DOI: 10.3901/JME.2020.19.182

仿蝠鲼机器鱼软体胸鳍建模与仿真^{*}

陈令坤¹ 乔涛² 毕树生¹ 任行伟¹ 蔡月日¹

(1. 北京航空航天大学机器人研究所 北京 100191;

2. 中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

摘要: 介绍一种仿蝠鲼机器鱼上使用的软体胸鳍推进器, 具有三维立体翼型并集成多个软体致动单元, 具备更高形态及运动仿生度。分析提取了生物原型翼缘曲线并建立扑翼运动学模型, 解耦描述胸鳍俯仰-摆转复合运动模式; 对比了不同致动器数量的软体胸鳍运动特性与控制策略, 并通过样机静态加载试验验证了有限元模型可靠性; 基于格子-玻尔兹曼方法实现复杂曲面动态边界的流固耦合, 在仿真环境中分析了单/多自由度软体胸鳍在不同工况下的扑翼推升力特性; 数据对比表明多自由度胸鳍平均推力为单自由度的 7.2 倍, 性能优势显著, 为进一步水动力试验研究与机器鱼平台整合提供了数据预测与方向指导。

关键词: 仿生机器鱼; 软体胸鳍推进器; 扑翼运动学建模; 流固耦合

中图分类号: TP242

Modeling and Simulation Research on Soft Pectoral Fin of a Bionic Robot Fish Inspired by Manta Ray

CHEN Lingkun¹ QIAO Tao² BI Shusheng¹ REN Xingwei¹ CAI Yueri¹

(1. Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100191;

2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

Abstract: A soft pectoral fin propeller used on a manta-like bionic robot fish is presented, which features three-dimensional profile with several multi-chamber pneumatic actuators integrated and can achieve higher form plus motion biomimetic performance. Based on motion features extracted from manta swimming analysis, a kinematic model is established to describe the oscillating-pitching coupled locomotion of the pectoral fin. Kinematic features and controlling strategies of the soft fin with different actuator amounts are evaluated by a finite element model with experimental verification. The Lattice-Boltzmann Method is introduced to solve the fluid-structure interaction problem of complex surface geometry and moving boundaries, for the purpose of analyzing the thrust and lift pattern of the fins with single or multiple motion DOFs in simulation environments. The advantage of multi-DOFs soft fin in propelling performance is proved by 7.2 times increase in average thrust compared to single-DOF fin, which offers an effective way to predict and guide hydrodynamic experiments as well as robotic fish platform integration in future research.

Key words: bionic robot fish; soft pectoral fin propeller; fin-flapping kinematic model; fluid-structure interaction;

0 前言

无人潜航器作为一种智能的水下载体平台, 在资源勘探、敌情侦察等军民作业任务中具有广泛应用。传统潜航器多采用螺旋桨推进方式,

虽然能获得较大推力和较高速度, 但存在效率低、能耗高、噪声大等诸多问题。为弥补这些缺点, 研究人员从水生生物尤其是鱼类的机体上获取灵感, 开发出了各类基于仿生推进原理的水下机器人。

鱼类的泳动推进模式可分为中央鳍/对鳍推进(MPF)、身体/尾鳍推进(BCF)两类^[1]。两种模式各具特色, 但难以在巡游、加速、机动性等方面同时达到最优^[2-3]。而 MPF 模式的鱼类, 因胸鳍具有多关节

^{*} 北京市自然科学基金(3182019)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。20200415 收到初稿, 20200726 收到修改稿

软骨、肌群等构成的柔性推进系统, 在推进效率、机动性及噪声等方面较 BCF 推进模式优势明显^[4-5]。因此针对这类胸鳍推进鱼类“软/柔”的特征进行深入研究并将其融入水下机器人设计中具有重要意义。

蝠鲼作为典型 MPF 推进模式鱼类, 胸鳍运动可视为展向摆动和弦向波动的耦合, 经由软骨肌肉的驱动与传导, 表现出强柔性特征^[6-7]。由于致动器数量、控制复杂度、结构体积等因素的限制, 现有仿生胸鳍多进行了工程简化, 无法良好复现原生柔性特征。基于胸鳍柔性分布及结构特点, 现有仿生胸鳍的研究可分三类。

(1) 弹性鳍条+被动变形二维胸鳍。对原生胸鳍结构进行大幅简化, 忽略了生物三维翼表外形, 多以前置弹性杆带动柔性翼膜, 构建仅能随水流被动变形的二维鳍面实现推进, 只保留了展向摆动特征。典型研究有新加坡国立大学 Manta Droid^[8]、哈尔滨工业大学 SMA 驱动仿生蝠鲼^[9]、北京航空航天大学 BHRay I~III 代^[10-12], 如图 1a~1c 所示。

(2) 弹性鳍条+主动变形三维胸鳍。用弹性材料构建内部鳍条骨架, 包覆以柔性布料制作的蒙皮, 可实现与生物原型相仿的翼面外形, 能够进行模仿胸鳍耦合运动, 部分实现了功能与结构仿生相结合, 但仿生翼型在运动中难以保持。典型研究如德国 Festo 公司 Aqua Ray^[13]、北京航空航天大学 BHRay IV~VI 代^[14-16], 如图 1d~1f 所示。

图 1 采用 I/II 类半柔性胸鳍的典型样机

(3) 完全柔性胸鳍。根据生物原型的生理解剖结构和扑翼运动特点, 对胸鳍的柔性分布进行优化设计, 兼具高仿生程度和推进性能。目前此类研究较少, 日本大阪大学曾用绕线式致动器前置驱动硅胶翼膜, 开发出世界首款气动软体蝠鲼^[17]; 浙江大学曾将介电高弹体(DE)嵌入硅胶薄膜内, 研制了一种高电压驱动的微型软体蝠鲼^[18], 如图 2 所示。

因早期软体机器人制造工艺与新型致动材料功率密度的限制, 上述全柔性胸鳍仍属于单自由度驱

动、二维翼膜被动变形的结构(I 类), 仿生程度与实际尺寸均受限, 真正具备三维翼型的多自由度软体胸鳍仍鲜有研究。随着软体机器人领域的发展, PDMS 硅橡胶等超弹性材料的建模、仿真技术, 以及 SDM 形状沉积制造、低温失蜡铸造、柔性平板印刷、多材料 3D 打印等制造工艺的日趋成熟^[19], 将全柔性胸鳍设计理念与软体机器人技术结合, 实现形态、运动仿生与高效推进有机统一已成为可能。

图 2 采用 III 类全柔性胸鳍的典型样机

本文介绍一种具有三维立体翼型的仿生软体胸鳍, 采用了多腔室液压致动方式, 通过优化调整致动单元数量和分布, 实现多自由度可控的翼面主动变形。

1 仿生胸鳍运动学建模

本文选取胸鳍形状、运动节律与蝠鲼高度相似的牛鼻鲼作为观测对象, 其较小的体型易于开发等比例样机试验平台。定义胸鳍坐标系如图 3a 所示; 拍摄侧视与后视方向直线巡游视频并逐帧分析, 得到一个完整扑翼周期内胸鳍弦向、展向运动序列, 如图 3b、3c 所示。标记翼缘特征点, 利用 Matlab 程序拟合输出翼缘轮廓曲线, 用于提取扑翼频率、俯仰角度、鳍面波长、前后缘相位差等运动参数。

图 3 坐标系定义与运动离散化

根据生物解剖所得胸鳍骨节肌肉分布特征^[20], 将扑翼运动分别离散为 m 组弦向平行排列的鳍条和 n 个展向串联的关节; 任意鳍条 i 上的分段 s_j 均按一

定相位差绕前一关节点 $j-1$ 依次摆转,如图 3d 所示。整体表现为展向拍动与弦向类正弦波动叠加,弦向波长由鳍条间相位差决定;对振动翼模式^[6]的蝠鲼胸鳍运动可解耦化简为关节 j 处的翼型截面绕 x 轴摆转和弦线 C_j 相对翼根轴线 x 俯仰,如图 4a 所示。

根据现有研究成果^[21],胸鳍展向截面可近似为 NACA 标准翼型。以下将采用 NACA0015 对称翼型,以胸鳍中部截面为基准进行运动分析。

图4 胸鳍截面运动分析

定义 θ_{ij} 为鳍条 i 分段 s_j 绕关节 $j-1$ 的摆转角, β_j 为关节 j 处截面弦线相对翼根轴线 x 的俯仰角; C_j 为截面弦长,即该处最前缘鳍条 p 至最后缘鳍条 q 的距离; S 为胸鳍最大展长,即位于平面 xOy 时翼尖节点 n 至 x 轴的法向距离,当各鳍条分段等长时 $S = ns_j$; 设摆动频率 f_1 , 俯仰频率 f_2 , 相邻鳍条间摆转运动的相位差 φ , 则任意鳍条 i 与截面 j 相交点的位置为

$$\begin{cases} x_{ij}(t) = x_{ij} = x_i \\ y_{ij}(t) = s_j \cdot \cos \theta_{ij}(t) + y_{ij-1}(t) \\ z_{ij}(t) = s_j \cdot \sin \theta_{ij}(t) + z_{ij-1}(t) \\ \theta_{ij}(t) = jn^{-1} \theta_{max} \cdot \sin(2\pi f_1 t + (i-1)\varphi) \end{cases} \quad (1)$$

设胸鳍摆转与俯仰运动的耦合相位差为 ψ , 则俯仰角 β_j 可描述为

$$\begin{cases} \beta_j(t) = jn^{-1} \beta_{max} \cdot \sin(2\pi f_2 t + \psi) \\ \beta_{max} = \arctan \frac{z_{mn}(0) - z_{in}(0)}{x_{mn}(0) - x_{in}(0)} \end{cases} \quad (2)$$

设翼型焦点 M_j 的弦上位置比例 η , 联立式(1)、(2), 推得以弦线焦点表示的理想扑翼运动学方程

$$\begin{cases} C_j = x_{qj} - x_{pj} \\ x_{Fj}(t) = x_{pj} + \eta \cdot C_j \\ y_{Fj}(t) = s_j \cdot \cos(\theta_{max} \cdot \sin(2\pi f_1 t + \eta(m-1)\varphi)) + y_{Fj-1}(t) \\ z_{Fj}(t) = s_j \cdot \sin(\theta_{max} \cdot \sin(2\pi f_1 t + \eta(m-1)\varphi)) + z_{Fj-1}(t) \\ \beta_{Fj}(t) = jn^{-1} \arctan \frac{s_j \cdot \sin(\theta_{max} \sin(m-1)\varphi)}{C_j} \times \sin(2\pi f_2 t + \psi) \end{cases} \quad (3)$$

由扑翼运动图像序列分析可得 $f_1 \approx f_2 \approx 0.4 \text{ Hz}$, $\psi \approx \pi/2$, $\theta_{max} \approx \pi/3$, 即展向摆动与弦向俯仰频率基本一致, 且存在约 90° 相位差, 扑翼振幅则约为 60° , 代入式(3)可计算胸鳍运动轨迹, 如图 4b 所示。

2 有限元仿真分析

2.1 单自由度胸鳍模型验证

利用有限元软件 ABAQUS 进行软体胸鳍仿真, 通过考察胸鳍变形效果与运动规律匹配程度, 调整软体致动器几何尺寸、腔室数量及位置分布。迭代优化后得到理想几何模型用于样机制造, 节省时间及物料成本, 并可获取不同摆动频率、幅度、相差等多工况的连续翼面几何序列, 作为流固耦合分析中的固体域边界。

软体胸鳍主体使用双组分铂催化硅橡胶, 作为一种超弹性、能够大变形、体积近似不可压缩的非线性材料, 其力学特性无法使用线弹性本构的杨氏模量、泊松比参数表征, 一般采用应变能密度函数模型如 Yeoh、Mooney-Rivlin、Neo-Hookean、Ogden 等进行描述^[22]。本文基于二阶 Yeoh 模型建立软体胸鳍的材料本构关系, 其能量密度函数可表示为

$$W = C_{10} \left(\lambda^2 + \frac{1}{\lambda^2} - 2 \right) + C_{20} \left(\lambda^2 + \frac{1}{\lambda^2} - 2 \right)^2 \quad (4)$$

式中, λ 为主伸长比, 多项式系数 C_{10} 、 C_{20} 通过 Abaqus Material Evaluation 工具计算^[24], $C_{10}=0.11$ 、 $C_{20}=0.02$; 材料拟合数据基于 ASTM D412 标准拉伸试验测得^[22-23]。

软体致动器基于拮抗原理实现双向弯曲, 腔室对称面使用低抗弯、高抗拉模量薄膜材料进行拉伸形变约束。软体胸鳍制造时选取合成纤维布料, 其弹性模量 $E = 6500 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.2$ 。

通过生物样本的俯视投影照片提取翼缘曲线, 并对前、后缘进行分段拟合

$$\begin{cases} x_f(y) = 0.4371y + 1.1551 \\ x_b(y) = 0.00129y^2 - 0.7278y + 193.226 \end{cases} \quad (5)$$

据此建立软体胸鳍的几何模型, 其展向长度 200 mm , 翼根弦长 195 mm , 展向截面为 NACA0015 标准翼型, 整体呈“三明治”结构, 硅胶半鳍前缘沿展向串联布置 17 个致动腔室, 中央对称面上铺设纤维约束层, 如图 5a 所示。

图5 单自由度胸鳍结构及形变分析

该胸鳍结构仅前置一组软体致动器, 只能实现展向主动弯曲, 弦向俯仰则依赖后缘柔性与水流的作用被动产生, 在此定义为“单自由度仿生胸鳍”。

使用 ABAQUS/Standard 求解器对单自由度胸鳍有限元模型进行准静态隐式动力学分析, 模拟致动腔室加压弯曲带动胸鳍整体摆动的过程, 如图 5b 所示。各腔室内壁均布压强 P 满足类正弦加载规律

$$P = A \cdot \sin \omega(t - t_0) \quad (6)$$

式中, 压力幅值 A 与扑翼摆转角正相关, 加载角频率 ω 换算后与扑翼频率 f 一致, 起始时刻 $t_0=0$ 。通过设定不同数值, 可模拟多种运动工况。

为验证有限元模型预测可靠性, 制造了等比例软体胸鳍样机。主体使用 Dragon Skin 20 型硅胶, 基于失蜡法工艺实现内部腔室与纤维夹层一次浇筑成型。在胸鳍前缘沿展向绘制标记点 $M_0 \sim M_{16}$, 等距 12.5 mm, 与有限元模型积分节点 $N_0 \sim N_{16}$ 一一对应。其中, 节点 N_0 即为 xOz 坐标系原点, 如图 6a 所示。

将试验样机翼尖向上竖直放置, 固定翼根基座。单侧内腔加载压缩空气, 通过减压阀控制稳态压强以步进 10 kPa 逐渐增加, 待胸鳍摆动静止后拍摄各组工况的弯曲变形照片, 分辨率 1 920×1 080; 提取各标记点像素位置, 通过投影标尺换算为实际空间坐标记作 $M_i(x_i, z_i)$; 相同加载参数输入有限元模型逐个工况计算, 利用后处理工具提取各组仿真数据的前缘节点坐标记作 $N_i(x_i, z_i)$ 。

通过式(6)计算相同压力载荷下各点间距标准差与其展向距离 S_i 之比, 以此评估加载条件和胸鳍

尺寸对仿真误差与的影响。其中, $M_i N_i$ 与 $\overline{MN}$ 分别表示单组节点偏置距离与各组距离均值, $n=16$ 。

$$\delta = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (M_i N_i - \overline{MN})^2}}{S_i} \quad (7)$$

由图 6b 可见, 仿真误差由翼根向翼尖增加但斜率不断放缓, 且维持在 8% 以内; 而与不同压力和弯曲程度的相关性不显著。前者说明弯曲变形沿着展向的累积误差逐渐趋稳, 后者说明仿真结果不依赖于加载条件, 具备工况独立性, 符合工程精度要求, 模型预测可靠。

(a) 胸鳍样机与标定实验

(b) 翼缘特征点误差对照

图6 有限元模型仿真误差分析

2.2 多自由度胸鳍运动优化

单自由度胸鳍结构简单、易于控制, 在早期的研究中被广泛采用^[8-12, 17-18]。但其仅能通过前缘致动器摆转/弯曲带动后缘, 借由自身柔性在水中被动变形产生推力, 无法主动控制胸鳍俯仰姿态, 推进效率与生物原型存在较大差距。

多腔室型软体致动器因其可无缝内嵌于胸鳍基体的特点, 易于实现小型化集成, 可沿展向布设多组致动单元, 各单元的几何尺寸与腔室数量根据翼面厚度变化趋势和驱动功率分配特性确定, 通过有限元仿真迭代, 得到最佳参数与变形效果。

依上述思路分别设计如图 7a 的 3 单元、5 单元驱动软体胸鳍, 各单元均可独立控制, 相邻单元的运动通过调整耦合节律即可实现展向摆转/弯曲和弦向俯仰的主动控制(图 7b), 定义为“多自由度仿生胸鳍”。

图7 多自由度胸鳍结构与运动控制

以三单元胸鳍为例, 对各致动单元内两侧腔室交替加载相位差 180° 的类正弦周期性压力, 相邻单元的同侧腔室间亦存在相位差 φ 。将各致动单元上

下两侧腔室由前向后依次编号 $U_1 \sim U_3$ 、 $L_1 \sim L_3$, 则6个独立内腔压力控制方程满足

$$\begin{cases} P_{U_i} = A_i \cdot \sin(\omega t + (i-1)\varphi) \\ P_{L_i} = A_i \cdot \sin(\omega t + (i-1)\varphi + \pi) \end{cases} \quad (8)$$

其中角频率 ω 换算后与扑翼频率 f 一致, 压力幅值 A_i 、相位差 φ 则根据有限元计算结果迭代优化, 令仿真的整体效果不断趋近式(3)所描述的理想扑翼运动。五单元及以上更复杂结构的胸鳍满足相同驱动原理及优化方法。

经多次迭代可得 1、3、5 单元软体胸鳍的优化结构/驱动参数, 如表 1 所示。提取一单元、五单元两组有限元模型的翼尖节点旋转角 R_1 、 R_2 , 分别对应弦向俯仰角 $\beta(t)$ 和展向摆转角 $\theta(t)$, 可对比单/多自由度胸鳍运动轨迹, 如图 8 所示。

表1 优化参数对照表

结构/驱动参数	致动器数量		
	1	3	5
腔室数量/个	17	8/16/8	6/9/15/9/6
单元间距/mm	—	58	30
压力幅值/kPa	155	120/150/100	100/120/140/105/90
加载频率/Hz	0.5	0.5	0.5
加载相差/rad	—	$\pi/2$	$\pi/4$

图8 单/多自由度胸鳍扑翼运动曲线对比

可见单自由度胸鳍 R_1 转角峰值不足 3° ; 且时变规律不符合类正弦波形, 仅为柔软胸鳍受前缘致动器弯曲牵拉而产生的微小扭转; 多自由度胸鳍则具有显著的俯仰角变化, 波动周期与轨迹曲线也更接近理想波形。另一方面, 两类胸鳍均能够模拟展向摆转运动, 而得益于多组单元的协同驱动, 多自由度胸鳍产生相同弯曲效果所需驱动

压力更低, 有效减小了腔室膨胀对翼面流线外形造成的影响。

综上, 在仿真环境下多自由度软体胸鳍的运动拟真度显著优于传统单自由度型, 经过试验标定的有限元模型亦具备较高可靠性。尽管集成更多致动单元理论上可实现更优扑翼运动效果, 但仍需考虑制造难度及控制复杂度, 综合平衡选择。

3 流固耦合仿真分析

3.1 基于 LBM 的流固耦合仿真

为分析软体胸鳍在流体介质即水下环境中的推进性能差异,使用基于格子-玻尔兹曼法的 XFlow 软件作为流体域求解工具与固体域有限元模型进行耦合仿真。相较于 N-S 方程为基础进行网格离散的传统 CFD 方法, LBM 方法使用 Boltzmann 方程描述介观层面上的流体特性^[25],具有天然离散特征,可避免冗长复杂的网格划分过程,特别适合复杂几何边界或大范围运动边界的求解。应用于软体胸鳍水下扑翼模拟这种动态复杂曲面的流固耦合,可以避免因边界插值和网格重构造成的数值误差,简化耦合数据传递过程,提高求解精度。

利用 ABAQUS 后处理模块将有限元模型在 3 个完整扑翼周期内全部翼表节点坐标转换为多边形曲面,以 100 Hz 采样率逐帧输出为 STL 格式的离散运动序列,并导入 XFlow 作为流固耦合模型的固体域几何边界。配置仿真环境包括流体域尺寸、流体介质参数、流场边界条件、流固耦合边界壁面函数、仿真时间及步长等,见表 2。

表 2 耦合仿真参数配置表

模型变量	配置参数	备注
固体域尺寸/mm	200×200	有限元模型导入
流体域尺寸/m	1×1×4	正方形截面流道
流体密度/(kg/m ³)	998.3	15℃纯水介质
动态粘度/(Pa·s)	10 ⁻³	15℃纯水介质
入口边界/(m/s)	0.5	来流速度入口
出口边界/Pa	0	远场压力出口
耦合壁面边界	Non-Equilibrium Enhanced	非平衡动态壁面函数
格子分辨率/mm	2/4/8	壁面/过渡/全局尺寸
计算步长/s	10 ⁻⁵	1/100 固体计算步长
仿真时间/s	4~20	随扑翼周期而变化

耦合仿真结束后处理计算数据提取相关物理量。其中,流体域任一格子点的速度、压力及涡量场等信息均可观测,便于分析扑翼推进机理;对固体域表面压力场积分则可得推力、升力及升阻比等数据,用于评估仿生扑翼推进性能,指导胸鳍设计、优化控制策略。流场观测效果如图 9 所示,可见胸鳍后缘产生呈交错嵌套排列的涡环组,从后缘脱落后在远离

过程中逐渐发散。这类似于反卡门涡街的三维空间形态,与扑翼规律一致的周期性推力相对应,符合经验预期。

图 9 扑翼耦合仿真三维涡量云图

3.2 软体胸鳍推进性能分析

调节有限元模型压力加载方程式(6)、(8)控制参数,计算并输出单自由度、多自由度两类软体胸鳍在多组扑翼振幅和频率下的翼面几何序列,并以表 2 的参数配置进行耦合仿真。提取典型工况下的瞬时推/升力数据,评估其周期性变化曲线与类正弦波型的相似度;绘制各组工况平均推力、最大升力对比图,分析胸鳍结构和驱动参数对推进性能的影响。

由图 10a 可知在扑翼频率 0.4 Hz、扑翼振幅约 60°、来流速度 0.5 m/s 的工况下,仿真所得推/升力与理想类正弦波的周期、相位基本一致。其中推力周期约为升力周期的 1/2;单自由度胸鳍的升力峰值高于多自由度,但推力远小于后者,且由于致动器数量太少,上下腔加载切换不够平顺,胸鳍运动换向时翼尖易出现弹性震颤,导致单个周期内的推升力呈不规则的“双峰分布”;而多自由度胸鳍由于致动器顺次做功,动力接续平稳、运动可控度高,故推/升力曲线也更接近理想波形。

由图 10b、10c 可知,水下扑翼的最大升力随振幅、频率增加而增大,其中单自由度胸鳍增速更快;多自由度胸鳍的平均推力同时与振幅、频率正相关,而单自由度型的平均推力仅与振幅正相关,随频率增加不升反降,远小于相同工况下多自由度型对应数值。由于其缺乏弦向俯仰自由度,无法形成有效攻角,反而因高频摆动时产生过多翼面湍流增加了阻力,导致本就不大的有效推力进一步减小,甚至局部出现负值(即推力小于阻力的情况)。

图10 水下扑翼推升力曲线

4 结论

(1) 从生物原型游动图像序列提取翼缘特征所建立的扑翼运动学模型可良好描述蝠鲼胸鳍的俯仰

摆转复合运动,能够快速获取不同几何尺寸的胸鳍在多组运动工况(扑翼幅度、频率、相位差等参数)下的理想运动轨迹。

(2) 基于有限元方法对不同致动器数量的软体胸鳍进行仿真,通过制作物理样机并进行静态加载

对照试验, 证明该有限元模型具备一定工况独立性与较好的可靠性; 经分析对比, 多自由度型能够理想的复现扑翼运动学模型描述的“摆转-俯仰”耦合运动, 相同弯曲程度所需驱动压力更低, 可有效减小腔室膨胀, 在扑翼过程中较好保持翼面流线减阻外形。

(3) 格子-玻尔兹曼方法可有效处理具有复杂曲面和运动边界的水下扑翼仿真问题; 将有限元模型数据转换为曲面几何帧序列导入 LBM 求解器可实现流固耦合单向数据传递, 为仿生扑翼水动力学分析提供了新途径。

(4) 流固耦合仿真条件下, 多自由度胸鳍凭借更高的扑翼运动仿生度, 在相同幅度、频率时平均推力为单自由度型的 7.2 倍, 推进效能优势明显; 推/升力的周期波动规律与理想类正弦波形基本一致, 验证了耦合模型有效性, 可利用仿真方法指导胸鳍结构设计、优化驱动控制策略, 作为水动力试验的先期预测和有益补充。

(5) 未来将进行考虑固体域变形的双向耦合仿真, 结合胸鳍水下摆动测力实验进一步提升数值模拟准确性。搭载至模块化机器鱼平台后, 预期实现高仿生度与高性能推进的有机结合。

参 考 文 献

- [1] LIU B, GUO Z. Hydrodynamic performance study on a flexible caudal fin[C]// IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin: IEEE, 2016: 618-622.
- [2] LINDESY C C. I form, function, and locomotory habits in fish[J]. *Fish Physiology*, 1978, 7: 1-100.
- [3] 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*, 2016, 20(4): 1274-1286. YU Junzhi, CHEN Erkui, WANG Shuo, et al. Research evolution and analysis of biomimetic robot fish[J]. *Control Theory & Applications*, 2016, 20(4): 1274-1286.
- [4] BLAKE R. W. Fish functional design and swimming performance[J]. *Journal of Fish Biology*, 2004, 65(5): 1193-1222.
- [5] TRIANTAFYLLOU M S, HOVER F S, TECHET A H, et al. Review of hydrodynamic scaling laws in aquatic locomotion and fishlike swimming[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2005, 58(1/6): 226.
- [6] ROSENBERGER L J. Pectoral fin locomotion in batoid fishes: Undulation versus oscillation[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(2): 379-394.
- [7] SCHAEFER J T, SUMMERS A P. Batoid wing skeletal structure: novel morphologies, mechanical implications, and phylogenetic patterns[J]. *Journal of Morphology*, 2005, 264(3): 298-313.
- [8] CHEW C M, LIM Q Y, YEO K S. Development of propulsion mechanism for robot Manta ray[C]// 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Zhuhai: IEEE, 2015: 1918-1923.
- [9] 王振龙, 杭观荣, 李健, 等. 面向水下无声推进的形状记忆合金丝驱动柔性鳍单元[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(2): 126-131. WANG Zhenlong, HANG Guanrong, LI Jian, et al. Shape memory alloy wire actuated flexible biomimetic fin for quiet underwater propulsion[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(2): 126-131.
- [10] XU Y, ZONG G, BI S, et al. Initial development of a flapping propelled unmanned underwater vehicle (UUV)[C]// IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics. Sanya: IEEE, 2007: 524-529.
- [11] GAO J, BI S, LI J, et al. Design and experiments of robot fish propelled by pectoral fins[C]// IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics. New York: IEEE, 2009: 445-450.
- [12] CAI Y., BI S., ZHANG L. Design and implication of a bionic pectoral fin imitating cow-nosed ray[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 2010: 3525-3529.
- [13] FESTO. Aqua ray[EB/OL]. <https://www.festo.com/group/zh/cms/10246.htm>, 2020-02-20.
- [14] ZHENG L, BI S, CAI Y, et al. Design and optimization of a robotic fish mimicking cow-nosed ray[C]// International Conference on Robotics and Biomimetics. Tianjin: IEEE, 2010: 1075-1080.
- [15] NIU C, ZHANG L, BI S, et al. Mechanical design and implementation of a bio-inspired robotic fish with flapping foils[C]// International Conference on Robotics and Biomimetics. Shenzhen: IEEE, 2013: 2291-2296.
- [16] MA Hongwei, CAI Yueri, WANG Yuliang, et al. A biomimetic cownose ray robot fish with oscillating and chordwise twisting flexible pectoral fins[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2015, 42(3): 214-221.
- [17] SUZUMORI K, ENDO S, KANDA T, et al. A bending pneumatic rubber actuator realizing soft-bodied Manta swimming robot[C]// Proceedings 2007 IEEE

- International Conference on Robotics and Automation. Rome: IEEE, 2007: 4975-4980
- [18] LI T, LI G, LIANG Y, et al. Fast-moving soft electronic fish[J]. Science Advances, 2017, 3(4): e1602045.
- [19] 王田苗, 郝雨飞, 杨兴帮, 等. 软体机器人: 结构、驱动、传感与控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 1-13. WANG Tianmiao, HAO Yufei, YANG Xingbang, et al. Soft robotics: Structure, actuation, sensing and control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 1-13.
- [20] SCHAEFER J T, SUMMERS A P. Batoid wing skeletal structure: Novel morphologies, mechanical implications, and phylogenetic patterns[J]. Journal of Morphology, 2005, 264(3): 298-313.
- [21] HEINE C. Mechanics of flapping fin locomotion in the cownose ray, *Rhinoptera bonasus* (Elasmobranchii, Myliobatidae)[D]. Durham NC, USA: Duke University, 1992.
- [22] 李树虎, 贾华敏, 李茂东, 等. 超弹性体本构模型的理论和特种试验方法[J]. 弹性体, 2011, 21(1): 58-64.
- LI Shuhu, JIA Huamin, LI Maodong, et al. Theory and special experiment methods of the constitutive model of hyper-elastic material[J]. China Elastomerics, 2011, 21(1): 58-64.
- [23] Hyper-elastic Behavior of Rubberlike Materials [EB/OL]. <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEMATRefMap/simamat-c-hyperelastic.htm#simamat-c-hyperelastic-yeoh>.
- [24] Evaluating Hyper-elastic and Viscoelastic Material Behavior [EB/OL]. <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAERefMap/simacae-c-prpeditorevaluate.htm>.
- [25] BLAIR S R. Lattice Boltzmann methods for fluid structure interaction[R]. Naval Postgraduate School Monterey CA, 2012.
-
- 作者简介: 陈令坤, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为仿生无人潜航器, 软体机器人。
E-mail: chenlingkun@buaa.edu.cn
- 乔涛, 男, 1984 年出生, 博士, 工程师。主要研究方向为浮空器设计与发放、机器人技术。
E-mail: qiaotao@aircas.ac.cn
- 毕树生(通信作者), 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为全柔性机构及仿生机器人。
E-mail: ssbi@buaa.edu.cn