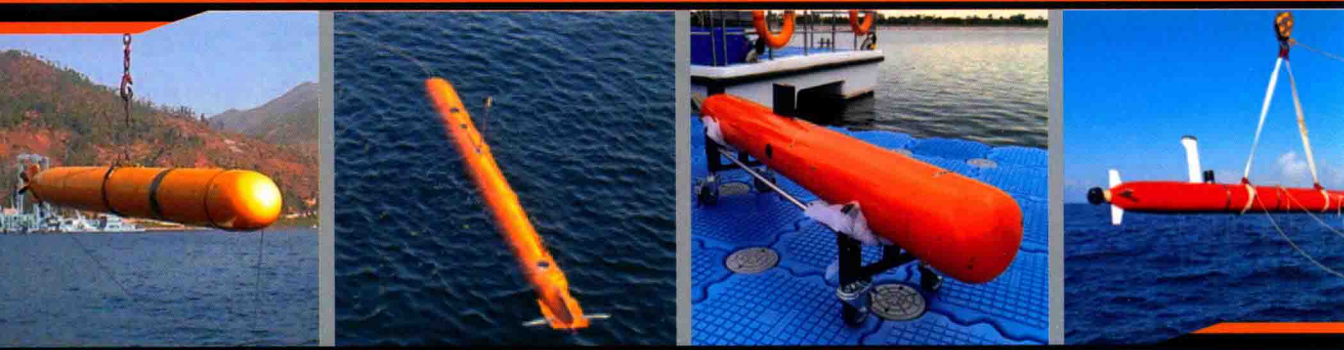


高等学校“十三五”规划教材

PLANNING TEXTBOOKS FOR HIGHER EDUCATION



无人水下航行器控制系统

——建模、算法设计与开发

高 剑 张福斌 编著

西北工业大学出版社

WUREN SHUIXIA HANGXINGQI KONGZHI XITONG

无人水下航行器控制系统

——建模、算法设计与开发

高 剑 张福斌 编著

西北工业大学出版社

西 安

【内容简介】 自动控制是无人水下航行器设计的核心技术之一,具有很强的理论性和工程性。导引控制算法的准确分析、合理设计和有效工程实现对于无人水下航行器的安全航行、控制精度实现、任务使命完成和自主性提升起着至关重要的作用。

本书立足工程特点,较为系统、全面地阐述了无人水下航行器控制系统的基本原理与分析设计方法。全书共分为7章,主要内容包括运动建模、导航传感器与驱动机构、三通道解耦控制分析与设计、现代设计方法、航路点与机动目标导引、全局与局部运动规划以及控制系统设计开发等。为了便于读者学习使用,书中提供了大量的数据、实物图片、计算实例、参考文献和练习题。本书内容丰富、全面,工程性强,力图反映国内外无人水下航行器控制方面的工程技术水平和相关研究成果,同时包括了作者长期从事该领域教学和科研的成果。

本书可作为高等院校水中兵器探测制导与控制、船舶与海洋工程等相关专业高年级学生、研究生的课程教材,也可作为水下航行器设计、制导与控制 and 系统仿真等相关领域工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

无人水下航行器控制系统:建模、算法设计与开发/
高剑,张福斌编著. —西安:西北工业大学出版社,
2018.11

ISBN 978-7-5612-5945-0

I. ①无… II. ①高… ②张… III. ①无人驾驶—可
潜器—控制系统 IV. ①U674.941

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 078287 号

策划编辑:张 晖

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:兴平市博闻印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:14.75

字 数:357 千字

版 次:2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月第 1 次印刷

定 价:48.00 元

前 言

无人水下航行器是一种可在水下运动,具有自身运动状态测量、环境与目标感知能力,通过遥控或自主作业方式,代替或辅助人类去完成水下测绘、探测和作业的装置。无人水下航行器最早可以追溯到 1866 年英国工程师怀特海德发明的鱼雷,距今已有 150 多年的历史。从 20 世纪 50 年代开始,世界各国陆续开发了形态各异的无人水下航行器,广泛应用于海洋研究、海洋资源开发、军事等领域,并产生了巨大的经济效益与社会效益。尤其是近 10 年来,随着现代工业技术的进步,水下航行器的开发、购置和使用成本大幅下降,逐步从专业海洋工程技术实验室和水下装备研究机构走向普通用户,成为一种常见的科学仪器和海洋装备,甚至进入消费领域。

我国也将无人水下航行器作为海洋技术和装备发展的一个重要方向:中科院沈阳自动化研究所、哈尔滨工程大学、上海交通大学等单位,在这一领域开展了大量深入的研究工作,以“潜龙一号”、“潜龙二号”、“智水”系列、“海龙号”、“海马号”等为代表,取得了丰硕的成果。西北工业大学也在鱼雷、水雷等传统水中兵器技术的基础上,研制了多型军用和民用无人水下航行器,在国防和海洋研究领域发挥了重要作用。

为了适应当前无人水下航行器技术的发展,满足培养水中兵器和海洋工程高层次专业人员的需要,笔者以徐德民院士主编的《鱼雷自动控制系统》(第 2 版)一书中的鱼雷敏感元件、执行机构和控制算法分析与设计等内容为基础编写了本书,针对无人水下航行器的技术特点和最新进展,结合 10 多年来在无人水下航行器控制系统教学和科研方面的工作,进一步系统介绍导航传感器、路径规划、开发与测试等控制系统相关知识。

全书共分为 7 章。第 1 章介绍无人水下航行器及其控制系统的基本概念;第 2 章介绍无人水下航行器航行力学的相关知识,建立运动学和动力学模型,并针对控制系统设计需要进行解耦和线性化;第 3 章简要介绍当前无人水下航行器主要装备的导航传感器和驱动机构,讲述它们的工作特点并给出具体实例;第 4 章讲授无人水下航行器的解耦控制,包括深度控制、航向控制、横滚控制以及速度控制,基于经典自动控制原理对系统的稳定性进行分析,并给出控制参数设计的一般方法;第 5 章应用现代控制理论进行无人水下航行器运动控制算法的设计,包括状态反馈、观测器设计、最优控制和变结构滑模控制;第 6 章主要讲述无人水下航行器高层控制技术,包括航路点导引、机动目标导引、全局和局部路径规划等内容;第 7 章则介绍无人水下航行器控制系统开发的相关内容,具体包括控制系统体系结构、控制器硬件设计、控制软件开发和测试以及控制系统仿真技术,并给出西北工业大学开发的两型自主水下航行器控制系统的具体实例。

本书由高剑、张福斌编著。其中,高剑负责全书的规划和统稿,并负责编写第 1,2,4~6 章和第 7 章部分内容,张福斌负责编写第 3 章和第 7 章的部分内容。徐德民院士和严卫生教授审阅了全稿,彭星光、崔荣鑫、焦振宏、赵宁宁等老师为本书提供了相关素材,研究生刘杰、张广洁、陈乐鹏、张丽军、白红丽、贾世森等人参与了本书的编写工作,航海学院的 03081501 和 03081502 班的同学在使用讲义的过程中提出了很好的建议。此外,本书的出版也得到了西北

工业大学出版基金的资助,西北工业大学出版社的张晖、李阿盟等老师给予了热情的帮助和大力支持,在此表示衷心感谢。

笔者多年来一直从事无人水下航行器控制技术的理论研究和工程开发,力图通过本书较为系统、完整地讲授无人水下航行器控制系统的相关知识,反映当前技术水平的进展,但由于水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者提出宝贵意见。

编著者

2018年9月1日于西北工业大学水下航行器研究所

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 无人水下航行器概述及分类	1
1.2 遥控水下航行器	3
1.3 自主水下航行器	6
1.4 典型的无人水下航行器	10
1.5 我国的无人水下航行器发展状况	13
1.6 无人水下航行器控制系统	16
1.7 自主水下航行器控制技术	22
练习题	27
第 2 章 无人水下航行器空间运动模型	28
2.1 无人水下航行器运动学模型	28
2.2 无人水下航行器动力学模型	33
2.3 无人水下航行器空间运动方程分组	41
2.4 纵向运动方程的线性化	45
2.5 侧向运动方程的线性化	51
2.6 横滚运动方程的线性化	54
小结	55
练习题	55
第 3 章 无人水下航行器导航传感器与驱动机构	56
3.1 无人水下航行器导航传感器	56
3.2 无人水下航行器驱动机构	72
小结	78
练习题	78
第 4 章 无人水下航行器三通道解耦控制	79
4.1 无人水下航行器航向控制系统	80
4.2 无人水下航行器深度控制系统	94
4.3 无人水下航行器横滚控制系统	106
4.4 无人水下航行器速度控制系统	114
小结	116
练习题	117

第 5 章 无人水下航行器控制系统的现代设计方法	118
5.1 状态反馈控制	119
5.2 输出反馈控制与状态观测器	121
5.3 最优控制	127
5.4 变结构控制	134
小结.....	146
练习题.....	146
第 6 章 无人水下航行器的路径规划与导引技术	147
6.1 路径规划与导引的基本原理	147
6.2 无人水下航行器航路点导引	148
6.3 机动目标导引	152
6.4 基于电子海图的水下航行器全局路径规划	161
6.5 基于模糊逻辑的水下航行器局部路径规划	169
小结.....	183
练习题.....	183
第 7 章 无人水下航行器控制系统开发	184
7.1 无人水下航行器控制体系结构	184
7.2 无人水下航行器自动控制器	189
7.3 无人水下航行器自动控制软件开发与测试	197
7.4 无人水下航行器仿真技术	204
7.5 无人水下航行器自动控制系统实例	216
小结.....	226
练习题.....	226
参考文献	227

第 1 章 绪 论

海洋占地球表面积的 71%，其中蕴藏着石油、天然气、矿产和生物等多种资源，以及潮汐能、风能、温差能等能源，是维持人类发展的宝库。海洋，尤其是 1 000 m 以下的深海，作为人类尚未充分开发的空間和高科技领域之一，已经成为各国的重要战略目标，也是当前国际上竞相争夺资源的焦点。我国拥有 32 000 km 的海岸线和 3×10^6 km² 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%。因此，认识海洋、开发海洋是建设海洋强国、捍卫国家安全和实现可持续发展所不可缺少的。

目前，人类对海洋探索的广度和深度还处于比较初级的阶段。尽管现代科学技术可以使人类登上月球，机器人登上火星，但在海洋中进行同样的旅行却非常困难。海洋与陆地不同，其自然条件十分严苛，除海面上的惊涛骇浪之外，随着海洋深度的增加而产生的压力变化，给人类开发海洋带来极大的困难。正如人们常说的“可以看见月亮却看不到海底”，因为地面同月亮之间几乎是真空状态，而要到达海底，水深每增加 10 m，水压就增加 1 atm (1 atm = $1.013\ 25 \times 10^5$ Pa)，水深到达 1 000 m，海水的压力就足以把木材的体积压缩到原来的一半。同时，水深超过 100 m 就暗无亮光，电磁信号在水下衰减很快，水下的远距离探测和通信必须依靠水声信号，与空中环境相比，探测精度和更新率极低，信息传输距离和带宽十分有限。

由于生理条件所限，人类本身是很难去征服和利用海洋的，必须借助水下装备进入海洋。水下航行器作为探索海洋的重要手段，甚至在某些情况下是唯一的手段，在开发和利用海洋中的作用并不亚于火箭和航天飞机在探索宇宙空间中的作用。

1.1 无人水下航行器概述及分类

水下航行器，又称水下机器人，是一种可在水下运动，具有自身运动状态测量、环境与目标感知能力，通过遥控或自主作业方式，代替或辅助人类去完成水下测绘、探测和作业的装置。水下航行器分为载人水下航行器 (Manned Underwater Vehicle, MUV) 和无人水下航行器 (Unmanned Underwater Vehicle, UUV)，而后者根据控制手段和运动形式分为遥控水下航行器 (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。

UUV 在世界范围内的应用领域已经不断扩大，如海洋科学研究、海洋开发和水下工程等。此外，以美国为代表的军事大国非常重视其在未来战争中的应用。在不远的未来，UUV 将成为海上战争中争夺信息优势、实施精确打击与智能攻击、完成战场中特殊作战任务的重要手段之一。UUV 的应用领域可分为民用和军事两个方面。

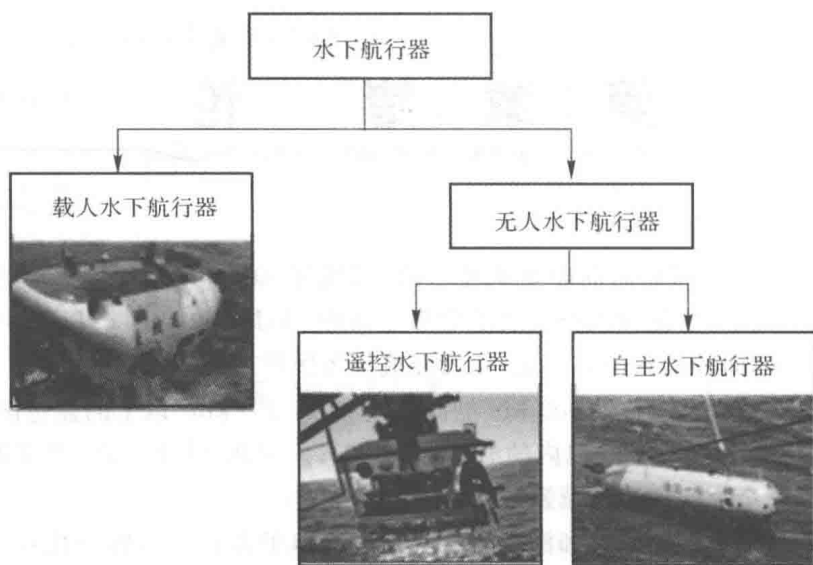


图 1-1 水下航行器的分类

1. 民用领域——海洋资源的研究和开发

海洋是生命的摇篮、资源的宝库、交通的要道，也是一个富饶且远未得到充分开发的宝库。21 世纪人类将面临人口膨胀和有限生存空间的矛盾，陆地资源枯竭和社会生产需求增长的矛盾，以及生态环境恶化和人类发展的矛盾这三大挑战。人类要维持自身的生存、繁衍和发展，就必须充分利用海洋资源，这也是人类无可回避的必然抉择。对人均资源占有率不高的我国来说，海洋开发更具有特殊意义。在海洋开发过程中，UUV 将在海洋环境的探测与建模、海洋目标的水下探测与识别、定位与信息传输、水下作业等方面的研究中发挥重要作用。

2. 军事领域——未来无人战争

以美国为代表的西方发达国家越来越强调战争中的零伤亡，这使得无人武器系统在未来战争中的重要性迅速提高，并且其潜在的作战效能越来越明显。作为无人武器系统重要组成部分的 UUV 能够以水面舰船或潜艇为平台，在数十千米乃至上千千米的范围内自主完成环境探测、目标识别、情报收集数据通信和负载投送等任务，从而大大地扩展了水面舰船和潜艇的作战空间。

目前各国重点探索的应用领域包括：

(1) 潜艇战——UUV 是辅助潜艇水下作战的理想装备，它可以利用装备的探测设备和攻击武器，跟踪和攻击敌方潜艇，还可充当诱饵，对敌方武器上的水声探测设备进行诱骗和干扰，使用中不必像载人潜艇那样冒巨大的风险。此外，UUV 可作为潜艇远距离水下通信中继站，也可作为潜艇外水声或尾流传感平台进行区域侦察，以扩大潜艇的搜索范围。在易被敌方反潜兵力发现和攻击的近海海域，UUV 可代替潜艇执行隐蔽情报收集、侦察等任务。

(2) 反潜战——除了携带战斗部作为鱼雷对敌方潜艇实施攻击外，UUV 还可搭载水听器探测和识别潜艇，执行水下警戒任务，并通过一定通信手段，把获取的情报自动传送给己方潜艇、水面舰艇和指挥中心。

(3) 水雷战——UUV 可携带水雷战斗部，由水面舰艇和潜艇发射，远程航行至敌方港口等重要水域实施布放，如图 1-2 所示为潜射自航水雷。

(4)反水雷战——装有探测装置的 UUV 能隐蔽进入敌方布雷海区,绘制出水雷分布图并储存,从而引导己方舰艇通过雷区,或者为猎雷、扫雷作业提供信息。比如美国海军在“自由伊拉克”行动中,采用 REMUS 100 UUV 进行反水雷作业,如图 1-3 所示,高效清理了在乌姆卡斯尔港的一条航路。

(5)海洋侦察——UUV 可在交战海域、政治敏感海域或敌方水域进行水下测量,绘制海图,布设水声应答器等,我国在周围海域就多次发现国外的侦查 UUV。

(6)特殊作战使命——UUV 可对敌方的海上目标进行破坏,比如切断水下电缆,破坏通信干线和供电电路,干扰敌方水下通信、水声阵列、导航应答等。

(7)非作战使命——搜索和打捞沉入海底的装备,包括导弹、鱼雷或人造卫星等,以及进行潜水支援工作、水下挖掘工作的后勤支援等。

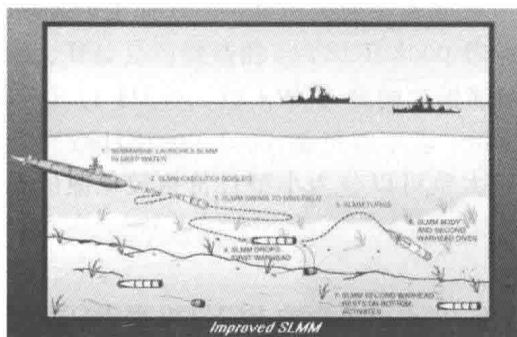


图 1-2 美澳联合研制的潜射自航水雷



图 1-3 REMUS 100 UUV 执行反水雷任务

1.2 遥控水下航行器

1.2.1 遥控水下航行器概述

20 世纪 60 年代早期,美国海军建造的缆控水下打捞航行器(Cable-controlled Undersea Recovery Vehicle,CURV)为现代遥控水下航行器的雏形。之后,海洋石油开发的需求促进了 ROV 的迅猛发展。1975 年,第一个商业化的水下航行器 RCV-150 问世,用于北海油田和墨西哥湾油田的探测。从那时起,一批高性能的 ROV 相继出现,例如,美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)的 Jason ROV(下潜深度为 6 500 m);日本海洋科学与技术中心(JAMSTEC)的 UROV 7K(下潜深度为 7 000 m)、海沟号(下潜深度为 11 000 m);法国海洋开发研究院(IFREMER)的 Victor 6000(下潜深度为 6 000 m)(见图 1-4)。

目前,ROV 在海洋研究、近海油气开发、海底矿藏调查、管道与电缆的铺设和检查、救捞作业、江河水库的大坝检查等方面都获得了广泛的应用。在军用方面,ROV 主要用于灭雷、海底军用设备的布放回收、辅助潜艇等。

ROV 系统主要包括航行器本体、连接电缆、收放系统和动力供应系统等部分,其中航行器本体带有推进装置、水下摄像机和机械手等。ROV 用一根连接电缆与水面母船连接,先通过它接收控制信号并提供电源,然后把图像和其他传感器数据回送给母船上的操作台。ROV 由母船上的操作者实时控制和导航,这就要求有高带宽、短延时的通信链与航行器连接。同时,因连接电缆的限制,导致水下航行器必须在靠近母船的区域工作,而且由连接电缆引起的阻力

十分巨大,这对推进能力和控制系统的抗干扰能力提出了要求。



图 1-4 法国 Victor 6000 ROV 及其操作台

1.2.2 遥控水下航行器的分类

按照外形尺寸大小、作业能力和任务使命,ROV 大致可以分为小型且价格较低廉的观测型 ROV 和为油田、深海科学考察等服务的作业型 ROV。

1. 观测型 ROV

世界上第一种经济型观测 ROV 是 Hydro 公司于 1974 年生产的 RCV225 型 ROV,其质量仅为 82 kg,使用深度为 400 m,具有较低的价格和使用成本。在整个 20 世纪 80 年代,观测型 ROV 的发展进入了高速发展时期,典型的产品包括加拿大 ISE 公司设计的 RASCAL,其质量为 54 kg,使用深度为 360 m。随后又推出了 MiniRover 观测型 ROV,其质量为 20 kg,使用深度为 100 m;美国 Deep Ocean Engineering 公司推出了 Phantom ROV。1999 年,VideoRay 型 ROV 推向市场(见图 1-5),它的质量仅为 5 kg,但其使用深度达到了 305 m,其基本型的价格仅为 6 000 美元。近年来,OpenROV 公司开发了售价不到 1 000 美元的 OpenROV,质量只有 2.5 kg,可为普通人提供水下探索和摄像的工具,并且其软、硬件都是开源的。正是由于这些观测型 ROV 的出现,原先必须由潜水员完成的任务,通过 ROV 可以很容易地实现,从而使得 ROV 的使用得到了普及。



图 1-5 VideoRay ROV 用于抚仙湖水下考古

相对于廉价的小型观测型 ROV,为了在更大水深和更加恶劣的海底环境中活动,产生了一些体形较大、价格较昂贵的观测型 ROV。这些 ROV 或多或少具有一定的作业功能,但它

们主要用于海洋观测任务,其所具有的作业能力有限,只具有一些简单的辅助功能,如配备液压剪用于剪断渔网,或者装备简单的机械手用于夹持一些设备或者开关阀门等,如英国 Saab Seaeeye 公司开发的 Falcon ROV。

2. 作业型 ROV

作业型 ROV 是相对于观测型 ROV 来说的,对于那些质量在数百千克及以上,装备有探测、搜索和观测装置,如各种声呐、水下摄像机和传感器等,并装备一台或者多台多功能机械手的 ROV 就可以被称为作业型 ROV。

作业型 ROV 最先用于海底石油开采领域。由于初期的海底石油开采深度很少超过 1 000 m,因此该类型 ROV 最大使用深度并不太大。但随着大深度采油技术的发展,相继出现了多种大深度型号的 ROV。如图 1-6 所示为由英国 Perry Tritech 公司生产的 Super Scorpio 作业型 ROV,其最大使用深度为 1 000 m,有效载荷为 150 kg,空气中质量为 1.6 t。加拿大 ISE 公司制造的 HYSUB 5000 作业型 ROV,使用深度为 365~6 000 m,功率为 6~250 HP (1 HP=0.75 kW)。我国广州海洋地质调查局从 ISE 公司订购的海狮号 ROV,其型号为 HYSUB130-4000,装机功率为 130 HP,最大作业深度为 4 000 m。



图 1-6 Super Scorpio ROV(右上)用于营救 AS-29 微型潜艇(左下)

相对于以上介绍的商用作业型 ROV,还有另外一些专门用于科学研究的大深度作业型 ROV。这类 ROV 具有使用深度大、作业能力强(某些型号装有力反馈型机械手)、导航传感器精度高、任务多样化等特点,代表了 ROV 发展的最高技术水平。但其制造数量少,往往只制造一艘。虽然有些商业用作业型 ROV 也可以用于科学研究目的,如 HYSUB-5000 型,但科研机构更习惯于使用专门设计的、对科学研究作业更有针对性的作业型 ROV。

美国的 Jason 系列是科学用作业型 ROV 的典型代表(见图 1-7)。第一代 Jason-I 型 ROV 于 1988 年服役,最大下潜深度为 6 000 m。在服役期间,它在太平洋、大西洋和印度洋完成了数百次下潜,最长下潜时间达 100 h,平均下潜时间为 21 h。2002 年,第二代 Jason-II 型 ROV 服役,其最大下潜深度更是达到了 6 500 m,其结构更坚固,技术更先进,并且已经取得了众多的科研成果。

世界上深度最大的科学用作业型 ROV 为日本海洋科学与技术中心的海沟号,可在载人潜水器无法到达的深海和危险的深海海底执行勘探任务(见图 1-8)。1995 年 3 月,海沟号下潜至 10 897 m 的马里亚纳海沟的底部。2003 年 5 月,海沟号在太平洋水域进行作业时丢失。事件发生后,日本海洋科学界和日本政府为之震惊,有人甚至将其比作海底的哥伦比亚号坠毁

事件。

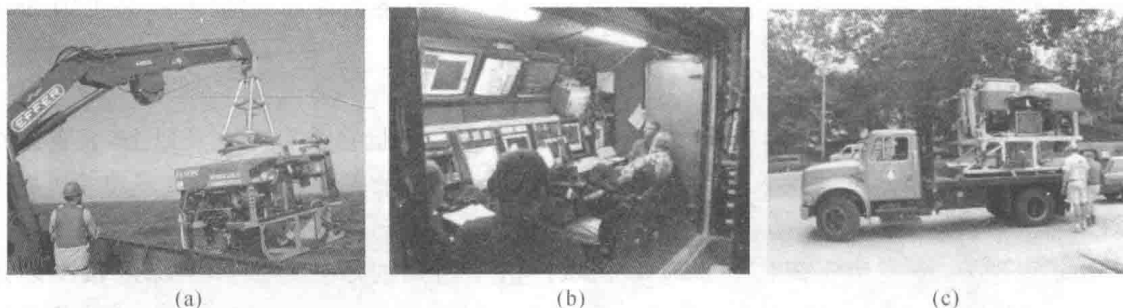


图 1-7 Jason ROV
(a)海上吊放；(b)操控台；(c)运输

由美国伍兹霍尔海洋研究所制造的混合遥控水下航行器 Nereus 号(见图 1-9)于 2009 年 5 月开始了挑战太平洋马里亚纳海沟深渊的航行,并于 2009 年 5 月 31 日到达了最深处 10 902 m。当工作在 ROV 状态时,Nereus 号没有使用传统 ROV 上的脐带电缆,而仅使用了一根最大长度为 40 km 的细光纤实现与母船的通信。它由运载器携带的 2 000 块锂铁充电电池提供电力,因此它的作业时间受到所携带电池电量的制约。它可以完成诸如岩石采样、水样采集、热液测量和海底地形图测绘等任务。当在浅水区域时,它又可以工作在无缆的 AUV 状态,进行大范围的作业。2015 年 5 月,Nereus 号在探索位于新西兰的世界第二深海沟克马德克海沟时失踪。



图 1-8 海沟号 ROV



图 1-9 Nereus 号 ROV

1.3 自主水下航行器

1.3.1 自主水下航行器概述

AUV 是一种水下远程航行、依靠自身自带能源、智能化自主航行、可根据任务使命要求搭载不同载荷、实现多种功能的集成无人水下航行器。AUV 具有以下特点:

(1)远航程:AUV 是以实施远距离海上或水下目标的探测或攻击为目的的,因此远航程是 AUV 的生命力之所在,是区别于遥控无人水下航行器的重要标志;

(2)智能化:AUV 可自主智能控制,并实现精确的导航定位;

(3)隐蔽性:AUV可长时间水下潜航,具有良好的隐身性能;

(4)机动性:AUV可实现大范围机动航行,有些AUV能够完成水下悬停或微运动状态下的作业任务,如我国的“潜龙二号”AUV;

(5)使命重构性:它可搭载不同任务模块,担负多种任务,具有使命重构能力;

(6)经济性:效费比高,使用成本较低。

在军事活动方面,AUV除了作为水中攻击武器鱼雷之外,还用于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、布雷和猎雷等任务。民用上可用于海洋资源调查,如海洋环境监测、航道测量、极区考察、远洋矿藏探测等,以及水下设施检查,如水下建筑、水坝、水下管道、水下电缆及沉船。

AUV是一种理想的海洋水下运载平台,可搭载多种海洋测量仪器。AUV的发展最早始于20世纪60年代。70年代为AUV的开发探索阶段,其技术上有了较大的发展,一些试验平台陆续建立。80年代是AUV的原型设计和试验阶段,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、指挥与控制硬件、逻辑与软件技术的发展,小型低功耗的计算机、存储器和软件工程方法为AUV的导航和控制提供了技术支持。AUV在日益先进的工业技术推动下快速发展,成为发达国家海洋技术研究的前沿。20世纪90年代以来,人们在人工智能、控制、能源、通信等各个方面取得了突破性进展,也为AUV的进一步研究提供了技术支撑。

世界各国的研究机构针对各种不同的任务相继开发了多型形态各异的AUV,如图1-10所示。其中比较有代表性的AUV有麻省理工学院(MIT)的Odyssey系列,海洋系统工程实验室的EAVE,佛罗里达亚特兰大大学(FAU)的Ocean Voyager II,WHOI的Autonomous Benthic Explorer和美国海军研究生院(NPS)的ARIES等。

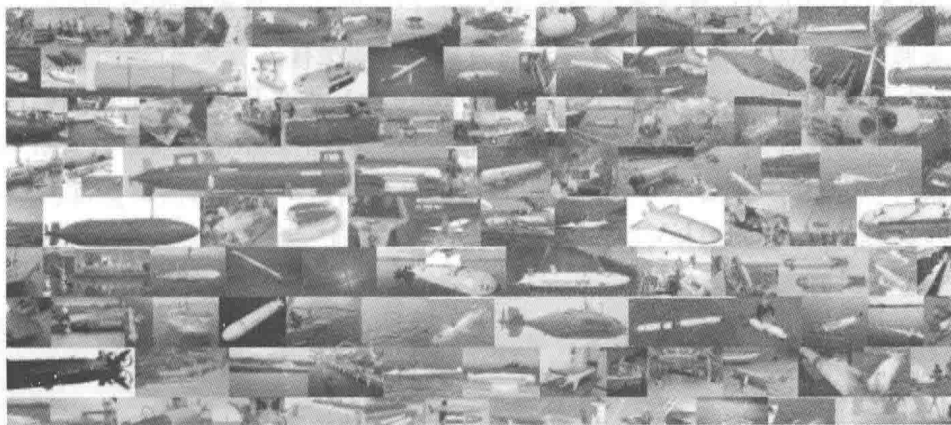


图1-10 世界各国的自主水下航行器(来自网站 <http://auvac.org/>)

1.3.2 自主水下航行器的分类

AUV不仅仅是无人驾驶的无系缆水下航行器,更重要的是它有自己的动力源,并能够依靠自身所携带的计算机和嵌入式机器智能执行航行任务。按照功能可以将AUV分为巡航型和作业型两种。

巡航型AUV一般具有良好的流线外形,能够利用声呐、CTD(电导率、温度、深度)传感器

和照相机等传感器,完成海底地形测量、海洋要素测量和水下目标拍照等任务。巡航型 AUV 在其执行任务期间连续航行,主要靠尾部的一台或多台推进器提供前进推力,并通过尾部的舵面实现姿态和航迹的控制。当前,世界上绝大多数的 AUV 都属于这一类型。

作业型 AUV 是指带有机械手或其他作业工具并能完成海底目标抓取等作业任务的 AUV,用于水下固定物体的检查并完成一定操作,工作时保持在水体中的位置和姿态稳定,一般需要5~6个推进器产生需要的操纵力和力矩。作业型 AUV 目前还处于研究阶段,如美国夏威夷大学的 SAUVIM 和西班牙 Girona 大学的 GIRONA 500,如图 1-11 所示。

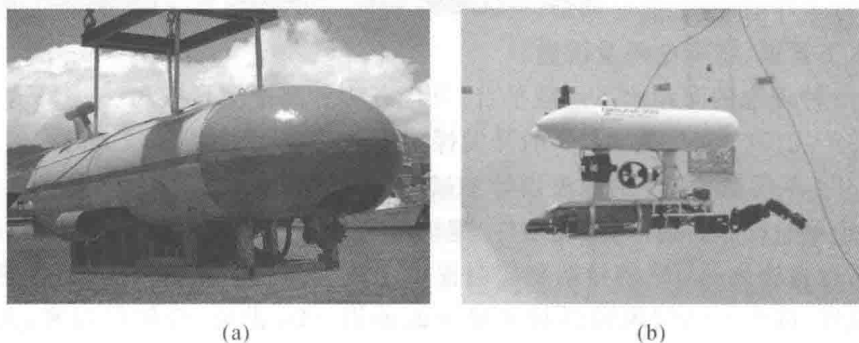


图 1-11 作业型 AUV
(a)SAUVIM; (b)GIRONA 500

依据美国海军 2004 年发布的《无人水下航行器总体规划》中的定义,为了适应不同的功能要求,按照排水量的大小和航行能力将 AUV 分为四个级别(见图 1-12):

(1)便携式 AUV:航行器排水量小于 45 kg(100 lb),水下续航能力为 10~20 h,无特定外形;

(2)轻型 AUV(LWV):直径通常约为 324 mm(12.75 in),排水量约为 227 kg(500 lb),负载能力是便携式 AUV 的 6~12 倍,续航能力是其 2 倍左右;

(3)重型 AUV(HWV):直径通常约为 533 mm(1 in),排水量约为 1 360 kg(3 000 lb),负载能力和续航能力较轻型 AUV 都有成倍提高,重型 AUV 中包括潜艇可搭载发射的航行器;

(4)大型 AUV:排水量达 10 t 以上,续航能力强,可以与水面舰艇和潜艇配合行动。例如波音公司开发的 Echo 系列 AUV。

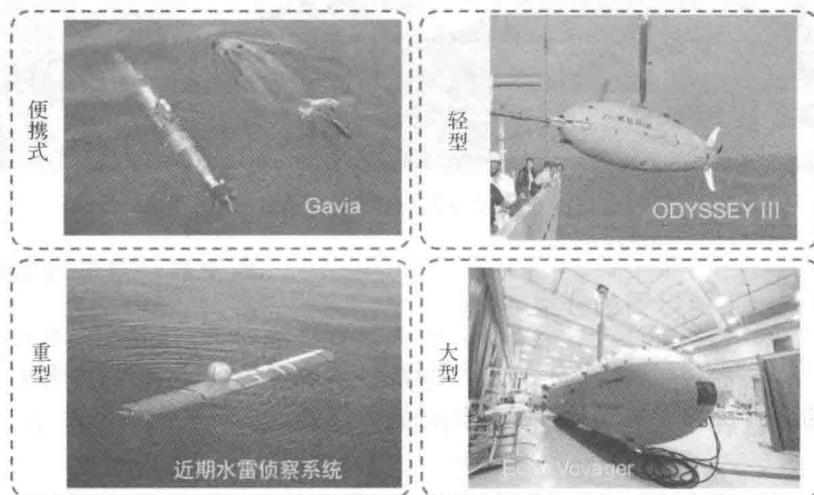


图 1-12 四个级别的 AUV

1.3.3 自主水下航行器的关键技术与发展趋势

因为没有连接电缆,AUV 可以从小而简易的母船上发射,甚至可以从船坞或码头上发射,这也使它能够在远离母船或平台的区域作业。因为不需人工操作,这就进一步降低了操作成本。但同时,这也决定了 AUV 的操作受其导航、控制系统的测量和计算能力的制约。由于没有连接电缆,AUV 只能依赖于其自身的动力源,续航能力受到极大的制约。由于上述限制,能源动力、自主导航与智能控制成为决定未来 AUV 应用的三大技术关键。

世界各国的科学家和工程技术人员在 AUV 领域开展了大量工作,涉及的关键技术包括定位、导航、运动控制、传感器与信号处理、图像传感、信息融合、任务与任务规划、故障诊断、系统辨识与建模、人机界面、能源系统、信息通信与传输、可靠性工程等。AUV 技术是许多国家十分重视的研究领域,目前正处于飞速发展的关键阶段。未来的水下航行器将向着多样化、智能化、网络化、长续航时间的方向发展。提高水下航行器的自主能力(autonomy)、对环境的适应能力(adaptability),以及通过多个水下航行器之间进行协作(coordination),完成单个水下航行器很难或不可能完成的复杂任务,是当前该领域研究的热点。

具体来说,AUV 未来发展趋势如下:

(1)开发新能源,提高续航力。AUV 的续航力主要是由所使用的能源决定的,能源的特性在很大程度上也决定了 AUV 的性能。目前,AUV 使用的能源主要有银锌电池、锂电池(如 LMRS,ALISTER 等 AUV)、碱性蓄电池(Sea Horse AUV)、铝氧半燃料电池(HUGIN-3000 AUV)等,各国都在此基础之上开发了更加先进的新型电池,发电效率、安全性、费效比、对环境的影响、可否重复充电使用等是研究的重点。

与此同时,麻省理工学院和美国伍兹霍尔海洋学研究所等研究单位针对海洋观测网络对 AUV 长时间工作的需求,提出了 AUV 水下自主对接系统,通过水下对接充电实现 AUV 的长时间工作,如图 1-13 所示。该系统主要由具有水下对接导引能力的 AUV 和与海洋观测网络连接的水下对接站组成。水下对接站安装有声学信标,用以给 AUV 提供对接站的位置信息,AUV 头部安装信号接收机获得回收站的位置信息,从而采用一定的对接导引控制算法,使 AUV 准确进入回收站并与站内机构锁紧。在回收站内,AUV 可通过水下插头与充电器连接实现水下充电和信息传输。近年来,人们开始研究基于电场和磁场的非接触充电技术,解决充电过程中的密封问题。

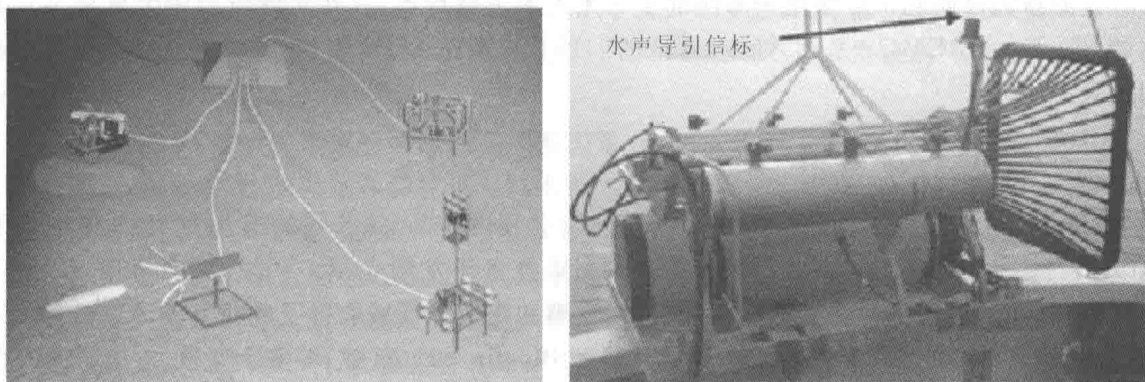


图 1-13 海洋观测网络中的 AUV 和水下对接系统

(2)提高耐压能力,向全海深航行发展。地球上 97%的海洋深度在 6 000 m 以内,研制 6 000 m 级的 AUV 是许多国家的目标。美国、俄罗斯、法国、中国等国家都拥有自己的 6 000 m 级的 AUV。尽管 ROV 和载人水下航行器也能达到这个深度,但发展 AUV 比其他航行器的造价要低得多,也更经济。

(3)变革通信方式,加强通信能力。水下通信技术是 AUV 系统与平台之间信息交互的关键。目前,AUV 水下通信采用了声学通信系统(如 Tailsman)、光纤电缆等,未来 AUV 通信方式的发展方向是大力发展高性能的声通信,在数据被传送之前,首先进行预处理,进行数据压缩以减少传送的数据总量,提高声通信的数据传输率,降低误码率。

(4)发展高精度自主导航系统。AUV 现有的导航设备主要有惯性导航(简称“惯导”)系统、罗经、多普勒计程仪等。目前,由于传感器固有的误差,惯导系统和航位推算系统不能满足 AUV 长期远程导航要求,在多普勒速度仪的辅助下,惯导系统的精度通常可以到达 0.2%~0.5%航程的水平。而全球定位系统(GPS)接收机可提供理想的修正值,但需要航行器浮出水面进行定位。为保持足够的定位精度需要不断利用 GPS 进行校正,这一方面导致 AUV 的行踪容易暴露,另一方面也缩短了 AUV 执行任务的时间。因此,未来的 AUV 必须发展自己的独立导航系统,减少对外界的依赖。目前美国海军水下作战中心开始发展非传统性导航技术,包括利用海底地形匹配、地形跟踪及重力场导航等。

(5)改进控制系统,提高自主能力和环境自适应能力。智能控制技术是实现 AUV 系统自主运行的关键技术。“自主”的含义是指 AUV 根据环境和自身状态来决定其行为,完成环境探测和分析、运动决策、最优路径实时规划、轨迹闭环控制、自主寻的和避障的能力。现代海战要求 AUV 必须能够在严苛的水下环境中完成任务,如浅水域、海底地形复杂、海面交通繁忙等都对 AUV 提出了很高的要求。

(6)提升自主作业能力,向作业型及智能化方向发展。现阶段的 AUV 只能用于观察和测量,没有作业能力,而且智能水平也不高。将来的 AUV 将引入人工智能,并且在 AUV 上安装水下机械手等作业装备,使 AUV 具有自主作业能力,扩大其应用范围,这是一个长远的目标。

1.4 典型的无人水下航行器

世界各国已研制了许多用于海洋勘测的无人水下航行器,并在实际应用中大显身手。美国的 Bluefin 和 REMUS 系列 AUV、挪威的 HUGIN 系列 AUV 和 Slocum 水下滑翔机是其中的代表。

1.4.1 Bluefin 系列 AUV

Bluefin 系列 AUV 是美国 Bluefin Robotics 公司的产品,该公司的前身为 1988 年创建于 MIT 的自主水下航行器实验室,被认为是 AUV 技术研发的先驱。1997 年,Bluefin 从 MIT 分离出来,凭借其高可靠性的 AUV,在科学、军事和商业等领域取得了成功。其 AUV 的产品包括 Bluefin-9(便携式)、Bluefin-12(轻型)和 Bluefin-21(重型)等多个型号,对应不同的直径、工作深度、负载和探测能力,如图 1-14 所示。