

水下高速仿生机器鱼的研究进展与分析

邱 玥¹, 陈明茹¹, 王 旭², 黄永祥¹, 余国栋³, 庄 焱¹, 王常宇⁴, 肖佳媚¹

1. 海洋生物地球化学全国重点实验室(厦门大学), 厦门大学海洋与地球学院, 福建 厦门 361102;

2. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人与智能系统全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;

3. 厦门大学马来西亚分校中国—东盟海洋学院, 马来西亚 雪邦 43900;

4. 沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870

基金项目: 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室与中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室“海洋科学与技术交叉创新研究基金”(MR202401)

通信作者: 陈明茹, mrchen@xmu.edu.cn 收稿/录用/修回: 2024-12-12/2025-04-21/2025-06-10

摘要

能实现高速运动的鱼类有许多与提高游泳性能有关的形态学适应特征, 这对高速仿生机器鱼的研制具有重要借鉴意义。然而, 在以往的研究中, 对于鱼体形态效应的讨论较少。本文旨在分析高速游动鱼类的形态特征对仿生机器鱼设计的启发, 探索提升仿生机器鱼高速游动性能的关键因素。通过梳理典型鱼类游动模式及其关键形态学特征, 归纳出典型高速游动鱼类在体型流线化、推进模式高效化方面的形态学特征。系统地总结了当前高速仿生机器鱼在流体动力学优化与运动过程控制方面的主要研究成果, 评估了不同推进方式、机械结构与游动性能的关系。结果表明, 目前多款高速仿生机器鱼的游速能达到 1 m/s 及以上, 最高游动速度可达到 3.7 m/s, 且已应用于多种实际场景; 但各高速模型机普遍在推进效率、机动性与能耗控制等方面存在优化空间。此外, 本文分析了高速仿生机器鱼在设计和控制过程中面临的材料结构轻量化、自主决策控制与动力协调等关键技术难题, 并针对性地提出了发展方向和应用展望, 以为后续高速仿生机器鱼的研制和应用提供理论支持与技术参考。

关键词

仿生机器鱼

高速游动

推进方式

推进机理

中图法分类号: TP18

文献标志码: A

Advancements and Analysis of Research on High-speed Underwater Bionic Robofish Research

QIU Yue¹, CHEN Mingru¹, WANG Xu², HUANG Yongxiang¹, YU Guodong³, ZHUANG Yan¹, WANG Changyu⁴, XIAO Jiamei¹

1. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China;

2. State Key Laboratory of Robotics and Intelligent Systems, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

3. China-ASEAN College of Marine Sciences, Xiamen University Malaysia, Sepang 43900, Malaysia;

4. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China

Abstract

Fish capable of high-speed movement have many morphological adaptation characteristics

Keywords

bionic robotic fish;

related to improving swimming performance, which are of great reference significance for the development of high-speed bionic robotic fish. However, in previous studies, there have been relatively few discussions on the morphological effects of fish bodies. We investigate how the morphological characteristics of fast-swimming fish inspire the design of high-speed bionic robotic fish and identify key factors for enhancing their swimming performance. By reviewing typical swimming patterns and associated morphological features, we summarize that fast-swimming species commonly exhibit streamlined body shapes and efficient propulsion mechanisms. Then we systematically analyze the current progress in hydrodynamic optimization and motion control of high-speed bionic robotic fish, with an evaluation of the relationships among propulsion modes, mechanical structures, and swimming performance. Results show that several prototypes have achieved swimming speeds of 1 m/s or higher, with the fastest reaching 3.7 m/s, and have been deployed in various practical scenarios. Nonetheless, limitations persist in propulsion efficiency, maneuverability, and energy consumption. Furthermore, we discuss the critical technical challenges, including lightweight structural design, autonomous control, and coordinated propulsion dynamics. Finally, we propose the future development directions and application prospects to provide theoretical and technical guidance for the advancement of next-generation high-speed bionic robotic fish.

high-speed swimming;
propulsion mode;
propulsion mechanism

0 引言

海洋蕴含着丰富的矿产资源和生物资源,随着陆地资源的逐渐枯竭,如何实现海洋资源的安全高效开发已成为全球关注的热点问题。在此需求驱动下,遥控式水下机器人(remotely operated vehicle, ROV)、自主式水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)等水下航行器应运而生。水下航行器可用于水下侦察与情报收集、布雷与扫雷、潜艇协同与反潜作战等军事任务,也可以进行资源勘探、海洋生物观测、深海基础设施检修及水下考古与沉船打捞等^[1-2]。然而此类传统的水下航行器普遍存在体积庞大、机动性能受限等不足,特别是采用螺旋桨推进器时会产生显著的水流扰动现象,这不仅造成能源利用率下降,还直接影响到整体作业效能。不仅如此,研究人员发现螺旋桨撞击会带来许多负面影响,如产生更多的海洋垃圾^[3],提高海洋生物的死亡率,导致浅水生态系统的紊乱等。此外,螺旋桨产生的宽带噪声也对海洋动物有着严重的声学危害。

经过自然界的不断淘汰和筛选,高速游泳鱼类能在复杂的涡流中通过振荡运动来实现高效率推进、超机动性、低噪音和对流场的轻微干扰^[4-5]。其中,蓝枪鱼(Makaira nigricans)的最大速度为 2.25 m/s^[6];短鳍灰鲳鲨(Isurus oxyrinchus)的最大爆发速度为 5.02 m/s^[7],近 10 kn;一项关于旗鱼捕获成群沙丁鱼的研究报告称其速度上限为 8.19 m/s^[8];一些大型肉食性鱼,如旗鱼(Istiophorus platypterus)^[9]和黑枪

鱼(Makaira indica)^[10]的游泳速度甚至能超过 30 m/s。不仅如此,鱼类还可以通过与周围流体的相互作用来达到减阻的目的,与传统的自主水下航行器相比,其各方面的优势都十分显著。因此,了解鱼类的形态和游泳行为,模仿鱼类的游动推进模式并将这些原理应用到机器鱼的设计中,现已成为各国研究人员追求的目标。自 1926 年 BREDER^[11]开始对鱼类的游动机理研究以来,各类仿生机器鱼的理论和实验研究已渐显规模。国内相关研究团队也已提出了具备鱼跃能力的高速仿生鱼设计方案,其最大游速可达 2.2 m/s,显著优于传统仿生设计^[12]。而南方科技大学研制的 BigBay 仿生鱼模型在实地测试中打破了“机器鱼 50 m 最快游泳”的世界纪录,实现 2.83 m/s 的高速游动^[13]。在工程应用方面,李洁雯等开发的仿生机器人系统已成功应用于海上风电场水下桩基腐蚀监测,标志着仿生机器鱼的应用正逐步向水下巡检、长期巡航等实际工程领域拓展^[14]。然而,现有机器鱼的工作频率通常低于 3 Hz,游速基本为 0.5 m/s~1 m/s。少数能够实现高频率的系统仍局限于低速^[15-16]。因此,针对鱼类如何实现高速游动的科学问题,通过借鉴高速鱼类的自然构造、表征特性及行为特点来构建高速仿生机器鱼模型是目前研究的空白。

1 高速仿生机器鱼设计原理

1.1 鱼类游动机理研究

1.1.1 生物力学基础

从生物学特征方面看,能实现高速运动的鱼类

有许多与提高游泳性能有关的适应特征, 包括高度流线型的身体、较细的尾柄、较高的核心温度、排列紧密的白肌(快肌)纤维及主要由新月形尾鳍的横向运动而非身体起伏提供的动力等^[17-19]。

流线型身体可以减少整体阻力^[20]。鱼类的体型可以通过体细度比来有效地区分, 体细度比是指鱼的长度与其横截面直径的比值^[21]。基于传统阻力模型, 流线型的最佳体细度比被认为是 4.5 左右, 尽管 WALKER 等最近的一项分析表明, 体细度大于 4 时对游泳表现的影响都不大^[22]。

而鱼体尾柄处的变窄意味着梭形身体能节约尾流释放出的能量。部分高速鱼类的尾柄处还具有坚硬隆起的结构, 可以加强肌肉的附着, 强化尾柄强度, 以防高速游动时尾鳍因剧烈摆动而折断。虽然尾鳍的内部结构及结构力学特性不尽相同, 但新月形或叉形尾鳍可以通过前缘吸力而产生较大的推力, 流线型体型和新月形尾部往往会使得推力最大化, 并最大限度地减少阻力和反冲能量损失, 如金枪鱼(Thunnini)、鲸(Cetacea)、海豚(Delphinidae)等^[23]。

还有许多鱼类的鳞片结构对水中减阻起到了重要作用。一些鲹科鱼类, 如蓝圆鲹(*Decapterus maruadsi*)、珍鲹(*Caranx ignobilis*)等在躯干的后半段拥有特化的侧线鳞, 这些粗厚的鳞片向侧面突起, 能有效地破开水体; 鼠鲨科的灰鲭鲨(*Isurus oxyrinchus*)皮肤上有微小的齿状鳞片(盾鳞), 在其游动过程中, 竖起的齿状体可以屏蔽产生阻力的漩涡, 从而显著减少水的阻力, 提高游动速度^[24]。也有研究表明, 自然界中的鱼类往往表现出高度协调的群体运动, 集群运动中相邻鱼类之间身体运动的相位匹配可以帮助鱼群内的单个鱼类增加推力或减少阻力, 同时降低能量消耗^[25]。鱼类还通过鱼体表面分泌的黏液物质^[26]或从体表传导的热量来降低身体周围的水黏度, 从而减少阻力^[27]。另有研究发现, 海洋中游速很快的水生生物, 如虎鲸(*Orcinus orca*)、海豚等, 它们的身体顶部呈深色, 底部呈白色。海洋生物身体顶部的黑色在减少皮肤阻力方面非常有效^[28]。

金枪鱼作为典型的高速鱼其体内具有特殊的血管分布, 即在其肌肉和内脏器官之间存在一套特殊的网状血管, 这套蓄热结构称为逆流热交换器^[29]。它可以使鱼体产生的热量不被水流带走, 促进骨骼、眼睛和大脑这些高需氧组织的温度升高, 从而加速糖类的分解以快速地产生能量, 作用于神

经系统, 使其具有爆发性的速度^[30]。以速度著称的剑鱼(*Xiphias gladius*)、旗鱼(*Istiophorus platypterus*)和枪鱼(*Makaira*)的头部也具备这样的逆流热交换结构, 可以使其眼睛和大脑的局部温度升高以保持敏锐的视觉和迅猛的游速^[31]。

1.1.2 鱼类推进模式分类

LINDSEY^[32]和 WEBB^[33]基于鱼类游动时驱动部位的差异, 将其推进方式划分为两大基本模式: 身体/尾鳍推进模式(Body and/or Caudal Fin, BCF)和中间鳍/偶鳍模式(Median and/or Paired Fin, MPF)。BCF 和 MPF 模式又都可以分为两种运动类型: 波动或振荡。此外, 也可以根据推进部分的不同, 划分为更细致的分类^[34]。BCF 模式通过鱼体特定区段的波动与尾鳍的协调运动, 与流体作用产生向后传播的推进波, 可以进一步细分为 5 个游动模式: 鳗鲡模式(Anguilliform)、亚鲹模式(Sub-carangiform)、鲹模式(Carangiform)、鲔模式(Thunniform)和箱鲀模式(Ostraciiform)。MPF 推进模式的鱼类则是通过身体中部的鳍来产生推力, 可以细分为 7 个游动模式: 鳐模式(Rajiform)、刺鲀模式(Diodontiform)、弓鳍鱼模式(Amiiform)、裸背鳗模式(Gymnotiform)、鳞鲀模式(Balistiform)、隆头鱼模式(Labriform)和鲀模式(Tetraodontiform)。鱼类不同游泳模式的详细分类及特征如表 1 所示。

如前所述, 不同的游泳模式使用不同的鳍, 所表现出的游速和机动性也各不相同。约 85% 的鱼类采用 BCF 模式, 就效率而言, 可以看出 BCF 中鲔科的运动模式堪称游泳进化的顶峰^[47]。与 BCF 推进方式相比, MPF 方式更为敏捷但在提速方面稍显逊色。在仿生机器鱼的发展中, 高速和高效率一直是关键指标。因此, 现有的仿生机器鱼大多采用 BCF 作为产生推力的方式。

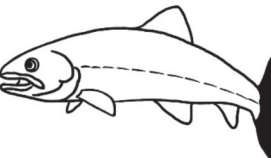
1.2 仿生鱼游动机理研究

1.2.1 流体动力学优化

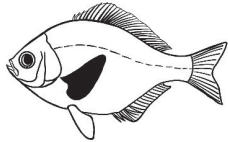
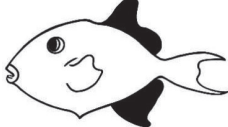
进入 21 世纪后, 高性能计算技术迅速发展, 仿真软件和流体力学软件用于运动学和动力学分析, 基于粘性流体的 CFD(Computational Fluid Dynamics)方法逐渐成为仿生水动力学数值手段的主流选择^[48]。在仿生流体力学领域, RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)方程被广泛应用于摆动尾鳍的涡动力学分析^[49-50]。CFD 仿真则成为研究仿生 AUV 水动力性能的主流方法, 包括稳态/非稳态流场模拟^[51]、自主推进模型的水动力参数优化^[52]及运动控制策略验证^[53]。近年来研究呈现两大

表 1 鱼类不同游泳模式的分类及特点

Tab.1 Classification and characteristics of different swimming patterns of fishes

推进方式	游动模式	推进特点	优缺点	代表仿生鱼模型	最大游速
	 鳗鲡模式 (Anguilliform)	日本鳗鲡 (<i>Anguilla japonica</i>) 和七鳃鳗 (<i>Lampetra japonica</i>) 是采用该模式的典型例子, 其明显特征是鱼体全身参与大振幅波动, 至少有一个完整的波长可以沿着鱼体传递, 横向力被充分抵消, 并可以通过反向推进波的方向向后移动 ^[35]	机动性高, 既能向前游也能向后游, 适合生存于复杂的环境; 但游泳速度较低	2022 Multi-joint Underwater Robot ^[36]	0.78 BL/s (Body Lengths per second, BL/s) (1.4 m/s, 全长为1.8 m)
	 亚鲹模式 (Subcarangiform)	代表鱼类为日本花鲈 (<i>Lateolabrax japonicus</i>), 鱼体的一半参与了波动运动, 从而提高了游泳速度	该游动模式的鱼类游速通常快于鳗鲡模式的鱼类, 但其头部被限制无法参与波动, 机动性下降	2021 Bio-inspired AUV ^[37]	1.5 BL/s (0.75 m/s, 全长0.5 m)
BCF	 鲹模式 (Carangiform)	代表鱼类为鲹鱼 (<i>Squaliobarbus oureculus</i>)、鲱鱼 (<i>Clupea pallasii</i>) 等, 鱼体相对刚性, 转弯和加速能力有一定下降, 参与波动的身体部位很明显, 大约占体长的1/3	是最常见的游动形式, 速度快于亚鲹科模式鱼类, 机动性较弱	2022 Tethered Bioinspired Robotic fish ^[38]	4.3 BL/s (1.19 m/s, 全长0.277 m)
	 鲔模式 (Thunniform)	代表鱼类为金枪鱼 (<i>Thunnini</i>)、鲨鱼等, 是水生环境中进化出的最有效的运动模式, 其推力是由基于升力产生的, 尾鳍对推进力的贡献超过90%	是在静水中运动速度最快、效率最高的游动模式, 可以长时间保持高巡航速度; 不太适合慢速游泳、转弯等	2016 Single-Motor-Actuated Robotic Fish ^[39]	3.07 BL/s (1.14 m/s, 全长0.37 m)
	 箱鲀模式 (Ostraciiform)	代表鱼类为箱鲀 (<i>Ostraciidae</i>), 是BCF模式中唯一的纯振荡运动模式。它的特点是尾鳍摆动相当僵硬, 被用作辅助运动手段, 以帮助在较高速度下产生推力, 鱼体基本上保持刚性	具有良好的稳定性和机动性; 水动力效率低, 速度明显慢于鲔科模式 ^[40]	2018 Ostraciiform Underwater Robot ^[41]	2 BL/s (0.3 m/s, 全长0.149 m)
	 鳐模式 (Rajiform)	代表鱼类为赤魟 (<i>Dasyatis akajeii</i>)、蝠鲼 (<i>Mobulidae</i>) 等。使用其大而宽的胸鳍进行波动来游动, 这种波动是从前到后的波浪式运动, 或是通过胸鳍的一部分进行局部波动。另一方面, 振荡模式依赖于快速拍打的鳍来产生振幅较大的波浪	具有高机动性, 能在复杂的环境中灵活移动, 且水动力效率高; 速度缓慢适合底栖生活	2022 Manta Ray Robot ^[42]	0.17 BL/s (0.17 m/s, 全长1 m)
MPF	 弓鳍鱼模式 (Amiiform)	代表鱼类为弓鳍鱼 (<i>Amia calva</i>), 用长背鳍来波动推进。弓鳍鱼的背鳍在波动过程中可以看到多达7个波浪通过, 且波浪的振幅范围各不相同	具有良好的机动性和稳定性, 常见于淡水环境中	2021 Bio-inspired Amphibious Robot ^[43]	0.48 BL/s (0.295 m/s, 全长0.62 m)
	 裸背鳗模式 (Gymnotiform)	代表鱼类为线翎电鳗 (<i>Apteronotus albifrons</i>), 其显著特征是它没有背鳍和腹鳍, 尾鳍退化至很小或无; 但具有很长的臀鳍, 鳍条多于140根。通过利用臀鳍来实现波动, 而不是用背鳍来实现类似的运动	机动性高, 既可以向后游动, 也可以向前游动	2018 Undulatory Fin Propulsion Bio-Inspired Robo ^[44]	0.37 BL/s (0.16 m/s, 全长0.426 m)

续表

推进方式	游动模式	推进特点	优缺点	代表仿生鱼模型	最大游速
		代表鱼类为海鲫(<i>Ditrema temmincki</i>), 在游泳时, 其狭窄的胸鳍能够提供两种类型的振荡运动: 拍打和划动。另一个例子是尖嘴龙鱼(<i>Gomphosus varius</i>), 其胸鳍也是以拍打运动为主 ^[45]	能灵活地移动和转向, 适合精确的定位和短距离游动	2020 Flexible folding fin robot ^[46]	0.58 BL/s (0.231 m/s, 全长0.4m)
MPF	隆头鱼模式 (Labriform)				
		代表鱼类为河豚(<i>Tetraodontidae</i>)。其胸鳍产生的力的垂直分量将提供上下运动, 依靠胸鳍的来回摆动产生推进力, 腹鳍则用于辅助控制方向和稳定性	具有较高的灵活性和稳定性, 用于短距离游动和精确控制		
	刺鲀模式 (Diodontiform)				
		代表鱼类为翻车鲀(<i>Mola mola</i>), 推进力主要依靠背鳍和臀鳍的左右拍打运动, 但其背鳍和臀鳍的摆动方式与尾鳍相同。	能在水中保持稳定的速度和方向, 但速度缓慢		
	鲀模式 (Tetraodontiform)				
		代表鱼类为鳞鲀(<i>Balistidae</i>), 依靠背鳍和臀鳍的同步运动以产生推进力的游泳模式。可以有效地产生水平力, 推动鱼体前进	两种鳍的波动十分协调, 有效提高游动的效率和稳定性		
	鳞鲀模式 (Balistiform)				

趋势: 一方面, 研究通过 CFD 技术拓展机器鱼的工程实用性, 如环境感知与避障功能开发^[54-55]。另一方面, 将数据驱动方法与 CFD 结合, 构建多目标协同优化框架, 推动仿生机械鱼设计向智能化发展^[56-57]。CFD 技术能够精确预测和模拟流体流动行为, 在优化仿生水下航行器的结构设计方面发挥着至关重要的作用, 可以显著增强其流体动力学和运动学性能。但是, 由于鱼游 CFD 模拟涉及巨大的计算量, 且现有实验数据的精度和完备性不足以支撑, 对鱼类游动过程中复杂流固耦合作用与水动力特性的认知仍存在诸多空白, 全面理解这一复杂机制仍面临较大挑战。

通过 CFD 模拟优化设计的仿生机器鱼形态与动力学模型, 能够在理论上达到高效推进。然而, 真实环境中的水动力条件复杂多变, 仅模型设计不足以保证其稳定性和适应性。在实际应用中, 仿生机器鱼的运动表现不仅依赖于其形态设计, 还高度依赖其对环境变化的感知能力和实时调整机制。

传感器的使用是仿生机器鱼实现自主游动和智能化的关键。仿生机器鱼通过传感器(如人工侧线、压力传感器、温度传感器、流速计等)实时感知周围环境中的水流变化、压力梯度及障碍物分

布, 能够动态响应外界刺激, 模拟鱼类在复杂水域中的灵敏导航能力并根据环境信息作出决策。如表 2 所示, 各类传感器具有不同的生物感觉功能^[58]; 表 3 进一步归纳了不同传感器在仿生机器鱼中的功能应用。通过摄像头、声呐等传感器, 机械鱼可以感知移动目标的位置、速度和运动轨迹, 模拟真实鱼类对猎物或伙伴的追踪行为。同时, 结合算法模型, 仿生机器鱼能够在多目标环境中做出行为选择, 优先追逐特定目标或避开潜在威胁, 展现出一定的智能决策能力。借助传感器网络和通信模块, 机械鱼能够感知同伴的位置、运动状态和行为意图, 从而实现群体内的动态信息共享与协同行动, 使其在执行复杂任务(如大面积环境监测、搜救等)时展现出自组织特性, 如编队游动、队形变化和任务分工等。

1.2.2 仿生鱼运动控制

仿生机器鱼在推进机制、驱动架构、动力学模型、控制对象及感知方式等关键要素上与传统水下机器人存在着本质差异。这些差异性特征对运动控制系统的架构设计、性能优化及算法选择均产生重要影响。因此, 如何设计高效、稳定的控制策略以精准调节推进模式、优化运动性能, 成为仿生机器

表 2 传感器的生物感觉功能
Tab.2 Biological sensory functions of sensors

感知能力	生物传感器	传感器	局限性
视觉	视锥细胞、视杆细胞	摄像机	当下潜深度增加，会使内部视频摄像机的无线通信系统出现断联，且受水中浑浊度的影响，很难辨别远处的物体
压力及水流检测	侧线	水流传感器，压力传感器，渗漏传感器和深度计等	只能测量本体压力，无法探测远距离目标；温度、压力变化会导致传感器中使用的金属膨胀或收缩
嗅、味觉	鼻腔、舌、触角	化学感受器	
听觉	耳石、韦伯氏器官	声呐、超声波接近传感器和超声波测距传感器等	水环境会使超声波衰减；水温、盐度、密度变化会影响声速

表 3 不同传感器在仿生机器鱼上的应用及其功能
Tab.3 The applications and functions of different sensors in bionic robotic fish

传感器类型	应用场景	功能	在仿生鱼中的应用
惯性测量单元 (IMU)	监测机器鱼的姿态、加速度和角速度	实现姿态控制和稳定性调整；优化游动效率和运动轨迹	文[59-60]
压力传感器、水流传感器	测量鱼体表面的压力分布感知水流速度、方向和湍流强度	两者多整合为人工侧线传感器使用；分析流体动力学特性；优化鱼体形态以减少阻力；调整游动策略以适应不同水流条件；提高能量利用效率	文[61-64]
视觉传感器	捕捉周围环境的图像信息	实现目标识别与追踪；避障与导航；环境地图构建	文[65-66]
声呐传感器	探测水下障碍物、目标物体或地形	实现水下避障；目标定位与追踪；水下环境感知	文[14,67]
温度传感器	监测水温变化	适应不同温度环境；研究温度对机器鱼性能的影响	文[68-69]
光电传感器	检测光线强度或特定波长的光	实现光信号追踪；适应不同光照条件	文[70]
力传感器	测量尾鳍或胸鳍的推进力	优化推进效率；实现精确的运动控制	文[71]

鱼研究的关键问题。

根据控制系统的反馈方式，仿生机器鱼的运动控制系统可分为开环控制系统 (open-loop control system) 和闭环控制系统 (closed-loop control system)。开环控制系统通常依赖预设的运动模式或周期信号，实现仿生游动的基本控制，具有计算量小、实现简单的优势，但缺乏对外部环境变化的自适应能力。闭环控制系统则通过实时反馈调整运动参数，提高系统的稳定性和环境适应性，包括比例—积分—微分控制 (proportional-integral-derivative control, PID)、模型预测控制 (model predictive control, MPC) 和滑模控制 (sliding mode control, SMC) 等经典控制方法，以及模糊控制 (fuzzy controller, FC)、基于学习的控制 (learning-based control, LBC) 方法等智能控制方法。这两类控制系统在控制精度、实

时性、环境适应性、计算复杂度等方面各具特点，因而针对不同应用场景具有不同的适用性^[72]，如表 4 所示。

2 高速仿生机器鱼样机研制现状

2.1 生物仿生模型选择的多样性

仿生机器鱼的设计大多以自然界的鱼类或海洋生物为仿生模型，旨在通过模仿这些生物的游泳机制来提升推进效率和机动性。麻省理工学院 (MIT) 是这一领域的先驱，其著名的 RoboTuna (图 1) 项目^[86]由 David Barrett 团队启动，以蓝鳍金枪鱼为生物模型，实现了高达 91% 的推进效率和 1.67 BL/s (2.1 m/s) 的直线巡航速度，是现代首款功能完备的仿生鱼。

随后，该团队又同美国 Draper 实验室联合研发了“VCUV” (图 2) 仿生黄鳍金枪鱼 (Thunnus

表 4 仿生机器鱼运动控制系统的分类及应用
Tab.4 Classification and application of bionic robot fish motion control system

控制系统类型	控制方法	控制优势	局限性	适用场景	机器鱼模型
开环控制系统	轨迹逼近方法	通过数学优化, 使实际轨迹尽可能地贴合目标轨迹, 减少偏差, 提高运动控制的准确性	运动参数集的维度大, 计算过程复杂; 对关节的结构和驱动电机的性能均有一定的要求	适用于需要高精度轨迹跟踪、路径优化、运动平滑化等任务	
	周期信号控制	使用的模型、参数较为简单, 易于编程; 参数可调节, 易于实现仿生运动	受控参数的变化易使运动不够平滑; 运动模式固定, 灵活性较差	适用于周期性游动, 如巡航任务	
	基于中枢模式发生器(Central Pattern Generator, CPG)的开环控制	运动方式灵活可控; 运动的平滑性不受受控参数变化的影响	缺乏基础理论研究; 模型精确建立难度高	适用于基础仿生步态控制	文[73-74]
经典控制	PID 控制	结构简单, 计算量小, 易于实现; 控制精度较高, 适用于直线游动和恒速巡航	对复杂非线性系统控制效果差; 参数整定困难, 对环境变化适应性差	适用于简单游动	文[75]
	MPC控制	适用于非线性、时变系统; 具备优化预测能力, 能处理约束问题	计算量大, 硬件要求高; 依赖精确的系统模型	适用于复杂环境自适应游动、目标跟踪	文[76-77]
	SMC控制	具有较强的鲁棒性, 适用于非线性系统; 快速收敛, 动态响应速度快	存在抖振问题, 影响系统平稳性; 需要建立精确的系统动力学模型	适用于扰动环境中的运动控制	文[78]
闭环控制系统	FC控制	无需精确数学模型, 适用于复杂环境; 具备较好的自适应能力	依赖人工经验, 规则设定较难优化; 计算复杂度较高	适用于自适应避障、流场适应	文[79]
	LBC控制	具备自学习、自优化能力; 不要求系统有精确的模型, 算法简便	训练周期长, 计算资源需求大; 收敛性不稳定, 难以保证全局最优	适用于复杂环境中的自主导航	文[80-81]
	进化算法控制	全局搜索能力强; 适用于未知环境中的智能决策	计算复杂度高, 难以在实时控制任务中直接应用; 适用于离线优化, 不适合需要即时决策的任务	适用于多机器鱼协作路径优化	文[82-83]
混合控制	PID+FC	提高了控制系统的自适应性; 减小了超调量, 提高系统稳定性	不同任务需要不同的规则集, 通用性较低; PID调节在非线性系统中仍存在局限	适用于精度较高仿生游动控制	文[84]
	SMC+FC	结合模糊控制后, 可以在不确定性环境下进一步优化滑模面, 使控制更加稳定; 优化切换策略, 减少抖振	计算复杂度高, 对计算硬件要求高; 模糊规则设计仍依赖经验	适用于复杂流体动力环境中的仿生机器鱼	文[85]

albacares)^[87], 在 RoboTuna 的基础上提高了推进效率和机动性并具有稳定的转向和深度保持能力, 在 1 Hz 的摆尾频率下, 最高可达到 0.5 BL/s (1.25 m/s) 的游速和 75.8°/s 的转向速率; 而当频率超出 1 Hz 时, 其产生的力会大于预期, 尾部控制性能大大下降。

弗吉尼亚大学朱建忠团队提出 Tuna Robotics 项目^[88], 以黄鳍金枪鱼和大西洋鲭鱼 (Scomber scombrus) 为 Tunabot(图 3) 外观设计的灵感来源。其设计只保留了由高刚度聚合物制成的尾鳍, 体表附有弹性皮肤以最大限度地减少驱动过程中的屈曲; 通过高频尾摆技术, 其摆尾频率可达 15 Hz,



图 1 仿生机器鱼 RoboTuna
Fig.1 Bionic robotic fish RoboTuna

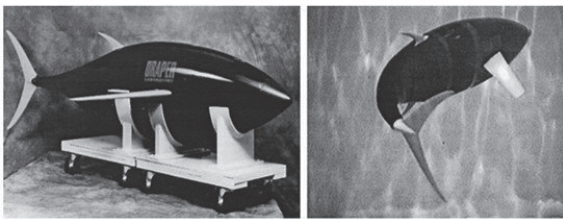


图 2 仿生机器鱼 VCUUV
Fig.2 Bionic robotic fish VCUUV

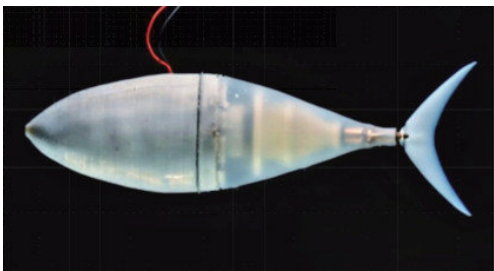


图 3 仿生机器鱼 Tunabot
Fig.3 Bionic robotic fish Tunabot

最大游动速度约为 4 BL/s (1 m/s)。

北京航空航天大学研发了国内首款采用波动推进机制的仿生机器鱼^[89], 该机器鱼通过模拟鳗鲡的波动运动和尾鳍的摆动, 最高游速达到 0.75 BL/s (0.6 m/s)。日本东京工业大学、伊斯坦布尔科技大学和北京大学喻俊志团队分别以海豚为仿生对象开发了两关节机器海豚^[90](图 4)、仿生海豚 Rodo-2^[91](图 5)和能执行重复跳跃动作的仿生机器海豚^[92](图 6), 其推进最大速度分别达到 0.69 BL/s (1.2 m/s)、 0.5 BL/s (1 m/s)和 2.93 BL/s (2.11 m/s)。

北京航空航天大学的王田苗团队以鲔科鱼类为模型, 设计优化了仿生机器鱼 SPC-3 UUUV^[93](图 7), 研究表明采用模糊逻辑控制方法对斯特劳哈尔数 (Strouhal number, St) 进行主动调控, 当 St 控制在 $0.4 \sim 0.5$ 时, 推进效率得到显著优化, 可

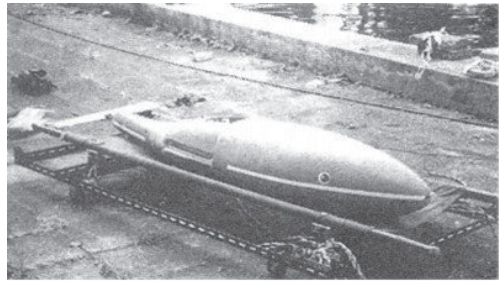


图 4 仿生两关节机器海豚
Fig.4 Bionic two-joint robotic dolphin

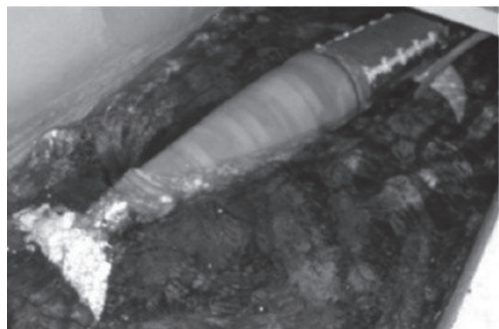


图 5 仿生三关节机器海豚 Rodo-2
Fig.5 Bionic three-joint robotic dolphin Rodo-2

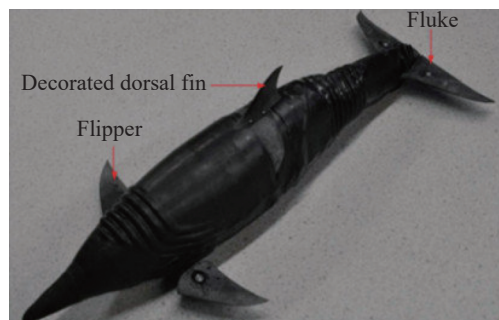


图 6 仿生机器海豚
Fig.6 Bionic robotic dolphin



图 7 仿生机器鱼 SPC-3 UUUV
Fig.7 Bionic robotic fish SPC-3 UUUV

降低机器鱼功耗并提升游速, 实现最大速度 1.87 m/s 。

英国科尔切斯特埃塞克斯大学的 Clapham 团队开发了 iSplash-I(图 8)项目^[94], 该机器鱼以鲤鱼为模仿类群, 实现了最大速度 3.4 BL/s (0.88 m/s), 并

在 6.6 Hz 下保持 2.8 BL/s (0.7 m/s) 的稳定游泳速度。后续又在一代的基础上研发了以鲹科鱼类为模型的 iSplash-II^[95](图 9), 该模型使用了 0.6 kg 的大电动机(占总质量的 75%), 这样集中质量的设计有效地减少了后坐力, 有助于后部稳定性的提高, 并获得较大的振幅和推力。此外, 可通过实验调整鱼体后部链接的组成, 以实现各种频率下的游动。该机器鱼通过一个峰值功率为 120 W 的电机以 20 Hz 驱动尾鳍, 其稳定直线速度可高达 11.6 BL/s (3.7 m/s), 并能在最大速度下保持耐力约 10 min, 成为目前游速最快的仿生机器鱼。然而, 由于结构设计的限制, iSplash-II 并不能实现转向。

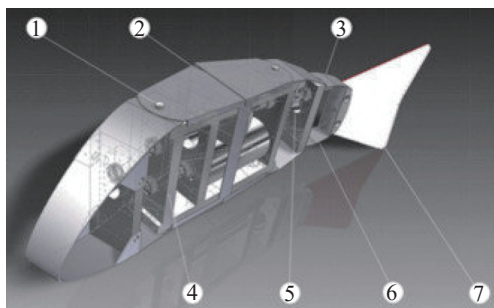


图 8 仿生机器鱼 iSplash-I

Fig.8 Bionic robotic fish iSplash-I

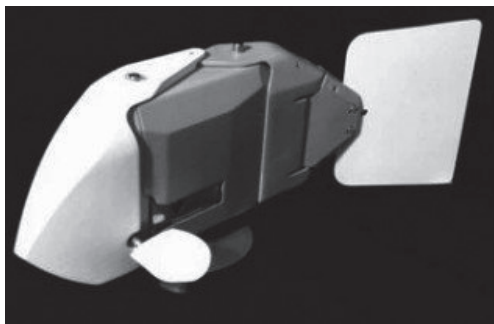


图 9 仿生机器鱼 iSplash-II

Fig.9 Bionic robotic fish iSplash-II

2.2 续航能力与动力系统的改进

仿生机器鱼项目普遍采用高效能耗的伺服电机与长续航电池组, 以确保机器鱼能够在长时间内进行自主作业。Tunabot 的研究显示, 一个 10 Wh 的电池组可支持机器鱼游泳 4.2 km。哈尔滨工程大学研制的“仿生-I”号^[96](图 10)水下仿生机器鱼采用双伺服电机驱动系统, 两台电机分别独立调控胸鳍和尾鳍的运动, 具备 10 m 左右的下潜深度和 70 kg 的负载能力, 最高航速达到 0.5 BL/s (1.2 m/s)。

而南方科技大学王峥教授团队的 BigBay 机器

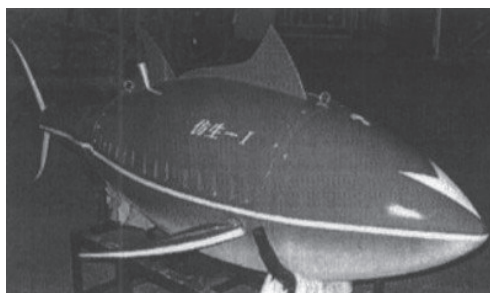


图 10 机器鱼仿生-I号

Fig.10 Robotic fish FangSheng-I 号

鱼^[13](图 11)配备 150 W 的驱动电机和多种传感器, 基于智能算法来获取自身实时姿态信息并以单向持续高速转动加轭式机械结构来实时调整 3 自由度的摆尾换向, 可以在 50m 长泳池内保持稳姿态并以平均 4 kn (约 2.26 m/s)、瞬时 5 kn (2.83 m/s) 的高速完成游泳任务。



图 11 仿生机器鱼 BigBay

Fig.11 Bionic robotic fish BigBay

韩国建国大学的研究人员开发了一款能够完成快速游泳和跳水运动的仿生机器鱼 KUFish^[97](图 12), 它采用小型高效的直流电机, 额定转速可达 12 000 转/分, 配合减速比 14.4 的齿轮系统, 由 4 块锂聚合物电池供电 (150 mAh, 3.7 V), 以确保机器鱼在水下有足够的能量驱动高频尾摆。在其释放后的 0.68 s 瞬间可达到最大 6.1 BL/s (1.35 m/s) 的速度跃出水面。

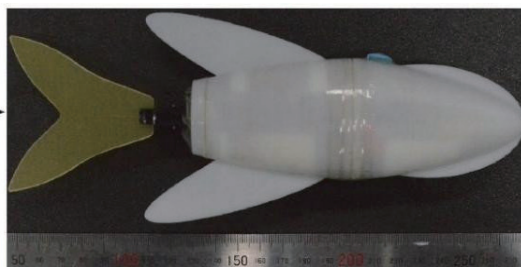


图 12 仿生机器鱼 KUFish

Fig.12 Bionic robotic fish KUFish

这些续航能力与动力系统的改进,不仅提升了仿生机器鱼的实际操作性能,还降低了其在长时间复杂任务中的能耗,为大规模推广提供了技术保障。

2.3 智能材料驱动系统的创新

电机和螺旋桨驱动普遍存在噪音大、效率低(通常低于 40%)的问题。近年来,驱动材料不再局限于传统的电动机或液压驱动,更多具有低噪声、高效率、高柔韧性的新型功能材料被应用于仿生机器鱼的制作,如离子聚合物—金属复合材料(ionic polymer metal composite, IPMC)^[98]、形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)^[99]、压电材料(lead zirconate titanate, PZT)^[100]等。这类以智能材料制成的新型机器鱼体型都较为微小,功率和精度无法与电机相提并论,在游动速度方面远低于用电机驱动机器鱼,但在高变形性和适应性方面具有独特的优势。

日本早稻田大学的研究人员开发了一种仿生机器鱼^[101](图 13),其软尾内部缝有两组 SMA 导线,通过提供电流使 SMA 线产生热量收缩,尾鳍向两侧弯曲,实现与真鱼相似的 BCF 推进模式。机器鱼能在 3 种不同频率(1 Hz、2.25 Hz 和 3 Hz)下保持恒定的速度和稳定的游泳状态,并在 2.25 Hz 下达到最快的游泳速度 0.46 BL/s (0.069 m/s)。

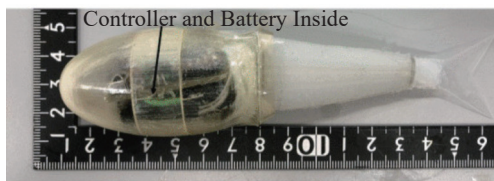


图 13 SMA 微型机器鱼

Fig.13 SMA-based miniature robotic fish

北方工业大学开发了由 PZT 材料驱动的双尾鳍微型仿生机器鱼^[102](图 14)。其尾鳍由基于 PZT 薄膜的压电双晶片悬臂通过四杆联动实现闭合或打开运动,在 130 V、4 Hz 下测得的微型机器鱼的最大速度约 0.75 BL/s(0.045 m/s),整体效率 η 约为 1.69%,远大于已报道的由 IPMC 驱动的机器鱼(η 约为 $6.3 \times 10^{-6}\%$)^[103]、SMA (η 约为 0.7%)^[104]和压电纤维复合材料(η 约为 1.35%)^[105]。

2.4 仿生关节与推进机制的优化

仿生机器鱼的推进机制通常通过多关节驱动系统实现,以模拟鱼类摆尾或波动运动,从而有效增强机器鱼的推进速度。韩国产业技术研究所开发的

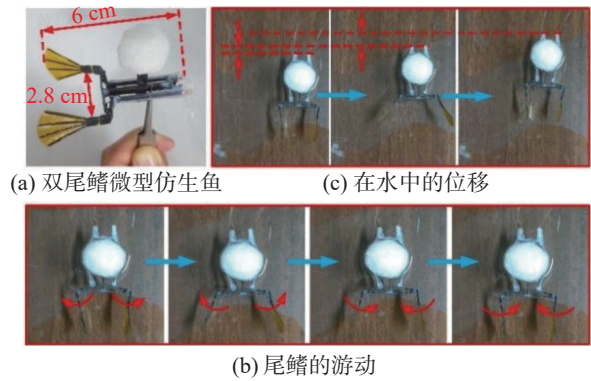


图 14 双尾鳍微型仿生鱼

Fig.14 Bionic micro-robotic fish with double caudal fins

机器鱼“ICHTHUS V5.7”^[106](图 15)有一个用于推进的 3-DOF 串行链接结构和用于其胸鳍的上下运动的 1-DOF 串行链接结构;每个关节上的伺服电机直接连接到机器鱼的主体框架,通过使用伺服电机,能够控制机器鱼的频率、相位差和振幅,以改变其推进力。在实证测试中,该机器鱼游速达到 4 BL/s(2 m/s)。

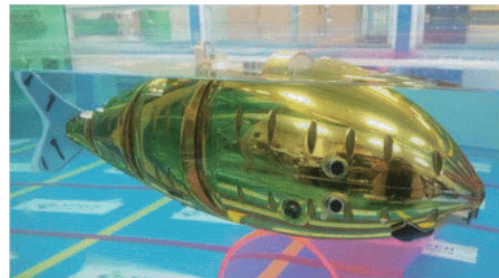


图 15 仿生机器鱼 ICHTHUS V5.7

Fig.15 Bionic robotic fish ICHTHUS V5.7

但现有仿生机器鱼在推进效率与机动性方面往往存在性能折中问题。ICHTHUS V5.7 达到了 4 BL/s(2 m/s)的直线游速,但机动性能有待提高;LIU 等^[107]研制的机器鱼 G9 虽具备 1.02 BL/s 的直线游速,转弯角速度可达 110 (°/s),但在复杂机动场景下的运动稳定性不足;iSplash-II 机器鱼最大直线游速可达 11.6 BL/s (3.7 m/s),但无法完成转向。这些仿生机器鱼运动性能的显著差异揭示了传统设计在推进—机动协同优化方面的技术瓶颈。中国科学院自动化研究所研制出新型仿生两关节机器鱼^[108](图 16),其第一个关节采用偏心轮结构,即齿轮电动机带动关节来回摆动以产生足够的推进力;第二关节由一根“Z”形连杆驱动,以节省大量空间并降低传动机构的阻力。这样的设计使其在推进系统的

综合优化上实现了较大的突破, 该机器鱼最大直线游速可达 3.07 BL/s (1.14 m/s), 常规转向角速度达到 $90^\circ/\text{s}$, 且在复杂机动模式下仍可保持 $63.8^\circ/\text{s}$ 的有效角速度。

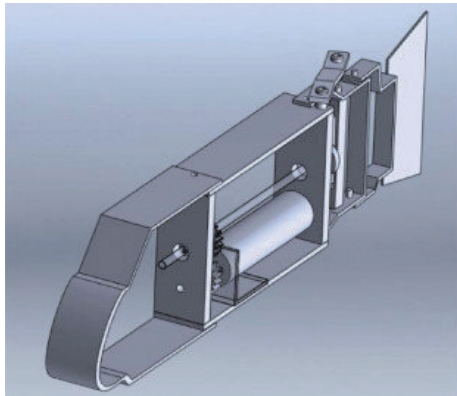


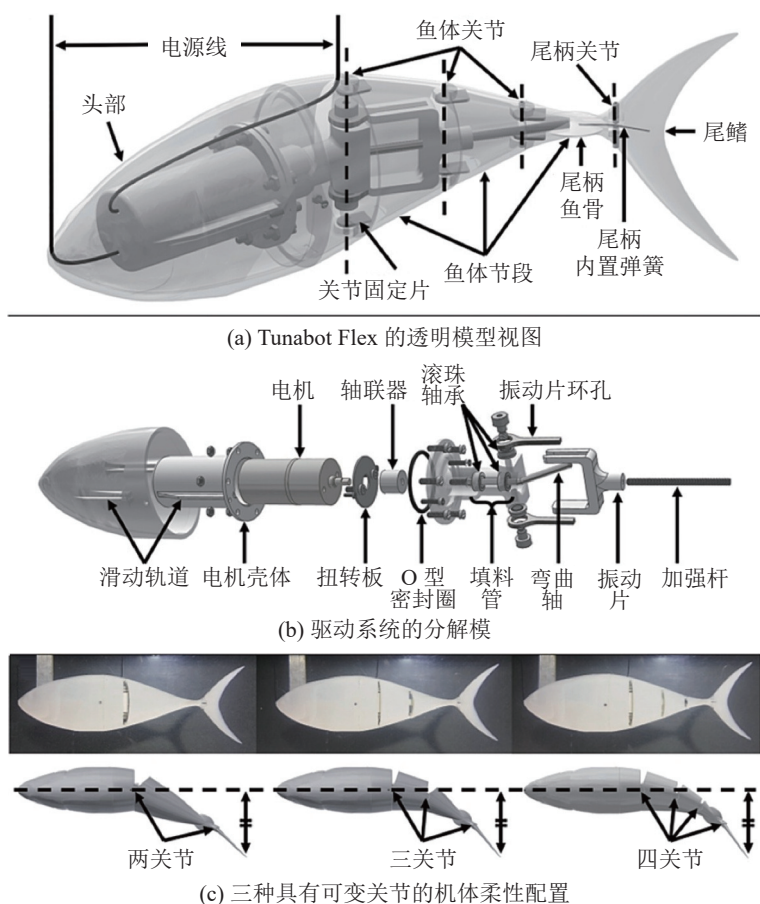
图 16 两关节机器鱼的机械结构

Fig.16 Mechanical structure of a two-joint robotic fish

大多数仿生机器鱼系统以低频率 ($\leq 3 \text{ Hz}$) 运行, 导致游泳速度低 ($\leq 1.5 \text{ BL/s}$), 运输成本 (COT) 通常比黄鳍金枪鱼高 1 到 4 个数量级。而弗吉尼亚大学 White 团队推出的 Tunabot Flex^[109]

(图 17) 通过模块化设计调整关节数量与角度以研究身体灵活性的作用并缩小机器人和生物系统之间的性能差距。研究人员探索不同自由度 (2 DoF、3 DoF、4 DoF) 和柔性配置对机器鱼性能的影响, 当摆尾频率为 8 Hz 时, 实现了 4.6 BL/s (1.17 m/s) 的高速游动, 且其最灵活配置的 COT 在所有测试速度中仅比黄鳍金枪鱼的 COT 大不到半个数量级。

湍流与复杂系统国家重点实验室的陈迪团队研制出一款小型高速仿生机器鱼^[12] (图 18), 其具备高速游泳和与鱼类一样跳跃的能力。其设计理念以小型化和轻量化为主, 通过伺服电机驱动一对单自由度的胸鳍, 以实现俯仰运动, 柔顺关节中加入扭力弹簧以增大传递到尾鳍的动力; 研究人员采用 4 种不同柔性关节和尾鳍刚度进行游动和跳跃实验, 测得其最大速度为 8.4 BL/s (2.22 m/s), 稳定速度为 7.1 BL/s (1.88 m/s), 远高于一般机器鱼的速度, 且最大跳跃高度可达 0.23 m , 最大游泳距离至 427 m 。该研究通过优化刚度显著提高了速度和运动跳跃性能, 但在高频运动下的功耗仍大于 Tunabot 和 Tunabot Flex 等仿生机器鱼。



(a) Tunabot Flex 的透明模型视图

(b) 驱动系统的分解模

(c) 三种具有可变关节的机体柔性配置

图 17 仿生机器鱼 Tunabot Flex

Fig.17 Bionic robotic fish Tunabot Flex



图 18 无绳高速游泳机器鱼

Fig.18 Cordless high-speed robotic fish

2.5 高速仿生鱼应用领域的扩展

除了推进系统的研究,许多高速仿生机器鱼项目已拓展至环境监测、军事探测、科学考察等应用领域。例如, ICHTHUS V5.7 集成了多种嵌入式传感器,如超声波距离传感器、GPS 传感器、水压传感器、INS(惯性导航系统)等,能够在河流等真实环境中进行自主导航,并可以用作环境监测系统,以监测水质污染。北京航空航天大学与中国科学院自动化所共同开发了 SPC 系列仿生机器鱼。其二代 SPC-II^[110] 仿生机器鱼(图 19)内部集成了电池、GPS 和罗盘组合导航系统,可在 5 m 水深范围内保持定深的自主航行,在福建东山岛郑成功古战船遗址水下考古工作中首次应用,对 4 000 m² 的水域进行了摄像考察,有关图像能即时传送到水面指挥部并在 2.5 Hz 下达到最高游速 1.14 BL/s(1.4 m/s),证明了其在复杂水下环境中的探索能力。同一系列的 SPC-III 仿生机器鱼^[111](图 20)通过搭载多参数水质探测仪,最大速度可达 0.87 BL/s(1.36 m/s),在太湖完成了约 49 km 的水质探测巡游,获取了蓝绿藻浓度分布等重要水质数据。至 2023 年,中国太湖蓝藻水华面积和密度较往年分别下降了 45.7% 和 30.3%,达到 2007 年以来的最佳水平。



图 19 仿生水下航行器 SPC-II

Fig.19 Bionic underwater vehicle SPC-II

此外,机电一体化和机器人系统(MaRS)实验室的 NG 团队设计出的 Snapp 机器鱼^[112](图 21)以一种新颖的循环微分方法对柔性尾鳍进行偏航控



图 20 仿生水下航行器 SPC-III

Fig.20 Bionic underwater vehicle SPC-III

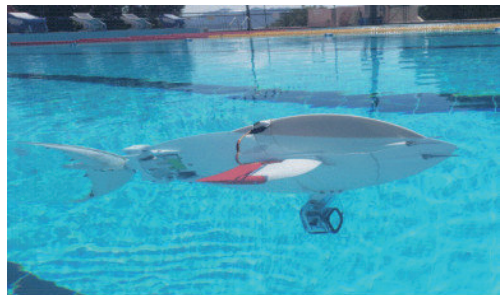


图 21 仿生机器鱼 Snapp

Fig.21 Bionic robotic fish Snapp

制,而胸鳍控制滚动和俯仰。该机器鱼不仅可以执行复杂的游泳动作,如“8”字形和“S”形轨迹,还具有较高的负载能力,能够连续运行 30 min,携带高达 1 kg 有效载荷。在 2.7 Hz 和 4 Hz 两种驱动模式下,其平均游泳速度分别达到 1.8 BL/s(1 m/s)和 2.7 BL/s(1.5 m/s),为深海探测提供了技术支持。

针对大型油浸式变压器内部检测的特殊工况,国家电网天津公司研制了一款仿生机器鱼检测装置^[113],具备 360°全周向姿态调整能力,其巡航速度与垂向速度分别稳定在 0.04 m/s 和 0.025 m/s,悬停定位误差不超过 0.03 m。该装备同时集图像识别、空间定位、路径跟踪和全向巡航等功能于一体,有效协助天津电网将 2023 年设备故障率同比降低 15%;在供电质量方面,系统整体可靠性指标达到 99.993 1%,供电电压合格率提升至 99.997%,该成果为封闭式电力设备的在役检测提供了创新解决方案。

3 高速仿生机器鱼的未来研究方向及发展趋势

这些研究工作不仅在仿生学和机器人技术的结合上取得了卓越成就,还展示了在材料选择、驱动系统、控制算法和应用领域的创新。但不难看出,仿生机器鱼与真鱼在性能方面(如游速、转弯角度

等)仍有较大差距。鱼类可以表现出自由灵活的机动性能,如逃跑、快速提速和制动,而机器鱼只能执行简单的转弯、直游或潜水。因此,未来仿生机器鱼的发展方向可能集中在以下几个方面。

3.1 推进效率与能源消耗

传统的电机和推进器在高速下可能会导致较大的能量消耗和热量积累,影响续航和稳定性。此外,目前以传统电机方式驱动的高速仿生机器鱼,虽游速较快,但广泛存在体积较大、柔性不足的问题,如 SPC-III 长 1.75 m、仿生-I 长 2.4 m,不利于水下作业。

将低耗能材料和高效驱动系统相结合是仿生机器鱼实现游速突破的一大关键。未来需要开发更加新型高效的推进系统,如改进的仿生鳍片驱动、流体动力学优化的推进器等;液压形式的推进器在稳定性和能量可回收性方面也具有很大的前景,它有望应用于实现仿生鱼体波动和类似肌肉收缩的运动。

3.2 流体动力学设计

鱼类的身体形状、皮肤结构及游动方式都经过了亿万年的进化,能够有效减少水中的阻力和涡流。仿生机器鱼难以完全复制这种精细的结构和动态流体特性,尤其是在高速游动时,如何减小湍流和阻力是一个难点。

未来可以采用更先进的 CFD 模拟和仿生设计,精确模拟鱼类的复杂流体动力学环境,并优化机器鱼的形状和结构以减少阻力和能量损耗。CFD 可以模拟不同推进系统的流场分布和涡流结构,评估不同设计对推力和效率的影响,使得仿生鱼的多种设计方案可以在虚拟环境中进行测试和优化,大大缩短了研发周期和成本。研究人员可以在 CFD 环境中测试各种仿生鱼的形态和运动模式,找到最优的设计方案,以达到更高的推进速度。

3.3 自主感知与自主决策

高速游动时,仿生机器鱼需要精确的姿态控制和高效的导航能力。水下环境复杂多变,存在不确定的流体环境和障碍物,传统的控制算法和传感器可能无法满足高速情况下对实时性和精度的要求。

现有的许多研究集中于开发模拟具有真实鱼类侧线感知功能的人工侧线,使仿生机器鱼能够更好地进行水动力环境传感和涡流检测等^[114],从而使其在运动学习及自适应行为优化等方面也有显著的进展。FishGym 平台^[115]的提出,为仿生机器鱼提供了一个高效的训练框架,该平台利用关节体和蒙皮

技术构建仿生鱼模型,并基于 GPU 实现高性能局部双向耦合的流体—结构相互作用仿真,使仿生鱼能够在仿真环境中精确感知自身运动状态,并通过强化学习不断优化游动策略,提升游动速率和环境适应性。此外,OpenFish^[116]作为一种开源软体仿生机器鱼,采用了主动与被动相结合的尾部结构,该设计不仅优化了高速游动能力(优于之前报道的最快软体机器鱼 27%),同时赋予了机器鱼更强的自适应行为,使其能够感知流场变化并动态调整自身运动方式,提高推进效率和机动性。

未来还可以在控制算法上,结合人工智能和机器学习技术,开发更加智能化、自主化的控制系统,以应对复杂的水下环境。例如,根据风或波参数等复杂海洋环境中存在的影响因素,提出的基于反向传播神经网络(BPNN)和遗传算法(GA)的速度预测算法(GA-BPNN)^[117],可提高在海洋环境中预测机器鱼速度和航向的准确性和效率。而通过随机算法结合神经网络可实现仿生机器鱼的运动控制^[118],在一定程度上改善机器鱼运动过程中水流和其它非线性因素引起的扰动。通过整合机器学习和自适应控制算法,实时调整推进系统的工作状态和鱼体姿态。可尝试在不同的流体条件下,自动调整鱼鳍的角度和频率,最大限度地减少阻力并提高速度。同时,开发更敏感的传感器来监测流体环境中的压力、速度及方向变化,通过反馈机制实时优化鱼体的运动模式,确保在高速游动中维持稳定的推进效果。

3.4 材料与结构优化

高速运动会对机器鱼的结构和材料产生更大的应力和劳损,而减少能量消耗还需要机器鱼轻量化,这使得传统材料无法满足需求。现有的新型驱动材料适合小型和微型仿生鱼,但相比传统电机驱动,此类材料驱动的输出力有限、驱动效率低、材料寿命较短、稳定性较差。如何突破新型材料的局限,是提升仿生鱼高速游动性能的另一关键。

目前的研究重点应集中于研发更轻质、更坚韧的复合材料,如生物启发聚合物、智能材料等,以模拟生物组织的灵活性和强度,有利于增强仿生系统的机械可行性和环境可持续性。可借鉴中国科学院沈阳自动化研究所开发的基于仿生肌肉驱动与嵌入式柔性感知的软体机器鱼^[119],其核心结构由 3D 打印的柔性仿生框架以及集成多种驱动单元与传感元件的软体驱动器构成。该软体驱动器采用多层柱状设计,由压缩弹簧、介电弹性体(DE)薄膜及

柔性电极组成。其中,压缩弹簧模拟鱼类脊柱的支撑功能,增强机器鱼整体结构的稳定性;而多层柔性薄膜则模拟生物鱼类的肌肉组织,赋予机器鱼形变能力并提供驱动动力。这种集成化设计显著提升了仿生机器鱼的运动灵活性及环境适应性。此外,还利用仿生学的设计原则,开发既能够承受高速运动产生的应力,又能有效模仿鱼类皮肤的顺应性的仿生皮肤材料。新研发的微纳 4D 打印技术具有一定的可用性^[120]。它是微纳 3D 打印和智能响应材料的结合,通过在 3 维静态结构中引入对外界刺激(如磁场、溶剂、pH 值、温度、光照等)有响应的材料,实现了复杂微纳结构的动态调控,为仿生机器鱼的动态结构调控提供了新的途径,可以利用其制作鱼类复杂波动的柔性鱼鳍,动态调整形状以适应不同的流体环境,从而提高机器鱼的推进效率和在复杂水环境中的机动性。未来还可结合计算机物理仿真以高效选择并优化机器鱼的材料参数,如 ZHANG 等^[121]提出了一个实验模拟框架,通过可微分仿真从准静态数据中学习仿生机器鱼的材料参数,并将其应用于动态性能的预测而无需进行广泛的材料测试,能有效缩短材料研发周期,减少实验迭代次数。

3.5 续航与能源管理

高速游动需要更多的能量供应,这对仿生机器鱼的电池容量和续航能力提出了更高的要求。现有的电池技术可能无法在体积和重量受限的情况下提供足够的能量。

未来可考虑深入研发高效的能源管理系统和更高能量密度的电池,同时探索水下能量获取和再生系统,如微型水力发电、化学能转换等,为仿生机器鱼提供持久的动力来源。此外,还可以尝试研究能量回收机制,如在鳍片运动过程中回收动能,以减少整体能量消耗。

3.6 多机器鱼协作系统

在自然界中,鱼类时常以集群的形式觅食、防御和巡航。这也可以为水下机器人系统的开发提供灵感。受限于水下作业环境的高度不确定性,仿生推进结构的独特性,以及水下通信、环境感知、精确定位等技术的瓶颈,实现多仿生水下机器人系统的协同将是一个非常具有挑战性的方向。

研究者们借鉴生物群体行为并结合人工智能优化算法,推动仿生鱼群体智能的演化。针对多机器鱼任务分配问题,研究者利用蚁群算法优化个体任务分配与路径规划,提高了协作效率和任务执行的

准确性,通过设计特定的势能函数,确保机器鱼群体中所有个体的运动方向趋于一致,运动速度快速收敛至同一值,从而有效规避机器鱼间的运动干涉风险^[122]。此外,强化学习在多自主水下机器人导航中的应用也受到了广泛关注,通过自适应学习,机器人能够自主探索最优路径,实现高效的协同导航^[123]。在分布式控制方面,研究者提出了一种基于强化学习和认知一致性理论的控制方法,该方法无需了解机器鱼的动力学模型,仅依赖仿真训练,即可直接迁移至真实机器人模型,显著提升了仿生鱼群的自主决策能力及环境适应性^[124]。此外,受鱼群和鸟群等自然群体行为的启发,设计出一种应用于分布式控制机器人群体的新型仿生学方法,使仿生鱼能够通过局部感知和信息共享,自主调整队形和行为模式,提高整体系统的协调性和稳定性^[125]。

通过利用多个仿生水下机器鱼组成协作系统,学习鱼群的避碰、分工、领队跟随等机制,将有助于实现大规模、多任务的协作,有效提高水下作业效率。同时,机器鱼协作系统需要构建高实时性、低时延性的通信网络,以保障个体之间的信息能够实时传递,并通过多次尝试和反馈不断优化自身的运动轨迹和协作策略。

4 结论

本文系统梳理了水下高速仿生机器鱼领域的研究现状与发展动态。依据生物运动机理和机械驱动材料特征,简要介绍了各类水下仿生机器鱼的特点及优劣势,并通过分析高速鱼类具有的生物学特征和推进机理总结了该领域的主要成果。可以看出在国际范围内,水下高速仿生机器鱼的研究在机械结构设计、新型材料应用及智能控制算法等关键领域均已取得显著进展。一些原型机已经实现了快速转弯、路径跟踪、自主作业和其他难度动作,在速度和机动性方面也有了很大的提高,但由于水下环境的复杂性,水下机器鱼的机械结构设计与控制技术仍需进一步优化和改进。未来可以通过增强水下机器鱼的自我控制和自我感知等特性并结合机器人系统的协调控制,使高速仿生鱼可以更好地融入水下环境完成各类工作。相信通过多学科交叉研究,结合人工智能和先进制造技术,高速仿生鱼项目有望在未来实现更快、更高效的水下运动,满足日益增长的海洋探测和资源开发需求。这不仅将推动仿生机器人技术的发展,还将为海洋科学、环境监测和军事应用提供强大的技术支撑。

参考文献

- [1] 赵涛, 刘明雍, 周良荣. 自主水下航行器的研究现状与挑战[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(6): 1 – 6.
ZHAO T, LIU M Y, ZHOU L R. A survey of autonomous underwater vehicle recent advances and future challenges[J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(6): 1 – 6.
- [2] SCARADOZZI D, PALMIERI G, COSTA D, et al. BCF swimming locomotion for autonomous underwater robots: A review and a novel solution to improve control and efficiency[J]. Ocean Engineering, 2017, 130: 437 – 453.
- [3] LOW K H, CHONG C W, ZHOU C, et al. An improved semi-empirical model for a body and/or caudal fin (BCF) fish robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 78 – 83.
- [4] WILLIAMS S B, NEWMAN P, ROSENBLATT J, et al. Autonomous underwater navigation and control[J]. Robotica, 2001, 19(5): 481 – 496.
- [5] BLIDBERG D R. Autonomous underwater vehicles: A tool for the ocean[J]. Unmanned systems, 1991, 9(2): 10 – 15.
- [6] BLOCK B A, BOOTH D, CAREY F G. Direct measurement of swimming speeds and depth of blue marlin[J]. Journal of Experimental Biology, 1992, 166(1): 267 – 284.
- [7] WALLER M, QUEIROZ N, DA COSTA I, et al. Direct measurement of cruising and burst swimming speeds of the shortfin mako shark (*Isurus oxyrinchus*) with estimates of field metabolic rate[J]. Journal of Fish Biology, 2023, 103(5): 864 – 883.
- [8] MARRAS S, NODA T, STEFFENSEN J F, et al. Not so fast: Swimming behavior of sailfish during predator-prey interactions using high-speed video and accelerometry[J]. Integrative and Comparative Biology, 2015, 55(4): 719 – 727.
- [9] BARSUKOV V V. The speed of movement of fishes[J]. Pridora, 1960, 3: 103 – 104.
- [10] LANE F W. How fast do fish swim[J]. Country Life, 1941, 90: 534 – 535.
- [11] BREDER C M. The locomotion of fishes[J]. Zoologica, 1926, 4: 159 – 297.
- [12] CHEN D, WU Z, ZHANG P, et al. Performance improvement of a high-speed swimming robot for fish-like leaping[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(2): 1936 – 1943.
- [13] GUINNESS WORLD RECORDS. Fastest 50 metres by a robotic fish[EB/OL]. (2021-08-21)[2025-05-13]. <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/413784-fastest-50-metres-by-a-robotic-fish>.
- [14] 李洁雯, 高磊, 徐滨. 用于海上风电场水下桩基腐蚀情况监测的仿生机器鱼: CN202111581958.0[P]. 2022-04-22.
LI J W, GAO L, XU B. Bionic robotic fish for corrosion monitoring of underwater pile foundations in offshore wind farms: CN202111581958.0[P]. 2022-04-22.
- [15] FUJIWARA S, YAMAGUCHI S. Development of fishlike robot that imitates carangiform and subcarangiform swimming motions[J]. Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms, 2017, 6(1): 1 – 8.
- [16] SHAO W, XU C. Pitch motion control of a soft bionic robot fish based on centroid adjustment[C/OL]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2019[2025-05-13]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8816287>. DOI: 10.1109/ICMA.2019.8816287.
- [17] BERNAL D, DICKSON K A, SHADWICK R E, et al. Analysis of the evolutionary convergence for high performance swimming in lamnid sharks and tunas[J]. Comparative Biochemistry and Physiology, 2001, 129(2/3): 695 – 726.
- [18] GRAHAM J B, DICKSON K A. The evolution of thunniform locomotion and heat conservation in scombrid fishes: New insights based on the morphology of *Allothunnus fallai*[J]. Zoological Journal of the Linnean Society, 2000, 129(4): 419 – 466.
- [19] GRAHAM J B, DICKSON K A. Tuna comparative physiology[J]. Journal of experimental biology, 2004, 207(23) : 4015 – 4024.
- [20] VIDELER J J. Fish swimming[M]. Springer Science & Business Media, 1993: 260.
- [21] WALKER J A, ALFARO M E, NOBLE M M, et al. Body fineness ratio as a predictor of maximum prolonged-swimming speed in coral reef fishes[J/OL]. PloS one, 2013[2025-05-13]. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0075422>.
- [22] BLAKE R W. Fish functional design and swimming performance[J]. Journal of fish biology, 2004, 65(5): 1193 – 1222.
- [23] 王为. 仿鲹科加新月型尾鳍仿生机器鱼的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.

- WANG W. Development of a bionic robotic fish Mimicking Carangidae with a lunate caudal fin[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005.
- [24] DIEZ G, SOTO M, BLANCO J M. Biological characterization of the skin of shortfin mako shark *Isurus-oxyrinchus* and preliminary study of the hydrodynamic behaviour through computational fluid dynamics[J]. *Journal of Fish Biology*, 2015, 87(1): 123 – 137.
- [25] LI L, NAGY M, GRAVING J M, et al. Vortex phase matching as a strategy for schooling in robots and in fish[J/OL]. *Nature Communications*, 2020[2025-05-13]. <https://www.nature.com/articles/s41467-020-19086-0>.
- [26] HOYT J W. Hydrodynamic drag reduction due to fish slimes[M]//*Swimming and Flying in Nature: Volume 2*. Berlin, Germany: Springer, 1975: 653 – 672.
- [27] BUSHNELL D M, MOORE K J. Drag reduction in nature[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1991, 23: 65 – 79.
- [28] HASSANALIAN M, ABDELMOULA H, MOHAMMADI S, et al. Aquatic animal colors and skin temperature: Biology's selection for reducing oceanic dolphin's skin friction drag[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2019, 84: 292 – 310.
- [29] 郭祖宝. 部分动物体内的“逆流交换”现象[J]. *生物学通报*, 2001, 36(3): 15.
GUO B Z. The phenomenon of "countercurrent exchange" in certain animals[J]. *Bulletin of Biology*, 2001, 36(3): 15.
- [30] ALTRINGHAM J D, BLOCK B A. Why do tuna maintain elevated slow muscle temperatures? Power output of muscle isolated from endothermic and ectothermic fish[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1997, 200(20): 2617 – 2627.
- [31] BLOCK B A. Structure of the brain and eye heater tissue in marlins, sailfish, and spearfishes[J]. *Journal of Morphology*, 1986, 190(2): 169 – 189.
- [32] LINDSEY C C. Form, function, and locomotory habits in fish[J]. *Fish Physiology*, 1978, 7: 1 – 100.
- [33] WEBB P W. The biology of fish swimming[M]//*Mechanics and physiology of animal swimming*, 1994: 45 – 62.
- [34] SFAKIOTAKIS M, LANE D M, DAVIES J B C. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1999, 24(2): 237 – 252.
- [35] RAJ A, THAKUR A. Hydrodynamic parameter estimation for an anguilliform-inspired robot[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2020, 99(3): 837 – 857.
- [36] LYU F, XU X, ZHA X, et al. A snake eel inspired multi-joint underwater inspection robot for undersea infrastructure intelligent maintenance[C/OL]//*United Nations Ocean Conference*. Piscataway, USA: IEEE, 2022[2025-05-13]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9775350>. DOI: 10.1109/OCEANSChennai45887.2022.9775350.
- [37] GLAZE J, SALAZAR R, VASCONCELLOS R, et al. Comparative design, hydrodynamic analysis, and physical performance of fish-like robots[J/OL]. *Applied Ocean Research*, 2021[2025-05-13]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141118720310026>. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102443.
- [38] CHEN D, WU Z, MENG Y, et al. Development of a high-speed swimming robot with the capability of fish-like leaping[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(5): 3579 – 3589.
- [39] YU J, ZHANG C, LIU L. Design and control of a single-motor-actuated robotic fish capable of fast swimming and maneuverability[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(3): 1711 – 1719.
- [40] COSTA D, PALMIERI G, PALPACELLI M C, et al. Design of a bio-inspired autonomous underwater robot[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2018, 91: 181 – 192.
- [41] ZHANG R, SHEN Z, WANG Z. Ostraciiform underwater robot with segmented caudal fin[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(4): 2902 – 2909.
- [42] LIU Q, CHEN H, WANG Z, et al. A manta ray robot with soft material based flapping wing[J/OL]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022[2025-05-13]. <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/7/962>. DOI: 10.3390/jmse10070962.
- [43] YIN S, HU Q, ZENG Y, et al. Kinetic analysis and design of a bio-inspired amphibious robot with two undulatory fins[C/OL]//*IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics*. Piscataway, USA: IEEE, 2021[2025-05-13]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9517667>.
- [44] LIU H, CURET O. Swimming performance of a bio-inspired robotic vessel with undulating fin propulsion[J/OL]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2018[2025-05-13]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-3190/aacd210.1088/1748-3190/aacd2>.

- [45] NASER F A, RASHID M T. Labriform swimming robot with steering and diving capabilities[J/OL]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2021[2025-05-13]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10846-021-01454-7>. DOI: 10.1007/s10846-021-01454-7.
- [46] NGUYEN T T, LEE B R, VO T Q. Dynamic analysis of a robotic fish propelled by flexible folding pectoral fins[J]. *Robotica*, 2020, 38(4): 699 – 718.
- [47] JIAN X, ZOU T. A review of locomotion, control, and implementation of robot fish[J/OL]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2022[2025-05-13]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10846-022-01726-w>. DOI: 10.1007/s10846-022-01726-w.
- [48] COSTA D, PALMIERI G, Palpacelli M C, et al. Design of a carangiform swimming robot through a multiphysics simulation environment[J/OL]. *Biomimetics*, 2020[2025-05-13]. <https://www.mdpi.com/2313-7673/5/4/46>. DOI: 10.3390/biomimetics5040046.
- [49] LIU H, WASSERSUG R J, KAWACHI K. A computational fluid dynamics study of tadpole swimming[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1996, 199(6): 1245 – 1260.
- [50] LIU H, WASSERSUG R, KAWACHI K. The three-dimensional hydrodynamics of tadpole locomotion[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1997, 200(22): 2807 – 2819.
- [51] JADHAV P S, THONDIYATH A, VIJAYAKUMAR R, et al. Numerical estimation of hydrodynamic derivatives of a biomimetic autonomous underwater vehicle by captive model tests[C/OL]//42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. New York, USA: ASME, 2023[2025-05-13]. <https://asmedigitalcollection.asme.org/OMAE/proceedings-abstract/OMAE2023/86878/V005T06A094/1167210>. DOI: 10.1115/OMAE2023-108006.
- [52] LI N, LIU H, SU Y. Numerical study on the hydrodynamics of thunniform bio-inspired swimming under self-propulsion[J/OL]. *PLoS One*, 2017[2025-05-13]. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0174740>. DOI: 10.1371/journal.pone.0174740.
- [53] TIAN R, LI L, WANG W, et al. CFD based parameter tuning for motion control of robotic fish[J/OL]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2020[2025-05-13]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31935704>. DOI: 10.1088/1748-3190/ab6b6c.
- [54] JI D, REHMAN F U, AJWAD S A, et al. Design and development of autonomous robotic fish for object detection and tracking[J/OL]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2020[2025-05-13]. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1729881420925284>.
- [55] ZOU T, JIAN X, AL-TAMIMI M, et al. Development of a low-cost soft robot fish with biomimetic swimming performance[J/OL]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2024[2025-05-13]. <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanismsrobotics/article/16/6/061004/1164591>. DOI: 10.1115/1.4063037.
- [56] ZHANG T, TIAN R, YANG H, et al. From simulation to reality: A learning framework for fish-like robots to perform control tasks[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2022, 38(6): 3861 – 3878.
- [57] CHEN H, LI W, CUI W, et al. Multi-objective multidisciplinary design optimization of a robotic fish system[J/OL]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021[2025-05-13]. <https://www.mdpi.com/2077-1312/9/5/478>. DOI: 10.3390/JMSE9050478.
- [58] RAJ A, THAKUR A. Fish-inspired robots: Design, sensing, actuation, and autonomy: A review of research[J/OL]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2016[2025-05-13]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-3190/11/3/031001>. DOI: 10.1088/1748-3190/11/3/031001.
- [59] HAN J, HUANG S, YAO Y, et al. Data-assisted dynamic modeling of bionic robotic fish and its precise speed control[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, 9(1): 10447 – 10454.
- [60] WANG Z, LI Z, XIA G, et al. Research on the prediction of motion trajectory and precise control method of bionic robotic fish based on LSSVR interactive network[J/OL]. *Ocean Engineering*, 2024[2025-05-13]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801824021954>. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.118857. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.118857.
- [61] ZHENG X, WANG W, LI L, et al. Artificial lateral line based relative state estimation between an upstream oscillating fin and a downstream robotic fish[J/OL]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2020[2025-05-13]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-3190/abb86c>. DOI: 10.1088/1748-3190/abb86c.

- [62] ZHENG X, WANG W, XIONG M, et al. Online state estimation of a fin-actuated underwater robot using artificial lateral line system[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2020, 36(2): 472 – 487.
- [63] XIE O, SUN Z, SHEN C. A study on flow field characteristics of a self-propelled robot fish approaching static obstacles based on artificial lateral line[J/OL]. Bioinspiration & Biomimetics, 2023[2025-05-13]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37044102/>. DOI: 10.1088/1748-3190/accc64.
- [64] ZHANG Z, ZHOU C, CHENG L, et al. Artificial lateral line sensor for robotic fish speed measurement based on surface flow field detection and turbulence noise suppression[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, 22: 4947 – 4960.
- [65] ZHANG T, XIAO J, LI L, et al. Toward coordination control of multiple fish-like robots: Real-time vision-based pose estimation and tracking via deep neural networks[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2021, 8(12): 1964 – 1976.
- [66] HONG L, WANG X, ZHANG D S, et al. Vision-based underwater inspection with portable autonomous underwater vehicle: Development, control, and evaluation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 9(1): 2197 – 2209.
- [67] 熊明磊. 一种仿生机器鱼: CN201910126278.6[P]. 2019-05-24.
XIONG M L. One kind of bionic robotic fish: CN201910126278.6[P]. 2019-05-24.
- [68] RYUH Y S, YANG G H, LIU J, et al. A school of robotic fish for mariculture monitoring in the sea coast[J]. Journal of Bionic Engineering, 2015, 12(1): 37 – 46.
- [69] JI Y, WEI Y, LIU J, et al. Design and realization of a novel hybrid-drive robotic fish for aquaculture water quality monitoring[J]. Journal of Bionic Engineering, 2023, 20(2): 543 – 557.
- [70] 叶秀芬, 胡娅南, 郭书祥, 等. 一种水下微型仿生机器鱼: CN200810064358.5[P]. 2010-01-13.
YE X F, HU Y N, GUO S X, et al. Miniature bionic robotic fish for underwater applications: CN200810064358.5[P]. 2010-01-13.
- [71] WEI D, HU S, ZHOU Y, et al. A magnetically actuated miniature robotic fish with the flexible tail fin[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(10): 6099 – 6106.
- [72] 王文谦, 马鹏磊, 李广浩, 等. 仿生机器鱼步态控制及闭环运动控制方法综述[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(1): 29 – 45.
WANG W, MA P, LI G, et al. Review of gait control and closed-loop motion control methods for bionic robotic fish[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(1): 29 – 45.
- [73] YAN Z, YANG H, ZHANG W, et al. Research on motion mode switching method based on CPG network reconstruction[J]. IEEE Access, 2020, 8: 224871 – 224883.
- [74] CAO Y, MA S, CAO Y, et al. Similarity evaluation rule and motion posture optimization for a manta ray robot[J/OL]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022[2025-05-13]. <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/7/908>.
- [75] PHAMDUY P, CHEONG J, PORFIRI M. An autonomous charging system for a robotic fish[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(6): 2953 – 2963.
- [76] WANG J, WU Z, TAN M, et al. Model predictive control-based depth control in gliding motion of a gliding robotic dolphin[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 51(9): 5466 – 5477.
- [77] ZHANG P, WU Z, MENG Y, et al. Nonlinear model predictive position control for a tail-actuated robotic fish[J]. Nonlinear Dynamics, 2020, 101(4): 2235 – 2247.
- [78] YE M, WANG H, YAZDANI A, et al. Discrete-time integral terminal sliding mode-based speed tracking control for a robotic fish[J]. Nonlinear Dynamics, 2021, 105(1): 359 – 370.
- [79] BAL C, KOCA G O, KORKMAZ D, et al. CPG-based autonomous swimming control for multi- tasks of a biomimetic robotic fish[J/OL]. Ocean Engineering, 2019[2025-05-13]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801819305001>.
- [80] WANG M, ZHANG Y, DONG H, et al. Trajectory tracking control of a bionic robotic fish based on iterative learning[J]. Science China Information Sciences, 2020, 63: 1 – 9.
- [81] LI G, SHINTAKE J, HAYASHIBE M. Deep reinforcement learning framework for underwater locomotion of soft robot[C]//IEEE international conference on robotics and automation. Piscataway, USA: IEEE, 2021: 12033 – 12039.
- [82] YU J, WU Z, WANG M, et al. CPG network optimization for a biomimetic robotic fish via PSO[J]. IEEE Transactions on

- Neural Networks and Learning Systems, 2015, 27(9): 1962 – 1968.
- [83] ZHOU C, LOW K H. On-line optimization of biomimetic undulatory swimming by an experiment-based approach[J]. Journal of Bionic Engineering, 2014, 11(2): 213 – 225.
- [84] 宋英杰, 王刚, 唐武生, 等. 基于模糊自适应串级 PID 控制器的仿生机器鱼位姿控制[J]. 控制工程, 2023, 30(10): 1870 – 1880.
- SONG Y, WANG G, TANG W, et al. Posture control of bionic robotic fish based on fuzzy self-adaptive cascade PID controller[J]. Control Engineering of China, 2023, 30(10): 1870 – 1880.
- [85] YU J, LIU J, WU Z, et al. Depth control of a bioinspired robotic dolphin based on sliding-mode fuzzy control method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(3): 2429 – 2438.
- [86] BARRETT D S. The design of a flexible hull undersea vehicle propelled by an oscillating foil[D]. Cambridge, UK: Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [87] ANDERSON J M, CHHABRA N K. Maneuvering and stability performance of a robotic tuna[J]. Integrative and Comparative Biology, 2002, 42(1): 118 – 126.
- [88] ZHU J, WHITE C, WAINWRIGHT D K, et al. Tuna robotics: A high-frequency experimental platform exploring the performance space of swimming fishes[J/OL]. Science Robotics, 2019[2025-05-13]. <https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.aax4615>. DOI: 10.1126/scirobotics.aax4615.
- [89] 梁建宏, 王田苗, 魏洪兴, 等. 水下仿生机器鱼的研究进展 II: 小型实验机器鱼的研制[J]. 机器人, 2002, 24(3): 234 – 238.
- LIANG J, WANG T, WEI H, et al. Researchful development of underwater robofish II: Development of a small experimental robofish[J]. Robot, 2002, 24(3): 234 – 238.
- [90] NAKASHIMA M, TOKUO K, KAMINAGA K, et al. Experimental study of a self-propelled two-joint dolphin robot[C]//ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. California, USA: ISOPE, 1999, 2: 419 – 424.
- [91] DOGANGIL G, OZCICEK E, KUZUCU A. Modeling, simulation, and development of a robotic dolphin prototype[C]//IEEE International Conference Mechatronics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2005: 952 – 957.
- [92] YU J, WU Z, SU Z, et al. Motion control strategies for a repetitive leaping robotic dolphin[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(3): 913 – 923.
- [93] WANG T, WEN L, LIANG J, et al. Fuzzy vorticity control of a biomimetic robotic fish using a flapping lunare tail[J]. Journal of Bionic Engineering, 2010, 7(1): 56 – 65.
- [94] CLAPHAM R J, HU H. iSplash-I: High performance swimming motion of a carangiform robotic fish with full-body coordination[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 322 – 327.
- [95] CLAPHAM R J, HU H. iSplash: Realizing fast carangiform swimming to outperform a real fish[M]//Robot Fish: Bio-Inspired Fishlike Underwater Robots. Berlin, Germany: Springer, 2015: 193 – 218.
- [96] 成巍. 仿生水下机器人仿真与控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.
- CHENG W. Research on simulation and control technology for bionic underwater vehicle[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2004.
- [97] PHAM T H, NGUYEN K, PARK H C. A robotic fish capable of fast underwater swimming and water leaping with high Froude number[J/OL]. Ocean Engineering, 2023[2025-05-13]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822027950>. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113512.
- [98] CHEN Z, BART-SMITH H, TAN X. IPMC-actuated robotic fish[M]//Robot Fish: Bio-inspired Fishlike Underwater Robots. Berlin, Germany: Springer, 2015: 219 – 253.
- [99] WANG Z, WANG Y, LI J, et al. A micro biomimetic manta ray robot fish actuated by SMA[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 1809 – 1813.
- [100] 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: 267 – 272.
- [101] CHEN X, SHIGEMUNE H, SAWADA H. An untethered bionic robotic fish using SMA actuators[C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2020: 1768 – 1773.

- [102] ZHAO Q, LIU S, CHEN J, et al. Fast-moving piezoelectric micro-robotic fish with double caudal fins[J/OL]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2021[2025-05-13]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092188902100018X>. DOI: 10.1016/j.robot.2021.103733.
- [103] GUO S, FUKUDA T, ASAKA K. A new type of fish-like underwater microrobot[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2003, 8(1): 136 – 141.
- [104] SONG S H, KIM M S, RODRIGUE H, et al. Turtle mimetic soft robot with two swimming gait[J/OL]. *Bioinspiration & biomimetics*, 2016[2025-05-13]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-3190/11/3/036010>. DOI: 10.1088/1748-3190/11/3/036010.
- [105] CHEN Y, ZHAO H, MAO J, et al. Controlled flight of a microrobot powered by soft artificial muscles[J]. *Nature*, 2019, 575(7782): 324 – 329.
- [106] YANG G H, RYUH Y. Design of high speed fish-like robot ‘Ichthus V5.7’[C]//10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 451 – 453.
- [107] LIU J, HU H. Biological inspiration: from carangiform fish to multi-joint robotic fish[J]. *Journal of bionic engineering*, 2010, 7(1): 35 – 48.
- [108] ZHANG C, YU J, TAN M. Swimming performance of a robotic fish in both straight swimming and making a turn[C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 1111 – 1115.
- [109] WHITE C H, LAUDER G V, BART-SMITH H. Tunabot Flex: A tuna-inspired robot with body flexibility improves high-performance swimming[J/OL]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2021[2025-05-13]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32927442>. DOI: 10.1088/1748-3190/abb86d.
- [110] 梁建宏, 邹丹, 王松, 等. SPC-II 机器鱼平台及其自主航行实验[J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31(7): 709 – 713.
LIANG J H, ZHOU D, WANG S, et al. Trial voyage of SPC-II fish robot[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(7): 709 – 713.
- [111] 梁建宏, 郑卫丰, 文力, 等. 两关节仿生水下航行器 SPC-III 的推进与机动性[J]. *机器人*, 2010, 32(6): 726 – 731.
LIANG J H, ZHENG W F, WENG L, et al. Propulsion and maneuvering performances of two-joint biorobotic autonomous underwater vehicle SPC-III [J]. *Robot*, 2010, 32(6): 726 – 731.
- [112] NG T J K, CHEN N, ZHANG F. Snapp: An agile robotic fish with 3-D maneuverability for open water swim[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, 8(10): 6499 – 6506.
- [113] LI D, TO S, XU Z, et al. Robotic fish: Opening a new era of underwater detection[J/OL]. *The Innovation*, 2024[2025-05-13]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666675824001826>. DOI: 10.1016/j.xinn.2024.100744.
- [114] ZHAI Y, ZHENG X, XIE G. Fish lateral line inspired flow sensors and flow-aided control: A review[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2021, 18: 264 – 291.
- [115] LIU W, BAI K, HE X, et al. Fishgym: A high-performance physics-based simulation framework for underwater robot learning[C]//International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2022: 6268 – 6275.
- [116] VAN DEN BERG S C, SCHARFF R B N, RUSÁK Z, et al. OpenFish: Biomimetic design of a soft robotic fish for high speed locomotion[J/OL]. *Hardware X*, 2022[2025-05-13]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067222000657>. DOI: 10.1016/j.ohx.2022.e00320.
- [117] SHEN X, ZHENG Y, ZHANG R. A hybrid forecasting model for the velocity of hybrid robotic fish based on back-propagation neural network with genetic algorithm optimization[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 111731 – 111741.
- [118] CHEN G, YANG X, XU Y, et al. Neural network-based motion modeling and control of water- actuated soft robotic fish[J/OL]. *Smart Materials and Structures*, 2022[2025-05-13]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-665X/aca45610>. DOI: 10.1088/1361-665X/aca456.
- [119] WANG R, ZHANG C, TAN W, et al. Soft robotic fish actuated by bionic muscle with embedded sensing for self-adaptive multiple modes swimming[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2025, 41: 1329 – 1345.
- [120] 张铭铎, 邓春三, 范旭浩, 等. 微纳 4D 打印研究进展[J]. *中国激光*, 2022, 49(10): 283 – 307.
ZHANG M D, DENG C S, FANG X H, et al. Recent advances in micro/nano 4D printing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(10): 283 – 307.

- [54] XU C, DU X Y, LI L, et al. End-edge collaborative lightweight secure federated learning for anomaly detection of wireless industrial control systems[J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2024, 5: 132 – 142.
- [55] DU X Y, XU C, LI L, et al. Multigranularity feature automatic marking-based deep learning for anomaly detection of industrial control systems[J/OL]. IEEE Open Journal of Instrumentation and Measurement, 2024, 3 [2025-07-02]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10570378>. DOI: 10.1109/OJIM.2024.3418466.
- [56] 李新春, 谭新欢, 李琳, 等. 基于深度元学习的工控系统异常检测方法[J]. 计算机科学与探索, 2025, 19(8): 2251 – 226.
- LI X C, TAN X H, LI L, et al. Deep meta learning-based anomaly detection for industrial control systems[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2025, 19(8): 2251 – 226.
- [57] 李新春, 杜昕宜, 许驰, 等. 多尺度特征深度学习的未知工控协议分类方法[J]. 信息与控制, 2025, 54(2): 241 – 250.
- LI X C, DU X Y, XU C, et al. Unknown industrial control protocols classification method based on multi-scale feature deep learning[J]. Information and Control, 2025, 54(2): 241 – 250.

作者简介

许 驰(1987—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师。研究领域为工业无线网络, 5G/6G, 边缘计算与工业人工智能等。

(上接第 20 页)

- [121] ZHANG J Z, ZHANG Y, MA P, et al. Sim2real for soft robotic fish via differentiable simulation[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2022: 12598 – 12605.
- [122] 谢景鹏. 多机器鱼系统任务分配及群体行为控制方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- XIE J P. Research on task assignment and group behavior control of multi-robot fish system[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [123] 胡静波. 基于强化学习的多自主水下机器人导航研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- HU J B. Research on navigation of multi-autonomous underwater robot based on reinforcement learning[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [124] ZHANG T, LI Y, LI S, et al. Decentralized circle formation control for fish-like robots in the real-world via reinforcement learning[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2021: 8814 – 8820.
- [125] KOIFMAN Y, BAREL A, BRUCKSTEIN, A M. Distributed and decentralized control and task allocation for flexible swarms[EB/OL]. (2024-05-22) [2025-05-13]. <https://arxiv.org/abs/2405.13941>.

作者简介

邱 玥(2001—), 女, 硕士生。研究领域为海洋鱼类生物学, 仿生鱼游动机理。

陈明茹(1968—), 女, 博士, 教授。研究领域为海洋鱼类生物学, 海洋鱼类资源与保护, 区域海洋生态系统管理。

王 旭(1985—), 男, 博士生, 副研究员。研究领域为长续航水下滑翔机, 新概念水下机器人。