

弹性沉积层上的低掠射角反射与剪切波共振*

谢金怀¹⁾²⁾³⁾ 张海刚^{1)2)3)†} 曹德璠¹⁾²⁾³⁾

1) (哈尔滨工程大学, 水声技术全国重点实验室, 哈尔滨 150001)

2) (哈尔滨工程大学, 海洋信息获取与安全工业和信息化部重点实验室, 哈尔滨 150001)

3) (哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001)

(2025年5月20日收到; 2025年6月9日收到修改稿)

弹性沉积层海底的低掠射角反射存在奇异性极大值的频率特征, 其特征对浅海远程声传播会产生显著的影响. 针对海底与波导联合测量到具有频率间隔小特征的海底共振与声虹吸现象. 通过分析弹性沉积层海底的低掠射角反射特征, 理论推导了沉积层与剪切波的共振频率表达式, 并分析了海底反射特征对远程声传播的影响. 结果表明: 在弹性沉积层海底模型下, 受剪切波调制的低掠射角反射特征会引起指定频率的剪切波在沉积层发生共振, 从而导致水中传播的声能被沉积层禁锢而出现声虹吸效应. 进一步根据海底剪切波共振频率相关参数的敏感性及其耦合性的分析结果, 提出了一种结合海底与波导观测信息的地声参数反演策略用于获取实验海域的底质参数, 反演结果验证了弹性沉积层海底模型对水体中声虹吸效应的作用机制.

关键词: 低掠射角反射, 剪切波共振, 声虹吸效应**PACS:** 43.30.Ma, 43.30.+m, 43.30.Pc**DOI:** 10.7498/aps.74.20250656**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250656

1 引言

海底沉积物的反射特征对浅海远程声传播的影响机制是水声学研究的重点课题^[1]. 根据海底沉积物的地声特性差异, 可建立不同的声学模型进行近似描述. 当海底沉积物由沙子、黏土或淤泥等未固结混合物组成时, 其中剪切模量足够低, 沉积物的声学介质可以合理地近似为流体. 然而, 在某些海洋动力过程活跃的浅海区域, 其海底沉积物迁移活跃、未固结沉积层较薄, 海底介质的剪切效应会显著地影响上覆水体的声波传播特性^[2]. 为了更加有效地反映实际海底的声学特性, 海洋沉积物中的剪切效应成为海底相互作用的重要因素^[3], 此时海底沉积物可描述为弹性介质.

由于考虑了剪切效应, 弹性海底的声学反射特征往往比流体海底环境更加复杂, 由此引起水中的声传播特征一直是人们关注的研究领域^[4,5]. 例如, Duncan 等^[2]在研究澳大利亚大陆架区域的低频声传播时, 发现海底为软质石灰岩的弹性海底时, 在略高于低阶模态临界频率的狭窄频段内的声传播损失相对较低; Vidmar^[6]和 Xie^[7]等分析边界接收的质点振速强度时, 发现海底沉积物的剪切效应会导致质点振速的垂直位移强烈增加; 以及声波与弹性海底的相互作用会发生共振效应^[8], 如上层沉积物的剪切速度梯度和海洋地震噪声的共振^[9]、声波与软海洋沉积物的纵波共振^[10,11].

1980年, Hastrup^[12]通过数值仿真首次预言, 由于低声速沉积层海底的小掠射角反射损失异常, 会产生传播效果差的特定频率. 近年来, 得利于低声

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 12404513) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhanghaigang@hrbeu.edu.cn

速沉积层海底环境的测量实验^[13-15], 低声速沉积物的声学研究成为人们日益关注的研究领域^[16]. 2019年, 李梦竹等^[17]基于浅海不同频率声传播损失会出现周期性增大现象, 提出了一种适用于低声速沉积层的海底参数声学反演方法. 2024年, Zhou等^[18]结合2002年中国黄海实验测量结果, 对低声速沉积层海底的小掠射角反射引起的水中传播损失异常增大的现象进行了深入研究, 并将现象首次命名为“声虹吸效应”. 其本质是由于低声速沉积层海底的小掠射角反射异常, 使得指定频率声能被海底沉积层禁锢, 从而导致水中的相应频率传播损失异常增大. 类似的声传播特征在弹性海底环境也有被发现, 1990年, Hughes等^[19]在基岩上覆盖薄沉积层的浅海声传播实验中发现10—100 Hz频带内具有高传播损失特征, 并验证了观测到的高传播损失与沉积物层内的剪切波共振有关. 2021年, Hovem等^[20]从理论和实验的角度讨论了薄沉积层对低频和远距离传播的影响. 证明当硬岩基底上覆盖一层较软的弹性介质时, 可能会发生剪切波共振, 从而导致许多非常窄频的高传输损失. 显然, 弹性沉积层海底环境的高传播损失特征与低声速沉积层海底环境的声虹吸效应存在相似之处, 但其形成环境、机理以及特征具有明显差异. 目前, 针对弹性沉积层海底环境引起的类似的声传播效应的研究报道较少, 且相应的联合观测实验数据也比较缺乏.

2021年, 在中国南海东北部的大陆坡区域开展的一次声传播实验中, 利用海底地震仪 (ocean bottom seismometer, OBS) 和垂直阵列阵 (vertical linear array, VLA) 同时测量海底与水体中的声传播. 有趣的是, OBS的质点振速信号存在明显

的功率谱峰值现象 (共振现象), 而且VLA观测到了比低声速海底声虹吸频率间隔更小的虹吸特征. 为此, 本文为了研究实验测量的声学现象受海底底质的调制作用, 在弹性沉积层海底的低掠射角条件下, 推导出弹性海底沉积层与剪切波的共振理论, 用于定性地解释观测结果的主要特征. 目的是揭示实验中观测到的海底共振与声虹吸效应的物理机理, 为浅海弹性海底对水中声传播的影响提供新的见解.

第2节介绍了这项工作所依据的实验, 以及利用OBS观测到的海底共振现象和垂直阵列观测到的声虹吸效应. 第3节首先分析了弹性海底低掠射角反射特征, 进一步理论推导了弹性海底剪切波共振频率的分析表达式, 揭示了弹性沉积层海底的低掠射角反射与剪切波共振的关系, 并阐述了海底反射特征对水中声传播的影响. 第4节分析了剪切波共振频率表达式对声衰减的敏感性以及相关参数之间的耦合关系, 进一步提出一种结合海底与波导观测信息的地声参数反演方法对实验区域的海底地声参数进行了反演, 并利用反演结果验证了弹性沉积层海底对声虹吸的作用机制.

2 实验数据

2.1 实验介绍

2021年7月, 在中国南海东北部的东沙海域开展了一次声传播实验^[21], 实验地形环境以及接收系统与声源的相对位置如图1(a)所示. 其中垂直阵列阵被布放在 O_2 位置, 由阵元间距为2 m的32个阵元组成, 工作深度为200—264 m, 接收系统的灵敏度为-196 dB, 放大倍数为40 dB, 采样率

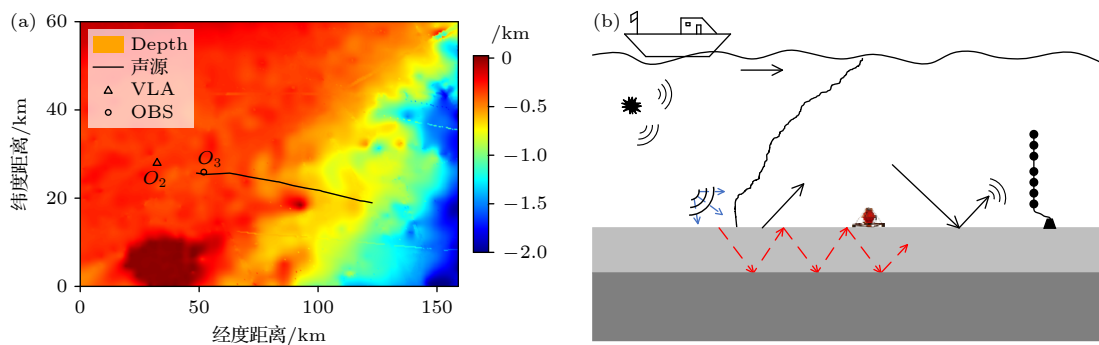


图1 实验环境及示意图 (a) 声传播实验区域地形及接收设备的位置; (b) 海底与波导声传播同步测量实验示意图

Fig. 1. Experimental environment and schematic diagram: (a) Topography of sound propagation experiment area and location of receiver; (b) schematic diagram of synchronous measurement experiment of sound propagation in seabed and waveguide.

为 10 kHz, 用于接收水中传播的声信号. OBS 被布放在 O_3 点的海底, 其采样率为 100 sps, OBS 三分量矢量传感器用于接收海底振动信息.

在声传播实验过程中, 声源船沿着图 1(a) 所示的测线 (黑色点连线) 从远距离向 O_2 点方向进行声源投放作业, 航行过程中每隔 8 min (水平距离间隔约为 1.56 km) 投掷一枚爆炸声源, 在与 VLA 距离 19.23—94.28 km 范围内共投掷 49 枚爆炸声源, 声源的爆炸深度为 100 m, 其真实的爆炸深度误差小于 $\pm 3\%$. 在声源轨迹范围内, 距离 VLA 19.23—31.14 km 区域的海底地形较为平坦, 海水深度约为 340 m. 因此, 在地形较为平坦的区域, 海底与水体联合测量实验可用图 1(b) 示意, 图中的声速剖面是实验期间利用 CTD 测量系统在 O_2 位置获取.

2021 年 9 月, 在实验海域的相邻区域开展了一次多道地震勘探实验, 反演获得了图 2 所示的地质勘探结果. 实验区域海底层状结构明显, 其顶层沉积层的纵波声速为 1637—1673 m/s, 这为典型的高声速海底 [22]. 历史资料同样表明了实验区域的海底表层沉积物主要由粉砂质砂和黏土质粉砂组成 [23].

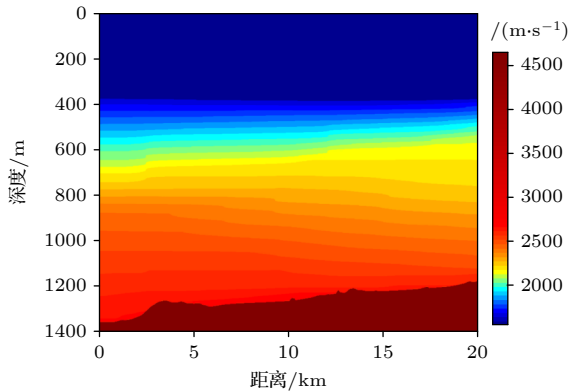


图 2 邻近海域多道地震剖面反演结果
Fig. 2. Seabed profile inversion using multichannel seismic data in adjacent areas.

2.2 海底共振现象

在利用 OBS 对海底沉积物进行测量时, 由于三分量振速通道对海底振动更加敏感, 容易在质点振速信号上观测海底的共振现象. 如 1993 年, Godin 和 Chapman [9] 在 OBS 的水平和垂直检波器上观测到了更加明显的环境噪声与剪切波的共振. 以及在 2007 年剪切波调查实验 [24,25] 海底电缆

(ocean bottom cable, OBC) 三分量矢量传感器上观测到的软沉积物与纵波的共振 [10]. 因此, 为了分析南海实验 OBS 观测爆炸声源引起的海底振动信息, 分别对 OBS 三分量矢量传感器接收的质点振速信号进行频谱计算. 图 3(a) 给出了声源与 OBS 距离 16.46 km 的归一化频谱, 可以看出三个分量矢量传感器接收信号的频谱信息存在明显的差异, 这是由于单个矢量传感的空间方向上的不确定性引起. 但是有一个共同的特征是在 11.8 和 37 Hz 频率存在两个明显的频谱峰值, 如图 3(a) 中的红色圆圈所示, 其中 11.8 Hz 位置以水平振速的径向分量最突出.

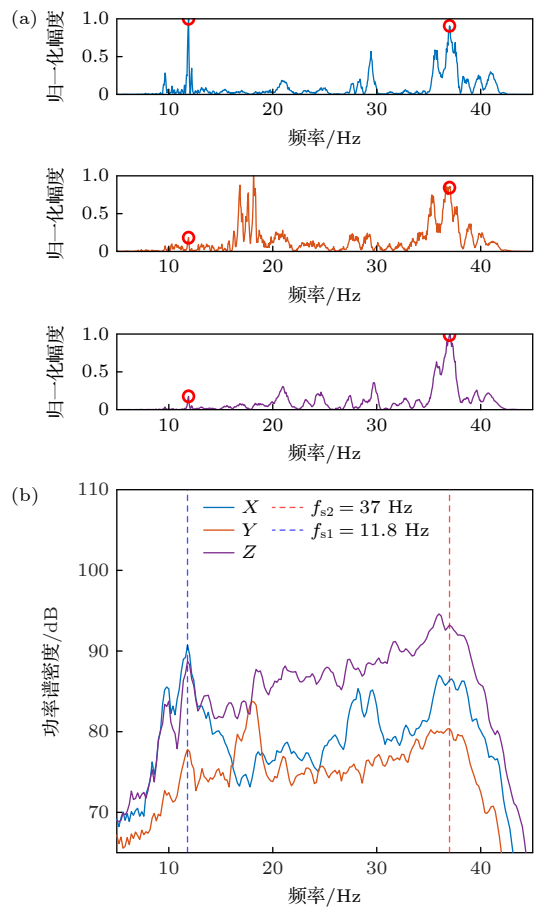


图 3 海底 OBS 测量的振速信号 (a) 声源与 OBS 距离 16.46 km 的归一化频谱, 水平质点振速的径向 (顶部) 和横向 (中部) 分量, 垂直质点振速分量 (底部); (b) 距离 OBS 2.7—24.8 km 范围内 15 个爆炸声源信号的平均 PSD
Fig. 3. Particle velocity signal measured by OBS: (a) Normalized spectrum of a sound source and OBS at a distance of 16.46 km, normalized spectra of the radial (top) and cross-range (middle) components of the horizontal particle velocity, as well as vertical particle velocity (bottom); (b) the power spectral density averages 15 explosion sound source signals within the 2.7—24.8 km range from the OBS.

相较于单个声源的可能存在的偶然性, 利用多个声源的平均结果更能反映出接收信号的统计特征. 因此, 计算了与 OBS 距离 2.7—24.8 km 范围的 15 枚爆炸声源信号的平均功率谱密度 (power spectral density, PSD), 结果如图 3(b) 所示. 振速信号三个分量的 PSD 曲线在 5—45 Hz 频段虽然存在能量强弱的差异, 但在 11.8 和 37 Hz 频率的频谱峰值特征依然明显. 在 11.8 和 37 Hz 的尖峰峰值可以解释为一种源自实验声波传播条件的海底共振. 与苏格兰大陆架实验的次声地震环境噪声激发的垂直极化剪切波共振频率间隔^[9]($\Delta f = (1.11 \pm 0.04)$ Hz) 和剪切波调查实验的软沉积物的纵波共振频率间隔^[10]($\Delta f > 85$ Hz) 不同的是, 实验测量的共振频率间隔 $\Delta f \approx 26$ Hz.

2.3 声虹吸现象

在低声速海底环境下, 如果小掠射角反射异常和低声速海底层中的共振激发泄露模态同时发生, 就会出现声虹吸效应^[18]. 实验采用 OBS 和 VLA 共同接收爆炸声信号, 为同时捕获海底的共振现象与波导中声传播的虹吸特征提供了可能. 图 4(a) 显示了与 VLA 距离 19.2—50.0 km 范围声源的 PSD 在 50—300 Hz 频段的分布. 由图 4(a) 可以看出: PSD 在频域上存在较稳定的明暗相间条纹特征, 该特征不同于浅海干涉结构随距离变化的特征. 在小于 30 km 和大于 40 km 范围内, PSD 的明暗相间条纹基本不随距离变化, 且具有稳定的频率间隔. 而在 30—40 km 范围内随距离变化出现了明显的跃变, 这是由于在 30—40 km 距离范围海底地形发生了明显起伏^[21].

为了更加直观地描述接收信号的频率特性, 给出了声源与 VLA 距离 20.8 km 的 PSD 曲线 (图 4(b)), 其中灰色曲线表示 32 个阵元的计算结果, 红色曲线表示平均结果. PSD 曲线表现出 $\Delta f \approx 26$ Hz 规律的能量凹陷, 如图 4(b) 中红圈处的频率, 将这一现象与低声速液态海底小掠射角 ($<5^\circ$) 反射引起的声虹吸效应对比可以发现: 1) 在合理的海底参数取值范围内, 低声速海底的声虹吸频率间隔普遍为百赫兹量级, 如 Zhou 等^[18] 观测到的声虹吸频率间隔为 512 Hz, 而东沙海域实验观测到的频率间隔约为 26 Hz; 2) 根据实验海域的多道地震探测结果表明, 实验区域的海底为高声速海底; 而且根据实测声速剖面可以计算出, 布放在 200—264 m

深度的 VLA 接收声源深度为 100 m 的爆炸声信号的最小掠射角大于 8° , 与低声速海底的小掠射角 ($<5^\circ$) 反射奇异性存在差异.

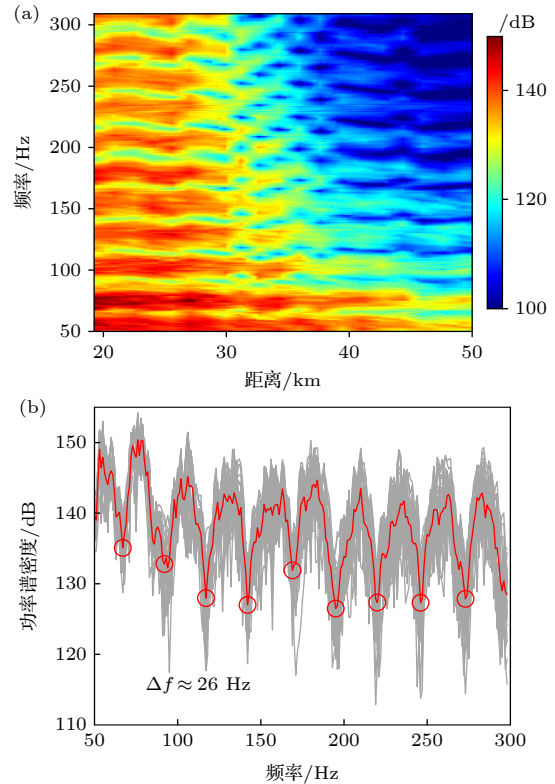


图 4 VLA 测量的爆炸声信号 (a) 声源与 VLA 距离 19.2—50.0 km 范围的 PSD, 其中每个距离的 PSD 级采用 VLA 所有阵元数据的平均结果; (b) 声源与 VLA 距离 20.8 km 的 PSD

Fig. 4. Explosion sound signal measured by VLA: (a) PSD within the range of 19.2–50.0 km from the sound source and VLA, where the PSD of each distance is the average result of all array metadata of the VLA; (b) PSD with a distance of 20.8 km between the sound source and the VLA.

结合 OBS 测量的振速频谱峰值频率可以发现, 实验测量的海底共振频率间隔与声虹吸频率间隔都是约 26 Hz. 图 5 给出了 VLA 接收的三个不同距离声源的 20—150 Hz 频段的 PSD 曲线, 可以发现在 37 Hz 恰好存在能量凹陷, 与海底观测的质点振速峰值频率吻合. 海底与波导联合测量的声学现象直观地验证了水中声虹吸效应与海底沉积层的声学共振有关.

对比低声速海底的声虹吸效应研究资料^[17,18], 在合理的沉积层纵波声速 (>1400 m/s) 条件下, 低声速沉积层海底的纵波共振无法形成频率间隔约为 26 Hz 的声虹吸效应. 而且多道地震勘探反演结果和历史资料表明, 实验区域为典型的高声速海

底. 根据弹性沉积层海底的剪切波速度普遍小于水中声速的特征, 可以推断出沉积层与剪切波的共振与具有频率间隔小特征的声虹吸效应的联系.

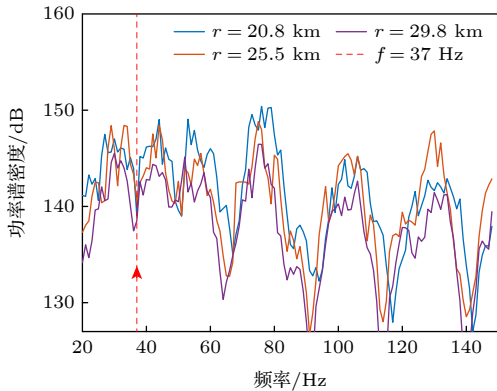


图 5 三个不同距离声源的 20—150 Hz 频段的 PSD 在 37 Hz 存在能量凹陷
Fig. 5. The PSD of the 20—150 Hz frequency band has an energy depression at 37 Hz.

3 弹性海底低掠射角反射与剪切波共振

为了理论验证弹性沉积层海底的低掠射角反射和剪切波共振关系, 并分析弹性海底地声模型对水中的声传播产生的影响. 本节分别从弹性沉积层海底的反射特征、剪切波共振频率形成条件以及相应环境下的声传播特征三个方面展开研究.

3.1 弹性沉积层海底低掠射角反射特征

考虑图 6 所示的分层弹性海底模型, 假定沉积

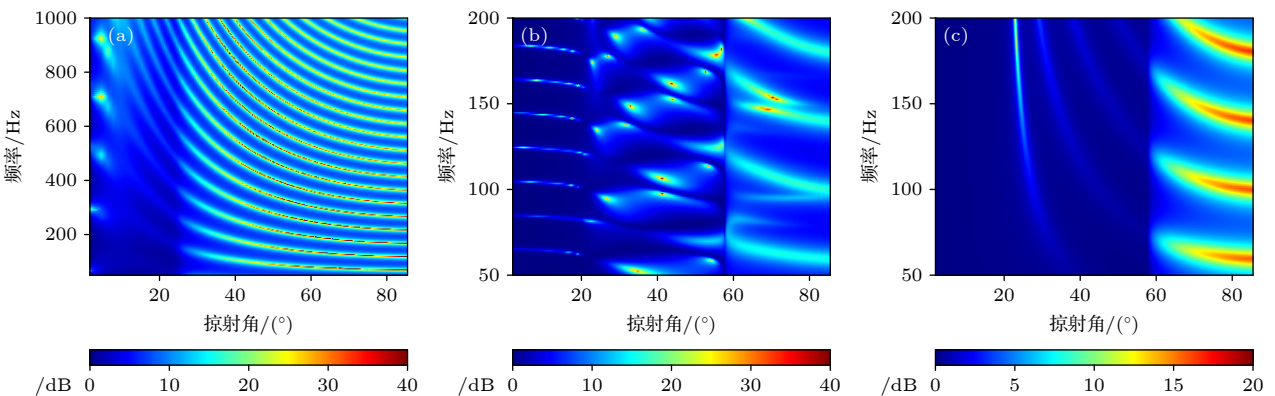


图 7 海底反射损失与频率的关系, 其中反射损失是利用 Porter^[26] 的 Bounce 程序计算获得 (a) 低声速沉积层海底的地声参数见表 1; (b) 弹性沉积层海底的地声参数见表 2; (c) 高声速液态沉积海底采用了表 2 中除了剪切波参数以外的所有参数
Fig. 7. Relationship between seabed reflection loss and frequency. Porter's Bounce program calculates the reflection loss: (a) The geo-acoustic parameters of the seabed of low-velocity sediments are shown in Table 1; (b) geo-acoustic parameters of elastic sedimentary seabed are shown in Table 2; (c) all the parameters except the shear wave parameters in Table 2 are used in the high-velocity liquid deposition seabed.

物参数在弹性层内是恒定的、液体半空间和弹性半空间是均匀且半无限. 其中水介质中声速为 c_1 、密度为 ρ_1 ; 沉积层中纵波声速为 c_{p2} 、剪切波声速为 c_{s2} 、厚度为 h 、密度为 ρ_2 、纵波衰减为 α_{p2} 、剪切波衰减为 α_{s2} ; 基底的纵波声速为 c_{p3} 、剪切波声速为 c_{s3} 、密度为 ρ_3 、纵波衰减为 α_{p3} 、剪切波衰减为 α_{s3} . θ 为水介质声波的掠射角, θ_p 为纵波折射角, θ_s 为剪切波折射角. 参考低声速沉积层海底的小掠射角反射, 我们假设分层弹性海底各层的剪切波声速满足 $c_{s2} < c_1 < c_{s3}$ 、纵波声速满足 $c_1 < c_{p2} < c_{p3}$.

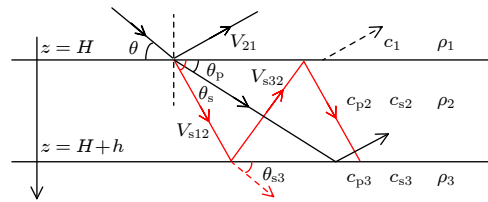


图 6 弹性沉积层海底地声模型
Fig. 6. Submarine geo-acoustic model of elastic sedimentary layer.

图 7 给出了低声速沉积层海底、弹性沉积层海底和高声速液态沉积海底的反射损失与频率的关系. 图 7(a) 表明, 在低声速沉积层海底条件下, 低掠射角反射损失存在等频率间隔的奇异性极大值, 2002 年黄海实验测量的虹吸效应被解释为这类环境的小掠射反射特征引起^[18]. 在弹性沉积层海底条件下 (图 7(b)), 与液态低声速海底条件的小掠射角的反射损失奇异值具有一定的相似性. 但频率间隔更小, 在 50—200 Hz 频带内存在 7 个虹吸频

率, 频率间隔为 19.5 Hz, 而图 7(a) 中低声速沉积层海底的声虹吸频率间隔为 230 Hz. 除此之外, 弹性沉积层海底反射损失奇异值的掠射角范围为 $\theta < \arccos(c_1/c_{p2})$. 图 7(c) 给出了与弹性海底相同纵波声速的高声速液态沉积层海底的反射损失, 因不考虑声速小于海水声速的剪切波, 在小于纵波临界角范围的声波无法透射至沉积层. 此时低掠射角反射损失与频率无关, 结果表明剪切波对低掠射角反射特征的调制作用.

表 1 低声速沉积层海底的声学参数

Table 1. Acoustic parameters of low sound velocity sediment seabed.

海底声学参数	压缩波声速 / (m·s ⁻¹)	层厚 / m	密度 / (g·cm ⁻³)	压缩波衰减 / (dB·λ ⁻¹)
水介质层	1499	100	1.0	0
沉积层	1465	15	1.6	0.1
基底	1650	—	1.9	0.2

3.2 弹性沉积层的剪切波共振

进一步分析弹性沉积层海底的低掠射角反射与海底剪切波共振的关系. 在 $z = H$ 边界处, 不考虑 $z = H + h$ 边界的反射情况下, 水层-弹性沉积层的平面波反射可以近似为水层-弹性半无限的情况, 则反射系数:

$$V = \frac{Z_p \cos^2 2\theta_s + Z_s \cos^2 2\theta_s - Z}{Z_p \cos^2 2\theta_s + Z_s \cos^2 2\theta_s + Z}, \quad (1)$$

式中, Z_p 和 Z_s 分别弹性介质中的纵波和横波阻抗; Z 是水介质中的波阻抗. 考虑 $c_{s2} < c_1 < c_{p2}$ 情形下, 掠射角 $\theta < \arccos(c_1/c_{p2})$ 时, 反射系数可以写为

$$V = \frac{Z_s \cos^2 2\theta_s - Z - i|Z_p| \cos^2 2\theta_s}{Z_s \cos^2 2\theta_s + Z - i|Z_p| \cos^2 2\theta_s}. \quad (2)$$

此时, 弹性沉积层内的纵波畸变为非均匀波, 而剪切波为通常的平面波. 这意味着弹性沉积层海底的低掠射角反射问题可简化为海底只存在剪切波反射的情况, 而且实际浅海远程声传播通常由低掠射角的低阶简正波模态主导. 因此, 在讨论弹性沉积层海底的剪切波共振问题时, 可将分析海底反射特征的角度范围限定在 $\theta < \arccos(c_1/c_{p2})$ 范围.

在低掠射角 $\theta < \arccos(c_1/c_{p2})$ 条件下, $H < z < H + h$ 层波导中的剪切波满足 (3) 式条件时发生共振:

$$V_{s12} V_{s32} \exp\left(2i\omega h \sqrt{c_{s2}^{-2} - u^{-2}}\right) = 1, \quad (3)$$

其中反射系数 V_{s12} 和 V_{s32} 具有不同的含义, V_{s12} 表示沉积层的剪切波在上边界的反射系数, V_{s32} 表示沉积层中的剪切波在下边界的反射系数; u 为剪切波的相速度, $\omega = 2\pi f$ 为角频率. 根据波束射线简正波理论, (3) 式与简正波在 $H < z < H + h$ 沉积层的频散方程具有一致性^[27], 可写成:

$$\begin{aligned} & \phi_{s12} + \phi_{s32} + 2\omega h \sqrt{c_{s2}^{-2} - u^{-2}} \\ & = 2(n-1)\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (4)$$

在沉积层 $z = H$ 边界处, 当沉积层内的剪切波向水介质中入射的角度 $\theta_2 < \arccos(c_{s2}/c_1)$ 时, 此时边界满足全内反射, 其幅度 $|V_{s12}| = 1$, 相位 ϕ_{s12} ^[28]:

$$\phi_{s12} = -2 \arctan\left(\frac{\rho_1 c_1^2}{\rho_2 c_{s2}^3} \sqrt{\frac{1 - u^2/c_1^2}{u^2/c_{s2}^2 - 1}}\right). \quad (5)$$

在 $c_{s2} < c_1 < c_{p2}$ 条件下, $\arccos(c_1/c_{p2})$ 始终小于 $\arccos(c_{s2}/c_1)$, 因此上边界全反射条件必然满足.

在 $z = H + h$ 边界处, 由于在 $\theta < \arccos(c_1/c_{p2})$ 范围内沉积层内正常传播的波仅有剪切波, 因此, 沉积层与基底的反射问题同样可以简化为剪切波与剪切波的反射. 此时, 下边界的剪切波反射系数可简化为

$$V_{s32}|_{\theta < \arccos(c_1/c_{p2})} = \frac{Z_{s3} \cos \theta_s - Z_{s2} \cos \theta_{s3}}{Z_{s3} \cos \theta_s + Z_{s2} \cos \theta_{s3}}, \quad (6)$$

其中, $Z_{s2} = \rho_2 c_{s2}$ 和 $Z_{s3} = \rho_3 c_{s3}$ 分别为沉积层介质和基底的剪切波阻抗. 根据 Snell 定律, 在 $c_{s3} > c_{s2}$ 条件下, 当入射波为临界角或超临界角时, $\cos \theta_{s3}$ 变为纯虚数, 此时反射系数 (6) 式为复数, 下边界发生全内反射. 则在 $\theta < \arccos(c_1/c_{p2})$ 范围内, 下边界剪切波反射系数可表示为 $V_{s32} = \exp(i\phi_{s32})$ 、相位 ϕ_{s32} ^[28]:

$$\phi_{s32} = -2 \arctan\left(\frac{\rho_3 c_{s3}^2}{\rho_2 c_{s2}^3} \sqrt{\frac{1 - u^2/c_{s3}^2}{u^2/c_{s2}^2 - 1}}\right). \quad (7)$$

在 $H < z < H + h$ 沉积层内, 当频率为沉积层剪切波模态的截止频率时, 剪切波的水平波数 $k_{s2} = k_1$, 相速度 $u = c_1$, 其中 $k_1 = \omega/c_1$ 为水介质中的水平波数. 此时, 沉积层内的剪切波在上下边界同时发生全内反射, 声能被禁锢在沉积层内传播, 并表现为弹性沉积层的剪切波共振. 将相速度 $u = c_1$ 代入 (5) 式可以发现 $\phi_{s12} = 0$, 进一步将上

下边界反射系数相位代入 (4) 式, 可以得到弹性沉积层海底的剪切波共振频率:

$$f_n = \frac{c_{s2}}{2\pi h \sqrt{1 - c_{s2}^2/c_1^2}} \times \left[\arctan \left(\frac{\rho_3 c_{s3}^2 \sqrt{1 - c_1^2/c_{s3}^2}}{\rho_2 c_{s2}^2 \sqrt{c_1^2/c_{s2}^2 - 1}} \right) + (n-1)\pi \right],$$

$$n = 1, 2, 3 \dots \quad (8)$$

相邻阶频率间隔为

$$\Delta f = \frac{c_{s2}}{2h \sqrt{1 - c_{s2}^2/c_1^2}}. \quad (9)$$

基阶频率为

$$f_1 = \frac{c_{s2}}{2\pi h \sqrt{1 - c_{s2}^2/c_1^2}} \arctan \left(\frac{\rho_3 c_{s3}^2 \sqrt{1 - c_1^2/c_{s3}^2}}{\rho_2 c_{s2}^2 \sqrt{c_1^2/c_{s2}^2 - 1}} \right). \quad (10)$$

可以发现弹性沉积层的剪切波共振频率与软沉积物海底的纵波共振表达式^[10]数学结构高度相似, 但物理上依赖于剪切波速度.

图 8 显示了表 2 所列的弹性沉积层海底环境的 50—200 Hz 频段的三个不同角度的低掠射角反射损失, 以及利用剪切波共振频率表达式计算的 4—10 阶的共振频率. 对比可以发现: 剪切波共振频率与弹性沉积层低掠射角反射极大值频率基本吻合, 有效地揭示了弹性沉积层的剪切波共振与低掠射角反射特征的关系.

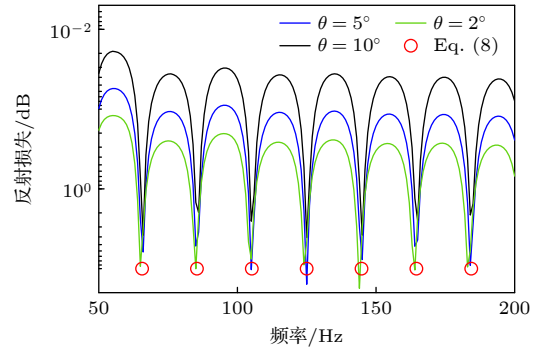


图 8 弹性海底低掠射角反射与剪切波共振的频率关系. 绿色、蓝色和黑色曲线分别表示掠射角为 2°、5°和 10°的反射损失曲线; 红色圆圈是沉积层剪切波共振频率 (Eq. (8))

Fig. 8. Frequency relationship between low grazing angle reflection and shear wave resonance in elastic seabed. The green, blue, and black curves represent the reflection loss curves for grazing angles of 2°, 5°, and 10°, respectively; the red circle is the shear wave resonance frequency (Eq. (8)).

3.3 弹性沉积层海底的声传播特征

由弹性沉积层海底低掠射角反射引起的剪切波共振对水中声传播会产生明显的影响, 基于简正波理论模型 (KRAKENC^[26]) 计算了与图 7 相同环境的频率-距离域的传播损失, 如图 9 所示. 其中图 9(a) 所示的低声速液态海底环境在小掠射角反射损失极大值对应的频率存在传播损失异常增大现象, 且高传播损失特征具有高频、远距离更加明显的特征. 由于弹性沉积层的剪切波对低掠射角反射具有类似的调制作用, 表现为沉积层中的剪切波

表 2 弹性沉积层海底参数

Table 2. Acoustic parameters of elastic sediment seabed.

声学参数	压缩波声速/(m·s ⁻¹)	剪切波声速/(m·s ⁻¹)	层厚/m	密度/(g·cm ⁻³)	压缩波衰减/(dB·λ ⁻¹)	剪切波衰减/(dB·λ ⁻¹)
水层	1499	—	100	1.0	0	—
沉积层	1600	700	15	1.6	0.1	0.1
基底	2800	1600	—	2.2	0.2	0.2

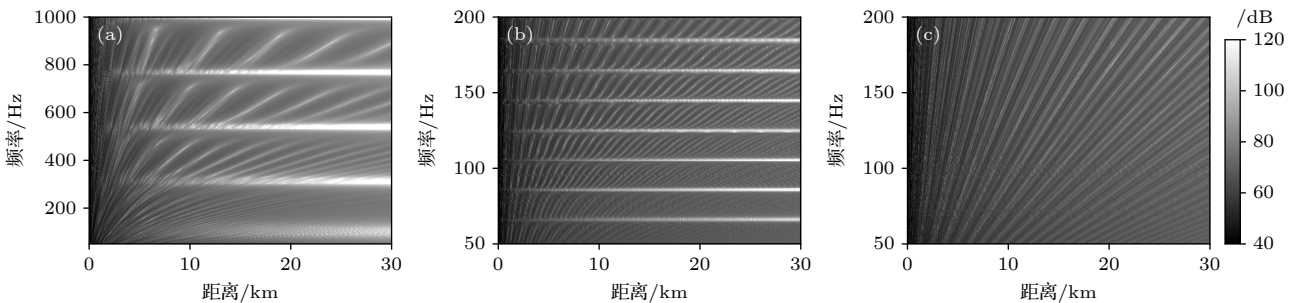


图 9 传播损失的频率特征, 其中声源深度为 50 m, 接收深度为 80 m (a) 低声速沉积层海底; (b) 弹性沉积层海底; (c) 高声速液态海底

Fig. 9. Frequency characteristics of propagation loss, where the sound source depth is 50 m, and the receiving depth is 80 m: (a) Low-velocity sediment seabed; (b) the elastic sedimentary seabed; (c) the high-velocity liquid seabed.

共振, 因此与低声速液态海底环境的传播损失具有相同的频率特性, 但频率间隔更小 (图 9(b)). 需要说明的是, 低声速液态海底和弹性沉积层海底的频率特征与高声速海底典型的浅海距离-频率干涉结构 (图 9(c)) 存在明显的差异, 意味着低掠射角的反射特征对声波的远距离传播具有重要的影响, 同时也表明了实验测量的 $\Delta f \approx 26$ Hz 的声虹吸效应与弹性海底的低掠射角反射相关.

结合图 8 和图 9(b) 可以知道, 由于弹性沉积层的剪切波共振是在低掠射角条件下推导获得, 因此弹性海底的剪切波共振频率与低掠射角反射特征频率相对应. 同时, 当发生海底共振时, 水中对应频率的声能向海底泄漏, 导致水中的声传播损失出现异常增大的频率, 即出现声虹吸效应.

4 弹性海底声学参数反演

为了验证弹性沉积层的地声模型对实验观测

的声学现象的作用机制, 需对实验环境的海底参数进行有效反演. 弹性沉积层海底声学参数反演的难点在于: 1) 反演参数涉及多维参数的组合; 2) 各参数之间存在明显的耦合效应, 这将导致反演工作难以获得最优反演结果. 为了获得最优反演结果, 首先利用剪切波共振频率表达式对本文关注的声学特征相关参数进行分析.

4.1 剪切波共振频率参数分析

4.1.1 剪切波共振频率对声衰减的敏感性

海底的声衰减是影响浅海远程声传播的关键参数, 分析剪切波共振频率对声衰减的敏感性对有效获取海底参数具有重要意义. 由图 8 可知, 在弹性沉积层海底条件下, 低掠射角反射损失的极大值特征频率与剪切波共振频率相对应. 图 10(a) 给出了 n 分别是 9, 11, 14, 16 和 18 这 5 个共振频率的海底反射损失与沉积物剪切波衰减的函数关系. 可以发现, 不同阶次的共振频率受沉积层剪切波衰减

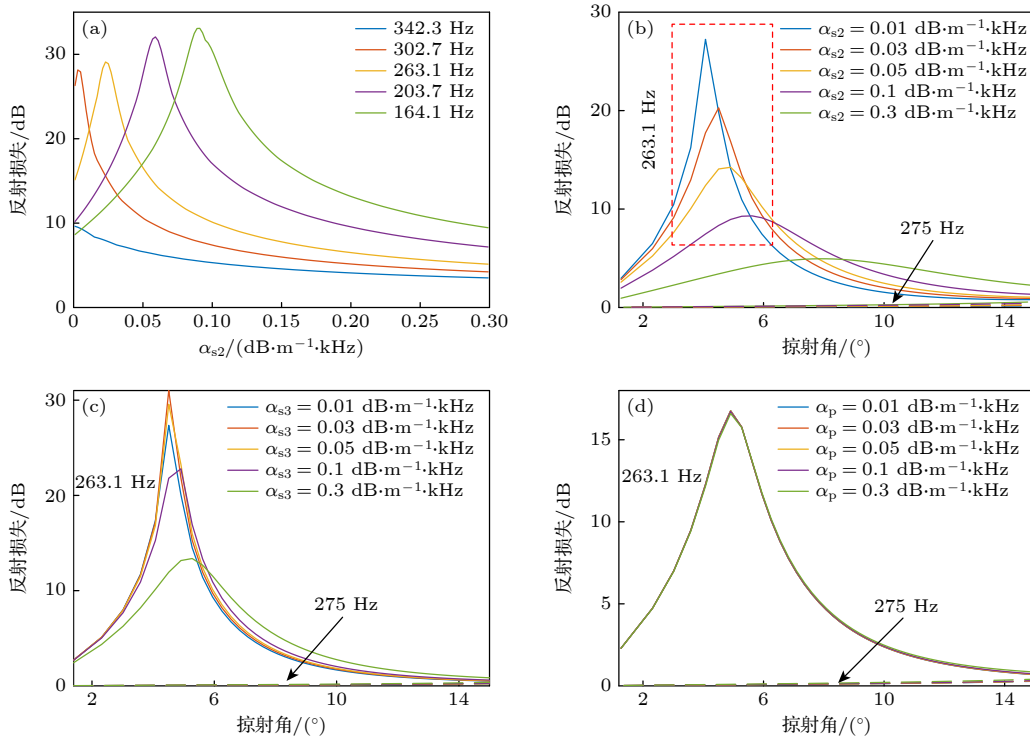


图 10 剪切波共振频率低掠射角反射损失特征的敏感性分析 (a) 底部反射损失与剪切波衰减的关系, 同一环境取低掠射角 ($\theta < \arccos(c_1/c_2)$) 的反射损失极大值; (b) 共振频率 263.1 Hz 对剪切波衰减的敏感性; (c) 共振频率 263.1 Hz 对基底剪切波衰减的敏感性; (d) 共振频率 263.1 Hz 对纵波衰减的敏感性

Fig. 10. Sensitivity analysis of low grazing angle reflection loss characteristics of shear wave resonance frequency: (a) Relationship between bottom reflection loss and shear wave attenuation, and the maximum reflection loss of low grazing angle ($\theta < \arccos(c_1/c_2)$) is taken in the same environment; (b) sensitivity of the resonance frequency 263.1 Hz to the shear wave attenuation; (c) sensitivity of the resonance frequency 263.1 Hz to the base shear wave attenuation; (d) sensitivity of the resonance frequency 263.1 Hz to the longitudinal wave attenuation.

的影响规律相似, 低掠射角反射损失极大值随着沉积层剪切波衰减系数的增大先增大后减小, 且具有频率越低、低掠射角反射损失极大值对应的损失最强衰减系数越大的特点.

以共振频率 263.1 Hz 为例, 分析沉积层剪切波声衰减、基底剪切波声衰减和纵波衰减对低掠射角反射损失极大峰的影响. 通过分析图 10(b)—(d) 可以知道, 低掠射角反射损失极大峰对沉积层剪切波衰减非常敏感, 其次是基底剪切波衰减具有一定的敏感性, 纵波衰减几乎不影响低掠射角反射. 而且非共振频率的反射损失对剪切波衰减不敏感, 如图 10(b)—(d) 中频率为 275 Hz 的低掠射角反射损失曲线. 结果有效地反映出了海底声衰减对弹性沉积层海底低掠射反射以及共振频率的影响.

4.1.2 参数耦合性分析

除海底的声衰减之外, 与弹性海底剪切波共振频率相关的不同地声参数同样会影响剪切波共振频率的声传播特性. 为了分析其地声参数之间的耦合关系, 构造以下代价函数分析海底剪切波共振频率特征的耦合性.

$$E(\mathbf{n}) = \frac{1}{\sqrt{(f_{1c}(\mathbf{n}) - f_{1e})^2}}, \quad (11)$$

式中, f_{1c} 表示理论计算的基阶频率; f_{1e} 为实验测量的基阶频率; \mathbf{n} 为反演参数向量. 图 11 为剪切波共振基频相关参数与剪切波速的二维代价函数取对数计算结果, 其中真值为图中红色方框位置参数. 代价函数在真值处均能取极大值, 但相关声学参数之间存在严重的耦合, 沉积层的厚度、密度与沉积层剪切波速呈正相关, 基底剪切波速、密度与

沉积层剪切波速呈负相关, 其中沉积层剪切波速与厚度之间的耦合最为强烈, 各参数与沉积层剪切波速的敏感性满足 $h > c_{s2} > \rho_2 > \rho_3$. 因此, 尽管利用 (11) 式进行反演可得到满足基频条件的参数组合, 但受参数耦合的影响可能得不到正确的最优反演结果.

在海底与波导声传播同步测量实验条件下, 由于 OBS 对海底振动的敏感性, 利用测量结果提前确定特定参数的寻优区间, 对准确获取海底声学参数将会是有利的帮助. 在本文的研究内容中, 沉积层的剪切波声速与厚度之间的耦合最为强烈, 因此, 利用 OBS 测量的声矢量信号结果, 可以提前获得沉积层中剪切波声速范围, 进而在弹性海底参数反演过程中, 限定沉积层剪切波声速或厚度的取值范围, 为获取最优的海底声学参数提供帮助.

4.2 弹性海底参数反演

4.2.1 剪切波声速取值范围

在东沙海域海底与波导声传播联合测量实验中, OBS 被用于测量海底振速信号, 因此我们可以直接利用复声强法计算得到海底声信号的俯仰角. 图 12 给出了 OBS 接收质点振速的水平分量与垂直分量的时域波形和不同距离声源的俯仰角. 图中显示了 OBS 接收 19.82 km 距离声源的质点振速垂直分量的振幅显著强于水平分量的振幅的特性^[6,7], 且在水平距离大于 2 km 范围的声信号俯仰角较为稳定, 平均俯仰角为 67.98°. 意味着海底的剪切波声速小于水中声速, 因为根据 Snell 定律, 只有海底剪切波声速小于水中声速时, 由水源激发的沉积物传播的垂直剪切波才会以大掠射角的方向传播.

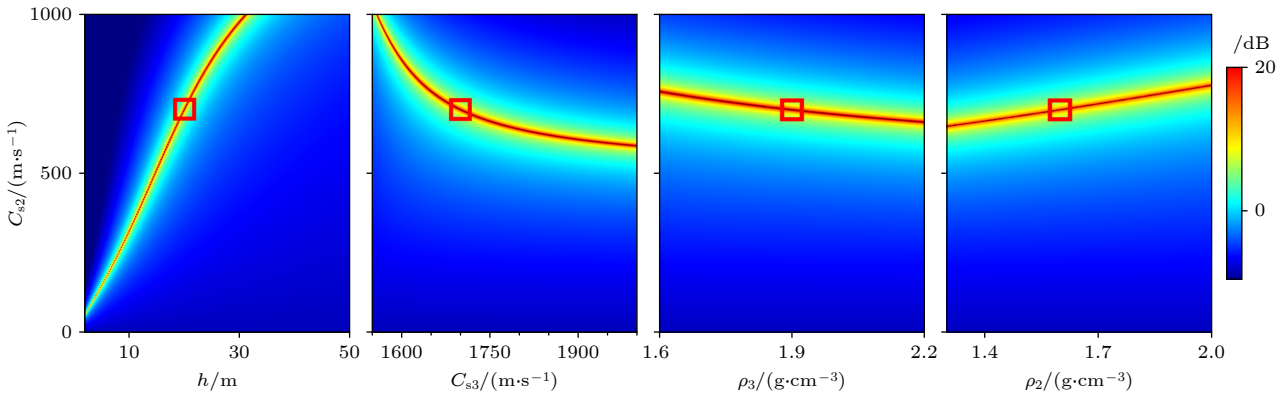


图 11 剪切波共振频率闭式表达式的耦合关系

Fig. 11. Coupling relationship of shear wave resonance frequency closed-form expression.

结合前文对弹性沉积层海底的反射损失特征分析可以知道, 剪切波共振效应主要是由低掠射角的反射引起. 由此可以确定沉积层剪切波声速范围大于 562.27 m/s, 且小于 800 m/s, 这一结果可以为后续海底沉积层剪切波声速反演提供有效的寻优范围, 并在一定程度上避免了沉积层剪切波声速与其他参数之间的强耦合问题.

4.2.2 反演策略

在海底与波导同时测量的实验条件下, 宽带声源在水体中的频率虹吸和海底共振可能会被同时观测到. 在此基础上, 我们可以根据水中观测声信号的虹吸特征, 将海底判定为低声速沉积层海底或弹性沉积层海底, 并计算得到声虹吸的初始频点及频率间隔. 如果声虹吸频率间隔或海底共振频率间隔较小, 则海底环境判定弹性沉积层海底. 接着, 根据测量到的共振频率间隔可以确定沉积层中的

剪切波声速与厚度的关系, 同时, 利用 OBS 振速信号计算海底声信号的俯仰角 (掠射角), 由 Snell 定律便可以得到沉积层剪切波声速与水体透射至海底的声波掠射角的关系. 在此约束条件下, 引入非相干 Bartlett 处理器构造匹配的代价函数, 并利用全局搜索算法-粒子群优化算法^[29] 来获取最优解, 由此可获得弹性沉积层海底的多维地声参数的最优化组合. 具体流程如图 13 所示.

根据 VLA 接收信号的宽带特征, 基于非相干 Bartlett 处理器构造匹配的代价函数为^[16]

$$E(\mathbf{m}) = \frac{1}{M} \sum_j \left\{ \frac{\left| \sum_i^N p_i^c(f_j)^* p_i^c(f_j, \mathbf{m}) \right|^2}{\left[\sum_i^N |p_i^c(f_j)|^2 \right] \left[\sum_i^N |p_i^c(f_j, \mathbf{m})|^2 \right]} \right\}, \quad (12)$$

其中, $p_i^c(f_j)$ 表示第 i 个垂直阵元测得的声压场;

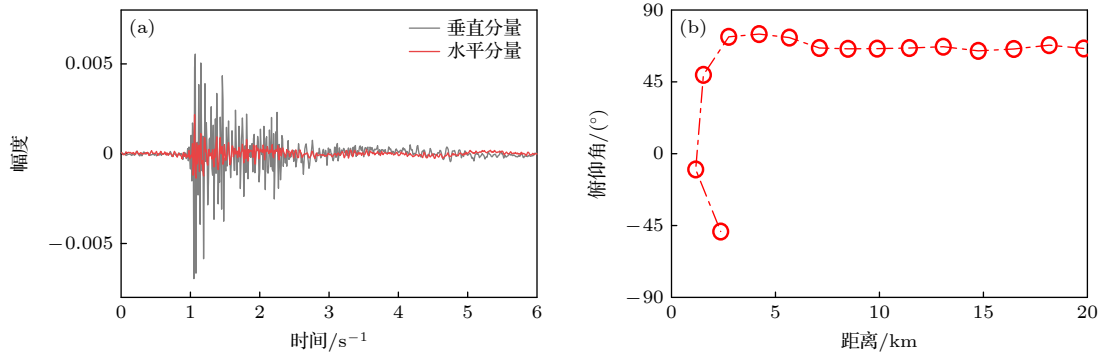


图 12 (a) OBS 接收的振速信号水平分量和垂直分量的时域波形, 该声源距离 OBS 19.82 km; (b) 利用复声强法计算的 0—20 km 声源的俯仰角

Fig. 12. (a) Time domain waveforms of the horizontal and vertical components of the particle velocity signal received by the OBS. The sound source is 19.82 km away from the OBS; (b) the elevation angle of 0—20 km sound source is calculated by using the complex sound intensity method.

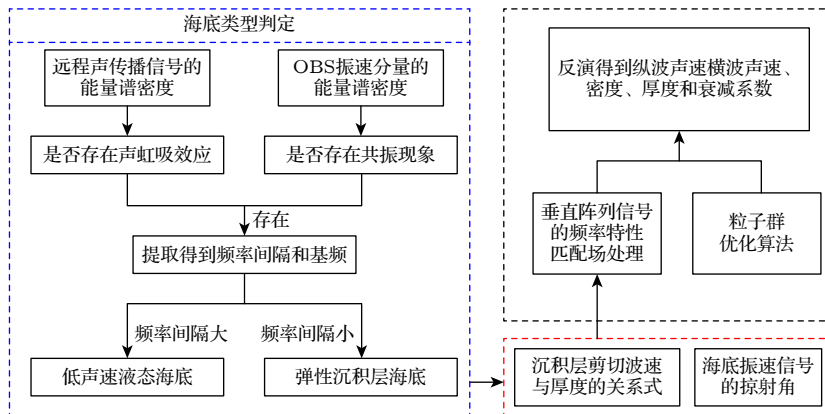


图 13 反演策略

Fig. 13. Inversion strategy.

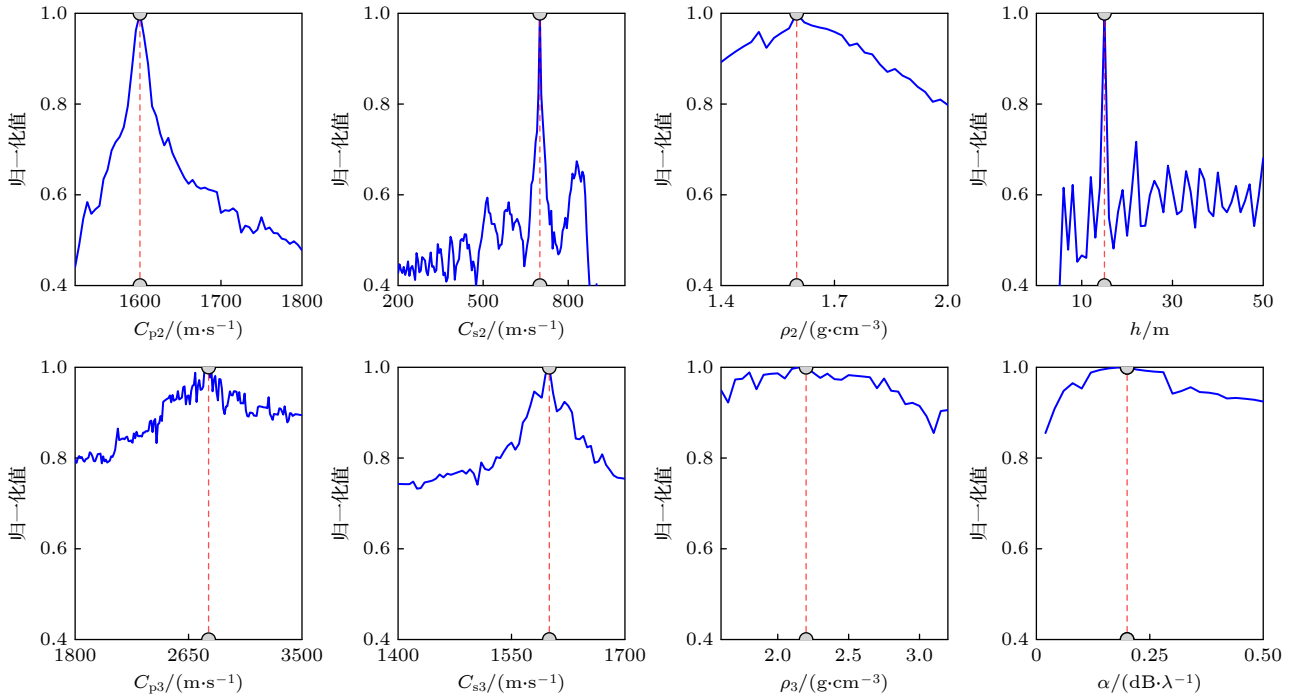


图 14 实际波导环境的弹性沉积层海底参数敏感性分析, 红色虚线为真值

Fig. 14. Sensitivity analysis of seabed parameters of elastic sediment layer in actual waveguide environment, red dotted line is true value.

$p_i^c(f_j, \mathbf{m})$ 是基于简正波理论计算得到的第 i 个垂直阵元的拷贝场, \mathbf{m} 表示待反演参数向量; j 表示频点序号, 为垂直阵元个数 32; M 表示反演所用频点数; 上标“*”表示共轭。

图 14 分别给出了实际波导环境中, 代价函数 $E(\mathbf{m})$ 对弹性沉积层海底各参数的敏感性. 可以看出, 在所展示的 8 个地声参数讨论范围内, 各项参数的敏感性存在明显差异, 其中沉积层中的纵波声速、横波声速和厚度的敏感性最强, 而衰减系数、密度的敏感性较弱. 但均在真值处取得最大值且无伪峰, 避免了局部最优解的陷阱, 证明了该目标函数的可行性. 由 4.1 节可知剪切波共振频率对声衰减的敏感度较高, 然而在实际波导环境反演时, 由于代价函数 (12) 式仅需利用单个声源的信号, 且进行了归一化处理, 因此声衰减系数的敏感性较弱. 需要说明的是, 本文主要关注海底地声模型对海底共振与声虹吸特征的调制作用, 因此基于代价函数 (12) 式反演获取的参数并不影响本文的定性分析.

4.2.3 反演结果及特性验证

根据图 13 所示的反演策略对实验区域的海底参数进行反演, 在实际反演中, 选取 3 个宽带爆炸

声信号作为实测信号, 选择频带为 100—180 Hz, 共 81 个频点. 粒子群优化参数过程中, 粒子数设定为 80, 迭代次数 t_{\max} 为 100 次, 惯性权重随着迭代次数递减 $w = 0.9 - (0.9 - 0.3) \cdot t/t_{\max}$, 其中 t 为代数. 学习因子 a_1, a_2 同样与迭代次数相关 $a_1 = 2.5 - (2.5 - 0.5) \cdot t/t_{\max}$, $a_2 = 0.5 - (0.5 - 2.5) \cdot t/t_{\max}$.

反演结果及其寻优区间的设置如表 3 所列, 将反演结果代入 (9) 式、(10) 式计算可以得到共振频率间隔为 26.36 Hz、基频 11 Hz, 与实验测量的虹吸频率间隔 (约 26 Hz) 以及 OBS 观测的共振基频 (11.8 Hz) 吻合较好. 进一步基于简正波理论计算得到反演环境下的 50—250 Hz 带宽的传播损失, 以及将反演参数代入 (8) 式计算的剪切波共振频率, 并与两个不同距离的实测结果对比, 如图 15 所示. 在 50—250 Hz 频段内, 反演计算与实测的传播损失存在规律的声虹吸特征, 且实测结果与理论仿真吻合较好. 同时, 声虹吸频率与剪切波共振频率具有较好的一致性. 结果验证了海底参数反演结果的可靠性以及实验测量到具有频率间隔小特征的声虹吸效应是由弹性沉积层海底, 并揭示了剪切波调制的低掠射角反射导致声能被海底禁锢的作用机制.

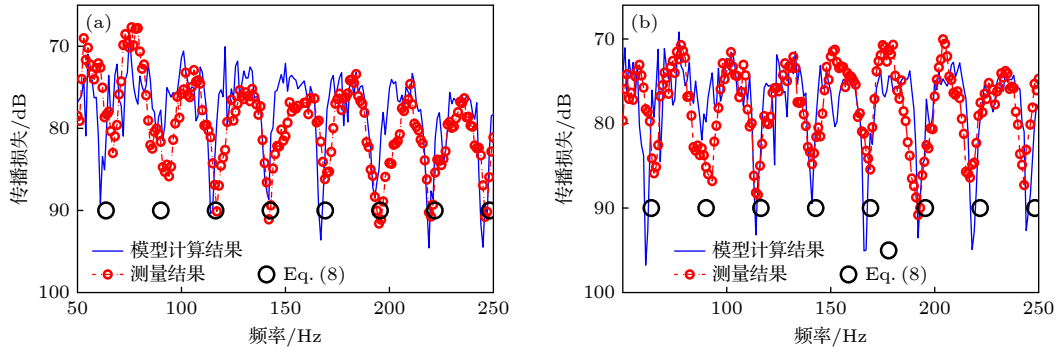


图 15 根据反演结果计算的 50—250 Hz 频段传播损失与实验测量得到的传播损失结果对比 (a) 声源与 VLA 的距离 20.8 km; (b) 声源与 VLA 的距离 24.99 km

Fig. 15. Propagation loss in the 50–250 Hz band calculated from the inversion results is compared with the experimental measurement: (a) Distance from a sound source to VLA is 20.8 km; (b) from the sound source to VLA is 24.99 km.

表 3 弹性沉积层海底地声参数反演结果
Table 3. Inversion results of seafloor geoaoustic parameters of the elastic sedimentary layer.

层	反演参数	寻优区间	反演结果
沉积层	$c_{p2}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1550—1800	1640.7
	$c_{s2}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	500—800	681.0
	h/m	2—40	14.5
	$\rho_2/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.55—2.1	1.65
	$\alpha_{p2}/(\text{dB}\cdot\lambda^{-1})$	0.05—0.5	0.14
	$\alpha_{s2}/(\text{dB}\cdot\lambda^{-1})$	0.05—0.5	0.11
基底	$c_{p3}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1850—3000	2476
	$c_{s3}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1510—1800	1757.6
	$\rho_3/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.15—4.0	3.5
	$\alpha_{p3}/(\text{dB}\cdot\lambda^{-1})$	0.1—0.6	0.22
	$\alpha_{s3}/(\text{dB}\cdot\lambda^{-1})$	0.1—0.6	0.29

5 结论

本文利用南海东沙海域海底与波导联合测量的声传播实验数据,对弹性沉积层海底的低掠射角反射与剪切波共振进行了研究.首先分析了实验观测到的海底共振现象(或声虹吸现象)的频率间隔与低声速海底相关现象的差异,并在低掠射角条件下推导了弹性沉积层海底的剪切波共振频率理论,以及浅海远程声传播受海底环境的影响.结果指出了弹性沉积层海底的低掠射角反射损失的极大值特征是引起海底剪切波共振的物理基础,明确了弹性沉积物中的剪切波共振会导致水体中的声波能量被沉积层禁锢,从而引起浅海远程声传播损失异常增大.理论与实验均有效地验证了海底共振现象与水中声虹吸现象的关系.

在此基础上,通过分析剪切波共振频率对声衰

减系数的敏感性以及相关参数的耦合关系,提出了一种结合海底与波导观测信息的地声参数反演方法.该方法根据浅海远程声传播的频率特征实现海底类型判定,并利用 OBS 三分量振速信号确定沉积层剪切波速范围,最后结合传统海底参数反演思路实现弹性海底参数的有效获取.反演结果有效的验证了实验海区的海底模型为弹性沉积层海底,以及弹性沉积层海底的剪切波调制的低掠射角反射导致声能被海底禁锢的作用机制.

感谢参与 2021 年夏季中国南海东沙海域水声实验的全体工作人员,是他们的辛勤劳动为本文提供了可靠的实验数据.

参考文献

- [1] Katsnelson B, Petnikov V, Lynch J 2012 *Fundamentals of Shallow Water Acoustics* (New York: Springer Press) p65
- [2] Duncan A J, Gavrilov A N, McCauley R D, Parnum I M, Collis J M 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **134** 207
- [3] Godin O A 2021 *J. Acoust. Soc. Am.* **149** 3586
- [4] Godin O A 2025 *J. Acoust. Soc. Am.* **157** 314
- [5] Zhang S Z, Piao S C 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 214304 (in Chinese) [张士钊, 朴胜春 2021 物理学报 **70** 214304]
- [6] Akal T, Berkson J 1986 *Ocean Seismo-Acoustics: Low-Frequency Underwater Acoustic* (New York & London: Nato Scientific Affairs Division Plenum Press) p149
- [7] Xie J H, Cao D J, Zhang H G 2024 *Journal of Physics: Conference Series* 2718 Changsha City, China, October 13–15, 2023 p012070
- [8] Fokina M S, Fokin V N 2001 *J. Comput. Acoust.* **09** 1079
- [9] Godin O A, Chapman D M F 1999 *J. Acoust. Soc. Am.* **106** 2367
- [10] Godin O A, Deal T J, Dong H F 2021 *J Acoust Soc Am.* **149** 49
- [11] Dall'Osto D R, Tang D J 2022 *J. Acoust. Soc. Am.* **151** 3473
- [12] Hastrup O F 1980 *Some Bottom-Reflection Loss Anomalies near Grazing and Their Effect on Propagation in Shallow*

- Water” In Bottom-Interacting Ocean Acoustics* edited by Kuperman W A, Jensen F B (New York: Plenum Press) p135
- [13] Hermand J P, Siderius M 1997 *J. Acoust. Soc. Am.* **102** 3142
- [14] Wilson P S, Knobles D P, Neilsen T B 2020 *IEEE J. Ocean. Eng.* **45** 1
- [15] Wilson P S, Knobles D P, Neilsen T B 2022 *IEEE J. Oceanic Eng.* **47** 497
- [16] Zhou J X, Li Z L, Zhang X Z, Qin J X 2024 *J. Acoust. Soc. Am.* **155** 3490
- [17] Li M Z, Li Z L, Zhou J X, Zhang R H 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 094301 (in Chinese) [李梦竹, 李整林, 周纪浚, 张仁和 2019 物理学报 **68** 094301]
- [18] Zhou J X, Qin J X, Li Z L, Zhang X Z 2024 *J. Acoust. Soc. Am.* **156** 1575
- [19] Hughes S J, Ellis D D, Chapman D M F, Philip R S 1990 *J. Acoust. Soc. Am.* **88** 283
- [20] Hovem J M, Solberg C E, Tollefsen D 2001 *Annual Conference of the Marine-Technology-Society* Honolulu, HI, USA, November 5–8, 2001 p715
- [21] Zhang H G, Xie J H, Wang X H, Ma Z K 2024 *Acta Acustica* **49** 835 (in Chinese) [张海刚, 谢金怀, 王笑寒, 马志康 2024 声学学报 **49** 835]
- [22] Zheng G X, Piao S C, Dong Y, Gong L J 2024 *JASA Express Lett.* **4** 126004
- [23] Li L, Chen Z, Liu J G, Chen H, Yan W, Zhong Y 2014 *J. Trop. Oceanogr.* **33** 54 (in Chinese) [李亮, 陈忠, 刘建国, 陈翰, 颜文, 仲义 2014 热带海洋学报 **33** 54]
- [24] Vanneste M, Madshus C, Socco V L, Maraschini M, Sparrevik P M, Westerdahl H, Duffaut K, Skomedal E, Bjørnara T I 2011 *Geophys. J. Int.* **185** 221
- [25] Socco V L, Boiero D, Maraschini M, Vanneste M, Madshus C, Westerdahl H, Duffaut K, Skomedal E 2011 *Geophys. J. Int.* **185** 237
- [26] Acoustics toolbox, Porter M B <https://oalib-acoustics.org/> [2025-5-20]
- [27] Zhang R H, Li F H 1999 *Sci. China, Ser. A Math. Phys. Astron.* **42** 739
- [28] Brekhovskikh L M, Godin O A 1998 *Acoustics of Layered Media. 1: Plane and Quasi-Plane Waves* (Vol. 2) (Berlin: Springer Press) p14
- [29] Kennedy J, Eberhart R 1995 *IEEE Int Conf on Neural Networks* Perth, WA, Australia, November 26–December 2, 1995 p1941

Low grazing angle reflection and shear-wave resonance on elastic-solid sediment*

XIE Jinhuai¹⁾²⁾³⁾ ZHANG Haigang^{1)2)3)†} CAO Dejin¹⁾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, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

3) (*College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

(Received 20 May 2025; revised manuscript received 9 June 2025)

Abstract

The low-grazing-angle reflection on elastic sediment seabed exhibits abnormally enhanced frequency characteristics, which significantly influences long-range sound propagation in shallow water. To study the influence of elastic sedimentary layer seabed environment on long-range sound propagation in shallow waters, we conduct a joint measurement of seabed and waveguide sound propagation in the Dongsha area of the South China Sea. The measurements show for the first time that the seabed resonance and the sound siphon effect occur simultaneously. Notably, this effect is different from the sound siphon effect observed in low-sound-speed seabed environments, as it exhibits smaller frequency intervals. By analyzing the low-grazing-angle reflection characteristics of the elastic seabed, we develop a theoretical model for the resonance frequencies of shear waves in elastic sediment layers under low grazing angles and investigate their influence on long-range sound propagation. The results indicate that under an elastic seabed model, the low-grazing-angle reflection modulated by shear waves induces resonance at specific frequencies within the sediment layer. This trap acoustic energy in the seabed, leading to the sound siphon effect. Furthermore, we analyze the sensitivity and coupling of key parameters related to the resonance frequency of shear wave. According to these findings, we develop an inversion strategy that integrates seabed and waveguide observations to estimate geo-acoustic parameters of the experimental area. The inversion results validate the mechanism by which the elastic seabed model contributes to the sound siphon effect in the water column.

Keywords: low grazing angle reflection, shear wave resonance, sound siphon effect

PACS: 43.30.Ma, 43.30.+m, 43.30.Pc

DOI: [10.7498/aps.74.20250656](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250656)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250656](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250656)

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12404513).

† Corresponding author. E-mail: zhanghaigang@hrbeu.edu.cn



弹性沉积层上的低掠射角反射与剪切波共振

谢金怀 张海刚 曹德璠

Low grazing angle reflection and shear-wave resonance on elastic-solid sediment

XIE Jinhuai ZHANG Haigang CAO Dejin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 164301 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250656

CSTR: 32037.14.aps.74.20250656

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250656>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于大掠射角海底反射特性的深海地声参数反演

Inversion of deep water geoacoustic parameters based on the seabed reflection characteristics of large grazing angles

物理学报. 2022, 71(11): 114302 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211915>

反磁剪切托卡马克等离子体中低频剪切阿尔芬波的理论研究

Theoretical studies of low-frequency shear Alfvén waves in reversed shear tokamak plasmas

物理学报. 2023, 72(21): 215207 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230255>

剪切形变下磷烯的力学和热学性能

Mechanical and thermal properties of phosphorene under shear deformation

物理学报. 2023, 72(12): 126201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230084>

轴对称指向性球面波的界面反射波

Interface reflection wave of axisymmetric directional spherical-wave

物理学报. 2022, 71(7): 074301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211718>

非牛顿流体剪切稀化特性的分子动力学模拟

Molecular dynamics simulation on shear thinning characteristics of non-Newtonian fluids

物理学报. 2021, 70(12): 124701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202116>

J-TEXT托卡马克锯齿振荡期间湍流传播和对称性破缺对边缘剪切流的影响

Effects of turbulence spreading and symmetry breaking on edge shear flow during sawtooth cycles in J-TEXT tokamak

物理学报. 2025, 74(4): 045201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241364>