

水下组合导航系统

王国臣 齐 昭 张 卓 编著
吴简彤 审

Underwater Integrated
Navigation System



国防工业出版社

National Defense Industry Press

水下组合导航系统

Underwater Integrated Navigation System

王国臣 齐 昭 张 卓 编著
吴简彤 审

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

水下组合导航系统可充分利用各导航子系统之间优势互补的特点,大大提高导航系统的精度与可靠性,已成为实现精确定位导航的有效手段,它一直是导航技术领域研究重点与热点。全书内容共分10章:第1章主要介绍了水下组合导航系统的历史与现状;第2~4章分别介绍了惯性导航系统的基本原理、误差分析、标定及初始对准技术;第5~10章是本书的重点内容,其中第5章介绍了组合导航系统基本结构与信息滤波技术,为后续奠定基础;第6~9章分别介绍了惯性/速度匹配组合导航、惯性/地形匹配组合导航、惯性/地磁匹配组合导航、惯性/重力匹配组合导航;第10章介绍了静电陀螺监控技术。

本书既可作为导航专业本科生和硕士研究生的课程教材,也可作为工程技术人员在水下导航系统科研中的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水下组合导航系统/王国臣,齐昭,张卓编著. —北京:国防工业出版社,2016.4

ISBN 978-7-118-10546-9

I. ①水… II. ①王… ②齐… ③张… III. ①水下—组合导航—导航系统 IV. ①TN967.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第056682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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本710×1000 1/16 印张17 $\frac{1}{4}$ 字数328千字

2016年4月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价82.00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

前言

PREFACE

海洋是人类发展的四大战略空间(陆、海、空、天)中继陆地之后的第二大空间,是生物资源、能源、水资源和金属资源的战略性开发基地,是目前最有发展潜力的空间,对经济与社会发展有着直接巨大的支撑作用。所以,对海洋进行广泛深入的探索开发已成为 21 世纪的发展主题之一。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。

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利用。因此,相对陆空导航,水下导航可利用信息源较少,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。

本书系统性强、理论联系实际,可作为导航专业本科生和硕士研究生的课程教材,又可作为工程技术人员在水下导航系统科研中的参考书,希望所提出的一些观点和思想能够对国内同行提供一定的帮助。水下组合导航技术涉及多门学科前沿,内容较新。由于编者水平有限,本书难免存在不足之处,恳请各位专家和广大读者批评指正。

这里,要特别感谢高伟教授的悉心指导,并对本书提出了很好的建议;感谢吴简彤教授,他对本书提出了许多方向性的建议和具体修改意见;感谢王秋滢博士、史洪洋博士、卢宝峰博士、赵博硕士、梁宏硕士、阮双双硕士、杨若雨硕士、张鹏硕士,他们都先后参加了本书部分内容的编写与校对工作。此外,本书部分内容还参考了国内外同行专家、学者的最新研究成果,在此一并向他们致以诚挚的谢意!

编者
2015 年 5 月

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 水下导航定位技术	2
1.2.1 惯性导航	2
1.2.2 水声定位与导航	5
1.3 组合导航系统	6
1.3.1 INS/地形匹配组合导航	7
1.3.2 INS/地磁匹配组合导航	7
1.3.3 INS/重力匹配组合导航	8
1.3.4 静电陀螺监控导航	9
1.4 导航信息融合及滤波技术	10
1.4.1 卡尔曼滤波	11
1.4.2 非线性滤波	12
1.4.3 联邦卡尔曼滤波	14
参考文献	14
第 2 章 惯性导航系统	16
2.1 坐标系及坐标变换	16
2.1.1 坐标系定义	16
2.1.2 坐标变换矩阵	19
2.2 平台惯性导航系统	24
2.3 捷联惯性导航系统	27
2.3.1 四元数算法	30
2.3.2 等效旋转矢量算法	34
2.3.3 等效旋转矢量法圆锥误差补偿算法	41
2.3.4 速度更新算法	52
2.3.5 位置更新算法	68

参考文献	73
第3章 惯性导航系统的误差分析	74
3.1 惯性导航系统的基本方程	74
3.1.1 平台运动基本方程	74
3.1.2 速度基本方程	75
3.1.3 位置基本方程	77
3.2 惯性导航系统的误差方程	78
3.2.1 平台运动误差方程	78
3.2.2 速度误差方程	79
3.2.3 位置误差方程	80
3.3 误差的传播特性	81
3.3.1 特征方程式分析	81
3.3.2 误差分析	83
3.3.3 计算机模拟	96
参考文献	97
第4章 惯性导航系统的标定及初始对准	98
4.1 惯性单元标定技术	98
4.1.1 惯性器件误差源分析及数学模型	98
4.1.2 惯性测量单元误差模型	100
4.1.3 标定方案设计	100
4.2 平台惯性导航系统的静基座对准	107
4.2.1 指北方位惯性导航系统误差方程	107
4.2.2 单轴水平回路的初始对准	108
4.2.3 方位罗经对准原理及精度分析	113
4.3 捷联惯性导航系统的静基座对准	116
4.3.1 粗对准公式的推导	116
4.3.2 捷联系统静基座精对准的卡尔曼滤波方法	118
4.3.3 最优多位置对准技术	120
4.4 动基座对准	121
4.4.1 角速度匹配传递对准	122
4.4.2 速度匹配传递对准	124
4.4.3 姿态匹配传递对准	131
4.4.4 速度加姿态匹配传递对准	135
参考文献	139

第 5 章	组合导航与信息滤波	140
5.1	组合导航系统	140
5.1.1	组合导航的基本概念	140
5.1.2	以 INS 为主的组合导航系统	142
5.1.3	组合导航系统的估计理论	144
5.1.4	舰艇组合导航系统	146
5.2	卡尔曼滤波技术	149
5.2.1	离散型卡尔曼滤波器	149
5.2.2	卡尔曼滤波的意义	151
5.3	联邦卡尔曼滤波技术	154
5.4	非线性卡尔曼滤波技术	156
5.4.1	扩展卡尔曼滤波	156
5.4.2	无迹卡尔曼滤波	163
	参考文献	168
第 6 章	水声定位与 INS/速度匹配组合导航	170
6.1	水声定位系统	170
6.1.1	短基线水声定位	171
6.1.2	长基线水声定位	174
6.2	多普勒计程仪工作原理	178
6.3	INS/速度匹配组合系统误差模型	180
6.3.1	INS 误差模型	180
6.3.2	多普勒计程仪误差模型	181
6.4	组合导航算法	184
	参考文献	187
第 7 章	INS/地形匹配组合导航系统	188
7.1	地形辅助导航系统	188
7.2	水下地形测量系统	188
7.2.1	单波束测深系统	188
7.2.2	多波束测深系统	189
7.2.3	侧扫声纳系统	190
7.3	地形辅助导航系统的组成及工作原理	191
7.3.1	基本原理	191
7.3.2	系统组成	192
7.4	地形匹配算法	192

7.4.1	TERCOM 算法	193
7.4.2	SITAN 算法	196
7.4.3	ICP 算法	199
	参考文献	200
第 8 章	INS/地磁匹配组合导航系统	201
8.1	地磁敏感器件	201
8.1.1	磁罗经	201
8.1.2	磁通门	203
8.1.3	固态磁敏感器件	207
8.2	地磁匹配系统组成及工作原理	212
8.3	地磁匹配算法	213
8.3.1	基于相关分析的地磁匹配算法	213
8.3.2	基于等值线匹配的地磁匹配算法	215
8.4	组合导航系统仿真	222
	参考文献	223
第 9 章	INS/重力匹配组合导航系统	224
9.1	重力仪	224
9.1.1	绝对重力仪	224
9.1.2	相对重力仪	228
9.2	重力梯度仪	236
9.2.1	发展背景及现状	236
9.2.2	工作原理	236
9.2.3	典型的重力梯度仪	239
9.2.4	新型的美国海军重力梯度仪	241
9.3	重力匹配算法	241
9.3.1	重力序列相关极值匹配的基本原理	241
9.3.2	基于 ICCP 的重力匹配算法	242
9.4	基于递推滤波技术的重力匹配算法	242
9.4.1	状态方程	243
9.4.2	量测方程	244
9.5	重力匹配组合导航系统仿真	248
	参考文献	250
第 10 章	静电陀螺监控技术	251
10.1	静电陀螺监控技术	251

10.1.1	静电陀螺仪·····	251
10.1.2	空心转子静电陀螺仪·····	251
10.1.3	实心转子静电陀螺仪·····	253
10.1.4	两类静电陀螺仪技术比较·····	253
10.1.5	静电陀螺监控器的类型·····	254
10.1.6	静电陀螺监控器的用途·····	257
10.2	系统组成及工作原理·····	257
10.2.1	六常平架 ESGM 的主体结构·····	257
10.2.2	六常平架系统的工作原理·····	258
10.3	静电陀螺导航/监控器系统·····	260
10.3.1	SPN/GEANS 和 GEO/SPIN 系统·····	261
10.3.2	静电陀螺导航仪(ESGN)系统·····	261
10.3.3	静电陀螺监控器(ESGM)系统·····	262
10.4	测量船静电陀螺监控器系统·····	263
10.4.1	系统组成·····	263
10.4.2	基本工作原理·····	264
	参考文献·····	268

第1章

绪 论

1.1 概 述

随着世界经济和军事发展的需求,海洋资源开发、海洋能源利用等现代海洋高新技术的研究已成为世界新科技革命的主要领域之一。海洋导航和定位是一切海洋开发活动与海洋高技术发展的基础,在探测海底地形地貌、建设海洋工程、开发海洋资源、发展海洋科学及维护国家海洋权益等诸多方面都发挥着极其重要的作用。

对于当前水下航行器的发展而言,导航系统必须提供远距离及长时间范围内的精确定位、速度及姿态信息。精确的导航能力是航行器的一个关键技术,但由于受到使用条件的限制及水介质的特殊性、隐蔽性等因素的影响,实现水下航行器的精确导航是一项艰难的任务。对于水下航行器而言,可供应用的导航方式主要有两类:基于外部信号的非自主导航和基于传感器的自主导航。非自主导航方式,如罗兰、欧米伽、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)等,仅在接收机能接收到信号时能够完成导航;罗兰、欧米伽相对于GPS导航精度要低,而且GPS具有全球较高精度的导航能力。但是这些基于无线电的导航方式,由于电波在水中衰减很快的原因,在水下航行器上的使用受到很大限制。而基于传感器的自主导航方式可以依靠水下航行器自身携带的装备,如惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)、水声换能器、重力或地磁传感器等手段完成导航。声学导航要求事先在工作海域布设位置精确已知的参考基阵,且维护费用较高;重力导航要求在航行器计算机中事先存储精确的海底重力地图;基于惯性测量装置(Inertial Measurement Unit, IMU)导航方式的主要缺陷是陀螺存在随机漂移,若得不到有效的校正,导航误差会无限增大。

在水下定位技术方面,已发展了长基线、短基线和超短基线等水下声定位系统,且均已在实际中得以应用。这些系统在布设、校准和维护等方面都比较困难,费时耗资,灵活性差,不能机动,作用范围有限。为了满足高精度水下定位导

航系统的要求,近几年来发展出了水下 GPS 定位技术。美国海军于 2001 年委托法国 ASCA 公司开发了全球第一套水下 GPS 目标跟踪系统(专利属于美国国防部),用于水雷对抗、水下搜救和水下哑弹爆破,近期又利用该项技术进行海洋水下导弹试验和水下军事平台建设。美国海军研究生院水下机器人研究中心设计的小型自主式水下潜器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)导航系统(SANS)已经更新三代。最初的 SANS 是为“Phoenix” AUV 设计的,采用的是 GPS/INS 组合导航^[1]。它配备了罗经、差分全球定位系统(Differential Global Positioning System, DGPS)、IMU、水速传感器。挪威军事研究所研制的“HUGIN2”型 UUV 导航选用的定位方式是:母船采用 DGPS 定位^[2],HUGIN 的相对定位是采用高精度的声定位系统(HiPAP)。美国亚特兰大大学研制的小型“AUV”上面配置的导航设备传感器有 IMU、磁罗经、多普勒计程仪(Doppler Velocity Log, DVL)、GPS/DGPS。GPS 定位信号只能在载体到达水面后才能获得,并作为任务之前或两段航程之前的初始导航定位。水下导航用小型敏感器部件,它由三个加速度计、三个陀螺和一个磁罗经组成,可分别测量线加速度、角速度和角度(包括横摇角、纵摇角和航向)。用积分法可实现运载体位置的动态实时更新。它的导航系统可以保证在 INS 失效时可以通过 GPS、DVL 和罗经进行基本的导航。

水下高精度定位导航系统是我国海洋监测技术的主要发展项目之一,为了适应大陆架区水下载体和拖体、特殊水下工程高精度定位的需求,我国继美国和法国之后自主研制开发了一套精度好、功能强、自动化程度高的水下 GPS 定位系统。该系统不但可用于从水上(海面、沿岸陆地或飞机上)对水下目标跟踪监视和动态定位,还率先利用 GPS 技术实现了水下设备导航、水下目标瞬时光学监测、水下授时、水下工程测量控制和工程结构放样等功能。在过去的几十年中,导航系统也已从单一传感器类型系统发展到了组合导航系统,将多种类型的传感器进行优化配置,互补性能,使得系统的精度和可靠性都有了很大的提高,导航信息的处理方法也向多传感器多数据信息融合的方向发展。

1.2 水下导航定位技术

1.2.1 惯性导航

1.2.1.1 惯性导航发展概况

一般说来,惯性技术是指惯性导航技术、惯性制导技术、惯性元件、惯性系统与元件的测试技术之总称。惯性导航是自主式导航系统,具有完全独立工作性能,不受任何自然条件或环境的制约,可连续长时间工作,也具有精度高的特点。

惯性导航系统有着多输出的特性,不像其他导航仪器或导航系统只给出一种或很少几种导航参数。它能给出位置、速度、航程、水平及方位基准。所以不仅用于导航,也可给武备及其他系统提供有用的信号。

惯性导航的不足之处在于:惯性导航实现的定位是由加速度经过两次积分而得到的,它是一种推算定位法,所以它的误差是随着时间而积累的。这就要求惯性导航系统在长期使用过程中要用其他系统来重调和校正,以保证它的高精度。另外由于误差是积累的,因而必须要求惯性元件有较高的精度。

1. 惯性导航发展简史^[3]

惯性技术的历史可追溯到利用惯性原理制成仪表时开始,用惯性原理制成仪表而且用于导航,要算陀螺罗经了。自 1852 年傅科提出报告开始,在许多科学家的不断努力下,船用的陀螺罗经在 1908 年底完成。它是安修茨博士创立的,以后又出现了其他许多种罗经,直至今天的平台罗经。罗经只能给出方位基准或者方位及水平基准,还不能自动定位。

惯性制导最先出现在德国,1942 年德国的科学家将陀螺仪和加速度计应用于 V-2 火箭的惯性制导系统中,首次完成惯性制导的任务。

第二次世界大战后,惯性技术在美国和苏联迅速地发展起来,首先是在舰船、飞机及导弹等运载体和飞行器的高精度导航定位要求下得到迅速发展,以后在其他领域也得到广泛应用。例如:航天飞行、民用航空、民用航海、矿藏勘探、石油开采、大地测绘、海洋调查、地震预报、海底救生等。

美国在发展惯性技术方面处于世界领先地位,它的突出贡献者是麻省理工学院仪表实验室主任查尔斯·斯塔克德雷珀博士。该实验室 1930 年开始研究惯性技术,1944 年开始研制用于轰炸机的自主式导航系统 FEBE,1949 年试飞。虽然 FEBE 不是惯性系统,但它给研制惯性系统打下了基础。1953 年研制成功舰船惯性导航系统样机,1957 年研制出“北极星”导弹惯性制导系统样机,1964 年研制出“阿波罗”飞船惯性系统样机,从而使它成为惯性技术发展中心。麻省理工学院仪表实验室于 1973 年 7 月 1 日改名为德雷珀公司。

北美航空公司机电工程部,20 世纪 40 年代末期开始研究惯性技术,1955 年改名为奥特奈蒂克斯集团。从 1946 年开始研制“娜伐霍”(Navaho)亚声速飞航导弹的惯性系统 XN-1,1950 年试飞。1954 年开始研制潜艇用惯性导航系统,1958 年研制出 N6A (MK1)型舰船惯性导航系统,装在核潜艇“缸鱼”号上,成功地进行了穿越北极的试验。1959 年研制出 N7A (MK2)型舰船惯性导航系统,装在第一艘弹道导弹核潜艇“华盛顿”号上。1964 年研制出采用陀螺监控技术的 MK2 Mod3 型舰船惯性导航系统,1968 年研制出 MK2 Mod6 惯性导航系统,1972 年静电陀螺导航系统 XN88 问世,1976 年生产静电陀螺监控器系统,并研制和生产了 MK2 Mod7 舰船惯性导航系统。1980 年研制出船用捷联导航仪 N2000。1986 年,MARLIN 捷联惯性导航系统通过了综合转台试验,1987 年通过

了海上试验,定位精度可达到 $1\text{ n mile}/24\text{ h}$;随后斯贝里船舶公司又陆续推出了 MK39 Mod3C 和 AN/WSN-7B 单轴旋转式激光陀螺捷联惯性导航系统,1989 年 11 月,在单轴旋转基础上改进的双轴旋转 MARLIN 系统被北约各国用于装备舰船,代号为 MK49。1991 年 4 月,英国一艘装备有 MK49 系统的潜艇在 GPS 重置后由常规模式下航行 4d 后自动转为极区模式于高纬度地区航行了 10d,其平均定位误差低于 $0.46\text{ nmile}/24\text{ h}$ 。2000 年 3 月,波音公司利用 ADM II 光纤陀螺样机在实验室进行旋转调制方案的导航性能试验,2003 年完成第三代光纤陀螺样机 ADM III 的研制任务,并于 2004 年初完成测试和鉴定,2006 年该公司完成光纤陀螺导航仪的工程样机,2009 年制成第一套正式装船的光纤陀螺导航仪,采用三轴连续旋转方案(初期为四轴旋转方案),预计 2012 年在潜艇上部署该系统。

这里还应提到德国火箭专家冯·布劳恩和他的同事们在发展惯性导航技术中所起的作用,第二次世界大战后,冯·布劳恩及其研制小组,在 V-2 火箭基础上先后研制出“红石”“丘辟特”和“潘兴”等弹道导弹的制导系统。“红石”兵工厂后来成为美国国家宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的惯性部。

2. 惯性导航技术现状和发展趋势

德雷珀按定位精度将系统及惯性元件分为四代,20 世纪 40 年代以前没有组成惯性系统,只有地平仪及方位仪等定向仪表,这为第一代。从 V-2 火箭制导中应用加速度计作为测量元件来确定位置开始,直到目前使用的多数惯性导航系统和惯性元件属于第二代,定位精度约几百英尺,速度误差约每小时几千英尺。从 70 年代开始研制第三代惯性技术,精度要比第二代提高两个数量级。从 70 年代末开始设计的第四代惯性系统,定位精度小于 0.3 m ,速度误差小于 0.3 m/h 。

与系统相适应,也将惯性元件分为四代。第一代陀螺为飞机上使用的地平仪及方位仪中的陀螺。第二代陀螺漂移为 $3 \times 10^{-3} \sim 0.3(^{\circ})/\text{h}$,加速度计的阈值为 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3}\text{ g}$ 。第三代陀螺漂移为 $3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-3} (^{\circ})/\text{h}$,加速度计的阈值为 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-5}\text{ g}$ 。第四代惯性元件性能要比第三代还要高出两个数量级。

目前,国内外用于惯性系统的惯性元件种类很多,陀螺仪的类型有液浮陀螺、动压气浮陀螺、挠性陀螺、静电陀螺、激光陀螺和光纤陀螺等。加速度计的类型有陀螺摆式积分加速度计、液浮摆式加速度计、挠性摆式加速度计、脉冲积分摆式加速度计等。用于 MK2 舰船惯性导航系统的 G7B 陀螺仪的漂移为 $0.001(^{\circ})/\text{h}$,而 AN/WSN-5 船用惯性导航系统的二自由度陀螺仪的漂移为 $0.003(^{\circ})/\text{h}$ 。船用惯性导航系统的加速度计 16PMPIA 是一种脉冲积分摆式加速度计,其阈值为 $5 \times 10^{-5}\text{ g}$ 。

由于舰船惯性导航系统使用时间长,精度要求高等特点,所以多采用平台结

构。在 20 世纪 60 年代初出现了陀螺监控技术,系统性能有明显改善。用于“北极星”核潜艇的 MK2 系统,每天定位精度 $0.8 \sim 1.6n \text{ mile}$ 。据 1971 年 10 月 14 日鲍瑞特在美国导航学会国家航海会议上透露,该船用惯性导航最高水平基准精度为 $11''$ 左右,航向精度为 $15''$ 左右,速度精度 $0.4n \text{ mile/h}$ 左右。美国“阿波罗”海上跟踪船用惯性导航系统与星体跟踪器组合使用,定位精度可达 $244 \sim 609\text{m}$ 。

除平台惯性导航系统外,用于飞机、导弹、航天器上的各种捷联惯性导航系统也相继出现。

目前,惯性导航正朝着高精度、高可靠性、低成本的方向发展。为实现高精度,有两条基本的途径,一条着重从研究新型惯性元件,或提高惯性元件精度方面来提高惯性导航系统的精度;另一条途径是着重在方案和系统技术上来提高惯性导航系统精度。

此外,捷联系统发展很快,特别是在航空器上。组合导航在卫星导航发展成条件下也有了较快发展。

在系统方面卡尔曼滤波技术得到了广泛的应用,有效地提高了惯性导航系统精度。此外由高精度的新型惯性元件构成的惯性导航系统,如静电陀螺监控技术、机载静电陀螺导航系统等都极大地提高了系统的精度。

1.2.1.2 惯性导航的关键技术

1. 惯性元件的精度

惯性元件的误差将影响惯性导航系统的精度。陀螺仪精度,一是指漂移率,分为常值漂移和随机漂移。二是指陀螺仪的力矩器及标度因数线性度。加速度计的精度主要是零偏稳定性、最小敏感量及标度因数等。根据使用对象及所采用的方案的不同,惯性导航系统对这些关键性元件要求也就不同。一般来讲,标准级惯性导航系统的陀螺仪漂移可在 $0.001 \sim 0.01(^{\circ})/\text{h}$ 范围,力矩器线性度、标度因数为 0.01% ;加速度计精度在 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}g$ 。

2. 初始对准

要使惯性导航系统正常工作,必须进行初始对准。如果初始条件给定得不准确,惯性导航系统就会产生初始误差。初始条件主要是给定初始方位、水平姿态,另外还有初始位置和初始速度。

3. 信息滤波技术

为提高惯性导航系统的精度,常采用卡尔曼滤波技术。

三个关键技术中最重要的是惯性元件的精度。如果不能保证,则无法实现高精度的惯性导航。

1.2.2 水声定位与导航

水声定位系统主要指可用于局部区域精确定位和导航的系统。它在海域中

布防多个声接收器或应答器,构成基元;系统根据基元间基线的长度,可分为长基线系统(Long Baseline,LBL)、短基线系统^[4](Short Baseline,SBL)和超短基线系统(Ultra Short Baseline,USBL)。长基线系统、短基线系统可理解为通过时间测量得到距离,从而解算目标位置的定位系统。超短基线系统则通过相位测量来进行定位解算。

根据工作方式,水声定位系统还可分为海底路标定位法和水声基阵定位法两种。海底路标定位法通过在海底布放多个声应答器,构成海底路标方式辅助潜艇定位。当潜艇通过应答器附近区域时,路标装置被激活并按约定通信方式发送相应声信号,潜艇声纳接收到路标信号后迅速完成定位和INS的误差修正。水声基阵定位法采取在海域中布防多个声应答器阵,通过声纳对多应答器的远距离实时精确测量,实现载体水下方位、距离和轨迹的确定^[5]。

国外对声学测量定位研究较早的是挪威Kongsberg公司。该公司产品涵盖了超短基线、短基线和长基线三种类型,有一系列成熟的产品投入到军方及民用。定位的水深几乎能达到全海域。Sonardyne公司在声学定位领域的技术开发、设计和生产方面也有较长的历史。

1.3 组合导航系统

组合导航技术是指使用两种或两种以上的不同导航系统对同一信息源做测量,从这些测量值的比较中提取出各系统的误差并校正之。采用组合导航技术的各系统构成组合导航系统,参与组合的各导航系统称为子系统。由于惯性导航系统(INS)具有自主性、隐蔽性、信息的全面性和宽频带等特有优点,所以一般都以惯性导航系统作为组合导航系统的关键子系统。又由于惯性导航系统和GPS导航系统性能互补,所以,以该两子系统构造出的组合导航系统是航空导航及舰船水面导航等的最佳方案。随着计算机技术、最优估计理论、信息融合理论及大系统理论的发展,组合导航系统迅速发展成为一种高性能和高可靠性的导航系统。

尽管航海导航技术自古以来都是利用多种途径方式进行导航,但现代意义上的组合导航技术最早出现在20世纪50年代的航天领域。在“阿波罗”载人太空船登月计划方案研究的核心导航问题中,所采用的数据测量信息分别来自3个子系统:飞船装备的惯性测量装置、天文观测仪和地面测轨系统。采用R. E. Kalman提出的卡尔曼滤波算法成功地解决了太空船运动状态的估计问题。

20世纪60年代,组合导航技术在航海领域得到应用。1969年,挪威控制公司(NorControl)与挪威船舶研究院等部门共同研制了避碰和导航系统,并取名为数据桥(Data Bridge),安装在2.2万吨的邮轮上,从此诞生了世界上第一套综合导航系统(Integrated Navigation System,INS)。20世纪70年代初出现了综合舰

桥系统;20 世纪 90 年代又出现了导航、控制、监视和通信一体化及智能化综合舰桥系统。

综合舰桥系统(Integrated Bridge System, IBS)是继综合导航系统之后新一代舰艇组合导航系统的代表。它是一种海上导航、通信、雷达、航行控制、监控为一体的集成系统。经过 30 多年的发展,已推出了第三代、第四代 IBS。综合舰桥系统的功能已经从以信息组合为主干,发展到涵盖航海功能、平台控制、舰艇状态监测、设备管理、通信控制、智能决策、维修诊断、黑匣子等方面的多功能系统。

以下介绍以惯性导航系统(INS)为主的可用于水下导航的各种组合导航系统。

1.3.1 INS/地形匹配组合导航

地形辅助导航系统是利用地形和地物特征进行导航的总称。利用地形特征对飞机进行导航是一种人们熟知的导航方法,在产生地形辅助导航系统之前,飞行员就经常通过目视地形、地物进行导航。但现代地形辅助导航技术与传统的地形导航技术不同,它把地形数据和地形匹配的概念结合起来,使导航定位性能达到了新的高度。它和卫星导航、惯性导航一样均为十分重要的军事导航技术。地形辅助导航技术首先在陆地战场上得到了广泛应用,目前已经拓展到更加复杂的海底地形匹配领域。海底地形匹配导航技术(Seabed Terrain Aided Navigation, STAN)是近年提出的一个新概念,它的研究和实现使导航制导技术从传统的空基武器向舰基、潜基武器发展。为了实现水下导航定位,载体需要事前将预定地区的地形地貌信息存入计算机。当载体达到预定海区时,利用载体上的地形地貌测量设备现场测量该区域的地形地貌,然后采取某种算法和先验信息进行搜索匹配,从而确定载体的地理位置。

资料表明^[6],丹麦、瑞典、挪威三国的潜艇已计划使用精确的地形测量匹配技术辅助传统的 INS,以满足潜艇在波罗的海和北海的近岸潜水域的高精度导航要求。当前已知的海底地形匹配辅助导航系统由 INS、测深测潜仪、水深数据库和数据处理计算机四部分组成。系统将 INS 提供的导航位置信息及测深测得的水深信息送给数据处理计算机,计算机根据 INS 提供的位置信息从数字海图中读取相关的水深数据,然后采用一定的匹配算法将测得的水深数据与从数字海图中读取的水深数据进行匹配,得到最佳匹配点。利用该匹配点的位置信息对 INS 进行校正,提高 INS 的定位精度。按照美国海军的军事发展理论,未来海战的主要战场集中在离海岸 200km 的范围内,这使得今后海底地形匹配技术的发展和前景更加广阔。

1.3.2 INS/地磁匹配组合导航

地磁匹配技术与重力匹配、地形匹配均属于数据库匹配导航技术。它的主

要优势是不需要外部信息支持,是一种自主式导航装备。由于地磁场是一个矢量场,具有全天时、全天候、全地域的特征。在地球近地空间内的任意一点的磁场强度矢量具有唯一性,且与该点的经纬度一一对应,只要准确确定各点的地磁场矢量即可实现全球定位。地磁匹配导航正是利用地磁场空间的各异性这一典型特征来确定载体的地理位置的。导航时,首先把测量好的地磁信息存储在计算机内,构成数字地磁基准图。当载体运动到特定匹配区域时,由磁传感器测量所处位置的磁场特征,经载体运动一段时间后,测量得到一系列实时磁场特征值(简称测量序列),得到实时地磁图并在计算机中与基准图进行相关匹配,计算出载体的实时位置,从而达到导航的目的。

目前,由于地磁场模型精度低、磁测量设备性能不高及磁场随时间变化等因素影响,地磁匹配导航技术还达不到期望的要求。但是,随着地球物理学理论的不断深入、传感器技术的进步,并且借鉴较为成熟的地形匹配算法,地磁匹配导航技术在若干年内必将得到长足发展。

2003年8月,美国国防部文件中宣称他们所研制的纯地磁导航系统的导航精度为地面和空中定位精度优于30m(CEP),水下导航精度优于500m(CEP),并计划用于提高飞航导弹和巡航鱼雷的命中率。

早在1992年国际防御评价报道,美国为水下无人运载器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)研制了一种磁定位系统。UUV上装有惯性导航系统、计算机、高度计和模数转换装置,利用导航区布置的一些磁标,通过UUV的三轴磁传感器测量相对于磁标的位置,就可以确定UUV的位置^[4]。1994年,美国发表了一项水下运载体磁标定位系统专利,用于定位和重调。运载体上装有惯性导航系统,可确定相对于地球固连坐标系的位置,磁标磁矩大小存储在计算机中。运载体上装有三轴矢量磁力计,磁敏感器相互垂直安装。当运载体导航系统需要位置重调时,运载体上的三轴矢量磁力计探测磁标在载体坐标轴上的磁感应分量,经计算后提供运载体相对于磁标位置估计值,然后将该相对位置转换到地球坐标系中的位置,将该位置与惯性导航位置进行比较,提供要求的位置重调^[7]。

1.3.3 INS/重力匹配组合导航

地球重力场是地球近地空间最基本的物理场。不同的位置对应着不同的重力位,重力场强度取决于地下岩石密度、成分、地形等诸多因素。重力场参量是重力位空间的一阶和二阶导数,海洋环境下每一处的重力场强度都各不相同并且是连续变化的,重力场参量可描述为一种二维或三维图形。重力导航技术的发展归功于美国舰载弹道导弹计划。20世纪70年代后期,重力敏感器引入战略潜艇的导航系统。最初应用海洋重力场信息的目的,一是提供垂线偏差实时估计,以减小惯性导航系统的舒拉误差和平台误差;二是实时估算重力异常,用以改正以前使用的正常重力模型并初始化导弹制导系统。20世纪80年代美国