

潜水飞机及其结构降载技术研究进展



李勐,陈星伊,王向盈,孙启星,周进,王文娟

中国航空研究院,北京 100012

摘要:近年来,潜水飞机凭借其卓越的水空作业能力,在军民两用领域展现出广阔的应用前景,尤其适用于隐身突防、情报侦察、水下救援等多域复杂任务场景,其研制需求日益增长。本文系统地梳理了近十年潜水飞机的典型研制案例,基于出入水动力学特征,将其划分为缓速式、冲击式和滑行式三类机型。研究表明,冲击式水空跨越方法耗能最少,对环境要求最低,应用最为广泛。不同机翼构型下,变后掠翼能够有效减少冲击载荷和水动阻力,多用于冲击式潜水飞机。针对强冲击载荷这一关键技术挑战,本文从仿生降载、变体结构和缓冲结构三个维度进行了深入分析,提出仿生缓冲结构、变展向与变后掠机翼结构、缓冲变密度材料是未来潜水飞机结构降载研究的重点方向。

关键词:跨介质飞行器;潜水飞机;结构降载;变体结构;缓冲结构

中图分类号:V271.9

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.04.001

潜水飞机作为一种新型跨介质飞行器,集成了常规飞机的巡航速度与水下航行器的潜航能力^[1],在军民两用领域展现出独特的应用价值。在军事应用方面,潜水飞机凭借其水空巡航与自由跨越的特性,能够有效规避空中与沿海雷达的侦测与防御,具有显著的隐身效果,在隐身突防、情报侦察和中继通信等任务中具有重要战略意义。美国国防预先研究计划局(DARPA)提出的潜水飞机作战构想具体描述了其作战流程^[2]:飞机从陆地跑道起飞,爬升至1850m高度后实施水面巡航,择机完成水空跨越并下潜至22m深度,隐蔽接近目标区域待命执行侦察或攻击任务。美国海军研究实验室(NRL)进一步提出了利用潜水飞机进行沿海基地侦察的作战方案^[3]:由舰载机携带跨介质飞行器至预定区域投放,飞行器沿水面巡航接近目标,充分发挥其机动性与跨介质特性执行侦察任务。在民用领域,潜水飞机同样展现出显著的应用优势。Stewart等^[4]通过观察海鸭觅食行为,创新性地提出了基于潜水飞机的水下搜救方案,并制定了相应的实施策略。Bershadsky等^[5]针对传统水样采集器水下移动效率低、能耗高的问题,提出了一种基于潜水飞机的新型水纹采样方案,该方案通过将水平移动阶段转移至空中进行,显著降低了能耗,提升了移动速度与采

样效率。

相比于传统飞机,潜水飞机在入水过程瞬间受到强冲击载荷,结构响应呈现出明显的非线性,因此,结构降载技术的突破是研制关键。本文重点梳理了近十年国内外潜水飞机的研制案例,分析了结构降载技术,为潜水飞机的研制提供技术参考与实践指导。

1 跨水空方式

2008年,DARPA制定了潜水飞机的性能指标:高空巡航里程应不少于1852km,水上滑行里程不少于185.2km,水下航行里程不少于22.22km;机组人员及乘客不少于8名,有效载荷不低于907kg。这一标准的提出推动了潜水飞机研制热潮,各类创新设计方案相继涌现。根据机翼构型特点,可分为固定翼、变后掠翼、多轴旋翼、复合翼及扑翼潜水无人机。

潜水飞机的运动状态分为空中飞行、水空跨越和水下潜行。如图1所示,根据不同的出入水方式,水空跨越主要有缓速式、冲击式、滑行式三种。冲击式的灵感源于自然界:海鸥通过收起翅膀,调整着水角度的方式俯冲入水,以

收稿日期:2024-09-26; 退修日期:2024-12-22; 录用日期:2025-02-25

引用格式: Li Meng, Chen Xingyi, Wang Xiangying, et al. Research progress of submersible aircraft and structural load reduction technology [J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(4): 1-8. 李勐, 陈星伊, 王向盈, 等. 潜水飞机及其结构降载技术研究进展[J]. 航空科学技术, 2025, 36(4): 1-8.

减少冲击载荷。仿生降载及变体结构设计多应用于冲击式潜水飞机。滑行式不仅可以减少入水时的冲击载荷,还能有效地减少浸润面积,降低水动阻力,适合大型有人或无人固定翼潜水飞机。相比之下,缓速式的着水速度较低,着水时冲击载荷较为缓和,目前仅适用于多轴旋翼及复合翼无人机。

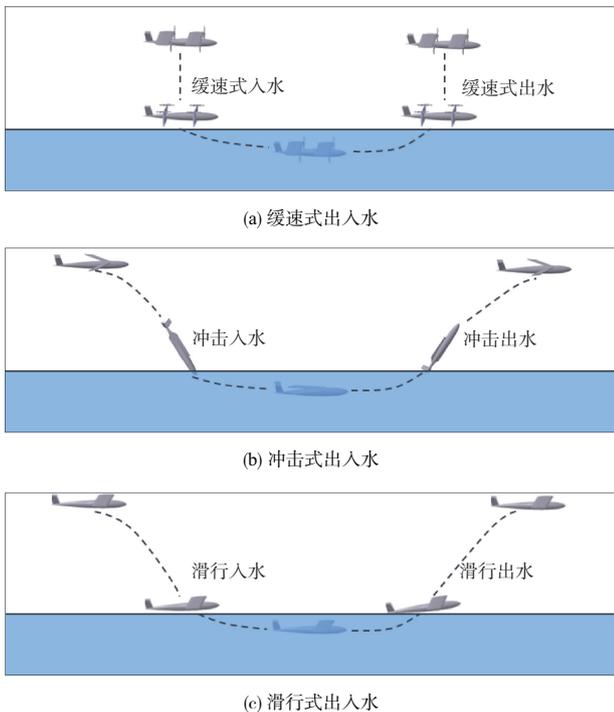


图1 潜水无人机出水、入水方式示意图

Fig.1 Illustration of how the Submersible UAV exits and enters the water

2 国内外研究现状

2.1 缓速式潜水飞机

缓速式潜水飞机设计初期,多旋翼构型应用广泛。Paulo Drews等^[6]于2014年设计了一款八旋翼无人机,首次以缓速式出入水方式实现跨水空运动。Alzu'bi等^[7]设计了一款名为“Loon Copter”的多旋翼潜水无人机,配备4个旋翼动力装置,即可完成水空运动。Vyas等^[8]设计了一款变构型多旋翼潜水无人机,4根旋翼支臂可收起,有效减少了水下潜航的水动阻力。李磊等^[9]设计了一款自适应旋翼潜水无人机,旋翼可根据转速及所受阻力自主收放。

多旋翼构型多适用于低空低速任务场景^[10]。为了提升巡航速度,2018年,Stewart等首次将复合翼构型应用于潜水飞机,采用尾坐式垂向缓速出入水方式。Weisler等^[11]设

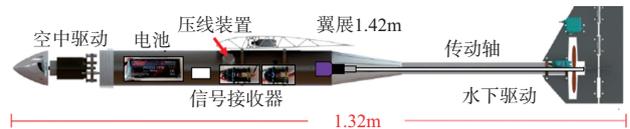


图2 “EagleRay”潜水无人机结构剖面图

Fig.2 Structural cross-section of EagleRay submersible UAV

计了一架固定翼潜水无人机,命名为“EagleRay”,并进行了飞行验证,该无人机可以执行水面起飞、空中巡航、水面着陆与滑行和水下航行等任务。图2展示了该无人机的结构剖面。机翼翼尖为开放式,空气和水可自由涌入,入水过程主要靠机翼产生的重力来克服浮力。空中采用电机搭配螺旋桨的动力方案,静态推力试验中,推力达109N。水下采用水动驱动方案,配备一套水动驱动器(由水泵、喷嘴和储罐组成)^[12]。

2019年,上海交通大学曾铮团队设计了一架组合翼潜水无人机,名为“哪吒”,如图3所示,可实现长航时空巡航、缓落式水空跨越及水下潜航。其翼展690mm,总重4kg,机头配有气囊装置,通过改变充气量来控制水下垂向运动。该团队以设计工况中水下航行轨迹为基准,提出必要运动及几何参数,基于牛顿-欧拉法建立动力学模型,采用两组独立比例-积分-微分(PID)控制方法,实现了多域及跨水空介质控制。最终,通过飞行、跨水空、潜航试验,验证了整体方案的可行性^[13]。

2020年,该团队研制出“哪吒III”,提出了一种针对浮力-俯仰耦合问题的水平运动控制方法,明显节省了能耗。与初代机型相比,轻型浮力控制系统代替了线性致动式气囊装置;为了减少阻力,旋翼支臂变为折叠式。试验证明,“哪吒III”已经具备下潜50m的能力^[14]。如图4所示。

2022年,该团队设计了一套轻量化活塞式浮力控制系统,并发布了“哪吒III”(VTOL版)潜水无人机,通过试验证明了潜水深度可达35.5m,并且能够实现24h水下航行^[15]。

2.2 冲击式潜水飞机

2012年,麻省理工学院林肯实验室^[16]首次设计出冲击式变体潜水无人机,名为“GANNET”,并进行了跨水空试验:飞机在0.25s内完成机翼后掠收起,并以7m/s着水速度安全进入水域。Siddall等^[17]设计了一款名为“AquaMAV”的冲击式变体潜水无人机,与“GANNET”潜水无人机不同,该无人机的变体运动机构经过优化设计后确保机翼后掠角可达90°。Friedrich等^[18]参考“GANNET”设计了一款名为“Dipper”的冲击式变后掠潜水无人机,通过切换电机转动方向,实现水空驱动转换,有效控制了动力系统重量。

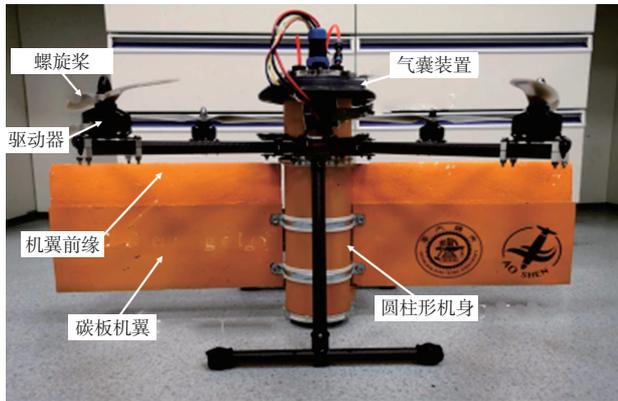


图3 “哪吒”组合翼潜水无人机

Fig.3 Combined-wing submersible UAV named “Nezha”

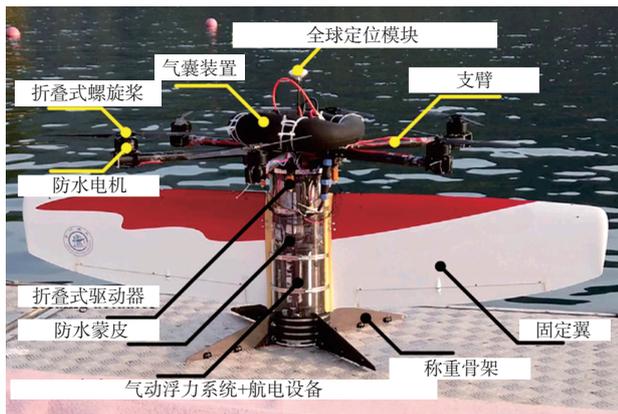
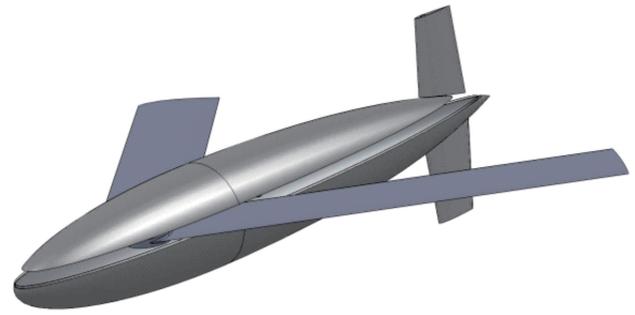


图4 “哪吒III”组合翼潜水无人机

Fig.4 Combined-wing submersible UAV named “Nezha III”

NRL^[19]公布了两种小型潜水无人机概念模型,如图5所示,并以固定翼潜水无人机为研究对象,开展了空中飞行(巡航速度为30m/s)、水下航行及着水试验。两种方案的机翼构型均可变,旨在减少水动阻力并提升水下机动性。经过飞行试验,发现变后掠翼概念机的低速性能较弱,且后掠角需达到45°时,气动中心才能到达设计位置。鸭式布局的折叠翼概念机展现出更好的机动性及操稳性,前鸭翼可以起到水下控制的作用,但是压心过于靠后,导致恢复力矩不足。

北京航空航天大学(北航)梁建宏团队^[20]针对仿生变后掠翼潜水无人机进行了俯冲入水试验,研究了不同入水高度、角度及机翼后掠角对垂向过载及翼根载荷的影响,为该团队后续研究奠定了基础。同年,该团队公布了一种仿生变后掠翼潜水无人机的设计方案,并进行了仿真分析与飞行试验,如图6所示。开放式机身由4根纵梁构成,机翼中空且无翼肋,目的是通过自由涌入的水改变整机重量,以克服浮力。



(a) 变后掠翼潜水无人机



(b) 折叠翼概念机

图5 NRL公布的潜水无人机概念模型

Fig.5 Submersible UAV concept model, published by the NRL

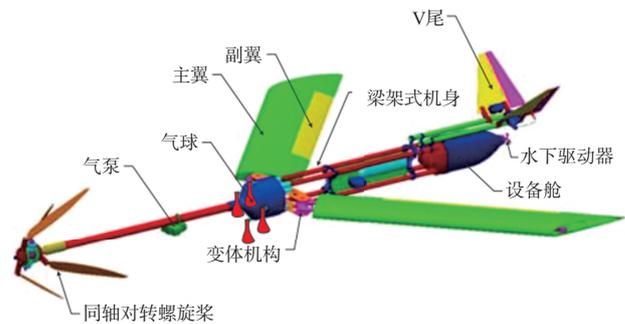


图6 北航仿生变后掠翼潜水无人机

Fig.6 BUAA Bionic Submersible UAV with variable swept wing

2017年,英国帝国理工学院Siddall等^[21]设计了一架仿生变后掠翼潜水无人机,并进行了水空验证、飞行测试。该机翼展长592mm,最大飞行速度为10m/s,最大飞行时长为14min,总重201.3g。图7为机翼、机身结构示意图,机翼通过双齿转动实现后掠,最大后掠角为90°,V形垂尾增强了飞行稳定性,二氧化碳储罐与空心碳管构成了水动驱动器,可以为出水过程提供足够动力。通过风洞缩比试验和潜航试验,评估了气动性能,分别分析了不同飞行参数及机翼后掠角对气动性能的影响,验证了潜水能力。总结了动力学模型,根据试验数据,预测了不同初始高度与速度下的潜水轨迹。

2.3 滑行式潜水飞机

2010年,Grouse等^[22]首次提出滑行式固定翼潜水飞机这一概念。同年,美国海军水面作战中心Goddard等^[23]提

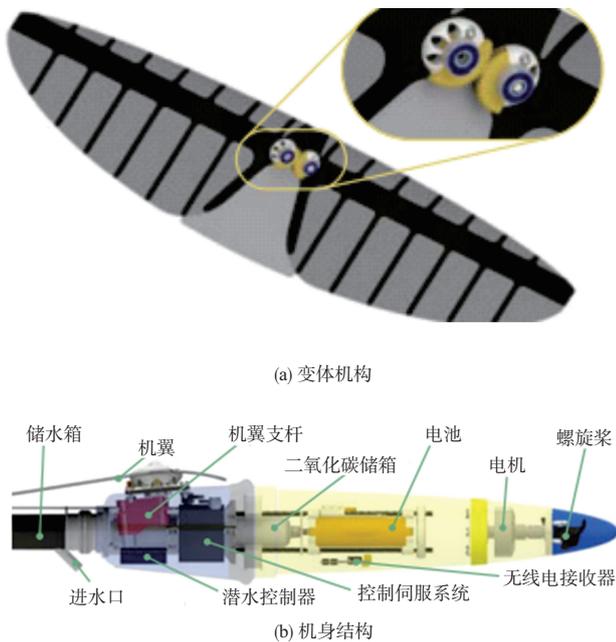


图7 英国帝国理工学院仿生变后掠翼潜水无人机机翼、机身结构示意图

Fig.7 Illustration of the wing and fuselage structure of a bionic submersible UAV with variable swept wing from Imperial College London

出了一款滑行式固定翼潜水飞机设计方案。美国海军研究实验室设计了一款滑行式固定翼潜水无人验证机,名为“Test Sub”。

北航梁健宏团队^[24]由飞鱼引发灵感,设计了一架潜水无人机,并进行了飞行试验。机身长1.98m,翼展3.4m,总重12kg,最大飞行速度可达23.61m/s,水下航行速度为0.5m/s。如图8所示,飞行状态下采用电机结合螺旋桨的动力推进方式,水下采用水泵低速驱动。可实现滑行式水空跨越,该过程中,机翼后掠90°,位于机头的电磁阀打开,水灌入机身舱与机翼内,整机重量上升,以克服浮力实现下潜。与水陆两栖飞机相似,机底为船身式结构,可在水面滑行。

3 降载关键技术

3.1 仿生降载设计

减少水空跨越过程的冲击载荷对于潜水飞机设计至关重要。通过观察并模仿自然界中鸟类的结构与运动特点,可以优化水空跨越方式及轨迹,达到降载增速,提升飞行稳定性与机动性的目的。

图9展示了塘鹅与鸬鹚的几何尺寸及运动轨迹。塘鹅



图8 北航滑行式潜水无人机
Fig.8 BUAA glide submersible UAV

属于大型水禽,体长可达950mm,颈细身肥,身体宽度约80mm,翼展可达1780mm。为了捕获鱼类,塘鹅将肱骨向后收紧,身体呈梭形,收起脚并调整脖颈方向,俯冲入水,以减少冲击,入水速度达27.7m/s。水下潜游时,前臂滑动以产生动力,最大潜水深度可达24m。出水时,它依靠前臂与脚蹼的划动游出水面,待风浪平静,便振动翅膀,从水面起飞^[25]。

Bhar等^[26]对塘鹅羽毛进行了载荷扩散机理分析,发现其羽毛在受到冲击载荷时,可以起到缓冲作用。相比其他水禽,塘鹅拥有更多的气囊,分布在头部、颈部、锁骨及胸部,受冲击时气囊会向外膨胀,也具备缓冲作用^[27]。

鸬鹚属于中型游禽,擅长潜水。其体长840mm,翼展1450mm,约为体长的1.7倍。虽然展弦比较低(8.45),但从水面起飞时鸬鹚可用脚蹼拍动水面,脚蹼运动不仅能够提供额外的飞行动力并缩短起飞时间,而且耗能低,这一特点值得研究并应用于潜水飞机及水陆两栖飞机设计^[28]。

仿生学设计适合应用于冲击式潜水飞机运动姿态及轨迹优化、机头及前缘缓冲结构、变体机翼结构设计中,既能实现结构降载,又能有效控制结构重量。

3.2 变体结构设计

塘鹅与鸬鹚的例子说明了变体及缓冲结构具备显著降载能力。目前,在潜水飞机设计中,变体结构主要包括变形桨叶及变形机翼。李磊等在传统飞机桨叶的基础上,设计出一款自适应折叠桨叶。试验表明,跨水空运动中桨叶旋转速度调整时间下降了61.1%,明显缩短了两种介质下旋转速度的跨度。除折叠式桨叶外,变形桨叶还包括两种形式:扭转式桨叶和偏转式桨叶,如图10(b)和图10(c)所示。

变形机翼主要分为三大类:翼面变形式(见图11)、面外变形式(见图12)和翼型变形式(见图13)。目前,在潜水

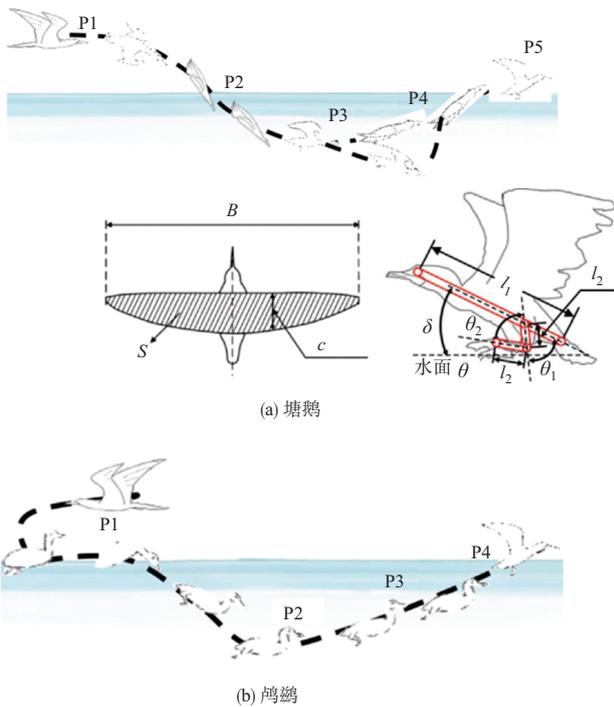
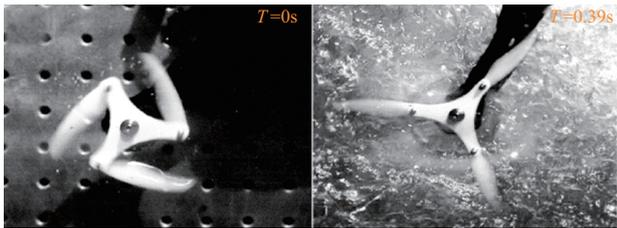


图9 塘鹅与鸬鹚的几何尺寸及运动轨迹
Fig.9 Geometric dimensions and movement trajectories of gannets and cormorants



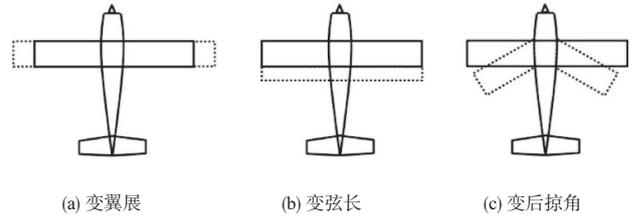
(a) 自适应折叠式桨叶
(b) 扭转式桨叶
(c) 偏转式桨叶
图10 变形桨叶示意图

Fig.10 Illustration of deformed propeller blades

飞机设计中,变后掠翼应用广泛,且主动柔性变形机翼成为主流。Fabian等利用细绳及方向舵组成主动触发机构,方向舵转动后绳子释放,机翼在弹性纤维杆的回弹作用下后掠收起。梁建宏团队将气泵与运动机构结合,通过控制气泵实现机翼主动后掠。

变后掠及变前掠机翼已应用于冲击式潜水飞机设计

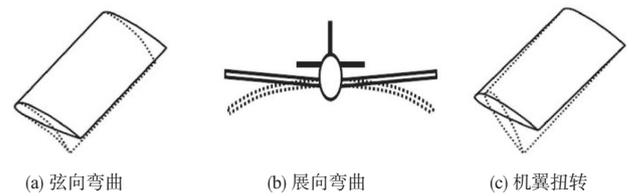
中,应优化运动机构的形式及驱动方案,使重量代价降至最低。变翼展机翼应尝试用于滑行式潜水飞机,可达到降载目的。除此之外,变翼展机翼可以有效减少跨水空过程的浸润面积,适用于滑行式潜水飞机。



(a) 变翼展 (b) 变弦长 (c) 变后掠角

图11 翼面变形式机翼示意图

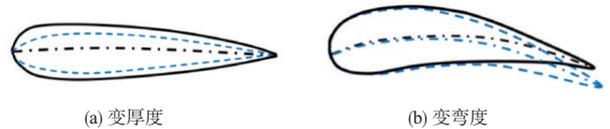
Fig.11 Illustration of planform alternation methods



(a) 弦向弯曲 (b) 展向弯曲 (c) 机翼扭转

图12 面外变形式机翼示意图

Fig.12 Illustration of out-of-plane transformation methods



(a) 变厚度 (b) 变弯度

图13 翼型变形式机翼示意图

Fig.13 Illustration of airfoil profile adjustment methods

3.3 缓冲技术

缓冲技术可以分为主动式与被动式两种。对于被动式缓冲,可以借鉴鱼雷结构设计思路:在冲击式潜水飞机头部安装缓冲头帽,可以有效降低冲击载荷。Hinkkey等^[29]通过分析硬聚氨酯泡沫的材料力学特性,提出了一种缓冲头帽方案。目前,鱼雷常规缓冲头帽如图14所示,结构包括整流罩、泡沫垫及弹簧片组合等^[30]。

主动缓冲可以采用降速伞、气囊等方法。同时,Ermanyuk^[31]、Okada^[32]等对物体着水产生的空气垫效应进行了深入研究,发现滞留在水中的空气可以有效降低冲击载荷,起到缓冲作用。邹志辉团队^[33]进行了航行器入水试验,研究了喷气缓冲装置的效果。喷气系数较大时,射流产生的空泡聚集形成空气垫,具有较好的降载效果。

除应用成熟的主被动缓冲技术以降低着水速度外,应着重研究缓冲变密度材料,未来可应用在机翼前缘等受冲

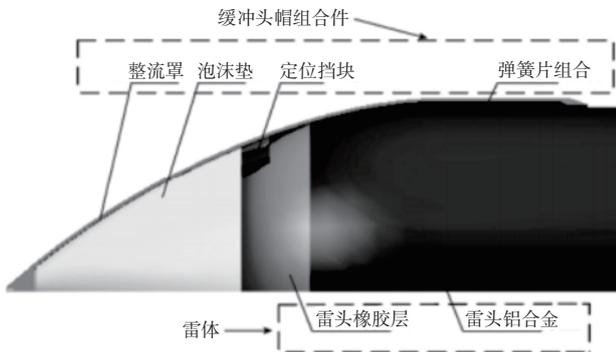


图14 鱼雷常规缓冲头帽示意图

Fig.14 Illustration of torpedo conventional buffer head cap

击部位。

4 结论及展望

通过对近十年国内外潜水无人机项目的分析研究,总结应用场景、类型、技术特点及成果,可以看出:(1)目前所有潜水飞机均为无人机型,同时在电动与水动驱动作用下,初步实现了水空跨越。(2)针对三种出入水方式,冲击式是耗能最少、对环境要求最低、应用广泛的一种水空跨越方法。(3)不同机翼构型下,变后掠翼能够有效减少冲击载荷和水动阻力,广泛用于冲击式水空跨越的潜水无人机。在此基础上,分别从仿生设计、变形与缓冲结构三个方向对潜水飞机结构降载技术进行了展望:(1)塘鹅、鸬鹚等动物的跨水空行为对出入水方式及轨迹、变体结构设计、缓冲技术有启发性意义。(2)对现有的变形桨叶与变形机翼技术进行了总结与分类,变展向及变后掠翼可以减少浸润面积,可有效降低冲击载荷。(3)除应用主动与被动成熟缓冲技术外,还应探索缓冲变密度材料,并应用于受冲击结构设计。

未来,以仿生及多学科交叉融合的角度,探索多种基础布局的可能性,深入研究变形结构设计,分析不同结构变形方式的降载效果与机理,加大应用缓冲结构,并且研制新型缓冲材料,为潜水飞机开拓新思路。

AST

参考文献

- [1] Tan Yuheng, Chen Benmi. Survey on the development of aerial-aquatic hybrid vehicles [J]. Unmanned Systems, 2021, 9(3): 263-282.
- [2] Yao Guocai, Li Yanze, Zhang Haiyi, et al. Review of hybrid aquatic-aerial vehicle (HAAV): Classifications, current status, applications, challenges and technology perspectives[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2023,139: 100902.
- [3] Young T Z. Design and Testing of an Unmanned Aerial to Underwater Vehicle[C]. 14th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference, 2014: 2014-2721.
- [4] Stewart W, Weisler W, Macleod M, et al. Design and demonstration of a seabird-inspired fixed-wing hybrid UAV-UUV system[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2018, 13(5): 056013.
- [5] Bershadsky D, Haviland S, Valdez P E, et al. Design considerations of submersible unmanned flying vehicle for communications and underwater sampling[C]. OCEANS Conference. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016: 7761266.
- [6] Paulo Drews J R, Neto A A, Campos M F M. Hybrid unmanned aerial underwater vehicle: modeling and simulation [C]. 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2014: 6943220.
- [7] Alzu'bi H, Mansour I, Rawashdeh O. Loon Copter: Implementation of a hybrid unmanned aquatic aerial quadcopter with active buoyancy control[J]. Journal of field Robotics, 2018, 35(5): 764-778.
- [8] Vyas A, Sivadasan R P N, Molawade A, et al. Modelling and dynamic analysis of a novel hybrid aerial underwater robot acutus[C]. OCEANS Conference, 2019:1-6.
- [9] Li Lei, Wang Siqi, Zhang Yiyuan, et al. Aerial-aquatic robots capable of crossing the air-water boundary and hitchhiking on surfaces[J]. Science Robotics, 2022, 66(7): 6695.
- [10] 李昊. 美军公布未来高速旋翼机性能需求[J]. 航空科学技术, 2019, 30(10): 77-78.
Li Hao. The US military announces the performance requirements for future high-speed rotorcraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(10): 77-78. (in Chinese)
- [11] 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, 2017, 43(4): 969-982.
- [12] 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.
- [13] Di Lu, Xiong Chengke, Lu Bozhi, et al. Multi-mode hybrid

- aerial underwater vehicle with extended endurance[C]. 2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). IEEE, 2018: 1-7.
- [14] Di Lu, Xiong Chengke, Zhou Hexiong, et al. Design, fabrication, and characterization of a multimodal hybrid aerial underwater vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 219:108324.
- [15] Rui Hu, Di Lu, Xiong Chengke, et al. Modeling, characterization and control of a piston-driven buoyancy system for a hybrid aerial underwater vehicle[J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 120:102925.
- [16] Zheng Zeng, Liu Chenxin, Bi Yuanbo, et al. Review of hybrid aerial underwater vehicle: Cross-domain mobility and transitions control[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 248:110840.
- [17] Siddall R, Ortega Ancel A, Kovač M. Wind and water tunnel testing of a morphing aquatic micro air vehicle[J]. *Interface Focus*, 2017, 7(1): 20160085.
- [18] Friedrich M, Jeger S, Beltran L, et al. Dipper: a dynamically transitioning aerial-aquatic unmanned vehicle[J]. *Robotics: Science and Systems*, 2021,13(5) : 12-16.
- [19] Young T. Design and testing of an air-deployed unmanned underwater vehicle[C]. 14th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2014: 2721.
- [20] Liang Jianhong, Yao Guocai, Wang Tianmiao, et al. Wing load investigation of the plunge-diving locomotion of a gannet *Morus* inspired submersible aircraft[J]. *Science China Technological Sciences*, 2014, 57: 390-402.
- [21] Siddall R, Kovac M. Fast aquatic escape with a jet thruster[C]. 2016 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016: 217-226.
- [22] Crouse G. Conceptual design of a submersible airplane[C]. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2010: 1012.
- [23] Goddard R, Eastgate J. Submersible aircraft concept design study[J]. *Submersible Aircraft Concept Design Study*, 2010, 12 (5):419-421.
- [24] Liang Jianhong. Design and experiment of a bionic gannet for plunge-diving[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2013, 10(3): 282-291.
- [25] Wang Xinyang, Zhao Jiawei, Pei Xuan, et al. Bioinspiration review of aquatic unmanned aerial vehicle(AquaUAV) [J]. *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 2024, 4(2):100154.
- [26] Bhar K, Chang B, Virost E, et al. How localized force spreads on elastic contour feathers[J]. *Journal of The Royal Society Interface*, 2019, 160(16): 20190267.
- [27] Huang Jinguo, Gong Xiao, Wang Zeyu, et al. The kinematics analysis of webbed feet during cormorants' swimming[C]. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2016: 301-304.
- [28] Barbarino S, Bilgen O, Ajaaj R M, et al. A review of morphing aircraft[J]. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, 2011, 22(9): 823-877.
- [29] Hinckley W M, Yang J C S. Analysis of rigid polyurethane foam as a shock mitigator[J]. *Experimental Mechanics*, 1975, 15(5):177-183.
- [30] 徐新栋,李建辰,曹小娟. 鱼雷缓冲头帽入水冲击性能研究[J]. *鱼雷技术*, 2012, 20(3):160-165.
Xu Xindong, Li Jianchen, Cao Xiaojuan. Water-entry impact performance of torpedo's cushion nose cap[J]. *Torpedo Technology*, 2012, 20(3): 161-165.(in Chinese)
- [31] Ermanyuk E V, Ohkusu M. Impact of a disk on shallow water [J]. *Journal of Fluids & Structures*, 2005, 20(3):345-357.
- [32] Okada S, Sumi Y. On the water impact and elastic response of a flat plate at small impact angles[J]. *Journal of Marine Science & Technology*, 2000, 5: 31-39.
- [33] 邹志辉,李佳,杨茂,等. 喷气协助航行体入水空泡流动特性实验研究[J]. *弹道学报*, 2022, 34(1): 1-8.
Zou Zhihui, Li Jia, Yang Mao, et al. Experimental investigation on cavity flow characteristics of water entry of vehicle with gas jet cavitator[J]. *Journal of Ballistics*, 2022,34(1):1-8.(in Chinese)

Research Progress of Submersible Aircraft and Structural Load Reduction Technology

Li Meng, Chen Xingyi, Wang Xiangying, Sun Qixing, Zhou Jin, Wang Wenjuan

Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100012, China

Abstract: In recent years, submersible aircraft have demonstrated vast application prospects in both military and civilian sectors due to their exceptional water-to-air operational capabilities. They are particularly suited for complex multi-domain mission scenarios such as stealth penetration, intelligence reconnaissance, and underwater rescue, leading to an increasing demand for their development. This paper systematically reviews typical development cases of submersible aircraft over the past decade, categorizing them into three types based on their water entry and exit dynamics: slow-speed, impact, and planing models. Research indicates that the impact-type water-to-air transition method consumes the least energy, has the lowest environmental requirements, and is the most widely applied. Under different wing configurations, variable-sweep wings can effectively reduce impact loads and hydrodynamic resistance, and are commonly used in impact-type submersible aircraft. Addressing the key technical challenge of strong impact loads, this paper provides an in-depth analysis and outlook from three dimensions: bionic load reduction, morphing structures, and cushioning structures. It proposes that bionic cushioning structures, variable-span and variable-sweep wing structures, and cushioning variable-density materials are the focal directions for future research on load reduction in submersible aircraft structures.

Key Words: hybrid aquatic-aerial vehicle; submersible aircraft; structural load reduction; morphing structure; buffer structure