

自主式水下机器人控制技术研究综述^{*}

王永鼎¹ 王 鹏^{*,1} 孙鹏飞²

(1. 上海海洋大学工程学院, 上海 201306;

2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

摘 要:自主式水下机器人(AUV)是海洋资源勘探和开发的重要工具,AUV 先进的导航与控制、通信、传感器和其他技术使得人类在认识海洋上取得了大的飞跃。控制系统是构成水下机器人的核心部件,同时也是决定水下机器人工作状态是否稳定与可靠的关键。本文首先对国内外自主式水下机器人的发展进程和研究现状进行归纳与分析,介绍了水下机器人控制技术,总结造成水下机器人不易控制的成因,并针对应用于水下机器人的主要控制技术展开系统论述。然后简述几种主要控制方法的基本原理,同时进一步对水下机器人的运动控制进行具体剖析,为合理选用水下机器人运动控制方法、设计相应控制器与构建控制系统提供了一定的参照依据。最后展望持续进步的自主式水下机器人研制技术在未来海洋开发领域的应用前景。

关键词:自主式;水下机器人;控制技术;控制系统

DOI:10.16507/j.issn.1006-6055.2021.01.004

Review on Research of Control Technology of Autonomous Underwater Vehicle^{*}

WANG Yongding¹ WANG Peng^{*,1} SUN Pengfei²

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Autonomous underwater vehicles (AUV) are important tools for exploration and development of Marine resources. AUV's advanced navigation and control, communications, sensors and other technologies have enabled humans to make a big leap in understanding the ocean. The control system is the core component of the underwater vehicle, which is also the key to determine whether the working state of the underwater vehicles are stable and reliable. The paper summarizes and analyzes the development process and research status of AUV at home and abroad, introduces the control technology of AUV and summarizes the causes of the difficult control of AUV. The main control technologies of AUV are systematically discussed, and the basic principles of several main control methods are briefly introduced. At the same time, the motion control of AUV are further analyzed in detail, which can provide some certain references for the selection of the operation control methods, the design of the corresponding controllers and the construction of the control system for underwater vehicle. Finally, the potential application of the continuous advancement of AUV's development technology in the future marine development field is prospected.

Keywords: Autonomous; Underwater Vehicle; Control Technology; Control System

^{*} 上海市科技兴农重点攻关项目“标准化池塘养殖水质改良关键设备研发与优化”(沪农科攻字(2014)第6-3号)

^{**} E-mail: wp2529sx@163.com; Tel: 18616832529

21 世纪以来,人类对神秘海洋的认识和探索不断加深,水下作业装备对海洋资源的开发与利用的支撑作用日益凸显。水下机器人作为一种有效的深海探测装置已成为开发认识海洋的重要工具,具有机动灵活、续航时间长的显著优点。研制水下机器人并将其应用于海洋关键领域的重要性和战略意义不言而喻。其关键技术的开发代表了先进机器人技术在水下这一特定领域的应用实践和对机械、结构、材料、能源、流体、计算机控制等多种前沿技术的综合运用能力,一个国家的综合科技实力也很好地展现在类似于水下机器人等新型科技产品的研制水平上。

当今水下机器人种类繁多,用途多样。具有水下观测考察和作业用途的水下机器人依据功能可分为探险型和作业型,依据是否配备载人舱又可分为无人水下机器人(Unmanned Underwater Vehicles, UUV)和载人水下机器人(Human Operated Vehicles, HOV),二者功能相辅、各具特点,通常在完成某些特定任务时需要联合作业,在某些故障和意外情况发生时需要彼此救援,因此,载人与无人水下机器人在用途上密不可分。无人水下机器人依据母船与艇体间是否有脐带电缆又可分为遥控水下机器人(Remotely Operated Vehicles, ROV)和自治水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)。ROV 与水面母船之间利用脐带电缆连接,脐带电缆既由母船向艇体正向输送动力和控制信号,又由艇体至母船反向实时输送图像数据。而 AUV 与母船之间则无脐带电缆连接,它通过艇体配备的动力源以及自身的智能自主航行。

较之于 ROV, AUV 具有一系列显著优势,其活动范围广、下潜深度大、无脐带电缆纠缠、机动灵活性好、无需水面支持系统、体积小、便于维修

保养等。AUV 应用领域较为多样,在军用领域主要可用于地形测绘、水下施工、后勤增援、巡逻侦察、情报搜集、反潜战和水雷战等,因而世界各国为了增强国防实力的现实需要,皆争相致力研究先进的 AUV 系统。在民用领域, AUV 普遍用于海事救援、海底光缆铺设与保养、海底矿产勘探和海洋生物研究、海洋环境科考及海洋考古等。由于受相关技术发展水平的制约,目前 AUV 相比于 ROV 还有较大发展空间。AUV 不仅在海洋探索领域具有广泛应用,同时在池塘水质改良中也发挥着十分关键的作用,尤其体现在艇体可搭载传感装置对标准化池塘各区域水体变化进行实时监测和相关信息采集的工程意义明显。本文归纳分析了自主式水下机器人的研究现状,介绍了国内外具有较强代表性的相关研究部门及其典型 AUV 产品,并对主要的自主式水下机器人控制技术进行系统论述,同时对其在 AUV 控制上的相关工程应用进行较为全面的分析与研究。

1 自主式水下机器人研究现状与对比分析

水下机器人的研究最早可以追溯到 1554 年意大利人塔尔奇利亚发明制造的木质球形潜水器,至今已经有四百多年的历史。而世界上第一艘用于水文调查的自主式水下机器人(Self Propelled Underwater Research Vehicles, SPURV)于上世纪五十年代末在美国华盛顿大学应用物理实验室诞生,随后到六十年代中期各国学者纷纷将目光投向自主式水下机器人,然而受当时相关技术的制约,自主式水下机器人的研发进展一直徘徊不前。经历了初创时期和探索时期,直至 20 世纪 80 年代后期,由于控制领域和计算机领域相关技术的大幅进步,智能水下机器人技术开始蓬

勃发展,许多临海国家尤其是西方国家都竞相致力于研发智能水下机器人技术和产品^[1,2]。美国、英国、德国、法国、俄罗斯、澳大利亚、加拿大、日本以及中国等国家,均成立了专门研究机构或者在高校建立相应实验室研究水下机器人技术。进入 20 世纪 90 年代以来,自主式水下机器人的研发进展更是迎来了迅速发展时期,并随着水下自治机器人应用范围的不断拓宽逐渐形成系列产品。

1.1 国内外研究现状

AUV 依赖自身智能和配备的能源自主航行,具有活动范围广和高度智能化等特点。当下各国研制的 AUV 型号繁多,极具代表性的有美国海军研究所设计的 Bluefin 系列和 Hydroid 公司生产的 REMUS 系列、英国南安普顿国家海洋中心开发的 Autosub 系列和 BEA 系统公司水下系统部研制的 Tailsman 系列、法国 ECA 公司研发的 Alister 系列、德国 ATLAS 集团的 ATLAS MARIDAN 公司研制的 Sea Otter MK 系列、加拿大国际水下工程公司研制的 ISE Expolorer 系列、挪威 Kongsberg Maritime 公司研制的 Hugin 系列、丹麦研制的 Maridan 系列等^[2]。其中知名的水下机器人由美国伍兹霍尔海洋研究所内海洋系统实验室设计开发,Hydroid 公司加工制造的(Remote Environment Monitoring UnitS, REMUS) 系列水下机器人, REMUS-100 水下机器人被美英海军频繁地使用在执行濒海的反水雷任务中。该研究所同时研制出其余同系列水下机器人,如 REMUS-TIV、REMUS-600 以及 REMUS-6000 等^[3]。

在澳大利亚国防科学技术组织制定的“纳夫松”计划的有序推进下,与该计划密切相关的 Wayamba 号无人潜航器研制任务在皇家海军的要求下被澳大利亚国防科学技术研究院顺利完

成。该型潜航器艇体尺寸参数为:总长 3 m、宽 1.6 m、重 900 kg,设计航速 6 kn,实验潜深 250 m,有效载荷 100 kg。载有前视声纳、双频扫描声纳、彩色和黑白摄像机、GPS 接收器、高度计、罗盘、惯导装置等传感器^[4]。Wayamba 号采用模块化设计和分布式控制系统,具备航行机动灵活、活动范围广、导航和定位精度高,可适应高海况环境,通信能力可靠等优良的技术性能^[5]。主要用于承担水下研究、部署、通信、探测和 underwater 环境评估等任务。

日本东京大学工业科学研究所研制了 r2D4、TEROA150&250、Twin-Burger1&2 和 Tri-Dogl 等不同型号的观测型 AUV,主要应用于海底电缆布设和维护施工情况的实时监测。这些机器人在进行海底勘测实验活动中,得到了清晰的侧扫图像并在印度洋海底发现了世界最大熔岩平原,对海洋资源勘查以及海洋地质研究等方面具有重要意义^[6,7]。艇体形似鱼雷的自主式水下无人航行器 OKPL-6000 由韩国 Daewoo 重工业公司的船舶海洋研究所与俄罗斯海洋研究所协作共同研发,主要用于海底探测、搜寻海底沉没物与执行相关海洋科学考察任务等^[8]。

我国对自主式水下机器人的研究工作始于上世纪八十年代,其中处于国内领先水平、研发进程已进入实质性试验环节的研究单位主要有:中国科学院沈阳自动化所、哈尔滨工程大学、中船重工 710 所、上海交通大学、浙江大学、西北工业大学和天津大学^[9]等。

中国的首艘自主式水下机器人为“探索者”号 AUV,问世于 20 世纪 90 年代中期,其最大潜深 1000 米,由中国科学院沈阳自动化所、中国船舶总公司 702 所、中国科学院声学研究所、哈尔滨工程大学和上海交通大学等若干单位联合设计研

制。中国科学院沈阳自动化所于 1992 年联合其他相关单位进一步开展了自主式水下机器人的研制工作,利用引进俄罗斯的技术,先后成功研制出“CR-01”和“CR-02”型 6000 米级 AUV。此后,凭借自身掌握的开发技术和经验,又研制出“潜龙系列”探测型 AUV,并成功进行海试,同时应用于深海资源勘查任务。2011 年后中国构建了“探索系列”和“潜龙系列”两大 AUV 技术体系,分别应用于海洋科学研究和海洋资源勘查这两大主要领域。

中船重工 710 所研制出具有代表性的 HD 系列水下机器人。HD 系列水下机器人工作水域宽泛同时适用于高海流和大水深环境。该系列 AUV 可进行三维全自由度空间运动且配备高精度水下定位系统和近、中距离声纳和电视、可搭载多种水下作业机械手广泛应用于水下搜救、打捞作业、海洋考古、堤坝与海床地质地貌勘查、海洋环境探测等工程领域。HD1 型 AUV 具有三维机动性,续航时长 4 h,其最大潜深 300 m,最大直航航速 7.5 kn,抗流航行能力 3~4 kn,探测距离 100 m,识别距离 50 m,外形尺寸(长×宽×高):3.14×1.2×0.8 m,重量 700 kg^[10-13]。

哈尔滨工程大学水下机器人技术国防科技重点实验室成功研制出一种鱼雷形智能水下机器人。该智能 AUV 具有五自由度运动能力,无法实现横滚运动。其最大的创新在于采用密封舱和艇体进水的设计理念。密封舱材质为玻璃钢材料,可经受水深 100 米压力,其位于艇体上方。舱内设备通过防水接插装置与舱外设备连接。艇体材质选用较轻的碳纤维材料,AUV 水下航行时艇体内外水压平衡。在整个艇体下侧挂载了两个电池仓,仓体材质选用有机玻璃,分别向艇体提供设备电和动力电^[14-19]。

1.2 典型产品对比分析

我国自主式水下机器人经过 30 多年的不懈探索,已经取得了丰硕的成果,同时积累了较为完备的 AUV 全流程研发经验。也产出许多处于世界先进水平、具有代表性的典型 AUV。但在装备的智能化、续航能力和核心部件制造方面仍有不足,在技术总体上也不如一些起步较早的国家成熟,有待于创新驱动进一步提升在自主式水下机器人关键技术领域的研发能力。尤其是对于开发具有军事作战用途的远程自主航行和长续航能力的高智能作业型 AUV 的研发技术才初步形成,更要加大力度攻关相关技术方面的难点,才能在较短时间内缩小与西方海洋强国的技术差距。要充分利用我国的相关技术和人才,群策群力,在材料、能源、导航、水声通讯、控制技术、传感器技术和人工智能等核心关键技术领域力争有所突破,注重学科交叉研究,加强相关技术在 AUV 研制过程中的集成和融合,对研制开发特定领域的 AUV 模块化和标准化积极促成统一方案。加强交流合作,对各研制单位所开发产品间的兼容性和彼此集群协同作业能力方面的信息共享和任务分配等工程应用要在开发初期进行设计。相关部门和研究机构要依据行业需求和现实需要制定好发展规划和研发计划,进一步加快自主式水下机器人谱系化研发进程和产业化进程。在 AUV 配套核心部件与专用设备生产上要形成专门研究机构和制造产业,丰富国内相关配套市场,促进研发进度,确保自主式水下机器人专用相关设备的生产不落后来于设计研发和总体集成。同时也要加强对自主式水下机器人在突发状况下的应急自救和故障诊断相关技术的研究,这也是提高 AUV 在态势感知、环境交互和决策规划三方面自主能力的关键。随着专业研发团队的不断扩大和相关领

表 1 国内外典型 AUV 一览表

Tab. 1 Typical AUV at Home and Abroad

型号	工作水深/m	航速/kn	续航能力/h	质量/kg	国家
Bluefin 系列	200/300/1500/4500	3 ~ 5	12 ~ 30	50 ~ 750	美国
REMUS 系列	100/1500/3000/6000	1 ~ 5	24 ~ 85	37 ~ 862	美国
Wayamba	250	6	—	900	澳大利亚
r2D4	4000	3	12	1630	日本
OKPL-6000	6000	3	10	980	韩国
AutoSub 系列	6000	1 ~ 5	36 ~ 70	1800 ~ 2800	英国
Tailsman 系列	300 ~ 6000	1 ~ 5	12 ~ 24	50 ~ 1800	英国
Alister 系列	100 ~ 3000	2 ~ 5	15 ~ 30	50 ~ 1000	法国
ISE Expolorer 系列	300 ~ 6000	3 ~ 5	24	640 ~ 1850	加拿大
Sea Otter MK 系列	600	4 ~ 8	24	1100 ~ 1500	德国
DeepC	4000	1 ~ 8	60	2000	德国
Hugin 系列	600 ~ 6000	2 ~ 6	18 ~ 60	600 ~ 1900	挪威
MT-88	6000	2	6	1150	俄罗斯
CR-01/CR-02	6000	2.3	10 ~ 25	640 ~ 1850	中国
“探索”系列	100/800/4500	2 ~ 5	20	1200 ~ 15000	中国
“潜龙”系列	4500/6000	2 ~ 3	30 ~ 43	1500 ~ 15000	中国
HD 系列	300	5 ~ 7.5	4	700 ~ 1500	中国
海灵	1000	2 ~ 5	36	380	中国
橙鲨	2000	3 ~ 8	36	1400	中国

域技术的进步,我国在未来研制自主式水下机器人的能力必定会不断增强。表 1 列出了国内外典型 AUV 及其性能对比情况。

2 自主式水下机器人控制技术

控制技术作为水下机器人研究工作中最为关键的技术问题之一,历来都是备受国内外专家学者密切关注的焦点。由于水下机器人在水中运动,工作环境相比于陆地上机器人差异明显,水下机器人的运动工况和控制特性自然也大不相同,不仅要保证控制的稳定性,而且还要保证足够的控制精度和效率。水下机器人控制技术的研究方向主要集中在以下几个方面:控制系统体系结构的构建、动力学建模与模型的合理简化及相关参数的优化、运动控制算法、导航策略、路径规划、避障和编队等^[20-24]。由于水下机器人工作环境具有未知性,水下机器人控制问题向来是一个难点,参考国内外专家研究总结^[25-30],造成

其不易控制的主要原因有:

- 1) 水下机器人运动具有强非线性、耦合性和时变性等特点。
- 2) 机器人在水中运动时,实时获取精确的水动力系数十分困难。
- 3) 流体环境中的实际运动对于流体密度和粘性变化较敏感。
- 4) 海流干扰明显。
- 5) 负载的变化导致重心和浮心发生偏移。
- 6) 在不同的应用场合,水下机器人结构和形状有所不同,对应流体动力响应也会产生差异,相应控制方法及其效果不尽一致。

2.1 水下机器人控制方法概述

水下机器人能否完成预定任务的先决条件是能否对艇体的运动和位姿进行有效控制,国内外专家学者对水下机器人控制技术的研究也聚焦于此。由于水下机器人应用领域趋于多样化,

在控制技术上对其运动控制的精度、可靠性及响应的快速性与功能的自主性和智能化方面也提出更高要求,如何提升其运动控制性能成为研究的一个关键所在。而水下机器人运动的典型特征是强非线性、水动力性能的时变性及不同自由度间运动的耦合性。水下机器人的精确数学模型通常不易获取,因而在水下机器人的控制问题上,不依赖于数学模型的控制方法应用潜力巨大。当前,国内外相关研究机构结合控制理论在水下航行器控制中的应用研究,关于水下机器人的控制方法主要涉及滑模变结构控制、模糊控制、自适应控制、神经网络控制、专家控制、PID 控制、S 面控制等。同时还有衡量以上各自控制方法优势与不足,为了弥补单一控制方法自身缺陷将多种控制方法加以综合应用的混合控制方法,如模糊滑模变结构控制、自适应滑模变结构控制、自适应神经网络控制、模糊神经网络控制、神经网络滑模变结构控制等^[31-34]。在工程实际中为了达到较好的控制效果则往往采用两种甚至两种以上控制方法相结合的控制策略。

2.2 水下机器人主要控制方法

上一节水下机器人控制方法概述中给出了七种单一的水下机器人主要控制方法,下面将逐一对这些方法的原理以及相关控制机理进行简介。

1) 滑模变结构控制

滑模变结构控制是一类特殊的变结构控制,最为显著的特征表现为控制的非连续性。该种控制策略下控制器结构的切换是依据系统当前状态偏离滑动模态的程度来实现的,控制器切换后系统将在控制律的作用下遵照预定滑动模态的规律运行。其控制机理为根据系统所期望的动态特性来进行系统切换面的设计和切换函数

的选取,进而设计对应滑动模态控制器并确保系统状态收敛于切换面,系统状态收敛至切换面后将在控制作用下沿切换面滑动至系统原点。极点配置法、特征向量配置法、最优化设计方法等是常用的切换面设计方法;而滑动模态控制器的设计方法通常有固定顺序控制器设计、自由顺序控制器设计和最终滑动控制器设计等^[35,36]。滑模变结构控制独立于系统精确的数学模型之外进行控制且在多输入多输出的非线性系统控制的应用中体现出优良的控制性能。因此,滑模变结构控制对水下机器人这种强非线性、时变性和对外界扰动敏感的运动控制问题具有较大的应用潜力。

2) 模糊控制

模糊控制的基本思想是利用计算机来实现人的控制经验,是一种以模糊集合论、模糊语言变量和模糊逻辑推理为基础的智能控制技术。模糊控制不仅理论成体系,而且也兼具大量应用背景。模糊控制器的设计包括定义变量、模糊化处理、建立知识库、确立模糊规则和反模糊化这一系列步骤,其中定义变量为确定模糊控制器的输入输出变量并进行对应尺度归一化处理;模糊化处理即明确各变量的模糊语言取值及隶属函数;建立知识库为确立经模糊处理变量后得到的数据库和根据人工经验获得的模糊规则库;确立模糊规则为模拟人工判断时的模糊概念,基于模糊逻辑和模糊推论法进行推理,得到符合要求的模糊控制信号;反模糊化为使获得的模糊信号转化为系统可识别的信号,将其当作系统输出^[37]。模糊控制在机器人控制领域应用广泛,也较适用于水下机器人的控制。

3) 自适应控制

自适应控制是一种能感知环境变化并智能

调节自身特性使得系统在设定标准下工作状态最佳的控制方法,其广泛用于航空、航海和军事等关键领域。自适应控制器相比于经典控制器而言,最突出的特点为系统自身参数并不是一成不变的,而是依据输入输出数据变化,通过持续的在线辨识来优化自身系统参数,进而达到理想工作状态。自适应控制可大致分为模型参考自适应控制方法和自校正方法两种^[38,39]。由于自适应控制器能增强系统对外界干扰和机器人自身动力学特性变化的适应性,所以自适应控制十分适用于水下机器人这种工作环境复杂多变的控制对象。

4)神经网络控制

神经网络控制是一种基于人工神经网络对复杂非线性被控对象进行控制的策略。该控制策略是在现代神经生物学和认识科学对人类信息处理研究的基础上形成的,人工神经网络不但可以模拟生物神经网络行为特征处理指定信息而且还具有自学习和自适应的能力。将人工神经网络应用于控制领域,是控制理论不断丰富发展的有力体现,神经网络控制的发展与形成也是控制理论向智能化迈进的重要产物。神经网络控制在处理强非线性和严重不确定性多变量系统的控制问题方面具有很大潜力^[40]。

5)专家控制

专家控制能够利用人类专家的知识和解决问题的经验方法来解决控制领域的相关难题,是一类可以在陌生环境条件下仿效专家智能对系统进行控制并使得过程控制达到专家级水准的计算机智能控制方法。专家控制器的设计关键在于知识库的构建与推理机制的确立,依据控制器在系统中的作用与功能,将专家控制器划为直接型专家控制器和间接型专家控制器两类。直

接型专家控制器依靠相应反馈信息及知识库中的规则对系统进行直接控制,常适用于高度非线性或过程难以描述的系统控制问题^[40]。间接型专家控制器通常和传统控制器组合使用,能够实现优化适应、协调组织等高层决策的功能。

6)PID 控制

PID 控制作为最早发展起来的经典控制策略之一,距今已有 108 年历史。其控制机理为依据给定值与实际输出值构成控制偏差,对偏差 (Error) 进行相应的比例 (Proportional)、积分 (Integral) 和微分 (Derivative) 运算并加以线性组合构成控制量,进而作用于被控对象。作为线性控制器的 PID 控制器,已经被广泛应用于各种工业过程控制^[41],在自主式水下机器人运动控制器的设计中仍大量选用。相应控制方程为:

$$\begin{aligned} u(t) &= K_p \left[E(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t E(t) dt + T_d \frac{dE(t)}{dt} \right] \\ &= K_p E(t) + K_i \int_0^t E(t) dt + T_d \frac{dE(t)}{dt} \end{aligned} \tag{1}$$

传统 PID 控制在应用中存在静态误差与动态响应间难以调和的矛盾,比例控制环节动态响应迅速,但存在静态误差;积分控制环节虽可以消除稳态误差,但动态响应迟缓^[17]。因此,为了取得良好的控制效果,工程应用中单独选用传统 PID 控制较少,大多是选用 PID 与其他控制方法联合的混合控制方法。如模糊 PID 控制、自适应 PID 控制、神经网络 PID 控制等。

7)S 面控制

S 面控制是一类利用模糊控制的思想同时参考 PID 控制结构而形成的复合控制策略,该策略通过利用一个 Sigmoid 函数来拟合模糊控制器中的控制规则不仅使得控制器设计流程大大减少,而且在控制性能上兼具模糊控制和 PID 控制的

部分优点^[42]。其控制方程为：

$$u = \frac{2.0}{(1.0 + e^{(-k_1e + k_2\dot{e}})})}$$

(2)

其中,参数 k_1 和 k_2 往往是根据经验所得,常用的参数调整方式为人工调整和自适应在线调整,自适应调整的方式不唯一,可以通过模糊原理等方法来实现^[43]。

2.3 水下机器人控制技术分析

运动控制作为水下机器人底层控制系统不可或缺的首要组成部分是实现其智能化的关键,其主要包括以下几个部分:艏向角(AUV 艇艏方向与地理北极的夹角)控制、深度(AUV 重心距水面的垂直距离)控制、航速控制、位置控制和高度控制等^[44,45]。考虑到水下环境的复杂多变和水深设备延时效应明显,不少学者长期致力于重点研究水下机器人的闭环控制。

为便于实现控制功能,通常对水下机器人各自由度间的运动耦合进行解耦处理,分别设计彼此独立的单回路闭环控制器来表征水下机器人的整体操纵功能。通常情况下,对水下机器人的深度、艏向和航速控制均需单独设计闭环控制回路,如下图 1~3 所示。为满足较高控制精度的要求,可加入纵倾角的闭环控制回路,但横滚角不加以人为控制^[37]。水下机器人搭载的各类传感器是闭环控制回路中至关重要的装置,传感器精度与闭环回路的性能和控制效果的优劣也关联密切。

1) 深度控制回路

图 1 中,输入 H_0 为设定深度, H 为艇体实际深度, θ 为实际纵倾角, K_1 为对应纵倾角反馈系数。由于深度计基本无延时效应,故深度控制响应执行能力较强^[37]。在控制精度要求不高的场合,可不加入纵倾角反馈。

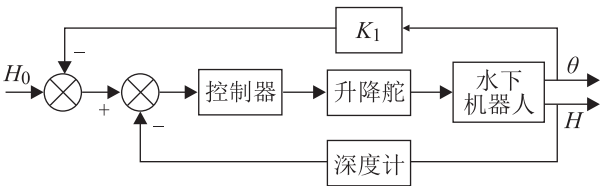


图 1 深度控制回路结构示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of the Depth Control Loop Structure

2) 艏向控制回路

图 2 中,输入 ψ_0 为设定艏向角, ψ 为艇体实际艏向角, $\dot{\psi}$ 为艏向角角速度, K_2 为对应艏向角角速度反馈系数。加入艏向角角速度反馈能够提升系统响应速度和控制效果^[37]。在控制精度要求不高的场合,可不加入艏向角角速度反馈。

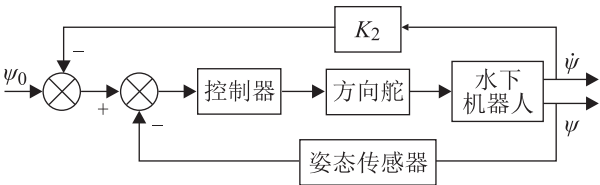


图 2 艏向控制回路结构示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Heading Control Loop Structure

3) 航速控制回路

图 3 中,输入 u_0 为设定航速, u 为艇体实际航速, $\dot{u}$ 为加速度, K_3 为对应加速度反馈系数。加入加速度反馈能够改善航行稳定性。

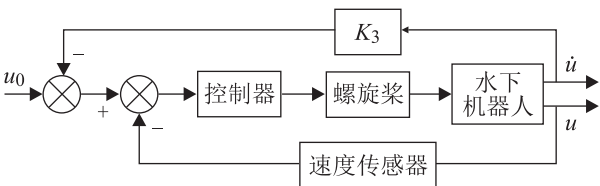


图 3 航速控制回路结构示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of Speed Control Loop Structure

纵使控制技术持续向前发展,新的控制算法接连涌现,但大都尚在理论探索阶段,真正推进至水下机器人上的应用实现还有很长的路要走。

考虑到建立水下机器人的精确模型的实际困难和进行相关试验的复杂性,在工程实际中,要确保控制算法稳定可靠、鲁棒性强,参数意义明确且具备一定冗余量,方可达到对水下机器人预期的控制效果。

3 结语

本文通过参阅大量参考文献,首先归纳分析了国内外自主式水下机器人的研究现状:主要介绍了关于最早研究水下机器人的历史以及后来随着多领域技术的发展演进,国际与国内知名的水下机器人专门研究机构和相关院所纷纷着眼于 AUV 的开发研制,AUV 系列产品在这一时期开始大量涌现,同时选取了国内外一些技术相对成熟与先进且较具有影响力的 AUV 及其对应系列产品,并对其性能指标、功能用途和相关参数进行了详细介绍;在研究现状的基础上进一步对主要的自主式水下机器人控制技术展开系统论述:包括自主式水下机器人控制中存在的难点及成因、几种主要控制方法的基本原理和自身特性简介;最后对自主式水下机器人控制技术加以具体分析,为合理选用水下机器人运动控制方法、设计相应控制器提供了一定的参照依据。本文不仅为笔者在后续研究自主式水下机器人控制技术在标准化池塘养殖水质改良关键设备研发与优化课题的具体工程应用方面奠定了坚实理论基础,而且也为今后构建可靠的自主式水下机器人运动控制系统提供了有力支撑。

许多前沿的问题都来自于人类对神秘海洋的探索活动,但该活动受制于装备技术能力的高低。随着科学的发展,作为探索海洋资源的重要工具——水下机器人的设计研发也日臻完善,在未来会有更多用途愈加广泛且种类功能多样的

水下机器人相继问世,我们认识海洋和经略海洋的目标将伴随着智能 AUV 研制技术的不断进步而逐渐达成。

参考文献

- [1]余明刚,张旭,陈宗恒. 自治水下机器人技术综述[J]. 机电工程技术,2017,46:155-157.
YU Minggang, ZHANG Xu, CHEN Zongheng. Overview of Autonomous Underwater Vehicle Technology [J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2017, 46: 155-157.
- [2]李波. 水下无人航行器发展研究[D]. 西安:西北工业大学,2001.
LI Bo. Research on the Development of Underwater Unmanned Vehicles [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2001.
- [3]AIT C V. REMUS 100 Transportable Mine Countermeasure Package [C]. Oceans. IEEE, Proceedings, San Diego, California, USA, 2003, 1925-1930.
- [4]SFAKIOTAKIS M, LANE D M, BRUCE J, DAVIES C. Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion [J]. IEEE Journal of Ocean Engineering, 1999: 237-238.
- [5]窦刚. AUV 动力定位控制技术研究[D]. 镇江:江苏科技大学电子信息学院,2019.
DOU Gang. AUV Dynamic Positioning Control Technology Research [D]. Zhengjiang: Jiangsu University of Science and Technology Electronic Information School, 2019.
- [6]TAMAKI U, KENJI N, TAKSHI O, et al. Dives to the Deep by AUV "r2D4" in Five Years [C]. Proceedings of Sixth International Symposium on Underwater Technology, 2009.

- [7]郭亦平,王益民,林莉,等. 基于空间视线导引法的 AUV 三维航迹控制技术研究[J]. 声学 with 电子工程,2019(4):28-32.
- GUO Yiping, WANG Yimin, LIN Li, et al. Research on AUV Three-Dimensional Trajectory Control Technology based on Space Sight Guidance Method[J]. Acoustics and Electronic Engineering, 2019(4):28-32.
- [8]朱大奇,胡震. 深海潜水器研究现状与展望[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版),2018,41(3):205-216.
- ZHU Daqi, HU Zhen. Research Status and Prospect of Deep-Sea Underwater Vehicle [J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science), 2018,41(3):205-216.
- [9]龚昊. 立扁体 AUV 的操纵性与运动控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
- GONG Hao. Research on Maneuverability and Motion Control of Flat-Body AUV [D]. Harbin: Harbin Engineering University,2017.
- [10]W. SX. HD 系列水下机器人[J]. 军民两用技术与产品. 2004(8):19-19.
- W. SX. HD series underwater Vehicle [J]. Military and Civil Dual-use Technology and Products. 2004(8):19-19.
- [11]李金林. 水下机器人—机械手结构设计及自适应神经网络控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
- LI Jinlin. Underwater Vehicle-Manipulator Structure Design and Adaptive Neural Network Control Research [D]. Harbin: Harbin Engineering University,2018.
- [12]赵昊广. 新型水下航行器的路径跟踪控制研究[D]. 太原:太原科技大学,2018.
- ZHAO Haoguang. Research on the Path Following Control of a New Type of Underwater Vehicle [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology,2018.
- [13]苗建明,王少萍,范磊,等. 欠驱动自主水下航行器空间曲线路径跟踪控制研究[J]. 兵工学报,2017,38(9):1786-1796.
- MIAO Jianming, WANG Shaoping, FAN Lei, et al. Research on Space Curve Path Tracking Control of Under-Actuated Autonomous Underwater Vehicle [J]. Acta Armamentarii, 2017,38(9):1786-1796.
- [14]王刚. 基于多传感器的 AUV 控制系统[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- WANG Gang. AUV Control System Based on Multi-Sensor [D]. Harbin: Harbin Engineering University,2013.
- [15]杨光仪. 自主水下航行器近水面的预测控制策略研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
- YANG Guangyi. Research on Predictive Control Strategy of Autonomous Underwater Vehicle near Water Surface [D]. Harbin: Harbin Engineering University,2017.
- [16]张凯. 基于反步滑模算法的 AUV 三维航迹跟踪控制研究[D]. 大连:大连海事大学,2017.
- ZHANG Kai. Research on Three-Dimensional Trajectory Tracking Control of AUV Based on Backstepping Sliding Mode Algorithm [D]. Dalian: Dalian Maritime University,2017.
- [17]刘青. 小型自主水下航行器垂直面的运动控制研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2017.
- LIU Qing. Research on the Motion Control of the Vertical Plane of a Small Autonomous Underwater Vehicle [D]. Qinhuangdao: Yanshan University,

- 2017.
- [18] 于曹阳. 基于模糊逼近补偿法的 AUV 位形切换饱和跟踪控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- YU Caoyang. AUV Configuration Switching Saturation Tracking Control Based on Fuzzy Approximation Compensation Method [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [19] 周军. 变质量水下航行器均衡系统自动控制技术研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2016.
- ZHOU Jun. Research on Automatic Control Technology of Variable Mass Underwater Vehicle Equalization System [D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2016.
- [20] ANTONELLI G, Open Control Problems in Underwater Robotics [C]. Proceedings of the Fourth International Workshop on Robot Motion & Control. IEEE, 2004, 6: 219-229.
- [21] 杨新平. 遥控自治水下机器人控制技术研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2012.
- YANG Xinping. Research on the Control Technology of Remotely Controlled Autonomous Underwater Robots [D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2012.
- [22] YU Jiang, XIANG long, PENG Mingzhu, et al. An Underwater Human-robot Interaction Using Hand Gestures for Fuzzy Control [J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2020 (prepublish).
- [23] 王晓伟, 姚绪梁, 夏志平, 等. 欠驱动 AUV 三维直线路径跟踪控制[J]. 控制工程, 2020, 27(6): 977-983.
- WANG Xiaowei, YAO Xuliang, XIA Zhiping, et al. Under-actuated AUV Three-dimensional Linear Path Tracking Control [J]. Control Engineering, 2020, 27(6): 977-983.
- [24] 王通, 齐向东. 遗传算法 PID 控制在 AUV 姿态调节中的应用[J]. 自动化技术与应用, 2020, 39(4): 8-14.
- WANG Tong, QI Xiangdong. Application of Genetic Algorithm PID Control in AUV Attitude Adjustment [J]. Automation Technology and Application, 2020, 39(4): 8-14.
- [25] 刘和平. 浅水水下机器人设计与控制技术工程研究[D]. 上海: 上海大学, 2009.
- LIU Heping. Engineering Research on Shallow Water Underwater Vehicle Design and Control Technology [D]. Shanghai: Shanghai University, 2009.
- [26] 张冠生, 沈钺, 刘嘉. 海流扰动作用下 AUV 航速控制策略研究及应用[J]. 中国新通信, 2019, 21(17): 240-240.
- ZHANG Guansheng, SHEN Yue, LIU Jia. Research and Application of AUV Speed Control Strategy Under Ocean Current Disturbance [J]. China New Telecommunications, 2019, 21(17): 240-240.
- [27] ALEXANDER, MILLER, BORIS, et al. On AUV Control with the Aid of Position Estimation Algorithms Based on Acoustic Seabed Sensing and DOA Measurements [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(24).
- [28] 尹广帅. 欠驱动自主式水下航行器路径跟踪控制研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
- YIN Guangshuai. Research on Path Following Control of Under-actuated Autonomous Underwater Vehicle [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.
- [29] 孙俊松. 欠驱动 AUV 的轨迹跟踪反步滑模控

- 制研究[D]. 大连:大连海事大学,2020.
- SUN Junsong. Research on Under-actuated AUV Trajectory Tracking Backstep Sliding Mode Control[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.
- [30] 郭亦平,王益民,任元洲. 基于视线导引法的 AUV 轨迹跟踪控制技术研究[J]. 声学 & 电子工程,2018,(4):32-36,40.
- GUO Yiping, WANG Yimin, REN Yuanzhou. Research on AUV Trajectory Tracking Control Technology Based on Line-of-sight Guidance[J]. Acoustics and Electronic Engineering, 2018, (4):32-36,40.
- [31] 徐瑜璐. 智能水下机器人运动规划研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2014.
- XU Yulu. Research on Motion Planning of Intelligent Underwater Vehicle [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2014.
- [32] 曹晓旭. 自治式水下管线巡检机器人协调规划与控制技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2018.
- CAO Xiaoxu. Research on Coordination Planning and Control Technology of Autonomous Underwater Pipeline Patrol Robot [D]. Hangzhou: Zhejiang University School of Mechanical Engineering, 2018.
- [33] 段杰. 基于神经网络的 AUV 故障诊断与容错控制技术研究[D]. 北京:中国舰船研究院,2018.
- DUAN Jie. Research on AUV Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control Technology Based on Neural Network [D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy,2018.
- [34] 张晓悠. AUV 故障诊断与容错控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.
- ZHANG Xiaoyou. AUV Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Technology Research [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [35] 王青山. AUV 在海流环境中的滑模变结构控制应用技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.
- WANG Qingshan. Research on Application Technology of Sliding Mode Variable Structure Control of AUV in Ocean Current Environment [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.
- [36] 马艳彤,郑荣,于闯,等. 位置—速度闭环的 AUV 水平面悬停控制研究[J]. 控制工程,2019,26(10):1810-1814.
- MA Yantong, ZHENG Rong, YU Chuang, et al. AUV Horizontal Hover Control Based on Position-speed Closed Loop [J]. Control Engineering,2019,26(10):1810-1814.
- [37] 陆柳延. 水下机器人运动控制与路径规划研究[D]. 扬州:扬州大学,2013.
- LU Liuyan. Research on Underwater Vehicle Motion Control and Path Planning [D]. Yangzhou: Yangzhou University,2013.
- [38] 晏刚,周俊. 水下机器人智能控制技术综述[J]. 电子世界,2013,30:21-22.
- YAN Gang, ZHOU Jun. Overview of Intelligent Control Technology for Underwater Vehicles[J]. Electronic World,2013,30:21-22.
- [39] 张子迎. 水下机器人运动控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2005.
- ZHANG Ziying. Research on Motion Control Method of Underwater Robot[D]. Harbin: Harbin

Engineering University,2005.

[40]王智学,边信黔,王奎民,等. 近壁面水动力干扰下的 AUV 运动控制研究[J]. 船海工程,2006,28 (5):63-66.

WANG Zhixue, BIAN Xinqian, WANG Kuimin, et al. Research on AUV Motion Control Under Near-Wall Hydrodynamic Interference [J]. Ship and Ocean Engineering,2006,28 (5):63-66.

[41]陶永华,尹怡欣,葛芦生. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1998.

TAO Yonghua, YIN Yixin, GE Lusheng. New PID Control and its Application [M]. Beijing: Machinery Industry Press,1998.

[42]郭冰洁. 微小型水下机器人运动控制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.

GUO Bingjie. Motion Control of Micro Underwater Vehicles [D]. Harbin: Harbin Engineering University,2008.

[43]刘学敏,徐玉如. 水下机器人运动的 S 面控制方法[J]. 海洋工程,2001,19(3):81-84.

LIU Xuemin, XU Yuru. S-plane Control Method for Underwater Vehicle Motion [J]. Ocean engineering,2001,19 (3):81-84.

[44]蒋新松. 机器人及机器人学中的控制问题[J]. 机器人,1990,12(5):1-7.

JIANG Xinsong. Robotics and Control Problems in Robotics [J]. Robotics,1990,12(5):1-7.

[45]王波,孙玉山. 舵桨联合操纵水下机器人运动控制研究[J]. 控制工程,2011,18(3):440-443.

WANG Bo, SUN Yushan. Research on the Motion Control of Autonomous Underwater Vehicle Controlled by Thruster and Rudders[J]. Control Engineering,2011,18(3):440-443.

作者贡献说明

王永鼎:设计文章框架,补充修正引言、第 1 节相关内容;

王 鹏:撰写文章初稿;

孙鹏飞:收集、整理资料并进行分析,撰写文章摘要,修改完善结语。