

“十一五”国家重点图书出版规划项目



海军新军事变革丛书

总策划：魏刚 主编：马伟明

无人水下航行器进展

Advances in Unmanned Marine Vehicles

[英] G.N.Roberts R.Sutton 编

任志良 张刚 主译

钱东 徐钧 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

总策划：魏 刚

主 编：马伟明

海军新军事变革丛书

Advances in Unmanned Marine Vehicles

无人水下航行器进展

[英] G. N. Roberts R. Sutton 编

任志良 张 刚 主译

钱 东 徐 钧 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING



Original English Language Edition Published by The IEE, Copyright © 2004 by G. N. Roberts & R. Sutton, All Rights Reserved. No Part of this book may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

本书英文版由 IEE 公司出版, IEE 公司已将中文版独家版权授予中国电子工业出版社及北京美迪亚电子信息有限公司。未经许可, 不得以任何形式和手段复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字:01-2007-4330

图书在版编目(CIP)数据

无人水下航行器进展/(英)罗伯茨(Roberts, G. N.), (英)萨顿(Sutton, R.)编; 任志良, 张刚译. —北京: 电子工业出版社, 2009. 1

(海军新军事变革丛书)

书名原文: Advances in Unmanned Marine Vehicles [英]

ISBN 978-7-121-07835-4

I. 无… II. ①罗…②萨…③任…④张… III. 无人驾驶—潜艇—研究 IV. U674.76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 181670 号

责任编辑: 吴源 易昆 李荣

印 刷: 北京天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

北京市海淀区翠微东里甲 2 号 邮编: 100036

开 本: 850×1168 1/32 印张: 16.875 字数: 450 千字

印 次: 2009 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 50.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

海军新军事变革丛书

- 丛书总策划 魏 刚
编委会主任 马伟明
编委会副主任 文宏武 高敬东 李敬辉 赵晓哲
曹跃云
常务副主任 贲可荣
编委会委员 (以姓氏笔画为序)
王公宝 王永生 王永斌 王延璋
王德石 朱 锡 朱建冲 刘 勇
邱志明 宋裕农 何 琳 吴正国
吴晓锋 张永祥 张明敏 郁 军
侯向阳 高 俊 夏惠诚 鲁 明
察 豪 蔡志明 潘德彬
选题指导 徐 韬 唐宗礼 胡 颀 裴晓黎
邹时禧
出版策划 卢 强 吴 源

《海军新军事变革丛书》总序

进入 21 世纪,一场世界性的新军事变革以前所未有的深度和广度迅猛发展。这场变革以信息技术的飞速发展作为直接动力,以军事技术的变革、军事理论的创新和军队体制结构的调整改革为核心内容,目标是把工业时代的机械化军队建设成为信息时代的信息化军队,使战争形态加速向信息化演变。因此,新军事变革是军事领域一次新的历史性飞跃,在世界军事史上具有划时代的意义。

党的十六大报告明确指出,国防和军队建设要“适应世界军事变革的趋势”,“努力完成机械化和信息化建设的双重历史任务”。新军事变革的深入发展,已经深刻改变了世界军事领域的面貌。认真研究它的内在规律,探索信息化战争的制胜之道,实现我军现代化建设的跨越式发展,是我们面临的现实而紧迫的历史性任务。面对新军事变革的浪潮,我们必须更新思想观念,开阔视野,时刻关注世界军事领域发生的深刻变化,准确预测世界军事发展的趋势,从我国的国情军情出发,牢牢把握军事变革的方向,加速推进中国特色的军事变革,不断提高人民海军现代化作战能力。

古人云:兵者,国之大事。死生之地,存亡之道,不可不察。中国是濒海大国,海上方向的防御是国防的重要组成部分。建设一个强大的国防,建设一支强大的海军,关系到民族的荣辱和国家的兴衰。中国近代屡遭列强来自海上的侵略,几乎所有的重要港口、岛屿和沿海地区,都曾受到外敌蹂躏。惨痛的历史告诫我们,军事上落后必然使国家遭受耻辱,没有海上安全就没有国家安全。海军是一个国际性战略军种,担负着维护国家海洋权益、保卫国家海上安全的重要使命。我们必须看到,在世界性新军事变革中,战争

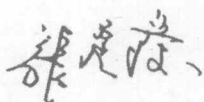
形态已经发生了深刻变化,海军的作战和建设也出现了一系列新的特点。对此,我们应在密切关注的同时,深入研究信息化条件下的海军作战思想、武器装备、体制编制、教育训练和后勤保障,发展和创新海军作战理论,在推进中国特色的军事变革过程中完成机械化和信息化建设的双重历史任务。

江主席指出,在当今世界,任何一支军队,如果关起门来搞建设,拒绝学习国外先进的东西,是不可能实现现代化的。世界新军事变革的大潮来势猛、发展快。各军事强国纷纷加快军队的信息化建设,抢占战略制高点,虽然从总体上看,目前新军事变革还处在初级阶段,但外军在新军事变革中积累了一些有益的经验。同时,现代科学技术在国际间的迅速转移和相互渗透,为我们准确把握世界科技发展前沿、吸收最新科研成果提供了有利条件,也为我们最大限度地发挥后发优势、在自力更生的基础上跨越某些技术上的发展阶段、加快人民海军的现代化建设提供了机遇和可能。海军是技术与知识高度密集的军种,海军建设有其内在规律。我们在推进海军的军事变革时,必须坚持自主创新,同时大胆借鉴和吸收国外最新军事科研成果和先进经验,在借鉴和创新中实现“跨越式”发展。

发展与创新中很重要的方面是了解世界,面向未来。信息化战争从一定意义上来说,既是武器装备等物质条件的对抗,更是知识与观念等精神力量的较量。美国著名思想库兰德公司的军事研究专家马歇尔曾提出,未来“我们面临的首要挑战是知识的挑战”。夺取未来战争的战略主动权,必须依靠先进的科学技术和先进的军事理论。近年来,国外出版了许多研究新军事变革的著作和技术文献。把这些新的研究成果介绍给国内读者,有益于我们学习和借鉴外军的先进经验。海军装备部与海军工程大学组织专家编著翻译出版的这套海军新军事变革丛书,以翻译国外海军先进技术和理论著作为主,出版海军军内自编教材和专著为辅,对世界海军在新军事变革中推出的研究成果进行了系统介绍。这是一项很

有意义的工作。在此我谨对参与这项工作的各位专家表示感谢。同时对各位译、著者在笔耕之劳中付出的心血表示敬意。希望这套丛书能够对推进中国特色的军事变革,加快人民海军的信息化建设发挥积极的借鉴与参考作用。

中央军委委员
海军司令员

Handwritten signature in black ink, reading '张惠峰' (Zhang Huifeng).

二〇〇四年七月十八日

译者序

本书英文原名“*Advances in Unmanned Marine Vehicles*”当译做《无人海洋航行器进展》，但出于对全书内容和行业习惯的考虑，择名为《无人水下航行器进展》。

无人水下航行器(UUV)是可以在水下承担情报收集、制导、导航、侦察、水下武器对抗、通信、反潜、应急救生与打捞、海洋勘探、危险条件下作业等多种任务的、可以反复使用的自主式航行器，包括无需操作员监视和操控的海上自主航行器(AUV)和需要操作员通过电缆或声学通信进行遥控的水下航行器(ROV)，具有很大的实用性和灵活性。因而无人水下航行器已成为当前世界各国海洋开发、国防工业部门和海军装备的最重要的研究方向之一。

由于无人水下航行器涉及流体动力学、水声学、光学、通信、导航、制导与控制、计算机科学、传感器技术、仿生学等许多领域的高新技术并在不断地发展，国内外相关专著很少。本书的特点是紧密联系无人水下航行器研究的实际情况，由该领域中在不同研究方向上做出重大贡献的领跑者编写。全书分 19 章，每章以独立专题形式介绍了无人水下航行器的非线性建模、辨识与控制、制导与障碍物规避、路径跟踪、动作控制、过驱动推进器控制分配、多模切换监控、自主导航、自主航行的鲁棒控制、遥控航行器的高精度运动控制、干预型 AUV 的自主操纵、仿生式自主航行器的制导与控制、基于混合照明的海底导航、时空 3D 数据实时可视化、海战的博弈应变、自主水面航行器的建模与仿真、海洋机器人的载体与任务控制、穿浪式自主航行器和水下滑翔机模型等理论知识和工程技术，结合水下航行器的类型和应用，给出了提高水下航行器性能的创新性方法和技术。在有关的数学建模、制导与避碰规则、系统

控制、试验验证,以及各种无人水下航行器的性能、关键技术的进展、使用操作和试验验证等方面,都有相当深入翔实的介绍,反映了当前无人水下航行器领域的研究成果和技术水平。因此,《无人水下航行器进展》一书的翻译出版将增进国内相关行业对无人水下航行器的深入了解并推动我国无人水下航行器的发展。

本书内容丰富、覆盖面广,适合于船舶与海洋结构物设计,导航、制导与控制,兵器科学与运用工程,动力工程,电力电子工程,水下目标探测与识别,通信与信息,军用光学,海洋勘探与救捞,传感器技术,计算机科学,网络工程等学科专业的研究和使用者及爱好者阅读。

感谢海军装备研究院钱东研究员对本书的认真审校和所提出的许多宝贵意见。感谢华中科技大学黄玉盈教授、张志鹏教授和海军工程大学鱼雷武器教研室博士研究生李耀波、俞伟等为本书所做的部分章节的译校和录入工作。丛书编委会和电子工业出版社为本书的出版也付出了辛勤的劳动,在此一并表示诚挚的谢意。限于译者水平,加之时间仓促和内容涉及面广,难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论:无人水下航行器的导航、制导与控制	1
1.1 引言	1
1.2 章节安排	4
1.3 结束语	13
参考文献	14
第 2 章 UUV 的非线性建模、辨识与控制	15
2.1 引言	15
2.1.1 符号	15
2.2 UUV 的建模	16
2.2.1 六自由度运动学方程	17
2.2.2 动力学	18
2.2.3 运动方程	19
2.2.4 包含海流因素的运动方程	22
2.2.5 纵向和横向模型	24
2.3 UUV 的辨识	30
2.3.1 刚体参数的预估计	30
2.3.2 流体动力附加质量的预估计	31
2.3.3 阻尼项的辨识	31
2.4 UUV 的非线性控制	38
2.4.1 速度、深度和俯仰控制	39
2.4.2 航向控制	47
2.4.3 控制的其他方法	50
2.5 结论	50

参考文献	50
第 3 章 制导律、障碍物规避与虚拟势函数	53
3.1 引言	53
3.2 航行器制导与航路跟踪	54
3.2.1 航行器操纵模型	55
3.2.2 视线制导	57
3.2.3 航路横向误差	58
3.2.4 航路横向误差控制器下的视线	59
3.2.5 滑动模式下的航路横向误差导引	61
3.2.6 大航向误差模式	63
3.2.7 航路转换	63
3.3 障碍物规避	64
3.3.1 规划规避偏移路径	64
3.3.2 反应式规避	66
3.4 虚拟势函数	73
3.4.1 障碍物规避势函数	74
3.4.2 多障碍物	75
3.5 结论	78
3.6 致谢	79
参考文献	79
第 4 章 UUV 的行为控制	81
4.1 引言	81
4.2 基于行为的控制系统原理	84
4.2.1 协调	86
4.2.2 自适应	87
4.3 控制结构	87
4.3.1 行为的混合协调	89

381	4.3.2	基于强化学习的行为	91
381	4.4	实验装置	93
181	4.4.1	URIS UUV	93
381	4.4.2	装置	94
381	4.4.3	软件结构	95
381	4.4.4	用做导航工具的计算机视觉	96
181	4.5	结果	97
138	4.5.1	目标跟踪任务	98
140	4.5.2	未知环境的探测和测绘	100
141	4.6	结论	101
141		参考文献	102
81			
	第5章	过驱动开架式水下航行器的推进器控制分配	105
	5.1	引言	105
183	5.2	问题的阐述	106
181	5.3	术语	108
181	5.3.1	约束控制子集 Ω	108
181	5.3.2	可达指令集 Φ	110
181	5.4	伪逆	111
181	5.5	不动点迭代法	115
181	5.6	混合方法	116
181	5.7	过驱动螺旋桨推进 UV 的推进器控制分配	
181		应用	118
181	5.8	结论	124
181		参考文献	125
181			
	第6章	水下航行器的切换监控	127
181	6.1	引言	127
181	6.2	多模切换监控模型	128

6.3	EBSC 法	132
6.3.1	EBSC 的一种实现方法	133
6.4	HSSC 方法	134
6.4.1	切换策略	135
6.5	稳定性分析	136
6.5.1	基于估计的监控方法	136
6.5.2	分层切换监控	137
6.6	ROV 模型	138
6.6.1	线性化模型	140
6.7	数值仿真结果	141
6.8	结论	147
	参考文献	148

第 7 章 Hammerhead 自主式水下航行器的导航、制导与

	控制	152
7.1	引言	152
7.2	Hammerhead AUV 的导航系统	154
7.2.1	模糊卡尔曼滤波器	155
7.2.2	模糊逻辑观测器	156
7.2.3	模糊隶属函数的优化	157
7.2.4	运行结果	158
7.2.5	GPS/INS 导航	163
7.3	系统建模	174
7.3.1	识别结果	175
7.4	制导	177
7.5	Hammerhead 的自动驾驶仪设计	178
7.5.1	LQG/LTR 控制器设计	178
7.5.2	模型预测控制	181
7.6	结束语	187

参考文献	187
第 8 章 自主式水下航行器的鲁棒控制器及其在系缆航行器上的验证	191
8.1 引言	191
8.2 鱼雷形自主式水下航行器的鲁棒自动驾驶仪设计	193
8.2.1 Subzero III 动力学分析	193
8.2.2 控制系统设计建模	196
8.2.3 降阶的自动驾驶仪设计	197
8.3 Subzero III 的系缆补偿	201
8.3.1 组合控制方案	201
8.3.2 系缆效应的估计	202
8.3.3 系缆效应的抵消	211
8.3.4 组合控制的非线性仿真验证	213
8.4 鲁棒型自动驾驶仪的外场试验验证	215
8.5 结论	218
致谢	218
参考文献	219
第 9 章 遥控航行器(ROV)的低成本高精度运动控制	221
9.1 引言	221
9.2 相关研究	223
9.2.1 建模与辨识	223
9.2.2 制导与控制	224
9.2.3 传感技术	225
9.3 Romeo ROV 的结构设计	227
9.4 制导和控制	229
9.4.1 速度控制(动力学)	230

9.4.2	制导(目标运动学)	231
9.5	基于视觉的运动估计	232
9.5.1	视觉系统设计	233
9.5.2	三维激光三角测量传感器	235
9.5.3	模板检测和跟踪	237
9.5.4	标记的运动	238
9.5.5	俯仰和横滚扰动的抑制	238
9.6	试验结果	239
9.7	结论	249
	致谢	249
	参考文献	250
第 10 章 干预型 AUV 的自主操纵 255		
10.1	引言	255
10.2	水下操纵装置	256
10.3	控制系统	259
10.3.1	运动控制	259
10.3.2	运动学、反向运动学和冗余解决方案	262
10.3.3	运动速率控制的求解	262
10.3.4	操纵性的测度	264
10.3.5	单任务的奇异点回避	264
10.3.6	基于任务优先级的逆运动学扩展	267
10.3.7	实例	270
10.3.8	碰撞和关节限制规避	271
10.4	航行器通信和用户接口	273
10.5	应用实例	274
10.6	结论	277
	致谢	278
	参考文献	278

098	第 11 章 AUV “r2D4” 的开发和 AUV 发展路线图	280
	11.1 引言	280
098	11.2 AUV “r2D4” 及它在罗塔岛水下火山的	
068	第十六次下潜	281
188	11.2.1 R-2 项目	281
288	11.2.2 AUV “r2D4”	283
838	11.2.3 罗塔岛水下火山下潜	287
888	11.3 AUV 研究和开发的展望	293
788	11.3.1 AUV 的多样性	294
098	11.3.2 AUV 研发路线图	295
098	11.4 致谢	297
198	参考文献	297
	第 12 章 仿生式自主水下航行器(BAUV)的制导和控制	299
518	12.1 引言	299
898	12.2 动力学模型	302
	12.2.1 刚体动力学模型	302
898	12.2.2 水动力学模型	308
448	12.3 BAUV 的制导和控制	312
798	12.3.1 BAUV 的制导	312
248	12.3.2 控制器设计	313
	12.3.3 试验结果	317
748	12.4 结论	321
188	致谢	322
878	参考文献	322
828	 	
	第 13 章 基于混合照明的海底导航	324
828	13.1 引言	324