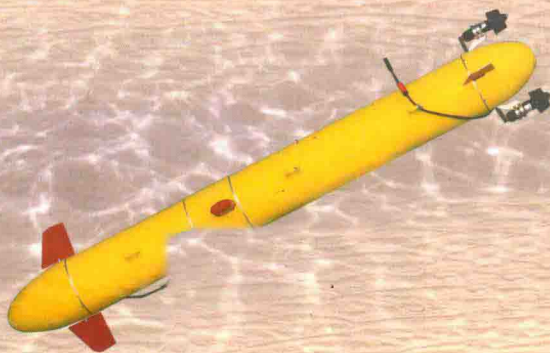


无人潜水器水下搜救 理论与技术

WUREN QIANSHUIQI SHUIXIA SOUJIU LILUN YU JISHU

■ 朱大奇 胡 震 张铭钧 周晨阳 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

无人潜水器水下搜救 理论与技术

朱大奇 胡 震 张铭钧 周晨阳 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

深海水下搜救既是无人潜水器的重要应用领域,也是现代智能信息处理的重要应用领域,是一多学科交叉的高新技术。本书在综述近年来无人潜水器水下搜救关键技术研究进展的基础上,从单个无人潜水器水下搜救和多潜水器协作搜救两个方面,研究无人潜水器水下搜救的基本理论方法与关键技术。最后给出一个实际的无人潜水器硬件与软件系统和实际的水下搜救案例。

本书可供从事水下搜救、探测、考古的科研人员阅读,也可供从事潜水器系统设计、海洋工程、自动控制、信号处理、机器人等有关专业的工程技术人员和高校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

无人潜水器水下搜救理论与技术/朱大奇等著. —北京:
国防工业出版社,2016.5
ISBN 978-7-118-10772-2

I. ①无… II. ①朱… III. ①潜水器-水下-救
援-研究 IV. ①P754.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 134764 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 17 字数 330 千字

2016 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 78.00 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

序 言

深海水下搜救既是无人潜水器的重要应用领域,也是现代智能信息处理的重要应用领域,是一门多学科交叉的高新技术。早在1963年就有美国“阿尔文”号与“科夫”号无人潜水器协作搜寻、打捞出西班牙海沟失落氢弹的成功案例;2014年初的马航MH370失联客机水下搜救中,“蓝鳍金枪鱼”号自治无人潜水器在4500m的深海进行了大规模水下搜索,虽然由于未知原因,仍未找到失联客机,但毫无疑问无人潜水器是深海搜救的首选工具,甚至是唯一选择,同时也表明深海无人潜水器水下搜救的困难与挑战性。

作为一门新兴、交叉学科,无人潜水器水下搜救技术既要研发面向水下搜救、具有自主知识产权的无人潜水器系统,同时又要突破水下搜救应用的关键技术,如水下环境感知与地图构建技术、水下路径规划与安全避障技术、水声通信与导航定位技术、水下轨迹跟踪控制技术、水下目标探测与识别技术、无人潜水器故障自诊断与容错控制技术及大规模水下搜索时的多潜水器协作搜救控制技术。

本书在综述近年来无人潜水器水下搜救关键技术研究进展的基础上,从单个无人潜水器水下搜救和多潜水器协作搜救两个方面,探讨无人潜水器水下搜救的基本理论方法、仿真研究结果。最后给出一个实际的无人潜水器硬件与软件系统和实际的水下搜救案例。

作为国内外第一部无人潜水器水下搜救理论专著,其主要创新之处在于:提出多传感器信息融合水下环境感知与地图构建算法,基于生物启发的自适应水下路径规划与安全避障技术,生物启发滑模串级水下轨迹跟踪控制方法;针对多潜水器大规模水下搜救问题,提出自组织多AUV多任务分配与路径规划算法和栅格信度自组织多AUV多任务分配算法,多AUV主从式运动学编队控制方法,基于生物启发神经网络的三维多AUV目标搜索算法。

该书既有无人潜水器水下搜救算法的计算机仿真,也有基于具体无人潜水器系统的实际系统开发和实际的水下搜救案例分析,是一本系统化的无人潜水器水下搜救专著。

中国工程院院士
“蛟龙号”载人潜水器总设计师
徐芑南

前 言

水下搜救既是无人潜水器的重要应用领域,也是智能信息处理与水声通信的重要应用领域,是一多学科交叉的高新技术,基于无人潜水器的深海水下搜救技术已成为航运和海洋工程领域的研究热点。早在1963年就有美国“阿尔文”号与“科夫”号无人潜水器协作搜寻、打捞出西班牙海沟失落氢弹的成功案例;2014年初的马航MH370失联客机水下搜救,美国就动用了“蓝鳍金枪鱼”号自治无人潜水器进行4500m的深海大规模水下搜索,虽然未找到失联客机,但毫无疑问无人潜水器是深海搜救的首选工具,甚至是唯一选择。

近些年来随着国家海洋战略的实施与现代海上运输业的发展,无人潜水器与水下搜救在国内也引起了广泛关注,特别是无人潜水器研制开发,在国家863等计划支持下,中国船舶重工集团公司第七〇二研究所、中国科学院沈阳自动化研究所、上海交通大学、哈尔滨工程大学、西北工业大学、上海海事大学等推出了多种型号的无人潜水器。但是真正面向水下搜救应用,具有完全自主知识产权的无人潜水器系统还很少。为了实现无人潜水器在水下搜救中可靠有效的应用,既要研发面向水下搜救、具有自主知识产权的无人潜水器系统,同时又要突破水下搜救的关键技术,特别是有关水下搜救的“水下路径规划与安全避障技术”“水声通信与导航定位技术”“水下目标探测与识别技术”及“多潜水器协作搜索技术”等。

本书以国家863计划项目(2006AA09Z210),国家自然科学基金项目(50775136、51075257、51279098、51409156、51575336、61503239、51509150),交通运输部基础研究计划(2011-329-810-440),上海市科委创新行动计划(10550502700、13510721400、14JC1402800),长三角联合攻关项目(10595812700),上海市优秀学术(科)带头人计划(11XD1402500),上海市领军人才计划(032)及上海市教委科研创新研究项目(13ZZ123、10ZZ97、10YZ113、09YZ248)的研究成果为基础,在综述近年来无人潜水器水下搜救关键技术研究进展的基础上,从单个无人潜水器水下搜救和多潜水器协作搜救两个方面,研究无人潜水器水下搜救的基本理论方法与关键技术。最后给出一个实际的无人潜水器硬件与软件系统和实际的水下搜救案例。

本书在内容阐述上有以下特点:

- 通俗易懂,条理清晰,便于学习。注重物理概念内涵的阐述,尽量避免繁琐的数学推导。
- 注重理论联系实际,加强搜救原理与系统开发及搜救案例的关联性介绍。

- 内容介绍上注重层次性。在综述近年来无人潜水器水下搜救关键技术的基础上,从单个无人潜水器水下搜救,到多潜水器协作搜救,再介绍无人潜水器研制和实际的水下搜救案例,层层推进。

全书内容共分九章。其中:

第1章无人潜水器水下搜救概述,介绍深海潜水器的相关概念、发展历史及无人潜水器水下搜救关键技术。

第2章信息融合与水下地图构建,介绍无人潜水器水下环境模型、水下传感器系统及水下环境地图构建的信息融合方法,为后面无人潜水器路径规划与跟踪控制技术研究提供基础。

第3章人工势场 AUV 水下路径规划,介绍人工势场路径规划原理及方法, AUV 水下人工势场路径规划方法及海流状况下 AUV 人工势场路径规划技术。

第4章生物启发 AUV 水下路径规划,介绍生物启发神经网络原理及其稳定性,生物启发神经网络路径规划原理与方法,环境信息已知和未知状况下的生物启发路径规划效果。

第5章无人潜水器水下轨迹跟踪控制,内容包括生物启发模型的运动学三维轨迹跟踪,生物启发模型的动力学三维轨迹跟踪,海流环境下的运动学与动力学三维轨迹跟踪。

第6章多 AUV 水下搜救任务分配,内容包括自组织多 AUV 多任务分配与路径规划算法,栅格信度自组织多 AUV 多任务分配算法和改进 SOM 算法的三维多 AUV 任务分配等。

第7章多 AUV 水下编队控制,内容包括多 AUV 主从式运动学编队控制原理与仿真,人工势场的多 AUV 编队控制与避障方法。

第8章多 AUV 协作搜索,内容包括生物启发神经网络搜索路径规划模型,生物启发神经网络的三维多 AUV 目标搜索仿真及分析,海流环境中的多 AUV 目标搜索等。

第9章无人潜水器研发与搜救实践,内容包括小型自主式 AUV 系统开发与无人潜水器水下搜救案例。

由于作者水平所限,时间仓促,不足和错误之处,敬请广大读者和专家批评指正。

作者 2015 年 10 月
于上海临港

目 录

第 1 章 无人潜水器水下搜救概述	1
1.1 深海潜水器	1
1.1.1 载人潜水器	2
1.1.2 无人潜水器	2
1.2 无人潜水器研究概况	3
1.2.1 有缆遥控无人潜水器	4
1.2.2 无缆自治无人潜水器	6
1.2.3 国内深海潜水器研究	8
1.3 无人潜水器水下搜救关键技术	11
1.3.1 无人潜水器水下环境感知与地图构建技术	11
1.3.2 无人潜水器的导航与通信系统	12
1.3.3 无人潜水器的水下路径规划及安全避障技术	13
1.3.4 无人潜水器的轨迹跟踪控制技术	14
1.3.5 无人潜水器的水下目标探测与识别技术	15
1.3.6 无人潜水器故障自诊断与容错控制技术	16
1.3.7 多潜水器水下协作搜救技术	17
参考文献	19
第 2 章 信息融合与水下地图构建	22
2.1 无人潜水器坐标系	22
2.2 无人潜水器水下搜救环境模型	25
2.3 声纳传感器参数与模型的建立	27
2.3.1 前视声纳模型	27
2.3.2 声纳传感器参数与模型建立	28
2.4 基于 D-S 信息融合的 AUV 地图构建与更新	29
2.4.1 D-S 信息融合算法	29
2.4.2 AUV 地图构建系统组成	30
2.4.3 AUV 地图栅格的状态判别规则	32
2.5 构建地图仿真结果及分析	33
2.5.1 实验环境初始化及仿真流程	33

2.5.2	地图构建准确率的定义	33
2.5.3	仿真结果及分析	34
	参考文献	41
第3章	人工势场 AUV 水下路径规划	43
3.1	人工势场模型	44
3.1.1	引力势场建模	44
3.1.2	斥力势场建模	45
3.2	人工势场路径规划的局部极小问题	47
3.3	人工势场的 AUV 路径规划	49
3.3.1	改进的引力势场函数	49
3.3.2	仿真实验及分析	50
3.3.3	局部极值问题	59
3.4	海流状况下的 AUV 人工势场路径规划	62
3.4.1	AUV 在海流环境的运行特点	62
3.4.2	速度矢量合成与人工势场集成的路径规划算法	63
3.4.3	仿真实验及分析	67
	参考文献	74
第4章	生物启发 AUV 水下路径规划	76
4.1	生物启发神经动力学的基本原理	76
4.2	生物启发神经网络模型	77
4.2.1	二维生物启发神经网络模型	77
4.2.2	三维生物启发神经网络模型	78
4.2.3	模型的稳定性分析	79
4.3	模型的参数敏感性分析	81
4.3.1	神经元之间的连接权系数	81
4.3.2	神经元的外部输入信号	82
4.3.3	神经元活性输出的取值范围	82
4.3.4	神经元活性值的衰减速率	83
4.4	基于生物启发神经动力学模型的 AUV 全局路径规划	85
4.4.1	水下环境建模	85
4.4.2	环境信息已知的点到点路径规划方法	86
4.5	环境信息未知全局路径规划方法	91
4.5.1	路径规划模型初始化	91
4.5.2	路径规划中的死锁问题	92
4.5.3	路径规划的实现与效果对比	93
4.6	基于声纳的长距离路径规划应用	94

4.6.1	AUV 与环境建模	95
4.6.2	声纳传感器信息处理	96
4.6.3	神经网络模型及目标点激励	98
4.6.4	长距离路径规划实验	100
4.7	基于三维生物启发神经网络的路径规划	102
4.7.1	三维环境地图与三维神经网络模型	102
4.7.2	路径规划算法	103
4.7.3	路径规划仿真实验	104
4.7.4	路径优化	104
	参考文献	107
第 5 章	无人潜水器水下轨迹跟踪控制	109
5.1	基于生物启发模型的运动学三维轨迹跟踪	112
5.1.1	无人潜水器运动学轨迹跟踪控制	112
5.1.2	生物启发模型	114
5.1.3	基于生物启发模型的反步运动学控制算法	115
5.1.4	仿真与分析	118
5.2	基于生物启发模型的动力学三维轨迹跟踪	122
5.2.1	基于生物启发模型的反步滑模级联动力学 跟踪控制算法	122
5.2.2	FALCON 三维跟踪控制仿真	125
5.2.3	蛟龙号三维跟踪控制仿真	132
5.3	海流状况下的自适应三维轨迹跟踪控制	141
5.3.1	无人潜水器的传统自适应控制	141
5.3.2	海流状况下基于自适应控制的无人潜水器 轨迹跟踪控制	143
5.3.3	仿真与分析	146
	参考文献	154
第 6 章	多 AUV 水下搜救任务分配	158
6.1	自组织多 AUV 多任务分配与路径规划算法	159
6.1.1	自组织特征映射(SOM)神经网络	159
6.1.2	基于 SOM 的多 AUV 系统的多任务分配	161
6.1.3	三维速度矢量合成算法	163
6.2	仿真结果	163
6.2.1	无海流环境下的多任务分配与路径规划	163
6.2.2	静态海流环境下的多任务分配与路径规划	166
6.2.3	时变海流环境下的多任务分配与路径规划	167

6.2.4	时变海流环境下的动态多任务分配与路径规划	169
6.3	栅格信度自组织多 AUV 多任务分配与路径规划算法	172
6.3.1	栅格位置信度函数	173
6.3.2	方向信度函数	173
6.3.3	AUV 路径选择策略与权值更新	174
6.4	基于改进 SOM 算法的三维多 AUV 任务分配仿真及分析	175
6.4.1	三维静态环境中的多 AUV 任务分配仿真及分析	175
6.4.2	三维动态目标环境中的多 AUV 任务分配仿真及分析	176
6.4.3	三维动态障碍物环境中的多 AUV 任务分配仿真及分析	179
	参考文献	181
第 7 章	多 AUV 水下编队控制	183
7.1	多 AUV 主从式运动学编队控制研究	187
7.1.1	基于领航 AUV 位置信息的虚拟 AUV 设计	187
7.1.2	运动学编队控制律设计	190
7.1.3	稳定性分析	192
7.1.4	运动学编队控制仿真及结果分析	193
7.2	多 AUV 编队避障方法研究	200
7.2.1	基于人工势场的多 AUV 编队避障方法	201
7.2.2	基于人工势场的多 AUV 避障仿真	203
	参考文献	207
第 8 章	多 AUV 协作搜索	210
8.1	生物启发神经网络搜索路径规划模型	212
8.1.1	二维搜索路径规划模型	213
8.1.2	三维搜索路径规划模型	214
8.2	基于生物启发神经网络的二维多 AUV 目标搜索仿真及分析	215
8.2.1	二维环境中静态目标搜索	215
8.2.2	二维环境中动态目标搜索	218
8.2.3	二维环境中部分 AUV 出现故障情况下的目标搜索	219
8.2.4	二维环境中不同算法的性能比较	221
8.3	基于生物启发神经网络的三维多 AUV 目标搜索仿真及分析	223
8.3.1	三维环境中静态目标搜索	223
8.3.2	三维环境中动态目标搜索	225
8.3.3	三维环境中部分 AUV 出现故障情况下的目标搜索	226
8.3.4	三维环境中不同算法的性能比较	229
8.4	海流环境中的多 AUV 目标搜索	231

8.4.1	海流模型	231
8.4.2	速度矢量合成算法	232
8.5	三维海流环境中的多 AUV 目标搜索仿真及分析	233
8.5.1	三维常值海流环境下的多 AUV 目标搜索	233
8.5.2	三维动态海流环境下的多 AUV 目标搜索	234
8.5.3	三维动态海流环境下的多 AUV 动态目标搜索	236
	参考文献	238
第 9 章	无人潜水器研发与搜救实践	240
9.1	AUV 系统设计	240
9.1.1	核心控制系统	242
9.1.2	水面导航定位系统	243
9.1.3	任务传感系统	244
9.1.4	运动控制系统	244
9.1.5	能源动力系统结构设计	246
9.2	主要硬件设备介绍	247
9.2.1	罗经(附带陀螺仪)	247
9.2.2	深度计	247
9.2.3	推进器	248
9.2.4	嵌入式模板	249
9.3	嵌入式系统软件设计	253
9.3.1	VxWorks 简介	253
9.3.2	VxWorks 集成开发环境 Tornado2.2	254
9.4	无人潜水器水下搜救案例	254
9.4.1	搜寻任务背景	254
9.4.2	搜寻任务准备	256
9.4.3	ROV 搜索路径规划	256
9.4.4	水面定位	257
9.4.5	水下目标搜寻	258
	参考文献	262

第 1 章 无人潜水器水下搜救概述

深海水下搜救既是无人潜水器的重要应用领域,也是现代智能信息处理的重要应用领域,是一门多学科交叉的高新技术,无人潜水器水下搜救技术已成为航运与海洋工程领域的研究热点。早在 1963 年就有美国“阿尔文”号与“科夫”号无人潜水器协作搜寻、打捞出西班牙海沟失落氢弹的成功案例;2014 年初的马航 MH370 失联客机水下搜救中,“蓝鳍金枪鱼”号自治无人潜水器在 4500m 的深海进行了大规模水下搜索,虽然由于未知原因,仍未找到失联客机,但毫无疑问无人潜水器是深海搜救的首选工具,甚至是唯一选择,同时也表明深海无人潜水器水下搜救的困难与挑战性。

1.1 深海潜水器

深海潜水器是运载各种电子装置、机械设备和人员快速精确地到达各种深海环境,进行高效的勘探、科学考察和开发作业的装备^[1]。潜水器包括载人潜水器(Human Occupied Vehicle, HOV)、无人潜水器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)和其他深海勘查设备(如深海拖曳测绘系统等)三类,其中无人潜水器(又称水下机器人)包括有缆遥控无人潜水器(Remotely Operated Vehicle, ROV)和无缆自治无人潜水器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)两种。图 1-1 为深海潜水器分类关系图。

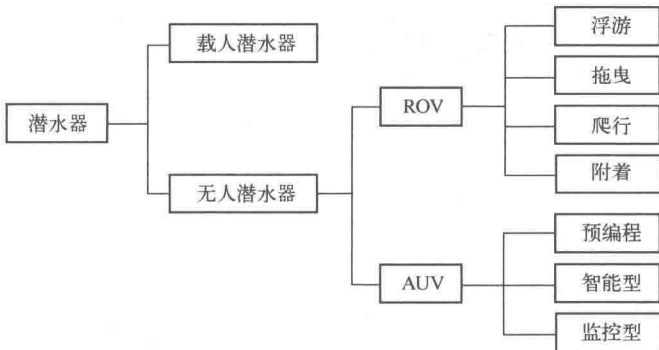


图 1-1 深海潜水器分类

1.1.1 载人潜水器

载人潜水器(HOV)以其有人驾驶、直接观察与操作的特性,已成为深海装备研究的热点之一,目前,美国、法国、俄罗斯、日本和中国等纷纷加入到HOV研发之中^[2],其中,法国的“鸚鵡螺号”HOV作业水深达6000m,已下潜1700多次;日本“深海6500”HOV已调查水深达6500m的海洋斜坡及大断层;美国正积极开发下潜深度6500m的“新阿尔文”号HOV;俄罗斯研制的“和平1”号、“和平2”号是世界上唯一一对可配合作业的载人潜水器;中国船舶科学研究中心(即中国船舶重工集团第七〇二研究所)深海载人装备国家重点实验室为主研制的“蛟龙号”7000m深海载人潜水器,是目前世界上下潜最深的载人潜水器,表1-1给出了全球4500m以上载人潜水器的主要参数。

从表1-1可见,载人潜水器最早在20世纪60年代已开始研制,到本世纪初已有六套4500m深度的系统推出,在国内“蛟龙号”载人潜水器已通过了7000m海试实验和多次应用作业,毫无疑问,载人潜水器研究取得了长足的进步。另外,我们必须看到,虽然“蛟龙号”载人潜水器在下潜深度和应用作业中都取得了极大的成功,但许多关键部件全部依赖进口,国产化率较低。目前正在研制的4500m深海载人潜水器正是为了弥补这一缺陷,研制真正的国产化深海载人潜水器,其国产化率达到90%以上,预计2018年实现海试并交付使用。

表1-1 全球4500m以上载人潜水器(HOV)的对比情况

型 号	阿尔文号	新阿尔文号	鸚鵡螺号	和平号	深海6500	蛟龙号
国家	美国	美国	法国	俄罗斯	日本	中国
最大工作深度/m	4500	6500	6000	6000	6500	7000
海洋覆盖范围	62%	99%	98%	98%	99%	99.8%
平均每年下潜次数	180	—	100~115	20	60	—
可容纳观察员/驾驶员	2/1	2/1	1/2	2/1	1/2	2/1
水下作业时间/h	4~5	约12	5	10~15	5	约12
有效载荷/kg	205	>205	200	250	200	220
球体部分体积/m ³	4.07	4.84	4.84	4.84	4.19	4.40
始建时间	1964	2004	1984	1987	1989	2002

1.1.2 无人潜水器

无人潜水器是一种能在水下浮游或在海底行走,具有观察能力和使用机械手或其他工具进行水下作业的装置。从机器人学的角度看,无人潜水器属于特种机器人范畴,在海洋工程界,无人潜水器通常也称为水下机器人(Underwater Vehicle)^[3]。

按无人潜水器在水下运动方式不同,可将其分为浮游式无人潜水器、拖曳式无人潜水器、爬行式无人潜水器和附着式无人潜水器;按潜水器与母船之间有无电缆连接,又分为有缆遥控无人潜水器(也称缆控无人潜水器)和无缆自治无人潜水器。随着无人潜水器技术的发展,近些年又出现了一种自治-遥控混合型无人潜水器(Autonomous & Remotely-operated Vehicle, ARV),它是将 ROV 和 AUV 的某些特性结合在一起的新型无人潜水器,通过光纤进行通信,自带电源,除去光纤可以作 AUV 使用,加上光纤又具有 ROV 功能。图 1-2 为有缆遥控无人潜水器 ROV 系统组成图。图 1-3 为无缆自治无人潜水器 AUV 基本组成。

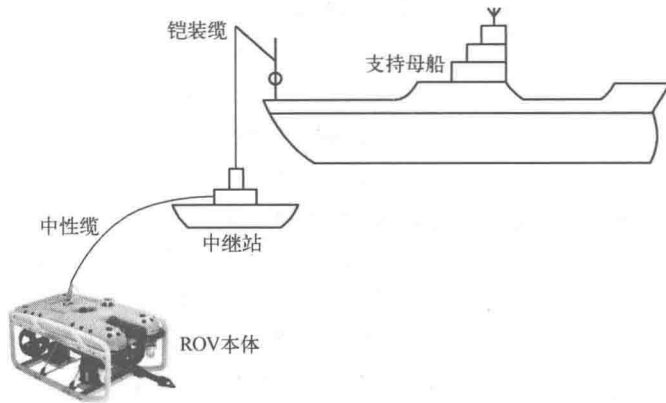


图 1-2 ROV 系统

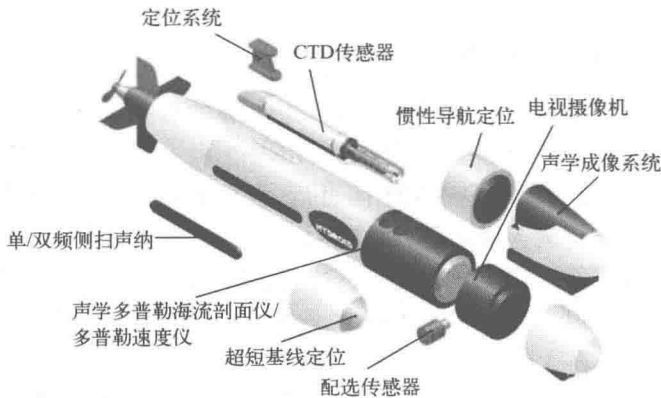


图 1-3 AUV 基本构造图

1.2 无人潜水器研究概况^[4-8]

620 年前,荷兰物理学家德雷尔发明了世界上第一艘原始潜水器。它能在水

下 5m 深处连续航行几海里,在当时是一件很了不起的事。这艘“潜艇”使用优质木材做艇体,并在外表覆盖了一层牛油皮,潜水艇的两边各有 6 名划手,用力向后划水而使艇前进。当潜艇要下潜时,将海水灌进羊皮囊;而上浮时,则将水挤出羊皮囊。该潜艇没有安置任何观察设备,也没有装备武器。

被誉为“潜艇”之父的美国人约翰·霍兰先后建造了 6 艘性能不断完善的潜艇,特别是他设计的霍兰 6 号具备了许多现代潜艇的特征:潜艇长约 15m,装有 45 马力^①的汽油发电机和蓄电池,航行平稳,配置有先进的鱼雷、炸药等武器。19 世纪末,美国的西蒙·莱克受科幻小说《海底两万里》的启发,建造了世界上第一艘具有双层壳体的潜艇,率先找到了潜水艇快速下潜和上浮的方法。到第二次世界大战时,潜水艇已应用于战争。

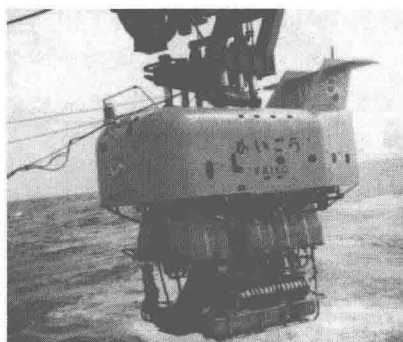
早期潜艇技术的发展与积累,为深海潜水器的发展提供了技术支撑,1934 年,美国潜水器潜入 914m 深度,开始了人类第一次在深海对生物进行观察。1960 年,人类终于下潜到海洋最深处 10913m,在太平洋马里亚纳海沟。这段时期研制的潜水器一般仅限于观察,无运动作业能力,发展也较为缓慢。这主要是由于所涉及的新技术还不够成熟,电子设备故障率高,通信的匹配,脐带电缆绞缠以及起吊回收等问题都没有很好解决,因此没有广泛被工业界所接受,发展不快。从 1975 年以后,由于工业及军事领域的需要,加上电子技术、计算机技术的迅速发展,使无人潜水器从基础理论研究、技术开发到实际的工业应用,都取得了较大进展。特别是近些年来,无人潜水器更是受到了各国政府部门、工业界及军事部门的高度重视,各种用途的无人潜水器都得到了极大发展。

1.2.1 有缆遥控无人潜水器

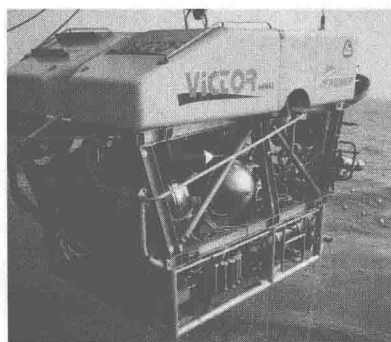
20 世纪 70 年代,由于海上石油开采及军事等的需要,使 ROV 技术得到迅猛发展,并且渐渐形成了一个新的产业部门:ROV 工业。大约在 1975 年,在观察型商业化的缆控无人潜水器 ROV-125 问世后,世界上有关 ROV 产品不断出现,典型的有日本的 KAIKO 无人潜水器(图 1-4(a))以及法国的 VICTOR 6000 无人潜水器(图 1-4(b))等。目前,ROV 型号已达几百种,全世界有超过 400 家厂商提供各种型号的 ROV 和其零部件^[8]。ROV 的最大下潜深度已经达到 11000m,可以说 ROV 的工作范围几乎达到全部的海洋空间。

近些年,国外已有多种型号的缆控无人潜水器作为成熟的商业产品销往国内。如美国 OUTLAND 技术公司的 OUTLAND1000(图 1-5),它配备了各种传感器,如深度计、声纳系统、罗经等;4 个推进器(2 个进退推进器、1 个横移推进器、1 个潜浮推进器)及计算机视觉系统。采用框架式结构,为系统升级和加装各种附件提供了充足的空间。其主要性能如下:长宽高为 65cm × 37cm × 26cm,质量约为

① 马力为非法定计量单位,1[米制]马力 = 735.49875W。



(a) KAICO



(b) VICTOR 6000

图 1-4 各类 ROV 设备

17.7kg,最大潜水深度为300m,航行速度为0~3kn(节),可调负载为2.3kg;

加拿大 SEAMOR300 无人潜水器(图 1-6),配备了深度计、高度计、声纳系统、罗经及计算机视觉系统等,4 个推进器成对称排列,与水平面成近 45°角,框架式结构,最大潜水深度为 300m,航行速度为 0~3kn,可调负载为 3kg;

英国 FALCON 无人潜水器(图 1-7)和 FALCON DR 系列产品,下潜深度达 300m 至 1000m,以 FALCON 为例,300m 耐压水深,8.5kg 载荷,脐带缆最长 450m,可升级到 1100m,5 个磁耦合无刷直流推进器,水平面 4 个矢量推进器和 1 个垂直推进器,具有速率反馈功能,分布式智能控制系统,功能较齐全的传感器系统和多功能机械手等作业系统。

法国 ECA HYTEC 公司 H300 MKII 无人潜水器(图 1-8)为浅水型 ROV,它的工作水深 300m,负载能力 8kg,能搭载众多传感器,如: Micron DST 扫描声纳,深度计、罗经及计算机视觉系统等;并配备功能强大的 5 功能液压机械手 BMHLK-4300;4 个磁耦合无刷直流推进器,最大推力达到 17.3kgf^①。

此外,还有美国 Seabotix 公司生产的 LBV200L 系列、Teledyne Benthos 公司的 Stingray 系列、加拿大 Videoray 系列等。



图 1-5 OUTLAND1000

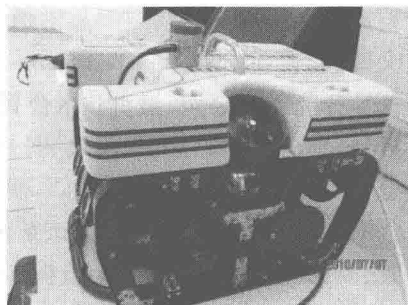


图 1-6 SEAMOR300 无人潜水器

① kgf(千克力)为非法定计量单位。1kgf=9.80665N。



图 1-7 FALCON 无人潜水器



图 1-8 H300 MKII 无人潜水器

1.2.2 无缆自治无人潜水器

无缆自治无人潜水器(AUV)是将人工智能、自动控制、模式识别、信息融合与系统集成等技术应用于传统载体上,在与母船之间没有物理连接,无人驾驶的情况下,依靠自身携带的动力以及机器的智能自主地完成复杂海洋环境中预定任务的潜水器。

由于 AUV 具有活动范围不受电缆限制,隐蔽性能好等优点,所以从 20 世纪 60 年代中期起,工业界和军方开始对其产生兴趣。但是,由于当时技术上难度太大,工业界和军方后来将兴趣转移到载人潜水器上。这使得无缆自治无人潜水器研究在低水平上徘徊多年。70 年代中期,微电子技术、计算机技术、人工智能技术及通信导航技术的迅速发展,再加上海洋工程和军事活动的需要,国外工业界和军方再次对 AUV 产生兴趣。

目前,美国是世界上 AUV 研究中心,也是世界上 AUV 研究机构最多的国家。仅美国海军主要研制无人潜水器的单位就包括:美国海军水下作战中心、美国海军研究局、美国海军海洋系统中心、美国海军空间和海战系统中心、美国国防高级研究计划局和查尔斯·斯塔克·德雷珀实验室、美国海军研究生院等。此外,还有华盛顿大学、麻省理工学院、Woods Hole 海洋研究所、通用动力公司和雷声公司、洛克希德导弹和宇航公司、佩里技术公司等。

另外,英国、德国、法国、瑞典、丹麦、挪威等许多欧洲国家在 AUV 研制与应用方面也有出色的表现。如德国海军研制一种用于反潜战的水下无人航行体——TCM/TAU 2000 鱼雷对抗系统。该系统主要由探测设备及信号处理装置、指挥控制装置、发射集装箱、4 个铰接盖板和 TAU 效应器组成,能进行全方位的区域侦察,作战系统信号处理时间短、反应速度快;由于采用了模块化设计,该系统能很容易地装配到 209、212 级潜艇上。另外,德国公司开发的名为“深海 C”(Deep C)的新型自主水下航行器,续航时间 60h,潜深达 4000m,直径 1m,重约 2000kg,他们在