

水下定位 与导航技术

田 坦 编著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

水下定位与导航技术

田坦 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书详细介绍了水下定位与导航的基本原理和采用的技术。书中分别叙述了水下长基线、短基线、超短基线声学定位技术,声多普勒和声相关测速技术,海底地形地貌测量技术及其信号处理方法。

本书突出原理和技术方面的叙述、分析,内容由浅入深,便于自学。它可作为高等院校水声工程专业研究生教材和从事声呐设计技术人员的参考书,也可供雷达、信息处理及导航专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水下定位与导航技术/田坦编著. —北京:国防工业出版社, 2007.9

ISBN 978-7-118-05224-4

I. 水... II. 田... III. ①水下一水声定位②水下一水声导航 IV. U675.6 U666.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 087927 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 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 10 字数 224 千字

2007 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 22.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

舰船导航是一个很经典的课题,已有许多相关书籍和专著加以阐述,但涉及水下的定位导航问题,则非有水声技术介入不可。这是因为迄今为止声波在海水介质中传播的距离仍优于诸如电磁波等其他传播载体。因此,水声导航定位技术已逐渐发展成导航领域的一个十分重要的技术分支。鉴于导航专业的技术人员对水声技术本身可能比较生疏,而从事水声的工作者又对导航知之不多,故本书作者试图为导航领域和水声领域搭建一座桥梁。

本书是一本水下定位导航技术的专业教材。它适合于高等院校水声专业的教学用书,也可供从事水声工程的专业技术人员阅读,还可供导航及信息处理等专业的师生参考。

本书的编写以导航定位中涉及的水声技术为主,目的是使读者通过本书了解并掌握目前水下导航定位中使用的水声技术,为今后从事这方面工作打下基础。

本书分7章。第1章绪论,介绍了水声定位导航技术的发展概况以及水声导航技术的分类。考虑到声呐方程是从事水声工程的技术人员必不可少的工具,因而对声呐方程的有关参数也做了简要介绍。第2、3、4章分别介绍了短基线、超短基线和长基线水声定位系统的基本原理,并结合作者的工作经验分析介绍了某些具体的系统。第5章和第6章则分别介绍了两种声学测速技术:声多普勒测速和声相关测速技术。第7章则分析了多波束回波测深仪的基本原理和所涉及的信号处理技术。

本书在编写过程中曾得到朱志德教授、张殿伦教授的帮助,刘伯胜教授和孙大军教授审阅了原书稿并提出了若干有益的意见,在此一并表示感谢。

由于作者水平所限,选材及叙述必有许多不当之处,诚请读者批评指正。

作者

2006年10月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 定位与导航概述	1
1.2 水面舰船的定位导航方法	1
1.3 水下导航定位技术的发展	3
1.4 水声定位与导航技术简介	4
1.4.1 水声定位系统	4
1.4.2 声学测速和计程设备	6
1.4.3 地形地貌测量	7
1.5 声呐方程及有关参数	9
1.5.1 主动声呐方程	10
1.5.2 被动声呐方程	12
1.6 本书的安排	12
参考文献	13
第2章 短基线水声定位系统	14
2.1 引言	14
2.2 使用非同步信标的短基线系统	15
2.3 使用应答器的短基线水声定位系统	16
2.3.1 使用应答器的优点	16
2.3.2 定位解算方法	16
2.4 位置修正	18
2.5 短基线系统的应用实例——船舷悬挂式目标轨迹短基线测量系统	19
2.5.1 引言	19
2.5.2 定位方程	19
2.5.3 误差源分析	20
2.5.4 基阵校准与水下姿态修正	22
2.5.5 距离模糊问题和数据预处理	23
2.6 本章小结	26
参考文献	26
第3章 超短基线水声定位系统	27
3.1 引言	27
3.2 入射角和深度方式(非同步信标方式)位置解算	28
3.3 入射角与距离算法(应答器或响应器方式)	30

3.4	超短基线定位系统定位误差分析	30
3.5	改善超短基线定位系统定位精度的措施	32
3.5.1	引言	32
3.5.2	增大基元间距改善定位精度	33
3.5.3	采用宽带信号提高定位精度	34
3.6	超短基线定位系统相位差测量方法	37
3.6.1	自适应陷波滤波器(Notch 滤波器)	37
3.6.2	自适应相位差估计器	38
3.7	超短基线定位系统的标校	39
3.7.1	基元相位差校准	39
3.7.2	超短基线系统的海上校准	42
3.8	本章小结	44
	参考文献	45
第4章	长基线水声定位系统	46
4.1	引言	46
4.2	长基线水声定位系统的几种应用模式	47
4.2.1	舰船导航模式	47
4.2.2	长基线有缆潜器(TTS)导航模式	48
4.2.3	长基线无缆潜器(FSS)定位模式	48
4.3	海底应答器阵的校准	50
4.3.1	2个应答器的情况	50
4.3.2	3个应答器的情况	50
4.3.3	用于四边形应答器阵的两种校准方法	51
4.4	长基线定位系统的跟踪定位算法	54
4.4.1	2个应答器导航	54
4.4.2	3个应答器导航定位	56
4.4.3	4个应答器导航定位	57
4.5	长基线深水应答器水声导航系统应用实例	58
4.5.1	系统组成	58
4.5.2	定位解算方程	58
4.5.3	定位解算方法	59
4.5.4	海底应答器阵相对位置的测定	60
4.5.5	深水长基线系统的声速补偿	63
4.5.6	数据的预处理	64
4.6	本章小结	65
	参考文献	65
第5章	声多普勒测速技术	66
5.1	引言	66
5.2	舰船多普勒测速原理	66

5.2.1	多普勒效应的时域分析	66
5.2.2	舰船多普勒测速原理	68
5.3	影响多普勒测速的主要因素及改进方法	69
5.3.1	由解算公式近似引起的误差	69
5.3.2	船舶摇摆引起的测速误差及摇摆补偿	70
5.3.3	声速引起的测速误差	73
5.3.4	有限波束宽度的影响	73
5.3.5	噪声对频率测量的影响	74
5.3.6	安装角度偏离误差及其校正	75
5.4	相控阵多普勒测速技术	77
5.4.1	引言	77
5.4.2	使用相控阵可补偿声速的基本原理	77
5.4.3	相控阵布阵及相控收发的实现	78
5.5	多普勒计程仪在大深度使用时摇摆问题的分析及摇摆补偿	83
5.5.1	摇摆分析	83
5.5.2	摇摆补偿	86
5.6	多普勒测速声呐的频率测量	87
5.6.1	过零点频率测量方法	87
5.6.2	复相关频率测量方法	91
5.7	本章小结	94
	参考文献	94
第6章	声相关测速技术	96
6.1	引言	96
6.2	声相关测速的基本原理	97
6.2.1	波形不变原理	97
6.2.2	接收器信号相关的几何条件	99
6.3	时间相关测速和空间相关测速	100
6.3.1	时间相关测速	100
6.3.2	空间相关测速	102
6.4	相关测速声呐的海底回波和体积混响	104
6.4.1	海底回波	104
6.4.2	体积混响	106
6.5	声相关计程仪的有关参数	108
6.5.1	时间相关计程仪接收器的间距	108
6.5.2	时间相关计程仪载体速度与深度的关系(速度—深度积)	109
6.5.3	相关计程仪需要的信号噪声比	110
6.6	声相关计程仪的信号形式	111
6.6.1	时间相关计程仪的信号形式	111
6.6.2	空间相关计程仪的信号形式	113

6.7 时空相关测速模型	115
6.7.1 海底散射信号多阵元接收的理论时空相关矩阵的表示	115
6.7.2 时空相关函数的理论模型	116
6.7.3 时空相关信号处理算法简介	119
6.8 本章小结	121
参考文献	122
第7章 多波束回波测深技术	124
7.1 引言	124
7.2 多波束测深的基本原理	126
7.3 多波束测深仪的波束形成技术	128
7.3.1 DFT 波束形成方法	128
7.3.2 直接相移多波束形成	130
7.4 信号到达时间测量——能量中心收敛法和特征窗时延估计法	132
7.4.1 引言	132
7.4.2 能量中心收敛法	133
7.4.3 特征窗时延估计法	135
7.5 分裂波束相位差检测	136
7.5.1 分裂波束的概念及子阵间的相位差	136
7.5.2 子阵信号相位差的模糊问题	137
7.5.3 分裂子阵相位差的估计	139
7.6 利用多子阵的海底检测	140
7.6.1 多子阵的相位斜率	140
7.6.2 多子阵海底深度估计方法——海底图像变换法	142
7.7 BDI 和 WMT 处理	143
7.7.1 引言	143
7.7.2 BDI 处理	145
7.7.3 WMT 处理	147
7.8 声速补偿和声线跟踪	149
7.9 本章小结	150
参考文献	150

第1章 绪论

1.1 定位与导航概述

在讨论水下定位与导航技术之前,先对一般的导航定位问题进行简要的描述。

什么是定位与导航? Leonard 和 Durrant - Whyte^[1]曾将定位与导航归结为要回答这样3个问题:我在什么地方? 我要到哪儿去? 我怎样去那里? 为了回答这3个问题,必须有一个坐标,因而又提出了第4个问题:我的地图是什么? 人们不可能随便简单地说出一个连自己都不知道在什么位置的地方去。因此,只有已知一个“地图”,才可以根据这个“地图”明确指出载体现在处于什么位置和要到达的位置。亦即必须先回答第4和第1个问题,才能进一步回答第2和第3个问题。第2个问题——“我要到哪儿去?”,属于使命任务问题,换言之,要根据具体任务才能确定需要到达的地点。而关于“怎样去?”的第3个问题,则属路径规划问题,即在已经确定需到达的地点之后,如何规划最佳路径或航线,有效、准确且安全地到达目的地。由上述可知,导航问题的核心是载体的定位问题。从海军作战的角度出发,舰船在海上航行必须时时知道自身的位置,以便根据需要有针对性地机动。而陆上指挥中心则从作战全局考虑,也需要知道作战舰船的具体位置,以便指挥其作战行动。

关于使命任务显然不在本书的讨论范围之内,使命任务通常在舰艇出航之前已经确定。在一张“地图”上进行路径规划对于无人机器人而言是非常重要的任务,已有许多文献涉及这一问题,也不是本书的讨论范围。本书着重研究有关定位的技术和手段,特别是水下载体定位的技术和手段。

在涉及水下定位导航技术之前,有必要对水面舰船的导航手段作一综述,以便加深读者对水下定位导航的理解。

1.2 水面舰船的定位导航方法

现有水面舰船导航方法有陆标、天文导航和无线电导航、卫星定位导航、推算导航等几种,在一些海军的舰艇上有时还配备惯性导航系统^[2]。

图1.1是舰船导航方法的分类简图。陆标导航和天文导航是传统的、但有时仍为行之有效的导航手段,未包括在内。

陆标导航是利用罗经、测距仪及六分仪测定陆标的方位(船与陆标连线与船舶所在子午线的夹角)、距离或水平夹角等决定船舶位置的导航过程。进行陆标导航必须天气良好,物标必须在视界内,而且物标形状易于辨认、选择和观测。陆标定位被公认为是一种准确的定位方法。有时,可将陆标导航作为标准导航来考查其他导航方法,例如推算导航、天文导航及无线电导航的准确性。但如果天气不好,见不到陆标或陆标难以辨认,就

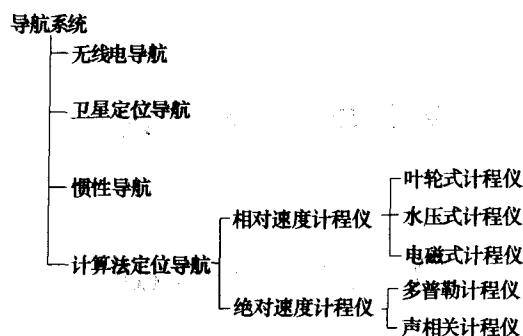


图 1.1 舰船导航方法分类

无法利用陆标导航。

天文导航是利用六分仪测定天空中具有一定运动规律的天体(星、太阳、月亮)决定船舶位置进行导航的过程。在白天、早晨、黄昏和蒙影时间利用太阳、月亮、行星或恒星对船舶进行导航。利用航海天文历确定天文船位圆的圆心,用六分仪测出天体高度,则船位是在以天体的地理位置为圆心、天体顶距为半径所作的船位圆的圆周上面的。天文船位的精度除了决定于天体方位夹角及高度外,还决定于观测、计算和绘画的准确性。天文导航必须天气良好,星体和水天线必须清晰可见,测、算、画必须特别迅速。天文导航是远洋航行中主要的船舶导航方法。

上述两类传统的定位导航方法中,陆标导航利用海岸或海岛上的标记来对船舶进行导航;天文导航则利用天空中的星体决定船舶位置进行导航;推算导航是在已知船位的基础上估算随后的位置进行导航。它们都使用普通导航装置,只能在天气良好的条件下,物标或天体的能见度良好时才能适用,而且观测繁杂,速度慢,精度差。

另一类水面导航方法是无线电导航,这是利用无线电技术确定船舶的位置、引导船舶沿规定的航线按规定的时间安全地到达目的地的方法。利用无线电导航可完成船舶定位,使船舶沿规定的路线安全、准时地到达目的地,在复杂的气象和海况条件下,对船舶进行可靠的导航。此外利用无线电导航手段还可进行航海计算(例如风流压、航向、航速、航程、配载及燃料消耗量等计算)及为船舶所需的其他导航任务(例如海图更换与修改,航线设计,航道标绘自动跟踪与驾驶,事件存储及导航监视等任务)。在这些任务中,船舶定位、导航是无线电导航的基本任务,是完成其他各项无线电导航任务的基础。

无线电导航与上述几种导航方法相比有下列优点:受外界条件(气象、海况及时间)的限制较小;可在近、中、远距离,甚至在全球进行导航,精度高,速度快;可靠性高且经济效益好;采用了数字技术及电子计算机进行自动导航;可实现导航、通信及识别等多种功能。无线电导航的缺点是易受自然环境、人为因素的干扰及发射台的制约。

利用无线电导航手段进行导航,在 50 海里的近程区域内,定位精度可达 1m ~ 10m,在 500 海里的中程区,定位精度在 50m ~ 500m 之间。在远程区,例如 1500 海里,则定位精度约 2000m ~ 3600m。全球无线电导航有奥美咖系统(定位精度为 2000m ~ 3000m)、NNSS(定位精度为 50m ~ 50m)、GPS(定位精度约在 100m 量级)以及 DGPS(定位精度约为几米到十几米)。这些系统均可在全球实现舰船的导航。

无线电导航系统大体可分为两类。

一类为无线电测向系统。这是利用无线电测向仪测定无线电台的方位进行定位、导航、救助的无线电导航系统。它利用专门供无线电测向用的发射台(无线电信标),用无线电测向接收机测出无线电信标的方位。只要测出两个信标的方位,就可确定船舶的位置。显然,由于只利用方位信息进行交会,因而定位精度有限。定位精度较高的无线电导航系统是另一类称为双曲线定位的导航系统。这种系统利用双曲线导航仪测量双曲线导航台信号的时间差或相位差,从而求出距离差进行舰船的定位、导航。海上常用的双曲线导航仪有罗兰-C接收机、台卡接收机、 Ω 接收机。

另一类可归入无线电导航的是卫星导航系统^[3]。这是利用导航人造地球卫星进行导航的。这种系统由导航卫星、地面站及用户设备三大部分组成。美国首次实现了第一个海军导航卫星系统(NNSS),又称子午仪卫星导航系统的实验导航星,1964年投入商用。NNSS卫星有6颗,轨道高度1100km,运行周期106min,轨道倾角约90°,每天最少能见6颗卫星24次~36次,可实现全球、全天候、高精度导航。1973年美国国防部批准陆海空三军共同研制的GPS(导航星全球定位系统)有24颗卫星,按6个轨道每个轨道4颗卫星布设,其中21颗为工作卫星,3颗为备用卫星。GPS卫星轨道高度约为20200km,运行周期约12h,轨道倾角为55°。在地平线7.5°以上至少可看到4颗卫星,在地平线以上至少可看到5颗卫星,可实现全球、全天候、高精度、连续导航。近年来发展的差分GPS(DGPS)和广义差分GPS可在海上达到米级的定位精度。

推算导航指的是根据船舶的航向(航行方向)和航程(一定时间内航行的距离)算出船舶位置的方法。推算导航的过程是从已知的坐标位置开始,根据航向、航速和航行时间,推算下一时刻的坐标位置的导航过程。进行推算导航必须有航向和航速测量等设备。推算导航有作(海)图法及计算(数学计算及查表)法两种。推算船位的精度决定于起始位置、航行时间、航速、航向、计算器材、所用资料及作图的准确性。在海上对推算导航影响最大的是海流、潮汐和风。推算导航随推算时间的延长而产生定位积累误差。用于推算导航的器材有相对速度计程仪和绝对速度计程仪两类。前者包括叶轮式计程仪、水压式计程仪和电磁式计程仪等。这些设备或是仅能测量与水的相对速度,或是精度不高,最终都使导航达不到好的精度。绝对速度计程仪包括多普勒计程仪和声相关计程仪,它们测量的是舰船对地的绝对速度。有了载体的对地绝对速度,再配以高精度航向测量装置,可以使推算导航达到高的精度。

尽管已有这些舰船导航定位手段,但人们还是希望舰船有不依赖外部设备的自身导航和定位的能力,即所谓自主导航能力。惯性导航系统(简称惯导)是进行长时间自主导航的有效手段。但是纯惯导系统有累积误差,其量级达到每小时几十米。因此需要其他设备实时提供速度信息,或经常进行校准。它与其他导航系统(例如GPS、多普勒声呐)配合,构成组合导航系统可大大提高惯导的导航定位精度。许多大型船只和军用舰船都配有惯性导航系统。

1.3 水下导航定位技术的发展

上述各种导航手段,基本上可以满足水面舰船的导航需要。然而,对于水下载体例如潜艇的定位导航,就不像水面舰船那样容易。对水下航行的载体,即使利用最精确的大地

测量方法,也难以定出其精确位置。

20 世纪 70 年代,由于经济上、科学上和军事上的需求,对水下载体的定位要求也愈来愈高。经济上,因为海洋为人类提供了丰富的矿产、石油、天然气等资源,最直接的导航需求就是在资源试行开采,经评估其藏量后,如何重新回到试采地点。这已成为一个十分重要而困难的任务。从科学考察的角度看,为弄清大陆架的成因、构造、沉积物的分布,也需要对水下人工建造物进行精确定位。在军事上,预先了解水下战场环境,对于提高海军作战效能十分重要。这种对水下战场的准备,是航海保证部门长期而艰巨的任务。具体要求便是要对海底地形、地貌进行测量,并给出相对于大地坐标的精确海底地形图和地貌图。历次海战表明,潜艇的水下隐蔽性,是发挥潜艇突袭作战能力的可贵因素。潜艇一旦浮出水面,即使只用 GPS 接收机进行短暂定位,也可能暴露自己,失去隐蔽性。为保证潜艇可长时间在水下隐蔽航行,自主导航定位能力是必不可少的。

然而,上面介绍的各种用于水面舰艇的导航手段,除惯性导航设备以外,均很难用于水下载体的定位导航。这是因为光波和无线电波进入海水,基本上呈“短路”状态。当载体潜入水下时,利用光学原理的天文导航、陆标导航手段已无法使用。在具有强传导率的海水中,电磁波能量随距离的传播损失约为 $1400 f^{1/2}$ dB/km,这里 f 以 kHz 计^[4]。由此可知,在海水中仅 100m 的距离,对于频率为 2000MHz 的电磁波,能量损失高达 20000dB。即使是频率为 30kHz 的极长波长的电磁波,其损失也高达 770dB。这意味着,水下载体基本上无法通过无线电导航系统进行定位导航。

众所周知,当前获取水下信息最有效的传播载体仍然是声波。因此,水下目标及载体定位和导航的任务不可避免地要使用水声技术。

从 20 世纪 70 年代开始,已经形成了所谓海洋勘探行业。那时,在海底勘探时需要有一定的定位系统配合。因而出现长基线、短基线和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,并对水下载体进行导航。

80 年代,军事上对水下定位的需求更为迫切。核潜艇和水下导弹发射技术的发展,对潜艇定位提出了更高的要求。例如,它的位置和速度对于水下武器发射时初始参数的设定至关重要,这便是水下定位导航系统的任务。

因此,无论从海洋开发和军事方面的需求出发,水下定位和导航技术都已愈来愈引起各个国家的重视。结果是,水声定位和导航已经成为导航领域的一个十分重要的分支。

1.4 水声定位与导航技术简介

从广义上说,一切利用水下声波进行定位的技术都应列为水声定位与导航技术这一范畴。因此,诸如目标的探测定位声呐(包括主动、被动声呐)、水下成像声呐等都是应当研究的内容。但是本书作者更倾向于将那些可以为载体进行定位又具有导航功能的手段归为水声定位导航技术要研究的范畴。因此按作者的理解,水声定位与导航技术大体分为 3 类,分别是水声定位技术、载体声学测速技术和海底地形地貌测量技术。

1.4.1 水声定位系统

水声定位系统主要指的是可用于局部区域精确定位导航的系统。水声定位系统分为

长基线系统、短基线系统和超短基线系统。这些定位系统都有多个基元(接收器或应答器),基元间的连线称为基线。一般用基线的长度来判断属于哪类系统。表 1.1 列出了 3 种定位系统的分类^[5]。

表 1.1 水声定位系统分类

定位类型	基线长度/m	简称
长基线	100 ~ 6000	LBL
短基线	1 ~ 50	SBL
超短基线	<1	USBL 或 SSBL

实际上分类方法没有绝对标准,可从两方面理解。

从基线长度方面理解,认为长基线定位系统指的是基线长度可与海深相比拟的定位系统,例如海深 500m,基线长为 1000m 的定位系统。短基线定位系统指的是基线长度远小于海深,例如海深 500m,基线长为几米的定位系统。而超短基线定位系统则是基线长度极小(小到几厘米),且几个阵元构成一体的定位系统。

从定位方法方面理解,长基线和短基线定位系统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。这样的系统基线几百米以上通常为长基线系统,而基线几米到几十米则为短基线系统。通过相位测量来进行定位解算的定位系统是超短基线定位系统(其基线长度必然极小)。

当然,还可以按定位系统使用水声应答器或水声信标(同步、非同步信标)来进一步分类。

各类水声定位系统都有其自身的优点和缺点。长基线系统因其基线较长,因而定位精度高。缺点是在深水使用时,位置数据更新率较低,达到分钟的量级。另一缺点是布放、校准和回收需要较长时间,且这些作业过程较为复杂。

短基线系统的基线虽远小于长基线系统,但也有几米到几十米。多个水听器阵元需在船上或平台上仔细选择位置分开安装,最好在舰船建造时进行。短基线系统的缺点是某些水听器可能不可避免地被安装在高噪声区(例如靠近螺旋桨或机械的部位),从而使跟踪定位性能恶化。这种系统的定位精度比常规超短基线系统高,但比长基线系统低。只要短基线系统基阵业经安装,进行定位导航作业就比较方便,因为不需要布放多个应答器并进行标校。当然,在定位导航时它需要用—个应答器提供参考位置。

超短基线系统提供的定位精度往往比上两种系统差。这是因为它与前两种系统不同,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一个有利位置。此外,它也无需布放和标校应答器阵。通过精心设计,超短基线系统的定位精度可能接近长基线系统的定位精度。与短基线系统一样,定位时也需要用一个应答器作为参考。

上述各种定位系统既可单独使用,也可以有机地组合,构成组合系统。组合系统可提供可靠的位置冗余,并发挥各个系统的优点。例如,可组合成长/超短基线系统(L/USBL)、长/短基线系统(L/SBL)、短/超短基线系统(S/USBL)以及长/短/超短基线系统(L/S/USBL)等。

水声定位系统的工作频率和作用距离可归纳成表 1.2。应当注意,这里的高频、超高频等所说的频率范围不同于无线电系统,这是根据水下声波传播的性质划定的频率范围。

表 1.2 水声定位系统的工作频率和作用距离

频率简称	频率范围/kHz	定位范围/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(EHF)	50 ~ 110	< 1k
甚高频(VHF)	200 ~ 300	< 100

随着海洋开发事业和科学技术的发展,水声定位系统有愈来愈广泛的用途。例如,它可用于水下目标的跟踪、定位(如对鱼雷水下运动轨迹进行跟踪测量、对水下作业的潜水员进行定位、测量潜器的位置等)、海上石油勘探(如给海上油井定位、引导钻头重入等)和其他矿产资源的开发、海底管道和电缆、光缆的铺设定位及维修、潜器的水下导航、水下结构施工和定位等场合。此外它们还可用作深海海上试验平台和船舶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。水声定位系统在军事上的应用也已受到各国的重视。如在某些预定海域布放声学定位系统,潜艇只要能到达该海域,便可以利用它进行精确定位,以此对惯导设备进行校准,从而提高潜艇的作战效能^[6]。

国外较早开展水声定位系统研制的有挪威 Kongsberg Simrad 公司、法国汤姆逊公司和马可尼公司。它们均已近 30 年的研究历史,产品覆盖了上述 3 种类型,且已有多个产品被军方使用。法国 OCEANO 公司于 1997 年推出的 POSIDONIA 6000 的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,定位精度为斜距的 0.5%。为了达到更高的定位精度,该公司对产品进行了改进:采用宽带多移频键控(MFSK)信号和调频(FM)信号,辅以相关处理使系统输出信号/噪声比增益达到 19dB。新型 POSIDONIA 6000 系统定位精度的设计指标为斜距的 0.3%。新产品已安装在德国一条海洋调查船和法国海军的某舰艇上。我国海洋调查船大洋一号也安装了此设备,并在深海进行了试验,据称在 7400m 深度,船下方 60°锥体范围内的最好定位精度达到斜距的 0.2%。图 1.2 为该超短基线定位系统的水下基阵照片,中间为发射换能器,周围 4 个为接收水听器,基阵直径为 580mm。

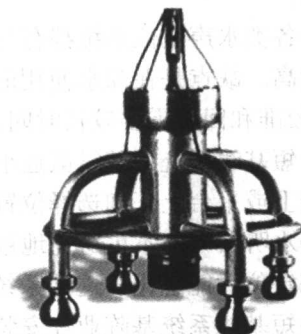


图 1.2 法国 POSIDONIA 6000 型深水远距离超短基线系统的水下基阵

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

1.4.2 声学测速和计程设备

迄今为止,测量舰船对地绝对速度的最佳手段仍首推声学测速技术。有了速度,便可容易地得知舰船的累计航程。因而这类设备常被人们称为“速度计程仪”。声学测速设备可测量舰船的艏艉向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

(艏尾线相对于正北的角度),便可利用这些速度独立地进行船位推算,实现自主导航。

声学测速和计程设备主要有两种^[7]。

一种是多普勒速度计程仪(Doppler Velocity Log, DVL),也称为测速声呐。它的机理是众所周知的多普勒效应:声源与接收器存在相对径向运动时,接收器接收的信号频率会不同于声源发出的信号频率,而频率的变化与相对运动速度直接关联。基于这一原理,当载体上的发射换能器向海底斜下方发射声信号时,接收的海底回波频率随载体的速度不同而不同,由接收频率的变化可推算出载体的矢量速度。

这种测速声呐的优点是可在很低的速度下仍有较高的测速精度。其缺点是在要求的海底跟踪深度较大时,须采用较低频率,导致基阵尺寸过大。近年来,已经研制出基于相控阵的多普勒速度计程仪^[8]。这种设备的基阵与常规多普勒计程仪相比要小得多,且其最突出的优点是无需考虑声速补偿。相控阵多普勒计程仪已成为当今多普勒计程仪的主流。

另一种是声相关速度计程仪(Acoustic Correlation Log, ACL)^[9,10]或称相关测速声呐。这种测速声呐的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。

这种测速声呐的主要优点是基阵尺寸较小,甚至在低频率时基阵尺寸也不大。缺点是浅水、低速情况下测速效果一般不佳,误差甚大。

自20世纪70年代市场上就有了第一批声多普勒或声相关测速声呐产品。目前国外已有了不少著名生产公司,如Krupp、Atlas、Thomson、Simrad、Magnavox、Sontech、RDI等公司均有产品。其中RDI公司的多普勒速度计程仪已被包括我国在内的许多国家采购使用。

1.4.3 地形地貌测量

海底地形是指海底深度与地理坐标对应的关系图(或等高线图),海底地貌是指海底表面的细微结构图(类似于照片或图像)。海底地形图通过海底深度测量数据绘制,地貌图则根据海底各点回波强度来获得。

海底地形和地貌的信息对于航海具有重要的意义,海区地形和地貌的测量是航海保证部门艰巨而复杂的任务。近年来提出的水下地形匹配导航新概念,其基本先验信息便是海底地形和地貌。利用这一技术对水下载体进行水下定位导航时,载体上需预先将预定地区的地形地貌信息存入计算机。当载体到达预定海区时,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,然后采用某种算法与先验信息进行搜索比较,从而确定载体的地理位置。

用于海底地形地貌测量的设备有:

1) 单波束回波测深仪(Single Beam Echosounder)

顾名思义,单波束回波测深仪只利用一个声波束。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双程传播时间,根据已知声速得到海底深度。这种设备每一次信号收发只能得到一个点的海底深度,因而测量效率较低。但因其技术相对简单,价格低廉,在许多民用船上仍广泛使用。近年来,为了适应不同海深的测深需要,发展了双频测深仪。在浅水情况下使用较高的频率,而在深水情况则使用较低的频率。

2) 多波束回波测深仪(Multibeam Echosounder)或条带测深仪(Bathymeter)^[11-13]

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。众多的接收波束指向海底不同位置,因而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。显然,采用了多波束后,使海底地形测量效率大为提高。然而由于多波束回波测深技术相对复杂,设备价格昂贵,多用于军用船只。多波束回波测深仪在航道探测、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有十分重要的意义。

图 1.3 是多波束回波测深仪测量数据成图后的海底三维地形图。利用得到的数据还可以制成等高线图。图 1.4 给出了多波束回波测深仪获得的海底地貌图。

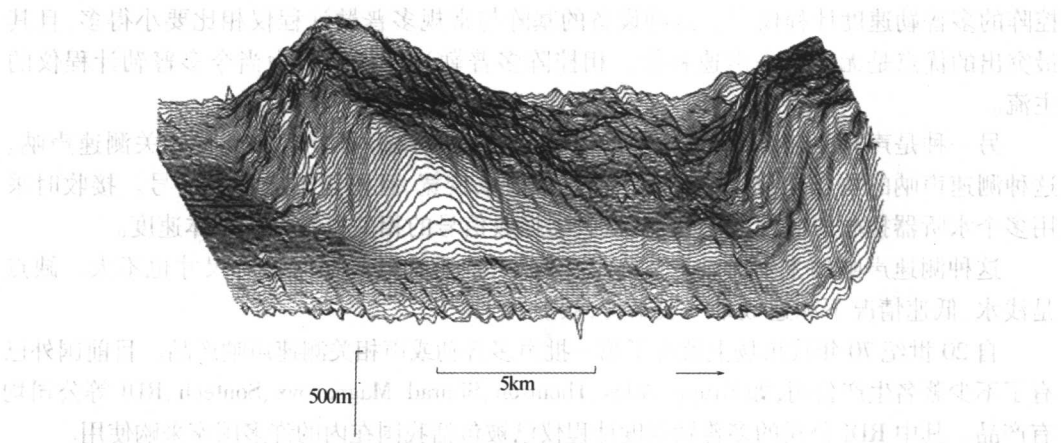


图 1.3 多波束回波测深仪测得的海底三维地形

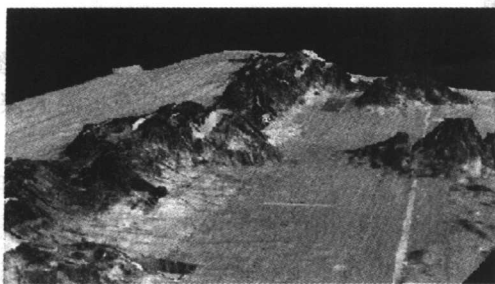


图 1.4 多波束回波测深仪测得的海底地貌

3) 侧扫或旁视声呐(Side Scan Sonar)

侧扫声呐可安装于船壳上也可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。侧扫声呐用于大面积海底成像,也可用于对海底结构、岩石、沉船、障碍物、管线进行定位。由于它提供的是图像,可从图像中提取某些特征,从而实现水下目标识别和海底地质分类。侧扫声呐在海洋开发、环境研究等方面有广泛的应用。军事上也可用来探测沉于海床上的水雷。

图 1.5 为双侧单波束侧扫声呐的海底照射区示意图。图 1.6 给出了某侧扫声呐获得的地貌图,中间暗的部分为该声呐波束未照射区。

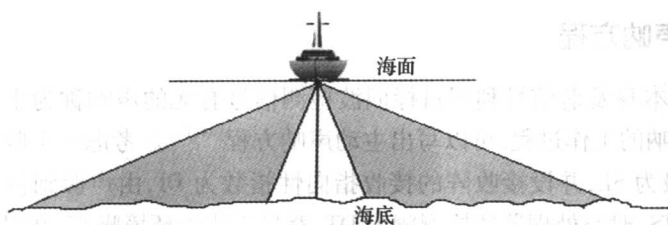


图 1.5 侧扫声呐船两侧照射区

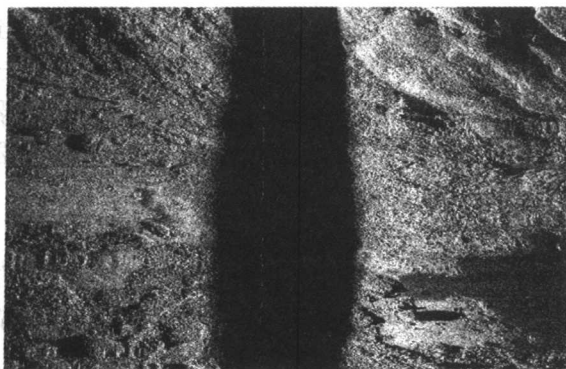


图 1.6 侧扫声呐获得的海底地貌图

4) 综合地形测量设备

综合地形测量设备结合了地貌和地形测量两种功能。一种以多波束测深为主,可以兼顾地貌测量。它的地形测量精度较高,而地貌图像是通过波束内插得到。以船载式为主,在深水情况地貌图像分辨率变差。另一种以地貌测量为主,兼顾地形测量。它采用了近年来发展起来的称为相干声呐的技术。地貌测量与常规侧扫声呐类似,但与其不同之处是沿深度方向布置 2 排或 3 排基阵。在进行地形测量时利用这 2 排或 3 排换能器,通过测量回波的相位差来测量海底相应点的深度。此种设备常为拖曳式,适合用于浅水情况。当用于深水时,可对拖体深度进行调整,让拖体与海底的相对高度基本保持不变,使其始终以一个好的照射扇面照射海底。

1.5 声呐方程及有关参数

海水中的声传播水声中的现象与效应对声呐设计和应用会产生多种影响。工程上将这些影响用声呐参数来度量。声呐方程是将介质、目标和设备的各项参数相互作用联结在一起的关系式。声呐方程的用途之一是对已有的或正在设计的声呐设备进行性能预报。此时,声呐设备的设计性能是已知的或是已假设好的,要求对某些有意义的参数,如检测概率或搜索概率进行估计。

声呐方程的另一用途是进行声呐设计。在这种情况下,所要设计的声呐作用距离是预先规定的,这时要对声呐方程中特定的参数进行求解。这些参数在实际应用中往往不易确定,必须通过反复试算求得最佳的折中结果。本书涉及的水声导航与定位系统也都是声呐。因此,有必要先简要介绍声呐方程中各个参数的含义,以便更好地理解后续各章的内容。