文章编号:1004-2474(2017)02-0239-04

压电式十字型 MEMS 矢量仿生水听器的设计和研究

何 剑,王二伟,丑修建

(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)

摘 要:设计并研究了基于压电效应的微机电系统(MEMS)仿生结构的三维矢量水声传感机理,包含基础结构的建模、定向探测分析,器件制备的基础研究及其相关测试。通过 Ansys 15.0 对器件进行了静态位移分布和应力分析仿真,借助扫描电镜和原子力显微镜对锆钛酸铅(PZT)压电薄膜进行了观察,对器件进行了扫频测试和指向性测试,谐振频率约为 500 Hz,输出电压峰-峰值为 280 mV。它对促进现代水声传感技术的发展和解决对液体环境中微弱信号的高精度定位、识别、探测等技术难题具有一定的科学和实用价值。

关键词:压电式;薄膜;仿生;悬臂梁;水听器

中图分类号:TN384 文献标识码:A

Design and Study on a Piezoelectric Cross-shaped MEMS Vector Bionic Hydrophone

HE Jian, WANG Erwei, CHOU Xiujian

(Key Lab. of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education,

North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: This paper designed and studied the three-dimensional underwater acoustic sensing mechanism of MEMS vector bionic hydrophone based on piezoelectric effect, including modeling of basic structure, analysis of directional detection, basic research of devices fabrication and related test. The static displacement distribution and stress analysis of the device have been simulated by Ansys 15. 0. With the help of scanning electron microscopy and atomic force microscopy, $Pb(Zr_{0.53} Ti_{0.47})O_3$ (PZT) piezoelectric thin film was observed. The frequency sweeping test and directivity test were carried out and the resonance frequency is about 500 Hz, the peak-peak output voltage value is 280 mV. The obtained results have a certain scientific and practical values for promoting the development of modern underwater acoustic sensing technology and solving technical problems such as high precision position, identification and detection of weak signal in liquid environment.

Key words: piezoelectric; film; bionic; cantilever beam; hydrophone

0 引言

高灵敏度水听器作为声呐系统的核心组成单元,是水下探测和成像前沿技术领域的重要发展方向,应用前景广泛且需求迫切^[1]。传统压电式微机 电系统(MEMS)矢量水听器的换能元器件是压电 陶瓷圆管,结构相对简单,沿圆管半径方向的水平面 该器件有均匀的指向性,常用作标准水听器。但压 电陶瓷圆管制作的圆柱状水听器存在抗冲击性能 差,质量重,声阻抗与液态环境不匹配,制作工艺复 杂,加工难等^[2]缺点。与传统压电式 MEMS 水听器 相比,压电式 MEMS 矢量仿生水听器以错钛酸铅 (PZT)压电功能薄膜材料为敏感单元的水听器结 构^[3],结合 MEMS 技术制造出光纤式十字型,包含 4 个悬臂梁结构的新型无源器件^[4]。该器件可实现 *x*,*y*,*z* 三维方向对声压信息感知,提供水平方位角 和俯仰角信息,具有空间三维矢量性。压电式 MEMS 矢量水听器是将压电效应、MEMS 技术结 合应用在矢量水听器结构的无源器件,可使矢量水

收稿日期:2016-05-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51605449);山西省应用基础研究计划基金资助项目(No. 201601D021064);中北大学自然科 学研究基金资助项目(No. XJJ2016027)

作者简介:何剑(1985-),男,四川巴中人,副教授,博士,主要从事功能材料制备及 MEMS 器件设计与制造的研究。

听器体积进一步缩小,还具有动态测试范围广,噪声 低及灵敏度高等优点^[5-7],为解决当前技术瓶颈和实 际应用问题提供了一种新技术、新途径和新思路。

1 水听器结构

本文设计的压电式 MEMS 仿生结构矢量水声 传感器就是利用 PZT 压电功能材料的压电效应实 现外界环境机械能转变为电能的传感机理。其基础 结构是以鱼类的侧线听觉器官为原型^[8-10],依据同 振型矢量水声传感器的工作原理及正压电效应设计 的。该结构主要包括十字悬臂梁-中心粘接体和仿 纤毛结构的光纤两部分。图 1 为基础芯片的整体结 构示意图。用光纤模仿鱼类可动纤毛,用 PZT 压电 功能薄膜敏感单元模仿鱼类感觉细胞,设计出该水 声传感器的仿生换能基础结构,属于一种新型无源 器件。



图 1 水听器仿生结构

2 水听器结构仿真

图 2 为压电式 MEMS 仿生结构矢量水声传感 器基础芯片在 x、y、z 方向上及总体的静态位移分 布图^[11-12]。由图可见,当在十字梁-中心连接体的 z 方向施加载荷时,由于 4 根悬臂梁的对称性,各 部分的位移和应力曲线成中心对称,最大位移仅 0.089 5 μm。





如图 3 所示,从左到右依次为 1、5、10 层 PZT 压电薄膜,随着薄膜厚度的增加,表面均匀性变好, 致密性变好。但层数过多时薄膜在制作时质量又无 法得到保证,易出现放射性裂纹,最终选择在器件悬 臂梁上制备 20 层的 PZT 薄膜,如图 4 所示。



图 4 20 层 PZT 薄膜表面

如图 5 所示,单根悬臂梁最大应力发生在关于梁 中心位置近似对称的两端,大小相等方向相反,梁上 有大小相等的拉应力区和压应力区,则 PZT 薄膜上 分布极性相反的电荷。根据仿真,本文设计 PZT 压 电敏感单元时尽可能将其布置在应力最大的压电敏 感区,共用底电极、断开上电极的方式(见图 6),能实 现 2 个敏感区 PZT 压电薄膜的串联,增大电信号。





4 力学特性分析

压电式 MEMS 仿生结构矢量水声传感器受载 荷作用时,光纤倾斜,进而将载荷传递到中心连接体 上,使其随之侧向旋转,直至芯片四悬臂梁反作用等 于中心连接体受力方可平衡。如图 7 所示,在器件 *x* 方向施加载荷 *F*_x 时,中心连接体分别产生沿 *x* 方 向的反作用力和绕 *y* 轴的力矩。



图 7 x 方向施加载荷时受力和力矩分析图

5 水听器实物及测试

图 8 为压电式 MEMS 水听器实物。将仿生微 结构固定在振动台表面上,最大输出方向与振动台 垂直,安装方法如图 9 所示,此时 *x* 方向输出最大。 图 10 为频率 500 Hz 时仿生微结构输出波形及压电 敏感微结构 *x* 向的频响曲线。



图 8 压电式 MEMS 水听器实物



图 9 振动台频响测试安装示意图及测试现场图





由图 10 可知,仿生微结构共振峰在 500 Hz 左 右,与 Ansys 模态分析有差异,分析可能是由于 PZT 压电功能薄膜制备,器件工艺制造及流固耦合 引起阻尼和附加质量等原因导致谐振频率下降。

本文设计的水听器在驻波筒内完成指向性测 试。如图 11 所示,采用声源方向恒定,改变水听器 接收方向的方法(改变方位角)进行测量。恒定发射 声场频率,回旋装置以转动待测水听器,记录各个方 位角水听器的接收灵敏度。





$$L = 20\log D(\theta) = 20\log\left(\frac{e_{\theta}}{e_{\max}}\right) \tag{1}$$

式中:e₀为水听器在某一方向上接收的输出电压; e_{max}为水听器最大输出电压。

通过绘制归一化的数据,得到的极坐标图就是 该水听器在某一频率下的指向性图。图 12、13 为本 文设计的水听器在 *x* 方向的指向性图。由图可看 出 100 Hz 和 300 Hz 的凹点深度和最大不对称性分 别为-20 dB,0.2 dB 和-23.5 dB,0.8 dB。观察结 果发现,压电式 MEMS 仿生矢量水听器指向性曲线 较平滑,凹点深度值大,结构抑制横向灵敏度效果 较好。



6 结束语

本文设计并研究了十字型 MEMS 仿生结构的 三维矢量水声传感器,对器件进行了相关仿真和测 试,通过 PZT 压电薄膜作为敏感单元,主要研究了 *x*方向的最大输出和指向性,对促进现代水声传感 技术的发展具有一定的科学价值和实用价值,但仍 有许多不足,如*z*方向的指向性不好导致整体三维 指向性偏低,器件的结构还需要改进,还不能应用到 实际中。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈丽洁,张鹏,徐兴烨,等. 矢量水听器综述[J]. 传感器 与微系统,2006,25(6):5-8. CHEN Lijie,ZHANG Peng,XU Xingye, et al. Overview

of vector hydrophone[J]. Transducer and Microsystem Technologies,2006,25(6):5-8.

- [3] 王春雷,李吉超,赵明磊. 压电铁电物理[M].北京:科 学出版社,2009.
- 【4】 张亚婷, 丑修建, 郭涛, 等. 振动驱动微能源技术研究进展[J]. 微纳电子技术, 2012, 46(11): 242-247.
 ZHANG Yating, CHOU Xiujian, GUO Tao, et al. Research progress on vibration-driven micro power technology [J]. MEMS and Sensors, 2012, 46 (11): 242-247.
- [5] 何祚镛,赵玉芳.声学理论基础[M].北京:国防工业出版社,1981.
- [6] 王鹏. 基于 MEMS 矢量水听器阵列的声目标定向定 位技术研究[D].太原:中北大学,2013.
- [7] 赵俊渭,陈华伟,李金明.基于矢量水听器的被动声制 导系统的研究[J].哈尔滨工程大学学报,2004,25 (1):25-29.

ZHAO Junwei, CHEN Huawei, LI Jinming. Research on passive acoustics-guidance system based on vector hydrophones[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2004, 25 (1): 25-29.

- [8] 李振,张丛,刘涛,等.四元阵列 MEMS 矢量水听器的 有限元分析[J]. 压电与声光,2013,6(35):910-914.
 LI Zhen, ZHANG Cong, LIU Tao, et al. Finite element analysis of four-element array MEMS vector hydrophone[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013,6 (35): 910-914.
- [9] 李振,张国军,薛晨阳,等. MEMS 仿生矢量水昕器封 装结构的设计与研究[J]. 传感技术学报,2013,26(1): 25-30.
- [10] 许姣,李俊,张国军,等. 一种新型 MEMS 矢量水听器 的设计[J]. 压电与声光,2012,34(1): 90-91.
 XU Jiao,LI Jun,ZHANG Guojun, et al. Design of a novel vector hydrophone based on MEMS[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012,34(1): 90-91.
- [11] 周长城,胡仁喜,熊文波. ANSYS11.0 基础与典型范 例[M].北京:电子工业出版,2007.
- [12] 缪建,朱若谷. 基于 ANSYS 的压电微悬臂双梁的有限 元分析[J]. 压电与声光,2011,33(4):557-560.
 MIAO Jian,ZHU Ruogu. The finite element analysis of twin piezoelectric micro-cantilever based on ANSYS
 [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33 (4): 557-560.