不同浅海环境下点声源海底地震波特征研究

卢再华，张志宏，顾建农
(海军工程大学理学院力学系，武汉 430033)

摘要：航行舰船在海底岩土层中引起的弹性波被称为舰船地震波，主要由舰船低频辐射噪声引起，可用于识别舰船目标。将舰船地震波简化为液固多层半无限空间低频点声源引起的地震波动问题，基于波数积分方法，通过 FFP 数值积分得到了海底表面声压、位移和加速度的频率特性曲线，分析了不同浅海环境对点声源海底地震波的波动特征的影响。结果表明：软质海底竖直方向加速度具有明显的低频通过特征，点声源海底地震波频域特征具有方向性；接收横距、岩土层吸收衰减系数和软硬程度、水深、沉积层厚度等均对点声源海底地震波的波动特征具有影响。

关键词：浅海；点声源；地震波；声压；位移；加速度
中图分类号：P631.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-3630(2009)-05-0596-05
DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2009.05.007

Characteristics of seabed seismic wave caused by point sound source in various shallow water circumstances

LU Zai-hua, ZHANG Zhi-hong, GU Jian-nong
(*College of Science*, *Naval University of Engineering*, *Wuhan* 430033, *China*)

Abstract: The elastic wave in seabed caused by the low frequency noise of sailing vessel is the so-called ship caused seismic wave that can be used to identify ship target. The ship caused seismic wave is simplified to the seismic wave generated by a low frequency point sound source in a liquid-solid multi-layered semi-space in this paper. Based on the wave-number integration technique, the characteristic curves of acoustic pressure, displacement and acceleration on the surface of seabed varied with frequency are obtained by FFP numerical evaluation technique. The influences of various shallow water circumstances on the characteristics of the seismic wave in seabed are discussed. According to the calculation results, the characteristic of the vertical acceleration in soft seabed is dominant in low frequency band and differs from the horizontal acceleration. The characteristics of the seismic wave in seabed are apparently influenced by receiver distance, attenuation and stiffness of sediment, water depth and sediment thickness.

Key words: shallow-water; point sound source; seismic wave; acoustic pressure; displacement; acceleration

1　引 言

航行舰船在海底岩土层中引起的弹性波被称为舰船海底地震波，可用于识别舰船目标。目前，舰船海底地震波已经在美、俄水雷的引信中得到应用，并开发出了地震波引信水雷的系列产品[1-2]。已有研究结果表明，舰船地震波主要由舰船低频辐射噪声引起，海底岩土层是舰船地震波的传播通道，舰船地震波信号特征强烈依赖于所在海域的海洋环境和海底岩土层地质特性[3-7]。因此，分析不同浅海环境下点声源海底地震波的波动特征及其变化律具有一定的研究意义，可以为舰船地震波在水中军用目标探测领域的应用提供理论基础。

2　波数积分计算方法

采用由理想流体海水层和均质各向同性海底岩土层组成的液固多层半无限空间简单海洋环境模型，如图 1 所示。

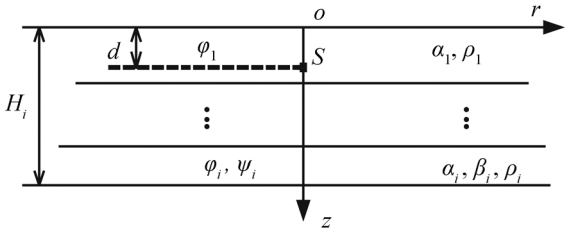

图 1　液固多层半无限空间中的点声源
Fig.1　Point sound source in a liquid-solid multi-layered semi-space

收稿日期：2009-04-13；**修改日期**：2009-06-18
基金项目：国防预研项目(51303030501)；海军工程大学自然科学基金项目。
作者简介：卢再华(1972-)，男，江西人，博士，副教授，研究方向为舰船海底地震波。
通讯作者：卢再华，E-mail: luzaihua01@163.com

图 1 中 α_1、ρ_1 为海水层的纵波波速和密度；α_i、β_i、ρ_i 为岩土层的纵波波速、横波波速和密度；d 是点源 S 的深度；H_i 为各层底面深度。φ_1、φ_i、ψ_i 分别是海水层和各岩土层的位移势函数，满足亥姆霍兹方程如下：

$$[\nabla^2+k^2(z)]\varphi_1(r,z)=S_\omega\delta(z-d)\delta(r)/(2\pi r) \tag{1}$$

$$[\nabla^2+k^2(z)]\varphi_i(r,z)=0 \tag{2}$$

$$[\nabla^2+\kappa^2(z)]\psi_i(r,z)=0 \tag{3}$$

式中，S_ω 为声源强度；$k(z)$、$\kappa(z)$ 分别为各层纵波波数、横波波数。海水层表面满足自由面边界条件(声压为 0)；海底表面满足竖直位移、竖直应力连续条件；各岩土层之间则满足水平和竖直方向的位移、应力连续条件。以上亥姆霍兹方程和边界条件、层间连续性条件共同构成液固多层半无限空间低频简谐点声源波动模型。

对亥姆霍兹方程式(1)~式(3)实施 Hankel 变换，可得到深度相关的波动方程。以非奇次方程式(1)为例，其 Hankel 变换后的深度相关波动方程为：

$$\{\mathrm{d}^2/\mathrm{d}z^2+[k^2(z)-k_r^2]\}\varphi_1(k_r,z)=S_\omega\delta(z-d)/(2\pi) \tag{4}$$

式中 k_r 为水平波数。该方程的解为：

$$\begin{aligned}\varphi_1(k_r,z)=&S_\omega\exp(\mathrm{i}k_z|z-d|)/(4\pi\mathrm{i}k_z)+\\&A^-\exp(-\mathrm{i}k_zz)+A^+\exp(\mathrm{i}k_zz)\end{aligned} \tag{5}$$

式中，k_z 为海水层纵波的垂直波数；A^- 和 A^+ 分别为上行波和下行波的复幅度。式(5)也称为深度相关格林函数，对其实施反 Hankel 变换，即得到海水层势函数的积分表达式(6)：

$$\varphi_1(r,z)=\int_0^\infty\varphi_1(k_r,z)\mathrm{J}_0(k_rr)k_r\mathrm{d}k_r \tag{6}$$

式中 $\mathrm{J}_0(k_rr)$ 为零阶贝塞尔函数。类似地可得到各岩土层位移势函数的深度相关格林函数和积分表达式：

$$\varphi_i(k_r,z)=A_i^-\exp(-\mathrm{i}k_zz)+A_i^+\exp(\mathrm{i}k_zz) \tag{7}$$

$$\psi_i(k_r,z)=B_i^-\exp(-\mathrm{i}\kappa_zz)+B_i^+\exp(\mathrm{i}\kappa_zz) \tag{8}$$

$$\varphi_i(r,z)=\int_0^\infty\varphi_i(k_r,z)\mathrm{J}_0(k_rr)k_r\mathrm{d}k_r \tag{9}$$

$$\psi_i(r,z)=\int_0^\infty\psi_i(k_r,z)\mathrm{J}_0(k_rr)k_r\mathrm{d}k_r \tag{10}$$

式中，k_z、κ_z 分别为各岩土层纵波、横波的垂直波数；A_i^-、A_i^+、B_i^-、B_i^+ 分别为纵波和横波的上行波和下行波复幅度。根据位移势函数和位移、声压的关系，可得到海水层竖直位移、声压的深度相关格林函数如下：

$$w_1(k_r,z)=-\mathrm{i}k_zA^-\exp(-\mathrm{i}k_zz)+\mathrm{i}k_zA^+\exp(\mathrm{i}k_zz) \tag{11}$$

$$p_{zz1}(k_r,z)=-\rho_1\omega^2[A^-\exp(-\mathrm{i}k_zz)+A^+\exp(\mathrm{i}k_zz) \tag{12}$$

类似地，岩土层竖直和水平方向位移、应力的深度相关格林函数如下：

$$\begin{aligned}w_i(k_r,z)=&-\mathrm{i}k_zA_i^-\exp(-\mathrm{i}k_zz)+\mathrm{i}k_zA_i^+\exp(\mathrm{i}k_zz)+\\&k_rB_i^-\exp(-\mathrm{i}\kappa_zz)+k_rB_i^+\exp(\mathrm{i}\kappa_zz)\end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}q_i(k_r,z)=&-k_rA_i^-\exp(-\mathrm{i}k_zz)-k_rA_i^+\exp(\mathrm{i}k_zz)+\\&\mathrm{i}\kappa_zB_i^-\exp(-\mathrm{i}\kappa_zz)-\mathrm{i}\kappa_zB_i^+\exp(\mathrm{i}\kappa_zz)\end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{zzi}(k_r,z)=&\mu_i\{(2k_r^2-\kappa^2)[A_i^-\exp(-\mathrm{i}k_zz)+\\&A_i^+\exp(\mathrm{i}k_zz)]-2\mathrm{i}k_r\kappa_z[B_i^-\exp(-\mathrm{i}\kappa_zz)-\\&B_i^+\exp(\mathrm{i}\kappa_zz)]\}\end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{rzi}(k_r,z)=&\mu_i\{2\mathrm{i}k_rk_z[A_i^-\exp(-\mathrm{i}k_zz)-\\&A_i^+\exp(\mathrm{i}k_zz)]-(2k_r^2-\kappa^2)\cdot\\&[B_i^-\exp(-\mathrm{i}\kappa_zz)+B_i^+\exp(\mathrm{i}\kappa_zz)]\}\end{aligned} \tag{16}$$

式中，μ_i 为各岩土层弹性介质的拉梅常数。定义第 i 层的自由度向量 $\boldsymbol{a}_i(k_r)=(A_i^-,A_i^+,B_i^-,B_i^+)$，局部向量 $\boldsymbol{v}_i(k_r,z)=(w_i,q_i,\sigma_{zzi},\sigma_{rzi})$，则式(13)~(16)可统一表示为：

$$\boldsymbol{v}_i(k_r,z)=\boldsymbol{c}_i(k_r,z)\boldsymbol{a}_i(k_r) \tag{17}$$

其中，$\boldsymbol{c}_i(k_r,z)$ 为层 i 中局部系数矩阵。第 i 层和第 i+1 层之间的连续性条件为：

$$\boldsymbol{v}_i(k_r,z_i)-\boldsymbol{v}_{i+1}(k_r,z_i)=\hat{\boldsymbol{v}}_{i+1}(k_r,z_i)-\hat{\boldsymbol{v}}_i(k_r,z_i) \tag{18}$$

式中 $\hat{\boldsymbol{v}}_i(k_r,z_i)$、$\hat{\boldsymbol{v}}_{i+1}(k_r,z_i)$ 分别表示第 i 层、第 i+1 层中源对应的局部向量。将式(17)~(18)反复应用到其它各层界面，可得到全局自由度的方程组：

$$\boldsymbol{C}\boldsymbol{X}=\boldsymbol{D} \tag{19}$$

式(19)中 $\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{X}$、$\boldsymbol{D}$ 分别为全局系数矩阵、全局自由度向量和各层中源对应的全局向量。解方程组即得到各层上、下行波的复幅度，进而可求解出各层位移、声压和应力的积分核，对积分核实施反 Hankel 变换，即得到类似式(6)的位移、声压和应力的积分表达式。计算此类积分最常用的是 FFP 算法[8]，以式(6)为例，势函数的积分表达式可近似为：

$$\begin{aligned}\varphi_1(r,z)\approx&\sqrt{1/(2\pi r)}\exp(-\pi\mathrm{i}/4)\times\\&\int_0^\infty\varphi_1(k_r,z)\sqrt{k_r}\exp(\mathrm{i}k_rr)\mathrm{d}k_r\end{aligned} \tag{20}$$

再利用 FFT 变换就得到势函数的近似表达式：

$$\begin{aligned}\varphi_1(r_j,z)\approx&\Delta k_r/\sqrt{1/(2\pi r_j)}\exp(-\pi\mathrm{i}/4)\times\\&\sum_{l=0}^{M-1}[\varphi_1(k_l,z)\exp(\mathrm{i}\Delta k_rlr_{\min})\sqrt{k_r}]\exp(2\pi\mathrm{i}jl/M)\end{aligned} \tag{21}$$

改变积分核函数，可得到位移、声压和应力积分表达式的 FFT 近似表达式，限于篇幅不再列出。

3　计算实例

某典型浅海环境下的计算参数如表 1 所示，点

源 S 深度 50m，采用单位压强点源，声压级为 120dB。各层吸收衰减系数的频散特性采用指数函数描述，参照文献[9]研究结果，衰减指数取为 1.9，以 100Hz 为基准的吸收衰减系数如表 1 所示。

表 1 计算参数
Table 1 Parameters for calculation

分层名称	分层密度 /(kg/m^3)	纵波波速 /(m/s)	横波波速 /(m/s)	层面深度 /m	纵波衰减系数 /(dB/m)	横波衰减系数 /(dB/m)
海水	1000	1500	0	0	0.005	0.00
泥沙	1860	1520	200	60	0.02	0.04
沙土	1950	1680	400	80	0.02	0.04
砂砾	2100	2000	600	100	0.01	0.02
砂岩	2500	2500	1000	120	0.01	0.02
玄武岩	2800	3500	1800	180	0.005	0.01

考虑到单位压强点源在大横距处产生的位移、加速度幅值很小，且不同频率存在数量级的差别，为分析方便，参照水声学中声压级定义方法[10]，定义位移级和加速度级如下：

$$DL=20\lg(w/w_0) \tag{22}$$

$$AL=20\lg(a/a_0) \tag{23}$$

式中 DL 、AL 分别为位移级、加速度级；w 、a 分别为接收处的位移、加速度幅值；w_0 、a_0 分别为参考位移、参考加速度，本文分别取 1^{-14}m 和 1^{-10}m/s^2 。为了分析海底岩土层吸收衰减系数、软硬程度、海水层深度、沉积层厚度等不同浅海环境对点声源海底地震波特征的影响，共进行了 4 个算例的计算。

3.1 软质海底

海底岩土层共 5 层，如表 1 所示，模拟沉积层较厚的软质海底条件。图 2~5 分别为横距 2000m 处海底表面的竖直加速度、水平加速度、声压和位移的频率特性曲线。

可见，竖直方向加速度具有明显的低频通过特征；水平方向加速度则各频率成分差别相对较小，说明点声源海底地震波在不同的方向上频域特征有所不同，具有方向性；海底表面声压随频率增大

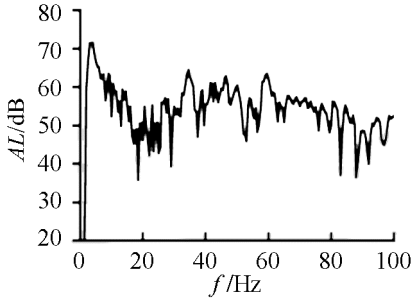

图 2 竖直加速度频率特性曲线
Fig.2 Characteristic curve of acoustic pressure

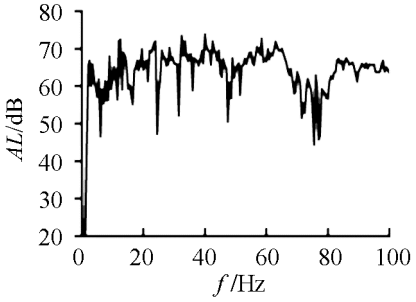

图 3 水平加速度频率特性曲线
Fig.3 Characteristic curve of horizontal acceleration

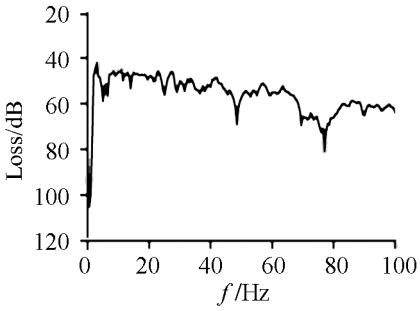

图 4 声压频率特性曲线
Fig.4 Characteristic curve of acoustic pressure

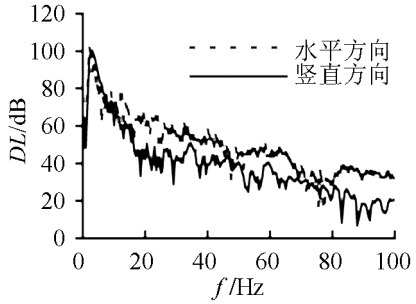

图 5 位移频率特性曲线
Fig.5 Characteristic curve of displacement

逐渐减小；位移则随频率增大急剧减小。图 6 为不同横距处竖直加速度频率特性曲线。图 6 中，随横距增大竖直加速度幅值总体逐渐减小，但较低频率成分减小较慢，较高频率成分减小较快，当横距达到 2000m 时，基本呈现低频通过特征。

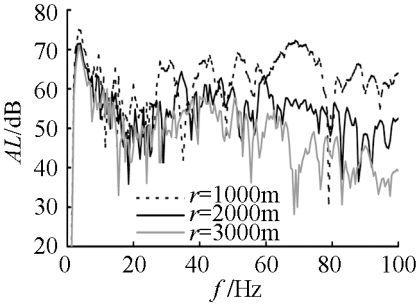

图 6 不同横距处竖直加速度频率特性曲线
Fig.6 Characteristic curves of vertical acceleration in frequency domain at different receiving distances

图 7 为不同吸收衰减系数下 2000m 处竖直加速度的频率特性曲线，其中两倍吸收衰减条件为将表

1 中除海水层外的所有衰减系数加倍，可见吸收衰减系数对较高频率成分(30Hz 以上)有明显衰减作用，对较低频率成分影响不大。

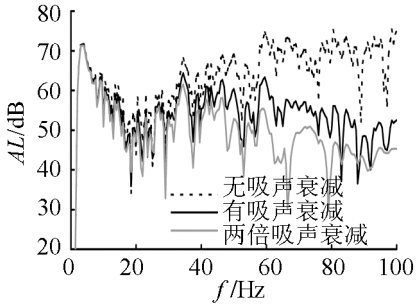

图 7　不同衰减系数下竖直加速度频率特性曲线

Fig.7　Characteristic curves of vertical acceleration in frequency domain for different attenuations

3.2　硬质海底

采用由表 1 中砂岩和玄武岩组成的 2 层海底模拟硬质海底条件，以分析海底岩土层软硬程度对地震波特征的影响。图 8 和图 9 分别为软质海底、硬质海底条件下竖直加速度和水平加速度的频率特性曲线。可见，软质海底更有利于声源较低频率成分(10Hz 以下)的传播，另外水平方向的加速度幅值较硬质海底总体上要大一些。

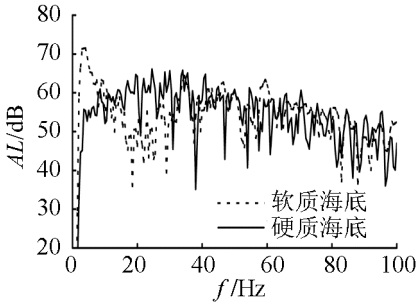

图 8　竖直加速度频率特性曲线

Fig.8　Characteristic curve of vertical acceleration in frequency domain

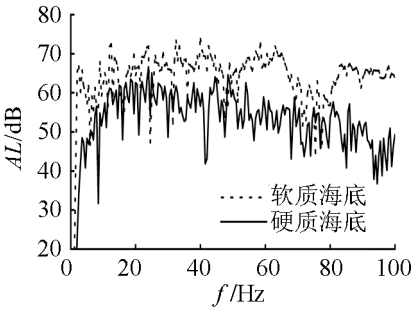

图 9　水平加速度频率特性曲线

Fig.9　Characteristic curve of horizontal acceleration in frequency domain

3.3　浅海水层

将表 1 中海水层水深分别减小为 40m 和 20m，声源深度均位于水面以下 10m 处，以分析水深对地震波特征的影响，结果如图 10 和图 11 所示。可见，随水深的减小，较低频率成分的幅值逐渐增大，竖直方向加速度逐渐表现出低频通过特征，较高频率成分变化不大，说明浅水环境更有利于较低频率成分的传播。

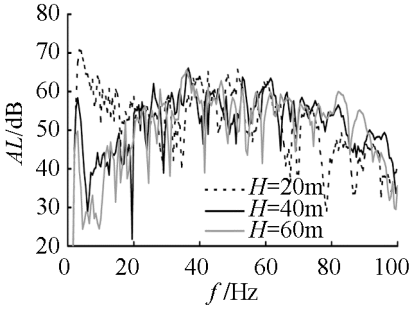

图 10　竖直加速度频率特性曲线

Fig.10　Characteristic curve of vertical acceleration in frequency domain

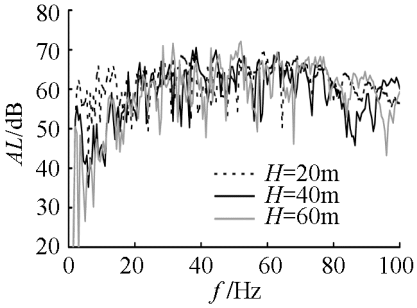

图 11　水平加速度频率特性曲线

Fig.11　Characteristic curve of horizontal acceleration in frequency domain

3.4　浅沉积层

由图 12 可见，当沉积层厚度变浅时，加速度幅值总体上增大，峰值频率由 4Hz 变化到 10Hz 左右，峰值频率范围整体右移。

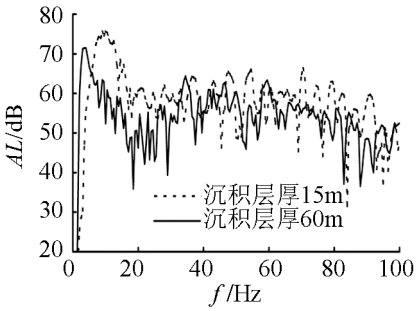

图 12　竖直加速度频率特性曲线

Fig.12　Characteristic curve of vertical acceleration in frequency domain

4　结论及讨论

将舰船地震波简化为液固多层半无限空间低频点声源引起的地震波动问题，基于波数积分方法，对不同浅海环境下海底地震波特征的分析结果表明：

(1) 软质海底竖直方向加速度具有明显的低频

通过特征，点声源海底地震波频域特征具有方向性。

(2) 随着横距增大，竖直加速度幅值总体上逐渐减小，但在较低频率成分减小较慢，在较高频率成分减小较快。

(3) 吸收衰减系数对较高频率成分有明显的衰减作用，对较低频率成分影响不大。

(4) 软质海底更有利于声源较低频率成分的传播，水平方向的加速度幅值较硬质海底总体上要大一些。

(5) 浅水环境更有利于较低频率成分的传播。

(6) 当沉积层厚度变浅时，加速度幅值总体上增大，峰值频率范围整体右移。

实际的浅海环境比较复杂，通常为倾斜海底和不均匀厚度分层，沉积层为典型的饱水两相多孔介质，本文尚未加以考虑。因此对低频点声源海底地震波特征的分析还需在考虑倾斜不均匀厚度分层海底和饱水两相多孔介质等方面做进一步研究。

参 考 文 献

[1] 卢再华, 张志宏. 舰船海底地震波及其在水雷引信中的应用[J]. 水雷战与舰船防护, 2004, (4): 25-28.
LU Zaihua, ZHANG Zhihong, The ship-induced seismic wave on the seafloor and it's application in water mine fuze[J]. Mine Warfare and Ship Self-defence, 2004, 4: 25-28.

[2] 陈云飞, 吕俊军. 航行舰船地震波及其在水中目标探测中的应用[J]. 舰船科学技术, 2005, **27**(3): 62-66.
CHEN Yunfei, LU Junjun. The ship-induced seismic wave and it's application in the underwater target detection[J]. Ship Science and Technology, 2005, **27**(3): 62-66.

[3] 卢再华, 张志宏. 浅海低频点声源作用下海底地震波的数值模拟[J]. 武汉理工大学学报, 2007, **31**(4): 607-610.
LU Zaihua, ZHANG Zhihong. A numerical simulation of seafloor seismic wave caused by low frequency point sound source in shallow water[J]. Journal of Wuhan University of Technology，2007, **31**(4): 607-610.

[4] 卢再华, 张志宏. 舰船海底地震波形成机理的理论分析[J]. 应用力学学报, 2007, **24**(1): 54-57.
LU Zaihua, ZHANG Zhihong. A theoretical analysis of the mechanism of seafloor seismic wave induced by sailing vessel[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2007, **24**(1): 54-57.

[5] 颜冰, 周伟. 浅海地震波传播的简正波模型[J]. 武汉理工大学学报, 2006, **30**(5): 805-807.
YAN Bing, ZHOU Wei. A normal mode model for ocean seismo-acoustics in shallow water[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, **30**(5): 805-807.

[6] 周伟, 颜冰. 舰船低频声传播的海底损失[J]. 噪声与振动控制, 2006, (2): 62-65.
ZHOU Wei, YAN Bing. Bottom loss of the ship's low frequency noise from a horizontally stratified sea bottom[J]. Noise and Vibration Control, 2006, (2): 62-65.

[7] 卢再华, 张志宏. 航行船舶引起河岸微幅地震波的试验结果分析[J]. 声学与电子工程, 2006, (增刊): 105-107.
LU Zaihua, ZHANG Zhihong. Detecting data of seismic wave on the bank of river caused by sailing vessel[J]. Acoustics and Electronics Engineer, 2006, (supplement): 105-107.

[8] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B. Computational ocean acoustics[M]. New York: AIP Press, 1993.

[9] 鹿力成, 马力. 浅海海底模型对低频声传播的影响[J]. 声学技术, 2007, **26**(5): 787-793.
LU Licheng , MA Li . Effects of seabed model on low frequency sound propagation in shallow water[J]. Technical Acoustics，2007，**26**(5): 787-793.

[10] 刘伯胜, 雷家熠. 水声学原理[M]. 哈尔滨工程大学出版社, 1993.
LIU Bosheng, LEI Jiayi Y. Under-water acoustic theory[M]. Harbin Engineer University Press, 1993.