

浅海 Scholte 波的频散特性研究

罗夏云¹, 程广利¹, 张明敏¹, 刘雁春²

(1. 海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 海军工程大学 导航工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要: 为了研究 Scholte 波在浅海传播过程中的频散特性, 基于海底半无限空间模型推导了 Scholte 波特征方程, 对两种典型弹性固态海底条件下 Scholte 波的频散特性进行仿真计算。利用小波变换对试验数据进行时频分析, 确定了 Scholte 波能量集中的频段。采用滑动窗分析法研究 Scholte 波的频散特性。对湖上试验数据分析发现, Scholte 波能量主要集中在 5~15 Hz, 其中在 5~10 Hz 存在明显的频散现象。结果表明: 湖上试验分析与理论仿真结果的频散规律一致, 滑动窗分析法可用于分析 Scholte 波的频散特性。

关键词: Scholte 波; 频散特性; 滑动窗分析; 相速度

中图分类号: TB566; P733.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2018)09-1786-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.09.016

Research on Dispersion Characteristics of Scholte Wave in Shallow Sea

LUO Xia-yun¹, CHENG Guang-li¹, ZHANG Ming-min¹, LIU Yan-chun²

(1. Electronics Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China;

2. Department of Navigation Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China)

Abstract: In order to study the dispersion characteristics of Scholte wave propagation in shallow sea, the characteristic equation of Scholte wave is deduced based on the seabed semi-infinite space model. The dispersion characteristics of Scholte wave under the condition of several kinds of typical elastic solid seabed are simulated. The frequency band of Scholte wave energy concentration is found by using the wavelet transform method to analyze the experimental data. The dispersion characteristics of Scholte wave are studied by using moving window analysis method. From the analysis of experimental data it is found that the energy of Scholte wave is mainly concentrated in 5–15 Hz, and there is obvious dispersion phenomenon in 5–10 Hz. The results show that the experimental results of the lake are consistent with the theoretically simulated results in the law of dispersion, and the moving window analysis method can be used to analyze the dispersion characteristics of Scholte wave.

Key words: Scholte wave; dispersion characteristic; moving window analysis; phase velocity

0 引言

由舰艇发出的甚低频声场及水压场与海底的频繁接触导致能量传入海底, 诱发了海底介质中横波、纵波、表面波等多种振动波。其中, 沿海底表面传播

的地震波是一种在波动方式上不同于水中声波的固体表面波, 称为 Scholte 波。其在界面处具有幅度大、频率低、传播距离远的特点, 传播速度不会因季节、气象水文条件而改变, 更不会像声波那样受到海水介质起伏和内波等随机因素的干扰, 同时也与声

收稿日期: 2018-01-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41576105)

作者简介: 罗夏云(1991—), 男, 博士研究生。E-mail: luox_y1991@163.com

通信作者: 程广利(1976—), 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: sonarcgl@126.com

波一样携带着目标的位置信息^[1-2],因此 Scholte 波可作为海底振动传感器的地声探测信号,并在水雷引信和水下目标探测等方面具有重要的应用价值^[3]。

Scholte 波相速度是获取目标位置信息的关键参数,同时也能利用其反演海底剪切波速度剖面^[4],但是因为 Scholte 波在传播过程中,不同频率向海底渗透能量的深度不同,存在相速度随频率变化的频散现象,所以像传统方法那样利用阵列的阵间距与信号到达各阵元相对时延差的比值求取 Scholte 波相速度与实际情况是不相符的,因此确定 Scholte 波的频散特性,对 Scholte 波速度场、时空特性、目标定位、海底参数反演等方面的研究具有重要意义。

针对表面波频散问题,各国学者主要从频散理论^[5-8]、提取方法^[9-13]、试验分析^[14-17]等方面展开了研究。频散理论方面,文献[5]推导了 Scholte 波相速度频散方程,认为当雷诺数大于 2 500 时可以忽略流体黏性对 Scholte 波相速度的影响。文献[6]采用复变函数方法推导求解液体与固体半无限空间分界面上 Scholte 波的频散方程,并证明了如果 Scholte 波存在,那么一定是唯一的。文献[7]建立了含沉积层的半无限弹性海底模型,仿真分析了海底沉积层对 Scholte 波频散特性的影响,结果表明覆盖在硬海底上的软沉积层对 Scholte 波频散特性影响最大,且高频成分在沉积层中衰减大。文献[8]建立了分层海底模型,研究发现 Scholte 波受海底介质中横波速度影响最大,频散曲线的转折点可用于估算弹性沉积层厚度。

国外学者较早地开展了 Scholte 波频散曲线提取方法的研究。1968 年 Landisman 等^[9]提出采用滑动窗分析法分析地震引发的海底地震波的频散特性,1969 年他又提出一种快速、有效地分析频散特性的方法——多重滤波技术^[10],此方法相比滑动窗分析法具有更高的频率分辨率,但是在信噪比较低或者信号波形发生混叠的情况下效果较差。1981 年 McMechan 等^[11]采用频率波数谱方法提取 Scholte 波相速度频散曲线。1998 年 Mallat 等^[12]利用小波变换法提取群速度频散曲线,该方法具有较高的频率分辨率。2012 年 Potty 等^[13]采用动态刚度矩阵建模仿真并分析了 Scholte 波的频散特性。但国内则鲜有这方面的研究文献。

国外关于地震波频散的试验研究主要集中在地球物理和地球物理勘探方面,只有少部分文献针对海底 Scholte 波频散特性展开研究。文献[14]在深

海中进行了爆炸声激发 Scholte 波的接收试验,采用滑动窗分析法分析 Scholte 波的频散特性,结果表明爆炸点与传感器之间的距离小于 1 250 m 时, Scholte 波存在明显的频散现象,而距离在 2 100 m 左右时不能有效地判别出 Scholte 波信号。文献[15]在美国俄勒冈州海岸和圣地亚哥海岸进行了爆炸声激发 Scholte 波的接收试验,试验分析结果表明两个试验地点接收到的 Scholte 波在不同频段均存在频散特性。在国内,张海刚^[16]利用近岸的地震波测量系统进行了目标船航行辐射噪声激发地震波测量试验;卢再华等^[17]在汉江上开展了 9 个批次的实船地震波检测试验;李响等通过试验在目标定位^[18]、地震波场^[19]等方面展开了研究。文献[16-19]都只是在试验中观察到了 Scholte 波,没有讨论 Scholte 波的频散问题,同时在试验过程中将地震检波器布放在岸上而非海底,导致接收到的信号是 Scholte 波从海底传播到岸上发生波型转换后的信号。

综上所述,目前国内外主要通过理论分析、建模仿真的方法研究 Scholte 波的频散特性,而针对浅海中声源激发的地震波试验研究相对较少,使得基于这类试验数据研究 Scholte 波频散特性的文献就更少。

本文以半无限海底声场模型为对象,基于波动理论推导 Scholte 波的频散方程,仿真分析了两种典型弹性固态海底条件下 Scholte 波的频散特性;组织开展了湖上气枪声源激发的地震波试验,利用布放于湖底的地声传感器阵列接收信号,采用文献[9]提出的滑动窗分析法研究了 Scholte 波频散特性。试验分析与理论仿真结论相一致,表明所建模型及其理论分析的正确性,同时证明了滑动窗分析方法也适用于分析浅海声源所激发出的 Scholte 波频散特性,为 Scholte 波速度场、时空特性、目标定位、海底参数反演等方面的研究奠定了基础。

1 海底地震波理论

建立如图 1 所示的半无限弹性海底模型,上层介质是厚度为 H 、密度为 ρ_1 、声速为 c_1 的均匀流体层,下层介质是密度为 ρ_2 、横波速度为 c_s 、纵波速度为 c_p 各向同性的半无限弹性海底,上下层介质均为理想介质。取柱坐标系,声源为单频点声源,位于 z 轴上,深度为 z_0 , r 轴代表水平方向距离, z 轴代表垂直方向距离。

ϕ_1 、 ϕ_2 、 ψ_2 分别为流体层纵波、海底纵波以及海底横波的位移势函数,满足以下波动方程:

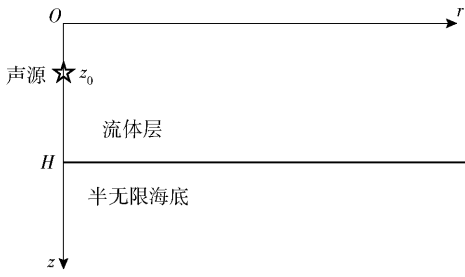


图 1 半无限海底声场模型

Fig. 1 Semi-infinite elastic model of underwater acoustic field

$$\begin{cases} (\nabla^2 + \omega^2/c_1^2)\phi_1 = 0, \\ (\nabla^2 + \omega^2/c_p^2)\phi_2 = 0, \\ (\nabla^2 + \omega^2/c_s^2)\psi_2 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\nabla^2 = \partial^2/\partial r^2 + \frac{1}{r}\partial/\partial r + \partial^2/\partial z^2$; ω 为角频率。

设 u, v 分别为水平位移和垂直位移, p_{zz}, p_{rz} 分别为法向应力和切向应力, λ 和 μ 分别为拉梅系数, 则位移、应力与势函数存在以下关系^[14]:

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{\partial \phi_1}{\partial r}, \\ v_1 &= \frac{\partial \phi_1}{\partial z}, \\ u_2 &= \frac{\partial \phi_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial r \partial z}, \\ v_2 &= \frac{\partial \phi_2}{\partial z} + \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c_p^2} \psi_2, \\ (p_{zz})_1 &= \lambda_1 \nabla^2 \phi, \\ (p_{zz})_2 &= \lambda_2 \nabla^2 \phi + 2\mu_2 \frac{\partial v_2}{\partial z}, \\ (p_{rz})_2 &= \mu_2 \left(\frac{\partial u_2}{\partial z} + \frac{\partial v_2}{\partial r} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

式中: 下角标 1 代表在液体层中; 下角标 2 代表在弹性海底中。

在液体层表面 ($z = 0$)、点源处 ($z = z_0$) 以及液体与固体分界面 ($z = H$) 分别满足以下边界条件:

$$\begin{aligned} p_{zz}|_{z=0} &= 0, \\ p_{rz}|_{z=H} &= 0, \\ p_{zz}|_{z=z_0^+} &= p_{zz}|_{z=z_0^-}, \\ \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \Big|_{z=z_0^+} - \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \Big|_{z=z_0^-} &= 2ZJ_0(kr), \\ (p_{zz}|_{z=H})_1 &= (p_{zz}|_{z=H})_2, \\ v_1|_{z=H} &= v_2|_{z=H}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $Z = kdk, k = \frac{\omega}{c}, c$ 为相速度; $J_0(kr)$ 为 0 阶贝塞尔函数。

考虑到各势函数满足 $z = 0$ 处边界条件以及无穷远处辐射条件, 则 (1) 式中各势函数的通解可写为

$$\begin{cases} \phi_1 = A \sin(\xi z) J_0(kr), & 0 \leq z \leq z_0; \\ \phi_1' = [B \sin(\xi z) + C \cos(\xi z)] J_0(kr), & z_0 \leq z \leq H; \\ \phi_2 = D e^{-\eta z} J_0(kr), & z \geq H; \\ \psi_2 = E e^{-\zeta z} J_0(kr), & z \geq H. \end{cases} \quad (4)$$

式中: A, B, C, D, E 为待定系数; ξ, η, ζ 为分离常量, $\xi = \sqrt{k_1^2 - k^2}, \eta = \sqrt{k^2 - k_p^2}, \zeta = \sqrt{k^2 - k_s^2}, k_1, k_p, k_s$ 分别为流体层中声波、海底纵波、海底横波波数, $k_1 = \frac{\omega}{c_1}, k_p = \frac{\omega}{c_p}, k_s = \frac{\omega}{c_s}$ 。

根据点源条件及分界面的边界条件, 可得各待定系数所应满足的方程为

$$\begin{cases} A \sin(\xi z_0) - B \sin(\xi z_0) - C \cos(\xi z_0) = 0, \\ \xi A \cos(\xi z_0) - \xi B \cos(\xi z_0) + \xi C \sin(\xi z_0) = 2Z, \\ \xi B \cos(\xi H) - \xi C \sin(\xi H) + \eta D e^{-\eta H} + \left(\frac{\omega^2}{c_p^2} \zeta - \zeta^2 \right) E e^{-\zeta H} = 0, \\ 2\eta D e^{-\eta H} - \left(2\zeta^2 + \frac{\omega^2}{c_p^2} \right) E e^{-\zeta H} = 0, \\ -\rho_1 \omega^2 B \sin(\xi H) - \rho_1 \omega^2 C \sin(\xi H) + \left[\rho_2 (c_s^2 - 2c_p^2) \frac{\omega^2}{c_s^2} - 2\rho_2 c_p^2 \eta^2 \right] D e^{-\eta H} + \left(2\rho_2 c_p^2 \zeta^3 + 2\rho_2 c_p^2 \zeta \frac{\omega^2}{c_p^2} \right) E e^{-\zeta H} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

整理后可以得到各待定系数的分母项为

$$\tan \left(\frac{\omega H}{c} \sqrt{c^2/c_1^2 - 1} \right) = \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{c_s^4}{c^4} \frac{\sqrt{c^2/c_1^2 - 1}}{\sqrt{1 - c^2/c_p^2}} \cdot [4 \sqrt{1 - c^2/c_s^2} \sqrt{1 - c^2/c_p^2} - (2 - c^2/c_s^2)^2]. \quad (6)$$

(6) 式也可写为

$$\tanh \left(\frac{\omega H}{c} \sqrt{1 - c^2/c_1^2} \right) = \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{c_s^4}{c^4} \frac{\sqrt{1 - c^2/c_1^2}}{\sqrt{1 - c^2/c_p^2}} \cdot [4 \sqrt{1 - c^2/c_s^2} \sqrt{1 - c^2/c_p^2} - (2 - c^2/c_s^2)^2], \quad (7)$$

(7) 式即为 Scholte 波的特征方程。

将 k_1, k_p, k_s 和分离常量代入 (7) 式中可得

$$(k^2 + \zeta^2)^2 - 4k^2 \eta \zeta = -\frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\omega^2}{c_s^2} \frac{\eta}{\xi} \tan(\xi H). \quad (8)$$

(8) 式与文献 [20] 中给出的 Scholte 波特征方程相同。当特征方程存在实数根时, 该实数根即为

Scholte 波波速。

对特征方程(7)式作如下讨论:

当海水深度与波长的比值很小($H/\lambda \rightarrow 0$)时,

$$\tanh\left(\frac{\omega}{c} H \sqrt{1 - c^2/c_1^2}\right) \rightarrow 0, \quad (7) \text{ 式就退化为}$$

$$4 \sqrt{1 - c^2/c_s^2} \sqrt{1 - c^2/c_p^2} - (2 - c^2/c_s^2)^2 = 0, \text{ 这就是著名的 Rayleigh 波方程, 此时相速度 } c \text{ 与频率无关, 无频散特性。}$$

当海水深度与波长的比值很大($H/\lambda \rightarrow \infty$)时,

$$\tanh\left(\frac{\omega}{c} H \sqrt{1 - c^2/c_1^2}\right) \rightarrow 1, \quad (7) \text{ 式就退化为 } \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot$$

$$\frac{c_s^4 \sqrt{c^2/c_1^2 - 1}}{c^4 \sqrt{1 - c^2/c_p^2}} [4 \sqrt{1 - c^2/c_s^2} \sqrt{1 - c^2/c_p^2} - (2 - c^2/c_s^2)^2] = 1, \text{ 此时相速度 } c \text{ 与频率无关, 无频散特性。}$$

当海水深度与波长的比值介于上述两种情况之

间时, $\tanh\left(\frac{\omega}{c} H \sqrt{1 - c^2/c_1^2}\right) \in (-1, 1)$, 从特征方程(7)式可以看出 Scholte 波的速度与层中介质参数以及海水层厚度有关, 并且与频率有关, 故 Scholte 波具有频散特性。

2 滑动窗分析算法

本文采用 Dzewonski 提出的滑动窗分析方法分析 Scholte 波频散特性。滑动窗为矩形窗, 窗长随信号周期而变化, 以期在信号所有的周期上都能保持相同的频率分辨率。具体算法如图 2 所示, 步骤如下:

1) 设计矩形窗参数。d 为声源与阵元之间的距离, 给定群速度 v 以及周期 T 的取值范围, v_n, T_m 分别为在给定的群速度与周期范围内第 n 点的群速度以及第 m 点的周期取值, W 为矩形窗长度与信号周期的比值。W 的取值对数据处理的结果影响较大, Pfeiffer 等^[21]证明了 W 的取值一般为 4 ~ 6, 本文取 W = 4。

2) 设计对称调制函数。参考文献[11], 选择调制函数 $q(t) = \cos\left(\frac{\pi t}{WT_m}\right)$, $-\frac{1}{2}WT_m \leq t \leq \frac{1}{2}WT_m$; 对截取的时间信号进行第 1 次去平均及去线性化。

3) 利用调制函数对信号进行调制, 该过程分为 5 步: ①利用矩形窗截取时间信号 $f(t)$, 截取的信号为 $s(t)$; ②对 $s(t)$ 进行去平均及去线性化($s(t) \rightarrow \bar{s}(t)$), 以消除长周期信号以及噪声信号可能产生的非零均值和非零趋势项; ③对信号进行第 1 次调制($p(t) = q^{\frac{1}{2}}(t)$, $e(t) = \bar{s}(t)p(t)$); ④对信号进行去平均及去线性化, 以消除信号调制过程中可能产生

的非零均值和非零趋势项; ⑤对信号进行第 2 次调制($h(t) = \bar{e}(t)p(t)$)。

4) 对调制后的时间信号进行傅里叶变换后求和, 然后取绝对值得到幅度矩阵 A_{nm} 。

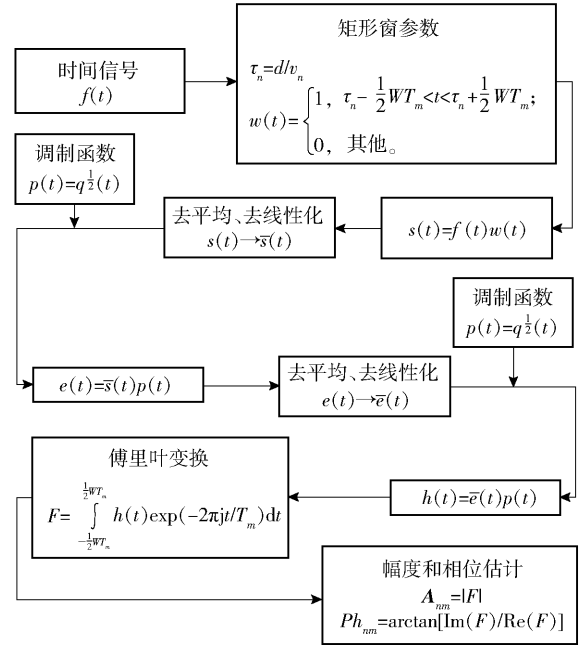


图 2 滑动窗分析法

Fig. 2 Moving window analysis method

3 数值算例及分析

针对(8)式实数根存在条件, 分以下两种情况讨论。

3.1 软海底 ($c_s < c_1$)

当 $c_p > c_1 > c > c_s$ 时, $\tan\left(\frac{\omega}{c} H \sqrt{c^2/c_1^2 - 1}\right)$ 为纯虚数, 方程右侧为复数而非纯虚数, 故不存在实数根。当 $c_p > c_1 > c_s > c$ 时, 方程两侧均为纯虚数, 存在实数根。对(7)式进行变换, 由于 ρ_1, ρ_2, c_s, c_p 均已知, 可以将其看成关于未知数 c 的函数 $P(c)$:

$$P(c) = \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{c_s^4}{c^4} \frac{\sqrt{1 - c^2/c_1^2}}{\sqrt{1 - c^2/c_p^2}} [4 \sqrt{1 - c^2/c_s^2} \sqrt{1 - c^2/c_p^2} - (2 - c^2/c_s^2)^2] - \tanh\left(\frac{\omega H}{c} \sqrt{1 - c^2/c_1^2}\right) = 0, \quad (9)$$

令 $x = \frac{c_s^2}{c^2}, p = \frac{c_s^2}{c_p^2}, q = \frac{c_s^2}{c_1^2}$, 则

$$P(x) = \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{\sqrt{x - q}}{\sqrt{x - p}} [4x \sqrt{x - 1} \sqrt{x - p} - (2x - 1)^2] - \tanh\left(\frac{\omega H}{c_1} \sqrt{\frac{x}{q} - 1}\right) = 0. \quad (10)$$

表 1 给出了两种浅海层典型弹性固态海底物质的地声特性,以白垩岩为例,将其参数代入(10)式可得

$$P(x) = 2.1 \frac{\sqrt{x-0.444}}{\sqrt{x-0.16}} [4x \sqrt{x-1} \sqrt{x-0.16} - (2x-1)^2] - \tanh\left(\frac{2\pi fH}{c_1} \sqrt{\frac{x}{0.444}-1}\right) = 0, \quad (11)$$

式中: f 为频率。

表 1 浅海层典型弹性固态海底物质的地声特性

Tab. 1 Geo-acoustic characteristics of a typical elastic solid seabed

沉积物	深度/m	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	c_p / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	c_s / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
海水	20	1.0	1 500	0
粉砂-黏土	∞	1.9	1 550	400
白垩岩	∞	2.1	2 500	1 000

在 $x \geq 1$ 区间,给定不同的 fH 值, $P(x)$ 随 x 的增加呈单调递减(见图 3),因此在海水深度 H 给定情况下,每个频率值对应 1 个实数根。

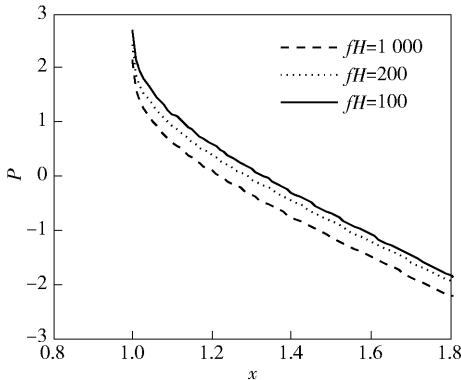


图 3 特征方程变化曲线($c_p > c_1 > c_s > c$)

Fig. 3 Changing curves of characteristic equation ($c_p > c_1 > c_s > c$)

3.2 硬海底 ($c_s > c_1$)

当 $c_p > c_s > c > c_1$ 时,(8)式等号两侧均为纯虚数,存在实数根。以表 1 中白垩岩为例,将其参数代入(10)式可得

$$P(x) = 2.1 \frac{\sqrt{x-1.44}}{\sqrt{x-0.2025}} [4x \sqrt{x-1} \sqrt{x-0.2025} - (2x-1)^2] - \tanh\left(\frac{2\pi fH}{c_1} \sqrt{\frac{x}{1.44}-1}\right) = 0. \quad (12)$$

在 $x \geq 1.44$ 区间,给定不同的 fH 值,在海水深度为固定值时,当频率大于某一数值后 $P(x)$ 随 x 的

增加呈单调递减(见图 4),每个频率值对应 1 个实数根,而当频率小于这一数值时方程无解,故此条件下 Scholte 波存在截止频率。

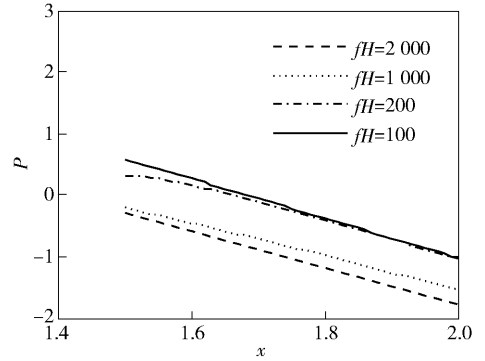


图 4 特征方程变化曲线($c_p > c_s > c > c_1$)

Fig. 4 Changing curves of characteristic equation ($c_p > c_s > c > c_1$)

当 $c_p > c_s > c_1 > c$ 时,(8)式等号两侧均为纯虚数,存在实数根,此时方程可变换为以下形式:

$$P(x) = 2.1 \frac{\sqrt{1.44-x}}{\sqrt{x-0.2025}} [4x \sqrt{x-1} \sqrt{x-0.2025} - (2x-1)^2] - \tan\left(\frac{2\pi fH}{c_1} \sqrt{1-\frac{x}{1.44}}\right) = 0. \quad (13)$$

由于 $\tan\left(\frac{2\pi fH}{c_1} \sqrt{1-\frac{x}{1.44}}\right)$ 是周期函数,存在多值性,导致方程存在多个实根,对应于满足边界条件的多阶波。

综上所述可知:当海底为软海底时,存在一种海底表面波,即 Scholte 波;当海底为硬海底时分为两种情况,当 $c > c_1$ 时仅存在 Scholte 波,当 $c < c_1$ 时表面波对应的声波在海水中以简正波的形式存在,而海底以表面波的形式存在。

将表 1 中粉砂-黏土、白垩岩参数代入(7)式中,可得到 Scholte 波频散曲线(见图 5)。从图 5 中可以看出, Scholte 波存在频散现象,当声源频率接近 0 时, Scholte 波速度接近于 Rayleigh 波速度。

4 试验环境概况及气枪布放

试验地点选择在某处地形相对较平坦、环境噪声较小的水库。试验采用一条具有 6 个垂直轴向压电式振动传感器的线列阵接收数据,阵元间距为 55 m。为了保证阵列沉底后得到理想的均匀线列阵,在布放线缆时,首先将粗线缆在岸边有序排放,在粗线缆的头部和每个阵元处绑上浮球,然后由拖曳船以低速拖向湖中,以此来布放粗线缆和传感器,

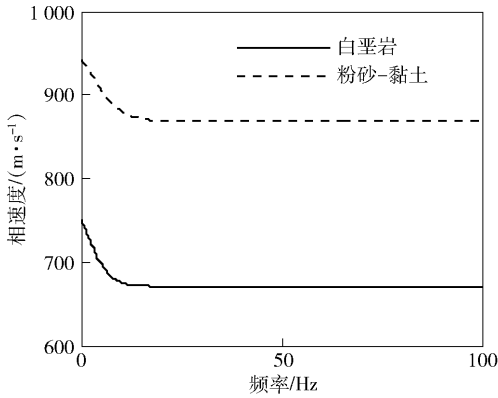


图5 Scholte波相速度和频率的关系

Fig. 5 Relationship between Scholte wave phase velocity and frequency

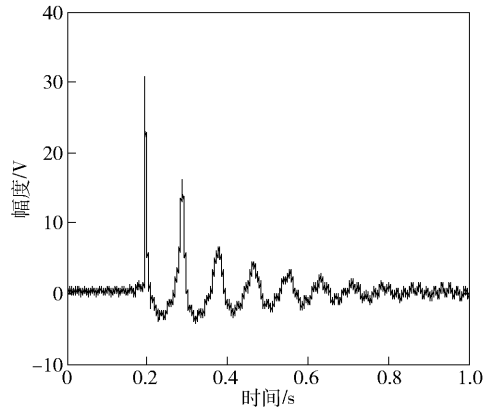


图7 发射信号(气压 10 MPa)

Fig. 7 Transmission signal (10 MPa)

确保线缆尽量拉直后依次剪掉系浮球的绳子,粗线缆和传感器一并沉入湖底。为获取各阵元精确的空间关系,采用2次定位精确测定各阵元沉底后的位置(见图6),从阵元1到阵元6,相邻两阵元的间距依次为53.6 m、54.2 m、54.1 m、52.8 m、53.0 m。

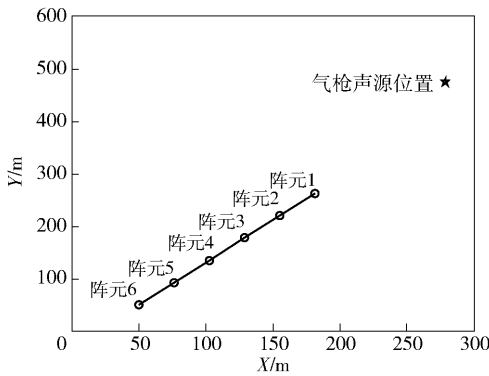


图6 试验空间布局

Fig. 6 Spatial layout of test

表2给出了各阵元的深度。试验中选择气枪作为脉冲声源,气枪声源吊放在阵列的端射方向水下6 m处,距阵首端(阵元1)的水平距离为254 m。试验中气枪发射8 MPa、10 MPa的气压,在气枪声源正上方1 m处悬挂水听器,用以记录气枪子波信号。图7给出了气枪子波发射信号的波形。

表2 阵元深度

Tab. 2 Array elements depth

阵元编号	1	2	3	4	5	6
深度/m	22.0	22.0	19.5	19.5	16.0	16.0

独给出阵元1接收到的信号。从图8可以看出,每个阵元信号明显存在时间延迟。根据各阵元的空间相对位置以及每个阵元接收信号的最强幅值时延差,可以计算出幅值最强信号的传播速度约为1490 m/s。由于阵元距声源较近,水声信号能量较强,除了能够看到微弱的初至波(即侧面波,以海底

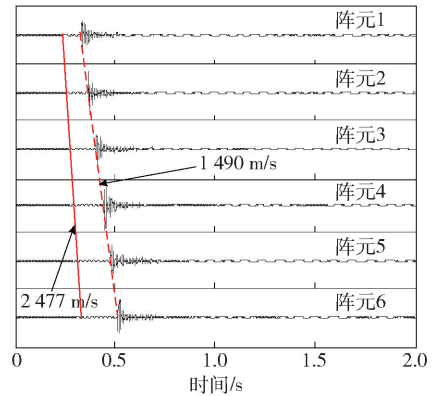


图8 6个阵元接收的时域信号

Fig. 8 Time-domain signals received by six array elements

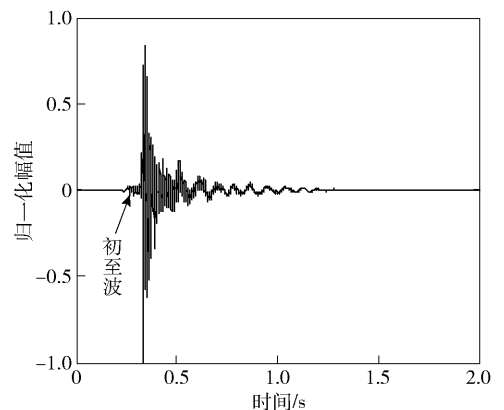


图9 阵元1接收的时域信号

Fig. 9 Time-domain signal received by array element 1

5 试验数据处理与分析

图8给出了6个阵元接收的时间信号,图9单

纵波的速度传播,速度为 2 477 m/s)信号,其他信号均被水声信号淹没。利用小波变换对阵元 1 接收到的信号进行时频分析,如图 10 所示,可见信号能量主要集中在 50 Hz 以上和 25 Hz 以下这两个频段。对比图 9、图 10 可以看出,图 9 中幅度最强的信号与图 10 中 50 Hz 以上的信号在时间上相对应,再结合此频段信号传播速度为 1 490 m/s 的特征,可以确定 50 Hz 以上频段为水声信号。采用截止频率为

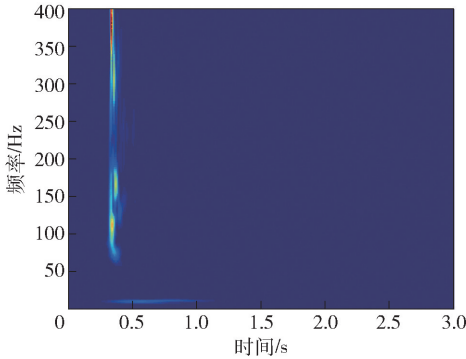


图 10 阵元 1 接收信号的时频图(滤波前)

Fig. 10 Time-frequency spectrum of time-domain signal received by array element 1 (unfiltered)

25 Hz 的低通滤波器对阵元 1 接收到的信号进行滤波,利用小波变换对滤波后信号进行时频分析,结果如图 11 所示。

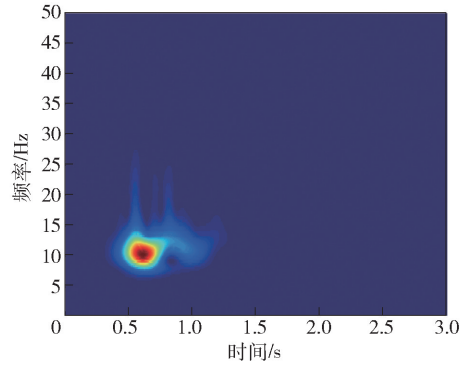
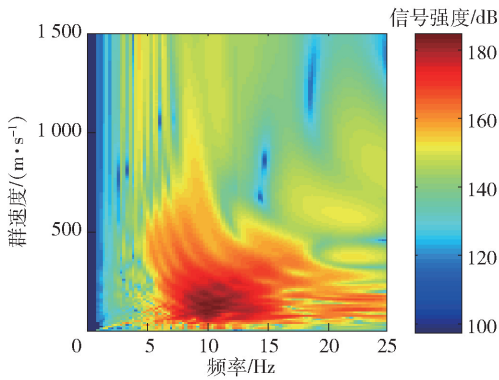


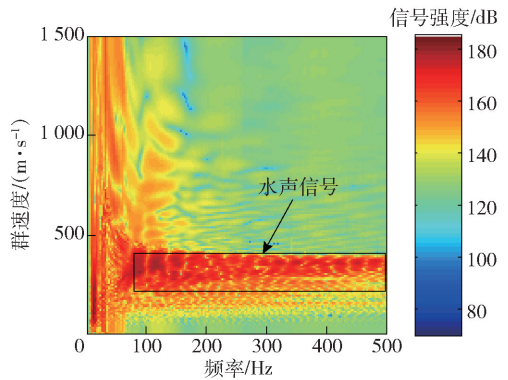
图 11 阵元 1 接收信号的时频图(滤波后)

Fig. 11 Time-frequency spectrum of time-domain signal received by array element 1 (filtered)

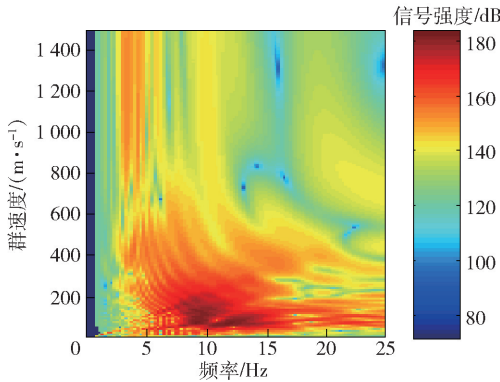
针对阵元 1 和阵元 2 接收到的信号,采用滑动窗分析方法分别对滤波前、滤波后的信号进行频散分析,得到结果如图 12 所示。由图 12 可见,滤波前频率 50 Hz 以上的水声信号,群速度 200 ~ 400 m/s 之间,与其相速度存在明显差别,这是因为在近距离



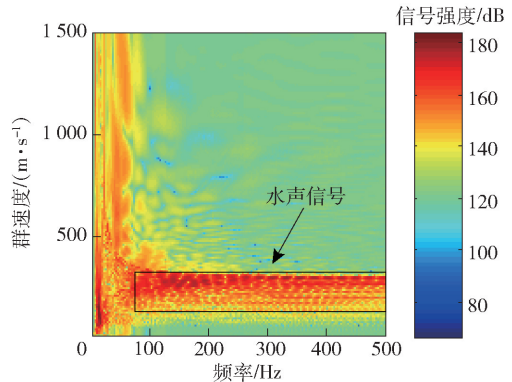
(a) 阵元1(滤波后)
(a) Array element 1 (filtered)



(b) 阵元1(滤波前)
(b) Array element 1 (unfiltered)



(c) 阵元2(滤波后)
(c) Array element 2 (filtered)



(d) 阵元2(滤波前)
(d) Array element 2 (unfiltered)

图 12 频散曲线

Fig. 12 Dispersion curves

上,强烈的气枪冲击信号产生的非线性效应所致。滤波后可见 10 Hz 以下频段明显存在频散现象;5 ~ 10 Hz 之间群速度随频率的增加而减小;频率高于 10 Hz 后,随着频率增加群速度基本保持不变;变化规律与仿真结果相符。

为确定地震波相速度,选取频散现象不明显的频带,采用 10 ~ 15 Hz 的带通滤波器分别对阵元 1 ~

阵元 6 接收气枪压力 8 MPa 和 10 MPa 激发的信号进行滤波,并对滤波前、滤波后的信号进行归一化处理,结果如图 13、图 14 所示,图中黑线代表滤波前时域信号,红线代表滤波后时域信号。根据阵元间距及相对时延,其中幅度最大的波系其相速度分别为 422.9 m/s、422.7 m/s。由此可见,该波系属于地震波中的 Scholte 波。

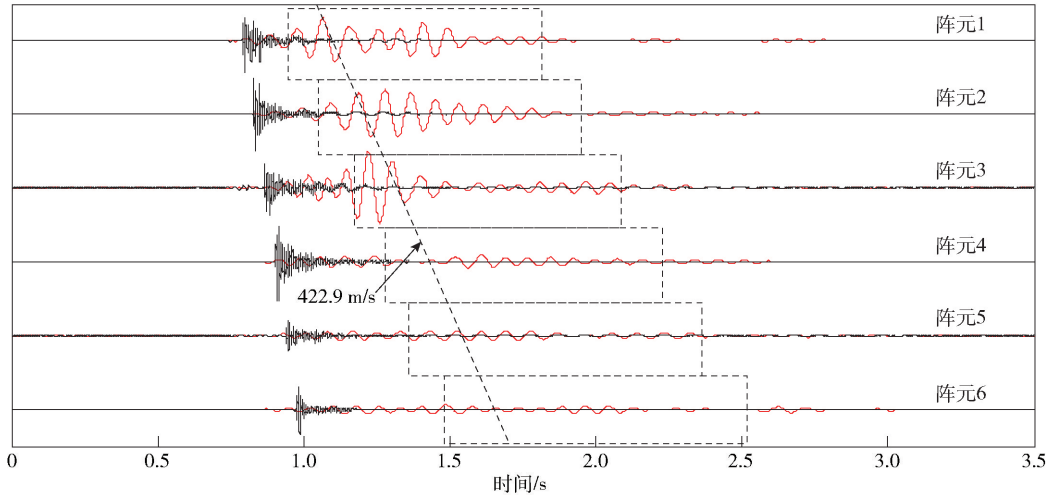


图 13 滤波前与滤波后信号对比图(气压 8 MPa)

Fig. 13 Contrast diagram of signals before and after filtering (8 MPa)

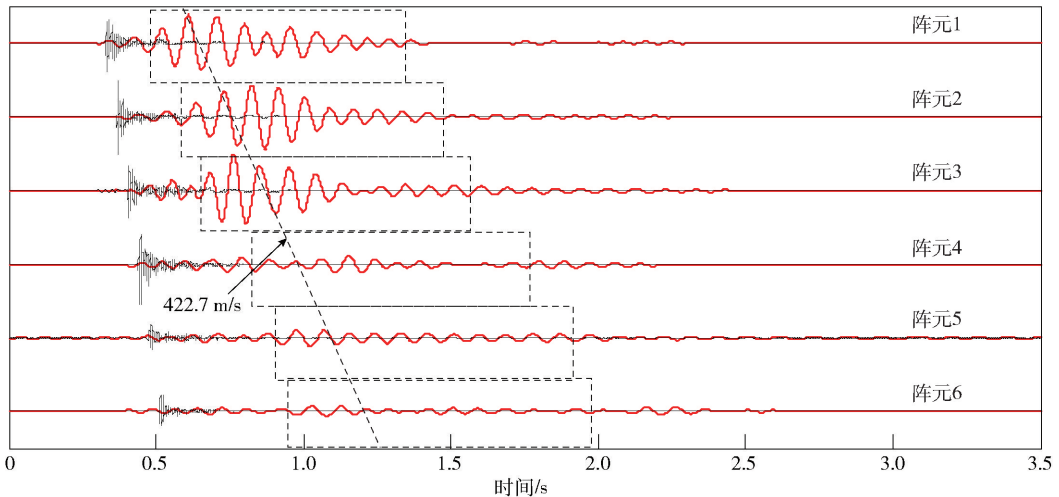


图 14 滤波前与滤波后信号对比图(气压 10 MPa)

Fig. 14 Contrast diagram of signals before and after filtering (10 MPa)

6 结论

为了研究浅海中 Scholte 波的频散特性,本文建立了半无限弹性海底模型,开展了湖上气枪声源激发的地震波试验。所得主要结论如下:

1) 理想半无限固态弹性海底模型下,不同海底条件下均能激发产生 Scholte 波,且存在频散现象。

2) 利用滑动窗分析方法对湖上试验数据展开分析,结果表明,Scholte 波存在频散特性,试验分析与理论仿真结果的频散规律一致,说明滑动窗分析方法适用于分析浅海声源所激发出的 Scholte 波频散特性。

3) 针对 Scholte 频散特性,分别对 8 MPa、10 MPa 气枪压力下阵元接收的时域信号进行 10 ~ 15 Hz 带

通滤波,根据阵元间距及相对时延差计算得到试验水域的 Scholte 波相速度约为 422 m/s.

本文主要针对此次湖上试验数据分析了 Scholte 波频散特性,声源深度变化、距离变化、海水层厚度以及不同海底物质的地声特性等对 Scholte 波频散特性影响,有待于进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] Rauch D. Experimental and theoretical studies of seismic interface waves in coastal waters[J]. *Bottom-Interacting Ocean Acoustics*, 1980,5:307-327.
- [2] Hoven J M, Frivik S A. Determination of shear wave properties in the upper seafloor using seismo-acoustic interface waves[J]. *Oceans*, 2002,2:682-686.
- [3] 孟路稳,程广利,陈亚男,等.舰船地震波传播机理及其在水雷引信中的应用研究[J]. *兵工学报*, 2017,38(2):319-325.
MENG Lu-wen, CHENG Guang-li, CHEN Ya-nan, et al. On the propagation mechanism of ship seismic wave and its application in mine fuze[J]. *Acta Armamentarii*, 2017,38(2):319-325. (in Chinese)
- [4] Jennifer L G. An inversion scheme for shear wave speed using Scholte wave dispersion[D]. New York, NY, US: University of Rhode Island, 2013.
- [5] Qi Q. Attenuated leaky Rayleigh waves[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, 95(6):3222-3231.
- [6] Pham C V. Scholte-wave velocity formulae[J]. *Wave Motion*, 2013,50(2):180-190.
- [7] Hassan B A, Bibee L D. The influence of sediment layering and geoacoustics on the propagation of Scholte interface waves[C]// *Proceedings of OCEANS93. Engineering in Harmony with Ocean*. Victoria, BC, Canada:IEEE, 1993:105-113.
- [8] 祝悍浩,郑红,林建民,等.海洋环境参数对 Scholte 波特性的影响[J]. *上海交通大学学报*, 2016,50(2):257-264.
ZHU Han-hao, ZHENG Hong, LIN Jian-min, et al. Influence of ocean environment parameters on Scholte wave[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2016,50(2):257-264. (in Chinese)
- [9] Landisman M, Dziewonski A, Satoo Y. Recent improvements in the analysis of surface wave observations[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1969,17(4):369-403.
- [10] Dziewonski A, Bloch S, Landisman M. A technique for the analysis of transient seismic signals[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1969, 59(1):427-444.
- [11] McMechan G A, Yedlin M J. Analysis of dispersion waves by wave-field transformation[J]. *Geophysics*, 1981,46(6):869-874.
- [12] Mallat S. A wavelet tour of signal processing[J]. Academic Press, 1999,31(3):83-85.
- [13] Potty G R, Miller J H. Measurement and modeling of Scholte wave dispersion in coastal waters[J]. *AIP conference Proceedings*, 2012,1495(1):500-507.
- [14] Bibee L D, Dorman L M. Implications of deep-water seismometer array measurements for Scholte wave propagation[C]// *Proceedings of the conference on Shear Waves in Marine Sediments*. Netherlands: Springer, 1991:221-230.
- [15] Ali H B, Bibee L D. The influence of bottom geoacoustics on the dispersive behavior of Scholte interface waves[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1993,93(4):2396.
- [16] 张海刚.浅海甚低频声传播建模与规律研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2010.
ZHANG Hai-gang. Research on modeling and rule of infrasound propagation in shallow sea[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. (in Chinese)
- [17] 卢再华,张志宏,顾建农.砂土底质浅水条件下实船地震波的检测试验[J]. *兵工学报*, 2016,37(3):482-488.
LU Zai-hua, ZHANG Zhi-hong, GU Jian-nong. A detecting test of seismic waves caused by random ships in shallow water with sandy bottom[J]. *Acta Armamentarii*, 2016,37(3):482-488. (in Chinese)
- [18] 李响,颜冰,周穗华.基于直达波与地声界面波时延的目标定位方法[J]. *探测与控制学报*, 2010,32(6):50-53.
LI Xiang, YAN Bing, ZHOU Sui-hua. Passive localization of underwater targets using delay time of direct wave and geosound interface wave[J]. *Journal of Detection & Control*, 2010,32(6):50-53. (in Chinese)
- [19] 李响,颜冰.舰船地震波场分析[J]. *噪声与振动控制*, 2007, 27(4):120-122.
LI Xiang, YAN Bing. Wavelet spectrum analysis of ship seismic wave field[J]. *Noise and Vibration Control*, 2007,27(4):120-122. (in Chinese)
- [20] Viktorov I A. Rayleigh and Lamb waves[M]. New York, US: Plenum Press, 1967.
- [21] Pfeffer R L, Zarichny J. Acoustic-gravity wave propagation in an atmosphere with two sound channels[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1963,55(1):175-199.