

专著 西北工业大学
出版资助项目
基金 ZIZHU XIANGMU

ZHUANZHU

无人水下航行器自适应非线性控制技术

高 剑 著

ZHUANZHU

西北工业大学出版社

WUREN SHUIXIA HANGXINGQI ZISHIYING FEIXIANXING KONGZHI JISHU

无人水下航行器自适应 非线性控制技术

高 剑 著

西北工业大学出版社

【内容简介】 无人水下航行器是人类探索、开发和利用海洋的重要水下装备,近年来在军事、科学研究和海洋工程等领域得到广泛的应用。运动控制是发展无人水下航行器的核心技术,一直是国内外学者和技术人员研究的热点。本书采用自适应反演、神经网络、模型预测等控制技术,针对无人水下航行器的非线性自适应控制问题开展了系统、深入的研究,内容包括空间运动建模、自适应反演轨迹跟踪控制、动力定位控制、欠驱动控制特性分析、路径跟踪控制、自主回收导引与控制等,反映了作者在该领域多年来的研究成果,具有专业性、前沿性、理论与应用相结合的特点。

本书可为高等学校和科研院所开展无人水下航行器控制技术研究提供参考,也可用于船舶与海洋工程、兵器科学与技术、控制理论与控制工程等相关专业的研究生教学。

图书在版编目(CIP)数据

无人水下航行器自适应非线性控制技术/高剑著. —西安:西北工业大学出版社,2016.3

ISBN 978-7-5612-4797-6

I. ①无… II. ①高… III. ①可潜器—自适应控制—非线性控制系统—研究 IV. ①U674.941

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 063045 号

策划编辑:杨 军

责任编辑:李阿盟

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西向阳印务有限公司

开 本:727 mm×960 mm 1/16

印 张:15.25

字 数:267千字

版 次:2016年3月第1版 2016年3月第1次印刷

定 价:38.00元

序

进入 21 世纪,随着现代工业和信息技术的不断发展和进步,人类加快了向海洋进军的步伐,海洋工程和海洋装备已经成为世界各国发展的重点技术领域。无人水下航行器可完成海底地形测绘、资源勘探、环境监测、负载投送和精确作业等任务,是探索和开发海洋的重要装备。

运动控制是无人水下航行器的关键技术之一,也是衡量无人水下航行器先进程度的主要指标。由于海洋环境的复杂性,无人水下航行器六自由度运动的强非线性和相互耦合,其运动学和动力学模型非常复杂,对控制系统的自适应性和鲁棒性提出了较高的要求。

《无人水下航行器自适应非线性控制技术》是作者多年从事无人水下航行器运动控制理论研究和工程实践的成果。全书共分为 9 章,分别采用非线性自适应控制、神经网络控制等先进控制方法,系统地研究了无人水下航行器运动控制领域中所涉及的建模、动力定位、轨迹跟踪、路径跟踪、自主回收等问题,并通过深入的理论分析和大量的仿真实验,对控制系统的稳定性和控制性能进行了证明和验证。本书内容新颖、学术性强、特色明显,具有较高的理论研究和工程应用价值。

本书不仅可供开展无人水下航行器控制领域研究的专家学者和高校师生阅读,还可为从事无人水下航行器产品研制、试验与生产的工程技术人员提供参考。

本书的出版,将丰富和促进我国无人水下航行器控制技术的研究,为我国无人水下航行器的进一步发展做出贡献。

中国工程院院士



2016 年 2 月

前 言

海洋覆盖了大约 71% 的地球表面积,蕴藏有大量的资源和能源,海洋开发和海洋权益已经成为世界各国普遍关注的焦点。然而,尽管目前的技术可以使得人类登上月球,机器人登上火星,但在海洋中作同样的旅行却非常困难,人类对海洋探索的广度和深度还远远不够。海洋与陆地不同,除海面的惊涛骇浪之外,随着深度的增加海水将产生巨大的压力,同时受信号传输的局限,水下仍缺乏有效的远距离通信和定位手段,这些因素都给人类开发海洋带来巨大的困难。

水下航行器,尤其是无人水下航行器(UUV)的出现为人类进行深海资源的研究与开发提供了强有力的工具,许多国家都投入巨资进行相关的研发工作。目前水下航行器已经广泛应用于海洋救助、打捞、海洋资源调查、石油开采以及军事领域,并产生了巨大的经济效益与社会效益。进入 21 世纪,我国将水下航行器作为海洋技术和装备发展的一个重要方向,投入了大量的人力和物力,并以“蛟龙”号、“海马”号和“潜龙二号”为代表,取得了丰硕的成果。

作为发展无人水下航行器的核心技术之一的运动控制技术得到了国内外学者和工程技术人员的广泛关注,并开展了大量的理论研究和工程实践工作。水下航行器的 6 自由度空间运动具有很强的非线性和不确定性,各自由度运动之间交叉耦合,运动时受到水下环境的时变干扰,这些因素都要求控制器必须具有很强的自适应性和鲁棒性。而 UUV 运动模型的欠驱动特性,更是对控制算法设计提出了极大的挑战。

本书在笔者近年来的科研成果基础上,对 UUV 的自适应运动控制问题,尤其是轨迹跟踪和路径跟踪控制,进行系统的研究。全书共分为 9 章。第 1 章绪论,简要介绍水下航行器的基本概念和分类,给出 UUV 控制技术研究的基本问题。第 2 章建立 UUV 的空间运动模型。第 3 章采用自适应反演控制和神经网络动态逆控制技术,研究全驱动 UUV

的非线性自适应跟踪控制问题。第4章针对具有超短基线水声定位系统的全驱动UUV,采用模型预测控制和神经网络自适应控制,设计“运动学-动力学”分层控制结构,研究UUV动力定位控制问题。第5章讨论欠驱动UUV的非完整特性、可控性和可镇定性。第6章采用级联系统理论,研究非完整和欠驱动约束下的UUV轨迹跟踪控制问题,证明轨迹跟踪误差的全局一致渐近稳定性。第7章研究欠驱动UUV水平面和空间直线航迹跟踪控制问题,并结合信息一致性算法,提出一种欠驱动UUV的编队直线跟踪控制算法。第8章采用Serret-Frenet坐标系设计欠驱动UUV的路径跟踪控制算法,并进一步研究无速度反馈和工作环境有障碍物情况下的路径跟踪控制问题,以及基于路径参数一致性的编队路径跟踪控制问题。第9章在上述UUV运动控制的基础上,开展欠驱动AUV自主回收导引与控制问题的研究。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金的资助(项目编号:50909082,51279164)。写作过程中得到了西北工业大学徐德民院士、严卫生教授、刘明雍教授、张福斌副教授、崔荣鑫教授、张立川副教授,以及西北工业大学水下航行器研究所其他教师的指导和热情帮助,另外,刘昌鑫、齐贝贝、夏飞、赵新元等研究生参与了部分研究工作。本书的写作和出版还得到了西北工业大学出版社的大力支持和具体指导,在此一并表示感谢。

由于水平有限,错误和不妥之处在所难免,殷切希望读者批评指正。

著者

2016年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 无人水下航行器	2
1.2 无人水下航行器控制技术	10
1.3 本书的主要内容	11
参考文献	13
第 2 章 UUV 空间运动模型	15
2.1 坐标系定义	15
2.2 运动学模型	18
2.3 动力学模型	20
2.4 由广义坐标描述的 UUV 运动模型	26
2.5 UUV 运动模型的分解	26
2.6 UUV 的 Matlab 仿真建模	28
2.7 本章小结	32
参考文献	32
第 3 章 全驱动 UUV 自适应非线性跟踪控制	34
3.1 非线性反演设计方法	35
3.2 UUV 单自由度运动跟踪控制	36
3.3 UUV 空间轨迹跟踪控制	41
3.4 一类低速 UUV 的垂直面运动控制	48
3.5 基于神经网络的 UUV 自适应动态逆轨迹跟踪控制	53
3.6 本章小结	61
参考文献	62

第 4 章 基于逆 USBL 系统的全驱动 UUV 动力定位控制	65
4.1 基于逆 USBL 系统的 UUV 动力定位模型	66
4.2 全驱动 UUV 模型预测动力定位控制	68
4.3 全驱动 UUV 模型预测直线航迹跟踪控制	82
4.4 本章小结	88
参考文献	88
第 5 章 欠驱动 UUV 控制特性分析	90
5.1 微分几何工具	90
5.2 欠驱动系统	93
5.3 欠驱动 UUV 的非完整特性	96
5.4 欠驱动 UUV 的平衡点可镇定性	98
5.5 欠驱动 UUV 的可控性	99
5.6 欠驱动 UUV 与移动机器人的控制特性比较	103
5.7 本章小结	105
参考文献	105
第 6 章 欠驱动 UUV 水平面轨迹跟踪控制	107
6.1 级联系统理论	107
6.2 非完整约束下的 UUV 轨迹跟踪控制	112
6.3 欠驱动约束下的 UUV 轨迹跟踪控制	118
6.4 本章小结	130
参考文献	131
第 7 章 欠驱动 UUV 直线航迹跟踪控制	133
7.1 UUV 水平面直线航迹跟踪控制	134
7.2 UUV 3 维空间直线航迹跟踪控制	143
7.3 多 UUV 编队直线航迹跟踪控制	157
7.4 本章小结	164

参考文献	164
第 8 章 欠驱动 UUV 路径跟踪控制	167
8.1 Serret - Frenet 坐标系与路径跟踪建模	168
8.2 基于级联-反演方法的路径跟踪控制	171
8.3 无速度反馈的欠驱动 UUV 路径跟踪控制	178
8.4 基于行为的 UUV 避碰路径跟踪控制	184
8.5 基于路径参数一致性的多 UUV 协同路径跟踪控制	190
8.6 本章小结	202
参考文献	202
第 9 章 欠驱动 AUV 自主回收导引与控制	205
9.1 典型的 AUV 自主回收系统	206
9.2 基于视线导引和横向跟踪的 AUV 自主回收控制	209
9.3 基于变系数人工势场的 AUV 自主回收控制	215
9.4 基于偶极势场的 AUV 回坞导引	220
9.5 AUV 回坞路径规划与跟踪控制	224
9.6 本章小结	227
参考文献	227
附录 UUV 模型参数	229
附录 1 Kambara UUV	229
附录 2 REMUS AUV	230
参考文献	231

第 1 章 绪 论

地球的表面积为 $5.1 \times 10^8 \text{ km}^2$, 其中海洋的面积为 $3.6 \times 10^8 \text{ km}^2$, 占地球总表面积的 71%; 海水量约占地球上总水量的 97%。广袤的海洋中蕴藏着极其丰富的生物资源、矿产资源及各种形式的能源, 尤其深海仍是人类尚未开发的宝地, 如果能对这些海洋资源进行探查、开发和利用, 将会对人类社会和经济的可持续发展起到巨大的作用。

同时, 海洋作为蓝色国土, 是一个沿海国家的“门户”, 是其与外界联系的重要途径, 海洋安全是国家安全的重要组成部分。自从 1994 年“联合国海洋法公约”提出海洋国土新概念, 国际海洋关系进入了一个新时期。管辖海区的国土化, 强化了海洋对国家命运的重大影响, 也大大提高了海洋的战略地位, 海洋权益、海洋开发和海洋环境成为世界各国普遍关注的焦点。

我国拥有 $3.2 \times 10^4 \text{ km}$ 的海岸线和 $300 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上的蓝色国土, 占陆地国土面积的 1/3, 其中水深 4 000 m 以内的海域约占 90%。但是, 美国、日本等国家在太平洋上建立了所谓的“太平洋锁链”, 通过大量的军事设施对中国形成了牢牢的围堵之势, 缩小了我国海上方向的防御纵深, 阻碍了我国自海入洋的战略通道, 形成目前“有海无洋”的海洋局势。因此, 无论是从经济发展的角度还是国家安全的角度来看, 认识海洋、开发海洋和守卫海洋都是建设海洋强国、捍卫国家主权和实现可持续发展的伟大目标所不可缺少的。

进入 21 世纪, 随着现代工业技术的不断发展和进步, 人类加快了向海洋进军步伐, 海洋工程和海洋装备已经成为世界各国发展的重点技术领域^[1-2]。对于海洋的探索面临着巨大的困难, 每下潜 100 m 就增加 10 atm ($1 \text{ atm} = 1.013 25 \times 10^5 \text{ Pa}$), 且海底能见度极低, 环境非常恶劣, 潜水员和普通设备都很难在这种条件下完成沉船打捞、光缆铺设、资源勘探、海洋环境调查等任务。尽管当今的科技发展已经使人类登上月球, 机器人登上火星, 但对海洋深处的探索仍具有极大的挑战。

1.1 无人水下航行器

1.1.1 水下航行器概述

水下航行器,又称水下机器人,是一种可在水下运动、具有探测和感知能力、通过遥控或自主操作方式、代替或辅助人类进行海洋调查测绘和水下作业的装备^[3-4]。水下航行器作为探索海洋的重要手段,甚至在有些情况下是唯一的手段,在海洋开发与利用中起到至关重要的作用。

按照一般的观点,水下航行器可分为载人潜水器(Human Operated Vehicle, HOV)和无人水下航行器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV),而后者又包括遥控水下航行器(Remotely Operated Vehicle, ROV)和自主水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)两大类,如图 1-1 所示。

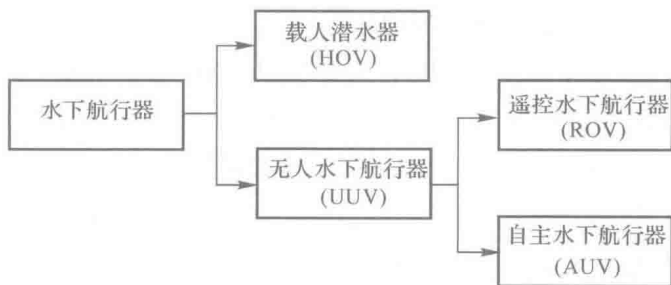


图 1-1 水下航行器分类

世界上经济发达国家均在水下航行器技术上有着很大的投入和发展,如美国、日本、俄罗斯、挪威、加拿大等。而中国也在近年将水下航行器作为我国海洋技术和装备发展的一个重要方向,投入了大量的人力和物力,并以“蛟龙”号 HOV、“海马”号 ROV 和“潜龙二号”AUV 为代表,取得了丰硕的成果,达到和接近世界领先水平,如图 1-2 所示。

在科学研究和工业应用领域,水下航行器可以完成海洋物理参数(温度、盐度等)的测量、海洋三维环境的探测与建模、海洋目标(如失事飞机残骸)的水下探测与识别、水下定位、信息传输、负载投送等任务,在海洋研究和海洋开发过程中发挥着重要作用^[5]。尤其是近年来,人们通过水下对接站和海底光缆将 AUV 接入海

洋观测网络,与海底固定传感器、浮标、潜标等设备一起实现对大范围海洋信息的不间断、全方位的观测^[6],如图 1-3 所示。

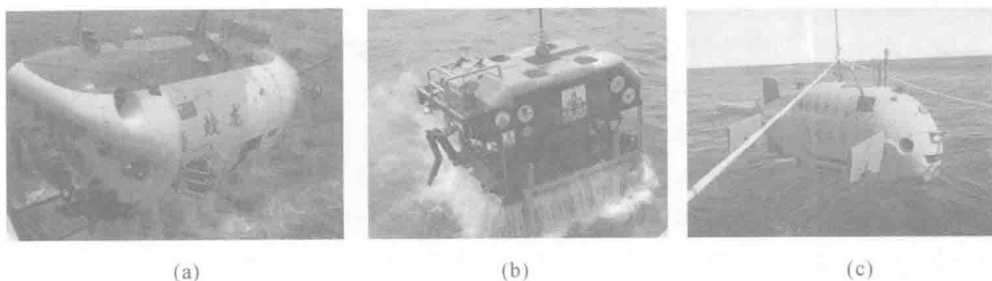


图 1-2 中国的水下航行器

(a)“蛟龙”号; (b)“海马”号; (c)“潜龙二号”

在军事领域,通过不断的探索和实践,美国等发达国家海军逐步认识到 UUV 在未来战争中潜在的作战效能^[7-8]。UUV 能够以水面舰船或潜艇为搭载平台,在数十千米乃至上千千米的空间范围内自主完成环境探测、目标识别、情报收集、数据通信等任务,争夺水下信息优势,实施精确打击与智能攻击,大大地扩展了水面舰船和潜艇的作战空间,成为赢得水下战争的力量倍增器。UUV 可以独立作战,或作为网络中心战的节点,通过水下局域网或水面无线和卫星通信进行信息交互并接受有人平台的远程指挥,有效执行各种复杂军事任务,避免人员伤亡。如图 1-4 中描述的美国海军提出的战力网(FORCEnet)体系^[7]中就包含了不同尺寸和功能的 UUV,用于执行情报收集、数据传输等任务。

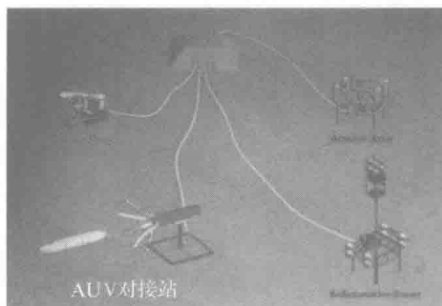


图 1-3 海洋观测网络中的 AUV

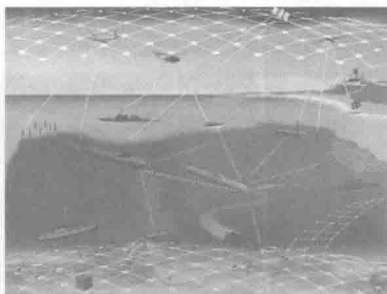


图 1-4 美国海军战力网概念图

1.1.2 载人潜水器

载人潜水器,又称为微型潜艇,其任务是运载科学家、工程技术人员和各种装置精确到达海洋环境,完成复杂的勘探、科学考察和开发作业,执行隐蔽的军事任务,甚至宣示主权,它是人类开发利用海洋的一项重要技术手段。

载人潜水器上有密封的载人舱室及生命保障系统,一般可乘坐 2~3 人,潜水人员坐在耐压舱内可通过视窗对海底世界进行观察,同时潜水器内还带有各种测量仪器、通信设备,并可携带水下机械手进行取样和作业。世界上第一台载人潜水器是由美国人 Simon Lake 于 1897 年制造的 the Argonaut First,并于 1898 年完成了从弗吉尼亚州 Norfolk 到纽约的长距离水下航行。受各方面技术的限制,载人潜水器的早期发展十分缓慢。20 世纪 60 年代以来,随着计算机、人工智能、水声、图像处理等相关技术的发展,载人潜水器技术进入一个新的发展时期^[9]。

美国的 Alvin 号是载人潜水器中的代表,如图 1-5(a)所示。Alvin 下潜深度为 4 800 m,可以携带 2 名科学家和 1 名驾驶员,于 1962 年研制成功,后经不断地升级改造,现在仍在执行各种海上任务。它曾帮助美军成功地从 856 m 的深处打捞一颗意外坠落的氢弹,并勘探了沉没于北大西洋深海的“泰坦尼克”号游轮残骸。著名导演和探险家 James Cameron 投资建造了“深海挑战者”单人深潜器,如图 1-5(b)所示。2012 年 3 月 26 日,他乘坐该潜水器成功下潜至地球海洋的最深处——马里亚纳海沟底部,最大深度为 10 898 m。

此外,日本的载人潜水器“Shinkai”号下潜深度是 6 500 m,俄罗斯的两艘载人潜水器“和平 I”号与“和平 II”号下潜深度是 6 000 m,法国“Nautile”号载人潜水器下潜深度 6 000 m。

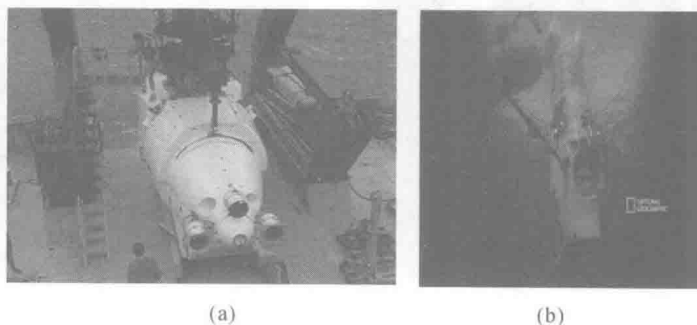


图 1-5 Alvin 号和深海挑战者号 HOV

为了向海底资源调查和科学研究提供高技术装备,同时为深海勘探、海底作业研发共性技术,推动我国深海运载技术发展,科技部于2002年将“蛟龙”号深海HOV研制列为国家高技术研究发展计划(863计划)重大专项,由中船重工七〇二所联合多家单位开展自行设计、自主集成研制工作。

“蛟龙”号载人潜水器设计最大下潜深度为7 000 m,经过联合攻关实现了耐压结构、生命保障、远程水声通信、系统控制等关键技术的突破。2012年7月,“蛟龙”号在马里亚纳海沟试验海区创造了下潜7 062 m的中国载人深潜纪录。这意味着中国具备了载人到达全球99.8%以上海洋深处进行作业的能力,如图1-2(a)所示。

1.1.3 遥控水下航行器

ROV用一根连接电缆与水面母船连接,通过它接收控制信号并提供工作所需的能源,同时可以把图像和其他传感器数据实时发送给母船^[10-11]。在民用方面,ROV主要用于海洋研究、近海油气开发、海底矿藏调查、石油管道检测、水下电缆敷设、救捞作业、水下考古、江河水库的大坝检查等方面。在军用方面,主要作为灭雷具使用,也可用于打捞丢失于海底的试验武器(如鱼雷)。近年来,ROV在军事领域的应用也在不断扩展,例如瑞典Saab公司开发出可以辅助潜艇完成AUV回收的ROV系统。

20世纪60年代早期,美国海军建造的缆控水下回收航行器为ROV的雏形。1975年,第一个商业化的ROV问世,它首先工作在北海油田和墨西哥湾。此后,海洋石油开发的需求促进了ROV的迅猛发展。现在ROV已经形成一种产业,在水下航行器中最成熟且应用范围最广。

目前,世界上较为著名的ROV包括美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)的Jason(见图1-6),帮助解救被困海底的俄罗斯小型潜艇的英国“天蝎”号,参与法航747失事客机黑盒子打捞的法国Ifremer开发的Victor 6000(见图1-7),1995年潜入世界最深的马里亚纳海沟创造10 912 m ROV下潜纪录的日本海洋科技中心(JAMSTEC)的“海沟(Kaiko)”号等。

中国从20世纪80年代开始ROV的研制,2003年9月,北极科学考察中首次使用了中国科学院沈阳自动化研究所研制的“海极”号ROV。此后的2008年和2014年,该研究所研制的“北极ARV”两次参加了我国的北极科学考察活动,成功获取了大量的基于海冰位置信息的海冰厚度、温盐深、光学及海冰底形态等多项关键的科学数据^[12]。此外,上海交通大学等单位2014年成功研制的“海马”号

4 500 m 级深海 ROV 作业系统,是中国自主研发的下潜深度最大、国产化率最高、工作能力最强的遥控水下航行器,如图 1-2(b)所示。

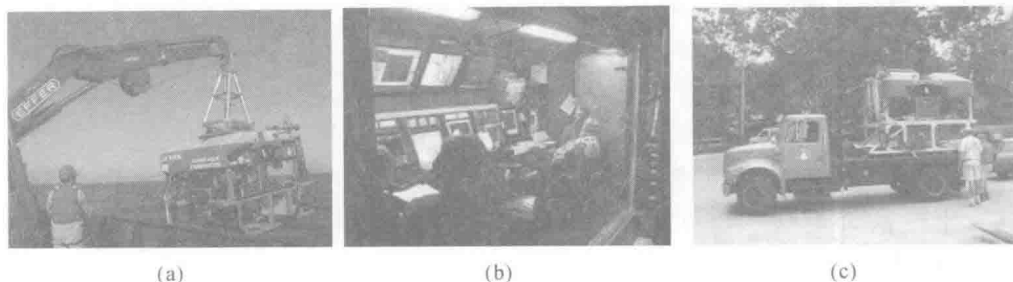


图 1-6 Jason ROV

(a)海上吊放; (b)操作台; (c)装载运输



图 1-7 Victor 6000 ROV 及其操作台

ROV 由母船上的操作者实时控制和导航,这就要求有高带宽、短延迟的通信链与航行器连接。连接电缆限制了 ROV 必须在靠近母船的区域工作,同时海水作用在线缆上也会产生巨大的阻力和干扰,这就对 ROV 的推进能力和控制系统的抗干扰能力提出了挑战。

1.1.4 自主水下航行器

到了 20 世纪 80 年代末,随着微电子技术、计算机技术、人工智能技术、小型化导航设备的发展,AUV 脱颖而出,成为世界各国开展海洋技术研究的前沿^[13-14]。AUV 是一种无人操纵的无系缆水下航行器,携带能源、推进器和自主导航设备,依靠嵌入式控制计算机和自主控制软件来执行预定航行任务,并具备较为完善的安全保障能力。

在民用领域中,AUV 可高效地完成包括水文探测、水下考古、海底资源探测、

沉船打捞、海底光缆铺设等任务。在军事领域,除了作为水中攻击武器鱼雷之外,AUV能够自主航行或与潜艇、舰艇、空基平台协同,完成水雷等水中武器的运载、布放,配合完成武器海底发射、侦察、反潜、警戒、布雷、猎雷等军事任务。AUV代表了未来水下航行器发展的重要方向,是当前世界各国海洋工程领域研究工作的热点^[14-15]。

与HOV和ROV相比,AUV具有以下特点:

(1)航程远:AUV是以实施远距离水下探测或负载投送为目标的,因此远航程、长航时是AUV的生命力之所在。例如,美国蒙特利尔海洋研究所(MBARI)的Tethys AUV可以航行上千千米。

(2)智能化水平高:AUV可自主精确定位和智能控制,完成预定任务使命,并可基于对周围环境的探测进行航路的二次规划(Re-planning)和避碰。

(3)隐蔽性强:与其他水下航行器相比,AUV可以长时间水下潜航,无需水面船舶在附近支持,航行噪声低,这对于军事领域尤为重要。

(4)机动能力高:AUV可实现大范围快速机动航行,适于执行水下搜索和测量任务。

(5)经济性好:AUV可以从小而简易的母船上发射,甚至从船坞或码头上发射,航行时不需人工操作,使用成本远低于HOV和ROV。

(6)高风险:AUV在工作时,航路上的渔网等障碍物严重威胁着AUV的安全,由于水声通信和定位的距离十分有限,操作人员几乎没有有效手段对AUV的航行进行跟踪和干预。

(7)作业能力弱:AUV主要携带声呐、温盐深(CTD)等传感器,以巡航方式进行海洋环境测量,通常情况下不具备通过机械手进行水下精确作业的能力。

上述特点决定了AUV执行任务的能力受其导航与控制系统性能的制约。同时,AUV只能依赖于其自身的动力源,由此减少了可能的任务持续时间。因此,能源动力、导航、控制成为未来AUV应用的三大关键技术。

自从AUV诞生以来,尤其是近20年来,世界各国的研究机构相继开发了多型形态各异的AUV,如图1-8所示。其中比较有代表性的AUV有麻省理工学院(MIT)的Odyssey系列,美国Bluefin公司的Bluefin系列(包括Bluefin-9, Bluefin-12和Bluefin-21等,见图1-9),瑞典Kongsberg Maritime公司的REMUS系列(包括REMUS 100, REMUS 600, REMUS 1500和REMUS 6000等),HUGIN系列(包括HUGIN 1000, HUGIN 1000 for 3 000 m, HUGIN 3000和HUGIN 4500等)。

国内的中国科学院沈阳自动化研究所、哈尔滨工程大学、西北工业大学等科研

院所从 20 世纪 90 年代开始了 AUV 的理论研究和工程研制,开发出多台军用和民用 AUV,达到或接近世界先进水平,其中包括沈阳自动化研究所的“探索者”“CR-01”“CR-02”“潜龙一号”和“潜龙二号”(见图 1-2(c))等,哈尔滨工程大学的智水系列 AUV 和“海灵”号等,西北工业大学水下航行器研究所开发的远程 AUV^[16]、外场试验平台^[17]和 50 kg 级便携式 AUV 等,如图 1-10 所示。



图 1-8 世界各国的自主水下航行器



图 1-9 Bluefin AUV,从左到右为 Bluefin-9,Bluefin-12,Bluefin-21

发展具备水下作业能力的干预型 AUV(Intervention AUV, I-AUV)是目前 AUV 领域的一个重要方向,其目标是 AUV 携带机械手或其他装置,自主完成打捞、维修、安装敷设水下设施、扫雷等水下作业任务,如图 1-11 所示。