

弹性沉积层声虹吸效应对浅海甚低频声场的影响

曹德璠^{1,2,3}, 张海刚^{1,2,3}, 谢金怀^{1,2,3}, 龚李佳^{1,2,3}

(1. 哈尔滨工程大学 水声技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学) 工业和信息化部, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:研究海底弹性沉积层特征对浅海甚低频声场的影响, 对实现甚低频段水声技术的应用具有重要意义。本文对能够导致浅海甚低频声传播损失周期变化的软弹性沉积层声虹吸效应进行研究。依据波束位移射线简正波理论与声波反射理论, 研究了弹性沉积层海底反射特征, 给出了该条件下声虹吸频率周期的表达式; 分析了声虹吸效应随海底参数的变化规律及其对甚低频声场特性的影响。研究表明: 声虹吸频率对沉积层横波与厚度敏感, 声虹吸效应会影响波导中简正波传播, 浅海甚低频声场干涉结构周期变化、相速度频散曲线在声虹吸频率处突变。

关键词:声虹吸效应; 软弹性沉积层; 海底反射系数; 甚低频; 浅海; 声虹吸频率周期; 干涉结构; 频散特性

DOI: 10.11990/jheu.202505023

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1390.u.20250613.1704.002>

中图分类号: O427.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2025)08-1485-10

Effect of elastic layer acoustic siphon on shallow-water very low frequency sound field

CAO Dejin^{1,2,3}, ZHANG Haigang^{1,2,3}, XIE Jinhui^{1,2,3}, GONG Lijia^{1,2,3}

(1. National Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security (Harbin Engineering University), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150001, China; 3. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The very low frequency (VLF) acoustic field is strongly affected by the elastic characteristics of the seabed. This study analyzes the acoustic siphon effect caused by the soft, elastic, sedimentary seabed, which induces periodic variations in shallow waters, namely the VLF acoustic propagation loss. The beam displacement ray mode and acoustic wave reflection theories were used in calculating the acoustic siphon frequency period for the elastic sedimentary seabed based on analysis of the reflection characteristics of the seabed. The variation of the acoustic siphon effect with the seabed parameters and the impact on the characteristics of the VLF acoustic field were analyzed. The acoustic siphon frequencies are sensitive to the shear wave and thickness of the sedimentary layer. The acoustic siphon effect influences the propagation of normal modes, altering the interference structure and dispersion characteristics of the VLF acoustic field in shallow waters.

Keywords: acoustic siphon effect; soft elastic sedimentary layer; seabed reflection coefficient; very low frequency; shallow waters; acoustic siphon frequency period; interference structure; dispersion characteristics

海洋中的声传播受到许多因素的影响, 在浅海波导中, 声波沿传播路径与海底发生反复相互作用, 海底沉积层的反射特性对远程声传播具有显著的影响。当海底存在粉质黏土等细粒沉积物构成的低速沉积层(介质声速小于海底附近的水

中声速)时, 特定频率下的小掠射角声波会因异常透射向海底泄露, 使得声传播损失周期性增大, 影响浅海的声传播特性, 这种异常透射现象被称为声虹吸效应^[1]。该效应不仅可以用于地声参数的反演^[2], 还可能会影响浅海声场模型建模^[3]的研究以及水下目标跟踪^[4]等水声工程技术的应用。Kuperman等^[5]在理论研究中发现了声虹吸效应的存在, 当海底存在低速流体沉积层时, 小掠射角下海底的反射损失会出现周期性增大的现象。随着

收稿日期: 2025-05-23. 网络出版日期: 2025-06-16.
基金项目: 国家自然科学基金项目(12204128).
作者简介: 曹德璠, 男, 博士研究生;
张海刚, 男, 教授, 博士生导师.
通信作者: 张海刚, E-mail: zhanghaigang@hrbeu.edu.cn.

多次低速沉积层海域实验的开展,使得声虹吸效应逐步受到研究人员的重视,Zhou 等^[6]在一次黄海海域实验中发现接收声信号在中低频段存在传播损失异常增大的周期频率(称之为声虹吸频率),该海域低速层的声虹吸效应使得这些频率下本可以远距离传播的小掠射角声波能量进入海底,从而导致在水柱中的传播损失周期性异常增大,从理论和实验角度验证了声虹吸效应对浅海声场传播特性的影响。

然而目前针对声虹吸效应的研究仍存在不足,现有有关声虹吸效应的研究主要集中在低速流体层海底环境中。某些浅海海域的海底介质剪切效应明显,甚低频条件下沉积层中的横波能够显著的影响浅海声传播特性^[7-8],此时海底的弹性特征不可忽略。与低速流体沉积层类似,横波波速小于水层底部声速的软弹性沉积层同样具有周期性的声虹吸效应,但目前关于弹性沉积层声虹吸效应对浅海甚低频声场特性影响的研究较少。当硬质基底上存在薄软弹性沉积层时,某些频段传播损失会周期性异常升高,这种声场特性与海底软弹性沉积层横波机制导致的声虹吸效应有关^[9],但针对这种现象并没有系统性的研究。

本文从海底反射与浅海声传播的角度出发,揭示弹性沉积层海底声虹吸效应的产生机理,开展了声虹吸效应对浅海甚低频声场特性的影响机制及规律研究。

1 弹性沉积层的声虹吸效应物理机制研究

1.1 基于简正波理论的浅海声强计算

根据简正波理论^[10],远场条件下声源深度 z_0 时,水中 (r, z) 处声场可用简正波叠加为:

$$P(r, z) = \frac{i}{\sqrt{8\pi r}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n(z_0)U_n(z)}{\sqrt{k_n}} e^{-\frac{\pi i}{4}} e^{(ik_n - \beta_n)r} \quad (1)$$

其中声强 $I = PP^*$ 的非相干部分有:

$$I_1 = \frac{-1}{8\pi r} \sum \frac{|U_n(z_0)|^2 |U_n(z)|^2}{k_n} e^{-2\beta_n r} \quad (2)$$

式中: U_n 为简正波的本征函数; k_n 为模态的水平波数; β_n 为模态的衰减系数。

基于波束位移射线简正波 (beam displacement ray mode, BDRM) 理论^[11],结合 WKB (Wentzel-Kramers-Brillouin, WKB) 近似^[12],考虑均匀浅海波导环境,简正波均为海面反射-海底反射 (surface reflected and bottom reflected, SRBR) 模态,设 k_w 为水中介质波数,此时波导中第 n 阶简正波能够分解为一对掠射角 $\theta_n = |\arccos(k_n/k_w)|$ 的上下行准平面波,模

态的频散方程和衰减系数 β_n 为:

$$\int_0^{H_1} \sqrt{k^2(z) - k_n^2} dz + \varphi_{\text{top}}(k_n) + \varphi_{\text{bot}}(k_n) = (n-1)\pi \quad (3)$$

$$\beta_n = \frac{-\ln |V_{\text{bot}}(\theta_n)|}{S(\theta_n) + \delta_{\text{top}}(\theta_n) + \delta_{\text{bot}}(\theta_n)} \quad (4)$$

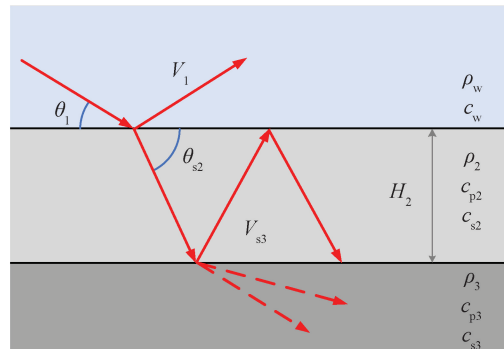
式中: H_1 为海水深度;界面反射系数 V 写作 $|V|e^{i\varphi}$ 的形式; φ 为反射系数相位; δ 为界面处波束位移,下角标 top, bot 分别代表海面与海底界面; $S(\theta_n)$ 为本征声线的循环距离。考虑声场的平均深度结构,通过 WKB 近似,模态能量的平均深度分布可以近似为 $|U_n(z)|^2 = 2/S(\theta_n) \tan \theta_n(z)$ ^[13],此时非相干声强为:

$$I_1 = \frac{-1}{8\pi^2 r} \int \frac{2\exp(-2r\beta_n)}{S(\theta_n) \tan \theta_n(z)} d\theta \quad (5)$$

从式(5)可以看出,浅海波导边界不同掠射角的反射系数和反射位移能够决定波导中的声强强度变化。当海底反射系数在优势简正波模态对应的掠射角范围内呈现随频率变化的周期性特征时,声场强度将出现相同的变化规律。

1.2 弹性沉积层海底反射系数变化规律

构建如图 1 所示的弹性沉积层海底环境模型,介质波速满足 $c_{p3} > c_{s3} > c_{p2} > c_w > c_{s2}$ 的关系。



注: c_w 为水中声速, ρ_w 为密度, c_{p2} 为沉积层纵波波速, c_{s2} 为横波波速, ρ_2 为密度, H_2 为厚度, c_{p3} 为弹性半空间纵波波速, c_{s3} 为横波波速, ρ_3 为密度

图 1 环境模型

Fig. 1 Environment model

考虑到远场条件下水中传播简正波的水平波数范围为 $k_{p2} < k_i < k_w$, 本文重点研究与之对应在掠射角范围为 $0 \leq \theta \leq \arccos(c_w/c_{p2})$ 的上下行准平面波海底声反射问题。

假设设在海水介质中有一掠射角为 θ_1 的声波入射至软弹性沉积层的海底界面, 当 $0 \leq \theta_1 \leq \arccos(c_w/c_{p2})$ 时, 海底界面处纵波发生全内反射, 沉积层中纵波为非均匀波, 沉积层中仅有横波传播。

此时平面波从水中入射至沉积层的复平面反射系数可以简化为:

$$V_{\text{bot}}(\theta_1, f) = \frac{V_1 + V_{s3} e^{i2k_2 H_2 \sin \theta_{s2}}}{1 + V_1 V_{s3} e^{i2k_2 H_2 \sin \theta_{s2}}} \quad (6)$$

式中: V_1 为平面波在单独海底界面处的反射系数; V_{s3} 为横波在基底界面的反射系数,其相位为 φ_1 、 φ_{s3} 。当式(6)成立的条件下,从水中入射至海底的反射系数存在奇异值,由于底部反射系数不可能趋近于 ∞ ,当式(6)成立的条件下,分母为 0 时,从水中入射至沉积层海底的反射系数存在奇异值,此时有:

$$V_1 V_{s3} \exp(i2k_2 H_2 \sin \theta_{s2}) = -1 \quad (7)$$

式(7)的相位变化满足:

$$e^{i\varphi_1} \cdot e^{i\varphi_{s3}} \cdot e^{i2H_2 k_2 \sin \theta_{s2}} = -1 = e^{i\pi} \quad (8)$$

可以写作:

$$\varphi_1 + \varphi_{s3} + 2H_2 k_2 \sin \theta_{s2} = (2n - 1)\pi \quad (9)$$

根据 snell 定律有:

$$\frac{c_1}{\cos \theta_1} = \frac{c_2}{\cos \theta_{s2}} \quad (10)$$

此时海底反射系数变化的频率周期为:

$$\Delta f = \frac{c_2}{2H_2 \sin \theta_{s2}} = \frac{c_2}{2H_2 \sqrt{1 - [(c_2/c_1) \cos \theta_1]^2}} \quad (11)$$

当 $\theta \rightarrow 0$ 时有:

$$\Delta f_0 = \frac{c_2}{2H_2 \sqrt{1 - (c_2/c_1)^2}} \quad (12)$$

此时沉积层海底反射系数存在以频率间隔 Δf 周期性减小的现象,该周期即为软弹性沉积层声虹吸频率周期。

设图 1 模型的声学环境参数如表 1 所示,使用数值方法^[14]计算了 $0 \leq \theta_1 \leq \arccos(c_w/c_{p2})$ 掠射角范围内的海底反射损失 $-20\lg V$,计算结果如图 2(a)所示。图 2 可知在该区间范围内,相比于半无限海底,软弹性沉积层海底的反射损失表现出了明显的频率相关性,不同掠射角的海底反射损失均存在周期性增大现象。

表 1 环境参数

Table 1 Environment parameters

环境	厚度/ m	纵波 波速/ (m/s)	横波 波速/ (m/s)	纵波 衰减/ (dB/λ)	横波 衰减/ (dB/λ)	密度/ (g/cm ³)
水层	100	1 500	0	0	0	1
沉积层	100	1 700	700	0.2	0.2	1.5
基底	∞	3 000	2 000	0.2	0.2	2.0

选取一个低掠射角度 (5°) 的海底反射损失与式(11)理论计算的频率周期进行对比,结果如图 2(b)所示。图中反射损失每隔 $\Delta f \approx 4$ Hz 出现

极大值,根据式(11)所求得掠射角为 5° 时声虹吸频率周期为 $\Delta f = 3.95$ Hz,这与反射损失周期性变化的仿真计算结果相吻合,验证了软弹性沉积层的声虹吸频率周期与海底反射特征间的关系。

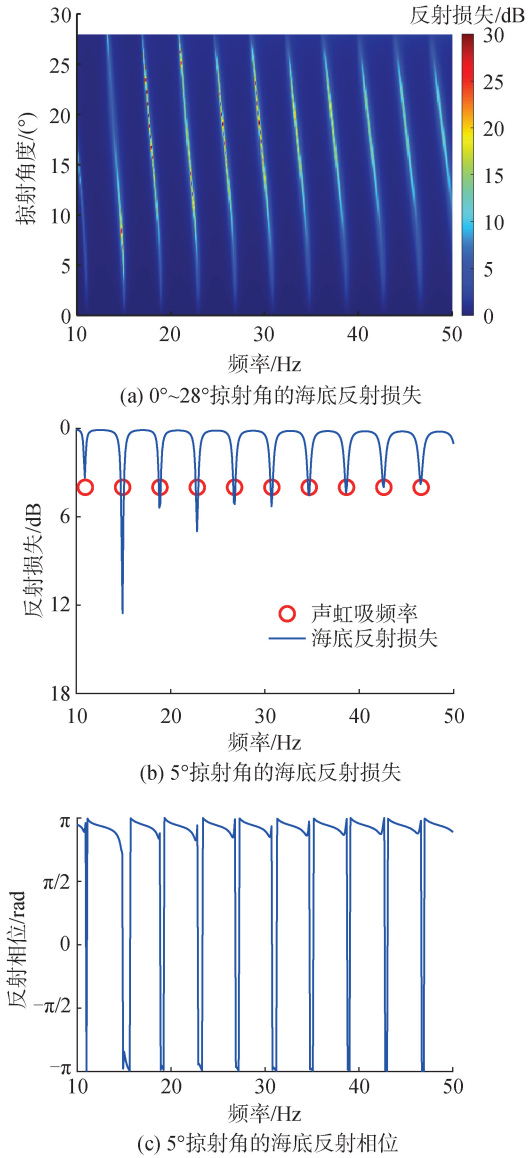


图 2 海底反射损失与反射相位

Fig. 2 Seabed reflection loss and phase

结合图 2(c) 中 5° 掠射角的海底反射相位变化能够看出,海底反射系数的相位同样会发生周期性变化,由于声波在流固耦合界面的反射系数 V 为^[15]:

$$V = \frac{Z_{\text{all}} - Z_w}{Z_{\text{all}} + Z_w} \quad (13)$$

式中: Z_{all} 为总阻抗; Z_w 为介质声阻抗。

在海底反射损失增大时,反射系数的相位变化为负值,此时反射系数 $V < 0$,海底的等效总阻抗 Z_{all} 小于水的介质声阻抗 Z_w ,此时海水-海底分界面表现为声学软边界,其反射相位发生反转;而在其余频段内,反射损失未显著增大,反射系数相位为正,此

时反射系数 $V > 0$, 海底的等效声阻抗大于水中的介质声阻抗, 此时海底界面对于海水波导构成声学硬边界。

2 不同海底环境条件下海底反射特性研究

海底反射特性与地声参数间存在显著相关性, 通过理论和仿真计算验证了软弹性沉积层的声虹吸频率与海底反射损失极大值频率的等效关系, 因此以表 1 所列地声环境参数为基准, 采用数值仿真方法研究了海底反射损失极大值频率随地声参数的变化规律, 进而开展关键地声参数对声虹吸频率及其周期特性的影响研究。

图 3 展示了 $\theta = 5^\circ$ 的平面波在半无限水域中入射海底时, 通过控制变量改变单一沉积层地声参数, 计算了 10~50 Hz 频段范围内海底反射损失的变化, 进而分析了沉积层厚度 H_2 、横波波速 c_{s2} 、纵波波速 c_{p2} 以及密度 ρ_2 改变时的声虹吸频率的变化规律。

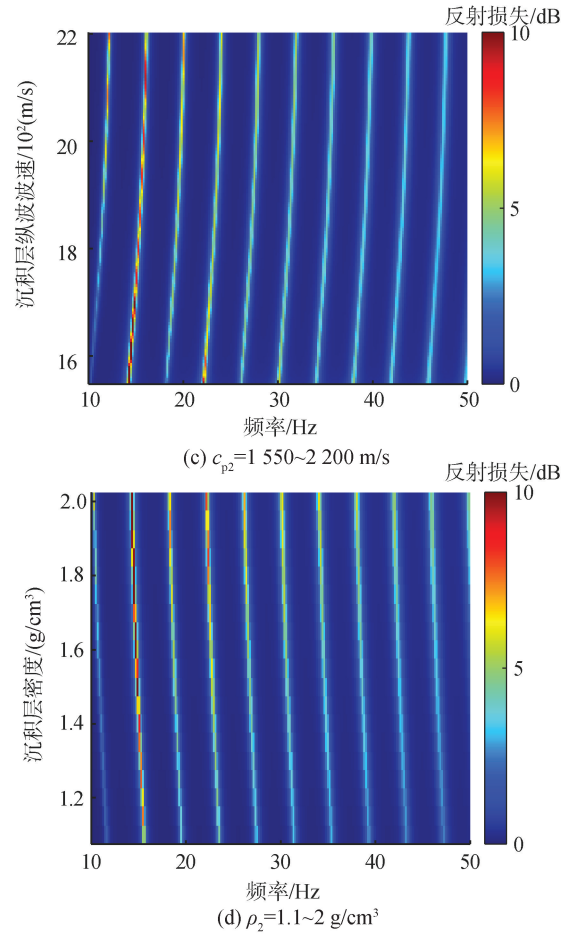
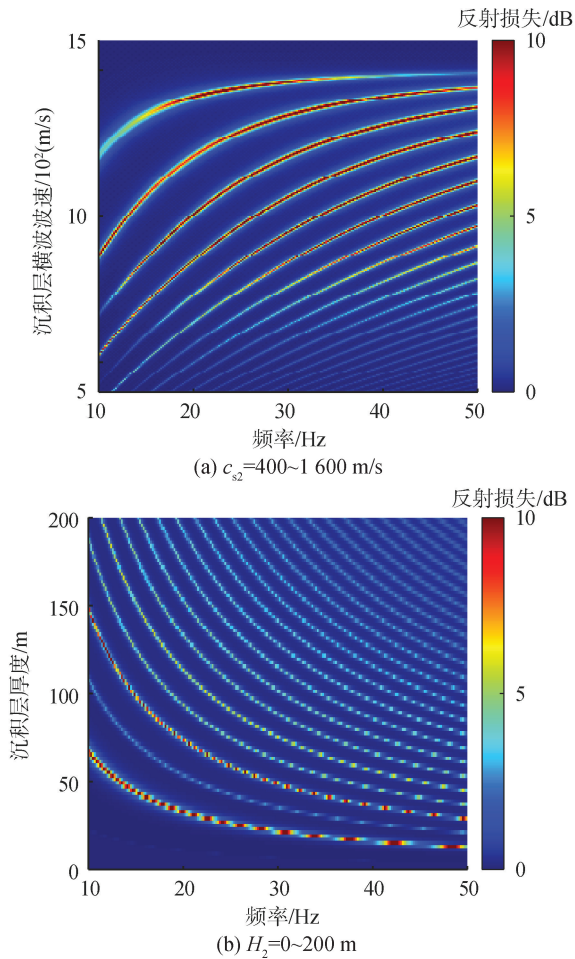


图 3 不同沉积层地声参数的海底反射损失 ($\theta=5^\circ$)
Fig. 3 Seabed reflection loss with different sediment layer geoacoustic parameters ($\theta=5^\circ$)

在图 3 中, 能够清晰地观察到软弹性沉积层海底在不同地声参数条件下声虹吸频率与频率周期的分布特征及其变化规律。从图 3(a) 和图 3(b) 中可以看出, 声虹吸频率对沉积层横波波速和厚度的变化具有更高的敏感性。结合图 3(c) 和图 3(d), 可以看出沉积层纵波波速与沉积层密度变化时声虹吸频率改变幅度较小。根据式 (11) 可知, 声虹吸周期只受沉积层横波波速与沉积层厚度影响, 不受沉积层纵波波速与密度的影响, 这个结论与图 3 中的计算结果吻合。

同时从图 3(a) 中可以看出, 当沉积层横波波速大于水中声速 1 500 m/s 时, 海底变为硬弹性分层海底, 此时的海底不具有声虹吸效应。图 3(b) 中给出了沉积层厚度变化时海底反射损失的变化, 当沉积层厚度为 0 时, 海底转变为半无限弹性海底, 此时声波发生全内反射, 同样不存在声虹吸效应。

为了能够直观对比各环境参数对声虹吸频率的影响程度, 定义代价函数 $E(\mathbf{n})$ 及敏感性因子 S 为:

$$E(\mathbf{n}) = \frac{1}{1 + \sqrt{|f_c(\mathbf{n}) - f_e|^2}} \quad (14)$$

$$S = 1 - (E(\mathbf{n}_0) - E(\mathbf{n}_1)) \quad (15)$$

式中: \mathbf{n} 为环境参数向量; f_c 为海底反射损失极大值频率计算得到的第 8 阶声虹吸频率; f_e 为表 1 参数条件下的第 8 阶声虹吸频率, 有 $f_e = 30.7 \text{ Hz}$; \mathbf{n}_1 表示环境参数变化后的参数向量; \mathbf{n}_0 为表 1 环境的参数向量。当计算的环境参数值与参考模型相等时, 敏感性因子等于 1, 对于式(14)中的代价函数而言, 敏感性曲线越陡峭, 则该参数的敏感性越强。计算各环境参数的敏感性如图 4 所示。

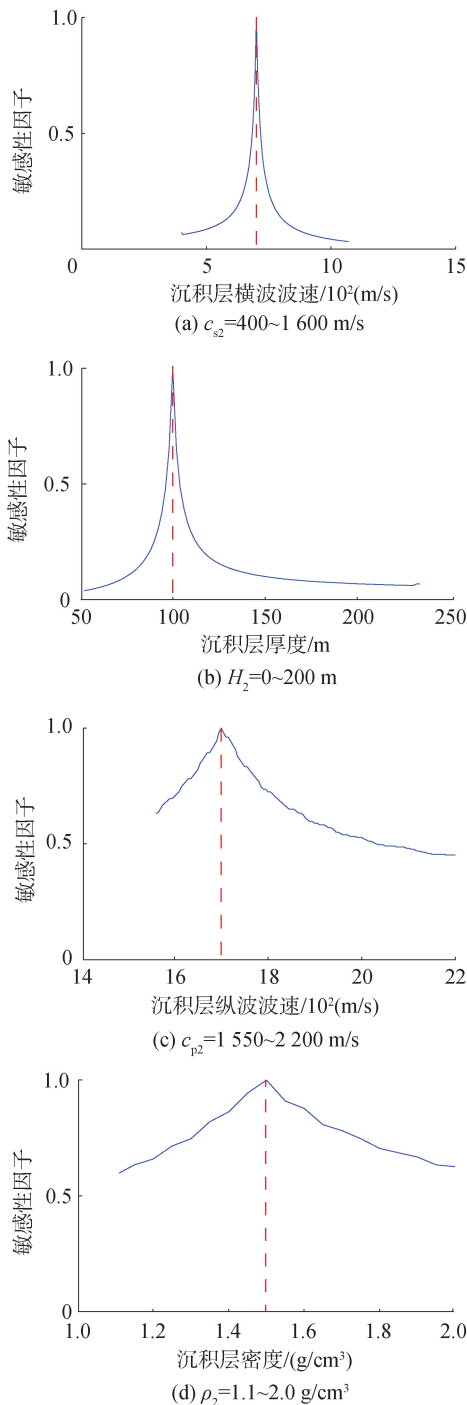


图 4 环境参数的敏感性曲线

Fig. 4 Sensitivity curves for environmental parameters

在图 4 中可以看出, 声虹吸频率对沉积层横波波速与沉积层厚度这 2 个地声参数最为敏感, 计算得到的敏感性曲线峰值尖锐, 起伏幅度很大; 沉积层纵波波速和沉积层密度对声虹吸频率具有一定的影响, 但其敏感性低于沉积层厚度和横波波速。

针对沉积层横波波速与厚度这 2 个对声虹吸效应影响最为显著的地声参数, 图 5 给出了不同地声参数条件下海底反射损失的变化曲线, 其中反射损失幅度的变化能够反映出不同地声参数条件下声虹吸效应对入射声波影响的强弱变化趋势。图 5(a) 给出了横波波速分别为 400、600 和 800 m/s 时的海底反射损失随频率变化曲线, 结果表明, 随着横波波速从 400 m/s 增至 800 m/s, 声虹吸频率对应的反射损失呈现明显的增大趋势。图 5(b) 中比较了沉积层厚度为 50、100 和 150 m 共 3 种情况下的海底反射损失, 发现当沉积层厚度由 50 m 增加至 150 m 时, 声虹吸频率处的反射损失幅值会随厚度的增加而降低。

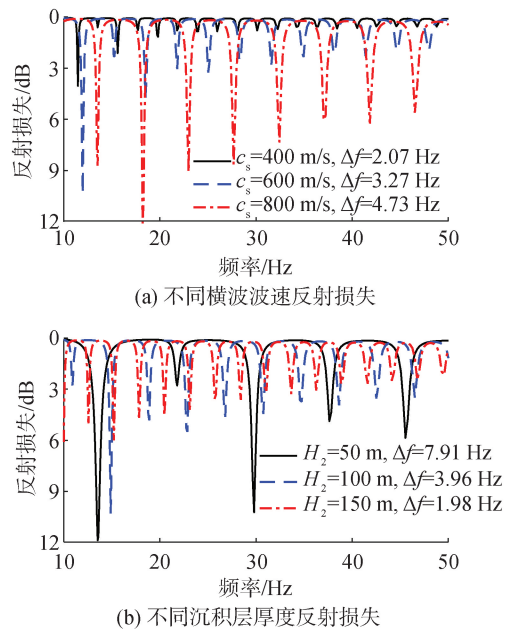


图 5 不同沉积层地声参数海底反射损失 ($\theta=5^\circ$)

Fig. 5 Seabed reflection loss with different sediment layer geoacoustic parameters ($\theta=5^\circ$)

图 6 给出 $\theta=5^\circ$ 的平面波从半无限水空间入射海底时, 控制变量改变基底横波波速 c_{p3} 、基底纵波波速 c_{p3} 、基底密度 ρ_3 以及海底界面处水中声速 c_w 这些半空间声学参数时, 海底反射损失在 10~50 Hz 频率范围内的变化情况。

结合式(11)与图 6 中各子图的计算结果分析表明, 半无限基底的声学特性参数(纵波波速、横波波速和密度)以及入射界面处的水中声速, 与海底反射损失周期性增大的声虹吸频率周期无关。

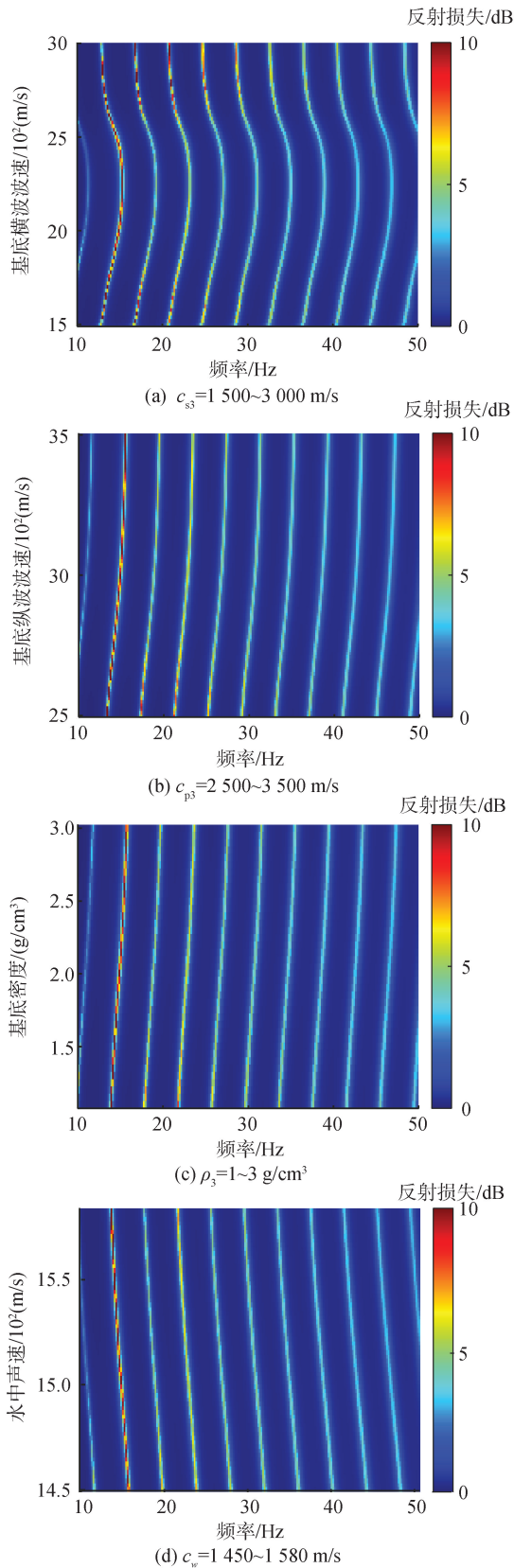


图 6 不同半空间声学参数海底反射损失 ($\theta=5^\circ$)

Fig. 6 Seabed reflection loss with different half-space acoustic parameters ($\theta=5^\circ$)

在图 7 中给出了各半空间环境参数敏感性曲线的计算结果,可以看出基底半空间的声学参数能够对声虹吸频率产生一定的影响,其敏感度与沉积层

纵波波速和沉积层密度的敏感度类似,其敏感性同样远低于沉积层厚度和横波波速。尤其是基底半空间的横波波速,结合图 6(a)与图 7(a)可以发现,声虹吸频率与基底横波波速之间的变化关系呈现非线性特征,且其敏感度曲线会表现出多个峰值。

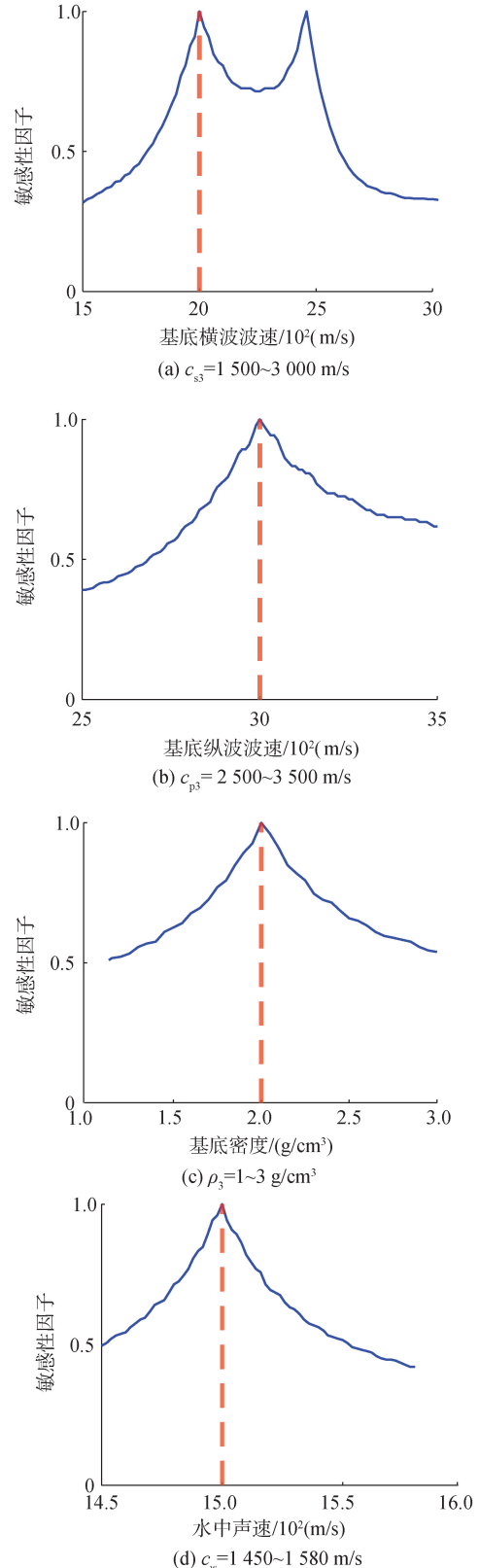


图 7 环境参数的敏感性曲线

Fig. 7 Sensitivity curves for environmental parameters

结合理论和数值仿真研究证明,当海底存在横波波速低于水中声速的软沉积层时,小掠射角入射声波将产生反射损失周期性增大的声虹吸效应。该效应的频率周期间隔仅与沉积层横波波速及沉积层厚度有关;但声虹吸频率的具体频点会受到多个地声参数影响,对沉积层横波波速及厚度最为敏感,而对其他声学参数(如纵波波速、密度等)的敏感性较低。基于这一物理机制,可实现对沉积层横波波速和厚度的快速估计,进而应用于海底地声参数反演。

3 声虹吸效应下的浅海甚低频声场特性

海底作为海洋声波传播的下边界,在浅海波导环境中对声场特性具有重要影响。根据式(5)可知,海底反射特性将直接影响波导中的声场分布及简正波模式的传播。

3.1 软弹性沉积层条件下声场特性研究

3.1.1 声场干涉特性研究

以表 1 中环境参数为基准,计算了软弹性沉积层海底与流体沉积层环境条件下,10~50 Hz 频带内 1 Hz 带宽平均的声强传播损失,其中声源深度以及接收深度均为 50 m,计算结果如图 8 所示。

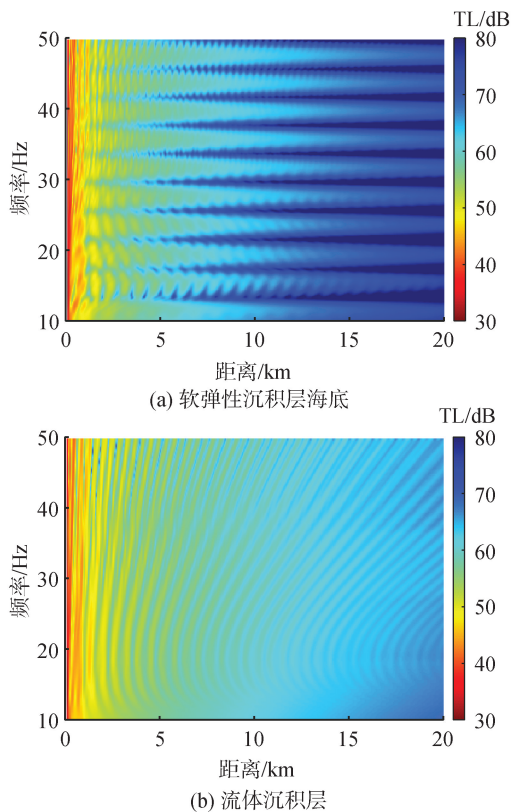


图 8 声强干涉结构

Fig. 8 Acoustic intensity interference structure

通过对比图 8(a)与图 8(b)可以发现:在软弹性沉积层条件下,声强传播损失具有与距离无关的频率干涉结构,这一特征明显区别于流体海底环境

中随距离变化的空间-频率干涉条纹^[16]。该声强传播损失干涉结构的频率变化周期间隔 $\Delta f_{ii} \approx 4.0$ Hz,这与声虹吸频率间隔的理论计算结果 $\Delta f = 3.96$ Hz 基本吻合,可以说明,软弹性沉积层的声虹吸效应在一定情况下能够影响声场的干涉特性,使传播损失具有周期性增大的性质。

声场能够表示为简正波叠加的形式,简正波的激发强度由接收深度与声源深度处本征函数的幅值共同决定,当海深 H 100 m、声源 50 m 深时有利于海水波导的第 1 阶简正波模式激发^[10],该模式相速度最接近且大于水中声速。在此将软弹性沉积层海底环境波导中,相速度最接近且大于水中声速的模式称为等效第 1 阶模式。表 2 给出了在同个周期内的 19.8、21.8 和 23.8 Hz 共 3 个频率处,波导中等效第 1 阶模式的水平波数等相关参数,其中 21.8 Hz 为声虹吸频点。

表 2 简正波模式参数

Table 2 Normal mode parameters

频率/Hz	实际阶数	水平波数	相速度/(m/s)
19.8	7	0.078 644 62+ 0.000 061 57i	1 581.87
21.8	7	0.088 368 31+ 0.000 302 16i	1 550.03
23.8	8	0.095 742 81+ 0.000 059 45i	1 561.89

图 9 给出了 19.8、21.8、23.8 Hz 时声场传播损失以及该频率下等效第 1 阶简正波的第 7、7、8 阶模式本征函数随深度变化的情况。图 9(a)与(c)中声传播损失较小,结合声场的空间干涉结构及模式的包络形状可以看出,模式能量主要分布在水中,衰减较小,在声场远距离传播的能量中占据主导地位;图 9(b)给出了声虹吸频率 21.8 Hz 处的声传播损失,其传播损失显著增大,结合图中干涉结构以及表 2 的计算结果可以看出,此时该阶模式在水中存在较大衰减,模式能量进入沉积层,不利于水中远距离传播,使得该频率下的水中声场整体传播损失明显高于其他 2 个频率。

对于以软弹性沉积层海底为边界的海水波导,在非虹吸频率频段,海底等效声阻抗高于海水阻抗,使得波导中的利于激发的优势模式对应的上下行准平面波在边界发生全内反射,导致模式传播衰减较小,可以在波导中远距离传播;而在声虹吸频率处,海底等效声阻抗降低至小于海水阻抗,优势模式能够穿透海底边界进入沉积层传播,使得水中声场能量减小,这一物理机制直接导致了水中声场传播损失出现周期性增大的特征现象。

3.1.2 声场频散特性研究

对于软弹性海底,从表 2 中可以看出:在 21.8 Hz 处,等效第 1 阶模式相速度出现明显跳变,

当频率升至 23.8 Hz 时,等效第 1 阶模态的实际模态阶数由第 7 阶转变为第 8 阶。这一现象说明在 1 500~1 700 m/s 的相速度区间内,模态的相速度频散曲线具有非连续、不光滑的特性,同时模态相速度会随频率升高降至水中声速以下。这与经典 Pekeris 半无限海底波导模型^[17]的频散特性存在明显的不同。波导中声波相速度与掠射角的转换关系为:

$$c_p = c_w / \cos \theta \quad (16)$$

图 10 基于式(16)给出了该频率区间内相速度变化的准平面波入射沉积层海底的反射损失。图中圆点给出了在表 1 给定环境参数下,10~50 Hz 频段内简正波模态在 1 500~1 700 m/s 相速度区间的相速度频散曲线。

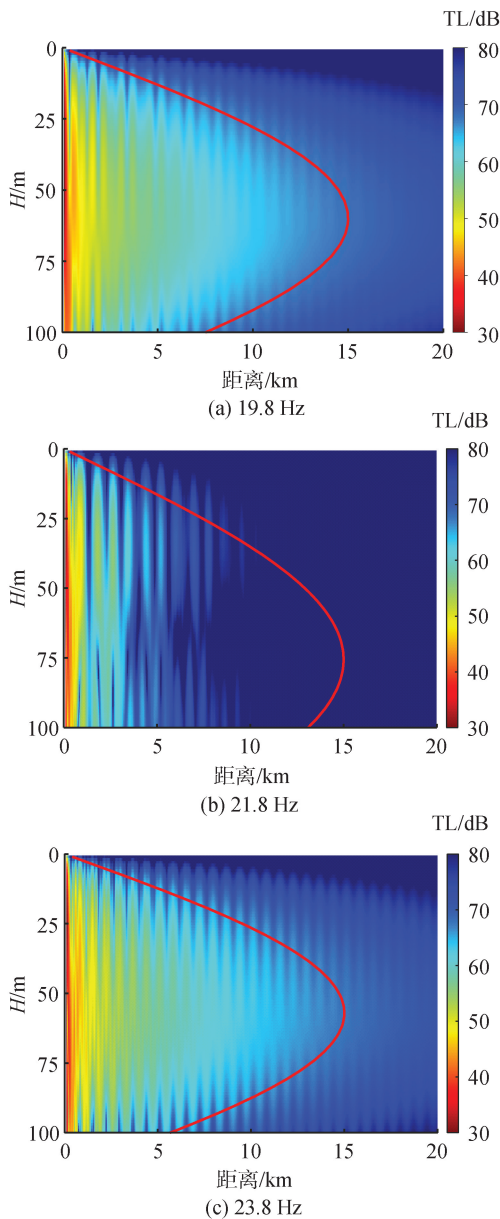


图 9 声传播损失及模态本征函数空间分布
Fig. 9 Acoustic transmission loss and spatial distribution of modal functions

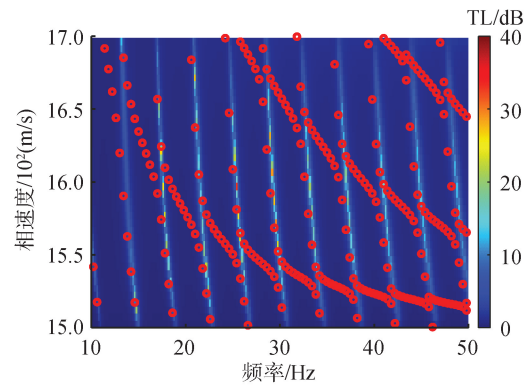


图 10 100 m 海深频散曲线与海底反射损失
Fig. 10 Seabed reflection loss and dispersion curves in 100 m water depth

图 10 中可以看出,波导中频散曲线具有复杂的转折变化,模态相速度会在声虹吸频率处发生突变,结合海底反射损失变化研究发现,在非虹吸频率区间,海底界面表现为声学硬边界条件,模态受海底分层结构影响较弱,各阶模态的相速度分布与经典 Pekeris 波导模型的频散特性类似。在声虹吸频率附近,简正波模态穿透海底界面并在沉积层中传播,导致模态函数空间分布发生改变,截止于沉积层下界面;此时模态对应波阵面法向传播方向改变,致使单阶模态相速度发生突变并急剧减小。

3.2 海深对声虹吸效应下声场特性的影响

当沉积层环境确定时,海底的声虹吸频率确定,海水深度会影响波导中激发简正波的个数以及本征模态的相速度分布规律,这会对声场的传播特性产生影响。

图 11 给出了海深为 100、200、500 m 时在 15 km 距离处的声强传播损失随频率的变化,其中声源深海与接收深度均为海深的 1/2,这有利于海水中等效第 1 阶模态的激发。

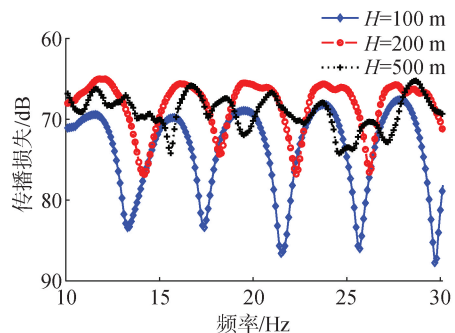


图 11 不同海深下 15 km 处声强传播损失
Fig. 11 Acoustic intensity transmission loss at 15 km range for varying water depths

由图 11 可以看出,所有海深条件下的声强传播损失均具有声虹吸效应导致的 $\Delta f \approx 4$ Hz 的周期性增大现象。但对比不同海深条件下传播损失随频率

变化的曲线可以发现,随着海水深度的增加,声强传播损失曲线的干涉结构呈现干涉结构趋于复杂化及曲线的起伏幅度趋于平缓 2 个显著变化特征。水深增加导致波导中能够激发的简正波数量增多,各阶模态间的干涉叠加增强了声场干涉的复杂性;同时由于简正波数量的增加,降低了单阶优势模态能量在总声场能量中的占比,使得声虹吸频率处优势模态能量向海底泄漏时,水中声场总能量的相对变化幅度减小,从而平滑了传播损失曲线的起伏。因此,声虹吸效应对水中声场的影响会受到水深条件的制约。当海深减小至临界深度以下,也就是研究频段内简正波干涉引起的声能起伏弱于声虹吸效应时,声虹吸效应能够对浅海的声传播产生明显的影响。

随着水深增加,简正波干涉效应会部分掩盖声虹吸引起的传播损失周期性特征,导致在空间-频率域直接识别声虹吸频率的难度显著增大,本文将声场信号的频散信息映射至频率-相速度域后,识别声虹吸效应对相速度不同的简正波模态的影响。

与图 10 类似,图 12 展示了 200、500 m 波导中模态频散与海底反射损失的对应关系,其中纵轴的相速度通过式(16)由平面波掠射角计算获得,可以观察到声虹吸效应导致的等频率间隔的反射损失极大值。分析发现,当同阶声虹吸频率对应入射波相速度从 1 700 m/s 降至 1 500 m/s (掠射角 $\arccos(c_w/c_{p2}) \rightarrow 0^\circ$),虹吸频率点会沿频率轴右移约 2.5 Hz。结合图中模态相速度频散曲线,能够明确地识别由声虹吸效应引起的转折变化特征,此时能够清晰地分辨出波导中各阶模态所对应的声虹吸频率。

针对大于 10 Hz 频率范围第 4 阶虹吸频率(约 22 Hz 处)的声能泄漏过程,200 m 海深波导中受影响的等效第 1 阶优势模态(图 12(a)方框区域)的相速度低于 100 m 海深波导条件。这一相速度差异导致 200 m 海深波导中对应的声虹吸频率点相较于 100 m 波导升高约 0.8 Hz。该结果与图 11 的计算结果吻合;200 m 海深波导的传播损失峰值相对于 100 m 海深波导具有 0.8 Hz 的右移。海深的变化会使得传播损失增大的频率点发生偏移。

从图 12 可以看出,与低速流体沉积层海底仅考虑小掠射角声波的虹吸效应^[3]不同,软弹性沉积层海底条件下在较大相速度(掠射角度)范围内均具有声虹吸效应。在甚低频频段,频率接近低阶模态的截止频率,此时其相速度对环境参数变化敏感。海深的改变会显著影响波导优势模态的相速度分布,使得其对应准平面波的掠射角发生明显变化。由于不同掠射角对应的同阶声虹吸频率存在一定的差异,这使得相同海底条件下,海深变化会导致声传

播损失周期性峰值频率发生偏移,该偏移幅度与波导中优势模态相速度变化幅度相关。

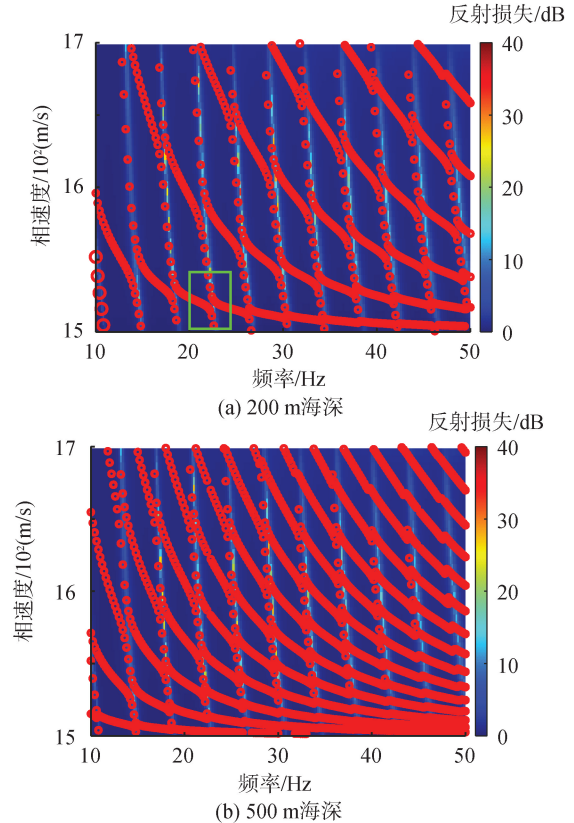


图 12 不同海深频散曲线与海底反射损失

Fig. 12 Seabed reflection loss and dispersion curves in different water depth

4 结论

1) 当海底存在横波声速小于水中声速的软弹性沉积层时,海底具有声虹吸效应,能够导致部分掠射角的声波在特定周期频率下进入海底传播。

2) 声虹吸频率周期对海底沉积层的横波与厚度敏感,对其他地声参数不敏感,这使得声虹吸效应能够用于海底地声参数的反演工作。

3) 声虹吸效应使得浅海简正波在特定频率进入沉积层传播,使深度方向能量分布和相速度改变,影响了声场的干涉结构与频散特性。与低速沉积层不同,软弹性沉积层环境下声波在较大相速度范围内存在声虹吸效应;海深变化时声场模态相速度改变,由于同阶虹吸频率受入射声波相速度影响,会使得声传播损失周期性峰值频率偏移。

4) 本文对于软弹性海底海域的甚低频地声参数反演工作以及相关海域内探测定位研究提供了重要的参考价值。

参考文献:

- [1] ZHOU Jixun, LI Zhenglin, ZHANG Xuezheng, et al. Sound attenuation at low to mid frequencies in low velocity seabot-

- toms[J]. The journal of the acoustical society of America, 2024, 155(5): 3490-3504.
- [2] 李梦竹, 李整林, 周纪浚, 等. 一种低声速沉积层海底参数声学反演方法[J]. 物理学报, 2019, 68(9): 172-183.
LI Mengzhu, LI Zhenglin, ZHOU Jixun, et al. Geoacoustic inversion for acoustic parameters of sediment layer with low sound speed[J]. Acta physica sinica, 2019, 68(9): 172-183.
- [3] XU Liang, ZHANG Haigang, ZHANG Minghui. Training a deep operator network as a surrogate solver for two-dimensional parabolic-equation models[J]. The journal of the acoustical society of America, 2023, 154(5): 3276-3284.
- [4] LIANG Guolong, ZHANG Boyu, QI Bin, et al. Underwater multitarget fusion tracking method for passive sonar[J]. Acta acustica, 2024, 49(3): 501-51.
- [5] BUCKINGHAM M. Bottom interacting ocean acoustics [C]//IEEE Journal of Oceanic Engineering. Piscataway, NJ, 1983: 50.
- [6] ZHOU Jixun, QIN Jixing, LI Zhenglin, et al. Small grazing angle reflection and the sound siphon effect over a low velocity layer of sediments[J]. The journal of the acoustical society of America, 2024, 156(3): 1575-1585.
- [7] DUNCAN A J, GAVRILOV A N, MCCAULEY R D, et al. Characteristics of sound propagation in shallow water over an elastic seabed with a thin cap-rock layer[J]. Journal of the acoustical society of America, 2013, 134(1): 207-215.
- [8] 张海刚, 朴胜春, 杨士莪. 水中甚低频声源激发海底地震波的传播[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(7): 879-887.
ZHANG Haigang, PIAO Shengchun, YANG Shi'e. Propagation of seismic waves caused by underwater infrasound[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(7): 879-887.
- [9] HUGHES S J, ELLIS D D, CHAPMAN D M F, et al. Low-frequency acoustic propagation loss in shallow water over hard-rock seabeds covered by a thin layer of elastic-solid sediment[J]. The journal of the acoustical society of America, 1990, 88(1): 283-297.
- [10] JENSEN F B, KUPERMAN W A, PORTER M B, et al. Computational Ocean Acoustics [M]. New York, NY: Springer New York, 2011.
- [11] ZHANG Renhe, LI Fenghua. Beam-displacement ray-mode theory of sound propagation in shallow water[J]. Science in China series A: mathematics, 1999, 42(7): 739-749.
- [12] 张仁和, 何怡, 刘红. 水平不变海洋声道中的 WKBZ 简正波方法[J]. 声学学报, 1994, 19(1): 1-12.
ZHANG Renhe, HE Yi, LIU Hong. WKBZ mode approach to sound propagation in horizontally stratified oceans[J]. Acta acustica, 1994, 19(1): 1-12.
- [13] 周纪浚. 浅海平均声场角度谱分析法与回波混响比的距离、深度结构[J]. 声学学报, 1980, 5(2): 86-99.
ZHOU Jixun. The analytical method of angular power spectrum, range and depth structure of echo: reverberation ratio in shallow water sound field[J]. Acta acustica, 1980, 5(2): 86-99.
- [14] SCHMIDT H, JENSEN F B. A full wave solution for propagation in multilayered viscoelastic media with application to Gaussian beam reflection at fluid-solid interfaces [J]. The journal of the acoustical society of America, 1985, 77(3): 813-825.
- [15] BREKHOVSKIKH L M, GODIN O A. Acoustics of Layered Media I [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1990.
- [16] 任群言, 朴胜春, HERMAND Jean-Pierre. 一种宽带声场干涉图案处理的方法及其应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(3): 296-301.
REN Qunyan, PIAO Shengchun, JEANPIERRE H. A method for interference structure processing and its application [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(3): 296-301.
- [17] PEKERIS C. Theory of propagation of explosive sound in shallow water[J]. Geological society of america memoirs, 1948, 27: 1-116.

本文引用格式:

曹德璠, 张海刚, 谢金怀, 等. 弹性沉积层声虹吸效应对浅海甚低频声场的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(8): 1485-1494.
CAO Dejin, ZHANG Haigang, XIE Jinhui, et al. Effect of elastic layer acoustic siphon on shallow-water very low frequency sound field [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8): 1485-1494.