

1 概 论

1.1 引言

海洋约占地球表面积的四分之三,孕育无数生命,调节全球生态,提供丰富资源,对人类的生存发展具有至关重要的意义。我国不仅是陆地大国,亦是海洋大国,大陆海岸线总长约 1.8 万 km,海域面积约 473 万 km²,海洋渔业、矿产、油气、旅游资源丰富充盈。同时,我国与日本、韩国及南海诸国存在较多领海争议,围绕海洋空间与资源的竞争愈演愈烈。如何保护我国海洋、合理开发利用海洋资源是功在当代、利在千秋的重大课题。党的二十大报告明确提出^[1]:“发展海洋经济,保护海洋生态环境,加快建设海洋强国。”而无人水下航行器(unmanned underwater vehicle,UUV)作为一种高新技术运载工具,正是认识海洋和经略海洋过程中不可替代的坚强利器,更是支撑我国建设海洋强国的重要装备^[2]。

相比有人水下航行器,UUV 具有隐蔽性好、风险性低、智能性高、可回收等特点,在遂行任务过程中扮演前置探测、通信节点、投送平台、攻击武器等多种角色。随着人类开发海洋的步伐逐渐加快,UUV 在海洋勘探、环境监测、水下考古、反潜作业、水下侦察等领域发挥着越来越重要的作用。为此,结构和功能各异的 UUV 相继研制成功,有效集成探测识别、信息融合、智能控制等多种技术,能够自主规划、控制、决策和完成复杂海洋环境中的任务使命。按照操作方式不同 UUV 可分为遥控式和自主式两种作业模式。遥控式无人水下航行器

(remote operated vehicle, ROV)需要由操作人员通过电缆或无线通信手段进行远程操控和监测。这种方式适合长期开展海洋环境调查、生物多样性调查、深海极端环境探测和深海矿产资源调查等科考工作。自主式无人水下航行器 (autonomous underwater vehicle, AUV)没有接到母船的电缆和外部操作人员,而是依靠控制器程序自主感知、决策和执行任务。

根据运动机理和应用需求,AUV又演化出水下滑翔机 (underwater glider, UG)和仿生水下机器人 (bionic underwater robot, BUR)。UG通过内部和鱼鳔工作原理相似的浮力调整机构调节浮力和重力差,低能耗和低噪声性能突出,可实现水下长时间连续性工作。这种方式适合在远程、恶劣环境或需要高精度自主能力的情况下执行任务。BUR通过学习海洋生物的形态结构与运动机理,使UUV具有推进效率高、尾迹特征小及机动性好等特点,大致可以分为仿生机器鱼、仿生机器水母和仿生两栖机器人^[3]。仿生机器鱼采用体/尾鳍 (body and/or caudal fin, BCF)推进模式或中央鳍/反鳍 (median and/or paired fin, MPF)推进模式实现UUV高机动、高效率、高速度及低扰动的运动。仿生机器水母则利用外伞和内伞的收缩与舒张来实现UUV的运动。仿生两栖机器人包括腿足式、蛇形和球形两栖机器人,兼具陆地和水下环境中的运动功能,运动原理各不相同但各具优点。

根据美国海军对无人潜航器划分标准,无人水下航行器根据尺寸与质量大小可分为巨型、大型、中型和微小型UUV^[4]。由于巨型、大型、中型UUV开发周期长且造价成本昂贵,微小型UUV在科研、商业和军事上表现出旺盛的生命力,具有体积小、质量轻,便于存储、布放和回收,可以遂行多样任务等诸多优势^[5-6]。得益于材料、能源、控制、计算机等技术日新月异的发展,微小型UUV已成为无人水下系统技术研究的前沿^[7]。同时,随着海洋应用设备体积功耗不断减小,摄像机、侧扫声呐、多波束声呐、水质仪、荧光计、浊度计等多种传感器也适合搭载于微小型UUV上。这些模块化、可扩展的设备又促进了微小型UUV的发展及其智能化水平的显著提升^[8-10]。

由于海洋环境的复杂性和应用场景的多样性,微小型UUV的探测、感知、

能源受限,其携带载荷单一,单体执行任务能力有限。而微小型 UUV 集群是一种由几十台、上百台甚至上千台微小型 UUV 组成,可通过飞机空投、舰艇发射或岸基布放,可长时间在水下自主航行的无人系统,具有数量多、隐蔽性强、集群智能等独特优势^[11-13]。作为一种颠覆性技术,微小型 UUV 集群吸引了各国的目光^[14-15]。新一代人工智能相关技术,如物联网、云计算、大数据、深度学习、机器学习、自主计算等技术也将大幅度提升微小型 UUV 集群智能水平^[3],助力高效率完成广域信息收集、环境监测、覆盖搜索、侦察监视、识别跟踪、巡逻围捕等各类枯燥、恶劣和危险任务^[16-17]。

微小型 UUV 集群作为新型水下装备,与多变的水下环境和繁杂的应用场景等要素构成复杂的无人水下集群系统,向着 UUV 集群的智能化和协同化方向发展^[18-19],这也对 UUV 集群智能感知与协同控制的建模理论方法研究提出了更高的要求。然而,已有多智能体(multi-agents, MAS)建模理论方法缺少对系统结构与协调机制紧耦合关系的考虑,缺乏复杂环境条件下协调过程与动态演化的交互行为分析,忽视分布式仿真支撑系统对协调机制建模精度分析的重要性。同时,与地面和空间环境相比,水下环境更为复杂、动态、不可控,因此地面和空间多智能体的集群协同理论无法直接应用于微小型 UUV 集群^[20]。随着科学技术的发展,可利用全球定位系统(global positioning system, GPS)定位、视频分析、声呐成像等高质量观测技术挖掘更为细致的仿生集群交互机制^[21-22],例如拓扑交互、视觉引导、免疫网络等,这为提升集群自主协同能力提供了新的设计思想和控制理念。

本书聚焦微小型无人水下航行器集群协同理论,从复杂系统建模与仿真研究入手,阐述免疫智能体交互网络的建模新理论,同时从个体智能与群体协同的角度给出多层次混合式免疫智能体结构的 UUV 智能性建模、约束条件下自适应动态的群体协同性建模,以及免疫智能体交互网络框架下的信息融合等方法,并基于 NetLogo 仿真平台构建分布式仿真系统进行应用研究。

1.2 微小型 UUV 集群

微小型 UUV 根据工作模式可以划分为单体模式和集群模式。单体模式虽然具有隐蔽性强、灵活性好、环境适应性强等特点,但是其能源、探测、通信能力的受限不容忽视。而集群模式不仅可以弥补上述受限问题,还能发挥集群分布性、鲁棒性和容错性等优势,已经在世界海洋工程领域引起广泛关注。

1.2.1 单体模式

关于微小型 UUV 的定义国际上没有统一的标准,通常是指体积小、质量轻,具备自主水下航行能力的无人机器人,可用于执行各种水下任务。从广义上来说,这种定义涵盖了各种大小和类型的微小型水下机器人。总的来说,其主要性能指标可概括为:直径 0.2m 左右,长度 2m 左右,质量 50kg 左右,最大续航能力达到 12h 以上。美国微小型 UUV 技术处于国际领先水平,已研制出多款系统并进行了大规模应用。

Bluefin-9(图 1-1)是美国 Bluefin 公司推出的小型无人航行器^[23],直径 0.24m,长度 1.75m,质量 60.5kg,续航时间 12h,最大下潜深度 200m,采用 GPS 导航,精度为 0.3%。它可遂行海洋调查、水下环境监测、反水雷、情报监视和侦察等多种任务。

Riptide(图 1-2)无人水下航行器是美国 Riptide 公司推出的微小型 UUV,直径 0.12m,长度约 1m,质量 9.98kg,最大下潜深度 300m。这是一款新型的、高度灵活的、开源的自主航行器^[24]。它可遂行情报侦察、超浅水域反水雷、反恐防卫等多种任务。



图 1-1 Bluefin-9



图 1-2 Riptide

REMUS 100(图 1-3)是由美国 UUV 制造商 Hydroid 公司为沿海 100 米深度左右的工作环境研发的一种轻型无人航行器,最大直径 0.19m,长度 1.32m,质量约 37kg,最大下潜深度 100m,其传感器可搜集 3~150m 水深中的声呐信号和环境数据,最大航深 60m。它可遂行港口巡逻、反水雷、打捞与救援、环境监测及近海资源勘探等多种任务。

SEAScout(图 1-4)无人水下航行器是美国 QinetiQ North America 公司研制的一款微型 UUV^[25],具有可重配置的有效载荷能力,直径约 0.12m,长度约 0.25m,最大下潜深度 200m,采用 GPS、9 轴惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)、深度传感器组成导航系统。它可遂行诱饵、信息中继、数据采集、情报侦察等多种海上任务。

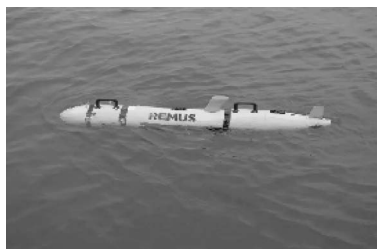


图 1-3 REMUS 100



图 1-4 SEAScout

Seabed 无人水下航行器是美国伍兹霍尔海洋研究所专为深海海底探测与成像研制^[26]。不同于其他 UUV 的鱼雷体结构,它采用双体结构并搭配四个推

进器,如图 1-5 所示,可应用于极地科考、海洋生物考察、深渊地质探测和 underwater 考古。

Seaglider 滑翔机(图 1-6)是美国华盛顿大学应用物理实验室研制成功的无人水下航行器^[27],不同于传统的“螺旋桨+操纵舵”的推进模式,它通过改变自身浮力来实现上升和下潜,利用海洋中的垂直海流和浮力变化来滑翔,直径约 0.3m,长度 0.18~2m,质量约 52kg,最大下潜深度 1000m,最大航程 4600km,体积变化 850mL,续航时间 2 个月。它可遂行海洋科学研究、气候变化研究、海洋资源管理、环境监测等任务。



图 1-5 Seabed



图 1-6 Seaglider 滑翔机

Robotuna(图 1-7)是美国麻省理工学院成功研制的世界上第一条真正意义上的水下仿生机器鱼^[28],采用 BCF 推进模式,长约 1.2m,质量 68kg,最高速度为 1.6m/s,续航时间 20h。这款机器人的设计初衷是用于海洋探测,它的外形和游动方式与真实的金枪鱼非常相似,可以在不被发现的情况下接近水下生物并进行近距离观察。它可应用于海洋科学研究、海洋牧场检测等领域。

国外其他科研单位与公司也研制了相关的微小型 UUV 系统。例如,日本 Yumeiruka 水下机器人采用自主式和声控式两种运行方式^[29],其前后均采用 X 型控制舵,使机器人在高速情况下也能迅速改变航向,如图 1-8 所示。法国 SeaExplorer 滑翔机^[30]是 ALSEAMAR 公司研制的用于测量水下流速的微小型潜航器,最大下潜深度 1000m,如图 1-9 所示。欧盟 SHOAL 仿生金枪鱼^[31]主要用于水质污染监测,长度约 1.5m,已在西班牙港口进行了测试,如图 1-10 所示。荷兰 Galatea 仿生波动鳍推进水下机器人^[32]是由代尔夫特理工大学研

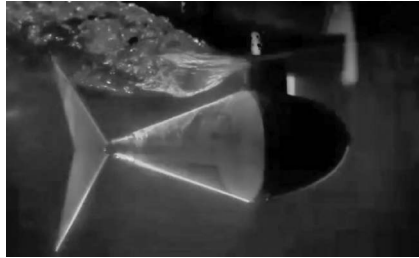


图 1-7 Robotuna

制,不同于大多数 BCF 推进的 BUR,其采用 MPF 模式,通过以凸轮摆臂为核心的仿生波动鳍推进机构驱动鳍条,带动柔性鳍面产生连续波状变形,并与水相互作用产生前进推力,配合中部的沉浮调节机构,可实现水下机器人的多维度运动,如图 1-11 所示。



图 1-8 日本 Yumeiruka 水下机器人



图 1-9 法国 SeaExplorer 滑翔机



图 1-10 欧盟 SHOAL 仿生金枪鱼

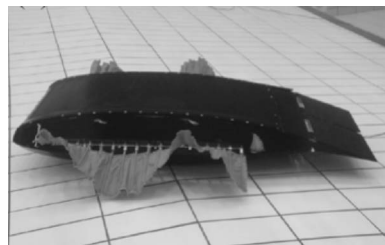


图 1-11 荷兰 Galatea 仿生波动鳍推进水下机器人

在国内,“海鳗号”便携式自主水下航行器(图 1-12)由西北工业大学联合多家单位研制^[33],直径 0.2m,长度 1.8~2.2m,质量 50~60kg,最大工作水深

100m,巡航速度 3~5kn,最大续航能力达到 12h 以上。它可遂行水文调查、地图测绘、水污染调查、水下考古等民用领域的工作任务,也在水下侦察、战场数据收集、水下反水雷等军用领域有广阔的应用前景。

“海燕号”水下滑翔机(图 1-13)是天津大学自主研发的一款融合浮力驱动与螺旋桨推进技术的水下滑翔机^[34],直径 0.3m,长度 1.8m,质量 70kg,最大工作水深 1500m,最大航程 1000km,可持续不间断工作 30 天左右,具备独立在水下全天候工作的能力。它可应用于海洋生物调查、环境监测、灾害预警、军事侦察、反潜等领域。



图 1-12 海鳗号



图 1-13 海燕号

SPC 系列仿生机器鱼(图 1-14)是由北京航空航天大学研制成功的。其中,2004 年研制成功的 SPC-II 是中国第一条具有实际应用的仿生机器鱼^[35],体长 1.23m,转向角速度 $30(^{\circ}/s)$,续航 2~3h。SPC-III 体长 1.76m,最大游速可达 1.36m/s,尾部采用四连杆并联结构,均由 150W 直流电机驱动。在太湖水质检测实验中,单次续航 13h,航程达到 49km。此外,文力等人研制了仿生鲫鱼软体吸盘机器人^[36]。该机器人本质上是一种跨水空的无人航行器,如图 1-15 所示,可用于水下考古、探查狭窄水道、渔业养殖和捕捞,也可作为水下微小型运载工具,在抢险搜救等工作中发挥重要作用。

此外,国内其他科研单位也对微小型 UUV 开展了相应研究。中国科学院沈阳自动化研究所研制了“探索 100”便携式 AUV 和“海翼”UG^[37],并顺利进行了湖上试验,如图 1-16 所示。中国科学院自动化研究所吴正兴等人以北美狗



图 1-14 SPC 系列



图 1-15 仿生鲫鱼软体吸盘机器人

鱼和海豚为研究对象,研制了高机动机器狗鱼和水质监测机器海豚^[38],如图 1-17 和图 1-18 所示。哈尔滨工业大学以霞水母为研究对象,研制了机械驱动的仿生水母样机^[39],最大推进速度为 0.12m/s,如图 1-19 所示。



图 1-16 “探索 100”便携式 AUV 和“海翼”UG

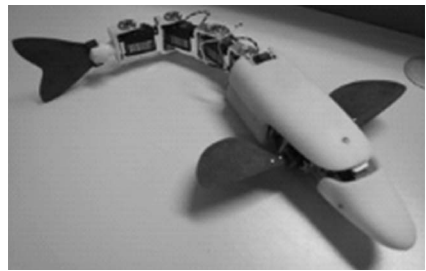


图 1-17 高机动机器狗鱼



图 1-18 水质监测机器海豚



图 1-19 仿生水母样机

1.2.2 集群模式

微小型 UUV 集群是由几十台、上百台甚至上千台微小型 UUV 组成的智能无人系统。相比于单体模式,其具有数量多、隐蔽性强、扩展性好、集群智能等独特优势,而且可与其他潜水器、水面船、无人机、卫星等无人系统构成立体网络,不仅在民用领域应用广泛,也在军事应用中作为“力量倍增器”越来越受到重视。下面介绍几种典型的微小型 UUV 集群系统。

SwarmDiver 项目是美国 Aquabotix 公司开发的水下微小无人机集群^[40],其中个体长度为 0.75m,质量为 1.7kg,能达到的水下深度为 50m,最大航速为 2.2m/s,最大运行时间为 2.5h,搭载有温度和压力传感器,单个售价 1000~10 000 美元不等,能以 40 个以上个体的集群模式工作,如图 1-20 所示。该水下微小无人机集群可用于环境监测、港口管理、预留追踪以及军事用途。

微型自主水下探险者(Miniature Autonomous Underwater Explorer, M-AUE)项目是美国加州大学 2017 年报道的水下微小无人机集群^[41]。M-AUE 上安装了浮力控制装置用于控制深度,同时还搭载了温度、压力、水声传感器、发光 LED、GPS 天线、RF 信标等装置,如图 1-21 所示。集群可模仿海洋浮游生物的行为,在海底三维空间内采集温度信息,为研究洋流对浮游生物生存状况的影响提供参考。



图 1-20 SwarmDiver

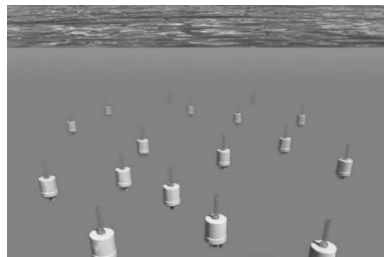


图 1-21 M-AUE

集体认知机器人(Collective Cognitive Robotics, CoCoRo)项目是 2015 年