

微型软体机器人能源驱动技术研究进展*

杨云, 林泽宁, 洪阳, 蒋涛, 尚建忠, 罗自荣
(国防科技大学智能科学学院, 湖南长沙 410073)

摘要:具有高柔顺性、低能耗、高功率等特点的微型软体机器人在管道检修、战场侦察等复杂环境中具有广阔的应用前景。能源与驱动器决定了微型软体机器人运动方式和运动性能。为使更多研究人员了解现有柔性驱动技术及其能量来源的研究进展,从物理能源驱动、化学能源驱动以及生物混合驱动三方面入手,总结了基于这三种能源的典型驱动方式并分析其优劣。对现有柔性驱动及其能源存在的不足与未来发展进行讨论与总结,可为后续软体机器人柔性驱动技术发展及性能提升提供参考。

关键词:微型软体机器人;物理能源驱动;化学能源驱动;生物混合驱动

中图分类号:TH-39 **文献标志码:**A **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

文章编号:1001-2486(2023)03-076-10



与作者互动
听语音
聊科研

Research progress of energy and actuation technology for micro-soft robots

YANG Yun, LIN Zening, HONG Yang, JIANG Tao, SHANG Jianzhong, LUO Zirong

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Micro-soft robots with high compliance, low energy consumption and high energy density have wide application prospects in complex environments such as pipeline maintenance and battle field reconnaissance. Energy and actuator play a decisive role in the motion modes and performances of micro-soft robots. In order to make more researchers understand the research progresses of the existing flexible driving technology and their energy sources, the typical driving methods based on physical energy driving, chemical energy driving and biological hybrid driving were summarized and analyzed. The shortcomings and future development of the existing flexible driving technology and their energy sources were discussed and summarized, which can provide reference for the development and improving performance of the flexible drive technology of soft robots in the future.

Keywords: micro-soft robots; physical energy actuation; chemical energy actuation; bio-hybrid actuation

随着科技的发展,机器人与人类的生活紧密联系在一起。刚性机器人已广泛应用于工业生产、生活服务、军事侦察等领域^[1-3],为人类的生产生活带来极大的便利。然而,当面临狭窄弯曲的复杂环境时,传统刚性机器人受自身刚性结构的制约无法完全发挥出其优势。此时,大自然中的软体动物(如毛毛虫、蛇等)给予科研人员启发,这些动物凭借着其柔软的身材可以轻松灵活地通过各种复杂环境。通过对这些动物结构和运动方式的研究,软体机器人便应运而生。

软体机器人作为仿生机器人的延续,由柔性材料制成。它可以轻松改变形状和尺寸^[4],弥补了刚性机器人的不足,在生物医疗、应急救援、管

道检修等领域具有广阔的应用前景^[5]。我国软体机器人的研究起步于20世纪90年代,上海交通大学马建旭团队受蚯蚓启发设计了用于狭窄管道检修的机器人^[6]。该机器人使用记忆金属作为机器人的动力源,模仿蚯蚓的蠕动过程。该机器人的研究对我国软体机器人的发展具有历史意义。

驱动器作为软体机器人的动力转换部件,是决定软体机器人运动方式和运动性能的关键要素^[7];能源作为软体机器人运动的动力来源,是决定软体机器人的运动能力的重要环节。因此,如何开发适合微型软体机器人的驱动器及其驱动能源成为制造软体机器人的关键点。通过对微型

* 收稿日期:2022-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52105039);国防科技大学自然科学研究类资助项目(ZK19-33);2022年湖南省研究生科研创新资助项目(CX20220027);智能科学学院青年骨干教师2020资助项目(4142Z6G2)

作者简介:杨云(1998—),男,云南曲靖人,硕士研究生,E-mail:yangyun17@nudt.edu.cn;

蒋涛(通信作者),男,浙江桐乡人,副教授,博士,E-mail:jiangtao@nudt.edu.cn

软体机器人现有驱动器及能源类型进行分析,其供能方式可分为:①物理能源驱动,如形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)驱动^[8-11]、介电弹性体(dielectric elastomer, DE)驱动^[12-16]、磁场驱动^[17-19];②化学能源驱动^[20-22],如过氧化氢分解驱动^[23-25];③生物混合驱动^[26-27],如心肌细胞驱动^[28-30]、骨骼肌细胞驱动^[31-33]。在此基础上,本文首先对基于不同能量来源的驱动方式进行归纳总结并阐述其基本驱动机理;然后结合现有国内外研究现状,总结所述驱动的优势与不足;最后,对未来柔性驱动发展提出思考,为未来微型软体机器人的发展提供参考。

1 物理能源驱动

物理能源包括光能、电能、磁能等,驱动器将这些形式的能源转化为供机器人行走运动的机械能。在此基础上,研究人员相继开发了四种驱动方式:基于电能的介电弹性体驱动和聚电解质水凝胶驱动、基于热能的形状记忆合金驱动和气液相变驱动、基于光能的液晶弹性体(liquid crystal elastomers, LCEs)驱动和光响应复合水凝胶驱动、基于磁场的磁致驱动。

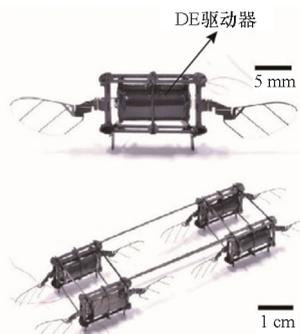
1.1 电能驱动

1.1.1 介电弹性体驱动

DE作为一种智能材料,通过软电介质的变形将外部电势提供的静电能量转换为应变能和机械功,具有响应速度快、柔顺性好、自由度和能量密度高的特点^[34]。最简单的驱动器配置类似于平行板电容器,由两个导电刚性材料充当极板,储存静电能;软弹性体充当介质,将摄入的能量大部转化为机械应变能。当连接到电源时,一个极板带正电,另一个极板带负电。相反的电荷相互吸引,通过弹性体产生净库仑引力,使其受到压缩力,发生机械形变。

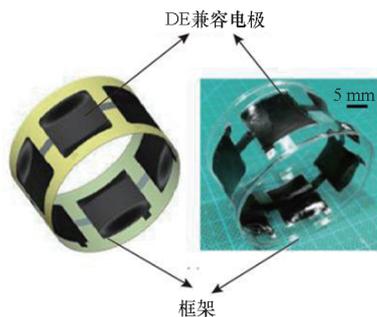
目前已有较多研究人员采用DE驱动软体机器人,最经典的是麻省理工学院Ren等^[35]的工作。他们提出一种基于新型多层膜技术和电极材料优化的低电压、高耐久、高功率密度的DE,并将其集成到空中机器人上。该机器人展现了优越的性能,当它以400 Hz频率工作时,143 mg的DE可产生0.36 N的力和1.15 mm的位移。此外其悬停电压低至500 V、驱动循环次数超过200万次,是现有亚克级飞行机器人中飞行时间最长、性能最好的机器人,如图1(a)所示。在此之前,Li^[36]等提出一种DE驱动的滚动式软体机器人,如图1(b)所示。他们将多段DE首尾相连形成

圆形结构,机器人身体具备主动变形的能力。在外加高压控制系统的控制下,机器人实现了在平地上连续稳定的滚动运动,平均速度可达36.27 mm/s、速质比约为41.22 mm/(s·g),展现出优越的运动性能。



(a) 亚克级飞行机器人^[35]

(a) Arc-class flying robot^[35]



(b) 介电弹性体驱动滚动式软体机器人^[36]

(b) Rolling soft robot driven by dielectric elastomer^[36]

图1 两种介电弹性体软体机器人

Fig. 1 Two soft robots based on dielectric elastomers

为了使软体机器人更贴近于真实生物的运动形态,研究人员从不同生物的运动机理进行机器人开发。受蠕虫启发,新加坡国立大学曹家卫等^[37]设计了一种使用软经典驱动器的无绳系软体机器人。这种机器人同样由DE制成,可变形身体、两只纸质脚构成了它的主体。通过交替扩张、收缩其可变形的身体,以及黏附、脱离它的两只纸质脚来实现运动,在实验中跑出了0.02体长/s的速度。同样来源于仿生学,哈尔滨工业大学郭亚光等^[38]受毛毛虫启发,制作了一款仿毛毛虫机器人。该机器人由一个两自由度DE驱动器和两个柔性电胶组合而成,能够完成多模式转弯、爬行和攀登等运动。

2022年,清华大学赵慧婵团队提出了一种智能材料驱动的管道检测机器人^[39]。该机器人采用高功率密度、长寿命DE致动器,使用基于智能复合微结构的高效锚固单元作为传动装置、具有可调节单元数的磁铁作为快速组装组件。利用电

缆为机器人提供动力,在亚厘米级管道内实现了水平(1.19 身长/s)和竖直运动(1.08 身长/s)。

DE 驱动机器人虽然具有响应速度快、能量密度高等突出优势,但是驱动电压高、介质易被击穿、尾部仍然需要携带电缆等不足需要进一步优化和创新。

1.1.2 聚电解质水凝胶驱动

聚电解质水凝胶是由具有带电官能团的聚合物网络和可移动的反离子组成的。当向水凝胶施加电场时,水介质中的离子与聚电解质水凝胶中的反离子同时向同一电极迁移,形成离子梯度。随后,产生渗透压导致聚电解质水凝胶不对称膨胀^[40],从而产生伸缩、弯曲等力学响应形式,为机器人提供驱动力。形变幅度大、响应时间短、材料柔软等特性使得聚电解质水凝胶非常适合于制造软体机器人。

Pfeil 等^[41]使用基于聚丙烯酰胺的离子水凝胶,制作了一种能在水下执行弯曲运动的仿生“鱼”,如图 2 所示。使外部电极与周围的水直接接触,从而驱动鳍末端产生起伏的波浪作为可能的推进方法。这其中最具优势的是利用水本身传输电荷。为解决驱动电压高的问题,Sun 等^[42]将碳纳米管(carbon nano tube, CNT)富集在聚乙烯-醋酸乙烯酯(ethylene vinyl acetate, EVA)以形成高密度导电网络,结合电学特性和形状记忆效应,提供了一种制造低压驱动聚合物致动器的方法。

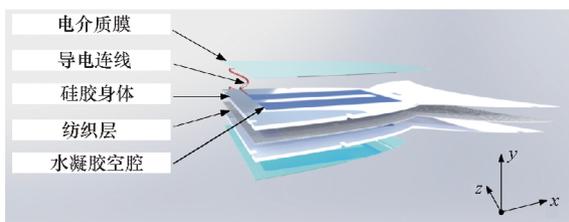


图 2 离子水凝胶软体机器人^[41]

Fig. 2 The ionized hydrogel soft robot^[41]

聚电解质水凝胶材料本身具备的柔软性在软体机器人领域具有极大的优势,但是材料本身的结构强度不足以支持其承受较大的拉伸载荷,此外其十分依赖于外界输入的电能。因此这类软体机器人大多在水环境中使用。

1.2 热能驱动

温度梯度的改变,会造成智能材料形状的改变,也会使低沸点液体发生液-气相变,并伴随有体积的变化。形状记忆合金受热时能够恢复原状、盛有易挥发液体的弹性球体受热会膨胀,由此

为机器人的运动提供了动力。

1.2.1 形状记忆合金驱动

SMA 是一种具有形状记忆效应的智能材料^[43],其驱动原理为当处于冷却或存在力载荷时,其从高温马氏体转变为低温马氏体,原始形状被破坏而发生形变;当处于加热状态时,其恢复初始形状,对外输出力和位移。

Coral 等^[44]受黑鳕鱼启发,制作了一种水下仿鱼机器人,鱼身由 3D 打印而成,驱动器由可变形结构和基于形状记忆合金丝的直线“肌肉”组成,并在静水中展开实验,在 PID 控制器的作用下,输出运动与期望运动基本吻合。与之类似,Basilio Sobrinho 等^[45]设计了一种镍钛 SMA 微型弹簧驱动旋转电机。电机结构使用聚合物材料 3D 打印而成,进行了有电驱动和无电驱动的实验测试,获得良好的扭矩/体积比。更典型的是 Park 等^[46]提出了一种新型 SMA 弹力型织物肌肉(spring-based fabric muscle, SFM),SFM 受热时收缩,在加热温度为 70 °C 时能产生 100 N 的力,收缩应变可达 50%。

此外,针对在复杂、狭窄的非结构化地形下跳跃机器人存在的着陆稳定性和运动连续性的问题,南京航空航天大学毛婷等^[47]提出了一种 SMA 材料驱动的柔性跳跃机器人,它具有轻质小型、结构简单及连续运动的优点。依托尺寸为 6 cm × 4 cm × 2.5 cm、质量为 3.8 g 的原理样机实现跳跃触发和形态恢复,实验测得最大跳跃高度和远度分别为 8.67 cm 和 18 cm,展现了优越的运动性能。

2021 年, Bena 等^[48]开发了一种基于 SMA 的弯曲微致动器,并在此基础上制作了毫克级爬行动物机器人 SAMLLBug。该机器人尺寸小(长度为 13 mm)、质量小(质量为 30 mg)、运动性能优越(平均运动速度 17 mm/s)。然而该机器人只有一个执行器,缺乏闭环转向控制能力。因此 SMA 旅行昆虫机器人(SMARTI)应运而生,如图 3 所示。SMARTI 质量为 60 mg,通过平行配置两个 SMA 致动器来独立驱动两个运动模块。这两个模块使用受控的差动转向装置来推动机器人前进和改变航向。实验中,SMARTI 最大持续速度为 46 mm/s,相当于 3.54 体长/s,转弯速度为 107 (°)/s,这种速度和机动性的结合是无与伦比的。得益于优异的特性,SMARTI 成为迄今为止开发的最轻、最小、最快的可操纵和可控制的爬行动物机器人之一。

SMA 作为一种具有形状记忆效应的智能材料,在软体机器人领域的应用不胜枚举,但随着加

载次数的增加,会出现滞后损耗和疲劳裂纹。这些缺陷限制了它的使用寿命^[49],同时也存在温度控制难度高、驱动频率低等缺陷。

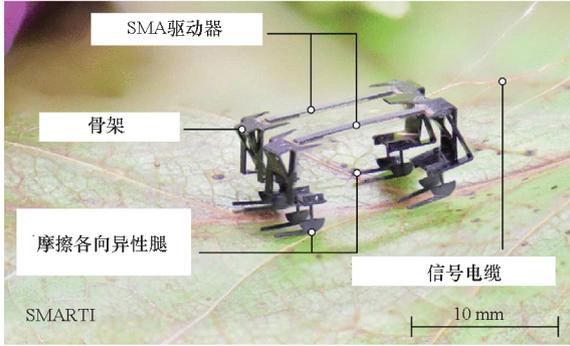


图3 SMA 旅行昆虫机器人 SMARTI^[48]

Fig.3 SMA robotic traveling insect SMARTI^[48]

1.2.2 气液相变驱动

所谓气液相变驱动就是利用挥发性物质随着温度变化而发生相变时,容腔的体积改变为机器人的运动提供动力。温度升高时,液体挥发容腔内压力增大,容腔开始膨胀;温度降低时,气体液化容腔内压力降低,容腔开始收缩。

Matsumoto 等^[50]设计了一种气液相变驱动全软机器人,如图4所示。他们选用交联型硅橡胶和天然橡胶分别制作成机器人本体和气球, NovecTM7000(沸点 34 °C)、NovecTM7100(沸点 61 °C)充当挥发性物质。布设在机器人本体四周的4个气球,与地面交替接触吸收热量而膨胀,从而推动机器人滚动。分别在气球中装填 NovecTM7000、NovecTM7100 两种挥发性液体,并在室温条件下(24 °C)开始加热,使机器人旋转一周,前者用时 290 s,后者用时 430 s。此型机器人以柔性材料为基础,利用外部热能驱动液气相变,实现了全柔性移动。

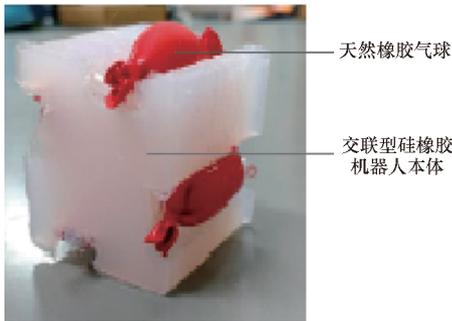


图4 气液相变驱动全软机器人^[50]

Fig.4 Gas-liquid variable driven fully soft robot^[50]

为解决传统机器人功耗和噪声大的缺点,西安交通大学张鸿健等^[51]受河鲀启发设计了由柔

性硅橡胶材料制成的气液相变驱动的柔性水下悬停机器人。该方法与 Matsumoto 团队低沸点驱动液体相似,通过改变驱动温度使液体沸腾发生液气相变从而改变机器人的体积。利用体积的变化来控制浮力,最后达到通过控制驱动温度即可对机器人的上下浮动和悬停加以控制的目的。

气液相变驱动虽然在功耗和噪声控制方面表现较好,但是气液相变时存在较长反应时间,机器人的实时操作性不好。此外,运动场景受制于温度梯度。

1.3 光能驱动

1.3.1 液晶弹性体驱动

LCEs 的物理性质介于有序结晶固体和各向同性液体之间。它能将外界给予的光能转化为热,并通过聚合物消散。LCEs 受热时向各向同性相转变,破坏了聚合物网络的各向异性,这种相变导致沿列向高达 400% 的单轴收缩;冷却后恢复到其初始形状,实现了由光能到机械能的转变^[52]。

华中科技大学王云明等^[53]报告了一种高灵敏度的光控软机器人,如图5所示,该机器人采用由 LCEs、高弹性形态稳定相变聚合物 (high elastic form - stable phase change polymer, HEPCP) 和多壁碳纳米管 (multiwalled carbon nanotubes, MWCNTs) 合成的光响应纳米复合材料 LHM (LCE/HEPCP/MWCNT), 在近红外光刺激下, LHM 软机器人通过产生可恢复的变形来执行包括直行、扭转和弯曲在内的任务。此外, Shahsavan 等^[54]使用极软、光敏、低致动温度的液晶材料扩展了液晶材料的灵活性,模仿海底无脊椎动物的运动模式,为开发在充满液体的环境中具有移动能力的无绳索软机器人提供了一种方法。



图5 高灵敏度光控软机器人^[53]

Fig.5 High sensitivity light controlled soft robot^[53]

LCEs 具有优异的力学性能、良好的柔韧性、各向异性以及可逆的形状响应等优点。但是,由于 LCEs 的热致性特征,很难实现多刺激响应和远程控制。随着新型 LCE 材料、先进微/纳米制造技术、新颖的动作方案和复杂的操作策略的进步,基于 LCE 的执行器在不久的将来可能实现快速发展并找到更多的前沿应用^[55]。

1.3.2 光响应复合水凝胶驱动

光响应型水凝胶在非接触式光的照射下,其体积会发生变化,表现为对外做功。常见的水凝胶的光响应性通过以下两种策略实现:①特定基序的光致异构化以改变凝胶基质的性质,如荷电状态、亲水性或交联度;②水凝胶的光热效应和温度介导的体积转变的级联耦合。

Wang 等^[56]结合光刻聚合和热聚合,在无响应的凝胶中嵌入空间分布的热响应性和光响应性凝胶来制备复合水凝胶。该复合水凝胶在加热或近红外光照射下做出弯曲、折叠和扭曲变形三个动作,从而导致凝胶体积的收缩以造成内应力的积累。由于光在空间和时间上存在极高的分辨率,该型复合水凝胶实现了局部驱动和分步变形。通过特殊结构将弯曲、折叠和扭转变形整合到同一复合水凝胶中,即可通过光编程变形获得更复杂的构型。

基于相似的思路,Yin 等^[57]制备了一种对可见光快速响应的高性能复合水凝胶。在可见光照射下,当碳纳米管的质量浓度为 3 mg/mL 时,条状水凝胶的最大弯曲角速度可达 65.72 (°)/s。基于此,制作了一种可以模拟水母游泳的微型软体机器人 JMSR,如图 6 所示。该机器人不但能够在水中模拟水母游动,还能行走、跳跃、搬运微小物体。这些复杂动作通过改变光源的频率和光强来实现。

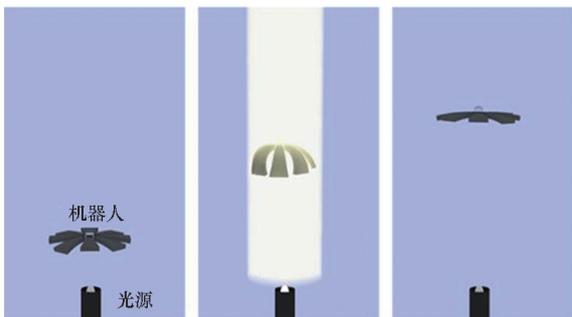


图 6 JMSR 仿水母机器人^[57]

Fig. 6 Robot JMSR modelled on the jellyfish^[57]

光响应复合水凝胶本身就是柔性软体材料,由此制作的机器人柔顺性与生俱来,但是这种水

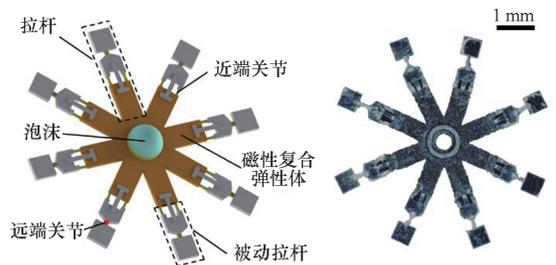
凝胶材料组成复杂,刺激响应速度较慢、运动控制难度大。

1.4 磁场能驱动

经典的磁场驱动就是利用变换的磁场对磁性结构进行无接触驱动,是研究较多、效果较好的一类驱动技术。旋转磁场被用来产生旋转运动,而振荡或波动运动是由交变磁场驱动。

Kim 等^[58]提出一种基于旋转磁场内柔性磁致动器的动态驱动的鱼形磁性微型机器人,由主体、两个胸鳍和一个尾鳍组成。尾鳍的主要功能是为游泳提供动力,而胸鳍根据尾鳍的摇摆和俯仰运动提供转向功能。这种机器人利用基于磁铁的致动器和外加磁场工作,采用无线控制策略,并且不需要电池供电。同样源于仿生学,北京化工大学刘赵龙^[59]模仿蚕和尺蠖,设计了电磁致动软体机器人,使用内置镍氢电池供电,可进行远距离操控,实现了“无尾化”。而广州大学祝韬^[60]则以心血管疾病微创手术需求为切入点,提出一种使用三轴亥姆霍兹线圈作为磁驱动模块的内螺旋血管机器人,为解决病患治疗安全性提供技术支持。

水母总能给予科研人员无穷的灵感, Ren 等^[61]提出一种无系留毫米级软体机器人,如图 7 所示。该机器人由磁性复合弹性体和八根拉杆组成。在远程振荡磁场作用下拉杆弯曲变形,促使其身体周围流体产生不同的受控流动,进而推动机器人实现 5 种不同游泳模式。最突出之处在于通过操纵机器人周围流体的流动来实现各种功能。而利用流体流动实现多种功能的能力与磁场无关,只依赖于机器人主体和流体之间的相互作用。



(a) 机器人原理设计图 (b) 组装完毕的机器人
(a) Principle design scheme (b) The assembled robot
of the robot robot

图 7 无系留软体机器人^[61]

Fig. 7 The untethered soft robot^[61]

以磁场为驱动源,可以通过改变磁场的方向、强度、频率等对机器人实施粗略的控制,但对于精

确的轨迹控制还缺乏相关的研究。

2 化学能源驱动

化学能源驱动,就是利用化学反应过程中释放的能量或释放的气体来产生驱动。这种驱动克服了能量需要外界供给的缺点,扩大了机器人的运动范围。

过氧化氢是一种高能量密度的化学物质,分解过程中产生大量的氧气。一方面可以利用氧气直接驱动机器人运动;另一方面产生的氧气可以改变机器人的内部压强,从而改变体积或重心,使机器人浮动或者滚动。

最经典的设计当属 Wehner^[62]团队的工作,他们以过氧化氢为燃料,研发了第一款全软体气动机器人,完全突破了刚性控制系统与电源的限制,如图8所示。该机器人使用嵌入式3D打印技术在弹性体机器人体内制造气动网络致动器、燃料箱和催化反应室。使用微流控逻辑控制过氧化氢溶液的流动,当过氧化氢溶液流至反应室时,在铂催化剂的作用下分解得到氧气。通过利用氧气的存储与排放,带动机器人的爪弯曲变形,最终达到驱动机器人运动的目的。这其中3D打印技术的应用和集成设计思想的引入,使得章鱼机器人能进行快速可编程组装。在此之后的2019年,哈尔滨工业大学李隆球等^[63]设计了一种化学反应驱动的仿生鱼,通过使用微控制器对5级反应池内过氧化氢分解反应的控制,产生气泡推动仿生鱼在水中柔性前进。更具优势的是,它的主体部分采用水凝胶材料3D打印而成,能快速规模化生产,兼具隐身性。

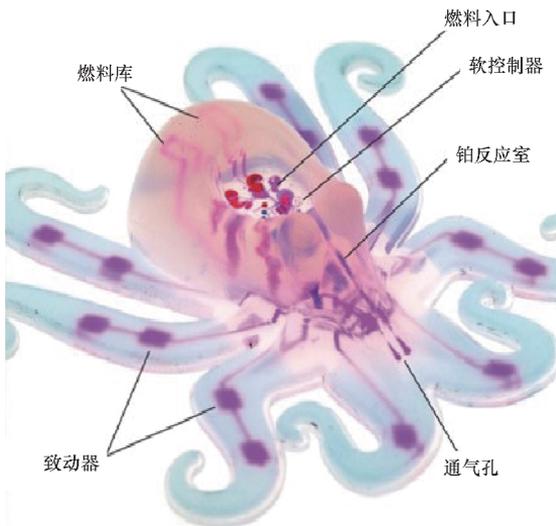


图8 全软体气动机器人^[62]

Fig. 8 Fully soft pneumatic robot^[62]

与之不同的是北京化工大学何雪涛等^[64]设计了一种化学反应自驱动滚动机器人,该机器人由6个装有二氧化锰催化剂的腔室组成,相邻腔室之间使用单向阀连通,选择3个不相邻的腔室安装重力阀。向其中注入过氧化氢后,发生分解反应,导致气压升高,进而推动过氧化氢单向流动,使重心偏移而发生滚动。

在微米尺度下,同样有较好的发展,哈尔滨工业大学贺强^[65]教授团队研制出一种自驱动双面聚电解质多层空心胶囊,该胶囊可作为马达提供动力。温度为22℃的条件下,利用铂纳米粒子(platinum nanoparticles, PtNPs)催化过氧化氢分解产生的氧气来提供动力,运动速度可达70 μm/s,每秒运动的距离超过自身体长的6倍。

基于化学能源的驱动在一定程度上改进了传统电机的不足,微小空间内极具优势,但由于化学物质本身的性质限制,这类机器人的环境适应性有待提高。

3 生物混合驱动

在自然界中,生物体表现出灵活的运动性能,是各种仿生机器的灵感来源。随着技术的进步,使用具有活性的生物肌肉作为驱动器,逐渐走进我们的视野。它的驱动原理是利用肌肉组织受刺激条件下的收缩来驱动。

2018年,Morimoto等^[31]设计了一种由一对拮抗性骨骼肌组织驱动的生物机器人,如图9所示。该机器人在50 Hz电刺激的作用下,通过肌肉的选择性收缩使拮抗组织的张力平衡,以防止自发收缩,由此产生约90°旋转,并可实现抓取、放置操作。基于此,Takeuchi^[66]团队在2020年开发出一种能够在空气中运动的生物机器人,突破了培养基的限制,如图10所示。该机器人将骨骼肌组织和柔性基底材料包裹在胶原结构中,以保持较高的细胞活性和收缩性。在电刺激的作用下,能

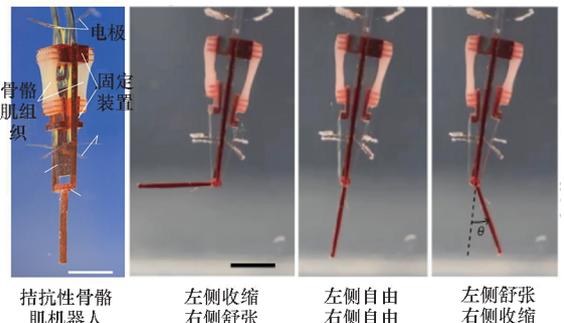


图9 拮抗性骨骼肌驱动生物机器人^[31]

Fig. 9 The antagonistic skeletal muscle driven biorobot^[31]

够在空气中实现运动,采用培养液灌流的情况下,能够连续运动 1 h。

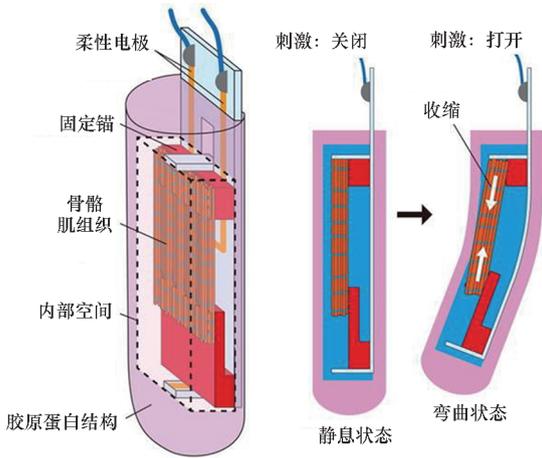


图 10 能在空气中运动的生物混合机器人^[66]

Fig. 10 Airborne locomotor bio-hybrid robot^[66]

同样在 2020 年,在生物混合机器人领域深耕多年的东南大学赵远锦^[28]教授团队成功制作了仿毛毛虫机器人。在碳纳米管水凝胶上二次聚合形成结构颜色水凝胶。当毛毛虫机器人肌肉收缩时,能够带动水凝胶结构颜色发生可逆的变化,由此可以动态地即时反应机器人的运动状态。并且,在弱磁场作用下,机器人可实现自主性定向运动,很好地模拟毛毛虫爬行行为。

2022 年初,Parker^[67]教授团队使用大鼠原代心肌细胞制作了一条带有自主起搏点的自主游动“鱼”。这条“鱼”使用水凝胶材料制成躯干和鳍,在尾部设置特殊结构容纳心肌细胞。该“鱼”结

构简单,一共 5 层结构,两边由对称的肌肉细胞所组成,质量只有 25 mg,总共使用 73 000 个活体心肌细胞,在 108 d 的生命周期中,两层肌肉和自主起搏节点一起产生连续、自发和协调的来回鳍运动。

作为最接近真实生物体的一类机器人,生物混合机器人具有极高的能量利用率和生物相容性,在医疗领域的前途不可限量,但是这类机器人只能生活在特定的培养液中,离真实的生物体还有较大的差距,此外还可能存在伦理问题。

4 讨论

为使研究人员更明了地了解微型软体机器人的特点,从能量来源、功率密度、响应速度、能量效率等方面对上述部分驱动方式作了简要的归纳总结,如表 1 所示。介电弹性体驱动在响应速度、能量效率方面具有突出优势,但在使用中,动辄需要几千伏的驱动电压,需要大量的能源输入的同时,高电压的存在会导致介质容易被击穿而造成损坏;形状记忆合金能量密度相对较高,但响应速度较慢,难以适应一些需要快速响应的场合。化学能源驱动有效解决了传统机器人噪声大的问题,同时过氧化氢分解产物为水和氧气,清洁绿色环保,因此不失为有效的驱动手段。作为生物体能源的葡萄糖具有最高的能量密度,与此同时生物肌肉对能量的利用效率也最高。综合而言,生物混合驱动是最优的驱动方式。

表 1 部分驱动方式性能对比

Tab. 1 Performance comparison of some driving modes

驱动方式	能量来源	响应速度	能量效率	主要优点	主要缺点
介电弹性体驱动	高压电源	最快	高	功率密度高 ^[35] , 响应速度快 ^[36]	需要高电压,电路系统占用较大空间
形状记忆合金驱动	电阻热	较慢	低	结构简单、功率密度高, 易于微型化	响应速度慢,多次使用后存在功能疲劳 ^[68]
液晶弹性体驱动	光能	慢	较高	变形连续可逆、柔顺接触, 可承载大变形 ^[69]	光致变形调控精确度低
过氧化氢分解驱动 ^[62]	化学能	可调节	较高	产物清洁、绿色环保, 瞬时功率较大	化学反应进程无法控制,需及时补充燃料
生物混合驱动	葡萄糖	快	最高	最接近真实生物体, 能量效率最高	体外活性肌肉培养与驱动控制难度大

微型软体机器人在管道检修、灾后探测、生物医学等领域具有较大的潜力,但是受驱动能源与技术的限制,在运动能力、控制精度、响应速度等方面还有很大的提升空间。物理能源驱动高度依赖外界能量的输入,且对外界物理势场具有较高要求,间接增加了成本,并限制了其应用范围;化学能源驱动依赖释放气体来工作,控制精度较差;生物混合驱动以肌肉组织作为驱动,单元寿命短、组织培养困难。对此提出以下研究思路:

1) 创新机器人的结构设计思想。将介电弹性体、磁流变液等智能材料与橡胶等软材料相结合,使设计的机器人刚柔并济、刚度可调,既保证了软体机器人柔顺的特性,在特殊条件下还可以通过提高智能材料的刚度增强其负载能力。

2) 采用多种驱动方式。在机器人完成任务过程中,根据任务环境自主选择合适的驱动方式,以提高机器人执行任务中的效率。通过深入研究猎豹、野兔等野生动物的运动机制和反应机制,为高速运动软体机器人的诞生提供依据。

3) 为克服上述驱动能源存在的缺点,设计出一种能够同时利用多种能源工作的新型驱动器,提高冗余自由度。当前的机器人大多只是使用单一能源工作,可以考虑使用多种能源以适应机器人多任务、多载荷的特点。此外,还可研究生物体从物质到能量的转化机制,模拟生物体决策分配体系,将葡萄糖等高能密度物质开发为软体机器人的驱动能源。

4) 突破仿生范畴,以真实生物肌肉驱动为目标,结合生物技术培养人工肌肉组织或直接从动物体解剖肌肉组织用于驱动。同时还可以结合生物3D打印技术,直接构建出具有真实生物组织特征的模型,使之具有人造“血管”、人造“心脏”,实现养料的自主供应与循环,同时废物通过运送机制及时排除。这其中需要突破细胞长时间体外培养、刺激信号传递与工作机制等关键技术,最终创造出为人类社会服务的生物混合机器人。

5 总结

从物理能源驱动、化学能源驱动、生物混合驱动三个大方向入手,综述了基于上述能源的典型驱动方式,并总结了各自的优缺点。作为仿生机器人的重要分支,得益于机械、电子、控制、材料等多个学科的交叉融合,在近年来微型软体机器人的研究取得很大的进展。

未来在材料、能源、机械等领域的深度融合之后,微型软体机器人高柔性、大变形、抗疲劳的特

点会更加突出。而引入生物技术后,具有生命力、可自主决策运动、能自我修复的微型软体机器人将问世,科幻电影里的生物机器人可能会成为现实,从而掀起一场新的机器人革命^[70]。

参考文献(References)

- [1] JI W, WANG L H. Industrial robotic machining: a review[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103(1): 1239–1255.
- [2] LEE I. Service robots: a systematic literature review[J]. *Electronics*, 2021, 10(21): 2658.
- [3] LI S, FENG C Y, NIU Y C, et al. A fire reconnaissance robot based on SLAM position, thermal imaging technologies, and AR display[J]. *Sensors*, 2019, 19(22): 5036.
- [4] 曹玉君, 尚建忠, 梁科山, 等. 软体机器人研究现状综述[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(3): 25–33.
CAO Y J, SHANG J Z, LIANG K S, et al. Review of soft-bodied robots[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(3): 25–33. (in Chinese)
- [5] CIANCHETTI M, LASCHI C, MENCIASSI A, et al. Biomedical applications of soft robotics[J]. *Nature Reviews Materials*, 2018, 3(6): 143–153.
- [6] 王宇. 软体机器人研究现状及应用前景[J]. *中国科技信息*, 2022(10): 62–64.
WANG Y. Research status and application prospect of soft robot [J]. *China Science and Technology Information*, 2022(10): 62–64. (in Chinese)
- [7] 李明鑫, 宁萌, 陈海卫. 一种新型软体驱动器的设计与研究[J]. *机械科学与技术*, 2021, 40(1): 33–39.
LI M X, NING M, CHEN H W. Design and research of novel soft actuator [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2021, 40(1): 33–39. (in Chinese)
- [8] MOTZKI P, GORGES T, KAPPEL M, et al. High-speed and high-efficiency shape memory alloy actuation [J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(7): 075047.
- [9] DANILEVICH A G, L'VOV V A. Elastically driven metamagnetic-like phase transformations of shape memory alloys[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(10): 105001.
- [10] KIM M S, LEE H T, AHN S H. Laser controlled 65 micrometer long microrobot made of Ni-Ti shape memory alloy[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(12): 1900583.
- [11] MC CAFFREY C, UMEDACHI T, JIANG W W, et al. Continuum robotic caterpillar with wirelessly powered shape memory alloy actuators[J]. *Soft Robotics*, 2020, 7(6): 700–710.
- [12] HAJIESMAILI E, CLARKE D R. Dielectric elastomer actuators[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129(15): 151102.
- [13] TANG C, MA W T, LI B, et al. Cephalopod-inspired swimming robot using dielectric elastomer synthetic jet actuator [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2020, 22(4): 1901130.
- [14] SUN W J, LIU F, MA Z Q, et al. Soft mobile robots driven by foldable dielectric elastomer actuators [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(8): 084901.

- [15] YANG T, XIAO Y H, ZHANG Z, et al. A soft artificial muscle driven robot with reinforcement learning[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 14518.
- [16] CHRISTIANSON C, GOLDBERG N N, DEHEYN D D, et al. Translucent soft robots driven by frameless fluid electrode dielectric elastomer actuators[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(17): eaat1893.
- [17] GAO Y W, WEI F N, CHAO Y, et al. Bioinspired soft microrobots actuated by magnetic field [J]. *Biomedical Microdevices*, 2021, 23(4): 52.
- [18] HUANG C Y, LAI Z Y, ZHANG L, et al. A magnetically controlled soft miniature robotic fish with a flexible skeleton inspired by zebrafish [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2021, 16(6): 10.1088/1748-3190/ac23a9.
- [19] XU C Y, YANG Z L, LUM G Z. Small-scale magnetic actuators with optimal six degrees-of-freedom[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(23): 2100170.
- [20] HESS H, ROSS J L. Non-equilibrium assembly of microtubules; from molecules to autonomous chemical robots[J]. *Chemical Society Reviews*, 2017, 46(18): 5570-5587.
- [21] LASKAR A, SHKLYAEV O E, BALAZS A C. Self-morphing, chemically driven gears and machines[J]. *Matter*, 2021, 4(2): 600-617.
- [22] CHEN S E, CAO Y T, SARPARAST M, et al. Soft crawling robots: design, actuation, and locomotion [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(2): 1900837.
- [23] KIM K R, JEONG S H, KIM P, et al. Design of robot hand with pneumatic dual-mode actuation mechanism powered by chemical gas generation method [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(4): 4193-4200.
- [24] YANG Z, GU C Y, CHEN T, et al. Kink and delta self-actuating platinum micro-robot [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2018, 17(3): 603-606.
- [25] WEHNER M, TOLLEY M T, MENGÜÇ Y, et al. Pneumatic energy sources for autonomous and wearable soft robotics[J]. *Soft Robotics*, 2014, 1(4): 263-274.
- [26] SUN L Y, YU Y R, CHEN Z Y, et al. Biohybrid robotics with living cell actuation [J]. *Chemical Society Reviews*, 2020, 49(12): 4043-4069.
- [27] ANDO N, KANZAKI R. Insect-machine hybrid robot [J]. *Current Opinion in Insect Science*, 2020, 42: 61-69.
- [28] SUN L Y, CHEN Z Y, BIAN F K, et al. Bioinspired soft robotic caterpillar with cardiomyocyte drivers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(6): 1907820.
- [29] WANG J, SOTO F, MA P, et al. Acoustic fabrication of living cardiomyocyte-based hybrid biorobots[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(7): 10219-10230.
- [30] HOLLEY M T, NAGARAJAN N, DANIELSON C, et al. Cardiac muscle-cell based actuator and self-stabilizing biorobot—PART 1 [J]. *Journal of Visualized Experiments: JoVE*, 2017(125): 55642.
- [31] MORIMOTO Y, ONOE H, TAKEUCHI S. Biohybrid robot powered by an antagonistic pair of skeletal muscle tissues[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(18): eaat4440.
- [32] GUI X M, MESTRE R, PATIÑO T, et al. Biohybrid soft robots with self-stimulating skeletons[J]. *Science Robotics*, 2021, 6(53): eabe7577.
- [33] LI Z W, SEO Y, AYDIN O, et al. Biohybrid valveless pump-robot powered by engineered skeletal muscle[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(5): 1543-1548.
- [34] XING Z G, ZHANG J M, MCCOUL D, et al. A super-lightweight and soft manipulator driven by dielectric elastomers[J]. *Soft Robotics*, 2020, 7(4): 512-520.
- [35] REN Z J, KIM S, JI X, et al. A high-lift micro-aerial-robot powered by low-voltage and long-endurance dielectric elastomer actuators[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(7): 2106757.
- [36] LI W B, ZHANG W M, ZOU H X, et al. A fast rolling soft robot driven by dielectric elastomer [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(4): 1630-1640.
- [37] CAO J W, QIN L, LIU J, et al. Untethered soft robot capable of stable locomotion using soft electrostatic actuators[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2018, 21: 9-16.
- [38] GUO Y G, GUO J L, LIU L W. Bioinspired multimodal soft robot driven by a single dielectric elastomer actuator and two flexible electroadhesive feet[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2022, 53: 101720.
- [39] TANG C, DU B Y, JIANG S W, et al. A pipeline inspection robot for navigating tubular environments in the sub-centimeter scale[J]. *Science Robotics*, 2022, 7(66): eabm8597.
- [40] LEE Y, SONG W J, SUN J Y. Hydrogel soft robotics[J]. *Materials Today Physics*, 2020, 15: 100258.
- [41] PFEIL S, MIETING A, GRÜN R, et al. Underwater bending actuator based on integrated anisotropic textile materials and a conductive hydrogel electrode [J]. *Actuators*, 2021, 10(10): 270.
- [42] SUN W J, GUAN Y, WANG Y Y, et al. Low-voltage actuator with bilayer structure for various biomimetic locomotions[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(36): 43449-43457.
- [43] ÖZKUL İ, KURGUN M A, KALAY E, et al. Shape memory alloys phenomena: classification of the shape memory alloys production techniques and application fields [J]. *The European Physical Journal Plus*, 2019, 134(12): 585.
- [44] CORAL W, ROSSI C, CURET O M, et al. Design and assessment of a flexible fish robot actuated by shape memory alloys[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2018, 13(5): 056009.
- [45] BASILIO SOBRINHO J M, CUNHA M F, EMILIAVACA A, et al. A compact rotary motor actuated by shape memory alloy mini springs[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2020, 31(15): 1808-1820.
- [46] PARK S J, KIM U, PARK C H. A novel fabric muscle based on shape memory alloy springs [J]. *Soft Robotics*, 2020, 7(3): 321-331.
- [47] 毛婷, 彭瀚旻, 查泽琳, 等. 形状记忆合金驱动连续跳跃柔性机器人[J]. *振动. 测试与诊断*, 2021, 41(3): 447-452, 617.
- MAO T, PENG H M, ZHA Z L, et al. Continuous jumping soft robot driven by shape memory alloy [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(3): 447-452, 617. (in Chinese)
- [48] BENA R M, NGUYEN X T, CALDERÓN A A, et al. SMARTI: a 60-mg steerable robot driven by high-frequency shape-memory alloy actuation [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(4): 8173-8180.
- [49] 陈一哲, 杨雨卓, 彭文鹏, 等. 形状记忆合金的应用及其特性研究进展 [J]. *功能材料*, 2022, 53(5):

- 5026 – 5038.
CHEN Y Z, YANG Y Z, PENG W P, et al. Research progress on the application and properties of shape memory alloys[J]. *Journal of Functional Materials*, 2022, 53(5): 5026 – 5038. (in Chinese)
- [50] NISHIKAWA Y, MATSUMOTO M. A design of fully soft robot actuated by gas-liquid phase change[J]. *Advanced Robotics*, 2019, 33(12): 567 – 575.
- [51] 张鸿健, 韩捷, 蒋维涛, 等. 柔性水下悬停机器人的液气相变驱动及制造[J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(2): 10 – 17.
ZHANG H J, HAN J, JIANG W T, et al. Liquid-gas phase change driving and manufacturing of flexible underwater hovering robot[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(2): 10 – 17. (in Chinese)
- [52] DA CUNHA M P, DEBIJE M G, SCHENNING A P H J. Bioinspired light-driven soft robots based on liquid crystal polymers[J]. *Chemical Society Reviews*, 2020, 49(18): 6568 – 6578.
- [53] YU Z H, WANG Y M, ZHENG J Q, et al. Fast-response bioinspired near-infrared light-driven soft robot based on two-stage deformation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(14): 16649 – 16657.
- [54] SHAHSAVAN H, AGHAKHANI A, ZENG H, et al. Bioinspired underwater locomotion of light-driven liquid crystal gels[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(10): 5125 – 5133.
- [55] SUN D D, ZHANG J Z, LI H P, et al. Toward application of liquid crystalline elastomer for smart robotics; state of the art and challenges[J]. *Polymers*, 2021, 13(11): 1889.
- [56] WANG Z J, LI C Y, ZHAO X Y, et al. Thermo-and photo-responsive composite hydrogels with programmed deformations[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2019, 7(10): 1674 – 1678.
- [57] YIN C, WEI F N, FU S H, et al. Visible light-driven jellyfish-like miniature swimming soft robot[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(39): 47147 – 47154.
- [58] KIM S H, SHIN K, HASHI S, et al. Magnetic fish-robot based on multi-motion control of a flexible magnetic actuator[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2012, 7(3): 036007.
- [59] 刘赵龙. 电磁致动软体机器人及其致动机理的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
LIU Z L. The research on soft robots actuated by electromagnetic force and its actuating mechanism [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015. (in Chinese)
- [60] 祝韬. 基于外磁场驱动的螺旋血管机器人研究[D]. 广州: 广州大学, 2021.
ZHU T. Research on spiral vascular robot driven by external magnetic field [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2021. (in Chinese)
- [61] REN Z Y, HU W Q, DONG X G, et al. Multi-functional soft-bodied jellyfish-like swimming[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 2703.
- [62] 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 – 455.
- [63] 李隆球, 周德开, 汪慧铭, 等. 一种基于化学反应驱动的仿生鱼: CN109263843B[P]. 2019 – 09 – 24.
LI L Q, ZHOU D K, WANG H M, et al. A bionic fish driven by chemical reactions: CN109263843B[P]. 2019 – 09 – 24. (in Chinese)
- [64] 何雪涛, 刘由之, 焦志伟, 等. 化学反应自驱动滚动机器人设计与实验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(1): 410 – 417.
HE X T, LIU Y Z, JIAO Z W, et al. Design of chemical reaction self-driven rolling robot [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(1): 410 – 417. (in Chinese)
- [65] WU Z G, WU Y J, HE W P, et al. Self-propelled polymer-based multilayer nanorockets for transportation and drug release [J]. *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*, 2013, 52(27): 7000 – 7003.
- [66] MORIMOTO Y, ONOE H, TAKEUCHI S. Biohybrid robot with skeletal muscle tissue covered with a collagen structure for moving in air [J]. *APL Bioengineering*, 2020, 4(2): 026101.
- [67] LEE K Y, PARK S J, MATTHEWS D G, et al. An autonomously swimming biohybrid fish designed with human cardiac biophysics [J]. *Science*, 2022, 375(6581): 639 – 647.
- [68] HAGHGOUYAN B, YOUNG B, PICAK S, et al. A unified description of mechanical and actuation fatigue crack growth in shape memory alloys [J]. *Acta Materialia*, 2021, 217: 117155.
- [69] LI S, BAI H D, LIU Z, et al. Digital light processing of liquid crystal elastomers for self-sensing artificial muscles[J]. *Science Advances*, 2021, 7(30): eabg3677.
- [70] 刘璟, 张益峰, 王子又. 软体机器人研究发展综述[J]. *科技创新导报*, 2017, 14(10): 118, 134.
LIU J, ZHANG Y F, WANG Z Y. A review of soft robot's research and development [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2017, 14(10): 118, 134. (in Chinese)