

## The Design of a Vector Hydrophone's Chip-Level Damping Structure\*

LIU Xibao<sup>1,2</sup>, ZHANG Guojun<sup>1</sup>, XUE Chenyang<sup>1\*</sup>, XU Jiao<sup>2</sup>, WANG Xiaoyao<sup>2</sup>, YU Jiaqi<sup>2</sup>, LI Hui<sup>2</sup>

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

**Abstract:** A novel damping spring structure is designed based on the existing structure of MEMS vector hydrophone. It is desirable that this novel structure can improve the antinoise ability of hydrophone. According to finite element simulation by Ansys, the geometry, stiffness and location of the spring are determined. Two pairs of spring are adopted and placed inside and outside vertically. Simulation results show that the reducing flow noise ability of this damping structure can be increased by 3 times, as well as it does not affect the sensitivity of hydrophone. The advantages of this chip-level spring damping structure are one integrated, good consistency and engineering applications.

**Key words:** vector hydrophone; damping; ansys; spring; coefficient of stiffness

EEACC:2575D

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2011.06.011

## 矢量水听器的芯片级减震结构的设计\*

刘细宝<sup>1,2</sup>, 张国军<sup>1</sup>, 薛晨阳<sup>1\*</sup>, 许 姣<sup>2</sup>, 王晓瑶<sup>2</sup>, 于佳琪<sup>2</sup>, 李 辉<sup>2</sup>

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

**摘 要:** 在 MEMS 矢量水听器现有结构的基础上, 设计出一种新型弹簧减震结构, 期望利用该结构提高水听器抗噪能力。根据 Ansys 有限元仿真, 确定出该弹簧的几何尺寸、劲度系数( $k \approx 5 \text{ N/m}$ )及弹簧的所在位置——弹簧设置为内外圈相互垂直的两对。仿真结果表明, 该减震结构抑制流噪声能力可提高 3 倍以上, 同时几乎不影响水听器的接收灵敏度。该芯片级弹簧减震结构具有一次集成、一致性好、易于组阵、工程应用方便等特点。

**关键词:** 矢量水听器; 减震; ansys; 弹簧; 劲度系数

中图分类号: TB565.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)06-0835-04

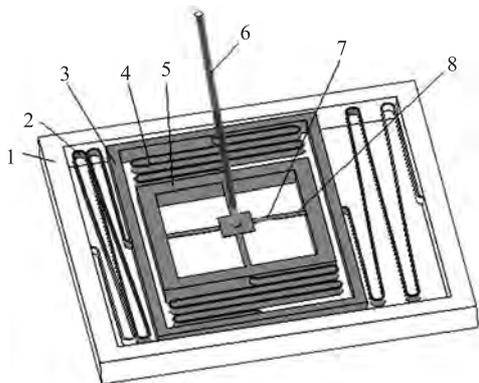
声纳是江河湖海中轮船的耳目, 而水听器<sup>[1-2]</sup>是决定声纳性能好坏的关键部件——感知并转换部分。海洋中有各种各样背景噪声<sup>[3]</sup>, 包括流噪声、海浪声、船舶和鱼等生物的活动声音。而在这为数众多的背景噪声中要数由海浪、涡流、船体在风浪下的摇摆等引起的流噪声最为严重和厉害。水听器在理想的消声水池中有很高的灵敏度, 但海试时性能都会大打折扣。当目标信号源有一定距离, 信号本身比较微弱时, 在经过一定距离的衰减之后, 便被湮没在流噪声之中。于是流噪声便成为了提取有用信号的屏障, 成为了限制水听器性能优化发展和工程应用的瓶颈。

流噪声主要是以脉冲冲击的方式干扰水听器的正常工作。一旦水听器拾取了含有大量流噪声的信

号, 要想在后续的电路处理中滤除流噪声便甚为困难和麻烦。而冲击客观存在无法避免, 常见解决办法就是弹性安装。目前的矢量水听器在工程应用时, 一般都需采用柔性连接。例如, 哈尔滨工程大学的贾志富教授 1997 年成功研制的同振球形声压梯度水听器<sup>[4]</sup>, 该水听器用加速度计作为敏感元件放置在一个刚硬的直径 6 厘米的球壳内, 并通过悬置装置的柔性连接将球壳置于声场中。但外接软连接既无法做到微型化, 又极易导致声散射。尤其是组成阵列时, 无法保证一致性和稳定性。为此, 设计重点放在水听器的内部结构上, 笔者受此启发, 进行了合理化改进, 目的是使水听器在抗冲击的同时不影响接收灵敏度。

### 1 抗流传感器的设计与工作原理

抗流矢量水听器的芯片级减震敏感体如图1所示,包含在半导体衬底中部采用半导体体刻蚀技术刻蚀成的内外圈两对弹簧、内中外三框架、十字形悬臂梁结构和四梁交叉处的质量块。其中内中框架通过内圈两个弹簧相连,外中框架通过外圈两个弹簧相连,两对弹簧方向垂直;微型柱状体垂直固定于十字形悬臂梁结构的中央(即四梁交叉处的质量块上),该微型柱状体选用密度与水的密度相近的材料;十字形悬臂梁结构的四梁端部上设置有转换元件,该转换元件为硅微应变压敏电阻<sup>[5-6]</sup>,经MEMS工艺<sup>[7]</sup>加工出,4个应变压敏电阻为P型等值电阻(无形变时),且按[110]晶向布置,连接构成惠斯通电桥。所述的弹簧、框架和十字形悬臂梁结构一次集成,保证了一致性和稳定性。



1-正方形外框架, 2-外圈弹簧, 3-长方形中框架, 4-内圈弹簧, 5-正方形内框架, 6-十字形悬臂梁结构, 7-微型柱状体, 8-转换元件。

图1 芯片级减震传感器的结构示意图

通过惠斯通电桥,将电阻的变化转换为电压的变化,以此实现对水下声信号的方向、声压大小的测量,这就是此种传感器的检测原理。其具体的结构及工作原理,张文栋等人在相关文献中已详尽阐述<sup>[8-10]</sup>。与现有无弹簧结构相比,所不同的是该减震结构的十字梁四周连接有弹簧,当水流冲击时,会引起弹簧发生形变,弹簧像减震器一样有效的缓解了水流的压力,从而大大提高了抗冲击的能力。

### 2 减震传感器有限元模拟

采用有限元分析软件 Ansys 对上述结构进行仿真。首先建立有限元模型,其次分析设计弹簧的尺寸、位置,再次对微结构进行静力分析,最后对比测试。

#### 2.1 弹簧尺寸的设计:

本文运用控制变量法,分别只改变弹簧<sup>[11-12]</sup>的垂直厚度、水平宽度、单侧长度和匝数,测试弹簧的劲度(倔强)系数,得到如下结论:

弹簧的劲度(倔强)系数与垂直厚度  $d$  成正比,与水平宽度  $w$  的三次方成正比,与弹簧单侧长度的  $m$  次方成反比,其中  $2 < m < 3$ ,与弹簧匝数  $n$  成反比。

弹簧越长越细,劲度系数越小,越容易发生形变,减震效果越理想;但同时也意味着弹性限度越小,因正常冲击导致弹簧断裂的可能性越大。因为弹簧的劲度系数与弹簧单侧长度的  $m$  次方成反比,其中  $2 < m < 3$ ,又不能超过四梁边框的边长  $l = 6\ 400\ \mu\text{m}$ ;因为弹簧的劲度系数与水平宽度的三次方成正比,而与其他的都只成一次方比,所以水平宽度是主要决定因素。综合考虑以上因素,该弹簧尺寸设计为  $l = 3\ 000\ \mu\text{m}$ ,  $w = 30\ \mu\text{m}$ ,  $n = 2$ ,  $d = 150\ \mu\text{m}$ ,此时弹簧的劲度系数  $k \approx 5\ \text{N/m}$ 。

#### 2.2 弹簧位置的设计:

为了使两组弹簧单独作用,互不耦合,即在施力方向上只体现切向刚度无法起作用的、施力方向上的弹簧的作用,起到抗冲击的作用。设计弹簧位置如图2所示。 $Y$ 轴向上弹簧尺寸为  $l = 5\ 000\ \mu\text{m}$ ,  $w = 30\ \mu\text{m}$ ,  $n = 2$ ,  $d = 300\ \mu\text{m}$ ,此时弹簧的劲度系数也为  $k \approx 5\ \text{N/m}$ 。经测试:此分离弹簧结构在各种分析中耦合度很小,在  $Y$ 轴向上外圈弹簧起减震作用(如图2),在  $X$ 轴向上内圈弹簧起减震作用(如图4),整个结构一直趋于静止(如图3、图5)。

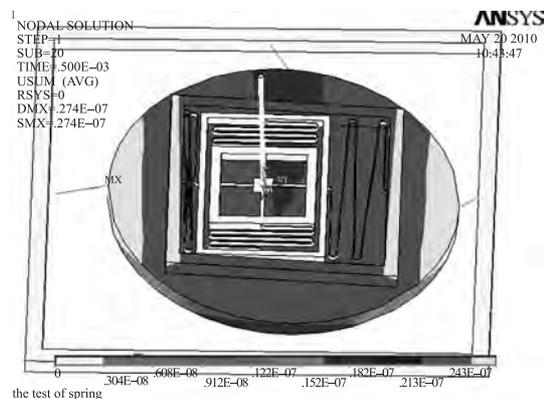


图2 减震结构受Y轴向上冲击时,结构的位移图

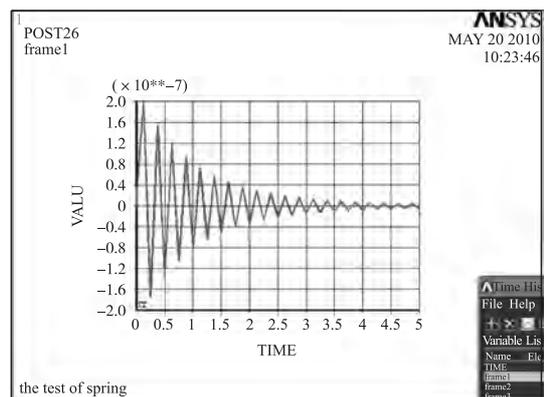


图3 减震结构受Y轴向上冲击时,结构的振动图

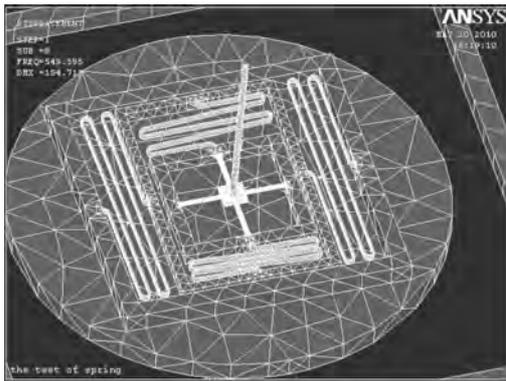


图 4 减震结构受 X 轴向上冲击时, 结构的位移图

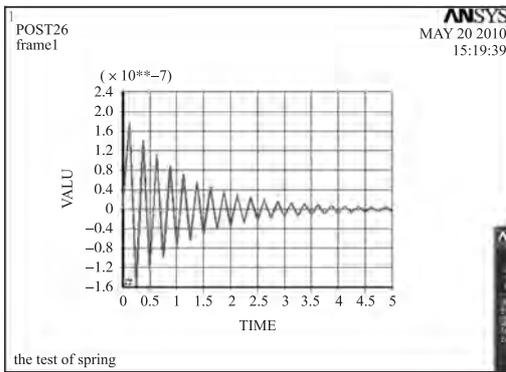
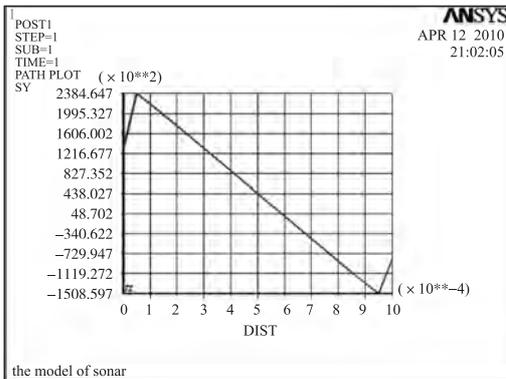


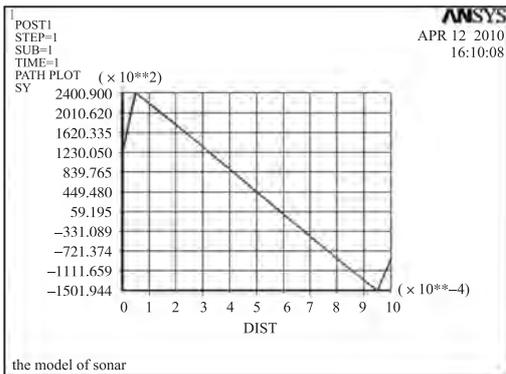
图 5 减震结构受 X 轴向上冲击时, 结构的振动图

2.3 静力分析

纤毛单侧受到同样大小的声压作用时 ( $P = 1$  Pa), 由图 6 比较可知, 梁上应力值基本相同, 分别



(a) 无弹簧结构的梁上应力图



(b) 优化弹簧结构的梁上应力图

图 6 纤毛一侧受 1 Pa 声压时, 梁上应力对比图

约为  $2.191 \times 10^2$  Pa 和  $2.205 \times 10^2$  Pa, 充分说明了减震结构几乎不影响对有用信号的采集, 即不影响灵敏度。

3 冲击响应仿真结果对比

在受到相同冲击时 ( $P \approx 200$  Pa), 施加在刚性底座半侧面上, 持续时间为 0.000 5 s, 由下图 7 对比看出, 现有结构受力图呈现出随时间缓慢减小的三角波, 最大受力为  $1.8 \times 10^4$  Pa, 而优化减震结构受力图则相对平滑, 最大受力仅为  $0.5 \times 10^4$  Pa。由此可见, 此减震结构使外部冲击能量基本都由外阻尼作用损耗, 抑制流噪声能力提高了 3 倍以上。

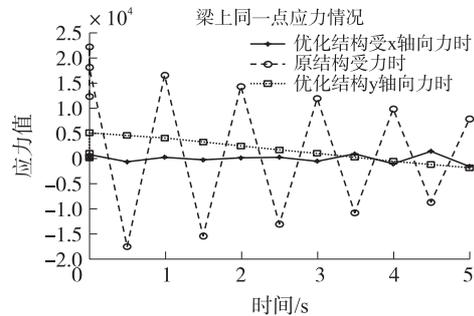


图 7 结构受相同冲击时, 梁上应力对比图

4 结论

以惠斯通电桥将电阻的变化转换为电压的变化为检测原理, 结合 MEMS 工艺研制水声传感器。期望利用该新型减震结构提高水听器抗冲击能力, 从而将外接软连接做到芯片级, 一次集成一致性好, 便于组阵。通过 Ansys 仿真, 优化现有结构。在现有结构的基础上增加减震弹簧, 设计该弹簧的几何尺寸、所在位置和劲度系数 ( $k \approx 5$  N/m), 并将弹簧设置为内外圈相互垂直的两对。仿真结果表明该优化抗流结构具有可行性, 能有效的提高水听器的抗冲击能力, 同时几乎不影响其接收灵敏度, 更能适应水下恶劣的环境。

参考文献:

- [1] 陈丽洁, 张鹏, 徐兴辉, 等. 矢量水听器综述[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(6): 5-8.
- [2] 杨德森, 洪连进. 矢量水听器原理及应用引论[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 41-45.
- [3] 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981. 397.
- [4] 贾志富. 同振球型声压梯度水声传感器的研究[J]. 应用声学, 1996, 16(3): 20-25.
- [5] 李伟东, 吴学忠, 李圣怡. 一种压阻式微压力传感器[J]. 仪表技术与传感器. 2006, 18(7): 1-5.

- [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):302.
- [7] 王阳元,武国英,郝一龙,等.硅基MEMS加工技术及其标准工艺研究[J].电子学报,2002,30(11):1577-1584.
- [8] Xue CH Y, Tong ZH M, Zhang B Z, et al. A Novel Vector Hydrophone Based on the Piezoresistive Effects of Resonant Tunneling Diode[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(4):401-402.
- [9] 谢斌,薛晨阳,张文栋,等.硅微仿生矢量水声传感器研制[J].传感技术学报,2006,19(5):2300-2303.
- [10] Zhang W D, Xue CH Y, Xiong J J, et al. Piezoresistive Effects of Resonant Tunneling Structure for Application in Micro-Sensors[J]. Indian Journal of Pure & Applied Physics, 2007, 45(4):294-298.
- [11] 李华,石庚辰. mems 平面微弹簧弹性系数的研究[J]. 探测与控制学报, 2005, 27(4):41-43.
- [12] 熊继军,张文栋,薛晨阳,等.拉曼光谱应用于硅微悬臂梁的应力特性测试[J].中国机械工程,2005,16(14):1292-1295.



刘细宝(1985-),男,硕士研究生,湖北黄冈人,研究方向为MEMS矢量水听器, xiaobao1125282@sina.com;



张国军(1977-),男,讲师,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,2004.7-2006.7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。