

· 编者按 ·

学科交叉，仿生智控，推动水下 无人系统总体设计技术高质量发展

水下无人系统是现代海洋装备的重要组成部分，是新技术、新概念应用最为活跃的领域，在深海资源开发、环境监测、水下安防及跨域协同作业中发挥着不可替代的作用。随着深海探测、极地科考等国家战略任务对智能化、长航程、大潜深需求的激增，水下无人系统面临着复杂流场、极端压力、操纵稳定性、弱观测与通信、自主智能等多重挑战。在此背景下，总体设计技术成为决定系统综合性能的关键，需要统筹解决低阻外形优化与能源动力适配、模块化布局与结构轻量化、智能控制与任务载荷协同等跨学科难题。不仅牵引新概念、新构型、新布局的水下无人装备持续涌现，推动多学科深度耦合与协同优化，更直接支撑水下无人系统装备的谱系化升级与跨域拓展，为我国抢占深海装备技术制高点、参与国际标准制定提供核心技术支撑。

总体设计研究早期，以单体平台的线型优化和结构强度校核为主要内容，历经几代技术积累，逐步拓展至多学科协同优化、仿生运动机理、智能操纵稳定性、极端载荷防护等新领域。随着技术的发展，水下无人系统总体设计研究越来越呈现出以下特点：一是多学科耦合程度日益加深。能源、推进、结构、控制、声隐身等学科之间的相互制约关系愈发凸显，传统串行设计方法已难以满足高性能平台的研发需求。二是对基础科学问题的探究不断深入。从流固耦合机理到内爆失效机制，从仿生推进机理到多体协同控制，研究者正努力从工程现象中凝练科学问题，知其然更知其所以然。三是创新驱动和交叉融合的趋势愈发明显。仿生技术与智能控制的结合、先进材料与结构安全性的协同、人工智能在总体设计中的应用，无不体现着多学科交叉融合对技术创新的强大推力。

为集中展示近期我国在水下无人系统总体设计领域的创新成果，推动该领域技术的交流与发展，《中国舰船研究》于2026年第2期推出“水下无人系统总体设计技术”专题。编辑部特邀西北工业大学潘光教授、哈尔滨工程大学严浙平教授担任专题主编。经过严格的审稿流程，本专题共收录学术论文20篇，主要来源于国家重点研发计划、国家自然科学基金等资助项目的最新研究成果，内容涵盖水下无人系统总体布局与结构设计、操纵稳性控制、低噪声推进、结构安全性、导航控制、感知对接等方面，呈现了我国在水下无人系统总体设计基础理论、研究设计方法及工程应用方面的最新进展和研究热点。

在总体设计方法研究方面：《大型无人潜航器多学科总体优化与发展综述》构建了包含“每吨重量下的当量航程”“当量负载”“置空率”等多维度指标的总体优化评价体系，系统剖析了大型化趋势下面临的多学科耦合难题。《基于模型的水下无人飞行器设计方法》首次将基于模型的系统工程方法应用于UUV设计过程，提出了一套完整的正向设计方法和分布式仿真验证手段。

在新型平台与仿生设计方面：《仿蝠鲼航行器多模态运动水动力机理研究综述》首次系统梳理了仿蝠鲼潜水器从单体到集群的多模态运动水动力机理，为后续仿生设计提供了理论参考。《可变形水下作业机器人总体设计及作业分析》完成了一款具备双模态多作业能力的可变形水下作业机器人设计，提供了此类机器人的设计范式。《仿生航行器鳍-艇几何参数对推进性能的影响》揭示了艇体与波动鳍之间的相互影响机理，为MPF游动模式仿生航行器外形设计提供了理论依据。《基于矢量推进的深海航行器有动力下潜技术试验研究》在国内首次完成了3700 m水深环境下，矢量推进型航行器动力下潜的实海测试。《基于多段铰接刚性杆脐带缆模型的波浪滑翔器纵剖面运动响应特性研究》建立了多段刚性杆铰接的脐带缆动力学模型，揭示了脐带缆形态变化对系统推进运动的影响规律。

在探测隐身性与结构安全性研究方面：《“虎鲸”超大型无人潜航器目标强度特性研究》系统分析了Orca XLUUV在1~10 kHz频段的目标强度特性，提出将角检测率作为隐身性能评价指标。《深海高压环境下钛合金圆柱壳内爆失效机制及冲击特性研究》开展了深海高压环境下钛合金圆柱壳水下内爆试验，揭示了内爆中心迁移效应和失效形态转变的规律。《考虑热效应的深海陶瓷耐压结构内爆特性研究》提出了一种考虑热效应的陶瓷耐压结构内爆数值模拟方法，阐明了压力和水温对内爆特性的影响

规律。

在推进与减振降噪技术方面:《基于多孔介质定子前缘的泵喷推进器降噪研究》首次提出了在“泵喷推进器定子叶片”前缘引入多孔介质材料的降噪策略,为推进器降噪提供了新的思路。《导管螺旋桨与尾鳍运动参数对飞潜器水下流体动力特性影响研究》重点研究了推进器旋转速度和尾鳍偏转角度对“飞潜器”水下直航和回转运动的影响。

在导航与控制技术方面:《基于扰动观测器的欠驱动 UUV 预设性能路径跟踪容错控制》设计了预定义时间扰动观测器,实现了执行器故障与未知扰动的有效补偿。《基于函数化重构算法的多区间水下航迹融合与应用》提出了一种基于函数化重构的水下数据融合算法,解决了高动态参数序列变化不连续的问题。《基于仿射变换的多 UUV 自适应队形变换路径规划方法》提出了一种基于仿射变换的编队全局路径规划方法,实现了 UUV 编队主动灵活的队形调整避障。《事件驱动量测-通信联合框架下基于 LMPC 的多 AUV 编队控制方法》引入自适应量测-通信联合框架,解决了系统状态感知及传输能力受限条件下的编队控制问题。

在感知与对接技术方面:《避障场景下基于成像声呐的轻量化实时感知方法》提出了轻量化卷积模块,在显著削减计算量和参数数量的同时提升了感知精度。《多特征融合的 AUV 末端视觉自主对接技术研究》将暗通道先验去雾算法应用于水下图像增强,提出了多特征融合的动态权重分配策略。《基于自适应快速非奇异积分终端滑模的双闭环 AUV 动基座对接控制》提出了基于快速非奇异积分终端滑模的双闭环控制架构,实现了全系统有限时间收敛。《AUV 与拖曳式回收坞站的对接碰撞分析》建立了充分保留“拖曳式回收坞站”运动特性的对接模型,设计了多阶段协调控制策略。

作为船舶与海洋工程领域的重要分支,水下无人系统总体设计技术正处在从经验积累向科学认知跨越的关键阶段,总体性能的竞争日益体现为多学科协同深度与智能融合水平的竞争。本专题从总体设计方法、新型平台构型、结构安全性、推进与控制、感知与对接等不同的角度,呈现了当前该领域的研究进展,也反映出仿生创新、智能控制、极端环境适应等方向正在成为新的研究热点。期望本专题能够推动水下无人系统总体设计在理论深度与工程实效上的持续进步,为广大从事水下无人系统研究、船舶工程设计及相关交叉学科的科研人员提供有益的参考,助力我国水下无人装备技术创新发展,为海洋强国建设贡献坚实的力量。



潘光

潘光

西北工业大学



严浙平

严浙平

哈尔滨工程大学