

压电微机电系统水下特征信息检测传感微系统

朴胜春^{1,2}, 雷亚辉^{1,2}, 张强^{1,2}, 葛宣佐², 李德勇^{1,2}, 金奇峰³, 陈丽洁²

(1. 哈尔滨工程大学 水声技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 中国电子科技集团公司第14研究所, 江苏 南京 210039)

摘要: 在水下信息网络应用中可有针对性地通过检测目标特定特征信息唤醒传感微系统, 并通过与环境背景相关的技术方法进行特征信息有无的检测判别和特定特征信息目标的检测。本文基于水下声场频域特征水听器, 研制了水下特征信息检测唤醒压电微机电系统传感微系统, 通过对特定特征信息的检测及特征信息组合检测实现目标检测与识别。对水下特征信息检测唤醒传感微系统样机进行了验证试验, 结果表明: 该传感微系统可对预设的不同目标频谱特征信息进行检测, 从而在水下通讯或探测系统应用中实现对特定目标或信号的检测唤醒与驱动功能。

关键词: 近零功耗; 微机电系统声传感器; 矢量水听器; 目标声学特征; 特征检测; 特征识别; 传感微系统; 唤醒与驱动

DOI: 10.11990/jheu.202506018

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1390.U.20250703.1109.004>

中图分类号: TP212 文献标志码: A 文章编号: 1006-7043(2025)08-1635-09

Piezoelectric micro-electromechanical systems sensing microsystem for underwater feature information detection

PIAO Shengchun^{1,2}, LEI Yahui^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2}, GE Xuanzuo², LI Deyong^{1,2}, JIN Qifeng³, CHEN Lijie²

(1. Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 3. The 14th Research Institute of China Electronics Technology Group, Nanjing 210039, China)

Abstract: In underwater information network applications, sensing microsystems can detect targets by obtaining specific feature information. This study expanded upon a previously developed underwater acoustic frequency domain characteristic hydrophone and developed an underwater characteristic information detection and wake-up piezoelectric micro-electromechanical systems sensing microsystem. It achieves target detection and recognition by detecting specific and combined characteristic information. A prototype of an underwater feature information detection wake-up sensing microsystem was validated in the study. The results indicate that the sensing microsystem can detect preset spectral characteristic information of different targets, thereby achieving the detection, awakening, and driving functions for specific targets or signals in underwater communication or detection system applications.

Keywords: near-zero power consumption; micro-electromechanical systems acoustic sensor; vector hydrophone; target acoustic characteristics; feature detection; feature recognition; sensing microsystem; awakening and driving

随着国家深远海发展战略的不断深化, 对深远海的信息获取与应用能力提出了更高要求, 由于海洋空间巨大, 海洋信息系统能力的发挥在一定层面上需要与网络技术结合, 形成局域网络信

息系统才能发挥更大的作用。在水下信息网络应用技术不断探索发展中, 网络节点的信息感知与自主决策能力成为提升信息网络能力的核心关键技术。随着无人平台技术与装备的快速发展, 扩展了海洋探测作业的方式和方法, 延展了海洋活动的空间和范围^[1-3]。基于无人水下航行器(unmanned underwater vehicle, UUV)、各类浮标、潜标的无人平台的节点组网技术为未来海洋探测与预

收稿日期: 2025-06-08. 网络出版日期: 2025-07-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52375529).

作者简介: 朴胜春, 男, 教授, 博士生导师;

雷亚辉, 男, 副教授, 博士.

通信作者: 雷亚辉, E-mail: leiyahui@sina.com.

警提供了新思路,成为新海防的重要核心技术手段。但长航时 UUV 及各种长期值守浮潜标预置系统对减小水声设备的体积载荷和功率消耗提出了前所未有的技术挑战。目前搭载的水声信息与探测设备都面临着尺寸和功耗等技术瓶颈问题,由于尺寸和质量限制,相关设备系统无法搭载,有些设备由于功耗大、工作时长受限而无法实现长期值守工作要求^[4-5]。针对此类网络信息应用面临的远端节点信息有效感知与决策问题,美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)提出了一项近零功耗传感器应用创新技术,专门为解决无人值守网络传感器系统因功耗大而无法达到实用要求提出的创新技术解决方案。基于这种近零功耗传感技术创新思想,目前国际上已实现了多个纳瓦级的近零功耗信息系统^[6]。2018 年 12 nW 物联网传感器节点目标识别微系统可以探测发电机、卡车和汽车等目标,这些目标的特征主要集中在 500 Hz 以下相对较窄的带宽内^[7]。2017 年,美国康奈尔大学依托压电传感技术开发出一种超低功耗多传感器网络节点^[8]。传感器节点包括振动、声学、磁性、旋转和加速度传感器,利用横向双晶片作为敏感元件,采用亥姆霍兹谐振器,实现了特征声信息的增强耦合传感以及多信息的融合感知,该节点还集成了纳瓦功率 CMOS 特征分类器。通过现场测试,在长达 10 h 内没有误报,在关机状态下,功耗为 2 nW。基于特征信息唤醒传感的检测方法可以实现目标的自主快速检测与识别,并且在复杂的(多基地)分布式网络信息系统中,能够在远端分布节点位置上,自主实现关键特征信息或者目标的快速检测判断,支持复杂链路的远端快速自主决策,有效缩短决策时间。

在水下声场信息应用技术领域,同样可以采用这种针对特征信息进行选择性传感与检测的工作模式,结合微机电系统(micro-electromechanical systems, MEMS)传感技术^[9],实现具有极低功耗以及小尺度特点的,适合水下分布式网络信息(包括通信)节点布放的特征信息获取与检测判定与识别应用系统,扩展水下信息系统应用模式。本文针对水下声场的参数特点,在前期提出并开展的水下频域特征声压水听器 and 频域特征矢量水听器研究基础上,进一步开展水下特征信息检测唤醒传感微系统设计与研制工作,通过对设计与研制的水下特征信息检测唤醒传感微系统样机进行试验,验证相关关键技术与应用模式,为实现基于特征信息耦合传感检测及基于多特征信息的目标检测与识别技术积累经验,为水下网络节点提供信息应用技术支撑。

1 水下声场特征信息与传感检测模型

1.1 水下声场特征信息

水下目标体会产生噪声,这些时域噪声在频率域会呈现出不同的频谱分布特点,噪声谱一般都是由连续谱叠加线谱构成^[10-11]。线谱是一种特征信息,不同目标线谱因出现位置不同而具有特征,图 1 为船辐射噪声的时-频谱图。

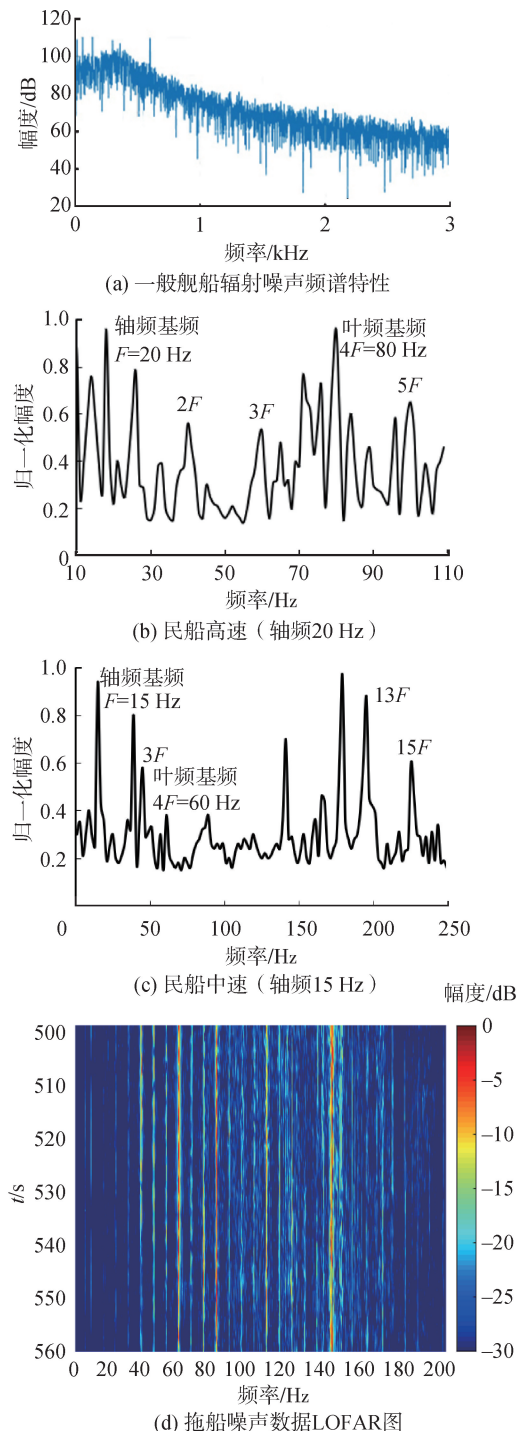


图 1 水下航行体振动与声辐射频谱

Fig. 1 Vibration and sound radiation spectrum of underwater vehicle

由图 1 可知,舰船在某些特定频率点上存在持续的信号(称为特征信号),对于不同的目标船体可能同时存在多个处于不同频率位置上的特征信号。可通过对舰船噪声图谱上的特征信号进行传感与检测,实现对舰船目标的探测^[12]。常规声呐系统可实现对特征信息的检测,其工作原理是通过宽频带水听器获取丰富的水下噪声信息,然后通过专业水声信号技术在背景噪声信息中将有用的特征信息分离并提取出来,实现特征信息的检测。与此相对比,采用特征水听器技术则可实现只针对特征信息进行选择性感,结合背景噪声动态阈值生成技术可以直接完成特征信息的检测,结合应用模式设计可以有效节约信号处理资源。

1.2 水下声场特征信息参数模型

设在水下声场中,存在由某目标船辐射的噪声,其中包含 m 个特征频率信息,每个特征频率信息中都包含声压标量参数及质点振动振速、加速度等矢量参数信息,则声场中所包含的目标特征信息参数 R 为:

$$R = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & \cdots & p_m \\ v_1 & v_2 & \cdots & v_m \\ a_1 & a_2 & \cdots & a_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: p 、 v 、 a 分别为空间坐标质点上感受到的声压、质点振动的速度和加速度参数。如果只考虑声压参数,则目标特征信息参数 P 为:

$$P = [p_1 \ p_2 \ \cdots \ p_m] \quad (2)$$

特征水听器只对特征信息进行选择性感,因此可有效抑制噪声以及干扰。由于声场信息包含标量的声压参数信息,同时包含质点振速和加速度等矢量参数信息,因此特征水听器也分为标量特征水听器和矢量特征水听器。可通过 m 个标量特征水听器实现对 m 个特征信息的传感与检测,也可以通过 m 个矢量特征水听器实现对 m 个特征信息的传感与检测,另外,除了通过单参数检测模式实现特征信息检测之外,还可通过多参数模式基于能量参数实现对 m 个特征信息的传感与检测。

1.3 水下特征信息传感检测模型

在水下声学信息系统的应用中,对特征线谱检测的基本方法是基于功率谱进行线谱检测。其工作模式采用宽带水听器在一定的宽带内接收所有带内声信息,连同背景噪声和干扰声信息一同接收,通过专业水声信号处理技术对接收的信息进行处理。在环境背景噪声和各种干扰信号里提取特征信息的功率谱,与设定阈值进行比较,实现线谱特征检测。图 2 为常规声呐系统实现线谱提取检测技术原理示意图。

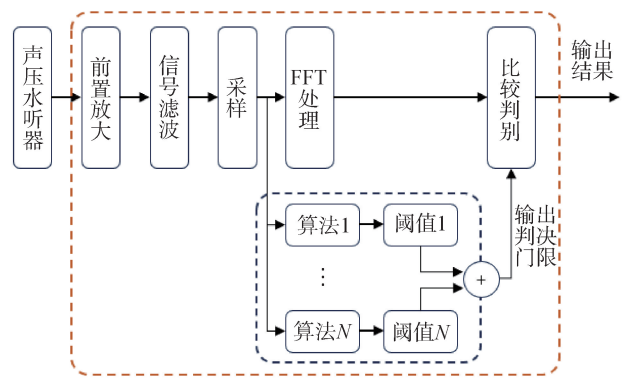


图 2 声呐系统线谱提取检测技术实现原理

Fig. 2 Implementation principle of sonar system line spectrum extraction and detection technology

与常规声呐工作模式不同,节点特征信息检测唤醒传感微系统采用特征水听器直接屏蔽各种带外噪声和干扰,只针对特征信息进行传感,即特征水听器只负责传感特征信息,省却特征信息提取过程,简化工作过程环节。线谱特征的检测模型可分为单参数线谱特征检测模型和多参数线谱特征检测模型。

单参数检测模型通过单一声压或振速参数获得特征信息,将通过声压或矢量特征水听器获得的特征信息时域信号进行归一化与加权处理,然后与设定的噪声背景相关的阈值进行比较,判定是否存在特征信息。线谱本质上是水听器接收信息中的某一特征频率的信号,包含多个参数,且在时间域具有连续性。因此除了通过单参数检测模型将其与背景噪声进行比较实现特征信息检测,也可以将同频特征信息的多个参数进行处理,例如声压与质点振速相乘,还可以通过多参数模型实现特征信息的检测。

设 K 为特征线谱的频率位置, D_T 为根据环境背景噪声设定的检测阈值。 P_K 为特征水听器输出的特征线谱的声压信号,当 $P_K > D_T$,判定存在特征频率为 K 的特征线谱,反之判定为无特征线谱。

单参数特征传感检测模型:

$$\begin{cases} P_K > D_T = 1 \\ P_K < D_T = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$D_T = P_n \quad (4)$$

式中: p_n 为背景噪声的声压,在实际系统设计中可通过宽带水听器直接获取,也可通过多个特征水听器取均值获得,用多特征传感器获取检测阈值:

$$D_T = \frac{1}{n} \sum_k^n P(f_k) \quad (5)$$

式中 n 为特征线谱的个数。由于采用将特征信息直接与背景噪声相比,因此使用这种技术方法的先决条件是在“正”信噪比条件下(单参数模型),其检测原理如图 3 所示。

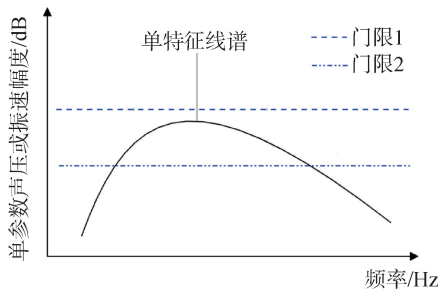


图3 单参数线谱特征传感检测原理示意

Fig. 3 Schematic diagram of single parameter line spectrum feature sensing detection principle

2 特征信息检测传感微系统工作原理

2.1 水下特征信息唤醒传感机制

水下声场中的声信息一般都很微弱,要把微弱的特征信息从各种干扰信息中针对性提取出来,增敏唤醒传感是传感机制设计的首要考虑因素。由于谐振系统具有很强的物理过程放大作用,同时具有结构特性对应性特点,因此可用于构建唤醒传感机制,根据传感器设计理论和声场声信息检测方法^[13],采用谐振敏感机制建立特征信息耦合模型。如图4所示,通过构建谐振耦合敏感结构^[14],使特征信息成为谐振触发条件,即采用特征信息中的具体参数触发谐振系统工作,可以实现用特征信息唤醒谐振系统工作,使特征信息得到增敏及选择性传感。

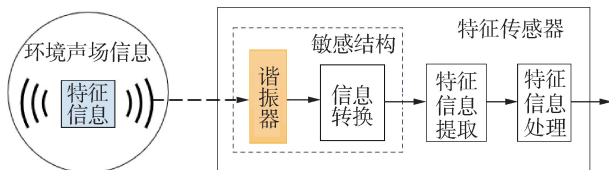


图4 特征信息唤醒传感谐振系统原理示意

Fig. 4 Schematic diagram of characteristic information awakening sensing resonance system principle

被感知特征信息参数与谐振器结构相关,系统谐振受特征信息控制。当声场中出现特征信息时,通过参数耦合唤醒谐振器,启动特征水听器敏感结构工作,通过对敏感结构产生的变化进行转换,形成可提取和处理的电信号,即将特征信息增敏放大转化成电学信号输出。

2.2 动态阈值生成与逻辑比较检测原理

基于传统功率谱的检测技术和基于特征信息传感的检测技术都需要对接收到的信号和噪声进行判决,以确定是否有目标存在。最简单的检测判决与阈值设置有关,只要信号加噪声的幅度超过阈值就认为有目标存在,因此合理设置阈值十分重要。如果阈值设定不当,有可能出现错误判断,当输出信号超过阈值时,实际上并没有特征信

号存在,称为虚警;同样,在存在特征信号时,由于输出信号的幅度没有超过阈值,会出现漏检或漏报。漏检和虚警是不希望出现的。减小虚警的最直接的方法是提高阈值,但是阈值提高之后会导致漏检概率增加。同时考虑到水下声场具有时变性,接收信号存在起伏,因此静态阈值不适合实际应用。为准确判定特征信息有无,需要将阈值设计成与特征线谱信息和背景噪声信息二维相关,并具有随动性。

设置多个特征水听器,可取其平均加权作为阈值。如图5所示, F_1 、 F_2 、 F_3 为3个特征水听器,对应3个特征线谱的输出,假设某一个特征信息不存在,例如 F_3 不存在,则其输出为环境背景噪声,此时阈值由2个特征信息加上噪声组成,特征信息变化时,阈值也发生变化;噪声起伏时,阈值也随之变化,这样就建立了阈值与特征信息和环境背景噪声的二维动态相关性,这种阈值设置方法可以使阈值动态跟随信号与环境噪声起伏变化,克服声场信号起伏对检测带来的影响。当某2个特征信息,例如 F_1 和 F_2 幅值差异较大时,会出现阈值落在两者之间的情况,这时需要通过加权对阈值进行调整,或者对检测逻辑进行修正,否则会出现漏检情况。

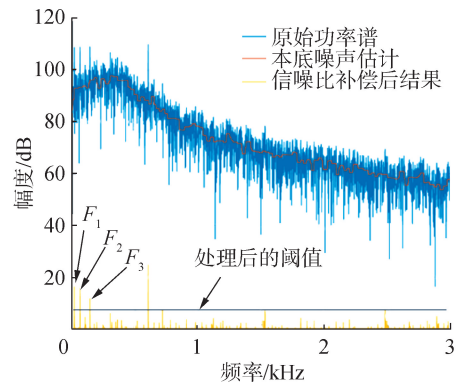


图5 动态阈值生成与逻辑比较检测原理示意

Fig. 5 Schematic diagram of dynamic threshold generation and logic comparison detection principle

2.3 特征信息检测唤醒传感微系统组成

针对水下网络节点应用中对特征信息检测与唤醒驱动的功能要求,图6给出了基于特征信息检测实现传感唤醒功能的结构组成与原理框图。

如图6所示,水下网络节点上的特征信息检测唤醒传感微系统,采用 n 个频率域特征水听器,每个频率域特征水听器内含一个频率域特征敏感芯片,针对性传感获取水下某个频率特征信息;如果采用芯片集成设计,将 i 个频率域特征敏感芯片进行集成,可实现针对 i 个频率特征信息的同时敏感获取,获得水下 i 个频率特征信息组。分别采用增敏前放

技术对传感获取的每个频率特征信息进行匹配前处理,所述前处理包括阻抗匹配、噪声抑制、信号放大及滤波等。对每个频率特征信息进行匹配前处理后输出 i 个归一化的传感信号输出。在获得特征信息后可直接通过阈值比较进行特征信息检测,将特征水听器给出的 i 个频域特征信息信号输出,与通过动态阈值电路生成的检测阈值进行比较,形成特征信息有无的数字判断结果,完成特征信息的检测;进

一步,通过将多个特征信息检测结果与依据目标特征预置的特征向量组进行比对,可进行基于目标特征预置的特征向量组的目标匹配检测,形成目标有无的检测数字结果,当检测结果为“有”时,输出后续唤醒驱动信号。如图 7 所示,特征信息检测唤醒传感微系统的结构构成包含特征信息传感芯片、特征信息前处理单元、动态阈值生成模块、检测模块和输出驱动模块。

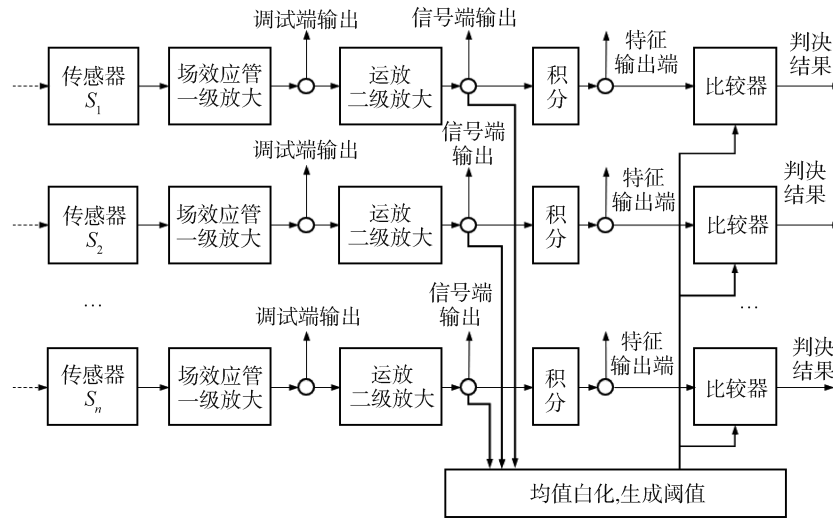


图 6 特征信息传感检测唤醒结构组成与原理框图

Fig. 6 Composition and principle diagram of feature information sensing detection wake-up structure

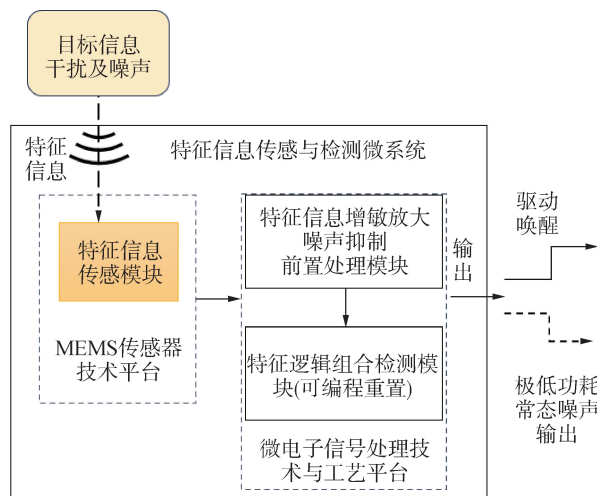


图 7 特征信息检测唤醒传感微系统构成

Fig. 7 Composition of feature information detection wake-up sensing microsystem

3 特征信息检测微系统设计及实现

水下特征信息检测微系统可在分布式网络系统里作为节点完成对特征信息或具有特定特征信息目标的检测。工作方式一般为值班型,需要关注工作时长的设计,依据本团队前期研发的具有极低功耗的单特征声压水听器和多特征集成水听器,重点进行总体结构设计和信号处理电路设计。

3.1 微系统设计

水下特征信息检测微系统的结构设计需要考虑水介质工作环境和防水耐压设计,同时需要考虑水听器接收声信号的声学工作条件以及如何保证电池仓容量最大化以及安全设计。设计的水下特征信息检测微系统如图 8 所示。

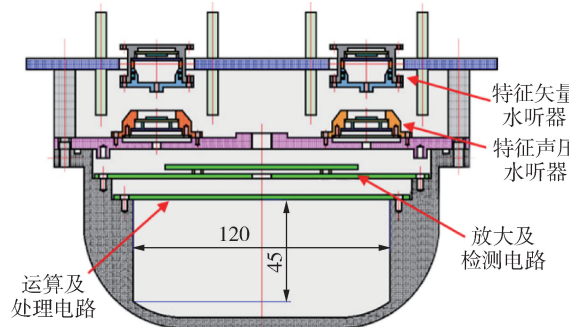


图 8 水下特征信息检测微系统结构示意图

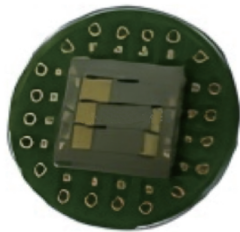
Fig. 8 Schematic diagram of the microsystem structure for underwater feature information detection

外壳分为底壳和上盖 2 个部分,周边采用法兰设计,方便安装;电池仓位于底壳底部,可以保持重心稳定在偏底部;电池仓上设计防护盖板,既可以起到安全防护作用,也可实现电源线的引出与管理;电池仓上盖外安装信号处理电路板,方便与特征水听

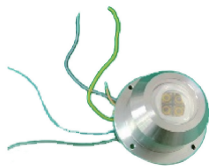
器连接;多个特征水听器分别水密安装于上盖上,最后将安装有特征水听器的上盖与底壳进行水密结构封装;上盖中部设计过孔,可实现控制与驱动引线电缆的水密适配安装。

3.2 极低功耗特征水听器

具有极低功耗特点的特征水听器分为单特征声压水听器(单芯片单通道)和组合后的多特征集成水听器(单芯片多通道),如图 9 所示。水下特征信息检测微系统上盖结构上设计 4 个单特征声压水听器的安装位置。壳体周边法兰结构设计延展安装支架结构,可以满足集成多特征水听器的结构安装要求。



(a) 封装前的芯片(单芯片,多通道)



(b) 封装后的特征水听器

图 9 极低功耗特点的特征水听器实物

Fig. 9 Physical image of a feature hydrophone with extremely low power consumption characteristics

3.3 微系统电路设计

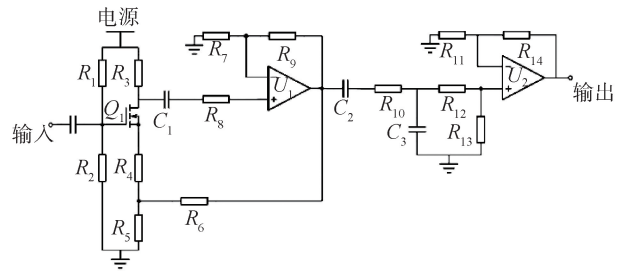
MEMS 特征传感器还需要配套信号调理电路以实现特征信息检测,通过合理设计微系统电路,可以实现优异的检测性能^[15-16]。图 10 为水下特征信息检测微系统的电路设计与实物照片。

电路设计分为信号前处理、动态阈值生成与检测电路 3 个部分^[17]。采用场效应管前放电路同时实现阻抗匹配与低功耗设计,选用低功耗运算放大器与比较器实现低功耗特征信息检测。由于采用场效应管亚阈值电路设计机制,该电路具有极低功耗的特点,支持实现近零功耗的特征信息唤醒传感功能与设备实现。

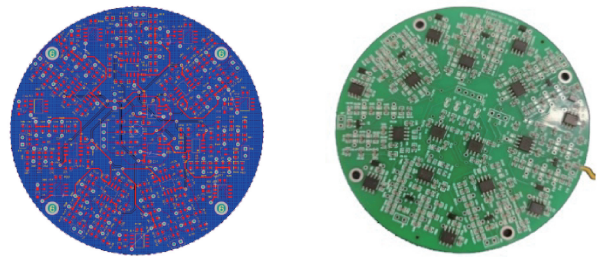
3.4 水下特征信息检测微系统测试样品

由于水下特征信息检测微系统工作在水下,因此需要对其进行组合封装实现多特征目标检测,需要兼容水声信息传播与敏感条件。图 11 中设计 4 个单特征声压水听器采用对称安装结构(实际传感器仅 3 只有效,1 只损坏);多特征集成水听器采用悬挂安装,封装后形成的水下特征信息检测微系统

测试样品如图 11 所示。图 11 中采用 3 个单特征声压水听器(编号分别为 M5-62、MM5-47、M3-130)制作的水下特征信息检测唤醒传感微系统(测试过程中有一只水听器损坏)。图 12 为采用多特征集成敏感芯片制作的多特征集成水听器(编号 SHL-134)及其测试工装。



(a) 水下特征信息检测微系统接收电路原理



(b) 水下特征信息检测微系统的电路实物照片

图 10 水下特征信息检测微系统的电路及实物照片

Fig. 10 Physical photo and the circuit of the underwater feature information detection microsystem

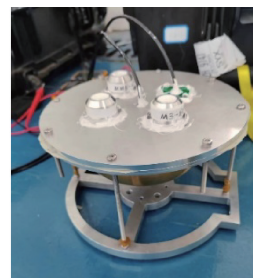


图 11 水下特征信息检测微系统测试样品

Fig. 11 Underwater feature information detection microsystem test sample

4 测试与结果分析

为验证水下特征信息检测唤醒传感微系统的功能,首先对单特征声压水听器和多特征集成水听器依据相关标准分别进行性能测试,在特征水听器性能测试基础上进行水下特征信息检测唤醒传感微系统对水下特征信息检测功能验证。

4.1 测试方法

根据 GB/T 3223—94《声学水声换能器自由场校准方法》,采用比较法在消声水池对水下单特征

声压水听器和多特征集成水听器进行灵敏度频响测试;然后在同样环境条件下,对具有极低功耗特点的水下特征信息检测唤醒传感微系统进行特征信息检测功能测试。试验仪器及构建的测试系统,测试时保证标准水听器、待测水听器与声源处于同一水深,声源与水听器相距大于 1 m。通过信号源产生单频脉冲信号,经过功率放大器对信号进行放大,经声源发出脉冲声信号。标准水听器与待测水听器同时接收到声源发出的脉冲信号,经过测放的放大与滤波,将去除干扰后的信号传输给示波器,在示波器上可读取 2 个水听器接收信号的峰-峰值,参比标准水听器灵敏度,经计算得到特征水听器的频率响应。

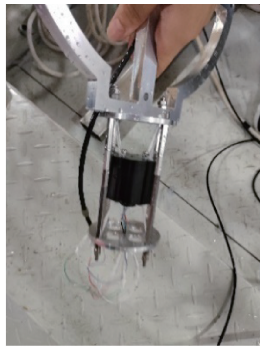


图 12 多特征集成水听器(编号 SHL-134)测试样品
Fig. 12 Multi feature integrated vector hydrophone (SHL-134) test sample

4.2 特征声压水听器性能测试结果

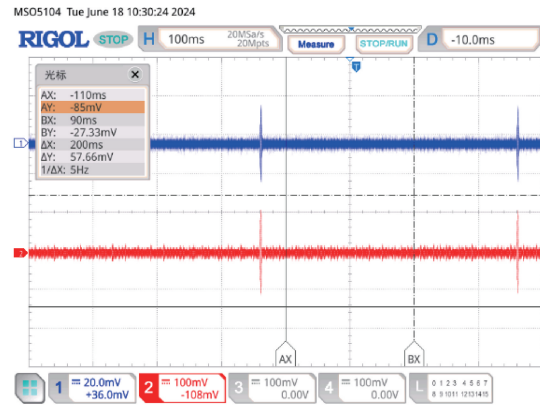
对编号为 M5-62、MM5-47、和 M3-130 的 3 只单特征声压水听器分别在消声水池进行灵敏度频响测试。测试频率从 2 kHz 开始,测试过程中发射不同频率和幅值的声信号,测试标准水听器和被测特征水听器的输出信号,测试过程接收的信号波形如图 13 所示,其中蓝色曲线为标准水听器测试线输出,红色曲线分别对应被测特征声压水听器 M3-130 的测试输出结果。

根据测试数据绘制出 M5-62、MM5-47 和 M3-130 特征声压水听器的灵敏度频响曲线如图 14 所示。由图 14 可知,编号 M5-62 特征频率点在 3.15 kHz,灵敏度-173 dB@ 3.15 kHz;编号 MM5-47 特征频率点在 4 kHz,灵敏度为-136 dB@ 4 kHz;编号 M3-130 特征频率点在 12.5 kHz,灵敏度为-146 dB@ 12 kHz。

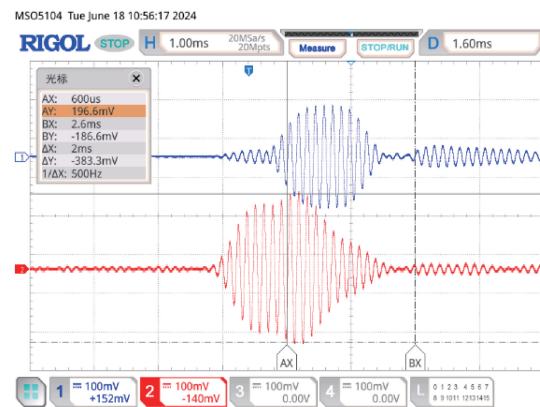
4.3 多特征集成水听器性能测试结果

在消声水池对 SHL-134 多特征集成水听器进行灵敏度频响测试(由于制作的 MEMS 芯片数量较少且频率选择性能还需进一步完善,因此实际完成的多特征集成水听器仅按照 2 个传感器进行拼接组

合),测试频率从 2 kHz 开始。SHL-134 特征水听器的测试频率范围为 2~18 kHz,特征水听器在入水过程中未进行严格定位,其敏感方向与声源成一定角度,响应多特征集成水听器的响应不是其正方向的最大响应值,但不影响特征响应验证结果。



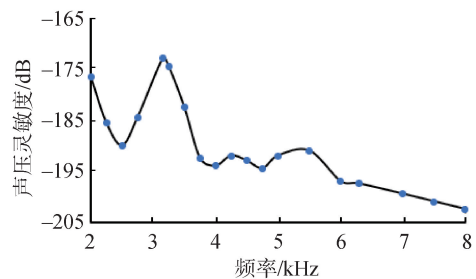
(a) 标准水听器和特征水听器 (M3-130) 测试波形



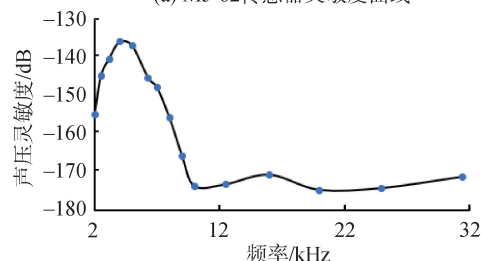
(b) 时域展开波形

图 13 测试过程接收信号波形

Fig. 13 Waveform diagram of received signal during the testing process



(a) M5-62 传感器灵敏度曲线



(b) MM5-47 灵敏度曲线

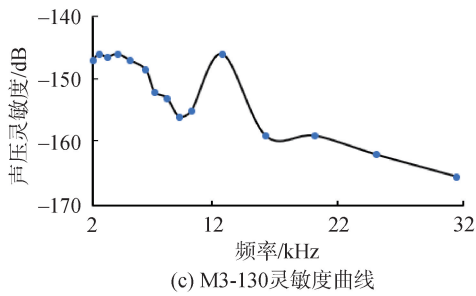


图 14 3 个单特征声压水听器的灵敏度频响曲线

Fig. 14 Sensitivity frequency response curves of three single characteristic sound pressure hydrophones

根据测试数据绘制出 SHL-134 多特征集成水听器频响曲线,如图 15 所示。

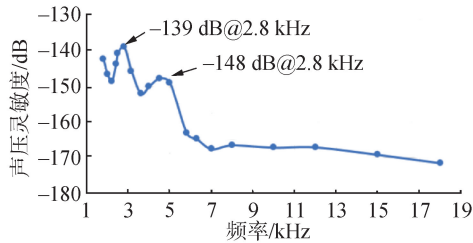


图 15 SHL-134#集成多特征水听器频响曲线

Fig. 15 SHL-134# integrated feature vector hydrophone frequency response curve

由图 15 可知,SHL-134 多特征集成水听器在 2~18 kHz 频率范围内存在 2.8 kHz、4.5 kHz 共 2 个特征频点,响应分别为 -139 dB@2.8 kHz 和 -148 dB@4.5 kHz。

4.4 水下特征信息检测微系统检测功能测试结果

编号为 MM5-47 和 M3-130 的 2 只单特征声压水听器组成水下特征信息检测唤醒传感微系统,将此传感微系统在消声水池进行功能测试(M5-62 样品特征频率与 MM5-47 比较接近且灵敏度较低,因此未组合使用),M3-130 号特征水听器的特征峰为 12 kHz,对应白灯亮;MM5-47 号特征水听器的特征峰 4 kHz,对应红灯亮。实际测试结果如表 1 所示。

由表 1 可知,特征信息响应测试结果一共出现了 3 种状态,状态(1)在 3.15 kHz 频率点红灯亮,此时对应 MM5-47 号特征水听器的特征响应输出,其特征峰为 4 kHz,对应红灯亮。造成特征频点与响应频点没有完全吻合的原因是 MM5-47 传感器带宽较宽,频率选择性不好,频点选取离散性带来一定的测试误差^[19];状态(2)在 9~14 kHz 频率段,白灯亮,对应 M3-130 特征水听器(特征峰 12 kHz)的特征响应输出,对应白灯亮;状态(3)在 16~31 kHz 频率段,所有灯不亮,对应此频率段,没有特征信息响应。

对应上述几种情况,将水下特征信息检测微系

统测试样品特征信息检测功能的测试结果示意如图 16 所示。

表 1 水下特征信息检测微系统检测功能测试结果

Table 1 Test results of underwater feature information detection microsystem detection function

频率/ Hz	标听/ mV	MM5-47/ mV	M3-130/ mV	检测灯
3 150	17.33	683	483	红灯亮(*1)
4 000	26	2 716	900	红灯亮(*1)
5 000	66.66	6 583	4 866	红灯亮(*1)
6 300	155.8	6 250	5 033	红灯亮(*1)
7 000	198	5 500	4 080	全不亮
8 000	221	2 300	4 000	全不亮
9 000	258	883	2 666	白灯亮(*2)
10 000	208	275	1 866	白灯亮(*2)
12 000	228	308	8 000	白灯亮(*2)
14 000	214	326	7 100	白灯亮(*2)
16 000	158	308	1 333	全不亮(*3)
20 000	115	141	966	全不亮(*3)
25 000	120	160	650	全不亮(*3)

注: *1 状态(1); *2 状态(2); *3 状态(3)

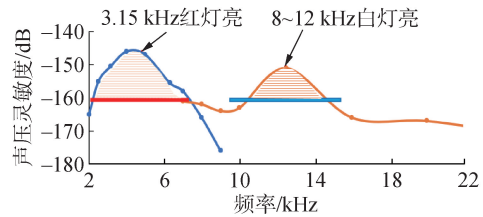


图 16 特征信息检测功能测试结果示意

Fig. 16 Schematic diagram of feature information detection function test results

在上述测试结果中,不同特征信息的响应幅度和带宽出现不一致现象,存在一定差异,主要原因是水下特征信息检测微系统测试传感器样品的带宽参数控制不一致引起(传感器灵敏度通过电路增益进行补偿,以减小灵敏度不一致导致对阈值设置的影响)。

为评估功耗情况,对与水下特征信息检测微系统测试样品采用的 3 通道特征传感器及检测电路进行功耗测试,测试系统在+5 V 供电条件下的工作功耗如图 17 所示。

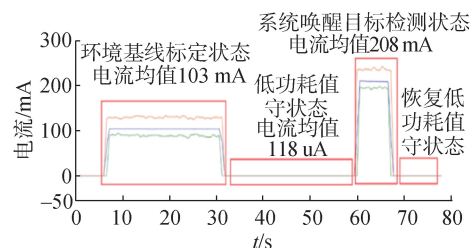


图 17 检测系统功耗测试结果

Fig. 17 Power consumption test results of the detection system

从图 17 可以看出,仅维持传感器和过门限检测电路工作条件下,系统功耗控制在 118 μA ,如果再将检测电路进行优化改进,值守电路预期可实现 10 μA 量级的功率消耗,传感器功耗小于 1 μA ,验证了系统具备极低功耗的工作能力。

5 结论

1)通过对单特征声压水听器和多特征集成水听器测试结果可知,利用谐振敏感模式,通过压电 MEMS 技术能以极低的功耗实现特征信息的高灵敏、低噪声检测。通过该技术设计并研制的单特征声压水听器和多特征集成水听器可以实现 1~20 kHz 频率范围内的特征信息的针对性响应。

2)通过对采用特征水听器设计并研制的水下特征信息检测唤醒传感微系统样机进行功能测试试验,验证了特征信息检测唤醒传感微系统可对预设的 4、12 kHz 这 2 个特征信息同时进行检测与识别。由于可采用特征响应带宽调控技术,因此可包容目标特征频率的飘移和起伏,动态阈值生成技术可实现阈值跟随可调的检测置信度预置。

3)压电 MEMS 水下特征信息检测传感技术可应用于水下通信系统前缀信号的识别,同时基于该项技术通过选取目标典型特征进行组合可进一步实现对目标的检测,可在相应的网络信息应用系统中基于特征信息识别实现对特定目标的检测唤醒与驱动功能。由于水下特征信息检测微系统具有极低功耗和小尺寸优势特征,通过技术优化可以实现无保养长期工作,支撑水下长期值守任务的实现。

参考文献:

- [1] 闫敬,关新平. 海上无人系统跨域集群发展现状及其关键技术[J]. 自动化学报, 2025, 51(4): 744-761.
YAN Jing, GUAN Xinping. Development status and key techniques for cross-domain swarm of maritime unmanned systems [J]. Acta automatica sinica, 2025, 51(4): 744-761.
- [2] 王童豪,彭星光,胡浩,等. 海上有人/无人协同系统及其关键技术综述[J]. 兵工学报, 2024, 45(10): 3317-3340.
WANG Tonghao, PENG Xingguang, HU Hao, et al. Summary of manned/unmanned cooperative system at sea and its key technologies [J]. China industrial economics, 2024, 45(10): 3317-3340.
- [3] 龚国林,周俊吉,王博涵,等. 反制潜艇与 UUV 协同作战模式研究[J]. 科技与创新, 2024(19): 105-107.
GONG Guolin, ZHOU Junji, WANG Bohan, et al. Research on cooperative operation mode of counter submarine and UUV[J]. Science and technology & innovation, 2024(19): 105-107.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] PINROD V, RUYACK A, YING R, et al. PZT lateral bimorph based sensor cuboid for near zero power sensor nodes [C]//2017 IEEE SENSORS. Piscataway, NJ, 2017: 1-3.
- [8] 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.
- [9] 熊紫英,朱锡清. 基于 LOFAR 谱和 DEMON 谱特征的舰船辐射噪声研究[J]. 船舶力学, 2007, 11(2): 300-306.
XIONG Ziyang, ZHU Xiqing. Ship radiated-noise research based on the LOFAR spectrum and DEMON spectrum characteristics [J]. Journal of ship mechanics, 2007, 11(2): 300-306.
- [10] 程玉胜,马凯,邱家兴,等. 船舶侧斜螺旋桨空化噪声调制谱模型[J]. 声学学报, 2022, 47(1): 27-35.
CHENG Yusheng, MA Kai, QIU Jiaying, et al. Model of radiated noise modulation spectrum of ships with skewed propellers [J]. Journal of acoustics, 2022, 47(1): 27-35.
- [11] FANG S, CUI J, YANG L, et al. Research on signal extraction and classification for ship sound signal recognition [J]. Journal of marine science and application, 2024, 23(4): 984-995.
- [12] 李昊鑫,肖长诗,元海文,等. 特征降维与融合的水声目标识别方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(1): 102-110.
LI Haoxin, XIAO Changshi, YUAN Haiwen, et al. Feature dimension reduction and fusion based underwater acoustic target recognition method [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(1): 102-110.
- [13] 李科杰. 新编传感器技术手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
LI Kejie. New compilation of sensor technology manual [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [14] 王登攀,黄晶,赵德锋,等. 一种低频高灵敏度压电 MEMS 声接收器设计[J]. 压电与声光, 2025, 47(1): 28-31.
WANG Dengpan, HUANG Jing, ZHAO Defeng, et al. Design of a low-frequency high-sensitivity piezoelectric MEMS acoustic receiver. [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2025, 47(1): 28-31.

- atic equation of state for detonation products[J]. Science and technology of energetic materials, 2010, 71(1-2): 44-50.
- [15] SZELUGA U, KURZEJA L, GALINA H. Dynamic mechanical properties of epoxy/novolac system modified with reactive liquid rubber and carbon filler[J]. Journal of thermal analysis and calorimetry, 2008, 92(3): 813-820.
- [16] 刘盛. 给排水管道中爆炸冲击波的传播规律[D]. 天津: 天津大学, 2020.
LIU Sheng. Propagation law of explosion shock wave in water supply and drainage pipeline[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [17] KOLI S, CHELLAPANDI P, BHASKARA R L, et al. Study on JWL equation of state for the numerical simulation of near-field and far-field effects in underwater explosion scenario[J]. Engineering science and technology, an international journal, 2020, 23(4): 758-768.
- [18] SHURSHALOV L V. On a modification of the two-term equation of state[J]. Fluid dynamics, 2020, 55(6): 751-759.
- [19] 刘清宇, 马树青, 杨华. 爆炸声源声源级数据分析方法[J]. 声学及电子工程, 2014(4): 1-4.
LIU Qingyu, MA Shuqing, YANG Hua. Analysis method of sound source level data of explosion source[J]. Acoustics and electronics engineering, 2014(4): 1-4.
- [20] LI Qihu. Digital sonar design in underwater acoustics[M]. Springer, Berlin, Heidelberg: 2024:160-180.

本文引用格式:

- 耿立婷, 崔建功, 张国军, 等. 微型水下爆炸声源的数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(8): 1678-1684.
GENG Liting, CUI Jiangong, ZHANG Guojun, et al. Numerical simulation and experimental validation of miniature underwater explosive sound sources[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8): 1678-1684.

(上接第 1643 页)

- [15] 李振, 张国军, 薛晨阳. 新型三维 MEMS 矢量水听器的设计[J]. 传感技术学报, 2013, 26(7): 950-954.
LI Zhen, ZHANG Guojun, XUE Chenyang. Design of a novel three-dimensional vector hydrophone based on MEMS[J]. Chinese journal of sensors and actuators, 2013, 26(7): 950-954.
- [16] 方尔正, 洪连进, 杨德森. MEMS 型水听器的自噪声分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(3): 285-288.
FANG Erzhen, HONG Lianjin, YANG Desen. Self noise analysis of MEMS hydrophones[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(3): 285-288.
- [17] PRZYBYLA R J, SHELTON S E, GUEDES A, et al. In-air rangefinding with an AlN piezoelectric micromachined ultrasound transducer[J]. IEEE sensors journal, 2011, 11(11): 2690-2697.
- [18] XU Liang, ZHANG Haigang, ZHANG Minghui. Training a deep operator network as a surrogate solver for two-dimensional parabolic-equation models[J]. Journal of the acoustical society of america, 2023, 154(5): 3276-3284.
- [19] 陈丽洁, 范茂军, 侯占民, 等. 压阻式加速度计的阻尼分析[J]. 传感器技术, 1999, 18(2): 15-17.
CHEN Lijie, FAN Maojun, HOU Zhanmin, et al. Damping analysis of piezoresistive accelerometer[J]. Transducer and microsystem technologies, 1999, 18(2): 15-17.
- [20] WYGANTI O, KUPNIK M, KHURI-YAKUB B T. Analytically calculating membrane displacement and the equivalent circuit model of a circular CMUT cell[C]// 2008 IEEE Ultrasonics Symposium. Piscataway, NJ, 2008: 2111-2114.

本文引用格式:

- 朴胜春, 雷亚辉, 张强, 等. 压电微机电系统水下特征信息检测传感微系统[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(8): 1635-1643, 1684.
PIAO Shengchun, LEI Yahui, ZHANG Qiang, et al. Piezoelectric micro-electromechanical systems sensing microsystem for underwater feature information detection[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8): 1635-1643, 1684.