

重力梯度水下探测 与导航

纪 兵 边少锋 金际航 蒋东方 著



科学出版社

重力梯度水下探测与导航

纪 兵 边少锋 金际航 蒋东方 著

本书得到以下项目资助：

国家自然科学基金项目(No. 41374082, 41474061)

军队“2110”三期建设

海军工程大学自然科学基金项目(No. HGDKYJGZX15011)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书提出一种水下利用重力梯度测量探测不同障碍物的新方法,其特点是利用重力梯度仪对近处质量异常(或密度异常)敏感的特性,发现潜器周围的障碍物,为其避碰提供依据,从而保障潜器的水下航行安全。同时结合当前海洋物理场匹配辅助导航的热点问题,分析重力梯度仪外部补偿惯性导航系统的效果,为提高惯性导航系统的精度提供参考。本书的研究拓展了重力梯度仪的应用领域。

本书可作为大地测量、海洋测绘、海洋地球物理等专业的本科生和研究生及从事相关专业的科研人员、工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

重力梯度水下探测与导航 / 纪兵等著. —北京:科学出版社,2016.9

ISBN 978-7-03-049639-3

I. ①重… II. ①纪… III. ①重力梯度-水下探测 IV. ①P223②U675.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 201419 号

责任编辑:张艳芬 纪四稳 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝 正

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

2016 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 10 月第一次印刷 印张:8 3/4 彩插:2

字数:166 000

定价:70.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着现代材料技术、超导技术、信号处理技术、激光技术、冷原子技术等的发展,以及加工工艺技术水平的不断提高、计算机技术的广泛应用,重力梯度仪的研制得到了长足的发展,而重力梯度仪独特的优势使其在许多领域都具有广阔的应用前景,本书就其在水下导航与探测方面的应用展开探索性的研究。由于重力梯度仪在观测过程中是被动地接收采集外界信号,不用向外发射信号,因此对隐蔽性要求很高的潜艇等水下武器平台具有天然的优势,可以实现无源、全天候、长航时的探测和导航保障,具有极佳的军事应用价值。本书开展的研究拓展了重力梯度仪的应用领域,对相关领域的应用也具有一定的借鉴意义。

本书共7章。第1章为绪论,阐述重力梯度仪的发展历史、应用需求、研究背景,以及国内外在导航探测方面的研究现状。第2章介绍重力梯度的基础知识,剖析重力梯度测量的地球物理机制,深入研究不同规则形体产生重力梯度在空间的分布规律与特性,分析重力梯度的9个分量在空间的分布特性,为本书后续的研究奠定基础。第3章介绍重力梯度仪的结构与测量原理,重点分析旋转加速度计重力梯度仪、超导重力梯度仪及原子干涉重力梯度仪的结构、测量原理、误差源,对各种重力梯度仪的测量方式、特点进行分析,为相关部门的设备选型提供参考。第4章阐述重力梯度反演的知识,针对当前缺乏重力梯度实测数据的现状,研究利用目前已经积累的较高精度和分辨率的海底地形数据、重力异常数据和垂线偏差数据进行重力梯度反演的算法,从而构建必要的重力梯度背景场数据。对反演过程中涉及的平面积分、球面积分和梯形积分等不同方法进行分析,重点针对计算过程中涉及的奇异问题,研究利用非奇异变换来解决这类问题的方法,并进行非奇异变换之后计算精度的分析。第5章研究重力梯度仪外部补偿惯性导航系统,分析重力梯度仪外部补偿惯性导航系统的原理、方法及相应的数学模型。重力梯度仪在观测时可以消除载体运动加速度的影响,而不像重力仪那样无法区分重力加速度和载体运动加速度,因此可以为惯性导航系统提供较纯净的重力场信息,从而提高导航计算的精度。仿真分析有无重力梯度仪外部补偿情况下的惯性导航系统的位置和速度误差。第6章提出并分析基于重力梯度观测的水下目标探测技术。针对潜

艇在水下运行状态的多样性,分析在潜艇上搭载重力梯度观测系统对水下海底凸起地形等固定障碍物的探测、潜艇在潜航时对与之相同潜深运载体的探测、潜艇在上浮时对水面运载体的探测等不同情形的研究,并依据重力梯度仪的测量分辨率得出不同情形下的探测能力的结论。第7章对本书的工作进行总结与展望。

边少锋制订了本书的写作提纲,并对全书进行了审校;纪兵负责第1、2、4、6、7章的撰写,并对全书进行了统稿;蒋东方负责第3章的撰写;金际航负责第5章的撰写。

在撰写本书过程中,得到了海军工程大学导航工程系各位领导及同事的大力支持和帮助;在与中国科学院测量与地球物理研究所、武汉大学、海军海洋测绘研究所的各位同仁的交流中受到很大启发,为本书的撰写提供了宝贵的思想源泉,在此一并表示衷心的感谢。本书由国家自然科学基金项目(No. 41374082, 41474061)、军队“2110”三期建设和海军工程大学自然科学基金项目(No. HGDKYJGZX15011)资助完成,在此表示诚挚的谢意!

限于作者水平,书中难免存在疏漏或不足之处,恳请读者批评指正,如有意见或建议请发邮件至 jibing1978@126.com,不胜感激。

作 者

2016年6月于武汉

目 录

前言

第 1 章 水下探测和导航的应用需求与研究现状	1
1.1 研究背景	1
1.2 重力梯度在水下导航中的应用研究现状	4
1.2.1 国外研究现状	4
1.2.2 国内研究现状	6
1.3 重力梯度在水下探测中应用研究现状	7
第 2 章 重力梯度的基础知识	10
2.1 引言	10
2.2 重力梯度的地球物理机制分析	10
2.3 规则形体的垂直梯度分析	12
2.3.1 均质半球体的引力梯度	12
2.3.2 质点的空间梯度分布	15
2.3.3 长方体质体重力梯度分布	16
2.4 本章小结	18
第 3 章 重力梯度仪的结构与测量原理	19
3.1 引言	19
3.2 重力梯度仪的发展历程	19
3.3 旋转加速度计重力梯度仪	24
3.3.1 旋转加速度计重力梯度仪的测量原理	24
3.3.2 旋转重力梯度仪的误差分析	25
3.4 超导重力梯度仪	27
3.4.1 超导加速度计测量原理	27
3.4.2 线型结构的超导重力梯度仪及其电路图	29
3.4.3 交叉型超导重力梯度仪	31
3.5 原子干涉重力梯度仪	33

3.5.1	原子干涉测量技术发展概况	33
3.5.2	原子干涉仪及其测量原理	34
3.5.3	原子干涉重力梯度仪	36
3.6	本章小结	38
第4章	重力梯度反演	39
4.1	引言	39
4.2	由重力异常计算重力梯度	39
4.2.1	平面积分	40
4.2.2	球面积分	42
4.2.3	梯形积分	43
4.3	重力异常垂直梯度中央区效应的精密计算	45
4.3.1	重力异常垂直梯度计算公式及其平面近似形式	45
4.3.2	中央区效应的精密计算	47
4.3.3	算例分析	51
4.4	由垂线偏差计算重力梯度	55
4.5	由海底地形数据计算重力梯度	56
4.5.1	基本原理	56
4.5.2	区域数据试算	59
4.6	由地球重力场模型计算重力梯度	62
4.6.1	基于 EGM96 的分析	62
4.6.2	基于 EGM2008 的分析	68
4.7	重力梯度改正	69
4.8	本章小结	72
第5章	重力梯度仪外部补偿惯性导航系统	73
5.1	引言	73
5.2	惯性导航系统	73
5.3	地球重力场对惯性导航系统的影响	75
5.3.1	重力差异对定位的误差分析	75
5.3.2	正常重力对惯性导航系统的影响	76
5.3.3	扰动重力对惯性导航系统的影响	79
5.4	重力梯度仪外部补偿惯性导航系统	79

5.4.1 重力梯度仪外部补偿基本原理	80
5.4.2 重力梯度仪外部补偿数学模型	80
5.4.3 仿真分析	83
5.5 本章小结	88
第6章 基于重力梯度测量的水下目标探测	90
6.1 引言	90
6.2 基于重力梯度探测的基本原理	91
6.3 水下对水面的探测	91
6.3.1 分布在舰艇外壳上的质量产生的重力梯度	92
6.3.2 舰艇下半部分海水质量亏损产生的重力梯度	97
6.3.3 舰艇产生的总的重力垂直梯度	100
6.4 水下对水下的探测	104
6.4.1 模型建立	104
6.4.2 分布在潜艇外壳上的质量产生的重力梯度	105
6.4.3 潜艇内部海水质量亏损产生的重力梯度	109
6.4.4 潜艇产生的总的重力垂直梯度	111
6.5 对水下固定障碍物的探测	113
6.5.1 探测计算过程	113
6.5.2 计算结果的可视化分析	115
6.6 探测中的定位、定向	117
6.7 本章小结	120
第7章 水下探测与导航技术展望	121
参考文献	125
附录 主要符号说明	132
彩图	

第1章 水下探测和导航的应用需求与研究现状

1.1 研究背景

潜艇尤其是核潜艇是重要的战略武器平台,是一个拥有可怕打击力量、可以自由移动、秘而不宣的导弹基地,具有重要的威慑作用,正所谓“君子不战而屈人之兵”。核弹强大的核打击能力在关键时刻可以一招制敌,实现战略打击的目的,正是由于其强大的摧毁能力让人谈“核”色变,同时由于具备隐蔽性、发起攻击的突然性,核潜艇在军事领域备受关注,成为衡量一个国家军事综合实力的重要参考指标,因此现在世界各军事强国都发展或储备自己的核潜艇技术手段。

潜艇在遂行作战、演习的等待阶段从隐蔽性角度出发,需要关闭无线电、主动声呐等通信和探测设备,甚至关闭一些非作战平台设备来降低自身噪声,从而避免被敌方探测到,来达到在合适的时机发起进攻、实现突然袭击的军事效果。

潜艇在水下航行时与陆地上或空中的运载体最大的区别是它完全被海水这一特殊的介质包围,当它处于无线电静默状态时,常规的无线电导航方式由于电磁波信号无法穿透很厚的海水而无法应用,此时一些无源导航探测装备如惯性导航系统、计程仪等可以给出相对于出发点的速度、方位信息,作战人员可以从海图上根据速度和方位推算自己所处的位置;被动声呐可以侦听外界有声源的运动体,即便如此,声呐还会受到不可预测的海上环境的干扰,存在一定的探测盲区等缺陷,但是,除了能得到以上信息^[1,2],潜艇就完全处于“盲视”状态,无法了解自己所处的外部环境,也就很难确定自身的处境、外界是否存在安全威胁等,即便如此,以上提到的导航方式也存在一定的局限性与不足,如常规的水下惯性导航系统(inertial navigation system, INS)由于陀螺漂移误差、加速度计误差、重力场误差和海流海况变化的影响,导航定位误差随航行时间积累^[3,4],单一的惯性导航系统很难在水下隐蔽环境中长时间地提供精确的导航定位信息。在水下续航一定时间后,潜艇惯性导航系统必须借助外部其他系统进行校准或重调,从而不能满足潜航待命的时间要求;相对计程仪则由于水流、潮汐等因素的影响使其推算的精度较低,也无

法满足长航时的精度要求;而海图(无论是电子海图还是纸质海图)都存在更新滞后的问题,而且出于测绘作业规范,以及测绘作业的难度等,有些海域的海底地形地貌在海图上没有显示或者显示的要素不全面,同时还存在某些小尺寸的海底地形地貌会被忽略,这些都给潜艇的水下航行留下了很大的安全隐患。

正是由于以上因素,潜艇水下安全事故频发,而且造成的损失也令人触目惊心,据不完全统计,20 世纪以来,国际上潜艇发生了近 500 起非战时海损事故,直接导致 84 艘潜艇沉没大海,其中核潜艇有 7 艘^[5]。在这些事故中,由于潜艇潜航时触礁、搁浅、触底,潜艇上浮时与水面舰艇、渔船相撞,水下潜艇之间的相撞等碰撞沉没事故占到 20% 以上。图 1.1 为一起典型的海图没有及时更新造成的潜艇水下安全事故后损失惨重的情形,该潜艇为美国洛杉矶级核潜艇“旧金山”号,它于 2005 年 1 月 8 日在从关岛前往澳大利亚布里斯班的途中猛烈地撞上了一座海山。事后调查发现,其原因是潜艇上使用的海图是 1989 年绘制的,1989 年后一直没有进行修改。在这份过时的海图上,出事地点周围没有标示出任何水下礁石山体等主要障碍物,最近的图标也不过是 3mi(1mi=1.609344km)外的变色海水,而且即使是这一标示也是 20 世纪 60 年代日本报告的,已经过时。在老版海图交付使用 10 年后,美军间谍卫星曾经拍摄过一张出事地点周边海域的照片,表明水下发生了地壳运动,产生了海图上没有显示出的水下山脉。但间谍卫星拍摄的海洋照片有数千张,海图绘制部门在更新数据时是否充分参考了这些先进手段,目前还不得而知^[6,7]。

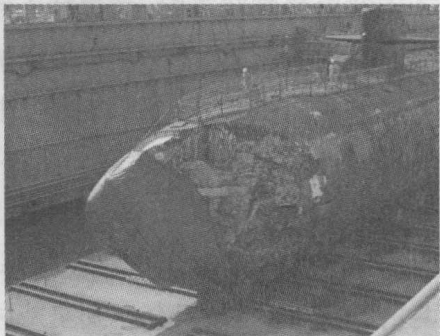


图 1.1 美国洛杉矶级核潜艇在水下撞上海山后的情形
(<http://jczs.sina.com.cn> 2005 年 02 月 17 日 15:03 新浪军事)

以上事例表明,为了潜艇水下航行的安全,需要无源、更灵敏、更准确的探测手段,但是就目前的技术手段来看,没有非常合适的途径,其主要原因是很多探测手段不满足隐蔽性要求。与导航探测手段没有取得很好解决的局面相反,目前随着

潜艇建造技术及国际上各军事强国在潜艇消声降噪技术方面的大力投入,潜艇降噪技术得到了大幅度提高。前法国国防部长莫兰曾说“它们(核潜艇)发出的声响不超过一只虾”,那只是一种形容而已,但现今最先进的核潜艇经过种种降噪减振措施后,在低速巡航时,噪声确实很小,几乎与嘈杂的海洋环境融为一体。

在海洋中,声呐面临的是数百个噪声信号,所以要准确分辨有用信号和删除干扰信号并非易事。数据显示,美国海军潜艇的自噪声甚至达到了 90dB 左右,几乎接近海洋背景噪声,利用常规的探测技术已经很难探测到即使是近在咫尺的潜艇,而英、法等国的潜艇在降噪方面也都达到了很高的水平,这也是发生在 2009 年 2 月 3 日比斯开湾的骇人听闻的法国“凯旋”号核潜艇与英国皇家海军“前卫”号核潜艇在水下碰撞事件(图 1.2)的重要原因。当时两艘都搭载有核武器的核潜艇在低速巡航时发生碰撞,导致“凯旋”号受损严重,声呐几乎被全部撞毁,用了 3 天时间才返回法国西北海岸的布雷斯特海军基地,而英国皇家海军“前卫”号的壳体被撞出了凹陷并被刮出很多痕迹需做全面修复,所幸的是没有人员伤亡,潜艇上搭载的核弹头安然无恙,也没有发生核泄漏现象^[8],没有对海洋局部生态环境造成伤害。

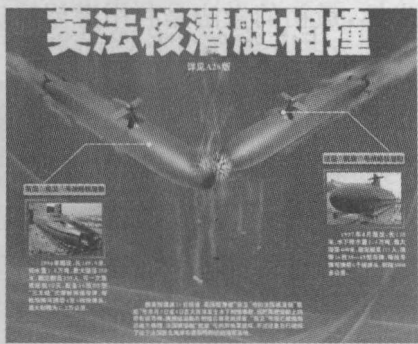


图 1.2 英、法核潜艇在水下发生碰撞

(<http://news.163.com/special/000136LF/subscollision0217.html>)

以上现象凸显出水下安全航行对潜艇这一特殊武器平台的重要性,结合军事应用隐蔽性的需求,需要一种更有效、无源、高精度、长航时、全天候、连续保障载体航行安全的导航、探测手段。正因为如此,国内外都在积极寻求新的导航探测手段,或者在现有装备的基础上探索增添辅助手段来提高其精度或延长精度保持的周期,这也是目前国内外开展利用较稳定的海洋重力场、海底地形、海洋磁场等海洋物理场进行匹配辅助惯性导航系统的背景。而水下探测技术从潜艇诞生之后就如影相伴地同步发展,但是其发展速度已经不足以匹配潜艇在隔音降噪等方面快

速发展的水平,因此也促使人类借助科学技术的发展来寻求更好的方式来探测噪声水平不断降低的潜艇。

1.2 重力梯度在水下导航中的应用研究现状

1.2.1 国外研究现状

第二次世界大战后,美国和苏联相继集中力量重点发展了战略导弹核潜艇。从美国 1959 年建成第一艘弹道导弹核潜艇到目前核潜艇已发展到第三代,即北极星、海神和三叉戟。随着战略核潜艇技术的不断发展和变化,潜艇导航技术也已经历了 50 多年的发展过程。舰船惯性导航系统是北极星、海神和三叉戟战略武器系统的重要组成部分。1960 年,奥特蔡蒂克斯分公司(现在属于波音公司)制造的 MK2 舰船惯性导航系统(SINS)最初安装在北极星潜艇上,至 1974 年 MK2 系统经过了几次改进,明显提高了精度,也延长了重调间隔时间^[9],但是为了限定惯性误差,经常需要外部位置坐标,最初的做法是利用潜望镜进行天文观测来提供这些信息。

从 1960 年北极星潜艇开始,出现了不同类型的无线电辅助导航系统,包括 LORAN-C、子午仪导航系统及现在的 GNSS(包括 GPS、GLONASS、GALILEO 和 BDS 及其他差分增强系统)。这些无线电导航系统提供了较高精度的导航信息,但是需要潜艇天线露出水面,从而增加了被探测到的风险。如果不进行位置重调,任何惯性导航系统的误差都会随时间积累而增大,直至误差超过限定的阈值,因而续航时间长短代表惯性导航系统的质量等级,决定着导航系统需要外部定位信息的频数。

1974 年,静电陀螺监控器(ESGM)作为一个“监控器”用在舰船惯性导航系统中。由于静电陀螺监控器改善了长期稳定性,因此静电陀螺技术使战略潜艇导航向前迈进了一大步。静电陀螺监控器辅助的舰船惯性导航系统仍需要外部定位信息,但其续航时间比舰船惯性导航系统本身大大提高。目前,三叉戟 I 型仍采用静电陀螺监控器配置形式。20 世纪 80 年代,三叉戟 II 型研制成功,极大地改善了战略武器系统的精度。其不再使用舰船惯性导航系统,而是将静电陀螺监控器进行重新配置作为主导航仪,并重新命名为静电陀螺导航仪(ESGN)。同时还采用了下述三种技术来改善导航精度:

(1) 编绘精确重力图。联合重力仪海上测量和卫星雷达高度计观测数据编绘出海洋垂线偏差图(垂线偏差是对惯性导航系统误差影响最大的重力分量,可用于减少舒拉速度误差)。重力异常和大地高度图是海洋测绘和卫星数据的副产品。

(2) 在潜艇上安装重力敏感器系统(GSS)。重力敏感器系统为常平架式平台,平台上装有三个重力梯度仪(GGI)和两个重力仪,这种在运动平台上精确地实时测量重力异常和重力梯度是重力测量技术上巨大的成就。对于三叉戟 II 型,重力敏感器系统的目的是提供垂线偏差的实时估计,以补偿惯性导航系统的误差。

(3) 安装测速声呐即导航声呐系统(NSS)。导航声呐系统通过水听器阵从海底反射回的相关延时波来提供改善的潜艇速度数据。

最初应用重力梯度仪、重力仪获取海洋重力场信息的目的有两个: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,美国贝尔实验室研制出重力敏感器系统,并于 1983 年在海上成功地进行了演示,后来将其部署在美国海军的三叉戟潜艇上(图 1.3)。同期开展研究的还有利用测量船进行海洋重力测量和利用卫星测高资料反演海洋地区垂线偏差和重力异常的研究,主要以美国海洋研究所的 Sandwell 为主。

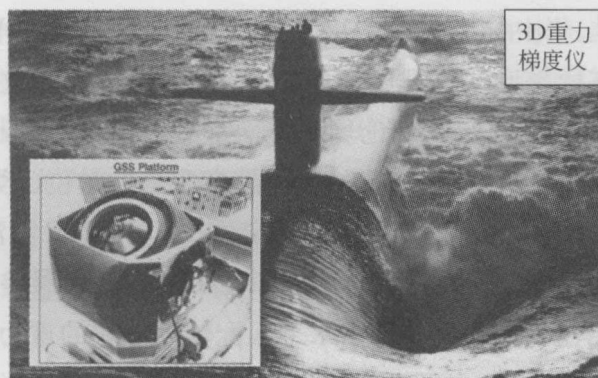


图 1.3 重力测量敏感器应用于美国潜艇水下导航

20 世纪 90 年代初,利用重力图形匹配技术改善惯性导航系统性能的新概念被提出。美国贝尔实验室、洛克希德·马丁(Lockheed Martin)公司等机构对重力图形匹配技术开展了专项研究,并取得了预期成果。贝尔实验室研发了重力梯度仪导航系统(GGNS)^[10]和重力辅助惯性导航系统(GAINS)^[11]。重力梯度仪导航系统通过将重力梯度仪测出的重力梯度与重力梯度图进行匹配后得到定位信息,对惯性导航系统进行校正。重力梯度仪导航系统中的重力梯度图形匹配是三维空

间处理过程。重力辅助惯性导航系统利用重力敏感器系统、静电陀螺导航仪、重力图和深度探测仪,通过与重力图匹配提供位置坐标,以无源方式实现减少和限定惯性误差。洛克希德·马丁公司研制的通用重力模块(UGM)包括两种重力传感器:一个重力仪和三个重力梯度仪。通用重力模块利用重力仪和重力梯度仪的测量数据可实现两种功能:一是重力无源导航;二是地形估计,即估计载体附近的地形变化。美国海军于1998年和1999年分别在水面舰船和潜艇上对通用重力模块进行了演示验证。演示时使用的重力图数据来源于卫星数据和船测数据。实验数据表明,采用重力图形匹配技术,可将导航系统的经度误差和纬度误差降低至导航系统标称误差的10%^[12,13]。

1.2.2 国内研究现状

国内在利用重力梯度仪服务于水下导航方面开展了一定的研究工作,尤其是在利用重力异常、重力梯度等海洋物理场进行匹配辅助惯性导航系统的研究方面进行了理论上的准备工作,取得了一些有益的研究成果,但是在重力梯度仪外部补偿惯性导航系统方面的工作开展得较少。

目前,国内开展海洋物理场匹配辅助导航研究的单位主要有北京大学、武汉大学、哈尔滨工程大学、华中科技大学、东南大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学、中国科学院测量与地球物理研究所、海军工程大学和解放军信息工程大学等,科研院校结合自身的优势,在理论创新方面都有所建树,呈现出欣欣向荣的局面,培养了许多博士和硕士研究生,撰写了一批高质量的学位、学术论文。哈尔滨工程大学的刘承香博士研究了地形匹配辅助定位技术,对ICP算法、数字地图的获取、匹配单元的形成、导航系统的容错、地形匹配的可靠性和误差等方面进行了研究^[14];该校的成怡博士专门研究了用于水下匹配辅助导航的重力背景场数据的融合技术,并探讨了ICCP算法在融合重力图上的应用^[15];中国科学院测量与地球物理研究所的王虎彪博士研究了基于重力和重力梯度的水下导航技术,对匹配导航涉及的导航基础数据库的建立、ICCP和TERCOM匹配算法、可导航性与线路设计等内容进行了研究,并基于某海洋科考队在进行海洋重力测量科考任务时实测的重力资料进行了匹配仿真实验,验证了重力异常匹配辅助导航的可行性和有效性^[16];海军工程大学的郑彤博士探讨了水下地形匹配辅助导航技术的关键技术,重点研究了利用多波束测深系统获取海底地形的数据处理技术与数字成图技术^[17];王志刚博士讨论了重力匹配辅助导航中局部地球重力场建模、匹配算法、误

差分析和可匹配区划分等关键技术^[18];该校的吴太旗博士研究了重力基准图的生成技术、水下实测重力数据的归算与误差修正、匹配算法,并构建了辅助导航的仿真平台^[19]。

以上是目前国内各科研院所在利用海洋地球物理场进行匹配辅助导航方面开展的工作,已经取得了一些有意义的研究成果,许多学者对各种辅助惯性导航系统的匹配算法进行了改进与完善,虽然仿真实验在一定阶段可以对重力匹配辅助导航算法进行检验与完善,但仿真分析毕竟只是停留在理论研究阶段,考虑的外界因素相对简单化、理想化,因而仿真的结果缺乏足够的说服力。尤其是国内目前尚没有重力梯度仪的现状,限制了研究的深入开展,从现有的资料和报道来看,国内尚没有单位开展过海上水面或水下匹配辅助惯性导航系统实验。

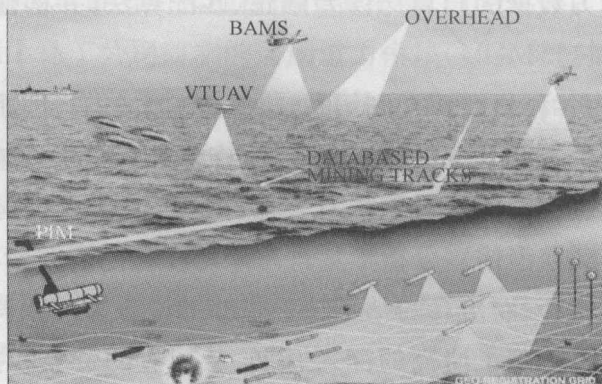
总体而言,国内在利用海洋物理场辅助水下导航方面相较于国外尚有一定的差距。原因是:一方面由于国内起步较晚,同时以美国为首的西方国家对该技术进行严密的封锁,因此目前国内开展该方面的研究都是在摸索中前进;另一方面是硬件条件基础较差,在重力仪研制尤其是重力梯度仪方面较西方国家落后得多,因此缺乏开展实验所需的硬件条件。即便如此,国内在基础研究方面仍取得了一定的成绩,为匹配辅助惯性导航系统的工程化应用奠定了坚实的基础。

从上述国内外的应用研究现状可以看出,重力梯度在水下匹配辅助惯性导航方面具有举足轻重的地位与作用,国外已经开展过海上系列验证性实验,验证了方案的可行性,并得到工程化的应用,在军事领域已发挥了效益;而国内在该领域还处于理论研究阶段,尚有许多基础工作需要完善。

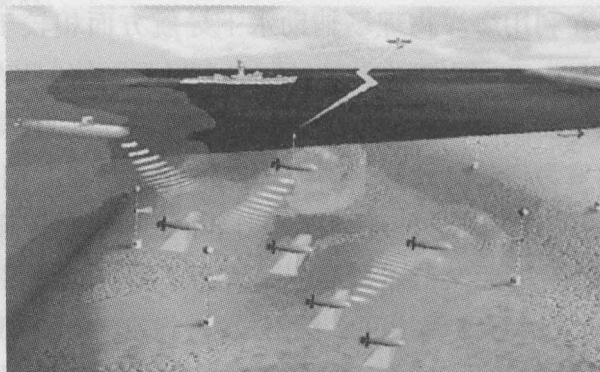
1.3 重力梯度在水下探测中应用研究现状

与水下导航一样,水下探测技术也是决定潜艇水下安全航行的另一个重要因素,从潜艇诞生之时,探测与反探测技术就在相互促进、互补中不断完善发展,而且随着科学技术的发展,又催生了许多新的探测途径。其中,随着无人水下航行器(UUV)在军事方面应用中优势的不断凸显,其发展受到越来越多国家的重视,而其涉及的相关技术也受到很大的关注,得到了长足的发展^[20~24]。单忠伟等^[25]在分析和总结国际上基于无人水下航行器的水下警戒探测技术(图 1.4)的基础上,展望了其发展前景,并对我国开展相关的研究提出了建设性的建议。但是,以上涉及的探测技术中其信号的传播媒介都是基于声信号,属于有源的技术手段,在对敌方探测的

同时会暴露自身的位置,因此这些技术都不能满足军事应用隐蔽性的要求。



(a) 水下探测系统示意图1



(b) 水下探测系统示意图2

图 1.4 无人水下航行器协同探测系统示意图

李汉清等^[26]分析和总结了美国正在发展的水下探测技术,包括先进可展开系统(advanced deployable system, ADS)、商用现成技术固定式分布系统(fixed distributed system-COTS, FDS-C)、商用声学流行技术快速嵌入计划(acoustic rapid COTS insertion, A-RCI)、潜艇拖曳阵系统(TB-29A)和无人水下航行器。

先进可展开系统的局限性在于只能短期使用,用于探测、定位并报告在浅水近岸环境中的安静型常规潜艇或核潜艇,该系统为了组成监听阵需要大面积地布放传感器,而且分析处理组件需要通过电缆与水下组件相连,这在布设上存在一定难度并需要较高成本,但是其工作特点是具有隐蔽性。其他几个系统,即商用现成技术固定式分布系统、商用声学流行技术快速嵌入计划和潜艇拖曳阵系统,从名称上可以看出它们是商用和民用的技术,而军方则直接将其应用到军事领域,该方法虽然具有投资少、见效快的特点,但是由于民用、商用不考虑隐蔽性的要求,存在有源

信号的发送,因此在直接服务军事应用时是一个很大的缺陷。

与以上所述的探测类型有所区别,本书讨论的水下探测只关注对潜艇自身周围环境的探测,而且一般是针对单一潜艇对外界的探测,这也是本书在相关项目的支持下,从研究过程中受启发而提出的基于重力梯度测量对外界环境探测的技术途径。从目前来看尚没有相应的资料报道,这是国内首次提出的,对未来重力梯度仪在水下安全航行方面的应用具有很好的借鉴意义。