



“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

水下机器人先进导航技术

Advanced Navigation Technology of
Underwater Vehicle

冀大雄/著



科学出版社
龙 门 书 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

水下机器人先进导航技术

冀大雄 著

北 京

内 容 简 介

本书论述水下机器人先进导航技术, 主要内容包括水下机器人导航系统关键参数标定、声学跟踪、单信标导航、主从式 UUV 群体导航、长基线导航、多信标导航技术以及计算机仿真与应用实验结果。同时为方便读者, 给出代码实例供读者使用和参考。

本书可以作为水下机器人、海洋工程与装备相关领域科研人员的参考用书, 也可作为高等院校海洋工程与技术、船舶与海洋工程等专业高年级本科生和研究生的选修课教材。

图书在版编目(CIP)数据

水下机器人先进导航技术 / 冀大雄著. —北京: 龙门书局, 2019.7

(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 978-7-5088-5609-4

I. ①水… II. ①冀… III. ①水下作业机器人—应用—航海导航—研究 IV. ①TP242.2 ②U675.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 129529 号

责任编辑: 姜 红 张 震 陈 琼 / 责任校对: 王萌萌

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版
龙 门 书 局

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 7 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019 年 7 月第一次印刷 印张: 14 插页: 2

字数: 287 000

定价: 118.00 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的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，海洋机器人一直为世界各海洋强国所关注。

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

无人水下机器人(unmanned underwater vehicle, UUV), 简称水下机器人, 不同于水面船舶、潜艇等传统海洋航行器, 它是一种智能的, 能够自动航行的, 可以执行探测、侦察、跟踪、作业等任务的水下航行器。导航是水下机器人的关键技术之一, 目前对水下机器人导航还没有统一的定义, 本书将水下机器人导航定义为: 把水下机器人引导到目的地的技术和方法, 具有狭义导航和广义导航两个含义。狭义导航是指获取水下机器人位置(或坐标)的技术和方法, 广义导航除包括狭义导航的内容外, 还包括规划、决策、避障、制导等技术和方法。本书主要研究狭义导航, 即位置(或坐标)的获取技术及方法。一般来说, 在应用水下机器人执行任务时, 获得水下机器人的位置(或坐标)是完成任务的前提, 因此水下机器人导航能力至关重要。

本书沿着我国水下机器人导航技术发展脉络, 整理并提出水下机器人先进导航理论, 为推动我国水下机器人技术突破提供重要理论参考。现阶段, 水下机器人正朝着更深、更远、更强的方向发展, 在国防和民用领域都具有巨大应用价值与潜力, 发挥着越来越重要的作用。从航程和深度指标区分, 水下机器人分为两类: 长航程水下机器人和深海水下机器人。长航程水下机器人常采用惯性导航系统(简称惯导系统, inertial navigation system, INS)和多普勒计程仪(Doppler velocity log, DVL)构成的组合导航系统, 再以北斗卫星导航系统/全球定位系统(global positioning system, GPS)辅助校准, 这种导航方式已有较多文献研究, 方案较为成熟, 本书不再详述, 但本书在第7章给出圆概率误差(circular error probability, CEP)预报方法, 可以用于长航程水下机器人导航性能指标预测; 深海水下机器人采用INS(或罗盘)和DVL以及声信标(简称信标)导航技术, 目前还没有专门的著作论述这类机器人导航技术。本书的一个目的是为水下机器人提供先进的导航技术方案, 从导航参数标定到声学跟踪、从航位推算算法到多模型滤波算法、从单信标导航一直到多信标导航^①, 首次系统、完整地论述水下机器人导航技术。

本书结构安排如下。第1章介绍水下机器人导航的基本概念、国内外技术现状以及关键问题。第2章论述不同于传统“8”字形标定法的垂线相交标定法, 提高标定效率, 还针对导航传感器参数的标定问题给出水面标定和水下标定两种方

^① 本书为叙述简便, 将单个信标命名为单信标, 两个信标命名为双信标, 多个信标命名为多信标, 其他命名以此类推

案, 根据信标检测电路, 提供信标检测时延测定方法, 进一步提高测距精度, 给出实际结果。第 3 章利用射线声学理论为超短基线导航系统 [简称超短基线 (ultra short baseline, USBL) 系统] 跟踪水下机器人以及长基线导航系统 [简称长基线 (long baseline, LBL) 系统] 跟踪水下机器人提供技术手段, 给出跟踪范围、声学询问器 (简称询问器) 布放深度、信标缆线长度等的计算方法, 还针对水面机器人自主跟踪水下机器人的问题, 提出基于水声通信的自主跟踪策略, 给出湖上试验 (简称湖试) 结果。第 4 章研究单信标导航系统运动学方程, 分析系统能观性和稳定性, 设计确保导航滤波器收敛的机动航行策略, 给出计算机仿真实验结果。第 5 章研究主从式 UUV 群体的协同导航策略, 分析系统能观性, 设计领航 UUV 机动航行路径和随从 UUV 机动航行路径, 设计基于方位与距离粗测量的随从 UUV 运动参数估计算法, 并给出仿真实验结果。第 6 章分析长基线系统配置和运动学方程, 给出卡尔曼滤波器导航算法, 设计抗野值能力的 M 估计导航算法, 并给出仿真实验和湖试数据处理结果。第 7 章根据概率数据关联 (probabilistic data association, PDA) 原理, 研究多模型扩展卡尔曼滤波器 (extended Kalman filter, EKF) 组合导航算法, 给出海上试验 (简称海试) 数据后处理结果; 提出水下机器人 CEP 预报方法, 用实际试验结果表明方法的有效性。附录列出本书的 MATLAB 源代码等内容, 供读者使用和参考。

非常感谢阅读本书初稿并给予反馈的工作人员。尤其感谢封锡盛院士在百忙之中审阅了本书, 提出了指导意见; 感谢刘健研究员细致入微地审订了本书全部章节, 给出了中肯的意见和建议; 感谢孙明哲等同学协助完成了本书的整理工作, 缩短了本书的交稿时间; 感谢王飞、李冬冬同学参与了本书相关内容的研究工作, 对完成本书做出贡献。

冀大雄

2018 年 8 月浙江大学

目 录

丛书前言一

丛书前言二

前言

1 绪论	1
1.1 水下机器人导航的定义与发展	1
1.2 水下机器人导航技术研究现状	2
1.2.1 自主导航定位技术研究现状	2
1.2.2 信标导航定位技术研究现状	3
1.2.3 测距信标技术研究现状	6
参考文献	8
2 常见参数标定问题和解决方案	12
2.1 垂线相交标定法	12
2.1.1 基本原理	12
2.1.2 改进垂线相交标定法	13
2.1.3 计算机仿真实验	19
2.2 导航传感器标定方法	21
2.2.1 标定原理	21
2.2.2 鲁棒 M 估计标定方法	24
2.2.3 直接水下标定方法	27
2.3 信标信号检测时延测定方法	30
2.3.1 接收电路概述	30
2.3.2 基于预白化的放大电路	31
2.3.3 信号时延估计	33
2.3.4 实验结果与分析	35
2.4 本章小结	38
参考文献	39

3	常见声学跟踪问题和解决方案	41
3.1	超短基线跟踪水下机器人	41
3.1.1	问题提出	41
3.1.2	声学理论及其应用方法	42
3.1.3	湖试和海试	44
3.2	长基线系统应用方法	48
3.2.1	信标应用方法研究	48
3.2.2	拖阵入水深度确定	49
3.2.3	信标缆线长度计算	52
3.2.4	信标阵作用面积计算	55
3.3	水面机器人自主跟踪水下机器人	56
3.3.1	问题描述	57
3.3.2	基于追逐行为策略的跟踪控制	57
3.3.3	水面机器人对水下机器人的自主跟踪算法	60
3.3.4	湖试	61
3.4	本章小结	63
	参考文献	63
4	单信标导航方法	65
4.1	运动学模型	66
4.2	能观性分析	68
4.3	单信标导航	72
4.4	单信标水下校准	76
4.5	计算机仿真实验	79
4.5.1	无水流情况	79
4.5.2	未知水流速度情况	81
4.5.3	已知水流速度情况	83
4.6	本章小结	86
	参考文献	87
5	主从式 UUV 群体导航方法	89
5.1	主从式 UUV 群体导航系统	89
5.2	系统方程	90
5.3	能观性分析	92
5.4	随从 UUV 参数估计	94

5.5 计算机仿真实验	99
5.5.1 跃变水流速度实验	100
5.5.2 测距断点实验	101
5.6 本章小结	103
参考文献	104
6 长基线导航算法	105
6.1 长基线系统结构	105
6.2 本征声线法定位	106
6.2.1 水平距离计算	106
6.2.2 位置解算	107
6.2.3 计算机仿真与分析	108
6.3 卡尔曼滤波器导航算法	111
6.3.1 深海 AUV 运动学分析	112
6.3.2 卡尔曼滤波器设计	113
6.3.3 距离测量值的预处理	115
6.3.4 计算机仿真与分析	115
6.4 M 估计导航算法	121
6.4.1 算法模型	121
6.4.2 计算机仿真与分析	123
6.4.3 湖试	126
6.5 本章小结	127
参考文献	127
7 多信标导航算法	128
7.1 多模型自适应滤波	128
7.1.1 组合导航系统	129
7.1.2 多模型 EKF 组合导航算法	132
7.1.3 海试	135
7.2 水下机器人 CEP 的有效预报	139
7.2.1 航路和误差	139
7.2.2 CEP 计算	142
7.2.3 实验结果	144
7.3 本章小结	144
参考文献	145

附录	146
附录 1 垂线相交标定法仿真实验 MATLAB 源代码	146
附录 2 M 估计标定法仿真实验 MATLAB 源代码	150
附录 3 单条航迹线水下标定方法仿真实验 MATLAB 源代码	155
附录 4 确定超短基线系统跟踪距离计算机仿真 MATLAB 源代码	157
附录 5 询问器声线轨迹软件包 MATLAB 源代码	159
附录 6 信标声线轨迹软件包 MATLAB 源代码	162
附录 7 信标阵作用面积计算方法	164
附录 8 水面机器人自主跟踪水下机器人计算机仿真 MATLAB 源代码	166
附录 9 AUV 单信标位置修正估计计算机仿真 MATLAB 源代码	176
附录 10 有水流情况下水下机器人单信标 EKF 位置估计计算机仿真 MATLAB 源代码	179
附录 11 信标机动情况下水下机器人的位置估计计算机仿真 MATLAB 源代码	184
附录 12 低成本主从式 UUV 群体导航计算机仿真 MATLAB 源代码	187
附录 13 本征声线法定位计算机仿真 MATLAB 源代码	193
附录 14 水下机器人卡尔曼滤波器导航计算机仿真 MATLAB 源代码	197
附录 15 M 估计导航计算机仿真 MATLAB 源代码	202
附录 16 水下机器人 CEP 预报计算机仿真 MATLAB 源代码	206
索引	209
彩图	

1.1 水下机器人导航的定义与发展

水下机器人包括遥控水下机器人(也称遥控潜水器)(remotely operated vehicle, ROV)、自主水下机器人(也称自主潜水器)(autonomous underwater vehicle, AUV)和混合水下机器人(也称混合潜水器)(hybrid underwater vehicle, HUV)。从发展历史看,水下机器人可以追溯到19世纪初出现的鱼雷的前身——“撑杆雷”,以及早于20世纪50年代出现的遥控水下机器人。但是,20世纪80年代以后,水下机器人技术才提高到智能的水平,自主导航能力得到增强。21世纪以来,水下机器人航程提高,续航力增加,作业环境愈加复杂,海洋研究开发和海洋国防领域对水下机器人导航技术的需求越来越高,推动了国内外学者对水下机器人先进导航技术的研究。

水下机器人导航的基本原理是,水下机器人搭载的导航计算机采集导航仪器送来的数据,实时计算水下机器人当前位置,指引其航行到目标点。根据水下机器人的航程指标以及深度指标,工程师或研究人员给水下机器人装备适合的导航仪器。长航程水下机器人航行距离远,以INS、DVL和卫星定位系统组合导航为主;深海水下机器人下潜深度大,以声学定位系统、INS和DVL为主。导航能力是决定水下机器人性能的关键因素之一,尤其是军用水下机器人对导航能力要求更高。从国内外水下机器人导航技术的发展来看,近年来,传感器技术、控制理论、人工智能和信号处理算法的发展促进了水下机器人导航技术的不断提高,也出现了多种新颖的水下机器人导航方式,有关研究和试验表明这些方法具有重要的发展潜力与实用价值。归纳起来,水下机器人导航技术的发展趋势如下。

(1)惯性导航:以INS为主,其他导航为辅。INS和DVL组合导航是水下机器人重要的自主导航方式。现阶段国外已经有多种水下机器人通过了湖试、海试,并投入实际使用。国内外市场上已推出了面向水下机器人的高精度INS、DVL等商用产品,导航传感器可靠性得到保证,进而使得水下机器人INS和DVL组合导航技术逐步成熟可靠。随着水下机器人导航传感器市场的不断扩大和多传感器

数据融合技术的进步，我们有理由相信，未来一段时间内惯性传感器的体积会进一步缩小，成本、功耗会进一步降低，导航性能也会进一步提高，从而满足各种水下机器人导航需要。

(2) 无源导航：地球物理导航系统具有隐蔽性好、无须浮出水面校准等特点，是水下机器人技术的研究热点。这种全新导航方式具有无源特性，不需要外部辅助设备，也无须初始校准，就能够得到位置信息。它的出现是海洋地球物理科学与技术进步的结果，代表着未来长航程水下机器人导航的发展趋势。

(3) 信标导航：基于信标测距的导航定位技术是目前水下机器人导航发展的主要方向之一。将基于 GPS 的声呐浮标水下定位导航系统用于水下机器人，可以弥补传统长基线无法移动阵位、水面水下通信能力不足的缺点，并且可以省去烦琐的海底布阵、测阵和收阵等操作过程。单信标导航方法能够有效降低长基线系统的复杂操作，增大水下机器人作业范围，更重要的是提供了一种适用于水下机器人群体的协同导航方法。许多研究充分证明了基于测距信标的导航定位方法能够满足单个水下机器人及多水下机器人的航行需要，具有重要的应用潜力和价值。

1.2 水下机器人导航技术研究现状

1.2.1 自主导航定位技术研究现状

自主导航定位技术是指不依赖外部设备，独立计算当前位置的技术。惯性导航和无源导航都属于自主导航定位技术。INS 具有优良的导航性能，但是功耗较大，成本高，限制了它在民用水下机器人上的广泛应用。目前商用 DVL 对地测速精度达到 0.3% 甚至更小，数据更新率为 5Hz。从导航系统性能指标来看，单一的导航系统往往难以满足水下机器人的导航要求。大量研究资料表明，组合导航技术是水下机器人导航的主要手段。它综合两个或两个以上导航传感器的信息，利用性能上的互补特性，以获得比单独使用任一系统更优的导航性能，满足水下机器人作业的多种需求。惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 能够输出艏向、纵倾等姿态数据和角速率，这些数据是导航的重要数据。IMU 相较于 INS 价格低廉，因此在水下机器人导航中得到了广泛应用。组合导航系统主要组成形式有 LBL/DVL、IMU/DVL、IMU/GPS、IMU/DVL/GPS、GPS/DVL^[1-11] 等。典型组合导航方案是利用 DVL 的速度测量数据和从 GPS 或声学定位系统得到的位置测量数据校正 INS 的状态估计误差。其中基于 IMU/DVL 的组合导航系统已应用于高精度水下调查、冰盖海域及中间深度海域。文献[5]提出一种将 GPS、300kHz