

引用格式: 丁俊文, 周瑜, 李晓雷, 等. MEMS 矢量水听器声压通道封装技术研究[J]. 声学技术, 2021, 40(2): 295-300. [DING Junwen, ZHOU Yu, LI Xiaolei, et al. Research on the encapsulation method of the sound pressure channel of MEMS vector hydrophone[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(2): 295-300.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.02.023

# MEMS 矢量水听器声压通道封装技术研究

丁俊文, 周瑜, 李晓雷, 滕超, 刘云飞

(中国电子科技集团公司第三研究所, 北京 100015)

**摘要:** 为了更全面地获取水下声场信息, 微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)矢量水听器常需集成声压敏感通道来提升单个换能器性能, MEMS 矢量水听器的敏感芯片采用的是 MEMS 工艺制备完成, 其封装必须与水隔离, 传统的橡胶灌封方式会破坏 MEMS 敏感芯片的机电性能, 故 MEMS 敏感芯片常采用油封的方式, 如硅油/蓖麻油。相反, 对于 MEMS 矢量水听器声压通道的封装技术却不尽相同。文章选择给定尺寸的沿径向极化的压电陶瓷圆环, 针对低频 5~2 000 Hz 的探测频带需求, 对比了两种不同封装形式, 即聚氨酯密封和硅油作为耦合剂的聚氨酯密封, 对声压通道接收灵敏度的影响规律。首先, 建立了四种仿真模型, 分析了不同形式下, 接收灵敏度的变化规律。接着, 设计了聚氨酯灌封和硅油耦合聚氨酯密封两种封装结构, 并制备了实物。最后在驻波管中对两种封装形式的压电陶瓷圆环进行了接收灵敏度标定。结果显示, 聚氨酯灌封和硅油耦合聚氨酯密封对声压通道的接收灵敏度特性影响不大, 实操过程中要注意两种方式的工艺复杂度区别。

**关键词:** 微机电系统(MEMS)矢量水听器; 声压通道; 低频探测; 接收灵敏度

中图分类号: TB565

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-02-0295-06

## Research on the encapsulation method of the sound pressure channel of MEMS vector hydrophone

DING Junwen, ZHOU Yu, LI Xiaolei, TENG Chao, LIU Yunfei

(The Third Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

**Abstract:** In order to obtain more comprehensive underwater sound field information, Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) vector hydrophones often need to integrate sound pressure sensitive channels to improve the performance of a single transducer. The sensitive chip of MEMS vector hydrophone is prepared by MEMS technology, and its encapsulation must be water proofed. Traditional rubber potting method will destroy the electromechanical performance of MEMS sensitive chip. Therefore, MEMS sensitive chip is often sealed with oil, such as silicone oil / castor oil. In contrast, the encapsulation technology for the MEMS vector hydrophone sound pressure channel is not the same. In this paper, a given sized piezoelectric ceramic ring with radial-polarization is selected as the sound pressure channel, and the receiving sensitivities of the sound pressure channel with two different encapsulation forms, polyurethane seal and polyurethane sealant with silicone oil, are compared in the low frequency band of 5 ~ 2000 Hz. Firstly, four simulation encapsulation models for the ceramic ring are established to analyze the variation of receiving sensitivity with different models. Then, two kinds of encapsulation structures, polyurethane potting and silicone oil coupling polyurethane sealing, are designed and prepared. Finally, the receiving sensitivity calibration is carried out for the piezoelectric ceramic ring with the two packaging methods in the standing wave tube. The results show that polyurethane potting and silicone oil-coupled polyurethane sealing have little effect on the receiving sensitivity of the sound pressure channel, and in the actual operation process, it is necessary to pay attention to the difference in technical complexity between the two methods.

**Key words:** Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) vector hydrophone; sound pressure channel; low frequency detection; receiving sensitivity

## 0 引言

近年来, 随着微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)矢量水听器的快速发展, 越来越多的研究者希望在 MEMS 矢量水听器中增加声压敏感通道来实现环境声压场的感知, 最理想的

收稿日期: 2019-10-25; 修回日期: 2019-12-02

作者简介: 丁俊文(1992—), 男, 湖北监利人, 硕士研究生, 研究方向为矢量水听器设计与工艺研究。

通信作者: 周瑜, E-mail: zycctc3@163.com

方法就是通过 MEMS 工艺一次集成声矢量和声压通道, 由于声矢量和声压通道感知声信号的原理不同, 很难通过 MEMS 工艺一次集成成功。常用的办法就是将 MEMS 矢量通道和声压通道进行物理集成, 声压通道选用成熟的压电陶瓷圆环敏感结构。这样就带来了声压通道封装形式的问题。如文献[1]中提到了一种将传统的压电陶瓷器件与 MEMS 加速度敏感器件物理集成在一起的封装方式。MEMS 芯片因为需要电气连接, 封装必须与水隔离, 常采用的办法就是通过硅油/蓖麻油进行水密封装, 韩国浦项科技大学相关课题组提出了一种在场效应管上制作压电栅极的新型 MEMS 水听器<sup>[2]</sup>, 其封装方式采用的是蓖麻油密封方式; 中北大学提出的基于仿生原理的仿生纤毛式 MEMS 矢量水听器<sup>[3]</sup>, 其封装方式采用的是硅油密封方式。相反常用的压电陶瓷封装大部分是直接聚脲灌封<sup>[4-7]</sup>, 除了少数情况下需要进行油封以外<sup>[8]</sup>, 如应用于深水(>1 000 m)的水声换能器常采用充油或溢流式结构。研究聚脲封装和硅油耦合聚脲封装对 MEMS 矢量水听器声压通道集成具有重要的指导意义。

本文首先介绍了纤毛式 MEMS 矢量水听器矢量通道性能, 其次根据频率需求, 选择性能和尺寸满足要求的压电陶瓷圆环作为研究对象。用 COMSOL5.3a 软件进行建模仿真研究, 分析了压电圆环在全水域, 硅油封装、聚脲封装不同形式下的灵敏度仿真。后对压电陶瓷圆环进行了硅油+聚脲封装和聚脲封装的结构设计与制备。通过实验对比研究, 结果表明, 采用聚脲灌封的压电陶瓷圆环和硅油耦合聚脲灌封的压电陶瓷圆环, 在低频段接收灵敏度响应曲线相对一致。

## 1 纤毛式 MEMS 矢量水听器简介

纤毛式 MEMS 矢量水听器依据鱼类侧线细胞感知声信号原理, 用刚硬塑料柱体模仿鱼类侧线细胞可动纤毛, 用悬空十字悬臂梁模仿感觉细胞, 当外界有声源信号时, 刚硬柱体感知声源信号, 发生谐振, 进而带动微结构悬臂梁产生形变, 使得悬臂梁上惠斯通电桥失去平衡, 输出相应的电压信号。根据中国船舶重工集团第 715 研究所计量站计量得到: 纤毛式 MEMS 矢量水听器可探测频段为 5~1 000 Hz, 矢量通道灵敏度为 -179.8 dB@1kHz (0 dB=1 V· $\mu$ Pa<sup>-1</sup>), 凹点深度大于 30 dB。

## 2 仿真设计

仿真设计主要思路为: 模型分为四种形式, 一是建立压电陶瓷圆环和水模型; 二是建立压电陶瓷+硅油+水模型; 三是建立压电陶瓷+硅油+聚脲+水模型; 四是建立压电陶瓷圆环+聚脲+水模型。分别仿真计算出四种模型下的灵敏度曲线。进行比较分析四种不同模型对声压通道灵敏度的影响。通过改变聚脲层的厚度, 可以得到聚脲厚度对两种封装模型的影响关系。其次分析四种模型对压电陶瓷圆环指向性的影响。本次仿真与试验用圆环压电陶瓷型号为 PZT-5A, 尺寸为内径 21 mm, 外径 25 mm, 高度 12.5 mm。聚脲透声橡胶帽厚度初始值 3 mm。仿真频带宽度 5~2 000 Hz。

### 2.1 压电陶瓷+水模型

依据初始值尺寸建立压电陶瓷+水模型, 如图 1 所示, 建模维度方式选择二维轴对称, 压电陶瓷选用软件内置材料 PZT-5A, 材料参数均为默认。在仿真设计中预留有陶瓷上下盖板的空隙。

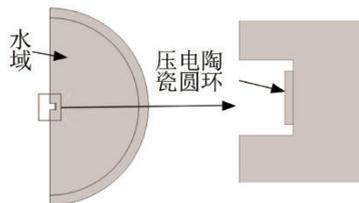


图 1 压电陶瓷+水仿真模型

Fig.1 Piezoelectric ceramic+water simulation model

仿真得到的接收灵敏度曲线如图 2 所示, 图中横坐标为对数坐标形式。

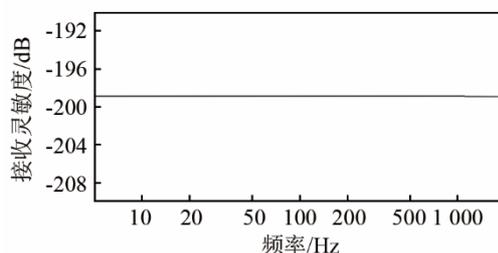


图 2 压电陶瓷+水模型接收灵敏度曲线

Fig.2 The receiving sensitivity curve of the piezoelectric ceramic+water model

### 2.2 压电陶瓷+硅油+水模型

考虑压电陶瓷置于硅油中, 建立如图 3 所示压电陶瓷+硅油+水模型。硅油分布在压电陶瓷周围。仿真中设置硅油的材料参数为: 密度 970 kg·m<sup>-3</sup>, 声速为 1 470 m·s<sup>-1</sup>。材料参数选用《水声材料手册》中 275 硅油材料参数<sup>[9]</sup>。

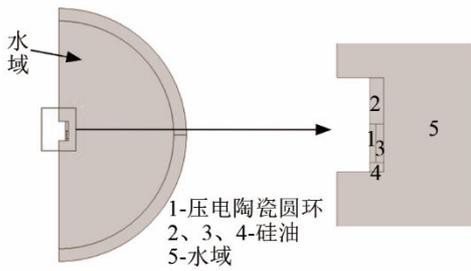


图 3 压电陶瓷+硅油+水仿真模型

Fig.3 Piezoelectric ceramic+silicone oil+water simulation model

仿真得到的压电陶瓷+硅油+水模型接收灵敏度曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看到，其灵敏度在频带内响应平坦，灵敏度达到-197.3 dB，带内起伏小于 1 dB。从仿真结果来看，包裹硅油后，其接收灵敏度提高了近 1 dB。

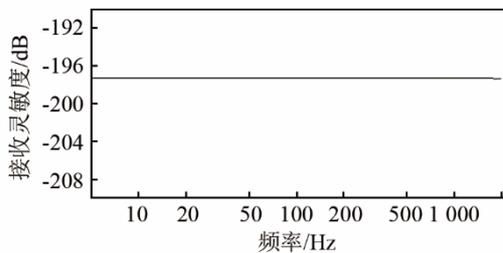


图 4 压电陶瓷+硅油+水模型接收灵敏度曲线

Fig.4 The receiving sensitivity curve of the piezoelectric ceramic+silicone oil+water model

### 2.3 压电陶瓷+硅油+聚氨酯+水模型

实际封装过程中硅油外侧为一层绝缘透声帽，达到绝缘密封，增强结构抗压等性能。聚氨酯透声层按实际封装简化。聚氨酯材料参数：密度为  $1\ 080\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，泊松比为 0.48，弹性模量为 9 MPa。底部有固定聚氨酯帽约束的结构钢托台。压电陶瓷+硅油+聚氨酯+水仿真模型如图 5 所示。

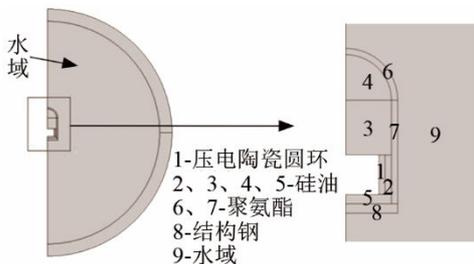


图 5 压电陶瓷+硅油+聚氨酯+水仿真模型

Fig.5 Piezoelectric ceramic+silicone oil+polyurethane+water simulation model

仿真得到的灵敏度曲线如图 6。从图 6 中可以看到，其灵敏度在频带内响应平坦，灵敏度为 -198.6 dB，带内起伏小于 1 dB。从仿真结果来看，加上聚氨酯透声帽后，其接收灵敏度与第一种模型的灵敏度基本一致。

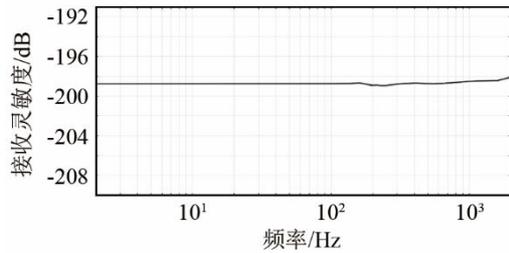


图 6 压电陶瓷+硅油+聚氨酯+水模型接收灵敏度曲线

Fig.6 The receiving sensitivity curve of the piezoelectric ceramic+silicone oil+polyurethane+water model

### 2.4 压电陶瓷+聚氨酯+水模型

压电陶瓷+聚氨酯+水模型为常用的压电陶瓷灌封模型，其仿真模型如图 7 所示。压电圆环上端建立有聚氨酯模型，与实际封装情况一致。聚氨酯材料参数与 2.3 节中一致。

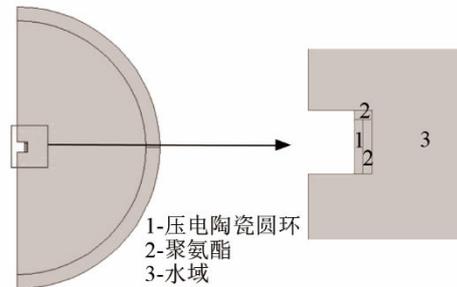


图 7 压电陶瓷+聚氨酯+水仿真模型

Fig.7 Piezoelectric ceramic+polyurethane+water simulation model

仿真得到在聚氨酯灌封条件下，压电陶瓷+聚氨酯+水模型接收灵敏度曲线如图 8 所示。可以看到在频带内响应平坦，灵敏度为 -197.2 dB，带宽内起伏小于 1 dB。

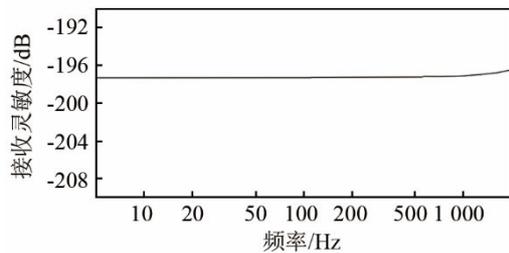


图 8 压电陶瓷+聚氨酯+水模型接收灵敏度曲线

Fig.8 The receiving sensitivity curve of the piezoelectric ceramic+polyurethane+water model

## 3 封装结构设计及实验验证

实验验证思路为：首先设计聚氨酯灌封封装和硅油密封结构，制作实物，然后在驻波管中进行实验测试，对比实验结果，得出结论。

### 3.1 聚氨酯灌封封装结构

聚氨酯封装示意图如图 9 所示，封装设计中考

考虑压电陶瓷圆环的固定，设计有内置支撑泡沫及金属托台，另外考虑陶瓷环的振动形式以及防止与金属托台接触构成短路，陶瓷与金属托台间设计有绝缘橡胶垫等。

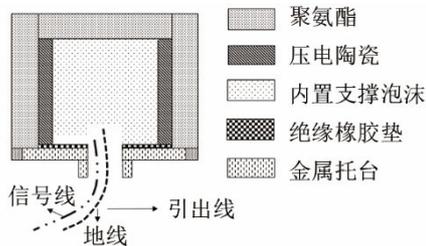


图9 聚氨酯灌封和封装示意图

Fig.9 Schematic diagram of polyurethane potting and packaging

制作聚氨酯灌封封装结构水听器，首先要准备制作材料，如金属托台结构件、内置支撑泡沫结构件、环氧胶、压电陶瓷圆环、绝缘橡胶垫等。各金属件及陶瓷需先用酒精进行清洗擦拭，以保证表面干净，无污渍。环氧胶主要用于陶瓷、绝缘橡胶垫及金属托台之间的粘接，在进行聚氨酯灌封前，也用于支撑泡沫表面的涂覆，防止灌胶操作中，加热使得泡沫内空气溢出，从而影响其带内接收灵敏度性能。聚氨酯灌封封前后的压电陶瓷环实物图如图10所示。



图10 聚氨酯封装前后的压电陶瓷环实物图

Fig.10 Real object diagrams of the piezoelectric ceramic ring before and after being encapsulated by polyurethane

### 3.2 硅油耦合聚氨酯密封封装结构

硅油耦合聚氨酯密封中主要考虑因素为：声压通道的固定安装及灌油密封等关键工艺。设计中，压电陶瓷上下用橡胶 O 圈进行减震固定，内置支撑材料选用不渗入硅油的聚甲醛 (polyformaldehyde, POM) 材料，由于内置支撑材料与陶瓷内壁是否接触会影响压电陶瓷振动特性，设计中考虑制作工艺

的可行性及圆环的径向振动形式，支撑聚甲醛与陶瓷内壁设计有约 1 mm 的间隙。陶瓷振动形变量一般为纳米级，支撑聚甲醛对于低频条件下的振动特性可以认为没有影响。为了验证这一结论，设计有加入聚甲醛的硅油耦合聚氨酯密封封装模型，如图11所示。接收灵敏度的仿真结果如图12所示。可以看到，加入支撑聚甲醛后，压电圆环的接收灵敏度响应仍为一条平坦的曲线。这里需要注意聚甲醛与陶瓷圆环内壁之间需有一个微小间隙，否则在振动过程中会影响其接收灵敏度的特性。

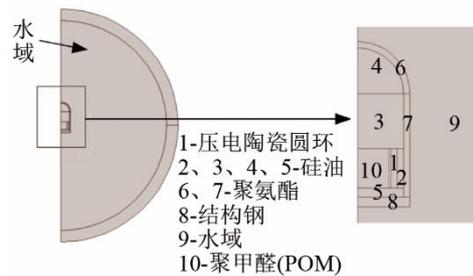


图11 POM+压电陶瓷+硅油+聚氨酯+水仿真模型  
Fig.11 POM+ piezoelectric ceramic+silicone oil+ polyurethane + water simulation model

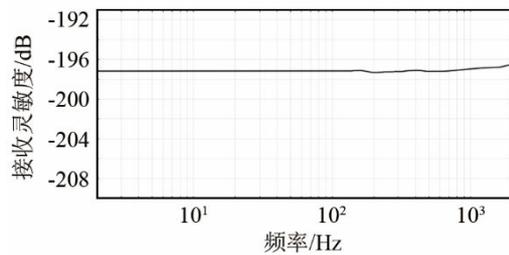


图12 POM+压电陶瓷+硅油+聚氨酯+水模型接收灵敏度曲线  
Fig.12 The receiving sensitivity curve of the POM+Piezoelectric ceramic+silicone oil+polyurethane+water model

结构中底部托台用软胶硅橡胶 704 进行粘接固定，在硅油耦合聚氨酯密封设计中，底部金属托台内侧设计有进油孔和出油孔。设计中预留了矢量通道窗口，为后续进行 MEMS 矢量通道集成做铺垫。硅油耦合聚氨酯密封和封装示意图如图13所示。

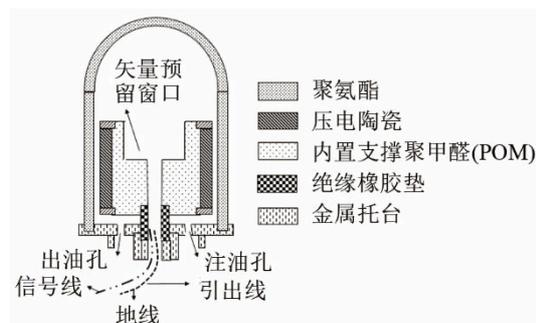


图13 硅油耦合聚氨酯密封和封装示意图  
Fig.13 Schematic diagram of silicone oil-coupled polyurethane sealing and packaging

制作硅油耦合聚氨酯密封封装结构水听器,其工艺比制作聚氨酯灌封封装结构水听器相对复杂,主要涉及硅油的填充,压电陶瓷的固定等。需要准备的材料有金属托台结构件、压电陶瓷圆环、支撑聚甲醛结构件、绝缘橡胶垫、环氧胶、聚氨酯透声帽灌封结构件等。为了保证引线方便,支撑聚甲醛外部设计有引线槽。在用橡胶 O 圈进行压电陶瓷圆环固定时,需选用合适的 O 圈,不能过大或过小,过大,陶瓷会松动,不稳定;过小,陶瓷受力不均,会使一端贴合在聚甲醛外壁。在测试过程中,其相对位置的变化对接收灵敏度影响很大。在硅油填充过程中,首先需要对金属结构件进行预热,硅油在 80℃ 条件下进行抽真空处理,去除硅油内溶解的空气。在硅油填充操作过程中,需要在加热后进行,防止温度过低时,空气易溶解在硅油中。填充硅油选用医用无尘针管进行注入,注入工艺需多次进行,在第一次注满后,会有少量气泡残留在支撑聚甲醛空余部分。硅油耦合聚氨酯封装及制作实物图如图 14 所示。



图 14 硅油耦合聚氨酯封装前后的压电陶瓷环实物图

Fig.14 The frequency response curves of receiving sensitivity of the piezoelectric ceramic ring with two different packaging methods

#### 4 灵敏度测量与对比分析

将两种封装方式制作的水听器置于驻波管中进行灵敏度标定。测试中采用比较法进行测量,将待测水听器与标准水听器置于水平液面下同一深度。标准水听器的型号为 RESON 4032。由信号发生器产生 10~2 000 Hz 的正弦信号,经功率放大器进行放大,驱动底部声源产生所需声信号,待测水听器与标准水听器共同感知声信号,经示波器显示信号。读取两路信号输出电压峰峰值,即可根据标

准水听器灵敏度得到待测水听器灵敏度,灵敏度计算公式为

$$M_V = M_S \frac{U_V}{U_S} \tag{1}$$

式中:  $M_V$ ,  $M_S$  分别代表被测水听器和标准水听器的灵敏度;  $U_V$ ,  $U_S$  分别代表被测水听器和标准水听器的输出电压峰值;

可以得到两种不同封装方式下的压电陶瓷圆环灵敏度曲线如图 15 所示。

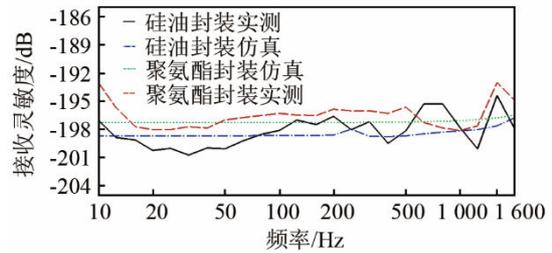


图 15 两种封装方式下压电陶瓷接收灵敏度响应曲线  
Fig.15 The frequency response curves of receiving sensitivity of the piezoelectric ceramic ring with two different packaging methods

采用驻波管校准(即振动液柱法)测试有其低频可测极限,约为 10 Hz,因此测试从 10 Hz 开始测量。对于低频段 10~20 Hz,由于与最低可测频点相近,测试中由于测试设备的原因会产生测试误差,主要原因为在此低频段内,驻波管底部声源会使建筑机械结构产生同振,这里结论分析不予考虑。从图 15 中可以看出,在 1 600 Hz 频点处,均出现尖峰值。由于标准水听器与待测水听器此频点处均表现出较小的接收声压信号,读数误差值较大,这里结论分析中不予考虑 1 600 Hz 处频点灵敏度。综上,本结论只分析 20~1 250 Hz 频段内灵敏度测试结果。在该频段内,水听器接收信号曲线光滑平整,整体看没有失真情况。测试过程中,待测水听器用橡胶 O 圈进行固定,两种封装方式均采用同一种方式固定,在测试过程中均位于液面以下同一深度,以确保水听器所处的声场一致。测试过程中采用 1/3 倍频程进行计数,每一个频率点,用示波器读取待测水听器与标准水听器输出电压信号峰峰值,用比较法得到两种封装方式下的灵敏度曲线。从图 15 中,可以看到在 20~1 250 Hz 频段内两种封装方式均表现出一定的起伏变化,且起伏趋势基本一样,与仿真值相差不大,灵敏度的带内均值达到 -197.5 dB。其中聚氨酯封装灵敏度响应起伏小于 3 dB,硅油耦合聚氨酯密封封装灵敏度响应起伏小于 6 dB,其起伏相对较大,这与硅油耦合聚氨酯封装制作工艺相对复杂有关,在橡胶 O 圈的减震固定及灌油封装的温度控制,气泡的处理等均有一

定关系, 需要进一步深入研究, 以使得其带内接收灵敏度更加平坦。

## 5 结 论

本文针对 MEMS 矢量水听器声压通道封装技术进行了研究, 设计了硅油耦合聚氨酯封装和聚氨酯封装两种封装形式。首先仿真分析了两种封装形式对声压通道灵敏度的影响规律, 其次设计了这两种封装形式的制作工艺并制备了实物, 最后在驻波管中实验测试对比了这两种封装方式对灵敏度的影响关系。结果表明, 理论上这两种封装方式对声压通道的灵敏度特性影响不大, 实际操作过程中, 聚氨酯封装工艺相对成熟稳定, 硅油耦合聚氨酯封装工艺相对复杂、不确定, 在考虑与 MEMS 敏感芯片集成时, 要注意第二种封装方式在制作工艺中可能带来的不确定性。实验结果对后续 MEMS 矢量水听器的声压通道集成, 进而提升水听器及系统整机性能, 具有重要的意义。

### 参 考 文 献

- [1] SANTOS P J M, FELISBERTO P, ZABEL F, et al. Dual accelerometer vector sensor mounted on an autonomous under-water vehicle (AUV)-Experimental results[C]//Proceeding of Meeting on Acoustics, 2018
- [2] SUNG M, SHIN K, MOON W. A new transduction mechanism for hydrophones employing piezoelectricity and a field-effect transistor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, **233**: 557-568.
- [3] LIU M R, JIAN Z M, ZHANG G J, et al. Design of MEMS bionic vector hydrophone based on NBR sound-transparent cap[J]. *Sensor Review*, 2015, **35**(3): 303-309.
- [4] 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: 41-42.  
LI Zhongqiang. The research of high sensitivity hydrophone[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010: 41-42.
- [5] 李星, 王丽坤, 仲超, 等. 陶瓷体积分数对压电换能器性能影响[J]. *压电与声光*, 2019, **41**(3): 400-404.  
LI Xing, WANG Likun, ZHONG Chao, et al. Effect of ceramic volume fraction on the performance of piezoelectric transducers[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2019, **41**(3): 400-404.
- [6] 陈洪娟, 洪连进. 采用双迭片压电敏感元件的同振柱型矢量水听器[J]. *应用声学*, 2003, **22**(3): 23-26.  
CHEN Hongjuan, HONG Lianjin. Vector hydrophone of the resonant-column type using a piezoelectric bilaminar sensing element[J]. *Applied Acoustics*, 2003, **22**(3): 23-26.
- [7] 尹义龙, 李俊宝, 邢建新, 等. 基于 Cymbal 结构的 PMNT 单晶压差矢量水听器[C]//Symposium on Piezoelectricity, 2010.
- [8] 桑永杰. 低频宽带水声换能器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015: 16-18.  
SANG Yongjie. Study on low frequency broadband underwater acoustic transducer[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015: 16-18.
- [9] 王荣津. 水声材料手册[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 120-122.