文章编号:1004-2474(2022)02-0278-05 **DOI**:10.11977/j.issn.1004-2474.2022.02.026

锥形结构超声阵列换能器研究

朱时雨[1],王月兵[1],赵成功[2],李世平[1]

(1. 中国计量大学 计量测试工程学院,浙江 杭州 310018;2. 北京电子工程总体研究所,北京 100854)

摘 要:传统外形构造的换能器难以适应水下高速运动。因此,在头部为圆形或椭圆形的普通阵列式换能器基础上,该文设计了一种锥形结构的超声阵列式换能器,其可适用于水下高速航行器。通过有限元仿真确定了阵元尺寸与阵列构造,分析了换能器整体的声场分布,研制换能器样机并测试其电声性能。样机测试结果与仿真结果呈现出较好的一致性,换能器指向性与发射电压响应满足使用需求。结果表明,此种换能器结构具有实际的可行性。

关键词:锥形结构;超声;换能器;水下高速运动

中图分类号:TN605;TB565.1 **文献标志码**:A

Research on Ultrasonic Array Transducer with Conical Structure

ZHU Shiyu[1], WANG Yuebing[1], ZHAO Chenggong[2], LI Shiping[1]

(1. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2. Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China)

Abstract: The transducers with traditional structure are difficult to adapt to underwater high-speed movement. This paper proposes a design scheme of ultrasonic array transducer with conical structure based on the design of ordinary array transducer with circular or elliptical head. The proposed transducer can be suitable for underwater high-speed aircraft. The size and structure of the array element are determined by finite element simulation, the overall sound field distribution of the transducer is analyzed. A prototype of the transducer is developed and its electroacoustic performance is tested. The test results of the prototype are in good agreement with the simulation results. The directivity and emission voltage response of the transducer meet the application requirements. The results show that the structure of the transducer is practical and feasible.

Key words: conical structure; ultrasonic; transducer; high-speed underwater motion

0 引言

水声学主要研究声波在水中的发射、传播和接收,而声波的发射和接收都依赖于换能器,因此换能器的发展对水声学影响较大。水声换能器是在水介质中实现声与其他形式能量或信息转换的一类传感器,它是各类声呐系统最前端的设备,也是声呐系统与水介质相互作用、信息交流的关键[1-3]。

随着水下航行器快速发展,航行速度也越来越快,传统的换能器结构已难以适应水下高速运动[4-5]。本文在传统压电换能器阵列结构的基础上,将外形结构改为锥形设计,使换能器整体适用于水下高速航行器。本文介绍了换能器的基本结构与工作原理,使用有限元法仿真分析了阵元及阵列的振动模态及换能器在水中的声场分布。根据仿真结果与1-3型压电复合材料[6-7]的制作方式,设计阵列排布,制作了换能器的试验样机,通过实验测试并验证了其工作特性。

1 换能器设计

结合换能器的发展情况,针对水下航行器高速运动的需求,在此换能器的研制中,本文提出了一种锥形设计构想,其中换能器的圆锥形头部可有效地减少其在水中的阻力,以适应水下航行器的高速运动[8-10]。

收稿日期:2021-10-14
基金项目:国防军工计量"十三五"科研计划基金资助项目(JSJL2018207B007)
作者简介:朱时雨(1997-),男,浙江省义乌市人,硕士生,主要从事水声学计量测试的研究。通信作者:王月兵(1963-),男,安徽省滁州市人,教授,主要从事水声学计量测试的研究。

1.1　换能器外壳

图 1 为换能器结构示意图。换能器头部呈 30°的圆锥形设计,头部底面开一凹槽用于安装阵列。聚四氟乙烯具有较高强度,能在水流冲击下保持形态,其较低的摩擦系数有利于减小流阻,同时其特性阻抗与水相差不大,有利于声波透射。因此,在兼顾结构强度和声匹配的情况下,选用聚四氟乙烯制作换能器头部。

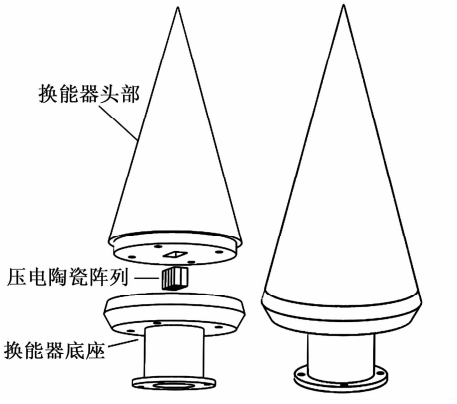


图 1　换能器结构示意图

采用不锈钢材料制作换能器底座,不锈钢材料强度高,耐腐蚀性强,可设计不同样式的底座,使换能器装配在各种使用环境中。设计中选用 PZT-4 型压电陶瓷作为换能器阵元(2×4 式阵列排布),在阵列底部有一层硬质泡沫作为吸声层,用以隔离运动平台辐射噪声的影响,使换能器系统具有安静的工作环境。

1.2　换能器阵元设计

阵元及阵列设计思路:

1) 阵元的长和宽(截面积)控制换能器的指向性。

2) 阵元的厚度(极化方向高度)决定换能器的特征频率,厚度与谐振频率成反比。

3) 结合使用频率及各项要求,确定合适的阵元尺寸。

选用 PZT-4 压电陶瓷(中功率发射的锆钛酸铅压电陶瓷)为换能器阵元,使其在频率 100 kHz 的脉冲激励下工作。对阵元的振动模态进行 COMSOL 有限元仿真,如图 2 所示。分别建立了不同尺寸的 4 个阵元模型并置于空气环境中,通过对单个阵元的振动模态进行仿真分析,在极化方向高度均为 15.5 mm 时,截面积分别为 3 mm×3 mm、4.5 mm×4.5 mm 及 6 mm×6 mm,对应的特征频率变化很小。因此,截面积对其特征频率的影响很小。当截面积为 6 mm×6 mm,极化方向高度改变时,特征频率变化明显,高度增加 1.5 mm,特征频率减小了 11 kHz。由此可知,阵元的特征频率主要受阵元极化方向高度的影响。极化方向高度约为 15.5 mm时,阵元的特征频率接近 100 kHz。为了充分利用压电陶瓷元件的纵向振模,需对元件电极按仿真结果进行切割。

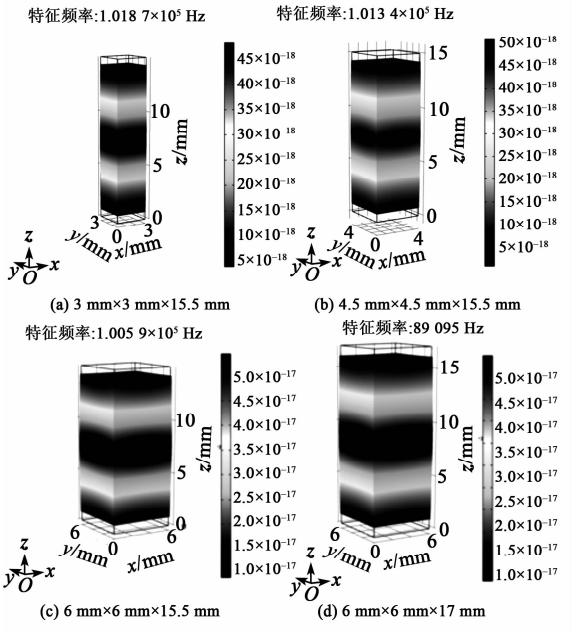


图 2　阵元振动模态仿真

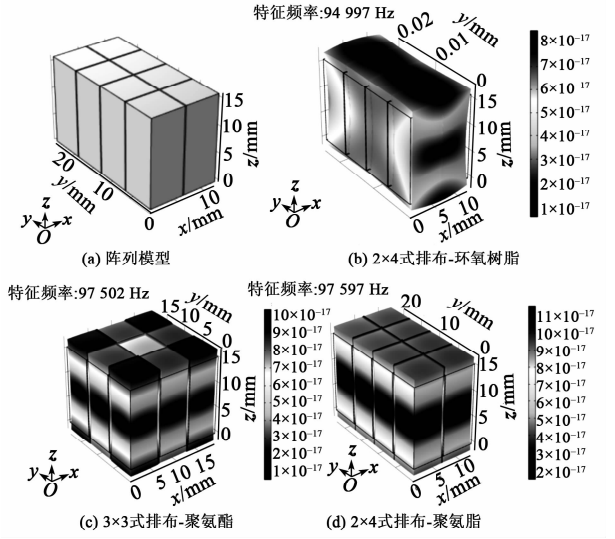
1.3　阵列设计

由于后续在发射阵周围还需增加接收阵的排布,换能器内部空间有限。因此,阵列设计未采用半波长的设计思路。

阵元间常用的粘接剂有环氧树脂与聚氨酯等,两者粘接阵元效果较好,由于环氧树脂固化后的强度远高于聚氨酯,会使粘接后阵列的振动模态为整体振动,阵元之间有较大影响。因此,采用弹性模量较小的聚氨酯作为此阵列的粘接剂。

对阵列的 3×3 式排布和 2×4 式排布分别进行仿真分析,得到结果如图 3 所示。由图可知,2×4 式排布阵列效果较理想,8 个阵元的振幅相同,故采用 2×4 式排布方式。对采用 2×4 式排布,分别使用环氧树脂和聚氨酯粘接的阵列进行各阵元发射电压响应测试,结果如图 4 所示。由图可知,采用环氧

树脂粘接阵列的阵元一致性较差，且其阵列中各阵元发射电压响应比聚氨酯粘接阵列中各阵元的发射电压响应小 1～2 dB，这是由于用环氧树脂粘接时，单个阵元的振动需带动阵列整体进行振动，使发射电压响应略偏小。



(a) 阵列模型 (b) 2×4式排布-环氧树脂
(c) 3×3式排布-聚氨酯 (d) 2×4式排布-聚氨脂

图 3 阵列仿真结果

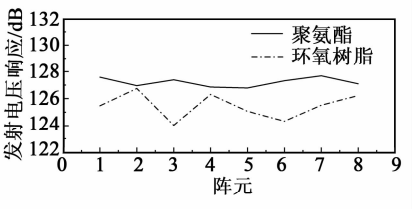


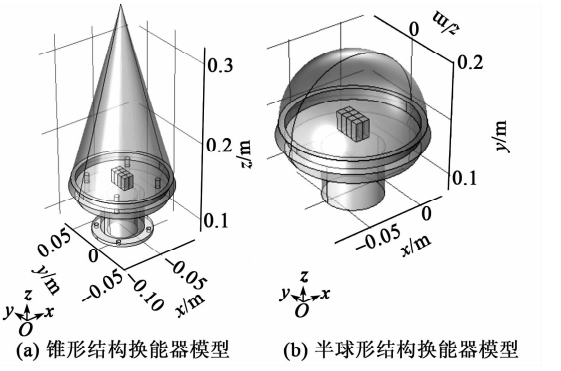
图 4 阵元发射电压响应测试

使用 TH2826 型阻抗分析仪对此排布方式粘接后的阵列谐振频率进行测试，阻抗分析仪测得阵列谐振频率为 96.8 kHz，与仿真结果(97.6 kHz)相近。

阵列设计思路与 1-3 型复合材料相似，通过将整块压电材料切割成压电小柱以抑制横向模态，从而实现纯净的厚度振动模态，提高其有效机电耦合系数。本文通过改进 1-3 型压电复合材料，将阵元间填充的聚合物从传统的环氧树脂改为聚氨酯，有效降低了阵元间的振动耦合，提高了阵元一致性。

1.4 换能器整体仿真

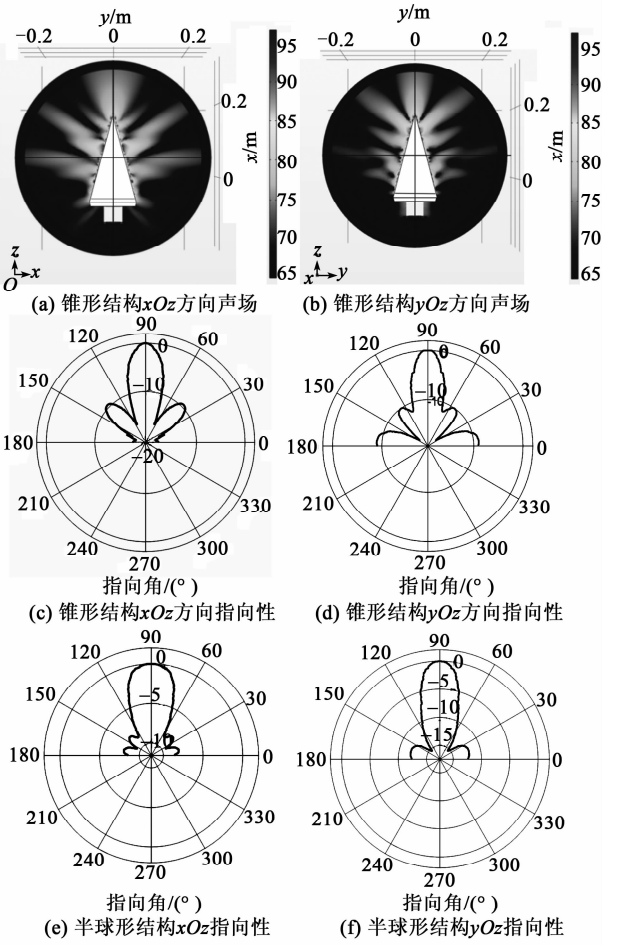
为了研究换能器使用时发射声波的声场情况，首先利用 COMSOL 建立有限元仿真模型，采用压力声学模块、固体力学模块和静电模块进行求解，建立了整体模型(见图 5)对换能器声场进行仿真分析。通过仿真得到锥形结构换能器的指向性，并将其与常见的半球形头部结构换能器的指向性进行对比分析。



(a) 锥形结构换能器模型 (b) 半球形结构换能器模型

图 5 仿真模型图

如图 6 所示，换能器内阵元发出的声波经过聚四氟乙烯头部后，入射到水域中，在换能器尖端处，xOz 切面(阵列的 2 阵元方向)声场中最大辐射方向有一清晰主瓣，在换能器尖端位置，其主瓣幅值大于



(a) 锥形结构xOz方向声场 (b) 锥形结构yOz方向声场
(c) 锥形结构xOz方向指向性 (d) 锥形结构yOz方向指向性
(e) 半球形结构xOz指向性 (f) 半球形结构yOz指向性

图 6 仿真声场分布图

−3 dB,宽度约为 25°,如图6(c)所示。yOz 切面(阵列的 4 阵元方向)声场中有一宽度约为 20°的主瓣,两侧分布部分旁瓣,如图6(d)所示。半球形头部的 xOz 切面主瓣宽度约为 32°,如图 6(e)所示。yOz 切面主瓣宽度约为 25°,如图 6(f)所示。仿真结果显示,锥形结构的换能器指向性宽度比半球形结构换能器指向性宽度小 5°～7°。

2　换能器制作与测试

2.1　换能器制作

根据图 6 仿真结果进行换能器的整体装配与制作。换能器外壳加工时主要是锥尖部位加工难度较大,需要尽可能保证锥尖的尖锐度。头部和底座分别采用聚四氟乙烯与不锈钢材料进行加工,其表面需加工至光滑以保证换能器的低阻力。阵列制作时阵元之间采用聚氨酯粘接,阵元负极用导电胶连通后用导线引出,正极各阵元分别用导线引出。整体装配则根据螺孔位置用螺栓连接,走线后对换能器整体进行水密处理。图 7 为换能器样机图。

图 7　换能器样机图

2.2　换能器性能测试

为了进一步验证此设计方案的可行性和仿真模型的可靠性,搭建的实验测试环境图如图 8、9 所示。

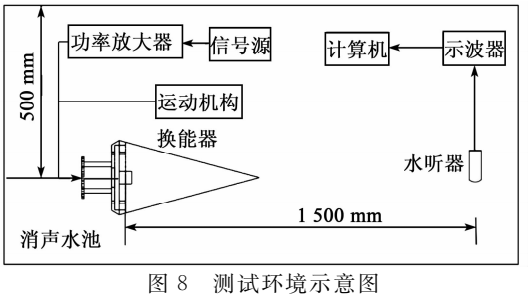


图 8　测试环境示意图

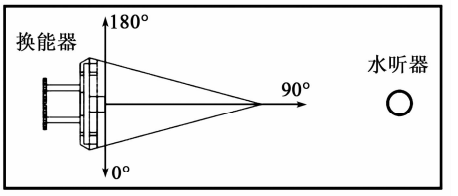


图 9　测试环境俯视图

实验在消声水池中进行,使用夹具夹持换能器置于水下 500 mm 处,在距离换能器阵元 1 500 mm 处放置一个标准水听器,满足远场条件换能器尖端与水听器中心在同一水平面上,测试其声学性能。

设置信号源输出电压为 500 mV,发射 20 个周期的正弦脉冲波作为换能器的激励信号,设置换能器尖端指向水听器时为 90°位置。采用 LABVIEW 软件制作测试程序,控制运动机构使换能器从 0°位置旋转至 180°位置,每隔 0.5°采集水听器接收信号,测试换能器指向性,如图 10 所示。

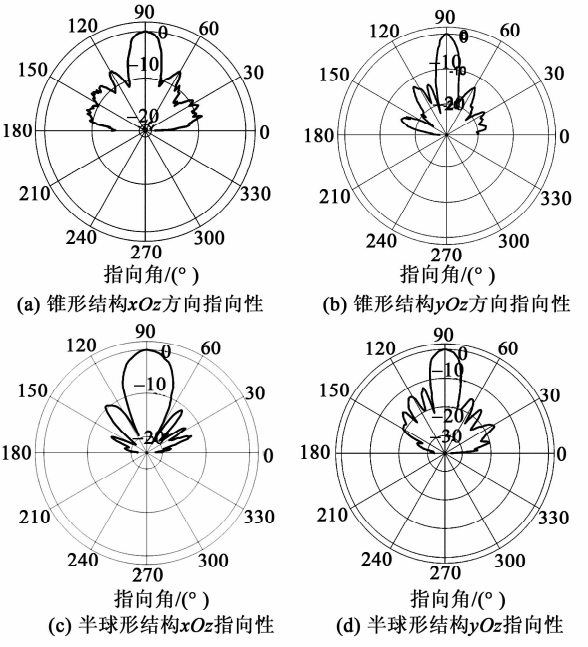


图 10　指向性测试图

由图 10 可知,换能器在尖端朝向水听器时,水听器接收到的信号幅值最大,主瓣清晰。如图10(a)所示,换能器 xOz 方向大于-3 dB 的主瓣宽度约 22°。如图 10(b)所示,yOz 方向主瓣宽度约 12°,比仿真结果的指向性宽度略小。与半球形结构的测试结果相比,锥形结构会使换能器指向性小 5°～10°。

为了得到换能器的发射性能,进行了发射电压响应测试。在相同实验环境下,设置换能器头部尖

端正对水听器中心，8 个阵元同时加上激励电压，测试换能器输入电压与水听器接收电压，计算得到发射电压响应。在频率为 96 kHz 处发射电压响应有最大值(133 dB)，比仿真的理论结果小 1.1 dB，比半球形结构换能器小 1.3 dB。图 11 为换能器样机发射电压响应测试曲线。由图可看出，实测与仿真发射电压响应趋势一致，结果不完全相同，这是由于仿真时均采用理想状态条件，忽略了现实因素。

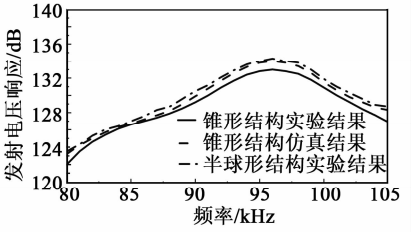


图 11 换能器样机发射电压响应测试曲线

3 结论

1）本文在压电式阵列换能器设计基础上，结合使其适应水下高速航行器运动的设计思路，将传统换能器的平面或球面结构改为锥形结构，并研究了此结构的实际可行性。

2）通过建立换能器在水下工作时的物理模型，研究其工作机理。应用有限元仿真软件计算并分析了换能器工作时的声场分布，得到其指向性数据。根据仿真结果制作换能器样机，并搭建实验测试系统。实验测试表明，实验结果与仿真结果具有较好的一致性。

3）根据理论和实验表明，此换能器的构造设计具有实际可行性。研究证明，声波在透过锥形头部后指向性变小。通过测试发射电压响应可知，在谐振频率处有最大值(133 dB)，比半球形结构换能器小 1.3 dB，这是由于锥形结构的 z 向长度比半球形结构长，产生了发射响应损失。总体来看，锥形结构换能器指向性宽度合适，既保证了较好的探测范围，又能减少干扰，透过锥形头部后的声强可以满足使用需求。

参考文献：

[1] 莫喜平. 我国水声换能器技术研究进展与发展机遇[J]. 中国科学院院刊，2019，34(3)：272-282.
MO Xiping. Research progress and development opportunities of underwater acoustic transducer technology in China[J]. Bull Chin Acad Sci，2019，34(3)：272-282.

[2] 滕舵. 水声换能器与换能器阵技术研究[D]. 西安：西北工业大学，2004.

[3] 郑乙. 水声换能器在水下探测应用中的发展[J]. 科技风，2011(19)：58-60.
ZHENG Yi. Development of underwater acoustic transducer in underwater detection[J]. Technology Wind，2011(19)：58-60.

[4] 傅仁琦，曹焱，王晓林. 无人水下航行器声呐装备现状与发展趋势[J]. 舰船科学技术，2020，42(3)：82-87.
FU Renqi，CAO Yan，WANG Xiaolin. Current status and developing trend of sonar equipments for undersea vehicle[J]. Ship Science and Technology，2020，42(3)：82-87.

[5] 高浩楠. 水下高速航行体制导与控制一体化研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2017.

[6] 陈俊波，王月兵，仲林建. 1-3 型压电复合材料和普通 PZT 换能器性能对比分析[J]. 声学与电子工程，2007，4(3)：25-27.
CHEN Junbo，WANG Yuebing，ZHONG Linjian. Performance comparison between 1-3 piezoelectric composite and ordinary PZT transducer[J]. Acoustic and Electronic Engineering，2007，4(3)：25-27.

[7] 林书玉，王帅军，付志强，等. 径向极化压电陶瓷长圆管复合超声换能器的径向振动[J]. 声学学报，2013，38(3)：354-363.
LIN Shuyu，WANG Shuaijun，FU Zhiqiang，et al. Radial vibration of radially polarized piezoelectric ceramic long tube composite ultrasonic transducer[J]. Acta Acoustica Sinica，2013，38(3)：354-363.

[8] 傅金祝. 超空泡研究方案[J]. 水雷战与舰船防护，2002(3)：15-18.
FU Jinzhu. Supercavitation research scheme[J]. Mine Warfare and Ship Protection，2002(3)：15-18.

[9] SARANJANM B. Experimental and numerical investigation of an un-steady supercavitating moving body[J]. Ocean Engineering，2013，59：9-14.

[10] BÁLINT V. Longitudinal motion control of a high-speed supercavitation vehicle[J]. Journal of Vibration and Control，2007，13(2)：159-184.