

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412550

水声矢量传感器研究进展与挑战*

李智^{1,2,3}, 杨士莪^{1,2,3}

(1. 哈尔滨工程大学水声技术全国重点实验室 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) 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

摘要:水下声信息的有效获取,是开展水声科学研究的基础。水声矢量传感是继常规声压传感之后的一类新型水下声接收技术,以矢量传感器作为核心载体,可同步共点获取完备的海洋声场信息,是新一代矢量声呐的根基。特别是与频率无关的自然余弦指向性和抑制各向同性海洋环境噪声的优势,使得矢量传感器在水下安防、海洋资源勘探、远程通信和环境监测等领域拥有巨大应用潜力。综述了水声矢量传感新机理探索、有源功能新材料应用、新结构与新技术发展等方面研究新进展,并对矢量传感器在甚低频、深水、平台应用和测试技术等方面未来的发展与挑战阐述了观点。

关键词: 矢量传感器; 矢量水听器; 水声换能器; 矢量声呐; 水声工程

中图分类号: TH73 TB565.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Advances and challenges in underwater acoustic vector sensors

Li Zhi^{1,2,3}, Yang Shie^{1,2,3}

(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. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The effective acquisition of underwater acoustic information is the basis for conducting underwater acoustic science research. The underwater acoustic vector sensor is a new kind of underwater sound receiving transducer compared to traditional hydrophones, in which the vector sensor is the core carrier. It can obtain the complete ocean sound field information, including both sound pressure and particle velocity. In particular, the frequency-independent natural cosine directivity and the advantages of suppressing isotropic marine environmental noise make acoustic vector sensor (AVS) have great potential to be applied in underwater security defense, marine resource exploration, long-distance communication, and environmental monitoring. This article reviews the main developments of AVS over the past decade, including the exploration of novel sensing mechanisms, the application of new piezoelectric active materials, and the design of innovative structures. Furthermore, the comprehensive challenges to be addressed in future work, such as device design at very low frequencies or in deep ocean conditions, platform suitability considerations, and advanced calibration techniques are analyzed and discussed.

Keywords: acoustic vector sensor; vector hydrophone; underwater acoustic transducer; vector sonar; underwater acoustic engineering

0 引言

海洋作为全球资源的新基地,其经济和社会意义、安全和战略地位的影响日益显著。海洋信息获取是海洋活动的开端,而声波作为迄今已知唯一可在水下远距离传播的信息载体,是认知海洋的重要物理基础。在海洋环境监测、资源勘探与开发、水下通信与导航、目标探测与

识别及自然灾害预报等领域,水声技术均发挥着不可替代的作用^[1-3]。水声换能技术作为与海洋进行信息交换的第一窗口,既是推动海洋科技进步的根本,也是制约其发展进程的首要瓶颈,是第一梯队的“卡脖子”问题,重要性不言而喻^[4-5]。

水声矢量传感是继声压传感之后的一类新型水下声接收技术,可以获取声场中的声质点矢量信息。矢量传感器(acoustic vector sensor, AVS)作为水声矢量传感技

术的核心载体,不仅可以同步采集声场中的声压和质点振速,获得更加完备的声场信息,并且具有与频率无关的自然余弦指向性,可抑制各向同性海洋环境噪声,提升信噪比,在低频、甚低频探测领域具有显著优势;与常规声压水听器需要成阵才能进行目标方位估计相比,单矢量传感器即可实现这一功能^[6-8],极大的简化了水下声系统设计;而矢量传感器成阵后,不但可以有效减小基阵体积,提升定向精度,还解决了常规声压水听器阵列定向的左右舷模糊问题^[9-10];在水声通信领域,已验证了单矢量传感器性能与声压水听器阵列近似,并对抑制水下声通信系统干扰具有优势^[11-12],而矢量传感器阵列则为各类水声通信新方法提供了物理基础^[13-14];利用矢量传感器开展的环境噪声、海底地震及可再生能源声环境等海洋监测研究工作,为观察、开发、利用海洋提供了新手段^[15-17];矢量传感器获取声场中矢量信息的能力,进一步拓展了鲸类、鱼类和珊瑚礁等海洋生物领域研究范畴^[18-21];基于矢量传感器的低频小尺度基阵,突破了常规半波长布阵理论限制,显著减小了声呐孔径,拓展了应用场景,在水下安防领域发挥了重要作用^[22-24],实现了重大创新。

自上世纪中期以来,水声矢量传感技术经历了从原始探索到蓬勃发展,特别是近十余年,随着器件研究的逐渐深入、应用的日趋广泛,以及材料、加工、电子等行业的快速进步,矢量传感器也取得了日新月异的进展。有鉴于此,将简要回顾矢量传感器发展的主要历程以及每个阶段解决的重要技术问题,重点聚焦矢量传感新机理探索、有源功能新材料应用、新结构和新技术等研究进展;最后分析矢量传感器在甚低频、大深度、平台应用和测量技术等领域发展前景与所面临的综合性挑战。

1 水声矢量传感器原理及分类

水下声场声压 $p(r)$ 理论上可以用泰勒级数展开形式表示:

$$p(\mathbf{r}) = p(\mathbf{r}_0) + (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)^T \nabla p(\mathbf{r}_0) + \frac{1}{2} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)^T \nabla^2 p(\mathbf{r}_0) (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) + \dots \quad (1)$$

等式右边第 1 项 $p(\mathbf{r}_0)$ 为声场中任一点 $\mathbf{r}_0$ 处的声压标量,可利用水听器获取;第 2 项为以 $\mathbf{r}_0$ 点为中心,半径为 r 的小体积元内的声压梯度矢量,其中 r 要远小于波长。

若根据声场中质点运动方程式(2),声压梯度 ∇p 又可与质点振速 u 建立联系(ρ 为介质密度),这也表明了矢量声信号的两种获取方法:采集两点标量声压从而间接获得声压梯度矢量,或直接拾取声质点振速矢量。由此也就衍生了两类不同工作机理的矢量传感器:梯度式

或惯性式。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -p \quad (2)$$

梯度式矢量传感器也称为压差式矢量传感器,核心思想是利用有限差分近似原理,直接测量声场中远小于波长范围内临近两点的声压标量,从而间接获得声压梯度矢量。根据该原理,式(1)中的第 3 项为二阶声压梯度量,属于高阶梯度式传感器;若通过直接测量质点振速或加速度进行有限差分后获取二阶声压梯度,则称之为振速梯度或加速度梯度传感器,也称为并矢量或张量传感器^[25]。

惯性式矢量传感器的本质是将振动传感器置于密封壳体内,使其整体呈现中性浮力,通过检测声波激励下整体的振动来获得声波质点振速。由于传感器整体与水质点共同振动,因此国内也称其为同振式。上世纪五十年代,Leslie 等^[26-27]推导了自由场条件下远小于声波波长的中性浮力刚性球振速与水介质质点振速的关系,阐述了直接测量声质点振速矢量的机理,同时展示了美国海军军械实验室研制的样机及测试结果,基本奠定了惯性式矢量传感技术体系,并一直沿用至今。根据直接测量质点矢量类型的不同,可进一步分为振速型、加速度型和位移型。

实际应用时,矢量传感器通常由相互正交布置的矢量单元和声压单元复合而成,可以同时、共点拾取声场中的标量和矢量信息。根据内部集成矢量单元的数量,有二维或三维矢量传感器之分,各单元的输出相互独立。另外,根据能量转换功能材料的不同,也可将矢量传感器分为压电、压阻、电磁、电容或光纤式;根据加工工艺不同,也常用微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)矢量传感器与常规机械式进行区分。

2 水声矢量传感器研究新进展

经过近四十余年的初期探索和积累,从上世纪九十年代开始,水声矢量传感器进入了快速发展阶段,期间陆续开展了一系列具有开创性的工作:

在结构设计方面,为寻求性能和稳定性的提升,开发了双叠片弯曲圆盘、悬臂梁圆管等多种结构的加速度型和位移型惯性式矢量传感器^[28-29],提高了灵敏度,拓宽了工作频带;针对实验室条件下存在电磁干扰的问题,在矢量传感器内部增加了屏蔽结构加以抑制^[30],在提升实用性方面起到了推进作用;针对工程中出现的问题,研究了流噪声和柔性悬挂对矢量传感器性能的影响^[31-34],将应用层面的问题从理论上给出了分析,进一步提升了设计能力;

在新材料方面,提出利用低密度复合高分子材料-玻

玻璃微珠和环氧树脂—作为水密层替代常规金属外壳,降低传感器整体密度,使之在水中呈现中性浮力,进一步验证了惯性式矢量传感理论^[35];尝试利用 1-3 型压电陶瓷复合材料、聚偏二氟乙烯 (polyvinylidene fluoride, PVDF)、非晶态合金等开发矢量传感器^[36-38],取得了原创性的成果;

在新技术应用层面, MEMS 加工工艺首次被用于研制电子隧道式加速度型矢量传感器,为该技术在水声领域的应用奠定了基础^[39];光纤技术也在此期间用于开发矢量传感器^[40-41],以不同技术路径实现了水下声质点振速测量。基于矢量传感器的线列阵^[42-43]应用于海洋环境噪声测量、近岸港口和航路安防等不同场景^[44-46],验证了矢量传感器在不同领域工程应用的可行性。

在此期间,围绕新结构、新材料和新技术的研究显著提升了矢量传感器性能;通过开展内场和外场试验,发现并解决了一系列工程应用中的关键问题,推动了矢量传感器的实用化进程,拓宽了其应用领域,也为未来的研究奠定了坚实基础。同时,矢量传感器的快速发展也从另一角度突显了水声质点振速测量的重要性。

鉴于此,九十年代末期,哈尔滨工程大学在国内率先引进声矢量传感技术,在接下来十余年的研究中先后发表了如声压梯度式、加速度型同振式、中频、三轴小型化、微型以及振速梯度等一系列矢量传感器研究成果^[47-52],并利用矢量传感器开展了实船噪声测量、声源声强测量、声压与质点振速空间相关性等外场试验研究,验证了矢量传感器及其成阵性能优势^[53-55],快速推进了矢量传感器技术在我国的发展,缩小了与先进国家之间的差距。国内其他单位此后也陆续开展了矢量传感器相关工作,如杭州第七一五研究所和上海船舶电子设备研究所分别设计了声压和振速一体化组合式矢量传感器,成阵后进行了拖曳试验,获得了良好的阵增益;国防科技大学研制了三维芯轴推挽式加速度型光纤矢量传感器并进行了海上试验,初步验证了光纤矢量传感器的实用性^[56-58]。各单位所开展的相关工作,为矢量传感器技术在我国的发展积累了宝贵的数据和经验,为后续深入研究奠定了坚实的基础。

近年来,随着矢量声学技术在目标探测、被动测距、环境噪声监测、水声通信、地声反演等领域的应用日益深入^[14-15, 59-63],以及新兴矢量声呐对传感器更高的技术要求,矢量传感器也在新机理、新材料、新技术和新结构等方向上取得了新进展。

2.1 理论研究进展

理论研究是传感技术发展的根基,也是解决各类工程应用问题的重要基础。近十余年间,矢量传感器针对原有惯性式和梯度式基础理论的研究日趋深入,技术体系更加完善;同时也在传感新机理方面进行了探索性研究,为突破原有技术瓶颈提供了新思路。

1) 惯性式理论发展

惯性式矢量传感器可以直接测量水质点振速,因此具有与频率无关的自然指向性,是其不同于梯度式的核心技术优势。从最初建立的中心对称刚性球模型,到更适用于二维声场接收的轴对称刚性短圆柱模型,再到对流噪声抑制性能更优的类椭球或胶囊型矢量传感器出现,惯性式矢量声接收理论随着应用的扩展也在逐步完善。针对椭球或胶囊外形矢量传感器,周宏坤等^[64-65]研究了平面波入射条件下刚性无约束长椭球的运动,发现声波斜入射会引起平动及扭转,且椭球体顶部的声响应带宽会由于扭转运动有所增加;针对矢量传感器实际并非为刚性体这一问题, Keltie^[66]构建了含内置传感器的球形弹性体理论模型,分析了聚氨酯包覆层对矢量传感器接收性能的影响,发现包覆层厚度会影响频率响应的平坦性及上限频率,内置传感器的尺寸则对频带内性能影响很小。上述研究从不同角度理论分析了传感器形状、材料等对性能的影响,丰富了惯性式矢量传感器设计理论。

作为除频率响应以外的另一重要性能,矢量传感器的最小可检测信号量级(水声领域通常用输入端等效噪声声压级表征^[67]),也称自噪声或本底噪声,近年来备受关注。特别是惯性式矢量传感器在新型阵列和低频远程探测领域应用逐渐深入,低频本底噪声过高这一问题也变得日益突出,这对于弱信号接收是不可忽视的,更是急需突破的技术瓶颈^[68-69]。作者团队围绕惯性式压电矢量传感器的本底噪声性能提升,开展了一系列研究工作:基于 Gabrielson 等^[70-71]在振动与声传感器本底噪声研究的基础上,进一步考虑了悬挂结构特性,并结合前置放大电路建立了等效自噪声分析模型,研究发现:低频段的等效噪声声压级不仅与有源材料有关,还与前置放大电路噪声、传感结构与放大器件的耦合特性息息相关^[72],据此提出了低噪声设计方法^[73],依次设计了内置电荷放大器加速度计、压电陶瓷(lead zirconate titanate, PZT)和弛豫铁电单晶矢量传感器,获得了本底噪声性能的逐步提升^[74-75]。低频本底噪声的降低,不仅可以显著提升接收信噪比,提高弱信号拾取的能力,扩展矢量传感器的应用场景,更是矢量差分型阵列高阶成阵的基础,具有重要实际应用价值。

为满足惯性式矢量传感器在探测和通信等领域应用需求,其工作频段正在向着更低和更高两端扩展,甚低频和高频矢量传感器的研发迫在眉睫;而弹性悬挂对于惯性式矢量传感器不可或缺,如何设计合适的悬挂体系,也是其实际应用中不可回避的课题。

2) 梯度式理论发展

梯度式接收最具潜力的是高阶声场量的获取,理论上可得到更窄的指向性开角,对环境噪声和空间干扰的

抑制能力更强。根据目前直接获取声场量的不同可将其分为声压梯度式和矢量梯度式。声压梯度式目前已从简单的双声压传感器组合,发展到对有源材料进行电极切割的多模式(multi-mode)梯度传感器^[76-78],其优点是各单元一致性更佳,还可根据需求组合输出不同的指向性图。矢量梯度式直接测量声质点振速或加速度,再经过有限差分计算获取声场张量,既可利用振速或加速度传感器一体化设计^[6,79],也可基于已有矢量传感器进行组合^[80]。获取更高阶声场的矢量传感技术,目前还以阵列形式的研究居多,如多极子小尺度矢量阵^[22-24]、声压圆环阵^[81]等。2018年Lawrence等^[82]研究了一种基于相位梯度的有限差分方法,优势是可以提高带宽,获得与频率无关的任意阶声场梯度量,但局限于目前仅可在频域应用,且稳健性还有待进一步研究,不过该方法为后续梯度式矢量传感器的研究提供了新思路。对于梯度式矢量传感技术,重要问题之一是要保证各传感单元的幅相一致性,否则将直接影响带宽和指向性;而对于更高阶矢量传感器的实现,确保各传感单元足够低的本底噪声则另一个关键技术问题。

3) 新机理矢量传感器

新机理的出现,可能突破原有技术瓶颈,引发研究领

域革命性的改变。Zalalutdinov等^[83]提出了一种不同于传统惯性式或梯度式原理的新型声矢量传感方法,该方法基于介质的粘滞效应,通过检测声波传播经过微结构所产生的相关粘滞力大小,从而获得入射声波强度和方位信息。具体实现方法如下:

该传感结构为一整体直径6 mm,网格间距约20 μm 的平面蜘蛛网状结构组成(图1(a)),每根微纤维尺寸为3.6 $\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ (图1(b)),中心处有一薄膜反光镜。当声波入射时,每根微纤维在声流的粘滞力作用下产生振动,多根纤维构成多孔网状结构,令整体结构形成一个显著的声流致法向位移,通过光学干涉仪检测放置在结构中心的薄膜反射镜位移,即可推算入射声波的质点振速。由于网格结构的切向振动不会在法向产生投影,因此法向位移将产生与入射声波相关的响应,即余弦方向性(图1(c))。该矢量传感器利用微纳尺度上类二维结构特性,可在低频和甚低频获得更高的灵敏度,并拓展带宽;同时该结构无深度依赖性,理论上可在不影响接收性能的前提下应用于深海,且批量制造成本低,在军民品领域均具有较好的应用前景。此外,作者也将该传感器安装于坐底式浮球基座,用以在海洋环境中开展声质点振速检测(图1(d))^[84]。

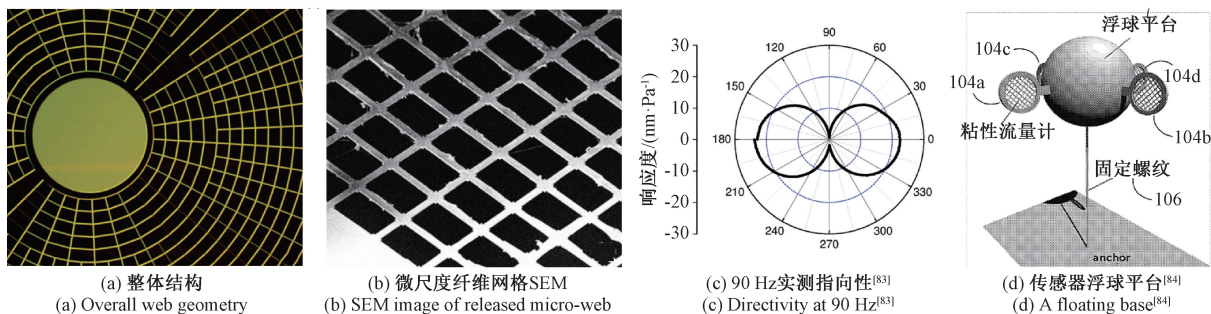


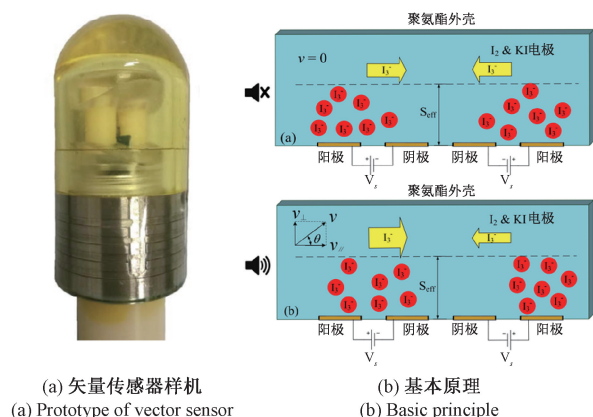
图1 “声流式”矢量传感器

Fig. 1 Acoustic flow type vector sensor

根据上述测量原理,可将该类型称之为“声流式”矢量传感器。而其特有的机理和结构特性,也使得这类传感器必将会面临新的技术挑战:例如,是否存在非声流致振动产生的误输出,影响程度如何;平台或环境是否会令传感结构中的微纤维产生非线性振动,该如何抑制;光学检测系统复杂程度高,该如何集成到湿端,或是采用其他检测手段;复杂传感结构对声场和粘滞效应产生的影响如何,该朝着什么方向进行优化等,以上问题均有待于科研人员进一步深入研究。

电化学传感机理水听器可以有效提升低频灵敏度^[85],这为改善矢量传感器低频性能提供了新思路。Li等^[86]在2018年研究了一种基于电化学传感机理的振速型矢量传感器(图2(a)):基于碘化物(I^-)存在的条

件下碘变成可溶性三碘化物(I_3^-)且溶解度会显著增加这一特性,将两组电极浸入含有碘和碘化钾的电解液中并施加电压,三价碘离子在阳极上产生并通过氧化还原反应在阴极上消耗,使两组电极产生相等的电解电流,当有外界声波入射时电解液中粒子振动,三价碘离子获得额外的速度,声波入射一侧电极对的电解电流增加,另一侧电极对的电解电流减少,两组电极产生电流差(图2(b));通过检测电流差值推算入射声波质点振速,经测试该传感器具有偶极子指向性;2020年Zhong等^[87]同样利用类似原理,研制了0.5~150 Hz低频矢量传感器。该类型矢量传感器没有常规的惯性质量和弹簧等机构,机理上更适合低频应用。不过,近场声-结构耦合特性、本底噪声、温度压力依赖性等方面仍有待进一步探索。

图 2 电化学矢量传感器^[86]Fig. 2 Electrochemical acoustic vector sensor^[86]

2.2 压电有源新材料应用研究

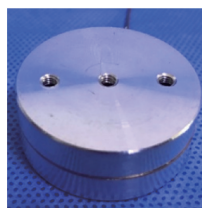
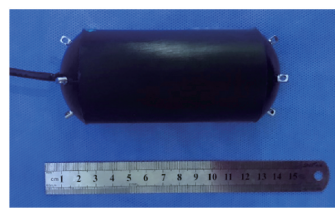
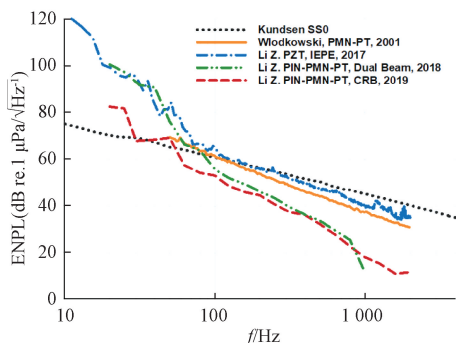
设计方法和制造工艺固然重要,但真正决定传感器性能极限的还是材料本身,特别是有源功能材料。压电材料凭借着性能优异、水下适应性强、可靠性高等特点,是水下声传感器实用性最强、应用范围最广、最具发展潜力的有源功能材料。每一次压电材料的升级换代,都会令水声传感器性能显著提升。

1) 弛豫铁电单晶

弛豫铁电单晶为铌镁酸铅-钛酸铅($(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$, PMN-PT)、铌铟酸铅-钛酸铅($(1-x)\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$, PZN-PT) 或其改性材料一类的统称,它凭借着极高的电致应变、压电耦合系数和低介电损耗,被认为是继石英晶体、钛酸钡陶瓷、PZT 之后的第 4 代水声压电有源材料,上世纪末就已在声换能器上开展了应用探索研究^[88]。Wilcoxon Research Inc. 在美国海军的支持下,先后研制了适于单晶各向异性电学及弹性参数的应力放大结构加速度计和三维剪切结构矢量传感器^[89-91],显示了弛豫铁电单晶在矢量传感器开发上的优势;尹义龙等^[92-93]则验证了 PMN-PT 较 PZT 材料矢量传感器的灵敏度提升。经过近二十年的发展,新型三元系弛豫铁电单晶铌镁酸铅-铌铟酸铅-钛酸铅($x\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3-y\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-(1-x-y)\text{PbTiO}_3$, PIN-PMN-PT)居里温度更高,晶体尺寸更大,均匀性更佳。这些改善对接收型水声传感器的设计及工艺、特别是对矢量传感器成阵大有裨益,而晶体成本的进一步降低,更有益于产业化和大规模应用。

弛豫铁电单晶不仅具有更高的压电常数,可提升矢量传感器的电压灵敏度,更具优势的则是更低的介电损耗,可以降低本底噪声,对突破加速度型矢量传感器低频接收信噪比低这一技术瓶颈至关重要。作者^[75]在 2019 年分析了[011]方向极化弛豫铁电单晶可以获得更高的

低频信噪比提升,并设计了双臂弯曲梁结构矢量传感器,样机实测低频等效噪声压级(equivalent noise pressure level, ENPL)达到了 55 dB@100 Hz,初步验证了弛豫铁电单晶改善低频本底噪声的优势;接下来设计了十字圈梁匹配结构加速度计(图 3(a))^[94],联合前置放大电路一体化低噪声设计研制了矢量传感器样机(图 3(b)),同时开发了自噪声测试平台(图 3(c)),又将本底噪声降低到约 50 dB@100 Hz^[74],较美国 Wilcoxon Research Inc. 的矢量传感器降低近 10 dB^[95],且在 60 Hz 以上的频率范围均低于 Knudsen 零级海洋环境噪声(图 3(d))。在同工况条件下的实际海上比测试验中,相较常规压电陶瓷矢量传感器,弛豫铁电单晶矢量传感器获得了约 14.8 dB 的接收信噪比提升,且工作更加稳定(图 3(e));在黄海开展的海试则验证了利用该传感器成阵后,空间甚低频三维波束形成技术的可行性^[96]。该系列研究及实验结果表明,弛豫铁电单晶矢量传感器在低频性能优势明显,有望进一步规模化应用。

(a) 十字圈梁加速度计
(a) Cross-ring beam accelerometer(b) 二维低噪声样机
(b) 2D low-noise prototype(c) 矢量传感器本底噪声测试平台
(c) Vector sensor noise floor measurement platform(d) 等效噪声压级对比
(d) Noise floor comparison

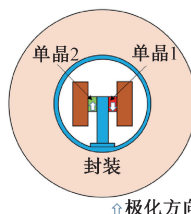
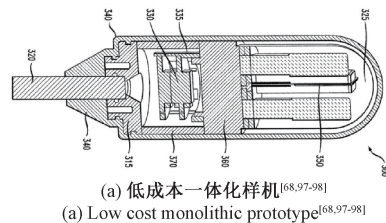
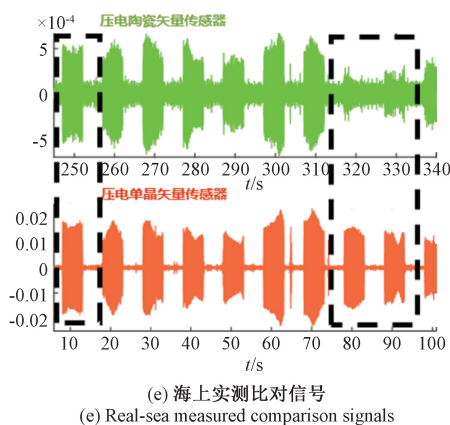


图3 低噪声弛豫铁电单晶矢量传感器^[74,78,94]
Fig.3 Low-noise relaxor ferroelectric single crystal based vector sensor^[74,78,94]

(a) 低成本一体化样机^[68,97-98]
(a) Low cost monolithic prototype^[68,97-98]

(b) 厚度剪切模式样机^[100]
(b) Thickness shear type prototype^[100]

(c) 弯曲模式加速度计和小型化传感器^[101]
(c) Bending mode accelerometer and miniature vector sensor^[101]

图4 不同工作模式的弛豫铁电单晶矢量传感器

Fig.4 Relaxor ferroelectric single crystal based vector sensor with various working mode

美国 Applied Physical Sciences Corp. 近几年公布了多个弛豫铁电单晶矢量传感器专利^[68,97-98],利用晶片的弯曲模式,开发了用于减小矢量传感器体积的谐振式加速计(图4(a)),提升一体化设计能力,并降低成本;韩国庆北也开展了一系列相关研究:针对不同类型单晶的电学及弹性参数各向异性特点,测试了[111]方向极化的PMN-PT厚度剪切模型下的电压输出各向异性^[99],利用[011]方向极化PIN-PMN-PT的厚度剪切模式设计了矢量传感器样机(图4(b))^[100];在小型化方面,Cho等^[101]基于[011]方向极化单晶研制了三叠片悬臂梁结构加速度计,晶片和梁的厚度分别为0.4和0.3mm,长度7mm,配合直径10mm、高度20mm的径向极化PZT-4圆管(图4(c)),开发了小型二维复合式矢量传感器,该结构未封装前的重量仅为6.4g。以上研究表明,弛豫铁电单晶可在一定尺寸范围内显著提升接收性能,初步验证了开发小型化高性能矢量传感器的优势:其中,[111]方向极化晶体虽然在剪切模式具有更高的压电性,但晶片定向工艺复杂,一致性不高,目前大规模应用还存在一定难度;[011]方向极化单晶在弯曲模式下的压电性更高,更适合低频应用,虽剪切模式压电性不及[111]极化单晶,但仍显著高于压电陶瓷,且定向简单,在实际开发中更具优势。上述研究已经充分表明了弛豫铁电单晶在矢量传感器开发上的优势,但如何发挥其各向异性特征,开发与之匹配的新型传感结构,从而应对不同的需求,仍是该领域一个重要研究方向。此外,掺杂稀土元素Sm的弛豫铁电单晶压电常数 d_{33} 已经达到了 $3\,400 \sim 4\,100\text{ pC/N}$ ^[102-103],这对于进一步提升矢量传感器性能、尤其是甚低频信噪比可能十分有利,有待进一步深入研究。

2) 压电薄膜

除了常规压电材料外,如氮化铝(aluminum nitride,

AlN)、氧化锌(ZnO)和PZT等薄膜类压电材料,近年来也被用于开发矢量传感器,结合MEMS加工制造技术,在结构设计上提供了很多新思路。2021年Kim等^[104]基于PZT薄膜和微悬臂梁结构研制了矢量传感器(图5(a)),在100Hz频点处的灵敏度达到了-194dB(含前置放大器增益);Yeon等^[105]利用PZT压电薄膜,研制了具有蘑菇形惯性质量的矢量传感器(图5(b))。李俊红等^[106]利用ZnO作为有源功能材料,研制了悬臂梁结构矢量传感器(图5(c)),封装后重量仅10g,灵敏度相比于压阻式提高了17dB;Abdul等^[107-108]基于AlN薄膜,研制了用于水下声接收的交叉型微悬臂梁结构传感器(图5(d)),利用每个悬臂梁形成的心形指向性,在较高频率范围合成了全指向性。这些压电薄膜近似二维材料,具有优异的弯曲性能,可设计出常规压电材料不易实现的敏感结构,但其制造的器件容抗高,与后级电路的匹配不易;电容值过低也会导致低频等效本底噪声难以降低,令低频应用受限。

各类新型压电材料的应用,无外乎在于提升传感器的性能,其中又以接收信噪比最为关键。对于矢量传感器来说,用品质因数(figure of merit, FOM)来表征包含灵敏度和自噪声在内的接收信噪比更为合理^[69]:

$$FOM = M^2 C_f / \tan \delta = g d V_0 / \tan \delta \quad (3)$$

其中, $M(\text{V}/\mu\text{Pa})$ 为矢量传感器的电压灵敏度, $C_f(\text{F})$ 为电容量, $\tan \delta$ 是压电材料的介电损耗, $g(\text{V}\cdot\text{m}/\text{N})$

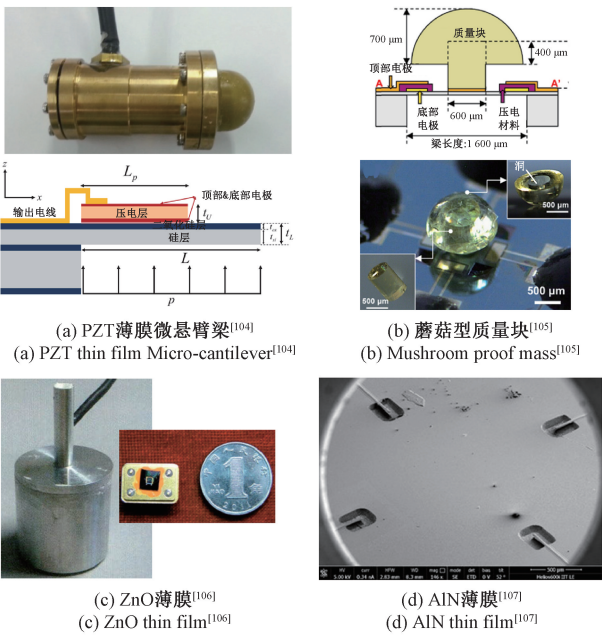


图 5 压电薄膜矢量传感器

Fig. 5 Piezoelectric thin films vector sensor

和 $d(\text{pC/N})$ 分别为矢量传感器压电材料主要工作模式下对应的压电电压常数和压电电荷常数,为了仅讨论压电材料对接收信噪比性能的影响,将压电材料体积 V_0 归一化处理。表 1 梳理了上述各类压电材料的主要参数,并以常用压电陶瓷 PZT-5A 为参考,计算其他压电材料的矢量传感器灵敏度和 FOM;如压电陶瓷 PZT-5H,虽然灵敏度有所降低,但 FOM 略有提升,整体与 PZT-5A 相当;对于工作在不同模式(切型)的弛豫铁电单晶,不论是灵敏度还是 FOM 均有所提升,特别是 FOM 提升显著,这也说明了以弛豫铁电单晶作为有源功能材料的矢量传感器综合性能更为优异;而压电薄膜类材料虽然电压灵敏度有所提高,但 FOM 相比于压电陶瓷略有降低,如果进一步考虑到低频应用,其过低的介电常数将会令矢量传感器的电容量过低,从而导致系统自噪声过高,接收信噪比降低,这在设计时要加以关注。当然,上述仅为理想情况下的讨论,能否获得实际性能提升还与制作工艺和前置放大电路等因素有关。但不能忽视的是,由于新材料矢量传感器的本底噪声更低、灵敏度更高,各类信号和干扰均可被接收,这对后端信号处理技术提出了更高的

表 1 压电材料及其矢量传感器性能

Table 1 Piezoelectric materials and vector sensors' performance

参考 文献	压电材料	材料参数				矢量传感器性能					
		压电电荷常数/ ($\text{pC} \cdot \text{N}^{-1}$)		压电电压常数/ ($\text{mV} \cdot \text{m/N}$)		相对介电 常数/(-)	介电损耗/ %	电压灵敏度 M / (dB ref. PZT-5A)		品质因数 FOM / (dB ref. PZT-5A)	
		d_{33}	d_{31}	g_{33}	g_{31}	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	$\tan\delta$	纵振	弯曲	纵振	弯曲
[69]	PZT-5A	374	-171	24.8	-11.4	1 704	~ 2	0	0	0	0
[69]	PZT-5H	593	-274	19.7	-9.11	3 401	~ 2	-2.00	-1.95	2.00	2.15
[109]	PMN-29PT [011]c	—	-1 883	—	-52.8	4 033	~ 0.2	—	13.31	—	54.14
[110]	PIN-40PMN-33PT [001]c	2 742	—	42.8	—	7 244	~ 0.2	4.73	—	42.04	—
[102]	Sm-PMN-PT [001]c	3 710	—	29.8	—	12 430	~ 0.2	1.60	—	41.53	—
[111]	AlN	4.7	—	62.8	—	~ 9	~ 0.2	8.07	—	-9.95	—
[112]	ZnO	13	—	154.5	—	~ 9.5	~ 0.3	15.9	—	3.2	—
[113]	PVDF	30	—	308	—	~ 11	~ 3	21.9	—	-3.6	—

要求:如何发挥高性能矢量传感器性能优势,是矢量信号处理领域需要深入研究的重要课题。

此外,近年来新型压电材料频出且特性各异,均有望应用于矢量传感器;如织构陶瓷的压电和介电性能上优于压电陶瓷,虽比弛豫铁电单晶略低,但是价格介于陶瓷和单晶,这对于低成本高性能矢量传感器的开发提供了新的选择;又如新型分子生物铁电材料,压电性已经与常规 PZT 相当甚至更高^[114-115],而声阻抗却远低于常规压电材料,同时兼具柔性特征,容易进行结构设计和调控^[116],这可能对于新型深水矢量传感器的开发有益。

2.3 新结构与新技术

有源和无源材料在客观条件下均存在性能极限,设计新结构、采用新技术则是提升矢量传感器性能的另一条必要的途径。

1) 喇叭结构的应用

喇叭结构作为一种经典的声学放大结构,近年来在声矢量传感技术中也有所应用。2012 年, Donskoy 等^[117]从理论上证明了喇叭结构对声质点振速的放大作用;对于尺寸远小于波长的喇叭结构,在低于共振频率的宽频范围内可以提供接近理想的振速偶极子方向性和声压全

向响应,以及无振幅和相位畸变的灵敏度增益,且增益与结构尺寸正相关,在低频段更具优势^[118];另外,该结构还可以抑制流噪声和其他环境干扰,进一步提升接收信号质量^[119]。马鑫等^[120]则设计了如图6所示的喇叭型悬挂结构,在不影响余弦指向性的情况下,获得了5 dB左右的灵敏度提升,验证了该结构对声质点振速的放大效果。对传统声学结构进行分析并改进,研究其对声质点矢量接收的优势,这种思路也有益于矢量传感结构的创新。

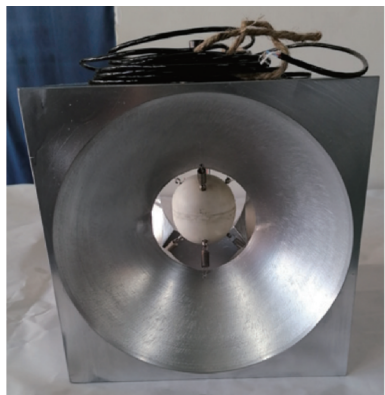


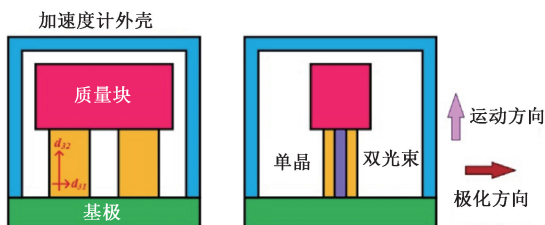
图6 具有振速放大作用的喇叭型悬挂结构^[120]

Fig. 6 Horn type suspending structure with particle velocity amplification^[120]

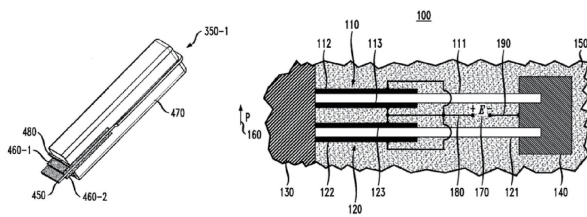


(a) 弯曲层合梁结构^[121]

(a) Bending laminated beam structure^[121]

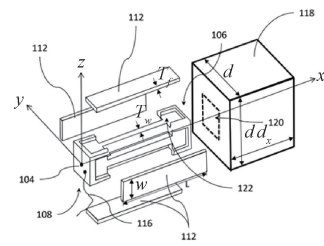


(c) 抗扭转功能的双臂弯曲梁^[75]
(c) Bending dual-beam structure^[75]

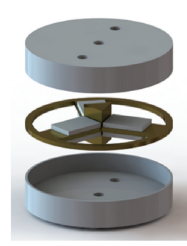


(b) 覆盖粘弹性材料的弯曲梁^[68,97]

(b) Bending beam covered by viscoelastic material^[68,97]



(d) 二维弯曲梁结构^[122]
(d) 2D dual beam vector sensor^[122]



(e) 弯曲式圈梁结构^[94]
(e) Bending ring-beam^[94]

图7 改进的弯曲梁结构

Fig. 7 Improved bending beam structure for vector sensor

使用常规金属材料并敷设粘弹性材料等改进手段,不外乎是调节传感结构的质量、刚度、阻尼等参数矩阵,使之满足特定的技术需求。新型无源材料、特别是具有特殊力学和声学性能的超材料尝试,可能会在简单结构形式下获得所需性能,从而降低工艺难度,不失为一种

2) 弯曲梁结构的改进

弯曲梁作为矢量传感器的经典结构形式,由于结构简单、易于加工等特性,至今仍被广泛研究和使用的。为了进一步提升低频灵敏度,研究重点已从简单结构优化转向考虑刚度和阻尼的复合型梁结构研究,如涂馨予等^[121]设计了弯曲层合梁(图7(a)),将金属梁的中部挖空,填入软性聚氨酯材料,达到降低刚度提升低响应目的;McConnell等^[68]采用的方法是在梁和晶片上包覆一层粘弹性材料(图7(b)),整体结构呈现分布式质量和阻尼,通过调节材料特性即可改变谐振频率和机械品质因数,从而获得所需的响应;也可将单臂弯曲梁沿激励方向复制,形成双臂弯曲梁,整体包覆粘弹性材料,增加水平阻尼,调节谐振频率^[97]。从实际应用出发,作者^[75]设计了一种双臂弯曲梁结构,两臂水平分布,共用一个质量块(图7(c)),不但可增加灵敏度,且具有更优的抗扭转干扰作用;美国海军也在近期公布了一种二维弯曲梁结构矢量传感器(图7(d)),可以在同一条臂上集成两个正交方向的弯曲梁^[122],有益于矢量传感器的小型化。不同于一端固定、一端自由的悬臂式弯曲梁,作者团队^[94]还设计了一种弯曲式圈梁结构加速度计,具有频带更宽的优势,参数调节也更加灵活(图7(e))。

可以探索的途径。

3) 复合棒结构的拓展

复合棒作为声学换能器最基本的结构形式,已广泛应用于各类超声、水声换能器。Roh等^[123]在2017年基于复合棒传感器(图8(a))提出了一种矢量定向方法:将

压电陶瓷堆四等分并采用不同方向极化(图 8(b)),以特定方式组合 4 路输出电压,由于理论上随着入射波角度的不同,4 种组合后的输出信号在时域上会呈现出特定的关系,将实际接收到的组合信号与其比对,就可以判断来波方向。该方法虽然在理论上可以实现对入射声波方位的估计,但对各组陶瓷堆的一致性和接收信噪比要求高,且工作频率难以降低,因此实施上还存在诸多限制。不过,该方法对中高频矢量传感器的设计、特别是主动式矢量声呐具有一定的参考价值。

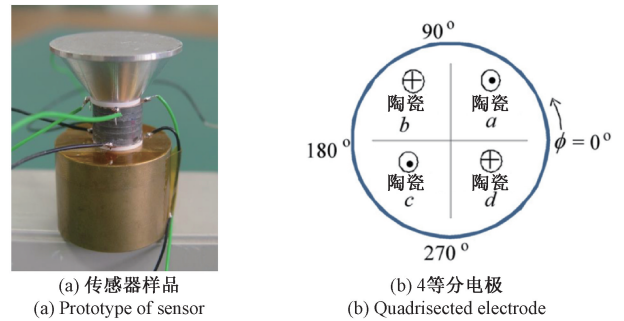


图 8 可用于定向的复合棒换能器^[123]
Fig.8 Tonpils sensor for estimating direction^[123]

4) 仿生结构与 MEMS 技术

MEMS 技术以其微纳尺度加工能力,可实现常规机械传感器难以制造的结构形式,更易接近生物结构特性,因而在仿生传感技术方面优势显著。Miles 等^[124]发现了奥米亚棕蝇具有独特的听觉结构(图 9(a)),可以在远小于波长的频率范围内实现声源定向,从而建立了鼓膜的耦合力学模型;该结构具有“摆动”和“弯曲”的两种振动形式(图 9(b)),两者的机械耦合放大了两侧鼓膜接收信号的时间差和幅度差,由于不同入射方向和入射频率时间差和幅度差具有明显的不同,依此特性即可对声源实现定向^[125]。美国海军研究生院则利用互成一定角度的两只该类型仿生 MEMS 传感器(图 9(c)),实现了空气声定向^[126];在进行了一系列敏感结构优化和封装改进后,将其用于水下声矢量信号接收(图 9(d)),获得了余弦指向性^[127-129]。中北大学科研人员^[130-131]模仿鱼类侧线器官,提出纤毛式矢量传感微结构(图 9(e)),利用压阻效应,将入射声波引起的纤毛结构应力变化转化为半导体材料的电阻变化,通过惠斯通电桥将其换为电压信号输出。

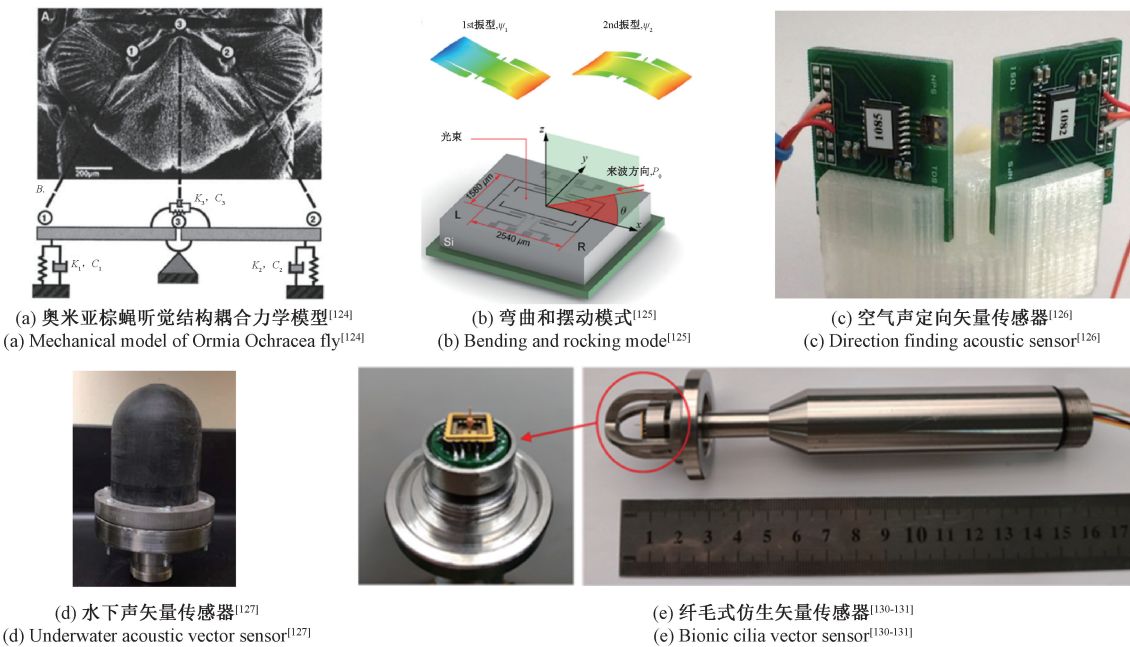


图 9 MEMS 仿生结构矢量传感器
Fig.9 MEMS technology based bionic vector sensor

相比压电式传感器,电容式传感器具有测量范围广、灵敏度高、动态响应快等特点。其敏感结构可以设计为变间隙、变面积或变介电常数等形式^[132],结合 MEMS 技术,可应用于惯性式矢量传感器的开发;Edalatfar 等^[133-134]于 2018 年基于 MEMS 技术开发了两种可变间隙的电容式加

速度型矢量传感器,具有宽频带和高灵敏度特性,并在微纳尺度器件上表现出较低的本底噪声。不过,电容式传感器的阻抗通常较大,且容易产生非线性效应,因此在设计时需特别考虑这些因素。Microflow 公司^[135]基于热声原理和 MEMS 技术,研发了水下矢量传感器“Hydroflow”

(图 10(b)), 赵龙江等^[136]跟踪研制了该类型传感器(图 10(c)), 张虹等^[137]设计了双圆柱增敏结构来改善水

下应用时灵敏度损失过大问题(图 10(d)), Yang 等^[138]则进一步研制了热丝式振速梯度矢量传感器。

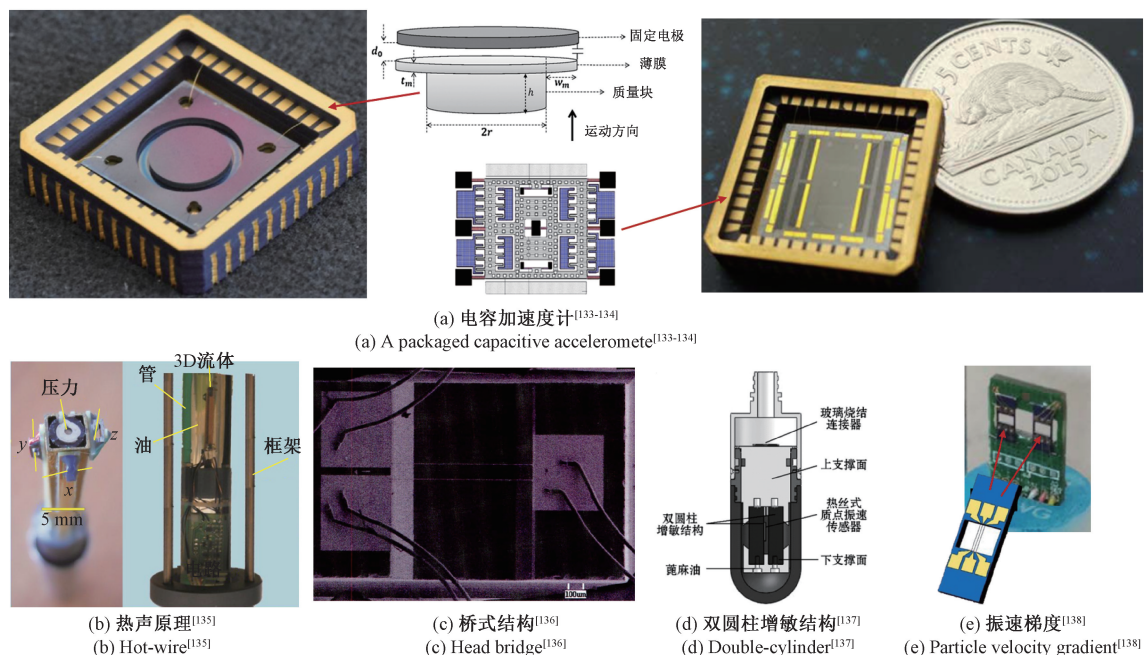


图 10 基于 MEMS 技术的矢量传感器

Fig. 10 Other types MEMS based vector sensor

MEMS 技术的核心优势是器件的小型、批量和低功耗,在声矢量传感器领域主要解决的是微型及阵列化问题,一致性高且综合成本低,特别是与微电子系统一体化设计与制造能力,在器件或阵列的芯片化方向独具优势,在产业化方面也颇具潜力。不过在实现器件微型化的同时,检测能力也随之降低,特别是在低频段,相信随着相关技术的发展,这种限制带来的影响可以减小。而在未来一定时期内,基于压电材料的矢量传感器仍会是实际工程应用的主流选择,MEMS 技术则会凭借其独特优势为声矢量传感器的创新提供强力支撑。

3 发展与挑战

在近十余年的发展中,矢量传感器技术新机理、新材料、新结构和新技术等方面均有所建树,其应用也日趋广泛深入,随之而来的短板也逐渐暴露,其中一些问题已经成为新时期的技术瓶颈,矢量传感器面临着新的发展和挑战。

3.1 甚低频声矢量传感技术

矢量传感器与频率无关的自然余弦指向性,使其在甚低频目标探测领域极具优势。一方面,甚低频接收信噪比过低是当前面临的主要问题,不论是何种类型的传感器,提升灵敏度、降低本底噪声均是解决该问题的核心

技术途径。针对当前广泛应用的加速度型矢量传感器,可采用新型有源功能材料从根本上提升甚低频综合接收性能,并结合“有源材料-传感结构-前置放大”系统级一体化建模,对甚低频噪声源进行识别,开展低噪声优化设计,或是开发谐振式器件来提升低频灵敏度;基于电涡流传感器的非惯性式声矢量传感器,由于直接检测中性浮力球在声波激励下产生的位移,因此较惯性式接收灵敏度更高,可能有利于甚低频信号接收^[139-140],但是否对甚低频水声信号接收有益仍有待验证;一般来说声压水听器在甚低频段的灵敏度远高于加速度型矢量传感器,可否借助这一特性提升甚低频矢量传感器性能,也是可以尝试研究的课题。另一方面,已证实水中甚低频声源可以激发弹性海底界面产生 Scholte 表面波,该类型波传播速度小、传播损失低,可以在海底-海水界面远距离传播,是一种可以用于目标探测的新型水-地声通道^[141-143]。不同于水中纵波质点的一维运动, Scholte 波的质点运动轨迹在深度-距离平面内为逆进的椭圆,为了获取准确的幅度和方位信息,就必须利用矢量传感器,而该如何针对性地设计传感结构、甚至重新思考传感机理,这是未来矢量传感器在该方向研究所面临的重要挑战。

3.2 深水高性能声矢量传感技术

深远海的探索与开发具有重要战略意义,对深水高性能矢量传感器的需求也日益紧迫。美国和俄罗斯早在

上世纪末就已在深海开展了基于矢量传感器的声学试验^[144-145],在 6 000 m 海深进行了可靠声路径研究^[42],这意味着已具备了深水矢量传感器制造能力。我国从 2010 年才逐步开展深水矢量传感器研制工作^[146-149],取得了一些经验,但性能及深度仍有待提升。对于深水矢量传感器,惯性式和声压梯度式所面临问题各不相同:梯度式传感器直接接收声压信号,有源功能材料和内部结构均要承受高静水压,这可能导致压电材料的电学及弹性性能、传感结构的力学性能发生改变,进而影响接收性能,甚至导致传感器失效;惯性式矢量传感器虽可采用高强度外壳或充液方式提高器件耐压能力,但会导致传感器平均密度增加或体积增大,进而引发接收性能下降和适装性变差等问题;同时,高强度外壳的透声性能较差,声压通道性能劣化也是不能回避的问题。

为了应对上述挑战,可以从多个研究方向开展探索:如选用声阻抗与水介质更加匹配的有源功能材料,并对传感器结构进行精细化设计,以增强梯度式矢量传感器的抗压能力;研制新型高强度透声无源材料,并结合新型加工与成型工艺,设计具有优异耐压透声性能的惯性式矢量传感器壳体;此外,针对传感器的结构特点,设计并优化制造工艺,以提升可靠性。这些均是有望使深水矢量传感器性能得到提升的技术路径。

3.3 针对不同平台的适用性设计

矢量传感器所搭载平台的振动干扰以及平台本身作为障板产生的散射效应等,都会对指向性、频率响应或本底噪声产生影响。随着矢量传感器在各类水下平台上广泛应用,各种新问题也随之衍生:如搭载于移动平台的矢量传感器会受到更强的流噪声干扰、用于空投平台的矢量传感器则需要应对入水时产生的高冲击过载、无人平台则需要矢量传感器小型化高性能等。不同平台的特性,会对矢量传感器的设计产生不同的影响,甚至会大幅度限制矢量传感器的性能。除了常规的减振降噪考虑外,还应结合平台特性,通过有源或无源材料的选择、传感结构优化等手段,进行特性化、精细化设计,降低平台特征干扰对接收性能的影响;此外,平台的影响会在硬件层面得到抑制,但终究不会消除,一方面从硬件层面增加不同干扰源的感知手段,另一方面从软件层面引入反馈机制,开发干扰抑制算法,以“软硬结合”的方式提升矢量传感器的适用性,进而突破平台特性限制,让声矢量传感器在更多领域发挥优势。

3.4 矢量传感测试新技术

矢量传感器的快速发展也对其测试校准能力提出了更高的要求。1) 甚低频校准问题:当前驻波管的实际下限校准频率仅为 5 Hz 左右,同时受限于管内尺寸,无法对体积较大的器件进行有效测量;静水压激励法虽然可

以在低至 0.01 Hz 的极低频条件下校准声压水听器^[150],但由于矢量传感器存在方向性,无法在其中进行有效校准;湖海等外场条件虽可在一定范围内降低测试频率下限,但环境干扰强、布放难度大、成本高等因素也导致不宜在其中广泛开展校准工作。利用激光等手段,或是基于实验室水池条件研究有限空间测量方法来拓展频率下限,可能是推进甚低频校准技术发展的有效途径。2) 深水条件下电声性能实时在线测量问题:如前文所述矢量传感器在高等静压条件下会有电声性能改变,因此在深海工作时性能必然与常压下标定的不同。压力釜等设备虽然可以模拟全海深压力情况,检测器件的耐静水压性能,但无法评估深海条件下工作的电声性能。开发既能兼顾模拟压力条件、又可激发标准声场的在线测量装置是当前急需推进的课题。3) 甚低频本底噪声测量问题:矢量传感器对振动信号敏感特性使得常规本底噪声测量手段已经无法在甚低频获得有效的结果,通过改善测量装置及研究测量方法来抑制低频环境干扰已被证明是提高测量精度的有效手段^[151-152],但如何进一步抑制甚低频段环境振动干扰仍是矢量传感器本底噪声测量技术要突破的瓶颈。“技术要发展,测量需先行”,在发展水声矢量传感技术的道路上,不应该也不能够忽视相应测量技术的发展,可以说测试能力水平反映了水声矢量传感器所能达到的性能极限。只有两者相辅相成,齐头并进,才能令水声矢量传感技术有更加长足的发展。

4 结 论

水声矢量传感器既不同于声压水听器,也不同于常规振动传感器,作为新型传感器技术,既包含了传感器学科的基础原理,又与水声及海洋学科密不可分。基于其独特的学科交叉特性和广泛的应用前景,本文梳理并总结了近年来水声矢量传感器技术的发展与挑战,旨在帮助研究人员更好地理解矢量传感器,为学术研究提供有益的思路和启示,加快推进技术瓶颈攻关,缩小国内外技术差距;也为从事相关应用研究的技术人员提供参考,以帮助其深入理解矢量传感器机理,进一步提升矢量声系统设计及实施能力,拓宽应用场景。

纵观国际学界,近十余年来对矢量传感技术的重视程度日益增加;以美国和俄罗斯为第一研究梯队的国家在新机理探索、新材料新技术应用和新领域拓展等方面仍具有前瞻性;欧洲多国、加拿大、韩国、印度等国家也紧跟发展,在器件研制和应用方面展开了跟踪研究工作。在大力推进自主创新、建设科技强国背景下,我国声矢量传感技术已经从学习、模仿进入到自主创新阶段,难点的逐一突破和工程化的不断深入,已令某些技术能力达到国际先进水平,但呈现的问题也更为复杂突出。作为新

兴矢量声呐的根基,水声矢量传感器在未来不但要建立更加完善的理论体系,结合不断出现的新材料、新技术和新工艺,借助一体化和精细化设计思想突破技术极限、提升器件综合性能,更要着眼于实际工程应用,广泛深入开展多领域交叉研究。水声矢量传感器技术不仅是我国水声创新能力的重要体现,也是提升国防技术水平和海洋开发能力的关键手段。未来,该技术必将取得更显著的进展,为水声及海洋事业的发展、为实现海洋强国和科技强国的目标作出积极贡献。

参考文献

- [1] 杨士莪. 研究海洋开发海洋-海洋环境及海洋资源调查、监测技术概述[J]. 舰船科学技术, 2008 (5): 17-19,27.
YANG SH E. Ocean expedition and ocean exploitation-A great review about techniques of ocean inspection and survey[J]. Ship Science and Technology, 2008 (5): 17-19,27.
- [2] 王军成, 孙继昌, 刘岩, 等. 我国海洋监测仪器装备发展分析及展望[J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 42-52.
WANG J CH, SUN J CH, LIU Y, et al. Research progress and prospect of marine monitoring instruments and equipment in China[J]. China Engineering Science, 2023, 25(3): 42-52.
- [3] 李整林, 余炎欣. 深海声学研究进展[J]. 科学通报, 2022, 67(2): 125-134.
LI ZH L, YU Y X. Overview of deep water acoustics[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(2): 125-134.
- [4] 杨德森, 朱中锐, 田迎泽. 矢量声呐技术理论基础及应用发展趋势[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(3): 185-192.
YANG D S, ZHU ZH R, TIAN Y Z. Theoretical bases and application development trend of vector sonar technology[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2018, 26(3): 185-192.
- [5] 莫喜平. 水声换能器发展中的技术创新[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 1-12,133.
MO X P. Technical innovations with progress of underwater transducers [J]. Journal of Shanxi Normal University Natural Science Edition, 2018, 46(3): 1-12, 133.
- [6] SILVIA M T, RICHARDS R T. A theoretical and experimental investigation of low-frequency acoustic vector sensors [C]. IEEE OCEANS 2002 Conference. Biloxi MI, 2002, 1886-1897.
- [7] 曾雄飞, 孙贵青, 李宇, 等. 单矢量水听器的几种 DOA 估计方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3): 499-507.
ZENG X F, SUN G Q, LI Y, et al. Several approaches of DOA estimation for single vector hydrophone[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(3): 499-507.
- [8] ZHANG J, XU X Y, CHEN ZH F, et al. High-resolution DOA estimation algorithm for a single acoustic vector sensor at low SNR [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2020, 68: 6142-6158.
- [9] NEHORAI A, PALDI E. Acoustic vector-sensor array processing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(9): 2481-2491.
- [10] 井岩, 沈毅, 冯乃章, 等. 确定性采样的矢量水听器阵列舰船目标方位估计[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1267-1276.
JING Y, SHEN Y, FENG N ZH, et al. Ship target bearing estimation based on deterministic sampling vector hydrophone array[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6): 1267-1276.
- [11] ABDI A, GUO H H, SUTTHIWAN P. A new vector sensor receiver for underwater acoustic communication[C]. OCEANS 2007, IEEE, 2007: 1-10.
- [12] WANG CH, YIN J W, HUANG D F, et al. Experimental demonstration of differential OFDM underwater acoustic communication with acoustic vector sensor[J]. Applied Acoustics, 2015, 91: 1-5.
- [13] 朱中锐, 吴亮. 基于矢量传感器的水声通信系统研制[J]. 电子测量技术, 2007 (8): 153-155.
ZHU ZH R, WU L. Development of underwater communication system based on vector sensor [J]. Electronic Measurement Technology, 2007 (8): 153-155.
- [14] HAN X, YIN J W, TIAN Y N, et al. Underwater acoustic communication to an unmanned underwater vehicle with a compact vector sensor array [J]. Ocean Engineering, 2019, 184(15): 85-90.
- [15] 李楠松, 朴胜春. 单矢量水听器被动测距方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2273-2282.
LI N S, PIAO SH CH. Research on passive ranging method with single vector hydrophone[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10): 2273-2282.
- [16] RAGHUKUMAR K, CHANG G, SPADA F, et al. A

- vector sensor-based acoustic characterization system for marine renewable energy[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(3): 187.
- [17] FELISBERTO P, SANTOS P, ZABEL F, et al. An AUV mounted vector-sensor for seismic surveying[C]. 2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). IEEE, 2018: 1-5.
- [18] MCDONALD M A. DIFAR hydrophone usage in whale research[J]. *Canadian Acoustics*, 2004, 32(2): 155-160.
- [19] MILLER B S, CALDERAN S, GILLESPIE D, et al. Software for real-time localization of baleen whale calls using directional sonobuoys: A case study on Antarctic blue whales[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2016, 139(3): EL83-EL89.
- [20] HORODYSKY A Z, BRILL R W, FINE M L, et al. Acoustic pressure and particle motion thresholds in six sciaenid fishes[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2008, 211(9): 1504-1511.
- [21] KAPLAN M B, MOONEY T A. Coral reef soundscapes may not be detectable far from the reef[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 31862.
- [22] 郭俊媛, 杨士莪, 朴胜春, 等. 基于超指向性多极子矢量阵的水下低频声源方位估计方法研究[J]. *物理学报*, 2016, 65(13): 187-200.
- GUO J Y, YANG S H E, PIAO S H C H, et al. Direction-of-arrival estimation based on superdirective multi-pole vector sensor array for low-frequency underwater sound sources[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(13): 187-200.
- [23] YANG S H E. Directional pattern of a cross vector sensor array[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 131: 3484.
- [24] GUO X J, YANG S H E, MIRON S. Low-frequency beamforming for a miniaturized aperture three-by-three uniform rectangular array of acoustic vector sensors[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2015, 138(6): 3873-3883.
- [25] 杨德森, ГОРДИЕНКО В А, 洪连进. 水下矢量声场理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 79.
- YANG D S, ГОРДИЕНКО В А, HONG L J. Underwater vector sound field theory and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2013: 79.
- [26] KENDALL J M. Underwater microphone. US, 2582994[P]. 1952-01-22.
- [27] LESLIE C B, KENDALL J M, JONES J L. Hydrophone for measuring particle velocity[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, 28(4): 711-715.
- [28] MOFFETT M B, TRIVETT D H, KLIPPEL P J, et al. A piezoelectric, flexural-disk, neutrally buoyant, underwater accelerometer[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 1998, 45(5): 1341-1346.
- [29] FRANKLIN J B, BARRY P J. Acoustic particle acceleration sensors[C]. *AIP Conference Proceedings: American Institute of Physics*, 1996, 368(1): 144-165.
- [30] BARNARD A R, HAMBRIC S A. Design and implementation of a shielded underwater vector sensor for laboratory environments[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, 130(6): EL387-EL391.
- [31] LAUCHLE G C, MCEACHERN J F, JONES A R, et al. Flow-induced noise on pressure gradient hydrophones[C]. *AIP Conference Proceedings: American Institute of Physics*, 1996, 368(1): 202-225.
- [32] LAUCHLE G C, WANG J, HOWE M S. Flow-induced noise on underwater pressure-vector acoustic sensors[C]. *IEEE OCEANS 2002 Conference*, 2002, 3: 1906-1910.
- [33] 时胜国, 于树华, 时洁, 等. 矢量拖线阵水听器流噪声响应特性[J]. *物理学报*, 2015, 64(15): 305-314.
- SHI S H G, YU S H H, SHI J, et al. Flow-induced noise calculations for vector hydrophones in towed arrays[J]. *Acta Phys Sin*, 2015, 64(15): 305-314.
- [34] MCCONNELL J A. Analysis of a compliantly suspended acoustic velocity sensor[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2003, 113(3): 1395-1405.
- [35] GABRIELSON T B, GARDNER D L, GARRETT S L. A simple neutrally buoyant sensor for direct measurement of particle velocity and intensity in water[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1995, 97(4): 2227-2237.
- [36] CASPALL J J, CAILLE G W, JARZYNSKI J, et al. (3, 1) Drive PVDF acoustic displacement sensor[C]. *AIP Conference Proceedings: American Institute of Physics*, 1996, 368(1): 134-143.
- [37] GENTILMAN R L, BOWEN L J, FIORE D F, et al. Injection molded 1-3 piezocomposite velocity sensors[C]. *AIP Conference Proceedings*, 1996, 368(1): 312-319.
- [38] BUTLER J L, BUTLER S C, MASSA D P, et al. Metallic glass velocity sensor[C]. *AIP Conference Proceedings*, 1996, 368(1): 101-133.

- [39] ROCKSTAD H K, KENNY T W, KELLY P J, et al. A microfabricated electron-tunneling accelerometer as a directional underwater acoustic sensor[C]. AIP Conference Proceedings, 1996, 368(1): 57-68.
- [40] VOHRA S T, DANVER B, TVETEN A, et al. Fiber optic interferometric accelerometers[C]. AIP Conference Proceedings: American Institute of Physics, 1996, 368(1): 285-293.
- [41] BROWN D A. Fiber optic accelerometers and seismometers[C]. AIP Conference Proceedings: Acoustic Particle Velocity Sensors: Design, Performance, and Applications. Mystic CT, 1996, 368(1): 260-273.
- [42] MCEACHERN J F, MCCONNELL J A, JAMIESON J, et al. ARAP-deep ocean vector sensor research array[C]. IEEE OCEANS 2006 Conference. Boston MA, 2006, 1948-1952.
- [43] SHIPPS J C, DENG K. A miniature vector sensor for line array applications [C]. Oceans 2003 MTS/IEEE Conference (OCEANS 2003), 2003, 5:2367-2370.
- [44] ABRAHAM B M. Ambient noise measurements with vector acoustic hydrophones [C]. IEEE OCEANS 2006 Conference, 2006. 1649-1655.
- [45] SHIPPS J C, ABRAHAM B M. The use of vector sensors for underwater port and waterway security[C]. ISA/IEEE Sensors for Industry Conference, 2004: 41-44.
- [46] CARPENTER R, SILVIA M, CRAY B A. The design of a broadband ocean acoustic laboratory: Detailed examination of vector sensor performance[C]. Unattended Ground, Sea, and Air Sensor Technologies and Applications VIII, 2006, 62310P.
- [47] 贾志富. 同振球型声压梯度水听器的研究[J]. 应用声学, 1997, 16(3): 20-25.
JIA ZH F. On pressure gradient hydrophone with co-oscillating sphere [J]. Journal of Applied Acoustics, 1997, 16(3): 20-25.
- [48] 贾志富. 采用双迭片压电敏感元件的声压梯度水听器[J]. 传感器技术, 1997, 16(1): 22-24.
JIA ZH F. Pressure gradient hydrophone based on piezoelectric bilaminar sensing elements[J]. Journal of Transducer Technology, 1997, 16(1): 22-24.
- [49] 陈洪娟, 杨士莪, 王智元, 等. 中频小型矢量水听器设计研究[J]. 应用声学, 2006, 25(6): 328-333.
CHEN H J, YANG SH E, WANG ZH Y, et al. Design a medium frequency-small size vector hydrophone[J]. Journal of Applied Acoustics, 2006, 25(6): 328-333.
- [50] 陈丽洁. 微型矢量水听器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
CHEN L J. The Study of minisize vector hydrophone[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.
- [51] 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 L J, YANG D S, SHI SH G, et al. Study on a medium three dimensional co-oscillating vector hydrophone[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(3): 79-84.
- [52] 杨德森, 孙心毅, 洪连进, 等. 基于矢量水听器的振速梯度水听器 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(1): 7-14.
- [53] YANG D S, SUN X Y, HONG L J, et al. The velocity gradient sensor based on the vector sensors[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(1): 7-14.
- [54] 杨德森, 战国辰, 刘星. 低噪声水下目标辐射噪声测量的新方法研究[C]. 中国声学学会 2001 年青年学术会议论文集, 2001, 245-247.
YANG D S, ZHAN G CH, LIU X. A new method to measure the radiated noise of low noise level submerged targets [C]. 2001 Youth Academic Conference of the Chinese Acoustical Society, 2001, 245-247.
- [55] 孙贵青, 杨德森, 时胜国. 基于矢量水听器的声压和质点振速的空间相关系数 [J]. 声学学报, 2003, 28(6): 509-513.
SUN G Q, YANG D S, SHI SH G. Spatial correlation coefficients of acoustic pressure and particle velocity based on vector hydrophone [J]. Acta Acustica, 2003, 28(6): 509-513.
- [56] 何元安, 贾志富. P-U 法声强测量及其应用研究[J]. 声学技术, 1999, 18(A11): 195-196.
HE Y AN, JIA ZH F. Study of the sound intensity measurement based on P-U method and its use [J]. Technical Acoustics, 1999, 18(A11): 195-196.
- [57] 熊水东, 罗洪, 胡永明, 等. 基于加速度传感的三维光纤矢量水听器实验研究[J]. 压电与声光, 2005, 27(5): 483-485.
XIONG SH D, LUO H, HU Y M, et al. Experimental research on three-dimensional fiber optic vector hydrophone based on acceleration sensing[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2005, 27(5): 483-485.
- [58] 孟洪, 周利生, 惠俊英. 组合矢量水听器及其成阵技术研究[J]. 声学与电子工程, 2003, 69(1): 15-20.

- MENG H, ZHOU L SH, HUI J Y. Research on combination vector hydrophone and its array technology[J]. *Acoustics and Electronics Engineering*, 2003, 69(1): 15-20.
- [58] 王艳, 姜亚浩, 陆玲兰. 一种组合二维矢量水听器[C]. 2002 年全国声学学术论文集. 桂林, 2002: 515-516.
- WANG Y, JIANG Y H, LU L L. A combined two dimensional vector hydrophone[C]. *Proceedings of the 2002 National Acoustical Congress*. Guilin, 2002: 515-516.
- [59] WHITAKER S, BARNARD A, ANDERSON G D, et al. Recurrent networks for direction-of-arrival identification of an acoustic source in a shallow water channel using a vector sensor[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2021, 150(1): 111-119.
- [60] SMITH K B, LEARY P, DEAL T, et al. Acoustic vector sensor analysis of the Monterey Bay region soundscape and the impact of COVID-19[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2022, 151(4): 2507-2520.
- [61] NICHOLS B, MARTIN J, VERLINDEN C, et al. Enhancing ambient noise correlation processing using vector sensors[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, 145(6): 3567-3577.
- [62] SHI J J, DOSSO S E, SUN D J, et al. Geoacoustic inversion of the acoustic-pressure vertical phase gradient from a single vector sensor[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, 146(5): 3159-3173.
- [63] QI Y B, ZHOU SH H, LIANG Y Q, et al. Passive broadband source depth estimation in the deep ocean using a single vector sensor[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, 148(1): EL88-EL92.
- [64] ZHOU H K, HONG L J. Motion of a rigid prolate spheroid in a sound wave field[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 136(2): EL179-EL184.
- [65] 周宏坤. 航空声纳浮标用矢量水听器及其悬挂技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- ZHOU H K. Research on airborne sonobuoy employed acoustic vector sensor and suspension technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [66] KELTIE R F. Analysis and design of an elastically coated acoustic velocity sensor[C]. *The 21st International Congress on Sound and Vibration*. Beijing, 2014, 4: 3218-3225.
- [67] 袁文俊. 声学计量[M]. 北京: 原子能出版社, 2002: 204.
- YUAN W J. *Acoustic metrology*[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2002: 204.
- [68] MCCONNELL J A, ABRAHAM B M, JENSEN S C, et al. Acoustic vector sensor having an accelerometer with in-band resonant frequency. US, 9016129B2[P]. 2015-04-28.
- [69] SHERMAN C H, BUTLER J L. *Transducers and arrays for underwater sound*[M]. New York: Springer, 2007: 176-177.
- [70] GABRIELSON T B. Fundamental noise limits for miniature acoustic and vibration sensors[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1995, 117(4): 405-410.
- [71] SCHLOSS F. Accelerometer noise[J]. *Sound and Vibration*, 1993, 27: 22-22.
- [72] 李智. 低噪声矢量水听器设计及其校准方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- LI ZH. Design and calibration of low-noise vector hydrophone[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [73] 李智, 杨士莪, 陈洪娟. 压电矢量传感器的低噪声设计[J]. *声学学报*, 2018, 43(4): 432-444.
- LI ZH, YANG SH E, CHEN H J. Low-noise design of piezoelectric vector sensor[J]. *Acta Acustica*, 2018, 43(4): 432-444.
- [74] LI ZH, YANG SH E, WANG S H, et al. Development of a new kind low frequency low-noise vector sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 301: 111743.
- [75] LI ZH. Development of low-noise vector sensor using bending mode relaxor ferroelectric single crystal materials[C]. *5th Underwater Acoustics Conference and Exhibition. Hersonissos CRETE*, 2019, 955-961.
- [76] MCCONNELL J A, JENSEN S C, RUDZINSKY J P. Forming first-and second-order cardioids with multimode hydrophones[C]. *OCEANS 2006. IEEE*, 2006: 1-6.
- [77] COLE J E. Multipole hydrophone[C]. *AIP Conference Proceedings: Acoustic Particle Velocity Sensors; Design, Performance, and Applications*, 1996, 368(1): 328-334.
- [78] CRAY B A, EVORA V M, NUTTALL A H. Highly directional acoustic receivers[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2003, 113(3): 1526-1532.

- [79] BASTYR K J, LAUCHLE G C, MCCONNELL J A. Development of a velocity gradient underwater acoustic intensity sensor [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 106(6): 3178-3188.
- [80] 孙心毅. 基于矢量水听器的高指向性二阶水听器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
SUN X Y. Research of highly directional second-order hydrophone based on vector hydrophones [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- [81] 汪勇, 杨益新, 马远良. 圆环形声学传感器阵列超指向性理论及方法 [J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(5): 297-309, 318.
WANG Y, YANG Y X, MA Y L. Discussion about the superdirective beamforming theory and methods of circular acoustic sensor arrays [J]. Torpedo Technology, 2017, 25(5): 297-309, 318.
- [82] LAWRENCE J S, GEE K L, NEILSEN T B, et al. Highly directional pressure sensing using the phase gradient [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 144(4): EL346-EL352.
- [83] ZALALUTDINOV M K, PHOTIADIS D M, SZYMCZAK W G, et al. Mesh-type acoustic vector sensor [J]. Journal of Applied Physics, 2017, 122(3): 034504.
- [84] ZALALUTDINOV M K, PHOTIADIS D M, BUCARO J A, et al. Floating base vector sensor. US, 1287508B2 [P]. 2022-03-29.
- [85] YANG D P, PAN L ZH, MU T T, et al. The fabrication of electrochemical geophone based on FPCB process technology [J]. Journal of Measurements in Engineering, 2017, 5(4): 235-239.
- [86] LI ZH, CHANG W H, GAO CH CH, et al. A MEMS acoustic particle velocity sensor based on electrochemical method [C]. 2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems, Belfast, 2018, 1080-1083.
- [87] ZHONG AN X, CHEN M W, LU Y L, et al. A MEMS-based co-oscillating electrochemical vector hydrophone [J]. Micromachines, 2022, 13(1): 143.
- [88] POWERS J M, MOFFETT M B, NUSSBAUM F. Single crystal naval transducer development [C]. Proceedings of the 12th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, 2000, 1: 351-354.
- [89] DENG K. Acoustic vector sensor. US, 0034519A1 [P]. 2005-02-17.
- [90] DENG K. Underwater acoustic vector sensor using transverse-response free, shear mode, PMN-PT crystal. US, 7066026B2 [P]. 2006-06-27.
- [91] DENG K, SCHLOSS F, WLODKOWSKI P A, et al. Method and apparatus for strain amplification for piezoelectric transducers. US, 6715363B1 [P]. 2004-04-06.
- [92] 尹义龙, 李俊宝, 莫喜平. 弛豫铁电单晶压差水听器有限元设计 [J]. 声学与电子工程, 2012, 107(3): 32-34.
YIN Y L, LI J B, MO X P. Finite element design of relaxor ferroelectric single crystal differential pressure hydrophone [J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2012, 107(3): 32-34.
- [93] 尹义龙, 李俊宝, 邢建新, 等. 弛豫铁电单晶弯曲梁矢量水听器研究 [J]. 声学学报, 2014, 39(2): 243-250.
YIN Y L, LI J B, XING J X, et al. Research on the relaxor ferroelectric single crystal flexural beam vector hydrophone [J]. Acta Acustica, 2014, 39(2): 243-250.
- [94] LI ZH, QU Y D, WEN SH L, et al. Development of a high-performance piezoelectric single-crystal accelerometer by using gradient optimization method [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(22): 27102-27110.
- [95] WLODKOWSKI P A, SCHLOSS F. Advances in acoustic particle velocity sensors [C]. Proceedings of the Workshop on Directional Acoustic Sensors. Newport RI, 2001.
- [96] GUO J Y, LI L W, PIAO SH CH, et al. Very low frequency three-dimensional beamforming for a miniaturized aperture acoustic vector sensor array [J]. JASA Express Letter, 2022, 2: 054805.
- [97] MCCONNELL J A. Dual cantilever beam relaxor-based piezoelectric single crystal accelerometer. US, 8816570B1 [P]. 2014-08-26.
- [98] MCCONNELL J A. Relaxor-based piezoelectric single crystal accelerometer. US, 8915139B1 [P]. 2014-12-23.
- [99] KIM J, PYO S, ROH Y. Analysis of a thickness-shear mode vibrator for the accelerometer in vector hydrophones [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 266: 9-14.
- [100] PYO S, KIM J, KIM H, et al. Development of vector hydrophone using thickness-shear mode piezoelectric single crystal accelerometer [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 283: 220-227.
- [101] CHO Y, JE Y, JEONG W B. A miniaturized acoustic vector sensor with PIN-PMN-PT single crystal cantilever beam accelerometers [J]. Acta Acustica, 2020, 4(5): 17.

- [102] LI F, CABRAL M J, XU B, et al. Giant piezoelectricity of Sm-doped $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ single crystals[J]. *Science*, 2019, 364(6437): 264-268.
- [103] 李飞, 张树君, 徐卓. 压电效应—百岁铁电的守护者[J]. *物理学报*, 2020, 69(21): 73-85.
LI F, ZHANG SH J, XU ZH. Piezoelectricity-An important property for ferroelectrics during last 100 years[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(21): 73-85.
- [104] KIM J, YANG S, OH K, et al. A piezoelectric micro-cantilever acoustic vector sensor designed considering fluid-structure interaction[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2021, 150(1): 257-269.
- [105] YEON A, YEO H G, ROH Y, et al. A piezoelectric micro-electro-mechanical system vector sensor with a mushroom-shaped proof mass for a dipole beam pattern[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 332(1): 113129.
- [106] 李俊红, 魏建辉, 马军, 等. ZnO 薄膜硅微压电矢量水听器[J]. *声学学报*, 2016, 41(3): 273-280.
LI J H, WEI J H, MA J, et al. ZnO thin film piezoelectric micromachined vector hydrophone[J]. *Acta Acustica*, 2016, 41(3): 273-280.
- [107] ABDUL B, MASTRONARDI V M, QUALTIERI A, et al. Design, fabrication and characterization of piezoelectric cantilever MEMS for underwater application[J]. *Micro and Nano Engineering*, 2020, 7: 100050.
- [108] ABDUL B, MASTRONARDI V M, QUALTIERI A, et al. Sensitivity and directivity analysis of piezoelectric ultrasonic cantilever-based MEMS hydrophone for underwater applications[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(10): 784.
- [109] WANG F F, LUO L H, ZHOU D, et al. Complete set of elastic, dielectric, and piezoelectric constants of orthorhombic $0.71\text{ Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-}0.29\text{ PbTiO}_3$ single crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(21): 212903.
- [110] LIU X ZH, ZHANG SH J, LUO J, et al. Complete set of material constants of $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ single crystal with morphotropic phase boundary composition[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(7): 074112.
- [111] FEI CH L, LIU X L, ZHU B P, et al. AlN piezoelectric thin films for energy harvesting and acoustic devices[J]. *Nano Energy*, 2018, 51: 146-161.
- [112] WANG ZH L. Zinc oxide nanostructures: Growth, properties and applications [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2004, 16(25): R829-R858.
- [113] SHUNG K K, CANNATA J M, ZHOU Q F. Piezoelectric materials for high frequency medical imaging applications: A review[J]. *Journal of Electroceramics*, 2007, 19: 141-147.
- [114] YOU Y M, LIAO W Q, ZHAO D W, et al. An organic-inorganic perovskite ferroelectric with large piezoelectric response[J]. *Science*, 2017, 357(6348): 306-309.
- [115] LIAO W Q, ZHAO D W, TANG Y Y, et al. A molecular perovskite solid solution with piezoelectricity stronger than lead zirconate titanate[J]. *Science*, 2019, 363(6432): 1206-1210.
- [116] 熊昱安, 冯子杰, 景政印, 等. 具有钙钛矿结构的分子铁电体研究进展[J]. *科学通报*, 2020, 65(10): 916-930.
XIONG Y AN, FENG Z J, JING ZH Y, et al. Recent progress in molecular ferroelectrics with perovskite structure. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(10): 916-930.
- [117] DONSKOY D M, CRAY B A. Acoustic particle velocity horns [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 131(5): 3883-3890.
- [118] DONSKOY D M. Directionality and gain of small acoustic velocity horns[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, 142(6): 3450-3458.
- [119] DONSKOY D M, HASSAN S E. Sound amplification and flow noise reduction with acoustic velocity horns[C]. *Proceedings of 167th Meeting of the Acoustical Society of America*. Providence RI, 2014, 21(1), 4896037.
- [120] 马鑫, 洪连进, 吴鸿博. 一种小尺寸惯性式矢量水听器的振速放大结构设计[J]. *中国惯性技术学报*, 2021, 29(3): 381-386.
MA X, HONG L J, WU H B. Design of vibration velocity amplification structure of a small size inertial vector sensor[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2021, 29(3): 381-386.
- [121] 涂馨予, 李俊宝, 刘晓迪. 用于矢量水听器的低频高灵敏度层合梁加速度传感器[J]. *声学学报*, 2021, 46(4): 623-632.
TU X Y, LI J B, LIU X D. Low-frequency and high-sensitivity laminated beam-based acceleration sensors for vector hydrophones[J]. *Acta Acustica*, 2021, 46(4): 623-632.
- [122] CIPOLLA K M, TRAWEEK C M. Compact dual beam vector sensor. US, 102171[P]. 2020-04-21.

- [123] ROH Y, LIM Y. Tonpilz-type vector sensor for the estimation of underwater sound wave direction[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 144(5): 2801-2810.
- [124] MILES R N, ROBERT D, HOY R R. Mechanically coupled ears for directional hearing in the parasitoid fly *Ormia ochracea*[J]. The Journal of the Acoustical Society of America. 1995, 98(6): 3059-3070.
- [125] KUNTZMAN M L, HALL N A. Sound source localization inspired by the ears of the *Ormia ochracea*[J]. Applied Physics Letters. 2014, 105(3): 033701.
- [126] WILMOTT D, ALVES F, KARUNASIRI G. Bio-inspired miniature direction finding acoustic sensor[J]. Scientific Reports. 2016, 6: 29957.
- [127] COLLINS J D. Bio-inspired MEMS direction finding underwater acoustic sensor[D]. California: Naval Postgraduate School, 2017.
- [128] RE DA G E. MEMS underwater direction finding acoustic sensor[D]. California: Naval Postgraduate School, 2018.
- [129] PEYROT A A E. Packaging and characterization of bio-inspired underwater MEMS directional sound sensor[D]. California: Naval Postgraduate School, 2019.
- [130] XUE CH Y, CHEN SH, ZHANG W D, et al. Design, fabrication, and preliminary characterization of a novel MEMS bionic vector hydrophone[J]. Microelectronics Journal, 2007, 38(10/11): 1021-1026.
- [131] ZHU SH, ZHANG G J, SHANG ZH ZH, et al. Design and realization of cap-shaped cilia MEMS vector hydrophone[J]. Measurement, 2021, 183: 109818.
- [132] 洪连进. 声学传感器技术及工程应用[M]. 高等教育出版社, 2018: 157-158.
- HONG L J. Techniques and engineering applications of acoustical sensors[M]. Higher Education Press, 2018: 157-158.
- [133] EDALATFAR F, YAGHOOTKAR B, QURESHI A Q A, et al. Development of a micromachined accelero-meter for particle acceleration detection[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 280: 359-367.
- [134] EDALAFAR F, AZIMI S, QURESHI A Q A, et al. A wideband, low-noise accelerometer for sonar wave detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 18(2): 508-516.
- [135] AKAL T, DE BREE H E, GUERRINI P, et al. Hydroflown: MEMS-based underwater acoustical particle velocity sensor[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 123: 3006.
- [136] 赵龙江, 冯杰, 冯晖, 等. 用于空气声测量的质点振速传感器[J]. 声学学报, 2015, 40(4): 598-606.
- ZHAO L J, FENG J, FENG H, et al. A particle velocity sensor for airborne sound measurement[J]. Acta Acustica, 2015, 40(4): 598-606.
- [137] 张虹, 郭世旭, 王月兵, 等. 基于双圆柱增敏结构的热丝式 MEMS 矢量水听器研制[J]. 仪表技术与传感器, 2018(12): 105-110.
- ZHANG H, GUO SH X, WANG Y B, et al. Research on hot-wire MEMS vector hydrophone with sensitized structure of double-cylinder[J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(12): 105-110.
- [138] YANG L M, ZHU ZH ZH, CHANG W H, et al. A compact acoustic particle velocity gradient sensor based on MEMS hot-wire sensor chips[C]. 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers). Orlando FL, 2021: 50-53.
- [139] DONSKOY D M, CRAY B A. Eddy-current non-inertial displacement sensing for underwater infrasound measurements[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 129(6): EL254-EL259.
- [140] LI Y, HONG L J. Research of eddy current sensors applied to displacement-based vector hydrophones[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 331: 112968.
- [141] 张海刚, 朴胜春, 杨士莪. 水中甚低频声源激发海底地震波的传播[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(7): 879-887.
- ZHANG H G, PIAO SH CH, YANG SH E. Propagation of seismic waves caused by underwater infrasound[J]. Journal of Harbin Engineering University. 2010, 31(7): 879-887.
- [142] 孟路稳, 罗夏云, 程广利, 等. 海底地震波波动成分及传播特性分析[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(12): 1627-1633.
- MENG L W, LUO X Y, CHENG G L, et al. Components and propagation characteristics of seabed seismic waves[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2018, 52(12): 1627-1633.
- [143] DUNCAN A J, GAVRILOV A N, MCCAULEY R D, et al. Characteristics of sound propagation in shallow water over an elastic seabed with a thin cap-rock layer[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(1): 207-215.
- [144] ADAIR R G, ORCUTT J A, FARRELL W E. Infrasonic

- seismic and acoustic measurements in the deep ocean[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1988, 13(4): 245-253.
- [145] SHCHUROV V A. Coherent and diffusive fields of underwater acoustic ambient noise[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 90(2): 991-1001.
- [146] 杨松涛. 深水矢量水听器的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- YANG S T. The research of deep-water vector hydrophone[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [147] 孙梅, 周士弘, 李整林. 一种基于大深度矢量水听器的深海直达波区近水面声源定位方法[J]. 中国科学:物理学,力学,天文学, 2016, 46(9): 59-66.
- SUN M, ZHOU SH H, LI ZH L. Near-surface source localization in the direct-arrival zone in deep water using a deep-located vector sensor[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2016, 46(9): 59-66.
- [148] 王文龙, 孙芹东, 王超, 等. 大深度复合共振式矢量水听器设计[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(3): 149-158.
- WANG W L, SUN Q D, WANG CH, et al. Design of pressure-resistant structure for large depth co-vibrating vector hydrophone[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(3): 149-158.
- [149] 马鑫, 洪连进, 吴鸿博. 深海惯性式组合型矢量水听器设计[J]. 中国惯性技术学报, 2022, 30(2): 229-234.
- MA X, HONG L J, WU H B. Design of a deep sea inertial combined vector sensor[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2022, 30(2): 229-234.
- [150] 陈毅, 赵涵, 袁文俊. 水下电声参数测量[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2017. 92.
- CHEN Y, ZHAO H, YUAN W J. Measurements of underwater electroacoustic parameters[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2017. 92.
- [151] 李智, 陈洪娟, 张虎. 双通道传递函数法测量矢量水听器自噪声[J]. 声学技术, 2017, 36(6): 602-605.
- LI ZH, CHEN H J, ZHANG H. Self-noise measurement of vector sensor by using dual-channel transfer function method[J]. Technical Acoustics, 2017, 36(6): 602-605.
- [152] LI ZH, CHEN H J. Method for measuring self-noise of vector hydrophones[J]. Journal of Marine Science and Application, 2017, 16(3): 370-374

作者简介



李智(通信作者), 2009年、2011年和2017年于哈尔滨工程大学分别获得学士、硕士和博士学位, 现为哈尔滨工程大学水声工程学院副教授, 主要研究方向为水声传感器与测试计量。

E-mail: zhili@hrbeu.edu.cn

Li Zhi (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Harbin Engineering University in 2009, 2011, and 2017, respectively. He is currently an associate professor in the College of Underwater Acoustic Engineering at Harbin Engineering University. His main research interests include underwater acoustic sensors and measurement.