

水空跨介质航行器前沿技术进展

侯涛刚¹, 靳典哲¹, 龚毓琰¹, 王新阳¹, 裴轩¹, 杨兴帮^{2*}

1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044

2. 北京航空航天大学生物与医学工程学院, 北京 100191

摘要 随着仿生技术的不断发展, 人类对飞鱼、崖海鸦、鲣鸟、飞鸟贼等两栖生物的数据观测、仿真建模有了突破性的进展, 水空跨介质航行器领域也随之得到飞速发展, 但仍然存在一些关键技术难点。按照被仿生对象的种类, 对水空跨介质航行器样机的研究进程, 以及近年来在机翼结构、水空两栖推进方式等方面取得的进展进行归纳, 并从计算机仿真与实验测试的角度, 剖析了在对运动学和动力学的研究中所用到的研究方法。结合该领域发展现状, 总结了一些关键的技术挑战, 并提出跨介质航行器未来的展望。

关键词 水空跨介质航行器; 变机翼设计; 推进系统; 计算机流体仿真

动物的一些特殊身体结构和功能可为人类的科学研究提供大量的灵感^[1]。如鸟类翅膀适合于空域飞行, 陆生动物腿足结构适合陆地奔跑、跳跃、爬行, 水生动物的尾鳍或喷射推进结构可以高效游动。而两栖动物的身体结构和习性能适应在多种环境中运动, 也就是具备跨介质运动能力。因此, 水空两栖生物可为人类跨介质航行器的研发提供大量的建设性启示, 包括在推进系统、结构设计及性能提升等方面, 极大地拓展了现有空中无人系统的作业环境 and 应用范围。近年来各国研究人员纷纷将目光转移到水空两栖多模式无人飞行器的研

究上^[2], 包括水空多模式运动机制研究及仿生样机的研制。本文按照仿生水空两栖动物进行分类, 回顾水空跨介质航行器(AquaUAV)的发展历程, 总结设计过程中的关键技术、研究方法及目前面临的挑战, 展望 AquaUAV 未来的发展方向。

1 AquaUAV 概览

通过模仿两栖动物的结构, 仿生 AquaUAV 的运动能力可媲美甚至超过两栖动物。这些仿生生物包括鸬鹚、飞鱼、鲣鸟、飞鱿鱼和一些水生昆虫,

收稿日期: 2022-08-26; 修回日期: 2022-09-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(62103035); 北京市自然科学基金面上项目(3222016); 中国博士后科学基金项目(2021M690337); 中央高校基本科研业务费专项(2020JBM265); 北京市城市轨道交通实验室项目(353203535)

作者简介: 侯涛刚, 副教授, 研究方向为仿生机器人, 电子信箱: houtaogang@bjtu.edu.cn; 杨兴帮(通信作者), 副教授, 研究方向为仿生机器人和康复辅助医疗, 电子信箱: yangxingbang@buaa.edu.cn

引用格式: 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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.02.001

涉及鸟类、鱼类、门头足类动物和昆虫。

1.1 鸬鹚

仿生 AquaUAV 的研究出现在 2005 年,洛克希德马丁公司(LMC)开发了一种潜艇发射的带有可变形翅膀的无人机,如图 1(a)所示,称为“鸬鹚”。“鸬鹚”着陆时会模仿鸬鹚快速飞溅入水,但它没有在水下自主移动的能力。此外,研究人员正在研究

鸬鹚的运动学^[9],即其拍打起飞的过程^[4],然而尚未达到样机阶段。

通过分析认为鸬鹚的仿生样机欠缺,至少存在 2 个原因:一方面,鸬鹚是从水的表面潜入水中,相比于与鸬鹚同属鹈形目的鳀鸟,研究后者从空中潜入水中的方式更有意义;另一方面,鸬鹚扑翼起飞的过程复杂,对其的研究还处于理论和仿真阶段。



图1 “鸬鹚”无人机(a)及 GULL 24(b)、GULL 36(c)

1.2 海鸥

2007、2008 年,英国 Warrior (Aero-Marine) Ltd. 以海鸥为蓝本,开发了 2 款水上飞机 GULL24 和 GULL 36^[5],如图 1(b)、(c)所示。GULL 系列无人机可在海面上滑行、起飞和降落,可在空中飞行,但不能潜水,主要用于高效的海上监视。分析认为,对海鸥的仿生研究核心是从水面潜入水中的过程,与鸬鹚类似,由于它在下潜高度和速度上都要比鳀鸟的入水方式有所欠缺,所以后续的仿生样机减少。

1.3 飞鱼

2007 年,密歇根大学开发了“飞鱼”水上无人机,用于持续的海洋监视^[6-7],如图 2(a)所示。该无人机具有特殊的起降结构和控制方法。一般情况下,该无人机在海面漂流执行监测任务,当其被风浪吹出监测区时,会自主从海面起飞回监测区继续监视。2007—2016 年,该团队一直在研究气动构型优化和气动性能、航电系统、飞行管理系统、自动导航与控制系统、路径规划、太阳能收集系统等^[8-9],其成果对后续水空跨介质飞行器的发展具有重要的指导和参考意义。

2009 年,北京航空航天大学(BUAA)开发了“飞鱼”样机^[10]。这款飞行器不仅可以在水面上起降,还通过模拟水鸟密度变化的压力罐、压载水舱

等设计实现了漂浮和潜水,如图 2(b)所示。它是第 1 款能够进行水下航行、水/空、空/水过渡的水陆两栖无人机,但样机性能仍然较差,起飞速度较慢。

2011 年,麻省理工学院(MIT)提出的“飞鱼”样机^[11]如图 2(c)所示。团队通过水下发射实验测量了水下阻力和出水时刻的力,发现功率密度与速度的平方成正比,并提出了 4 种鱼鳍波动推进的理论设计,发现推力与鱼鳍后缘幅度有关,最后,提出了基于中央模式发生器(CPG)的多执行器运动控制算法。该研究为未来研制完整的水陆两栖飞鱼机器人奠定了重要的基础。

2013 年,斯坦福大学仿生学与灵巧操作实验室(BDML)通过模仿飞鱼从水下飞出并在空中滑翔的过程,提出了一种跳跃滑翔无人机^[12-14],如图 2(d)所示。该样机依靠碳纤维弹簧弹起,一对翼展 70 cm 的机翼可使其滑翔 5 m。这种弹射加滑翔的运动模式拓展了跳跃机器人的水平运动范围。虽然其不是两栖无人机,但碳纤维弹簧具有很高的能量密度,对于 AquaUAV 的水/空过渡具有很大的启示。

2021 年,济州国立大学(JEJUNU)的两栖无人机^[15]如图 2(e)所示。以理论计算获得翼展、弦长、机身直径、水平尾翼和垂直尾翼等的设计参数并对

样机建模,通过CFD(computational fluid dynamics)仿真得到无人机在空气和水中的压力和流场分布。然后通过FSI(fluid structure interaction)模型分析了5种常用的轻质材料。结果表明,与其他轻质材料相比,环氧玻璃纤维复合材料具有轻质、高刚度、低等效应力等优点,表明该材料在AquaUAV的应用方面具有良好的潜力。

飞鱼的身体非常适合在水下潜水(图2(b)、(e)),不论在水面上(图2(a)、(b))还是在水下起飞(图2(c)、(d)),都具有良好的运动特性,随后可以展开胸鳍在空中滑翔(图2(c))。这些运动特性吸引了大量研究人员进行仿生研究,不断尝试构建各种形式的样机。

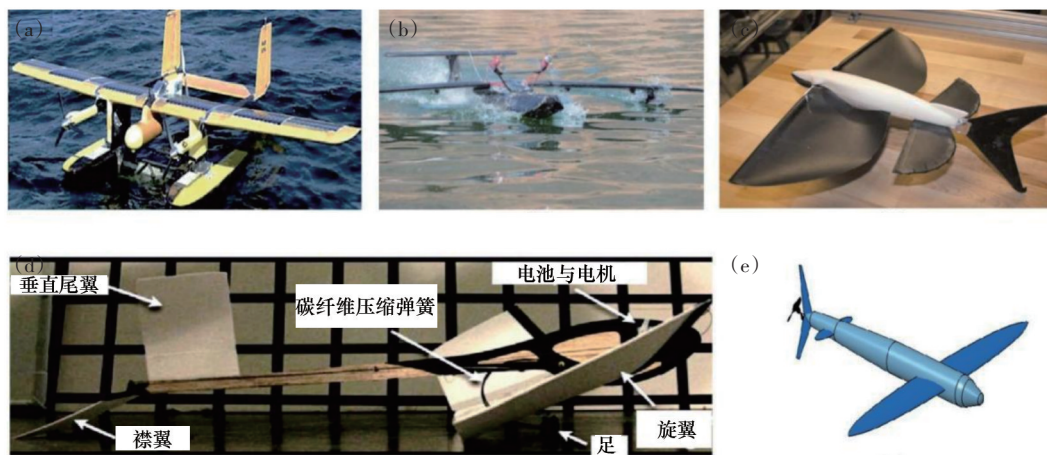


图2 仿生飞鱼样机

1.4 崖海鸦

2010—2014年,布里斯托大学的Lock等^[16-19]仿照崖海鸦设计了一种跨介质无人机机翼,由柔性薄膜制成,由电机驱动拍打,通过四连杆结构进行伸缩,如图3(a)所示。该团队在不同的扑动方向、频率、振幅等条件下测量了机械推进效率和推力系数,结果证明了使用收缩扑翼进行水下推进的可行性,这为扑翼式跨介质飞行器的发展提供了宝贵的理论支持。

麻省理工学院的Izraelevitz等^[20]受到海雀和海鸥等水鸟利用翅膀游泳和飞行的启发,在2014年提出了一种基于直线运动的扑翼式AquaUAV。该运动模式可以像海龟游泳一样产生无升力的推力,也可以像海鸟一样在低速时产生巨大的升力,如图3(b)所示。扑翼式直线运动是一种结合了龟类和鸟类的颤振特性的新颖高效的方式,非常适合在AquaUAV中应用。

2015年,美国海军研究实验室(NRL)设计了一

种混合型水上无人机^[21],具有2对尾翼,机身前部为主翼,机身顶端为小翼。研究表明,通过选择适当的主翼参数可以提高飞行稳定性,如图3(c)所示。并且当4个翅片都拍动时,飞行器能够以超过1节的速度推进。结合流动求解器和六自由度模型,还研究了无人机降落在水面时的轨迹和受力,证明了无人机的机翼在与水面碰撞时不会损坏。

2018年,北卡罗来纳州立大学(NCSU)的Stewart等^[22]设计了一种模仿崖海鸦的固定翼AquaUAV,如图3(d)所示。机翼上设置一个通风口和一个出口,使无人机可装载水下潜、排水起飞。对于推进方式,使用2对电机和螺旋桨分别作为空中和水下推进系统。水空过渡阶段采用垂直起降方式实现快速过渡。从空中到水下时,主要依靠重力,而从水下到空中时,会同时运用空、水两套推进系统共同作用进行起飞,以满足推力要求。最后结合CFD仿真和实验验证了样机的升力和推力满足跨介质过程的要求。

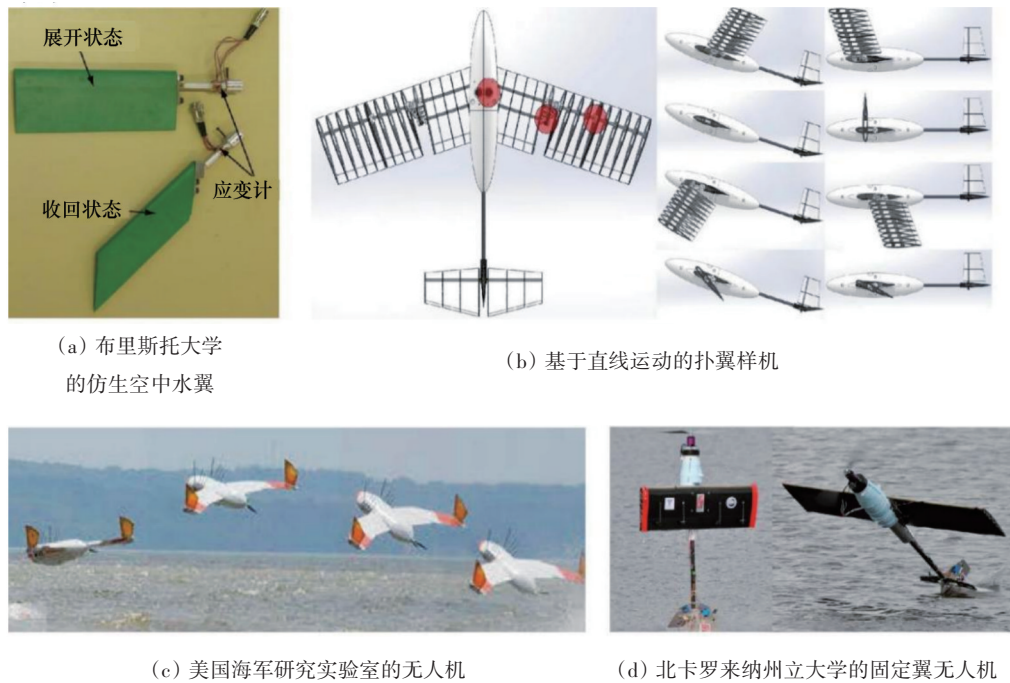


图3 崖海鸦仿生样机

1.5 鳀鸟

2012年,麻省理工学院林肯实验室的Fabian等^[23]首次以鳀鸟为灵感,设计了一种仿生鳀鸟无人机,如图4(a)所示。该样机模仿鳀鸟俯冲入水方式,设计可变后掠翼减少入水时阻力,可以7 m/s的速度落入水中,且机翼可在0.25 s内快速折叠。虽然这一初步研究缺少对鳀鸟的形态和生理特征的仿生度,但是它为仿生AquaUAV的灵感提供了一个新的选择。

2012—2014年,北京航空航天大学对鳀鸟俯冲入水进行了大量研究,如图4(b)所示。2012年,利用CFD研究了鳀鸟以不同速度和倾角入水时的冲击加速度,证明了鳀鸟的身体结构可以有效地降低冲击力^[24-26]。而后,该团队建立了一个仿生鳀鸟的3D模型,并通过CFD模拟技术得到了机身纵轴方向的冲击加速度以及机翼后掠角在入水时的变化^[27-28]。随后,基于仿真结果研制了仿生样机^[29-30],真实地获得了在入水时的机身纵轴方向的冲击加速度和机翼根部径向载荷。以上结果对于仿照鳀鸟俯冲入水的样机设计提供了数据支撑。

2016年,伦敦帝国理工学院(IC London)的

Siddall等^[31-33]进一步研究了喷水推进器,并设计了潜水式高功率起飞两栖无人机AquaMAV,该无人机装有液态CO₂气罐并使用SMA(形状记忆合金)阀门来控制CO₂的释放。其模仿乌贼的喷水推进,利用高压CO₂产生的高压水射流成功实现了高速水空过渡,且机翼为90°可变,如图4(c)所示。AquaMAV可以减少发射过程中的水阻力,其自身重量为100 g,滑翔速度超过11 m/s。该无人机的头部安装螺旋桨,与CO₂推进器形成的混合推进系统推进了该类航行器的水空过渡速度与效率。

2019年,皇家墨尔本理工学院(RMIT)的Guo等^[34]设计的仿生鳀鸟样机如图4(d)所示。样机设计为65°后掠式机翼,并设计混动推进系统,水下发射使用压缩气体推进器,控制飞行使用可折叠的外部螺旋桨,水下航行则使用固定的内部螺旋桨。对推进系统得仿真和实验分析,验证其在水中和空气中可产生足够高效的推力。

2020年,新墨西哥州立大学(NMSU)的Peña等^[35]设计的仿生鳀鸟样机如图4(e)所示,研究了样机的机翼性能、浮力控制和推进机构等。该团队充分利用鳀鸟机翼形状的优势,采用升力线理论

(LLT)、涡格法(VLM)、3D面板法等三维分析方法对鳐鸟的翼形进行分析。此外,由于鳐鸟无人机体积小、浮力大,该团队还设计了一个压载水舱。如果系统需要更大的浮力,可以装 CO_2 ;反之,如果需要的浮力较小,则可以装水。该罐可与压缩 CO_2 一起使用,为水下发射提供高压推力。必要时可使用调节器控制 CO_2 注入以维持 CO_2 储存量,这种对

CO_2 储存能力的保护有助于实现多次水下发射。

鳐鸟从空中俯冲入水的方式十分高效,通过折叠翅膀将身体变成纺锤形,然后高速潜入水中。以上样机都是在此仿生特征上研究的。但是,鳐鸟的水空过渡能力还不够优秀。IC London和RMIT的样机为了通过巨大的爆发力实现水下起飞,采用了喷水推进器的设计,这正是飞鸟贼的特点。

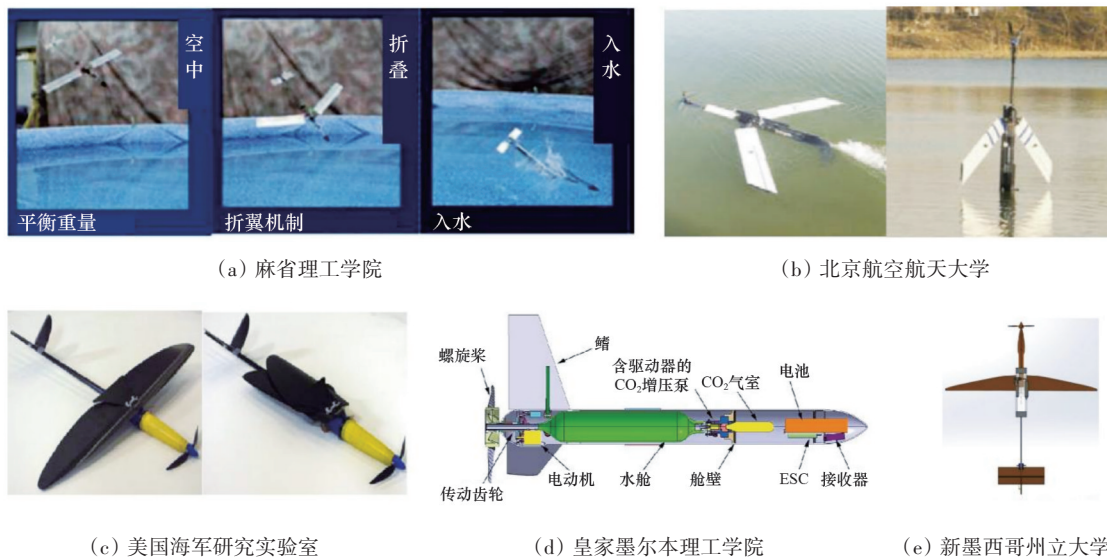


图4 鳐鸟仿生样机

1.6 飞鸟贼

2015年,伦敦帝国理工学院的Siddall等^[36]设计了一种仿鸟贼的射流推进系统用于水空过渡,如图5(a)所示。该团队使用高功率密度液态 CO_2 罐来产生射流并推动无人机快速起飞。

2019年,Zufferey等^[37]提出了一种可以从水面连续起飞的样机,它依靠固体反应物 CaC_2 与水的化学反应,产生可燃气体 C_2H_2 ,由火花塞点燃 C_2H_2 气体在无人机内部爆炸,如图5(b)所示。爆炸产生的巨大压力会将水箱内的水挤出,产生高压射流。 CaC_2 的高能量密度和储存能力,实现了该样机从水面多次发射的操作。

2019年,Hou等^[38-39]提出了一种软体仿“鸟贼”样机,通过喷射高压 CO_2 气体实现水下喷水推进发射,如图5(c)所示。此外,该团队还设计了一种柔软的变形鳍片,依靠波纹管来实现鳍片的折叠变

形,从而能紧紧地贴合在机身上。通过风洞、水洞试验证明,软鳍展开时可产生足够的升力,折叠时可显著降低水下运动阻力。作为一种水下生物,飞鸟贼已经进化出2个适合跨介质的运动特征,即喷射出水 and 展开胸鳍在空中滑翔。

Zufferey等和Hou等分别在推进方式和AquaUAV的变结构机翼方面进行了重要创新。对于推进方式,依靠固体反应物的高能量密度,提高了水下发射速度,并实现了可重复性。对于可变结构设计,依靠软体材料增强了无人机的结构恢复能力,并通过模仿飞鸟贼的收缩鳍将阻力最小化。

1.7 水栖昆虫

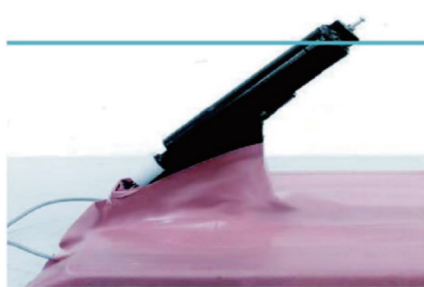
2015年,哈佛大学的Chen等^[40]开发了一种微型AquaUAV——RoboBee I。该无人机重量只有80 mg,依靠压电致动器来驱动扑翼。RoboBee I不仅可以完成空中和水下运动,还可以通过拍动翅膀

实现空-水过渡。这是第一款可以实现该功能的昆虫机器人。更重要的是,该工作对扑翼的流体动力学分析不仅能够运用于昆虫鳞片,从毫米级的昆虫到米级的鱼类和鸟类都可以应用。因此他们推测扑翼可以应用于更大尺寸的两栖无人机。

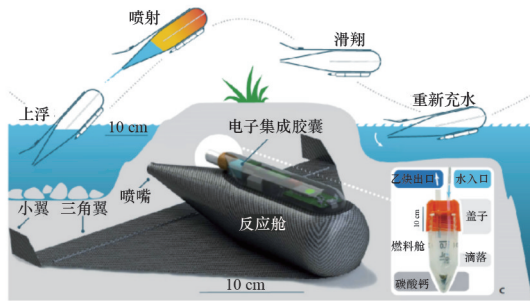
2017年,Chen等^[41]开发了RoboBee II,如图5(d)所示。该机器人通过水下电解板产生氢气和氧

气,然后用火花塞点燃氢氧混合物爆炸,成功实现了基于喷气推进的跨介质运动。

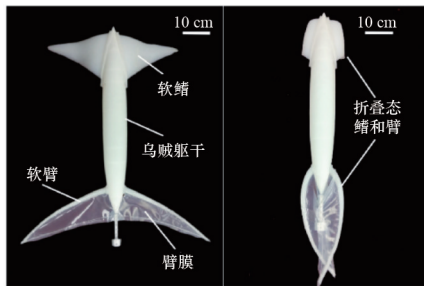
氢氧能源是一种新型的绿色能源,具有超高比能。电解水化学反应的合理应用,可以实现AquaUAV从水下到空中的连续发射,为未来中大型AquaUAV的能源发展带来无限可能。



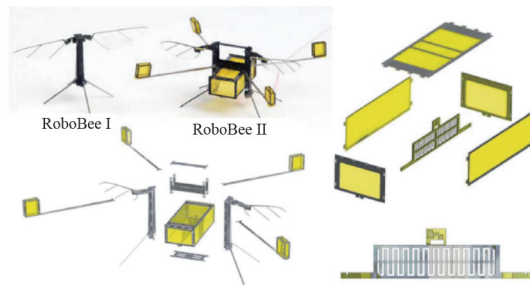
(a) 帝国理工学院的喷水推进器



(b) 帝国理工学院水反应燃料无人机



(c) 北京航空航天大学仿飞乌贼航行器



(d) RoboBee I 和 RoboBee II

图5 飞乌贼样机

2 关键技术

2.1 变结构机翼设计

将具有跨介质能力以及跨介质应用潜力的机

翼设计结构总结为2类,分别为变后掠翼结构、软体结构,如表1所示。此外,各用一个示例展现这2种结构的展开和折叠状态,如图6所示。

表1 结构兼容性设计优劣横向对比

变结构设计	制作方法	致动器	优势	劣势
变后掠翼设计	3D打印(如碳纤维) CNC(computerized numerical control)加工	电池和伺服/电机,流体传动和齿轮油缸	响应速度快,布局和操作简单,刚度高	破坏躯干流线型,对空气动力学有一定限制
软体鱼鳍设计	橡胶,形状记忆合金,离子交换聚合物金属复合材料,响应水凝胶	物理驱动(如SMA(shape memory alloy)),流体驱动(如气动、液动),电活性聚合物驱动	高灵活性,高仿生性,空气动力学良好	刚度低,抗性差

2.1.1 变后掠翼

大多数具有水空过渡变形能力的样机都选择了模仿鳗鱼俯冲入水的变后掠翼结构^[42]。该结构最重要的特点是通过简单的驱动控制来实现机翼的向后折叠,如图6(a)^[32]所示。考虑到空气动力学性能,机翼的轮廓通常从NACA翼型中选择。此外,机翼是使用碳纤维或其他轻质高强度材料通过3D打印技术制造的。电池常用于为感应系统或液压系统供电。通过折叠机翼,减少了过渡时机身的截面积,增加了跨介质运动的流畅度。但机翼即使完全折叠,也会在一定程度上破坏机身的流线型结构,从而增加 AquaUAV 在过渡过程中的阻力。而且这种方案通常会简化机翼的结构设计以实现机翼的平滑变形,机翼面积小、展弦比低,使得机翼的气动性能难以达到预期的目标。

2.1.2 软体结构

受飞鸟软鳍变形的启发,Hou等^[39]提出了可变形软体结构,如图6(b)所示。利用软体结构控制技术^[43]实现软体材料的变形,软体机翼可以在空-水过渡过程中包裹到机身上,从而减少阻力。软体机翼的潜在制作材料有橡胶^[44-45]、形状记忆合金^[46-48]、离子交换聚合物-金属复合材料^[49-50]、水凝胶^[51]等。驱动方法可分为物理驱动^[52](例如SMA驱动)、压力驱动^[53](例如高压气体^[54]、高压液体^[55]、内燃爆炸^[56])和其他软体致动器(例如介电弹性体^[57])。Hou等的研究成功实现了基于气动波纹管

和高压CO₂驱动的飞鸟软鳍设计。软体结构相比于传统的刚性摆动翼结构具有更好的动力学特性和高度仿生的外形设计,可以显著提高仿生 AquaUAV 的性能。然而,软体材料由于其自身的局限性^[58],其刚度较小,并且软体机翼在高速飞行条件下容易抖动,因此姿态控制的可靠性不能得到充分保证。可变刚度技术^[59]可能有助于解决这个问题。

2.1.3 变结构机翼总结

机翼是 AquaUAV 的重要组成部分。想要增强样机在2种介质之间的运动能力,就必须设计出一种既能够适应水空多模式运动,又能在水空过渡过程中受控折叠的可变机翼系统^[60]。现有的水空跨介质样机变结构机翼设计仍存在刚性与仿生相似性的矛盾。

2.2 能源与推进系统

AquaUAV 运动性能的评估标准包括深度、高度、运动速度、水空过渡速度、执行连续发射的能力,强大的能量和高效的推进方式对其性能起着决定性的作用。

2.2.1 射流推进

喷水推进器可以在出水过程中为 AquaUAV 提供强大的动力^[10],它是最快的水空过渡方式之一。对于水空过渡过程,能源功率输出速度的要求是推进器的设计中最为关键的。因此,总结了一些高能量密度和高功率密度的能源用于喷水推进。根据反应物的物理性质,AquaUAV 现有的喷水动力来源可分为气体、液体和固体3类。此外,每种反应物也可被划分为2类:一类是已被研究和应用的,另一类则是具有潜在应用的,如表2所示。

1) 气体反应物。

按其工作原理可分为释放压缩气体和点燃烃类气体2种方式。释放压缩气体是一种广泛应用的方式。如图7(a)所示,在许多样机^[36-38]中,压缩CO₂是主要动力来源,这种方式具有许多优点,安全可靠、气体释放响应时间快、反应物价格低廉、易获得等。但由于气瓶受限于样机尺寸,CO₂储罐仅够单次水下发射,且需要经常更换,气瓶的气密性也难以保证,难以实现重复起飞。因此点燃烃类气

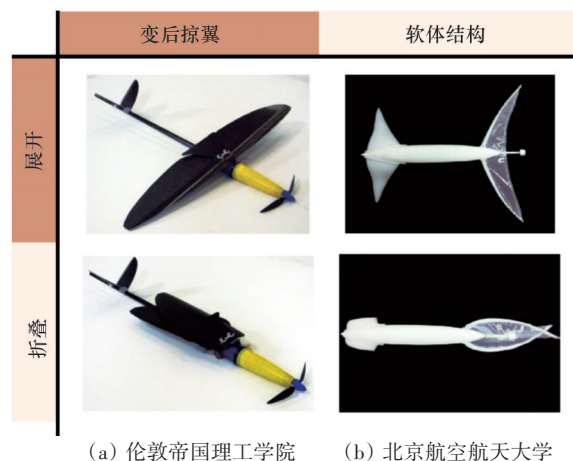
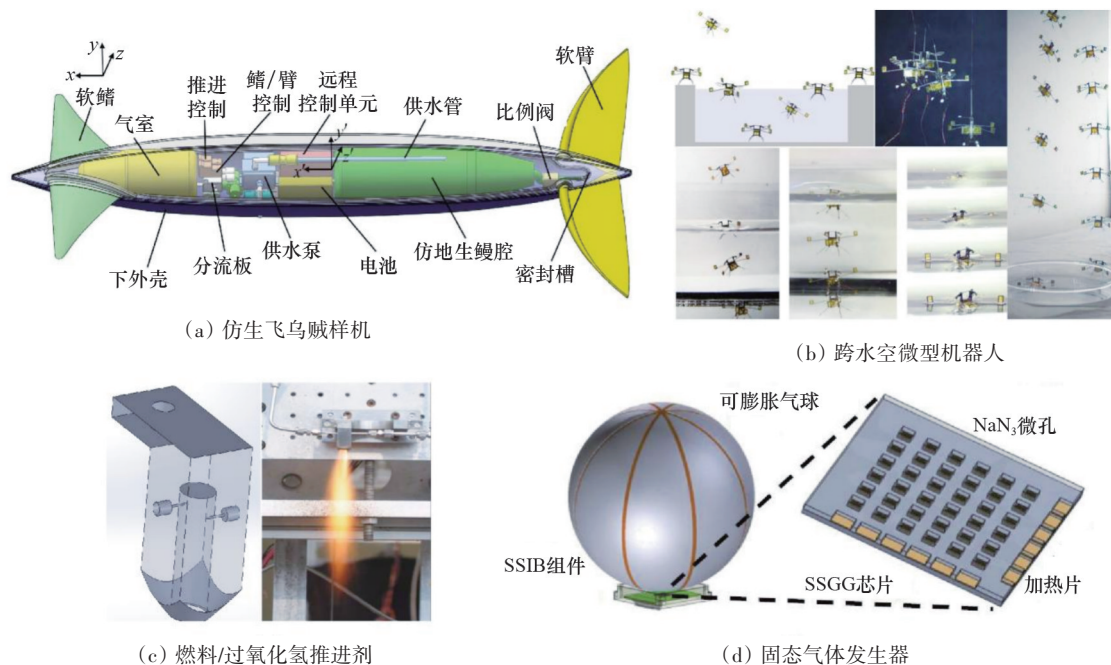


图6 2种机翼结构的展开和折叠状态

表2 基于水射流的推进模式

反应物种类	反应原理	反应物	优势	劣势
气体	释放压缩气体	压缩 CO ₂	可靠性高,反应快,成本低,布局和操作简单	有限容器不能实现连续推进
	烃类气体的点燃	丁烷	在有限容器中储存量大,反应快	释放气体量控制困难
液体	电解反应	水	超高的比能量,反应物可就地取材	液体环境可能腐蚀电路板
	自燃反应	H ₂ O ₂ 、煤油	高密度比,在喷射推进中表现出色	额外的容器可能增加总重量
固体	碱金属氢化物中储存气体的点燃	碳化钙	高能量密度的反应物可以实现连续发射	固体可大量存储气体
	储存气体的释放	叠氮化钠	固体可大量存储气体	反应条件严苛



SSGG—固态气体发生器;SSIB—固态膨胀气球

图7 喷水推进系统

体这种方式更适合应用于 AquaUAV。Tolley 等^[56]成功地使用液态丁烷作为跳跃式软体机器人的爆炸反应物来实现快速致动。类似的,氢气、甲烷^[61]、丁烷^[56]都具有很大的可压缩性,只需要小气瓶就能实现高存储容量,从而使样机更轻。此外,这种方式可以用于重复起飞。起飞时,只需要控制气阀放出可燃气体,用火花塞点燃,化学爆炸的冲击力就会将水喷出,实现跨介质过渡。然而,可燃气体释

放量和氧气供应的控制精度是该方法实现最佳发射效率必须要考虑和解决的问题。

2) 液体反应物。

根据工作原理,它们还可以分为电解反应和自燃反应。电解反应的著名例子是水的电解^[41],如图7(b)所示。通过电解板电解水收集氢气和氧气,从而增加样机的排水量,使其漂浮起来。到达水面后,用火花塞点燃气体,实现爆炸喷水推进发射。

这样,既合理利用了样机的液体空间,且阶段的化工产品也对环境友好,实现了电能到化学能到机械能的整体转换。氢氧能是一种超高比能的能源,在未来的应用中需要克服电解板被环境液体腐蚀的问题,并且还需要提高气体的定量控制能力,才有可能应用于中大型 AquaUAV。

自燃反应是一种应用于火箭发动机的推进原理^[62],尚未有其应用于 AquaUAV 的报道。反应物是由高浓度过氧化氢催化分解产生的氧气,和雾化醇或煤油混合而成。借助高浓度过氧化氢的催化放热,无需单独的点火装置即可使反应物发生化学爆炸,从而实现喷水推进。Chen 等^[63]使用与过氧化氢混合的煤油基燃料进行自燃反应,如图 7(b)所示。团队成功地实现了 21 ms 的低点火延迟和 $\Delta H = 32.5 \text{ kJ/g}$ 的高热值。这种过氧化氢双组分燃料具有比肼更高的密度比冲^[64],这一特性可能会使 AquaUAV 具有在水下和空中二次加速的可能性。但使用这种反应物推进的样机需要 2 个独立的液体储罐和 1 个合适的雾化系统,并且需要考虑高浓度过氧化氢的强氧化性^[65]和液体管道的合理设计。

3) 固体反应物。

固体反应物可分为 2 种类型:一种是利用碱金属氢化物产生可燃气体并点燃,另一种则是利用固体反应物产生并释放高压气体。碱金属储存的氢

气具有用作反应物的潜力,但氢气释放产生的大量热量具有一定的安全风险。因此,大多数类型的碱金属尚未被应用。然而,用电石与水混合产生一定量的乙炔气体,并使用火花塞点燃乙炔,该方法成功实现了 AquaUAV 在水面上的爆炸推进起飞^[37,66],如图 7(c)所示。与液体和气体相比,固体反应物往往具有非常高的能量密度,每次起飞只需要非常少量的反应物。固体反应物叠氮化钠已被应用于汽车中的安全气囊,其可以通过在高温下从叠氮化钠中释放的氮气或通过对车辆的外部撞击来打开。此外,叠氮化钠分解可用作脱轨技术的固态气体发生器^[67-68],如图 7(d)所示。当叠氮化钠用作气动微执行器^[69]时,几乎瞬间分裂以产生钠和氮。氮气可直接用于推进,钠可与水混合进一步用作附加动力。但在 AquaUAV 领域使用时应注意叠氮化钠的毒性和化学反应条件的合理设计。

2.2.2 电机与螺旋桨

基于电动机和螺旋桨进行推进也是一种很好的推进方式,大多数螺旋桨推进方式的能源是电池。螺旋桨的布局 and 结构是整个推进系统设计的关键。因此,根据螺旋桨的数量将这种推进方案分为 3 类,其螺旋桨的布局结构分别为 1 个多模式螺旋桨、2 个组合螺旋桨、多个组合螺旋桨。表 3 总结了各推进方式的优缺点。

表 3 基于电机和螺旋桨的推进模式

推进方式	能源	优点	缺点
单一多模态螺旋桨	电池	布局和操作简单,在单一介质运动中表现良好	无法实现样机的出入水过渡
2 个组合螺旋桨	电池	可以实现运动的整个过程(潜游、飞行、水/空气过渡)	增加了系统的复杂度,样机出入水过程缓慢
多组合螺旋桨	电池	实现运动的全过程和动作姿态的可控性	极大增加了系统的复杂度,样机出入水过程缓慢
电机和螺旋桨+水喷射	电池和压缩 CO ₂	实现运动的全过程,迅速出水	极大增加了系统的复杂度

1) 单一多模态螺旋桨。

单一多模态螺旋桨只有 1 个电机和 1 个螺旋桨,它与减速器的多模态运动相配合,实现在水中和空气中的运动。例如,在图 8(a)中,Tan 等^[70]开发了一种新型减速器,可以帮助螺旋桨在 2 种介质之

间灵活切换,实现样机的高效运动。这种推进很容易实现,可以制作出轻量级的样机,但不能让样机实现水与空气之间的过渡。

2) 2 个组合螺旋桨。

这种结构的样机头部有 1 个螺旋桨,尾部有 1

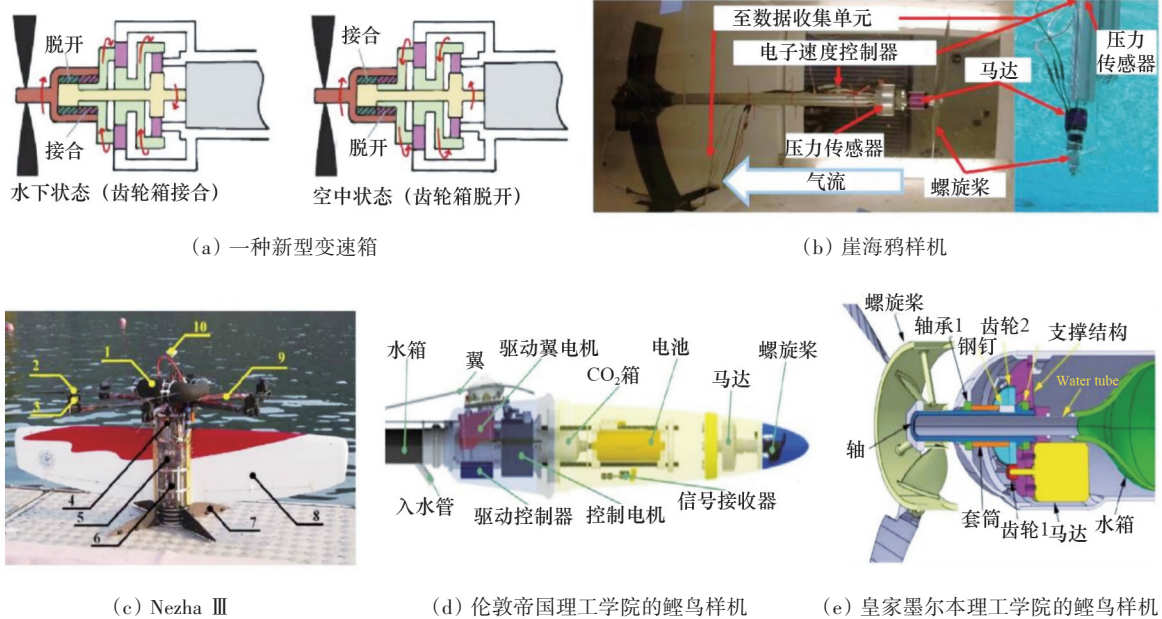


图8 螺旋桨推进系统

个螺旋桨。一个用于空气驱动飞行,另一个用于水下驱动飞行,两者的结合可以实现水和空气之间的过渡。Stewart等^[22]开发的“Uria aalge”样机,如图8(b)所示。这样的螺旋桨布局可以让样机完整地完水下单介质运动以及水空跨介质运动。然而,该样机在进出水过程中的运动速度相对较慢。

多组合螺旋桨通常使用4个或6个或更多的螺旋桨进行推进。经过样机的3次迭代,Lu等^[7]开发了Nezha III,如图8(c)所示,利用6个螺旋桨联合实现单介质和跨介质运动,样机姿态可控性高。然而,这种方案的跨介质过程也比较慢,并且会产生很多额外的噪声。

2.2.3 混动推进系统

该系统结合了基于压缩二氧化碳的喷水推进和电机螺旋桨推进,拥有跨介质过程中喷水推进的快速性和单介质运动中螺旋桨推进的高效率^[32,34]。混合推进系统具有完成水下-空中单次全过程运动的能力,包括在单一介质中运动和跨介质运动,如图8(d)、图8(e)所示。然而,这2种推进系统不可避免地增加了样机的复杂性和整体重量,研究人

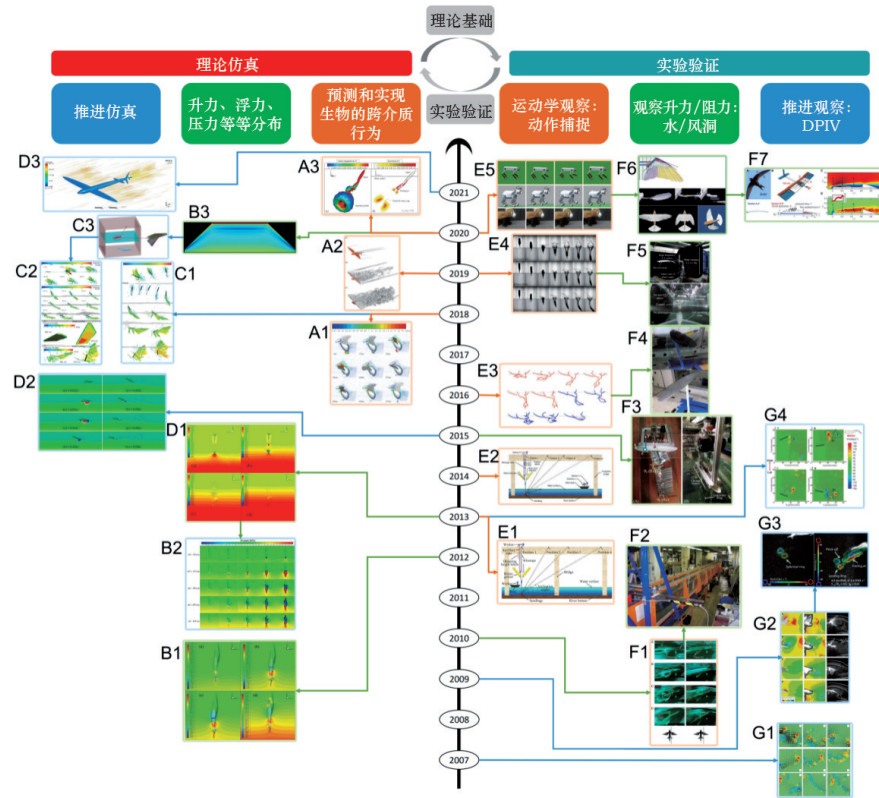
员需要在样机的尺寸重量与运动性能间做出折衷。

2.2.4 能源与推进系统总结

通过对样机实例的分析,总结了3种推进方式的工作原理和优缺点。其中,认为喷水推进是最有可能满足上一节所述的性能要求并且使AquaUAV实际表现良好的推进方式。因此,在现有应用实例的基础上,提出了其他3种用于喷水推进的潜在能源,即丁烷气、 H_2O_2 和煤油、叠氮化钠。

3 分析方法

为了使AquaUAV的设计更加合理,常常需要使用一些计算机模拟方法、实验方法及其组合。在设计阶段,CFD被用于生物体飞行、游泳和过渡运动的机理分析,以及仿生样机的设计优化分析。此外,还需要建造风洞、水洞等测试环境,以进行空气动力、水动力性能测试。同时采用运动捕捉、数字粒子图像测速(DPIV)等观察技术验证样机的实际运动性能,进一步对AquaUAV运动性能进行分析和优化。选择了一些典型的仿真和实验案例(图9)。



“理论模型”和“实验验证”下方同色方框表示同一研究方向;同一条线连接同一年的研究;相同的字母表示相同类型的研究

图9 典型仿真案例和实验验证案例(按时间顺序排列)

3.1 理论分析

计算流体仿真最早开始运用于水上飞机的研究,逐步被广泛应用到水空跨介质飞行器领域。

3.1.1 预测并再现跨介质过程

在仿生学研究中,一些生物的运动行为难以通过传统方式捕捉、研究、复现,如鱼类游动、鸟类飞行、两栖飞鱼和水鸟的跨介质运动等,但CFD技术可以通过对研究对象进行建模并做出合理假设,提供高效的数值计算方法模拟复现生物的运动。所以CFD技术被越来越多地应用到仿生学研究中。

Huang等^[72]利用CFD技术对鸬鹚脚蹼在起飞时的运动学和动力学特征进行了分析。通过使用VOF(volume of fluid)模型中的标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型、Navier-Stokes方程等进行计算,再现了鸬鹚起飞过渡的过程,如图9中A1所示。Deng等^[73]利用CFD技术对3种不同飞鱼模型的空气动力学性能进行了数值研究,数据表明这些模型在纵向上是稳定

的。之后通过三自由度(3-DOF)动力学模型预测了滑翔范围,如图9中A2所示。Hou等^[74]对乌贼的3D模型进行网格划分,通过Fluent的集成预处理环境GAMBIT指定边界条件,使用RANS(reynolds average Navier-Stokes)模型计算流体运动并捕获涡旋特征,采用VOF模型作为多相流模型。最终,定量研究了乌贼水-空多模式运动的运动学和动力学信息,展现了完整的运动数据和流场信息,如图9中A3所示。

3.1.2 机翼的升力、浮力、压力分布问题

水空两栖生物的翅膀能够在水、空气2种介质中对自身姿态和运动角度进行调整,而这2种环境的密度相差了近3个数量级。因此对于水空两栖生物翅膀上力的分布随运动变化特点的研究一直都是该领域的重要一环。CFD技术的有效数值仿真实验可以定量再现机翼在水空多模式运动中力的分布特征。Yang等^[24]使用CFD技术重现了鳃鸟

的入水,利用VOF技术计算并获得了以不同初速度入水时鳐鸟身体周围的流场和压力分布,并分析了不同浸入深度下的压力分布,如图9中B1所示。Wang等^[25]使用CFD技术研究了鳐鸟入水阶段的冲击加速度,如图9中B2所示。建立了鳐鸟运动中的3D模型,结合RANS方程与VOF技术来模拟空气-水混合流体的流动。使用预处理软件ICEM对设定的计算域进行网格划分,并选择有限体积法(FVM)求解方程。Peña等^[35]使用气动分析方法对鳐鸟的机翼与其他有机翼对比,发现仿生机翼的升阻比最高,如图9中B3所示。

3.1.3 推进力仿真

生物的推进结构所提供的水空推进力是成功实现跨介质运动的重要保证。CFD技术为生物推进力测试开辟了新道路。Huang等^[4,75]提出了流固耦合(FSI)模型,该模型基于有限元法的瞬态动力学模块进行计算。在流体计算模块中,使用基于有限体积法(FVM)的Fluent模块进行计算。在流体模型中,使用 $k-\varepsilon$ 湍流模型,流体重力(浮力)和VOF气液两相流模型进行计算,如图9中C1、C2所示。在之后的工作中^[76],使用基于有限体积法(FVM)的集成求解器解决了两相流中可变形生物的水动力问题。最终呈现了基于计算流体动力学(FSI-CFD)流固耦合的数值物理模型解决方案,如图9中C3所示。

3.1.4 运动性能仿真

在研究出仿生生物的一些运动特性后,还需要对样机进行一些流体分析,比如样机推进力的定量测试和出入水过程力的分布。Yang等^[29]通过CFD技术计算了鳐鸟样机入水的冲击加速度和冲击力,如图9中D1所示,得到并分析了入水过程中的相分布和压力分布。Ramamurti等^[21]设计了一款用于浅水区起飞的混动型UAV/UUV,通过CFD技术探究飞行器滑行起飞时在不同攻角(angles of attack)下的空气动力学特性以及水下推进力的产生。前者对前翼的稳定性做了验证,后者验证了拍动鳍能够产生足够的推力,如图9中D2所示。Mathaiyan等^[15]在仿生飞鱼的过程中使用了SST $k-\omega$ 模型。他们观察到共轴螺旋桨引起了机翼尾部的湍流。

该发现指导了基于推杆和共轴螺旋桨的无人机推进系统的设计,如图9中D3所示。

3.2 实验验证

计算机仿真技术需要通过一些运动、流场观测技术进行实验验证。使用运动捕捉技术(DPIV)观测生物和飞行器的水、空运动学状态。风洞、水洞技术可用来对飞行器的气动力和水动力性能进行测试。DPIV技术能够将流场可视化,揭露生物的推进机制和推进力的流场分布情况,从而探索各工况参数对推进速度场的影响规律。

3.2.1 运动学观测

动作捕捉技术是利用外来设备对实验目标的运动过程进行捕捉和相应的技术处理,可以测量物体在物理空间中的位置和方向,然后通过计算机编程语言记录信息。该技术可以精准提供目标移动时的运动学信息,包括速度、角度、加速度等,从而建立运动模型。

Liang等^[27]利用动作捕捉技术对鳐鸟样机进行溅落实验,得出较大的机翼后掠角、较小的下降高度和入水倾斜角可以减小样机枢轴关节的径向负荷,如图9中E1所示。同时发现,机翼载荷与下降高度、进水倾角和机翼后掠角之间的关系可用于计算样机俯冲时的机翼载荷^[28],如图9中E2所示。Huang等^[3]利用视频图像处理技术分析了鸬鹚的脚蹼轨迹和受力特征,揭示了鸬鹚有效推动力的机制,如图9中E3所示。实验所使用的2个摄像头可以对图像标记点进行视频合成和3D运动重建。Sharker等^[77]捕捉了11种3D打印的鸟头暴跌入水的场景,解释了跳水潜水者头部形状对暴跌过程安全性的影响,如图9中E4所示。Zhao等^[78]利用动作捕捉技术对视频中真实动物的运动进行了捕捉,如图9中E5所示,交互式四足机器人对捕捉的图像进行模仿,从而简化了机器人运动控制器的设计,并提高了机器人的仿生度和交互能力。

3.2.2 升力、阻力等观测

为探究飞行器的气动力、水动力性能,需要搭建合适的实验环境。利用风洞、水洞环境和六维力传感器,研究员可以对飞行器在空中和水中的升力系数、阻力系数、俯仰力矩系数等进行测定,从而验

证 CFD 对飞行器水/空动力学性能的仿真结果。

Park 等^[79]进行了风洞实验,研究飞鱼飞行的空气动力学特性,提供了飞鱼飞行的定性和定量数据,并对具有不同机翼形态的真实飞鱼样机进行了力测量,如图 9 中 F1 所示。他们发现飞鱼翅膀的空气动力学性能可与各种鸟的翅膀媲美,并且飞鱼具有一些与现代飞机相同的形态特征,符合空气动力学的设计。Lock 等^[16]利用应变测试仪配合水洞实验,探索了样机机翼的俯仰变化对所受阻力的影响,如图 9 中 F2 所示。Izraelevitz 等^[20]利用搭载六维力传感器的小型水下拖曳平台(水洞),验证了样机机翼设计的线性扑动概念,如图 9 中 F3 所示。Siddal 等^[32]设计了风洞试验评估样机机翼性能和纵向稳定性,并评估了空气动力学系数和样机的入水深度,如图 9 中 F4 所示。在水洞实验中使用相同的力进行平衡,证实了风洞实验的测量。Hou 等^[38]使用水下牵引平台来测试样机的水下流体动力性能,如图 9 中 F5 所示。牵引平台牵引样机运动,六轴力传感器记录三轴力和三轴扭矩,测试样机软鳍和机翼在不同的攻角下展开和折叠状态的水动力性能。还进行了风洞试验,利用高频力平衡法采集数据,研究了乌贼样机的软体鱼鳍在风洞流场下的性能。Chang 等^[80]为测试飞行器 PigeonBot 欠驱动的软生物混合变身机翼的有效性,在风洞中对机翼进行动态弯曲和扩展,如图 9 中 F6 所示,确定了在空气动力载荷下机器人羽毛的运动能力。Luca 等^[81]开发了一套仿生分离流翼(bioinspired separated flow wing),在风洞中利用六维力传感器测试了机翼的升力和阻力,在水洞中用 DPIV 技术获得了分离流翼周围的流场,捕获了流分离、从层流过渡到湍流,以及它们重新连接的细节,如图 9 中 F7 所示。

3.2.3 推进力观测

推进力观测可使用 DPIV 技术,其将图像处理技术与流场可视化、单点测速和多点测量技术相结合,主要用于测量复杂的瞬态流量,例如非定常流量,湍流、涡流和多相流量。主要用于测量复杂的瞬态流量,例如非定常流量,湍流、涡流和多相流量。示踪剂颗粒在激光薄板光(或自然光)辐照下

散布在流体中,在垂直方向上通过相机镜头的光学膜获得运动粒子的流体图像。对粒子图像进行深度处理和分析,可以得到测量区域的二维速度场。

对于生物运动时形成的空气流场和水流场,如鸟拍打翅膀、鱼类拍打鳍等,DPIV 技术可以对其进行可视化,进而深入揭示生物的推进机制,为仿生学的推进力探索提供切实可行的方法。Hedenström 等^[82]使用 DPIV 技术对蝙蝠的尾流图像进行分析,并使用定量的尾流涡度和总循环量来推导空气动力的大小并构建尾流拓扑,成功构建了新的基于涡流的蝙蝠飞行空气动力学模型,如图 9 中 G1 所示。Young 等^[83]使用基于详细机翼运动学的三维计算流体动力学进行模拟,分析了蝗虫机翼变形的空气动力学性能。之后对真实蝗虫使用烟雾可视化和数字粒子图像测速技术,验证了仿真结果,如图 9 中 G2 所示。Wen 等^[84]结合 DPIV 与机电技术,定量测量了机器鱼的功率、尾流场和自推进速度,从而对其效率进行定量测量,如图 9 中 G4 所示。DPIV 测量结果显示,同时具有伞形和钩形运动学结构的样机所产生的流动模式,其大部分特征是楔形的双行尾流结构。

此外,有学者也使用 DPIV 技术对喷水推进涡环进行研究,进而对乌贼喷水推进力产生机制进行分析^[85-87],如图 9 中 G3 所示。

4 挑战与展望

4.1 水空跨介质航行器的结构折衷

AquaUAV 的设计是为了在空中和水中自由穿梭移动。在空中,样机通过升力飞行,需要轻型的机身结构和较大的翼展;而在水下,则需要重型和流线型机身。为了平衡这一矛盾,本研究从 2 个角度总结了解决方案。

1) 设计一种多模态结构,仿照可以入水的鸟类。具体来说,就是变后掠翼在空中展开以增加升力,并在水中折叠成纺锤形以减少流动阻力。然而,现有的变后掠翼技术还不能很好地平衡在水和空气中的共同适应性。分析认为,可变刚度技术^[88]和折纸技术^[89]等一些技术的融合可能会促进样机

的发展。

2) 设计压载水舱,模仿海洋生物,吸水下沉,需要飞到空中时通过喷水减轻重量,从而滑翔更远的距离。该方法还有很多方向有待探索,例如研究如何缩短吸水和注水时间,如何提高水气转化效率,如何使水射流产生更大推力等。

4.2 跨介质过程折衷

水空跨介质过程需要较大的爆发力,而在水下或空中航行时则需要稳定的输出。在现有研究中,螺旋桨可以提供稳定的输出,喷水推进可以满足大爆发力的要求,但并不稳定。因此认为,未来的研究重点将至少有2个部分:一是深入研究喷水推进的可控方式,使其兼具爆发力和稳定输出。二是将这2种推进结合起来,分时段工作。然而,这会使结构变得庞大,因此将这2种动力耦合的小型化方法是一种潜在的解决方案。然后是能源供应问题。电池是一种常见的能源,经常用于螺旋桨推进,因为电力很容易使用,但它们的能量密度有限。一些新型的燃料电池,例如小型氢氧燃料电池^[90],可能会在未来解决这个问题。内燃机具有高能量密度,只需少量燃料即可实现长续航。然而,内燃机的大重量使得样机难以进行跨介质运动。此外,通过携带气体、液体和固体化学燃料,将化学能直接转化为动能也是一个热门话题,如电石分解^[37]、丁烷气爆炸等。综上所述,在之后的研究中,跨介质过程的燃料反应条件、反应产物的处理、样机可控性等方面仍需进一步探索。

4.3 生物仿生度

在进化过程中,生物的身体结构趋于更好地适应环境。因此,使样机与生物具有更高的相似性一直是仿生样机的设计目标。然而,跨介质生物的身体结构复杂,必须对仿生过程的各个阶段进行深入研究。例如:如何精细收集形态数据,如何准确建模,如何获取关键特征,如何将其应用到样机中,如何评估和优化仿生学的相似性等。

本研究总结了CFD技术在生物行为再现、生物或样机推力和升力的数据采集、运动捕捉系统观察到的运动学数据的处理等方面的应用。这些研

究对促进仿生样机的改进起到了重要作用。然而,现有的CFD模拟大多都基于少量参数及约束,而生物体的各种形状参数之间往往存在复杂的耦合关系。因此认为未来可能的研究方向是增加更多的参数,合理设计模型降维解耦,以获得更全面的物理模型。此外,基于一些新型复合材料^[91]、柔性结构^[92-93]和混合推进技术^[94],降维后的耦合关系可以逐渐在仿生样机中实现,进一步提高样机的仿生相似性。在未来,经过大量的CFD模拟并结合样机的实验观察,可以形成样机和生物体的相似性评价体系,以进一步指导和优化仿生样机的设计。

5 结论

水空跨介质飞行器可极大地拓展飞行器的空间活动范围,两栖生物给予了其极大的设计灵感。本文从仿生角度入手,按照被仿生物的生物类型分类,将近年来的仿生水空跨介质样机进行梳理总结,希望找到各类仿生样机中的设计要点及难点。进一步地,提取出机翼结构兼容性设计和能源与推进两种关键技术进行详细分析。对于机翼,变后掠翼结构简单稳定但破坏了流线型外形,而软体机翼有更高的仿生度。对于能源与推进技术,电机螺旋桨的推进效率高,而射流推进技术具有更高的瞬时功率和能量密度,有较大的研究空间,因此总结了3类有潜在价值的能源方式。或许,螺旋桨与射流推进相结合形成混动推进的方式是一种更优的方法对于样机的验证,仿真和实验相辅相成。基于CFD技术可模拟并预测生物的跨介质行为,并对机翼的空气、水动力性能和推进力仿真;运用运动捕捉技术、风洞水洞实验、DPIV技术将上述过程实验验证。

在仿生跨介质飞行器样机的研究过程中,还有很多困难需要克服,例如如何更好地克服飞行器在水下和空中2种介质中的运动适应性难题,如何在水、空2种介质中实现快速、平稳的过渡,如何克服传统的生物仿生度难题,如何进一步提高样机运动的高效率等问题,是未来需要重点关注的问题。

参考文献 (References)

- [1] Müller R, Abaid N, Boreyko J B, et al. Biodiversifying bioinspiration[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2018, 13(5): 053001.
- [2] Ajanic E, Feroskhan M, Mintchev S, et al. Bioinspired wing and tail morphing extends drone flight capabilities [J]. *Science Robotics*, 2020, 5(47): eabc2897.
- [3] Huang J G, Gong X, Wang Z Y, et al. The kinematics analysis of webbed feet during cormorants' swimming[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). New York: ACM, 2016: 301-306.
- [4] Huang J G, Li J Y, Chen H Y, et al. Design and CFD based simulation analysis of a biotic webbed feet propulsion mechanism for hydroplaning[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway: IEEE, 2018: 83-87.
- [5] Pengelley R. All hands on deck: The sky's the limit for shipboard UAVs[N]. *Navy International*, 2009, 12: 12-17.
- [6] Macy D, Eubank R, Atkins E, et al. Flying fish: A persistent ocean surveillance buoy with autonomous aerial repositioning[C]//AUVSI Conference 2009. Reston: AIAA, 2011: AIAA 2009-1902.
- [7] Eubank R, Atkins E. Unattended autonomous mission and system management of an unmanned seaplane[C]//Info-tech@Aerospace Conferences 2011. Reston: AIAA, 2011: AIAA 2011-1614.
- [8] Eubank R D. Autonomous flight, fault, and energy management of the flying fish solar-powered seaplane[D]. Michigan: University of Michigan, 2012.
- [9] Eubank R D, Bradley J M, Atkins E M. Energy-aware multiflight planning for an unattended seaplane: Flying fish[J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2017, 14(2): 73-91.
- [10] 刘华欣. 仿生跨介质飞行器机理研究及原型机工程 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2009.
- [11] Gao A, Techet A H. Design considerations for a robotic flying fish[C]//OCEANS'11 MTS/IEEE KONA. Piscataway: IEEE, 2011: 1-8.
- [12] Desbiens A L, Pope M T, Christensen D L, et al. Design principles for efficient, repeated jumpgliding[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2014, 9(2): 025009.
- [13] Desbiens A L, Pope M, Berg F, et al. Efficient jumpgliding: Theory and design considerations[C]//2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2013: 4451-4458.
- [14] Marks P. Robot takes to the air on the wings of a fish[J]. *New Scientist*, 2013(2916): 22.
- [15] Mathaiyan V, Vijayanandh R, Vijayanandh R, et al. Conceptual design and numerical analysis of an unmanned amphibious vehicle[C]//AIAA Scitech 2021 Forum. Reston: AIAA, 2021: AIAA 2021-1285.
- [16] Lock R J, Vaidyanathan R, Burgess S C. Development of a biologically inspired multi-modal wing model for aerial-aquatic robotic vehicles[C]//2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE, 2010: 3404-3409.
- [17] Lock R J. A biologically-inspired multi-modal wing for aerial-aquatic robotic vehicles[D]. Bristol: University of Bristol, 2011.
- [18] Lock R J, Vaidyanathan R, Burgess S C. Design and experimental verification of a biologically inspired multi-modal wing for aerial-aquatic robotic vehicles[C]//2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob). Piscataway: IEEE, 2012: 681-687.
- [19] Lock R J, Vaidyanathan R, Burgess S C. Impact of marine locomotion constraints on a bioinspired aerial-aquatic wing: Experimental performance verification[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2014, 6(1): 011001.
- [20] 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. Piscataway: IEEE, 2015: 5830-5837.
- [21] Ramamurti R, Geder J D, Edwards D, et al. Computational studies for the development of a hybrid UAV/UUV [C]//33rd AIAA Applied Aerodynamics Conference. Reston: AIAA, 2015: 2414.
- [22] 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.
- [23] Fabian A, Feng Y, Swartz E, et al. Hybrid aerial underwater vehicle[R]. Cambridge: Mit Lincoln Lab, 2012.
- [24] 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. Piscataway: IEEE, 2012: 569-574.
- [25] 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.
- [26] Yang X, Liang J, 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., in The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. Maui: ISOPE, 2011: ISOPE-I-11-199.
- [27] Liang J H, Yang X B, Wang T M, et al. Design and ex-

- periment of a bionic gannet for plunge-diving[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2013, 10(3): 282-291.
- [28] Liang J H, Yao G C, Wang T M, et al. Wing load investigation of the plunging locomotion of a gannet *Morus* inspired submersible aircraft[J]. *Science China Technological Sciences*, 2014, 57(2): 390-402.
- [29] 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. Reston: AIAA, 2013: 4422.
- [30] 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. Piscataway: IEEE, 2013: 1138-1143.
- [31] Siddall R, Kovac M. Fast aquatic escape with a jet thruster[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(1): 217-226.
- [32] Siddall R, Ortega Ancel A, Kovač M. Wind and water tunnel testing of a morphing aquatic micro air vehicle [J]. *Interface Focus*, 2017, 7(1): 20160085.
- [33] Armanini S F, Siddall R, Kovac M. Modelling and simulation of a bioinspired aquatic micro aerial vehicle[C]//AIAA Aviation 2019 Forum. Reston: AIAA, 2019: 3115.
- [34] Guo D, Bacciaglia A, Simpson M, et al. Design and development a bimodal unmanned system[C]//AIAA SciTech 2019 Forum. Reston: AIAA, 2019: 2096.
- [35] Pena I, Billingsley E, Zimmerman S, et al. Comprehensive sizing process, actuation mechanism selection, and development of gannet-inspired amphibious drones[C]//AIAA Aviation 2020 Forum. Reston: AIAA, 2020: 2764.
- [36] Siddall R, Kovač M. A water jet thruster for an aquatic micro air vehicle[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2015: 3979-3985.
- [37] Zufferey R, Ancel A O, Farinha A, et al. Consecutive aquatic jump-gliding with water-reactive fuel[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(34): eaax7330.
- [38] 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). Piscataway: IEEE, 2019: 4681-4687.
- [39] 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. Piscataway: IEEE, 2019: 1020-1026.
- [40] Chen Y F, Helbling E F, Gravish N, et al. Hybrid aerial and aquatic locomotion in an at-scale robotic insect[C]//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway: IEEE, 2015: 331-338.
- [41] Chen Y F, Wang H Q, Helbling E F, et al. A biologically inspired, flapping-wing, hybrid aerial-aquatic micro-robot[J]. *Science Robotics*, 2017, 2(11): eaao5619.
- [42] Shealer D A. Foraging behaviour and food of seabirds [M]//Schreiber E A, Burger J. *Biology of marine birds*. Boca Raton: CRC Press, 2002: 13-178.
- [43] Laschi C, Cianchetti M. Soft robotics: New perspectives for robot bodyware and control[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2014, 2: 3.
- [44] 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. Piscataway: IEEE, 2012: 4328-4333.
- [45] 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.
- [46] Kim S, Laschi C, Trimmer B. Soft robotics: A bioinspired evolution in robotics[J]. *Trends in Biotechnology*, 2013, 31(5): 287-294.
- [47] 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.
- [48] 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. Piscataway: IEEE, 2014: 21-26.
- [49] Nakabo Y, Mukai T, Asaka K. Biomimetic soft robots using IPMC[M]//*Electroactive Polymers for Robotic Applications*. London: Springer London, 2007: 165-198.
- [50] Stoimenov B L, Rossiter J, Mukai T. Soft ionic polymer metal composite (IPMC) robot swimming in viscous fluid [C]//*SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. Proc SPIE 7287, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2009*. San Diego: SPIE, 2009, 7287: 757-764.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] Rus D, Tolley M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 467-475.
- [54] Roche E T, Horvath M A, Wamala I, et al. Soft robotic

- sleeve supports heart function[J]. *Science Translational Medicine*, 2017, 9(373): eaaf3925.
- [55] Tang W, Zhang C, Zhong Y D, et al. Customizing a self-healing soft pump for robot[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 2247.
- [56] 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. Piscataway: IEEE, 2014: 561–566.
- [57] 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.
- [58] Calisti M, Picardi G, Laschi C. Fundamentals of soft robot locomotion[J]. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2017, 14(130): 20170101.
- [59] Hou T G, Yang X B, Aiyama Y, et al. Design and experiment of a universal two-fingered hand with soft fingertips based on jamming effect[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 133: 706–719.
- [60] Li D C, Zhao S W, da Ronch A, et al. A review of modelling and analysis of morphing wings[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2018, 100: 46–62.
- [61] Shepherd R F, Stokes A A, Freake J, et al. Using explosions to power a soft robot[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2013, 52(10): 2892–2896.
- [62] Whitmore S A, Merkley D P. Arcignition of a 70%–85% hydrogen peroxide/ABS hybrid rocket system[C]//53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Reston: AIAA, 2017: 5047.
- [63] Chen Y T, Zhou J Y. The auto-ignition of kerosene-based synthetic fuel/hydrogen peroxide propellants and its injector design[C]//2018 Joint Propulsion Conference. Reston: AIAA, 2018: 4775.
- [64] Schneider S J. Hydrogen peroxide–water–ethanol monopropellant blend for CubeSat propulsion[C]//AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum. Reston: AIAA, 2020: 3809.
- [65] Kolsgaard A. Hydrogen peroxide based reaction control system[C]//53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Reston: AIAA, 2017: 4925.
- [66] Siddall R, Kennedy G, Kovac M. High-power propulsion strategies for aquatic take-off in robotics[M]//Springer Proceedings in Advanced Robotics. Cham: Springer International Publishing, 2017: 5–20.
- [67] Roddy M, Hodges H, Roe L, et al. Solid state gas generator for small satellite deorbiter[C]//2017 IEEE 12th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. Piscataway: IEEE, 2017: 644–649.
- [68] Roddy M A, Huang P H A. A solid-state gas generator actuated deorbiter for CubeSats[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2019, 28(6): 1068–1079.
- [69] Norton A A, Minor M A. Pneumatic microactuator powered by the deflagration of sodium azide[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, 15(2): 344–354.
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] Huang J G, Liang J H, Wang T M, et al. Numerical analysis of the body, webbed-feet, and wings during cormorant’s take off[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway: IEEE, 2018: 94–99.
- [73] Deng J, Zhang L X, Liu Z Y, et al. Numerical prediction of aerodynamic performance for a flying fish during gliding flight[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2019, 14(4): 046009.
- [74] Hou T G, Yang X B, Wang T M, et al. Locomotor transition: how squid jet from water to air[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2020, 15(3): 036014.
- [75] Huang J G, Sun Y L, Wang T M, et al. Fluid–structure interaction hydrodynamics analysis on a deformed bionic flipper with nonuniformly distributed stiffness[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(3): 4657–4662.
- [76] Huang J G, Wang T M, Lueth T C, et al. CFD based investigation on the hydroplaning mechanism of a cormorant’s webbed foot propulsion[J]. *IEEE Access*, 2022, 8: 31551–31561.
- [77] Sharker S I, Holekamp S, Mansoor M M, et al. Water entry impact dynamics of diving birds[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2019, 14(5): 056013.
- [78] Zhao D, Song S F, Su J L, et al. Learning bionic motions by imitating animals[C]//2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway: IEEE, 2020: 872–879.
- [79] Park H, Choi H. Aerodynamic characteristics of flying fish in gliding flight[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2010, 213(Pt 19): 3269–3279.
- [80] Chang E, Matloff L Y, Stowers A K, et al. Soft biohybrid morphing wings with feathers underactuated by wrist and finger motion[J]. *Science Robotics*, 2020, 5(38): eaay1246.
- [81] Di Luca M, Mintchev S, Su Y X, et al. A bioinspired Separated Flow wing provides turbulence resilience and aerodynamic efficiency for miniature drones[J]. *Science Robotics*, 2020, 5(38): eaay8533.
- [82] Hedenström A, Johansson L C, Wolf M, et al. Bat flight generates complex aerodynamic tracks[J]. *Science*,

- 2007, 316(5826): 894–897.
- [83] Young J, Walker S M, Bomphrey R J, et al. Details of insect wing design and deformation enhance aerodynamic function and flight efficiency[J]. *Science*, 2009, 325(5947): 1549–1552.
- [84] Wen L, Wang T M, Wu G H, et al. Quantitative thrust efficiency of a self-propulsive robotic fish: Experimental method and hydrodynamic investigation[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(3): 1027–1038.
- [85] Anderson E J, Grosenbaugh M A. Jet flow in steadily swimming adult squid[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2005, 208(Pt 6): 1125–1146.
- [86] Bartol I K, Krueger P S, Stewart W J, et al. Hydrodynamics of pulsed jetting in juvenile and adult brief squid *Lolliguncula brevis*: Evidence of multiple jet 'modes' and their implications for propulsive efficiency [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2009, 212(Pt 12): 1889–1903.
- [87] Bartol I K, Krueger P S, Jastrebsky R A, et al. Volumetric flow imaging reveals the importance of vortex ring formation in squid swimming tail-first and arms-first[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2016, 219(Pt 3): 392–403.
- [88] Guo X Y, Li W B, Zhang W M. Adjustable stiffness elastic composite soft actuator for fast-moving robots[J]. *Science China Technological Sciences*, 2021, 64(8): 1663–1675.
- [89] Rus D, Tolley M T. Design, fabrication and control of origami robots[J]. *Nature Reviews Materials*, 2018, 3(6): 101–112.
- [90] Yang X B, Pei X. Hybrid system for powering unmanned aerial vehicles: demonstration and study cases[M]//*Hybrid Technologies for Power Generation*. Amsterdam: Elsevier, 2022: 439–473.
- [91] Wei X Y, Xiong J, Wang J, et al. New advances in fiber-reinforced composite honeycomb materials[J]. *Science China Technological Sciences*, 2020, 63(8): 1348–1370.
- [92] Pan J, Shi Z Y, Wang T M. Variable-model SMA-driven spherical robot[J]. *Science China Technological Sciences*, 2019, 62(8): 1401–1411.
- [93] Huang Y A, Zhu C, Xiong W N, et al. Flexible smart sensing skin for "Fly-by-Feel" morphing aircraft[J]. *Science China Technological Sciences*, 2022, 65(1): 1–29.
- [94] Rendón M A, Josselyn G M, et al. Aircraft hybrid-electric propulsion: Development trends, challenges and opportunities[J]. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 2021, 32(5): 1244–1268.

Frontier technology analysis and future prospects of aquatic un-manned aerial vehicle

HOU Taogang¹, JIN Dianzhe¹, GONG Yuyan¹, WANG Xinyang¹, PEI Xuan¹, YANG Xingbang^{2*}

1. School of Electronic Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2. School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract With the continuous development of bionic technology, human beings have made breakthroughs in observation and simulation modeling of amphibians such as flying fish, *Uria aalge*, Gannet, and flying squid. On this basis, the field of aquatic unmanned aerial vehicle (AquaUAV) has also developed rapidly, but there are still some key technical difficulties. According to the types of bionic organisms, this review summarizes the studies of the AquaUAV prototype, as well as the progress made in the wing structure, water/air propulsion method in recent years. Then, from the perspective of computer simulation and experiments, the research methods used in the study of kinematics and dynamics are analyzed. Finally, combined with the development status of this field, some key technical challenges are summarized and the future of AquaUAV is prospected.

Keywords aquatic unmanned aerial vehicle; variable wing design; propulsion system; computer fluid simulation (CFD) ●



(责任编辑 刘志远)