

文章编号: 1674-9057(2013)04-0629-05

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2013.04.009

基于软弱夹层模型的瑞雷面波各模式 相速度敏感性分析

周文宗, 熊章强, 张大洲

(中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘要: 针对瑞雷面波在工程勘察中常见的含软弱夹层地质结构, 分析了其各阶模式相速度对横波速度和层厚的敏感性。通过计算不同模型参数时的雅克比矩阵, 得到各阶模式相速度对变化参数的敏感性。结果表明: 在软弱夹层模型中相速度对第1层介质的敏感频段依次相连, 各阶模式相速度的敏感性曲线都出现了一个峰值; 相速度对第2层介质的敏感性增大, 各阶模式都出现两个敏感频段, 呈驼峰状; 相速度对横波速度的敏感性总体上强于对层厚的敏感性。

关键词: 瑞雷面波; 软弱夹层; 频散曲线; 横波速度; 层厚; 敏感性

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

早在1885年, 英国学者 Rayleigh 发现横波和纵波在自由表面相干涉, 从而形成一种新的波——瑞雷面波^[1]。瑞雷波在层状介质中所具有的频散特性被广泛应用于地球内部研究^[2]和工程勘察中^[3]。如何有效的利用频散曲线进行反演也就至关重要, 瑞雷在层状介质传播会产生多个模式的导波^[4-5], 仅用基阶模式的频散曲线进行反演, 将降低反演精度和可靠性^[6]; 杨天春等^[7-8]发现在不同的3层层状介质模型下接收到的导波模式不同, 且各频散曲线互不相交; Xia 等^[9]联合基阶与高阶瑞雷波进行反演, 提高反演精度; 张明财等^[10]探讨了3层层状速度递增模型中瑞雷波各阶模式频散曲线对横波速度和层厚的敏感性, 认为各阶模式相速度对表层的横波速度和层厚较敏感。

在瑞雷面波应用于工程勘察中经常会遇到软弱地层, 然而, 目前对于软弱夹层中瑞雷面波各模式导波的传播规律研究较少, 在对含软弱夹层场地的勘察中很可能会导致错误的地质解释。因

此研究软夹层中瑞雷波各模式相速度对横波速度和层厚的敏感性具有十分重要的理论及实际意义。

本文在前人研究基础上, 对含软弱夹层的3层层状介质模型中瑞雷面波各阶模式相速度对横波速度和层厚的敏感性进行分析。

1 建立模型

研究表明, 瑞雷波在层状介质中传播, 会产生无穷多个模式, 只有大于某一频率时, 高模式瑞雷波才会出现。Xia 等^[11]给出瑞雷波截止频率的计算公式

$$f_k = \frac{kv_{s1}}{2h \sqrt{1 - (v_{s1}/v_{s2})^2}}, \quad (1)$$

其中:

$$v_{s1} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} h_i}{\left(\sum_{i=1}^{n-1} (h_i/v_{s2}) \right)}, \quad (2)$$

收稿日期: 2012-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41004047; 41274123); 中南大学自由探索计划资助项目(ZL11028)

作者简介: 周文宗(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 瑞雷面波正反演, wenzongzhou@126.com。

通讯作者: 熊章强, 博士, 教授, xzqxzq666@163.com。

引文格式: 周文宗, 熊章强, 张大洲. 基于软弱夹层模型的瑞雷面波各模式相速度敏感性分析[J]. 桂林理工大学学报, 2013, 33(4): 629-633.

v_{s1} 为均匀半空间以上地层横波速度的时间加权平均; v_{s2} 为均匀半空间横波速度; k 是高模式波的阶数。

设计含软弱夹层的 3 层层状介质模型, 其模型参数如表 1。

表 1 含软弱夹层模型参数				
Table 1 Low-velocity interlayer model parameter				
层数	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	$v_p/(m \cdot s^{-1})$	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	h/m
1	200	600	1 900	10
2	100	300	1 800	10
3	225	700	2 000	∞

利用式 (1) 计算表 1 模型瑞雷波第一至第四阶高模式波截止频率分别为 $f_1 = 4.138$ Hz, $f_2 = 8.276$ Hz, $f_3 = 12.414$ Hz, $f_4 = 16.552$ Hz。为了便于计算, 对截止频率使用进一法。

Nazarian 等^[12]认为, 瑞雷波相速度可用频率和 4 个地层参数的非线性函数表示

$$v_{Rkj} = F(f_j, v_s, v_p, h_i, \rho_i), \tag{3}$$

式中: v_{Rkj} 为第 k 高阶模式、第 j 个频点的相速度, 本文中 $j = 0, 1, \cdots, 100$; $v_s = (v_{s1}, v_{s2}, \cdots, v_{sn})^T$, $v_p = (v_{p1}, v_{p2}, \cdots, v_{pn})^T$, $h_i = (h_1, h_2, \cdots, h_n)^T$, $\rho_i = (\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n)^T$, 分别为横波速度向量、纵波速度向量、层厚向量、密度向量; n 为模型层数。本文利用快速标量算法^[13]计算出表 1 模型瑞雷波频散曲线, 如图 1 所示。图中各阶模式频散曲线互不相交, 基阶模式相速度的零频率值为 213.3 m/s, 其他模式在截止频率处的相速度趋近于第 3 层介质横波速度, 随着频率的增加, 各阶模式相速度趋于稳定。

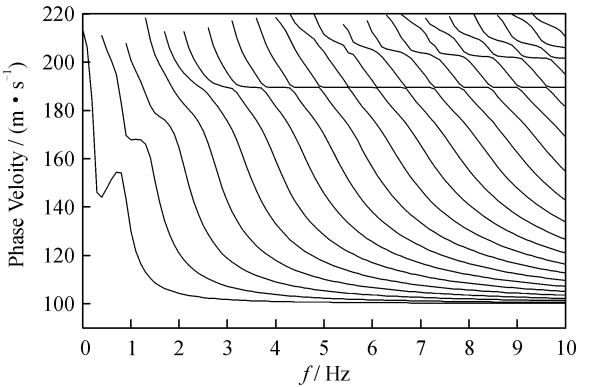


图 1 含软弱夹层模型频散曲线
Fig. 1 Dispersion curve of low-velocity interlayer model

2 敏感性分析

2.1 对横波速度的敏感性

对于敏感性的计算, 本文采用文献[14]提出的利用 Jacobian 矩阵 J_s 来计算瑞雷波相速度对横波速度的敏感性

$$J_s = \frac{\partial F / \partial v_{sn}}{\partial F / \partial v_{Rkj}} \tag{4}$$

在分析横波速度敏感性时将不同层的横波速度 v_{sn} 分别增加 10%, 其余参数不变, 利用式 (3) 计算变化后的频散曲线后通过式 (4) 得到基阶、第一高阶、第二高阶、第三高阶、第四高阶模式相速度对第各层横波速度的敏感性 (用 S 表示) 曲线。下面分别就相速度对不同层横波速度的变化进行分析。

将表 1 所示模型中的第 1 层横波速度增加 10%, 其余参数不变, 得到如图 2 所示的敏感性曲线。可以看出, 各阶模式波对第 1 层横波的敏感性主要集中于不同的频段: 基阶模式的敏感频段为 3~9 Hz; 第一高阶模式的敏感频段为 8~15 Hz; 第二高阶模式的敏感频段为 14~20 Hz; 第三高阶模式的敏感频段为 18~25 Hz; 第四高阶模式的敏感频段为 17~31 Hz, 敏感频段依次相连。各阶模式相速度对第 1 层横波速度的敏感性曲线都出现了一个峰值, 随着频率的增大, 敏感性减小, 最后趋近于 0。

将表 1 所示模型中的第 2 层横波速度增加 10%, 其余参数不变, 得到图 3 所示的敏感性曲线。

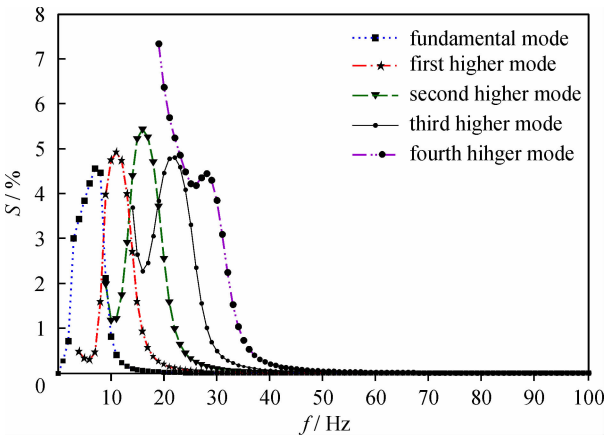


图 2 相速度对第 1 层横波速度的敏感性
Fig. 2 Sensitivity of phase velocity to shear velocity of the first layer

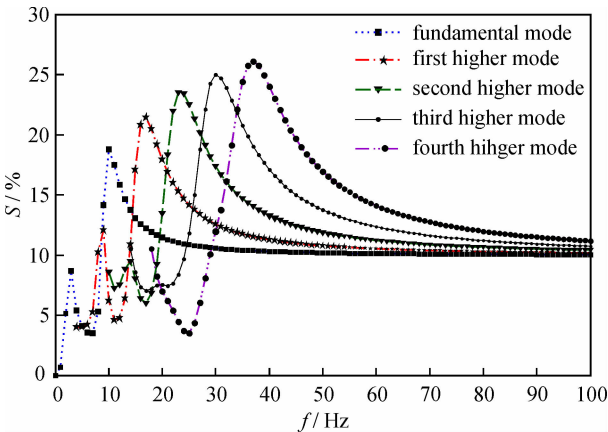


图3 相速度对第2层横波速度的敏感性
Fig. 3 Sensitivity of phase velocity to shear velocity of the second layer

对比图3和图2可以发现，相速度对第2层横波速度的敏感性增大，各阶模式都出现2个敏感频段，呈驼峰状。基阶模式的敏感频段为2~5 Hz和9~13 Hz，第一高阶模式的敏感频段为8~10 Hz和15~23 Hz，第二高阶模式的敏感频段为13~15 Hz和21~29 Hz，第三高阶模式的敏感频段为14~15 Hz和27~38 Hz，第四高阶模式的敏感频段为18~19 Hz和33~45 Hz。各阶模式的第2个敏感段依次相连，最大敏感值随模式的增高而逐渐增大（基阶模式最大敏感性为18.8%，第一高阶模式最大敏感性为21.4%，第二高阶模式最大敏感性为23.5%，第三高阶模式最大敏感性为25%，第四高阶模式最大敏感性为26.1%）。随着频率的增大，敏感性减小，最后趋近于10%。

将表1所示模型中的第3层层横波速度增加10%，其余参数不变，得到如图4所示的敏感性

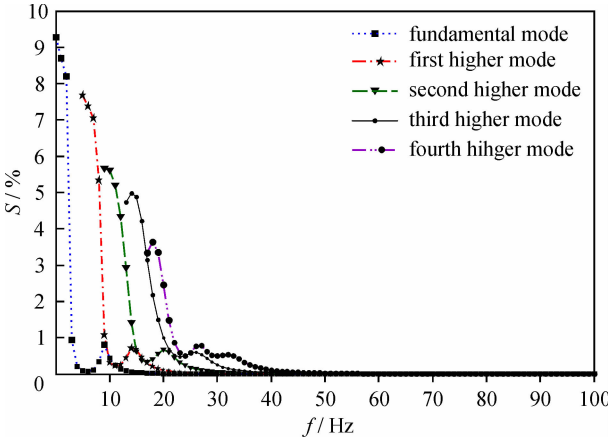


图4 相速度对第3层横波速度的敏感性
Fig. 4 Sensitivity of phase velocity to shear velocity of the third layer

曲线。基阶模式的敏感频段为0~2 Hz，第一高阶模式的敏感频段为5~8 Hz，第二高阶模式的敏感频段为9~13 Hz，第三高阶模式的敏感频段为13~18 Hz，第四高阶模式的敏感频段为17~20 Hz。随着频率的增大，敏感性减小，最后趋近于0。各阶模式相速度对第1层层厚的敏感性都小于10%。

2.2 对层厚的敏感性

在分析相速度对层厚的敏感性时将仅对不同层厚 h_i 分别增加10%后由式(3)和式(4)计算 J_s ，得到基阶、第一高阶、第二高阶、第三高阶、第四高阶模式相速度对厚度的敏感性曲线。

将表1所示模型中的第1层层厚增加10%，其余参数不变，得到如图5所示的敏感性曲线。从图中可以看出相速度对第1层层厚的敏感性明显小于对横波速度的敏感性，各阶模式相速度对第1层层厚的敏感性都小于3%。

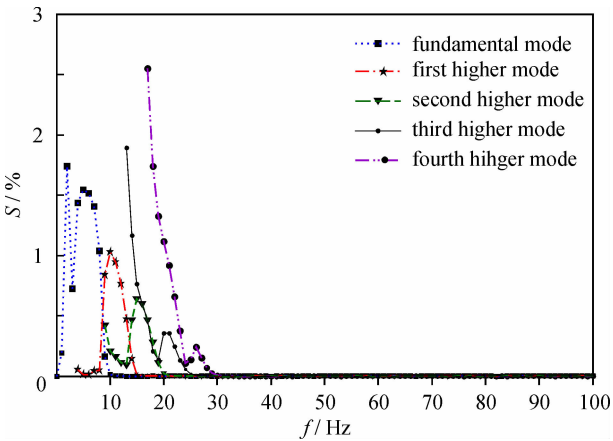


图5 相速度对第1层层厚的敏感性
Fig. 5 Sensitivity of phase velocity to thickness of the first layer

表1所示模型中的第2层层厚增加10%，其余参数不变，得到如图6所示的敏感性曲线。对比图5和图6可以看出：相速度对第2层层厚的敏感性大于对第1层层厚的敏感性，各模式相速度对第2层厚度的敏感性都出现两个敏感频段，基阶模式的敏感频段为2~3 Hz和8~12 Hz，第一高阶模式的敏感频段为5~9 Hz和13~18 Hz，第二高阶模式的敏感频段为9~14 Hz和18~26 Hz，第三高阶模式的敏感频段为13~19 Hz和23~32 Hz，第四高阶模式的敏感频段为17~19 Hz和18~40 Hz。高阶模式的第1个敏感性频段都是从截止频率开始，第2个敏感性频段依次相连。第2

个敏感频段最大敏感性随模式的增高而逐渐增大(基阶模式最大敏感性为 12.3%, 第一高阶模式最大敏感性为 13.3%, 第二高阶模式最大敏感性为 15.3%, 第三高阶模式最大敏感性为 16.32%, 第四高阶模式最大敏感性为 17.1%), 随着频率的增大, 敏感性减小, 最终趋近于 0。各阶模式相速度对第 2 层层厚的敏感性都小于 20%。

为了比较相速度对横波速度与对层厚的敏感性, 特对同一频点处, 用相速度对第 2 层横波速度的敏感性减去对第 2 层层厚的敏感性, 得到敏感性差值如图 7 所示。图中各模式波在较小的频段范围内, 相速度对第 2 层层厚的敏感性强于对第 2 层横波速度。总体上相速度对第 2 层横波速度的敏感性强于对第 2 层层厚。

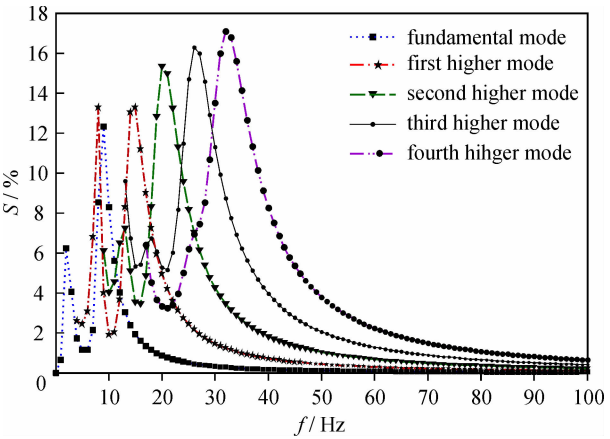


图 6 相速度对第 2 层层厚的敏感性
Fig. 6 Sensitivity of phase velocity to thickness of the second layer

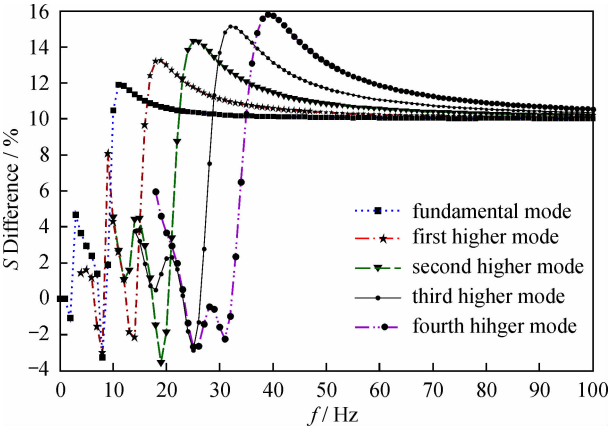


图 7 相速度对第 2 层横波速度与对第 2 层层厚敏感性比较

Fig. 7 Sensitivity comparison of phase velocity to shear velocity and thickness of the second layer

3 结 论

通过改变模型横波速度和层厚来研究相速度的变化可以得出: 瑞雷面波各阶模式波相速度对软夹层中横波速度和层厚都较为敏感, 但总体上相速度对横波速度的敏感性强于对层厚的敏感性。

相速度对第 1 层介质的横波速度和厚度的敏感频段依次相连, 各阶模式相速度的敏感性曲线都出现了一个峰值, 随着频率的增大, 敏感性减小, 最后趋近于 0。相速度对第 2 层介质的横波速度和厚度的敏感性增大, 各阶模式都出现两个敏感频段, 呈驼峰状, 高阶模式的第 1 个敏感性频段都是从截止频率开始, 第 2 个敏感性频段依次相连, 第 2 个敏感频段最大敏感性随模式的增高而逐渐增大。总体来看瑞雷面波相速度对软弱夹层中横波速度和厚度敏感性较高。

软弱夹层模型中, 瑞雷面波各阶模式相速度对软夹层中横波速度和层厚都较为敏感。然而在速度递增模型中, 各阶模式波仅对表层的横波速度和层厚较敏感(参见文献[10]), 两种不同模型的敏感性特征表明瑞雷面波法更适用于软弱夹层的勘察。

参考文献:

[1] Rayleigh L. On waves propagated along the plane surface of an elastic solid [J]. Proceedings of the London Mathematic Society, 1885, 17: 4-11.

[2] 徐果明, 李光品, 王善恩, 等. 用瑞利面波资料反演中国大陆东部地壳上地幔横波速度的三维构造 [J]. 地球物理学报, 2000, 43 (3): 366-375.

[3] 单娜琳, 程志平. 高阶模态面波在软弱薄层探测中的应用 [J]. 桂林工学院学报, 2004, 24 (2): 155-158.

[4] 肖柏勋. 高模式瑞雷面波及其正反演研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2000.

[5] 张碧星, 肖柏勋, 杨文杰, 等. 瑞利波勘探中“之”形频散曲线的形成机理及反演研究 [J]. 地球物理学报, 2000, 43 (4): 551-567.

[6] Zhang S X, Chan L S. Possible effects of misidentified mode number on Rayleigh wave inversion [J]. Journal of Applied Geophysics, 2003, 53 (1): 17-29.

[7] 杨天春, 何继善, 吕绍林, 等. 三层层状介质中的多导波模式及其频散和位移特征 [J]. 物探化探计算技术, 2004, 26 (1): 20-26.

[8] 杨天春, 何继善, 吕绍林, 等. 三层层状介质中瑞利波的频散曲线特征 [J]. 物探与化探, 2004, 28 (1): 41 – 45.

[9] Xia J, Miller R D, Park C B. Advantages of calculating shear-wave velocity from surface waves with higher modes [C] //70th Annual Meeting, Calgary, Canada, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 2000: 1295 – 1298.

[10] 张明财, 熊章强, 张大洲, 等. Rayleigh 面波各阶模式频散曲线对横波速度和层厚的敏感性探讨 [J]. 物探化探计算技术, 2011, 33 (2): 153 – 158.

[11] Xia J, Xu Y, Chen C, et al. Simple equations guide high-frequency surface-wave investigation techniques [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26 (5): 395 – 403.

[12] Nazarian S, Stokoe K H, Hudson W R. Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thickness of pavement systems [J]. Transportation Research Record, 1983, 930: 38 – 45.

[13] 凡友华, 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.

[14] 罗银河, 夏江海, 刘江平, 等. 基阶与高阶瑞利波联合反演研究 [J]. 地球物理学报, 2008, 51 (1): 242 – 249.

Sensitivity Analysis of Multiple Modes Rayleigh Waves Phase Velocity by Low-Velocity Interlayer Model

ZHOU Wen-zong, XIONG Zhang-qiang, ZHANG Da-zhou
(College of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The sensitivity of multiple modes Rayleigh waves phase velocity are analyzed based on a low-velocity interlayer model. The results show that the wave phase velocity of multiple modes is very sensitive to the shear velocity of low-velocity interlayer and thickness of the layer. The wave phase velocity is more sensitive to the shear velocity than thickness of the layer. The sensitive band of fundamental model is concentrated in a narrow band of low frequency. Inverting Rayleigh waves of fundamental and higher modes can effectively improve the accuracy of inverted S-wave velocities. The sensitivity of multiple modes Rayleigh waves phase velocity to the shear velocity of low-velocity interlayer and thickness of the layer show that Rayleigh surface wave method is suitable for low-velocity interlayer survey.

Key words: Rayleigh wave; low-velocity interlayer; dispersion curve; shear velocity; thickness of layer; sensitivity