

Design of A Novel Three-Dimensional Vector Hydrophone Based on MEMS *

LI Zhen^{1,2}, ZHANG Guojun^{1,2*}, XUE Chenyang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, Taiyuan 030051, China;
2. Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: According to the requirements of high sensitivity, low frequency and small volume three-dimensional vector hydrophone, a new kind of three-dimensional MEMS vector hydrophone imitated fish's lateral line sense organ is proposed in this paper. Multiple cilia structure of the hydrophone is used to receive the acoustic information of X, Y and Z directions. The piezoresistive reasonable position is obtained through finite element analysis by ANSYS, and the resonance frequency is 1.5 kHz. A standing wave barre test results show that: the sensitivity range of the hydrophone can be from -200 dB to about -180 dB; and it has a good frequency response characteristics in 25 Hz ~ 2 000 Hz band; directivity tests display that the hydrophone has a good "8"-shaped directivity, and the directivity resolution is not less than 30 dB.

Key words: vector hydrophone; MEMS; ANSYS; bionic

EEACC: 2575D; 2860C

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2013.07.010

新型三维 MEMS 矢量水听器的设计 *

李 振^{1,2}, 张国军^{1,2*}, 薛晨阳^{1,2}

(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: 根据国内对高灵敏度、低频小体积三维矢量水听器的需求, 提出了一种仿鱼侧线纤毛的 MEMS 三维矢量水听器。该水听器采用多纤毛结构分别用来接收 X、Y 与 Z 方向的声信息, 采用 ANSYS 进行仿真, 静力分析得出了布放压阻的合理位置, 谐响应分析得出该结构的固有频率在 1.5 kHz 左右; 驻波桶校准测试结果表明: 该水听器的灵敏度范围在 -200 dB 到 -180 dB 左右; 在 25 Hz ~ 2 000 Hz 频段内具有良好的频响特性; 指向性分辨率大于等于 30 dB, 具有良好的“8”字形指向性。

关键词: 矢量水听器; MEMS; ANSYS; 仿生

中图分类号: TB565.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)07-0950-05

为了能够在低频、小尺度阵形下获得一定的空间增益, 且能给出水下目标精确的方位信息, 矢量水听器是一种最佳的选择^[1-2]。在矢量水听器发展过程中, 先后采用不同工作原理, 在设计和制作方面出现了各种各样的形式。具有代表性的主要为动圈式和压电式的同振矢量水听器^[3-4], 近些年来随着科学技术的不断进步, 利用各种新型敏感机理来探测水声信号的报道屡见不鲜, 比如英国和法国制作的 PVDF 薄膜矢量水听器, 这种水听器已经用在两国的潜艇上。仿生学是一门模仿生物的特殊本领, 利用生物的结构和功能原理来研制机械或各种新技术的科学技术^[5]。

由中北大学研制的二维纳机电仿生矢量水听器, 是一款小体积、高灵敏度、矢量性的水听器, 相对于当前国内的矢量水听器具有体积小、低频响应好、指向性、刚性安装等特点^[6-9], 但也存在只能实现水平定位不能实现水下空间定位的缺陷, 不能有效定位水下目标, 为此亟需研制三维纳机电矢量水听器。

本文在原有二维纳机电仿生矢量水听器的基础上, 结合声学理论提出了一种仿鱼侧线感觉器的 MEMS 三维压阻矢量水听器, 对其进行了理论分析和实验研究, 得到了一些有意义的结论, 对研究新一代高性能矢量水听器具有重要的指导意义。

项目来源: 国家 863 计划项目 (2011AA040404); 国家自然科学基金项目 (51205374); 国家自然科学基金专项基金项目 (61127008)

收稿日期: 2013-04-13 修改日期: 2013-05-24

1 探测原理^[10-11]

由声学理论可知, 平面波声压可表示为:

$$p(r, t) = p_0 e^{j(kr - \omega t)} = p_0 \exp[j(kx \cos \alpha \cos \theta + ky \cos \alpha \sin \theta + kz \sin \alpha - \omega t)] \quad (1)$$

式中 k 是波矢量, 表示声波传播的方向, 它与水平面的夹角为 α , 取值范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$, 它在水平面内的投影与 x 轴的夹角为 θ , 取值范围 $[0, 2\pi]$ 。波矢量的值为 $k = \omega/c$, ω 是声波的角频率, c 是介质的声速 (如图 1 所示)。

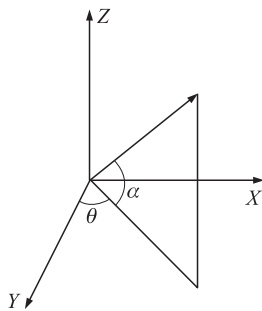


图 1 波矢量 k 在直角坐标系中的投影

在均匀介质中, 声场的运动方程为:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \nabla p = 0 \quad (2)$$

将(2)代入(1)得:

$$\bar{v} = \frac{p_0}{\rho_0 c} (\cos \theta \cos \alpha \xi + \sin \theta \cos \alpha \eta + \sin \alpha \tau) \quad (3)$$

上式 ξ, η, τ 是 x, y, z 轴上的单位矢量, 式(3)表明, 平面波的声压与质点振速三分量之间仅差一个常数, 两者的波形则是一样的, 因而对平面波来说, 声压与振速是完全相关的。

由式(3)可得质点振速的三个分量:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{p}{\rho_0 c} \cos \theta \cos \alpha \\ v_y &= \frac{p}{\rho_0 c} \sin \theta \cos \alpha \\ v_z &= \frac{p}{\rho_0 c} \sin \alpha \end{aligned} \quad (4)$$

由此可见, 只要测得质点振速在水平面内的二个分量 v_x, v_y, v_z , 就可以得到声源在水平面内的方位角 θ , 声源的俯仰角 α 。

$$\theta = \arctan(v_y/v_x)$$

$$\alpha = \arctan(v_z/\sqrt{v_x^2 + v_y^2})$$

2 结构设计与有限元分析

2.1 结构设计

根据鱼类侧线感觉器的结构, 设计了如图 3 所

示的水听器基础结构。该结构用长的单悬臂硅梁 (Z 方向拾振单元) 和刚硬柱体 (X, Y 方向拾振单元) 模仿可动敏感纤毛, 以下简称仿生纤毛, 用十字梁和单臂硅梁根部的压敏电阻模仿感觉细胞, 各方向上的压敏电阻以惠斯通电桥方式连接, 其中, X, Y 方向的压敏电阻以惠斯通全桥方式连接, Z 方向每两个悬臂梁上的电阻连成惠斯通半桥, 形成两个半桥, 在后续电路中将两个半桥的信号相加, 以弥补半桥灵敏度低的缺陷。

图 2 中, 刚硬柱体 1 的高度为 4 mm, 直径为 0.2 mm; 十字梁 2 的每四分之一梁长为 1 mm, 梁宽为 0.13 mm, 梁厚为 0.02 mm; 单臂硅梁 3 的梁长为 3.5 mm, 梁宽为 0.13 mm, 梁厚为 0.02 mm。

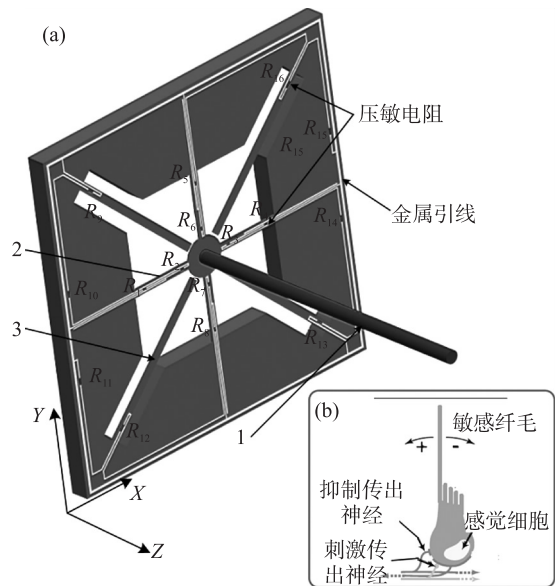


图 2 仿生纤毛式 MEMS 三维矢量水听器基础结构示意图

2.2 有限元分析

半导体的压阻效应是由于应力作用使半导体能带变形, 变形的能带改变了有效质量和载流子的迁移率, 从而改变了电阻, 对于硅悬臂梁上压阻变化可用公式 $\Delta R/R = \sigma_l \pi_l + \sigma_t \pi_t$ ^[12] 计算得到。为使电阻变化最大, 压阻布防原则为悬臂梁上应力最大且线性变化区域。为确定水听器基础结构的压阻布防位置, 采用 ANSYS 对水听器基础结构进行应力分析, 分析时在刚硬柱体 Y 向和单臂硅梁 Z 向上加载 1 Pa 的力并对十字梁和单臂硅梁提取路径得到其上面的应力分布和应力云图, 如图 3 ~ 图 5 所示。

根据压阻的布防原则, 本传感器的布防位置如图 3、图 4 中标记所示, 分别位于悬臂梁根部或端部 100 μm 到 200 μm 处。对于十字梁 X 方向的横向应力, 在图 5 十字梁和单臂梁局部应力分布图和图 7 应力云图的都可看出, 其大小相对于 Y 方向的 X 方向梁

上的纵向应力几乎为零,且对称分布,所以可以忽略。

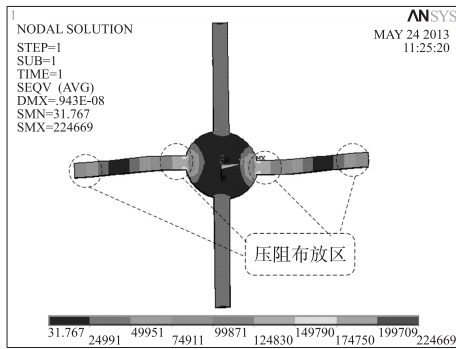


图3 十字梁应力分布图

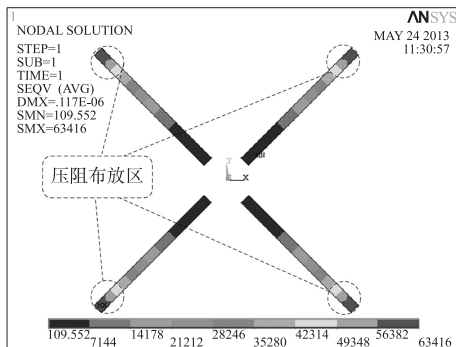


图4 单臂硅梁应力分布图

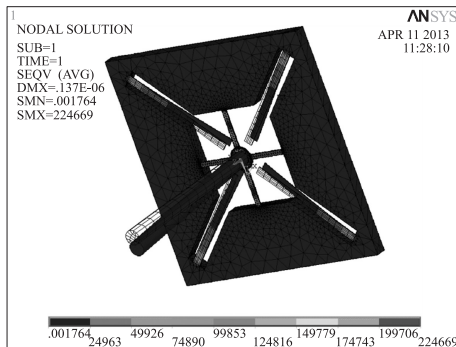


图5 梁上应力分布云图

矢量水听器微结构的工作带宽与其固有频率有关,与输入信号无关,为获得微结构的固有频率,利用ANSYS对微结构进行谐响应分析,分析结果如图6、图7所示,从图中看到水听器的十字梁-垂直纤毛结构的固有频率在1.2 kHz左右,单臂梁的固有频率在1.5 kHz左右。

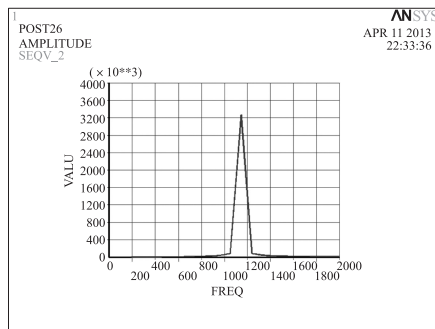


图6 十字梁-垂直纤毛谐分析结果

3 仿生封装与实验测试

加工好的MEMS水听器基础结构如图8所示。对于图8所示结构必须对其进行封装,以使其在水中不被损坏。因此,需要设计一个封装结构将水听器基础结构保护起来;同时,还要确保外界声信号能够最大限度传递到仿生纤毛上。一般对于100 kHz以下的水听器,常采用低衰减、低渗水的聚氨酯橡胶作为封装材料,它具有透声性能,耐海水浸泡等特性。MEMS结构周围的液体需绝缘且特性阻抗要与水接近,为此选用硅油作为封装结构填充物质。综上,采用聚氨酯透声材料制成的透声帽并在内部充入硅油作为封装结构,封装后的水听器如图9所示。

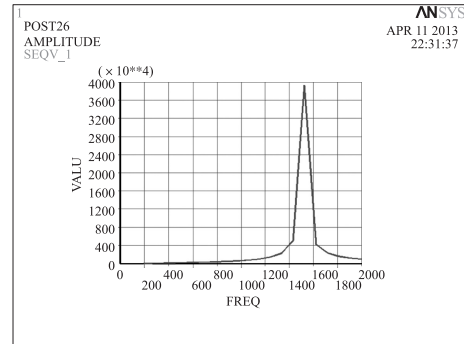


图7 单臂硅梁谐分析结果

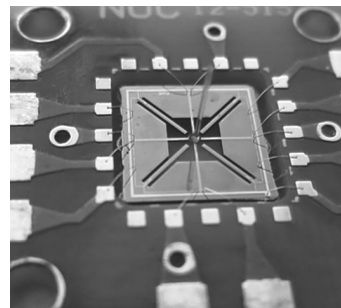


图8 MEMS结构照片

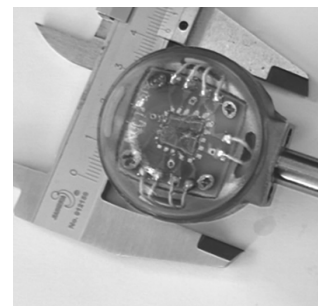


图9 封装后的水听器照片

为了验证水听器结构的合理性和可行性,在充水驻波桶中采用驻波场比较法对水听器进行了校准测试,校准装置组成原理如图10所示。校准测试时,将仿生水听器和标准水听器同时放入声场中,测量比较这两个水听器的输出电压值,测试分为两

部分: 1) 频响测试, 测试频率范围为 25 Hz ~ 3.5 kHz, 分别将水听器 X、Y、Z 方向与驻波桶内的声波传播方向平行, 按频率的 1/3 倍频程方式记录数据, 将数据代入公式 $M_x = M_0 \frac{e_x \sin kd}{e_0 \cos kd}$ (M_0 表示标准水听器的自由场电压灵敏度, e_x 、 e_0 分别表示待校准水听器和标准水听器的开路输出电压, d 表示待校准水听器的放置深度), 得到水听器的频响曲线; 2) 指向性测试, 由于变化发射声波的角度比较不方便, 所以将其转化为变化矢量水听器的方位角, 利用机械回转杆改变水听器相对声源的接收方向, 当发射声场的频率为某一恒定不变时, 通过回旋杆转动水听器, 记录下矢量水听器在各个方向上的接收灵敏度, 将所测数据代入公式 $L = 20 \log D(\theta) = 20 \log (e_\theta / e_{\max})$ (e_θ 、 e_{\max} 是任意方向和最大方向水声传感器的输出电压值) 进行归一化处理, 可以得到水听器的指向性图。对测试数据处理后得到的频响曲线图和指向性图如图 11 ~ 图 13 所示。

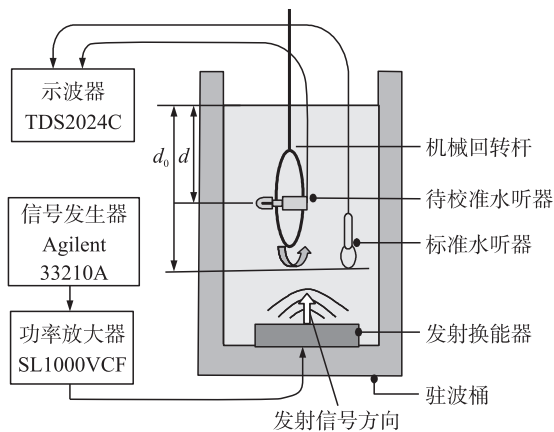


图 10 测试装置组成原理图

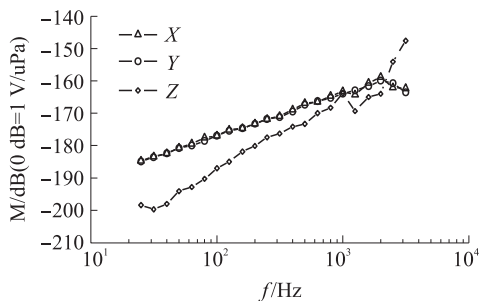


图 11 频响曲线

图 11 显示在 25 Hz ~ 2 kHz 频段内, 该水听器的频响曲线近似为线性规律增长, 并且水听器的灵敏度范围在 -200 dB 到 -180 dB 之间变化。从图 12、图 13 显示该水听器具有比较平滑的“8”字形指向性图, 指向性的分辨率(某一频率下水听器轴向灵敏度最大值 M_{\max} 与其横向灵敏度最小值 M_{\min} 比值的

分贝数) 大于等于 30 dB。

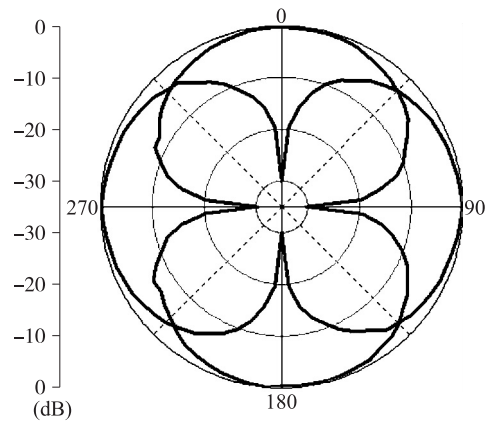


图 12 X、Y 向指向性图

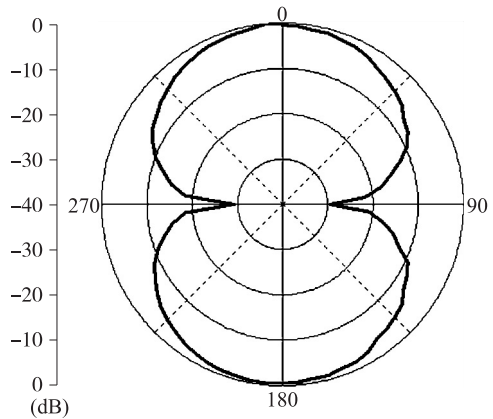


图 13 Z 向指向性图

4 结论

本文设计了一种基于 MEMS 技术的仿生三维压阻矢量水听器。分析了该水听器的探测原理, 并通过有限元仿真确定了压阻布放位置和固有频率。采用 MEMS 技术设计加工的仿生水听器实现了矢量水声传感器高灵敏特性、中低频特性和小型化的特点, 并实现了单矢量水听器的三维声信息测量, 实验结果表明该水听器在 25 Hz ~ 2 000 Hz 频段内具有良好的频响特性和“8”字形指向性。实验测试的频响范围与仿真所得固有频率有所出入, 分析原因可能为 MEMS 结构加工时需在硅表面进行氮化硅淀积以及金属蒸渡等工艺操作, 致使 MEMS 结构的弹性模量、密度等参数发生改变, 最终造成结构固有频率升高, 进而拓展了水听器的工作频段。

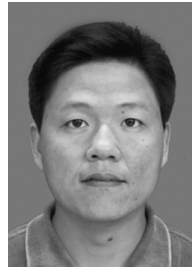
参考文献:

- [1] Nehorai A, Paldi E. Acoustic Vector-Sensor Array Processing[J]. IEEE Trans Signal Processing, 1994, 42(9): 2481-2491.
- [2] 赵俊渭, 陈华伟, 李金明. 基于矢量水声传感器的被动声制导系统的研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(1): 25-29.

- [3] 陈丽洁,张鹏,徐兴桦,等. 矢量水听器综述[J]. 传感器与微系统,2006,25(6):5-8.
- [4] 贾志富. 全面感知水声信息的新传感器技术-矢量水听器及其应用[J]. 物理,2009,38(3):157-159.
- [5] 彭子模. 再谈仿生学的应用前景. 新疆师范大学学报[J]. 2001,20(1):46-51.
- [6] 乔慧,刘俊,张斌珍,等. 一种新型压阻式硅微仿生矢量水听器的设计[J]. 传感技术学报,2008,21(2):301-304.
- [7] 许姣,张国军,石归雄,等. 纤毛式矢量水听器新型封装结构的研究[J]. 传感技术学报,2011,24(4):517-520.
- [8] 刘细宝,张国军,薛晨阳,等. 矢量水听器的芯片级减震结构的设计[J]. 传感技术学报,2011,24(6):835-837.
- [9] 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(3):25-30.
- [10] 何祚镛,赵玉芳. 声学理论基础[M]. 国防工业出版社,1981:51-59.
- [11] 陈尚. 硅微 MEMS 仿生矢量水声传感器研究[D]. 太原:中北大学,2008.
- [12] Mohamed Gad-el-Hak. 微机电系统设计与加工[M]. 张海霞,赵小林,译. 北京:机械工业出版社,2010:49-53.



李 振(1988-),男,硕士研究生,黑龙江哈尔滨人,主要研究方向为 MEMS 器件及水声传感器, lizhen200808@126.com;



张国军(1977-),男,副教授,2001年7月毕业于华北工学院自动控制系并留校任教,同年9月份被派往清华大学微电子系进修微电子专业。2003年,考取中北大学精密仪器与机械专业的研究生,2004年7月~2006年7月在中国科学院声学研究所做有关穿孔板结构非线性声学方面的研究工作。