

邵广周,李庆春,梁志强. 液体表层层状介质导波频散曲线研究. 地球物理学报, 2007, 50(3): 915~920

Shao G Z, Li Q C, Liang Z Q. A study on dispersion curves of guided wave in layered media with overlying liquid surface. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(3): 915~920

# 液体表层层状介质导波频散曲线研究

邵广周,李庆春,梁志强

长安大学应用地球物理研究所,西安 710054

**摘 要** 随着地震勘探向浅海、湖泊等流体覆盖层的渗透,存在液体表层或夹层介质中导波的传播研究受到人们重视.在前人研究工作的基础上,本文对存在上覆液体层时的两层、三层以及低速夹层的固体层状介质模型的频散曲线进行了数值计算,分析了当上覆液体表层的厚度变化时多模式导波频散曲线特征.通过与没有液体表层时的完全固体介质模型相对比,研究了存在上覆液体表层时多模式导波频散曲线独特的形态特征,进一步引伸出在滩浅海进行地震勘探中应注意的问题.为在滩浅海及湖泊等表层为液体覆盖层的地区利用导波进行勘探和研究提供一定的研究思路和理论依据.

**关键词** 频散曲线,导波,层状介质,液体层

文章编号 0001-5733(2007)03-0915-06

中图分类号 P631

收稿日期 2006-04-24, 2007-01-17 收修定稿

## A study on dispersion curves of guided wave in layered media with overlying liquid surface

SHAO Guang-Zhou, LI Qing-Chun, LIANG Zhi-Qiang

*Institute of Applied Geophysics, Chang'an University, Xi'an 710054, China*

**Abstract** With seismic exploration extending to liquid-covered areas (such as shallow sea and lakes), much attention is being paid to the propagation of the guided wave in media underlying a liquid layer or with interlayers. Based on previous researches, we calculate the dispersion curves respectively for two-layer, three-layer and a low-speed-inter layer models, which are covered with a liquid layer. We analyze the different characteristics of the multi-mode guided wave, for varied thickness of the liquid layer. We compare the geometric characteristics of the multi-mode dispersion curves to those of that without a liquid surface. And then, we point out some problems which should be taken into consideration when seismic exploration is applied in off-shore areas. The study in this paper may provide some thoughts and theoretical bases for guided wave exploration in liquid-covered areas.

**Key words** Dispersion curve, Guided wave, Layered medium, Liquid layer

## 1 引 言

自 20 世纪 50 年代初,发现瑞雷面波在层状介质中具有频散特性以来,面波的理论研究及应用得

到了极大的重视与发展<sup>[1~7]</sup>.在面波频散正演方面,相继出现了 Thomson-Haskell 法<sup>[7,8]</sup>(1953), Knopoff 分解法(1953)、快速 Schwab-Knopoff 法(1970)、矩阵法(1953,1965,1970)、RT 矩阵法(1974)、Abo-Zena 法(1979)、快速 矩阵法等方法<sup>[7]</sup>,一大批学者先后

基金项目 国家 863 计划(2005AA615010)资助.

作者简介 邵广周,男,1977 年生,讲师,2003 年获长安大学地球探测与信息技术硕士学位,现为在职博士研究生.主要从事面波地震勘探与地球物理信号处理方面的研究. E-mail: shaoguangzhou@tom.com

从事这方面的研究工作,大大推进了瑞利波频散的正反演研究.然而由于只考虑了固体介质情况,上述算法不适用于计算表层为液体层介质情况下的导波频散问题.朱介寿<sup>[8]</sup>、陈蔚天<sup>[9]</sup>等人在天然地震中采用水平层状介质的陆模型和海洋模型来研究地球内部结构,而他们的研究也仅限于利用天然地震面波来研究地球深部结构,并不适用于液体覆盖地区的浅层结构探测.近年来,瑞雷面波勘探作为一种新型的有效手段,在陆地地区的浅层工程地质勘察中也得到广泛的应用和发展<sup>[7, 10]</sup>.上述研究和应用大多都集中在介质模型为固体的水平层状介质.对于表层为液体层的水平层状介质的导波频散曲线研究,尚未广泛开展.有资料表明<sup>[11]</sup>,在海底附近,沿海水层和海底附近的分界面上存在海底波.这是一种在液体-固体分界面上形成的一种斯通利波 (Stoneley Wave),这种波对海底电缆 (OBC) 地震勘探是有影响的.反过来看,如果能够从 OBC 资料中提取该类导波,研究并加以利用,或者研究在液体覆盖区利用导波来探测浅层结构的方法技术,无疑具有重要的研究意义和实用价值.本文在前人工作和研究成果的基础上,以表层为液体层的水平层状介质模型为例,开展理论研究和数值模拟计算,并分析该导波多阶模式的频散曲线特征,为在滩浅海及湖泊

等表层为液体覆盖层的地区利用导波进行勘探和研究提供一定的研究思路 and 理论依据.

## 2 理论依据

本文所考虑的表层为液体层的水平层状固体介质模型,实际上可以模拟水平层状海洋地球模型<sup>[8]</sup>,如图 1 所示.

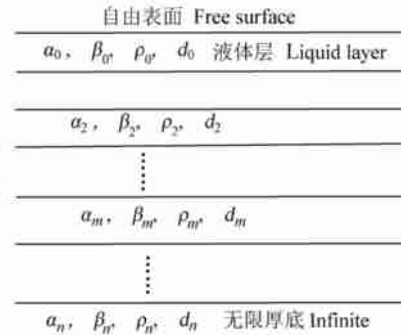


图 1 液体表层层状介质模型示意图  
Fig. 1 Liquid-covered layered media model

满足自由表面 (液体面) 应力分量为零,液 - 固界面位移及应力垂直分量连续,切向分量为零的条件,由此可得以下  $2 \times 4$  阶界面子矩阵:

$$U_{liq}^{(0)} = \begin{bmatrix} -\alpha_0(1 - \beta_0) & j\alpha_0 \rho_0 \text{tg } P_0 / \rho_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_0(1 - \beta_0) & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

对于第  $m$  层 ( $m = 0, 1, \dots, n$ ,  $n$  为模型总分层数), (1) 式各项的表达形式分别为

$$U_m = \begin{cases} + [(c/c_m)^2 - 1]^{\frac{1}{2}} & c > c_m \\ - i[1 - (c/c_m)^2]^{\frac{1}{2}} & c < c_m \end{cases},$$

$$U_m = \begin{cases} + [(c/c_m)^2 - 1]^{\frac{1}{2}} & c > c_m \\ - i[1 - (c/c_m)^2]^{\frac{1}{2}} & c < c_m \end{cases}.$$

$\rho_m$  为密度,  $d_m$  为厚度,  $c_m$  为纵波速度,  $c_m$  为横波速度,  $c$  为导波的相速度, liq 表示液体.

因此,最终得到的频散函数在  $n$  为偶数和奇数时分别为

$$F_R(\omega, c) = [V^{(n-1)}, W^{(n-1)}, R^{(n-1)}, S^{(n-1)}] \times \begin{bmatrix} - (1 - c^2/c_n^2)^{1/2} \\ - (1 - c^2/c_n^2)^{1/2} (1 - c^2/c_n^2)^{1/2} \\ 1 \\ - (1 - c^2/c_n^2)^{1/2} \end{bmatrix};$$

( $n$  为偶数时)

$$F_R(\omega, c) = [V^{(n-1)}, W^{(n-1)}, R^{(n-1)}, S^{(n-1)}] \times \begin{bmatrix} (1 - c^2/c_n^2)^{1/2} \\ 1 \\ - (1 - c^2/c_n^2)^{1/2} (1 - c^2/c_n^2)^{1/2} \\ (1 - c^2/c_n^2)^{1/2} \end{bmatrix};$$

( $n$  为奇数时) (2)

其中递推频散函数所用的实数初值为

$$U^{(0)} = -\alpha_0(1 - \beta_0),$$

$$V^{(0)} = 0,$$

$$R^{(0)} = \frac{\alpha_0}{\rho_0},$$

$$W^{(0)} = (1 - \beta_0)^2,$$

$$S^{(0)} = \text{tg } P_0 / (\alpha_0 \rho_0),$$

$$= (-1)^{n-1} \frac{\alpha_0 c^2}{\rho_0 c_n^2} / (\alpha_n \rho_n \frac{c_n^2}{c_n^2}). \quad (3)$$

篇幅所限,文中只给出必要的数学公式,具体推导可

见文献[8].

### 3 液体表层下存在两层固体介质时导波频散曲线

表 1 为两层固体介质上覆液体层模型, 固体介质的纵波速度、横波速度以及介质密度都随深度的增加而增大. 数值计算时, 液体层以水为例, 水的纵波速度取为 1520 m/s, 密度取为 1030 kg/m<sup>3</sup>. 若液体层为除水之外的其他液体(如油层等), 则取其相应的速度和密度参数进行计算即可. 以下除特殊说明外, 液体层均为水层.

表 1 两层固体介质上覆液体层模型  
Table 1 Two layer solid medium model with a liquid covered layer

层数	纵波速度 / (m·s <sup>-1</sup> )	横波速度 / (m·s <sup>-1</sup> )	密度 / (kg·m <sup>-3</sup> )	厚度 h/m	导波相速度 c / (m·s <sup>-1</sup> )
0	1520	0.0	1030	$h_{liq}$	0.0
1	2000	1200	1800	10	1097
2	2800	1800	2000		1623

图 2 给出了液体层厚度  $h_{liq}$  不同时导波的各频散曲线. 图 2a 为无液体表层时的导波频散曲线; 图 2(b~d) 则给出了液体表层在 3 种不同厚度情况下的导波频散曲线. 在速度递增分层介质模型参数情况下, 导波频散存在无限多个模式, 从低频到高频将这些模式称为第 1、2、3、4 阶模式(下同)<sup>[6,7]</sup>. 由图 2 可以看出, 不管是否存在液体表层, 导波频散曲线的基阶模式都没有截断频率, 并且其相速度的零频极限都为只有第二层固体介质时半空间的导波速度  $c_2$  (1623 m/s). 当没有液体表层时, 基阶模式的高频极限为只有第一层固体介质时半空间的导波速度  $c_1$  (1097 m/s)<sup>[6]</sup>, 而存在液体表层且液体层的纵波速度大于下层固体介质横波速度的情况下, 基阶模式高频极限与固体软夹层时类似(固体软夹层时, 所有诸模式的高频速度都趋向于第二层软弱夹层的横波速度<sup>[7]</sup>). 所不同的是基阶模式高频极限相速度略小于第一层固体介质的横波速度且不存在逆频散现象. 这可能是由于液体层的存在而产生的一种特殊现象. 对于液体层的纵波速度小于下层固体介质横波速度的情况, 基阶模式与高阶模式频散曲线的高频极限则都为上层液体层中的纵波速度  $c_0$  (篇幅所

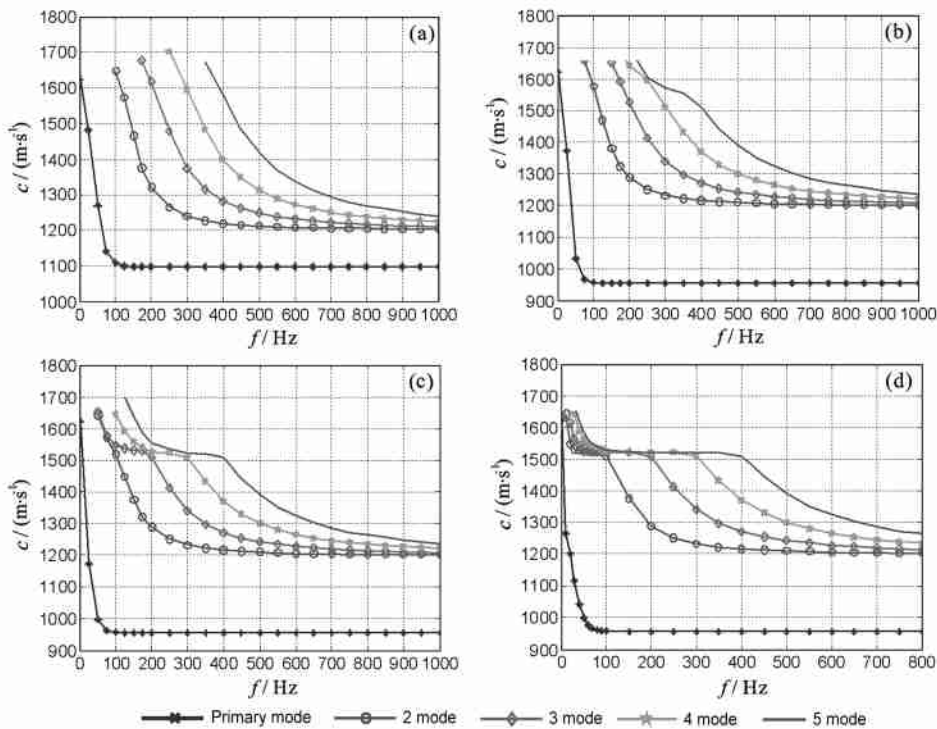


图 2 表层条件不同时两层固体介质导波的频散曲线

(a) 固体介质模型; (b) 固体介质, 液体表层厚 5 m; (c) 固体介质, 液体表层厚 20 m; (d) 固体介质, 液体表层厚 100 m.

Fig. 2 Dispersion curves of a two layer solid medium under different conditions of the surface layer

(a) Two-layer solid medium model; (b) Two-layer solid medium, thickness of liquid surface: 5 m; (c) Two-layer solid medium, thickness of liquid surface: 20 m; (d) Two-layer solid medium, thickness of liquid surface: 100 m.

限,文中没有给出两层固体介质在此情况下的算例,读者可参见图3和图4(b~d).图2中各频散曲线的高阶模式都存在截止频率,并且在截止频率处的相速度趋近于第二层固体介质的横波速度 $c_2$ (1800 m/s).不管是否存在液体表层,高阶模式相速度的高频极限都为第一层固体介质的横波速度 $c_1$ (1200 m/s).由图2(b~d)可以看出,在存在液体表层的两层水平固体均匀介质中,导波频散曲线的高阶模式存在一段近似水平段,并且随着液体表层深度的增加,水平段的趋势越来越明显,频散曲线水平段处的相速度大约为表层液体的纵波速度(1520 m/s).随着液体表层深度的增加,导波高阶模式的频散曲线有向低频方向集中的趋势.

### 4 液体表层下存在三层固体介质时导波频散曲线

#### 4.1 液体表层下存在速度递增型三层固体介质时的导波频散曲线

表2为三层固体介质上覆液体层模型,以及依次递增.

图3给出了三层固体介质模型在液体层厚度 $h_{liq}$ 不同时导波的各种频散曲线.图3a为无液体表层

表2 三层固体介质上覆液体层模型  
Table 2 Three solid layered media model with a liquid covered layer layer

层数	纵波速度 /( $m \cdot s^{-1}$ )	横波速度 /( $m \cdot s^{-1}$ )	密度 /( $kg \cdot m^{-3}$ )	厚度 h/m	导波相速度 $c$ /( $m \cdot s^{-1}$ )
0	1520	0.0	1030	$h_{liq}$	0.0
1	4000	2500	2500	10	2269
2	5000	3000	2800	20	2743
3	6000	3500	3000		3213

时的导波频散曲线;图3(b~d)则给出了液体表层在三种不同厚度情况下的导波频散曲线.可以看出,不管是否含有液体层以及液体层的深度如何,基阶模式相速度的零频极限都为只有最底层(第三层)固体介质时的导波速度 $c_3$ (3213 m/s).当固体介质表层没有液体层时,基阶模式的高频极限为只有第一层固体介质时的导波速度 $c_1$ (2269 m/s),高阶模式在截止频率处的相速度为最底层介质的横波速度 $c_3$ (3500 m/s),高频极限为第一层固体介质时的横波速度 $c_1$ (2500 m/s).而当三层固体介质表层存在液体层时,基阶模式与高阶模式频散曲线的高频极限都为上层液体层中的纵波速度 $c_0$ (1520 m/s)(注意,此时液体层的纵波速度小于下层固体介质横波

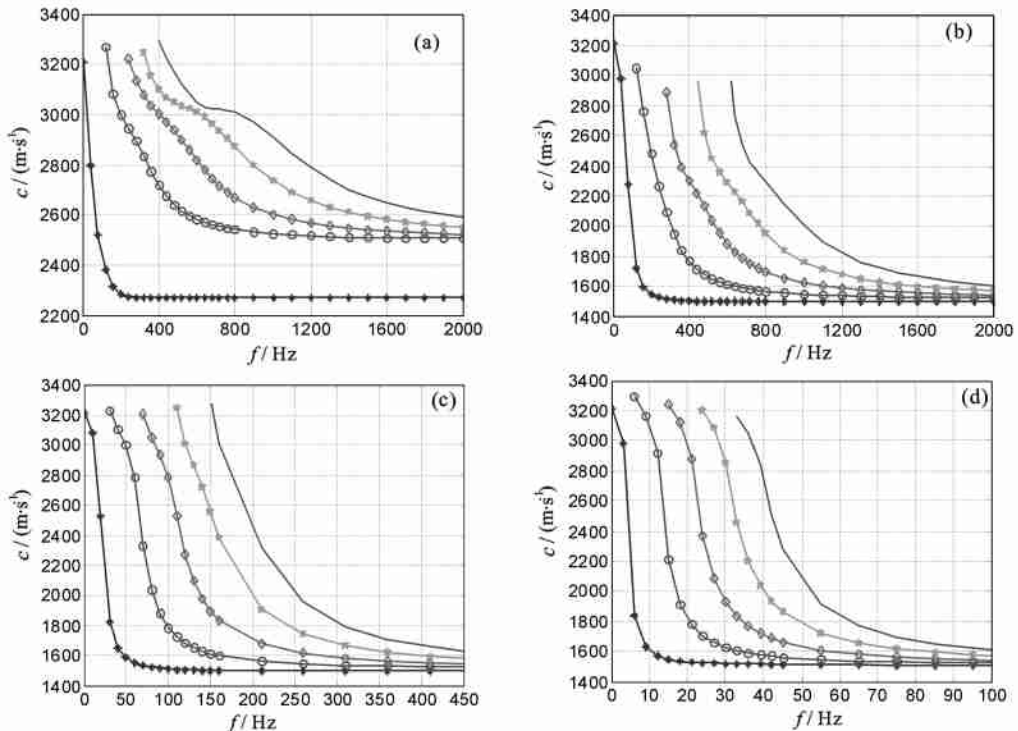


图3 表层条件不同时三层固体介质导波的频散曲线  
图注同图2.

Fig. 3 Same as Fig. 2 but for the three-layer medium

速度), 同样, 高阶模式在截止频率处的相速度也为最底层介质的横波速度  $c_3$ . 并且通过对比图 3 中的 (b、c、d) 可以知道, 随着液体表层深度的增加, 导波各阶模式的频散曲线开始向低频集中, 且密集程度增大, 即基阶模式和高阶模式相距更近, 说明“海底波”各模式的分布会随着表层液体的增厚而变化, 因而在浅海地区进行 OBC 勘探要充分重视导波的影响.

#### 4.2 液体表层下存在含有低速软夹层的三层固体介质时的导波频散曲线

表 3 所列出的模型为陆地工程勘探中产生“之”字型频散曲线的低速软夹层<sup>[4-6]</sup>, 在工程中经常遇见这种情况, 如海洋油气勘探中的储层以及地下存在的塌陷、暗穴、空洞及破碎带等, 高强度材料中的裂隙, 气泡等.

图 4 给出了含有低速夹层的三层固体介质模型在液体层厚度  $h_{liq}$  不同时导波的各频散曲线. 图 4a 为无液体表层时的导波频散曲线; 图 4 (b ~ d) 则给

表 3 含有低速软夹层的三层固体介质上覆液体层模型  
Table 3 Three-layer solid medium model with an overlying liquid surface and a low velocity interlayer

层数	纵波速度 /( $m \cdot s^{-1}$ )	横波速度 /( $m \cdot s^{-1}$ )	密度 /( $kg \cdot m^{-3}$ )	厚度 $h/m$	导波相速度 $c/(m \cdot s^{-1})$
0	1520	0.0	1030	$h_{liq}$	0.0
1	5000	3000	3000	5	2743
2	3500	2000	2200	2	1841
3	6000	3500	3500		3213

出了液体表层在三种不同厚度情况下的导波频散曲线. 与表 2 中三层固体介质速度递增模型的频散曲线相对比, 可以发现, 此时导波的频散曲线有所不同. 当模型表层无液体层时, 由于低速软夹层的存在, 使得基阶模式呈现正频散与逆频散现象, 并且频散曲线的形态表示为“隆起”, 而当模型的表层存在液体层时, 该“隆起”明显向高阶模式“转移”, 随着液体表层的厚度逐渐增大, 该“隆起”逐渐消失. 这可能

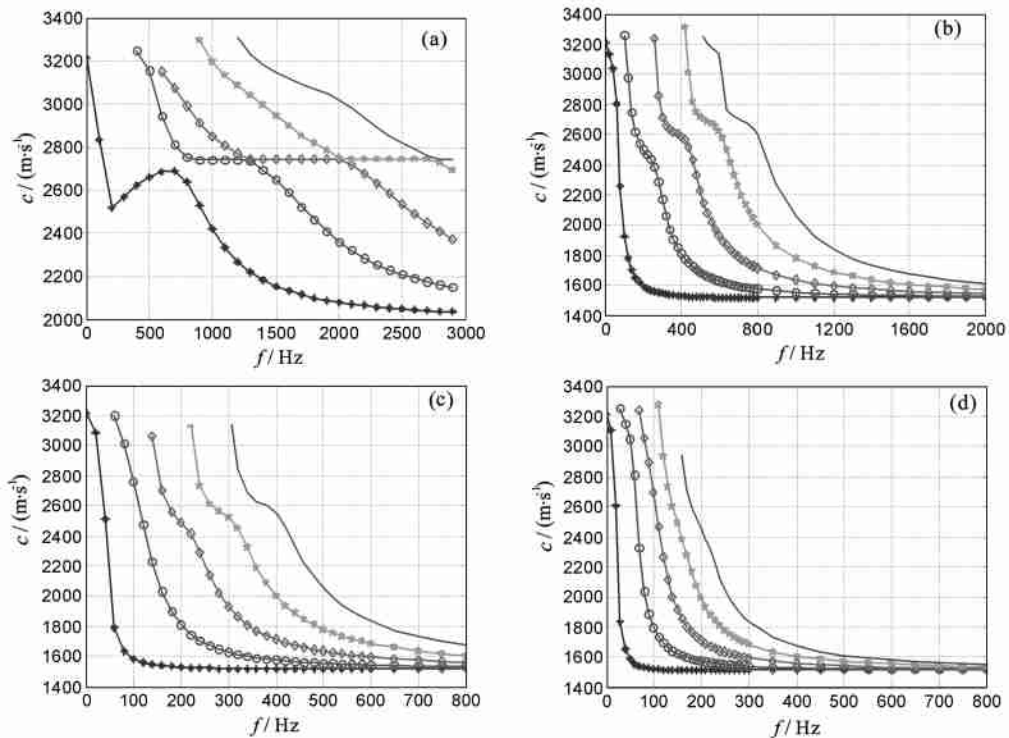


图 4 表层条件不同时含有低速软夹层的三层固体介质导波的频散曲线

(a) 固体介质模型; (b) 固体介质, 液体表层厚 5 m; (c) 固体介质, 液体表层厚 10 m; (d) 固体介质, 液体表层厚 20 m.

Fig. 4 Dispersion curves of a three-layer solid medium with a low velocity interlayer under different conditions of the surface layer

(a) Three-layer solid medium model; (b) Three-layer solid medium, thickness of liquid surface: 5m; (c) Three-layer solid medium, thickness of liquid surface: 10 m; (d) Three-layer solid medium, thickness of liquid surface: 20 m.

与存在液体表层时面波中的能量主要集中在浅层有关<sup>[3]</sup>,也说明在湖泊或者浅海地区等表层存在较厚液体层的环境下利用导波寻找下伏软夹层更为困难,或者说在浅水、沼泽环境下开展水底电缆地震勘探,要特别重视压制或提取利用导波.如何利用这些频散曲线的特性,并且将其应用在滩浅海等地区的浅层结构探测中,如探测浅层海水下存在的低速夹层(含油气层或裂缝空洞等),将会是下一步工程应用研究的一个重要方向.

## 5 结 论

通过理论计算,本文研究了在有液体表层存在的情况下,海洋模型水平层状介质中导波各阶模式的频散曲线形态,与完全固体层状介质模型的频散曲线形态做了对比,发现存在液体表层且液体层的纵波速度小于下层固体介质的横波速度时,导波频散曲线基阶模式的高频极限均为液体表层纵波速度,并且当液体层厚度不同时,导波各阶模式都向低频方向集中,且密集程度增大.当液体表层的纵波速度大于下层固体介质横波速度时,导波频散曲线基阶模式的高频极限相速度略小于第一层固体介质的横波速度且不存在逆频散现象.这可能是由于液体层的存在而产生的一种特殊现象.针对实际工作中经常碰到的低速夹层的讨论,发现存在液体表层时,随着液体层厚度的增大,频散曲线的逆频散逐渐变为正频散且明显向高阶模式转移.液体表层对下层固体介质的影响随着上覆液体表层深度的加大而越来越大,其原有的(即完全固体或者液体表层比较薄时)频散曲线形态也变得越来越不明显,这说明在表层液体比较厚时利用导波进行勘探的困难性,同时也说明当介质表层的液体层比较薄时(如浅海区)应充分重视面波的影响.上述研究为在滩浅海及湖泊等表层为液体覆盖层的地区利用导波进行勘探和研究提供一定的研究思路和理论依据.下一步将结合实际资料的面波提取与正反演结果作深入讨论.

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Xia J H, Richard D M, Choon B P. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *J. Geophys. Res.*, 1999, **64**(3): 691 ~ 700
- [ 2 ] Xia J H, Richard D M, Choon B P. Advantages of calculating shear-wave velocity from surface waves with higher modes. Expanded Abstracts. 70th Ann. Int. Meeting, Soc. Expl. Geophys., 2000. 1295 ~ 1298
- [ 3 ] 张碧星, 兰从庆, 喻明等. 分层介质中面波的能量分布. 声学学报, 1998, **23**(2): 97 ~ 106  
Zhang B X, Lang C Q, Yu M, et al. Energy distribution of surface wave in stratified media. *Acta Acustica* (in Chinese), 1998, **23**(2): 97 ~ 106
- [ 4 ] 张碧星, 肖柏勋, 杨文杰等. 瑞雷波勘探中“之”字型频散曲线的形成机理及反演研究. 地球物理学报, 2000, **43**(4): 557 ~ 567  
Zhang B X, Xiao B X, Yang W J, et al. Study on the mechanism of Zigzag dispersion curves in the Rayleigh wave exploration and inversion problems. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, **43**(4): 557 ~ 567
- [ 5 ] 张碧星, 鲁来玉. 层状半空间中导波的传播. 声学学报, 2002, **27**(4): 295 ~ 304  
Zhang B X, Lu L Y. Propagation of guided waves in stratified half space. *Acta Acustica* (in Chinese), 2002, **27**(4): 295 ~ 304
- [ 6 ] 张碧星, 鲁来玉, 鲍光淑. 瑞利波勘探中“之”字形频散曲线研究. 地球物理学报, 2002, **45**(2): 263 ~ 274  
Zhang B X, Lu L Y, Bao G S. Study on the Zigzag dispersion curves in the Rayleigh wave exploration. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(2): 263 ~ 274
- [ 7 ] 肖柏勋. 高模式瑞雷面波及其正反演研究[博士论文]. 长沙: 中南大学, 2000  
Xiao B X. Study on rayleigh wave of high mode and it's forward and inversion [Ph. D. thesis] (in Chinese). Changsha: Central South University, 2000
- [ 8 ] 朱介寿. 地震学中的计算方法. 北京: 地震出版社, 1988  
Zhu J S. Computing Method in Seismology (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1988
- [ 9 ] 陈蔚天, 陈晓非. 水平层状海洋-地球模型中地震面波振型解. 中国科学(D辑), 2001, **31**(9): 712 ~ 718  
Chen W T, Chen X F. Model solutions in stratified multi-layered fluid-solid half-space. *Science in China* (Series D) (in Chinese), 2001, **31**(9): 712 ~ 718
- [ 10 ] 杨成林. 瑞雷波勘探. 北京: 地质出版社, 1993  
Yang C L. Rayleigh Wave Exploration (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1993
- [ 11 ] 杜世通主编. 弹性波动力学. 东营: 石油大学出版社, 1996  
Du S T. Elastic Wave Dynamics (in Chinese). Dongying: China University of Petroleum Press, 1996

(本文编辑 汪海英)