



引文格式:黄谟涛,欧阳永忠,边少锋,等.美俄水下重力辅助惯性导航技术发展分析与思考[J].武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(11):1977-1991.DOI:10.13203/j.whugis20240228

Citation: HUANG Motao, OUYANG Yongzhong, BIAN Shaofeng, et al. Analysis and Reflections on the Development of Underwater Gravity-Aided Inertial Navigation Technology in the United States and Russia[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(11):1977-1991. DOI:10.13203/j.whugis20240228

美俄水下重力辅助惯性导航技术发展 分析与思考

黄谟涛^{1,2,3,4} 欧阳永忠^{1,2,3,4} 边少锋⁵ 李姗姗⁶ 李明叁^{1,4}
陆秀平^{1,3,4} 王伟平³ 董超³ 汤民强³ 洪黎丹^{1,3,4} 侯广超^{1,3,4}

1 福建理工大学智慧海洋科学技术学院,福建 福州,350118

2 中国船舶航海保障技术实验室,天津,300131

3 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室,广东 广州,510300

4 海洋智能装备福建省高校重点实验室,福建 福州,350118

5 海军工程大学电气工程学院,湖北 武汉,430033

6 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

摘要:中国水下重力辅助惯性导航技术发展正处于关键期,面临诸多困难和挑战,既有研究思路上的认知问题,又有核心技术上的“卡脖子”难题,需要人们集中智慧、创新思维,寻找破解这些难题的办法。首先将重力辅助导航技术的内涵明确定义为重力补偿和重力修正两类辅助导航技术的统称,分析评述了美俄两国在这个研究领域的发展方略、规划布局、发展思路、研发路径、创新成果、测试应用及一些值得关注的发展动向,总结归纳了两国研发历程不同阶段的技术特征和成功经验,对照分析了中国研究进程与两国的差异和差距,依据中国国情提出了5个方面的对策和建议,涉及研究思路、研发重点和优先事项安排等方向性议题,旨在抛砖引玉、深入交流、达成共识,为决策部门部署下一步工作提供参考。

关键词:水下重力辅助惯性导航技术;重力补偿;重力修正;分析评述;对策建议

中图分类号:P229

文献标识码:A

收稿日期:2024-06-21

DOI:10.13203/j.whugis20240228

文章编号:1671-8860(2024)11-1977-15

Analysis and Reflections on the Development of Underwater Gravity-Aided Inertial Navigation Technology in the United States and Russia

HUANG Motao^{1,2,3,4} OUYANG Yongzhong^{1,2,3,4} BIAN Shaofeng⁵ LI Shanshan⁶
LI Mingsan^{1,4} LU Xiuping^{1,3,4} WANG Weiping³ DONG Chao³ TANG Minqiang³
HONG Lidan^{1,3,4} HOU Guangchao^{1,3,4}

1 School of Smart Marine Science and Technology, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China

2 Laboratory of Science and Technology on Marine Navigation and Control, China State Shipbuilding Corporation, Tianjin 300131, China

3 Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China

4 Key Laboratory of Marine Intelligent Equipment in Fujian Province, Fuzhou 350118, China

5 School of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

6 School of Survey and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Objectives: The development of underwater gravity-aided inertial navigation technology in China is coming to a critical period and faces many difficulties and challenges. There are both cognitive problems in research ideas and “stuck neck” problems in key technologies, which require us to concentrate

基金项目:国家自然科学基金(42174013,42274015);中国船舶航海保障技术实验室开放基金(2024010201);自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室开放基金(MESTA-2023-A002)。

第一作者:黄谟涛,教授,主要从事海洋重力场理论方法及应用技术研究。Huangmt@163.com

通讯作者:欧阳永忠,博士,教授。562273857@qq.com

our wisdom and make creative thinking, and to find ways to solve these problems. **Methods:** First, we clearly define the connotation of gravity-aided navigation technology as the general term for two types of the aided navigation technologies: gravity compensation and gravity correction. Second, we analyze and review the development strategies, planning layout, development ideas, research and development paths, innovation results, test applications and some development trends worthy of attention in this research field in the United States and Russia, summarize the technical characteristics and successful experiences at different stages of the research and development process of the two countries. **Results:** The characteristics of technological development in the United States include: (1) The demand for gravity compensation has been leading the development of gravity data modelling technology. (2) The demand for gravity compensation has been leading the development of gravity equipment technology. (3) The progress of gravity equipment technology has been promoting the development of gravity correction technology. The technological development characteristics in Russia include: (1) The military requirement has been dominating the development of sea and air gravity equipment technology. (2) The special attention has been paid to the researches on the correction algorithms of inertial navigation system parameter using gravity information. Finally, we comparatively analyze the differences and gaps research process between China and the two countries, and put forward five aspects of countermeasure and suggestion based on China's national conditions, involving directional issues such as research ideas, development focus, and priority arrangements. **Conclusions:** The purpose is to attract ideas, exchange in-depth, reach consensus, and provide reference for decision-making departments to deploy the next work. Our specific countermeasures and suggestions are: (1) Give priority to the first task of gravity compensation. (2) Urgently promote detail gravity measurements in the key sea areas and gravimeter development for polar region. (3) Focus on the development of nonlinear filtering technology and filtering algorithms for gravity correction. (4) Give priority to the development of practical software-based gravity-aided inertial navigation systems. (5) Strengthen the requirement demonstration and top-level design for gravity-aided inertial navigation.

Key words: underwater gravity-aided inertial navigation technology; gravity compensation; gravity correction; analysis and review; countermeasure and suggestion

水下高精度导航定位一直是世界性技术难题,对于既有高精度和隐蔽性要求,又有长航时需求的水下载体,其面临的导航定位技术挑战更加巨大,大型作战潜器便是此类水下载体的典型代表^[1]。潜艇是一个国家海上作战力量支撑平台的重要组成部分,具有极高的军事战略价值。美国和俄罗斯两大军事大国一直都非常重视潜艇特别是核潜艇作战力量建设,不惜投入巨资开发新型潜艇作战平台及配套的高端武器系统。为了适应海上多样化和灵活性作战需求,刚进入21世纪,美军就着手对三叉戟战略核潜艇进行战术性改造,使其成为既能发射战略导弹,又能发射战术导弹及小型输送系统的综合作战平台,美军新一代攻击型核潜艇也设计为能够携带弹道导弹、巡航导弹、鱼雷、水雷、水下无人运载工具等各类武器系统的新型作战平台^[2]。俄罗斯早在20世纪末就宣布,要用15~20年的时间将海上战略核力量提升到国家三位一体核力量的第一位,将海军在国家战略力量中的比重从原来的30%

提升到50%^[3]。但需要指出的是,要想充分发挥潜艇作战的独特优势,必须首先解决潜艇水下精确导航定位问题,这是确保潜艇巡航隐蔽性的第一要件,事关潜艇自身的生存能力。惯性导航系统(inertial navigation system, INS)一直是潜艇水下导航的核心装备,估计在未来可预见的很长一段时间内,INS仍将是水下平台导航的必备装备。INS的关键器件是惯性陀螺仪,其性能优劣直接决定导航系统的精准度和可靠性。为了保障潜艇特别是核潜艇的作战能力,美国和俄罗斯都不惜成本开发创新惯性导航技术,在惯性敏感器方面,先后推出了液浮陀螺仪、静电陀螺仪、环形激光陀螺仪、光纤陀螺仪、半球谐振陀螺仪、音叉陀螺仪和超导陀螺仪等多型高精度产品^[2-3],确保两国海军的水下综合作战能力始终保持世界领先水平。但即使如此,当今的INS仍达不到全面解决水下导航问题的特殊要求,这主要源于INS存在固有的缺陷,即INS的定位误差随航行时间增长而积累,这是由陀螺仪固有的漂移特性(由于

扰力矩和角度随机游走等各种不确定性因素引起)所决定的。这一缺陷迫使潜艇在水下航行一段时间以后不得不上浮到海面,寻求天文、陆基无线电、全球导航卫星系统等暴露性定位手段对其进行位置校正。确保隐蔽性是保障潜艇生存力和攻击力的第一要务,因此所有需要潜艇浮出海面的导航校正手段都是不可接受的,至少是不完备的,即使不浮出水面而只是在水下接收和发射信号的行为,也会对潜艇安全带来致命性危险。美海军在 20 世纪 70 年代就提出,要让战略核潜艇最终实现“码头到码头”水下自主无源导航^[1,4]。为此,美军先后开发了多种辅助 INS 的水下自主导航技术,包括声学导航、地形导航、地磁导航和重力导航技术,由于声学 and 地形导航都需要向外部发射或接收信号,属于有源导航模式,地磁导航适用环境又过于苛刻,故前面 3 种导航手段在应用上均受到较大的限制,只有重力辅助导航可完全满足水下导航的隐蔽性需求,无须向外部发射或接收信号,是一种名副其实的完全自主无源重力/惯性组合导航系统,能够满足核潜艇长期隐蔽航行的导航要求,因此其军事意义非常重大。

实际上,美军早在 20 世纪 50 年代末就已经开启重力辅助惯性导航技术研究,只不过当时的研究目标主要聚焦于如何实现 INS 力学编排中的扰动重力矢量参数(特别是垂线偏差)精确补偿,以减弱 INS 的舒勒振荡误差影响。此后,随着重力传感器技术的快速发展和重力场信息的不断积累,重力辅助惯性导航的技术内涵才得以持续扩展。根据重力场信息利用方式及应用场景的不同,重力辅助惯性导航技术可划分为重力补偿和重力修正两个发展阶段。国内大部分文献更愿意将后者称为重力匹配导航技术或干脆将重力辅助惯性导航技术简称为重力匹配导航技术,考虑到匹配导航只反映重力辅助导航算法(即相关性算法)的一个方面,为避免误解,并统一重力辅助惯性导航技术的内涵,笔者强烈建议将在重力补偿技术基础上发展起来的重力辅助惯性导航技术称为重力修正技术。两者的具体含义可表述为:重力补偿技术是指在 INS 框架内,也就是在惯性导航解算回路中直接加入扰动重力(垂线偏差)信息以改善 INS 力学编排,达到抑制惯性导航误差增长的目的;重力修正技术是指单独或联合利用海洋重力场实时观测信息和重力背景场数据,通过相关性

算法或实时滤波算法,对 INS 随时间积累的定位误差进行间断性或连续性修正,并对 INS 参数进行校准(相当于对 INS 进行在线标定)。重力补偿技术实现过程比较简单,补偿效果可立竿见影,但在舒拉回路中完成的重力补偿只能减弱惯性导航误差的振荡幅度及位置误差累积速度,进而抑制误差发散趋势,并不能消除由 INS 初始对准和惯性器件零偏、漂移及观测噪声引起的累积误差和周期性振荡;重力修正技术则不受这样的限制,它可消除由 INS 内部各类干扰源引起的位置误差、速度误差和姿态误差。因此,精密的重力修正技术才是解决重力辅助惯性导航问题的全面性和终极性方案。

重力辅助惯性导航主要涉及重力传感器研制、重力背景场模型构建及辅助导航算法等三大核心技术。国际上关于重力辅助惯性导航技术的研究已经有超过 60 年的历史,可见它并非新的热点问题,而是水下精密导航领域有待持续攻关突破的重大关键瓶颈问题。近 20 多年,该技术受到国内学者的高度重视,是因为随着重力传感器技术特别是重力梯度仪制造技术的发展进步,为重力辅助惯性导航研究提供了源动力和新机遇。从 20 世纪 80 年代初至 90 年代中期,美军用 15 年左右的时间实现了战略核潜艇完全自主高精度无源重力辅助惯性导航^[2,5]。美军发展的成功经验和成就极大鼓舞了中国学者对重力辅助惯性导航技术研究的热情和投入,从 20 世纪 90 年代末开始,中国投入大量的人力和物力开展海洋重力传感器和重力辅助惯性导航算法研究,取得了一系列创新性研究成果,海空重力仪研制已经取得实质性突破^[6],海空重力梯度仪研制也取得新进展,重力辅助惯性导航算法研究成果更为显著^[7],特别是在相关性分析匹配算法研究方面,近十几年中国学者发表的相关研究论文数量在世界上的占比粗略估算应该超过 70%,博士论文就有近 20 篇^[8-10]。这样的成绩可喜可贺,但笔者也注意到,中国学者研究成果的转化应用程度还比较低,绝大部分成果还处于理论分析和仿真试验阶段,距离实际应用需求还有很长的路程,与美国和俄罗斯等发达国家的先进研究水平相比,仍存在较大的差距,需要特别关注的是,中国学者在研究开发技术路径上也可能存在一定的偏差,值得认真思考和系统分析。

1 美国水下重力辅助惯性导航技术发展分析

1.1 重力补偿需求牵引重力数据建模技术发展

美军在20世纪50年代就明确将保障战略核潜艇高精度导航定位和潜基战略武器精准发射作为海洋重力场信息需要突破的两大军事应用方向,并将其列入重大军事技术清单。两大应用方向均涉及惯性导航和制导系统的重力补偿问题,都需要全海域重力数据建模技术的支撑。为此,美军于1957年开始启动“全球重力测量”项目计划,统筹各方资源,采用各种技术手段在全球海域开展重力场探测、信息搜集和数据建模工作,历时超过50年,至2007年因卫星测高重力技术取得重大突破,重力数据覆盖状况得到明显改善,美军才对外宣布结束该计划的相关工作任务,并宣称该计划取得了巨大成功,为提升美军水下作战能力作出了重大贡献。如前所述,地球重力场信息主要通过INS的力学编排方程直接影响导航解的精度。因INS传感器观测到的加速度是包含惯性加速度和地球重力加速度的合成加速度,故要想获得精确的惯性导航解,必须对INS的力学编排方程进行垂线偏差补偿^[20]。随着卫星重力和重力观测技术的发展进步及全球重力数据的不断精化和积累,重力补偿技术大致经历了基于重力统计函数模型的理论研究阶段、基于重力确定性函数模型与数据模型的应用研究阶段及基于重力梯度仪实时输出信息的高级发展阶段。20世纪60年代末,尽管当时的INS器件的测量精度水平还很低,以Nash、Levine和Jordan等为代表的一批美国学者就已经开始关注重力垂线偏差参数对惯性导航定位精度的影响与补偿问题^[21-24],并陆续通过建立重力统计函数模型和卡尔曼滤波方法,开展重力垂线偏差对船用和地面INS的影响特性研究,先后提出了包括一阶至三阶马尔可夫模型、弱白噪声模型等在内的十余种统计模型,并将其应用于不同运动轨迹及运行环境下的INS误差影响分析与补偿效果评估,获得了一些当时具有指导和引领未来发展作用的研究结论^[25-26]。美国学者同样主导了重力补偿技术发展的第二阶段研究,他们最早提出将全球重力位球谐函数模型用于INS的重力补偿方法^[27];20世纪80年代,随着卫星测高重力技术的发展和海面船测重力数据的积累,海域垂线偏差观测信息的分辨率、精准度和覆盖率得到空前

提高,为惯性导航重力补偿技术提供了坚实的数据基础。美国在该领域具有明显的技术优势,美国学者据此提出了利用实测数据模型对INS重力误差进行在线估计和垂线偏差实时补偿的技术方法,并成功将其应用于水下INS精度提升项目实践^[28-29]。这些持续不断的基础性和应用性研究工作始终得到美国军方的支持,对提升美军INS的技术性能发挥了重要作用。从上述研究历程可以看出,INS的重力补偿需求持续牵引垂线偏差参数建模从最初的统计模型发展到确定性的球谐函数模型,再到高精度、高分辨率的网格数值模型,现代航天技术的发展进步又助推了垂线偏差参数建模的创新和应用,美军则是及时抓住了现代科学技术取得重大突破的机会,同时很好地利用了学术界和科研领域的研究成果,很快将其转换为提升军事装备作战效能的助推器。

1.2 重力补偿需求牵引重力观测装备技术发展

如前所述,惯性导航重力补偿需要重力垂线偏差数据模型做支撑,垂线偏差参数既可以采用传统的天文大地测量方法和现代的卫星测高法及重力梯度测量法进行直接观测获得,也可以将重力异常作为输入,通过维宁·曼尼斯公式间接计算得到,一般称后者为重力测量法。在开展重力补偿技术研究初期,主要采用重力测量法进行垂线偏差参数建模,获取全球海域重力异常信息就成为当时突破重力补偿技术研究和应用的核心任务,正是这样的需求牵引了海洋重力观测装备的快速发展。首先是海面动态相对重力测量装备的发展,美国在该领域无论是军方还是民方都具有坚实的技术基础,在商业应用领域,美国LaCoste&Romberg公司(现改名为Micro-g公司)在20世纪50年代中期,就通过改进其生产的助动金属零长弹簧型陆地重力仪,制造出第一代被命名为L&R系列的摆杆型海洋动态相对重力仪。20世纪60年代以后,随着海洋资源开发和军事应用需求的增加,海洋重力仪研制步伐加快,LaCoste&Romberg公司及时对其生产的L&R摆杆型海洋重力仪进行了全面改造,包括用陀螺稳定平台代替常平架、优化光学读数装置、增加交叉耦合效应计算单元等^[30]。20世纪90年代,LaCoste&Romberg公司对L&R型重力仪的升级更新速度更是前所未有的,技术上从前期的用陀螺稳定平台替代常平架到中期的用电容读数装置替代光学读数,用全数字控制系统替代模拟系统,再到近期的用电磁力反馈替代步进电机精密

螺杆,重力仪型号也从原先的 L&R 常平架型发展为 S 型、Air/Sea 型、TAGS 型、TAGS-6/MGS-6 型、SIII 等多种型号^[6]。在军工领域,一直得到美军方支持的贝尔航空公司于 20 世纪 60 年代也加入海洋重力仪的研究行列,80 年代该公司推出 BGM-3 型重力仪,90 年代将 BGM-3 升级为 BGM-5。L&R 和 BGM 两型重力仪在美军获取全球海空重力场信息项目计划中发挥了重要作用,目前仍然是美军水下重力辅助惯性导航组合系统的核心装备。

重力补偿技术发展的高级阶段是直接采用垂线偏差的实时观测信息对 INS 的力学编排方程进行在线补偿,正是这样的军事需求极大地推动了美国重力梯度测量装备技术的发展。利用重力梯度测量方法确定垂线偏差参数的技术基础,是能够测量重力位二阶导数张量所有分量的全张量重力梯度仪。实际上,这类测量仪器研制历史已经历了一个多世纪的时间,重力梯度仪概念最初由匈牙利物理学家 Eötvös 提出,并于 19 世纪末成功研制出第一台用于静止测定地球重力场变化特征的扭秤型重力梯度仪。为了满足军事应用需求,20 世纪 60 年代末,美国空军首先提出研制移动式重力梯度测量装备的需求;70 年代中期,美国国防部开始组织研制用于潜艇的重力梯度仪,以保障三叉戟 II 型潜地弹道导弹系统的作战使用。研究初期,美国贝尔航空航天/特克斯特隆公司(现已并入洛克希德·马丁公司)、休斯飞机公司、麻省理工学院德雷伯实验室等多家公司和科研机构先后参与了移动式重力梯度仪原理样机的研制工作。此后,休斯实验室、德雷伯实验室和贝尔实验室分别研制出了 3 种不同类型的重力梯度仪样机:旋转重力梯度仪、液浮重力梯度仪和旋转加速度计重力梯度仪。20 世纪 80 年代,实用型重力梯度仪研制工作得到快速推进,1982 年贝尔实验室研制成功重力敏感系统(gravity sensor system, GSS),并于 1983 年在海上成功进行了技术测试验证,后来将其部署在美国海军的三叉戟潜艇上,主要目的是实时提供潜艇航行轨迹上的重力垂线偏差观测值,用于补偿 INS 的重力扰动影响,提升武器系统的打击精度。地球表面附近的重力垂线偏差量值大小在几个角秒至 1 角分之间,现代高精度 INS 对重力补偿的精度要求可等价描述为:垂线偏差最大确定误差应控制在 1" 以内^[31]。在静基座条件下,垂线偏差 1" 的确定精度要求完全能够得到满足,但在运

动载体上进行测量时,要保证 1" 的精度将变得非常困难,这就要求重力位二阶导数张量所有分量的测量精度应优于 1 E ($1 \text{ E} = 1 \times 10^{-9} / \text{s}^2$)。为了实现这样的测量精度指标,美国军工企业和科研部门持续开展技术攻关,在军事应用和资源开发等多重需求驱动下,重力梯度仪研制工作得到快速发展,技术性能得到不断提升。然而,在重力梯度测量技术兴起的最初几年,出于保密原因,关于重力梯度仪在自主导航中应用的公开资料非常有限,只是一些简要介绍重力梯度仪与 INS 和卫星导航系统组合应用方面的文章,直至 20 世纪末,张量重力梯度仪制造技术工艺逐渐解密,才为重力梯度仪实现完全商品化创造了条件^[31]。1994 年,美国贝尔航空航天公司获得研制名为三维全张量重力梯度仪的商业授权,用于开展海洋动态条件下的重力梯度测量,该系统当时的测量噪声水平为 10 E;2003 年,贝尔航空航天公司对该系统进行了现代化改造,研制出可利用飞行载体进行测量的航空重力梯度仪,2010 年在 BT67 飞机上搭载该系统进行重力梯度测量,在波长为 200 m 情况下,测量误差为 2~3 E;搭载在 Zeppelin 现代飞艇上进行测量时,波长为 100 m 情况下的测量误差为 1.7 E。为了开发矿产资源,21 世纪初,澳大利亚必和必拓公司与美国洛克希德·马丁公司签署协议,引进贝尔航空航天公司的重力梯度传感器(gravity gradient instrument, GGI),联合研制一型航空重力梯度仪,其测量噪声水平为 2~3 E。几乎在同一时期,英国 ARKeX 航空地球物理公司与洛克希德·马丁公司签署协议,获得使用者全张量重力梯度仪的技术专利,并根据用户需求,对全张量重力梯度仪技术进行适应性改造,进而研制出了新一型重力梯度仪 FTGeX,此后又改进研制出增强型全张量重力梯度仪。美国 AOSense 公司和斯坦福大学早在 20 世纪末就开始启动利用原子干涉仪开发新一代重力梯度仪研究工作,并于 1998 年利用这样的原理样机成功测得重力梯度值,测量噪声水平为 38 E,没有达到理论上的预期精度。2014 年,美国喷气推进实验室(jet propulsion laboratory, JPL)开始启动研制利用原子干涉仪测量各独立原子团之间距离原理的量子重力梯度仪,美国航空航天局为这项 3 年期研究计划向 JPL 每年拨款 4 亿美元,专门用于研制量子重力梯度仪。美国国防高级研究计划局(defense advanced research projects agency, DARPA)为了推进“用于地下隧

道破袭的重力异常技术”计划,曾于2010年与洛克希德·马丁公司签订了总价为460万美元的研制合同,开发利用直升机搭载重力梯度仪侦测地下建筑物、堡垒及防御工事的专用装备,用于打击恐怖组织。实际上,重力梯度仪的研制和应用早就被美国国防部列入军事关键技术清单,DARPA研究中心正在推进研制定位精度接近全球定位系统(global positioning system, GPS)水平的自主抗干扰高精度INS项目计划,明确在这种系统中要加入重力梯度仪,用于实时测量重力梯度的全维张量和垂线偏差。从上述发展历程可以看出,重力梯度仪研制历史相当漫长,其中研制用于运动载体的重力梯度仪难度最大。美军作战装备的应用需求推动了这项技术的突破,并在1980—1995年的15年时间内成功研制出了移动式重力梯度仪实用样机。实践证明,重力梯度仪的研制、生产及应用属于现代仪器仪表设计最复杂的工艺技术范畴^[31]。目前使用重力梯度仪进行商业化业务运行还只是少数几家拥有或获得这种张量重力梯度仪技术专利使用权公司的特权。

1.3 重力观测装备技术进步推动重力修正技术发展

如前所述,重力梯度测量装备技术发展最初的推动力是军用INS对重力补偿信息的需求,也就是重力垂线偏差参数实时观测获取需求,用于补偿由于INS无法区分运动载体水平加速度和地球重力场切向分量加速度引起的重力扰动误差。这样的军事需求不仅推动了重力梯度仪和重力补偿技术的发展,同时推动了重力辅助导航另一研究方向也就是重力修正技术的快速发展。至20世纪80年代末,实用型重力梯度仪和重力垂线偏差数据建模技术都已经发展到了一个相对成熟的阶段,尽管贝尔实验室在80年代初就研制出GSS(含重力梯度仪),但考虑到生产成本和使用条件要求过高,美军在初期并未优先选择GSS作为水下INS重力补偿的辅助装备,而是继续选用重力垂线偏差数据模型进行在线重力补偿,致使贝尔实验室一度中止GSS的生产。但是,美国学者并未因此停止重力梯度测量技术的研究步伐,美军也未停止对重力梯度仪拓展应用的关注。这是因为,一方面,尽管重力补偿方法可在一定程度上减弱由重力垂线偏差(也就是重力扰动)引起的惯性导航解算误差影响,减缓惯性导航误差累积速度,但并不能从根本上解决惯

性导航误差随时间积累而发散的问题;另一方面,重力梯度测量包含的重力变化高频信息要远远多于传统的重力异常测量,如何发挥重力信息高频特征的作用是极具挑战性的课题。从理论上讲,由全张量重力梯度仪测量获得的5个独立梯度分量完全可以提供像人类指纹一样的地理位置唯一区别性特征^[32],这就为进一步利用重力梯度测量信息提升INS性能提供了理论支撑。借鉴早期陆地和海底地形匹配导航的开发经验,从1990年开始,贝尔实验室对GSS进行改进和功能拓展,利用扩展卡尔曼滤波方法,使其能够结合重力背景图实现水下自主无源导航,达到进一步减小和限制INS误差发散的目的。美军也由此开启了水下重力辅助惯性导航技术研究进程的第二个阶段,也就是重力修正阶段。1991年,美海军将改进型GSS安装在两艘配备静电陀螺导航仪的弹道导弹战略核潜艇上,并成功进行了功能演示。1996年,美海军再次对GSS进行改进优化,旨在验证其对低精度惯性导航陀螺仪的作用效能,海上各项测试活动均安排在弹道导弹战略核潜艇上开展,一直延续到1998年^[33]。海上演示结果表明,当载体配备高精度静电陀螺导航仪时,采用无源重力导航与不采用情形相比,INS速度误差减小幅度在10%~40%之间;当改用配备低精度惯性导航陀螺仪时,以攻击型核潜艇14天累积航行误差限定值为比对基准,速度误差大小从限定误差的85%减小到50%(由于测试数据是保密的,相关文献没有给出绝对精度评估结果)。此后,洛克希德·马丁公司吸收多年商用重力梯度仪研发经验,于1998年开发出了通用重力模块(universal gravity module, UGM),该模块综合利用一台重力仪和3组重力梯度仪观测信息及相对应的重力场背景图,实现高精度水下无源导航和局部地形估计两大功能。UGM采用的无源导航滤波算法可连续地对载体INS误差进行估计,进而对INS参数进行连续性“重置”(也就是调整),确保INS精度始终保持在一个可接受的水平,无需提供周期性的外部定位信息校准。UGM提供的“重置”信息可以开环和闭环两种模式对INS进行修正,开环模式工作原理比较简单,“重置”信息直接用于INS的输出改正,不改变INS原有的工作状态;闭环模式则更能充分体现UGM的作用效能,不仅能够限制INS误差的积累,还能连续地估算出惯性导航仪表误差的大小,进而可以对INS参数进行校准,相当于对INS

进行在线标定。因此,即使 UGM 在航行过程中出现故障,也不会影响已经过充分校准后的导航仪正常工作^[33],这正是重力辅助导航实时滤波算法与传统匹配算法的原则区别。美海军于 1998 年使用海军水面舰艇先锋号对 UGM 的功能进行了海上航行测试,1999 年又使用洛杉矶级攻击核潜艇孟菲斯号进行了类似的海上测试。测试目的是验证使用 UGM 实施重力修正后,惯性导航误差是否能够被控制在攻击型核潜艇 14 天累积航行误差限定值的 20% 以内。测试结果表明,当不使用 UGM 修正时,连续航行 4 天后,INS 在纬度方向的累积误差已达到限定值的 25%,在经度方向的累积误差更是达到限定值的 41%。而使用 UGM 修正后,只过去一天时间就控制住了惯性导航误差的增长,两天后,惯性导航误差已经被控制在很低的水平^[34]。最终的测试结论是:使用重力无源导航,可使惯性导航纬度和经度误差降低到惯性导航仪标称指标的 10% 以内。即使是使用精度水平较低的重力背景图作为无源导航滤波观测量输入,惯性导航误差降低幅度也能达到限定值的 18% 以内的水平。完全不使用 UGM 修正与只使用 UGM 实时观测信息、不使用重力背景图作重力无源导航两种情形的测试对比结果是,连续航行 30 天后,前者对应的惯性导航纬度和经度方向累积误差均超过限定值的 150%,后者对应的惯性导航纬度方向累积误差不超过限定值的 30%,经度方向累积误差不超过限定值的 90%。由此可见,即使在重力无源导航中不使用重力背景图,也能取得比较好的累积误差控制效果。同一时期洛克希德·马丁公司在这一领域推出的另外两个代表性成果分别是于 1990 年和 1991 年先后研制成功的重力梯度仪导航系统 (gravity gradiometer navigation system, GGNS)^[32]和重力辅助惯性导航系统 (gravity aided inertial navigation system, GAINS)^[35]。两者均为无须任何外部信息校正、不受任何外部信息干扰的完全无源导航系统,GGNS 主要由 INS、贝尔旋转加速度计重力梯度仪、重力梯度背景图和最优滤波器组成,INS 为提取重力梯度背景图数据提供载体位置信息,以重力梯度仪实时观测值与相对应点位重力梯度背景图数据的比对值作为最优滤波器量测方程的输入,与 INS 的误差方程进行联合解算,用于实时修正 INS 参数误差。GAINS 的组成除了 GGNS 包含的几个部分以外,还增加了重力仪和深度传感器两种装备,但

重力背景图不是必需的。相比 GGNS, GAINS 的主要特点是,除了能够利用重力梯度仪输出量实现传统意义上的 INS 重力补偿以外,还在最优滤波器中增加了两类新的量测方程,一类以惯性方法计算得到的载体深度值与压力传感器测量得到的深度值的互差作为观测量,另一类以滤波器预测的梯度值与重力梯度仪测量得到的梯度值的互差作为观测量。更为重要的是, GAINS 在最优滤波器的量测方程中加入了 INS 速度误差对重力状态传递过程的影响项,从而使得滤波器能够不依赖其他外部信息源就能实现 INS 速度误差的实时修正。测试结果表明,当没有重力梯度背景图做支撑时,使用 GAINS 进行重力修正的结果为:只有东向误差出现无界,其他类型的导航误差都能得到很好控制;当使用重力梯度背景图做支撑时, GAINS 可在图形匹配滤波方式下实现连续平稳运行,取得比没有重力梯度背景图约束时更好的导航误差修正效果。美国军工企业为美海军开发的上述各类重力辅助导航原型系统,虽然都曾在美军的实艇实船上进行过测试和验证,但此后这些系统是否已经列装部队使用,目前还不得而知,需要作进一步的跟踪分析研究。但有一点是明确的,美军开发的上述各类原型系统均使用实时滤波算法作为重力辅助导航修正算法,相关文献没有提及相关性匹配算法的研究内容和评估情况。

2 俄罗斯水下重力辅助惯性导航技术发展分析

2.1 军方需求始终主导海空重力观测装备技术发展

俄罗斯水下重力辅助惯性导航技术发展虽然不如美国那样超大投入、进展快速和体系完备,但在某些单项技术特别是海空重力仪研发技术方面的成果并不逊色于美国。与美军一样,俄罗斯军方发展海空重力测量装备的首要目标是获取全球海域的重力场信息,用于水下 INS 的重力补偿。这样的军事需求一直主导着俄罗斯海空重力测量装备技术的发展^[31]。俄罗斯海空重力仪研制工作始于 1967 年,经过几年的海上测试和迭代改进,俄罗斯中央科学电气研究所于 20 世纪 70 年代研制成功俄罗斯第一代海洋重力仪,并装备俄罗斯海军舰艇,用于海面走航式重力测量。配备专用数字计算机的俄罗斯第二代海洋重力仪于 1982 年研制成功,除批量装备俄罗斯海

军舰艇外,还大量装备民用科学考察船,装备总量接近百套,用于全球海域重力信息获取。俄罗斯第三代海洋重力仪研制始于1994年,但直至2006年才开始装备俄罗斯海军,用于实施年度常态化海洋重力背景图测绘任务。俄罗斯第四代海洋重力仪研制始于1998年,1999年推出海洋型重力仪 Chekan-A,2001年推出海空型重力仪 Chekan-AM,俄罗斯中央科学电气研究所先后为俄罗斯国内外多家组织和机构生产交付了几十套 Chekan-AM 型重力仪。2015年,俄罗斯中央科学电气研究所开始批量生产 Chekan-AM 型重力仪的改进型仪器 Shalif-E,后者比前者在测量精度和应用特性方面均得到明显提升。目前,世界上最好的海空重力仪是由俄罗斯莫斯科重力测量技术公司生产的 GT-A/M(航空/海洋)型重力仪,该型重力仪的第一套样机于2001年研制成功,2002年生产了第一套 GT-A/M 商用重力仪,并很快从 GT-1A/M 型发展到 GT-2A/M 型。GT-2A/M 型重力仪的主要特性是使用三轴陀螺稳定平台和一个自研的带有电磁反馈通道的高精度重力敏感部件(自研加速度计),标称精度优于 0.5 mGal,是目前国际上测量精度最高、稳定性最好的海空型重力仪。标准配置的 GT-2A/M 型重力仪只能在 $\pm 75^\circ\text{N}$ 的地理纬度范围内正常作业,为了满足军方特殊需求,2012年莫斯科重力测量技术公司研制出应用多天线卫星导航系统接收机、作业纬度范围扩大至 $\pm 89^\circ$ 的改进型产品 GT-2AP;2015年,该公司又研制出另一改进型产品 GT-2AQ,该型重力仪利用了伪坐标系原理,作业纬度范围不受限制,甚至可以直接在地理极点开展重力测量工作。目前,至少有美国、德国和中国的3家机构购买了 GT-2AQ 型重力仪用于极地重力测量工作^[31]。从此也能看出俄罗斯海空重力仪技术水平在国际上的层次和影响力。

为了进一步推动水下重力辅助惯性导航技术的发展,俄罗斯军方也非常重视重力梯度测量技术的研发和转化应用。俄罗斯重力梯度仪研制工作始于20世纪末,开创性研究工作是由俄罗斯中央科学电气研究所完成的,启动初期的主要研究思路是根据俄罗斯第一代重力仪设计方案开展海洋重力梯度仪的研制工作,突破重点是研制能够保证技术性能比传统地球物理梯度测量设备精度有明显提升的敏感器结构组件和部件。1997年推出第一代重力梯度仪原理样机,对其进

行摇摆测试结果表明,该样机对重力梯度变化的灵敏度估计值为 0.4 E,但受工作原理和制造工艺的限制,该型样机未能实现工程化应用转化。从2001年开始,俄罗斯拉明斯克仪表设计局和茹科夫斯基航空学院共同开展了旋转加速度计重力梯度仪和扭称式旋转重力梯度仪的研制,并于2009年按照弗沃德重力梯度仪设计方案研制成功了一款扭称式旋转重力梯度仪试验样机,利用试验平台对其进行测试表明,该样机的测量误差为 13 E~16 E,暂时还不能满足高精度自主导航的应用需求。关于俄罗斯重力梯度仪近期的研制工作进展情况尚未见报道。

2.2 特别关注重力信息修正 INS 参数算法研究

俄罗斯重力梯度仪研制虽然没有像美国那样取得重大突破,但并不影响俄罗斯军方对利用重力信息精确修正水下 INS 参数算法研究的支持,俄罗斯学者持续在此领域开展研究论证和试验验证,取得了比较丰硕的研究成果。大家知道,传统重力辅助导航的数据基础是安装在运动载体上的重力传感器的观测值和由重力背景图或重力场模型计算得到的先验值,根据所用观测信息量类别的不同,俄罗斯学者把重力辅助导航模式划分为3类:一类为当前时刻重力测量值是沿某条航线上的某个单独测点获得的,也就是说,在某个时刻重力传感器输出信息为标量;另一类为重力传感器可在短时间周期内沿任意航线测量输出相连测点的重力信息,这时可将重力测量值视为矢量;第三类为当前时刻重力测量值是沿某个区块获得,也就是观测信息是以面状或图像的形式给出。简单讲,上述3种模式就是分别对应于点、线、面3类观测信息重力辅助导航系统。俄罗斯学者认为,最能体现导航实时性和持续性要求及观测信息累积性作用的系统是第一类以单点观测信息为基础的重力辅助导航系统。这一观点可能与国内许多学者的观点不一致,由此也导致国内学者对这一问题研究的关注点与国外学者存在一定的偏差。关于水下重力辅助导航算法,受传统观念影响,人们往往简单将重力导航的实施理解为就是将实测重力与背景图重力进行对准匹配的过程,因此直接将重力辅助导航算法简称为重力匹配算法,笔者认为,这样的称呼是不全面的,容易造成误解,具体原因在本文的引言部分已经做了简要说明,这里不再重复。实际上,根据所使用理论框架的不同,目前国际上推出的水下重力辅助惯性导航算

法大致可分为两大类:一类为以相关性分析理论为支撑的匹配定位算法;另一类为以贝叶斯非线性滤波理论框架为基础的实时滤波算法。两类算法都借鉴了发展比较成熟的地形匹配技术思路,前者主要通过对比实测重力数据与重力背景图信息,寻找其相关性最大的点作为最佳匹配点,进而用于导航参数修正。最具代表性的成果是源于英国宇航公司研制的地形剖面匹配系统算法和基于等值线的最近点迭代算法。第二大类算法也就是实时滤波算法又可细分为基于线性化的近似解法和基于随机采样的滤波算法,目前应用广泛的扩展卡尔曼滤波和无迹卡尔曼滤波属于线性化近似算法,粒子滤波和点群滤波(也称网格方法)则属于随机采样算法。俄罗斯学者的研究重点几乎都一致放在了重力辅助导航实时滤波算法研究领域,具体原因本文后续内容再做分析。俄罗斯学者认为,为了解决地球物理场导航问题而提出的建模方案与算法发展进化结果,就形成了贝叶斯非线性滤波理论框架的基本问题,俄罗斯学者给出了该问题的科学内涵,解析了该问题的科学本质,指出了解决该问题的关键点^[31]。为了提高基于后验概率密度的高斯近似算法的有效性,俄罗斯学者先后提出了多种改进的扩展卡尔曼滤波算法,其中包括能够修正线性化点的迭代滤波算法。在此基础上,他们又提出了能够利用多个线性化点的后验概率密度近似法(也称高斯和近似法)的算法改进方案和多种组合算法,其中包括基于该思想设计的脉冲滤波器。为了解决先验信息不确定性带来的滤波发散问题,俄罗斯学者深入研究并发展了点群方法、序贯蒙特卡罗法和粒子滤波方法,并对各种滤波算法的技术特点和计算精度进行了分析比较,证明实时滤波算法的有效性直接取决于载体位置坐标的先验不确定性程度(等级),当位置坐标不确定性程度较高时,应用卡尔曼滤波算法会导致解算精度明显下降。相比较而言,基于序贯蒙特卡罗法设计的滤波算法是当前解决地球物理场导航问题最有效的算法之一(在英文文献中一般称之为序贯重要采样法,改进方法称为序贯重要性重采样法)^[36]。当样本点数增至无穷大时,蒙特卡罗特性等价于后验概率密度的函数表示,序贯重要采样滤波结果接近于最优贝叶斯估计。为了提高重力辅助导航滤波算法的可靠性和有效性,俄罗斯学者持续开展了地球重力异常场导航信息估计方法研究,也就是国内学者

熟悉的海洋重力场特征分析与适配区选择研究。经分析论证及相应的测试验证,俄罗斯学者建议以地球重力异常场参数的离散差 D^* (方差)和相关半径 ρ^* (相关长度)作为给定阈值,满足 $D \geq D^*$ 或 $\rho \leq \rho^*$ 的区域(段)就认定为重力异常场信息丰富(变化特征明显)的区域,适合开展INS重力修正计算。相对应地,把不满足该条件的区域认定为不适合开展自主重力辅助导航的区域。考虑到地球重力异常场相关参数(重力异常、垂线偏差、重力位二阶导数)可能达到的测量精度水平,根据目前已有的研究结果,俄罗斯学者建议采用下述方差值作为相应参数的阈值 D^* :重力异常方差 $D_{\Delta g}^* = 16 \text{ mGal}^2$;垂线偏差方差 $D_{\xi_{\eta}}^* = 4(\prime)^2$;重力位二阶导数 $D_{T_{xx}T_{yy}}^* = 25 \text{ E}^2$ 。考虑到地球重力异常场参数相关长度一般都在几千米到几十千米范围内变化,同时顾及自主导航精度需求,俄罗斯学者建议可统一采用 $\rho^* = 10 \text{ km}$ 作为重力异常场参数相关长度的阈值。这些经过海上测试验证获得的量化指标要求对中国学者开展相关问题研究具有非常重要的参考应用价值。

上述研究积累为俄罗斯军方推动水下重力辅助惯性导航技术应用进程发挥了重要作用。从俄罗斯学者的研究思路和研发成果不难看出,重力梯度仪确实是水下重力辅助导航技术的关键点,但并非发展这项技术的“堵点”,重力梯度仪暂时未能取得突破并未妨碍俄罗斯军方推动水下重力辅助导航技术向前发展并取得实质性成效。

3 思考与建议

对比美俄两国水下重力辅助惯性导航技术的发展脉络和研究重点,不难看出,虽然两国的技术发展水平略有差异,但两国军方的发展目标和研发思路是一致的,最终目标都是为了提升战略核潜艇的惯性导航精度和 underwater 长航时续航能力,研究思路都是利用海洋重力场的空间分布特征,通过重力补偿和重力修正两种途径对INS参数进行实时在线校准。相比美俄两国在此领域的发展进程,中国不仅在技术发展水平上存在明显的差距,在发展思路和研发重点上也存在一定程度的差异性。为此,笔者经过一定的分析和思考,提出以下对策和建议。

3.1 优先做好做实重力补偿第一道工序

如前所述,美俄两国的惯性导航重力修正技

术都是在传统的重力补偿技术基础上发展起来的,重力补偿技术从起步到成熟大概经历了二三十年的时间。中国启动重力辅助惯性导航技术研究始于20世纪90年代,比美俄两国大约晚了30多年的时间,也就是说,当中国开启这个领域研究时,美俄两国的研发进程已经进入了第二阶段即重力修正技术研究阶段^[2]。面对这种情形,中国学者并没有按照国际上普遍采用的顺序即先做重力补偿后做重力修正来开展相关研究工作,而是同时进行两道工序的研究论证和技术攻关,相比较而言,投入重力修正第二道工序的精力和热情更多于重力补偿第一道工序。经过30多年的研究积累,中国在此研究领域虽然也取得了重要进展,特别是在重力匹配算法研究方向,理论方法拓展方面的创新比较明显,但无论是重力补偿还是重力修正,中国投入实际应用的研究成果还非常少。主要原因可能涉及两个方面:一是重力修正需要有高精度重力梯度仪做支撑,中国目前还不具备这样的条件;二是重力扰动影响与补偿机理研究还不够深入,补偿效能测试验证还不够充分。高精度重力梯度仪研制要想在短期内取得实质性突破几乎是不可能的,因此,重力修正需要有新的研究思路,关于这一点后文再做进一步分析。重力补偿原理相对简单,可能正是因为这个原因,中国学者对其投入研究精力不够,未能全面掌握重力扰动对INS的耦合影响机理,无法对重力补偿效能和作用做出明确而肯定的评价,从而影响了该项技术的推进应用。实际上,重力补偿效能高低不仅取决于重力扰动实时测量精度或垂线偏差数据模型的完备性及测点的初始定位精度,还取决于惯性器件误差特别是加速度计零偏的大小^[19]。当加速度计零偏增大到与重力扰动同一量级时,该项偏差会对重力补偿效果产生显著影响,甚至可能出现补偿重力扰动后,惯性导航精度反而下降的情况^[18]。这说明加速度计零偏与重力扰动的交叉耦合作用影响不容忽视,要想提升惯性导航的重力补偿效能,必须首先对可能存在较大零偏的加速度计进行零偏估计和校准。在此基础上实施重力补偿,即可望获得立竿见影的补偿效果。为此,建议针对中国当前短期无法实现高精度重力修正的实际情况,应集中精力优先推进重力扰动影响与补偿机理研究,联合卫星测高和海空重力测量数据构建高精度、高分辨率垂线偏差数值模型,全面开展海上实船实艇重力补偿测试验证,做好做实

惯性导航重力补偿第一道工序。重力补偿的作用不只体现于抑制和减缓INS误差随时间积累而发散的趋势,还体现在它能为第二道工序的重力修正提供相对精确的测点初始位置信息,进而提升重力修正滤波算法或匹配算法的成功率和解算精度。由此可见,重力补偿是实现高精度、高可靠重力修正的关键性步骤。

3.2 紧前推进重点海域重力加密测量和极区重力仪研制

无论是重力补偿还是重力修正,都需要海上精细的重力场信息做支撑。重力补偿要求实时提供测点上的垂线偏差数据,在重力梯度仪还没有取得实质性突破的情况下,只能采用重力异常观测信息,通过位场转换模型计算获得。即使当前通过卫星测高手段可获取比较高精度的垂线偏差数值模型,但在重力场特征变化比较剧烈的局部海域,卫星测高重力信息的精度和分辨率都不足以支撑INS重力补偿的精细化要求。重力修正的理论依据是重力场具有像人类指纹一样的地理位置唯一区别性特征,很显然,这种区别性特征越显著,重力修正的效能就越能显现。因此,重力修正对特征变化剧烈海域重力场信息的精细度有更高的要求。当前,在海底地形变化比较平缓的宽阔海域,利用卫星测高手段获取的重力信息已经足以满足重力补偿和重力修正的一般性要求^[2],正是因为这个原因,美军才终止了历时超过50年的“全球重力测量”项目计划,因此单就水下重力辅助惯性导航需求而言,似乎已经完全没有必要再以普查和耕地的方式开展大面积的船载重力测量。当前需要抓紧落实的首要任务是,摸清全球海底地形的局部变化特征及相对应海域实测重力信息的分布状况,统筹安排重点海域船载重力加密测量作业,通过多源数据融合和精细化处理,构建全球海域高精度多分辨率重力基础数据模型。

在海上开展精细化重力测量需要高精度重力仪做支撑。经过最近十多年的技术攻关,中国的海空重力测量装备研制已经取得突破性进展,其技术性能已达到国际同类装备先进水平,基本实现海空重力测量核心装备国产替代目标。但正如前文所述,水下重力辅助导航对重力数据的保障需求是全球海域覆盖,这就意味着海空重力测量装备必须具备全球海域作业能力,特别是地球极区作业能力。目前只有俄罗斯生产的GT改进型重力仪具备这种能力,国产化重力仪需要做

相应的适应性改造,研制满足全纬度应用(极区型)的海空重力测量装备应尽快列入中国相关研究领域的关键技术清单。

3.3 重点发展重力修正非线性滤波技术和滤波算法

如前所述,目前国际上推出的水下重力辅助惯性导航重力修正算法主要分为匹配定位算法和实时滤波算法两大类。美俄两国都一致将实时滤波算法作为研究重点,并将其应用于实际。中国学者则更多偏爱于匹配定位算法,并以算法改进和仿真验证研究居多。这可能与匹配定位算法实现过程相对简单、对初始位置误差不太敏感、对 INS 依赖性不强等因素有关,也可能跟中国惯性导航技术与重力场信息应用研究联系不紧密、相互分割有关。但显而易见的是,匹配算法在应用上存在着明显的不足和缺陷,因为它是典型的批处理方法,运动载体必须航行一段距离获取足够的重力数据后才能完成匹配运算,所以匹配算法不是严格意义上的实时处理方法。这一缺陷对于作战应用是不可接受的,甚至是致命的。为了实现高精度可靠匹配定位,需要预先为运动载体规划设计好航行路径和适配区域,寻找适配区的过程就可能要花费几个小时,到达适配区后可能还需要几个小时的航行时间才能实现有效的匹配定位。很显然,这样的匹配定位导航流程很难满足常态化海上作战保障需求,更是无法满足应急作战实时化保障需求。可能正是因为这个原因,美俄两国从一开始就放弃了重力修正匹配算法的研究思路,直接将研究重点集中于实时滤波算法优化和改进。最近几年,美空军技术研究院在拓展应用地磁信息辅助航空惯性导航技术研究领域取得了重大突破,在飞行器飞行高度较低、地磁背景场数据质量较高情形下,导航定位精度可达几十米甚至更高;当飞行高度较高时,也能取得几百米的定位精度。值得关注的是,美空军采用的导航定位算法也是实时滤波算法,第一阶段他们采用含 5 个状态变量的粒子滤波器^[37],第二阶段采用含 13 个状态变量的边缘粒子滤波器^[38],第三阶段则试验采用了不需要地磁背景图的即时定位与地图构建算法,采用的滤波器是 Rao-Blackwellized 粒子滤波器^[39]。这一动态也从另一侧面说明,实时滤波算法是国际上应对海上和空中地球物理辅助导航实战化需求的主流方法,也是首选方法。基于这样的认知,笔者强烈呼吁,中国应重新审视这个研究领域的工

作部署,紧跟国际发展态势,将研究重心从相关性匹配算法转移到实时滤波算法方向。从技术特性上讲,滤波算法除了具有实时性优势外,还具有较强的抗噪声干扰能力,可同时修正 INS 的位置、速度、高度和姿态等多维度误差。该算法的主要缺陷是对初始位置误差比较敏感,线性化近似要求初始位置坐标具有一定的精准度,否则会引起滤波发散。美俄两国的 INS 都具有较高的技术性能,能够保证载体初始位置坐标精度始终保持在可接受范围以内,这大概也是他们优先选择滤波算法并能够取得良好效能的主要原因。中国 INS 技术性能相对低一些,但如果在采用先进的静电陀螺仪和陀螺监控技术基础上,再增加比较精准的重力补偿第一道工序,那么,为载体提供满足精度要求的初始位置坐标是可以实现的。此外,由于滤波算法是一种连续的实时处理过程,不必像匹配算法那样,非要等到惯性导航定位误差累积到一定程度才开始启动匹配定位程序,水下运动载体离开码头即可启动滤波算法运算,在重力变化特征不明显的区域,可通过设置阈值和改变权因子的方式,调控重力信息在滤波算法中的作用比重,确保实时滤波解算结果收敛。因此,在中国推进实时滤波算法应用既有紧迫性又具可行性。可喜的是,近期中国已经有学者在陆续开展这一方向的研究工作^[17,19,40],但研究成果离工程化应用还有较长的距离。

3.4 优先发展实用软件型 GAINS

尽管在发展水下重力辅助惯性导航技术方面,美军一直在追求高精度、高可靠和超前性,但考虑到制造成本、环境适应性和作用效能等多方面的因素,美军并未把所有的精力都放在新产品研发上,而是通过海上反复试验验证,寻找那些具有更高性价比的组合导航系统。美军有几个发展动态值得我们关注,一是洛克希德·马丁公司早在 20 世纪 90 年代就提出一个更经济的 GSS 替代方案,称为重力敏感模块,该模块的核心构件是一个低成本的 GGI 和一个作为重力仪的振梁加速度计,它既可以与静电陀螺仪组合使用,也可以与激光陀螺仪组合使用^[5]。这里的低成本重力梯度仪指的是什么样的设备,目前还没有公开文献给出说明,但至少可以确认,美军已经意识到,精度极高的原型 GGI 并不一定适合水下载体的导航应用,需要在减小设备体积和降低制造成本方面做出更多努力和创新,比如可考虑将 GGI 中的 3 组重力梯度仪减为 2 组甚至 1 组^[1]。

第二个动态是,在同一时期,美军还开发了一种更经济的基于静电陀螺仪的全软件型GAINS,称为三元组电磁加速度计无源导航系统^[5],该系统不需要装备专用重力仪,直接使用三元组电磁加速度计测得的垂向加速度分量作为重力观测值,其精度足以满足重力辅助导航需求,重力背景场则通过卫星测高手段获取。从这一动态不难看出,美军在很早以前就已经将主要精力放在研发满足精度要求的低成本重力传感器及相对应的辅助导航系统。第三个动态是,2008年,美国海军研究办公室对外公开招标,标题为:降低弹道导弹潜艇对GPS依赖性的重力辅助导航技术。其研发目的是:提升重力辅助导航能力,以减少或消除战略核潜艇对GPS的依赖。在成功研发出世界上最先进的GAINS过去10多年以后,美军为什么又一次将目光投向这一研究领域,该招标说明书给出的理由是:早期开发的GAINS只针对单一特定的INS、武器平台和作战场景,如今这些外部因素都已经发生很大的变化,惯性传感器、导航算法和重力测图等相关技术也已经取得显著进步,将这些变化和进展转化为导航能力提升需要创新研发超越当前技术水平的新装备。招标书设定的主要研究内容包括:(1)GAINS应用于战略核潜艇、巡航导弹核潜和攻击型核潜艇的可行性研究;(2)GAINS应用于不同武器平台的自适应算法研究;(3)实现水下重力测量精度优于1.5 mGal的技术和方法研究(包括使用惯性导航仪加速度计实施重力测量的可能性)。从这一动态可以看出,美军在成果推广应用阶段更加注重研发产品的适用性和实用性,不再单纯追求新型装备的高精度和先进性。该招标书中有一句话很值得关注:“至今(也就是至当时),重力导航计划从未被执行过”,这说明,虽然美军推动重力补偿惯性导航技术工程化应用已经有几十年的历史,但对第二阶段的重力修正导航技术应用,美军一直持谨慎态度,早期研发的重力辅助惯性导航原型系统只是完成了海上应用效能测试验证,并未正式列装部队使用。另外,该招标书只提及重力仪、重力测图和重力异常信息的相关内容及要求,没有涉及重力梯度仪的创新研发和使用问题。其中的缘由目前还不清楚,笔者推断,可能跟重力梯度仪的敏感度太高,对环境的要求过于苛刻,致使其适用性和性价比不高有关。这是否也说明,美军一直在使用的惯性导航重力补偿系统还是继续采用可满足精度要求

的垂线偏差数值模型作为支撑信息源,并未引入价格昂贵的重力梯度仪装备,尽管当初研发高精度重力梯度仪的原动力是来自军方对重力补偿INS的数据实时化保障需求。总之,美军的这些发展动态很值得中国学者深入思考和分析借鉴,根据中国的实际情况对现有研究思路做出必要的调整。

首先,应加快推进基于重力仪和重力异常背景场的重力辅助导航系统应用落地,目前实现这一目标的各方面条件都已经具备。决策部门应继续支持不同工作原理重力梯度仪的研发,但不能被动地等待可能若干年后才能实现应用目标的新装备。正如美军所强调的,重力仪已经为INS提供了最基本的无源导航能力,重力梯度仪只是进一步增强了这种能力^[1]。基于同样的认知,面对重力梯度仪短期内无法取得突破的困难局面,笔者建议尽快启动中国自主可控的软件型重力辅助导航系统研制,它们可以是半软件型系统,也可以是全软件型系统,前者由重力仪、重力异常背景场模型、重力梯度背景场模型和滤波算法组成;后者则比前者少了重力仪部分,也就是全部由数据模型和算法组成。这样的设想主要受美军前期开发的UGM、GGNS、GAINS 3种原型系统无图工作模式的启发。根据相关文献介绍,UGM、GGNS和GAINS三系统都可以在无重力场背景图支撑条件下运行,也就是说,这些系统使用的滤波算法量测方程的观测量可以是重力仪器(包括重力仪和重力梯度仪)观测值与背景场数据的互差值,也可以只是重力仪器观测值自身(即对应无图工作模式,这也是本文建议将重力匹配称呼改为重力修正的原因之一)。这就意味着,如果把无图工作模式的观测量从重力仪器观测值换成重力场背景图数据,即在此模式下使用重力场背景图数据替代重力仪器实测重力信息,也不会影响上述3个系统的运行状态,它们只是从无图工作模式转到无实测数据工作模式,这样就达到了通过完全软件化或半软件化方式实现水下重力辅助惯性导航的目的。这样的软件型系统既能较好地发挥现有重力异常成熟观测技术及数据资源优势,又能最大限度地挖掘人们当前所能掌控的重力梯度信息的潜力。目前,联合利用超高阶全球重力位模型、海上实测重力异常、卫星测高重力和高分辨率海底地形数据构建重力梯度场模型的理论和方法已经发展成^[41],在各类数据都得到较好保障条件下,重

力梯度场建模精度可望达到 10~20 E 甚至更高的水平。因此,在当前条件下,研发笔者推荐的全软件或半软件型 GAINS 是可行有效的。全软件型系统的导航精度可能会略逊色于软硬件一体化综合系统,但前者具有比后者更高的运行和解算稳定性,也不会出现实测重力数据需要滤波处理带来的延迟困扰。

3.5 强化深化重力辅助惯性导航需求论证和顶层规划设计

开展水下重力辅助导航技术研发及应用的重要性和必要性是不言而喻的,但关于这项技术的需求论证,我们做得还不够全面和深入,特别是关于产品研发技术指标方面的量化需求,还缺少体系化的分析研究和论证说明,致使我们的顶层规划设计无法设定明确的建设总目标和阶段目标,也导致我们确定的研究思路和研发路径在认识上无法取得完全统一。面对这些问题,我们需要认真对照美俄两国在这一领域的发展经验,做出深入细致的分析和思考,根据中国现有条件,给出符合中国国情的全面解决方案。

首先,应组织各专业力量共同完成重力辅助导航系统战术和技术指标分解。将最终的组合系统定位精度指标精细分解到各个环节和各个要素,研究确立它们之间的关联性,倒推确定各类相关设备、算法和基础数据的保障要求;其次,需要研究确定各种技术手段的应用载体、应用场景和应用模式,明确各技术手段的适用条件、潜在风险和载体的保障要求;最后,还需要研究构建各技术手段的综合效能评估体系,明确各技术手段的评估流程、方法、准则和试验验证的保障要求。完成上述 3 个大方面的保障需求清单生成以后,我们就掌控了水下重力辅助惯性导航技术研发顶层规划设计的主动权,使实施思路和路径变得更加清晰,实施管控和评估变得更加严谨,最终实现实施效能的最大化。总之,我们要通过全面深入的研究论证,清晰准确地回答装备决策部门关心的“新装备有多大的军事价值”“不可行”“在哪用”“怎么用”等与需求和使用相关的问题,回答业务决策部门关心的“使用新装备的基本条件和要求是什么”“需要增加什么样的信息保障”“现有保障装备和手段存在什么样的差距”等与信息保障相关的问题,也让装备研发部门充分了解“军方需要什么样的新装备”“什么样的装备最符合实战需求”“需要突破哪些核心技术才能达到预期指标要求”等与研发思路和技术

路线相关的问题。

4 结 语

自主性、高精度、长航时和隐蔽性是核动力潜艇水下导航的根本需求,水下重力辅助惯性导航技术是 INS 的高度自主性和信息全面性与重力信息的时空分布稳定性和唯一性特点的完美结合。美俄两国在此研究领域为我们提供了许多可借鉴的发展经验,本文对这些经验进行了分析和归纳总结,通过对照分析和思考,对中国水下重力辅助惯性导航技术发展提出了 5 个方面的改进建议。经过近二三十年的发展,中国在该研究领域也取得了较大进展,积累了一定的研发经验,但面临的问题和挑战也显而易见,需要进行反思和思考,本文的建议可为下一步工作部署提供参考。

参 考 文 献

- [1] Moryl J. Advanced Submarine Navigation Systems [J]. *Sea Technology*, 1996, 37(11): 33-39.
- [2] Hays K M, Schmidt R G, Wilson W A, et al. A Submarine Navigator for the 21st Century [C]//IEEE Position Location and Navigation Symposium, Monterey, CA, USA, 2002.
- [3] Wu Fengde, Zhang Zongxun. Development Level and Trend of Passive Gravity Navigation Technology [C]//The Seminar on Development Trend and Direction of Inertial Technology, Yichang, China 2003. (武凤德,张宗询. 无源重力导航技术发展水平及趋势[C]//惯性技术发展动态发展方向研讨会,中国宜昌,2003.)
- [4] May M B. Gravity Navigation [C]//IEEE Position Location and Navigation Symposium, Orlando, FL, USA, 1978.
- [5] Vajda S, Zorn A. Survey of Existing and Emerging Technologies for Strategic Submarine Navigation [C]//IEEE Position Location and Navigation Symposium, Palm Springs, USA, 1996.
- [6] Liu Min, Huang Motao, Ouyang Yongzhong, et al. Development and Prospect of Air-Sea Gravity Survey and Its Applications, Part II: Sensor, Plan and Design of Survey [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2017, 37(3): 1-11. (刘敏,黄谟涛,欧阳永忠,等. 海空重力测量及应用技术研究进展与展望(二): 传感器与测量规划设计技术[J]. 海洋测绘, 2017, 37(3): 1-11.)
- [7] Fu Mengyin, Liu Fei, Yuan Shuming, et al. Review of Undersea Autonomous Inertial-Gravity

- Matching Navigation[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2017, 25(1): 31-43. (付梦印, 刘飞, 袁书明, 等. 水下惯性/重力匹配自主导航综述[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(1): 31-43.)
- [8] Dai Quanfa, Xu Houze, Xu Daxin, et al. Simulation of Gravity Matching Navigation System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(2): 203-207. (戴全发, 许厚泽, 许大欣, 等. 基于卫星测高数据的重力匹配导航仿真[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(2): 203-207.)
- [9] Cheng Li, Cai Tijing. Gravity Matching Algorithm Based on Pattern Recognition Neural Network [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2007, 37(5): 839-843. (程力, 蔡体菁. 基于模式识别神经网络的重力匹配算法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(5): 839-843.)
- [10] Wang Wenjing. Research on Underwater Navigation and Positioning Method Based on Gravity and Environmental Characteristics [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009. (王文晶. 基于重力和环境特征的水下导航定位方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.)
- [11] Xiao Yun, Zhang Jinbai, Cao Jie, et al. Suitability Analysis of Gravity Matching Navigation Based on Multiple Attribute Decision Making Theory [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1089-1099. (肖云, 张锦柏, 曹杰, 等. 多属性决策理论的重力匹配导航适配性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1089-1099.)
- [12] Wang Zhigang, Bian Shaofeng. ICCP Algorithm for Gravity Aided Inertial Navigation [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(2): 147-151. (王志刚, 边少锋. 基于ICCP算法的重力辅助惯性导航[J]. 测绘学报, 2008, 37(2): 147-151.)
- [13] Wu Taiqi, Ouyang Yongzhong, Lu Xiuping, et al. Analysis on Effecting Mode of Several Essential Factors to Gravity Aided Navigation [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(5): 559-564. (吴太旗, 欧阳永忠, 陆秀平, 等. 重力匹配导航的影响模式分析[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(5): 559-564.)
- [14] Liu Fanming, Yao Jianqi, Li Yan. Local Analysis Method on the Marine Gravity Matching Area Based on Skeleton Extraction [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(4): 428-434. (刘繁明, 姚剑奇, 李艳. 一种骨架提取的海洋重力适配区域局部分析方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(4): 428-434.)
- [15] Li Shanshan, Wu Xiaoping, Tian Yanfeng. Improvement on the Iterated Closest Contour Point Matching Algorithm Using Underwater Gravity Anomalies [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(2): 226-230. (李姗姗, 吴晓平, 田颜锋. 水下重力异常最近等值线迭代匹配算法的改进[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(2): 226-230.)
- [16] Wang Hubiao. Research on Underwater Assisted Navigation Technology Based on Gravity Anomaly and Gravity Gradient [D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2010. (王虎彪. 基于重力异常和重力梯度的水下辅助导航技术研究[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球研究所, 2010.)
- [17] Yao Jianqi. Research on Underwater Gravity-Assisted Navigation and Positioning Method [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015. (姚剑奇. 水下重力辅助导航定位方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.)
- [18] Tie Junbo. Research on Gravity Compensation Method of Inertial Navigation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (铁俊波. 惯性导航重力补偿方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.)
- [19] Luo Kaixin. Research on Key Technologies of Ocean Gravity-Aided Inertial Navigation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2023. (罗凯鑫. 海洋惯性重力辅助导航关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2023.)
- [20] Kwon J H, Jekeli C. Gravity Requirements for Compensation of Ultra-precise Inertial Navigation [J]. *Journal of Navigation*, 2005, 58(3): 479-492.
- [21] Nash R. The Estimation and Control of Terrestrial Inertial Navigation System Errors Due to Vertical Deflections [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1968, 13(4): 329-338.
- [22] Gelb A. Geodetic and Geophysical Uncertainties-Fundamental Limitations on Terrestrial Inertial Navigation [C]//The Control and Flight Dynamics Conference, Pasadena, CA, USA. 1968.
- [23] Jordan S K. Effects of Geodetic Uncertainties on a Damped Inertial Navigation System [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1973, AES-9(5): 741-752.
- [24] Lu Zhidong, Wang Jing. Gravity Compensation Methods for High-Accuracy INS [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2016, 27(8): 1-6. (陆志东, 王晶. 高精度惯性导航系统重力补偿方法[J]. 航空科学技术, 2016, 27(8): 1-6.)

- [25] Kasper J F. A Second-Order Markov Gravity Anomaly Model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(32): 7844-7849.
- [26] Jordan S K. Self-Consistent Statistical Models for the Gravity Anomaly, Vertical Deflections, and Undulation of the Geoid[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77(20): 3660-3670.
- [27] Chatfield A B, Bennett M M, Chen T. Effect of Gravity Model Inaccuracy on Navigation Performance [J]. *AIAA Journal*, 1975, 13(11): 1494-1501.
- [28] Chatfield A B. Fundamentals of High Accuracy Inertial Navigation [M]. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997.
- [29] Kwon J H. Gravity Compensation Methods for Precision [C]//The 60th Institute of Navigation, Dayton, OH, USA, 2004.
- [30] Huang Motao. Determination and Application of Marine Gravity Field [M]. Beijing: Sino Maps Press, 2005. (黄谟涛. 海洋重力场测定及其应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 2005.)
- [31] Лещехонов В Г, Стеланов О А, Болотин Ю В, et al. Современные Методы и Средства Измерения Параметров Гравитационного Поля Земли [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2022. (皮舍霍诺夫 ВГ, 斯捷巴诺夫 ОА, 博洛廷 ЮВ. 等. 地球重力场参数现代测量方法与设备 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2022.)
- [32] Affleck C A, Jircitano A. Passive Gravity Gradiometer Navigation System [C]//IEEE Symposium on Position Location and Navigation, Las Vegas, USA, 1990.
- [33] Moryl J, Rice H, Shinnars S. The Universal Gravity Module for Enhanced Submarine Navigation [C]//IEEE Position Location and Navigation Symposium, Palm Springs, USA, 1996.
- [34] Rice H, Mendelsohn L, Aarons R, et al. Next Generation Marine Precision Navigation System [C]//IEEE Position Location and Navigation Symposium, San Diego, USA, 2002.
- [35] Jircitano A, Dosch D. Gravity Aided Inertial Navigation System (GAINS) [C]. The 47th Institute of Navigation, Williamsburg, VA, 1991.
- [36] Doucet A, Freitas N, Gordon N. Sequential Monte Carlo Methods in Practice [M]. New York: Springer, 2001.
- [37] Canciani A, Raquet J. Absolute Positioning Using the Earth's Magnetic Anomaly Field [J]. *Navigation*, 2016, 63(2): 111-126.
- [38] Canciani A, Raquet J. Airborne Magnetic Anomaly Navigation [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(1): 67-80.
- [39] Lee T N, Canciani A J. MagSLAM: Aerial Simultaneous Localization and Mapping Using Earth's Magnetic Anomaly Field [J]. *Navigation*, 2020, 67(1): 95-107.
- [40] Ouyang Mingda, Yang Yuanxi. Underwater Gravity Matching Navigation Simulation and Experiment Based on the Improved Particle Filtering Algorithm [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2022, 43(10): 1514-1521. (欧阳明达, 杨元喜. 改进粒子滤波的水下重力匹配导航仿真与实验 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(10): 1514-1521.)
- [41] Liu Jinzhao, Liu Lintao, Liang Xinghui, et al. Based on Measured Gravity Anomaly and Terrain Data to Determine the Gravity Gradients [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(7): 2245-2256. (刘金钊, 柳林涛, 梁星辉, 等. 基于实测重力异常和地形数据确定重力梯度的研究 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2245-2256.)