

20MPa高压消声舱声场特性实验研究

郑江龙¹, 江彪¹, 李志锋¹, 黄晓鑫¹, 李林伟¹, 黄逸凡^{1*}

¹ (中国科学院深圳先进技术研究院 科学仪器研究所(集群) 深圳 518055)

摘要: 高压消声舱是开展深海换能器、传感器以及其他声学仪器设备等研制的重要实验测试平台, 本文对前期设计研制的20MPa高压消声舱开展了本底噪声和不同频率下的声场起伏测量, 计算了固定测量位置、测量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。本底噪声测量结果显示虽然舱内本底噪声较高, 且在10-12kHz频段有特征峰, 但允许开展具有足够测量信噪比的实验。同时, 不同频段的声场起伏测量的时域波形结果显示在发射宽度2ms之后信号幅度迅速衰减, 而且频率越高, 衰减越快, 说明舱内吸声尖劈有良好的吸声效果。回声干涉量计算结果显示10kHz以上大多数频点不超过1dB, 设计的固定测量位置满足自由声场测试条件, 尤其20kHz、28kHz、34kHz等频点的回声干涉量不超过 ± 0.5 dB, 满足精密测量条件。

关键词: 高压水舱; 消声水池; 声场特性

中图分类号: P754 文献标志码 A

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

ZHENG Jianglong¹, JIANG Biao¹, Li Zhifeng¹, Huang Xiaoxin¹, Li Linwei¹, HUANG Yifan^{1*}

¹ (Institute of Scientific Instrument, Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The high-pressure anechoic 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 20MPa 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 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 10-12kHz, 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 2ms, 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 10kHz 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 20kHz, 28kHz, and 34kHz does not exceed ± 0.5 dB, which meets the requirements of precision measurement.

Key words: High pressure water tank; Anechoic water tank; Acoustic field

收稿日期:

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

1. 引言

高压消声舱是通过在高压舱内设计和安装消声尖劈进而达到模拟深海高压环境的同时实现声学测量,是深海声学换能器、传感器以及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的特殊军事意义,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(USRD)^[1]、英国国家物理实验室(NPL)^[2]、日本防卫省防卫研究所(NIDS)第五研究中心^[3]和杭州应用声学研究所(HAAR)^[4,5,6],可检索的相关文献资料比较少。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,内径在4.0m左右,有效长度达到12.0m左右,测量频率下限达到2kHz,而NPL和NIDS的舱体设计参数近似,小于前两者,测量频率下限达到3kHz。

我们前一个工作设计了一个20MPa高压消声舱(SIAT消声舱),是文献可查阅的第5台此类设备。该舱采用圆柱形外壳,两端端盖为半球形,内部直径1.5m,中心轴向长度3.0m,舱顶部设有两个法兰窗口,窗口内径200mm,中心间距1.0m。舱内安装红松木质的消声尖劈,安装后的舱内有效内径0.9m,有效长度2.14m(中心轴向),具体如图1所示。该高压消声舱理论上的频率下限为4.3kHz(最短声程差为230 μ s对应一个周期的频率),考虑到测量的冗余度,设计工作频率下限为10kHz。经仿真计算,10kHz至58kHz频段的回声干涉量大于1dB,58kHz以上频段的回声干涉量不超过1dB^[7]。对高压消声舱而言,舱内消声尖劈的结构设计与材料选择都极为关键,直接影响消声舱的吸声效果^[8-9]和使用寿命。与前述的高压消声舱相比较,我们设计的高压消声舱虽然内部尺寸更小,但工作压力更高,同时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。

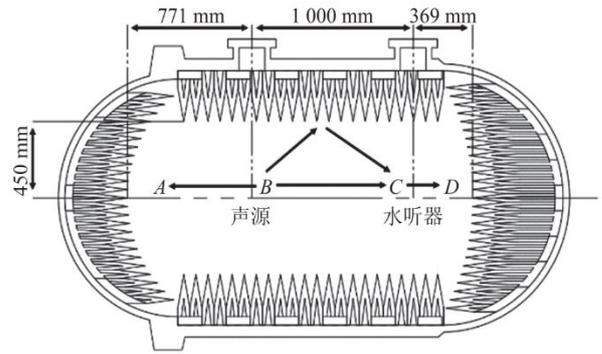


图 1 20MPa 高压消声舱结构示意图^[7]

Fig.1 Schematic structure of 20MPa high pressure anechoic water tank

目前,该高压消声舱已经投入使用,实物如图2所示。左下角内嵌图是内部安装的消声尖劈。为了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国家计量技术规范 JJF 1146-2006《消声水池声学特性校准规范》,本文对20MPa高压消声舱内的本底噪声和不同频率下的声场起伏进行了测量,计算了固定测量位置、测量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。



图 2 20MPa 高压消声舱实物

Fig.2 20MPa 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、功率放大器、信号发生器、水听器和示波器等。由于测量频段宽度大,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下表所示。图 3 是测量系统的实物图。

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
换能器	WBT15-2U/ 苏州声之源	工作带宽	10-20kHz
		发送电压响应	140±1.5dB
	WBT30-2U/ 苏州声之源	工作带宽	20-40kHz
		发送电压响应	140±1.5dB
	WBT60-3U/ 苏州声之源	工作带宽	40-90kHz
		发送电压响应	142±1.5dB
水听器	SP60/ 苏州声之源	灵敏度	-200 ± 1.5dB @10Hz-10kHz
			-203 ± 1.5dB @10-100kHz
功率放大器	L400_500K/ 云南拓普	工作带宽	1-500kHz
		最大输出功率	500W
示波器	TBS1102C/ Tektronix	工作带宽	100MHz
		采样长度	20k
信号发生器	AFG3101C/ Tektronix	工作带宽	100MHz
		最大输出电压	10Vp-p



图 3 声学测量系统实物图

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,测量过程中采用水听器 SP60 在

图 1 的 C 位置进行采集,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。测量的频率范围设计为 100Hz 至 100kHz,为了充分采集该频率范围的本底噪声,测量过程中设定了示波器的记录时长为 16ms。每次测量重复记录 10 次。根据采样精度=记录时长/采样长度,16ms 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下表所示。其中,为保证采样准确,频率上限取值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	采样精度	采样率	频率下限	频率上限
16ms	800ns	1250kHz	62.5Hz	250kHz

参照《声学 水下噪声测量(GB/T 5265—2009)》标准,高压消声舱本底噪声分析方法主要是计算频带声压级 L_{pf} 和谱级 L_{ps} 。根据表 2 记录参数,噪声记录时长 16ms 的数据频率下限和上限分别为 62.5Hz 和 250kHz,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 100Hz-100kHz 之间以 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} ,具体如下公式:

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

式中, P_f 是以 f 为中心频率 1/3 倍频程带宽的噪声声压, Pa; P_0 是水下基准声压, $1 \mu Pa$ 。

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

式中, Δf 是中心频率为 f 的有效带宽, Hz, 因此 L_{ps} 的基准值为 $1 \mu Pa / \sqrt{Hz}$ 。

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:信号频率不变条件下改变收发位置和收发位置固定条件下改变信号频率。前者主要用于分析水池不同位置的声场起伏,用于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,用于

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点位置)产生声脉冲;水听器(图1中的C点位置)接收信号并通过示波器进行记录。

根据我们上一个工作,直达波达到时为0.67ms,壁面反射波和端盖反射波的达到时分别为0.90ms和1.69ms,因此考虑满足充分混叠要求,信号发生器产生的激励信号脉冲宽度选择为2ms^[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。为了获得10-100kHz范围内的声场起伏特征,我们采用3个换能器(WBT15-2U、WBT30-2U和WBT60-3U)分别发射8-20kHz、20-40kHz和40-90kHz范围内的声脉冲,频率递进步长均为2kHz。采用单个水听器(SP60)接收信号并通过示波器记录数据。取直达波幅值和混叠后的声压幅值即可以计算回声干涉量 I_r ,具体如下公式:

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

式中, P_t 直达波声压,Pa; P_i 是混叠后声压,Pa。

3. 结果与分析

3.1 本底噪声分析

图4是示波器记录时长为16ms的消声舱内本底噪声的噪声频带声压级和噪声谱级分析结果,其中黑色曲线是10组记录的平均结果。由结果可知,舱内本底噪声的较高,且在10kHz至12kHz具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米)。对于本底噪声较大的实验环境,测量信噪比要足够大,才能获得准确的测量结果。根据图1所示,20MPa高压消声舱内设计的声波发射和接收的距离为1m,远小于常规消声水池的一般实验距离,因此能够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。

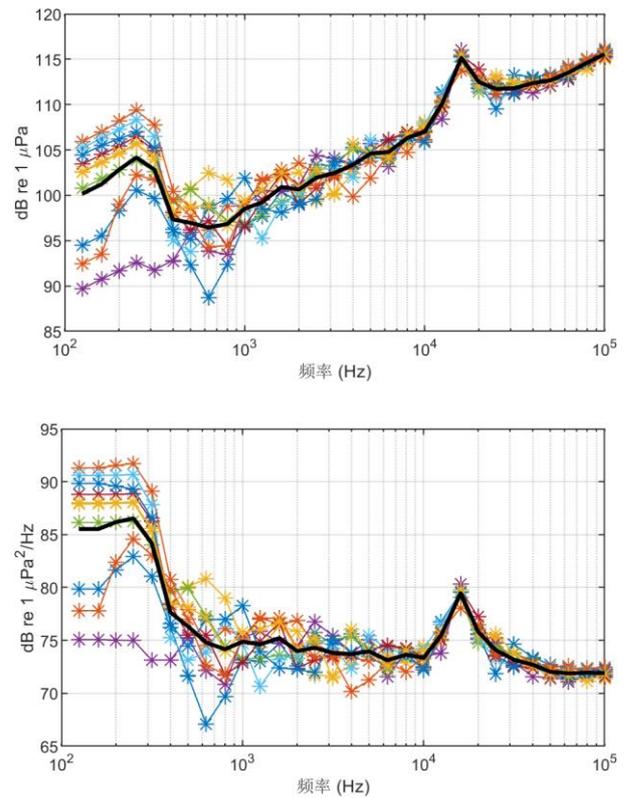


图4 20MPa 高压消声舱内噪声频带声压级(上)和噪声谱级(下)

Fig.4 Noise frequency band sound pressure level (upper) and noise spectral level (lower) in the 20MPa 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2Hz,且每个频点测量次数为10次,因此数据量比较庞大。图5给出的是典型测量频率10kHz、20kHz、30kHz、40kHz、50kHz、60kHz、70kHz、80kHz和90kHz的时域波形结果。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0.67ms。随着频率增大,直达波达到时范围内的波数相应增加。0.67ms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0.9ms,绿色竖线为端盖反射达到时1.69ms。上述结果显示低频10kHz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

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 2ms，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），这同样说明高压消声舱内吸声尖劈有良好的吸声效果，尤其在高频段的效果更好。

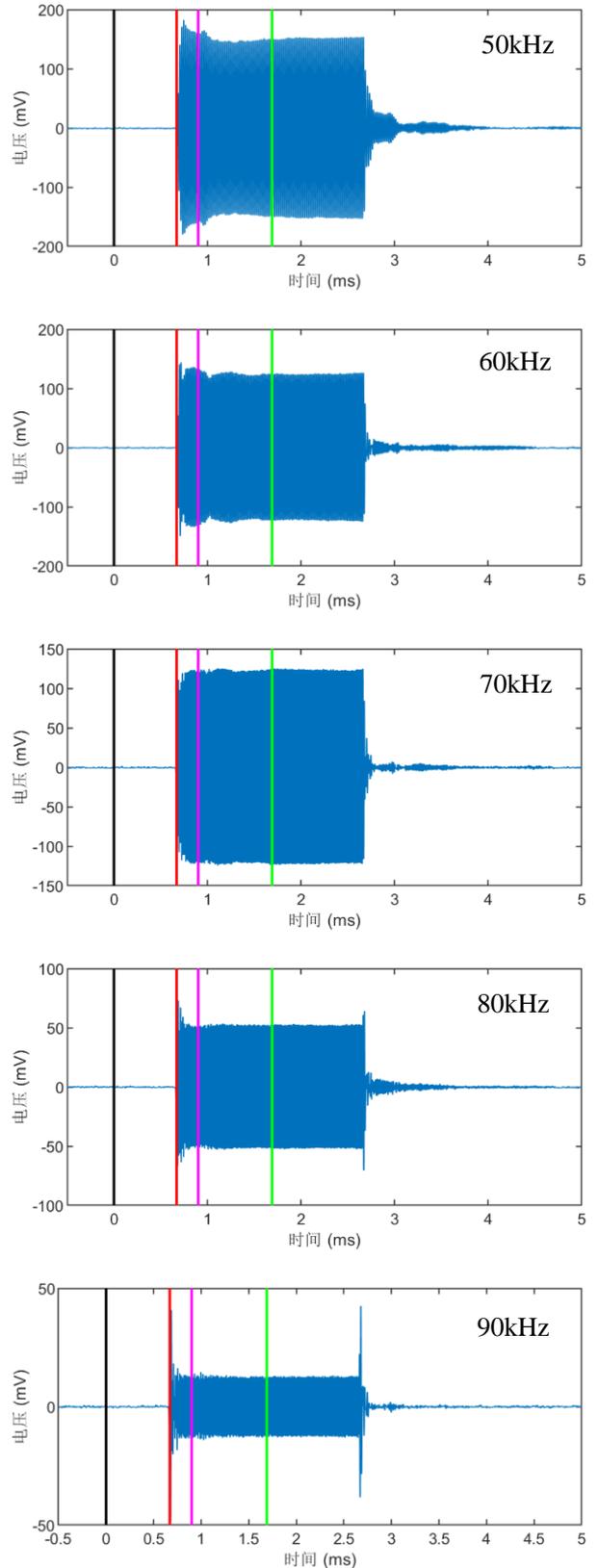
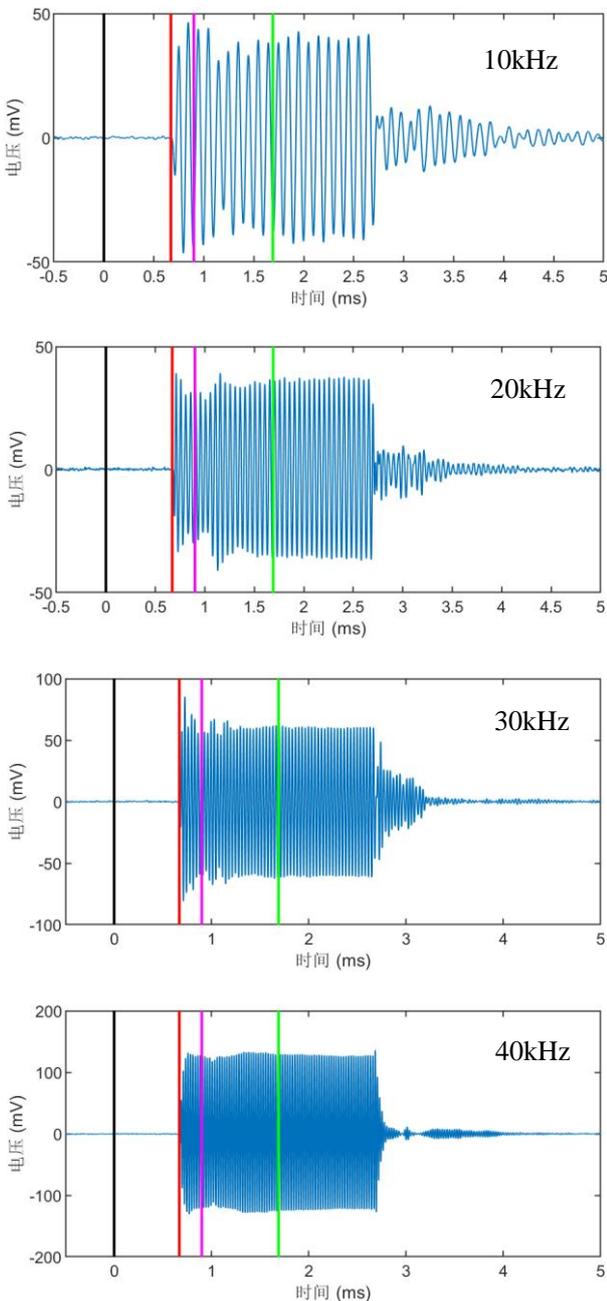


图5 不同频率的 2ms 声脉冲时域波形

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

表 3 是根据公式 3 计算得到的不同频率下的回声干涉量，其中直达波声压 P_i 和混叠后声压 P_i 的取

值通过计算机编程自动拾取 0.67ms 至 0.90ms 和 0.90ms 至 2ms 内的声波最大幅值。数据包含从 8kHz 至 90kHz 频率范围内的 40 个频率点,即,其中 8kHz 至 80kHz 之间的频率步长为 2kHz。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 0.1dB,说明高压消声舱内声场相对稳定。同时,10kHz 至 90kHz 频段内大部分频率点的回声干涉量在 $\pm 1\text{dB}$ 以内,水听器所在位置满足自由声场一般测量条件,尤其在 20kHz、28kHz、34kHz、36kHz、40kHz、44kHz、48kHz、52kHz、62kHz、68-78kHz、90kHz 等频点的回声干涉量不超过 $\pm 0.5\text{dB}$,满足精密测量条件。此外,低频段(30kHz 以下)的回声干涉量总体高于高频段(30kHz 以上)。上述结果绘制成回声干涉量曲线,结果如图 6 所示,与我们前期所做的计算仿真工作基本相符,在 10kHz 和 30kHz 附近频段具有较大的回声干涉量。

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	-2.0	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

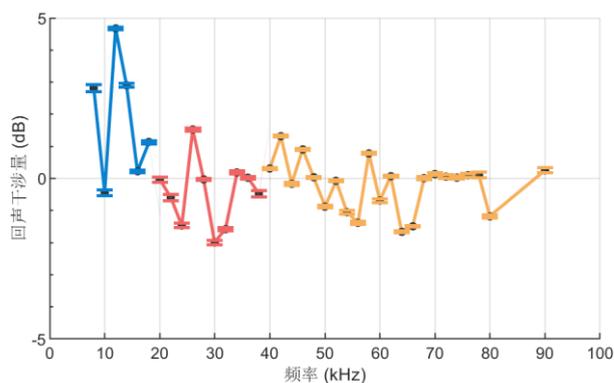


图 6 回声干涉量曲线

Fig.6 The echo interference curve

文献[6]给出了 HAAR 高压消声舱的声场特性分析结果,在 2kHz~6kHz 范围内,声场起伏高达 10dB;在 6kHz 以上频率,声场起伏均不小于 3dB。在 10kHz 和 20kHz 两个频率点,HAAR 消声舱实测的回声干涉量分别为 6.0dB 和 3.5dB,而 SIAT 消声舱在这两个频率点测量的回声干涉量分别为 0.44dB 和 0.04dB。由此可见,相比 HAAR 消声舱,SIAT 消声舱不仅在工作水深方面有显著提升,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。

图 7 给出了低频 10kHz 和高频 60kHz 两个典型频率的时频谱,采用的是短时傅里叶变换方法(时窗长度均取 0.5ms,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 0.67ms 和 2.67ms 处)。由于时频分析是采用了固定时窗长度,故波至时刻附近高频信号有更强的能量,这是由短时傅里叶变换方法的时频分辨率所决定的。从 10kHz 时频谱可见,1.25ms 处的能量带变窄,这是由于舱壁反射波与直达波相互干涉的结果;而 60kHz 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 10kHz 信号在发射宽度 2ms 后混响时间长,且具有较为明显的多径反射叠加导致的陷频特征,而高频 60kHz 信号混响时间短,且不具有明显的陷频特征,这进一步说明了消声舱内吸声尖劈对高频声具有更好的吸声效果。

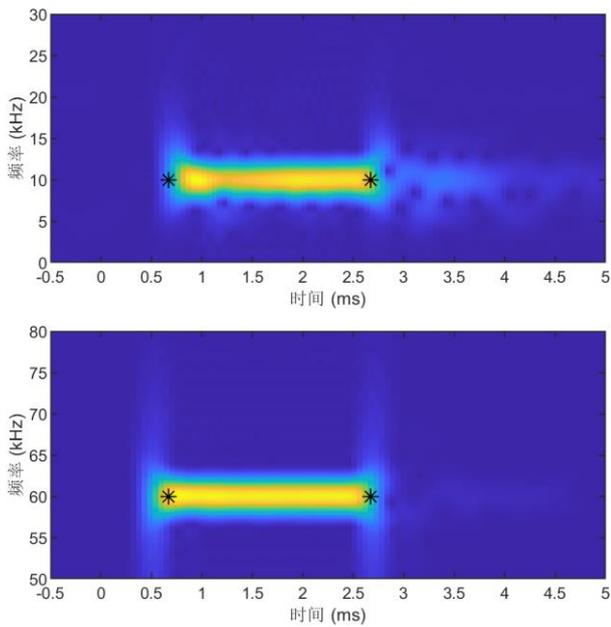


图7 声脉冲时频谱结果：10kHz（上）和60kHz（下）

Fig.7 Time spectrum results of sound pulse: 10kHz (upper) and 60kHz (lower)

4. 结论与展望

本文对前期设计研制的 20MPa 高压消声舱开展了本底噪声和不同频率下的声场起伏测量，计算了固定测量位置、测量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测量的时域波形结果显示在发射宽度 2ms 之后信号幅度迅速衰减，而且频率越高，衰减越快，说明舱内吸声尖劈有良好的吸声效果。回声干涉量计算结果显示 10kHz 以上大多数频点不超过 1dB，设计的固定测量位置满足自由声场测试条件，尤其 20kHz、28kHz、34kHz 等频点的回声干涉量不超过 ± 0.5 dB，满足精密测量条件。相比于国内同类测试平台 HAAR 高压消声舱，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

噪声测量结果显示 20MPa 高压消声舱内本底噪声较高，且在 10-12kHz 频段有特征峰，这可能与安装场地环境有关，下一步需要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来降低舱内本底噪声，优化测量环境。

参 考 文 献

- [1]. Buren A L V, Blue J E. Calibration of underwater acoustic transducers at NRL/USRD[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 86.
- [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(01):1-4.
Wang YB. Underwater acoustic measurement facilities and research project of the British National Physical Laboratory [J]. Acoustics and Electronic 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(02):43-47.
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(03):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. 10MPa 静水压下 20Hz~200kHz 标准水听器校准[J]. 高压物理学报, 2013, 27(03):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 C , Zhang S , Huang L .On the acoustic wedge design and simulation of anechoic chamber[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2016:139-155.
- [9]. Nejad M E T, 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.