

## 海底声散射特性进展及展望

郑毅<sup>1,2,3</sup>, 秦志亮<sup>1,2,3</sup>, 于盛齐<sup>4</sup>, 马本俊<sup>1,2,3</sup>, 赵吉祥<sup>1,2,3</sup>, 刘梦婷<sup>1,2,3</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 水声技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 工业和信息化部 海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学), 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; 4. 哈尔滨工程大学 青岛创新发展基地, 山东 青岛 266400)

**摘要:** 为了对海底声散射特性进行系统分析和规律总结, 本文梳理了国内外有关海底声散射特性的研究进展。介绍了海底声散射的基本概念, 并对界面粗糙散射及沉积物体积散射的理论模型进行了总结; 从高频(>10 kHz)和中频(1~10 kHz)2个方面阐述了国内外典型海底声散射特性测量实验, 同时对当前具有代表性的海底声散射实验结果进行了归纳分析。最后剖析和探讨了当前海底声散射研究中存在的问题和未来发展方向, 并指出海底中频及宽掠射角声散射模型研究在水下攻防应用中尤为紧要。

**关键词:** 声散射特性; 声散射理论; 粗糙界面散射; 体积散射; 高频; 中频; 声散射实验; 宽掠射角

**DOI:** 10.11990/jheu.202303003

**网络出版地址:** <https://link.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20240325.1112.006>

**中图分类号:** P733.24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2024)04-0748-10

## Progress with regard to research on bottom acoustic scattering properties and associated future prospects

ZHENG Yi<sup>1,2,3</sup>, QIN Zhiliang<sup>1,2,3</sup>, YU Shengqi<sup>4</sup>, MA Benjun<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Jixiang<sup>1,2,3</sup>,  
LIU Mengting<sup>1,2,3</sup>

(1. Acoustic Science and Technology Laboratory, 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; 4. Qingdao Innovation and Development Base of Harbin Engineering University, Qingdao 266400, China)

**Abstract:** To systematically analyze bottom acoustic scattering properties and summarize their regularities, this paper presents a review of the associated research progress at home and abroad. First, the fundamental concept of bottom acoustic scattering is introduced, drawing a conclusion on existing associated theoretical models for interface roughness scattering and sediment volume scattering. Then, typical measurement experiments with regard to the scattering properties worldwide are expounded from two aspects, high frequencies (>10 kHz) and midfrequencies (1~10 kHz), sorting out the currently representative results of bottom acoustic scattering experiments. At last, the problems in the current bottom acoustic scattering research and future research directions are analyzed and discussed, noting that research on models of midfrequency and wide grazing angle bottom acoustic scattering is particularly essential to underwater offensive and defensive applications.

**Keywords:** acoustic scattering properties; acoustic scattering theory; roughness scattering; volume scattering; high frequency; midfrequency; acoustic scattering experiment; wide grazing angle

海底混响是主动声呐对海底附近目标进行探测和识别时的主要背景干扰, 而海底声散射则是造成

海底混响的主要原因<sup>[1]</sup>。研究海底声散射对应用在海底附近的声呐系统至关重要, 反水雷声呐必须在海底声散射形成的背景声场中探测和识别布放在海底界面或掩埋在沉积物中的目标<sup>[2]</sup>。由于海底声散射蕴含了丰富的海底环境信息, 也被广泛用于沉积物分类或地声反演。因此, 无论是在军用还是民用领域中, 对海底声散射的研究都具有非常重要

收稿日期: 2023-03-02.

网络出版日期: 2024-03-26.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(3072022TS2610); 水声技术重点实验室项目; 哈尔滨工程大学青年科学家培育基金项目.

作者简介: 郑毅, 男, 博士研究生;

秦志亮, 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 秦志亮, E-mail: qin\_zhiliang@126.com.

的意义。

海底声散射研究主要包括海底声散射机理研究、海底声散射模型构建和海底声散射测量技术3个方面。其中,海底声散射机理研究与声散射模型构建可为海底声散射测量技术的发展提供理论基础,而测量技术的发展则可为前两者提供实验数据支撑。海底声散射的形成主要源于声波与海底界面、沉积物内部介质,以及贝壳碎片和气泡等离散体的相互作用。自20世纪50年代以来,国外相关研究人员开始对海底声散射的形成机理进行了深入研究,并针对不同的沉积物声学模型构建了适用于不同频段、不同掠射角范围下的声散射模型。随着海底声学测量技术的发展,针对性地研制出多款海底声散射测量装备,开展了一系列实验,积累了大量的实验数据,并通过数据-模型对比进一步验证了理论模型的准确性<sup>[3]</sup>。相比之下,我国对海底声散射的研究起步较晚,且主要以理论研究及模型仿真为主,在各方面与国外相比仍有一定的差距。

本文主要归纳总结了海底声散射理论与实验的研究进展及当前存在的问题,并对海底声散射的未来发展方向进行了探讨。

## 1 海底声散射模型研究进展

### 1.1 海底声散射基本概念

当声波与海底发生相互作用时,会形成反射、散射、折射和透射等声学现象。其中,反射与散射一般难以区分,但实际上反射和散射是声波与海底相互作用后的2种不同机制,反射是声波在平坦海底下产生的“镜面反射”,而散射则是声能在海底界面明显粗糙情况下向各个角度的重新分配<sup>[2]</sup>,如图1所示。

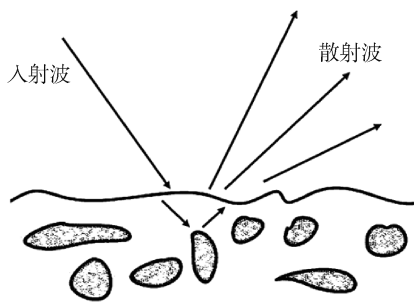


图1 海底声散射效应示意<sup>[2]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of bottom acoustic scattering effects<sup>[2]</sup>

海底声散射效应与海底粗糙界面及其沉积物内部物理性质的非均匀性有关<sup>[4]</sup>。一般按形成机制不同分为2类:1)由海底界面的粗糙起伏(界面粗糙度)引起的海底界面粗糙散射;2)由沉积物内部物理性质的空间差异性引起的体积散射。而对于声

呐系统的不同收发位置,又可分为反向散射和前向散射,前者是指声源与水听器位置相近或位于同一点下的声散射;后者则是指声源与水听器位置位于同一垂向平面下的声散射。

声波在海底界面及沉积物非均匀性的作用下产生随机散射,使得声波随机向镜面反射以外方向散射形成复杂声场。随着频率的增大,海底在声波波长尺度上表现出明显不均匀性,如波纹等引起海底粗糙度明显时空变化从而使散射更加随机<sup>[5]</sup>。海底总声压 $P$ 通常表示为:

$$P = \langle P \rangle + P_s \quad (1)$$

式中: $P$ 为总声压场; $\langle P \rangle$ 为总声压场的相干部分; $P_s$ 为总声压场的散射部分。对式(1)进行整理,则可得散射场的均方波动:

$$\langle |P_s|^2 \rangle = \langle |P|^2 \rangle - \langle P \rangle^2 \quad (2)$$

需要注意的是,符号“ $\langle \rangle$ ”为使用相同采集设备条件下获得的不同海底无限集合中的理想平均值。这些用于形成平均值的声压样本集合由多个海底散射区域的声压测量值组成,但这些样本均来自同一个统计上均匀的区域,在实际声散射测量实验中难以实现<sup>[6]</sup>。因此,在实际测量中通常采用一个在足够大区域内统计性质与海底位置无关的有限统计样本集合均值来近似实现这种“无限集合均值”。

海底声散射的强弱通常采用“散射强度”进行衡量。如图2所示,假设位于声源远场有一面积为 $A$ 的海底散射区域。高频情况下,可以假设海底粗糙与声波波长具有相当的尺度。若在海底使用相同几何排列进行多次散射压力值测量,则均方波动与海底散射区域 $A$ 的面积及入射场的平方 $|P_i|^2$ 成正比。考虑球面波扩展,均方波动与海底散射区域到接收器距离 $r_s$ 的平方成反比。在不考虑海水中的声吸收和折射时,均方波动为<sup>[4]</sup>:

$$\langle |P_s|^2 \rangle = |P_i|^2 A \sigma (r_s^{-2}) \quad (3)$$

式中 $\sigma$ 为散射截面,表示海底单位面积单位立体角内的散射程度。对式(3)进行整理,可得散射截面为:

$$\sigma = \langle |P_s|^2 \rangle r_s^2 / (|P_i|^2 A) \quad (4)$$

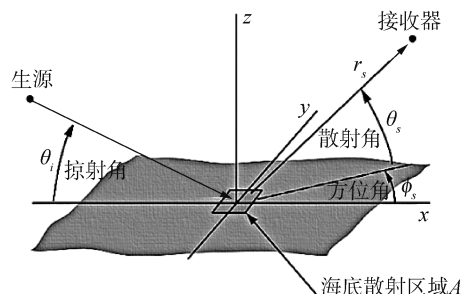


图2 海底散射坐标系定义示意<sup>[2]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of bottom scattering coordinate system definition<sup>[2]</sup>

由图 2 可知,散射截面  $\sigma$  与入射声波掠射角  $\theta_i$ 、散射声波掠射角  $\theta_s$ 、散射声波方位角  $\phi_s$  有关,通常表示为  $\sigma(\theta_i, \theta_s, \phi_s)$ 。海底界面粗糙散射强度  $S_{br}$  为散射截面  $\sigma$  的分贝形式:

$$S_{br} = 10 \lg \sigma \quad (5)$$

当频率较低时,声波穿透海底界面与沉积物内部非均匀介质产生相互作用引起体积散射。类似界面粗糙散射,体积散射下的均方波动为:

$$\langle |P_s|^2 \rangle = |P_i|^2 A \sigma_v (r_s^{-2}) \quad (6)$$

式中  $\sigma_v$  为体积散射下的散射截面。同理,海底体积散射强度  $S_{bv}$  为:

$$S_{bv} = 10 \lg \sigma_v \quad (7)$$

在海底散射建模中,一般将海底散射独立划分为海底界面粗糙散射和体积散射进行讨论,而对海底界面粗糙散射和体积散射的统一处理方式则各不相同。Ivakin<sup>[7]</sup> 通过将海底界面粗糙描述为特殊形式的体积扰动,提出了一种界面粗糙散射和体积散射的统一处理方法,但适用性不强。使用最为广泛的是 Urick 给出的定义,其将体积散射等效为薄层界面散射,散射强度为:

$$S_b = 10 \lg (\sigma_{re} + \sigma_{ve}) \quad (8)$$

式中  $\sigma_{re}$  和  $\sigma_{ve}$  分别为海底界面粗糙散射截面和体积散射等效界面散射截面<sup>[8]</sup>。

## 1.2 海底声散射模型

海底声散射模型通常用于预测海底散射强度或散射截面<sup>[6]</sup>。根据海底声散射形成原因可将海底声散射模型划分为海底界面粗糙散射模型和海底沉积物体积散射模型。

### 1.2.1 海底界面粗糙散射模型

海底界面粗糙散射模型主要用于建立海底界面粗糙散射强度与声波频率、掠射角、方位角以及海底沉积物物理参数之间的联系<sup>[9]</sup>。目前,构建海底界面粗糙散射模型最常用的近似方法有 4 种,分别是 Lambert 定律、小粗糙度微扰近似、Kirchhoff 近似和小斜率近似。其中,Lambert 定律较好地描述了中小掠射角范围内海底界面粗糙散射强度与掠射角之间的依赖关系,但其本质上是一个半经验形式的描述方法,不具备实际的物理意义。

小粗糙度微扰近似理论(也称为 Rayleigh-Rice 微扰理论)适用于起伏较小的粗糙界面,作为处理海底界面粗糙散射的经典方法,微扰近似理论也对散射的物理机理提供了直观的解释<sup>[2]</sup>。近年来,相关研究人员基于不同海底沉积物声学模型(主要包括流体模型、弹性体模型、多孔介质模型)给出了海底界面粗糙散射的小粗糙度微扰近似计算方法。基于流体模型,Kuo<sup>[10]</sup> 忽略了介质损耗,结合 Marsh 理论<sup>[11]</sup> 给出了粗糙散射截面的微扰近似表达式。基

于弹性体模型,Jackson 等<sup>[12]</sup> 采用一阶微扰理论给出了粗糙散射截面的微扰近似表达式;Dacol 等<sup>[13]</sup> 则结合微扰理论,系统地分析了流体-弹性体界面粗糙对声波的作用机制,建立了界面粗糙散射模型,并将数值仿真结果和绝对硬边界下的声散射实验结果进行了对比,验证了模型的有效性。Williams<sup>[14]</sup> 将海底沉积物视为多孔弹性介质,结合微扰理论和多孔弹性理论,提出了粗糙散射截面的微扰近似表达式。此外,Essen 等<sup>[15]</sup> 将一阶微扰理论用来处理较软沉积物到玄武岩等硬质沉积物下多种底质类型的界面粗糙散射。Kuperman 等<sup>[16]</sup> 利用一阶微扰理论得到了具有层状弹性海底的相干场。目前,对于微扰理论在海底界面粗糙散射中的研究已趋于成熟,被广泛应用于多种海底条件下散射强度计算。

Kirchhoff 近似适用于界面起伏较缓的粗糙海底:

$$R_c \gg \lambda / \pi \sin^3 \theta \quad (9)$$

式中:  $R_c$  为界面曲率半径;  $\lambda$  和  $\theta$  为声波波长和入射波局部掠射角<sup>[17]</sup>。Kirchhoff 近似起初应用于处理海面声散射,而后研究人员将其引入到海底界面散射的处理中,并得到了广泛关注。Thorsos<sup>[18]</sup> 采用高斯粗糙度谱证明了 Kirchhoff 近似应用于海底粗糙界面的有效性。Mourad<sup>[19]</sup> 和 Williams 等<sup>[20]</sup> 将 Kirchhoff 近似应用于单基地和双基地散射模型的研究。Jackson 等<sup>[21]</sup> 利用 Kirchhoff 近似处理垂直入射附近角度、频段为 10~100 kHz 下的界面粗糙散射,并将计算得到的海底反向散射强度与实验测量数据进行对比,结果基本趋于一致。Dacol<sup>[22]</sup> 也采用 Kirchhoff 近似用于处理具有随机粗糙特性的流体-弹性界面形成的粗糙散射。在高频极限条件下,Jackson 等<sup>[2]</sup> 简化并推导了散射截面表达式,并应用于各向同性粗糙度统计特征的海底粗糙界面反向散射计算。总体来说,Kirchhoff 近似在中高频段、入射掠射角为垂直入射附近方向时预测结果较为准确,在低频时误差较大,且未考虑影区效应和多重散射带来的影响<sup>[4]</sup>。研究表明,Kirchhoff 近似的计算精度与粗糙界面相关长度呈正相关,当界面相关长度增大时,其计算精度也随之增大,适用的掠射角范围也随之增宽<sup>[23]</sup>。

相较于上述 2 种近似方法,小斜率近似方法要求海底介质必须为均匀介质,且没有分层和梯度变化,其表达式为给定界面斜率的级数展开式,阶数越高近似精度越高<sup>[24]</sup>,目前已广泛应用于流体、弹性体及多孔弹性介质半无限空间海底界面粗糙散射的研究。Gragg 等<sup>[25]</sup> 提出了弹性海底界面粗糙散射的理论计算方法,并完整给出了双基地散射强度计算公式,同时与小粗糙度微扰近似方法进行对比,证明

了小斜率近似方法在海底散射研究中的优越性。同样, Soukup<sup>[26]</sup>和 Jackson<sup>[27]</sup>也采用小斜率近似用于处理弹性海底下的界面粗糙散射研究。Yang等<sup>[28]</sup>结合多孔弹性理论和小斜率近似方法给出了多孔介质半无限空间海底界面粗糙散射模型。此外,小斜率近似方法也可用于分层海底散射模型研究,如 Jackson<sup>[27]</sup>和 Olson<sup>[29]</sup>利用小斜率近似方法给出了层状流体的海底散射强度计算公式。对上述3种不同的海底粗糙界面散射近似模型, Jackson总结了给定条件下形式上不依赖于沉积物波动理论的3种近似模型的通用表达,并进行了对比<sup>[2]</sup>。

图3为相同砂质海底输入参数下,声频率为30 kHz时,基于流体理论的小粗糙度微扰近似、Kirchhoff近似和小斜率近似的海底反向散射强度计算结果对比图。可以看出 Kirchhoff近似和小粗糙度微扰近似存在适用范围内的互补性,有关学者基于这种互补性提出了复合粗糙度近似模型。复合粗糙度近似模型按截止波数对大粗糙度和小粗糙度进行划分,但这种划分依据需要给出清晰的划分标准<sup>[30]</sup>。Jackson<sup>[21]</sup>提出了一种截止波数划分方法,按掠射角范围采用不同的近似理论对大粗糙度和小粗糙度下的声散射进行处理:当掠射角在垂直入射附近时,采用 Kirchhoff近似模拟大粗糙计算散射强度;其他情况则采用微扰理论处理小粗糙度。在此基础上,Novarini等<sup>[31]</sup>将 Jackson提出的划分方法运用于垂直入射方向附近角度下的声散射强度计算,取得了较好的结果。

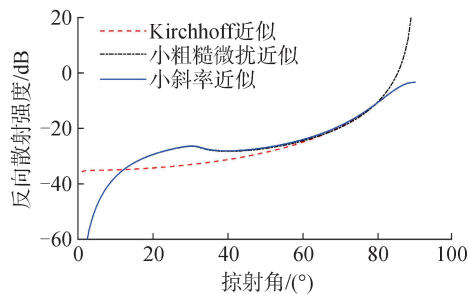


图3 基于流体理论的小粗糙度微扰近似、Kirchhoff近似和小斜率近似反向散射强度对比<sup>[2]</sup>

Fig. 3 A comparison of backscattering strengths computed in the small-slope, Kirchhoff, and small-roughness perturbation approximations based on fluid theory<sup>[2]</sup>

整体上讲,小斜率近似方法在处理界面粗糙散射问题时几乎涵盖了所有角度,且精度上不亚于 Kirchhoff近似和小粗糙度微扰近似;与复合粗糙度近似模型相比,处理起来也更为简单。

此外,研究人员针对分层海底和海底混响研究,建立了相应的散射模型。在海底混响研究中,彭朝晖等<sup>[32]</sup>结合 Ivakin提出的射线管积分法和 Hines

提出的复射线/最速下降法,给出了收发分置海底散射模型,用于计算海底粗糙界面和沉积物内部不均匀性引起的界面粗糙散射;侯倩男等<sup>[33]</sup>结合海底反射系数三参数模型对海底反向散射模型进行了近似简化,为海底地声反演提供了思路。在分层海底研究方面, Jackson等<sup>[34]</sup>结合 Kirchhoff近似和一阶微扰理论构建了地球声底部相互作用模型(the geoacoustic bottom interaction model, GABIM),计算分层流体海底下的海底界面粗糙散射和沉积物体积散射;Weidner等<sup>[35]</sup>给出了一维海底分层界面散射模型,预测由介质密度和声速梯度变化产生的分层界面反向散射强度。

### 1.2.2 海底沉积物体积散射模型

海底沉积物物理性质的空间差异性使得声波与沉积物相互作用时产生体积散射。这种物理性质的空间差异性具有多种表现形式,如悬浮颗粒沉降等形成的海底分层<sup>[27]</sup>、底栖生物引起的沉积物声学性质的时空波动<sup>[2]</sup>、掩埋的贝壳碎片及气泡导致海底声学性质的差异等。掩埋贝壳和气泡属于离散散射体,其引起的沉积物声学性质大幅波动会对海底散射强度测量和建模研究造成相当大的困难。而对于物理性质平缓变化的沉积物,一般采用微扰近似方法进行处理。

海底沉积物体积散射模型的构建与所采用的沉积物声学模型有关<sup>[2]</sup>。Stockhausen等<sup>[36]</sup>基于流体模型来进行沉积物体积散射建模,并做出几项关键假设:1)沉积物中的体积散射非常微弱,且散射声场的强度且远低于入射声场,2)可以使用线性增加的散射截面来表征体积散射,3)声波透射深度远小于源-接收器到海底散射区域的距离,4)忽略海水-沉积物界面处的海底界面粗糙散射。这些基本假设具有一般普适性,对不同环境条件下构建沉积物体积散射模型时需要对上述假设做出修正。Ivakin<sup>[37]</sup>给出了弹性海底沉积物体积散射的微扰近似方法。与流体模型不同,在使用弹性体模型时,除考虑沉积物体积密度和压缩波速的空间差异性外,还要考虑剪切波速的非均匀性。此时,由于弹性海底剪切波的存在,难以对弹性海底沉积物体积散射模型给出通用的表达式。Hines<sup>[38]</sup>通过微扰近似方法提出了带有物理参数的体积散射模型,但该模型很大程度上依赖于孔隙度等相关函数,计算较为复杂。

虽然基于多孔弹性理论的沉积物声学模型可以很好地表征海底沉积物声学性质,但在其基础上构建体积散射模型时,相比于流体模型和弹性体模型会引入额外的散射机制,使得处理过程变得更为复杂。等效密度流体模型作为多孔弹性介质模型的有效简化,在沉积物体积散射研究过程中使用更为广

泛。总体来说,相关研究人员在海底声散射理论建模方面作了大量的研究,且绝大部分工作都致力于界面粗糙散射建模。

### 2 海底声散射测量实验进展

目前,国内外研究人员开展了大量不同频段的海底声散射测量实验,但由于测量技术限制,实验频段主要集中在高频,而在中频的测量实验较少。

#### 2.1 高频海底声散射测量

20 世纪 50 年代,Urick 等<sup>[3]</sup>进行了高频段的海底声散射实验,在 10~60 kHz 频段内,采用收发合置方式开展了单基地海底声散射测量实验。随着相关研究人员对海底声散射测量技术研发的不断重视,一些大型的海底声散射测量系统被研制出来并投入使用。Barry 等<sup>[39]</sup>研制出一种拖曳式海底反向散射测量系统(图 4),该系统利用拖曳平台,采用收发合置测量方式,实现了多掠射角下的后向散射强度测量。此外平台上还装有声学测深传感器和姿态测量传感器,以方便对散射测量设备做出调整。Jackson 等<sup>[40]</sup>利用该系统对粉砂、砂质和砾石 3 种不同沉积物类型的海底进行了 20~85 kHz 频段内的反向散射强度测量。

Stanic 等<sup>[41]</sup>研制出一种坐底式海底声学散射测量系统,该系统由高频参量阵声源和 T 型接收阵组成,T 型接收阵则是由 16 个水听器组成,适用于浅水,可以通过 2 个子系统对海底反向声散射和前向声散射进行测量。Stanic 等<sup>[41]</sup>采用该系统开展了频段范围为 20~180 kHz、掠射角范围为 5°~30°的海

底反向散射强度测量。

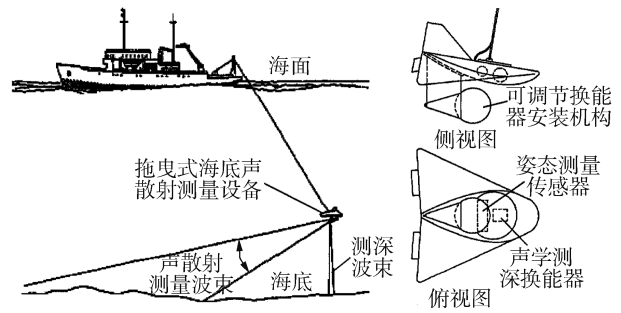


图 4 拖曳式海底声散射测量系统示意<sup>[39]</sup>

Fig. 4 Towed sonar system for bottom scattering measurement<sup>[39]</sup>

美国海军研究办公室联合华盛顿大学、Scripps 海洋研究所、意大利 NATOSACLANT 海底科学研究中心等开展了 2 个综合性的海底声学实验:SAX99 (sediment acoustic experiment-1999) 和 SAX04 (sediment acoustic experiment-2004)<sup>[42]</sup>。其中,SAX99 实验采用 BAMS (benthic acoustic measurement system)、STEM (sediment transmission measurement system) 和 XBAMS (accelerated benthic acoustic measurement system) 3 种系统对海底声散射进行了多掠射角、多频段下的系统性测量,其工作频段为 20~150 kHz,通过潜水员移动设备来实现不同掠射角下的声散射测量(图 5)。SAX04 将实验频段拓宽到 20~500 kHz,并铺设导轨代替潜水员实现声学设备的旋转,从而进行不同掠射角的声散射测量,以减少人工操作对测量带来的影响<sup>[43]</sup>。

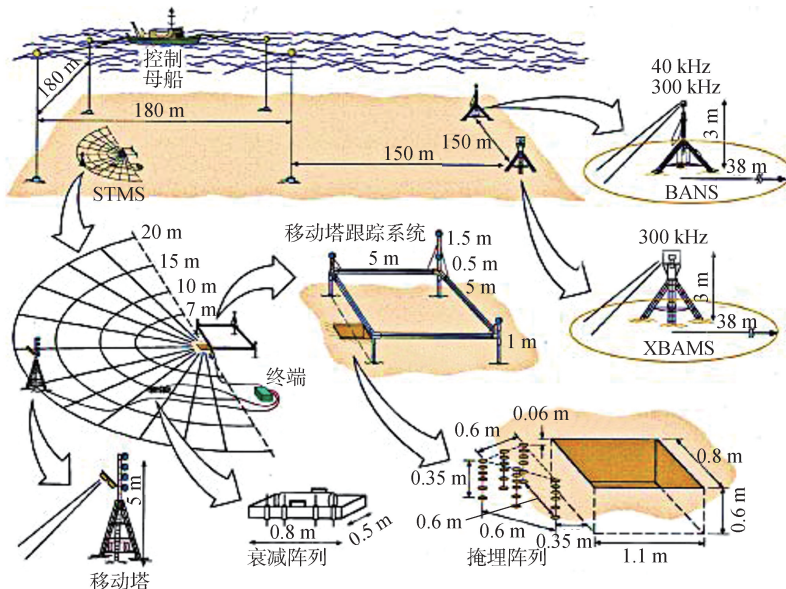


图 5 SAX99 实验海底声学散射测量系统示意<sup>[42]</sup>

Fig. 5 Geometry of bottom scattering in SAX99<sup>[42]</sup>

此外,研究人员也开展了一些小型高频海底声散射实验。Boehme 等<sup>[44]</sup>采用收发合置换能器实现

了小掠射角(10°以内)下的海底反向散射强度测量,频段为 30~95 kHz。Jackson 等<sup>[45]</sup>对 3 个不同站

位(底质不同)开展了宽掠射角下 15~45 kHz 频段内的海底反向散射强度测量。

除采用常规收发合置或分置的源-接收器(阵)外,也有研究人员利用多/单波束回声测深仪器进行海底声散射测量。Dimitrios 等<sup>[46]</sup>利用多波束回声测深仪对海底泥沙沉积物进行了 200 和 300 kHz 的海底反向散射测量实验。Ridha Fezzani 等<sup>[47]</sup>利用校准的单波束 Simrad EX80 宽带回声测深仪(Kongsberg 产品型号)对法国布雷斯特湾的 4 个站位(不同底质)进行了海底反向散射强度测量实验(图 6)。

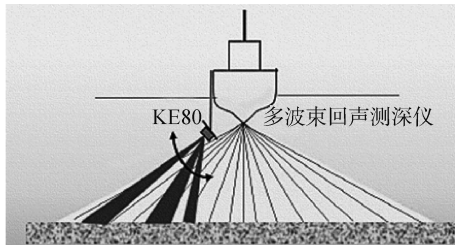


图 6 单波束回声测深仪进行海底反向散射测量示意<sup>[47]</sup>  
Fig. 6 Schematic representation of a single-beam echosounder measurement configuration<sup>[47]</sup>

相较于国外,国内对海底声散射测量实验起步较晚,且大多服务于海底混响研究。如金国亮等<sup>[48]</sup>采用固定在标杆上的 10 元换能器阵实现了频率为 10 kHz、掠射角为 0.6°~40°的含砂硬泥声学散射测量。张明辉<sup>[49]</sup>采用平面阵和垂直均匀线阵进行了 25~34 kHz 的海底前向散射强度的测量。近几年,于盛齐等<sup>[50]</sup>采用无指向性发射-接收系统对黄海典型砂质区域和泥质区域进行了 6~24 kHz 中高频段内海底声散射的全向性测量(图 7)。系统采用全向性声源和全向性水听器,在测量过程中更换 3 个不同的声源来覆盖 6~24 kHz 的测量频带,其主频分别为 8、15 和 20 kHz。

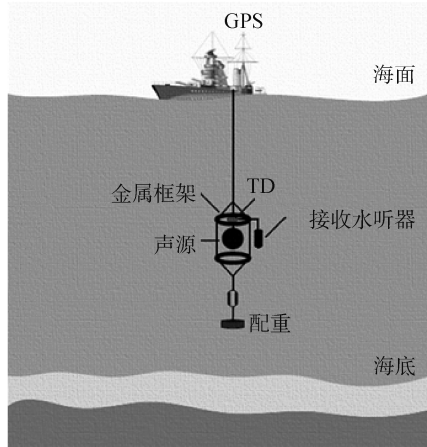


图 7 海底声散射测量设备布局<sup>[50]</sup>  
Fig. 7 Schematic diagram of the layout of the bottom acoustic scattering measurement equipment<sup>[50]</sup>

## 2.2 中频海底声散射测量

受到海底声散射测量技术的限制,国内外关于中频海底声散射测量实验较少。Holland 等<sup>[51]</sup>提出了一种直接路径浅水海底声散射测量技术,采用组合声源和垂直换能器阵列的海底反向散射强度进行了测量,实验频段为 400~4 000 Hz 频段。

Hines 等<sup>[52]</sup>开发了一套宽带主动声呐海底声散射测量系统,对砂质沉积物进行了小掠射角(3°~15°)海底反向散射强度测量,测量频率为 4 和 8 kHz。该系统主要由 9 元参量发射阵、超指向性线阵、声强接收机等部分组成。其中,超指向性线阵由间距为 0.16 m 的 6 个小型全向性水听器组成。

在小型中频声散射测量实验上,Hyongsul La 等<sup>[53]</sup>对韩国南部海岸粉质沉积物进行了小掠射角(6°~11°)海底反向散射强度全向性声学测量,测量频率为 8 kHz。Soukup 等<sup>[54]</sup>采用线性声源阵和垂直接收阵(9 个基元组成)对海底石灰岩区域开展了全向性反向散射强度测量实验,实验频段为 2~3.5 kHz。Kunz 等<sup>[55]</sup>对苏格兰西部海域 18 个站点进行了 2~5 kHz 的海底反向散射强度测量。

## 3 海底声散射实验结果分析

### 3.1 高频海底声散射实验分析

自 20 世纪 50 年代开始,国内外多次开展高频海底声散射测量实验,积累了丰富的海底散射测量数据,表 1 列出了一些具有代表性的高频声散射测量实验。McKinney 等<sup>[56]</sup>对 16 个不同类型沉积物(从泥质到岩石)海底站点的反向散射强度测量实验结果做了综合分析,实验频段范围为 12.5~290 kHz,掠射角范围为 30°~85°,该实验结果成为后来普遍公认的海底反向散射特性规律:1)海底反向散射平均散射强度值从泥到沙、砾石和岩石不断增加,2)海底反向散射强度依赖于粒径和界面粗糙度,3)海底反向散射强度总体上随着掠射角的增大而增大。而在频率依赖性上,实验结果表明几种砂质沉积物的平均散射强度按  $f^n$  随频率变化,但对于细砂质和岩石沉积物则没有发现明确的频率依赖性。

Jackson 等<sup>[40]</sup>及 Williams 等<sup>[57]</sup>在海底声散射特性研究方面开展了大量的测量实验,并得出了具有代表性的分析结果。Jackson 等<sup>[40]</sup>对 5 个不同类型沉积物(从泥质到砾石)海底站点的海底反向散射测量结果做了综合分析,实验频段范围为 20~85 kHz,掠射角范围为 0°~85°,结果表明:海底反向散射强度有轻微的频率依赖性,散射强度随着掠射角的减小而降低;当掠射角大于 70°时没有很强的频率依赖性。Williams 等<sup>[57]</sup>分别对 SAX99 和 SAX04

实验中海底反向散射强度测量进行了分析和对比(在 SAX99 中,掠射角范围为  $40^\circ \sim 70^\circ$ ,频段范围为  $10 \sim 500$  kHz,底质主要为砂质;在 SAX04 中,掠射角范围为  $40^\circ \sim 70^\circ$ ,频段范围为  $20 \sim 500$  kHz,底质主要为泥砂混合层),结果显示:对于 SAX99 实验中的砂质海底,在  $20 \sim 150$  kHz 频率、掠射角小于  $45^\circ$  时的声散射由界面粗糙散射引起,而在 SAX04 实验中的泥砂混合层海底则主要以体积散射为主;2 种不同底质类型海底声散射都表现出了一定的频率和掠射角依赖性。此外, Jackson 等<sup>[21,45]</sup>对多次实验进行了综合分析,研究结果表明:除较小(小于临界掠射角)和较大(在垂直入射附近)的掠射角外,对于泥质海底,体积散射是主要的散射机制;对于中等粒度砂和粗砂质海底,界面粗糙散射在较宽掠射角范围内为主要散射机制;对于大多数不同底质类型的海底,在垂直入射附近角度,界面粗糙散射为主要散射机制。

表 1 高频段不同掠射角下海底散射测量研究总结

Table 1 Summary of bottom scattering measurement at different grazing angles in high frequency bands

底质主成分	频段/kHz	掠射角/ $(^\circ)$	实验时间
从泥质到岩石 <sup>[56]</sup>	12.5~290	30~85	1964 年
细砾石 <sup>[40]</sup>	20~45	40~80	1986 年
中粒砂 <sup>[40]</sup>	20~48	45~80	
细粒砂 <sup>[40]</sup>	20~48	0~80	
粉砂 <sup>[40]</sup> 泥质 <sup>[40]</sup>	20~85	20~75	
粗砂、贝壳碎片 <sup>[60]</sup>	20~180	$5^\circ \sim 30^\circ$	1989 年
砂质 <sup>[59]</sup>	40	5~20	1994 年
含气泡层粉砂质 <sup>[59]</sup>			1999/2004 年
砂质 <sup>[57]</sup>	10~500	40~70	
泥砂混合层 <sup>[57]</sup>	30~500		2015 年
砂质 <sup>[58]</sup>	170~250	45	
砾石 <sup>[58]</sup>	35~450		2018 年
粗砂 <sup>[58]</sup>	45~450	0~70	
砾石、泥质 <sup>[47]</sup>	90~450		
粉砂 <sup>[47]</sup> 泥质 <sup>[47]</sup>	90~450		

近年来,有相关学者利用单波束回声测深仪对不同沉积物海底开展了宽带声散射测量并进行了分析。Weber 等<sup>[58]</sup>分析了掠射角为  $45^\circ$  附近砂质和砾石海底反向散射强度,结果表明:在  $170 \sim 250$  kHz 频段范围内,反向散射强度随频率呈下降趋势。Ridha 等<sup>[47]</sup>分析了 4 种沉积物类型在不同频段下的海底反向散射强度测量结果,表明 4 种不同沉积物类型的海底反向散射强度均具有频率和掠射角依赖性,但在不同频段范围、不同掠射角范围内的反向散射强度变化速率不同。

对于掩埋贝壳碎片或气泡等离散体的海底声散射测量,相关学者也开展了相关实验并作出了分析。Tang 等<sup>[59]</sup>在 40 kHz 下对砂质海底与含气泡层粉砂质海底的反向散射强度进行了对比分析(掠射角范围为  $5^\circ \sim 20^\circ$ ),结果表明:在砂质海底形成的声散射中,界面粗糙散射为主要散射机制;而在含气泡层的粉砂质海底形成的声散射中,由于气泡层对声波的影响,则以体积散射为主要散射机制,在相同频率下,含气泡层粉砂质海底反向散射强度要大于砂质沉积物。Stanic 等<sup>[60]</sup>分析了覆盖或部分掩埋贝壳碎片的粗砂质的海底声学反向散射数据,其掠射角范围为  $5^\circ \sim 30^\circ$ 、频段为  $20 \sim 180$  kHz。结果显示:该底质下的反向散射强度遵循 Lambert 定律,并由有轻微的负频率依赖性。掩埋贝壳碎片或含有气泡等离散体沉积物的声散射测量及分析是海底声散射特性研究中的重要组成部分,但目前开展相关实验较少,在频率和掠射角依赖性及机理分析方面仍有较大的数据空白。

### 3.2 中频海底声散射实验分析

相较于高频段,国内外对中频海底声散射实验测量起步较晚,且主要以不同底质类型海底散射强度的掠射角和频率依赖性研究为主。表 2 列出了一些具有代表性的中频声学散射实验。

表 2 中频段不同掠射角下海底散射测量研究总结

Table 2 Summary of bottom scattering measurement at different grazing angles in middle frequency bands

底质主成分	频段/kHz	掠射角/ $(^\circ)$	实验时间
石灰岩 <sup>[54]</sup>	2~3.5	8~75	1996 年
砂质 <sup>[61]</sup>	5.5	6~90	2000 年
泥质 <sup>[62]</sup>	0.4~4	0~45	2000 年
岩浆岩 <sup>[62]</sup>	4,8	3~15	2005 年
砂质 <sup>[52]</sup>	8	6~31	2010 年
粉砂 <sup>[53]</sup>	6~24	20~70	2018 年
砂质 <sup>[50]</sup> 泥质 <sup>[50]</sup>			

Soukup 等<sup>[54]</sup>分析了掠射角范围为  $8^\circ \sim 75^\circ$ 、频段  $2 \sim 3.5$  kHz 的石灰岩海底反向散射强度的掠射角依赖性,并与散射模型进行了对比,结果显示:海底反向散射强度随掠射角增大而增大,但在局部掠射角区间变化速率不同,与散射模型表现一致。Ohkawa 等<sup>[61]</sup>分析了 5.5 kHz 下砂质海底在掠射角范围为  $8^\circ \sim 75^\circ$  下的海底反向散射数据,结果表明:海底反向散射强度随掠射角增大而增大,但存在一个临界掠射角,使得在低于临界角时以界面粗糙散射为主,而在大于临界角时以体积散射为主。Holland 等<sup>[62]</sup>对掠射角范围为  $0^\circ \sim 45^\circ$ 、 $0.4 \sim 4$  kHz 频段内泥浆和岩浆岩海底的反向散射强度进行了分

析,结果表面:在测量频段内岩浆岩的反向散射强度要大于泥质海底,且泥质和岩浆岩海底反向散射强度具有频率和掠射角依赖性;同时证明了层状结构的海底散射是明显的。Hines 等<sup>[52]</sup>在 4 和 8 kHz 下进行了小掠射角的海底反向散射实验数据分析,并指出砂质沉积物的反向散射强度在掠射角范围为  $3^{\circ} \sim 15^{\circ}$  的区间内为  $-50 \sim -20$  dB,说明了反向散射强度随着掠射角的增加而增加。Hyongsul 等<sup>[53]</sup>分析了小掠射角下 ( $6^{\circ} \sim 11^{\circ}$ ) 韩国南部海岸粉质沉积物 8 kHz 海底声学反向散射的测量数据,分析表明该区域粉砂质沉积物反向散射中体积散射为主要散射机制,且粉砂沉积物的反向散射强度随频率的增加而增加。

在国内,于盛齐等<sup>[50]</sup>对细砂质和泥质海底开展了频段为 6~24 kHz、掠射角为  $20^{\circ} \sim 70^{\circ}$  的海底反向散射强度测量实验,结果表明:对于砂质沉积物,海底反向散射强度随掠射角的增加而增加,在大掠射角下增长速率较大,且海底反向散射强度对频率增加略有增强;对于泥浆质沉积物,海底反向散射强度随频率的增加有所减小,且界面粗糙散射在低频时占主导地位,而随着频率的增加,体积散射在大掠射角下逐渐成为主要的散射机制。

## 4 结论

1) 海底声散射模型研究方面,大多研究人为地将界面粗糙散射模型和体积散射模型单独考虑,忽略了两者的相互联系。相较于小粗糙度微扰近似、Kirchhoff 近似和复合粗糙度近似模型,小斜率近似法在覆盖掠射角范围以及精度上都体现出一定的优越性而被更多地应用于界面粗糙散射模型研究。体积散射模型主要采用微扰理论并结合相应海底半空间介质声学模型进行研究。

2) 在海底声散射测量实验方面,传统的海底声散射测量实验大多数采用收发合置或分置的源-接收器(阵),近些年,有相关研究人员采用校正的多/单波束回声测深仪器进行海底声散射测量,但主要用于高频段测量。相较于高频,受到测量技术的限制,中频声散射实验开展较少。

3) 在海底声散射实验结果分析方面,高频上,研究人员通过对大量测量数据的综合分析得出了一些普遍公认的结论。而对于掩埋贝壳碎片或气泡等离散体沉积物的散射研究以及中频海底声散射研究则开展实验较少,仍需进一步开展相关实验来弥补当前数据空白。

进一步地,本文整理出海底声散射研究存在的关键问题及发展方向:

1) 界面粗糙散射和体积散射的关系。

海底声散射是一个特别复杂的过程,不同频段的声波穿透粗糙界面的深度不同,从而在沉积物中产生不同的声场。因此,如何在不同条件下准确区分界面粗糙散射和体积散射是一个尚未解决的问题,尤其是沉积层垂直起伏在某种程度上跟随海水-沉积物界面起伏时,很难划分界面粗糙散射和体积散射。同时,在构建散射模型时,如何合理处理界面粗糙散射和体积散射之间的关系也是当前研究的一大难点。

2) 双基地海底声散射特性研究。

目前开展的海底声散射实验大多采用单基地声呐来进行小范围内海底反向散射强度测量。相比与单基地测量,双基地测量可实现大范围内海底前向散射强度的测量,且能有效降低散射测量频率,对海底声场结构分析、海底混响建模与预报等具有十分重要的意义。同时,研究双基地海底前向散射机理,揭示前向散射强度的频率、掠射角和方位角依赖性,分析海底环境对前向散射强度的影响以及构建双基地海底散射模型等基础研究也将成为迫切的研究需求。

3) 海底中频及宽掠射角声散射模型研究。

相对于高频海底声散射,中频声散射在散射机理分析、实验测量和模型构建方面的研究均比较匮乏。而在实际应用中,水声通信、掩埋目标探测和反潜声呐等大多工作中频。因此,迫切需要加强对海底中频声散射特性的研究,并构建中频及宽掠射角声散射预测模型来满足水下攻防等应用需求。

4) 分层海底声散射模型研究。

实际海底结构十分复杂,在部分区域存在海底分层结构,当前的海底声散射模型通常将海底视为单层半无限空间介质进行处理。因此,研究分层海底声散射机制,并构建分层海底声散射模型将是海底声散射特性研究的另一个重要方向。

## 参考文献:

- [1] LIU Jiheng, ZHOU Zemin, ZENG Xinwu. Multi-static active sonar target recognition method based on bionic signal [C]//2019 IEEE 2nd International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP). Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 285-289.
- [2] JACKSON D R, RICHARDSON. High-frequency seafloor acoustics[M]. New York: Springer, 2007.
- [3] URICK R J. The backscattering of sound from a harbor bottom[J]. The acoustical society of America journal, 1954, 26(2): 231.
- [4] 邹博. 基于后向声散射模型的海底沉积物参数反演方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.  
ZOU Bo. Study on inversion method of bottom sediment parameters based on backscattering model[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [5] BRIGGS K B, WILLIAMS K L, RICHARDSON M D, et al.

- Scattering of high-frequency acoustic energy from discrete scatterers on the seafloor: glass spheres and shells[C]//Conference Paper, 1999.
- [6] MATTHEW C. Preliminary investigation into temporal changes in acoustic scattering from the seafloor[D]. University of New Hampshire, 2021.
- [7] IVAKIN A N. A unified approach to volume and roughness scattering[J]. The journal of the acoustical society of America, 1998, 103(2): 827-837.
- [8] 杨玉春. 基于 Jackson 模型的高频海底散射研究[J]. 声学与电子工程, 2015(4): 33-36.  
YANG Yuchun. Study on high frequency bottom scattering based on Jackson model[J]. Acoustics and electronics engineering, 2015(4): 33-36.
- [9] MASHKOOR M. Estimation of measurement uncertainty of seafloor acoustic backscatter[D]. Durham; University of New Hampshire, 2019.
- [10] KUO E Y T. Wave scattering and transmission at irregular surfaces[J]. The journal of the acoustical society of America, 1964, 36(11): 2135-2142.
- [11] MARSH H W. Sound reflection and scattering from the sea surface[J]. The journal of the acoustical society of America, 1963, 35(2): 240-244.
- [12] JACKSON D R, IVAKIN A N. Scattering from elastic sea beds: first-order theory[J]. The journal of the acoustical society of America, 1998, 103(1): 336-345.
- [13] DACOL D K, BENNAN D H. Sound scattering from a randomly rough fluid-solid interface[J]. The journal of the acoustical society of America, 1987, 82(S1): S123-S124.
- [14] WILLIAMS K L, GROCHOCINSKI J M, JACKSON D R. Interface scattering by poroelastic seafloors: first-order theory[J]. Acoustical society of America journal, 2001, 110(6): 2956-2963.
- [15] KUPERMAN W A, SCHMIDT H. Rough surface elastic wave scattering in a horizontally stratified ocean[J]. The journal of the acoustical society of America, 1986, 79(6): 1767-1777.
- [16] ESSEN H H. Scattering from a rough sedimental seafloor containing shear and layering[J]. The journal of the acoustical society of America, 1994, 95(3): 1299-1310.
- [17] 刘保华, 阚光明, 裴彦良, 等. 海底声散射特性研究进展[J]. 海洋学报, 2017, 39(7): 1-11.  
LIU Baohua, KAN Guangming, PEI Yanliang, et al. A review on the progress of bottom acoustic scattering research[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(7): 1-11.
- [18] THORSOS E I. The validity of the Kirchhoff approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum[J]. The journal of the acoustical society of America, 1988, 83(1): 78-92.
- [19] MOURAD P D, JACKSON D R. High frequency sonar equation models for bottom backscatter and forward loss [C]//Proceedings OCEANS. Piscataway, NJ: IEEE, 1989: 1168-1175.
- [20] WILLIAMS K, JACKSON D. Bistatic bottom scattering: model, experiments, and model/data comparison[J]. Journal of the acoustical society of America, 1998, 103: 169-181.
- [21] JACKSON D R, WINEBRENNER D P, ISHIMARU A. Application of the composite roughness model to high-frequency bottom backscattering[J]. The journal of the acoustical society of America, 1986, 79(5): 1410-1422.
- [22] DACOL D K. The Kirchhoff approximation for acoustic scattering from a rough fluid-elastic solid interface[J]. The journal of the acoustical society of America, 1990, 88(2): 978-983.
- [23] THORSOS E I, JACKSON D R. Thirty years of progress in theory and modeling of sea surface and bottom scattering[C]//AIP Conference Proceedings. AIP, 2012.
- [24] BROSCHEAT S L, THORSOS E I. An investigation of the small slope approximation for scattering from rough surfaces. Part II. Numerical studies[J]. The journal of the acoustical society of America, 1997, 101(5): 2615-2625.
- [25] GRAGG R F, WURMSER D, GAUSS R C. Small-slope scattering from rough elastic ocean floors: general theory and computational algorithm[J]. The journal of the acoustical society of America, 2001, 110(6): 2878-2901.
- [26] SOUKUP R J, CANEPA G, SIMPSON H J, et al. Small-slope simulation of acoustic backscatter from a physical model of an elastic ocean bottom[J]. The journal of the acoustical society of America, 2007, 122(5): 2551-2559.
- [27] JACKSON D, OLSON D R. The small-slope approximation for layered, fluid seafloors[J]. The journal of the acoustical society of America, 2020, 147(1): 56.
- [28] YANG Taiqian, BROSCHEAT S L, GALEA C. A comparison of perturbation theory and the small-slope approximation for acoustic scattering from a rough interface for a Biot medium[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 2002, 27(3): 403-412.
- [29] OLSON D R, JACKSON D. Scattering from layered seafloors: comparisons between theory and integral equations[J]. The journal of the acoustical society of America, 2020, 148(4): 2086.
- [30] MCDANIEL S T, GORMAN A D. An examination of the composite-roughness scattering model[J]. The journal of the acoustical society of America, 1983, 73(5): 1476-1486.
- [31] NOVARINI J C, CARUTHERS J W. The partition wavenumber in acoustic backscattering from a two-scale rough surface described by a power-law spectrum[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 1994, 19(2): 200-207.
- [32] 彭朝晖, 周纪浚, 张仁和. 非均匀海底和粗糙界面引起的平面内海底散射[J]. 中国科学 G 辑: 物理学、力学、天文学, 2004, 34(4): 378-391.  
PENG Chaohui, ZHOU Jixun, ZHANG Renhe. In-plane bottom scattering caused by uneven bottom and rough interface[J]. Science in China (series G), 2004, 34(4): 378-391.
- [33] 侯倩男, 吴金荣. 浅海小掠射角的海底界面声反向散射模型的简化[J]. 物理学报, 2019, 68(4): 238-246.  
HOU Qiannan, WU Jinrong. Simplification of roughness bottom backscattering model at small grazing angle in shallow water[J]. Acta physica sinica, 2019, 68(4): 238-246.
- [34] JACKSON D R, ODOM R I, BOYD M L, et al. A geoacoustic bottom interaction model (GABIM)[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 2010, 35(3): 603-617.
- [35] WEIDNER E, WEBER T C. An acoustic scattering model for stratification interfaces[J]. The journal of the acoustical society of America, 2021, 150(6): 4353.
- [36] STOCKHAUSEN J H. Scattering from the volume of an inhomogeneous half-space[J]. The journal of the acoustical society of America, 1963, 35(11\_Supplement): 1893.

- [37] IVAKIN A. Sound scattering by inhomogeneities of an elastic half-space [J]. *Soviet physics acoustics*, 1990, 36: 377-380.
- [38] HINES P C. Theoretical model of in-plane scatter from a smooth sediment bottom [J]. *The journal of the acoustical society of America*, 1996, 99(2): 836-844.
- [39] BARRY W, JACKSON D, SCHULTZ J. A flexible towed sonar for ocean acoustic measurements [C]//ICASSP 78. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Piscataway, NJ: IEEE, 2003: 152-154.
- [40] JACKSON D R, BAIRD A M, CRISP J J, et al. High-frequency bottom backscatter measurements in shallow water [J]. *The journal of the acoustical society of America*, 1986, 80(4): 1188-1199.
- [41] STANIC S, BRIGGS K B, FLEISCHER P, et al. Shallow-water high-frequency bottom scattering off Panama City, Florida [J]. *The journal of the acoustical society of America*, 1988, 83(6): 2134-2144.
- [42] THORSOS E I, WILLIAMS K L, CHOTIROS N P, et al. An overview of SAX99: acoustic measurements [J]. *IEEE journal of oceanic engineering*, 2001, 26(1): 4-25.
- [43] THORSOS E I, WILLIAMS K L, TANG Dajun, et al. The sediment acoustics experiment in 2004 (SAX04) [J]. *The journal of the acoustical society of America*, 2006, 120(5\_Supplement): 3096.
- [44] BOEHME H, CHOTIROS N P. Acoustic backscattering at low grazing angles from the ocean bottom [J]. *The journal of the acoustical society of America*, 1988, 84(3): 1018-1029.
- [45] JACKSON D R, BRIGGS K B. High-frequency bottom backscattering: roughness versus sediment volume scattering [J]. *Acoustical society of America journal*, 1992, 92(2): 962-977.
- [46] ELEFTHERAKIS D, BERGER L, LE BOUFFANT N, et al. Backscatter calibration of high-frequency multibeam echosounder using a reference single-beam system, on natural seafloor [J]. *Marine geophysical research*, 2018, 39(1): 55-73.
- [47] FEZZANI R, BERGER L, LE BOUFFANT N, et al. Multispectral and multiangle measurements of acoustic bottom backscatter acquired with a tilted calibrated echosounder [J]. *The journal of the acoustical society of America*, 2021, 149(6): 4503.
- [48] 金国亮, 吴承义, 张国华, 等. 浅海二维海底散射系数的测量 [J]. *声学学报*, 1987, 12(3): 227-231.  
JIN Guoliang, WU Chengyi, ZHANG Guohua, et al. The measurement of two-dimensional bottom backscattering coefficients at shallow water [J]. *Acta acustica*, 1987, 12(3): 227-231.
- [49] 张明辉. 海底声散射强度测量方法及不规则海域混响特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.  
ZHANG Minghui. Research on bottom sound scattering strength measurement method and reverberation properties in irregular sea area [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [50] YU Shengqi, LIU Baohua, YU Kaiben, et al. Comparison of acoustic backscattering from a sand and a mud bottom in the South Yellow Sea of China [J]. *Ocean engineering*, 2020, 202: 107145.
- [51] HOLLAND C W, HOLLETT R, TROIANO L. Measurement technique for bottom scattering in shallow water [J]. *The journal of the acoustical society of America*, 2000, 108(3): 997-1011.
- [52] HINES P C, OSLER J C, MACDOUGALD D J. Acoustic backscatter measurements from littoral bottoms at shallow grazing angles at 4 and 8 kHz [J]. *The journal of the acoustical society of America*, 2005, 117(6): 3504-3516.
- [53] LA H, CHOI J W. 8-kHz bottom backscattering measurements at low grazing angles in shallow water [J]. *The journal of the acoustical society of America*, 2010, 127(4): EL160-EL165.
- [54] SOUKUP R J, GRAGG R F. Backscatter from a limestone seafloor at 2~3.5 kHz: measurements and modeling [J]. *The journal of the acoustical society of America*, 2003, 113(5): 2501-2514.
- [55] KUNZ E L, GAUSS R C. Bottom backscattering strengths measured at 2~5 kHz in shallow water west of Scotland [C]//*Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE*. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 1745-1749.
- [56] MCKINNEY C M. Measurements of backscattering of sound from the ocean bottom [J]. *Acoustical society of America journal*, 1964, 36(1): 158.
- [57] WILLIAMS K L, JACKSON D R, TANG Dajun, et al. Acoustic backscattering from a sand and a sand/mud environment: experiments and data/model comparisons [J]. *IEEE journal of oceanic engineering*, 2009, 34(4): 388-398.
- [58] WEBER T C, WARD L G. Observations of backscatter from sand and gravel seafloors between 170 and 250 kHz [J]. *The journal of the acoustical society of America*, 2015, 138(4): 2169-2180.
- [59] TANG Dajun, JIN Guoliang, JACKSON D R, et al. Analyses of high-frequency bottom and subbottom backscattering for two distinct shallow water environments [J]. *The journal of the acoustical society of America*, 1994, 96(5): 2930-2936.
- [60] STANIC S, BRIGGS K B, FLEISCHER P, et al. High-frequency acoustic backscattering from a coarse shell ocean bottom [J]. *The journal of the acoustical society of America*, 1989, 85(1): 125-136.
- [61] OHKAWA K, YAMAOKA H, YAMAMOTO T. Acoustic backscattering from a sandy bottom [J]. *IEEE journal of oceanic engineering*, 2005, 30(4): 700-708.
- [62] HOLLAND C W. Coupled scattering and reflection measurements in shallow water [J]. *IEEE journal of oceanic engineering*, 2002, 27(3): 454-470.

### 本文引用格式:

郑毅, 秦志亮, 于盛齐, 等. 海底声散射特性进展及展望 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2024, 45(4): 748-757.  
ZHENG Yi, QIN Zhiliang, YU Shengqi, et al. Progress with regard to research on bottom acoustic scattering properties and associated future prospects [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2024, 45(4): 748-757.