本文引用格式：王晓广,钟勇.高机动仿生机器鱼综述：机构创新与流体动力增益效应[J].自动化与信息工程,2026,47(1):1-15.
WANG Xiaoguang, ZHONG Yong. Review of high-maneuverability biomimetic robotic fish: Mechanism innovation and hydrodynamic dynamic gain effects[J]. Automation & Information Engineering, 2026,47(1):1-15.

高机动仿生机器鱼综述：机构创新与流体动力增益效应*

王晓广　钟勇

（华南理工大学吴贤铭智能工程学院，广东 广州 511442）

摘要：随着水下作业环境从广阔海洋向非结构化复杂水域转变，传统自主水下航行器面临机动性不足的严峻挑战。该文综述了高机动仿生机器鱼在机构创新、流体动力增益以及性能评价等方面的最新研究进展。首先，基于生物学观测分析鱼类通过躯干变刚度、多鳍协同、内源性姿态调节机制实现高机动性的生物运动机理；然后，阐述高机动仿生机器鱼机械系统的设计范式，对比线驱动拮抗机构、阻塞变刚度机构、智能材料驱动等变刚度技术，以及多鳍矢量推进的实现路径；接着，从非定常流体动力学角度，揭示瞬态爆发、矢量推进与涡流操控的流体动力增益机理，并探讨基于中枢模式发生器与强化学习的高机动控制策略；最后，总结仿生机器鱼当前在动力学建模与解算、流场感知与控制、硬件集成与驱动及实海况环境验证等方面存在的挑战，并对其未来发展方向进行展望。

关键词：仿生机器鱼；高机动性；变刚度；多鳍协同；非定常流体动力学；流体动力增益

中图分类号：TP242　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1674-2605(2026)01-0001-15

DOI：10.12475/aie.20260101　　开放获取

Review of High-maneuverability Biomimetic Robotic Fish: Mechanism Innovation and Hydrodynamic Dynamic Gain Effects

WANG Xiaoguang　ZHONG Yong

(Shien-Ming Wu School of Intelligent Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 511442, China)

Abstract: As underwater operational environments shift from vast oceans to unstructured and complex waters, traditional autonomous underwater vehicles face significant challenges due to insufficient maneuverability. This paper reviews the latest research progress in high-maneuverability biomimetic robotic fish, focusing on mechanical innovation, fluid dynamic gain, and performance evaluation. Firstly, based on biological observations, it analyzes the locomotion mechanisms by which fish achieve high maneuverability through body variable stiffness, multi-fin coordination, and endogenous attitude regulation. Secondly, it elaborates on the design paradigms of the mechanical systems of high-maneuverability biomimetic robotic fish, comparing variable stiffness technologies such as cable-driven antagonistic mechanisms, jamming-based variable stiffness structures, and smart material-based actuators, as well as the implementation approaches for multi-fin vector propulsion. Thirdly, from the perspective of unsteady fluid dynamics, it reveals the fluid dynamic gain mechanisms of transient bursts, vector propulsion, and vortex manipulation, and discusses high-maneuverability control strategies based on central pattern generators and reinforcement learning. Finally, it summarizes the current challenges in biomimetic robotic fish, including dynamic modeling and computation, flow field perception and control, hardware integration and actuation, and validation in real marine environments, while offering insights into future development directions.

Keywords: biomimetic robotic fish; high maneuverability; variable stiffness; multi-fin synergy; unsteady hydrodynamics; hydrodynamic dynamic gain

* **基金项目：**广东省海洋经济发展（海洋六大产业）专项资金项目（GDNRC [2023]33）

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

0 引言

随着人类对海洋资源开发与深海科学考察需求的日益增长，水下机器人的作业环境正从广阔海洋向非结构化复杂水域转变[1-2]。在珊瑚礁生态监测、海底沉船考古及近岸湍流区作业等任务场景中，环境呈现高度的狭窄性、动态性和不可预测性[3]。然而，目前广泛应用的自主水下航行器（autonomous under water vehicle, AUV）多采用基于螺旋桨推进的刚性体设计，在开阔水域稳态巡游时虽表现出优异性能，但在复杂受限环境下难以兼顾敏捷机动性与环境适应性[4]。螺旋桨推进系统在低速工况下操纵效率较低，难以实现零半径原地转向或瞬态急停，且在湍流干扰下易发生碰撞或被水草缠绕[5]。这种巡游能力过剩与机动能力不足的矛盾，迫切需要突破传统设计思路，从自然界中寻求新的推进解决方案[6]。

经过亿万年的自然选择与进化，鱼类已演化出适应各种极端水流环境的卓越运动能力。生物学观测数据显示，鱼类不仅具备高效的长距离迁徙能力，还拥有突出的高机动性。如狗鱼在捕食时利用“C 型起动”，可在毫秒级时间内产生数倍于自身重力的爆发加速度[7-8]；蓝鳃太阳鱼通过胸鳍与尾鳍的协同配合，能在狭窄空间内完成原位旋转或任意方向的矢量机动[9]。这种基于躯干柔性变形与多鳍协同的非定常推进模式，使鱼类在复杂流场中具有较高的敏捷机动性与环境适应能力，为下一代高机动 AUV 设计提供了重要的仿生学依据[10-11]。

然而，将鱼类复杂的生物运动机理转化为工程可实现的机械系统，仍面临从结构设计到控制策略的多重挑战。在过去二十年间，仿生机器鱼研究已取得长足进展，但早期研究多聚焦于身体/尾鳍推进的稳态效率优化[12]。近年来，随着软体机器人技术、智能材料以及非定常流体动力学的发展，仿生机器鱼的研究焦点开始向瞬态高机动性转移。研究人员试图通过模拟鱼类的变刚度脊柱、多自由度鳍肢以及质心/浮力主动调节机制，缩小仿生机器鱼与鱼类在运动学、动力学指标上的差距。

基于上述背景，本文全面综述高机动仿生机器鱼在机构创新、流体动力增益以及性能评价等方面的最新研究进展，旨在为下一代具备瞬态爆发与敏捷转向性能的仿生 AUV 提供设计与控制范式。

1 研究框架与技术逻辑

与以往侧重于稳态巡游效率的综述论文相比，本文更关注在非定常流体动力学框架下，生物运动机理与机械系统之间的协同增益效应[13]。本文研究框架与技术逻辑如图 1 所示。

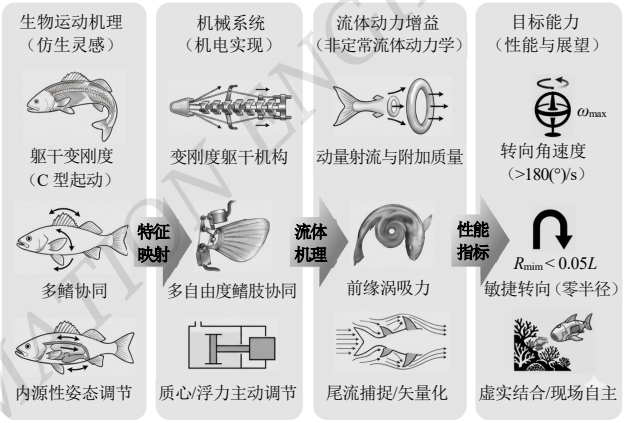


图 1 本文研究框架与技术逻辑

本文遵循“生物运动机理-机械系统-流体动力增益-目标能力”的递进演化技术逻辑。首先，基于鱼类躯干变刚度、多鳍协同以及内源性姿态调节等生物运动机理，通过特征映射构建刚柔耦合的仿生机械系统（变刚度躯干机构、多自由度鳍肢协同系统、质心/浮力主动调节模组）；然后，从非定常流体动力学角度，阐释机械系统如何利用前缘涡吸力与动量射流等效应产生流体动力增益；最后，突破瞬态爆发与敏捷转向性能瓶颈，实现从理论模型向实海况自主作业的跨越。

在仿生机器鱼的研究中，高机动性并非单一的速度指标，而是一个涵盖几何运动灵活性与物理驱动爆发力的多维科学概念，其核心在于非定常流场中的瞬态控制能力。基于相关理论框架[14-15]，从运动学与动力学两个维度，构建高机动仿生机器鱼的关键定量性能评价指标如表 1 所示。

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

表 1 高机动仿生机器鱼的关键定量性能评价指标

评价维度	评价指标	评价指标描述
运动学指标（用于衡量高机动仿生机器鱼改变空间几何状态的灵活性）	极小转弯半径	无量纲化转弯半径 R_{min}/L（转弯半径/体长），需具备在 $R_{min}<0.5L$ 甚至零半径条件下的转弯能力[16]
	最大转向角速度	反映其改变航向的速度（ω_{max}），通常需达到 180(°)/s 以上[17]
	有效运动自由度	在六自由度空间内实现俯仰、横滚、偏航等姿态的独立快速切换[13]
动力学指标（用于衡量高机动仿生机器鱼克服流体惯性与阻力的爆发力）	瞬时起动加速度	从静止状态到最大速度的爆发力，通常以 g 或 BL/s²为单位，反映其瞬时提取流体反作用力的效率[18]
	急停响应时间	从高速巡游状态瞬间切换至静止悬停状态所需的时间，反映其利用胸鳍等结构产生反向矢量推力的能力[19]
	扰动抑制力矩	在湍流环境下维持目标姿态所需的瞬态控制力矩，反映其抗扰输出能力[20]

2 鱼类生物运动机理

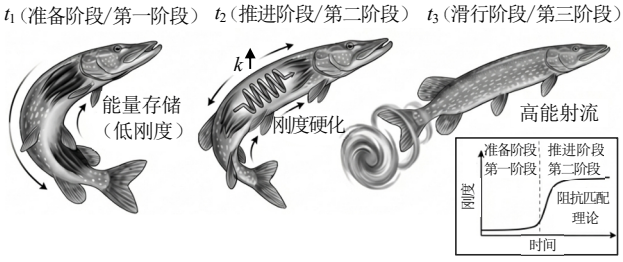
鱼类在复杂流场中的高机动性源于其身体构造与非定常运动模式[21]的高度耦合。深入解析鱼类的多源协同效应，是构建高机动仿生机器鱼的理论基础。经典的生物流体动力学研究表明[8,20]，鱼类的高机动行为并非单一器官的独立作用，而是躯干变刚度、多鳍协同、内源性姿态调节等机制在时空维度的高度集成，其高机动性生物运动机理如表 2 所示。

表 2 鱼类高机动性生物运动机理

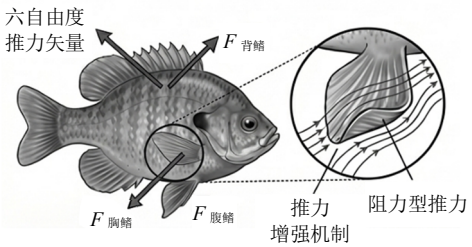
生物运动机理	机动性贡献
通过减小转动惯量[7]，激发高能涡环脱落，以产生反作用力[22]	瞬时爆发，产生数倍于自身重力的加速度
通过肌肉调节实现能量存储或释放[23-25]，以克服高速转弯时的流体负载[26]	高频回弹，维持急转弯时的大曲率构型[14]
通过奇鳍（背/臀鳍）与偶鳍（胸/腹鳍）的时空解耦与联动[27]，合成多鳍矢量推力与控制力矩	全向机动（六自由度），实现急停或侧向平移[9]
通过主动改变鳍面曲率来改变流体附着力[28]，进而产生非线性矢量推力[29]	零半径原地转向，利用凹面划水产生较大的偏航力矩[30]
通过内脏团位移或鳔体积调节打破流体静力平衡[31]，从而利用非稳态产生姿态力矩[32-33]	敏捷横滚/俯仰，缩短机动响应时间[34-35]

续表

鱼类高机动性生物运动机理的动力学过程如图 2 所示。

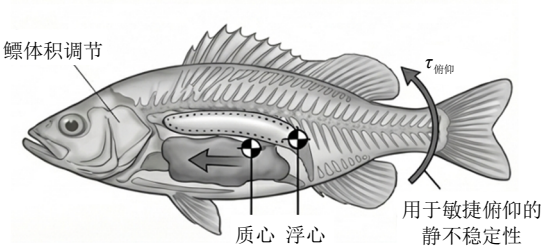


(a) 躯干变刚度



(b) 多鳍协同

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING



(c) 内源性姿态调节

图 2 鱼类高机动性生物运动机理的动力学过程

图 2(a)展示了鱼类通过躯干刚度调节实现“C 型起动”的能量转换过程；图 2(b)揭示了鱼类通过多鳍（奇鳍与偶鳍）协同产生的六自由度推力矢量机制；图 2(c)阐释了鱼类通过调节内脏团质心位置与鳔体积来打破流体静力平衡，从而实现敏捷俯仰机动的物理原理。这些生物运动机理共同构成了高机动仿生机器鱼的仿生基础。

2.1 躯干变刚度机制

躯干是鱼类调节流体动力的核心控制面。在捕食或逃逸的毫秒级瞬间，鱼类通过躯干变刚度机制，即躯干大曲率变形（弯曲成 C 或 S 型），可最大化有效行程并减小转动惯量，从而激发高能涡环脱落，产生数倍于自身重力加速度的爆发力。文献[23-24]研究发现，鱼类可通过肌肉激活主动调节波传递刚度：在准备阶段，降低刚度以顺应流体；在推进阶段，增加刚度以实现能量的高频回弹[25]，不仅实现了肌肉弹性势能与流体惯性的耦合，还有效维持了急转弯时的大曲率构型，防止躯干因过载而折断，确保 $R_{\min}<0.5L$ 的极小转弯半径。

2.2 多鳍协同机制

鳍肢系统是鱼类实现精准矢量机动的核心执行单元，其高机动性主要体现在多鳍空间协同与单鳍主动变形两种机制。其中，多鳍空间协同机制作用于宏观层面，即鱼类利用奇鳍与偶鳍的时空分布特性建立胸鳍/腹鳍推进模式，通过合成多鳍矢量推力在六自由度空间内构建全向机动能力；单鳍主动变形机制作用于介观尺度，即鳍肢固有的主动变形能力允许其通过调节骨架鳍条来实时改变鳍面的三维曲率，不仅能产生非线性推力增益[28]，还能通过增强流体动量交换产生较大的侧向力矩，以支持零半径原地转向[18]。尽管上述两种机制的作用尺度不同，但本质上均是通过对鳍面运动参数的调控，实现对尾迹涡流拓扑的主动重构。

2.3 内源性姿态调节机制

鱼类外部流体表面的矢量控制与内部质心、浮心的主动调控，共同构成了高机动性的关键支撑。在静力学层面，鳔体积调节通过改变浮力大小实现低能耗的定深悬停。在高机动性层面，鱼类通过内脏团位移或鳔的非对称充气，主动构建质心、浮心的空间偏置，打破流体静力平衡[33-34]。这种利用“静不稳定性”产生的姿态力矩，能够与外部水动力形成时空协同，从而缩短横滚或俯仰的机动响应时间。

3 机械系统设计

高机动仿生机器鱼的物理实现本质上是对鱼类非定常运动机制的工程重构，其设计范式正从早期的离散刚性拟合向刚柔耦合、主动调控方向演进。基于鱼类运动特性的工程映射，高机动仿生机器鱼的机械系统主要由变刚度躯干机构、多自由度鳍肢协同系统、质心/浮力主动调节模组 3 部分构成。通过梳理这 3 部分的技术路径，揭示当前技术在复现生物高机动性方面的能力边界与工程集成瓶颈[36]。

3.1 变刚度躯干机构

鱼类通过调节肌肉激活度实时改变躯干弹性，实现与流体环境的动态阻抗匹配[37]。变刚度躯干机构克服了传统恒定刚度结构在柔性顺应与高频爆发之间的物理矛盾[38-39]。现有主流变刚度调节技术主要遵循结构约束调节与材料本征调节两条路径演进。其中，结构约束调节路径主要利用线驱动拮抗或阻塞变刚度机构来改变结构耦合度；材料本征调节路径依赖智能材料的物理属性响应，以满足更高频率响应与更大动态范围的机动性能需求。

3.1.1 线驱动拮抗机构

线驱动拮抗机构利用人工肌腱模拟鱼类骨骼肌的对拉特性，通过调控人工肌腱线缆张力来改变关节

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

等效弹性系数，其技术演化呈现从离线被动组件向在线主动控制跨越的趋势，其原理如图 3 所示。

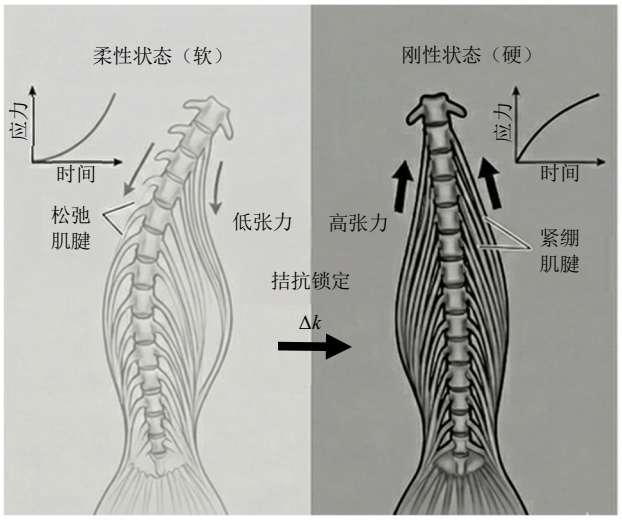


图 3　线驱动拮抗机构原理图

文献[37]采用弹簧组件验证了被动刚度匹配机制的有效性；文献[40-41]利用滑块在线调节板簧力臂，实现刚度的连续变化。为进一步提升线驱动拮抗机构的仿生相似度与动态性能，文献[42]提出一种基于线驱动主动躯干与柔性尾鳍耦合的设计，通过 3R 伪刚体模型优化脊柱刚度分布，实现接近真实鱼类的 S 型高效游动；针对线驱动系统在高频工况下的松弛与迟滞难题；文献[43]研制了基于双正弦凸轮的驱动系统，提高了高频工况下推力输出的稳定性。在此基础上，主动拮抗控制技术日益成熟，文献[44]利用电流环精确控制肌腱张紧力，实现毫秒级的等长收缩与刚度硬化；文献[45-47]引入张拉整体结构，利用预应力非线性调节结构刚度，在共振频率处提升了能量传递效率。

3.1.2　阻塞变刚度机构

为解决线驱动结构难以兼顾大变形能力与高刚度需求的局限，利用介质物理相变或体积模量调节来实现刚度跃变已成为重要研究方向。

早期的气动变刚度方案受限于气体可压缩性，在高频驱动下存在显著的响应滞后[48]。针对此问题，文献[49]利用液体不可压缩性实现 33 倍的抗弯刚度调节倍率。为进一步提升刚度调节倍率，研究人员提出基于颗粒或层状材料摩擦互锁效应的阻塞技术。文献[50]设计的“线驱动+颗粒链”双腔体结构，实现了 57 倍的刚度调节倍率，有效解决了高机动仿生机器鱼大曲率机动刚性支撑不足的难题。阻塞变刚度机构原理如图 4 所示。

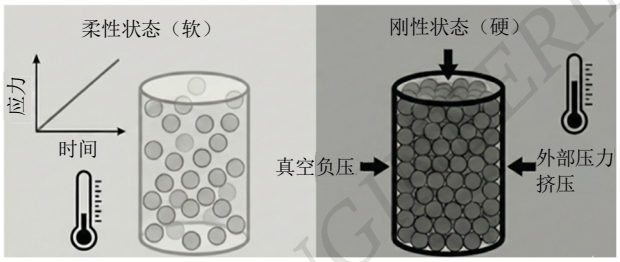


图 4　阻塞变刚度机构原理图

3.1.3　智能材料驱动

智能材料通过改变微观晶格或分子排列直接调控宏观杨氏模量，在系统集成度上具有显著优势。智能材料的驱动原理如图 5 所示。

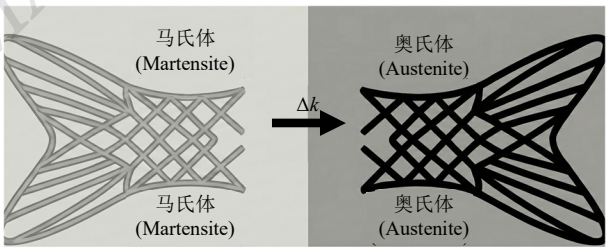


图 5　智能材料的驱动原理图

针对微型化机动需求，电流变液材料利用电场产生的粘弹性突变，实现毫秒级响应[51]；形状记忆合金（shape memory alloy, SMA）虽热响应速度较慢，但文献[52]通过相变可有效调节尾鳍固有频率，从而降低斯特劳哈尔数。尽管目前此类方案多应用于微型或隐蔽式样机，但其仍是实现未来“材料−结构−功能”一体化设计的关键突破口[53-55]。

3.1.4　性能对比

现有主流变刚度调节技术在调节范围、响应带宽及承载能力上具有显著的互补特征。线驱动拮抗技术具有高带宽特性，适用于跃水等瞬态爆发运动；阻塞

变刚度技术可实现较高的刚度调节倍率，适用于柔性巡游与刚性机动的平衡需求；智能材料在微型化集成与声学隐蔽性方面具有应用潜力。主流变刚度调节技术性能对比如表 3 所示。

表 3　主流变刚度调节技术性能对比

典型研究	刚度/模量	性能增益	局限性
Nakabayashi[40-41]	基于板簧力臂实现刚度连续可调	巡游速度提升 47.2%，推进效率提升 13.7%	响应速度慢、难以应对突发机动
Yu[44]、Park[56]、Chen[45]、Zhong[42-43]	等效刚度调节倍率为 3 ~ 14	实现 2.85 BL/s 超高速巡游，可完成跃水爆发动作	控制算法复杂，系统能耗较高
Ju & Yun[49]	抗弯刚度调节倍率约为 33 刚度调节范围为 0.001~0.050 N·m²	峰值速度提升 260%	需配备泵源，系统体积与质量较大
Zhang & Yu[50]、Hong[57]	抗弯刚度调节倍率为 57 刚度调节范围为 2~114 N·m² 层状阻塞结构[57]倍率约为 10	推力提升>300% 兼顾大曲率转向与高效推进	存在迟滞效应，气密性要求较高
Liu[52]	基于 SMA 相变弹性模量调节倍率为 1.5~3.0	巡游速度提升 35.5%	SMA 热响应与冷却速度慢，难以实现高频机动
Behbahani[51]	—	阻尼比提升 130%	负载能力相对较弱

3.2　多自由度鳍肢协同系统

为模拟鱼类依靠胸鳍与尾鳍的矢量合成，实现全向游动的高机动性，高机动仿生机器鱼从单一尾部摆动向多鳍协同与主动变形演进。通过多自由度关节与柔性表面配合，多自由度鳍肢协同系统可实现对推力矢量的精确控制，从而突破传统欠驱动 AUV 的运动限制[58]。

3.2.1　构型与自由度

多自由度鳍肢协同系统通过构建运动冗余构型，使高机动仿生机器鱼在受限空间内具有零速机动性与姿态解耦能力。在低速或悬停状态下，该系统通过解耦推力矢量与力矩输出，实现类全向移动特性。如文献[59]采用双胸鳍差动策略，利用两侧独立拍打产生的非对称偏航力矩实现零半径原地转向；文献[60]设计的蓝鳃太阳鱼机器人，通过高自由度胸鳍精确控制划水法向矢量，在悬停状态下可生成任意方向的侧向与垂直推力，展现出较好的定点作业与全向位姿调整能力。

针对复杂流场中的瞬态敏捷性需求，多自由度鳍肢协同系统构型进一步向全身协同与异构耦合方向演进，以提升高机动仿生机器鱼的三维机动性能。文献[61]通过整合背鳍、胸鳍、尾鳍的复合驱动，不仅实现了长续航与高机动的模态切换，还完成了跃水、空翻等高爆发动作。在此基础上，为突破传统舵面控制的局限性，文献[62]设计的仿生翻车鱼与文献[63]设计的 Snapp 样机，利用异构双鳍或多鳍-躯体耦合机制重构流体动力矩；文献[64]提出全向自适应柔性尾鳍设计，通过线驱动索网结构，实现尾鳍在三维空间下的主动矢量偏转。上述设计均在无舵面辅助下，实现了转弯半径小于 1 BL 的急转弯及稳定的三维螺旋

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

下潜，增强了高机动仿生机器鱼在非稳态环境下的快速响应能力。多自由度鳍肢协同系统构型样机的性能对比如表 4 所示。

表 4　多自由度鳍肢协同系统构型样机性能对比

样机名称	多鳍协同构型	驱动机制	机动特性	性能指标
BoxyBot[59]	双胸鳍+尾鳍	差动拍打	原地转向	转向角速度≈40(°)/s
Robotic Dolphin[70]	背鳍+胸鳍+尾鳍	全身耦合	三维跃水	跃出水面高度 > 0.3 BL
Gliding Fish[61]	可变后掠胸鳍	浮力+升力	混合滑翔	续航时间提升约 50%
Sunfish-Bot[62]	垂直双鳍	双鳍协同	敏捷转向/螺旋下潜	转弯半径约 0.89 BL
Snapp[63]	多鳍融合	快速机动	三维高机动	转弯半径 < 1 BL

3.2.2　柔性变形控制

传统的刚性桨叶难以模拟鱼鳍的抓水效应。而高机动仿生机器鱼通过引入柔性表面与主动变形机制，实现对鳍面曲率与有效面积的动态控制，提升了其非稳态巡游性能。

在鳍面曲率控制方面，文献[29,65]利用柔性梁的几何非线性，使鳍面在划水阶段主动弯曲成勺状，以最大化流体捕获量；文献[66]提出基于空间并联机构的主被动复合柔性设计，利用刚柔耦合产生推力矢量偏转，实现了 60(°)/s 的零半径原地转向；文献[65]通过计算流体力学分析，验证了展向弯曲变形是改善推力系数的关键。此外，介电弹性体等智能材料的应用，实现了对鳍面波形的连续主动控制[53]。

在有效面积控制方面，可折叠/展开机构被广泛用于平衡巡游能效与瞬态机动性之间的需求。文献[67]设计的多自由度胸鳍通过快速展开可最大化制动阻力，实现急停控制；文献[68]设计的仿生金枪鱼在转弯过程中动态展开背鳍与臀鳍，虽增加了巡游阻力，但利用附加的流体动力矩将转弯半径减小 33%，使高机动仿生机器鱼在受限空间内具有敏捷的转弯能力。

3.3　质心/浮力主动调节模组

在低速悬停或精密作业工况下，常规鳍肢推进的流体动力舵效能显著下降。为解决这一欠驱动问题，高机动仿生机器鱼引入质心/浮力主动调节模组，成为打破流体稳态、实现非定常运动的关键内源性驱动力。

3.3.1　主动浮力系统

主动浮力系统通过改变高机动仿生机器鱼的浮力与浮心位置，实现无动力定深悬停或低能耗滑翔。目前，主动浮力系统的主要实现方案为基于排水体积的动态调节。以文献[61]为代表的活塞水舱方案利用丝杆电机驱动活塞吸排油/水，在大深度环境下具有良好的耐压性与控制精度，常被用于长续航滑翔机器鱼的设计。文献[69]采用注射器结构将变浮力机构小型化，并将其引入欠驱动柔性机器鱼，通过融合浮力驱动的滑翔模态与柔性尾鳍的扑动模态，实现了高机动与低能耗兼顾的混合推进。然而，此类系统存在体积庞大、机械噪声明显等问题。

针对高机动仿生机器鱼的集成化需求，文献[16]在 SoFi 样机中提出一种紧凑型浮力控制单元，其没有沿用传统的大型水舱结构，而是设计了基于微型直线电机的双活塞模组，通过直线执行器压缩气缸内的密闭空气腔，调节机身整体密度，从而在保证结构紧凑的同时，实现有效的深度调节（0~18 m）。该设计解决了高机动仿生机器鱼在深海环境中自主深度控制能力不足的难题。

3.3.2　质心调节系统

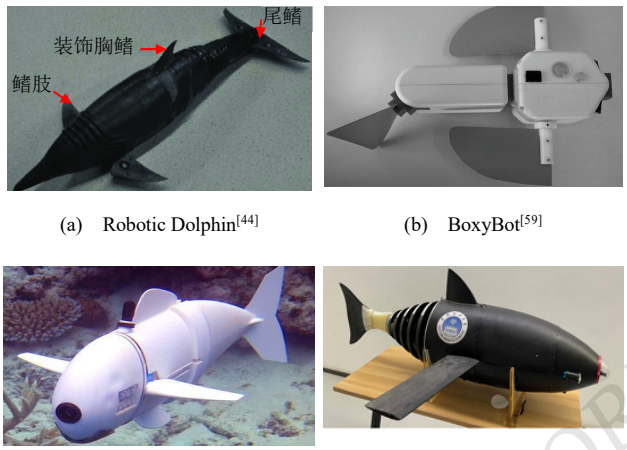
质心调节系统通过主动改变高机动仿生机器鱼的内部质量分布以产生重力矩，是实现多自由度姿态控制的关键。在纵向维度上，文献[71]设计了沿脊柱轴向移动的质心调节系统，通过对俯仰力矩的主动控制，有效抑制了扑翼游动过程中的姿态振荡，并实现了稳定的三维滑翔与螺旋下潜。在横向机动方面，文献[72]引入内部旋转偏心质量块，利用横向质心偏移产生侧倾力矩，辅助高机动仿生机器鱼完成类似固定

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

翼飞行器的倾斜转弯。

质心/浮力主动调节模组的引入，突破了仿生机器鱼的低机动性瓶颈。质心调节系统不仅能修正仿生机器鱼跨介质跃水等高动态动作中的姿态误差[73]，还能通过侧倾效应增强仿生机器鱼的转弯向心力，提升其转弯敏捷性。此外，质心调节系统与主动浮力系统的集成，使高机动仿生机器鱼在抗流悬停稳定性与长续航能效方面均优于传统的纯鳍驱动方式[74]。

近年来，具有代表性的高机动仿生机器鱼样机如图 6 所示。



(a) Robotic Dolphin[44]　(b) BoxyBot[59]

(c) SoFi[16]　(d) 欠驱动柔性机器鱼[69]

图 6　高机动仿生机器鱼样机

图 6 所示的高机动仿生机器鱼样机中融合了上述多种机构以应对复杂工况：图 6(a)、(b)在多鳍协同的基础上分别引入了躯干变刚度机构、高频拍动机构，以提升瞬态爆发力；图 6(c)、(d)集成了质心/浮力主动调节模组，在保持多鳍矢量操控能力的同时，实现了长续航滑翔与高机动巡游的混合推进。这种“多鳍协同+变刚度/内源调节”的复合机构设计，已成为新一代高机动仿生机器鱼的主流范式。

4　非定常流场机理

高机动仿生机器鱼瞬态爆发、矢量推进与涡流操控的动力学特性已超出准定常理论范畴，本质上是非定常流体效应与机械系统动态调控的深度耦合[75]。

4.1　瞬态爆发动力学

根据非定常流体动力学理论，瞬态爆发主要通过大曲率变形诱发附加质量效应与前缘涡吸力增强机制。在“C 型起动”的准备阶段，鱼类躯干卷曲以最大化侧向投影面积，从而积蓄大量的流体动量[76]；同时，大攻角运动促使前缘涡附着于鳍面，通过延缓动态失速并积蓄较高的流体环量，使瞬时升力系数达到稳态值的数倍[77]。最新研究表明，瞬态爆发过程伴随复杂的涡系演化：准备阶段与推进阶段产生的脱落涡环在流场中发生拓扑重连，且头部脱落的独立涡环通过流固相互作用，增强了高机动仿生机器鱼在转弯过程中的旋转力矩[78]。

变刚度躯干机构通过调控流固耦合相位来最大化上述效应：在准备阶段，高机动仿生机器鱼保持低刚度以顺应流体载荷，从而最大化躯干弯曲曲率并延长前缘涡的成长与环量积蓄；在推进阶段，变刚度躯干机构模拟鱼类的神经机械相位滞后现象，即肌肉内部转矩的后向传播速度快于躯干波曲率的传播速度（约 1.56 倍）[78]。这种时变刚度调控策略类似生物“弹簧-质量”系统，能够将积蓄的结构势能与流体动能高效转化为推进动能，从而提升爆发速度[79]。

4.2　矢量推进与涡流操控动力学

鱼类实现矢量机动（如急转、倒游）的流体物理本质在于对脱落涡拓扑结构的动态重构。其通过非定常运动在身体内侧激发强烈的前缘涡脱落，利用涡核低压区产生的吸力提供主要的转弯向心力；同时，尾鳍的非对称摆动将连续尾迹离散化为携带高冲量矩的独立涡环，通过改变涡环喷射方向确定推力矢量，从而在无舵面辅助下实现灵活的矢量推进[58]。

基于上述非定常流体原理，多自由度鳍肢协同系统利用涡流捕获与流场耦合机制增大了机动增益。文献[35]通过精确调控上游鳍与下游尾鳍的相位差，产生相干干涉，并将耗散尾迹重构为高能定向射流，从而增强了尾鳍推力；文献[80]将背鳍等结构作为涡流发生器，通过产生预旋流对尾鳍注入动量，利用附加的流体动力矩提升转向角速度；文献[81]通过数值模拟证实了多鳍协同系统中的涡流融合效应，即胸鳍脱落涡与尾涡的拓扑重构增强“加速-滑行”模式下的瞬态推力，实现了基于流场主动重构的敏捷机动。

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

4.3 动稳态与姿态控制

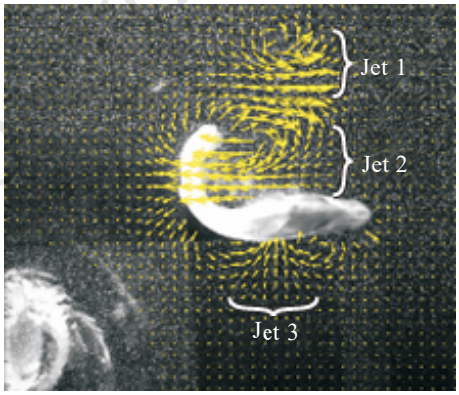
在低速或狭窄空间内，高机动仿生机器鱼维持有效流体力的前提是保证前缘涡的稳定附着，这要求鳍面攻角需控制在动态失速临界角（通常为 30°~40°）以内[82]。然而，高机动性往往需要快速打破稳态。通过内部质心调节系统，高机动仿生机器鱼可人为制造力矩失衡，利用“静不稳定性”缩短克服流体阻力所需的力矩积累时间。这种内部质心与外部流体致动的耦合，使高机动仿生机器鱼能在低雷诺数下实现毫秒级的姿态突变，达到“意动身随”的敏捷操控效果[73]。

4.4 流场观测与仿真

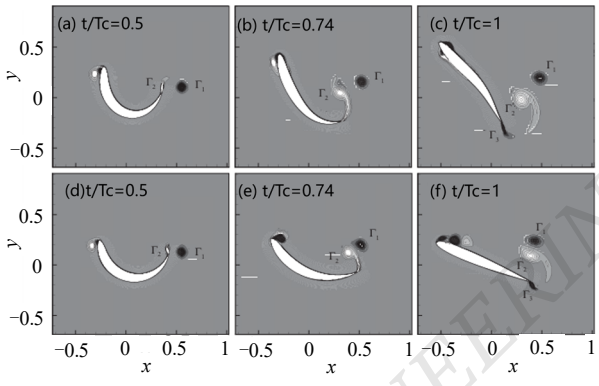
本文采用可视化实验与数值仿真共同构成的互补现代物理验证体系，验证上述非定常流场机理。

流场可视化技术特别是粒子图像测速技术作为捕捉瞬态流体拓扑的“金标准”，被广泛应用于观测涡流演化过程。文献[24]利用高分辨率数字粒子图像测速技术对“C 型起动”爆发机动进行观测，捕捉到尾迹中脱落涡环的结构（见图 7(a)），验证了推力峰值与涡环脱落时刻存在高度的时空相关性。

计算流体力学数值解析弥补了实验难以测量体表压力分布的不足。基于重叠网格或浸入边界法的流固耦合仿真，能够精确量化大变形过程中的非定常力系数[83]。文献[84]通过分析变刚度尾鳍在回弹阶段出现的压力梯度反转现象（见图 7(b)），定量验证了刚度动态调节对推力增强的具体贡献。



(a) 基于粒子图像测速观测的“C 型起动”瞬态涡环结构[24]



(b) 基于计算流体力学数值解析的变刚度尾鳍非定常压力分布[84]

图 7 非定常流场机理的实验与仿真互补验证

综上所述，高机动仿生机器鱼的设计已不再局限于外形仿生，而是深入到“结构–流场–性能”闭环映射关系的主动控制层面[85]。

5 高机动控制策略

高机动仿生机器鱼的控制本质在于解决非定常流场下的瞬态推进与多自由度非线性耦合问题。面对高动态游动中的强时变性与欠驱动特性，传统的线性控制方法难以满足毫秒级的爆发起动与精准机动需求。当前的研究重点在于构建由算法驱动的流体动力增益闭环，通过中枢模式发生器（central pattern generator, CPG）实现生物级的运动节律调控，并利用强化学习在复杂流场中挖掘最优推进策略，从而构建“感知–决策–执行”的一体化高机动控制体系。

5.1 CPG 节律调制与协同控制

CPG 作为一种底层前馈控制机制，利用非线性振荡器的极限环特性，在无高层反馈的情况下可产生稳定的节律信号，是保障高机动仿生机器鱼在剧烈机动中运动稳定性的基础[86]。为实现高机动性，CPG 的控制维度已从单一的稳态波形生成扩展至瞬态幅频调制与多鳍肢相位协同。高机动任务要求仿生机器鱼具备从稳态巡游瞬间切换至“C 型起动”等爆发状态的能力，通过构建非线性振荡器网络，控制系统能够对波动频率与幅值进行瞬态增益调节，实现推力的脉冲式输出[87]。针对多自由度鳍肢协同系统，复杂的 CPG 拓扑结构建立了胸鳍与尾鳍之间的相位解耦机制，通

过精确调控多鳍肢间的相位差，可在狭窄水域内诱导非对称流场，从而提升高机动仿生机器鱼的零半径原地转向与侧向平移能力[88]。

为突破单一刚度对机动带宽的限制，控制策略开始深度融合物理结构的变刚度特性。如在模块化自适应变刚度控制框架下，CPG 信号与关节的物理顺应性动态匹配，在宽频率范围内实现了推进速度与机动能效的同步增益[89]。针对基于双正弦机构的线驱动仿生机器鱼，CPG 参数优化进一步提升了高频工况下的推力稳定性[43]。此外，为应对逆流与湍流干扰，基于人工侧线或力矩反馈的闭环控制被引入 CPG 模型[46,90]。基于多源感知反馈的闭环 CPG 控制架构如图 8 所示。

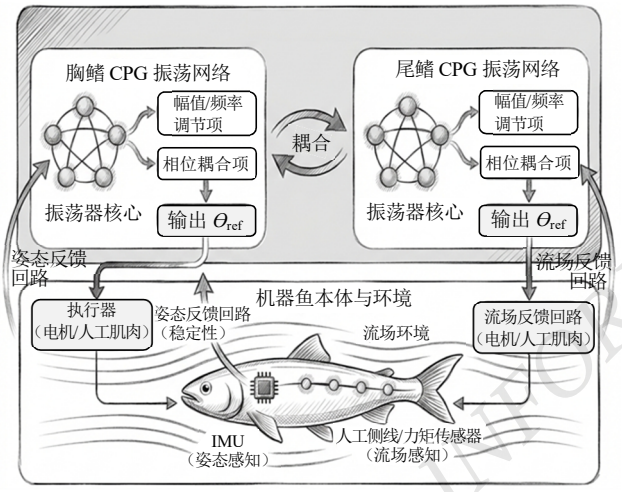


图 8　基于多源感知反馈的闭环 CPG 控制架构

基于多源感知反馈的闭环 CPG 控制架构，在传统的胸鳍与尾鳍 CPG 网络之间建立了相位耦合机制，并将惯性测量单元（inertial measurement unit, IMU）采集的姿态信息与人工侧线感知的流场数据实时反馈至振荡器核心。通过对输出信号（Θ_{ref}）中的幅值、频率及相位耦合项进行在线调制，赋予高机动仿生机器鱼在非定常流场中自动重构步态的瞬态反射能力，从而增强了其抗扰稳定性[91]。

5.2　强化学习决策与流场适应

强化学习通过数据驱动的方式，解决了复杂流场环境中难以建立精确建模的不足，为高机动仿生机器鱼获取超生物的机动策略提供了有效路径。其核心优势在于能够直接处理高维、强非线性的控制任务，实现对流场能量的主动利用[92]。在高机动推进中，智能体能够通过与环境的持续交互，自主学习流场中涡流结构的演化规律，通过精确的相位锁定与姿态调整，高机动仿生机器鱼能够捕获脱落涡环中的能量，在不增加驱动功率的前提下，通过动量注入获得瞬时推力增益[79,92]。这种对流场环境的主动适应能力，可提升高机动仿生机器鱼在复杂海况下的长续航与高爆发性能。

为克服分层控制带来的信号延迟与信息丢失，端到端的深度强化学习策略成为提升机动性的关键。该策略通过深度神经网络与物理信息融合建模，直接建立了从原始流场感知数据到多自由度致动器输出的非线性映射，提升了高机动仿生机器鱼在不可预测湍流环境下的姿态响应速度[93-94]。针对混合驱动系统（如鳍-桨协同）的高维控制空间，以及复杂仿生结构（如异构双鳍）的动力学建模难题，大规模域随机化与长短期记忆网络被广泛应用[62]，使高机动仿生机器鱼能够从历史状态序列中推断未建模的流体反作用力，确保高爆发动作从仿真环境到物理样机的准确迁移与复现[95-97]。

5.3　策略融合与性能演进

高机动控制策略的演进体现了从运动学拟合向动力学增益的跨越。CPG 控制利用其天然的节律稳定性与参数可调性，解决了多关节冗余机构在模态切换中的平滑性与协调难题。强化学习赋予高机动仿生机器鱼在未知非定常流场中自主进化策略的能力。两者有机结合，深度融合躯干变刚度、多鳍协同及内源性姿态调节等机制，不仅提升了高机动仿生机器鱼的瞬态爆发力与转弯敏捷性，更为未来实现全自主、高适应性的复杂水下作业奠定了坚实的算法基础。

6　挑战与展望

6.1　动力学建模与解算

尽管计算流体力学已能通过浸入边界法等方法，解析仿生机器鱼在高机动过程中的涡流拓扑与压力分布，但这种后验式的高维数值模拟耗时较大，难以

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

满足机器人实时控制（毫秒级响应）的需求。目前的简化动力学模型大多基于准定常假设，忽略了快速启动或急停时流体记忆效应与附加质量的非线性变化，导致模型预测力与实际瞬态流体力的偏差较大。因此，如何在保留关键非定常特征（如前缘涡演化）的同时，构建可在线快速解算的降阶模型，成为实现基于模型的精确机动控制理论的瓶颈。

此外，随着变刚度材料与软体结构的引入，高机动仿生机器鱼的动力学系统呈现“刚-柔-液”强耦合特性。传统的多刚体动力学模型难以准确描述软体尾鳍在大变形下的迟滞特性及与湍流的交互作用。未来的建模工作需向数据驱动方向演进，利用深度学习等工具建立结构刚度参数、运动学输入与流体动力输出之间端到端的映射关系，从而避免复杂的解析方程求解，为复杂流场中的预测控制提供理论支撑。

6.2 流场感知与控制

鱼类通过侧线系统感知流速与压力的梯度变化，从而利用涡流进行节能游动或爆发机动。然而，目前的高机动仿生机器鱼多依赖视觉或惯性导航，对流场环境缺乏感知能力。现有控制策略大多基于 CPG 生成的开环节律运动，在面对突发湍流或需要精确相位匹配的涡流捕获机动时，缺乏有效的局部流场反馈机制，适应能力不足。同时，受限于表面压力传感器阵列（人工侧线）的高灵敏度、低延迟性，高机动仿生机器鱼难以捕捉最佳的机动时机（如在涡环脱落瞬间施加反力矩），限制了其在非结构化环境中的敏捷性。

未来的“感知-运动”耦合控制系统需实现从稳态节律到瞬态反射的转变。一方面，需要开发能够检测微弱压力变化与流向的柔性电子皮肤，使高机动仿生机器鱼具有流场感知能力；另一方面，控制算法需具备非线性鲁棒性，以支持周期性巡游与非周期性爆发机动之间的平滑切换。通过构建分层控制系统，将上层的运动规划与下层的流体反射弧相结合，是实现仿生机器鱼高机动性的必经之路。

6.3 硬件集成与驱动

高机动性对仿生机器鱼的驱动系统提出了爆发力与顺应性兼备的双重要求，现有硬件方案面临二律背反的困境。线驱动与液压系统虽能提供较大的瞬时扭矩以实现爆发加速，但系统庞大、密封困难且缺乏柔性顺应；智能材料虽然集成度较高且具备仿生变刚度特性，但受限于响应带宽或输出力不足，难以驱动大型样机对抗强流的高频机动。因此，如何在有限的载荷空间内提升驱动系统的功率密度并兼顾变刚度调节能力，已成为硬件集成的核心挑战。

此外，深海或近岸湍流等恶劣作业环境也对高机动仿生机器鱼的耐久性与密封性提出严峻考验。现有的多自由度胸鳍与变刚度关节多包含复杂的机械传动部件，在高含沙量或高水压环境下易发生磨损、泄漏等问题。未来的硬件演进将趋向于“存算一体”与“结构功能一体化”，如研发具有自感知与自修复能力的软体驱动器，或设计全封闭的磁耦合传动机构，以提升高机动仿生机器鱼在真实复杂水域中的长期生存能力与作业可靠性。

6.4 实海况环境验证

当前大多数高机动仿生机器鱼的性能验证仍局限于单纯的流场环境（如实验室水槽或静水池），其极小转弯半径或瞬时加速度是在无外界扰动下的理想指标。然而，实际海洋环境具有高度的非结构化特征，暗流涌动、复杂地形、多变温盐深度对高机动仿生机器鱼的稳定控制提出了不同维度的挑战。实验室中的高机动控制策略在面对真实海流干扰时，常因控制时延或推力不足而失效。

因此，未来高机动仿生机器鱼的研究需跨越“仿真-现实”的鸿沟，通过建立高保真的水下物理仿真环境，测试极端工况下的机动策略。更重要的是，应推动样机从水槽展示走向野外实测，在真实湍流、狭窄航道或深海环境中验证其急停、避障与抗流悬停等能力。只有通过真实环境的严苛检验，高机动仿生机器鱼才能真正从理论原型发展为具有实际作业能力的工程装备。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

参考文献

[1] 李硕,吴园涛,李琛,等.水下机器人应用及展望[J].中国科学院院刊,2022,37(7):910-920.

[2] 封锡盛,李一平,徐红丽.下一代海洋机器人写在人类创造下潜深度世界记录10 912米50周年之际[J].机器人,2011,33(1):113-118.

[3] WANG Y, WANG J, YU L, et al. Toward the intelligent, safe exploration of a biomimetic underwater robot: Modeling, planning, and control[J]. Biomimetics, 2024,9(3):126.

[4] YU J, TAN M, WANG S, et al. Development of a biomimetic robotic fish and its control algorithm[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2004, 34(4):1798-1810.

[5] FISH F E. Advantages of natural propulsive systems[J]. Marine Technology Society Journal, 2013,47(5):37-44.

[6] 喻俊志,陈尔奎,王硕,等.仿生机器鱼研究的进展与分析[J].控制理论与应用,2003,20(4):485-491.

[7] DOMENICI P, BLAKE R W. The kinematics and performance of fish fast-start swimming[J]. Journal of Experimental Biology, 1997,200(8):1165-1178.

[8] TRIANTAFYLLOU M S, TRIANTAFYLLOU G, YUE D K. Hydrodynamics of fishlike swimming[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2000,32(1):33-53.

[9] DRUCKER E G, LAUDER G V. Wake dynamics and fluid forces of turning maneuvers in sunfish[J]. Journal of Experimental Biology, 2001,204(3):431-442.

[10] LAUDER G V. Fish locomotion: Recent advances and new directions[J]. Annual Review of Marine Science, 2015,7(1):521-545.

[11] YU J, WEN L, REN Z. A survey on fabrication, control, and hydrodynamic function of biomimetic robotic fish[J]. Science China Technological Sciences, 2017,60(9):1365-1380.

[12] MARCHESEANDREW D, ONALCAGDAS D. Autonomous soft robotic fish capable of escape maneuvers using fluidic elastomer actuators[J]. Soft Robotics, 2014.

[13] WU Z, YU J, YUAN J, et al. Towards a gliding robotic dolphin: Design, modeling, and experiments[J]. IEEE-ASME Trans Mechatron, 2019,24(1):260-270.

[14] WEBB P W. Maneuverability-general issues[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004,29(3):547-555.

[15] WANG Z, DONG C, ZHANG Z, et al. Review of multi-fin propulsion and functional materials of underwater bionic robotic fish[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022,236(13):7350-7367.

[16] KATZSCHMANN R K, DELPRETO J, MACCURDY R, et al. Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish [J]. Science Robotics, 2018,3(16):eaar3449.

[17] SU Z, YU J, TAN M, et al. Implementing flexible and fast turning maneuvers of a multijoint robotic fish[J]. IEEE-ASME Trans Mechatron, 2013,19(1):329-338.

[18] DRUCKER E G, LAUDER G V. Function of pectoral fins in rainbow trout: Behavioral repertoire and hydrodynamic forces [J]. Journal of Experimental Biology, 2003,206(5):813-826.

[19] STANDEN E, LAUDER G V. Hydrodynamic function of dorsal and anal fins in brook trout (Salvelinus fontinalis)[J]. Journal of Experimental Biology, 2007,210(2):325-339.

[20] SFAKIOTAKIS M, LANE D M, DAVIES J B C. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002,24(2):237-252.

[21] BLAKE R W. Fish functional design and swimming performance[J]. Journal of Fish Biology, 2004,65(5):1193-1222.

[22] WEIHS D. The mechanism of rapid starting of slender fish[J]. Biorheology, 1973,10(3):343-350.

[23] LONG JR J H, NIPPER K S. The importance of body stiffness in undulatory propulsion[J]. American Zoologist, 1996,36(6):678-694.

[24] TYTELL E D, LAUDER G V. Hydrodynamics of the escape response in bluegill sunfish, Lepomis macrochirus[J]. Journal of Experimental Biology, 2008,211(21):3359-3369.

[25] TYTELL E D, HSU C-Y, WILLIAMS T L, et al. Interactions between internal forces, body stiffness, and fluid environment in a neuromechanical model of lamprey swimming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010,107(46):19832-19837.

[26] MCHENRY M J, PELL C A, LONG J H, JR. Mechanical control of swimming speed: Stiffness and axial wave form in undulating fish models[J]. Journal of Experimental Biology, 1995,198(11):2293-2305.

[27] NAUEN J C, LAUDER G V. Hydrodynamics of caudal fin locomotion by chub mackerel, Scomber japonicus (Scombridae)[J]. Journal of Experimental Biology, 2002,205(12):1709-1724.

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

[28] FISH F, LAUDER G V. Passive and active flow control by swimming fishes and mammals[J]. Annu Rev Fluid Mech, 2006,38(1):193-224.

[29] TANGORRA J, PHELAN C, ESPOSITO C, et al. Use of biorobotic models of highly deformable fins for studying the mechanics and control of fin forces in fishes[J]. Integrative and Comparative Biology, 2011,51(1):176-189.

[30] FLAMMANG B E, LAUDER G V, TROOLIN D R, et al. Volumetric imaging of fish locomotion[J]. Biology Letters, 2011,7(5):695-698.

[31] ALEXANDER R M. The physical properties of the swim-bladder in intact cypriniformes[J]. Journal of Experimental Biology, 1959,36(2):315-332.

[32] WEBB P W. Stability and maneuverability [J]. Fish Physiology, 2005,23:281-332.

[33] WILGA C, LAUDER G V. Three-dimensional kinematics and wake structure of the pectoral fins during locomotion in leopard sharks triakis semifasciata[J]. Journal of Experimental Biology, 2000,203(15):2261-2278.

[34] LIAO J C. A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2007,362(1487):1973-1993.

[35] LAUDER G V, MADDEN P G. Learning from fish: Kinematics and experimental hydrodynamics for roboticists[J]. International Journal of Automation and Computing, 2006, 3(4):325-335.

[36] CHU W-S, LEE K-T, SONG S-H, et al. Review of biomimetic underwater robots using smart actuators[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012,13(7): 1281-1292.

[37] 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. ISOPE, 1999:ISOPE-I-99-179.

[38] LI Z, CHU X, HU X, et al. Variable stiffness methods for robots: A review[J]. Smart Materials and Structures, 2024, 33(6):063002.

[39] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. Nature, 2015,521(7553):467-475.

[40] NAKABAYASHI M, KOBAYASHI R, KOBAYASHI S, et al. Bioinspired propulsion mechanism using a fin with a dynamic variable-effective-length spring-evaluation of thrust characteristics and flow around a fin in a uniform flow[J]. Journal of Biomechanical Science and Engineering, 2009,4(1): 82-93.

[41] NAKABAYASHI M, KOBAYASHI R, KOBAYASHI S, et al. A novel propulsion mechanism using a fin with a variable-effective-length spring[C]. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE, 2009:1515-1521.

[42] ZHONG Y, LI Z, DU R. A novel robot fish with wire-driven active body and compliant tail[J]. IEEE-ASME Trans Mechatron, 2017,22(4):1633-1643.

[43] YANG Q, WANG Q, CAO Z, et al. Development of a wire-driven robotic fish based on double sine mechanism[J]. Biomimetics, 2025,10(3):136.

[44] YU J, SU Z, WU Z, et al. Development of a fast-swimming dolphin robot capable of leaping[J]. IEEE-ASME Trans Mechatron, 2016,21(5):2307-2316.

[45] CHEN B, JIANG H. Body stiffness variation of a tensegrity robotic fish using antagonistic stiffness in a kinematically singular configuration[J]. IEEE Trans Robot, 2021,37(5): 1712-1727.

[46] DING F, CHEN W, ZHANG J, et al. A high-frequency oscillating tensegrity robotic fish with wide-ranging online body stiffness adjustability[J]. Ocean Egineering, 2025, 328: 121063.

[47] LIAO X, ZHOU C, WANG J, et al. A wire-driven dual elastic fishtail with energy storing and passive flexibility[J]. IEEE-ASME Trans Mechatron, 2023,29(3):1914-1925.

[48] JUSUFI A, VOGT D M, WOOD R J, et al. Undulatory swimming performance and body stiffness modulation in a soft robotic fish-inspired physical model[J]. Soft Robotics, 2017, 4(3):202-210.

[49] JU I, YUN D. Hydraulic variable stiffness mechanism for swimming locomotion optimization of soft robotic fish[J]. Ocean Eng, 2023,286:115551.

[50] ZHANG Y, WANG N, ZHAO W, et al. Development and performance analysis of pneumatic variable stiffness imitation dolphin tail actuator[J]. J Bionic Eng, 2024,21(5):2271-2290.

[51] BEHBAHANI S B, TAN X. Design and dynamic modeling of electrorheological fluid-based variable-stiffness fin for robotic fish[J]. Smart Materials and Structures, 2017,26(8):085014.

[52] LIU S, LIU C, LIANG Y, et al. Tunable stiffness caudal

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

peduncle leads to higher swimming speed without extra energy [J]. IEEE Robot Autom Lett, 2023,8(9):5886-5893.

[53] 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.

[54] HINES L, ARABAGI V, SITTI M. Shape memory polymer-based flexure stiffness control in a miniature flapping-wing robot[J]. IEEE Trans Robot, 2012,28(4):987-990.

[55] CHEN T, YANG X, ZHANG B, et al. Scale-inspired programmable robotic structures with concurrent shape morphing and stiffness variation[J]. Science Robotics, 2024,9(92):eadl0307.

[56] PARK Y J, HUH T M, PARK D, et al. Design of a variable-stiffness flapping mechanism for maximizing the thrust of a bio-inspired underwater robot[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2014,9(3):036002.

[57] HONG Z, WU Z, WANG Q, et al. A novel variable-stiffness tail based on layer-jamming for robotic fish[J]. Advanced Intelligent Systems, 2024,6(11):2400189.

[58] BANDYOPADHYAY P R. Trends in biorobotic autonomous undersea vehicles[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005,30(1):109-139.

[59] LACHAT D, CRESPI A, IJSPEERT A J. BoxyBot: A swimming and crawling fish robot controlled by a central pattern generator[C]. The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006. BioRob 2006. IEEE, 20026:643-648.

[60] LAUDER G V, LIM J, SHELTON R, et al. Robotic models for studying undulatory locomotion in fishes[J]. Marine Technology Society Journal, 2011,45(4):41-55.

[61] ZHANG F. Modeling, design and control of gliding robotic fish [M]. Michigan State University, 2014.

[62] HUANG L, HUANG Z, LIU Q, et al. Coordinated dual-fin actuation of bionic ocean sunfish robot for multi-modal locomotion[J]. Biomimetics, 2025,10(8):489.

[63] NG T J, CHEN N, ZHANG F. Snapp: An agile robotic fish with 3-D maneuverability for open water swim[J]. IEEE Robot Autom Lett, 2023,8(10):6499-6506.

[64] LIANG Y, WANG K, MO Y, et al. A wire-driven flexible vector-propelled robotic fish with omnidirectional adaptive caudal fin[C]. 2023 29th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP). IEEE, 2023.

[65] TANGORRA J L, LAUDER G V, HUNTER I W, et al. The effect of fin ray flexural rigidity on the propulsive forces generated by a biorobotic fish pectoral fin[J]. Journal of Experimental Biology, 2010,213(23):4043-4054.

[66] 牛传猛,毕树生,蔡月日,等.胸鳍摆动推进仿生鱼的设计及水动力实验[J].机器人,2014,36(5):535-543.

[67] HE Q, ZHU Y, LI W, et al. Pectoral fin-assisted braking and agile turning: A biomimetic approach to improve underwater robot maneuverability[J]. J Mar Sci Eng, 2025,13(7):1295.

[68] HUANG H, LIN Z, ZHENG W, et al. Morphing median fin enhances untethered bionic robotic tuna's linear acceleration and turning maneuverability[J]. arXiv preprint arXiv:2407-18843, 2024.

[69] ZHONG Y, WANG Q, YANG J, et al. Design, modeling, and experiment of underactuated flexible gliding robotic fish[J]. IEEE-ASME Trans Mechatron, 2023,29(3):2266-2276.

[70] YU J, WANG C, XIE G. Coordination of multiple robotic fish with applications to underwater robot competition[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015,63(2):1280-1288.

[71] ZHENG X, XIONG M, ZHENG J, et al. Three-dimensional dynamic modeling and motion analysis for an active-tail-actuated robotic fish with barycentre regulating mechanism[J]. arXiv preprint arXiv:200614420, 2020.

[72] HONG E Y, CHITRE M. Roll control of an autonomous underwater vehicle using an internal rolling mass[C]. Field and Service Robotics: Results of the 9th International Conference. Cham: Springer International Publishing, 2015:229-242.

[73] YU J, WANG T, CHEN D, et al. Quantifying the leaping motion using a self-propelled bionic robotic dolphin platform [J]. Biomimetics, 2023,8(1):21.

[74] BEN L, HUANG Z, BIN H, et al. Research status and control technology of autonomous underwater vehicle variable buoyancy system [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022,17(5): 134-147.

[75] TRIANTAFYLLOU M S, TECHET A H, HOVER F S. Review of experimental work in biomimetic foils[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004,29(3):585-594.

[76] TRIANTAFYLLOU M S, TRIANTAFYLLOU G S. An efficient swimming machine[J]. Scientific American, 1995, 272(3):64-70.

[77] DICKINSON M H. Unsteady mechanisms of force generation in aquatic and aerial locomotion[J]. American Zoologist, 1996, 36(6):537-554.

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

[78] LI Y, SONG J, YIN L, et al. Hydrodynamics and musculature actuation of fish during a fast start[J]. Applied Sciences, 2023, 13(4):2365.

[79] ZHU J, WHITE C, WAINWRIGHT D K, et al. Tuna robotics: A high-frequency experimental platform exploring the performance space of swimming fishes[J]. Science Robotics, 2019,4(34):eaax4615.

[80] YAN S, WANG J, WU Z, et al. Autonomous vision-based navigation and stability augmentation control of a biomimetic robotic hammerhead shark[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023,21(3):3319-3331.

[81] 李浩宇,李宗刚,杜亚江,等.机器鱼多鳍协同推进加速—滑行行为数值模拟[J].兵器装备工程学报,2023,44(3):163-174; 266.

[82] ANDERSON J M, STREITLIEN K, BARRETT D, et al. Oscillating foils of high propulsive efficiency[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998,360:41-72.

[83] MITTAL R, DONG H, BOZKURTTAS M, et al. A versatile sharp interface immersed boundary method for incompressible flows with complex boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 2008,227(10):4825-4852.

[84] LIU G, YU Y L, TONG B G. Flow control by means of a traveling curvature wave in fishlike escape responses[J]. Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, 2011,84(5 Pt 2):056312.

[85] ZHAO W, HU Y, ZHANG L, et al. Design and CPG-based control of biomimetic robotic fish[J]. IET Control Theory & Applications, 2009,3(3):281-293.

[86] IJSPEERT A J. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review[J]. Neural Networks, 2008, 21.

[87] WANG M, YU J, TAN M. CPG-based sensory feedback control for bio-inspired multimodal swimming[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014,11(10): 170.

[88] CUI X, SUN B, ZHU Y, et al. Enhancing efficiency and propulsion in bio-mimetic robotic fish through end-to-end deep reinforcement learning [J]. Physics of Fluids, 2024, 36(3).

[89] WANG Q, ZHANG J, HUANG P, et al. Design and modeling of a robotic fish with modular adaptive variable stiffness passive joint[J]. IEEE-ASME Trans Mechatron, 2025, 30(4): 3170-3179.

[90] GONG Y, WANG M, ZHAO Q, et al. Investigating the influence of counterflow regions on the hydrodynamic performance of biomimetic robotic fish[J]. Biomimetics, 2024, 9(8): 452.

[91] KORKMAZ D, OZMEN KOCA G, LI G, 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.

[92] VERMA S, NOVATI G, KOUMOUTSAKOS P. Efficient collective swimming by harnessing vortices through deep reinforcement learning[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018,115(23): 5849-5854.

[93] SUN Y, YAN C, XIANG X, et al. Towards end-to-end formation control for robotic fish via deep reinforcement learning with non-expert imitation[J]. Ocean Eng, 2023, 271: 113811.

[94] KOIRI M K, SHARMA A K, JHA A, et al. A comprehensive review of bio-inspired swimming in robotic fishes[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2025: 116913.

[95] ZHANG D, HUANG Q, XU H, et al. Development and three-dimensional modeling of a bionic robotic Fish with pectoral fins[J]. Ocean Eng, 2025, 321: 120393.

[96] HUANG H, XIAN S, XIONG C, et al. Design and dynamics modeling of a hybrid drive bionic robotic fish[J]. Biomimetic Intelligence and Robotics, 2025: 100247.

[97] BAI F, SONG X, WANG Z, et al. Research on design, modeling, and maneuverability analysis of hybrid-driven robotic fish[J]. Frontiers in Marine Science, 2025, 12: 1648335.

作者简介：

王晓广，男，2002 年生，在读硕士研究生，主要研究方向：仿生机器人及其智能控制。E-mail: 202420160441@mail.scut.edu.cn

钟勇（通信作者），男，1989 年生，博士研究生，教授，主要研究方向：仿生机器人及其智能控制。E-mail: zhongyong@scut.edu.cn

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING