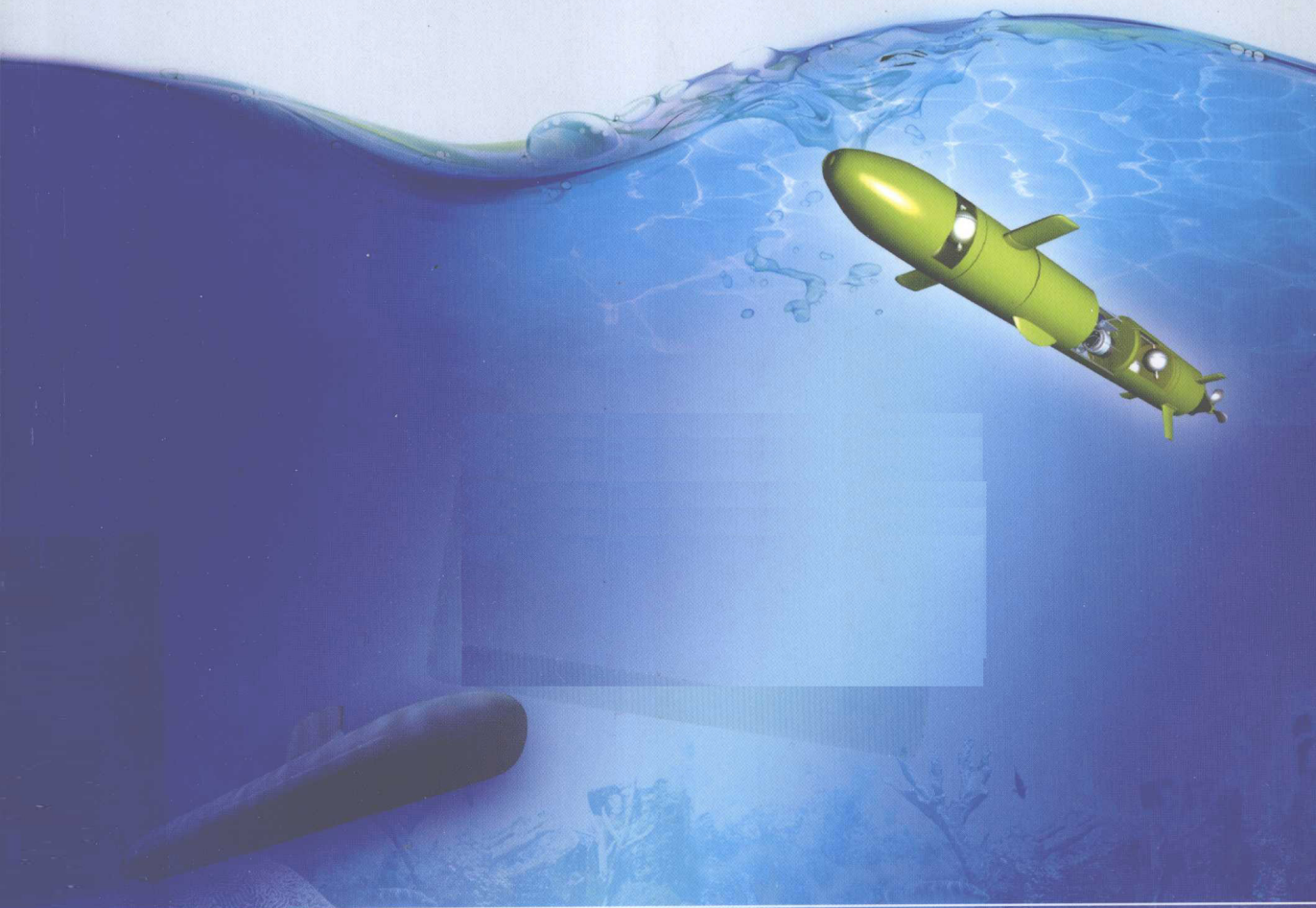


水下导航定位技术

张红梅 赵建虎 杨 鲲 田春和 编著

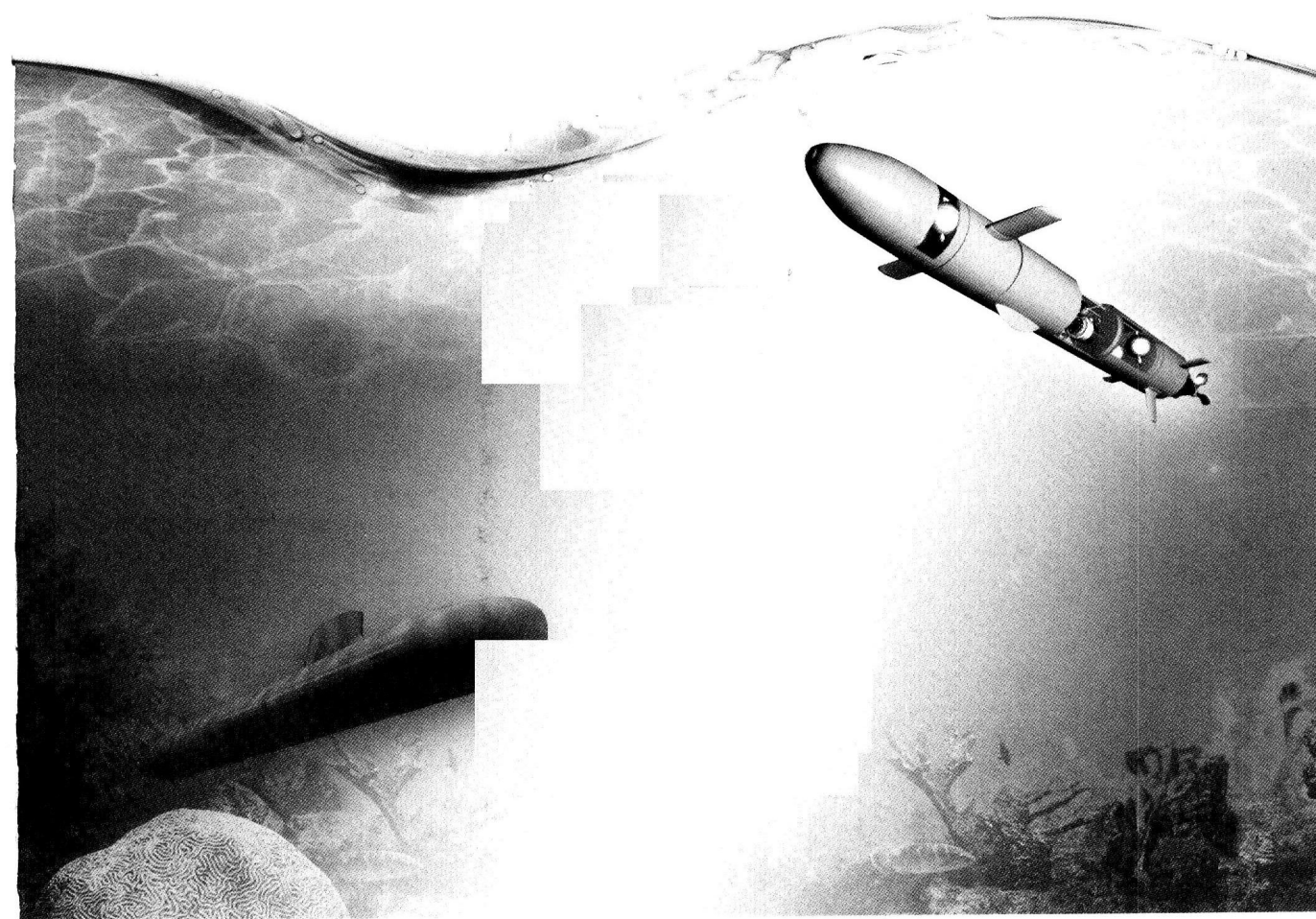


WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

水下导航定位技术

张红梅 赵建虎 杨 鲲 田春和 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

水下导航定位技术/张红梅,赵建虎,杨鲲,田春和编著. —武汉:武汉大学出版社,2010. 11

ISBN 978-7-307-08256-4

I. 水… II. ①张… ②赵… ③杨… ④田… III. 潜艇—航海导航
IV. U675. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 201976 号

责任编辑:黄汉平 责任校对:王 建 版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北恒泰印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:12.75 字数:290千字 插页:1

版次:2010年11月第1版 2010年11月第1次印刷

ISBN 978-7-307-08256-4/U·12 定价:30.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

由于水介质的特殊性,诸如光学导航、无线电导航、卫星导航等常用的导航技术在水下难以被采用。因此,相对陆空导航,水下导航可利用资源较少,实施起来相对困难。无源、自主惯性导航系统短时间内具有导航精度高、导航信息全面等特点,非常适合水下导航。但由于系统漂移,长时间导航会存在误差积累。随着现代科学技术的发展,特别是我国海洋强国战略的实施,对水下导航在精度和可靠性方面都提出了更高的要求,仅靠单一惯性导航系统很难满足这些要求,因此需要形成以惯性导航系统为主导航系统、其他导航系统为辅助导航系统的组合导航系统,以提高导航的精度和可靠性,这也是当前水下导航技术的发展趋势。

本书在分析国内外水下导航技术的基础上,介绍了惯性导航技术和水下声学导航技术以及基于匹配思想的导航技术的原理,最后对水下组合导航系统的设计方法和系统性能进行了详述并给出了实验验证。

全书由八章组成,分别为:

第 1 章 绪论

第 2 章 导航坐标系及其相互转换

第 3 章 惯性导航系统

第 4 章 水下声学导航定位

第 5 章 水下地形匹配导航

第 6 章 海床地貌匹配导航

第 7 章 水下地磁匹配导航

第 8 章 水下组合导航系统

本书由国家 863 项目“地形地貌与地磁水下组合导航定位关键技术研究”(项目编号 2009AA12Z311)资助,由承担项目的武汉大学和天津水运工程科学研究所两个单位课题参加人员联合完成。其中,张红梅、杨鲲完成第 1 章、第 3 章的撰写;赵建虎、杨鲲完成第 2 章的撰写;杨鲲、张红梅、田春和、张彦昌完成第 4 章的撰写;张红梅、赵建虎完成第 5 章、第 6 章的撰写;赵建虎、张红梅完成第 7 章和第 8 章的撰写。

本书的所有原始试验数据由合作单位天津水运工程科学研究所提供,在此表示感谢。同时,博士生张凯、硕士生孟先阔为地形匹配导航试验提供了实验成果;博士后陶维亮、硕士生邵楠为地貌匹配导航试验提供了实验成果;博士生王胜平、王爱学为地磁匹配导航试验提供了实验成果;博士后陶维亮、博士生王胜平、张凯和王爱学为水下组合导航试验提供了实验成果。在此一并表示感谢。

本书适合作为从事水下导航工作研究人员的参考书,也可作为高校本科生和研究生

的教材。

鉴于水下导航的特殊性,以及本书所涉及的某些导航领域的前端性,书中定会存在一些错误,敬请读者批评指正。

编 者

2010 年 9 月于武汉

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 水下导航发展的历史和现状	2
1.2.1 惯性导航	3
1.2.2 声学导航	4
1.2.3 地形/地貌匹配导航	6
1.2.4 重力匹配导航	8
1.2.5 地磁匹配导航	9
小结	11
第 2 章 导航坐标系及其相互转换	12
2.1 导航常用坐标系	12
2.2 坐标系间的转换	15
2.2.1 惯性坐标系到非惯性坐标系的转换	15
2.2.2 地球坐标系到导航坐标系的转换	16
2.2.3 导航坐标系与载体坐标系的转换	16
2.2.4 载体坐标系与计算坐标系间的转换	17
小结	17
第 3 章 惯性导航系统	18
3.1 系统组成及分类	18
3.2 平台式惯性导航系统	19
3.2.1 惯导平台	20
3.2.2 平台伺服回路性能指标	20
3.2.3 三轴平台伺服回路的耦合与隔离	22
3.2.4 游动方位惯导系统导航参数的计算	23
3.3 捷联式惯性导航系统	27
3.3.1 捷联式惯导系统的姿态计算	28
3.3.2 捷联式惯导系统导航参数的解算	32
3.4 惯导系统误差分析	33
3.4.1 惯导系统的误差方程	34

3.4.2 惯导系统的基本误差特性	36
小结	40
第4章 水下声学导航定位	41
4.1 概述	41
4.2 系统组成及导航定位方式	41
4.3 水声导航定位系统及其工作原理	43
4.3.1 长基线声学定位系统	43
4.3.2 短基线声学定位系统	47
4.3.3 超短基线声学定位系统	49
4.4 系统数据处理	52
4.4.1 数据质量控制	52
4.4.2 船姿改正	55
4.4.3 水听器基阵偏移改正	55
4.4.4 声速改正	56
4.4.5 坐标转换	58
4.5 导航定位实施	61
4.5.1 准备工作	61
4.5.2 水下导航定位	64
4.6 导航定位误差分析	68
4.6.1 声学导航系统误差	68
4.6.2 辅助设备精度	71
4.6.3 定位精度综合分析	71
小结	72
第5章 水下地形匹配导航	73
5.1 概述	73
5.2 水下地形测量系统	74
5.2.1 单波束测深系统	74
5.2.2 多波束回声测深系统	74
5.2.3 高分辨率测深侧扫声呐系统	76
5.2.4 机载激光测深系统	77
5.2.5 水深遥感	78
5.3 测深数据处理	79
5.3.1 声速改正/声线跟踪	79
5.3.2 测点地理坐标计算	81
5.3.3 潮位改正	81
5.4 海床地形描述	82

5.4.1 海床地形格网化	82
5.4.2 海床地形等深线描述	82
5.5 水下地形匹配定位技术	84
5.5.1 基于等深线走向的海床地形匹配算法	84
5.5.2 基于等深线图像的地形匹配算法	86
5.5.3 基于链码和形状特征的等深线综合匹配算法	90
5.6 实验及分析	92
小结	100
第6章 海床地貌匹配导航	101
6.1 海床地貌图像的获取及数据处理	101
6.1.1 声呐图像的形成	101
6.1.2 多波束声呐图像	104
6.1.3 侧扫声呐图像	107
6.2 声呐图像处理技术	111
6.2.1 图像平滑	111
6.2.2 图像增强	113
6.2.3 图像边缘检测和分割	114
6.3 地貌图像匹配导航技术	115
6.3.1 SIFT 匹配算法	116
6.3.2 SURF 匹配算法	123
6.3.3 SURF 和 SIFT 匹配方法比较	126
6.4 约束匹配算法	128
6.5 匹配实验及分析	129
小结	131
第7章 水下地磁匹配导航	132
7.1 水下地磁匹配导航系统组成	132
7.2 地磁测量及数据处理	134
7.2.1 地磁测量	134
7.2.2 地磁数据处理	136
7.3 地磁场建模	138
7.3.1 拟合建模法	139
7.3.2 内插建模法	140
7.3.3 基于位理论的建模方法	141
7.4 地磁匹配导航算法	145
7.4.1 TERCOM 匹配算法及其改进算法	145
7.4.2 ICCP 匹配算法	149

7.4.3 改进型 ICCP 匹配算法	153
小结	157
第8章 水下组合导航系统	158
8.1 卡尔曼滤波	158
8.1.1 离散系统卡尔曼滤波的数学描述	159
8.1.2 自适应卡尔曼滤波	159
8.2 地形辅助 INS 水下组合导航系统	162
8.2.1 系统组成	162
8.2.2 系统工作原理	163
8.2.3 系统误差分析	164
8.2.4 实验及分析	169
8.3 地貌辅助 INS 水下组合导航系统	170
8.3.1 系统组成	170
8.3.2 导航工作原理	172
8.3.3 系统误差分析	173
8.3.4 实验	174
8.4 地磁辅助 INS 水下组合导航系统	175
8.4.1 系统组成	176
8.4.2 系统工作原理	178
8.4.3 系统误差分析	179
8.4.4 实验及分析	180
8.5 地形/地貌/地磁综合辅助 INS 水下组合导航系统	182
8.5.1 系统组成	182
8.5.2 系统工作原理	184
8.5.3 系统误差分析	185
8.5.4 实验及分析	185
小结	188
参考文献	189

第1章 绪 论

1.1 概述

海洋约占整个地球表面积的 71%,蕴藏着极为丰富的自然资源。随着陆地资源的逐渐匮乏,人类已将资源开发和利用的重点转向海洋,21 世纪是人类开发和利用海洋的世纪。我国拥有 18000km 长的海岸线和 300 余万平方公里的管辖海域以及 6500 多个岛屿,对人均资源占有率不高的我国来说,海洋开发更具有特殊的意义。而在海洋开发活动中,导航定位,尤其是水下导航定位起着举足轻重的作用。

导航是将航行载体从起始点引导到目的地的技术或方法。导航所需的最基本参数包括载体的即时位置、速度和航向。Leonard 和 Durrant-Whyte 曾将定位与导航的基本功能归结为要回答以下三个问题,即:

(1)我现在在哪里?(Where am I?)

潜航器等必须知道自己在什么地方,从而为下一步动作做出规划。航行器的当前位置需要根据其外部或者内部环境信息来估计。

(2)我要去哪里?(Where am I going?)

为了完成各种有意义的任务,潜航器等必须知道它将要去哪里,即目的地。在实际的环境中,必须能够识别出周围的物体,并确定它们的状态,进而获得运动的目的地。

(3)我怎样到那里?(How should I get there?)

潜航器一旦知道了它在哪里以及它将要去哪里,那么接下来就是如何规划最佳路径或航线,从而有效、准确并安全地到达目的地。

导航是由导航系统完成的,其核心问题是载体的定位问题,任何导航系统中均包括装在运载体上的导航设备。

导航一般又可分为自主式导航(无源导航)和非自主式导航(有源导航)两种类型。

如果装在载体上的导航设备可以不需要外部设备而单独产生导航信息,则称为自主式导航系统。反之,如果除了要有装在运载体上的导航设备外,还需要其他的外源设备,才能产生导航信息,则这种系统称为非自主式导航系统。目前自主式导航系统主要有天文导航系统和惯性导航系统,非自主式导航系统主要有包括卫星导航系统在内的无线电导航系统。就非自主式导航系统而言,还包括装在其他地方的与导航设备配合使用的导航台。从导航台的位置来看,主要有陆基导航系统和空基导航系统。陆基导航系统,即导航台位于陆地上,导航台与导航设备之间用无线电波联系。空基导航系统,导航台设在人造卫星上,其覆盖范围更大。驾驶员或自动驾驶系统根据导航系统所输出的导航信息,可

以在空中、海上、陆地等空间位置,对运载体进行控制、制导,使载体正确地向目的地前进。

水下导航定位服务在军用和民用方面都有着很大的需求和应用前景,水下航行器作为探索海洋、开发海洋的一种重要工具,具有很好的运用价值。20 世纪 70 年代,由于军事、经济以及科学上的需求,对水下载体的定位要求也越来越高。从 20 世纪 70 年代开始,已经形成了所谓的海洋勘探行业,并出现了长基线、短基线以及超短基线等水下定位系统。这些系统可以在局部海域对水下目标进行高精度的定位,并可实现对水下载体的导航。到了 80 年代,军事上对水下定位的需求更为迫切。随着核潜艇和水下导弹发射技术的发展,对潜艇导航定位也提出了更高的要求,尤其在导航精度、可靠性以及隐蔽性等方面。然而,不同于陆地导航,由于水下环境的特殊性,使得水下定位与导航比较困难。如何提高水下定位导航的精度一直是导航界关注的热点问题。

水下导航系统具有工作时间长、环境复杂、信息源少、隐蔽性高等特点,采用单一导航方法,其精度和可靠性都很难满足导航性能的要求。提高水下导航定位系统精度和可靠性的有效途径是采用组合导航技术,即将两种或两种以上的非相似导航系统有机地组合在一起,形成水下组合导航系统,参与组合的各导航系统称为子系统。将多种导航技术适当融合,不仅可以取长补短、提高导航系统的精度,而且可以适当地降低对单一导航系统器件的精度要求,降低系统成本,提高系统的可靠性和容错性。

实现组合导航的基本方法有两种,其一是回路反馈法,即采用经典的回路控制法,抑制系统误差,并使各子系统间实现性能上的互补。其二是最优估计法,即采用卡尔曼滤波或维纳滤波,从概率统计最优的角度估计出系统误差并消除之。两种方法都使各子系统内的信息互相渗透,有机融合,从而起到性能互补的功效。但由于各子系统的误差源和量测误差都是随机的,所以,以状态空间分析法为基础,以卡尔曼滤波为代表的最优估计法远优于第一种方法,其应用最为广泛,也最为典型。因此,在组合导航系统的实际设计中,一般都采用卡尔曼滤波。

组合导航系统是随着计算机技术、电子信息技术以及现代控制理论的发展与进步,率先在航空、航天与航海等领域发展起来的。组合导航是 21 世纪导航技术发展的主要方向之一,也是未来导航技术应用的主要模式。

1.2 水下导航发展的历史和现状

长期以来,水下导航定位多借助惯性导航和声学导航系统来实现,这在一定程度上满足了民用的需要,但对于军事应用,更强调的是水下潜航器的隐蔽性。长期潜航能力一直是水下航行器所追求的重要目标,隐蔽性是潜艇等水下武器生存并发挥效力的前提。潜艇一旦浮出水面,即使只用 GPS 接收机进行短暂定位,也可能暴露自身,失去隐蔽性。为保证潜艇在水下长时间潜航,自主导航定位能力对于潜艇而言是必不可少的。潜艇的导航仪器比较多,但主要是依靠惯性导航系统。惯性导航系统是当前唯一能向核潜艇导航和武器发射提供必要的全部数据的设备,与其他导航方式相比较,其优点除了精度和自动化程度高外,最为突出的是工作完全独立。依靠自身的惯性元件进行导航,与外界任何参考物(如岸上的物标、太阳、无线电波等)不发生关系,所以不受外界干扰和破坏,隐蔽性

能好,在军事上有着极其重要的应用价值。惯性导航的无源性和自主性,为实现潜航器自主导航定位创造了条件,也因此成为潜航器的核心导航设备。但是,惯性导航系统的主要缺点是定位误差随时间的积累而增大,无法满足长期和高精度的导航定位要求。通常情况下,为抑制导航系统位置误差的增长,提高长期导航的精度,必须对惯性导航系统进行定期校正。传统修正方法需要航行器接近水面,从而增大了航行器暴露的可能性,直接影响其隐蔽性能,甚至威胁其生存。因此,需要一种无需航行器接近水面就能对惯性导航系统进行及时修正的方法。近年来,利用地球物理特征的无源导航理论和方法愈来愈多地引起国内外研究机构和学者的注意,开展了诸如地形匹配导航技术、重力辅助导航技术以及地磁辅助导航技术等研究。匹配辅助导航具有精度高、不受时间限制、无需暴露于水面以及对外无辐射等特性,可最终解决潜艇的隐蔽性问题。

相对于陆地和水面导航,在水下实施导航,尤其是精密导航要困难得多。实际导航中,往往是将两种或两种以上的导航系统组合在一起,即形成水下组合导航系统。相对单一的导航系统,组合导航系统具有如下主要优点:

- (1)有效利用了各子系统的导航信息,提高了定位精度;
- (2)允许在子系统工作模式间进行自动转换,进一步提高了系统工作的可靠性;
- (3)可实现对各子系统及其元件的校准,从而放宽了对子系统技术指标的要求。

在不同导航系统组合中,虽然对于何种系统可以组合到一起没有什么限制,但考虑到水下环境的特殊性,目前水下组合导航系统中以水声和惯性导航为主。水下声学导航在导航距离、隐蔽性和精度等方面存在一些不足,而惯性导航因存在误差积累,导航精度随时间推移逐渐降低。为此,开展自主式水下组合导航定位的关键技术研究对于构建水下自主、稳健、高精度的导航系统具有重要意义,这也是水下组合导航发展的一个重要方向。

为了更全面地了解水下导航技术的发展历史和现状,下面分别介绍惯性导航、声学导航这两类常用导航技术以及近几年来发展起来的基于地球物理属性实现匹配导航技术的发展历史和现状。

1.2.1 惯性导航

在众多导航系统中,惯性导航系统(inertial navigation system, INS)是一种真正意义上的自主式导航系统,是导航技术领域内的重要分支。其基本工作原理是以牛顿力学定律为基础的,即在载体内部测量载体运动加速度,经积分运算后得到载体的速度和位置等导航信息,是一种完全自主式的导航系统。惯性导航系统完全依靠装在载体上的导航设备自主地提供运载体的加速度、速度、位置、角速度和姿态等信息,而与外界没有任何光或电的联系。相对其他导航系统,它具有自主、隐蔽、实时、不受干扰、不受地域、时间和气候条件限制以及输出参数全面等诸多独特的优点,对于军事用途的飞机、舰艇、导弹等有着十分重要的意义,已成为航天、航空和航海领域中一种被广泛使用的主要导航方法。鉴于在第3章中要对惯性导航系统进行详细的阐述,在此仅对其发展历史和现状做简单介绍。

17世纪,牛顿研究了高速旋转刚体的力学问题,为惯性导航奠定了理论基础。1852年傅科称这种刚体为陀螺,后来制成供姿态测量用的陀螺仪。1906年,H.安林兹制成陀螺方向仪,其自转轴能够指向固定的方向。1907年,他又在方向仪上增加摆性,制成陀螺

罗盘。这些研究成果成为惯导系统的先导。1923 年, M. 舒拉发表“舒拉摆”理论, 解决了在运动载体上建立垂线的问题, 使加速度计的误差不致引起惯性导航系统误差的发散, 为工程上实现惯性导航提供了理论依据。1958 年, “缸鱼”号潜艇依靠惯导穿过北极在冰下航行 21 天。

20 世纪 60 年代开始, INS 首先在航海, 然后是在航空, 被大量投入使用。20 世纪 80 年代以前所用的 INS 都是平台式的, 它以陀螺为基础, 形成一个不随载体姿态和载体位置而变动的稳定平台, 保持着指向惯性坐标系或者东、北、天三个方向的坐标系。相应坐标系三个方向上的载体加速度由固定在平台上的加速度计分别测量出。通过对加速度进行一次和二次积分, 可以导出载体的速度和所经过的距离。载体的航向及姿态由陀螺及框架构成的稳定平台输出。1955 年舰用惯导系统取得了突破性的进展, 随着舰船和弹道导弹技术的发展, 从 20 世纪 60 年代初起, 军舰上开始大量装备惯导。经过不断改进, 达到了可以几个小时才校准一次且仍可以保持一定定位精度的水平。

惯性导航系统的主要缺点是导航定位误差随时间增长, 因而难以长时间独立工作。为解决这一问题, 常采取的途径有两种:

- 其一, 从惯导系统的自身结构特点出发, 提高惯性传感元件的性能和精度。
- 其二, 采用惯性组合导航技术, 利用各种外部辅助导航手段, 取长补短, 应用现代滤波理论和信息融合技术对惯性导航的累积误差进行补偿。实践证明, 通过软件技术来提高导航精度的组合导航, 是一种行之有效的方法。通过有效利用组合系统中其他方式导航系统的信息对惯导系统进行误差修正, 可获得较高的精度和稳定性。

1.2.2 声学导航

由于声学信号在海水中传播衰减很小, 可以穿透较远的距离, 因此长基线 (long baseline, LBL)、短基线 (short baseline, SBL) 和超短基线 (ultra-short baseline, USBL) 水下声学定位和导航系统在近年来得到了快速发展和广泛应用。这些系统都有多个基元 (接收器或应答器), 基元间的连线称为基线。根据基线的长度可以判断属于哪一类系统, 如表 1-1 所示。

表 1-1 水声定位系统分类	
系统类型	基线长度/m
长基线 (LBL)	100 ~ 6000
短基线 (SBL)	20 ~ 50
超短基线 (USBL 或 SSBL)	<10

上述各类水声定位系统分别具有各自的优缺点。

长基线声学定位系统因其基线较长, 所以定位精度高。但是在深水使用时, 位置数据更新率较低, 仅达到分钟量级。其次, 布放、校准以及回收需要较长时间, 且作业过程较为复杂。采用长基线定位系统跟踪潜水器或为其导航, 其最大的优点是在较大的范围和在

较深的海水情况下,导航定位具有较高的精度。

短基线声学定位系统的基线远小于长基线系统,多个水听器阵元需在船上或平台上仔细选择位置并分开安装,这最好是在舰船建造时进行。其缺点是某些水听器可能不可避免地安装在高噪声区,如靠近螺旋桨或机械的部位,从而使跟踪定位性能变差。其定位精度比常规超短基线系统高,但比长基线系统低。短基线系统无需布放多个应答器并进行标校(需要用—个应答器提供参考位置),一旦基阵安装好,定位导航作业就较为方便。

超短基线系统提供的定位精度一般比上两种系统差,它只有一个紧凑的、尺寸很小的声基阵安装在载体上。基阵作为一个整体单元,可以使其处在流噪声和结构噪声均较弱的某个有利位置处。此外,也无需布放标校应答器阵(但也需要一个应答器作为参考)。通过精心设计,定位精度有可能接近长基线系统的定位精度。

上述三种定位系统,可单独应用,也可进行组合,构成组合系统,如 L/SBL、L/USBL、S/USBL 以及 L/S/USBL。

水声定位系统的作用距离和工作频率有关,随着工作频率的提高,其作用距离逐渐变短,如表 1-2 所示。大多数 LBL 系统的工作频率大约在 10kHz,其作用距离大概在几千米,这时的定位精度约为几米。

表 1-2 水声定位系统的工作频率和作用距离

频率范围/kHz	作用距离/m
低频 LF(8 ~ 16)	>10k
中频 MF(18 ~ 36)	(2 ~ 3)k
高频 HF(30 ~ 60)	(1 ~ 2)k
超高频 UHF(50 ~ 110)	<1k
甚高频 VHF(200 ~ 300)	<100

声学定位和导航技术有着广泛的应用。例如,在海洋石油勘探中,可以给海上油井定位,在钻井工程期间遇到特大风暴和台风时,船可以暂时离开井位,返回基地避风,待风暴过去后,可引导重返井位,导入井口。用于水下目标的跟踪,如对水下作业的潜水员进行定位、测量潜器的位置以及对鱼雷水下运动轨迹进行跟踪测量等。还可用于其他矿产资源的开发、海底管线的铺设定位、检查和维修等。此外,还可用作动力定位钻井船、海底取芯船、海上救捞船以及其他海上动力定位特种工作船等动力控位系统的位置传感器,给动力控位系统提供精确的船位信息。作为军事用途,可用于打捞鱼雷、沉船以及潜艇的水下导航等。

挪威的 Kongsberg Simrad 公司、法国的汤姆逊公司和马可尼公司是国外较早开展水声定位系统研制的单位,其研究历史近 30 年,产品涵盖上述 3 种类型,而且多个产品已被军方采用。法国的 OCEANO 公司于 1997 年推出的 POSIDONIA 6000 远距离超短基线定位系统,工作水声达 6000m,最大作用距离(斜距)8000m,在 6000m 水深,换能器基阵下方

30°开角范围内的定位精度为斜距的 0.5%。经过改进后新型的 POSIDONIA 6000 系统的定位精度设计指标为斜距的 0.3%。该产品已安装在德国的一艘海洋调查船以及法国海军的某舰艇上。我国的大洋一号海洋调查船也安装了此设备。

此外,英国的 Sonardyne 公司,澳大利亚的 Nautronix 公司以及美国的 ORE 公司等也都有声学定位系统产品。

声学测速设备可测量舰船的艏艉和横向两个速度分量,即可给出矢量速度。若用电罗经测出舰船的航向,便可进行航位推算,从而实现导航。声学测速和计程设备主要有两种,一种是多普勒速度计程仪(doppler velocity log, DVL),也称测速声呐。其工作原理是基于多普勒效应。另一种是声相关速度计程仪(acoustic correlation log, ACL),也称相关测速声呐。其特点是载体上的发射换能器波束较宽,且向正下方发射信号。接收时采用多个水听器接收海底回波,通过各接收器接收信号的相关特性推算载体速度。自 20 世纪 70 年代市场上就出现了第一批多普勒或声相关测速声呐产品。目前国外已有不少著名公司,如 Krupp、Simrad、Thomson、Atlas、RDI 等公司均有产品。

同惯性导航一样,通过声学测速来进行导航的系统也是一种航位推算定位系统。而多普勒/惯性是一种速度综合模式,它只能减小位置误差随时间增长的速度值,不能改变位置误差随时间增长的基本特性(如惯性系统),这是速度综合导航系统的主要不足之处。

1.2.3 地形/地貌匹配导航

通过海底地形地貌,也可进行导航,即地形/地貌匹配导航。海底地形是指海底深度与地理坐标的对应关系,利用海底地形图来描述。海底地形图借助海底深度测量数据来绘制。海底地貌是指海底表面的细微结构图,是根据海底各点的回波强度来获得的。地形匹配导航利用地形的几何起伏变化来实施自主导航,其精度主要取决于地图精度和地形变化情况。在特征地形下,其导航精度和可靠性较高;但当特征不明显或地形近似度较高时,导航可靠性会降低,且易出现误匹配问题。

水下地形测量的发展与其测深手段的不断完善是紧密相关的。在回声测深仪尚未问世之前,水下地形探测只能靠测深铅锤来进行,精度很低,且费工费时。20 世纪 20 年代出现的回声测深仪,即单波束回波测深仪(single beam echo sounder),其基本原理是利用安装在船底的换能器垂直向下发射声脉冲信号,测量该信号经海底反射回到换能器的往返传播时间,根据已知声速即可得到海底深度。当测量船在水上航行时,船上的测深仪可测得一条连续的水深线,即地形断面,通过水深的变化,可以了解水下地形的情况。单波束回声测深仪只利用一个回波,每一次信号收发只能得到一个点的海底深度,测量效率较低,属于“点”状测量。但由于其操作简单、价格低廉,在许多民用船上仍被广泛使用。双频测深仪是为适应不同海深的测深需要而发展起来的,在浅水区使用较高的频率,而在深水情况下则使用较低的频率。

20 世纪 70 年代出现了多波束回波测深仪(multibeam echo sounder)或条带测深仪(bathymeter),多波束回波测深仪发射时采用较宽的波束,而在接收时采用预成波束技术形成多个接收波束,在一次信号发射和接收期间可同时获得海底多个点的深度数据,工作

效率高。它能一次给出与航线相垂直的平面内几十个甚至上百个测深点的水深值,或者一条一定宽度的全覆盖的水深条带。所以它能精确、快速地测出沿航线一定宽度内水下目标的大小、形状和高低变化,属于“面”测量。相对单波束系统,多波束回波测深技术相对复杂,设备价格昂贵。多波束回波测深仪在航道测量、海底勘探等方面得到愈来愈多的应用。在军事上对于作战战场的探测或战场的准备也有着十分重要的意义。

多波束系统的研制工作起源于20世纪60年代美国海军研究署资助的军事研究项目。1962年,美国国家海洋调查局(NOAA)在Surveyor号上进行了新问世的窄波束回声测深仪(NBES)海上实验。第一套原始的多波束系统采用两个换能器阵列,长发射阵沿船的龙骨安装,波束发射角为 $2.66^{\circ} \times 54^{\circ}$;发射阵列与船的龙骨垂直,产生16个 $20^{\circ} \times 2.66^{\circ}$ 波束,接收信号来自于发射和接收波束的交织部分,形成16个 $2.66^{\circ} \times 2.66^{\circ}$ 窄波束。随着军事需求和计算机技术等不断发展,美国通用仪器公司认识到NBES系统可以进行宽幅度的水下地形测量。1976年,数字化计算机处理及控制硬件应用于多波束系统,从而产生了第一台多波束扫描测深系统,简称SeaBeam。该系统有16个波束,波束宽度 $2.66^{\circ} \times 2.66^{\circ}$,扇面开角为 42.67° 。系统还增加了一个微型计算机处理系统,同时处理16个纵横稳定的波束,并在软件中进行横摇改正。通过波束间的内插处理,还可以形成15个波束,声线弯曲改正后便获得了实测深度。SeaBeam的横向测量幅度约为水深的0.8倍,如水深为200m左右,海底实际扫幅宽度约为150m;如水深为5000m左右,扫幅宽度约为4000m。SeaBeam的工作频率为12kHz,最大测深量程为11000m。进入20世纪80年代,美国海洋研究集团(NECOR)完善了SeaBeam在船上的数据采集、综合、处理和显示能力。为了实现海陆数据编绘和整理,先后将先进的计算机应用于SeaBeam的数据提取、整理,使其能够为多任务、多用户提供足够的储存能力,数据处理速度也基本上满足了当时的野外测量需要。20世纪80~90年代,先后出现了浅、中、深水多波束系统,如L-3 Communications ELAC Nautik GmbH公司的Seabeam系列,RESON公司的Seabat系列,Kongsberg Simrad公司的EM系列以及Atlas公司的Fansweep 20等。

激光测深系统是另外一种具有广阔发展前途的测量手段。激光光束相对一般水下光源能发射至更远的距离,其发射的方向性也大大优于声呐装置所发射的声束。激光光束的高分辨率能获得海底传真图像,从而可以详细调查海底地貌与海底底质。

侧扫声呐(side scan sonar)也称旁视声呐或海底地貌探测仪,可显示海底地貌,确定目标的概略位置和高度。过去因其难以给出深度而只能用于水下地貌调查,近年来,随着水下定位等相关技术的发展以及高分辨率测深侧扫声呐的面世,侧扫声呐也可用于水下地形测量;同时,AUV(autonomous underwater vehicle)/ROV(remotely operated vehicle)所承载的扫测设备也逐步成为高精度水下地形测量的一个非常有效的手段。

侧扫声呐可安装于船壳上,也可安装在一个称为拖鱼的密封壳体上由船拖曳。它采用单波束进行收发,波束宽度沿船(或拖体)前进方向很窄,而在船的横向则很宽。在信号发出之后连续采集回波数据,然后将各次发射信号采集的回波数据构成一幅海底图像。海底地貌仪分单侧和双侧两种,目前多使用双侧地貌仪。侧扫声呐用于海底大面积成像,也可用于对海底结构、岩石、沉船、障碍物、管线等进行定位。根据其提供的图像,提取出某些特征,从而实现水下目标的识别和海底底质分类。侧扫声呐在海洋开发、环境研究等

方面有着广泛应用,在军事上也可用于探测沉于海床上的鱼雷。

综合地形地貌测量设备结合了地貌和地形测量两种功能。一种是以多波束系统为主,可兼顾地貌测量,它的地形测量精度较高,而地貌图像通过波束内插得到。另一种是以地貌测量为主,同时兼顾地形测量,它采用了近年来发展起来的相干声呐技术。

将多波束、高精度测深侧扫声呐等声呐扫测设备安装在潜航器上,也可以实现对海底的高精度测量,如我国大洋一号上的 6000m 水下自治机器人 AUV 系统安装了测深侧扫声呐、浅地层剖面仪等设备,用于大洋的海底地形地貌调查。

1.2.4 重力匹配导航

研究表明,地球重力场不是均匀分布的,而是存在一个变化的拓扑,这些变化主要是由当地拓扑和密度不均匀性所造成的。对于 INS 来说,当地重力场的变化对于加速度计自身来说是不能区分的,为此美国海军曾经为了校正 INS 的误差对重力场进行了测绘,Gerber 提出采用重力梯度计来作为 INS 的辅助导航工具。之后,该研究结果被进一步推广,采用重力梯度计模型完成了导航系统的仿真,取得了很好的结果。这种方法考虑的主要因素是梯度计的体积、成本及复杂度,而且梯度计必须安装在惯性空间稳定且隔振的平台上。

进行重力场导航时,事先需做好重力分布图,图中的各路线都有特殊的重力分布。重力分布图存储在导航系统中,再利用重力敏感仪器测量重力场特性来搜索期望的路线。通过一定的算法使潜器确认、跟踪或横过路线,到达某个目的点。这种方法由于不进行辐射,不使用外部坐标,所以称为无源重力导航。重力匹配导航是基于图的导航,其前提条件是要有相当精度的重力图。无源重力导航具有精度高、不受时间限制、无需浮出水面的特点,可最终解决导航隐蔽性问题。但是无源重力导航适用于地理特性变化比较大的区域,因此常作为惯性导航的辅助手段。

无源重力导航是在重力测量及重力仪异常和垂线偏差的测量和补偿的基础上发展起来的。20 世纪 80 年代初研制了重力敏感器系统(GSS)。GSS 是一种包括重力仪和重力梯度仪的当地水平稳定平台,用于实时估计垂线偏差,以补偿 INS 的误差。由于 GSS 的生产成本太高,同时垂线偏差图形技术已取得成功,1987 年,研究者开始将主要精力放在垂线偏差图形技术上,终止了 GSS 的生产。

20 世纪 90 年代初开发了无源重力导航,最近出现了一种比较经济的无源导航,在这种设计中没有专用的重力仪表。它的基本依据是垂直加速度分量可用作重力仪的测量值,其精度可足以用来进行重力图匹配。

目前还进行着几种重力辅助导航的研究,将来可能会得到应用。例如 Lockheed Martin 公司研制的重力敏感模块(GSM),它可看做是更经济的 GSS。GSM 的主要部分是重力梯度仪(GGI)和一个作为重力仪的振梁加速度计(VBA)。

1998 年,贝尔宇航公司研制的重力仪/重力梯度仪惯性导航系统可满足战略核潜艇(SSBN)、攻击型核潜艇(SSN)和无人潜航器的要求,其中 GGI 是关键元件,整个系统可装在直径为 0.5334m 的潜器中,1h 的 CEP(circular error probability)位置精度可达 30m,8h 的 CEP 位置精度为 62m。1999 年和 2000 年美国 Lockheed Martin 公司就无源导航申