

引用格式: 刘柯源, 王月兵, 郭世旭, 等. 基于溢流环换能器液腔的水听器校准系统[J]. 声学技术, 2023, 42(3): 404-408. [LIU Keyuan, WANG Yuebing, GUO Shixu, et al. Hydrophone calibration system based on liquid cavity of overflow ring transducer[J]. Technical Acoustics, 2023, 42(3): 404-408.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2023.03.021

基于溢流环换能器液腔的水听器校准系统

刘柯源, 王月兵, 郭世旭, 赵 鹏

(中国计量大学计量测试工程学院, 浙江杭州 310018)

摘要: 针对溢流环换能器液腔振动表现出的优秀低频特性, 提出利用溢流环换能器液腔内部声场进行低频校准的校准方法。首先分析了溢流环换能器液腔特性, 并在现有刚性罐体的基础上, 构造出了一套无须激励台, 以溢流环换能器为低频声源, 溢流环换能器液腔为两端开口振动液柱的低频比较法校准系统。通过实验测量确定了液柱高度为 15 cm 处的圆心位置为最佳的比较法测量点, 实验测试该点在 100~1 400 Hz 频段的径向声压变化不超过 5%。对 $\Phi 20$ mm 球型水听器进行比较法测量, 在 100~1 000 Hz 频段的测量结果与标准校准结果最大偏差为 0.8 dB, 测量不确定度为 1 dB。结果表明, 以溢流环液腔为基础构造的低频校准系统是可行的。

关键词: 声学; 低频校准; 溢流环换能器液腔; 比较法

中图分类号: TB56

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2023)-03-0404-05

Hydrophone calibration system based on liquid cavity of overflow ring transducer

LIU Keyuan, WANG Yuebing, GUO Shixu, ZHAO Peng

(College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China)

Abstract: Due to the excellent low-frequency characteristics of the liquid cavity vibration of the overflow ring transducer, a calibration method using the sound field inside the liquid cavity of the overflow ring transducer is proposed in this paper. Firstly, the characteristics of the liquid cavity of the overflow ring transducer in rigid cavity are analyzed. Based on existing rigid tank, a calibration system without excitation platform is constructed by using the low-frequency comparison method, in which, the overflow ring transducer is taken as the low-frequency sound source and the overflow ring liquid cavity is taken as the vibrating liquid column with openings at both ends. Through measurements, it is determined that the center position of the liquid column with a height of 15 cm is the best measurement point for the comparison method, and the change of radial sound pressure at this point is no more than 5% at 100~1 400 Hz. A spherical hydrophone of $\Phi 20$ mm is calibrated by the comparison method. Within 100~1 000 Hz, the maximum deviation between the measurement result and the standard calibration result is 0.8 dB, and the measurement uncertainty is 1 dB. The results show that the low frequency calibration system based on the overflow ring liquid cavity is feasible.

Key words: acoustics; low frequency calibration; overflow ring transducer's liquid chamber; comparison method

0 引言

水听器是接收水下信号的基本单元, 在水声工程测量和水声科学研究领域应用广泛^[1]。为保证水下声压测量的准确性, 须要对水听器的接收灵敏度进行校准^[2]。

溢流环换能器由于具有良好的低频发射特性, 因此被广泛应用于自由场测量中^[3]。现阶段对溢流环换能器的使用主要是在远场条件下, 利用其径向振动向外发射声能量进行水声测量。在有限水域的自由场条件下, 常规的测试方法由于信噪比较低, 很难进行频率在 1 kHz 以下的水听器灵敏度低频校准。

对于溢流环换能器, 其特殊的中空圆管结构, 使其在低频段工作时存在液腔谐振, 能扩展测试时的频率下限。同时, 液腔内部声场只向液腔端口发散, 具有声能量衰减更小的特点。

本文通过对刚性腔中溢流环换能器液腔内的信噪比进行分析, 提出了以溢流环换能器为低频声

收稿日期: 2021-12-21; 修回日期: 2022-03-08

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(11904346); 国家管网集团科技项目(CLZB202108); 国防军工计量“十三五”科研计划项目(JSJL2018207B007)。

作者简介: 刘柯源(1997—), 男, 湖南常德人, 硕士研究生, 研究方向为高静水压下水听器灵敏度校准。

通信作者: 王月兵, E-mail: wyb_1963@163.com

源，溢流环换能器液腔为测试腔体的水听器灵敏度的低频比较法校准系统。

1 溢流环换能器液腔特性

1.1 溢流环换能器谐振特性

溢流环换能器一般由单个径向极化的压电圆管或者多个压电陶瓷条拼镶而成，特殊的中空圆管结构使其具有两个谐振模式：高频段的径向谐振与低频段的液腔谐振^[4]。图1是尺寸为 $\Phi 22\text{ cm} \times \Phi 16\text{ cm} \times 16\text{ cm}$ 溢流环换能器的发送电压响应曲线。两种发射模式的耦合，有效地拓展了溢流环换能器的发射带宽，使其可以在几百到几千赫兹范围内发射大功率的声能量^[5]。

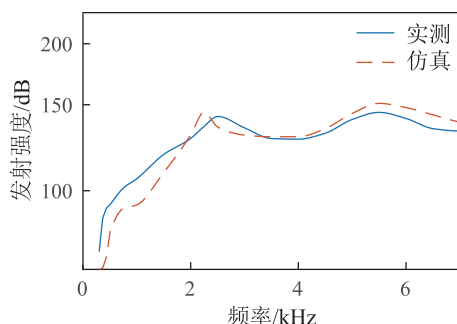


图1 溢流环换能器的发送电压响应曲线

Fig.1 The emitting voltage response curve of the overflow ring transducer

当平均半径为 a 、厚度为 t 、高度为 h 的镶拼溢流环换能器工作在水中时，根据Merriweather的修正公式^[6]，其液腔谐振频率 f_{rc} 为

$$f_{rc} = (kr_a)_c = \frac{\pi}{1.257h/r_a + 1.052} \quad (1)$$

式中： k 为波数， r_a 为溢流环的内半径。

径向谐振频率为

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{(M + m_s) C_m}} \quad (2)$$

$$C_m = \frac{as_{33}^E}{2\pi th} \quad (3)$$

式中： M 为溢流环整体质量； m_s 为液体共振质量； C_m 为圆管的柔顺性； $s_{33}^E = 15.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$ 为材料杨氏模量的倒数。

1.2 刚性腔中溢流环换能器液腔信噪比分析

能否接收到低频信号受两个因素的影响，一是发射源本身的发射强度，二是环境中的噪声大小。信噪比是低频校准系统中的重要因素。

自由场中，声能量衰减较快，将溢流环置于小型刚性腔体中时，声波经过刚性壁的反折，在水

中形成叠加的驻波场，声能量更集中。图2为在100 V发射电压激励下的刚性腔内溢流环液腔中的声压随频率变化曲线。

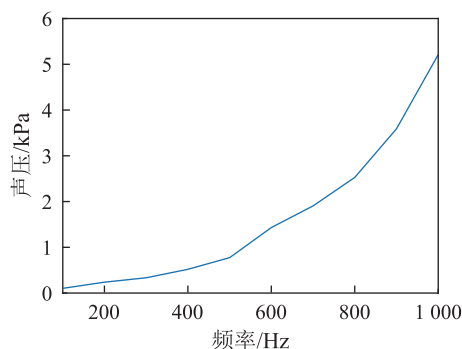


图2 刚性腔中溢流环换能器液腔声压随频率变化曲线

Fig.2 Variation curve of sound pressure in liquid cavity of overflow ring transducer in rigid cavity with frequency

信噪比的计算公式为

$$R_{SN} = 20 \lg \left(\frac{V_s}{V_n} \right) \quad (4)$$

根据式(4)计算100 Hz时的信噪比。本底噪声幅度 V_n 约为 $1 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}@100\text{ Hz}$ ，实际测量值约为 $8.8 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}@100\text{ Hz}$ ，接收电压 $V_s = 5.3\text{ mV}$ ，此时信噪比约为36 dB，大于声学低频测量系统要求的20 dB^[7]。

2 测试系统组成

2.1 腔体组成

搭建如图3所示的测试系统，该系统由刚性腔体、溢流环换能器、支撑工装、待测水听器组成。腔体由外部合金钢、内部溢流环换能器、待测水听器、结构工装以及测试设备组成。外部的合金钢是罐体的主要材料，可以有效保障腔壁的声刚性。

在溢流环工作时，液腔内部会产生一个两端开口的振动液柱，由于溢流环长度较短，为了延伸液腔长度，在溢流环换能器上放置一个刚性圆筒，二

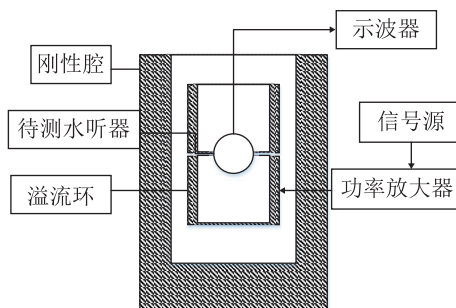


图3 换能器测试系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of the transducer measurement system

者之间放置了隔振材料。

2.2 刚性腔体中声场测量

2.2.1 轴向声压测量

为了确定液柱中声场的分布情况，首先对液腔圆心的轴向位置声压变化进行测量。以液腔底部端口作为轴向坐标零点，并将水听器置于溢流环的圆心位置，使用 $\Phi 15\text{ mm}$ 的小球水听器分别测量离液腔底部端口 0、7、13、16、19、22、25 cm 处的声压。测试结果如图 4 所示。由图 4 可知，频率在 1 000 Hz 以下的声压分布曲线具有较好的一致性，高度为 0~15 cm 时声压上升，15 cm 之后呈下降趋势。在不考虑径向声压变化的情况下，测量区域应选择在声压较强而且变化率较小的位置，因此高度在 8~15 cm 是理想的测量范围。

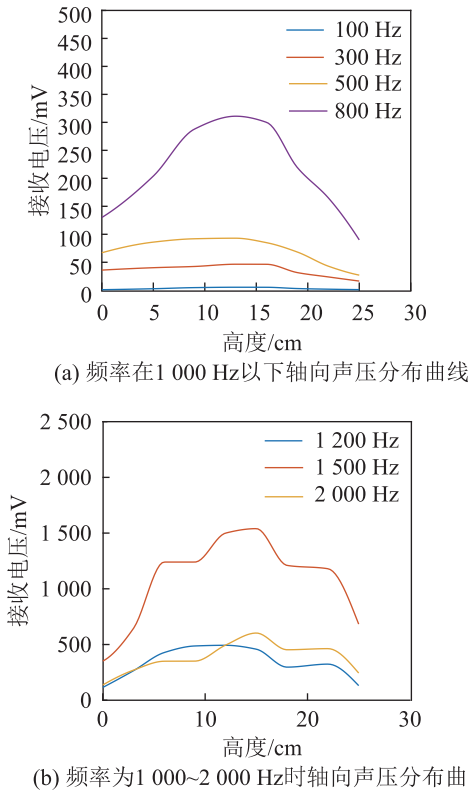


图4 液腔中轴向声压变化测试结果

Fig.4 Test results of axial sound pressure change in the liquid cavity

2.2.2 径向声压测量

结合轴向声压的测试结果，在高度 8~15 cm 的范围内选择三个径向测试点。在该范围内选择三个边界值测试其径向声压的变化情况。

选择距溢流环下方端口 15、12、8 cm 处的位置，使用 $\Phi 15\text{ mm}$ 的小球水听器分别测量离圆心 0、2、4m，6 cm 处，发射频率为 500 Hz 时的径向声压，测试结果如图 5 所示。

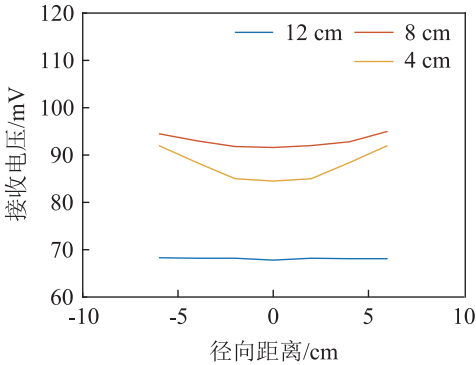


图5 液腔中径向声压变化测试结果

Fig.5 Test results of radial sound pressure change in the liquid cavity

由图 5 可知，在轴向距离 15 cm 处的径向声压变化幅度最小，越接近 8 cm 处，径向声压变化幅度越大。比较 100~2 000 Hz 频率范围内，15、12、8 cm 三个位置的径向声压变化率，如表 1 所示。

表1 径向声压变化率

Table 1 Change rates of the radial sound pressure

频率/Hz	径向声压变化率/%		
	15 cm	12 cm	8 cm
100	1.1	1.1	1.9
300	1.8	2.8	3.9
500	1.6	3.1	5.8
700	2.5	3.2	6.6
900	3.0	5.2	7.8
1 200	3.5	5.0	8.2
1 400	4.8	6.6	9.7
1 600	7.0	8.0	12.0
1 800	11.0	13.0	15.0
2 000	16.0	18.0	20.0

由表 1 可知，15 cm 处径向声压变化率较小。在 100~1 400 Hz 频率范围内，径向声压的变化均小于 5%。因此可选择 15 cm 处作为测量区域。

3 比较法测量实验

3.1 测量实验

以离液腔下方端口 15 cm 处的圆心位置作为测量位置，通过分别测量待测水听器与标准水听器在同一位置下的接收电压，得到待测水听器灵敏度。水听器灵敏度的计算公式为

$$M_H = \frac{U_H}{U_R} M_R \tag{5}$$

式中： U_H 是待测水听器的接收电压； U_R 是标准水听器的接收电压； M_R 是标准水听器的灵敏度；

测量实验中，标准水听器使用丹麦 BK8104 型

水听器。该水听器可以在0.1 Hz~120 kHz的频域内进行测量，是理想的校准工具。

待测水听器为自制的Φ20 mm球型水听器。具体测量步骤如下：

(1) 换能器的布放与系统搭建，连接好所有设备，在腔体中注满纯净水并使待测水听器与标准水听器在介质中浸泡30 min；

(2) 在保持测量位置和激励条件不变的条件下，在100~1 000 Hz分别测量标准水听器以及待测水听器，通过式(5)，可以求出待测水听器灵敏度。

水听器灵敏度的测试结果如图6所示。

分别采用振动液柱法和液腔比较法测试水听器的灵敏度，结果如表2所示。由表2可知，测试结果与标准结果相比最大相差0.8 dB，该偏差在不确定度范围内。

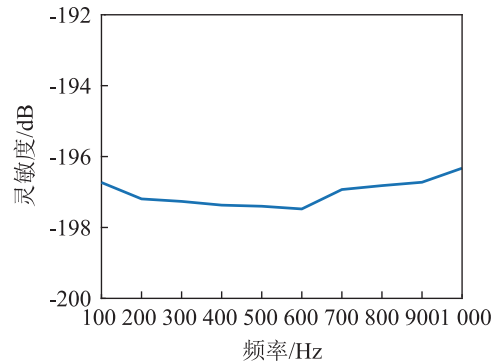


图6 灵敏度测试结果
Fig.6 Sensitivity test results

表2 两种不同方法的水听器灵敏度结果对比
Table 2 Comparison of hydrophone sensitivities obtained by two different calibration methods

频率/Hz	振动液柱法测试 灵敏度/dB	液腔比较法测试 灵敏度/dB	差值/dB
100	-196.9	-196.7	0.2
200	-196.7	-197.2	0.5
300	-196.7	-197.4	0.7
400	-196.7	-197.4	0.7
500	-196.7	-197.5	0.8
600	-196.7	-197.0	0.3
700	-196.7	-196.8	0.1
800	-196.6	-196.9	0.3
900	-196.6	-196.7	0.1
1 000	-196.6	-196.3	0.3

3.2 测量不确定度分析

测量系统中的不确定度包含A、B两类^[8]，A类不确定度主要来源于重复测量，B类不确定度主要来源于系统或者测量方法本身。现以测量频率为1 000 Hz时的测试数据为例进行分析。

通过对待测水听器的灵敏度进行6次重复测量(I=6)，以测量结果算术平均值的标准差作为系统的A类不确定度分量s，计算公式为

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (\bar{x} - x_i)^2}{I-1}} \tag{6}$$

式中： x_i 表示第*i*次的测量值， $\bar{x}$ 表示灵敏度测量的平均值；*I*表示测量次数，*I*=6。

水听器灵敏度重复测试数据如表3所示。根据式(6)以及表3数据计算得到A类不确定度 $u_A=0.4$ dB。

表3 水听器灵敏度重复测试数据
Table 3 Repeated test data of hydrophone sensitivity

序号	灵敏度/dB	序号	灵敏度/dB
1	-198.5	4	-196.3
2	-196.5	5	-197.6
3	-195.8	6	-196.2

B类不确定度的评定通常根据有用信息或经验判断各个不确定度分量可能值的区间(-*a*, *a*)及概率分布，根据概率分布和要求的估计置信因子 k_j ，B类不确定度为

$$u_B = \frac{a}{k_j} \tag{7}$$

B类不确定度的来源主要包括：

(1) 电压测量误差，包括待测水听器的电压测量误差引入的不确定度分量 u_{B1} ，以及标准水听器电压测量误差引入的不确定度分量 u_{B2} (电压测量误差按2%计算，取均匀分布， $k=\sqrt{3}$)；

(2) 被测水听器与标准水听器体积声场的影响所引入的不确定度 u_{B3} 。该误差主要体现在对待测水听器接收电压的影响(按5%计算，取均匀分布， $k=\sqrt{3}$)；

(3) 标准水听器灵敏度的不确定度分量 u_{B4} 。

B类不确定度的合成公式为

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2} \tag{8}$$

B类不确定度分量如表4所示。根据式(4)计算表4中不确定度分量合成的不确定度^[9]： $u_B=0.3$ dB。

表4 B类不确定度分量
Table 4 Class B measurement uncertainty components

分量名称	分量值/dB	分量名称	分量值/dB
u_{B1}	0.1	u_{B3}	0.25
u_{B2}	0.1	u_{B4}	0.1

将A、B类不确定度进行合成，得到扩展不确定度*U*，合成公式为

$$U = k(u_A^2 + u_B^2)^{1/2} \tag{9}$$

取 $k=2$, 根据式(9)得到的扩展不确定度为 $U=1$ dB。

4 结 论

本文首先对溢流环换能器液腔特性进行了分析, 并在刚性罐体内, 以溢流环换能器为低频声源, 溢流环换能器液腔为测试场所, 构造了水听器低频灵敏度比较法测试系统。

实验结果表明, 以溢流环换能器液腔为基础构造低频测试系统是可行的。与现阶段常用的振动液柱法测试系统相比, 该方法无须配置激振器激发声场, 系统搭建简洁, 成本低, 适用性广。

参 考 文 献

- [1] 平自红. 一种水听器灵敏度空气中的测试方法[C]//2019中国西部声学学术交流会, 2019.
- [2] 王敏, 杨平, 何龙标, 等. 水听器自由场灵敏度的光学法绝对校准[C]//2019年全国声学大会论文集. 深圳, 2019: 563-564.
- [3] MARSSET T, MARSSET B, KER S, et al. High and very high resolution deep-towed seismic system: performance and examples from deep water Geohazard studies[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2010, 57(4): 628-637.
- [4] 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.
- [5] 王涛, 张争气. 溢流环换能器的有限元分析[J]. 电声技术, 2010, 34(10): 62-64.
WANG Tao, ZHANG Zhengqi. Finite element analysis of free-flooded ring transducer[J]. Audio Engineering, 2010, 34(10): 62-64.
- [6] MCMAHON G W. Performance of open ferroelectric ceramic cylinders in underwater transducers[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 36(3): 528.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 《声学水听器低频校准方法》: GB/T 4130-2017. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [8] 贾梦雯, 赵鹏, 王月兵. 高静水压下换能器阻抗特性的测量方法研究[J]. 计量学报, 2020, 41(4): 461-468.
JIA Mengwen, ZHAO Peng, WANG Yuebing. Research on measurement method of electrical impedance of transducer under high hydrostatic pressure[J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(4): 461-468.
- [9] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 6版. 北京: 机械工业出版社, 2005.