

仿生结构摩擦纳米发电机俘获自然流体能量研究进展

王军雷, 张鑫宇, 康熙龙

(郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 物联网分布式传感节点的规模化部署对自供能技术提出迫切需求。目前传感器多采用电池供电, 面临污染环境、续航有限等问题, 而可将环境机械能转换为电能的摩擦纳米发电机(TENG)为此提供了理想解决方案。本文结合仿生学与 TENG 技术, 系统分析其在自然流体中俘获能量的优势, 针对不同流体特点, 总结适用结构与性能特征。首先概述了自然流体特性与 TENG 工作原理, 进而阐明波浪能、水流能、风能的形式特点及仿生 TENG 的优势; 在波浪能俘获领域中, 仿生 TENG 由于可更好适应复杂波浪情况, 实现多方位俘获波浪能; 在水流能俘获中, 仿生结构 TENG 因其可有效消除锁频效应并且实现低流速启动, 弥补传统方式低流速效率不足; 在风能俘获领域, 仿生 TENG 借助于仿生翼型实现了更低风速下的启动, 促进全风向能量收集。本文还探讨了现有结构问题并展望未来发展, 并构建“生物原型-结构-性能”关联框架, 为 TENG 结构优化提供参考, 推动其在海洋物联网、智慧农业等场景的规模应用, 助力全球能源转型。

关键词: 摩擦纳米发电机; 仿生结构; 自然流体; 流致振动; 能量俘获

中图分类号: TH113; TK79 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2026.06.015

随着物联网技术的发展, 传感器在智慧农业、环境监测、智慧城市、智能制造等领域得到了广泛应用。作为物联网技术中关键一环, 分布式无线传感节点逐年增加, 因此传感器供电需求剧增。电池是目前普遍解决方式, 但是电池容量与其潜在的环境污染成为了新问题^[1]。在此背景下, 发展利用清洁能源的自供能技术愈发迫切^{[2][3]}。近年来, 随着科技进步, 多种新型能源技术也应运而生。其中, 基于接触起电(摩擦起电)与静电感应耦合效应的摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG)技术脱颖而出, 获得了学术界的广泛关注^[4-6]。TENG 技术由佐治亚理工学院王中林院士团队于 2012 年首次提出^[7]。这一创新性发明拓宽了能量转换方式, 为能源领域开辟了新的研究方向。其核心工作原理在于两种不同材料接触分离过程中发生的电荷转移, 从而实现机械能向电能的高效转换^[8]。

相较于传统的电磁发电机(electromagnetic gen-

erator, EMG), TENG 展现出多项显著优势。EMG 主要依赖洛伦兹力驱动闭合回路中的电子流动产生电流, 通常需要强磁场及高速切割磁力线运动, 导致设备结构复杂且体积庞大^[9]。而 TENG 基于材料表面的接触起电与静电感应耦合, 无需复杂磁场结构和高速运动, 结构设计更为简洁灵活^[10]。针对低频(通常为 0.1~3 Hz)机械能收集, TENG 性能显著优于 EMG^[11-12]。研究证实, 在波浪、潮汐等低频能量环境中, 传统 EMG 的能量转换效率常降至 20% 以下, 而 TENG 在相同频率下可维持 80% 以上的效率^[13]。TENG 在输出功率密度方面亦具优势, 部分器件的面功率密度已可达 10 mW/m² 的瞬时功率^[14]。TENG 可选用多种来源广泛、成本低廉的高分子材料, 其良好的柔韧性和可加工性为大规模应用提供了有利条件^[15]。相比之下, EMG 的材料成本相对昂贵^[16]。与同样用于低频机械能收集的压电能量收集技术相比, TENG 依然具备优势。压电

收稿日期: 2026-03-23; 修订日期: 2026-05-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52277227); 河南省重点研发与推广专项(252102241025)

作者简介: 王军雷(1988—), 男, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事面向空-地-海环境微能量俘获自供能传感理论及器件研发、流致振动抑制与高效能量俘获机理与理论方法等方面的研究, E-mail: jlwang@zzu.edu.cn。

通信作者: 康熙龙(1992—), 男, 郑州大学副研究员, 博士, 主要从事环境能量俘获, 可穿戴器件与自供能系统等方面的研究, E-mail: xlkang@zzu.edu.cn。

能量收集利用压电材料在应力作用下产生的压电效应实现机械能-电能转换^[17]。尽管压电材料在特定领域应用广泛,但其输出性能受限于材料的固有压电系数,功率密度普遍较低^[18]。此外,压电材料的制备工艺复杂,对材料纯度和晶体结构要求严格,增加了生产成本^[19]。TENG 则不受特定功能材料的限制,极大拓宽了材料选择范围^[20]。因此,TENG 在输出电压和电流方面更具优势,能更好地满足多样化应用场景的需求^[21]。

近年来,随着仿生学理念在工程领域的深度融合,将仿生结构引入 TENG 的设计与制备已成为新兴研究热点,为技术创新提供了丰富的灵感来源^[22]。仿生学旨在通过模拟自然界生物体的结构、功能和行为,解决工程技术难题^[23]。工程仿生学包括三种方法:生物灵感、仿生和生物复制^[24],将仿生结构与 TENG 结合,可协同提升器件性能与应用潜力。例如:借鉴荷叶组织在材料表面复制荷叶微纳结构,构建了仿生 TENG。揭示自然超疏水表面的液-固接触起电现象,并通过仿生工程实现高效、稳定的能量收集器件^[25]。模拟鳗鱼等海洋生物适应复杂水流环境的柔性身体结构^[26],设计仿生 TENG,可显著增强其在海浪、潮汐等动态海洋能源环境中的适应性及能量俘获效率。此外,仿生结构还可赋予 TENG 诸如自修复、自适应调节等独特功能,提升器件在实际应用中的稳定性和可靠性^[27-28]。

综上所述,TENG 作为一种新兴的能源转换方式,在低频能量收集、材料选择、结构设计及成本等方面相较于传统 EMG 和压电能量收集技术展现出显著优势。在清洁能源利用领域,波浪能、水流能及风能之所以受到极大关注,关键在于它们均源于自然流体的运动,本质上是分布广泛、取之不尽的可再生流体动能^[29]。而融合仿生结构设计,为 TENG 性能的突破与应用领域的拓展提供了创新途径,特殊环境适用性更佳。本文旨在系统综述近年来基于仿生结构的摩擦纳米发电机在波浪能,水流能和风能俘获方面的研究进展,归纳总结波浪能,水流能和风能三种自然流体的能量形式特点,详细分析仿生 TENG 性能提升、结构设计策略以及多领域应用现状,以期为该领域的深入研究和科技发展提供参考与借鉴。

1 自然流体介绍

波浪能源于风对水体作用而产生,因此是太阳能的一种间接和集中的形式。在深水区域,可以认为波浪中的能量可以均分为两部分:由于水粒子在

圆形轨道中运动而产生的动能,以及与当平坦的海面变形为波浪(水从波谷到波峰被重力抬起)时所做的机械功相关的势能,目前利用波浪能转换在自供能传感器浮标中的应用已经得到测试,即应用众所周知的振荡水柱原理或其他浮式振荡系统^[30]。然而,其功率输出较低,且性能对资源特性的依赖性较低,因此探索和理解海洋及其资源的追求需要其他解决方案。

水流是指具有方向和速度的水的体积,常见于河流中,从激励机制的研究维度来看,当前学界已针对不同场景下水流的驱动源与调控机制开展了系统性探索:在自然系统中,水流的激励主要依赖自然势能梯度(如河流的重力势能差),作为广泛使用的激励机制--流致振动已被用于激励能量俘获器^[31]。

作为清洁、丰富且广泛使用的能源之一,风能凭借其分布广泛性已被广泛地用于当前的电力供应,目前对于风能的利用大多为风力发电机,利用风能带动叶片旋转转化为机械能,进而转化为电能,但是其在低风速下无法启动。另一种利用方式为诱导振动,当气流以一定速度范围流经钝体时,钝体带动部件将产生振动^[32]。这种流致振动模式虽然可以降低启动风速,但是振动存在结构依赖性,因此仍需要优化设计以提升俘能效率。

流致振动(flow-induced vibration, FIV)是流体力学与固体力学交叉的一个非常重要的现象,指流体流过物体时,由于流动的不稳定性,诱导物体产生周期性或随机性振动的现象。流致振动的本质是流体动力与结构弹性/惯性之间的相互作用,流致振动根据诱发机制可大致分为涡激振动,驰振,颤振等。其中涡激振动是指当流体(如水流或风)流过一个非流线型物体(如圆柱体)时,在物体的尾部会交替地产生并脱落漩涡,形成所谓的“卡门涡街”,这种交替脱落的漩涡会在物体两侧产生周期性的压力差,从而对物体施加一个交变的力。如果这个力的频率与物体自身的固有频率接近或一致,就会引发强烈的共振,导致物体大幅振动^[33]。颤振是一种自激型流致振动,其发生不需要外部的周期性激励(如涡旋脱落)^[34]。它是结构从流动中吸收能量,并通过自身的振动和变形,反过来影响流场,形成一个正反馈循环。驰振常见于非圆形截面的结构(如正方形、D形)。当风吹向这类结构时,在一定攻角下,气动力会做负功,导致结构从流体中吸收能量,从而在与风向垂直的方向上产生大幅度的单自由度振动。流致振动是流体与固体相互作用的基本问题,其中蕴含着被开发利用的潜力,其与 TENG 技术

有效结合将是新兴能源技术创新的关键。

综上所述,本文围绕清洁可再生能源的开发利用展开,聚焦波浪能、水流动能、风能的应用现状与局限,同时系统阐述流致振动(FIV)的本质、分类及能源俘获潜力,指出 TENG 技术是新兴能源技术创新的关键方向。波浪能源于风对水体的作用,属太阳能的间接集中形式,其能量由动能与势能构成,已在自供能传感器浮标中通过振荡水柱等原理测试应用,但存在功率输出低、性能对资源特性依赖性强的问题。水流能的激励机制中,自然系统依赖重力势能差、密度梯度等自然势能梯度,涡激振动、颤振等可用于俘能,却需特定结构设计。风能主流利用方式为风力发电机(低风速无法启动),诱导振动(含涡激振动、颤振)可降低启动风速,但前者存在锁频区间、后者依赖特殊结构,三者均需探索优化或替代方案。

2 TENG 工作原理

2.1 摩擦起电原理

摩擦电纳米发电机(TENG)作为一种高效收集环境中低品质机械能的技术,其核心机理源于接触起电效应与静电感应的耦合作用。传统麦克斯韦方程组主要适用于边界和体积固定的介质系统,而 TENG 中介质的运动(如接触-分离、滑动等)及表面电荷的动态变化需通过扩展麦克斯韦方程组进行描述。近年来关于 TENG 的理论有着较快的发展,位移电流概念用于量化 TENG 的能量输出^[35],由于传统麦克斯韦方程组仅适用于静态介质(介质边界/体积时不变)。当介质存在刚性平动且表面携带非电场诱导静电荷时,传统方程因忽略介质运动与表面电荷动力学而违反电荷守恒定律,需引入广义理论框架。2016 年王等^[36]对麦克斯韦方程进行研究发现,TENG 输出的电流与麦克斯韦方程中的第二项直接相关,这直接表明 TENG 是麦克斯韦位移电流在能量和传感器领域的体现,2022 年王中林进一步研究扩展了麦克斯韦方程组,这一突破性的研究进展,进一步论证了 TENG 的起电原理,如图 1 所示,通过加入极化密度 P_s ,将机械触发的表面静电荷纳入电磁理论框架,通过物质导数描述运动介质的场变化,新增“Wang term”,解决电荷守恒问题,奠定纳米发电机理论基础,至此关于 TENG 的第一性原理有了合理的解释。扩展麦克斯韦方程组不仅完善了运动带电介质系统的电磁理论,更明确了 TENG 中“机械运动-电荷变化-电流输出”的定量关系。这一理论框架为 TENG 的性能优化(如提高电

荷密度、降低损耗)提供了指导,并推动其在微纳能源、自供能传感器、蓝色能源收集等领域的应用。

Maxwell's equations (Stationary media)	Expanded Maxwell's equations (Moving charged media)
$\nabla \cdot D' = \rho_f$	$\nabla \cdot D' = \rho_f - \nabla \cdot P_s$
$\nabla \cdot B = 0$	$\nabla \cdot B = 0$
$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	$\nabla \times E = -\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla\right)B$
$\nabla \times H = J_f + \frac{\partial D'}{\partial t}$	$\nabla \times H = J_f + \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla\right)(P_s + D')$

图 1 静止介质和移动带电介质的麦克斯韦方程组的比较^[36]

Figure 1 Comparison of Maxwell's equations for static media and moving charged media^[36]

2.2 TENG 工作模式

基于如上理论,目前科研人员所设计的 TENG 主要有 4 种工作模式,如图 2 所示,分别为垂直接触-分离式,水平滑动式,单电极式,独立层式。本节将具体讨论这 4 种工作模式。

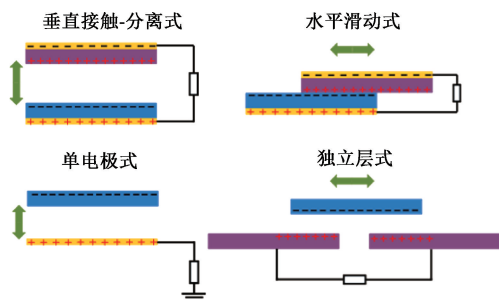


图 2 TENG 工作模式

Figure 2 Working mode of TENG

垂直接触-分离式 TENG 的工作原理基于摩擦起电与静电感应的协同作用:电子亲和势不同的两摩擦层紧密接触时发生电荷转移,形成等量异号表面电荷;外部机械力驱动两摩擦层垂直分离,产生电势差并驱动自由电子通过外电路定向迁移形成瞬态电流;分离至最大距离后摩擦层相向运动,电势差减小并诱导电子反向流动,直至重新接触完成一个工作周期水平滑动式 TENG 中,两摩擦层初始接触时因摩擦起电产生等量异号界面电荷;当两摩擦层沿接触面平行相对滑动时,接触面积与电荷分布的改变使两电极间产生动态电势差,驱动外电路电荷定向迁移形成电流;连续滑动过程中,电荷分布随相对位置演变,电流方向周期性反转,滑动至初始位置对称点时完成一个电信号输出周期。

单电极式 TENG 仅含一个接地底部电极,其工作依赖带电顶部摩擦层与单电极间的静电感应:顶部摩擦层接近电极时,电极感应产生异号电荷,电子从大地流向电极;远离时感应电荷减少,电子从电极流回大地,形成交变电流;顶部摩擦层的空间位移调

控局域电场,进而控制电荷迁移方向与通量。

独立层式 TENG 的核心是可自由移动的预带电或可摩擦起电独立层,其运动于两个空间分离且接外电路的固定电极之间;独立层相对固定电极运动时,通过静电感应使两固定电极产生不对称感应电荷分布,形成电势差并驱动电子定向流动;独立层的运动模式直接决定感应电荷分布与强度,进而影响输出电信号的幅值、频率及波形。

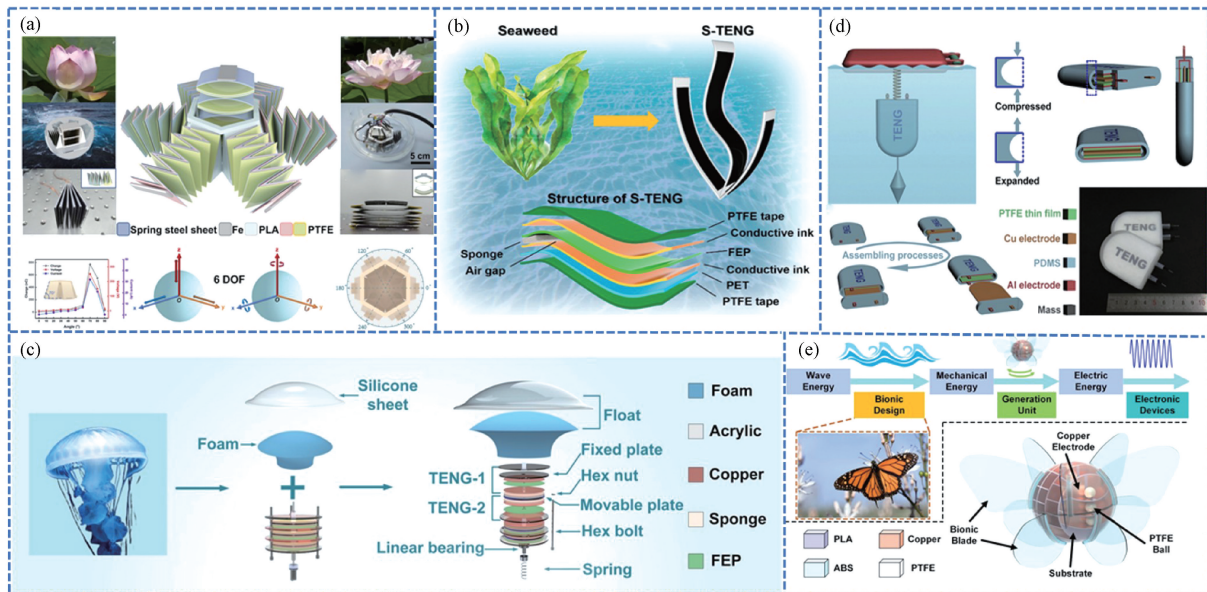
3 仿生 TENG 俘获波浪能

全球波浪能资源总量巨大,据估算每年可开发潜力达数万亿千瓦时,然而传统电磁俘能装置无法很好的契合波浪能特点,能量转化效率偏低。随着 TENG 的发展,波浪能利用成为可能,并且对海洋生态系统的影响可通过装置设计,如避开敏感生物栖息地、优化结构减少噪声进行控制,属于低碳环保的可再生能源^[37]。波浪运动形式多样且无规则,传统电磁式波浪能俘能装置依赖齿轮箱、液压马达等高速旋转传动结构。受波浪低频往复特性影响(典型频率 0.1~2 Hz,振幅 0.5~5 m),其传动链机械损耗高达 35%~50%,能量转换效率普遍不足 15%。因此,基于仿生 TENG 的设计,恰好满足此条件,可以更为高效的俘获波浪能。

波浪作为海洋环境中典型的流体运动形式,呈低频率主导的多自由度耦合特征,频率普遍处于 0.1~1.5 Hz 区间。Wen 等^[38]通过观察荷花的花瓣结构,模仿荷花绽放-闭合特性,适配 0~15 r/s 旋转与 15°摆角,花瓣部分模拟荷花花瓣的倾斜姿态,利用惯性力触发折叠-展开运动,捕获水平方向 2 个平动自由度和 3 个旋转自由度的动能;花芯部分模拟荷花花蕊的集中结构,通过垂直方向的伸缩运动,捕获 1 个垂直平动自由度的动能,最终实现六自由度全方位动能收集。在 0°~90°范围内测试倾斜角度对输出性能的影响,发现 70°时输出最优,在 1.3 Hz、8 cm 波高下,220 μF 电容 1 分钟内可充电至 1.3 V,成功为手表、温度计、湿度计供电;当前大多数波浪能摩擦纳米发电机的设计主要专注于从海浪表面获取能量。然而,提升其与现有海上设施(如监测浮标、养殖平台或海上风电基础)的集成兼容性,将极大地增强其实际应用价值与市场吸引力。Wang 等^[39]人通过观察海底水草,根据水草在波浪中随水流弯曲、恢复的振动特性,设计了一种仿水草结构 TENG,采用 FEP 与 PET 薄膜作为摩擦层,通过波浪激励下的弯曲-恢复运动实现能量转换,流体-结构耦合效应显著,波浪流体流经结构时形成压

力差,为 TENG 运动提供动力,兼具水面漂浮与水下浸没工作能力,通过间距布局优化发现间距大于等于 90 mm 时可避免单元间波浪衰减干扰,转移电荷显著提升。在频率 1.25 Hz,振幅 8 cm 条件下输出峰值功率达到 79.023 μW 成功为温度计及海岸灯塔模型供电,验证了其在海洋物联网(MIoT)中实现电池独立供电;水母作为海洋生物,其独特的身体结构引人深思,因此 Chen 等^[40]人模仿水母半球形躯体结构,通过仿生浮体与水母伞体结构的协同作用,在波浪峰谷处产生更大压力差,通过仿真模拟对比三棱柱、六面体、半球形浮体,半球形浮体表面压力差最大,捕获波浪力达 0.228 N,显著提升纵荡波能量俘获效率,其电性能较传统浮体结构提升约 3 倍,短路电流放大约 560 倍(达 28 mA),在波浪频率 0.9 Hz、波高 12 cm 条件下峰值功率输出达 81.23 mW,成功点亮 4 个 30 W 的 LED 灯泡,并可为水质传感器和警示灯供电;同样借鉴水母结构,通过水母的形状适应性与弹性回弹特性,Yang 等^[41]人采用形状自适应密封封装(PDMS 外壳)与弹性回复结构,模仿水母的压力感应与形变特性,通过液体压力诱导摩擦层接触-分离实现能量转换,并且添加磁体与 PMMAL 形面板组成的弹性回弹系统,模拟水母的推进辅助机制,使摩擦层接触面积提升 24%。在 0.75 Hz、60 cm 水深下输出电流密度输出高达 11.8 mA/m²、电荷密度高达 22.1 $\mu\text{C}/\text{m}^2$,可直接驱动数十盏绿色 LED 及温度传感器,为海洋传感器自供能提供了解决方案;由于海上波浪具有不规则性,各个方向都可能有波浪涌动,因此为了更好的利用全方位波浪能,Wang 等^[42]人仿蝴蝶翅膀对称分布特性,利用“阻力放大效应”增强低频水下波能量收集,设计含 5 对仿生叶片的球形壳体与弧形轨道发电单元,通过模拟对比弧形、直线形、仿生叶片,得出仿生叶片的阻力系数和力矩系数最大,表面压力差分布最广,测试 3~6 对叶片,5 对叶片时阻力系数最大且结构轻量化,避免六对叶片导致的流体干扰。该装置对 0°~360°多方向波浪均有响应,可在 1.25 Hz 低频下,电压输出 400 V、电流输出 2.9 μA 、电荷输出 0.31 μC ,适配水下复杂波向环境,成功为温度计供电。

综上所述,通过仿生设计突破传统结构局限,在能量收集效率、工作稳定性、应用场景适配性等方面取得显著进展,具体各类结构适用对比见表 1。仿生结构 TENG 较传统波浪能浮标性能提升显著,并且可以全方位俘获波浪能,对于水下复杂海况仍有较为稳定的输出。但是目前研究多聚焦装置自身性



注:(a) 仿荷花结构^[38]; (b) 仿海藻结构^[39]; (c) 仿水母伞体结构^[40]; (d) 仿水母结构^[41]; (e) 仿蝴蝶结构^[42]。

图3 俘获波浪能的 TENG 结构

Figure 3 TENG structures used for wave energy harvesting

能优化,未充分考虑与监测浮标、养殖平台、海上风电基础等现有海上设施的集成方案,缺乏可灵活调整结构参数以适配多场景的模块化设计以及结构本身抗波浪冲击性,未来可联合海洋工程领域,设计标准化的集成接口与能量管理系统,将仿生 TENG 拆解为能量收集单元、能量转换单元、能量存储单元,通过更换不同单元实现场景灵活切换。并且根据波浪的运动形式,可从流体动力学、能量分布、流固耦合及环境参数约束四个维度对 TENG 结构进行优化,使其更好适配于波浪环境。总之,波浪能作为海洋可再生能源的重要组成部分虽然目前面临技术、成本、环境适应性等挑战,但随着研究的深入与技术突破,其在清洁电力供应、海洋资源开发中的战略价值将逐步凸显,有望成为推动全球能源转型与海洋经济发展的关键技术之一。

4 仿生 TENG 俘获水流能

水流能是一种极具潜力的可再生能源,水的密度是空气的 832 倍,因此即使在较低流速下,水流能也蕴含巨大的动能和势能,但高昂的成本和复杂的环境限制了其大规模开发^[43]。传统电磁发电启动流速较高,TENG 则是作为一种颠覆性的互补技术,开辟了利用水流能的新型研究框架。其核心价值在于高效收集分布式、低频的水流能量。然而,传统结构的 TENG 在利用水流能时,无法很好的适应环境,仿生 TENG 为水流能采集提供了一种富有潜力的补充方案,根据生物特有的结构特点,可更为高效的在

表 1 不同仿生结构对波浪能的俘获

Table 1 The capture of wave energy by different bionic structures

仿生结构	工作频率/Hz	最大输出功率密度	优点	缺点
仿荷花结构	0.9~1.4 Hz 的海洋低频水波	31 W/m ³	水面多方向俘能	抗冲击能力弱
仿海藻结构	0~1.25 Hz 的海洋低频水波	79.023 μW	覆盖海洋表面及海底	受水压影响敏感
仿水母伞体结构	0~0.9 Hz 的海洋低频波浪	81.23 mW	输出功率高	仅适配波浪纵波
仿水母结构	0.1~2.25 Hz 的低频波动	1.69 W/m ²	兼具发电与传感	装配结构复杂
仿蝴蝶结构	0.1~1.5 Hz 的海洋低频波浪	0.69 mW	水下多方向适配	高频 (>1.5 Hz) 输出趋于饱和

低流速条件下进行能量俘获,有望进一步丰富可再生能源利用形式,推动水力发电向小型化、分布式和自适应方向发展。

针对浅水低流速环境,Jing 等^[44]人根据鱼体结构,设计 3D 全封闭仿生鱼形摩擦纳米发电机,模拟鱼类通过鳍部受力实现姿态调整和能量捕获的特性,利用鳍部承受水流冲击力,将流体动能转化为装置的周期性摆动,实现浅水(仿生鳍部分浸没)低速环境下的零水头发电,突破传统水轮机对水深和高流速的依赖采用,通过优化仿生鱼鳍 30,50,70 mm 3 种长度规格,实验验证 50 mm 和 70 mm 长度鳍在

低流速(0.21 m/s)下能量捕获能力更突出,70 mm 鳍平均输出功率最优,但过长易导致结构损坏和摆动不协调,综合选择 50 mm 作为适配长度。在流速为 0.2 m/s 时开始启动,最大功率密度达 0.36 W/m³,并且可为温度计供电;同样基于鳍类结构,Zhang 等^[45]人提出“仿生鳍型软体+摆动-旋转机制”的摩擦-电磁混合发电方案,以鱼鳍涡流效应为灵感设计仿生鳍型钝体,通过优化鳍-圆尺寸比以及鳍-圆角度,其升力系数和阻力系数较传统圆形钝体分别提升 9.6 倍和 2.6 倍,显著强化涡激振动效应以驱动软体摆动,TENG 单元在 0.34~0.96 m/s 流速下输出电压 143~203 V 且 4 h 连续工作后两者输出电压保留率高别达 98%,成功驱动温湿度传感器;鱼鳃是水生鱼类特有的器官,基于此 Zhang 等^[46]人,针对传统涡轮式 TENG 低速启动难、滑动摩擦导致耐久性差的问题,设计仿生鳃盖结构柔性滚动 TENG,通过对比镂空轮、普通轮及带鱼鳃、鲸鲨鳃、金枪鱼鳃的仿生轮,鲸鲨鳃盖水轮旋转频率达 0.41 Hz,较普通轮提升 24.54% 并且通过仿真验证其尾缘涡附着效应可降低表面压力,输出功率达到 0.036 mW,并且该结构可在 0.22 m/s 低流速下仍可稳定工作成功在自然明渠中为无线温光传感器供电,为智能农业灌溉渠道的能量收集与环境监测提供创新方案;由于传统涡激振动存在锁频限制,无法全时域发电,Dong 等^[47]人提出仿生蜻蜓交错扑翼构型的混合发电机,模拟蜻蜓前后翅的空间布局与相位协同关系,设计前后两个扑翼,通过机械耦合实现交替扑动,保证全时域持续能量捕获,通过对扑翼结构的俯仰中心位置、俯仰幅度以及相位差的优化,最终该结构在 0.21~0.61 m/s 流速下 TENG 输出电压 1 460~2 180 V、电流 9.12~18.18 μ A,可为无线水质传感器供电,为智慧农业供电提供解决方案;实际环境中,河流流速差异较大,因此传统器件适用范围较窄,针对此问题 Li 等^[48]人提出“可伸缩仿生叶片+仿生翼板”的层级发电方案,该结构设计仿生叶片模仿白头海雕翅膀、仿生翼板模仿虎鲨背鳍,通过优化仿生翼板的倾斜角度(低流速状态下 10°,最优高流速状态下 20°最优)以及背鳍高度,TENG 启动流速降至 0.16 m/s(较传统涡轮翼型降低 23.8%),同时 EMG 模块的设计使得启动流速降至 0.4 m/s(降低 23.1%),在流速 0.5 m/s 条件下,TENG 输出峰值功率为 3.63 mW,因此该结构兼顾低速启动与高速能量收集效率,可实现河流生态的实时监测与异常预警。

综上所述,针对浅水低流速环境下传统发电装

置(如水轮机、涡轮式 TENG)对水深和高流速依赖强、启动难、耐久性差等局限,当前研究通过模仿鱼类、蜻蜓、鸟类等生物的躯体、鳍、鳃盖、翅膀等结构,结合摩擦发电或摩擦-电磁混合发电机制,开发出适配浅水低流速场景的仿生 TENG,在启动流速、能量输出稳定性、耐久性、场景适配性上取得突破,大幅拓宽了工作区间,具体各类结构适用对比见表 2。另外水流能具有低流速主导、浅水环境适配、低频率低动能密度、流体动力学效应显著的特点,结合上述特点可有效提升能量俘获效率。然而,现有设计对于复杂河流环境,如水生植物缠绕、石块撞击、淤泥等,缺乏针对性的抗干扰结构,长期服役易出现性能衰减或结构损坏,未来结构设计可增加抗缠绕保护机制,表面处理等,以提升复杂条件下的稳定性。

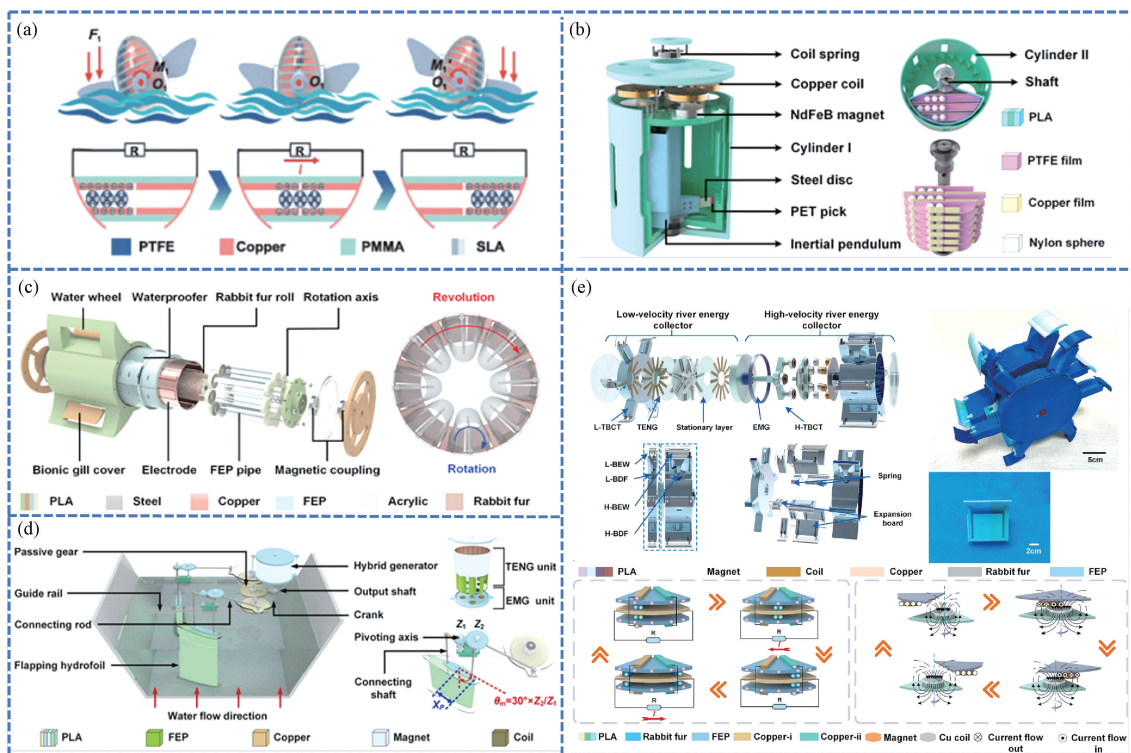
表 2 不同仿生结构对水流能的俘获

Table 2 The capture of hydrokinetic energy by different bionic structures

仿生结构	工作流速/(m/s)	最大输出功率表现	优点	缺点
仿鱼体结构	0.21~0.81 m/s	7 W/m ³	实现零水头发电	低速水流输出功率较低
仿鳍型结构	0.34~0.96 m/s	0.064 mW (TENG) 0.403 mW (EMG)	混合发电设计	环境适应性受结构参数限制
仿鳃盖结构	0.22~0.53 m/s	0.036 mW	适配不同浸泡深度	加工工艺要求高
仿蜻蜓翼结构	0.16~1.1 m/s	4.19 mW (TENG) 8.01 mW (EMG)	无锁频现象	结构复杂,装配精度要求高
仿海雕翅膀结构	0.16~1.1 m/s	60.8 mW/m ² (TENG) 267.7 W/m ³ (EMG)	适配宽流速范围	高湿度环境下 TENG 性能衰减明显

5 仿生 TENG 俘获风能

全球陆上可开发风能资源量(按年平均风速 ≥ 4 m/s、年有效利用小时数 $\geq 2 000$ h 计)达 5 300~6 000 GW。传统电磁式风力发电当风速低于此阈值时,风叶无法有效转动,能量收集效率趋近于零,然而通过模拟自然界生物的结构与机制,仿生摩擦纳米发电机(TENG)利用纳米材料间的摩擦电效应,能够有效实现风能向电能的转化,并且 TENG 更能适应真实环境中不稳定的风速,能够适应不同风速条件,为偏远地区及低功耗电子设备提供可持续的电力支持^[49]。



注:(a)仿鱼体结构^[44];(b)仿兔型结构^[45];(c)仿鳃盖结构^[46];(d)仿蜻蜓翼结构^[47];(e)仿海雕翅膀结构^[48]。

图4 俘获水流能的 TENG 结构

Figure 4 TENG structures used for water flow harvesting

风能具有资源广泛、随机间歇、风速带宽大、能量密度低等特点。因此,许多学者针对风能的核心特点,开展了一系列仿生结构的 TENG 研究。对于复杂环境的风速流场, Ma 等^[50]以风车和草坪为灵感设计出 TENG 装置,模拟草坪草叶的密集、柔性、多向分布特性,构建单电极模式摩擦纳米发电机,该装置在 2.9 m/s 时开始启动,并且在振动频率 4 Hz 下,开路电压达 250 V、短路电流 (ISC) 达 12 μ A,将 TENG 分别设计为风车与仿生草坪结构,利用输出电信号与风速的线性关联特性,实现风速与风向的自供能检测,为农业生产中风能利用与环境监测的一体化提供新方案;针对小型风力发电机低风速启动难而高风速存在效率衰减问题, Zhu 等^[51]人基于海豚背鳍形态与尾鳍摆动特性,设计仿生叶片摩擦-电磁混合发电机,通过设计低启动扭矩的发电单元,结合计算流体力学优化叶片结构与运动轨迹,设计 6 种不同仿生叶片结构,以弦长 (c) 为基准,筛选出 $1/4c$ 的叶片结构为最优,其气动性能最佳该装置启动风速降至 2 m/s,充电功率为 0.712 mW,通过持续运行测试,可稳定为户外无线温湿度传感器供电,验证其作为分布式能源在物联网 (IoT) 低功耗设备供电中的可靠性;自然环境中往往是各个方向的风,为了全方位的俘获风能, Zhao 等^[52]人借鉴金鸡菊

花瓣空间分布特性,设计含八组柔性块 (EPE 材料) 与定子交错结构的仿生摩擦纳米发电机,通过柔性块在气流作用下的摆动实现摩擦层 (铝膜/聚酰亚胺 (Kapton)) 的垂直接触分离,解决传统 TENG 单向能量收集的局限性,实现全方向风能的高效收集。在风速 15 m/s 条件下,峰值功率输出达到 11.57 mW/m²,为气象监测、农业生产与航海领域的自供能传感系统提供新载体;为了更好地结合 TENG 和 EMG 在不同频率的风能收集中的优势, Zhu 等^[53]人提出了提出升阻混合涡轮,创新性融合阻力型叶片与仿生升力型叶片优势——阻力型叶片实现低风速启动 (启动风速降至 2 m/s),仿生叶片在低攻角下具有更大升力系数,相较传统 NACA 0018 翼型叶片,升力型叶片转速提升约 11%,阻力型叶片转速提升约 5.8%,在 4 m/s 的风速下,输出峰值功率高达 202.4 mW,在自然风驱动下,该装置成功为无线气象站供电,实现风速/风向、温湿度、降雨量、光照强度、气压等参数的无线传输,持续工作约 15 min,验证其作为物联网 (IoT) 低功耗设备分布式电源的可行性。

综上所述,借鉴生物结构优化风能收集性能,解决低风速启动难、俘能方向单一等问题,并结合摩擦-电磁混合机制提升能量输出实用性,实现风速与

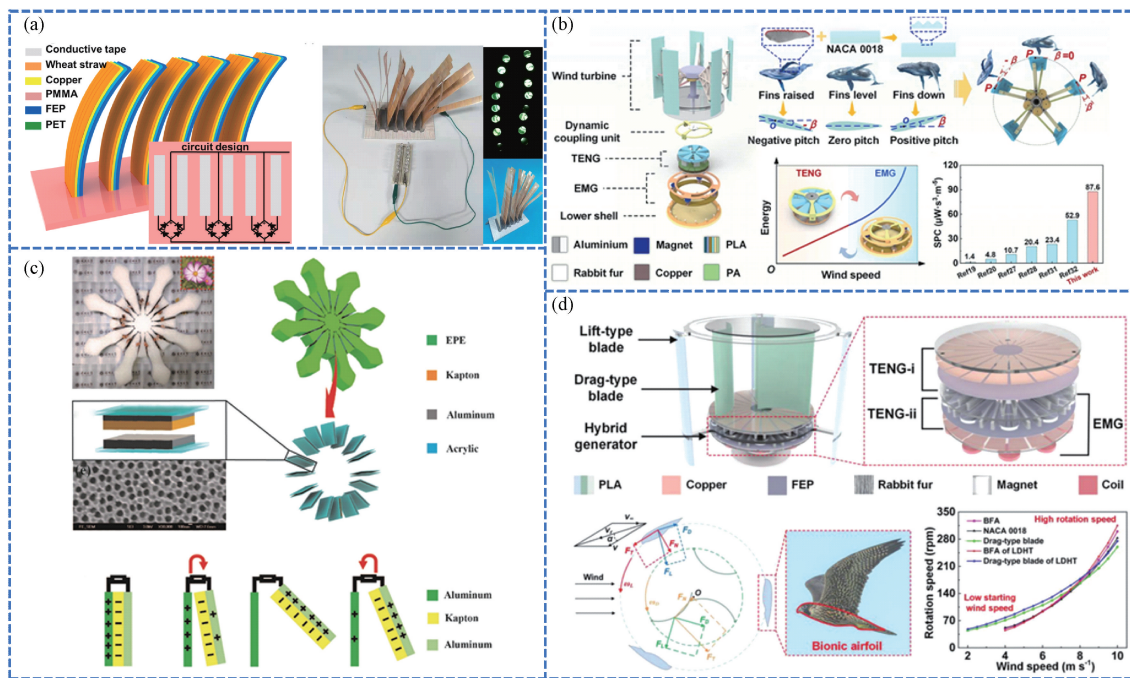
风向自供能检测,为气象监测,智慧农业提供能量来源。另外,通过分析总结风能的特点,根据其风速大带宽,分布式潜力,以及分布波动等特点,结合仿生结构,开发出适用性更强,效率更高的 TENG,更为高效的利用风能这个“高熵”能源,并且对于物联网供电,提供了解决方案。尽管仿生风能收集 TENG 具有结构紧凑、质量轻和易于集成等优势,为分布式风能俘获提供了新颖的解决方案,其在材料长期稳定性、能量输出密度和系统可扩展性方面仍面临挑战。现有设计虽然将启动风速降低到 2 m/s,但是对于夜间静风期仍无法启动,并且对于风速高于 10 m/s 的高峰速场,仿生叶片等结构易发生断裂或形变。对于特殊天气环境面临雨水浸泡、紫外线照射、沙尘磨损等干扰。现有结构缺乏有效的抗风保护机制,因此未来可设计自适应抗风结构,在 TENG 表面涂覆可降解抗紫外涂层,在仿生柔性结构外层包裹耐候性弹性膜,以适应极端环境。总体而言,仿生 TENG 在风能收集领域展现出显著潜力,根据自然灵感提供的生物结构,大幅提高了风能的利用效率,

可针对于风能的分布特点增加了环境匹配度,但仍需在结构适用性与系统集成等方面进一步深入研究,增强抗干扰能力,继续拓宽俘能区间。

表 3 不同仿生结构对风能的俘获

Table 3 The capture of wind energy by different bionic structures

仿生结构	工作风速/ (m·s ⁻¹)	最大输出 表现	优点	缺点
仿草坪结构	2.9~9.1	404 mW/m ²	能俘获低频、小振幅的机械能量	输出性能随环境湿度升高显著下降
仿海豚鳍结构	2~15	55 mW/m ³	高、低风速下均能稳定运行	制备与组装难度高
仿金鸡菊结构	7~17.6	11.57 mW/m ²	全向风能收集	高频率下接触不足
仿叶片结构	2~10	202.4 mW	分级自适应发电	高风速下能量利用率有待提升



注:(a)仿草坪结构^[50]; (b)仿海豚鳍结构^[51]; (c)仿金鸡菊结构^[52]; (d)仿叶片结构^[53]。

图 5 俘获风能的 TENG 结构

Figure 5 TENG structures used for Wind Energy harvesting

5 结论与展望

本文系统综述了仿生结构摩擦纳米发电机 (TENG) 在波浪能、水流能、风能三大场景下的能量俘获研究进展。仿生设计通过复刻自然界生物经亿年进化的功能结构,实现俘能性能的多维度突破。

在波浪能俘获领域,仿生 TENG 结构能更好适用于真实不规则的波浪环境,进而提升俘能效率,通过不同结构设计,可全方位多维度利用波浪能;在水流能俘获领域,仿生 TENG 结构可有效降低装置的启动流速,弥补了传统电磁发电在低流速状态下俘能效率低的缺点,更加高效的俘获水流能,实现了低频水

流能利用上的技术突破;在风能俘获领域,仿生 TENG 结构可以很好的突破传统风力发电的风速阈值,并且可以多方向的收集风能,更加适用于不稳定风速下的能量收集。综上,仿生结构有效解决了传统 TENG 在低频、复杂环境下的俘能局限,结合电磁发电,协同优化了能量转换效率、环境适应性与长期稳定性。

目前对于自然流体的仿生 TENG 研究,虽然已基本满足多数传感器自供能问题,但仍有诸多不足,未来研究可从结构方面和强化流体适配性方面深化:

(1) 在结构方面:

1) 推进模块化与集成设计。目前 TENG 尚未有成熟的应用系统,因此为了提升应用场景适配性,解决能量采集、整流稳压、储能及传感等多模块间因强耦合导致的性能相互制约问题,模块化与集成设计尤为重要,开发标准化能量俘获-转换-存储单元及接口,提升与海上浮标、农业灌溉渠、物联网设备的兼容性;

2) 强化抗干扰结构创新。TENG 的性能和稳定性受到环境干扰(温度、湿度等)、机械振动、电磁噪声等多方面因素的影响。强化抗干扰结构创新已成为提升 TENG 可靠性和实用性的核心需求。针对水流场景设计抗水生植物缠绕、抗淤泥附着的表面机制,针对风能场景开发自适应抗强风形变结构与耐紫外-沙尘涂层;

3) 需结合微观表征技术(如扫描电镜、原子力显微镜),精准复刻生物微观结构的尺寸、排布与材质特性,建立“生物原型-微观结构-俘能性能”的量化关联模型,通过结构参数迭代(如调整仿生叶片的厚度、弧度)进一步提升能量转换效率。

(2) 强化流体适配性:

1) 拓宽俘能区间。自然流体(波浪、水流、风能)存在流速/风速跨度大、频率不规则、方向随机的特点,现有仿生 TENG 多适配特定参数区间。未来需基于流体动力学仿真,开发可响应流体参数动态变化的自适应结构,比如针对水流 0.1~1 m/s 流速区间,设计可伸缩仿生鳍片调节阻力系数;针对风能 2~15 m/s 带宽,优化仿生叶片升阻比,实现全参数区间高效俘能;

2) 提高“流体动能-机械能”的转化效率。流体流经 TENG 结构时易产生涡旋脱落、压力衰减等耦合损耗,需通过仿生结构复刻生物与流体的高效作用机制(如海豚皮肤减阻纹理、海草柔性摇曳模式),减少流体扰动衰减,强化“流体动能-机械能”

的转化效率;

3) 多种俘能仿生协同。自然流体多为分散式,为了同时捕获多种分散能源可通过摩擦-压电-电磁-光伏协同技术,进一步拓展仿生 TENG 在分布式能源与极端环境监测中的应用,助力可再生能源技术向小型化、高效化、场景化升级。

参考文献:

- [1] Chen Shengbo, Li Shuai, Wang Guanghui, et al. Finite-horizon energy allocation scheme in energy harvesting-based linear wireless sensor network[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2025, 162: 107493.
- [2] Hu Xiaosong, Xu Le, Lin Xianke, et al. Battery lifetime prognostics[J]. *Joule*, 2020, 4(2): 310-346.
- [3] Ciez R E, Whitacre J F. Examining different recycling processes for lithium-ion batteries[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 148-156.
- [4] Kang Xilong, Li Pengbo, Yurchenko D, et al. Fundamental theory and cutting-edge applications of TENGs[J]. *Materials Futures*, 2025, 4(4): 042101.
- [5] Wang Junlei, Sun Zeye, Hu Guobiao, et al. Improving mechanical energy harvesters without complex fabrication using origami/kirigami[J]. *Device*, 2024, 2(9): 100548.
- [6] Wang Zhong lin. Triboelectric nanogenerator (TENG)—sparking an energy and sensor revolution[J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(17): 2000137.
- [7] Fan Fengru, Tian Zhongqun, Wang Zhonglin. Flexible triboelectric generator[J]. *Nano Energy*, 2012, 1(2): 328-334.
- [8] Vidal J V, Slabov V, Kholkin A L, et al. Hybrid triboelectric-electromagnetic nanogenerators for mechanical energy harvesting: a review[J]. *Nano-Micro Letters*, 2021, 13: 199.
- [9] Xu S, Fu X, Liu G, et al. Comparison of applied torque and energy conversion efficiency between rotational triboelectric nanogenerator and electromagnetic generator[J]. *Iscience*, 2021, 24(4).
- [10] Zhang Chi. Comparison of triboelectric nanogenerator and electromagnetic generator[M]//*Handbook of triboelectric nanogenerators*. Cham: Springer, 2023: 505-538.
- [11] Zhao Junqing, Zhen Gaowei, Liu Guoxu, et al. Remarkable merits of triboelectric nanogenerator than electromagnetic generator for harvesting small-amplitude mechanical energy[J]. *Nano Energy*, 2019, 61: 111-118.
- [12] Ahmed A, Hassani I, Helal A S, et al. Triboelectric nanogenerator versus piezoelectric generator at low frequency (< 4 Hz): a quantitative comparison[J]. *iScience*, 2020, 23(7): 101286.

- [13] Zi Yunlong, Guo Hengyu, Wen Zhen, et al. Harvesting low-frequency (< 5 Hz) irregular mechanical energy: a possible killer application of triboelectric nanogenerator [J]. *ACS Nano*, 2016, 10(4): 4797–4805.
- [14] Wu Hao, Wang S, Wang Zuankai, et al. Achieving ultrahigh instantaneous power density of 10 MW/m² by leveraging the opposite-charge-enhanced transistor-like triboelectric nanogenerator (OCT-TENG) [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 5470.
- [15] Luo Hongchun, Ni Xingyi, Cui Yingxuan, et al. High stability rotary solid-liquid triboelectric nanogenerator for ionic liquid detection [J]. *Nano Energy*, 2025, 138: 110870.
- [16] Wang Zhonglin, Jiang Tao, Xu Liang. Toward the blue energy dream by triboelectric nanogenerator networks [J]. *Nano Energy*, 2017, 39: 9–23.
- [17] Wang Junlei, Zhang Chengyun, Chen Weizhe, et al. Study on piezoelectric energy harvesting of square column oblique body at different angles [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2021, 42(1): 99–104. [王军雷, 张程云, 陈卫哲, 等. 不同切角方柱斜切体驰振压电能量收集研究 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2021, 42(1): 99–104.]
- [18] Yu Yaonan, Luo Chao, Suto T, et al. Fabrication, evaluation, and multiscale simulation of piezoelectric composites reinforced using unidirectional carbon fibers for flexible motion sensors [J]. *Small*, 2024, 20(24): 2307689.
- [19] Abbasipour M, Khajavi R, Akbarzadeh A H. A comprehensive review on piezoelectric polymeric and ceramic nanogenerators [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2022, 24(6): 2101312.
- [20] Hong Jianlong, Wei Xiao, Zhang Huiyun, et al. Advances of triboelectric and piezoelectric nanogenerators toward continuous monitoring and multimodal applications in the new era [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2025, 7(1): 012007.
- [21] Shao Zhichao, Chen Junshuai, Xie Qiong, et al. Functional metal/covalent organic framework materials for triboelectric nanogenerator [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2023, 486: 215118.
- [22] Vincent J F V, Bogatyreva O A, Bogatyrev N R, et al. Biomimetics: its practice and theory [J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2006, 3(9): 471–482.
- [23] Sengupta D, Kottapalli A G P. Nanomaterials-based bioinspired next generation wearable sensors: a state-of-the-art review [J]. *Advanced Electronic Materials*, 2024, 10: 2300436.
- [24] Himel M H, Sikder B, Ahmed T, et al. Biomimicry in nanotechnology: a comprehensive review [J]. *Nanoscale Advances*, 2023, 5(3): 596–614.
- [25] Choi D, Kim D W, Yoo D, et al. Spontaneous occurrence of liquid-solid contact electrification in nature: toward a robust triboelectric nanogenerator inspired by the natural lotus leaf [J]. *Nano Energy*, 2017, 36: 250–259.
- [26] Zhang Shaojun, Yin Zhirao, Zhang Qianrong, et al. Simulation of self-powered electric-eel friction nanogenerator [J]. *Procedia Computer Science*, 2024, 243: 734–743.
- [27] Zhang Faming, Chang Jiang, Lu Jianxi, et al. Bioinspired structure of bioceramics for bone regeneration in load-bearing sites [J]. *Acta Biomaterialia*, 2007, 3(6): 896–904.
- [28] Li Wenjian, Pei Yutao, Zhang Chi, et al. Bioinspired designs and biomimetic applications of triboelectric nanogenerators [J]. *Nano Energy*, 2021, 84: 105865.
- [29] Li Shenfang, Wang Junlei, Wang Zhonglin. Progression on fluid energy harvesting based on triboelectric nanogenerators [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(11): 2910–2927. [李申芳, 王军雷, 王中林. 利用摩擦纳米发电机的流体能量俘获研究新进展 [J]. *力学学报*, 2021, 53(11): 2910–2927.]
- [30] Ma Xiaoqing, Zhou Shengxi. A review of flow-induced vibration energy harvesters [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 254: 115223.
- [31] Gao Yue, Zhu Hongjun, Zhou Xinyu, et al. Numerical investigation on wake flow structure and hydrodynamic characteristics of flow around C-shaped cylinder [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2024, 39(1): 8–16. [高岳, 朱红钧, 周新宇, 等. C形钝体绕流的尾涡结构与水动力特性分析 [J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2024, 39(1): 8–16.]
- [32] Ma Xiaoqing, Zhou Shengxi. Analysis of tristable wind-induced vibration energy harvesting system [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2023, 21(10): 65–71. [马小青, 周生喜. 三稳态风致振动能量俘获系统分析 [J]. *动力学与控制学报*, 2023, 21(10): 65–71.]
- [33] Xu Wanhai, Wu Haokai, Sha Mu, et al. Numerical study on the flow-induced vibrations of two elastically mounted side-by-side cylinders at subcritical Reynolds numbers [J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 124: 103191.
- [34] Li Zhiyuan, Lyu Wenbo, Ma Xiaoqing, et al. A magnetic sliding airfoil flutter energy harvester [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(10): 2146–2155. [李支援, 吕文博, 马小青, 等. 一种磁力滑动式翼型颤振能量俘获器 [J]. *力学学报*, 2023, 55(10): 2146–2155.]

- [35] Wang Zhonglin. On Maxwell's displacement current for energy and sensors: the origin of nanogenerators[J]. *Materials Today*, 2017, 20(2): 74–82.
- [36] Wang Zhonglin. On the expanded Maxwell's equations for moving charged media system-General theory, mathematical solutions and applications in TENG[J]. *Materials Today*, 2022, 52: 348–363.
- [37] Clemente D, Rosa-Santos P, Taveira-Pinto F. On the potential synergies and applications of wave energy converters; a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 135: 110162.
- [38] Wen Honggui, Yang Peiyuan, Liu Guanlin, et al. Flower-like triboelectric nanogenerator for blue energy harvesting with six degrees of freedom[J]. *Nano Energy*, 2022, 93: 106796.
- [39] Wang Yan, Liu Xiangyu, Wang Yawei, 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.
- [40] Yang Borui, Li Hengyu, Wang Zheng, et al. High-performance triboelectric nanogenerator inspired by bionic jellyfish for wave energy harvesting[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 503: 158399.
- [41] Chen Baodong, Tang Wei, He Chuan, et al. Water wave energy harvesting and self-powered liquid-surface fluctuation sensing based on bionic-jellyfish triboelectric nanogenerator[J]. *Materials Today*, 2018, 21(1): 88–97.
- [42] Wang Xinxian, Gao Qi, Zhu Mingkang, et al. Bioinspired butterfly wings triboelectric nanogenerator with drag amplification for multidirectional underwater-wave energy harvesting[J]. *Applied Energy*, 2022, 323: 119648.
- [43] Zhang Baosen, Jiang Yunchong, Ren Tianci, et al. Recent advances in nature inspired triboelectric nanogenerators for self-powered systems[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2024, 6(6): 062003.
- [44] Jing Zhaoxu, Zhang Jiacheng, Wang Jianlong, et al. 3D fully-enclosed triboelectric nanogenerator with bionic fish-like structure for harvesting hydrokinetic energy [J]. *Nano Research*, 2022, 15(6): 5098–5104.
- [45] Zhang Sheng, Jing Zhaoxu, Wang Xinxian, et al. Enhancing low-velocity water flow energy harvesting of triboelectric-electromagnetic generator *via* biomimetic-fin strategy and swing-rotation mechanism[J]. *ACS Energy Letters*, 2022, 7(12): 4282–4289.
- [46] Zhang Jiacheng, Li Hengyu, Wang Jianlong, et al. A flexible rolling triboelectric nanogenerator with a bionic gill cover structure for low-velocity water flow energy harvesting[J]. *Small*, 2025, 21(6): 2409864.
- [47] Dong Lu, Zhu Jianyang, Li Hengyu, et al. Bionic dragonfly staggered flapping hydrofoils triboelectric-electromagnetic hybrid generator for low-speed water flow energy harvesting[J]. *Nano Energy*, 2024, 127: 109783.
- [48] Li Tianyu, Li Chenxi, Wang Kuankuan, et al. Hierarchical structure-based biomimetic triboelectric-electromagnetic hybrid generator for river monitoring[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 509: 161035.
- [49] Wang Yuqi, Yu Xin, Yin Mengfei, et al. Gravity triboelectric nanogenerator for the steady harvesting of natural wind energy[J]. *Nano Energy*, 2021, 82: 105740.
- [50] Ma Ping, Zhu Huarui, Lu Hao, et al. Design of biodegradable wheat-straw based triboelectric nanogenerator as self-powered sensor for wind detection[J]. *Nano Energy*, 2021, 86: 106032.
- [51] Zhu Jinzhi, Feng Yuming, Yang Zheng, et al. Enhanced wind energy harvesting performance of triboelectric-electromagnetic hybrid generator *via* whale fin blades and speed matching[J]. *Nano Energy*, 2025, 135: 110615.
- [52] Zhao Chenghan, Wu Yinghui, Dai Xingyi, et al. Calliopis structure-based triboelectric nanogenerator for harvesting wind energy and self-powered wind speed/direction sensor[J]. *Materials & Design*, 2022, 221: 111005.
- [53] Zhu Mingkang, Yu Yang, Zhu Jianyang, et al. Bionic blade lift-drag combination triboelectric-electromagnetic hybrid generator with enhanced aerodynamic performance for wind energy harvesting[J]. *Advanced Energy Materials*, 2023, 13(46): 2303119.

Research Progress on Energy Harvesting from Natural Fluids by Bionic Structure Triboelectric Nanogenerators

WANG Junlei, ZHANG Xinyu, KANG Xilong

(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The large-scale deployment of distributed sensor nodes in the Internet of Things created an urgent demand for self-powering technologies. Currently, sensors were mostly powered by batteries, which faced problems such as environmental pollution and limited endurance. However, the triboelectric nanogenerator (TENG), which could convert ambient mechanical energy into electricity, provided an ideal solution. This paper combined bionics and TENG technology. It systematically analyzed the advantages of TENG in harvesting energy from natural fluids. Based on different fluid characteristics, it summarized the applicable structures and performance features. First, the characteristics of natural fluids and the working principle of TENG were outlined. Then, the form characteristics of wave energy, water flow energy, and wind energy, as well as the advantages of bionic TENG, were clarified. In the field of wave energy harvesting, bionic TENG could better adapt to complex wave conditions and achieve multi-directional wave energy harvesting. In water flow energy harvesting, bionic TENG could effectively eliminate the lock-in effect and achieve start-up at low flow velocities. It thus compensated for the low efficiency of traditional methods under low flow conditions. In wind energy harvesting, bionic TENG, with the aid of bionic airfoils, achieved start-up at lower wind speeds and promoted omnidirectional wind energy collection. This paper also discussed existing structural problems and looked forward to future developments. In addition, it constructed a "biological prototype-structure-performance" correlation framework. This framework provided a reference for TENG structural optimization, promoted its large-scale application in scenarios such as the marine Internet of Things and smart agriculture, and contributed to the global energy transition.

Keywords: triboelectric nanogenerator; bio-inspired structures; natural fluid; flow-induced vibration; energy harvesting