

文章编号 1004-924X(2015)05-1387-07

MEMS 矢量水听器封装的流体-结构相互作用

刘梦然*, 简泽明, 张国军, 张文栋

- (1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;
2. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要:针对水听器的频响曲线会在透声帽谐振频率处出现共振峰,使水听器频响曲线失真,工作频带变窄等问题。本文考虑水听器的工作环境,通过研究流体-结构相互作用对透声帽谐振频率进行了分析。首先理论分析流体对结构模态频率的影响,分析显示在流体作用下透声帽谐振频率会降低。然后利用 LMS Virtual. lab Acoustics 有限元软件对空气中和液体中的 MEMS 矢量水听器芯片和透声帽进行了模态分析;并利用振动平台和驻波管对有无进行透声帽封装的 MEMS 矢量水听器进行了测试以验证上述分析。验证结果显示:透声帽在水中的实际一阶谐振频率为 550 Hz,与仿真结果非常吻合,表明该谐振频率可使水听器工作频带变窄。实验结果表明:对水听器中透声帽的流固耦合模态分析非常必要,通过准确地获得透声帽在实际状态下的固有频率并预测水听器的接收频响特性,可为改进封装结构提供理论依据,为进一步优化水听器奠定基础。

关键词:微机电系统(MEMS);MEMS 矢量水听器;流固耦合;透声帽;谐振频率;频带

中图分类号:TB565.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152305.1387

Fluid-structure interaction of MEMS vector hydrophone in packing processing

LIU Meng-ran*, JIAN Ze-ming ZHANG Guo-jun, ZHANG Wen-dong

- (1. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of the 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)

* Corresponding author, E-mail: liumengran1991@163.com

Abstract: Some resonant peaks in the frequency response curve of a hydrophone usually appear at the resonant frequencies of the sound-transparent cap, which make the frequency response curve distorted and the working band narrowed. Thereby, it is necessary to forecast the resonant frequencies of the sound-transparent cap accurately. According to the working environment of a MEMS Hydrophone, this paper analyzes the resonant frequencies of the sound-transparent cap based on the Fluid-Structure Interaction(FSI). Firstly, the effect of fluid action on the FSI of the sound-transparent cap was analyzed in theory, and it shows that the resonant frequencies of the sound-transparent cap will be lowered by the fluid action. Then, the vacuum mode and coupling mode of the chip and sound-transparent cap were simulated by LMS Virtual. lab, respectively. Finally, the MEMS vector

收稿日期:2014-12-15;修订日期:2015-01-20.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2013AA09A412);国家自然科学基金资助项目(No. 61127008, No. 51205374);中北大学研究生科技立项资助项目(No. 201411146)

hydrophones with and without sound-transparent cap packaging were tested in a shaking table and a standing wave tube to verify the above analysis. The results indicate that the actual first-order resonant frequency of sound-transparent cap in water is 550 Hz, which is the same as the simulation and makes the working frequency band of hydrophone narrowed. The results show that the research on coupling modal analysis of sound-transparent cap and predicting the properties of the hydrophone accurately would provide the guarantee for further optimization and improvement of the hydrophones.

Key words: Micro-electro-mechanical System (MEMS); MEMS vector hydrophone; fluid-structure interaction; sound-transparent cap; resonant frequency; frequency band

1 引言

面对水下安全日益严峻的形势,矢量水听器作为声纳探测的重要组成部分,迫切需要采用新技术、新方法来满足工程应用的需求^[1]。矢量水听器性能很大程度上取决于封装,如透声帽固有机特性耦合作用于 MEMS 芯片上,导致水听器频率响应起伏较大,并在透声帽的共振频率处出现峰值,导致测试曲线不平坦,使实际测量的频率上限低于矢量水听器透声帽的共振频率。水听器接收频响曲线,是衡量矢量水听器性能的重要指标。因此迫切需要对水听器的封装进行深入研究,对透声帽共振频率进行准确的预测^[2]。通常,计算结构模态时均将结构考虑在真空环境中,认为真空中的模态和有空气情况下的结构模态几乎完全相同,也就是说在大多数情况下并不特别考虑空气对结构模态的影响^[3]。但是,在一些特殊结构中,例如,本文所研究的 MEMS 水声传感器,必须考虑周围流体对其结构模态的影响,按照耦合模态来对其进行评价。微悬臂梁与流体的耦合振动特性在传感器领域中具有广泛的应用,例如利用微悬臂梁与流体耦合的谐振频率和品质因子测量流体的流动速率、密度和黏度等热物性数据,分析悬臂梁表面的化学黏附作用。Jeong 等人采用瑞利-里兹法对部分浸没于流体中的薄壁圆筒进行了建模和模态提取的工作^[4]。Aldo 等人采用测量应变的方法对悬臂梁的谐振频率进行了分析^[5],Kozlovsky 采用能量法对悬臂梁的动态特性进行了分析^[6],Tikeswar 等人对 10 mm × 1 mm × 0.5 mm 尺寸较大的细长梁在不同黏度的流体中进行了动态响应分析^[7]。然而,针对传感

器封装的流固耦合问题研究较少。

因此,本文对水听器的封装进行了进一步研究。首先,理论分析了流固耦合作用对透声帽谐振频率的影响,利用 LMS Virtual. lab Acoustics 有限元软件对空气和液体中 MEMS 矢量水听器芯片和透声帽进行模态分析,通过灵敏度校准实验验证流体对 MEMS 矢量水听器透声帽的共振频率和水听器性能的影响,为 MEMS 矢量水听器的低频特性的改善提供了重要依据。

2 水听器工作原理

MEMS 矢量水听器是将仿生原理、压阻原理及 MEMS 技术应用于矢量水声传感器的一种新原理和新方法。其仿生结构如图 1 所示。当水下声音信号作用于鱼类侧线器官的神经丘感觉器时,可动纤毛会发生偏斜,从而使感觉细胞获得刺激,刺激通过感觉神经纤维,经侧线神经传递到延脑。因此,只要刚硬塑料柱体(模仿可动纤毛)能够获取水下声音信号信息,即可通过压敏电阻(模仿感觉细胞)实现水下声音信号的探测^[8-10]。其芯片以硅片为材料,由采用标准压阻式硅微机械工艺加工成的 4 梁臂硅微结构及固定于四梁中心的刚硬柱状体组成,结构模型如图 2 所示。四梁臂上通过扩散工艺加工有 8 个阻值相等的应变压敏电阻,并连接成 X 方向(R_1, R_2, R_3 和 R_4)和 Y 方向(R_5, R_6, R_7 和 R_8)2 个惠斯通电桥,微结构上的压敏电阻的分布连接如图 3(a)所示,构成的惠斯通电桥如图 3(b)所示。当有任一振动声信号作用于传感器时,刚硬柱状体接收信号,产生弯矩,并分解到 X 和 Y 方向,使悬臂梁发生变形,从而使 X 和 Y 方向的惠斯通电桥的输出电压发生变化,获得声场矢量信息。

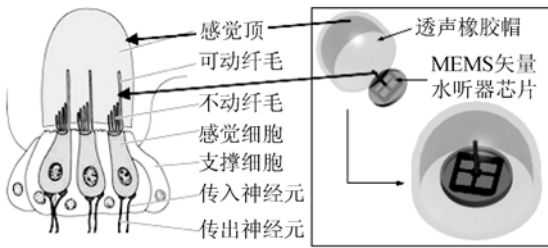


图 1 水听器的仿生结构示意图

Fig. 1 Bionic structure of MEMS vector hydrophone

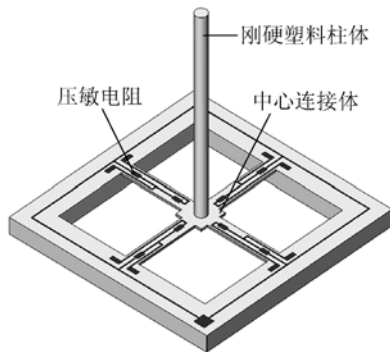
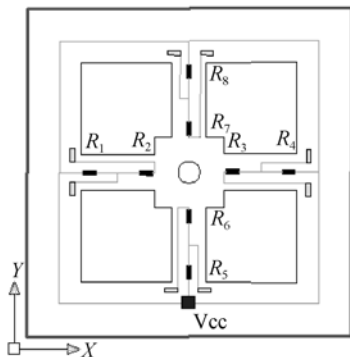


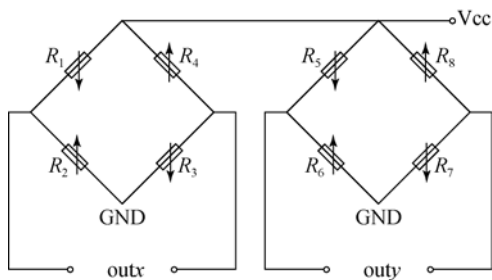
图 2 水听器微结构模型图

Fig. 2 Diagram of hydrophone micro structure model



(a) 压敏电阻的分布图

(a) Diagram of distribution of piezo-resistors



(b) 惠斯通电桥图

(b) Photo of Wheatstone bridge

图 3 微结构上的电阻连接示意图

Fig. 3 Connection of piezo-resistors on micro structure

3 流固耦合理论分析

透声帽的下端为空心圆柱体,上端为空心半球体,理论分析时可以简化为一个高度取修正值的空心圆柱模型,如图 4 所示。当透声帽产生震动时,其内外壁均会产生动压力^[11]。

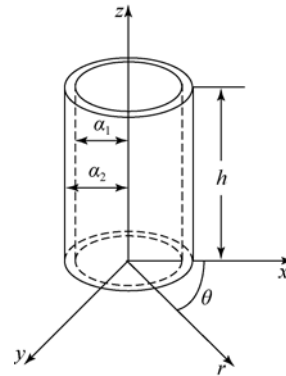


图 4 透声帽简化模型示意图

Fig. 4 Simplified model of sound-transparent cap

根据连续件条件,在扰动液体内的任意一点处的流体速度势函数 Ψ 均必须满足三维拉普拉斯方程:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \gamma^2} + \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial \gamma} + \frac{1}{\gamma^2} \cdot \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

Ψ 满足以下边界条件:

$$z=0, \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

$$z=h, \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$r=a, \frac{\partial \psi}{\partial r} = \left[\dot{u}_g + \frac{\partial u}{\partial t} \right] \cos \theta. \quad (4)$$

边界条件式(2)表示结构底面液体没有竖向速度,条件式(3)表示液体表面为自由面(不考虑重力波的影响),条件式(4)表示透声帽表面的振动速度和液体在该处的振动速度相同,即连续性条件。其中 \dot{u}_g 为沿 x 方向水平地震作用时的地面运动速度, $\partial u / \partial t$ 为透声帽沿 x 方向的弹性振动速度。

将流体势函数的试探函数表示为:

$$\Psi(\gamma, z, \theta, t) = \cos \theta \sum_{n=1}^{\infty} \dot{q}_n \sum_{s=1,3,5}^{\infty} f(r) \cos \frac{\pi s}{2h} z, \quad (5)$$

式中: $f(r)$ 为圆柱坐标 r 的函数,可由式(1)确定,

\dot{q}_n 为广义坐标对时间 t 的一阶导数, 或称为广义速度。将式(5)带入式(1), 并令 $r_1 = \pi s/2h \cdot r$ 得:

$$\frac{\partial^2 f(r_1)}{\partial r_1^2} + \frac{1}{r_1} \cdot \frac{\partial f(r_1)}{\partial r_1} - \left[\frac{1}{r_1^2} + 1 \right] f(r_1) = 0, \quad (6)$$

式(6)为第一类修正贝塞尔方程, 方程的解为:

$$f(r_1) = B_{ns} I_{1s}(r_1) + C_{ns} K_{1s}(r_1), \quad (7)$$

式中: B_{ns} 、 C_{ns} 为根据透声帽边界条件决定的常数, I_{1s} 、 K_{1s} 为第一类和第二类修正贝塞尔函数。

同时, 由数学分析理论可知:

$$\begin{aligned} r \rightarrow 0, I_{1s} \rightarrow 0, K_{1s} \rightarrow \infty \\ r \rightarrow \infty, I_{1s} \rightarrow \infty, K_{1s} \rightarrow 0. \end{aligned} \quad (8)$$

在式(8)条件下将式(7)代入式(5)得:

透声帽内部液体的速度势为:

$$\phi(r, z, \theta, t) = \cos\theta \sum_{n=1}^{\infty} \dot{q}_n \sum_{s=1,3,5}^{\infty} B_{ns} I_{1s}(r_1) \cos \frac{\pi s}{2h} z. \quad (9)$$

透声帽外部液体的速度势为:

$$\phi(r, z, \theta, t) = \cos\theta \sum_{n=1}^{\infty} \dot{q}_n \sum_{s=1,3,5}^{\infty} C_{ns} K_{1s}(r_1) \cos \frac{\pi s}{2h} z. \quad (10)$$

将弹性位移 $u(z, t)$ 用透声帽结构的有水振型 X_n 及广义坐标 q_n 展开, 即:

$$\mu(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} q_n(t) X_n(z). \quad (11)$$

若令透声帽任一阶流固耦合振型 X_n 对圆频率 ω_1 作简谐振动, 则:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \ddot{q}_n = -\omega_1^2, \quad (12)$$

式中 \ddot{q}_n 为广义坐标对时间的二次导数。

叠加透声帽内部和外部单位高度上的弹性动水压力, 则可得到内外均有液体时, 沿透声帽高度的总动水压力:

$$p_{\text{flexible}}^{(n)} = \frac{4r}{g} \omega_1^2 \sum_{s=1,3,5}^{\infty} \overline{H}_s \cos \frac{\pi s}{2h} z \int_0^h X_n \cos \frac{\pi s}{2h} \xi d\xi, \quad (13)$$

式中: $\overline{H}_s = H_s \cdot s$.

此时, 透声帽在流体中的振动微分方程应满足:

$$\begin{aligned} EI \frac{d^4 X}{dz^4} - \frac{\rho F}{g} \omega^2 X = \\ \frac{4r_0 \omega^2}{g} \sum_{s=1,3,5}^{\infty} \overline{H}_s \cos \frac{\pi s}{2h} z \int_0^h X \cos \frac{\pi s}{2h} \xi d\xi, \end{aligned} \quad (14)$$

式中: E 为透声帽的杨氏弹性模量, I 为透声帽断面惯性矩, F 为透声帽的横断面积, ρ 为材料密度, ω 为自振圆频率。

将任透声帽一阶流固耦合振型 X 按其在真空中的振型 \overline{X} 展开:

$$X = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \overline{X}_n. \quad (15)$$

真空振型与相应的圆频率应满足:

$$EI \frac{d^4 \overline{X}_n}{dz^4} - \frac{\rho F}{g} \omega_{0n}^2 \overline{X}_n = 0. \quad (16)$$

将式(15)和(16)带入(14)中得:

$$\begin{aligned} \frac{\rho F}{g} \sum_{n=1}^{\infty} \omega_{0n}^2 A_n \overline{X}_n - \frac{\rho F}{g} \omega^2 \sum_{n=1}^{\infty} A_n \overline{X}_n = \\ \frac{4r_0 \omega^2}{g} \sum_{s=1,3,5}^{\infty} \overline{H}_s \cos \frac{\pi s}{2h} z \sum_{k=1}^{\infty} A_k \int_0^h \overline{X}_k \cos \frac{\pi s}{2h} \xi d\xi. \end{aligned} \quad (17)$$

以 X_n 乘式(17)两端, 从 0 到 h 积分, 利用振型 \overline{X}_n 的正交条件, 得:

$$\begin{aligned} \frac{\rho F}{4r_0 h} N_n (\omega_{0n}^2 - \omega^2) A_n - \omega^2 \sum_{s=1,3,5}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \overline{H}_s M_{ns} M_{ks} A_k = \\ 0 \quad (n = 1, 3, 5, \dots, \infty), \end{aligned} \quad (18)$$

式中:

$$M_{ns} = \frac{1}{h} \int_0^h \overline{X}_n \cos \frac{\pi s}{2h} z dz,$$

$$N_n = \frac{1}{h} \int_0^h \overline{X}_n^2 z dz.$$

取 $n=1, k=1$, 可以求得水中振型的一阶频率, 与真空中一阶频率之比的平方为:

$$\left(\frac{\omega_1}{\omega_{01}} \right)^2 = \frac{1}{1 + \frac{4r_0 h}{\rho F N_1} \sum_{s=1,3,5}^{\infty} \overline{H}_s M_{1s}^2} < 1. \quad (19)$$

由式(19)可以得到, 透声帽在水中的频率小于在真空中的频率。

4 流固耦合仿真分析

采用 LMS Virtual. lab 分别对芯片和透声帽的真空模态和耦合模态进行仿真分析。芯片在真空中一阶模态的仿真结果如图 5 所示, 水中一阶模态的仿真结果如图 6 所示。由于水听器工作频段为几十至一千赫兹, 芯片的谐振频率不在此范围内^[12], 故无需考虑芯片谐振频率的影响。

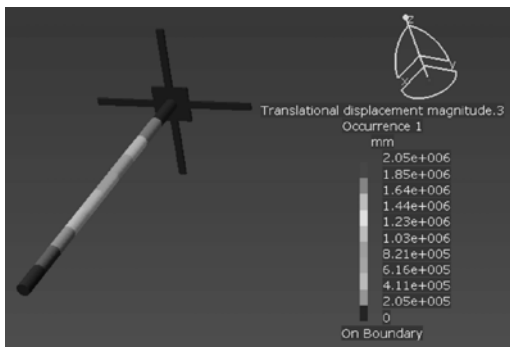


图 5 芯片一阶真空模态仿真图(2 693 Hz)

Fig. 5 Simulation diagram of the first-order vacuum modal of chip (2 693 Hz)

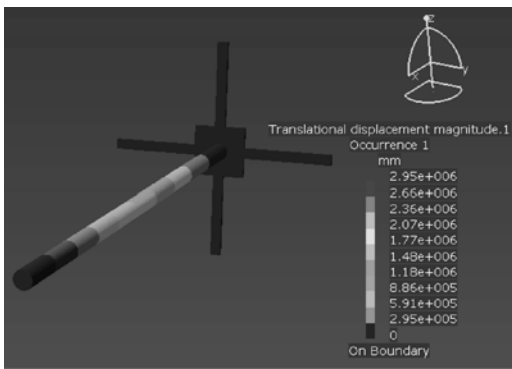


图 6 芯片一阶耦合模态仿真图(1 863 Hz)

Fig. 6 Simulation diagram of the first-order coupling modal of chip (1 863 Hz)

表 1 聚氨酯透声帽模态分析结果

Tab. 1 Modal analysis results of polyurethane sound-transparent cap

模态/Hz	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶
真空模态	796	797	1 500	1 729	1 731	1 827
耦合模态	564	565	1 359	1 423	1 500	1 505

透声帽前六阶模态频率如表 1 所示。由于水听器感兴趣的工作频段为几十~一千 Hz,此时只需对一阶和二阶模态频率进行分析,一阶和二阶的误差可能来源于软件自身误差,可忽略,只对一阶模态频率进行分析。透声帽真空中一阶模态的仿真结果如图 7 所示,水中一阶模态的仿真结果如图 8 所示。与真空模态相比,耦合模态的频率和振型都发生了改变。透声帽的一阶真空共振频率为 796 Hz,而一阶模态频率为 564 Hz,降低了 29.1%,与理论分析的结论一致。透声帽的谐振频率处于水听器感兴趣工作频段几十~一千 Hz

之内,谐振频率的降低将使水听器的工作频段变窄。

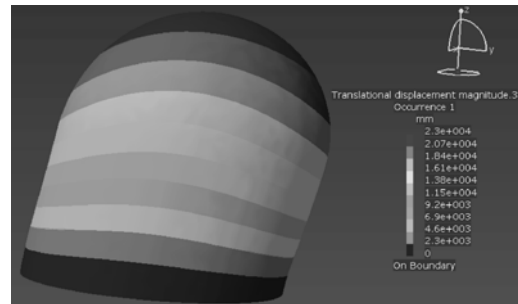


图 7 透声帽一阶真空模态仿真图(796 Hz)

Fig. 7 Simulation diagram of the first-order vacuum modal of sound-transparent cap (796 Hz)

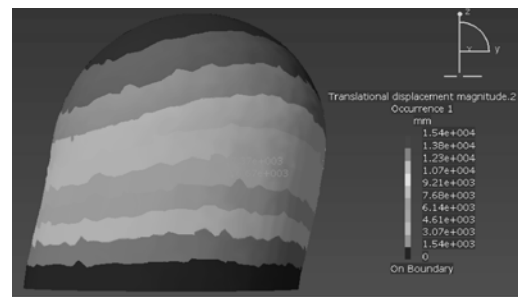
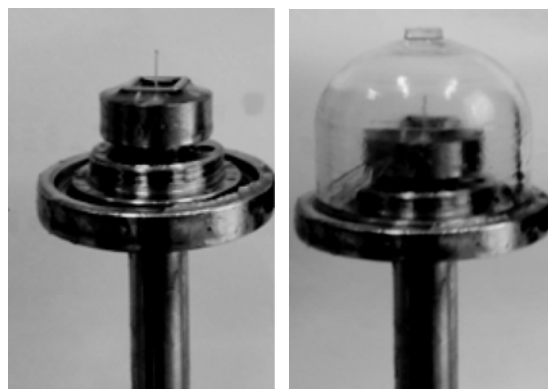


图 8 透声帽一阶耦合模态仿真图(564 Hz)

Fig. 8 Simulation diagram of the first-order coupling modal of sound-transparent cap (564 Hz)

5 测 试

在驻波桶中,分别对未封装的裸片(如图 9(a)所示)和聚氨酯帽封装的水听器(如图 9(b)所示)进行灵敏度校准测试。



(a) 未封装(裸片) (b) 聚氨酯帽封装

(a) Unpackaged(naked chip) (b) Packaged polyurethane cap

图 9 水听器实物图

Fig. 9 Photo of MEMS vector hydrophone

灵敏度校准测试采用比较法原理,即将被测 MEMS 矢量水听器和 CS-3A 标准水听器的输出进行比较,得到被测 MEMS 矢量水听器的声压灵敏度。由于管中为驻波声场,管中任意一点声压满足 $1/p \propto \sin(kd)$ (其中 k 为波数, d 为水-空气界面处与考察点之间距离),因此,被测水听器的灵敏度为^[13]:

$$M_x = \frac{U_x \sin kd_0}{P_0 \cos kd}, \quad (20)$$

其中: U_x 为被测水听器的开路电压有效值, M_x 为被测水听器的接收灵敏度, d 和 d_0 分别为标准水听器和被测水听器与水-空气界面处之间距离,此时 $d = d_0$, P_0 可以通过测量标准水听器的开路电压得到。

将水听器固定在机械回转杆中,将水听器最大输出方向对准声波入射方向,同时固定标准水听器至相同液面(如图 10 所示)。图 11 所示为驻波筒测试现场图。裸片与聚氨酯帽封装水听器频响对比曲线如图 12 所示。

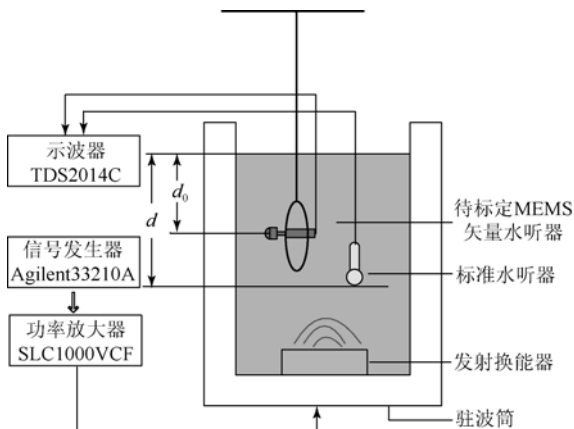


图 10 测试安装示意图
Fig. 10 Schematic diagram of test setup

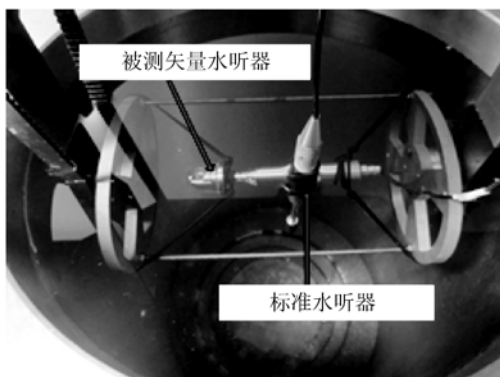


图 11 驻波筒测试现场图
Fig. 11 Test site of standing wave tube

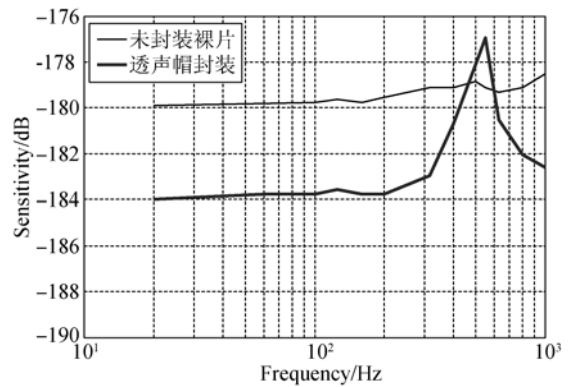


图 12 水听器灵敏度曲线
Fig. 12 Hydrophone sensitivity curves

实验测试结果表明:当声源频率为 20 ~ 1 000 Hz 时,未封装的裸片结构的灵敏度曲线无较大起伏,而封装后的水听器灵敏度曲线在 550 Hz 处出现共振,使水听器频响曲线失真,工作频带变窄。由此可以推断透声帽在水中的实际一阶谐振频率为 550 Hz,与透声帽在水中的耦合模态仿真一阶谐振频率 564 Hz 仅存在 2.5% 的误差。

因此,为了避免透声帽谐振频率对水听器工作频带的影响,下一步可以从以下方向对封装结构进行改进:(1)在聚氨酯帽中嵌入不锈钢支撑体,在不影响透声帽透声性能的前提下,提高透声帽的刚度,从而提高其谐振频率;(2)寻找新型的封装材料,使透声帽的谐振频率低于水听器的工作频率下限,或者高于水听器的工作频率上限。

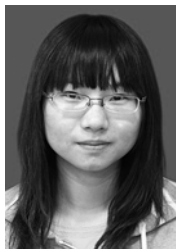
6 结 论

本文针对流体介质对水听器性能的影响,对透声帽谐振频率进行分析。从理论上分析了在流体作用下透声帽谐振频率,然后用 LMS Virtual. lab 对其进行仿真分析。仿真结果表明:真空中透声帽一阶模态频率为 796 Hz,水中一阶耦合模态频率为 564 Hz,降低了 29%。最后对其进行测试,结果显示:透声帽在水中的实际一阶谐振频率为 550 Hz,更接近透声帽在水中的一阶耦合模态仿真谐振频率 564 Hz。而透声帽的谐振频率处于水听器感兴趣工作频段几十至一千赫兹之内,谐振频率的降低将使水听器的工作频段变窄。因此,对水听器透声帽的流固耦合分析可以更准确的得到透声帽在实际状态下的固有频率,预测水听器接收频响性能,为水听器的进一步优化提供了保障。

参考文献:

- [1] 杨松涛. 深水矢量水听器的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
YANG S T. *The research of deep-water vector hydrophone* [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. (in Chinese)
- [2] 陈德勇, 曹明威, 王军波, 等. 谐振式 MEMS 压力传感器的制作及圆片级真空封装[J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1235-1242.
CHEN D Y, CAO M W, WANG J B, *et al.*. Fabrication and wafer-level vacuum packaging of MEMS resonant pressure sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1235-1242. (in Chinese)
- [3] 李增刚, 詹福良. Virtual. lab Acoustics 声学仿真计算高级应用实例 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
LI Z G, ZHAN F L. *Virtual. lab Acoustic Simulation Calculation Application* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [4] JEONG K H, LEE G M, KIMET T W. Free vibration analysis of a circular plate partially in contact with a liquid [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 324(1/2): 194-208.
- [5] ALDO M, AGNESE C, SALVATORE P, *et al.*. Modal analysis of a cantilever beam by use of Brillouin based distributed dynamic strain measurements [J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(12): 1-7.
- [6] KOZLOVSKY Y. Vibration of plates in contact with viscous fluid; extension of Lamb's model [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 326(1/2): 332-339.
- [7] TIKESWAR N, ELLEN K L, SUSAN C M. Dynamic response of a cantilever in liquid near a solid wall [J]. *Sensors and Actuators: A*, 2003, 102(3): 240-254.
- [8] 伞海生, 宋子军, 王翔, 等. 适用于恶劣环境的 MEMS 压阻式压力传感器[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 550-555.
SAN H S, SONG Z J, WANG X, *et al.*. Piezoresistive pressure sensor for harsh environments [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 550-555. (in Chinese)
- [9] 王帆, 董景新, 赵淑明. 硅微振梁式加速度计的温度检测及闭环控制[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1590-1597.
WANG F, DONG J X, ZHAO SH M. Temperature measurement and close-loop control of silicon resonant accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1590-1597. (in Chinese)
- [10] 李振, 张国军, 薛晨阳, 等. MEMS 仿生矢量水听器封装结构的设计与研究[J]. 传感技术学报, 2013, 26(1): 25-30.
LI ZH, ZHANG G J, XUE CH Y, *et al.*. The design and research of encapsulation on MEMS bionic vector hydrophone [J]. *Chinese Journal of Sensor and Actuators*. 2013, 26(1): 25-30. (in Chinese)
- [11] 居荣初, 曾心传. 弹性结构与液体的耦联振动理论 [M]. 北京: 地震出版社, 1983.
JU R CH, ZENG X CH. *Coupling Vibration Theory Between Elastic Structure and Liquid* [M]. Beijing: Seismological Press, 1983. (in Chinese)
- [12] 陈尚, 硅微仿生矢量水声传感器研究[D]. 太原: 中北大学, 2008.
CHEN SH. *Research of MEMS Bionic Vector Hydrophone Based on Silicon* [D]. Taiyuan: North University of China, 2008. (in Chinese)
- [13] 费腾. 矢量水听器校准装置[J]. 声学技术, 2005(增刊): 289-291.
FEI T. The vector hydrophone calibration device [J]. *Technical Acoustics*, 2005(supplement): 289-291. (in Chinese)

作者简介:



刘梦然(1991—), 女, 湖北随州人, 博士研究生, 2008 年于中北大学获得学士学位, 主要从事微纳器件及传感器相关信号处理方面的研究。E-mail: liumengran1991@163.com

导师简介:



张文栋(1962—), 男, 河南太康人, 博士, 教授, 1982 年、1986 年于中北大学分别获得学士、硕士学位, 1995 年于北京理工大学获得博士学位, 主要从事微纳器件方面的研究。E-mail: wdzhang@nuc.edu.cn