

脉冲与连续声源激发的 Scholte 波频散特性研究

吴其彪¹, 池晴佳¹, 林永水¹, 陈威²

(1. 武汉理工大学理学院, 430070 武汉; 2. 武汉理工大学船海与能源动力工程学院, 430070 武汉)

摘 要:浅海中声源激发的 Scholte 波频散及极化特性对于目标探测有着重要意义, 当前对脉冲与连续点声源激发的 Scholte 波认识仍不够充分。分别运用简正波理论, 时域有限元模型结合小波变换对这两种声源激发的 Scholte 波进行研究。首先基于浅海半无限弹性海底声场模型, 利用简正波理论分析了 Scholte 波的频散特性, 得出硬质海底和软质海底条件下 Scholte 波都存在频散现象。然后, 利用时域有限元模型结合小波变换探究了脉冲与连续声源激发的 Scholte 波频散和质点运动轨迹的极化特性。结果表明, 从时频分析看, 两种声源在硬质海底时均可观察到 Scholte 波的频散现象。连续声源在软质海底时可观察到 Scholte 波的频散, 但脉冲声源难以观察频散现象。从 Scholte 波极化特性看, 脉冲声源激发的 Scholte 波椭圆率先减小后增大, 连续声源下的椭圆率保持稳定; 脉冲声源激发的 Scholte 波在硬质海底下以垂直振动为主; 连续声源激发的 Scholte 波在硬质海底下以垂直振动为主, 在软质海底下以水平振动为主。研究结果可为浅海中脉冲与连续声源的探测提供初步依据。

关键词: Scholte 波; 弹性海底; 频散特性; 极化特性; 数值模拟

中图分类号: P733.21

文献标志码: A

文章编号: 1000-4939(2025)05-1165-09

Dispersion characteristics of Scholte waves excited by pulsed and continuous sound sources

WU Qibiao¹, CHI Qingjia¹, LIN Yongshui¹, CHEN Wei²

(1. School of Science, Wuhan University of Technology, 430070 Wuhan, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, 430070 Wuhan, China)

Abstract: The dispersion and polarization characteristics of Scholte waves excited by sound sources in shallow sea are of great significance for target detection. The Scholte waves excited by pulse and continuous point sound sources are still not well understood. The Scholte waves excited by these two sound sources are studied by using the theory of normal wave, the finite element model in time domain, and the wavelet transform. First, based on the semi-infinite elastic submarine sound field model in shallow sea, the dispersion characteristics of Scholte waves are analyzed by using the normal wave theory, and the dispersion phenomenon of Scholte waves exists in both hard and soft seabed conditions. Then, the time domain finite element model combined with wavelet transform is used to investigate the dispersion of Scholte waves and the

收稿日期: 2023-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 52201334)

通信作者: 池晴佳, 副教授。E-mail: qingjia@whut.edu.cn。

引用格式: 吴其彪, 池晴佳, 林永水, 等. 脉冲与连续声源激发的 Scholte 波频散特性研究[J]. 应用力学学报, 2025, 42(5): 1165-1173.

WU Qibiao, CHI Qingjia, LIN Yongshui, et al. Dispersion characteristics of Scholte waves excited by pulsed and continuous sound sources[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2025, 42(5): 1165-1173.

polarization characteristics of particle motion trajectory excited by pulse and continuous sound source. The results show that the dispersion of Scholte waves can be observed when the two acoustic sources are in the hard seabed. The dispersion of Scholte waves can be observed for continuous sound sources in the soft seabed, but it is difficult for pulsed sound sources to observe the dispersion phenomenon. According to the polarization characteristics of Scholte waves, the ellipse of the waves excited by pulsed sound source decreases first and then increases, while the ellipticity of Scholte waves under continuous sound source remains stable. Scholte waves excited by pulsed sound source vibrate vertically under hard seafloor mainly. Those excited by continuous sound source mainly vibrate vertically under hard seafloor and horizontally under soft seafloor. The results can provide a preliminary basis for the detection of pulse and continuous sound sources in shallow sea.

Key words: Scholte wave; elastic seafloor; dispersion property; polarization property; numerical simulation

随着减振降噪技术的发展,船舶和水下航行器辐射噪声在不断降低,其探测和定位均在低频。在浅海环境中航行时引起的振动、噪声和水扰动通过海水以压力波的形式传播到海底,从而诱发沿液-固界面传播的舰船地震波场,称为 Scholte 波^[1]。相比初至波和横波, Scholte 波传播时衰减缓慢,因此 Scholte 波在远距离传播的特性有望实现目标远程探测。

掌握 Scholte 波的特性对其目标探测的应用十分重要。Scholte 波与声波一样都携带着目标的位置信息^[2-3],其 Scholte 波相速度是获取目标位置信息的关键所在,并能通过 Scholte 波的频散特性来反演海底横波波速^[4-5]。因此研究 Scholte 波特性对 Scholte 波目标探测定位和海底介质参数反演具有重要意义。

国内外学者从实验、理论和数值模拟等方面对脉冲声源激发的 Scholte 波展开了研究,实验方面, EWING 等^[6]开展了浅海环境下爆炸产生的脉冲声传播实验,并接收到水中爆炸产生的海底地震波,但未对 Scholte 波的特性展开研究。 RAUCH^[7]总结推导出上层为均匀半无限流体介质,下层为均为半无限弹性介质中存在 Scholte 波。并通过水中脉冲爆炸实验得到了 Scholte 波的传播规律和粒子运动轨迹。邵雨新等^[8]通过脉冲声源实验,利用匹配追踪法和 Wigner 变换识别 $\tau-p$ 变换提取的 Scholte 波,精确提取出了 Scholte 波的频率、速度和能量,但未进一步分析 Scholte 波的特性。理论方面, VINH^[9]用复变函数法推导了 Scholte 波在流体半空间和各向同性弹性半空间界面上传播的频散方程,证明了 Scholte 波的唯一性。祝捍皓等^[10-11]建立半无限弹

性海底 Scholte 波模型,并扩展至分层海底,分析了 Scholte 波的频散特性、质点运动轨迹和位移。数值模拟方面, FLORES-MENDEZ 等^[12]采用间接边界元法,在时频域上研究了脉冲声源激发的 Scholte 波数值模型,证实了 Scholte 波的存在与传播。 WANG 等^[13]基于时域有限元法,建立了脉冲声源下浅海全波导低频声场的时域数值计算模型,分析了 Scholte 波的传播机理和特性。 ZHAO 等^[14]利用 LS-DYNA 模拟了脉冲声源激发的水声场,分析了 Scholte 波的激发机理和粒子轨迹,并将该方法应用于复杂波场信号中分离 Scholte 波。

在连续声源激发的 Scholte 波研究方面, TOMAR 等^[15]研究了连续声源激发的 Scholte 波波速层析成像,通过 Monte Carlo 方法反演得到了 Scholte 波的平均频散曲线。王勃等^[16]通过连续声源实验,利用极化分析对时频域上各种波的区分以及计算极化参数的准确性作了验证。

对于 Scholte 波质点运动轨迹的极化特性研究方面,更多的是基于脉冲声源。赵晗^[17]通过脉冲声源激发的 Scholte 波场,利用极化分析对 Scholte 波和直达声波进行区分,其中直达声波指的是从震源出发直接到达海底界面各接收点的地震波。然后利用相关法得到两者的时延差,获取目标距离信息。 LU 等^[18]通过极化分析将有效的地震信号从噪声中区分开。 HUANG 等^[19]基于广义 s 变换时频法的时频域瞬时极化分析方法对波形进行识别,该方法比传统的时域极化分析方法识别更加准确。韩雪^[20]将舰船地震波的极化特性应用到水面船只的线谱检测中,对于船只的远距离探测具有重要意义。

当前研究大多是针对脉冲点声源激发的 Scholte

波频散及极化特性研究,对连续点声源激发的 Scholte 波研究还不够深入。但实际水下目标的辐射噪声多为连续声源。本研究建立浅海半无限弹性海底 Scholte 波模型,基于简正波理论,推导了浅海海底 Scholte 波的频散方程,分析了硬质海底和软质海底下的频散特性。应用时域有限元建立两种声源激发的 Scholte 波模型,从频散和质点运动轨迹的极化特性对 Scholte 波作分析。

1 浅海海底 Scholte 波频散特性

建立图 1 所示的浅海分层 Scholte 波模型, H 为海水层深度, ρ_1 为海水的密度, c_1 为海水声速, ρ_2 为海底密度, c_l 为纵波波速, c_t 为横波波速。在笛卡尔坐标系下,用 φ_0 表示海水层的位移势函数,在浅海半无限弹性海底中用 φ_1 表示纵波的位移势函数,用 φ_2 表示横波的位移势函数。

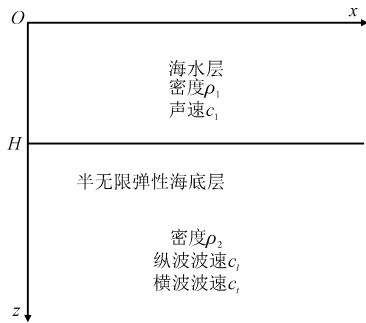


图 1 浅海半无限弹性海底声场模型

Fig. 1 A semi-infinite elastic submarine sound field model in shallow seas

海水和弹性海底中的位移势函数满足以下波动方程^[21]。

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial z^2} &= \frac{1}{c_1^2} \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z^2} &= \frac{1}{c_l^2} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial z^2} &= \frac{1}{c_t^2} \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (1)$$

由于海水表面是压力释放边界,弹性海底在无穷远处满足辐射条件,则每个势函数的一般解为

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= 2A \sinh(k\xi_1 z) e^{i(kx - \omega t)}, \\ \varphi_1 &= (B e^{-k\xi_l z}) e^{i(kx - \omega t)}, \\ \varphi_2 &= (C e^{-k\xi_t z}) e^{i(kx - \omega t)} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: A 、 B 、 C 为各势函数的系数; $\xi = \sqrt{1 - (c^2/c_l^2)}$,

$i = 1, l, t$; $\omega = 2\pi f$; $k = \omega/c$; f 为声源频率; k 为表面波波数。

由质点位移和势函数的关系可得

$$\begin{aligned} w_a &= \frac{\partial \varphi_0}{\partial x}, v_a = \frac{\partial \varphi_0}{\partial z}, \\ w_b &= \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} - \frac{\partial \varphi_2}{\partial z}, v_b = \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: w 表示水平位移; v 表示垂直位移;下标 a 表示海水,下标 b 表示弹性海底。

在液-固界面处满足边界条件法向应力和法向位移连续,切向应力为 0^[22]。可得

$$\begin{aligned} v_a &= v_b, \\ \sigma_{zz}|_a &= \sigma_{zz}|_b, \\ \sigma_{xz}|_b &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: σ_{zz} 表示法向应力; σ_{xz} 表示切向应力。

且应力分量用质点位移表示为

$$\begin{aligned} \sigma_{zz} &= \lambda \frac{\partial w}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v}{\partial z}, \\ \sigma_{xz} &= \mu \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: λ 、 μ 为拉梅常数;在海水中 $\lambda_1 = \rho_1 c_1^2$, $\mu_1 = 0$;在海底中 $\lambda_2 + 2\mu_2 = \rho_2 c_l^2$, $\mu_2 = \rho_2 c_t^2$ 。

将式(2)、式(3)、式(5)代入式(4),化简可得

$$\begin{aligned} 2\xi_1 A \cosh(k\xi_1 H) + \xi_l B e^{-k\xi_l H} - i C e^{-k\xi_t H} &= 0, \\ 2\rho_1 \omega^2 A \sinh(k\xi_1 H) - B(\rho_2 \omega^2 - 2\rho_2 c_l^2 k^2) e^{-k\xi_l H} - \\ 2i C \rho_2 c_t^2 k^2 \xi_t e^{-k\xi_t H} &= 0, \\ 2i \xi_l B e^{-k\xi_l H} + C(1 + \xi_t^2) e^{-k\xi_t H} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

根据(6)式即可求得以下特征方程。

$$\begin{aligned} (2 - c^2/c_l^2)^2 - 4 \sqrt{1 - (c^2/c_l^2)} \sqrt{1 - (c^2/c_t^2)} + \\ \tanh\left(\frac{\omega}{c} \sqrt{1 - (c^2/c_l^2)} H\right) \frac{\rho_1 c^4 \sqrt{1 - (c^2/c_l^2)}}{\rho_2 c_l^4 \sqrt{1 - (c^2/c_t^2)}} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

此方程即为浅海半无限弹性海底声场模型下的频散方程。下面分别对硬质海底、软质海底条件下点声源激发的 Scholte 波进行数值计算,分析 Scholte 波的频散关系,具体参数见表 1。

表 1 不同介质类型及其声学参数

Tab. 1 Different medium types and their acoustic parameters

介质类型	介质密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	纵波波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	横波波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
海水	1 000	1 500	0
冰碛石	2 100	1 950	600
玄武岩	2 600	4 500	1 900

1.1 硬质海底介质

以玄武岩作为硬质海底($c_t > c_l$)介质,海水深度为 50 m,将玄武岩的参数代入频散方程式(7),得到图 2 硬质海底条件下 Scholte 波的频散曲线。

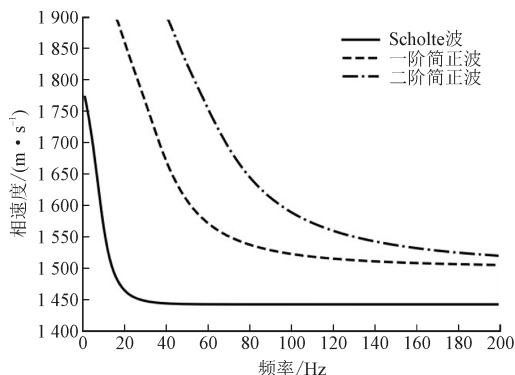


图2 硬质海底 Scholte 波频散曲线

Fig. 2 Scholte wave dispersion curve of the hard seabed

由图 2 知海底地震波包含 Scholte 波和简正波, Scholte 波波速随频率增加呈减小的趋势。声源频率趋于 0 Hz 时, Scholte 波的传播趋近于 Rayleigh 波,即空-固分界面上传播的波。由于 $\tanh$ 项趋于 0,式(7)转化为

$$(2 - c^2/c_t^2)^2 - 4 \sqrt{1 - (c^2/c_t^2)} \sqrt{1 - (c^2/c_l^2)} = 0 \quad (8)$$

该方程为 Rayleigh 方程,其解为 Rayleigh 波波速,与频率无关,因此 Rayleigh 波无频散特性。声源频率大于 40 Hz 后, Scholte 波波速随频率增加保持稳定。此时 $\tanh$ 项趋于 1,式(7)变为

$$(2 - c^2/c_t^2)^2 - 4 \sqrt{1 - (c^2/c_t^2)} \sqrt{1 - (c^2/c_l^2)} + \frac{\rho_1 c^4 \sqrt{1 - (c^2/c_t^2)}}{\rho_2 c_l^4 \sqrt{1 - (c^2/c_l^2)}} = 0 \quad (9)$$

方程的解与频率无关, Scholte 波传播趋近于 Stoneley 波,即固-固分界面上传播的波。Scholte 波没有频散特性。

图中还显示频率大于 15 Hz 和 39 Hz 时分别激发了一阶和二阶简正波。表明在水平方向弹性海底界面处存在传播的简正波,其传播速度小于海底横波波速且大于海水声速,截止频率处的速度趋近于海底横波波速,简正波波速随频率增加也呈减小的趋势,可见简正波也具有频散现象。

1.2 软质海底介质

以冰碛石作为软质海底($c_t < c_l$)介质,图 3 为海水深度为 50 m 时 Scholte 波在软质海底条件下的频散曲线。Scholte 波波速随频率增加呈减小的趋势,声源频率接近于 0 Hz 时, Scholte 波波速趋近于 Rayleigh 波,在频率大于 5 Hz 后, Scholte 波波速随频率增加保持稳定。与硬质海底不同,软质海底无简正波的频散现象。因为当相速度大于横波波速时,频散方程只有复数根存在,海水和弹性海底中的简正波随距离增加而衰减。因此弹性海底为软质海底时,海水中没有正常传播的简正波。

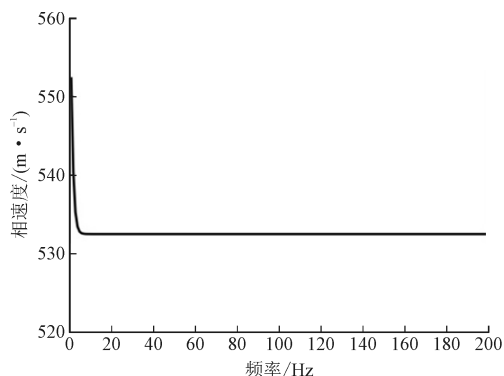


图3 软质海底 Scholte 波频散曲线

Fig. 3 Scholte wave dispersion curve of the soft seabed

由图 2 和图 3 可知,在甚低频段 Scholte 波才具有频散现象,无论是硬质海底还是软质海底条件下, Scholte 波都表现出正常频散, Scholte 波速度随频率的增加都相应减小。

2 声源激发的海底 Scholte 波仿真模型

2.1 仿真计算模型

基于多物理场耦合有限元软件 COMSOL 建立海底 Scholte 波场有限元模型。通过声-固相互作用时域模块建立模型,模型分为海水和海底 2 个部分。海水采用压力声学单元,海底采用固体力学单元,海底界面为声-固耦合边界。在海水上表面设置软声场边界;海水外侧设置完美匹配层(perfectly matched layer, PML)作为吸收边界;海底外侧和底部设置为低反射阻尼吸收边界。海水深度设置为 50 m,水平距离设置为 1 500 m,海底深度设置为 300 m,考虑到

计算量问题,采用二维轴对称模型将三维问题简化为二维问题。模型如图4所示。



图4 点声源激发海底 Scholte 波有限元模型

Fig. 4 Finite element model of seabed Scholte wave excited by point sound source

2.2 海底 Scholte 波极化

极化通过椭圆率来表征,椭圆率与椭圆长短轴相关,本研究采用椭圆率对 Scholte 波质点运动轨迹的极化特性进行分析。

令椭圆上任意一点到两焦点的距离之和 l_1 作为优化参数,对于实际椭圆上任意一点到两焦点的距离之和 l 为

$$l = \sqrt{(x_i - a_1)^2 + (y_i - b_1)^2} + \sqrt{(x_i - a_2)^2 + (y_i - b_2)^2} \quad (10)$$

式中: (x_i, y_i) 为椭圆上任意一点; (a_1, b_1) 和 (a_2, b_2) 为椭圆的两焦点。

定义方差为

$$S^2 = \frac{(l - l_1)^2}{n - 1} \quad (11)$$

式中, n 为椭圆上所有坐标总数。

数值仿真结果由方差优化得到 l 的最小值,椭圆性质 $l = 2a$ (a 为常数) 可得椭圆的长半轴或短半轴,然后由焦距与长短轴的关系得到短半轴或长半轴。最后得到椭圆率为

$$e = \pm \arctan(b/a) \quad (12)$$

式中: b 为短半轴; a 为长半轴。

椭圆率数值越高,椭圆越接近于圆形,数值越低,椭圆越扁。因此通过椭圆率表征 Scholte 波的质点运动轨迹,可研究 Scholte 波极化特性的变化规律。

3 仿真结果与讨论

3.1 硬质海底介质下脉冲声源激发的 Scholte 波频散及极化特性

以玄武岩为海底介质分析 Scholte 波频散和极化特性。脉冲声源采用主频为 30 Hz 的低频雷克子

波^[23],图5为雷克子波波形。

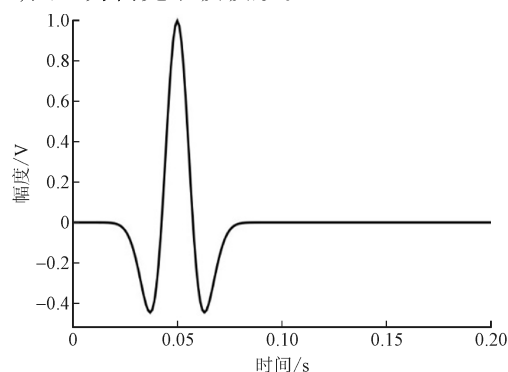


图5 雷克子波波形

Fig. 5 Waveform of Reich wavelet

图6为距声源水平距离为600 m处流-固界面水平方向的波形曲线。为了验证仿真结果的准确性,图7给出了文献[24]的地震波信号时域波形图。实验结果能观察到纵波、水中声波、横波和表面波,与本研究仿真结果得到的波的成分一致。仿真结果与实验的波形曲线基本一致。但是实验中的水中声波信号最强,因为实际海洋环境中的水中声波能量大且衰减小,且声波在浅海中传播时,多径效应导致声波聚集在一起。故实验结果初步证明了仿真结果的有效性。

根据玄武岩计算参数纵波为4500 m/s,横波为1900 m/s,因此纵波和横波应分别出现在0.13 s和0.32 s,由式(7)计算得到模型中 Scholte 波的速度为1448 m/s,即 Scholte 波出现在0.41 s,并在图6中观察到0.54 s前后波形差异明显。图6可以看到纵波、横波和 Scholte 波的阵列,纵波的水平速度幅值最小,横波次之, Scholte 波最大。随探测距离的增加,3种波衰减最慢的是 Scholte 波,对目标远距离探测时,可通过观测 Scholte 波为目标远距离探测提供帮助。

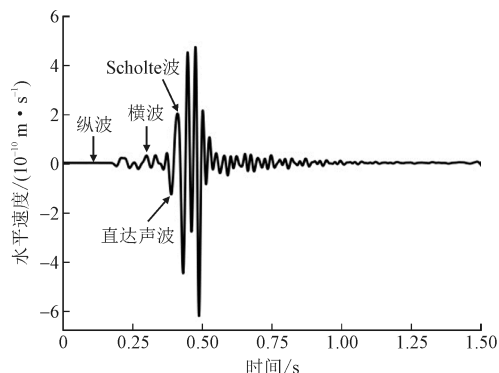


图6 硬质海底下600 m处脉冲声源激发的水平方向波形曲线

Fig. 6 Horizontal waveform curve of pulsed sound source excitation at 600 m under the hard seabed

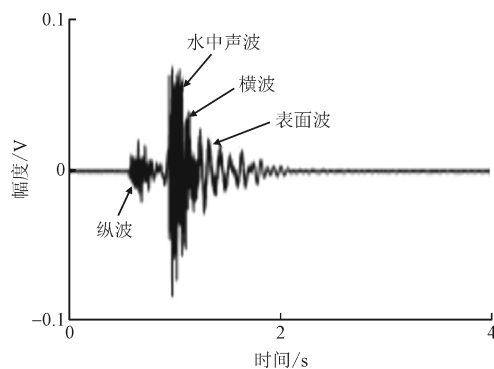


图7 文献[24]中地震波信号的时域波形图

Fig. 7 Time domain waveform of seismic wave signal in reference [24]

为了直观地分析脉冲声源激发的 Scholte 波的频散特性,对水平分量作小波变换得到图 8 所示的时频图,其中色柱表示速度幅值 (m/s),表示速度信号在不同时刻、不同频率成分上的强弱变化。图中高亮的部分即为 Scholte 波,随着时间的增加, Scholte 波的频率逐渐增加,在 0.54 s 之后 Scholte 波的频率保持稳定,和图 6 中 0.54 s 前后 Scholte 波波形差异相吻合。说明硬质海底条件下脉冲声源激发的 Scholte 波有频散现象;不同时刻下频率越高, Scholte 波传播速度越慢,说明频率低有利于 Scholte 波的传播。

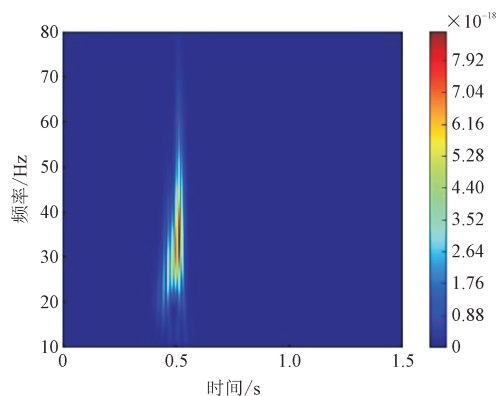


图8 硬质海底下 600 m 处脉冲声源激发的时频图

Fig. 8 Time-frequency diagram of pulsed sound source excitation 600 m below the hard seabed

对 0.41 ~ 0.54 s 的水平和垂直方向的波形数据做归一化处理得到 Scholte 波的极化特性 (图 9)。质点的运动轨迹为一个逆时针的椭圆^[2],符合 Scholte 波的极化特性,进一步证明了结果的准确性。Scholte 波与纵波和横波的极化轨迹不同,因此利用 Scholte 波的极化性质可将纵波、横波与 Scholte 波区分开,进一步研究 Scholte 波的性质。

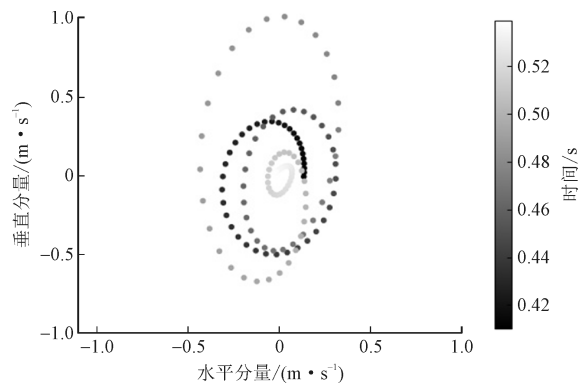


图9 硬质海底下 600 m 处脉冲声源激发的质点运动轨迹

Fig. 9 Trajectory of particle motion excited by pulsed sound source 600 m below the hard seabed

3.2 软质海底介质下脉冲声源激发的 Scholte 波频散及极化特性

以冰碛石为海底介质,其他条件保持不变。图 10 为距声源水平距离为 600 m 处流-固界面水平方向的波形曲线。根据冰碛石计算参数纵波为 1950 m/s,横波为 600 m/s,水中声速为 1500 m/s,因此纵波出现在 0.31 s,直达声波出现在 0.4 s,横波出现在 1 s,由式(7)计算得到模型中 Scholte 波的速度为 532 m/s,即 Scholte 波在 1.12 s 出现。与硬质海底不同,图中依次观察到纵波、直达声波、横波和 Scholte 波,软质海底下直达声波的水平速度幅值最大,而 Scholte 波较小,可见软质海底不利于激发 Scholte 波。

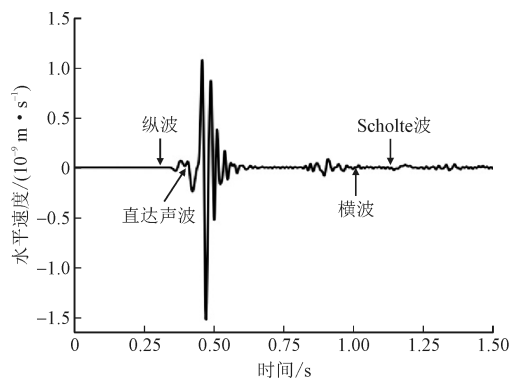


图10 软质海底下 600 m 处脉冲声源激发的水平方向波形曲线

Fig. 10 Horizontal waveform curve of pulsed sound source excitation at 600 m below the soft seabed

对水平分量作小波变换得到图 11 所示的时频图。图中高亮的部分即为直达声波,因为软质海底条件下直达声波信号强, Scholte 波信号弱在时频图

中难以观察到,可见软质海底难以看到 Scholte 波的频散现象。

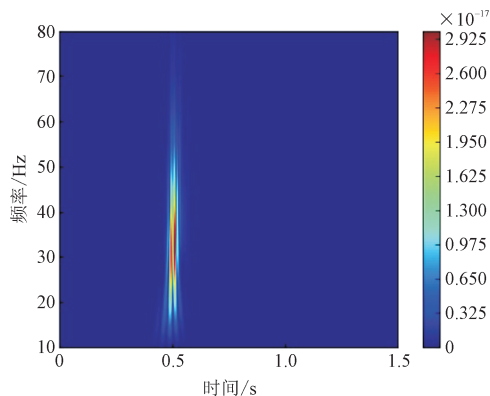


图 11 软质海底下 600 m 处脉冲声源激发的时频图

Fig. 11 Time-frequency diagram of pulsed sound source excitation 600 m below the soft seabed

3.3 硬质海底介质下连续声源激发的 Scholte 波频散及极化特性

以玄武岩为海底介质。采用主频为 30 Hz 的正弦波作为连续声源^[23]。

对于连续声源激发的 Scholte 波频散特性,图 12 是距声源水平距离为 600 m 处流-固界面水平分量作小波变换得到的时频图。因为声源持续激发,流-固界面的 Scholte 波被持续激发。2.5 s 前为各种声波的叠加,Scholte 波在 2.5 s 后趋于稳定,Scholte 波存在截止频率,不同时刻下随着频率增加,Scholte 波传播速度在减小,最后趋于稳定,这与理论的频散特性相吻合。说明连续声源激发的 Scholte 波有频散现象,并能够持续观察到 Scholte 波的频散。

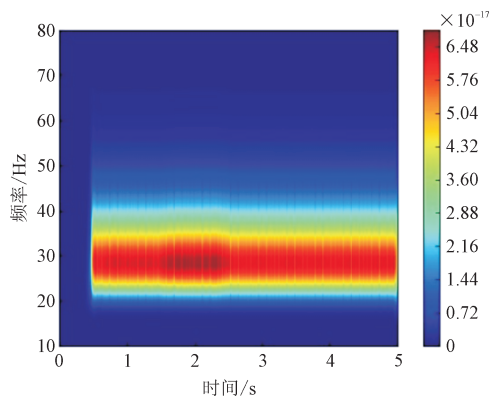


图 12 硬质海底下 600 m 处连续声源激发的时频图

Fig. 12 Time-frequency diagram of continuous sound source excitation 600 m below the hard seabed

图 13 为距声源水平距离为 600 m 处的波形数据,由图可知质点的运动轨迹稳定为逆时针椭圆。

因流-固界面持续激发 Scholte 波,可见连续声源激发的 Scholte 波的椭圆率最终趋于稳定,而脉冲声源随着 Scholte 波的衰减,其激发的 Scholte 波椭圆率先减小后增大。脉冲声源与连续声源激发的 Scholte 波差异可为 2 种水下声源的探测提供初步依据。

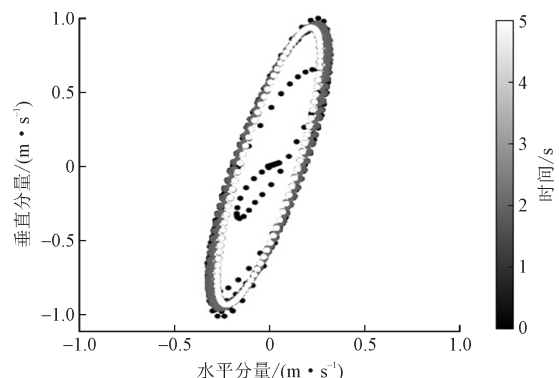


图 13 硬质海底下 600 m 处连续声源激发的质点运动轨迹

Fig. 13 Trajectory of particle motion excited by continuous sound source 600 m below the hard seabed

3.4 软质海底介质下连续声源激发的 Scholte 波频散及极化特性

以冰碛石为海底介质,图 14 是距声源水平距离为 600 m 处流-固界面水平分量作小波变换得到的时频图。相比于硬质海底,Scholte 波更早趋于稳定,因为软质海底激发的 Scholte 波比硬质海底的信号弱,波动小,随时间增加,能较快的保持稳定。因 Scholte 波的信号强度与直达声波相差不大,从时频图能持续观察到 Scholte 波的频散。

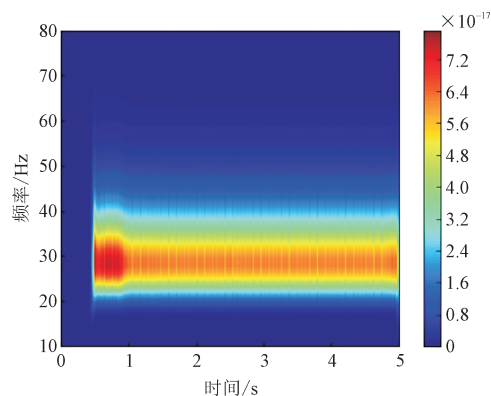


图 14 软质海底下 600 m 处连续声源激发的时频图

Fig. 14 Time-frequency diagram of continuous sound source excitation 600 m below the soft seabed

图 15 为距声源水平距离为 600 m 处的波形数据,由图可知质点的运动轨迹稳定为逆时针椭圆,相比于硬质海底,Scholte 波的椭圆率较大。

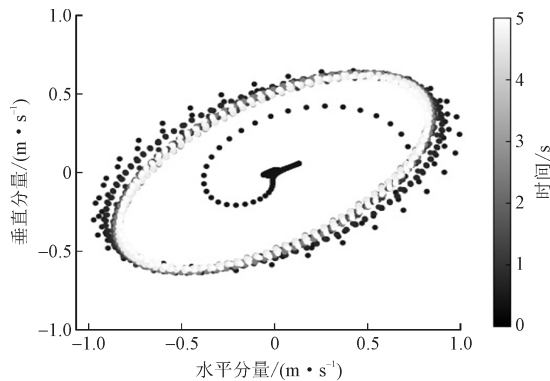


图 15 软质海底下 600 m 处连续声源激发的质点运动轨迹

Fig. 15 Trajectory of particle motion excited by continuous sound source 600 m below the soft seabed

由脉冲与连续声源激发的 Scholte 波质点运动轨迹,硬质海底条件下两种声源激发的 Scholte 波以垂直振动为主,软质海底条件下连续声源激发的 Scholte 波以水平振动为主,软质海底更有利于 Scholte 波的水平传播。

4 结 论

本研究研究了脉冲与连续点声源在浅海条件下激发的 Scholte 波频散及极化特性。先基于简正波理论分析了 Scholte 波的频散特性,然后利用时域有限元模型结合小波变换分析了两种声源激发的 Scholte 波的频散以及质点运动轨迹的极化特性。主要结论如下。

1) 浅海半无限弹性海底声场模型下,结合简正波理论,硬质海底和软质海底条件下都可以激发海底 Scholte 波,且都存在频散现象。

2) 硬质海底下,时频图均可观察到两种声源激发 Scholte 波的频散现象;软质海底下,因水中直达声波信号强度大幅超过 Scholte 波信号,难以观察到脉冲声源激发的 Scholte 波的频散,而连续声源条件下 Scholte 波信号与直达声波相近,可观察到频散现象。

3) 脉冲与连续声源条件下的 Scholte 波质点运动轨迹有显著差异,前者质点轨迹的椭圆率先减小后增大,后者的椭圆率趋于稳定;这一差异可为 2 种水下声源的探测提供初步依据。硬质海底条件下 2 种声源激发的 Scholte 波以垂直振动为主,软质海底条件下连续声源激发的 Scholte 波以水平振动为主,后者更有利于 Scholte 波的水平传播。

参考文献:

- [1] 司洁戈,冯海新,苏俊,等. 基于海底界面地震波的浅海目标探测研究[J]. 地球物理学进展,2022,37(6):2596-2603.
SI Jiege, FENG Haixin, SU Jun, et al. Research on shallow sea detection technology based on seismic wave[J]. Progress in geophysics, 2022, 37(6): 2596-2603 (in Chinese).
- [2] RAUCH D. Experimental and theoretical studies of seismic interface waves in coastal waters[M]//KUPERMAN W A, JENSEN F B. Bottom-Interacting Ocean Acoustics. Boston, MA: Springer US, 1980:307-327.
- [3] FRIVIK S A, HOVEM J M. Determination of shear wave properties in the upper seafloor using seismo-acoustic interface waves[C]//IEEE Oceanic Engineering Society. OCEANS'98. Conference Proceedings. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1998:682-686.
- [4] GIARD J L, POTTY G R, MILLER J H, et al. Validation of an inversion scheme for shear wave speed using Scholte wave dispersion[C]//2013 OCEANS-San Diego. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013:1-9.
- [5] DU S Y, CAO J P, ZHOU S H, et al. Observation and inversion of very-low-frequency seismo-acoustic fields in the South China Sea[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2020, 148(6):3992-4001.
- [6] EWING M, VINE A, WORZEL J L. Photography of the ocean bottom[J]. Journal of the optical society of america, 1946, 36(6):307-321.
- [7] RAUCH D. Seismic interface waves in coastal waters: a review[J]. Seismic interface waves in coastal waters: a review NATO, 1980, 5(1):1-106.
- [8] 邵雨新, 李环, 张自圃, 等. 浅海舰船地震波中 Scholte 波识别技术研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2017, 36(3):32-37.
SHAO Yuxin, LI Huan, ZHANG Zipu, et al. Research on recognition of Scholte wave in shallow sea ship seismic wave[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2017, 36(3):32-37 (in Chinese).
- [9] VINH P C. Scholte-wave velocity formulae[J]. Wave motion, 2013, 50(2):180-190.
- [10] 祝捍皓, 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 Hanhao, ZHENG Hong, LIN Jianmin, et al. Influence of ocean environment parameters on Scholte wave[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(2):257-264 (in Chinese).
- [11] QIU H M, XIA T D, CHEN W Y, et al. Low-frequency pseudo-Rayleigh and pseudo-Scholte waves at an interface of liquid/soft porous sediment with underlying hard porous sediment substrate[J]. Geophysical journal international, 2019, 219(1):540-552.
- [12] FLORES-MENDEZ E, CARBAJAL-ROMERO M, FLORES-

- GUZMAN N, et al. Rayleigh's, Stoneley's, and Scholte's interface waves in elastic models using a boundary element method[J]. Journal of applied mathematics, 2012, 2012(1): 313207.
- [13] WANG Q L, ZHU H H, TANG Y F, et al. Propagation characteristics of low-frequency acoustic wave in full waveguide of shallow water based on time-domain finite element method[J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2021, 734(1): 012040.
- [14] ZHAO S, ZHANG J, WANG Z L, et al. Improving Scholte-wave vibration signal recognition based on polarization characteristics in coastal waters[J]. Journal of coastal research, 2020, 36(2): 382-392.
- [15] TOMAR G, SHAPIRO N M, MORDRET A, et al. Radial anisotropy in Valhall; ambient noise-based studies of Scholte and Love waves[J]. Geophysical journal international, 2017, 208(3): 1524-1539.
- [16] 王勃, 曾林峰, 张衍, 等. 煤矿井下全空间地震波时频域极化分析及其试验研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 2978-2984.
- WANG Bo, ZENG Linfeng, ZHANG Yan, et al. Time-frequency domain polarization analysis of seismic waves in the whole space of mine and its experimental study[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 2978-2984 (in Chinese).
- [17] 赵晗. 甚低频水声地波联合探测关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [18] LU J, WANG Y, CHEN J Y. Noise attenuation based on wave vector characteristics[J]. Applied sciences, 2018, 8(5): 672.
- [19] HUANG L Y, WANG S C, SONG X J. Comparison study of three-component polarization analysis methods for seismic advanced detection in the roadway[J]. Arabian journal of geosciences, 2020, 13(23): 1276.
- [20] 韩雪. 舰船地震波信号特性分析与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- [21] 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.
- [22] ZHAO S, ZHANG J, GUO C A, et al. Study on fluctuant element and attenuation rules of seismo-acoustic wave[J]. Noise & vibration worldwide, 2019, 50(7): 217-226.
- [23] 罗夏云, 孟路稳, 程广利, 等. 浅海中声源激发的 Scholte 波频率特性研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(16): 267-274.
- LUO Xiayun, MENG Luwen, CHENG Guangli, et al. A study on frequency characteristics of Scholte wave excited by sound sources in a shallow sea[J]. Journal of vibration and shock, 2020, 39(16): 267-274 (in Chinese).
- [24] 刁爱民, 程广利, 王泽明. 气枪声源激发的浅海地震波频散特性研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(4): 724-729.
- DIAO Aimin, CHENG Guangli, WANG Zeming. On the dispersive characteristics of shallow water seismic waves excited by air gun sound source in shallow water[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(4): 724-729 (in Chinese).

(编辑 张璐)