

水空跨介质两栖无人飞行器关键技术研究现状及发展前景

杨 阳 周丰镭 梅许文

南昌航空大学科技学院, 江西 南昌 332020

[摘要]水空跨介质两栖无人飞行器能够融合飞行器与水面/水下飞行器双重工作能力, 能够跨越空气-水介质中间界面完成作业任务, 在海洋搜救、灾害应急、水域巡检等场景具备重要研究价值, 是海洋智能装备与无人系统领域的研究热点。文中梳理了水空两栖无人飞行器国内外研究进展, 从总体结构设计、跨介质机构与动力系统、多源环境感知技术、运动控制算法、多平台协同控制五大维度归纳现有技术方案, 剖析当前样机与理论研究中存在的续航短板、跨介质切换稳定性不足、水空异构感知融合困难、集群通信抗干扰能力弱等关键瓶颈, 对水空两栖飞行器未来发展方向做出展望, 旨在为跨介质无人装备的后续研究提供参考。

[关键词]水空两栖; 跨介质飞行器; 多传感器融合; 智能控制; 协同控制

DOI: 10.33142/sca.v9i9.20350

中图分类号: V279.2

文献标识码: A

Research Status and Development Prospects of Key Technologies for Water Air Cross Medium Amphibious Unmanned Aerial Vehicles

YANG Yang, ZHOU Fenglei, MEI Xuwen

Science and Technology College of NCHU, Nanchang, Jiangxi, 332020, China

Abstract: Water air cross medium amphibious unmanned aerial vehicles can integrate the dual working capabilities of aircraft and surface/underwater vehicles, and can complete operational tasks across the air-water interface. They have important research value in scenarios such as marine search and rescue, disaster emergency, and water area inspection, and are a research hotspot in the field of marine intelligent equipment and unmanned systems. The article summarizes the research progress of amphibious unmanned aerial vehicles (UAVs) both domestically and internationally, and summarizes existing technical solutions from five dimensions: overall structural design, cross medium mechanism and power system, multi-source environmental perception technology, motion control algorithm, and multi platform collaborative control. It analyzes the key bottlenecks in current prototype and theoretical research, such as short endurance, insufficient stability of cross medium switching, difficulty in heterogeneous perception fusion between water and air, and weak anti-interference ability of cluster communication. The article also looks forward to the future development direction of amphibious UAVs, aiming to provide reference for the subsequent research of cross medium unmanned equipment.

Keywords: water air amphibious; cross medium aircraft; multi-sensor fusion; intelligent control; coordinated control

引言

建设海洋强国是我国重要发展战略, 国家多项政策文件明确提出拓展海洋经济空间、完善海洋保障体系、加快海洋科技创新、实现海洋科技高水平自立自强的发展目标。传统单一介质装备, 例如常规多旋翼无人机仅能够在空中作业, 受电池容量限制续航时间短; 无人艇只能在水面航行, 抵达远岸、复杂滩涂、洪涝灾区等区域效率低下; 水下潜器需要母船投放, 部署流程烦琐, 难以兼顾空中快速抵近与水下探测任务, 无法满足复杂水域环境下多样化作业需求^[1]。

水空跨介质两栖无人飞行器可以在空气、水两种介质内工作, 完成空中飞行、水面滑行、水下潜航以及介质之间的出入水切换, 打破单一介质装备的场景限制。在民用领域可用于洪涝灾害救援、海上人员搜救、海岸线生态巡检等; 在科研领域服务于极地冰区勘测、近海资源调查, 同时也是跨域无人集群系统的重要节点装备^[2]。

水空两栖飞行器属于典型的多学科交叉装备, 融合机械结构设计、流体力学、电子硬件、计算机视觉、自动控制、通信工程等多门类技术。近些年国内外高校与科研院所相继开发多款水空两栖样机, 围绕结构构型、推进系统、

姿态控制、感知算法开展大量研究,但该装备依旧面临诸多技术难点:出入水瞬间流场剧烈扰动带来动力学突变、水-空环境感知特征差异巨大、续航能力不足、介质切换机构可靠性有限、水下无线通信带宽受限等问题制约装备走向工程化落地。本文基于现有文献资料,系统总结水空两栖无人飞行器研究现状,梳理关键核心技术,分析现存技术痛点,展望未来发展趋势。

1 水空两栖无人飞行器国内外研究现状

仿生多栖机器人按照工作介质可以划分为水陆空多栖、水陆、陆空、水空四大类别,水空两栖飞行器属于其中重要分支,按照总体构型可以划分为固定翼型、多旋翼型、仿生构型三类。

1.1 国内研究现状

国内众多高校和科研机构对水空跨介质飞行器开展大量样机研制与算法仿真工作。在总体设计方面,南京信息工程大学钟鹏等设计船型机身的水空两栖多旋翼无人机,空中依靠旋翼提供升力,水面航行配置水下推进器,硬件基于 ARM 内核微控制器,实现飞行与水面航行两种模式切换^[3]。河南理工大学龙振超等人基于四旋翼平台搭建水上救援两栖飞行器系统,硬件包含飞控模块、无线通信、图像识别单元,面向落水人员救援场景开展方案设计^[4]。

广东白云学院古玉婷等人通过机身拓扑优化,实现整机减重 25%;并设计浮力调节机构,改善跨介质作业能力^[5]。中国石油大学张桐溪等人面向水域救援场景,设计机翼旋转、螺旋桨伸缩变形机构实现形态快速切换,采用模糊 PID 控制器完成仿真验证,提升救援装备响应速度^[6]。

硬件控制层面,合肥工业大学文伟等人搭建水空两用无人机样机,3D 打印加工真空舱、核心舱结构件,完成飞行样机试制与试验^[7];沈阳化工大学李鑫等人设计蛋壳状减阻外壳,划分飞行模块、水下航行模块、飞控系统,基于 ARM 内核微控制器,开展飞行仿真测试^[8]。

在高级控制算法研究方面,中山大学张柏嘉等针对纵列双旋翼跨介质无人机,使用自适应超螺旋滑模算法解决出入水阶段姿态扰动问题,改善跨介质切换稳定性^[9];江苏海洋大学刘强等开展深潜型海空一体无人机研究,采用联合仿真手段验证变结构方案跨介质航行性能^[10];南京理工大学向雨竹研究异构水空无人系统协同容错控制,提出分层强化学习编队策略,划分协同交互层与执行层,引入事件触发通信机制抵御 DoS 攻击,缓解集群通信带宽压力^[11]。

样机方面,北京航空航天大学跨域机器人、南京理工

大学浮筒式水空两栖多旋翼平台均为国内代表性样机。南京理工大学样机采用 X 型四旋翼布局,机身下方配置双浮筒结构,浮筒保障水面漂浮能力,水下搭载推进单元,实物样机完成水面漂浮、起飞降落基础试验。图 1、图 2 分别为北京航空航天大学跨域机器人和南京理工大学浮筒式样机。



图 1 北京航空航天大学跨域机器人样机图



图 2 南京理工大学浮筒式水空两栖飞行器样机图

北京交通大学侯涛刚等总结飞鱼、鲹鸟等自然界水空两栖生物仿生启示,梳理机翼变形、跨介质推进前沿进展,总结仿真与物理试验两类研究手段的优缺点。复旦大学王健华等人系统总结仿生多栖机器人形态设计理论,从结构仿生、功能仿生、行为仿生、耦合仿生角度归纳多栖机器人设计思路,为水空两栖装备仿生设计提供理论参考^[12]。

1.2 国外研究现状

国外研究机构较早开展跨介质飞行器探索,早期研究集中于固定翼潜空飞行器^[13]。部分固定翼样机采用折叠机翼结构,空中展开机翼飞行,入水后机翼折叠减小水下航行阻力;但固定翼跨介质装备起降条件苛刻,低速状态稳定性差,小型化难度高。

多旋翼方案凭借结构简单、垂直起降优势逐步成为小

型水空两栖平台主流方案。国外研究重点聚焦浮力调节机构、防水密封、出入水冲击抑制^[14]。部分样机采用可压缩浮力舱,通过气体充放实现浮力变化完成上浮下潜;但浮力调节机构响应速度慢,难以应对快速介质切换。仿生构型模仿鳗鱼、飞鱼身体外形,优化入水冲击,但仿生样机载荷能力弱,工程化实现难度较高。

受限于文献公开程度,国外研究多以概念设计与水池试验为主,样机大多停留在实验室原型阶段,普遍存在载荷小、续航短、水下深度有限的问题,多以原理验证为主,成熟工程化产品较少。

1.3 当前研究总体存在的共性问题

综合国内外文献,现有水空两栖航行器仍存在若干共性短板:

(1) 介质切换动力学复杂: 出入水瞬间流场突变,冲击扰动大,模型耦合非线性强,控制算法难以兼顾空中、水面、水下多种工况。

(2) 感知体系割裂: 空中依赖视觉、激光雷达,水下激光衰减严重,需要声呐,两套传感体系数据特性不一致,多源融合难度大。

(3) 机构可靠性不足: 变形机构、浮力调节机构等在反复出入水环境下容易发生故障。

(4) 集群协同难题: 水下无线通信速率低、延迟高,空气-水下异构集群通信协议不完善,多平台任务分配、编队控制算法成熟度不足。

2 水空两栖航行器总体结构与动力系统关键技术

水空两栖航行器总体设计需要同时兼顾空气动力学性能与水动力学性能,二者设计目标存在天然矛盾: 飞行器追求轻量化、低空气阻力,水下航行器需要耐压密封、浮力匹配,会带来整机重量上升。总体构型主要分为多旋翼构型、固定翼构型、仿生构型三类,其中小型平台以多旋翼构型应用最广。

2.1 主流构型方案

2.1.1 多旋翼构型

多旋翼水空两栖航行器支持垂直起降,机动能力强,分为浮筒式与全潜式。浮筒式依靠浮筒提供浮力实现水面漂浮,旋翼负责飞行,额外水下推进器完成水面机动,不具备下潜能力;该方案密封简单成本低,但作业场景受限。代表如南京理工大学双浮筒样机、钟鹏提出船型机身两栖无人机。该方案结构简单,密封压力要求低,成本可控。全潜式样机可完全潜入水下,依靠吸水排水或者气囊充放气调节浮力,电机需要动密封处理;缺点是整机重量大,空中续航衰减明显。

2.1.2 固定翼构型

固定翼潜空航行器依靠机翼升力实现长距离飞行,空中续航优于多旋翼。入水时机翼需要折叠收纳,降低水下航行阻力。缺点是无法垂直起降,需要滑跑或者抛射起飞,对作业场地要求高;出入水冲击载荷大,机构复杂,更适合大中型平台,小型装备较少采用该方案。

2.1.3 仿生构型

仿生方案参考飞鱼、鳗鱼、飞鸟等生物身体结构与运动模式,优化外形降低入水冲击。仿生样机外形流线型优秀,但机械结构复杂,有效载荷小,大多用于原理验证,距离实际工程应用还有较大距离。

2.2 机身与跨介质切换机构设计

机身设计需要结合流体仿真、有限元分析,平衡减重、结构强度、水阻、气密防水需求,常见机身形式包括船形壳体、蛋壳外壳、中空椭圆壳体,上述壳体形式均需在减重与耐压之间进行权衡。

跨介质切换机构分为变形机构和浮力调节机构。变形机构包含机翼折叠、螺旋桨伸缩,通过形态变化适配不同介质流体环境;浮力调节分为充排气式与水舱吸水排水式,充排气响应慢,水舱式响应更快,但会增加整机重量功耗。反复出入水环境造成的密封磨损是机构失效的重要诱因。

2.3 动力系统

动力系统分为复用式推进与分离式推进两类。复用式推进采用同一套旋翼完成空中飞行与水下推进,结构简洁,但空气与水介质密度差异巨大,执行器难以同时匹配两种介质最优工作点,水下功耗显著升高^[15]。分离式推进将空中旋翼与水下推进电机相互独立,两套机构分别优化,控制逻辑简单,但零部件增多,整机重量上升,降低飞行续航。

2.4 主控硬件系统

主流控制芯片多采用 ARM 系列微控制器,如 STM32F407、STM32F103 等,负责传感器数据读取、姿态解算、控制运算、通信交互。集成 IMU 惯性测量单元、GPS 模块、气压计等复杂样机搭载机载计算机,运行视觉感知、深度学习推理任务,完成目标检测识别。水下工况下更是以深度计替代 GPS,并同时解决电路板与接插件的防水密封问题。

3 水空两栖航行器智能环境感知技术

感知系统是水空两栖航行器智能化基础,完成本体状态感知与外部环境感知,为导航、避障、路径规划、决策控制提供输入数据。水空两种介质物理特性差异巨大: 可见光、激光在水中快速衰减;声波在水下传播良好但传播速度慢,时间延迟大,不存在一套传感器可以同时适配空

中和水下场景，因此需要采用多传感器融合方案，构建水空异构感知体系。

3.1 常用传感器特性

表 1 为水空两栖航行器常用传感器的特点对照。

表 1 航行器中常用传感器对照表

传感器	空中工作性能	水下工作性能	作用
可见光摄像头	效果好	水质浑浊时衰减严重	目标识别、障碍物图像采集
激光雷达	精度高，测距稳定	衰减快，浑浊水体几乎失效	空中避障、三维建图
IMU 惯性单元	可用	可用	获取角速度、加速度，解算姿态
GPS	定位可靠	水下完全失效	空中定位
声呐	不适用	良好	水下测距、障碍物探测、水下地形感知
深度计	无效	可用	获取水下深度信息

空中环境可以依靠激光雷达、摄像头、GPS、IMU 组合；进入水下之后 GPS 丢失，激光雷达失效，感知主要依靠声呐、IMU、深度计。两套传感器输出维度、噪声特性、采样频率不一致，直接拼接数据会造成感知失真，必须开展多源异构传感器融合处理。单一传感器方案可靠性差，当传感器受环境干扰出现数据丢失、异常时，系统很容易失效，因此必须研究传感器异常条件下的数据补偿算法。

3.2 多传感器数据融合方法

多传感器融合分为原始数据层融合、特征层融合、决策层融合。针对水空两栖场景：空中将摄像头图像信息与 IMU 姿态数据融合，解算障碍物空间位置；激光雷达和视觉融合实现环境网格化建图；水下将声呐回波数据、IMU、深度计数据融合获取水下环境信息。当航行器跨越介质界面，传感器工作集合发生切换，融合算法需要具备动态适配能力。图 3 为航行器多传感器融合算法结构图。

上述深度学习感知方法可与多传感器融合框架结合，为跨介质导航提供语义信息。引入深度卷积神经网络 DCNN，搭配混合注意力机制完成水面目标检测、语义分割，识别水面船只、漂浮障碍物，输出目标位置掩码，为避障提供依据。算法输入机载摄像头图像，主干网络提取特征，分为语义分割分支与目标检测分支，实现障碍物检测与水域分割。

3.3 虚拟数字仿真环境构建

水空两栖样机实物试验成本高，存在样机损毁风险，虚拟仿真平台可以有效降低开发成本。通过搭建传感器、海洋扰动、航行器动力学数据库，模拟风浪流、传感器丢包等复杂工况，完成感知与控制算法迭代测试；实现岸基仿真平台与机载控制系统交互，完成不同控制方案对比验证。图 4 为虚拟数字仿真环境建模图。

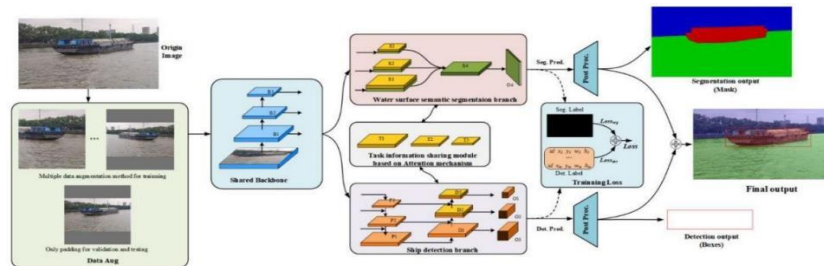


图 3 为航行器多传感器融合算法结构图

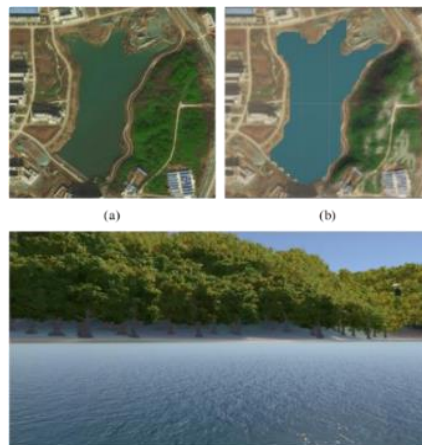


图 4 虚拟仿真环境建模图

4 水空两栖飞行器运动控制技术

水空两栖飞行器动力学具备强非线性与时变特性。出入水瞬间介质密度急剧变化,流场冲击强烈,动力学参数发生跳变;空中属于欠驱动系统,水下动力学模型完全不同,固定参数控制器难以覆盖全部工况,这是跨介质控制的核心难点。主流控制算法分为 PID 及相应改进算法和智能学习控制两类。

4.1 PID 及其改进算法

PID 是无人系统中最基础的控制算法,原始 PID 面对水空跨介质强扰动效果有限,因此学界发展串级 PID、模糊自适应 PID、模糊 PID。钟鹏、文伟等采用内环姿态、外环位置的串级 PID,引入模糊自适应逻辑动态修正控制参数,构成双闭环串级模糊自适应 PID。张桐溪针对救援无人机设计模糊 PID 控制器,借助 Simulink 完成仿真验证。PID 类算法实现简单,但面对出入水强冲击扰动,控制鲁棒性有限。张柏嘉将自适应超螺旋滑模控制应用于纵列双旋翼跨介质无人机,解决出入水动力学跳变带来的姿态-高度控制难题,同时开展稳定性分析;该算法存在抖动问题,需要依靠自适应参数进行抑制。

4.2 智能学习控制算法

强化学习、深度学习为代表智能算法逐步应用于跨介质飞行器。强化学习不需要精确完整动力学模型,通过与环境交互试错优化控制策略,适合模型高度不确定的水空跨介质场景。但是强化学习训练需要大量样本,实物训练成本高,大多依托虚拟仿真环境训练,之后迁移到真实样机;仿真-现实迁移误差是该方法需要解决的问题。

5 多水空两栖飞行器集群协同控制技术

单台水空两栖飞行器载荷有限,作业覆盖范围有限,执行搜救、大范围巡检任务效率较低。由多台水空两栖飞行器组成异构集群,开展协同感知、任务分配、编队协同作业,可以大幅度提升任务能力,是该领域重要发展方向。

5.1 集群协同面临的核心困难

(1) 通信异构问题:空气环境无线电通信速率高;水下无线电衰减极快,主要依靠水声通信,水声通信带宽低、时延大,空气-水下混合集群通信条件差异巨大;还会面临通信干扰、DoS 攻击、数据包丢失、通信拓扑动态变化;(2) 任务多目标优化:集群任务往往是多目标,兼顾任务完成度、能耗、航行安全避碰,传统单目标任务分配算法无法适配;(3) 编队扰动:水域风浪流扰动,介质切换带来个体运动扰动,容易引发集群内部碰撞风险;(4) 异构平台差异:集群内部不同飞行器性能参数不一致,进一步加大协同调度难度。

5.2 协同控制算法研究进展

目前水空两栖集群协同控制研究尚处于起步阶段,南京理工大学向雨竹等提出分层强化学习容错协同框架,划分协同指令交互层与自主控制执行层,协同层采用事件触发通信机制降低通信开销、抵御拒绝服务攻击,底层完成单机运动控制,为水空异构集群提供可行方案。集群控制分为集中式与分布式:集中式逻辑简单,但中心节点故障会造成整体瘫痪;分布式依靠局部通信完成编队与任务重分配,鲁棒性更强,更加适配水空两栖集群场景。

6 当前关键技术瓶颈总结及发展展望

综合现有文献与样机研究成果,水空两栖无人飞行器主要瓶颈如下:(1) 能源续航瓶颈:多类型功耗叠加,结构增重加剧能耗,现有电池技术下作业半径受限,是装备实用化最大阻碍。(2) 跨介质动力学与控制难题:出入水冲击引发动力学跳变,仿真环境控制效果较好,真实水域强扰动下鲁棒性有待验证。(3) 异构多源感知融合难题:水空传感器体系差异大,水下定位漂移,水体浑浊造成视觉失效,传感器故障容错感知技术尚不完善。(4) 机构可靠性问题:浮力调节、变形、密封部件反复承受水-空气交替工况,样机多为实验室原型,缺乏长期可靠性验证。

(5) 集群协同工程化不足:水声通信存在固有短板,协同算法大多停留在仿真阶段,实物集群试验案例稀缺。

结合关键技术瓶颈,未来的发展方向有:结构-仿生一体化设计:借鉴飞鱼、鳐鸟等生物运动机理开展耦合仿生设计,优化外形降低出入水冲击;研发轻量化耐压密封复合材料,缓解续航-结构强度矛盾。跨介质自适应智能控制:发展滑模、自适应、强化学习相结合的混合控制方案;建立出入水瞬态流场耦合动力学模型,研究介质扰动自适应参数切换机制,推进仿真-实物迁移算法。水空异构感知融合技术:研究介质切换下传感器动态融合策略;开发水 GPS 缺失条件下视觉-声呐-惯性紧耦合定位方案,完善传感器失效时容错感知算法。

7 结语

水空跨介质两栖无人飞行器作为一类新型跨域智能装备,突破传统无人平台的介质边界,在海洋强国建设、灾害应急救援、水域环境监测等领域具备巨大潜力。经过多年发展,国内在样机结构设计、硬件控制系统、仿真平台等方面积累了大量成果,但装备仍然面临跨介质扰动控制困难、异构感知融合、机构可靠性、集群协同等诸多技术挑战。随着仿生技术、人工智能、材料能源技术持续进步,水空两栖无人飞行器性能将持续提升,未来在民用应急、海洋科研领域会拥有更加广阔的发展空间。

[参考文献]

- [1]穆子豪,陈玲,韦浩,等.跨介质水空两栖航行器的设计研究[J].今日制造与升级,2022(2):38-40.
- [2]张向锋,郭子奥,李雨桐,等.一种水空两栖探测航行器的教学实验设计[J].实验室科学,2024,27(5):18-22.
- [3]钟鹏,张彪,陈冲.水空两栖多旋翼无人机研究和设计[J].现代电子技术,2021,44(20):127-132.
- [4]龙振超,孟子涵,张宏伟.基于四旋翼无人机的水空两栖新型飞行器系统的设计[J].科技创新与应用,2019(23):54-56.
- [5]古玉婷,钟小华,李应果,等.基于介质自适应调节的水空两栖四旋翼无人机系统[J].南方农机,2025,56(23):132-135.
- [6]张桐溪,束奇.一种新型水空两栖救援无人机的设计及仿真分析[J].制造业自动化,2025,47(8):178-188.
- [7]文伟,邓昌胜,樊志伟.水空两用无人机的设计与控制系统研究[J].新型工业化,2021,11(7):36-39.
- [8]李鑫,郭树国,李猛.基于 STM32 单片机的可潜水式水空两用无人机设计[J].机电工程技术,2023,52(4):146-149.
- [9]张柏嘉,王继河,孙慧杰.一种纵列双旋翼跨介质无人机出入水切换控制[J].控制与决策,2026,41(6):1563-1576.
- [10]刘强,张羽,周涛,等.深潜型海空一体无人机控制策略仿真[J].飞行力学,2023,41(4):29-34.
- [11]向雨竹,陈晨,郭健,等.水空跨域无人系统协同优化容错控制:一种分层强化学习策略[J].控制理论与应用,2026(8):1-9.
- [12]王健华,梅傲然,牟尧佳,等.仿生多栖机器人研究现状与未来展望[J].机器人,2025,47(2):283-304.
- [13]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(2):1-14.
- [14]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.
- [15]高良,高靖松,许威,等.两栖类仿生机器人研究现状及发展前景[J].机器人产业,2023(4):51-59.

作者简介:杨阳(1987—),男,汉族,湖北黄冈人,硕士、高级工程师,南昌航空大学科技学院,研究方向为运动控制、飞行控制。