

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311290

基于原子干涉技术的水下重力辅助导航研究展望*

万伏彬, 邝文俊, 钟曜宇, 徐馥芳, 胡青青
(国防科技创新研究院 北京 100071)

摘要:重力辅助惯性导航是当前水下潜航器导航定位研究的热点和前沿问题,有望成为下一代水下高精度导航系统发展的重要方向。首先,介绍了水下重力信息对于校正惯导系统误差的重要性,阐述了水下重力辅助惯性导航的基本原理与技术内涵;然后,从无图匹配、有图匹配等不同发展阶段,总结了基于传统相对重力仪的水下重力辅助导航的研究现状及发展趋势;进一步分析了下一代水下自主导航系统对高精度绝对重力测量技术的需求,梳理并讨论了基于原子干涉重力测量技术的最新发展及应用状况,展望了原子干涉重力测量技术在水下惯性导航领域的应用前景并总结了仍需解决的关键技术;最后,给出了我国重力辅助导航研究存在的不足及发展建议。

关键词:原子干涉技术;绝对重力测量;重力辅助导航;惯性导航系统;水下导航

中图分类号: TH71 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420.5

Research prospect of underwater gravity-assisted navigation based on atomic interference technology

Wan Fubin, Kuang Wenjun, Zhong Yaoyu, Xu Fufang, Hu Qingqing
(National Innovation Institute of Defense Technology, Beijing 100071, China)

Abstract: Gravity assisted underwater inertial navigation has been a hot and cutting-edge issue in the research of underwater vehicle navigation and positioning in recent years, which is expected to become an important direction for the development of the next generation of high-precision underwater navigation systems. Firstly, the importance of underwater gravity information for correcting inertial navigation system error is introduced, and the basic principles and technical connotations of underwater gravity assisted inertial navigation are elaborated. Then, the research status and development trend of underwater gravity assisted navigation based on traditional relative gravimeter are summarized from different development stages such as unmapped matching and mapped matching. Furthermore, the demand of high-precision absolute gravimetry technology for next-generation underwater autonomous navigation system is analyzed, and the latest development and application status of atomic interferometric gravity measurement technology are reviewed and discussed. The application prospects of atomic interference gravity measurement technology in the field of underwater inertial navigation are forecasted and the key technologies that still need to be solved are summarized. Finally, the shortcomings and development suggestions of gravity assisted navigation research in China are given.

Keywords: atomic interference technology; absolute gravity measurement; gravity assisted navigation; inertial navigation system; underwater navigation

0 引言

水下潜航器是海洋资源开发和权益维护的重要载体,在军事上可在目标海域执行侦查、监视、巡逻及打击等遂行任务,已经成为国际军事强国在深远海领域重点

关注和发展的对象^[1-2]。安全性、隐蔽性是潜航器在水下安全航行并保持对抗能力的重要因素^[3],高精度高可靠的自主导航与定位系统是潜航器水下航行过程中保持安全性和隐蔽性的关键装置。目前,水下潜航器主要依靠惯导系统进行导航定位,在已知自身位置、角度、速度和角速度初始值的情况下,通过惯性敏感器件(主要是加速

收稿日期:2023-04-10 Received Date: 2023-04-10

* 基金项目:国家自然科学基金青年基金(11904408)项目资助

度计和陀螺仪)测量潜航器的加速度和角加速度并进行积分运算,即可求得潜航器的实时速度、姿态及位置等信息。在潜航器长时间的航行中,加速度计和陀螺仪存在漂移误差并不断累积^[4]。根据文献^[5]报道,水下惯性导航系统在不做校正的情况下,航行3 d后的累积位置偏差可达2 km,加上水下洋流等复杂环境因素的影响,该位置偏差将更大。

近年来,基于原子干涉技术的新型重力测量仪器快速发展^[6-11],构建高精度高分辨率的海洋重力数字地图已成为可能,利用实时测量的海洋重力数据及海洋重力数字地图来标校和改正惯性敏感器件的漂移误差,提高潜航器水下自主导航定位能力,延长潜航器上浮校正周期,使得水下重力辅助惯性导航系统具有更加重要与可行的军事用途。特别是在我国深远海领域探索方面,基于原子干涉技术的重力辅助惯性导航方式既可弥补国产惯性导航仪器精度不高的短板,又能够降低在GPS拒止情况下无外部导航信号调校惯导仪器的风险。

目前,水下重力辅助惯性导航系统主要依赖于相对重力仪^[12-16],但是相对重力仪存在零点漂移、需要定期校准等问题。原子干涉重力仪/重力梯度仪是一种绝对重力测量仪器^[17-20],具有超高精度、绝对测量、无源自主、抗干扰性强等优点,为下一代重力辅助惯性导航系统提供了一种有广阔应用前景的替代方案。本文首先介绍了水下重力信息校正惯导系统误差的优点和重要性,阐述了水下重力辅助惯性导航的基本原理与技术内涵;然后,从无图匹配、有图匹配等不同发展阶段,归纳并总结基于传统相对重力仪的水下重力辅助导航技术研究现状及应用特点;最后,梳理并讨论原子干涉重力测量技术的最新发展及应用状况,分析并提出原子干涉重力测量在辅助惯性导航应用中需解决的关键技术及其后续展望,为我国下一代水下自主导航与定位技术的研究发展提供参考。

1 重力信息辅助惯性导航的原理

1.1 水下重力场匹配原理

目前,水下自主导航定位方式主要有3大类:惯性导航定位、声学导航定位及水下地球物理场导航定位。惯性导航是一种基于牛顿第二定律的航迹推算导航方法,自主性好、隐蔽性和抗干扰性强,但加速度计、陀螺仪等器件漂移误差随时间积累,长航时工作需要定期校正与重调。声学导航定位利用声信号在水下的传播特性得到自身载体的导航与定位参数,但需要部署声信标,向外界交换和传递信号,隐蔽性差、容易暴露。水下地球物理导航定位主要包括基于地球磁场辅助惯性导航和基于地球重力场辅助惯性导航方式。基于地磁的辅助惯性导航定位方式容易受周围环境影响,匹配定位精度较低。重力

信息(重力异常或重力梯度)一般不会受到外界干扰而发生变化,主要根据纬度、海拔、地形高度、地质构造的不同而变化。因此,潜航器在利用重力信息修正惯性导航系统误差的过程中,无需潜出水面或使用外部信号,也不需要预先制作人工导航信标,能够不受地域和时域限制工作,在卫星、无线电拒止情况下仍可进行自主隐蔽的导航定位,有望解决潜航器长航时安全通行问题。因此,基于高精度重力信息辅助惯性导航是水下自主导航目前研究的热点和前沿方向。

如图1所示,水下重力辅助惯性导航系统主要由惯性导航系统、重力测量系统、重力数据库系统和匹配算法4部分构成,其中惯性导航系统是核心部分,其他组成部分主要是为提高惯性导航系统的精确性、可靠性及鲁棒性而服务。重力测量系统由高精度重力仪/重力梯度仪和惯性稳定平台构成,用来实时测量当地重力信息。重力数据库系统是基准部分,用来提供先验基准数据,将事先测量的重力数据以数字地图形式存储在专用计算机中,每个测量网格点中保存有位置信息和相对应的重力信息。匹配理论及算法是水下重力辅助惯性导航系统的重要组成部分,目前主要有基于相关极值点求解和基于最优滤波估计的两大类匹配算法^[21]。

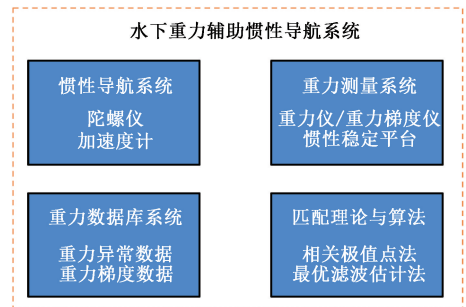


图1 水下重力场辅助导航定位系统构成

Fig. 1 Composition of the underwater gravity field assisted navigation and positioning system

水下重力辅助惯性导航系统的匹配原理如图2所示,其本质是利用水下重力场物理特性(重力异常、重力梯度及垂线偏差)及其分布特征修正惯性导航累积位置误差的一种无源自主导航方法^[22-24]。匹配过程的基本工作流程为:首先,将前期测量的高精度重力信息和位置信息以数字地图形式存储在专用计算机中,通过专用计算机提取惯性导航系统提供的位置信息,利用该位置信息在预存的重力数字地图中提取相对应的重力信息。然后,利用匹配解算算法,将重力测量系统实时采集的重力数据与重力信息数据库中提取的信息相匹配,输出经过匹配解算后的潜航器定位信息。最后,利用匹配的定位信息校正惯性导航系统积累的的定位误差,实现潜航器精确导航定位。

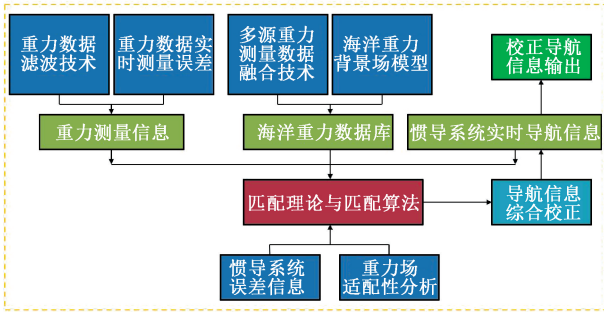


图2 水下重力辅助惯性导航原理

Fig.2 Principle of underwater gravity-assisted inertial navigation

1.2 水下重力辅助惯性导航的技术内涵

水下重力辅助惯性导航系统的定位精度主要受惯性器件误差、重力测量仪器误差、重力信息数据库分辨率以及匹配算法性能影响^[25]。其中高精度重力测量仪器的研制和高分辨率重力基准图的制备,是实现水下重力辅助惯性导航系统的前提和基础。因此,水下重力场辅助惯性导航在实际工程应用之前,需要解决高精度动态绝对重力测量仪器、高分辨率高精度海洋重力信息数据库以及重力匹配理论与准确高效的匹配算法等关键技术^[26-29]。

1) 高精度动态绝对重力测量仪器

绝对重力传感器是水下重力辅助惯性导航系统开展实际应用的关键仪器,若重力测量仪器存在时延或误差较大情况,会导致导航定位的实时性及精度降低,甚至会得到虚假定位结果。工程应用中的重点和难点在于研制高精度绝对重力传感器以及突破数据实时处理技术,从而满足惯性/重力组合导航对重力测量数据高精度和实时性要求。

2) 高分辨率高精度重力信息数据库

构建高分辨率高精度的海洋重力信息数字地图是重力辅助水下惯性导航技术开展工程应用的基础技术储备,当前获取海洋重力异常和重力梯度的方式主要有星载重力测量、机载重力测量和船载重力测量。不同重力数据的后处理及多源融合技术是构建高分辨率高精度海洋重力数字地图的重要研究方向。

3) 重力场匹配理论与匹配算法

重力匹配理论及相关匹配算法在一定程度上决定了重力辅助导航系统最终输出的导航定位精度,其本质是综合比较分析实测数据和存储在海洋重力信息数字地图中的数据,基于特定判断准则输出最佳匹配序列点,主要涉及海洋重力测量仪器的测量误差分析与建模、海洋重力场特征的数学模型以及防虚假定定位准则等方面技术,对匹配算法的抗干扰性、高效性、鲁棒性及可靠性提出了较高的要求。

2 传统重力辅助水下导航研究现状及发展趋势

2.1 国外研究现状

国外开展重力辅助惯性导航相关研究的国家主要是美国,美国海军对水下重力辅助导航开展了长期深入及系统的研究,同时在工程实践中得到了较为成熟的应用。从目前文献调研的情况可知,美国海军对水下重力辅助惯性导航技术的研究开始于20世纪60年代^[30],最初的目的在于提高潜艇水下导航定位精度和战略武器水下机动发射及精准打击能力。水下重力辅助惯性导航系统经历了从无图匹配到有图匹配的发展阶段,主要原因在于大地测量卫星的应用和传统重力仪/重力梯度仪测量性能的提高,能够为有图匹配重力辅助惯性导航系统提供局部区域的高精度重力信息数据库。

1) 无图匹配辅助惯性导航

无图匹配重力辅助惯性导航技术是一种利用传统重力仪/重力梯度仪修正惯导系统中理论重力场模型误差的组合导航技术。美国海军率先开展了水下重力场辅助惯性导航系统的研究与实验,花费数十亿美元开展基于移动载体的传统重力梯度仪研究,用于消除重力场模型中带来的系统误差^[30-31],共有3家研究机构开展了3种不同方案的重力梯度仪研制:美国贝尔航空公司(Bell Aerospace)的旋转加速度计型重力梯度仪研制方案、美国查尔斯·斯塔克·德雷珀实验室(Charles Stark Draper Laboratory)的球形悬浮型重力梯度仪研制方案和美国休斯飞机公司(Hughes Aircraft Company)的旋转质量块型重力梯度仪研制方案,最终贝尔航空公司的旋转加速度计型重力梯度仪方案凭借测量精度高和稳定性好等优点被美国海军采纳。20世纪70年代,美国海军利用实时精确测量的相对重力信息开展水下辅助导航研究,提高潜航器自主导航与抗干扰能力,延长潜航器水下航行周期,重力辅助导航技术显现了广泛的应用前景。20世纪80年代,美国洛克希德·马丁公司(Lockheed Martin Company)成功研制了重力敏感系统(gravity sensitive system, GSS),用于实时测算垂线偏差,以补偿搭载平台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,并于1983年在海上成功开展了演示验证试验,后来装配在美国三叉戟潜艇上。

无图匹配重力辅助导航系统能够较好地消除重力场理论模型引入的系统误差,但是惯性敏感器件存在固有漂移误差,导致无图匹配重力辅助导航系统不能有效解决惯性误差累积问题。

2) 有图匹配辅助惯性导航

有图匹配重力辅助惯性导航技术是一种将实测重力数据与重力基准图中存储重力数据相匹配,基于特定判断准则输出最佳匹配序列点,从而校正惯导系统定位误差的综合导航技术。从20世纪90年代开始,研究人员提出了基于重力数字地图匹配技术改善惯性导航系统定位精度的新概念与新技术。有图匹配重力辅助导航主要包括两种典型系统,分别是重力梯度辅助导航系统^[32-33](gravity gradiometer navigation system, GGNS)和重力辅助惯性导航系统^[34](gravity aided inertial navigation system, GAINS)。美国贝尔航空公司和洛克希德·马丁公司等研究机构对重力数字地图匹配技术开展了重点研究,GGNS和GAINS均由贝尔航空公司研发,洛克希德·马丁公司在GAINS基础上研制出了适用性好、操作简单的通用重力模块(universal gravity module, UGM)。1990年,贝尔航空公司研发了GGNS,GGNS是基于惯性导航系统、传统重力梯度仪和重力梯度数字地图开发的水下自主导航定位匹配系统。GGNS在工作中以实际测量的重力梯度值与存储在数字地图上的重力梯度值之差作为滤波器输入量,对惯性导航系统误差进行校正和优化估计^[35-37]。1991年,贝尔航空公司研发了GAINS,GAINS利用重力测量系统、静电陀螺仪、重力数字地图和深度仪,通过与重力数字地图匹配提供位置参数,减少惯性器件误差。为了满足潜航器长时航行的导航需求,美海军将模块化结构确定为潜航器导航系统的研制发展思路。美国洛克希德·马丁公司在GAINS基础上研制出了UGM^[38],可以测量实际重力偏离理论值的大小以及在空间上的变化率,UGM经测试可使惯性导航系统的经纬度误差缩小10%。

有图匹配重力辅助导航技术引入重力数字地图作为外部参考源,具有校正惯导系统固有漂移误差的能力,因此成为传统重力辅助惯性导航系统的主要研究方向。目前,美国通过多种重力测量手段,构建了部分海洋重力场基准数据背景图,其精度优于1 mGal,分辨率优于1'×1',美国海军潜艇通过重力辅助惯性导航的修正和优化,能够实现“从港口到港口”的作战航行^[39]。

2.2 国内研究现状

我国从20世纪90年代初开始对水下重力辅助惯性导航技术开展了研究,并且随着近年来海洋资源和权益需求增长受到更多关注与重视。目前,国内在水下重力辅助惯性导航领域的研究还处于理论建模仿真与验证、工程样机试验阶段,在重力匹配理论建模、匹配算法仿真及验证等方面有一定的创新,但是在实际应用中仍需突破一些关键技术。21世纪以来,随着精密测量研究领域的发展和进步,海洋相对重力测量技术与器件的研究取得了积极成果。国防科技大学研制的SGA-WZ系列相对

重力仪、北京航天控制仪器研究所研制的SAG系列相对重力仪和中国科学院测量与地球物理研究所研制的CHZ系列相对重力仪均开展了海上船载测量试验^[40-42],目前国产相对重力仪工程样机海上试验精度达到1.5 mGal。从1999~2002年,我国完成了2000国家重力基本网的建立,重力基准点的观测精度优于0.005 mGal,重力基本点的相对观测精度优于0.01 mGal。高精度重力测量仪器的不断发展将极大地推进我国水下重力辅助惯性导航系统的工程应用。2014年,中国科学院测量与地球物理研究所的Wang等^[43]开展了重力辅助惯性导航技术船载海上验证试验,在中国南海的两条航线中验证了重力辅助惯导技术的可行性和有效性,在34 h的海上试验中获得了1.9 n mile的导航定位精度。2021年,中船集团航海保障技术实验室的李晓平等^[44]通过15条实船航迹的重力匹配导航与定位数据,验证了重力辅助导航的有效性,为重力辅助导航系统的应用奠定了理论和试验基础。

从上述传统重力辅助水下惯性导航的国内外应用研究现状可以看出,国外已经开展了水下系列验证性试验,证实了方案的可行性和有效性,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从理论研究向工程样机试验阶段,尚有许多基础工作需要完善。

2.3 发展趋势

水下重力辅助惯性导航的可靠性及鲁棒性水平是实际工程应用的关键。从水下自主导航应用需求出发,重点研究重力测量分辨率、重力测量误差、重力场分布特性以及匹配算法等因素的耦合关系,是提升重力辅助惯性导航定位系统准确性及鲁棒性的关键。在掌握水下自主导航系统误差特性的基础上,提升重力匹配算法的可靠性以及开展演示验证试验是重力辅助惯性导航研究的重要内容。研究重力场物理特性及分布特征,评估潜航器航行区域重力辅助导航的可行性和有效性,对航行线路进行规划也可以有效避免出现较大误差情况。此外,在惯性导航应用中,需要在动态范围、复杂振动环境和极其有限的体积重量功耗限制条件下实现动态测量。因此,用于惯性导航的重力传感器需要更为小型化低功耗的物理系统及更强的抗外界扰动平台。

3 原子干涉重力测量在辅助导航中的应用前景

在水下环境实际应用中,基于相对重力测量技术来辅助惯性导航的方法受到仪器测量流程、仪器测量效率等因素限制,导致辅助导航效果并不显著,甚至在许多区域难以发挥作用。近年来,基于原子干涉的重力测量技术成为量子精密测量领域研究的重点和热点,原子干涉重力仪/重力梯度仪具有测量精度和灵敏度高、稳定性

好、测量效率高、无磨损等特点,突破了小型化、可移动及动态绝对测量等工程应用限制,正处于从原理样机向工程样机转化应用阶段。采用基于原子干涉技术的重力仪/重力梯度仪替代传统相对重力仪器,使得构建超高精度的重力信息数据库以及实时测量高精度的重力异常/重力梯度已成为可能,水下重力辅助惯性导航技术具有更加可行的现实意义与应用前景。

3.1 基于原子干涉的重力测量新技术

基于原子干涉技术的重力测量以超低温原子团为重力感受源,通过激光与原子团的相互作用来构造高灵敏高精度的冷原子物质波干涉仪,根据干涉后原子内态布居数来推算重力加速度信息,如式(1)所示。

$$P = P_0 - A \cos[(k_{\text{eff}} \cdot g - \alpha) T^2] \quad (1)$$

式中: k_{eff} 是拉曼光有效波矢, P_0 、 A 为原子干涉条纹的偏置和幅度, α 是拉曼激光的频率啁啾率。通过啁啾率对干涉条纹进行相位调制,求解重力加速度对应的干涉条纹相位零点 $k_{\text{eff}} \times g - \alpha = 0$,无论怎么改变两拉曼脉冲之间的时间间隔 T ,所有的干涉条纹都将交汇一点,最后通过频率测量该点的啁啾值 α_0 读取重力加速度的绝对值 $g_{\text{ab}} = \alpha_0 / k_{\text{eff}}$ 。

原子干涉重力梯度仪一般是原子干涉重力仪的差分应用形式,由空间间隔距离 L 的两个原子干涉重力仪构成^[45]。如通过对两个重力仪获得的重力加速度 g_1 、 g_2 进行空间差分得到垂直型重力梯度分量 Γ_z ,式(2)所示。

$$\Gamma_z = \frac{g_1 - g_2}{L} \quad (2)$$

原子干涉重力仪/重力梯度仪直接测量绝对重力信息,不对外发射信号、不需标校、没有漂移和机械磨损,这些技术优势使得原子干涉重力仪/重力梯度仪更适合潜航器水下长航时工作对重力测量仪器的性能要求。因此,开展基于原子干涉技术的重力/重力梯度辅助水下惯性导航的研究,有利于提高潜航器水下工作的安全性、隐蔽性和可靠性,为发展具有高精度、长航时、安全隐蔽等特点的下一代自主导航系统提供技术支撑。

3.2 原子干涉重力仪研究进展

1991年,斯坦福大学朱棣文小组的Kasevich等^[46]在国际上首次实现原子干涉重力仪。从此,原子干涉重力仪因其优秀的潜在性能得到了高度关注。目前,原子干涉重力仪测量精度已经达到甚至超越传统相对重力仪,并已经进入工程应用阶段。下面介绍国外原子干涉重力仪在动态绝地重力测量方面的研究进展。

1) 国外研究进展

如图3所示,德国洪堡大学Peters小组的Hauth^[47]于2013年研制出可移动原子干涉重力仪GAIN,将原子干涉重力仪GAIN搭载在小型汽车上,从实验室运输到

不同的指定位置实现了流动式绝对重力测量,其测量灵敏度为 $30 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$ 。



图3 洪堡大学研制的可移动原子干涉重力仪

Fig. 3 Mobile atomic interference gravimeter developed by Humboldt University

如图4所示,法国Muquans公司于2014年推出面向野外应用的AQG原子干涉绝对重力仪,探头直径40 cm,高度约70 cm,重量约为25 kg,测量重复率为2~3 Hz,分辨率为 $5 \mu\text{Gal}@90 \text{ s}$ 。通过车载移动测量结果表明,在安静环境下测量灵敏度为 $50 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$,在噪声较大的环境下测量灵敏度为 $70 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$,长期稳定性优于 $1 \mu\text{Gal}$ ^[48]。

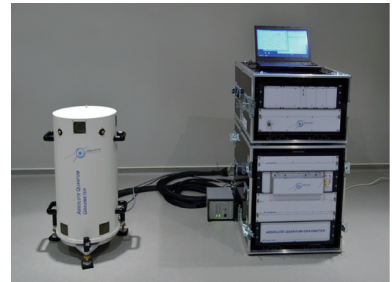
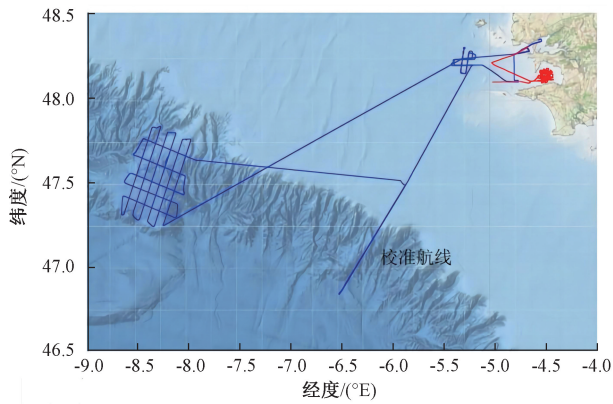


图4 法国Muquans公司研发的可移动AQG原子干涉重力仪

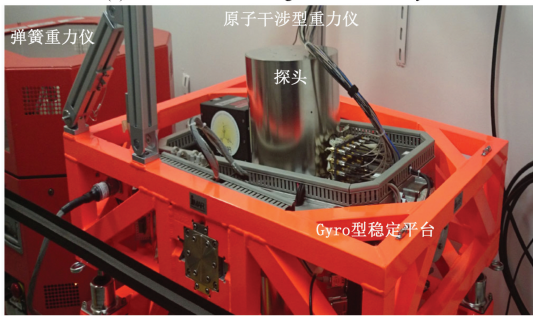
Fig. 4 Mobile AQG atomic interference gravimeter developed by Muquans, France

如图5所示,法国航空航天实验室2018年报道了该实验室开展为期3个月的船载重力测量试验,为了证明原子干涉重力仪测量性能的优越性,在船上还同时使用了商用弹簧型重力仪开展重力测量,测量结果表明,原子干涉重力仪的测量精度优于毫伽量级,其内符合和外符合精度都可以达到 0.5 mGal ,比商用弹簧型重力仪的测量精度提高了5倍^[49]。

如图6所示,2019年美国伯克利大学开展了基于车载的原子干涉重力仪野外测量试验,图6为试验开展情况,曲线为测试路线,总长约为7.6 km,高度差约为



(a) 海洋重力测量路线图
(a) The route of marine gravimetric survey



(b) 测量用的原子干涉重力仪和商用弹簧重力仪
(b) The atomic interference gravimeter and the commercial spring gravimeter for gravity measurement

图5 法国航空航天实验室开展的船载原子干涉重力测量试验

Fig. 5 The onboard atomic interference gravity measurement experiment presented by the French Aerospace Lab

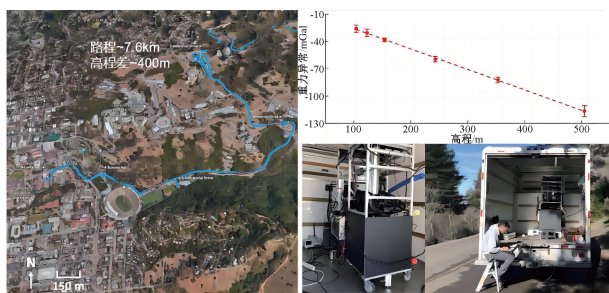


图6 美国伯克利大学开展的车载绝对重力测量

Fig. 6 The vehicle-mounted absolute gravity measurement conducted by Berkeley University

400 m,该原子干涉重力仪的长期稳定性约为 $2 \mu\text{Gal}$,测量不确定度约为 $40 \mu\text{Gal}$ ^[50]。

2) 国内研究进展

国内对原子干涉重力仪的研究起步于2005年,目前已经取得了一些研究进展和成果,下面介绍其中具有代表性的研究成果。

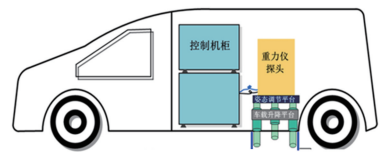
中国科学院武汉物数所于2011年研制了一套喷泉

式原子干涉重力仪,在脉冲间隔 $T=150 \text{ ms}$ 的条件下得到重力测量灵敏度约为 $200 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$,测量分辨率为 $7 \mu\text{Gal}@236 \text{ s}$,并于2018年研制了小型化原子干涉重力仪,在脉冲间隔 $T=60 \text{ ms}$ 下获得重力测量灵敏度为 $230 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$ ^[51]。

华中科技大学 Zhou 等^[52]于2011年研制了喷泉式原子干涉重力仪,重力测量分辨率为 $6 \mu\text{Gal}@203 \text{ s}$ 。2013年突破主动隔振技术获得了当时国际上最高的重力测量灵敏度 $4.2 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$ 。2023年该研究团队将重力测量灵敏度提高到 $2.2 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$ ^[53]。为了满足野外车载快速绝对重力测量的需求,其团队研制了车载原子干涉重力仪 MAIN^[54],如图7(a)所示,其探头直径为48 cm,高为62 cm,重量约30 kg;如图7(b)所示,在华中科技大学校内开展了车载绝对重力测量试验,结果表明其测量灵敏度为 $1.9 \text{ mGal}/\text{Hz}^{1/2}$,长期测量分辨率能达到 $30 \mu\text{Gal}@10\,000 \text{ s}$ 。



(a) 车载原子干涉重力仪MAIN
(a) The vehicle-mounted atomic interference gravimeter MAIN



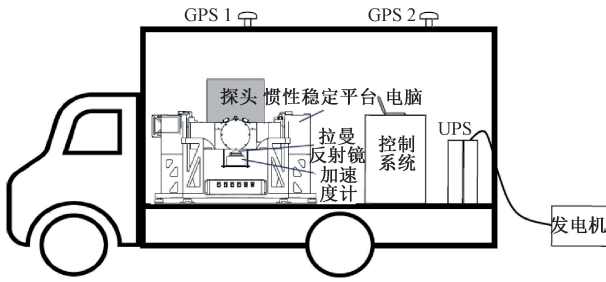
(b) 车载重力测量系统
(b) The vehicle-mounted gravity measurement system

图7 华中科技大学开展的车载绝对重力测量

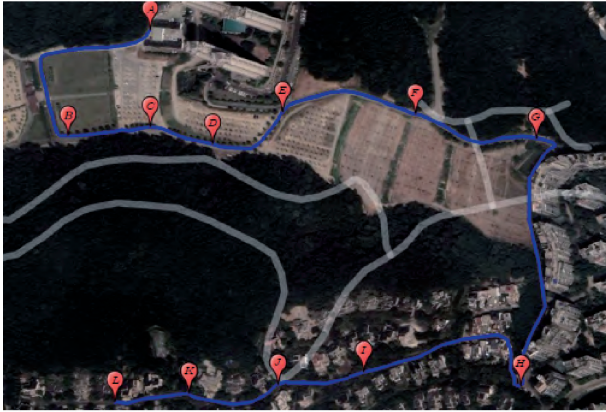
Fig. 7 The vehicle-mounted absolute gravity measurement conducted by Huazhong University of Science and Technology

浙江工业大学林强团队的王凯楠等^[55]基于自主研制的原子干涉绝对重力测量系统,成功开展了车载和船载绝对重力测量试验。在车载原子干涉绝对重力测量方面,其测量系统由原子绝对重力仪、振动补偿系统和辅助系统组成,如图8(a)所示;该车载重力测量系统在浙江工业大学校园内、杭州宝寿山和长沙黄兴大道等多个不同振动环境进行了绝对重力测量,测试结果如图8(b)、(c)所示,在环境安静校园内的内符合精度达到 0.030 mGal ,在杭州宝寿山低振动环境和长沙黄兴大道

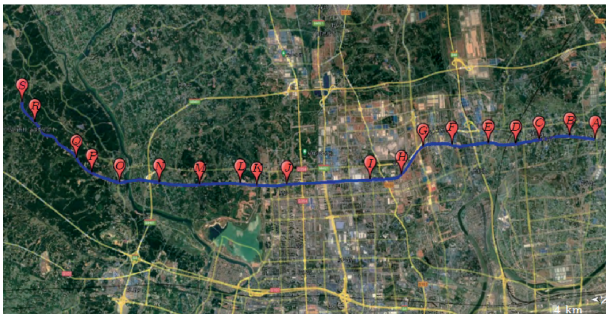
高振动噪声环境下各自的内符合精度分别为 0.123 mGal和 0.162 mGal^[56]。



(a) 车载重力测量系统
(a) Diagram of the vehicle-mounted gravity measurement system



(b) 杭州市宝寿山测试路线
(b) The test route at Hangzhou Baoshou Mountain



(c) 长沙黄兴大道测试路线
(c) The test route at Changsha Huangxing Avenue

图8 浙江工业大学开展的车载绝对重力测量

Fig. 8 The vehicle-mounted absolute gravity measurement conducted by Zhejiang University of Technology

在车载原子干涉绝对重力测量方面,浙江工业大学也取得了积极进展。如图9所示,2020年其团队搭建了一套车载原子干涉重力测量系统,在车载系泊状态下开展了两周左右的绝对重力测量^[57],测量灵敏度为 16.6 mGal/Hz^{1/2},分辨率为 0.7 mGal@1 000 s;2020年9月,该原子干涉重力测量系统在南海某海域进行了 85 km 的动态测量^[58],测量灵敏度达 136.8 mGal/Hz^{1/2}。

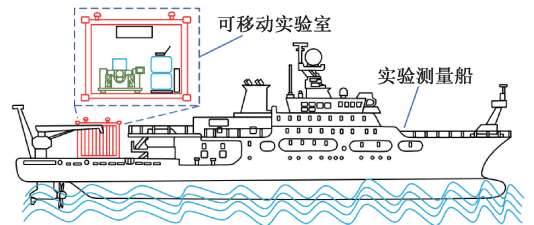
如图10所示,2022年海军工程大学采用冷原子干涉重力仪与传统相对重力仪组合测量方式,在武汉某湖



(a) 船载系泊测试现场
(a) The shipborne mooring testing site



(b) 原子干涉重力仪在船上搭载情况
(b) Atomic interference gravimeter on board



(c) 船载绝对重力动态测量系统
(c) The shipborne absolute gravity dynamic measurement system

图9 浙江工业大学开展的船载绝对重力测量

Fig. 9 The shipborne absolute gravity measurement conducted by Zhejiang University of Technology

区开展了船载动态绝对重力测量试验,航速为 4.6 kn 时,四条测线的内符合精度为 2.272 mGal^[59]。

总结上述国内外研究现状可知,在原子干涉动态绝对重力测量领域,美、英、法等发达国家制定了战略规划并积极开展原子干涉重力测量技术研究,推动原子干涉重力测量仪器向小型化、可移动化方向发展,同时对外实施严格技术封锁。我国在原子干涉重力测量领域起步较晚,经过近20年技术积累,以华中科技大学、浙江工业大学、中国科学技术大学和中国科学院精密测量科学与技术创新研究院(简称“中科院精密院”)为代表的国内研究机构已掌握了一批核心关键技术,形成一系列标志性

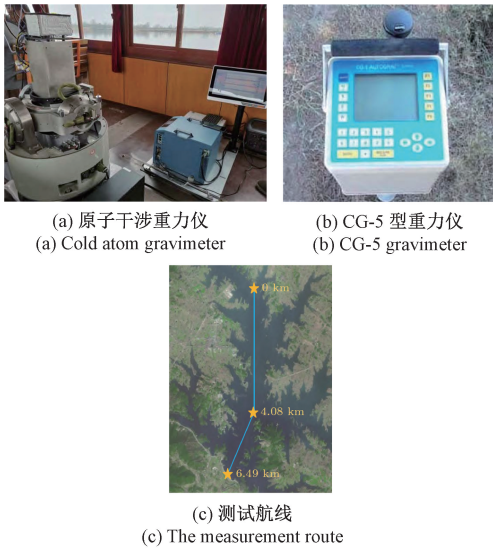


图 10 海军工程大学开展的船载绝对重力测量

Fig. 10 The shipborne absolute gravity measurement conducted by Naval University of Engineering

成果,在实验室/静态测试指标上达到了国际一流水平,但在野外动态应用上刚刚起步,应用技术指标离国际先进水平还有一定差距。

3.3 原子干涉重力梯度仪研究进展

1) 国外研究进展

原子干涉重力梯度仪测量的结果是绝对重力梯度值,理论上没有漂移,是开展长航时水下重力辅助惯性导航的最优技术方案之一。1998年,美国耶鲁大学研究人员首次采用原子干涉技术实现了重力梯度的测量,开辟了原子干涉重力梯度仪研究新领域^[60]。此外,意大利佛罗伦萨大学、法国巴黎天文台、英国伯明翰大学等研究机构也开展了原子干涉重力梯度仪技术的研究并取得了一系列重要的进展。

如图 11 所示,耶鲁大学研制的国际上首台原子干涉重力梯度仪由两个独立的原子干涉重力仪组成,采用双 MOT 同时冷却和俘获铯原子团,该原子干涉重力梯度仪测量基线为 1.09 m,在实验室环境下测量了当地重力梯度值为 $3\ 370 \pm 175\ \text{E}$ 。如图 12 所示,2007 年,该团队采用基于原子干涉技术的重力梯度仪测量了引力常数 G ,结果为 $6.693 \times 10^{-11}\ \text{m}^3/\text{kg}/\text{s}^2$,其中平均值的标准误差为 $\pm 0.027 \times 10^{-11}$,系统误差为 $\pm 0.021 \times 10^{-11}$ ^[61]。

佛罗伦萨大学也是国际上研究原子干涉重力梯度仪的重要科研机构之一。如图 13 所示,其研究团队于 2014 年研制出单阱双抛型垂向重力梯度仪,此方案利用单个磁光阱,按时序控制的时间抛出两个原子团,对激光及电路通道的需求更少,使得物理系统更加紧凑、简洁。该重力梯度仪测量灵敏度达到约 $100\ \text{E}/\text{Hz}^{1/2}$,测量分辨

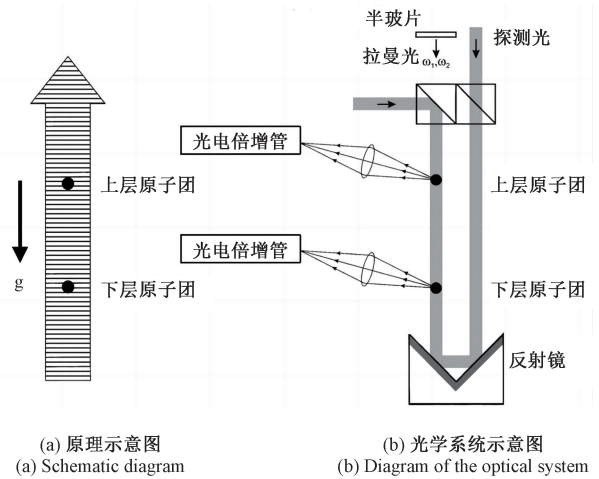


图 11 耶鲁大学研制的首台原子干涉重力梯度仪
Fig. 11 The first atomic interference gravity gradiometer developed by Yale University

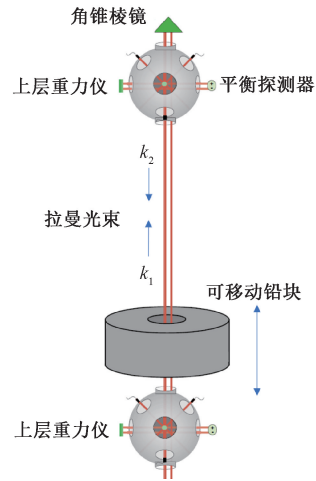


图 12 耶鲁大学研发的双阱垂直型原子干涉重力梯度仪
Fig. 12 Double-well vertical atomic interference gravity gradiometer developed by Yale University

率达到约 $1.7\ \text{E} @ 8\ 000\ \text{s}$ ^[62],并且实现了测量精度为 1.5×10^{-4} 的万有引力常数测量^[63]。

2008 年,美国斯坦福大学研制出首个可移动的原子干涉重力梯度仪并开展了车载绝对重力测量试验。如图 14(a) 所示,重力梯度仪由两个原子干涉重力仪组成,基线长度为 0.7 m,测量灵敏度约为 $60\ \text{E}/\text{Hz}^{1/2}$,测量分辨率约为 $2\ \text{E} @ 2\ 000\ \text{s}$ ^[64],重力梯度仪搭载在专用保障车上,从实验楼一层区域内进行往返测量,测试结果表明在该区域内重力梯度变化约为 300 E,测量场景及测试结果如图 14(b) 和(c) 所示。

2022 年,英国伯明翰大学在《Nature》上发表相关研究成果,验证了基于原子干涉技术的重力梯度仪可探测

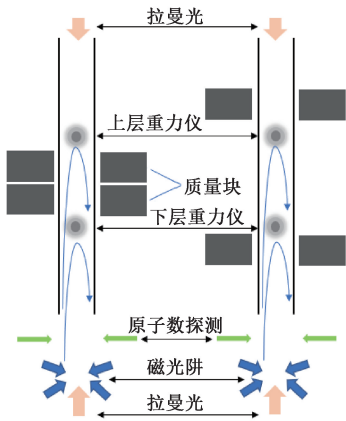
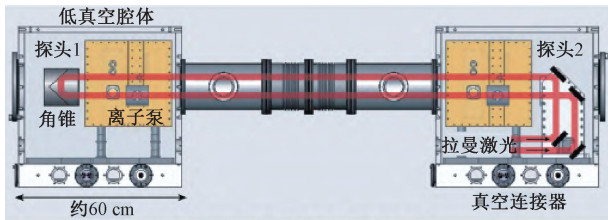


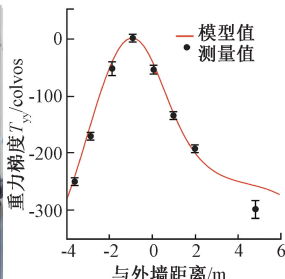
图 13 佛罗伦萨大学研发的单阱垂向型原子干涉重力梯度仪
 Fig. 13 Single-well vertical atomic interference gravity gradiometer developed by University of Florence



(a) 可移动水平型原子重力梯度仪组成
 (a) Diagram of movable horizontal atomic gravity gradiometer



(b) 车载测试
 (b) Vehicle-mounted testing



(c) 重力梯度测试结果
 (c) Gravity gradient test results

图 14 斯坦福大学开展的车载原子梯度仪测试
 Fig. 14 Vehicle-mounted atomic gradiometer testing conducted by Stanford University

到隐藏在地下工事和物体。如图 15 所示,伯明翰大学研究团队研制了一台垂直型原子干涉重力梯度仪^[6],据报道该原子干涉重力梯度仪可在 0~30℃ 环境温度下工作,测量灵敏度为 466 E/Hz^{1/2},测量分辨率约为 20 E@600 s,该原子干涉重力梯度仪在隧道(长 2 m×高 2 m)上方 0.5 m 进行了重力梯度测量,探测到的重力梯度异常信号大小约为 170 E。

2) 国内研究进展

我国在 21 世纪初开展了原子干涉重力梯度仪的研究工作,其中华中科技大学、浙江工业大学、中科院精测院等科研机构是开展研究较早的单位。

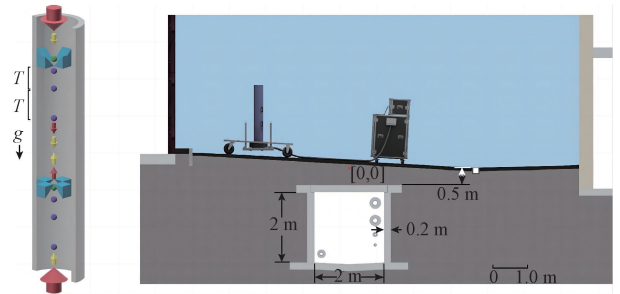


图 15 伯明翰大学开展原子干涉重力梯度仪地下探测
 Fig. 15 Underground detection based on atomic interference gravity gradiometer conducted by University of Birmingham

2021 年,华中科技大学研制出测量万有引力常数的双阱上抛型垂向原子干涉重力梯度仪。如图 16 所示,该原子干涉重力梯度仪的基线长为 30 cm,脉冲间隔为 300 ms,测量灵敏度为 99 E/Hz^{1/2},测量分辨率约为 1E@3 600 s^[65]。

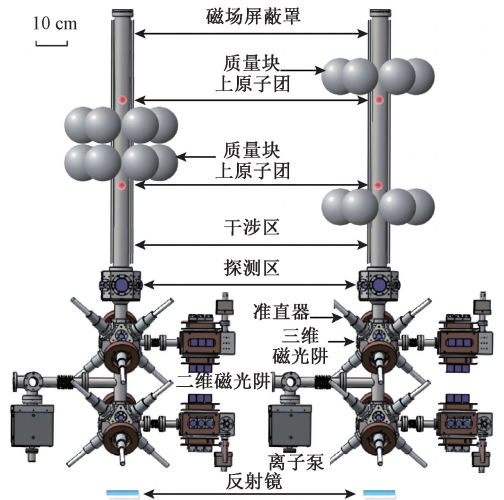


图 16 华中科技大学研制的双阱垂向原子干涉重力梯度仪
 Fig. 16 Double well vertical atomic interference gravity gradiometer developed by Huazhong University of Science and Technology

如图 17 所示,2021 年中科院精测院研制出可移动水平型原子干涉重力梯度仪,并开展了车载测量试验^[66]。该原子干涉重力梯度仪物理系统总长为 70 cm,基线长为 45 cm,脉冲间隔为 100 ms,车载条件下该仪器测量灵敏度约为 500 E/Hz^{1/2},测量分辨率约为 10 E@1 000 s。

经过 20 多年迅速发展,原子干涉重力梯度仪在测量精度、小型化和鲁棒性等方面都取得了较大成果,目前正处于从原理样机向移动载体搭载的发展阶段,众多应用案例验证了其在野外应用场景下的优异性能,其工程化应用对于潜航器水下自主导航、地下工事探测等领域具

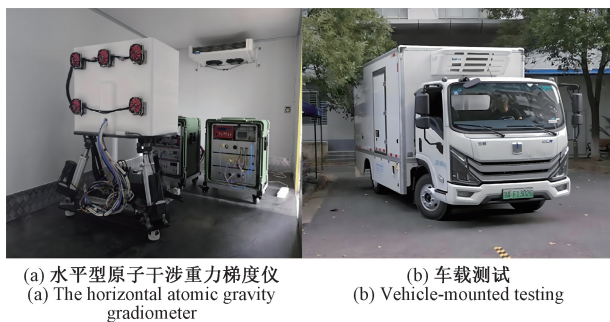


图 17 中国科学院精测院研制的水平型原子干涉重力梯度仪
Fig. 17 The horizontal atomic interference gravity gradiometer developed by Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS

有非常重要的意义。

3.4 需解决的关键技术

水下惯性导航系统对于高精度原子干涉重力测量技术的需求极为迫切,这主要是在军事应用上不仅需要水下惯性导航系统具有高精度定位能力,还需要满足小型化、鲁棒性和可靠性等工程应用要求^[67-68]。因而,相比于地面静态测量,用于水下自主导航的原子干涉重力测量系统需要更为紧凑的物理系统、更强的振动噪声鲁棒性、以及更小的死区测量时间。

1) 小型化集成技术

原子干涉重力仪/重力梯度仪主要由真空系统、光学系统、电路系统和时序控制等部分组成,为满足其野外工程化应用需求,相关研制单位都在对其开展小型化、集成化研究。原子干涉重力测量仪器小型化发展的第1个思路是从喷泉型过渡到自由下落式^[69],原子团从上抛变成自由下落,拉曼冷却光由一个声光调制器提供,简化了光路系统和控制系统。原子干涉重力测量仪器小型化发展的第2个思路是使用金字塔结构真空腔实现原子干涉重力测量。韩国科学技术研究院的科研人员使用金字塔型真空腔结构进行了磁光阱原子冷却^[70],使用一束冷却光就满足了6束激光配置。原子干涉重力测量仪器小型化发展的第3个思路是研发紧凑型、集成化的光学系统,通过巧妙设计激光光路系统和时序系统,减小激光器数量,实现激光输出的复用^[71-73]。中科院精测院^[74]利用单个种子激光和声光调制器,实现了两套小型化的单种子激光光纤光学系统。

2) 动态绝对重力测量技术

动态绝对重力测量在重力辅助惯性导航领域有着非常重要的应用,目前海洋/水下重力测量主要依赖相对重力仪,存在测量频率较低和零点漂移等问题,影响了海洋/水下重力测量效率,甚至将降低辅助导航定位精度。

原子干涉重力仪/重力梯度仪是一种绝对测量仪器,具有高精度、高分辨率及低漂移等特性,为深远海超长周期、超远距离重力测量提供了一种很好的解决方案。原子干涉动态绝对重力测量技术将重力测量仪器通过惯性稳定平台安装在水下潜航器上,在运动状态下实现高精度绝对测量,近年来动态绝对重力测量技术处于快速发展阶段^[75]。

4 结 论

以原子干涉技术为代表的重力测量新手段作为下一代颠覆性测量方式,具有超高精度、绝对测量、长期稳定及自主隐蔽等优点,在未来水下辅助导航方面具有重要应用前景。目前,由于对动态环境振动噪声的有限抑制和实时补偿能力不足,限制了目前原子干涉重力传感器在水下移动平台上的应用。原子干涉重力测量技术尚未完全成熟,但相比传统相对重力仪器已经具有强劲的竞争力,作为下一代重力/惯性组合导航系统的潜在重要组成部分,原子干涉重力传感器需要在小型集成化、大动态范围、可移动性、高测量频率和多场景抗干扰的鲁棒性等方面开展持续深入的研究,为开展水下动基座的重力实时测量打下基础,开展面向潜航器水下导航、路径规划及目标探测等方面研究及应用方案探索。

参考文献

- [1] CHU Z Z, WANG F L, LEI T J, et al. Path planning based on deep reinforcement learning for autonomous underwater vehicles under ocean current disturbance[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 8(1): 108-120.
- [2] WANG R, WANG S, WANG Y, et al. Development and motion control of biomimetic underwater robots: A survey[J]. IEEE Transactions on Systems Man Cybernetics Systems, 2022, 52(2): 833-844.
- [3] 郑伟, 李钊伟, 吴凡. 天海一体化水下重力辅助导航研究进展[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(3): 39-49.
ZHENG W, LI ZH W, WU F. Research progress of the underwater gravity-aided navigation based on the information of aerospace-marine integration[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(3): 39-49.
- [4] 孙枫, 曹通. 基于重力信息的惯性系粗对准精度分析[J]. 仪器仪表学报, 2011(11): 11-17.
SUN F, CAO T. Accuracy analysis of coarse alignment based on gravity in inertial frame[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011(11): 11-17.
- [5] 黄谟涛, 邓凯亮, 欧阳永忠, 等. 海空重力测量及应

- 用技术研究若干进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1635-1650.
- HUANG M T, DENG K L, OUYANG Y ZH, et al. Development and study in the marine and airborne gravimetry and its application [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(10): 1635-1650.
- [6] STRAY B, LAMB A, KAUSHIK A, et al. Quantum sensing for gravity cartography [J]. Nature, 2022, 602: 590-594.
- [7] POLI N, WANG F Y, TARALLO M G, et al. Precision measurement of gravity with cold atoms in an optical lattice and comparison with a classical gravimeter [J]. Physical Review Letters, 2011, 106(3): 038501.
- [8] ROSI G, CACCIAPUOTI L, SORRENTINO F, et al. Measurement of the gravity-field curvature by atom interferometry [J]. Physical Review Letters, 2015, 114(1): 013001.
- [9] GUGLIELMO M T. Testing gravity with cold atom interferometry: Results and prospects [J]. Quantum Science and Technology, 2021, 6(2): 1-25.
- [10] 李安, 车浩, 覃方君, 等. 冷原子干涉重力测量技术发展展望[J]. 海军工程大学学报, 2021, 33(6): 1-6.
- LI AN, CHE H, QIN F J, et al. Development and prospect of cold atom interferometry gravimetry measurement [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2021, 33(6): 1-6.
- [11] 程冰, 陈佩军, 周寅, 等. 基于冷原子重力仪的绝对重力动态移动测量实验 [J]. 物理学报, 2022, 71(2): 247-257.
- CHENG B, CHEN P J, ZHOU Y, et al. Experiment on dynamic absolute gravity measurement based on cold atom gravimeter [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(2): 247-257.
- [12] SHI Z M, LANG J J, LIANG X H, et al. Experimental study on improving the accuracy of marine gravimetry by combining moving-base gravimeters with GNSS antenna array [J]. Earth, Planets and Space, 2023, 73(1): 1-20.
- [13] XIONG Z M, CAO J L, WU M P, et al. A method for underwater dynamic gravimetry combining inertial navigation system, doppler velocity log, and depth gauge [J]. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., 2020, 8(17): 1294-1298.
- [14] WANG Q, YANG C S, WU S E, et al. Application of gravity passive aided strapdown inertial navigation in underwater vehicles [J]. International Journal of Sensor Networks, 2020, 4(32): 209-217.
- [15] SHINOHARA M, KANAZAWA T, FUJIMOTO H, et al. Development of a high-resolution underwater gravity measurement system installed on an autonomous underwater vehicle [J]. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., 2018, 12(15): 1937-1941.
- [16] 毛宁, 李安, 许江宁, 等. 惯性/重力组合导航可观性分析及鲁棒滤波方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, Doi: 10.13203/j.whugis20230075.
- MAO N, LI AN, XU J N, et al. Observability analysis and robust fusion algorithms of INS/Gravity integrated navigation [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, Doi: 10.13203/j.whugis20230075.
- [17] 吕梦洁, 王光明, 颜树华, 等. 原子干涉重力仪集成光源系统综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 1-10.
- LYU M J, WANG G M, YAN SH H, et al. Review of compact laser system for atom interferometry gravimeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 1-10.
- [18] 章欢开, 颜树华, 朱凌晨, 等. 冷原子干涉绝对重力精密测量与系统误差 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 1-12.
- ZHANG H K, YAN SH H, ZHU L X, et al. Precision measurement of absolute gravity by cold atom interference and the system errors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 1-12.
- [19] 房丰洲, 顾春阳. 高精度重力仪的测量原理与发展现状 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1830-1840.
- FANG F ZH, GU CH Y. Measurement principle and development status of high precision gravimeters [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1830-1840.
- [20] 杨共鼎, 翁堪兴, 吴彬, 等. 量子重力梯度仪研究进展 [J]. 导航定位与授时, 2021, 8(2): 18-29.
- YANG G D, WENG K X, WU B, et al. Research progress of quantum gravity gradiometer [J]. Navigation Positioning and Timing, 2021, 8(2): 18-29.
- [21] 程力, 蔡体菁, 夏冰. 重力辅助惯性导航系统中的一种新的相关匹配算法 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(S3): 2235-2236.
- CHENG L, CAI T J, XIA B. Correlative matching algorithm of gravity aided inertial navigation system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(S3): 2235-2236.
- [22] 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.

- FU M Y, LIU F, YUAN SH M, et al. Review of undersea autonomous inertial-gravity matching navigation[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2017, 25(1):31-43.
- [23] 王博, 付梦印, 李晓平, 等. 水下重力匹配定位算法综述[J]. *导航与控制*, 2020, 19(4):170-178.
WANG B, FU M Y, LI X P, et al. Review of underwater gravity matching positioning algorithm [J]. *Navigation and Control*, 2020, 19(4):170-178.
- [24] 徐遵义, 晏磊, 宁书年, 等. 海洋重力辅助导航的研究现状与发展[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(1):104-111.
XU Z Y, YAN L, NING SH N, et al. Situation and development of marine gravity aided navigation system[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(1):104-111.
- [25] 万晓云, 吴云龙, 郭恒洋, 等. 基于重力场产品的水下匹配导航发展现状及影响因素分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(6):879-890.
WAN X Y, WU Y L, GUO H Y, et al. Development status and influencing factor analysis of underwater matching navigation based on gravity field products[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(6):879-890.
- [26] ZHAO S J, WEI Z, LI Z W, et al. Improving matching efficiency and out-of-domain positioning reliability of underwater gravity matching navigation based on a novel domain-center adaptive-transfer matching method [J]. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1001811.
- [27] WANG C, WANG B, DENG Z, et al. A co-occurrence matrix-based matching area selection algorithm for underwater gravity-aided inertial navigation [J]. *IET Radar Sonar Navig.* 2021, 15:250-260.
- [28] WANG B, ZHU J, MA Z, et al. Improved particle filter based matching method With Gravity Sample Vector for Underwater Gravity-Aided Navigation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(6):5206-5216.
- [29] 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.
YAO J Q. Research on the method of underwater gravity-aided navigation and positioning [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [30] HELLER W G. Gradiometer aided inertial navigation[R]. Analytic Sciences Corporation, 1975.
- [31] WELLS E M, BREAKWELL J V. A study to determine the best utilization of gravity gradiometer information to improve inertial navigation system accuracy [C]. *Proceedings of Guidance and Control Conference*, 1980: 72-79.
- [32] AFFLECK C A, JIRCITANO A. Passive gravity gradiometer navigation system[C]. *IEEE Symposium on Position Location and Navigation*, Las Vegas, USA, 1990: 60-66.
- [33] JIRCITANO A, WHITE J, DOSCH D. Gravity based navigation of AUV [C]. *Proceedings of Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, 1990: 177-180.
- [34] JIRCITANO A, DOSCH D E. Gravity aided inertial navigation system (GAINS) [C]. *Proceedings of 47th Annual Meeting on Navigation and Exploration*, Williamsburg, 1991: 221-229.
- [35] ZHANG F, CHEN X, SUN M, et al. Simulation study of underwater passive navigation system based on gravity gradient [C]. *IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, 2004.
- [36] GOLDSTEIN M S, BRETT J. Precision gravity gradiometer/auv system [C]. *Autonomous Underwater Vehicles*, 1998: 167-174.
- [37] LEONARD J J, BAHR A. *Autonomous underwater vehicle navigation* [M]. Springer International Publishing, 2016.
- [38] MORYL J, RICE H, SHINNERS S. The universal gravity module for enhanced submarine navigation [C]. *Proceedings of IEEE Position Location and Symposium*, 1998: 324-331.
- [39] 韩雨蓉. 水下导航重力匹配算法研究[D]. 北京:北京理工大学, 2017.
HAN Y R. Research on gravity matching algorithm for underwater navigation [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [40] 李姗姗. 水下重力辅助惯性导航的理论与方法研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2010.
LI SH SH. Research on the theory and method of underwater gravity aided inertial navigation [D]. Zhengzhou: Information Engineering University of PLA, 2010.
- [41] 胡明, 涂海波, 柳林涛, 等. CHZ 型重力仪控制系统的数字化设计与实现 [J]. *导航与控制*, 2016, 15(4): 1-7.
HU M, TU H B, LIU L T, et al. Digital design and implementation of the control system for CHZ gravimeter[J]. *Navigation and Control*, 2016, 15(4): 1-7.
- [42] 刘少明, 孙少安, 卢红艳. LCR 重力仪与 CG-5 重力

- 仪的长基线混合标定[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(1): 56-59.
- LIU SH M, SUN SH AN, LU H Y. Mixed calibration on long baseline for LCR gravimeter and CG-5 gravimeters[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(1): 56-59.
- [43] WANG H, WU L, CHAI H, et al. Technology of gravity aided inertial navigation system and its trial in South China Sea[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2015, 10(5): 862-869.
- [44] 李晓平, 周贤高, 宫京. 重力匹配导航要素影响机理建模与试验验证[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(6): 777-787.
- LI X P, ZHOU X G, GONG J. Factor influencing mechanism modelling and test validation of gravity map matching navigation [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021, 29(6): 777-787.
- [45] 徐炜豪, 吕伟, 仲嘉琪, 等. 原子干涉重力梯度仪发展现状与分析[J]. 导航与控制, 2022, 21(Z2): 80-90.
- XU W H, LYU W, ZHONG J Q, et al. Development status and analysis of gravity gradiometer based on atom interferometer [J]. Navigation and Control, 2022, 21(Z2): 80-90.
- [46] KASEVICH M, CHU S. Atomic interferometry using stimulated Raman transitions [J]. Physical Review Letters, 1991, 67(2): 181-184.
- [47] HAUTH M, FREIER C, SCHKOLNIK V, et al. First gravity measurements using the mobile atom interferometer GAIN[J]. Applied Physics B, 2013, 113: 49-55.
- [48] MÉNORET V, VERMEULEN P, LE MOIGNE N, et al. Gravity measurements below $10^{-9}g$ with a transportable absolute quantum gravimeter [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 12300.
- [49] BIDEI Y, ZAHZAM N, BLANCHARD C, et al. Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry [J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 627.
- [50] WU X, PAGEL Z, MALEK B S, et al. Gravity surveys using a mobile atom interferometer [J]. Science Advances, 2019, 5(9): eaax0800.
- [51] ZHOU L, XIONG Z Y, YANG W, et al. Measurement of local gravity via a cold atom interferometer[J]. Chinese Physics Letters, 2011, 28(1): 013701.
- [52] ZHOU M K, HU Z K, DUAN X C, et al. Performance of a cold-atom gravimeter with an active vibration isolator[J]. Physical Review A, 2012, 86: 043630.
- [53] ZHANG T, CHEN L L, SHU Y B, et al. Ultrahigh-sensitivity bragg atom gravimeter and its application in testing lorentz violation [J]. Phys. Rev. Applied, 2023, 20: 014067.
- [54] ZHANG J Y, XU W J, SUN S D, et al. A car-based portable atom gravimeter and its application in field gravity survey [J]. AIP Advances, 2021, 11(11): 115223.
- [55] 王凯楠, 徐晗, 周寅, 等. 基于车载原子重力仪的外场绝对重力快速测绘研究[J]. 物理学报, 2022, 71(15): 159101.
- WANG K N, XU H, ZHOU Y, et al. Research on rapid surveying and mapping of outfield absolute gravity based on vehicle-mounted atomic gravimeter[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(15): 159101.
- [56] 吴彬, 周寅, 程冰, 等. 基于原子重力仪的车载静态绝对重力测量[J]. 物理学报, 2020, 69(6): 060302.
- WU B, ZHOU Y, CHENG B, et al. Static measurement of absolute gravity in truck based on atomic gravimeter[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(6): 060302.
- [57] 程冰, 周寅, 陈佩军, 等. 船载系泊状态下基于原子重力仪的绝对重力测量[J]. 物理学报, 2021, 70(4): 040304.
- CHENG B, ZHOU Y, CHEN P J, et al. Absolute gravity measurement based on atomic gravimeter under mooring state of a ship [J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(4): 040304.
- [58] 朱栋, 徐晗, 周寅, 等. 基于扩展卡尔曼滤波算法的船载绝对重力测量数据处理[J]. 物理学报, 2022, 71(13): 133702.
- ZHU D, XU H, ZHOU Y, et al. Data processing of shipborne absolute gravity measurement based on the extended Kalman filter algorithm [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(13): 133702.
- [59] 车浩, 李安, 方杰, 等. 基于冷原子重力仪的船载动态绝对重力测量实验研究[J]. 物理学报, 2022, 71(11): 113701.
- CHE H, LI AN, FANG J, et al. Ship-mounted dynamic absolute gravity measurement based on cold atom gravimeter [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(11): 113701.
- [60] SNADDEN M J, MCGUIRK J M, BOUYER P, et al. Measurement of the Earth's gravity gradient with an atom interferometer-based gravity gradiometer [J]. Physical Review Letters, 1998, 81(5): 971-974.
- [61] FIXLER J B, FOSTER G T, MCGUIRK J M, et al. Atom interferometer measurement of the Newtonian constant of gravity[J]. Science, 2007, 315: 74-77.
- [62] SORRENTINO F, BODART Q, CACCIAPUOTI L, et al. Sensitivity limits of a Raman atom interferometer as

- a gravity gradiometer [J]. *Physical Review A*, 2014, 89(2):023607.
- [63] ROSI G, SORRENTINO F, CACCIAPUOTI L, et al. Precision measurement of the Newtonian gravitational constant using cold atoms [J]. *Nature*, 2014, 510: 518-521.
- [64] BIEDERMANN G W, WU X, DESLAURIERS L, et al. Testing gravity with cold-atom interferometers [J]. *Physical Review A*, 2015, 91(3):033629.
- [65] MAO D K, DENG X B, LUO H Q, et al. A dual-magneto optical-trap atom gravity gradiometer for determining the Newtonian gravitational constant [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(5): 053202.
- [66] ZHU L, ZHONG J Q, ZHANG X W, et al. Feedback control of atom trajectories in a horizontal atom gravity gradiometer [J]. *Optics Express*, 2022, 30(6): 10071-10083.
- [67] 许大欣. 利用重力异常匹配技术实现潜艇导航 [J]. *地球物理学报*, 2005, 48(4):812-816.
XU D X. Using gravity anomaly matching techniques to implement submarine navigation [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(4):812-816.
- [68] JOSÉ M, ANÍBAL M. Survey on advances on terrain based navigation for autonomous underwater vehicles [J]. *Ocean Engineering*, 2017, 139: 250-264.
- [69] BORDÉ C J. Atomic interferometry with internal state labelling [J]. *Physics Letters A*, 1989, 140(1-2): 10-12.
- [70] LEE K I, KIM J A, NOH H R, et al. Single-beam atom trap in a pyramidal and conical hollow mirror [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(15): 1177-1179.
- [71] DEGEN C, REINHARD F, CAPPELLARO P. Quantum sensing [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2017, 89(3): 035002.
- [72] 吴彬, 王肖隆, 王河林, 等. 冷原子干涉型重力仪的发展现状与趋势 [J]. *导航与控制*, 2015, 14(2):2-9.
WU B, WANG X L, WANG H L, et al. The current situation and trend of the gravimeter based on cold atom interferometer [J]. *Navigation and Control*, 2015, 14(2):2-9.
- [73] LEE J, DING R, CHRISTENSEN J, et al. A compact

cold-atom interferometer with a high data-rate grating magneto-optical trap and a photonic-integrated-circuit-compatible laser system [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 5131.

- [74] HUANG P W, TANG B, CHEN X, et al. Accuracy and stability evaluation of the 85Rb atom gravimeter WAG-H5-1 at the 2017 international comparison of absolute gravimeters [J]. *Metrologia*, 2019, 56(4):045012.
- [75] MEGUINNESS H J, RAKHOLIA A V, BIEDERMANN G W. High data-rate atom interferometer for measuring acceleration [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(1): 011106.

作者简介



万伏彬, 2012 年于北京理工大学获得学士学位, 2014 年于国防科技大学获得硕士学位, 2019 年于国防科技大学获得博士学位, 现为军事科学院国防科技创新研究院助理研究员, 主要研究方向为量子精密测量与应用。

E-mail: wanfubin12@nudt.edu.cn

Wan Fubin received his B.Sc. degree both from Beijing Institute of Technology in 2012, and received his M.Sc. degree and Ph.D. degree both from National University of Defense Technology in 2014 and 2019. He is currently an assistant research fellow at National Innovation Institute of Defense Technology in Academy of Military. His research interests include quantum precision measurement and application.



胡青青 (通信作者), 2010 年于西安交通大学获得学士学位, 2012 年于国防科技大学获得硕士学位, 2017 年于国防科技大学获得博士学位, 现为军事科学院国防科技创新研究院副研究员, 主要研究方向为量子精密测量与应用。

E-mail: huqingqing365@123.com

Hu Qingqing (Corresponding author) received her B.Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2010, received her M.Sc. degree and Ph.D. degree both from National University of Defense Technology in 2012 and 2017. She is currently an associate research fellow at National Innovation Institute of Defense Technology in Academy of Military. Her research interests include quantum precision measurement and application.