

# 水空跨介质航行器发展需求及其关键技术

冯金富<sup>1</sup>, 胡俊华<sup>1</sup>✉, 齐 铎<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 空军工程大学空管领航学院, 西安, 710051)

**摘要** 针对未来军事竞争与对抗呈现多介质空间的体系对抗,而现有航行器平台仍大多局限于单一介质空间运行环境的现状,突破传统航行器定式,提出具有多介质航行能力的水空跨介质航行器概念,介绍了研究背景和发展此类航行器的必要性,分析了规划和发展过程中的关键技术,并对今后的发展思路进行了展望。

**关键词** 水空跨介质;航行器;变体技术

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.03.002

**中图分类号** V1;TJ76 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)03-0008-06

## Study on Development Needs and Key Technologies of Air-Water Trans-Media Vehicle

FENG Jinfu<sup>1</sup>, HU Junhua<sup>1</sup>✉, QI Duo<sup>2</sup>

(1. Aeronautical Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Aimed at the problems that military competition and confrontation in the near future is present to the system of the multi-media space, and the most active-service navigation vehicles are still limited to the single medium space, this paper proposes a brand-new vehicle named air-water trans-media vehicle, conceives a transfiguration vehicle which can travel in multi-media, analyzes the key technologies, and presents the future developing conception.

**Key words:** air-water trans-media; vehicle; morphing technologies

飞机、舰艇、水下航行器及其相关技术的发展日新月异,在侦察、探测、搜救、通讯等领域有着普遍的应用,纵观其发展,不难发现它们大都固定在单一介质空间,或陆面、水面,或空中、水下,亦或是近空、太空。随着军事对抗技术与手段的发展,单一介质空间航行器在多维态势感知、信息交互、突防攻击等方面的能力受到制约,研究适应多介质环境的跨介质航行器已成为军事强国的重要发展方向<sup>[1-2]</sup>。

水空跨介质航行器(以下简称航行器)是指能够以自主变体适应不同介质环境,保持最优气(水)动性能,可多次跨越介质界面并长时间在空中飞行或水下航行的新型航行器,突破了传统飞行器或潜航器在使用环境上的限制。航行器集空中飞行器、水面舰船和水下航行器功能于一身,具备空中飞行、水面起降、水下潜航等能力,能够完成水下、空中及水空交叉介质上的诸多类型任务<sup>[3-10]</sup>。

**收稿日期:** 2018-11-28

**基金项目:** 国家自然科学基金(51779263)

**作者简介:** 冯金富(1964—),男,江苏泰州人,教授,博士生导师,主要从事跨介质航行器对抗技术、机载武器控制系统研究。E-mail: wcsjif@163.com

**通信作者:** 胡俊华(1980—),男,江西新余人,博士,副教授,主要从事跨介质航行器对抗技术、机载武器控制系统研究。E-mail: hujh\_air@163.com

**引用格式:** 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.  
FENG Jinfu, HU Junhua, QI Duo. Study on Development Needs and Key Technologies of Air-Water Trans-Media Vehicle[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(3): 8-13.

# 1 飞行器研究现状及发展需求

## 1.1 飞行器的研究现状

早在1934年苏联的科学家鲍里斯·乌沙可夫就在LPL项目的支持下,尝试设计一种水空两用飞机,受限于当时科技水平,此方案仅停留在设计阶段,但其为后来的科研人员提供了一个新思路<sup>[11]</sup>。

随着科技的迅猛发展,飞行器的实现具备了可能性。2008年,美国DARPA着手研发一种既能够在空中飞行,又能够在水面和水下航行的飞行器——“潜水飞机”,用于突袭敌方海岸的特种作战行动,根据初步设想,“潜水飞机”能够在连续飞行1 000 n mile后,再贴着水面飞行100 n mile抵达敌方海岸,其后能在水下持续潜行至少12 n mile(见图1)。由于该项目需要解决的技术难题过多、风险较大,该项目未能取得实质性进展,但其提出了一种未来海上作战新模式<sup>[12-13]</sup>。

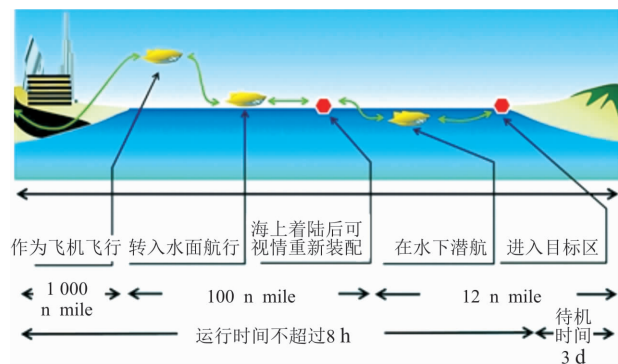


图1 水下飞机作战方案

2009年,北京航空航天大学从鳐鱼捕鱼的行为中受到启发,设计了图2“鳐鱼”水空两用飞行器,能够空中飞行、水下航行和水面起降<sup>[14]</sup>。

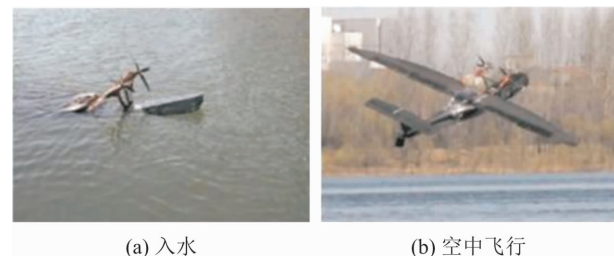


图2 “鳐鱼”水空两用飞行器

2010年,美国富兰克林欧林工程学院学者受飞鱼启发,研制了图3所示的仿生机器人,该仿生机器人在空中滑翔飞行时依靠胸鳍进行控制,在水下航行时则依靠尾部提供产生动力<sup>[15]</sup>。

2011年,南昌航空大学设计了一款电力驱动的变后掠翼水空两用飞行器(见图4),空中飞行时展

开机翼,水下航行时收拢机翼<sup>[16]</sup>。

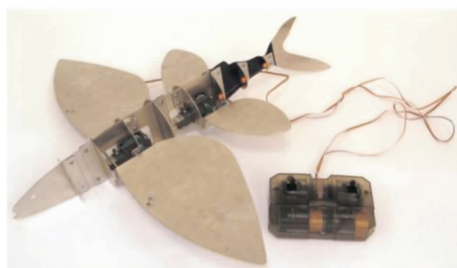


图3 仿“飞鱼”水空两用飞行器



图4 南昌航空大学设计方案

2014年,美国海军研究实验所研制了变体无人机“Flimmer”(见图5),可以分别在空气和水中处于不同构型以满足特定介质航行的要求<sup>[17]</sup>。

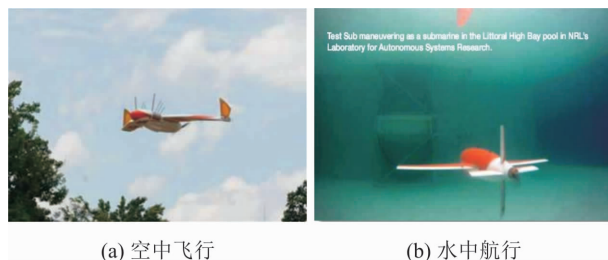


图5 “Flimmer”变体无人机

2016年,空军工程大学廖保全提出了跨介质飞行器设计方案(见图6),研究了其空中气动特性和水下水动特性<sup>[18-19]</sup>。



图6 折叠变体跨介质飞行器

## 1.2 飞行器发展需求

飞行器的出现,在军事上将颠覆传统海上作战模式和作战空间,在民用领域也将大放光彩,其应用价值具体体现在以下几个方面:

1)可作为跨介质攻击武器。随着攻防体系的发展完善,反弹道导弹技术日益扩散,以及反空空导弹技术的发展,使得传统武器的突防能力越来越弱。飞行器既能隐蔽于水下,又能突防于空中,使其难于被追踪锁定;可支持全空间协同作战,利用敌方目标空中威胁识别区和水下威胁识别区因介质物理上的

不同而形成的割裂,通过水空介质间的反复切换,有效规避被打击,实施突防攻击任务。

2)可作为移动信息交互平台。航行器通过传感器、组网技术等,将战时的空间、大气层、水面、水下真正连成一体,完成电磁波各种波段的互相通讯甚至转换,实现信息互联互通无缝融合。

3)可作为态势感知平台。航行器凭借自身良好的机动能力,利用携带的传感器对各种空中、水面和水下目标进行探测,可在深远海遂行任务中实施侦察、监视和预警,提高态势感知能力,缩短预警时间,为决策者提供更丰富的信息和选择。

4)民用领域。未来将有可能在海上航空失事快速搜寻、事故人员快速搜救等方面起到很大作用。对远距离探测目标,可先在飞行状态下以较短时间到达目标区域,再转入水下进行近距离观察,从而充分发挥水空跨介质航行器灵活快速的优势<sup>[6-7]</sup>。

## 2 航行器关键技术

### 2.1 外形与变体技术

航行器需经历空气与海水2种介质环境,具有空中飞行、水面航行和水中潜航3种巡航状态,水下到空中和空中到水下2种介质跨越状态。因此,该航行器必须满足空中飞行构型、水下潜航构型和跨介质过渡构型等多种要求,变体技术和仿生技术是将上述两种航行器功能在同一平台上实现跨介质航行的最佳途径<sup>[3]</sup>,目前的技术发展水平已经使得该类技术的应用成为可能。因而要根据任务剖面中航行介质特点、飞/航行速度、操稳特性等技战术指标,重新构建气动与结构布局,并通过变体或仿生来实现<sup>[20]</sup>。

由于传统的变后掠翼变体形式为机械的、单自由度变体,变体量主要体现在一些相对量的变化,如后掠角、展弦比、顺气流相对厚度等,而涉及飞行器物理特征的一些绝对量,如机翼面积、浸润面积等的变化却非常小<sup>[21-23]</sup>,难以满足跨介质航行的大幅度变体要求。采用新兴的智能变体技术,如任务自适应机翼技术、主动柔性机翼技术、主动气动弹性机翼技术、折叠机翼技术、滑动蒙皮技术以及众多研究机构一直坚持探索的扑翼技术等<sup>[24-26]</sup>不失为解决上述问题的良方。通过采用智能材料与结构,利用先进的流动控制与飞行控制技术,主动改变全机布局或气动外形,以便适应不同介质环境、不同速度的任务需求,在空气、海水介质航行状态下均获得最佳气动/水动性能。同时,变体使得航行器空气动力学/水流体动力学呈现强的非定常、非线性特征,必须研

究机翼面积、展弦比、后掠角等参数在空中、水面、水下的尺度变化与时间变化所产生的动力学效应,以此优化机翼的展向或弦向结构以及变形方式,进而实现光滑、连续地改变机翼气动外形,使航行器空中飞行、水下航行及跨介质过渡等状态的气动/水动特性整体达到最优。

### 2.2 跨介质推进技术

跨介质推进系统必须具备在2种不同介质(空气和海水)中持续、稳定工作的能力,且满足介质切换和不同速度航行对动力的需求。然而,目前的航空、航天、航海推进系统均不能满足上述要求,因为不同介质环境中推进系统的工作原理和工作方式截然不同,飞机使用的涡轮螺旋桨发动机、涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机等不能在水中工作;潜艇、鱼雷等使用的水下螺旋桨、泵喷推进器、喷水推进器等也不能在空气中工作;部分导弹和鱼雷武器使用的固体/液体火箭发动机虽然不受空气与水介质的限制,但其工作时间短,比冲小,难以满足水空跨介质航行器远距离航行的需求。因此,必须探索适合多介质环境的推进系统,容易联想到的解决方案即是组合空中/水下推进系统。简单的组合形式就是在航行器上同时加装2套动力装置,一套负责空中,一套负责水下,显然,这种方式付出了过大的负载代价,可用性不高。另一类组合方式则是从原理结构上进行组合,通过组合传统的航空、航天、航海推进系统可以满足低速航行器的一般需求,但对高速航行器来说,为了满足高速、远程、大推力的需求,必须研究采用新能源、新原理的更加高效的新概念推进系统,如等离子爆轰发动机、脉冲爆震发动机等<sup>[27-28]</sup>。

### 2.3 多维空间跨越适航技术

航行器跨越空气-海水界面(入水)的初期瞬间(毫秒级)会产生巨大的冲击载荷<sup>[4]</sup>,容易引起航行器发生弹塑性变形、屈曲、断裂,器件失灵,弹道失控等问题。此类问题同时涉及到结构体、气体流和液体流3种不同性质对象之间的相互作用,既是一个具有自由液面和特殊空泡的不定常流体力学问题,又是一个有可能引起结构破坏的高速撞击问题,还是一个涉及弹性体运动的动力学问题<sup>[29-31]</sup>。其具有气液两相流干扰运动的特点,并伴随气垫效应、气液耦合作用、射流现象、液面隆起以及入水空泡生长、发展和溃灭等过程。

航行器跨越海水-空气界面(出水)的过程中所受的附连质量力、浮力、阻力迅速下降,速度激变。如果伴随空泡效应,则空泡的溃灭将引起航行器表面压力分布的剧烈变化,形成相当大的扰动力和力

矩,产生剧烈的冲击和振动,甚至导致飞行器结构的破坏和控制系统的失灵。同时,飞行器接近水面时,受海洋中波浪的干扰作用,其弹道会发生偏离,偏转角受波浪的各种参数,如波速、波高、相位、波的传播方向等的影响而有较大的随机性,作用力呈现出强的非定常、非线性效应<sup>[32-34]</sup>。

根据出水起飞与入水跨越技术的不同,飞行器跨越介质界面的类型可分为渐变跨越型与瞬时跨越型两类。采用类似水上飞机的水上滑行起飞与着水滑行降落,再下潜入水的方式,称为渐变跨越;而采用类似空投鱼雷方式入水、潜射导弹方式出水,称为瞬时跨越。2种类型的跨越方式代表了不同的任务需求和设计理念。渐变跨越方式飞行器受到的冲击过载较小,变体时间充分,变体时机容易把握,跨越过程控制要求低,但对飞行器外形有严格要求,否则难于实现稳定的滑行加速或减速降阻。因此,该方式适宜于载人跨介质飞行器等低速飞行器。瞬时跨越型方式飞行器受到的冲击过载很大,且要求在很短暂的时间间隔内完成变体过程和发动机模式的切换,变体控制与推进系统设计难度都很高,此外该方式恶劣的过载环境也对飞行器的结构、材料提出了较高要求,但该方式介质界面跨越过程简洁、速度快,适宜于跨介质攻击武器等高速飞行器。

## 2.4 多介质导航与控制技术

导航技术方面,以激光陀螺、光纤陀螺为核心部件的捷联惯性导航系统,与以重力场、地磁场矢量信息为对象的地球物理导航技术近年来取得了显著进展<sup>[35-37]</sup>。因此,采用捷联惯性导航系统为主、地球物理场导航辅助的组合导航系统,能够满足水空跨介质飞行器空中、水面、水下的导航要求,是一种可行的跨介质导航方案<sup>[38]</sup>。

控制技术方面,为了克服跨介质过程中的瞬间力、力矩干扰,实现跨介质全过程稳定航行,必须有一套适应潜航/过渡/变体/飞行的多模态、强鲁棒性控制系统,完成不同模态下的自动控制及不同模态之间的自动、准确切换,解决跨介质时复杂航行环境带来的强干扰和被控对象参数大范围快速变化带来的控制难题,保证高精度的飞行轨迹控制。

飞行器的控制可分为顶层飞行/航行控制和底层变体控制。飞行控制器感知航行环境信息和飞行器姿态等状态信息,将任务所需的飞行器静态形状和动态变化特征传输给变体控制器;变体控制器控制变形部位,达到变体的动态和静态要求。

由于航行环境变化大,外形状态相互切换,控制器设计需考虑对象时变和非线性特征,且不能像常规飞行器那样将其作为单个刚体建模,而应视其为

多柔性体系统,给飞行器控制研究带来了挑战。

## 2.5 材料技术

1) 变形材料技术。主要有形状记忆材料、磁致伸缩材料、压电材料、电(磁)流变流体材料等智能材料<sup>[39]</sup>,它们能感知环境变化并能实时改变自身的一种或多种性能参数,作出所期望的、能与变化后的环境相适应的形变<sup>[40-41]</sup>。就飞行器所需的机翼大范围变体而言,变形材料需着重解决环境适应性、变形时间、能力、精度控制等问题。

2) 缓冲吸能材料。飞行器在入水时遭遇很高的瞬时冲击压力及过载,为耗散冲击能量,提供一定耐撞性,需要研究冲吸能元件的配置形式和材料技术,例如各类增强的硬质聚氨酯泡沫塑料<sup>[42-43]</sup>。

## 3 飞行器研究与展望

得益于航空技术和航海技术的融合与发展,水空跨介质飞行器以其独特的运动方式,在军事领域和民用领域都有着广阔的发展前景。目前大部分试验样机都已经完成了原理验证、关键技术攻关和系统功能验证,可以设想,在不久的将来,水空跨介质飞行器会成为独立与空中飞行器和水下飞行器的第三类飞行器。

现有水空跨介质飞行器的研制思路主要是仿生和变体,可以从结构、动力和控制等方面提升飞行和跨越能力。未来飞行器可遵循“先近后远、先慢后快、先简变,后智变”的发展思路,走“概念驱动技术、技术牵引装备”的技术路线,从概念及未来需求的深入论证出发,引领出关键技术的研究与突破,以此促进新概念飞行器的发展与革新。

## 参考文献(References):

- [1] 徐保伟. 变结构飞行器水空跨越动力学模型及运动特性研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2016.  
XU B W. Dynamic Model and Motion Characteristics of Morphing Air-Water Crossing Vehicle [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2016. (in Chinese)
- [2] 何肇雄, 郑震山, 马东立, 等. 国外跨介质飞行器发展历程及启示[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(9): 152-157.  
HE Z X, ZHENG Z S, MA D L, et al. Development of Foreign Trans-Media Aircraft and Its Enlightenment to China[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(9): 152-157. (in Chinese)
- [3] 冯金富, 陈国明, 张萌. 变体技术在兵器设计上的应用[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(12): 215-220.  
FENG J F, CHEN G M, ZHANG M. Application of

- Morphing Technology in Aircraft[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(12): 215-220. (in Chinese)
- [4] CHEN G M, FENG J F, HU J H, et al. The Influence of Initial Conditions of Water-Entry on Ricochet Phenomenon[J]. *Fluid Dynamics Research*, 2017, 49(4):045505.
- [5] YANG J, LI Y L, FENG J F, et al. Simulation and Experimental Research on Trans-Media Vehicle Water-Entry Motion Characteristics at Low Speed[J]. *PLoS One*, 2017, 12(5):e0178461.
- [6] 杨健,冯金富,齐铎,等.水空介质跨越航行器的发展与应用及其关键技术[J].*飞航导弹*,2017(12):1-8.  
YANG J, FENG J F, QI D, et al. Development, Application and Key Technologies of Air-Water Trans-Media Vehicle[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2017(12):1-8. (in Chinese)
- [7] 刘安,冯金富,廖保全,等.旋翼类飞行潜航器的发展及关键技术[J].*舰船科学技术*,2017,39(3):1-6.  
LIU A, FENG J F, LIAO B Q, et al. Progress and Key Technologies of Multi-Rotor Unmanned Aerial Underwater Vehicle[J]. *Ship Science and Technology*, 2017,39(3):1-6. (in Chinese)
- [8] 李永利,冯金富,齐铎,等.航行器低速斜入水运动规律[J].*北京航空航天大学学报*,2016,42(12):2698-2708.  
LI Y L, FENG J F, QI D, et al. Movement Rule of a Vehicle Obliquely Water-Entry At Low Speed [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics*, 2016, 42(12):2698-2708. (in Chinese)
- [9] WU M. Modeling and Simulation on the Gas/Water Two-Phase Ballistics of Trans-Media Aircraft[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 743:66-70.
- [10] PAN C J, GUO Y Q. Design and Simulation of Ex-Range Gliding Wing of High Altitude Air-Launched Autonomous Underwater Vehicles Based on SIMULINK[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, 26(2):319-325.
- [11] FANTASTIC P. Ushakov LPL flying submarine [EB/OL]. [2017-09-20]. [http://www.fantastic-plastic.com/Ushakov\\_LPL\\_Flying\\_Sub\\_page.html](http://www.fantastic-plastic.com/Ushakov_LPL_Flying_Sub_page.html).
- [12] 李红军.飞行潜艇或水下飞机? [J]. *兵器知识*, 2010(9):52-53.  
LI H J. Flying Submarine or Underwater Airplane? [J]. *Ordnance Knowledge*, 2010(9):52-53. (in Chinese)
- [13] 陈建峰,杨龙塾.美国 DARPA 提出的“潜水飞机”概念[J].*现代舰船*,2009,14(3):38-39.  
CHEN J, YANG L S. The Concept of “Underwater Airplane” Proposed by DARPA in the United States [J]. *Modern Ships*, 2009, 14(3):38-39. (in Chinese)
- [14] LIU H X. Investigation on the Mechanism of a Bionic Aquatic-Aerial Aircraft and Prototype Aircraft Project [D]. Beijing: Beihang University, 2009.
- [15] CHERNEY R. Robotic Flying Fish, Needham; Franklin W. Olin College of Engineering[Z]. Report ENGR 2330, 2010.
- [16] 朱莎,王云,刘伟.水空两用无人机进排气系统分析[J].*航空科学技术*,2011,22(4):83-85.  
ZHU S, WANG Y, LIU W. Analysis to Intake and Exhaust System of Water-air UAV[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2011, 22(4): 83-85. (in Chinese)
- [17] TRENT Y, JASON G, DAN E. Flimmer: A Flying Submarine [Z]. Naval Research Laboratory SPEC-TRA, 2015.
- [18] 廖保全,冯金富,齐铎,等.基于 FLUENT 的新型跨介质航行器气动/水动特性研究[J].*数值计算与计算机应用*,2016,37(4):265-272.  
LIAO B Q, FENG J F, QI D, et al. Study of Aerodynamic and Hydrodynamic Characteristics for a New Trans-Media Vehicle Based on FLUENT[J]. *Journal on Numerical Methods and Computer Applications*, 2016,37(4):265-272. (in Chinese)
- [19] 廖保全,冯金富,齐铎,等.一种可变形跨介质航行器气动/水动特性分析[J].*飞行力学*,2016,34(3):44-47.  
LIAO B Q, FENG J F, QI D, et al. Analysis on Aerodynamic and Hydrodynamic Characteristics of Morphing Submersible Aerial Vehicle Flight Dynamics[J]. *Flight Dynamics*, 2016,34(3):44-47. (in Chinese)
- [20] RODRIGUEZ A. Morphing Aircraft Technology Survey [Z] Aiaa Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 2013.
- [21] ZHU L P, LIU Z H, LI L C. Modeling and Aerodynamic Characteristics Analysis of Morphing Aircraft [C] //2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Chongqing, China:CCDC, 2017: 1703-1709.
- [22] GUO T H, HOU Z X, ZHU B J. Dynamic Modeling and Active Morphing Trajectory-Attitude Separation Control Approach for Gull-Wing Aircraft [J]. *IEEE Access*, 2017, 5:17006-17019.
- [23] LI M T, GUO L, WU K J. Modeling and Control for Morphing Unmanned Aircraft Vehicle [C] // 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC). Nanjing, China: IEEE, 2016: 1226-1231.
- [24] NICASSIO F, SCARSELLI G, PINTO F, et al. Low Energy Actuation Technique of Bistable Composites for Aircraft Morphing [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 75:35-46.
- [25] MICHAUD F, DALIR H, JONCAS S. Structural De-

- sign and Optimization of an Aircraft Morphing Wing; Composite Skin[J]. *Journal of Aircraft*, 2017, 55(1): 1-17.
- [26] 刘卫东. 变形机翼关键技术的研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.  
LIU W D. Research on Key Technology of Morphing Wing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [27] 范玮, 严传俊, 黄希桥, 等. 新概念脉冲爆震发动机研究的最新进展[C]//中国工程院航空工程科技论坛学术报告会. 北京:中国工程院, 2002: 22-34.  
FANG W, YANG C, HUANG X, et al. Recent Advances in Research on New Concept Pulse Detonation Engines[C]//Chinese Academy of Engineering Aviation Engineering Science Forum. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2002: 22-34. (in Chinese)
- [28] ROY G. Practical Pulse Detonation Engines-How Far Are They[Z]. ISABE-2001-1170, India, 2001.
- [29] TRUSCOTT T T, EPPS B P, BELDEN J. Water Entry of Projectiles[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2014, 46(1):355-378.
- [30] ABRAHAM J, GORMAN J, RESEGHETTI F, et al. Modeling and Numerical Simulation of the Forces Acting on a Sphere during Early-Water Entry[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 76:1-9.
- [31] SCOLAN Y M, KOROBKIN A A. Three-Dimensional Theory of Water Impact. Part 1. Inverse Wagner Problem[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001, 440: 293-326.
- [32] KOROBKIN A A, SCOLAN Y M. Three-Dimensional Theory of Water Impact. Part 2. Linearized Wagner Problem[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 549(1):343-373.
- [33] KOROBKIN A. Analytical Models of Water Impact [J]. *European Journal of Applied Mathematics*, 2004, 15(6):821-838.
- [34] GU H B, QIAN L, CAUSON D M, et al. Numerical Simulation of Water Impact of Solid Bodies with Vertical and Oblique Entries[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 75:128-137.
- [35] 杨元喜, 徐天河, 薛树强, 等. 我国海洋大地测量基准与海洋导航技术研究进展与展望[J]. *测绘学报*, 2017, 46(1):1-8.  
YANG Y X, XU T H, XUE S Q, et al. Progresses and Prospects in Developing Marine Geodetic Datum and Marine Navigation of China[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(1): 1-8. (in Chinese)
- [36] 许昭霞, 王泽元. 国外水下导航技术发展现状及趋势[J]. *舰船科学技术*, 2013, 35(11):154-157.  
XU Z X, WANG Z Y. Recent Advances and Future Trends in Foreign Underwater Navigation Techniques [J]. *Ship Science and Technology*, 2013, 35(11):154-157. (in Chinese)
- [37] 郑彤. 国外水下导航技术现状分析[J]. *舰船电子工程*, 2016, 36(10):8-10.  
ZHENG T. Present Status Study on the Foreign Underwater Navigation Techniques [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2016, 36(10):8-10. (in Chinese)
- [38] 刘佳兴. 基于 ANFIS 的水下航行器组合导航技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2013.  
LIU J X. Research on Integrated Navigation Technology of Underwater Vehicle Based on ANFIS[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. (in Chinese)
- [39] 张利军, 薛祥义, 常辉. 我国航空用变形钛合金材料[J]. *中国材料进展*, 2012, 31(8):40-46.  
ZHANG L J, XUE X Y, CHANG H. Deformation of Titanium Alloy Materials for China Aircraft[J]. *Material China*, 2012, 31(8):40-46. (in Chinese)
- [40] 石鹏飞, 孙锐, 胡斌. 变形飞机结构技术发展[J]. *科学家*, 2017, 5(9): 2, 21.  
SHI P F, SUN R, HU B. Development of Deformation Aircraft Structure Technology [J]. *Scientist*, 2017, 5(9): 2, 21. (in Chinese)
- [41] 滕腾. 可变形飞行器受载变形控制问题研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.  
TENG T. Research on Variant Aircraft's Control in Wing Loads [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [42] 孟松鹤, 杜善义, 韩杰才. 热防护系统及材料的研究进展[C]//第十四届全国复合材料学术会议. 湖北, 宜昌:中国宇航学会, 2006:11-17.  
MENG S H, DU S Y, HAN J C. Research Progress in Thermal Protection Systems and Materials [C]//14th National Academic Conference on Composites. Yichang Hubei: Chinese Society of Astronautics, 2006: 11-17. (in Chinese)
- [43] 刘方辉. 硬质聚氨酯泡沫塑料在军事领域的应用研究进展[J]. *科技资讯*, 2013, 11(13): 248.  
LIU F H. The Development and Application of Rigid Polyurethane Foam Plastics in Military Field[J]. *Science and Technology Information*, 2013, 11(13): 248. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)