

【引用格式】曹红梅, 胡光兰, 李晓东. 国外无人潜航器能源技术发展现状与趋势研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(4): 361-368.

# 国外无人潜航器能源技术发展现状与趋势研究

曹红梅<sup>1, 2</sup>, 胡光兰<sup>1, 2</sup>, 李晓东<sup>1, 2</sup>

(1. 中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;  
2. 清江创新中心, 湖北 武汉 430076)

**摘要** 无人潜航器 (UUV) 因其较强的灵活性、隐蔽性、高适应性等特点, 在军事、科技、经济等方面有广阔的应用前景。UUV 执行的任务越来越复杂, 需要更大的自主作业能力, 其续航能力是决定其性能的关键技术之一, 而 UUV 的动力能源是决定 UUV 续航力的关键因素。介绍了国外 UUV 能源技术发展现状、UUV 能源技术的优缺点以及最新技术进展, 探讨了 UUV 能源技术的发展趋势。

**关键词** 动力能源; 蓄电池; 燃料电池; 混合动力

中图分类号 TM911 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2022)04-0361-08

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.04.012

## Research on the Development Status and Trend of Foreign Unmanned Underwater Vehicle Energy Technology

CAO Hongmei<sup>1, 2</sup>, HU Guanglan<sup>1, 2</sup>, LI Xiaodong<sup>1, 2</sup>

(1. No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China;  
2. Qingjiang Innovation Center, Wuhan 430076, China)

**Abstract** Underwater unmanned underwater vehicle (UUV) has broad application prospects in military, science and technology, economy and other aspects due to its strong flexibility, concealment, high adaptability and other characteristics. The tasks performed by UUVs are becoming more and more complex and require greater autonomous operation capabilities. Its endurance is one of the key technologies that determine its performance, and the power energy of UUVs is a key factor determining the endurance of UUVs. The endurance of UUV is one of the key technologies that determine its performance, and the power source of UUV is the key factor to determine the endurance of UUV. This paper introduces the development, the advantages and disadvantages, and the latest technological progress of UUV energy technology, and discusses the development trend of UUV energy technology.

**Key words** power source; battery; fuel cell; hybrid power

## 0 引言

自主潜航器 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV)、遥控潜航器 (Remotely Operated Vehicle, ROV) 等统称为无人潜航器 (Unmanned Underwater

Vehicle, UUV)。UUV 技术的研究始于 20 世纪 50 年代, 早期主要用于海上石油与天然气的开发等<sup>[1]</sup>。20 世纪 80 年代后期, 随着自动控制技术、微电子技术、水下通信技术、精确导航技术的发展, UUV 的军事作用也受到广泛关注。无人潜航器 (UUV)

因其较强的灵活性、隐蔽性、高适应性等特点，在军事、科技、经济等方面有广阔的应用前景，成为各国技术研究的热点。UUV 动力系统决定了潜航器的续航力和载荷能力，是无人潜航器最重要的分系统之一。

## 1 国外 UUV 能源技术发展现状

### 1.1 蓄电池

蓄电池主要有铅酸电池、银锌电池和锂离子电池。早期的潜航器采用铅酸蓄电池、银锌蓄电池等<sup>[2]</sup>。21 世纪以来，随着锂离子电池的发展日益成熟，其在潜航器中的应用也越来越普遍。

#### 1.1.1 铅酸电池

早期的 UUV 大多数使用铅酸电池作为动力源。铅酸电池于 1859 年发明，其技术成熟、性能可靠、成本低、安全性好，比能量约为 30 Wh/kg，在早期的潜航器中得到了广泛使用。美国 1996 年研制的“曼塔”(MANTA)大排量无人潜航器重 14 t，使用铅酸蓄电池，最高航速 10 kn，巡航速度 5 kn，耐力为 4 h。它采用扁平形式，既可与舰艇联合执行任务，也可脱离母艇单独执行任务。



图 1 “曼塔”无人潜航器

Fig. 1 MANTA UUV

由于铅酸电池有能量密度低、充电困难、质量大等缺点，很多 UUV 都不再使用铅酸电池作为动力源，目前主要用于 UUV 训练。

#### 1.1.2 银锌电池

最早用于潜航器的电池为锌银电池，银锌电池在 20 世纪 90 年代成为 UUV 的主要动力电池，这种电池的比能量较高，约为 80~110 Wh/kg，是当时铅酸电池的 2~3 倍，能持续大电流放电<sup>[3]</sup>。美国的先进无人搜索系统(AUSS)、“奥德赛”(ODYSSEY)

UUV、韩国的 OKPL-6000 UUV 均采用银锌电池为动力电源。

表 1 银锌电池的应用实例

Table 1 Application examples of silver zinc battery

名称	国家	电池类型	主要参数
先进无人搜索系统 (AUSS)	美国	20 kWh 的银锌电池	长 5.2 m，直径 0.8 m，重 1 230 kg，以最大速度 6 kn 行驶可达 10 h
“奥德赛”(ODYSSEY)	美国	1.1 kWh 的银锌电池	长 2.2 m，直径 0.57 m，水平运动速度大于 4 kn，爬升速度大于 3 kn，续航力 6 h (3 kn 时)，如果采用最大电池结构，续航力可达 24 h
OKPL-6000 UUV	韩国	银锌二次蓄电池	长 3.8 m，直径 0.7 m，重 980 kg，最大工作深度 6 000 m，最大巡航速度 3 kn，续航力 10 h <sup>[1]</sup>

由于锌银电池充电慢，经不住多次充放电，在低温环境中放电性能受影响大，含银导致成本较高、维护费用高等，目前少量的中小型 AUV 用这种电池。

#### 1.1.3 锂离子电池

锂离子电池是现在应用最广泛的电池之一，其具有比能量高、电动势高、循环使用寿命长、无记忆效应等优点。自 1990 年日本将锂离子电池商品化以来，其优越性获得了世界各国的关注<sup>[4]</sup>。21 世纪初，锂离子电池开始应用于 UUV 上，锂离子的比能量约为 210 Wh/kg。锂离子电池的应用实例如表 2 所示。

表 2 锂离子电池的应用实例

Table 2 Application examples of lithium-ion battery

名称	国家	电池类型	主要参数
“塔利斯曼”(TALISMAN)	英国	锂离子电池	长约 4.5 m，宽约 2.5 m，重 1 800 kg，最大航速 5 kn，续航力超过 24 h
“阿利斯特”(ALISTER)	法国	锂离子二次电池	长 3.5 m，高 1.4 m，宽 1.35 m，重 1 000 kg (取决于有效载荷)，航速 0~9 kn，可在 3 kn 以上的水流中运行
“休金”(HUGIN) 1000	挪威	15 kWh 锂聚合物电池	长 4.5 m，直径 0.75 m，潜深 1 000 m，重 650~850 kg 之间，航速 2~6 kn，航速 4 kn，续航力 18 h
“金枪鱼”-9 (BLUEFIN-9)	美国	1.5 kWh 聚合物锂电池	长 1.75 m，直径 0.24 m，重 60.5 kg，潜深 200 m，航速 3 kn，续航力 8 h

## 1.2 燃料电池

燃料电池是一种把燃料所产生的化学能直接转换成电能的化学装置。燃烧所用燃料包括纯氢气、甲醇、乙醇、天然气等,由于燃料价格便宜,无化学危害,发电后产生纯水和热,对环境无污染,能量转化效率高等特点,受到了各国的广泛关注。常用的燃料电池有铝/过氧化氢半燃料电池、固体氧化物燃料电池、质子交换膜燃料电池<sup>[5]</sup>。燃料电池的比能量为260~400 Wh/kg,目前,燃料电池的技术还不够成熟,处于应用初期,因此,燃料电池仅应用在有限的大型UUV上。

## 1.3 混合动力技术

### 1.3.1 电-电混合动力

虽然燃料电池有很多优点,但是当潜航器所需功率波动时,燃料电池需要经过一段时间的调整才能适应负载的变化,因此,需要一个辅助的能量装置与燃料电池互补,共同供电。电-电混合动力系统通常由燃料电池系统和电池组组成。混合目的是使用燃料电池满足AUV的基本功率需求,当UUV的功率需求较高时,燃料电池的动力不足,由电池组补充动力,当UUV功率需求较低时,燃料电池给电池组充电<sup>[6]</sup>。以下是几个混合动力驱动UUV的例子。

表3 燃料电池的应用实例  
Table 3 Application examples of fuel cell

名称	国家	电池类型	主要参数
HUGIN 3000	挪威	45 kWh 铝/过氧化氢半燃料电池	长 5.5 m, 直径 1 m, 质量 1.4 t, 潜深 3 000 m, 航速 4 kn, 续航力 60 h
HUGIN 4500	挪威	60 kWh 铝/过氧化氢燃料电池	长 6 m, 直径 1 m, 质量 1.9 t, 潜深 4 500 m, 航速 4 kn, 续航力 60 h
DEEP C (2007)	德国	PEM 燃料电池	直径 1 m, 重约 2 000 kg, 潜深达 4 000 m, 航速 2~4 kn, 续航力 60 h

表4 混合动力电池的例子<sup>[6]</sup>  
Table 4 Application examples of hybrid battery

名称	国家	电池类型	特性
“浦岛” I	日本	PEM+锂离子电池 产生 H <sub>2</sub> 的金属氢化物	长 10 m, 直径 1.4 m, 重 10 t, 300 km 航程, 3 500 m 深; 2003 年 6 h 26 km; 2004 年 44 h 220 km; 2005 年 56 h 317 km
“浦岛” II	日本	PEM+锂离子电池	600 h 续航, 3 000 km 航程; 2009 年 1 000 h 测试; 2013 年 180 m 潜深
DEEP C (2003)	德国	1.5 kW PEM+锂离子电池	重 2 t, 2 m/s, 60 h, 潜深 4 000 m
IDEFIX	法国	PEM+锂离子电池	长 6 m, 重 1.6 t, 潜深 400 m, 航程 300 km

### 1.3.2 柴电混合动力

柴油机能够以相当高的热效率将热能转变为电能,柴油机和电动力可构成柴电混合动力,是有很大发展前景的动力能源。它具有技术成熟度高、使用成本便宜等优点,一般用于大排量无人潜航器。潜航时使用蓄电池,电量耗尽后浮出水面使用柴油发电机组充电,其原理与柴电潜艇类似。2017年美国研制的“回声旅行者”(ECHO VOYAGER)采用了柴电混合的动力系统,在日常作业中靠电力进行驱动,但当电力不足时,则可使用燃油进行发电。它可以携带大约3 800 L的燃油,可以使其横



图2 “回声旅行者”  
Fig. 2 ECHO VOYAGER UUV

跨太平洋且中途不需要进行补给。“回声旅行者”(ECHO VOYAGER)重约 50 t, 长度约 15.5 m, 与同类潜艇相比有省油的优点, 配有的油电混合系统让它可以在海上航行 6 个月。

#### 1.4 国外典型 UUV 能源技术对比分析

UUV 动力能源有铅酸电池、银锌电池、锂离子电池以及燃料电池等(见表 5)。铅酸电池和银锌电池比能量较低, 现已被锂离子电池取代。锂离子电池的比能量是铅酸电池的几倍, 是中小型潜航

器的主要动力源。美国的金枪鱼系列均采用锂离子电池, 比能量最高达 210 Wh/kg。燃料电池的比能量比锂离子电池高, 高达 400 Wh/kg, 使用该电池可将潜航器续航时长提升数倍, 多用于远航程 UUV 上。对于大型潜航器, 各国开始采用与常规潜艇类似的柴电动力系统。

随着 UUV 技术的不断发展, 各国对 UUV 动力能源的要求也越来越高, 更偏好能量密度高、价格便宜、安全性能好的动力源。

表 5 UUV 各类电池对比  
Table 5 Comparison of various types of UUV batteries

电池类型	比能量/(Wh/kg)	优势	劣势	适用范围	典型 UUV
铅酸电池	30	技术成熟, 性能可靠, 成本低, 安全性好	能量密度低, 放电时有害气体溢出, 充电困难, 质量大, 经不住多次充放电, 寿命短, 在低温环境中电池放电性能受影响大, 含有铅导致电池成本、维护费较高	早期或训练 UUV	美国 ABE
银锌电池	80~110	能量密度大(比铅酸电池大), 能大流量放电		早期 UUV	美国 AUSS
锂离子电池	210	比能量高, 自放电率低, 可快速充放电, 不含有毒有害物质等	不耐受过充、过放, 需要保护机制, 寿命约 2 000 次	低功率、长航时 UUV	美国 Bluefin 系列
燃料电池	260~400	价格便宜, 噪音小, 对环境无污染, 比能量高	技术不成熟, 氢气具有高度爆炸性, 氧气储存成本较高	远航程 UUV	HUGIN 3000
电-电混合	200~400	供电效率高, 噪音小, 燃料多, 比能量高	技术不成熟, 氢气氧气储存问题, 燃料电池和电池之间的功率分配对电池容量影响大	适合远航程 UUV	Deep C
柴电混合	在海上运行数月	可长时间在海中作业	日常养护和维修要求高, 柴油机的发热和震动会影响 UUV 可靠性和其他零部件可靠性	大型 UUV	“回声旅行者”(Echo Voyager)

## 2 国外 UUV 能源技术发展趋势分析

UUV 续航能力的大小、传感器携带的多少都取决于其能源技术的性能。随着 UUV 执行的任务越来越复杂, 对更大续航能力的 UUV 的需求日益提升, 传统的 UUV 能源电池性能有限, 严重限制了它们的潜水周期和应用范围, 远远不能满足新型 UUV 持久续航能力和多重任务执行的需求, 迫切需要开发大容量、长时间工作的能源。目前, 各国已开始研制各种比能量和能量密度更高的新型能源动力技术。新型蓄电池未来仍将大量应用在便携式、轻型及重型 UUV 上, 研究的重点在改进正负极材料比容量, 以提高电池的能量密度。燃料电池大多处于实验室开发阶段, 各国开始试验重整制氢

技术, 寻找新型燃料, 用以研制高功率密度的燃料电池。混合动力技术将采用较高能量密度和功率密度的燃料电池和电池组系统。利用可再生能源、水下充电技术、浮力推进、核动力等动力能源也将得到更多的研究和应用。

### 2.1 新型蓄电池技术

目前新型 UUV 普遍应用锂离子电池为水下动力。常用的锂离子电池易形成枝晶, 引起短路着火, 存在一定安全隐患, 耐压、耐温、耐穿刺特性较差, 容易短路和过热引发起火、爆炸等事故。因此, 各国正在研发锂离子电池的替代品, 包括锂硫电池、锂空气电池等, 未来将可能取代锂离子电池。

#### 2.1.1 锂硫电池

锂硫电池负极由纯锂金属组成, 正极是硫碳混

合物, 理论能量密度能达到 2 600 Wh/kg, 几乎是锂离子电池的 5 倍, 其价格低廉、污染小。但是锂硫电池存在容易自放电、循环特性差等问题。2016 年, 美国德克萨斯大学使用三元 S/PPy-MnO<sub>2</sub> 复合正极材料, MnO<sub>2</sub> 可捕获溶解的多硫化物, 抑制穿梭效应, 管状的聚吡咯柔韧性和导电性好, 两者协同作用可有效解决锂硫电池自放电的问题<sup>[7]</sup>。2021 年, 英国 OXIS 公司研制了闪点高于 100 ℃ 的锂硫电解质, 在电池正极形成硫化锂 (Li<sub>2</sub>S) 保护层, 其熔点高达 938 ℃, 可以起到绝缘作用, 防止热量散失, 第 1 代锂硫电池能量密度可达 450 Wh/kg, 更高能量密度的锂硫电池还在研制中<sup>[8]</sup>。

### 2.1.2 锂-空气电池

锂-空气电池负极是金属锂, 正极是空气 (氧气), 利用金属锂的氧化还原反应实现电池的充放电。负极电解液一般使用含锂盐的有机电解液, 正极电解液一般为碱性水溶性凝胶。锂-空气电池负极使用锂离子与氧气直接反应, 理论储能密度远高于锂离子电池。目前存在的问题在于电压损失高、氧的吸收和释放易引起电池体积变化。为了解决这些问题, 各国开始研究新型锂-空气电池技术。美国麻省理工学院将 Li<sub>2</sub>O 纳米颗粒填充到海绵状的 CO<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 结构中, 研制出新型超轻负极, 充放电时, 负极材料在 Li<sub>2</sub>O/Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/LiO<sub>2</sub> 三相间转换, 无氧气的吸收与释放, 保证了结构的稳定性<sup>[9]</sup>。该设计为封闭结构, 有望用于 UUV。

## 2.2 高功率密度燃料电池

目前, 燃料电池的技术还不够成熟, 氢气的储存或制备是限制燃料电池大规模应用的瓶颈。因此, 燃料电池仅应用在有限的大型 UUV 上, 如挪威 HUGIN 3000, 采用 45 kWh 铝/过氧化氢半燃料电池, 潜深 3 000 m, 续航力为 60 h。为了进一步提高 UUV 的续航力, 各国研究机构开始大力发展战略、高功率密度的燃料电池技术。燃料电池 (Fuel Cell Energy) 能源公司、UTC 公司、通用原子 (General Atomics) 公司和英飞尼迪 (Infinity) 公司, 通用汽车公司等多个机构参加了该技术研究。这些机构采用技术路线不同, 燃料电池类型包括质子交换膜 (PEM)、固态氧化物以及金属燃料

等, 此外, 还开始试验重整制氢技术, 为 UUV 试验了甲醇、JP-10 燃油、铝水反应等制氢方式<sup>[10]</sup>。这类燃料电池比功率高, 能量密度大, 可以支持潜航器长达 30 d 的航程。

2015 年, 美国开始研制大排量创新型 LDUUV-INP 潜航器, 该 UUV 直径约 1.5 m, 长 13.5 m, 重量约 10 t, 最高航速 10 kn, 采用燃料电池动力系统。2019 年, 美海军进行了 LDUUV-INP 的最终测试。美国为 LDUUV-INP 研制了 2 种燃料电池: 固体氧化物燃料电池和质子交换膜燃料电池。燃料电池能源公司为其开发固体氧化物燃料电池系统, 该系统以 JP-10 燃油和液氧为燃料, 可产生 1 800 kWh 的电能, 满足 LDUUV 航行 70 d 的需求。通用原子公司和英飞尼迪公司联合研制质子交换膜燃料电池: 英飞尼迪公司负责研制氢氧燃料电池; 通用原子公司负责研制铝水反应制氢装置, 已完成 40 h 不间断测试。



图 3 美国 LDUUV-INP

Fig.3 LDUUV-INP

开放水域动力公司研发了一种铝-海水燃料电池, 通过铝合金与水的置换反应, 直接产生电能, 无需携带储氧罐, 能量密度高达 2~3 kWh/L, 是锂离子电池的 10 倍<sup>[11-12]</sup>。

挪威研制了一种流体阻力较低的 UUV, 主要用于海洋研究。该 UUV 采用镁-海水燃料电池。如果采用比能高的低压镁-海水电池, 该 UUV 的潜在航程可达 1 100~1 200 n mile。

## 2.3 混合动力技术

### 2.3.1 电-电混合动力

电-电混合动力能源技术的发展很大程度上取决于燃料电池和蓄电池的技术发展。随着燃料电池

技术的不断进步，高功率密度的燃料电池的研制成功势必会带来电-电混合动力的进步；另一方面，随着新型蓄电池技术的发展，电池能量密度高。这种电-电混合动力能源既有高功率密度，又有高能量密度，是无人潜航器动力电源的重要发展方向。

### 2.3.2 柴电混合动力

近年来，UUV 的发展呈现出大型化的发展趋势，大排量 UUV 成为技术发展的重点。为了支撑新型 UUV 的长期作业能力，多采用较高能量密度

和功率密度的柴电混合动力系统。“虎鲸”( ORCA ) 是美国 2017 年开始研制的一款超大型无人潜航器。其尾部布置有柴油机发电机组、蓄电池舱等动力与能源系统。凭借先进的柴电动力系统，它可自主航行 6 500 n mile，可装载轻型甚至重型鱼雷，具备应对“反水雷、反潜、反水面舰艇等作战任务”的突出能力。2022 年 4 月 28 日，美国海军在对“虎鲸”进行了首次水下测试。图 4 为美国“虎鲸”超大型无人潜航器概念图。

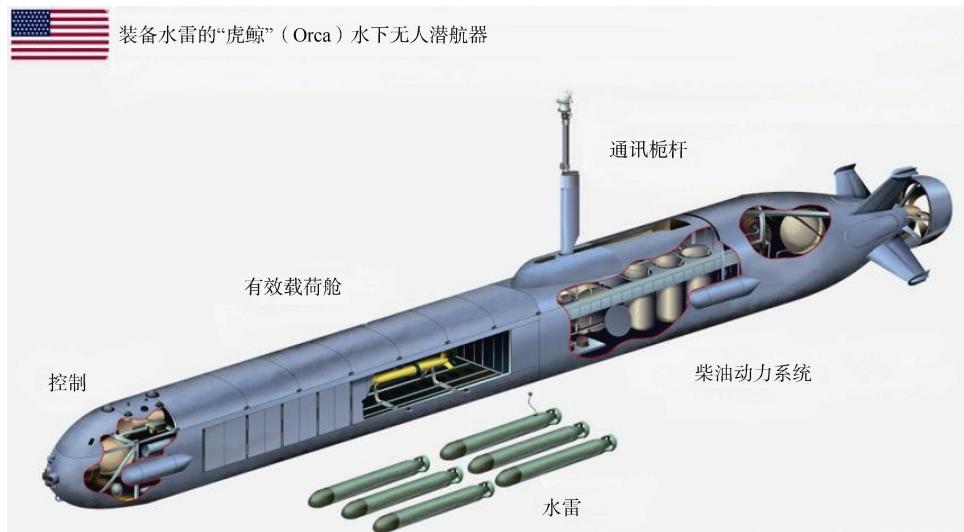


图 4 “虎鲸”概念图  
Fig. 4 Concept of Orca UUV

## 2.4 可再生能源

### 2.4.1 微生物燃料电池

微生物燃料电池 ( Microbial Fuel Cell, MFC ) 是一种利用微生物将有机物中的化学能直接转化成电能的装置。它利用海底沉积物中富含厌氧微生物的呼吸作用直接产生电能，阳极一般放置在养分充足但氧气不足环境中，阴极放在富含溶解氧的海水中。

2017 年，美国海上作战系统中心太平洋分部 ( SSC Pacific ) 研发了一种海底的微生物燃料电池，该电池装备了搅拌器，搅拌器把海底沉积物搅动起来，形成稀释的 ( 大约 1% ) 沉积物-海水溶液，该稀释的溶液缓慢地通过阳极室进行循环，平均功率密度可达到  $170 \text{ mW/m}^2$ 。该电池可在一段时间内不接触海底沉积物，每月接触几分钟就可以维持其运

行，并可在阳极不暴露在氧气中的状态下重新放置在海底沉积物区。因此，这种微生物燃料电池有望为 UUV、下滑翔机和弹出式海底设备提供自主电源。

美国海上作战系统中心太平洋分部还提出了一种利用 MFC 供电可变形 UUV。阳极布置在 UUV 底部，可直接接触微生物环境；阴极布置在 UUV 上部，暴露在海水中。该 UUV 底部接触模式时，UUV 为扁平状，底部阳极可全面接触海底沉积物发电，阴极呈弯曲状态。当 UUV 运动时，UUV 为流线型，MFC 电极使用柔性材料，可跟随 UUV 变形。

### 2.4.2 温差能技术

海水温差能技术是利用表层和深层海水间的温差进行发电，用于浮标或滑翔式 UUV，其续航力可达数年。2009 年美国研发出 SOLO-TREC 潜

航器, 是世界首个温差能驱动的 UUV<sup>[13]</sup>。温差能技术的发展方向是建造海洋温差能供电的充电站。2014 年, 美海军计划建造水下充电站。最终目标是在深海部署大型电源。据推测, 这种无须维护、寿命极长的电源, 可以与 UUV 水下充电站相结合, 形成海上无人充电网络。

## 2.5 水下充电技术

使用蓄电池的 UUV 需要上浮或打捞进行充电或更换电池组, 在上浮充电时极易遭受攻击, 大幅限制了 UUV 在水下的航行时间和任务执行能力, 成为制约 UUV 的瓶颈问题之一, 因此, 美国海军正在为 UUV 开发水下充电站, 让 UUV 无需上浮或打捞就可充电。目前设想的水下充电技术有 2 种形式: 1) 接入潜艇水下远程导弹系统 (ULRM)

或干式遮蔽舱, 利用潜艇为 UUV 充电; 2) 在海底布放, 利用水下电缆为 UUV 充电<sup>[14]</sup>。

美国巴特尔 (Battelle) 公司 2014 年已研发出“水下母港” (Oceanhub) 样机, 利用“金枪鱼” -12 UUV 完成了海试。利用该样机, UUV 可自主导航并停泊, 使用感应线圈实现电力传输, 无需金属间的直接接触。“水下母港” 充电功率为 1.7 kW, 效率可达 90%, UUV 充电时间为 4~6 h<sup>[15]</sup>。美国 2015 年启动的创新性海军项目, 设想在 3 000 m 海底布设一定数量能源补给点, 这些补给点可延绵数百千米, 寿命超过 20 年。UUV 在这条线执行任务时, 这些能源补给点如同加油站一样, 潜航器可在补给点补充能源并中转数据, 保障了水下长航时、远航程作业。



图 5 “金枪鱼” -12 UUV 完成“水下母港” 海试  
Fig. 5 The sea trial of OceanHub for Bluefin 12 UUV

## 2.6 浮力推进

潜航器还有一种特殊的动力推进方式, 即浮力推进。水下滑翔机是利用浮力推进的带翼 UUV。它利用鱼鳔的工作原理, 依靠调节自身重力与浮力实现上浮与下潜, 借助水动力实现水中滑翔, 可以对复杂海洋环境进行长时滞、大范围的观测与探测<sup>[16]</sup>。浮力推进因其能源消耗极小, 具有效率高、续航力大的特点, 深受美国海军及美国海洋科研机构的青睐。美国特利丹 (Teledyne) 公司研制的 SLOCUM 水下滑翔机利用净浮力和姿态角调整获得推进力<sup>[17]</sup>。

2021 年, 美国 DAPPA 开始研制“蝠鲼” (MANTA RAY), 它是高效率、长航时的 UUV, 将应用新型能源管理技术和海底能量收集技术以及低功率、高效率的水下推进系统。从 DARPA

披露的资料来看, “蝠鲼” 很可能融合了浮力推进技术。

## 2.7 核动力

核动力是利用可控核反应来获取能量, 从而得到动力、热量和电能。将核能转化为电能的装置包括反应堆和汽轮发电机组。核能在反应堆中被转化为热能, 热能将水变为蒸汽推动汽轮发电机组发电。俄罗斯最新研制的“波塞冬”的动力系统使用了小型核动力, 使其可以不受自身燃料携带量的限制, 有了几乎无限巡航能力。“波塞冬” 长度约为 20 m, 直径为 1.5 m, 其最大潜深可达 1 000 m, 可以 200 km/h 的速度前行。由于俄罗斯官方透露的信息并不多, 所以对于“波塞冬”的具体情况, 外界依然知之甚少。



图 6 俄罗斯“波塞冬”  
Fig. 6 Russian POSEIDON UUV

### 3 结束语

未来 UUV 的商业和军事领域的应用范围会越来越复杂多样，对 UUV 续航能力的要求也会越来越高，这对 UUV 新的能源技术提出了长达数月、甚至数年的超长续航力的迫切需求。目前应用较多的动力能源是锂系列电池，可满足 UUV 近期的发展需求，然而发展更大容量、更高能量密度以及环保清洁的能源已成为未来 UUV 动力能源的发展方向。新型锂电池、高功率密度燃料电池由于其理论比能量较高，后期提升空间较大，可以满足 UUV 中长期应用的需求，此类能源技术后期发展潜力巨大，是 UUV 未来发展的优选动力能源。可再生能源、核动力等动力能源虽然其发展不成熟，但是与锂离子电池组的混合动力系统在不断进步中，未来应用极具潜力。除了文中介绍的最新能源技术外，UUV 的动力源还有太阳能、潮汐能、风能等能源。相信在目前先进的电池技术基础上，未来无人潜航器的能源系统将会更加持久和安全。

### 参考文献

- [1] 国防科技信息网. 国外自主式水下航行体(AUV)研发现状比较[EB/OL]. [2009-12-18]. <http://www.dsti.net/special/newsview/136>.
- [2] 钟宏伟. 国外无人水下航行器装备与技术现状及展望[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25 (3): 215-225.
- [3] SHARKH S, GRIFFITHS G. Energy storage systems for unmanned underwater vehicles[J]. Journal of the Society for Underwater Technology, 2003, 25 (3): 143-148.
- [4] 史小锋, 党建军, 梁跃, 等. 水下攻防武器能源动力技术发展现状及趋势[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29 (6): 634-647.
- [5] 蔡年生. UUV 动力电池现状及发展趋势[J]. 鱼雷技术, 2010, 18 (2): 81-87.
- [6] CHICHE A, LINDBERGH G, STENIUS I, et al. A strategy for sizing and optimizing the energy system on long-range AUVs[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2021, 46 (4): 1132-1143.
- [7] ZHANG J, SHI Y, DING Y, et al. In situ reactive synthesis of polypyrrole-MnO<sub>2</sub> coaxial nanotubes as sulfur hosts for high-performance lithium-sulfur battery[J]. Nano Letters, 2016, 16 (11): 7276-7281.
- [8] OXIS ENERGY. Novel electrode structure provides new promise for lithium-sulfur batteries [EB/OL]. [2016-11-2]. <https://oxisenergy.com/wp-content/uploads-2020-11-press-release-nov-2020-final-pdf-2/>.
- [9] GIRISHKUMAR G, MCCLOSKEY B, LUNTZ A C, et al. Lithium-air battery: promise and challenges[J]. Journal of Physical Chemistry Letters, 2010, 1 (14): 2193-2203.
- [10] 聂卫东, 马玲, 张博, 等. 浅析美军水下无人作战系统及其关键技术[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25 (4): 310-318.
- [11] NICHOLAS B, PULSONE D P, HART A M, et al. Aluminum-water energy system for autonomous undersea vehicles[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2017, 22 (2): 79-90.
- [12] VERMA J, KUMAR D. Recent developments in energy storage systems for marine environment[J]. Royal Society of Chemistry, 2021, 2: 6800-6815.
- [13] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Powering the blue economy: exploring opportunities for marine renewable energy in maritime markets [EB/OL]. [2019-04-05]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2019/09/f66/73355-3.pdf>.
- [14] GRANGER R, NEAL M, POMERLEAU R, et al. Resident AUV system with subsea dock in development [EB/OL]. [2014-04-10]. <https://www.offshore-mag.com/home/article/16804687/resident-aув-system-with-subsea-dock-in-development>.
- [15] 刁宏伟, 李宗吉, 王世哲, 等. 水下滑翔机研究现状及发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2022, 44 (6): 8-12.
- [16] 刘子琪, 兰世泉, 杨绍琼, 等. 基于水下滑翔机平台的海洋声学探测技术发展现状与展望[J]. 数字海洋与水下攻防, 2021, 4 (1): 8-14.
- [17] 王书玉, 张玮, 李磊. 水下无人运输平台关键技术及发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2021, 43 (21): 6-10.

(责任编辑: 曹晓霖)