

# 基于 CPG 控制的双髻鲨仿生机器人设计与实验研究<sup>\*</sup>

周宇斐 岳新阳 宋自根<sup>†</sup>

(同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)

**摘要** 随着人类对自然的探索越来越深入, 新型水下航行器的需求与日俱增, 仿生机器人因其特殊的推进方式和高效的推进效率而受到越来越多的关注, 而传统的仿生鱼类仅模拟了流线型外壳, 少有提及仿生对象本身结构对于仿生性能的影响, 本文提出了一种基于中央模式发生器(CPG)的类双髻鲨仿生机器人. 以鱼类基本运动形态为基础, 将鱼身抽象为关节连杆结构, 建立了三关节四连杆的仿生机器人模型并进行了仿真计算. 根据步态规律预估了其运动性能, 随后通过实验验证了可行性. 本仿生鱼旨在以简单的机械结构和较低的控制成本, 实现对双髻鲨的最大限度模拟, 得益于良好的仿生结构, 中央模式发生器的引入, 以及柔性硅胶材料在鱼身的应用, 此机器人拥有体型小, 控制简单, 地形适应能力强, 能量利用率高等特点, 与传统水下推进器相比噪音更小, 环境适应能力更强, 在科研、农业等行业均具有广泛的应用前景, 如野外勘测, 水下救援, 水域巡逻等.

**关键词** 仿生机器人, 类双髻鲨仿生, 中央模式发生器

**中图分类号** TP242; Q811

**文献标志码**: A

## Bionic Robot Inspired by the Hammerhead Shark with a CPG-Based Controller<sup>\*</sup>

Zhou Yufei Yue Xinyang Song Zigen<sup>†</sup>

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** As human exploration of nature becomes increasingly in-depth, the demand for new types of underwater vehicles is growing day by day. Biomimetic robots are receiving more and more attention due to their unique propulsion methods and high efficiency. However, traditional biomimetic fish models only imitate streamlined shells, with little consideration given to the impact of the structure of biomimetic objects on biomimetic performance. This paper proposes a biomimetic robot based on a central pattern generator (CPG) that mimics the behavior of the thresher shark. Using the basic movement pattern of fish as a foundation, the fish body is abstracted into a jointed linkage structure, and a biomimetic fish model with three joints and four linkages was established and subjected to simulation calculations. The movement performance was estimated based on gait patterns, and feasibility was subsequently verified through experiments. This biomimetic fish aims to achieve maximum simulation of the thresher shark with simple mechanical structure and economical control costs. Thanks to its well-designed biomimetic structure, the introduction of a central pattern generator, and the application of flexible silicone material in the fish body, this robot possesses characteristics such as small size, simple control, strong terrain adaptability, and high energy utilization efficiency. Compared to traditional underwater propellers, it ex-

2024-01-11 收到第 1 稿, 2024-02-28 收到修改稿.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(12172212)和中央高校基本科研业务费专项资金资助(22120220588), National Natural Science Foundation of China (12172212) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (22120220588).

<sup>†</sup> 通信作者 E-mail: zgsong@tongji.edu.cn

hibits lower noise and stronger environmental adaptability. It has broad potential applications in industries such as scientific research, agriculture, and fields like field surveys, underwater rescue, and water patrol.

**Key words** bionic robot, bionic hammerhead shark imitation, central pattern generator

## 引言

随着人类对河流海洋等水域的探索 and 开发不断深入,为了代替人类执行各种监测、探索等任务,水下航行器的需求日渐提升,并且有着广阔的发展前景<sup>[1]</sup>.然而传统水下航行器大多采用螺旋桨推进的方案,对工作环境要求高,工作效率低,面临复杂工况时稳定性较差,应用在科研勘探等领域时还会因为较大的噪声和明显的轨迹影响勘探结果,同时需要有负载的配套控制系统<sup>[2]</sup>.这些缺陷极大地限制了水下航行器的应用场景,因此有必要研究新的水下推进方案.

在这一背景下,鱼类独特的运动模式和其在水下的优异机动性引发了众多学者的研究,随着新型材料的出现和控制理论的逐步完善,鱼形仿生机器人从理论走向实践<sup>[3-8]</sup>.目前机器鱼大多采用底层步态控制和闭环运动控制相结合的方式进行控制,而中央模式发生器(CPG)能够在缺乏规律的信号输入情况下,输出不同模式的,有节奏的控制信号,在控制多关节运动机构时有着独特的优势,Kimura 在 Matsuoka 振子模型的基础上做了一定的改进.振荡器模型使用两个相互抑制的神经元来形成振荡器,其对应于动物的屈肌和伸肌控制神经元实现了对机器鱼关节的精确控制<sup>[3]</sup>.Wang 等人使用尖峰神经网络(SNN)和中央模式发生器(CPG)复制了高等生物运动时神经元信号的传输过程,为多模态水下机器人的开发和控制提供了理论指导<sup>[4]</sup>.

在此基础上,研究人员选取了不同的鱼类进行了仿生研究,各式各样的仿生鱼层出不穷,对仿生对象的选择也不尽相同,例如 Bal 等人受七鳃鳗的启发制作了以 CPG 为控制核心的仿生鱼,并且为其加入了有限状态机(FSM)算法<sup>[5]</sup>.此外 Hao 等受鳗鱼和鳐鱼启发,同样以 CPG 为核心开发出了仿生鱼 Manta<sup>[6]</sup>.随着 CPG 的关注度日益增长,与之配合的传感体系也逐渐完善,应用范围也逐渐拓展:Korkmaz 等人建立了基于闭环传感的仿生机器鱼 CPG 控制模型<sup>[7]</sup>.Nguyen 等人引入强化学习对 CPG 振荡器进行优化,并将其应用于细长波浪鳍

推进运动<sup>[8]</sup>.

以往的仿生鱼以常见鱼类的外形为主,仅仅模拟了鱼类的流线型外形,并未详细分析外形本身对仿生鱼性能的影响<sup>[9]</sup>,而我们认为,仿生对象的选取同样对仿生鱼的性能有所启发,双髻鲨作为海洋生物中机动性的代表,主要捕食机动性较高的水下生物,是出色的仿生对象,本文将从双髻鲨的生理学特点出发,从机械设计,控制系统建立,联合仿真分析,实验对照四个环节展开论述,介绍类双髻鲨仿生机器人的研制和测试,并对其未来应用进行展望.

## 1 类双髻鲨仿生机器人结构

### 1.1 仿生对象概况

双髻鲨,是脊索动物门软骨鱼纲真鲨目双髻鲨科鱼类的统称.双髻鲨头部宽大,身体呈流线型,脑袋形状特殊,被认为具有方向舵的能力,有助于双髻鲨在水中的游动.依靠其特殊的头部,双髻鲨能够非常准确地感知周围环境,以及确定猎物的方向和速度.在前向游动时,其锤头和身体形成的流线型外形使其拥有着非凡的机动性能<sup>[10]</sup>,研究表明双髻鲨拥有远超鲨类动物的捕食能力和游动能力<sup>[11]</sup>,因此将双髻鲨作为仿生对象符合人们对水下航行器的性能要求,在鱼形仿生的同时兼顾机动性和地形适应能力.



图1 双髻鲨生理特点

Fig. 1 Physiological characteristics of the hammerhead shark

双髻鲨在运动时胸鳍之前的部位不会弯曲,运动时会摆动胸鳍后面的部分产生推力,

此外双髻鲨游动时头部会左右摆动,以此获取更大的视野收集更多的环境信息<sup>[12]</sup>.根据生态和行为学观察,双髻鲨通常以缓慢的方式游动,主要

通过侧面扭动身体来推进. 它们的背鳍和尾鳍协同工作, 通过摆动和扭动来产生动力. 背鳍颇为发达, 通常较高, 能够提供稳定性和操纵性. 双髻鲨的尾部呈蝶形, 上下叶较大, 用于产生推进力.

## 1.2 机械结构建立

软脊椎动物的运动模式与机械运动存在较大差异, 因此使用纯机械方式模拟鱼类的运动较为困难, 目前常见的模拟软脊椎动物的方式是将其抽象成多关节模型, 对每个关节分别进行精确控制, 例如 Kakogawa 等人就采用多关节耦合的方式制作出了蛇形仿生机器人<sup>[13]</sup>. 常见的鱼类仿生机器人大多采用舵机与刚性外壳相配合的方式进行制作, Wu 等人使用四枚舵机成功模拟了鱼类的多种运动步态<sup>[14]</sup>.

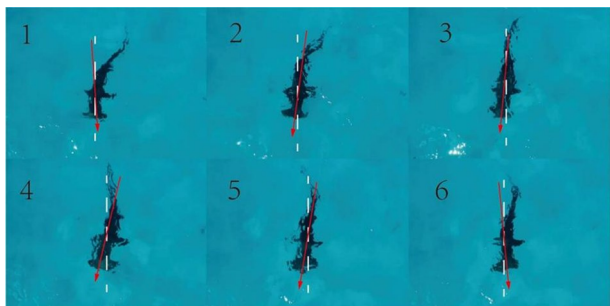


图2 双髻鲨运动步态

Fig. 2 Locomotion patterns of the hammerhead shark

机器鱼结构如图2所示, 该机器鱼主体部分可以视为由三关节四连杆组成的机械结构. 该机器鱼的尺寸为  $700\text{mm} \times 200\text{mm}$  (若包含鱼鳍宽度为  $310\text{mm}$ )  $\times 170\text{mm}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高). 鱼头部分为 3D 打印制作而成的硬质外壳, 内部包含电源, 控制板以及传感器; 中部结构为包含三个关节的灵活躯干, 关节处使用三枚舵机模仿鱼类的游泳步态; 尾部则是由硅胶浇筑而成的软体结构.

机器鱼前方具有可活动锤头, 两侧分布有可活动鱼鳍. 锤头部分布置有超声传感器, 该传感器可帮助鲨鱼对前方环境进行感知, 及时判断机器鱼是否需要前进或者转向, 此外, 双髻鲨两侧和下方也设计有装置传感器的部位, 未来可以装备更多水下传感器, 使其具有更强的环境感知能力.

由于该机器人需要长时间在水下运行, 我们在鱼身中段上包覆了防水性塑料薄膜, 使用电子密封胶对鱼身接缝处进行了细致的防水处理. 此外, 机器鱼内部的舵机、电路板等电子元件也都进行了独立防水处理, 机器鱼样机规格如图3所示.

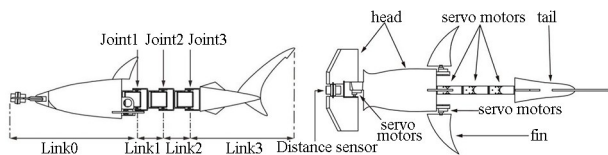


图3 机器鱼结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the robot fish structure

## 1.3 电控设计分析

电控部分由开发板, 舵机, 超声波距离传感器等组成, 机器鱼采用 esp32 开发板作为控制器, 该开发板集成了多种接口, 拥有优秀的拓展能力, 能够在较低功耗下正常运行. 三枚 RDS3218 舵机在 esp32 的控制下执行不同的步态, 以此实现多模式多步态的自由切换. RDS3218 舵机具有反应灵敏, 行程范围大, 扭矩大, 精度高的优点, 工作电压为  $4.8\text{V} \sim 6.5\text{V}$ , 堵转电流  $2\text{A}$ , 以 PWM (脉冲宽度调制) 方式驱动, 脉宽范围为  $500 \mu\text{s} \sim 2500 \mu\text{s}$ , 最大扭矩可达  $20\text{kg}/\text{cm}$ , 通过调整 PWM 信号空占比即可实现舵机的多角度自由转换.

鱼头部分携带的 L042MTW 超声波传感器能够提供前方的距离信息, 及时切换步态避开障碍物. 得益于 esp32 集成的 UART 通信模式, 该开发板可以直接连接超声波传感器进行数据收发. 超声波传感器的加入使得本仿生机器人具备自主避障能力, 能够在水下环境中根据障碍物的距离切换运动步态. 另外考虑到机器鱼在水下工作时可能会出现动力不足的问题, 该机器鱼为三枚舵机配备了独立供电, 以便快速完整地完成任务周期.

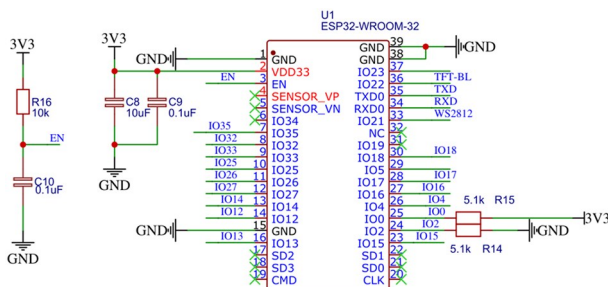


图4 esp32 引脚定义图

Fig. 4 esp32 pinout diagram

此外, 为方便后期参数调试, 我们借助 esp32 搭载的 WIFI 功能实现了程序的远程 OTA 更新, 无需回收拆装机器就能对内部参数进行调整, 仿生鱼内部的主要电路如图5所示. 得益于中央模式发生器的应用, 只需要简单的结构就能够实现相对复杂的运动模式和多步态切换, 并且具有较大的后期

迭代空间。

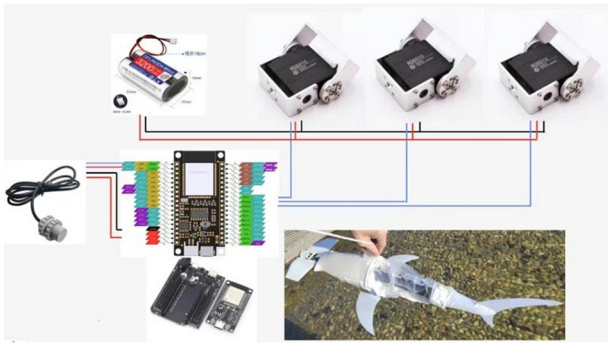


图 5 内部主要电路示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the main internal circuits

## 2 联合仿真分析

### 2.1 SolidWorks 辅助设计

使用计算机进行辅助设计,利用 SolidWorks 进行模型建立和结构优化分析,能够最大限度地降低前期实验研发的投入,同时能够对最终产品进行针对性的改进(图 6)。经过实验后,可以根据相应缺陷进行再设计,反复迭代推进产品进步。因此我们根据双髻鲨的生理特点,我们建立了简化后的机械结构三维模型,经过多次迭代,模型已经能较好地体现双髻鲨的结构特色,符合实验需求。

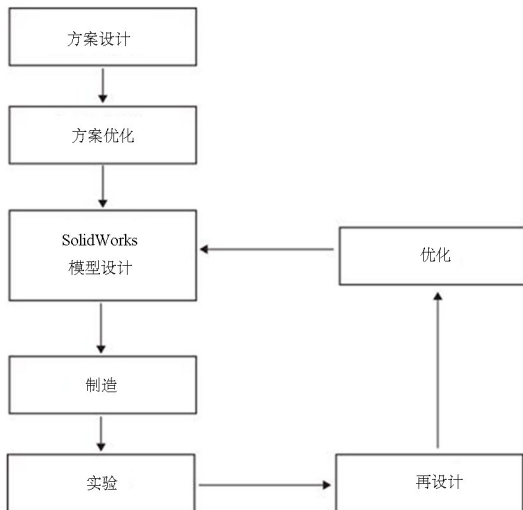


图 6 设计流程

Fig. 6 Design process

### 2.2 Adams-Simulink 联合仿真

根据机器鱼的运动机理,可以将鱼类运动抽象成四连杆三关节模型进行分析,鱼类向前游动的动作可以看作一个波从前向后的传递过程,由第一个

关节开始向后传播。在这一过程中每个关节的运动模式都和第一节相同或者类似,只是存在恒定的相位差,各个关节的振幅也因步态而异。在 CPG 模型中,关节可以看作是相互连接的神经元模型,由第一个神经元的自身激励产生振荡,随后振荡以恒定的相位差向后传播。

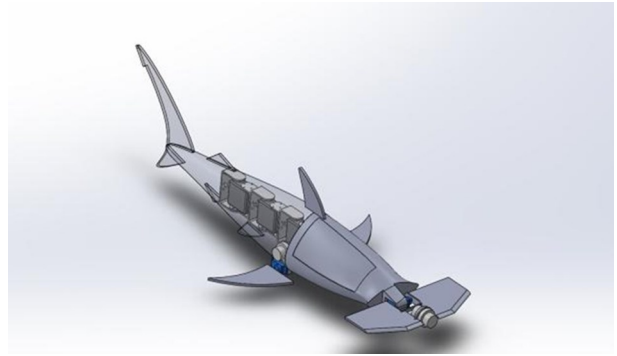


图 7 SolidWorks 模型

Fig. 7 SolidWorks model

这里使用的是由三个 Stein 神经振荡器构成的 CPG 控制网络,每一个振荡器对应着机器鱼的一个关节,这一模型通过三个相互耦合的振荡器实现多关节的联动控制,通过调整特征参数,可以实现多步态的控制和转换。CPG 控制器的数学模型如下图所示,其中  $i$  下标代表着第  $i$  个振子(本模型中  $i=1,2,3$ ),调整相位差  $\theta$  和方向偏差  $\epsilon$  可以实现不同运动模式之间的自由切换。另外,每一个振子的振幅可以独立调节,来更好地贴合真实鱼类的运动,为鱼类步态研究提供帮助。

为了更好地研究 CPG 控制器内部参数的实际效果,我们使用 Simulink 建立了仿真模型,并调整相关参数对其输出信号进行了模拟,结果如下图所示,CPG 控制器能够在不规律的参数输入后平滑地切换到新的输出模式。

在向前游动的步态中,三个振子拥有相同的振幅和频率,保持恒定的相位差进行运动,产生向后传递的波,此时鱼身向前运动,通过改变  $\omega$  的值可以实现加减速游动,更好地模拟真实鱼类的运动姿态,提升不同环境下的通过能力。而转向步态中,我们改变了方向偏差  $\epsilon$  的值,使其振荡中心偏离前进步态并保持恒定夹角,夹角的存在会使鱼身向夹角方向偏离,从而实现转向。在最后两个环节中,我们反转了三个振荡器之间的相位差,即鱼尾关节先开始振荡,使波从鱼尾向鱼头传递,使鱼身向后运动。

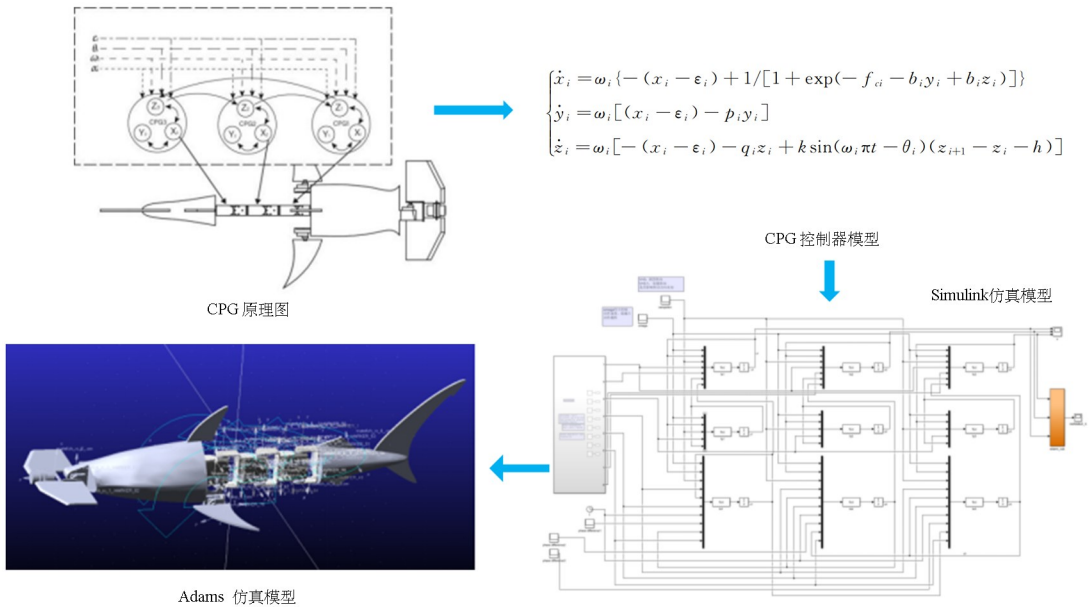


图8 联合仿真流程

Fig. 8 Co-simulation process

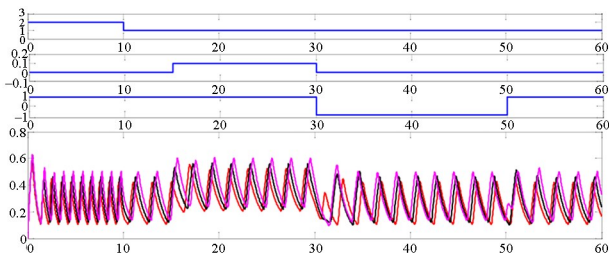


图9 步态切换示意图

Fig. 9 Gait transition illustration

### 3 实验验证

实验场地设置在一处水池中,水池长约十米,宽约五米,深一米.实验当天天气状况良好,水池清澈,确保环境在几乎不影响实验结果的情况下模拟自然条件.我们对实验过程进行了全程跟拍.机器鱼的一个前进运动周期如图所示.

在实验环节中,CPG 控制器中的 Stein 神经振荡器由舵机代替,通过旋转角度的变化来模拟 CPG

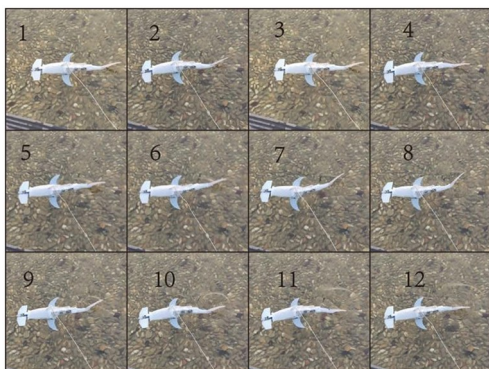


图10 前进步态

Fig. 10 Forward swimming gait

控制器的输出信号,相位差的存在使得鱼身整体的运动更为自然,贴合仿生对象本身的运动逻辑.实验较好地验证了控制器中各项参数对仿生鱼运动节律的调节作用,通过调节相位差大小,振荡频率以及幅度,可实现不同前进速率之间的自由切换,最大可达 0.6m/s.另外得益于柔性尾部对机械波的良好传递,仿生鱼的转向步态能够在最大限度上模拟真实鱼类(图 10),配合 CPG 控制器的节律控制,简单的三关节仿生结构就能拥有非常出色的灵活度.

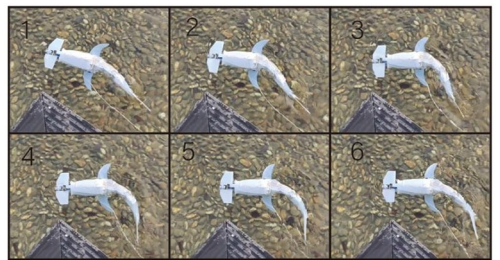


图11 转向步态

Fig. 11 Turning swimming gait

针对仿生鱼步态控制系统的实验结束后,我们尝试将机器鱼投入到自然环境的真实鱼群中,结果表明机器鱼的运行不会影响鱼群的正常活动.区别于传统的螺旋桨推进水下航行器,仿生鱼在运行时不会产生过大的噪音,同时拥有更好的通过能力,软体结构和流线型外壳减弱了水下复杂环境对航行器运动的影响.仿生鱼的外形也避免了水草缠绕、硬物堵塞等传统水下航行器面临的问题.

## 4 结束语

本文提出了一种基于CPG控制器设计的双髻鲨仿生机器人,以简单的结构和控制方案达到了相对高效的运动模式控制,实现了对双髻鲨的仿生目的,主要设计特点包括:将鱼身软体结构抽象为关节连杆模型简化控制、对多种材料进行有机组合、利用计算机辅助设计加速产品迭代.CPG控制器的引入使仿生鱼在拥有更自然的运动步态的同时,具备多模式多步态平稳切换能力,为未来水下航行器的发展提供了一个可能的方向。

## 参考文献

- [1] 董格羽. 仿生机器人技术的发展对经济的促进作用与应用前景分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(10): 112-114+118.  
DONG G Y. Analysis of the development of bionic robotics technology to promote the role of economy and application prospects [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2023, 13(10): 112-114+118. (in Chinese)
- [2] 刘洋, 孙显鹏, 徐超, 等. 无人水下航行器控制技术的发展[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(10): 5-10.  
LIU Y, SUN X P, XU C, et al. Development of the control of unmanned underwater vehicles [J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(10): 5-10. (in Chinese)
- [3] JIAN X Y, ZOU T. A review of locomotion, control, and implementation of robot fish [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2022, 106(2): 37.
- [4] WANG M, ZHANG Y Y, YU J Z. An SNN-CPG hybrid locomotion control for biomimetic robotic fish [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2022, 105(2): 45.
- [5] BAL C, OZMEN KOCA G, KORKMAZ D, et al. CPG-based autonomous swimming control for multi-tasks of a biomimetic robotic fish [J]. Ocean Engineering, 2019, 189: 106334.
- [6] CHEN J Y, YIN B, WANG C C, et al. Bioinspired closed-loop CPG-based control of a robot fish for obstacle avoidance and direction tracking [J]. Journal of Bionic Engineering, 2021, 18(1): 171-183.
- [7] KORKMAZ D, OZMEN KOCA G, LI G Y, et al. Locomotion control of a biomimetic robotic fish based on closed loop sensory feedback CPG model [J]. Journal of Marine Engineering & Technology, 2021, 20(2): 125-137.
- [8] NGUYEN V D, VO D Q, DUONG V T, et al. Reinforcement learning-based optimization of locomotion controller using multiple coupled CPG oscillators for elongated undulating fin propulsion [J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2022, 19(1): 738-758.
- [9] TSYBINA Y A, GORDLEEVA S Y, ZHARINOV A I, et al. Toward biomorphic robotics: a review on swimming central pattern generators [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2022, 165: 112864.
- [10] MCCOMB D M, TRICAS T C, KAJIURA S M. Enhanced visual fields in hammerhead sharks [J]. Journal of Experimental Biology, 2009, 212(24): 4010-4018.
- [11] LIM D D, MOTTA P, MARA K, et al. Phylogeny of hammerhead sharks (Family Sphyrnidae) inferred from mitochondrial and nuclear genes [J]. Molecular Phylogenetics and Evolution, 2010, 55(2): 572-579.
- [12] GAYLORD M K, BLADES E L, PARSONS G R. A hydrodynamics assessment of the hammerhead shark cephalofoil [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 14495.
- [13] KAKOGAWA A, JEON S, MA S G. Stiffness design of a resonance-based planar snake robot with parallel elastic actuators [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(2): 1284-1291.
- [14] WU Z X, YU J Z, TAN M, et al. Kinematic comparison of forward and backward swimming and maneuvering in a self-propelled sub-carangiform robotic fish [J]. Journal of Bionic Engineering, 2014, 11(2): 199-212.