

# 用于矢量水听器的加速度敏感结构\*

王文龙<sup>1,2</sup>, 笪良龙<sup>1,2</sup>, 孙芹东<sup>1,2</sup>

(1. 海军潜艇学院二系 青岛, 266199)

(2. 海洋科学与技术国家实验室 青岛, 266235)

**摘要** 同振式矢量水听器中常用的商用压电加速度计具有质量较大的缺点,限制了矢量水听器的性能提升。为了解决该问题,设计了一种三轴加速度敏感结构,采用厚度剪切压电效应,具有质量轻、灵敏度高等优点。该加速度敏感结构的质量仅为 0.039 kg,灵敏度在 200 Hz 处约为 3 000 mV/g,工作频段为 20~2 000 Hz,工作频段内最大横向灵敏度比小于 8%。将该加速度敏感结构安装在球形耐压矢量水听器中进行测试,其直径为 72 mm, $x, y, z$  通道在 200 Hz 处的等效声压灵敏度级分别为 -191.6, -191.4 和 -191.8 dB,具有良好的余弦指向性,各通道一致性较好,证明其适合应用在矢量水听器中。并与安装商用加速度计的矢量水听器进行对比,证明其能够有效降低矢量水听器的平均密度,提高灵敏度。

**关键词** 压电加速度计;厚度剪切;有限元仿真;同振式矢量水听器

**中图分类号** TH824.4

## 引言

矢量水听器是一种能够测量水中质点振速信息的声学传感器,按照测量原理可分为压差式和同振式 2 种<sup>[1]</sup>。由于压差式矢量水听器存在对敏感元件的一致性要求较高、制作工艺复杂、灵敏度较低以及易受振动干扰等缺点,已很少使用;而同振式矢量水听器具有性能可靠、灵敏度高以及低频指向性好等优点<sup>[2-4]</sup>,应用愈加广泛。目前,较优的矢量水听器设计方案是在刚性硬壳体内沿正交坐标轴方向安装两轴或三轴加速度计。按照测量原理,加速度计的种类分为压电式、压阻式、电容式和电磁式等<sup>[5]</sup>。压电式加速度计利用压电材料的正压电效应来测量振动加速度的传感器。按照敏感元件的受力方式不同,压电加速度计又可分为平面压缩型、弯曲梁型和剪切型。相比其他类型而言,厚度剪切型压电加速度计具有体积小、灵敏度高、自噪声低、工作频带适中、工作温度广、结构简单可靠和抗冲击性好等优点,已成为目前使用最广泛的加速度传感器<sup>[6]</sup>。

目前,同振式矢量水听器多采用商用剪切型三轴压电加速度计<sup>[7-11]</sup>。这类加速度计技术成熟、结构紧凑、灵敏度高<sup>[12]</sup>,最常见的应用场景是安装在建筑或大型设备内进行振动监测。由于该应用对其重量没有限制,因此这些商用加速度计大都具有较厚

实的铁制外壳。此外壳既承担基座的功能,又起到屏蔽和保护的作用,这也导致了此类加速度计一般质量较大。对于矢量水听器来说,体积和质量对其性能影响重大。体积越大,则高频上限越低;平均密度越大,则灵敏度越低。因此,商用加速度计在矢量水听器上应用时,质量较大是其主要缺点,会限制矢量水听器相关指标的提升。

对于金属壳体耐压矢量水听器,其本身就有一个金属外壳,可以对加速度计起到保护和屏蔽的作用。笔者设计一种没有外壳的剪切式加速度敏感结构,并与安装支架合并,以达到减轻重量、提高矢量水听器性能的目的。

## 1 厚度剪切压电效应工作原理

### 1.1 灵敏度理论分析

该加速度敏感结构所用的厚度剪切压电片如图 1 所示。其厚度为  $t$ , 2 个面积最大的表面为电极面,电极面的长度为  $l$ , 宽度为  $w$ 。电极面垂直于  $x$  轴,压电片的极化方向沿  $z$  轴方向。压电片所用材料为 PZT-5A 压电陶瓷。当加速度敏感结构在低频段内使用时(即工作频率远低于压电片的谐振频率),压电片处在弹性控制情况下,此时可近似用弹性静力学方法分析。

\* 国家重点研发计划资助项目(2019YFC0311700)

收稿日期:2019-09-04;修回日期:2020-06-18

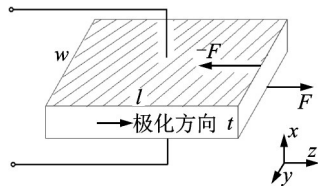


图1 厚度剪切压电片

Fig.1 The thickness shear piezoelectric ceramic piece

假设剪切力  $F$  和  $-F$  分别作用在  $x=0$  和  $x=t$  的端面上。该剪切力是由重块受到加速度作用,以静摩擦力的形式作用到压电片的端面上,故  $F=ma$ ,其中: $m$ 为重块的质量; $a$ 为加速度敏感结构所受到的加速度。在这种情况下,其应力分布为  $T_1=T_2=T_3=T_4=T_6=0$ ,而  $T_5=-F/lw$ 。压电片没有受到外加电场作用,所以  $D_1=D_2=D_3=0$ 。根据  $g$ -型压电方程  $E_1=-g_{15}T_5$ ,得到单片剪切压电片的开路电压<sup>[13]</sup>为

$$V = \int_0^l E_1 dx = \int_0^l \left( -g_{15} \frac{-F}{lw} \right) dx = g_{15} \frac{ma}{lw} t \quad (1)$$

单片剪切压电片的开路电压接收灵敏度为

$$\left| \frac{V}{a} \right| = g_{15} \frac{m}{lw} t \quad (2)$$

### 1.2 灵敏度有限元仿真

使用有限元分析软件 Comsol 对厚度剪切压电片的开路电压接收灵敏度进行仿真。

1) 建立厚度剪切压电片的几何模型,在其上表面施加沿  $z$  轴正方向的剪切力  $F=0.004$  N,下表面施加固定约束并接地,厚度剪切压电陶瓷片参数如表 1 所示。极化坐标系为正交直角坐标系,极化方向沿  $z$  轴正方向,物理场选择压电效应。

2) 对模型进行网格划分并运行稳态仿真,将模型的体电势仿真结果以多切面的方式显示,厚度剪切压电片开路电压仿真结果如图 2 所示。可见,电势在压电片内水平方向均匀分布,厚度方向由小到大分布,接地的下表面电势为 0,上表面电势最大,为 0.008 73 V。将相关参数代入式(1),计算开路电压的理论值为 0.008 595 V,与仿真结果基本吻合。

### 1.3 频率响应有限元仿真

对厚度剪切压电片的频率响应进行仿真,设置频率范围为 1 Hz~5 MHz,每 10 倍频 20 个点,得到厚度剪切压电片频率响应仿真结果如图 3 所示。可见,在 10 Hz~100 kHz 频段内,该剪切压电片的电压接收灵敏度很平坦,其值为 0.084 1 V/g,与理论计算结果吻合。曲线在 549.5 kHz 处出现最大峰值,该频率即为剪切压电片的厚度切变谐振频率。

表 1 厚度剪切压电陶瓷片参数

Tab.1 Parameters of the thickness shear piezoelectric ceramic piece

参数	数值
$t/\text{mm}$	0.9
$l/\text{mm}$	4.0
$w/\text{mm}$	4.0
$m/\text{kg}$	0.004
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 750
$c_{66}^E/\text{Pa}$	$2.257 \times 10^{10}$
$g_{15}/(\text{V}\cdot\text{m}\cdot\text{N}^{-1})$	$38.2 \times 10^{-3}$

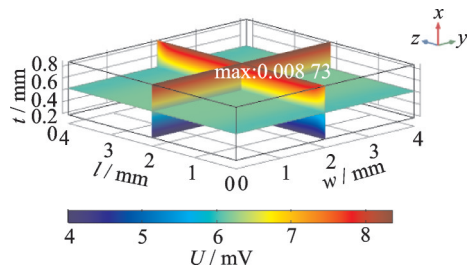


图2 厚度剪切压电片开路电压仿真结果

Fig.2 Open circuit voltage simulation result of the thickness shear piezoelectric ceramic piece

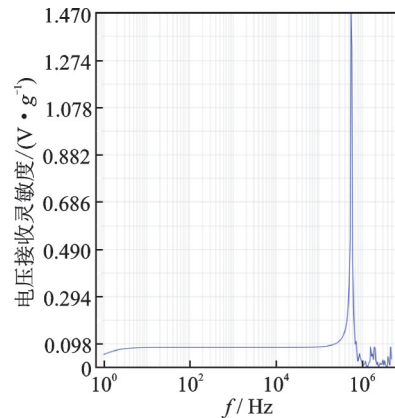


图3 厚度剪切压电片频率响应仿真结果

Fig.3 Frequency response simulation result of the thickness shear piezoelectric ceramic piece

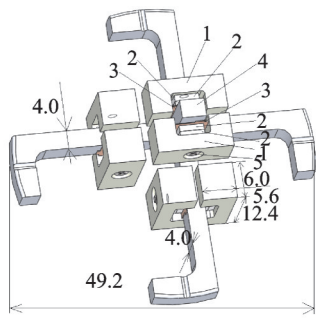
## 2 加速度敏感结构

### 2.1 加速度敏感结构设计

加速度敏感结构设计如图 4 所示,包括 1 个正交的十字形支架和 3 组敏感单元。正交十字形支架在  $x, y, z$  方向各有一条臂,每条臂上有一组敏感单元。将  $x, y$  方向的臂延长,可以与矢量水听器内部的凹槽配合,起到安装支架的作用。每组敏感单元均包括 2 个凹字形重块、4 片压电陶瓷片、2 片电极片和 1 根紧固螺栓。压电陶瓷片由 PZT-5A 材料制成,沿

正方形的一个边长方向极化,而电极是在厚度方向的2个面上。为了增大加速度敏感结构的灵敏度,每组敏感单元采用4片剪切压电片串联输出。

当该加速度敏感结构受外力作用产生加速度时,由于惯性作用,重块会产生与加速度方向相反的运动趋势,而紧固螺栓提供的预压力将重块、剪切压电片和支架紧紧固定在一起,使三者之间不能发生相对位移。此时重块的运动趋势就会给紧贴它的剪切压电片的面上施加静摩擦力,该力的大小与紧固螺栓的预压力无关,而是与重块的质量和受到的加速度成正比,其方向与加速度方向相反。因此,剪切压电片的开路电压接收灵敏度与重块的质量成正比。为了提高加速度敏感结构的灵敏度,重块采用钨基高比重合金制成,以较小的体积提供较大的质量,样品中每个重块的质量为0.004 kg。



1-重块; 2-剪切压电片; 3-隔离电极片; 4-支架; 5-紧固螺栓

图4 加速度敏感结构设计(单位:mm)

Fig.4 Design of the acceleration sensitive structure (unit:mm)

## 2.2 加速度敏感结构性能测试

加速度敏感结构性能测试如图5所示。加速度敏感结构刚性安装在与其相匹配的基座上,基座安装在振动台上,基座上同时有1个标准加速度计与被测加速度敏感结构背靠背刚性安装,二者的信号分别通过电荷放大器放大后进入信号采集系统,由软件自动进行对比分析。加速度敏感结构用的自制电荷放大器在工作频段的放大倍数为10倍。图6为加速度敏感结构3个通道的频率响应曲线。

由图6可见,加速度敏感结构3个轴的灵敏度一致性较好,且在低频段灵敏度较平坦, $x, y, z$ 轴在200 Hz处的灵敏度分别为3 017, 3 058和2 988 mV/g。将重块质量代入式(2),求得4片压电片串联的开路电压灵敏度理论值为3 369 mV/g(10倍放大后)。可见,灵敏度实测结果与理论值基本吻合。当频率超过2 kHz时,灵敏度迅速增大。若设定灵敏

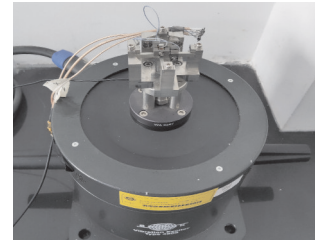


图5 加速度敏感结构性能测试

Fig.5 Performance test of the acceleration sensitive structure

度变化不超过 $\pm 1$  dB为工作频段的选择标准,则该加速度敏感结构的工作频段为20 Hz~2 kHz。

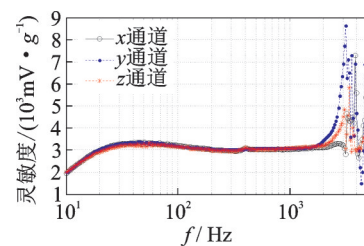


图6 加速度敏感结构的频率响应曲线

Fig.6 Frequency response of the acceleration sensitive structure

由于没有全向旋转振动平台,因此只对加速度敏感结构的最大横向灵敏度作简化测量。分别在 $x, y$ 轴施加振动,并测量 $z$ 轴的灵敏度输出,选择二者中较大的数值作为 $z$ 轴的最大横向灵敏度。以此类推,可测得 $x, y$ 轴的最大横向灵敏度。加速度敏感结构各轴的最大横向灵敏度频率响应曲线如图7所示。可见,加速度敏感结构 $x, y, z$ 轴的最大横向灵敏度在20 Hz~2 kHz工作频段内均小于240 mV/g,即在全工作频段内三轴最大横向灵敏度比均小于8%。

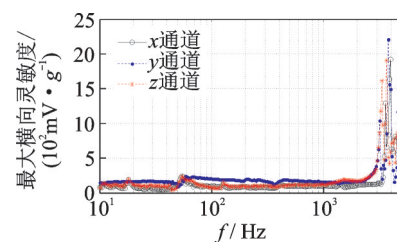


图7 加速度敏感结构各轴的最大横向灵敏度频率响应曲线  
Fig.7 Maximum lateral sensitivity-frequency response of the acceleration sensitive structure

## 2.3 加速度敏感结构谐振频率仿真

由图6,7可见,当频率超过2 kHz后,该加速度敏感结构的灵敏度和横向灵敏度都迅速升高,并在



3 100 Hz 附近出现第 1 个峰值。导致此现象的原因可能是由于安装支架较细长,而中间部分由于重块的存在,质量较大,从而导致整个结构的谐振频率较低。为了验证此推测,对整个加速度敏感结构建模,使用 Workbench 软件对结构模态进行有限元分析。该结构的一阶模态仿真结果如图 8 所示,其谐振频率为 3 033 Hz,与测试结果基本吻合。

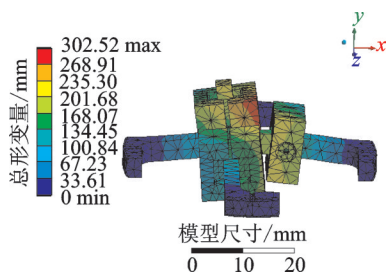


图 8 加速度敏感结构的一阶模态仿真结果

Fig.8 First order modal deformation of the acceleration sensitive structure

### 3 矢量水听器性能指标测试

为实际测试加速度敏感结构在矢量水听器中的应用表现,将其安装在某型耐压球形矢量水听器的内部,如图 9 所示。安装完成的矢量水听器总质量为 0.207 kg,直径为 72 mm,平均密度为 1 058 kg/m<sup>3</sup>。矢量水听器最重要的 2 个性能指标是灵敏度和指向性,一般使用驻波管水声标定系统对这 2 个指标进行测试。将该矢量水听器置于驻波管中,矢量水听器及其测量环境如图 10 所示。

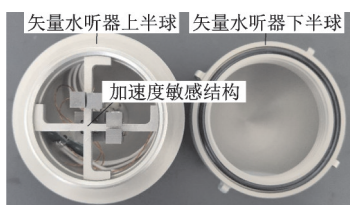


图 9 加速度敏感结构在矢量水听器中的安装

Fig.9 Installation of the acceleration sensitive structure in vector hydrophone

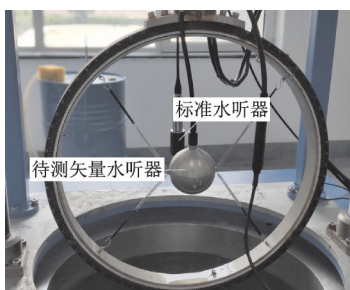


图 10 矢量水听器及其测量环境

Fig.10 Vector hydrophone and its test environment

### 3.1 矢量水听器灵敏度测试

矢量水听器的接收灵敏度也称为接收电压响应 (receiving voltage response, 简称 RVS),一般用等效自由场声压灵敏度  $M_p$  来表示,其与矢量水听器内部加速度敏感结构的加速度灵敏度  $M_a$  根据下式<sup>[14]</sup>换算

$$M_a = \frac{\rho c}{\omega} M_p \quad (3)$$

其中:水介质密度  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ;水中声速  $c = 1500 \text{ m/s}$ ;声波角频率  $\omega = 2\pi f$ 。

RVS 可用等效声压灵敏度级来表示,可根据  $RVS = 20 \lg(M_a) - 120$  由等效声压灵敏度计算得到,单位为 dB,参考值  $0 \text{ dB} = 1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$ 。已测得本矢量水听器中所用加速度敏感结构各通道的灵敏度,计算可得矢量水听器  $x, y, z$  通道在 200 Hz 处的理论等效声压灵敏度级分别为  $-191.8, -191.7$  和  $-191.9 \text{ dB}$ 。根据理论声压灵敏度与频率的关系,推出加速度灵敏度不随频率变化的情况下,水听器矢量通道的等效声压灵敏度级应该每倍频程增加 6 dB。

矢量水听器各通道的灵敏度在驻波管中采用比较法测试。将待测矢量水听器和标准水听器同时悬挂于驻波管中相同高度,使矢量水听器的待测通道坐标轴平行于驻波管中轴线并指向发射换能器。改变驻波管中声波发射频率,同时记录矢量水听器和标准水听器的输出电压,通过比较法得到矢量水听器待测通道灵敏度。由于所用驻波管只能产生 100~1 000 Hz 的驻波,因此本次测量频段为 100~1 000 Hz,频率间隔按 1/3 倍频程设置。矢量水听器各通道灵敏度测试结果如图 11 所示。在 200 Hz 处  $x, y, z$  通道的实测灵敏度级分别为  $-191.6, -191.4$  和  $-191.8 \text{ dB}$ ,各通道灵敏度一致性很好,每 1/3 倍频程增加 2 dB,与理论值相吻合。测量频带内灵敏度级不稳定性小于 0.5 dB。

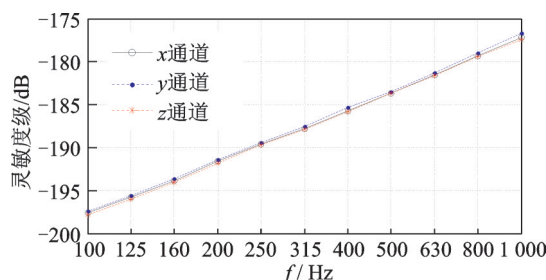


图 11 矢量水听器灵敏度测试结果

Fig.11 Sensitivity of the vector hydrophone

### 3.2 矢量水听器指向性测试

理论上,矢量水听器的各通道应具有与频率无关的余弦指向性。将矢量水听器悬挂在驻波管中的旋转框架内,使矢量水听器的待测通道坐标轴平行于驻波管中轴线并指向发射换能器,保持发射换能器输出功率和频率稳定,使用回转装置将矢量水听器旋转一周并记录下不同旋转角度值对应的矢量水听器输出电压值,最后进行归一化处理并用对数形式表示,得到该频点的矢量水听器的指向性曲线。

回转装置的旋转速度为 $120^\circ/\text{min}$ ,记录仪的读数间隔为 $0.2\text{ s}$ ,即指向性测试的角度间隔为 $0.4^\circ$ 。测试显示,该矢量水听器在 $100\sim 1\,000\text{ Hz}$ 频段内均具有较好的余弦指向性。图12为 $200\text{ Hz}$ 频点处矢量水听器各通道指向性曲线的测量结果。可见,在 $200\text{ Hz}$ 时,矢量水听器各通道均具有良好的余弦指向性。 $x$ 通道灵敏度凹点深度为 $36.4\text{ dB}$ , $y$ 通道灵敏度凹点深度为 $38.5\text{ dB}$ , $z$ 通道灵敏度凹点深度为 $37.3\text{ dB}$ 。3个通道的凹点深度均大于 $35\text{ dB}$ ,可以满足应用需求。

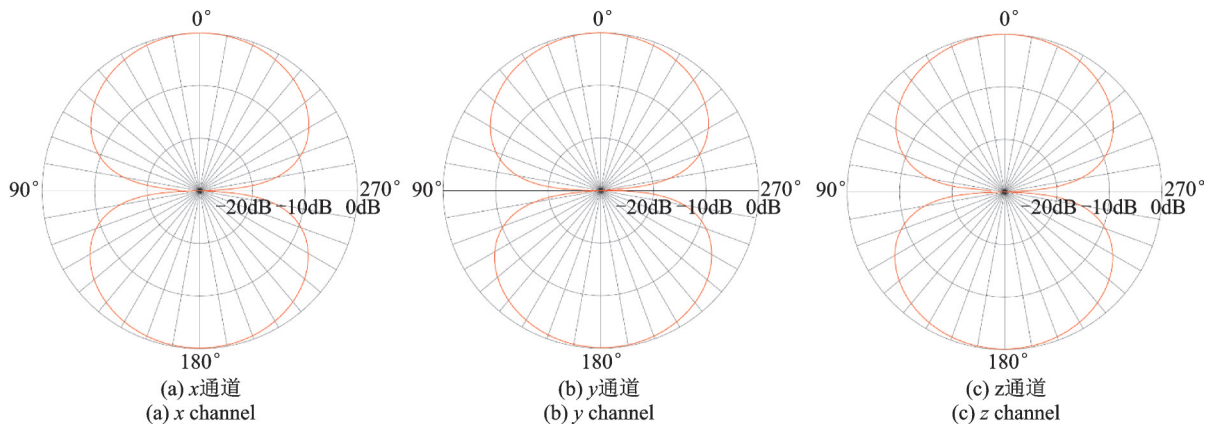


图12 矢量水听器指向性曲线的测量结果(200 Hz)

Fig.12 Directivity pattern of the vector hydrophone at 200 Hz

### 3.3 与商用压电加速度计性能对比

为了展现笔者设计的加速度敏感结构各项指标的优劣,将其与目前同振式矢量水听器中常用的ZWX572型商用三轴加速度计进行对比,如表2所示。表2中,ZWX572的质量包括其本身质量 $0.049\,2\text{ kg}$ 和安装支架质量 $0.012\,5\text{ kg}$ 。可以看出,该压电加速度敏感结构相比于ZWX572,最大的优势就是质量减小了 $1/3$ ,且灵敏度还略有提高。将2者分别装入同一种矢量水听器外壳内进行测试,发现安装了ZWX572的矢量水听器的总质量为 $0.231\text{ kg}$ ,平均密度为 $1\,182\text{ kg}/\text{m}^3$ ,而安装了该压电加速度敏感结构的矢量水听器的平均密度降低到

$1\,058\text{ kg}/\text{m}^3$ 。由于灵敏度的提高,使安装该压电加速度敏感结构的矢量水听器的振速灵敏度比安装ZWX572的矢量水听器提高了 $18\%$ (约 $1.4\text{ dB}$ )。同时,该压电敏感结构相比于ZWX572,缺点是其工作频率上限由 $5\text{ kHz}$ 降到 $2\text{ kHz}$ 。球形矢量水听器的工作频率上限除受其内部的加速度计工作频率上限限制外,还受其半径 $r$ 的限制。在矢量水听器平均密度与水的密度相当的前提下,其工作频率上限 $f_H$ 满足 $f_H \ll c/2\pi r$ ,其中, $c$ 为介质中的声速,工程上一般取 $f_H = c/10\pi r$ 。当矢量水听器平均密度略大于水的密度时, $f_H$ 可适当提高。测试中所用矢量水听器的最大尺寸 $r=36\text{ mm}$ ,工作频率 $f_H=1\,326\text{ Hz}$ ,其平均密度比水的密度略大,勉强将其最高工作频率提高至 $2\text{ kHz}$ 。此时,该压电敏感结构的工作频段已经够用,而ZWX572的 $5\text{ kHz}$ 的上限频率发挥不了作用。在最大横向灵敏度方面,ZWX572只给出 $160\text{ Hz}$ 频点处的最大横向灵敏度,为 $4\%$ ,而本压电敏感结构测量了整个工作频段的最大横向灵敏度,均小于 $8\%$ 。由图7可见,除 $y$ 通道最大横向灵敏度稍大外, $x,z$ 通道只有在 $60\text{ Hz}$ 左右出现较大值,工作频段内其他频率处的最大横

表2 加速度敏感结构与ZWX572性能对比

Tab.2 Performance comparison between the acceleration sensitive structure and ZWX572

参数	本加速度敏感结构	ZWX572
质量/kg	0.038 1	0.061 7
灵敏度/ $(\text{mV}\cdot\text{g}^{-1})$	3 000	2 840
最大横向灵敏度/%	$<8(20\sim 2\,000\text{ Hz})$	4(160 Hz)
工作频段/ Hz	20~2 000	10~5 000

向灵敏度也小于4%。

## 4 结束语

设计了一种基于厚度剪切压电效应的三轴加速度敏感结构,质量为0.039 kg,工作频段为20 Hz~2 kHz,在200 Hz处灵敏度约为3 000 mV/g,工作频段内最大横向灵敏度比小于8%,具有质量小、灵敏度高优点,适合在矢量水听器中应用。将其与商用压电加速度计ZWX572分别安装在耐压矢量水听器中进行对比,证明其能够有效降低矢量水听器的整体密度,提高灵敏度。不足之处是该加速度敏感结构在3 kHz左右存在谐振点,限制了其工作频率上限,可通过更改支架材料、加粗支架等方式来提高其谐振频率。

## 参 考 文 献

- [1] 孙贵青,李启虎.声矢量传感器研究进展[J].声学学报,2004,29(6):481-490.  
SUN Guiqing, LI Qihu. Progress of study on acoustic vector sensor [J]. Acta Acoustic, 2004, 29(6): 481-490. (in Chinese)
- [2] 洪连进,杨德森,时胜国,等.中频三轴向矢量水听器的研究[J].振动与冲击,2011,30(3):79-84.  
HONG Lianjin, YANG Desen, SHI Shengguo, et al. Study on a medium three dimensional co-oscillating vector hydrophone [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(3): 79-84. (in Chinese)
- [3] BARNARD A R, HAMBRIC S A. Design and implementation of a shielded underwater vector sensor for laboratory environments [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 130(6): 387-391.
- [4] 笮良龙,孙芹东,王文龙,等.基于MEMS姿态传感器的声矢量传感器设计[J].中国惯性技术学报,2016,24(4):531-536.  
DA Lianglong, SUN Qindong, WANG Wenlong, et al. Design of acoustic vector sensor based on MEMS attitude sensor [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(4): 531-536. (in Chinese)
- [5] 徐文骏.加速度传感器种类剖析及适用性[J].中国检验检疫检测,2019,9(4):28-29.  
XU Wenjun. Analysis of the types of accelerometers and their applicability [J]. China Inspection Body & Laboratory, 2019, 9(4): 28-29. (in Chinese)
- [6] 鲁敏,胡红波,朱刚,等.抗恶劣环境的三角剪切压电加速度计[J].测控技术,2018,37(S):109-112.  
LU Min, HU Hongbo, ZHU Gang, et al. Triangle shear piezo electric accelerometer for hostile environ-
- ment [J]. Measurement & Control Technology, 2018, 37(S):109-112. (in Chinese)
- [7] 贾志富.三维同振球形矢量水听器的特性及其结构设计[J].应用声学,2001,20(4):15-21.  
JIA Zhifu. Design and characteristics of a resonant-sphere type three-dimensional vector hydrophone [J]. Journal of Applied Acoustics, 2001, 20(4): 15-21. (in Chinese)
- [8] KIM K, LAUCHLE G C, GABRIELSON T B. Near-field acoustic intensity measurements using an accelerometer-based underwater intensity vector sensor [J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 309(1/2): 293-306.
- [9] LIDIA E W, ANTONIO C, FRIEDRICH L, et al. Sound pressure and particle acceleration audiograms in three marine fish species from the Adriatic Sea [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 126(4): 2100-2107.
- [10] KORENBAUM V I, TAGILTSEV A A. Flow noise of an underwater vector sensor embedded in a flexible towed array [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 131(5): 3755-3762.
- [11] 孙芹东,侯文姝,王文龙,等.同振式三轴向矢量水听器设计与实现[J].传感技术学报,2016,29(6):652-656.  
SUN Qindong, HOU Wenshu, WANG Wenlong, et al. The design and implementation for three dimension co-vibrating vector hydrophone [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(6): 652-656. (in Chinese)
- [12] 何仑.内置电路加速度计的应用研究[J].振动、测试与诊断,1999,19(2):144-146.  
HE Lun. Application of accelerometer with built-in circuit [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1999, 19(2): 144-146. (in Chinese)
- [13] 栾桂冬,张金铎,王仁乾.压电换能器和换能器阵[M].北京:北京大学出版社,2005:114-117.
- [14] 陈洪娟.矢量传感器[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2006:93-95.



**第一作者简介:**王文龙,男,1990年1月生,博士、助理研究员。主要研究方向为声学传感器研制、海洋设备研发。  
E-mail:wilon7521@qq.com

**通信作者简介:**笮良龙,男,1967年4月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为海洋环境效应及水下无人探测技术等。

E-mail:272573121@qq.com