

水下软体机器人柔性驱动方式及其仿生运动机理研究进展

傅珂杰, 曹许诺, 张桢, 刘先卫, 李国瑞, 梁艺鸣, 李铁风

浙江大学航空航天学院工程力学系, 杭州 310058

摘要 随着水下作业要求的增加以及软体机器人技术的发展, 水下软体机器人的研究成为水下机器人的一个前沿方向。用人工肌肉实现驱动控制并能实现仿生运动的水下软体机器人成为相关领域的研究热点。本文介绍现有水下软体机器人中7类人工肌肉驱动方式, 再根据水下软体机器人推进形式, 按5种仿生运动形式介绍了现有的水下软体机器人, 最后展望了水下软体机器人未来在水下勘探的应用前景。

关键词 软体机器人; 仿生机器人; 人工肌肉; 水下运动

1 水下软体机器人研究背景

水下机器人的发展与水下电缆和管道的铺设、天然气钻井和水下生态环境保护等相关的水下作业任务提供了新的技术手段。传统的水下机器人结构通常由电机、活塞、关节、铰链等构件组装而成, 动力足、功率大、性能成熟。由斯坦福大学Dussame Khatib团队研制的潜水机器人“海洋一号”(图1)便是其中的佼佼者, 其先进的触觉反馈系统可以向操作人员再现触感, 它的首航帮助打捞了17世纪法王路易十四的沉船——月亮号。但是传统的水下机器人存在很多缺点,



图1 斯坦福大学研制的潜水机器人“海洋一号”
Fig. 1 A diving robot developed by Stanford University

例如笨重、安全系数低、环境适应性差、可靠性低、传动效率低下、噪声大等。

自然界中水下生物柔软的身体、优良的灵活性和强大的环境适应性为水下机器人的发展提供了新思路, 软体机器人技术的发展也为更好的设计水下仿生机器人提供了基础支撑。软体机器人作为一类新型机器人, 具有结构柔软度高、环境适应性好、亲和性强、功能多样等特点, 有着十分广阔的研究和应用前景。以水下的软体生物为原型, 其躯体主要由可以承受大变形的弹性材料构成, 可以连续变形, 具有极高的自由度^[1]。科学家从水下生物的游动方式汲取灵感, 利用最新发展起来的软体机器人技术, 设计了一系列的水下仿生机器人。

哈佛大学科学家、该研究的领导者之一 Robert Wood 研发了世上第一个全软体机器人, 该机器人像一个小巧的玩具章鱼, 完全以气动代替电动(图2)。

波兰华沙大学与英国剑桥大学合作研发的一种体型极小的毛毛虫一般的软体机器人(图3), 可以通过感应光线调整运动形态模拟出自然生物的步态。

哈佛大学生物工程学院教授 Kevin Parker 以活体细胞制造出了一条人造的黄貂鱼(图4), 这条小鱼可以自发地向着光源移动, 但是由于活体细胞对环境的特殊要求, 目前只能在营养液里游动。

收稿日期: 2017-06-30; 修回日期: 2017-08-15

作者简介: 傅珂杰, 硕士研究生, 研究方向为软体机器人, 电子信箱: 3140102548@zju.edu.cn; 李铁风(通信作者), 副教授, 研究方向为软体智能材料、软体机器人, 电子信箱: litiefeng@zjz.edu.cn

引用格式: 傅珂杰, 曹许诺, 张桢, 等. 水下软体机器人柔性驱动方式及其仿生运动机理研究进展[J]. 科技导报, 2017, 35(18): 44-51; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.18.005

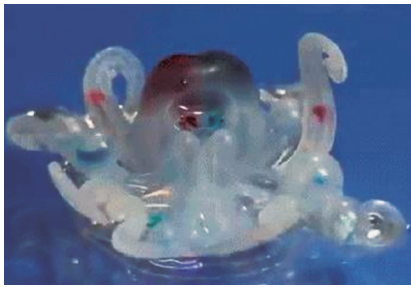


图2 哈佛大学研发的世界
上第一个全软体机器人^[2]

Fig. 2 World's first full-bodied robot
developed by Harvard University



图3 毛毛虫软体机器人

Fig. 3 A caterpillar software robot



图4 哈佛大学以活体细胞制造的人造
的黄貂鱼^[3]

Fig. 4 Harvard University's artificial
stingrays made of living cells

2 水下软体机器人的柔性驱动方式

水下软体机器人驱动不同于传统水下机器人的电机螺旋桨水泵,需要找到适合的软体材料,并且掌握其运动性能。这些软体材料就是研究者们可以利用的工具,将其做成人工肌肉,即选择合适的激励方式驱动这些材料实现类似生物肌肉的运动。现在主流的驱动方式有形状记忆合金驱动、离子交换聚合物金属复合材料驱动和介电高弹体驱动等。下面逐一介绍其原理和发现人及其成果,可以看到驱动力量小、精确控制难几乎是所有软体驱动共有的难点。

2.1 形状记忆合金驱动

形状记忆合金(SMA)是一种智能合金材料,其原理如图5所示,在加热时能够恢复原始形状,消除低温状态下所发生的变形。形状记忆合金的热力耦合行为源于材料本身的相变,例如热弹性马氏体相变。在形状记忆合金中存在两种相:高温相奥氏体相和低温相马氏体相。马氏体一旦形成,就会随着温度下降而继续生长,如果温度上升它又会减少,以完全相反的过程消失。两项自由能之差作为相变驱动力,两项自由能相等的温度 T_0 称为平衡温度。只有当温度低于平衡温度 T_0 时才会产生马氏体相变,反之,只有当温度高于平衡温度 T_0 时才会发生逆相变。在SMA中,马氏体相变不仅由温度引起,也可以由应力引起,这种由应力引起的马氏体相变叫做应力诱发马氏体相变,且相变温度同应力正相关^[4]。

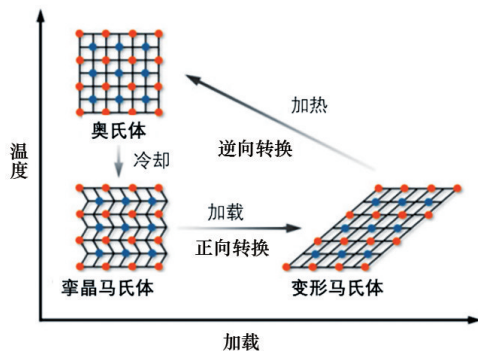


图5 形状记忆合金原理^[2]

Fig. 5 Principle of shape memory alloy (SMA)^[2]

根据SMA变形原理,将SMA埋在刚度较小的橡胶中,将其作为柔性驱动器,利用SMA受自身温度影响的变形,带动整个软体结构弯曲变形。如图6所示, Villanueva等^[5]利用SMA驱动设计了一种软体仿生水母机器人。

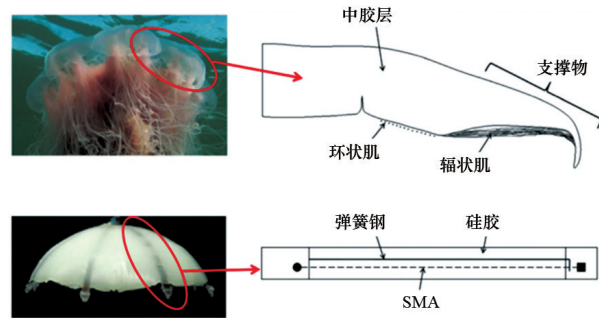


图6 SMA驱动仿生水母^[3]

Fig. 6 Bionic jellyfish actuated by SMA

2.2 离子交换聚合物金属复合材料驱动

离子交换聚合物金属复合材料(IPMC),是一种电致变形智能材料(离子型)。IPMC材料由Nafion离子交换薄膜和电极组成。其原理如图7所示,在含水状态下,聚合物薄膜中的阳离子(例如 Na^+ 和 Ca^{2+})可以自由移动,阴离子(例如 SO_3^-)固

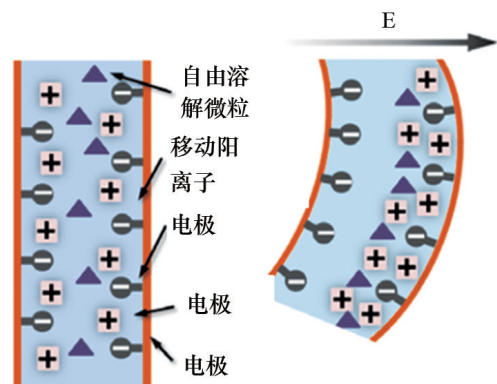


图7 离子交换聚合物金属复合材料驱动原理^[4]

Fig. 7 Principle of ionic polymer metal composite

定在碳链中不能移动。在 IPMC 电极的两端施加电压时,在电极之间会产生电场。在电场的作用下,水合阳离子向负极移动,而阴离子的位置固定不变。从而导致 IPMC 的负极溶胀、正极收缩,致使 IPMC 弯曲变形。IPMC 具有变形灵活、可重复、大位移、低电压驱动,响应速度快等特点。基于 IPMC 的这些特点,可以广泛用于水下软体机器人的驱动器中,如仿生机器鱼、机器水母等^[4]。

2.3 介电高弹体驱动

介电高弹体(DE)是一种典型的电致变形智能软材料,聚丙烯酸类材料是一种典型的介电高弹体材料,如图8所示,在介电高弹体薄膜的两侧覆盖柔性电极,并施加驱动电压时,介电高弹体薄膜在电场力的作用下产生变形,导致厚度减小,面积扩张。介电高弹体具有弹性模量低、质轻、能量密度大、响应速度快的优点。

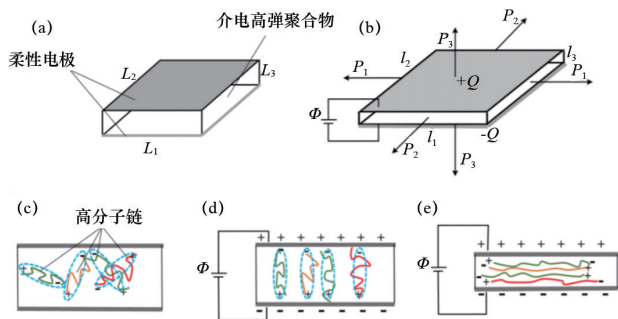


图8 介电高弹体驱动器工作原理^[6]
Fig. 8 Working principle of DE actuators

浙江大学工程力学系、浙江省软体机器人与智能器件重点实验室李铁风研究组基于介电高弹体的机电耦合特性,通过力电失稳实现了材料的极大电致变形^[7],并可振动调频,能用于智能结构的驱动^[8]。

2.4 充气驱动

充气驱动水下软体机器人是指通过在结构中充气,利用气压使结构产生变形或者运动,从而实现驱动的一类水下软体机器人。日本冈山大学设计 Suzumori K^[9]了一种二维弯曲充气驱动器(图9(a)),并在基础上设计了一款充气驱动水下软体机器人(图9(b))。

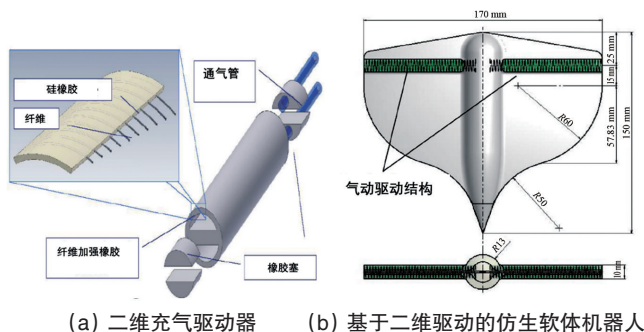


图9 充气驱动结构及充气驱动机器人^[9]
Fig. 9 Pneumatic structures and robots

2.5 响应水凝胶驱动

水凝胶是由亲水性的功能高分子,通过物理或化学作用交联形成三维网络结构,吸水溶胀而形成。响应水凝胶指能够对外部环境的变化产生响应性变化的水凝胶,如一些水凝胶能因外界温度、pH值、光电信号、特殊化学分子等的微小变化,而产生相应的物理结构或化学结构的变化。如一类具有低临界相转变温度(LCST)的温敏水凝胶,在温度低于LCST时,表现为亲水性,而高于LCST时相转变为疏水性。水凝胶高分子网络的相变使得水凝胶中的水分大量出入其中(温度升高缩水,降低吸水),从而使得水凝胶产生体积等形态变化。又例如一类具有对酸碱度敏感的水凝胶,其高分子网络中含有可电离的阴离子基团(羧基、磺酸基等)或阳离子基团(氨基等),外界pH值的改变影响基团的电离情况,使得它们与水分子的结合情况也发生相应改变,从而使水凝胶的体积形态随着pH值的改变而发生变化。由于智能水凝胶能够随外界环境变化而产生形变,可以作为智能驱动材料应用于水下软体机器人驱动。

Li等^[10]用pH值响应水凝胶开发了一款微型软体水母(图10),该水母为磁驱动水凝胶机器人,一方面,能够沿磁场方向通过自身化学反应实现运动;另一方面,当PH值变化时,能够改变自身形态,但有驱动力小、难以精确控制的困难。

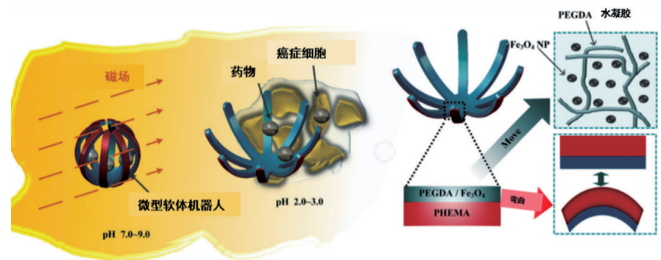


图10 磁驱动水凝胶机器人^[10]
Fig.10 Magnetically actuated hydrogel robot

2.6 流道化学反应驱动

微孔道化学反应驱动即依赖特定化学反应提供驱动能,并借由嵌入软体机器体内的微孔道控制输送能量进行运动的一种软体驱动运动方式。其优势在于化学反应作为供能源微孔道作导体可以摒弃传统软体机器人电源及导线为硬质的缺陷,实现全软体结构,代表作为哈佛大学 Robert Wood 发布的 Octobot^[2](图11)。

Octobot 在硅胶机体上利用3D打印机将两种特殊墨水打印成章鱼内部的通路后覆盖,其中一种墨水混有铂可作为过氧化氢分解为氧气的催化剂,另一种则是 poly(ethylene oxide)-b-poly(propylene oxide)-b-poly(ethylene oxide)triblock copolymer (Pluronic F127)凝胶^[11-12],可在加热时蒸发,在章鱼体内形成可供气液流动的微孔道^[13]。Octobot先注入过氧化氢溶液至两个独立的储液腔,每个储液腔间隔对应一组4个触手,两个反应通路在控制芯片出口处交叠,由于反应气体膨

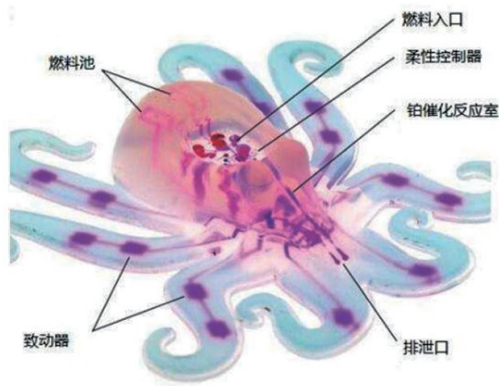


图 11 流道化学反应驱动水下软体机器人^[2]
Fig. 11 Microchannel chemical reactions driven underwater soft robots

胀,通路扩张,致使上下交叠处的通路仅有一路畅通并驱动其对应触手运动,排气后压强降低;另一通路压强较高占据通路,实现另外4个触手运动,达到触手交替运动。

2.7 活体细胞驱动

另一种创新的水下软体驱动方式就是利用生物的活体细胞作为驱动器,驱动软体机器人的游动。基于活体细胞驱动,美国哈佛大学生物工程和应用科学部门推出了全球首个生物合成机器人——机器鳐鱼(robo-ray)^[3](图12)。他们利用培养出的哺乳动物的心肌细胞,将这些细胞以一定的图案均匀分布在一层透明的弹性聚合物表面,同时对细胞进行基因编码,使其对特定的蓝色闪光产生反应。然后用对细胞无抑制作用的黄金作为骨架,再将整个装置放入含糖的生理盐水中维持细胞的活动。之后,用蓝色光脉冲对其进行冲击就

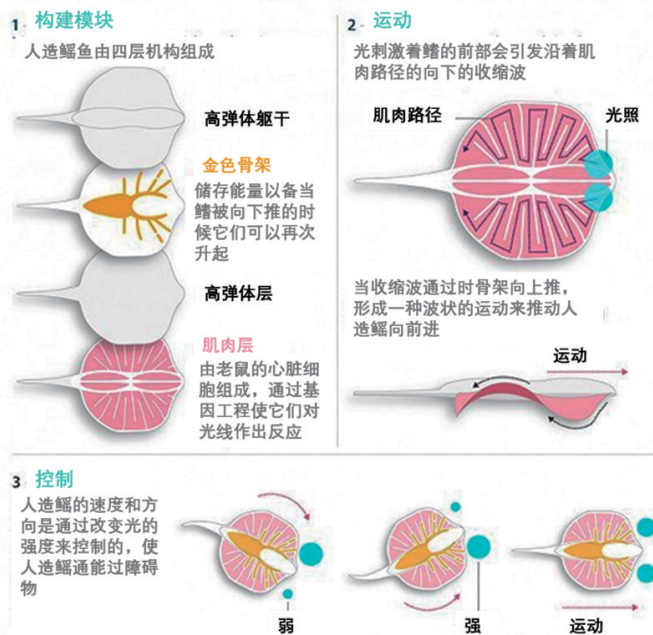


图 12 活体细胞驱动水下软体机器人^[3]
Fig. 12 A tissue-engineered soft-robotic ray

能带动躯体发生弯曲,从而推动前进。但目前看这种驱动方式还存在很大的局限性,即活体细胞需要的外界环境较为苛刻,这种技术短期内难以走出实验室。

3 水下软体机器人的仿生运动

利用上一节所提到的柔性驱动方式,研究者们可以设计相应的运动机构,构造水下软体机器人的运动机构,使水下软体机器人整体实现特定的运动形式。现阶段的水下软体机器人的运动形式都以水下生物的运动为参考而设计,而仿生的水下软体机器人大多以仿鱼类运动为主。自然界鱼类主要运动分为5种^[4](图13):躯干摆动型、躯干波动型、翼(鳍)扑动型、翼(鳍)波动型、喷水推进型,目前针对这些运动形式都有相应的软体机器人设计存在。

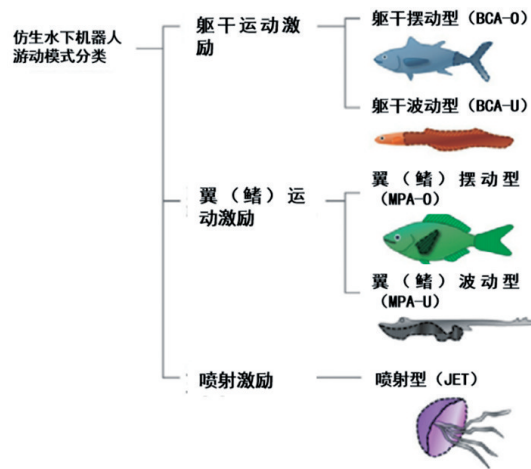


图 13 仿生水下机器人的游动模式分类^[19]
Fig. 13 Classification of swimming modes of biomimetic underwater robots

3.1 躯干摆动型(BCA-O)水下软体机器人

躯干摆动型作为最常见的鱼类游动方式,具有较高稳定性。如图14(a)所示,此类软体机器人通过特殊的驱动方式使得躯干左右两边不对称交替收缩或舒张,在躯干前端产生低压涡推动鱼前进。

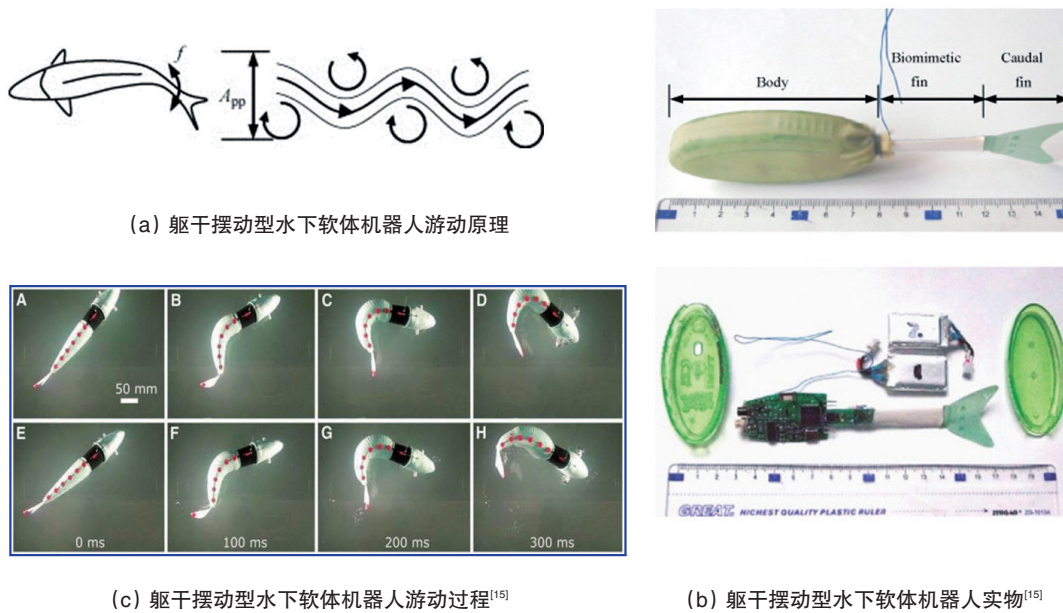
一般常见的驱动方式为形状记忆合金驱动、充气(充水)驱动。哈尔滨工业大学的王振龙研究组^[14]通过将条状SMA嵌入聚丙烯和硅胶内,通过单侧加热SMA弯曲实现鱼躯干的来回摆动。

美国麻省理工学院 Daniela Rus^[15]设计了充气式的硅胶躯干(如图14(b)所示),通过对左右两边对称分布的气室交替充气实现两侧杨氏模量交替变化弯曲。

然而由于普通鱼类驱动躯干弯曲的W型肌肉分布极其复杂,躯干摆动型水下软体机器人依然面临着严重的控制协调问题。

3.2 躯干波动型水下软体机器人

躯干波动型(BCA-U)机器人仿照带鱼、鳗鱼结构,能够



(a) 躯干摆动型水下软体机器人游动原理

(b) 躯干摆动型水下软体机器人实物^[15]

(c) 躯干摆动型水下软体机器人游动过程^[15]

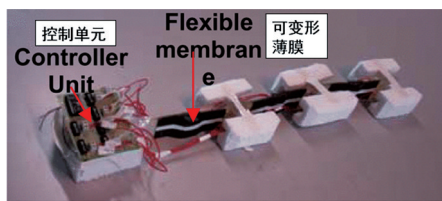
图 14 躯干摆动型水下软体机器人

Fig. 14 Underwater soft-robot in BCA-O swimming mode

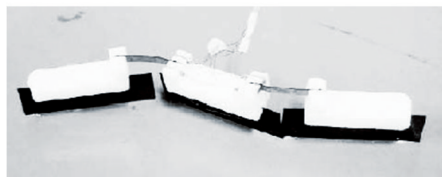
通过自身的高自由度在海底、珊瑚丛等复杂地形中灵活穿行。躯干波动型软体机器人主要由 SMA 与 IPMC 驱动。

中国科技大学与南洋理工大学共同研发的 SMA 材料驱动躯干波动型水下软体机器人原型机^[16],其通过多个分段式躯干,每一段躯干中间固定有聚氨酯做弹性体,聚氨酯两侧分别固定一条 SMA 做驱动器,工作时通过收缩不同侧 SMA 实现多段躯干波动式运动(图 15(a))。但由于效率较为低下,改用 SMA 材料制作翼(鳍)摆动型软体机器人^[17]。

英国帝国理工大学的研究人员则将 SMA 材料改为 IPMC^[18],如图 15(b)所示,取消了中间弹性体,使其运动更加灵活。



(a) SMA 材料驱动躯干波动型水下软体机器人^[16]



(b) IPMC 材料驱动躯干波动型水下软体机器人^[18]

图 15 躯干波动型水下软体机器人

Fig. 15 Underwater soft-robot in BCA-U swimming mode

躯干波动性运动方式的运动效率较低可操控性较差,仍需要对鱼类运动方式的深入理解,以及现有控制水平的提高才能得以实用。

3.3 翼(鳍)扑动型水下软体机器人

由于翼(鳍)扑动型(MPA-O)对称设计结构简单,制造方便可靠,游动速度较快,成为现今水下软体机器人研究的热门领域。翼(鳍)摆动型研究方向分为两条:设计能够输出较大力矩及变形的驱动装置;精确模仿鱼鳍扑动细节,实现转向控制等,DE 驱动、SMA 驱动及 IPMC 驱动、充气驱动均有涉及,本文主要介绍 DE 驱动及充气(充水)驱动。

浙江大学李铁风课题组研制的 DE 材料驱动机器人^[19](图 16(a)),该机器人由中部 DE 材料加电收缩舒张带动硅胶框架面外变形实现类似肌肉的收缩舒张效果,进而带动鱼鳍扑动实现前行。

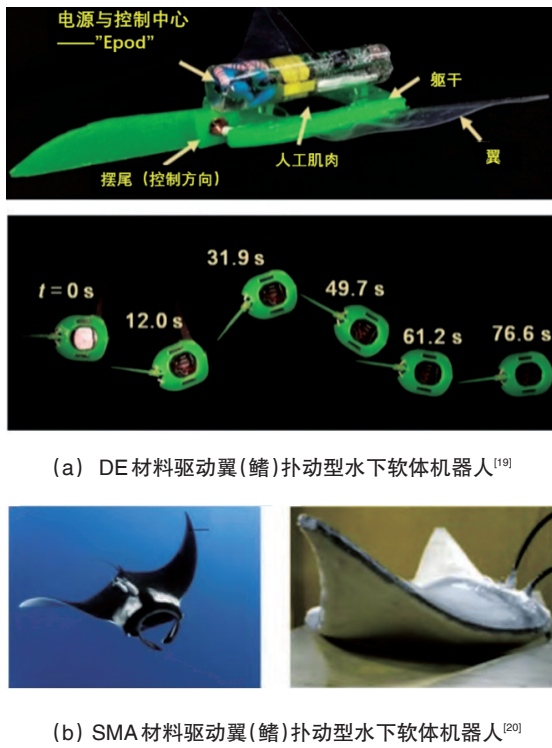
北京航空航天大学开发的气动驱动^[20]采用了两根“气动肌肉”,如图 16(b)所示,在两端固定的弹性管内充气,气压压缩导致管在径向方向扩张,在轴向方向缩短,实现类似肌肉收缩运动,进而带动鱼鳍扑动。

扑动式水下软体机器人结构简单自由度较低,不得不依靠机械转向舵实现转弯,未来在多自由度运动及控制方面依然面临挑战。

3.4 翼(鳍)波动型水下软体机器人

翼(鳍)波动型(MPA-U)主要仿造乌贼的游动方式(图 17(a))通过两侧翼(鳍)对称波动实现前游,不同频率,不同相位或不同幅值的波动实现转向,稳定性高,可较好地实现较大较长尺寸的水下软体机器人驱动。

主要有弗吉尼亚大学研究的 IPMC 驱动方式^[21-22](图 17



(a) DE材料驱动翼(鳍)扑动型水下软体机器人^[19]

(b) SMA材料驱动翼(鳍)扑动型水下软体机器人^[20]

图16 翼(鳍)扑动型水下软体机器人

Fig. 16 Underwater soft-robot in MPA-O swimming mode

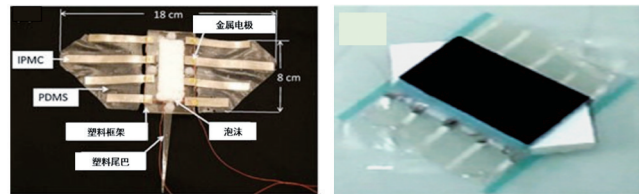
(b)与哈尔滨工业大学研究的SMA驱动方式^[23](图17(c))。两者结构近乎一致均使用了接近等间距排列的驱动器,而前者通过非等长的驱动器扩大周期长度实现了三维运动。翼(鳍)波动型需要较多驱动器独立工作完成周期性波动,使得软体机器人体积较大,需要较为繁杂的控制电路。

3.5 喷射型(JET)水下软体机器人

喷射型(JET)软体机器人的灵感来源于水母和墨鱼,通过水泵装置泵水后挤出形成反冲驱动机器人前游,体积可大



(a) 乌贼水下实物图



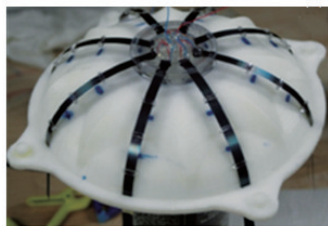
(b) IPMC材料驱动翼(鳍)波动型水下软体机器人^[21-22] (c) SMA材料驱动翼(鳍)波动型水下软体机器人^[23]

图17 翼(鳍)波动型水下软体机器人

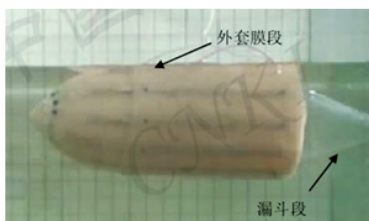
Fig. 17 Underwater soft-robot with MPA-U swimming mode

可小、对称性高、定向性好、加工方便,加速度较高。主要有SMA驱动方式。

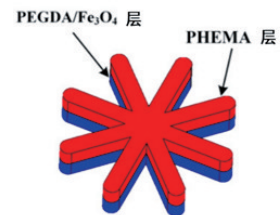
由美国弗吉尼亚理工学院研究的水母型机器人^[2],通过8条中心对称的SMA的弯曲变现使得半开放内腔体积的增加或缩小实现泵水推进(图18(a))。哈尔滨工业大学研制了SMA驱动的仿生乌贼推进器^[24-25](图18(b))。同时由于泵水型定向性好,可以将利用这种驱动方式制成微型的医疗机器人,目前,由Li^[10]团队研制的基于PH敏感型凝胶驱动的微型水下软体机器人,利用该微型机器人包裹药物,将其注射在生物体中,可较为准确地移动至体内病变部位,并释放药物,发展前景较好。然而由于泵水式推进方式速度变化较大,稳定性较低,且依然面临控制难的问题,实用性尚待检验。



(a) 美国弗吉尼亚理工学院SMA材料驱动泵水型水下软体机器人^[2]



(b) 哈尔滨工业大学SMA材料驱动泵水型水下软体机器人^[24-25]



(c) 响应水凝胶驱动泵水型水下软体机器人^[10]

图18 泵水型水下软体机器人

Fig. 18 Underwater soft-robot in JET swimming mode

4 结论与展望

未来水下软体机器人将作为一种新型工具,辅助人类进行各类水下作业活动,尤其以水下勘探为主。它将可以完成实际的水下作业任务,如水下摄影、声呐探测、监测预警、水

下设备修复等。

相比传统水下机器人,水下软体机器人拥有着很大的优势:水下软体机器人首先是拟态的,这可以保证它不惊动水下生物,保障摄影和探测的进行。其次水下软体机器人的运

动前进虽然缓慢,但是各个角度都能到达。最后水下软体机器人形体小巧,可伸缩,使得它可以穿越复杂的地形或者进入狭小的空间。

在水下勘探中,水下软体机器人可通过携带水下小型摄像头以及深度学习对鱼群进行识别,借由高生物亲和性实现对生物资源的跟踪勘探;在水下软体机器人上加装水下激光通信系统可实现实时传输水下视频供研究者能够以空间及时间的高还原度来获取信息并制定策略;同时,通过进一步减小软体仿生勘测机器人的体积,可实现人类在水下作业时大量携带水下软体机器人,并进行大规模投放提升勘探效率,实现撒网式多点阵监测。

目前,水下软体机器人的研究尚处于起步阶段,仍有很多难题需要去解决,包括能源供给、运动学建模、动作控制及通信传感等,以下4个方面可以提供一些研究思路。

1) 建模方式。水下软体机器人具有极高的自由度,因此在建模与控制方面与传统的机器人有所不同,难以实现精确建模与控制。目前,在水下软体机器人动力学建模中,主要通过结构功能分类进行多体离散化,将实验与模型验证,并充分考虑控制对步态的影响,从而优化机器人构造,提升性能^[26-27]。开发适用于软体机器人大变形、高自由度等特点的控制策略及建模方法对其基础研究及实际应用非常关键。

2) 新型智能软材料。水下软体机器人的进步在很大程度上依赖高性能的智能软材料制备及结构成型。需要研发高能量密度、高效率、可大变形驱动、宽频率驱动并且易于成型的智能软材料。

3) 能源供应装置。研究开发面向水下软体机器人应用的能源供应装置也是其发展的关键。例如气动式水下软体机器人、电源以及气源的质量较大,影响了机器人的运动;介电高弹体驱动的水下软体机器人,小型高压电源的可靠性至关重要。水下软体机器人的电源要求延展性好、轻质且可携带^[1]。

4) 与生物技术结合。哈佛大学黄貂鱼的成功制作让人看到生物材料在软体机器人上的应用可能,虽然目前只能在实验室的营养液中游动,但是随着机器人技术和生物技术的进一步结合和发展,未来可能会生出新的火花。

参考文献(References)

- [1] 李铁风, 李国瑞, 梁艺鸣, 等. 软体机器人结构机理与驱动材料研究综述[J]. 力学学报, 2016, 48(4): 756-766.
Li Tiefeng, Li Guorui, Liang Yiming, et al. Review of materials and structures in soft robotics[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(4): 756-766.
- [2] Wehner M, Truby R L, Fitzgerald D J, et al. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots[J]. Nature, 2016, 536(7617): 451.
- [3] Park S J, Gazzola M, Park K S, et al. Phototactic guidance of a tissue-engineered soft-robotic ray[J]. Science, 2016, 353(6295): 158-162.
- [4] Chu W S, Lee K T, Song S H, et al. Review of biomimetic underwater robots using smart actuators[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(7): 1281-1292.
- [5] Villanueva A, Smith C, Priya S. A biomimetic robotic jellyfish (Robojelly) actuated by shape memory alloy composite actuators[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2011, 6(3): 036004.
- [6] Zhu F B, Zhang C L, Qian J, et al. Mechanics of dielectric elastomers: materials, structures, and devices[J]. Journal of Zhejiang University-Science A(Applied Physics & Engineering), 2016(1): 1-21.
- [7] Li T, Keplinger C, Baumgartner R, et al. Giant voltage-induced deformation in dielectric elastomers near the verge of snap-through instability[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2013, 61(2): 611-628.
- [8] Li T, Qu S, Yang W. Electromechanical and dynamic analyses of tunable dielectric elastomer resonator[J]. International Journal of Solids & Structures, 2012, 49(26): 3754-3761.
- [9] Suzumori K, Endo S, Kanda T, et al. A bending pneumatic rubber actuator realizing soft-bodied manta swimming robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 2007: 4975-4980.
- [10] Li H, Go G, Ko S Y, et al. Magnetic actuated pH-responsive hydrogel-based soft micro-robot for targeted drug delivery[J]. Smart Materials & Structures, 2016, 25(2): 027001.
- [11] Wu W, Deconinck A, Lewis J A. Omnidirectional printing of 3d microvascular networks[J]. Advanced Materials, 2011, 23(24): H178-H183.
- [12] Kolesky D B, Truby R L, Gladman A S, et al. 3D bioprinting of vascularized, heterogeneous cell-laden tissue constructs[J]. Advanced Materials, 2014, 26(19): 3124.
- [13] Barnes H A. Thixotropy: A review[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1997, 70(1/2): 1-33.
- [14] Wang Z, Hang G, Li J, et al. A micro-robot fish with embedded SMA wire actuated flexible biomimetic fin[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2008, 144(2): 354-360.
- [15] Marchese A D, Onal C D, Rus D. Autonomous soft robotic fish capable of escape maneuvers using fluidic elastomer actuators[J]. Soft Robotics, 2014, 1(1): 75-87.
- [16] Low K H, Yang J, Pattathil A P, et al. Initial prototype design and investigation of an undulating body by SMA[C]//IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. New York: IEEE, 2006: 472-477.
- [17] Zhang S, Liu B, Wang L, et al. Design and implementation of a lightweight bioinspired pectoral fin driven by SMA[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(6): 1773-1785.
- [18] Kamamichi N, Yamakita M, Asaka K, et al. A snake-like swimming robot using IPMC actuator/sensor[C]//Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Florida: IEEE, 2006: 1812-1817.
- [19] Li T, Li G, Liang Y, et al. Fast-moving soft electronic fish[J]. Science Advances, 2017, 3(4): e1602045.
- [20] Cai Y, Bi S, Zheng L. Design and experiments of a robotic fish imitating cow-nosed Ray[J]. Journal of Bionic Engineering, 2010, 7(2): 120-126.
- [21] Chen Z, Um T I, Bartsmith H. Ionic polymer-metal composite enabled robotic manta ray[J]. Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering, 2011, 7976(17): 797637-797637-12.
- [22] Chen Z, Um T I, Bart-Smith H. A novel fabrication of ionic polymer-metal composite membrane actuator capable of 3-dimensional kine-

- matic motions[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2011, 168(1): 131–139.
- [23] Wang Z, Hang G, Wang Y, et al. Embedded SMA wire actuated biomimetic fin: a module for biomimetic underwater propulsion[J]. *Smart Materials & Structures*, 2008, 17(2): 025039.
- [24] 杜威. SMA 驱动的仿乌贼喷射推进器原型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
Du Wei. A prototype of squid like propeller driven by SMA[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [25] 李健. 仿生乌贼推进器及其流体动力仿真和实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
Li Jian. Simulation and experimental investigation of biomimetic squid thruster[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [26] Fang H, Li S, Wang K W, et al. Phase coordination and phase-velocity relationship in metameric robot locomotion[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, 10(6): 06600.
- [27] Fang H, Li S, Wang K W, et al. A comprehensive study on the locomotion characteristics of a metameric earthworm-like robot[J]. *Multi-body System Dynamics*, 2015, 35(2): 1–23.

A review of the flexible driving mode of underwater software robot and its mechanism of bionic movement

FU Kejie, CAO Xunuo, ZHANG Zhen, LIU Xianwei, LI Guorui, LIANG Yiming, LI Tiefeng

Department of Engineering Mechanics, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract With the increase of the underwater operation requirements and the development of the soft robot technology, the underwater soft robot becomes one of the top choices in the underwater robots. The underwater soft robots with artificial muscles to realize the drive control and the bionic motion become a research hot spot. This paper introduces underwater soft robots in seven kinds of the existing drive modes, based on the artificial muscles. The underwater soft robots can have five bionic movement forms. At the end, the future applications of underwater robots in the underwater exploration are discussed.

Keywords soft robotics; bionic robot; artificial muscle; underwater movement

(责任编辑 刘志远)