

面向能效优化的攻角反馈机器人智能控制方法

王天柱¹, 刘佳音², 韩松¹, 车洪磊³, 史聪灵³

(1. 中国安全生产科学研究院北京市地铁火灾与客流疏运安全重点实验室, 北京 100012;

2. 中国矿业大学(北京)机械与电气工程学院, 北京 100083;

3. 中国安全生产科学研究院城市火灾监测预警应急管理部重点实验室, 北京 100012)

摘要: 水生生物能够感知水流状态并及时调节攻角, 从而在周期性拍动过程中保持最高的运动效率。生物尾鳍的运动伴随着尾部刚度的变化, 同时依赖于尾部肌肉的收缩/松弛。在与外部流体的相互作用中, 攻角调节有助于生物在运动中保持最佳攻角, 以提高推进性能。基于此, 提出了一种基于攻角反馈的仿生机器人高速运动智能控制方法。首先, 分析所设计的机器海豚的运动学特性, 明确算法的硬件基础; 其次, 针对尾鳍电机在高频运动时无法与腰关节电机有效协同的问题, 提出基于模糊推理的关节角控制算法, 实现了尾鳍关节在力矩模式下对期望关节角的跟踪; 然后, 提出了一种基于攻角反馈的尾关节闭环控制方案以提高运动性能; 最后, 通过实验验证了所提出的运动控制方法的有效性。

关键词: 能效优化; 攻角反馈; 智能控制; 仿生机器人

中图分类号: TP39

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202511

Intelligent control method of robot based on angle of attack feedback for energy efficiency optimization

WANG Tianzhu¹, LIU Jiayin², HAN Song¹, CHE Honglei³, SHI Congling³

1. Beijing Key Laboratory of Metro Fire and Passenger Transportation Safety, China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

3. Ministry of Emergency Management Key Laboratory of Urban Fire Monitoring and Early Warning, China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China

Abstract: Aquatic organisms can sense the flow state and adjust the attack angle in time, thereby maintaining the highest movement efficiency during the periodic flapping process. The biological caudal fin, accompanied by changes in tail stiffness, depends on the contraction/relaxation of tail muscles. In the interaction with external fluid, attack angle adjustment helps organisms maintain the optimal attack angle during the movement to improve propulsion performance. Inspired by this, an intelligent control method for high-speed movement of bionic robots based on attack angle feedback was proposed. Firstly, the kinematic characteristics of the designed robotic dolphin was analyzed to clarify the hardware basis of the algorithm. Secondly, in view of the problem that the caudal fin motor cannot effectively cooperate with the lumbar joint motor during high-frequency movement, a joint angle control algorithm based on fuzzy reasoning was proposed to realize the tracking of the expected joint angle by the caudal fin joint in the torque mode. In addition, a closed-loop control scheme for the caudal joint based on attack angle feedback was proposed to improve movement performance. Finally,

收稿日期: 2024-10-14; 修回日期: 2024-12-27

通信作者: 车洪磊, sychehonglei@163.com; 史聪灵, shicl@chinasafety.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2022YFC3004903); 中国安全生产科学研究院基本科研业务费专项资金项目 (No.2023JBKY06)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2022YFC3004903), Basic Research Operational Fund Program of China Academy of Safety Science and Technology (No.2023JBKY06)

the experiments verify the effectiveness of the proposed motion control scheme.

Key words: energy efficiency optimization, angle of attack feedback, intelligent control, bionic robot

0 引言

科研人员和工程人员一直致力于研制媲美生物^[1-3]、能承担复杂水下任务^[4-5]的仿生机器人。得益于数万年的进化,水生动物在推进效率和机动性方面都有突出的表现。就效率而言,有关金枪鱼的研究表明,鱼类产生的推力90%以上来自尾鳍^[6]。机器鱼的实验也表明,在未安装尾鳍的情况下,推进力最大会减少80%^[7]。因此,研究尾鳍推进力的机制,能够为仿生运动优化提供关键帮助。无论是纵向拍动的机器海豚,还是横向拍动的机器鱼,大多数人工推进鳍为刚性水翼,在简化模型中均可被视为振荡水翼。一般认为,攻角在振荡水翼的推进中起着关键作用。

尾鳍水流攻角如图1所示,攻角 α 是水流来向 V_r 与鳍状结构弦之间的夹角。当鳍面在水中运动时,鳍弦朝向和水流朝向均在变化,因此攻角也随时间不断变化。分析水翼在稳态流体中的受力时,随着攻角逐渐增大至临界值,升力比阻力增加得快。一旦超过临界攻角,阻力持续增加,升力急速下降,进而出现失速。生物鱼类能够时刻感知水流的状态,及时调整尾鳍攻角,避免失速,从而在周期性拍动中尽可能保持最大净推力^[8-9]。此外一些研究表明,随着攻角增加,尾鳍还会形成前缘涡流,这与推进力、推进效率和加速度都有潜在的联系^[10-12]。

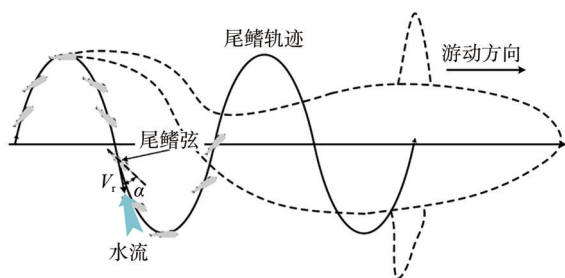


图1 尾鳍水流攻角

与水下仿生机器人相比,生物在运动方面有着得天独厚的优势。以海豚等鲸豚类为例,尾鳍是其运动的关键器官,也是帮助其在水中保持平衡和控制速度的重要部件。生物海豚通过肌肉的快速收缩和舒张以及强壮的尾柄参与运动,驱动力强劲。研

究表明,鱼类在游动时会主动收缩肌肉来调整尾部的刚度。如Flammang等^[13]发现蓝鳃太阳鱼随着速度的增加,尾巴也跟着变硬。Long等^[14]的研究表明,美洲鳗鲡通过收缩肌肉增加身体刚度,并在前向稳态游动中获得净推力。生物鱼类通过调整驱动器官的刚度从而进行运动优化的机制仍待进一步研究,但上述现象给仿生机器海豚的研究带来了一定启示。

针对水下仿生机器人,研究人员尝试引入刚度调节机制以优化其运动性能。如Chen等^[15]和Tong等^[16]在机器鱼尾部安装被动刚度元件(扭簧),或者有研究者使用可调刚度器件^[17-18],这些方式均优化了机器鱼的运动性能。此外,还有研究者使用特殊驱动机构改变刚度,如Park等^[19]使用人工肌腱来模拟鳍片的刚度。Zhong等^[20]提出,为保持高效率,最优刚度必须随流速变化。若想在大幅度范围内利用改变刚度的方法提高运动性能,仿生机器人需要提前标定最佳参数,并根据运动状态及时调整驱动机构的刚度,所以该方法适用范围有限。早期变刚度调节聚焦于机械结构层面的改良,模仿生物关节在运动过程中灵活改变刚度的特性,此类方法多依赖复杂机械传动装置(如多层嵌套齿轮、连杆组合)切换不同刚度模式。此类方法适用范围有限,原因如下:一是复杂结构限制其在小型化、便携仿生设备中的运用;二是环境适应性差,多数机械结构的刚度调节预设固定参数,面对复杂、未知工况时应变能力不足;三是仿生机器人要依据环境实时反馈调整刚度,目前传感与控制技术融合不佳。

如前文所述,尾鳍是机器海豚推进力的主要来源,同时攻角在推进力的形成机制中扮演着重要角色。具体地,生物鱼类能够时刻感知水流状态,及时调整攻角,从而在周期性拍动中始终保持最高运动效率。生物调整尾鳍攻角依赖尾部肌肉收缩/舒张,随着尾部刚度的改变,在外界流体作用下能够在运动中寻找最佳攻角。

受上述研究的启发,针对仿生机器海豚运动性能优化问题,本文提出了一种基于攻角反馈的尾关节运动智能控制方案。首先,结合生物学观察数据和翼形升阻力模型,设计了尾鳍最优攻角控制律;

其次,针对高频运动时尾部电机无法有效配合腰关节电机的问题,基于模糊推理提出一种变刚度关节角控制策略,实现尾关节在扭矩模式下跟踪期望关节角;再次,分析了尾柄与尾鳍的运动关系,并基于攻角反馈思想设计了尾关节控制律;最后,通过水池实验验证了所提运动优化方案的有效性。

1 仿生机器人平台

仿生机器人平台如图2所示。本文使用的仿生机器人平台以点斑原海豚为对象进行设计,利用其流线型外形减小水下运动阻力。为模仿生物海豚典型的背腹式游动模式,机器海豚推进系统配备了两个高性能无刷直流电机(maxon EC-4pole 200 W、90 W),分别作为腰关节和尾关节动力源。尾鳍与尾部关节电机通过锥齿轮箱连接,是主要的前向推力来源。尾鳍后缘安装了一款适用于水下仿生鳍面的攻角传感器^[21],用于实时反馈尾鳍攻角数据。

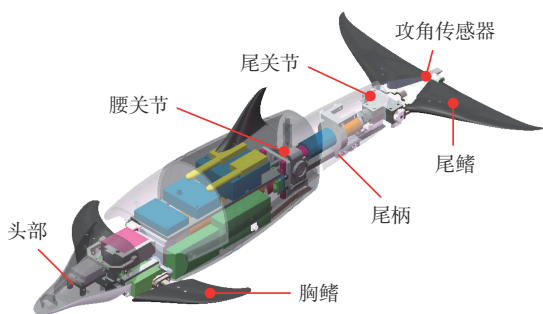


图2 仿生机器人平台

在电路系统方面,传感器、嵌入式控制器芯片、通信模块和电池等组件均内置于机器海豚体内,使其能够实现无缆自主游动。具体地,机器海豚头部安装了微型姿态航向参考系统(attitude and heading reference system, AHRS),为机器人提供姿态数据。此外,机器海豚基于专用电机驱动器获取各关节的状态信息(如速度、位置等)。控制指令通过射频通信模块无线传输到机器海豚内部。

2 最优攻角控制律

著名生物学家Fish等^[6]的研究表明,对于大西洋宽吻海豚而言,其运动达到不同速度时最大攻角的平均值为 $4.6^{\circ}\sim 17.5^{\circ}$,低速时甚至接近 30° 。麻省理工学院的Anderson等^[22]也指出攻角为 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 时,可为二维振荡水翼提供最佳推力,类似海豚尾鳍的水翼甚至可以在 30° 的攻角下维持升力而不失

速。上述研究表明,尾鳍推力与速度跟攻角的关系非常密切,且不同速度时需要的最大攻角并不相同。开环控制的水下仿生机器人无论处于何种速度,都保持固定的控制律。由于忽略了尾部攻角的变化,水下仿生机器人的速度往往无法匹配最优攻角,存在优化空间。

根据翼型受力模型,尾鳍的升力、阻力系数和攻角共同决定鳍面所受的升力(平行于鳍面)和阻力(垂直于鳍面)。不考虑重力和浮力,升力、阻力的矢量和决定了尾鳍的前向推力。在已知升力、阻力系数的情况下,存在一个攻角可以使尾鳍获得最大前向推力,这里称之为最优攻角。以最优攻角为目标值,调整关节角度使当前攻角趋近于目标值,与固定参数的开环控制相比,这种方式能够使尾鳍尽可能地获得最大前向推力,从而优化运动性能。具体地,在每个控制周期内,根据安装于机器海豚尾鳍上的攻角传感器得到当前攻角值,其与期望攻角的差值即可用于设置尾关节角的控制量。

本文基于上述思路设计最优攻角控制律,具体地,首先基于水动力学仿真获取尾鳍的升力、阻力系数,其次推导前向推力与攻角的关系,最后设计最优攻角控制律曲线。

2.1 水动力学分析

水动力是尾鳍推力的重要来源,尾鳍的水动力学特性直接影响运动性能。本文使用升阻力模型对尾鳍进行水动力学特性分析。升阻力系数依赖尾鳍的形状,而计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)是获取不规则形状物体水动力学特性的有效方法。本文使用有限元仿真软件Ansys Workbench对机器海豚的尾鳍进行CFD仿真:基于ICEM模块进行计算域绘制和网格划分;基于Fluent模块求解尾鳍的水动力参数。

CFD仿真实验设置的流体域范围较大,速度入口和压力出口到尾鳍的距离大于3倍尾鳍体长,可减小涡流对仿真结果的影响。尾鳍的网格划分使用非结构方法,在尾鳍表面创建5层三棱柱边界层网格用于加密实验对象与环境的边界,以获得更好的收敛性和分析结果。在使用Fluent软件仿真时,假定流体为不可压缩稳定纯水,选用低雷诺数下的 $k-\omega$ 剪切应力输运湍流模型进行求解。图3展示了尾鳍流体计算域的边界条件:流体入口条件为速度入口,流场速度为 0.5 m/s ;出口边界条件为压力出口;计算域上、下、前、后4个壁面均为无滑移壁

面；尾鳍所有壁面均为静止的无滑移壁面，壁面粗糙度为0。

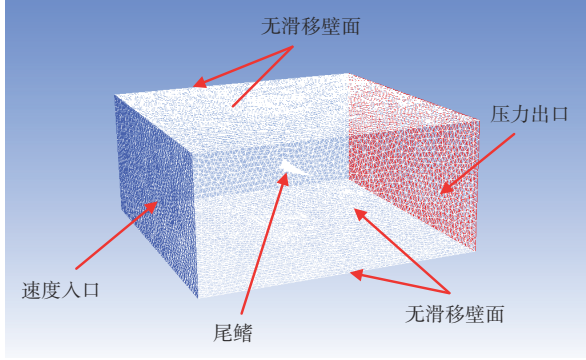


图3 尾鳍流体计算域的边界条件

2.2 尾鳍受力分析

攻角是尾鳍所在平面与水流的夹角，是决定尾鳍推进力的关键变量。图4展示了尾鳍攻角与作用力的关系。尾鳍在水中受到的流体作用力可被拆分为两部分：垂直于运动方向的升力 L 、平行于运动方向的阻力 D 。运动方向为尾鳍在真实世界中的绝对速度 V_r ，由尾鳍流体计算域的边界条件 V_b 和尾鳍的侧向速度分量 V_f 共同合成。

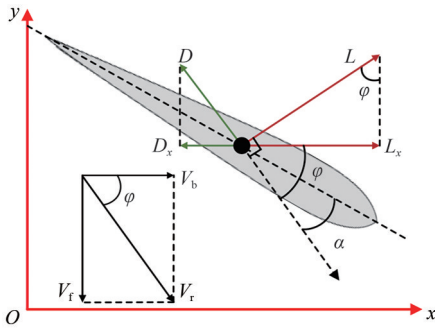


图4 尾鳍攻角与作用力的关系

忽略表面摩擦力、压差阻力和重力，根据升阻力模型，尾鳍受到的力可以表示为：

$$\begin{cases} L_x = L \sin \varphi = 0.5 \rho \cdot S \cdot C_l \cdot V_r^2 \sin \varphi \\ D_x = D \cos \varphi = 0.5 \rho \cdot S \cdot C_d \cdot V_r^2 \cos \varphi \end{cases} \quad (1)$$

其中， L_x 、 D_x 分别为升力和阻力沿x轴的分量， φ 为尾鳍移动方向与前进方向的夹角， ρ 为流体密度， S 为尾鳍受力面积， C_l 、 C_d 分别为升力系数和阻力系数，两者的大小跟尾鳍的形状以及攻角有关。对于指定的尾鳍而言， C_l 和 C_d 是攻角 α 的函数，记为 $C_{l,\alpha}$ 和 $C_{d,\alpha}$ 。计算尾鳍在前进方向受到的净推力如下：

$$T = L_x - D_x = 0.5 \rho \cdot S \cdot V_r^2 (C_{l,\alpha} \sin \varphi - C_{d,\alpha} \cos \varphi) \quad (2)$$

当且仅当 $C_{l,\alpha} \sin \varphi - C_{d,\alpha} \cos \varphi > 0$ 时，海豚才能获得净推力，即：

$$\tan \varphi > C_{d,\alpha} / C_{l,\alpha} \quad (3)$$

记 $C_{l,d} = C_l / C_d$ 为尾鳍升阻比系数，基于CFD仿真得到尾鳍攻角与升阻比关系，如图5所示。由图5可知， $\alpha = 7.4^\circ$ 时获得最大升阻比，此时 $\varphi > 8.0^\circ$ ，即当尾鳍运动方向与前进方向夹角小于 8.0° 时，净推力为负。此时攻角应置为 0° ，否则会引入负净推力。

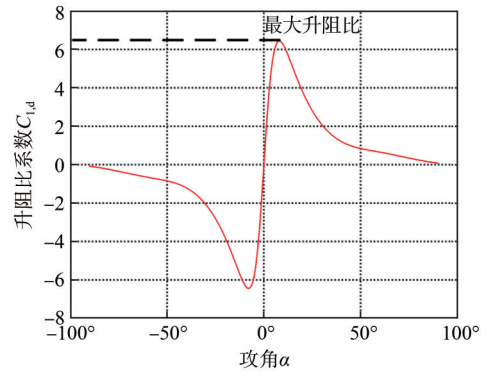


图5 尾鳍攻角与升阻比关系

2.3 最优攻角控制律曲线设计

尾鳍攻角控制有2个要求：保持净推力为正；使尾鳍攻角尽量保持在升力系数最大值。

当仿生机器人处于低速度运行状态时，周遭流体相对流速较小，依据流体动力学基本理论——库塔-茹科夫斯基定理，升力与流速、攻角密切相关。要生成足够的向前推力，需适当增大攻角。尾鳍作为仿生机器人的关键操控与动力辅助部件，让其攻角靠近升力系数最大值，能够实现高效运动。由翼型特性曲线可知，每种尾鳍翼型都对应独特的升力系数随攻角变化曲线，存在一个攻角值使升力系数达到峰值。精确测量、模拟尾鳍在不同流速下的升力系数曲线是设计攻角变化律的前提。流速小时，由于雷诺数较低，黏性力主导流体行为，尾鳍周围流场复杂。为最大化升力系数，需依据前期实验，计算流体力学模拟结果，微调攻角找到最佳值，确保边界层附着良好，形成稳定涡旋结构，放大升力效果。

针对本文所选尾鳍，若能够保持净推力为正，取 $\varphi > 8.0^\circ$ 。若无法满足，则应使尾鳍攻角尽量保持在升力系数最大值，即 $\alpha = 22.3^\circ$ ，此时升阻比系

数为3.31, 对应 $\varphi > 16.8^\circ$ 。因此制定如下攻角变化律。

(1) 当 $0^\circ \leq \varphi < 8.0^\circ$ 时, $\alpha = 0^\circ$ 。

(2) 当 $8.0^\circ \leq \varphi < 16.8^\circ$ 时, 攻角无法保持最佳升力系数, 进而导致负净推力。为避免机器人运动时控制参数发生跳变, 设置在此区间的 α 平滑曲线。

(3) 当 $\varphi \geq 16.8^\circ$ 时, 攻角保持最大升力系数, 即 $\alpha = 22.3^\circ$ 。

将上述约束公式化, 保证攻角在 $[8.0^\circ, 16.8^\circ]$ 取值平滑, 有:

$$\begin{cases} \alpha_{\max}, \varphi \in [\varphi_2, 90^\circ] \\ 0.5\alpha_{\max} \left(\sin \left(\frac{(\varphi - \varphi_1)\pi}{\varphi_2 - \varphi_1} - 0.5\pi \right) + 1 \right), \varphi \in [\varphi_1, \varphi_2] \\ 0, \varphi \in [0, \varphi_1) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\varphi_1 = 8.0^\circ$, $\varphi_2 = 16.0^\circ$, $\alpha_{\max} = 22.3^\circ$ 。

值得说明的是, 本文基于CFD仿真数据给出的最大攻角 $\alpha_{\max}$ 与文献[6]对生物海豚观察统计的结果和Anderson等^[22]对二维振荡水翼的研究结果均一致, 这在一定程度上证明了本文设计的机器海豚尾部运动规律与生物海豚相符合。

3 变刚度关节角智能控制

对于多关节水下仿生机器人, 拍动频率、关节角幅值和关节间相位差是决定运动性能的关键参数, 其中拍动频率对游速的提升最为明显。考虑尾关节和腰关节须互相配合, 如何有效增加拍动频率是一件具有挑战的任务。本文提出了一种基于扭矩模式的变刚度关节角控制算法, 该算法位于基于攻角反馈的尾关节闭环控制算法中的内环。相较于位置模式的电机控制方案, 在不改变电机硬件参数的情况下, 该方法能够有效提高系统可用最大拍频。具体地, 尾关节的电机位置不再追求最小跟踪误差, 而是根据水流的反馈来保证尾鳍角度满足最佳

攻角。考虑改变尾关节电机的输出扭矩, 仅需改变电流, 该过程所需的时间控制比位置控制显著减少, 因此该方法能够有效保持最佳攻角。

首先介绍常见的直流电机轮廓位置模式 (profile position mode, PPM)。图6展示了PPM原理, 即该控制周期内尾电机加速度 A 、速度 V 和位置 P 的变化曲线。由图6可知, 在PPM下实现从 p_1 运动到 p_2 , 尾电机先加速至最大速度, 再减速至完全停在目标位置。该模式的优势是, 无论尾鳍受力如何变化, 尾关节总能跟踪期望轨迹。但每个控制周期的时间很短, 每个拍动周期由多个不断启停的短距离运动组成。因此, 该控制模式仅适用于低频运动, 在对电机响应要求非常高的高频运动中, 难以实现控制目标。

针对上述问题, 本文考虑直接控制尾电机的扭矩, 利用电机驱动器的循环同步扭矩模式 (cyclic synchronous torque mode, CST) 实现关节角控制。与PPM相比, 在CST下轨迹生成由主控制器实现。工作时, 主控制器以循环同步的方式向驱动板提供目标转矩, 从而进行扭矩控制。图7展示了CST下的尾鳍运动。在该模式下, 单个周期尾鳍的摆动运动同样包含两个离程阶段 (阶段1和阶段4) 和两个回程阶段 (阶段2和阶段3)。在离程阶段, 随着尾关节角增加, 电机输出扭矩随之增加; 回程阶段则相反, 电机扭矩逐渐减小。上述过程类似在尾关节处加装一副可调刚度的扭簧, 离程和回程两个阶段类似扭簧释放能量和储存能量的过程, 但本质上两个过程都在消耗电机的能量, 且电机可以根据需要随时调整蓄能大小。

以 p_1 点至 p_2 点的运动为例, 控制周期开始时, 控制器根据当前的误差以及电机当前状态, 确定本控制周期内的扭矩。若本周期负载超限, 只会增加位置误差, 不会损坏关节。与PPM相比, CST的缺点是控制精度有限, 优点是尾鳍近似为被动关节, 同等条件下可配合更高的腰关节拍频。

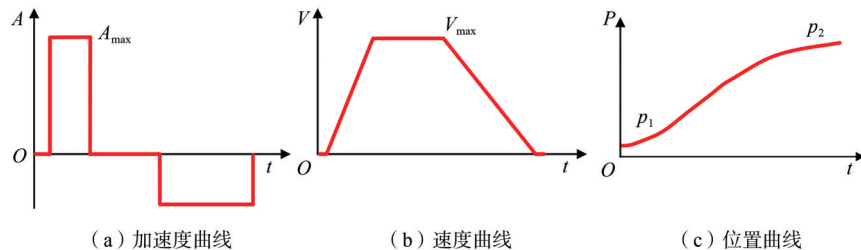


图6 PPM原理示意

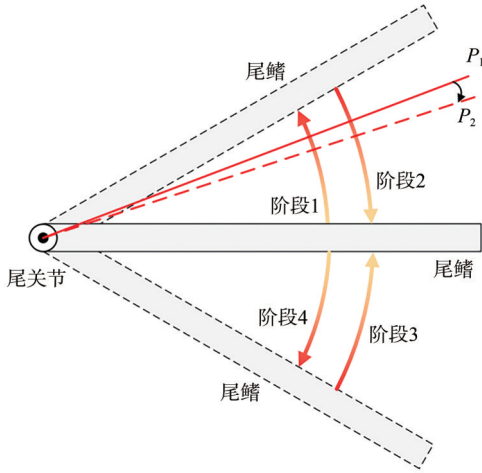


图7 CST下的尾鳍运动

基于CST, 本文所提出的变刚度关节角控制算法框架如图8所示。首先, 求取期望值 $P_{w,ref}$ 与根据电机位置传感器返回的当前位置 P_w 的偏差; 其次, 设计模糊推理系统, 将当前位置偏差映射至期望扭矩 $\tau_{w,u}$; 然后, 将当前位置 P_w 输入阻力补偿模型, 计算摩擦力和乳胶蒙皮的回复力, 并输出补偿扭矩 τ_{off} ; 最后, 电机驱动的扭矩控制器综合期望扭矩 $\tau_{w,u}$ 、补偿扭矩 τ_{off} 、当前实际扭矩 τ_w 以及其他电机参数 C_w , 输出控制量至尾关节电机。尾鳍在上述控制器的作用下不断沿着期望轨迹运动, 最终配合腰关节拍动, 实现前向游动。

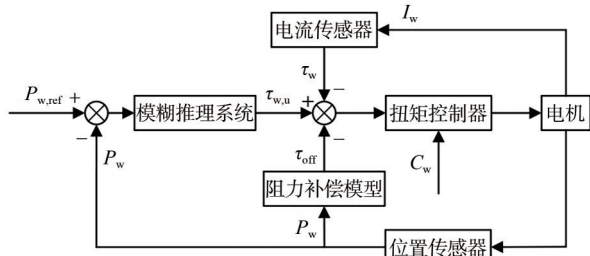


图8 变刚度关节角控制算法框架

4 基于攻角反馈的尾关节智能控制

仿生机器海豚的腰关节电机以恒定速度转动, 即腰关节的控制律是固定的, 其运动规律近似于正弦波。尾关节的角度应根据实际情况主动调整, 以保证攻角符合前文所述的最优攻角控制律。最优攻角控制律基于水动力学原理, 严密计算并锁定能使尾鳍获取最大升力、最小阻力的理想攻角数值。最优攻角控制律聚焦于尾鳍理想攻角设定以获得良好的流体动力, 机器人在实际运动时的可控制对象为

关节刚度, 其影响能量传递、动作响应精度。变刚度关节角控制的核心思路为依据最优攻角下期期望的动作轨迹与力反馈, 动态调整关节刚度, 以期达到机械结构柔顺配合, 减少能量损耗与运动迟滞的目的。

机器海豚尾柄与尾鳍运动关系如图9所示。图9中机器海豚正处于沿 x 轴正向运动状态, 此时尾柄向上拍动。记 β_2 为尾柄与前进方向的夹角, β_3 为尾鳍与前进方向的夹角。 λ_3 表示尾关节角, L_2 和 L_3 分别为简化后尾柄和尾鳍连杆的长度。在该时刻, 尾鳍在世界坐标系中的运动速度用 V_r 表示, V_r 由 V_b 和 $V_{c,\perp}$ 组成, V_b 为机器海豚沿 x 轴的速度分量, $V_{c,\perp}$ 垂直于尾柄, 表示腰关节转动引起的尾鳍前缘的速度分量。 φ 为 V_r 与 V_b 的夹角, 也可视为尾鳍移动角, 是前文最优攻角控制律的主要参数。 α 为尾鳍与 V_r 的夹角, 即攻角。

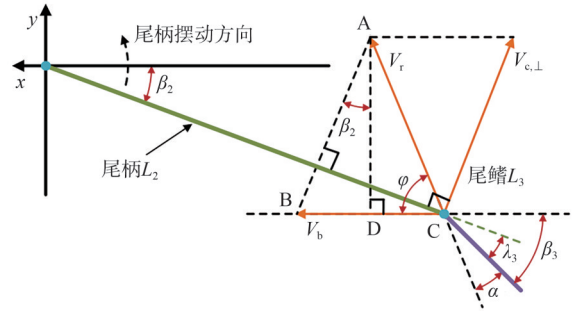


图9 机器海豚尾柄与尾鳍运动关系

根据最优攻角控制律, 计算期望攻角之前需要先计算尾鳍移动角 φ 。考察 $\triangle ABC$, 有:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{|AD|}{|CD|} \quad (5)$$

根据几何关系, $\angle BAD = \beta_2$, 则有:

$$|AD| = V_{c,\perp} \cos \beta_2 \quad (6)$$

利用式(5)、式(6), 可进一步求解 $|CD|$:

$$|CD| = |BC| - |BD| = V_b - V_{c,\perp} \sin \beta_2 \quad (7)$$

考虑 $V_{c,\perp}$ 为腰关节转动引起的尾鳍前缘的速度分量, 其大小为:

$$V_{c,\perp} = \dot{\beta}_2 L_2 \quad (8)$$

其中, $\dot{\beta}_2$ 为 β_2 导数, 进一步可得:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\dot{\beta}_2 L_2 \cos \beta_2}{V_b - \dot{\beta}_2 L_2 \sin \beta_2} \quad (9)$$

因此, 建立如图10所示基于攻角反馈的尾关

节闭环控制算法框架。首先,基于机器海豚的内部状态数据,使用最优攻角控制律计算当前控制周期内的期望攻角 α_{ref} ;其次,利用期望攻角与攻角传感器反馈的数据计算攻角偏差 α_e ,并设计模糊控制器,将 α_e 映射为期望的尾鳍关节角;最后,基于变刚度关节角控制器,调整尾关节角至期望值。上述控制框架需要通过实时的俯仰角、关节角和游速反馈才能确定最佳期望扭矩。其中,机器海豚的俯仰角由头部的AHRS提供,关节角及角速度数据来自电机驱动器,游动速度则需要借助外部测量手段或者人工干预确定。

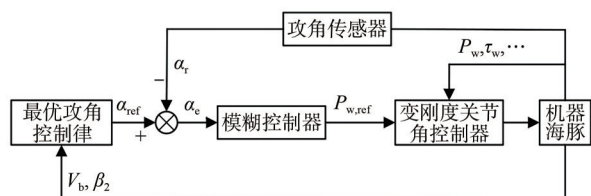


图10 基于攻角反馈的尾关节闭环控制算法框架

5 实验与分析

为验证本文所提基于攻角反馈的尾关节闭环控制算法的有效性,本文进行了水池实验。首先介绍了仿生机器海豚实验场景,其次详述了攻角反馈算法的实验过程,最后通过对比实验验证算法的有效性。

5.1 实验设置

实验场景如图11所示,实验平台主要包含4个部分:实验室水池、全局视觉测量系统、上位机系统和仿生机器海豚。实验室水池规格为5.0 m×4.0 m×1.2 m。全局视觉测量系统主要包含一台位于水池上方的彩色摄像机(分辨率为1 294像素×964像素)。实验过程中,仿生机器海豚头部粘贴有红色和黄色的色标,全局视觉测量系统负责采集检测运动中的机器海豚,并返回机器海豚在二维平面内的坐标。上位机系统负责向机器海豚下发控制指令,同时接收机器海豚的数据。机器海豚尾部后缘安装有攻角传感器,用于为尾关节闭环控制实时反馈攻角数据。同时,机器海豚本体也带有陀螺仪和加速度计,用于反馈本体的姿态和速度数据。此外,在验证攻角反馈算法的实验中,全局视觉测量系统获取的速度信息经由上位机系统下发至机器海豚。

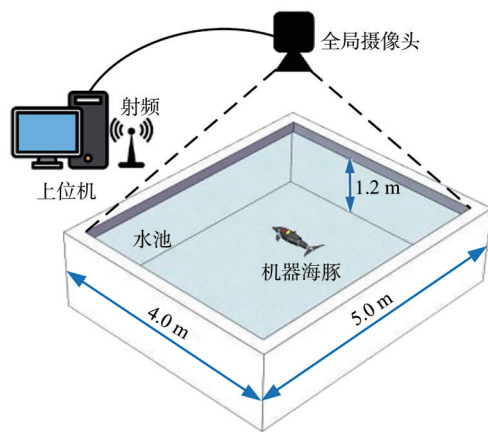
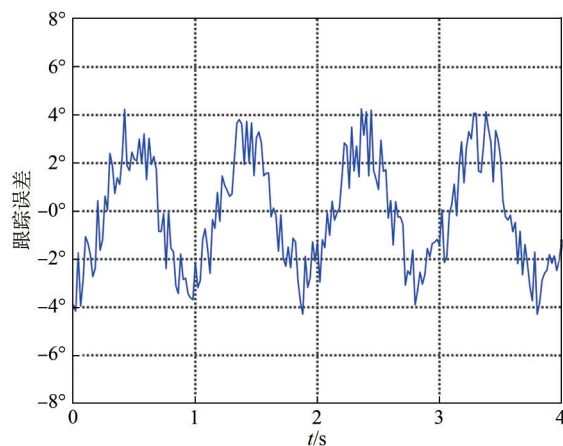


图11 实验场景示意

5.2 攻角反馈控制实验与分析

为验证本文所提基于攻角反馈的尾关节运动控制算法的有效性,与常规基于轮廓位置模式的控制算法进行对比,设计了动态实验和功率实验。

在进行上述实验之前,本文首先对基于攻角反馈的尾关节闭环控制算法中的关键变量进行跟踪误差分析,以保证本文所提方法在实验结果中的有效性。跟踪误差实验设置腰关节以恒定速度旋转,而尾鳍以1.0 Hz频率配合运动。图12展示了 α_r 与 α_{ref} 之间的跟踪误差,二者的平均跟踪误差为1.95°。

图12 α_r 与 α_{ref} 之间的跟踪误差

此外,图13展示了尾关节实际位置 P_w 和期望位置 $P_{w,\text{ref}}$ 之间的跟踪误差,二者的平均跟踪误差为0.99°。由图13可知,位置变量的平均跟踪误差明显小于尾鳍攻角,这种现象的产生可能有两个原因:一是尾鳍的攻角是由自制的传感器采集而来的,而尾鳍位置是直接由电机的编码器获取的,后者具有更好的稳定性;二是尾鳍攻角是控制框架中的外

环变量,与内环变量相比,更易造成累积误差。当机器人快速机动时,算法延迟致使执行器动作滞后于理想时机,机器人无法精准遵循预设轨迹,累积跟踪误差。尤其在高频动态运动场景中,短暂延迟便会造成显著位置偏差。持续存在的跟踪误差会直接降低运动精度,导致尾关节难以精准抵达目标位置,维持预定姿态。为消除跟踪误差,可以考虑引入模型在线辨识技术,持续监测关节状态、环境参数,动态更新动力学、运动学模型,缩小模型与实际偏差;同时设计专门的抗扰动补偿模块,利用扰动观测器实时预估外部干扰力、力矩,前馈至控制算法,提前抵消扰动影响。针对已知扰动类型,预设补偿策略;未知扰动出现时,凭借智能算法快速解析扰动特性,生成有效补偿方案。

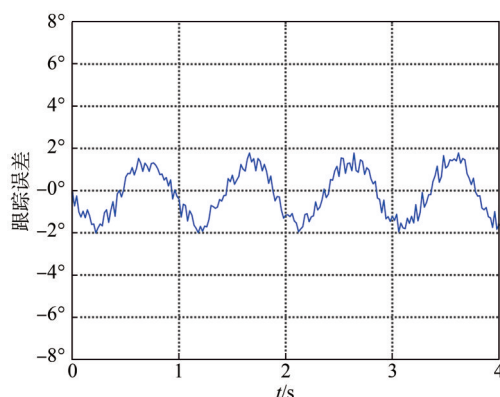


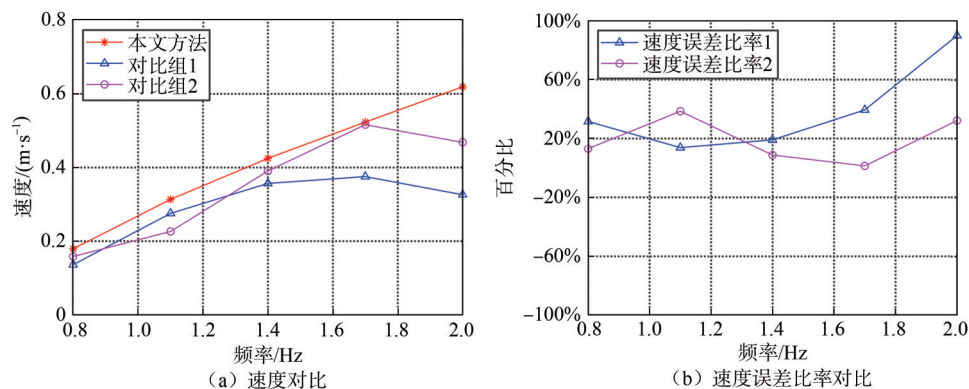
图13 尾关节实际位置 P_w 和期望位置 $P_{w,ref}$ 之间的跟踪误差

在动态实验中,加入基于轮廓位置模式控制的游动实验与本文所提方法进行对比。具体地,在对比实验中,腰关节使用轮廓速度模式(profile velocity mode, PVM)匀速运动,尾电机处于PPM,通过控制电机正反转,实现尾关节角控制。对比组尾关节幅值均选择 45° ,其中对比组1与腰关节相

位差为 -80° ,对比组2相位差为 -60° 。此外,本文所提方法和对比组的参数完全一致。图14展示了上述3组动态实验速度结果对比。

由图14(a)可知,本文所提方法在各个频率上取得的速度均优于对比组,且最大速度约为 0.62 m/s 。对比组均在某些频率上表现突出,但超出最优频率区间之后,游动速度的增长不再显著。当频率升高时,对比组甚至出现了游速下降的现象。这表明开环控制适应的最佳频率区间范围比闭环控制要小,即一组开环参数仅在极少数频率下取得较高速度,脱离该频率区间,游动速度反而下降。该情况的成因可能如下:首先,在高频振荡工况下,若机器人外壳材质刚性不足、表面未进行流线型优化处理,在水流大力冲击时,其外壳极易产生较大形变,增加额外水阻;同时,电机作为核心动力源,在不同频率指令驱动下,其扭矩输出特性可能出现波动。当实验频率趋向低频时,电机难以克服水的黏滞阻力以维持稳定转速,致使推进力不足,游速降低;此外,传动机构如齿轮的啮合精度差、皮带松弛等问题,导致在频率切换过程中造成发动力传输迟滞、能量损耗,进一步影响机器人游动连贯性与速度表现。

为进一步分析本文方法与对比组的速度数据,图14(b)给出了本文方法与对比组的量化误差。其中,速度误差比率1代表本文方法与对比组1的速度误差比率,基准为对比组速度。同理,速度误差比率2为本文方法与对比组2的误差比率。由图14(b)可知,在开环参数最优的频率上,本文方法的游速与开环控制的误差最低为 $+1.4\%$ 。而在最大驱动频率时,本文方法可实现 89.8% 的游速增量。



5.3 功率实验结果与分析

为进一步分析方法有效性,本文对仿生机器海豚的游动功率进行了测试。功率的获取依赖于电机驱动器的电流反馈功能。具体地,电机驱动器使用截止频率为50 Hz的一阶低通滤波器对高频电流数据进行滤波,并向数据采集和处理单元反馈当前电流平均值,最高可达200 Hz采样频率。随后,数据处理单元基于移动均值滤波法对采集的电流信息进行降噪处理,并计算出不同实验条件下机器海豚消耗的总功率。具体地,仿生机器人运动是一个动态连续过程,瞬时功率波动剧烈,单一瞬时功率值无法精准表征能耗全貌。因此,在数据处理单元引入积分算法,将运动全程按毫秒甚至微秒细分时段,逐段计算瞬时功率后累加,历经复杂数值积分运算,获取一段时间内电机消耗的总电能。此外,数据处理单元还会综合考虑电机功率因数校正环节。多数电机因具有电感特性,运行时的电压、电流存在相位差,致使实际做功功率低于电压电流简单乘积。数据处理单元依据电机等效电路模型、预存电机参数,精准估算功率因数,将其融入总功率的计算中,校正因相位差造成的功率偏差,使最终结果无限接近电机的真实能耗。

图15展示了不同频率下的实验功率结果。由图15(a)可知,总功率正相关于驱动频率。尽管使用不同的控制策略,在同一驱动频率下,总功率消耗并未有显著差异。与动态实验类似,图15(b)展示了不同组别之间的功率误差比率的对比。功率误差比率1和功率误差比率2分别表示本文方法耗费的总功率对开环控制两组的误差比率。由图15(b)可知,本文方法的总功率均比其他两组的高。定量来看,与实验组1相比,本文方法的总功率平均增加6.4%,最小值为2.4%,最大值为10.7%;与实

验组2相比,本文方法的总功率平均增加3.4%,最小值为0.4%,最大值为5.3%。即本文方法在能耗方面相比于开环控制最大误差在11%以内,多数情况在5%以内。

对比图14和图15,在总功率一致的情况下,仿生机器海豚的游动速度并不相同。因此,引入运输成本(cost of transport, COT)的概念, $COT=P/V$,即用功耗与速度的比值来衡量机器海豚的推进效率。COT经常被用于衡量机器人在运动单位距离消耗的能量,COT越低,其推进效率越高。

图16展示了3组实验在不同频率下的COT结果分析。由图16(a)可知,本文所提方法在COT层面明显低于对比组,意味着攻角反馈控制算法提升了机器海豚的推进效率。在频率为1.7 Hz时,机器海豚取得最优推进效率,为91.7 J/m。以机器海豚搭载的29.6 V、1 300 mA·h的电池来计算,机器海豚的最大续航里程为1 510.7 m。图16(b)给出了相应的量化误差对比。由16(b)可知,本文方法的COT比实验组1平均减少了27.6%,最大减少了41.1%;比实验组2平均减少了15.6%,最大减少了25.3%。与开环控制方法相比,本文所提方法能够有效避免能量在水中的耗散,将流体作用在鳍面上的力尽可能转化为前进方向的动力,显著提高了机器海豚的推进能效。

值得注意的是,变刚度控制需要多种传感器来获取关节状态、外力等信息,以便准确控制刚度。然而,将不同类型的传感器的数据进行融合是一个复杂的问题。仿生机器人通常还需要结合运动控制、力控制等其他控制策略。此外,变刚度控制与这些控制策略的协同工作是一个难点。关节的刚度变化会影响整个机器人的运动特性,而这些特性又受到多种因素的影响,如材料非线性、摩擦、间隙

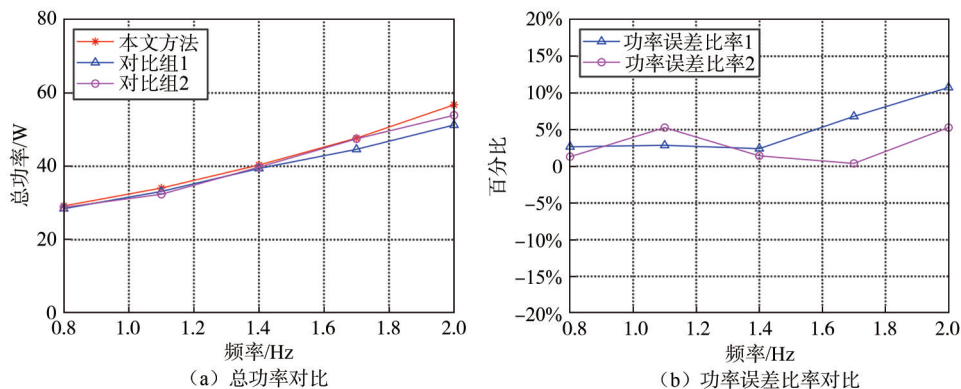


图15 不同频率下的实验功率结果

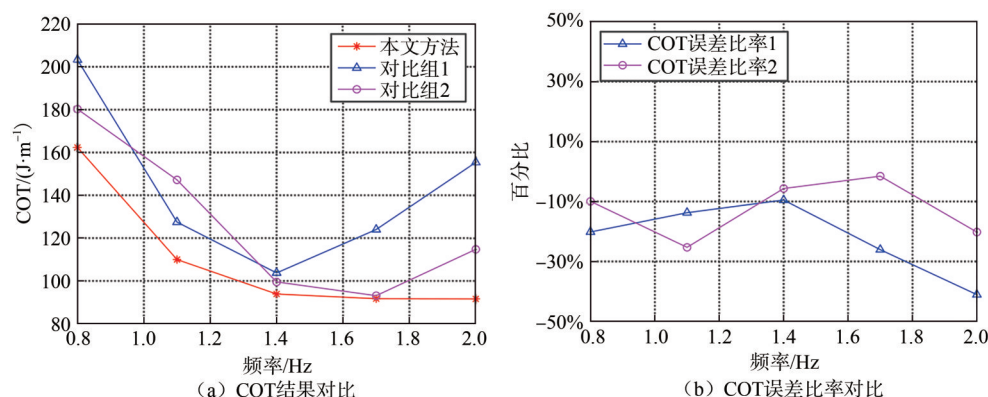


图16 不同频率下的COT结果

等。要准确地对这个过程进行建模，需要考虑关节材料的弹性模量变化、关节内部的摩擦特性（包括静摩擦和动摩擦）以及可能存在的关节间隙等因素。当关节刚度发生变化时，通常会有能量的损耗或释放，但目前很难有效地回收这些能量。

6 结束语

本文提出了一种基于攻角反馈的仿生运动智能控制策略，以实现仿生机器海豚的高速运动。本文基于生物学研究成果揭示了攻角调控对仿生推进的关键机制，进而创新性地提出基于攻角反馈的尾关节变刚度控制策略，将生物学研究结论转化为可工程应用算法，以实现仿生推进的速度和能效优化，通过在自主研制的仿生机器人平台上进行多工况测试，验证了本文提出方法的有效性。实验结果表明，与开环控制相比，本文方法的游速误差最低为1.4%，而在最大驱动频率时，本文方法可实现89.8%的游速增量。本文通过生物学机理与工程控制技术的深度融合，为研究水下机器人仿生推进速度和能效提供了新的技术路径。

参考文献：

- [1] LIAO X C, ZHOU C, CHENG L, et al. A fast online elastic-spine-based stiffness adjusting mechanism for fishlike swimming[J]. *Soft Robotics*, 2024, 11(6): 935-945.
- [2] CHEN B X, ZHANG J, MENG Q X, et al. A dynamic model of tensegrity robotic fish considering soft fish skin and tail[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2025, 113(1): 329-353.
- [3] LU B, WANG J, ZOU Q Q, et al. Towards power cost analysis and optimization of a multi-flexible robotic fish[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 294: 116746.
- [4] 许一航, 刘剑, 孙长银. 基于四元数的全驱动碟形AUV单矢量反馈控制[J]. *智能科学与技术学报*, 2022, 4(4): 513-521.

control for fully-actuated dish-shaped AUV[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2022, 4(4): 513-521.

- [5] 苏震, 刘殿勇, 孙达智, 等. 基于路径参数一致的水下机器人编队与避障控制[J]. *智能科学与技术学报*, 2022, 4(4): 533-541.
- SU Z, LIU D Y, SUN D Z, et al. Path parameter consensus-based formation and obstacle avoidance control of autonomous underwater vehicles[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2022, 4(4): 533-541.
- [6] FISH F, ROHR J. Review of dolphin hydrodynamics and swimming performance[R]. 1999.
- [7] KOPMAN V, PORFIRI M. Design, modeling, and characterization of a miniature robotic fish for research and education in biomimetics and bioinspiration[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(2): 471-483.
- [8] FISH F E, LAUDER G V. Control surfaces of aquatic vertebrates: active and passive design and function[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2017, 220(23): 4351-4363.
- [9] FISH F E, LEGAC P, WILLIAMS T M, et al. Measurement of hydrodynamic force generation by swimming dolphins using bubble DPIV[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2014, 217(2): 252-260.
- [10] LIU G, REN Y, DONG H B, et al. Computational analysis of vortex dynamics and performance enhancement due to body-fin and fin-fin interactions in fish-like locomotion[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 829: 65-88.
- [11] AKANYETI O, PUTNEY J, YANAGITSURU Y R, et al. Accelerating fishes increase propulsive efficiency by modulating vortex ring geometry[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(52): 13828-13833.
- [12] LI C, YANG W J, XU X H, et al. Numerical investigation of fish exploiting vortices based on the Kármán gaiting model[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 140: 7-18.
- [13] FLAMMANG B E, LAUDER G V. Speed-dependent intrinsic caudal fin muscle recruitment during steady swimming in bluegill sunfish, *Lepomis macrochirus*[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2008, 211(4): 587-598.
- [14] LONG J H. Muscles, elastic energy, and the dynamics of body stiffness in swimming eels[J]. *American Zoologist*, 1998, 38(4): 771-792.
- [15] CHEN D, WU Z X, 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.
- [16] TONG R, WU Z X, CHEN D, et al. Design and optimization of an untethered high-performance robotic tuna[J]. *IEEE/ASME Transactions*

on Mechatronics, 2022, 27(5): 4132-4142.

- [17] ZIEGLER M, HOFFMANN M, CARBAJAL J P, et al. Varying body stiffness for aquatic locomotion[C]//Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2011: 2705-2712.
- [18] NAKABAYASHI M, KOBAYASHI R, KOBAYASHI S, et al. Bio-inspired 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.
- [19] 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.
- [20] ZHONG Q, ZHU J, FISH F E, et al. Tunable stiffness enables fast and efficient swimming in fish-like robots[J]. Science Robotics, 2021, 6(57): eabe4088.
- [21] CLAPHAM R J, HU H S. iSplash-MICRO: a 50 mm robotic fish generating the maximum velocity of real fish[C]//Proceedings of the 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2014: 287-293.
- [22] ANDERSON J M, STREITLIEN K, BARRETT D S, et al. Oscillating foils of high propulsive efficiency[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 360(1): 41-72.

[作者简介]



王天柱（1993-），男，博士，中国安全生产科学研究院北京市地铁火灾与客流疏运安全重点实验室工程师，主要研究方向为智能机器人系统、应急救援装备研发。



刘佳音（1997-），女，中国矿业大学（北京）机械与电气工程学院博士生，主要研究方向为矿山数据智能、知识自动化。



韩松（1991-），男，博士，中国安全生产科学研究院北京市地铁火灾与客流疏运安全重点实验室工程师，主要研究方向为机器人技术和人工智能。



车洪磊（1983-），男，博士，中国安全生产科学研究院城市火灾监测预警应急管理部重点实验室正高级工程师，主要研究方向为安全科学与工程、应急机器人技术。



史聪灵（1979-），男，博士，中国安全生产科学研究院城市火灾监测预警应急管理部重点实验室正高级工程师，主要研究方向为地铁与地下空间工程安全，交通安全与消防安全理论、技术、装备和材料研发。