

惯性 / 多普勒组合 导航回溯算法研究

李万里 陈明剑 李俊毅 著
陈 刚 马智刚 胡文军



中国地质大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF GEOSCIENCES PRESS

惯性/多普勒组合导航回溯算法研究

GUANXING DUOPULE ZUHE DAOHANG HUISU SUANFA YANJIU

李万里 陈明剑 李俊毅 著
陈刚 马智刚 胡文军



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

内容提要

惯性/多普勒组合导航是实现水下自主导航的主要方式。由于仅有载体系下的多普勒速度观测,水下导航信息源少、环境复杂,因此如何实现高精度自主导航仍然面临挑战。作者在总结多年科学研究成果的基础上,提出了一套基于回溯的多普勒测速误差精确标定、快速动基座对准及组合导航的理论和方法,并对此进行了实验验证。

本书可作为从事水下导航、惯性导航、组合导航的工程技术人员参考用书,也可作为高等院校相关专业研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

惯性/多普勒组合导航回溯算法研究/李万里,陈明剑,李俊毅,陈刚,马智刚,胡文军著. — 武汉:中国地质大学出版社,2016.11

ISBN 978-7-5625-3941-4

I. 惯…

II. ①李…②陈…③李…④陈…⑤马…⑥胡…

III. ①惯性导航-多普勒导航-组合导航-研究

IV. ①TN967.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 280440 号

惯性/多普勒组合导航回溯算法研究

李万里 陈明剑 李俊毅 著
陈刚 马智刚 胡文军

责任编辑:胡珞兰

责任校对:代莹

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传 真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cug.edu.cn>

开本:787mm×1092mm 1/16

字数:170 千字 印张:6.5

版次:2016 年 11 月第 1 版

印次:2016 年 11 月第 1 次印刷

印刷:武汉市教文印刷厂

印数:1—500 册

ISBN 978-7-5625-3941-4

定价:36.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前言

海洋是生命的摇篮,生物的演变进化离不开海洋。时至今日,人类的生存和发展也离不开海洋。伴随着人类认识海洋、开发海洋、利用海洋和保护海洋的进程,水下航行器的研究和发展将日趋活跃。21世纪将是水下航行器广泛应用的世纪。对于水下航行器,由于条件的限制,导航问题尤为突出。

水下导航技术是一门涉及精密机械、微电子、计算机技术、现代控制理论、光学等多种学科的综合技术。由于水下环境的特殊性以及应用的需求,要求导航系统能够提供大范围 and 长航时的位置、速度、姿态信息。可用于水下定位的导航方式十分有限,主要有惯性导航、地形匹配、多普勒测速仪、声学导航等。任何一种单独的导航方式,无论是精度还是可靠性,都无法满足水下导航的要求。组合导航是水下导航技术的主要发展方向。

从国内外水下导航的发展情况来看,运用得比较多的主要是惯性/多普勒组合导航系统。惯性/多普勒组合导航系统利用多普勒提供的速度信息抑制惯性导航定位系统误差的积累,具有自主性和精度高的优点。虽然惯性/多普勒组合导航系统应用已比较成熟,但是由于仅有载体系下的多普勒速度观测,水下导航信息源少、环境复杂,如何实现高精度、快速自主导航仍然面临挑战。

本书在国内外研究的基础上,立足于水下航行器的应用,针对水下自主导航中需要解决的迫切问题,以惯性/多普勒组合导航系统为主要研究对象,实现快速动基座对准及高精度自主导航。主要内容来源于作者在读博士期间参与的科研项目及博士学位论文。不同于传统算法,作者在组合导航上提出了一条基于“回溯”的新思路,萌生成书的想法,希望与国内外同行在组合导航领域进行一些研究和探讨。

本书的主要内容如下:

第1章,绪论。主要介绍本书的研究背景和意义,国内外相关技术的研究进展,本书的研究内容、组织结构和主要贡献。

第2章,基于回溯的惯性/多普勒测速误差标定。建立了GNSS辅助下的多普勒测速误差标定模型,对标度因数、3个安装偏差角同时进行滤波估计。推导了利用已知地标的多普勒测速误差标定方法,利用起点和一个已知地标即可完成标定。指出姿态误差是影响标定精度的重要因素,通过利用姿态回溯算法,改进了该标定方法,消除了由初始对准带来的姿态误差对标定精度的影响。

第3章,基于回溯的优化对准算法。建立了多普勒辅助下的优化对准模型,把对准问题转化为一个连续的矢量定姿问题。提出了基于回溯的优化对准方法以解决在优化对准过程中导航定位问题。比较了初始对准姿态估计中多种不同的采样策略,采用交叉采样策略提高了优化对准的精度。

第4章,基于回溯的卡尔曼滤波对准算法。通过可观测度分析,指出依靠多普勒提供的载体系速度辅助对准存在收敛慢的缺点。为此,本章提出了基于回溯的对准结构,即:在粗对准的过程中存储一定的数据以用于之后的精对准,为此,精对准不需要花费额外的时间,提高了对准的快速性。提出了一个新的惯性系下的六状态惯导对准模型,通过采用该模型,

在粗对准过程中只需要存储少量的数据就可以完成回溯精对准。

第5章，基于回溯的对准算法与大失准角非线性滤波对准算法的比较研究。提出了多普勒辅助下的大失准角对准模型，并以非线性UKF滤波技术完成初始对准。从对准的快速性、精度，及对准的鲁棒性上比较了大失准角对准方法和在第3章、第4章中提出的基于回溯的对准方法。

第6章，回溯组合导航与参数估计算法研究。提出了基于回溯结构的INS/DVL组合导航算法，使得水下航行器在只有初始位置和多普勒速度的情况下就可以进行导航，而不需要等待初始对准的完成。建立了惯性系下的惯导误差模型以减少回溯导航中需要存储的数据量。利用PWCS可观性分析及可观测度分析理论对提出的新模型进行了可观测性的验证和可观测度研究。对提出的回溯导航模型进行了实验验证。

本书的研究内容是在广泛关注国内外研究成果的基础上提出的，为解决水下航行器的快速导航提供了一条有效的解决思路，具有一定的先进性和创造性，相信对从事水下导航、惯性导航、组合导航的工程技术人员及相关专业的研究生有一定的参考作用。

在本书的写作过程中，作者参阅和部分引用了一些专家学者的论文与专著，在此对原作者表示衷心的感谢。感谢国防科学技术大学吴文启教授在本书的撰写过程中给予的诸多宝贵意见。作者在撰写的过程中得到了多方面的支持，衷心感谢信息工程大学导航与空天目标工程学院的领导和同事们的关心。由于作者的水平有限，书中错误和疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2016年9月

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 水下导航的重要意义	(1)
1.2 国内外相关技术研究进展	(3)
1.2.1 水下航行器及水下导航技术发展现状	(3)
1.2.2 惯性/多普勒组合导航发展现状	(5)
1.3 惯性/多普勒组合导航中的主要问题	(10)
1.3.1 多普勒的测速误差标定	(10)
1.3.2 水下航行器的快速动基座对准	(11)
1.3.3 基于回溯的组合导航与参数估计	(11)
1.4 本书的研究内容、组织结构和主要贡献	(12)
1.4.1 本书的研究内容和组织结构	(12)
1.4.2 本书的主要贡献和创新点	(13)
2 基于回溯的惯性/多普勒测速误差标定	(15)
2.1 多普勒测速误差	(15)
2.1.1 坐标系定义	(15)
2.1.2 多普勒测速误差模型	(15)
2.1.3 基于最小二乘的多普勒测速误差标定	(16)
2.2 GNSS辅助下的标定方法	(18)
2.2.1 标定原理	(18)
2.2.2 基于卡尔曼滤波的标定方法	(19)
2.3 地标辅助下的多普勒测速误差标定	(20)
2.3.1 INS/DVL组合导航	(20)
2.3.2 标定方法	(21)
2.3.3 基于回溯的标定改进方案	(24)
2.4 实验验证	(29)
2.4.1 主要实验设备	(29)
2.4.2 GNSS辅助下的标定实验	(29)
2.4.3 地标辅助标定实验	(32)
2.5 本章小结	(35)
3 基于回溯的优化对准算法	(36)
3.1 优化对准方法问题描述	(36)
3.1.1 惯性系对准	(36)
3.1.2 方向余弦矩阵的分解	(37)
3.1.3 优化对准模型	(38)
3.1.4 Wahba 问题	(39)

3.2	回溯优化对准	(39)
3.2.1	优化对准采样策略	(39)
3.2.2	回溯方法	(41)
3.2.3	优化对准方法精度分析	(43)
3.3	实验验证	(44)
3.3.1	对准结果	(44)
3.3.2	与其他对准方法的比较	(46)
3.4	本章小结	(48)
4	基于回溯的卡尔曼滤波对准算法	(49)
4.1	多普勒辅助下的初始对准可观测度分析	(49)
4.1.1	可观性分析	(49)
4.1.2	可观测度分析	(50)
4.1.3	多普勒辅助与 GPS 辅助进行初始对准的可观测度比较	(51)
4.2	回溯结构	(52)
4.3	惯性系精对准模型	(53)
4.3.1	系统方程	(53)
4.3.2	观测方程	(55)
4.4	回溯对准算法	(56)
4.5	实验验证	(57)
4.5.1	静基座对准实验	(57)
4.5.2	动基座对准实验	(59)
4.5.3	对准算法性能分析	(61)
4.6	本章小结	(65)
5	基于回溯的对准算法与大失准角非线性滤波对准算法的比较研究	(66)
5.1	大失准角对准模型	(66)
5.1.1	DVL 辅助的大失准角对准	(66)
5.1.2	系统方程	(67)
5.1.3	量测方程	(68)
5.2	UKF 滤波技术	(68)
5.3	实验比较	(69)
5.3.1	大失准角对准	(69)
5.3.2	对准快速性比较	(71)
5.3.3	对准精度比较	(73)
5.3.4	对准鲁棒性比较	(74)
5.4	本章小结	(75)
6	回溯组合导航与参数估计算法研究	(76)
6.1	组合导航模型	(76)
6.1.1	系统方程	(76)
6.1.2	测量模型	(77)

6.2 回溯组合导航.....	(77)
6.2.1 回溯结构.....	(77)
6.2.2 算法实现.....	(78)
6.3 实验验证.....	(79)
6.3.1 实验条件.....	(79)
6.3.2 可观测性及可观测度分析.....	(80)
6.3.3 组合导航实验.....	(81)
6.4 本章小结.....	(84)
参考文献	(87)

在陆地上，GPS接收机接收卫星信号，通过接收机内部的芯片，计算出接收机的位置、速度、时间等信息。在水下，GPS接收机无法接收卫星信号，因此无法直接获得位置信息。为了解决这个问题，人们提出了多种水下定位方法，其中，最常用的水下定位方法是惯性导航系统（INS）和声学定位系统（USBL）的组合使用。

表 1-1 常用水下定位系统

系统名称	定位原理	定位精度 (m)	定位范围 (km)	备注
惯性导航系统 (INS)	基于加速度计和陀螺仪	0.1~1.0	0.1~1.0	水下定位精度最高
声学定位系统 (USBL)	基于声学测距和测向	1~10	1~10	精度受水深影响
卫星定位系统 (GPS)	基于卫星信号	1~10	1~10	精度受信号遮挡影响
磁定位系统 (MAG)	基于磁感应	1~10	1~10	精度受磁场干扰影响
重力定位系统 (GRA)	基于重力测量	1~10	1~10	精度受重力异常影响
深度定位系统 (DPT)	基于深度测量	1~10	1~10	精度受深度测量误差影响
组合定位系统 (CNS)	基于多种定位系统组合	1~10	1~10	精度受系统组合影响

在水下定位系统中，GPS接收机无法接收卫星信号，因此无法直接获得位置信息。为了解决这个问题，人们提出了多种水下定位方法，其中，最常用的水下定位方法是惯性导航系统（INS）和声学定位系统（USBL）的组合使用。惯性导航系统（INS）是一种基于加速度计和陀螺仪的定位方法，它通过测量物体的加速度和角速度，计算出物体的位置、速度和姿态。声学定位系统（USBL）是一种基于声学测距和测向的定位方法，它通过测量物体与接收机之间的声学距离和方向，计算出物体的位置。GPS接收机是一种基于卫星信号的定位方法，它通过接收卫星信号，计算出接收机的位置、速度和时间。在水下定位系统中，GPS接收机无法接收卫星信号，因此无法直接获得位置信息。为了解决这个问题，人们提出了多种水下定位方法，其中，最常用的水下定位方法是惯性导航系统（INS）和声学定位系统（USBL）的组合使用。

1 绪 论

1.1 水下导航的重要意义

占地球表面积 71% 的海洋和海洋底部蕴藏着极其丰富的生物资源及矿产资源^[1]。它是人类生存和可持续发展的重要空间。中国作为海洋大国,也拥有着近 $3 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的蓝色国土。对其进行合理的开发和利用,有着极其重要的意义。

水下航行器是探索海洋的重要手段,在开发利用海洋的作用绝不亚于火箭和航天飞机在探索宇宙空间中的作用^[2]。水下导航是水下航行器应用的最大制约因素。目前,可以用于水下导航的设备仍然十分有限。其中,最常用的水下导航设备如表 1-1 所示^[3]。

表 1-1 常用水下导航传感器

设备	测量值	更新频率 (Hz)	精度	范围
声学高度计	海拔	0.1~10	0.01~1.0m	随频率变化
深度计	深度	1	0.01%~0.1%	水下所有深度
倾角计	俯仰、滚动角	1~10	0.1°~1°	±45°
磁罗盘	航向角	1~10	1°~10°	360°
陀螺(机械)	姿态角	1~10	0.1°	360°
陀螺(光纤、激光)	姿态角	1~1600	0.01°~0.1°	360°
12 kHz LBL	3 维位置	0.1~1	0.1~10m	5~10km
300 kHz LBL	3 维位置	1~10	±0.007m	100m
IMU	位置速度姿态	1~1000	变化	变化
底跟踪多普勒	载体系速度	1~5	≤0.3%	18~100m
GPS	3 维位置	1~10	0.1~10m	水下不可用

这些导航设备在水下应用中都有一定的限制。全球导航定位系统 (Global Positioning System, GPS) 可以提供准确的位置信息,为此在陆地、空中及水上舰艇导航得到了广泛的应用。然而, GPS 信号在水下很快会被阻隔。因此,水下航行器若想获得 GPS 的信息就需要定时上浮或者通过水面上的声学应答设备转发^[4-7],这对于执行水下任务是极其不利的。长基线导航 (Long Baseline, LBL) 是一种常用的声学导航方法,其导航精度随声音信号的发射频率、声学设备的几何结构而变化^[8]。发射频率为 12kHz 的长基线导航的作用范围在 10km 左右,并且可以达到 ±(0.1~10)m 的定位精度,导航频率为 0.1~1Hz^[9-12]。高频长基线导航可以达到很高的导航精度,如 300kHz 的 LBL 可以达到厘米级的定位精度,且更新频率可以达到 10Hz^[13]。然而,高频声音信号在水中很快会衰减,因此,高频 LBL 的作用范围十分有限。以该方式进行导航,需要有水面舰船停在附近作为发射基站,应用条件十

分苛刻^[14-16]。

水下航行器的导航系统必须具有远程、长航时、高精度的导航能力，它是航行器有效应用和安全回收的一个关键技术。此外，在实际使用中，我们期望航行器在水中能够自主导航，而不需要做经常性的上浮来接收 GNSS 信号，否则就会极大地影响航行器的水下作业能力。尤其是在军事应用中，航行器的隐蔽性尤为重要。惯性导航系统（Inertial Navigation System, INS）是以牛顿第二定律（惯性定律）为基础，利用陀螺仪和加速度计测量载体角运动和线运动，计算载体位置、速度和姿态的技术^[17-19]。它是自主导航的一个重要手段^[20-30]。然而，由于惯性传感器固有的漂移误差，惯性导航系统虽然能够在短时间内有很高的定位精度，但是导航误差会随着时间积累。为此，需要辅助传感器来抑制导航误差。声学多普勒（Doppler Velocity Log, DVL）技术的发展为这一需求提供了可能^[31-36]。多普勒在底跟踪模式下可以达到当前速度的 0.3% 的测速精度，更新率最快可达 5Hz。典型的水下组合导航系统的框架如图 1-1 所示。其中，惯性/多普勒（INS/DVL）组合导航是目前实现水下自主导航的主要方式，导航系统只有在水下航行器上浮的时候才利用 GNSS 信号进行有源校正。

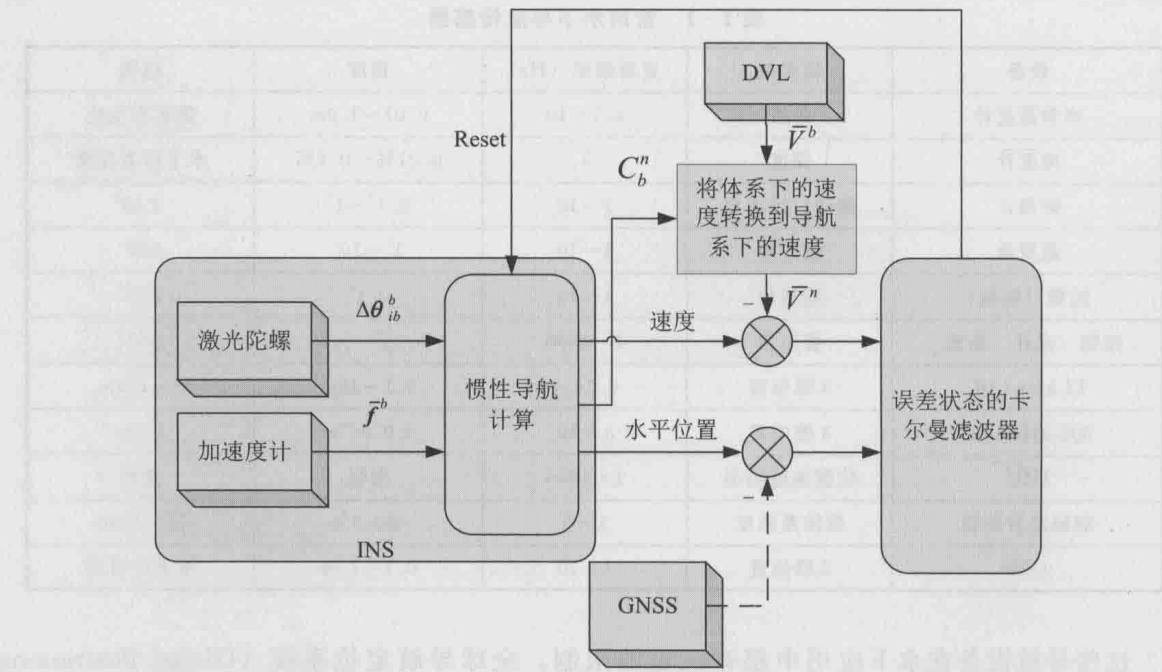


图 1-1 典型水下组合导航系统

多普勒的测速误差标定、动基座对准技术是影响 INS/DVL 组合导航精度的两个关键技术。多普勒测速仪得到的是多普勒载体系下的速度，而非导航系下的绝对速度。由图 1-1 可以看到，多普勒的速度需要利用惯导的方向余弦矩阵转换到导航坐标系下才可以作为卡尔曼滤波器的观测量。因此，观测量的精度与姿态误差是耦合的，而且，惯性导航（以下简称惯导）的载体系与多普勒的载体系不是完全重合的，在制造的过程中，存在一定的安装偏差。若不对其进行标定，将极大地影响组合导航的精度。此外，在多普勒速度观测的情况下，系统的可观测性弱，滤波器收敛缓慢。因此，如何在该条件下实现快速动基座对准将面

临一个十分严峻的挑战。高精度对准是高精度导航的前提。多普勒辅助下的动基座对准的难点有：①对准时间与对准精度的矛盾。为了提高载体的机动性，往往希望惯导能在短时间内达到高的对准精度。在仅有多普勒速度观测的条件下进行快速对准难度更高。②对准过程中的定位问题。在对准过程中，起始阶段姿态误差较大，必然引起较大的位置误差。在水下往往是没有位置观测的，因此，如何补偿对准过程中的定位误差及如何在动基座对准的过程中实现导航定位也是一个值得研究的问题。

本书旨在建立一套新的、完整的 INS/DVL 自主导航方案。回溯，即在对准或者导航的过程中存储一定的数据，并利用这些存储的数据进行重新解算，以弥补实时导航过程中的位置、姿态误差。本书以回溯为手段，提出了如何在回溯结构下实现标定、对准及导航。本书的研究对于实现水下远程、长航时、高精度自主导航具有重大的意义。

1.2 国内外相关技术研究进展

1.2.1 水下航行器及水下导航技术发展现状

1.2.1.1 水下航行器发展现状

当前，水下航行器的种类有很多，按照一般的观点可以分为载人水下航行器和无人水下航行器（Unmanned Underwater Vehicle, UUV），而 UUV 又包含了遥控水下航行器（Remotely Operated Vehicles, ROV）和自主水下航行器（Autonomous Underwater Vehicle, AUV）^[37-40]。其中 AUV 是水下航行器发展的主要方向，是国际学术界致力研究的目标。

AUV 是一种与水面没有直接联系的自携动力和能按设计程序进行操作的自治式潜航器^[40]，与载人水下航行器相比较，它具有安全（无人）、结构简单、质量轻、尺寸小、造价低等优点。在民用上，它可以进行深海搜索、观测、识别、取样、打捞等一系列作业，是人类开发海洋的重要工具。在军事上，AUV 亦是一种有效的水中兵器。民用与军用两大发展渠道在技术上是互相支持和促进的^[38]。

在 AUV 技术的发展上，美国等西方国家已经取得了一定的成果。美国水下航行器的主要研究机构有：美国海军研究生院（Naval Postgraduate School, NPS）、美国海军水下作战中心（Naval Undersea Warfare Center, NUWC）、麻省理工学院 SEA Grant's AUV 实验室等。NUWC 的主要研究成果有 REMUS 系列^[41]、21UUV、SAUV、MARV、RAZOR 等。其中的 REMUS 600 主要侧重于远程、长航时工作，其结构如图 1-2 所示。它最多可以在水下持续工作 70h，航行速度可以达到 2.6m/s (5knot)，最深工作深度为 600m。它配置了 INS/DVL 组合导航系统、长基线导航、超短基线导航，并能通过应答设备接收 GNSS 数据，可以根据任务和环境自由地切换导航方式。侧重于深海作业的 REMUS 6000，最深工作深度可达 6000m。此外，NPS 研制的 Phoenix 系列^[42]、麻省理工学院研制的 Odyssey 系列水下航行器也代表了当今 AUV 发展的最高水平。英国、加拿大、挪威、日本的 AUV 技术也有了较好的发展。英国研制的 Dolphin 具有从英国航行到美国的能力，且最深工作深度可达 6000m。加拿大多年来一直致力于发展小型 AUV 技术，如 PURL、RAY、Sunfish 等。挪威早在 1990 年便制订了一个连续长期的军用 AUV 发展计划，主要研发产品为 HUGIN 系列水下航行器，部分产品已经装备挪威皇家海军^[43]。日本研制的“浦岛”AUV 正常工作

的最大深度为 3500m, 在 2005 年进行了长达 317km 的实验^[38]。

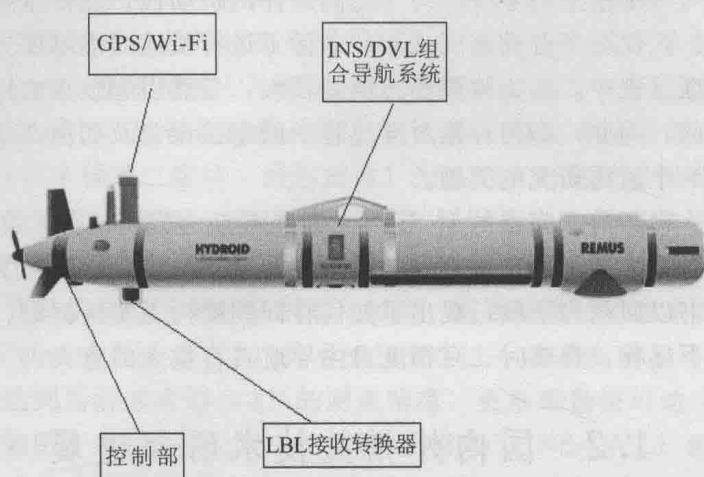


图 1-2 REMUS 600

我国水下航行器的研究起步比较晚, 整体水平不高^[37-39]。比较具有代表性的成果有中国船舶重工集团公司 702 所、中国科学院沈阳自动化研究所和中国科学院声学研究所等机构联合研制的“蛟龙号”载人潜航器。该潜航器于 2010 年取得了 3000m 级海试的成功^[2]。AUV 中比较具有代表性的成果为中国科学院沈阳自动化研究所研制的 CR-01 和 CR-02 自主水下航行器, 均已完成了 6000m 的深海试验^[2,38,39]。

1.2.1.2 水下导航技术发展现状

要使水下航行器完成预定的使命, 离不开水下导航技术, 它是决定水下航行器发展和应用的瓶颈问题。与陆地和空中导航相比, 水下导航信息源少、环境复杂, 具有更大的导航难度。目前, 水下导航方式可以归为 3 类: 惯性导航^[44-56]、声学导航、地球物理场导航^[57]。

惯性导航有着出色的水下自主导航能力。基于旋转调制的高精度惯导甚至可以达到 1 个月 1 海里 (1 海里 = 1.852km) 的定位精度, 但其成本过高。为此, 在满足导航精度要求的情况下, AUV 往往采用中低精度的惯性器件来降低其成本。由于惯性导航的误差随着时间的积累, 往往采用多普勒辅助的方式^[55, 56]。短距离导航时, 在安装了信号应答设备的条件下, 也可以考虑用 GNSS 提供的位置、速度信息来校正惯性导航的误差。

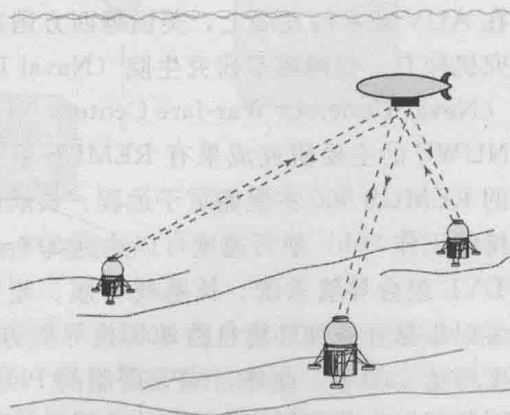


图 1-3 水下声学导航原理

声学导航是水下短距离导航的一个常用方式, 其工作原理如图 1-3 所示。声学导

航一般采用信号应答器把从基站得到的定位信息传输到水下航行器, 包含长基线导航 (LBL) 和超短基线导航 (Ultrashort Baseline, USBL)。虽然声学导航可以达到较高的定位

精度(厘米级),由于其需要基站提供定位信息,因此其作用范围往往十分有限。USBL 的作用范围甚至比 LBL 更短,通常只有 4000m。在浅水区,作用范围甚至会降到 500m。声学导航的限制在于^[3]:①它需要在海底或者水面舰船上固定好定位的基站^[58-61];②它需要精确地知道声音的速度,而声音的速度随着海水的温度和密度变化很大;③受到声速的影响,定位信息更新率低。

所谓的地球物理场导航是根据已知的地球物理场信息(如地形匹配、地磁场、重力场)来确定当前位置的导航方式^[62-65]。这些地球的物理特征可以通过应用已知的地图或者通过 AUV 测量得到。地球物理场导航的缺点在于:①它通常需要一个已知的地图(地磁场图、重力场图)^[66-69]。而在大多数水下任务中,先验地图往往是不可知的^[70];②地球力场往往比较弱,容易受到干扰而导致导航匹配失败。

表 1-2 列出了近年来研发的几种常用 AUV 的主要导航方式,可以看到,惯导与多普勒组合导航是实现水下自主导航的主要方式。惯性/多普勒组合导航的相关技术将在下一小节作具体介绍。

表 1-2 几种常用 AUV 导航方式

AUV 名称	导航系统	研究机构
REMUS 100	INS、LBL、USBL、GPS (标准配置)、DVL、侧扫声纳、深度计、摄像机(可选)	美国 NUWC
REMUS 600	INS、DVL、GPS、侧扫声纳、深度计(标准配置)、LBL、USBL、Wi-Fi、摄像机(可选)	美国 NUWC
HUGIN 1000	INS、DVL、合成孔径声纳(SAS)、GPS、DGPS-USBL、地形匹配导航	挪威 Kongsberg
Talisman	INS、DVL、测深和测高传感器、GPS	英国 AEB
AUTOSUB	INS、DVL、GPS、LBL、USBL	英国 SOC

1.2.2 惯性/多普勒组合导航发展现状

1.2.2.1 INS/DVL 组合导航误差因素

多普勒是利用安装在载体上的超声换能器向海底发射超声波,并根据多普勒效应原理测量载体速度的仪器^[56]。多普勒通常有两种工作模式:底跟踪模式和水跟踪模式。当载体相对于海底的距离在多普勒测速的有效射程之内时,多普勒可以在底跟踪模式和水跟踪模式下工作。在底跟踪模式下,多普勒可以提供精确的载体系下的对地速度;当载体对底的距离超过了有效射程,多普勒只能工作在水跟踪模式,测量得到是载体的对水速度,需要知道水流的速度才能得到载体的对地速度。多普勒的测速精度与声音信号的发射频率有关,频率越高,测速精度越高,然而有效射程就越短,反之亦然。美国 RDI 公司生产的 Workhorse 声纳,是为 AUV 专门设计的新一代测速仪,其主要性能如表 1-3 所示^[43]。

惯导与多普勒导航有航迹推算和组合导航两种方式。由于组合导航可以在组合的过程中有效地估计惯性器件的误差(陀螺零偏、加表零偏)、部分多普勒测速误差参数,因此被认为优于航迹推算方法。惯导与多普勒导航在水下航行器中已经得到了广泛的应用。1994 年,Brokloff 采用航迹推算方法^[31],进行了长达 5h 的实验。在实验中,航行器的航速为 5knot。

表 1-3 RDI 公司多普勒性能

发射频率 (kHz)	测速精度	有效射程 (m)
150	$0.5\%V \pm 0.2\text{cm/s}$	425~500
300	$0.4\%V \pm 0.2\text{cm/s}$	200
600	$0.2\%V \pm 0.2\text{cm/s}$	90
1200	$0.2\%V \pm 0.2\text{cm/s}$	30

实验采用惯性测量单元 (提供航向角、水平姿态角)、底跟踪多普勒、GPS, 得到了相当于航程 4‰ 的导航精度。此外, 他还提出了一种基于最小二乘的惯性、多普勒安装偏差标定方法。1997 年, Brokloff 把该算法扩展到了水跟踪多普勒^[71]。1998 年, Whitcomb 通过引入 LBL, 进一步提高了导航性能^[59]。2004 年, Whitcomb 与 Kinsey 为水下航行器设计了一套惯性/多普勒组合的导航系统 “DVLNAV”^[35]。2005 年, McEwen 等进行了在低温条件下 (高纬度地区冰下) 惯性/多普勒组合导航测评^[54]。

制约惯性与多普勒组合导航的因素有很多。首先最主要的是惯性器件的精度。惯导系统通常按照纯惯性导航的精度进行分类, 典型的用于水下航行器的惯导系统的器件性能如表 1-4 所示。惯导系统在纯惯性导航的情况下, 只要很短的时间就会产生很大的位置误差。惯导的姿态精度是影响组合导航精度的重要因素, 尤其是航向精度, 如在纬度 45° 的情况下, 1nmi/h 的惯导系统航向精度约为 0.027°, 它将会产生相当于航程的 0.05% 的位置误差^[72]。

表 1-4 典型水下 INS

分类 (nmi/h)	陀螺技术	陀螺零偏 (°/h)	加表零偏
>10	RLG, FOG	1	1×10^{-3}
1	RLG, FOG	0.005	3×10^{-5}

多普勒测速精度是 INS/DVL 组合导航精度的决定性因素。多普勒的测速误差主要由两部分组成: 标度因数误差和安装偏差。多普勒的标度因数受到水下的声速、多普勒安装结构、温度、水下地貌等多种因素的影响。如表 1-3 所示, 发射频率为 300kHz 的多普勒, 它的标度因数误差大约为 0.4%, 若不对它进行修正, 它将产生相当于航程的 0.4% 的位置误差。在牺牲多普勒作用范围的条件下, 可以通过采用提高发射频率来提高测速精度, 如 600kHz 和 1200kHz 的多普勒的标度因数误差仅为 0.2%。标度因数误差在载体机动的条件下可以通过卡尔曼滤波器进行校正, 表 1-5 为 1nmi 级别的 INS 与一个 1200kHz 的多普勒在不同的航行轨迹下进行组合导航的位置精度^[72]。在匀速直航的条件下, 组合导航的精度只有 0.11%, 而进行大机动时, 组合导航的精度可以达到 0.03%。但是由于水下航行器往往采取匀速直航的航行方式, 因此如果采用在线估计标度因数误差的方法, 估计效果往往比较差。

表 1-5 INS/DVL 组合导航在不同航行模式下的定位误差

航行方式	定位误差 (相对于航程的百分比)
匀速直航	0.11%
大机动	0.03%

影响多普勒测速精度的另一个重要因素是惯导与多普勒的安装偏差。多普勒测量得到的是多普勒载体系下的速度，它通过惯导的姿态转换到导航坐标系下。在生产制造和安装过程中，很难保证惯导的载体系与多普勒的载体系完全重合，如图 1-4 所示。为此，若不对惯导与多普勒的安装偏差进行标定，将产生一定的测速误差，从而影响导航的定位精度。

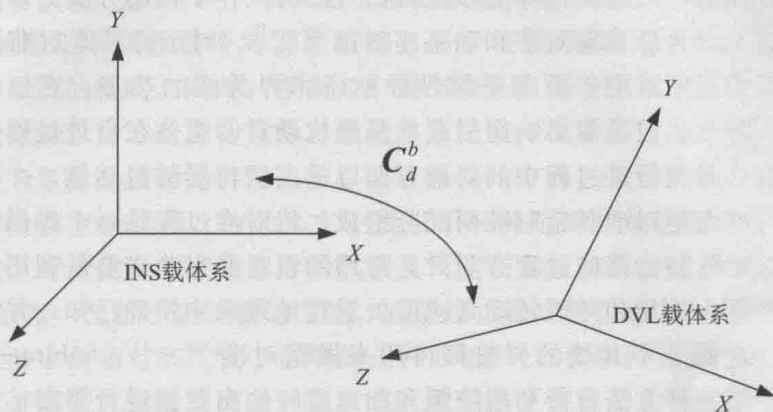


图 1-4 惯导、多普勒安装偏差

由于惯导的精度在很大程度上由器件决定，为此，提高惯导与多普勒组合导航精度的主要途径在于提高多普勒的测速精度。多普勒标度因数误差及安装偏差的标定是提高惯导、多普勒组合导航精度的关键。

为提高 INS/DVL 组合导航精度，惯导、多普勒安装偏差标定问题引起了国内外学者的广泛关注。最早的标定方法只考虑了一个自由度^[73-75]。1989 年，Joyce 提出了一种基于最小二乘的估计船载 DVL 航向安装误差的方法。该方法以 GPS 的速度作为参考来估计安装偏差^[73]。Pollary 和 Read 进一步研究了该方法^[74]，他们指出惯导的航向精度是限制该方法标定精度的一个重要因素。1994 年，Münchow 和他的同事以该方法进行了水下实验^[75]。

随后，惯导、多普勒的安装偏差标定被扩展到 3 个自由度^[76-80]。美国约翰霍普金斯大学的 Whitcomb 与 Kinsey 对该问题进行了深入的研究，提出了基于位置观测、基于速度观测以及基于加速度观测的 3 种标定方法。这 3 种标定方式均采用了最小二乘算法^[81-88]。其中，基于位置观测和速度观测的标定方法都需要额外的观测信息，如 GPS、LBL 等提供的位置和速度参考信息。因此，这两种标定方式的应用受到了一定的限制。基于加速度的标定方式不需要增加额外的传感器，可以实现自标定，然而它需要很复杂的运动轨迹，极大地增加了水下航行器的控制难度。对于该问题，国内通常采用 GNSS 辅助下的标定方式^[89-93]。朱春云等提出了一种 GNSS 辅助下的基于卡尔曼滤波的标定方法。该方法要求水下航行器在一段时间内连续接收 GNSS 信号，为水下航行器的应用带来了一定的不便。国内学者对多普勒安装偏差的在线估计也作了一定的研究^[56]，但是，由于水下航行器机动性小，也难以取得比较好的估计效果。

综上所述，多普勒测速误差标定的难点在于：水下航行器难以得到额外的速度、位置观测，且水下航行器机动性小，为实现自标定带来了极大的难度。为此，本书将考虑如何在仅仅只有少量观测的情况下实现安装偏差标定，使之能适用于水下航行器的应用。

1.2.2.2 动基座对准

初始对准,即确定初始时刻的姿态矩阵。初始对准的精度对惯导系统的导航精度有着重要的影响,初始对准的时间在很大程度上决定了载体的快速反应能力,因此,对准精度和对准快速性是初始对准最重要的两个指标^[94-98]。

按不同的划分标准可以把惯性导航系统初始对准方式作不同的分类。若按基座的运动状态,可以把初始对准分为静基座对准和动基座对准^[99-107]。对于静基座对准技术,研究成果已经比较成熟。而动基座对准一直都是惯性导航学术界关注的热点,它包含两种情况^[17]:①载体受到振动、阵风、浪涌等影响而引起的基座扰动;②载体在行进过程中进行对准。本书重点研究水下航行器在行进过程中的对准方法以提高航行器的机动性。

传统的初始对准由粗对准和精对准两部分组成。粗对准过程是一个提供载体坐标系和导航坐标系之间姿态矩阵初始值的过程^[108-119]。常用的粗对准方法主要是利用已知重力和地球自转角速度。由于重力矢量和地球转动角速度矢量在地理系中精确已知,并可通过陀螺和加速度计测量得到,这两个不共线的矢量即可用来做粗对准^[108-111]。Schimelevich^[112]研究了两种粗对准方法。第一种方法直接利用陀螺和加速度计输出数据进行姿态估计。加速度计输出用以计算水平角,而陀螺输出用以计算方位角。角振动环境将会制约对准精度。第二种方法,称之为陀螺罗经方法,基于陀螺输出连续跟踪系统的水平和方位姿态。重力加速度在体坐标系的投影包含两部分:常值项,以及正比于地球自转角速率的时变项。其中,常值项可以计算水平角,而时变项用以计算方位角。因此,陀螺罗经方法实质是一种基于加速度计输出的最小二乘估计方法。关于这两种粗对准算法,其水平角的计算是等价的,而前者方位角是直接基于陀螺输出观测计算的,后者是基于加速度计测量的线性趋势计算方位角。为了提高粗对准的快速性及准确性,Neddy^[113]首先对陀螺和加速度计数据进行预滤波,以减小测量噪声,提高观测精度,其次采用时间平滑的方法计算准确的角速率和比力测量值。然后,时间平滑后的信息用于计算单位矢量和方向余弦矩阵 DCM,进而确定体坐标系相对于导航坐标系的姿态四元数,提供精对准过程的初始值。重力矢量和地球转动角速度矢量的测量值中不可避免地包含基座运动的干扰,因而该方法对于行进中的动基座对准则难以取得比较好的对准效果。近年来发展起来的惯性系粗对准方法是解决该问题的重要思路^[112-114]。秦永元等^[120-122]指出,考虑到系泊环境下舰船的摇摆使陀螺无法准确测出地球自转角速度,从而无法根据陀螺和加速度计的输出直接计算出姿态阵。针对这一问题,提出了基于重力加速度的粗对准算法。该算法将姿态矩阵分解为 4 个矩阵计算,所利用的信息为摇摆基座姿态变化信息、重力加速度相对惯性空间随地球自转引起的方向变化信息、地球自转信息、地理信息。算法的巧妙之处在于应用惯性凝固假设,建立了基座惯性坐标系,使舰体相对基座惯性系的姿态初始值为单位阵,从而使姿态更新解算成为可能。然而,由于重力加速度在基座惯性坐标系内的积分值未考虑船体垂荡、纵荡以及横荡的干扰加速度影响,因此该算法仍然有一定的对准误差。

精对准则是利用外部观测量的信息,进一步得到载体坐标系和导航坐标系之间姿态矩阵的精确值^[123-150]。典型的精对准方法有罗经对准以及基于最优估计的对准等方法。罗经效应方位对准的基本原理如下^[17]:假定水平对准已实现、方位粗对准已完成,由于方位失准,导致地球转动角速度矢量在东向轴上存在投影分量,引起北向轴不水平,从而可以利用北向速度误差来修正方位角,最终达到方位精对准的目的。对大失准角情况而言,罗经效应对准

方法需要粗对准过程,对准时间较长,不利于武器系统快速反应和快速机动。以卡尔曼滤波为代表的状态空间最优估计对准方法是当前 SINS 初始对准研究的热点。最常用的方法是利用导航系下惯导的小失准角度误差模型,通过外部观测量,以标准卡尔曼滤波的方式来进行初始对准。Reddy^[113]使用了五状态的卡尔曼滤波进行精对准,滤波状态选为 3 个姿态误差以及 2 个水平速度误差。Grewal^[124]针对较大维数状态矢量的情况,使用了扩展卡尔曼滤波(EKF)方法。他提出了惯性器件的误差模型,基于该误差模型,通过双协方差的分析原理,评估了惯性系统的精度。同时,根据文中提出的姿态误差模型,获取了方向余弦矩阵的微分方程以及近似解。为了减少计算量,通过最小二乘“预滤波”方法把高速的加速度计数据进行压缩,给卡尔曼滤波器提供输入。在滤波器设计方面,参数估计到状态估计的转换使得对准过程为非线性变换过程。为此,文中提出了一种陀螺和加速度计参数残差的解耦方法,同时也描述了可被估计的惯性器件参数以及只能在实验时进行计算的参数。最后针对离线处理的 IMU 数据,分析了滤波器的性能、收敛性、稳定性以及估计精度。采用基于四元数的惯导误差模型也是精对准过程中常用的一种方法^[149]。在实际应用中常常出现大初始失准角的情况,为了解决大初始失准角问题,熊芝兰等基于乘性四元数和加性四元数,提出并推导了两类非线性惯导系统误差模型。实验结果表明,该模型不仅可以用于小失准角对准,在大失准角的情况下也可以取得较好的估计效果。基于方向余弦矩阵的惯导滤波模型也是初始对准的发展方向^[150]。不同于传统的基于误差的模型,Bar-Itzhack 等直接利用方向余弦矩阵的元素作为卡尔曼滤波的状态。此外,Bar-Itzhack 等还提出了矩阵卡尔曼滤波方法,该滤波方法可以在方向余弦矩阵模型下直接进行滤波。该方法有效地减小了小角度近似时带来的误差。

除了传统的两阶段对准方法外,近年来涌现出了一些对准方法的新思路。其中,基于非线性滤波的大失准角对准是一个重要的发展方向^[151-162]。在水下很难在短时间内得到一个较好的粗对准结果,为此,有必要研究多普勒辅助下的大失准角对准。常用的非线性滤波方法包含 EKF、UKF^[163-169]、PF 等。误差模型大致可以分为两类^[169]:一类是研究大失准角下的非线性误差模型,以大方位失准角模型最具有代表性;另一类是通过近似或者状态变换,推导线性化的大失准角误差模型,其中基于四元数的 INS 误差模型最具有代表性。然而,基于四元数的模型,其速度误差方程仍然是非线性的,能否将速度误差方程也线性化,值得深入探讨。为此,建立惯导的非线性误差模型,然后以非线性滤波的方式来进行对准是最为常用的一种方式。

一种被称为“优化对准”的对准方法是动基座对准发展的一个新方向^[170-174]。优化对准源于惯性系对准算法^[170]。惯性系对准把对准问题转换为求解两个凝固惯性系之间的方向余弦矩阵。然而,对于该方向余弦矩阵的求解,求解方式过于简单,没有达到应有的精度。文献^[171]对惯性系对准方式提出了一个十分有效的改进方式。文中指出基于无限矢量观测,SINS 的初始对准可以等价转换为连续的姿态估计问题,同时揭示了初始对准和矢量定姿问题的相互联系,把对准问题高度概括为“基于优化理论的 SINS 初始对准方法”,并与传统的陀螺罗经方法和滤波方法进行了比较。文中还推导了静基座条件下该算法的极限精度,认为该方法可以达到与传统卡尔曼滤波接近的极限精度。Yuanxin Wu 和 Tang T 等^[173, 174]对该方式进一步完善,使之可以用于动基座对准。Silson^[172]在该问题的求解上提出了一种新的交叉采样的方式,取得了比文献^[171, 173, 174]更高的对准精度。以多普勒辅助进行优化对准