

开阔水域条件下界面反射对声源体积速度计算的影响估计

许稼航, 康鲁迪, 刘碧龙

青岛理工大学机械与汽车工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2024年10月30日; 录用日期: 2024年11月26日; 发布日期: 2024年12月6日

摘要

采用互易方法测量声源到测点传递函数的过程中需要测定声源体积速度, 而体积速度的测量会受到环境混响的影响。针对典型的混响环境, 文中通过数值仿真方法分别探究混响水池、湖中心环境、弧形码头环境、含远距离反射面的码头环境等全混响和部分混响条件下混响声和直达声的关系, 并给出声源与测点相对位置变化对混响声影响声源体积速度的规律。数值结果表明: 在10 Hz~1000 Hz的频率范围内, 全反射界面条件下混响声对声源体积速度估计的影响不能忽略; 在部分反射边界条件下, 测点距离声源一定范围内误差小于2 dB, 对声源体积速度的测定影响较小, 而当测点距离声源超过x m时, 误差超过X dB, 此时, 混响对声源体积速度估计的影响也不容忽视。

关键词

互易原理, 声源体积速度, 混响声场, 混响半径

Estimation of the Influence of Interfacial Reflection on Volume Velocity Calculation of Sound Source in Open Water

Jiahang Xu, Ludi Kang, Bilong Liu

School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong

Received: Oct. 30th, 2024; accepted: Nov. 26th, 2024; published: Dec. 6th, 2024

Abstract

It is necessary to measure the volume velocity of the sound source in the process of measuring the transfer function from the sound source to the measuring point by the reciprocity method, and the

measurement of volume velocity is affected by environmental reverberation. In view of the typical reverberation environment, the relationship between reverberation sound and direct sound under full and partial reverberation conditions such as reverberation pool, lake center environment, curved dock environment, and dock environment with long-distance reflector surface is studied by numerical simulation method. The trend law of the influence of the relative position of the sound source and the hydrophone on the volume velocity of the sound source is given. The numerical results show that in the frequency range of 10 Hz~1000 Hz, the influence of reverberation on volume velocity estimation of the sound source can not be ignored under the condition of total reflection interface. Under partial reflection boundary conditions, the error within a certain range of the measuring point distance from the sound source is less than 2 dB, which has little influence on the measurement of the volume velocity of the sound source. When the error exceeds X dB, and the distance from the measuring point distance from the sound source exceeds x m, the influence of reverberation on the estimation of the volume velocity of the sound source cannot be ignored.

Keywords

Reciprocity Principle, Acoustical Source Volume Velocity, Reverberant Field, Reverberation Radius

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

互易测试方法是一种基于互易原理的工程应用,广泛用于声学 and 振动测量中。互易原理指出,如果在位置 A 发出的信号能够在位置 B 产生某种效果,那么从位置 B 发出的相同信号也会在位置 A 产生相同的效果。最早在 1860 年, Helmholtz [1]提出了声场中的互易性理论,随后 Rayleigh [2]扩展了这一理论,使其适用于非保守振动系统中的谐波振动。随着理论的发展, Wolde [3]将互易原理应用于传递函数的测量,徐荣武[4]则在全消声水池中利用力-声互易法进行了力-声传递函数的测量研究。张森林[5]提出了三维频域声散射的等几何双重互易边界元法。程果[6]进一步提出了一种结合空间平均的互易测试方法,并通过实验验证了其在实际应用中的可行性和有效性。

互易测试方法的关键在于精确测定声源的体积速度,而传统方法通常通过测量声源辐射的声压级,并借助公式计算出体积速度。然而,在复杂的混响环境中,声压测量容易受到反射声的干扰,影响测量精度[7]。尤其在复杂的水下环境中,如何减少混响声的干扰成为一个重要的技术挑战[8]。目前,针对混响声场的修正方法主要分为三类:(1) 尚大晶等[9]通过空间平均消除简正波干涉,并利用平均后的声压谱测量水下复杂声源的源强。唐锐等[10]提出了一种基于声场精细校准的低频扩展技术,拓宽了混响法在低频段的应用范围。殷丽君等[11]通过噪声平均强度相减的方法修正了混响噪声,减少了测量误差,但该方法需要大量测试数据,操作较为复杂。(2) 声全息法: Hald [12]提出了基于 SONAH 的声场分离技术,用于反射环境下的声场重建。毕传兴等[13]提出了一种基于等效源法的双测量面声场分离技术,张小正等[14]通过模拟边界反射,开发了一种基于有限空间等效源的近场声全息法。这种方法能够一次性获取声源的振动分布和声强分布等信息,但对实验条件要求较高,操作复杂。(3) 深度学习法: Niu 等[15]提出了一种基于深度转移学习的水下声源定位方法,利用历史数据生成复制的声场数据,通过训练预设的 CNN 模型并使用少量实际海上数据调整模型参数。冷翰[16]等人基于深度学习,探索了减少实验设备复杂度并缩短测量时间的方法。刁威宇[17]进一步基于神经网络做出改进。然而,深度学习方法需要大量数据来进

行训练, 且其对环境的适应性相对较差。

在互易测试中, 体积速度的修正通常需要引入房间常数。房间常数的计算通常依赖于封闭空间中的混响时间, 混响时间由空间体积、表面吸声系数以及边界条件决定。然而, 湖泊等开阔水域属于部分混响环境, 难以准确计算出具有指导意义的房间常数, 因而无法通过公式对声源体积速度进行有效修正。本文通过有限元计算, 总结了混响水池、湖中心环境、弧形码头环境及含远距离反射面的码头环境等典型环境中混响声的影响规律, 为互易测试实验提供理论指导。

2. 基本理论

2.1. 互易原理

互易原理揭示了线性时不变弹性系统中振动与声传递的互易关系, 即在系统中某一点 A 处施加的激励, 与该激励在系统另一点 B 处产生的响应之比, 等于在 A 处施加的激励与其在 B 处产生的响应之比。因此经典的声学互易关系如式[18]:

$$\left(\frac{P_2}{Q_1}\right)_{Q_2=0} = \left(\frac{P_1}{Q_2}\right)_{Q_1=0} \quad (1)$$

表示位置 1 处的声源在位置 2 处产生的声压 P_2 与其体积速度 Q_1 之比等于位置 2 处的声源在位置 1 处产生的声压 P_1 与其体积速度 Q_2 之比。这一互易关系, 在不同的应用场合, 有不同的表达形式。在水下振动监测等实际应用中, 往往使用的是式(2) [19]:

$$\left(\frac{P_2}{F_1}\right)_{Q_2=0} = \left(\frac{v_1}{Q_2}\right)_{F_1=0} \quad (2)$$

表示保持周围环境不变, 在水下结构物上的某激励力 F_2 的作用下, 在远场某点产生的声压 P_2 与该激励力比值等于远场某一点声源在结构上该点产生的振速 v_1 与声源体积速度 Q_2 的比值。

2.2. 声源体积速度

式(2)中的声压 p 、激励力 F 和振速 v 都可以直接测得, 而体积速度 Q 需要单独计算。已知功率的水下声源可以直接计算其体积速度, 如果功率未知, 则需要用以下公式来计算体积速度[20]:

$$Q(f) = \frac{2r(1+jkd)}{f\rho_0} P(r, f) \quad (3)$$

式中: $Q(f)$ 为声源在频率为 f 时的体积速度, j 为虚数, k 为波数, d 为水下声源发声半径, $p(r, f)$ 为与声源距离为 r 处, 频率为 f 时的自由声场响应声压, ρ_0 为介质密度。当水下声源体积较小且只考虑低频时, 式(3)也可以简化为[21]:

$$Q(f) = \frac{2r}{f\rho_0} P(r, f) \quad (4)$$

然而, 上述公式中的声压值是基于自由场环境中的测量值。混响声场会影响平均声能密度, 从而使公式(3)中的 $p(r, f)$ 值偏大, 这导致计算得到的体积速度高于实际的体积速度。

2.3. 全混响声场条件下的声源体积速度修正公式

在扩散声场的条件下, 若测量点距离声源的距离为 r , 则在混响声场中与在自由声场中测得的声压之间有如下关系[6]:

$$p_h^2 = W \rho_0 c_0 \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) = \left(1 + \frac{16\pi r^2}{R} \right) p_z^2 \quad (5)$$

其中, W 为声源的平均辐射功率, ρ_0 为空间介质的密度, c_0 为空间介质内的声速, R 为房间常数[22]。

$$R = \frac{S\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}} \quad (6)$$

房间常数随空间位置变化, 描述了在边界尺寸和吸声系数不变的条件下, 某一位置处混响声能与直达声能的比例。 R 越大, 混响声能与直达声能的比值越小。

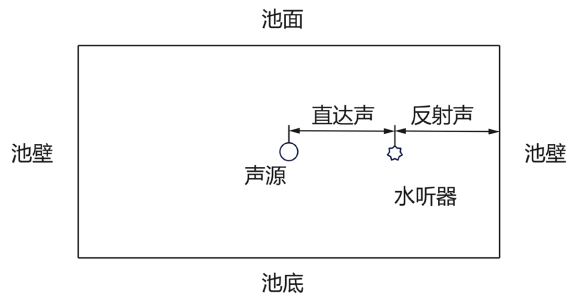


Figure 1. Schematic diagram of reverberation pool
图 1. 混响水池示意图

声源的体积速度是通过测量声源附近的声压, 并根据公式(3)计算得到的, 这也会受到混响声场的影响。根据公式(5), 混响声场会影响平均声能密度, 导致公式(3)中的 $p(r, f)$ 值偏大, 从而使得计算出的体积速度大于实际的体积速度, 将公式(5)代入公式(3)即可得到混响条件下的声源体积速度公式(7)。

$$Q_h = \frac{2r}{\rho_0 f} p_h = \sqrt{1 + \frac{16\pi r^2}{R}} Q_z \quad (7)$$

需要注意的是, 公式(7)适用于全混响环境, 如图 1 混响水池所示, 然而, 在湖泊、海洋等部分混响环境中, 房间常数难以获得, 且误差较大。导致无法使用该方法对声源体积速度进行修正。因此, 下一步的工作将通过仿真进一步深入研究这一问题, 探索不同典型混响环境下的具体影响。

3. 开阔水域典型混响声场仿真

本文通过 Comsol 建立有限元模型, 主要探讨湖中心环境、弧形码头环境以及含远距离反射面的码头环境等典型部分混响场条件下, 反射声与直达声叠加形成的总声压级与自由声场中仅包含直达声的声压级对比关系。为了进行对比, 本文还考虑了混响水池中该关系的模拟分析。

全混响声场和半混响声场的尺寸如图 2、图 4、图 6 和图 8 所示。流体域的介质密度 ρ_0 为 $1000 \text{ Kg} / \text{m}^3$, 声速 c_0 为 $1500 \text{ m} / \text{s}$ 。在测量位置靠近反射面的情况下, 设置硬声场边界以反射声波; 当测量位置远离反射面时, 添加完美匹配层(PML)以模拟近似无反射的边界。声源为半径 0.1 m 的脉动球源, 以法向速度 $v=1.55 \times 10^{-2} \text{ m} / \text{s}$ 进行收缩和膨胀运动, 工作频率设置在 $10 \sim 1000 \text{ Hz}$ 范围内。水域部分采用自由四面体网格, 完美匹配层使用扫掠网格。

在混响声场中, 反射声与直达声叠加形成的总声压级与自由声场中仅包含直达声的声压级之间的差值 ΔL_p 定义为:

$$\Delta L_p = 20 \log_{10} \frac{P_h}{P_z} \quad (8)$$

3.1. 混响水池

图 2 展示了一个混响水池模型，该模型尺寸为长 30 米、宽 20 米、高 15 米的长方体。声源位于模型的中央，水听器与声源之间的距离分别为 0.5 米、1 米、2 米、3 米、4 米和 5 米。模型的六个面作为声学边界，均设置为硬声场边界，其他设置与前述条件相同。

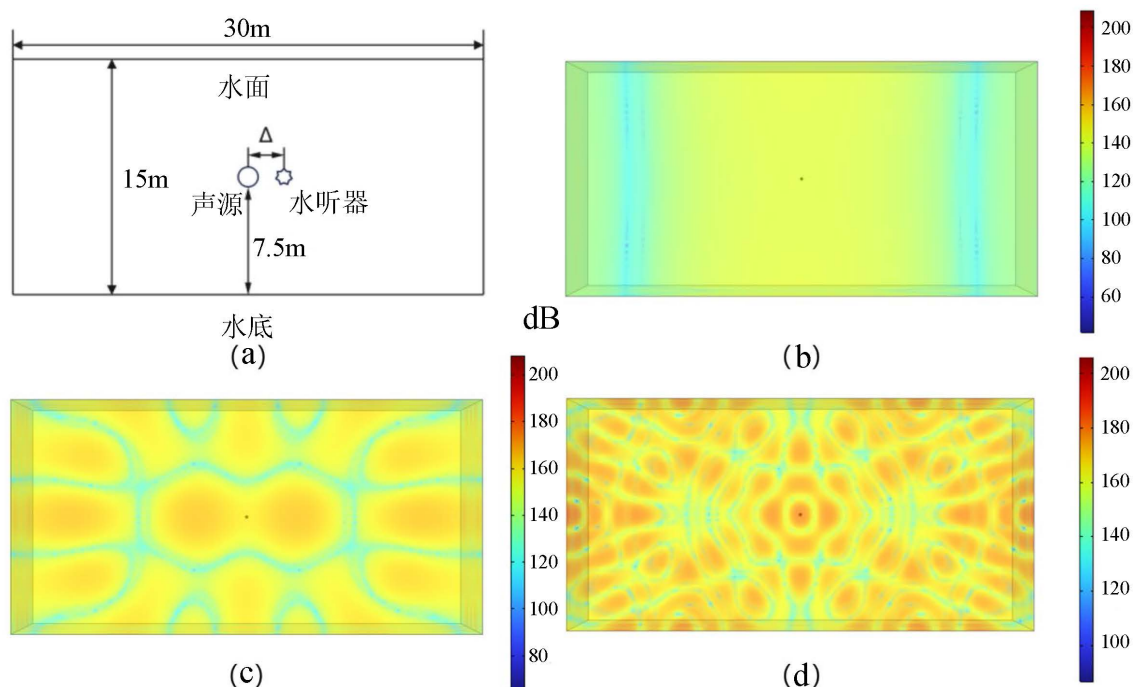


Figure 2. Reverberation pool model simulated by Comsol: (a) model diagram; (b) 63 Hz sound field cloud image; (c) 250 Hz sound field cloud image; (d) 500 Hz sound field cloud image

图 2. Comsol 模拟的混响水池模型: (a) 模型示意图; (b) 63 Hz 声场云图; (c) 250 Hz 声场云图; (d) 500 Hz 声场云图

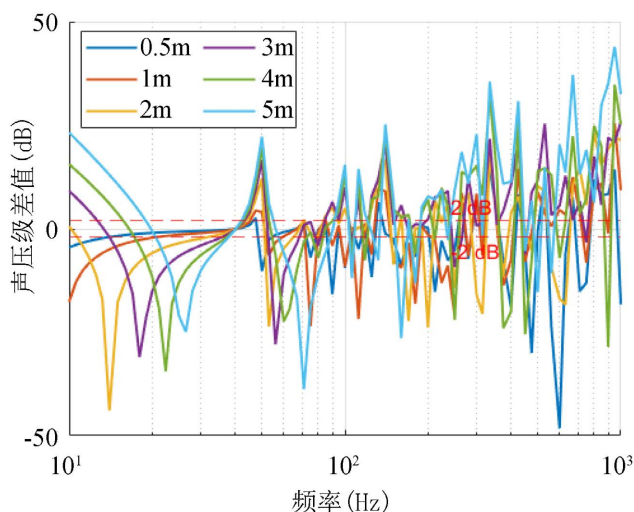


Figure 3. Difference of sound pressure level at different distance of hydrophone from sound source

图 3. 水听器距声源不同距离时的声压级差

图 3 展示了水听器与声源的距离 Δ 分别为 0.5 m、1 m、2 m、3 m、4 m 和 5 m 时，混响声与直达声

的差值 ΔL_p ，其中 P_h 为混响声场中测得的声压， P_z 为自由场声压。从图中可以看出，在全反射界面环境下，混响因素对声压的影响显著，混响声的影响远远大于 2 dB，因此在这种环境下测量声源的体积速度时，必须进行修正。

3.2. 湖中心环境

图 4 所示为湖中心环境只存在水底和水面两个反射面，四周离反射面较远，故可近似为无边界反射，其他设置与前述条件相同。

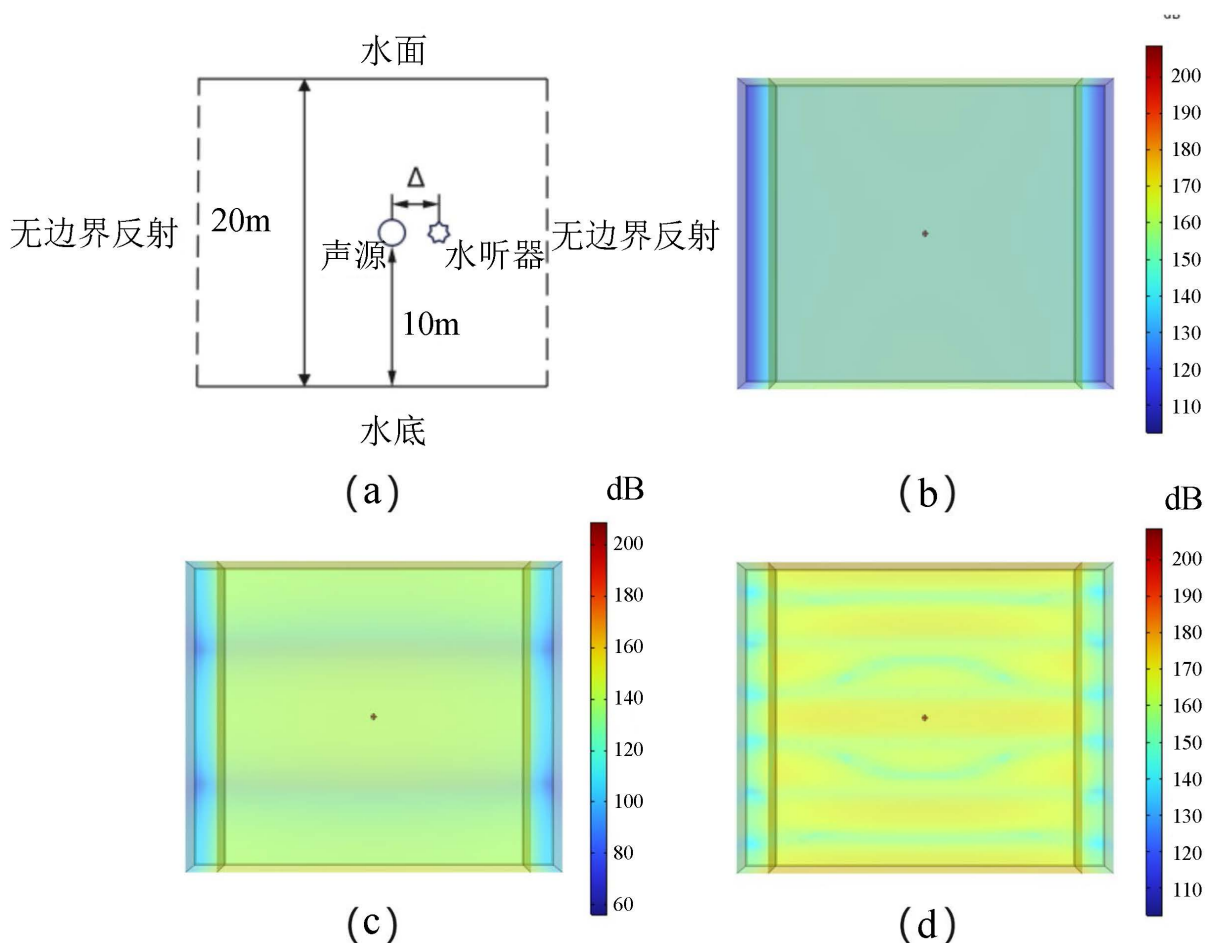


Figure 4. Comsol simulation analysis of lake central environment: (a) schematic diagram of the model; (b) 63 Hz sound field cloud image; (c) 250 Hz sound field cloud image; (d) 500 Hz sound field cloud image

图 4. 湖中心环境的 Comsol 仿真分析: (a) 模型示意图; (b) 63Hz 声场云图; (c) 250 Hz 声场云图; (d) 500 Hz 声场云图

图 5 中(a)展示了水听器与声源的距离 Δ 分别为 0.5 m、1 m、2 m、3 m、4 m 和 5 m 时，混响声与直达声的差值 ΔL_p ，图 5(b)展示了通过公式(4)由声压反演出的声源体积速度。从图 5 可以看出，当水听器距离声源小于 1 m 时，界面反射对声场的干扰小于 2 dB，体积速度计算的误差在 0~3 dB 之间；当距离增加至 2 m 时，部分频段的界面反射干扰超过 2 dB；当距离达到 5 m 时，部分频段的干扰可高达 20 dB。随着水听器与声源距离的增加，混响声与直达声的差异也逐渐增大。这是因为当水听器靠近声源时，直达声占主导，混响影响较小；而随着距离增大，混响声的影响显著增强，导致体积速度测量误差随之增大。

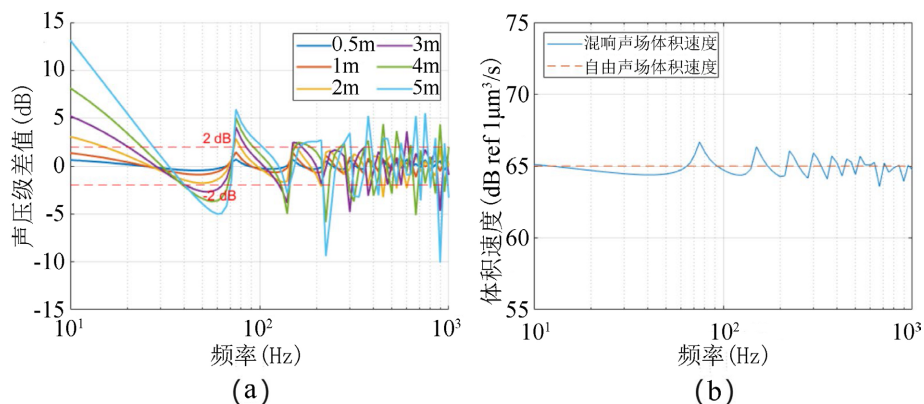


Figure 5. (a) The difference of sound pressure levels at different distances between hydrophones and sound sources; (b) Volume velocity comparison of the sound source by sound pressure at 1 m distance of the hydrophone from the sound source in the central lake environment

图 5. (a) 水听器距声源不同距离时的声压级差; (b) 湖中心环境下, 水听器距声源 1 m 处的通过声压反演出的声源体积速度对比

3.3. 弧形码头环境

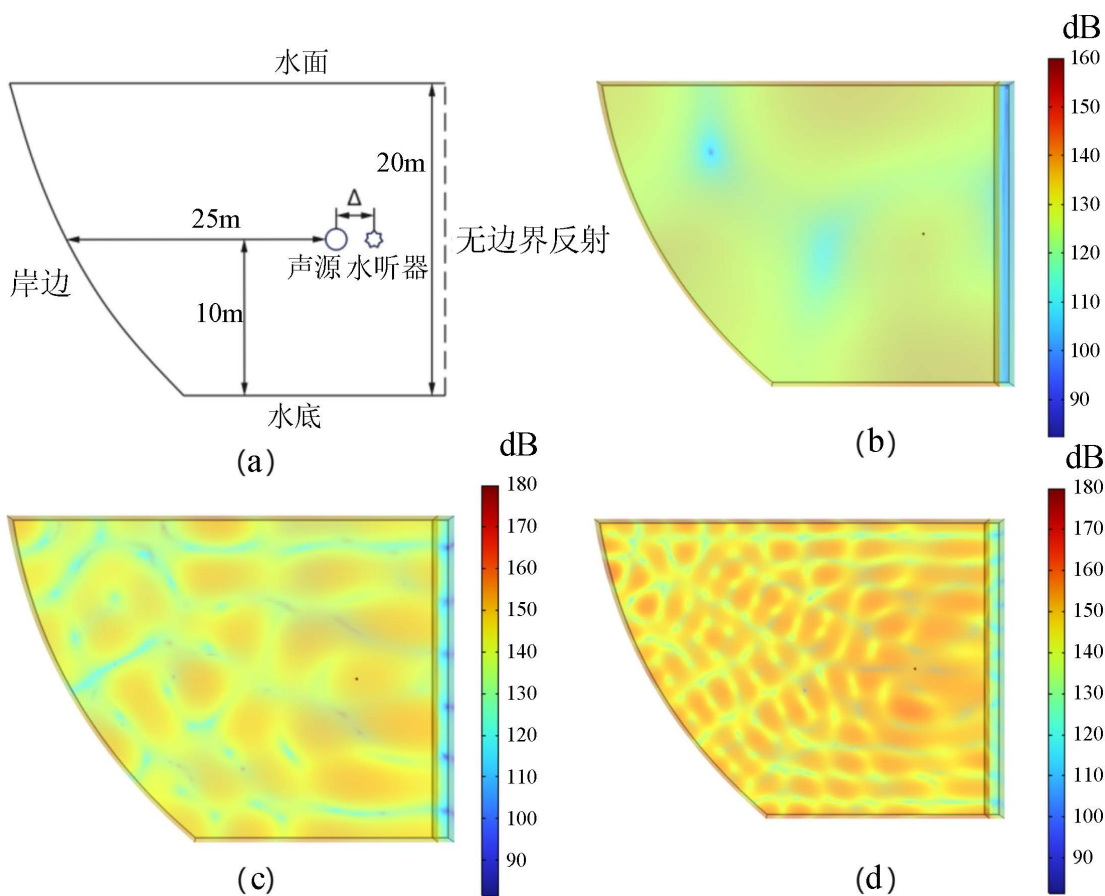


Figure 6. Comsol simulation analysis of curved dock environment: (a) schematic diagram of the model; (b) 63 Hz sound field cloud image; (c) 250 Hz sound field cloud image; (d) 500 Hz sound field cloud image

图 6. 弧形码头环境的 Comsol 仿真分析: (a) 模型示意图; (b) 63 Hz 声场云图; (c) 250 Hz 声场云图; (d) 500 Hz 声场云图

图 6 所示环境包含水面、水底以及侧方的一个弧形码头三个反射面共同作用，其他三个面近似为无反射边界，其他设置与前述条件相同。

图 7(a)展示了水听器与声源的距离 Δ 分别为 0.5 m、1 m、2 m、3 m、4 m 和 5 m 时，混响声与直达声的差值 ΔL_p ，图 7(b)展示了通过公式(4)由声压反演出的声源体积速度。由图可见，水听器离声源 1 m 以内时，界面反射对声场的干扰小于 2 dB。

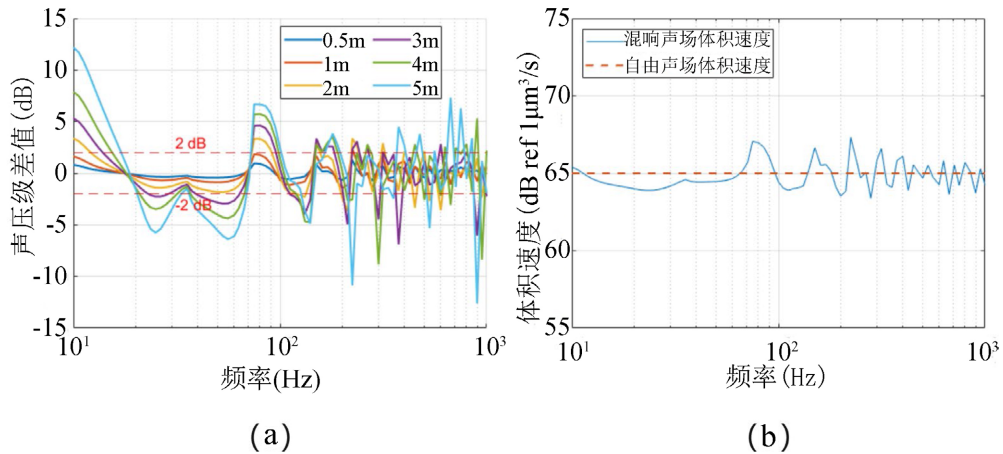


Figure 7. (a) The difference of sound pressure levels at different distances between hydrophones and sound sources; (b) Hydrophone distance sound in free field and dock environment sound source volume velocity comparison at source 1 m by sound pressure inversion.

图 7. (a) 水听器距声源不同距离时的声压级差；(b) 自由场与码头环境中，水听器距声源 1 m 处的通过声压反演出的声源体积速度对比。

3.4. 含远距离反射面的码头环境

在低频情况下，由于波长较长，即使反射面距离测量点距离较远也会产生一定的反射，因此建立该模型用于模拟和估计远反射面对低频声波的影响。图 8 所示模型为宽 1000 米、高 20 米的不规则边缘流体域，包含一个远反射面和三个近反射面(水面、水底两个反射面以及一个侧斜面)，其余三个面近似为无反射边界。图 9 为 Comsol 模拟的含远距离反射面的码头环境云图。

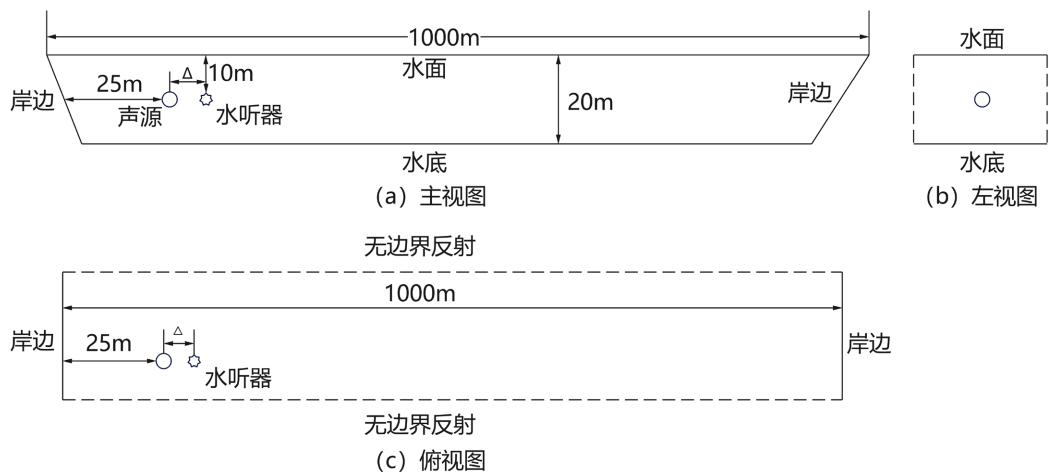


Figure 8. Three views of the dock environment with remote reflectors

图 8. 含远距离反射面的码头环境三视图

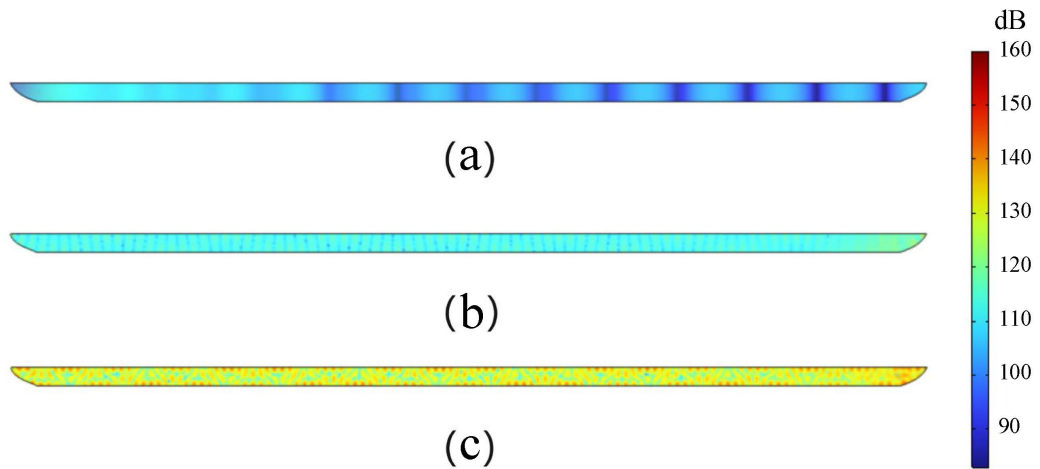


Figure 9. Cloud image of dock environment with remote reflector simulated by Comsol: (a) 10 Hz sound field cloud map; (b) 63 Hz sound field cloud map; (c) 100 Hz sound field cloud image

图 9. Comsol 模拟的含远距离反射面的码头环境云图：(a) 10 Hz 声场云图；(b) 63 Hz 声场云图；(c) 100 Hz 声场云图

图 10(a)展示了水听器与声源的距离 Δ 分别为 0.5 m、1 m、2 m、3 m、4 m 和 5 m 时，混响声与直达声的差值 ΔL_p ，图 10(b)展示了通过公式(4)由声压反演出的声源体积速度。由图可见，水听器离声源 1 m 以内时，界面反射对声场的干扰小于 2 dB。

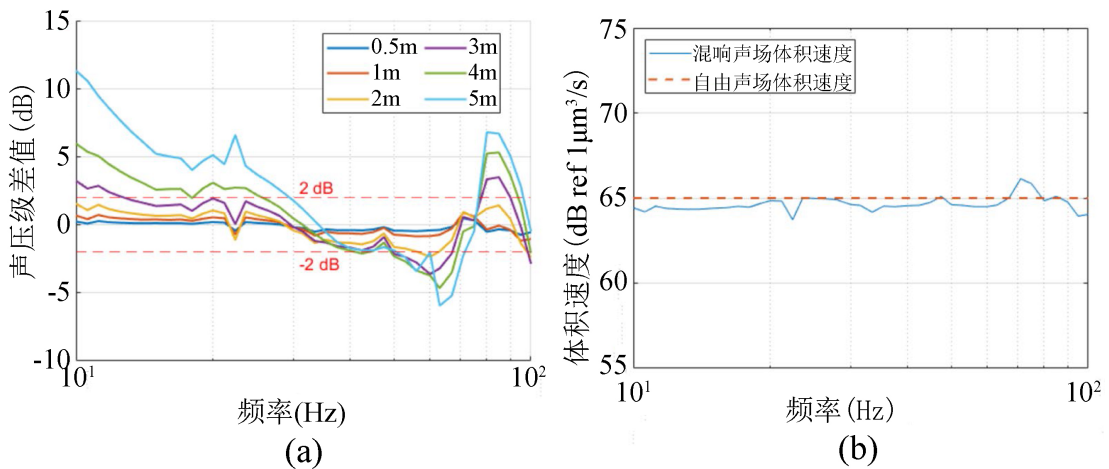


Figure 10. (a) The difference of sound pressure levels at different distances between hydrophone and sound source; (b) Comparison of the volume velocity of the sound source at 1 m from the hydrophone to the sound source in a free field and a dock environment with a distant reflector.

图 10. (a) 水听器距声源不同距离时的声压级差；(b) 自由场与含远距离反射面的码头环境中，水听器距离声源 1 m 处的通过声压反演出的声源体积速度对比。

4. 结论

本文针对典型的全混响和部分混响环境，基于 Comsol 的数值仿真模型分别计算分析了混响水池、湖中心环境、弧形码头环境和含远距离反射面的码头环境等典型环境下反射声对声场的影响。结果表明：在全反射界面条件下，反射声对声场的影响不可忽视，必须在测量和计算中对其进行修正；在部分混响条件下，当水听器距离声源在 1 米以内时，测量误差均小于 2 dB；2~3 m 间，小部分频段误差较大；3 m 以上时大部分频段误差都较大。这表明，部分反射面会对声场产生一定影响，但距离声源较远的侧面或

远距离反射面对声场的影响相对较小。此时，声源附近的直达声占主导，混响声的干扰较小。因此，在此条件下无需进行复杂的测量与计算，即可准确估算出声源的体积速度，从而简化了互易测试过程。以上结论为部分混响环境下测定水声互易的体积速度修正提供了理论指导。

参考文献

- [1] Helmholtz, H. (1860) Theorie des Luftschalls in Röhren mit offenen Enden. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, **57**, 1-72.
- [2] Styutt, J.W. (1945) *The Theory of Sound*. Dover Publications.
- [3] Wolde, T.T. (1973) Reciprocity Experiments on the Transmission of Sound in Ships.
- [4] 徐荣武, 何琳, 孙红灵, 等. 双层柱壳结构水下互易实验研究[C]//中国造船工程学会. 第十四届船舶水下噪声学术讨论会论文集. 2013: 109-114.
- [5] 张森林, 余波. 声散射问题的等几何双重互易边界元法[J]. *声学学报*, 2024, 49(4): 889-904.
- [6] 程果, 陈景兵, 何琳. 基于互易原理和空间平均的水下传递函数测量[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(3): 151-155.
- [7] 陈毅, 赵涵, 袁文俊. 水下电声参数测量[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2017.
- [8] 孟春霞, 杨士莪, 张亮, 等. 船舶辐射噪声源模型的试验验证[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(11): 6-8.
- [9] 尚大晶, 李琪, 商德江, 等. 水下声源辐射声功率测量实验研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2010, 31(7): 938-944.
- [10] Tang, R., Tian, H. and Shang, D. (2020) Faster Calculation of the Low-Frequency Radiated Sound Power of Underwater Slender Cylindrical Shells. *Mathematical Problems in Engineering*, **2020**, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2020/3939160>
- [11] 殷丽君, 吴金荣, 侯倩男, 等. 噪声修正的混响反演海底反射系数幅值参数[J]. *声学学报*, 2022, 47(5): 634-642.
- [12] Hald, J. (2006) Patch Holography in Cabin Environments Using a Two-Layer Handheld Array with an Extended SONAH Algorithm. *Acta Acustica United with Acustica*, **92**, S24.
- [13] Bi, C., Chen, X. and Chen, J. (2008) Sound Field Separation Technique Based on Equivalent Source Method and Its Application in Nearfield Acoustic Holography. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **123**, 1472-1478. <https://doi.org/10.1121/1.2837489>
- [14] 张小正, 徐廷廷. 任意形状管道内噪声源识别的等效源法研究[J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2021, 44(12): 1604-1610.
- [15] Niu, H., Reeves, E. and Gerstoft, P. (2017) Source Localization in an Ocean Waveguide Using Supervised Machine Learning. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **142**, 1176-1188. <https://doi.org/10.1121/1.5000165>
- [16] 冷翰. 基于深度学习方法的混响水池声场重建技术研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
- [17] 刁威宇. 基于组合神经网络的混响水池声场重建技术研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- [18] Rayleigh, J.W.S.B. (1896) *The Theory of Sound*. Macmillan.
- [19] Musha, T., Abe, I., Shinohara, A. and Takashima, M. (1994) Evaluation of Acoustic Radiation Efficiency for Hull Plate Using the Reciprocity Method. *JSME International Journal, Series C, Dynamics, Control, Robotics, Design and Manufacturing*, **37**, 612-615. <https://doi.org/10.1299/jsmec1993.37.612>
- [20] Ten Wolde, T., Verheij, J.W. and Steenhoek, H.F. (1975) Reciprocity Method for the Measurement of Mechano-Acoustical Transfer Functions. *Journal of Sound and Vibration*, **42**, 49-55. [https://doi.org/10.1016/0022-460x\(75\)90301-6](https://doi.org/10.1016/0022-460x(75)90301-6)
- [21] Ten Wolde, T. (1976) Reciprocity Measurement of Acoustical Source Strength in an Arbitrary Surrounding. *Noise Control Engineering*, **7**, 16-23. <https://doi.org/10.3397/1.2832031>
- [22] 郭明霞, 田丰. 室内噪声预测模型优化及程序设计[J]. *电声技术*, 2021, 45(8): 62-66.