



引文格式:覃方君,张海波,陈浩,等.冷原子重力仪动态测量研究进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(11):2016-2027.DOI:10.13203/j.whugis20240245

Citation: QIN Fangjun, ZHANG Haibo, CHEN Hao, et al. Research Progress on Dynamic Measurement of Cold Atom Gravimeter[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(11):2016-2027. DOI:10.13203/j.whugis20240245

冷原子重力仪动态测量研究进展

覃方君¹ 张海波¹ 陈浩¹ 李东毅¹

¹ 海军工程大学电气工程学院,湖北 武汉,430033

摘要:基于冷原子重力仪的动态测量技术区别于应用相对重力仪动态测量重力值方法,具有高精度、无漂移、长期稳定测量等突出优势,然而重力仪从静基座实验走向野外动态测量,仍受体积、死区时间、噪声等多重因素的影响。综述了国内外冷原子重力仪动态测量技术的研究进展。首先论述了冷原子重力仪基本原理,分析了小型化及惯性稳定平台、隔震减震、“死区时间”补偿、组合测量等动态误差抑制技术;然后详述了冷原子重力仪在陆、海、天、空一体化动态测量开展的若干代表性工作;最后展望了冷原子重力仪测量技术新方法及其在军事等应用领域的前景。

关键词:冷原子制备;拉曼干涉;冷原子重力仪;动态测量

中图分类号:P223

文献标识码:A

收稿日期:2024-07-04

DOI:10.13203/j.whugis20240245

文章编号:1671-8860(2024)11-2016-12

Research Progress on Dynamic Measurement of Cold Atom Gravimeter

QIN Fangjun¹ ZHANG Haibo¹ CHEN Hao¹ LI Dongyi¹

¹ College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: The dynamic measurement technique based on cold atom gravimeter is distinguished from the application of relative gravimeter dynamic measurement of gravity value method, which has the outstanding advantages of high accuracy, no drift, long-term stable measurement, etc. However, the gravimeter from the static bench experiment to the dynamic measurement in the field is still affected by multiple factors such as the volume, the dead time, the noise, and so on. This paper summarizes the research progress of the dynamic measurement technology of cold atom gravimeter at home and abroad. First, it discusses the basic principle of cold atom gravimeter, analyzes the miniaturization and inertial stabilization platform, vibration isolation and damping, “dead time” compensation, combined measurement and other dynamic error suppression techniques. Second, it details some representative work carried out by the cold atom gravimeter in the integration of dynamic measurements in the land, sea, sky and space. Finally, it looks forward to the new methods and the military and other applications of cold atomic gravimeter measurement techniques.

Key words: cold atom preparation; Raman interference; cold atom gravimeter; dynamic measurement

重力学与地震学、地质学、基础物理学、地球动力学、水文学、海洋学和天文学等众多学科交叉融合并蓬勃发展,是服务国家测绘基准、资源勘探、军事安全及灾害监测等战略需求和基础地球科学问题研究的关键学科^[1]。重力场能有效表征地球物质密度分布,精密重力场信息能为地球物理、资源勘探、基础物理指标探测及导航提供重要物理场信息,为背景信息构建提供数据支

撑。同时又在诸如油气资源勘探、潮汐模型构建、海底重力场构建、重力背景场构建、无源导航^[2]等目标对象的应用中扮演核心角色,因此重力指标的精确测量对基础学科理论的外延及实践应用尤为重要。无源导航利用惯性导航^[3-5]为核心,处理运载体的地球物理场信号组合并减小长时误差积累,以为载体提供精准方位信息及指令,该方法对地球物理场的构建提出更高要求,

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42274013)。

第一作者:覃方君,教授,主要从事惯导及重力测量研究。haig2022@126.com

而重力值的精确测量对重力场的构建起决定性作用。通过测定地理参考系的重力信息,并对应做重力场演算,能有效提取物体的位置信息。

重力仪测量重力加速度^[6-8]可分为相对重力测量和绝对重力测量两大类。相对重力仪用于重力随时间和空间变化的测量,而绝对重力仪可以为相对重力仪提供绝对重力参考标准,是一种保证重力测量结果准确性的方案。当前,激光干涉与原子干涉是绝对重力仪的两大技术分类。其中美国 Microg-Lacoste 公司生产的激光干涉绝对重力仪 FG5-X,在国际重力对比中仍占主导地位^[9]。FG5 通过迈克尔逊干涉法测算重力值,在真空环境中放置质量块,并让质量块做自由落体运动,激光干涉仪能准确记录物体下落信息,并计算重力信息。当前最新 FG5 精度相较于第一代得到大幅度提升,当前 FG5 精度仍在进一步探索。随着原子操控技术、激光集成系统的发展,冷原子重力仪在精度和灵敏度方面得到提升,正在一步步向 FG5 型绝对重力仪精度逼近,甚至超过。

当今军事和民用领域对高精度惯性导航系统需求逐渐增长,传统的陀螺仪和加速度计误差难以满足高精度低漂移、长航时的导航需求。随着量子力学等现代理论框架的更新,原子物理及激光光学相关理论,尤其是原子冷却与陷俘技术的发展为冷原子重力仪提供理论支撑。冷原子重力仪因其低漂移、长时稳定测量、高精度等特性,使得冷原子重力仪重力测量成为热点话题,各国争相投入研发资源。随着量子技术的发展,国内外多家机构在近 30 年时间里就原子重力仪由实验室走向野外开展研究,力求更高的测量精度和更好的动态测量性能。

冷原子重力仪作为新型高精度绝对重力测量惯性传感器,在重力测量方面有着显著的性能优势。原子物质波干涉作为量子惯性传感器的分支具有广泛应用,冷原子重力仪应用相干性强,单色性好,频率稳定的激光作为相干光源,与外加磁场共同构建磁光阱冷却碱金属原子。通过调整激光器相位实现拉曼干涉的分束、反转、合束,进一步调整激光频率对干涉条纹进行扫描,计算当地重力值。随着时间的发展,冷原子干涉仪逐渐从静基座实验室状态走向野外,一定小型化、智能化程度的冷原子重力仪得到发展。然而在惯性导航测量重力值应用中,运载单元需要考虑载荷体积、速度及稳定性等多方面因素。冷原子重力仪野外大范围动态测量对体积、功耗及噪声抑制能力则有更高要求。本文

就冷原子重力仪动态测量展开研究,首先对冷原子重力仪主要环节的基本原理进行了简介;然后分析了冷原子重力仪动态测量技术及研究进展,就小型化、动态测量误差抑制技术展开论述,总结了冷原子重力仪在不同领域重力动态测量的典型应用;最后对新工艺、新技术在未来冷原子重力仪中的应用和重力动态测量在军事等领域的未来发展方向进行了展望。

1 冷原子重力仪基本原理

光是一种电磁波,量子理论表明,微观粒子具有波动性和量子性。光的干涉效应在自然界中普遍存在,薛定谔方程证明波函数能有效描述光子的波粒二象性。冷原子重力仪利用光的波粒性,外加磁场对碱金属元素铷原子实现冷却囚禁,通过光的干涉技术并扫描干涉条纹,计算得到当地重力值。从脉冲式原子干涉^[10]的提出至今,干涉仪呈现跨越式发展,精密测量组件逐渐由宏观向量子化发展,量子导航技术在舰船、潜艇、飞行器及军事等领域的应用得到发展,未来小型化程度更高、集成度更好的量子惯性测量器件将在诸多领域展现出高精度测量的亮眼表现。

铷原子干涉重力仪测量重力值则是经稳定且固定频率的物质波(激光)照射碱金属铷原子,产生受激辐射。外加以磁场使原子静止,形成原子黏团,经拉曼干涉过程产生明暗交替的干涉条纹,利用探测手段探测干涉条纹计算重力值。

典型的拉曼干涉型冷原子重力仪以拉曼干涉理论为支撑,演算重力信息,主要有自由下落和喷泉式两类。国外斯坦福大学研制世界上第一台喷泉式冷原子干涉重力仪,由 Kasevich 等^[11]1992 年设计开发,积分 2 000 s 时间后的分辨率为 30 μGal ,后来提升到 3 μGal 。Peters 等^[12]研制 Cs 原子干涉重力仪经优化后,干涉条纹灵敏度为 1×10^{-8} g/Hz,精度达 3×10^{-9} g。喷泉式冷原子重力仪研制单位国外还有德国柏林洪堡大学^[13]、国内喷泉式冷原子重力仪研制单位主要有华中科技大学^[14-15]、中国科学院精密测量科学与技术创新研究院^[16]等。

自由下落式冷原子重力仪的研制单位有法国巴黎天文台的自由下落式铷原子重力仪^[17]、浙江大学的自由下落式重力仪^[18],此外,还有国防科技大学^[19]、中国科学技术大学^[20]、浙江工业大学^[21]等。国外冷原子重力仪起步较早,国内则相对较晚,但随着量子技术的发展,精密测量材料

及工艺的更新,国内单位逐渐在精度、灵敏度等参数指标上实现弯道超车。

以典型拉曼脉冲型 Mach-Zehnder 干涉自由下落式冷原子重力仪为例,冷原子重力仪的构造主要包含真空系统^[22]、磁光阱系统^[23]、拉曼干涉^[24]与啁啾扫描^[18]、电路控制单元、隔振系统^[25]及数据可视化等,结构如图1所示。

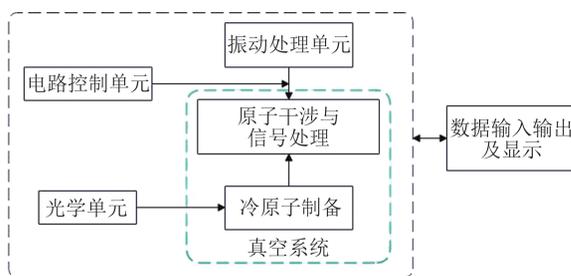


图1 冷原子重力仪的构成

Fig. 1 Composition of Cold Atom Gravimeter

光学单元为冷原子重力仪的磁光阱、拉曼干涉、末态荧光等环节提供固定的稳定频率。6束两两对射的红失谐光保证铷原子能在共振频率下发生能级跃迁,拉曼干涉光用于产生干涉条纹,探测光用于啁啾扫描计算重力值,吹扫光用于吹扫铷原子蒸汽等。真空腔系统用以保证铷原子不受气体环境干扰,为了保持真空腔的真空状态,离子泵按设定时序运转保持真空腔真空状态。铷源经加热形成蒸汽进入真空腔,光学单元通过稳频技术将激光频率锁定在铷原子D2线跃迁频率^[26]上。3对红失谐冷却光同时两两空间垂直对射,使铷原子发生受激辐射与自发辐射,结合反亥姆线圈及补偿磁场构成磁光阱,将原子冷却形成原子黏团。磁光阱结构如图2所示。

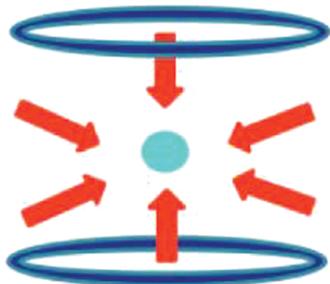


图2 磁光阱结构示意图

Fig. 2 Structure of a Magneto Optical Trap

时序控制冷却光逐步减弱,经由偏振梯度冷却^[27]使铷原子冷却到多普勒极限温度,此时关闭冷却光,让铷原子黏团^[28]自由下落。同时时序控制两束拉曼光由垂直方向对射以改变原子的内态和动量,使原子波包分束、反射和合束^[29],干涉过程见图3。

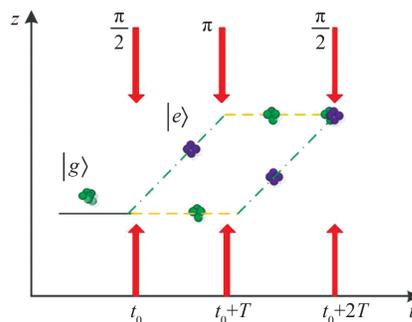


图3 原子干涉原理示意图

Fig. 3 Principle of Atom Interferometry

图3展示了拉曼干涉过程产生明暗交替的条纹,原子自由下落至探测区,探测光继续作用于原子团。探测原子黏团末态荧光,以扫描原子布居数进而计算重力值。具体过程如下:初始状态,铷原子处于基态,经 $\pi/2$ 相位拉曼光作用照射到原子团。基态原子在光的作用下受激辐射发生能级跃迁,部分跃迁至激发态,光电探测器探测信号并转换为电信号,计算得到处于激发态原子的概率。然后,经第二束 π 脉冲作用出现反转,即基态原子向激发态跃迁,激发态原子向基态跃迁。最后,再次将拉曼光相位调整为 $\pi/2$,并再次将拉曼光作用于原子上,原子则出现合束,再次重复荧光探测原子数的过程,则获得激发态的原子数,应用归一化处理手段,计算原子布居数 P ,并计算 g 值,公式如下:

$$P = P_m \pm \frac{C}{2} \cos(k_{\text{eff}} \cdot g - \alpha) T^2 \quad (1)$$

式中, P_m 是平均归一化原子布居数; C 为干涉条纹; k_{eff} 表示等效拉曼光波矢; g 是重力加速度; α 为拉曼光扫描啁啾率; T 为两束拉曼光的时间间隔。

2 冷原子重力仪动态测量技术

2.1 冷原子重力仪小型化及动态测量

因制造工艺的不同,冷原子重力仪尺寸10 cm~10 m不等,尺寸大小受工艺和材料限制较大。最大尺寸10 m的冷原子重力仪则用于基础物理指标探测,是早期物理研究的主要设备尺寸^[30]。受早期技术限制,庞大的冷原子重力仪走向室外场景远远达不到,无法满足动态测量需求。

随着多家单位的加入,实验室静座状态下冷原子干涉仪向小型化可搬运发展。小型化可搬运冷原子重力仪能在野外场景下开展实验研究。小型化大致可以从冷原子重力仪的组成结构上分为真空系统小型化、光路集成化等方面开展研究。

2.1.1 真空系统小型化

气室环境下,气体碰撞将大大缩减原子团寿命,同时无法达到极限冷却温度,此外,气体对激光波矢有折射效应,导致测量误差。因此,原子的制备过程需要保证碱金属原子能尽量少地受背景气体干扰,真空腔能有效保证原子制备所需的真空状态,一般要求冷原子重力仪真空腔的真空度至少在 1×10^{-7} Pa^[31]。真空腔主要有玻璃材质和金属材质两大类,这些材质需要综合考虑硬度、磁场等指标^[32]。真空腔腔长对实验精度的影响是主要指标,冷原子重力仪的腔长越长,则下落时间越长,进而干涉条纹明暗区分度越明显,重力测量精度越高,灵敏度越好。但野外环境对小型化、可搬运的要求使真空腔的腔长无法满足越长越好,因此需要找到折中的方案。真空腔的小型化包括对腔长的考量和整体体积的控制^[33]。目前真空腔小型化设计主要从减小体积、使用新型材料、减小重力探头尺寸、稳定性优化等方向着手,基本能满足动态测试及小型化需要,但加工周期长也是需要考虑的因素。

2.1.2 光路系统小型化

激光系统在可移动冷原子重力仪整个系统中,同样易受环境因素的影响,而稳定的激光频率对原子冷却、拉曼干涉、荧光探测及重力动态探测精度等环节都会产生较大影响。激光系统为了满足可移动的需要,小型化是重要的策略,激光系统紧凑型是一个研究方向^[34-40]。冷原子重力仪激光系统包括稳定频率的小型化光源稳频系统和光路系统。冷原子重力仪在长时间测量重力值时,易发生激光频率漂移、频率丢失等状况,小型化冷原子重力仪在频率漂移、丢失时能自动重新锁定^[41-45]是激光系统保证重力精度测量的关键。目前前端稳频激光系统如何做到小型化且自动频率稳定及丢失重锁仍是一项挑战。应用 DSP^[46]、FPGA^[47]等硬件手段集成化能将激光器做紧凑的同时提升自动稳频精度和速度。激光整体系统的紧凑型设计不同单位提出多种方案,国内外多家单位提出自研紧凑型激光系统用于小型化冷原子重力仪。López-Vázquez 等^[48]将激光各元件紧凑排列到 $31 \text{ cm} \times 31 \text{ cm} \times 1.3 \text{ cm}$ 大小盒子里。华中科技大学团队应用单个激光实现光路,并将光路集成到 $40 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 盒子中。中国科学院精密测量创新研究院^[49]设计一套高灵敏度的用于可移动冷原子干涉仪的紧凑型便携式激光系统。激光系统安装在尺寸

为 $45 \text{ cm} \times 45 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$ 的单个模块上,并发射直接点亮多达 13 个光纤端口,用于磁光阱单元、原子喷泉、拉曼转换和归一化检测。

除了紧凑型方案外,芯片集成化则是实现小型化的终极方式。美国桑迪亚国家实验室 Lee 等^[50]提出应用微加工光子集成电路技术,将激光系统集成到 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 芯片上。随着新兴材料、纳米技术的突破,光学系统片上集成将推动冷原子重力仪向集成化方向发展。激光系统小型化分紧凑型设计和微机电片上设计两个方向,目前紧凑型激光系统在考虑尽量少器件,光纤转接同时需要考虑各个元件间的排布。虽然在体积重量上变小,但并没改变传统的光路搭建,易受振动及温度的影响,在动态长期测量方面仍然具有较大挑战。

目前小型化发展向芯片化发展是一个新兴方向。极小型化也是一个重要趋势,随着新材料的研发,在光学领域应用新型半导体激光器、调制解调器、光学镜等技术手段升级,有望实现除激光系统片上集成外,冷原子重力仪其他单元的高度集成化。Abend 等^[51]通过集成化真空腔系统,应用新型材料工艺芯片化激光系统做到片上集成,片上设计改变了传统的光路布局,但稳定度及精度等整体性能仍需要进一步提升。

2.1.3 冷原子重力仪动态测量及误差分析

冷原子重力仪小型化逐渐走向野外开展实验,多家单位在车载、船载、机载等多种载体上实现准动态或动态重力值测量,取得不同的进展。探索新材料、新手段,寻求在小型化发展、精度、灵敏度、长期稳定性等指标的突破。表 1 罗列了国内外几家典型的冷原子重力仪的测量数据,未标参考文献部分数据来源于第十届全球绝对重力仪国际比对会议(ICAG-2017)实测精度。动态环境下的重力测量除了对仪器的体积、重量、功耗提出较高要求外,对抗振动干扰能力要求较高,且需要解决动态环境引入的横纵摇摆、垂向振动叠加、水平加速度串扰等一系列问题。动态运动环境下横纵摇摆、水平加速度的存在导致重力测量失准是动态测量误差主要来源之一。在动态测试中振动产生具有随机性、不可预测性,振动会导致光功率、偏振波动,进而影响干涉条纹导致测量精度异常。此外,远距离长航时航行过程中单次原子团制备及探测过程中重力无法测量的问题对动态测量的整体精度提出严峻挑战。因此如何有效保证动态环境下横纵摇摆、水平加速度串扰、振动、重力无法测量状况是动态测量的主要误差来源,必须找到有效办法加以抑制。

表1 冷原子重力仪重力测量指标/ μGal Tab. 1 Gravity Measurement Indicators of Cold Atom Gravimeter/ μGal

研究团队	精度	不确定度
ONERA ^[52]	25	25
加州大学伯克利分校 ^[53]	—	40
中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 ^[25]	10	9
浙江工业大学 ^[30]	560.6	28.1
中国科学技术大学 ^[29]	—	19
中国计量科学研究院 ^[31]	566.8	9.3
清华大学	568	13.5
华中科技大学 ^[54]	640	6.1
中国科学院大地测量学研究所	653	21.2
香港科技大学	585.6	20.3
中国地震局地球物理研究所	573.1	12.3

2.2 冷原子重力仪动态误差抑制技术

2.2.1 惯性稳定平台技术

冷原子重力仪动态测量要求在载体运动状态下完成重力值的测量,对动态测量系统提出极高要求。既要保证冷原子重力仪在运动过程中完成精密测量,又必须抑制载体行进中摇晃导致倾斜等姿态变化对冷原子重力仪测量的精度影响。惯性稳定平台与经典惯性传感器能很好地消除行进中的车、舰船、潜艇、飞机等载体产生的运动干扰^[55-56]。搭载高精度惯性稳定平台的冷原子重力仪动态重力系统,能保证冷原子重力仪在载体运动状态下保持期待姿态完成重力测量,但重量降低和精度提升方面仍有较大空间。

2.2.2 隔振减振技术

除了保证动态测量时姿态的稳定性外,高精度惯性稳定平台能保证动态测量的姿态平稳,但振动误差带来的影响却不能直接消除,振动噪声对原子重力仪的测量有较为明显的影响,尤其在海洋环境中,海浪起伏、船舶的航行速度、机械振动,以及海风、海流等的影响范围从百微伽量级到十毫伽量级均有可能。寻求抑制或补偿振动等噪声带来的测量精度影响十分必要,隔振系统对抑制振动噪声是十分有效的方案。主动隔振系统能通过持续从外界摄入能量,在被动隔振的基础上增加振动测量传感器与消振执行单元,传感器采集振动信号反馈给控制单元,控制单元反馈动作控制执行单元抵消振动力,从而隔离振动。最早斯坦福大学Hensley等^[57]将主动隔振技术引入原子重力仪,振子上安装加速度计,控制单元检测到振动信号动作施加抑制力,以减少振动影响。德国洪堡大学的Freier等^[58]研制了结构简单的主动隔振装置,最终能将0.03~5 Hz

的振动噪声降至1/200。国内早期将隔振技术用于原子重力仪的是华中科技大学的胡忠坤团队^[59]设计了一款低频主动隔振系统抑制3个维度的振动噪声影响。笔者团队还设计了适用于原子海洋重力仪的单自由度主动隔振系统^[60],如图4所示,主要应用于海洋环境下动态重力测量。图4(a)为主动隔振平台,在0.1~10 Hz振动频率范围内,最大振动抑制水平达到了91.25%,在2~10 Hz范围内,最大抑制水平达到了98.34%,振动噪声对原子重力仪灵敏度的影响比未隔振降低了2个数量级。国内外对隔振系统深入研究,中国已在低频隔振系统领域取得了显著进展,多家研究机构已研发了各类隔振系统,并在高精度原子重力仪上验证了其工作性能,重力测量最高精度达到微伽。

2.2.3 克服测量“死区”技术

冷原子重力仪在一次重力测量需要经过冷原子制备时间、拉曼干涉、末态荧光探测等过程,上述过程需要时间消耗,该段时间内重力值无法测量,称为“死区时间”^[61]。测量“死区”的存在导致共振噪声加大,直接影响动态测量性能。除此之外,测量“死区”导致重复频率降低,直接导致重力测量数据率降低,这将严重影响重力仪动态测量性能,必须采取手段加以消除。国内外学者针对“死区时间”提出多种方案,目前,主要有优化制备结构和其他重力仪组合两种方案。

结构优化方法通过优化重力测量中间环节,尽可能减少从原子制备到重力计算所需时间消耗以克服“死区时间”。例如,光抽运技术通过圆偏振光激发原子,使原子能级的粒子数分布产生重大变化,来提升冷原子制备效率以减少制备时间消耗。中国航天科技集团有限公司量子工程研究中心^[62]运用光抽运技术改变原子能级粒子数量级,实现冷原子制备效率大幅提升,有效减少制备时间。除了制备时间和制备效率提升方法外,运用再捕获技术^[63]则是通过一种新方法降低“死区时间”。再捕获技术的核心是巧妙地利用上一测量周期内下落至探测区的原子黏团,重新施加冷却制备过程,实现原子黏团的回收再利用,减少铷源加热等重新加载耗时,以减小死区时间。由于冷原子重力仪测量重力值的整个流程串行运行,时序顺序执行,无法做到各环节并行,如果能在前一周期测量过程对下一周期进行态制备将能有效减少“死区时间”。但上述多种结构优化方法只能做到尽可能减小时间消耗,但无法真正消除“死区时间”。

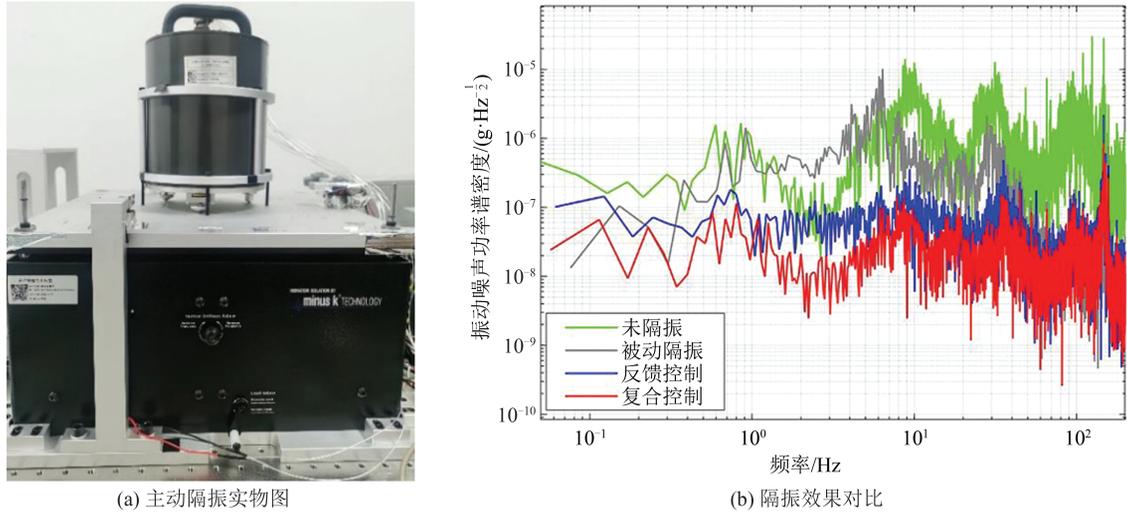


图 4 原子海洋重力仪主动隔振系统

Fig. 4 Active Vibration Isolation System Applied in Oceanic Atom Gravimeter

与其他设备级联的组合方法,则利用设备级联,在“死区时间”内利用经典惯性器件测量重力值或者重力变化趋势以弥补“死区时间”内重力值消失的问题。与经典加速度计组合测量重力的方式在不消除“死区时间”情况下弥补“死区时间”内重力值空白。

2.2.4 组合测量技术

与经典惯性器件结合消除振动等噪声影响的方法被应用到动态测量中。组合测量技术在振动消除和补偿、“死区时间”克服、载体姿态保障等方面有广泛应用。浙江大学与浙江工业大学团队将地震仪与冷原子重力仪组合,车载状态记录振动信号,在重力测量时补偿振动带来的干扰^[64]。本课题组将加速度计^[65]与冷原子重力仪组合测量空间加速度分量,补偿振动干扰,减小冷原子重力仪测量重力误差。组合动态测量方案优势互补,将冷原子重力仪精密测量、无零漂、长时间重力动态测量等优势发挥到最大,在“死区时间”内,结合加速度计等惯性测量元件则能在制备时间内提供加速度变化,为冷原子重力仪提供参考,组合测量技术是保障精密测量的重要手段,但加速度计存在长时零点漂移、温漂等问题需要校正,随着技术更新换代,该问题将得到有效解决,以满足动态测量需要。

3 冷原子重力仪动态测量研究进展

随着小型化发展,野外动态测量取得一定进展,2010年,AOSense公司交付第一台商用重力仪,灵敏度为 $1 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$,分辨率达 $0.1 \mu\text{Gal}$ ^[66]。此外,法国 Muquans 公司开发激光商用冷原子重力仪,灵

敏度为 $50 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。国内有公司报道也开发了微伽量级的国产冷原子重力仪。冷原子重力仪虽然从试验静基座向小型化野外动态实验,但野外环境动态实验的精度指标,以及冷原子重力仪的野外环境适应性和搭载在快速机动的载体上能否满足或优于现有绝对重力仪测量的精度则需要进一步验证。国内外多家单位开展一定范围的准动态测量和动态测量实验,动载基座实验的重力数据在多领域都十分关键。车载、船或者机载等冷原子重力仪动态测量重力值往往受载体复杂运动姿态和各种本征或应用噪声制约^[67-68],对重力值精度产生较大影响。研究团队在动态测试方面,应用多手段降低噪声对系统测量的影响,并开展动态重力测试实验验证。

国外开展研究相对较早,法国 Alandragin 小组^[69]将自研开发的商用冷原子重力仪应用于 Etna 火山重力监测,长期稳定度优于 $1 \mu\text{Gal}$ 。Bidel 等^[52]将冷原子重力仪搭载在移动的电梯上开展重力测量实验。低速卡车重力梯度测量^[70]、下降台或弹射器也有冷原子重力测试实验开展^[71]。加州大学伯克利分校^[53]在伯克利山开展野外重力测量,使用隔振平台隔绝噪声,测量精度为 $40 \mu\text{Gal}$,灵敏度为 $500 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。船载相较于车载不同,海洋场景下不确定性更高,对重力仪精度保证提出更高要求。国外船载实验起步较早,2015年法国航空航天实验室在北大西洋开展船载实验,而后又在杜瓦讷内海湾进行二次船载实验,实现亚毫伽级重力测量^[72]。次年还开展机载冷原子重力仪飞跃冰岛完成重力动态测量^[73],并开展对机载^[74]和船载绝对重力数据的校正处理,外

符合精度最优为 $3.3 \text{ mGal}^{[75]}$ 。

国内在车载、船载、机载等方面持续加大研究力度,在多个方面赶超。程冰等^[76]将冷原子重力仪搭载到惯性稳定牵引平台以 5.5 cm/s 慢速移动测量动态重力值,精度在 $-1.22 \pm 2.42 \text{ mGal}$,后续又开展车载^[77]静态实验,在野外 40°C 高温、 8° 倾角的普通路面上正常工作,测量精度结果约为 $30 \text{ }\mu\text{Gal}$ 。同时利用双倾斜计检测大倾角下冷原子重力仪性能,在嘈杂车间环境下经补偿后,精度达到 $12.3 \text{ }\mu\text{Gal}^{[78]}$,其车载系统如图5所示。

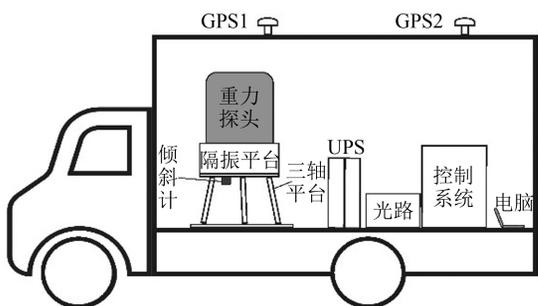


图5 车载重力测量系统

Fig. 5 Vehicle Mounted Gravity Measurement System

国防科技大学张旭等^[79]则开展了基于铁轨的慢速动态重力测量,实验精度在野外高温环境下经校正灵敏度在 $707.9 \text{ }\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$,不确定度优于 $15 \text{ }\mu\text{Gal}$ 。同时还开展了冷原子重力仪车载实验,灵敏度达 $570 \text{ }\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$,长期稳定度达 $10 \text{ }\mu\text{Gal}$,精度达 $20 \text{ }\mu\text{Gal}^{[80]}$,该团队还进行了针对多场景的定点长距离重力数据测量^[81]。华中科技大学在南北长 810 m 、落差 70 m 的喻家山上开展车载准动态实验,灵敏度为 $1.9 \text{ mGal}/\sqrt{\text{Hz}}$,分辨率达 $10\,000 \text{ s}$ 积分时间 $30 \text{ }\mu\text{Gal}^{[82]}$ 。浙江工业大学同样开展车载实验,内符合精度为 $35.4 \text{ }\mu\text{Gal}$,外符合精度为 $76.7 \text{ }\mu\text{Gal}^{[83]}$ 。

国内船载实验方面,浙江工业大学团队在舟山某码头系泊状态下测得灵敏度为 $16.6 \text{ mGal}/\sqrt{\text{Hz}}$, $1\,000 \text{ s}$ 积分时间内重力测量值分辨率为 0.7 mGal ,不确定度达 $-0.072 \pm 0.134 \text{ mGal}^{[84]}$ 。还在千岛湖上开展系泊和两条航线的动态测试,航速 12 km/h ,系泊状态下精度为 0.643 mGal ,直线内符合精度为 0.8 mGal ,圆导航条件下内符合精度为 $1.2 \text{ mGal}^{[85]}$,此外在南海海域,搭载冷原子重力仪最大航速约 13 节 ,航程约 46 n mile ,测得灵敏度为 $136 \text{ mGal}/\sqrt{\text{Hz}}^{[86-87]}$ 。

2020年至今,笔者课题组在冷原子重力仪的研制、误差噪声抑制、振动校正与补偿、冷原子重力仪动态测试等方面做了大量工作。2021年,课

题组联合中国科学院精密测量科学与技术创新研究院、哈尔滨工业大学在木兰湖试验训练基地开展冷原子重力仪动态测试,灵敏度达数百 $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$,4条重复测线内符合精度达毫伽级^[88]。除开展湖上测试实验外,为进一步验证冷原子重力仪系统的实测性能,2023年,课题组还开展了多次海上试验验证,利用加速度计与原子重力仪组合,测量振动信号,以修正重力加速度动态测量值。为消除船在深海航行中运动姿态变化对系统的影响,将组合系统搭载在高精度三轴惯性稳定平台上,以保证姿态平稳。冷原子重力仪船载系统见图6,图6左侧是物理探头搭载在惯性稳定平台以保证运行中姿态平稳,真空腔上方搭载典型加速度计,右侧为光电系统,搭载惯性稳定平台保证船在行进中冷原子重力仪姿态的稳定,搭载加速度计能进一步降低振动噪声的同时为“死区时间”提供重力参考。为探究和提升冷原子重力仪航行精度,笔者课题组在隔振^[89]、降噪方面持续研发^[90-93],并陆续开展远洋航行实验,图7给出了3次测线重力异常测量结果对比。其中,扣除海面高度差引起的重力异常值后的精度相较于未扣除海面高度差前的一致性更好,测得扣除海面高度差后的内符合精度得到进一步提升。

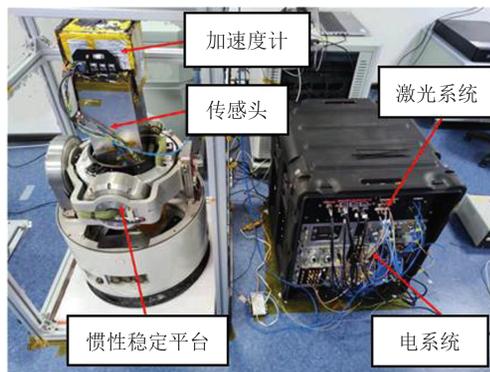


图6 冷原子重力仪船载系统

Fig. 6 Shipborne System of Cold Atom Gravimeter

在深空探测方面,航行器的自主性尤为重要,在深远空,航行器能自主探测自身的姿态、位置等信息对自主技术提出极高要求^[94]。深空探测引力波使用原子干涉手段^[95],由于冷原子重力仪几乎无漂移的特性,少人为干预,十分适用于行星任务。欧洲空间局Müller等^[96]将冷原子重力仪搭载到卫星上测量重力值并构建金星和火星的重力场。

中国神十六乘组航天员还在天和核心舱的高微柜中设置了空间冷原子干涉仪,以便后续开展重力等基础物理指标的测量实验。

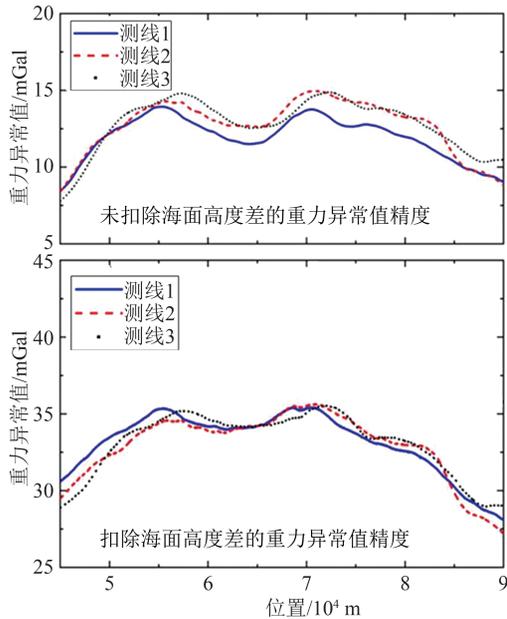


图 7 3次测线重力异常测量结果对比

Fig. 7 Comparison of Gravity Anomaly Measurement Results from Three Survey Lines

除了在基础领域的应用外,动态重力测量技术在其他领域应用同样广泛。利用冷原子重力仪及配套组件,开展原子重力仪远洋绝对重力测量及海洋重力场构建^[97],基于原子重力仪的城市地下空间探测^[98],原子重力仪地震台站流动观测^[99],分析包括基于均匀半空间中重力扰动的解析模型,模拟断层破裂产生的预期重力应变信号,应用冷原子重力仪测量重力信息,并在断层破裂期间进行早期震级估计,从而补充当前的海啸预警系统等^[100]。

在军事领域,高精度、大载荷的稳定平台搭载冷原子重力仪能保证稳定的姿态,尽可能测量垂直重力加速,抑制动态环境下振动倾斜等扰动,为承载设备动态重力测量提供稳定条件^[97]。高精度重力值为军事武器精确打击目标提供基准参考,诸如洲际弹道导弹瞄准则需要构建精确的地球重力场模型^[101]。对于核潜艇,优点在于长时远潜,为了保证潜艇隐蔽性,要求长时间、长距离水下潜航。而长时间远距离潜航,位置和速度不断变化,水下无基准点参考,因此高精度的位置和速度信息十分必要,惯性导航能唯一满足。但对重力场数据的精确性提出高要求,量子导航系统通过捕捉量子信号实现高精度导航定位^[102]。由于GPS会在水下失灵,潜艇下沉后会失去GPS信号。依靠加速计来导航,航行一天可能会偏离航线1 km左右。2016年,英国皇家海军在潜艇测试时发现,量子导航系统精度在24 h内的定位误差仅有1 m。通过冷原子重力仪实时动态数据测量则为惯性导航系统提供高精度

的重力场信息,进而推演得到精确的速度和位置信息^[103],其导航精度可以精确到厘米级。2024年,波音公司完成全球首个多量子传感器飞行测试,旨在为国防和商业提供GPS替代方案。飞机、船只、潜艇、无人装备等军事装备在自主导航过程中,需要精确的重力场数据作为导航依据。重力测量技术可以提供这些关键数据,支持军事装备的精确导航和定位^[104]。

4 结语与展望

本文论述了冷原子重力仪的基本原理、小型化技术的发展、动态测量技术以及在多领域的应用。冷原子重力仪经过实验静态测量走向动态重力测量,向实时毫伽精度量级迈进。但复杂野外环境对抗干扰能力要求较高,在动态重力测量领域借助高精度抑制单元能起到较好效果,但仍需要更优异的冷原子制备、探测方法。

量子导航技术的发展将为重力场构建、潜艇、舰船及导弹装备高精度应用提供有力保障。未来随着量子理论及量子技术的发展,超越经典技术探测极限的量子操纵和探测技术的出现,将进一步推动量子导航技术的发展,小型化仍是动态测量的主要方向之一。多传感器组合导航将充分融合各自优势提升整体性能,将是未来另一发展方向。另外探索低“死区时间”、高噪声抑制性能的冷原子重力仪将在前沿量子技术的发展中更进一步提升测量性能。

参 考 文 献

- [1] Sun Heping. Some Reflections on Developing Trend of Gravimetry in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2024, 39(5): 881-890. (孙和平. 对我国重力学未来发展的几点思考[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(5): 881-890.)
- [2] Bruss A R, Horn B K P. Passive Navigation[J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1983, 21(1): 3-20.
- [3] Wu Yanxiong, Teng Yuntian, Wu Qiong, et al. Error Correction Model and Uncertainty Analysis of the Shipborne Absolute Gravity Measurement System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(4): 492-500. (吴燕雄, 滕云天, 吴琼, 等. 船载绝对重力仪测量系统的误差修正模型及不确定度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(4): 492-500.)
- [4] Wang W, Gao J Y, Li D M, et al. Measurements and Accuracy Evaluation of a Strapdown Marine Gravimeter Based on Inertial Navigation[J]. *Sensors*,

- 2018, 18(11): 3902.
- [5] 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 Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(8): 1294-1298.
- [6] Peters A, Chung K Y, Chu S. Measurement of Gravitational Acceleration by Dropping Atoms [J]. *Nature*, 1999, 400(6747): 849-852.
- [7] Li An, Che Hao, Qin Fangjun, et al. Development and Prospect of Cold Atom Interferometry Gravimetry Measurement [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2021, 33(6): 1-7. (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): 1-7.)
- [8] Chen Lele, Luo Qin, Deng Xiaobing, et al. Precision Gravity Measurements with Cold Atom Interferometer [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2016, 46(7): 21-38. (陈乐乐, 罗覃, 邓小兵, 等. 基于原子干涉技术的精密重力测量研究 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46(7): 21-38.)
- [9] Tian Gui'e, Chen Xiaodong, Wu Shuqing, et al. Correction of Measured Gravity Tides with FG5 Absolute Gravimeter Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(6): 870-878. (田桂娥, 陈晓东, 吴书清, 等. FG5 绝对重力仪观测数据的实测重力潮汐改正 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(6): 870-878.)
- [10] Kasevich M, Chu S. Atomic Interferometry Using Stimulated Raman Transitions [J]. *Physical Review Letters*, 1991, 67(2): 181-184.
- [11] Kasevich M, Chu S. Measurement of the Gravitational Acceleration of an Atom with a Light-Pulse Atom Interferometer [J]. *Applied Physics B*, 1992, 54: 321-332.
- [12] Peters A, Chung K Y, Chu S. High-Precision Gravity Measurements Using Atom Interferometry [J]. *Metrologia*, 2001, 38(1): 25-61.
- [13] Schmidt M, Senger A, Hauth M, et al. A Mobile High-Precision Absolute Gravimeter Based on Atom Interferometry [J]. *Gyroscope and Navigation*, 2011, 2(3): 170-177.
- [14] Hu Z K, Sun B L, Duan X C, et al. Demonstration of an Ultrahigh-Sensitivity Atom-Interferometry Absolute Gravimeter [J]. *Physical Review A*, 2013, 88(4): 043610.
- [15] 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(4): 043630.
- [16] 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.
- [17] Le Gouët J, Mehlstäubler T E, Kim J, et al. Limits to the Sensitivity of a Low Noise Compact Atomic Gravimeter [J]. *Applied Physics B*, 2008, 92(2): 133-144.
- [18] Wu B, Wang Z Y, Cheng B, et al. The Investigation of a mGal-level Cold Atom Gravimeter for Field Applications [J]. *Metrologia*, 2014, 51(5): 452-458.
- [19] Hu Qingqing, Yang Jun, Luo Yukun, et al. Analysis on Key Experimental Requirements of Bragg Diffraction-Based Cold Atom Interferometry Gravimeter [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2017, 39(5): 139-144. (胡青青, 杨俊, 罗玉昆, 等. 布拉格衍射型冷原子干涉重力仪关键实验条件分析 [J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(5): 139-144.)
- [20] Xie H T, Chen B, Long J B, et al. Calibration of a Compact Absolute Atomic Gravimeter [J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(9): 093701.
- [21] Fu Z J, Wang Q Y, Wang Z Y, et al. Participation in the Absolute Gravity Comparison with a Compact Cold Atom Gravimeter [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(1): 011204.
- [22] dos Santos F P, Bonvalot S. Cold-Atom Absolute Gravimetry [M]//Encyclopedia of Geodesy. Cham: Springer International Publishing, 2016: 1-6.
- [23] 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.
- [24] Tan Y J, Shao C G, Hu Z K. Finite-Speed-of-Light Perturbation in Atom Gravimeters [J]. *Physical Review A*, 2016, 94: 013612.
- [25] Qi K, Xu Y Y, Deng X B, et al. Influence of Magnetic Field on the Seismometer in Vibration Correction for Atom Gravimeters [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(4): 044503.
- [26] Zhang J Y, Chen L L, Cheng Y, et al. Movable Precision Gravimeters Based on Cold Atom Interferometry [J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(9): 093702.
- [27] Castin Y, Wallis H, Dalibard J. Limit of Doppler Cooling [J]. *Journal of the Optical Society of America b—Optical Physics*, 1989, 6: 2046-2057.
- [28] Treutlein P, Chung K Y, Chu S. High-Brightness Atom Source for Atomic Fountains [J]. *Physical Review A*, 2001, 63(5): 051401.
- [29] Zhou M K, Duan X C, Chen L L, et al. Micro-Gal Level Gravity Measurements with Cold Atom Interferometry [J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(5): 050401.
- [30] Zhou L, Xiong Z Y, Yang W, et al. Development of an Atom Gravimeter and Status of the 10-meter Atom Interferometer for Precision Gravity Measurement [J]. *General Relativity and Gravitation*, 2011, 43(7): 1931-1942.
- [31] Wu Bin. Study on Noise and System Error of High

- Precision Cold Atomic Gravimeter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (吴彬. 高精度冷原子重力仪噪声与系统误差研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.)
- [32] Zhou Minkang. Experimental Study on the Principle of Atomic Interference Gravity Measurement [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (周敏康. 原子干涉重力测量原理性实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.)
- [33] Hauth M, Freier C, Schkolnik V, et al. First Gravity Measurements Using the Mobile Atom Interferometer GAIN[J]. *Applied Physics B*, 2013, 113(1): 49-55.
- [34] Kulas S, Vogt C, Resch A, et al. Miniaturized Lab System for Future Cold Atom Experiments in Microgravity [J]. *Microgravity Science and Technology*, 2017, 29: 37-48.
- [35] Wang Q Y, Wang Z Y, Fu Z J, et al. A Compact Laser System for the Cold Atom Gravimeter [J]. *Optics Communications*, 2016, 358: 82-87.
- [36] Luo Q, Zhang H, Zhang K, et al. A Compact Laser System for a Portable Atom Interferometry Gravimeter [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(4): 043104.
- [37] Schmidt M, Prevedelli M, Giorgini A, et al. A Portable Laser System for High-Precision Atom Interferometry Experiments [J]. *Applied Physics B*, 2011, 102(1): 11-18.
- [38] Fang J, Hu J G, Chen X, et al. Realization of a Compact One-Seed Laser System for Atom Interferometer-Based Gravimeters [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1586-1596.
- [39] Zhao Y, Wang S K, Zhuang W, et al. Raman-Laser System for Absolute Gravimeter Based on ^{87}Rb Atom Interferometer [J]. *Photonics*, 2020, 7(2): 32.
- [40] Ge G G, Chen X, Li J T, et al. Accuracy Improvement of a Compact ^{85}Rb Atom Gravimeter by Suppressing Laser Crosstalk and Light Shift [J]. *Sensors*, 2023, 23(13): 6115.
- [41] Yu Zhijian, Xue Wenxiang, Zhao Wenyu, et al. Automatic Frequency Stabilization System of DFB Diode Laser for POP Rb Atomic Clock [J]. *Journal of Time and Frequency*, 2015, 38(3): 129-138. (鱼志健, 薛文祥, 赵文宇, 等. 用于 POP 铷原子钟的 DFB 激光器自动稳频技术研究 [J]. 时间频率学报, 2015, 38(3): 129-138.)
- [42] Dinkelaker A N, Schiemangk M, Schkolnik V, et al. Autonomous Frequency Stabilization of Two Extended-Cavity Diode Lasers at the Potassium Wavelength on a Sounding Rocket [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(5): 1388.
- [43] Dong L, Yin W B, Ma W G, et al. A Novel Control System for Automatically Locking a Diode Laser Frequency to a Selected Gas Absorption Line [J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18(5): 1447-1452.
- [44] Zhang Yin, Wang Qing. Research of Automatic Frequency Stability Diode Laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(6): 0602001. (张胤, 王青. 自动稳频半导体激光器研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0602001.)
- [45] Li Q X, Zhang X, Zhu L X, et al. Intelligent and Automatic Laser Frequency Locking System Using Pattern Recognition Technology [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 126: 105881.
- [46] Xiang Jingfeng, Wang Liguang, Li Lin, et al. Automatic Frequency Stabilization System of External Cavity Diode Laser Based on Digital Signal Processing Technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 146-154. (项静峰, 王利国, 李琳, 等. 基于 DSP 技术的外腔半导体激光器自动稳频系统 [J]. 光学学报, 2017, 37(9): 146-154.)
- [47] Zhang Xingping. Design and Implementation of Laser Frequency Stabilization System Based on FPGA [D]. Xi'an: Xidian University, 2022. (张兴平. 基于 FPGA 的激光稳频系统的设计与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.)
- [48] López-Vázquez A, Maldonado M A, Gomez E, et al. Compact Laser Modulation System for a Transportable Atomic Gravimeter [J]. *Optics Express*, 2023, 31(3): 3504-3519.
- [49] Zhang X W, Zhong J Q, Tang B, et al. Compact Portable Laser System for Mobile Cold Atom Gravimeters [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(22): 6545-6551.
- [50] 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(1): 5131.
- [51] Abend S, Gebbe M, Gersemann M, et al. Atom-Chip Gravimeter with Bose-Einstein Condensates [D]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2017.
- [52] Bidet Y, Carraz O, Charrière R, et al. Compact Cold Atom Gravimeter for Field Applications [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(14): 144107.
- [53] Wu X J, Pagel Z, Malek B S, et al. Gravity Surveys Using a Mobile Atom Interferometer [J]. *Science Advances*, 2019, 5(9): eaax0800
- [54] Xu Y Y, Cui J F, Qi K, et al. Evaluation of the Transportable Atom Gravimeter HUST-QG [J]. *Metrologia*, 2022, 59(5): 055001.
- [55] Fang J C, Yin R, Lei X S. An Adaptive Decoupling Control for Three-Axis Gyro Stabilized Platform Based on Neural Networks [J]. *Mechatronics*, 2015, 27: 38-46.
- [56] An Wen, Xu Jiangning, Wu Miao, et al. Influence Analysis of Vertical Deflection on Attitude Accuracy of CHZ-II Gravimeter Stabilized Platform [J]. *Geomatics*

- and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(3): 381-387. (安文, 许江宁, 吴苗, 等. 垂线偏差对CHZ-II重力仪稳定平台姿态精度的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(3): 381-387.)
- [57] Hensley J M, Peters A, Chu S. Active Low Frequency Vertical Vibration Isolation[J]. 1999, 70(6): 2735-2741.
- [58] Freier C. Measurement of Local Gravity Using Atom Interferometry [D]. Berlin : Humboldt-Universität zu, 2010.
- [59] Zhou M K, Xiong X, Chen L L, et al. Note: A Three-Dimension Active Vibration Isolator for Precision Atom Gravimeters[J]. 2015, 86(4): 046108.
- [60] Gong W B, Li A, Ma J X, et al. An Ultralow Frequency Vertical Isolation System Based on Composite Feedforward and Feedback Control[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(23): 29109-29118
- [61] Rakholia A. High Data-Rate Atom Interferometer for Measuring Dynamic Inertial Conditions [D]. New Mexico:University of New Mexico, 2015.
- [62] Li J H, Jiang B N. Research Progress of Cold Atom Interferometry Gravimeter [C]//The 2019 Scientific and Technological Workers' Symposium of China Society of Inertial Technology, Kunming, Yunnan, China, 2019. (李嘉华, 姜伯楠. 冷原子干涉重力仪的研究进展[C]//中国惯性技术学会2019年科技工作者研讨会, 云南昆明, 2019.)
- [63] McGuinness H J, Rakholia A V, Biedermann G W. High Data-Rate Atom Interferometer for Measuring Acceleration [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(1): 011106.
- [64] Guo J, Ma S Q, Zhou C, et al. Vibration Compensation for a Vehicle-Mounted Atom Gravimeter[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(13): 12939-12946.
- [65] Zhou Y, Wang W Z, Ge G G, et al. High-Precision Atom Interferometer-Based Dynamic Gravimeter Measurement by Eliminating the Cross-Coupling Effect[J]. *Sensors*, 2024, 24(3): 1016.
- [66] Kasevich M. Precision Navigation Sensors Based on Atominterferometry [C]//Frontiers in Optics, Tucson, Arizona, USA, 2003.
- [67] Gong W B, Li A, Ma J X, et al. A Vibration Compensation Optimization Method for a Mobile Atomic Gravimeter[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(5): 055014.
- [68] Qiao Z K, Yuan P, Zhang J J, et al. Error Analysis and Filtering Methods for Absolute Ocean Gravity Data [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(13): 14346-14355.
- [69] Antoni-Micollier L, Carbone D, Ménoret V, et al. Detecting Volcano-Related Underground Mass Changes with a Quantum Gravimeter[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(13): e97814.
- [70] Mahadeswaraswamy C. Atom Interferometric Gravity Gradiometer: Disturbance Compensation and Mobile Gradiometry[D]. Stanford:Stanford University, 2009.
- [71] Müntinga H, Ahlers H, Krutzik M, et al. Interferometry with Bose-Einstein Condensates in Microgravity [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(9): 093602.
- [72] Bidel Y, Zahzam N, Blanchard C, et al. Absolute Marine Gravimetry with Matter-Wave Interferometry[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 627.
- [73] Bonnin A, Bidel Y, Bernard J, et al. Marine and Airborne Gravimetry with an Absolute Cold Atom Sensor[C]// IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022.
- [74] Bidel Y, Zahzam N, Bresson A, et al. Absolute Airborne Gravimetry with a Cold Atom Sensor[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(2): 20.
- [75] Bidel Y, Zahzam N, Bresson A, et al. Airborne Absolute Gravimetry with a Quantum Sensor, Comparison with Classical Technologies[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2023, 128(4): e2022JB025921.
- [76] Cheng Bing, Chen Peijun, Zhou Yin, et al. Experiment on Dynamic Absolute Gravity Measurement Based on Cold Atom Gravimeter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(2): 247-257. (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.)
- [77] Wu Bin, Zhou Yin, Cheng Bing, et al. Static Measurement of Absolute Gravity in Truck Based on Atomic Gravimeter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(6): 25-32. (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): 25-32.)
- [78] Wu Bin, Cheng Bing, Fu Zhijie, et al. Measurement of Absolute Gravity Based on Cold Atom Gravimeter at Large Tilt Angle[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(19): 71-81. (吴彬, 程冰, 付志杰, 等. 大倾斜角度下基于冷原子重力仪的绝对重力测量[J]. 物理学报, 2018, 67(19): 71-81.)
- [79] Zhang Xu, Yan Shuhua, Li Qixue, et al. Movable Measurement of Absolute Gravity on the Rail Based on Cold Atom Gravimeter[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2023, 43(4): 128-134. (张旭, 颜树华, 李期学, 等. 基于冷原子重力仪的轨道移动绝对重力测量[J]. 计测技术, 2023, 43(4): 128-134.)
- [80] Zhang Xu, Yan Shuhua, Li Qixue, et al. Field Flow Gravity Measurement Based on Vehicle-Mounted Atomic Interferometer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(9): 94-101. (张旭, 颜树华, 李期学, 等. 基于车载原子干涉仪的野外流动重力测量[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(9): 94-101.)
- [81] Li Q X, Zhang X, Zhang H K, et al. Multi-scene Mobile Absolute Gravity Surveying by Developing a Vehicle-Mounted Static-Base Atom Interferometry

- Gravimeter[J]. *Measurement*, 2024, 231: 114556.
- [82] 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.
- [83] Wang H L, Wang K N, Xu Y P, et al. A Truck-Borne System Based on Cold Atom Gravimeter for Measuring the Absolute Gravity in the Field[J]. *Sensors*, 2022, 22(16): 6172.
- [84] Cheng Bing, Zhou Yin, Chen Peijun, et al. Absolute Gravity Measurement Based on Atomic Gravimeter Under Mooring State of a Ship[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(4): 103-109. (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): 103-109.)
- [85] Zhou Y, Zhang C, Chen P J, et al. A Testing Method for Shipborne Atomic Gravimeter Based on the Modulated Coriolis Effect[J]. *Sensors*, 2023, 23(2): 881.
- [86] Zhu Dong, Xu Han, Zhou Yin, et al. Data Processing of Shipborne Absolute Gravity Measurement Based on Extended Kalman Filter Algorithm[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(13): 159-167. (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): 159-167.)
- [87] Wu B, Zhao Y P, Zhou Y, et al. Construction of Absolute Gravity Benchmark Offshore with an Atomic Gravimeter [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(15): 23527-23536.
- [88] Che Hao, Li An, Fang Jie, et al. Ship-Borne Dynamic Absolute Gravity Measurement Based on Cold Atom Gravimeter [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(11): 148-156. (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): 148-156.)
- [89] Ma J X, Li A, Qin F J, et al. ICEEMDAN/LOESS: An Improved Vibration-Signal Analysis Method for Marine Atomic Interferometric Gravimetry[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(2): 302.
- [90] Che H, Li A, Zhou Z, et al. An Approach of Vibration Compensation for Atomic Gravimeter Under Complex Vibration Environment[J]. *Sensors*, 2023, 23(7): 3535.
- [91] Huang C F, Li A, Qin F J, et al. Temperature Drift Modeling and Compensation of Accelerometer Applied in Atom Gravimeter [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(23): 29053-29062.
- [92] Huang C F, Li A, Qin F J, et al. An Atomic Gravimeter Dynamic Measurement Method Based on Kalman Filter[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(1): 015013.
- [93] Huang C F, Li A, Qin F J. Research Progress of Dynamic Measurement Technology of Atom Gravimeter[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(15): 8774.
- [94] Zhang Guowan, Li Jiahua. The Principle of Cold Atom Interferometry and Its Potential Applications in Deep Space Exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(1): 14-19. (张国万, 李嘉华. 冷原子干涉技术原理及其在深空探测中的应用展望[J]. *深空探测学报*, 2017, 4(1): 14-19.)
- [95] Graham P W, Hogan J M, Kasevich M A, et al. New Method for Gravitational Wave Detection with Atomic Sensors[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(17): 171102.
- [96] Müller F, Carraz O, Visser P, et al. Cold Atom Gravimetry for Planetary Missions [J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 194: 105110.
- [97] Che Hao, Li An, Qin Fangjun, et al. Analysis of Noise and System Effect in Cold Atom Interference Dynamic Gravity Measurement[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2023, 40(5): 700-711. (车浩, 李安, 覃方君, 等. 冷原子干涉动态重力测量中的噪声与系统效应分析[J]. *量子电子学报*, 2023, 40(5): 700-711.)
- [98] Stray B, Lamb A, Kaushik A, et al. Quantum Sensing for Gravity Cartography[J]. *Nature*, 2022, 602(7898): 590-594.
- [99] Chen Luokan, Li Chenyang, Zheng Guolei, et al. Development of Cold Atom Gravimeter and Preliminary Results of a Test at Anhui and the First Deployment in the Chuandian Area[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2023, 44(S1): 53-56. (陈涿侃, 李琛阳, 郑国磊, 等. 冷原子重力仪研制与并网测试及川滇实验场监测试验[J]. *地震地磁观测与研究*, 2023, 44(S1): 53-56.)
- [100] Chai S J, Fekete J, Andersen M F. Measuring the Local Gravitational Field Using Survival Resonances in a Dissipatively Driven Atom-Optics System[J]. *Physical Review A*, 2018, 98(6): 063614.
- [101] Ford C T, Zhang Zongmei. The Impact of Gravity Models on the Accuracy of Intercontinental Ballistic Missiles [J]. *Missiles and Space Vehicles*, 1985(5): 12-22. (C T Ford, 张宗美. 重力模型对洲际弹道导弹精度的影响[J]. *国外导弹技术*, 1985(5): 12-22.)
- [102] Wang Qun. Quantum Navigation System: A Cutting-Edge Military Navigation System [N]. *China National Defense News*, 2017-09-29(014). (王群. 量子导航系统: 军用导航系统的新锐[N]. *中国国防报*, 2017-09-29(014).)
- [103] Lou Guiyang, Pi Yanyan, Feng Zeyuan. Technical Foresight of High-Precision Inertial Navigation Systems [J]. *National Defense Technology*, 2024, 45(2): 44-50. (娄葵阳, 皮燕燕, 冯泽源. 高精度惯性导航系统的技术预见[J]. *国防科技*, 2024, 45(2): 44-50.)
- [104] Chen J Y C. UAV-Guided Navigation for Ground Robot Tele-Operation in a Military Reconnaissance Environment[J]. *Ergonomics*, 2010, 53(8): 940-950.