

谐振敏感式低噪声压电微机电系统水听器

葛宣佐^{1,2,3}, 朴胜春^{1,2,3}, 张强^{1,2,3}, 雷亚辉^{1,2,3}, 龚李佳^{1,2,3}, 王大成^{1,2,3}, 陈丽洁³

(1. 哈尔滨工程大学 水声技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学) 工业和信息化部, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对水下无人平台低噪声高灵敏探测需求,本文提出基于目标频谱特征信息的谐振敏感检测思想。利用水听器在谐振频率处具有高灵敏的特点,根据水下目标的频域特征信息设计水听器敏感结构。本文研制了谐振敏感式压电微机电系统芯片和水听器样机,并进行了实验测试。所设计水听器样机在谐振频率处实现了高灵敏响应(-146 dB@12 kHz (Re. 1V/ μ Pa)和-138 dB@4 kHz (Re. 1V/ μ Pa))和远低于knudsen 零级海况的自噪声水平(M5#样机在谐振频率处等效噪声声压谱密度级 22.03 dB@4 kHz (Re. 1 μ Pa/ $\sqrt{\text{Hz}}$))。本文所提出的基于目标特征信息的谐振敏感检测思想为水下目标检测提供了思路。

关键词:谐振敏感; 压电微机电系统; 水听器; 低噪声; 敏感结构设计; 水下目标; 频谱特征; 零级海况

DOI:10.11990/jheu.202506025

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1390.U.20250702.1315.004

中图分类号:TP212.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7043(2025)08-1660-09

High-sensitivity and low-noise piezoelectric micro electro mechanical systems sound pressure hydrophone based on spectral feature detection

GE Xuanzuo^{1,2,3}, PIAO Shengchun^{1,2,3}, ZHANG Qiang^{1,2,3}, LEI Yahui^{1,2,3}, GONG Lijia^{1,2,3}, WANG Dacheng^{1,2,3}, CHEN Lijie³

(1. National Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security (Harbin Engineering University), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150001, China; 3. School of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To address the low-power consumption and detection requirements for equipment carried by underwater unmanned platforms. This work proposes the idea of resonant sensitive detection based on target spectral features; that is, the sensitive structure of a hydrophone is designed, leveraging the high sensitivity of hydrophones at the resonant frequency, based on the frequency domain characteristics of underwater targets. Building upon this idea, several piezoelectric MEMS resonant sensitive chips and characteristic sound pressure hydrophones for target frequency domain feature information were designed and developed, and experimental tests were conducted. Sound pressure hydrophone prototypes M3 and M5 achieved high sensitivity responses at their resonant frequencies of -146 dB@12 kHz (Re. 1V/ μ Pa) and -138 dB@4 kHz (Re. 1V/ μ Pa). These prototypes exhibited self-noise levels far below the Knudsen sea state zero noise levels at the resonant frequency: the equivalent noise spectral density level of M5 prototypes at the resonant frequency was 22.03 dB@4 kHz (Re. 1 μ Pa/ $\sqrt{\text{Hz}}$). The proposed concept of resonance-sensitive detection based on target feature information provides a new approach for underwater target detection.

Keywords: resonance sensitivity; piezoelectric MEMS; hydrophone; low noise; sensitive structural design; underwater target; spectral characteristics; zero level sea condition

水下无人航行器、各类浮标、潜标等无人平台的快速发展,为海洋探测预警、海洋权益保障提供了重

要的小平台能力支撑^[1-4]。无人平台的长期值守工作模式,对所搭载的设备提出小体积、轻质量、低功耗等面临技术挑战的实际需求^[5-6]。海洋声场的时变和空变性使水下探测问题和水声探测设备变得十分复杂^[7-8]。目前,无人平台所能搭载的常规水声探测系统体积质量相对较大、功耗较高,因此面临减

收稿日期:2025-06-09. 网络出版日期:2025-07-02.
基金项目:国家自然科学基金项目(52375529).
作者简介:葛宣佐,男,博士研究生;
张强,男,副教授,博士.
通信作者:张强,E-mail:zhangqianghit@hrbeu.edu.cn.

小尺寸和降低功耗的技术挑战。为解决无人值守网络传感与探测系统因功耗大无法满足长期值守的问题,可利用基于特征识别的新型传感与检测方法构建新型检测系统,解决功耗问题。目前,该技术已经应用于振动、声、磁、红外等多个传感领域^[9-12]。微电子机械系统技术(micro electro mechanical systems, MEMS)的发展为传感器系统的体积小型化、载荷轻量化提供了技术可能性。伴随着多种功能材料及其制备技术的发展,基于压电 MEMS 技术的水声传感技术,为解决无人平台所面临的减小尺寸和降低功耗的技术挑战提供了可行的技术路线。其中,氮化铝(aluminium nitride, AlN)作为一种新型压电材料,其六方纤锌矿晶体结构使其具有天然压电性和低本底噪声特点。近几年,AlN 在水下传感领域的应用逐渐得到重视。Richard 等^[13]利用 AlN 研制的 MEMS 水听器与压电陶瓷水听器相比,信噪比得到明显改善;徐景辉等^[14]应用氮化铝压电材料实现的 MEMS 超低频水听器,工作频率为 10~100 Hz,声压灵敏度为 -182 dB,对于 MEMS 压电水听器实现了较高的声压灵敏度,且具有小尺度特点;谢晋^[15]研制的 AlN 水听器,在 10~100 Hz 频率范围,声压灵敏度为 -178 dB;杨月^[16]研制的 AlN 压电 MEMS 水听器获得了 -183 dB 的灵敏度。

本文利用 AlN 压电 MEMS 水听器的低本底噪声优势,提出频率域特征传感概念,并基于 AlN 研制压电 MEMS 特征声压水听器。频率域特征传感是指直接针对频谱上的特征信息进行高灵敏窄带传感,通过设定阈值对特征信息的有无进行判断,并进行即时检测处理,形成特征信息唤醒驱动信号启动后续相关操作。与常规的宽带水听器相比,这种基于特征信息传感与检测模式虽然具有宽带信息获取能力的局限性,但对于已知特征信息的目标而言,可构建特征信息传感检测微系统,跳过对时域信息的

复杂信号处理,直接在特定时间和频段上对特征信息进行选择性传感,从而有效降低水下传感系统的硬件和功耗需求。

1 基于目标频谱特征信息传感与检测原理

1.1 基于目标频谱特征信息传感与检测机制

水下目标的辐射噪声谱是由连续谱叠加线谱构成的,不同的水下目标具有不同的噪声谱^[17-19]。常规声呐设备工作原理是利用常规水听器获得海量宽带时域信息,并利用时频转换、小波变换、自适应线谱增强等多种信号处理方法^[20-21]将隐藏在海量时域信息中的目标特征提取出来,进一步基于目标特征进行探测与识别。

不同于常规声呐设备工作原理,基于目标频谱特征信息传感与检测是一种针对目标频域特征信息进行选择性传感的技术。即基于目标的频谱特征,利用特征水听器对目标频谱特征信息进行针对性的提取和检测。如图 1 所示,为基于目标频谱特征的传感与检测技术示意图。水下声信息包含了来源于多种水下目标、海洋生物和环境等因素所产生的各种频率成分,目标特征信息和环境背景噪声混在一起。当包含水下目标特征信息的声场信息传播到特征水听器时,特征水听器对声场信息中的目标特征信息进行选择性敏感,进一步对特征水听器检测到的特征信号进行检测判断,输出检测结果。例如:可通过动态阈值生成系统生成实时的背景阈值,将特征信息电压输出信号与背景阈值进行比较,超过阈值时给出特征信息存在的输出结果,这样就实现了基于动态阈值比较的特征信息有无的检测判断。当存在多个特征信号输出时,可将所有特征信息检测输出数字结果,输入特征检测向量机,可依据是否符合特征向量组逻辑给出有无目标的检测,实现了基于特征向量的目标检测。

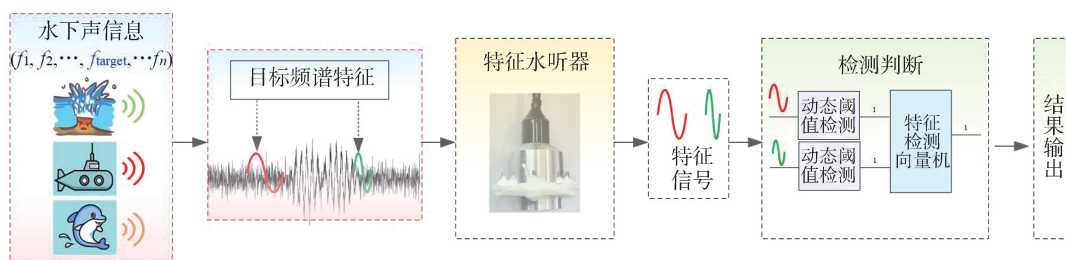


图 1 基于目标频谱特征的传感与检测技术示意

Fig. 1 Schematic diagram of sensing and detection technology based on target spectrum features

1.2 针对目标特征信息的特征水听器工作机制

水下目标特征信息属于微弱信号,通常在微帕乃至纳帕量级。因此,要求特征水听器对特征信息具备足够高的灵敏度,才能将目标特征信息从环境背景噪声和干扰中提取出来。特征水听器主要是感

知目标特征信息的有无,因此本文提出采用谐振增敏机制设计特征水听器,实现对目标特征信息的针对性感知。谐振又称“共振”,当外力作用频率与系统固有振荡频率相同或很接近时,出现振幅急剧增大的现象。因此,基于目标特征信息的频谱特征设

计特征水听器,使得特征水听器在目标特征信息频率附近具有高灵敏谐振响应,建立目标特征信息与特征水听器敏感结构之间的谐振耦合传递关系,进一步通过压电转换机制将目标特征信号转换成可提取的电学信号,实现特征信息的增敏传感。

为实现小质量和低功耗设计,本文利用 AlN 材料设计压电 MEMS 特征敏感芯片,进一步将特征敏感芯片封装为特征水听器。通过对特征水听器的灵敏度、本底噪声进行测试,验证基于目标频谱特征信息谐振耦合敏感与检测的思想的技术优势。

2 压电 MEMS 特征敏感芯片设计

本文设计了周边固支的圆形压电 MEMS 声压特征敏感芯片对水下声压信号进行感知,对敏感芯片的谐振频率、应力分布、压电转换及灵敏度和阻尼特性进行了设计。

2.1 压电 MEMS 声压特征敏感芯片谐振频率设计

图 2 所示为直径为 $2R$,厚度为 t 的圆形压电 MEMS 声压谐振敏感芯片在水下声信息作用下的示意图。为了能够实现对水下目标特征信息的有效检测,需要将敏感芯片的谐振频率设计在水下目标特征频率点上。

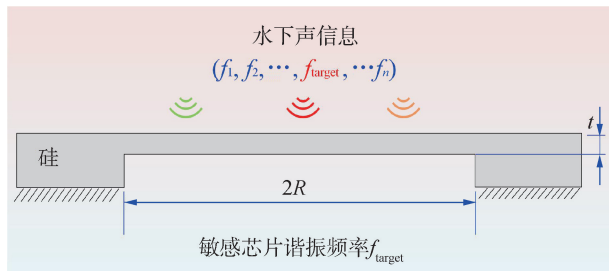


图 2 周边固支的压电 MEMS 声压谐振敏感芯片

Fig. 2 Piezoelectric MEMS acoustic resonance sensitive chip with peripheral fixed support

根据弹性力学理论,周边固支的圆形薄膜结构的谐振频率可以表达为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{10.17t}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{E}{12(1-\mu^2)\rho}} \quad (1)$$

式中: K 为圆形薄膜结构的刚度; m 为圆形薄膜结构的等效振动质量; E 为圆形薄膜结构材料的弹性模量; μ 为泊松比; ρ 为材料密度; t 为薄膜厚度。

式(1)表明:圆形薄膜结构的谐振频率取决于膜片的材料和几何参数。谐振频率与薄膜厚度 t 及弹性模量 E 的 $1/2$ 次方成正比,与薄膜半径的平方及密度的 $1/2$ 次方成反比。在对圆形薄膜结构的谐振频率进行设计时,主要对圆形薄膜结构的几何参数进行设计。如图 3 所示,给出了圆形薄膜结构谐振频率随薄膜结构参数的变化情况。随着薄膜半径的减小和薄膜厚度的增大,圆形薄膜结构谐振频率

增大。因此,可以根据水下目标特征信息的频率,对圆形薄膜敏感结构的直径及厚度进行设计。

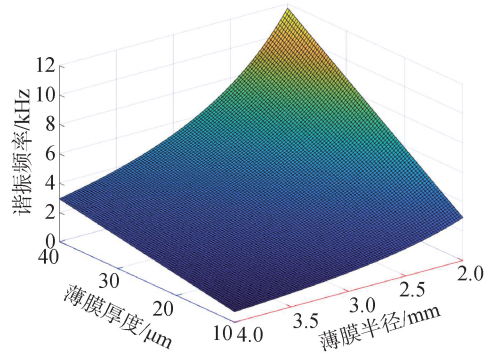


图 3 圆形薄膜结构谐振频率随薄膜结构参数的变化情况

Fig. 3 The variation of resonant frequency of circular thin film structure with the parameters of the thin film structure

2.2 压电 MEMS 声压特征敏感芯片应力分布设计

在水下声压信号作用下,压电 MEMS 声压特征敏感芯片内部产生相应的应力(或应变)响应,应力(或应变)再通过压电材料的压电效应转换为电荷或电压信号。因此,应力的分布特性对压电 MEMS 声压特征敏感芯片电信号的产生和提取至关重要。

根据弹性力学理论,圆形薄膜在平面波声压 p 作用下的应力可以沿着圆形薄膜的径向和切向进行分解,径向应力和切向应力分别为^[22]:

$$T_r = \frac{3p}{8t^2} [R^2(1+\mu) - r^2(3+\mu)] \quad (2)$$

$$T_\theta = \frac{3p}{8t^2} [R^2(1+\mu) - r^2(1+3\mu)] \quad (3)$$

式中: p 为平面波声压; R 为圆形薄膜半径; t 为圆形薄膜厚度; r 为径向坐标。径向应力和切向应力随着坐标 r 呈现一定的分布特性。

如图 4 所示,给出了半径 R 为 2.5 mm,厚度 t 为 20 μm 的圆形薄膜敏感结构在平面波声压为 0.1、0.3、0.5 Pa 时,径向应力和切向应力沿半径的分布情况。在不同的载荷下,圆形薄膜结构表现出与载荷大小成正比的应力幅值;圆形薄膜结构的径向应力和切向应力在 r 方向上均存在一个零应力点,且不同载荷下,零应力点为同一个位置;此外,径向应力和切向应力具有不同的零应力点位置。对比图 4(a)和 4(b)可知,在相同载荷大小下,在靠近圆形薄膜敏感结构中心的位置径向应力和切向应力的幅值大小接近;在远离中心的负应力区,径向应力的幅值为切向应力幅值的数倍。在不同的频点,圆形薄膜敏感结构具有不同的位移响应。在谐振点处,圆形薄膜敏感结构的位移呈现峰值响应,此时应力幅值也达到相应的峰值。

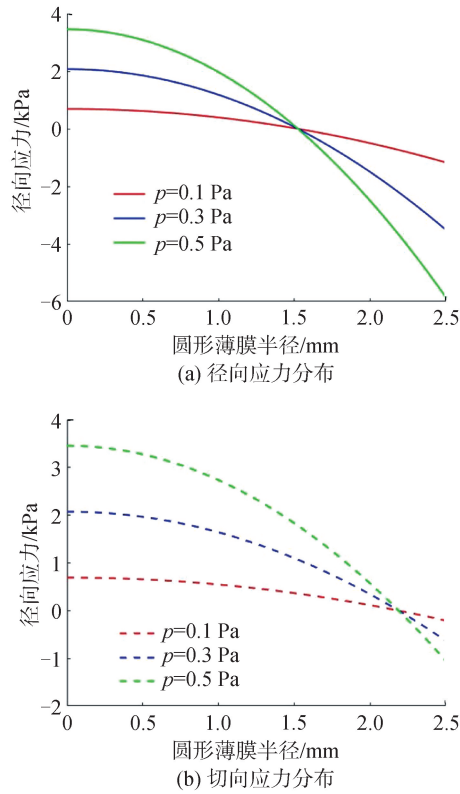


图 4 不同平面波声压作用下圆形薄膜结构径向应力和切向应力的分布

Fig. 4 Distribution of radial and tangential stresses in circular thin film structures under different plane wave sound pressures

2.3 压电 MEMS 声压谐振敏感芯片灵敏度

水下目标产生的微弱声压作用在圆形薄膜敏感表面时,敏感结构产生的应力通过力传递的方式耦合作用到敏感结构表面的压电材料上,进一步通过压电效应转化为相同频率的电信号。通过提取压电材料表面的电信号并进行处理,即可获取水下目标的参数信息。

本文采用 500 μm 的 SOI 晶圆,顶硅 20 μm ,通过背腔刻蚀获得圆形薄膜敏感结构。进一步在圆形薄膜敏感结构上依次溅射或生长底层电极、AlN 压电层和上层电极。其中,AlN 压电层为 002 晶向,为使其对圆形薄膜敏感结构的径向应力敏感,需要依据圆形薄膜敏感结构的径向、切向应力分布规律设计底层电极和上层电极的图形。由图 4(a)可知,半径为 2.5 mm 的圆形薄膜敏感结构径向应力的零点位置大约在 $r=1.5$ mm 处,零点位置两侧径向应力的值相反。因此,在设计电极时,需要设计内、外电极,分别用于正应力和负应力区产生的电荷信号的提取。如图 5 所示,为压电 MEMS 声压谐振敏感芯片的内、外电极设计的示意图。其中,上层电极和底层电极均分为内、外电极,且内、外电极分别引出,单独提取电荷。

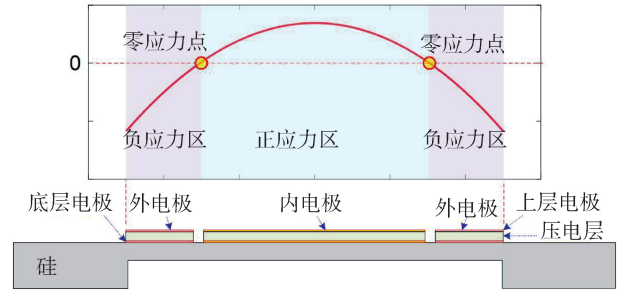


图 5 压电 MEMS 声压谐振敏感芯片的内、外电极设计示意图

Fig. 5 Schematic diagram of internal and external electrode design for piezoelectric MEMS acoustic resonance sensitive chip

圆形薄膜敏感结构在声压作用下产生图 4 所示的应力分布,进一步通过压电材料的压电效应转化为电荷信号输出。一个沿着 z 方向极化的压电片在机械自由、电学短路情况下的压电转换过程满足 d 型压电方程:

$$\begin{cases} S_h = s_{hk}^E T_k + d_{hj} E_j, & h, k = 1, 2, \dots, 6 \\ D_i = d_{ik} T_k + \varepsilon_{ij}^T E_j, & i, j = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (4)$$

式中: S_h 、 T_k 分别为应力和应变分量; D_i 、 E_j 分别为电位移矢量分量和电场强度分量; s_{hk}^E 为恒电场的柔性常数分量; d_{ik} 和 d_{hj} 互为转置,为压电应变常数分量; s_{hk}^E 为恒电场的柔性常数分量; ε_{ij}^T 为恒应力的介电常数分量。式(4)展开为:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{22}^T & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 1、2、3、4、5、6 分别代表直角坐标系 3 个坐标轴及法向方向,对应 x 、 y 、 z 、 yz 、 zx 、 xy 。

对压电层表面积的电位移矢量积分,可求得电极上的自由电荷量:

$$Q = \int D dA \quad (6)$$

式中 A 为电极面积。由图 5 可知,本文中的内、外电极分别为圆形和圆环形,采用圆柱坐标系计算更方便。因此,将电极面积在圆柱坐标系中展开积分。

因此可将电极表面产生的电荷表示为:

$$Q_1 = \int D_z dA = \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} [d_{31}(T_r + T_\theta)] r dr d\theta \quad (7)$$

式中: R_1 和 R_2 分别为积分半径, 根据内、外电极的不同取不同的值; T_r 和 T_θ 分别为柱坐标下的径向和切向应力分量, 可由直角坐标系中的应力分量经过坐标变换获得。

在小振幅状态下, 压电薄膜和电极构成理想平行板电容器, 其电容量可以表示为:

$$C = (\epsilon_r \epsilon_0 A) / h \quad (8)$$

式中 ϵ_0 和 ϵ_r 分别为真空介电常数和氮化铝压电薄膜的相对介电常数 h 为氮化铝压电薄膜厚度。因此, 圆形薄膜水听器的电压灵敏度可以表示为:

$$M_e = (Q/C) / p \quad (9)$$

将式(2)、(3)、(7)代入式(9)整理得, 圆形薄膜水听器的电压灵敏度的表达式为:

$$M_e = \frac{3}{8} F_{OM} \cdot g_{31} t \cdot \frac{1 + \mu}{E} \cdot \frac{(R_1 - R_2)^2}{h^2} \quad (10)$$

式中: g_{31} 为压电电压系数分量; F_{OM} 为品质因数, 其表达式为:

$$F_{OM} = \frac{d_{31}}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (11)$$

图 6(a) 所示, 本文进一步建立压电 MEMS 特征声压水听器在水域中的有限元模型。利用聚氨酯对压电 MEMS 声压谐振敏感芯片进行水密封装, 并对压电 MEMS 声压谐振敏感芯片的背腔进行封闭, 形成空气背衬; 通过设置声吸收边界层以获得自由场条件。图 6(b) 所示: 为直径 3.2 mm (M3#)、5 mm (M5#), 薄膜厚度为 20 μm 时, 压电 MEMS 特征声压水听器的频响特性曲线。由图可知, 水域环境中, 压电 MEMS 特征声压水听器分别在 11.8 kHz、3.8 kHz 处产生谐振, 谐振频率处的声压灵敏度分别为 -185 dB 和 -181 dB。

2.4 压电 MEMS 声压谐振敏感芯片工作带宽及阻尼设计

本文所设计的特征声压水听器采用圆形薄膜敏感芯片的谐振敏感模式, 其工作带宽一般以谐振频率为中心点, 按照响应的 -3 dB 原则给出。压电 MEMS 声压谐振敏感芯片需要经过封装, 才能成为特征水听器, 由于封装结构和材料会改变阻尼结构及阻尼特性, 水听器的谐振频率及其带宽都会受到影响。因此, 在进行敏感芯片谐振点设计时需要考虑阻尼作用和影响, 可以通过封装结构和材料的设计调整阻尼特性, 完成水听器特征频点和带宽的最终设计。特征水听器带宽为:

$$\Delta f = 2f_0 s / \sqrt{1 - 2s^2} \quad (12)$$

式中: f_0 为系统固有谐振频率; s 为阻尼比。

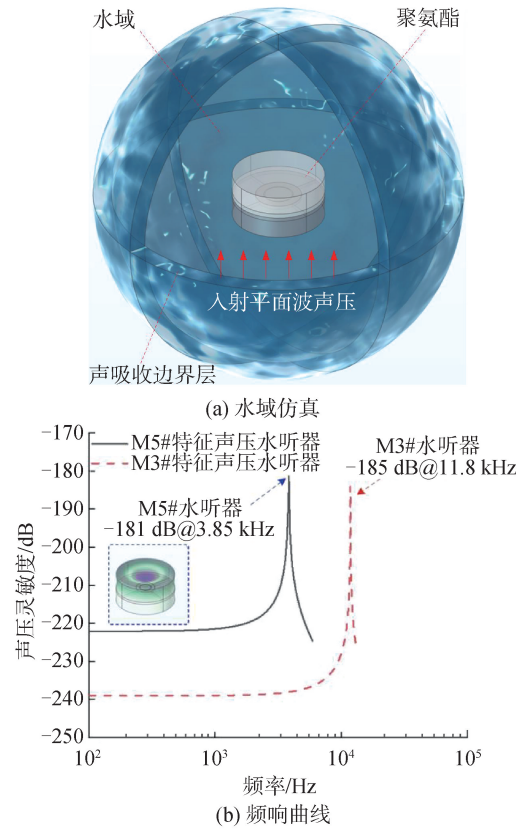


图 6 压电 MEMS 特征声压水听器声压灵敏度仿真
Fig. 6 Simulation of sound pressure sensitivity of piezoelectric MEMS characteristic sound pressure hydrophone

式(12)表明, 特征水听器的工作带宽取决于压电 MEMS 声压谐振敏感芯片的谐振频率和阻尼比。如图 7 所示, 给出了特征水听器的工作带宽随谐振频率和阻尼比的变化情况。特征水听器的工作带宽随着谐振频率的增大呈线性增长, 随阻尼比的增大呈非线性增长, 且阻尼比越大带宽的增长率越大。

3 压电 MEMS 声压谐振敏感芯片及特征声压水听器研制

3.1 压电 MEMS 声压谐振敏感芯片及特征声压水听器研制

如图 8 所示, 为本文所设计的压电 MEMS 声压谐振敏感芯片的结构示意图及设计版图。所设计的压电 MEMS 声压谐振敏感芯片采用双抛 SOI 硅晶圆, 从而保证薄膜厚度一致性。本文的 AlN(002) 压电薄膜是在深圳大学 MEMS 大型仪器共享平台制备, 采用沈阳汇思真空设备型号为 CK19-1 的磁控溅射镀膜台制备 AlN 薄膜。首先, 在 SOI 硅衬底上沉积一层 120 nm 厚的种子层和 Mo 作为底电极; 其次, 在 Mo 电极上溅射一层 2 μm 厚的 AlN 薄膜(002 晶向); 进一步, 在 AlN 表面溅射一层 100 nm 的金电极; 最后, 进行正面图形化和背面空腔结构的刻蚀。

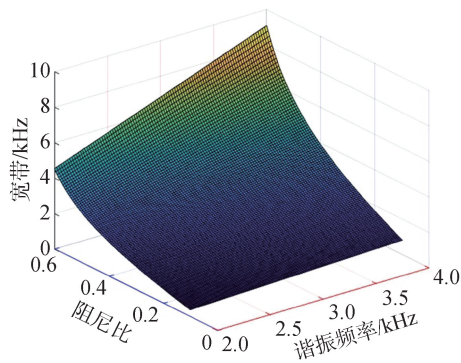


图 7 工作带宽随阻尼比及谐振频率的变化

Fig. 7 The variation of working bandwidth with damping ratio and resonant frequency

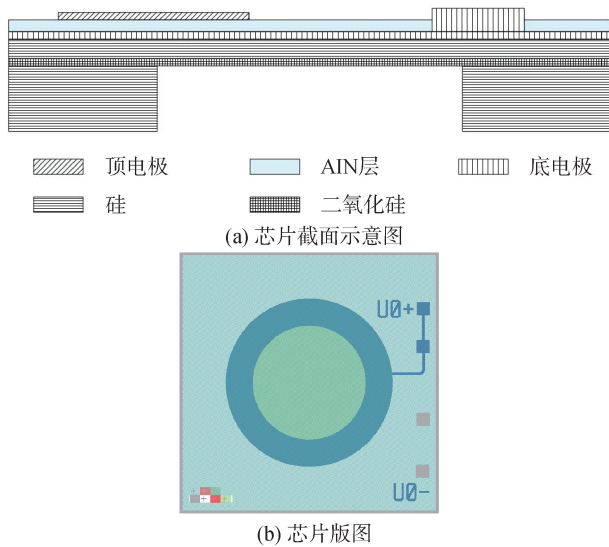


图 8 压电 MEMS 声压谐振敏感芯片结构及设计版图

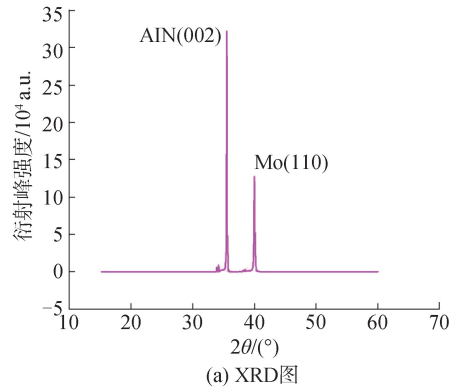
Fig. 8 Structure and design layout of piezoelectric MEMS acoustic resonance sensitive chip

图 9 所示,为本文所设计制作的压电 MEMS 声压谐振敏感芯片的 XRD 及截面 SEM 测试结果。如图 9 (a) 所示,衍射角 2θ 为 35.55° 和 40.02° , 分别对应 $\text{AlN}(002)$ 和 $\text{Mo}(110)$, 该衍射角接近 002 晶相的 AlN 衍射角。图 9(b) 所示,为声压谐振敏感芯片截面的 SEM 图,所研制的敏感芯片的 AlN 层的厚度约为 $1.912\ \mu\text{m}$ 。利用压电力显微镜测得本文制备的 AlN 薄膜的有效压电系数为 $4.83\ \text{pm}/\text{V}$ 。理想情况下,该值可以直接反映 AlN 的宏观 d_{33} 值为 $4.83\ \text{pC}/\text{N}$ 。

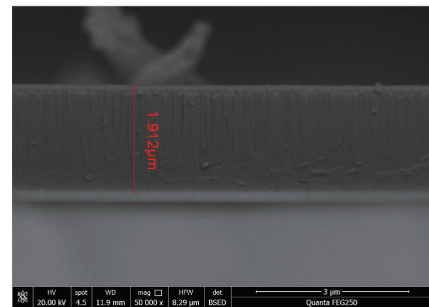
图 10 所示,利用所研制的压电 MEMS 声压谐振敏感芯片,本文研制了压电 MEMS 特征声压水听器。

图 10(a) 和 10(b) 所示,分别为直径为 3.2 和 5 mm 压电 MEMS 声压谐振敏感芯片安装在转接板上的实物照片。如图 10(c) 所示,敏感芯片安装转接板后,经过前置信号调理电路进行初步的信号调理,带有敏感芯片的转接板和前置信号调理电路固定在特征声压水听器的壳体内,利用聚氨酯对敏感芯片进行透声和水密封装。图 10(d) 所示为封装完

成后的压电 MEMS 特征声压水听器。



(a) XRD图



(b) 芯片SEM图

图 9 压电 MEMS 声压谐振敏感芯片 XRD 和截面 SEM 图
Fig. 9 XRD and cross-sectional SEM images of piezoelectric MEMS acoustic resonance sensitive chip

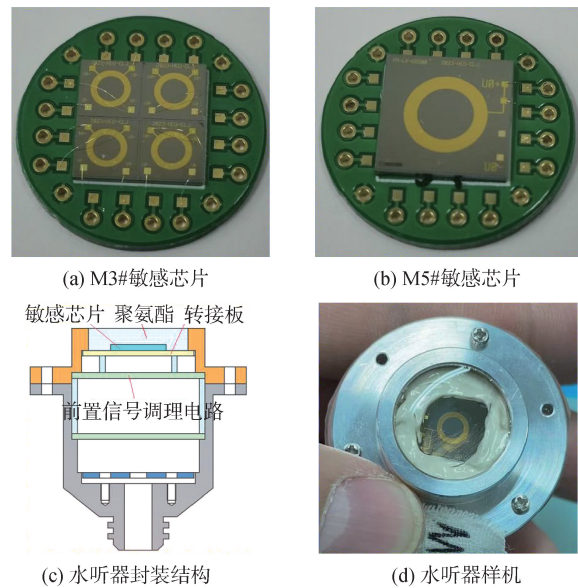


图 10 压电 MEMS 声压谐振敏感芯片及特征水听器

Fig. 10 Piezoelectric MEMS acoustic resonance sensitive chip and characteristic hydrophone

3.2 压电 MEMS 特征声压水听器前置信号调理电路

本文所设计的压电 MEMS 特征声压水听器敏感芯片的容值较小,在声信号作用下产生微弱电信号。因此,要求前置信号调理电路在对信号进行放大的同时,具备低电路噪声的特点。考虑上述因素,如图 11 所示,本文采用场效应管搭建前置信号调理电路,对微弱电荷特征信号进行转换和放大。

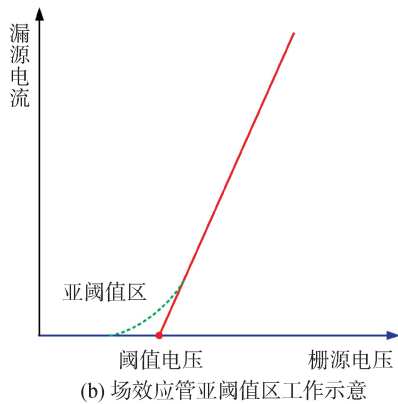
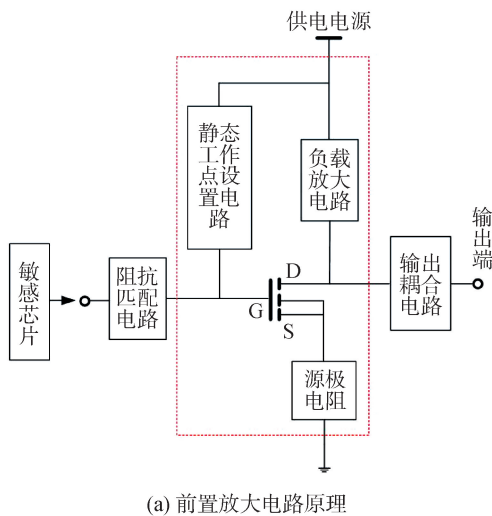


图 11 场效应管亚阈值前置信号调理电路原理
Fig. 11 Principle of sub threshold pre signal conditioning circuit for field-effect transistor

图 11(a) 为场效应管前置信号调理电路原理图,以 MOS 场效应管为核心器件,通过静态工作点设置电路将 MOS 场效应管的工作区设置于亚阈值区,辅之以信号输入端阻抗匹配电路、源级电阻、负载放大电路及输出耦合电路完成传感器前端信号放大处理功能。图 11(b) 为场效应管漏源电流与栅源电压的关系图,在亚阈值区,漏源电流与栅源电压呈现近指数型函数关系;当漏极电阻足够大时,栅源电压的微小变化会导致漏源电流的剧烈变化,从而实现信号增敏放大。场效应管亚阈值区的漏源电流可以达到 $10 \mu\text{A}$ 以内,考虑供电电压 $+9 \text{ V}$ 条件下,水听器的输出功耗可达 $100 \mu\text{W}$ 以内。

4 压电 MEMS 特征声压水听器实验测试

4.1 压电 MEMS 特征声压水听器灵敏度频响测试

在消声水池中,采用比较法对所研制的压电 MEMS 特征声压水听器的灵敏度频响进行测试。如图 12 所示,将压电 MEMS 特征声压水听器和标准水听器 (B&K8104) 放置于同一深度 H (消声水池 $1/2$ 深处),在位于同一深度的距离 d 处布置声源,

使声源距离标准水听器和特征声压水听器的声程相等。利用信号源和功率放大器激励声源发出不同频率的声信号,利用测量放大器对标准水听器和特征声压水听器的信号进行放大并在示波器上显示。利用比较法,通过比较 2 个水听器的幅值,即可测得特征声压水听器在不同频点处的声压灵敏度。如图 12(c) 给出了敏感芯片直径为 3.2 mm (M3#) 和 5 mm (M5#) 压电 MEMS 声压特征水听器的灵敏度测试结果。由图可知, M3# 和 M5# 压电 MEMS 声压特征水听器的谐振频率分别为 12 kHz 和 4 kHz ,二者在谐振点处的声压灵敏度分别为 $-146 \text{ dB} @ 12 \text{ kHz}$ (Re. $1\text{V}/\mu\text{Pa}$)、 $-138 \text{ dB} @ 4 \text{ kHz}$ (Re. $1\text{V}/\mu\text{Pa}$)。

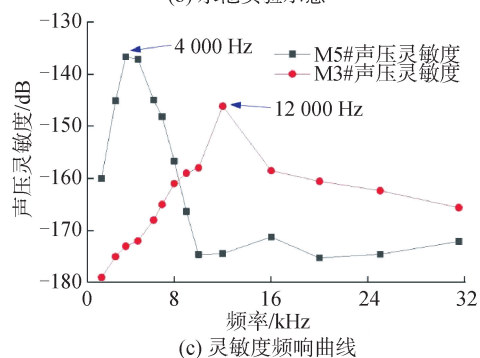
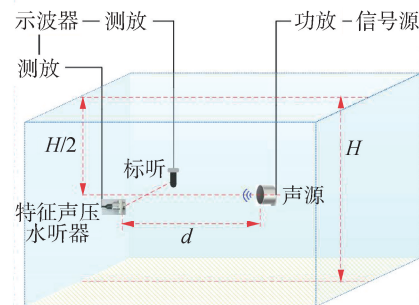
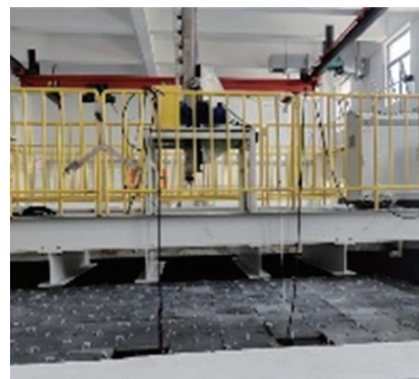


图 12 压电 MEMS 声压特征水听器的灵敏度消声水池测试实验

Fig. 12 Sensitivity testing experiment of piezoelectric MEMS acoustic pressure characteristic hydrophone in anechoic water tank

如表 1 所示,对 M3# 和 M5# 压电 MEMS 声压特征水听器的谐振频率及声压灵敏度的仿真计算和实

验测试结果进行对比。其中,实验测试的灵敏度值含 40 dB 的电路增益。由表 1 可知,M3#和 M5#特征水听器的谐振频率处的声压灵敏度的仿真结果和实测结果吻合较好。

表 1 特征水听器设计参数仿真和实验对比

Table 1 Simulation and experimental comparison of design parameters for characteristic hydrophones

参数	仿真值	实验值	仿真值	实验值
谐振频率/kHz	11.8	12	3.8	4
谐振频率处的声压灵敏度/dB	-185	-146	-181	-137

4.2 压电 MEMS 特征声压水听器本底噪声测试

如图 13 所示,本文进一步对所研制的压电 MEMS 特征声压水听器的本底噪声进行测试。将特征声压水听器放入隔振真空罐中,对特征水听器的本底噪声进行测试。水听器等效噪声声压定义为单位赫兹(1Hz)带宽内的开路噪声电压 U_s 与水听器在空气中的有效自由场声压灵敏度 M 的比值,即:

$$p_s = U_s / M \quad (13)$$

式中: p_s 为带宽为 1 Hz 的水听器等效噪声声压; U_s 为水听器末端 1 Hz 带宽的开路噪声电压; M 为水听器在空气中的有效自由场灵敏度。

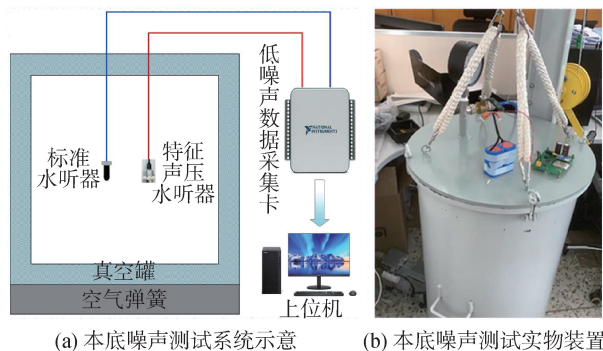


图 13 压电 MEMS 特征声压水听器本底噪声测试

Fig. 13 Background noise testing of the piezoelectric MEMS characteristic sound pressure hydrophone

用声压级表示水听器的等效噪声声压时,则称为水听器的等效噪声压谱密度级可以表示为:

$$L_{ps} = 20 \lg \frac{p_s}{p_0} - M_L \quad (14)$$

式中: p_0 为参考声压; M_L 为压电 MEMS 特征声压水听器的灵敏度级。

图 14 所示为 M5#特征声压水听器的本底噪声曲线,该图显示噪声曲线在 4 kHz 处也有一个噪声低谷,为 22.03 dB@4 kHz。这是由于在谐振点处,特征声压水听器声压灵敏度较高,由式(14)可知,计算所得的等效噪声压谱密度级较低。由此表明,所研制的压电 MEMS 特征声压水听器在谐振频率

附近具有高灵敏度和低本底噪声特点,能够实现其特征信息的高灵敏低噪声检测。

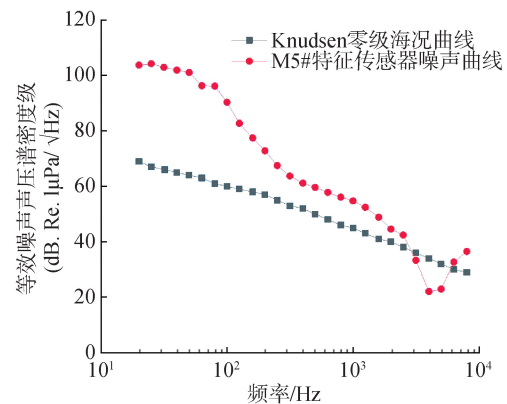


图 14 压电 MEMS 特征声压水听器本底噪声曲线

Fig. 14 Noise curves of the piezoelectric MEMS characteristic sound pressure hydrophone

5 结论

1) 本文提出了一种基于目标频谱特征信息的谐振耦合传感检测思想,根据目标特征信息直接进行检测,可以大幅提高检测效率和降低系统功耗。

2) 采用压电 MEMS 技术和亚阈值增敏信号处理方法,所设计压电 MEMS 特征声压水听器在谐振频率处实现了高灵敏度与低本底噪声。

3) 结合本文所研制的压电 MEMS 特征声压水听器,可以实现目标特征信息的高灵敏、低功耗检测,为水下无人平台低功耗目标探测微系统的搭建提供了思路 and 核心技术支撑。与目前水下目标特征频率相比,本文所研制的水听器特征频率偏高,后续研究中将致力于低频谐振水听器的研究。

参考文献:

- [1] LI Jiqiang, ZHANG Guoqing, JIANG Changyan, et al. A survey of maritime unmanned search system: Theory, applications and future directions [J]. Ocean engineering, 2023, 285(1): 115359.
- [2] ZHANG Zekai, MI Weishi, Du Jun, et al. Design and Implementation of a Modular UUV Simulation Platform [J]. Sensors, 2022, 22(20): 8043.
- [3] JING Yan, LIN Jingsheng and YANG Xian, et. al. Cooperation detection and tracking of underwater target via aerial-surface-underwater vehicles [J]. IEEE Transactions on automatic control, 2025, 70(2): 1068-1083.
- [4] LIU Qiong Xiao, BAO Jian, SHAO Yunzhu, et al. Dynamic modeling and underwater configuration analysis of fiber optic cable for UUV-launched UAV [J]. Ocean engineering, 2024, 303(1): 117774.
- [5] FENG Jingxiang, XU Weicheng, DONG Jingwei, et al. A UUV cluster route-planning method for dynamic target search [J]. Electronics, 2024, 13(20): 4033.
- [6] 陈丽洁, 雷亚辉, 于洋, 等. 新型氮化铝 MEMS 声压传

- 感器技术[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(9): 1355-1362.
- CHEN Lijie, LEI Yahui, YU Yang, et al. MEMS sound pressure sensor technology based on a new type of AlN piezoelectric film[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(9): 1355-1362.
- [7] 殷敬伟. 多途信道中 Pattern 时延差编码水声通信研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- YIN Jingwei. A study of pattern time delay shift coding communication in underwater acoustic multipath channel [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.
- [8] XU Liang, ZHANG Haigang, ZHANG Minghui. Training a deep operator network as a surrogate solver for two-dimensional parabolic-equation models[J]. Journal of acoustic society of America, 2023, 154(5): 3276-3284.
- [9] 彭玉婷, 陈丽洁, 王龙奇, 等. DARPA 趋零功耗传感器技术及军事应用前景分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(11): 1123-1127.
- PENG Yuting, CHEN Lijie, WANG Longqi, et al. Analysis of DARPA's N-ZERO technology and military application prospects[J]. Journal of China academy of electronics and information technology, 2020, 15(11): 1123-1127.
- [10] JEONG S, CHEN Yu, JANG T, et al. Always-on 12-nW acoustic sensing and object recognition microsystem for unattended ground sensor nodes[J]. IEEE journal of solid-state circuits, 2017, 53(1): 261-274.
- [11] 国务院发展研究中心国际技术经济研究所. 世界前沿技术发展报告[R]. 北京: 国务院发展研究中心, 2021.
- Development research center of the state council, institute of international technoeconomic research. world frontier technology development report [R]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2021.
- [12] 杨郑. 低功耗低频电磁式水下声源关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- YANG Zheng. Research on key technologies of low-power and low-frequency electromagnetic underwater sound source[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [13] REINHARDT B, DAW J, TITTMANN B R. Irradiation testing of piezoelectric (aluminum nitride, zinc oxide, and bismuth titanate) and magnetostrictive sensors (remendur and galfenol) [J]. IEEE transactions on nuclear science, 2018, 65(1): 533-538.
- [14] XU Jinghui, ZHANG Xiaolin, FERNANDO S N, et al. Aln-on-SOI platform-based MEMS hydrophone with ultra-low operation frequency and ultra-high noise resolution [C]//2016 IEEE 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Piscataway, NJ, 2016: 1086-1089.
- [15] YANG Dengfei, YANG Lei, CHEN Xuying, et al. A piezoelectric AlN MEMS hydrophone with high sensitivity and low noise density[J]. Sensors and actuators A: physical, 2021, 318: 112493.
- [16] 杨月. 基于氮化铝薄膜的 MEMS 压电水听器设计与仿真分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- YANG Yue. Design and simulation analysis of MEMS piezoelectric hydrophone based on AlN thin film [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.
- [17] 陈玄真, 铁煜, 王少坤, 等. 面向水声探测识别的小目标特征提取研究进展[J]. 电子信息对抗技术, 2024, 39(5): 106-120.
- CHEN Xuanzhen, TIE Yu, WANG Shaokun, et al. Research advances of small target feature extraction for underwater acoustic detection and recognition[J]. Electronic information warfare technology, 2024, 39(5): 106-120.
- [18] 李小双. 基于辐射噪声线谱特征的水声目标检测方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- LI Xiaoshuang. Research on underwater acoustic target detection method based on radiated noise line spectrum characteristics [D]. Nanjing: Southeast University, 2023.
- [19] 叶昱清. 船舶水声辐射信号降噪算法和识别技术研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2023.
- YE Yuqing. Research on denoising algorithms and recognition techniques for ship underwater acoustic radiation signals[D]. Qingdao: Qingdao University, 2023.
- [20] 王燕, 上官佩熙, 郝宇, 等. 非高斯噪声背景下的目标辐射线谱自适应增强方法[J]. 声学学报, 2024, 49(5): 927-938.
- WANG Yan, SHANGGUAN Peixi, HAO Yu, et al. Adaptive enhancer of the target radiated line-spectrum under non-Gaussian noise [J]. Acta acustica, 2024, 49(5): 927-938.
- [21] 耿搏. 舰船辐射噪声非线性动力学特征提取方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- GENG Bo. Research on nonlinear dynamical feature extraction method of ship-radiated noise [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [22] 李科杰. 新编传感器技术手册[M]. 国防工业出版社出版, 2002.
- LI Kejie. New compilation of sensor technology manual [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.

本文引用格式:

葛宣佐, 朴胜春, 张强, 等. 谐振敏感式低噪声声电微机电系统水听器[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(8): 1660-1668.

GE Xuanzuo, PIAO Shengchun, ZHANG Qiang, et al. High-sensitivity and low-noise piezoelectric micro electro mechanical systems sound pressure hydrophone based on spectral feature detection[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8): 1660-1668.