

引文格式:

郑江龙, 江彪, 李志锋, 等. 20 MPa 高压消声舱声场特性实验研究 [J]. 集成技术, 2025, 14(3): 145-152.
Zheng JL, Jiang B, Li ZF, et al. The experimental research of acoustic field characteristics in 20 MPa high pressure anechoic water tank [J]. Journal of Integration Technology, 2025, 14(3): 145-152.

20 MPa 高压消声舱声场特性实验研究

郑江龙 江彪 李志锋 黄晓鑫 李林伟 黄逸凡*

(中国科学院深圳先进技术研究院 科学仪器研究所(筹) 深圳 518055)

摘要 高压消声舱是研制深海换能器、传感器和其他声学仪器设备的重要实验测试平台。本文测量了前期设计研制的 20 MPa 高压消声舱的本底噪声和不同频率下的声场起伏, 计算了固定测量位置和距离条件下的回声干涉量, 绘制了回声干涉曲线, 分析了典型低频和高频条件下信号的时频特性。本底噪声测量结果表明, 虽然舱内本底噪声较高, 且在 10~12 kHz 频段有特征峰, 但允许信噪比足够高时进行测量实验。同时, 不同频段声场起伏的时域波形测量结果表明, 在发射宽度 2 ms 之后, 信号幅度迅速衰减, 而且频率越高, 衰减越快, 舱内吸声尖劈有良好的吸声效果。回声干涉量的计算结果表明, 在 10 kHz 以上, 大多数频点不超过 ± 1 dB, 设计的固定测量位置满足自由声场测试条件, 尤其是在 20 kHz、28 kHz 和 34 kHz 等频点, 回声干涉量不超过 ± 0.5 dB, 满足精密测量条件。

关键词 深海; 高压舱; 消声水池; 声场特性

中图分类号 P754 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20241205001

CSTR: 32239.14.j.issn.2095-3135.20241205001

The Experimental Research of Acoustic Field Characteristics in 20 MPa High Pressure Anechoic Water Tank

ZHENG Jianglong JIANG Biao LI Zhifeng HUANG Xiaoxin LI Linwei HUANG Yifan*

(Institute of Scientific Instrumentation, Shenzhen Institutes of Advanced Technology,

Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

*Corresponding Author: yf.huang@siat.ac.cn

Abstract The high-pressure anechoic water tank is an important experimental testing platform for the development of deep-sea transducers, sensors, and other acoustic instruments and equipment. In this paper, background noise and acoustic field fluctuations at different frequencies were measured for the homemade 20 MPa high-pressure anechoic tank. The echo interference level under fixed measurement position and distance conditions was calculated, and the echo interference curve was drawn. The time-frequency

收稿日期: 2024-12-05 修回日期: 2025-01-14

基金项目: 深圳市科技研发资金项目 (JCYJ20220818101609021); 广东省科技厅重点研发计划项目 (2023B1111050015); 国家自然科学基金项目 (12404546); 福建省海洋物理与地质过程重点实验室开放基金项目 (KLMPG-22-04); 国家重点研发计划项目 (2024YFC2814902)

作者简介: 郑江龙, 博士, 研究方向为海底声学探测技术; 江彪, 学士, 研究方向为机械工程; 李志锋, 学士, 研究方向为机械工程; 黄晓鑫, 学士, 研究方向为自动化与软件工程; 李林伟, 博士, 研究方向为海洋地球物理; 黄逸凡 (通讯作者), 正高级工程师, 博士生导师, 研究方向为海洋探测和海底资源环境调查技术, E-mail: yf.huang@siat.ac.cn.

characteristics of signals under typical low-frequency and high-frequency conditions were analysed. The measurement results of background noise show that although the background noise inside the tank is relatively high and has characteristic peaks in the frequency range of 10–12 kHz, it allows for measurement experiments with sufficient signal-to-noise ratio conditions. Meanwhile, the time-domain waveform results of sound field fluctuations measured in different frequencies show that the signal amplitude rapidly decays after a transmission width of 2 ms, and the higher the frequency, the faster the attenuation, indicating that the sound absorption cone inside the tank has a good sound absorption effect. The calculation results of echo interference level show that most frequency points above 10 kHz do not exceed ± 1 dB. The designed fixed measurement position meets the requirements of free field testing, especially the echo interference of frequency points such as 20 kHz, 28 kHz, and 34 kHz does not exceed ± 0.5 dB, which meets the requirements of precision measurement.

Keywords deep sea; high pressure tank; anechoic water tank; acoustic field characteristics

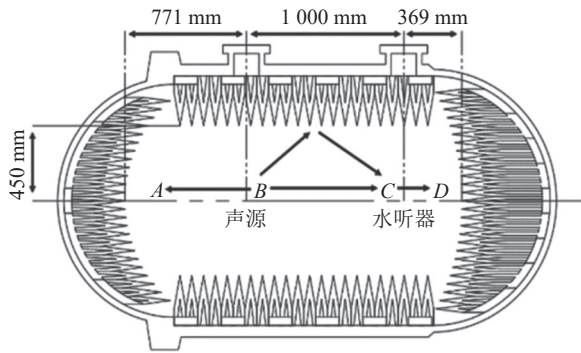
Funding This work is supported by Shenzhen Science and Technology Innovation Commission Project (JCYJ20220818101609021); Key Research and Development Program of Guangdong Provincial Science Technology Department (2023B1111050015); National Natural Science Foundation of China Program (12404546); Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Physical and Geological Processes (KLMPG-22-04); National Key Research and Development Program of China (2024YFC2814902)

1 引 言

高压消声舱通过在高压舱内设计和安装消声尖劈达到同时模拟深海高压环境和实现声学测量的目的,是深海声学换能器、传感器和其他声学相关仪器设备测试和标定的必要条件。由于深海声学技术研究具有特殊军事意义,因此国内外建有高压消声舱的单位大部分具有国防背景,如美国水声计量中心(Underwater Sound Reference Detachment, USRD)^[1]、英国国家物理实验室(National Physical Laboratory, NPL)^[2]、日本防卫省防卫研究所(National Institute for Defense Studies, NIDS)第五研究中心^[3]和杭州应用声学研究所(Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, HAAR)^[4-6],可检索的相关文献资料较少。在上述几个单位建设的高压消声舱中,USRD和HAAR的舱体尺寸近似,内径约为4.0 m,有效长度约为12.0 m,测量频率下限为

2 kHz,而英国国家物理实验室与日本防卫省防卫研究所的舱体设计参数近似,小于前两者,测量频率下限为3 kHz。

本团队前期设计了一个20 MPa的高压消声舱(SIAT消声舱),是文献可查阅的第5台此类设备^[7]。该舱采用圆柱形外壳,两端端盖为半球形,内部直径为1.5 m,中心轴向长3.0 m,舱顶部设有两个法兰窗口,窗口内径为200 mm,中心间距1.0 m。舱内部安装红松木质的消声尖劈,安装后的舱内有效内径为0.9 m,有效长度为2.14 m(中心轴向),其结构如图1所示。该高压消声舱理论上的频率下限为4.3 kHz(最短声程差为230 μ s对应的频率),考虑到测量的冗余度,设计工作频率下限为10 kHz。经仿真计算,10~58 kHz频段的回声干涉量大于1 dB,58 kHz以上频段的回声干涉量不超过1 dB^[7]。高压消声舱的舱内消声尖劈的结构设计和材料选择都极为关键,直接影响消声舱的吸声效果^[8-9]和使用寿

图 1 20 MPa 高压消声舱结构示意图^[7]Fig. 1 Schematic structure of 20 MPa high pressure anechoic water tank^[7]

命。与前述的高压消声舱相比, 本团队前期设计的高压消声舱虽然内部尺寸较小, 但工作压力更高, 且改进了消声尖劈的结构设计, 包括所有尖劈采用中空结构, 两侧端盖的尖劈采用弧面设计等。

目前, 该高压消声舱已投入使用, 实物如图 2 所示。左下角的内嵌图是内部安装的消声尖劈。为验证上述创新设计的有效性和测量范围的适用性, 根据国家质量监督检验检疫总局颁布的《消声水池声学特性校准规范》(JJF 1146—2006)^[10], 本文测量了 20 MPa 高压消声舱内的本底噪声和不同频率下的声场起伏, 计算了固定测量位置和距离条件下的回声干涉量, 绘制了回声干涉曲线, 分析了典型低频和低频条件下信号的时频特性。



图 2 20 MPa 高压消声舱

Fig. 2 20 MPa high pressure anechoic water tank

2 方法

2.1 测量系统

本文采用的测量系统包括发射换能器、水听器、功率放大器、示波器和信号发生器。由于测量频段宽度大, 因此发射换能器使用了 3 个型号。具体的测量系统配置和型号参数等信息如表 1 所示。测量系统的实物如图 3 所示。

表 1 测量仪器参数列表

Table 1 List of the measurement instrument parameters

测量仪器	型号/厂家	参数	数值
发射换能器	WBT15-2U/ 苏州声之源电子科技有限公司	工作带宽	10~20 kHz
		发送电压响应	(140±1.5) dB
	WBT30-2U/ 苏州声之源电子科技有限公司	工作带宽	20~40 kHz
		发送电压响应	(140±1.5) dB
	WBT60-3U/ 苏州声之源电子科技有限公司	工作带宽	40~90 kHz
		发送电压响应	(142±1.5) dB
水听器	SP60/ 苏州声之源电子科技有限公司	灵敏度	(-200±1.5) dB @10~10 000 Hz
		灵敏度	(-203±1.5) dB @10~100 kHz
功率放大器	L400_500K/ 云南拓普科技有限公司	工作带宽 最大输出功率	1~500 kHz 500 W
示波器	TBS1102C/ Tektronix	工作带宽	100 MHz
		采样长度	20 000 点
信号发生器	AFG3101C/ Tektronix	工作带宽	100 MHz
		最大输出电压	10 V (峰峰值)



图 3 声学测量系统

Fig. 3 Acoustic testing system

2.2 测量和计算方法

(1) 本底噪声测量方法

本底噪声是评价消声舱声环境的重要指标。由于缺乏模拟滤波器，因此测量过程中采用 SP60 型水听器在图 1 的 C 处进行采集，示波器记录原始波形文件，在后期处理时用数字滤波方法进行 1/3 倍频程带内滤波。测量的频率范围设为 0.1~100 kHz，为充分采集该频率范围的本底噪声，测量过程中设示波器的记录时长为 16 ms。每一个频率重复测量 10 次。根据采样精度=记录时长/采样长度，16 ms 时长波形文件对应的采样精度、采样率、频率下限和频率上限等参数如表 2 所示。其中，为保证采样准确，频率上限为该时长条件下采样率的 1/5，频率下限为记录时长的倒数。

表 2 本底噪声测量记录参数

Table 2 Recording parameters of background noises

记录时长/ms	采样精度/ns	采样率/kHz	频率下限/Hz	频率上限/kHz
16	800	1 250	62.5	250

根据《中华人民共和国国家标准：声学 水下噪声测量 (GB/T 5265-2009)》^[11]，高压消声舱的本底噪声分析主要是计算频带声压级 L_{pf} 和谱级 L_{ps} 。由表 2 可知，噪声记录时长 16 ms 的数据频率下限和上限分别为 62.5 Hz 和 250 kHz，满足覆盖测量系统物理带宽要求。结合水听器响应频率范围，在 0.1~100 kHz 以 1/3 倍频程选定 30 个频率点，对每组数据计算每个频率点的 L_{pf} 和 L_{ps} ，如式 (1)~式 (2) 所示：

$$L_{pf} = 20 \times \lg(P_f/P_0) \quad (1)$$

其中， f 为中心频率； P_f 为 1/3 倍频程带宽的噪声声压，单位为 Pa； P_0 为水下基准声压，数值为 1 μ Pa。

$$L_{ps} = L_{pf} - \lg \Delta f \quad (2)$$

其中， Δf 为 f 的有效带宽，单位为 Hz。因此 L_{ps} 的基准值为 1 μ Pa/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。

(2) 声场起伏测量方法

声场起伏也是评价消声设备测量环境的重要指标。测量方法主要分为两种：信号频率固定，改变收发位置；收发位置固定，改变信号频率。前者主要用于分析水池不同位置的声场起伏，以评价自由声场区域范围；后者主要用于分析不同波长的信号叠加相位改变引起的声场起伏，以评价自由声场频率范围。由于本文设计的消声舱尺寸较小，收发位置固定，因此采用后一种测量方法。测量过程使用信号发生器产生固定宽度的单频脉冲信号，经功率放大器放大后驱动发射换能器 (图 1 中的 B 点) 产生声脉冲；水听器 (图 1 中的 C 点) 接收信号并通过示波器进行记录。

根据本团队前期工作^[7]，直达波的达到时为 0.67 ms，壁面反射波和端盖反射波的达到时分别为 0.90 ms 和 1.69 ms，因此为满足充分混叠要求，信号发生器产生的激励信号脉冲宽度设为 2 ms^[7]。功率放大器通过调节串联电抗器与换能器进行匹配，以确保有足够的接收信噪比。为获得 10~100 kHz 的声场起伏特征，本文采用 3 个换能器 (WBT15-2U、WBT30-2U 和 WBT60-3U) 分别发射 10~20 kHz、20~40 kHz 和 40~90 kHz 范围内的声脉冲，频率递进步长均为 2 kHz。本文采用单个水听器 (SP60) 接收信号，并通过示波器记录数据。可通过直达波幅值和混叠后的声压幅值计算回声干涉量 I_r ，表示如下：

$$I_r = 20 \times \lg(P_t/P_i) \quad (3)$$

其中， P_t 为直达波声压，单位为 Pa； P_i 为混叠后声压，单位为 Pa。

3 结果与分析

3.1 本底噪声分析

消声舱内本底噪声的噪声频带声压级和噪声谱级如图 4 所示，其中黑色曲线是 10 组记录的平均结果。由结果可知，舱内本底噪声较高，且

在 10~12 kHz 有一个明显的特征峰, 可能与高压消声舱安装的位置靠近城市高架快速路有关(距离道路边界约 80 m)。对于本底噪声较大的实验环境, 只有测量信噪比足够大, 才能获得准确的测量结果。由图 1 可知, 20 MPa 高压消声舱内设计的声波发射和接收的距离为 1 m, 远小于常规消声水池的一般实验距离, 因此能满足具有足够测量信噪比的实验要求, 如发射换能器、水听器的测量等。

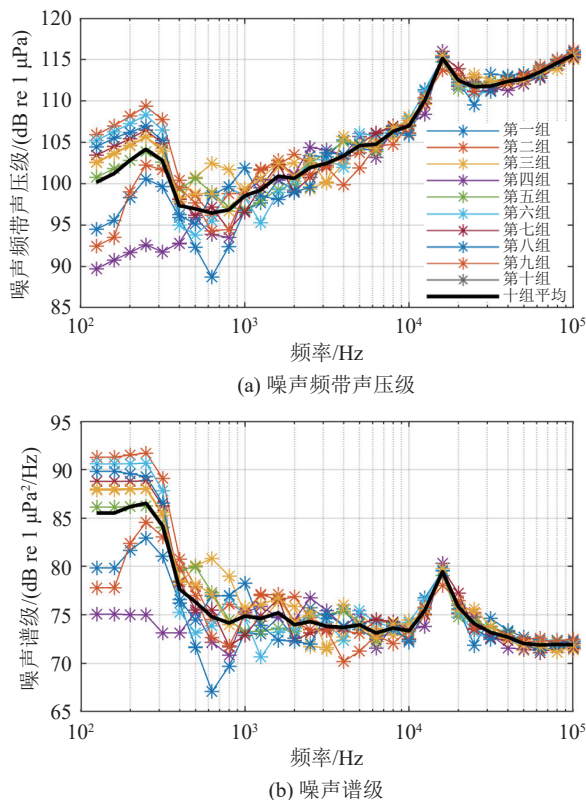


图 4 20 MPa 高压消声舱内的噪声频带声压级和噪声谱级
Fig. 4 Noise frequency band sound pressure level and noise spectral level in the 20 MPa high pressure anechoic water tank

3.2 声场起伏分析

由于声场起伏测量选择的频率递进步长为 2 Hz, 且每个频点测量次数为 10 次, 数据量比较大。因此本文仅给出典型测量频率 10 kHz、20 kHz、30 kHz、40 kHz、50 kHz、60 kHz、

70 kHz、80 kHz 和 90 kHz 的时域波形, 如图 5 所示。时域图中黑色竖线为声信号发射时刻, 红色竖线为直达波达到时 0.67 ms。随着频率增大, 直达波达到时范围内的波数相应增加。0.67 ms 以后为壁面反射和端盖反射混叠部分, 其中品红色竖线为壁面反射达到时 0.9 ms, 绿色竖线为端盖反射达到时 1.69 ms。上述结果表明, 低频 10 kHz 的声波起伏较大, 而随着频率增加, 起伏变小。这种起伏产生的主要原因是当直达波与反射波的传播路径和距离不变时, 随着信号频率变大, 波长变小, 直达波与反射波叠加时相对相位会发生变化, 信号幅度因此发生起伏。由此现象可知, 声波频率越高, 安装在壁面和端盖的吸声尖劈消声效果越好, 反射波幅度越小, 因此与直达波叠加引起的信号幅度起伏也就越小。同时, 信号发射宽度为 2 ms, 之后信号幅度迅速衰减, 而且频率越高, 衰减越快(即混响时间越短), 这同样表明高压消声舱内吸声尖劈有良好的吸声效果, 尤其在高频段, 效果更好。

由式 (3) 可得不同频率下的回声干涉量, 如表 3 所示, 其中直达波声压 P_1 和混叠后声压 P_2 的取值通过计算机编程自动拾取 0.67~0.90 ms 和 0.90~2.00 ms 内的声波最大幅值。数据包含 8~90 kHz 频率范围内的 40 个频率点, 其中 8~80 kHz 的频率步长为 2 kHz。每个频率点均由 10 次测量数据计算其误差范围, 最大误差不超过 0.1 dB, 表明高压消声舱内的声场相对稳定。同时, 10~90 kHz 频段内的大部分频率点的回声干涉量在 ± 1 dB 以内, 水听器所在位置满足自由声场一般测量条件, 尤其在 20 kHz、28 kHz、34 kHz、36 kHz、40 kHz、44 kHz、48 kHz、52 kHz、62 kHz、68~78 kHz、90 kHz 等频点, 回声干涉量不超过 ± 0.5 dB, 满足精密测量条件。此外, 低频段(30 kHz 以下)的回声干涉量总体高于高频段(30 kHz 以上)。上述结果绘制成回声干涉量曲线, 结果如图 6 所示, 图中

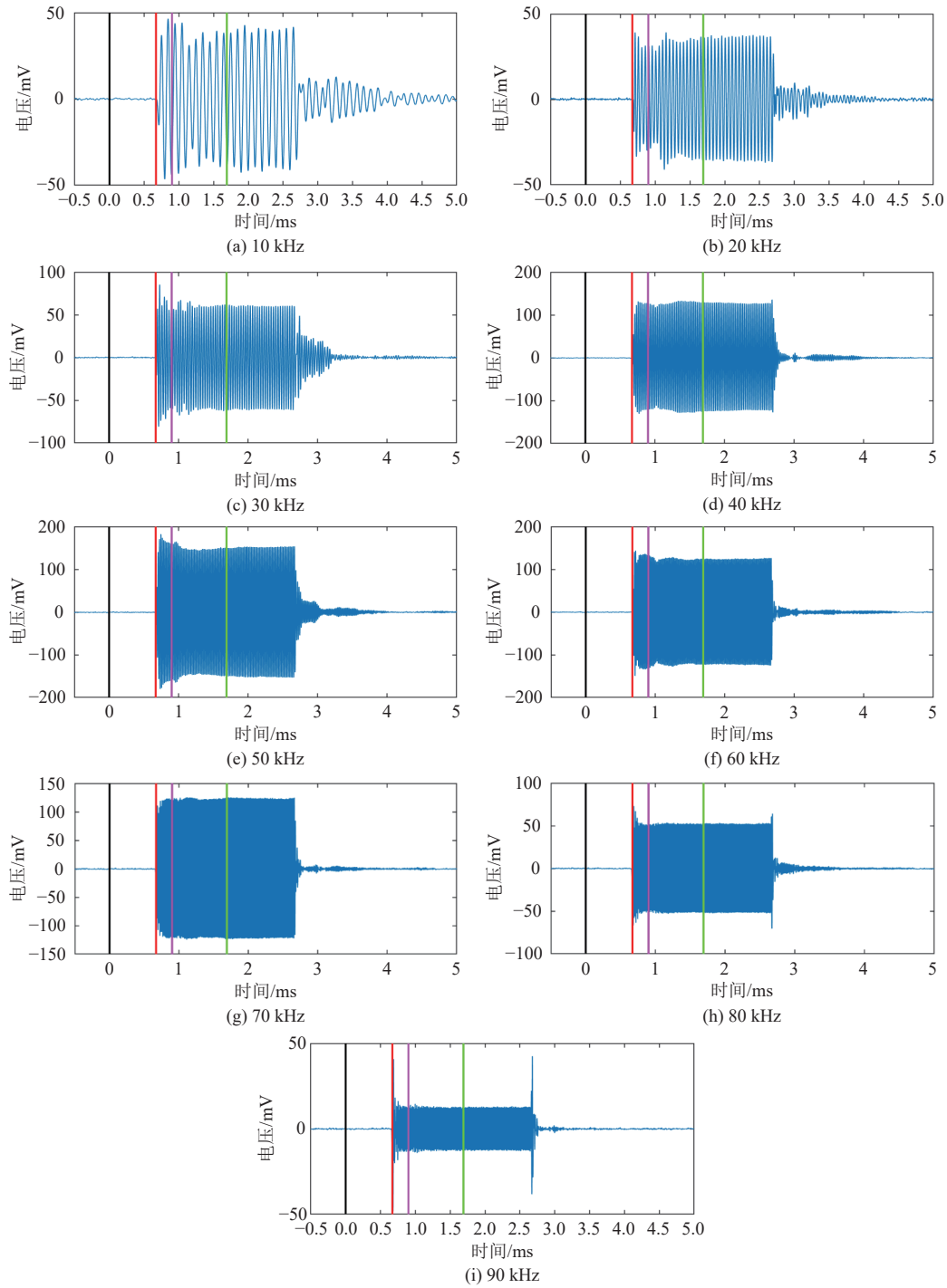


图 5 不同频率的 2 ms 声脉冲时域波形

Fig. 5 Time domain waveforms of 2 ms sound pulses with different frequencies

3 种颜色对应 3 个不同频段换能器的测量数据，与本团队前期所做的计算仿真工作基本相符，在 10 kHz 和 30 kHz 的附近频段具有较大的回声干

涉量^[7]。

梁丽辉等^[6]分析了 HAAR 高压消声舱的声场特性，结果表明：在 2~6 kHz 内，声场起伏高

表 3 不同频率的回声干涉量

Table 3 Echo interference levels at different frequencies

频率/kHz	回声干涉量/dB	标准差/dB
10	-0.44	0.086
20	-0.04	0.081
30	-2.00	0.070
40	0.31	0.036
50	-0.88	0.037
60	-0.69	0.058
70	0.13	0.041
80	-1.18	0.050
90	0.25	0.079

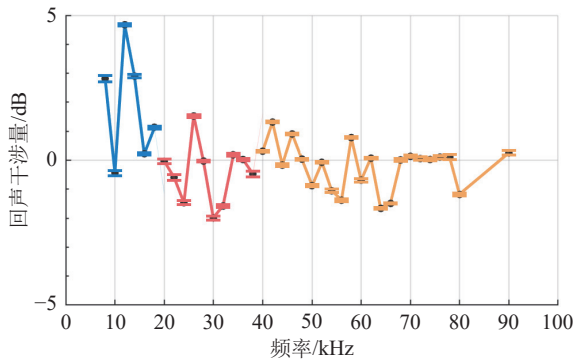


图 6 回声干涉量曲线

Fig. 6 The echo interference curve

达 10 dB; 在 6 kHz 以上, 声场起伏均不小于 3 dB。在 10 kHz 和 20 kHz 两个频率点, HAAR 消声舱的实测回声干涉量分别为 6.0 dB 和 3.5 dB, 而 SIAT 消声舱在这两个频率点测量的回声干涉量分别为 0.44 dB 和 0.04 dB。由此可见, 与 HAAR 消声舱相比, SIAT 消声舱的工作水深不仅显著提升, 高频吸声效果也有明显优势, 可为深水高频换能器的测试工作提供较好的平台条件。

低频 10 kHz 和 60 kHz 两个典型频率的时频谱如图 7 所示。时频分析采用的是短时傅里叶变换方法 (时窗长度均取 0.5 ms, 窗口覆盖率为 90%), 图中两个黑色 “*” 号分别对应直达波波至时刻和发射信号结束时刻 (分别位于 0.67 ms 和 2.67 ms 处)。由于时频分析的时窗长度固定, 因此波至时刻附近的高频信号有更强的能量, 这取

决于短时傅里叶变换方法的时频分辨率。由 10 kHz 时频谱可知, 1.25 ms 处的能量带变窄, 这是舱壁反射波与直达波相互干涉的结果; 而 60 kHz 时频谱未见明显的能量带变化, 可见舱壁反射波影响较小。此外, 低频 10 kHz 信号在发射宽度 2 ms 后混响时间长, 且具有较明显的多径反射叠加导致的陷频特征, 而高频 60 kHz 信号混响时间短, 且不具有明显的陷频特征, 这进一步表明消声舱内吸声尖劈对高频声的吸声效果更好。

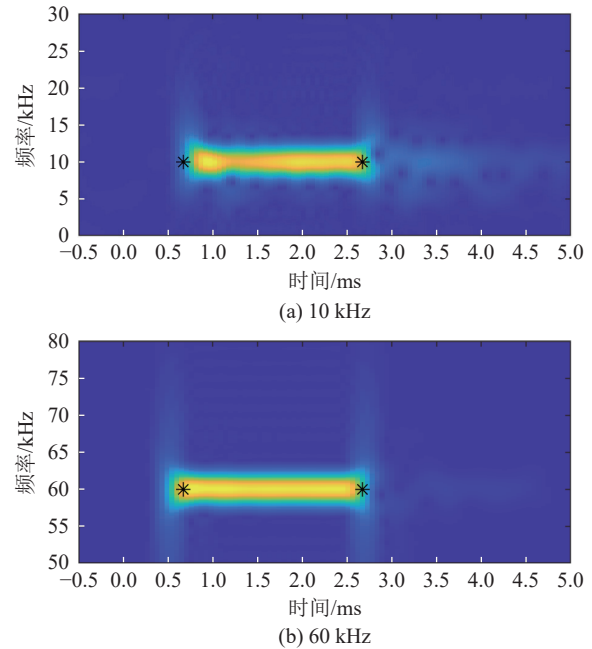


图 7 声脉冲时频谱

Fig. 7 Time spectrum of sound pulse

4 结论与展望

本文测量了前期设计研制的 20 MPa 高压消声舱的本底噪声和不同频率下的声场起伏, 计算了固定测量位置和距离条件下的回声干涉量, 绘制了回声干涉曲线, 分析了典型低频和高频条件下信号的时频特性。不同频段的声场起伏的时域波形测量结果表明, 在发射宽度 2 ms 之后, 信号幅度迅速衰减, 且频率越高, 衰减越快, 表明舱内吸声尖劈的吸声效果良好。回声干涉量计算

结果表明, 10 kHz 以上, 大多数频点的回声干涉量不超过 ± 1 dB, 设计的固定测量位置满足自由声场测试条件, 尤其在 20 kHz、28 kHz 和 34 kHz 等频点, 回声干涉量不超过 ± 0.5 dB, 满足精密测量条件。与国内同类测试平台 HAAR 高压消声舱相比, 本文测试的高压消声舱在工作水深和 高频吸声效果两个方面均有显著提升, 可为深水高频换能器研发工作提供较好的测试平台。然而, 本底噪声测量结果表明, 20 MPa 高压消声舱内的本底噪声较高, 且在 10~12 kHz 频段有特征峰, 这可能与安装场地环境有关, 下一步需进行相关的环境振动测量和分析, 采取相应的隔振处理措施, 降低舱内本底噪声, 优化测量环境。

参 考 文 献

- [1] Van Buren AL, Blue JE. Calibration of underwater acoustic transducers at NRL/USRD [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 86: 221-241.
- [2] 王月兵. 英国国家物理实验室的水声计量设施和研究计划 [J]. 声学与电子工程, 2006, (1): 1-4.
Wang YB. Underwater acoustic measurement facilities and research project of the British National Physical Laboratory [J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2006, (1): 1-4.
- [3] 钱东, 谢蓉, 范江鹏. 水压测试系统——新型高压消声罐 [J]. 水下无人系统学报, 1998, 6(2): 39-43.
Qian D, Xie R, Fan JP. Water pressure test system—a new type of high-pressure silencer [J]. The Torpedo Technology, 1998, 6(2): 39-43.
- [4] 陈毅, 陈卫华, 袁文俊, 等. 高静水压下自由场水声声压标准装置的研究 [J]. 计量学报, 2008, 29(3): 257-261.
Chen Y, Chen WH, Yuan WJ, et al. The development of free-field underwater acoustic pressure standard at high hydrostatic pressure [J]. Acta Metrologica Sinica, 2008, 29(3): 257-261.
- [5] 陈毅, 黄勇军, 费腾. 10 MPa 静水压下 20 Hz~200 kHz 标准水听器校准 [J]. 高压物理学报, 2013, 27(3): 454-460.
Chen Y, Huang YJ, Fei T. Calibration of standard hydrophones in the frequency range of 20 Hz to 200 kHz at 10 MPa hydrostatic pressure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(3): 454-460.
- [6] 梁丽辉, 易文胜. 高压消声水罐声场特性分析 [J]. 声学技术, 2015, 34(4): 133-135.
Liang LH, Yi WS. The analysis of sound field characteristic in the high hydrostatic pressure and anechoic water tank [J]. Technical Acoustics, 2015, 34(4): 133-135.
- [7] 张永亮, 江敏, 季念迎, 等. 20 MPa 高压消声水池系统设计 [J]. 集成技术, 2021, 10(2): 63-74.
Zhang YL, Jiang M, Ji NY, et al. The system design of 20 MPa high pressure anechoic water tank [J]. Journal of Integration Technology, 2021, 10(2): 63-74.
- [8] Jiang CY, Zhang SY, Huang LX. On the acoustic wedge design and simulation of anechoic chamber [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 381: 139-155.
- [9] Nejad MET, Loghmani A, Ziaei-Rad S. The effects of wedge geometrical parameters and arrangement on the sound absorption coefficient—A numerical and experimental study [J]. Applied Acoustics, 2020, 169: 107458.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局. 消声水池声学特性校准规范: JJF 1146—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Calibration specification for the acoustic characteristics of an anechoic water tank: JJF 1146-2006 [S]. Beijing: China Standard Press, 2006.
- [11] 全国声学标准化技术委员会 (SAC/TC 17). 声学水下噪声测量: GB/T 5265-2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
National Technical Committee on Acoustics Standardization of China (SAC/TC 17). Acoustic underwater noise measurement: GB/T 5265-2009 [S]. Beijing: China Standard Press, 2009.