

· 研究进展 ·

走向深海,发展自立自强的海底大地测量基准

鲍李峰^{1,2*} 席梦寒^{1,2} 翟振和³ 李琦⁴ 孙和平^{1,2}

1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院/大地测量与地球动力学国家重点实验室,武汉 430077
2. 中国科学院大学,北京 100049
3. 西安测绘研究所,西安 710054
4. 西安测绘总站,西安 710054

[摘要] 海洋是重要的经济通道和安全屏障,需要建立实时、快速感知海洋环境变化的海底基准网。海底大地测量基准在海洋资源勘探、海洋科学研究和保障海洋安全方面具有巨大优势和重要作用。通过回顾国内外海底大地测量基准构建的发展情况,分析和讨论了构建海底大地测量基准的主建思路和关键科学问题。阐述自主发展和构建海底重力基准的意义,并分析构建基准网需要重点突破的关键技术。在量子精密测量技术不断突破的基础上,提出利用量子测量技术改变现有观测技术缺陷的思考,有望加快建设海底大地测量基准网,为水下复杂环境提供陆海连续、安全可靠和高精度的时空服务。

[关键词] 海底大地测量基准;水下动态测量技术;量子精密测量技术

21世纪是海洋的时代,谁拥有了海洋,谁就拥有了生存和持续发展的空间。充分了解海洋精细结构,是认知海洋、经略海洋的科学依据,是谋划、决策、规划和实施海洋强国战略的重要基础。2016年,习近平总书记在全国科技创新大会上指出:“深海蕴藏着地球上远未认知和开发的宝藏,但要得到这些宝藏,就必须在深海进入、深海探测、深海开发方面掌握关键技术”。《国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》中,明确将着力突破深海探测的关键技术,向深海空间拓展,整合先进的海洋观测技术及手段,逐步形成多要素、全天候、全自动的全球海洋立体观测系统。海底大地测量基准是海洋立体观测体系重要组成,是人类研究探索海洋,开发和利用海底资源的重要前提,也是海洋强国战略的核心关键。

时空基准是一种协议,能够让我们以相同的“方式”探索地球、理解自然,时空基准构建的科学使命是不断延伸基准,不断提高精度。对陆地、海洋和天空的探索,离不开大地基准、高程基准和重力基准等



鲍李峰 中国科学院大学岗位教授、研究员,博士生导师,大地测量与地球动力学国家重点实验室副主任。主要研究工作聚焦海洋大地测量学科主题,充分利用现代大地测量技术精准定量的优势,针对海洋重力场精细模型构建和水下长航时无源导航面临的诸多理论与技术难题开展系统化研究。

大地测量基准^[1];海底大地测量基准是海洋资源环境信息的基本载体和重要组成部分。21世纪以来,世界各国加快了争夺、瓜分海洋资源的步伐,美国、加拿大通过“海王星”计划,日本通过布测先进的海底大地测量基准网,都在不断完善海底基准设施,加快海底大地测量技术的革新,力求在海洋资源争夺和海洋空间利用中占据有利地位。当前,我国海洋形势十分严峻,国家主权和海洋权益正面临巨大挑战,实现海底大地测量基准的基础建设已经刻不容缓。

海底大地测量基准是探索未知海底世界的先行

收稿日期:2023-09-14;修回日期:2023-11-29

* 通信作者,Email: baolifeng@whigg.ac.cn

本文受到国家自然科学基金项目(42174102,42192535,41931076)的资助。

者,是时空基准建设的重要组成部分^[2]。为响应我国海洋强国发展战略,关心海洋,认识海洋,经略海洋,向海洋进军,必须加快建设和发展自立自强的海底大地测量基准网。由于声波在海水中的传播性能良好,海底大地测量基准网建设的主要技术是以水声导航定位技术和水下重力测量技术为主,与其它导航定位技术共同构成的组合定位系统^[3]。综合全球导航卫星系统和水声定位系统的水下组合导航定位系统被称为 GNSS-A(Global Navigation Satellite System-Acoustics)组合定位系统,该系统是国际各发达国家构建海底大地测量基准网的主要技术手段;而水下重力测量技术则主要用于构建海底重力基准网,这些关键技术手段也是我国自主发展海底大地测量基准网的主要研究方向。GNSS-A 定位系统和水下重力测量技术还将海面与海底进行联合观测,打造立体的观测控制网,使得陆地、天空和海洋能够实现连续导航,该技术手段已成为海洋测绘与导航领域的热点问题和前沿方向。

同时,海底大地测量基准是地球科学前沿进展的基础保障,地球科学研究需要稳定可靠、高精度的海底大地测量基准网和水下导航定位技术提供不间断的水下导航定位服务;同时也是水下战场环境现代化、信息化的测绘基础信息保障,保卫海岛礁资源需要实时、快速地感知海洋环境的变化,提升海洋环境监测的精细化能力。

1 全球海底基准发展现状和主要技术

加快发展海底大地测量基准的建设有助于对海底世界的深入探索,对地球科学的前沿探究以及对水下环境的测绘保障。海底大地测量基准主要内涵包括海底空间基准和海底重力基准。目前,构建海底空间基准的主要观测技术手段是声学导航、惯性导航和组合导航技术等水下导航定位技术与全球卫星导航技术的综合应用;海底重力基准则主要依靠水下重力测量技术。本节主要介绍国内外空间基准的研究进展、海底重力测量和海底大地测量的发展现状。

1.1 海底空间基准研究进展

在构建海底空间基准研究中,水声定位技术是水下导航定位系统中的重要技术手段。目前,声学信号是已知的最为有效的水下信息载体,在水中具有良好的传输能力^[4],因此,在海洋中常利用水声定位技术进行导航和通信。

由美国克利普斯海洋研究所率先提出的

GNSS-A 组合定位系统,是将海面上 GNSS 定位和 水下声学定位技术相结合的定位方法。因此,其大多是由 GNSS 系统、声学定位系统和其他定位系统组成的,如:GNSS 系统、超短基线定位系统和长基线定位系统,以及多普勒计程仪、压力计等多传感器构成。GNSS-A 组合定位系统综合了超短基线定位系统和长基线定位系统的优势,既有着超短基线定位系统布设简单的优点,又兼顾了长基线定位系统定位精度高且不受水深影响的优势,能够实现水下载体的连续、高精度的导航定位功能^[5]。GNSS-A 水下定位技术是建设海底大地测量基准网的核心技术,其能够在 GNSS 拒止的水下环境中,提供陆海连续、高精度的导航定位服务;亦可满足日益增长的海洋科学研究与海洋经济开发需求。日本利用 GNSS-A 定位系统,已获取了大量重要的数据结果,推动地震与板块运动间科学研究进展。我国在国家重点研发计划项目的支持下,开展了 GNSS-A 海底大地基准点位置标校试验,实现了分米级精度的海底定位和米级精度的水下声学导航成果^[6,7]。

建立全球海底大地测量基准网将有助于提供实现增进研究海洋物理、生物、化学和地质等系统的手段。海底基准点将具有电力和通信能力,并将为空间分布式传感系统和移动平台提供支持,传感器和仪器可能会从海面上方到海底下方收集数据。海底基准点还将是卫星导航系统的有力补充,它提供了收集空间垂直分布测量数据的能力,同时还提供了校准遥感卫星测量数据的能力。目前仅美国、日本、加拿大和俄罗斯等^[8-13]少数发达国家具备相应技术条件,基本掌握了海底大地测量基准网的建立和维护技术,且已在全球范围内布测先进的海底大地测量基准网^[14,15]。日本海上保卫厅海洋水文部门联合众多科研院校,分别在日本南海海槽 2 000 m 水深海域布设了大量的基准点,构建起海底大地测量基准网,用以监测海底地壳运动^[16]。美国海洋学研究所所在胡安—德—富卡洋中脊海底区域布设了 GNSS-A 基线阵,用于监测大洋板块运动^[13,17]。美国国防高级研究计划局于 2015 年,提出“深海定位导航系统”的构建计划,采用水下声学定位技术,在海底布设声呐信标装置,组成基准网。水下潜航器则能够根据声呐信标装置发出的信号,推算出自身精确的位置信息^[18]。国际大地测量协会设立海洋大地测量工作组,进一步推动了海洋空间基准与水下导航定位技术的发展^[19]。

我国在建设海底大地测量基准网方面也取得了

一定的进展,刘经南院士^[20]提出建立完备精确的海洋时空基准、海洋泛在智能感知网络,建设国家精密动态综合海洋时空基准和海态检测网,开展全球性海洋时空基准与环境监测网的布设。杨元喜院士^[21]提出海底大地测量基准与水下导航新技术,提出了一种具有周期误差参数的水下弹性定位观测模型,创建海底大地测量基准与水下导航技术体系,并在南海 3000 米深度海底建立了我国首个海底基准网和导航定位综合试验场,实现了我国海底导航定位基准技术与装备从 0 到 1 的突破。目前,国内学者研究成果大多集中在水下声学定位模型和算法方面,还未能建成能够长期稳定工作的海底大地测量基准网。阳凡林等^[22]提出利用测距误差与声信号传播时间的关系模型,采用最小二乘法估计有效声速,定位水下静态目标。Chen 等^[23, 24]研究了 GNSS-A 的三个关键技术:最佳几何配置、声学观测的差分技术和压力计提供的深度约束。结果表明,距离交会定位技术中最优几何结构为半径为 $\sqrt{2}$ 倍深度的圆形轨道加上长度为圆直径的架空交叉轨道。赵建虎等^[25]、曾安敏等^[26]均分析指出圆走航模式具有一定的定位优势。Wang 等^[27]提出了一种基于两步系统误差估计的卡尔曼滤波器用于海底基准点的声学定位。邝英才等^[28]提出一种基于自适应选权滤波的 GNSS/声学联合解算方法,能有效改善状态扰动对 GNSS/声学联合定位的异常影响,提升其定位稳定性及定位精度。Zhao 等^[29, 30]提出一种总平差方法,进行海上航迹实验,结果表明该方法在实验中可将定位精度提高 15%;构建一种考虑测距误差和未校正的声射线弯曲误差的声射线入射角随机模型,以提高定位精度。

1.2 海底重力测量发展现状

地球表面有 70% 以上的面积是海洋,海洋重力场的确定是研究地球重力场工作中非常重要的组成部分。自从 1923 年费宁—梅内斯使用摆仪在潜艇上成功地进行了第一次海上重力测定,海洋重力测量的技术手段及其获取海洋重力数据的分辨率和精度等都在日益精化和提高,与之相应地确定海洋重力场精细结构的理论和方法也在不断更新。目前,常用的海洋重力测量技术包括船测重力、航空重力、卫星重力、卫星测高、卫星梯度等。受客观条件限制,当前海洋重力场测量实际观测区域集中在海洋表面区域,并以地球物理普查为主;其中船测重力和航空重力主要采用走航式路线测量方式,测量精度约为 1~2 毫伽;卫星测高和卫星重力可以提供全球

覆盖的海洋重力场,实际精度约 2~3 毫伽。相比陆地微伽级绝对重力测量,海域微伽级绝对重力测量几乎为空白。同时,当前海洋表面毫伽级的重力场数据,已无法满足深海探测的实际需要,发展海底绝对重力测量系统是现代大地测量学研究的一项重要内容。

海洋重力场是重要的海洋地球物理信息,是感知海洋的首要前提,在地球物理科学研究、海底矿产资源勘探、军事应用等方面有着广泛的应用。重力场信息还可以用于辅助惯性导航系统,共同构成重力辅助导航定位系统,该系统具有无源、自主、隐蔽性强的优势,是未来潜艇导航技术的重要发展方向。与海面重力测量相比,海底重力测量更有利于地球物理反演和解释。深海探测以及地球科学研究中,相比海洋表面,海底及其以下固体地球内部的物质特性,包括其密度、分布及其动态等信息更加具有科研价值。由重力场基本理论可知,重力观测信号大小与参考体距离的平方呈反比。海底相对海表,距离地球内部参考体/场源距离更近,因此观测信噪比更强,可以探测到海底重力异常信号的高频分量,进而得到的地球物理反演和解释更为准确可靠。此外,在位场反演中,向下延拓,本质是微分过程,通常都是发散的,延拓深度越大,精度越差。由海底向下,相比海洋表面,延拓的距离相对更小,其精度损失也更小;位场反演向上延拓,本质是积分过程,其精度是向上收敛的。因此,当海底观测密度满足要求时,由海底微伽级重力向上延拓获得的外部重力场,其精度可以获得保证。

海底重力测量技术分成水下静态重力测量和水下动态重力测量,两者都需要通过 GNSS-A 定位系统获取重力测量仪器准确的三维位置信息。水下静态重力测量中由于重力测量仪器处于静止状态,所以其测量精度能够达到很高,接近在地面测量时的精度水平,但其测量效率较低,无法应用于大范围海域的重力测量。水下动态重力测量则需要海面船只与水下潜航器组成的惯性系中,将地球引力加速度从动态测量值中分离出来,动态测量值中包括了潜航器的加速度;另外,由于重力测量仪器处于动态过程中,保持传感器的敏感轴有着稳定的指向也是十分关键的。由广义相对论的等效原理可知,加速度和万有引力的作用是等效的,因此不能直接使用加速度计测量重力值^[31]。Stevenson 等^[32]利用重力仪共测量得到 63 个点位数据,结合海面重力观测资料,确定了海脊处浅海地壳的平均密度,建立了密度

结构模型。Shinohara 等^[33]开发了一种水下重力测量系统,该系统适用于靠近海底的广域高分辨率测量,并在日本 Sagami 湾进行测量,水下潜航器以恒定的速度和深度进行导航。2018 年,格拉斯哥大学报道了正在开发的一种基于 MEMS(Micro-Electro-Mechanical System)技术的重力仪,它有可能比目前最先进的重力仪更小、更轻、更便宜,同时仍具有相当高的灵敏度^[34]。

2016 年,由广州海洋地质调查局牵头,国防科技大学等多家单位承担了国家重点研发计划项目,分别于 2018 年和 2019 年在南海海域进行水下重力测量实验,重复测线内符合精度分别达到 1 毫伽/230 米和 1.1 毫伽/180 米。武汉大学李建成团队利用由改造后的 BQR800 无人潜航器和 dg-M 捷联式重力仪组成水下动态重力测量系统,于 2020 年在武汉木兰湖进行重力测量实验,重复线精度可达到 0.42 毫伽,验证了水下动态重力测量的可行性^[35]。山东省物化探勘查院引入先进的海底重力仪,在山东省周边海域开展了浅海区海底重力测量工作,完成 1:5 万~1:25 万浅海海底重力测量面积近 15 000 km²^[36]。

1.3 海底大地测量发展理论基础

大地测量位理论,是以大地水准面为基准面;而海洋区域,则逼近于静止的平均海平面,这样的简化有助于全球大地测量各类主题问题的解算。陆地大地水准面是静止海平面在陆地的延伸,进行大地主题解算时,需要将固体地球(陆地地表)面上或外部空间的实际观测结果,延拓归算到大地水准面上,由此带来一系列改正(例如布格改正等)。地球物理反演或归算对比原始观测,引入了一系列的系统偏差和噪声误差,降低了高精度原始观测数据的精度效能。在海域,我们却面临相反的难题。受观测条件限制,当前海洋大地测量各种观测技术主要是在海表及浅层区域实施,因其与海域大地水准面十分相近,无需特别考虑归算至大地水准面的各项改正误差影响。

地球本质是个固体星球,海表与固体地球界面(海底地形)平均间隔三四千米,中间充满近似均匀密度的海水介质。海表处的各类地球物理观测信息,相较于海底观测,因距离固体地球内部更远,中高频信息将大大衰减。而对解决中小尺度地球物理和地球动力学问题,中高频的地球物理场是尤为重要的,它能反映地下物质结构密度分布异常的细节特征。仅靠损失部分中高频信息的海表观测,很难

向下恢复海底界面的高频信息。经过近几十年的发展,从理论和技术方法上,将大地测量和地球物理观测面延展到海底,已具备可行性;但仍需加强前沿基础理论研究,解决实际过程中可能面临的核心关键问题。

2 海底大地测量基准主建思路

海底大地测量基准在未来将主要应用于全球海底板块运动精准定量分析、全球海水变化精准评估、感知海洋动力环境与水下声速场,以及保障海底连续可靠的导航定位需求等。因此,本节将从三个方向介绍海底大地基准的发展趋势,分别是工程实施的可行性、构建/维护的可靠性和科学研究的前沿性。

2.1 工程实施的可行性

以工程项目为牵引,推动建设海底大地测量基准的基础设施,针对海底特殊环境,需要研制出能够适应复杂水下环境,且具备稳定可靠、抗压防腐等性能的声呐信标装置;考虑工程项目的经济效益,研制的信标装置应当具备低维护或免维护的特点,以降低装备的维护成本。在工艺流程上,解决海底大地测量基准网的顶层设计与规划问题,确保陆地和海底基准体系的观测一致性、数据一致性,建立统一的空间立体观测技术体系。同时,针对 GNSS-A 组合定位系统中多子系统、多传感器并存的情况,规范各数据来源的采集、格式和处理,解决多源海洋大地测量观测数据的融合问题。

2.2 构建/维护的可靠性

海底大地测量基准网构建完成后,要建立长期稳定的监测机制,利用监测数据的分析结果保障基准网的可靠性。突破海底大地测量基准网的维护和保持技术,以提高维护海底基准网高精度稳定运行的可靠性;构建全球海底联合精密基准网,以提高全球海底大地测量基准数据的一致性和规范性;建立泛在、稳健和智能的综合 PNT 系统,以提高海底监测的广泛性和实时性。强调能够在未知海域隐蔽布设海底大地测量基准网,突破声学信号容易泄漏,有效作业范围小等问题,形成一套高精度、高效率且规范的海底大地测量基准网布设技术流程。注重海底大地测量基准网的稳健性、防欺骗和抗干扰性能,提升基准网的抗打击能力。在构建和维护基准网的过程中,以提升导航定位信息数据的可靠性为目的,建立新体制下的组网观测系统。

2.3 科学研究的前沿性

目前,海底大地测量基准网的最高精度为厘米

级,作为前沿科学研究问题,应当研究毫米级海底大地测量基准网的应用前景、技术难题、构建方案和维护机制。量子测量作为基本物理量标定基准,先天具有高精度潜力,能够观测得到更高精度的基准信息,研究量子精密测量技术与构建海底大地测量基准网的结合,有利于突破声学传递基准信息体制的精准度局限。以建立不依赖具体标记的海底大地测量基准,仅与客观物理定律相联系的绝对基准体系为科学目标,探索地球系统科学与海底大地测量基准的关联机理。突破海底大地测量基准网在长期观测与独立监测时的稳定性、可靠性等问题,保障基准网数据的一致性,提升基准网数据的精度,更新观测数据处理理论,逐步建立全球统一的海底大地测量基准网及其维护方案。

3 科学问题牵引

随着海底科学探索的不断深入,未来海底大地测量基准网建设涉及的主要科学问题包括空间基准全域无缝连接、海洋动力环境与声速场构建、全球板块运动精准定量分析等。通过不断突破与这些关键科学问题相关的技术方法瓶颈,以推动海底大地测量基准网的不断发展。

3.1 空间基准全域无缝连接

无缝连接全时域、全空域的基准网,构建陆海连续的立体观测体系,空间基准在全域的统一拓展,是陆地空间基准在海底世界的延伸,构建的海底大地测量基准网,要与陆地、天空的基准系统保持一致性,创新设计基准观测模式,组成全时空、连续可靠、高精度的立体观测体系。需要解决如下问题:(1)选择平坦稳定的区域建立基准点,根据水下导航设备测量精度规范基准点的间距和网型,设立定期重复观测机制以保障海底基准点位置精度。(2)组网后要建立有效的监测系统,进行网平差、网校正处理,评估海底大地测量基准网的可靠性。(3)在GNSS-A组合定位系统中,存在有多种传感器,能够获得多源观测数据,因此需要解决多源数据信息融合问题。(4)从局部海域走向全球范围,将面临较大的工程和技术挑战,研制的声呐信标装置在复杂的水下环境中仍需要保证工作的稳定性、耐用性和免维护等性能;提出的布设方案需要充分考虑建设成本、维护成本和整个系统高效、可靠的性能。

3.2 海洋动力环境与水下声速场

快速感知海洋环境的动态,能够极大地提升我国海上搜寻与救助、海洋科研、航行安全、环境保护

和渔业生产服务等方面的综合保障能力。为了实时动态进行海洋观测探测活动,一是必须充分了解和掌握海洋动力环境与水下声速场数据,准确评估海洋动态环境对海底大地测量基准网间各基点信号传递精度的影响,系统分析复杂水下声速场对声学信号测量所带来的误差。二是整合现有数据资源,建设标准规范、系统集成、高效共享、综合展示的海洋科学大数据中心,集中力量铺设空白海域的基准网^[37]。

3.3 全球海地板块运动精准定量分析

构建精密的海底大地测量基准网能够实现监测全球海地板块运动,并进行准确定量分析;能够精准评估全球海水变化,探索全球海洋变化与海地板块垂直形变的关系,有助于推动地球系统科学热点问题的突破。但面对海洋复杂多变的水声环境,多种因素造成的声线弯曲和声速场变化等问题难以克服,从而导致水下声学测量精度不高,缺乏精准有效的水下测量技术手段,因此需要提升水声测量精度。其次,打造多源海底大地测量基准数据集成模型,进行有效地组织、管理和应用,实现从需求层到数据层的有效集成,保障解决集成数据的精细化分类,便于进行实时分析^[38]。

4 海底重力测量及其地学应用研究

4.1 自主海底重力基准构建意义

重力场是地球最重要的物理特性之一,地球重力场结构由地球物质分布结构所决定,重力场信息反映了地球内部物质分布、运动及其变化状态。重力异常,即实际重力场与处于流体静力平衡理想地球体的正常重力场之差,揭示了地球内部物质分布的非平衡状态,对应地球内部的密度异常,是地球内部动力学过程的动因。确定精细地球重力场模型在地球科学中具有重要意义,也是目前探索地球内部结构的三种手段(包括地震波传播分析以及地磁场测定)之一。

随着国家战略利益和战略空间不断向海底拓展和延伸,全面掌握全球海洋重力场精细结构可直接服务于国家重大海洋战略规划,为深海探测、深海开发以及地球科学深层次研究提供关键、可靠的基础信息。掌握海洋重力场精细结构,可提升海洋国防、维护海洋权益和海洋资源开发的能力,是关系国家安全和军队现代化建设的重要核心战略资源,在战略武器作战保障,提升军事装备作战效能和水下航行安全及长航时隐蔽导航等方面具有重大应用前

景。对矿产勘查和油气资源勘探及远景评价，保障国家资源能源安全都具有十分重要的作用。同时，对海底重力场精细结构的深入研究，可推动地球系统科学创新发展，揭示地球系统内部机制，如三维密度分布、板块运动、核幔起伏、地幔热柱以及地球的转速变化和极移引起的局部和动态变化。

当前，海面船载重力测量、航空重力测量以及卫星测高重力反演仍是当今测定海洋重力场的主要技术手段。但从船载和航空重力测量基本原理来看，其本质是一种相对测量(相对陆地起始点)方式。通过对起点和终点观测闭合差，进行误差分配和校正，推算航线点重力值相对起点的相对量，是非独立观测。受海面观测条件限制，船载重力测量的实际观测精度(内符精度)约为 1~2 毫伽。卫星测高重力场反演基本原理是由海平面相对起伏梯度，通过求解边值方程，设定协方差函数或者采用先验参考重力场模型，计算剩余重力异常，再推算海域重力值。目前，以美国 D. T. Sandwell 和丹麦 O. B. Anderson 为代表发布的最新测高重力场模型，与船测结果相比，其相对精度约为 2~3 毫伽。然而，参考陆地实际应用需求，对重力观测值的精度要求普遍优于 50 微伽。海底重力测量是在陆地重力测量基础上发展起来的，由于几乎不受海洋动态因素的影响，环境稳定，干扰小，其观测精度与陆地重力测量相似，可达到微伽级的测量精度，且各观测点重力值为独立观测，可用作参考基准。海底重力测量是海底大地测量基准的重要支撑，现有海底重力观测系统理论可以实现海域微伽级重力测量。

海底重力长期监测是精准量化全球海洋变化的可靠技术手段，全球海洋变化是全球变化研究的一个主要研究内容。空间测量技术提供了毫米级的全球海平面高度的长期监测结果，能够更为精准地确定全球海洋整体变化趋势，除了海洋表面高度的变化，还需关注海底地壳垂直形变趋势。陆地上可以通过高精度的空间测量技术，例如全球定位系统等，准确的监测地表沉降趋势。由陆地板块监测到的每年毫米级的变化趋势推估，全球海洋的变化必须准确监测海底地壳的垂直变化。在空间观测中，广泛采用的电磁波测量方法在水中受客观条件限制，主要依靠声学测量的方法，但水中声学测量精度远不能满足毫米级的监测要求。海底压力计实际记录的是海洋垂直剖面的质量变化，在水体密度假设的基础上，把观测值转换成几何量。这样的假设在毫米级监测精度要求下，不再适用；且现有压力计传感器本身长期漂移趋势项，将对最终的海洋水体变化趋

势推估结果产生影响。由地球重力场基础理论推导可知，海洋水体质量的变化对海底重力仪观测结果的影响，远小于海洋地壳的垂直变化影响。重力长期监测结果，也已成功应用于陆地板块垂直运动监测。通过优化改进仪器精度，海底重力仪可以用来提供海底地壳沉降长期监测，进而为科学准确的分析全球变化提供精准可靠的观测数据。

海底重力测量系统将直接服务国家重大需求，习近平总书记在党的十九大报告中明确要求“坚持陆海统筹，加快建设海洋强国”，为建设海洋强国再一次吹响了号角。随着国家战略利益和战略空间不断向海洋拓展和延伸，近年来，我国先后启动一批重大科学/工程项目，包括国家重点研发计划“深海关键技术与装备”重点专项、“深海空间站”重大工程论证设计、“国家海底科学观测网”重大科技基础设施建设，“透明海洋”计划和“海洋重大科学工程”，以及海洋 PNT 等国家重大战略项目都在稳步推进。海底重力观测系统可直接服务于这些国家重大战略需求，为深海探测和地球科学研究提供关键、可靠的重力场信息。

4.2 海底重力基准构建技术

围绕海底重力测量及其地学应用主要核心任务是提升海底重力测量的精细度和可靠性。在前期海洋大地测量研究的基础上，重点聚焦海底重力测量技术、海底重力场反演技术和海底重力应用等方向开展关键技术攻关，具体海底重力测量技术及其应用领域如图 1 所示。

(1) 水下动态重力测量关键技术研究

针对海底重力场精细建模的需求，突破传统海面重力场测量值向下延拓发散的瓶颈，开展海底水下定深动态重力测量关键技术研究，包括：水下载体的重力测量方法研究，水下重力测量多源数据融合方法研究，水下重力测量误差补偿方法研究等。利用水下运载体或拖体在更接近重力场源体的水下观测空间开展动态测量，在高效作业大面积覆盖的同时，避免了重力高频分量的衰减，可提高信噪比，获取高分辨率高精度的水下重力测量数据。水下定深动态重力测量，可为水下重力导航精细模型的构建提供更直接和更加精确的约束，获得更高分辨率和精度的水下重力场模型。

(2) 结合地质统计信息恢复海底重力场精细模型高频信号

根据海洋重力场的频谱特性，在进行重力场计算过程中通常将其分为中长波信号恢复和短波信号

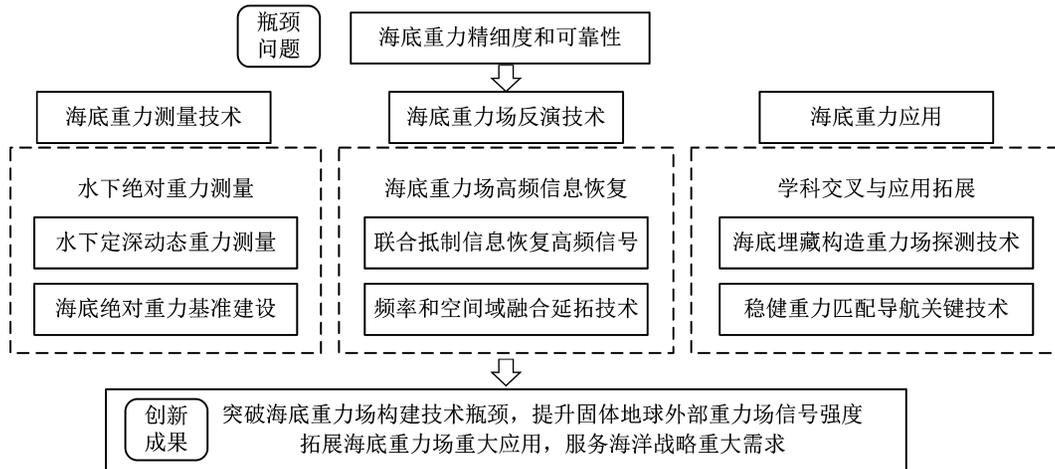


图1 海底重力测量及其地学应用

恢复, 中长波信息主要源自地球重力场模型, 一般通过卫星重力技术获取; 短波信号通常通过卫星测高技术进行全球范围的快速获取。在此过程中, 为提高海洋重力场的精度和分辨率, 需进行多源测高卫星的联合反演。考虑到测高高度计数据的误差特性, 在推算海洋重力场之前, 应对高度计数据进行波形重构、地球物理改正、粗差的检测与剔除等精细化数据处理, 以获取高质量的海面高数据。在海洋中, 由于海水的覆盖, 海底地形的精细结构产生的高频重力信号往往由于向上延拓而衰减, 因此, 在进行短波海洋重力场计算时会有一定波长的信号损失, 使得重力场无法探测海底微小海山、深海丘陵等精细结构。

针对测高卫星数据存在的观测误差、仪器误差、环境引起的误差以及多源卫星数据之间参考基准不同等问题, 对多源卫星测高数据进行精细化处理, 通过对各测高卫星数据进行波形重构、地理环境改正、数据编辑、粗差检测与剔除、基准统一等处理, 生成高质量的沿轨海面高数据, 为后续海洋重力场基准图构建提供数据支撑。基于格网重力场元的重力导航基准图重构技术, 利用包含自主重力卫星、测高卫星在内的多源卫星重力数据和卫星测量海面高数据, 通过海面交叉点平差, 开展海洋重力场元的解算, 考虑海底地形的影响, 并结合海洋航空、船测重力数据, 构建海底重力精细结构模型。针对现有海洋重力异常模型中高频信号缺失、海山特征存在误差等问题, 结合地质统计信息开展恢复重力场高频信号的技术研究, 结合深海丘陵和典型海山区域的基础测绘及地质统计特性信息, 包括海底扩散速率/方向、测高重力场反演地形方差估计、海底沉积层模型等, 以及高精度的垂直重力梯度振幅估计, 建立深

海丘陵的随机模型和精细海山模型; 并通过 Parker 理论正演, 恢复测高海洋重力场高频信号。

(3) 海表重力场数据向下融合延拓技术研究

海表重力场数据向下融合延拓的原理主要是基于海表重力场数据中蕴含着地球内部质量分布的信息, 结合已有地质信息之间的融合, 以获取更深层次的地质信息。向下融合延拓技术需要高精度、高分辨率的重力场数据和准确可靠的地质信息, 通过合适的模型和算法的处理, 将海表重力场数据进行向下延拓。模型和算法的选择需要利用已知的地质信息进行对比验证, 以保证其准确性和可靠性。向下延拓的技术途径是提取研究区域的海底地形起伏信息, 以空间域海底地形起伏正演理论为基础, 解算出测量位置与目标层位置的重力场信息, 从重力场信息中去除掉地形影响得到剩余重力场信息, 同时在延拓时充分考虑海底位置与海面之间海水质量的影响, 将这部分信息从剩余重力场信息剥离, 并以此为数据核心, 采用基于频率域和空间域融合的向下延拓技术, 完成该区域的重力场数据向下延拓应用。针对频率域向下延拓容易受到噪声干扰使得重力场信息发生畸变, 常规滤波手段存在滤波过度或滤波不足等问题, 采用向上延拓和解析信号作为稳定算子, 有效增强向下延拓的稳定性。面对某些海域重力场信息复杂、信号强度变化幅度大、频谱特征复杂等引起的频率域延拓精度下降的问题, 采用空间域迭代的计算方法, 建立观测数据与延拓数据的线性关系, 利用最优化理论和数据压缩理论, 以正则化方法为核心全面提升空间域向下延拓的精度和效率。从海域向下延拓体系出发, 在剥离掉地形高频重力场信息的基础之上, 针对剩余重力场信息的信号强度和信号频谱特征, 开展频率域和空间域融合的向

下延拓技术,以频率域向下延拓为基础,针对重点区域进行剖分开展空间域向下延拓,最终完成频率域和空间域向下延拓的融合。

(4) 海底埋藏构造重力场探测关键技术研究

围绕海底埋藏构造这一研究对象,充分利用高精度的海底重力资料,通过位场反演技术,揭示被沉积层覆盖的海洋基底分布及海底埋藏构造特征。海底埋藏构造在海洋矿产资源勘察、海洋构造演化史、边缘海形成演化过程、海洋地球动力学等方面都具有重要的科学意义。全球近半的海洋被沉积层覆盖,这些被沉积层覆盖的海洋,其海底埋藏构造无法从海底地形上直接识别,并且大多延伸几百到几千公里。而地震反射剖面等地球物理手段只适合局部精细埋藏构造的探测,无法实现对海洋的覆盖;要实现全球海域海底埋藏构造进行探测,则需要充分利用现代大地测量技术优势,在对短波海洋重力场分析的基础上,研究海底埋藏构造反演理论方法。充分利用重力梯度对浅部短波长异常更敏感的优势,探索高精度海洋重力梯度进行埋藏构造探测的技术方法。通过研究和掌握海底埋藏构造的重力场探测关键技术,能够显著提升我国在海底构造探测领域的技术水平,为海洋资源勘探、海洋构造演化、边缘海形成演化过程等提供重要的基础资料。根据基底深度分布图,讨论基底的分布特征,分析基底内断裂的原因,对基底内的构造单元进行划分。对渤海、黄海、东海、南海四大海域的详细结构进行分区讨论,详细讨论重点油气勘探区的基底特征,分析海底构造特征与基底构造之间的关系,分析沉积层与埋藏构造之间的关系,讨论基底构造对沉积盆地的控制作用。从反演结果中识别海底埋藏构造,包括海底断裂带、海底凹陷等,结合其它地质、构造、地球物理等资料,进行海洋地球动力学讨论,解释大陆边缘沉积盆地的形成过程。

5 量子时代下的海底大地测量基准

现代精密测量技术的发展,特别是量子精密测量技术的突破,为大地测量研究提供更为精准的技术手段,改变了传统几何大地测量基本途径的观测方式,推动了相应空间基准的研究与建设,使得建立厘米级现代高程基准体系成为可能。在广义相对论中,爱因斯坦揭示了时间和引力场的关系,认为有引力场存在的宇宙时空是弯曲的时空,没有引力场存在或者引力场很弱的时空则是平直的时空,而且物质质量愈大,分布愈密,引力场愈强,时空也愈弯曲。

引力位同时也是物理大地测量学基本概念之一,它与诸多高程系统有着直接联系,它在测定高程和研究地球重力场等方面具有十分重要的作用。重力位差代表的是计算点所处水准面之间的位能差,具有实际的物理意义,因此可用来精确地求定起始点与计算点之间的高差。如何由重力位差计算高差,目前已有一套比较成熟的理论和处理程序。精确确定重力位的空间分布以及不同等位面间的位势差,是全球高程基准统一的有效途径之一。

智能化的国民经济需要测量精度更高的传感器,量子测量作为基本物理量标定基准,其先天具有实现高精度测量的潜力,量子感知是未来测量基准的发展方向。所谓时空信息量子感知技术需要具备四个特性,一是高动态的快速测量技术;二是测量数据有着较高的信噪比;三是系统拥有较强的稳定性;四是测量传感器的集成化技术。目前,实际应用的量子测量技术有量子惯导陀螺、量子重力梯度测量、量子重力测量、超高精度原子钟和原子磁力仪等量子仪器。Phillips 等^[39]提出了一种利用由两个冷原子干涉仪组成的重力梯度传感器与一个共同激光参考信号的部分测量值来定位的方法,该方法可以消除两次测量之间的振动噪声。Wright 等^[40]基于原子干涉仪的量子传感器提供的高精度惯性测量性能,缓解了当前经典惯性导航系统中的部分问题。中国科学院精密测量科学与创新研究院的鲍李峰团队^[41]利用量子重力仪实现海洋动态绝对重力测量,围绕“海底火山活动与全球变化”这一科学主题,充分利用现代空间大地测量技术方法的优势,创新性的开展海底火山大地测量学机理研究;利用测高海洋重力场时变资料,精准定量地分析海底活跃火山的活动特征—岩浆活动深度(质量迁移),与地震监测结果吻合。

量子物理发现,原子内部存在着一些分立的能量状态,这些能量状态在一定频率的电磁波作用下,会产生跃迁。电磁波的能量是一份一份的携带在每一个光子中,每一个光子的能量值严格取决于电磁波的频率,当光子的能量与原子内部两个状态的能量差相等时,也就是所谓的共振。共振发生时,跃迁发生的几率最大,利用原子跃迁频率稳定的特性来获取精准时间频率信号的设备就是所谓的原子钟。2018 年,美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, U. S., NIST)科学家威廉姆·麦克卢等,根据三个基准表征了两个镱原子光晶格钟。以钟频为单位,系统不

确定度为 1.4×10^{-18} , 测量不稳定度为 3.2×10^{-19} , 并能通过反复本地频率比对, 达到不同钟频差为 10^{-19} 量级的再现性^[42]。如此高的精确度, 已经可以确保大地水准面测定的不确定度小于 1 厘米, 远超过现有技术。通过对高精度原子钟跃迁时频的精准监测, 推算空间引力位的相对变化及高程的变化, 实现重力位差的直接测量与原子钟基础频率相关, 该高程基准是全球统一的绝对基准。由于相对论性红移效应, 光钟对地球重力场的敏感程度达到了一个新的水平, 在大地测量学中有一个广泛的应用前景。

近年来原子钟的巨大进步开辟了时频快速发展的新纪元, 具有频率不确定度 10^{-18} 数量级的原子钟可以分辨相对于固定钟 1cm 高度差产生的引力势变化。可搬运高精度原子钟设备的进步, 为利用原子钟技术建立现代高程基准创造了条件。当需要将原子钟的尺寸缩小到可以移动, 并将其搬离实验室的可控环境时, 人们不得不在精确度和稳定性之间寻找折中方案。2018 年, *Nature* 报道了德国联邦物理技术研究院 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) 利用新研制的大型车载式可搬运铯原子光钟, 在法国 LSM 实验室通过 110km 长的通信光纤和意大利 INRIM 的铯原子光钟进行远程比对, 然后进一步搬运至 INRIM 进行本地比对, 由此测量两地的高程差, 第一次室外演示了光钟相对论大地水准测量^[43]。在各种光钟候选体系中, 囚禁钙离子光钟具有相对简单的系统方案, 在小型化, 高可靠性光钟研制方面具有良好的潜力。经过多年攻关积累, 中科院精密测量科学与技术创新研究院小型化光钟研究团队在光钟装置的模块化, 集成化和小型化设计等关键技术方面取得了一系列突破, 研制出国际上首套小型化的可搬运光钟样机。目前, 其频率不确定度达到 1.0×10^{-17} 水平和天稳定度达到 1.6×10^{-17} 水平, 两项关键指标均超过了国际上最好的铯喷泉微波钟。同时, 其物理系统 (不包含控制电路部分) 体积约 0.33 立方米, 成为国际上体积最小的光钟^[44-46]。可搬运高精度原子钟设备的进步, 为我们利用原子钟实现高程基准统一实验创造了条件。

6 结 语

响应国家建设海洋强国的重大战略, 建立海底大地测量基准网能够为水下活动提供必要的导航定位服务, 且能够与陆地已有的基准网进行统一, 建立

全时域、全空域、可靠的立体观测体系。目前, 国际上多个发达国家已构建海底大地测量基准网, 美国构建基准网总长度超过 880 km, 欧洲构建的海底观测网中主基站达到 15 个。我国的海底大地测量基准网还处于刚起步的阶段, 需要注重解决 GNSS-A 组合定位系统和水下动态重力测量技术的精度问题和多源数据融合处理问题, 研制量子精密测量装备和创新性解决量子观测技术构建大地测量基准网的相关问题, 加强顶层规划设计、探索海底大地测量基准网的分级布设方案、观测策略, 综合考虑构建陆地海洋一体化的立体观测网络和组网的服务方式。

参 考 文 献

- [1] 魏子卿, 刘光明, 吴富梅. 2000 中国大地坐标系: 中国大陆速度场. 测绘学报, 2011, 40(4): 403—410.
- [2] 李风华, 路艳国, 王海斌, 等. 海底观测网的研究进展与发展趋势. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 321—330.
- [3] 赵建虎, 梁文彪. 海底控制网测量和解算中的几个关键问题. 测绘学报, 2019, 48(9): 1197—1202.
- [4] 许江宁. 浅析水下 PNT 体系及其关键技术. 导航定位与授时, 2017, 4(1): 1—6.
- [5] 辛明真. 基于 GNSS-A 浮标的水下非差定位关键技术研究. 青岛: 山东科技大学, 2016.
- [6] Fujita M, Ishikawa T, Mochizuki M, et al. GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application. *Earth, Planets and Space*, 2006, 58(3): 265—275.
- [7] 杨元喜, 刘焱雄, 孙大军, 等. 海底大地基准网建设及其关键技术. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(7): 936—945.
- [8] Mochizuki M., Sato M, Katayama M, et al. Construction of seafloor geodetic observation network around Japan. *Recent advances in marine science and technology*, 2002, 591—600.
- [9] Matsumoto Y, Ishikawa T, Fujita M, et al. Weak interplate coupling beneath the subduction zone off Fukushima, NE Japan, inferred from GPS/acoustic seafloor geodetic observation. *Earth, Planets and Space*, 2008, 60(6): e9—e12.
- [10] Spiess FN, Chadwell CD, Hildebrand JA, et al. Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1998, 108(2): 101—112.
- [11] Favali P, Beranzoli L. Seafloor observatory science: a review. *Annals of Geophysics*, 2009, 49(2/3): 515—567.
- [12] Fujiwara T, Kodaira S, No T, et al. The 2011 Tohoku-Oki earthquake: displacement reaching the trench axis. *Science*, 2011, 334(6060): 1240.

- [13] Blum JA, Chadwell CD, Driscoll N, et al. Assessing slope stability in the Santa Barbara Basin, California, using seafloor geodesy and CHIRP seismic data. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(13): 1—4.
- [14] 杨元喜, 徐天河, 薛树强. 我国海洋大地测量基准与海洋导航技术研究进展与展望. *测绘学报*, 2017, 46(1): 1—8.
- [15] 李林阳, 柴洪洲, 李姗姗, 等. 海洋立体观测网建设与发展综述. *测绘通报*, 2021(5): 30—37, 95.
- [16] Yokota Y, Ishikawa T. Shallow slow slip events along the Nankai Trough detected by GNSS-A. *Science Advances*, 2020, 6(3): eaay5786.
- [17] Sweeney AD, Chadwell CD, Hildebrand JA, et al. Centimeter-level positioning of seafloor acoustic transponders from a deeply-towed interrogator. *Marine Geodesy*, 2005, 28(1): 39—70.
- [18] Defense Advanced Research Projects Agency. Department of Defense Fiscal Year (FY) 2017 President's Budget Submission. (2016-02-09)/[2023-09-14]. <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/652687/department-of-defense-dod-releases-fiscal-year-2017-presidents-budget-proposal/>.
- [19] 刘焱雄, 李梦昊, 刘杨, 等. 海底大地基准建设技术及其研究进展. *海洋科学进展*, 2022, 40(4): 684—700.
- [20] 刘经南, 陈冠旭, 赵建虎, 等. 海洋时空基准网的进展与趋势. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(1): 17—37.
- [21] Yang YX, Qin XP. Resilient observation models for seafloor geodetic positioning. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(7): 79.
- [22] Yang FL, Lu XS, Li JB, et al. Precise positioning of underwater static objects without sound speed profile. *Marine Geodesy*, 2011, 34(2): 138—151.
- [23] Chen GX, Liu Y, Liu YX, et al. Improving GNSS-acoustic positioning by optimizing the ship's track lines and observation combinations. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(6): 61.
- [24] Chen XH, Zhang HM, Zhao JH, et al. Positioning accuracy model of sailing-circle GPS-acoustic method. *Earth and Space Science*, 2021, 8(10): e00639.
- [25] Zhao JH, Zou YJ, Zhang HM, et al. A new method for absolute datum transfer in seafloor control network measurement. *Journal of Marine Science and Technology*, 2016, 21(2): 216—226.
- [26] 曾安敏, 杨元喜, 明锋, 等. 海底大地基准点圆走航模式定位模型及分析. *测绘学报*, 2021, 50(7): 939—952.
- [27] Wang JT, Xu TH, Liu YF, et al. Kalman filter based acoustic positioning of deep seafloor datum point with two-step systematic error estimation. *Applied Ocean Research*, 2021, 114: 102817.
- [28] 邝英才, 吕志平, 王方超, 等. GNSS/声学联合定位的自适应滤波算法. *测绘学报*, 2020, 49(7): 854—864.
- [29] Zhao S, Wang ZJ, Nie ZX, et al. Investigation on total adjustment of the transducer and seafloor transponder for GNSS/Acoustic precise underwater point positioning. *Ocean Engineering*, 2021, 221: 108533.
- [30] Zhao S, Wang ZJ, He KF, et al. Investigation on underwater positioning stochastic model based on acoustic ray incidence angle. *Applied Ocean Research*, 2018, 77: 69—77.
- [31] 张志强. 水下移动重力测量理论方法及应用研究. 武汉: 武汉大学, 2020.
- [32] Stevenson JM, Hildebrand JA, Zumberge MA, et al. An ocean bottom gravity study of the southern Juan de Fuca Ridge. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, 99(B3): 4875—4888.
- [33] Shinohara M, Kanazawa T, Fujimoto H, et al. Development of a high-resolution underwater gravity measurement system installed on an autonomous underwater vehicle. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(12): 1937—1941.
- [34] Aftalion M, Middlemiss R, Bramsiepe S, et al. Low-cost MEMS Gravimeters for Underwater Gravimetry and Submarine Detection. Washington, D. C.: AGU Fall Meeting, 2018: 10—14.
- [35] Zhang ZQ, Li JC, Zhang KD, et al. Experimental study on underwater moving gravity measurement by using strapdown gravimeter based on AUV platform. *Marine Geodesy*, 2021, 44(2): 108—135.
- [36] 吴治国, 刘洪波, 臧凯, 等. 海底重力测量精度的影响因素及评价方法. *华北地震科学*, 2020, 38(2): 1—8.
- [37] 吴园涛, 任小波, 段晓男, 等. 构建自立自强的海洋科学观测探测技术体系的思考. *中国科学院院刊*, 2022, 37(7): 861—869.
- [38] 毛华斌, 吴园涛, 殷建平, 等. 海洋环境安全保障技术发展现状和展望. *中国科学院院刊*, 2022, 37(7): 870—880.
- [39] Phillips AM, Wright MJ, Riou I, et al. Position fixing with cold atom gravity gradiometers. *AVS Quantum Science*, 2022, 4(2): 024404.
- [40] Wright MJ, Anastassiou L, Mishra C, et al. Cold atom inertial sensors for navigation applications. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 994459.
- [41] Li QQ, Bao LF, Shum CK. Altimeter-derived marine gravity variations reveal the magma mass motions within the subaqueous Nishinoshima volcano, Izu-Bonin Arc, Japan. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(5): 46.
- [42] McGrew WF, Zhang X, Fasano RJ, et al. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level. *Nature*, 2018, 564: 87—90.
- [43] Grotti J, Koller S, Vogt S, et al. Geodesy and metrology with a transportable optical clock. *Nature Physics*, 2018, 14: 437—441.
- [44] Liu DX, Cao J, Yuan JB, et al. Laboratory demonstration of geopotential measurement using transportable optical clocks. *Chinese Physics B*, 2023, 32(1): 010601.
- [45] Huang Y, Zhang HQ, Zhang BL, et al. Geopotential measurement with a robust, transportable ^{40}Ca optical clock. *Physical Review A*, 2020, 102: 050802.

- [46] Cao J, Yuan J, Wang S, et al. A compact, transportable optical clock with 1×10^{-17} uncertainty and its absolute frequency measurement. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(5), doi: 10.1063/5.0079432.

Developing Self-reliant Seafloor Geodesy

Lifeng Bao^{1, 2*} Menghan Xi^{1, 2} Zhenhe Zhai³ Qi Li⁴ Heping Sun^{1, 2}

1. *The State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*
3. *Xi'an Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054*
4. *Xi'an Division of Surveying and Mapping, Xi'an 710054*

Abstract The ocean is an important economic channel and security barrier, and it is necessary to establish a seafloor geodetic fiducial network that can sense changes in the Marine environment in real time and quickly. The seafloor geodetic datum has great advantages and plays an important role in Marine resource exploration, Marine scientific research, and Marine security. By reviewing the development of seafloor geodetic fiducial network construction at home and abroad, the main construction ideas and key scientific problems of seafloor geodetic fiducial network construction are analyzed and discussed. This article expounds the significance of developing and constructing seafloor gravity datum independently, and analyzes the key technologies to be broken through in constructing seafloor gravity fiducial network. On the basis of the continuous breakthrough of quantum precision measurement technology, the consideration of using quantum measurement technology to change the defects of existing observation technology is proposed, which is expected to accelerate the construction of seafloor geodetic reference network and provide continuous, safe, reliable and high-precision spatiotemporal services on land and sea for the underwater complex environment.

Keywords seafloor geodetic datum; underwater dynamic measurement technology; quantum precision measurement technology

(责任编辑 刘敏 张强)

* Corresponding Author, Email: baolifeng@whigg.ac.cn