

[引用格式] 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): 1-22.

# 面向观测网络供电的水下能量捕获技术研究进展

张 宇, 王 昊, 相 城, 徐敏义\*

(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)

**摘要:** 水下立体观测网络通过实时获取水下环境、水下目标和水下活动等相关信息, 为国家海洋安全、深海能源与资源开发、海洋灾害预警预报等提供重要支撑。然而, 传统基于蓄电池供电的能量供给方式越来越难以满足水下观测网络长时间持续可靠工作需求。为提升水下观测网络的续航能力, 基于水下能量捕获的原位供电技术受到国内外广泛关注。海流能、波浪能具有分布广、持续性强、能量密度高等优势, 因此文中重点关注面向水下立体观测网络供能的海流能与波浪能捕获装置研究进展。根据能量转换方式的不同, 作者梳理了基于电磁发电、压电、摩擦纳米发电和混合式发电的水下能量捕获技术代表性工作, 对比总结了不同发电形式的优缺点。进一步, 文章展望了水下能量捕获技术发展趋势, 为水下观测网络实现原位供能提供了思路。

**关键词:** 水下能量; 能量捕获; 水下观测网络; 原位供能

中图分类号: U667.3; TJ630.32

文献标识码: A

文章编号: 2096-3920(2023)01-0001-22

DOI: [10.11993/j.issn.2096-3920.2022-0088](https://doi.org/10.11993/j.issn.2096-3920.2022-0088)

## Recent Progress on Underwater Energy Harvesting for Powering Observation Networks

ZHANG Yu, WANG Hao, XIANG Cheng, XU Min-yi\*

(Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian Key Laboratory of Marine Micro/Nano Energy and Self-powered Systems, Dalian 116026, China)

**Abstract:** The underwater stereo observation networks are critical in acquiring real-time awareness of environments, targets and activities underwater. It forms the essential foundation for national marine security, subsea resource exploitation and marine disaster early warning. The traditional battery-based power supply is becoming increasingly inadequate in supporting long-term sustainable work of the observation network. In order to improve the endurance of underwater observation devices, it is highly desired to develop in-situ underwater energy harvesting. Due to the underwater current energy and underwater wave energy has the advantages of extensive distribution, good consistency and high power density, this study focus on the recent progress of underwater current energy, underwater wave energy harvesting for powering underwater observation devices. According to the difference of energy transfer type, the present review summarized and compared the representative studies on underwater energy harvesters that based on electromagnetic generator, piezoelectric nanogenerator, triboelectric nanogenerator and hybrid generator. Furthermore, this review made a prospect on the development of underwater energy harvesters in the future. It provides a certain idea for the innovation of in-situ energy supply technology of underwater observation network.

**Keywords:** underwater energy; energy harvesting; underwater observation network; in-situ energy supply

收稿日期: 2022-12-07; 修回日期: 2023-02-01.

基金项目: 国家自然科学基金(51979045, 52101382).

\* 通信作者简介: 徐敏义(1984-)男, 博士, 教授, 主要研究方向为海洋微纳能源与自驱动系统. .

## 0 引言

水下立体观测网络是以海底观测网络为主体, 移动观测网为扩展的水下立体观测系统。该系统通过有线或无线的方式, 借助水下及海底传感器、自主水下航行器等固定或移动平台(如图 1 所示), 对海洋噪声、海洋污染、海水流动规律、海底地形变化等进行全方位立体化的观测与信息采集<sup>[1-4]</sup>, 对于水下环境监测、海洋资源开发、国防安全保护等具有重要的应用价值<sup>[5-9]</sup>。

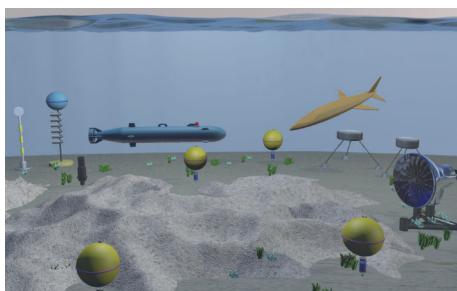


图 1 水下观测网络

Fig. 1 Underwater observation network

目前, 各类水下观测设备已形成初步体系, 但供电问题始终是制约水下观测系统长时间工作的主要瓶颈。图 2 显示了部分水下观测设备的能耗, 包括浊度、盐度和压力传感器<sup>[10-11]</sup>以及水下移动观测平台等。微型水下传感器通常可下潜至水下 300 m, 最大潜深可达 6 000 m, 功率大多数在 10 W 以下<sup>[12]</sup>。这些传感装置既可以单独放置于水下, 也可装配在无人航行器中进行水下勘测任务。对于水下移动观测平台而言, 长度不超过 1 m 的水下小型探测航行器功率通常在 100 W 以内, 最大续航能力不超过 24 h<sup>[13]</sup>。其中, 天津大学王延辉教授等<sup>[14]</sup>对水下滑翔机的能耗进行了详细分析, 并指出电池电源是限制水下航行器工作时间的关键因素。水下观测系统的传统供电方式主要包括电池供电和电缆供电, 其具有成本高、维护难等问题。以搭载蓄电池供电的水下航行器为例, 频繁回收至岸上充电与再投放入海不仅降低工作效率, 也会消耗大量人力物力。对于能耗较低的潜标, 传统的电池供电虽能够驱动其在水下工作较长时间, 但较大的电池体积阻碍了潜标的小型化。并且, 大容量高功率电池的安全性也有面临挑战<sup>[15]</sup>。此外, 对于海底观测网络而言, 传统的海

底电缆供电模式会限制观测设备的空间布置, 对海洋探索也会存在一些局限性。

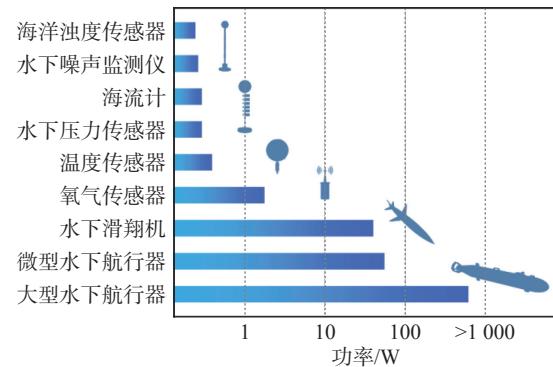


图 2 部分水下装置能耗图

Fig. 2 Energy consumption diagram of some underwater devices

为提升水下观测网络的续航能力, 基于水下能量捕获的原位供电技术受到国内外广泛关注。通过水下能量捕获装置将海洋能量转换为电能直接供给至水下观测设备, 是一种很有潜力的解决方案<sup>[16]</sup>。

目前, 海流能、波浪能、温差能、光能驱动的水下观测装置已有相关研究<sup>[17-20]</sup>。在众多海洋能量形式中, 海流能与波浪能因其具有分布范围广、能量密度高等特点, 有望成为水下观测网络的主要能量来源<sup>[21]</sup>, 通过水下能量捕获装置与水下立体观测网络相结合的新型供电方式在海洋原位供电领域具有广阔应用前景<sup>[22]</sup>。

## 1 水下能量形式

水下能量形式丰富, 包括海流能、波浪能、温差能、盐差能、光能等, 如图 3 所示。由于海水密度的差异、海上风力的驱使以及行星引力的影响, 在水下会形成覆盖大部分水深的海流, 且由于涡激振动以及流致振动效应的影响, 海流在穿过某些障碍物时会形成不稳定的涡流<sup>[23]</sup>。波浪能则是

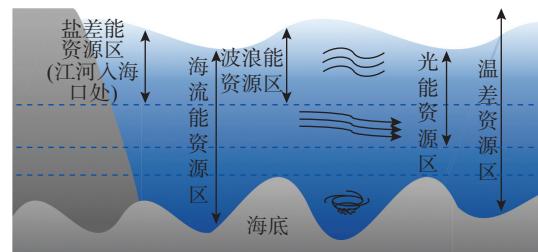


图 3 水下能量分布区域

Fig. 3 The distribution of underwater energy

风将动能传递给表层海水所形成的。海水可以高效且稳定的将太阳能储存在自身内部继而形成温差能。在江河入海口处,由于海水与淡水间盐浓度的差异,含盐量高的海水会向淡水进行扩散以平衡盐度差,从而释放出盐差能。

上述能量形式中,盐差能能量密度较低,暂不适合对水下观测装置进行能量供给。太阳光在水下的穿透能力较弱,这使得大多数水下观测装置无法依靠收集光能进行工作。海流能和波浪能具有分布范围广、能量密度高等优势,在水下观测网络供电领域具有广阔应用前景。海洋温差能具有总储量高、输入稳定性较强、昼夜波动小、不受气象与海况因素影响的特点,在水下装备能量供给领域具有重要应用价值<sup>[24-25]</sup>。近年来,应用于水下滑翔机的温差供电技术不断发展并取得良好成果<sup>[25]</sup>。由于文章篇幅受限,本文重点介绍基于海流能与波浪能供电的水下能量捕获装置。

由式(1)可知,海流的功率与流速、海水密度等参数有关<sup>[26]</sup>。

$$P = \frac{1}{2} \rho \int (U^3 dA) \quad (1)$$

式中:  $\rho$  代表海水密度;  $A$  代表流通面积;  $U$  代表海水流速。据统计,世界范围内海流能总储量可达  $3.6 \text{ TW}$ <sup>[27]</sup>。由图 4 所示<sup>[28]</sup>,当海流速度在  $1 \text{ m/s}$  以上时,功率密度可超  $0.5 \text{ kW/m}^2$ 。

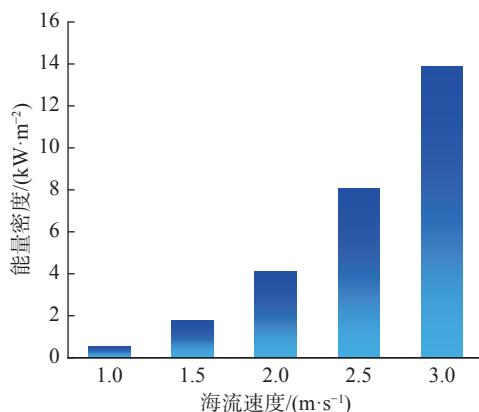


图 4 不同海流流速所对应的能量密度

Fig. 4 Power densities of different ocean current velocities

波浪能同样具有持续性好、能量密度较高等优点。据统计世界范围内的波浪能储量约为  $3 \text{ TW}$ <sup>[27]</sup>,与太阳能和风能相比,其能流密度更高<sup>[29]</sup>。除了水面运动,波浪在形成时通常会带动水下数米深

区域的运动<sup>[30]</sup>。在波浪场作用下,水下装置会产生脉动压力场。目前大部分水下电磁发电机正是根据波浪导致水下压力场变化这一原理进行波浪能的收集<sup>[31-35]</sup>。

作为水下观测网络的能量来源,海流能与波浪能具有储量大、能量密度高、分布面积广等众多优势。因此,文中重点关注水下海流能与波浪能能量捕获装置研究进展。

## 2 水下能量捕获装置

根据能量转换形式的不同,水下能量捕获装置可以分为电磁发电机、压电发电机和摩擦纳米发电机,如图 5 所示。国内外研究团队针对不同条件下的海流能和波浪能,研发了基于电磁、压电和摩擦纳米发电的多种类型水下能量捕获装置,为水下观测网络的原位供能提供了众多方案<sup>[36-39]</sup>。

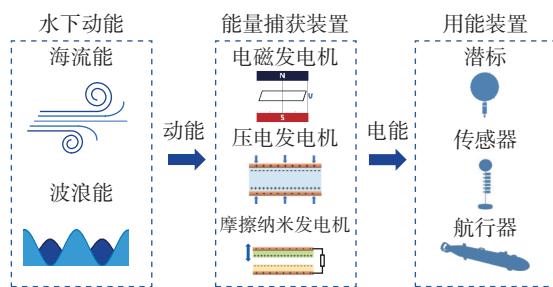


图 5 水下能量利用方式

Fig. 5 Methods of underwater energy utilization

### 2.1 基于电磁发电机的能量捕获装置

#### 2.1.1 电磁发电机基本原理

根据法拉第电磁感应效应,运动的导体切割磁感线将会产生电流。电磁感应效应可描述为:当闭合回路中的磁通量发生变化时,闭合回路会产生感应电动势,从而在外电路中产生电流,原理公式为

$$E = n \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (2)$$

式中:  $\Delta \Phi$  为磁通变化率;  $E$  为感应电动势;  $n$  为线圈匝数<sup>[40]</sup>。

图 6 更直观地展示了电磁感应效应,即运动的导体切割磁感线将会产生电流,感应电动势亦可表达为

$$E = BLv \sin \theta \quad (3)$$

式中:  $B$  代表磁感应强度;  $L$  为切割磁感线的导体

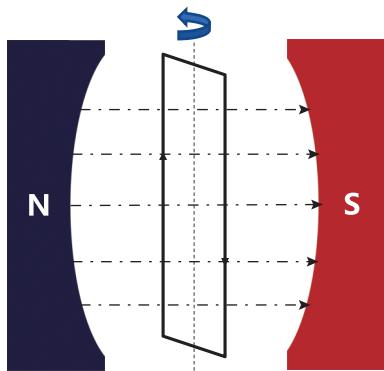


图 6 EMG 工作原理  
Fig. 6 Working principle of EMG

长度;  $v$  为导体速度<sup>[40]</sup>。

作为一种传统的能量转换方式, 电磁发电机 (electromagnetic generators, EMG) 因能量转换效率高、电能输出稳定而被广泛应用于大型海洋能发电装置<sup>[41]</sup>。然而, 对于体积受限的水下观测装置, 基于 EMG 的水下能量捕获装置面临巨大挑战。

### 2.1.2 往复式电磁能量捕获装置

往复式电磁能量捕获装置通过永磁铁的往复运动切割线圈进行发电。为延长水下传感器的工作时间, 葡萄牙米尼奥大学学者 Faria<sup>[22]</sup> 研制出了一种布置于水下的小型 EMG, 如图 7(a) 两线圈式电磁电机模拟图所示。该装置由安装在亚克力管内部的磁铁以及管外部的 2 组线圈组成, 通过捕获垂直于波浪传递方向的海水动能而输出电能。在模拟实验中, 发电装置在自制实验平台中进行往复运动以模拟水下运动场景, 频率范围在 0.1~0.4 Hz, 图 7(b) 为两线圈式电磁电机能量输出<sup>[22]</sup>。实验表明, 当 199~510 Ω 之间的负载电阻与发电机串联时, 电机的平均功率可超过 6 mW。模拟海浪频率在 0.1 Hz 时, 发电机功率为 1.31 mW。当海浪频率达到 0.4 Hz 的顶峰时, 该电磁电机功率可达 7.73 mW, 输出能量达 7.77 mJ/s, 足以为数个水下小型传感器供电。

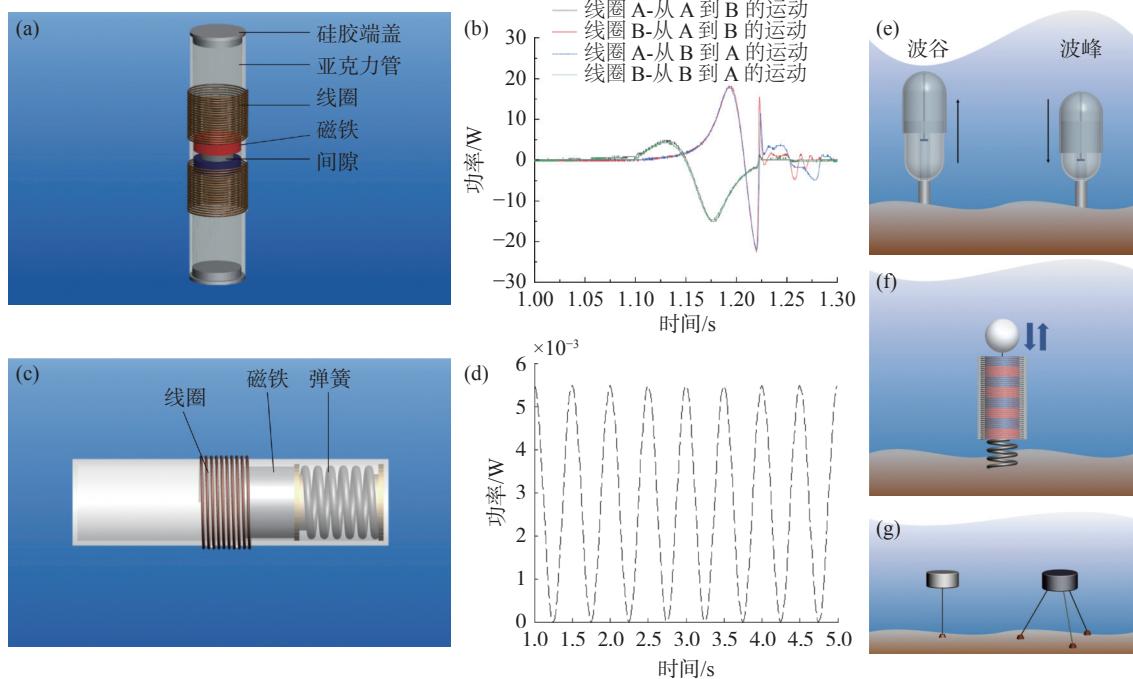


图 7 往复式电磁能量捕获装置  
Fig. 7 Reciprocating electromagnetic energy harvesting devices

与两线圈电磁发电机类似, 我国台湾省中州科技大学 Chiu 等<sup>[42]</sup> 同样以水下传感装置供电为目的, 研发了一种收集水流动能的小型电磁发电机。该小型能量捕获装置的结构示意图如图 7(c) 所示, 图 7(d) 为该能量捕获装置的功率输出。作用

在装置壳体上的外力使电机外壳与内部磁铁进行周期性的往复运动, 进而使得线圈切割磁感线以产生电流。实验结果显示, 该能量捕获装置最高输出功率可达 5.8 mW, 电压为 1.5 V。

相比于大型电磁能量捕获装置, 上述 2 类小型

能量捕获装置虽未能进行商业化的应用,但小型化、简易化的特点以及新颖的供电方式可为日后电磁能量捕获装置向着小型化发展提供一定的思路。

除了动能驱动的往复式电磁能量捕获装置,目前还存在一种比较成熟的压差式波浪能发电装置,其原理如图7(e)所示。以典型的水下压差式波浪能发电装置(archimedes wave swing, AWS<sup>[31-32]</sup>)为例,该装置由圆柱形气室和安装在海底的固定物两部分组成。当波峰越过AWS时,装置受到的压力增大而使得顶部下移,气室体积减小;当波谷位于AWS上方时,AWS受到的水压降低,在气室内高压空气的作用下,体积增大。在AWS下方安装有永磁发电机,磁铁随着波峰波谷的变化而上下垂直运动,进而切割磁感线对外发电。水下压差式波浪能发电装置尺寸相对较小,易于产生显著的升沉运动<sup>[28]</sup>。水下压差式波浪能发电装置由上至下一般分为两部分:用以俘获波浪能的浮子和永磁发电机单元,如图7(f)所示。该类型装置通过波浪带动浮标升沉运动或纵荡运动来带动动子相对于定子往复运动,切割磁感线以发电。浮子主要形式有圆柱状、球状、椭球状等。此外,通过直接将浮子和发电机相连的模式,可以大量减少动能传输中的损耗。东南大学黄磊教授针对此类发电装置进行了大量研究,分析了不同水深下的波浪激振力、不同海况下浮标的位移等水动力参数和相应的电能输出效率<sup>[34]</sup>。

Carnegie公司研制的CETO装置也是一种典型的水下压差式波浪能利用设备,装置外型如图7(g)中的右侧结构所示<sup>[19,35]</sup>。该装置通常位于海面以下几米处来捕获波浪能。通过将多个CETO进行阵列部署以实现更大功率的电能输出。此外,阿德莱德大学学者Sergienko<sup>[19]</sup>发现单系泊点收集装置可以在水下更好的捕获来自于各自由度的纵荡、垂荡运动,如图7(g)所示。但对于CETO装置来说,三线系泊虽在一定程度上抑制了装置的运动能力,但据估计其发电量约为单线系泊的3倍<sup>[19]</sup>。

因点吸收式波浪能捕获装置发电效率高,技术较为成熟,且部分装置已接近商业化供电,这使得此类型波浪能捕获装置对水下观测网络供能的潜力极大。如图8所示,通过阵列化布置此类小型波浪能捕获装置,形成海底电站,进而实现水下观测

网络的供电覆盖或许是未来解决水下观测网络供能问题的有效途径。

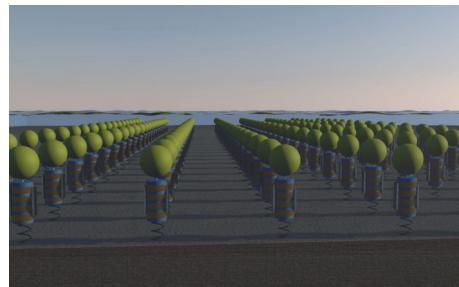


图8 阵列化点吸收式波浪能捕获装置  
Fig. 8 Arrayed point wave energy harvesting devices

以点吸收式水下俘能装置为例,位于水下的能量捕获装置工作时可以避免海浪的冲击以及紫外线的影响,这意味着水下能量捕获装置通常可以具有较高的寿命。且将装置布置于水下,可以减少海面以上生物的视觉冲击,更不会占用航道,干扰船舶航行,这是水下能量捕获装置的优势。相较于文中所提到的其它电磁能量捕获装置,位于水下的点吸收式能量收集装置发展最为成熟,但将点吸收式俘能装置应用于水下观测网络的实例却极为稀少。这表明水下观测网络的原位供电技术仍处于起步阶段,若想实现这一技术,仍需要不断地对现有的水下能量捕获装置进行改进与创新。

### 2.1.3 旋转式电磁能量捕获装置

由于长度与空间的影响,直线电机在加减速时会产生一定的能量损耗。不同于呈单一自由度运动的往复电磁能量捕获装置,旋转式电磁能量捕获装置可以进行连续单向旋转,其起动转矩相对较低,能量转换效率较高。

旋转式海流能捕获装置根据叶片的形式不同可分为垂直轴式发电机与水平轴式发电机两大类,基本组成可分为以下4部分:

- 1) 叶片: 捕获海流动能带动自身动作, 将海流动能转化为叶片动能。
  - 2) 传动机构: 将叶片传递而来的转速进行放大, 以适应叶片在水下转速不宜过高的特点。
  - 3) 发电机单元: 一般为电磁发电机, 电磁电机通过接收传动机构传递而来的动能进行发电。
  - 4) 密封单元: 对传动机构以及发电机单元进行密封, 以防止海水腐蚀、海洋生物堵塞等问题。
- 海流推动叶片旋转, 以此带动发电机转子切割

磁感线进行发电为旋转式海流能发电机的基本工作原理。

因我国大部分海域流速较低, 尤其在水下环境中, 随着水深的增加海水剖面流速下降极快, 且流向较为复杂多变。这要求水下能量捕获装置具有低流速启动与发电的能力<sup>[43-44]</sup>。为了实现水下观测网络能量就地获取与使用, 中船 701 所田应元等<sup>[43]</sup>设计了一种应用于深海的超低速水平轴海流能发电装置, 如图 9(a)所示。该发电装置为适应低

流速海域海况, 在常规发电技术的基础上采用一种辅助启动技术, 将传统的海流能发电装置的连续性发电模式转变为周期性发电模式, 极大地降低了发电系统对于流速的要求。经实验结果显示, 在海流流速为 1 m/s 时, 装置发电功率可达 200 W, 此功率足以为水下小型用能装置进行供电。此外, 该发电装置在 0.1 m/s 的来流流速下即可稳定输出电能, 其原理的正确性以及可行性已得到验证, 为今后工程样机的研制以及应用奠定了基础。

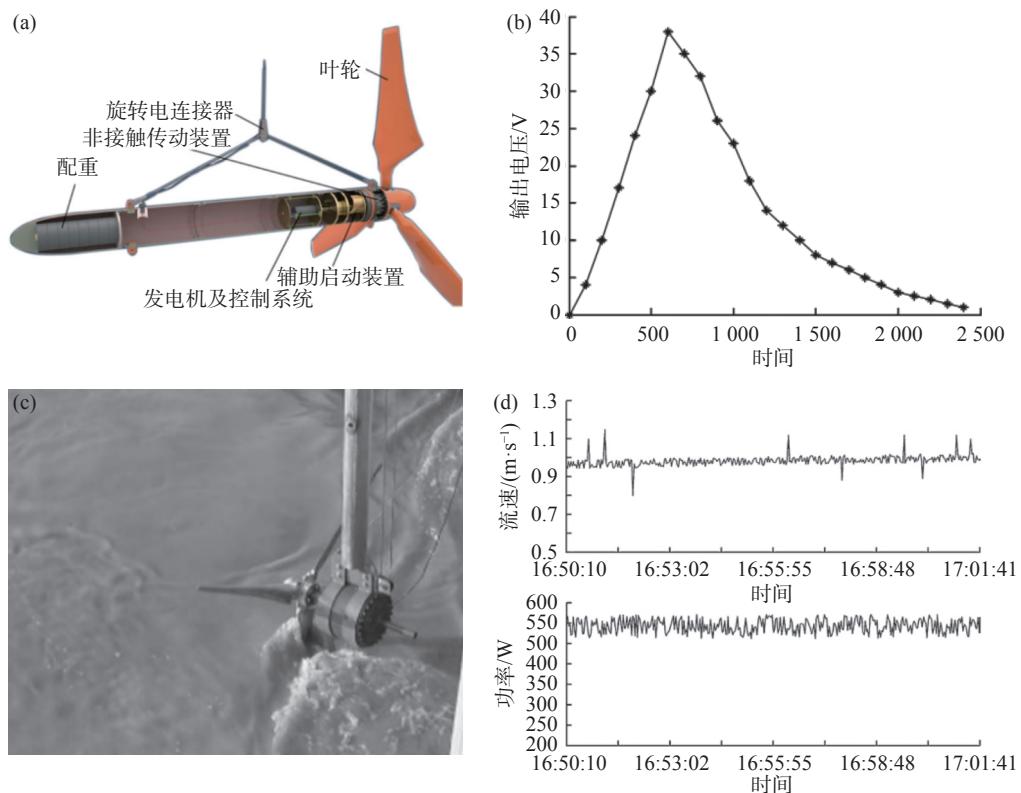


图 9 低流速海流能发电装置  
Fig. 9 Low flow rate ocean current energy power generation device

为实现低流速海流能的高效发电, 解决海洋观测网络用能需求, 上海船舶电子研究所祁长璞等<sup>[44]</sup>设计了一台额定流速 1 m/s、额定功率达 500 W 的样机, 如图 9(c)和(d)所示。与并入电网的常规海流能发电机组不同, 为使海流发电机的电能输出满足海洋仪器的使用要求, 离网型海流能发电机需要考虑电能供应的稳定性问题。为此, 该装置研发了一套能够将发电机输出的不稳定电能转化为稳定电能的能量管理系统。这一能量管理系统的研发成为该工作区别于其他水下能量收集装置的显著优势, 极大的提高了水下能量捕获装置的

实用性, 为今后工作于深海的海洋仪器实现真正的原位供电提供思路。随后, 为进一步提升小型海流发电机于低流速海流能的利用效率以及自身的稳定性, 西北工业大学赵天祥等<sup>[45]</sup>设计了一种用于低流速海域的小功率海流能发电系统。实验中, 该装置通过调节 DC-DC 电路输出电流, 用最大功率跟踪的方法对系统的稳定性与效率进行提升。因该工作避免了效率低、对控制要求高的传统调节方式, 使得该工作具有一定的参考价值。

因绝大部分水下观测网络节点目前依靠装置内部电池或外接电池仓进行供电<sup>[15,46]</sup>, 此供电模式

存在较多弊端, 普通的电池电源对于低功耗的水下传感器节点供能通常只能维持数周<sup>[47]</sup>, 电源耗尽后的人工更换成本也极高。通过外加电池舱能够有效增加水下观测网络的续航能力, 但并不是水下观测网络续航问题的完美解决方案。为了实现原位供电, 意大利卡拉布里亚大学学者 Cario 团队<sup>[47-48]</sup>设计出一种新型的水下海流能捕获装置,

螺旋桨式海流电机与传感器水下应用图如图 10(a)所示。同传统水平轴海流涡轮发电机类似, 该海流发电机通过吸收海流动能带动自身叶片旋转, 进而将海流能转化为电能, 用于对水下传感器节点供能。经实验, 在海流流速为 1 kn 的条件下, 该能量捕获装置输出功率为 4 W, 可以满足大部分水下传感器的用能需求。

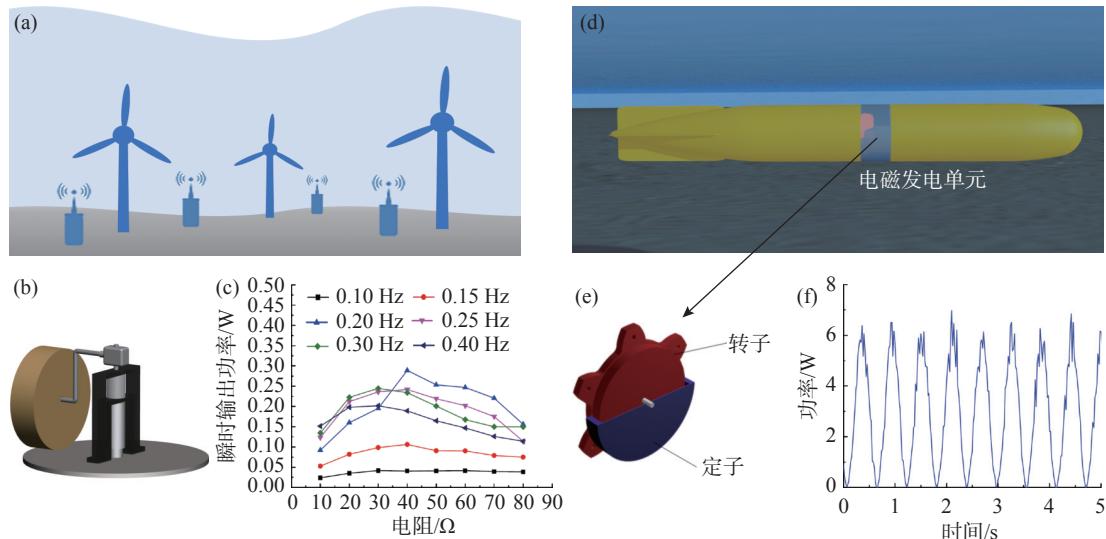


图 10 旋转式电磁俘能装置  
Fig. 10 Rotary electromagnetic energy harvesting device

此外, 为增强水下潜标、水下系泊航行器等水下观测系统的能量供给, 西北工业大学 Ding 等<sup>[49]</sup>设计了一种安装于水下系泊装置用以捕获海洋低频动能的小型水平摆动式海流能捕获电磁发电机, 如图 10(b)所示。图 10(c)为该装置摆距角为 3°时不同频率下的功率。在该装置的模拟实验中, 海洋动能频率为 0.2、0.25、0.3 Hz 时, 最大平均功率可达 0.3 W。除研究解决水下系泊平台的能量供给问题之外, 其还设计了 2 类直接安装于水下小型航行器内部的电磁能量捕获装置, 用以对水下航行器中的传感设施供电或增强水下航行器的续航能力<sup>[50-51]</sup>, 水下无人航行器模拟图见图 10(d); 电磁发电单元模拟图见图 10(e)。两类电磁发电装置安装方法与工作原理基本一致, 水下航行器随着波浪的晃动带动内部的电磁发电装置动作以产生电流。

经过测试, 发电装置在 1 级海况下所输出的功率超过 150 mW, 足以驱动小型传感器<sup>[50]</sup>。在 2 级海况下, 小型航行器中的电磁发电设备功率可达

到 0.15 W, 基本能够满足布置于无人水下航行器中的探测设备能源需求<sup>[51]</sup>, 图 10(f)为其瞬时输出功率。

## 2.2 基于压电发电机的能量捕获装置

### 2.2.1 压电发电机工作原理

通过挤压某些电介质材料可以使得材料上下表面带有相反电荷, 即所谓的压电效应。图 11 展示了压电发电机(piezoelectric generators)的基本工作原理。在外力的激励作用下, 压电材料上下表面会形成电势差。压电材料所产生的电压可表示为<sup>[52]</sup>

$$V = -g(L/A)F \quad (4)$$

式中:  $L$  为块体厚度;  $A$  为沿力方向截面面积;  $F$  为施加在压电板表面的力;  $V$  为输出电压。

因压电材料具有功率高、结构简单、输出电压高并易于整流等优点<sup>[53-56]</sup>, 以压电效应为原理的能量捕获装置已经成为重要研究方向<sup>[57]</sup>。

### 2.2.2 用于水下能量收集的压电材料

具有压电效应的压电材料对于外界环境中的

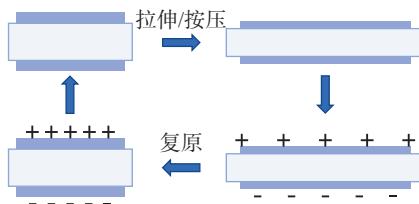


图 11 压电材料发电方式

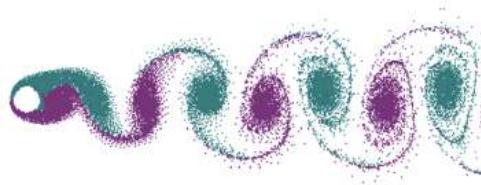
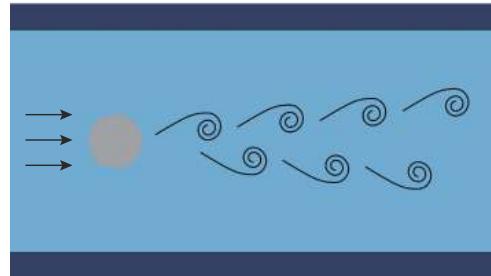
Fig. 11 Principle of the power generation of piezoelectric material

机械运动灵敏性极高,这使得压电材料可以用于吸收包括海流能、波浪能在内的机械能量,并将机械能量转化为电能。随着压电材料制备技术的不断发展,压电材料由最早的硬质石英材料逐渐发展为以压电陶瓷(piezoelectric ceramic transducer, PZT)、压电聚合物纤维和压电聚合柔性薄膜(polyvinylidene fluoride, PVDF)为主的各类高性能硬质或柔性材料<sup>[57]</sup>。除上述发展较为成熟的主流压电材料外,近年来比较新颖的还有以 ZnO 纳米线为核心的压电纳米发电机等<sup>[58]</sup>。经过几十年的发展,压电发电机已经作为能量捕获装置应用于各类领域。尤其在海洋能量利用领域,因压电发电机捕获能量时并不需要依靠运动部件,因此压电发电机可以被制作得极其紧凑且可靠,小型化的能量捕获装置使压电发电机在捕获海洋细微能量并对水下小型传感器供电方向具有极大的前景。

PZT 陶瓷与 PVDF 薄膜是捕获海洋能量最常用的两种材料,一般情况下对于同一机械能的捕获,相较于 PVDF 柔性薄膜, PZT 陶瓷具有更高功率的输出<sup>[59]</sup>。但由于水下环境复杂,根据卡门涡街效应(如图 12 所示),由海流引起的涡流能量呈多向性与发散性,以 PZT 为主的硬质压电材料会限制其对于涡流能的吸收<sup>[60]</sup>,而具有高延展性的 PVDF 薄膜相较于高刚度、低灵活性的 PZT 陶瓷更适合布置于水下收集海流动能。图 13 描绘了柔性压电材料在涡激振荡效应下的形变<sup>[61-62]</sup>。

### 2.2.3 柔性压电膜结构能量捕获装置

据上文所述,PVDF 压电薄膜由于材料具有高延展性以及抗冲击性而被广泛应用于海流能量的捕获。伦敦大学 Taylor 等<sup>[39]</sup>根据 PVDF 薄膜设计了一种鳗鱼型压电装置,其柔性电机及材料场景图见图 14(a)和(b)所示,图 14(c)为电压输出。“仿生鳗鱼”式压电发电机通过布置于水下可将海流

图 12 “卡门涡街”效应  
Fig. 12 The Carmen vortex effect图 13 柔性压电薄膜在涡流应力场中的形变  
Fig. 13 Deformation of flexible piezoelectric films in vortex fields

在涡激振动效应下产生的涡流能量转化为自身电能储存在内部电池单元,用以对水下移动观测装置与传感器供电。经实验结果表明,仿生鳗鱼型能量捕获装置可在 1 m/s 的水流下产生 1 W 的功率。目前,该仿生鳗鱼已经完成了在实验平台上的数据监测。此装置如今所存在的问题是如何在河口乃至广阔的海洋区域进行设计与布置,为了实现在海洋环境中的能量捕获,该装置仍需要解决一些比较突出的难点,包括如何在复杂多变的海洋环境中实现稳定工作。

虽然将该装置应用于海洋中进行实际化供电仍具有一些困难,但 Taylor 称未来会将此“鳗鱼”作为小型轻量级发电装置为分布式水下机器人或传感器阵列的电池组与电容器供电<sup>[39]</sup>。

日本广岛大学 Mutsuda<sup>[63]</sup>近十年来致力于研究捕获涡激振荡的压电能量捕获装置。为有效捕获流体动能,其设计并优化了一种柔性薄片型压电装置(flexible piezoelectric device, FPED),装置结

构与原理如图14(d)和(e)所示, 电压输出见图14(f)。为有效捕获海流动能并承受由海流、波浪引起的巨大弯曲, FPED由多层压电材料与弹性基片相结合构成。与上述电鳗结构类似, Mutsuda仍采用

PVDF作为压电材料。在模拟实验中, 由十层薄膜组成的FPED在振幅为8 mm时平均功率密度可达 $0.7 \text{ mW/m}^2$ 。作为小型能量捕获装置, FPED通过收集波浪与海流能量可成功激活无线传感器<sup>[63]</sup>。

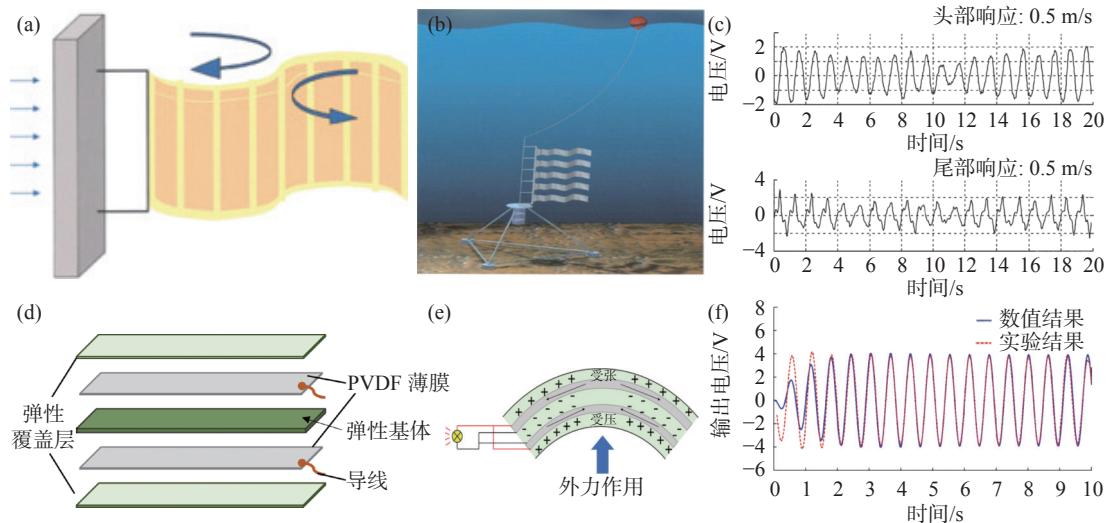


图14 柔性压电装置  
Fig. 14 Flexible piezoelectric devices

#### 2.2.4 弹性悬臂梁结构能量捕获装置

水下系泊平台通常使用数十米或者数百米长的系泊缆绳固定在海底。受涡激振动效应的影响, 海流流过系泊索时所产生的涡流动能也是客观的。为利用这些能量, 西北工业大学An等<sup>[64]</sup>提出一种新型的涡激压电能量捕获装置(vortex-induced piezoelectric energy converter, VIPEC), 用以在水下环境中捕获海洋动能。其结构与功率密度如图15(a)和(b)所示, 该捕能装置由圆柱体、转动板与压电片共同组成。涡激振动所引起的周期性压力作用在旋转板上, 驱动旋转板左右挤压压电片进而将海流动能转化为电能进行输出。由于目前关于水下悬臂梁结构能量捕获装置的受力分析研究较少, 而悬臂梁结构的受力情况恰恰是影响此类装置能量输出最重要的一环。为了有效分析VIPEC的输出性能, 该团队通过进行二维计算流体动力学仿真, 研究了悬臂梁自身长度以及海流流速对装置输出性能的影响。经实验分析, 该水下能量捕获装置最大输出电压为2.3 mV, 最大功率密度可达 $0.035 \mu\text{W/m}^3$ , 可以有效对蓄电池以及电容器进行充电以增强水下航行器等装置的工作时间。

与安装在水下系泊平台的VIPEC装置应用场

景不同, 针对水下能量的高效捕获, 日本学者Zurkinden<sup>[65]</sup>设计了一种固定于浅海海床的悬臂梁结构压电发电机, 如图15(c)所示。其估计该发电机功率输出可在mW或W级以上。在波浪振幅为0.03 m, 周期1.1 s的仿真实验中, 该水下能量捕获装置输出电压峰值可达3.28 V。为进一步提高悬臂梁结构所受的应力冲击并提高发电效率, 加拿大曼尼托巴大学Xie等<sup>[66]</sup>研制了一种由固定在海底并向上延伸至海面的垂直悬臂梁结构压电能量捕获装置, 如图15(e)和(f)所示。从其数学模型分析, 在波高2 m, 波长15 m的条件下该悬臂梁装置功率可达55 W。

#### 2.3 基于摩擦纳米发电机的能量捕获装置

##### 2.3.1 摩擦纳米发电机工作原理

摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG)的基本原理由中科院北京纳米能源与系统研究所王中林院士于2012年提出<sup>[67-68]</sup>, 其是通过摩擦起电和静电感应效应的耦合, 利用介质材料的表面电荷在周期性外力作用下产生交变的电场驱动外电路电子流动, 从而对外输出电能。TENG利用摩擦起电与静电感应, 可将无规则的机械能直接转化为电能输出, 具有高电压、低电流的输出

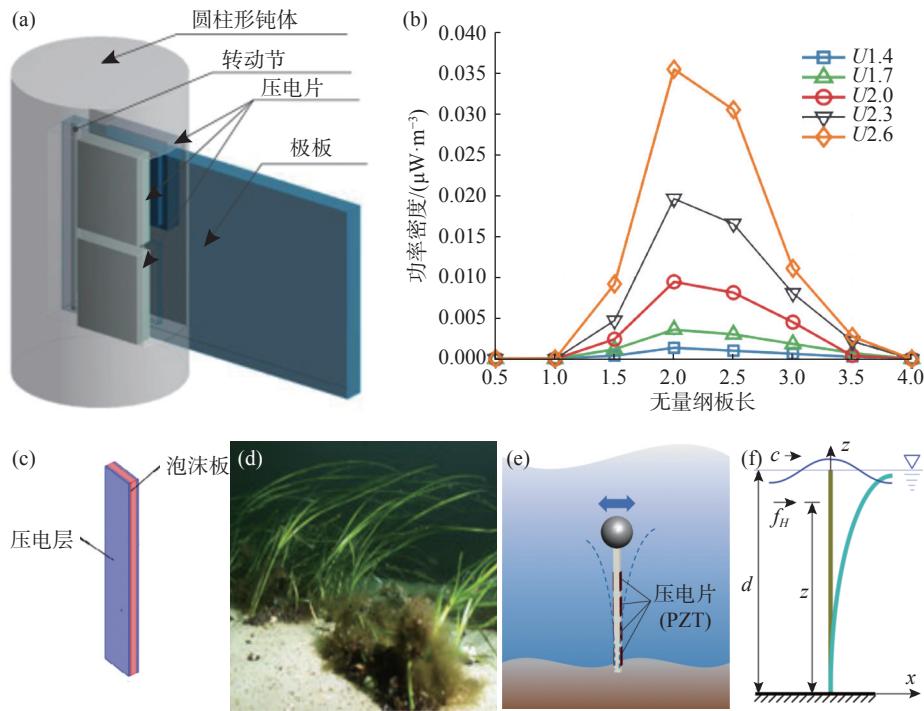


图 15 弹性悬臂梁压电能量捕获装置  
Fig. 15 Elastic cantilever piezoelectric devices

特性。其在捕获和转化低频率、低振幅的机械能方面有巨大的优势,尤其面对高熵的海洋蓝色能源,摩擦纳米发电技术展现出广阔的应用前景。

王中林院士团队推导出了低速运动介质中的动生麦克斯韦方程组(Maxwell equations for mechano-driven slow-moving media)。首次在电位移矢量  $D$  中增加了  $P_s$  项, 其代表由于机械运动产生的表面电荷而引入的极化项。在麦克斯韦方程组中由原来的电磁转换引入了代表“动生电”的物理项及其力-电-磁耦合, 建立了 TENG 的理论基础<sup>[69-74]</sup>, 即

$$\nabla \cdot D' = \rho_f - \nabla \cdot P_s \quad (5)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \times (E - v \times B) = -\frac{\partial}{\partial t} B \quad (7)$$

$$\nabla \times [H + v \times (D' + P_s)] = J_f + \rho_f v + \frac{\partial}{\partial t} P_s + \frac{\partial}{\partial t} D' \quad (8)$$

式中:  $D'$  为电位移场;  $\rho_f$  为自由电荷的电荷密度;  $B$  为磁场;  $E$  为电磁场;  $v$  为平均速度;  $J_f$  为局部自由电流密度;  $P_s$  为极化电场。

TENG 可分为 4 种基本形式<sup>[69]</sup>, 即垂直接触-分离模式、水平滑动模式、单电极模式和独立层模式, 如图 16 所示。其中基于接触分离模式以及独

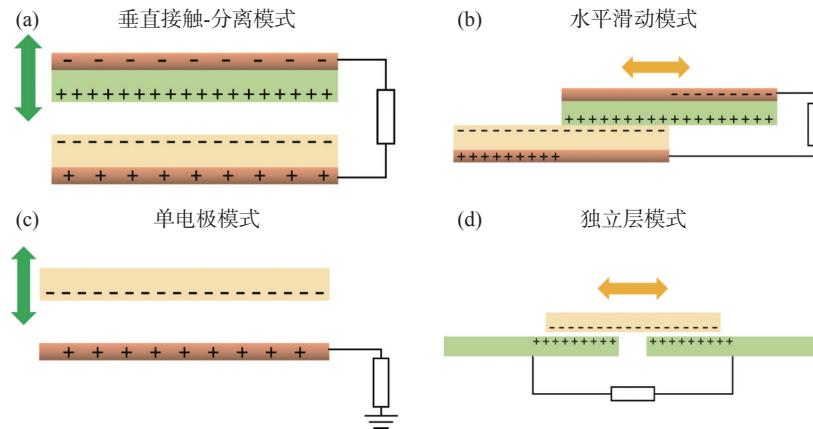


图 16 TENG 基本工作形式  
Fig. 16 Basic working modes of TENG

立层模式的TENG广泛应用于水下能量捕获。

接触分离模式TENG基于垂直方向上的极化效应产生电流(如图16(a)所示)。2种具有不同电荷约束能力的介电薄膜通过不断地接触分离会使两电极间产生电势差。其对应的公式为

$$V = -\frac{Q}{S \epsilon_0} [d_0 + x(t)] + \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (9)$$

式中: $S$ 为接触面积; $d_0$ 为有效介电材料厚度; $x(t)$ 为2种摩擦材料随时间移动的距离; $\epsilon_0$ 为介电常数<sup>[75]</sup>。

独立层模式TENG基本原理如图16(d)所示。2种不同电性的材料相互接触摩擦时会在两材料表面形成摩擦电荷。当一种材料移动时,由于静电感应效应使得外电路形成电流。其理论公式为

$$V = \frac{d_0 + g}{\epsilon_0 s} Q + \frac{2\sigma x}{\epsilon_0} \quad (10)$$

具体能量捕获装置工作原理将在下文详细介绍。

### 2.3.2 柔性接触分离模式TENG

为高效捕获海流能,大连海事大学徐敏义教授团队<sup>[76]</sup>研发出一种水下柔性旗子摩擦纳米发电机(underwater flag-like triboelectric nanogenerator, UF-

TENG),如图17(a)所示。UF-TENG由导电油墨覆盖的聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)、导电油墨覆盖的氟化乙烯丙烯共聚物(fluorinated ethylene propylene, FEP)和2片聚四氟乙烯膜(poly tetra fluoro ethylene, PTFE)制成,如图17(b)所示。当海流激励装置摆动时,FEP膜将定期与PET膜接触分离。在与涂有油墨的PET接触后,FEP膜将带负电。根据静电感应的本质,当PET的油墨电极与FEP薄膜充分接触时,等量的正电荷会出现在PET上的墨电极。随着UF-TENG弯曲,电子将从连接到FEP的电极流到连接到PET的电极(通过外部电路),因此产生瞬态电流。随着FEP和油墨电极分离,正电荷将流回上电极。根据其高杨氏模量以及良好的油墨粘附特性,选择PET材料作为UF-TENG的摩擦层。单个UF-TENG装置在流速为0.133 m/s的低临界速度下,输出电压可达12.8 V,输出电流约为0.81 μA。在流速为0.416 m/s时,6个UF-TENG单元并联的峰值功率可达52.3 μW,其对100 μF的电容充电100 s后可成功为水下温度计供电。UF-TENG自身体型细薄、重量轻,可固定在水下设施表面为各种水下传感器进行供电。

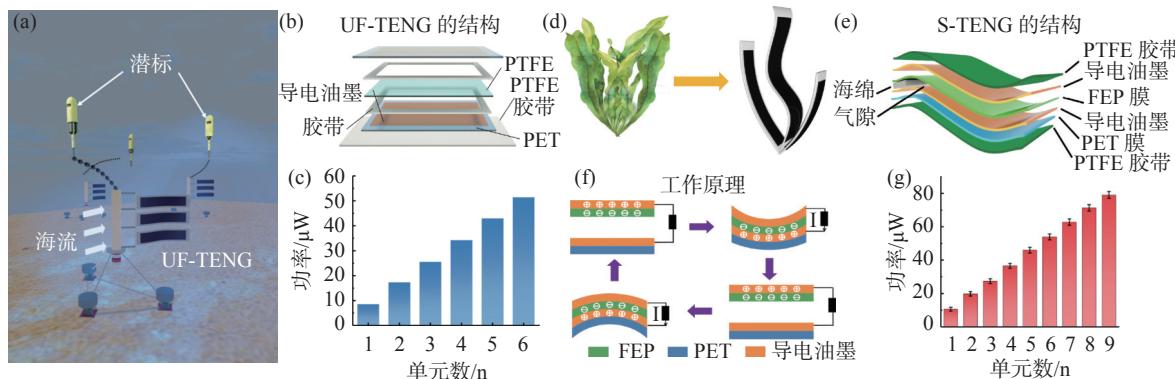


图17 柔性旗子与柔性海草  
Fig. 17 UF-TENG and SW-TENG

此外,大连海事大学团队还设计了一种仿生海草型摩擦纳米发电机(seaweed-like triboelectric nanogenerator, SW-TENG)<sup>[30]</sup>,可用于捕获波浪能,如图17(d)所示。该发电机由PTFE薄膜、PET基片、FEP薄膜与涂敷在PET、FEP的导电油墨组成,如图17(f)所示。实验结果表明,随着振幅、频率的增加,SW-TENG的输出性能增加,单个SW-TENG最大电压可达24.8 V,输出电流最大达

2.6 μA;在多组并联的条件下最大输出功率达79.023 μW。

该团队建立了柔性摩擦纳米发电机的动力学和发电模型,并通过实验方法研究了其在波浪和海流作用下的运动模态和发电性能。柔性摩擦纳米发电机具有低成本、强适应、高稳定等优势,为实现水下传感器自供能提供了新的思路。

为能够在深水区有效承受海水高压并进行稳

定的电能输出, 王中林院士团队研发出一种对状摩擦纳米发电机(paired triboelectric nanogenerator, P-TENG)<sup>[7]</sup>, 其单元由数十对组件成对组成, 整体类似于“蜂箱”结构, 如图 18(a)所示, 当水流穿过“蜂箱”内部空间, 激励“蜂箱”表面 P-TENG 组件动作并对外输出电流, 原理如图 18(b)所示, 图 18(c)展示了 TENG 组件的结构。实验结果表明, 在 2.43 m/s 的水流流速下, 该摩擦纳米发电机的累计电荷输出高达 1.59 μC/s, 大大优于现有的 TENG 器件, 功率与电流如图 18(d)所示。此外该 TENG 既可以附着在各种物体表面进行自供电传感, 又可单独安置于水下, 作为一种能量收集装置进行

水下供电。由于此装置体积较小, 因此可以在实际应用中大规模阵列形式部署。

该自驱动型 TENG 展现出优异的性能以及广阔的应用前景, 其大范围集成后可作为“水下电站”的一种形式为水下观测网络进行供电。

### 2.3.3 刚性独立层模式 TENG

为了捕获水流能量, 美国麻省理工学院 Ahmed<sup>[78]</sup>设计了一种独立层模式水下摩擦纳米发电装置 (underwater triboelectric nanogenerator, U-TENG), 如图 19(a)和(b)所示, 图 19(c)为其电能输出。该装置由定子和转子的交替层组成, 转子由铜材料制作。每个 U-TENG 组件自上而下为丙烯

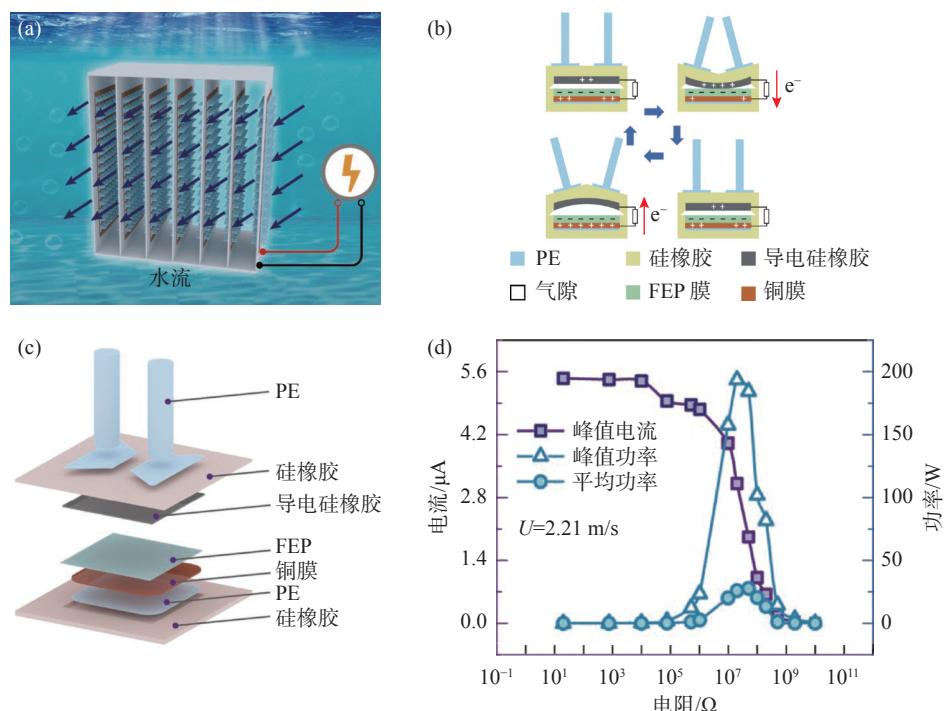


图 18 P-TENG “蜂箱”结构、工作原理及电能输出

Fig. 18 The beehive structure, working principle and electric energy output of P-TENG

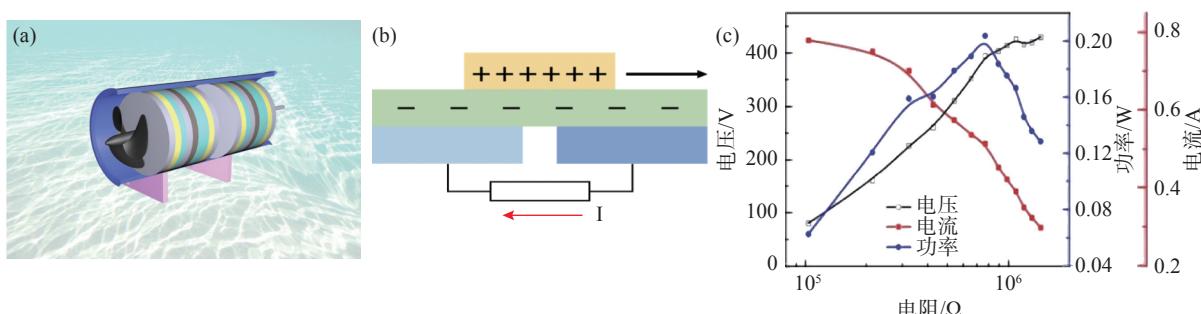


图 19 独立层模式水下摩擦纳米发电装置

Fig. 19 Underwater triboelectric nanogenerator

酸板铜转子、FEP板、电极板与丙烯酸板, 呈三明治结构一层层累加4组U-TENG构成一个单元。水流驱动最外层叶片带动转子旋转, 带动独立层形式摩擦纳米发电机工作。实验结果显示, 这种结构最高可以产生400 V的电压, 0.8 mA的电流, 功率可达200 mW。产生的电能可稳定驱动水下pH传感器与浊度传感器工作。

此外, 为捕获浅水低流速水流动能, 中科院北京纳米研究所设计出独立层模式的鱼型摩擦纳米发电机(fully-enclosed triboelectric nanogenerator, FE-TENG), 结构与工作原理如图20(a)、(b)和(c)所示<sup>[79]</sup>。该装置摩擦材料由PTFE小球与铜电极组成。当水流流过FE-TENG时, PTFE小球随着水流冲击在铜电极包裹的通道中移动, 进而与铜电

极发生摩擦使得PTFE表面带负电, 铜电极表面带正电。随着PTFE小球的运动, 铜电极表面正电荷由于静电感应的作用会在外电路进行移动, 进而对外输出电流。在水流流速为0.81 m/s的模拟实验中, FE-TENG的峰值功率密度达0.36 W/m<sup>3</sup>。在实际应用中, FE-TENG在水中浸泡35天后依然表现出良好的电输出性能。与鱼型仿生结构类似, 该纳米研究所设计的另一种仿生鱼尾型摩擦纳米发电机(triboelectric soft fishtail, TE-SFT)对于水流能量的捕获依然可以表现出良好的电能输出, 见图20(d)。在流致振动作用下, 仿生鱼尾由于惯性作用将进行往复摆动。鱼尾摆动所产生的力将作用在内部尼龙球, 使其左右移动, 进而从低流速水流中获得足够的能量以带动传感器动作<sup>[80]</sup>。

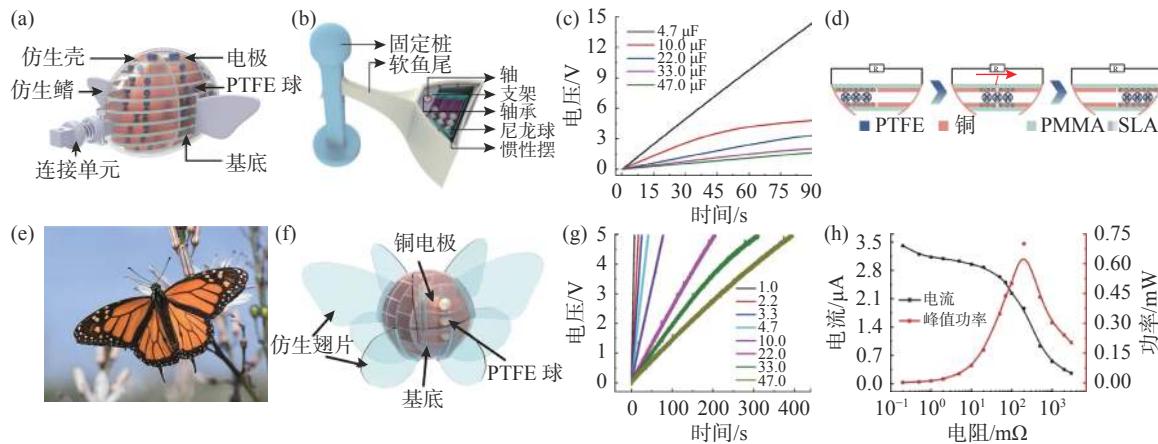


图20 仿生鱼型TENG与仿蝴蝶翅膀型TENG  
Fig. 20 FE-TENG and BBW-TENG

各类仿生结构为水下能量捕获装置的设计提供了思路。除上述两类仿生鱼型TENG, 长春工业大学Wang等<sup>[81]</sup>设计出一款仿蝴蝶翅膀型摩擦纳米发电机(bioinspired butterfly wings triboelectric nanogenerator, BBW-TENG), 用于捕获水下波浪能, 图20(f)展示了BBW-TENG的外型, 其充电能力与电能输出见图20(g)和(h)。该装置可以收集来自多个自由度的波浪能, 并将其转化为电能进行输出。实验结果表明, BBW-TENG可以在1.25 Hz的频率下实现400 V、2.9 μA的电能输出, 且自身具有很强的水下适应性, 在水中持续工作45天仍具有良好的输出性能。

作为一种新型发电方式, 摩擦纳米发电机被尝试用于水下涡流、海流、水下波浪等各种形式的水

下能量捕获。它为水下供能不断向轻便化、分布式发展提供了一种新颖的思路。此外, 摩擦纳米发电通过与电磁发电机、压电发电机等其它发电技术的结合, 可以在水下能量捕获等领域发挥更大的作用。

#### 2.4 混合型能量捕获装置

因电磁发电机、压电发电机、摩擦纳米发电机在能量捕获领域各具优势, 近年来研究人员尝试通过将上述3类或2类不同原理的能量捕获装置进行结合以提高其能量捕获效率。与依靠单一原理进行发电的传统能量捕获装置相比, 混合型发电机可以最大程度地将环境能量收集并转化为电能<sup>[82-84]</sup>, 且可以较好地弥补基于单一原理能量捕获装置的缺陷。

在 4 种 TENG 工作模式中, 基于旋转结构的独立层模式 TENG 结构较为成熟。目前的研究成果证明该结构可高效捕获流体能量<sup>[78,85-88]</sup>。因旋转结构 TENG 在捕获环境能量时装置自身运动状态与旋转式电磁发电机工作状态较为相像, 这使得将二者相结合形成 EMG-TENG 混合型能量捕获装置成为可能。

为更好的收集复杂恶劣环境中的能量, 重庆大学 Guo 等<sup>[89]</sup>设计了一种可放置于水下捕获水流能的 EMG-TENG 混合型能量收集装置(water proof triboelectric electromagnetic hybrid generator, WPHG)。其外形见图 21(a), 该能量捕获装置自上而下分为 EMG 与 TENG 两部分。其中基于旋转结构的独立层式 TENG 由铜材料充当电极, 铜电极呈径向结构布置于丙烯酸板之上, FEP 薄膜覆盖在铜电极表面充当定子, 定子上方的铜材料通过旋转使得外电路产生电流。具体工作原理可参考旋转式

TENG 发电原理<sup>[78,85,86]</sup>, 见图 21(b)。EMG 由直径 100 mm 的亚克力板制备而成。在亚克力板的外边缘均匀嵌有 6 个相同的线圈, 6 块大小相同的磁铁安装在亚克力板上方的丙烯酸板处。为更好地实现 EMG 与 TENG 的同步运转, 该装置于 TENG 上装载相同的 6 块磁铁, 与 EMG 磁铁一一对应, 两组磁铁之间由于引力作用相互吸引。当 EMG 捕获环境能量进行转动时, 通过 EMG 与 TENG 磁铁之间的引力作用即可带动 TENG 工作, 实现 TENG 的非接触式旋转。磁铁之间的引力是实现 TENG 与 EMG 共同运转的关键因素。经实验, 在 1 600 r/m 的转速下, 该混合能量捕获装置的短路电流可达 2.3 mA, 开路电压达到 5 V。在 22 s 内, 该装置输出的电能可将 20 mF 的电容充电至 1 V, 见图 21(c)。当此装置布置于水下捕获水流能量时所捕获的能量可点亮数十个 LED。作为一种外接电源, 该装置的研发为驱动水下小型设备提供了新方法。

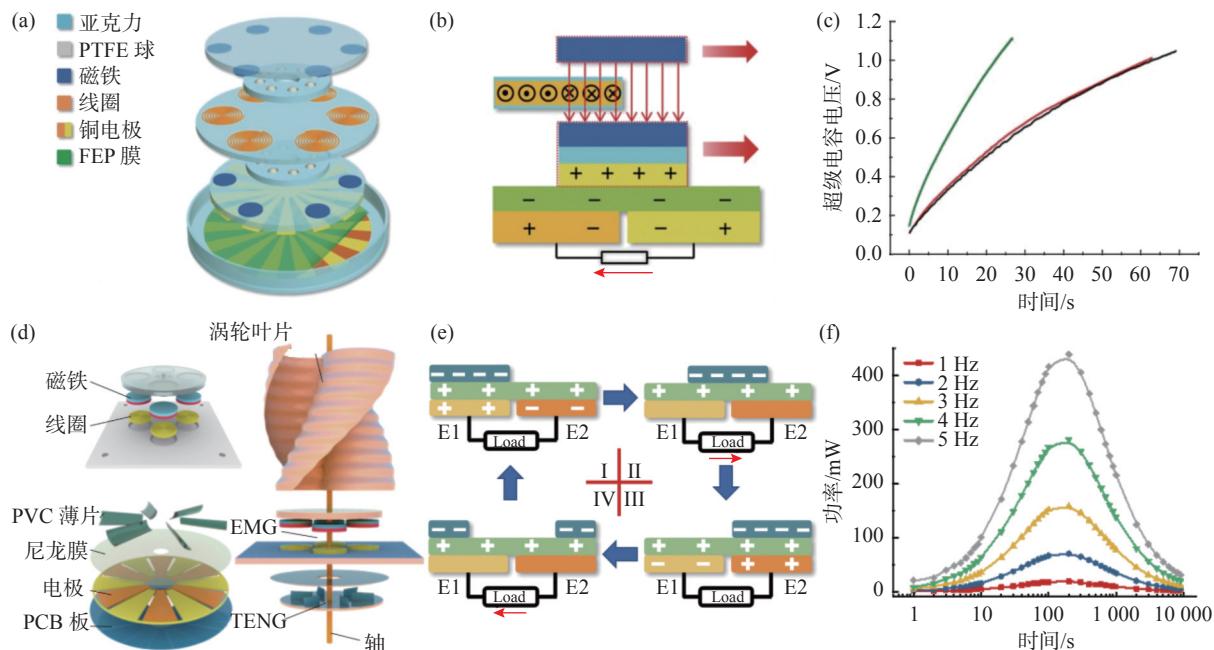


图 21 混合型能量收集装置  
Fig. 21 Hybrid energy harvesting devices

为更高效的对海洋观测网络供能, 大连海事大学 Wang 等<sup>[90]</sup>研发了一种具有高适应性的 EMG-TENG 混合型能量捕获装置。如图 21(d)为其外型与结构组成, 图 21(e)为发电原理, 图 21(f)为功率输出所示。此装置由涡轮、轴和 EMG-TENG 混合纳米发电机三部分组成。涡轮捕获海流能将动能传

递至 EMG 与 TENG 处, 从而带动 EMG 与 TENG 旋转发电。采用垂直轴涡轮可以使该装置更好地捕获水下海流能量。装置 EMG 部分与传统电磁发电装置相同, 能量捕获装置通过旋转磁铁切割线圈对外发电。TENG 部分转子由 PVC(polyvinyl chloride)薄片构成, 定子由尼龙材料以及铜电极组

成。实验表明,该混合动力装置在转速频率为5 Hz时的峰值功率达449 mW,可为50 mAh-3.7 V的锂电池充电。

海流流速与装置的电压频率呈线性关系。由于海流流速是海洋环境中的一个重要参数,这使得该装置除作为一种为水下观测系统供电的能量捕获装置外,还可作为流速传感器的一种形式来监测海流信息。虽然该装置目前仍停留在实验研究阶段,但其作为水下能量捕获装置以及水下传感器具有极大的应用潜力。

### 3 水下能量捕获装置对比与展望

#### 3.1 水下能量捕获装置优缺点比对

图22展示了上述三类能量捕获装置的原理以及优缺点。表1中总结了上文主要发电装置的原理以及电能输出,图23描述了电磁发电机、压电发电机、摩擦纳米发电机的电压输出、电流输出、鲁棒性等方面的特性。相较于压电和摩擦电2种能量捕获装置,基于电磁感应原理的能量捕获装置最成熟。对于高频能量的捕获,电磁发电机可

	电磁发电机	压电发电机	摩擦纳米发电机
收集原理	电磁感应	压电效应与静电感应	摩擦起电与静电感应
内阻型式	感性	容性	容性
优点	1.技术发展较为成熟 2.易大规模化 3.大型电磁发电机供电量大,可以实现稳定的电能供应	1.装置简易,体积较小 2.容易减少尺寸至纳米尺寸	1.体积小,结构简单 2.高电量输出 3.造价低
缺点	1.对于低频能量的收集能力较弱 2.小规模器件输出较低 3.需要高磁性	1.电能输出过于依赖材料性质 2.脉冲输出 3.阻抗较高	1.脉冲输出 2.阻抗较高

图22 3种水下能量收集装置工作原理与优缺点分析

Fig. 22 Analysis of the working principles and characteristics of three underwater energy harvesting devices

表1 水下能量捕获装置参数列表  
Table 1 Parameter list of underwater energy harvesting devices

装置类型	发电形式	主要材料构成	能量来源	电能输出
Faria研发的双线圈能量捕获装置 <sup>[22]</sup>	电磁发电机	永磁铁、线圈	海流能、波浪能	海浪频率为0.4 Hz时发电功率达7.73 mW
深海微流发电机 <sup>[43]</sup>	电磁发电机	永磁铁、叶片	海流能	海流流速为1 m/s时功率可达200 W
低流速海流能发电装置 <sup>[44]</sup>	电磁发电机	—	海流能	额定流速为1 m/s时额定功率500 W
Cario设计的海流能捕获装置 <sup>[48]</sup>	电磁发电机	永磁铁、叶片	海流能	海流流速为1 kn时输出功率为4 W
仿生鳗鱼压电装置 <sup>[39]</sup>	压电发电机	PVDF	海流能	在1 m/s的海流下可产生1 W功率
Mutsuda所研发的FPED装置 <sup>[63]</sup>	压电发电机	PVDF	波浪能、海流能	功率密度可达0.7 mW/m <sup>2</sup>
VIPEC <sup>[64]</sup>	压电发电机	—	海流能	最大输出电压达2.3 mV,最大功率密度0.035 μW/m <sup>3</sup>
直立悬臂梁结构压电能量捕获装置 <sup>[66]</sup>	压电发电机	—	波浪能	最高功率达55 W
UF-TENG <sup>[76]</sup>	摩擦纳米发电机	FEP薄膜、PTFE薄膜等	海流能	流速在0.133 m/s下功率达10 μW
SW-TENG <sup>[30]</sup>	摩擦纳米发电机	FEP薄膜、PTFE薄膜等	波浪能	波浪频率1 Hz时功率达64.4 μW
BBW-TENG <sup>[81]</sup>	摩擦纳米发电机	PTFE球、铜电极等	波浪能	1.25 Hz的波浪频率下功率达1 160 μW
WPHG混合型能量捕获装置 <sup>[89]</sup>	电磁发电机、摩擦纳米发电机	永磁铁、FEP膜、铜电极等	海流能	在1 600 r/m的转速下,功率达11.5 mW

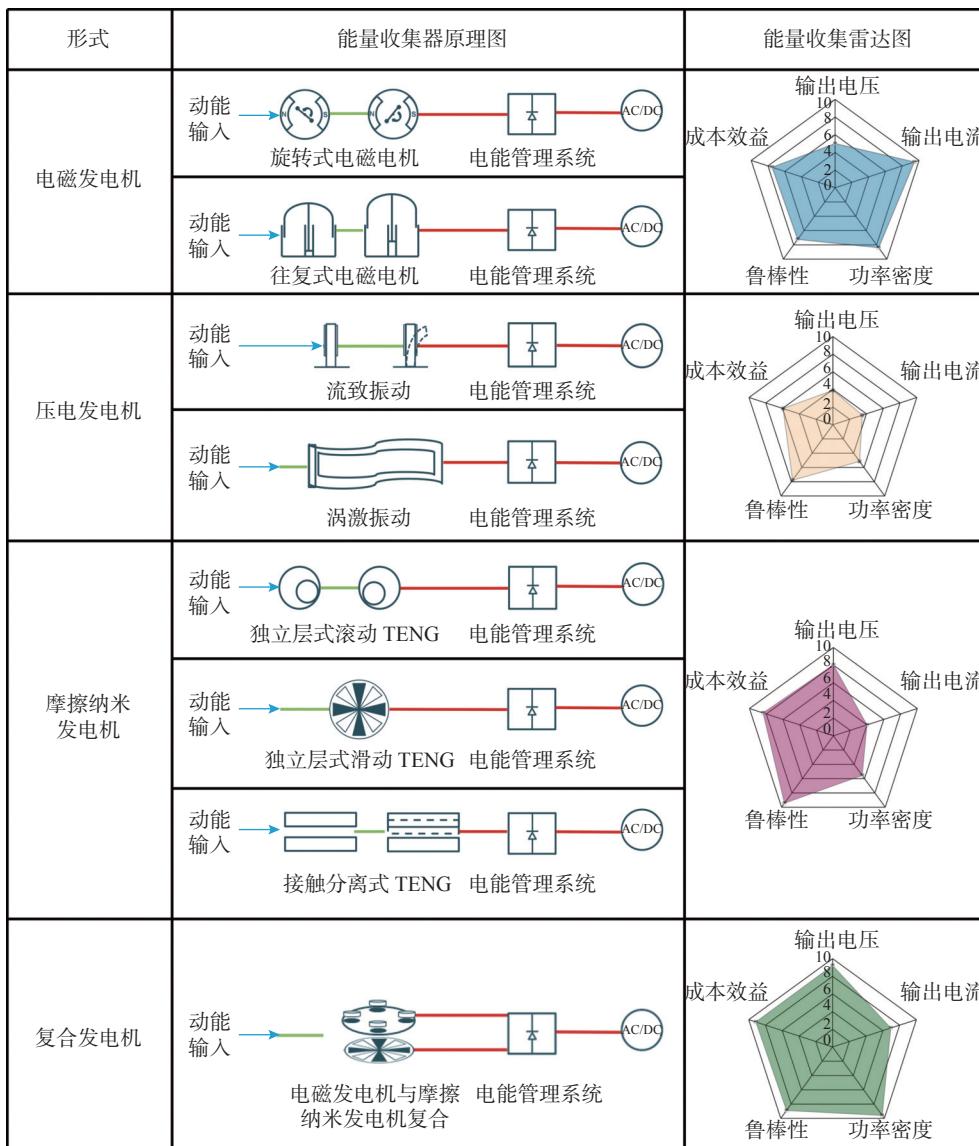


图 23 水下能量收集装置优缺点比对

Fig. 23 Comparison diagram of characteristics of underwater energy harvesting devices

以产生更高的电能输出与更为稳定的电流, 尤其在高流速海域, 基于电磁发电机的水下能量捕获装置已经能够进行商业化发电, 但是其体积相比于摩擦纳米发电机与压电发电机较大, 结构也更为复杂。且目前大多数电磁能量捕获装置转子材料多采用永磁体, 定子以刚性材料为主<sup>[22, 42, 31–35, 67–68]</sup>。当装置放置于水下时, 对其防腐性能提出了更高的要求。另一方面, 位于水下的电磁发电机在捕获低频动能时, 能量捕获效率将会减弱。

不同于电磁发电机, 压电发电机和摩擦纳米发电机具有体型小、结构简单、对输入要求低、鲁棒性较高等优势。由于摩擦纳米发电机和压电发

机发电性能与材料密切相关, 如广泛应用于压电发电机的 PVDF、PZT 材料以及用于摩擦纳米发电机的 FEP、PTFE 材料, 这些材料可以使设备有效应对腐蚀, 更容易适应复杂的水下环境。

对于压电发电机而言, 其发展时间相较于摩擦纳米发电机更长, 技术也更为成熟。如图 23<sup>[12]</sup> 所示, 压电发电机的优势在于装置自身具有较好的鲁棒性。特殊的材料以及相对灵活的结构使其即使在极端的海况下也能够保持较稳定的电能输出。简单的结构以及对外界压力变化的高灵敏性使得压电发电机在自供能领域也有着广阔前景<sup>[91]</sup>, 但由于技术上的限制, 压电发电机并不会输

出很高的能量, 较小的电流输出使其适合为一些水下小型传感器供电而不适宜为大功率设备供能, 这是压电发电机的主要局限。

摩擦纳米发电机发展历程仅有十年, 是捕获高熵能量的一种新方法<sup>[92]</sup>。由图23可知, 相比于电磁发电机与压电发电机, 摩擦纳米发电机所输出的电压较高, 且受环境中能量频率高低的影响较小(外界能量频率小于5 Hz时, 摩擦纳米发电机的输出性能优于电磁发电机<sup>[93]</sup>)。上述特点使得摩擦纳米发电机可与水下各类小型传感装置相匹配以进行能量供给。尤其对于水下潜标、传感器这类单机低能耗装置, 通过将小型TENG安装至用能装置内部, 又或将TENG与多功能传感器结合实现自供电海洋传感将会是一种具有前景的发展方向<sup>[94]</sup>。

### 3.2 水下能量捕获装置展望

相较于世界其他国家, 我国海域海水流速普遍偏低<sup>[43-45]</sup>。为更有效的利用海水动能, 根据不同海域的能量分布特点, 应更具针对性的部署能量捕获装置。表面海流流速影响着海水流动状态。由于受黑潮的影响, 我国潮流中黄海、渤海、东海潮流流速较高, 能量密度较大。其中渤海与黄海的潮流以半日潮为主, 平均流速在1 m/s, 部分地区最高流速可达2 m/s, 如图24所示。该部分海域适合布置以海流能发电为主的能量俘获装置。

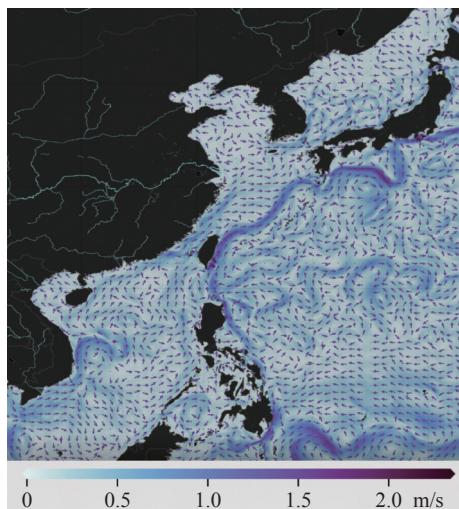


图24 我国沿海海域流速分布

Fig. 24 Velocity distribution of current in Chinese coastal sea

对于我国波浪能分布状况, 图25描绘了我国沿海海域波浪能的能流密度。由图所示, 在有效

波高分布中, 渤海(内海)最低, 黄海次之, 波高普遍在1 m以下。东海和南海波高最高, 波浪高度在1~1.5 m区域内, 使得该部分海域可成为波浪能捕获装置部署的良好平台。

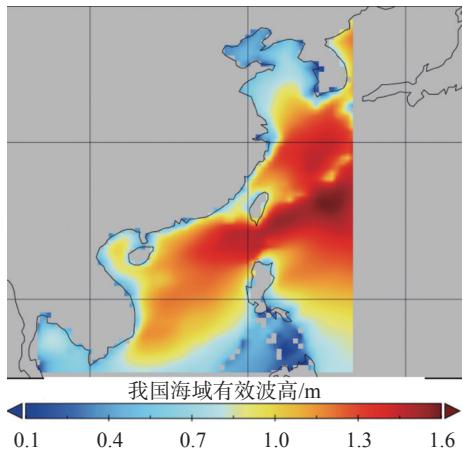


图25 我国沿海海域有效波高  
Fig. 25 Significant height of wave in Chinese coastal sea

根据已有文献可知, 当前面向水下观测网络供电的各类能量捕获技术仍处于起步阶段, 面临众多挑战。因此, 文中对未来水下能量捕获技术发展提出以下几点展望。

#### 1) 发展混合型能量捕获装置以提升电能输出

上述水下能量捕获装置的功率输出理论上已经能够满足不少水下观测设备的用电需求, 但其依然存在着较大的缺点。例如: 电磁发电机捕获低频能量输出效率低, 摩擦纳米发电机与压电发电机的电能输出小等。水下立体观测网络的发展在未来将会更加迅速。为此, 提升目前水下捕能装置的效率、开发适配水下观测网络的能源供给装置越加重要。为改善能量捕获装置性能, 研发混合型能量捕获装置是提升设备能量捕获效率的一种可行方案。

混合式能量捕获装置是指将2种或2种以上不同发电原理的能量捕获装置通过一定的结构相结合进行发电<sup>[35]</sup>。以EMG-TENG混合电机为例, 混合之后的能量捕获装置可以有效弥补电磁发电机对于低频输入发电效率低、以及摩擦纳米发电机输出电流低的缺点, 最大限度地提高海洋能量的转换效率<sup>[95-96]</sup>。

研发混合型能量捕获装置需要考虑合适的安装组合方式, 使其尽可能发挥各类电机的优势。

据上文所述, 目前针对水下能量捕获的混合型装置已有部分成果, 主要集中于 EMG-TENG 的复合, 且复合装置以旋转型结构为主<sup>[89-90]</sup>, 结构较为单一。此外, 除 EMG-TENG 复合型装置外, 目前用以捕获水下能量的其他复合种类发电装置仍较少。研发不同原理发电装置进行组合的新结构、尽可能地将三类不同原理的能量捕获装置进行结合, 以更为高效的捕获海洋能量, 成为未来水下能量捕获装置发展的可行道路。

### 2) 阵列化水下能量捕获装置以形成能量捕获网络

目前已有的小型压电、摩擦纳米发电能量捕获装置, 具有成本较低、结构简单、体积较小等优势。而对于大范围集成化的供电系统, 单个装置的损坏并不会影响整体的电能输出。这一特点使得未来以摩擦纳米发电机和压电发电机为核心建设集成化海底电站成为可能(如图 26 所示), 并有望与水下观测网络形成良好的能量供给关系。目前已经有部分学者提出关于 TENG 网络的构想<sup>[97]</sup>, 但真正实现这一愿景仍存在较多障碍, 未来需要在不断提高能量捕获装置的电能输出效率以及耐用性等。

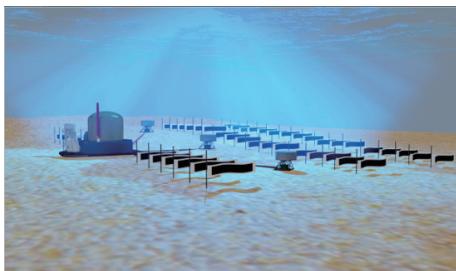


图 26 水下 TENG 网络  
Fig. 26 The underwater TENG network

### 3) 研发新型材料以提高能量捕获装置耐久性

除对能量捕获装置进行组合以提高捕能效率外, 研发更为适合海洋环境的新型材料也是未来优化水下能量捕获装置的有效办法, 以摩擦纳米发电机为例, 摩擦材料的不同会严重影响 TENG 的发电性能。不同于岸上能量捕获装置的工作环境, 远离陆地的水下能量捕获装置因极端的工作条件、深层海水的腐蚀、以及长时间作业需求使得其使用寿命成为研究人员重点关注的要素。

此外, 还需研究生物附着对于装置性能的影

响。因过度的水下生物附着会导致装置的重心以及稳心发生改变, 这会使水下捕能装置的水动力性能发生改变。为此, 为确保水下能量捕获装置的长期高效运行, 研究新的方法对能量捕获装置进行必要的保护极其重要。

## 4 结束语

文中梳理了水下能量捕获技术的研究现状, 介绍了 3 种不同原理的水下能量捕获方式, 包括电磁发电机、压电发电机与摩擦纳米发电机, 并对上述发电机目前的典型发电技术进行了总结。最后以实例对上述 3 种发电装置的优缺点进行对比分析, 为水下能量捕获技术的研究与发展提供一定的参考。

综合来看, 目前面向水下立体观测网络供电的水下微小型能量捕获装置已经形成初步体系, 部分水下能量捕获装置已能够实现稳定的电能输出, 足以满足小型传感器装置、小型航行器等水下观测装置的能量需求。但水下能量捕获装置的研究仍处于起步与发展阶段, 目前还未有对水下观测网络进行连续性供电的实例, 大多能量捕获装置只能满足于在实验室所模拟的水下环境中进行工作, 发电量也仅可满足水下观测网络中部分微型装置的供能需求, 且装置存在使用寿命短、发电不稳定等缺点。未来仍需不断研发改进和优化能量捕获技术, 以期实现真正意义上的水下原位供电。

## 参考文献:

- [1] 马蕊, 赵修涛, 柳存根. 海洋水下立体观测技术装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 19-25.  
Ma Rui, Zhao Xiu-tao, Liu cun-gen. Development of Marine Equipment for Underwater Stereoscopic Observation[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2020, 22(6): 19-25.
- [2] 陈建冬, 张达, 王潇, 等. 海底观测网发展现状及趋势研究[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(6): 19-25.  
Chen Jian-dong, Zhang Da, Wang Xiao, et al. Research on the State-of-the-Art and Trends of Seafloor Observatory[J]. Journal of Ocean Technology, 2019, 38(6): 19-25.
- [3] 罗续业, 李彦. 我国海洋水下观测网发展战略思考[J]. 海洋学研究, 2016, 34(3): 1-5.  
Luo Xu-ye, Li Yan. Thinking of Development Strategy on Undersea Observation Network in China[J]. Journal of Marine Sciences, 2016, 34(3): 1-5.
- [4] 李风华, 路艳国, 王海斌, 等. 海底观测网的研究进展与发

- 展趋势[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(3): 321-330.
- Li Hua-feng, Lu Yan-guo, Wang Hai-bin, et al. Research Progress and Development Trend of Seafloor Observation Network[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(3): 321-330.
- [5] Muhammad K, Zahid U, Naveed A, et al. A Survey of Routing Issues and Associated Protocols in Underwater Wireless Sensor Networks[J]. *Journal of Sensors*, 2017: 7539751.
- [6] Awan K M, Shah P A, Iqbal K, et Al. Underwater Wireless Sensor Networks: A Review of Recent Issues and Challenges[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2019: 6470359.
- [7] Blidberg D R, Turner R M, Chappell S G. Autonomous Underwater Vehicles: Current Activities And Research Opportunities[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1991, 7(2-3): 139-150.
- [8] Tian Z, Su L, Wang H Y, et al. Underwater Self-Powered All-Optical Wireless Ultrasonic Sensing, Positioning and Communication with Ultrafast Response Time and Ultrahigh Sensitivity[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(5): 1-9.
- [9] 徐文, 李建龙, 李一平, 等. 无人潜水器组网观测探测技术进展与展望[J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 60-78.
- Xu Wen, Li Jian-Long, Li Yi-Ping, et al. Networks of Unmanned Underwater Vehicles for Ocean Exploration: Advances And Prospects[J]. *Science and Technology Foresight*, 2022, 1(2): 60-78.
- [10] Xu G B, Shi Y J, Sun X Y, et al. Internet of Things in Marine Environment Monitoring: A Review[J]. *Sensors (Switzerland)*, 2019, 19(7): 1-21.
- [11] 李红志, 闫晨阳, 贾文娟. 海洋温盐深传感器技术自主创新与产业发展的几点思考[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(3): 249-256.
- Li Hong-Zhi, Yan Chen-Yang, Jia Wen-Juan. Some Thoughts on Independent Innovation and Industrial Development of Ocean CTD Seneor Technology[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2021, 29(3): 249-256.
- [12] 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.
- [13] 康帅, 俞建成, 张进. 微小型自主水下机器人研究现状[J]. *机器人*, 2022: 1-20.
- Kang Shuai, Yu Jian-Cheng, Zhang Jin. Research Status of Micro Autonomous Underwater Vehicle[J]. *Robot*, 2022: 1-20.
- [14] Song Y, Wang Y H, Yang S Q, et al. Sensitivity Analysis and Parameter Optimization of Energy Consumption for Underwater Gliders[J]. *Energy*, 2020, 191: 116506.
- [15] 戴国群, 丁星胜, 唐俊, 等. 海洋潜标新型电源系统研制[J]. *电源技术*, 2017, 41(6): 932-934.
- Dai Guo-Qun, Ding Xing-Sheng, Tang Jun, et al. Development of New Power System for Submerged Buoy[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2017, 41(6): 932-934.
- [16] Howe B M, Chao Y, Arabshahi C, Et Al. A Smart Sensor Web for Ocean Observation: Fixed and Mobile Platforms, Integrated Acoustics, Satellites and Predictive Modeling[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2010, 3(4): 507-521.
- [17] Webb D C, Simonetti P J, Jones C P, et al. SLOCUM: An Underwater Glider Propelled by Environmental Energy[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 447-452.
- [18] Hu Y L, Wang J J. Study on Power Generation and Energy Storage System of A Solar Powered Autonomous Underwater Vehicle (SAUV)[J]. *Energy Procedia*, 2012, 16: 2049-2053.
- [19] Sergienko N Y, Rafiee A, Cazzolato B S, et al. Feasibility Study of The Three-Tether Axisymmetric Wave Energy Converter[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 150: 221-233.
- [20] Khan N, Kalair A, Abas N, Et Al. Review of Ocean Tidal, Wave and Thermal Energy Technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 72: 590-604.
- [21] 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): 7.
- Liu Xiang-Yu, Wang Yan, Wang Hao, et al. Research on Flexible Triboelectric Nanogenerator for Underwater Energy Harvesting[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2022, 30(5): 7.
- [22] Faria C L, Martins M S, Matos T, et al. Underwater Energy Harvesting to Extend Operation Time of Submersible Sensors[J]. *Sensors*, 2022, 22(4): 1341.
- [23] Zhang B S, Li B Y, Fu S, et al. Vortex-Induced Vibration (VIV) Hydrokinetic Energy Harvesting Based on Nonlinear Damping[J]. *Renewable Energy*, 2022, 195: 1050-1063.
- [24] Wang J, Wu Z, Dong H, Et Al. Development and Control of Underwater Gliding Robots: A Review[J]. *IEEE Journal of Automatica Sinica*, 2022, 9(9): 1543-1560.
- [25] 王国晖, 杨亚楠, 王延辉, 等. 海洋温差能供电下滑翔机的液电转换过程建模与效率分析[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(4): 451-458.
- Wang Guo-Hui, Yang Ya-Nan, Wang Yan-Hui, et al. Modeling and Efficiency Analysis of the Hydro-Electric Conversion Process of Underwater Glider Powered by Ocean Thermal Energy[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2021, 29(4): 451-458.
- [26] Bryden I G, Couch S J. ME1-Marine Energy Extraction: Tidal Resource Analysis[J]. *Renewable Energy*, 2006, 31(2): 133-139.
- [27] Chen H, Ait-Ahmed N, Zaïm E H, et al. Marine Tidal Current Systems: State of the Art[J]. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2012: 1431-1437.
- [28] Chen H, Tang T H, Ait-Ahmed N, et al. Attraction, Challenge and Current Status of Marine Current Energy[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 12665-12685.
- [29] Falnes J. A Review of Wave-Energy Extraction[J]. *Marine Structures*, 2007, 20(4): 185-201.
- [30] 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.
- [31] Polinder H, Damen M E C, Gardner F. Linear PM Generator System for Wave Energy Conversion in the AWS[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, 19(3): 583-589.
- [32] Polinder H, Damen M E C, Gardner F. Design, Modelling and Test Results of The AWS PM Linear Generator[J]. *European Transactions on Electrical Power*, 2005, 15(3): 245-256.
- [33] Schubert B W, Robertson W S P, Cazzolato B S, et al. Linear and Nonlinear Hydrodynamic Models for Dynamics of a Submerged Point Absorber Wave Energy Converter[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 197: 106828.
- [34] Li Y, Huang L, Tan P W, et al. Resonance Control Based on Hydrodynamic Analysis for Underwater Direct Drive Wave Energy Converter[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(11): 1192.
- [35] Tran N, Sergienko N Y, Cazzolato B S, et al. The Impact of Pitch-Surge Coupling on the Performance of a Submerged Cylindrical Wave Energy Converter[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 104: 102377.
- [36] Meng Q C, Zhang C W. Analytical Study on a Submerged Tubular Wave Energy Converter[J]. *Renewable Energy*, 2018, 118: 955-964.
- [37] Khan U, Kim S W. Triboelectric Nanogenerators for Blue Energy Harvesting[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(7): 6429-6432.
- [38] Wang X, Wen Z, Guo H Y, et al. Fully Packaged Blue Energy Harvester by Hybridizing a Rolling Triboelectric Nanogenerator and an Electromagnetic Generator[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(12): 11369-11376.
- [39] Taylor G W, Burns J R, Kammann S M, et al. The Energy Harvesting Eel: A Small Subsurface Ocean/River Power Generator[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 539-547.
- [40] Xu L, Hasan M A M, Wu H T, et al. Electromagnetic-Triboelectric Hybridized Nanogenerators[J]. *Energies*, 2021, 14(19): 6219.
- [41] Gong Y, Yang Z B, Shan X B, et al. Capturing Flow Energy from Ocean and Wind[J]. *Energies*, 2019, 12(11): 1-22.
- [42] Chiu M C, Karkoub M, Her M G. Energy Harvesting Devices for Subsea Sensors[J]. *Renewable Energy*, 2017, 101: 1334-1347.
- [43] 田应元, 袁日, 李小涛. 深海微流发电系统设计及试验[J]. 太阳能学报, 2018, 39(4): 873-878.  
Tian Ying-Yuan, Yuan Ri, Li Xiao-Tao. Design and Test of Under Deep Sea Micro-flow Power Generation System[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2018, 39(4): 873-878.
- [44] 邱长璞, 林勇刚, 赵建兴. 用于海洋仪器供电的低流速海流能发电技术研究[J]. *机电工程*, 2017, 34(9): 1055-1059.  
Qi Chang-Pu, Lin Yong-Gang, Zhao Jian-Xin. Ocean Current Power Generation at Low Flow Velocity for Oceanographic Instruments[J]. *Journal of Mechanical Electrical Engineering*, 2017, 34(9): 1055-1059.
- [45] 赵天祥, 高天德, 刘培洲, 等. 小功率海流能发电能量收集系统设计[J]. *电子设计工程*, 2020, 28(24): 70-75.  
Zhao Tian-Xiang, Gao Tian-De, Liu Pei-Zhou, et al. Design of Energy Harvesting System for Low-Power Ocean Current Power Generation[J]. *Electronic Design Engineering*, 2020, 28(24): 70-75.
- [46] 闫枫, 付平, 熊学军. 深海潜标系统电池舱的设计与分析[J]. *机械制造*, 2021, 50(1): 11-15.  
Yan Feng, Fu Ping, Xiong Xue-Jun. Design and Analysis of Battery Compartment of Deep Sea Submersible Marking System[J]. *Machinery*, 2021, 50(1): 11-15.
- [47] Basagni St, Di V V, Gjanci P, et al. Harnessing Hydro: Harvesting-Aware Data Routing for Underwater Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of the International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (Mobicom). 2018: 271-279.
- [48] Cario G, Casavola A, Gjanci Petrika, et al. Long Lasting Underwater Wireless Sensors Network for Water Quality Monitoring in Fish Farms[C]//OCEANS 2017-Aberdeen. Aberdeen, UK: IEEE, 2017: 1-6.
- [49] Ding W J, Song B W, Mao Z Y, et al. Experimental Investigations on a Low Frequency Horizontal Pendulum Ocean Kinetic Energy Harvester for Underwater Mooring Platforms[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2016, 21(2): 359-367.
- [50] Ding W J, Song B W, Mao Z Y, et al. Experimental Investigation on an Ocean Kinetic Energy Harvester for Underwater Gliders[C]//2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Montreal, Canada: IEEE, 2015: 1035-1038.
- [51] 丁文俊, 宋保维, 毛昭勇, 等. 浅水域探测型无人水下航行器波浪能发电系统设计[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(2): 141-147.  
Ding Wen-Jun, Song Bao-Wei, Mao Zhao-Yong, et al. Wave Energy Conversion System Design for Detection Unmanned Underwater Vehicle in Shallow Water[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(2): 141-147.
- [52] Li Z J. Low-Frequency Piezoelectric Energy Harvesting[D]. Toronto: University of Toronto, 2019.
- [53] Song H C, Kumar P, Maurya D, et al. Ultra-Low Resonant Piezoelectric MEMS Energy Harvester with High Power Density[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2017, 26(6): 1226-1234.
- [54] Hobeck J D. Energy Harvesting with Piezoelectric Grass for Autonomous Self-Sustaining Sensor Networks[D]. Michigan: University of Michigan, 2014.
- [55] Saadon S, Sidek O. Ambient Vibration-Based MEMS Piezoelectric Energy Harvester for Green Energy Source[J]. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2012, 66(5): 614-617.
- [56] Andosca R, McDonald T G, Genova V, et al. Experimental and Theoretical Studies on MEMS Piezoelectric Vibrational Energy Harvesters With Mass Loading[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 178: 76-87.

- [57] 段利利, 邢健. 浅谈压电材料研究现状及发展趋势[J]. *山东工业技术*, 2015(22): 271.
- [58] Wang Z L, Song J H. Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays[J]. *Science*, 2006, 312(5771): 242-246.
- [59] Jbaily A, Yeung R W. Piezoelectric Devices for Ocean Energy: a Brief Survey[J]. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 2015, 1(1): 101-118.
- [60] Kim H M. Electroactive Polymers for Ocean Kinetic Energy Harvesting: Literature Review and Research Needs[J]. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 2018, 4(4): 343-365.
- [61] Sivadas V, Wickenheiser A M. A Study of Several Vortex-Induced Vibration Techniques for Piezoelectric Wind Energy Harvesting[J]. *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems*, 2011, 7977: 167-179.
- [62] Demori M, Ferrari M, Ferrari V, et al. Energy Harvesting from Von Karman Vortices in Airflow for Autonomous Sensors[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 87: 775-778.
- [63] Mutsuda H, Tanaka Y, Patel R, et al. A Painting Type of Flexible Piezoelectric Device for Ocean Energy Harvesting [J]. *Applied Ocean Research*, 2017, 68: 182-193.
- [64] An X Y, Song B W, Tian W L, et al. Design and CFD Simulations of a Vortex-Induced Piezoelectric Energy Converter (VIPEC) for Underwater Environment[J]. *Energies*, 2018, 11(2): 330.
- [65] Zurkinden A S. Wave Energy Converter Through Piezoelectric Polymers[C]//Proc. of the COMSOL Users Conference. Grenoble, France: Comsol Multiphysics, 2007.
- [66] Xie X D, Wang Q, Wu N. Potential of a Piezoelectric Energy Harvester from Sea Waves[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, 333(5): 1421-1429.
- [67] Wang Z L. Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(11): 9533-9557.
- [68] Niu S M, Wang S H, Lin L, et al. Theoretical Study of Contact-Mode Triboelectric Nanogenerators as an Effective Power Source[J]. *Energy and Environmental Science*, 2013, 6(12): 3576-3583.
- [69] Wang Z L. On Maxwell's Displacement Current for Energy and Sensors: the Origin of Nanogenerators[J]. *Materials Today*, 2017, 20(2): 74-82.
- [70] 王中林. 摩擦纳米发电机[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [71] 王中林, 邵佳佳. 非匀速运动介质系统中的动生麦克斯韦方程组——低速与非相对论近似[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(8): 1198-1211.
- Wang Zhong-Lin, Shao Jia-Jia. Maxwell's Equations for a Mechano-Driven Varying-Speed-Motoin Media System for Engineering Electrodynamics and Their Solutions[J]. *Scientia Sinica(Technologica)*, 2022, 52(9): 18.
- [72] 王中林, 邵佳佳. 面向工程电磁学的动生麦克斯韦方程组及其求解方法[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(9): 18.
- [73] Wang Z L. 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.
- [74] Wang Z L. Maxwell's Equations for a Mechano-Driven, Shape-Deformable, Charged-Media System, Slowly Moving at an Arbitrary Velocity Field V(R, T)[J]. *Journal of Physics Communications*, 2022, 6: 085013.
- [75] Rodrigues C, Nunes D, Clemente D, et al. Emerging Triboelectric Nanogenerators for Ocean Wave Energy Harvesting: State of the Art and Future Perspectives[J]. *Energy and Environmental Science*, 2020, 13(9): 2657-2683.
- [76] 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: 1-10.
- [77] Deng Z Z, Xu L, Qin H F, et al. Rationally Structured Triboelectric Nanogenerator Arrays for Harvesting Water-Current Energy and Self-Powered Sensing[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34: 1-9.
- [78] Ahmed A. Self-Powered Wireless Sensing Platform for Monitoring Marine Life Based on Harvesting Hydrokinetic Energy of Water Currents[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(4): 1992-1998.
- [79] Jing Z X, Zhang J C, Wang J L, et al. 3D Fully-Enclosed Triboelectric Nanogenerator with Bionic Fish-Like Structure for Harvesting Hydrokinetic Energy[J]. *Nano Research*, 2022, 15(6): 5098-5104.
- [80] Zhang S, Jing Z X, Wang X X, et al. Soft-Bionic-Fishtail Structured Triboelectric Nanogenerator Driven by Flow-Induced Vibration for Low-Velocity Water Flow Energy Harvesting[J]. *Nano Research*, 2022.
- [81] Wang X X, Gao Q, Zhu M K, et al. Bioinspired Butterfly Wings Triboelectric Nanogenerator with Drag Amplification for Multidirectional Underwater-Wave Energy Harvesting[J]. *Applied Energy*, 2022, 323: 119648.
- [82] Askari H, Saadatnia Z, Asadi E, et al. A Flexible Hybridized Electromagnetic-Triboelectric Multi-Purpose Self-Powered Sensor[J]. *Nano Energy*, 2018, 45: 319-329.
- [83] Zhang T T, Yang T, Zhang M, et al. Recent Progress in Hybridized Nanogenerators for Energy Scavenging[J]. *Iscience*, 2020, 23(11): 101689.
- [84] Shao H Y, Wen Z, Cheng P, et al. Multifunctional Power Unit by Hybridizing Contact-Separate Triboelectric Nanogenerator, Electromagnetic Generator and Solar Cell for Harvesting Blue Energy[J]. *Nano Energy*, 2017, 39: 608-615.
- [85] Li Q Y, Liu W L, Yang H M, et al. Ultra-Stability High-Voltage Triboelectric Nanogenerator Designed by Ternary Dielectric Triboelectrification with Partial Soft-Contact and

- Non-Contact Mode[J]. *Nano Energy*, 2021, 90: 106585.
- [86] Han K, Luo J J, Feng Y W, et al. Self-Powered Electrocatalytic Ammonia Synthesis Directly from Air as Driven by Dual Triboelectric Nanogenerators[J]. *Energy and Environmental Science*, 2020, 13(8): 2450-2458.
- [87] Yong S, Wang J Y, Yang L J, et al. Auto-Switching Self-Powered System for Efficient Broad-Band Wind Energy Harvesting Based on Dual-Rotation Shaft Triboelectric Nanogenerator[J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11: 2101194.
- [88] Li X, Cao Y Y, Yu X, et al. Breeze-Driven Triboelectric Nanogenerator for Wind Energy Harvesting and Application in Smart Agriculture[J]. *Applied Energy*, 2022, 306: 117977.
- [89] Guo H Y, Wen Z, Zi Y L, et al. A Water-Proof Triboelectric-Electromagnetic Hybrid Generator for Energy Harvesting in Harsh Environments[J]. *Advanced Energy Materials*, 2016, 6: 1501593.
- [90] Wang Y W, Qian Z A, Zhao C, et al. Highly Adaptive Triboelectric-Electromagnetic Hybrid Nanogenerator for Scavenging Flow Energy and Self-Powered Marine Wireless Sensing[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2022: 2201245.
- [91] Covaci C, Gontean A. Piezoelectric Energy Harvesting Solutions: a Review[J]. *Sensors(Switzerland)*, 2020, 20(12): 1-37.
- [92] Wang Z L. Nanogenerators, Self-Powered Systems, Blue Energy, Piezotronics and Piezo-Phototronics-a Recall on the Original Thoughts for Coining These Fields[J]. *Nano Energy*, 2018, 54: 477-483.
- [93] Shen F, Li Z J, Guo H Y, et al. Recent Advances towards Ocean Energy Harvesting and Self-Powered Applications Based on Triboelectric Nanogenerators[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2021, 7: 2100277.
- [94] Chen H M, Xing C, Li Y L, et al. Triboelectric Nanogenerators for a Macro-Scale Blue Energy Harvesting and Self-Powered Marine Environmental Monitoring System[J]. *Sustainable Energy and Fuels*, 2020, 4(3): 1063-1077.
- [95] Sun X, Shang C J, Ma H X, et al. A Tube-Shaped Solid-Liquid-Interfaced Triboelectric–Electromagnetic Hybrid Nanogenerator for Efficient Ocean Wave Energy Harvesting[J]. *Nano Energy*, 2022, 100: 107540.
- [96] Yang H M, Deng M M, Zeng Q X, et al. Polydirectional Microvibration Energy Collection for Self-Powered Multifunctional Systems Based on Hybridized Nanogenerators[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(3): 3328-3336.
- [97] Wang Z L, Jiang T, Xu L. Toward the Blue Energy Dream by Triboelectric Nanogenerator Networks[J]. *Nano Energy*, 2017, 39: 9-23.

(责任编辑: 许 妍)