

文章编号: 1007-7294(2022)02-0301-13

# 基于智能材料的深海执行器及海洋仿生机器人研究综述

郭 健<sup>1,2</sup>, 潘彬彬<sup>1,2</sup>, 崔维成<sup>1,2,3</sup>, 胡胜兵<sup>2</sup>, 韩挚阳<sup>2</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 深渊科学技术研究中心 (上海深渊科学技术研究中心), 上海 201306; 3. 西湖大学 工学院, 杭州 310024)

**摘要:**在“关心海洋、认识海洋、经略海洋”的战略背景下,智慧海洋工程开始向深海推进。新概念海洋装备逐渐向全海深、多学科、精细化、智能化、小型化和低能耗方向发展。智能材料是一种集感知、驱动和控制为一体的新型功能材料,以此为基础的深海执行器和海洋仿生机器人是近年来海洋科学技术的前沿之一。目前,基于智能材料的深海执行器和海洋仿生机器人的深海工程化应用尚处于起步阶段,仍有很多技术难题需要攻克。本文对现阶段国际上常见的智能驱动材料的结构属性和驱动机理进行了介绍,综述了基于智能材料的深海执行器和海洋仿生机器人的国内外研究现状,指出了实际深海工程化应用所需要解决的关键技术挑战,并对未来的发展趋势进行了概述。

**关键词:**智慧海洋;智能驱动材料;深海执行器;海洋仿生机器人

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2022.02.014

## Review of deep-sea actuators and marine bionic robots based on intelligent materials

GUO Jian<sup>1,2</sup>, PAN Bin-bin<sup>1,2</sup>, CUI Wei-cheng<sup>1,2,3</sup>, HU Sheng-bing<sup>2</sup>, HAN Zhi-yang<sup>2</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Hadal Science and Technology Research Center (Shanghai Engineering Research Center of Hadal Science and Technology), Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. School of Engineering, Westlake University, Hangzhou 310024, China)

**Abstract:** Under the national strategy of ‘caring for the ocean, understanding the ocean, and managing the ocean’, the smart ocean engineering has stepped into the deep sea. The new concept marine equipment is gradually developing in the direction of full ocean depth, multidisciplinary, refined, intelligent, miniaturized, and low energy consumption. The intelligent material is a new type of functional material that integrates sensor, actuator and control together. Deep-sea actuators and marine bionic robots based on intelligent materials are one of the frontiers of international science and technology in recent years. At present, the engineering application of deep-sea actuators and marine bionic robots based on intelligent materials in the deep-sea field has just started, and many technical problems still need to be solved. By introducing the structural character

收稿日期: 2020-08-21

基金项目: 国防科技创新特区某计划专项(18-163-12-ZT-004-058-04); 国家重点研发计划重点专项(2018YFC0308004; 2018YFC0310601); 国家自然科学基金面上项目(51879157)

作者简介: 郭 健(1990-),男,博士,工程师; 潘彬彬(1982-),男,博士,副研究员,通讯作者, E-mail: bbpan@shou.edu.cn; 崔维成(1963-),男,博士,教授; 胡胜兵(1993-),男,学士,助理工程师; 韩挚阳(1995-),男,学士,助理工程师。

and actuating mechanism of the current popular intelligent actuating materials at first, the current research status of deep-sea actuators and marine bionic robots based on intelligent materials is reviewed in this article. The key technical challenges that need to be solved in actual deep-sea engineering applications and the future development trends are also pointed out.

**Key words:** smart ocean; intelligent actuating material; deep-sea actuators; marine bionic robots

## 0 引 言

21世纪是海洋的时代,同时海洋装备呈现高质量发展趋势。海洋中90%的水深超过1000 m,但遗憾的是,人类对水深在1000 m以上的海洋知之甚少。深海是海洋中充满神秘和未知的区域,是全球油气、矿物以及生物资源的最主要集结区<sup>[1]</sup>,是“智慧海洋”的核心区。近年来,随着人工智能、海量数据集合、网络云等新兴技术在海洋领域的应用,智慧海洋成为了实施海洋强国战略的又一角逐“高地”<sup>[2]</sup>。智慧海洋工程走向深海,在现代化的海洋装备和海洋活动中深度融合先进的信息技术和智能技术,不断推进深海海域的透明化,这对了解海洋、认识海洋和服务海洋具有重要意义。

智能材料是20世纪90年代受生物启发或模仿生物特性而开发出的一类集感知、驱动及控制为一体的类似生物智能特征的新型功能材料,是21世纪最具发展潜力的涉及多学科的前沿交叉研究领域之一,在航天、国防、海工、机电、生物医学与工程等领域具有极大的应用潜力<sup>[3-4]</sup>。在海洋智能化时代,发展小型智能化水下无人设备是实现未来海洋观测的重要机遇和挑战<sup>[5]</sup>。面对人类不可预知的极端深海环境,开发和应用可以挑战各种复杂海底环境的智能水下机器人将至关重要。由于受传统的水下机器人响应速度、驱动方式和体积等因素的限制,导致其机动性、可控制性及环境适应性受到极大的制约。“物竞天择”的自然生存法则使海洋生物的身体结构和运动模式得到了最优化的选择,将智能驱动材料深度融合到海洋仿生机器人的研制中是当前水下机器人领域的技术前沿之一<sup>[6-7]</sup>。

本文综述了基于智能材料的深海执行器和海洋仿生机器人的国内外发展概况,分析比较了它们的驱动机理、结构设计特点以及优劣势等,并对未来在海洋领域应用的主要技术挑战和发展趋势作出了展望。

## 1 智能驱动材料

智能材料是一类可以对外界差异刺激做出不同反应和处理的新型智能化功能材料系统。智能驱动材料兼具感知、执行和信息控制等功能,可以实现“无机械关节的原位驱动”模式,是一种发展潜力极大的独特驱动方式<sup>[6]</sup>。常见的智能驱动材料主要包含形状记忆合金/聚合物(shape memory alloy/polymer, SMA/SMP)、压电陶瓷(piezoelectric transducer, PZT)、电活性聚合物(electroactive polymers, EAP)等<sup>[8]</sup>,其中典型的电活性聚合物又可细分为离子聚合物金属复合材料(ionic polymer-metal composites, IPMC)和介电弹性体(dielectric elastomer, DE)<sup>[9]</sup>。

智能材料的驱动特点和性能会因各材料的驱动机理不同而有所区别。SMA用于水下驱动系统主要是利用形状记忆效应(SME)的性质,且以单程记忆效应为主。目前,Ni-Ti系SMA的实践应用最为普遍<sup>[10]</sup>,其最大收缩应变可达8%,具有优异的超弹性、形状记忆效应、生物相容性、高阻尼性以及耐磨性等<sup>[11]</sup>;PZT具有高输出能力、高功率密度以及尺寸紧凑等优点,在传感器和制动器领域被广泛应用<sup>[12]</sup>;IPMC具有体积小、重量轻、响应快的优势,但输出功率较小<sup>[13]</sup>;DE具有弹性模量低、变形大、工作温度宽、机电耦合效率高以及频率范围广等独特的优点<sup>[14]</sup>,但驱动电压较高,在海水环境中的绝缘传输存在较大的困难,且面临超限击穿失效的风险,常见智能材料的性能参数如表1所示。

表1 典型智能驱动材料的性能参数<sup>[6]</sup>Tab.1 Performance parameters of typical smart drive materials<sup>[6]</sup>

	SMA	PZT	IPMC	DE
应变/%	<8(中等)	0.1~0.3(小)	2.3~2.6	300
应力/MPa	700(高)	30~40	0.2~0.3	0.2
响应速度	1 s~1 min	$\mu$ s~s	ms~s	ms
密度/(g.cc <sup>-1</sup> )	5~6	6~8	2.5~2.9	1.5
驱动电压/V	>2(低)	50~800(高)	1~5(低)	144 V/ $\mu$ m(高)
驱动频率/Hz	~1(慢)	~10 000(很快)	<100(快)	快
功耗能级	W	W	mW	W
断裂韧性	弹性	脆性	柔性	柔性

## 2 深海执行器

随着深海探索的发展,越来越多的海洋装备被投放在深海区域,其搭载的很多传感器和采样设备都需要深海执行器将电能转化为机械能,并完成触发或执行指定动作,而传统的执行器存在固有缺陷,迫切需要新型执行器来代替。

### 2.1 传统深海执行器

经过多年的发展,深海探索的装备主要有载人潜水器、无人潜水器、深海着陆器、水下滑翔机、剖面浮标和深拖等<sup>[15-16]</sup>,如图1所示。这些传统深海装备一般以电磁体、电机或液压等<sup>[17]</sup>作为驱动执行器,存在造价高、系统复杂、重量重、体积大、长周期布放可靠性低、噪声和电磁干扰及生物兼容性差等固有的局限性。

图1 传统海洋探索装备<sup>[15-16]</sup>Fig.1 Traditional ocean exploration equipment<sup>[15-16]</sup>

### 2.2 智能驱动器

为了突破传统深海执行器的缺陷,人类开始向自然学习,将可以感知外部刺激的智能材料引入海洋领域。智能材料的应力-应变性能优异,耐压和密封系统结构简单,重量和体积超小,自身可以完成电能到机械能的输出。目前,智能驱动器主要有SMA驱动器、EAP驱动器和PZT驱动器等,且大部分处于淡水试验阶段,在深海极端环境下的性能参数尚不明确。

#### 2.2.1 SMA驱动器

多数SMA驱动器由软体介质基底和驱动元件组成,其结构的变形和驱动力通常是单根或多根

SMA 丝的组合致动<sup>[9]</sup>。SMA 驱动器的变形能力较为突出,但存在散热慢和效率低的问题。针对这些局限性,Wang 等<sup>[18]</sup>提出了一种以易熔合金管来提高软体材料刚性的耦合新型驱动器,如图 2(a)所示。She 等<sup>[19]</sup>利用宽窄片的物理结构优势研制了一种片状的 SMA 驱动器,成功规避了材料散热慢的问题,从而有效提高了工作效率,如图 2(b)所示。Hugo 等<sup>[20]</sup>将 SMA 丝倾斜分列在硅胶薄片表面,通过加热圆柱形的卷缩硅胶片可产生最大 30°的扭转变形,实现了 SMA 驱动器的扭转运动,如图 2(c)所示。

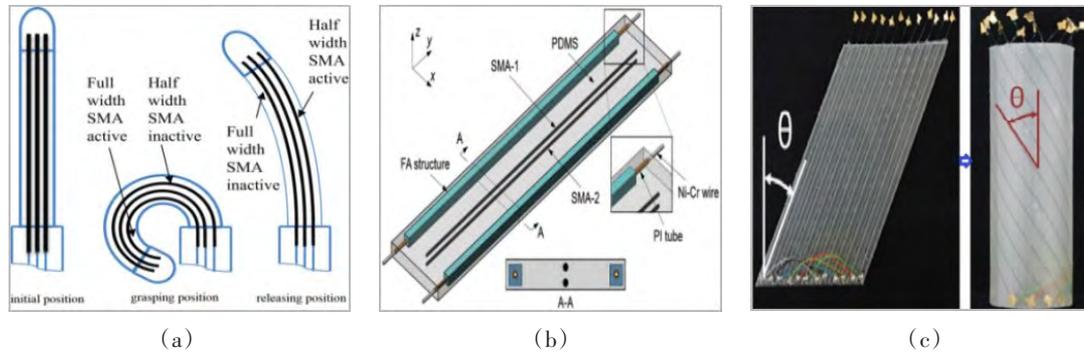


图 2 SMA 驱动器<sup>[18-20]</sup>  
Fig.2 SMA actuator<sup>[18-20]</sup>

### 2.2.2 EAP 驱动器

EAP 驱动器主要包括 IPMC 和 DE 两种。IPMC 驱动器的驱动电压低、频率快、能耗少,但流速和驱动力较小。Guo 等<sup>[21]</sup>将柔性聚合物(PEDOT)移植到 IPMC 电极表面,改善驱动器的机电性能并有效减少水分流失,使其稳定工作时间延长至 1000 s 以上,如图 3(a)所示。DE 驱动器响应快、无噪点干扰,但驱动电压较高,技术难度相对较大。Liu 等<sup>[22]</sup>提出一种内置蜂窝元结构的单向软介电弹性体执行器,其蜂窝元将驱动器的面扩展转换为定向变形,额定应变达到 15.8%,如图 3(b)所示。Giacomo 等<sup>[23]</sup>设计了一种基于苯乙烯基合成橡胶(SR)的介电弹性体执行器,利用橡胶的双轴预拉伸来实现 DE 膜的刚度补偿,从而使执行器侧面行程提升了 18% 以上,如图 3(c)所示。

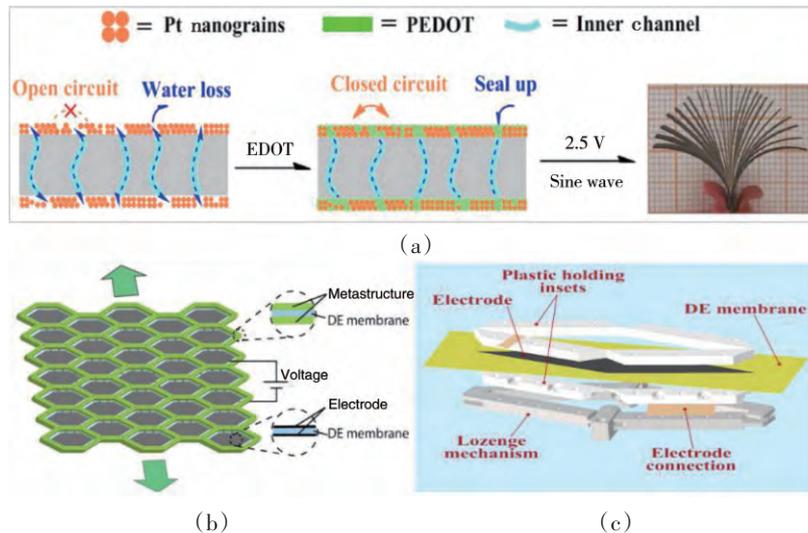


图 3 EAP 驱动器<sup>[21-23]</sup>  
Fig.3 EAP actuator<sup>[21-23]</sup>

### 2.2.3 PZT 驱动器

PZT 驱动器在水下可执行伸缩双向动作,类似双程记忆效应 SMA 的功能,伸缩应力在 100 MPa 量级,且动作频率较高,电能转为机械能的效率高达 90% 左右,但变形量仅有 0.2% 左右,作为驱动器时需要传输机构来放大,一定程度上增大了装备的体积,同时驱动 PZT 需要较高的电压(50~800 V),这

就带来密封困难和效率降低等问题。因此,目前PZT驱动器仅在压电电机领域应用<sup>[24-25]</sup>(见图4),而在深海领域未有实际探索尝试。

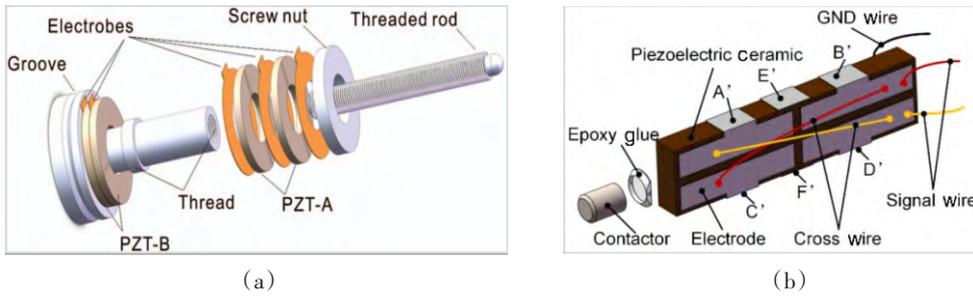


图4 PZT驱动器<sup>[24-25]</sup>

Fig.4 PZT actuator<sup>[24-25]</sup>

### 2.3 典型深海执行器的对比

SMA驱动器造价低、结构简单、耐腐蚀、应力和应变都较大,具备很多深海执行器需要的输出力和输出行程要求。DE驱动器的高驱动电压在海水环境中的绝缘传输存在较大的困难。IPMC驱动器提供的驱动力较小,在海水等离子溶液中存在较严重的漏电现象,导致其动作幅度和效率极大降低。综合使用环境、输出力、行程、结构、重量以及体积等因素,SMA驱动器是现阶段最接近海洋工程实用化的智能材料。不同执行器的性能参数见表2。

表2 典型深海执行器的性能参数

Tab.2 Performance parameters of typical deep-sea actuators

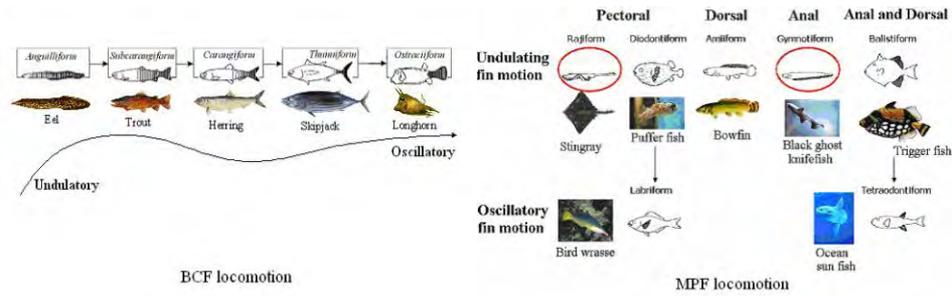
属性	电动	液压	电磁	SMA	PZT	EAP
驱动力	较大	大	较大	较小	较小	较小
应变	较大	中等	中等	中等	中等	较大
反应速度	快	快	快	较慢	较快	较快
质量	大	中等	小	较小	较小	较小
体积	较大	较大	小	中等	中等	较小
控制难度	较低	较低	较低	中等	中等	较高
精度	较高	中等	中等	中等	中等	中等
环境要求	低	低	低	中等	较高	中等-较高
成本	低	低	低	中等	中等	低
功耗	高	中等	中等	较高	较高	较低
交互性	较好	较好	较好	中等	中等	较低
制造难度	低	低	低	低	较高	较高
商业化程度	较高	较高	高	中等	较低	较低

## 3 海洋仿生机器人

综合智能材料和海洋生物的推进方式而设计出的海洋仿生机器人能够较好地完成指定动作,从而使人类在不破坏海洋生态系统的前提下更好地了解海洋、运用海洋。

### 3.1 海洋生物推进模式

海洋生物的推进模式是生活环境、习性、运动能力长期综合优化的结果。科学家将海洋生物的推进方式分为:摆动、划动、螺旋以及喷射推进。摆动模式是海洋鱼类最普遍的游动方式<sup>[26]</sup>,也是目前研究最多的推进方式,具体如图5(a)所示;划动推进是近底海洋端足类生物的常用运动方式,如图5(b)所示;喷射推进在乌贼、鱿鱼、水母等具有特殊构造的海洋生物中较为常见,是仿生推进系统的重点模仿模式。



(a)<sup>[26]</sup>



(b)

图5 海洋生物推进方式

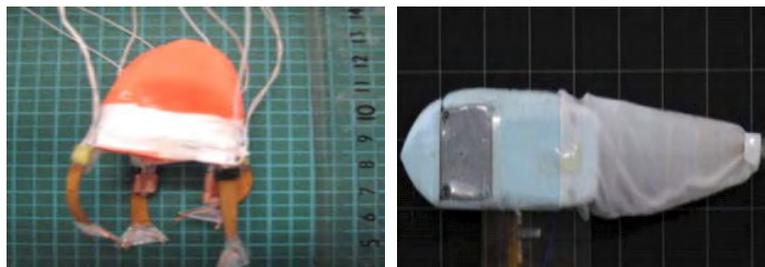
Fig.5 Swimming modes of marine life

### 3.2 智能海洋仿生机器人

综合现有仿生结构、智能驱动材料以及先进的控制方式,发展功能趋近海洋生物的机器人是当前水下机器人领域的技术前沿之一。目前,海洋仿生对象主要有海龟、水母、乌贼、蝠鲼和牛鼻鲉鱼等。

#### 3.2.1 SMA 仿生机器人

日本香川大学 Shi 等<sup>[27]</sup>模仿水母的运动,提出了基于 SMA 驱动的新型仿生水下机器人,如图 6(a)所示;之后,Sumoto 等<sup>[28]</sup>为了突破小型机器鱼的有效载荷小和无法携带传感器的局限性,通过分段二进制控制控制法(SBC)开发了 SMA 驱动的大型鱼型机器人,游速达到了 7 cm/s,如图 6(b)所示;美国弗吉尼亚



(a)

(b)



(c)

(d)

图6 SMA 仿生机器人(I)<sup>[27-30]</sup>

Fig.6 Biomimetic robot (I) actuated by SMA<sup>[27-30]</sup>

理工学院的 Villanueva 等<sup>[29]</sup>模仿海月水母的推进机制和外观,研制了一种基于仿生形状记忆合金复合材料(BISMAC)驱动的仿生水母机器人 Robojelly,其直径为 164 mm,最高速度为 54.2 mm/s,如图 6(c)所示;韩国首尔国立大学的 Song 等<sup>[30]</sup>开发了以智能软复合材料结构(SSC)为执行器的仿生海龟,通过 SMA 和编织物的复合实现了海龟在多步态下的柔和动作,游速最大可达 22.5 mm/s,如图 6(d)所示。

哈尔滨工业大学 Wang 等<sup>[31]</sup>研制了一种以 SMA 丝驱动的无线仿生蝠鲼机器人,长 243 mm,质量 354 g,最高游速为 57 mm/s,如图 7(a)所示;高飞等<sup>[32]</sup>结合乌贼喷射推进的运动方式,将 SMA 丝和硅胶组合作为仿生外套膜,设计了一种推进速度更快(87.7 mm/s)、运动性能更佳的仿生机器人,如图 7(b)所示;中国科学技术大学 Zhou 等<sup>[33]</sup>通过软智能模块化结构(SMS)实现了水母的三维运动模式,其以最大 111 mm/s 的直线巡游速度超过了海洋水母的速度,如图 7(c)所示;哈尔滨工程大学林希元<sup>[34]</sup>研制了一款 SMA 弹簧驱动的仿生水母,通过搭建非线性控制系统,得到了水母运动速度、排水情况与 SMA 加热电流的关系,如图 7(d)所示。

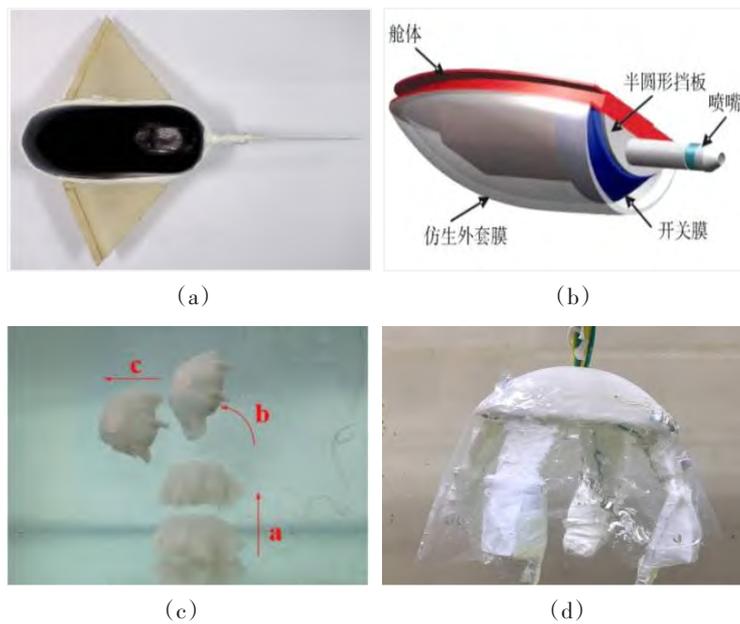
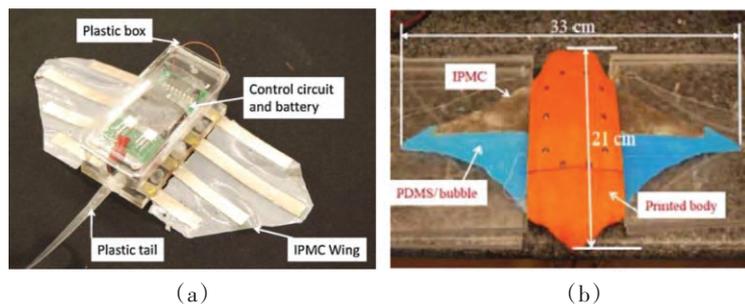


图7 SMA 仿生机器人(II)<sup>[31-34]</sup>

Fig.7 Biomimetic robot (II) actuated by SMA<sup>[31-34]</sup>

### 3.2.2 IPMC 仿生机器人

美国弗吉尼亚大学 Chen 等<sup>[35]</sup>以 IPMC 为驱动材料研制了长 80 mm,质量为 55.3 g 的仿生蝠鲼机器人,其在 3.3 V 电压、0.4 Hz 频率下,最大速度达到 4.2 mm/s,如图 8(a)所示;之后,他们又以牛鼻鲛鱼为仿生对象,研制了基于 IPMC 驱动的仿生机器人,其体长 210 mm,重 119 g,可自主游动,游动速度为 7 mm/s<sup>[36]</sup>,如图 8(b)所示;美国弗吉尼亚理工大学 Najem 等<sup>[37]</sup>基于维多利亚水母的钟形运动学机理,设计了一种以多个 IPMC 执行器驱动的软体透明水母机器人,其直径为 164 mm,重量为 11 g,最大速度为



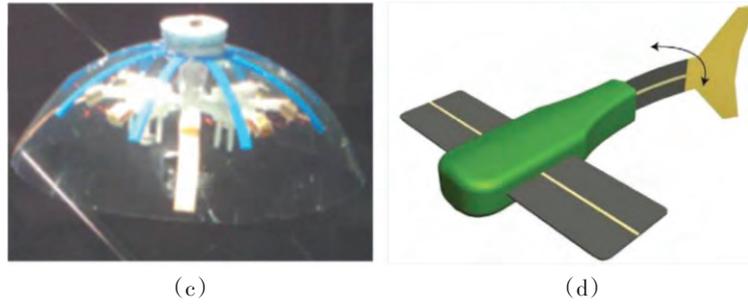


图8 IPMC仿生机器人<sup>[35-38]</sup>

Fig.8 Biomimetic robot actuated by IPMC<sup>[35-38]</sup>

1.5 mm/s,如图8(c)所示;Hubbard等<sup>[38]</sup>在软体机器鱼的鱼鳍和鱼尾上融合了IPMC材料,从而使最大游速达到了28 mm/s,如图8(d)所示。

### 3.2.3 DE仿生机器人

哈佛大学Berlinger等<sup>[39]</sup>将多层DE叠加形成的模块化鳍状致动器应用于微型水下自主航行器(AUV)中,使输出力和效率得到了极大的提升,最大游速达到了55 mm/s,如图9(a)所示。瑞士洛桑联邦理工学院Shintake等<sup>[40]</sup>研制了基于DE驱动的仿生机器鱼和仿生水母,解决了DE在导电液体中可靠运行的问题,但实测游速均较小,如图9(b)所示。之后,又改进设计了长150 mm,厚0.75 mm,重4.4 g,最高游速可达37.2 mm/s的超薄软体机器鱼<sup>[41]</sup>,同时证明基于DE驱动的摆动推进方式具有很高的潜力,如图9(c)所示。

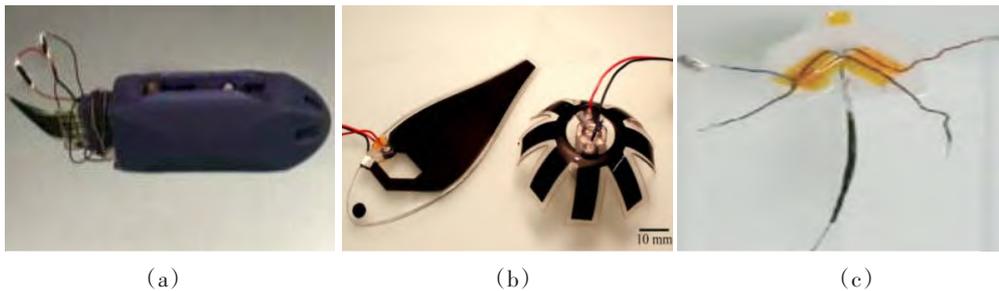


图9 DE仿生机器人(I)<sup>[39-41]</sup>

Fig.9 Biomimetic robot (I) actuated by DE<sup>[39-41]</sup>

浙江大学Li等<sup>[42]</sup>以蝠鲼为仿生原型,将DE作为驱动材料,以透明硅胶作为柔性结构体,研制了可快速运动且方向可控的隐蔽性柔性电子鱼,其长93 mm,在9.5 kV、5 Hz的条件下可达到64 mm/s的游动速度,如图10(a)所示。浙江大学李国瑞<sup>[43]</sup>以硅胶胸鳍和DE驱动模块为动力系统,研制了一种耐极端静水压力的深海软体机器鱼,其长205 mm,重138.6 g,实现了在110 MPa静水压力下的自主游动,如图10(b)所示;之后,又开发了一款电驱动仿生水母机器人<sup>[43]</sup>,其在9 kV、1.6 Hz时最大游速达到了10 mm/s,最大推力为0.12 mN,如图10(c)所示。

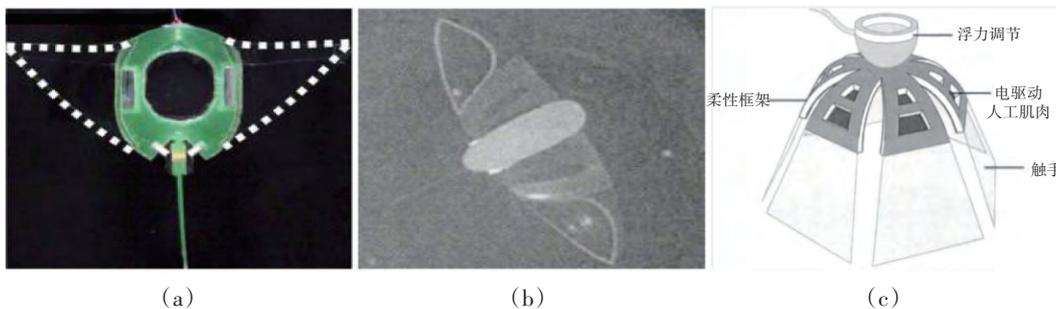


图10 DE仿生机器人(II)<sup>[42-43]</sup>

Fig.10 Biomimetic robot (II) actuated by DE<sup>[42-43]</sup>

### 3.2.4 PZT 仿生机器人

美国加州大学伯克利分校 Deng 等<sup>[44]</sup>模仿箱鲀科鱼类, 试制了一种总长为 12 mm 的微型水下航行器, 具体见图 11(a)。韩国 Heo 等<sup>[45]</sup>研制了一种以 PZT 驱动的仿生机器人鱼, 其长为 270 mm, 在 0.9 Hz 频率下的最大推力为 0.0071 N, 最大游速为 25.19 mm/s, 如图 11(b) 所示。之后, Nguyen 等<sup>[46]</sup>用 4 个 PZT 薄膜作为驱动元件, 设计了一款仿生机器人鱼, 如图 11(c) 所示。该机器人鱼长 400 mm, 在 1.4 Hz 频率下的最大推力为 0.0048 N, 最大游速为 32 mm/s。

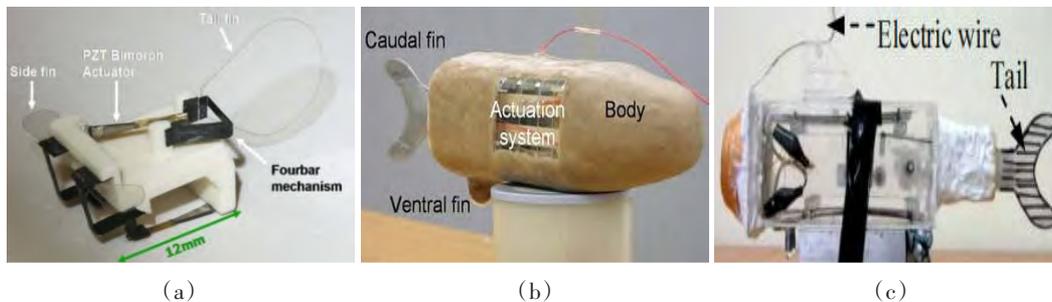


图 11 PZT 仿生机器人<sup>[44-46]</sup>

Fig.11 Biomimetic robot actuated by PZT<sup>[44-46]</sup>

## 4 深海技术挑战及展望

### 4.1 深海技术挑战

智能材料驱动的深海装备及海洋仿生机器人的研究是为了最终在海洋中投放使用甚至组成集群执行任务, 但目前的淡水试验阶段, 并未考虑深海实际使用环境。因此, 在耐压、低温、驱动力和环境适应性等关键技术方面仍需开展深入研究。

#### (1) 深海高压环境

全海深极端环境下的最大压力可达到 110 MPa, 智能驱动器在静水压力和执行载荷作用下的应力-应变变化情况需要构建三维本构模型, 一维模型已不符合实际外部环境要素。现阶段的实验室仿生驱动结构大都以硅胶包覆, 不具备耐压能力, 其在深海压力环境下会存在结构损坏和漏水等问题。

#### (2) 深海低温环境

智能材料的热力学性能与环境温度密切相关, 而深海海底的温度与常温最大相差 10 倍, 现阶段的仿生机器人仅基本研究智能材料在室温环境 (约 24 °C) 下的热力学性能, 而在深海低温环境下的热力学性能还属未知。

#### (3) 海水导电性

智能材料的最大优势就是集执行和传感于一身, 通过自身的电阻变化可知驱动器的执行情况, 但海水是导电的离子溶液, 且不同海区在不同季节的电导率不同, 这将导致采用材料电阻来进行闭环控制的方法会存在偏差。此外, 海水导电性也将使智能材料和连接线路产生漏电, 这必然引起驱动器电能转换为机械能的效率损失。

#### (4) 海浪

目前的智能仿生机器人结构大都以硅胶作为包覆主体, 且驱动器和主体结构基本采用粘胶固定, 在实际海洋环境中的布放会因海浪的冲击而发生破坏或失效。因此, 针对多变的海洋环境和实际海洋工程应用, 需要对智能仿生机器人的整体结构进行强度设计。

### 4.2 未来发展趋势

#### (1) 海洋仿生学的微观认知

随着多学科、多领域的技术融合交叉, 传统仿生学的宏观认知已经无法适应多变的技术要求, 海

洋仿生学将实现从宏观到微观的多层次跨域、不断深入细化,从而为实际工程应用提供理论支撑。

#### (2) 海洋复杂环境的高度适应性

复杂多变的海洋环境对海洋仿生机器人的实际工程应用是一个巨大的挑战,未来对于仿生机器人的结构、材料轻便度以及抗腐蚀性等都将提出更高的要求,同时还应兼具小型轻便的发展趋势。

#### (3) 全柔一体化仿生结构

目前的海洋仿生机器人并未对海洋生物的生物原型进行完全模仿,其主体结构还是以刚性结构为主,仅有驱动部分属于柔性结构,这就使大部分仿生机器人只能单维度运动。未来可将柔性结构和仿生驱动构件结合,发展全柔一体化仿生结构,不仅可以避免粘胶固定的弊端,而且可以实现多个自由度的连续柔性动作。

#### (4) 智能化精准控制

传统的控制方法基本还是以人为主导,对于外界的环境变化无法做出合理判断和更正。未来的海洋仿生机器人将会融合人工智能和机器学习技术,更加注重无人自主化,通过模仿生物神经系统对自身的精准控制,实现多感知信息融合和协同控制的环境感知能力。

#### (5) 负载应用能力

目前的海洋仿生机器人基本处于运动仿生阶段,不具备实际工程化应用的负载能力。未来针对实际的海洋环境勘测和调查需要,仿生机器人必须具备运动自维持和携带部分传感器的能力,从而完成其既定任务目标。

#### (6) 高效的生物能转换应用

随着海洋仿生机器人工程化应用的深入,单一的电能转化为机械能必然无法满足应用的长周期能源供给。未来将综合物理、化学以及生物学等多个学科领域来实现生物能量的高效转换和传递,从而降低仿生机器人的能耗,提高能量利用率<sup>[47-48]</sup>。

## 5 结 语

基于智能材料的深海执行器和海洋仿生机器人是一个多学科交叉的新兴前沿领域。本文通过对常见的智能驱动材料的结构属性和驱动机理进行介绍,综述了深海执行器和海洋仿生机器人的国内外研究现状和存在的主要问题:

(1) 智能材料的应力-应变性能优异,自身可完成电能至机械能的直接输出,从而可免去(或部分免去)耐压和密封结构,整个系统结构简单,具有传统水下驱动器无法比拟的超小重量和体积,是未来传统水下驱动器的优秀替代者,但材料的驱动效率相较于传统驱动器还有一定的差距。

(2) 从使用环境、输出力、输出行程、结构、重量、体积等方面综合比较,SMA是现阶段最具有海洋工程应用前景的智能材料。

(3) 传统深海执行器存在重量体积大、可靠性低、噪声和电磁干扰以及生物兼容性差等问题。目前,基于智能材料的水下执行器主要有SMA驱动器、EAP驱动器和PZT驱动器等,且基本处于实验室阶段,其在深海极端环境下的性能参数仍有待进一步研究。

(4) SMA仿生机器人制作简单、驱动力大、应用范围广,但是散热慢、效率较低;IPMC仿生机器人运动灵活、输出位移大,但响应频率低、驱动力较小且材料需要液体环境;DE仿生机器人驱动频率高,变形大,但驱动电压高,需要预拉伸来发挥驱动作用,同时需要预设刚性框架支撑;PZT仿生机器人响应速度快,驱动力大,但驱动电压大,变形小。

## 参 考 文 献:

- [1] 李春峰. 中国海洋科技发展的潜力与挑战[J]. 人民论坛·学术前沿, 2017(18): 37-43.

- Li Chunfeng. The potential and challenges of China's marine science and technology development[J]. People's Forum·Academic Frontiers, 2017(18): 37-43. (in Chinese)
- [2] 李佳佳, 刘 峰, 马维良. 国内外海洋无人系统智能装备产业发展现状[J]. 船舶工程, 2020, 42(2): 25-31.  
Li Jiajia, Liu Feng, Ma Weiliang. Development status of intelligent equipment industry for marine unmanned systems at home and abroad[J]. Ship Engineering, 2020, 42(2): 25-31. (in Chinese)
- [3] 郭克星, 夏鹏举. 智能复合材料的研究进展[J]. 功能材料, 2019, 50(4): 4017-4022+4029.  
Guo Kexing, Xia Pengju. Research progress of smart composite materials[J]. Functional Materials, 2019, 50(4): 4017-4022+4029. (in Chinese)
- [4] 白子龙. 智能材料研究进展及应用综述[J]. 军民两用技术与产品, 2020, 3: 15-20.  
Bai Zilong. Summary of research progress and application of smart materials[J]. Military and Civilian Dual-use Technology and Products, 2020, 3: 15-20. (in Chinese)
- [5] 周 立, 张 阳, 张 一, 等. 无人水下智能海洋测绘装备的机遇与挑战[J]. 海洋信息, 2019, 34(3): 1-6.  
Zhou Li, Zhang Yang, Zhang Yi, et al. Opportunities and challenges of unmanned underwater intelligent marine surveying and mapping equipment[J]. Marine Information, 2019, 34(3): 1-6. (in Chinese)
- [6] 王延杰, 郝牧宇, 张 霖, 骆敏舟. 基于智能驱动材料的水下仿生机器人发展综述[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(2): 123-133.  
Wang Yanjie, Hao Muyu, Zhang Lin, et al. Progress of biomimetic underwater robot based on intelligent actuating materials: A review[J]. Journal of Underwater Unmanned Systems, 2019, 27(2): 123-133. (in Chinese)
- [7] Alexander P. Robot fish: Bio-inspired fishlike underwater robots[J]. Underwater Technology, 2017, 34(3): 143-145.
- [8] Chu W, Lee K, Song S, et al. Review of biomimetic underwater robots using smart actuators[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(7): 1281-1292.
- [9] 孙沂琳, 张秋菊, 陈宵燕. 软体驱动器研究综述[J]. 机械设计, 2019, 36(2): 5-18.  
Sun Yilin, Zhang Qiujun, Chen Xiaoyan. Overview of soft-bodied actuators[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(2): 5-18. (in Chinese)
- [10] Bhagyaraj J, Ramaiah K V, Saikrishna C N, et al. Behavior and effect of Ti 2 Ni phase during processing of NiTi shape memory alloy wire from cast ingot[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2013, 581(18): 344-351.
- [11] 李铁凤, 李国瑞, 梁艺鸣, 程听雨, 杨栩旭, 黄志龙. 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. (in Chinese)
- [12] 林 超, 陈 凤, 袁 莉, 梁国正, 顾媛娟. 智能复合材料研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012, 2: 74-77.  
Lin Chao, Chen Feng, Yuan Li, et al. Research progress of smart composite materials[J]. FRP/Composite Materials, 2012, 2: 74-77.
- [13] 刘贵杰, 刘展文, 田晓洁, 王清扬, 陈 功. 智能材料在水下仿生机器人驱动中的应用综述[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(3): 114-120.  
Liu Guijie, Liu Zhanwen, Tian Xiaojie, et al. A review of the application of intelligent materials in underwater biomimetic robot[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(3): 114-120. (in Chinese)
- [14] 徐丰羽, 郭义全, 周映江, 吴明亮, 宋玉蓉. 软体机器人的驱动器及制作方法研究综述[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2018, 38(4): 69-80.  
Xu Fengyu, Guo Yiquan, Zhou Yingjiang, et al. A review of the research on the driver and production method of soft robots [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2018, 38(4): 69-80. (in Chinese)
- [15] Cui W, Wu X. A Chinese strategy to construct a comprehensive investigation system for hadal trenches[J]. Deep-sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography, 2018, 155: 27-33.
- [16] Cui W, Hu Y, Guo W, et al. A preliminary design of a movable laboratory for hadal trenches[J]. Methods in Oceanography, 2014: 1-16.
- [17] 王 宏. 用于仿生推进的SMA驱动器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.

- Wang Hong. Research on SMA driver for bionic propulsion[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007. (in Chinese)
- [18] Wang Wei, Rodrigue Hugo, Ahn Sung-Hoon. Smart soft composite actuator with shape retention capability using embedded fusible alloy structures[J]. *Composites Part B*, 2015, 78: 507-514.
- [19] She Yu, Li Chang, Jonathon Cleary, et al. Design and fabrication of a soft robotic hand with embedded actuators and sensors [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2015, 7(2): 021007-021016.
- [20] Rodrigue Hugo, Wang Wei, Bhandari Binayak, et al. Fabrication of wrist-like SMA-based actuator by double smart soft composite casting[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(12): 125003-125013.
- [21] Guo Dongjie, Wang Long, Wang Xinjie, Xiao Yanan, Wang Caidong, et al. PEDOT coating enhanced electromechanical performances and prolonged stable working time of IPMC actuator[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 305: 127488.
- [22] Liu Kun, Chen Shitong, Chen Feifei, Zhu Xiangyang. A unidirectional soft dielectric elastomer actuator enabled by built-in honeycomb metastructures[J]. *Polymers*, 2020, 12(3): 619.
- [23] Giacomo Moretti, Luca Sarina, Lorenzo Agostini, Rocco Vertechy, et al. Styrenic-rubber dielectric elastomer actuator with inherent stiffness compensation[J]. *Actuators*, 2020, 9(2): 44.
- [24] Yuan S, Zhao Y, Chu X, et al. Analysis and experimental research of a multilayer linear piezoelectric actuator[J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(8): 225.
- [25] Chu X, Wang J, Yuan S, et al. A screw-thread-type ultrasonic actuator based on a Langevin piezoelectric vibrator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(6): 065002.
- [26] 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 & Engineering*. IEEE, 2006.
- [27] Shi L, Guo S, Asaka K, et al. A novel jellyfish-like biomimetic microrobot[C]. *IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering*, 2010.
- [28] Sumoto H, Yamaguchi S. A study on a control method of artificial muscle using segmented binary control for an up-scaled fish type robot[C]. *Proceedings of the 21st International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2011.
- [29] 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.
- [30] Song S H, Kim M S, Rod Rigue H, et al. Turtle mimetic soft robot with two swimming gaits[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2016, 11(3): 036010.
- [31] Wang Z, Wang Y, Li J, et al. A micro biomimetic manta ray robot fish actuated by SMA[C]. *IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics*, 2010.
- [32] 高 飞. SMA 驱动仿生机器鱼的尾鳍和喷射推进性能及其实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
Gao Fei. The caudal fin and jet propulsion performance of the bionic robot fish driven by SMA and experiment research[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [33] Zhou Y, Jin H, Liu C, et al. A novel biomimetic jellyfish robot based on a soft and smart modular structure (SMS)[C]. *IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics*, 2016.
- [34] 林希元. 基于记忆合金驱动的仿生水母设计及实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.  
Lin Xiyuan. Design and implementation of bionic jellyfish based on shape memory alloy[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [35] Chen Z, Um T I, Bartsmith H, et al. A novel fabrication of ionic polymer-metal composite membrane actuator capable of 3-dimensional kinematic motions[J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2011, 168(1): 131-139.
- [36] Chen Z, Um TI, Zhu J, et al. Bio-inspired robotic cownose ray propelled by electroactive polymer pectoral fin[C]. *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2012.
- [37] Najem J S, Leo D J. A bio-inspired bell kinematics design of a jellyfish robot using ionic polymer metal composites actuators[C]. *Proceedings of SPIE*, 2012.
- [38] Hubbard JJ, Fleming M, Palmre V, et al. Monolithic IPMC fin for propulsion and maneuvering in bioinspired underwater robotics[J]. *Oceanic Engineering, IEEE Journal*, 2014, 39(3): 540-551.
- [39] Berlinger F, Duduta M, Gloria H, et al. A modular dielectric elastomer actuator to drive miniature autonomous underwater vehicles[C]. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, 2018.

- [40] Shintake J, Shea H, Floreano D. Biomimetic underwater robots based on dielectric elastomer actuators[C]. Proceedings of 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2016.
- [41] Shintake J, Cacucciolo V, Shea H, et al. Soft biomimetic fish robot made of dielectric elastomer actuators[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(4): 466–474.
- [42] Li T, Li G, Liang Y, et al. Fast-moving soft electronic fish[J]. *Science Advances*, 2017, 3(4): e1602045.
- [43] 李国瑞. 介电高弹聚合物力电耦合调控与软体机器人研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.  
Li Guorui. A study for the electromechanical regulation of dielectric elastomer and soft robot[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)
- [44] Deng X, Avadhanula S. Biomimetic micro underwater vehicle with oscillating fin propulsion: System design and force measurement[C]. Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, 2005.
- [45] Heo S, Wiguna T, Park H C, et al. Effect of an artificial caudal fin on the performance of a biomimetic fish robot propelled by piezoelectric actuators[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2007, 4(3): 151–158.
- [46] Nguyen Q S, Heo S, Park H C, et al. A fish robot driven by piezoceramic actuators and a miniaturized power supply[J]. *International Journal of Control Automation and Systems*, 2009, 7(2): 267–272.
- [47] 陈 芳, 李东巧, 韩 涛, 王 溯. 海洋仿生机器人领域规划与研究态势分析[J]. *科学观察*, 2018, 13(6): 11–22.  
Chen Fang, Li Dongqiao, Han Tao, et al. Planning and research situation analysis of marine biomimetic robots[J]. *Scientific Observation*, 2018, 13(6): 11–22. (in Chinese)
- [48] 王国彪, 陈殿生, 陈科位, 等. 仿生机器人研究现状与发展趋势[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(13): 27–44.  
Wang Guobiao, Chen Diansheng, Chen Kewei, et al. The current research status and development strategy on biomimetic robot[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(13): 27–44. (in Chinese)