

潜空跨介质无人航行器发展现状与展望

孙祥仁, 曹建, 姜言清, 李岳明, 李晔

(哈尔滨工程大学 船舶工程学院 水下机器人技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 潜空跨介质无人航行器作为一种能够同时完成水中、空中作业任务的航行器, 已成为当前的研究热点。简要介绍了一些关于潜空跨介质航行器的研究成果, 以及不同设计思路的原理样机。该类航行器无论是在科学调查或军事上均有广阔的应用前景, 但其研制过程也充满各类难点与挑战, 当前的技术水平尚无法完成实际作业任务的样机。为此, 探讨了潜空跨介质航行器的研制可能遇到的各类难点问题。

关键词 潜空跨介质航行; 潜空两用无人机; 跨介质航行器; 两栖飞行器

中图分类号 V279+.2 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2020)03-0178-07

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.03.001

Development Status of Unmanned Underwater-aerial Cross-domain Vehicles

SUN Xiangren, CAO Jian, JIANG Yanqing, LI Yueming, LI Ye

(Key Laboratory of Underwater Vehicle Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract As a kind of vehicle capable of simultaneously accomplishing underwater and aerial operations, the unmanned underwater-aerial cross-domain vehicle has become a hot research topic nowadays. In this paper, several research results on underwater-aerial cross-domain vehicle are briefly introduced, and an introduction to prototypes of different design ideas is given. This type of vehicle has broad application prospects on scientific investigation or military, but its development process is also full of difficulties and challenges. The current technology is still unable to complete the prototype for actual operation tasks. Therefore, the various difficulties that may be encountered in the development of the cross-domain vehicle have been introduced.

Key words underwater-aerial cross-domain sailing; unmanned underwater-aerial drone; cross-domain vehicle; amphibious aircraft

0 引言

潜空跨介质无人航行器是一种能同时拥有水中、空中运动能力, 且能通过自身能量多次跨越水、空2种介质, 通过搭载相应的传感器能完成水中、空中作业任务的无人航行器。实际上, 潜射无人机的发射同样也经历了由水下至空中的跨介质过程。但一般潜射无人机在水下不具备作业能力, 也不能完成多次出入水作业, 因此潜射无人机不属于本文

讨论重点。

潜空跨介质航行器综合了水下航行器的隐蔽性以及空中飞行器的快速性优势, 并可在同一航行器上完成水下和空中的作业任务, 这使得各国都对该类航行器产生了较大兴趣。二战之前, 就曾有苏联人提出过飞行潜艇的概念。20世纪70年代, 美国也曾对大型潜水飞机方案进行过概念设计。进入21世纪以来, 不断有研究机构对潜空跨介质航行器进行论证、设计, 部分机构做了原理样机并进行

了初步试验。潜空航行器的跨介质特点也是其研究的最大难点, 由于水和空气 2 种介质差别巨大, 在设计时往往难以兼顾航行器在 2 种介质中的航行性能^[1]。水下航行器一般使用电池作为能源, 并采用细长的流线型外壳以降低航行阻力, 所受浮力一般接近于重力; 而长航时空中飞行器一般使用内燃机作为动力来源, 依靠机翼或旋翼提供升力, 机体则是越轻越好。此外, 由于出水过程极为耗能, 要想达到长航时要求, 跨介质航行器一般需携带较多电池, 这又增加了整体重量。目前为止, 潜空跨介质无人航行器的研究多数停留在理论层面上, 设计制造出原理样机的不多, 原理样机能够完成水下航行、出水、空中航行、入水这一循环的少之又少。

1 国内外研究现状

本文在此介绍一些国内外较为典型的潜空跨介质无人航行器的相关研究, 主要偏向于 21 世纪以后各研究机构的相关成果。

1.1 国外研究现状

2010 年, 英国布里斯托大学的研究人员研制出可应用于潜空跨介质航行器的仿生翼结构^[2]。在实验中, 测定了仿生翼在不同运动模式下的功耗, 并得出扑翼的运动模式可以为航行器提供足够的水下前进动力。这种结构对于潜空跨介质航行器有潜在的应用价值, 为其设计实现提供了更多研究资料和经验借鉴^[1]。

2011 年, 麻省理工学院 (MIT) 机械工程系研制了一型两栖仿飞鱼的原理样机 (如图 1 所示), 并在飞鱼游动理论、机构设计实现、驱动控制方式等方面进行深入研究, 对今后仿生样机的研究有一定指导意义^[3]。



图 1 “飞鱼”仿生潜空航行器^[3]

Fig. 1 “Flying Fish” bionic underwater-aerial vehicle

2016 年, 英国伦敦帝国理工学院设计了一款螺旋桨推进的潜空航行器 AquaMAV, 如图 2 所示。该航行器仿照飞鸟贼喷射的方式, 将飞行器携带的少量水喷出实现起飞。其入水方式为溅落入水, 即空中完成机翼折叠, 螺旋桨停转后自动折叠且最先入水, 从而完成航行器入水过程, 水中、空中航行采用的是同一可折叠螺旋桨完成推进^[4-5]。该样机重量仅有 201 g, 飞行时间约 14 min, 期望被用于特定水域的数据收集或环境监测, 如监测海洋石油泄漏等^[6]。目前尚未找到该样机完成水下航行—出水—空中航行—入水这一全过程的资料, 且由于无法补充喷水所需的高压气体, 尚无法完成多次出水过程。但该样机以其轻小的机体, 特别的出水方式为潜空跨介质航行器的设计提供了新思路。



图 2 AquaMAV 实物图^[6]

Fig. 2 Physical image of AquaMAV

2019 年 9 月发表的论文显示, 伦敦帝国理工学院团队设计了新一代跨介质航行器^[7], 如图 3 所示。与上一代样机相似的是新样机同样采用喷水的方式出水, 不同之处在于新样机利用化学反应爆炸而不是高压气体来完成喷水动作, 且团队为新样机设计了三角翼以在出水后提高飞行稳定性。其爆炸的产生方式是: 通过微型泵将环境中的水泵装入有碳化钙的容器中, 水与碳化钙结合产生乙炔气体并进入到另一个有少量水和空气的容器中, 通过产生电弧引燃乙炔产生爆炸将容器中的水喷出。每次仅消耗 0.2 g 碳化钙即可将 160 g 的航行器喷射出水面并滑翔约 26 m。通过携带少量碳化钙粉末, 入水后用一根较细的金属管向容器内补充水, 即可满

足多次出水的需要。该论文重点对出水过程进行了验证，并未涉及水、空航行过程的试验。



图3 伦敦帝国理工学院的新型航行器^[7]
Fig. 3 ICL's new vehicle

2017年7月，美国罗格斯大学与海军研究办公室联合研制的“航海家”(Naviator)潜空航行器成功用于特拉华纪念大桥的空中和水下桥体检测，如图4所示。该航行器自2013年开始研究，是一型经特殊改进的四旋翼无人机。主要改进包括：1)对航行器的关键部位进行了防水处理，使其能在一定水深正常工作；2)优化螺旋桨转速，航行器一旦进入水中，自动切换为较低转速旋转，同时机身旋转90°，此时螺旋桨的升力转为水平推力，推动航行器前进；3)改进数据传输能力，空中采用无线信号传输，在水中将采用水声信号传输等。“航海家”可以携带多类传感器执行空中/水下探测侦察任务。此类航行器起降灵活，不足之处在于水中、空中航程提高空间小。



图4 “航海家”潜空航行器
Fig. 4 “Naviator” underwater-aerial vehicle

2018年2月，北卡罗来纳州立大学和特力丹科学与成像公司(Teledyne Scientific and Imaging)联合开发了“鹰鳐”(EagleRay)固定翼跨介质航行器，可从水面起飞或潜入水下航行。“鹰鳐”长约1.4 m，翼展约1.5 m，重量约5.7 kg，机身主体由碳纤维和铝合金制成，由同一个电动机驱动的螺旋桨完成空中和水中推进，同时具备手控和自控2种模式^[8]，如图5-6所示。其起飞流程是：1)在螺旋桨推进下航行至起飞点；2)向机腔后部注水，使航行器转为直立状态，由螺旋桨将航行器从水面拉起；3)飞行至一定高度，腔体排水，转为平飞；4)完成空中任务后，平飞降落水面。潜水流程是：1)腔体注水，航行器潜入水下航行；2)完成水下任务后，腔体排水，浮出水面。该航行器目前已经进行了多次试验，是目前潜空跨介质航行器中为数不多地完成了各个航行过程试验的样机^[9]。

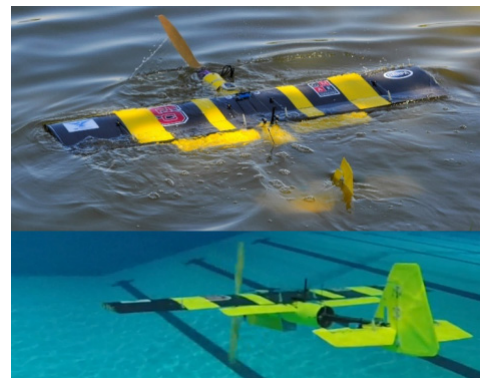


图5 “鹰鳐”在水面和水下航行^[8]
Fig. 5 “EagleRay” sailing above and below water



图6 “鹰鳐”出水瞬间
Fig. 6 The moment of “EagleRay” flying out of water

1.2 国内研究现状

当前国内关于潜空跨介质航行器的研究主要有航行器模型的仿真验证、原理样机的研制、对水空过渡等关键技术进行验证等。

2009年,北京航空航天大学研制出潜空航行器“飞鱼”^[10],如图7所示。“飞鱼”通过浮力调节机构出入水面,在水面滑跑完成起飞,降落也同樣要在水面减速,具有水下运动能力。该样机采用可变后掠角机翼,以减小水下航行时的阻力,同时也方便在上浮时快速排干机翼内的水^[1]。



图7 “飞鱼”潜空航行器^[10]

Fig. 7 “Flying Fish” underwater-aerial vehicle

2015年,北京航空航天大学开发了一款仿鳶鸟潜空跨介质航行器^[11],如图8所示。从模型图上来看,该样机空中推进器布置于机身最前端,尾部配有水下推进器,并包含了姿态调节机构以在出水时调节机身俯仰角,其结构设计尽可能地轻量化处理。机翼后掠角可根据不同工作状态进行调节,为了出水时快速排水,机翼为中空结构^[12]。该团队在原理样机关键部件强度设计、分析、入水抨击试验等方面进行了深入研究,为后续潜空航行器发展提供了宝贵经验^[1]。

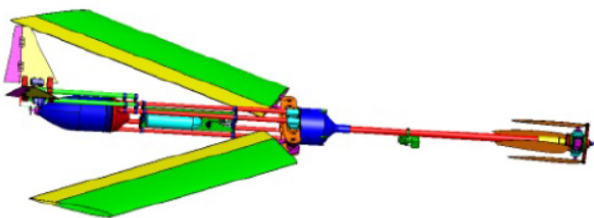


图8 仿鳶鸟潜空航行器^[11]

Fig. 8 Gannet-like underwater-aerial vehicle

2011年,南昌航空大学研制了2型潜空航行器样机。研究人员对几种气动外形进行了设计并做了相应的仿真计算,同时对关键结构件进行了设计与分析。此外,其中一型航行器采用油电混合的推进方式,但试验样机未能进行起飞试验。尽管如此,通过2型样机的研制依然积累了关于机翼变换、油电混合动力在潜空航行器上应用的重要经验^[13-14]。

2 潜空跨介质航行器的未来应用

2.1 民用方面

潜空跨介质航行器可应用于水体环境监测和灾害响应中,在海洋学、水库管理、农业等领域也有多种重要的应用。当前水质监测方法费时费力,而潜空航行器可多次出入水且具备空中、水中航行能力,比单一领域的水中、空中系统响应更快。因此,可在一个水域收集样本、记录数据或视频后出水,并由空中迅速转移到下一目标水域继续采集信息,从而可以在较短时间内将不同位置的水质信息提供给基站。这种高效率的工作模式在一些水体污染等灾害响应中尤为关键。



图9 AquaMAV用于密闭水域数据收集的设想^[4]

Fig. 9 Assumption of AquaMAV used for data collection in confined spaces

2.2 军用方面

2.2.1 情报收集

潜空跨介质无人航行器的应用对于海上情报收集、掌握战场海洋环境有着巨大的帮助^[15],这往往是取得海战主动权不可或缺的条件。常规的

水文调查手段（如水面船、浮标、潜标等）由于目标明显，往往不适合在敏感水域使用；单纯的水下无人航行器（包括水下滑翔机和自主水下机器人）尽管隐蔽性好，但由于速度慢，从安全位置进入目标海域范围航渡时间过长，不利于执行战时应急水文调查任务。潜空跨介质航行器兼具水文调查隐蔽性和跨区域航渡高速性，可很好地解决战时应急水文调查这类难题。使用时，航行器可由水面船、飞机、潜艇等平台布放，从空中快速抵达目标海域，完成入水并开始执行水中隐蔽水文调查任务。同样，该类航行器也可以作为水中隐蔽的值守平台，对目标海域执行长期定点监测任务，当附近有水面目标接近时可随时出水完成空中监视、情报收集等任务^[16]。

2.2.2 集群作战

随着技术的进步，潜空跨介质无人航行器可向低成本、集群作战方向发展。例如：1）可由水面舰船等同时布放数十架潜空航行器，而后经水下航渡到达预定目的地并在水下潜伏。在目标舰艇到达潜伏区域后，潜空航行器编队可按批次袭扰目标舰艇。第1批次吸引目标舰艇防空火力，后续批次对舰艇重要目标实施攻击。2）以蜂群战术同时攻击目标舰艇，目标舰艇难以同时应对大量的近距离袭扰，从而可以瘫痪其雷达、通信设备等关键设备设施，大幅度降低主力作战部队对目标舰艇的攻击难度。

2.2.3 通信中继

潜空跨介质无人航行器还可以作为岸上基地、水面舰艇与水下潜艇部队的通信中继。潜艇出航后与外界通信难度大，且容易暴露，而潜空跨介质航行器可作为潜艇与外界沟通的“信使”，对潜空航行器通信系统进行必要的加密，并加装自毁装置等保险措施，在航行器由水下接近己方潜艇时建立通信，远离潜艇后出水并回传信息。这样可以大幅度降低潜艇远航时的通信难度，同样也能降低在紧急时刻潜艇与外界建立通信的暴露几率。此外，还可将多架潜空航行器分别布置在不同海区待命，在指定时间或接到命令时出水并达到一定飞行高度，在较大范围内架起“鹊桥”

式通信网络，从而完成特殊情况下的海上远距离通信。

3 潜空跨介质航行器的技术难点

潜空跨介质航行器同时具备了飞行器和水下航行器的特征，而这两者在设计理念上有许多矛盾之处，进而产生了一些难点问题。

3.1 航行器重量控制问题

由于水下深度每增加10 m，航行器就要多承受约1个大气压的压力，因此水下航行器为了承受水压，各类设备都要做一定的处理。最常见的形式是为电子设备、电池等设计1个耐压舱，这显然要增加航行器的重量。水下航行器对重量要求没有像飞行器那样严苛，但多数水下航行器为了在水下有更好的航行性能，要求机体受到的浮力近似等于重力。除了设计时考虑机体排水体积和质量的关系外，往往还要在航行器上增加配重和浮力材料以满足重力、浮力以及重心位置等静稳性要求，这些对于飞行器来说显然是增加了不必要的重量。另外，潜空跨介质航行器由水下至空中这一过程要消耗巨大的能量，如果没有外界能量输入，达到多次出入水的要求就要靠航行器自身携带更多的燃料、电池或者采用喷射出水机构，这些都会导致航行器重量增加。将上述讨论的水下航行器设计成会飞的跨介质航行器，显然难以满足飞行器轻质化的要求。将一个较重的物体带到天上往往需要较大的机翼或强大的推进器。一些轻小的航模机翼往往使用轻木制作，考虑到跨介质航行器需要在水中航行，因此木质材料一般不考虑。机翼需要尽可能轻又能够在出水阶段快速排水，因此可以考虑使用碳纤维等材料制作一个中空的机翼。

3.2 航行器出水问题

出水是潜空跨介质航行器一个关键技术难题。航行器由水下过渡到空中这一过程消耗巨大的能量，出水过程中水面风浪对航行器的影响，以及出水后作为飞行器的姿态调整等都是亟待解决的问题^[17]。当前各研究机构对航行器出水过程有不同的方案，因此要考虑的问题也不尽相同。

例如伦敦帝国理工大学的 AquaMAV 通过飞行器向后喷水的方式出水, 进而能够节约出水过程的能量消耗, 但这种方式机构较为复杂, 每次出水前都要想办法向容器中充入适量的水; 而北卡罗来纳大学和特利丹 (Teledyne) 公司设计的跨介质飞行器则是简单的通过螺旋桨提供拉力使飞行器脱离水面, 该方式则需要更多地考虑推进器推力, 以及出水前后飞行器姿态的调整等问题。

3.3 飞行器入水抨击问题

入水抨击同样是潜空飞行器设计过程中需要关注的重点。类似于水上飞机的水面降落方式对结构强度要求略低, 但其滑行距离远, 整个入水过程耗时长, 不适合一些对入水位置要求较精确、快速反应的任务。另一种入水方式是参照鸟类入水捕食的动作, 机身有较大俯角, 首部最先入水, 此方式对机身结构强度要求很高, 但整个过程耗时很短, 并更容易达到特定入水范围的要求。一些机构对鳀鸟等由空中入水捕食的鸟类进行了仿生研究, 并设计了仿生样机进行试验。为了减小入水抨击带来的机身结构损害, 飞行器应拥有尽可能高的强度, 但这往往与轻量化设计产生矛盾。此外, 入水时应尽可能地降低速度, 减小机身投影面积。

3.4 能量来源

能量来源也是关键问题之一。长航程飞行器多使用内燃机等依赖空气的推进器, 而水下环境不能提供空气, 若使用内燃机则要求飞行器自带氧化剂, 目前来看难度较大。因此, 推进器一般考虑电动, 能源一般考虑使用电池。为满足多次出水或长航程的要求, 除了减阻外还需要增加能源携带量, 而常用的二次锂电池能量密度十分有限, 使用常规锂电池就必须要在设计时考虑到巨大的重量对飞行器带来的影响。一些新型电池的研发可能对潜空跨介质飞行器的研发产生较大帮助, 通过应用能量密度较高的电池可大幅度降低飞行器的重量, 例如小型化的氢氧燃料电池、海水溶解氧半燃料电池, 特殊情况下为了提高航程还可使用如锂氟化碳等一次性电池。

3.5 推进器设计

潜空无人飞行器推进器设计也决定了飞行器的性能。由于水和空气物理性质差别较大, 水下推进器和空中推进器一般各司其职, 难以相互取代, 如果潜空跨介质飞行器同时配备 2 类推进器, 无论是水下或者空中航行都会有 1 个不工作的推进器, 这显得很经济。因此设计一种既能在空气又能在水中运行的推进器也是研究者考虑的问题。北卡罗来纳大学和特利丹公司 (Teledyne) 所设计的飞行器使用同一个推进器完成水下和空中推进, 然而其实质仍属于空中推进器, 只是在水下工作时大幅度地限制了功率, 可以认为是牺牲了水下航行性能所作的妥协。

轻小型飞行器一般选择电机作为推进器动力源。电机有轻小、调速简单、不依赖空气、不产生废气等一系列优点。在飞行器大功率、长续航的需求下, 使用内燃机等热动力源往往比电机更加经济有效, 电机要使用电池作为电源, 而大功率、大容量电池往往伴随着更大的重量问题, 即这种情况下电池的质量比能量要更低, 整个系统负载加大, 效果不佳。潜空无人飞行器热动力研究一直在进行, 热动力使得高速、大航程航行更加容易。然而, 热动力推进依赖燃料和氧化剂, 且往往有废气、废水产生, 这就大幅度增加了其在水下应用的难度, 目前尚未了解到有成熟产品应用于潜空无人飞行器。

4 结束语

综上所述, 潜空跨介质飞行器有着相当广阔的应用前景和发展潜力, 目前已有较多的研究机构在从事相关研究。但从现有的资料来看, 当前较多的研究是在理论层面, 一些研究机构制作了原理样机, 仅少数能完成水下航行、出水、空中航行、入水这一循环, 仍没有飞行器能够搭载载荷完成实际任务。潜空跨介质飞行器研究过程中要解决的难点有很多, 但随着越来越多的新思路、新方法产生, 难题也将迎刃而解, 潜空飞行器的实际应用只是时间的问题。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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): 1-10.
- [3] GAO A, TECHET A H. Design considerations for a robotic flying fish[C]// Oceans. US: IEEE, 2011.
- [4] SIDDALL R, KOVAC M. Launching the AquaMAV : bioinspired design for aerial-aquatic robotic platforms[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2014, 9 (3): 1-15.
- [5] SIDDALL R, KOVAC M. Fast aquatic escape with a jet thruster[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22 (1): 217-226.
- [6] SIDDALL R, ORTEGA A, Kovac M. Wind and water tunnel testing of a morphing aquatic micro air vehicle[J]. Interface Focus, 2017, 7(1): 20160085.
- [7] ZUFFEREY R, ANCEL A O, FARINHA A, et al. Consecutive aquatic jump-gliding with water-reactive fuel[J]. Science Robotics, 2019, 4 (34): eaax7330.
- [8] WEISLER W, STEWART W, Anderson M B, et al. Testing and characterization of a fixed wing cross-domain unmanned vehicle operating in aerial and underwater environments[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018, 43 (4): 969-982.
- [9] WILLIAM S, WARREN W, MARC M L, et al. Design and demonstration of a seabird-inspired fixed-wing hybrid UAV-UUV system[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2018, 13 (5): 056013.
- [10] YAO G, LIANG J, WANG T, et al. Submersible unmanned flying boat: design and experiment[C]// IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics. US: IEEE, 2015.
- [11] YANG X, WANG T, LIANG J, et al. Submersible unmanned aerial vehicle concept design study[C]// 2013 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2013.
- [12] YANG X, LIANG J, WANG T, et al. Computational simulation of a submersible unmanned aerial vehicle impacting with water[C]// 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). US: IEEE, 2013.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 姜琬. 仿生系列跨介质新概念飞行器气水动布局设计[C]// 探索 创新 交流——第六届中国航空学会青年科技论坛文集: 上册. 北京: 中国航空学会, 2014.
- [16] 冯金富, 胡俊华, 齐铎. 水空跨介质航行器发展需求及其关键技术[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2019, 20 (3): 8-13.
- [17] HU J H, XU B W, FENG J F, et al. Research on water-exit and take-off process for morphing unmanned submersible aerial vehicle[J]. China Ocean Engineering, 2017, 31 (2): 202-209.

(责任编辑: 曹晓霖)