

# 摩擦纳米发电的水下流速感知

刘建华<sup>1,2</sup>, 刘搏<sup>1,2</sup>, 王思远<sup>1,2</sup>, 徐鹏<sup>1,2,3</sup>, 徐敏义<sup>1,2</sup>, 王昊<sup>1,2</sup>

- (1. 大连海事大学轮机工程学院, 辽宁 大连 116026;  
2. 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;  
3. 北京大学工学院, 北京 100871)

**[摘要]** 为满足水下流场信息感知, 借鉴海洋哺乳动物胡须结构设计摩擦电式水下流速传感器(triboelectric underwater flow velocity sensor, TUFVS)。该传感器利用了摩擦纳米发电机在流场激励下能够产生电信号的原理。同时, 为探究传感器的感知特性, 搭建以循环水槽为主的水下实验系统, 通过分析传感器产生的电信号获得水下流速和攻角等特征。实验结果表明, TUFVS的感知信号在一定范围内随着流速的增加而升高; 传感器的信号与攻角保持线性关系, 相关系数约为0.99; 在攻角为90°时, 感知电压信号达到峰值, 感知效果最明显。

**[关键词]** 摩擦纳米发电; 水下流速感知; 仿生触须传感器

**[中图分类号]** TB 34

## Underwater Flow Velocity Sensing Based on Triboelectric Nanogenerator

LIU Jianhua<sup>1,2</sup>, LIU Bo<sup>1,2</sup>, WANG Siyuan<sup>1,2</sup>, XU Peng<sup>1,2,3</sup>, XU Minyi<sup>1,2</sup>, WANG Hao<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** In order to fulfill the information sensing of underwater flow field, a triboelectric underwater flow velocity sensor (TUFVS) was designed by imitating the structure of marine mammal whisker. The sensor was developed by utilizing the principle of triboelectric nanogenerators capable of generating electrical signals when excited by a flow field. An underwater experimental system based on a circulating water tank was established to investigate the sensing characteristics of the sensor. Characteristics such as underwater flow velocity and angle of attack could be obtained by analyzing the electrical signals generated by the sensor. The experimental results showed that the sensed signal of the triboelectric underwater flow velocity sensor increased with the increasing of flow velocity in a certain range. The signal of the sensor maintained a linear relationship with the angle of attack, and had a correlation coefficient of about 0.99. The sensed voltage signal peaks at an angle of attack of 90°, and the sensing effect is the most obvious.

**Keywords:** triboelectric nanogenerator; underwater flow velocity sensing; whisker-like sensor

**[收稿日期]** 2023-12-22

**[基金项目]** 科工局基础科研项目(JCKY2022410C011)

**[通信作者]** 王昊(1989—), 博士, 副教授, 从事海洋工程水动力分析研究。E-mail: hao8901@dlmu.edu.cn

## 0 引言

水下感知能力对于海洋资源开发和海洋权益维护至关重要,海洋流场中流速的测量是其中一个重要方面,包括使用各种水下机器人搭载传感器,或直接部署水下传感器来感知水下流场<sup>[1-3]</sup>。然而,受到海洋环境复杂多变的影响,传统的水下感知技术在复杂海况下会面临各种挑战<sup>[4]</sup>。为了更好地实现水下信息感知,研究人员试图开发新型感知技术来解决目前存在的问题。

当前,国内外研究人员已经开展了多种类型的水下流速感知技术研究,包括研究开发基于声学、电磁等不同方式的流速感知装置。然而,在复杂的海洋环境中,这些传统的水下流速感知装置应用受到一定的限制,如超声波流速传感器会受到水质和气泡等因素影响,且使用成本相对较高;电磁式流速传感器相对其他类型传感器则需要更大的安装空间。因此,如何解决上述问题成为目前水下流速传感研究需重点关注的方向。

摩擦纳米发电机 (triboelectric nanogenerator, TENG) 作为一种新型机电转换方式,利用摩擦起电和静电感应效应,能够将环境中的机械扰动高效转换成电信号<sup>[5-13]</sup>。利用该技术感知水下流速信息,具有成本低、灵敏度高、环境适应性好等相对优势。海洋生物作为地球上出现最早的生命体,各种感知器官的进化高度适应海洋环境<sup>[14-15]</sup>,通过借鉴海洋生物独特的器官结构,研究者设计出了可用于多种场景的传感器。Xu 等<sup>[16]</sup>借鉴海獭的掌心结构,提出了一种能够识别被抓取物体硬度信息的触觉传感器,并将该传感器搭载在水下抓取机器人的机械手上,能够实现水下管道破损检测等功能。Yuan 等<sup>[17]</sup>模仿鱼类侧线结构设计了一种灵敏度高和响应时间短的仿生压电传感器,该传感器能够对人体呼吸状况进行有效监测。受鳄鱼皮肤感觉器官启发, Kanhere 等<sup>[18]</sup>构建了能够检测流量和水中振荡压力的压阻传感器。

为实现水下流速的有效检测,本文利用摩擦纳米发电对微扰动信号敏感的特性,设计摩擦电式水下流速传感器 (triboelectric underwater flow velocity sensor, TUFVS)。受海洋生物胡须结构的启发, TUFVS 通过模拟其结构横截面为椭圆形的结构特点对传感器外形部分进行设计,能够通过自身形变所产生的电学信号来测量流场参数信息,为水下流场信息感知研究提供新的思路。

## 1 TUFVS 的结构及其工作原理

海洋生物经过亿万年的进化,具备了高度适应海洋环境的感知能力<sup>[19-21]</sup>,其触觉感知能力在追捕捕食、躲避天敌和环境感知等方面发挥了不可忽视的作用。受海豹触须的感知功能启发,基于摩擦纳米发电原理,本文设计了 TUFVS (见图 1) 用于感知水下流场的流速信息。

如图 1a 所示, TUFVS 结构主要包括仿生触须构型和感知单元 2 部分。其中,感知单元内嵌于仿生构型中,由 2 层印有导电油墨的氟化乙烯丙烯 (fluorinated ethylene propylene, FEP) 薄膜同向叠合;外层采用具有良好耐水性和气密性的丁腈橡胶对感知单元进行封装处理,确保传感器在水下的稳定性和安全性。随后,将感知单元嵌入在由 3D 打印模具灌装获得的仿生触须硅胶构型

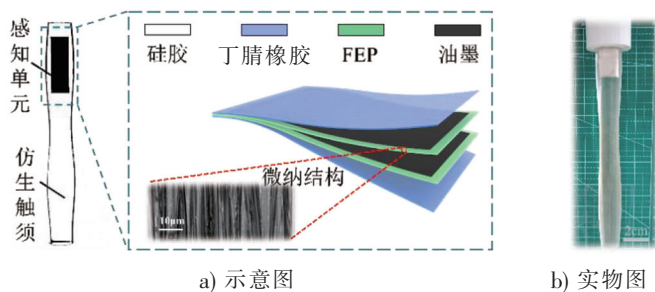


图 1 TUFVS 结构示意图及实物图

Fig.1 Schematic structure and physical drawing of TUFVS

中。硅胶的封装处理能够确保 TUFVS 的防水性能得到进一步提升。为了提高 TUFVS 对水下流速信息感知的灵敏性,实验中对 FEP 薄膜表面进行微纳结构处理,使 TUFVS 在受到外界扰动时,内部的 FEP 与导电油墨接触面积增大,接触更加充分,提升电荷转移量,提高电信号输出效果。图 1b 为摩擦电式水下流速传感器的实物图。

在受到外部来流干扰时, TUFVS 感知单元内部的金属电极与介电层会产生接触分离运动,电荷

通过外电路转移, 产生相应的电信号。接触分离式 TENG 基于垂直方向的极化工作, TUFVS 的 2 个摩擦层分别为介电材料和导电材料。图 2 给出了垂直接触-分离模式下 TENG 的理论模型和等效电路图。2 种电介质之间的周期性接触和分离会导致外部电路中的交流输出, 对应的方程<sup>[22]</sup>为

$$V = -Q[d_1 + x(t)]/(S\varepsilon_0) + \sigma x(t)/\varepsilon_0。$$

(1)

其中:  $\sigma$  是静电荷密度;  $S$  是金属电极面积;  $\varepsilon_0$  是自由空间的介电常数;  $d_1$  是有效电介质厚度;  $x(t)$  是 2 种摩擦材料之间的时间相关距离。

图 3 给出了 TUFVS 的工作原理。可见, 当 TUFVS 感知到外部环境流速时, 自身将会发生形变。具有不同电子亲和力的 2 种材料 FEP 薄膜与导电油墨电极之间的物理接触分离会产生电子转移, 当 FEP 与底层导电油墨电极接触时, 顶层导电油墨电极的电荷将会通过外电路转移到底层油墨电极表面, 从而产生电流。随着 TUFVS 恢复原位, FEP 与底层油墨电极分离, 电荷将会再次回流。TUFVS 正是通过这种方式将外部流场扰动转化为电信号, 以达到感知的目的。

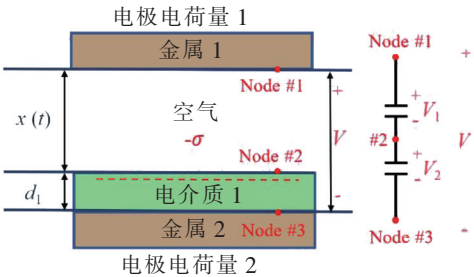


图 2 TUFVS 理论模型和等效电路图  
Fig.2 Theoretical model and equivalent circuit diagram of TUFVS

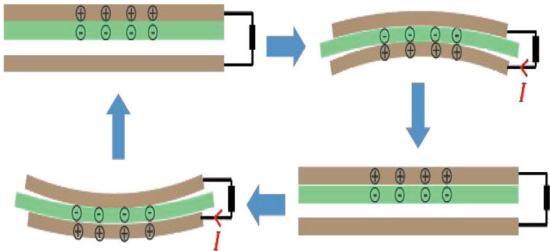


图 3 TUFVS 的工作原理  
Fig.3 The working principle of TUFVS

为验证 TUFVS 在感受到水下流速扰动时, 其内部感知单元的电荷转移过程, 本文通过 COMSOL 多物理场仿真软件进行模拟, 过程如图 4 所示。通过对 TUFVS 在图 4a ~ 图 4d 不同状态进行仿真分析, 可以直观地看到感知单元的电势分布情况。当 FEP 薄膜与导电油墨接触, 到回中, 再到反向运动时, 其电势情况与基于电荷转移原理预测的一致。

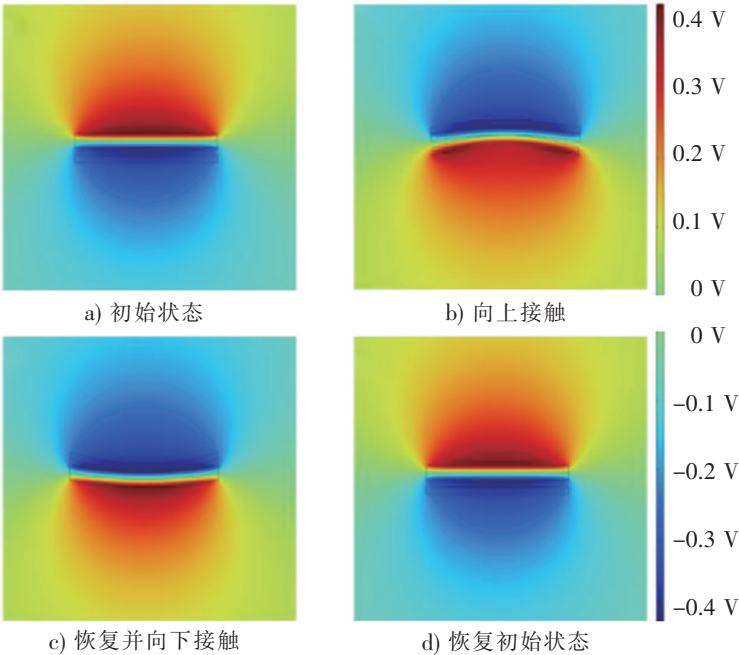


图 4 TUFVS 仿真电势分布图  
Fig.4 The simulating potential distribution diagram of TUFVS



2 TUFVS 的水下特性感知结果及其分析

由于水下工作场景复杂，所以有必要充分研究 TUFVS 的水下特性。本文借助循环水槽对 TUFVS 的感知特性进行了实验探究和性能分析。

当 TUFVS 位于空旷开阔水域时，传感器本体仅受到稳定水流的影响。当水流经过 TUFVS 时，其后方会形成尾涡，如图 5 所示。此时，TUFVS 将出现流致振动现象。在水中流速稳定的情况下，振动频率  $f$  与流速  $v$  服从斯特劳哈尔关系<sup>[23]</sup>。即

$$f = S_i v / D。$$
 (2)

其中： $D$  为 TUFVS 的横截面短径； $v$  为环境中水的流速； $S_i$  为斯特劳哈尔数。本文针对流速传感器在不同工况条件下进行了电学性能测试。

首先将 TUFVS 放置于尺寸为 0.9 m × 0.25 m × 0.25 m 的循环水槽中进行电学性能测试。图 6 为循环水槽装置的示意图，其组成包括静电计、LabVIEW 采集程序和循环水槽 3 部分，其中循环水槽包括变频电机、螺旋桨、导流板、格栅结构和固定夹持装置。YX3-112M-4 型变频电机控制螺旋桨的旋转，驱动水通过导流板在循环水槽中逆时针流动，同时通过调整螺距为 12.7 cm 的螺旋桨的转速来获得不同的水流速度。其中，变频电机最高转速达到 1 455 r/min，变频器型号为 AT2-0450X，变频范围在 0 ~ 50 Hz，水流速度调节范围在 0.133 ~ 0.511 m/s。测试前将 2 个格栅结构分别安装于螺旋桨前段和导流板出口处，以稳定循环水槽中的流量。图 6 的下面部分突出展示了 TUFVS 由 3D 打印机制作的夹具固定于循环水槽测试区域内的测试状态。本文通过改变螺旋桨转速来调节循环水槽中的水流速度，对 TUFVS 的感知特性进行测试。

本文利用循环水槽对 TUFVS 的感知特性进行研究，选取流速的测试范围为 0.2 ~ 0.5 m/s。通过改变循环水槽中的水流速度，分析 TUFVS 的信号输出性能，结果如图 7 所示。可见，当水流速度为 0.2 m/s 时，TUFVS 的开路电压为 0.37 V；当水流速度从 0.2 m/s 增加到 0.5 m/s 时，TUFVS 的开路电压升高至 1.08V。同时，将 TUFVS 的开路电压和水流速度进行多项式拟合，结果如图 8 所示。可见，其拟合方程为  $U = -10.5v^2 + 9.67v - 1.137$ ，相关系数  $R^2$  高达 0.996 88。随着水流速度的逐渐增加，TUFVS 产生的电信号逐渐增大直至趋于稳定。

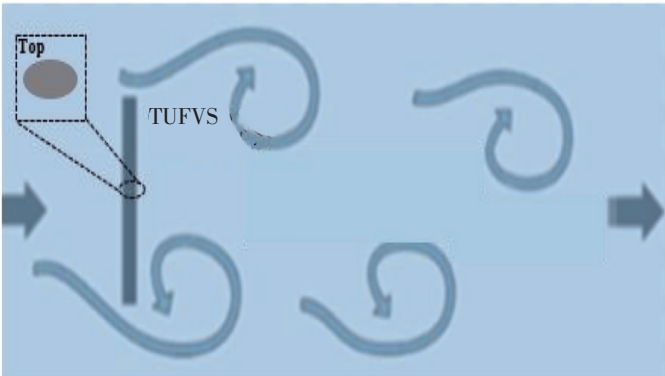


图 5 稳定流场中的 TUFVS  
Fig.5 TUFVS in a stable flow field

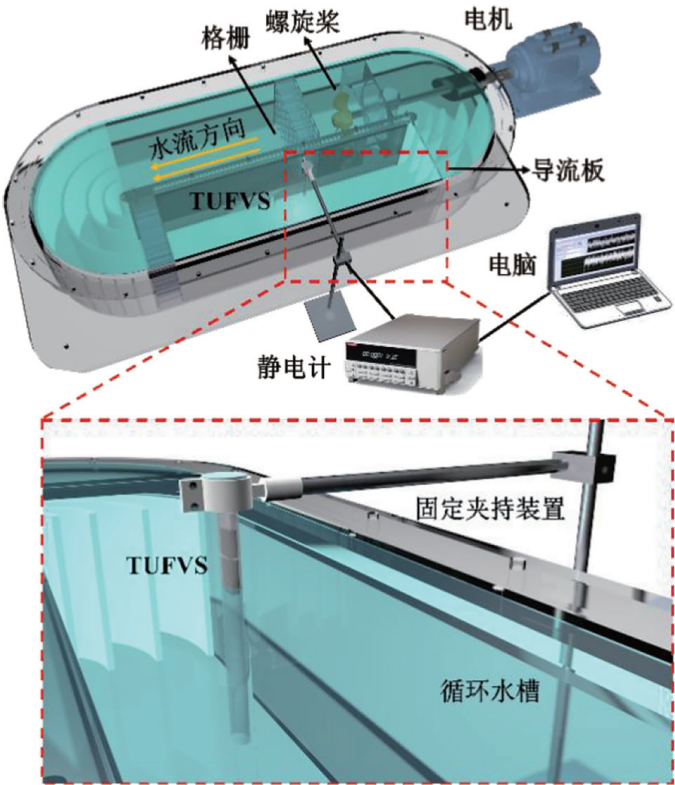


图 6 循环水槽装置示意图  
Fig.6 Schematic diagram of the circulating water tank

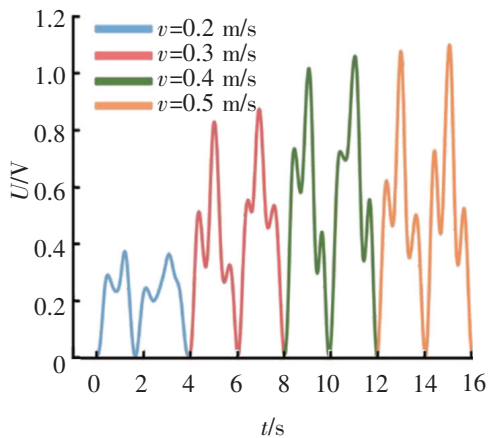


图7 不同流速下的电压信号

Fig.7 The voltage signal at different flow rates

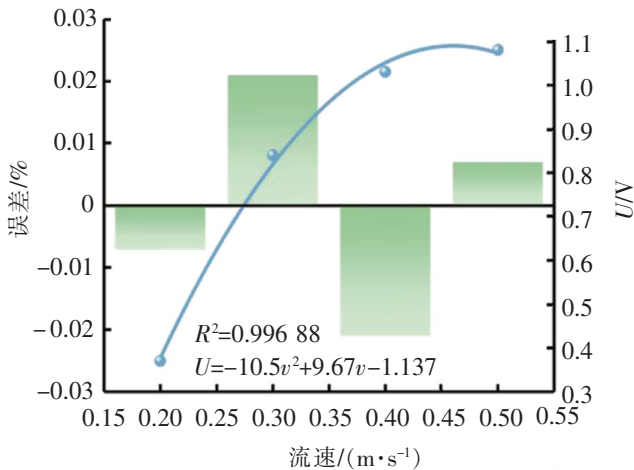


图8 流速与电压信号的拟合关系

Fig.8 The fitting between flow rate and voltage signal

此外,在水流速度为0.5 m/s的条件下,本文针对TUFVS的不同攻角情况进行了感知性能测试。图9为水流方向与4种不同攻角角度的示意图。

根据

$$D_p = D_L D_s \sqrt{[1 + \cot^2(\alpha)]/[D_s^2 + D_L^2 \cot^2(\alpha)]} \tag{3}$$

可以得到不同攻角下的有效直径<sup>[24]</sup>。其中: $D_s$ 为TUFVS的椭圆截面的短径; $D_L$ 为椭圆截面的长径; $\alpha$ 为TUFVS的椭圆截面的长径相对于来流方向的角度。图10给出了攻角与有效直径之间的关系。可见,当攻角为0°时,TUFVS面对水流方向的有效直径为14 mm;随着攻角的不断增加,TUFVS的迎流有效直径也逐渐增加,直到最大直径为34 mm。

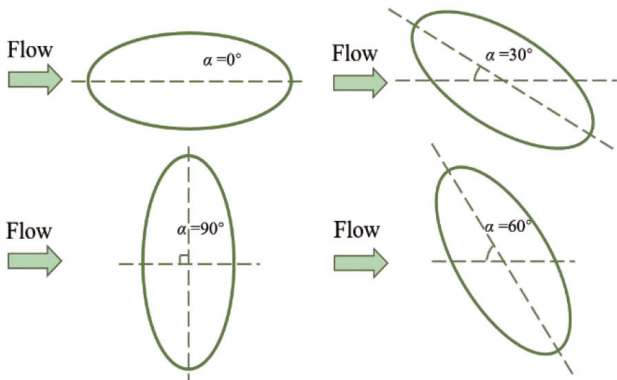


图9 TUFVS 攻角示意图

Fig.9 Schematic diagram of attack angle for TUFVS

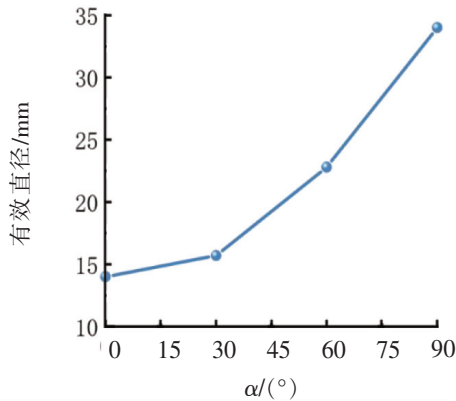


图10 TUFVS 攻角与有效直径的关系

Fig.10 The relationship between the angle of attack and effective diameter for TUFVS

图11给出了不同攻角下的开路电压。可见,当攻角为0°时,TUFVS的电压值最小,为0.21 V;随着攻角增加至90°,TUFVS的开路电压也随之增加到最大值。为了更直观看攻角对TUFVS信号输出性能的影响,本文针对攻角和开路电压进行了线性拟合,结果如图12所示。可见,线性拟合方程为 $U = 0.00987\alpha + 0.196$ ,线性相关系数 $R^2$ 为0.99927。因此可以看出,TUFVS的电压信号输出与其自身攻角的变化具有较强的相关性。

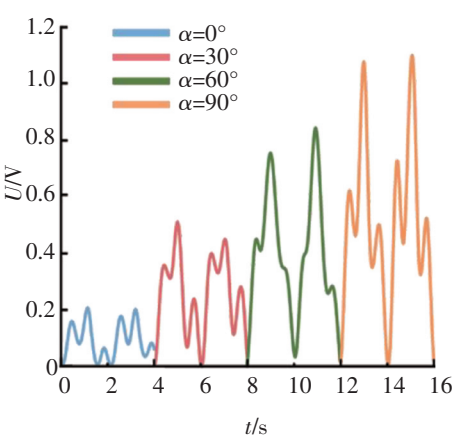


图 11 TUFVS 在不同攻角下的电压信号  
Fig.11 The voltage signals of TUFVS at different angles of attack

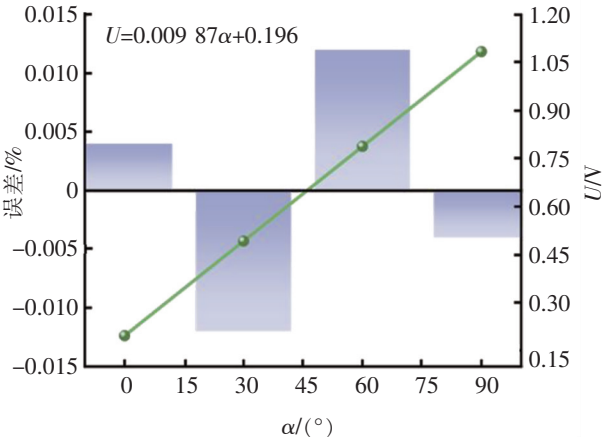


图 12 TUFVS 不同攻角与电压信号的拟合关系  
Fig.12 The fitting relationship between angles of attack and voltage signals for TUFVS

图 13 给出了不同攻角情况 TUFVS 的电压输出信号与环境水流速度之间的关系。通过比较可以发现,在不同攻角情况下,TUFVS 电压输出信号与流速始终保持着逐渐增长的变化规律。同时,这也证实,在所测流速条件下,当攻角  $\alpha$  为  $90^\circ$  时,TUFVS 的流速感知效果最为明显。

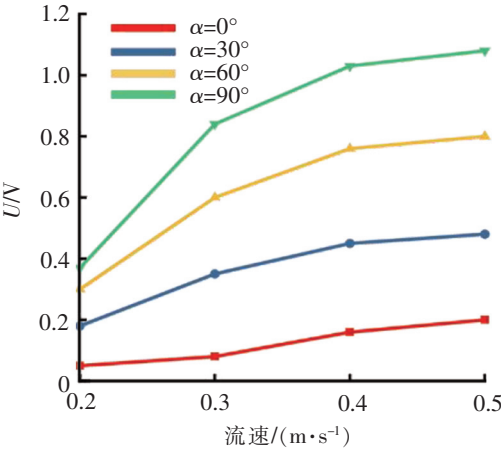


图 13 TUFVS 在不同攻角条件下流速与电压信号之间的关系

Fig.13 The relationship between flow rate and voltage signal for TUFVS under different angles of attack conditions

3 结论

针对水下复杂环境给传统水下感知装备带来的问题,本文设计了一种 TUFVS。通过对其动力学响应、感知信号输出性能的分析 and 仿真,研究 TUFVS 的感知机理。采用循环水槽实验台对 TUFVS 的感知特性进行实验测试,得到:在一定范围内,TUFVS 的电压输出信号随着流速的增加而升高,且上升趋势逐渐平缓;在攻角为  $0^\circ$  时,TUFVS 的电压输出信号最小,随着攻角的不断增加,电压输出信号逐渐升高,并在  $90^\circ$  时产生最大电压输出信号。结果表明,TUFVS 有望为水下流速感知领域研究提供一种新方法。但是,TUFVS 感知装置在输出性能提升方面仍然有很大的改进空间,对于其不同海域环境中的适应情况也有待进一步验证,下一步研究可以通过感知单元材料改性和加工处理等工艺来提高其自身的耐用性。

[ 参考文献 ]

[1] HUY D Q, SADIJOLI N, AZAM A B, et al. Object perception in underwater environments: a survey on sensors and sensing  
<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

- methodologies[J]. *Ocean Engineering*,2023,267:113202.
- [2] LISTAK M, MARTIN G, PUGAL D, et al. Design of a semiautonomous biomimetic underwater vehicle for environmental monitoring[C]//International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Espoo, Finland: IEEE, 2005: 9-14.
- [3] 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.
- [4] ZHAO X H, YUAN Y C, TANG W Y. A practical optimisation method of submarine base considering vibration reduction, light-weight and shock resistance[J]. *Ships and Offshore Structures*,2022,17(11):2416-2427.
- [5] ZHAO T C, XU M Y, XIAO X, et al. Recent progress in blue energy harvesting for powering distributed sensors in ocean[J]. *Nano Energy*,2021,88:106199.
- [6] WANG Z L, JIANG T, XU L. Toward the blue energy dream by triboelectric nanogenerator networks[J]. *Nano Energy*,2017,39:9-23.
- [7] XU P, ZHENG J X, LIU J H, et al. Deep-learning-assisted underwater 3D tactile tensegrity[J]. *Research*,2023(3):683-695.
- [8] WANG Y, LIU X Y, WANG Y W, et al. Flexible seaweed-like triboelectric nanogenerator as a wave energy harvester powering marine internet of things[J]. *ACS Nano*,2021,15(10):15700-15709.
- [9] WANG S Y, XU P, LIU J H, et al. Underwater triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*,2023,118:109018.
- [10] LIU J H, XU P, LIU B, et al. Underwater biomimetic lateral line sensor based on triboelectric nanogenerator for dynamic pressure monitoring and trajectory perception[J]. *Small*,2023,20(19):202308491.
- [11] JIN T, SUN Z D, LI L, et al. Triboelectric nanogenerator sensors for soft robotics aiming at digital twin applications[J]. *Nature Communications*,2020,11(1):5381.
- [12] GUO X G, HE T Y Y, ZHANG Z X, et al. Artificial intelligence-enabled caregiving walking stick powered by ultra-low-frequency human motion[J]. *ACS Nano*,2021,15(12):19054-19069.
- [13] WANG Y, LIU X Y, CHEN T Y, et al. An underwater flag-like triboelectric nanogenerator for harvesting ocean current energy under extremely low velocity condition[J]. *Nano Energy*,2021,90:106503.
- [14] STROBEL S M K, MILLER M A, MURRAY M J, et al. Anatomy of the sense of touch in sea otters: cutaneous mechanoreceptors and structural features of glabrous skin[J]. *The Anatomical Record*,2022,305(3):535-555.
- [15] GRAP N J, MACHTS T, ESSERT S, et al. Stimulus discrimination and surface wave source localization in Crocodilians[J]. *Zoology*,2020,139:125743.
- [16] XU P, LIU J H, LIU X Y, et al. A bio-inspired and self-powered triboelectric tactile sensor for underwater vehicle perception[J]. *NPJ Flexible Electronics*,2022,6(1):252-261.
- [17] YUAN Y B, CHEN H, XU H C, et al. Highly sensitive and wearable bionic piezoelectric sensor for human respiratory monitoring[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*,2022,345:113818.
- [18] KANHERE E, WANG N, KOTTAPALLI A G P, et al. Crocodile-inspired dome-shaped pressure receptors for passive hydrodynamic sensing[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*,2016,11(5):056007.
- [19] ZHAI Y F, ZHENG X W, XIE G M. Fish lateral line inspired flow sensors and flow-aided control: a review[J]. *Journal of Bionic Engineering*,2021,18:264-291.
- [20] WANG S Y, LIU J H, LIU B, et al. Potential applications of whisker sensors in marine science and engineering: a review[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*,2023,11(11):2108.
- [21] SAYEGH M A, DARAGHMA H, MEKID S, et al. Review of recent bio-inspired design and manufacturing of whisker tactile sensors[J]. *Sensors*,2022,22(7):2705.
- [22] NIU S M, WANG S H, LIN L, et al. Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source[J]. *Energy & Environmental Science*,2013,6(12):3576-3583.
- [23] 刘翔宇,王岩,王昊,等.基于柔性摩擦纳米发电机的水下能量收集技术研究[J].水下无人系统学报,2022,30(5):543-549.
- [24] ZHANG X X, 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 马建华 英文审校 郑青榕)