第 14 卷 第 1 期
2025 年 1 月
集 成 技 术
JOURNAL OF INTEGRATION TECHNOLOGY
Vol. 14 No. 1
Jan. 2025

引文格式：
谢智钧, 赵灿明, 柯鑫, 等. 小型单关节机器鱼设计与游动稳定性分析 [J]. 集成技术, 2025, 14(1): 39-49.
Xie ZJ, Zhao CM, Ke X, et al. Design and swimming stability analysis of small single-joint robotic fish [J]. Journal of Integration Technology, 2025, 14(1): 39-49.

小型单关节机器鱼设计与游动稳定性分析

谢智钧[1] 赵灿明[1] 柯 鑫[1] 肖 扬[1] 武 静[1,2] 宋加雷[1,2*]

[1](东莞理工学院机械工程学院 东莞 523808)
[2](广东省城市生命线工程智慧防灾与应急技术重点实验室 东莞 523808)

摘 要 该文基于鲹科鱼的推进模式和鱼鳍模块化设计了一款结构紧凑、成本低廉、高效游动的小型单关节仿生机器鱼，其胸鳍、腹鳍和尾鳍拆装方便。此外，该文对仿生机器鱼的直线推进、静止转弯、鱼头稳定性进行了水下实验，研究了胸鳍和腹鳍对游动性能的影响。在样机游动测试中，该文利用一台高速相机和一面平面镜构建了一个记录机器鱼运动的“双目视觉系统”，可对鱼头最前端和质点上方两处标记点进行追踪，并可记录三维位置信息，这为机器鱼的游动性能、姿态变化和头部稳定性的定量分析提供参考。结果表明：机器鱼的直线推进和转弯性能较好；在稳定性实验中，配备胸鳍和腹鳍的机器鱼在低频游动时，头部稳定性更优，而在高频游动时，未显示出优势，这与自然界中鱼类在高频游动时除尾鳍外的各种鳍紧贴身体的现象一致。

关键词 小型机器鱼；单关节；水下实验；头部稳定性
中图分类号 TP242.6 **文献标志码** A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20240312002

Design and Swimming Stability Analysis of Small Single-Joint Robotic Fish

XIE Zhijun[1] ZHAO Canming[1] KE Xin[1] XIAO Yang[1] WU Jing[1,2] SONG Jialei[1,2*]

[1](*School of Mechanical Engineering*, *Dongguan University of Technology*, *Dongguan* 523808, *China*)
[2](*Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Disaster Prevention and Emergency Technologies for Urban Lifeline Engineering*, *Dongguan* 523808, *China*)
[*]*Corresponding Author*: *songjl@dgut.edu.cn*

Abstract The paper designed a compact, low-cost, and efficiently swimming small, single-jointed bionic robotic fish based on the propulsion mode and fin modularity of trevally fish, with easy disassembly of the pectoral, ventral, and caudal fins. In addition, the paper conducted underwater experiments on the straight-

收稿日期：2024-03-12 **修回日期**：2024-04-20
基金项目：东莞市科技特派员项目(20231800500632)；广东省自然科学基金面上项目(2023A1515011506)；广东省城市生命线工程智慧防灾与应急技术重点实验室项目(2022B1212010016)；国家自然科学基金青年科学基金项目(12302296)
作者简介：谢智钧，本科生，研究方向为仿生机器人设计与制造；赵灿明，本科生，研究方向为仿生机器人设计与制造；柯鑫，本科生，研究方向为仿生机器人设计与制造；肖扬，硕士，研究方向为仿生机器人设计与制造；武静，副教授，研究方向为仿生机器人设计；宋加雷(通讯作者)，博士，特聘副教授，研究方向为动物运动机理和仿生机器人设计，E-mail：songjl@dgut.edu.cn。

line propulsion, static turning, and head stability of the bionic robotic fish, and investigated the effects of the pectoral and ventral fins on the swimming performance. In the swimming test of the prototype, the paper utilizes a high-speed camera and a plane mirror to construct a “binocular vision system” to record the movement of the fish, which can track the most anterior part of the fish head and two marking points above the prime point, and record the three-dimensional position information. This can provide a reference for quantitative analysis of swimming performance, attitude change and head stability performance. The results showed that the straight-line propulsion and turning performance of the robotic fish was better; in the stability experiment, the robotic fish equipped with pectoral and ventral fins had better head stability in low-frequency swimming, while it did not show an advantage in high-frequency swimming, which was consistent with the phenomenon that various fins except the caudal fin stick to the body in high-frequency swimming of fishes in nature.

Keywords small robotic fish; single-joint; underwater experiment; head stability

Funding This work is supported by Dongguan City Science and Technology Commissioner Project (20231800500632), Guangdong Natural Science Foundation General Project (2023A1515011506), Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Disaster Prevention and Emergency Technology for Urban Lifeline Engineering (2022B1212010016), National Natural Science Foundation of China Youth Science Fund Project (12302296)

1 引 言

随着人类对海洋的深入探索和开发，传统的螺旋桨式水下推进器存在效率低、噪声大、机动性能差等缺陷，已不能满足日益多样化的需求。为突破当今单一的运输方式和水下推进方式，利用鱼类的游动机理设计出效率高、能耗低、噪声小的水下推进器已成为热门研究课题[1]。现有的仿生机器鱼可按照体型分为大型和小型两类。整体来看，大型机器鱼性能优，可在水中浮潜，还可在游动时保持流畅的曲线，并可通过搭载多类传感器实现复杂的特定工作[2]。但是，大型机器鱼设计复杂，时间和金钱成本较高，且体型过大导致隐蔽性较差。与大型机器鱼相比，目前制成的小型机器鱼不仅体型小、隐蔽性好、结构简单、成本较低，机动性能和反应性能[3-4]也更好。

由于自然界中 90% 以上的鱼类推进采用身体-尾鳍波动推动的形式，因此，该种形式的推进是机器鱼经常采用的推进形式。此种情况下，鱼或者机器鱼的纵向中心位置的数学模型可表示如下：

$$h(x,t)=\left(a_0+a_1x+a_2x^2\right)\sin\left(\omega t-kx\right) \tag{1}$$

其中，h 为鱼体中心线的侧向移动；x 为从鱼头到鱼尾的位置；a_0、a_1 和 a_2 为控制鱼体振幅的参数；k 为与鱼体波长相关的参数；ω 为拍动角频率[5-6]；t 为时间步。目前的大部分机器鱼通过多关节、多舵机串联驱动的方式实现波形运动，即一个电机驱动一个关节，控制每节鱼体关节的摆动角度和速度；或者通过线驱动，即一个电机控制一对线，以拟合鱼体的游动曲线。吴文广[7]研制了基于仿生对象形态结构和运动形式的四关节仿生机器鱼，分析了机器鱼各运动学

参数对机器鱼推进效率的影响。王飞等[8]通过改变机器鱼摆动舵机的数量，研制了单关节、双关节和三关节仿生机器鱼，论证了仿生机器鱼关节数目对机器鱼游动性能的影响，提出了仿生机器鱼关节数目和巡游速度的关系方程。杜如虚等[9]研制了基于拉线机构的机器鱼，并对拉线机构的鱼尾进行了仿真分析和运动控制，结果表明：基于拉线机构的机器鱼与传统的多关节、多串联结构的机器鱼相比，能更好地匹配理论上的鱼体干波曲线。Clapham 等[10]在研制的 iSplash-I 机器鱼上设计了一种适用于两种游姿的新型机械驱动系统，该系统所设计的全身线性游动协调了前、中、后 3 个位置的位移，减少了现有自由游动机器鱼的运动学误差，与传统的尾部波浪推进相比，线性游动速度显著提高。上述方法能较好地模拟鱼类游动的姿态，但多关节、多舵机串联驱动随着关节数增多控制起来比较复杂，且功耗较高，线驱动则会增加机械的复杂性和控制难度。

在特定环境中，搭载视觉系统的仿生机器鱼通常协助工作人员完成水下探测任务。然而，由于视觉摄像头通常安装在机器鱼的头部，而头部的被动摆动容易导致视觉成像模糊、成像质量不稳定，进而影响机器鱼的闭环控制。因此，抑制机器鱼头部摆动幅度，并优化其稳定性，成为后续精准控制的重中之重。王平等[11]通过引入头部摆动方程和摆动中心偏移量，使优化后的运动学模型集中体现仿生机器鱼的尾部运动，削弱了头部与尾部的关联性，有效抑制了其头部的摆动。孙飞虎等[12]基于水动力学模型，比较了两种鱼体波模型下的机器鱼头部摆动情况，进一步采用遗传算法对运动关节的摆动进行优化，实现机器鱼头部的最小摆动。在多鱼鳍设计方面，郑长镇[13]提出一种刚柔耦合结构的仿生机器鱼设计方案，研制的机器鱼配备了臀鳍、尾鳍和两个胸鳍，用于多维运动的切换，其中刚柔耦合结构的尾鳍推进器不仅使其具有身体柔软度和可控刚度，还使其具有较优的推进效率和稳定性。刘宁[14]研究了胸鳍展弦比对机器鱼推进性能的影响，建立了 3 种具有相同前缘长度和厚度，展弦比依次递增的胸鳍，对比分别装配这 3 组胸鳍的鱼体推进性能，结果表明：与高胸鳍展弦比相比，当前缘相同时，低胸鳍展弦比的稳定性较优，可为不同水下任务所需的机器鱼胸鳍展弦比的选择提供参考。Zhang 等[15]提出并开发了一种结合昆虫翅膀和鱼鳍优点的集成仿生机器鱼，通过将两个尾鳍平行设置在机器鱼的尾部，作为主要推进机构，使两个尾鳍的相对拍打在巡航过程中产生相反的侧向力，并在机器鱼的两侧配备了两个模仿昆虫翅膀功能的胸鳍，从而实现稳定和高性能的游动。Chen 等[16]在自驱动机器鱼实验平台上安装了基于射流弹性体驱动器的背鳍和臀鳍，结果表面：与背鳍和臀鳍闭合时相比，当背鳍和臀鳍展开时，线性加速度提升了 32.3%，而侧向力下降了 24.8%。Zhong 等[17]总结了背鳍和臀鳍截面的锐利程度对直游性能的影响：背鳍和臀鳍的截面形状越锐利，直游速度和效率越高。Mignano 等[18]的研究表明：相互作用的鳍产生的力与非相互作用的鳍组合产生的力的矢量和不同，操纵背鳍、臀鳍与尾鳍之间的相位和位置会对推进力的大小和形状产生较大影响，这为设计机器鱼各种鳍的相互位置提供了参考。此外，其他研究者还从姿态控制、预测控制、多传感器融合等方面优化机器鱼的头部稳定性。

为探究不同鱼鳍对鱼类游动过程的影响，本文基于具有特定刚度、适合大幅度柔性摆动的尾鳍，采用模块化的设计思想，研制出多鳍可拆卸、体型小巧的单关节柔性尾鳍机器鱼，针对有无胸鳍、腹鳍，对机器鱼水下游动头部稳定性的影响进行了定量实验，为后续探究机器鱼的游动性能优化提供参考。

2 材料与方法

2.1 单关节机器鱼结构的基本设计思想

在鲹科鱼类的尾鳍推进模式中，波动主要集中在身体后半部分的尾鳍和尾柄，而身体前半部分的波幅较小，明显的侧向位移主要出现在尾鳍和尾柄部分。尾鳍通过一定幅度的摆动，对鱼体产生推进力，使得该模式下的机器鱼适合进行长期巡游。

考虑到小型仿生机器鱼的内部利用空间较局促，本文从结构设计和功能实现上进行考量，参考鲹科鱼类推进模式，设计出一款能完成直游、转弯等高效率、高性能游动的小型机器鱼 Nemo，从单关节设计上简化机器鱼的尾巴摆动方式，使尾巴摆动拟合鱼体波方程，实现逼真的仿生效果。

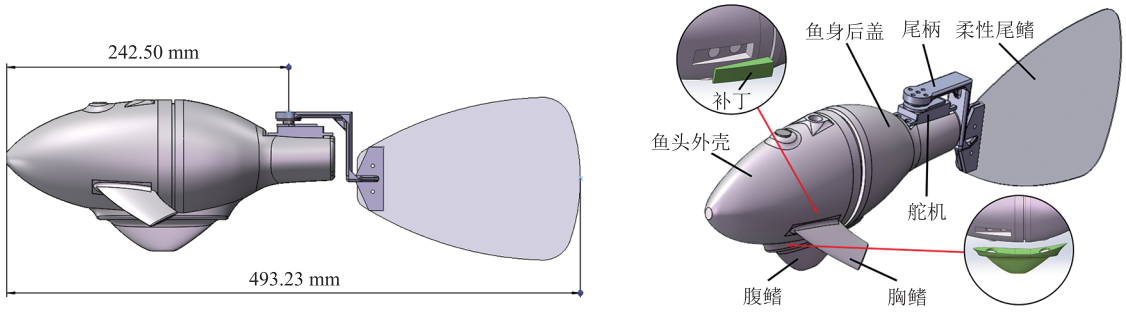
2.2 机器鱼的外形结构设计

仿生机器鱼 Nemo 由鱼头外壳、鱼身后盖、尾柄、胸鳍、腹鳍和柔性尾鳍组成。参考鲹科鱼类推进模式，本文所设计的单关节机器鱼仅有一个自由度，设计简洁紧凑。机器鱼身的前 1/2 为鱼头外壳和鱼身后盖组成的密闭空间，其内部存放机器鱼的控制电路和驱动电源等电子器件，后 1/2 为尾柄和尾鳍。小型机器鱼的结构设计如图 1 所示，机器鱼的性能参数和系统控制配置如表 1 所示。

由于仿生机器鱼的鱼头外壳应具有良好的减阻特性，因此，机器鱼的外形采用流线型设计，以减少机器鱼在水下所受的内摩擦力和避免涡旋的形成。设计上，鱼头外壳和鱼身后盖抽壳形成中空腔体，便于内部放置电子器件。鱼头外壳开口处设计一圈凹槽，鱼身后盖开口处设计一圈与鱼头凹槽配合的凸台，两者进行配合拼接，在拼接处形成的凹槽涂抹防水专用的硅橡胶，以防水，同时方便后续拆装。此外，由于硅胶在固定比例的凝固剂下能快速凝固，因此在拼接处涂抹一层顺滑硅胶，以减少水对拼接处的摩擦力。此做法增强了机器鱼的防水性能，有效保护了内部的电子器件。

2.3 机器鱼鱼鳍可拆卸化设计

为研究胸鳍和腹鳍是否影响机器鱼游动时



(a) 装配体总尺寸　　(b) 各部件装配情况

图 1 小型机器鱼 Nemo 装配体模型

Fig. 1 Assembly model of small robotic fish Nemo

表 1 机器鱼 Nemo 的性能参数

Table 1 Performance parameters of the robotic fish Nemo

项目	外形尺寸(除胸鳍和腹鳍外) $L\times W\times H$ (cm×cm×cm)	外壳材质	总质量 (kg)	最大直线速度 (BL/s (cm/s))	舵机型号	舵机空载转速 (s/60°)	主控芯片	工作电压 (V)	供电类型
参数	493×70×140	未来 8200Pro 树脂	0.879	0.71(34.58)	DS3235 防水舵机	0.13	ATmega328P	5	直流电

的头部稳定性，本文设计了便于拆装的胸鳍和腹鳍。在鱼头壳体两侧拉伸切除形成凹槽，凹槽内预埋了两颗圆形磁吸贴片，胸鳍一侧同样预埋了两颗磁吸贴片，以实现胸鳍磁吸安装和可拆卸化。当机器鱼没有安装胸鳍时，可磁吸安装用于填补槽位的补丁，腹鳍的拆装同样采用如图 1 所示的安装方法。此做法不仅可杜绝水从胸鳍和腹鳍安装处进入机器鱼内部，还可保持鱼头的流线型。本文设计的胸鳍体积为 5.74 cm^3，质量为 8.04 g，截面形状为扁平椭圆，胸鳍平面与竖直平面夹角为 42°；腹鳍体积为 19.22 cm^3，质量为 26.91 g，截面形状为扁平椭圆。胸鳍和腹鳍的外形如图 2 所示。

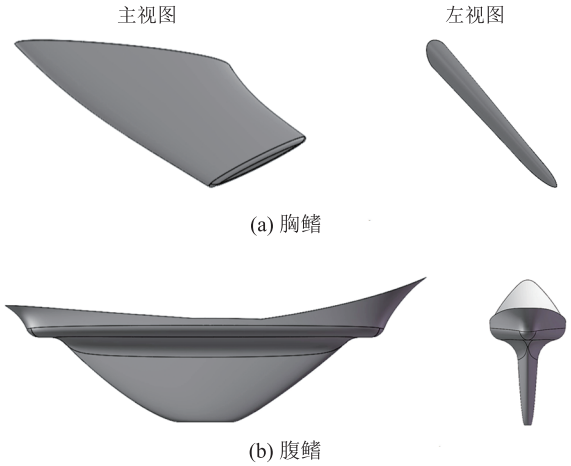


图 2　胸鳍和腹鳍的主视图和左视图

Fig. 2　Front and left views of the pectoral fins and pelvic fins

机器鱼的尾鳍同样易于拆装。机器鱼的尾巴总体由舵机、尾柄和柔性尾鳍组成，尾柄安装在舵机的舵盘上，尾柄随舵机转动而摆动。舵机安装处与鱼体内部贯通，此处注射防水胶水进行防水隔离。柔性尾鳍安装于尾柄处，通过螺栓固定与拆装。此外，真实的鱼类在游动时，尾鳍的摆动并非简单的左右摆动，而是形成一种波浪形的运动模式。如图 3 所示，使用厚度为 1 mm 的聚氯乙烯塑料板裁切制成长度为 25 cm 的柔性尾鳍，形成在单关节驱动设计上由尾柄驱动的柔性被动结构，使机器鱼的柔性尾鳍摆动模仿真实鱼类的摆动，能更有效地推动水流，从而提高推进效率。机器鱼鳍的参数如表 2 所示。

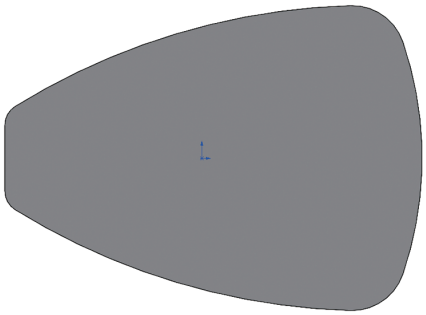


图 3　尾鳍形状

Fig. 3　The shape of caudal fins

3　机器鱼水下实验结果与讨论

3.1　实验平台与方法

为探究小型机器鱼的直线推进性能、转弯性能和头部稳定性，本研究搭建了一个可以测试自由游动的实验平台，如图 4(a)所示。机器鱼实验平台包括实验水池(5.5 m×1.2 m×2 m)、立式镜子(0.6 m×0.8 m)、1 台 Phantom v1212 高速摄像机(美国，Vision Researsh 公司)、AF 定焦镜头(日本，适马 105 mm f2.8)、LED 照明系统(中国，VISCO，功率 150 W，色温 5 500 K)等。实验水池由铝型材搭建，后续实验保持 40 cm 水深。

表 2　鱼鳍参数

Table 2　The parameters of fins

鱼鳍	材质	面积 (m^2)	长度 (cm)	长宽比	厚度 (mm)	截面形状	体积 (cm^3)	质量 (g)
尾鳍	聚氯乙烯	0.207 0	17.37	1.348	1			
胸鳍	未来 8200Pro 树脂					扁平椭圆	5.74	8.04
腹鳍	未来 8200Pro 树脂					扁平椭圆	19.22	26.91

首先使用支架固定一台高速摄像机，从侧上方对准机器鱼的运动区域，拍摄帧率固定为120 帧/s。将一个立式镜子竖立紧贴放置在鱼缸一侧，并保证处于拍摄区域内。拍摄画面 1 如图 4(b)所示，另将高速摄像机所拍摄的视频进行 180°旋转后作为画面 2，并将镜子反射形成的虚像中的机器鱼作为第二台“高速摄像机”拍摄的机器鱼。此方法利用一台相机与一面镜子构建双目视觉系统，与使用两台相机构建双目视觉系统相比，实现了相同的同步效果。拍摄时缩小光圈获得大景深，使镜子的机器鱼成像更清晰。标记点分布如图 4(b)所示，使用马克笔在机器鱼体对称轴线上做标记，标记点 1 位于鱼头最前端，标记点 2 位于质点正上方。两个标记点在镜子中的像也可以清晰看到，并把这个像看成第二台相机的画面。首先使用标定板录制视频得出标定结果，然后将 mp4 格式的机器鱼运动视频导入基于 MATLAB 的开源软件 DLTdv[19]，在软件内对标记点 1 和标记点 2 进行半自动追踪，获取标记点的三维位置信息。

实验时，机器鱼露出水面 1 cm，忽略机器鱼在竖直方向上的轻微起伏波动，仅考虑其在水平面上的运动。机器鱼有足够的空间移动，不会受到侧边界和自由表面的干扰。同时避免实验过程中其他因素的干扰，机器鱼每一次运动完成之后，待水池中水面平静之后再进行下一组数据的测量。后续实验将利用此方法分析两个标记点的三维位置信息，并得出数据。

3.2 直线推进实验

提高机器鱼的推进速度需考虑尾柄的摆动幅度。尾柄摆动的角度影响尾鳍摆动的角度，间接影响机器鱼推进力的大小。当摆动角度过小时，推进力可能不足以产生较高的速度；当摆动角度过大时，虽然推进力增大，但是造成的阻力也增大，会造成推进效率下降。因此，需要找到一个合适的摆动角度，使得推进力能较好地克服水阻力，以提高机器鱼的推进速度。此前多次实验得出：当机器鱼尾柄的摆角振幅为 50°，且舵机全速转动，摆动频率为 1.8 Hz 时，机器鱼的最大平均直线推进速度为 34.58 cm/s(0.71 体长/s)；当尾柄摆角振幅大于 40°时，机器鱼推进的头部稳定性稍差。在直线推进过程中，设尾柄居中状态的相位为 0°(即尾柄处于鱼身的对称轴线上)，则当尾柄摆角振幅为 40°，舵机在左右极限位置延迟 280 ms，尾柄左右摆动时，舵机转速均匀一致。保持尾柄摆角振幅为 40°，并保证其他运动参数不变，装配上胸鳍和腹鳍，研究机器鱼尾的摆动频率为 0.5 Hz、1.0 Hz、1.5 Hz 时，推进速度随尾柄摆动频率的变化规律。

通过实验观察可知，机器鱼上端的标记点 2

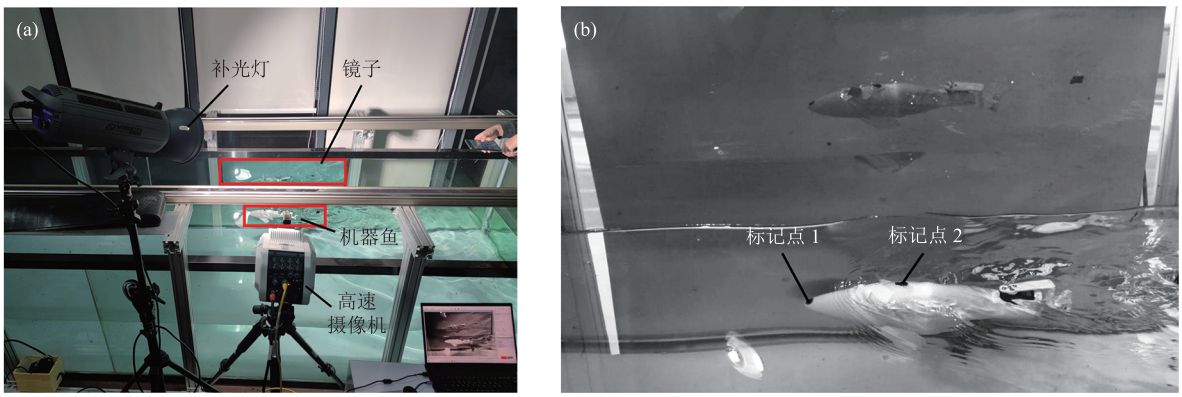


图 4 实验平台实拍图(a)和追踪机器鱼运动的标记点(b)

Fig. 4 Photograph of the experimental platform (a) and tracking markers for robotic fish movement (b)

的运动路径更接近直线，因此可通过分析标记点 2 实时变化的三维位置信息获得直线推进速度。机器鱼游动达到稳定速度的状态如图 5(a)所示，其中 T 为单位摆动周期，9 幅图分别显示机器鱼在单位摆动周期为 0T、1/8T、1/4T、3/8T、1/2T、5/8T、3/4T、7/8T、T 时的曲线。利用 MATLAB 软件对标记点 2 的三维位置信息进行分析，得出不同尾柄摆动频率下的机器鱼获得的直线推进速度，如图 5(b)所示。将摆动频率为 1.8 Hz 时的最大平均直线推进速度加入图示(图 5(b))，可以看出，在测试的摆动频率范围内，机器鱼推进速度随着摆动频率的增加而增加，而非线性增大。原因是在振幅不变的情况下，频率的提高会引起速度的变化，而速度与流体力呈二次方的关系。同时，与其他设计的机器鱼相比，本文发现，本项目的机器鱼在低频下(频率为 1 Hz)，速度性能弱于麻省理工学院设计的 RoboTuna[20]和 RoboPike[21]，但在频率较高时(大于 1.5 Hz)，本项目的机器鱼直线游动速度优于麻省理工学院设计的 soft robotic fish[3]和哈尔滨工业大学设计的 HRF-II[22]。

3.3　转弯实验

最小转弯半径是评估机器鱼运动性能的重要指标。机器鱼通过鱼尾的单侧摆动实现转弯运动，且控制节律与直线推进类似。控制步骤如下：先根据制造的机器鱼结构特性，设定鱼尾的摆动范围，再根据机器鱼的实际转弯需求设计相应的控制程序。确定机器鱼向左、向右转弯时尾柄的摆动角度，机器鱼向左转弯时，尾柄摆动的中间位置为 −64°，振幅为 32°(即范围为 −48°～−80°)。对称地，机器鱼向右转弯时，尾柄摆动的中间位置为 64°，振幅为 32°(范围为 48°～80°)。当尾柄摆出至 80°(−80°)时，设置舵机延迟 500 ms；当尾柄收回至 48°(−48°)时，设置舵机延迟 280 ms，尾柄摆出和收回的舵机转速一致。随后将机器鱼尾鳍设置到居中状态，并放至水面静止不动，进行原地持续转弯实验，并观察记录。为减小转弯起步误差，路径跟踪从机器鱼起步 5 s 后开始记录。对机器鱼标记点 2 进行追踪，利用 MATLAB 软件处理标记点 2 的三维位置信息，并绘出机器鱼左转弯路径。间隔 1 s 时机器鱼向左转弯的实验截图如图 6(a)所示，机器鱼原地转弯的路径如图 6(b)所示。

通过观察视频和分析转弯路径，可以看出机器鱼转弯一圈耗时 9 s。尾柄摆出阶段，机器

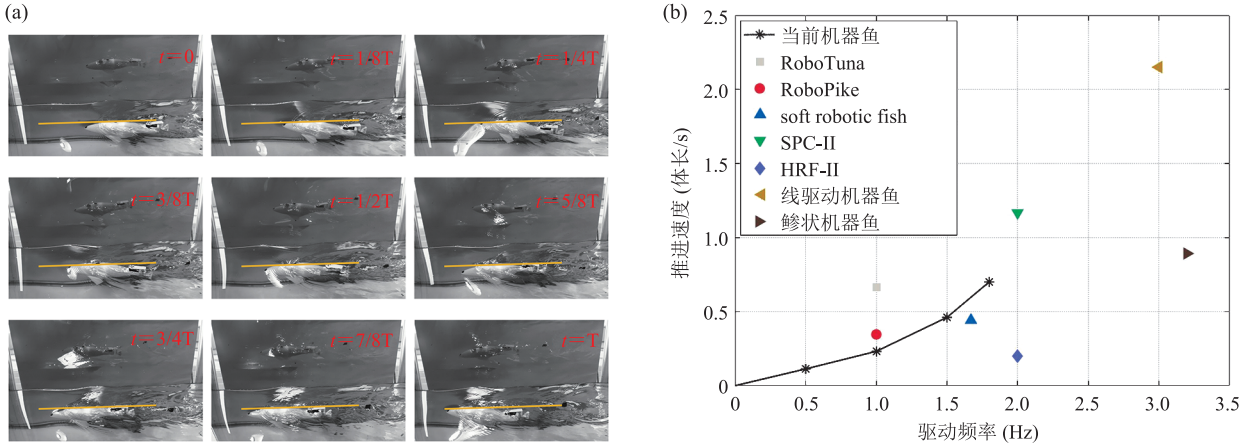


图 5　小型机器鱼在单位摆动周期内的实验截图(a)和尾部摆动频率对推进速度的影响(b)

Fig. 5　Experimental screenshots of the small robotic fish during unit swing period (a) and the effect of tail swing frequency on propulsion speed (b)

鱼实现转向，尾柄摆至关节限位角度后，程序设置了较长的舵机延迟，延后了尾柄回收阶段，机器鱼利用惯性，增强了转向效果；在尾柄收回阶段，机器鱼在转向的同时被向前推进，尾柄摆至

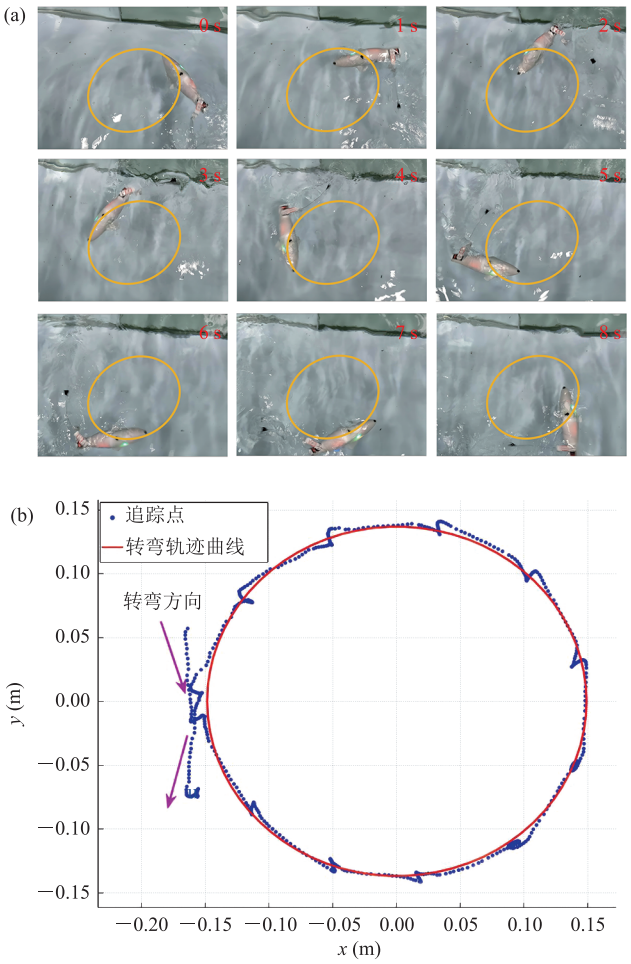


图 6 机器鱼原地左转弯序列图(a)和原地转弯路径(b)

Fig. 6 The sequence diagram of the robotic fish's left turn in place (a) and the path of its turn in place (b)

关节限位角度后，程序设置了较短的摆动延迟，缩减了推进距离，削弱了推进效果。而较小的转弯摆动范围提高了摆动的频率，让转弯更迅捷急促，有利于缩小转弯半径。机器鱼的转弯路径呈椭圆状，拟合后的椭圆曲线方程如下：

$$\frac{x^2}{0.15^2}+\frac{y^2}{0.14^2}=1 \tag{2}$$

其中，x 和 y 为平面直角坐标系中的坐标变量；椭圆的长轴为 0.30 m，短轴为 0.28 m。实验表明：机器鱼的静止转弯半径小，具备优秀的转弯性能。国内外几种不同机器鱼的转弯性能比较如表 3 所示，用转弯半径比 Tr(turning radius，实际转弯半径与机器鱼身体长度的比值)评估机器鱼的转弯效率。本研究团队发现：不同的机器鱼采用不同的关节数目和不同的转弯策略获得的转弯性能也不尽相同。此外，转弯路径呈椭圆状，且椭圆曲线方程的长轴与短轴接近，因此取半长轴和半短轴的平均值作为本文机器鱼的最小转弯半径。

3.4 头部稳定性实验

机器鱼头部通常需安装摄像头，以辅助其在水下进行探测和人员搜救，因此需要机器鱼尽量保持较小的头部摆动幅度，确保摄像头能平稳清晰地成像，以提高成像质量和数据的可靠性，此外，头部摆动还会对游动效率产生显著影响[3,25]。机器鱼头部被动摆动往往与尾巴摆动情况相关，而机器鱼的腹鳍和胸鳍对机器鱼头部的稳定性有重要作用，能协调机器鱼横向平衡，减

表 3 与其他机器鱼的转弯性能对比

Table 3 Comparison of the turning performance with other robotic fish

研究机构	机器鱼	驱动转弯的关节数目	Tr
北京理工大学	BLRF-Ⅰ 系列机器鱼[8]	1/2/3	1.22/0.40/0.34
华中农业大学	水产养殖机器鱼[23]	2	0.45
英国埃塞克斯大学	“fish-G9” 仿生机器鱼[24]	3 或 4	0.30
日本运输省船舶技术研究所	PPF-08i 机器鱼	1	0.50
东莞理工学院	小型单关节机器鱼 Nemo	1	0.29

少机器鱼在水中的侧倾和头部的俯仰。

机器鱼头部的姿态摆角可评估机器鱼的头部稳定程度，姿态摆角越大，机器鱼头部越不稳定；姿态摆角越小，机器鱼头部越稳定。在机器鱼巡游状态下，保持尾柄摆角为 40°，并保证其他运动参数不变，研究机器鱼尾摆动频率分别为 0.5 Hz、1.0 Hz、1.5 Hz 时，机器鱼头部姿态摆角在机器鱼装配胸鳍和腹鳍、不装配胸鳍和腹鳍、仅装配胸鳍、仅装配腹鳍 4 个状态下的变化情况。使用开源软件 DLTdv 分析标记点 1 和 2 的三维位置信息，将标记点 1 和 2 连成直线，此时机器鱼刚性头部的姿态摆角可简化成机器鱼游动时该直线的摆角，将摆角取平均值，可衡量机器鱼的头部摆动幅度。

如图 7 所示，在单一摆动频率下，机器鱼某种状态的头部姿态摆角越大，其推进速度越大；对比不同尾鳍摆动频率，从 0.5 Hz 提至 1.0 Hz 后，头部姿态摆角的范围基本无变化；而从 1.0 Hz 提至 1.5 Hz 后，头部姿态摆角大幅减小，机器鱼的头部摆动明显减弱。总体来看，尾鳍的摆动频率越低，机器鱼头部的摆角越大；尾鳍的摆动频率越高，机器鱼头部的摆角越小。这是因为尾鳍高频摆动下，单关节控制的弹性尾鳍变形较大，从而引起尾鳍波数提高。

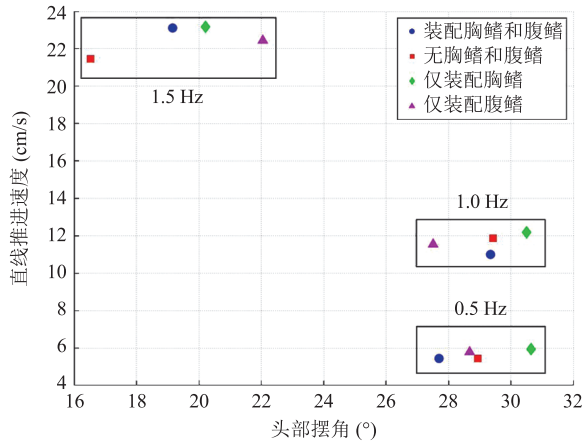


图 7　不同频率下 4 种装配鱼鳍情况的姿态摆角与推进速度关系分布

Fig. 7　Distribution of the relationship between the attitude swing angles and propulsion speeds for four configurations of assembled fins at different frequencies

此外，在尾鳍低频摆动、鱼体装配胸鳍和腹鳍时，头部姿态摆角较小；而在尾鳍高频摆动、无胸鳍和腹鳍时，头部姿态摆角较大。这是因为头部的摆动可以看成是尾鳍驱动和头部流体力相互作用下的受迫振动，与头部固有频率相关。一方面，头部是否装配胸鳍和腹鳍直接影响机器鱼的质量，间接影响头部固有频率；另一方面，机器鱼在游动时，流体力的大小，以及水流和机器鱼尾鳍之间的受力相位都会受到外部振动（即受迫振动）的影响。具体的作用本文还未厘清，是本研究团队的未来工作方向。此外，在低频摆动时，装配胸鳍、腹鳍与否对头部摆角的影响相对较小，头部摆角变化幅度大约为 2°；而在高频摆动时，头部摆角的变化幅度大约为 5.6°。不同机器鱼的头部摆动情况如表 4 所示，本文用头部姿态摆角和无量纲振幅（头部摆动幅度与身体长度比）评估头部摆动的程度。与其他机器鱼相比，Nemo 的头部姿态摆角大于河海大学的三关节仿生机器鱼[11]的头部姿态摆角；Nemo 在鱼尾摆动频率为 1.0 Hz 时，无量纲振幅小于英国埃塞克斯大学 iSplash-I 的无量纲振幅，鱼尾摆动频率

表 4　与其他机器鱼头部摆动情况的对比

Table 4　Comparison of the head swing situations with other robotic fish

研究机构	机器鱼	头部姿态摆角 (°)	无量纲振幅
河海大学	三关节仿生机器鱼[11]	7(1.0 Hz)/10(1.5 Hz)	
英国埃塞克斯大学	iSplash-I 机器鱼[10]		0.072(模式 2)
东莞理工学院	小型单关节机器鱼 Nemo	27.51(1.0 Hz)/16.53(1.5 Hz)	0.125(1.0 Hz)/0.067(1.5 Hz)

为 1.5 Hz 时，无量纲振幅大于英国埃塞克斯大学 iSplash-I 的无量纲振幅[10]。此外，理论上，多关节的机器鱼产生更显著的波动，多节之间的运动会抵消左右方向的力，头部摆角相对较小；相比之下，机器鱼 Nemo 的头部摆动幅度较大。

4 结 论

本文从鱼鳍模块化设计思路出发，研制了一款整体结构紧凑、性能良好的小型单关节仿生机器鱼，并设计了一套多种尾鳍作用的系统，机器鱼腹鳍、胸鳍和尾鳍的模块化拆装降低了机器鱼防水工作的难度。单关节单舵机驱动尾柄与柔性被动结构的尾鳍波动实现了较为逼真的仿生效果。本文还搭建了水下实验平台，使用高速摄像机搭建双目视觉系统，记录机器鱼游动时，头部最前端和质点正上方的两处标记点的三维位置信息，并根据标记点的三维位置信息分析机器鱼不同频率下的直线推进速度，优化机器鱼静止转弯的尾鳍摆动控制节律，探讨多种鱼鳍组合装配对机器鱼游动时头部稳定性的影响。

实验结果表明：本文机器鱼具有良好的直线推进性能和静止转弯性能；在 0.5 Hz、1.0 Hz、1.5 Hz 的摆动频率下，装配胸鳍和腹鳍时，机器鱼的头部稳定性在尾鳍低频摆动时更优，而在高频游动时，未显示出优势，这与自然界中鱼类在高频游动时，除尾鳍外的各种鳍紧贴身体的现象一致。此外，从本文的机器鱼设计到性能测试，都体现了节约成本的思想，可为低预算条件下的鱼类游动机理和机器鱼设计分析提供参考。

未来，本研究团队将构建刚体头部与柔性尾鳍耦合下的动力学方程，研究单关节机器鱼流体-结构共振与头部-尾鳍避开共振双重限定下的游动特性。此外，本研究团队将在机器鱼中加入反馈，探究单关节机器鱼头部-尾鳍协调作用对游动性能的优化。

参 考 文 献

[1] 魏清平, 王硕, 谭民, 等. 仿生机器鱼研究的进展与分析 [J]. 系统科学与数学, 2012, 32(10): 1274-1286.
Wei QP, Wang S, Tan M, et al. Research development and analysis of biomimetic robotic fish [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2012, 32(10): 1274-1286.

[2] Katzschmann RK, DelPreto J, MacCurdy R, et al. Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish [J]. Science Robotics, 2018, 3(16): eaar3449.

[3] Marchese AD, Onal CD, Rus D. Autonomous soft robotic fish capable of escape maneuvers using fluidic elastomer actuators [J]. Soft Robotics, 2014, 1(1): 75-87.

[4] Aritani T, Kawasaki N, Takada Y. Small robotic fish with two magnetic actuators for autonomous tracking of a goldfish [J]. Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms, 2019, 8(1): 69-74.

[5] Song JL, Zhong Y, Du RX, et al. Tail shapes lead to different propulsive mechanisms in the body/caudal fin undulation of fish [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235(2): 351-364.

[6] Zhong Y, Song JL, Yu HY, et al. Toward a transform method from lighthill fish swimming model to biomimetic robot fish [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(3): 2632-2639.

[7] 吴文广. 仿鲹科机器鱼推进性能实验研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
Wu WG. Modeling and Experimental Research of Integrating Propulsion Mechanism of Pectoral Fin's Fluctuation and Swing for the Biomimetic Robotic Fish [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.

[8] 王飞, 王庆林, 王震宇, 等. 仿生机器鱼巡游性能分析与实验 [J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(1): 80-84.
Wang F, Wang QL, Wang ZY, et al. Cruising performance analysis and experiments of biomimetic

robotic fish [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(1): 80-84.

[9] 杜如虚, 钟勇, 陈贤帅, 等. 基于拉线机构的机器鱼运动控制仿真研究 [J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2014, (5): 409-414.
Du RX, Zhong Y, Chen XS, et al. The kinematics simulation analysis of robot fish based on wire-driven mechanism [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, (5): 409-414.

[10] Clapham RJ, Hu HS. ISplash-I: high performance swimming motion of a carangiform robotic fish with full-body coordination [C] // Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2014: 322-327.

[11] 王平, 许炳招, 娄保东, 等. 仿生机器鱼运动学模型优化与实验 [J]. 智能系统学报, 2017, 12(2): 196-201.
Wang P, Xu BZ, Lou BD, et al. Ptimization and experimentation on the kinematic model of bionic robotic fish [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2017, 12(2): 196-201.

[12] 孙飞虎, 喻俊志, 徐德. 具有嵌入式视觉的仿生机器鱼头部的平稳性控制 [J]. 机器人, 2015, (2): 188-195.
Sun FH, Yu JZ, Xu D. Stability control for the head of a biomimetic robotic fish with embedded vision [J]. Robot, 2015, (2): 188-195.

[13] 郑长镇. 仿生机器鱼的刚柔耦合设计及其巡游性能优化 [D]. 南宁: 广西大学, 2023.
Zheng CZ. Rigid-flexible coupling design of biomimetic robotic fish and its cruising performance optimization [D]. Nanning: Guangxi University, 2023.

[14] 刘宁. 仿生机器鱼胸鳍结构优化及推进性能分析 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
Liu N. Optimization of pectoral fin structure and propulsion performance analysis for bionic robotic fish [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022.

[15] Zhang SW, Qian Y, Liao P, et al. Design and control of an agile robotic fish with integrative biomimetic mechanisms [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(4): 1846-1857.

[16] Chen BX, Jiang HZ. Swimming performance of a tensegrity robotic fish [J]. Soft Robotics, 2019, 6(4): 520-531.

[17] Zhong Q, Dong HB, Quinn DB. How dorsal fin sharpness affects swimming speed and economy [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 878: 370-385.

[18] Mignano AP, Kadapa S, Tangorra JL, et al. Passing the wake: using multiple fins to shape forces for swimming [J]. Biomimetics, 2019, 4(1): 23.

[19] Hedrick TL. Software techniques for two- and three-dimensional kinematic measurements of biological and biomimetic systems [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2008, 3(3): 034001.

[20] Barrett DS, Triantafyllou MS, Yue DKP, et al. Drag reduction in fish-like locomotion [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1999, 392: 183-212.

[21] Anderson JM, Chhabra NK. Maneuvering and stability performance of a robotic tuna [J]. Integrative and Comparative Biology, 2002, 42(1): 118-126.

[22] 刘英想, 刘军考, 陈维山, 等. 新型两关节机器鱼的研制及实验研究 [J]. 船舶工程, 2008, 30(4): 28-31.
Liu YX, Liu JK, Chen WS, et al. Development and experiment of new two-joint robot fish [J]. Ship Engineering, 2008, 30(4): 28-31.

[23] 曾鑫. 水产养殖机器鱼控制系统搭建与试验 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
Zeng X. Construction and experiment of aquaculture robotic fish control system [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.

[24] Liu JD, Hu HS. Biological inspiration: from carangiform fish to multi-Joint robotic fish [J]. Journal of Bionic Engineering, 2010, 7(1): 35-48.

[25] Zhong Y, Wu J, Wang C, et al. Hydrodynamic effects of the caudal fin shape of fish in carangiform undulatory swimming [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236(12): 6385-6394.