

# MEMS 矢量水听器海洋环境适应性研究\*

张文栋, 张国军, 王盼盼, 梁晓琦, 纪松祥

(中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室 太原, 030051)

**摘要** 海流、温度及压力等复杂海洋环境因素会对微机电系统(micro-electro-mechanical-system, 简称 MEMS)矢量水听器正常工作产生干扰, 影响其对微弱声信号的拾取能力。首先, 建立了基于“三明治”式抗流封装结构数学模型, 通过仿真得到了不同抗流结构参数对海流噪声抑制效果; 其次, 利用 Comsol 软件仿真研究了海水温度、水深(静水压强)等变化对 MEMS 矢量水听器灵敏度的影响; 最后, 通过试验验证, 得出了“三明治”式抗流封装结构具有 20 dB 以上的抑制流噪声能力, 在 0~40 °C 的海水温度范围内 MEMS 矢量水听器的灵敏度变化量小于 ±0.5 dB, 在 0~12 MPa 的静水压强范围内灵敏度变化量小于 ±0.9 dB, 与理论分析及仿真结果基本一致。

**关键词** 微机电系统; 矢量水听器; 流噪声; 仿生  
**中图分类号** TH3

## 引言

矢量水听器相对于标量水听器具有单个水听器可实现声目标定向功能, 且可以抑制各向同性环境噪声, 因而近年来发展迅速<sup>[1-2]</sup>。矢量水听器从工作原理来分, 可以分为同振式和压差式。基于 MEMS 技术的纤毛式<sup>[3-4]</sup>矢量水听器因其具有体积小、矢量性、甚低频、低成本及刚性安装等优势已在多个领域推广应用。但是, 在应用的过程中也逐渐暴露出一些问题, 例如受海流<sup>[5]</sup>影响较大, 另外, 也需要明确该水听器性能(特别是灵敏度)是否受海水温度、水深的变化而变化, 即海洋环境的适应性问题亟待解决。

基于 MEMS 矢量水听器的结构特点, 笔者提出了一种“三明治”式抗流封装结构(聚氨酯导流罩+水+聚氨酯透声帽), 并建立了数学模型, 在计算分析的基础上, 通过试验来验证该封装结构抗流噪声的性能。同时, 仿真和试验相结合研究 MEMS 矢量水听器工作在不同静水压强、不同环境温度下其灵敏度的变化。

## 1 抗流激噪声封装结构

当海流冲击传感器时, 会引起传感器电信号输出, 该输出由海流激发, 称之为流激噪声。流激噪声对水听器特别是矢量水听器影响非常大, 实用过程中必须外加导流或抗流罩来减小其影响。

### 1.1 “三明治”式抗流封装结构设计

为了能够有效解决流激噪声问题, 同时不能牺牲水听器的灵敏度, 在文献[6-7]的研究基础上, 笔者提出一种透声抗流封装结构<sup>[8]</sup>, 如图 1 所示。该结构由外层透声导流罩、水介质及内层透声帽 3 部分组成。导流罩<sup>[9]</sup>的顶部开一个孔, 与外部水介质相通, 当海流或涡流冲击该结构时, 导流罩内部的水被压缩并通过顶部的通孔与外界交换, 该过程有效减少湍流边界层压力起伏对水听器敏感单元的影响, 从而实现抗流噪声功能。

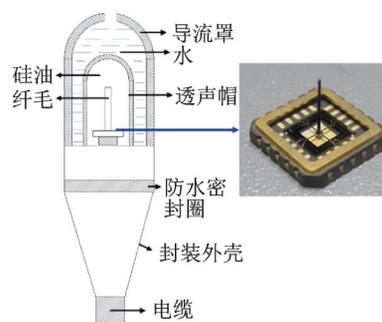


图 1 MEMS 矢量水听器“三明治”式封装结构

Fig.1 "Sandwich" packaging structure of MEMS vector hydrophone

### 1.2 “三明治”式封装结构流噪声抑制数学模型

前期试验过程中发现, MEMS 矢量水听器外层

\* 国家重大科研仪器研制资助项目(61927807); 国家重点研发计划资助项目(2019YFC0119800); 国家自然科学基金资助项目(51875535); 山西省“1331 工程”重点学科计划资助项目  
收稿日期: 2021-08-09; 修回日期: 2021-09-10

导流罩的长度对 MEMS 矢量水听器抗流噪声效果影响不大,因此把该导流罩看作无限长,其壁上的湍流边界层压力起伏频率-波数谱为

$$\Phi(k_x, \omega) = \frac{c^2 \rho_2^2 v_*^3 R^2 [(k_x R)^2 + 1/12]}{[(\omega R - v_c k_x \omega)^2 / (h v_*)^2 + (k_x R)^2 + 1/b^2]^{2.5}} \quad (1)$$

其中:  $\rho_2^2$  为外部流体密度;  $R$  为导流罩半径;  $v_c$  为迁移波速,  $v_c = 0.8v$ ;  $v$  为海流流速,即水听器相对海水的运动速度;  $v_*$  为湍流边界层剪切压力。

本研究模型参数取  $v_* = 0.04v$ ,  $c = 10.0$ ,  $h = 3.7$ ,  $b = 0.2$ 。

MEMS 仿生矢量水听器抗流封装结构接收到的噪声功率谱为

$$\Phi_0(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(k_x, \omega) |T_1(k_x, \omega)|^2 |T_2(k_x, \omega)|^2 \cdot \left| \frac{J_0(k_1 r)}{J_0(k_1 b)} \right|^2 |H(k_x)|^2 dk_x \quad (2)$$

其中:  $r$  为纤毛半径;  $T_1(k_x, \omega)$  和  $T_2(k_x, \omega)$  分别为外部导流罩和水听器透声帽的传递函数,该函数可以看作是低波束滤波器;  $|H(k_x)|$  为纤毛的波数响应函数,  $H(k_x) = \frac{\sin(k_x l/2)}{k_x l/2}$ ;  $l$  为纤毛的长度。

弹性壳体对湍流边界层压力起伏的传递函数  $T(k_x, \omega)$  表达式为

$$|T(k_x, \omega)|^2 = |k_b^2|^2 / |k_b^2 - k_x^2|^2 \quad (3)$$

其中:  $k_b$  为扩展函数。

$$k_b = \frac{2\rho_1 \omega^2 R}{Et} \quad (4)$$

其中:  $\rho_1$  为内部液体密度;  $E$  为导流罩材料的复弹性模量,  $E = E_1(1 + itg\delta)$ ;  $i$  为虚数单位;  $tg\delta$  为材料的损耗因子;  $t$  为导流罩的厚度 ( $t/R \ll 1$ ), 厚度对扩展波数的影响不大。

由式(2)可知: 外部导流罩、水听器透声帽和纤毛可以被看作空间低波数滤波器,能够抑制高波数的流噪声。

### 1.3 “三明治”式封装结构几何尺寸的确定

湍流边界层压力起伏激励下导流罩内水听器接收的流噪声功率谱可由式(3)给出,综合考虑确定的结构参数如表 1 所示。如图 2 所示,根据已建立的数学模型,利用 Matlab 仿真不同流速下该导流罩内流噪声的功率谱,可以看出:

表 1 典型海流流速与抗流封装结构参数

Tab.1 Typical current velocity and anti-current package structure parameters

参 数	数 值	参 数	数 值
海流流速 $v/(m \cdot s^{-1})$	1, 3, 6	导流罩外径/mm	36
剪切速度 $v_*$	$0.04 v$	导流罩内径/mm	32
迁移波速 $v_c$	$0.8 v$	导流罩厚度/mm	4
导流罩外流体密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )	1 000	水听器聚氨酯帽厚度/mm	2
导流罩内流体密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )	1 000	纤毛长度/mm	5
水听器内部流体密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )	硅油:960		

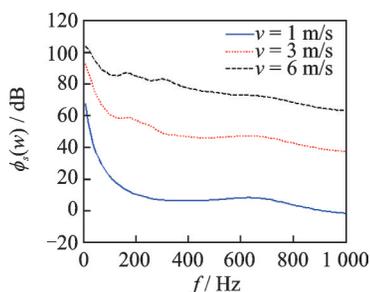


图 2 不同海流流速下的流激噪声功率谱

Fig.2 Power spectrum of downstream excitation noise at different ocean current velocities

1) 导流罩内水听器接收流噪声功率谱级随流速的增大而增大,从 1 m/s 增加到 3 m/s 流噪声谱级最大可增加 20 dB 左右,平均流速每增加 1 m/s,谱级增加 5~8 dB。事实上,流速越大,相应的 Reynolds 数增大,湍流边界层发展更为充分,流噪声谱值就越大,流噪声对 MEMS 矢量水听器接收性能的影响也越大。

2) 流噪声的能量主要集中在低频段,且随频率的减小而增大,在高频段流噪声谱级与海洋噪声谱级相当,甚至更小,因此流噪声是低频矢量水听器的主要影响因素。

### 1.4 “三明治”式封装结构流噪声抑制能力测试

试验方案如图3所示,选择的水域水深为1.5 m,水流流速为1 m/s。声源分为2类:①爆炸声波;②发射换能器发射单频声波。为避免水流冲击水听器支架产生抖动和倾斜,选择密度大的铅块作为支架底座。

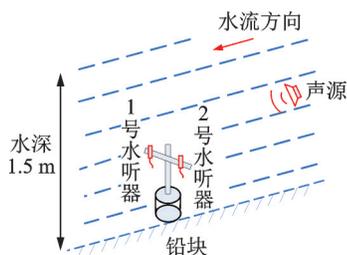


图3 试验方案

Fig.3 Test scheme

该试验分为2步:①先将未加导流罩的MEMS矢量水听器放入水下,测其噪声功率谱,然后分别施加一爆炸声源和单频声源(272和375 Hz),测其信噪比;②将MEMS矢量水听器从水中取出加上导流罩,再次重复第①步的工作,最后比对2种情况下的测试结果。

从图4可看出,“三明治”式封装结构具有显著的抑制流噪声能力,全频带降低20 dB。从图5可看出,未加导流罩的MEMS矢量水听器所接收的水下爆炸声源已被流噪声淹没,但“三明治”式封装结构的MEMS矢量水听器能够清晰地接收到爆炸声信号。

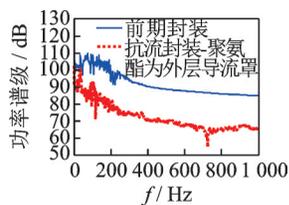


图4 MEMS矢量水听器抗流封装结构接收噪声功率谱级  
Fig.4 The anticurrent package structure receives noise power sepctrum levels

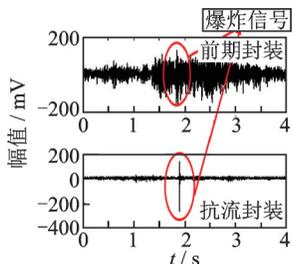


图5 水听器接收目标信号  
Fig.5 Hydrophone receiving target signal

单频信号的功率谱级如图6所示。未加导流罩的水听器接收到375 Hz的信号仅有2 dB的信噪比,接收到的272 Hz的目标信号也只有10 dB的信噪比;而“三明治”式封装结构的MEMS矢量水听器所接收到的375 Hz目标信号有14 dB的信噪比,所接收到的272 Hz目标信号接近30 dB的信噪比,且几

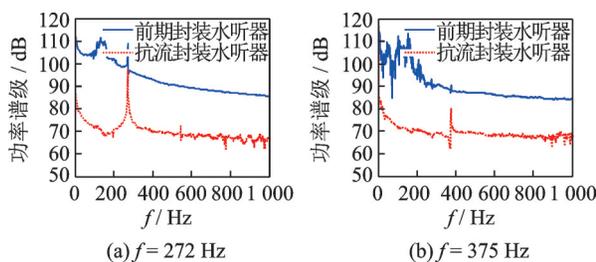


图6 接收信号的功率谱级

Fig.6 Power spectrum level of received signal

乎不受200 Hz以下的低频流噪声的干扰。

通过以上试验证明,该“三明治”式抗流封装结构能够显著提高MEMS矢量水听器的抗流噪声能力,大幅度提高信噪比。

## 2 温度变化对MEMS矢量水听器灵敏度的影响

MEMS矢量水听器在使用过程中往往面对不同水温的使用环境,水温的改变会引起压敏电阻的压阻系数变化<sup>[10]</sup>,进而影响MEMS矢量水听器的灵敏度。

### 2.1 温度对压敏电阻的影响

由于压阻效应,声信号作用于MEMS矢量水听器中的纤毛结构使悬臂梁发生形变,硅晶体电阻率的变化引起电阻变换,悬臂梁上的压敏电阻主要受纵向应力作用,纵向压阻系数<sup>[11]</sup>的计算公式为

$$\pi_l = \frac{1}{2} (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}) \quad (5)$$

根据文献[12-13]可知,压阻系数与温度以及掺杂浓度的关系可通过压阻因子P表示

$$\pi(N_A, \theta) = P(N_A, \theta) \pi(T_0) \quad (6)$$

$$P(N_A, \theta) = \theta^{-\nu} [1 + (N_A/N_b)^\alpha \theta^{-\beta} + (N_A/N_c)^\gamma \theta^{-\eta}]^{-1} \quad (7)$$

其中: $\pi$ 为压阻系数; $\theta = T/T_0$ ,  $T_0$ 取300 K;  $N_A$ 为掺杂浓度; $\nu, N_b, N_c, \alpha, \beta, \gamma, \eta$ 为拟合参数。

各参数的数值如表2所示。根据式(7)与各拟合参数得到P型硅的压阻因子与掺杂浓度和温度的关系,如图7所示。

当环境温度在0~40 °C之间时,MEMS矢量水听器的灵敏度变化量为

表2 拟合参数

Tab.2 Fitting parameters

参数	$N_b/cm^3$	$N_c/cm^3$	$\nu$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\eta$
数值	$6 \times 10^{19}$	$7 \times 10^{20}$	0.9	0.43	0.1	1.6	3

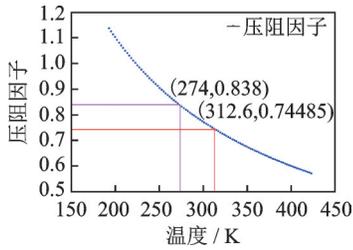


图7 温度对压阻因子的影响

Fig.7 Effect of temperature on piezoresistive factor

$$\Delta M_x = 20 \lg \left( \frac{V_o(T')}{V_o(T_0)} \right) = 20 \lg \left( \frac{P(N_A, \theta')}{P(N_A, \theta)} \right) \quad (8)$$

其中:  $T'$  为任意温度;  $T_0$  为基准温度。

在  $0 \sim 40^\circ\text{C}$  的温度范围内, 以常温 ( $22^\circ\text{C}$ ) 时的 MEMS 矢量水听器的灵敏度为基准, 根据上述公式, MEMS 矢量水听器的灵敏度变化量在  $\pm 0.6 \text{ dB}$  以内。

## 2.2 温度特性仿真分析

利用 COMSOL5.4 软件对 MEMS 矢量水听器进行不同温度下的仿真。按照实际的 MEMS 矢量水听器敏感单元建立模型如图 8 所示。

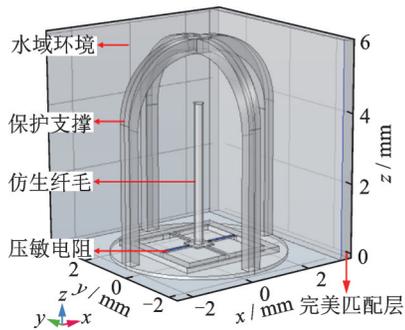


图8 MEMS 矢量水听器敏感单元仿真模型

Fig.8 Simulation model of MEMS vector hydrophone sensing unit

该模型主要由纤毛、四梁结构、压敏电阻、支撑架、水域环境及完美匹配层组成。当 MEMS 矢量水听器接收到声信号时, 仿真分析得出 MEMS 矢量水听器的输出电压。在  $0 \sim 40^\circ\text{C}$  温度范围内, 以常温 ( $22^\circ\text{C}$ ) 下的 MEMS 矢量水听器的灵敏度为基准, 其灵敏度变化量为

$$\Delta M_x = 20 \lg U_{T_x} / U_{T_0} \quad (9)$$

其中:  $U_{T_x}$  为温度  $T$  时刻 MEMS 矢量水听器的输出电压;  $U_{T_0}$  表示温度为  $22^\circ\text{C}$  时的 MEMS 矢量水听器的输出电压。

MEMS 矢量水听器的灵敏度的变化量在  $0 \sim 40^\circ\text{C}$  温度范围内的仿真结果如图 9 所示, 以常温 ( $22^\circ\text{C}$ ) 下的 MEMS 矢量水听器的灵敏度为基准, 灵

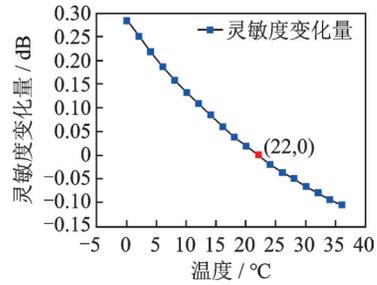


图9 MEMS 矢量水听器灵敏度变化量

Fig.9 Sensitivity variation of MEMS vector hydrophone

敏度变化量在  $\pm 0.3 \text{ dB}$  以内。

## 2.3 试验测试

为了测试 MEMS 矢量水听器的灵敏度在  $0 \sim 40^\circ\text{C}$  温度范围内的变化量, 采用专业的水听器校准系统对 MEMS 矢量水听器在常温 ( $22^\circ\text{C}$ ) 下进行灵敏度标定, 保证在进行试验验证时, MEMS 矢量水听器在不同温度下接收到的声信号激励一致。

在进行试验验证时, 如图 10 所示按照上述信号采集方法对 MEMS 矢量水听器在不同温度下的输出电压, 以常温 ( $22^\circ\text{C}$ ) 下的 MEMS 矢量水听器的灵敏度为基准, 将 MEMS 矢量水听器输出电压根据式 (9) 进行处理, 得到  $0 \sim 40^\circ\text{C}$  温度范围内的 MEMS 矢量水听器的灵敏度的变化量, 如图 11 所示。

经试验验证, 以常温 ( $22^\circ\text{C}$ ) 下的 MEMS 矢量水听

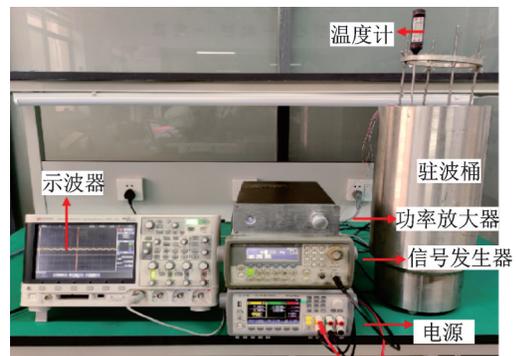


图10 MEMS 矢量水听器测试系统

Fig.10 MEMS vector hydrophone test system

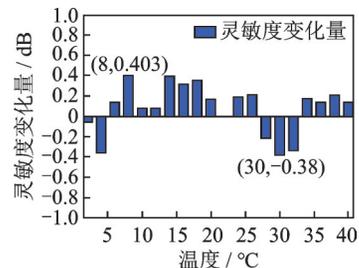


图11 MEMS 矢量水听器灵敏度温度漂移

Fig.11 Sensitivity temperature drift of MEMS vector hydrophone

器的灵敏度为基准, MEMS 矢量水听器的灵敏度在 0~40 °C 温度范围内的变化量在 ±0.5 dB 以内<sup>[14]</sup>。由于各种误差的存在, 虽然试验结果跟理论和仿真结果变化趋势不一致, 至少说明在该水温变化范围内, MEMS 矢量水听器的灵敏度变化不大, 甚至可以忽略掉。

### 3 不同水深对 MEMS 矢量水听器灵敏度的影响

根据 MEMS 矢量水听器的实际应用环境, 笔者在 0~12 MPa (0~1 200 m 水深) 静水压强范围内验证不同水深对 MEMS 矢量水听器灵敏度的影响。

#### 3.1 静水压强与压敏电阻

由文献[15]可知, 静水压强引起半导体压敏电阻电阻率<sup>[16-17]</sup>变化的主要原因是载流子迁移率发生了变化。当 P 型 Si 半导体材料在一定方向受到应力作用时, 其电阻率  $\rho$  的变化公式为

$$\rho = \frac{1}{n_p q \mu_p} + \frac{d\rho}{d\sigma} \sigma \quad (10)$$

其中:  $n_p$  为空穴浓度;  $\sigma$  为应力;  $d\rho/d\sigma$  为单位应力变化引起的电阻率变化。

由于 MEMS 矢量水听器应用环境所面临的静水压强 (0~12 MPa) 相对于 Si 的屈服强度 3 GPa 是个小量, 且是各向同性的, 所以从理论上分析不会对 MEMS 矢量水听器声电换能微结构产生影响。

#### 3.2 有限元仿真分析

利用 COMSOL5.4 软件对 MEMS 矢量水听器进行不同静水压强下的仿真。按照实际的 MEMS 矢量水听器敏感单元建立模型如图 8 所示。通过改变施加在传感器模型上的边界载荷的大小来达到改变环境中静水压强大小的目的。

以 0 MPa 下的 MEMS 矢量水听器输出电压为参考基准, 其灵敏度随静水压强的变化量为

$$\Delta M_p = 20 \log_{10} \frac{u_p}{u_0} \quad (11)$$

其中:  $\Delta M_p$  为灵敏度变化量 (dB);  $u_0$  为不加静水压强时的 MEMS 矢量水听器的输出电压 (mV);  $u_p$  为施加静水压强  $p$  后的输出电压 (mV)。

静水压强环境下仿真得出的 MEMS 矢量水听器灵敏度变化如图 12 所示。在 0~12 MPa 的静水压强范围内, 灵敏度变化量在 0.9 dB 以内。

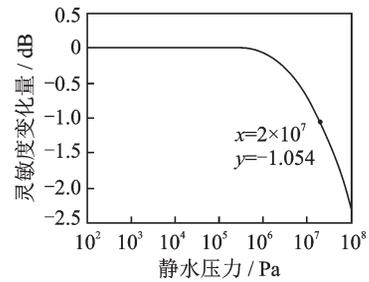


图 12 静水压强环境下灵敏度变化仿真结果

Fig.12 Simulation results of sensitivity changes under hydrostatic pressure

#### 3.3 试验验证

笔者采用海洋模拟试验系统来实现不同水深的压力环境, 采用在压力桶外置声源发射声波, MEMS 矢量水听器在压力桶内实时在线接收声源信号的方法。外置声源紧贴压力桶外壁, 并产生正弦波声信号, 声信号穿过筒壁到达桶内。MEMS 矢量水听器输出电信号由 NI 采集卡及示波器进行采集和观察。整套测试装置如图 13 所示。

试验得到各个静水压强下的输出信号的幅值。以 0 MPa 时的 MEMS 矢量水听器的输出电压为参考基准, 其灵敏度随静水压强的变化情况如图 14 所示。

由测试结果可知, 在 0~12 MPa 的静水压强范围内, MEMS 矢量水听器的灵敏度变化量在 ±0.9 dB 以内<sup>[18]</sup>。由于系统误差等存在, 虽然测试结果跟不同水深

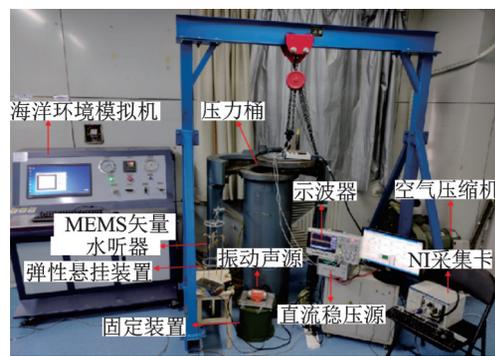


图 13 试验装置实物图

Fig.13 Physical picture of the experimental device

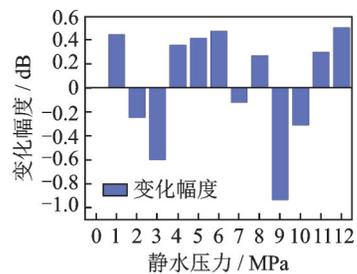


图 14 不同静水压强下 MEMS 矢量水听器灵敏度测试结果  
Fig.14 Sensitivity test results of MEMS vector hydrophone under different hydrostatic pressures

之间没有明显的规律,但也至少说明MEMS矢量水听器灵敏度随水深的变化影响不大,符合理论预期结果。

## 4 结束语

笔者提出的“三明治”式封装结构相对于当前普遍采用的“鸟笼”式导流罩<sup>[18]</sup>,具有小巧、安装方便等特点,试验验证该结构对抵抗洋流噪声干扰具有显著作用,并且几乎不损失水听器的灵敏度。通过理论、仿真分析及试验验证,证明了在0~40℃温度范围内和0~12 MPa静水压强范围内对MEMS矢量水听器灵敏度的影响均在±0.9 dB以内,可以认为在非极端工作温度和工作压力范围内MEMS矢量水听器的灵敏度受温度和静水压强的影响不大。以上研究结果对MEMS矢量水听器在复杂海洋环境里应用具有指导和借鉴意义。

## 参 考 文 献

- [1] ZHANG G J, WANG P P, GUAN L G, et al. Improvement of the MEMS bionic vector hydrophone [J]. *Microelectronics Journal*, 2011, 42(5): 815-819.
- [2] 管宇. 一种低频三维MEMS矢量水听器的研制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
- [3] XUE C Y, CHEN S, ZHANG W D, et al. Design, fabrication and preliminary characterization of novel MEMS bionic vector hydrophone [J]. *Microelectronics Journal*, 2007, 38: 1021-1026.
- [4] 张国军,陈尚,薛晨阳,等. 纤毛式MEMS矢量水声传感器的仿生组装[J]. *纳米技术与精密工程*, 2009, 7(3):221-227.  
ZHANG Guojun, CHEN Shang, XUE Chenyang, et al. Biomimetic assembly of ciliated MEMS vector underwater acoustic sensor[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2009, 7(3):221-227. (in Chinese)
- [5] LAUCHLE G C, WANG J, HOWE M S. Flow-induced noise on underwater pressure-vector acoustic sensors [C]//*Oceans 2002 MTS/IEEE*. [S.l.]: IEEE, 2002:1906-1910.
- [6] KO S H, NUTTALL A. Analytical evaluation of flush-mounted hydrophone array response to the circus turbulent wall pressure spectrum [J]. *Journal of the Americal Statistical Association*, 1991, 90(1): 579-588.
- [7] GOBAT J I, GROSENBAUGH M A. Reducing mechanical and flow-induced noise in the surface suspended acoustic receiver [C]//*Oceans IEEE*. [S.l.]: IEEE, 1997: 748-754.
- [8] 张国军,刘林仙,王盼盼,等. 用于MEMS矢量水听器流激噪声抑制的“三明治”式封装结构设计与性能测试 [J]. *测试技术学报*, 2015, 29(1):14-19.  
ZHANG Guojun, LIU Linxian, WANG Panpan, et al. Design and performance test of "sandwich" packaging structure for current-induced noise suppression of mems vector hydrophone [J]. *Journal of Test and Measurement*, 2015, 29(1):14-19. (in Chinese)
- [9] 时胜国,杨德森,陈志刚. 薄壁球形导流罩对矢量水听器接收性能的影响 [J]. *应用声学*, 2009, 28(5):342-349.  
SHI Shengguo, YANG Desen, CHEN Zhigang. Effect of thin-walled spherical baffle on the reception performance of vector hydrophone [J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2009, 28(5): 342-349. (in Chinese)
- [10] HAN J J, ZHANG G J, XU W, et al. Research on temperature characteristics and compensation method of MEMS vector hydrophone [J]. *Instrument Technology and Sensor*, 2016(7):1-3.
- [11] SMITH C S. Piezoresistance effect in germanium and silicon [J]. *Physical Review*, 1954, 94(1):42-49.
- [12] KANDA Y. A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon [J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 1982, 29:64-70.
- [13] KUMAR S S, PANT B D. Design principles and considerations for the 'ideal' silicon piezoresistive pressure sensor: a focused review [J]. *Microsystem Technologies*, 2014, 20(7): 1213-1247.
- [14] LIANG X, LV T, JI S, et al. The influence of ambient temperature on the sensitivity of MEMS vector hydrophone [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021(16):17678-17685.
- [15] WEN C B, WANG M, ZHONG C H, et al. Research on temperature compensation of silicon based piezoresistive pressure sensor based on DE-SVM [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2019, 32(10): 1493-1498.
- [16] LIU E K, ZHU B S, LUO J S. The physics of semiconductors [M]. [S.l.]: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 345-346.
- [17] DONALD A N. An introduction to semiconductor devices [M]. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2005: 177-178.
- [18] 张振宇. 光纤矢量水听器噪声声场特性分析 [D]. 长沙:国防科技大学,2008.



**第一作者简介:**张文栋,男,1962年9月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为动态测试技术、智能仪器、传感器及微机电系统(MEMS)等。荣获国家技术发明2等奖3项、3等奖1项、国家科学技术进步2等奖1项、国家教学成果2等奖1项、省部级奖9项。发明专利39项,出版著作4部,发表学术论文300余篇。2011年获何梁何利基金“科学与技术创新奖”。  
E-mail: wdzhang@nuc.edu.cn

**通信作者简介:**张国军,男,1977年9月生,博士、教授。主要研究方向为微机电系统传感器、矢量水听器。  
E-mail: zhangguojun1977@nuc.edu.cn