

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.05.004

电机与智能材料复合驱动仿生鳍推进器研究

何建慧

(台州职业技术学院 机电工程学院, 浙江 台州 318000)

摘 要:提出一款电机与智能材料复合驱动的仿生鳍推进器。首先分析仿生鳍推进器的机械结构和控制电路;根据鳍条和机构运动过程中的受力情况,计算了凸轮电机所需输出扭矩大小;构建形状记忆合金丝驱动的鳍条弯曲变形热动力学模型;实验测试了鳍条幅度分别按照逐渐增大运动和等幅运动(从根部至端部)时推进器的平均推进速度和平均推进力随鳍条运动频率的变化情况。结果显示:仿生鳍能够实现波动、摆动以及复杂三维柔性运动,满足推进、转弯以及稳定性调节等多种需求。

关 键 词:仿生系统;智能材料;形状记忆合金;波动鳍;鳍条;凸轮;曲柄滑块机构

中图分类号:TP242.6 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2017)05-0016-06

Research on Biomimetic Fin Propulsor Compound Driven by Motor and Intelligent Material

HE Jianhui

(Department of Mechatronics Engineering, Taizhou Vocational and Technical College, Taizhou, Zhejiang 318000, China)

Abstract: A motor intelligent material compound drive biomimetic propulsor was proposed. Firstly, the mechanical structure and control circuit of biomimetic fin propulsor was analyzed. Secondly, the output torque of motor was calculated according to the force of fin ray and structure endured during movement. Also, the analysis of thermodynamics on shape memory alloy (SMA) wire based on fin ray bending was established. Finally, the variety of averaged propulsion velocity and averaged thrust with frequency was tested under the condition that the fin ray amplitude gradually increased from roots to ends as well as the amplitude was fairly constant. The results indicate that the biomimetic fin is able to achieve undulating motion, oscillating motion and complex three-dimensional flexible motion, which also satisfies the requirements of cruising, turning, stability control.

Keywords: biomic system; intelligent material; shape memory alloy; undulating fin; fin ray; cam; slider-crank mechanism

近年来,各类仿生推进器迅猛发展,根据推进机理不同大致分为:身体/尾鳍推进^[1]、奇鳍/对鳍推进^[2-3]和射流推进^[4]3种模式。在此基础上,利用理论分析^[5]、数值计算^[6-7]和实验测量^[8-9]等多种手段,以及结构^[10-11]或控制策略优化^[12],提升推进器性能。

这些仿生推进器在驱动方式的选择上分成基于电机(包括直流电机^[13]和舵机^[14])驱动和智能材料(人造肌肉^[15]、压电陶瓷^[16-17]、高分子离子聚合物^[18-19]及形状记忆合金^[20-24]等)驱动2个方向。电机作为驱动源主要优势在于其响应速度快、输出扭矩大,工作可靠

性高。智能材料则在功重比高、应变量大、结构简单,无工作噪音以及具有柔顺驱动特征和生物相容性等方面占优^[25]。形状记忆合金材料因其较优的综合性能而被广泛使用。

近期,研究人员在鱼群协作^[26]和单体复合推进模式^[27]方面进行了探索,此类复合驱动模式呈现出比单一模式更优越的性能。文章利用机电系统响应速度快和工作扭矩大的优势,结合形状记忆合金材料应变量大和柔顺驱动的特点,设计了电机与智能材料复合驱动的仿生鳍推进器,通过仿生鳍波动、摆动以及复杂三维

收稿日期:2017-01-21;修回日期:2017-05-18

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LY15E060001);台州职业技术学院校级一般课题(2016YB01)。

第一作者简介:何建慧(1981),女,浙江台州人,硕士,副教授,主要从事仿生机器人研究。E-mail:hjh1103@mail.ustc.edu.cn

柔性运动实现巡游、转弯以及稳定性调节等多种功能。

1 结构设计

1.1 仿生鳍3种运动方式

仿生鳍运动方式分为3种,如图1所示。图1(a)是鳍条从根部至端部等幅运动;图1(b)是鳍条从根部至端部摆幅渐增;图1(c)是复杂的三维柔性运动。相比先前驱动的单一性,文中利用电机与智能材料复合驱动,同时实现上述3种运动方式。

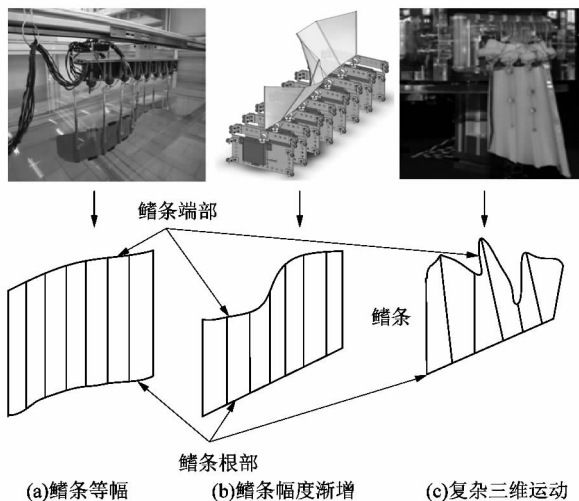


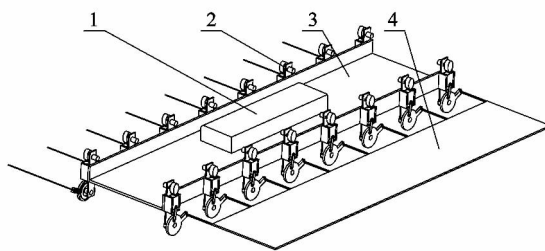
图1 3种典型仿生鳍运动方式

Figure 1 Three typical motion patterns of biomimetic fin

1.2 仿生鳍推进器机构设计

图2所示为仿生鳍推进器结构图,主要由控制与能源中心、仿生鳍单元、推进器本体以及弹性蒙皮4个部分组成,其长×宽×高尺寸为640 mm×350 mm×220 mm。控制与能源中心安置在推进器本体上,位于整个推进器的中心。左右两侧对称安装仿生鳍,每个仿生鳍由8个相同的仿生鳍单元构成,鳍条上覆盖弹性蒙皮(polyvinyl chloride, PVC)形成鳍面。鳍条既可以在电机驱动下被动运动,亦可在形状记忆合金驱动下主动运动。仿生鳍单元结构如图3所示,其核心为电机—凸轮—滑块—连杆—曲柄构成的传动机构。

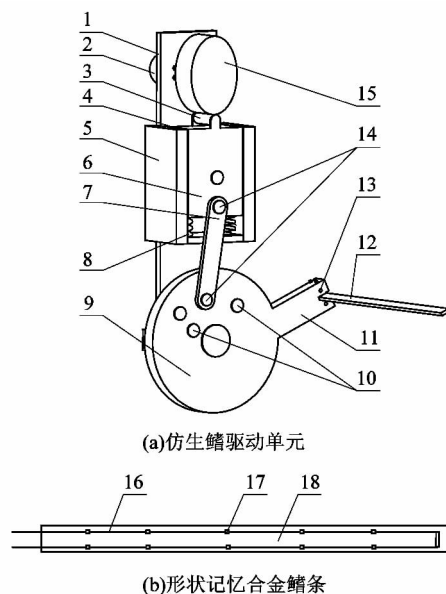
固定板上的电机带动凸轮旋转,凸轮与滑块上端滚轮配合,在滑块下端弹簧共同作用下,使得滑块沿着挡板内侧滑槽上下往复运动。滑块下方通过连杆活动铰接转盘,滑块和转盘上不同位置均有转轴,方便不同长度连杆的安装。转盘外延一凸起,凸起端面中间开设凹槽,用于固定形状记忆合金鳍条。丝状记忆合金由环扣固定在弹性基底上,其上方涂有一层导热硅胶并覆盖弹性蒙皮,构成形状记忆合金鳍条。仿生鳍单元主要结构参数如表1所示。



1—控制与能源中心;2—仿生鳍单元;3—推进器本体;4—弹性蒙皮。

图2 仿生鳍推进器结构

Figure 2 Structure of biomimetic fin propulsor



1—固定板;2—电机;3—滚轮;4—滑槽;5—挡板;6—滑块(从动件);7—连杆;8—弹簧;9—转盘(曲柄);10—转轴;11—凸起;12—鳍条;13—鳍条固定端;14—转轴;15—凸轮;16—环扣;17—弹性基底;18—形状记忆合金丝。

图3 仿生鳍单元结构

Figure 3 Structure of biomimetic fin unit

表1 结构参数取值

Table 1 Values of structure parameters mm

凸轮 基圆 半径 r_0	滑块(从动件) 推程中移动的 最大距离 h	转盘 (曲柄) 半径 R	连杆 长度 l	鳍条距离 转盘(曲柄) 中心距离 L
15	45	20	58	50

1.3 仿生鳍推进器电路设计

仿生鳍主控电路和驱动电路如图4所示,采用TI公司型号TMS320LF2407的DSP作为主控芯片,该芯片包含PLL时钟、数模转换ADC、串口通信SCI、JTAG端口及EV事件管理器模块等,满足系统要求。其中,EV模块产生脉宽调制信号PWM,用于控制电机及形状记忆合金丝的运动。

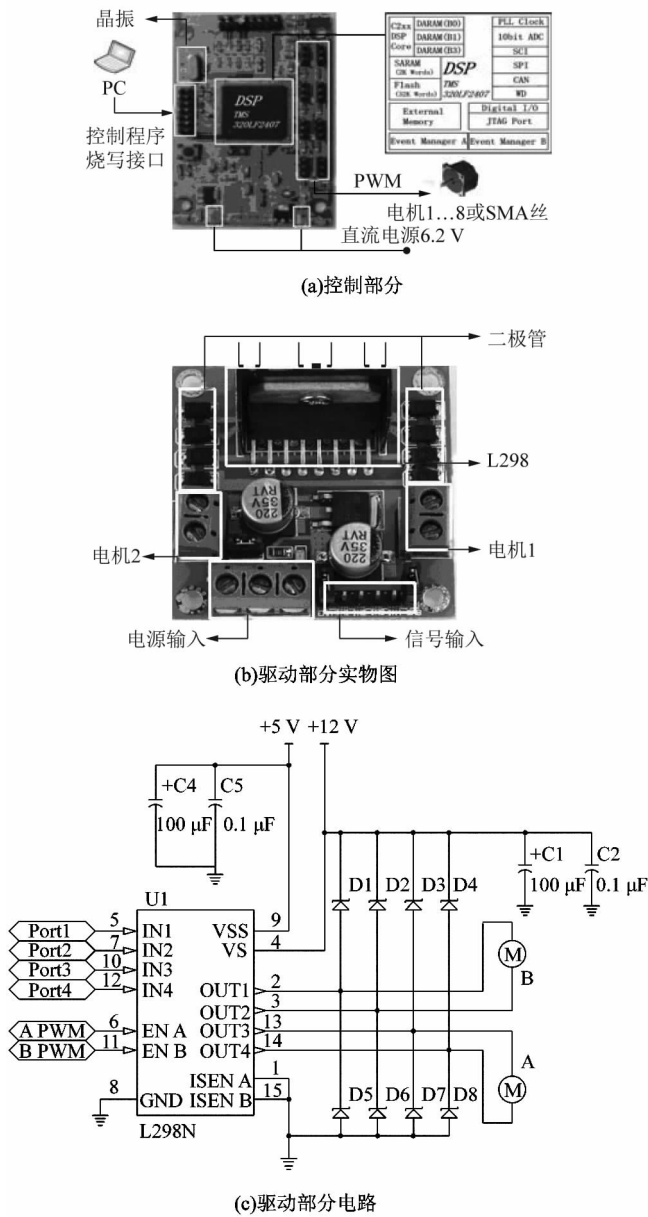


图4 仿生鳍控制电路

Figure 4 Control circuit of biomimetic fin

电机驱动电路采用标准 H 桥式电路,每块驱动板包括 1 片 L298 芯片、8 只二极管、1 个电源输入和信号输入端口,能同时驱动 2 路直流电机或 2 组形状记忆合金丝。IN1、IN2 对应直流电机 1 的逻辑输入,IN3、IN4 对应直流电机 2 的逻辑输入,EN A 和 EN B 分别为电机 1 和电机 2 的 PWM 输入。二极管与电机线圈相连,起续流保护作用。

形状记忆合金鳍条是利用电流产生的焦耳热使形状记忆合金发生微观上的热弹性马氏体相变,使其恢复“记忆”时形状。采用脉冲宽度调制 (PWM) 技术,控制加热电流大小,改变形状记忆合金丝相变速度,实

现鳍条运动频率和幅度的调节。

2 动力学分析

2.1 鳍条受力与电机扭矩关系

分析鳍条受力与电机扭矩关系,可以为选择合适的电机功率提供参考。如图 5 所示,根据力矩平衡条件,电机输出瞬时扭矩

$$T(t) = F(t) \times L_0(t). \quad (1)$$

式中: $T(t)$ 为电机输出瞬时扭矩; $F(t)$ 为凸轮作用于滚轮的瞬时力; $L_0(t)$ 为可变量臂长度。

由几何关系得到:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= F \cos \alpha; \\ F_5 &= \frac{F_3}{\cos \beta}; \\ F_7 &= F_6 \cos \gamma. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由胡克定律知,弹簧力

$$F_t = \kappa \Delta x. \quad (3)$$

式中: κ 为弹簧弹性系数; Δx 弹簧相对变形量。

根据力矩平衡条件得

$$F_7 \times \delta = F_d \times L. \quad (4)$$

式中: δ 为转盘上与连杆相连接的转轴到转盘中心距离; L 为鳍条到转盘中心距离; F_d 为鳍条在运动过程受到流体阻力,且有

$$F_d = \frac{1}{2} \rho c_d e f u. \quad (5)$$

式中: ρ 为流体密度; c_d 为无量纲阻力系数; e 为鳍条长度; f 为鳍条宽度; u 为鳍条运动速度。

其中,

$$u = \frac{d\theta}{dt} \times L = \frac{d(\Delta x)}{dt} \times \frac{L}{R}. \quad (6)$$

式中: θ 为转盘转角, R 为转盘半径。

$$\text{则 } F_d = \frac{1}{2} \rho c_d e f \frac{L}{R} v. \quad (7)$$

式(7)中 v 为滑块移动速度,又因为

$$\begin{cases} F_3 = F_1 - 2F_t, \\ F_5 = F_6. \end{cases}$$

则有

$$F(t) = \frac{F_d L \cos \beta + 2\kappa \Delta x \delta \cos \gamma}{\delta \cos \gamma \cos \alpha}. \quad (8)$$

将式(7)和式(8)代入式(1),得

$$T(t) = \frac{\rho c_d e f L^2 v^2 \cos \beta + 4\kappa \Delta x \delta R v \cos \gamma}{2R \delta \omega (p + r_0) \sin \alpha \cos \gamma} \times L_0. \quad (9)$$

式中: p 为凸轮与滚轮接触线到滚轮中心距离; ω 为凸轮运动角速度。

从式(9)知,在任意时刻,鳍条受流体阻力与电机

扭矩成比例关系。

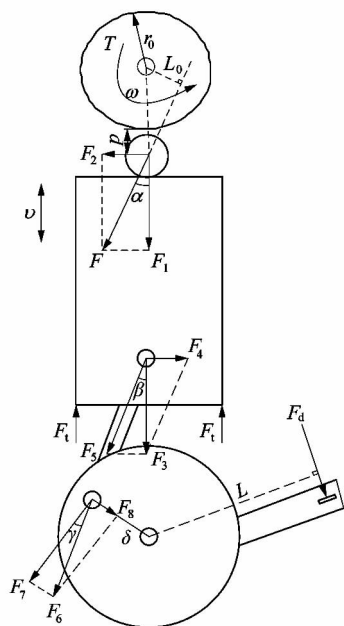


图5 动力学分析

Figure 5 Dynamics analysis

2.2 鳍条弯曲变形热动力学分析

鳍条的变形是仿生鳍实现复杂柔性三维运动的关键,而温度是诱导其相变产生动作的最重要因素。课题组通过建立鳍条弯曲变形热动力学方程,弄清形状记忆合金丝不同直径与加热电流对加热和冷却速度影响,为鳍条结构设计和控制策略提供依据。忽略形状记忆合金丝热辐射影响,假定形状记忆合金丝与环境的对流换热是唯一恒定的热对流系数,则在加热过程有

$$\int_t \frac{4\rho_e l_s}{\pi d^2} I^2(t) dt = \int_t \frac{\pi d^2}{4} \rho_s c_p l_s dT(t) + \int_t h_w \pi d l_s [T(t) - T_0] dt. \quad (10)$$

冷却过程有

$$\int_t \frac{\pi d^2}{4} \rho_s c_p l_s dT(t) = \int_t h_w \pi d l_s [T_0 - T(t)] dt. \quad (11)$$

式中: ρ_e 为电导率; ρ_s 为密度; c_p 为热容; d 为直径; l_s 为鳍条形状记忆合金丝长度; $I(t)$ 为电流; h_w 为形状记忆合金丝与环境的热传递系数; T_0 为环境温度。

3 试验

试验系统如文献[14]所述,试验测量了鳍条在2种运动方式下,仿生推进器平均推进速度和平均推进力随频率的变化情况。考虑到形状记忆合金加热和冷却速度,选择0.4,0.6,0.8,1.0和1.2 Hz共5种频率。

3.1 平均推进速度随频率的变化规律

图6所示为鳍条在摆幅逐渐增大(主动运动)和

等摆幅(被动运动)2种运动方式下,仿生推进器平均推进速度随频率的变化情况。从结果看,无论鳍条采用何种运动模式,随着频率增加,推进器的平均速度均随之增大,该结论与文献[28-29]的试验结果类似。另外,当鳍条采用摆幅逐渐增大运动方式时,在相同运动学参数下,其产生的平均推进速度始终大于鳍条采用等摆幅运动方式时推进器的平均推进速度。

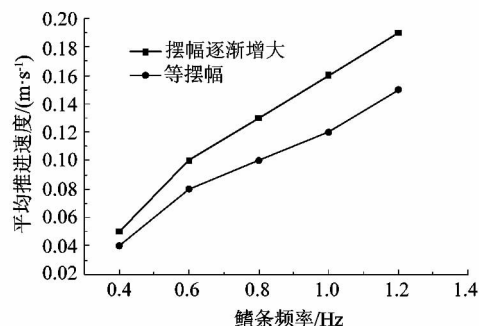


图6 平均推进速度随频率的变化

Figure 6 Variety of average propulsive velocity with frequency

3.2 平均推进力随频率的变化规律

图7所示为鳍条在摆幅逐渐增大(主动运动)和等摆幅(被动运动)2种运动方式下,仿生推进器平均推进力随频率的变化情况。平均值推进力根据采样获取的数据计算如下:

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n F_i. \quad (12)$$

式中 n 为采样点数。

与图6类似,仿生推进器平均推进力随着频率的增大而增大。而相同运动学参数下,鳍条在摆幅逐渐增大运动方式时产生的平均推进力始终大于鳍条等摆幅运动方式时推进器产生的平均推进力。

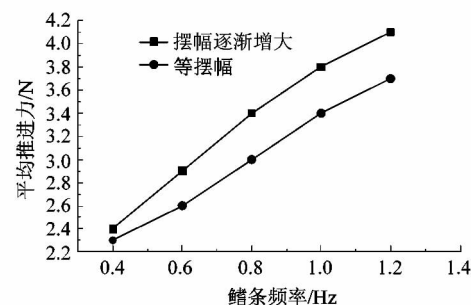


图7 平均推进力随频率的变化

Figure 7 Variety of averaged thrust with frequency

4 结论

笔者通过电机—凸轮—滑块—连杆—曲柄构成的

传动机构,结合形状记忆合金鳍条,实现了仿生鳍3种运动方式。搭建仿生鳍推进器及试验系统,测试了5种频率下,推进器在仿生鳍等幅度和摆幅逐渐增大2种不同运动方式时,平均推进速度和平均推进力的变化情况,得出以下结论:

1) 所设计的仿生鳍能够实现波动、摆动以及复杂三维柔性运动,满足推进、转弯以及稳定性调节等多种需求。

2) 仿生鳍推进器平均推进速度和平均推进力均随着频率的增加而增大,而相同运动学参数下,鳍条在摆幅逐渐增大运动方式时产生的平均推进速度和推进力始终大于鳍条等摆幅运动方式时的情况。

进一步的工作将针对仿生鳍推进器进行结构优化和控制算法优化,设计详细的试验方案,开展系统性的试验测试。

参考文献:

- [1] AJITH A M, SACHIN K S, SUDHEER A P. Design, fabrication and analysis of a bio-inspired tuna fish robot [C]//Proceedings of the 2015 Conference on Advances in Robotics. New York, USA: ACM, 2015: 54 - 54.
- [2] WANG Yangwei, TAN Jinbo, ZHAO Dongbiao. Design and experiment on a biomimetic robotic fish inspired by freshwater stingray [J]. *Journal of bionic engineering*, 2015, 12(2): 204 - 216.
- [3] CURET O M, PATANKAR N A, LAUDER G V, et al. Mechanical properties of a bio-inspired robotic knifefish with an undulatory propulsor [J]. *Bioinspiration & biomimetics*, 2011, 6(2): 1 - 9.
- [4] LI Jian, ZHAO Jianing, WANG Zhenlong. CFD simulation of effect of vortex ring for squid jet propulsion and experiments on a bionic jet propulsor [J]. *International journal of u- and e- service, science and technology*, 2016, 9(5): 211 - 226.
- [5] LIGHTHILL J, BLAKE R. Biofluidynamics of balistiform and gymnotiform locomotion: part 1 biological background and analysis by elongated-body theory [J]. *Journal of fluid mechanics*, 1990, 212: 183 - 207.
- [6] DONG Dibo, CHEN Weishan, SHI Shengjun. Coupling motion and energy harvesting of two side-by-side flexible plates in a 3D uniform flow [J]. *Applied sciences*, 2016, 6(5): 141.
- [7] HE Jianhui, ZHANG Yonghua, LOW K H. Comparative study of effect of fin arrangement on propulsion performance of bio-inspired underwater vehicles with multiple SMA fins [J]. *International journal of advanced robotic system*, 2015, 12(1): 1 - 15.
- [8] WEN Li, LAUDER G V. Understanding undulatory locomotion in fishes using an inertia compensated flapping foil robotic device [J]. *Bioinspiration & biomimetics*, 2013, 8(4): 046013.
- [9] QUINN D B, LAUDER G V, SMITS A J. Maximizing the efficiency of a flexible propulsor using experimental optimization [J]. *Journal of fluid mechanics*, 2015, 767: 430 - 448.
- [10] SHIBATA M, SAKAGAMI N. Fabrication of a fish-like underwater robot with flexible plastic film body [J]. *Advanced robotics*, 2015, 29(1): 103 - 113.
- [11] LOW K H. Modelling and parametric study of modular undulating fin rays for fish robots [J]. *Mechanism and machine theory*, 2009, 44(3): 615 - 632.
- [12] HOU Yahui, DU Gang, LI Xi, et al. A novel CPG controller of robotic fish: based on body wave function [J]. *Computer modelling and new technologies*, 2015, 19(4): 16 - 19.
- [13] HU Tianjiang, SHEN Lincheng, LIN Longxin, et al. Biological inspirations, kinematics modeling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by *Gymnarchus niloticus* [J]. *Mechanism and machine theory*, 2009, 44(3): 633 - 645.
- [14] HE Jianhui, ZHANG Yonghua. Development and motion testing of a robotic ray [J]. *Journal of robotics*, 2015, 2015(24): 1 - 13.
- [15] AYERS J, WESTPHAL A, BLUSTEIN D. A conserved neural circuit-based architecture for ambulatory and undulatory biomimetic robots [J]. *Journal of marine technology society*, 2011, 45(4): 147 - 152.
- [16] 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.
- [17] CEN L, ERTURK A. Bio-inspired aquatic robotics by untethered piezohydroelastic actuation [J]. *Bioinspiration & biomimetics*, 2013, 8(1): 016006.
- [18] CHEN Zheng, SHATARA S, TAN Xiaobo. Modeling of biomimetic robotic fish propelled by an ionic polymer - metal composite caudal fin [J]. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 2010, 15(3): 448 - 459.
- [19] HUBBARD J J, FLEMING M, PALMRE V, et al. Monolithic IPMC fins for propulsion and maneuvering in bioinspired underwater robotics [J]. *IEEE journal of oceanic engineering*, 2014, 39(3): 540 - 551.
- [20] WANG Yangwei, WANG Zhenlong, LI Jian, et al. Development of a biomimetic manta ray robot fish actuated by shape memory alloy [J]. *Robot*, 2010, 32(2): 256 - 261.
- [21] FINKBEINER J, AHMAD J, SANTOSA W, et al. Biomimetic fish actuated by shape memory alloy [C]//Sixth IEEE Conference on Industrial Electronics and Application. Beijing: IEEE, 2011: 2139 - 2144.
- [22] HUANG Peihua, WANG Jian. A new design of underwater robot fish system using shape memory alloy [J]. *Applied mechanics & materials*, 2012, 187: 260 - 266.
- [23] CORAL W, ROSSI C, MARTIN I P. Bio-inspired morphing caudal fin using shape memory alloy composites for a fish-like robot: design, fabrication and analysis [C]//12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Colmar, France: IEEE, 2015: 9.