超低频声压水听器的设计仿真与测试

于砚廷^{1,2,3,4},苏 伟^{1,2,3,4},王 振^{1,2,3,4},张 超^{1,2,3,4*},郑 轶^{1,2,3,4}

3. 国家海洋监测设备工程技术研究中心,山东 青岛 266100;

4. 中乌共建海洋声学科研创新联合实验室,山东 青岛 266100)

摘 要:随着减振降噪及消声技术的发展,水声探测技术逐渐向低频段延伸。相应地,对适用于超低频频段且具有 高灵敏度的水听器需求也越来越迫切。该研究基于有限元理论,对4种形式的声压水听器进行了灵敏度对比分 析,构建了超低频、高灵敏度声压水听器的系统模型;通过仿真,得到了其前二阶模态,空气及水中的导纳曲线,以 及声压接收灵敏度,仿真结果表明,超低频频段内,该研究设计的声压水听器在空气及水中的频响曲线平坦。基于 仿真结果进行了样机制作,对所研制的实物样机进行了实验测试,测试结果表明该种声压水听器具有良好的超低 频响应特性以及较高的灵敏度。通过对实物样机的测试,验证了其实用性。

关键词:超低频声压水听器;有限元法;谐振频率;声压灵敏度

中图分类号:TP181 文献标识码:A 文章编号:1002-3682(2019)02-0096-09

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2019.02.002

引用格式:YUYT,SUW,WANGZ, et al. Design, simulation and test of ultra-low frequency sound pressure hydrophone[J]. Coastal Engineering, 2019, 38(2): 96-104. 于砚廷,苏伟,王振,等. 超低频声压水听器的设计仿真 与测试[J]. 海岸工程, 2019, 38(2): 96-104.

声波是目前人类所掌握的唯一能在海洋中实现远距离传播的信息载体^[1]。水听器是获取水下声信号的 主要设备,声压水听器^[2-3]最常用,其工作原理是:通过探测水下声信号以及噪声声压变化来产生与声压成比 例的电压输出。发展至今,水听器已经成为被动声呐^[4]系统中的核心设备,并被广泛应用于海洋环境监测、 海洋资源开发和海洋军事探测等诸多领域^[5-6]。

近年来,随着潜艇降噪技术^[7-8]的不断发展,使得传统的声压水听器对安静型潜艇的探测距离缩减至几 百米以内^[9],但研究资料表明,潜艇降噪技术在低频段能达到的效果远比在中高频段差得多。所以,研制超 低频、高灵敏度的声压水听器必定是未来水声探测技术的主要发展趋势之一。根据 Coates^[10]提出的水下信 道各个频段的划分,通常 1.5 kHz 以下被称为超低频频段。目前,国内对于超低频、高灵敏度声压水听器的 研究与应用尚处于起步阶段。李世平等提出了 2 种液腔水听器,其中液腔耦合水听器显著提高了其谐振频 率附近的接收灵敏度,复合液腔水听器在 1.5~11.5 kHz 频带内,接收灵敏度级均高于-185 dB^[11];李中强 研究了 2 种高灵敏度水听器^[12],其中复合棒式水听器的工作频率上限为 15 kHz,声压灵敏度为-189 dB, 迷你罐式水听器的工作频率上限为 20 kHz,声压灵敏度为-176 dB;李飞设计的 PVDF 水听器虽然工作频 段低,但却需要设计与之匹配的前置放大电路^[13]。

水听器设计方法有瑞兹法,能量法,边界元法,有限元法等。但总得来说,对于线性压电器件,在忽略机

收稿日期:2018-12-17

资助项目:国家自然科学基金青年基金项目——水下目标前向声散射探测的多普勒域直达波抑制机制研究(61801275);山东省重大科技 创新工程项目——超低频同振式矢量水听器及其测试保障系统研究(2018YFJH0707);水声技术重点实验室稳定支持课题——浅海甚低频声强矢量抵达结构特征研究(SSJSWDZC2018014);山东省重点研发计划(科技合作)项目——水声系统模拟 设备软件的联合研发(2018JHZ002)

作者简介:于砚廷(1980-),男,工程师,主要从事传感器与换能器方面研究. E-mail: 18678903956@163.com

* 通讯作者:张 超(1990-),男,硕士,主要从事声学传感器与换能器方面研究. E-mail: zhangchao_ouc@163.com

(李 燕 编辑)

电损耗和电磁辐射的情况下,有限元法几乎可以解决水听器的所有问题。并且有限元法能够适应许多水声换能器涉及的结构不规则,材料不均匀以及边界条件复杂等情况,已成为目前水声换能器设计和分析的主流方法^[1420]。本研究结合当下迫切需求,借助有限元软件 ANSYS,仿真设计了一种可应用于超低频的高灵敏度声压水听器,测试表明,其具有良好的超低频响应特性以及较高的灵敏度。

1 设计仿真

1.1 仿真基础

水听器对声压的感知,归根结底是一个动力学问题,在设计仿真过程中,需要借助下面的有限元方 程^[21-22]进行模态及谐响应求解:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F, \tag{1}$$

式中,u为位移向量;F为载荷向量;M,C,K分别为系统的质量参数矩阵,阻尼参数矩阵及刚度参数矩阵。 其中,F=0和 $F=F_0e^{i\theta} \cdot e^{i\omega t}$ 时分别对应水听器的模态振型和谐波响应分析。

值得注意的是,以上求解涉及到多物理场的耦合分析。对于压电型水听器来说,主要包括压电耦合分析 以及流-固耦合分析。

ANSYS 在解决压-电耦合问题时所依赖的控制方程如下:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\boldsymbol{u}} \\ \boldsymbol{V} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{C} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\boldsymbol{u}} \\ \dot{\boldsymbol{V}} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{K} & \boldsymbol{K}^{Z} \\ [\boldsymbol{K}^{Z}]^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{K}^{\mathrm{d}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{V} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{F} \\ \boldsymbol{Q} \end{pmatrix},$$
(2)

式中,u为广义位移向量,V为压电体节点电位移向量, K^{z} 为机电耦合分量, K^{d} 为介电矩阵分量。

在求解流-固耦合[23]问题时所依赖的控制方程为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M}_{s} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{M}_{fs} & \boldsymbol{M}_{f} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\boldsymbol{u}} \\ \ddot{\boldsymbol{p}} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{s} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{C}_{f} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\boldsymbol{u}} \\ \dot{\boldsymbol{p}} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{K}_{s} & \boldsymbol{K}_{fs} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{K}_{f} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{F}_{s} \\ \boldsymbol{0} \end{pmatrix} , \qquad (3)$$

式中, u 为广义位移向量, P 为流体中节点声压向量, K_{fs}与 M_{fs}分别为广义刚度阵与广义质量阵中加入的流-固耦合分量。

1.2 仿真过程

声压灵敏度是表征声压水听器的重要指标参数。为获得声压水听器的超低频、高灵敏度特性,本文受新

型弯曲圆盘换能器^[9]的启发,分别对4种形式的 水听器(即极性相同的压电陶瓷串、并联接与极 性相反的压电陶瓷串、并联接)进行了灵敏度分 析,得到的灵敏度曲线如图1所示。

由图 1 可见,超低频段内,相比其他 3 种形 式来说,极性相同的压电陶瓷串联其灵敏度均值 最高,在-178 dB 左右,并且其谐振峰值在 3 800 Hz 左右,完全能够满足工程要求。本次 设计的声压水听器系统结构如图 2 所示。采用 极性相同的压电陶瓷进行串联方式连接。压电 陶瓷片在接收到声压信号后,会带动支架一起产 生厚度方向上的弯曲振动,并将声压信号转化为 电信号。









图 2 声压水听器系统结构图 Fig.2 Structural diagram of the sound pressure hydrophone system

由于声压水听器的结构具有轴对称性,为简化分析,在 ANSYS 中只建立其 1/4 部分的简化模型,空气 及水中的三维模型如图 3 所示。其中,陶瓷片与支架的半径分别为 25 和 30 mm,厚度分别为 1 和 2 mm。 流体域半径为 0.1 m,满足远场条件。



Fig.3 Three-dimensional model of the one quarter part of a hydrophone

定义压电陶瓷及金属支架的单元类型分别为耦合单元 SOLID5 与结构单元 SOLID185;定义近场水与 远场水的单元类型为 FLUID30,吸声系数为 0;边界水的单元类型为 FLUID130,吸声系数为 1。其次定义 压电陶瓷、金属支架以及海水的材料属性,材料基本参数如表 1 所示,压电陶瓷沿厚度极化,其参数矩阵查阅 相关文献即可得到^[24]。

Table 1Parameters of the basic materials				
材料	$ ho/(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3})$	$v/(m \cdot s^{-1})$	$E/(N \cdot m^{-2})$	σ
PZT-5	7 750			
海水	1 025	1 500		
钛合金	4 430		1.1×10^{11}	0.34

表 1	基本材料参数
-----	--------

注:空白处表示无数据

对空气中及流体中的三维模型进行网格划分,网格类型选择六面体单元,划分方式选择 Sweep,划分完 后的有限元模型如图 4 所示。



柱坐标系下,侧面施加周向位移约束UY=0,中间轴线施加径向位移约束UX=0。在对应电极面的压 电陶瓷界面上定义节点自由度耦合,并将相同电势面耦合,施加节点载荷及提取节点变量时只选择耦合部中 的最小节点进行操作,在负电极上施加载荷电压V=0,正电极上施加载荷电压V=1。此外,在进行流体域 中的仿真时,还需要设置流-固耦合界面为FSI(Fluid Solid Interaction)。

1.3 仿真结果

对声压水听器在空气中的模态进行仿真分析,提取第一、二阶振动模态,得到其固有频率及模态振型分 别如图 5 所示。





Fig.5 Vibration forms of the first and the second modes

通常,水听器工作于其一阶固有频率处。由图 5a 可以看出,由于两片极性相同的压电陶瓷串联,导致空 气中声压水听器在一阶固有频率处进行相向的厚度方向上的弯曲振动,符合设计需要。

为确定超低频声压水听器的工作频段及频率特性,需要对水听器进行谐响应分析。设置空气及流体中的阻尼系数分别为 0.006 与 0.04^[25-26]。仿真得到的空气中导纳曲线及导纳圆如图 6 所示,水中导纳曲线及导纳圆如图 7 所示。



Fig.7 Admittance curve and admittance circle in water

由图 6,图 7 可以看出,超低频段内,水听器 在空气及水中的频响曲线平坦,且谐振频率均大 于 3 倍的最高工作频率。

对比空气及水中的导纳曲线可以发现,其在 水中的一阶谐振频率比空气中减少了1400 Hz 左右,电导值减小了1.1 ms 左右。主要是由于 水在一定程度上充当了部分附加质量以及阻尼 作用,从而降低了声压水听器在水中的谐振频率 及电导值。

10~1000 Hz 频段内,仿真得到的声压灵 敏度曲线见图 8。由图 8 可以看出,在 10~ 1000 Hz 的工作频段内,声压水听器的灵敏度 曲线变化平坦,灵敏度均值约为-177.85 dB,具 有较高的灵敏度。



2 实物样机测试

制作完成的样机如图 9 所示,包覆透声橡胶之后, 水听器部分长度为 82.5 mm,宽度为 64.2 mm,厚度为 15.0 mm,制作过程主要包括:1)用砂纸对金属支架的 表面进行处理,然后用酒精清洗干净,便于良好的粘 接;2)焊接正负电极以及用于陶瓷片之间串联的导线; 3)利用环氧胶将金属支架与压电陶瓷片进行粘接,粘 好后在适当压力下室温固化 24 h;4)将固化好的样品 放入鼓风烘箱中,120 ℃条件下保温 30 min,消除内 应力。

利用同惠 TH2826A 型阻抗分析仪对置于消声水 池中的水听器样机进行了导纳测试,测试曲线如图 10 所示。测试与仿真结果的对比如图 11 所示。



图 10 水中导纳测试 Fig.10 Admittance test in water



图 9 实物样机 Fig.9 Physical prototype





Fig.11 Contrast of admittance simulation and test in water

由图 10 可见,仿真的声压水听器谐振频率在 3.7 kHz 左右,在 1~3 kHz 以内具有较为平坦的电导值, 未出现任何毛刺,因此本仿真的水听器具有良好的超低频响应特性,并且通过图 11 可见,实验与仿真得到的 频响曲线变化趋势一致;谐振频率仅相差 100 Hz,吻合度高,因此也进一步验证了仿真方法选择合理。

利用振动液柱法^[27]对水听器进行了声压灵敏度的测试,测试现场如图 12 所示。由测试与仿真结果对 比图(图 13)可见,10~1 000 Hz 频段内,通过测试得到的灵敏度同样较高,均值达到-179.64 dB;测试与仿 真得到的灵敏度曲线变化趋势相符,灵敏度均值相差不到 2 dB,验证了仿真方法的可行性。以标准水听器 8105 为例,其在 0.1~100 kHz 的标称灵敏度为(-205±2)dB,本文研制的水听器在设计频段内灵敏度高于 标准水听器 25 dB 以上。



calibration and measuring device



由测试结果可以得出,本文所研制的超低频声压水听器具有较高的灵敏度,其原因有必要作进一步解 释:即由于两片压电陶瓷极性相同,并且采用串联方式连接,响应电荷不变的情况下,电压响应会加倍,并且 水听器的工作形式为沿厚度方向上的弯曲振动,这样可以最大程度地利用压电陶瓷自身的压电应变常数,故 声压灵敏度会有较大提高。

结 语 3

利用有限元法,设计了一种适用于超低频频段的高灵敏度声压水听器,并进行了样机制作。对实验样机 的性能进行了测试,测试结果验证了本研究所设计的声压水听器具有良好的超低频响应特性。

1)本研究基于有限元法研制了一种高灵敏度、超低频声压水听器,测试表明该声压水听器具有良好的超 低频响应特性以及较高的灵敏度。

2)分析导纳仿真结果可得,水会在一定程度上充当部分附加质量以及阻尼作用,导致声压水听器在水中 的谐振频率及电导值会有所降低。

3)利用极性相同的压电陶瓷串联的方式以及其厚度方向上的弯曲振动模式,可以显著提高叠片式声压 水听器的灵敏度。

参考文献(References):

- [1] ZHU Y Q, YANG H, HU S C. Communication experiment system design based on acoustic wave[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017(3): 264-266. 朱玉琼,杨红,胡爽策. 基于声波的通信实验系统设计[J]. 装备制造技术, 2017(3): 264-266.
- [2] CHEN H, ZHENG Y J, HU H P, et al. Analysis on performance of an infrasound piezoelectric hydrophone [C]// IEEE. 2016 Symposium on Piezoelectricity Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA). Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016: 309-313.
- [3] HUI C, JIANG H L, HUA Z L. Offshore marine ambient noise measurement based on hydrophone[C]//International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics. France: Atlantis Press, 2015;1558-1561.
- [4] HAN J, ZHANG X G, MENG C X, et al. Simulated Research on Passive Sonar Range Using Different Hydrographic Conditions[C]// EDP Sciences. In Proceedings of the MATEC Web of Conferences. Lisbon: EDP Sciences, 2015: 04003.
- [5] CHEN Z , LI Z Z, GAO X, et al. Simulation of sonar target tracking and locating based on pressure hydrophone in ocean[J]. Computer Simulation, 2017, 34(5): 1-6. 陈喆, 李智忠, 高鑫, 等. 海洋中声压水听器对声纳目标跟踪定位仿真[J]. 计算机仿真, 2017, 34(5): 1-6.

38 卷

- [6] TENG D, YANG H, LI D J. Foundation of underwater acoustic transducer[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2016:1-18. 滕舵,杨虎,李道江. 水声换能器基础[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2016:1-18.
- [7] GAO F. Development prospect on the vibration isolation and noise reduction technology of submarine in European countries[J]. Ship Science & Technology, 2015, 37(10):160-164. 高峰. 欧洲国家海军潜艇减振降噪技术发展展望[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(10): 160-164.
- [8] WANG H G. Study of vibration isolation and noise reduction technology in US nuclear submarine propulsion system[J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(7): 149-153. 王汉刚. 美国核潜艇推进系统减振降噪技术发展分析[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(7): 149-153.
- [9] LU W. Finite element analysis for new bender disk transducer[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006. 芦苇. 新型弯曲圆盘换 能器的有限元设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2006.
- [10] COATES R. Underwater acoustic communication[C]//IEEE. Proceedings of OCEANS '93(3). Canada: IEEE, 1993: 420-425.
- [11] LISP, MOXP, ZHANGYQ, et al. A high sensitivity hydrophone with composite fluid cavity[J]. Journal of Applied Acoustics, 2017, 36(1): 54-58. 李世平, 莫喜平, 张运强, 等. 复合液腔高灵敏度水听器[J]. 应用声学, 2017, 36(1): 54-58.
- [12] LIZQ. Research on high sensitivity hydrophone[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. 李中强. 高灵敏度声压水听器研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2010.
- [13] LI F. Research on low frequency hydrophone based on PVDF[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013. 李 飞. 基于 PVDF 的低频水听器研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [14] VARADAN V V, CHIN L C, VARADAN V K. Finite-element modeling of flextensional electroacoustic transducers[J]. Smart Materials & Structures, 1993, 2(4):201.
- [15] BEJARANO F, LUCAS M. Finite element modeling and design of cymbal transducers for power ultrasonics applications[C] // IEEE.
 2011 IEEE International Ultrasonics Symposium, Orlando, FL, USA: IEEE, 2011: 1567-1570.
- [16] YOUN S K, BECKER E B. A finite element method for the analysis of piezoelectric composite hydrophones[J]. Computers & Structures, 1992, 44(6): 1215-1223.
- [17] MA Y C, LI D H, WANG L N. Analysis of cymbal piezocomposite transducer's effective piezoelectric coefficients based on ANSYS[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 1313-1315.
- [18] TREMPER T, CARAZO A V, UCHINO K. Finite element analysis simulations of apiezoelectric cymbal actuator using Atila software [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 123(5); 3115.
- [19] TRESSLER J F, CAO W, UCHINO K, et al. Finite element analysis of the cymbal-type flextensional transducer[J]. Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control IEEE Transactions on, 1998, 45(5): 1363-1369.
- [20] UZGUR E, DOGAN A, NEWNHAM R E. Design optimization of piezoelectric composite transducer using finite element method[J]. Key Engineering Materials, 2001, 206-213(2):1297-1300.
- [21] MO X P. Simulation and analysis of acoustics transducers using the ANSYS software[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(6): 1281-1290. 莫喜平. ANSYS 软件在模拟分析声学换能器中的应用[J]. 声学技术, 2007, 26(6): 1281-1290.
- [22] YU Y, ZHANG S, LI H, et al. Modal and harmonic response analysis of key components of ditch device based on ANSYS[J]. Procedia Engineering, 2017, 174: 956-964.
- [23] SIGRIST J F. Modal analysis of fluid-structure interaction problems with pressure-based fluid finite elements for industrial applications[J]. The International Journal of Multiphysics, 2007, 1(1): 123-149.
- [24] WANG R J. Underwater acoustic material handbook[M]. Beijing: Science Press, 1983: 144-146. 王荣津. 水声材料手册[M]. 北京:科学出版社, 1983: 144-146.
- [25] MO X P. Research and design of new bending transducer[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 1998. 莫喜平. 新型弯张换能器 的研究与设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 1998.
- [26] LIU Y P. Design of flexural transducer by finite element method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2003. 刘永平. 有限元法 设计弯张换能器[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2003.
- [27] 全国声学标准化技术委员会. 声学-水听器低频校准方法: GB/T 4130-2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2017. National Technical Committee 17 on Acoustics of Standardization Administration of China. Acoustics—Low frequency calibration methods of hydrophones: GB/T 4130-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

Design, Simulation and Test of Ultra-Low Frequency Sound Pressure Hydrophone

YU Yan-ting^{1,2,3,4}, SU Wei^{1,2,3,4}, WANG Zhen^{1,2,3,4}, ZHANG Chao^{1,2,3,4}, ZHENG Yi^{1,2,3,4}

(1. Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266100, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Environmental Monitoring Technology, Qingdao 266100, China;

3. National Engineering and Technological Research Center of Marine Monitoring Equipment, Qingdao 266100, China;

4. Joint China-Ukrainian Scientific & Innovation Laboratory for Hydroacoustics, Qingdao 266100, China)

Abstract: With the development of vibration reduction, noise reduction and noise elimination techniques, the underwater acoustic detection technology tends to extend toward low frequency range gradually. Accordingly, the demand for hydrophones which are suitable for ultra-low frequency band and has high sensitivity becomes more and more urgent. Based on finite element theory, the sensitivity of four types of sound pressure hydrophones is analyzed and compared, and the system model of sound pressure hydrophone with ultra-low frequency and high sensitivity is constructed. By simulation, the modes of first and second order, the admittance curves in air and water and the sound pressure receiving sensitivity are obtained. The results from the simulation show that within the ultra-low frequency band, the sound pressure hydrophone we designed has even frequency response curves in air and water. Based on the simulation, a prototype of sound pressure hydrophone is developed and tested experimentally. The test results indicate that the prototype of sound pressure hydrophone has good ultra-low frequency response character and high receiving sensitivity, which has verified the practicability of the prototype.

Key words: ultra-low frequency sound pressure hydrophone; finite element method; resonant frequency; sound pressure sensitivity

Received: December 17, 2018