



国防科技图书出版基金

水下地磁导航技术

Technologies on Underwater
Geomagnetic Field Navigation

主编 胡小平 副主编 吴美平



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

水下地磁导航技术

Technologies on Underwater Geomagnetic
Field Navigation

主 编 胡小平
副主编 吴美平
编 委 穆 华 刘 颖 陈龙伟
吴志添 王 鹏

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

水下地磁导航技术/胡小平主编. —北京:国防工业出版社,2013.8

ISBN 978-7-118-08967-7

I. ①水... II. ①胡... III. ①水下航行—地磁导航 IV. ①U675.5②TN96

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第179286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 710×1000 1/16 插页4 印张16 字数330千字
2013年8月第1版第1次印刷 印数1—2500册 定价70.00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

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需

要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	陆军	芮筱亭
	李言荣	李德仁	李德毅	杨伟
	肖志力	吴宏鑫	张文栋	张信威
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

近年来,水下自主航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)得到迅速发展,在科学考察、国民经济以及军事应用等领域展现出广阔的应用前景。长航时、高精度、自主性、隐蔽性等是 AUV 对导航系统提出的基本要求,就目前导航技术发展水平而言,这些要求还未能得到很好的满足,特别是长航时自主导航精度,远不能满足要求,甚至成为了制约 AUV 发展的瓶颈之一,因此,迫切需要探索和研究解决这一瓶颈问题的新的技术途径。

惯性导航系统具有自主性好、隐蔽性强、全天候工作、能为载体提供连续实时的导航参数,以及短时间内导航精度高等优点,但是,惯性导航系统存在导航误差随时间累积、长期稳定性差等固有弱点。地磁匹配导航系统突出的优点则是定位误差不随时间积累。将这两者组合,构成惯性/地磁匹配组合导航系统,不失为一种理想的选择。地磁导航研究涉及多个学科领域,有许多科学技术和工程应用问题亟待解决,如水下地磁图的获取、载体干扰磁场补偿、地磁图适配性分析方法、组合导航算法等。针对这些问题,本书著者所在研究团队开展了多年的理论研究和关键技术攻关,取得了丰硕的研究成果,并且完成了惯性/地磁匹配组合导航系统样机研制和实装搭载验证试验。本书是对多年研究工作的总结。

本书共分 6 章。第 1 章简要介绍面向 AUV 的水下地磁导航技术研究进展。第 2 章介绍惯性/地磁匹配组合导航的基本原理和主要关键技术。第 3 章讨论地磁场延拓问题。对频域和空间域内平面向上延拓的相关算法进行了研究,在此基础上,给出了快速稳定的平面向下延拓的频域 Tikhonov - Lcurve 算法和空间域 CGLS - BCE 算法,较好地解决了地磁场向下延拓的稳定问题。此外,还探讨了“平化曲”和“曲化平”问题,提出了快速稳定的曲化平算法。第 4 章讨论地磁图适配性问题。在分析深入地磁图特征体系的基础上,给出了地磁图适配性指标,研究了基于多属性决策的适配性分析方法和基于分类的适配性分析方法,初步探讨了在地磁图适配性约束条件下,AUV 的航迹规划问题。第 5 章讨论面向水下地磁导航的地磁测量误差补偿问题。分析了地磁测量误差的产生机理和分布特性,建立了地磁测量误差补偿模型;针对地磁测量噪声为非高斯分布的情况,提出了基于约束总体最小二乘算法的误差补偿算法;针对载体机动受约束是可能导致地磁观测空间不理想的情况,提出一种利用 D—优化方法进行转动编排的优化策略;针对地磁观测方程严重病态问题,提出了一种正则化测量误差补偿算法。第 6 章研究了惯

性/地磁匹配组合导航算法。分析了松组合和紧组合两类组合导航算法的特点;设计了基于等值线约束的地磁匹配算法、迭代多尺度地磁匹配算法、基于约束粒子群的地磁匹配算法等批处理匹配定位算法,给出了基于混合高斯逼近法的组合导航算法;设计了序贯处理定位算法及相应的组合导航算法;研究了扩展卡尔曼滤波和边缘化粒子滤波两种紧组合导航算法;设计了惯性/地磁匹配组合导航系统样机实装搭载试验方案,试验结果验证了惯性/地磁匹配组合导航技术的可行性。

本书第1章和第2章由吴美平执笔,第3章由陈龙伟执笔,第4章由王鹏执笔,第5章由吴志添执笔,第6章由刘颖和穆华共同执笔。全书由胡小平统稿。

感谢为水下地磁导航技术研究作出贡献的曹聚亮、张开东、庾洲慧、罗诗途、武元新、任治新、吕云霄、黄杨明、杨亚鹏、赵磊、张礼廉、马涛、刘伟、吕召鹏、张建平、靳树鑫等其他团队成员,所有的研究成果都是大家共同努力的结果。

感谢中国国土资源航空物探遥感中心、中国船舶重工集团公司第705研究所昆明分部等单位对研究团队在地磁数据资源、系统样机搭载试验保障等方面给予的鼎力支持和无私帮助。

感谢国防科技图书出版基金评审委员会的大力支持,感谢国防工业出版社为本书出版付出的辛勤劳动。

应该强调的是,水下地磁导航技术在我国尚处于关键技术攻关阶段,还有许多理论和工程技术难题值得进一步深入研究,希望本书能对从事该技术领域研究工作的国内同行有所帮助。鉴于著者学术水平所限,本书疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

胡小平
2013年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 AUV 对自主导航技术的需求	1
1.2 地磁场概述	4
1.2.1 地磁场的时空特征	4
1.2.2 地磁场模型	5
1.3 地磁导航技术研究现状	6
1.3.1 国外研究现状	6
1.3.2 国内研究现状	8
参考文献	9
第 2 章 惯性/地磁匹配组合导航	12
2.1 惯性/地磁匹配组合导航原理	12
2.1.1 系统组成与工作原理	12
2.1.2 系统信息处理流程	15
2.2 惯性/地磁匹配组合导航系统的关键技术	16
2.2.1 地磁场延拓	16
2.2.2 地磁图适配性	17
2.2.3 地磁测量误差补偿	17
2.2.4 地磁匹配定位	17
2.2.5 惯性/地磁匹配组合导航	18
参考文献	18
第 3 章 地磁场延拓方法	20
3.1 问题描述	20
3.1.1 向上延拓问题的数学描述	20
3.1.2 向上延拓边界积分方程	21
3.1.3 关于向下延拓问题的求解	24
3.2 平面向上延拓算法	26
3.2.1 频域向上延拓 GFT 算法	26
3.2.2 空间域向上延拓 BCE 算法	34
3.2.3 GFT 算法与 BCE 算法之间联系	46

3.2.4	算例	48
3.3	平面向下延拓算法	54
3.3.1	频域向下延拓 Tikhonov - Lcurve 正则化算法	54
3.3.2	空间域向下延拓 CGLS - BCE 算法	64
3.4	曲面延拓算法	79
3.4.1	曲化平问题分析	80
3.4.2	平化曲快速算法	81
3.4.3	曲化平 CGLS - SI - BCE 算法	83
3.4.4	算例	84
	参考文献	93
第 4 章	地磁图适配性	94
4.1	地磁图特征与适配性指标	94
4.1.1	地磁图特征	94
4.1.2	适配性指标	99
4.2	地磁图适配性分析	102
4.2.1	基于多属性决策的地磁图适配性分析	102
4.2.2	基于分类理论的地磁图适配性分析	109
4.2.3	地磁图向下延拓前后的适配性变化分析	117
4.3	地磁图适配性约束下的航迹规划问题	120
	参考文献	121
第 5 章	地磁测量误差补偿方法	124
5.1	地磁测量误差问题分析	124
5.1.1	地磁测量误差分析与建模	124
5.1.2	载体干扰磁场动态特性测试	127
5.1.3	地磁测量误差算法框架	130
5.2	基于约束总体最小二乘的地磁测量误差补偿算法	132
5.2.1	约束总体最小二乘算法	133
5.2.2	仿真结果	136
5.2.3	实验结果	139
5.3	基于 D—优化设计的磁力仪编排优化	145
5.3.1	D—优化设计方法	146
5.3.2	D—优化问题求解	149
5.3.3	仿真结果	151
5.4	病态条件下地磁测量误差补偿问题研究	157
5.4.1	地磁测量误差补偿病态问题	157
5.4.2	截断总体最小二乘方法	163

5.4.3 实验结果	165
参考文献	173
第6章 惯性/地磁匹配组合导航方法	177
6.1 组合导航算法分类	177
6.1.1 松组合导航算法	177
6.1.2 紧组合导航算法	179
6.2 批处理定位算法	179
6.2.1 算法模型	179
6.2.2 基于等值线约束的地磁匹配算法	182
6.2.3 迭代多尺度地磁匹配算法	190
6.2.4 基于约束粒子群的地磁匹配算法	197
6.2.5 地磁匹配长度估计方法	201
6.3 批处理组合导航算法	207
6.3.1 似然平面的混合高斯逼近算法	208
6.3.2 高斯成分动态缩减策略	211
6.3.3 仿真实验验证	212
6.4 序贯处理组合导航算法	213
6.4.1 序贯处理定位模型	213
6.4.2 点群滤波	213
6.4.3 组合导航算法	215
6.5 紧组合导航算法	215
6.5.1 扩展卡尔曼滤波算法	215
6.5.2 边缘化粒子滤波算法	218
6.6 水下搭载试验	224
6.6.1 水下试验设计	224
6.6.2 试验结果分析	225
6.6.3 试验结论	228
参考文献	229
附录A 延拓算法性能测试数据	231
A.1 地磁场仿真数据	231
A.2 随机噪声数据	232
A.3 起伏面高程仿真数据	233
A.4 实测磁异常数据	233
附录B 系数矩阵 $F_i (i=1,2,\dots,10)$ 的表达式	235
附录C 牛顿迭代法中梯度和 Hessian 矩阵的推导	237

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Requirement for Antonomous Navigation Technology for AUV	1
1.2 Geomagnetic Field	4
1.2.1 Geomagnetic Field Space and Time Character	4
1.2.2 Geomagnetic Field Model	5
1.3 Overview of Geomagnetic Navigation Research	6
1.3.1 Foreign Research Status	6
1.3.2 Home Research Status	8
References	9
Chapter 2 An Overview of Inertial/Geomagnetic Matching Integrated Navigation System	12
2.1 Principle of Inertial/Geomagnetic Matching Integrated Navigation	12
2.1.1 The Architecture and Operation Principle	12
2.1.2 System Information Processing	15
2.2 Key Techniques of Inertial/Geomagnetic Matching Integrated Navigation System	16
2.2.1 Geomagnetic Field Continuation	16
2.2.2 Geomagnetic Map Matching Suitability	17
2.2.3 Geomagnetic Field Measurement Error Compensation	17
2.2.4 Geomagnettll Matching Localization	17
2.2.5 Inertial Geomagnetic Matching Integrated Navigation	18
References	18
Chapter 3 Geomagnetic Field Continuation Methods	20
3.1 Problem Statement	20
3.1.1 Mathematical Formulation for Upward Continuation	20
3.1.2 Boundary Integral Equation for Upward Continuation	21
3.1.3 Consideration for Solving Downward Continuation	24
3.2 Algorithms for Upward Continuation	26
3.2.1 Frequency Domain GFT Algorithm	26

3.2.2	Spatial Domain BCE Algorithm	34
3.2.3	Relation between GFT Algorithm and BCE Algorithm	46
3.2.4	Numerical Experiments	48
3.3	Algorithms for Downward Continuation	54
3.3.1	Frequency Domain Tikhonov – Lcurve Algorithm	54
3.3.2	Spatial Domain CGLS – BCE Algorithm	64
3.4	Algorithms for Continuation of Geomagnetic Field from Uneven Surface to Level Plane	79
3.4.1	Analysis for Continuation of Potential Field from Uneven Surface to Level Plane	80
3.4.2	Fast Algorithms for Continuation of Potential Field from Level Plane to Uneven Surface	81
3.4.3	CGLS – SI – BCE Algorithm for Continuation of Potential Field from Uneven Surface to Level Plane	83
3.4.4	Numerical Experiments	84
	References	93
Chapter 4	Matching Suitability of Geomagnetic Map	94
4.1	Geomagnetic Map Feature and Matching Suitability Index	94
4.1.1	Geomagnetic Map Feature	94
4.1.2	Matching Suitability Index	99
4.2	Matching Suitability Analysis	102
4.2.1	Matching Suitability Analysis Based on Multi – attribute Decision – making	102
4.2.2	Matching Suitability Analysis Based on Classification	109
4.2.3	Variation Analysis of Matching Suitability Before and After Downward Continuation	117
4.3	Route Planning Under the Constraint of Matching Suitability	120
	References	121
Chapter 5	Geomagnetic Field Measurement Error Compensation	
	Methods	124
5.1	Analyze on Geomatnetic Field Measurement Error Problem	124
5.1.1	Analyzing and Modelling of Geomatnetic Field Measurement Errors	124
5.1.2	Tests of the Dynamic Performance of the Carrier Magnetic Disturbance	127
5.1.3	Framework of Geomagnetic Field Measurement Error Compensation Algorithm	130

5.2	Constrained Total Least Squares Based Geomagnetic Field Measurement Error Compensation Algorithm	132
5.2.1	Constrained Total Least Squares Algorithm	133
5.2.2	Simulated Results	136
5.2.3	Vehicular Experiment Results	139
5.3	Optimal Magnetometer Arrangement Based on D – optimal Design	145
5.3.1	D – optimal Design Algorithm	146
5.3.2	Solving for the D – optimal Design Problem	149
5.3.3	Simulated Results	151
5.4	Study on Geomagnetic Field Measurement Error Compensation in Ill – posed Case	157
5.4.1	Ill – posed Problem in the Geomagnetic Field Measurement Error Compensation	157
5.4.2	Truncated Total Least Squares Algorithm	163
5.4.3	Experimental Results	165
	References	173
Chapter 6	Inertial/Geomagnetic Field Integrated Navigation Methods	177
6.1	Classifications of Integrated Navigation Algorithms	177
6.1.1	Loose Integrated Navigation Algorithm	177
6.1.2	Tightly Integrated Navigation Algorithm	179
6.2	Batch Localization Algorithm	179
6.2.1	Algorithm Model	179
6.2.2	Contour Constraint Based Geomagnetic Matching Method	182
6.2.3	Iterative Multi – scale Geomagnetic Matching Method	190
6.2.4	Constrained Particle Swarm Optimization Based Geomagnetic Matching Method	197
6.2.5	Geomagnetic Matching Length Estimation Method	201
6.3	Batch Localization of Integrated Navigation	207
6.3.1	Gaussian Mixture Approximation Method of Likelihood Surface	208
6.3.2	Dynamic Reduction Strategy of Gaussian Components	211
6.3.3	Simulated Results and Discuss	212
6.4	Sequential Localization of Integrated Navigation	213
6.4.1	Sequential Localization Model	213
6.4.2	Point Mass Filter	213
6.4.3	Integrated Navigation Method	215

6.5	Tightly Integrated Navigation Methods	215
6.5.1	Extended Kalman Filtering Algorithm	215
6.5.2	Marginalized Particle Filtering Algorithm	218
6.6	Experimental Analysis of Underwater Navigation	224
6.6.1	Experimental Setup	224
6.6.2	Experimental Results Analysis	225
6.6.3	Conclusion	228
	References	229
Appendix A	Database for Continuation Algorithms Test	231
A.1	Simulated Geomagnetic Data	231
A.2	Random Data	232
A.3	Simulated Altitude Data	233
A.4	Real Geomagnetic Anomaly Data	233
Appendix B	Expression of the Coefficient Matrix $F_i (i = 1, 2, \dots, 10)$	235
Appendix C	Derivation of the Gradient and Hessian Matrix of Newton Iteration Method	237

第1章 绪论

水下自主航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)在科学考察、商业及军事方面均有着广阔的应用前景^[1,2]。水下长航时高精度自主导航是发展 AUV 必须突破的关键技术之一^[3,4],也是目前导航技术领域研究的热点和难点问题,因此探索和研究新的水下长航时高精度自主导航技术,具有重要的理论价值和应用价值。

1.1 AUV 对自主导航技术的需求

21 世纪是海洋的世纪,海洋占地球表面积的 70.8%,蕴藏着丰富的生物、矿产、化学和动力资源,探索和开发海洋将成为人类主要的生产活动,AUV 将成为这一生产活动的重要工具。利用 AUV,可以完成水下探测、水下设施检查、海洋资源勘查与开发、海洋环境时空变化的监测、海洋救险和打捞等任务。因此,AUV 已成为世界海洋大国的发展热点。

AUV 存在广泛的军事用途,不少国家将其看成是现代海军的“力量倍增器”。AUV 在军事应用上有着如下显著的特点:

(1) 作战用途广。可根据具体的作战需求,进行使命重构,搭载相应的任务模块,执行不同的任务。

(2) 智能化程度高。采用先进的人工智能技术,可自主进行航路规划、障碍物规避、目标运动要素解算以及战术机动。

(3) 隐蔽性能好。AUV 采用新材料、体积小、噪声低,难以被探测。

(4) 机动能力强。能长时间远距离航行,可在复杂海域或浅水区自由机动。

(5) 费效比高。与普通作战平台相比,AUV 价格低廉,可以无人搭载,重复使用。

随着 AUV 在平台、动力、导航、控制、探测、有效载荷和通信方面的发展,其作为未来的重要作战装备,已经开始显示出其潜在功能。美国等西方国家大力发展 AUV,到目前已取得了较为显著的成果,推出了多种用途的 AUV,完成包括反水雷、侦察监视、反潜攻击、特种人员与装备输送、水下信息传递等在内的多种任务^[5,6,7],许多型号产品已列装部队,如美国的海神之子、水雷侦察系统(NMRS 和 LMRS)、任务重构水下航行器(MRUUV)、潜艇回收 UUV、海马大型 UUV、曼獾攻击 UUV、滑行 UUV 和遥控环境监视系统(REMUS,图 1.1),以及挪威的

“HUGIN1000”,英国的“护身符”(Tailsman)等。2005年,德国阿特拉斯电子公司研制成功了DeepC,并在比斯开湾深海水域进行了演示活动。DeepC重2.5t,作业水深4km,续航时间约50h,最大装载能力为250kg。可执行水下管线检测、海底电缆铺设、海床勘探和海底资源调查等任务,其潜在军事应用价值已引起德国海军的关注^[6]。

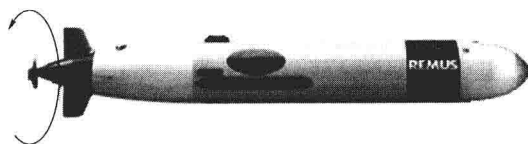


图 1.1 REMUS 外形图

在国内,中国科学院沈阳自动化所于1994年牵头研制出了“探索者”号水下航行器,后又相继研制开发了“CR-01”型和“CR-02”型无缆自主水下机器人,2006年研制出用于海底矿藏勘测的AUV。哈尔滨工程大学研发了“智水”系列智能水下航行器,标志着我国AUV的智能控制技术已接近世界先进水平^[8]。引起世界广泛关注的我国的“蛟龙号”载人潜水器,实现了世界同类载人潜水器最大下潜深度——7000m,实现了多种高性能海底作业能力,探测的范围覆盖全球99.8%的海洋。无疑,“蛟龙号”将在深海探索与海洋资源开发方面产生重要作用,也必将对发展我国的AUV技术起到推动作用。

2005年1月21日,美国海军公布了经过大规模修订后的升级版的“海军无人潜航器主计划”,明确要发展便携式、轻型、重型和巨型4类AUV,续航力将突破百小时,导航技术成为发展AUV的关键技术。由于受到尺寸、质量及电源使用的限制,要在AUV上实现长航时高精度的导航是相当困难的,再加上对AUV的一些其他要求,如隐蔽作业、高可靠性、恶劣环境下的作业及全球作业等,就使得AUV的导航更加复杂化了。因此,水下长航时高精度导航成为发展AUV的技术瓶颈之一。国内外近年主要AUV的导航系统参数由表1.1和表1.2给出。总结表1.1和表1.2给出的导航系统信息可知,目前AUV可用的水下导航定位系统主要有以下几种。

(1) 水深计。主要包括压力传感器和声学高度计,用于测量水下载体距离水面的深度。

(2) 定向系统。主要包括倾角仪、磁罗盘、陀螺罗经、陀螺航姿系统等,主要用于测量水下载体的姿态和航向。其中,陀螺罗经和航姿系统需要知道载体速度才能获得较高的测量精度。

(3) 水下多普勒测速仪。主要包括打底(Bottom-lock)多普勒和打水(Water-lock)多普勒测速系统。这类系统主要的误差源是航向误差,以及测速传感器与姿态传感器之间的对准误差,且易受载体垂直运动的影响。因此,这类系统