测中得到了较为广泛的应用。现有的理论研究主要针对对面波频散曲线的计算、正反演分析。工程中多以岩土工程勘察、路基压实质量检测以及地基承载力等测试方面应用较多。通过对大量野外面波测试信号的分析发现时域信号与测试区域地质具有很大的相关性。面波信号遇到孤石或空洞时, 时域信号会发生明显的反射或散射。地表为高刚度地层覆盖时, 面波时域信号中会有明显的高阶模态成分。若地表为软弱层时, 面波时域信号表现为振型较多, 且伴有高阶振型。测线范围内地表存在软硬分区时, 面波时域信号的同相轴存在明显的转折, 可以根据转折点确定软硬分区位置, 并判断软硬区域。现场信号数据采集时, 干扰信号常常存在, 可以根据时域信号特征判定干扰信号类型(固定干扰信号或随机干扰信号), 并采取相应措施加以解决, 以期获得高质量的信号数据。针对上述情况下的时域信号, 结合测区地质条件, 对时域信号进行工程地质解释, 从而得出几种典型时域信号反映的地质特征, 为工程技术人员现场快速判定提供帮助。

关键词: 岩土工程; 面波; 时域信号; 特征分析

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增1 - 4854 - 06

CHARACTERISTIC ANALYSIS OF TIME SIGNALS FOR SEVERAL TYPICAL SURFACE WAVES

LAI Si-jing, YANG Wei, LI Hai-ping

(Chongqing Communication Research and Design Institute, Chongqing 400067, China)

Abstract: Surface wave technique is applied extensively in engineering geological exploration and engineering testing. Existing theoretic studies have been focused on computation and forward and backward analysis, while engineering applications have been focused on geological exploration, roadbed compaction degree and groundwork bearing force testing. It is found that strong relativity exists between surface wave time domain signal and testing section's geological condition by means of studying on characteristic analysis of surface wave time signal. In media of isolated stone and hole, surface wave time domain signals occur distinct reflection and scatter. In the earth's surface with high stiffness, surface wave time domain signals exist higher mode component. In the earth's surface with weak layer, surface wave time domain signals behave lots of vibration mode component, and exist higher mode. When the earth's surface exists soft and stiff area, axis of in-phase of surface wave time domain signals has obvious transition, which makes location of soft and stiff area certain. Disturbing signals often exist in data collection, it determines type of disturbing signals(fixuping disturbing signals and random disturbing signals), and eliminates their impact. It explains the surface wave time domain signals at the aspect of engineering geology by means of testing section's geological condition, and draws some conclusions on geological characteristic reflected by several typical surface wave time domain signals, which helps engineers for quickly judgement in field.

Key words: geotechnical engineering; surface wave; time domain signal; characteristic analysis

收稿日期: 2005 - 04 - 02; **修回日期:** 2005 - 05 - 30

基金项目: 西部交通建设科技项目(200131800074, 200231800034)

作者简介: 赖思静(1976 -), 男, 硕士, 2002年于重庆大学资源与环境科学学院固体力学专业获硕士学位, 主要从事公路工程地质勘察、公路工程质量检测、岩土工程方面的研究工作。E-mail: lsijing@sohu.com。

1 引言

文[1]首先发现了面波的存在并揭示了其在弹性半空间介质中的传播特性。到了20世纪50年代初人们又发现了面波在分层介质中传播具有频散特性,从而使得面波的理论研究和工程应用研究达到了一个新的水平。在面波频散特性的理论研究方面,文[2~5]提出了采用传递矩阵方法计算面波频散曲线,并将其应用于大地构造的研究中。文[6]提出新的矩阵法计算频散曲线,大大提高了计算的速度,但是存在数值溢出和精度低等缺陷。文[7~9]则对算法作了改进,解决了上述问题。而文[10]从面波频散曲线的求取、正演和反演3个方面对面波勘探现状进行了详细总结,并讨论了存在的实践和理论问题,展望了其发展趋势。文[11]又从理论分析、测试及处理、剖面参数分析3个方面详细讨论了面波的分析方法,并详细讨论了面波时域信号遇到目的物发生反射和绕射等特点,介绍了面波在地下目的物探测中的应用情况。

近些年来,随着公路交通事业的快速发展,面波技术作为一种新型的地质勘察、无损检测技术广泛应用于公路工程地质勘察、施工质量及路基路面质量检测中。文[12]对面波勘探的应用现状和存在的问题进行了论述。文[13]中对面波的基本原理、测试方法及数据分析处理方法进行了较为深入的讨论,并给出了应用实例。文[14]中详细讨论了矩形涵洞、地下空洞探测和软弱地基调查等情况下时域信号传播特征。当前,面波勘探技术研究主要集中在两个方面:一是面波分析处理方法的理论研究,二是面波技术的工程应用研究。理论研究主要侧重于面波频散曲线的计算及正反演分析,文[10]作了较为详细的总结。工程应用以岩土工程勘察、路基压实质量检测及地基承载力等测试应用研究较多^[15~18]。

以上研究工作主要集中在面波频散曲线计算、正反演分析及面波速度与测试体的物理学参数相关分析上,但对面波传播的时域信号特征分析尚缺乏深入系统的研究。通过对大量野外面波测试信号的分析发现时域信号与测试区域地质具有很大的相关性。本文分析了几种典型时域信号所反映的地质特征,为工程技术人员现场快速判定提供帮助。

2 典型面波时域信号的特征分析

为了分析现场测试时域信号的特征,需要考察典型面波时域信号的基本特征^[13, 14]。图1是一个完整的面波时域信号记录,记录中包含了层状介质上地表接收到的面波及其他干扰波的基本波型。

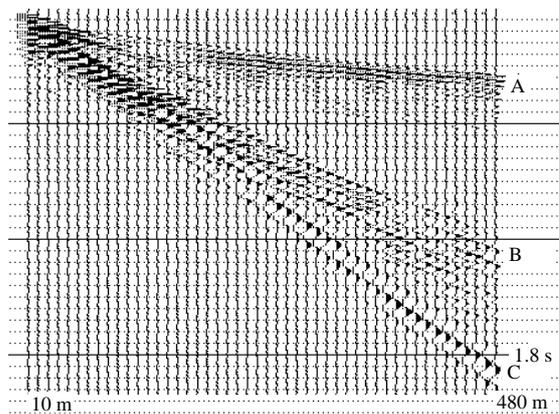


图1 时间距离域中的典型面波时域信号

Fig.1 Typical surface waves time domain signal

震源在左边,由左向右子波的到达时间越来越迟,其中标示出的3组波型有:

A: 视速度大(同相轴平缓),视周期短(主频率高),它属于浅层折射波和反射波的波型。

C: 视速度小(同相轴陡),视周期由短变长(主频率变低),它属于面波基阶模态的波型。

B: 视速度比C高(同相轴较缓),视周期比C短(主频率较高),属于面波的几个高阶模态的波型。

2.1 含局部异常体的地层

在现场测试时,地层中含有局部异常体一般存在2种情况:孤石和空洞。由于局部异常体的存在,信号在传播过程中会发生明显的变化(散射或反射)。

图2是地层中含局部异常体的面波信号,引发图中波形的震源位置在左边,正常地层的面波同相轴由左上方向右下方延伸。图中正常同相轴的中部出现向左下方的分支,表明面波向右方传播途中遇到局部异常介质,产生反向的散射。由钻孔资料得知,在测线的排列中部区域地层深部存在孤石。

图3为地层中含基坑的情况下的面波信号,从图中可以明显看出,除了面波信号以外还能看出沿声波信号到达基坑后的反射信号,从反射信号可以明显判定测试位置附近存在异常体。

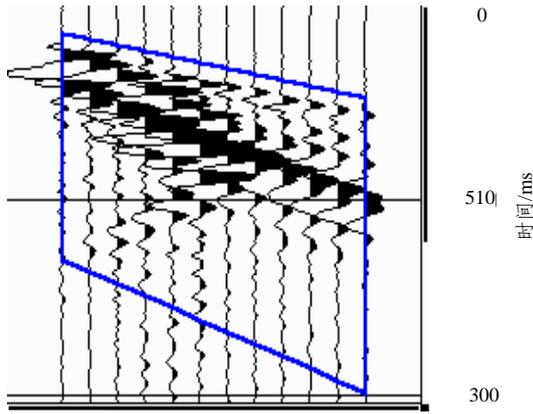


图 2 地层中含局部异常体的时域信号
Fig.2 Time domain signals of local abnormality in stratum

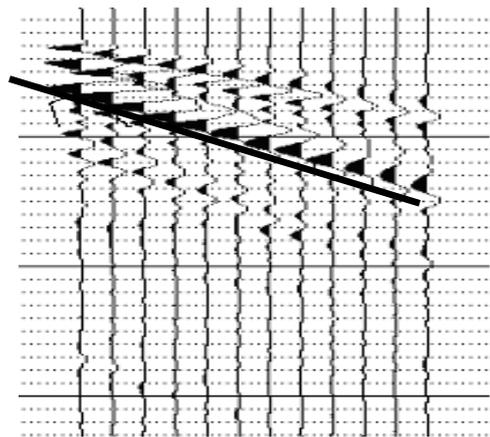


图 4 地表为高刚度地层的原始信号
Fig.4 Time domain signals of high stiffness surface

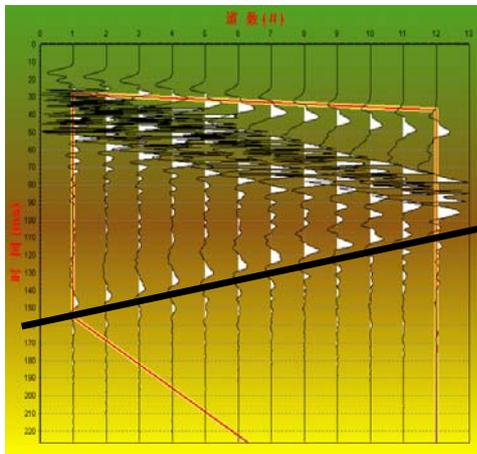


图 3 地层中含基坑的面波时域信号
Fig.3 Time domain signals of tunnel in stratum

这种异常现象在多道的时间距离域图形中容易判断，异常的水平位置也容易确定，但是难于判断异常体的深度。另外由于异常体的存在，往往会对面波的频散数据造成扭曲。由于现有的面波分析处理软件一般都是建立在排列方向上为横向均匀地层的基础之上的，针对该异常体难以通过频散数据来反映。

2.2 地表为高刚度层覆盖

采用面波法对路基路面进行施工质量检测时，往往表面为压实度较高的路基部分和沥青或水泥混凝土路面，此时的表层部分的刚度一般都比较高的。

图 4 为地表为水泥路面的填方路基时采集到的面波时域信号，其面波测试参数为：道间距 0.5 m，偏移距 2 m，采集道数 12 道，采样点数 1 024 点，采样时间 0.20 ms。由于填方路基表面为水泥路面，表明测试区域地表为高刚度层覆盖。

从图 4 中可以明显看出：

- (1) 面波时域信号的同相轴基本上没有发生转

折，表明测试的区域地层在横向上是均匀分布的；

(2) 面波同相轴较陡，表明视速度低，视周期长，反映了下覆地层的弹性波速较低，属于面波的基阶模态；

(3) 上部隐约可见视周期很短的振动，在左边距震源近的通道上振幅大，反映较明显，属于高刚度层覆盖层造成的面波的高阶模态的反映；

(4) 面波振幅随距震源距离的增大急剧衰减，表明面波在传播过程中能量衰减较快，是由于地表高刚度覆盖导致的特征漏能所致。震源的弹性能量在地表高刚度覆盖的下界面向下部地层漏失，其下再没有使它向上折返的界面条件。

2.3 地表为软弱层覆盖

采用面波技术进行野外地质勘察时，一般地表为第四系覆盖，表层较软。

图 5 是地表为软弱地层的测试信号，其面波测试参数为：道间距 0.5 m，偏移距 2 m，采集道数 24 道，采样点数 1 024 点，采样时间 0.20 ms。从图 5 上可以看出，面波时域信号的同相轴基本上没有发

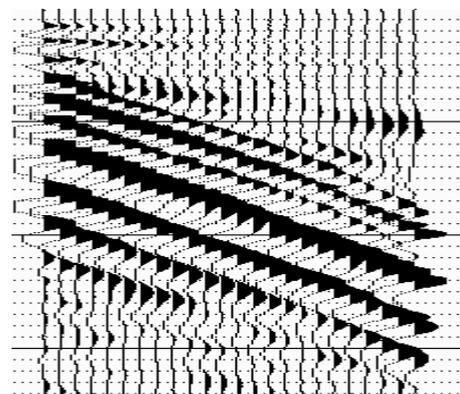


图 5 地表为软弱地层的时域信号
Fig.5 Time domain signals of soft surface

生转折, 表明测试的区域地层在横向上是均匀分布的。

为了考察地表为软弱层的面波时域信号特征, 对图 4, 5 两种现场测试信号进行了对比分析(两种信号的测试参数除了采集道数不同外, 其余均相同)。可以发现:

(1) 对于同样偏移距的瞬态信号, 地表为软弱层的第一道检波器面波初至时间比地表为硬地层的初至时间要晚;

(2) 对于同样偏移距的瞬态信号, 地表为软弱层面波传播同相轴较地表为硬地层的同相轴陡一些, 这表明地表为软弱层的面波传播速度比地表为硬地层的传播要慢;

(3) 对于同样偏移距的瞬态信号, 地表为软弱层的面波时域信号波形的振型较多, 有高阶振型存在。

2.4 地表层横向不均(软硬分区)

图 6 所示的时域信号为表层为软弱层的面波时域信号。表明检波器排列的面波信号前后同相轴斜率不一样, 即同相轴发生了转折, 这说明在地表横向上存在软硬分区。可以根据同相轴发生转折的位置初步判定 12 道检波器是一个软硬区域的分界线, 再由道间距计算出排列所在区域软弱表层的横向长度及区域。从图 6 上可以看出, 同相轴 A 斜率较同相轴 B 大, 表明同相轴 A 段地层的面波相速度较同相轴 B 段地层面波相速度大, 即 A 段地层较 B 段地层硬。

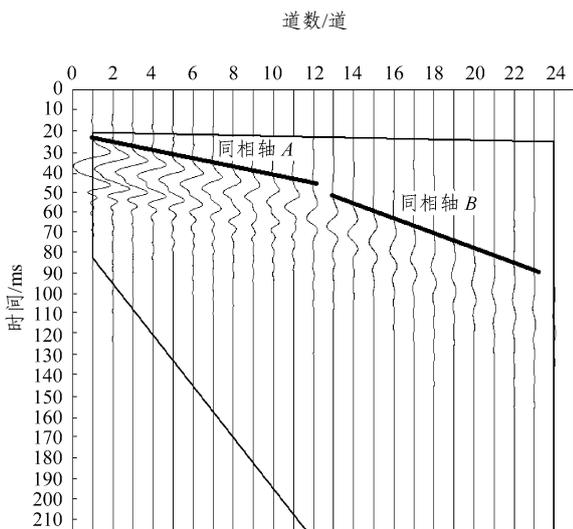


图 6 现场采集到的时域信号(左硬右软)

Fig.6 Time domain signals of field collection (the surface is stiff at left and soft at right)

图 7 所示的时域信号为表层为软弱层(左软右硬)的面波时域信号。可以根据同相轴发生转折的位

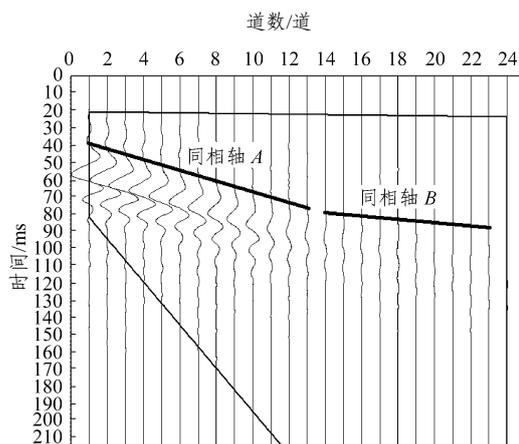


图 7 现场采集到的时域信号(左软右硬)

Fig.7 Time domain signals of field collection (the surface is soft at left and stiff at right)

置初步判定 13 道检波器是一个软硬区域的分界线, 再由道间距计算出排列所在区域软弱表层的横向长度及区域。从图 7 上可以看出, 同相轴 A 斜率较同相轴 B 小, 表明同相轴 A 段地层的面波相速度较同相轴 B 段地层面波相速度小, 即 A 段地层较 B 段地层软。

2.5 存在信号干扰下的时域信号

通过对于存在信号干扰下的时域信号的数据分析发现, 对于此类实测信号, 采用泛音分析法求不出准确的实测频散曲线, 同样采用 F-K(频率 - 波数域)分析法也求不出准确的实测频散曲线。所以在现场进行信号数据采集时一定要规避噪声信号的影响。

图 8 所示实测信号波形是在震源反方向存在低频噪声信号干扰, 干扰信号的视周期较长, 即表明干扰信号的频率较低。如果噪声为如图 8 所示的恒定信号, 须找出噪声源, 消除噪声。

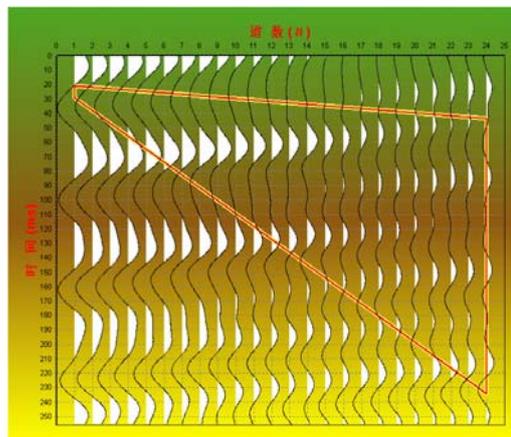


图 8 震源反方向存在低频干扰的面波信号

Fig.8 Time domain signals in the opposite direction of vibrating source

图 9 所示是在排列前方存在随机信号干扰的实测信号波形, 干扰信号没有规律性。如果噪声信号为随机噪声信号(如图 9 所示), 这类噪声可多次信号采集进行叠加方可减小噪声信号的影响。

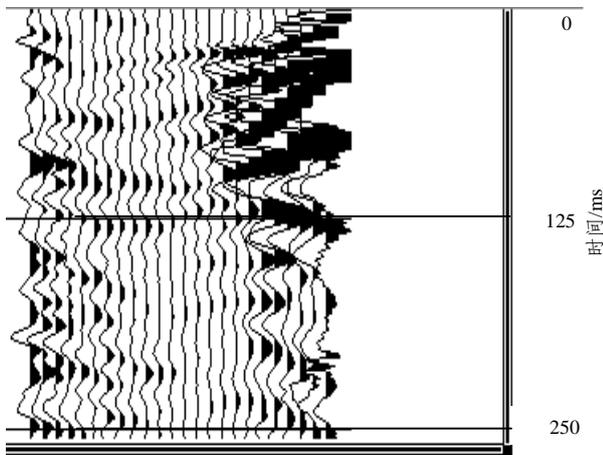


图 9 排列前方存在随机干扰的时域信号

Fig.9 Time domain signal with stochastic disturbances in the front of array

3 结 论

(1) 地层中如含有局部异常体时, 面波时域信号会产生散射或反射。

(2) 当测试区域地表层为高刚度地层时, 面波时域信号同相轴视速度低, 视周期长, 存在明显的高阶模态。振幅随距离震源的增大急剧衰减, 存在明显的特征漏能现象。

(3) 地表为软弱层覆盖时, 对应的面波时域信号波形的振型较多, 存在高阶振型。

(4) 当测线排列区域的地表层存在横向不均, 即测线方向上地层存在软硬分区时, 面波时域信号的同相轴会发生转折, 其转折点为分界点。同时可以根据同相轴的陡缓判定软硬区域。

(5) 现场测得的时域信号中干扰信号一般有两种: 随机干扰和固定干扰信号。对于随机干扰信号, 一般可以通过多次信号叠加予以消除; 对于固定干扰信号, 需找出干扰源, 从而降低或消除干扰信号。

参考文献(References):

[1] Rayleigh L. On waves propagated along the plane surface of an elastic solid[A]. In: Proceedings of the London Mathematic Society[C]. [s. l.]:

[s. n.], 1887. 4 - 11.

[2] Thomson W T. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium[J]. J. Appl. Phys., 1950, 21(1): 89 - 93.

[3] Haskall N A. The dispersion of surface waves on multilayered media[J]. Bulletin of the Seismological Society of America., 1953, 43(1): 17 - 34.

[4] Rosebaum J H. A note on the computation of Rayleigh wave dispersion curves for layered elastic media[J]. Bulletin of the Seismological Society of America., 1964, 53(3): 1 013 - 1 019.

[5] Throrer E N. The computation of the dispersion of elastic waves in the layered media[J]. J. Sound Vib., 1965, 2(3): 210 - 226.

[6] Knopoff L. A matrix method for elastic wave problems[J]. Bulletin of the Seismological Society of America., 1964, 54(1): 431 - 438.

[7] Schwab F, Knopoff L. Surface-wave dispersion computations[J]. Bulletin of the Seismological Society of America., 1970, 60(2): 321 - 344.

[8] Schwab F. Surface-wave dispersion computations: Knopoff's method[J]. Bulletin of the Seismological Society of America., 1970, 60(5): 1 491 - 1 520.

[9] Schwab F, Knopoff L. Seismic Surface Waves Methods in Computational Physics[M]. San Diego: Academic Press, Inc., 1991. 87 - 180.

[10] 祁生文, 孙进忠, 何 华. 瑞雷波勘探的研究现状及展望[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(4): 630 - 635.(Qi Shengwen, Sun Jinzhong, He Hua. Review and prospect of Rayleigh exploration[J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(4): 630 - 635.(in Chinese))

[11] 柴友华, 汪江波, 周一勤, 等. 瑞利波分析方法及应用进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 119 - 125.(Chai Youhua, Wang Jiangbo, Zhou Yiqin, et al. Progress of Rayleigh wave analysis method and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 119 - 125.(in Chinese))

[12] 王兴泰, 赵 东. 瑞雷波勘探: 应用、现状和问题[J]. 世界地质, 1995, 14(2): 87 - 100.(Wang Xingtai, Zhao Dong. Application, review and problem of Rayleigh exploration[J]. Global Geology, 1995, 14(2): 87 - 100.(in Chinese))

[13] 杨成林. 瑞雷波勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1993.(Yang Chenglin. Rayleigh Wave Exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.(in Chinese))

[14] 王振东. 浅层地震勘探应用[M]. 北京: 地质出版社, 1988.(Wang Zhendong. Application of Seismic Wave Exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988.(in Chinese))

[15] 肖 滨, 赵建三, 郭云开, 等. 地球物理方法在高速公路路基质量检测中的应用[J]. 公路, 2003, 1: 101 - 105.(Xiao Bin, Zhao Jiansan,

- Guo Yunkai, et al. Application of geophysical method to quality detection of expressway subgrade[J]. Highway, 2003, 1: 101 - 105.(in Chinese))
- [16] 张淑婷, 常锁亮, 王润福, 等. 多道瞬态瑞雷波勘探技术在岩土工程勘察中的应用[J]. 中国煤田地质, 2001, 13(4): 50 - 52.(Zhang Shuting, Chang Suoliang, Wang Runfu, et al. Application of multichannel transient Rayleigh wave exploration technique in engineering investigation[J]. China Coal Geology, 2001, 13(4): 50 - 52.(in Chinese))
- [17] 王超凡, 邹桂高, 刘金光, 等. 多道瞬态瑞雷波测波应用研究[J]. 地质科学, 2002, 37(2): 110 - 117.(Wang Chaofan, Zou Guigao, Liu Jinguang, et al. Study on application of multichannel transient Rayleigh wave exploration[J]. Chinese Journal of Geology, 2002, 37(2): 110 - 117.(in Chinese))
- [18] 宋先海, 肖柏勋, 顾汉明, 等. 反演瞬态瑞雷波频散曲线映射二维横波速度剖面[J]. 物探化探计算技术, 2003, 25(2): 105 - 109.(Song Xianhai, Xiao Baixun, Gu Hanming, et al. Mapping of 2D shear-wave velocity section by the inversion of the dispersion curves of instantaneous Rayleigh wave[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 37(2): 110 - 117.(in Chinese))