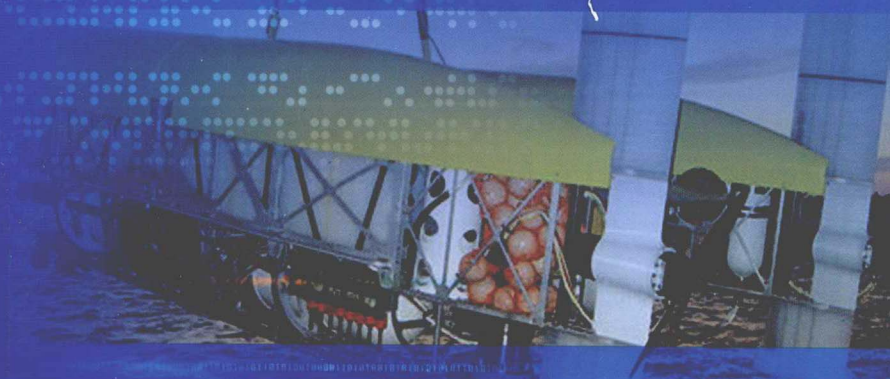


黄海 著

YAKONG QIANSHUIQI DE
KONGZHI TIXI JIEGOU JI ZUOYE JISHU

遥控潜水器的 控制体系结构及作业技术

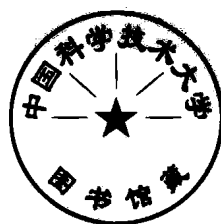


国防工业出版社

National Defense Industry Press

遥控潜水器的控制 体系结构及作业技术

黄海 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

遥控潜水器的控制体系结构及作业技术 / 黄海著.

—北京: 国防工业出版社, 2011. 10

ISBN 978-7-118-07765-0

I. ①遥… II. ①黄… III. ①潜水器—控制系统—
系统结构②潜水器—作业 IV. ①P754.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 209718 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 5 1/4 字数 118 千字

2011 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

海洋是生命的摇篮,资源的宝库,交通的要道,也是兵戎相见的战场。占地球表面积 71% 的海洋,是一个富饶而远未得到充分开发的宝库。人类要维持自身的生存、繁衍和发展,充分利用地球圈内仅有的这块最后待开发的疆土,将是不可避免必然抉择。遥控潜水器在世界范围内的应用领域已经不断扩大,如海洋研究、科学考察、海洋开发和水下工程、海洋环境监测、海洋地球科学数据采集和海底资源调查等。随着能源、水声通信、传感器、导航定位、自主控制等技术的不断发展,遥控潜水器在科学研究(海底地形测绘、海洋学研究、水文地理研究、水道测量研究、环境监测)和商业应用(海底资源调查、石油天然气管线检查、海底电缆光缆检查敷设、水下工程检查)等方面将会有更加广阔的应用前景。目前国外遥控潜水器正朝着大深度,高安全性、可靠性和应用性的方向发展。而国内的绝大多数遥控潜水器都处于试验和研究阶段,还不能直接用于海洋环境的可靠作业。

本书是一部探讨遥控潜水器控制体系结构及作业技术的学术专著。主要包括遥控潜水器的建模、遥控潜水器的传感器和数据处理、遥控潜水器的控制算法、遥控潜水器的控制体系结构、遥控潜水器的收放系统、遥控潜水器的水下作业技术、遥控潜水器的实例分析等几个部分。

自 2008 年,本书及相关研究先后得到了国家自然科学基金

项目(项目编号:51009040,50909025)、国家高技术研究发展(863)计划(项目编号:2008AA092301)、国防基础科研项目和哈尔滨工程大学引进人才项目(编号:HEUCFR1101)等多方面的的大力支持。在此向国家自然科学基金、863计划基金委和国防科工局表示衷心的感谢。本书是作者多年从事遥控潜水器及水下作业技术的研究成果总结,许多成果都是近年来最新取得的,在国内外都具备很先进的水平。

本书得到了哈尔滨工程大学智能水下机器人国防重点实验室庞永杰教授、苏玉民教授、万磊教授、张铭钧教授、秦再白高级工程师的大力支持、关怀与帮助。作者的同事以及同窗师兄弟李晔副教授、孙玉山副教授、王卓副教授、常文田副研究员、孙俊岭副研究员、王玉甲博士后、张铁栋博士、唐旭东博士、张赫博士、张国成博士和李岳明博士协助参加了相关的编写工作,作者在此向他们一并表示由衷的感谢。

遥控潜水器的控制体系结构及水下作业技术的理论和应用还处在快速发展阶段,相关的研究不断推陈出新。由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。作者将充分汲取读者的意见和建议,结合自身的科研工作,不断修改和完善本书,为遥控潜水器的控制体系结构及水下作业技术及相关技术领域的发展贡献绵薄之力。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 遥控潜水器发展综述	2
1.2.1 国外遥控潜水器发展现状	4
1.2.2 国内遥控潜水器发展现状	11
1.3 潜水器控制体系结构发展综述	13
1.4 潜水器作业技术发展综述	19
1.5 如何阅读本书	23
1.6 小结和补充读物	24
参考文献	25
第2章 遥控潜水器的建模	29
2.1 引言	29
2.2 潜水器的操纵性方程	29
2.2.1 坐标系及运动参数的选取	29
2.2.2 固定坐标系和运动坐标系的转换关系	31
2.2.3 潜水器的空间操纵运动方程	33
2.3 潜水器六自由度运动模型	37
2.4 潜水器的受力模型	40
2.4.1 环境影响	40

2.4.2	推进器推力仿真	41
2.4.3	重力与浮力	42
2.5	遥控潜水器光缆的模型	44
2.5.1	坐标系的建立	44
2.5.2	光缆的模型	45
2.5.3	边界条件	47
2.5.4	光缆的影响	48
2.5.5	遥控潜水器的动力学模型	49
2.6	水动力系数的实验测定	49
2.7	小结和补充读物	51
	参考文献	51
第3章	遥控潜水器的感知技术	52
3.1	引言	52
3.2	遥控潜水器的环境感知传感器	52
3.2.1	水下彩色变焦摄像机	52
3.2.2	水下微光摄像机	53
3.2.3	水下云台	53
3.2.4	前视声纳	55
3.3	遥控潜水器的图像处理方法	55
3.3.1	视觉图像的处理	55
3.3.2	声图像的处理	57
3.4	遥控潜水器的运动感知传感器	59
3.4.1	姿态传感器	59
3.4.2	速度传感器	60
3.4.3	声学基线系统	61
3.5	运动感知传感器的信息处理	64

3.5.1	船位推算的基本原理	64
3.5.2	野值的识别与剔除	65
3.5.3	离散型卡尔曼滤波	66
3.5.4	自适应卡尔曼滤波	69
3.6	小结和补充读物	71
	参考文献	71
第4章	遥控潜水器的控制算法与三维轨迹跟踪	73
4.1	引言	73
4.2	S面控制器	74
4.3	模糊神经网络控制	77
4.3.1	模糊神经网络结构	77
4.3.2	学习算法	79
4.4	基于扩展函数的递归模糊神经网络控制器	79
4.4.1	扩展函数	79
4.4.2	递归模糊神经网络控制器的结构	80
4.4.3	在线学习算法	83
4.4.4	改进的微粒群优化学习算法	85
4.5	实验结果与比较	87
4.6	小结与补充读物	92
	参考文献	92
第5章	遥控潜水器的控制体系结构	94
5.1	引言	94
5.2	遥控潜水器的结构和组成	94
5.3	遥控潜水器的控制体系结构	97

5.4	遥控潜水器的水面控制台	100
5.5	遥控潜水器的底层嵌入式控制系统	101
5.6	小结和补充读物	106
	参考文献	106
第6章	遥控潜水器的收放系统	107
6.1	引言	107
6.2	A型吊架收放系统的机构	109
6.2.1	摆动架	111
6.2.2	绞车和排缆器	112
6.2.3	伸缩架和波浪补偿装置	115
6.3	A型吊架收放系统的控制系统	117
6.3.1	波浪补偿装置	117
6.3.2	绞车电液伺服驱动系统	121
6.4	中继器	123
6.5	小结和补充读物	125
	参考文献	125
第7章	遥控潜水器的水下作业技术	126
7.1	引言	126
7.2	水下作业手	126
7.3	水下多自由度手爪	134
7.3.1	水下多自由度欠驱动手爪	135
7.3.2	水下多自由度灵巧手	137
7.4	水下作业工具	139
7.5	小结和补充读物	141
	参考文献	141

第 8 章 遥控潜水器的实例分析.....	143
8.1 引言.....	143
8.2 我国开发的 SY - II 型船体检测遥控潜水器	143
8.3 美国 Vedioray 小型遥控潜水器.....	151
8.4 美国 Seaeye 观察型遥控潜水器	154
8.5 小结和补充读物.....	156
参考文献	156

第1章 绪 论

1.1 引 言

海洋是生命的摇篮、资源的宝库、交通的要道,也是兵戎相见的战场。21 世纪人类面临人口膨胀和生存空间有限的矛盾,陆地资源枯竭和社会生产需要增长的矛盾,以及生态环境恶化和人类发展的矛盾这三大挑战。占地球表面积 71% 的海洋,是一个富饶而远未得到充分开发的宝库。人类要维持自身的生存、繁衍和发展,充分利用地球圈内仅有的这块最后待开发的疆土,将是不可避免的必要抉择。

作为人类探索海洋的工具,潜水器是先进机器人技术在水下的特殊应用,是机械、控制、信息、导航、船舶等学科相结合的前沿技术领域。潜水器的研究和广泛应用对于充分利用自然资源、发展国民经济具有十分重要的现实意义。当前潜水器的种类很多,其中遥控潜水器(Remotely Operated Vehicle, ROV)、无人无缆潜水器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)、自主式潜水器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 是三类最重要的潜水器。

潜水器在世界范围内的应用领域已经不断扩大,如海洋研究、科学考察、海洋开发和水下工程等。在民用方面,潜水器主要应用于海洋环境监测、海洋地球科学数据采集和海底资源调查等方面。随着能源、水声通信、传感器、导航定位、自主控制等

技术的不断发展,潜水器在科学研究(海底地形测绘、海洋学研究、水文地理研究、水道测量研究、环境监测)和商业应用(海底资源调查、石油天然气管线检查、海底电缆光缆检查敷设、水下工程检查)等方面将会有更加广阔的应用前景。在军事方面,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智能潜水器能够以水面舰船或潜艇为基地,在数百里的水下空间自主完成环境探测、目标识别、情报收集和数据通信,从而大大地扩展了水面舰船或潜艇的作战空间,它将成为未来水下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。目前各国重点研究的应用包括水雷对抗、反潜战、情报收集、监视与侦察、目标指示和环境数据收集等。

遥控潜水器(ROV)与自治式潜水器的最大区别,在于它的操作控制命令和动力电源均来自水面控制平台。脐带电缆在传输机器人动力和仪器电源的同时,还担负着下传指令、命令,上传状态和信息数据的任务,因而常常是由特种电缆、同轴电缆或光、电复合电缆构成。

1.2 遥控潜水器发展综述

遥控潜水器(ROV)是在其执行水下作业时操作员可以工作在相对舒适的环境之下的潜水器,通过脐带或系缆向潜水器传输动力、命令和控制信号、姿态及传感器数据传回操作员。

早在 20 世纪 50 年代,几个美国研究人员想把人的视觉延伸到神秘的海底世界,于是,他们就把摄像机密封起来送到了

海底,第一代浮游式缆控潜水器的雏形就这样产生了。世界上第一个真正意义上的 ROV - CURV 是在 1960 年由美国研制成功的。它在西班牙外海找到了一颗失落在海底的氢弹,这件事在全世界引起了极大地轰动,ROV 技术也开始引起人们的重视。

1960 年,第一个商业化缆控潜水器——“RCV - 125”问世了。“RCV - 125”属于观察型潜水器,外形就像一只球,所以又称作“眼球”。“眼球”首先工作在北海油田和墨西哥湾。从那时起,ROV 的发展更加迅速,20 世纪 70 年代发生的石油危机使得海洋石油产业得到迅速的发展,这也促进了 ROV 的迅猛发展,并且开始形成了 ROV 产业。表 1.1 所列为 ROV 的分类。

表 1.1 ROV 的分类

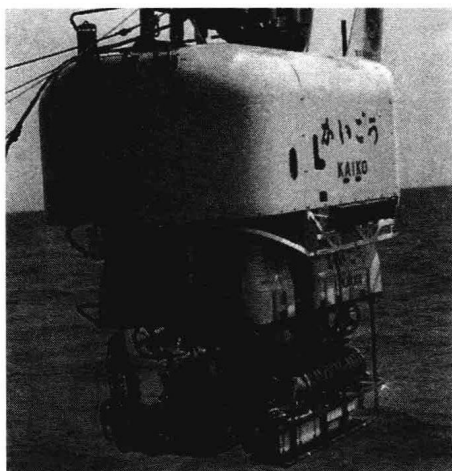
类 型	潜 深	动力(马力)①
低成本 ROV(全电)	观测(小于 100m)	小于 5
小型(全电)	观测(小于 300m)	小于 10
大型(全电)	观测/轻工作(小于 3km)	小于 20
超深度	观测/数据采集(大于 3km)	小于 25
中型(全电)	轻/中等强度工作(小于 2000m)	小于 100
大型(全电)	大强度工作/大负载(<3000m)	小于 300
超深度	大强度工作/大负载(>3000m)	小于 120

目前,ROV 的型号已经达到近百种,全世界有近 300 多家厂商提供各种 ROV、ROV 的零部件以及 ROV 服务。现代 ROV 系统可从以下几个方面进行分类:尺寸大小、潜深、动力以及是否全电或电—液驱动。

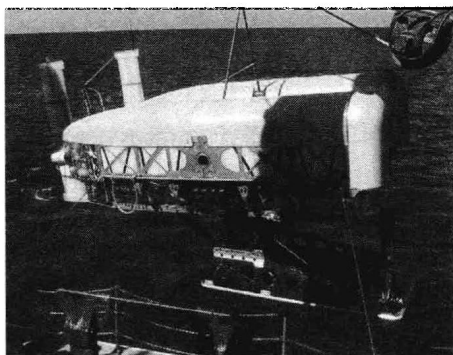
① 1 马力(hp)约合 735 瓦。

1.2.1 国外遥控潜水器发展现状

(1) “海沟”号遥控潜水器 (ROV) 是日本海洋技术研究所研制开发的世界上下潜深度最大的潜水器之一, 如图 1.1(a) 所



(a)



(b)

图 1.1 下潜最深的遥控式潜水器

(a) 日本的“海沟”号遥控潜水器; (b) 美国研制的混合型潜水器 Nereus。

示。1995 年,该潜水器下潜到了马里亚娜海沟的最深处: 10911.4 m。2003 年 6 月,该潜水器在太平洋水域采集细菌生物时失踪。

(2) 美国在 2007 年研制的混合型潜水器 Nereus 是一种集自治潜水器(AUV)和遥控潜水器(ROV)技术特点于一身的新概念潜水器(ARV),如图 1.1(b)所示。它自带能源并携带光纤缆,既可以作为 AUV 使用,进行大范围的水下调查,也可以作为 ROV 使用,进行小范围精确调查和作业。与传统的 AUV 相比,Nereus 可以携带机械手,增加了作业能力,而与传统的 ROV 相比,Nereus 将作业范围从几百米扩展到几十千米。因此,这种新概念潜水器可在大范围、大深度和复杂海洋环境下进行海洋科学研究和深海资源调查,具有更广泛的应用前景。Nereus 在自主探测时使用 $18\text{kW} \cdot \text{h}$ 的可充电电池,可下潜到 6500m。在遥控探测时下潜到了海底 11000m 的最深处,打破了日本海洋技术研究所研制开发的“海沟”号遥控潜水器(该机器人携带一对采集海底样品的机械手)在 1995 年创下的 10911.4m 的纪录。

(3) 美国的 MAX Rover(图 1.2)是世界上最先进的全电力驱动工作级 ROV,潜深达 3000m,配备有两只机械手,自身重

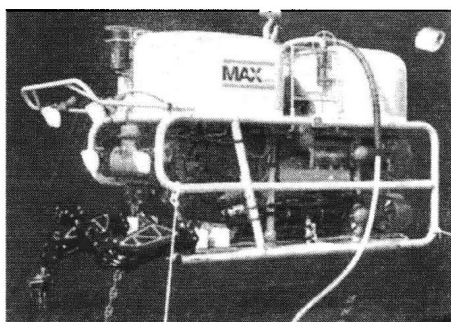


图 1.2 美国的 MAX Rover

795kg,推进器的纵向推力为 173kgf^①,垂向推力为 34kgf,横向推力为 39kgf,前进速度为 3kn,垂向速度为 1kn,横向速度为 1.5kn。

(4) Oceaneering's Magnum ROV (图 1.3) 潜深可达 3000m,主要用于海洋石油工业,两只机械手可以从事较重的水下作业。

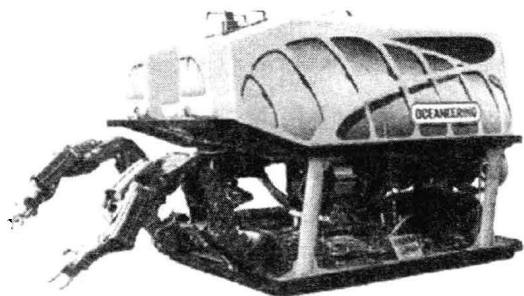


图 1.3 Oceaneering's Magnum ROV

(5) 美国的 Scorpio(图 1.4)由加利福尼亚州埃尔卡洪阿米特克公司开发,主要技术特征为:工作深度为 914m,尺度(长 ×

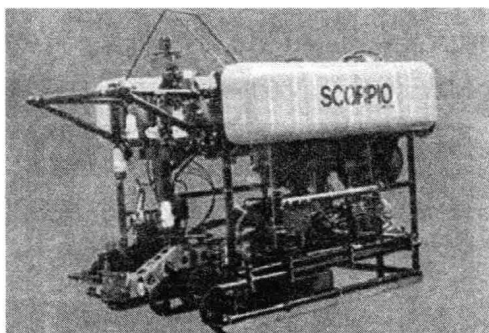


图 1.4 美国的 Scorpio 潜水器

① 力的法定计量单位为 N, $1\text{kgf} = 9.8\text{N}$ 。

宽×高)为223cm×122cm×163cm,潜水器重(干重)为680kg,速度(最大工作深度)为2kn。两只耐压浮筒位于一开式铝管框架内部的顶上。电子设备装在浮筒内可移动底架的抽屉里。浮力:潜水器具有正浮力。负浮力靠垂直推力器水力控制。电力要求:440V 交流电,60Hz,三相,50kW。

(6) 美国 SAAB 公司生产的 Seaeye COUGAR - Xti(图 1.5)专门用于深海作业,该潜水器具有模块化控制系统,系统故障诊断和容错控制,重 580kg、长 1.5m、宽 1m,最高速度 3.2kn,该潜水器装有两个模块化操作手,其模块化关节可以任意增减,适于多种水下作业。



图 1.5 美国 SAAB 公司的 Seaeye COUGAR - Xti

(7) 美国“Global Explorer”(图 1.6)主要用于深海观察、采样等科学研究和调查,在紧急情况下,可以在数小时内运输到现场。潜深为 3000m;全系统重约 11t。

(8) AC - ROV(图 1.7)是英国 AC - CESS 公司开发的目前世界上最小的遥控潜水器,该潜水器通过四个主推和两个垂推来实现水中六个自由度的运动,装有摄像机、深度计和漏水传感器,潜深达 75m,可通过一个手柄来控制,小潜水器重 3kg,潜水