



# 自供电软机器人成功挑战马里亚纳海沟

陈祥平<sup>1</sup>, 周方浩<sup>1</sup>, 李国瑞<sup>2</sup>, 曹许诺<sup>1</sup>, 李铁风<sup>1\*</sup>

1. 浙江大学交叉力学中心, 杭州 310027;

2. 之江实验室, 杭州 311100

\* 联系人, E-mail: [litiefeng@zju.edu.cn](mailto:litiefeng@zju.edu.cn)

## Self-powered soft robot in the Mariana Trench

Xiangping Chen<sup>1</sup>, Fanghao Zhou<sup>1</sup>, Guorui Li<sup>2</sup>, Xunuo Cao<sup>1</sup> & Tiefeng Li<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Center for X-Mechanics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

<sup>2</sup> Zhejiang Lab, Hangzhou 311100, China

\* Corresponding author, E-mail: [litiefeng@zju.edu.cn](mailto:litiefeng@zju.edu.cn)

doi: [10.1360/TB-2022-0605](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0605)

海水覆盖了地球约71%的表面积, 并孕育了独特的生物, 而海底拥有多样的地质特征和丰富的矿产资源. 一直以来, 人类在不停追求对深海的探索. 深海通常按照深度不同可划分为中层带(200~1000 m)、深层带(1000~4000 m)、深渊带(4000~6000 m)与超深渊带(6000 m以上). 随着深度的增加, 环境压力也以1 atm/10 m的速度增加. 特别是在深渊带与超深渊带, 这里水压高、完全黑暗、温度低, 生物分布也极其稀少.

目前已知的海洋最深处位于西太平洋的马里亚纳海沟, 最深处约10900 m. 10900 m是怎样的概念呢? 哪怕把地球上最高的山峰——珠穆朗玛峰填进去, 峰顶离海平面还有2000多米的距离. 与此相对, 这里的静水压高约110 MPa, 相当于海平面大气压的1100倍, 这样的压强可近似比作一辆小汽车全压在指尖上. 对于人类的工程设备而言, 深海极高的环境压力也是一个严酷挑战, 所以深海探索长期以来都是工程技术领域的难题.

### 1 深海极渊来了“新访客”

为了让执行水下探测与考察任务的人造潜水器能够深入海底, 以往的设计策略一直是“硬碰硬”, 即选用高强度的耐压金属外壳(如钛合金)或压力补偿系统作为“盔甲”<sup>[1-3]</sup>, 以此来保护内部机电系统. 无论是深海遥控潜水器还是载人潜水器, 如我国的“奋斗者”号、“蛟龙”号, 都普遍采用了这种技术路线.

随着水域越来越深, 外壳的厚度和尺寸也需要相应提升, 设备体积也会越来越大, 因此传统的深海机器人和载人深潜器都具有厚重的外壳. 人类第一艘到达马里亚纳海沟的潜水

器“的里雅斯特号”长度就超过15 m, 载人舱室就重达14 t. 然而, 近年来的深海生物科考进展为深海装备研究提供了崭新的思路. 研究表明, 哪怕是在6000 m以上的超深渊带这样的恶劣环境中, 仍有数百种物种生存<sup>[4]</sup>. 在这些类群中, 尤其以深海狮子鱼的分布最深、垂直分布跨度最大.

形态学研究表明, 狮子鱼为适应高压环境, 其身体的生理机能相比常规鱼类发生了很大变化<sup>[5]</sup>. 这些变化主要反映在肌肉和骨骼上. 结构分析发现, 深海狮子鱼体内存在大量的胶状物质, 这对于它们平衡内外压力具有重要作用. 另外, 它们的骨骼进化出了一些适应于深海压力环境的特征: 头部骨骼呈细碎状, 分布在软组织中; 绝大多数骨骼皆为软骨, 有效降低了硬质骨骼在高静水压下的局部应力集中<sup>[5]</sup>. 深海生物因其独特的生理结构和对高静水压的适应性, 无需厚重硬质结构保护, 便可在深海中展现出良好的生理状态和运动姿态, 这为深海智能装备的小型化、轻量化提供了丰富的仿生设计灵感.

受此深海狮子鱼启发, 作者团队联合之江实验室等合作单位开展跨学科交叉研究, 采用“以柔克刚”的策略, 突破性提出机电系统软-硬共融的压力适应原理, 研制出了一种全新的深海软体机器人(图1). 该软体机器人摆脱了厚重的外壳, 外表酷似一只深海狮子鱼. 其身長22 cm(体长11.5 cm, 尾长10.5 cm), 展翅28 cm, 大约为一张A4纸的长宽. 2019年12月, 软体机器人在马里亚纳海沟随深海着陆器下潜坐底10900 m, 并首次成功实现了深海电驱动. 在2020年7月我国南海的海试试验中, 软体机器人由无人潜水器携带到3224 m的深度后, 按预设程序成功实现了自由游动. 2021年3月, 相关研究成果作为封面文章发表在Nature上<sup>[6]</sup>.



图1 (网络版彩色) 软体机器人、硬质机械臂、深海虾三者同框  
Figure 1 (Color online) Soft robot with a rigid robotic arm and a deep-sea shrimp

## 2 巧思化作“机器之力”

那么这个深海软体机器人(图2)到底独特在哪儿呢? 该软体机器人的核心设计正是参考了深海狮子鱼的两个特征: 第一, 摒弃了笨重的抗压外壳, 采用软质有机硅材料作为主要躯干, 将控制电路、电池等各种硬质电子部件均匀分散到凝胶状的软体机身各处, 优化了高压环境下机器人体内的受力情况, 以实现最大限度的压力平衡, 从而使整个系统无需外壳保护即可适应高静水压力。第二, 摒弃了传统潜水器电机-螺旋桨式的推进方式, 无需考虑这些传统推进器的密封问题。机器人采用了电驱动的鱼鳍状仿生推进翼, 通过节律性地拍动推进翼让机器人在海中前进。前一个特征很好地吻合了深海狮子鱼适应深海超高压的骨骼分布特点, 后一个特征则借鉴了深海狮子鱼等深海生物的鱼鳍。

具体技术方面, 自供电软机器人的驱动主要通过内置电子设备和人工肌肉两部分来实现。其中, 电子设备模块由锂离子电池、高压放大器、红外接收器、芯片等控制电路组成。内置的2500 mA h锂离子电池作为能量来源, 通过高压放

大器对电源电压进行放大后, 输出周期性电压, 驱动人工肌肉变形进行扑翼运动, 从而实现机器人游动。在充满电的情况下, 机器人的续航时间可达45 min。

从仿生学角度出发, 在第一个“骨骼分布”特征中, 研究人员将机器人原印刷电路板尽可能分散成几块较小的电路板和元件, 彼此间再用细软导线连接回去。此外, 留在同一块电路板上的元件之间的距离也适当增大, 尽可能地减少元件的界面应力。对此, 研究人员进行了一系列的力学仿真模拟以及压力实验仓测试, 验证了这类方法的有效性。

在第二个特征中, 鱼鳍状推进翼的运动则是靠一种叫作介电高弹聚合物的“人工肌肉”实现。这种材料能将电能转化为机械能, 加上电压即可产生大变形。研究人员通过结构设计将“人工肌肉”材料制作成鱼鳍推进翼, 并巧妙地利用了围绕在“人工肌肉”外的海水作为离子导电负极, 由软体机器人自带能源在“人工肌肉”内外侧周期性地产生电势差, 让聚合物发生舒张与收缩形变。这样一来, 鱼鳍推进翼即可节律性地拍动, 实现软体机器人水中游动。此外, 研究人员还针对深海的低温高压工况对“人工肌肉”进行了材料改性, 解决了其电驱动能力衰减的问题, 即便在马里亚纳海沟的低温(0~4°C)、高压环境(110 MPa)下也能正常工作。

## 3 深海装备推向“鱼翔万米”

仿生学在水下机器人、小型化深海装备中有着非常好的应用前景。通过师法自然, 将深海生物的耐压机理、极端条件下的生存机制用于深海机器人的设计开发, 能够有效提升水下装备和深海机器的性能和设计空间。该深海软体机器人像深海生物一样具有柔软的身体、良好的环境适应性和机动性, 是人类首次在全球最深海域实现无任何耐压壳保护的深海装备的运行, 并将软体机器人推向了万米深海。

Laschi和Calisti<sup>[7]</sup>高度肯定了本研究的基础理论及技术路线, 认为其推动了软体机器人研究的新进展, 开创了智能深海软体机器人的新领域, 为新一代强适应和高可靠的深海

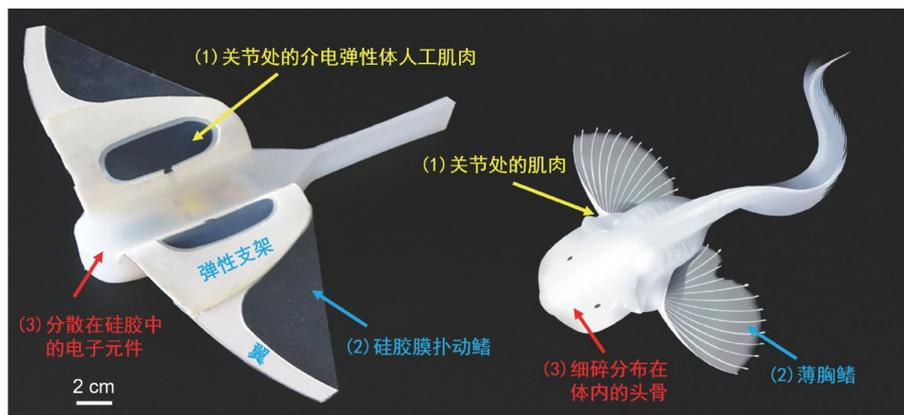


图2 (网络版彩色) 仿生深海软体机器鱼  
Figure 2 (Color online) Bio-inspired deep-sea soft robotic fish

机器人研究奠定了基础。该项研究具有鲜明的多学科交叉特色,融合了机械、力学、材料等多个基础领域的研究突破。

一方面,该项研究的无耐压壳压力自适应技术可以进一步拓展和应用到深海机器人和深海平台上。结合深海软体生物耐压机理,开展深海仿生软体机器人及智能系统研究,摒弃金属耐压壳保护,既能为深海装备的小型化和经济化提供新手段,又可将软体机器人从创新概念推向深海重大应用。未来,通过摒弃部分机构和器件的厚重耐压壳装置,有望大幅度降低现有深海装备的重量和成本,并提升其机动性。此外,小型化的深海软体机器人也可以通过集群作业进一步发挥独特优势,并提升实际作业能力。

另一方面,该软体机器鱼所集成的电驱动人工肌肉技术是新材料在深海领域的一个重要进展。在深海探测方面,目前的

水下机器人主要通过电机驱动螺旋桨进行推进,并用硬质的机械臂对样本进行采集与探测。但电机产生的噪音及螺旋桨产生的水流干扰加大了样本采集与原位探测的难度,同时,硬质机械臂的抓取过程也有可能对样本造成破坏。而深海软体机器人无需金属马达驱动,低噪声、高隐身,结合软体机器手进行作业,在对样本的无损采集与原位探测上具有很大优势。

综上,从发展的角度看,智能软体机器人因其特有的大变形与强适应能力,将在深海等极端作业场景中展现出极大应用潜力。深海软体智能系统具有很好的环境友好性、生物交互性和低成本优势。通过搭载一系列功能性的深海柔性传感器和信息采集模块,未来软体机器鱼和软体机器手可在深海原生态环境下,发挥无损检测、样本采集、人-机-物交互等方面的独特优势,并进一步帮助人类探索未知地带。

## 推荐阅读文献

- 1 Stachiw J D, Peters D, McDonald G. Ceramic external pressure housings for deep sea vehicles. In: Oceans 2006 Conference, 2006. 7–13
- 2 Blachut J, Smith P. Buckling of multi-segment underwater pressure hull. *Ocean Eng*, 2008, 35: 247–260
- 3 Kampmann P, Lemburg J, Hanff H, et al. Hybrid pressure-tolerant electronics. In: MTS/IEEE Oceans Conference, 2012. 1–5
- 4 Jamieson A J, Fujii T, Mayor D J, et al. Hadal trenches: The ecology of the deepest places on Earth. *Trends Ecol Evol*, 2010, 25: 190–197
- 5 Wang K, Shen Y, Yang Y, et al. Morphology and genome of a snailfish from the Mariana Trench provide insights into deep-sea adaptation. *Nat Ecol Evol*, 2019, 3: 823–833
- 6 Li G, Chen X, Zhou F, et al. Self-powered soft robot in the Mariana Trench. *Nature*, 2021, 591: 66–71
- 7 Laschi C, Calisti M. Soft robot reaches the deepest part of the ocean. *Nature*, 2021, 591: 35–36