DOI:10.11784/tdxbz202506029

压阻式仿海豹胡须流速传感器设计与原理验证

刘玉红[1]，谭　强[1]，王源耕[2]，赵烟桥[2]
(1. 天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室，天津 300350；
2. 哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院，哈尔滨 150080)

摘　要：为满足中小型无人水下航行器对传感器小型化和轻量化的需求，本研究借鉴海豹胡须在流场感知中的结构特征与感知机制，基于压阻原理并结合导向翼升力设计了一款小型仿海豹胡须流速传感器. 该传感器通过仿生结构、导向翼、十字悬臂梁与压阻应变片感知并传递流场信息，可同时实现水流大小与方向的测量；将周期性椭圆截面的仿海豹胡须结构与导向翼相结合，在有效抑制涡激振动的同时实现流向自适应测量. 依据海豹胡须结构特征及流场感知机制，设计了仿海豹胡须传感器的总体结构及海豹胡须仿生结构的几何参数，分析了其流场感知原理. 利用数值仿真方法分析了传感器在不同流速下的应力响应特性，理论计算与仿真结果的相对误差在 10%以内，且应力随流速变化呈高度相关的二次关系. 水洞试验结果表明，在流速为 0.3 m/s 时，制作的传感器原理样机能够实现较高精度的流速与流向感知与识别，流向识别平均绝对误差为 3.4°，流速灵敏度达到 11.887 V/(m/s)，高于已有同类仿生胡须传感器的水平，验证了测量原理的可行性. 本研究提出的仿海豹胡须流速传感器实现了小型化与轻量化设计，质量仅约 10 g，适合搭载于中小型无人水下航行器，同时在低速流场中具备较高的流速与流向同步感知能力，为水下传感设备的小型化与高性能发展提供了新的思路与参考.

关键词：海豹胡须仿生结构；流速传感器；导向翼；压阻应变片
中图分类号：TH12　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0493-2137(2026)11-1119-08

Design and Principle Verification of Piezoresistive Seal-Whisker-Inspired Flow Velocity Sensor

Liu Yuhong[1]，Tan Qiang[1]，Wang Yuangeng[2]，Zhao Yanqiao[2]
(1. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education，Tianjin University，Tianjin 300350，China；
2. School of Measurement-Control Technology and Communications Engineering，Harbin University of Science and Technology，Harbin 150080，China)

Abstract：The demand for miniaturized and lightweight sensors in small to medium unmanned underwater vehicles (UUVs) has been increasing. In this study，a compact seal-whisker-inspired flow velocity sensor was designed based on the principle of hydrofoil lift and piezoresistive effect，drawing inspiration from the structural characteristics and flow-sensing mechanism of seal whiskers. The overall structure and geometric parameters of the bionic sensor were designed based on the structural characteristics and flow-sensing mechanism of seal whiskers. The sensing principle was analyzed. The designed bionic sensor，which comprises a bionic structure，a hydrofoil，a cross-shaped cantilever beam，and piezoresistive strain gauges，detected and transmitted flow field signals through its perception and measurement units to simultaneously determine the flow velocity and direction. The periodic elliptical section of the bionic seal whisker structure and the hydrofoil integration effectively suppressed the vortex-induced vibrations and enabled the adaptive measurement of the flow direction. The stress response of the sensor at different flow velocities

收稿日期：2025-06-16；**修回日期**：2025-08-29.
作者简介：刘玉红（1971—　　），女，博士，教授.
通信作者：刘玉红，yuhong_liu@tju.edu.cn.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52375024).
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52375024).

was analyzed using numerical simulations. The simulation results showed a strong quadratic correlation between the flow velocity and stress response, with the relative errors between the theoretical predictions and simulations being within 10%. Water tunnel experiments demonstrated that the fabricated prototype achieved high-accuracy flow sensing at a flow velocity of 0.3 m/s, with an average absolute flow-direction error of 3.4° and a velocity sensitivity of 11.887 V/(m/s), substantially outperforming existing whisker-inspired sensors and validating the proposed design. The sensor features compactness and lightweight, with a total mass of approximately 10 g, making it suitable for use in small to medium UUVs. Further, it provides high precision in synchronous detection of flow velocity and direction in low-speed aquatic environments, offering a novel approach and valuable reference for the development of compact, high-performance underwater sensing equipment.

Keywords: bionic seal whisker structure; flow velocity sensor; hydrofoil; piezoresistive strain gauge

随着海洋开发的不断推进,中小型无人水下航行器(unmanned underwater vehicles, UUVs)在海洋资源勘察、海洋科学探测、海洋环境监测、海洋军事以及海洋渔业等领域发挥着日益重要的作用[1]. 中小型 UUVs 的有限搭载能力对其搭载传感器的小型化及轻量化提出了迫切需求与挑战. 流速传感器是 UUVs 上测量流速的必载设备,目前主流的流速测量设备,如多普勒式测速仪、粒子图像测速仪等,存在体积大、结构复杂、能耗高等问题[2],使其在中小型 UUVs 上的应用存在局限性. 因此,开展小型化、轻量化流速传感器的研究具有重要意义.

某些海洋鳍足类动物(如海豹)的胡须对其周围流场变化具有极高的敏感性,它们可以利用其高度敏感的胡须感知猎物留下的尾流痕迹,从而追踪猎物[3]. Dehnhardt 等[4]对海豹胡须感知能力的研究结果表明:即使在缺失视觉和听觉的情况下,海豹依然能够感知极低的水流速度;当海豹胡须被铁丝网固定以限制其运动时,则不再对水流刺激做出反应,这一发现证实了海豹胡须在感知水流方面的独特功能. 受此启发,研究者们基于仿生学原理,借鉴海豹胡须的被动流场感知机制,开展了多种小型化仿生传感器的设计与研究. Beem 等[5-6]设计了一种基于海豹胡须结构的传感器,胡须模型长度为 275 mm,直径为 15.9 mm,室内水池拖曳试验结果表明,该传感器可有效测量 0.2 ~ 0.8 m/s 范围内的水流速度. Kottapalli 等[7]设计了一种小型化仿海豹胡须传感器,将须状结构集成于压电薄膜上,模拟了海豹胡须的低流速感知性能,该传感器的流速传感阈值低至 193 μm/s. Gul 等[8]提出了一种基于石墨烯图案电阻的多材料仿生胡须传感器,用于检测人造鱼鳍往复运动时产生的涡旋. Zheng 等[9]设计了一种集成石墨烯纳米片压阻元件的仿海豹胡须微机电系统(micro-electro mechanical system, MEMS)传感器,用于感知上游水流,循环水槽试验结果表明该传感器可通过锁定尾流发生器频率成功感应上游尾流,展现出较高的信噪比. Wang 等[10]提出了一种基于摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG)的仿海豹胡须传感器,试验表明其输出信号与目标运动参数(距离、摆动角度、频率)高度相关,可据此确定水下物体相对运动状态.

现有仿海豹胡须传感器的研究多聚焦于涡流感知与尾迹跟踪,在流速感知方面仍处于初步探索阶段,且多数研究仅关注流速大小的测量,对于流速方向的同步检测尚缺乏研究. 基于上述问题,本文以海豹胡须为仿生原型,通过调研海豹胡须外形结构特征及感知原理,设计一种小型化、可用于二维流场信息(水流速度和流向)识别的仿海豹胡须流速传感器.

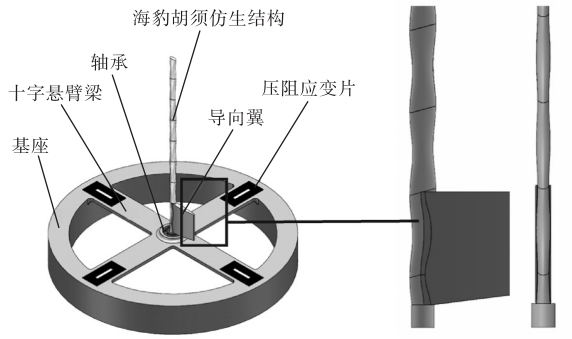
1 仿海豹胡须流速传感器结构及测量原理

1.1 总体结构

研究发现,海豹胡须中并没有神经元,当水流作用在胡须上并使胡须发生偏转时,这种变化会传递到胡须根部,并由分布在海豹面颊的神经元感知后传递至大脑,从而实现对复杂水下环境的感知与分析. 据研究,海豹科的 18 个种类中有 15 种的胡须外形具有起伏状结构[11]. 该结构特征表现为椭圆横截面的长轴与短轴呈周期性变化,且二者之间存在相位错位,即当长轴达到最大值时,短轴处于最小值,反之亦然. 与不具有起伏外形结构的胡须相比,这种起伏结构使连续截面波动时的横截面积保持相对恒定,可有效抑制涡激振动,同时显著提升水流感知灵敏度[9].

基于海豹胡须的功能特征,并充分发挥海豹胡须在涡激振动抑制方面的优势,本文提出的仿海豹胡须流速传感器结构如图 1(a)所示. 该传感器的结构主要由两部分构成:流速感知单元及测量单元. 流速感知单元由海豹胡须仿生结构、导向翼及轴承组成. 其中,海豹胡须仿生结构用于感知流场信息,其结构借鉴了海豹胡须的核心几何特征:周期性起伏的椭圆截

面形态，长轴与短轴呈相位错位，以最大限度抑制涡激振动. 海豹胡须仿生结构通过其根部的圆柱轴与轴承连接，导向翼布置于圆柱轴上方，如图 1(b)所示，并使导向翼弦长方向与胡须椭圆截面的长轴方向保持一致. 这一设计方案巧妙借用当导向翼与水流间存在攻角时会产生升力，其对仿海豹胡须产生旋转力矩，使胡须旋转，保证胡须椭圆截面长轴方向始终与来流方向平行，从而最大程度抑制涡激振动. 测量单元由十字悬臂梁、压阻应变片及圆筒形基座组成. 十字悬臂梁用于产生应变，圆柱筒形基座与十字梁一体成型，通过不同的结构设计使悬臂梁具有较大柔性，以满足易变形需求；而基座则表现为高刚性，以满足支撑功能. 压阻应变片等效于海豹面颊中神经元的感知功能，将十字梁结构变形转化为电信号. 压阻应变片黏贴于十字梁上表面靠近圆柱筒基座部分(此处的应变最大)，以最大限度提升信号强度.



(a) 总体结构　　(b) 海豹胡须仿生结构

图 1　仿海豹胡须流速传感器结构

Fig.1　Structure of the seal-whisker-inspired flow velocity sensor

1.2　测量原理

仿海豹胡须流速传感器的感知原理如图 2 所示，定义流体速度为 v，来流方向为 DIR，以十字悬臂梁中心为原点建立坐标系，应变片 A 的方向设定为 x 轴方向，应变片 B 的方向设定为 y 轴方向，来流方向与 x 轴夹角为 θ. 4 个压阻应变片的初始阻值相同，均为 R_0，4 个压阻应变片通过惠斯通电桥进行连接. 当仿海豹胡须未受到水流作用时，4 个压阻应变片的电压值相同，均为 E_0. 当水流与仿海豹胡须长轴存在夹角时，导向翼产生的升力会使仿海豹胡须模型绕轴承转动，使其长轴方向与水流方向一致. 在此状态下，仿海豹胡须模型受到的水动力 F_D 计算式为

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 w H \tag{1}$$

式中：C_D 为流速感知单元的阻力系数；ρ 为水的密度；w 为胡须的特征长度；H 为胡须长度.

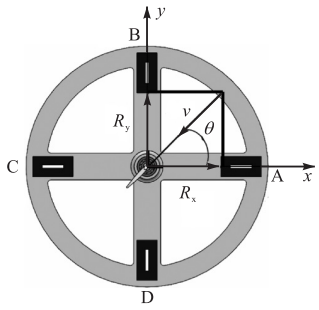


图 2　流速感知原理示意

Fig.2　Schematic of the flow velocity sensing principle

由式(1)知，在传感器流速感知单元结构确定、流体性质固定的条件下，水动力 F_D 的大小仅取决于流速的大小. 该水动力通过海豹胡须仿生结构作用于十字悬臂梁结构，使其产生形变，并驱动压阻应变片产生相应变形，从而导致其输出电压发生变化. 以图 2 所示水流方向为例，此时应变片 A 和 B 向上弯曲，其电阻值增加，从而导致输出电压升高；应变片 C 和 D 向下弯曲，电阻值减小，相应电压降低. 在测得的 4 个电压值 E_A、E_B、E_C、E_D 中，增量为正的数据标记增量为 E_x 和 E_y. 通过计算合成矢量 E_x 和 E_y 的方向角 θ 和模长大小 V，即可获得流体运动的方向及速度大小.

合成矢量的方向角为

$$\theta = \arctan\left(E_y / E_x\right) \tag{2}$$

假定沿 x 轴负方向设定为 0°，具体判断规则如下：若数据来源于应变片 A 和 B，则 DIR = θ；若数据来源于应变片 B 和 C，则 DIR = 180° − θ；若数据来源于应变片 C 和 D，则 DIR = 180° + θ；若数据来源于应变片 D 和 A，则 DIR = 360° − θ.

合成矢量模长大小为

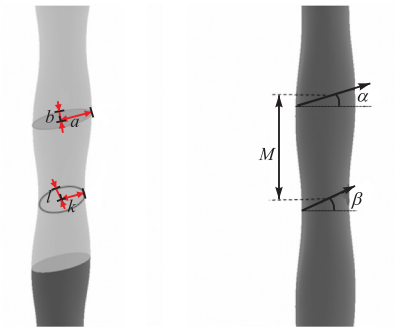
$$V = \left(E_x^2 + E_y^2\right)^{1/2} \tag{3}$$

根据式(3)计算得到合成矢量的模长 V，再通过试验标定拟合 V 与流体速度 v 之间的函数关系，即可实现对水流速度大小的定量测量.

1.3　流速感知单元结构与参数设计

Hanke 等[12]通过微型摄像技术测量了 13 根斑海豹胡须共 81 个起伏波段，提取出能够代表胡须表面特征的 7 个典型结构参数. 根据 Hanke 研究结果，绘制并定义海豹胡须仿生结构[12]如图 3 所示. 其中：a、b 为胡须起伏波段中较扁长的椭圆截面的长半轴和短半轴；k、l 为较短胖的椭圆截面的长半轴和短半轴；M 为相邻两个椭圆截面的距离；α、β 分别为两个椭圆截面与水平面的夹角. 典型海豹胡须的 M 为 0.91 mm，a 和 b 分别为 0.595 mm 和 0.24 mm，k 和 l

分别为 0.475 mm 和 0.29 mm，两个控制椭圆的倾斜角分别为 $\alpha = 15.27°$ 和 $\beta = 17.60°$.



（a）二等轴测 （b）正视

图 3 海豹胡须仿生结构典型参数

Fig.3 Typical parameters of the bionic seal whisker structure

Kamat 等[13]研究表明，尽管不同海豹胡须的具体形态存在差异，但其波长（$\lambda = 2M$）与等效直径（$d = (a+b+k+l)/2$）的比值（简称波径比）却表现出一定的规律性. 当波径比位于 4.4 ~ 4.6 之间时，海豹胡须能够展现出最好的涡激振动抑制能力.

本文设计的仿海豹胡须模型结构参数参考了 Hanke 等[12]及 Kamat 等[13]对海豹胡须的形态研究结果. 如表 1 所示，其中，a、b、k、l、α、β 采用 Hanke 所测量的参数. 由于 Hanke 等[12]提出的海豹胡须模型的波径比约为 2.275，这一比值远低于 Kamat 等[13]发现的最优比值范围，说明在 Hanke 等[12]模型下，海豹胡须的涡激振动抑制能力并未达到最佳. 针对这一问题，本文对 Hanke 等[12]提出的胡须几何模型关键参数 M 值扩大为 1.82 mm，使仿海豹胡须模型的波径比（值为 4.55）落于最优波径比范围，以提升流场扰动下的感知稳定性. 考虑到较长胡须在水下操作时易受扰动而引发噪声，本文将胡须长度 H 设定为 30 mm，以兼顾性能与稳定性.

表 1 海豹胡须仿生结构参数

Tab.1 Structural parameters of the bionic seal whisker model

a/mm	b/mm	k/mm	l/mm	α/(°)	β/(°)	M/mm	H/mm
0.595	0.24	0.475	0.29	15.27	17.60	1.82	30

导向翼选择 NACA 0012 翼型，该翼型在攻角较小情况下比其他形状能够展现出更优异的水动力性能[14]，在 0° ~ 10° 小攻角范围内，相同雷诺数时 NACA 0012 翼型的升力系数较 NACA 0015 和 NACA 0018 大，可以产生更大的水翼升力. 导向翼安装在胡须结构的底部（图 1），考虑到导向翼需要产生足够的力矩带动仿海豹胡须旋转，导向翼弦长设为 5 mm，高为 5 mm，最大厚度为 0.6 mm.

1.4 测量单元结构与参数设计

测量单元由基座及压阻应变片组成（图 1），其中基座由十字悬臂梁和圆筒基底组成. 当胡须椭圆长轴与十字悬臂梁中心线共线时，梁上的最大应力可表示为

$$\sigma_{\max} = \frac{L^2 + 3BL}{\frac{2}{3}Bt^2(L^2 + 3BL + 3B^2)} M_{\mathrm{D}} + \frac{F_{\mathrm{D}}}{Bt} \tag{4}$$

式中：L 为单根悬臂梁的长度（即基座内径）；B 为梁的宽度；t 为梁的厚度；M_{D} 为水动力 F_{D} 产生的水平力矩. 由式(4)可知，当感知单元结构确定后，十字悬臂梁所受的应力主要由十字悬臂梁的结构尺寸（长度、厚度和宽度）决定，且十字悬臂梁长度越长、厚度越薄，十字悬臂梁上的应力越大，传感器的灵敏度越高.

十字悬臂梁的宽度根据应变片宽度而定，本文研究中选用的应变片基底尺寸（长 × 宽）为 6 mm × 3 mm，故十字悬臂梁宽度确定为 4 mm. 考虑梁的承受能力、对动态稳定性的影响以及加工难度等方面，经仿真计算与模型测试[15]，本文将十字悬臂梁的长度设计为 30 mm，厚度确定为 0.5 mm. 底部圆筒基座设计为壁厚 3 mm，高度为 5 mm.

相比常用的金属应变片，半导体硅基应变片具有更高的灵敏系数和更小的滞后误差，能显著提升测量精度. 因此，本文选用电阻值为 120 Ω 的硅基压阻应变片作为敏感元件，其灵敏系数约为 120，温度系数为 (0.1% ~ 0.2%)/℃，兼具灵敏度与温度稳定性.

2 仿海豹胡须流速传感器结构及原理可行性

基于 Ansys 仿真软件对仿海豹胡须流速传感器进行仿真分析，以验证设计的仿海豹胡须流速传感器结构及测量原理的可行性.

2.1 仿真计算模型

鉴于所设计的仿海豹胡须结构较小，在低流速下对流体几乎无扰动，计算过程中可忽略. 因此，综合考虑计算成本与效率，采用单向流固耦合方法进行仿真计算.

将图 1 所设计的传感器几何模型导入到 Fluid Flow (Fluent) 中，设置流场计算域为 300 mm × 80 mm × 80 mm 的长方体，如图 4 所示. 传感器模型中心距计算域入口边界为 100 mm，距出口边界为 200 mm. 入口边界条件为速度入口，出口边界为自由出流，计算域侧面边界为对称边界，传感器模型表面

为无滑移壁面，湍流模型采用 k-ω SST 模型.

计算域网格类型为四面体网格，经网格独立性校验后确定单元尺寸为 2 mm，同时添加边界层，层数设置为 5，增长率为 1.2，第 1 层网格高度按照 $y^+ = 0.172(\Delta y / L)Re^{0.9}$ 确定[16].

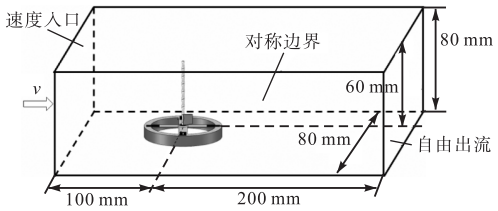


图 4　流体计算域示意

Fig.4　Fluid domain diagram

流场仿真过程中设置导向翼攻角为 0°(即导向翼弦向与水流方向一致)，来流速度大小分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 m/s.

流场计算完成后，将计算结果导入 Static Structural 中进行结构变形仿真. 传感器模型网格设置为四面体网格，采用自适应网格划分. 设置传感器圆筒形基座内壁为固定支撑，进行应力仿真计算. 选择 RESIONE M58 高韧性树脂(密度为 1.2 g/cm^3，弹性模量为 1 820.00 MPa)作为仿海豹胡须模型和导向翼的材料，选用 RESIONE F80 弹性树脂(密度为 1.1 g/cm^3，弹性模量为 6.19 MPa)作为测量单元的材料.

2.2　流速大小感知

图 5 展示了在不同流速条件下，通过式(1)、(4)理论计算及有限元仿真获得的十字悬臂梁的最大应力变化. 从图 5 可以看出，随着水流速度的增加，十字悬臂梁上的最大应力均呈现出二次增长趋势. 通过二次函数拟合，相关系数 R^2 的仿真值为 0.999 574，R^2 的理论值为 0.999 723，表明应力与流速之间具有高度拟合关系. 这一结果验证了传感器能够对水流速度变化产生显著响应，具备较高的流速感知灵敏度. 计算结果还表明，理论计算与有限元仿真的相对误差在 10% 以内，说明可以利用有限元仿真结果进行后续计算.

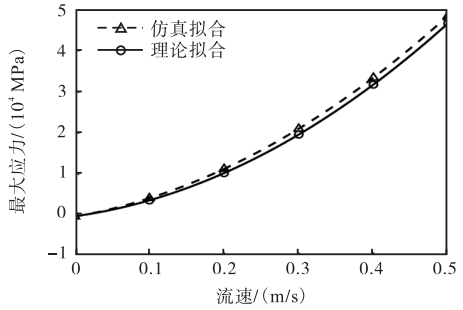


图 5　十字悬臂梁上最大应力随流速变化曲线

Fig.5　Variation of the maximum stress with flow velocity on the cross-shaped cantilever beam

2.3　流速方向感知

本文选用的轴承为 618/1 微型深沟球轴承，内径 d = 1 mm，外径 D = 3 mm，平均直径 d_m = 2 mm，该轴承的启动力矩主要受润滑油的边界摩擦影响，其计算公式为

$$T_{start} = \mu_{static} F_r \frac{d_m}{2} \tag{5}$$

式中：μ_{static} 为静摩擦系数(油润滑深沟球轴承取 0.001 ~ 0.003)，本文取 0.002；F_r 为径向载荷(垂直于轴承轴心线的载荷)，即仿海豹胡须模型和导向翼整体所受的水动力. 考虑到轴承在水中工作环境，对式(5)进行修正后，得水下启动力矩，即

$$T_{start\text{-}water} = k_{water} \mu_{static} F_r \frac{d_m}{2} \tag{6}$$

式中 k_{water} 为修正系数，取值为 1.2 ~ 2.0[17]，在本文中取 1.5.

在导向翼与水流攻角较大的情况下，导向翼与水流的接触面积较大，可产生足够的升力力矩以驱动海豹胡须仿生结构旋转. 而在小攻角条件下，导向翼产生的力矩变小，因此，为验证在小攻角范围内导向翼所产生的升力力矩是否足以克服轴承摩擦阻力并驱动仿生结构旋转，本文选取攻角为 10°的工况进行仿真分析. 通过水动力分析，得到 F_r 以及导向翼所产生的升力力矩 T_{lift}，将 F_r 代入式(6)，即可计算出不同水流速度下轴承转动所需的启动力矩，所得数据如表 2 所示. 结果表明，即使在小攻角条件下，导向翼产生的升力力矩亦远大于轴承启动力矩，足以驱动仿生胡须转动. 验证了本文设计的导向翼及选用的轴承的

表 2　导向翼水动力及轴承启动力矩计算结果(10°攻角)

Tab.2　Calculation results of the hydrofoil hydrodynamics and starting torque of the bearing(attack angle of 10°)

流速/(m/s)	F_r/mN	T_{lift}/(mN · mm)	$T_{start\text{-}water}$/(mN · mm)
0.1	0.226 6	0.014 564	$0.679\,8 \times 10^{-3}$
0.3	1.369 8	0.106 600	$4.109\,4 \times 10^{-3}$
0.5	3.207 1	0.269 300	$9.621\,3 \times 10^{-3}$

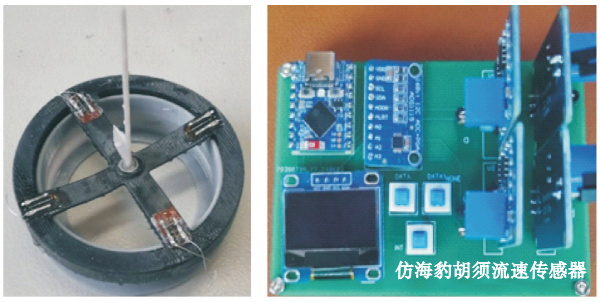
有效性与合理性.

3 仿海豹胡须流速传感器原理样机性能测试

3.1 仿海豹胡须流速传感器原理样机制备

仿海豹胡须传感器的各结构件(胡须仿生结构、导向翼、十字悬臂梁、基座)均采用 3D 打印工艺制备,并与轴承及压阻应变片组装成完整的感知与测量单元,如图 6(a)所示,成品样机质量约为 10 g.

基于所设计的传感器测量原理,本文构建了相应的信号采集处理系统,如图 6(b)所示,并完成了配套程序的开发与调试. 信号采集处理系统分为数据采集、处理与显示单元 3 部分. 数据采集模块采用惠斯通电桥将结构变化转换为电压变化,模数转换器选用 ADS1115,数据处理与显示模块选用 ESP32-S3 单片机搭配 SSD1306 OLED.



(a)感知与测量单元 (b)数据采集处理与显示单元

图 6 仿海豹胡须流速传感器原理样机

Fig.6 Prototype of the seal-whisker-inspired flow velocity sensor

将测量单元与信号采集处理系统进行连接集成,完成仿海豹胡须流速传感器原理样机的制作. 样机组装完成后,整体结构表面覆盖一层绝缘且致密的防水涂层,以增强其在水下环境中的适应性与耐久性.

3.2 测试平台与方案

测试在天津大学流体力学实验室的重力溢流式低湍流度循环水洞进行,如图 7 所示. 水洞整体尺寸 13 m × 3.72 m × 3.42 m(长 × 宽 × 高),其中试验段长为 4 040 mm,流道截面为 600 mm × 700 mm,侧面及底面采用亚克力材料,流速调控范围为 0 ~ 0.5 m/s.

样机通过支架固定于水洞试验段中心位置,确保其完全浸没于水体中,处于水流主轴线上,以获得均匀稳定的流场条件,待流速稳定后,开始测量. 信号由导线传输至采集系统,经模数转换后输入至电脑进行记录与分析,整体测试方案如图 8 所示.

试验过程中,通过水洞内置的流量测控系统可精确调控水流速度大小. 由于目前仿海豹胡须传感器样机在制备过程中工艺精度有限,其变形响应受到一定影响. 测试过程中对 0.2 m/s 的流速响应信号不明显;同时,0.5 m/s 流速下流场不稳定. 因此,测试过程中仅选取 0.3 m/s 及 0.4 m/s 两种情况的流速数据.

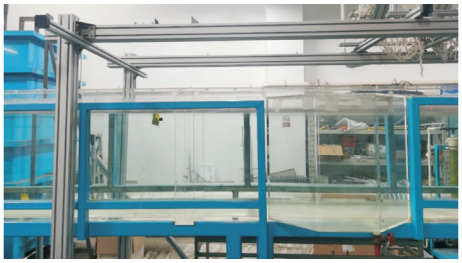


图 7 循环水洞(试验段)

Fig.7 Circulating water tunnel(for experimental section)

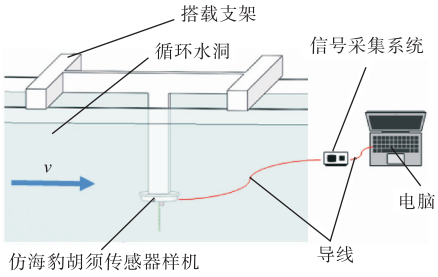


图 8 测试方案示意

Fig.8 Schematic of the water tunnel experiment

由于水洞内的水流方向无法改变,因此,试验过程中,通过旋转仿海豹胡须传感器样机的安装角度来改变传感器与水流之间的相对方向.

测量过程中数据采集频率设置为 200 Hz,可满足低频水下流场信号采集需求.

3.3 试验结果分析

表 3 列出了传感器原理样机在 0.3 m/s 的水流速度条件下,测得的水流方向与实际方向的对比数据. 由表 3 可知,传感器对水流方向的感知能力较强,平均绝对误差为 3.4°,最大绝对误差为 8.4°,正负误差分布对称且随机,未出现系统性偏差. 分析误差产生的原因主要是由于样机在制作、集成过程中结构及装配误差(应变片黏贴偏差、胡须安装误差等),轴承内部润滑状态不一致也会带来轻微的随机误差. 另外,测试过程中实际方向角的获得方式为传感器的安装方向与水流方向的夹角,测量这一夹角过程中也会产生手动误差.

图 9 显示了仿海豹胡须流速传感器在水流方向固定为 0°时,不同流速(0.3 m/s 和 0.4 m/s)下的输出电压变化情况. 试验结果表明,随着水流速度的增大,传感器输出电压明显升高,不同流速对应的电压曲线具有良好的可区分性,灵敏度达到 11.887

V/(m/s)，这一灵敏度远高于已有文献[18-19]提出的仿海豹胡须流速传感器的灵敏度，分别为 1.000 ~ 2.000 V/(m/s)和 1.599 V/(m/s)，证明了本文提出的仿海豹胡须传感器具有更高的灵敏度.

表 3　仿海豹胡须流速传感器流速方向测试结果

Tab.3　Flow direction test results of seal-whisker-inspired flow velocity sensor

实际方向/(°)	测量方向/(°)	误差/(°)
20	15.5	−4.5
41	45.6	4.6
76	75.6	−0.4
102	100.6	−1.4
134	125.6	−8.4
160	156.7	−3.3
201	201.9	0.9
229	227.9	−1.1
243	247.6	4.6
300	291.9	−8.1
316	318.4	2.4
340	341.2	1.2

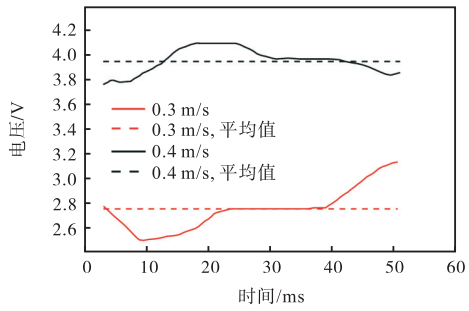


图 9　仿海豹胡须流速传感器输出电压变化

Fig.9　Variation in the output voltages of the seal-whisker-inspired flow velocity sensor at different water velocities

从图 9 还可看出，在水流速度为 0.3 m/s 时，输出电压相对于其平均值的波动范围为−0.38 ~ 0.38 V，而流速为 0.4 m/s 时，输出的电压相对于其平均值的波动范围为在−0.15 ~ 0.15 V，表明传感器输出信号具有一定的稳定性. 输出信号的轻微波动可能是由于水流无法实现完全稳态，仍存在微弱湍流扰动.

试验结果表明，所提出的仿海豹胡须结构与导向翼组合的流速传感器能够在低速流场中实现稳定的方向自适应，并对流速变化产生高灵敏响应，验证了本文提出的仿海豹胡须流速传感器的设计结构与测量原理的可行性与有效性.

4　结　语

本文结合海豹胡须的生物学特性，基于水翼升力与压阻原理提出并设计了一款可测量水流速度与方向的新型仿海豹胡须流速传感器，并且制作了原理样机. 该传感器借鉴海豹胡须外形结构并对其进行优化，结合柔性十字悬臂梁高变形响应，实现了在小型化条件下的高灵敏度流场感知；通过导向翼与胡须结构一体化设计，实现了自适应流场方向，使传感器同时具备流速与流向测量能力.

水洞测试结果表明，仿海豹胡须流速传感器原理样机具备良好的方向识别能力，在水流速度为 0.3 m/s 时，平均绝对误差为 3.4°，说明其对水流方向具有较强的辨识能力. 同时，传感器对流速变化响应灵敏，不同流速对应的电压输出具有明显区分度，灵敏度可达 11.887 V/(m/s)，验证了其在流速测量方面的可行性.

当前的仿海豹胡须传感器原理样机初步实现了水流速度大小和方向感知，未来将在此基础上，深入探究仿海豹胡须及十字悬臂梁材料及结构参数对传感器性能指标的影响. 同时，开展传感器加工与集成工艺研究、传感器信号处理方法研究，为其工程应用奠定基础.

参考文献：

[1] 黄　琰，李　岩，俞建成，等. AUV 智能化现状与发展趋势[J]. 机器人，2020，42(2)：215-231.
Huang Yan，Li Yan，Yu Jiancheng，et al. State-of-the-art and development trends of AUV intelligence[J]. Robot，2020，42(2)：215-231(in Chinese).

[2] Akyildiz I F，Pompili D，Melodia T. Challenges for efficient communication in underwater acoustic sensor networks[J]. ACM Sigbed Review，2004，1(2)：3-8.

[3] 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.

[4] Dehnhardt G，Mauck B，Bleckmann H. Seal whiskers detect water movements[J]. Nature，1998，394(6690)：235-236.

[5] Beem H，Hildner M，Triantafyllou M. Characterization of a harbor seal whisker-inspired flow sensor[C]//2012 Oceans. Hampton Roads，USA，2012：1-4.

[6] Beem H，Hildner M，Triantafyllou M. Calibration and validation of a harbor seal whisker-inspired flow sensor[J]. Smart Materials and Structures，2013，22(1)：014012.

[7] 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, 2015: 889-892.

[8] 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.

[9] Zheng X, Kamat A M, Cao M, et al. Wavy whiskers in wakes: Explaining the trail-tracking capabilities of whisker arrays on seal muzzles[J]. Advanced Science, 2023, 10(2): 2203062.

[10] 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.

[11] Hans H, Miao J M, Triantafyllou M S. Mechanical characteristics of harbor seal (Phoca vitulina) vibrissae under different circumstances and their implications on its sensing methodology[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2014, 9(3): 036013.

[12] 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.

[13] Kamat A M, Zheng X, Bos J, et al. Undulating seal whiskers evolved optimal wavelength-to-diameter ratio for efficient reduction in vortex-induced vibrations[J]. Advanced Science, 2024, 11(2): 2304304.

[14] 刘 聪, 闫宇婷, 徐明奇, 等. 后掠式水平轴潮流能水轮机的载荷与获能特性研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 384-391.
Liu Cong, Yan Yuting, Xu Mingqi, et al. Research on load and energy capture characteristics of swept-back horizontal-axis tidal stream turbine[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(1): 384-391(in Chinese).

[15] 王源耕. 面向水流速度测量的仿生胡须传感器设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
Wang Yuangeng. Design of Bionic Whisker Sensor for Water Velocity Measurement[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2024(in Chinese).

[16] 孙梦瑶. 水下滑翔机黏性水动力数值模拟方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
Sun Mengyao. Numerical Simulation of Viscous Hydrodynamics of Unmanned Underwater Glider[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014(in Chinese).

[17] Harris T A, Kotzalas M N. Rolling Bearing Analysis: 2 Volume Set[M]. 5th ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

[18] 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, 2013: 5956-5961.

[19] Zhang X Z, Shan X B, 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.

(责任编辑: 王晓燕)