



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

■ 海洋机器人科学与技术丛书 封锡盛 李 硕 主编

海洋机器人运动控制技术

Motion Control Technology for Unmanned
Maritime Vehicles

周焕银 刘开周 封锡盛/著



科学出版社
龍門書局



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

海洋机器人科学与技术丛书

封锡盛 李 硕 主编

海洋机器人运动控制技术

周焕银 刘开周 封锡盛 著



科学出版社

龍門書局

北京

内 容 简 介

本书针对自主水下机器人系统运动的特点介绍PID控制法、状态反馈控制法、滑模控制法、多模型控制法等设计过程,并针对两种类型的UMV(AUV与USV)系统设计对应的控制策略,解决这两类系统在湖泊试验与海洋试验过程中出现的控制品质差、耦合项间相互干扰等问题。

本书可供控制理论与控制工程、系统工程、模式识别与智能系统、船舶与海洋工程、机器人技术等专业的研究人员、研究生及高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

海洋机器人运动控制技术 / 周焕银, 刘开周, 封锡盛著. —北京: 龙门书局, 2019.9

(海洋机器人科学与技术丛书/封锡盛, 李硕主编)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 国家出版基金项目

ISBN 978-7-5088-5614-8

I. ①海… II. ①周… ②刘… ③封… III. ①海洋机器人—运动控制 IV. ①TP242.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第144707号

责任编辑: 杨慎欣 梁晶晶 张震 / 责任校对: 王瑞

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年9月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2020年4月第二次印刷 印张: 14 1/2 插页: 4

字数: 300 000

定价: 116.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

“海洋机器人科学与技术丛书”

编辑委员会

主任委员 封锡盛 李 硕

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

王晓辉 李智刚 林 杨

委 员 (按姓氏笔画排序)

田 宇 刘开周 许 枫 苏玉民

李 晔 李一平 何立岩 宋三明

张艾群 张奇峰 林昌龙 周焕银

庞永杰 胡志强 俞建成 徐会希

徐红丽 冀大雄

秘 书 姜志斌

丛书前言一

浩瀚的海洋蕴藏着人类社会发展所需的各种资源，向海洋拓展是我们的必然选择。海洋作为地球上最大的生态系统不仅调节着全球气候变化，而且为人类提供蛋白质、水和能源等生产资料支撑全球的经济。我们曾经认为海洋在维持地球生态系统平衡方面具备无限的潜力，能够修复人类发展对环境造成的伤害。但是，近年来的研究表明，人类社会的生产和生活会造成海洋健康状况的退化。因此，我们需要更多地了解和认识海洋，评估海洋的健康状况，避免对海洋的再生能力造成破坏性影响。

我国既是幅员辽阔的陆地国家，也是广袤的海洋国家，大陆海岸线约 1.8 万千米，内海和边海水域面积约 470 万平方千米。深邃宽阔的海域内潜含着丰富资源为中华民族的生存和发展提供了必要的物质基础。我国的洪涝、干旱、台风等灾害天气的发生与海洋密切相关，海洋与我国的生存和发展密不可分。党的十八大报告明确提出：“要提高海洋资源开发能力，发展海洋经济，保护海洋生态环境，坚决维护国家海洋权益，建设海洋强国。”^①党的十九大报告明确提出：“坚持陆海统筹，加快建设海洋强国。”^②认识海洋、开发海洋需要包括海洋机器人在内的各种高新技术和装备，海洋机器人一直为各海洋强国所关注。

关于机器人，蒋新松院士有一段精彩的诠释：机器人不是人，是机器，它能代替人完成很多需要人类完成的工作。机器人是拟人的机械电子装置，具有机器人和拟人的双重属性。海洋机器人是机器人的分支，它还多了一重海洋属性，是人类进入海洋空间的替身。

海洋机器人可定义为在水面和水下移动，具有视觉等感知系统，通过遥控或自主操作方式，使用机械手或其他工具，代替或辅助人去完成某些水面和水下作业的装置。海洋机器人分为水面和水下两大类，在机器人学领域属于服务机器人中的特种机器人类别。根据作业载体上是否有操作人员可分为载人和无人两大类，其中无人又包含遥控、自主和混合三种作业模式，对应的水下机器人分别称为无人遥控水下机器人、无人自主水下机器人和无人混合水下机器人。

无人水下机器人也称无人潜水器，相应有无人遥控潜水器、无人自主潜水器

^① 胡锦涛在中国共产党第十八次全国代表大会上的报告. 人民网, <http://cpc.people.com.cn/n/2012/1118/c64094-19612151.html>

^② 习近平在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告. 人民网, <http://cpc.people.com.cn/n1/2017/1028/c64094-29613660.html>

和无人混合潜水器。通常在不产生混淆的情况下省略“无人”二字，如无人遥控潜水器可以称为遥控水下机器人或遥控潜水器等。

世界海洋机器人发展的历史大约有 70 年，经历了从载人到无人，从直接操作、遥控、自主到混合的主要阶段。加拿大国际潜艇工程公司创始人麦克法兰，将水下机器人的发展历史总结为四次革命：第一次革命出现在 20 世纪 60 年代，以潜水员潜水和载人潜水器的应用为主要标志；第二次革命出现在 70 年代，以遥控水下机器人迅速发展成为一个产业为标志；第三次革命发生在 90 年代，以自主水下机器人走向成熟为标志；第四次革命发生在 21 世纪，进入了各种类型水下机器人混合的发展阶段。

我国海洋机器人发展的历程也大致如此，但是我国的科研人员走过上述历程只用了一半多一点的时间。20 世纪 70 年代，中国船舶重工集团公司第七〇一研究所研制了用于打捞水下沉物的“鱼鹰”号载人潜水器，这是我国载人潜水器的开端。1986 年，中国科学院沈阳自动化研究所和上海交通大学合作，研制成功我国第一台遥控水下机器人“海人一号”。90 年代我国开始研制自主水下机器人，“探索者”、CR-01、CR-02、“智水”系列等先后完成研制任务。目前，上海交通大学研制的“海马”号遥控水下机器人工作水深已经达到 4500 米，中国科学院沈阳自动化研究所联合中国科学院海洋研究所共同研制的深海科考型 ROV 系统最大下潜深度达到 5611 米。近年来，我国海洋机器人更是经历了跨越式的发展。其中，“海翼”号深海滑翔机完成深海观测；有标志意义的“蛟龙”号载人潜水器将进入业务化运行；“海斗”号混合型水下机器人已经多次成功到达万米水深；“十三五”国家重点研发计划中全海深载人潜水器及全海深无人潜水器已陆续立项研制。海洋机器人的蓬勃发展正推动中国海洋研究进入“万米时代”。

水下机器人的作业模式各有长短。遥控模式需要操作者与水下载体之间存在脐带电缆，电缆可以源源不断地提供能源动力，但也限制了遥控水下机器人的活动范围；由计算机操作的自主水下机器人代替人工操作的遥控水下机器人虽然解决了作业范围受限的缺陷，但是计算机的自主感知和决策能力还无法与人相比。在这种情形下，综合了遥控和自主两种作业模式的混合型水下机器人应运而生。另外，水面机器人的引入还促成了水面与水下混合作业的新模式，水面机器人成为沟通水下机器人与空中、地面机器人的通信中继，操作者可以在更远的地方对水下机器人实施监控。

与水下机器人和潜水器对应的英文分别为 *underwater robot* 和 *underwater vehicle*，前者强调仿人行为，后者意在水下运载或潜水，分别视为“人”和“器”，海洋机器人是在海洋环境中运载功能与仿人功能的结合体。应用需求的多样性使得运载与仿人功能的体现程度不尽相同，由此产生了各种功能型的海洋机器人，

如观察型、作业型、巡航型和海底型等。如今，在海洋机器人领域 robot 和 vehicle 两词的内涵逐渐趋同。

信息技术、人工智能技术特别是其分支机器智能技术的快速发展，正在推动海洋机器人以新技术革命的形式进入“智能海洋机器人”时代。严格地说，前述自主水下机器人的“自主”行为已具备某种智能的基本内涵。但是，其“自主”行为泛化能力非常低，属弱智能；新一代人工智能相关技术，如互联网、物联网、云计算、大数据、深度学习、迁移学习、边缘计算、自主计算和水下传感网等技术将大幅度提升海洋机器人的智能化水平。而且，新理念、新材料、新部件、新动力源、新工艺、新型仪器仪表和传感器还会使智能海洋机器人以各种形态呈现，如海陆空一体化、全海深、超长航程、超高速度、核动力、跨介质、集群作业等。

海洋机器人的理念正在使大型有人平台向大型无人平台转化，推动少人化和无人化的浪潮滚滚向前，无人商船、无人游艇、无人渔船、无人潜艇、无人战舰以及与此关联的无人码头、无人港口、无人商船队的出现已不是遥远的神话，有些已经成为现实。无人化的势头将冲破现有行业、领域和部门的界限，其影响深远。需要说明的是，这里“无人”的含义是人干预的程度、时机和方式与有人模式不同。无人系统绝非是无人监管、独立自由运行的系统，仍是有人监管或操控的系统。

研发海洋机器人装备属于工程科学范畴。由于技术体系的复杂性、海洋环境的不确定性和用户需求的多样性，目前海洋机器人装备尚未被打造成大规模的产业和产业链，也还没有形成规范的通用设计程序。科研人员在海洋机器人相关研究开发中主要采用先验模型法和试错法，通过多次试验和改进才能达到预期设计目标。因此，研究经验就显得尤为重要。总结经验、利于来者是本丛书作者的共同愿望，他们都是在海洋机器人领域拥有长时间研究工作经历的专家，他们奉献的知识和经验成为本丛书的一个特色。

海洋机器人涉及的学科领域很宽，内容十分丰富，我国学者和工程师已经撰写了大量的著作，但是仍不能覆盖全部领域。“海洋机器人科学与技术丛书”集合了我国海洋机器人领域的有关研究团队，阐述我国在海洋机器人基础理论、工程技术和应用技术方面取得的最新研究成果，是对现有著作的系统补充。

“海洋机器人科学与技术丛书”内容主要涵盖基础理论研究、工程设计、产品开发和应用等，囊括多种类型的海洋机器人，如水面、水下、浮游以及用于深水、极地等特殊环境的各类机器人，涉及机械、液压、控制、导航、电气、动力、能源、流体动力学、声学工程、材料和部件等多学科，对于正在发展的新技术以及有关海洋机器人的伦理道德社会属性等内容也有专门阐述。

海洋是生命的摇篮、资源的宝库、风雨的温床、贸易的通道以及国防的屏障，海洋机器人是摇篮中的新生命、资源开发者、新领域开拓者、奥秘探索者和国门

守护者。为它“著书立传”，让它为我们实现海洋强国梦的夙愿服务，意义重大。

本丛书全体作者奉献了他们的学识和经验，编委会成员为本丛书出版做了组织和审校工作，在此一并表示深深的谢意。

本丛书的作者承担着多项重大的科研任务和繁重的教学任务，精力和学识所限，书中难免会存在疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

中国工程院院士 封锡盛

2018年6月28日

丛书前言二

改革开放以来，我国海洋机器人事业发展迅速，在国家有关部门的支持下，一批标志性的平台诞生，取得了一系列具有世界级水平的科研成果，海洋机器人已经在海洋经济、海洋资源开发和利用、海洋科学研究和国家安全等方面发挥重要作用。众多科研机构 and 高等院校从不同层面及角度共同参与该领域，其研究成果推动了海洋机器人的健康、可持续发展。我们注意到一批相关企业正迅速成长，这意味着我国的海洋机器人产业正在形成，与此同时一批记载这些研究成果的中文著作诞生，呈现了一派繁荣景象。

在此背景下“海洋机器人科学与技术丛书”出版，共有数十分册，是目前本领域中规模最大的一套丛书。这套丛书是对现有海洋机器人著作的补充，基本覆盖海洋机器人科学、技术与应用工程的各个领域。

“海洋机器人科学与技术丛书”内容包括海洋机器人的科学原理、研究方法、系统技术、工程实践和应用技术，涵盖水面、水下、遥控、自主和混合等类型海洋机器人及由它们构成的复杂系统，反映了本领域的最新技术成果。中国科学院沈阳自动化研究所、哈尔滨工程大学、中国科学院声学研究所、中国科学院深海科学与工程研究所、浙江大学、华侨大学、东华理工大学等十余家科研机构 and 高等院校的教学与科研人员参加了丛书的撰写，他们理论水平高且科研经验丰富，还有一批有影响力的学者组成了编辑委员会负责书稿审校。相信丛书出版后将对本领域的教师、科研人员、工程师、管理人员、学生和爱好者有所裨益，为海洋机器人知识的传播和传承贡献一分力量。

本丛书得到 2018 年度国家出版基金的资助，丛书编辑委员会和全体作者对此表示衷心的感谢。

“海洋机器人科学与技术丛书”编辑委员会

2018 年 6 月 27 日

前 言

随着人类对海洋领域开发步伐的不断加快，作为海洋探测的重要工具——海洋机器人得到迅猛发展，人们根据不同需要发展出了多种新概念水下机器人系统。海洋机器人系统运动具有强耦合性、强非线性、复杂多变等特点，传统的运动控制技术很难达到期望的控制品质要求。运动控制技术是水下机器人底层控制的核心部分，其相当于驱使系统运行的大脑，一套鲁棒性强、自适应能力良好的控制策略是其高效率完成任务的关键。随着人类对水底世界探知的渴望越来越高，对水下任务的要求也越来越精细，为了提高水下机器人系统的控制品质，控制领域内众多专家学者将一些先进的控制技术应用于海洋机器人，近年来，国际上出现了许多智能控制技术在水下机器人中应用的实例与研究性探讨论文。

本书以提高海洋机器人系统运动控制品质为目标，根据所研究系统运动控制的特点，介绍此类系统运动控制模型的构建、控制技术的设计等。本书主要研究外场试验过程中的常见问题：各运动状态间的相互耦合影响问题，如纵向速度对航向、深度的影响等；外界环境对海洋机器人运动的干扰问题；深度控制过程中纵倾角过大与控制执行机构长期处于饱和状态等。

本书主要研究内容如下：首先，对海洋机器人运动模型进行分析研究；然后，针对自主水下机器人系统运动特点进行控制策略的数字仿真、半物理仿真验证；最后，针对两种类型海洋机器人系统（水面机器人与自主水下机器人）设计了自适应 PID 控制与多模型切换控制策略、多模型控制方法、状态反馈与滑模控制策略相结合等改进控制策略。

本书主要解决问题如下：针对海洋机器人耦合状态项间的互干扰问题提出动态反馈控制法、动态滑模变结构控制法等；针对海洋机器人受外界环境干扰大的问题提出自优化 PID 控制、状态反馈的滑模控制等技术；针对海洋机器人任务执行期间多任务要求造成运动模型发生较大变化的问题提出多模型切换策略，并根据系统运动特点对此控制策略进行优化；最后，给出相关智能控制技术在自主水下机器人、水面机器人式近水面航行体在湖泊试验与海洋试验中的应用实例分析。

本书第一作者自 2008 年在中国科学院沈阳自动化研究所读博至今，以水下机器人为研究对象，对相关先进控制技术，特别是多模型控制技术进行研究。研究过程中，她深感有必要结合相关领域的新成果、新进展与新发展趋势撰写一本学

术著作，对一些先进控制技术（如多模型切换控制技术）在海洋机器人外场试验中的控制优势进行系统的分析与介绍。希望本书对海洋机器人运动控制领域的理论与外场试验研究起到抛砖引玉的作用。

本书得到江西省自然科学基金项目（20181BAB202019）、国家自然科学基金项目（51409047）、国家重点实验室基金项目（2016-O05）、留学基金管理委员会项目（留金发（2017）（3059）号）、东华理工大学省级一流学科（电子科学与技术）建设的支持。

由于作者实践经验与知识水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

作 者

2018年7月28日

目 录

丛书前言一

丛书前言二

前言

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 UMV 运动模型的特点	4
1.1.2 UMV 运动控制技术研究现状	5
1.2 多模型控制及其在 UMV 中的应用	7
1.3 本书内容安排	9
参考文献	10
2 UMV 运动模型	15
2.1 UMV 运动控制模型特点	15
2.2 UMV 运动控制模型的设置	16
2.2.1 UMV 运动学模型	16
2.2.2 UMV 动力学模型	18
2.3 海洋机器人运动控制模型的简化	21
2.3.1 纵向速度运动模型	22
2.3.2 航向运动模型	22
2.3.3 深度控制模型	24
2.4 本章小结	27
参考文献	27
3 UMV 基本运动控制策略简介	30
3.1 PID 控制策略简介	30
3.1.1 PID 控制器概述	30
3.1.2 PID 控制器控制特点总结	34
3.1.3 系统控制品质与 PID 控制参数调整	35
3.1.4 自整定 PID 控制器概述	38

3.1.5	海洋机器人 PID 控制器设计	42
3.2	状态反馈控制策略简介	43
3.2.1	状态反馈基本概论	44
3.2.2	状态反馈控制的极点配置	50
3.2.3	状态反馈在海洋机器人中的应用	57
3.3	滑模控制策略简介	62
3.3.1	滑模控制设计	63
3.3.2	线性不确定系统滑模控制策略	69
3.3.3	非线性系统滑模控制策略	73
3.3.4	滑模面抖动问题研究	76
3.3.5	滑模控制策略在 UMV 系统运动中的应用	77
3.4	本章小结	80
	参考文献	80
4	UMV 多模型控制技术及其优化	83
4.1	多模型控制技术国内外研究现状	83
4.2	多模型控制技术基础理论	85
4.2.1	模型集的构建	86
4.2.2	切换策略的设置	86
4.2.3	控制器间的转换与优化	87
4.3	基于权值设置的线性多模型切换	87
4.3.1	多模型切换过程中权值范围的设置	87
4.3.2	基于 UMV 的多模型控制	91
4.3.3	基于权值设置的加权多模型切换流程	94
4.4	基于控制策略设置的非线性多模型优化切换	99
4.4.1	基于加权因子的非线性多模型切换	99
4.4.2	非线性多模型控制策略	100
4.4.3	UMV 运动控制模型特点	102
4.5	基于能量函数的非完全同态多模型优化切换	105
4.5.1	UMV 运动控制模型的特点	105
4.5.2	非完全同态多模型切换稳定定义	105
4.5.3	基于状态变量减少的多模型切换策略	107
4.5.4	状态变量增加的非完全同态多模型切换	110
4.5.5	数字仿真实验分析	111
4.6	本章小结	114

参考文献	114
5 AUV 运动控制技术仿真分析	118
5.1 基于神经网络补偿的 AUV 动态反馈控制	118
5.1.1 AUV 运动轨迹误差模型	119
5.1.2 所研究 AUV 运动控制模型的特点	123
5.1.3 半物理仿真验证	124
5.2 基于 AUV 运动控制的状态反馈滑模控制法	127
5.2.1 基于 SFSMC 的 AUV 控制模型设置	128
5.2.2 基于 AUV 运动模型的动态状态反馈控制策略	129
5.2.3 AUV 各控制模型控制律设计	131
5.2.4 基于 SFSMC 的 AUV 仿真	132
5.3 基于 AUV 运动控制的控制器集在线优化	135
5.3.1 AUV 运动模型的多模型控制库	135
5.3.2 AUV 多模型控制库的描述	137
5.3.3 基于 AUV 运动的多模型控制库仿真验证	138
5.4 本章小结	142
参考文献	142
6 USV 系统运动控制及其外场试验	145
6.1 USV 系统 (BQ-01) 简介	145
6.2 多辨识模型切换动态反馈 USV 湖泊试验航向运动控制	147
6.2.1 BQ-01 系统航向辨识模型	148
6.2.2 USV 系统航向辨识模型参数估计与筛选函数的构建	148
6.2.3 BQ-01 系统航向运动临时模型集的构建	150
6.2.4 基于 USV 航向运动的动态反馈控制策略	151
6.2.5 基于辨识模型集的控制切换策略	152
6.2.6 USV 航向湖泊试验验证及其分析	154
6.2.7 USV 系统湖泊试验航向控制小结	155
6.3 辨识模型集动态滑模控制在 USV 系统深度控制中的研究	156
6.3.1 基于 USV 深度模型的平均拟合偏差的最小二乘算法设计	157
6.3.2 深度控制模型参数估计与临时模型集构建	159
6.3.3 USV 多动态滑模控制法及其切换策略	162
6.3.4 系统湖泊试验数据分析	165
6.3.5 USV 系统湖泊试验深度控制小结	167

6.4	基于在线优化 PID 控制律的 USV 航向海洋试验	167
6.4.1	基于 USV 航向模型的在线自优化 PID 控制律构建	169
6.4.2	USV 航向控制试验数据分析	172
6.5	基于动态反馈控制的 USV 深度控制海洋试验数据分析	175
6.6	本章小结	177
	参考文献	177
7	基于多模型优化切换的 AUV 外场试验	181
7.1	非完全同态动态滑模控制在 AUV 深度控制中的研究	182
7.1.1	湖泊试验中 AUV 垂直面运动模型	183
7.1.2	基于状态变量增减的多模型切换策略	184
7.1.3	湖泊试验过程中 AUV 垂直面运动控制策略及其切换策略	189
7.2	非完全同态动态反馈控制在 AUV 航向控制中的研究	192
7.3	切换策略设置及其不同型号 AUV 切换	194
7.4	AUV 湖泊试验数据分析	194
7.4.1	基于多模型动态反馈的航向控制试验验证 (AUV-I)	195
7.4.2	基于多模型动态滑模控制的深度控制试验验证 (AUV-I)	198
7.4.3	控制模块通用性验证	200
7.5	基于 PID 的 AUV 运动湖泊试验数据分析	201
7.6	本章小结	203
	参考文献	205
8	总结	208
附录	六自由度动力学方程	211
索引		213
彩图		

1.1 引言

随着陆地资源的不断耗竭，人们将目光投向浩瀚的海洋、湖泊等水域。为了适应海洋科学研究工作和海洋资源开发不断发展的需求，人们研制开发了各种海洋机器人并将其应用于水下科学考察和海底资源探测与开发^[1-3]。自 20 世纪 90 年代中期以来，无人海洋机器人 (unmanned maritime vehicle, UMV) 就在海洋调查、勘探以及军事等领域中有着广泛应用^[4-6]。UMV 系统的广泛应用和水下机器人技术的不断进步，促成了其海底作业范围和作业任务的不断更新，其任务要求也逐渐多样化，用户对其运动控制品质的要求越来越高^[7]。UMV 系统能否高效率地完成任务要求在很大程度上取决于其位姿控制的精确程度。然而 UMV 系统自身的复杂性、所处外界环境的复杂多变性以及任务需求的多样化，给 UMV 系统运动控制策略的设计带来了一定的难度。

根据水下作业任务的不同，出现了多种类型的水下机器人系统^[8-10]，如自主水下机器人 (autonomous underwater vehicle, AUV) 系统、水面机器人 (unmanned surface vehicle, USV) 系统以及携机械手的遥控水下机器人系统 (remotely operated vehicle with manipulator system, ROVMS) 等。AUV 是一种能够自主完成水下作业任务的载体，其在水下搜救、海洋勘探、水下资源开发、军事等领域发挥着非常重要的作用^[11, 12]。在海洋探测或弱通信条件下，USV 与 AUV 系统通信等具有重要意义，此类系统根据任务要求既可在水面运行又可半潜于水下一定深度运行，其最大下潜深度有着严格的阈值要求，否则会危及系统安全^[13-15]。ROVMS (图 1.1) 因其经济性好、水下出水灵活、作业效率高、适应环境能力强等优点，同时，使用者可通过陆上平台随时观测 ROVMS 水下作业状况，通过和所携带的机械手或其他探测设备等协作完成指定任务而备受关注。然而，由于其受脐带缆的约束，作业范围比较小，同时 ROVMS 在水下作业过程中，水流干扰、机械手伸缩或抓取样品会导致系统不稳定，许多高精度控制要求的水下作业无法高效率完成，

ROVMS 控制策略设计过程中需同时考虑遥控水下机器人 (remotely operated vehicle, ROV) 载体与机械手的各自由度间相互耦合、相互干扰^[16, 17]。

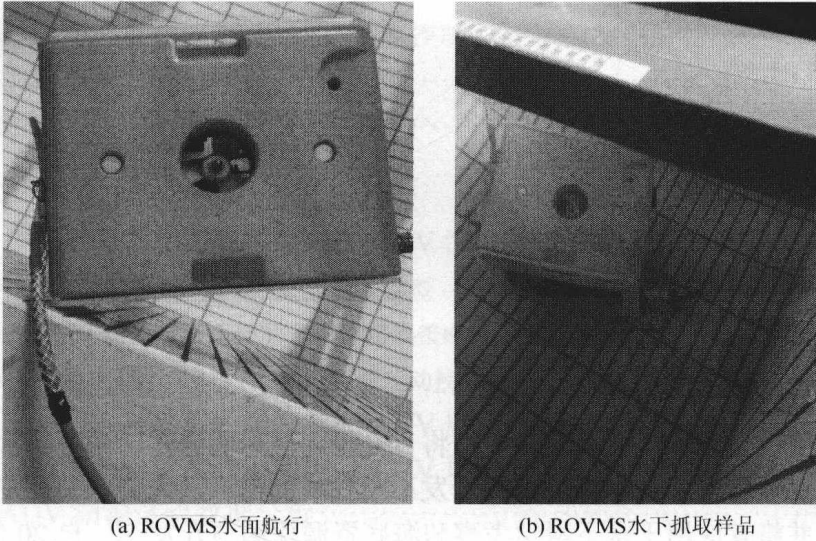


图 1.1 ROVMS (见书后彩图)

良好的操纵控制技术是海洋机器人完成水下作业的关键。海洋机器人精确的定深、定高、悬停定位、航向等位姿控制性能以及较强的抗干扰能力, 是保证其高效完成水下作业任务的前提条件。但由于海洋机器人所受外界环境干扰很难精确描述、系统运动为六自由度的三维空间运动, 且各自由度间具有强耦合性, 海洋机器人操纵控制技术很难达到预期的控制精度要求, 从而造成许多较高精度的水下作业, 如水底抓取样品、水底焊接等, 仍然是具有挑战性的难题^[18, 19]。海洋机器人的控制品质主要受以下因素影响: ①海洋机器人自身是一种强耦合的非线性系统; ②外界环境干扰复杂多变, 难以预测; ③任务过程中, 系统自身形体、重浮力等的变化。由于模型的复杂多变性, 系统运动控制策略难以确定, 系统运动控制品质难以改善。

通过控制策略的设计克服诸多因素对海洋机器人运动的影响, 提高 UMV 系统运动控制精度。UMV 系统硬件部分构建完成后, 如果试航过程中海洋机器人运动控制品质无法达到预期目标, 那么首先考虑的解决方案应该是改进其软件部分而非硬件部分。而运动控制品质问题则需要系统的运动控制策略来解决。随着 UMV 相关技术的逐渐成熟, 其运动控制理论也逐步完善, 众多控制领域的学者根据任务要求或任务中出现的运动控制问题提出了多种智能化的控制策略, 以优化 UMV 系统的运动控制性能^[20-22]。然而, 许多控制策略是建立于某些约束条件之上的, 在某些运动条件下, 系统的控制性能可能会变差, 甚至导致系统不稳定。设计一