

【引用格式】杨玺名, 曹建, 李晔, 等. 柔性翼仿生水空跨介质航行器研究现状[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(4): 365-375.

# 柔性翼仿生水空跨介质航行器研究现状

杨玺名<sup>1</sup>, 曹 建<sup>2</sup>, 李 晔<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 南海研究院, 海南 三亚 572000;  
2. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院 水下机器人技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 水空跨介质航行器凭借其能够在水下和空中2种介质中航行的特性, 在近几年一直保持着很高的研究热度。跨介质航行器在军用和民用领域的应用前景均非常广阔, 不仅能够完成水下侦察、探测等工作, 还能实现高速巡航和隐蔽突防。该类航行器需要自主完成出入水过程, 故以一些能够穿越水气界面并在2种介质中行动的动物为研究对象展开的仿生研究也成为了持续关注的焦点。由于柔性材料更符合自然界中一些生物的身体构造, 且柔性机翼的设计有助于解决采用刚性机翼时出现的一些问题, 柔性翼仿生跨介质航行器有着广阔的研究前景。简要介绍了目前国内外已有的刚性翼跨介质航行器, 重点介绍柔性翼仿生水空跨介质航行器的研究成果, 并探讨目前柔性翼仿生水空跨介质航行器研制过程中可能出现的难点。

**关键词** 水空跨介质航行器; 仿生航行器; 柔性机翼; 折叠翼

**中图分类号** V279.2      **文献标识码** A      **文章编号** 2096-5753(2024)04-0365-11

**DOI** 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.04.002

## Research Status of Flexible Wing Bionic Underwater-aerial Cross-domain Vehicles

YANG Ximing<sup>1</sup>, CAO Jian<sup>2</sup>, LI Ye<sup>2</sup>

(1. Nanhai Institute, Harbin Engineering University, Sanya 572000, China; 2. Key Laboratory of Underwater Robot Technology, College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract** Due to the capability of sailing in both water and air, underwater-aerial cross-domain vehicle has maintained high research interest in recent years. The vehicle has wide and bright application prospects in both military and civil field, as it can not only complete underwater reconnaissance and detection, but also realize high-speed cruise and covert penetration. The vehicle needs to complete the process of entering and exiting water autonomously, which results in the bionic research on some animals that can cross the water-air interface and move in two mediums has also become the focus of continuous attention. Flexible materials are more consistent with the body structure of some creatures, and flexible wings are helpful to solve some problems that exist in rigid wings, thus flexible wing bionic underwater-aerial cross-domain vehicles have broad research prospect. The existing rigid wing bionic underwater-aerial cross-domain vehicles at home and abroad are briefly introduced. The research results of flexible wing bionic underwater-aerial cross-domain vehicles are introduced in detail, and the difficulties that may arise in the development of the flexible wing bionic underwater-aerial cross-domain vehicles are discussed.

**Key words** underwater-aerial cross-domain vehicle; bioinspired vehicle; flexible wing; foldable wing

## 0 引言

跨介质航行器需要能够在水下以及空气 2 种介质中航行,由于其既能够在必要时通过在水下航行以保证其隐蔽性,又能够在空中飞行以实现快速移动<sup>[1]</sup>,在国内外有着很高的研究热度,很多团队已经提出了一些优秀的设计并实现了空中飞行、水下航行与出入水试验,其中包括使用柔性机翼的新型仿生跨介质航行器。

对于跨介质航行器来说,既能在水下航行又能够在空中飞行带来的学科交叉为其研究带来了困难,而出入水过程更是极大地提高了其研究难度。从自然界一些鸟类、鱼类等生物能够跨越水气界面的捕食、迁移等生活习性得到启发,模仿这些生物的出入水过程以及其身体结构来解决跨介质问题也成为了研究热点,而有些基于仿生学的研究使用与仿生原型更贴合的柔性材料作为样机的材料,相比于刚性翼跨介质航行器有助于解决机翼空腔内部进水、减轻跨介质航行器整体重量、减小机翼折叠后体积从而减小水下阻力等问题。

在此首先介绍多旋翼跨介质航行器、固定翼跨介质航行器、折叠翼跨介质航行器 3 种刚性翼水空跨介质航行器中几个具有代表性的研究成果,再着重介绍以柔性翼跨介质航行器为主的柔性翼研究成果,分析目前柔性翼跨介质航行器的设计难点及面对的主要问题。

## 1 刚性翼水空跨介质航行器研究现状

目前国内外一些较为典型的采用刚性翼设计的跨介质航行器相关研究,从采用的机翼设计形式上区分主要有多旋翼、固定翼、折叠翼 3 种,柔性翼跨介质航行器较少,如图 1 所示。



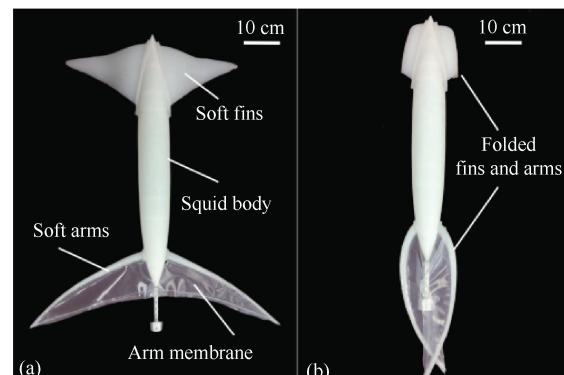
(a) 多旋翼跨介质航行器



(b) 刚性固定翼跨介质航行器



(c) 刚性折叠翼跨介质航行器



(d) 柔性翼跨介质航行器

图 1 水空跨介质航行器主要类型分类

Fig. 1 Classification of representative underwater-aerial cross-domain vehicles

### 1.1 多旋翼跨介质航行器

近年来多旋翼无人飞行器由于其较为简单的结构和完善的理论基础,已经拥有了许多能够投入实际应用的成熟设计,这也为很多跨介质航行器研究团队提供了设计思路,由此出现了一些多旋翼跨介质航行器。

在 2014 年,巴西圣若昂-德雷 UFSJ 联邦大学的 NETO 和南大河州联邦大学的 DREWS Jr 等人首次以四旋翼无人机为原型,采用共轴双层螺旋桨的布置方式设计了一种水空跨介质航行器<sup>[2]</sup>,其中上层 4 枚为空气桨,下层 4 枚为水桨。通过基于 PD 控制的仿真试验,他们验证了这种共轴八螺旋桨布局

在全方位运动中的可行性。此外, 该团队还提出了一种鲁棒切换控制策略, 旨在实现更为稳定的姿态控制, 目前团队已通过仿真试验证明了该策略的全局稳定性良好, 但暂未制作原理样机进行试验。



图 2 巴西 Paulo Drews Jr 四旋翼跨介质航行器  
Fig. 2 Quadrotor cross-domain vehicle by Paulo Drews Jr of Brazil

2014 年美国奥克兰大学的 ALZU'BI 等<sup>[3]</sup>进行了一系列试验, 重点研究了在水与空气 2 种介质中多个尺寸固定螺距空气桨的推进性能。试验结果显示, 在较低的转速(约 180 r/min)下, 空气桨能够有效地为水下运动提供充足的推力, 并且不会伴随有气蚀现象发生。基于试验数据, 该团队选用 8038 螺旋桨, 跨介质过程通过吸排水装置实现, 制作了样机。2016 年, 团队在进一步优化吸排水装置的布局后, 成功制造了第 2 代样机<sup>[4]</sup>, 命名为 Loon Copter。在姿态控制方面, 尽管 PD 控制器在单一介质中的运动控制表现出色, 但在跨介质运动过程中, 其性能仍有待进一步提升。

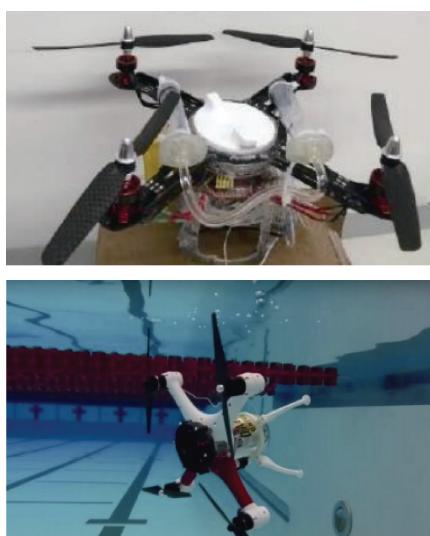


图 3 美国奥克兰大学四旋翼跨介质航行器  
Fig. 3 Quadrotor cross-domain vehicle by Oakland University

2016 年, 空军工程大学的冯金富团队<sup>[5-6]</sup>设计了一款八旋翼样机(如图 4), 采用双层结构螺旋桨, 与巴西 DREWS Jr 等人设计相似, 共有 4 枚空气桨和 4 枚水桨, 2 层桨之间以立柱连接, 长度可以调整。为解决跨介质航行器入水过程中的地面效应, 并减少参数不确定性的影响, 该团队使用了自抗扰技术(ADRC), 并设计了自适应滑膜控制器, 通过仿真试验证明其稳定性较高。目前该团队并未对除跨介质过程外的航行过程展开运动控制问题的研究。



图 4 空军工程大学八旋翼样机  
Fig. 4 Octocopter cross-domain vehicle prototype by Air Force Engineering University

尽管多旋翼跨介质航行器具有理论成熟、结构简单、控制难度小、制造成本低等优势, 但由于其基于多旋翼无人飞行器设计, 结构上更适合在空气中飞行, 而水密度较空气更大, 因此在水下航行时相较于多具有流线型外形的水下航行器, 多旋翼跨介质航行器往往受到更大的水下阻力; 在空中飞行时, 多旋翼无人飞行器的飞行速度也往往难以和固定翼飞行器相比。

## 1.2 刚性固定翼跨介质航行器

相较于多旋翼跨介质航行器, 固定翼跨介质航行器由于其机翼能够提供升力, 推进装置提供的推进力在速度方向上的分力更大, 这使其往往能够取得比多旋翼跨介质航行器更高的推进效率, 达到更高的航行速度。一些固定翼跨介质航行器的机身部分采用了流线型设计, 由此产生的水下阻力也比多旋翼跨介质航行器更低。

2018 年 2 月, 美国北卡罗来纳州立大学的 STEWART 等人设计了“鹰鳐”(Eagle Ray) 固定翼跨介质航行器, 能够实现水面航行、水下潜航及

空中飞行，可以遥控或自动航行<sup>[7]</sup>，如图 5 所示。该跨介质航行器需从水面起飞，通过向机身内后部腔体注水调整航行器姿态，同时前端螺旋桨提供牵引力实现起飞，然后排水调整航行器飞行姿态。入水时需先降落至水面，通过腔体注水使航行器下潜。该航行器完成了水下航行、空中飞行及出入水的完整试验流程<sup>[8]</sup>。



图 5 北卡罗来纳州立大学“鹰鳐”固定翼跨介质航行器

Fig. 5 Eagle Ray fixed-wing cross-domain vehicle by North Carolina State University

2019 年 9 月，伦敦帝国理工学院 ZUFFEREY 等人设计了一款跨介质航行器<sup>[9]</sup>，如图 6 所示。利用化学反应爆炸以实现喷水推进并出水，机翼则采用三角翼以在出水后提高飞行稳定性。该跨介质航行器每次仅需消耗 0.2 g 碳化钙，即可实现出水及滑翔约 26 m 的过程。如需实现多次出水，可以由金属管在水下为航行器注水以配合携带的碳化钙实现多次化学反应。文中主要关注出水过程，除在空中滑翔外并无关于入水及水下航行与空中远距离飞行的试验。



图 6 帝国理工学院喷水推进跨介质航行器  
Fig. 6 Cross-domain vehicle with water jet propulsion by Imperial College London

固定翼跨介质航行器在空中和水下航行时的

性能往往优于多旋翼跨介质航行器，但由于其机翼构造导致其在水下航行时相较于多数常规水下航行器仍会受到很大的水下阻力。

### 1.3 刚性折叠翼跨介质航行器

为解决固定翼跨介质航行器水下阻力过大的问题，产生了折叠翼跨介质航行器设计。在空中飞行时，折叠翼跨介质航行器的机翼展开，此时其外形上与固定翼跨介质航行器相似。在水下航行时，其机翼折叠，减小机翼产生的水下阻力。

2014 年，帝国理工学院的 SIDDALL 等人提出俯冲溅落入水，喷水推进出水的跨介质航行器出入水方案，为更顺利入水使用可折叠机翼，采用超疏水表面使水滴快速脱落<sup>[10]</sup>。SIDDALL 指出跨介质航行器能否实现出入水是设计跨介质航行器的关键，其中出水比入水更难实现。2016 年，他们设计了一款机翼后掠角可变的水空跨介质航行器，在首部安装螺旋桨作为空中与水中的推进装置，通过喷水的方式使飞行器快速出水<sup>[11]</sup>。



图 7 帝国理工学院水空两栖无人飞行器

Fig. 7 Underwater-aerial cross-domain vehicle by Imperial College London

2012–2014 年，北京航空航天大学团队设计了仿鲤鱼水空跨介质航行器。团队通过深入研究鲤鱼俯冲入水的过程，利用 CFD 技术分析了鲤鱼在不同速度和倾角入水时的冲击加速度，证实了其身体结构能有效减少冲击力<sup>[12–14]</sup>。基于这些研究，团队创建了鲤鱼的仿生 3D 模型，并通过 CFD 仿真获取了机身纵轴方向的冲击加速度数据<sup>[15–16]</sup>。随后，团队根据仿真结果成功研制出仿生样机<sup>[17–18]</sup>，如图 8 所示，获得了入水时机身纵轴方向的冲击加速度和机翼根部径向载荷。这些结果为设计仿鲤鱼跨介质航行器样机提供了重要数据支持。



图 8 北京航空航天大学仿鲣鸟跨介质航行器  
Fig. 8 Gannet-inspired cross-domain vehicle by Beihang University

随着刚性可折叠翼跨介质航行器的研究进行,机翼的一些设计难点也逐步显露了出来。为了减轻机翼重量,减少能量消耗并降低所需升力,一些团队采用了空腔形式的机翼设计。这种机翼内的空腔在水下容易进水,且在空中飞行时不易快速将水排出,这对跨介质航行器在飞行时的稳定性与能耗都是一种不利因素。

## 2 柔性翼航行器研究现状

针对出入水这一项跨介质航行器设计需要解决的关键问题,一些团队结合了仿生学展开研究,而与刚性跨介质航行器不同,自然界很多能够自主穿越水气界面的生物都有着可以弯曲甚至折叠的柔性翅膀,这种翅膀不仅重量更轻,且其可变形的能力使其收缩或折叠后在水下占用空间及阻力更小。目前采用柔性翼的跨介质航行器相较于刚性翼非常少,且尚无能够完整完成水下航行、空中飞行和反复出入水过程的样机,但对于空中飞行器的柔性翼研究已经出现了很多出色的成果。这里首先介绍一些柔性翼相关的研究成果,再主要围绕采用柔性翼的跨介质航行器分别介绍几个具有代表性的研究成果。

### 2.1 柔性翼扑翼飞行器

2012年,美国宇航环境公司(AeroVironment)仿照蜂鸟的外形设计了一种以扑翼作为推进方式的微型飞行器,并将其命名为“纳米蜂鸟”(Nano Hummingbird),如图9所示,翼展仅16.5 cm,整机重19 g,其扑翼频率高达30 Hz,并具备约4 min的续航能力<sup>[19]</sup>。在驱动机翼扑动的传动方式上,除齿轮驱动外,“纳米蜂鸟”还使用了结构简单、占用空间小、质量轻、可实现稍远距离传动

的优点,且成本较低,尤其适用于“纳米蜂鸟”体型小带来的受力、力矩较小的特性。机翼采用柔性薄膜材料制成,受到空气的反作用力会产生被动形变。



图9 美国宇航环境公司研制的“纳米蜂鸟”样机  
Fig. 9 “Nano Hummingbird” prototype from AeroVironment

西北工业大学团队借助MEMS技术,成功研制出一款微型扑翼飞行器<sup>[20]</sup>,机翼使用了柔性薄膜材料,机身采用了碳纤维作为主要材料,翼展为20 cm,整机重量仅为15 g。其最高扑翼频率可达20 Hz,尾部配备了方向舵,以控制转向<sup>[21]</sup>。团队为了深入探究该飞行器的气动性能进行了一系列风洞实验<sup>[22]</sup>,得到了详尽的试验数据,对于日后的相关研究具有很大的参考价值和借鉴意义。

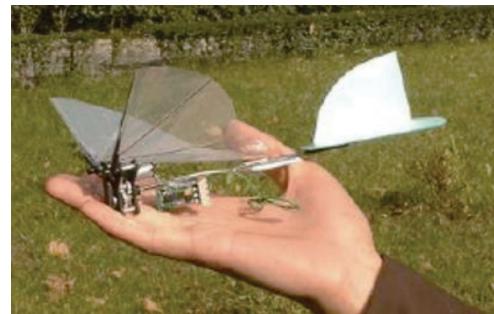


图10 西北工业大学研制的微型扑翼飞行器样机  
Fig. 10 Miniature flapping-wing aircraft prototype from Northwestern Polytechnical University

### 2.2 柔性翼水下滑翔机

2022年中国科学院沈阳自动化研究所李振宇等人将沈阳自动化研究所自主研制的海翼1000 mini水下滑翔机与柔性可折叠翼相结合<sup>[23]</sup>,如图11所示,对适用于载机空投和水下管式发射的柔性可折叠翼水下滑翔机水动力特性与滑翔运动性能进行了分析,通过比较柔性可折叠翼水下滑翔机不同翼面形变量下的水动力特性、建立滑翔机的动力学模型并进行运动仿真,得到了翼形变量与水下滑翔机水动力特性和

运动参数之间的关系,为后续滑翔机控制算法设计和运动优化提供了理论依据和数据支撑。

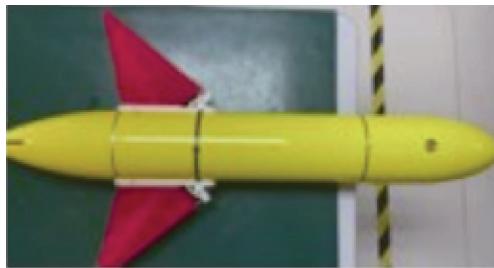


图 11 沈阳自动化研究所柔性翼水下滑翔机  
Fig. 11 Flexible-wing underwater glider from Shenyang Institute of Automation

### 2.3 柔性翼跨介质航行器

目前已有的柔性翼跨介质航行器研究较少,这些研究成果主要基于仿生学,旨在通过模仿自然界一些能够穿越水气界面的生物的外形与生理构造来设计跨介质航行器的外形和推进方式等,以此解决跨介质航行器出入水问题。

#### 2.3.1 仿海鸥航行器

麻省理工学院的 IZRAELEVITZ 等人从海雀和海鸥等水鸟利用翅膀游泳和飞行的行为中汲取灵感,于 2014 年提出了一种基于直线运动的扑翼式跨介质航行器设计<sup>[24]</sup>。这种运动模式既能模仿海龟游泳时产生无升力的推力,也能在低速时像海鸟一样产生很大的升力,如图 12 所示。扑翼式直线运动是一种融合了龟类和鸟类颤振特性的高效推进方式,非常适合应用于水空跨介质航行器的设计中。

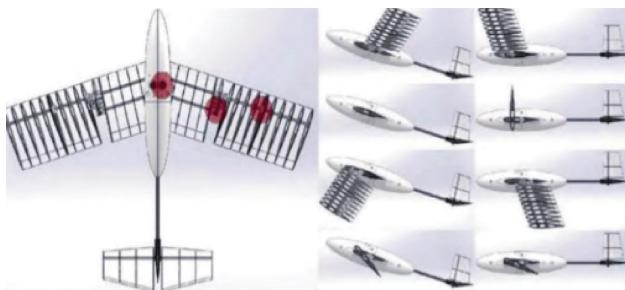


图 12 麻省理工学院仿海鸥跨介质航行器  
Fig. 12 Seagull-inspired cross-domain vehicle from Massachusetts Institute of Technology

#### 2.3.2 仿飞鸟贼航行器

2015 年,伦敦帝国理工学院的 SIDDALL 等<sup>[25]</sup>

设计了一种仿乌贼的射流推进系统用于水空过渡,该团队使用高密度液态 CO<sub>2</sub> 罐来产生射流并推动跨介质航行器快速起飞,使用形状记忆合金驱动阀来控制 CO<sub>2</sub> 的释放,如图 13 所示。该跨介质航行器具有可折叠与伸展的柔性机翼,使得其在水下航行时阻力最小化。



图 13 伦敦帝国理工学院仿飞鸟贼跨介质航行器  
Fig. 13 Ornithoteuthis-volatilis-inspired cross-domain vehicle from Imperial College London

2019 年,北京航空航天大学侯涛刚等人参考飞鸟贼的形态提出了一种新的仿生跨介质航行器,使用气动驱动控制硅胶制成的柔性鳍展开与收缩,并通过喷气的方式实现出水,目前完成了风洞和水下实验<sup>[26]</sup>,如图 14 所示。



图 14 北航仿飞鸟贼跨介质航行器  
Fig. 14 Ornithoteuthis-volatilis-inspired cross-domain vehicle from Beihang University

#### 2.3.3 仿水母航行器

2014 年,来自纽约大学的 RISTROPH 等人设计了一种扑翼无人机,其灵感来自于一种水母<sup>[27]</sup>,它可以在空中稳定盘旋<sup>[28]</sup>。原型机的重量为 2 g,并且可以通过拍打分布在身体周围的 4 个翅膀来提供升力,机身的主体框架由碳纤维材料制成,扑动翼由薄塑料制成,其运动由马达产生,如图 15 所示。对于这种布局和驱动,实现水下运动相对较容易,因此研究团队正在重新设计一种新的模型,使其能够适应水下环境。改进后的原型机将在空气和水中兼具更好的适应性。

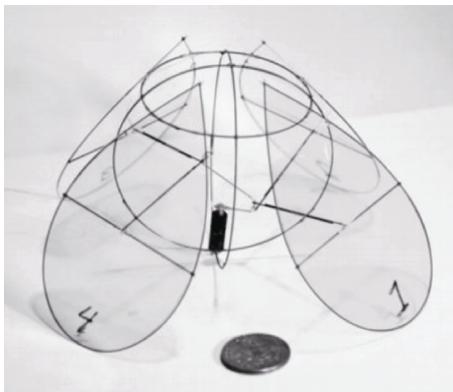


图 15 纽约大学仿水母飞行器

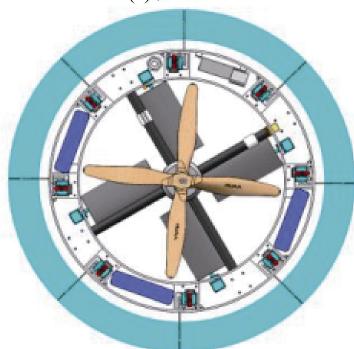
Fig. 15 Jellyfish-inspired cross-domain vehicle by New York University

#### 2.3.4 仿魟鱼航行器

2019 年, 南京航空航天大学陈怀远<sup>[29]</sup>设计了一款仿魟鱼跨介质航行器, 将魟鱼的鳍面结构与涵道螺旋桨相结合, 柔性鳍为水下航行提供推力, 螺旋桨为空中飞行提供升力, 如图 16 所示。作者通过 CFD 仿真分析了跨介质航行器在水下航行和空中飞行时的水、气动力性能, 并制作了样机, 对流场流动特性和航行器运动性能进行了验证, 但并未针对控制系统进行研究。



(a) 魟鱼



(b) 仿魟鱼跨介质航行器模型



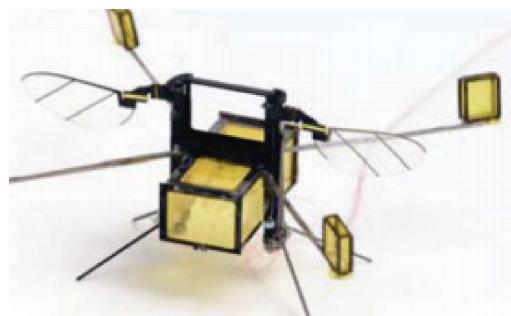
(c) 仿魟鱼跨介质航行器样机

#### 图 16 南京航空航天大学仿魟鱼跨介质航行器

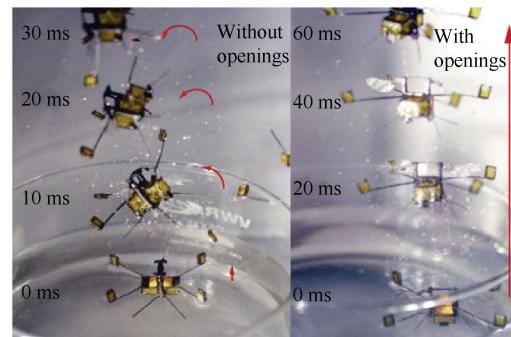
Fig. 16 Stingray-inspired cross-domain vehicle by Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

#### 2.3.5 仿昆虫航行器

2017 年, 哈佛大学 CHEN 等人<sup>[30]</sup>研制了一种仿昆虫跨介质航行器样机, 如图 17 所示, 该样机重 175 mg, 使用柔性翼扑翼驱动, 能够完成水下航行, 空中飞行及穿越水气界面的过程。出水时, 该样机能够通过电解板将浮力舱中的水分解成氢气和氧气, 以此提高浮力。团队分析了航行器在水下运动时的扑翼过程, 并研究了表面张力对微型机器人的影响。



(a) 仿昆虫跨介质航行器样机



(b) 样机穿越水气界面过程

#### 图 17 哈佛大学仿昆虫跨介质航行器

Fig. 17 Insects-inspired cross-domain vehicle by Harvard University

### 3 水空跨介质航行器研究难点

由于水空跨介质航行器涉及水下航行、空中飞行和出入水等多种领域的复杂问题,各领域的设计要求又有矛盾之处,航行器的研究过程面临众多难点,而柔性跨介质航行器又有着其独特的研究难点,在此分析其中的部分问题。

#### 3.1 航行器出水问题

对于以喷气等方式作为空中飞行推进方式的跨介质航行器,出水姿态是影响其空中点火的重点与前提,实现介质间稳定、可靠的转换是其出水过程中的难点,介质的突变导致系统动力学环境急剧变化,空泡流动演化的非定常性及不确定性使航行器受载特性的变化过程更为复杂,进而影响航行器运动姿态<sup>[31]</sup>。

另外,跨介质航行器出水过程中采用的推进方式不同,需要克服与解决的问题也不尽相同,但各种推进方式往往都需要消耗大量的能量。如伦敦帝国理工学院研制的跨介质航行器以喷水作为推进方式,每次出水时都需要在腔体中保证足够的水,而过多的水不仅会增大重量,还需要更大的容器从而占用更多的内部空间。而北卡罗来纳大学研制的跨介质航行器采用螺旋桨作为推进装置,则需要更多关注推力问题。

#### 3.2 航行器入水问题

跨介质航行器的入水过程涉及复杂的相变过程,根据不同的入水方式面对的问题也不尽相同。对于北卡罗来纳州立大学和特力丹科学与成像公司联合开发的“鹰鳐”可以在水面降落再下潜入水,该入水方式避免了入水载荷对结构及入水姿态的影响,但入水过程耗时长。对于仿鸟类以较大俯角快速进入水中的入水方式则往往伴随有较大的载荷,对航行器的结构强度要求较高,对其航行姿态也有较大影响,尤其是高速跨介质航行器入水过程中要受到很大的冲击载荷,同时伴随有能量转化后的动能排开水分超空泡,改变了航行器的流体动力及运动特性。

#### 3.3 能量来源

目前跨介质航行器为满足实际应用需求,有时

需要长时间航行甚至多次进出水面,加大了能量的需求量。对于这种情况,使用喷水推进方式将难以满足实际应用需要,而如果采用电池作为能源,使用常规锂电池则需要考虑航行器重量增加以及占用空间的问题,因此一些能量密度较高的新型电池,如小型化的氢氧燃料电池、海水溶解氧半燃料电池等可能有助于满足以上要求<sup>[32]</sup>。

#### 3.4 柔性跨介质航行器研究难点

##### 3.4.1 柔性材料选择

柔性机翼的潜在制作材料有橡胶<sup>[33-34]</sup>、形状记忆合金<sup>[35-37]</sup>、离子交换聚合物-金属复合材料<sup>[38-39]</sup>、水凝胶<sup>[40]</sup>、高分子聚合物等。对于需要主动形变的柔性机翼以及其他柔性结构,其驱动方法可分为物理驱动<sup>[41]</sup>(例如 SMA 驱动)、压力驱动<sup>[42]</sup>(例如高压气体<sup>[43]</sup>、高压液体<sup>[44]</sup>、内燃爆炸<sup>[45]</sup>)和其他软体致动器(例如介电弹性体<sup>[46]</sup>)。侯涛刚等<sup>[47]</sup>提出了可变形软体结构。利用软体结构控制技术<sup>[48]</sup>实现软体材料的变形,软体机翼可以在空气到水下过渡过程中包裹到机身上,从而减少阻力<sup>[49]</sup>。

对于柔性材料的选择是柔性翼跨介质航行器研究的重要问题,受到很多因素的限制。

##### 1) 柔性材料变形影响气动性能。

当跨介质航行器在空气中飞行时,柔性材料容易产生较大程度的变形,从而影响其气动性能,进一步影响跨介质航行器的飞行稳定性。对于除扑翼推进外的跨介质航行器,其在空中的飞行速度较快,柔性材料如果较为柔软,就会产生较大程度的变形;反之,如果材料较硬,则航行器在水下航行需要收起机翼时柔性材料不易折叠,可能会影响机翼折叠后的体积,进一步影响水下阻力。

##### 2) 柔性材料疏水性。

和刚性翼相似,柔性翼的材料选择同样需要面临表面疏水性的问题。当跨介质航行器在水下航行时,机翼通常会浸没至水中,而当跨介质航行器出水时,如果机翼表面或内部的水不能快速排净则会导致航行器重量增大,加剧能量消耗,甚至由于储水分布不均影响飞行稳定性。刚性翼可以采用疏水涂层覆盖在机翼表面来解决这一

问题, 而柔性翼除了使用疏水涂层, 还可以在选择柔性材料时选用本身带有疏水性的材料, 因此材料疏水性也是柔性翼跨介质航行器材料选择时不能忽略的重点。

### 3.4.2 水、气动力性能仿真

在水空跨介质航行器的设计过程中, 为了确保航行器能够符合性能要求, 同时降低研发成本, 不仅需要制作原理样机进行试验, 使用软件进行模拟仿真也是经常使用的方法, 如通过 CFD 对仿生原型生物的扑翼、飞行、游动及出入水过程等动作进行分析, 并优化仿真模型, 为原理样机的制作提供基础。

相对于刚性翼跨介质航行器, 柔性跨介质航行器的仿真过程更加复杂。柔性材料在流场中受力变形, 流场流动反之又受柔性材料变形影响, 由于柔性材料的变形量及其影响往往无法忽略, 因此是典型的双向流固耦合问题。对于水、气动力仿真, 涉及流固耦合的仿真过程比一般的水、气动力计算更为复杂, 不仅计算量大, 且计算结果更难收敛。

## 4 结束语

综上所述, 跨介质航行器的特性使其有着相当广阔的应用前景及发展潜力, 国际上已经有许多团队研究过或正在研究跨介质航行器, 设计思想多种多样, 使用的推进方式包括射流推进、螺旋桨推进、混合推进等, 但目前很多设计仍欠缺实用性, 有些研究还停留在理论设计阶段, 并未进行航行或出入水试验。其中, 柔性翼仿生跨介质航行器受限于比刚性机翼更复杂的结构带来的不稳定性等问题, 目前相关研究仍然较少, 且其中能够实现水下航行、空中飞行及出入水完整流程试验的更加稀少, 实际应用性也是亟待解决的问题。

尽管目前跨介质航行器的研究尤其是结合柔性翼的仿生跨介质航行器领域的研究仍有很大发展空间, 但考虑到基于仿生学的柔性翼设计具有的各种优点, 相信未来随着更多的技术发展与思路创新的出现, 柔性翼仿生跨介质航行器的相关研究将会极大发展, 实际应用也将不再是空谈。

## 参考文献

- [1] 冯金富, 胡俊华, 齐铎. 水空跨介质航行器发展需求及其关键技术[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2019, 20 (3): 8-13.
- [2] NETO A A, MOZELLI L, DREWS P L J, et al. Attitude control for an hybrid unmanned aerial underwater vehicle: a robust switched strategy with global stability[C]// 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seattle: IEEE, 2015.
- [3] ALZU'BI H, AKINSANYA O, KAJA N, et al. Evaluation of an aerial quadcopter power-plant for underwater operation[C]// 10th International Symposium on Mechatronics and Its Applications (ISMA). Sharjah: IEEE, 2015.
- [4] 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.
- [5] QI D, FENG J F, LI Y L. Dynamic model and ADRC of a novel water-air unmanned vehicle for water entry with in-ground effect[J]. Journal of Vibroengineering, 2016, 18 (6): 3743-3756.
- [6] MA Z C, FENG J F, YANG J, et al. Research on vertical air-water trans-media control of hybrid unmanned aerial underwater vehicles based on adaptive sliding mode dynamical surface control[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2018, 15 (2): 64597356.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] ZUFFEREY R, ANCEL A O, FARINHA A, et al. Consecutive aquatic jump-gliding with water-reactive fuel[J]. Science Robotics, 2019, 4 (34): eaax7330.
- [10] SIDDALL R, KOVÁČ M. Launching the AquaMAV: bioinspired design for aerial-aquatic robotic platforms[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2014, 9 (3): 031001.
- [11] SIDDALL R, ANCEL O A, KOVÁČ M. Wind and water tunnel testing of a morphing aquatic micro air

- vehicle[J]. Interface Focus, 2017, 7 ( 1 ): 20160085.
- [12] YANG X B, WANG T M, LIANG J H, et al. Numerical analysis of biomimetic gannet impacting with water during plunge-diving[C]// 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Guangzhou: IEEE, 2012.
- [13] WANG T M, YANG X B, LIANG J H, et al. CFD based investigation on the impact acceleration when a gannet impacts with water during plunge diving[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2013, 8 ( 3 ): 036006.
- [14] YANG X B, LIANG J H, LI Y, et al. Modeling and analysis of variable buoyancy device imitating waterfowl plumage structure[C]// The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. Maui : ISOPE, 2011.
- [15] LIANG J H, YANG X B, WANG T M, et al. Design and experiment of a bionic gannet for plunge-diving[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10 ( 3 ): 282-291.
- [16] LIANG J H, YAO G C, WANG T M, et al. Wing load investigation of the plungediving locomotion of a gannet Morus inspired submersible aircraft[J]. SCIENCE CHINA: Technological Sciences, 2014, 57 ( 2 ): 390-402.
- [17] YANG X B, WANG T M, LIANG J H, et al. Submersible unmanned aerial vehicle concept design study[C]// 2013 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Los Angeles: AIAA, 2013.
- [18] YANG X B, LIANG J H, WANG T M, et al. Computational simulation of a submersible unmanned aerial vehicle impacting with water[C]// 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Shenzhen: IEEE, 2013.
- [19] KEENNOM M, KLINGEBIEL K, WON H. Development of the Nano Hummingbird: a tailless flapping wing micro air vehicle[C]// 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Nashville: Nation Center for Space Exploration Research, 2012.
- [20] 侯宇, 方宗德, 刘岚. 基于 MEMS 技术的微扑翼飞行器研究[J]. 航空制造技术. 2003 ( 9 ): 38-43.
- [21] 薛栋, 宋笔锋, 宋文萍. 仿鸟型扑翼飞行器气动/结构/飞行力学耦合研究进展[J]. 空气动力学学报. 2018, 36 ( 1 ): 89-97.
- [22] 付鹏. 微型扑翼飞行器风洞实验方法与应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
- [23] 李振宇, 陈质二, 俞建成, 等. 基于柔性可折叠翼的下滑翔机建模与运动特性分析[J]. 船舶力学, 2022, 26 ( 10 ): 1433-1444.
- [24] IZRAELEVITZ J S, TRIANTAFYLLOU M S. A novel degree of freedom in flapping wings shows promise for a dual aerial/aquatic vehicle propulsor[C]// 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seattle: IEEE, 2015.
- [25] SIDDALL R, KOVAC M. Fast aquatic escape with a jet thruster[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22 ( 1 ): 217-226.
- [26] 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]// 2019 International Conference on Robotics and Automation ( ICRA ). Montreal: IEEE, 2019.
- [27] NAWROTCH J C, LEE H, FEINBERG A W, et al. A tissue-engineered jellyfish with biomimetic propulsion[J]. Nature Biotechnology, 2012, 30 ( 8 ): 792-797.
- [28] RISTROPH L, Childress S. Stable hovering of a jellyfish-like flying machine[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2014, 11 ( 92 ): 1-7.
- [29] 陈怀远. 跨介质飞行器设计及流体动力学特性分析 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [30] 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 ): aao5619.
- [31] 姚熊亮, 赵斌, 马贵辉. 跨介质航行体出水问题研究现状与展望[J]. 航空学报, 2023, 40 ( 1 ): 1-26.
- [32] 孙祥仁, 曹建, 姜言清, 等. 潜空跨介质无人航行器发展现状与展望[J]. 数字海洋与水下攻防, 2020, 3 ( 3 ): 178-184.
- [33] CHENG N G, LOBOVSKY M B, KEATING S J, et al. Design and analysis of a robust, low-cost, highly articulated manipulator enabled by jamming of granular media[C]// 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saint Paul: IEEE, 2012.
- [34] 王超. 线驱动硅胶软体机械臂建模与控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [35] KIM S, LASCHI C, TRIMMER B. Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics[J]. Trends in Biotechnology, 2013, 31 ( 5 ): 287-294.
- [36] KIM J S, LEE J Y, LEE K T, et al. Fabrication of 3D soft morphing structure using shape memory alloy ( SMA ) wire/polymer skeleton composite[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27 ( 10 ): 3123-3129.

- [37] JIN H, DONG E B, MAO S X, et al. Locomotion modeling of an actinomorphic soft robot actuated by SMA springs[C]// 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Bali: IEEE, 2014.
- [38] NAKABO Y, MUKAI T, ASAOKA K. Biomimetic Soft Robots using IPMC[M]. London: Springer, 2007.
- [39] STOIMENOV B, ROSSITER J M, MUKAI T. Soft ionic polymer metal composite robot swimming in viscous fluid[J]. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, 2009, 7287 (2B): 818705.
- [40] KEMPAIAH R, NIE Z H. From nature to synthetic systems: shape transformation in soft materials[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2014, 2 (17): 2357-2368.
- [41] CIANCHETTI M, CALISTI M, MARGHERI L, et al. Bioinspired locomotion and grasping in water: the soft eight-arm OCTOPUS robot[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, 10 (3): 035003.
- [42] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. *Nature*, 2015, 521 (7553): 467-475.
- [43] ROCHE E T, HORVATH M A, WAMALA I, et al. Soft robotic sleeve supports heart function[J]. *Science Translational Medicine*, 2017, 9 (373): eaaf3925.
- [44] TANG W, ZHANG C, ZHONG Y D, et al. Customizing a self-healing soft pump for robot[J]. *Nature Communications*, 2021, 12 (1): 2247.
- [45] TOLLEY M T, SHEPHERD R F, KARPELSON M, et al. An untethered jumping soft robot[C]// 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago: IEEE, 2014.
- [46] LI G R, CHEN X P, ZHOU F H, et al. Self-powered soft robot in the Mariana Trench[J]. *Nature*, 2021, 591 (7848): 66-71.
- [47] HOU T G, YANG X B, SU H H, et al. Design, fabrication and morphing mechanism of soft fins and arms of a squid-like aquatic-aerial vehicle with morphology tradeoff[C]// 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Dali: IEEE, 2019.
- [48] LASCHI C, CIANCHETTI M. Soft robotics: new perspectives for robot bodyware and control[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2014, 2: 00003.
- [49] 侯涛刚, 靳典哲, 龚毓琰, 等. 水空跨介质航行器前沿技术进展[J]. 科技导报, 2023, 41 (2): 5-22.

(责任编辑: 张曼莉)