

[引用格式] 万星甫, 周新跃, 王思远, 等. 面向水下流场感知的仿海豹胡须传感器设计与应用研究进展 [J]. 水下无人系统学报, 2025, 33(5): 795-817.

面向水下流场感知的仿海豹胡须传感器设计与应用研究进展

万星甫¹, 周新跃¹, 王思远¹, 吴梦维¹, 徐鹏^{1,2}, 徐敏义¹

(1. 大连海事大学 轮机工程学院 大连市海洋微纳能源与自驱动系统重点实验室, 辽宁 大连, 116026; 2. 北京大学 工学院, 北京, 100871)

摘要: 海洋环境感知, 尤其是水下流场的高精度感知技术, 在海洋资源勘探、自主水下航行器(AUV)作业及国防安全等领域具有关键意义。然而, 在低能见度和复杂背景扰动下传统光学与声学感知手段在性能与适应性上均面临严峻挑战。海豹胡须的波浪状几何结构能够显著抑制背景流场产生的涡激振动、提升信噪比, 毛囊复合体则赋予其对微弱扰动的高灵敏检测能力, 仿海豹胡须感知技术被视为突破现有感知技术瓶颈的重要方向。本文系统回顾了该技术领域的发展现状, 重点包括: 海豹胡须感知机理的生物学基础; 基于光学、电阻、电容、压电与摩擦电等原理的仿生胡须结构设计、材料选型与性能优化策略; 以及其在固定平台和水下移动平台中的典型应用与实证效果。最后, 归纳了仿海豹胡须感知技术在稳定性、微型化与信号处理等方面面临的主要挑战, 旨在为流场仿生感知技术的理论研究与工程实践提供系统参考与技术支撑。

关键词: 水下流场感知; 海豹胡须; 仿生感知技术; 固定平台; 移动平台

中图分类号: TJ630; U663

文献标识码: R

文章编号: 2096-3920(2025)05-0795-23

DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2025-0102

Design and Application Progress of Biomimetic Seal Whisker Sensors for Underwater Flow Field Sensing

WAN Xingfu¹, ZHOU Xinyue¹, WANG Siyuan¹, WU Mengwei¹, XU Peng^{1,2}, XU Minyi¹

(1. Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian Key Laboratory of Marine Micro/Nano Energy and Selfpowered Systems, Dalian 116026, China; 2. Engineering College, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Marine environment sensing, especially high-precision underwater flow field sensing, is vital for marine resource exploration, autonomous undersea vehicle(AUV) operations, and national defense. However, under low visibility and complex disturbances, conventional optical and acoustic sensing methods face severe limitations in performance and adaptability. Seal whiskers' undulated geometry suppresses vortex-induced vibrations(VIVs) and enhances signal-to-noise ratio(SNR), while the follicle-sinus complex(FSC) enables sensitive detection of subtle hydrodynamic cues. Biomimetic whisker sensors have emerged as a promising solution to current bottlenecks in sensing technologies. This review systematically summarized recent progress in this field, covering the biological sensing principles of seal whiskers, as well as the design strategies, material choices, and performance optimization of biomimetic sensors based on optical, resistive, capacitive, piezoelectric, and triboelectric mechanisms. Representative applications and effects on fixed and mobile platforms were discussed, followed by an overview of challenges in stability, miniaturization, and signal processing. This work aims to provide a systematic reference

收稿日期: 2025-08-08; 修回日期: 2025-09-02; 录用日期: 2025-09-09.

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52401399); 中国博士后科学基金面上项目(2025M770891); 汉江实验室开放基金(KF2024018).

作者简介: 万星甫(1997-), 男, 在读博士, 主要研究方向为水下触觉传感.

OPEN ACCESS

and technical support for the theoretical research and engineering practice of biomimetic flow sensing technologies.

Keywords: underwater flow field sensing; seal whisker; biomimetic sensing technology; fixed platform; mobile platform

0 引言

海洋作为全球资源开发的重要战略疆域,其综合利用高度依赖于水下环境感知技术的支持。其中,水下流场感知作为水下感知的核心内容,在海洋资源勘探、自主水下航行器(autonomous undersea vehicle, AUV)作业与国防安全等领域发挥着不可替代的作用^[1-3]。然而,海洋环境的高压、低能见度及复杂背景扰动等极端工况,对现有感知技术提出了严峻挑战^[4]。传统光学成像与声学探测方法在水下环境中易受光线、水质和多路径效应干扰,精度与稳定性难以保障^[5]。随着AUV在近底航行、抵近探测等任务中的广泛应用,亟需发展具备高精度、强适应性的近场流场感知技术,以突破传统方案的性能瓶颈^[6]。

自然界中多种海洋生物在长期进化过程中形成了适应复杂水下环境的高效感知系统。这些生物感知器官通常具备优异的信噪比,可有效抑制环境背景噪声,将微弱流场扰动转化为可识别信号,为其导航、觅食与避障等行为提供支持^[7-8]。例如,鱼类侧线系统^[9]和鳄鱼的圆顶压力感受器^[10],均通过高灵敏度的机械感受机制实现对水体扰动的精确感知。其中,鳍足类海洋哺乳动物表现出卓越的感知能力,其解剖结构高度适应海洋环境:其流线型体型有助于降低阻力^[11],近球形轮廓可减少热量散失^[12],尤其是真海豹科动物的胡须感知系统,通过独特的波浪状构型抑制本体振动噪声,结合毛囊窦复合体(follicle-sinus complex, FSC)提升对尾流扰动的感知灵敏度,为仿生传感器设计提供了关键生物原型^[13-14]。

基于生物感知系统的优异性能,仿生感知技术成为突破传统水下感知技术局限性的重要方向^[15-17]。其中,仿海豹胡须传感器通过模拟海豹胡须的几何结构与感知机制,在流场捕获与噪声抑制方面展现出显著优势。相关研究已逐步揭示其核心工作原理,并在水池实验、平台集成与目标识别等应用中进行了初步验证,展现出良好的工程化发展潜力,为复杂海洋环境下的智能感知系统提供了

重要支撑^[18-20]。

文章旨在系统综述仿海豹胡须传感器在水下流场感知领域的研究进展与工程应用,重点梳理其感知机理解析、功能材料选择及结构优化策略等关键技术路径,分析其在实际应用中的适应性表现与当前面临的主要挑战,并展望未来发展方向,期为该领域的理论研究与技术落地提供系统参考。

1 海豹胡须流场感知机理

海豹作为一类典型的具有卓越水下感知能力的海洋哺乳动物,即便在低光甚至完全黑暗的环境中,仍能高效完成捕食和导航任务^[21-23]。早期生物学观察发现,美国与芬兰海域曾记录到多例失明但长期健康存活的海豹个体,这一现象说明其在觅食过程中并不完全依赖视觉系统^[24-25]。随后的一系列研究逐步揭示,海豹的胡须系统是其关键的水下感知器官,具备极高的灵敏度,能够感知水体中极微弱的扰动信号,最低可检测约1 mm/s的振荡流速^[14]。

早在1979年,Renouf^[26-27]便提出海豹可能依赖胡须感知并追踪猎物的假设,此后众多实验陆续证实了该观点。2007年,在Dehnhardt^[14,28]团队早期工作的基础上,Schulte-Pelkum等^[29]进一步优化了实验设计:通过一只海豹游动制造尾流场,并训练另一只海豹在视觉与听觉完全屏蔽的条件下进行尾流追踪(如图1(a)所示)。海豹在该任务中成功率高达80%~90%,如图1(b)跟踪轨迹形态所示,其中63%的试验中沿直线路径准确跟随尾流,34%的试验则呈现之字形轨迹,多次与尾流交汇,展现出卓越的涡流感知能力。

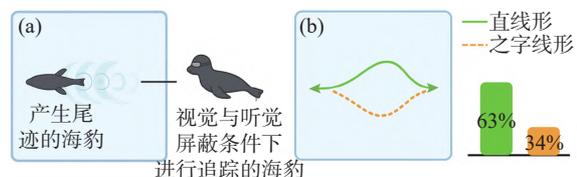


图1 感官剥夺条件下的海豹行为学研究

Fig. 1 Behavioral studies of seals under sensory deprivation conditions

海豹的高灵敏水下感知能力主要归因于其胡

须所具备的独特结构特征。2010年, Hanke 等^[30]首次通过实验证实, 港海豹和灰海豹胡须表面的波浪状几何构型(见图 2(a))可有效破坏尾流中规则的涡街结构, 从而显著抑制涡激振动(vortex-induced vibrations, VIVs)的产生。该波纹结构能削弱尾流中涡旋的相干性, 使得因自体运动诱发的流动扰动远离胡须本体, 并改善其尾流区域的压力分布对称性, 最终显著提升信噪比并增强流动感知精度。图 2(b)所示左图为不同截面形状物体的流场涡结构对比, 右图更加清晰地展现了海豹胡须截面的细微涡结构(其中 Ω 表示展向涡量)。由图可见, 该机制已通过粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)和计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)手段得到验证。

除宏观几何形态外, 海豹胡须的微观结构也在其感知能力中发挥关键作用。作为高度复杂的感知单元, 海豹的胡须内部包含 FSC(如图 2(c)所示)、高密度的神经末梢网络以及多种机械感受器, 构成了高效的信息获取系统。海豹的 FSC 并非随机分布, 而是高度集中于其吻部(口鼻部)的关键区域, 形成具有特定分布特征的流场探测阵列。其分布范围以上唇为中心, 向两侧脸颊及下颌前端延伸, 覆盖吻部前 2/3 区域。部分海豹物种(如象海豹)的

FSC 还可延伸至鼻孔周围, 进一步扩大其探测范围。在数量与排列方面, 不同种类海豹的 FSC 数量介于 100~200 根之间, 呈对称弧形排列(左右各 50~100 根), 构成扇形探测区, 可覆盖前方及两侧 180°范围的流场, 有效避免了探测盲区。就形态适配而言, 露出体表的胡须(毛干)长度约为 5~15 cm, 直径约 1~3 mm, 截面多呈椭圆形。Smodlaka 等^[31]通过光学显微镜和透射电镜研究发现, 北象海豹胡须的毛囊由不规则致密缔结组织形成的真皮囊包裹, 其底部真皮乳头区富含毛细血管。毛囊结构自外向内依次为外根鞘、内根鞘和角质层, 其中外根鞘在基底部尤为厚实, 周围分布有多个血窦, 包括海绵窦、环窦与下海绵窦。

当水下目标运动引发局部涡流扰动时, 海豹首先依靠胡须表面的波浪结构有效屏蔽因自身运动产生的干扰信号, 从而提高流动信号的信噪比; 随后, FSC 内的机械感受器覆盖静态压力及不同频率振动等多种信号维度, 能够将流场扰动所引发的毛干运动经窦腔液压放大后, 由高密度神经末梢网络(受三叉神经支配, 每个 FSC 连接有 200~400 根传入纤维)编码为电信号, 并快速传入中枢系统, 经大脑皮层解析, 最终实现对微弱流场扰动的灵敏检测与精确识别, 为其水下猎物定位与追踪提

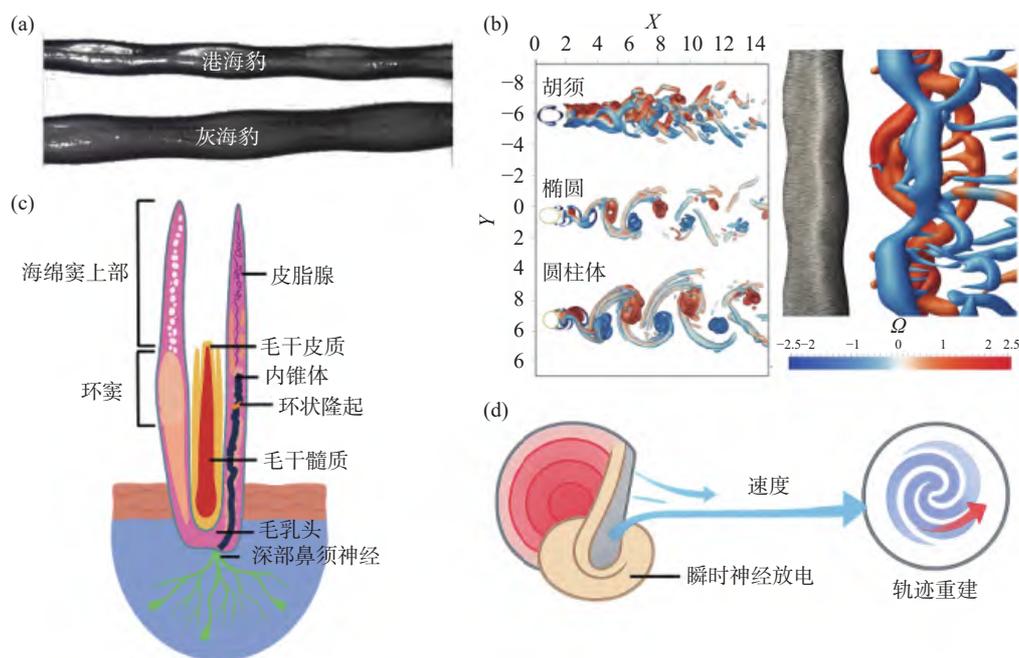


图 2 海豹胡须感知机制

Fig. 2 Perception mechanisms of seal whiskers

供高效感知支持。海豹胡须机械感知过程见图2(d)。

2 仿海豹胡须传感器设计

仿海豹胡须传感器作为触觉感知领域的一项关键突破,其设计灵感源于海豹在复杂水下环境中展现出的卓越流场感知能力。该类传感器通过感知胡须结构在外部扰动下的应变响应,进而解析流场信息。根据感知机制的不同,当前研究主要分为光学式、电阻式、电容式、压电式与摩擦电式5类,下文将分别梳理各类传感器的关键进展与技术特征。

2.1 光学式仿海豹胡须传感器

光学传感技术是目前应用最广泛的感知手段

之一,其关键传感元件成熟度已取得显著进展^[32-33]。基于该技术构建仿生胡须传感器,具备响应灵敏、抗电磁干扰强等优势,兼具良好的工程可行性。根据不同的光学感知原理,光学胡须传感器可呈现多样化的结构与工作模式。

图3^[34]展示了一种光学胡须传感器 WhiskSight 的设计方案。在该方案中,其胡须根部安装有小型磁体,并连接至带有多个标记点的弹性膜上(见图3(a))。胡须运动引起标记点位置变化,借助摄像头实时捕捉,并通过图像跟踪算法提取运动特征。图3(b)给出了该胡须沿z轴偏转的典型图像(其中,u、v分别代表速度在x、y轴上的分量),对应的实验装置如图3(c)所示。

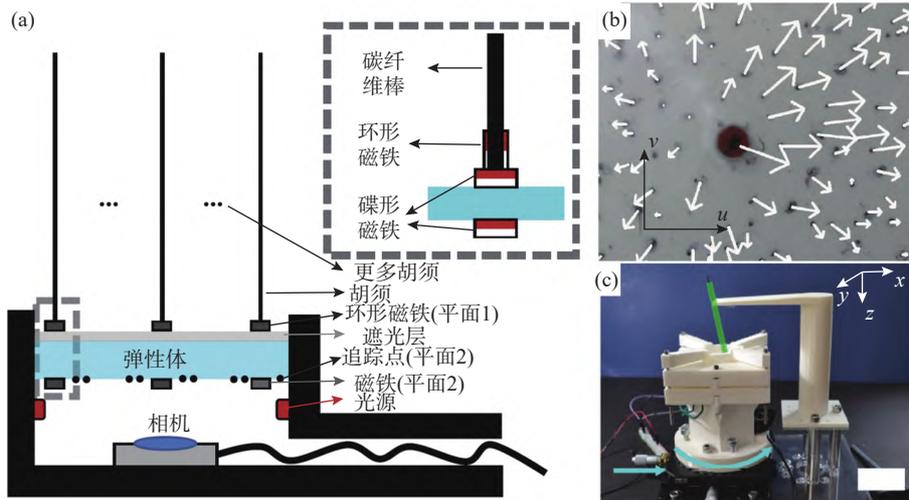


图3 WhiskSight 光学胡须传感器
Fig. 3 WhiskSight optical whisker sensor

Wang 等^[35]提出了一种基于光学聚合物纤维的胡须传感器,其结构如图4(a)所示(图中:L为胡须长度; L_{SMF} 为摆锤长度;G为摆锤纵向偏移)。该设计采用七芯光纤(seven-core fiber, SCF),其中中心芯延伸并连接至固体摆锤,在相邻光纤芯之间构建6个法布里-珀罗(Fabry-Pérot)干涉腔。该系统感知原理如图4(b)所示,外部扰动引起的胡须变形将改变干涉腔长度,进而引起多光束干涉信号的变化,实现对扰动信息的检测。图4(c)展示了实验平台(其中: α 为俯仰角; ψ 为摆锤实际偏转角; γ 为滚转角;R为滚动方向),其中固体摆锤施加机械扰动引起胡须变形,成像系统用于捕捉干涉响应信号。

Wang 等^[36]开发了一种基于光纤布拉格光栅

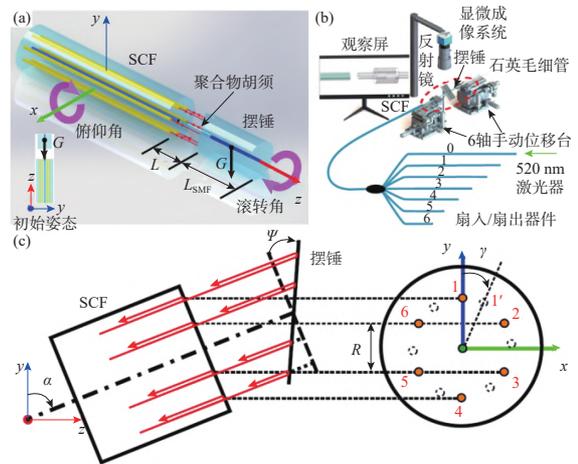


图4 基于光学聚合物纤维的胡须传感器
Fig. 4 Whisker sensor based on optical polymer fibers

(fiber Bragg grating, FBG)的仿海豹胡须传感器,其实物如图5(a)所示。该装置采用4个正交分布的FBG作为传感单元(见图5(b))(其中,ABS为丙烯腈-丁二烯-苯乙烯),通过监测其反射波长变化感知水动力扰动。实验方法如图5(c)所示(其中: z 表示空间坐标轴, $+z$ 表示 z 轴的正方向,用于确定传感器在空间中的方位和测量方向等; θ 为角度参数,用于描述传感器相关部件的角度变化或方位关系, $\theta=0^\circ$ 表示初始的基准角度状态),实验结果表明,传感器能成功锁定仿生鱼尾尾迹中的涡街频率,均方根误差仅为0.020 8 Hz,可识别涡旋旋转方向,最大探测距离达300 mm,并具备振荡激励感知能力。该传感器基于理论模型建立了波长偏移与稳态流速间的校准函数,最大灵敏度达0.86 nm/(m/s),为同类FBG传感器的7.2倍。同时具备优异的抗电磁干扰能力与复杂环境适应性,为水下动态目标跟踪等应用提供了全新感知框架。

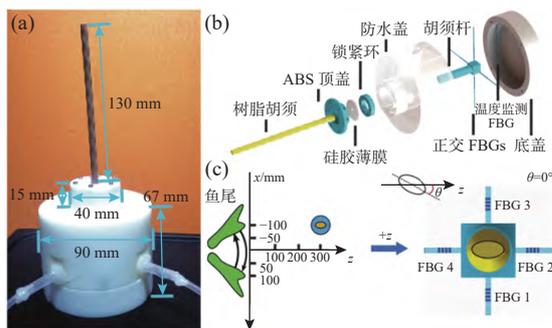


图5 基于光纤布拉格光栅的仿海豹胡须传感器
Fig. 5 Fiber Bragg grating-based seal whisker sensor

需要指出的是,基于图像识别的标记点监测方法结构简单,适合快速验证胡须运动特性,但其感知维度局限于二维,难以解析真实水下流场中的复杂三维扰动。相比之下,基于光学聚合物纤维与FBG的传感器能够实现高灵敏度和三维立体响应,在尾流频率识别与流向解算等方面表现突出,尤其适合高精度监测场景。然而,这类系统普遍依赖精密光学器件和复杂解调算法,对环境扰动和结构稳定性高度敏感,在水下动态平台上部部署面临诸多挑战。例如,光路稳定性受振动影响大,封装与密封工艺要求高,且整体体积和功耗限制了其在AUV上的集成应用。光学式胡须传感器未来的发展重点应放在:1)光机电一体化集成以降低

体积与功耗;2)抗干扰封装与防水密封工艺优化以提升长期稳定性;3)与智能算法结合实现光学信号的实时解算。通过这些方向的突破,有望推动光学式胡须传感器在复杂海洋环境下的实际应用。

2.2 电阻式仿海豹胡须传感器

电阻式仿海豹胡须传感器是一类基于电阻变化原理实现流场感知功能的传感器。当胡须结构在外部扰动作用下发生形变,内部导电材料的电阻随之改变,传感器可通过监测电阻变化实现对外力扰动的实时感知。该类传感器具备结构简单、功耗低和响应范围广等优势,具有良好的集成性和工程应用潜力。其在材料选择方面表现出高度灵活性,已广泛采用硅基材料^[37-38]、碳基复合物^[39-40]、石墨烯及其衍生结构^[41-42],以及其他新型导电材料体系^[43]。

图6^[44]所示为一类基于石墨材料构建的纸基电阻式胡须传感器,其感知机制基于石墨层之间的微观接触变化。如图6(a)所示,胡须在外力作用下产生形变,导致石墨片层间接触面积变化,进而引起电阻突变,实现扰动响应。图6(b)显示了该传感器在2种不同应变方向下的输出曲线,呈现出良好的方向分辨能力。图6(c)表明其在超2000次循环测试中仍维持稳定性能,展现出优异的耐久性。

图7^[45](a)展示了另一种基于碳纳米管(carbon nanotube, CNT)的三维应变胡须传感器。该器件利用自组装技术将功能化单壁CNT沉积于聚二甲基硅氧烷(PDMS)弹性基底表面,构建可拉伸的导电薄膜作为应变响应层。其制备的三维感知结构如图7(b)所示(其中:A代表竖直CNT,B~E代表4个不同方位的CNT),器件分辨精度达到毫米级;同时具备阵列化扩展能力,相关实例如图7(c)所示。整个传感器的制造流程完全依赖3D打印与材料加工,工艺简便,具备优良的可拓展性。进一步优化导电材料的微结构与界面粘附特性,将有望显著提升其灵敏度与稳定性。

此外,Dusek等^[46]研制了一种基于闭孔碳黑(carbon black, CB)掺杂PDMS泡沫(简称为CBPDMS)的水下压阻式传感器阵列。其感知机制如图8(a)所示,泡沫结构受压后CB颗粒间接触面积增大,整体电阻降低,4个探针电极实现压力变化感知。传感器采用银-CBPDMS复合电极提供导电路

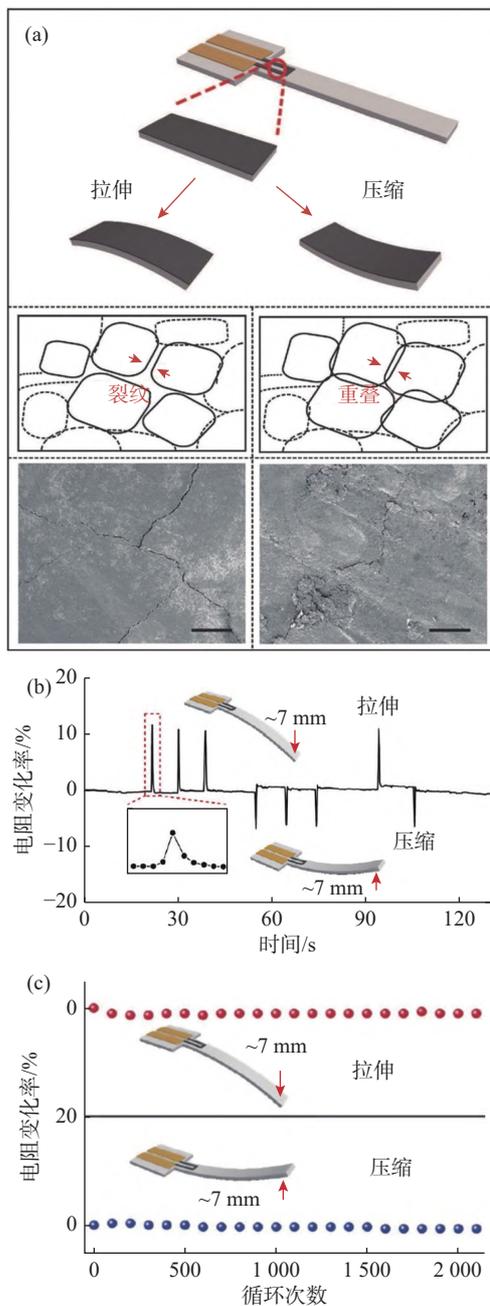


图 6 基于石墨材料的电阻式仿生胡须传感器

Fig. 6 Resistive bionic whisker sensor based on graphite material

径, PDMS 基体增强柔性及密封性。其制备流程为: 混合银粉、CB 与 PDMS 形成复合电极并嵌线, 随后将 CB 掺入硅橡胶发泡材料并填充电极间隙, 最终喷涂薄层 PDMS 完成封装。图 8(b)和图 8(c)分别展示了其在水池实验中的波浪发生系统与测试装置, 通过采用 Labview 控制桨式造波器模拟水下扰动环境。该传感器在宽动态压力范围内表现出良好的稳定性, 具有柔性化、阵列化与低制造成

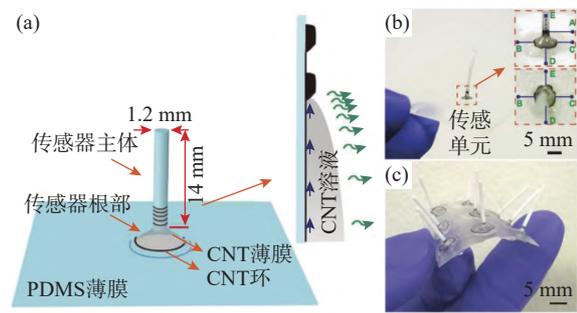


图 7 基于碳纳米管的三维应变胡须传感器

Fig. 7 Three-dimensional strain whisker sensor based on carbon nanotubes

本的显著优势。

需要指出的是, 尽管电阻式胡须传感器在结构小型化方面已取得一定进展, 例如通过硅基材料和导电复合物的优化, 实现了更小尺寸的传感器结构, 但这类器件普遍依赖外部供能与信号采集电路, 限制了其在长期独立部署与系统微型化方面的能力。此外, 在高应变或大幅度扰动工况下, 电阻式传感器常表现出明显的非线性响应和有限的信号幅值, 这影响了传感器在强流或湍流环境下的稳定性和精度。未来的改进方向应包括: 1) 开发高导电性复合材料以提升信号稳定性; 2) 改进信号放大与补偿机制, 增强在动态扰动条件下的响应; 3) 提升传感器的封装设计, 以增强其在复杂水下环境中的应用。通过这些改进, 能够促进电阻式传感器在长时间监测和低成本阵列部署中的应用潜力。

2.3 电容式仿海豹胡须传感器

电容式仿海豹胡须传感器利用电容元件对胡须结构变形引起的电容变化进行监测, 从而实现对外部扰动的感知^[47-49]。其基本工作原理为: 当胡须在外力作用下发生形变, 传感结构中 2 个电极板之间的相对距离或有效面积发生改变, 引起电容值的变化。该类传感器通常具备高灵敏度、低功耗、结构稳定以及对温度波动不敏感等优点, 在水下感知系统中展现出良好的应用前景。

图 9^[50](a)展示了一种基于平行板电容器原理设计的电容式胡须传感器。该传感器由 2 个金属涂覆的锥体构成, 内外锥体相互嵌套, 并通过导电银环氧树脂密封以实现水下防护。电容极板间隙填充绝缘硅油, 以提供足够的介电常数。电极间充

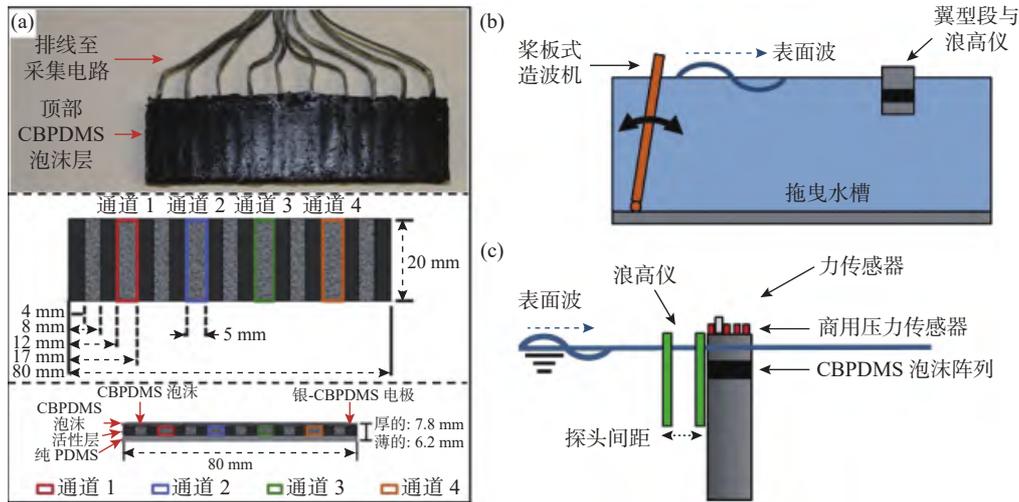


图8 水下压阻式压力传感器阵列
Fig. 8 Underwater piezoresistive pressure sensor array

填绝缘硅油以提高介电常数, 内锥体通过 PDMS 与外壳连接, 提供密封性与柔性支撑。尽管嵌套结构导致电极板非完全平行, 但可显著增加有效面积, 从而增强输出信号幅度。图 9(b)为该传感器的实物图。相比该团队早期设计, 该方案采用镀金的银环氧树脂提升抗腐蚀能力, 并取消传统防水涂层, 减小寄生电容, 提高信噪比。图 9(c)为系统爆

炸图(其中, WIDTS 为尾流信息探测与跟踪系统 (wake information detection and tracking system)), 展示了该传感器用于尾流检测的集成结构, 其中引入屏蔽线以降低电磁干扰, 进一步提升信号质量。

图 10^[51](a)展示了另一种基于旋转平板电容器原理的胡须传感器。其结构由仿生胡须(SU-8)、电极系统、氮化硅介电层与支撑基底构成, 通过微

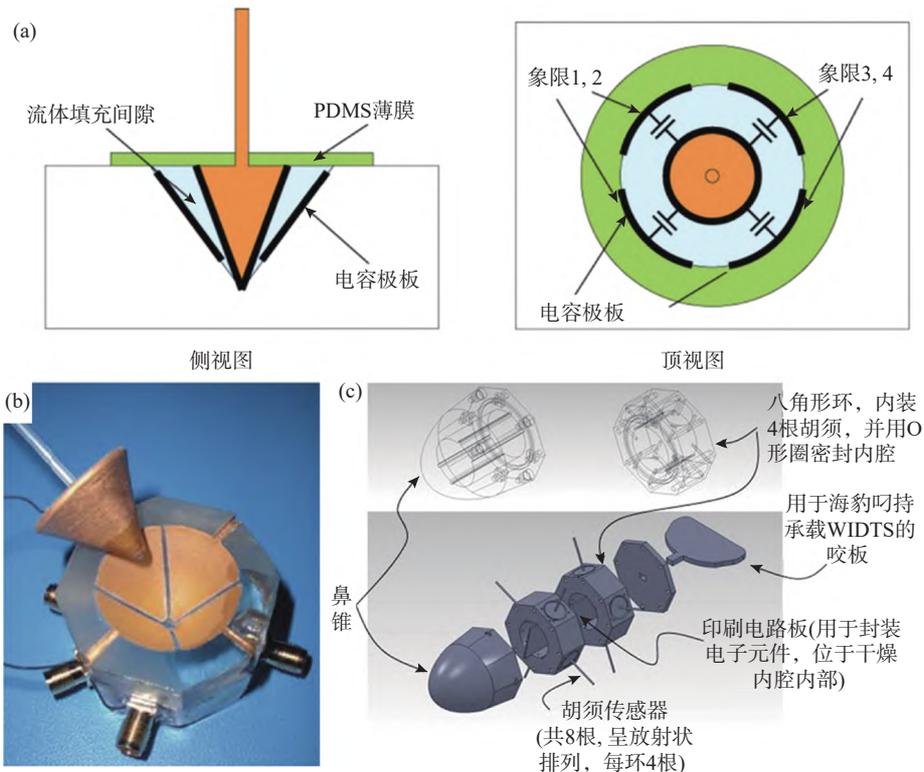


图9 基于平行板电容器的仿生胡须传感器
Fig. 9 Bionic whisker sensor based on parallel plate capacitor

机电系统(micro-electro-mechanical systems, MEMS)技术实现微型化集成。图10(b)为该传感器阵列组成的MEMS示意图。如图10(c)所示,当传感器的胡须须在谐波气流作用下发生周期性旋转,其角度变化与气流强度、频率及传感器结构参数(包括转动惯量、扭转阻力以及调制后的扭转刚度)密切相关。激光多普勒测振仪通过测量胡须反射光信号,将机械旋转运动转化为电信号,从而量化旋转角度的振幅和频率特性,实现旋转角度幅值与频率的精确测量,为探索参量放大机制(如增益调制与滤波性能)提供数据基础。

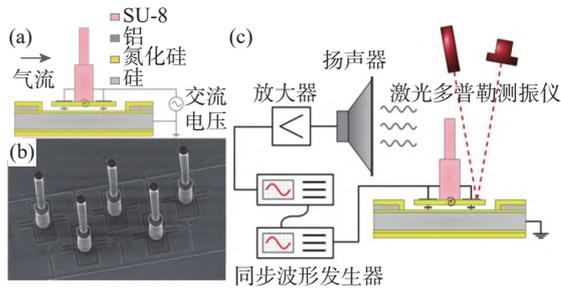


图10 基于旋转平行板电容器的胡须传感器

Fig. 10 Whisker sensor based on rotating parallel-plate capacitor

图11^[52](a)展示了基于共面电容设计的电容式胡须传感器(图中: F 为外力; τ 为扭矩; θ 为扭转角)。该结构将胡须固定于带有电极图案的印刷电路板上,通过测量胡须根部产生的微小位移所引起的共面电容变化,以反推出外力大小与作用方向。传感器实物如图11(b)所示,整体结构完全由3D打印制成,基底材料为聚乳酸(PLA),胡须部分采用透明树脂制备。该传感器底部结构可等效为一扭簧系统,通过优化电极分布和降低扭簧刚度,有望进一步提升响应灵敏度。

值得注意的是,电容式仿生胡须传感器在灵敏度与高集成化设计方面具备显著优势,但也面临一些典型的技术挑战。例如,基于平行板电容器的设计,虽具有高灵敏度,但寄生电容与电磁干扰问题会导致信号失真,阵列元件间的串扰亦是限制其在复杂环境中稳定工作的关键因素。这些问题在一定程度上限制了电容式传感器在复杂水下环境中的应用,尤其在高扰动环境下的稳定性与精度表现不足。例如,旋转电容传感器在动态流场下难以保持稳定的感知精度,难以满足深海探测等

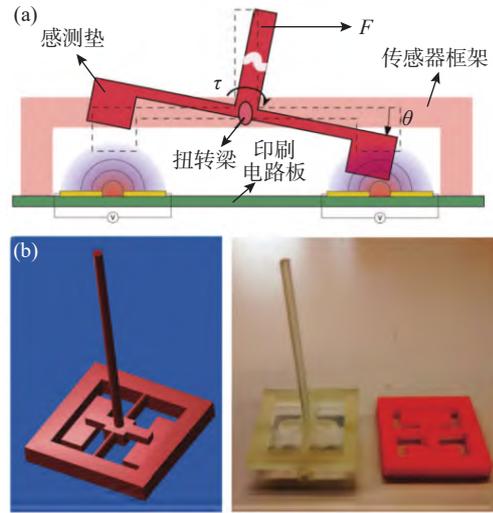


图11 基于共面电容设计的胡须传感器

Fig. 11 Whisker sensor based on coplanar capacitance

高精度需求。未来亟需从以下几个方面对电容式传感器开展系统性研究:1)优化电极结构,以提升抗干扰能力与信号稳定性;2)加强电磁屏蔽与抗噪声设计,减少外部电磁干扰的影响;3)引入创新的信号去耦与滤波算法,减少阵列元件间串扰,提升动态响应性能。通过这些优化,电容式传感器有望在水下机器人以及海洋环境监测等领域得到更广泛的应用。

2.4 压电式仿海豹胡须传感器

压电式仿海豹胡须传感器是一类基于压电效应实现能量转换与扰动感知的仿生传感器。其工作机制依赖于特定材料在外部机械载荷作用下发生形变,导致内部电荷极化,从而在材料表面产生电信号。与其他类型传感器相比,压电传感器最大的优势在于其自驱动特性,可在无外部供能的情况下达成感知功能。这一特性使其尤其适用于能源受限、高集成度需求高的应用场景,如机器人系统、微型自主设备等^[53-56]。

图12^[57](a)展示了一种基于聚偏二氟乙烯(PVDF)材料构建的压电式仿生胡须传感器(其中: d_1 、 d_2 、 d'_1 和 d'_2 分别为仿生胡须传感器不同部位的直径; l 为传感器长度)。该装置由波浪状PDMS外壳与内嵌的PVDF压电膜构成,PVDF膜下方集成有丝网印刷的银电极,如图12(b)所示。在涡旋扰动作用下,如图12(c)所示(实物图)的胡须传感器将外界流体扰动转化为自身的机械形变,其中的

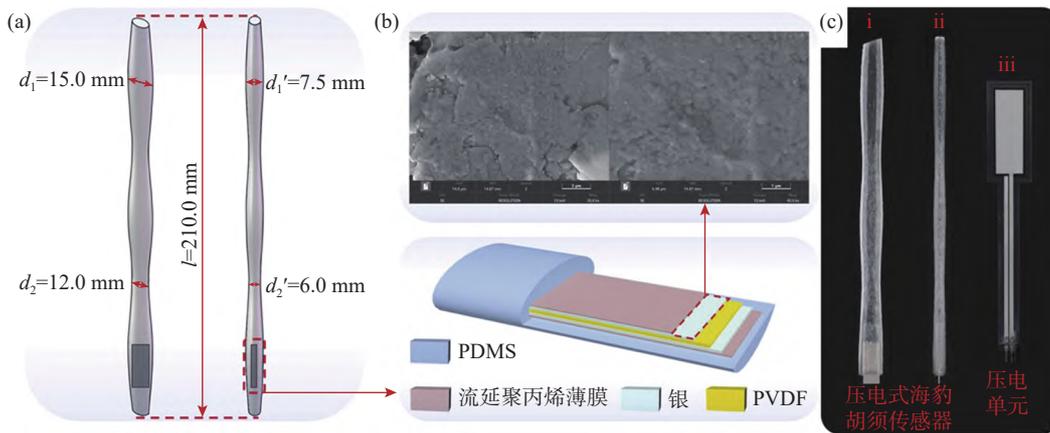


图 12 基于 PVDF 材料的压电式仿海豹胡须传感器
Fig. 12 Piezoelectric seal whisker sensor based on PVDF material

PVDF 薄膜通过压电效应产生电信号。仿海豹胡须的波浪形壳体设计在减少自身涡激振动的同时提高了对外部扰动的响应选择性, 从而有效提升信噪比。该传感器展示了仿生几何结构与压电功能材料融合的设计优势。

图 13^[58](a)展示了另一类采用锆钛酸铅(PZT)材料的压电式胡须传感器。该传感器由 1 组 PZT 双压电晶片、1 根钢制胡须以及球形封头组成。如图 13(b)所示(图中: F_x 为流体对钢质晶须在 x 方向

的作用力; V_x 为钢质晶须在 x 方向的速度; Z_m 为机械阻抗; E 为电压; I 为电流; Z_e 为电气阻抗; F 为外力; V 为机械速度; η 为动力粘度; ρ 为密度), 当胡须受到流体载荷作用时, 附着于尖端的球形封头与周围流体的相互作用会引起球体的机械响应, 进而激发 PZT 元件的压电效应。由此产生的耦合电信号可用于分析胡须的应变状态。球形封头结构增强了胡须与流体之间的耦合作用, 降低了工作频率, 并提升了扰动响应灵敏度。该传感器的实物图如图 13(c)所示。

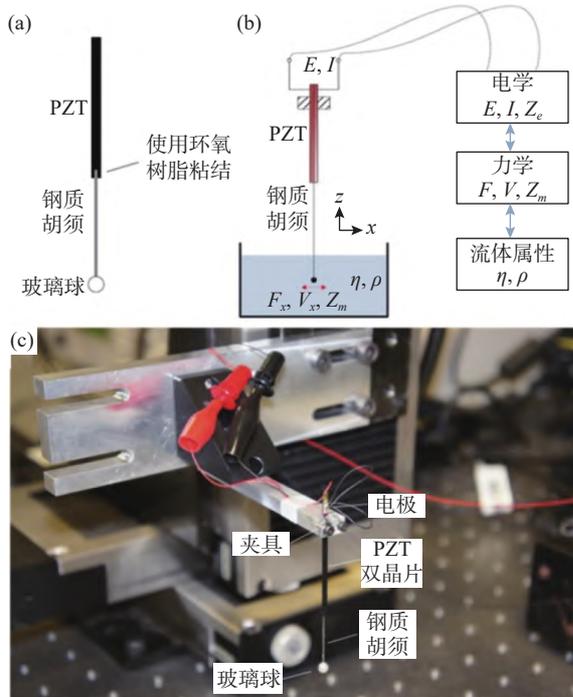


图 13 基于 PZT 材料的压电式仿生胡须传感器
Fig. 13 Piezoelectric bionic whisker sensor based on PZT material

此外, 压电式胡须传感器得益于其结构简单且具备自驱动能力的特点, 已被推进至微尺度制造领域。如图 14^[59]所示, 该传感器采用电流体动力喷射打印技术, 在钨钢微丝上沉积 PZT 膜层并完成电极溅射, 最终组装出直径仅为 120 μm 的微型胡须传感器。图 14(a)和(c)分别展示其制备工艺流程与器件实物图。首先制备并清洗钨钢微丝, 电喷印 PZT 浆料成膜并加热, 经 720 $^{\circ}\text{C}$ 退火, 固定掩模板后溅射电极, 最终组装成含微丝、PZT 膜和电极的结构, 极化后激活压电效应。该器件以银浆电极连接至 PCB 板, 在受力弯曲时产生交变电压, 实现高灵敏扰动检测。其结构简单、响应快速, 极具微型化与阵列化集成潜力。

总体来看, 压电式胡须传感器凭借其机电耦合效应, 能直接将微小的机械变形转化为电信号, 高灵敏度和无源特性使其在被动水下扰动检测中具有显著优势, 特别适用于能量受限的水下探测平台。然而, 压电式传感器普遍存在低电平输出问题, 这意味着传感器在捕捉微小扰动信号时的电

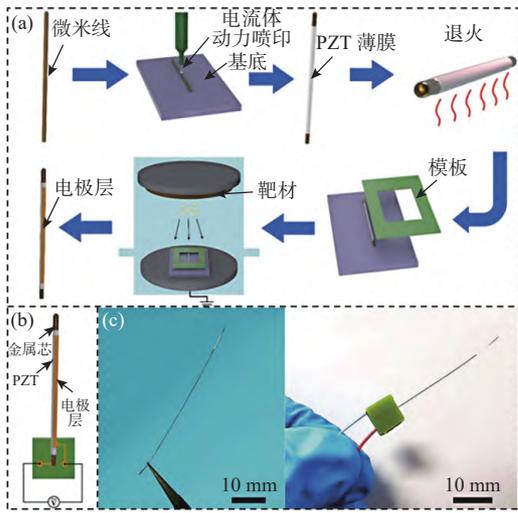


图 14 基于电流体动力喷射打印的微型胡须传感器
Fig. 14 Micro whisker sensor based on electrohydrodynamic jet printing

压输出较低。为了提高信号质量,通常需配合高输入阻抗电路或电荷放大器,以增强信噪比并提高系统稳定性。此外,压电材料在低频段响应性能不足,例如在低频流场监测中,压电传感器的输出信号较弱,这限制了其在复杂水下环境中的应用。随着传感器长时间服役,其稳定性与可靠性问题也

将显现,尤其是压电陶瓷材料的疲劳与老化现象,亟需通过材料优化与封装技术的改进来突破这些瓶颈,推动压电传感器在长时间水下监测中的应用。

2.5 摩擦电式仿海豹胡须传感器

摩擦电式仿海豹胡须传感器通过结合摩擦起电效应与静电感应机制,实现机械扰动向电信号的自驱动转换。其基本原理是在胡须结构受外部刺激变形时,摩擦层间的相对位移引发电荷转移,从而输出感知信号。与压电传感器相比,摩擦电传感器同样具备自供能能力,且通常表现出更高的输出电压和更低的制造成本,展现出在低功耗、高集成度传感系统中的广泛应用潜力^[60-62]。

图 15^[63](a)展示了一种基于膜结构摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG)的胡须传感器的结构组成。该器件采用硅胶制成的仿生胡须,其根部安装于 TENG 感知单元中心位置。该单元下层为沉积铜电极的丙烯酸基底,上层为沉积铜电极的聚四氟乙烯(PTFE)薄膜,兼作介电层与电极。胡须受扰动变形时驱动 TENG 的周期性接触—分离行为,形成类似电容器充放电的电荷交换机制,从而输出电压信号。图 15(b)显示该输出

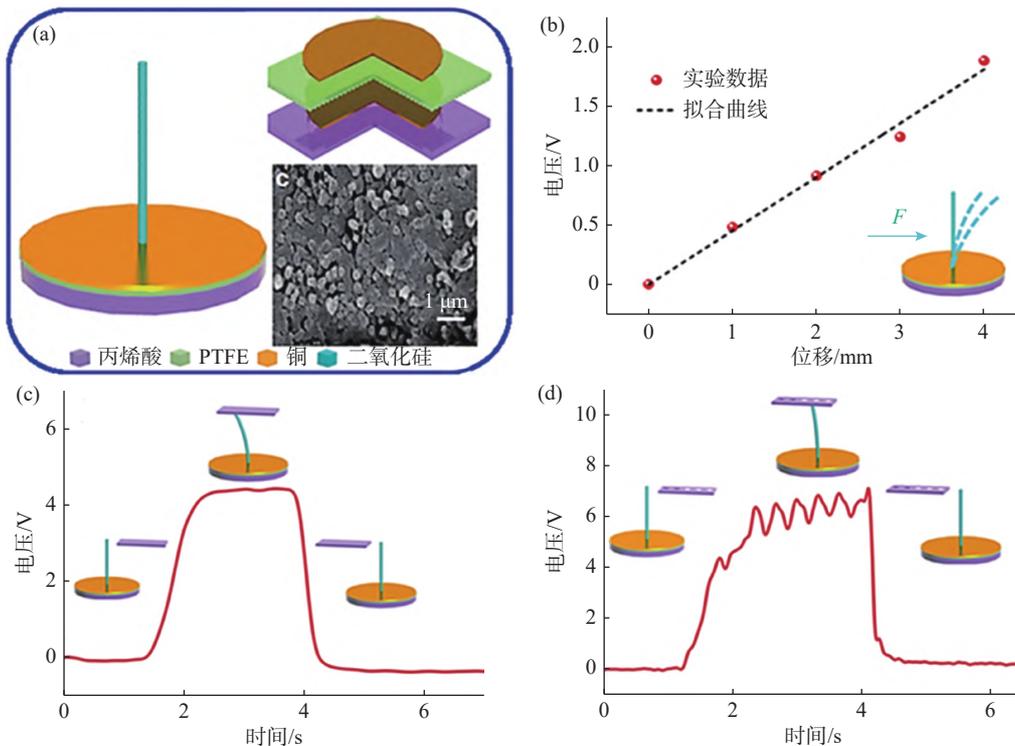


图 15 基于膜结构 TENG 的仿生胡须传感器
Fig. 15 Bionic whisker sensor based on membrane structured TENG

与胡须尖端位移呈良好的线性关系。图 15(c)和 (d)分别展示了传感器扫描平坦亚克力板和具有孔洞的亚克力板的信号差异,表明该传感器具备区分不同表面特征的能力。

TENG 的一项关键优势在于其优异的柔性材料与兼容性,便于构建多样化结构。其中一个典型案例是一种受毛囊结构启发的摩擦电式仿生胡须传感器^[64]。如图 16(a)所示,该结构由柔性硅橡胶连接体 Ecoflex 00-20、3D 打印的 PLA 外壳和刚性基座构成。基座内部嵌有弹簧机构,弹簧连接 1 个 PTFE 球体,球体作为介电层,弹簧则提供必要的阻尼与回复力。仿生胡须由形状记忆合金制成,外壳内壁对称分布有 4 个铜膜电极。图 16(b)展示了其传感原理,胡须轴受力偏转时带动 PTFE 球体发生位移,与周围的铜膜产生摩擦起电和静电感应现象,进而产生输出信号,实现对外部环境刺激的感知。图 16(c)展示了传感器的方向模式,

即对不同角度外加负载的响应情况,其中的不对称性是由传感器制作误差导致的。得益于 TENG 的高压输出特性,该类传感器可直接集成至机器人平台,无需外接供电模块,并可通过密封与防水设计以适应水下环境。

图 17^[65](a)展示了一种受海豹胡须启发的摩擦电式仿海豹胡须传感器,其结构包括碳纤维人造胡须、密封壳体及 4 个分布的 TENG 感知单元。图 17(b)详细说明了传感单元的结构组成与工作机理。器件采用氟化乙烯丙烯(FEP)薄膜作为介电层,导电油墨为电极层,外覆流延聚丙烯薄膜(CPP)以提供静电屏蔽,并以硅胶包覆提升整体防水性能。如图 17(c)所示(图中: A_w 为胡须位移量; α_w 为胡须偏转角度; H_w 为胡须长度),当人造胡须受到扰动产生形变时,内部 TENG 单元的介电材料之间发生接触—分离,进而诱导电荷转移并输出电信号。该结构体现了仿生设计与功能材料协同的优化路径。

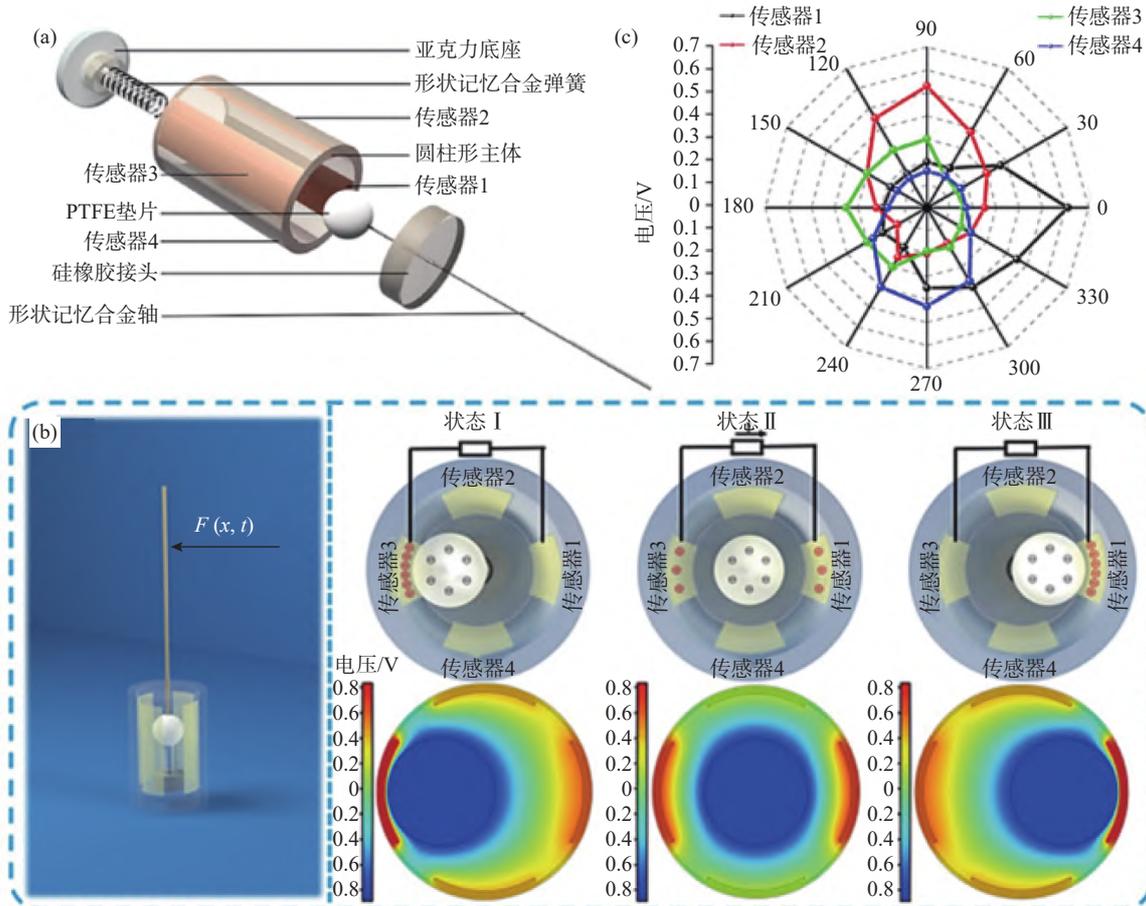


图 16 受毛囊结构启发的摩擦电式仿生胡须传感器

Fig. 16 Triboelectric bionic whisker sensor inspired by hair follicle structure

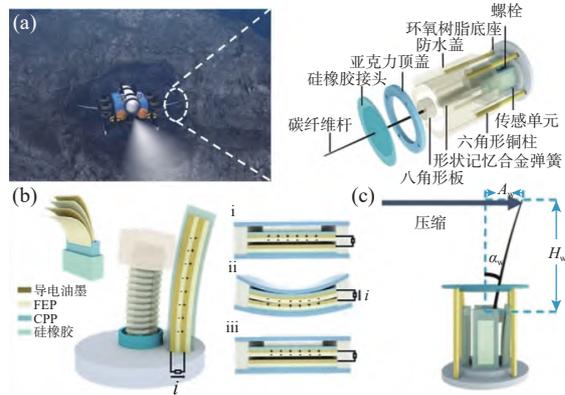


图17 受海豹胡须启发的摩擦电式仿海豹胡须传感器
Fig. 17 Triboelectric seal whisker sensor inspired by seal whiskers

总体而言,摩擦电式胡须传感器凭借其低频响应性和高灵敏度,尤其适合微弱水下扰动检测等需要无源感知的场景。例如,摩擦电传感器能够将直接将微小的机械扰动转化为电信号(无需额外供能),尤其适用于低频、低幅度水流条件下的水下环境监测。其结构简单、响应灵敏且制造成本低,使得摩擦电传感器在动态力变化监测和阵列化应用中具有广泛前景。然而,当前该类器件仍面临诸多

技术挑战。例如,大部分摩擦电材料的耐磨性较差,长时间使用后可能导致信号衰减,并且水流和盐水腐蚀等环境对其输出信号有较大干扰,影响其长期监测能力。未来研究应聚焦于开发高耐磨、环境稳定的摩擦电材料。例如,结合纳米增强材料与复合材料以提升其耐久性;同时,优化密封与封装设计,以提高传感器在复杂水下环境中的稳定性;并结合先进信号调理技术,如去耦算法与噪声抑制技术,进一步拓展其在深海探测以及长时间水下监测等领域的应用潜力。

2.6 对比分析

该章节分析了5种常见的仿海豹胡须传感器技术,分别是光学式、电阻式、电容式、压电式和摩擦电式传感器,每种传感器都有其独特的技术特点和应用场景。通过对每种传感器的主要感知机理、优势、不足以及典型应用场景的对比分析,揭示了这些技术的应用潜力及所面临的挑战。

表1总结了各类传感器的主要感知机理、优势、不足及典型适用场景,以提供清晰的对比,从而更好地理解每种传感器的技术特点及局限性。

表1 各类仿海豹胡须传感器特点对比

Table 1 Comparison of features among various seal-whisker-inspired sensors

类型	感知机理	优势	不足	典型适用场景
光学式	光纤干涉、图像识别	高灵敏度、高分辨率、抗电磁干扰	结构复杂,难以小型化,信号处理要求高	精细流场监测、高分辨率应用、静态监测
电阻式	电阻变化(导电材料)	结构简单、低成本、易阵列化	非线性响应、湿度敏感	大规模阵列部署、低成本传感器网络、短期监测
电容式	电容变化	高灵敏度、低功耗、稳定性好	寄生电容、阵列元件间串扰、电磁干扰	多通道阵列、静态监测、高精度测量
压电式	压电效应(机电耦合)	高灵敏度、自供能、响应迅速	低电平输出、低频响应不足	水下扰动感知、能量受限平台、自驱动系统
摩擦电	摩擦电效应(静电感应)	自供能、成本低、低频响应强	耐磨性差、信号衰减、环境稳定性差	微弱扰动感知、低频应用、自驱动系统

光学式传感器凭借其极高的灵敏度和分辨率,在精细流场监测和高分辨率应用中表现出了显著优势。然而,光学式传感器的结构复杂,难以实现小型化,且其信号处理要求较高,这限制了其在动态水下环境中的应用。

电阻式传感器具有结构简单、成本低的优势,特别适合用于大规模阵列化应用。然而,其在高应变和高湿度环境中的稳定性不足,非线性响应和湿度敏感性问题也是其主要短板,限制了其在复杂水下环境中的应用。

电容式传感器拼接其高灵敏度和在高集成化

设计方面的优势,在静态监测中表现优异。但由于寄生电容和电磁干扰问题,其在动态流场中的应用受到限制。

压电式传感器凭借自供能特性和高灵敏度,在水下扰动感知中表现突出,尤其适用于能量受限平台。然而,压电式传感器的低电平输出和低频响应不足,导致其在动态水下环境中的应用受限,且稳定性和长期可靠性问题依然需要进一步解决。

摩擦电式传感器凭借其低成本、低频响应性和自供能特性,特别适用于水下微弱扰动的感知。尽管如此,摩擦电式传感器的耐磨性差和信号衰

减问题,在长时间使用中限制了其性能和稳定性。

结合表1总结,进一步分析各类传感器的优势互补性:光学式传感器适合高精度静态监测;而电阻式传感器则更适合低成本、大规模阵列应用;电容式传感器可以与其他传感器协同工作,提升系统的灵敏度和稳定性;压电式和摩擦电式传感器则可以提供自供能方案,与其他传感器形成有效的互补。未来研究可将多传感器融合技术作为一个重要方向,探索如何利用传感器的互补性,从而提升整个系统的性能。例如,压电式传感器与电容式传感器的结合,可以通过增强信号放大和补偿机制解决压电式传感器的低电平输出问题;摩擦电式传感器与光学式传感器的融合,则能兼顾低功耗和高分辨率,为深海探测提供更具灵敏度和稳定性的方案。同时,在材料、信号处理和封装设计等方面的技术突破,将是推动仿海豹胡须传感器在复杂水下环境中广泛应用的关键。另外,多传感器融合技术的引入,能够提升系统的稳定性、精度及适应性,同时降低系统的能量消耗,不失为一种为更加高效和可持续的解决方案。

3 仿海豹胡须传感器在水下流场感知中的应用

海豹依赖其低噪声、高灵敏度的流体感知系统,展现出卓越的水动力尾迹跟踪能力,为仿生感知技术的工程化应用提供了重要启示。例如,海豹在水下的猎物探测距离可达约180 m^[28],与采用回声定位的海豚(107~173 m^[66])相当,表明其被动感知策略有望成为现有声呐系统的节能替代方案。其胡须结构独特的波浪状几何轮廓能够显著抑制涡激振动、提升信噪比,为低扰动水下感知提供了关键构型基础,并为水下工程抗振设计开辟新路径。以下将从固定平台集成与移动平台搭载2个方面,系统综述仿海豹胡须传感器在水下流场感知中的典型应用与关键进展。

3.1 固定平台海洋环境流场监测

Beem等^[67]提出了一种放大结构的仿海豹胡须水流传感器,以实现水流速度测量与流向识别。其采用放大30倍的波浪状胡须结构,主体由3D打印聚合物制成,通过橡胶隔膜与4个弯曲传感器相连。当胡须在水流中发生振动时,隔膜随之形

变,驱动4个弯曲传感器输出电压信号,进而实现对振动幅值与频率的精确感知。该装置通过4通道布线提升了方向分辨率,并且能够直观识别顺流与横流方向。该仿生传感器被安装于试验平台,并在实际海水环境中开展了水流测试(见图18^[67])。其测试结果与商用流速计高度一致,验证了波浪起伏结构在水流感知场景下的可行性与稳定性。

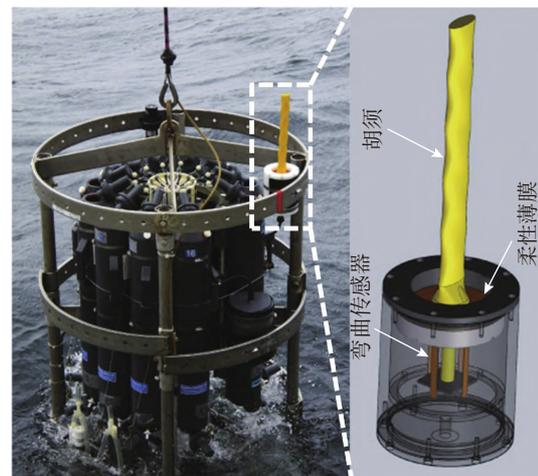


图18 放大版仿海豹胡须水流方向传感器

Fig. 18 Scaled-up biomimetic whisker flow sensor

与Beem等开发的放大版胡须传感器不同,Kottapalli等^[55,68]开发了一种基于微纳制造技术的微型仿海豹胡须传感器,其尺寸如图19(a)^[55]所示。该仿生结构采用立体光刻技术按真实尺寸3D打印,并集成安装于1块由微机电系统MEMS技术加工而成的压电PZT薄膜基底上,如图19(b)^[55]所示。实验表明,该仿海豹胡须传感器在稳态流场中产生的涡激振动响应明显低于无起伏结构的圆柱体基准样本,响应幅值仅为后者的1/50。这一结果充分验证了波浪状结构在降低扰动、提升信噪比方面的优势。此外,该传感器还通过进一步引入一个振动频率为35 Hz的球体模拟偶极流场进行了系统性的实验表征。结果表明传感器表现出极低的感知阈值,最低可检测水流速度为193 $\mu\text{m/s}$ (如图19(c)^[68]所示),这一数据与真实港海豹的水动力感知能力相当^[14]。此类传感器兼具结构紧凑、自驱动、宽频响应等特性,并在较宽的频率范围内(最高可达23.3 kHz)对动态扰动具有高度敏感性。这些优异的性能表明,此类微型胡须传感器不仅在仿生性能上具备生理对标意义,也具备良好的工程实用价值。

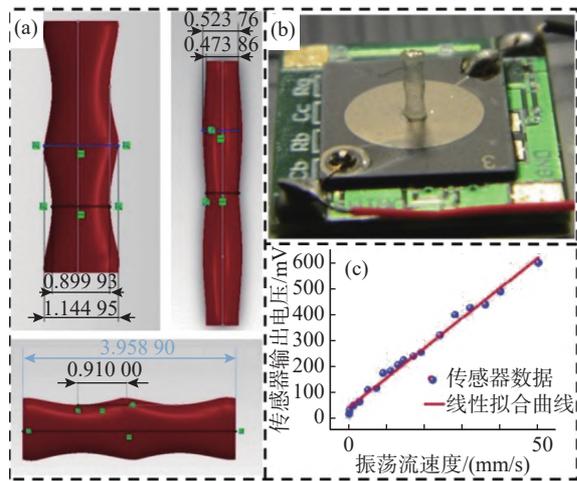


图19 微型化的压电式仿生胡须传感器

Fig. 19 Miniaturized piezoelectric biomimetic whisker sensor

除了对仿生胡须主体结构的设计优化外, Alvarado 等^[43,69-70]进一步将研究重心拓展至胡须根部的 FSC, 即包含神经分布的柔性支撑结构。这项研究具有较强的创新性, 在此之前, 胡须传感器设计多聚焦于刚性振动结构, 而对毛囊区域的柔性组织结构普遍缺乏关注。该团队以硅橡胶模拟 FSC 中肌肉与结缔组织, 结合柔性弯曲传感器采集胡须响应信号, 利用熔融沉积成型(fused deposition modeling, FDM)技术构建集起伏、渐缩和曲率于一体的仿胡须结构, 实现结构-感知一体化的仿生传感系统, 如图 20(a)^[69]所示。在实际水下流场测试中, 该仿生传感器的输出噪声水平明显低于类似的圆柱形传感器。更重要的是, 该团队建立了基于仿生 FSC 结构的集总参数模型, 揭示了柔性基座与刚性胡须之间的耦合机制, 实现了对传感器的灵敏度与共振频率等关键性能参数的有效调控, 为探索仿生结构中的“基座-胡须”耦合机制提供了理论支持。从水下感知机制的角度来看, 这项研究意义重大。已有研究发现, 海豹在主动追踪过程中通过调节毛囊肌肉组织的刚度以优化感知性能^[14,71]。该发现进一步突出了仿生系统中柔性底座设计的重要性, 为构建具有可调刚度与方向选择性的水下仿生传感系统提供了重要理论支撑。

Gul 等^[72]提出了一种完全基于 3D 打印制备的仿生胡须传感器, 在其根部集成了 4 个相互垂直的石墨烯应变片(如图 20(b)^[72]所示)。该结构在任意方向上偏转时均能诱发电阻变化, 实现对扰动

方向的判断。利用该特性, 研究者通过人工鱼鳍激发涡旋扰动, 成功实现了顺时针与逆时针尾流的区分。该项研究展示了 3D 打印技术在一次成型制造低成本仿生传感器方面的潜力。传感器以高应变系数的石墨烯^[73]作为感知材料, 聚氨酯(PU)作为柔性支撑结构材料, 在扰动检测中表现出高达 1 180% 的电阻变化率, 显著优于传统石墨烯柔性传感器在常规工况下约 50% 的响应水平^[74-75]。尽管其胡须本体结构仍为简单圆柱体, 但制造工艺具备良好的可拓展性, 具备向复杂起伏结构拓展的潜力, 为快速构建高灵敏、可定制的仿生流场传感器提供了可行路径。



图20 受胡须启发的2种水流传感器

Fig. 20 Two classes of whisker-inspired flow sensors

受海豹胡须结构启发, Kottapalli 团队^[76]采用 3D 打印技术, 利用具备优异弹性性能的热塑性聚氨酯弹性体(thermoplastic polyurethane, TPU)95a(即硬度为邵氏 A 95)材料成功制备了一种仿海豹胡须传感器。该研究复刻了胡须的波浪形起伏结构与轴向特征, 如图 21(a)所示。研究团队创新性地 将应变片作为核心感知单元嵌入传感器底座, 并沿 4 个不同方向布设, 模拟真实海豹胡须中 FSC 的空间排布方式(如图 21(b)所示)。同时, 使用柔性材料制成的仿胡须轴与底座, 并在循环水槽中验证该传感器的流场感知能力(如图 21(c)所示)。实验结果表明, 该仿生胡须结构具备良好的机械耐受性, 胡须轴与底座在无损状态下可承受高达

355%的形变,这一特性赋予其在剧烈流动扰动中长期工作的能力。性能测试进一步显示,当胡须轴的大径方向与流场方向平行(攻角为 0°)时,传感器可有效抑制自激振动;而当攻角调整至 90° 时,传感器对流速变化的响应显著,应变片输出信号强度随流速增加呈线性上升趋势。这证实了该结构在复杂扰动条件下的稳定运行能力及流向敏感性。该团队的这项研究展现出柔性结构设计在仿生流场感知中的独特优势。

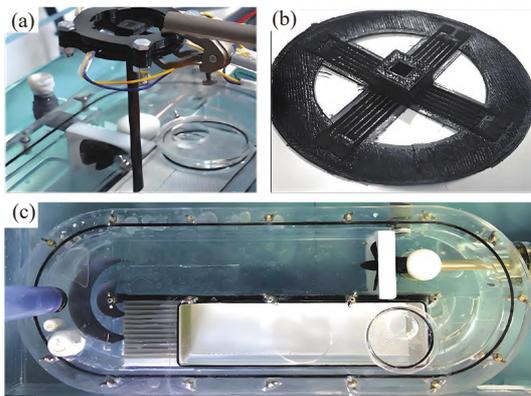


图 21 3D 打印的仿生流场传感器

Fig. 21 3D-printed biomimetic flow field sensor

Zhang 等^[77]结合海豹胡须的仿生结构与压电传感技术,研制出一款自供电的仿海豹胡须传感器。研究团队采用立体光刻技术打印出具有高径比特性的韧性光敏树脂仿胡须轴,并结合微加工工艺制备了 d33 型压电传感膜片,构建出完整的传感结构,如图 22(a)和(b)所示。其工作机制基于流场作用引发的胡须轴形变,进而通过压电效应将所受机械应力转换为可测量的电压信号。为验证其流场感知能力,研究团队搭建了振动流场实验系统,并使用振荡球体模拟典型水下扰动源,如图 22(c)所示。实验结果显示,该传感器的输出电压与水流速度呈良好的线性正相关关系,展现出优异的流速响应性能。此外,传感器能够通过电压波形的峰值变化准确判定攻角大小,并实现对扰动源频率的“锁定”识别,其输出电压频率与振荡球的振动频率完全一致。传感器实测感知灵敏度达到 $1.445 \text{ V} (\text{m/s})^{-1}$,在无外部供能条件下展现了良好地流场感知能力,为未来自驱动、低功耗水下感知系统提供了关键参考。

Liu 等^[78]基于自扩散压阻原理并结合海豹胡水下无人系统学报 sxwrxtxb.xml-journal.net

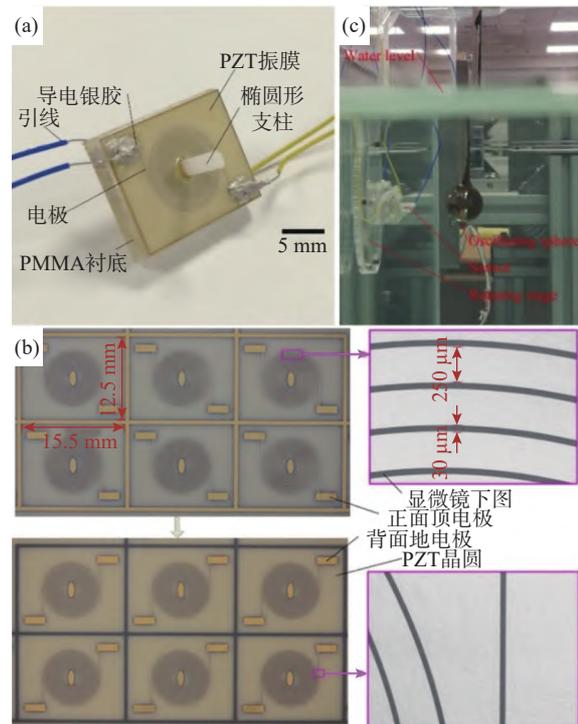


图 22 压电式仿海豹胡须传感器

Fig. 22 Piezoelectric seal-whisker-inspired sensor

须的波浪状起伏结构开发出一种具备流场识别功能的新型仿生传感器。该传感器由波浪形仿生胡须结构与集成 4 个 Ω 形微通道的 PDMS 柔性基座构成,其关键创新在于采用定向液体铺展技术,在微通道内填充导电纳米复合油墨,构建出高灵敏度的压敏电阻元件,如图 23(a)所示。在定常流动实验中,仿生胡须传感器在攻角为 0° 的条件下显著降低了流体阻力和涡激振动。进一步的振荡流实验结果表明,传感器可响应周期扰动引起的流量变化,最低可检测流速达 8 mm/s ,展现出良好的灵敏性。在尾流识别实验中,仿生胡须传感器被布设于圆柱钝体下游区域(如图 23(b)所示),用于感知并区分由上游圆柱体激发的不同尾流类型。实验表明,该传感器不仅能够有效辨别自激振动与尾流引起的涡激振动信号,还能准确识别上游扰动的特征,证明其在复杂流场感知与尾流辨识中的应用潜力。

综上,固定平台上的仿生胡须传感器研究充分验证了其在水下流场参数识别与尾流特征感知中的优势。通过融合海豹胡须的多尺度几何特征与多模态传感原理(如压阻、电容、压电和摩擦电等),

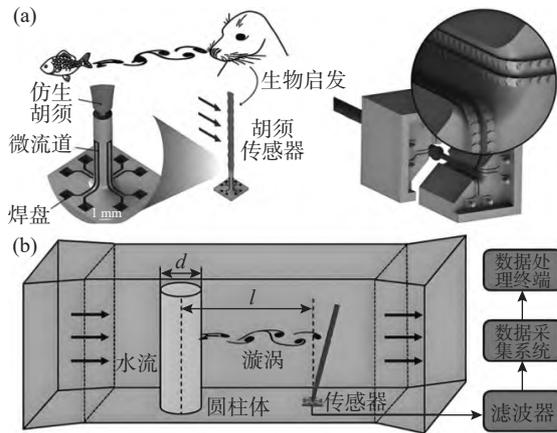


图 23 人工海豹胡须用于多种流动分析

Fig. 23 Artificial seal whiskers employed in multiple flow analyses

该类传感器不仅能有效解析稳态流场的流速与流向参数,更可锁定上游涡流源的尾涡振荡频率特征。然而,现阶段研究仍面临重要挑战:稳态流速与方向识别精度有限;尾流频率锁定尚未达到理论预期;更关键的是,静态平台条件下忽略了载体运动带来的流固耦合效应,导致实验结论与实际水下动态工况存在偏差,限制了其在 AUV 平台上的直接推广应用。

3.2 水下移动平台近场感知

Eberhardt 等^[50]提出了一种独特的在体测试方案,将无线仿生水流传感系统安装于港海豹口鼻部,借助海豹在水池中追踪移动目标(如振动球体或 AUV)的过程对系统性能进行验证。该系统被命名为“尾迹信息检测与追踪系统”,其核心结构为 1 组径向排列的 8 通道电容式仿生胡须传感阵列(如图 24(a)所示),其设计延续了团队先前的原型研究^[47, 79]。该实验设计使研究团队能够在海豹执行真实尾迹追踪任务的同时,对仿生传感系统进行测试(如图 24(b)所示)。实验显示,当海豹口鼻部穿过尾流区域时,传感器可记录到显著电压尖峰信号(如图 24(c)所示)。得益于多通道径向布局,该系统还能判断尾流来向,为复杂水下环境中的方向识别提供技术支持。该工作首次实现了海豹启发的“在体仿生胡须感知系统”,同时揭示了水下部署过程中面临的结构密封、材料腐蚀与基线漂移等挑战。此外,研究强调,面对非目标扰动引发的复杂噪声,信号处理算法在编码、提取与识别有

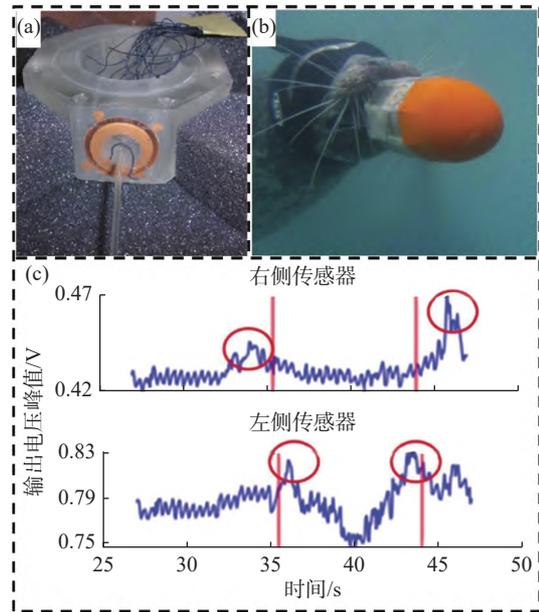


图 24 安装在海豹身上的电容式仿胡须水流传感阵列
Fig. 24 Capacitive biomimetic whisker flow-sensing array mounted on live seals

效信号中的关键作用不容忽视。

Wang 等^[80]受海豹胡须感知机制的启发,提出了一种基于仿生胡须设计的水流传感器,旨在为无人艇提供流场速度信息,其结构如图 25(a)所示。该传感器采用机械-磁转导机制工作,将胡须式拖动元件与电子测量单元分离,从而显著提升了整体的防水能力和抗盐雾腐蚀性能。此外,传感器采用模块化设计,允许通过调整拖动元件的几何形态来优化其在不同应用场景下的灵敏度与测量范围(如图 25(b)所示)。研究团队通过分析模型对该系统的感知性能进行了量化分析,并在实验中验证了胡须结构参数(如形态特征、横截面积、纵横比与浸没深度)对其输出响应的影响。在工程应用验证阶段,研究人员将防水仿生胡须传感器集成至 1 艘商用遥控船体上,开展静态流场条件下的速度估计实验(如图 25(c)所示)。结果显示,传感器估算得到的速度与参考测量数据高度一致,验证了其对流速感知的准确性与可行性。该仿生传感器的研究成果为海洋机器人平台提供了高适配性的速度估计手段,对提升海洋机器人在导航与环境感知能力方面具有广泛应用前景。

王森等^[81]基于海豹胡须的仿生感知原理,研制出一套移动式胡须传感器阵列系统,旨在通过

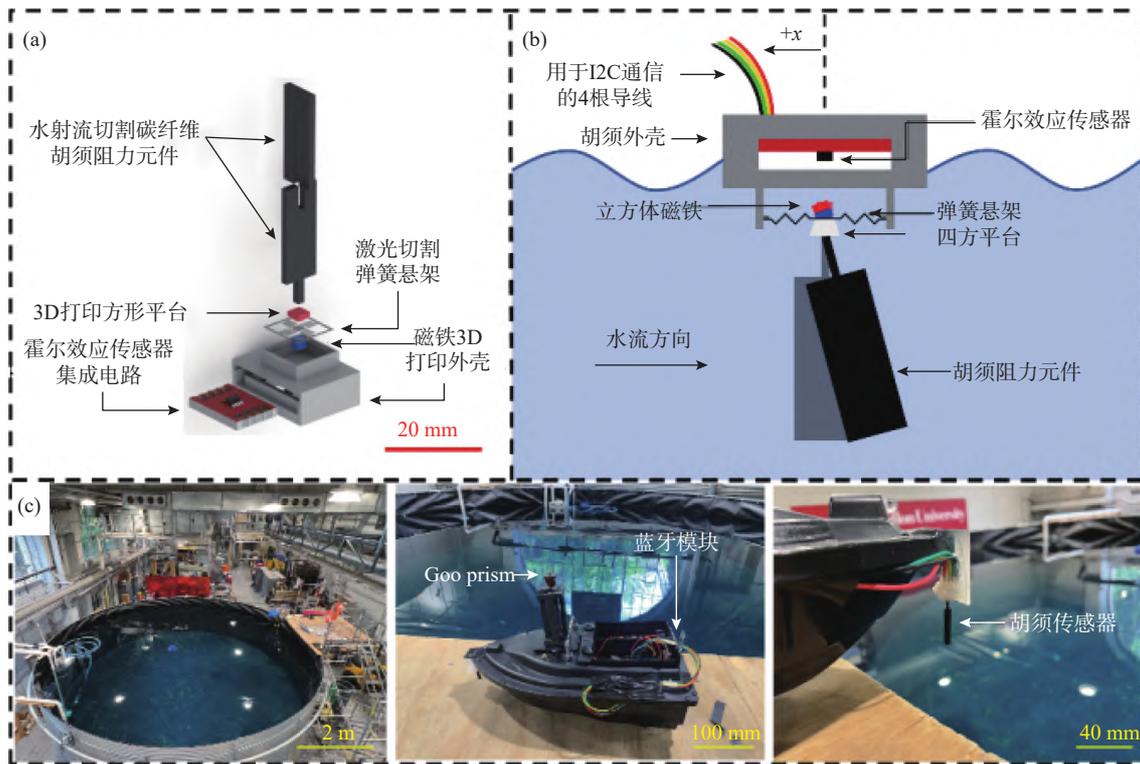


图 25 用于多向流体动力学传感的仿生胡须水流传感器
Fig. 25 Biomimetic whisker flow sensor for multi-axis hydrodynamic sensing

动态感知尾流特征实现对目标几何参数的反演。该团队利用 3D 打印技术制备了仿海豹胡须结构模型, 并将其与压阻传感单元集成, 构建形成传感器阵列, 如图 26(a)所示。为验证该系统的感知性能, 搭建了基于移动滑台的实验平台, 通过动态拖曳测试验证仿生胡须传感器阵列的流场感知能力(如图 26(b)所示)。实验结果表明, 该仿生胡须传感器阵列能够清晰区分尾流区域与非尾流区域, 且尾流区域的平均电压信号强度是非尾流区域的 3 倍以上。同时, 通过分析传感器阵列输出电压的空间梯度方向, 能够估计目标的运动方向。该研究通过结合实验验证与仿真建模, 系统地展示了仿生胡须阵列在识别水中运动目标尾流结构及推断运动方向方面的有效性, 为基于尾流感知的目标识别方法提供了新思路和技术支撑。

在柔性电子方向, 受海豹胡须的形态特征与感知机制启发, Wang 等^[82]结合 TENG 原理, 设计出一种柔性水下仿海豹胡须传感器(underwater bionic whisker sensor, UBWS)。如图 27(c)所示, UBWS 采用具有波浪状起伏轮廓的仿生结构, 可以有效抑制水流引发的涡激振动, 从而显著提升信噪比。

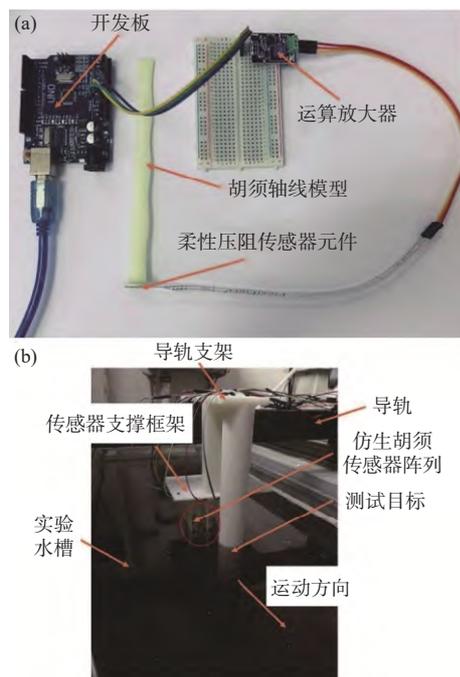


图 26 移动式仿海豹胡须传感器阵列
Fig. 26 Mobile seal-whisker-inspired sensor array

图 27(d)为海豹胡须波浪状起伏结构的放大图, 图 27(e)为传感器中导电油墨涂层的微观放大图。图 27(a)和图 27(b)为海豹感知追踪猎物的示意图,

海豹通过胡须来感知猎物在水中运动产生的涡流尾迹来锁定猎物的方位。该研究聚焦于反卡门涡街对 UBWS 输出信号的影响,并系统分析了传感器输出与扰动源参数之间的相关性。实验结果表明,传感器的响应与鱼尾的距离、摆幅以及摆频等变量呈现出显著相关性,表明 UBWS 对典型水下扰动具备良好的响应能力。进一步地,研究团队将 UBWS 集成至仿生机器人平台中,实现了基于水动力信号的水下目标实时定位与追踪。此项研究不仅验证了 UBWS 在动态感知场景中的可行性,也展示了仿生胡须结构与 TENG 技术融合在流场感知领域具有广阔的应用前景。

在此基础上, Liu 等^[65]进一步将海豹胡须的毛囊结构与 TENG 技术相结合,设计出一种用于水下机器人环境感知的仿生胡须传感器(bio-inspired whisker sensor, BWS)。与 Wang 等^[82]提出的柔性结构不同, BWS 为刚性结构设计,其根部集成了4个不同方向的 TENG 传感单元,用以模拟海豹毛囊的多方向感知能力,如图 28(a)所示。BWS 由碳纤维杆(作为触觉感知单元)、防水环氧树脂密封底座以及4个 TENG 传感单元组成。当碳纤维杆与

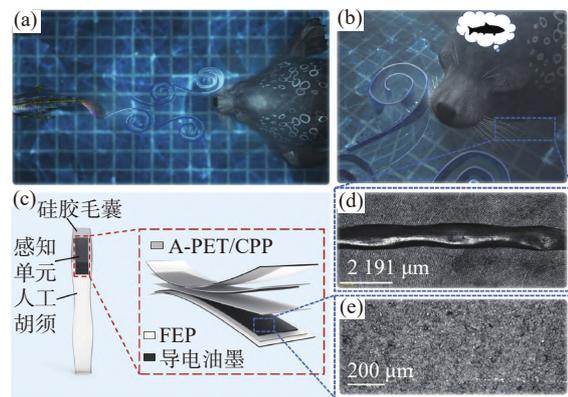


图 27 用于被动检测涡流的摩擦电式仿海豹胡须传感器
Fig. 27 Triboelectric seal-whisker-inspired sensor for passive vortex detection

流场接触并发生弯曲时,驱动内部的 TENG 单元产生形变,从而实现机械信号到电信号的转换。研究团队系统探究了碳纤维杆弯曲程度与 TENG 传感器单元输出电压之间的关系,实验结果显示,二者呈线性相关性。此外,通过分析4个 TENG 传感单元输出信号的相对强度,能够准确判断碳纤维杆的受力方向。基于上述特性,研究团队将 BWS 集成至水下机器人平台中(如图 28(b)所示),实现

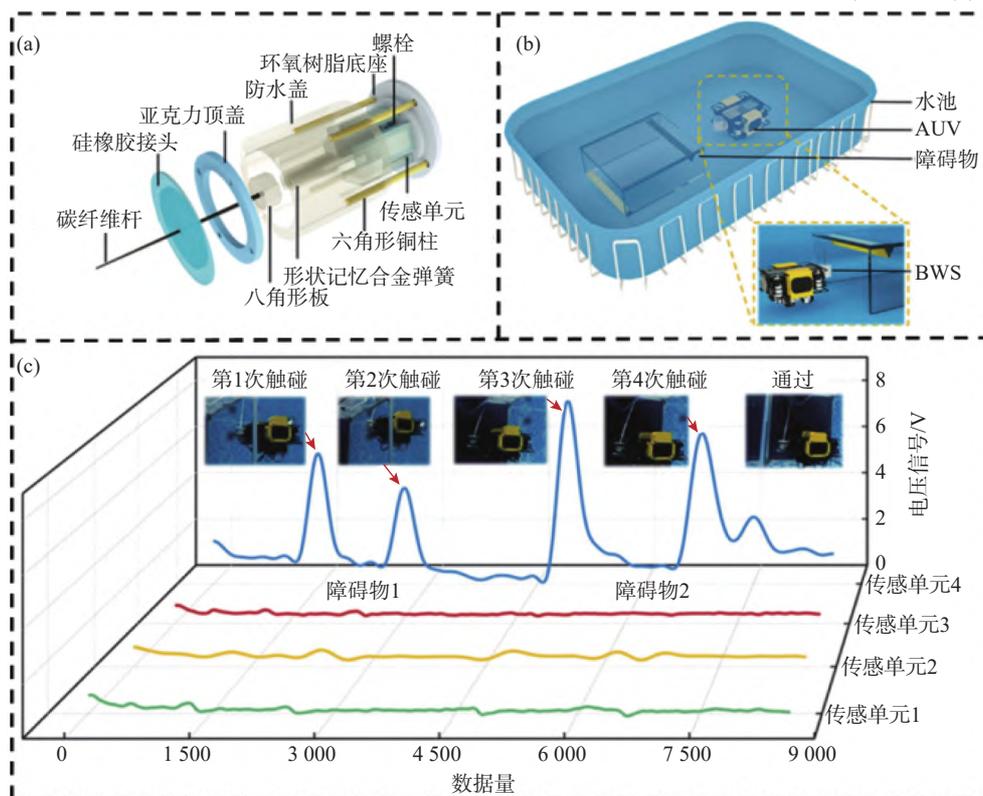


图 28 具有毛囊结构的摩擦电式仿海豹胡须传感器

Fig. 28 Triboelectric seal-whisker-inspired sensor with follicle-mimicking structure

了流场感知驱动的实时反馈。图 28(c)为传感器 4 个传感单元在流场中感知障碍物的电压信号响应曲线, 该系统能够在复杂水下环境中有效获取扰动信息, 并辅助机器人实现自主避障功能, 展现出该仿生胡须传感器在工程应用中的潜力。

Xu 等^[83]在此基础上进一步设计了一种融合深度学习技术的仿生水下摩擦电胡须传感器(underwater triboelectric whisker sensor, UTWS), 用于实现对多种水动力流场的被动感知。该传感器结构包括 1 个高宽比为 0.403 的椭圆形胡须轴、4 个模拟 FSC 的柔性摩擦电传感单元, 以及 1 个模仿海洋生物面部表皮的柔性波纹连接器。如图 29(a)所示(左图: S 为气囊窦长度, $b_1 \sim b_3$ 为阻尼系数, $k_1 \sim k_3$ 为对应的弹簧刚度系数; 中图: L_f 为仿生气囊长度, l_f 为气囊外胡须长度), 传感器在结构设计上引入了创新的双层气室屏蔽技术, 有效降低了水

中离子所引起的信号干扰。UTWS 表现出一系列优异的性能指标, 包括 21 ms 的快速响应时间和 61.66 dB 的高信噪比。该团队系统探究了 UTWS 输出信号与流体动力学参数之间的关联性, 实验证明该传感器不仅能够高精度感知流场速度和方向等参数, 还能够识别圆柱钝体尾流的典型特征。在系统集成方面, 将 UTWS 部署于水下航行器平台, 并结合深度学习算法对多通道传感信号进行解析处理。实验结果表明, 搭载 UTWS 的水下航行器可实现在线速度估计, 其均方根误差(root mean square error, RMSE)控制在约 0.093(如图 29(b)所示)。此外, UTWS 输出信号还可用于提取流场角度与扰动特征, 最终实现对航行器运动轨迹的精确估计(如图 29(c)~(e)所示)。该研究展现了将仿生传感器与智能算法融合的巨大潜力, 为构建下一代水下智能感知平台提供了新范式。

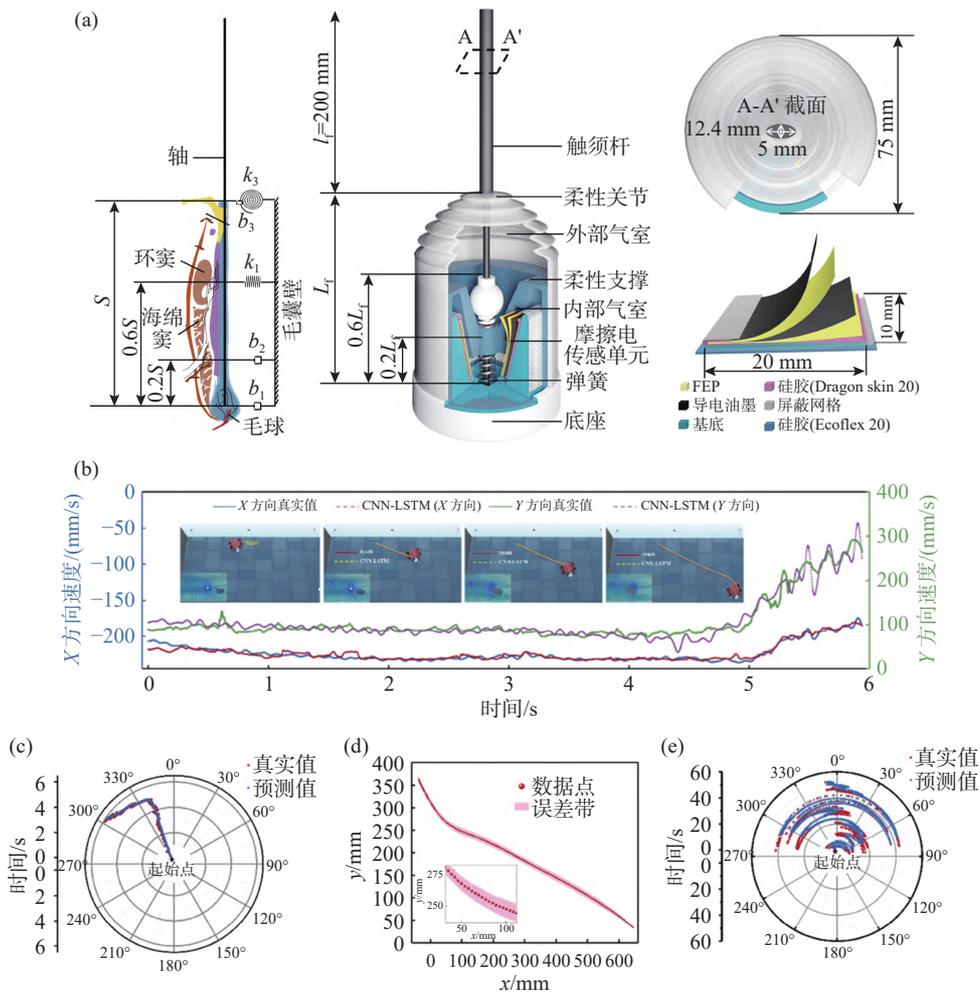


图 29 深度学习辅助的仿生水下摩擦电胡须传感器

Fig. 29 Deep learning-augmented biomimetic underwater triboelectric whisker sensor

综上所述,基于海豹胡须感知机理设计的仿生传感器在水下移动平台的流场感知中展现出出色性能。相关研究表明,该类传感器不仅能够在复杂水动力环境中有效捕捉流速、方向及尾流特征等关键参数,还具备优异的抗干扰能力和结构适应性。通过实时获取精准的流场信息,仿生胡须传感器为水下移动平台的自主导航、目标追踪与避障控制等任务提供了可靠的数据支撑。因此,将仿生胡须传感器集成至水下智能平台,不仅在技术上具备高度的可行性,也在工程应用层面展现出广阔的发展潜力。

4 结束语

仿海豹胡须传感器通过模拟海豹胡须的波浪状几何构型(有效抑制涡激振动)及FSC的多向感知机制,为水下高精度流场感知提供了前沿性的解决方案。文章系统回顾了该领域的发展路径:从生物感知机理的剖析,到基于光学、电阻、电容、压电与摩擦电等原理的多样化传感器设计,再到其在固定平台(流场监测)与水下移动平台(目标跟踪、避障导航)中的典型应用实践,全面揭示了该技术的研究进展与应用潜力。研究结果表明,仿海豹胡须传感器在水下复杂环境中能够高灵敏地感知流速与流向、准确捕捉涡旋频率特征并识别尾迹信号,表现出良好的抗干扰性与结构适应性。尤其在与水下移动平台融合时,可提供关键的近场流场信息,为AUV的智能导航与目标交互提供重要理论参考;同时,其与深度学习等智能算法的初步结合也展现出向智能感知系统演进的巨大潜力。

尽管取得诸多进展,该技术在实际应用中仍面临一系列挑战,主要包括材料长期稳定性不足(水下高压、腐蚀与生物附着)、复杂环境适应性有限(强湍流、低信噪比工况)、高效智能信号处理方法缺乏、微型化与系统集成难度大,以及缺少统一的性能评估标准等。面向未来,研究应着重在以下3个层面推进:其一,在材料与结构设计层面,开发兼具高稳定性与高灵敏度的新型功能材料和仿生结构,提升传感器的环境适应性和服役寿命;其二,在系统集成与制造工艺层面,借助先进制造技术实现多功能、小型化与高集成度器件设计,引入多传感器融合机制,并加强传感器与移动平台的流

固耦合机制研究,推动其在AUV与水下机器人上的高效应用;其三,在智能感知与应用推广层面,深化与人工智能、大数据方法的融合,提升流场特征识别与自适应控制能力,加快面向真实海洋环境的长期验证,构建统一的评价与测试体系。持续突破上述关键瓶颈,将有望推动仿海豹胡须传感器实现由实验验证向工程化应用的跨越,显著提升水下无人系统的智能水平,并为未来的海洋资源开发、生态环境监测及国防安全保障提供坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 蔡荣捷. 海洋技术的进展: 从声学突破到生物拟态工程的应用[J]. 科学咨询, 2025(1): 51-54.
CAI R J. Advances in marine technology: From acoustic breakthroughs to application of biomimetics[J]. Scientific Consult, 2025(1): 51-54.
- [2] 张宇, 王昊, 相城, 等. 面向观测网络供电的水下能量捕获技术研究进展[J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(1): 86-107.
ZHANG Y, WANG H, XIANG C, et al. Recent progress on underwater energy harvesting technology for powering observation networks[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2023, 31(1): 86-107.
- [3] 周正干, 李文涛, 李洋, 等. 相控阵超声水浸C扫描自动检测系统的研制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(12): 28-34.
ZHOU Z G, LI W T, LI Y, et al. Development of ultrasonic phased array immersion C-scan automatic detection system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(12): 28-34.
- [4] 吴青山, 翁俊杰, 郭斯琳, 等. 水下仿生柔性传感技术在流场感知中的进展与挑战[J]. 测控技术, 2024, 43(10): 1-9,16.
WU Q S, WENG J J, GUO S L, et al. Progress and challenges of underwater biomimetic flexible sensing technology in flow field perception[J]. Measurement & Control Technology, 2024, 43(10): 1-9,16.
- [5] 谢鸥, 孙兆光, 沈灿, 等. 基于仿鱼人工侧线的水下静态目标主动感知方法研究[J]. 传感技术学报, 2024, 37(10): 1786-1794.
XIE O, SUN Z G, SHEN C, et al. Study on the underwater static target active perception method based in fish-like artificial lateral line[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2024, 37(10): 1786-1794.
- [6] KRIEG M, NELSON K, MOHSENI K. Distributed sensing for fluid disturbance compensation and motion control of intelligent robots[J]. Nature Machine Intelligence, 2019, 1(5): 216-224.

- [7] BLECKMANN H, KLEIN A, MEYER G. Nature as a model for technical sensors[M]. Vienna: Springer, 2012: 3-18.
- [8] TRIANTAFYLLOU M S, WEYMOUTH G D, MIAO J. Biomimetic survival hydrodynamics and flow sensing[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2016, 48: 1-24.
- [9] KROESE A B, VAN J M, VAN D B J. Frequency response of the lateral-line organ of xenopus laevis[J]. Pflügers Archiv, 1978, 375(2): 167-175.
- [10] SOARES D. An ancient sensory organ in crocodylians[J]. Nature, 2002, 417(6886): 241-242.
- [11] WILLIAMS T M, KOOYMAN G L. Swimming performance and hydrodynamic characteristics of harbor seals phoca vitulina[J]. Physiological Zoology, 1985, 58(5): 576-589.
- [12] PERRIN W F, WÜRSIG B, THEWISSEN J G M. Encyclopedia of marine mammals[M]. Pittsburgh: Academic Press, 2009.
- [13] KOTTAPALLI A G P, ASADNIA M, MIAO J, et al. Biomimetic microsensors inspired by marine life[M]. Cham, Switzerland: Springer Cham, 2016.
- [14] DEHNHARDT G, MAUCK B, BLECKMANN H. Seal whiskers detect water movements[J]. Nature, 1998, 394(6690): 235-236.
- [15] 马峰, 张静晓, 贾曦雨, 等. 基于水下运动目标流场信息的仿生探测原理[J]. 水下无人系统学报, 2014, 22(6): 436-441.
MA F, ZHANG J X, JIA X Y, et al. Principle of biomimetic detection based on flow field information of underwater moving object[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2014, 22(6): 436-441.
- [16] 翟宇凡, 熊明磊, 王晨, 等. 水下仿生侧线感知研究进展[J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(1): 50-67.
ZHAI Y F, XIONG M L, WANG C, et al. A review on underwater perception based on bio-inspired artificial lateral line system[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2023, 31(1): 50-67.
- [17] 胡桥, 刘钰, 赵振轶, 等. 水下无人集群仿生人工侧线探测技术研究进展[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(2): 114-122.
HU Q, LIU Y, ZHAO Z Y, et al. Research advances of biomimetic artificial lateral line detection technology for unmanned underwater swarm[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2019, 27(2): 114-122.
- [18] BEEM H R, TRIANTAFYLLOU M S. Wake-induced 'slaloming' response explains exquisite sensitivity of seal whisker-like sensors[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 783: 306-322.
- [19] MUTHURAMALINGAM M, BRUECKER C. Seal and sea lion whiskers detect slips of vortices similar as rats sense textures[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 12808.
- [20] 李原正, 王天润, 关堂镇, 等. 基于液态金属型摩擦纳米发电的水下仿生触须传感器[J]. 水下无人系统学报, 2024, 32(5): 794-800.
LI Y Z, WANG T R, GUAN T Z, et al. Underwater biomimetic whisker sensor based on liquid metal and triboelectric nanogenerator[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2024, 32(5): 794-800.
- [21] DIAMOND M E, ARABZADEH E. Whisker sensory system – from receptor to decision[J]. Progress in Neurobiology, 2013, 103: 28-40.
- [22] PRESCOTT T J, DIAMOND M E, WING A M. Active touch sensing[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2011, 366(1581): 2989-2995.
- [23] AU W W L, BENOIT-BIRD K J, KASTELEIN R A. Modeling the detection range of fish by echolocating bottlenose dolphins and harbor porpoises[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2007, 121(6): 3954-3962.
- [24] NEWBY T C, HART F M, ARNOLD R A. Weight and Blindness of Harbor Seals[J]. Journal of Mammalogy, 1970, 51(1): 152.
- [25] HYVÄRINEN H. Diving in darkness: Whiskers as sense organs of the ringed seal(*Phoca hispida saimensis*)[J]. Journal of Zoology, 1989, 218(4): 663-678.
- [26] RENOUF D. Fishing in captive harbour seals (*phoca vitulina concolor*): A possible role for vibrissae[J]. Netherlands Journal of Zoology, 1979, 30(3): 504-509.
- [27] RENOUF D. Preliminary measurements of the sensitivity of the vibrissae of harbour seals(*Phoca vitulina*) to low frequency vibrations[J]. Journal of Zoology, 1979, 188(4): 443-450.
- [28] DEHNHARDT G, MAUCK B, HANKE W, et al. Hydrodynamic trail-following in harbor seals(*Phoca vitulina*)[J]. Science, 2001, 293(5527): 102-104.
- [29] SCHULTE-PELKUM N, WIESKOTTEN S, HANKE W, et al. Tracking of biogenic hydrodynamic trails in harbour seals(*Phoca vitulina*)[J]. Journal of Experimental Biology, 2007, 210(5): 781-787.
- [30] HANKE W, WITTE M, MIERSCH L, et al. Harbor seal vibrissa morphology suppresses vortex-induced vibrations[J]. Journal of Experimental Biology, 2010, 213(15): 2665-2672.
- [31] SMODLAKA H, GALEX I, PALMER L, et al. Ultrastructural, sensory and functional anatomy of the northern elephant seal(*Mirounga angustirostris*) facial vibrissae[J]. Anatomia, Histologia, Embryologia, 2017, 46(5): 487-496.
- [32] ZHANG P, WANG S, JIANG J, et al. A fiber-optic extrinsic fabry-perot hydrophone based on archimedes spiral-type sensitive diaphragm[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(23): 22654-22660.
- [33] ZHAO C, JIANG Q, LI Y. A novel biomimetic whisker technology based on fiber Bragg grating and its application[J]. Measurement Science and Technology, 2017,

- 28(9): 095104.
- [34] KENT T A, KIM S, KORNILOWICZ G, et al. Whisker-Sight: A reconfigurable, vision-based, optical whisker sensing array for simultaneous contact, airflow, and inertia stimulus detection[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 3357-3364.
- [35] WANG J, YANG X, WANG A, et al. Bio-inspired fiber attitude sensor for direction-distinguishable pitching and rolling sensing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(21): 6844-6851.
- [36] WANG J, WANG A, NIU C, et al. Bioinspired whisker sensor based on orthometric FBGs for underwater applications[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1-9.
- [37] ZHANG Y, YAN S, WEI Z, et al. A small-scale, rat-inspired whisker sensor for the perception of a biomimetic robot: Design, fabrication, modeling, and experimental characterization[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2022, 29(4): 115-126.
- [38] AHMAD RIDZUAN N A, MIKI N. Tooth-inspired tactile sensor for detection of multidirectional force[J]. *Micromachines*, 2019, 10(1): 18.
- [39] XIE R, ZHU J, WU H, et al. 3D-conductive pathway written on leather for highly sensitive and durable electronic whisker[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(28): 9748-9754.
- [40] LIN C W, ZHAO Z, KIM J, et al. Pencil drawn strain gauges and chemiresistors on paper[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 3812.
- [41] WAKABAYASHI S, YAMAGUCHI T, ARIE T, et al. Out-of-plane electric whiskers based on nanocarbon strain sensors for multi-directional detection[J]. *Carbon*, 2020, 158: 698-703.
- [42] ZHENG X, KAMAT A M, KRUSHYNSKA A O, et al. 3D printed graphene piezoresistive microelectromechanical system sensors to explain the ultrasensitive wake tracking of wavy seal whiskers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(47): 2207274.
- [43] VALDIVIA Y ALVARADO P, SUBRAMANIAM V, TRIANTAFYLLOU M. Design of a bio-inspired whisker sensor for underwater applications[C]//2012 IEEE SENSORS. Taipei, China: IEEE, 2012: 1-4.
- [44] HUA Q, LIU H, ZHAO J, et al. Bioinspired electronic whisker arrays by pencil-drawn paper for adaptive tactile sensing[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2016, 2(7): 1600093.
- [45] LIU Z, QI D, LEOW W R, et al. 3D-structured stretchable strain sensors for out-of-plane force detection[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(26): 1707285.
- [46] DUSEK J E, TRIANTAFYLLOU M S, LANG J H. Piezoresistive foam sensor arrays for marine applications[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 248: 173-183.
- [47] STOCKING J B, EBERHARDT W C, SHAKHSHEER Y A, et al. A capacitance-based whisker-like artificial sensor for fluid motion sensing[C]//2010 IEEE Sensors. Waikoloa, USA: IEEE, 2010: 2224-2229.
- [48] ASSAF T, ROSSITER J, PEARSON M. Contact sensing in a bio-inspired whisker driven by electroactive polymer artificial muscles[C]//2013 IEEE Sensors. Baltimore, USA: IEEE, 2013: 1-4.
- [49] FEND M, BOVET S, HAFNER V V. The artificial mouse - a robot with whiskers and vision[C]//Proceedings of the 35th International Symposium on Robotics(ISR 2004). Paris, France: International Federation of Robotics 2004, 2004.
- [50] EBERHARDT W C, WAKEFIELD B F, MURPHY C T, et al. Development of an artificial sensor for hydrodynamic detection inspired by a seal's whisker array[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2016, 11(5): 056011.
- [51] DROOGENDIJK H, BRUININK C M, SANDERS R G P, et al. Non-resonant parametric amplification in biomimetic hair flow sensors: Selective gain and tunable filtering[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(21): 213503.
- [52] DELAMARE J, SANDERS R, KRIJNEN G. 3D printed biomimetic whisker-based sensor with co-planar capacitive sensing[C]//2016 IEEE Sensors. Orlando, USA: IEEE, 2016: 1-3.
- [53] JIANG Y, LI J, WANG Z, et al. Design and fabrication of an E-whisker using a PVDF ring[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2021, 16(3): 036007.
- [54] BEBEK O, CAVUSOGLU M C. Whisker-like position sensor for measuring physiological motion[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2008, 13(5): 538-547.
- [55] KOTTAPALLI A G P, ASADNIA M, MIAO J M, et al. Harbor seal whisker inspired flow sensors to reduce vortex-induced vibrations[C]//2015 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Estoril, Portugal: IEEE, 2015: 889-892.
- [56] JIANG Y, GUO C, ZHANG Y, et al. Design and fabrication of a four-electrodes PVDF fiber for a flow sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(3): 1982-1989.
- [57] GUO L, LIU J, WU G, et al. Piezoelectric wavy whisker sensor for perceiving underwater vortex from a bluff body[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 365: 114875.
- [58] JU F, LING S F. Sensing fluid viscosity and density through mechanical impedance measurement using a whisker transducer[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(5): 055105.
- [59] WANG D, LI Y, HU X, et al. Electrohydrodynamic jet printed bioinspired piezoelectric hair-like sensor for high-sensitivity air-flow detection[J]. *Smart Materials and Structures*, 2023, 32(9): 095020.
- [60] WANG X, XU P, MA Z, et al. A bio-inspired whisker

- sensor based on triboelectric nanogenerators[C]//2020 35th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation(YAC). Zhanjiang, China: IEEE, 2020: 105-109.
- [61] WANG X, XU P, LIU J, et al. Semi-flexible bionic whisker sensor based on triboelectric nanogenerators[C]//2021 International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation(AIEA). Guangzhou, China: IEEE, 2021: 194-198.
- [62] PUNEETHA P, MALLEM S P R, PARK S C, et al. Ultra-flexible graphene/nylon/PDMS coaxial fiber-shaped multifunctional sensor[J]. *Nano Research*, 2023, 16(4): 5541-5547.
- [63] YU A, CHEN L, CHEN X, et al. Triboelectric sensor as self-powered signal reader for scanning probe surface topography imaging[J]. *Nanotechnology*, 2015, 26(16): 165501.
- [64] XU P, WANG X, WANG S, et al. A triboelectric-based artificial whisker for reactive obstacle avoidance and local mapping[J]. *Research*, 2021, 2021: 9864967.
- [65] LIU J, XU P, ZHENG J, et al. Whisker-inspired and self-powered triboelectric sensor for underwater obstacle detection and collision avoidance[J]. *Nano Energy*, 2022, 101: 107633.
- [66] AU W W L, BENOIT-BIRD K J, KASTELEIN R, et al. Acoustic basis for fish prey selection by echolocating odontocetes[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, 116(4_Supplement): 2503-2504.
- [67] BEEM H, HILDNER M, TRIANTAFYLLOU M. Calibration and validation of a harbor seal whisker-inspired flow sensor[J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 22(1): 014012.
- [68] KOTTAPALLI A G P, ASADNIA M, HANS H, et al. Harbor seal inspired MEMS artificial micro-whisker sensor[C]//2014 IEEE 27th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems(MEMS). San Francisco, USA: IEEE, 2014: 741-744.
- [69] ALVARADO P V, SUBRAMANIAM V, TRIANTAFYLLOU M. Performance analysis and characterization of bio-inspired whisker sensors for underwater applications[C]//2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo, Japan: IEEE, 2013: 5956-5961.
- [70] FRIES F, VALDIVIA Y ALVARADO P. Whisker-like sensors with soft resistive follicles[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics(RO-BIO). Macau, China: IEEE, 2017: 2038-2043.
- [71] WIESKOTTEN S, DEHNHARDT G, MAUCK B, et al. Hydrodynamic determination of the moving direction of an artificial fin by a harbour seal(*Phoca vitulina*)[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2010, 213(13): 2194-2200.
- [72] GUL J Z, SU K Y, CHOI K H. Fully 3D printed multi-material soft bio-inspired whisker sensor for underwater-induced vortex detection[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(2): 122-132.
- [73] KAMAT A M, PEI Y, KOTTAPALLI A G P. Bio-inspired cilia sensors with graphene sensing elements fabricated using 3D printing and casting[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(7): 954.
- [74] KAMAT A M, ZHENG X, JAYAWARDHANA B, et al. Bioinspired PDMS-graphene cantilever flow sensors using 3D printing and replica moulding[J]. *Nanotechnology*, 2020, 32(9): 095501.
- [75] KAIDAROVA A, KHAN M A, MARENGO M, et al. Wearable multifunctional printed graphene sensors[J]. *NPJ Flexible Electronics*, 2019, 3(1): 1-10.
- [76] HONING T V D. The 3D printing of a bio-inspired flow sensor system[D]. Groningen, Netherlands: University of Groningen, 2023.
- [77] ZHANG X, SHAN X, XIE T, et al. Harbor seal whisker inspired self-powered piezoelectric sensor for detecting the underwater flow angle of attack and velocity[J]. *Measurement*, 2021, 172: 108866.
- [78] LIU G, JIANG Y, WU P, et al. Artificial whisker sensor with undulated morphology and self-spread piezoresistors for diverse flow analyses[J]. *Soft Robotics*, 2023, 10(1): 97-105.
- [79] EBERHARDT W C, SHAKHSHEER Y A, CALHOUN B H, et al. A bio-inspired artificial whisker for fluid motion sensing with increased sensitivity and reliability[C]//2011 IEEE Sensors. Limerick, Ireland: IEEE, 2011: 982-985.
- [80] WANG T, KENT T A, BERGBREITER S. Design of whisker-inspired sensors for multi-directional hydrodynamic sensing[EB/OL]. [2023-07-14]. <https://arxiv.org/abs/>.
- [81] 王森, 徐贺, 孔德义, 等. 仿海豹胡须阵列检测水中运动目标尾流特征[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(6): 63-71.
WANG S, XU H, KONG D Y, et al. Detecting wake characteristics of moving targets in water by bio-inspired seal whisker array[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(6): 63-71.
- [82] WANG S, XU P, WANG X, et al. Underwater bionic whisker sensor based on triboelectric nanogenerator for passive vortex perception[J]. *Nano Energy*, 2022, 97: 107210.
- [83] XU P, LIU J, LIU B, et al. Deep-learning-assisted triboelectric whisker for near field perception and online state estimation of underwater vehicle[J]. *Nano Energy*, 2024, 129: 110011.

(责任编辑: 陈 曦)