

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.170241

水空两栖跨介质无人飞行器研究现状

杨兴帮^{1,2}, 梁建宏², 文力², 王田苗²

(1. 北京航空航天大学生物与医学工程学院, 北京 100191; 2. 北京航空航天大学机器人研究所, 北京 100191)

摘要: 通过充分的文献调研和总结, 对现有水空两栖跨介质无人飞行器进行了比较全面系统的分析, 从整个无人机领域的视角对该种无人飞行器进行了综述, 将当前水空两栖跨介质无人飞行器分为水上无人机、潜射无人机和潜水无人机 3 大类, 并综述了各类水空两栖跨介质无人飞行器的典型样机, 讨论了各自的共性和运动介质的转换方式。

关键词: 水空两栖运动; 跨介质无人飞行器; 水上无人机; 潜射无人机; 潜水无人机

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2018)-01-0102-13

Research Status of Water-Air Amphibious Trans-media Unmanned Vehicle

YANG Xingbang^{1,2}, LIANG Jianhong², WEN Li², WANG Tianmiao²

(1. School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: After sufficient literature survey and summary, a comprehensive and systematic analysis on the current water-air amphibious trans-media unmanned vehicle is conducted, and a survey on this kind of unmanned vehicle is completed from the view of the overall unmanned aerial vehicle (UAV) field. The existing water-air amphibious trans-media unmanned vehicles are divided into three categories, i.e., the seaplane UAV, the submarine-launched UAV, and the submersible UAV, and then the typical prototypes of each category are reviewed. Subsequently, the general issues and transition modes between media in which each type of vehicle moves are discussed.

Keywords: water-air amphibious locomotion; trans-media unmanned vehicle; seaplane UAV; submarine-launched UAV; submersible UAV

1 引言 (Introduction)

自 1903 年美国莱特兄弟“飞行者一号”载人飞机试飞成功以来, 这种在空气介质中航行的飞行器得到了迅速发展, 各种高性能的民用和军用飞机相继产生^[1]. 为了拓展现有飞行器的作业环境和应用范围, 充分利用水下航行的高度隐蔽性和空中飞行的高机动性的优势, 各国的航空科技人员开始把目光转移到具有水空两栖生存能力的跨介质飞行器上面^[2].

水空两栖跨介质飞行器是航空科学家和工程师结合飞行器和潜艇的优势发明的一种可以实现水空两栖作业的飞行器, 最初的设想是军事上用于实现紧急情况下的突防, 后来随着概念和技术的发展出现了更多将此种两栖飞行器用于民用领域的设计方案. 由于水体环境和空气环境的显著差异, 飞行器

在这两种介质中同时具有航行能力是一项艰巨的任务, 20 世纪初期水空两栖跨介质飞行器的概念还只出现在科幻小说等文学作品中^[3-4], 真正将这一概念付诸实践是 20 世纪 30 年代第二次世界大战前苏联提出的 LPL 水空两栖跨介质飞行器. 自 1934 年水空两栖跨介质飞行器的设计概念被提出后, 先后经历了 LPL 样机^[5]、RFS-1 样机^[6]、Convair 样机^[7]和 DARPA 样机^[8]等 4 个具有代表性的载人概念样机, 美国空军也委托美国军事战略高级研究机构兰德公司开展相关研究, 并完成了 4 份关于水空两栖跨介质飞行器的研究报告^[9-12]. 这些工作带动了跨介质航行器相关技术的研究和验证, 研究成果推动了这种新型飞行器概念的实现. 但目前还没有一款载人样机能够成功实现海空两栖生存, 因载人两栖飞行器除了要考虑两种不同流体介质的布局、结构、驱动等兼容性要求外, 还要考虑机组人员的

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (61703023); 国家自然科学基金面上项目 (51475028); 中国博士后科学基金 (2016M600892); 智能机器人与系统高精尖创新中心 2016 年度开放研究基金 (2016IRS07).

通信作者: 杨兴帮, xingbang1987@163.com 收稿/录用/修回: 2017-04-01/2017-06-04/2017-09-02

工作舱设计、生活保障系统设计及相关负载、有效载荷等因素, 因此在实现中具有更高的复杂度和技术难度。

近年来各国纷纷开始重视无人系统的研发, 相继推出各种高性能的海、陆、空无人系统^[13-16]。单介质无人系统设计及控制技术已日趋成熟, 利用单介质作业飞行器设计中的技术储备, 研究人员也开始着手水空两栖跨介质无人飞行器的研究工作。所谓水空两栖跨介质无人飞行器, 一般是指在空气介质和水体环境(表面)同时具有生存能力的无人驾驶的海空一体化飞行器。从国际发展水平上来看, 美、英发达国家, 如美国哈佛大学^[17]、麻省理工学院(MIT)^[18]和英国帝国理工学院^[19]等国外知名机构, 都已开展了水空跨介质航行的探索和研究工作。为了在水空跨介质飞行器设计和应用技术上与这些西方国家保持并进而甚至取得技术上的超越, 我国需要加紧跨介质机理及其应用示范方面的研究; 从国内需求来看, 我国在海洋权益保护过程中面临的挑战日益增加, 近年来在我国东海钓鱼岛海域、南海黄岩岛发生的海洋争端, 以及南海在建及建成岛屿的守护和警戒等方面, 该种飞行器都将发挥其他无人系统无法匹敌的优势, 因此在我国开展水空两栖跨介质无人飞行器的研制具有巨大的潜在应用价值和重要的战略意义。

在对已有水空两栖跨介质无人飞行器进行充分调研和分析的基础上, 本文将从整个无人机领域的视角对该种新型飞行器进行系统性的总结和介绍, 并对影响该种飞行器发展的关键问题进行分析, 最后对该种飞行器的发展前景进行展望。

2 水空两栖跨介质无人飞行器的潜在应用及分类 (The potential applications and classification of water-air amphibious trans-media unmanned vehicle)

水空两栖跨介质无人飞行器可以在水和空气两种不同流体介质间适应性地实现运动过渡, 并且可以在两种介质中自主地连续航行, 具备无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)的高速高机动和快速部署能力和无人水面舰艇(unmanned surface vehicle, USV)的快速游弋能力或无人水下飞行器(unmanned underwater vehicle, UUV)的高隐蔽性等优势, 因此在军事和民用领域都具有广阔的应用前景^[20]。

水空两栖跨介质无人飞行器在军事领域的应用前景主要体现在其多介质航行、水下的隐蔽性和空中的高速高机动性的结合。美国国防部 2013 年提出的无人系统路线图对陆、海、空三栖环境中的无人系统在国防和军事战争上的应用进行了总结^[13], 其中海上侦察、监视、通信中继和防空反制等应用场景需要 UAV、USV、UUV 等多种无人系统协同作业, 这种协同作业方式虽然可以实现相应的功能, 但多个无人系统的加入增大了整个任务的复杂度, 降低了操作的可靠性。如果以融合 3 种无人系统特点的单一无人系统来实现相应的功能, 可以大大提高任务的成功率。如图 1 所示, 水空两栖跨介质无人飞行器作为单一作战武器使用具有很好的水下隐身性能和空中快速高机动性能, 可以用作突破敌方防线的利器, 还可作为侦察和战斗武器进行巡逻警戒、搜索反潜、近海探雷等。美国海军研究认为, 海军若要在与敌较量中取得优势, 就必须将各种传感器置于舰船和潜艇外, 而其中以拥有空中优势最重要。因此, 具有“潜航—飞行”双重功能的水空跨介质无人飞行器的出现, 将使潜艇对海、对空观察搜索能力产生质的飞跃。它可以提供多次、快速的空中支持, 既拥有潜航的隐蔽性, 减少空中威胁, 又拥有飞行器速度和高度的优势, 提高潜艇收集信息的能力。

在民用领域, 该种飞行器也具有很广阔的应用前景。对于传统的 UAV、USV 和 UUV 来说, 完成海上搜索和救援任务需要多机协同或编队协作^[21]。而对于这种集多种无人系统特性于一身的新型航空—潜水器来说, 可以单独完成洪灾、海难、台风、海啸等自然灾害条件下的搜索和通信中继等任务。除此之外, 它还可以进行海洋资源勘探^[22-23]、海洋平台和结构物的监察、全范围集成化的海图绘制、海洋水质监测、生物观测、水文气象测量等^[24]。跨介质无人飞行器的两栖作业特性使其在这些应用领域具有当前其他无人系统无法比拟的优势, 它可以快速地飞行到作业区域, 潜入水下完成既定任务后可以停泊待命或搭载获取到的数据返航, 这样既提高了任务效率, 又增加了任务的成功率。另外, 近年来恐怖主义开始对海洋安全构成威胁, 这种新型的无人系统在海洋反恐上也具有一定的优势, 它可以远距离发射, 自主飞行到目标区域实现潜水侦察、监视或突袭攻击。

该种飞行器在技术上具有一定的通用性, 比如都需要进行自主或半自主控制, 运动过程都会接

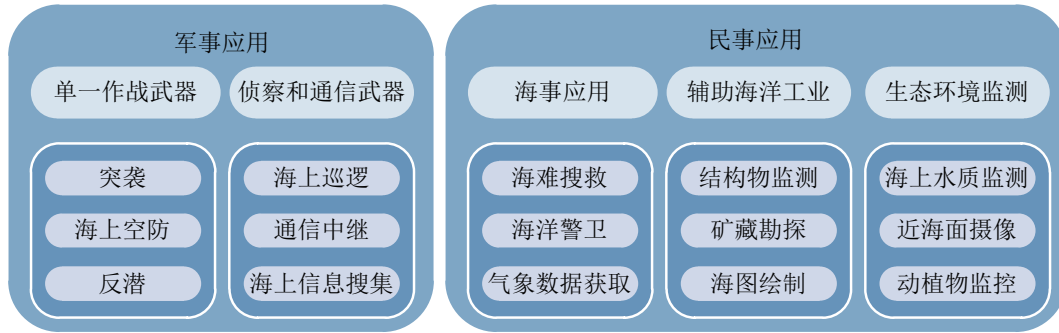


图1 水空两栖跨介质无人飞行器潜在军事民事应用

Fig.1 The potential applications of water-air amphibious trans-media unmanned vehicle in military/civil scenarios

触水和空气两种流体介质，结构和布局设计都要考虑水动力学和空气动力学等，本文对已有样机进行了充分调研和分析，按照操作形式和作业区域的不同，将水空两栖跨介质无人飞行器分为水上无人机、潜射无人机和潜水无人机3类，如表1所示。以下将对这3种水空两栖跨介质无人飞行器的研究现状分别进行综述性介绍和分析。

表1 3种水空两栖跨介质无人飞行器的比较

Tab.1 The comparison of three kinds of water-air amphibious trans-media unmanned vehicles

比较项目	水上无人机	潜射无人机	潜水无人机
运动区域及航行方式	水体介质 水面停泊或滑行	空气介质 空中飞行	水下航行 空中飞行
操作形式	可独立作业，无需母舰/艇搭载	潜艇搭载/释放/发射	可独立作业，无需母舰/艇搭载
共同点	作业过程接触水/空气流体介质，结构和布局设计都要考虑水/气动力学，进行自主或半自主控制		

3 水空两栖跨介质无人飞行器的国内外发展现状 (The development status of water-air amphibious trans-media unmanned vehicle at home and abroad)

3.1 国外发展现状

1) 水上无人机

水上无人机 (seaplane UAV) 是能在水面和空中作业的水空两栖无人驾驶飞机，它在水面停泊，同时可以实现水面起飞和降落，主要用来完成海上敌情侦察、监视和海洋环境监控等。如图2所示，在水上无人机研究方面，美国一直走在前列，先后提出了4款水上无人机概念样机，其中有2款已经经过首飞验证并投入使用。英国在水上无人机研制方面也取得了一定的成绩，海鸥系列已发展成

为比较成熟的水空无人机系统。

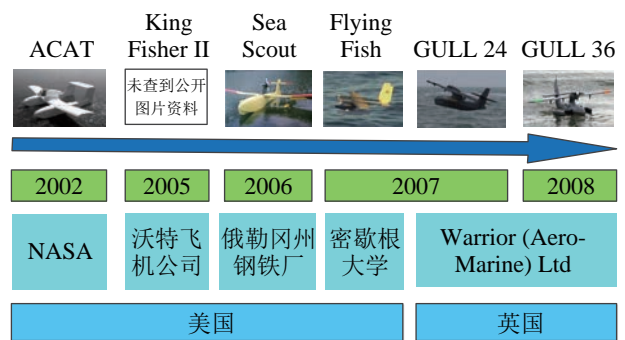


图2 水上无人机发展历程

Fig.2 The development history of seaplane UAV

根据文献记载，2002年美国NASA的埃姆斯研究中心 (Ames Research Center) 提出的自主两栖无人运输机 (autonomous cargo amphibious transport, ACAT) 的概念是水上无人机研究中较早的尝试^[25]。研究人员对该无人机的两栖降落能力进行了概念验证，它可以实现自主起飞、定点飞行、自主降落和按照预定轨迹自主飞行等。

2005年，美国沃特 (Vought) 飞机工业公司公开了为DARPA (美国国防部高级研究计划局) 研发的项目，名为“翠鸟II” (King Fisher II) 的无人水上飞机^[26]。根据Vought公布的研究计划，“翠鸟II”无人水上飞机可以完成情报搜集、通信中继、潜艇探测以及特种作战支持等任务。它可以用来部署无人水下航行器进行排雷，也可以利用自身配备的导弹和炸弹攻击敌方快艇群。

2006年，美国俄勒冈州钢铁厂 (OIW) 研制的“海上侦察机” (Sea Scout) 无人水上飞机实现了水上自主起飞和降落，成为第一款成功实现自主导航的水上无人机。Sea Scout由铝合金材料制成，翼展5.18 m，重159 kg，可携带15.9 kg的有效负载，机上搭载有一台激光雷达感应器，用来在进近和触水时向自动驾驶仪提供高度和水面状况数据^[27]。

2007 年, 美国密歇根大学在 DARPA 的支持下, 研制了能在海面自主起降的无人飞行器“飞鱼”(Flying Fish), 该飞行器具有特殊的起降结构和控制系统, 能在较大风浪下从海面自主起飞降落. 2007~2016 年, 密歇根大学的研究人员一直对这种新型水空两栖跨介质飞行器进行研究和探索, 对其气动布局设计及空气动力学性能、航电系统、飞行管理系统、自动导航和控制系统、路径规划、太阳能收集系统等进行了比较详细的研究^[28-31], 他们的研究成果对今后水上无人机的研制具有重要的指导和借鉴意义.

2007 年和 2008 年, 英国勇士海空技术研发有限公司 (Warrior (Aero-Marine) Ltd) 分别成功试验了两款海鸥系列水上无人机 GULL 24 和 GULL 36^[32]. 海鸥系列水上无人机不需具备短距离起降能力, 不需要额外的发射和回收设备, 兼具 UAV 和 USV 的特点, 提高了海上监视的效率和监控范围, 降低了多无人系统协同作业的附加成本.

以上对水上无人机的发展情况进行了概述, 从已有代表性样机的作业环境和起降方式分析可得到以下结论:

(1) 都采用浮筒式结构, 便于机身与水面分离, 减小起飞时水的阻力, 但是这种结构设计同时也增加了空中飞行时的空气阻力; 目前的样机都采用滑跑式起飞和飘落式降落方式.

(2) 作业区间为水体表面和空气介质, 无水下作业能力; 水面和空中采用相同布局, 不需考虑变结构设计.

(3) 水面起飞和降落过程是水上无人机成功完成任务的两个关键过程, 波浪干扰对起飞和降落影响较大, 自主起降系统需要考虑抗波浪干扰控制, 同时水面降落时还需要考虑机体与水作用区域及机上敏感元件的过载设计.

2) 潜射无人机

潜射无人机 (submarine-launched UAV) 是由潜艇载运协助其完成发射、空中侦察、目标定位和监视、通信中继、辅助攻击等任务的水空两栖无人系统, 其发射方式分为干发射和湿发射两种. 干发射潜射无人机由潜艇导弹发射筒或者专用小型运载一发射器发射升空, 湿发射潜射无人机无运载一发射器, 从潜艇发射管释放后依靠自身动力装置从水下实现升空. 升空后潜射无人机由潜艇或其他水陆作战人员进行实时引导和控制, 任务完成后由潜艇或水面人员实施回收或自毁. 如图 3 所示, 美国在潜射无人机方面一直处于领先水平, 先后提出了 7 种

具有代表性的潜射无人机概念样机或作战计划.

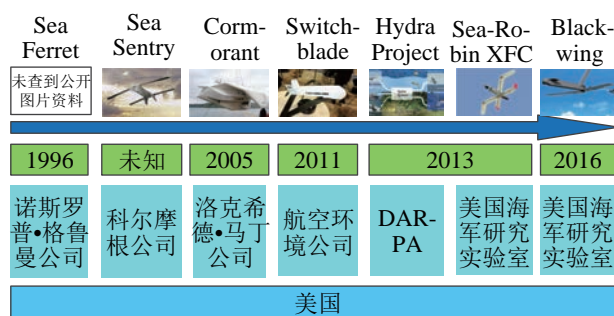


图 3 潜射无人机发展历程

Fig.3 The development history of submarine-launched UAV

1996 年美国海军委托诺斯罗普·格鲁曼公司 (Northrop Grumman Corporation) 研发的“海上搜索者”(Sea Ferret) 是最早见诸报道的潜射无人机. Sea Ferret 可用来协助潜艇完成秘密监视、目标锁定、战斗损伤评估等. Sea Ferret 的水下发射过程经过了 USS Asheville 号核潜艇验证, 证明了潜艇和潜射无人机协同作战的可行性^[33].

随后, 科尔摩根公司 (Kollmorgen) 研发了一款搜集潜艇潜望镜视野外的战术数据和目标信息的潜射无人机, 代号为“海上哨兵”(Sea Sentry)^[34]. Sea Sentry 利用潜艇现有的通信设备为潜艇提供实时详细的战术数据, 使潜艇超视距监视和目标定位能力大大提高, 使用 Sea Sentry 侦察是一种行之有效的空中情报获取方式.

2005 年, DARPA 委托洛克希德·马丁公司开展了“鸬鹚”(Cormorant) 无人机第 1 阶段的研制, 完成了模型入水冲击试验. “鸬鹚”无人机计划应用在美国海军“俄亥俄”级战略潜艇上, 采用变体结构设计^[35], 可以借助成熟的潜射导弹技术实现快速发射, 而后通过溅落方式快速入水, 但其还不具备水下的移动能力, 需要水下机器人抓取回收, 因此对潜艇的隐蔽性与安全性会有一定的影响. 由于资金短缺, 2007 年该项目被无限期搁置.

2011 年, 美国海军计划将航空环境公司 (AeroVironment) 设计的“弹簧刀”(Switchblade) 无人机发展成为一次性潜射无人机, 他们委托雷神公司 (Raytheon) 研发能够部署“弹簧刀”的水下运载器 (submerged launch vehicle, SLV). SLV 浮到水面之后可自动调整姿态完成发射. “弹簧刀”升空后可进行侦察和巡逻, 协助深藏水下的母艇监控远处的敌方舰艇等.

2013 年 8 月, 美国 DARPA 公布了 Hydra 项目的方案征求计划书^[36]. 该项目拟研发能够运送并

发射批量 UAV 和 UUV 到敌方区域的水下 AUV 母舰，同时研发可被母舰载运、可进行作战的 UAV 和 UUV 样机。Hydra 项目的目的是用最新的作战理念集成现有成熟的和新兴的技术从而创造一种新的运载和作战方式，AUV 母舰部署的 UUV 和 UAV 可以从空中、水面、水下为载人舰船、潜艇、飞行器的战术战略制订提供多角度全方位的支持。2016 年 9 月，波音公司与 DARPA 签订了 2000 万美元的合同，用于 Hydra 项目第 2 阶段的研发^[37]。

2013 年 12 月，美国海军宣布成功完成潜艇水下发射无人机的验证试验^[38]。该潜射无人机的代号为 Sea-Robin XFC，Sea-Robin 为“鲂鲱”水下运载器，XFC 为发射成功的无人机代号。该无人机的发射成功首次验证了由潜艇搭载并通过水下运载器进行发射的可行性，虽还处试验性阶段，但其成功研制将使潜艇海陆信息获取能力及与其他军兵种配合能力得到极大提升。

2016 年 9 月，航空环境公司宣布，他们生产的 Blackwing 潜射无人机与 UUV 群体和潜艇作战系统的信息连接和传输能力已成功被美国海军验证^[39]。Blackwing 是航空环境公司在 Switchblade 基础上改进得到的潜艇搭载和发射的小型无人机系统，可为载人潜艇、无人水下航行器及表面舰艇之间的高速数据传输提供中继支持。该无人机可从潜艇的鱼雷发射筒或者 AUV 母舰发射，也可从水面舰船或陆地移动车辆上发射。美国潜艇部队计划首批部署约 150 架 Blackwing 潜射无人机用于水下、水面、空中武装力量进行联合作战的情报搜集、监视和侦察以及通信中继等。

以上对近年来潜射无人机的发展现状进行了概述，从已有代表性样机的发射方式和作业环境分析可得到以下结论：

(1) 从已公布的资料分析，目前大部分样机都采用干式发射。干式发射方式也分为 2 类：一类是利用潜艇已有的发射通道进行发射（潜艇导弹发射管），这种发射方式减小了发射难度，但是容易使潜艇暴露目标，受到敌方反潜装备威胁；另一类是通过独立于潜艇的水下运载器发射，这种发射方式技术难度更高，除考虑潜射无人机的起飞性能外，还要为运载器设计配套的动力系统和无人机发射系统，但是这种发射方式使潜艇可以脱离发射区，更利于保证潜艇的隐蔽性和安全性。

(2) 目前的潜射无人机都采用变结构机翼设计，发射前机翼处于折叠状态，减小其空间尺寸，便于进行存储、运输、发射和回收。

(3) 作业区间为空域，无水面或水下航行能力，仅发射过程或回收过程接触水体环境。

(4) 发射和回收是潜射无人机完成一次任务的 2 个关键过程，对于湿发射和运载器发射，波浪干扰对水面起飞的稳定性影响较大。

3) 潜水无人机

潜水无人机 (submersible UAV) 是实现水下潜航和空中飞行的无人系统。与水上无人机相比，该种飞行器作业区间可以延伸到水下；与潜射无人机相比，除了作业区间扩展到水下以外，它还具有更大的独立性和自作业能力，起飞和降落都不必依赖其他载体。由于潜水无人机独特的海空两栖生存能力和广阔的军事民事应用前景，越来越多的研究人员对其产生兴趣。该种无人机大多参考自然界中具有优异水—空两栖生存特性的生物，国外很多研究机构开展了生物原型研究、两栖航行机理探究、原理样机验证等方面的工作。图 4 给出了潜水无人机发展历程中几种典型的原理样机或概念模型。

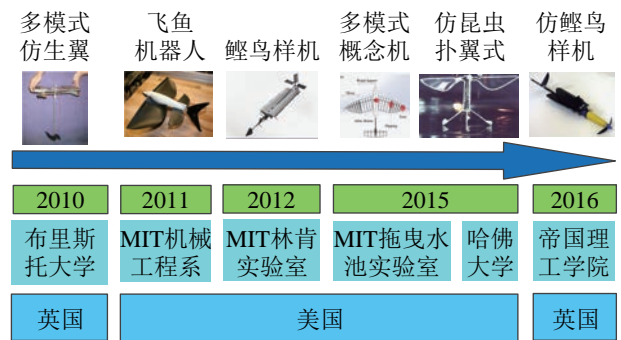


图 4 潜水无人机发展历程

Fig.4 The development history of submersible UAV

2010~2014 年，英国布里斯托大学的 Lock 等人研究了一种可应用于潜水无人机的多模式仿生翼^[40-43]。他们参考海鸦设计了一种可用于水下推进的仿生扑翼翅膀，在相同的流体环境和参数设置条件下，测定了翅膀在不同运动模式（开合程度）下的功率消耗。根据实验得出，翅膀收拢的运动模式可以提供足够的水下前进动力。因此他们认为，翅膀收拢的扑翼驱动模式在水空两栖跨介质飞行器水下推进方面具有潜在的应用价值。Lock 等人的研究首次对适应两栖环境的仿生驱动结构的水空运动模式进行了权衡分析，为未来水空两栖跨介质飞行器的最终实现提供了理论支撑和经验借鉴。

2011 年，MIT 机械工程系 Gao 等人提出了一款水空两栖作业的仿飞鱼机器人样机^[44]，他们从游动理论、机构设计、驱动方式和控制方式等方面展开研究，给出了相应的设计要素和限制条件，为

今后仿飞鱼样机的研究提供指导和借鉴。

2012年,MIT林肯实验室的Fabian等人设计了一款仿鳗鸟微小型两栖无人飞行器^[45]。该样机采用折叠翼结构,空中飞行时机翼完全展开提供升力,空-水过渡采用鳗鸟的溅落式入水方式,以7 m/s的速度撞击水面,同时机翼可在0.25 s内迅速折叠以减小入水阻力。整个机身的平均密度接近水的密度,入水后浮力和重力近似相等,有利于在水体环境中快速达到平衡。该样机多次成功实现了空-水介质转换(入水),验证了溅落方式入水的可行性,为其他水空两栖跨介质无人飞行器的研制提供了新的设计思路,但目前该研究还处在样机入水实验阶段,未开展进一步的生物观测和机理的研究工作。

2015年,MIT拖曳水池实验室提出一种用于水质采样的水空两栖多模式仿生样机概念^[18],该样机可利用空中高速飞行的优势快速锁定兴趣采样区,然后入水直接对水体进行取样和测量。该样机采用多模式仿生翼进行水下/空中驱动,通过改变内嵌运动(in-line motion)模式产生空中飞行所需的升力或水下游动的推力^[46-47],从而实现水空不同流体介质的推进。他们设计了仿生实验样机,并对水生动物推力模式推进和鸟类升力模式推进产生的力分别进行了定量测量,验证了该种仿生驱动方式在水和空气中都能够产生良好的推进性能。

2015年,哈佛大学的Robert Wood课题组在他们已有样机RoboBee^[48]的基础上提出了一种仿昆虫的扑翼式水空两栖跨介质无人飞行器样机^[17]。该样机的尺度与昆虫大小相当,采用扑翼方式提供在水空流体中航行的动力。通过3D-CFD仿真计算和仿生样机实验发现,采用扑翼推进方式在水下和空中都可以实现比较好的俯仰控制,同时验证了RoboBee在水下环境开环控制的游动能力,并实现了其从空气介质到水体介质的转换。课题组下一步的目标是实现RoboBee样机从水体介质到空气介质的起飞,并设计相应的控制策略实现多介质自主航行能力。

2016年,英国帝国理工学院的Siddall等人设计了一款桨式推进仿鳗鸟两栖飞行器^[49],该飞行器采用仿飞鸟喷射方式起飞^[24],成功实现了从水下到空中的过渡,同时采用鳗鸟溅落式入水实现了从空气介质到水体的转换。从公布的资料来看,该样机还未实现水-空/空-水介质转换及水/空介质全过程的航行,并且其水下移动和空中飞行均采用传统的螺旋桨推进;机翼变构方式也是传统的刚

性变结构方式,并通过电机驱动实现结构改变,这种方式增加了结构重量和系统复杂性。

以上对近年来潜水无人机的发展现状进行了概述,从已有样机的起降方式和作业环境分析可得到以下结论:

(1) 作业区间应为空域和水下环境,目前的研究还处在空域飞行能力、水域游动能力以及运动介质转换能力的验证阶段。

(2) 目前的潜水无人机大都采用变体结构设计,包括变后掠角机翼设计和仿生多模式扑翼设计等,采用变结构设计的主要原因是减小水下航行阻力,提高水下运动效率;当采用溅落方式入水时,变后掠角机翼对降低入水冲击载荷具有重要作用。

(3) 水-空过渡(出水)过程和空-水过渡(入水)过程是潜水无人机完成一次作业任务的2个关键过程,目前样机的研究多模仿自然界中具有两栖生存能力的生物的介质过渡方式,如飞鱼的跳跃起飞^[50],飞鸟的喷水推进式起飞^[51],鳗鸟的溅落式入水^[52]等。

3.2 国内发展现状

目前国内开展两栖飞行器研究的科研机构还比较少,从文献调研结果来看,当前阶段国内的研究主要集中在原理样机研制、测试和水空过渡阶段关键技术验证两个方面。



图5 北京航空航天大学“飞鱼”潜水无人机

Fig.5 Submersible UAV “Flying Fish” developed by Beihang University

2009年,北京航空航天大学研制了一款可潜入水下的海空两栖飞行器概念机“飞鱼”(图5)^[53-54]。“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,还可以实现下潜和水下航行。该样机的翼展约为3.4 m,起飞重量约为12 kg。设计中采用了可变90°后掠角机翼,主要是为了减小潜航状态的阻力同时利于上浮时快速排水。2015年,课题组开发了一款仿鳗鸟水空两栖跨介质无人飞行器并进行了试飞验证,从两栖样机适应水空环境及介质过渡的角度,设计了具有水空兼容性的样机结构^[55],探索了水空两栖跨介质无人飞行器原理样机的水空兼容

性设计、关键部件强度设计及分析,并对其水空航行能力进行初步的试验尝试(图6)。该飞行器在水体和空气介质中采用不同的推进系统,起飞时采用气囊协助实现姿态调控。



图6 北京航空航天大学“鳀鸟”潜水无人机
Fig.6 Submersible UAV “Gannet” developed by Beihang University

2011年,南昌航空大学研制了两款分别为全电驱动和油电混合驱动的潜水无人机样机^[56-57]。两样机都采用90°变后掠角机翼,空中飞行机翼展开产生升力,水下潜航时机翼90°后掠减小形状阻力。全电动样机采用飞翼、水翼、尾撑尾翼综合控制的混合结构(图7),机身采用玻璃钢艇型密封结构,水下航行和水面慢速滑行由机翼尾部的水下螺旋桨推进,空中飞行和水面快速滑行由该机前方的空气螺旋桨推进。研究人员利用全电驱动样机进行了外场的试验测试,验证了水下航行和水面滑行的可行性,但由于出水升空阻力较大及电机驱动的动力限制等原因,该样机没有实现水面起飞。



图7 南昌航空大学的潜水无人机样机
Fig.7 Submersible UAV prototype developed by Nanchang Hangkong University

2011年开始,中科院自动化研究所对水上无人机水面起飞的抗波浪干扰控制系统进行了一系列的研究工作^[58-61],建立了水上无人机在规则/非规则波浪中的非线性动力学模型。结合模糊识别和广义预测控制算法设计了无人机水面自主起飞控制器,通过数值仿真表明,他们所提出的控制方法可以使无人机成功实现水面自主起飞,并保持良好的起飞性能。

2010~2012年西北工业大学基于空气动力学和二元平面滑行理论建立了水空两栖跨介质飞行器滑跳动力学模型,并对滑跳弹道特点、影响因素和滑

跳动力学特性等进行了研究^[62-65]。2012年昆明船舶设备研究试验中心对跨介质两栖无人飞行器的水面滑跳转向特性进行了建模和仿真研究^[66],基于空气动力学、经典势流理论和二元平面滑行理论建立了水空两栖 UAV 滑跳转向飞行动力学模型,并研究其滑跳转向特性及其影响因素。上海大学^[67]和中国特种飞行器研究所^[68]对海空无人机的气/水动布局进行了设计和分析,为水空两栖跨介质无人机在不同介质中航行的设计布局提供了参考和借鉴。

水空两栖跨介质无人飞行器是近年来提出的新概念飞行器,目前国内一些机构已开始着手相关方面的研究和探索工作,而且已经有了一些技术积累和研究经验。与国外相关研究相比,我国还需在概念设计、样机结构设计和介质转换方式等方面开展一系列的研究,以推进该特种飞行器的研发进程。

4 水空两栖跨介质无人飞行器发展的关键技术(The key techniques of water-air amphibious trans-media unmanned vehicle)

以上对水空两栖跨介质无人飞行器的发展历程进行了阐述,根据操作形式和作业区域的不同,该种无人飞行器分为水上无人机、潜射无人机和潜水无人机。通过对现有典型样机进行总结和分析,可以发现该种飞行器的发展涉及以下关键技术。

4.1 空-水和水-空过渡方式

从典型样机的作业过程来看,运动介质的转换是成功实现海空作业的关键过程。对水空两栖跨介质无人飞行器来说,关键过程包括空-水过渡(水面降落)和水-空过渡(水面起飞)两个过程,如何实现水体环境和空气介质之间稳定可靠的转换是该种飞行器实现跨介质航行的难点。几种典型样机的水面起降方式如图8所示。现有典型样机的主要起飞方式包括滑跑起飞、火箭助推、弹射起飞、螺旋桨或高压气体助力起飞等,主要的降落方式为滑落和溅落两种,表2给出了各个仿生样机的介质过渡时间和起降距离。通过分析可以得到:

(1) 根据作者调研的数据,近40%的水空两栖跨介质无人飞行器采用滑跑方式起飞和降落。滑跑起飞和降落是一种对结构抗冲击能力要求较低的介质过渡方式,但是它的介质转换过程时间较长,而且需要较长的起飞降落距离,在紧急军事行动场合和狭小水域空间起降受到限制。

(2) 约45%的水空两栖跨介质无人飞行器采用溅落入水方式,这种方式在入水时间和降落距离上

都具有一定的优势, 是一种比较适合水空两栖跨介质飞行器空-水过渡的方式, 但是由于水体介质和空气介质密度相差约 800 倍, 飞行器溅落入水时运动介质的突变会产生较大冲击力, 对整个两栖飞行器的结构强度和敏感元件抗冲击能力要求较高。

(3) 对于各种水空两栖跨介质无人飞行器来说, 水上起飞过程都要受到波浪干扰, 从结构设计和起飞控制算法等方面开展抗波浪干扰的研究工作, 提高水空两栖跨介质飞行器对波浪干扰的适应性和对抗性, 是其成功实现水面起飞的关键。







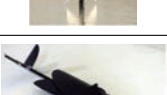
两栖样机	名称	研发时间	研发机构	水-空过渡方式	空-水过渡方式	变体结构设计
	海鸥系列水上无人机	2007 年	英国勇士公司	水面滑跑	滑落	无
	“飞鱼”水上无人机	2007 年	美国密歇根大学	水面滑跑	滑落	无
	鸪鹑	2005 年	美国洛克希德·马丁公司	火箭助推	溅落	横向折叠翼
	弹簧刀	2011 年	美国航空环境公司	弹射	溅落	变后掠角机翼
	“飞鱼”概念样机	2009 年	中国北京航空航天大学	水面滑跑	滑落	变后掠角机翼
	鳀鸟	2012 年	美国 MIT 林肯实验室	手抛式	溅落	变后掠角机翼
	“鳀鸟”仿生样机	2015 年	中国北京航空航天大学	水面垂直起飞	溅落	变后掠角机翼
	可潜水仿生样机	2016 年	英国帝国理工学院	高压气体助力	溅落	变后掠角机翼

图 8 现有典型水空两栖跨介质无人飞行器水面起降方式

Fig.8 The takeoff and landing modes of current typical water-air amphibious trans-media unmanned vehicles

4.2 不同流体介质航行的结构兼容性设计

水和空气两种流体介质在物理性质上存在显著差异, 如何在结构布局上满足水/空航行的兼容性, 是该种飞行器在不同介质中实现高效稳定航行的关键。由图 8 和表 2 可知, 为适应空/水不同流体介质航行时的增升/减阻需求, 大部分海空两栖飞行器都采用了变体结构设计。变体结构的基本设计思路是空气介质中整体布局和结构满足升力条件和高速飞行要求, 变体后在水体环境中满足减阻和耐压要求, 同时满足空-水过渡过程对结构的强度要求。目前应用在水空两栖跨介质飞行器上的变体结构形式包括横向折叠机翼、变后掠角机翼和仿生扑翼式两栖驱动翼等^[43, 69-71], 如图 9 所示。横向折叠

变构沿着翼展方向进行折叠(图 9(a)), 通过调整翼展方向的尺度有效地减小入水冲击力矩和水下航行的流体阻力, 但是铰链在实现折叠时需要较大的驱动力矩, 同时铰链关节处成为机翼的脆弱部位, 承受较大的冲击力时易发生损伤。变后掠角机翼是机翼朝机体中线旋转实现折叠的变构形式(图 9(b)), 当翼梢靠近机身中线时减小了翼展和最大迎水面积, 从而减小入水的冲击力和机翼冲击力矩, 有效地减轻了冲击对机翼结构的破坏。这种变后掠角机翼结构简单, 变构的驱动和控制易于实现, 但同样在翼根部铰链处需要较大的驱动力矩来实现折叠。仿生扑翼式两栖驱动翼参考自然界中的两栖水鸟进行设计, 通过在水体和空气介质的扑动运动产生前行

的推进力, 通过关节角的变化改变翼展从而适应不同流体介质 (图 9(c)). 该种变构形式通过一套动力系统实现了水体和空气介质中的推进, 但是结构复杂, 对控制系统要求也较高. 当前大部分水空两栖跨介质无人飞行器采用的都是变后掠角机翼的结构兼容性设计方案, 90° 后掠角的情况下, 机翼翼展与机体中线平行, 此时冲击力主要由翼根枢轴部分承担, 可以有效地减轻冲击力/矩和水阻力/矩对机翼结构的破坏.

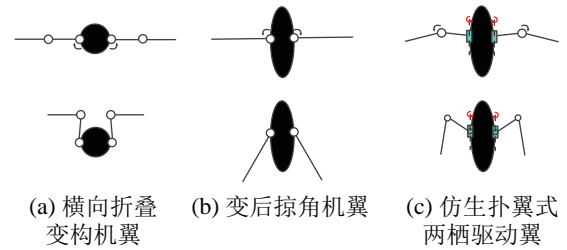


图 9 3 种典型的机翼水空兼容性结构设计方案

Fig.9 Three typical design schemes of the wing structure for water-air compatibility

表 2 几种典型样机跨介质能力的比较

Tab.2 The trans-media performance comparison of some typical prototypes

比较项目	飞行能力	潜航能力	飞行转潜航的时间	降落距离	潜航转飞行的时间	起飞距离	变构设计
“海鸥”无人机	具备	不具备	不具备	超过 30 m	少于 1 min (水面起飞)	超过 20 m	无
“飞鱼”无人机	具备	不具备	不具备	超过 30 m	少于 1 min (水面起飞)	20 m 左右	无
“鸬鹚”潜载无人机	具备	不具备	十几分钟 (溅落后被动回收)	溅落, 无要求	少于 1 min	火箭助推, 对距离无要求	横向折叠翼
“弹簧刀”无人机	具备	不具备	数秒钟 (溅落后被动回收)	溅落, 无要求	少于 1 min	弹射起飞, 对距离无要求	变后掠角折叠翼
“鳀鸟”两栖无人机	具备	具备	数秒钟	溅落, 无要求	少于 1 min (抛掷)	无水面起飞能力	变后掠角折叠翼
“飞鱼”概念机	具备	具备	15 min	超过 40 m	约 20 min	超过 30 m	变后掠角折叠翼

4.3 能量来源和推进方式

由于水和空气含氧量及航行环境的差异, 如何设计或选择适应水空两栖环境的动力系统是该种飞行器在水空不同介质中获得足够动力的关键. 当前典型样机主要的能量来源包括: a) 传统的航空燃料, 如航空汽油、航空煤油等; b) 对环境相对友好的燃料, 如甲醇汽油; c) 氢质子交换膜燃料电池; d) 锂离子电池. 以上 4 种燃料的体积能量密度 (MJ/L) 分别为 37.4、15.6、5.6、4.32, $a > b > c > d$, $a = 2.4 \times b = 6.7 \times c = 8.7 \times d$; 质量能量密度 (MJ/kg) 分别为 46、19.7、142、1.8, $c > a > b > d$, $c = 3.1 \times a = 7.2 \times b = 78.9 \times d$ ^[72]. 约 70% 水上无人机和潜射无人机采用传统的航空燃料和甲醇汽油, 因为这两种飞行器的作业区间为空域或水面, 环境可为燃料提供足够的氧气, 而且能量密度 (体积和质量) 都能够满足任务载荷和航程的要求. 目前 100% 的潜水无人机采用电能作为能量源, 因其作业区域包括水域, 为缺氧环境, 不适合燃料燃烧. 目前在水体环境下水空跨介质无人飞行器通常采用电动式驱动. 一个比较有应用前景的

供能方式是氢质子交换燃料电池, 它不通过燃烧就能将燃料的化学能转换为电能, 并且具有较高的能量转换效率. 在潜射无人机 Sea-Robin XFC 上的应用表明氢质子交换燃料电池具有较高能量密度^[38], 由燃料电池供能的推进系统也较易密封, 能保证水下的操作性能.

表 3 同时列出了各个水空两栖跨介质无人飞行器的动力源和空中/水下以及水-空过渡过程的推进方式. 主要的动力源包括电动机和发动机. 以电机作为动力源的推进方式主要包括螺旋桨推进 (约 70%) 和扑翼式推进 (约 20%), 以发动机作为动力源的推进方式主要包括喷气式推进 (约 20%)、火箭推进 (约 10%) 和螺旋桨推进 (约 70%). 发动机具有较高的能量密度^[73-74], 通常作为无人水上飞机和潜射无人机的动力源, 这两种飞行器的作业区域也适合发动机工作. 电机易于密封, 适合作为水下推进的动力源, 因此潜水无人机通常采用这种方式提供动力. 从推进类型的角度看, 对潜水无人机来说, 泵推进、水下螺旋桨推进和仿生扑翼推进都是比较实用的水下推进方式.

表 3 当前水空两栖跨介质无人飞行器样机的供能方式、动力源及不同介质运动的推进方式

Tab.3 Energy supply way, power source and propulsion of the current water-air amphibious trans-media unmanned vehicle prototypes in different media

类别	样机名称	供能方式	动力源	水下/水面推进	空中推进	水-空过渡推进
水上 无人机	ACAT (NASA)	甲醇燃料	四冲程模型 飞机发动机	小直径 螺旋桨	小直径 螺旋桨	通过螺旋桨 推力实现起 飞加速
	King Fisher II	航空煤油	1 个 PW525B 涡扇发动机	喷气式推进	喷气式推进	通过喷气推 力实现起 飞加速
	Sea Scout	航空煤油	1 个 38 马 力转子活塞发动机	空气螺旋桨	空气螺旋桨	通过螺旋桨 推力实现起 飞加速
	Flying Fish (UMich)	2 个锂电 池和 1 个 太阳能电池	2 个反向旋 转的主电机	无动力漂浮	反向旋转的 2 个螺旋桨	通过助推电 机实现起 飞加速
	GULL 24 (Warrior Ltd)	航空煤油	1 个 3.6 马 力的发动机	空气螺旋桨	空气螺旋桨	通过螺旋桨 推力实现起 飞加速
	GULL 36 (Warrior Ltd)	航空煤油	1 个 3W 牌 160 cm ³ 水平对置双 缸发动机	空气螺旋桨	空气螺旋桨	通过螺旋桨 推力实现起 飞加速
潜射 无人机	Sea Ferret	航空煤油	Sundstrand 公司生产 的 TJ50 小型涡轮 喷气发动机	不适用	喷气式推进	从潜艇导弹 发射筒发射
	Sea Sentry	航空煤油	1 个 2.5 马 力冷启动发动机	不适用	螺旋桨推进	通过冷火箭 从潜艇通用 模块化桅杆 (UMM) 发射
	Cormorant	航空煤油	火箭发动机	无动力漂浮	火箭助推器	火箭助推起飞
	Switchblade	电池	电动机	不适用	螺旋桨推进	通过 SLV 干发射
	Sea-Robin XFC	氢质子交 换燃料电池	燃料电池发动机	不适用	螺旋桨推进	通过螺旋 桨拉力拉 出水面
	Blackwing	电池	电动机	不适用	螺旋桨推进	艇载发射 筒或 UUV
潜水 无人机	Flying Fish (BUAA)	聚合物锂 离子电池	2 个 MAX70A 无刷 电机 (空中) 和 2 个真空泵 (水下)	通过 2 个真 空泵喷水推进	通过 2 个 MAX70A 无刷电机 驱动 2 个折叠 螺旋桨推进	通过 2 个 螺旋桨拉力 实现起飞加速
	Multi-modal wing model (Bristol)	直流电源	电动机和 传动机构	扑翼式仿 生推进	不适用	不适用
	Flying Fish (MIT)	直流电源	伺服电机或 者直流电机	摆尾式 BCF 推进	无动力 滑翔飞行	通过弹射 机构发射
	Diving plane I (NCHU)	锂电池	2 个直流电机	尾部电机带动 水下螺旋桨推进	头部电机带 动空气螺旋 桨推进	通过空气螺 旋桨拉力实 现起飞加速
	Diving plane II (NCHU)	油电混合	1 个直流电机 和 1 个汽油活 塞式发动机	尾部电机带动 水下螺旋桨推进	汽油活塞式 发动机带动空 气螺旋桨推进	通过空气螺 旋桨拉力实 现起飞加速
	Gannet (MIT)	电池	1 个直流电机	螺旋桨推进	螺旋桨推进	不适用
	Insect flapping UAV AquaMAV (IC London)	直流电源 电池	高密度 压电肌肉 直流电机	扑翼式推进 螺旋桨推进	扑翼式飞行 螺旋桨推进	扑翼产生起 飞升力 高压气体

从当前发展水平来看,大部分水空两栖跨介质无人飞行器系统实现了关键技术和系统功能的验证、集成和协同演示,成熟度等级(system readiness level, SRL)处在0.60~0.79之间,属系统研制与演示阶段^[75];部分水上无人机(如GULL系列)SRL可达0.90~1.00,可成功用于执行一项作战任务,处于作战和保障阶段.仿生变体结构设计、多流体环境高能量密度燃料研制、水/空介质传感和控制等优化,从结构、动力和传感控制等方面提升其水空两栖作业能力,是未来该种飞行器的总体发展趋势.

5 结论和展望 (Conclusions and prospect)

经过70多年的发展,水空两栖跨介质飞行器经历了由载人到无人的转变,虽然目前其跨海空性能还有待提高,但由于现代军事和民用领域的迫切需求和当前技术的迅猛发展,真正实现该种飞行器的跨海空作业只是一个时间问题.

本文从整个无人机领域的视角对一种新兴的飞行器—水空两栖跨介质无人飞行器进行了综述,重点介绍了该种飞行器的发展历程及国内外发展现状,并对其涉及的相关技术和问题进行了总结和归纳.现有的水空跨介质无人飞行器可以分为3类,分别为水上无人机、潜射无人机和潜水无人机,总结了每种样机的共性特点.同时对影响水空两栖跨介质无人飞行器发展的关键技术——水空介质转换方式,变体结构设计,动力及推进方式——进行了讨论和分析.对于水—空过渡来说,实现成功起飞的关键是设计具有良好波浪抗性的结构和起飞控制算法,配备比陆地起飞更高功率的起飞推进系统等;对于空—水过渡来说,在结构设计中需重点考虑变体结构机翼的设计,因为这种结构在适应不同流体介质航行时具有很大优势;燃料电池供能的电动式推进对两栖无人飞行器双介质作业环境具有潜在的应用价值.如何解决航行器的布局、结构设计、机身外形、动力系统和自重等在2种流体中的兼容性,是该种飞行器实现良好两栖作业性能所面临的重大技术挑战.

参考文献 (References)

- [1] Chant C, Taylor M J H. The world's greatest aircraft[M]. New York, USA: Book Sales Inc., 2008.
- [2] Nicolaou S. Flying boats & seaplanes: A history from 1905[M]. Bideford, UK: Bay View Books Ltd., 1996.
- [3] Verne J. Master of the world[M]. Hanover, Germany: Steerforth Press, 2010.
- [4] Drews Jr P L J, Neto A A, Campos M F M. A survey on aerial submersible vehicles[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 1-7.
- [5] Petrov G. Flying submarine[J]. Journal of Fleet, 1995, 3: 52-53.
- [6] Reid B D. The Flying submarine: The story of the invention of the Reid flying submarine, RFS-1[M]. Berwgn Heights, USA: Eagle Editions, 2004.
- [7] Convair. Convair flying submarine report[R]. San Diego, USA: Consolidated Vultee Convair, 1962.
- [8] DARPA. Broad agency announcement: Submersible aircraft[R]. Arlington, USA: DARPA, 2008.
- [9] Johnson R P, Rumble H P. The submersible aircraft: Design feasibility and performance calculations[R]. Santa Monica, USA: RAND Corporation, 1963.
- [10] Johnson R P, Rumble H P. Submersibly moored and submersible aircraft: Comparative design and parametric performance analysis[R]. Santa Monica, USA: RAND Corporation, 1964.
- [11] Johnson R P, Rumble H P, Tenzer A J. Submersible aircraft: Potential missions, selected system operations, and costs[R]. Santa Monica, USA: RAND Corporation, 1964.
- [12] Tenzer A J, Watts A F, Kermisch J J. System costs for strategic penetrator systems using submersible and conventional aircraft[R]. Santa Monica, USA: RAND Corporation, 1965.
- [13] Department of Defense. FY2013-2038 unmanned systems integrated roadmap[M]. Washington, USA: Department of Defense, 2013.
- [14] 王田苗, 杨兴帮, 梁建宏. 中央鳍/对鳍推进模式的仿生自主水下机器人发展现状综述[J]. 机器人, 2013, 35(3): 352-362,384.
Wang T M, Yang X B, Liang J H. A Survey on bionic autonomous underwater vehicles propelled by median and/or paired fin mode[J]. Robot, 2013, 35(3): 352-362,384.
- [15] 欧青立, 何克忠. 室外智能移动机器人的发展及其关键技术研究[J]. 机器人, 2000, 22(6): 519-526.
Ou Q L, He K Z. Research on key techniques and development of outdoor intelligent autonomous mobile robot[J]. Robot, 2000, 22(6): 519-526.
- [16] 杨斌, 何玉庆, 韩建达, 等. 作业型飞行机器人研究现状与展望[J]. 机器人, 2015, 37(5): 628-640.
Yang B, He Y Q, Han J D, et al. Survey on aerial manipulator systems[J]. Robot, 2015, 37(5): 628-640.
- [17] Chen Y F, Helbling E F, Gravish N, et al. Hybrid aerial and aquatic locomotion in an at-scale robotic insect[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 331-338.
- [18] Izraelevitz J S, Triantafyllou M S. A novel degree of freedom in flapping wings shows promise for a dual aerial/aquatic vehicle propulsor[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 5830-5837.
- [19] Siddall R, Kovac M. A water jet thruster for an aquatic micro air vehicle[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 3979-3985.
- [20] Yang X B, Wang T M, Liang J H, et al. Survey on the novel hybrid aquatic-aerial amphibious aircraft: Aquatic unmanned aerial vehicle (AquaUAV)[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2015, 74: 131-151.
- [21] Murphy R R, Steimle E, Griffin C, et al. Cooperative use of unmanned sea surface and micro aerial vehicles at Hurricane Wilma[J]. Journal of Field Robotics, 2008, 25(3): 164-180.

- [22] 朱心科, 金翔龙, 陶春辉, 等. 海洋探测技术与装备发展探讨[J]. 机器人, 2013, 35(3): 376-384.
Zhu X K, Jin X L, Tao C H, et al. Discussion on development of ocean exploration technologies and equipments[J]. Robot, 2013, 35(3): 376-384.
- [23] 戴瑜, 刘少军. 深海采矿机器人研究: 现状与发展[J]. 机器人, 2013, 35(3): 363-375.
Dai Y, Liu S J. Researches on deep ocean mining robots: Status and development[J]. Robot, 2013, 35(3): 363-375.
- [24] Siddall R, Kovac M. Launching the AquaMAV: Bioinspired design for aerial-aquatic robotic platforms[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2014, 9(3): 1-15.
- [25] Pisanich G, Morris S. Fielding an amphibious UAV: Development, results, and lessons learned[C]//The 21st Digital Avionics Systems Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2002: 1-9.
- [26] Sirak M. Vought markets unmanned seaplane to US navy[J]. Janes Defence Weekly, 2005, 42(14): 8-9.
- [27] Oregon Iron Works, Inc. Sea scout unmanned tactical seaplane offers increased mission flexibility and utility[EB/OL]. [2017-10-23]. <https://www.scribd.com/document/40874493/Seascout>.
- [28] Macy D, Eubank R D, Atkins E M, et al. Flying fish: A persistent ocean surveillance buoy with autonomous aerial repositioning[C]//2008 AUVSI Conference. San Diego, USA: 2008.
- [29] Eubank R D, Atkins E M. Unattended autonomous mission and system management of an unmanned seaplane[C]//InfoTech and Aerospace. Reston, USA: AIAA, 2011: 1-12.
- [30] Eubank R D. Autonomous flight, fault, and energy management of the flying fish solar-powered seaplane[D]. Ann Arbor, USA: University of Michigan, 2012.
- [31] Eubank R D, Bradley J M, Atkins E M. Energy-aware multi-flight planning for an unattended seaplane: Flying fish[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2016, 14(2): 1-19.
- [32] Pengelley R. All hands on deck: The sky's the limit for shipboard UAVs[J]. Jane's Navy International, 2009, 12: 12-17.
- [33] Vigliotti V. Demonstration of submarine control of an unmanned aerial vehicle[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 1998, 19(4): 501-512.
- [34] Kollmorgen. Sea sentry organic submarine launched UAV[R]. Radford, USA: Kollmorgen Corporation, 2009.
- [35] Weisshaar T A. Morphing aircraft systems: Historical perspectives and future challenges[J]. Journal of Aircraft, 2013, 50(2): 337-353.
- [36] DARPA. Broad agency announcement: Hydra[R]. Arlington, USA: DARPA, 2013.
- [37] SIGNAL Media. DARPA awards Hydra phase 2 contract [EB/OL]. [2017-09-27]. <https://www.afcea.org/content/Blog-darpa-awards-hydra-phase-2-contract>.
- [38] Majumdar D U S. Navy launches UAV from a submarine[EB/OL]. [2017-09-27]. <http://news.usni.org/2013/12/06/u-s-navy-launches-uav-submarine#more-5603>. 2013-12-06.
- [39] Business Wire Connect. United States Navy demonstrates cross-domain communications, command and control via AeroVironment Blackwing submarine-launched UAV[EB/OL]. [2017-09-27]. <http://www.businesswire.com/news/home/20160907005733/en/United-States-Navy-Demonstrates-Cross-Domain-Communications-Command>.
- [40] Lock R J, Vaidyanathan R, Burgess S C, et al. Development of a biologically inspired multi-modal wing model for aerial-aquatic robotic vehicles through empirical and numerical modelling of the common guillemot, *Uria aalge*[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2010, 5(4): NO.046001.
- [41] Lock R J. A biologically-inspired multi-modal wing for aerial-aquatic robotic vehicles[D]. Bristol, UK: University of Bristol, 2011.
- [42] 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]//4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob). Piscataway, USA: IEEE, 2012: 681-687.
- [43] Lock R J, Vaidyanathan R, Burgess S C. Impact of marine locomotion constraints on a bio-inspired aerial-aquatic wing: Experimental performance verification[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2014, 6(1): 1-10.
- [44] Gao A, Techet A H. Design considerations for a robotic flying fish[C]//OCEANS. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 1-8.
- [45] Fabian A, Feng Y F, Swartz E, et al. Hybrid aerial underwater vehicle[R]. Lexington, USA: MIT Lincoln Lab, 2012.
- [46] Izraelevitz J S, Triantafyllou M S. Adding in-line motion and model-based optimization offers exceptional force control authority in flapping foils[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 742(3): 5-34.
- [47] Licht S C, Wibawa M S, Hover F S, et al. In-line motion causes high thrust and efficiency in flapping foils that use power downstroke[J]. Journal of Experimental Biology, 2010, 213(1): 63-71.
- [48] Ma K Y, Chirarattananon P, Fuller S B, et al. Controlled flight of a biologically inspired, insect-scale robot[J]. Science, 2013, 340(6132): 603-607.
- [49] Siddall R, Ortega A A, Kovac M. Wind and water tunnel testing of a morphing aquatic micro air vehicle[J]. Interface Focus, 2017, 7(1): 1-5.
- [50] Makiguchi Y, Kuramochi K, Iwane S, et al. Take-off performance of flying fish *Cypselurus heterurus doederleini* measured with miniature acceleration data loggers[J]. Aquatic Biology, 2013, 18(2): 105-111.
- [51] Muramatsu K, Yamamoto J, Abe T, et al. Oceanic squid do fly[J]. Marine Biology, 2013, 160(5): 1171-1175.
- [52] Yan R C, Grémillet D, Ryan P, et al. Between air and water: The plunge dive of the Cape Gannet *Morus capensis*[J]. IBIS, 2004, 146(2): 281-290.
- [53] 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.
Liu H X. Investigation on the mechanism of a bionic trans-media vehicle and prototype project[D]. Beijing: Beihang University, 2009.
- [54] Yao G C, Liang J H, Wang T M, et al. Submersible unmanned flying boat: Design and experiment[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 1308-1313.
- [55] Yang X B, Wang T M, Liang J H, et al. Submersible unmanned aerial vehicle concept design study[C]//Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston, USA: AIAA, 2013: 1-12.

- [56] 朱莎. 水空两用无人机动力系统设计与研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
Zhu S. The design and research of power system in water-air UAV[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2012.
- [57] 刘伟. 潜水飞机总体设计与气动外形结构设计分析[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
Liu W. The diving plane design and the aerodynamic shape structural design and analysis[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2012.
- [58] Zhu Y G, Fan G L, Yi J Q. Modeling longitudinal aerodynamic and hydrodynamic effects of a flying boat in calm water[C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 2039-2044.
- [59] Du H, Fan G L, Yi J Q. Autonomous takeoff for unmanned seaplanes via fuzzy identification and generalized predictive control[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 2094-2099.
- [60] Du H, Fan G L, Yi J Q. Autonomous takeoff control system design for unmanned seaplanes[J]. Ocean Engineering, 2014, 85: 21-31.
- [61] Du H, Fan G L, Yi J Q. Nonlinear longitudinal attitude control of an unmanned seaplane with wave filtering[J]. International Journal of Automation and Computing, 2016, 13(6): 634-642.
- [62] 裴讓, 张宇文, 李闻白, 等. 跨介质飞行器气/水两相弹道仿真研究[J]. 工程力学, 2010, 27(8): 223-228.
Pei X, Zhang Y W, Li W B, et al. Simulation and analysis on the gas/water two-phase ballistics of trans-media aircraft[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(8): 223-228.
- [63] 裴讓, 张宇文, 袁绪龙, 等. 两栖 UAV 动力学建模与仿真[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(1): 10-13.
Pei X, Zhang Y W, Yuan X L, et al. Dynamic modeling and simulation of trans-media aircraft system[J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(1): 10-13.
- [64] 裴讓, 张宇文, 王银涛, 等. 两栖 UAV 滑跳动力学特性仿真研究[J]. 计算力学学报, 2011, 28(2): 173-177.
Pei X, Zhang Y W, Wang Y T, et al. Simulation and analysis of slide jump dynamic characteristic of the amphibious UAV[J]. Journal of Computational Mechanics, 2011, 28(2): 173-177.
- [65] 王伟, 张宇文, 朱灼. 跨介质飞行器弹道仿真分析[J]. 计算机仿真, 2012, 28(12): 1-4.
Wang W, Zhang Y W, Zhu Z. Simulation and analysis on ballistic trajectory of trans-media aircraft[J]. Computer Simulation, 2012, 28(12): 1-4.
- [66] 李金洪, 杨安强, 粟凌云. 跨介质 UAV 水面滑跳转向特性建模与仿真[J]. 鱼雷技术, 2013, 20(6): 401-406.
Li J H, Yang A Q, Su L Y. Modeling and simulation of dynamic characteristics of slide jump steering trajectory for trans-media UAV[J]. Torpedo Technology, 2013, 20(6): 401-406.
- [67] 邢文中, 蒋蓁. 海空无人机的构型设计与气动水动分析[J]. 火箭与制导学报, 2015, 35(4): 113-117.
Xing W Z, Jiang Z. Configuration design and aerodynamic and hydrodynamic performance analysis of sea-air unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2015, 35(4): 113-117.
- [68] 姜琬, 贾任重, 卢芳春. 仿生系列跨介质新概念飞行器气水动布局设计[C]//第六届中国航空学会青年科技论坛, 2014.
Jiang W, Jia R Z, Lu F C. Aerodynamics and hydrodynamics configuration design of bionic series transmedia new concept aircraft[C]//The Sixth China Aviation Institute Youth Science and Technology BBS. 2014.
- [69] 张亦波, 刘牧东, 熊峻江. 变体飞机技术[J]. 航空科学技术, 2013(6): 64-68.
Zhang Y B, Liu M D, Xiong J J. Morphing Aircraft Technology[J]. Aeronautical Science and Technology, 2013(6): 64-68.
- [70] 贺媛媛, 王博甲. 国外变形飞行器的研究现状[J]. 飞航导弹, 2013, 10(10): 49-55.
He Y Y, Wang B J. Current research status of abroad morphing aircraft[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2013, 10(10): 49-55.
- [71] Rodriguez A R. Morphing aircraft technology survey[C]//45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, USA: AIAA, 2007: 1-16.
- [72] Wikipedia. Energy density[EB/OL]. (2017-05-09) [2017-05-16]. https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density.
- [73] Griffis C A, Wilson T, Schneider J, et al. Unmanned aircraft system propulsion systems technology survey[M]. Washington, USA: Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2009.
- [74] Kweon C B M. A review of heavy-fueled rotary engine combustion technologies[R]. Aberdeen Proving Ground, USA: Army Research Lab, 2011.
- [75] 孙冲, 刘磊, 曹强. 海军装备技术体系中的系统成熟度评价方法研究[J]. 国防科技, 2014, 35(4): 54-58, 62.
Sun C, Liu L, Cao Q. Study on system readiness assessment in navy armament technology system-of-systems[J]. National Defense Science & Technology, 2014, 35(4): 54-58, 62.

作者简介:

杨兴帮 (1987-), 男, 博士后. 研究领域: 水空两栖多模式运动, 仿生机器人, 软体机器人.

梁建宏 (1977-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 微小型仿生机电系统.

文力 (1983-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 仿生机器人, 软体机器人.