

“十二五”国家重点出版规划项目



现代舰船导航、控制及电气技术丛书

赵琳 主编

# 水下无人航行器控制技术

■ 严浙平 周佳加 编著  
边信黔 审校



SHUIXIA  
WUREN HANGXINGQI  
KONGZHI JISHU



国防工业出版社

National Defense Industry Press

「一五」国家重点出版规划项目



现代舰船导航、控制及电气技术丛书

赵琳 主编

# 水下无人航行器控制技术

---

■ 严浙平 周佳加 编著  
边信黔 审校

 国防工业出版社  
National Defense Industry Press



## 内 容 简 介

控制技术是制约水下无人航行器能否成功应用的关键技术之一,也是自动远程航海和自主执行任务的基础和保障。本书是团队近20年科研实践的总结,结合水动力学、空间运动学等建立了航行器载体数字运动模型,研究了水下无人航行器的作业类型、工作流程以及自主作业的控制需求,开展了水下无人航行器的数据处理与信息融合、决策评估与动态规划、空间运动控制等适用方法,最后结合科研实践阐述了水下无人航行器的试验及测试方法,并给出了实际案例。

本书可供从事水下无人航行器控制方法和技术研究的科研工作者使用,也适合高校自动化、智能控制等方向的学生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

水下无人航行器控制技术 / 严浙平, 周佳加编著.

—北京:国防工业出版社,2015.11

(现代舰船导航、控制及电气技术丛书/赵琳主编)

ISBN 978-7-118-10306-9

I. ①水... II. ①严... ②周... III. ①可潜器-控制系统 IV. ①U674.941

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第308709号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

三河市鼎鑫印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 18 $\frac{1}{4}$  字数 412 千字

2015年11月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价88.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## 丛书编委会

主 编 赵 琳

副主编 刘 胜 兰 海

编 委 (按姓氏笔画排序)

王元慧 卢 芳 付明玉 边信黔

朱晓环 严浙平 苏 丽 杨 震

杨晓东 宋吉广 金鸿章 周佳加

孟 杰 梁燕华 程建华 傅荟璇

綦志刚 蔡成涛

随着海洋世纪的到来,海洋如今越来越成为人类新的希望,也越来越成为世界各国争夺的目标。当今世界强国,无一例外都是海洋大国,海洋战略已成为具有重要意义国家战略。现代舰船是保卫国家海上安全、领土主权,维护海洋权益,防止岛屿被侵占、海域被分割和资源遭掠夺的重要工具。伴随着我国“海洋强国”战略目标的提出,现代舰船对操纵性、安全性、可靠性及航行成本,适应现代条件下的立体化海战,及与其他军种、兵种联合作战等提出了更高的要求,必然要求在核心领域出现一大批具有自主知识产权的现代舰船装备。

要提升我国舰船行业竞争力,实现由造船大国向造船强国的转变,首先要培养一大批具有国际视野和民族精神的创新人才,突破制约舰船装备性能的瓶颈技术,进而取得具有自主知识产权的研究成果,应用于船舶工程和海军装备。而创新人才的培养,一直是科技教育工作者的历史使命。

新形势下,我国海洋安全面临着前所未有的严峻威胁和挑战。确立“海洋国土”观念,树立海洋意识,提升海军装备水平,是捍卫我国国土安全必不可少的内容。为此,我们邀请业内知名专家,联合开展“现代舰船导航、控制及电气技术丛书”编撰工作,就舰船控制、舰船导航、舰船电气以及舰船特种装备的原理、应用及关键技术展开深入探讨。

本丛书已列入“十二五”国家重点出版规划项目。它的出版不仅能够完善和充实我国海洋工程人才培养的课程体系,促进高层次人才的培养,而且能为从事舰船装备设计研制的工业部门、舰船的操纵使用人员以及相关领域的科技人员提供重要的技术参考。这对于加速舰船装备发展,提升我国海洋国防实力,确立海洋强国地位将起到重要的推动作用。



随着世界经济和军事的快速发展,海洋资源开发、海洋能源利用、海洋军事科技已成为 21 世纪的主旋律,现代海洋高新技术已成为领导世界新科技革命的杀手铜,也是国家科技实力强弱的重要体现。诸如海洋资源、环境、地形探测等水下作业的高新装备已成为各海洋大国不遗余力进行研究的主要对象,尤其伴随大规模海洋开发、海洋军事应用的需要,大深度、大范围、远距离和高效率水下作业技术与装备的研发需求将更为紧迫。水下无人航行器作为海洋资源环境探测、开发和海洋军事应用的主要运载平台,以其无人、智能化、多功能、适应性强等特点与优势,在海底地形地貌探测、海洋工程建设、海洋资源开发、海洋科学探索以及国家海洋权益维护等诸多方面发挥了极其重要的作用,并且受到世界各发达国家的高度重视。近五年也在国内掀起了水下无人航行器技术的研究热潮。

水下无人航行器是一种体积小、操控性好、续航力和搭载能力强的移动载体,可满足海洋军事、海洋科技和海洋经济等领域的不同需求。然而,水下无人航行器本身是高新技术的集成体,加上水下工作环境的复杂性和不可预知性,这对其安全自主航海、自主执行使命任务提出了极高的要求。

当前,水下无人航行器逐渐成为备受关注的研究热点,也有一些相关水下无人航行器控制技术的教学、科研译著,但主要是关于水下无人航行器研制进展概述和基本知识,未见有关水下无人航行器控制技术的专著出版。随着海洋开发、海洋军事对水下无人系统的需求日益增强,推进“中国海洋强国梦”的实现,需要培养更多的专业技术和科研人才,促进系统地了解和掌握水下无人航行器控制技术是人才培养的关键环节。

水下无人航行器研制涉及总体设计、载体结构、能源与供电、导航与控制、传感与信息处理、通信与组网、优化与集成、试验与测试等关键技术,其中控制技术是诸多关键技术中迫切需要研究和解决的关键技术之一。受复杂海洋环境、水下远程导航、弱观测手段、人难以在环等因素制约,水下无人航行器控制技术已成为自主行为技能实现的挑战性课题。海洋强国的实现,离不开高新装备的研制和应用,水下无人航行器是有效装备之一。但目前这些水下无人系统自主控制能力有限,仅能开展一些简单程式作业,离实际应用需求尚存在较大提升与改进空间,也不断对控制科学与技术领域提出新的理论需求;反之,科研实践的不断深化,又给理论创新提供了技术依据,理论和技术的相互交叉将推进水下无人航行器控制能力不断加强,进而加快我国利用水下无人航行器进行维权、探测和开发的速度。

综上,我们结合团队多年科研实践经验与研究成果,积极地对水下无人航行器控制技术的基础理论和工程经验进行总结,梳理了相关理论和方法,将水下无人航行器控制技术及相关内容建立体系,并按8章内容编撰成册。

本书的编著得到了哈尔滨工程大学自动化学院海洋装置与控制技术研究所王宏健教授,李娟、张伟、徐健副教授,张宏瀚、张勋、陈涛博士提供的帮助,李本银、于浩森、张耕实、刘一博、刘祥玲、汪慢、姜岸佐等博士研究生参与了本书部分章节的仿真和文献整理工作。同时,控制方法推导和证明过程中得到了哈尔滨工业大学高会军教授的无私帮助和指导。对书中引用的一些参考文献资料,在此一并致谢。

希望本书的出版,不仅能够完善和充实海洋工程人才培养的课程体系,促进高层次人才的培养,而且也能为从事水下无人系统研究及相关领域的科技人员提供重要参考,推进学术交流和探讨,为提高水下无人航行器的控制能力发挥应有的作用。

由于作者水平和研究工作的局限性,书中难免存在不足之处,恳请广大读者批评指正。

## 第1章 绪论

1.1 航行器的定义及分类 .....	002
1.2 航行器的系统组成 .....	003
1.3 航行器发展 .....	004
1.3.1 国外发展状况 .....	004
1.3.2 国内发展状况 .....	007
1.4 航行器控制技术的发展历程 .....	008
1.4.1 国外研究状况 .....	008
1.4.2 国内研究状况 .....	012
参考文献 .....	016

## 第2章 航行器控制系统的约束

2.1 航行器控制系统的基本组成 .....	021
2.2 感知系统的约束 .....	022
2.2.1 感知系统的基本结构 .....	022
2.2.2 环境感知系统模型 .....	023
2.3 碍航物的约束 .....	026
2.3.1 障碍物建模与分析 .....	026
2.3.2 障碍物运动检测 .....	032
2.4 执行机构的约束 .....	033
2.4.1 螺旋桨推进装置 .....	034
2.4.2 舵装置 .....	035
2.4.3 均衡装置 .....	036
2.4.4 矢量复合推进装置 .....	037
2.4.5 新型推进装置 .....	039
2.5 海流干扰的约束 .....	040
2.5.1 海流影响分析 .....	041
2.5.2 无漩涡海流 .....	041
2.5.3 漩涡海流 .....	042
2.6 近水面海浪干扰的约束 .....	045
2.6.1 长峰波随机海浪 .....	045



2.6.2 波浪力和力矩 .....	047
2.7 非结构化不确定性扰动 .....	048
2.8 模型不确定性扰动 .....	048
参考文献 .....	048

### 第3章 航行器控制系统的体系结构

3.1 控制系统的体系结构 .....	050
3.1.1 体系结构概述 .....	050
3.1.2 体系结构设计原则 .....	050
3.2 控制系统体系结构的分类 .....	051
3.2.1 分层递阶体系结构 .....	051
3.2.2 基于行为的体系结构 .....	053
3.2.3 混合式体系结构 .....	055
3.3 控制系统体系结构实例 .....	056
3.3.1 航行器控制系统硬件结构 .....	056
3.3.2 航行器控制系统软件结构 .....	058
3.4 行为仲裁的分层递阶控制体系结构 .....	060
3.4.1 基于行为仲裁的航行器控制过程中的定义 .....	060
3.4.2 具有行为仲裁的航行器体系结构描述 .....	062
参考文献 .....	066

### 第4章 航行器控制器前级技术

4.1 控制系统的观测器 .....	068
4.1.1 可观性 .....	068
4.1.2 Luenberger 观测器 .....	068
4.1.3 非线性无源观测器 .....	069
4.2 控制系统的滤波器 .....	070
4.2.1 低通滤波器 .....	070
4.2.2 Notch 滤波器 .....	071
4.2.3 离散系统卡尔曼滤波器 .....	071
4.2.4 连续系统卡尔曼滤波器 .....	072
4.2.5 扩展卡尔曼滤波器 .....	072
4.3 控制系统预测技术 .....	073
4.3.1 对动态障碍物的预测 .....	073
4.3.2 航行器运动位置的预报 .....	075
4.3.3 行为预测 .....	082
4.4 航行器数据融合技术 .....	083
4.4.1 多源信息融合 .....	083
4.4.2 行为融合 .....	092

4.4.3 态势融合 .....	093
参考文献 .....	095

## 第5章 航行器任务自主控制技术

5.1 自主控制与决策的概念 .....	097
5.1.1 基本概念及特性 .....	097
5.1.2 自主控制的分级 .....	097
5.2 任务规划与任务控制 .....	098
5.2.1 任务分解及重规划 .....	098
5.2.2 任务规划与任务控制概述 .....	098
5.2.3 任务规划与任务控制设计实例——基于分层递阶 Petri 网的 任务控制 .....	099
5.3 路径规划 .....	109
5.3.1 路径规划概述 .....	109
5.3.2 路径规划相关问题 .....	109
5.3.3 航行器路径规划的实例 .....	113
5.4 自主学习与自主决策 .....	119
5.4.1 自主学习与自主控制技术概述 .....	119
5.4.2 环境感知方法 .....	121
5.4.3 数据融合 .....	128
5.4.4 自主学习方法 .....	129
5.4.5 自主决策方法 .....	135
5.5 故障诊断 .....	145
5.5.1 故障诊断的概述及分类 .....	145
5.5.2 故障诊断的流程 .....	146
5.5.3 航行器故障诊断的方法 .....	146
5.5.4 故障诊断的实例——基于灰色动态预测的航行器传感器故障诊断 ..	148
参考文献 .....	151

## 第6章 航行器的运动控制技术

6.1 航行器的运动模型及控制特性 .....	153
6.1.1 航行器的运动模型 .....	154
6.1.2 航行器的动力学模型 .....	157
6.1.3 航行器的 6-DOF 空间运动方程 .....	162
6.1.4 航行器的特性分析 .....	164
6.2 航行器路径跟踪控制 .....	178
6.2.1 航行器水平面路径跟踪 .....	179
6.2.2 基于自适应 PID 的空间路径跟踪控制 .....	179
6.2.3 基于迭代滑模的空间路径跟踪控制 .....	183

6.3 航行器轨迹跟踪控制 .....	190
6.3.1 航行器水平面轨迹跟踪 .....	191
6.3.2 航行器三维轨迹跟踪 .....	201
参考文献 .....	209

## 第7章 航行器编队控制技术

7.1 航行器编队的体系结构 .....	212
7.1.1 常见的群体体系结构 .....	213
7.1.2 航行器编队系统的体系结构 .....	215
7.2 航行器编队控制技术 .....	217
7.2.1 基于改进人工势场的编队控制 .....	217
7.2.2 基于图论的编队控制 .....	225
7.3 路径跟随条件下的航行器编队控制 .....	229
7.3.1 直线路径跟踪下多航行器的协调编队控制 .....	229
7.3.2 曲线路径跟踪下多航行器的协调编队控制 .....	238
7.3.3 通信约束下多航行器的协调路径跟踪控制 .....	247
参考文献 .....	253

## 第8章 航行器控制测试与验证技术

8.1 仿真控制效果评价技术 .....	255
8.2 航行器控制虚拟仿真技术 .....	257
8.2.1 仿真硬件系统构建 .....	257
8.2.2 仿真软件系统的设计 .....	258
8.3 航行器 HILS 控制技术 .....	263
8.3.1 航行器 HILS 特点 .....	264
8.3.2 航行器 HILS 需求 .....	264
8.3.3 航行器 HILS 控制系统的组成及功能 .....	265
8.4 航行器内场测试技术 .....	267
8.4.1 内场水池测试 .....	268
8.4.2 小范围动态测试 .....	269
8.5 航行器外场测试技术 .....	271
8.5.1 外场跟踪技术 .....	271
8.5.2 外场测试与验证技术 .....	273
参考文献 .....	277

# 第 1 章

## 绪论

21 世纪的人类面临“人口、环境和资源”的困扰,人口增长和现代生活方式对能源、食物的需求迅猛增加,陆地上有限的矿物资源日趋枯竭。而地球表面的 70.8% 被蕴藏了丰富的生物、矿物和能源的海洋覆盖,走向海洋已经成为人们的共识。海洋资源如何利用已经成了本世纪最受关注的问题之一,水下无人航行器(以下简称航行器)具有体积小、可控性好、经济性强和作业风险低等特点,近几年已成为海洋工程技术的研究热点并逐渐在海洋开发、海洋军事等领域得到了推广应用。

航行器作为未来海洋探测和开发的重要工具之一<sup>[1]</sup>,能在危险水域和大深度海域进行综合勘测、作业,引领海洋开发进入新时代。例如,海洋石油资源的勘测、海底管道检视、海洋环境勘察、海洋军事侦察等作业都需要应用航行器执行任务。随着电子技术、人工智能和材料技术的快速发展,航行器研制也进入了一个飞速发展时期,它在某种程度上反映了一个国家海洋高科技的水平,因此航行器技术备受各国的重视。

在我国,面对海洋开发事业的迅速发展,军事应用的迫切需求,航行器技术得到了且行且研的试用。航行器在海洋勘探、海洋工程、水下救助和水下勘测等方面的研究应用从来没有停止过,也产生了一定的经济和社会效益。但面向非结构、非预知的复杂海洋环境,以及航行器本身动力学模型的非线性与耦合性,开发航行器的导航、定位及自动控制技术极具挑战性,主要表现在以下几个方面。

(1) 海洋的潮汐、涌浪、海流、地形等变化规律复杂,是时间和空间上的复杂函数,对水下自动航行会造成不同程度的影响,而且很难被预知和建立精确预报模型。目前,只能建立简化模型来表征其特征,并采用鲁棒控制设计方法,基本可满足运动控制性能的要求。

(2) 航行器自身作为一个复杂系统,在海洋空间可以进行多自由度机动,可以采用推进装置、方向舵、俯仰舵进行操纵控制。当航行器执行机构数少于可控运动的自由度时,航行器则成为一个典型的非完整系统,需要利用动力学耦合关系达到控制效果。

(3) 相对于陆地和空中而言,水下的导航和定位难度较大,受复杂多变的海洋因素影

响极易出现失效现象,一旦导航或定位失效,航行器空间运动控制就失去了基石,甚至会发生意想不到的危险。基于动力学模型运动预报是解决途径之一,通过建立较为精准的航行器动力学模型,辅之以精确的执行机构状态反馈信息,结合运动预报可以在一定程度上克服水下导航、定位的不足。

尽管如此,航行器的经济性好、人损风险低、作业自动化程度高等优点,仍吸引着人们的研究热情。作为后续问题阐述的基础,本章将依次介绍航行器的定义及分类、系统组成、发展概况以及控制技术的发展历程。

## 1.1 航行器的定义及分类

航行器是一类为执行水下任务而自带能源、自主导航与控制、自主决策及作业的无人平台,它需要集成各类传感器,如惯性测量单元(IMU)、测速声纳、测距声纳、深度计、高度计和自身健康监测仪等,当然根据不同的作业任务,还需要集成与执行任务相关的传感器或载荷模块。传感器是航行器完成航行任务的必要保障,也是无人系统自身健康诊断和安全的保障。航行器内部集成了嵌入预设任务的系统,以实现自主决策与控制,也促使其成为未知海洋环境探测、调查的利器。

依据不同的需求,航行器可执行各种任务,其构造、航程、航速、航深及使用流程也不尽相同。由于人不在环的航行器控制技术更加具有挑战和难度,本书暂不考虑缆控航行器的有关问题,下面按照航行器的用途、排水量、结构与外形等进行分类,当然也可以按照材料、电池、航程等其他标准进行分类。

### 1) 按航行器的用途分类

航行器可分为观测、调查、探测、作业(作战)和测量等类别。其中,观测用的航行器主要用于海洋水文参数、海底环境相关信息的获取;调查用的航行器主要用于环境污染、辐射计量等特殊信息的获取;探测用的航行器主要用于海洋资源、海洋石油、失事目标等信息的获取;作业(作战)用的航行器主要用于测定所要调查对象的参数;测量用的航行器则是利用照相机、录像机、声纳等观测海底的地形、地貌或者搜索水下沉物。

### 2) 按航行器的排水量分类

航行器可分为便携型、轻型、中型和大型等类别。例如,便携型航行器的排水量小于50kg;轻型航行器的排水量小于1500kg;中型航行器的排水量小于8000kg;大型航行器的排水量小于20000kg。再小的还可称为微型或迷你型,达到上百吨则可称为无人潜艇,当然就按排水量标准分类而言尚未形成行业标准。

### 3) 按航行器的结构与外形分类

航行器可分为鱼雷形、水滴形、扁平形和框架形等类别。其中,鱼雷形航行器的外形是类似鱼雷回转体的单壳体;水滴形航行器是两头或一头细小的回转体结构,其阻力特性最好;扁平形航行器的外形属于非回转体的左右、上下对称结构,一般是多壳体结构组合;框架形航行器类似缆控ROV,但其运动速度较低,水动力特性不好,一般用于特种作业。



## 1.2 航行器的系统组成

航行器系统通常由载体结构、能源与供电系统、推进与操纵系统、导航与控制系统、通信系统,以及作业载荷等组成,简述如下。

### 1. 载体结构

载体结构一般包括耐压结构和非耐压结构。其中,耐压结构主要指用于布置能源、导航和控制、载荷等设备干搭载的密闭壳体结构,也包括浮力材料结构;非耐压结构主要用于提供湿搭载空间、减阻外形和强度结构,也包括设备集成安装的结构件等。耐压壳体结构通常采用钛合金、铝合金、碳纤维混合等材料制成,非耐压结构采用玻璃钢、高强塑料等材料制成<sup>[2]</sup>。

### 2. 能源与供电系统

航行器的能源与供电系统一般由携带的能源和供电配电设备组成。航行器当前的能源形式主要有银锌电池、燃料电池、锂离子电池等,配置能源时为了减小电机与设备之间的互扰,通常设置推进用和仪器用两组电池<sup>[3]</sup>。能源电池的选用取决于航行器的总体优化结果,不同排水量、航程要求的航行器电池选用也是件很复杂的事情。航行器的供电设备主要有电制匹配与隔离和用电管理两项功能,同时应具备能源的自监视和预警功能<sup>[4]</sup>。

### 3. 推进与操纵系统

航行器的推进与操纵系统是其空间机动的执行机构,依据工作环境和使用条件的不同,推进功能可由主推进和辅助推进实现,其中主推进有单推进、双推进和多推进模式,辅助推进有水平、垂直推进模式,它们组合作用可实现航向、航速、航深及位姿的保持和改变<sup>[5,6]</sup>。当然,除了主推进装置必不可少外,辅助推进装置的功能也可以由舵替代,常用的有水平面的方向舵、垂直面的俯仰舵。如金枪鱼和海马等小型航行器,也经常采用导管型矢量推进装置实现前进、转向和俯仰等机动功能。

### 4. 导航与控制系统

航行器的导航与控制系统是航行的直接保障,导航功能一般由捷联惯导系统、多普勒测速声纳、GPS/北斗定位等实现,当然还包括磁罗经、陀螺罗经、CTD、压力计、磁力计、测高声纳、声定位系统等辅助导航定位设备<sup>[7,8]</sup>。控制功能一般由运动控制和智能控制两个层次实现,运动控制用于航向、航速、航深和姿态角等的控制,智能控制用于任务规划、避障规划和作业规划等,智能控制主要依据运动状态、能源消耗和健康状况进行决策与重规划。

航行器导航经常采用捷联惯导组合和舰位推算两种模式,该两种模式均需要定位校准源(GPS或北斗等)和外速度修正(DVL),如美国的金枪鱼、REMUS系列、LMRS等均采用了惯导组合方式,目前直航导航精度最高水平的可达到航程的2%~5%。当然小范围作业时,也可采用声基线定位方式,如AUSS设有长基线水声定位系统,ODYSSEY、REMUS-100设有长基线和超短基线水声定位系统。长基线水声定位系统,其定位精度小于5m,定位范围取决于布阵大小;超短基线水声定位系统,其定位范围几千米,定位精度小于1~5m,适合移动跟踪定位。

## 5. 通信系统

航行器的通信系统一般采用水声、无线电、卫星等无线通信手段,必要时也可采用光纤通信<sup>[9,10]</sup>。通信系统的主要作用是保证有限监督、遥控和信息回传。当航行器处于水下工作时,通信的实现非常困难<sup>[11]</sup>,水声通信传输的数据率和作用距离有限,通信距离在10km时的最高数据率也只有4kB/s<sup>[12]</sup>,采用无线电(长波、短波、超短波等)则可在较远距离以较高数据率进行通信,如美国Manta的无线电通信系统的数据率可达11MB/s。卫星通信的作用范围是水声、无线电无法比拟的,也是远程航行器通信技术的趋势。航行器通常会设置多种信道实施多径通信,以确保通信的冗余,如海马航行器构建了射频通信系统、卫星通信系统和水声通信系统,以保证与潜艇的多径通信联络。

## 6. 作业载荷

航行器的作业载荷是实现其作用必须配置的探测设备、观测仪器、作业装置,甚至是武器等。航行器的探测模块一般配置合成孔径声纳、侧扫声纳、前视声纳和海底剖面仪等声学探测设备<sup>[13-15]</sup>,当然还有摄像机、照相机等设备。如美国的LMRS配置合成孔径声纳,采用高/低双频工作模式,高频和低频声纳分别具有25.4mm和76.2mm的水平距离分辨能力,在4kn航速时,其探测距离可以覆盖84m。高频声纳对凸出海床的沉底水雷能绘出高清晰度的图像,低频声纳增加了对掩埋水雷的探测能力。金枪鱼的侧扫声纳工作频率为455kHz,纵向精度可以达到10cm,横向精度可以达到7.5cm,可提供分辨率较高的图像。NMRS的侧扫声纳采用了AN/AQS-14型猎雷声纳,前视声纳采用SeaBat 6012,其工作频率为455kHz,前向扫描范围为90°,探测距离最远达到200m,分辨率可达到5cm。目前,航行器配置作战武器进行自主作战或辅助作战是各国研究的热点。

# 1.3 航行器发展

公元前332年,亚历山大曾使用原始潜水钟潜入海洋,达芬奇也曾建造一个由山羊皮密封的木质框架航行器。在20世纪初期,潜艇成为海战中极具威胁力的一种武器,曾以狼群战术控制着海洋。20世纪50年代,几个美国人将摄像机密封起来送到海底,用以探索海底世界,产生了航行器的雏形。在发展初期,由于所涉及的技术不够成熟,很多问题没有得到很好的解决,因此其并没有被工业界广泛接受,发展并不快。自从1966年美国的CURV航行器在西班牙沿海将失落在868m深处的氢弹打捞上来后,才备受关注。20世纪60年代的石油短缺催生了该产业迅猛发展,航行器技术也得到了快速发展。

### 1.3.1 国外发展状况

现代航行器研究可追溯至20世纪中期,多种外形、不同用途的航行器导航、定位与控制等技术取得了重要成绩,逐渐地形成了一个综合应用学科。航行器在很大程度上反映了一个国家海洋高科技的发展水平,也越来越受到各国的重视。当前,全球正在从事航行器技术研究和应用的国家包括挪威、美国、法国、英国、意大利、葡萄牙、日本等。其中,挪威和美国等对航行器的理解较为深刻,在实际应用方面暂时处于领先地位,主要情况简述如下<sup>[16]</sup>。

(1) 美国海军空间和海战(SPAWAR)系统中心。该系统中心研发了AUSS、Free

Swimmer II - SFII、Flying Plug 三种航行器,用于指挥和控制、光纤和水声通信、非金属材料等技术研究。

(2) 麻省理工学院(MIT)。麻省理工学院研制的 Odyssey - II 主要用于:①在海冰下标图,以理解北冰洋下的海冰机制;②检测中部大洋山脊处的火山喷发。

(3) Woods Hole 海洋研究所。该研究所研制的 ABE 系列航行器主要用于深海海底观察,其特点是机动性好,能完全在水中悬停,或以极低的速度进行定位、地形勘测和自动回坞。

(4) 通用动力公司和雷声公司。通用动力公司开始研制 XP - 21 航行器,后期由雷声公司承担。XP - 21 采用模块化设计,主要用于水雷战。

(5) 美国国防高级研究计划局(DARPA)和 CSDL。已建成两个可用做试验平台的航行器。采用 12 马力(1 马力 = 735W)的无刷电机,最大航速为 10kn,续航力为 24h,已成功完成海试。

(6) 佩里技术公司。佩里技术公司研制的 MUST 是供试验用的航行器,采用 10 马力的主推进电机,航行器可作悬停、垂直或横向运动。

(7) 美国海军研究生院(NPS)。美国海军研究生院已开发三种类型:NPS UUV - I, Phoenix - UUV 和 ARIES - UUV,主要用于控制、人工智能、可视化和系统集成等技术研究。

(8) 美国海军水下作战中心(NUWC)。美国海军水下作战中心正在研制 LDUUV 和 21UUV,其中的许多先进技术将直接应用于 LMRS 项目中。

(9) 美国海军研究局(ONR)。ONR 从事航行器的研究工作主要涉及航行器的能源与推进、传感器信号处理、通信、使命管理控制、导航和运载器设计等方向。

(10) 美国其他单位的航行器研制情况。① 海军海洋系统中心(NAVOCEANO)购进了一型先进的航行器用于获取海洋数据,并在此基础上开展了一项研究,以使各种航行器都能适应水下军事海洋学观察的需要。② 洛克希德导弹和宇航公司于 1990 年获得了研制水雷搜索系统 MSS/潜艇舷外水雷搜索系统 SOMSS 的合同。由于研制周期过长,MSS/SOMSS 将由 NMRS(近期水雷探测系统)和 LMSS(远期水雷探测系统)取代。③ 1999 年,波音公司在和诺斯罗普·格鲁曼公司的竞争性设计、制造中获胜,于 2000 年 11 月向美国海军交付首套样机。④ 美国夏威夷大学的 ODIN 是一个球状,配有八个推力器、全方位智能导航器,具有六个自由度姿态控制和自适应规划能力,主要用途为海底地貌观测。

(11) 俄罗斯。俄罗斯在航行器的钛合金加工制造和焊接方面位居世界先进水平,在发展复合材料、陶瓷材料方面也取得了很大成就。俄罗斯研发了 SKAT - GEO、L - 2 MT88、MT - GEO、TIPHLONUS、TSL、SANPA - 1 等,并与中国合作研制了 CR - 01、CR - 02。

(12) 挪威。挪威国防研究机构和 KONSBERG 集团研制了 HUGIN 系列航行器,用于侦察和海洋研究,已经系列化。采用半燃料电池作为动力源,潜在航程可达 1000n mile 以上。

(13) 日本。日本的航行器技术在民用方面主要用于地震预报和海洋开发。日本东京大学开发了 Twin - Burger 1&2、PTEROA 150&250、Tri - Dog1、Tantan 等多个型号航行器。

(14) 加拿大。加拿大开发的航行器中最著名的是 RAY 和 Sunfish。其中,RAY 成功

地演示了通过移动重物来实现的纵倾控制;Sunfish 则是一个具有搜索功能的航行器。

(15) 英国。AUTOSUB 主要用于极地冰下研究和搜集近海海洋学信息。2005 年英国 BAE 公司公布了 TALISMAN 试验情况后,于最近又研发了 4 型以上的航行器。目前,正与欧共体合作研究 DOLPHIN 和 DOGGIE 航行器。

(16) 德国。德国 STN、HDW 等正在研制 TCM/TAU 2000,将装配到 209、212 级潜艇上。STN 公司开发的 DeeP C 采用碳纤维增强塑料、缩微燃料电池等新技术制造。

(17) 韩国。韩国 Daewoo 重工业公司与俄罗斯海洋研究所合作研制了 OKPL-6000 的航行器,主要用于深海探测、搜索与观察海底沉没物体,已完成东海及太平洋海底观察。

此外,葡萄牙波尔图大学研制了小型鱼雷型 Isurus UUV,丹麦研制了 MARIUSUUV 等。下面详细介绍几个比较有代表性的航行器。

日本东京大学在 1989 年研制成功了 PTEROA150 型航行器。该航行器的设计基于游弋型原理,稳定翼的面积较大,运动控制的稳定性较好,同时装备 4 个有效距离为 50m 的声学探测器。基本功能测试结束后,此航行器被用于探测海底的地质结构,在 1992 年 12 月的海试结果表明利用航行器可实现无人自主的海洋环境观测任务,且应用前景非常广泛。PTEROA250 为 PTEROA150 的改进型,该航行器在某次试验中下潜到 6000m 深度,并执行了长达 2h 的使命任务<sup>[17]</sup>。图 1-1 所示为 PTEROA150 型航行器的水面悬浮状态。

东京大学和日本三井造船公司于 2002 年携手研制成功 R2D4 航行器<sup>[18]</sup>。该航行器的最大下潜深度为 4000m,空气质量为 1.6t,在 3kn 的工作航速可连续航行 12h,利用锂离子电池给载体供电。该载体的执行机构包括纵向推进器、垂向推进器、舵机;搭载的测量设备有音控测位装置、GPS 等。该航行器在 2003 年的测试试验较成功。R2D4 型航行器如图 1-2 所示。

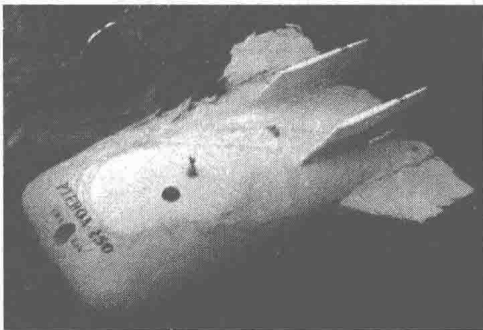


图 1-1 PTEROA150 航行器



图 1-2 日本东京大学的 R2D4 航行器

2005 年由挪威 Kongsberg<sup>[19,20]</sup> 研制的 Hugin 3000 是对 Hugin 1000 的发展,Hugin 3000 具有高速、高效、精确等性能,搭载传感器仍然稳定低噪。可以灵活地搭载多种传感器,最大潜深达到 3000m;可以进行实时的声学信息传输;在全负荷下可以完成全速 60h/440km 的航行。Hugin 3000 航行器如图 1-3 所示。

从 2000 年发展至今,葡萄牙 DSOR 实验室建造的 Infante 航行器<sup>[21]</sup>用于海岸地形勘测和环境监测。Infante 的俯仰舵包含艏俯仰舵和艉俯仰舵,分别布置在艇体的左侧和右侧,长 4.5m,翼展最宽 1.9m,最大潜深 500m,最大航速 5kn,在巡航速度 3.5kn 时可执行