

# 跨介质航行器水下推进技术研究进展与展望

## Research Progress and Prospect of Underwater Propulsion Technologies for Hybrid Aerial-Aquatic Vehicle

李靖宇<sup>a,b</sup>, 程俊涵<sup>a,b</sup>, 贺伟<sup>a,b\*</sup>

LI Jingyu<sup>a,b</sup>, CHENG Junhan<sup>a,b</sup>, HE Wei<sup>a,b\*</sup>

武汉理工大学, a. 高性能船舶技术教育部重点实验室; b. 船海与能源动力工程学院, 武汉 430063

Wuhan University of Technology, a. Key Laboratory of High Performance Ship Technology, Ministry of Education; b. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan 430063, China

摘要

Abstract

【DOI】10.13788/j.cnki.cbgc.2025.10.Z2

[目的] 跨介质航行器(HAAV)兼具空中飞行器的高度机动性和水下潜航器的长续航性与强隐蔽性,且在多维度海洋信息勘探、生态环境监测、海上应急救援等领域具有广阔的应用前景,吸引了航空航天、船舶海洋、智能装备等行业的广泛关注。为促进跨介质航行器水下推进技术的进一步发展,[方法]在构型分类的基础上,从推进器型式的角度将跨介质航行器分为传统水下推进技术、空水复用推进技术和特种仿生推进技术。对各种水下推进技术的工作原理、性能分析、设计应用现状及技术瓶颈进行梳理,并对该技术未来发展方向进行展望。[结果]结果表明:高性能HAAV水下推进技术的机理深化、概念创新和方案论证研究是该领域未来的重要发展趋势。[结论]研究成果可为跨介质航行器水下推进技术提供一定参考。

[Purpose] hybrid air and underwater vehicle (HAAV) combine the high maneuverability of aerial vehicles with the long endurance and strong stealth capabilities of underwater submersibles. They hold broad application prospects in multidimensional marine information exploration, ecological environment monitoring, and maritime emergency rescue, attracting widespread attention from industries such as aerospace, marine engineering, and intelligent equipment. To further advance the development of underwater propulsion technology for HAAV, [Method] based on the configuration classification, HAAV is divided into traditional underwater propulsion technology, air-water reuse propulsion technology and special biomimetic propulsion technology from the perspective of propeller type. The working principle, performance analysis, design application status and technical bottleneck of various underwater propulsion technologies are sorted out, and the development direction of the technology in the future is predicted. [Result] The results show that the mechanism deepening, concept innovation and scheme demonstration of high performance HAAV underwater propulsion technology are important development trends in the future. [Conclusion] The research results can provide some references for the underwater propulsion technology of HAAV.

跨介质航行器 (HAAV) ; 水下推进; 水动力性能; 跨介质运动  
hybrid aerial-aquatic vehicle (HAAV); underwater propulsion; hydrodynamic performance; tran-media locomotion

## 0 引言

随着新材料技术和储能电池技术的快速迭代, 自 21 世纪以来, 跨介质航行器 (Hybrid Aerial-Aquatic Vehicle, HAAV) 逐渐成为国内外学界和业界的关注热点<sup>[1]</sup>。此类航行器是一种具备多介质航行能力且可实现自主跨域的特种航行器, 通常兼具飞行器的高快速性及水下潜器的长续航性与强隐蔽性, 在多维度海洋信息勘探、生态环境监测<sup>[2]</sup>、海上应急救援<sup>[3-4]</sup>等领域具有广阔的应用前景。为充分发挥 HAAV 在海洋开发领域的效能, 需深入剖析其核心技术体系<sup>[5]</sup>, 该体系主要包括整机气/水动一体化布局<sup>[6]</sup>、跨介质策略与控制方法<sup>[7-8]</sup>、跨介质信息传输技术<sup>[4,9]</sup>及跨域推进方案研发<sup>[10-11]</sup>等。其中, HAAV 的跨域推进方式是影响航行器机动性和续航能力的重要因素, 直接决定了航行器作业的可行性。

HAAV 的水下任务涵盖监测、勘察等多种复杂场景, 这些应用对其水下推进系统提出了多重要求, 其中存在若干近乎矛盾的综合性能需求,

主要体现为高推力与轻量化、高机动与低噪声、跨域适应与结构简化之间的固有矛盾。这些问题既揭示了 HAAV 推进系统的设计难点, 也凸显了对该领域开展系统性研究的迫切需求。

近年来, 随着 HAAV 方案论证和工程应用的不断深入, 多种水下推进技术已在 HAAV 领域得到实际应用, 但针对此方面的系统性论述仍较为缺乏。此外, 当前 HAAV 研究工作多集中于各类构型的可行性验证阶段, 针对其水下推进技术的机理研究相对较少; 船用推进器领域已较为成熟的诸多关键技术问题 (如推进器流固耦合效应<sup>[12]</sup>、推进器空化问题<sup>[13]</sup>、特殊操纵工况下的推进器性能问题<sup>[14]</sup>等), 在 HAAV 应用背景下仍未受到广泛关注。基于此, 本文聚焦 HAAV 的水下推进技术, 简要概述 HAAV 的典型构型, 对其水下推进技术进行分类和原理分析, 并综述相关研究现状, 对该领域的未来研究方向进行展望与总结。

## 1 HAAV 典型构型

HAAV 的设计灵感源于空中飞行器和水下潜航器的结合。早在 1934 年, 苏联便提出并完成了飞行潜艇的概念设计, 期望该航行器能完成水空跨介质的两栖作业任务, 但受限于当时的技术能力和战略部署重点偏移, 该类航行器未能得到有效发展<sup>[1]</sup>。2008 年, 美国国防部高级研究计划

局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 提出了研制具备跨介质自主航行能力的潜水飞机计划<sup>[15]</sup>。此后近二十年, HAAV 进入快速发展时期, 许多创新性的设计理念被逐步付诸实践。根据样机构型的不同, HAAV 可分为多旋翼类、固定翼类、混合翼类和仿生类<sup>[16-17]</sup>。

### 1.1 多旋翼类

多旋翼类 HAAV 以旋翼为主要推进单元, 可实现水空跨介质运动。该类航行器通常配备 4 个

以上旋翼, 在气动模态下, 通过调节各个旋翼的转速实现飞行操纵和水面低速垂直起降; 在水动

模式下，通过水下推进器配合机身姿态调整完成机动。国内外多旋翼类 HAAV 的运动模式见表 1。综合已有研究可知，多旋翼类 HAAV 能够通过垂直起降的方式实现平稳的跨介质过程，且在空气和水下环境中均表现出良好的操纵性与稳定

性，但其在巡航工况下能耗较高，严重制约了续航能力。因此，多旋翼类 HAAV 更适用于对机动性与操控精度要求高，而对续航时间要求相对较低的任务场景。

表 1 多旋翼类 HAAV 运动模式  
Tab. 1 Motion Modes of Multi-Rotor Type HAAV

序号	构型示意	年份	单位	水下推进方式	空中推进方式	跨介质方式	参考文献
1		2014	南里奥格兰德联邦大学	水下导管桨	空气旋翼	垂直起降	[18]
2		2016	佐治亚理工学院	—	空气旋翼	垂直起降	[2]
3		2017	新泽西州大学	空水复用旋翼	空水复用旋翼	垂直起降	[19]
4		2018	奥克兰大学	空水复用旋翼	空水复用旋翼	垂直起降	[20]
5		2020	圣卡塔琳娜联邦大学	水下螺旋桨	空气旋翼	垂直起降	[21]

表 1 多旋翼类 HAAV 运动模式 (续)  
 Tab. 1 Motion Modes of Multi-Rotor Type HAAV (Continued)

序号	构型示意	年份	单位	水下推进方式	空中推进方式	跨介质方式	参考文献
6		2021	中国海洋大学	水下导管桨	空气旋翼	垂直起降	[22]
7		2022	上海交通大学	水下螺旋桨	空气旋翼	垂直起降	[23]
8		2024	上海交通大学	水下导管桨	空气旋翼	垂直起降	[24]
9		2023	长安大学	—	空气旋翼	垂直起降	[25]
10		2025	上海交通大学	水下导管桨	空气旋翼	垂直起降	[26]
11		2025	中山大学	空水复用旋翼	空水复用旋翼	垂直起降	[27]

## 1.2 固定翼类

固定翼类 HAAV 以固定翼和不可倾转旋翼组合为主要特征。在气动模态下，该类航行器与传统固定翼飞机相似，通过固定翼产生升力及水平布置的推进器分产生拉力，同时依靠方向舵与翼面副翼实现偏航与滚转控制；在水动模态下，该类航行器主要依靠推进器克服机身阻力，并通过浮力调节装置和固定翼升降舵的配合，维持机身垂向平衡和运动稳性。国内外固定翼类 HAAV 的运动模式见表 2。综合已有研究可知，固定翼类 HAAV 在空中整体气动效率较高，可支持高航速与远距离巡航，具备出色的气动性能；但该构

型的水下快速性和操纵性普遍较差：一方面，水动模态下流体黏性增强，大面积固定翼导致整机阻力性能恶化，进而加重推进器负荷，造成效率损失，最终表现为水下航速和续航能力受限；另一方面，固定翼在水动模态下的升力效应对航行器的水下运动姿态控制造成干扰，导致其低速操纵性能较差。尽管已有研究针对上述问题开展了折叠机翼、主动浮力调节等方案的尝试，并取得一定进展，但目前该类航行器更适用于作业范围广、须快速部署，且对水下机动性要求较低的任务场景。

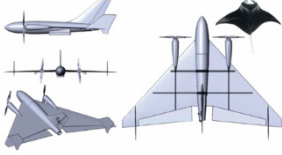
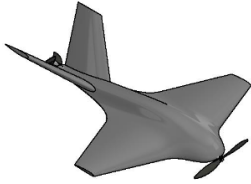
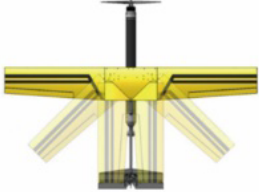
表 2 国内外固定翼类 HAAV 运动模式

Tab. 2 Motion Patterns of Fixed-Wing HAAV at Home and Abroad

序号	构型示意	年份	单位	水下推进方式	空中推进方式	跨介质方式	参考文献
1		2012	密西根大学	—	空气旋翼及固定翼	滑行起降	[28]
2		2014	北京航空航天大学	喷水推进	空气旋翼及固定翼	滑行起降	[29]
3		2018	北卡罗来纳大学	水下螺旋桨	空气旋翼及固定翼	垂直出水 / 溅落入水	[30]
4		2018	约翰斯·霍普金斯大学	空水复用旋翼	空水复用旋翼及固定翼	滑行起降	[31]
5		2018	北卡罗来纳大学	空水复用旋翼	空水复用旋翼及固定翼	大仰角出水 / 俯冲入水	[32]

表 2 国内外固定翼类 HAAV 运动模式 (续)

Tab. 2 Motion Patterns of Fixed-Wing HAAV at Home and Abroad (Continued)

序号	构型示意	年份	单位	水下推进方式	空中推进方式	跨介质方式	参考文献
6		2022	上海交通大学	空水复用旋翼	空水复用旋翼及固定翼	滑行起降	[33]
7		2022	塞萨洛尼亚基亚里士多德大学	水下螺旋桨	空气旋翼及固定翼	垂直出水 / 俯冲入水	[34]
8		2024	哈尔滨工程大学	水下螺旋桨	空气旋翼及固定翼	大仰角出水 / 俯冲入水	[35]

### 1.3 混合翼类

混合翼类 HAAV 融合了多旋翼类和固定翼类 HAAV 的优势, 通常以固定翼组合可倾转旋翼为核心推进部件, 具备水面垂直起降、低速操纵及高效巡航的能力。在气动模态下, 该类航行器具备与倾转旋翼机类似的悬停、过渡和巡航等飞行模式, 能够通过可倾转旋翼实现不同模式间的切换; 在水动模态下, 该类航行器则通过矢量推进

或额外的水下推进模块完成水下航行。混合翼类 HAAV 的运动模式见表 3。总体而言, 混合翼类 HAAV 具有较好的气、水动综合性能和较强的复杂任务适应性, 并展现出向航行器大型化发展的潜力, 适用于多种复杂作业场景。但该构型在推进系统与总体布局设计中需统筹多模态需求, 这给航行器的系统复杂性和可靠性带来了严峻挑战。

表 3 混合翼类 HAAV 运动模式

Tab. 3 Hybrid Wing HAAV Motion Patterns

序号	构型示意	年份	单位	水下推进方式	空中推进方式	跨介质方式	参考文献
1		2019	上海交通大学	水下滑翔翼	空气旋翼及固定翼	垂直起降	[36]

表 3 混合翼类 HAAV 运动模式 (续)  
Tab. 3 Hybrid Wing HAAV Motion Patterns (Continued)

序号	构型示意	年份	单位	水下推进方式	空中推进方式	跨介质方式	参考文献
2		2021	上海交通大学	水下滑翔翼	空气旋翼及固定翼	垂直起降	[37]
3		2022	南京航空航天大学	水下螺旋桨	空气旋翼及固定翼	滑行起降	[38]
4		2022	上海交通大学	水下滑翔翼	空气旋翼及固定翼	垂直起降	[39]
5		2024	内华达大学	空水复用旋翼	空气旋翼及固定翼	垂直起降	[40]
6		2025	中山大学	空水复用旋翼 / 水下滑翔翼	空水复用旋翼及固定翼	垂直起降	[41]
7		2025	上海交通大学	空水复用旋翼	空水复用旋翼及固定翼	垂直起降	[42]
8		2025	国防科技大学	空水复用旋翼	空水复用旋翼及固定翼	垂直起降	[43]

## 1.4 仿生类

仿生类 HAAV 以自然界动物的外部形态与运动模式为设计灵感, 通过扑翼等方式实现跨介质运动, 其总体性能与机体结构和运动策略的设计高度相关。基于鸟类、鱼类和昆虫等设计的仿

生类 HAAV 的运动模式见表 4。该类航行器通常具有推进灵活、隐蔽性好的优点, 但其结构设计复杂, 结构可靠性、运动稳定性与控制精度仍为技术难点, 目前多处于方案论证阶段。

表 4 仿生类 HAAV 运动模式  
Tab. 4 Bionic HAAV Motion Modes

序号	构型示意	年份	单位	水下推进方式	空中推进方式	跨介质方式	参考文献
1		2015	麻省理工学院	扑翼推进 (仿海龟)	扑翼推进 (仿海雀)	大仰角出水/ 俯冲入水	[44]
2		2015	美国海军研究实验室	扑翼推进 (仿鱼类)	滑翔	大仰角出水/ 俯冲入水	[45]
3		2017	哈佛大学	扑翼推进 (仿昆虫)	扑翼推进 (仿昆虫)	垂直起降	[46]
4		2019	北京航空航天大学	间歇喷水推进 (仿乌贼)	滑翔	大仰角出水/ 俯冲入水	[47]
5		2022	北京大学	喷水推进	滑翔 (仿飞鱼)	大仰角出水/ 俯冲入水	[48]

表 4 仿生类 HAAV 运动模式 (续)  
Tab. 4 Bionic HAAV Motion Modes (Continued)

序号	构型示意	年份	单位	水下推进方式	空中推进方式	跨介质方式	参考文献
6		2024	武汉理工大学	扑翼推进 (仿蝠鲼)	空气旋翼	垂直起降	[49]
7		2024	南方科技大学	扑翼推进 (仿蝠鲼)	空气旋翼及固定翼	滑行起降	[50]

## 2

## HAAV 的水下推进技术

纵观 HAAV 在不同介质中的推进策略，空中推进方案的选择呈现较强的趋同性，已形成以旋翼为主、结构相对统一的气动解决方案；而水下推进方案因任务需求复杂，表现出更强的多样性。水下推进系统不仅须克服流体密度高、黏性大带来的负荷加重问题，还须在效率、噪声指

标、结构可靠性、模态兼容性之间实现多维权衡，其具体方案的选择受总体布局、作业要求、性能指标等多种因素的影响。目前，HAAV 水下推进技术主要可归纳为 3 类：传统水下推进技术、空水复用推进技术和其他特种推进技术。

### 2.1 传统水下推进技术

#### 2.1.1 常规水下螺旋桨

常规水下螺旋桨（即船用螺旋桨）由中心桨毂与周向等间隔布置的若干桨叶组成。与空气旋翼的作用原理一致，螺旋桨工作时桨叶向后推水，桨叶自身受到水流反作用力，从而产生轴向力和周向扭矩。通常采用进速系数  $J$  表征螺旋桨的工作状态，其表达式为

$$J = \frac{V}{nD} \quad (1)$$

式中： $V$  为来流速度； $n$  为螺旋桨转速； $D$  为螺旋桨直径。

对于定距桨，螺旋桨在不同进速系数下表现出不同的推力、扭矩和效率特征，其在开放水域内的典型特性曲线见图 1。图 1 中： $K_T$  为推力系数； $K_Q$  为转矩系数； $\eta_0$  为敞水效率。尽管船用

螺旋桨与空气旋翼作用原理相同，但由于工作介质、运行工况和功能需求存在差异，二者的几何特征有所不同，见图 2。空气密度较低，且飞行器需在保证起飞能力的前提下尽可能控制设备质量，因此空气旋翼通常采用短弦长、大直径的设计，尺寸往往与航行器尺寸量级相当。相反，船用螺旋桨多采用高盘面比、小直径设计，尺寸可控制在航行器尺寸的 1/20 以内。此设计一方面是由于水的密度接近空气密度的 800 倍，螺旋桨可在较紧凑结构布置下发出较大推力；另一方面是由于船用螺旋桨表面压力过低时易诱发空泡现象，该现象会显著影响螺旋桨的振动、噪声性能及结构可靠性，而高盘面比设计能使桨盘面负荷均匀化，进而降低空泡产生的风险。

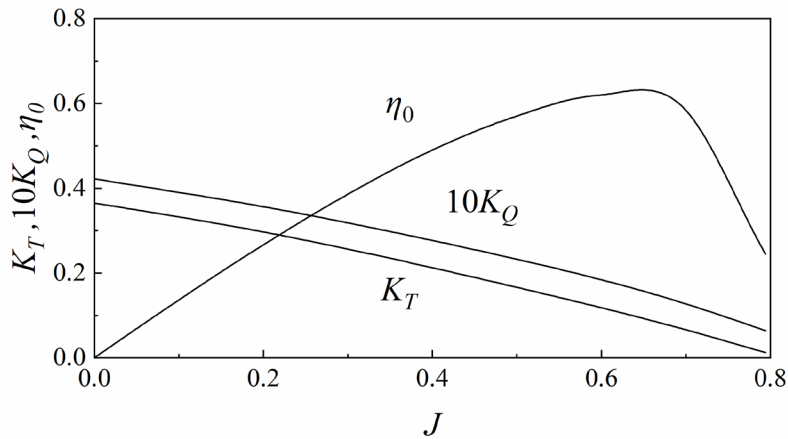


图1 典型螺旋桨特性曲线

Fig. 1 Typical Propeller Characteristic Curve

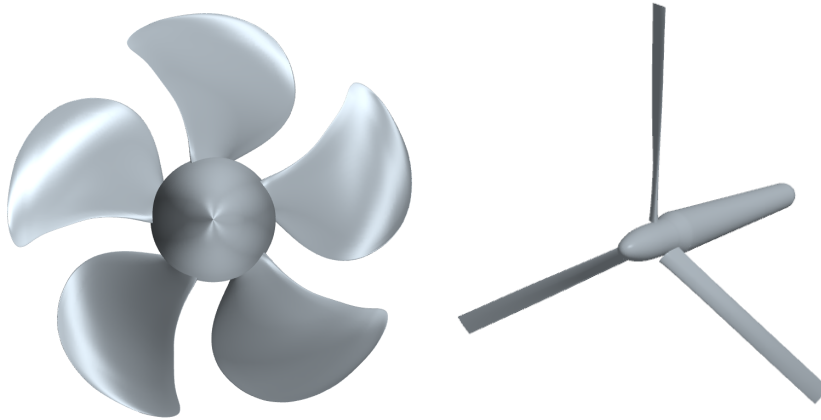


图2 船用螺旋桨和空气旋翼的几何特征对比

Fig. 2 Comparison of Geometric Features between Marine Propellers and Air Rotors

几何特征赋予常规水下螺旋桨水下推进效率高、载荷分布均匀等性能优势，因此被广泛应用于各类 HAAV 样机的水下推进设计中。DREWS 等<sup>[18]</sup>提出一种以导管桨（常规螺旋桨外增设导管）作为水下主推的共轴四旋翼 HAAV，其动力学模型分析结果表明，空气旋翼与水下导管桨的共轴布局有利于航行器实现快速、稳定的跨介质过程；但研究同时指出，该构型在整机质量与能耗方面仍存在明显优化空间。HORN 等<sup>[21]</sup>同样认可水下螺旋桨的效率优势，但进一步指出 DREWS 等<sup>[18]</sup>所提构型在水下须通过横滚或俯仰运动改变机身姿态以产生水平推力，这在很大程度上影响了整机的能耗表现和操纵响应速度。针对该问题，HORN 等<sup>[21]</sup>提出将其中一组对角分布

的水下推进器由垂直轴改为水平轴，在简化航行器水下操纵逻辑的同时，避免了因机身倾斜产生额外阻力。BI 等<sup>[23]</sup>基于类似思路设计了多旋翼 HAAV “Nezha-mini”，该航行器在水中通过 2 个水平轴螺旋桨和 1 个垂直轴螺旋桨实现水下巡航与全向操纵。研究指出，为不同介质独立配置推进系统虽然有助于提升控制精度与推进效率，但也导致推进系统质量显著增加。此外，在固定翼和混合翼 HAAV 的水下推进设计中，STEWART 等<sup>[30]</sup>、PAPADOPOULOS 等<sup>[34]</sup>和昂海松等<sup>[38]</sup>也采用了水下螺旋桨推进方案，该推进方式在此类构型的 HAAV 上同样表现出显著的水下推进效率优势。

总体而言，常规水下螺旋桨因性能稳定、技

术成熟，在 HAAV 水下推进方案中占重要地位，但其实际应用仍面临诸多挑战。首先是水下推进器的布局问题，以及额外推进设备带来的质量负担，这些问题已在 DREWS 等<sup>[18]</sup>、HORN 等<sup>[21]</sup>及 BI 等<sup>[23]</sup>的研究中被多次探讨；其次，在当前多学科交叉的 HAAV 总体设计中，部分研究对推进器性能的建模仍较为简化，未充分考虑螺旋桨推力和扭矩系数随进速系数的动态变化特性，

仅将其作为定值处理<sup>[18,21,23]</sup>，这可能导致仿真模型与物理实际产生偏离；最后，针对复杂 HAAV 作业工况下的螺旋桨动力响应研究仍显不足，BI 等<sup>[23]</sup>指出“Nezha-mini”的垂直轴螺旋桨性能易受水平来流影响，昂海松等<sup>[38]</sup>指出近水面航行时，螺旋桨在半浸没工况下会出现明显的性能恶化，而此类影响目前均未得到量化，这在一定程度上限制了航行器的总体性能优化。

### 2.1.2 喷水推进

喷水推进器是一类由管道内叶轮和导叶共同作用、在喷口产生射流并以快速性作为第一设计目标的推进器<sup>[51]</sup>，其早在 19 世纪便被应用于船舶推进<sup>[52]</sup>。喷水推进器的典型构型<sup>[53]</sup>见图 3，通常包括进水流道（非必需构件）、泵体和喷嘴。其工作原理如下：通过泵加速进水流道内的水流，再由喷嘴向航行器运动相反的方向喷射水流，航行器受到水流反作用力，从而实现推进。由于喷水推进技术具备抗空化性能优异、水下辐射噪声低、功率密度大等优势，近年来部分 HAAV 在水下推进和跨介质方案设计中也采用了该技术。



图 3 喷水推进器的典型构型

Fig. 3 Typical Configuration of the Water Jet Thruster

SHI 等<sup>[54]</sup>在“Qianxiang I”中将喷水推进作为其水下及水面航行的动力方案（见图 4），并在开放水域开展了自主推进试验。测试结果表明，喷水推进可使“Qianxiang I”在水面状态下以最高 14 kn 的速度巡航，且巡航过程中速度波动较小（均方根误差低于 0.43 kn）。研究同时指出，喷水推进器在水下工作时具有显著的低噪声特性，能较好地满足 HAAV 对推进效率和功率稳定性的综合需求。YAO 等<sup>[29]</sup>则在某固定翼 HAAV 中提出了“喷水推进-压载系统”一体化设计方案（见图 5），通过喷水水道与压载舱的共形设计，实现了跨介质作业的功能集成。其工作流程如下：航行器着水后，通过进水阀向压载

舱注水以实现下潜；下潜完成后关闭顶部气阀，启动离心泵在流道内形成射流，从而实现水下推进；任务结束后上浮至近水面，开启气阀并排空压载水，以完成出水。试验验证了该平台具备基本的水空跨介质能力，但也暴露出模式转换时间长、水下航速低等实际问题。

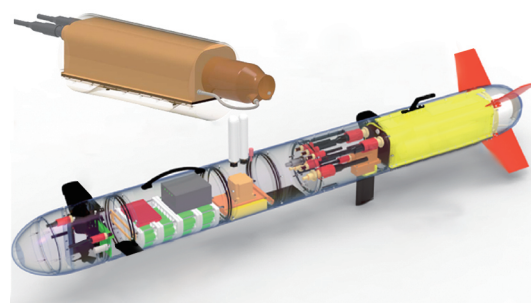


图 4 “Qianxiang I”及其喷水推进器示意图  
Fig. 4 Schematic Diagram of "Qianxiang I" and Its Water Jet Thruster

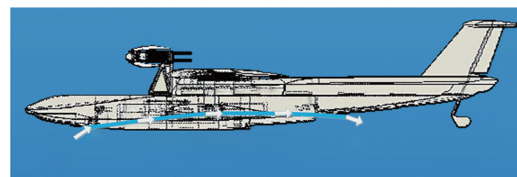


图 5 “喷水推进-压载系统”集成设计示意图  
Fig. 5 Schematic Diagram of the Integrated Design of the "Water Jet Propulsion-Ballast System"

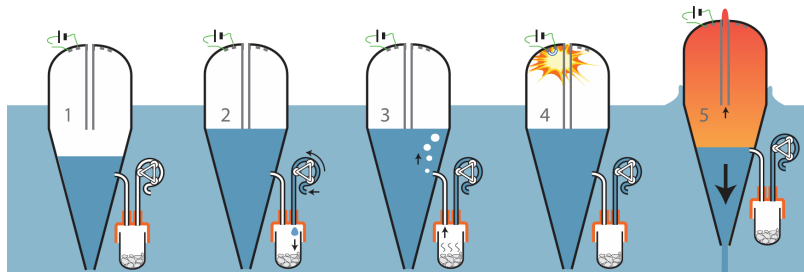
除常规喷水推进，部分研究尝试采用间歇喷水推进方案，以实现 HAAV 的快速跨介质运动。

该方式的基本原理与常规喷水推进一致，特殊性在于通过压缩气体或可燃燃料瞬时释放能量，以脉冲形式高速喷射水流，实现短时强推力输出。ZUFFEREY 等<sup>[55]</sup>在一种小型固定翼 HAAV 中采用了间歇喷水推进系统，实现快速出水，见图 6(a)。该系统将燃料反应室与储水室进行连通设计，通过电石与水反应生成乙炔气体，气体经点火后使燃烧室内的温度与压力急剧升高，从而推动水流高速喷出，实现了燃烧反应与喷水推进的有效衔接，见图 6(b)。试验结果表明，该推进方

式可使该型 HAAV 在出水阶段获得最大  $110 \text{ m/s}^2$  的加速度，最大飞行距离和高度分别为  $26.0 \text{ m}$  和  $8.3 \text{ m}$ 。然而，该系统也存在储水时间过长的问题，吸水结构仍需进一步优化以提升实用性。HOU 等<sup>[47]</sup>和 SIDDALL 等<sup>[56]</sup>则采用了气动驱动的间歇喷水推进方案，利用气缸内预存压缩气体推动水流喷射（见图 7），并通过阀门调节喷射量以控制推力大小。试验测试证明，该间歇喷水推进系统能够满足 HAAV 水空跨介质运动时对快速性与稳定性的要求。



(a) 基于间歇喷水推进的快速跨介质过程



(b) 间歇喷水推进流程

图 6 间歇喷水推进

Fig. 6 Intermittent Water Jet Propulsion

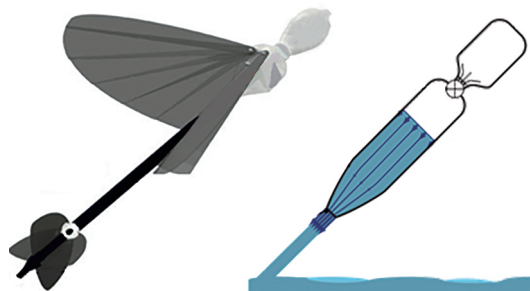


图 7 气动驱动的间歇喷水推进方案

Fig. 7 Pneumatic-Driven Intermittent Water Jet Propulsion Scheme

综上所述，喷水推进器凭借其高功率密度的特点，在 HAAV 推进系统中展现出良好的应用潜力。其中，常规喷水推进适用于中大型高速

HAAV 的水下主推进设计，但因其质量和体积较大，与 HAAV 的轻量化设计理念冲突。尽管 YAO 等<sup>[29]</sup>的集成思路是该技术在 HAAV 中的有益探

索,但若要进一步提升方案的实用性,仍须在流道构型优化、泵体设计与选型等方面开展深入研究。间歇喷水推进则更适用于小型 HAAV 的跨介

质辅助推进,该推进方式能以紧凑结构实现高比冲推进,但仍存在重复发射间隔长、无法满足复杂水下作业需求的问题<sup>[50]</sup>。

## 2.2 空水复用推进技术

空水复用旋翼是将空气旋翼直接用于 HAAV 水下推进任务的一种推进方式。空气旋翼发展历史悠久,相关气动性能研究也较为成熟<sup>[57]</sup>,因此诸多学者在 HAAV 方案论证过程中探讨了将其直接应用于水下环境的可行性。PRANTO 等<sup>[58]</sup>和 ALZUBI 等<sup>[59]</sup>分别采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法与模型试验方法,分析了空气旋翼在不同介质中的系柱推进特性。结果表明,空气旋翼能够在水下环境中以较低的转速实现推力输出目标,具备水下推进可行性。同时,研究指出在同等推力输出条件下,空气旋翼在水下的轴功率显著低于空中工况。

尽管上述研究证实了空气旋翼在水下具备推进可行性,但部分学者也指出,基于空水复用旋翼的推进系统在水下环境中会出现一定程度的效率恶化。TAN 等<sup>[60]</sup>基于 QPROF 工具分析了旋翼在不同介质中的推进性能,研究结果表明,旋翼在不同介质中的敞水特性曲线变化趋势相似,但水下工况的最高效率点较空中工况下降约 8%。YAO 等<sup>[61]</sup>总结了空气旋翼和船用螺旋桨的差异,并指出几何特征的不同可能是空气旋翼水下推进性能恶化的原因。STEWART 等<sup>[30]</sup>指出,空水复用旋翼无法同时保证 2 种介质工况下的高推进效率,并提出未来可考虑采用柔性桨或加装齿轮箱的方式,优化旋翼推进系统的水下推进效率。XIA 等<sup>[43]</sup>的样机实测结果同样证明,旋翼在水下工况时会出现性能恶化。

除了旋翼本身几何特征导致的水动力性能变化,旋翼-电机的状态匹配也是 HAAV 旋翼水下推进系统效率恶化的重要原因。WEISLER 等<sup>[32]</sup>通过样机试验指出, HAAV 可通过一套电机-旋翼系统完成空中高转速推进和水中低转速推进,但旋翼在水中的工作范围相对受限。TAN 等<sup>[60]</sup>指出, HAAV 在水下工况中航速低,导致旋翼转速慢、扭矩高,电机和旋翼的工作状态严重失配,最终造成系统总效率显著恶化。基于此, TAN 等<sup>[62]</sup>以匹配旋翼与电机的水下工作最优效

率点为出发点,提出了一种旋翼-电机的选型匹配策略,用于优化空水复用旋翼系统的水下推进效率。类似地, PANIGRAHI 等<sup>[63]</sup>针对该问题提出一种旋翼-电机匹配方法,用于推力输出要求、空化转速限制等约束条件下的 HAAV 电机选型。

当前空气旋翼普遍采用的复合材料结构,在为旋翼带来轻量化优势的同时,能够显著提高其抗冲击和抗疲劳性能。但相较于船用螺旋桨的传统金属桨叶,复合材料空气旋翼厚度小、刚度通常较低,在高密度流体环境中更易发生变形,进而影响其水动力性能。SEMENOV 等<sup>[64]</sup>对 4 种不同材料与剖面形式的旋翼进行了空、水介质下的性能测试,结果表明:水下工况的流固耦合效应显著强于空中工况,且各型旋翼的水下推进性能均受到不同程度影响,扭转刚度较低的旋翼 I 和旋翼 III 在水下出现剧烈结构振荡;刚度较高的旋翼 II 和旋翼 IV 虽振荡情况有所缓解,但仍因桨叶扭转变形导致有效攻角增大,进而引起水动力负荷上升。研究指出,旋翼在空中高速旋转时,高离心刚度可有效抑制流固耦合效应;而在水下运行时,转速大幅降低,离心刚度减弱,旋翼主要依靠自身结构刚度抵抗高密度流体载荷,因此流固耦合效应更为显著。水下扭转变形会显著改变旋翼推进特性,甚至可能因攻角失控引发非定常载荷与结构振动,因此扭转刚度是旋翼结构设计的关键指标。LENZE 等<sup>[65]</sup>指出,旋翼在水下易发生扭转变形,可基于桨叶变形特征,通过螺距修正方法实现对水下性能的有效预测。

为提升空水复用旋翼在空气和水等 2 种介质中的推进性能,部分学者开展了针对旋翼几何的优化设计研究。单润柳<sup>[66]</sup>基于面元法开发了螺旋桨动力性能快速预报程序,结合线性加权法和 Pareto 前沿多目标优化算法,以效率最优为目标,在推力需求与空泡约束条件下优化了空水复用旋翼的螺距与弦长分布。赵怡<sup>[67]</sup>根据 HAAV 在不同介质中的工作状态和工作时长占比评估了空水复用推进系统的工作耗能,并以降低耗能为优化目标,通过方案优选实现了旋翼盘面比与螺距分

布的优化。张宇川<sup>[68]</sup>采用粒子群算法,在直径限制与空中拉力约束条件下,以空气效率最高为目标优化水空两用螺旋桨的弦长与螺距分布。孟龙等<sup>[69]</sup>基于动量叶素理论开发了空水两用对转旋翼的快速设计程序,以最优推进效率为目标优化旋翼的弦长与螺距分布。

空水复用旋翼是未来 HAAV 推进系统轻量化与集成化的重要技术方向,其水下推进可行性已得到广泛验证,现有研究也围绕水动力效率优化、机-桨状态匹配及桨叶流固耦合效应等开展了初步探讨。然而,要实现该推进方式在多域环境下的高效、稳定推进,仍有若干问题亟待深入

探索。首先,空化问题是制约水下推进器性能的重要因素之一,尽管文献[70-71]在优化设计过程中将空化程度作为约束条件,但目前针对空水复用旋翼的空化初生机理、空泡形态演化及性能空化定量等方面的研究仍较为缺乏;其次,在桨叶结构设计方面,流固耦合效应下的桨叶声振特性、复合材料铺层策略等关键问题尚未得到系统分析;最后,随着高性能计算技术的发展,基于高精度数值模拟的旋翼水下流场解析有待进一步开展,这将有助于深入理解其水下效率损失机理,并为后续优化设计提供支撑。

## 2.3 特种水下推进技术

### 2.3.1 仿生扑翼推进

仿生扑翼推进是一种模仿鸟类、昆虫或鱼类运动姿态的推进方式<sup>[17,72-73]</sup>,见图8。该推进方式通过扑翼的多自由度周期运动组合产生驱动力,

并且能通过调整扑翼运动参数实现驱动力大小和方向的调节,具有推进效率高、机动性强和噪声低等优势<sup>[74-75]</sup>。

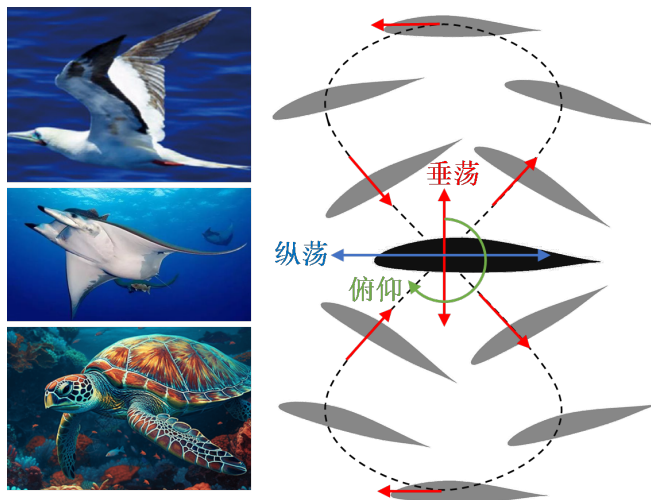


图8 仿生扑翼运动示意

Fig. 8 Schematic Diagram of Bionic Flapping-Wing Movement

LOCG等<sup>[76]</sup>基于海鸟的扑翼形态和运动机制设计了一种具备伸缩翼功能的双自由度扑翼推进系统,期望通过形态转换和运动参数调整实现推进系统在不同介质中的高效推进。该研究通过水下测试分析了收缩翼和伸展翼推进性能随进速、斯特劳哈尔数 $St$ 等参数的变化规律。结果表明,在相同 $St$ 下,收缩翼的推进效率和推力系数与伸展翼水平相当,经运动参数优化可替代伸展翼实

现高效水下推进。为提高扑翼推进技术在不同介质中的适用性,IZRAELEVITZ等<sup>[44]</sup>根据航行器在水、空介质下的推进需求,分别设计了海龟式和海雀式等三自由度扑翼运动模式,见图9。相较于原扑翼运动模式,水下模态的海龟式运动使扑翼推进器在轴向平均推力提高的前提下,缓解了垂向升力的振荡现象;空中模态的海雀式运动使扑翼推进器具备更好的垂向升力供给能力。研

究结果表明，通过对扑翼运动参数的优化设计，扑翼推进有望在空气和水两种介质中同时实现高效推进，表现出极强的设计灵活性和发展潜力。HE 等<sup>[50]</sup>将仿生扑翼推进应用于固定翼 HAAV，该航行器内翼段采用固定翼结构，外翼段则通过伺服电机驱动覆盖有硅胶蒙皮的碳纤维鳍条，构成扑翼装置。该研究通过扑翼运动轨迹优化提升了推进效率，并通过样机试验证明了该 HAAV

具备良好的跨介质能力和水下推进性能。CHEN 等<sup>[46]</sup>指出，扑翼推进方式对微型 HAAV 的推进方案设计具有重要意义，该方式不受航行器尺寸和质量的限制，能够在不改变机身形态的前提下，仅通过调整扑翼驱动系统的频率即可适应多介质环境，有效规避了固定翼推进的水下阻力问题和旋翼推进的构型转换问题。

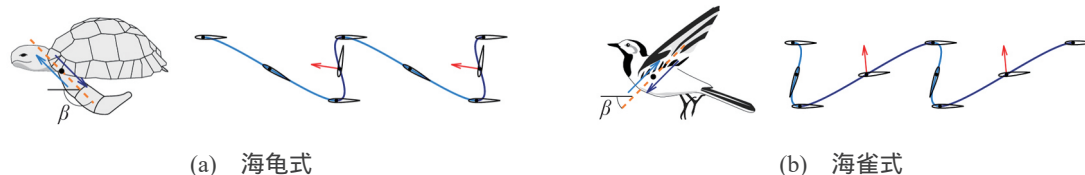


图9 海龟式和海雀式扑翼运动模式示意

Fig. 9 Schematic Diagram of Application Patterns of the Turtle and Puffin Flapping Wings

仿生扑翼推进通过模拟生物运动模式，有效规避了传统旋翼面临的介质适配难题，在多介质环境兼容性方面表现突出，同时兼具良好的隐蔽性与生态友好性<sup>[46]</sup>。然而，该技术受限于复杂的多自由度运动机制，且性能对结构刚度、材料特

性及驱动方式高度敏感，导致实际推进效率常低于理论预期。未来研究应聚焦于扑翼机构优化与新型智能材料应用，以提升其能量转换效率与运动可靠性。

### 2.3.2 水下滑翔翼推进

滑翔翼推进是一种结合固定水翼和浮力调节装置的无桨式水下推进方法。航行器通过内部的浮力调节机构改变重浮心和重浮力的相对关系，进而配合水下滑翔翼实现锯齿形轨迹的周期性滑翔运动，见图 10。当浮力小于重力时，航行器下沉，滑翔翼以特定水动力攻角产生水平推力，驱动航行器前进；同理，当浮力大于重力时，航行器在上浮的同时向前滑行<sup>[78]</sup>。

与传统推进方式不同，滑翔翼推进通过调整机身净浮力和姿态角获取推进力，从而使航行器以低能耗实现长时间航行，展现出高效率 and 强续航的优势。WANG 等<sup>[41]</sup>设计了一种混合动力式 HAAV，试验数据表明，该航行器在水下滑翔推进模式下可连续运行 504 min。LYU 等<sup>[39]</sup>设计了一种基于水下滑翔翼推进的混合翼式 HAAV，水下滑翔时间可达 24 h，续航能力远超旋翼推进式 HAAV。

浮力调节装置作为实现滑翔翼推进的核心部件，其性能直接决定了航行器的续航能力与作业深度。上海交通大学近年来研发了多型基于水下滑翔翼推进的 HAAV<sup>[36-37,39]</sup>，并在浮力调节装置设计方面开展了一系列突破性工作。LU 等<sup>[36]</sup>将尾座式四旋翼无人机与水下滑翔机融合研发了一种具有水下滑翔机模式的 HAAV，命名为“Nezha”，该航行器通过轻量化充气浮力（Lightweight Pneumatic Buoyancy, LPB）系统改变自身浮力和姿态以实现水下滑翔运动。然而，受环境静压影响，该 LPB 系统在深水条件下浮力

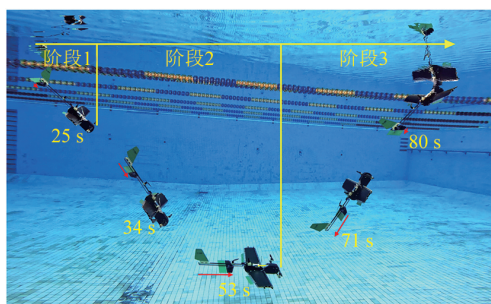


图 10 水下滑翔运动轨迹示意

Fig. 10 Schematic Diagram of Trajectory of Underwater Gliding Motion

控制精度下降,仅支持浅水作业。针对此问题,LU等<sup>[37]</sup>开发的“Nezha III”采用高压浮力充气系统,有效提升了航行器的水下作业深度;研究同时指出,充气式浮力调整装置不可避免地存在额外排气问题,且随作业深度增加,该问题愈发显著,进而导致水下滑翔续航时间缩短。考虑到压缩空气损耗、LPB系统结构复杂及质量较大的问题,LYU等<sup>[39]</sup>设计了一种活塞驱动的浮力装置用于滑翔姿态调节,该装置使滑翔循环次数

不再受压缩空气容量限制,在保证功能可靠性的基础上显著延长了HAAV的水下滑翔时间。

水下滑翔翼推进依靠浮力变化驱动,能耗极低,适合长期、大范围的海洋观测任务,但该推进方式也存在前进速度慢和复杂环境下抗干扰能力不足等缺陷。未来对滑翔翼推进的优化应着眼于浮力与滑翔姿态控制的创新方法,提高其水下快速性和稳定性。

## 3

## 结论

本文综述了HAAV水下推进技术的关键内容,在当前主流HAAV推进构型分类的基础上,重点分析了其水下推进技术的基本工作原理、应用现状、技术瓶颈及亟待开展的研究方向等问题。总体而言,高性能HAAV水下推进技术的机理深化、概念创新和方案论证研究是该领域未来的重要发展趋势,具体包括以下4个方面。

1) 开展跨介质过程中由物性剧变引发的航行器及推进器瞬态动力学问题、考虑水弹性的推进器流体动力失稳现象等关键机理研究,为HAAV水下推进系统迭代设计与可靠性评估提供理论支撑。

2) 构建面向HAAV推进系统的试验验证体系及标准化试验平台,为推进系统的方案论证与

性能优化提供可靠的数据支撑。

3) 发展适应水空双介质、多工况的空水复用推进器综合设计方法,统筹实现HAAV多介质推进在效率、稳定性、轻量化及响应速度等方面的多维度需求。

4) 探索与新原理、新能源深度融合的新概念推进系统,突破传统水下推进方式在能效、噪声与跨域适应性方面的技术瓶颈。

高效、稳定的HAAV水下推进技术是提升我国海洋装备智能化水平、拓展未来跨域作战能力的重要支撑,大力发展HAAV水下推进技术对促进高性能无人航行器核心技术及相关产业高质量发展具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 何肇雄,郑震山,马东立,等.国外跨介质飞行器发展历程及启示[J].舰船科学技术,2016,38(9):152-157.  
HE Z X, ZHENG Z S, MA D L, et al. Development of Foreign Trans-Media Aircraft and Its Enlightenment to China[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(9): 152-157.
- [2] BERSHADSKY D, HAVILAND S, VALDEZ P E, et al. Design Considerations of Submersible Unmanned Flying Vehicle for Communications and Underwater Sampling[C]// OCEANS. 2016.
- [3] LU D, XIONG C K, LYU B Z, et al. Multi-Mode Hybrid Aerial Underwater Vehicle with Extended Endurance[C]// OCEANS. 2018.
- [4] 陈建峰,张军.海/空跨介质无人平台发展现状与应用构想[J].中国造船,2024,65(2):265-277.  
CHEN J F, ZHANG J. Development of Unmanned Underwater-Aerial Cross-Domain Vehicles and Application Conceptions[J]. Shipbuilding of China, 2024, 65(2): 265-277.
- [5] 王聪,许海雨,马贵辉,等.跨介质航行器动力学前沿技术研究进展[J].水下无人系统学报,2024,32(3):384-395.  
WANG C, XU H Y, MA G H, et al. Research Progress of Cutting-Edge Technologies of Trans-Medium Vehicle Dynamics[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2024, 32(3): 384-395.

- [6] 于向财, 王志雄, 谭巍, 等. 固定翼式跨介质飞行器 (HAAV) 变体技术综述 [J]. 数字海洋与水下攻防, 2025, 8(1): 47-53.  
YU X C, WANG Z X, TAN W, et al. A Review of Morphing Wing Technologies for Fixed Wing Hybrid Aquatic-Aerial Vehicles (HAAVs)[J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2025, 8(1): 47-53.
- [7] 刘坤, 刘永强, 林好, 等. 水空飞行器跨介质策略研究 [J]. 水下无人系统学报, 2024, 32(3): 396-410.  
LIU K, LIU Y Q, LIN H, et al. Research of Trans-Medium Strategy for Unmanned Aerial-Undersea Vehicles[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2024, 32(3): 396-410.
- [8] 高福奎, 周后村, 余雷, 等. 仿生跨介质飞行器入水策略及降载方法综述 [J/OL]. [2025-09-26]. [http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=HYGC20240722003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ](http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HYGC20240722003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ).  
GAO F K, ZHOU H C, YU L, et al. Summary of Water Entry Strategy and Load Reduction Method of Bionic Transmedia Aircraft[J/OL]. [2025-09-26]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=HYGC20240722003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [9] 张旭, 李万鹏. 跨介质出水飞行器水下信息获取技术发展及展望 [J]. 水下无人系统学报, 2024, 32(4): 659-667.  
ZHANG X, LI W P. Progress and Prospect of Underwater Information Acquisition Technique for Trans-Medium Vehicles During Water Exit[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2024, 32(4): 659-667.
- [10] 刘梦莹, 熊栎, 黄河峡, 等. 跨介质动力系统方案发展现状及关键技术分析 [J]. 海军航空大学学报, 2025, 40(3): 370-376.  
LIU M Y, XIONG L, HUANG H X, et al. Program Development Status and Key Technology Analysis of Transmedia Power System[J]. Journal of Naval Aviation University, 2025, 40(3): 370-376.
- [11] 罗凯, 秦侃, 黄闯, 等. 空水跨介质鱼雷动力推进系统构型比较分析 [J]. 水下无人系统学报, 2024, 32(3): 535-541.  
LUO K, QIN K, HUANG C, et al. Comparative Analysis of Power Propulsion System Configurations of Air-Water Trans-Medium Torpedoes[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2024, 32(3): 535-541.
- [12] 贺伟. 船用复合材料螺旋桨水弹性分析与设计方法研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.  
HE W. Research on Hydroelastic Analysis and Design of Composite Marine Propellers[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- [13] LI Z R. Assessment of Cavitation Erosion with a Multiphase Reynolds-Averaged Navier-Stokes Method[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [14] 贺伟, 郭家伟, 胡小菲, 等. 升力分配系数对螺旋桨正倒车水动力性能影响的数值分析 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(1): 42-50.  
HE W, GUO J W, HU X F, et al. Influence of Lift Distribution Coefficient on Hydrodynamic Performance of Propeller in Forward and Astern Mode of Operation by Numerical Analysis[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(1): 42-50.
- [15] VAN B P. Unmanned Aircraft Systems Unmanned Aircraft Systems the Current Situation[R]. 2008.
- [16] ZENG Z, LYU C X, BI Y B, et al. Review of Hybrid Aerial Underwater Vehicle: Cross-Domain Mobility and Transitions Control[J]. Ocean Engineering, 2022, 248: 110840.
- [17] SUN Y, LIU X F, CAO K, et al. Design and Theoretical Research on Aerial-Aquatic Vehicles: a Review[J]. Journal of Bionic Engineering, 2023, 20(6): 2512-2541.
- [18] DREWS P L J, NETO A A, CAMPOS M F M. Hybrid Unmanned Aerial Underwater Vehicle: Modeling and Simulation[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2014.
- [19] MAIA M M, MERCADO D A, DIEZ F J. Design and Implementation of Multirotor Aerial-Underwater Vehicles with Experimental Results[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2017.
- [20] ALZU'BI H, MANSOUR I, RAWASHDEH O. Loon Copter: Implementation of a Hybrid Unmanned Aquatic-Aerial Quadcopter with Active Buoyancy Control[J]. Journal of Field Robotics, 2018, 35(5): 764-778.

- [21] HORN A C, PINHEIRO P M, GRANDO R B, et al. A Novel Concept for Hybrid Unmanned Aerial Underwater Vehicles Focused on Aquatic Performance[C]// Brazilian Symposium on Robotics. 2020.
- [22] GAO Y, ZHANG H, YANG H, et al. Trans-Domain Amphibious Unmanned Platform Based on Coaxial Counter-Propellers: Design and Experimental Validation[J]. IEEE Access, 2021, 9: 149433-149446.
- [23] BI Y B, JIN Y F, LYU C X, et al. Nezha-Mini: Design and Locomotion of a Miniature Low-Cost Hybrid Aerial Underwater Vehicle[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(3): 6669-6676.
- [24] JIN Y F, BI Y B, LYU C X, et al. Nezha-IV: A Hybrid Aerial Underwater Vehicle in Real Ocean Environments[J]. Journal of Field Robotics, 2024, 41(2): 420-442.
- [25] 王琛, 惠倩倩, 张帆. 水空跨域多模态共轴无人机设计 [J]. 航空学报, 2023, 44(21): 529047.  
WANG C, HUI Q Q, ZHANG F. Design of Water-Air Cross-Domain Multi-Mode Coaxial UAV[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(21): 529047.
- [26] SONG X W, BAI Y L, BI Y B, et al. Nezha-H: An HAUV for Aerial and Underwater Observation and Sampling[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2025, 10(7): 6776-6783.
- [27] WU S H, WU S F, SHAO M S, et al. Fault-Tolerant Control Strategies for Tilt-Rotor Aerial-Aquatic Vehicles: Design and Implementation[J]. Defence Technology, 2025, 51: 274-293.
- [28] EUBANK R D. Autonomous Flight, Fault, and Energy Management of the Flying Fish Solar-Powered Seaplane[D]. Michigan: University of Michigan, 2012.
- [29] YAO G C, LIANG J H, WANG T M, et al. Submersible Unmanned Flying Boat: Design and Experiment[C]// IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. 2014.
- [30] STEWART W, WEISLER W, MACLEOD M, et al. Design and Demonstration of a Seabird-Inspired Fixed-Wing Hybrid UAV-UUV System[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2018, 13(5): 056013.
- [31] MOORE J, FEIN A, SETZLER W. Design and Analysis of a Fixed-Wing Unmanned Aerial-Aquatic Vehicle[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2018.
- [32] WEISLER W, STEWART W, ANDERSON M B, et al. Testing and Characterization of a Fixed Wing Cross-Domain Unmanned Vehicle Operating in Aerial and Underwater Environments[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018, 43(4): 969-982.
- [33] WEI Z Y, TENG Y H, MENG X Y, et al. Lifting-Principle-Based Design and Implementation of Fixed-Wing Unmanned Aerial-Underwater Vehicle[J]. Journal of Field Robotics, 2022, 39(6): 694-711.
- [34] PAPAPOPOULOS C, VLACHOS S, YAKINTHOS K. Conceptual Design of a Fixed Wing Hybrid UAV UUV Platform[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022, 1226(1): 012028.
- [35] SUN X R, CAO J, LI Y, et al. Design and Field Test of a Foldable Wing Unmanned Aerial-Underwater Vehicle[J]. Journal of Field Robotics, 2024, 41(2): 347-373.
- [36] LU D, XIONG C K, ZENG Z, et al. A Multimodal Aerial Underwater Vehicle with Extended Endurance and Capabilities[C]// International Conference on Robotics and Automation. 2019.
- [37] LU D, XIONG C K, ZHOU H X, et al. Design, Fabrication, and Characterization of a Multimodal Hybrid Aerial Underwater Vehicle[J]. Ocean Engineering, 2021, 219: 108324.
- [38] 昂海松, 王源. 一种变轴螺旋桨水空跨域无人飞行器设计和控制技术 [J]. 无人系统技术, 2022, 5(3): 1-11.  
ANG H S, WANG Y. Design and Control Technology of a Variable Axis Propeller Unmanned Vehicle Cross Region of Water and Air[J]. Unmanned Systems Technology, 2022, 5(3): 1-11.
- [39] LYU C X, LU D, XIONG C K, et al. Toward a Gliding Hybrid Aerial Underwater Vehicle: Design, Fabrication, and Experiments[J]. Journal of Field Robotics, 2022, 39(5): 543-556.
- [40] CARLSON S J, PAPACHRISTOS C. Hybrid Locomotive Behaviors for an Amphibious Fixed-Wing/VTOL Tiltrotor UAV[C]// International Conference on Unmanned Aircraft Systems. 2024.
- [41] WANG Z J, JIANG Y H, ZOU Z H, et al. Design and Implementation of a Multimodal Tilt-Rotor Unmanned Aerial-

- Aquatic Vehicle[J]. *Journal of Field Robotics*, 2025, 42(5): 1766-1782.
- [42] JIN Y F, ZENG Z, LIAN L. Nezha-SeaDart: A Tail-Sitting Fixed-Wing Vertical Takeoff and Landing Hybrid Aerial Underwater Vehicle[J]. *Journal of Field Robotics*, 2025, 42(1): 137-152.
- [43] XIA M H, WANG B C, LUO Z R. Design and Experiment of a Multimodal Aerial Aquatic Vehicle with Morphing Wing and Tilting Rotors[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2025, 17(2): 168781.
- [44] IZRAELEVITZ J S, TRIANTAFYLLOU M S. A Novel Degree of Freedom in Flapping Wings Shows Promise for a Dual Aerial/Aquatic Vehicle Propulsor[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2015.
- [45] RAMAMURTI R, GEDER J D, EDWARDS D, et al. Computational Studies for the Development of a Hybrid UAV/UUV[C]// *AIAA Applied Aerodynamics Conference*. 2015.
- [46] CHEN Y F, WANG H Q, HELBLING E F, et al. A Biologically Inspired, Flapping-Wing, Hybrid Aerial-Aquatic Microrobot[J]. *Science Robotics*, 2017, 2(11): 1355619.
- [47] HOU T G, YANG X B, SU H H, et al. Design and Experiments of a Squid-Like Aquatic-Aerial Vehicle with Soft Morphing Fins and Arms[C]// *International Conference on Robotics and Automation*. 2019.
- [48] 李宏源, 吕凯, 陈迎亮, 等. 新型仿生水-空跨介质航行器结构设计 [J]. *水下无人系统学报*, 2022, 30(6): 726-732.  
LI H Y, LYU K, CHEN Y L, et al. Structure Design of a Novel Bionic Water-Air Cross-Domain Vehicle[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2022, 30(6): 726-732.
- [49] 张磊, 张智勇, 苗洋, 等. 基于软性跨介质的仿生潜空航行器设计 [J/OL]. [2025-09-26]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04012>.  
ZHANG L, ZHANG Z Y, MIAO Y, et al. Design of a Biomimetic Aerial-Submerged Navigation Vehicle Based on Soft Cross-Media Technology[J/OL]. [2025-09-26]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04012>.
- [50] HE J C, ZHANG Y J, FENG J J, et al. A Novel Aerial-Aquatic Unmanned Vehicle Using Flapping Wings for Underwater Propulsion[J]. *Biomimetics*, 2024, 9(10): 581-593.
- [51] 王永生. 喷水推进和泵喷推进的概念: 共性、特性及区别 [J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(5): 1-9.  
WANG Y S. Concepts of Waterjet Propulsion and Pumpjet Propulsion: Their Common Characteristics, Special Characteristics and Differences[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(5): 1-9.
- [52] 金平仲. 船舶喷水推进 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.  
JIN P Z. *Ship Water Jet Propulsion*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1986.
- [53] VAN TERWISGA T J C. *Waterjet-Hull Interaction*[D]. Delft: Delft University of Technical, 1996.
- [54] SHI Z Q, TAN X K, WANG Y W, et al. Experimental Investigation of High Speed Cross-Domain Vehicles with Hydrofoil[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(1): 152-168.
- [55] ZUFFEREY R, ANCEL A O, FARINHA A, et al. Consecutive Aquatic Jump-Gliding with Water-Reactive Fuel[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(34): 1217330.
- [56] SIDDALL R, KOVAC M. Fast Aquatic Escape with a Jet Thruster[J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(1): 217-226.
- [57] 刘沛清, 耿欣, 胡天翔, 等. 现代航空螺旋桨气动、噪声与优化设计的研究进展 [J]. *空气动力学学报*, 2023, 41(10): 61-78.  
LIU P Q, GENG X, HU T X, et al. Research Progress on Aerodynamics, Noise and Optimization Design for Modern Aviation Propellers[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2023, 41(10): 61-78.
- [58] PRANTO R I, DODUL S H, INAM M I, et al. CFD Analysis of Flow Characteristics over Air-Propellers used in a VTOL AquaUAV[C]// *International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering*. 2020.
- [59] ALZUBI H, AKINSANYA O, KAJA N, et al. Evaluation of an Aerial Quadcopter Power-Plant for Underwater Operation[C]// *International Symposium on Mechatronics and Its Applications* 2015.
- [60] TAN Y H, SIDDALL R, KOVAC M. Efficient Aerial-Aquatic Locomotion with a Single Propulsion System[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, 2(3): 1304-1311.

- [61] YAO G C, LI Y Z, ZHANG H Y, et al. Review of Hybrid Aquatic-Aerial Vehicle (HAAV): Classifications, Current Status, Applications, Challenges and Technology Perspectives[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2023, 139: 100902.
- [62] TAN Y H, CHEN B M. Motor-Propeller Matching of Aerial Propulsion Systems for Direct Aerial-Aquatic Operation[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2019.
- [63] PANIGRAHI S, THONDIYATH A, SK R. Characterization of the Propulsion System for Submersible Multimedium Robotic Vehicles[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2022, 37(12): 14-32.
- [64] SEMENOV I Y. Development of Hybrid Air-Water Rotor Transition Thrust Prediction and Control[D]. Maryland: University of Maryland, 2020.
- [65] LENZE V, MILLER S W, SPITZER A, et al. Thrust and Power Characterization of a Dual-Domain Aquatics UAV Electric Propulsion System[J]. Ocean Engineering, 2025, 339: 122060.
- [66] 单润柳. 水空两用螺旋桨优化设计与试验方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2021.  
SHAN R L. Research on Optimal Design and Test Method of Water-Air Propeller[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2021.
- [67] 赵怡. 水空跨介质飞行器推进系统设计与性能分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.  
ZHAO Y. Design and Performance Analysis of Propulsion System for Water-Air Transonic Vehicle[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
- [68] 张宇川. 水空两用推进器桨叶设计与优化 [D]. 沈阳: 东北大学, 2019.  
ZHANG Y C. Blade Design and Optimization of Water-Air Dual-Purpose Propeller[D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.
- [69] 孟龙, 肖京平, 韩向东. 水空两用对转螺旋桨快速设计方法 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(23): 19-22.  
MENG L, XIAO J P, HAN X D. Rapid Design Method of Water-Air Dual-Purpose Contra-Rotating Propeller[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(23): 19-22.
- [70] YANG Z, BIL C, MARZOCCA P. Design of Experiment Applied to Bi-Modal Propeller Design for Underwater and Air Operations[C]// 20th Australian International Aerospace Congress. 2023.
- [71] YANG Z, BIL C, MARZOCCA P. Propeller Design and Optimisation for Bi-Modal Operations[C]// AIAA AVIATION 2022 Forum. 2022.
- [72] 王巍, 吴志刚. 仿生飞行器多源信息融合与控制技术研究 [J]. 导航与控制, 2025, 24(增刊 1): 1-12.  
WANG W, WU Z G. Research on Multi-Source Information Fusion and Control Technology of Bionic Aircraft[J]. Navigation and Control, 2025, 24(Suppl. 1): 1-12.
- [73] 丁浩. 仿生扑翼水下飞行器推进特性及运动性能研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2015.  
DING H. Study on Propulsion Characteristics and Motion Performance of Bionic Flapping-Wing Underwater Vehicle[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
- [74] ZHOU P J, LIU T, ZHOU X H, et al. Overview of Progress in Development of the Bionic Underwater Propulsion System[J]. Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering, 2017, 32: 9-19.
- [75] 陈良军. 运动自由度对水下仿生扑翼性能的影响 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(13):107-110.  
CHEN L J. The Influence of Motion Freedom on the Performance of Underwater Bionic Flapping Foil[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(13): 107-110.
- [76] LOCK R J, VAIDYANATHAN R, BURGESS S C. Impact of Marine Locomotion Constraints on a Bio-Inspired Aerial-Aquatic Wing: Experimental Performance Verification[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2014, 6: 011001.
- [77] IZRAELEVITZ J S, TRIANTAFYLLOU M S. Adding In-Line Motion and Model-Based Optimization Offers Exceptional Force Control Authority in Flapping Foils[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 742: 5-34.
- [78] 温浩然, 魏纳新, 刘飞. 水下滑翔机的研究现状与面临的挑战 [J]. 船舶工程, 2015, 37(1): 1-6.  
WEN H R, WEI N X, LIU F. Research of Current Situation and Future Challenges of Underwater Glider[J]. Ship Engineering, 2015, 37(1): 1-6.