

跨介质飞行器相关技术及分析

Technology and Analysis of Trans-Media Vehicle

■ 刘阳 吴祯龙 谭慧俊 / 南京航空航天大学

随着科技的发展，单介质的航行不足以满足人们的需求，在创新性交叉领域对跨介质飞行器开展研究，引起了航空业界的广泛关注。跨介质飞行器在质量匹配、机身外形、机翼布局、结构设计，以及动力系统等方面具有显著的特殊性。

近年来，空中无人飞行器和水下无人潜行器技术得到了飞速发展，广泛应用于军用和民用领域。但单介质飞行器工作能力会受到许多条件的限制，例如，飞行器的自身工作范围、推进能源的补充等。当作业任务涉及到多种工作介质时，只有少数种类无人机能独立完成作业，往往还需要多个设备协同工作，提高了操作难度。

跨介质飞行器兼顾水下、空中运动能力，并且能够长时间交替航行，自由穿越水空界面。真正意义上的跨介质飞行器包括干飞、入水、水下潜行和出水4个基本功能，但其设计并不是简单地将空中无人飞行器以及水下无人潜行器技术进行叠加，而要考虑水空布局的融合以及水空过渡的方式，尤其在动力系统、水空界面跨越、外形布局、结构控制等方面具有较多难点。

外形与结构设计

由于水和空气密度的差异（同一条件下，水的密度为空气的800多倍，黏性为50多倍），飞行器在水中的阻力远大于在空中的阻力，其构型设计不仅需要具有良好的气动力及水动力特性，还需具备良好的出入水性能。兼顾气动和水动力性能及出入水性能的



跨介质飞行器运动过程示意图

流体动力布局方案设计是跨介质高速飞行器研制所需开展的首要工作。跨介质飞行器的外形与结构设计需要兼顾空中飞行的性能，以及水下航行的性能，综合跨介质飞行器的研究现状，基于不同机翼结构可大致分为扑翼、折叠翼以及多旋翼3类，再根据具体应用场景进行针对性的改进。

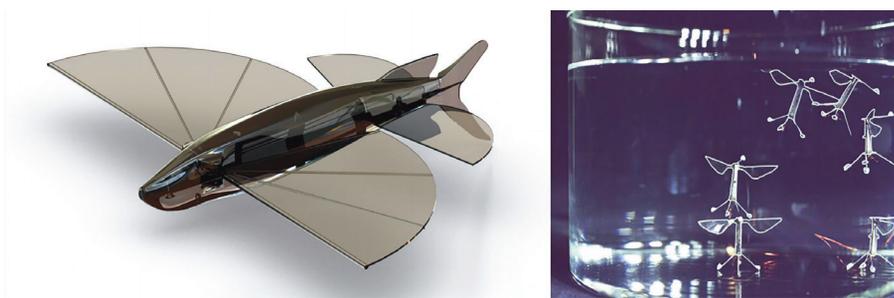
扑翼式跨介质飞行器

针对扑翼运动，英国布里斯托大学对海鸦在空中和水下的扑翼运动机理进行了深入研究，以探索未来跨介质飞行器的设计方案。利用自行设计的仿生机翼，通过试验和数值模拟，发现收缩翼展能降低近一半的形阻阻力，并且收缩扑翼驱动模式能够产生一定大小的力，足够作为驱动力。该研究证明了收缩扑翼驱动模式应用于跨介质飞行器水下推进的潜在可行性，并为扑翼式跨介质飞行器的发展

奠定了理论基础。

飞鱼也是利用扑翼驱动模式前进的生物，麻省理工学院参考飞鱼模型提出了一型水空两栖作业的仿飞鱼样机^[1]，具备水下潜行以及空中滑翔的能力。同时，通过试验测量行进过程的力，得出了水动力和外形之间的联系，并对扑翼波动控制做了深入研究。

许多昆虫同样是通过高频振动翅膀的方式进行运动，哈佛大学基于此提出了一型仿昆虫的扑翼式水空两栖跨介质无人飞行器样机，外形与尺寸均与真实昆虫大小相当。仿真和试验表明，扑翼驱动模式在水空两个介质中均能较好地进行俯仰控制并实现水空跨越。另外，研究发现对于扑翼的流体力学分析不会受到尺寸的影响，对于未来大型扑翼式跨介质飞行器的研究具有重要意义。



典型扑翼式跨介质飞行器

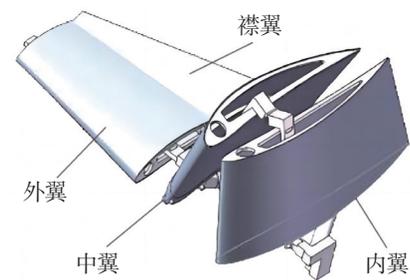
扑翼式推进已经得到了理论证明，并且相较于其他推进方式，在空气和水中还有一定优势。但对于跨介质飞行器来说，空中扑翼推进依赖于质量轻、频率高的机翼，但这类机翼及其控制系统难以在水中发挥可观的作用。同时，对于跨越水空界面这一过程，扑翼在水空两介质之间来回拍打，会导致极大的动力损失，难以实现从水中到空中的跨越。未来通过技术的发展，这些难题可能会被解决，使扑翼跨介质飞行器变得可行。

折叠式跨介质飞行器

折叠式跨介质飞行器一般是基于固定翼无人机，外形设计方面多参考仿生类研究，且变结构设计是此类跨介质飞行器设计的主要手段。鳐鱼、翠鸟在捕鱼过程中，会瞬间跨越水空界面，并在水中短暂停留。通过研究上述过程的姿态以及生理特性，可以为跨介质飞行器的设计提供新思路——变结构折叠翼。

折叠式跨介质飞行器可以沿翼展方向折叠，2016年，空军工程大学提出了一种外形可变跨介质飞行器，该飞行器两侧机翼可变形向机身收缩，空中似导弹、水下似鱼雷，为了适应水下的压力，设计为类似圆柱式回转体外形，并通过仿真验证了方案的可行性。2020年，中南大学基于翠鸟仿生研究设计了一款跨介质飞行器^[2]，该飞行器机翼分为3段，机翼折叠以及螺旋桨向后折叠使其结构强度能够承受入水冲击并减小水下航行阻力；还通过仿真研究了入水高度及入水角度的影响，同时和翠鸟性能进行对比，对飞行器的运动特性进行了详细的分析，得出了最佳的入水控制策略。

另一种折叠翼式跨介质飞行器具有变后掠翼结构。2014年，帝国理工学院提出了类似的跨介质飞行器方案，参考鳐鱼通过俯冲溅落入水，采用喷水方式实现出水，折叠机翼降低了入水冲击及水下阻力，



折叠式跨介质飞行器（翼展方向折叠）

且机身和机翼使用超疏水材料使水滴快速脱落以提高出水效率；2016年，又设计了一款可变机翼后掠角的水空两栖无人飞行器^[3-4]，机头安装了牵引螺旋桨，实现了空中飞行和水下潜行，并通过喷水的方式使飞行器迅速出水。这一设计综合了空中和水下航行的特点，强调了机翼后掠角的灵活性，使飞行器在不同模式之间的切换更为高效。

2015年，同样参考鳐鱼，北京航空航天大学设计了一款跨介质无人飞行器，通过机翼后掠变体，结合流线型的机头机身，可实现从空中垂直溅落水中。出水时，气泵向4个气球充气，增大浮力推进出水，同时调节飞行器俯仰。当飞行器前半部分跨越空水界面时，机头的空气螺旋桨工作将飞行器垂直从水下拉出水面。该飞行器的仿真以及样机验证结果为跨介质飞行器设计奠定了重要基础。

2011年，南昌航空大学设计出



折叠式跨介质飞行器（变后掠翼）

一款跨介质飞行器，通过机翼主梁的旋转控制机翼的翻转姿态实现机翼的变形，机翼的位置通过收缩绳索达到后掠以及平飞状态。水下潜航时通过机翼90°后掠减小迎水面积以减小形状阻力，并采用空心机翼减轻整机的质量。该研究验证了水下航行和水面滑行的可行性，然而未能克服出水过程的较大阻力，没有成功实现水面起飞，但也为未来类似项目提供了经验。

多旋翼式跨介质飞行器

近年来，以4旋翼为代表的多旋翼无人飞行器凭借其结构简单、理论成熟、制造成本低、控制难度小等优势迅速崛起，与此同时，对于多旋翼式跨介质飞行器的研究也逐渐开展。对于此类跨介质飞行器，不需要进行过多的复杂结构设计，只需添加防水功能，便可实现水空界面的垂直起降。但其旋翼机臂结构会极大地限制水下行进效率，导致多旋翼跨介质飞行器的速度较低，且工作半径远低于折叠式跨介质飞行器。

2015年，罗格斯大学研发了一款4旋翼的跨介质飞行器，基于飞行器的结构设计并采用共轴双桨。通过上下电机交替驱动上下螺旋桨的方式，实现飞行器平稳的介质过渡。

2018年，上海交通大学提出了一种跨介质飞行器的概念设计，并在之后完成样机验证^[9]。该模型结合4旋翼飞行器、固定翼飞机和水下滑翔机的优势，前飞阶段利用固定翼提供升力、4旋翼提供推力，介质跨越阶段由4旋翼通过垂直起降完成，水下运动阶段则采用滑翔模式。该研究内容验证了多旋翼跨介质飞行器的可行性并提供了新思路。

介质过渡方式

根据已有的跨介质飞行器相关研究，出水和入水过程非常关键。不同的介质过渡方式对于飞行器的控制方式、推进技术乃至外形设计都有不同的要求。根据始末介质的不同，可分为从空中进入水中 and 从水中进入空中两种。

从空中进入水中

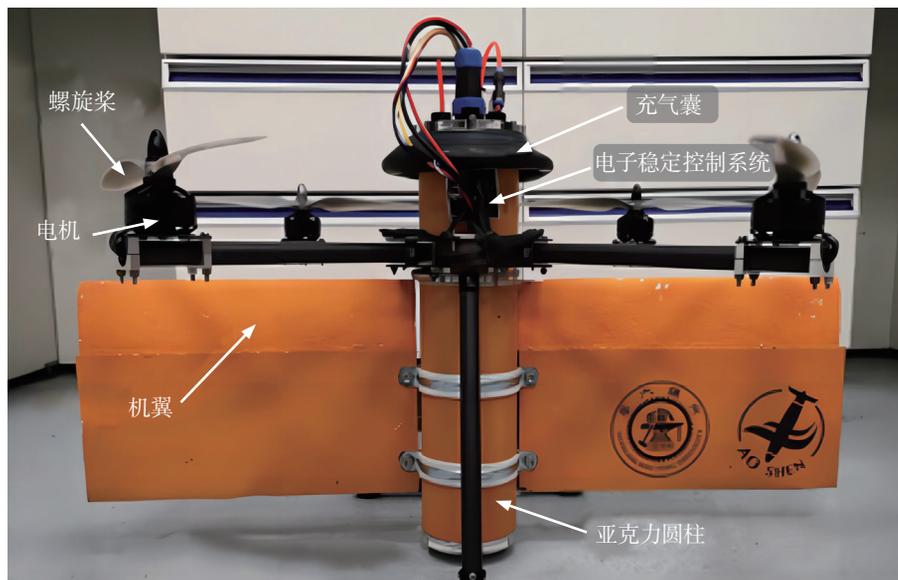
从低密度空气中进入高密度水介质的过程中会产生较大的冲击载荷和俯仰力矩，从而影响跨介质飞行器的速度以及入水姿态，甚至会造成翻转和机身结构毁坏。机身所受的冲击载荷与入水速度的平方成正比，因此可以通过降低入水速度或者减小冲击载荷影响实现入水，可参考的入水方式有两种。

一种可参考鸟类潜水捕鱼这一过程，为俯冲式入水。靠自身初始动能或者干飞时保持的速度直接落入水中，通过收缩机翼或者停止空气动力系统驱动，导致空中升力不足，进行俯冲。大多数折叠式跨介质飞行器均采用此类入水方式，因为俯冲式入水快速且高效，随之带来的便是入水时刻巨大的冲击力，所以对飞行器的结构设计要求较高。而折叠式跨介质飞行器可通过变结构设计，从而收缩机翼、改变后掠翼，达到减小迎水面积、降低入水冲击的效果。

另一种入水方式为分布式入水，首先平稳停留在水面上，然后通过进水等一系列增加质量的方式，使得飞行器密度大于水，从而实现下潜。此类入水方式带来的入水冲击相对较小，对结构要求也低，从而降低了设计难度。多旋翼跨介质飞行器和扑翼式跨介质飞行器一般采用此类方法，某些固定翼跨介质飞行器通过水面滑行穿越也采用类似的方法。但这种较为平缓的入水方式，需要耗费较多的时间，且效率低，控制也相对更加复杂。

从水中进入空中

出水时水的拖拽力及机身未脱落的水，会导致出水所需的力远大



多旋翼式跨介质飞行器

于水下潜行的力，所以出水为整个跨介质过程最大功率时刻，可参考的出水方式有两种。

一种为快速出水，即通过加速或外力，如高压气体射流、火箭助推等，提供瞬时较大的动能，将飞行器完全推出水面，空中动力系统工作，转成飞行状态。此类方式的优点是快速，缺点是完全推出水面需要消耗极大的能量，对跨介质飞行器的运动及姿态带来了较大不稳定性，外部能量的储存设备也需要额外设计。

另一种为分布式出水，通常先从水下运动到近水面位置，这一过程通过减轻质量或者自带水下动力系统实现。浮出水面后，通过空中动力系统进行姿态转换。多旋翼跨介质飞行器多数采用这种出水方式进行垂直起降。同样，这种方式出水过程较为平缓，能量损耗较小，对结构设计难度相对较低，但是耗时间较多，另外在近水面时刻，水面状态（如异物、波浪等）也会对跨介质过程产生很大影响。

供能和动力系统

动力系统和能量源对跨介质飞行器的气动、水动性能有着决定性影响，不同的供能和动力系统也影响着布局 and 结构设计。目前，多数飞行器采用燃料和电池作为能源，但考虑到跨介质无人飞行器的体积以及水下作业环境的无氧性，绝大多数还是采用电池作为能量源。通过电池和无刷电机及螺旋桨搭配，完成动力系统的设计。

根据螺旋桨的布局 and 数量可将动力系统分为三类：第一类是多模态螺旋桨，此类动力系统通过使用特殊的水空两用螺旋桨进行推进，

搭配减速器即可实现多种介质运动形态的转变，可据此设计出结构简单且轻量的样机，但对跨介质这一阶段却有诸多困难；第二类是空气螺旋桨和水下螺旋桨组合推进，也是大多数折叠式跨介质飞行器采用的动力系统，机身头部安装空气螺旋桨用于驱动飞行，尾部水下螺旋桨用于水下潜行，出水过程采用前面所提及的分布式出水，水下螺旋桨驱动使飞行器靠近水面并让机头部分浮出水面，然后空气螺旋桨开始工作，与水下螺旋桨共同发力，带动跨介质飞行器升起，实现出水，此类动力系统增加了结构的复杂性，且对于电池的容量以及驱动水空螺旋桨的电机来说也是一个挑战；最后一类是多组合螺旋桨，多旋翼式跨介质飞行器即采用此类推进系统，可实现水空单一介质的推进和跨介质过程。另外合理的控制策略也可以保证样机姿态的多样性及可控性，但会增加操作复杂度，且速度较慢并伴随噪声。

基于螺旋桨的动力系统可能会存在瞬时爆发动力不足的情况，导致跨介质过程失败，所以有研究人员搭配了相应的助推系统。通过压缩气体或者化学反应产生射流，从而增加推力达到出水效果。该动力系统能完整地进行水空航行及跨介质全过程运动，但不可避免地增加了结构复杂性和操作难度以及尺寸问题，在选取合适的动力系统时，要做好运动性能和结构尺寸的平衡。

结束语

跨介质飞行器因其广阔的应用背景和发展潜力受到了越来越多的关注。科研人员虽然针对其外形设计、过

渡方式，以及动力系统等做了大量研究，但是仅少数制作出了样机并完成干飞、入水、水下潜行、出水这一完整过程，并没有真正投入实际使用。跨介质飞行器涉及的专业和技术难点很多，布局、结构、质量以及动力性能的折中和兼容更是重大挑战。目前来看，平稳高效地跨越水空界面仍是技术重点，相信随着技术的发展，会有更多更好的新思路和新方法被提出来，越来越多的样机将被设计研究出来，实现真正的跨介质飞行。

航空动力

（刘阳，南京航空航天大学，硕士研究生，主要从事航空宇航科学与技术研究）

参考文献

- [1] GAO A, TECHET A H. Design considerations for a robotic flying fish [J]. *Oceans*, 2011.
- [2] 云忠, 温猛, 罗自荣, 等. 仿翠鸟水空跨介质飞行器设计与入水分析 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(2): 407-415.
- [3] SIDDALL R, KOVAC M. Launching the aquaMAV: bioinspired design for aerial-aquatic robotic platforms [J]. *Bioinspir Biomim*, 2014, 9(3): 031001.
- [4] 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.
- [5] LU D, XIONG C K, LYU B Z, et al. Multi-mode hybrid aerial underwater vehicle with extended endurance [J]. *2018 Oceans - Mts/Ieee Kobe Techno-Oceans (Oto)*, 2018.