

# 低频高灵敏度中性浮力式 MEMS 矢量水听器<sup>\*</sup>

刘 源<sup>1,2</sup>, 王丽娟<sup>1,2</sup>, 郭 楠<sup>1,2</sup>, 赵 龙<sup>1,2</sup>, 张文栋<sup>1,2</sup>, 张国军<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051;

2. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 太原 030051)

**摘 要:** 由中北大学研制的微机电系统(MEMS)矢量水听器具有小型化、低频性能好、灵敏度高、指向性好、价格低等特点,但目前该水听器对该低频水声信号的低频探测能力不够,所以进一步提高其灵敏度对水听器的未来的发展至关重要。在声学研究的基础上,提出了中性浮力微结构并确定其参数,该结构加大了外力的有效作用面积,从而提高水听器的灵敏度,采用 ANSYS 有限元对水听器性能进行仿真,为了验证其可靠性,在驻波场测试水听器的性能。结果表明,该水听器的灵敏度 $-175$  dB,频响范围为 $20\sim 500$  Hz,满足对远距离船舶辐射噪声的探测要求,灵敏度响应曲线的起伏在 $\pm 1.5$  dB 以内,具有良好的“8”字型指向性,凹点深度为 $48.8$  dB。

**关键词:** 矢量水听器; 低频; 中性浮力; 灵敏度; 流固耦合

**中图分类号:** TB565.1

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11884/HPLPB201527.054102

随着水声技术的不断进步,矢量水声传感器能够在低频、小尺度阵形下获得一定的空间增益,且能准确地给出水下目标的空间方位信息,因此,它逐渐成了一种最佳的选择<sup>[1-4]</sup>。近些年,有很多关于矢量水听器的研究。Yildiz 等用尺寸小于声波波长的水听器转换成矢量水听器<sup>[5]</sup>。Sung Min 等研制出压电效应的传感器来检测低频信号<sup>[6]</sup>。Heerfordt 等研制了一种新型光纤水听器,该水听器不需要供电、非常适合拖曳阵。远距离船舶噪声的频率范围是 $20\sim 500$  Hz,其中,Brüel & Kjær in Denmark 研制的 8106 的灵敏度为 $-173$  dB,美国的 Wilcoxon 研制的 VS-301 的灵敏度 $-193$  dB,国内研制的 CS-3 的灵敏度为 $-210$  dB。这些传感器的基本尺寸相对较大,基本没有把微机电系统(MEMS)技术和仿生原理集合在一起<sup>[7-8]</sup>。为了解决这些问题,中北大学提出了 MEMS 矢量水听器,该水听器的特征是:高灵敏度、低频和小型化。尽管经过了很多年的研制,但是,目前该水听器在 $20\sim 500$  Hz 灵敏度还不够高( $-197.7$  dB)<sup>[9]</sup>。本文提出了一种中性浮力式 MEMS 矢量水听器,给出了该结构的基本理论,分析该结构对水听器的灵敏度等的影响,通过在驻波场的测试验证该水听器性能。

## 1 MEMS 矢量水听器原理

MEMS 技术开拓了一个新兴技术领域。MEMS 仿生矢量水听器融合了 MEMS 技术、仿生原理和水声原理<sup>[10-12]</sup>。其微结构三维示意图如图 1 所示。当声源发出信号,引起水下声压发生变化,声压的变化通过硅油传递到纤毛上。纤毛的振动引起四梁发生变形。四梁上的压敏电阻受到压力而变化。最后通过惠斯通电桥把四梁的电压变化输出。MEMS 仿生矢量水听器敏感微结构如图 2 所示。

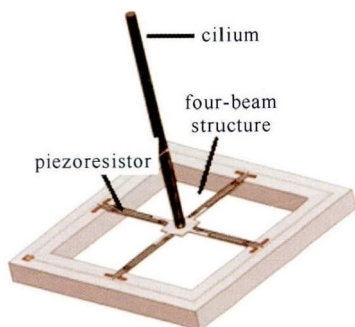


Fig. 1 3-D schematic of microstructure

图 1 传感器仿生微结构三维示意图

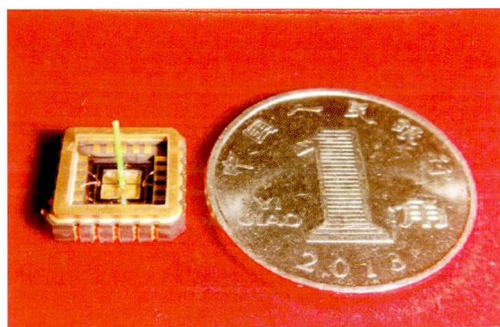


Fig. 2 Sensor unit of MEMS vector hydrophone

图 2 MEMS 仿生矢量水听器敏感单元

\* 收稿日期:2015-01-15; 修订日期:2015-02-09

基金项目:国家高技术发展计划项目;国家自然科学基金项目(61127008/F040703)

作者简介:刘 源(1990—),男,硕士,从事微传感器与微执行器研究;liuy\_wlj@163.com。

通信作者:张国军(1977—),男,博士,副教授,从事微传感器与微执行器研究;nuczgj@163.com。

## 2 中性浮力式微结构

### 2.1 中性浮力微结构设计

声学理论的研究表明,浸在水中的刚性运动柱体的振速为<sup>[13-15]</sup>

$$\frac{v}{v_0} = \frac{4}{j(ka)^2 \pi \frac{\bar{\rho}}{\rho_0} \frac{dH_1^{(2)}(ka)}{d(ka)} - j\pi(ka)H_1^{(2)}(ka)} \quad (1)$$

式中:  $v$  是刚硬柱体的振速幅值;  $v_0$  是周围水介质的振幅;  $a$  为柱体半径;  $k = \frac{\omega}{c}$  是波数, 其中  $\omega$  是声波的圆频率,  $c$  是波速;  $\rho_0$  是周围流体介质的密度;  $\bar{\rho}$  是刚硬柱体的密度;  $H_m(x)$  是汉克尔函数。

如若柱体的尺寸远小于声波波长 ( $ka \ll 1$ ) 时, 式(1)可以简化为

$$\frac{v}{v_0} = \frac{4}{2(\frac{\bar{\rho}}{\rho_0} + 1) + j\frac{\pi(ka)^2}{2}[\frac{\bar{\rho}}{\rho_0} - 1]} \quad (2)$$

在声波的作用下, 刚性柱体做自由运动时, 它的振动速度幅值与周围水质点振动的幅值具有如下的关系

$$\left| \frac{v}{v_0} \right| = \frac{2\rho_0}{\rho + \rho_0} \quad (ka \ll 1) \quad (3)$$

MEMS 矢量水听器的微结构中, 包括两部分: 四梁微结构和纤毛柱体。现阶段纤毛采用的是光纤, 该材料的属性如表 1 所示。由式(3)可知, 光纤的密度大于水, 使得柱体的振动幅值小于声波的振速幅值。

表 1 材料属性

Table 1 Material properties

No.	material	density/(kg · m <sup>-3</sup> )	Poisson coefficient	elastic modulus/Pa
1	EPS	25	0.11	1.15 × 10 <sup>7</sup>
2	fiber	2320	0.17	7.4 × 10 <sup>10</sup>

为了提高刚硬柱体拾取声信号能力, 引入了中性浮力, 也就是在柱体上包裹低密度复合材料(称之为中性浮力球), 使得整个微结构的平均密度接近于水的密度。中性浮力微结构示意图如图 3 所示

在本文中使用的中性浮力球的材料为聚苯乙烯塑料(EPS), 其属性如表 1 所示。在设计中性浮力球的过程中, 把敏感芯片整体结构考虑到, 当形成中性浮力时, 应该满足

$$\rho_c V_c + \rho_s V_s + \rho_{si} V_{si} = \rho_0 (V_c + V_s + V_{si}) \quad (4)$$

式中:  $\rho_c$  是纤毛密度;  $\rho_s$  是柱体的中性浮力球的密度;  $\rho_{si}$  是底部硅的密度;  $V_s$  是中性浮力球的体积;  $V_c$  是柱体的体积;  $V_{si}$  是底部硅体积。

使用的光纤纤毛半径为  $r_c = 150 \mu\text{m}$ , 高度为  $h = 5000 \mu\text{m}$ , 底部硅的外边框边长  $d_1 = 5700 \mu\text{m}$ , 内边框边长  $d_2 = 2000 \mu\text{m}$ , 厚度为  $t = 800 \mu\text{m}$ , 悬臂梁长度  $L = 800 \mu\text{m}$ , 中央方框边长  $f = 400 \mu\text{m}$ <sup>[7]</sup>。同时, 中性浮力球的体积也可以近似表达为

$$V_s \approx (4/3)\pi r_s^3 - 2\pi r_c^2 r_s \quad (5)$$

最后, 可以得到中性浮力球的直径为  $r_s = 2000 \mu\text{m}$ 。频率若是 20~500 Hz, 则  $ka$  约为  $0.17 \times 10^{-3}$  到  $4.3 \times 10^{-3}$ , 满足  $ka \ll 1$ 。该结构在之前微结构的基础上进行制备, 首先完成四梁微结构的加工, 然后精密成型加工出纤毛和浮力球, 接着把浮力球固定于纤毛中部, 最后通过纤毛粘结系统把纤毛粘结在四梁微结构上<sup>[7]</sup>。中性浮力微结构的实物图如图 4 所示。

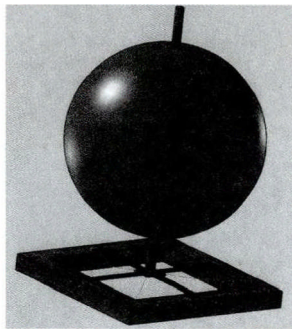


Fig.3 3-D schematic of central buoyant microstructure  
图 3 中性浮力微结构 3D 示意图

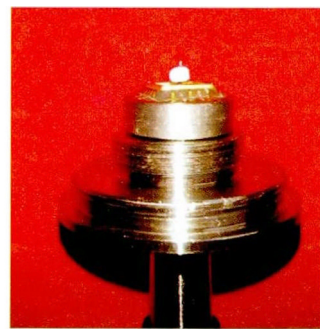


Fig.4 Physical picture of central buoyant microstructure  
图 4 中性浮力水听器实物图

## 2.2 中性浮力微结构对灵敏度的影响

微结构上的四梁应力为<sup>[12]</sup>

$$\sigma(x) = \pm \frac{L^2 + 3gL - 3x(g+L)}{\frac{2}{3}bt^2(L^2 + 3gL + 3g^2)} M_0 \pm \frac{F_H}{bt} \quad (6)$$

式中： $L$  是梁长； $b$  是梁宽； $t$  是梁厚； $g$  是中央方块的边长的一半； $F_H$  是纤毛受到的力； $M_0$  是作用在梁上的力矩； $x$  是纤毛的任意一点。

加入中性浮力球后，该结构与流体介质的接触面积加大。通过计算，接触面积的增大了约 15.4 倍，纤毛上的受力随之增大，也就增大了力矩  $M$ ，整个梁上的应力随之加大<sup>[9-10]</sup>。据此，梁上的应力提高了约 15.4 倍，从而水听器的灵敏度提高 15.4 倍，用分贝表示<sup>[10]</sup>

$$K = 20\lg(15.4) \approx 23.8 \text{ dB} \quad (7)$$

从理论上得出具有中性浮力微结构的水听器的灵敏度比之前水听器的灵敏度高 23.8 dB。

## 3 仿真分析

为了满足对远距离船舶辐射噪声的探测，在提高灵敏度的基础上，还需要保证频带宽度。首先，采用静力分析中性浮力微结构对灵敏度的影响，然后通过流固耦合分析中性浮力微结构的共振峰来判定工作频带。

### 3.1 中性浮力微结构对灵敏度的影响

为了验证中性浮力微结构接收灵敏度的提高，将用 ANSYS 有限元仿真分析之前的微结构和中性浮力微结构两种结构上应力，通过比较相同条件下微结构上应力，得出灵敏度的变化。在  $Y$  轴的负方向上加载 1 Pa 的应力，通过 ANSYS 仿真微结构梁上的应力，之前的水听器的微结构和中性浮力微结构的应力如图 5 所示。因此，中性浮力微结构的梁上应力提高了 15 倍左右，因此，灵敏度提高了约 22 dB，与理论分析接近。

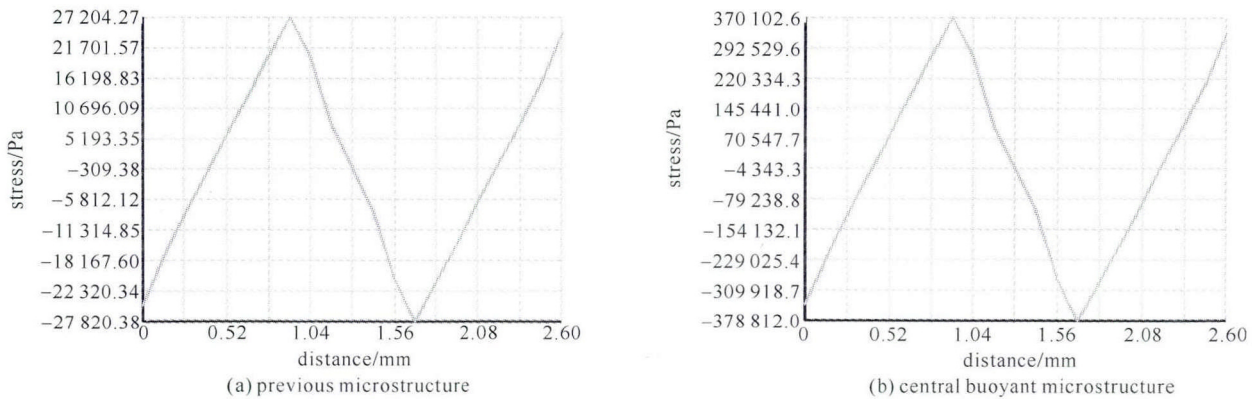


Fig. 5 Stress distribution on beams of different microstructures

图 5 不同微结构梁上应力分布

### 3.2 中性浮力微结构的工作频带

在微结构的灵敏度提高时，也需要考虑微结构的共振频率，该频率的会影响到水听器的频带。由于微结构是在水中工作，它与周围的流体介质会发生相互作用，也就是一个典型的流固耦合问题。所以，在仿真其共振频率时，需要考虑流固耦合作用。图 6 是流固耦合的网格划分图，图 7 是水听器的一阶振动模式。

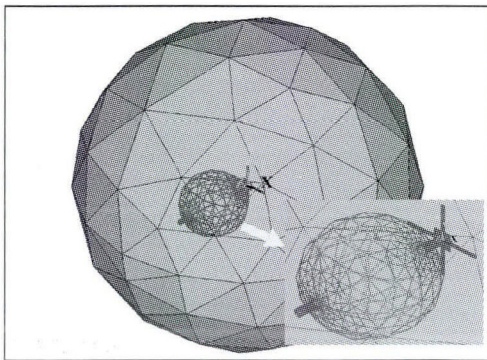


Fig. 6 Picture of finite element mesh of fluid structure interaction

图 6 流固耦合的网格划分图

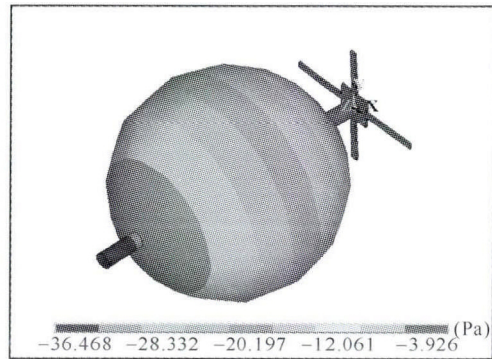


Fig. 7 First vibration form of microstructure

图 7 微结构一阶振动模式



分析得到了该结构的共振频率为 801.155 Hz, 该频率 2/3 倍频程以下为水听器的工作频率上限<sup>[16]</sup>, 即 500 Hz 是水听器工作频带的上限。因此, 水听器的共振峰不会影响到对远距离船舶辐射噪声的探测。

#### 4 水听器实验测试

对水听器的测试包括两部分: 在振动台验证水听器的共振峰和在驻波场中进行测试。首先在振动台测试水听器其的共振频率, 然后在驻波场对水听器的接收灵敏度和指向性进行校准测试。

##### 4.1 振动台测试

MEMS 矢量水听器本质是检测声场的振动信号, 其原理是惯性传感器原理。因此, 利用振动台可以测试 MEMS 矢量水听器的频响曲线, 从频响曲线中可以得到水听器的共振频率。频率响应曲线如图 8 所示。从频响曲线可以得出共振峰为 790 Hz, 与仿真结果接近, 因此共振峰不会影响到对远距离船舶噪声的探测。

##### 4.2 矢量水听器校准测试

为了验证水听器的性能的提高, 在驻波场中测试矢量水听器。接受灵敏度的测试才用驻波比较法, 也就是比较矢量水听器的输出电压和标准水听器的到水听器的灵敏度<sup>[15]</sup>。在驻波场中, 任意一点的声压可以表示为  $p \propto \sin(kd)$ 。因此, 水听器的灵敏度可以表示为<sup>[15]</sup>

$$M_x = \frac{e}{p_0} \frac{\sin(kd_0)}{\cos(kd)} \quad (8)$$

式中:  $e$  是被测水听器的开环电压;  $k$  是波数;  $d$  和  $d_0$  是被测水听器和标准水听器与水面的距离;  $M_x$  是被测水听器的接收灵敏度;  $p_0$  可以通过标准水听器的开环电压得到。

在本次实验中, 将比较两种水听器: 之前的水听器和中性浮力式水听器。两只水听器的灵敏度如图 9 所示, 灵敏度提高了 22.7 dB 左右。改进后灵敏度为 -175 dB, 工作频率范围是 20~500 Hz ( $\pm 1.5$  dB), 与理论和仿真分析几乎一致。

然后, 中性浮力式 MEMS 矢量水听器的指向性也用驻波法测试。在驻波场中指向性表示为<sup>[15]</sup>

$$l = 20 \lg D(\theta) = 20 \lg \left( \frac{e_\theta}{e_{\max}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (9)$$

式中:  $\theta$  是旋转的角度;  $e_\theta$  是开环电压;  $e_{\max}$  是最大开环电压。

测试结果如图 10 所示, 可以看出该水听器具有良好的“8”字指向性, 在 63 Hz 处凹点深度达到了 48.8 dB。驻波场测试表明, 改进后的水听器提高了 22.7 dB, 灵敏度响应曲线更加地平滑, 具有良好的指向性。

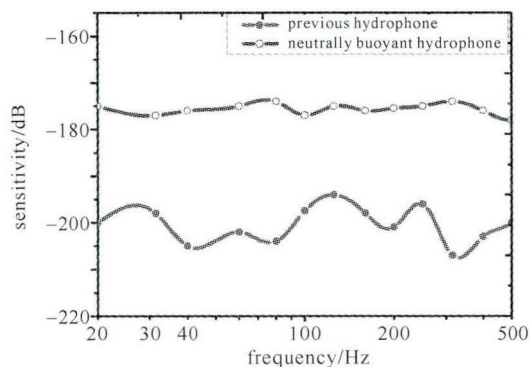


Fig. 9 Frequency response curve

图 9 灵敏度响应曲线

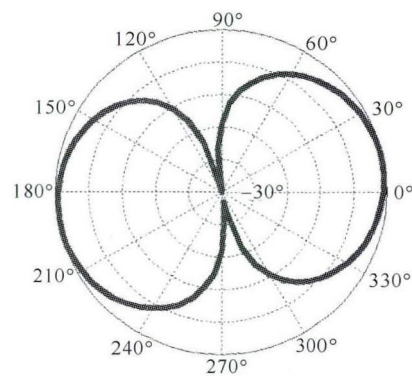


Fig. 10 Directivity of vector hydrophone

图 10 矢量水听器指向性

#### 5 结 论

本文介绍了中性浮力式 MEMS 矢量水听器, 采用了静力和流固耦合分析了新结构的性能, 针对性能的优化, 对水听器的性能进行了测试, 水听器的灵敏度得到了极大的提高, 频带宽度 20~500 Hz, 满足对远距离船舶辐射噪声的测试要求, 频率响应曲线的起伏范围为  $\pm 1.5$  dB 内。但是目前的频带宽度对于稍高频段的探

测能力还不够,如何进一步拓宽水听器的频带还需要做大量的工作。

#### 参考文献:

- [1] 任一石. 新型结构三维矢量水听器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013: 8-27. (Ren Yishi. Research of a new structural vector hydrophone with three channels. Harbin: Harbin Engineering University, 2013: 8-27)
- [2] Baar J V, Dijkstra M, Wiegerink R, et al. Arrays of cricket-inspired sensory hairs with capacitive motion detection[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Micro-Electro Mechanical Systems(MEMS). 2005: 646-649.
- [3] 郭静, 张国军, 王续博, 等. MEMS 仿生矢量水听器微结构的有限元分析[J]. 强激光与粒子束, 2015, **27**: 024125. (Guo Jing, Zhang Guojun, Wang Xubo, et al. Analysis for microstructure of MEMS bionic vector hydrophone. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, **27**: 024125)
- [4] McConnell J A. Analysis of a compliantly suspended acoustic velocity sensor[J]. *J Acoust Soc Am*, 2003, **113**(3): 1395-1405.
- [5] Yildiz S, Dorman L M. Using hydrophones as vector sensors[J]. *J Acoust Soc Am*, 2014, **135**(5): 2361-2364.
- [6] Sung M, Shin K, Joh C, et al. A micro-machined hydrophone based on piezoelectric-gate-of-field-effect-transistor for low frequency sounds detection[J]. *J Acoust Soc Am*, 2014, **135**(4): 2243-2243.
- [7] Heerfordt A, Möhl B, Wahlberg M. A wideband connection to sperm whales: A fiber-optic, deep-sea hydrophone array[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2007, **54**(3): 428-436.
- [8] 谭波, 严平, 黄俊斌, 等. 夹层式光纤激光水听器探头优化设计[J]. 强激光与粒子束, 2015, **27**: 024120. (Tan Bo, Yan Ping, Huang Junbin, et al. Optimization design of sandwich-type probe of fiber laser hydrophones. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, **27**: 024120)
- [9] Xue C, Chen S, Zhang W, et al. Design, fabrication, and preliminary characterization of a novel MEMS bionic vector hydrophone[J]. *Microelectron J*, 2007, **38**(10): 1021-1026.
- [10] Bagnoli P E, Beverini N, Falciai R, et al. Development of an erbium-doped fibre laser as a deep-sea hydrophone[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2006, **8**(7): S535.
- [11] 刘林仙. 基于 MEMS 仿生矢量水听器的测距声纳系统设计[D]. 太原: 中北大学, 2013: 27-36. (Liu linxian. Design of ranging sonar based on MEMS vector hydrophone. Taiyuan: North University of China, 2013: 27-36)
- [12] Li Jinping, Chen Lijie, Gong Zhanjiang, et al. A low-noise MEMS acoustic vector sensor[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM). 2013: 121-124.
- [13] He Jin, Liu Zhou. Underwater acoustic azimuth and elevation angle estimation using spatial invariance of two identically oriented vector hydrophones at unknown locations in impulsive noise[J]. *Digital Signal Processing*, 2009, **19**(3): 452-462.
- [14] Natarajan V, Kathiresan M, Thomas K A, et al. MEMS sensors for underwater applications[C]//Micro and Smart Devices and Systems. 2014: 487-502.
- [15] 费腾. 矢量水听器校准装置[J]. 声学技术, 2005(s0): 289-291. (Fei Teng. Vector hydrophone calibration equipment. *Acoust Technology*, 2005(s0), 289-291)
- [16] 郑士杰. 水声计量测试技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1995. (Zhen Shijie. Underwater acoustic measurement testing technology. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1995)

## Central buoyant MEMS vector hydrophone of low-frequency and high sensitivity

Liu Yuan<sup>1,2</sup>, Wang Lijuan<sup>1,2</sup>, Guo Nan<sup>1,2</sup>, Zhao Long<sup>1,2</sup>, Zhang Wendong<sup>1,2</sup>, Zhang Guojun<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The MEMS bionic vector hydrophone developed by North University of China has advantages of low frequency, miniaturization, high sensitivity, etc. But the sensitivity of the hydrophone is still low for detecting the week acoustic signals. How to enhance the sensitivity is a critical problem to the future developments. So a type of central buoyant microstructure is proposed, expecting to improve the sensitivity. And based on the acoustic research, the parameters of the central buoyant sphere is finally determined. The influences of the central buoyant microstructure on the sensitivity and the frequency band are analyzed by static analysis and fluid-structure interaction respectively. In order to verify the feasibility and performance, the hydrophone is tested in the standing wave field and in the real environment. Results show that the sensitivity of the hydrophone is  $-175$  dB, the frequency ranges from 20 Hz to 500 Hz, which satisfies the requirement of detecting the ship radiation noise over a long distance, and the fluctuation range of frequency response curve is  $\pm 1.5$  dB. The directivity pattern of “8”-shape is good (48.8 dB).

**Key words:** vector hydrophone; low frequency; central buoyancy; sensitivity; fluid structure interaction

**PACS:** 43.30.+m; 43.40.+s; 43.60.+d