

引用格式: 刘相知, 崔维成. 潜空两栖航行器的综述与分析[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(增刊2): 1-14.

Liu X Z, Cui W C. An overview and analysis of the water-air amphibious vehicles[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(Supp 2): 1-14.

# 潜空两栖航行器的综述与分析



扫码阅读全文

刘相知<sup>1,2</sup>, 崔维成<sup>\*2</sup>

1 浙江大学 控制科学与工程学院, 浙江省 杭州市 310007

2 西湖大学 工学院 深海技术研究中心, 浙江省 杭州市 310024

**摘要:** 潜空两栖航行器是一种既可以在水下潜行又可以在空中飞行的航行器, 由于其在军事和民用领域的潜在广泛应用前景而成为当今研究的热点。为了更好地理解这种潜空跨介质航行器的设计要求, 介绍飞行器、水面船舶和潜水器等航行器在不同介质中的特性, 对这三者进行简要的对比分析, 并总结潜空跨介质航行器可能的特性。根据总体结构, 现有的潜空两栖航行器被分为3类: 固定翼飞行器、旋翼飞行器和仿生飞行器, 简要介绍每种类别的典型样机。最后, 讨论潜空两栖航行器的关键技术和挑战。

**关键词:** 潜空两栖航行器; 跨介质运动; 无人飞行器; 潜水器; 综述

中图分类号: U662.3

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01901

## An overview and analysis of the water-air amphibious vehicles

Liu Xiangzhi<sup>1,2</sup>, Cui Weicheng<sup>\*2</sup>

1 College of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China

2 Deep Sea Technology Research Center, School of Engineering, Westlake University, Hangzhou 310024, China

**Abstract:** The water-air amphibious vehicle, a kind of vehicle that can operate both in water and air, has been a hot topic of recent research for its potential wide application prospects in military and civil fields. To better understand the design requirements of this kind of water-air transmedia vehicles, the characteristics of vehicles in different media are introduced including the aircraft, the surface ship and the submersible. Then a brief analysis is made to compare these three kinds of vehicles and summarize the possible characteristics of water-air transmedia vehicles. According to the flight structure, the current water-air amphibious vehicles are divided into three categories: fixed-wing vehicle, rotorcraft and bionic vehicle and the typical prototypes of each category are reviewed. Finally, the key technologies and challenges are discussed.

**Key words:** water-air amphibious vehicles; trans-media locomotion; unmanned aerial vehicles (UAV); submersibles; overview

## 0 引言

随着人类对自然空间的不断探索, 船舶和航空技术在各自的领域里都取得了巨大进步。其

中, 飞行器因其速度快、机动性好等优点而得到了广泛应用, 但是也存在续航力较短、隐蔽性较差等缺陷, 而这些缺陷恰好可以由潜航器弥补, 潜空两栖航行器的概念因此被提出。潜空两栖航行器是

收稿日期: 2019-09-26

修回日期: 2019-11-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(51879157); 杭州市创新团队建设项目; 西湖大学PI入职启动基金资助项目(041030150118)

作者简介: 刘相知, 女, 1999年生, 本科生。研究方向: 智能机器人。E-mail: 3170101815@zju.edu.cn

崔维成, 男, 1963年生, 博士, 讲席教授。研究方向: 深海技术。E-mail: cuiweicheng@wias.org.cn

\*通信作者: 崔维成  
(C)1994-2020, China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

一种既可以在水下潜行又可以在空中飞行的飞行器,不仅扩展了航行的空间范围,还结合了飞行器和潜航器两种飞行器的优点。自20世纪初期以来,潜空两栖飞行器已成为包括娱乐、探险、搜索与救援以及军事在内的广泛应用的热门话题<sup>[1]</sup>,从而产生了无数的概念和变体。然而,由于水环境和空气环境之间的显著差异,飞行器要同时满足两种介质的要求并不是一件容易的事。自1934年提出潜空两栖跨介质飞机的概念以来<sup>[2]</sup>,美国等一些国家提出了许多载人飞机设计方案,但最终都没有真正地实现潜空两栖航行。后来,科学家们开始重视无人系统的研发,与有人飞行器相比,这种系统的复杂度和技术难度有所降低,由此取得了可观的成果。

本文拟系统地分析飞行器、水面船舶和潜水器等飞行器的特性和设计要求,并对每种介质中的飞行器进行比较分析。然后,将现有的潜空两栖飞行器分为固定翼飞行器、旋翼飞行器和仿生飞行器这3类,并根据运动结构对每种类别的典型样机进行回顾。最后,详细讨论潜空两栖飞行器的关键技术和挑战,包括飞行结构、跨介质过程、通信和导航,以及能源和有效载荷。

## 1 单介质飞行器

### 1.1 飞行器

飞行器是一种能够从空气获得支持力而飞行的飞行器。它可以通过使用静态升力或通过翼型的动态升力来抵消重力,或者在某些情况下通过喷气发动机的向下推力来抵消重力<sup>[3]</sup>。图1给出了飞行器的简要分类。

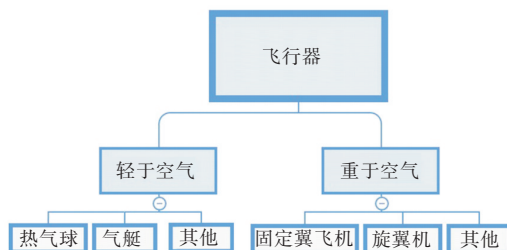


图1 飞行器分类

Fig.1 Types of aircraft

根据升力的产生方式,可以把飞行器分为2类:比空气轻的和比空气重的。前者依靠空气的静态浮力升空;后者依靠空气动力来克服自身的重力<sup>[4]</sup>。使用机翼的气动升力是最常见的,除飞艇、气球外的大多数飞行器依靠面积巨大的机翼或旋翼产生升力保持在空气中——固定翼飞行器通过机翼的向前运动而保持在空中,旋翼飞行器

通过旋转旋翼而保持在空中。

为尽可能地保障轻量性和机动性,飞行器需要配备质轻、功重比高的发动机和对空气做功来驱动装置。大多数飞机发动机都是轻型往复式活塞发动机或燃气涡轮机<sup>[5]</sup>,而小型多旋翼无人机通常都是电动的。与其他发动机相比,燃气涡轮机,即喷气发动机,可以提供更高的推力,更高的速度和更高的效率。所以,几乎所有大型、高速或高空飞机都使用喷气发动机<sup>[6]</sup>。发动机本身并非完整的航空动力设施,一般还需组合空气螺旋桨,才能获得升力和推力。

近几十年来,航空航天新材料和先进工艺得到了迅速发展,例如高强度铝合金、钛合金、高温合金、超高强度钢和复合材料等,为飞机的发展提供了物质安全保障<sup>[7]</sup>。飞机的制造通常会使用超硬铝和钢或钛合金。机翼和机身的连接部分由高强度结构钢制成;为了应对不同的压力,机翼和机身通常会使用硬铝作为表皮材料,它具有很高的抗拉强度和抗疲劳性<sup>[8-9]</sup>。除此之外,飞行器的材料还需尽可能地轻,在这方面可以借鉴小型无人机的案例。例如,DJI“精灵”4 Pro V2.0仅重1.3 kg,机身由钛合金和镁合金制成,机械臂由碳纤维制成。相应地,小型无人机的负载能力、飞行速度等也会受到更大的限制。DJI“精灵”4 Pro的轴距为350 mm,最高速度为50 km/h,飞行续航力为30 min或更短<sup>[10]</sup>。

飞行器以速度快、居高临下、跨越障碍能力强等见长。相比于旋翼飞行器,固定翼飞行器还具有负载能力强、航程远等优点;而旋翼飞行器则具有大多数固定翼飞行器所不具备的垂直升降、悬停、小速度向前或向后飞行等特点。这些特点使得旋翼飞行器在很多场合大显身手。与固定翼飞机相比,其缺点是速度低、耗油量较高、航程较短。另外,旋翼飞行器的飞行控制也较为复杂,主要是通过调整机身的姿态和旋翼的速度来实现的,俯仰/滚动将直接导致机体向前和向后/向左和向右移动,因而系统常具有非线性、强耦合和干扰敏感特性<sup>[11]</sup>。固定翼飞行器则通过飞机机翼和尾翼上的一些可移动表面(称为操纵面)来操纵和控制飞机的姿态或方向<sup>[12]</sup>,如图2所示。其基本原理是利用机翼表面两侧之间不同气流速度产生的气压差来实现定向运动。

### 1.2 水面船舶

水面船舶,包括船、舟、气垫船等<sup>[14]</sup>,通常可以分为非机动和机动这2类,如图3所示。手动和

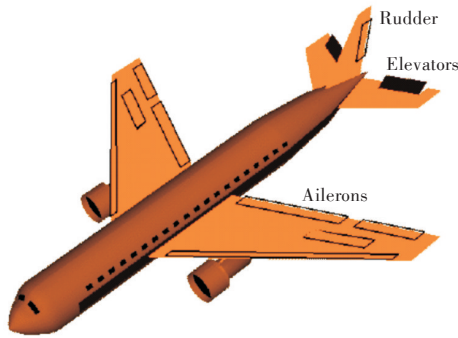


图2 飞机的操纵面<sup>[13]</sup>

Fig.2 The control surfaces of an airplane

力是前者的2种常见类型。它们是慢速船,有效载荷很小,通常用于娱乐和日常使用,例如独木舟和帆船。机动船舶则广泛用于运输、商业和军事领域,例如邮轮和航空母舰。本节仅讨论在水面航行的船舶,水下航行器将在第1.3节中讨论。

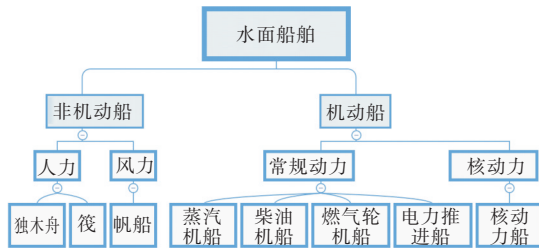


图3 船舶的分类

Fig.3 Types of surface ships

现代运输船舶的主机以柴油机为主<sup>[15]</sup>,驱逐舰以上吨位的大中型战斗舰船常采用燃气轮机。通过主机驱动螺旋桨等推进器工作,船舶得以实现在水上的运动。船舶的整体结构设计和材料选择,主要需要考虑克服船体的纵向弯曲<sup>[16]</sup>,保障船舶在静水中和海浪中的稳定性<sup>[17]</sup>和抗风能力。

船舶是水路交通的主要运载工具。与陆路交通和空中交通相比,水路运输的优势在于运载量大、能耗小、成本较低。但是水面船舶受自然条件影响较大,对水深和风浪情况等要求较高,且速度通常较慢。

### 1.3 潜水器

潜水器是一种用于水下操作的特种船舶,通常需要水面平台或是更大的潜艇作为支持,在水面上几乎没有功能<sup>[18]</sup>。

潜水器依靠浮力保持在水中,浮力大小与重力基本相当,需要能够精准地小幅改变重量、重心以上浮下潜或改变姿态。潜水器的潜浮和姿态控制基本上有2种方式:水静力和水动力,如图4所示。为了利用水静力下潜,潜艇和一些大型潜水器都有压载舱,可以容纳不同量的水和空气<sup>[19]</sup>。水静力下潜也称自由下潜,速度适中,能耗小,因

此在深海潜水器中被较多地使用。应该注意的是,在完全浸没之后,浮力仍然不是恒定的,并可能受到船体压缩和水密度等的影响<sup>[20]</sup>。因此,为了保持恒定的深度并执行精确的任务,潜水器还需要利用由不同种类的螺旋桨和操纵面(例如艉升降舵和围壳舵)产生的流体动力<sup>[21]</sup>。

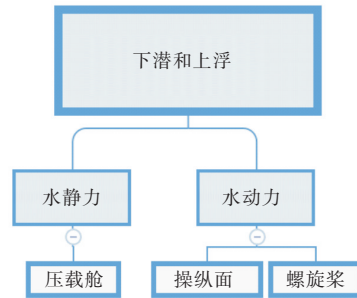


图4 下潜和上浮的方法

Fig.4 Methods of submersion and trimming

由于潜水器的工作环境是水下,因而无法直接采用常规水面船舶的动力装置,需要配备不依赖空气的动力装置和对水做功的驱动装置。潜水器通常使用电池作为能源<sup>[22]</sup>,配备多个可沿不同方向移动的推进器<sup>[23]</sup>,因而具有灵巧的机动性。潜水器需要完全密封且能够承受水压的完整外壳,其外形需要能减小水中各种阻力。著名的载人潜水器“阿尔文”号的结构图如图5所示。载人潜水器的尺寸相对较大,例如“蛟龙”号长8.2 m,宽3.0 m,高3.4 m。它在空中的重量不超过22 t,有效载荷为220 kg。它可以搭载1名潜航员和2名科学家以1 kn的巡航速度航行<sup>[24]</sup>。而小型无人潜水器的尺寸通常在1 m以内,并且速度更快。

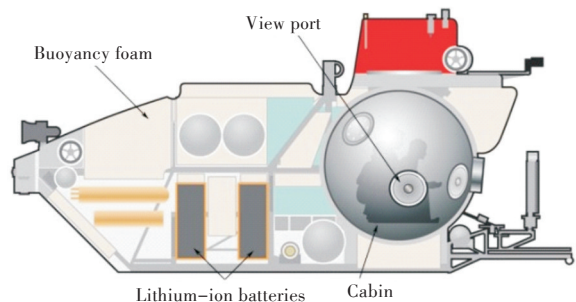


图5 美国载人深海研究潜水器“阿尔文”号结构图<sup>[25]</sup>

Fig.5 The structure diagram of Alvin, a manned deep-ocean research submersible owned by the United States

除了动力装置和结构设计,潜水器领域的主要限制之一是缺乏射频传输模式。水对高频电磁波具有不透性,因此在水下无法使用全球定位系统(GPS)以及高速水下无线电通信<sup>[26]</sup>,水下通信和导航必须依靠其他手段。

传统的长基线定位(LBL)方法通过测量到固



定标志物的飞行时间(time-of-flight, TOF)范围来估计绝对位置,并且精度、准确性、范围、分辨率和更新率非常有限。与缓慢、粗略但绝对的LBL定位相反,多普勒速度计程仪(doppler velocity log, DVL)或惯性导航系统(inertial navigation system, INS)会估算到达推断位置的距离。尽管航位推算速度快且分辨率高,但这种相对测量的误差会随时间单调递增,因此很难返回到已知位置或将全局测量值相互关联<sup>[27]</sup>。

有一些创新的方法可以更好地进行通信和导航,例如,当潜水器浮出水面时,可利用全球定位系统获得准确的位置并更新艇载惯性系统<sup>[28]</sup>。另外,在基于环境的导航算法方面已开展大量的研究和开发工作,该算法需要提取和匹配水下环境的特征或放置易于识别的人工地标<sup>[29]</sup>。

#### 1.4 比较分析和总结

由上文讨论可知:飞行器具有速度快、起降灵活、居高临下、跨越障碍能力强等诸多优势,然而能耗较大、续航能力较弱;将飞行器与潜水器结合,不仅可以扩展水下性能,还能通过空中飞行保障快速移动性;水面船舶是能耗最小的形式,水面状态可以作为一种过渡状态或长时间下的待机状态,在隐蔽性和机动性要求较低的情况下尽可能地减少能耗,延长续航时间。3种单介质飞行器的特性比较如表1所示。

表1 3种单介质飞行器的特性比较

Table 1 A comparison of the characteristics of the three types of single medium vehicle

类型	移动速度	能耗	灵活性	续航能力	隐蔽性	受自然条件限制
飞行器	快	高	高	低	中等	较大
水面船舶	慢	低	低	高	低	较大
潜水器	慢	中等	高	高	高	较小

通过总结3种单介质飞行器的特征,可以推测潜空两栖飞行器应该具有的特征和设计要求:

1) 动力和推进装置。潜航时的水下工作环境要求潜空两栖飞行器必须配备不依赖空气的动力装置和对水做功的驱动装置。从兼容性的角度考虑,电动机和螺旋桨的组合是较好的选择——电动机不需要有氧燃烧,而螺旋桨可以通过调整转速和转矩实现在空气和水体两种不同介质中的推进。但如果要追求更高的负载能力和移动性能,则可以考虑为空中/水上这样的有氧环境配备单独的内燃机作为动力系统。

更好的航行性能,潜空两栖航行器的外形设计需要能减小在流体介质中所受到的各种阻力,且需配备完全密封、能够承压的完整外壳,或需要对相应设备做防水处理。空中航行要求尽可能地轻量化设计,而潜航状态要求重力与浮力互相协调。航行器的主体材料可以采用强度高、耐腐蚀性能好的钛合金,必要时可以采用航空铝材以满足更高的性能要求。其他有特殊要求的组件应专门设计。

3) 要实现载人功能的技术难度较大。除了两种不同流体介质的兼容性、布局、结构设计、驱动装置等要求之外,还要考虑到机组人员的生命支持舱和其他相关的有效载荷。因此,载人两栖航行器面临的问题将更为严峻,在发展的初期,从小型无人航行器开始是合理的。

## 2 潜空两栖航行器的发展

潜空两栖航行器可以自适应地实现在水和空气这2种不同的流体介质之间的运动过渡,并可以在这2种介质中连续自主地导航<sup>[29]</sup>。在潜空两栖航行器的发展历程中,研究者们提出了很多不同的思路,它们在一定程度上实现了潜空两栖航行器的跨介质功能,有些仅在一种介质中有可控航行性能而将另一种介质作为短暂的过渡状态,有些航行器只能实现单次而非可重复的跨介质运动。这些研究案例虽不能称为真正的潜空两栖航行器,但是在很大程度上推动了潜空两栖航行器的发展,故在此处一并介绍。根据运动结构,可将当前的潜空两栖航行器和水空跨介质航行器分为3类:固定翼航行器(含折叠翼航行器)、旋翼航行器和仿生航行器。

### 2.1 固定翼航行器

固定翼航行器在发动机的推动下,借助流经机翼上下表面的气流速度差产生的升力实现空中飞行。飞行过程平稳,续航能力较好,飞行效率高<sup>[30]</sup>。固定翼飞行器虽具有优异的空中飞行性能,但提供升力的机翼严重阻碍了水下航行。有研究在固定翼的基础上提出了变后掠翼、折叠翼等方案,将机翼折叠收入机身,但需要设计复杂的机械结构。

早在第二次世界大战之前,前苏联提出了一项飞行潜艇计划,即LPL项目<sup>[2]</sup>。1938年,鲍里斯·乌沙科夫(Boris Ushakov)的团队完成了这种潜艇的设计和修改,如图6所示。LPL有3台1200 hp的发动机,使其可以以200 km/h的速度飞行。但是由于水下航行由电池供电,因此只能

6 n mile。然而由于第二次世界大战的爆发,LPL项目并未进入详细设计阶段<sup>[31]</sup>。



图6 飞行潜艇——LPL<sup>[32]</sup>  
Fig.6 Flying submarine: LPL

2005年,美国国防高级研究计划局(defense advanced research projects agency, DARPA)委托洛克希德·马丁公司对“鹈鹕”无人机项目进行了研究,该无人机可以在潜艇上发射并越过空—水表面<sup>[33]</sup>。其概念设计如图7所示。“鹈鹕”的可折叠机翼设计为海鸥翅膀的形状。机身采用钛合金制成,不仅强度高,而且还耐海水腐蚀。另外,机身的其他部分也被充入惰性气体以增加压力。在水下时,飞机的发动机和武器舱门都采用了充气膨胀式防水密封<sup>[34]</sup>。尽管装备有导弹发射器,但“鹈鹕”并不是像导弹那样从水里“发射”出来的,而是由像机械臂这样的引导装置释放出的。自行浮出水面后,“鹈鹕”将启动2台固体燃料发动机,在水面垂直起飞。“鹈鹕”只有在空中飞行的状态是可控的,在水面和水下并不具备其他功能。完成任务后,“鹈鹕”返回潜艇汇合处,并由水下机械臂将其回收进核潜艇<sup>[29]</sup>,这在一定程度上会降低潜艇的隐蔽性。

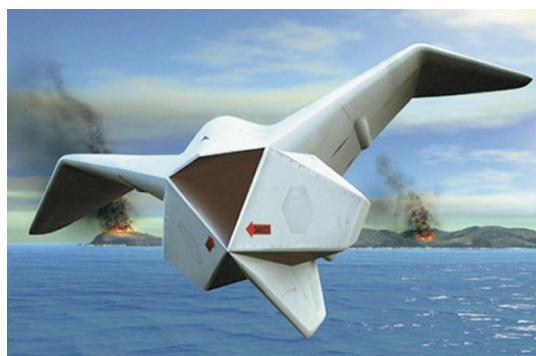


图7 美国“鹈鹕”无人机<sup>[34]</sup>  
Fig.7 The U.S. Cormorant UAV

2015年7月,波音公司宣布了一种可以浸没在水下的无人机设计<sup>[34]</sup>。无人机由一架主飞机运输到部署区域,然后通过远程控制将其从该主飞机上释放。在空中模式下,无人机配备2个机翼、稳定器和2套同轴螺旋桨叶片;在水下模式下,机翼、稳定器和机身相连。当机身进入水中时,机翼

和螺旋桨通过爆炸螺栓和水溶胶与机身分开,从而减轻重量并优化水动力特性,随后,无人机展开新的操纵面和螺旋桨,空中模式下的螺旋桨叶片组将从机身上脱离。水下任务完成后,它会浮出水面并将收集到的数据传输给其他飞机或指挥中心。该无人机可以实现空中和水下的可控航行,但每次任务中只能实现单次水空跨越,不可重复使用。

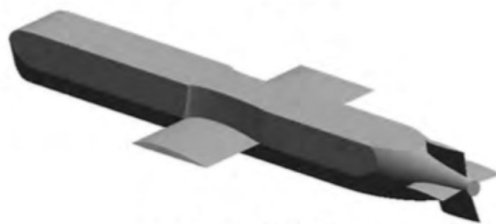
国内对潜空两栖航行器的研究起步较晚,此前许多国外的研究案例已经说明固定翼航行器在潜空两栖航行方面没有显著的优势,故国内并没有完全基于固定翼的潜空两栖飞行器研究。2017年,廖保全等<sup>[35]</sup>提出了折叠翼的方案。该设计通过改变外形来实现航行器的水空介质跨越:在水下航行时,采用类似鱼雷的外形;在空中飞行时,采用类似反舰巡航导弹的外形,如图8所示。水下航行时,航行器在较小的仰角范围内通过收缩机翼来减小阻力;空中飞行时,通过展开机翼来增大升力。对2种外形的气动/水动特性进行的CFD仿真表明,通过改变外形航行器能够同时满足水下航行和空中飞行的要求。但此设计方案并未实现实际应用。



(a) 水下航行状态



(b) 弹翼收放变形过程中



(c) 空中飞行状态

图8 折叠翼航行器设计方案<sup>[35]</sup>



## 2.2 旋翼飞行器

旋翼飞行器是指通过控制一个或多个旋翼进行航行控制的飞行器,具有垂直升降、悬停等功能,灵活性和控制性较高,成为了近年来的研究热点,且得到了商业化的应用。然而,大多数旋翼飞行器为小型多旋翼机型,能量效率低,续航时间短,若需要实现大负载能力和实战应用,还有许多亟待解决的技术问题。

2014年9月,Drews等<sup>[36]</sup>在评估了空中和水中航行器典型平台适应性的基础上,提出了混合动力无人潜空飞行器(hybrid unmanned aerial underwater vehicle, HUAUV)的概念,并为其设计了一个设计方案(如图9所示),以实现在两种环境中可控航行,该HUAUV的动力装置包括4个水下螺旋桨和4个空气螺旋桨。他们在论文中提出了运动学和动力学模型以及小尺寸模型的参数,通过仿真实验验证了控制器,包括在空中和水中可控航行以及介质转换问题。这是设想中第一款在介质过渡期间无需机械变形就能在两种环境中航行的飞行器。

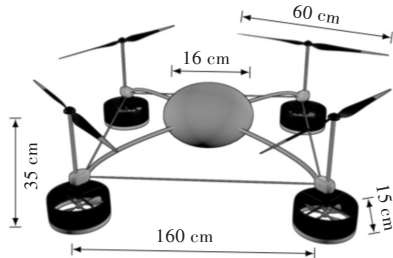


图9 Drews提出的混合动力无人机设计<sup>[36]</sup>  
Fig.9 A design of HUAUV proposed by Drews

2015年,Alzu'Bi等<sup>[37]</sup>开发了一种无线水空混合无人机。其深度控制系统由水深传感器和可变排放浮力装置组成,可自动将水泵入或泵出圆柱体,在空中和水中均采用由4个旋翼组成的同一套旋翼进行推进,如图10所示。在出水过程中,飞行器首先通过调节深度控制系统漂浮在水面上,然后像水上飞机一样起飞;在入水过程中,飞行器首先入水并漂浮在水上,然后通过调节深度控制系统浸入水中。

美国约翰·霍普金斯大学应用物理实验室<sup>[38]</sup>发明了一种无人飞行器,并将其命名为“耐腐蚀的空中隐身无人航海系统”(corrosion resistant aerial covert unmanned nautical system, CRACUNS),如图11所示,该无人飞行器适用于军事秘密探测任务。其研究团队表示,CRACUNS系统尚无法自动



图10 Alzu'Bi等设计的无线水空混合无人机<sup>[37]</sup>  
Fig.10 Alzu'Bi's HUAUV

潜水,在水下不具备可控航行能力,但能够长期潜伏在较深的水下并通过固定的底座在数百英尺的水下执行定点任务。必要时,它可以折断支架,然后自动上浮到水面,并借助4个旋翼升空。CRACUNS采用了一种使用3D打印技术的超轻型材料,可承受连续的水压。CRACUNS的敏感部件由压力腔保护,裸露的零件(例如4个电动机)上涂有防水层。值得一提的是,CRACUNS整个机身没有任何金属结构部件,并且表面没有通过切削或焊接加工。根据实验室测试,CRACUNS在盐水中工作2个月后仍能正常运行而没有任何损坏和锈蚀。



图11 耐腐蚀的空中隐身无人航海系统<sup>[38]</sup>  
Fig.11 The CRACUNS

2012年,国内学者王海晏等<sup>[39]</sup>提出了一种水空两用垂直跨越飞行器设计方案,有空中与水下2套动力装置,图12是研究团队针对不同的材料选择提出的3种设计方案。飞行器设计密度大于水,入水时首先逐步降低空气动力装置的转速,减少对飞行器的撞击损害;在触水后关闭空气动力装置,依靠飞行器自身重力没入水中,接着再启动水下螺旋桨进入潜航状态。飞行器出水时,采用2层动力接力推进出水,具备多次界面跨越能力和在多个介质中的持续航行能力,不需要辅助设备并且可以重复使用,具有较强的推广与应用价值。这种分层设计使得飞行器在水空介质跨越过



图12 王海晏等设计的水空两用垂直跨越航行器<sup>[39]</sup>  
Fig.12 The water-air vertical crossing vehicle by Wang Haiyan, et al

程中,至少有一种动力装置单独作用在空气或水中,避免了动力系统在水空两相环境下工作,防止水空混合环境对桨叶造成较大的损坏。

2017年,胡志强等<sup>[40]</sup>提出了一种水空两用推进装置设计方案,如图13所示,其中主体两侧对称设有附体,主体和附体通过前翼和后翼相连接,垂直稳定翼位于主体上方后部,前翼和后翼上均设有一可翻转的水空两用推进装置。此方案结合了负升力水翼型和多旋翼两种结构,具有较高的启发性。

然而上述两种设计方案均未有实际模型,只停留在理论阶段。

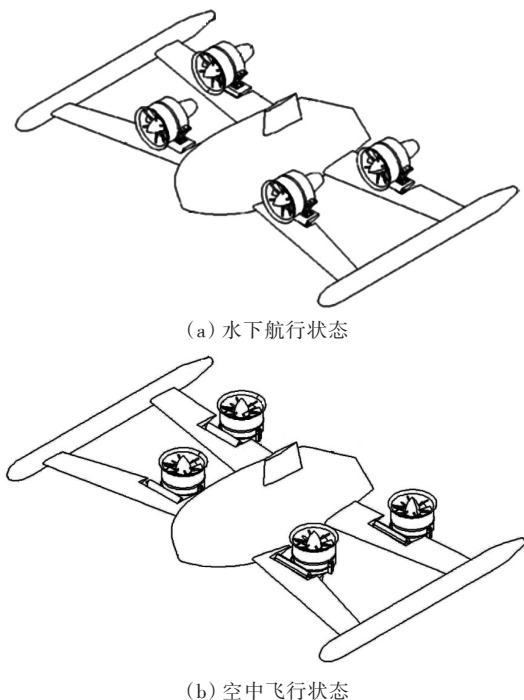


图13 胡志强等提出的水空航行器设计方案<sup>[40]</sup>  
Fig.13 Design scheme of water and air vehicle proposed by Hu, et al.

### 2.3 仿生航行器

2014年,Lock等<sup>[41]</sup>研究了可应用于潜水无人机的“海雀”(Guillemot)多模式仿生机翼。该研究首次对适用于两栖环境仿生结构的水-空运动模型进行了权衡分析,为将来实现潜空两栖航行器提供了理论支持和经验。

同年,Edwards<sup>[42]</sup>研发了一款名为Flimmer的无人飞行潜航器,如图14所示,其可在空中和水下操作,并在紧急情况下显著提高战术可用性。开发团队分别从鳶鸟(Gannet)的入水过程和飞鱼的出水过程中汲取了灵感,但与仿生技术不同的是,生物启发的技术以自然为出发点,可根据需要对技术进行调整以找到最佳解决方案。Flimmer可从陆上或舰船上发射,继而在需要的时候进行入水操作,但从潜航到飞行的功能尚在研发之中。在飞行状态下,Flimmer的速度可以达到50 kn (58 mile/h),在水下时最大速度为10 kn (12 mile/h)。该项目当前的研究重点在于效率和稳定性,以及因需反复入水而带来的总重管理和坚固性问题。

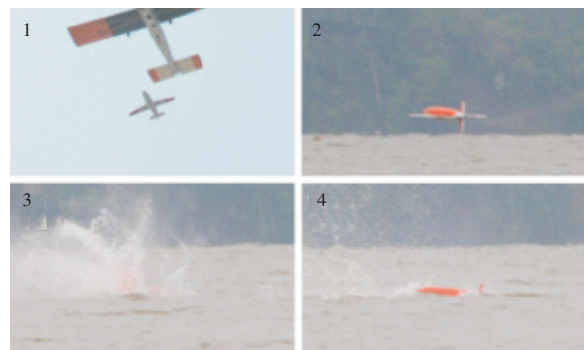


图14 Flimmer的飞行和入水过程<sup>[42]</sup>  
Fig.14 Flimmer flight and splashdown

如图15所示,哈佛机器蜜蜂(RoboBee)<sup>[43]</sup>是一种欠驱动的扑翼微型空中航行器,具有潜在的水上运动和空中运动能力。研发团队使用数值模型和流体力学实验研究了空气和水中的扑翼飞

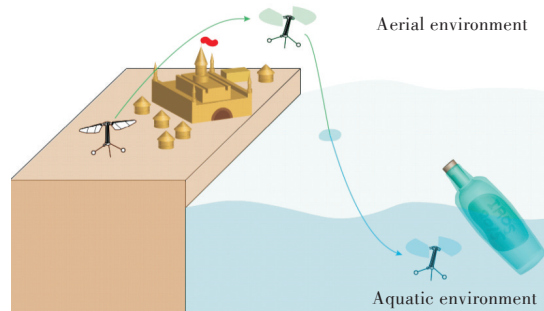


图15 哈佛机器蜜蜂<sup>[43]</sup>  
Fig.15 The Harvard RoboBee



行,并进行了大比例缩放分析,以估算适当的工作频率和扑翼振幅,从而使得两种流体都具有合适的被动机翼运动学。为了充分量化空气和水中的机翼—流体相互作用,他们引入了三维计算流体力学模型(3D-CFD),以研究降低雷诺数和运动学的影响,并验证了机器蜜蜂在开环控制中的水下移动能力。这是首次展示具有飞行和游泳能力的扑翼类昆虫机器人。图16所示的原型是一种新型混合机器蜜蜂<sup>[44]</sup>,可以飞行,跳入水中,游泳,将自己推离水面并安全入水。机器蜜蜂装有4个浮力室和1个中央集气室。一旦机器蜜蜂游到水面,室内的电解板会将水转化为可燃的氢氧混合气体(oxyhydrogen)。



图16 新型混合机器蜜蜂<sup>[44]</sup>  
Fig.16 The new, hybrid RoboBee

2016年,Siddall等<sup>[45]</sup>设计了一种独特的水上微型飞行器(aquatic micro air vehicle, AquaMAV),如图17所示,其灵感来自潜水鸟的跳水、潜水策略,它使用可重构机翼从飞行状态跳入水中。此外,该团队还提出了一种新颖的二氧化碳驱动的喷水推进器,从而实现出水滑行跳跃起飞,并开发出平面轨迹模型来预测水上微型飞行器的潜水行为。这款航行器的水下运动和空中运动都使用传统的螺旋桨推进。变构机翼为传统刚性结构设计并由电机驱动,这增加了结构重量和系统复杂性。

2009年,北京航空航天大学研制了一款潜空两栖飞行器概念机“飞鱼”<sup>[47]</sup>。“飞鱼”的设计仿照了飞鱼、水鸟的两栖生存特性及水上飞机的构造,具备水面滑跑起飞和降落的能力,同时通过类似潜艇的耐压舱、透水舱设计,实现了下潜和水下航行<sup>[48]</sup>。在此基础上,该课题组于2015年又开发了一款仿鸬鸟潜空两栖跨介质无人飞行器<sup>[49]</sup>,如图18所示。该飞行器可完成跳水式潜水的空—水过渡和垂直从水面起飞的水—空过渡。它采用格栅架机身和中空的无肋骨机翼,具有适应空气和水的结构特征,可快速注水和排水,其折叠式机



图17 Siddall的水上微型飞行器<sup>[46]</sup>  
Fig.17 Siddall's AquaMAV



图18 北航仿鸬鸟潜空两栖跨介质无人飞行器<sup>[49]</sup>  
Fig.18 Submersible UAV "Gannet" developed by Beihang University

翼装置可减少水中的阻力。

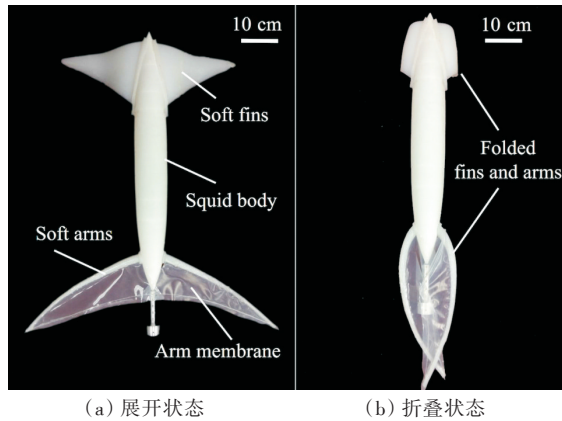
2019年5月,北京航空航天大学的学生开发了一种具有变构能力的跨介质航行器<sup>[50]</sup>,如图19所示。该航行器的形状为纺锤形,其软鳍可以像天然鱿鱼一样折叠和展开以辅助空中运动,成功地实现了水下运动和使用喷流推进器进行的喷射出水过程,具有极高的仿生相似性,然而并不能实现在空中的持续航行。

### 3 更深入的讨论

#### 3.1 飞行结构

固定翼和旋转翼是飞机的两种设计,各有其优缺点。固定翼飞机需要相对较高的飞行速度,这使其适合作为长途飞行器,但也意味着它们不





(a) 展开状态 (b) 折叠状态

图19 “飞行乌贼”样机<sup>[50]</sup>

Fig.19 Prototype of the squid robot

能以低速盘旋或飞行。此外,对于较小的无人机,升阻比会迅速降低。随着速度和尺寸的减小,雷诺数降低,无人机的效率也会降低<sup>[51]</sup>。因此,当升阻比降低时,大型固定翼无人机的优势将变得不那么明显<sup>[52]</sup>。在水下航行时,机翼会产生很大的阻力。因此,大型固定翼很少应用于水下航行。

相对地,旋翼飞行器具有更高的机动性。它们既可以高速和低速飞行,也可以垂直起降和空中悬停,这使其即使在有一些障碍物(例如室内空间)的环境中也可执行机动任务。尽管旋翼飞行

器具有控制系统简单、机动性良好等优势,但也具有功率消耗和耐久性受限等不足,这是因为其需要更高的功率,尤其是对于悬停飞行模式和水下具有更大转矩负载的运动模式<sup>[51]</sup>。

近年来,研究者在生物启发的扑翼飞行器上做出了巨大的努力。但是,许多设计方法都是基于从自然鸟类和昆虫中提取的经验公式,并且直接用于确定人造扑翼的大小,而没有考虑其他参数(例如翼膜材料)的影响。因此,还需要进一步研究和修正经验公式以优化设计<sup>[53]</sup>。

另外,研究者们还提出了许多可重构机翼模型,以更好地结合每种飞行结构的优点。这些类型的飞行器可以改变其结构,例如沿翼展折叠或采用后掠翼折叠机翼(图20),以在各种条件和任务中优化其能效、稳定性和可控性。此外,变后掠机翼在减小航行器撞击力方面也起着重要的作用,这种撞击是当航行器通过鳗鸟式跳水方法从空中过渡到水中时产生的<sup>[54]</sup>。然而,由于过渡模式的复杂性,所涉及的运动方程往往是高度耦合并且是非线性的,需要采取不同的控制策略<sup>[55]</sup>。此外,大多数结构变化是由电动机驱动的,这在一定程度上增加了结构的重量。因此,还需要对这些类型的航行器进行更多深入的研究。

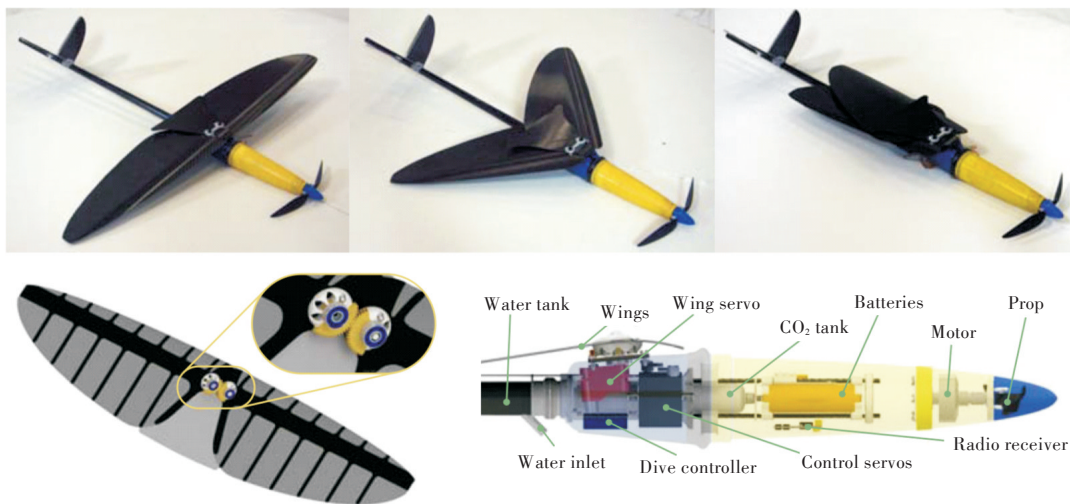


图20 AquaMAV水上微型飞行器的变后掠翼结构示意图<sup>[46]</sup>

Fig.20 The sweptback wings structure of AquaMAV

对于水下航行器,推进器的结构没有太多选择。最常见的推进结构就像潜艇:由螺旋桨推进,并由各种操纵面辅助<sup>[56]</sup>。这种结构具有强大的驱动力,并且控制并不复杂。仿生设计则具有更高的灵活性,AquaMAV水上微型飞行器的后掠翼结构如图20所示。

总之,螺旋桨/旋翼结构可以作为在水和空气环境中通用的一种结构。不同的操纵面在水中也可

可以发挥不同的作用,而扑翼和仿生结构仍需要进一步探索。

### 3.2 跨介质过渡过程

介质之间的过渡(包括空气—水和水—空气)是成功实现潜空操作的关键过程<sup>[29]</sup>。前者包括降落在水面上并潜入水中;后者是指从水中起飞。

浮动降落是一种常用的方法。与水碰撞时,

对结构的抗冲击性要求较低,但通常需要更长的时间才能完成过渡。跳水潜水在自然界的捕食者狩猎过程中非常普遍,通常用于具有较高抗冲击性的受生物启发的模型中<sup>[57]</sup>。跳水潜水的整个过程进行得非常快,因此,其适用于紧急情况和其他需要快速行动的情况。

此外,起降过程会受到波浪干扰<sup>[58]</sup>。为了尽量避免干扰的影响并保持更好的稳定性,跨介质航行器不仅需要优化控制算法,还可以借鉴海上船舶系统,以更简单的方式提高对水面的适应性。

### 3.3 通信和导航

全球定位系统是基于从一系列运行中的卫星接收信号的一种精确的全球导航和测量设施,已广泛用于各种类型的航行器<sup>[59]</sup>,但是它不适用于水下导航和定位。目前,大多数无人机都使用惯性导航系统(INS)和卫星导航作为基本导航模式,可以确保在大多数情况下的稳定导航。INS主要由加速度计和陀螺仪组成,用于计算航行器的速度、位置和方向<sup>[60]</sup>。平台惯性导航系统的精度非常高,某些配备该系统的核潜艇能够将水下航行数月后的误差控制在数海里以内。但是,该系统复杂且庞大,不适用于小型航行器<sup>[61]</sup>。捷联惯性导航系统使用虚拟数字平台,并且体积小,因为它们的传感器只是被简单地固定在航行器上。这种系统需要更高的速率以使系统将角速率准确地集成到姿态计算中。除电子设备外,涉及的数据更新算法(方向余弦或四元数)也非常复杂,无法准确执行。然而,得益于数字计算机的快速发展,陀螺仪系统已实现实际使用和大量生产<sup>[62]</sup>。此外,随着微型机电系统(micro-electromechanical systems, MEMS)技术的发展,惯性导航系统的体积在不断减小<sup>[63]</sup>。但是,导航过程中的坐标变换和数值积分等会使设备误差和数值计算的截断误差累积<sup>[64]</sup>,还需要其他算法或系统(例如特征匹配)来辅助导航。

目前,用于航空摄影的无人机可以在手机上进行远程控制,并将拍摄的图像以高达1 080像素的分辨率实时传输,最远有效距离达7 km,如图21所示<sup>[10]</sup>。这种长距离实时传输是通过大功率Wifi模块实现的<sup>[65]</sup>,并需借助地面中继器系统传输<sup>[66]</sup>。这种在地面上建立基站以帮助通信和导航的方法将来可能会逐渐应用于水下环境。像全球卫星系统一样,完整的水下系统建设将会极大促进人类对全球环境的掌握。



Fig. 21 集成了OcuSync 高清图像传输功能的“精灵”4 Pro V2.0 航空摄影无人机<sup>[10]</sup>

Fig.21 Phantom 4 Pro V2.0 remote with integrated OcuSync HD image transfer

### 3.4 能量和负载

现有潜空两栖航行器的主要能源为燃料和电池。燃料的体积和能量密度高于电池,因此大型水上飞机通常采用燃料,它们的工作范围是在空气中或在水面上,那里有足够的氧气供燃料燃烧。至于潜水器,无氧环境使其不适合燃烧燃料。因此,通常使用电驱动,例如锂电池<sup>[24]</sup>。在大多数早期的AUV能源系统中,铅酸电池占比很高,而其他更好的解决方案,例如银锌电池,对于非军事研究与应用而言过于昂贵,或者该技术仅由少数人掌握<sup>[67]</sup>。随着技术的飞速发展,如今设计和制造跨介质航行器的成本有所降低。科学家们还进行了一些新的尝试来解决能源问题,例如,质子交换膜燃料电池可以将燃料的化学能直接转化为电能,不需要燃烧,并且具有很高的能量转化效率<sup>[68]</sup>。而且,燃料电池供电的系统易于密封,可以确保水下操作性能。

能源是与航行器的有效载荷和续航能力密切相关的重要因素。随着在科学研究、娱乐、军事等各个领域应用的扩展,两栖航行器通常携带各种传感器,例如照相机、陀螺仪、红外传感器等。航行器携带的所有传感器和有效载荷将消耗更多功率。对于需要频繁实时通信和精确操作的功能,或者配备有生命支持系统的载人航行器,情况更加严峻。小型化、轻量化和集成化将继续成为近期研究的技术要点。“哈佛机器蜜蜂”(图22)是微型化的一个典型例子。然而小型化、轻量化也必然导致航行距离短、续航时间小、携带载荷少,只能执行个别战术级甚至单兵级任务,大型航行器的研发攻坚战迫在眉睫。



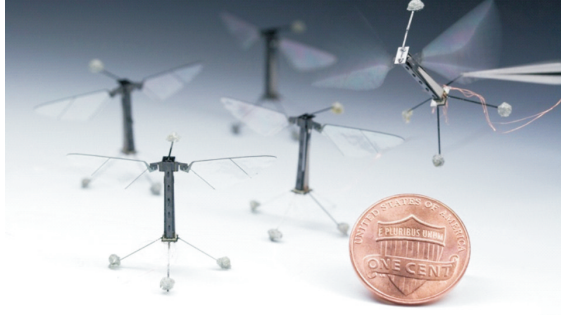


图 22 哈佛机器蜜蜂的尺寸<sup>[69]</sup>  
Fig.22 The size of Harvard RoboBees

## 4 结 语

本文从技术和应用前景的角度详细讨论了设计和制造潜空两栖航行器的关键技术。为了更好地理解这种潜空跨介质航行器的设计要求,本文列出了飞行器、水面船舶和潜水器这3类航行器在不同介质中的特征。讨论了每类航行器的推进方法、结构设计和关键技术等,并对这3类单介质航行器进行了简要比较分析。然后,将现有的潜空两栖航行器分为3类,即固定翼航行器、旋翼航行器和仿生航行器,并按时间顺序介绍了每个类别的典型样机。

通过分析和讨论,本文认为潜空两栖航行器的原型可以采用电动机和螺旋桨、钛合金主体结构并且尺度应该较小。潜空两栖航行器的设计和制造仍然面临一些关键技术和挑战。主要包括:

1) 结合仿生设计的可重构结构,而不是单一的机翼结构,将是在水和空气中具有更好的运动能力并改善跨介质过程的解决方案。但是复杂的控制算法和轻量化的可重构结构等相关技术仍需要大量研究和探索。

2) 除了当前的INS和即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)之外,需要像空中的全球卫星系统一样,建立完整的水下中继器系统以实现更快、更准确的水下通信和导航。

3) 更长的续航时间和更好的传感器有效载荷之间的权衡将继续是未来的技术重点。

## 致 谢

这篇综述是第一作者于2019年夏天在西湖大学访学时,在崔维成教授及其团队的指导下完成的。她十分感激西湖大学为她提供这一宝贵的机会。特别地,她非常感谢崔教授对于如何开展研究提供的指导。访学期间,她还获得了崔教授

团队人员的诸多帮助,其中包括李维研究员、陈浩先生、张利萍副研究员、宋长会副研究员、沙金余女士和李伟琨博士。另外,本文是第一作者的处女作,投稿后获得了杂志编辑部和审稿专家的很多指导,在此也一并感谢!

## 参 考 文 献

- [1] NICOLAOU S. Flying boats & seaplanes: a history from 1905 [M]. Bideford, Devon: Bay View Books Ltd, 1998.
- [2] GENNADY P. Летящая ПЛ [EB/OL]. [2020-02-18]. [http://www.airforce.ru/aircraft/miscellaneous/flying\\_submarine/index.htm](http://www.airforce.ru/aircraft/miscellaneous/flying_submarine/index.htm).
- [3] Definition of aircraft | dictionary. com [EB/OL]. [2019-08-14]. <https://www.dictionary.com/browse/aircraft>.
- [4] BOYNE W J, VANCE J E. Airplane—types of aircraft [EB/OL]. [2019-09-03]. <https://www.britannica.com/technology/airplane>.
- [5] LOFTIN L K. Quest for performance: the evolution of modern aircraft [EB/OL]. [2019-09-04]. <https://www.hq.nasa.gov/pao/History/SP-468/ch10-3.htm>.
- [6] KOFF B L. Gas turbine technology evolution: a designers perspective [J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(4): 577-595.
- [7] 康进兴, 马康民. 航空材料学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.  
KANG J X, MA K M. Aeronautical material science [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013 (in Chinese).
- [8] MOURITZ A P. Aluminium alloys for aircraft structures [M]//MOURITZ A P. Introduction to aerospace materials. Amsterdam: Elsevier, 2012: 173-201.
- [9] MOURITZ A P. Titanium alloys for aerospace structures and engines [M]//MOURITZ A P. Introduction to aerospace materials. Amsterdam: Elsevier, 2012: 202-223.
- [10] DJI. Phantom 4 Pro v2—专业智能航拍无人机 [EB/OL]. [2019-08-13]. <https://www.dji.com/cn/phantom-4-pro-v2>.  
DJI. Phantom 4 Pro v2—professional intelligent aerial photograph UAV [EB/OL]. [2019-08-13]. <https://www.dji.com/cn/phantom-4-pro-v2>.
- [11] 聂博文, 马宏绪, 王剑, 等. 微小型四旋翼飞行器的研究现状与关键技术 [J]. 电光与控制, 2007, 14(6): 113-117.  
NIE B W, MA H X, WANG J, et al. Study on actualities and critical technologies of micro/mini quadrotor [J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(6): 113-117 (in Chinese).



- [12] Aerospace Engineering—Training. Flight control surfaces | Aerospace engineering [EB/OL]. (2019-02-23) [2019-09-15]. <http://www.aerospacengineering.net/flight-control-surfaces/>.
- [13] NASA. English: an airplane pitching via tail elevators [EB/OL]. (2019-11-25) [2020-02-18]. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=566665>.
- [14] Watercraft [Z/OL]. (2019-08-08) [2019-09-16]. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Watercraft&oldid=909985198>.
- [15] WOODWARD J B, VANCE J E, STILWELL J J, et al. Ship—shipping in the 19th century [EB/OL]. (2018-06-22)[2019-09-16]. <https://www.britannica.com/technology/ship>.
- [16] TUPPER E C. Introduction to naval architecture[M]. Kidlington: Butterworth—Heinemann, 2013.
- [17] BIRAN A, PULIDO R L. Ship hydrostatics and stability [M]. 2nd ed. Kidlington: Butterworth—Heinemann, 2013.
- [18] CUI W C. An overview of submersible research and development in China[J]. Journal of Marine Science and Application, 2018, 17 (4) : 459–470. DOI: 10.1007/s11804-018-00062-6.
- [19] MUSIAL W, BUTTERFIELD S, BOONE A. Feasibility of floating platform systems for wind turbines[C]// Proceedings of 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [20] NAVE R. Hyper physics concepts [EB/OL]. (2000-08) [2019-09-18]. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>.
- [21] O'KANE R H. Wahoo: The patrols of America's most famous World War II submarine[M]. Novato, Calif: Presidio Press, 1996.
- [22] COHAN S. Trends in ROV development[J]. Marine Technology Society Journal, 2008, 42(1): 38–43.
- [23] STENOVEC G, HASELTON F. An efficient propulsion system for untethered submersible vehicles[C]// Proceedings of the 1987 5th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology. Durham: IEEE, 1987. DOI: 10.1109/UUST.1987.1158579.
- [24] LIU F, CUI W C, LI X Y. China's first deep manned submersible, JIAOLONG [J]. Science China Earth Sciences, 2010, 53 (10) : 1407–1410. DOI: 10.1007/s11430-010-4100-2.
- [25] Woods Hole Oceanographic Institution. DSV Alvin [EB/OL]. [2019-09-18]. [https://titanic.fandom.com/wiki/DSV\\_Alvin](https://titanic.fandom.com/wiki/DSV_Alvin).
- [26] STEWART W K. Remote—sensing issues for intelligent—underwater—systems [C]// Proceedings of 1991 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Maui: IEEE, 1991. DOI: 10.1109/CVPR.1991.139693.
- [27] BROWN H C, KIM A, EUSTICE R M. An overview of autonomous underwater vehicle research and tested at PeRL[J]. Marine Technology Society Journal, 2009, 43(2): 33–47. DOI: 10.4031/MTSJ.43.2.4.
- [28] AKYILDIZ I F, POMPILI D, MELODIA T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3 (3) : 257–279. DOI: 10.1016/j.adhoc.2005.01.004.
- [29] YANG X B, WANG T M, LIANG J H, et al. Survey on the novel hybrid aquatic—airial amphibious aircraft: aquatic unmanned aerial vehicle (AquaUAV) [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2015, 74: 131–151. DOI: 10.1016/j.paerosci.2014.12.005.
- [30] 刘安, 冯金富, 廖保全, 等. 旋翼类飞行潜航器的发展及关键技术[J]. 舰船科学技术, 2017, 39 (3): 1–6.
- LIU A, FENG J F, LIAO B Q, et al. Progress and key technologies of multi—rotor unmanned aerial underwater vehicle [J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(3): 1–6 (in Chinese).
- [31] AIRFORCE RU. Архив статей | Крылья над волнами—авиаторам ВМФ посвящается [EB/OL]. (2008-03-05) [2019-09-19]. <http://archive.is/5QGZk>.
- [32] FLITETEST. The flying submarine story [EB/OL]. (2018-10-25) [2019-09-19]. <http://www.flitetest.com/articles/the-flying-submarine-story>.
- [33] WEISSHAAR T A. Morphing aircraft systems: historical perspectives and future challenges[J]. Journal of Aircraft, 2013, 50 (2) : 337–353. DOI: 10.2514/1.C031456.
- [34] 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 (5): 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 (5): 152–157 (in Chinese).
- [35] 廖保全, 冯金富, 齐铎, 等. 一种可变形跨介质航行器气动/水动特性分析[J]. 飞行力学, 2016, 34 (3): 44–47, 57.
- LIAO B Q, FENG J F, QI D, et al. Aerodynamic and hydrodynamic characteristics analysis of morphing submersible aerial vehicle [J]. Flight Dynamics, 2016, 34(3): 44–47, 57 (in Chinese).
- [36] DREWS P L J, NETO A A, CAMPOS M F M. Hybrid unmanned aerial underwater vehicle: modeling and simulation [C]// Proceedings of 2014 IEEE/RSJ

- International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago, IL, USA: IEEE, 2014: 4637-4642. DOI: 10.1109/IROS.2014.6943220.
- [37] ALZU'BI H, AKINSANYA O, KAJA N, et al. Evaluation of an aerial quadcopter power-plant for underwater operation [C]//Proceedings of 2015 10th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA). Sharjah: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/ISMA.2015.7373488.
- [38] BROWN G. New UAV can launch from underwater for aerial missions [EB/OL]. (2016-03-17) [2019-09-23]. <https://www.jhuapl.edu/PressRelease/160317>.
- [39] 王海晏, 吝科, 王领, 等. 一种水空两用垂直跨越飞行器: CN203318067U [P]. 2013-12-04.  
WANG H Y, LIN K, WANG L, et al. Water-air vertical crossing vehicle: CN203318067U [P]. 2013-12-04.
- [40] 胡志强, 杨翊, 耿令波, 等. 多旋翼水空两栖跨越海洋机器人: CN108128450A [P]. 2018-06-08.  
HU Z Q, YANG Y, GENG L B, et al. A kind of many rotor water-air amphibious trans-media unmanned vehicles CN108128450A [P]. 2018-06-08.
- [41] LOCK R J, VAIDYANATHAN R, BURGESS S C. Development of a biologically inspired multi-modal wing model for aerial-aquatic robotic vehicles [C]//Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Taipei, Taiwan, China: IEEE, 2010: 3404-3409. DOI: 10.1109/IROS.2010.5650943.
- [42] EDWARDS D. Flimmer: a flying submarine-spectra 2014 | Aircraft | Flight [EB/OL]. [2020-01-31]. <https://www.scribd.com/document/255436078/Flimmer-A-Flying-Submarine-Spectra-2014>.
- [43] CHEN Y F, HELBLING E F, GRAVISH N, et al. Hybrid aerial and aquatic locomotion in an at-scale robotic insect [C]//Proceedings of 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Hamburg: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/IROS.2015.7353394.
- [44] 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): eaao5619. DOI: 10.1126/scirobotics.aao5619.
- [45] SIDDALL R, KOVAC M. Fast aquatic escape with a jet thruster [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22 (1): 217-226. DOI: 10.1109/TMECH.2016.2623278.
- [46] SIDDALL R, ANCEL A O, KOVA Č M. Wind and water tunnel testing of a morphing aquatic micro air vehicle [J]. *Interface Focus*, 2017, 7 (1): 20160085. DOI: 10.1098/rsfs.2016.0085.
- [47] LIU H X. Investigation on the mechanism of a bionic trans-media vehicle and prototype project [D]. Beijing: Beihang University, 2009.
- [48] 杨兴帮, 梁建宏, 文力, 等. 水空两栖跨介质无人飞行器研究现状 [J]. *机器人*, 2018, 40 (1): 102-114.  
YANG X B, LIANG J H, WEN L, et al. Research status of water-air amphibious trans-media unmanned vehicle [J]. *Robot*, 2018, 40 (1): 102-114 (in Chinese).
- [49] YANG X B, LIANG J H, WANG T M, et al. Computational simulation of a submersible unmanned aerial vehicle impacting with water [C]//Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Shenzhen: IEEE, 2013. DOI: 10.1109/ROBIO.2013.6739617.
- [50] 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]//Proceedings of 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Montreal: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793702.
- [51] SHYY W, LIAN Y S, TANG J, et al. Aerodynamics of low Reynolds number flyers [M]. New York: Cambridge University Press, 2008.
- [52] PETRICCA L, OHLCKERS P, GRINDE C. Micro-and nano-air vehicles: state of the art [J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011, 2011: 214549. DOI: 10.1155/2011/214549.
- [53] HASSANALIAN M, ABDELKEFI A, WEI M J, et al. A novel methodology for wing sizing of bio-inspired flapping wing micro air vehicles: theory and prototype [J]. *Acta Mechanica*, 2017, 228 (3): 1097-1113. DOI: 10.1007/s00707-016-1757-4.
- [54] MURAOKA K, OKADA N, KUBO D. Quad tilt wing VTOL UAV: aerodynamic characteristics and prototype flight [C]//AIAA Infotech@Aerospace Conference. Seattle, Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009. DOI: 10.2514/6.2009-1834.
- [55] IZRAELEVITZ J S, TRIANTAFYLLOU M S. A novel degree of freedom in flapping wings shows promise for a dual aerial/aquatic vehicle propulsor [C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle, WA, USA: IEEE, 2015: 5830-5837. DOI: 10.1109/ICRA.2015.7140015.
- [56] TECHET A H. Marine propellers [Z/OL]. (2005-08-30) [2019-09-19]. <http://web.mit.edu/2.016/www/handouts/2005Reading10.pdf>.

- [57] ZINK G. Computational studies on the effect of water impact on an unmanned air vehicle[D]. Ames: Iowa State University, 2008. DOI: 10.31274/rtd-180813-16429.
- [58] DU H, FAN G L, YI J Q. Autonomous takeoff control system design for unmanned seaplanes[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 85: 21-31. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.04.003.
- [59] ELDREDGE L. WAAS performance standard[S]. Washington: FAA, 2008: 60.
- [60] YOU Z. Chapter 7—Miniature inertial measurement unit[M]//YOU Z. *Space Microsystems and Micro/nano Satellites*. Kidlington: Butterworth-Heinemann, 2018: 233-293. DOI: 10.1016/B978-0-12-812672-1.00007-2.
- [61] HILKERT J M. Inertially stabilized platform technology concepts and principles [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, 28(1): 26-46. DOI: 10.1109/MCS.2007.910256.
- [62] TITTERTON D H, WESTON J L. Strapdown inertial navigation technology[M]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [63] ACAR C, SHKEL A. MEMS vibratory gyroscopes: structural approaches to improve robustness [M]. Boston, MA: Springer Science & Business Media, 2008.
- [64] SHUKLA S K, TALPIN J P. Synthesis of embedded software: frameworks and methodologies for correctness by construction [M]. New York: Springer, 2010.
- [65] GU Y X, ZHOU M, FU S L, et al. Airborne WiFi networks through directional antennae: an experimental study [C]//*Proceedings of 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. New Orleans: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/WCNC.2015.7127659.
- [66] TOM 天工测控. 无人机实时图传控制 WIFI 模块\_飞控系统介绍 [EB/OL]. (2017-10-27) [2019-09-23]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/30504378>. TOM SKYLAB. WIFI model for real-time image transmission of UAV \_ introduction to flight control system [EB/OL]. (2017-10-27) [2019-09-23]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/30504378>.
- [67] BLIDBERG D R. The development of autonomous underwater vehicles (AUV) ; a brief summary [C]//*IEEE Inter-National Conference on Robotics and Automation*. Seoul, Korea: IEEE, 2001: 12.
- [68] MAJUMDAR D. U.S. navy launches UAV from a submarine [EB/OL]. (2013-12-06) [2020-02-18]. <https://news.usni.org/2013/12/06/u-s-navy-launches-uav-submarine>.
- [69] BURROWS L. New RoboBee flies, dives, swims, and explodes out the of water [EB/OL]. (2017-10-25) [2019-09-21]. <https://wyss.harvard.edu/new-robobee-flies-dives-swims-and-explodes-out-the-of-water/>.