

# 复合式 MEMS 水听器的设计

王 雁<sup>1,2</sup>, 刘梦然<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, 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:**针对微机电系统(MEMS)仿生矢量水听器工作频带窄, 灵敏度低, 且存在左、右舷模糊问题, 设计了高灵敏宽频带复合式 MEMS 水听器。矢量部分选择 4 个不同纤毛长度的仿生矢量水听器组成阵列, 各结构间采用并联方式, 工作频带拓宽到 4 800 Hz, 并分割出 4 个不同的频率段, 在拓宽了频响带宽的同时保证了灵敏度。标量部分采用低频电容水声传感器进行优化设计, 空腔注满硅油、振膜开设声学孔, 提高振膜承压性的同时保证了良好的动态性能。后续对标量和矢量信息进行声能流联合算法处理, 解决了左右舷模糊的难题。该文主要介绍了复合式 MEMS 水听器的工作原理, 结合 ANSYS workbench 进行了仿真实验。选用玻璃片及绝缘衬底上的硅 (SOI) 片键合的单片集成复合结构工艺设计, 在玻璃上定义空腔及下电极, 在 SOI 片上定义十字梁和振膜, 整体结构一致性好, 定位精度高。

**关键词:**频带; 复合式微机电系统(MEMS)水听器; 声能流联合算法; 左右舷模糊; ANSYS workbench; 振膜

**中图分类号:** TN55; TB565.2 **文献标识码:** A

## The Design of Composite MEMS Hydrophone

WANG Yan<sup>1,2</sup>, LIU Mengran<sup>1,2</sup>, ZHANG Guojun<sup>1,2</sup>

(1. Key Lab. of Instrumentation Science and Dynamic Measurement1, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Key Lab. of Science and Technology on Electronic Test and Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Aiming at the disadvantages of narrow frequency band, low sensitivity, and ambiguity between the port hand and the starboard existing in micro-electro-mechanical system (MEMS) bionic vector hydrophone, a composite MEMS hydrophone was designed in this paper. An array consisting of 4 bionic vector hydrophone with different length of cilia was selected as the vector part, of which the parallel method between the structures was used. The operating frequency was extended to 4 800 Hz, and 4 different frequency bands were segmented, while broadened the frequency bandwidth and the sensitivity was ensured at the same time. The scalar part used the low frequency capacitance hydrophone sensor for the design optimization. The cavity was filled with silicone oil and the acoustic holes were opened in the diaphragm, while the pressure capacity of the diaphragm was enhanced and good dynamic performance was ensured at the same time. The scalar and vector information was processed through a joint algorithm of acoustic energy flux, thus the ambiguity between the port hand and the starboard was effectively eliminated. The working principle of composite MEMS hydrophone was introduced in this paper and the simulation verification was carried out through the ANSYS workbench. The cavity and bottom electrode were defined in glass and the four-arm and diaphragm were defined on SOI. The proposed hydrophone has good whole structure consistency and high positioning accuracy.

**Key words:** frequency band; composite MEMS hydrophone; joint algorithm of acoustic energy flux; the ambiguity between the port hand and the starboard; ANSYS workbench; diaphragm

### 0 引言

微机电系统(MEMS)水声传感器在工业、农业、医学等方面有广泛的应用,尤其在海上军事方

面,潜艇隐身、水声对抗与反对抗等起着重要的作用,因而也是近年来各国水声领域发展的新热点之一。水声传感器分标量和矢量水声传感器两类。标

收稿日期:2016-08-10

基金项目:山西省应用基础研究基金资助项目(201601D011035);国家自然科学基金资助项目(61127008);国家重点研发基金资助计划(2016YFC0101900);山西省研究生教育创新基金资助项目(2016BY122)

作者简介:王雁(1989-),女,山西省吕梁人,硕士生,主要从事微纳器件研究及传感器相关信号处理的研究。E-mail:ywangnuc@163.com。通信作者:张国军(1977-),男,副教授,博士,主要从事 MEMS 传感器及矢量水听器等的研究。

量水声传感器可测声场的声压标量信息,矢量水声传感器可测声场的声压梯度或加速度等矢量信息。目前研制的 MEMS 水听器均以矢量水听器为主,阵列式、复合式的 MEMS 水听器已成为现代水听器发展的主流方向。中北大学自主研制的 MEMS 仿生矢量水听器<sup>[1-3]</sup>是一款性能优越的低频矢量水听器,但存在灵敏度和频率响应带宽均不理想,及左、右舷模糊的缺陷。

为解决现有 MEMS 矢量水听器存在问题,提出了由一个  $2 \times 2$  阵列式 MEMS 仿生矢量水听器和 1 个低频电容标量水听器单片集成的复合式水听器,该水听器具有灵敏度高,量程宽及单极子指向性,同时解决了灵敏度和频率响应带宽不理想及左、右舷模糊的问题。单片集成复合式 MEMS 水听器,最终以单个传感器实现了小体积内的传感器组阵,拓宽了有效频带范围,同时克服了在传统组阵中的各个水听器的不一致性。

## 1 结构设计及工作原理

### 1.1 高灵敏宽频带复合式 MEMS 水听器的结构设计

单片集成复合式 MEMS 水听器以现有纤毛式 MEMS 仿生矢量水听器、MEMS 电容超声传感器<sup>[4]</sup>及实验室 MEMS 低频电容水声传感器的研究为基础进行设计,机构分为矢量和标量两部分,各机构间采用并联形式,其结构示意图如图 1 所示。

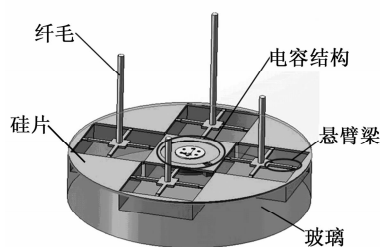


图 1 复合式 MEMS 传感器结构

#### 1.1.1 矢量部分

结合水听器阵列的优势,将矢量换能结构设置成  $2 \times 2$  阵列形式<sup>[5-6]</sup>,4 个纤毛敏感结构对称布置。为降低工艺难度,4 个敏感结构保持一致,各敏感结构惠斯通电桥间采用并联形式,通过对湖海环境噪声谱特征及航运、舰船等频谱特征<sup>[7]</sup>的分析,划分出 4 个频率检测段,针对不同的频率进行检测,将纤毛长度分别设置为 12 mm、8 mm、6 mm 和 3 mm,从而在拓宽了频响带宽的同时保证了灵敏度。

#### 1.1.2 标量部分

声压水听器采用电容式换能结构。基于水下工

作环境,为提高电容的承压性,在电容空腔内注满了硅油,同时为保证电容灵敏度,降低硅油填充造成的压膜阻尼,在振膜上开设了 6 个硅油孔<sup>[8-9]</sup>,保持振膜内、外动水压的平衡。

## 1.2 工作原理

### 1.2.1 矢量部分

当水听器的仿生纤毛受到水中声波作用时,仿生纤毛摆动带动与之相连的中心连接体摆动,进而引起敏感梁的运动变形,导致梁上压敏电阻阻值的变化,通过对惠斯通电桥电路输出电压信号的处理获得声场矢量信息。

### 1.2.2 标量部分

当声波信号作用于振膜表面,引起振膜形变发生挠曲变形,导致上、下电极间距发生改变,从而产生交变电容。通过四臂阻抗电路<sup>[10-11]</sup>,实现电容变化输出电压变化的检测,从而实现声能到电能的转化。

## 2 微结构理论分析

### 2.1 矢量部分

仿生微结构的共振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{2 \frac{Ebt^3}{mLh^2} \left( \frac{a^2}{L^2} + \frac{a}{L} + \frac{1}{3} \right)} \quad (1)$$

式中: $K$  为微结构的刚度系数; $m$  为结构质量; $L$  为悬臂梁的长度; $a$  为中心连接体的半宽长; $b$  为悬臂梁的宽度; $E$  为振膜杨氏模量; $t$  为悬臂梁的厚度; $h$  为刚硬柱体的高度。

对仿生微结构进行静力分析,对单根悬臂梁在弯矩  $M(x)$  和水平力  $F(H)$  共同作用下的任意一点  $x$  的应力为

$$\sigma_{(x)} = \pm \frac{L^2 + 3aL - 3x(a+L)}{\frac{2}{3}bt^2(L^2 + 3aL + 3a^2)} M(x) \pm \frac{F(H)}{bt} \quad (2)$$

仿生微结构的灵敏度为

$$S_{Ax} = S_{Ay} = 71.8 \times 10^{-11} \times \sigma_1 \times V_{in} \quad (3)$$

(对应 P 型压敏电阻)

式中: $\sigma_1$  为输入电压梁上纵向应力分量; $V_{in}$  为输入电压。

由式(1)、(3)可知,灵敏度与工作带宽存在相互制约的关系,灵敏度的提高,应从减薄悬臂梁厚度、增加纤毛长度入手,将导致频带变窄;要拓展带宽,则应增加悬臂梁厚度、减少纤毛长度,又会损失灵敏度。因此,利用阵列的优势,设置 4 个不同纤毛长度

的换能器,采用并联形式从强化个体优势着手提高整体的性能,在保证灵敏度的同时拓宽了带宽。

## 2.2 标量部分

电容结构的谐振频率<sup>[12]</sup>为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{n}} = \frac{0.469d_1 \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}}{R^2 \sqrt{1 + 0.67 \frac{\rho_1 R}{\rho d_1}}} \quad (4)$$

式中: $k$ 为结构的弹性模量; $n$ 为结构质量; $\rho$ 为振膜密度; $\rho_1$ 为硅油密度; $\mu$ 为泊松比; $R$ 为振膜半径; $d_1$ 为振膜厚。

在振膜周边固支的条件下,得到膜片内任意一点半径 $r=b$ 时,膜片形变量的解析式<sup>[12]</sup>为

$$\omega(r)|_{r=b} = \frac{qR^4}{64D} \left[ 1 - 4b^2 + 3b^3 + \ln(b) \left( 4b^2 + 16 \frac{b^4 \ln(b)}{1-b^2} \right) \right] \quad (5)$$

式中: $q$ 为施加在振膜上的载荷; $D = \frac{Ed_1^3}{12(1-\mu^2)}$ 为挠曲刚度。

在振膜的边缘处有最大应力 $\sigma_{\max}$ ,且

$$\sigma_{\max} = \frac{3}{4} \frac{qR^4}{d_1^3} \quad (6)$$

由以上分析可知,振膜的尺寸是电容谐振频率的决定因素,而振膜的形变量是电容灵敏度的决定因素。根据电容检测频率和工艺难度可确定电容的尺寸大小,采用器件层 $40 \mu\text{m}$ 厚的 SOI 片作为振膜的制作材料。基于电容敏感结构设计理念,空腔内充满硅油,振膜的灵敏度在振膜上打孔来降低压膜阻尼,进而通过增大振膜形变量确保灵敏度。电容结构参数如表 1 所示。

表 1 MEMS 低频电容敏感结构参数

膜径/ mm	$d_1/\mu\text{m}$	孔径/ mm	孔心距/ mm	孔数	腔高/ $\mu\text{m}$
$\varnothing 3$	40	$\varnothing 0.1$	0.3	6	3

## 3 ANSYS workbench 仿真

根据以上理论分析,得到微敏感结构的力学特性和动态特性,为验证上述结论的正确性,利用 ANSYS workbench14.5 建立微敏感结构仿真模型十字梁结构及电容敏感结构,通过模态及静态的仿真分析验证了结构频响及灵敏度的理论分析,同时分析了结构设计的合理性。

### 3.1 模态分析

通过模态仿真可得长度纤毛的频率,图 2 为纤毛长度与频率关系曲线图。频率随着纤毛长度的增加

而减少,选取各纤毛长度代入式(1)所得值与对应仿真值误差在 10% 以内,根据水听器设计频带 0~5 kHz 的需求,设定矢量水听器最短毛长为 3 mm、频率 4 816.1 Hz。图 3 为振膜形变分析云图。由图 3 可得标量频率仿真频率为 5 498.6 Hz,与式(4)所得理论值 5 547.6 Hz 相符,验证了结构设计理论的正确性。

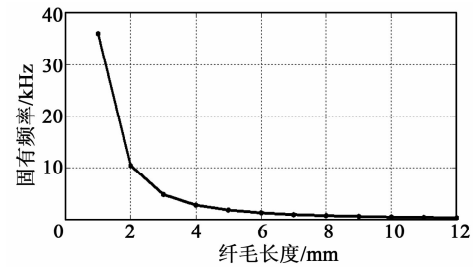


图 2 纤毛长度-频率曲线图

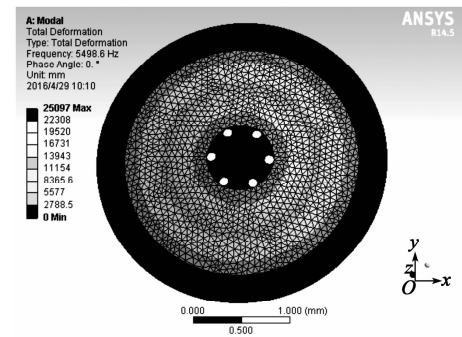


图 3 振膜形变分析云图

### 3.2 静态分析

由于微结构器件的灵敏度与力敏电阻器处所受应力有直接关系,压敏电阻所受应力越大,其灵敏度越大。图 4 为矢量敏感结构毛长-应力-频率曲线图。由图可看出,纤毛越长,应力越大,频率越低。

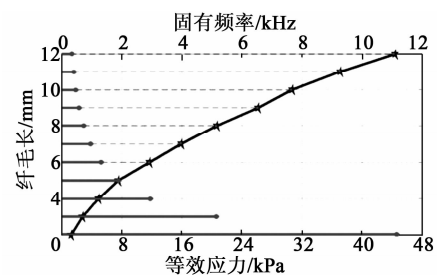


图 4 敏感结构毛长-应力-频率曲线

$2 \times 2$  阵列各纤毛敏感结构惠斯通电桥间采用并联形式,各敏感结构独立运行,由于纤毛长度不等,各敏感结构有不同的工作频带范围。分析湖海环境噪声谱特征及航运、船舰等频谱特征。图 4 为矢量敏感结构毛长-应力-频率曲线关系图。结合图 4,针对不同频段选择纤毛长度分别为 12 mm、

8 mm、6 mm、3 mm, 设置出 4 个连续的频率检测段, 如表 2 所示。

表 2 不同纤毛长度对应性能参数

毛长/mm	固有频率/Hz	最大应力/MPa	测量范围/Hz	灵敏度/dB
3	4 816.1	0.002 77	1 200~4 800	-213.9
6	1 254.4	0.011 68	500~1 200	-201.5
8	712.6	0.020 67	200~500	-196.6
12	320.6	0.044 36	0~200	-189.9

对电容微结构振膜挠曲位移是影响其灵敏度大小的决定因素, 对其进行路径提取分析, 可得振膜的形变量, 进而获得灵敏度为 -147.7 dB, 如图 5 所示。提取振膜不同半径点代入式(5), 所得形变量与对应点的仿真形变量值对比, 误差均在 5% 以内。

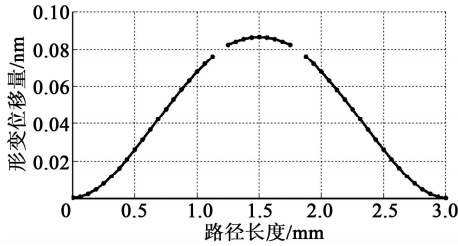


图 5 振膜路径位移曲线

#### 4 声压振速的联合处理

对复合式 MEMS 水声传感器, 可同时测得声场的声压和振速<sup>[13]</sup>, 图 6 为水听器的测量模型。其中, 原点  $O$  为水听器,  $S$  为声源,  $v$  为声源入射到水听器的声信号,  $\varphi$  为振速  $v$  入射俯仰角,  $\theta$  为振速  $v$  入射水平方位角。

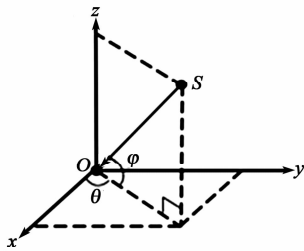
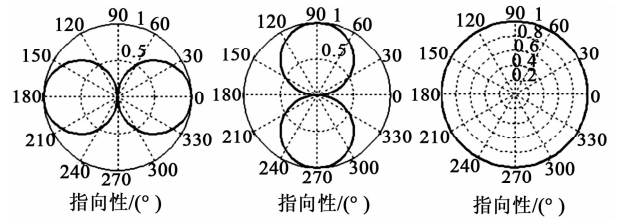


图 6 水听器的测量模型

由图 6 可看出, 振速  $v$  可分解为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个正交分量, 复合 MEMS 水声传感器的矢量部分测量的是水平面上  $x$ 、 $y$  方向的二维指向性, 标量部分的电容传感器测量声压信号, 对信号进行联合处理, 令声压信号  $p(t) = X(t)$ , 则

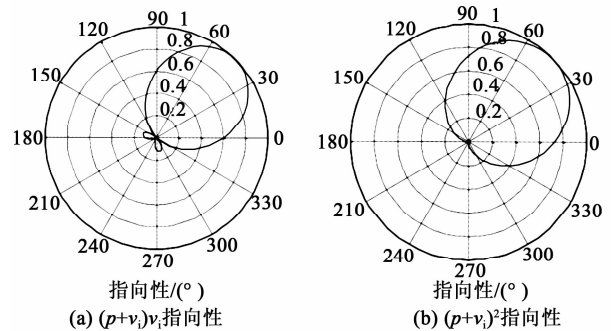
$$\begin{cases} v_x = X(t) \cos \theta \\ v_y = X(t) \sin \theta \end{cases} \quad (8)$$

对分量和具有正交的偶极子指向性, 而声压没有指向性, 图 7 为水听器的指向性图。



(a) 振速  $v_x$  分量指向性 (b) 振速  $v_y$  分量指向性 (c) 声压指向性  
图 7 水听器的指向性

将具有二维振速分量的单矢量水听器输出的振速信号  $v$  和声压传感器输出的声压信号  $p$  进行联合处理, 可形成多种指向性,  $(p + v_i) v_i$  和  $(p + v_i)^2$  是常用的组合形式, 均具有单边指向性, 其中  $i = x, y$ 。图 8 为  $(p + v_i) v_i$  和  $(p + v_i)^2$  的指向性图。指向性图具有单边指向性, 消除了左、右舷模糊的问题。



(a)  $(p+v_x)v_x$  指向性 (b)  $(p+v_x)^2$  指向性  
图 8 声压振速的联合处理指向性

#### 5 制作工艺

复合式 MEMS 水声传感器中声压敏感硅微电容与声压梯度敏感微结构工艺一次性集成, 克服了声源测量点的不一致性, 从而克服了传统组阵中各个水听器的不一致性。在工艺中采用玻璃作支撑底和 SOI 片键合的方式, 然后根据 MEMS 水声传感器的特点和工序的前、后关系设计出微结构加工工艺全部流程, 图 9 为工艺流程示意图。

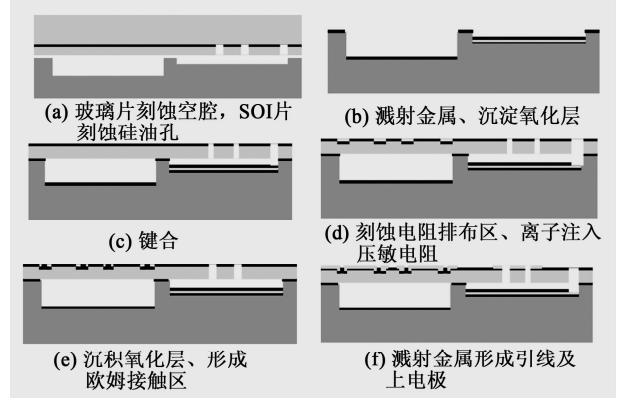


图 9 工艺流程

工艺流程具体步骤如下:

1) 标准 RCA 清洗直径  $\varnothing 10$  cm 的玻璃片及器件层  $40\ \mu\text{m}$  厚的 SOI 片。

2) 一次光刻玻璃片,用 HF 溶液刻蚀  $4\ \mu\text{m}$  的电容空腔,在空腔内溅射  $30\ \text{nm}$  钛金属,溅射  $200\ \text{nm}$  铝金属形成下电极,PECVD 沉淀  $50\ \text{nm}$   $\text{SiO}_2$  作为绝缘层。

3) 二次光刻玻璃片,用深硅刻蚀机将十字梁结构处刻蚀  $100\ \mu\text{m}$  深的十字梁腔体。

4) 一次光刻 SOI 片的器件层经 RIE 刻蚀形成背面梁结构,二次光刻 SOI 片的器件层深硅刻蚀  $40\ \mu\text{m}$  的硅油孔及电容引线孔,ICP 刻穿中间埋氧层。

5) 键合光刻后的玻璃片与 SOI 片,对键合后的结构刻蚀到埋氧层,并刻蚀形成压敏电阻排布区窗口,通过离子注入的方法形成压敏电阻。

6) 通过化学气相沉积在顶层形成一层氧化层并刻蚀。

7) 正面浓离子注入形成欧姆接触区。

8) 溅射形成金属互连线及电容上电极。

## 6 结束语

本文设计了高灵敏度宽频带复合式 MEMS 水听器,包含了 1 个  $2\times 2$  阵列式纤毛仿生矢量水听器和一个低频电容传感器,分别对 2 个结构进行了理论建模及仿真分析,完成了对信号的联合处理,解决了单以矢量水听器存在左、右弦模糊的问题,提高了水声目标定位的精确度,同时拓宽了结构频响带宽,保证了灵敏度。采用了硅-玻璃键合的结构复合工艺,完成了以单个传感器实现小体积内的传感器组阵,克服了在传统组阵中各个水听器的不一致性,有很好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 陈尚. 硅微 MEMS 仿生矢量水声传感器研究[D]. 太原:中北大学, 2008.
- [2] 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 Zhen, ZHANG Guojun, XUE Chenyang, et al. The design and research of encapsulation on MEMS bionic vector hydrophone[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(1): 25-30.
- [3] XUE Chenyang, CHEN Shang, ZHANG Wendong, et al. Design, fabrication, and preliminary characterization of a novel MEMS bionic vector hydrophone[J]. Microelectronics Journal, 2007, 38(10/11): 1021-1026.
- [4] 苗静, 何常德, 廉德钦, 等. 基于硅晶圆键合工艺的 MEMS 电容式超声传感器设计[J]. 传感技术学报, 2012, 25(12): 1653-1658.  
MIAO Jing, HE Changde, LIAN Deqin, et al. Design of MEMS capacitive ultrasonic transducer based on wafer bonding technology[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(12): 1653-1658.
- [5] SHIPPS J C, DENG K. A miniature vector sensor for line array applications[J]. IEEE Oceans 2003 Proceedings, 2003(5): 2367-2370.
- [6] 刘林仙, 张国军, 许姣, 等. 阵列式 MEMS 仿生矢量振动传感器研究[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(9): 39-41.  
LIU Linxian, ZHANG Guojun, XU Jiao, et al. Research on aligned array MEMS bionic vector vibration sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012, 31(9): 39-41.
- [7] 李丙辉. 浅海风成海洋环境噪声场空间结构及海底参数反演研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [8] 鲍敏杭, 孙远程, 杨恒, 等. 微电子机械器件压膜空气阻尼的一般化雷诺方程[J]. 半导体学报, 2002, 23(12): 1245-1248.  
BAO Minhang, SUN Yuancheng, YANG Heng, et al. A generalized reynolds' equation for squeeze-film air damping in MEMS[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(12): 1245-1248.
- [9] 董林玺, 刘国华, 钱欣, 等. 孔的形状和排列方式对厚孔板微结构压膜空气阻尼的影响分析[J]. 传感技术学报, 2007, 20(6): 1262-1266.  
DONG Linxi, LIU Guohua, QIAN Xian, et al. The effects of hole shapes and array forms on the squeeze-film air damping of thick perforated microstructures [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(6): 1262-1266.
- [10] 廉德钦. 电容式超声传感器信号提取电路设计[D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [11] QU Hao, YU Huijun, ZHOU Wu, et al. Design of minimal capacitance detect circuit for MEMS capacitive Sensor[C]//S. I.: Chinese Journal of Key Engineering Materials, 2015, 645: 824-829.
- [13] 惠俊英, 惠娟. 矢量声信号处理基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.