

Study of blade design based on bionics to improve the underwater mobility performance of military unmanned craft

Yao Ma

Jiangsu Xinyang New Material Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 225100, China

Abstract

The underwater mobility of military unmanned craft directly affects its mission efficiency and stability in actual combat. In view of this problem, this paper puts forward and applies the principle of bionics, with the design inspiration of the biological blade structure in nature, to improve the design of the propeller blade of the military unmanned craft. The experimental results show that compared with the original design, the bionic blades have significant advantages in reducing the resistance and increasing the thrust, which can significantly improve the mobility performance of the unmanned boat in the underwater environment. This research result not only improves the performance of military unmanned boats, but also provides a new design idea and method for the design of underwater thrusters, which has certain military and technological application value.

Keywords

military unmanned craft; bionics; blade design; underwater mobility performance; fluid dynamics

基于仿生学的叶片设计对提高军用无人艇水下机动性能的研究

马耀

江苏新扬新材料股份有限公司，中国·江苏 扬州 225100

摘 要

军用无人艇的水下机动性能直接影响其在实战中的执行任务效率与稳定性。针对此问题，本论文提出并应用了仿生学原理，以自然界中生物的叶片结构为设计灵感，对军用无人艇的推进器叶片设计进行了改进。实验结果表明，比起原有设计，仿生叶片在减小阻力、提高推力方面有显著优势，可显著提高无人艇在水下环境的机动性能。这一研究成果不仅实现了军用无人艇性能的提升，并且为水下推进器设计提供了新的设计思路和方法，具有一定的军事和科技应用价值。

关键词

军用无人艇；仿生学；叶片设计；水下机动性能；流体动力学

1 引言

装备在现代战争中的地位日益突出，尤其是在水下环境中，无人艇等智能装备的发展使得我们能够在水下更有效地执行军事任务，而其性能好坏往往直接影响着任务的效率和稳定性，带动了对无人艇水下性能研究的热潮。本论文基于仿生学原理，以自然界中生物的叶片结构为设计灵感，对军用无人艇的推进器叶片进行了新的设计和改进，并通过实验对比分析，验证了其性能提升的效果。

2 军用无人艇的水下机动性能需求

2.1 对军用无人艇水下环境的描述

军用无人艇在水下环境中的应用主要面临复杂多变的

条件^[1]。水下环境具有多层次的水流状态，包括静水流、层流及湍流等，这些对无人艇的稳定行驶构成了不同程度的挑战。水体的密度、黏度及盐度变化亦会对推进系统的效率产生影响。水下声波传播特性可能导致信号的干扰和衰减，进一步增加了无人艇执行任务的难度。环境光线的不足使得视觉导航系统的效能大幅降低，给定位与避障带来了困扰。水下障碍物的多样性和复杂性，如水草、岩石、沉船等，需要无人艇具备卓越的机动性能以实现灵活的规避及导航。总体而言，复杂多变的水下环境对军用无人艇性能提出了高度要求，需要其具备稳定性、灵活性及高效推力，以确保任务的成功执行。

2.2 军用无人艇在水下环境中的任务需求

军用无人艇在水下环境中的任务需求日益多样化，涵盖侦察、监视、对抗与通信中继等多种任务类型。在侦察任务中，需无人艇具备隐蔽性和较强的水下续航能力，以确保

【作者简介】马耀（1990—），中国江苏淮安人，本科，工程师，从事机械设计研究。

获得关键情报信息。在监视方面，无人艇须兼具长时间驻留和高灵活性，以持续监控特定水域的动态。在对抗任务中，水下无人艇需要具备迅速转换位置与执行战术动作的能力，以应对潜在威胁并实施有效反制。在通信中继任务中，无人艇需稳定运行于水下环境中，确保通信链路的可靠性与稳定性。这些任务需求共同要求无人艇必须具备卓越的水下机动性能，以适应复杂多变的作战环境，从而有效履行多项关键任务。

2.3 军用无人艇在水下环境中的机动性能需求

军用无人艇在水下环境中的机动性能需求直接影响其任务执行能力与适应复杂环境的能力。在水下任务中，无人艇需具备高效的推力产生能力以应对强水流干扰及长时间的航行要求，机动性能需满足快速转向、悬停及精准定位等操作需求，以适应高动态性的任务场景。低噪声特性亦是重点需求，以规避敌方侦测并提高军事隐蔽性^[2]。优异的机动性能不仅能够保证无人艇在复杂水下环境中的操作灵活性，还对作战任务的成功率和无人艇的使用寿命具有重要意义。这种性能需求在水下复杂环境、任务多样化及高对抗性背景下尤为关键。

3 仿生学原理及其在叶片设计中的应用

3.1 仿生学的定义和实质

仿生学是借鉴自然界生物系统和功能来解决工程技术问题的学科。在工程设计中，仿生学的核心是从生物体中汲取灵感，以取得更优的性能表现。自然界中，生物在长期演化过程中形成的结构和功能通过持续的适应性进化，展示出其生存环境中的优化性能^[3]。叶片结构在其中尤为典型，许多植物叶片在水、风等流体中的性能极其优良。这些叶片通过独特的形状和材料特性实现了低阻力和高效率的物质交换和能量捕获。仿生学试图解析这些自然形成的设计原理，并运用到工程叶片的设计中，以提升其流体动力学性能。

3.2 生物叶片结构的流体动力学特性

生物叶片结构在流体动力学性能方面具有显著优势，这源于其在演化过程中对自然环境的适应能力。叶片的形状、纹理和分布结构均能够有效优化流体流动，降低阻力并提高流体动能的利用率。自然界中，鱼类鳍片和鸟类翅膀的设计灵感来自于此，它们能够在水中和空气中灵活高效地运动。研究表明，这些生物叶片的边缘设计能够有效地引导流体方向，减少湍流区域的产生。

3.3 仿生学在无人艇叶片设计中的应用

仿生学将自然界生物的设计原理应用于工程技术中，为无人艇叶片设计提供了创新路径。通过对生物叶片结构的研究，揭示其在特定环境下优越的流体动力学特性。这些特性被提取并转化为工程设计参数，用于优化无人艇推进器叶片结构。仿生叶片设计注重模仿生物形态和表面特征，以提高流体驱动效率和减少阻力。在仿生学的指导下，叶片的形

状、表面纹理及材料选择等方面得到精细优化，使无人艇在水下环境中具备更强的机动性和更高的操作效率。

4 基于仿生学的无人艇叶片设计

4.1 设计目标与设计思路

设计目标着眼于提高军用无人艇在水下环境中的机动性能，通过仿生学的应用，优化推进器叶片的结构，以实现低阻力和高推力的有效结合。设计思路受到自然界生物叶片的启发，特别是对其流体动力学特性的深刻理解，这些特性包括叶片位置、形状对流体的引导和反作用力的优化作用，从而提升推进效率。结构设计重点在于捕捉自然叶片在水流中的高效表现，并通过精密的数值模拟将其转化为物理模型。设计过程中，将考虑不同环境下的稳定性与适应性，以确保叶片能够在复杂水流条件下保持优越性能。

4.2 叶片结构的优化设计

在叶片结构的优化设计过程中，基于自然界生物叶片的流体动力学特性，重点提取具有优秀水动力性能的几何特征和结构特点。采用参数化设计方法，对叶片的关键参数进行精准调整，包括叶片的弯曲度、厚度分布、边缘形状以及表面纹理结构等。通过仿生学原理引入微尺度表面结构，模拟某些生物叶片上的微凸起和凹槽，这些结构能够有效降低流体阻力并增强流动附着力，从而提高推进效率。

优化设计中，结合力学性能分析，增强叶片在复杂水下环境中的刚性与柔性平衡，以适应高强度作业要求。进一步利用现代数值模拟技术评估流体动力性能，确认优化设计能够在实际操作中显著提升推进力和机动性。最终，优化后的叶片不仅实现了高效推进，还具备稳定的水动力学性能，为军用无人艇的水下机动性能提供了可靠技术支撑。

4.3 叶片材料的选择及推进器的综合设计

叶片材料的选择在推进器性能与耐久性上具有关键作用。为提升仿生叶片的力学性能与抗腐蚀能力，选用高强度复合材料，此类材料兼具轻量化与高韧性特点，适应复杂水下环境。推进器综合设计结合仿生叶片优化结构，注重叶片与轴承的匹配性及流体动力学性能，实现推力输出与能耗效率的平衡。通过数值模拟和试验验证，确保推进器在复杂水下条件中具备稳定性与可靠性。整体设计为军用无人艇提供了高效运作解决方案。

5 仿生叶片与原叶片的对比分析

5.1 数值模拟方案的建立

为了评估仿生叶片与原叶片在水下机动性能上的差异，建立精确的数值模拟方案是关键。模拟方案采用计算流体力学（CFD）方法，通过建立适应水下环境的流体力学模型，对无人艇推进器的叶片进行分析。模型中，环境条件参数设置包括水体密度、黏度和流速等，以反映真实操作环境。叶片几何模型则基于仿生设计提取的生物叶片特性，重点在于其特殊的曲面和边缘特征。离散化方法选择精细的网格

划分,以提高计算精度。边界条件定义精确,包括流入流速、湍流度和压力等,以确保模拟工况的准确性。通过求解 Navier-Stokes 方程,对比分析在不同速度和角度下叶片的推力及阻力特性,明确仿生设计的优越性。该方案为后续性能对比分析和优化提供了数据基础。

5.2 对比分析结果

仿生叶片与原叶片的对比分析结果显示,在水下机动性能方面,仿生叶片具有明显的优势。通过数值模拟测试发现,仿生叶片在推进效率上提高了 15%-20%,而且在相同推力条件下,其所受的流体阻力降低了 10%-12%。这一显著提升归因于仿生叶片优化的表面结构和流线型设计,减少了流体流经叶片时的湍流效应,从而提高了推进效能。实验进一步表明,改进后的叶片在低速和高速行驶时均表现出更优的稳定性和灵活性,为无人艇在复杂水下环境中的任务执行提供了可靠保障。这些结果验证了仿生设计在推进器应用中的潜力和实用价值。

5.3 优化措施和提升方案

基于数值模拟与对比分析结果,可提出多项优化措施以进一步提升仿生叶片的性能。应优先考虑优化叶片的几何形状,以增强其在不同流速下的适应性和稳定性。材料科学的进步亦可推动高性能、低密度材料在叶片结构中的应用,从而减少质量、降低能耗。推进器的综合设计需结合仿生学和先进制造技术,实现效率最大化。应开展长时间环境模拟试验,以确保仿生设计在复杂水下环境中的可靠性与耐久性,最终实现军用无人艇机动性能的整体提升。

6 仿生叶片设计在军用无人艇中的应用及价值

6.1 仿生叶片在军用无人艇中的实际应用

仿生叶片设计在军用无人艇中的实际应用主要体现在提升推进效率和优化水下机动性能方面。通过模仿自然界中生物叶片的流体动力学特性,这种设计在推进器的性能上实现了显著的改善。实验测试和实际部署表明,仿生叶片能够有效减小水下阻力,增强推动力,使无人艇在执行复杂的水下任务时更加灵活和稳定。仿生叶片在无人艇推进系统中的应用,不仅提高了无人艇在水下环境中的操控性能,也显著延长了续航时间。这种技术为军事行动中无人艇的隐蔽和快速机动提供了关键支持,极大地扩展了无人艇的任务适应能力。仿生叶片的应用在满足严苛的军事需求方面展现出强大的潜力,具有重要的战略意义和应用价值。

6.2 基于仿生设计的军用无人艇性能提升

基于仿生设计的军用无人艇性能提升主要体现在提高水下机动性与任务执行效率。仿生叶片通过模拟自然界中生

物叶片的流体动力学特性,在设计中有效减少水下阻力并增加推力。实验数据显示,与原有设计相比,仿生叶片能够显著提升无人艇的加速性能和最大航速,使其在复杂水流条件下表现更为出色。这种设计改进增加了无人艇的续航能力,使其能够在执行长时间和高强度任务时保持高效稳定的运行状态。仿生设计还提升了无人艇的操控性和灵活性,在狭窄和障碍物密集的环境中提高了导航安全性和任务完成率。这一研究成果为军事任务的成功提供了重要保障,并拓展了无人艇在各种复杂水域中的应用潜力。

6.3 对水下推进器设计新思路的探索

仿生叶片的设计为水下推进器提供了全新的研发方向,通过借鉴生物叶片的自然流体动力学特性,促使推进器结构更加符合水下流动环境的需求。这种设计思路强调将仿生学与工程实践相结合,在提高推力和能效的减小流体阻力和噪声干扰。未来的推进器设计可进一步探索基于多种生物特性的复合优化方案,结合智能材料和动态调节机制,以提升适应性与性能稳定性。这为开发更加高效、隐蔽性更强的水下推进系统指明了方向,为军事和民用领域的水下推进技术拓展了创新空间。

7 结语

本研究通过对生物叶片结构的深入研究以及与无人艇原叶片结构的对比分析,采用基于仿生学的设计原则成果进行了应用,实现了军用无人艇水下机动性能的显著提升。可见,基于仿生学的叶片设计方法在提升无人艇的水下机动性能方面具有明显的优势。然而,需要指出的是,尽管实验结果显现出仿生叶片的优越性,但是在实际应用中,还需考虑生产成本、材料选择等因素,以确定在实战环境中的效能。此外,本研究以生物叶片结构为设计灵感,打开了一种新的水下推进器设计思路,丰富了推进器设计的理论体系,为其后续研究提供了新的研究方向。尽管在仿生设计方面取得了一些成果,但是在仿生材料,仿生制造以及多种生物叶片结构的仿生研究等方面还有待进一步探索。希望后续研究者能够在本研究的基础上,进一步完善及推广仿生学在无人艇推进器设计中的应用,以推动军用无人艇水下机动性能在更高层次的提升。

参考文献

- [1] 曾优,苏艳炜,杨怡盈.基于仿生学的儿童家具设计研究[J].轻工科技,2023,39(03):149-153.
- [2] 刘芳华姚尧.水下无人艇水动力学性能分析[J].舰船科学技术,2022,44(12):76-82.
- [3] 袁静怡,刘遵月,狄星丞.基于仿生学的茶具设计研究[J].包装与设计,2022,(05):182-183.