

数值算法实现同振式矢量水听器 驻波管中灵敏度修正*

张 虎¹ 陈洪娟² 张洪刚^{1†} 王 鹏¹

(1 海军工程大学 兵器工程学院 武汉 430033)

(2 哈尔滨工程大学 水声工程学院 哈尔滨 150001)

2021 年 11 月 2 日收到

2022 年 11 月 25 日定稿

摘要 大尺寸的矢量水听器在驻波管中进行灵敏度校准时会引起校准声场分布不均匀,使得灵敏度校准结果出现较大误差。在无法获取校准声场准确的解析表达式情况下,以实际驻波管校准装置为原型,建立声场仿真分析模型,通过数值计算得到矢量水听器和参考标量水听器的声压和加速度量值,并结合灵敏度校准公式和参考值导出灵敏度修正因子。利用修正因子,对不同尺寸矢量水听器灵敏度测试结果修正以后,与参考值最大绝对误差减小到 2.0 dB 下。结果表明数值算法能有效减小非均匀声场引起的大尺寸矢量水听器灵敏度校准误差,扩展了矢量水听器驻波管校准装置的测试对象。

关键词 驻波管, 矢量水听器, 灵敏度, 数值计算, 校准

PACS 数 43.58, 43.38

Sensitivity correction of co-vibrating vector hydrophone in standing wave tube by numerical calculation

ZHANG Hu¹ CHEN Hongjuan² ZHANG Honggang^{1†} WANG Peng¹

(1 College of Ordnance Engineering, Naval University of Engineering Wuhan 430033)

(2 College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University Harbin 150001)

Received Nov. 2, 2021

Revised Nov. 25, 2022

Abstract When the sensitivity of a large-size vector hydrophone is calibrated in a standing wave tube, the distribution of the calibration sound field will be uneven, resulting in a large error in the calibration results. In the case that the accurate analytical expression of the calibration sound field cannot be obtained, the sound field simulation analysis model is established based on the actual standing wave tube calibration device. The sound pressure and acceleration values of vector hydrophone and reference scalar hydrophone are obtained by numerical calculation, and the sensitivity correction factor is derived by combining the sensitivity calibration formula and the reference value. After using the correction factor, the maximum absolute error between the test results and the reference value of vector hydrophones with different sizes is reduced to less than 2.0 dB. The results show that the numerical calculation method can effectively reduce the sensitivity calibration error of large-size vector hydrophones caused by the non-uniform sound field and expand the test object of the vector hydrophone standing wave tube calibration device.

Keywords Standing wave tube, Vector hydrophone, Sensitivity, Numerical calculation, Correction

引言

为了实现远程、低噪声水下目标探测任务,声矢

量探测系统正朝着低频、高灵敏度方向发展。但多数低频、高灵敏度矢量水听器的内部都装配有一定尺寸的高灵敏度敏感器件,或外置特殊用途的前置放大器,导致整体外形尺寸变大^[1-2],所以在实验室有

* 国家自然科学基金项目(11474075)资助

† 通讯作者:张洪刚, honggangzhang@126.com

限空间声场内(如驻波场)对其进行灵敏度校准测试时,就会引起声场的畸变,导致作用在矢量水听器表面的声波不均匀,使得其测试结果在有些频段范围内与参考值相去甚远^[3-4]。

目前矢量水听器的计量校准方法主要有驻波场法、振动液柱法以及自由场法等^[5]。对于工作在高频段的矢量水听器校准测试一般采用自由场校准方法^[6-8],其矢量水听器外形尺寸的大小对声场的影响小,可忽略不计。而对于工作在低频段(2000 Hz 以下)的矢量水听器,由于频率低、波长大,在室内水池条件下很难保证自由场空间校准要求^[9],其校准频率下限通常也只能到 500 Hz 左右,采用 CMWA 技术也仅能扩展到 250 Hz^[7-8]。所以,对于大多数工作在低频的矢量水听器校准,国内外仍以驻波场法或振动液柱法为主^[10-14]。

国内 20~2000 Hz 量水听器校准规范规定^[15]:为保证驻波管内声场的均匀性,被校件的最大尺寸不应大于驻波管半径。而对于外形尺寸与驻波管半径相近、甚至大于驻波管半径的矢量水听器,欲使校准结果准确可靠,就需增大驻波管的内径。若通过增大驻波管内径的方法来实现大尺寸矢量水听器的驻波管校准测试,无疑增大了声管实际制造的工程难度以及制造成本,同时也降低了驻波管校准频率工作上限^[16]。因此,为保障矢量水听器在实验室驻波管校准系统中的测量准确度,提高现有驻波管矢量水听器校准系统的使用效率,需要开展大尺寸矢量水听器灵敏度校准修正方法研究。

本文基于矢量水听器驻波管灵敏度校准原理建立驻波管校准声场计算模型,分析不同尺寸的矢量水听器放入驻波管前后的声场分布特性,结合灵敏度校准公式,获得不同尺寸矢量水听器灵敏度修正因子。然后通过同种型号的加速度计为矢量水听器内部敏感器件,制作 50 mm 和 150 mm 的两种尺寸矢量水听器实物,在保持悬挂系统、测试仪器和测试条件相同的条件下对制作完成的不同尺寸矢量水听器进行灵敏度校准,利用修正因子对测量结果进行修正,与参考值比较从而验证修正因子的有效性。

1 矢量水听器驻波管灵敏度校准原理

同振式矢量水听器是通过内部置放振动传感器(如速度或加速度计)去拾取水下声场质点振速、加速度或位移矢量信息^[17]。在理想情况下(矢量水听器平均密度与水介质密度相同,几何尺寸远小于波长),矢量水听器灵敏度与内部振动传感器灵敏度一

致,所以一般将矢量水听器内部振动传感器的灵敏度通过转换计算后作为矢量水听器声压灵敏度级测试检验的参考值。矢量水听器在驻波管中进行校准测试时,是通过在一端开口的充水管中(图 1),利用管底的平面活塞声源,在正弦信号的激励下向上发射声波,由于上端水和空气交界面的声阻抗接近于零,到达水面的声波基本上被全反射,所以在管内水柱中形成了平面驻波场^[18]。

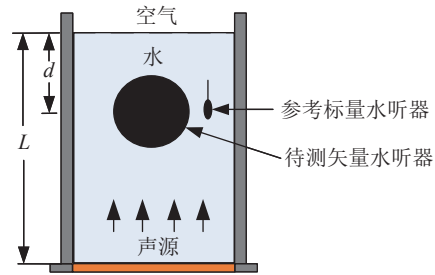


图 1 矢量水听器驻波管校准原理

因为驻波管内的水柱可视为短的声传输线,因此驻波管中任意一点的声阻抗为^[19]

$$Z_d = \frac{p_d}{u_d} = \rho c \tan(kd), \quad (1)$$

其中, p_d 为任意一点处的声压, u_d 为任意一点处的振速, ρ 为水密度, c 为水中声速, k 为波数。当一个灵敏度 M_0 已知的参考标量水听器与待测矢量水听器放置在同一深度 d 时(也可放置不同深度),则该点处加速度可利用声压与振速之间的阻抗关系间接获得,即

$$a_d = \omega u_d = \omega \frac{p_d}{Z_d} = \frac{\omega e_0}{M_0 \rho c \tan(kd)}, \quad (2)$$

其中, ω 为角频率, e_0 为参考标量水听器在该点处的开路输出电压。

由矢量水听器加速度灵敏度公式

$$M_a = \frac{e_1}{a_d} \quad (3)$$

可知,当矢量水听器放入驻波管后, e_1 为矢量水听器开路输出电压,若知道该点处的加速度 a_d ,其灵敏度 M_a 就可知。将式(2)代入式(3)可得到矢量水听器加速度灵敏度驻波管校准公式,即

$$M_a = \frac{e_1}{a_d} = \frac{e_1 \rho c \tan(kd)}{\omega p_d} = M_0 \frac{e_1 \rho c}{e_0 \omega} \tan(kd). \quad (4)$$

若将其转换为平面波自由场声压灵敏度则为

$$M_p = \frac{\omega}{\rho c} M_a = M_0 \frac{e_1}{e_0} \tan(kd). \quad (5)$$

由式(4)可知,矢量水听器驻波管灵敏度校准方法为比较法,该方法利用已知灵敏度的标量水听器

作为参考水听器,将矢量水听器的输出结果与其进行比较,得到矢量水听器灵敏度。可见,在测试环境参数(如水介质密度、声速、温度、入水深度等)、安装悬挂结构、测试仪器设备一定的情况下,驻波管内的声场特性将影响矢量水听器灵敏度测试的准确度,即矢量水听器放入驻波管后拾取的加速度将影响矢量水听器开路输出电压 e_1 ;矢量水听器同一深度平面处的声压 p_d 将影响参考标量水听器的开路输出电压 e_0 。

2 矢量水听器驻波管校准声场特性研究

2.1 仿真分析模型

矢量水听器驻波管灵敏度校准声场是一个有限空间内的多维度复杂声场,它包含驻波管底部声源形成的入射平面波、在球形矢量水听器表面形成的球面散射波和驻波管内壁反射回来的柱面散射波,散射波和入射波叠加形成最终的总声场。所以,为了对矢量水听器驻波管校准声场进行详细分析,以实际驻波管测试系统(图2)为原型建立矢量水听器驻波管校准声场仿真分析模型。

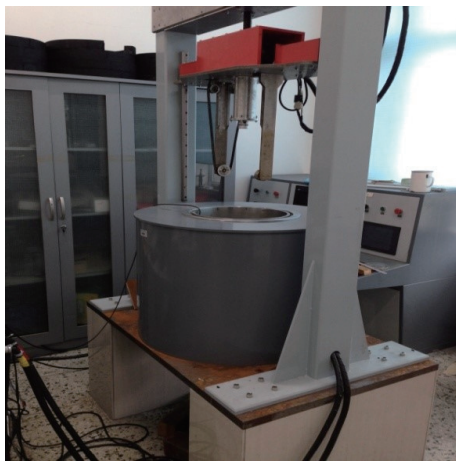


图2 矢量水听器驻波管校准系统

其中,驻波声管内半径 175 mm, 外半径 325 mm, 高 700 mm, 材质为不锈钢材料。管内填充除气液体水,管底为平面波辐射边界,方向向上;上表面为液-气软声学软边界,管内壁为声学硬边界。水面下 15 cm 处为矢量水听器,其材料为 ABS 塑料,密度为 1240 kg/m^3 ,杨式模量为 $2.5 \times 10^9 \text{ Pa}$,泊松比为 0.4。利用有限元法建立声-固耦合多物理场仿真分析模型,如图3所示。

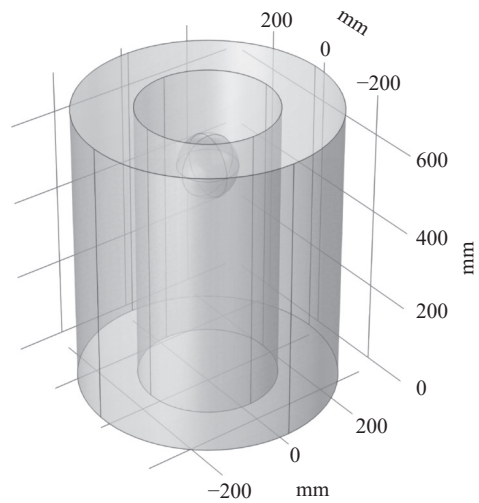


图3 驻波管校准声场仿真分析模型

2.2 校准声场的声压特性分析

在驻波管测试系统工作频率 20 Hz~2 kHz 范围内,按 1/3 倍频程进行频率扫描,选取部分频点下的声压场分布,如图4—图7所示。

图4—图7为部分频点下矢量水听器驻波管校准声场轴向截面绝对声压分布图和中心轴向绝对声压曲线。从图中可以看出:矢量水听器驻波管校准声场的绝对声压在竖直方向上呈现层状分布,水平均匀,仅随深度变化。在低频段(小于 1 kHz),绝对声压最大值位于底部声波发射面,并沿着轴线向上逐渐减小,在声管的最上方的空气-水界面处的声压值为 0。随着频率的增加,在深度方向上,绝对声压

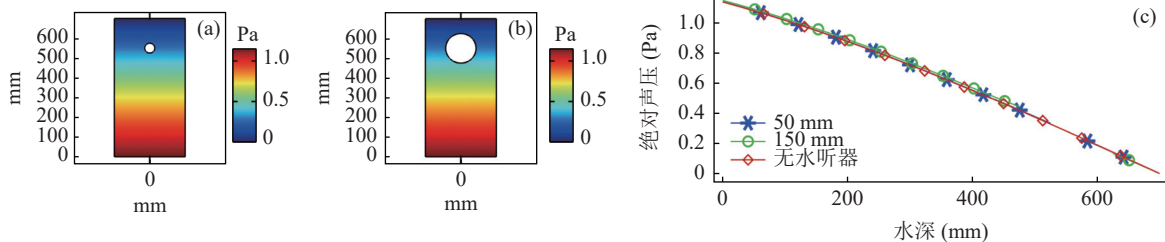


图4 $f = 315 \text{ Hz}$ 时声压特性分布 (a) 50 mm 矢量水听器轴向截面声压分布; (b) 150 mm 矢量水听器轴向截面声压分布; (c) 矢量水听器放入驻波管前后轴向声压曲线

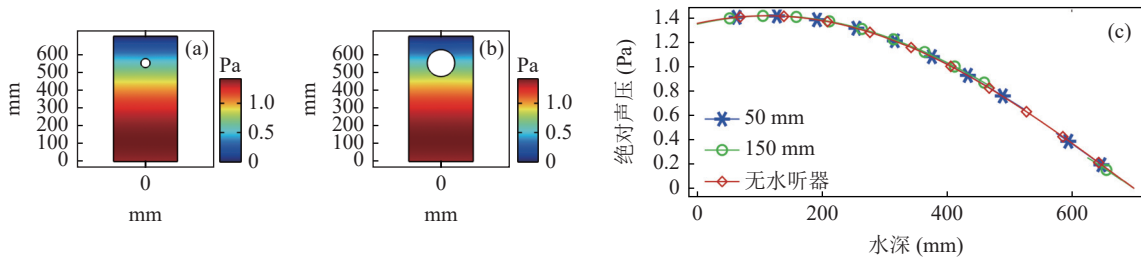


图 5 $f=630\text{ Hz}$ 时声压特性分布 (a) 50 mm 矢量水听器轴向截面声压分布; (b) 150 mm 矢量水听器轴向截面声压分布; (c) 矢量水听器放入驻波管前后轴向声压曲线

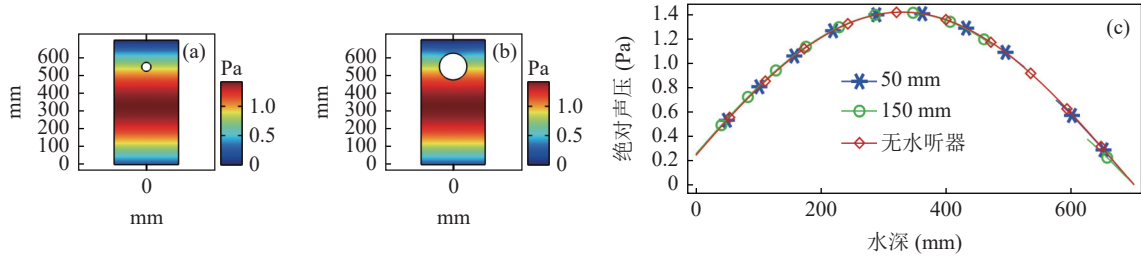


图 6 $f=1\text{ kHz}$ 时声压特性分布 (a) 50 mm 矢量水听器轴向截面声压分布; (b) 150 mm 矢量水听器轴向截面声压分布; (c) 矢量水听器放入驻波管前后轴向声压曲线

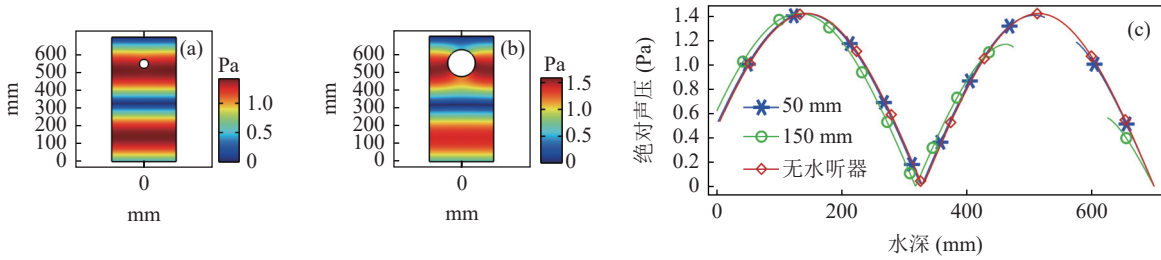


图 7 $f=2\text{ kHz}$ 时声压特性分布 (a) 50 mm 矢量水听器轴向截面声压分布; (b) 150 mm 矢量水听器轴向截面声压分布; (c) 矢量水听器放入驻波管前后轴向声压曲线

先变大再变小, 呈现出正弦规律特征, 与驻波管理论声场一致。在矢量水听器放入驻波管后, 水听器周围区域的声压场发生了畸变, 且频率越高、尺寸越大, 畸变越严重。为研究其畸变大小, 利用矢量水听器轴向声压曲线拟合得到其中心点处的绝对声压, 将其与放入之前相同点的绝对声压进行比较, 如图 8 所示。

图 8 为矢量水听器放入驻波管之前和放入水面下 150 mm 后其中心点处绝对声压比较图。从图中可以看出: 在驻波管 20 Hz~2 kHz 的工作频段范围内, 矢量水听器放入驻波管后的中心点处绝对声压与驻波管声场中实际绝对声压相比, 先是偏大, 然后随着频率增加, 逐步偏小。其中 50 mm 矢量水听器在 400 Hz 以下频率, 相对误差较为稳定, 从 0.30% 至 0.08%; 400 Hz 以上频率相对误差随着频率增加显著变化, 从-0.05% 变为-5.26%。150 mm 的矢量水听器在 200 Hz 以下频率, 相对误差较为稳定, 从 3.7% 至 3.0%; 200 Hz 以上频率相对误差随着频率增加显

著变化, 从 2.62% 变为-37.25% (负号表示值变小, 下同)。50 mm 外径的矢量水听器在 400 Hz 时相对误差最小为-0.05%; 150 mm 外径的矢量水听器在 500 Hz 时相对误差最小为-0.42%。

图 9 为矢量水听器放入驻波管之前和放入水面下 250 mm 后其中心点处绝对声压比较图, 其相对误差变化规律与图 8 基本一致。此时 50 mm 矢量水听器在 250 Hz 以下频率, 相对误差较为稳定, 从 0.35% 至 0.08%; 250 Hz 以上频率相对误差随着频率增加显著变化, 从-0.02% 变为-3.39%。150 mm 的矢量水听器在 200 Hz 以下频率, 相对误差较为稳定, 从 2.38% 至 1.44%; 200 Hz 以上频率相对误差随着频率增加显著变化, 从 0.92% 变为-30.98%。在 315 Hz 时, 50 mm 外径的矢量水听器和 150 mm 外径的矢量水听器相对误差均最小, 分别为-0.02% 和 0.12%。

2.3 校准声场的加速度特性分析

因为矢量水听器感知的就是声场中的加速度信息, 所以矢量水听器放入驻波管后还需研究声场中

的加速度量值的变化情况。图 10—图 13 为 50 mm 和 150 mm 球形矢量水听器放入驻波管声场前后部分频点下的加速度特性分布图。

从图 10—图 13 中可以看出：同驻波管声压场一样，驻波管内的加速度场也为层状分布，水平均匀，不同深度处加速度值不同；随着频率的增加，逐步呈现驻波特性。同样在矢量水听器附近区域，加速度

场出现畸变，频率越高、尺寸越大，畸变现象越严重。特别是 2 kHz 时，150 mm 外径的矢量水听器在放入驻波管后，其驻波节点位置向管底偏移。同样为研究其畸变大小，提取矢量水听器模型在中心轴线方向上的加速度与放入矢量水听器之前驻波管相同位置处的加速度进行比较，如图 14 所示。

图 14 为矢量水听器放入水面下 150 mm 后在声

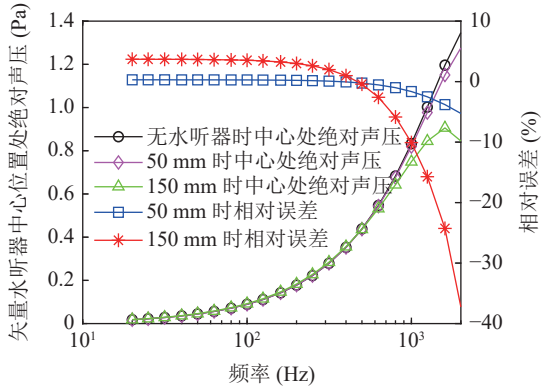


图 8 矢量水听器放入驻波管前后绝对声压 (水下 150 mm 处)

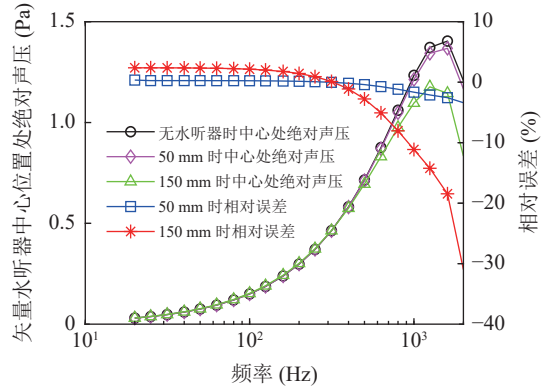


图 9 矢量水听器放入驻波管前后绝对声压 (水下 250 mm 处)

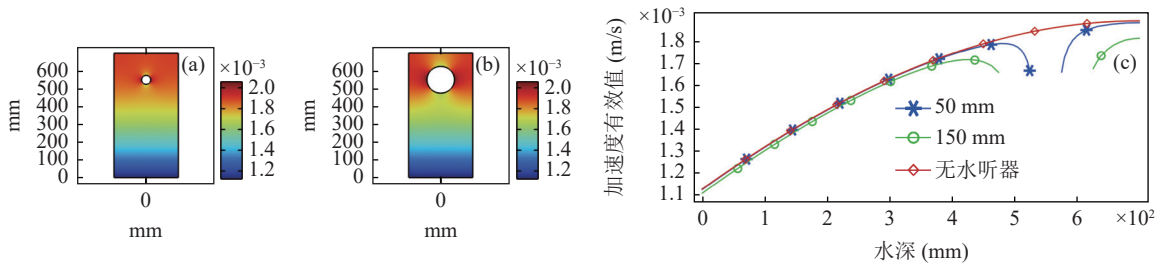


图 10 $f=315$ Hz 时加速度特性分布 (a) 50 mm 矢量水听器轴向截面加速度分布; (b) 150 mm 矢量水听器轴向截面加速度分布; (c) 矢量水听器放入驻波管前后轴向加速度曲线

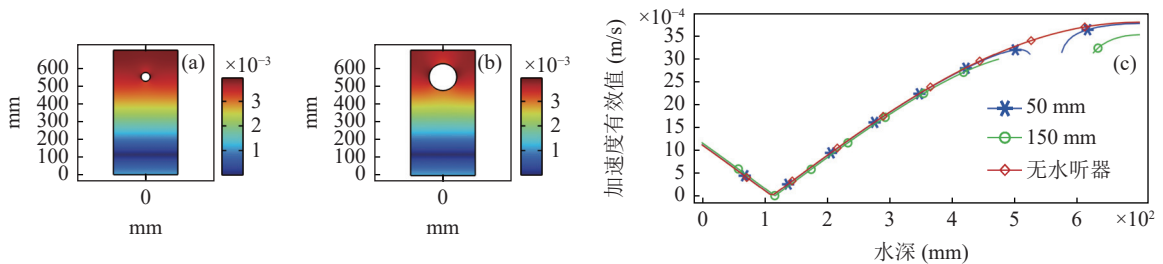


图 11 $f=630$ Hz 时加速度特性分布 (a) 50 mm 矢量水听器轴向截面加速度分布; (b) 150 mm 矢量水听器轴向截面加速度分布; (c) 矢量水听器放入驻波管前后轴向加速度曲线

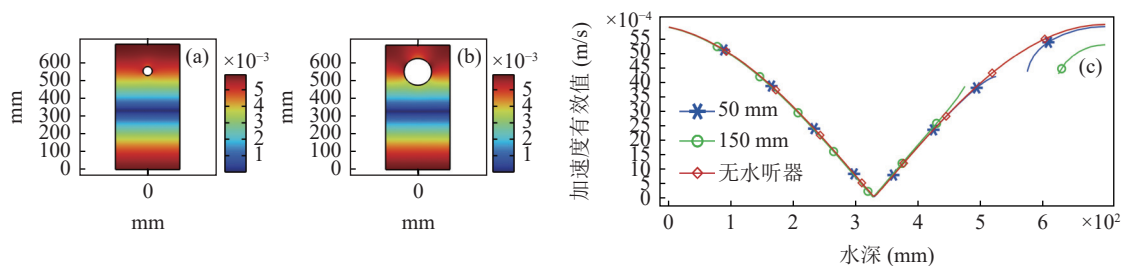


图 12 $f=1$ kHz 时加速度特性分布 (a) 50 mm 矢量水听器轴向截面加速度分布; (b) 150 mm 矢量水听器轴向截面加速度分布; (c) 矢量水听器放入驻波管前后轴向加速度曲线

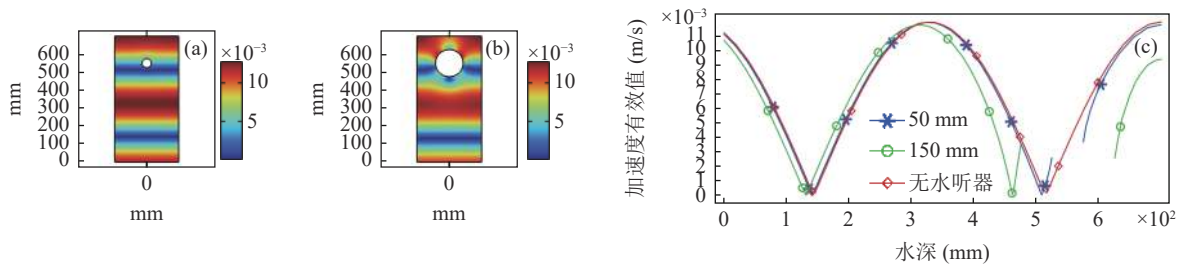


图 13 $f = 2 \text{ kHz}$ 时加速度特性分布 (a) 50 mm 矢量水听器轴向截面加速度分布; (b) 150 mm 矢量水听器轴向截面加速度分布; (c) 矢量水听器放入驻波管前后轴向加速度曲线

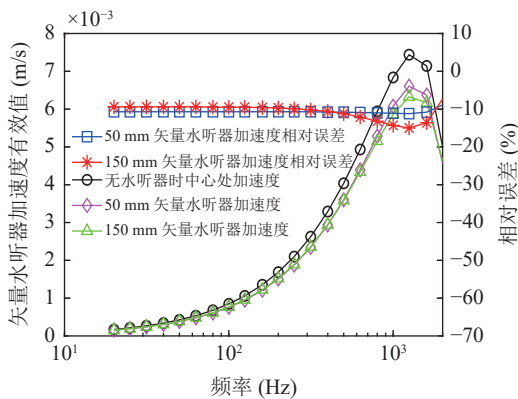


图 14 矢量水听器放入驻波管前后加速度 (水下 150 mm 处)

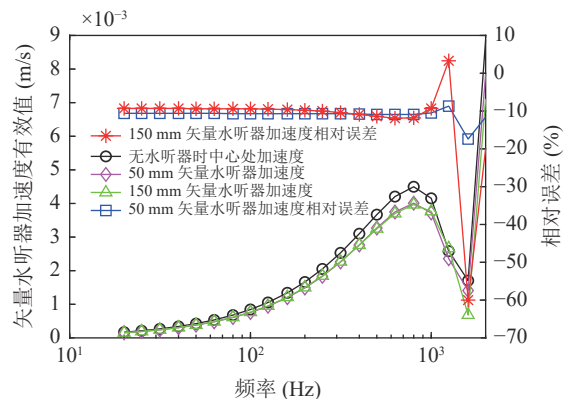


图 15 矢量水听器放入驻波管前后加速度 (水下 250 mm 处)

波作用下运动产生的加速度和放入之前该点处的加速度比较图。从图中可以看出: 矢量水听器在声波作用下获得的加速度在 20 Hz~2 kHz 频段范围内均比该点处驻波管声场中实际加速度小。其中 50 mm 外径的矢量水听器加速度相对误差变化范围为-8.9% 至-11.2%, 在 1.25 kHz 时最大为-11.2%, 在 2 kHz 时最小为-8.9%。而 150 mm 外径的矢量水听器加速度相对误差变化范围为-7.3% 至-15.0%, 在 1.25 kHz 时最大为-15%, 在 2 kHz 时最小为-7.3%。在 400 Hz 以下频率, 两种尺寸矢量水听器的加速度相对误差相对较为稳定, 其变化范围分别为-10.7% 至-10.8% 和-9.4% 至-10.6%。在 400 Hz 以上频率, 随着频率的增加, 其相对误差先变大后变小, 且外形尺寸越大, 相对误差越大。

图 15 为矢量水听器放入水面下 250 mm 后在声波作用下运动产生的加速度和放入之前该点处的加速度比较图。其中 50 mm 外径的矢量水听器加速度相对误差在 1 kHz 以下频率相对稳定, 变化范围为-10.5% 至-10.9%, 在 1.25 kHz 时最小为-8.7%, 在 1.6 kHz 时最大为-17.4%。而 150 mm 外径的矢量水听器加速度相对误差在 400 Hz 以下频率相对稳定, 变化范围为-9.3% 至-10.9%, 在 1.25 kHz 时最小为 3.3%, 在 1.6 kHz 时最大为-60%。

综合上述矢量水听器放入驻波管前后的绝对声

压和加速度比较分析可知, 在 400 Hz 以下频率, 矢量水听器的外形尺寸对驻波管声场影响相对较小, 所以研究者采用驻波管校准矢量水听器灵敏度时在 400 Hz 以下频率偏差较小^[8]。而在 400 Hz 以上频率, 则需要结合校准实际工况, 具体分析矢量水听器对驻波管声场畸变的影响大小。

3 不同尺寸矢量水听器灵敏度校准修正因子

通过矢量水听器驻波管校准声场特性研究可知, 当矢量水听器外形尺寸较大 (外形尺寸与驻波管半径相近、甚至大于驻波管半径) 时, 校准声场会产生畸变。所以, 通过建立与矢量水听器实际校准工况一致的仿真分析模型, 提取矢量水听器放入驻波管中获得的加速度和参考标量水听器位置处的声压, 并利用驻波管矢量水听器声压灵敏度校准公式 (5) 就可获得与实际校准较为一致的灵敏度, 再将其与参考值进行比较, 其差值即为矢量水听器在驻波管校准时的灵敏度修正因子。

图 16 为两种不同尺寸矢量水听器在驻波管中的声压灵敏度级仿真结果和通过内部加速度计灵敏度转换而来的参考值。从图中可以看出: 当驻波管声场不发生畸变时, 即矢量水听器放入之前, 其灵敏

度级仿真结果与参考值一致,说明仿真结果的有效性;在 1 kHz 以下频率范围内,两种尺寸的矢量水听器声压灵敏度级仿真结果呈一条直线,符合每 1/3 倍频程增加 2 dB 的变化规律;150 mm 外径的矢量水听器灵敏度级比参考值略小。在 1~2 kHz 频率范围内,随着频率的增加,150 mm 外径的矢量水听器灵敏度级开始出现显著变动。20 Hz~2 kHz 频段范围内,两种不同尺寸的矢量水听器声压灵敏度级与参考值之间的差值如表 1 所示。

从表 1 中可以看出:尺寸小的矢量水听器声压灵敏度级与理论参考值更为接近,这也进一步说明大尺寸的矢量水听器对驻波管声场均匀性的影响大。

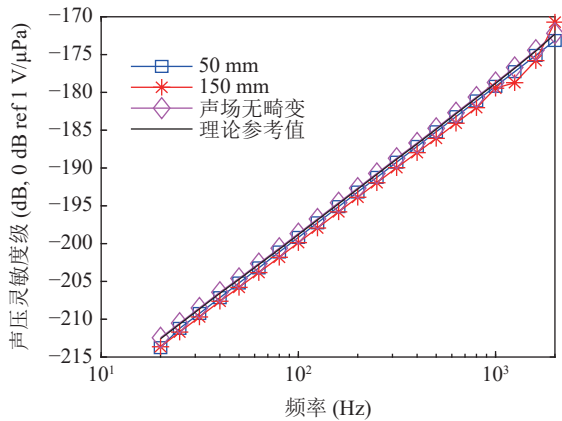


图 16 驻波管中矢量水听器声压灵敏度级仿真与理论参考值

表 1 不同尺寸矢量水听器驻波管灵敏度校准修正因子

频率 (Hz)	50 mm球形 (dB)	150 mm球形 (dB)	频率 (Hz)	50 mm球形 (dB)	150 mm球形 (dB)
20	-0.7	-1.2	250	-0.5	-1.2
25	-0.7	-1.2	315	-0.5	-1.3
31.5	-0.7	-1.2	400	-0.5	-1.3
40	-0.7	-1.2	500	-0.5	-1.3
50	-0.6	-1.2	630	-0.5	-1.4
63	-0.6	-1.2	800	-0.5	-1.4
80	-0.5	-1.2	1000	-0.5	-0.8
100	-0.5	-1.2	1250	-0.6	-2.0
125	-0.5	-1.2	1600	-0.7	-1.4
160	-0.5	-1.2	2000	-1.0	1.5
200	-0.5	-1.2			

4 校准修正因子有效性实验验证

为验证上述校准修正因子的有效性,采用灵敏度约为 0.3 V/(m/s²)、重 13 g、工作频段为 20 Hz~2 kHz 的同一型号加速度计作为矢量水听器内部核心敏感器件(图 17)。同时采用 3D 打印技术制作与上述仿真分析材料参数一致的 ABS 塑料外壳作为矢量水听器密封外壳,封装后的矢量水听器样品如图 18 所示。

利用实验室矢量水听器驻波管校准装置对两只矢量水听器样品进行测试后,其声压灵敏度级测量值、修正值以及校准修正前后与参考值之间的绝对误差如图 19 所示。

从图 19 中可以看出:在 20~800 Hz 频段范围内,

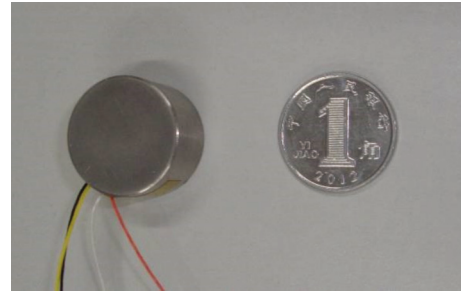


图 17 矢量水听器内部加速度计

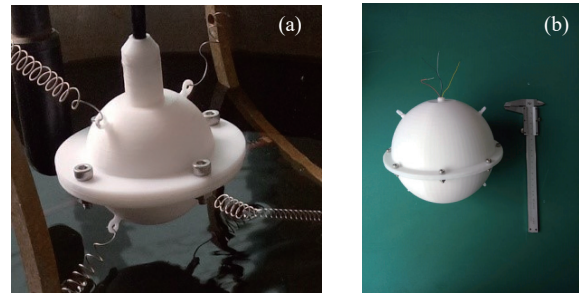


图 18 矢量水听器样品 (a) 50 mm; (b) 150 mm

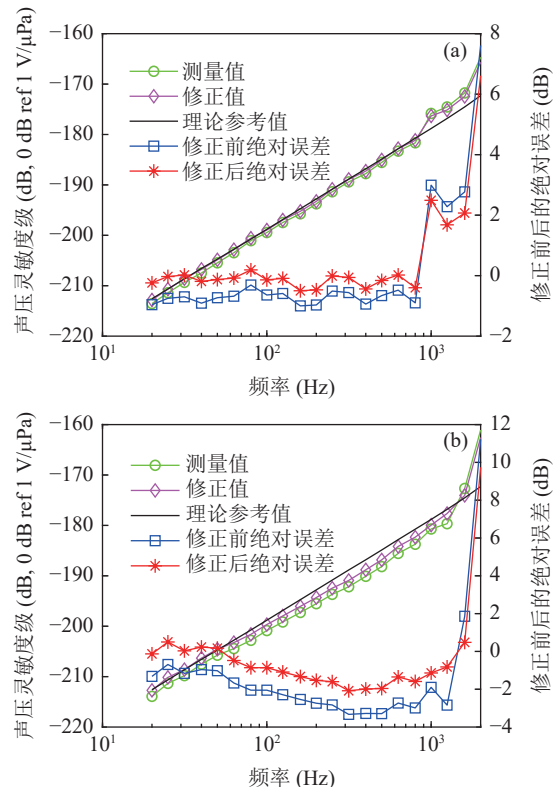


图 19 矢量水听器样品灵敏度测量和修正结果 (a) 50 mm; (b) 150 mm

除 150 mm 外径的矢量水听器个别频点灵敏度级与参考值相差较大外, 两种外径的矢量水听器的声压灵敏度级测量值与参考值基本一致。而经过修正后, 50 mm 外径的矢量水听器声压灵敏度级最大绝对误差由 1.0 dB 减小到 0.5 dB; 150 mm 外径的矢量水听器声压灵敏度级最大绝对误差由 3.3 dB 减小到 2.0 dB。在 1 kHz 以上频率, 经过修正后, 50 mm 外径的矢量水听器声压灵敏度级最大绝对误差从 7.6 dB 降到 6.6 dB, 150 mm 外径的矢量水听器声压灵敏度级最大绝对误差从 11.2 dB 降到 9.7 dB。修正不理想的原因可能在于所选内部加速度计谐振工作频率 (3.15 kHz) 与矢量水听器工作频率上限 2 kHz 较为接近, 导致矢量水听器的声压灵敏度级在 1 kHz 以上频率开始出现明显上扬。

所以, 为进一步证明该方法的有效性并排除内部加速度计谐振频率影响, 并能通过自由场消声水池进行验证, 特选择工作频带更宽 (20 Hz~8 kHz)、灵敏度约为 0.2 V/(m/s²) 的 ICP 加速度计制作矢量水听器样品, 其外径为 120 mm, 密度为 1100 kg/m³, 外壳为环氧树脂加玻璃微珠的混合物, 如图 20 所示。通过建立与实际测试情况一致的有限元仿真计算模型所得的声压灵敏度级仿真结果和通过内部加速度计灵敏度转换而来的参考值如图 21 所示, 两者之间的差值如表 2 所示。

从图 21 和表 2 中可以看出: 驻波管声场不发生畸变时的灵敏度级结果与参考值一致; 在 1.6 kHz 以下频率范围内, 矢量水听器声压灵敏度级仿真结果呈一条直线, 符合每 1/3 倍频程增加 2 dB 的变化规律, 其值比参考值小 1.3 dB 左右; 在 1.6 kHz 以上频率范围内, 随着频率的增加, 矢量水听器灵敏度级偏离参考值较大, 出现显著波动。

经过实验室矢量水听器驻波管校准装置和消声水池对其进行灵敏度级测试后, 其测量值、修正值和校准修正前后与参考值之间的绝对误差如图 22 所示。

由于受驻波管校准装置相关条件限制 (声源工作频率上限), 在驻波管中的测试结果频率上限为 3.15 kHz。同时, 也受到消声水池测试条件限制 (消声水池工作频率下限), 在消声水池中的测试结果频率下限为 1 kHz。

从图 22 中可以看出: 在驻波管中, 其测量值在 1.6 kHz 以下频率基本呈一条直线, 与参考值之间的最大绝对误差为 2.5 dB; 在 1.60~3.15 kHz 频率范围内, 测量值出现波动, 与参考值之间的最大绝对误差为 6.4 dB。经过修正后, 在 20 Hz~3.15 kHz 频率范围内, 其灵敏度级与参考值基本一致, 且修正后的结果

在高频段 (1.60~3.15 kHz) 与消声水池测试结果基本一致, 最大绝对误差也减小为 1.4 dB。在消声水池中, 其测量值在 1.6 kHz 以下频率偏离参考值较大, 1.6~8.0 kHz 频率范围, 与参考值基本一致。其中与驻波管中测试频率重合部分 (1.60~3.15 kHz) 内的测量值要优于驻波管中的测量值, 其最大绝对误差仅为 0.8 dB。所以在大于 2 kHz 以上频率, 自由场条件下矢量水听器灵敏度校准结果要好于驻波管条件。

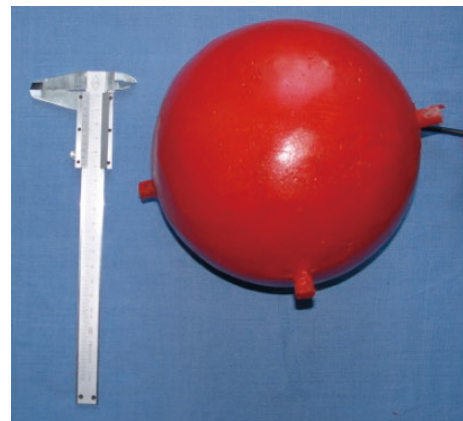


图 20 宽带矢量水听器样品

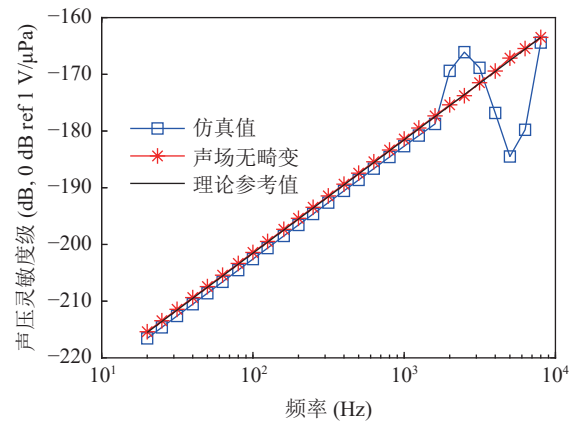


图 21 宽带矢量水听器声压灵敏度级仿真与理论参考值

表 2 宽带矢量水听器驻波管灵敏度校准修正因子

频率 (Hz)	宽带水听器 (dB)	频率 (Hz)	宽带水听器 (dB)	频率 (Hz)	宽带水听器 (dB)
20	-1.2	200	-1.2	1600	-1.4
25	-1.2	250	-1.2	2000	6.0
31.5	-1.2	315	-1.2	2500	7.7
40	-1.2	400	-1.2	3150	2.6
50	-1.2	500	-1.2	4000	-7.4
63	-1.2	630	-1.2	5000	-17.4
80	-1.2	800	-1.2	6300	-14.3
100	-1.2	1000	-1.3	8000	-0.9
160	-1.2	1250	-1.3		

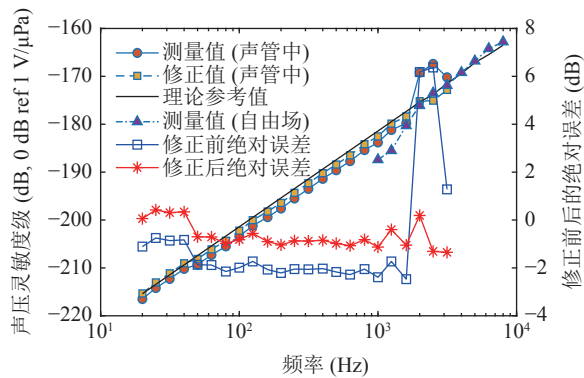


图 22 宽带矢量水听器声压灵敏度级测量和修正结果

5 结论

本文基于驻波管中矢量水听器灵敏度校准原理, 结合灵敏度校准公式, 通过有限元仿真计算, 获得了驻波管中矢量水听器灵敏度校准修正因子, 并通过实际测试验证, 证明了修正因子的有效性。由于该方法是在驻波管矢量水听器灵敏度校准测试实际工况基础上的, 所以对任何同振式矢量水听器在驻波管中进行灵敏度测试时, 均可建立相应灵敏度仿真分析模型, 具有一定的通用性。特别是对外形尺寸与驻波管半径相近或大于驻波管半径的同振式矢量水听器灵敏度修正效果较好。但也需要注意的是, 在实际测试过程中应按相关标准规范操作, 同时建立仿真计算模型也要与实际测试情况相符, 包括驻波管与矢量水听器的材料参数、驻波管与矢量水听器的外形尺寸以及测试时矢量水听器和参考标量水听器的入水深度, 这些参数均影响到修正因子的通用性。

参 考 文 献

- 1 杨德森, 洪连进. 矢量水听器原理及应用引论. 北京: 科学出版社, 2009
- 2 休罗夫 B A. 海洋矢量声学. 贾志富译. 北京: 国防工业出版社, 2011
- 3 Hu Z, Hong J C, Wen Z W. An underwater acoustic vector sensor with high sensitivity and broad band. *Sensors & Transducers*, 2014; **170**(5): 30—34
- 4 张虎. 平面矢量传感器阵列的研制及校准研究. 博士学位论文, 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014: 13—14
- 5 袁文俊. 声学计量. 北京: 原子能出版社, 2002: 103—104
- 6 陈洪娟, 张虎, 赵懿. 三维同振球形矢量水听器的小型化研究. *声学技术*, 2009; **28**(2): 168—170
- 7 贾广慧, 陈毅. 矢量水听器灵敏度的自由场互易校准研究. *声学技术*, 2017; **36**(S4): 93—96
- 8 陈毅, 贾广慧, 费腾, 等. 5 Hz~10 kHz 频率范围矢量水听器校准国际主导比对. *计量学报*, 2020; **41**(10): 1279—1283
- 9 赵松龄. 声学测量技术20年. *声学技术*, 2002; **21**(2): 52—54
- 10 Gordienko V A, Gordienko E L, Dryndin A V, et al. Absolute pressure calibration of acoustic receivers in a vibrating column of liquid. *Acoust. Phys.*, 1994; **40**(2): 219—222
- 11 陈洪娟, 费腾. 水声驻波声管在矢量水听器校准技术中的应用. *宇航计测技术*, 2022; **42**(5): 1—7
- 12 莫喜平, 王文芝, 郑士杰. 偶极子接收换能器驻波场校准系统的研究. *应用声学*, 1998; **17**(6): 14—18
- 13 卢治强, 廖述常, 于洪涛. 矢量水听器标准装置水声低频计量应用研究. *宇航计测技术*, 2016; **36**(2): 61—63
- 14 成浩, 陈洪娟, 李佳桐. 矢量水听器低频绝对校准装置研究. *声学技术*, 2018; **37**(3): 292—296
- 15 赵涵, 费腾, 禹建. 20 Hz~2000 Hz 矢量水听器校准规范. 北京: 中国质检出版社, 2012: 13
- 16 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础. 北京: 国防工业出版社, 1981
- 17 陈洪娟. 矢量传感器. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2006
- 18 陈毅, 赵涵, 袁文俊. 水下电声参数测量. 北京: 兵器工业出版社, 2017: 102—103
- 19 郑士杰, 袁文俊, 缪荣兴, 等. 水声计量测试技术. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1995: 79—83