

基于仿生学的变体水下机器人外形优化设计分析

孙沅贝

山东省实验中学 山东济南

【摘要】变体水下机器人是一种新型自适应水下观测工具,可实现高速巡航、低速侦查的极端任务需求。然而,水下变体仍存在环境恶劣、机构复杂、密封性差等技术挑战,并且对于水下变体机器人变体外形的研究仍不够充分。因此,本文重点针对 6 种典型鱼体进行了仿真建模以及流体分析,通过对各鱼体压强的定量分析,结果显示在高速环境下噬人鲨鱼体模型为最优仿生外形,在低速环境下箱鲀鱼体模型为最优仿生变体外形。本文结论为变体水下机器人在不同速度场景下的变形提供了理论参考,也为航空航海领域无人装备的外形变体设计提供了初步方法参考。

【关键词】变体水下机器人; 仿生学; 流体分析; 外形优化

【收稿日期】2024 年 8 月 12 日

【出刊日期】2024 年 9 月 27 日

【DOI】10.12208/j.jer.20240027

Shape optimization design and analysis of morphing underwater vehicle based on bionics

Yuanbei Sun

Shandong Experimental High School, Jinan, Shandong

【Abstract】Morphing underwater vehicle is a new type of adaptive underwater observation tool, which can realize the extreme task requirements of high-speed cruise and low-speed investigation. However, there are still technical challenges such as harsh environment, complex mechanism and poor sealing, and the research on the shape of underwater morphing robot is still insufficient. Therefore, this paper focuses on the model simulation and computational fluid dynamics of six typical fish bodies. Through the quantitative analysis of the pressure of each fish body, the simulation results show that the white shark body model is the optimal bionic shape under the high-speed environment, and the boxfish body model is the optimal bionic shape under the low-speed environment. The conclusion provides a theoretical reference for the design of the morphing underwater vehicle in different speed scenarios, and also provides a preliminary method reference for the morphing design of unmanned vehicle in the fields of aviation and marine.

【Keywords】Morphing underwater vehicle; Bionics; Computational fluid dynamics; Shape optimization

1 引言

海洋蕴藏着丰富的能源,水下机器人作为一种海洋观测的有效工具,已取得很多专家关注。水下机器人多采用螺旋桨作为驱动单元,然而其噪声大、隐蔽性差、推进效率低。相较于传统水下机器人,鱼类具有高机动、低阻力等优势,仿生鱼具有很高的开发潜力,所以基于仿生学的水下仿生机器人已经成为研究热点。

近年来,已有众多学者研究基于鱼类的仿生外形设计。

在鱼体仿生方面,耿文豹等^[1]基于鱼类仿生学

原理,建立了金枪鱼、海豚和旗鱼的机器鱼模型进行流体分析,结果表明旗鱼所受阻力最小;孔亮^[2]分析了金枪鱼的外形,设计了金枪鱼仿生水下机器样机,结果表明仿生机器鱼身体躯干的厚度越小,越有利于产生更大的水动力;马镜等^[3]通过计算流体力学进行分析,模仿鲨鱼和海豚的外形特征设计了 2 种水下机器外形,得到了一种具有明显减阻效果的 UUV 水动力外形。

在水下航行器外形设计方面,王妹婷等^[4]针对水下机器人航行时能源、阻力、航速平衡,研究了水下机器人回转体外形优化,降低了航行阻力;芦廷

彬^[5]对水下航行体进行了外形优化设计，为增加航行器速度提供了参考；龚喜等^[6]通过计算流体力学对某水下航行体的外形进行了阻力优化设计，为外形设计优化提供计算依据和设计基础；苗怡然等^[7]针对水下航行器的稳健性进行研究分析，有效提高了水下航行器的稳健性；薛侠峰等^[8]研究水下自航行器外形及水动力性能优化，实现了外形建模、仿真、设计的自动化，最终优化后的 AUV 具备低阻力、高承载能力。

尽管目前研究进展明显，但仍缺乏能兼顾运动机动性和稳定性的水下机器人。因此，本文研究了

一种变体水下机器人，可通过机构变化实现外形的伸展拉长和压缩，在高速场景下具有低阻流线型外形，在低速场景下具有高稳定性外形，以期获得在高速、低速两种不同场景下的最优仿生外形。

2 模型建立方法

2.1 研究对象选取

通过研究现有典型鱼类的游动速度，选取六种鱼类作为研究对象，分别是旗鱼(a)、噬人鲨(b)、鲤鱼(c)、小丑鱼(d)、鲫鱼(e)、箱鲀(f)。图1是六种典型鱼类的外形图片。

表1是典型鱼类的具体参数信息。

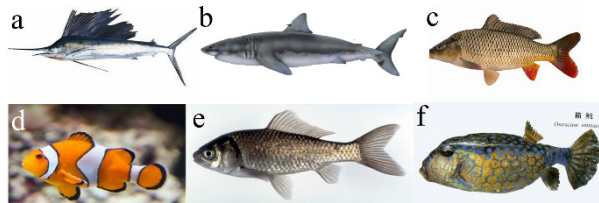


图1 典型鱼类图片

表1 典型鱼类参数

Gb	鱼体长度 (cm)	速度 (m/s)	科种
旗鱼	200~300	30~50	旗鱼科
噬人鲨	500	12	鼠鲨科
鲤鱼	9~30	1~1.5	鲤科
小丑鱼	5~6	0.5~1	雀鲷科
鲫鱼	5~6	0.4	鲤科
箱鲀	15~20	0.05~0.5	箱鲀科

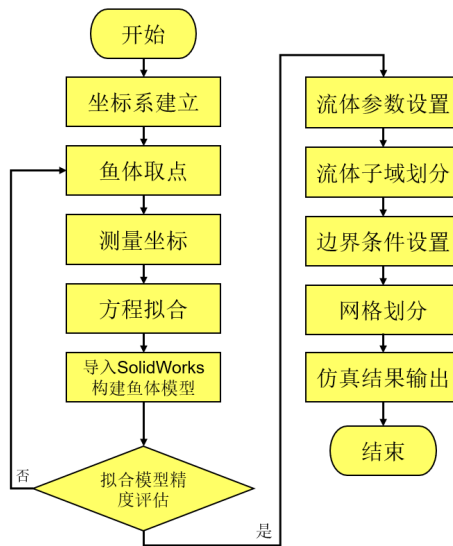


图2 鱼体模型阻力分析流程

2.2 鱼类线形拟合

图 2 为本文的鱼体模型阻力分析流程。

结合典型鱼类图像，首先进行轮廓描点分析，并拟合出多组数据点，而后采用样条曲线拟合方法对数据点进行拟合，从而获取鱼类外形曲线，之后导入到 SolidWorks 中进行鱼体建模。图 3 为鲫鱼外形数据获取步骤，图 4 为多项式拟合鲫鱼外形曲线方程。

如图 4 所示，鲫鱼外形拟合相关系数为 0.9758，与其实际外形基本相似。经过与二次、四次多项式拟合方程的对比，本文最终选择以三次多项式为拟合方程，对其他几类典型鱼类进行外形拟合，其结果如表 2 所示。

从表 2 中可以看出六类典型鱼类的拟合相关系数均大于 0.9，根据相关经验可近似认定为拟合曲线方程与鱼体外形基本相似。



图 3 鲫鱼外形数据获取

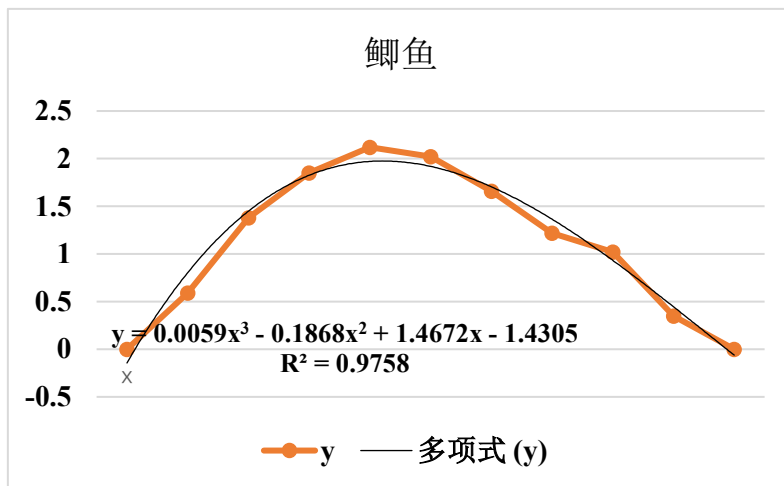


图 4 鲫鱼外形拟合曲线方程

表 2 典型鱼类外形拟合曲线方程及拟合相关系数

鱼类名称	外形拟合曲线方程	拟合相关系数 (R ²)
旗鱼	$y=0.0017x^3-0.0844x^2+0.7476x-0.7977$	0.9290
噬人鲨	$y=-0.001x^3-0.0526x^2+0.7577x-0.8347$	0.9483
鲤鱼	$y=0.001x^3-0.1055x^2+1.2171x-1.2675$	0.9421
小丑鱼	$y=-0.0019x^3-0.0679x^2+1.1702x-1.0601$	0.9879
鲫鱼	$y=0.0059x^3-0.1868x^2+1.4672x-1.4305$	0.9758
箱鲀	$y=-0.0011x^3-0.0752x^2+1.1559x-1.3091$	0.9775

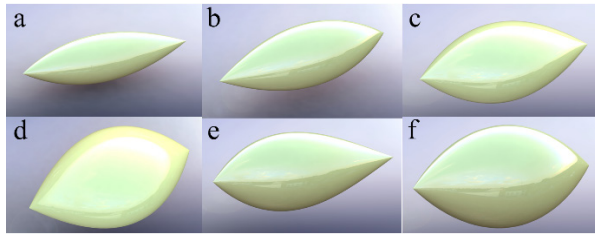


图 5 典型鱼类三维模型

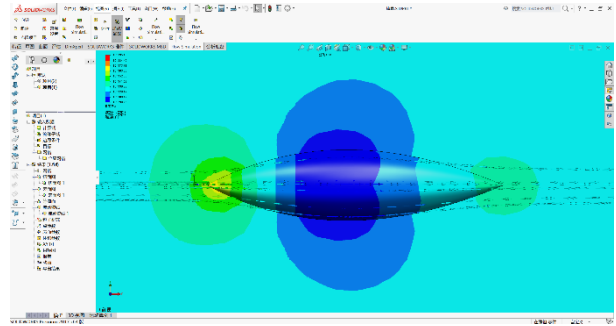


图 6 SolidWorks Flow Simulation 模块

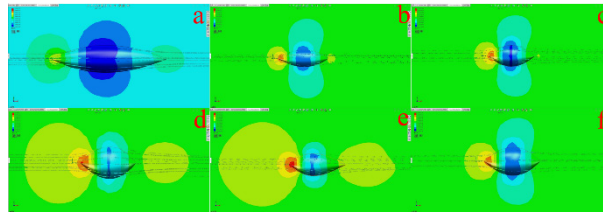


图 7 六种鱼体模型在水流速度为 1 m/s 时的压强分析和流场分布图

2.3 鱼体模型构建

将典型鱼类拟合曲线方程导入至 SolidWorks 进行三维模型建模，建模结果如图 5 所示，a~f 分别对应旗鱼、噬人鲨、鲤鱼、小丑鱼、鲫鱼、箱鲀。

3 模型阻力分析

3.1 Flow Simulation 模块描述

Flow Simulation 是 SolidWorks 软件的一个基本功能模块，本文基于该模块对鱼类三维模型的运动阻力和流场分布进行分析。

3.2 阻力分析流程

在仿真参数设置方面，分别设定六种鱼体模型在 0.5 m/s、1 m/s、1.5 m/s、2 m/s 的水流速度，分析运动阻力和流场分布，其结果如图 7 所示。通过图 7 可以看出，旗鱼模型头部压强分布较为均匀，压强值相较其他 5 类最小。噬人鲨模型、鲤鱼模型、箱鲀模型主体部分压强变化缓慢。小丑鱼模型、鲫鱼模型主体部分压强变化较快，且存在较高压强值。

4 结果和讨论

通过参数设置和流体分析，得到了六种典型鱼体模型在不同水流速度 (0.5 m/s、1 m/s、1.5 m/s、2 m/s) 下最大压强和最小压强变化曲线，如图 8 所示。六中典型鱼体模型最大压强与最小压强差如图 9 所示，在不同水流速度下的最大压强值和最小压强值如表 3 所示。

由图 8 和表 3 可以看出，当水流速度增大，各鱼体所受阻力也增大，呈现出一定的正相关性。当水流速度为 0.5 m/s 时，各鱼体模型的最大和最小压强并无显著差别，然而当水流速度逐渐增大为 2 m/s 时，各鱼体模型所受压强出现明显差异，且各鱼体模型压强的相对关系基本不变。

当水流速度为 0.5 m/s 时，旗鱼所受最大压强最大，为 101395.12 Pa，小丑鱼所受最小压强最小，为 101247.14 Pa；当水流速度为 1 m/s 时，旗鱼所受最大压强最大，为 101599.30 Pa，小丑鱼所受最小压强最小，为 101010.17 Pa；当水流速度为 1.5 m/s 时，旗鱼所受最大压强最大，为 101938.31 Pa，噬人鲨所受最小压强最小，为 100954.82 Pa；当水流速度为 2 m/s 时，旗鱼所受最大压强最大，为 102408.06 Pa，噬人鲨所受最小压强最小，为 100667.08 Pa。

从图 9 中可以看出，在四种速度下噬人鲨的压强差值均为最小，旗鱼的压强差值次之，鱼体模型上压强分布较为均匀，因此选择噬人鲨作为高速条件下的参考模型；在四种速度下小丑鱼的压强差值均为最大，鱼体模型上压强分布较为极端，加工制造后容易导致模型产生变形。在四种速度下鲫鱼和箱鲀的压强差值处于平均区间，但综合经验来看，箱鲀鱼游动速度较为稳定，因此选定其为低速条件下的参考模型。

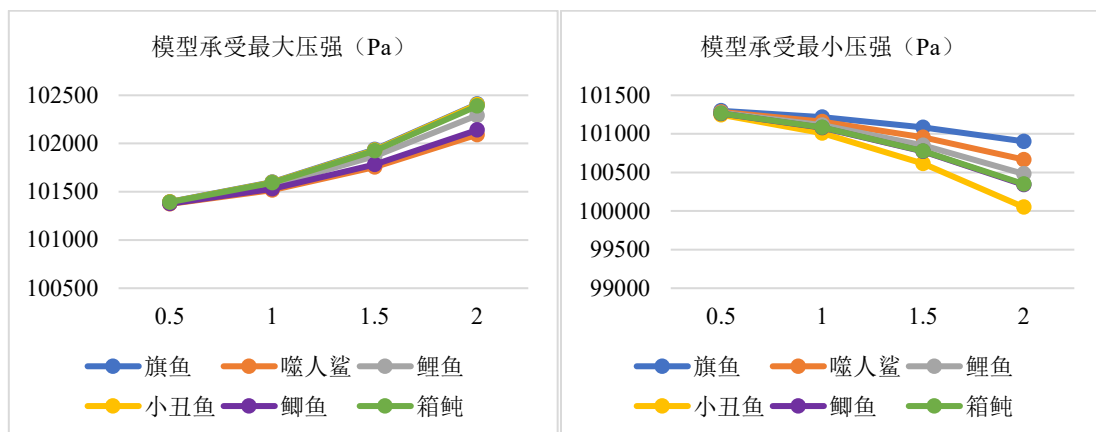


图 8 六种典型鱼体模型在不同水流速度（0.5 m/s、1 m/s、1.5 m/s、2 m/s）下最大压强和最小压强变化曲线

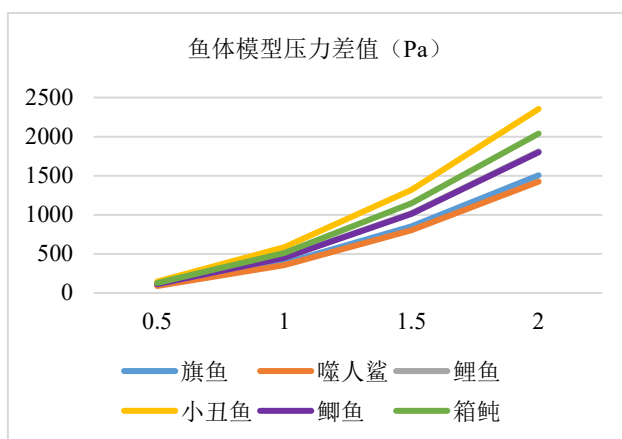


图 9 六种典型鱼体模型在不同水流速度（0.5 m/s、1 m/s、1.5 m/s、2 m/s）下最大压强和最小压强差

表 3 六种典型鱼体模型在不同水流速度下最大压强和最小压强值

类型	旗鱼		噬人鲨		鲤鱼		小丑鱼		鲫鱼		箱鲀	
	最大压强	最小压强	最大压强	最小压强	最大压强	最小压强	最大压强	最小压强	最大压强	最小压强	最大压强	最小压强
速度 (m/s)	101395.13	101298.76	101373.80	101284.28	101385.98	101272.70	101392.96	101247.14	101376.37	101264.15	101392.37	101264.74
1	101599.30	101218.79	101517.91	101160.17	101567.68	101114.84	101595.71	101010.17	101529.33	101080.29	101592.20	101082.18
1.5	101938.31	101084.96	101757.03	100954.82	101869.49	100851.02	101932.34	100613.95	101783.71	100772.43	101924.20	100776.78
2	102408.06	100903.16	102091.17	100667.08	102291.50	100480.99	102403.87	100050.17	102139.48	100339.62	102388.25	100349.42

注：最大压强和最小压强单位为 Pa。

5 结论

总体而言，项目组基于鱼类仿生学和流体分析方法对 6 种典型鱼体进行了建模分析，最终得出噬人鲨是高速条件下最优模型，箱鲀是低速条件下最优模型，为变体水下机器人在不同速度场景下的变体外形提供参考。

在未来工作中，我们将进行变体水下机器人控制策略的开发。同时，本文工作也为无人飞行器、无

人车的变体设计提供了方法参考。

参考文献

[1] 耿文豹, 魏永康, 洪树峰, 黄佳进. 仿生机器鱼外形设计及流场阻力数值分析[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(03): 318-325.

[2] 孔亮. 仿生金枪鱼外形特征的水动力学分析与实验研究[D]. 2023, 哈尔滨工程大学.

- [3] 马镜, 兰飞翔, 游航. 高速水下无人航行器仿生外形设计与阻力数值预报研究[J]. 应用科技, 2024. 51(01): 158-165.
- [4] 王妹婷, 齐永锋, 汤方平, 戴志光, 陆柳延, 吕学智. 水下机器人外形优化设计[J]. 机床与液压, 2014. 42(05): 76-79.
- [5] 芦廷彬. 一种水下航行体阻力外形优化设计[J]. 水雷战与舰船防护, 2012. 20(03): 89-91.
- [6] 龚喜, 袁晓宇, 吴小兵. 运用 FLUENT 优化设计某水下航行体外形[J]. 水雷战与舰船防护, 2012. 20(04): 55-57.
- [7] 苗怡然, 高良田, 刘峰, 彭夺锦. 基于参数化的水下航行器外形稳健性优化[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018. 39(04): 622-628.
- [8] 薛侠峰, 严天宏. 水下自航行器外形及水动力性能优化[J]. 计算机测量与控制, 2016. 24(03): 228-230.

版权声明: ©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

