

基于量子绝对重力仪的重力测量基准站研究

程源¹, 邓小兵¹, 周航¹, 陈乐乐¹, 罗覃¹, 徐文杰¹, 徐耀耀¹, 段小春¹, 周敏康¹, 胡忠坤^{1,2*}

(1. 华中科技大学国家精密重力测量科学中心, 湖北武汉 430074; 2. 武汉量子技术研究院, 湖北武汉 430206)

摘要:基于激光干涉落体型的绝对重力测量是建立重力测量基准的主要手段,也是当前使用的重力基准仪器。近年来,量子绝对重力测量技术的发展为建立更高精度的重力基准提供了新机遇。华中科技大学在国家发展改革委的支持下建设了“精密重力测量研究设施”(precision gravity measurement facility, PGMF)国家重大科技基础设施,该设施中的一个核心建设内容是建立微伽级的绝对重力测量基准站,为重力测量仪器和数据提供统一的基准参考,也是实现重力场高精度测量和应用的基础。高精度重力测量仪器是 PGMF 实现重力测量基准的核心设备。为此,PGMF 自主研制了适用于台站测量的基准型量子绝对重力仪和用于基准延拓的小型化量子绝对重力仪,并建立了重力比对场及背景物理环境监测系统,最终建成了微伽级重力测量基准站。

关键词:精密重力测量;重力基准站;量子绝对重力仪;重力比对场;背景物理场监测

中图分类号: O562 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2026)02-187-13

Research on gravity measurement reference stations based on quantum absolute gravimeter

CHENG Yuan¹, DENG Xiaobing¹, ZHOU Hang¹, CHEN Lele¹, LUO Qin¹, XU Wenjie¹, XU Yaoyao¹,
DUAN Xiaochun¹, ZHOU Minkang¹, HU Zhongkun^{1,2*}

(1. National Gravitation Laboratory, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Institute of Quantum Technology, Wuhan 430206, China)

Abstract: Absolute gravity measurement based on laser interferometry is the main means to establish a gravity measurement reference, and it is also the gravity reference instrument used currently. In recent years, along with the development of quantum absolute gravity measurement techniques, new opportunities have been presented for establishing a gravity reference with higher accuracy. With the support of the National Development and Reform Commission, Huazhong University of Science and Technology had established the “PGMF (precision gravity measurement facility)” as a major national scientific and technological infrastructure. A key component of this facility’s construction is the establishment of a micro-Gal level absolute gravity measurement reference station. This station provides a standardized reference for gravity measurement instruments and data, serving as a foundation for achieving high-precision measurements and applications in the gravitational field. High-precision gravity measurement instruments are the core equipment for PGMF to achieve a gravity measurement reference. For this purpose, PGMF independently developed a reference quantum absolute gravimeter suitable for station measurement and a miniaturized quantum absolute gravimeter for reference extension. Furthermore, a gravity comparison field and a background physical environment monitoring system were established. Ultimately, a micro-Gal level gravity measurement reference station was established.

Keywords: precise gravity measurement; gravity reference station; quantum absolute gravimeters; gravity comparison field; background physical environment monitoring

地球重力场是近地空间最基本的物理场之一,反映了地球物质分布及其随时间和空间的变

化。根据地球重力场空间分布和时间变化特征,可以研究地球内部结构分布^[1]、地球动力学^[2]、

收稿日期:2025-12-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12404553, U2341247, U2341246);国家重点研发计划基金资助项目(2023YFC2907003, 2022YFC3003802);国家精密重力测量科学中心开放课题基金资助项目(PGMF-2024-HP01)

第一作者:程源(1990—),男,河南信阳人,工程师,博士,E-mail:cycge@hust.edu.cn

*通信作者:胡忠坤(1972—),男,安徽安庆人,教授,博士,博士生导师,E-mail:zkhu@hust.edu.cn

引用格式:程源, 邓小兵, 周航, 等. 基于量子绝对重力仪的重力测量基准站研究[J]. 国防科技大学学报, 2026, 48(2): 187-199.

Citation: CHENG Y, DENG X B, ZHOU H, et al. Research on gravity measurement reference stations based on quantum absolute gravimeter[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2026, 48(2): 187-199.

地球质量迁移规律^[3]等基本科学问题,也可以用来获悉地球资源分布^[4-5]和对飞行器进行导航与制导^[6-7]等。因此,精密重力测量对于固体地球构造、全球环境变化、航空航天、大地测量、地质普查、资源勘探、地震监测、大气、海洋、基础物理以及天文科学等众多前沿基础研究及应用研究领域都有着广泛深远的意义。为此,国家发展改革委批复建设了“精密重力测量研究设施”^[8-9](precise gravity measurement facility, PGMF)。该设施以具备全球毫伽级、基准微伽级的重力数据获取、评估与应用能力为目标,项目的建设突破了陆地绝对和相对重力测量、海洋重力测量、航空重力测量以及卫星重力测量中的关键技术和仪器研制,形成高精度、高分辨率和多尺度探测地球重力场的技术体系,打破了发达国家在精密重力测量技术领域对我国的技术封锁,改变了我国长期以来依赖国外进口的局面,提升了我国精密重力测量技术水平和自主创新能力。

重力测量是从重力仪的研制发展起来的,重力仪器精度的提升,极大地推动了重力测量在地球物理和大地测量等领域的应用,例如在大地测量方面,国际大地测量协会提出的“全球超导重力仪观测用于地球动力学研究计划”(1997年至今)^[10],目的就是利用全球的超导重力观测网络研究地球各圈层的相互作用及动态过程。为获得全国重力场基础性资料,完善我国重力基准基础设施,我国先后建设了“1985 国家重力基本网”(85 网)和“2000 国家重力基本网”(2000 网)^[11],以及先后实施了两期重大科学工程——“中国大陆构造环境监测网络”(1995—2000 年,2006 年至今)^[12-13],布设了大量精密重力测量台站,给出了中国大陆重力场变化图像,用于大陆动力学研究和地震监测。同样,随着重力测量仪器精度的提升,绝对重力基准点的精度也得到了显著提升,但是观测技术和仪器的多样性往往是影响测量基准精度的重要因素,因此建立重力基准站系统及重力仪器校验系统以检验重力观测仪器的偏差及一致性的同时具备溯源校准能力具有重要意义。

为此,国内外多家单位都建立了重力基准站,并开展了重力比对。国际计量局(Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)是最早建立重力比对场并定期开展重力仪比对的单位,该重力比对场一共有 5 个站点、12 个重力比对点位,其中两个户外点位重力差异达到 8.8 mGal ($1 \text{ Gal} = 0.01 \text{ m/s}^2$),可用于相对重力仪的标

定^[14]。2009 年 BIPM 举办了第 8 届全球绝对重力仪关键比对^[15],此次用于比对的 6 个点位在一个尺寸为 4 m × 6 m、深度为 1.5 m、质量超过 80 t 的混凝土地基上,比对点位之间重力差异较小。此次比对并未配备长期背景重力变化监测的重力仪,他们根据前期水文观测资料认为比对期间重力变化较小,并建议后续比对过程中加入长期运行监测的重力仪。卢森堡大学在 2013 年举办了第 9 届全球绝对重力仪关键比对^[16],比对地点在卢森堡瓦尔费丹日的地球动力学地下实验室,该比对场一共由 15 个重力观测点组成,观测点分布在 3 个不同高度平台上,每个平台 5 个比对点,不同平台间重力整体差异约 100 μGal ,基准点参考值不确定度最大为 3.9 μGal ($k=2$,表示均值 ± 2 个标准差范围内的数据,即 95.4% 的置信度)。中国计量院于 2017 年主办了第 10 届全球绝对重力仪关键比对^[17],该重力比对场建立在 2 个隔振地基上,共有 10 个点位,每个地基的尺寸为 9 m × 5 m、深度为 4 m、质量约 400 t,隔振地基通过 12 m 长的混凝土支柱直接连接到稳定基岩上,两个隔振地基的高度差为 0.3 m,可产生约 80 μGal 的重力差值。隔振地基振动的均方根误差在 10 Hz 处优于 $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$,比对实验室温度变化为 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$,基准点参考值不确定度最大为 1.4 μGal ($k=2$)。卢森堡和计量院的重力基准站均配备了超导重力仪进行背景重力变化监测并定期对超导重力仪进行了标定,保证重力比对期间背景重力变化监测的准确性。此外,美国国家标准与技术研究院^[18]、湖北地震局等多家单位都建立了高精度的重力测量基准站。

PGMF 的其中一个重要任务是建立微伽级的重力基准站,重力基准站包含重力比对观测装置及背景物理场监测装置。重力比对观测装置建设由三部分组成,第一部分是绝对重力基准站点和经过详细物理特性表征的比对场地的建设,比对场地采用有高度差的台阶式比对场地设计,可为参加比重的重力仪提供分辨率检验的功能,比对场由具备 24 个比对点的标准比对场(位于精密重力测量大楼 B 栋)和具备 12 个比对点的山洞核心比对场(位于新山洞)构成;第二部分是重力基准参考单元,主要是以自研的基准型量子绝对重力仪为核心,为重力基准点和比对场地提供重力参考值;第三部分是重力比对辅助单元,将为长期重力比对提供保障,包含用于重力背景变化监测的超导重力仪,用于比对场环境监测的温湿度计、气压计等设备。背景物理场监测装置是一个多单元组合的系统,主要由地下水监测单元、气压

温湿度监测单元组成。地下水监测单元是对基准站比对场地周边的地下水进行监测以得到实时局部水文运动信息;气压温湿度监测单元是对比对场附近的气压、温度、湿度等数据进行监测,高精度的气压数据将被应用到所有相关重力仪器观测数据的大气重力效应校正中。最终通过对重力比对场高精度的重力测量以及背景环境高精度的实时监测,建立起微伽级的重力比对场。

高精度的绝对重力仪是提升重力基准站精度的核心仪器。目前高精度的绝对重力仪主要有激光干涉绝对重力仪和原子干涉绝对重力仪两种类型。激光干涉绝对重力仪是基于光学干涉法测量落体自由下落加速度的原理进行重力测量,即通过在高真空环境中测量落体在竖直方向自由运动所经历的时间和距离,根据牛顿第二定律计算得到运动的加速度即为重力加速度 g 。利用稳频激光提供长度测量基准、铷原子钟提供时间测量基准。在 20 世纪 90 年代后,以 FG5/FG5X 为代表的商用产品已成为相关行业主要使用的仪器^[19],并且在历次绝对重力仪国际比对中也占据绝对主导地位。在高精度基准点标定^[20-21]、陆态网基准点标定^[13,22-24]、超导重力仪格值标定^[25-27]等应用方面仍然依赖 FG5/FG5X 绝对重力仪。但美国已经对我国实施该型绝对重力仪禁运。

原子干涉绝对重力仪起步较晚,在 20 世纪 90 年代初步实现重力测量,经过 30 多年的发展,逐步实现了商业化,测量精度已经达到 FG5/FG5X 绝对重力仪相当水平,可为高精度重力基准站的建立提供支撑。原子干涉绝对重力仪基于物质波干涉原理进行测量,以原子作为检验质量,利用激光脉冲对原子波包进行操作,实现原子物质波的分束、反射、合束等操作以完成干涉,最后在干涉相位中提取重力信息。具体来说首先利用磁光阱对原子进行冷却囚禁,再经过偏振梯度冷却进一步将原子冷却到 μK 水平,然后原子团在重力作用下自由下落,并利用拉曼光进行选态,选态后的原子作用 3 束 $\pi/2 - \pi - \pi/2$ 拉曼脉冲激光(拉曼脉冲间隔的自由演化时间为 T),即可实现原子物质波的分束、反射、合束,形成 Mach-Zehnder 型原子干涉仪,最后使用归一化探测获取原子的跃迁概率:

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

式中, k_{eff} 为拉曼跃迁的有效波矢, g 为重力加速度, α 为拉曼光扫频啾啾率。在实验中为了补偿原子下落的多普勒效应,需要扫描拉曼光频率。

适当地改变扫频啾啾率 α , 就可以得到随相位变化的概率 P , 即干涉条纹。实验中通过记录不同 T 下的干涉条纹, 找到共同的条纹中心, 就可精确计算出重力加速度测量值 $g = \alpha/k_{\text{eff}}$ 。与激光干涉绝对重力仪不同, 原子干涉绝对重力仪采用经激光冷却后的冷原子团进行落体测量, 无机械磨损和疲劳问题, 具有高潜在灵敏度、高采样率、可长期连续测量的优点, 国内外多个单位已开展原子干涉绝对重力测量研究^[28-40], 部分仪器已经实现商业化^[41-42]。

当前, 激光干涉绝对重力仪因技术框架的局限从根本上制约了其应用范围和发展潜力。例如非连续性测量的特点, 使其难以用于构建高时空分辨率的重力监测网络, 对时间变化重力场的监测能力受限。原子干涉绝对重力仪则从原理上带来了转变, 利用原子作为理想测试质量, 以内禀的抗振性、连续测量能力和强大的小型化潜力, 实现了对传统仪器核心局限的根本性克服。它不仅能够覆盖传统基准测量的所有场景, 更将绝对重力测量从静态测量带入动态测量, 开启了重力场高时空分辨率、网络化、移动化观测的新时代。

针对高精度绝对重力仪器长期依赖国外进口的现状, 为了保障国家在高端仪器的自主可控, 提升我国绝对重力仪器自主创新能力, PGMF 研制了高精度量子绝对重力仪, 不仅支撑了微伽级基准站的建立, 而且突破了重力测量关键技术, 为量子绝对重力仪的应用提供了坚实保障。本文以 PGMF 重力基准站建设为核心, 分别介绍了用于基准站标定的高精度量子绝对重力仪的研制情况、重力比对场和背景物理场监测的建设情况, 然后介绍了该基准站系统的对外服务能力, 最后对量子绝对重力仪在未来的发展及重力测量基准站进一步的提升进行了讨论与展望。

1 重力测量基准站建设

1.1 高精度量子绝对重力仪

近年来量子绝对重力测量技术快速发展, 量子绝对重力仪已经实现产品化, 仪器测量精度也逐步达到 FG5X 的精度水平, 国内外多家单位已经将量子绝对重力仪应用在了绝对重力观测及其相关领域, 如火山连续重力监测^[43]、国际重力比对^[15-18,44]、陆态网重力比对^[24]、重力场测绘^[45-47]、相对重力仪格值标定^[48-50]等。此外, 基于量子绝对重力仪和相对重力仪的联合重力测量技术在地球物理勘测领域同样具有重要应

用^[51-53],即采用量子绝对重力仪作为基准参考及校准仪器,为不同勘测点或不同时间点采集的相对数据提供控制基准,通过将绝对重力仪与相对重力仪协同使用,既能凸显各自的技术优势,又能规避量子绝对重力仪便携能力不足和弹簧重力仪长期稳定性不足的固有缺陷。

计量学研究中重力仪最重要的需求体现在重力比对中。绝对重力仪比对是检验重力仪性能的重要手段,高精度的绝对重力仪在其中扮演着重要角色。从 1981 年至今,每 4 年举办一次重力仪国际比对,自 2009 年第 8 届全球绝对重力仪关键比对开始,量子绝对重力仪就连续参与了绝对重力仪关键比对^[15-18],特别是 2017 年在北京由中国计量科学研究院主办的第 10 届全球绝对重力仪关键比对中,来自中国 6 家单位研制的量子绝对重力仪参加了研究比对,实现了与激光干涉绝对重力仪的相互验证^[44, 54]。华中科技大学研制的可搬运量子绝对重力仪(型号 HUST-QG)参加了 2017 年第 10 届全球绝对重力仪关键比对,其测量的等效度为 1.3 μGal ,不确定度为 6.1 μGal ($k=2$),为同类型仪器精度最高。该比对结果也表明量子绝对重力仪测量的不确定度已经接近激光干涉绝对重力仪,测量精度主要受限于科里奥利力效应和波前畸变效应^[34]。

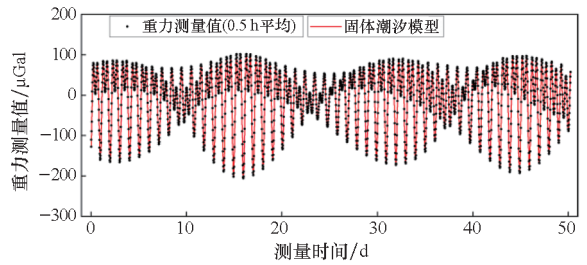
为了进一步提升量子绝对重力仪测量精度,同时实现 PGMF 绝对重力测量基准 2 μGal 的精度需求,PGMF 在可搬运量子绝对重力仪的研制基础上对重力仪进一步改进提升,对其系统误差进一步评估,研制出基准型量子绝对重力仪(型号 AG-ref)^[55-56],如图 1 所示,其系统误差评估结果为 1.6 μGal ,主要受限于波前畸变影响,其贡献为 1.4 μGal 。该仪器原子下落频率为 1 Hz,干涉



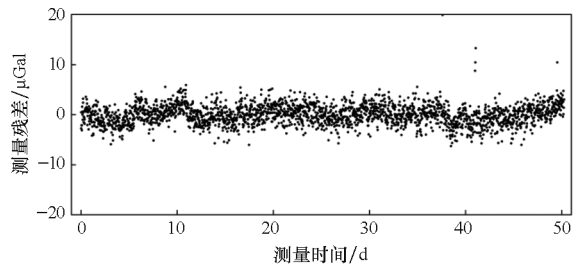
图 1 基准型量子绝对重力仪(型号 AG-ref)
Fig. 1 Reference quantum absolute gravimeter (model AG-ref)

时间 $T=200\text{ ms}$,测量灵敏度达到 27 $\mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$,该款量子绝对重力仪主要应用于实验室及台站长期连续绝对重力测量,服务于高精度的重力比对与基准点校准。利用 FG5X 绝对重力仪与基准型量子绝对重力仪在重力比对场比对测量,验证了基准型量子绝对重力仪测量的准确性,同样表明目前重力基准点测量精度能够达到 2 μGal ^[57]。

量子绝对重力仪的优势不仅是测量灵敏度高,而且能够进行长期连续绝对重力测量,这也是长期维持绝对重力基准的重要保证。图 2 为基准型量子绝对重力仪典型连续运行 50 d 测量结果,将重力测量值扣除潮汐、气压、极移后得到重力残差,其波动范围在 $\pm 5\ \mu\text{Gal}$ 以内,并无明显漂移,这也展示了量子绝对重力仪在连续绝对重力观测中的优势。



(a) 固体潮汐观测数据
(a) Solid tide observation data



(b) 基准型量子绝对重力仪测量值扣除固体潮汐、气压、极移后的重力残差
(b) The residual gravity values after subtracting the values of solid tides, atmospheric pressure and polar motion from the measurement values of the reference quantum absolute gravimeter

图 2 基准型量子绝对重力仪连续运行 50 d 测量结果
Fig. 2 Measurement results of the reference quantum absolute gravimeter during continuous operation for 50 d

为了解决重力基准的延拓和重力仪器便携测量问题,PGMF 对重力仪进一步小型化、模块化设计,研制出高精度小型化量子绝对重力仪(型号 RAI-g)产品^[58],该型重力仪主要针对台站定点标定,能够为相关的行业部门、重力测量机构提供比对及测量服务。该重力仪由光电控制机柜和重力

仪本体探头构成,如图3所示,控制机箱为标准14U机箱,质量为85 kg,本体探头体积为 $\varphi(45\text{ cm}) \times H(100\text{ cm})$ 、质量为60 kg,该仪器原子下落频率为2.67 Hz, $T=100\text{ ms}$,实验室安静环境下测量灵敏度达到 $15 \sim 40\ \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$,测量准确性达到 $2 \sim 5\ \mu\text{Gal}$ 。



图3 小型量子绝对重力仪(型号RAI-g)

Fig. 3 The miniaturized quantum absolute gravimeter (model RAI-g)

小型化量子绝对重力仪测量的准确度可以通过更高精度标定的基准点测量验证。2023年1月,利用小型化量子绝对重力仪测量了标准比对场S3点位,该点位已利用FG5/FG5X绝对重力仪及基准型量子绝对重力仪AG-ref进行了比对标定,RAI-g型量子绝对重力仪测量值与S3点位基准点偏差为 $-2.4\ \mu\text{Gal}$,如图4所示。

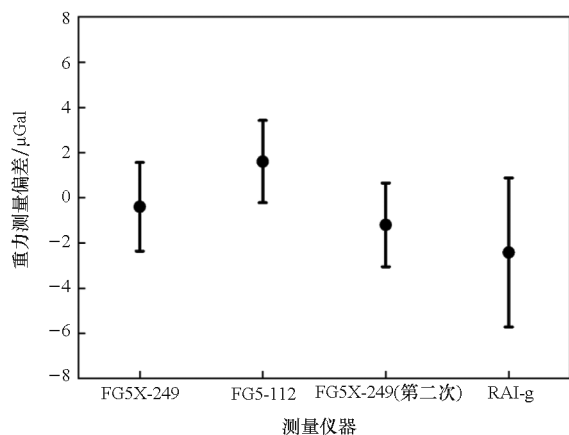


图4 小型化量子绝对重力仪比对测量结果

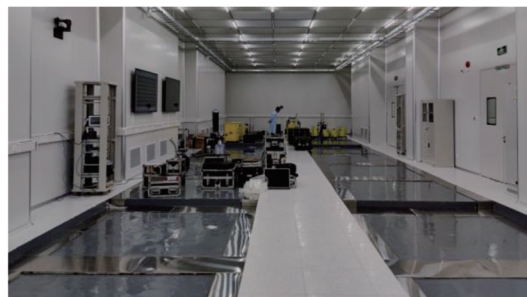
Fig. 4 Comparison measurement results of the miniaturized quantum absolute gravimeter

基于基准型量子绝对重力仪(型号AG-ref),PGMF实现了 $2\ \mu\text{Gal}$ 绝对重力测量基准,并利用小型化量子绝对重力仪(型号RAI-g)可实现重力基准的进一步延拓。基准型量子绝对重力仪测量灵敏度更高,长期稳定性更好,系统误差评估更

小,更适合实验室或基准站长期连续观测。小型化量子绝对重力仪体积更小,重量更轻,安装使用便捷,测量采样率更高,适合为相关的行业部门、重力测量机构提供比对及测量服务。目前RAI-g型绝对重力仪已经实现产品化,并已经服务于重力基准点建设及陆态网重力测量。

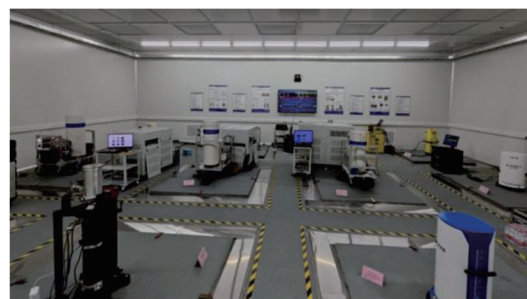
1.2 重力比对场

绝对重力仪测量结果的准确性和不确定度主要是靠重力比对确定和评估^[15-18],重力比对场由位于精密重力测量大楼内的标准比对场和喻家山山洞实验室内的核心比对场组成。标准比对场由1个基准引点和23个绝对重力比对点构成,基准引点利用高精度绝对重力仪进行定期标定,同时利用一台超导重力仪连续观测,使其具有常年提供标定值的能力。比对点分布在高度差为20 cm的台阶式平台上,便于重力仪利用重力梯度进行分辨率的测试,标准比对场占地约 $250\ \text{m}^2$,如图5所示。山洞核心比对场由1个基准引点和11个绝对重力比对点构成,核心比对场占地约 $130\ \text{m}^2$ 。山洞核心比对场位于华中科技大学主校区最北边的喻家山下,山洞实验室环境稳定,温度恒定,底部是坚硬的非风化基岩,与外界干扰源隔离,附近地区不会产生较大的质量迁移,满足基准点的点位要求。



(a) 标准比对场

(a) Standard comparison field



(b) 山洞核心比对场

(b) Cave core comparison field

图5 PGMF重力比对场

Fig. 5 Gravity comparison field of PGMF

PGMF 建设中每个比对点位面积都是 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$, 并且每个点位都配备独立隔振地基, 相邻点位相互干扰小。山洞核心比对场天然恒温, 并且振动干扰小, 适合小批量、高精度的绝对重力核心比对, 同时建有连续运转的基准型量子绝对重力仪, 将实时给出重力基准参考点的重力值, 提高比对场地的利用率。位于 PGMF 大楼一楼的标准比对场点位充足, 可满足多台套的重力仪同时比对标定服务需求, 使用频率较高。两个比对场地都有完善的环境监测装置, 能够为长时间重力比对提供保障。利用高精度重力仪对两个比对场的基准引点进行定期标测, 并利用固定的超导重力仪的连续观测, 使其具有常年作为重力基准引点的能力。两个比对场之间重力差异达到 6.5 mGal , 也可对相对重力仪进行标定。

目前, 重力测量基准站系统已经建成并投入使用, 该系统建设的比对场拥有多个重力比对点位。由于核心比对场建设在振动干扰小、温度恒定的山洞实验室, 其建设的基准点更加稳定, 水平更高。利用微震仪测量其地面竖直方向振动噪声, 测量结果表明在 $0.01 \sim 80\text{ Hz}$ 频段的振动噪声优于 $1 \times 10^{-7}\text{ g/Hz}^{1/2}$, 如图 6 振动噪声谱所示。图 7 记录了山洞核心比对场在 2024 年 10 月 1 日—10 月 31 日期间温度、湿度、气压的变

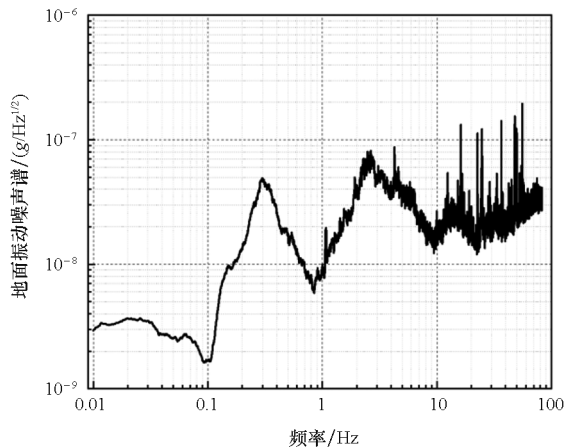
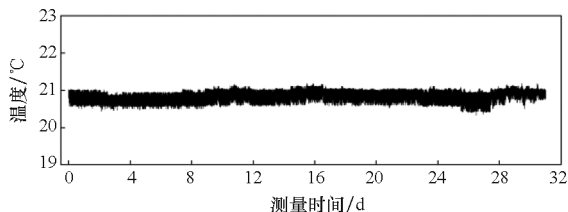
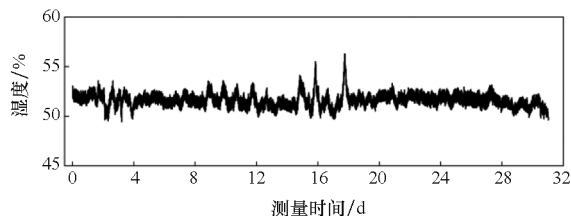


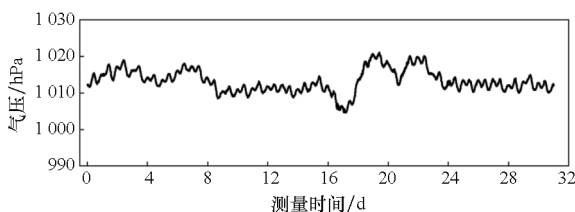
图 6 山洞核心比对场垂向背景振动噪声
Fig. 6 Vertical background vibration noise in the cave core comparison field



(a) 山洞核心比对场典型 1 个月温度变化
(a) Typical temperature variation over one month in the cave core comparison field



(b) 山洞核心比对场典型 1 个月湿度变化
(b) Typical humidity variation over one month in the cave core comparison field



(c) 山洞核心比对场典型 1 个月气压变化
(c) Typical atmospheric pressure variation over one month in the cave core comparison field

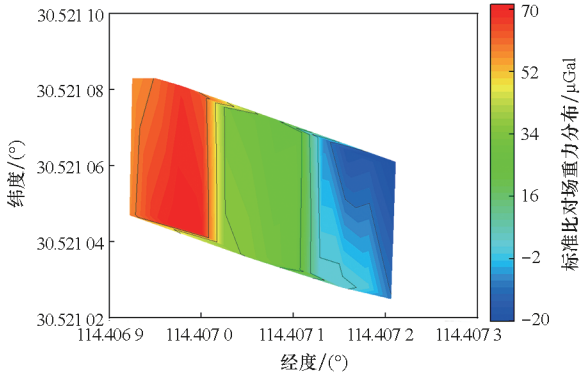
图 7 山洞核心比对场典型的温度、湿度、气压变化记录
Fig. 7 Typical records of temperature, humidity and atmospheric pressure changes in the cave core comparison field

化, 测量结果表明比对场一个月温度变化波动小于 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度变化小于 10% 。

高精度的重力基准点需要依靠绝对重力仪的比对, 不同类型的绝对重力仪测量重力值的等效高度不同, 且不同比对点位重力值存在差异。因此, 在重力比对之前需要对比对场的重力分布进行测量, 包括不同比对点位之间重力差异以及每个比对点位的垂向重力梯度, 最终将所有测量结果归算到同一点。

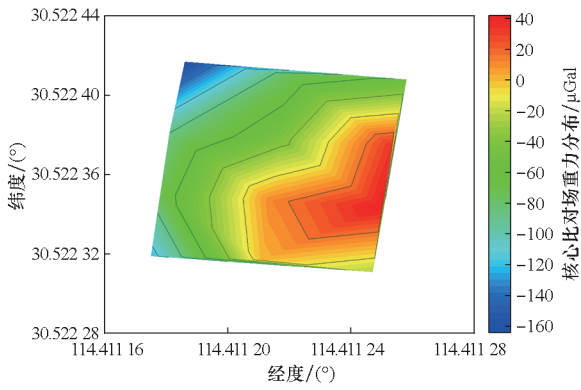
不同比对点位之间重力差异是利用 CG6 相对重力仪采用 A—B—A 循环的测量方法, 至少获得 16 组有效重力段差值, 将段差数据扣除漂移、气压修正后统计平均, 最终得到比对场重力分布, 测量精度优于 $1\text{ }\mu\text{Gal}$ 。标准比对场和核心比对场不同比对点位之间的重力差异如图 8 所示。其中标准比对场比对点位高度呈阶梯分布, 重力值差异同样呈阶梯分布, 最大差异大于 $90\text{ }\mu\text{Gal}$, 如图 8(a) 所示; 山洞核心比对场比对点高程差异小于 3 cm , 但重力加速度沿水平方向梯度较大, 不同点位重力值最大差异大于 $200\text{ }\mu\text{Gal}$, 如图 8(b) 所示。

测量比对点垂向重力梯度时, 考虑到重力值随高度的变化呈现非线性规律, 而且在国际比对中, 梯度测量通常利用相对重力仪测量多个高度



(a) 标准比对场各点位重力差异

(a) Gravity differences at each point in the standard comparison field



(b) 核心比对场各点位重力差异

(b) Gravity differences at each point in the core comparison field

图 8 比对场点位重力分布测量值

Fig. 8 Measured values of the gravity distribution at the comparison field

重力值进行二次拟合^[59-60]获得,二阶拟合模型如下:

$$g(h) = a + bh + ch^2 \quad (2)$$

式中, $g(h)$ 为点位重力值随高度的变化, h 为高度, a 、 b 、 c 为梯度拟合系数。因此,在测量比对点

位垂向重力梯度时,利用 CG6 相对重力仪选用在 21.7 cm、61.7 cm、91.7 cm、131.7 cm 高度 4 个点循环方式测量,共计测量 26 次,保证每个高度至少有 6 个测量值,测量方案如图 9 所示。

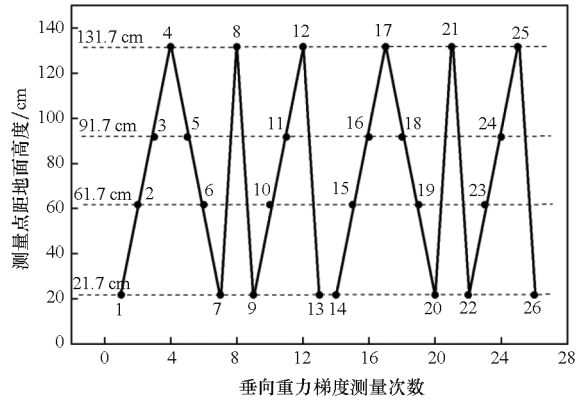


图 9 相对重力仪垂向重力梯度测量示意图

Fig. 9 Schematic diagram of vertical gravity gradient measurement with a relative gravimeter

梯度拟合结果中除了拟合系数 a 、 b 、 c , 还有拟合系数的标准差 (σ_b 和 σ_c 为拟合系数 b 、 c 的标准偏差, σ_{bc} 为协方差), 根据拟合系数的标准差来评判梯度测量的 A 类不确定度, 例如 h_1 和 h_2 高度的段差 δg 表示为:

$$\delta g = g(h_2) - g(h_1) = b(h_2 - h_1) + c(h_2^2 - h_1^2) \quad (3)$$

相应的不确定度为:

$$\sigma_{\delta g}^2 = (h_2^2 - h_1^2)^2 \cdot \sigma_c^2 + (h_2 - h_1)^2 \cdot \sigma_b^2 + 2(h_2^2 - h_1^2) \cdot (h_2 - h_1) \cdot \sigma_{bc} \quad (4)$$

最后通过判断 1 m 段差内 $\sigma_{\delta g}$ 的不确定度值得到梯度测量的精度。同时对比对场每个点位的垂向重力梯度进行了测量,取标准比对场 S2、S3 点位的垂向梯度测量结果作为典型代表,如表 1 所示,垂向梯度测量不确定度分别为 0.21 $\mu\text{Gal}/\text{m}$ 和 0.25 $\mu\text{Gal}/\text{m}$ 。

表 1 标准比对场垂向重力梯度典型测量结果

Tab. 1 Typical measurement results of the vertical gravity gradient in the standard comparison field

点位	一次项拟合系数/ ($\mu\text{Gal} \cdot \text{m}^{-1}$)	一次项拟合系数 标准偏差/ ($\mu\text{Gal} \cdot \text{m}^{-1}$)	二次项拟合系数/ ($\mu\text{Gal} \cdot \text{m}^{-2}$)	二次项拟合系 数标准偏差/ ($\mu\text{Gal} \cdot \text{m}^{-2}$)	协方差/ ($\mu\text{Gal}^2 \cdot \text{m}^{-3}$)	测量不确定 度/($\mu\text{Gal}/\text{m}$)
S2	-312.78	2.58	6.28	1.73	-4.45	0.21
S3	-311.29	1.54	3.92	1.07	-1.67	0.25

1.3 背景物理场监测

长期、稳定的高精度重力观测是探测地球物理信号的有力工具。重力场是一个时刻变化着的

场,包含潮汐和非潮汐两部分,潮汐部分主要由固体潮、海潮、极移等引起,最大幅度可达 300 μGal ,这部分可依据模型进行精确的计算和改正^[61]。

而非潮汐部分主要由地下水、气压等环境因素引起,最大幅度的影响可达 $10 \mu\text{Gal}^{[10]}$,而且影响尺度可从几分钟到几年。随着绝对重力测量仪器精度的提高,背景物理场效应逐渐成为高精度绝对重力仪偏差不确定的重要因素。为了进一步提高绝对重力测量的精度,防止地下水、气压等重力效应对重力测量信号的掩盖,PGMF 对地下水、气压参数进行了监测。通过与绝对重力测量精度匹配的背景物理场监测设备,获取地下水和气压等对重力测量有影响的综合影响量,有助于提高重力观测的精度^[62-67],为解译地球内部结构、板块构造、地球内部动力学等研究提供可靠的、高精度的重力观测信息。

为了获得地下水和气压变化实时数据,PGMF 建立了以山洞核心比对场为中心的地下水和气压监测系统。在研究地形地貌及水文地质条件后,将设计仪器集中安装在精密重力测量大楼院内、喻家山南坡靠近山洞核心比对场以及喻家山北坡三个位置。图 10 为精密重力测量大楼院内背景环境监测设备,主要包括雨量计、气压计、地下水水位计等设备。背景环境监测设备从 2022 年开始被观测,已稳定连续运行近 4 年,典型记录比对场附近地下水变化,如图 11 所示,地下水监测精度 1 cm,地下水水位年变化量最大达到近 5 m。



图 10 室外背景环境监测设备

Fig. 10 Outdoor background environment monitoring equipment

PGMF 除了对比对场附近的气压进行了监测,同样对比对场内部的气压进行了局部范围的高精度监测。气压修正一般都利用台站附近的气压资料对重力潮汐观测作气压改正。在重力潮汐资料的调和和分析中直接考虑气压的影响,采用时间域内的线性回归方法,计算出大气重力导纳值即可建立大气重力效应和大气气压的线性关系。结合基准站建设中布设的超导重力仪,可以通过高精度的超导重力观测数据来处理分析得到基准

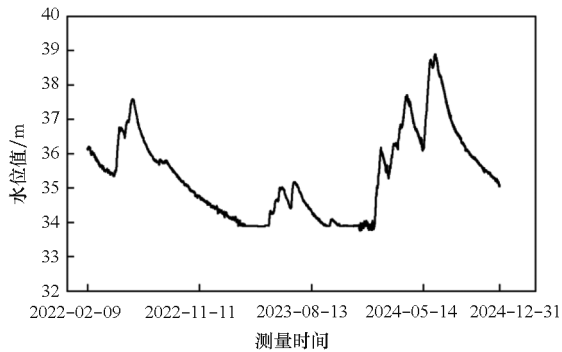


图 11 比对场附近地下水水位变化观测

Fig. 11 Observation on the variation of groundwater level near the comparison field

站适用的大气重力导纳值,并将其进一步应用到所有相关重力仪器观测数据的大气重力效应。比对场附近气压变化观测近 3 年数据如图 12 所示。气压监测的精度为 0.1 hPa,年变化最大超过 4 kPa。

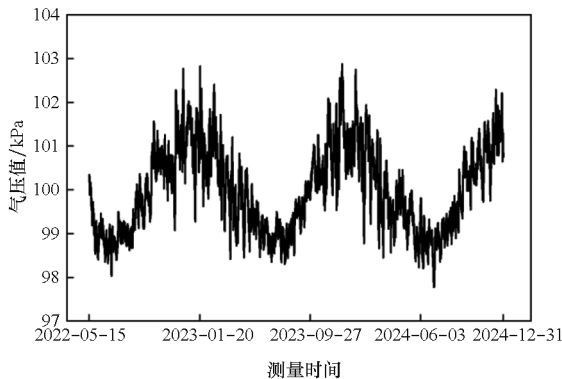
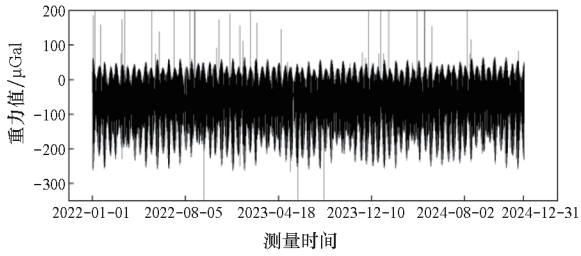


图 12 比对场附近气压变化观测

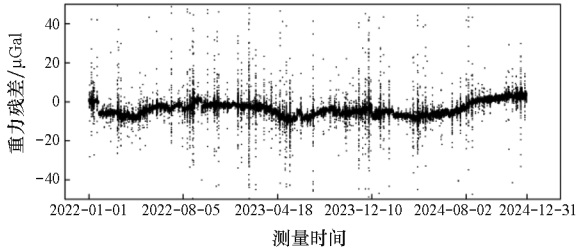
Fig. 12 Observation on the variation of atmospheric pressure near the comparison field

高精度重力基准的建立不仅依赖高质量的重力比对场,还需要对比对场及其周边环境进行高精度的监测,保证基准长期维持的可靠性。利用超导重力仪可直接监测背景重力的变化,PGMF 购置了两台 iGrav 超导重力仪,该仪器从 2018 年稳定运行至今,并定期利用绝对重力仪对其格值因子进行标定,可实现背景物理场影响监测精度优于 $1 \mu\text{Gal}$ 水平。图 13 为其中一台超导重力仪在 2022—2024 年连续 3 年测量的结果,可以看到超导重力仪测量结果扣除了固体潮汐、气压、极移后的残差变化仍然较大,需要结合地下水等局域监测数据进一步对其变化原因进行分析。

目前重力基准点的维持主要依靠绝对重力仪的比对和超导重力仪长期监测背景重力变化,超导重力仪尽管测量精度非常高,但仍然存在微伽级的年漂移,并且需要定期进行标定,这也对基准



(a) 超导重力仪在2022—2024年连续3年测量重力结果
(a) Gravity measurements obtained continuously over three years (2022—2024) using a superconducting gravimeter



(b) 超导重力仪测量结果扣除固体潮汐、
气压、极移后的重力残差

(b) Residual gravity obtained from superconducting gravimeter measurements, after correcting for solid tides, atmospheric pressure and polar motion

图13 超导重力仪重力变化观测

Fig. 13 Observation of gravity changes by superconducting gravimeter

参考点精度带来一定影响。PGMF以山洞核心比对场为中心,建设了地下水、雨量监测系统和气压监测系统,可长期获取地下水、降雨量和气压等监测数据,但目前仍然没有建立相匹配的环境效应评估模型,不能有效将环境监测数据和背景重力变化联系起来,因此下一步将对近几年比对场附近背景环境监测数据进行分析,并构建地下水重力效应模拟系统、气压重力效应模拟系统等模型,进一步研究背景物理场对重力测量的综合影响。对于地下水重力效应,首先应开展水文和地质调查获取重力比对场附近地表及有限深度内的水文地质信息,进一步构建比对场附近的三维水文地质模型,然后将降雨量、蒸发量、地下水文和土壤湿度等实测数据,经过预处理后输入到三维地下水流动模型得到实时地下水三维分布情况,最后根据实时三维地下水分布模型,进行多个观测台站处的重力效应计算。对于气压重力效应,采用时间域内的线性回归方法,计算出大气重力导纳值即可建立大气重力效应和大气气压的线性关系,利用气压观测数据与基准站中超导重力观测数据进行线性回归分析,得到整个时间段的平均气压重力导纳值,最后利用气压观测数据与气压

重力导纳值的乘积,得到相应的气压重力效应。最终根据地下水重力效应模型以及气压重力效应模型构建完整的背景效应评估模型,并通过已有的超导重力连续观测数据和模拟结果进行对比,寻找由明显降水所引起的重力变化信号,从该变化信号的幅值和变化周期两方面来对模拟系统的实用性进行检验。

2 重力基准校验服务能力

重力测量基准站建设完成后主要面向用户提供重力仪仪器的标定、比对、校验服务,同时为用户提供时间/频率标准、长度标准溯源,仪器分辨率、测量偏差等检验服务。基准站系统的建立不仅能够为重力技术研究和重力测量仪器提供性能检验和评估的统一基准,同时也将促进绝对重力仪、相对重力仪等仪器的研制,更好地服务于国民经济及国防建设。

为了对重力仪的时间/频率信号进行直接溯源,需要给重力仪提供稳定且连续的10 MHz频率参考信号。目前重力仪频率参考信号来自石英晶振、铷钟等,短期稳定度在 10^{-10} 水平,但对于建立长期连续的重力比对场,以及提供长期重力观测数据则需要稳定度更高的原子钟组,如氢钟、铯喷泉钟等。PGMF时频标准溯源装置通过氢钟产生稳定的频率信号,用铯喷泉钟对氢钟的频率进行驾驭,从而保证溯源服务的长期连续运行,能够为各台待标校的重力仪以及多家参与比对的重力仪等提供可溯源至国家标准的时间/频率信号,10 MHz信号相对不确定度优于 1×10^{-13} 。

目前绝对重力仪使用的激光波长主要为532 nm、633 nm以及780 nm,PGMF建立的高精度长度标准溯源基准,可用来常年随时进行相关波段的激光波长比对测量。将待溯源激光器与稳频激光器进行拍频,同时利用光梳测量稳频激光器的绝对频率,从而给出待溯源激光器频率。利用光梳进行频率测量时,光梳的频率锁定在本地原子钟上,本地原子钟通过全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)溯源到中国计量院,而中国计量院的时钟信号溯源至协调世界时(universal time coordinated, UTC),这样通过光梳测量出的频率也就间接溯源到了UTC。最终测量的频率通过真空中光速可转换为真空中的波长,成为长度标准。目前,作为长度标准的稳频激光波长相对不确定度优于 1×10^{-11} ^[68-69]。

重力仪的分辨力是指其能分辨的最小重力加速度变化的能力。重力仪分辨力除了利用国际通

用的 Allan 偏差进行评估,还可以利用最直接的方法即引入附加吸引质量源的方式来标定。通过调制吸引质量和传感器之间的距离,获取标定用的最小分辨力信号;通过吸引质量的移动,来产生可控的附加引力加速度变化。为了对重力仪的分辨力直接进行标定,针对不同类型的重力仪,PGMF 建设了多套标准引力场装置^[70-72]。每套装置通过上下移动吸引质量球体在竖直方向产生 20 μGal 范围内的加速度变化场,精度优于 0.2 μGal 。标准引力场装置可对激光干涉绝对重力仪(如 FG5X)、相对重力仪(如 CG6)和冷原子干涉绝对重力仪等微伽或亚微伽水平的高分辨率重力仪进行标定。

在建立高精度的重力基准站系统基础上即可实现对重力仪测量偏差的校验。将待校验重力仪放置于比对点,与基准型重力仪进行同步比对观测,或直接利用比对点的参考值给出待校验重力仪的偏差。偏差校验的能力取决于重力基准仪器的测量水平和重力基准站中基准点以及环境监测的精度。目前,重力基准仪器以及基准点重力测量不确定度均优于 2 μGal 。基于高精度量子绝对重力仪标定的重力基准站已对外开放运行。2024 年 9 月湖北省地震局(中国地震局地震研究所)在 PGMF 山洞核心比对场开展了绝对重力仪比对观测^[53],此次观测仪器包括 1 台 FG5X 绝对重力仪、1 台国产激光干涉绝对重力仪和 5 台国产量子绝对重力仪。在基准站良好的观测环境下,测量结果表明国产量子绝对重力仪测量精度与 FG5X 并无明显差异。高精度量子绝对重力仪也为重力基准的建设提供了新的基准仪器。

3 总结与展望

本文详细介绍了 PGMF 以建立微伽级的绝对重力测量基准站为目标,研制了高精度量子绝对重力仪器,包括:用于实验室及台站长期连续绝对重力测量的基准型量子绝对重力仪(型号 AG-ref),测量准确度为 2 μGal ;用于台站定点标定,能够为相关的行业部门、重力测量机构提供比对及测量服务的小型化量子绝对重力仪(型号 RAI-g),测量准确度为 2~5 μGal 。并在此基础上建立了高精度的重力比对场及完善的背景物理场监测系统,通过自主研发的高精度量子绝对重力仪比对标定,最终建立了 2 μGal 的重力基准站,同时利用高精度超导重力仪及量子绝对重力仪长期监测背景重力变化,实现了对基准点重力值的监测和维持。目前该平台已经具备了高精度重力测

量基准的溯源和各类重力测量仪器的检验、比对和校验服务能力。

尽管量子绝对重力仪测量的精度已经接近或达到 FG5X 相当的水平,但对于量子绝对重力仪而言,一方面仍需要进一步提升仪器的稳定性及可靠性,另一方面需要扩大重力仪的应用场景,例如在陆态网重力测量、地球动力学等领域开展多方位应用示范,高精度量子绝对重力仪有望成为新一代重力基准仪器。

随着绝对重力测量仪器及基准参考点精度的提高,背景物理场效应逐渐成为高精度绝对重力仪校准偏差的重要因素。尽管 PGMF 已经建立了背景环境监测系统而且积累了大量的观测数据,但目前仍然没有建立相匹配的环境效应评估模型,不能有效将环境监测数据和背景重力变化联系起来。因此,下一步将对近几年比对场附近背景环境监测数据进行分析,开展背景环境评估模型研究,构建三维地下水流模型,并根据地下水数据及降雨量对地下水重力效应以及气压重力效应进行模拟,最终构建完整的背景效应评估模型。最后利用超导重力仪及地下水数据对背景效应评估模型进行验证与改进。进一步研究背景物理场对重力测量的综合影响,不仅有助于提高重力比对观测的精度,同时准确扣除背景物理环境变化影响,也为解译地球内部动力学等研究提供可靠的、高精度的重力观测信息。

参考文献 (References)

- [1] 宁津生,王正涛. 地球重力场研究现状与进展[J]. 测绘地理信息, 2013, 38(1): 1-7.
NING J S, WANG Z T. Progress and present status of research on earth's gravitational field [J]. Journal of Geomatics, 2013, 38(1): 1-7. (in Chinese)
- [2] 孙和平,刘清超,吴书清,等. 北京地区最新重力潮汐结果及其在检测液核共振效应中的应用[J]. 地球物理学报, 2017, 60(12): 4699-4708.
SUN H P, LIU Q C, WU S Q, et al. The latest gravity tide results in Beijing and its application in detecting resonant effect of the fluid outer core [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(12): 4699-4708. (in Chinese)
- [3] BATTAGLIA M, ROBERTS C, SEGALL P. Magma intrusion beneath long valley caldera confirmed by temporal changes in gravity[J]. Science, 1999, 285(5436): 2119-2122.
- [4] NABIGHIAN M N, ANDER M E, GRAUCH V J S, et al. Historical development of the gravity method in exploration[J]. Geophysics, 2005, 70(6): 63ND-89ND.
- [5] ZHANG M H, QIAO J H, ZHAO G X, et al. Regional gravity survey and application in oil and gas exploration in China[J]. China Geology, 2019, 2(3): 382-390.
- [6] WANG H B, 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, 2016, 10(5): 862-869.
- [7] CHANG L B, QIN F J, WU M P. Gravity disturbance compensation for inertial navigation system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(10): 3751-3765.
- [8] 刘跃龙, 周泽兵, 范继, 等. 精密重力测量研究设施建设进展[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(9): 1-10.
- LIU Y L, ZHOU Z B, FAN J, et al. Construction progress of precision gravity measurement facility [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(9): 1-10. (in Chinese)
- [9] ZHOU Z B, LIU Y L, ZHOU H, et al. Precision gravity measurement facility [J]. Frontiers of Engineering Management, 2025, 12(4): 1254-1258.
- [10] VOIGT C, FÖRSTE C, WZIONTEK H, et al. Report on the data base of the international geodynamics and earth tide service (IGETS) [R]. Potsdam: GFZ German Research Centre for Geosciences, 2016.
- [11] 陈俊勇, 杨元喜, 王敏, 等. 2000 国家大地控制网的构建和它的技术进步[J]. 测绘学报, 2007, 36(1): 1-8.
- CHEN J Y, YANG Y X, WANG M, et al. Establishment of 2000 national geodetic control network of China and its technological progress[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(1): 1-8. (in Chinese)
- [12] 许厚泽. 重力观测在中国地壳运动观测网络中的作用[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(3): 1-3.
- XU H Z. Function of gravimetry in CMONOC[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2003, 23(3): 1-3. (in Chinese)
- [13] 张新林, 韩宇飞, 汪健, 等. 2010~2018 年中国大陆构造环境监测网络绝对重力仪比测结果分析[J]. 中国地震, 2020, 36(4): 872-878.
- ZHANG X L, HAN Y F, WANG J, et al. Comparisons of absolute gravimeters measurements from crustal movement observation network of China during 2010 and 2018 [J]. Earthquake Research in China, 2020, 36(4): 872-878. (in Chinese)
- [14] JIANG Z, BECKER M, JOUSSET P, et al. High precision levelling supporting the international comparison of absolute gravimeters[J]. Metrologia, 2012, 49(1): 41-48.
- [15] JIANG Z, PÁLINKÁŠ V, ARIAS F E, et al. The 8th international comparison of absolute gravimeters 2009; the first key comparison (CCM. G-K1) in the field of absolute gravimetry[J]. Metrologia, 2012, 49(6): 666-684.
- [16] FRANCIS O, BAUMANN H, ULLRICH C, et al. CCM. G-K2 key comparison[J]. Metrologia, 2015, 52(1A): 07009.
- [17] WU S Q, FENG J Y, LI C J, et al. The results of CCM. G-K2. 2017 key comparison[J]. Metrologia, 2020, 57(1A): 07002.
- [18] NEWELL D, ULLRICH C, BUTTA H, et al. CCM. G-K2. 2023; CIPM key comparison of absolute gravimeters [J]. Metrologia, 2024, 61(1A): 07009.
- [19] OKUBO S, YOSHIDA S, SATO T, et al. Verifying the precision of a new generation absolute gravimeter FG5—comparison with superconducting gravimeters and detection of oceanic loading tide [J]. Geophysical Research Letters, 1997, 24(4): 489-492.
- [20] XU J Q, ZHOU J C, LUO S C, et al. Study on characteristics of long-term gravity changes at Wuhan station [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(13): 2033-2040.
- [21] 张宏伟, 董朝阳, 赵东明, 等. 2000 国家重力基本网部分站的最新绝对重力测量[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(4): 52-55.
- ZHANG H W, DONG C Y, ZHAO D M, et al. Latest absolute gravity measurement at some points of 2000 national basic gravity network [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31(4): 52-55. (in Chinese)
- [22] 申重阳, 祝意青, 胡敏章, 等. 中国大陆重力场时变监测与强震预测[J]. 中国地震, 2020, 36(4): 729-743.
- SHEN C Y, ZHU Y Q, HU M Z, et al. Time-varying gravity field monitoring and strong earthquake prediction on the Chinese mainland[J]. Earthquake Research in China, 2020, 36(4): 729-743. (in Chinese)
- [23] 韩宇飞, 汪健, 徐如刚, 等. 陆态网络重力测网的分形特征与地震监测能力分析[J]. 中国地震, 2020, 36(4): 879-887.
- HAN Y F, WANG J, XU R G, et al. Fractal characteristics and earthquake monitoring capability of the CMONOC gravity network[J]. Earthquake Research in China, 2020, 36(4): 879-887. (in Chinese)
- [24] 王嘉沛, 张新林, 韩宇飞, 等. 2021 年中国大陆构造环境监测网络绝对重力比测结果分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(9): 11-16.
- WANG J P, ZHANG X L, HAN Y F, et al. Results of comparison of absolute gravimeters from crustal movement observation network of China in 2021 [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(9): 11-16. (in Chinese)
- [25] 牟爽爽, 冯金扬, 王启宇, 等. iGrav-012 超导重力仪定期格值结果分析[J]. 计量学报, 2019, 40(3): 373-377.
- MOU L S, FENG J Y, WANG Q Y, et al. Analysis of calibration factor of superconducting gravimeter iGrav-012[J]. Acta Metrologica Sinica, 2019, 40(3): 373-377. (in Chinese)
- [26] 陈晓东, 孙和平, 张为民, 等. 用绝对重力仪测定超导重力仪格值的精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(5): 145-149.
- CHEN X D, SUN H P, ZHANG W M, et al. Accuracy analysis on determination of calibration factor of a superconducting gravimeter using an absolute gravimeter[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(5): 145-149. (in Chinese)
- [27] 邢乐林, 李辉, 刘子维, 等. 利用绝对重力测量精密测定超导重力仪的格值因子[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(1): 48-50.
- XING L L, LI H, LIU Z W, et al. Scale factor calibration of a superconducting gravimeter by using absolute gravimetry[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(1): 48-50. (in Chinese)
- [28] PETERS A, CHUNG K Y, CHU S. High-precision gravity measurements using atom interferometry [J]. Metrologia, 2001, 38(1): 25-61.
- [29] BIDEL Y, CARRAZ O, CHARRIÈRE R, et al. Compact cold atom gravimeter for field applications [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(14): 144107.
- [30] GILLOT P, FRANCIS O, LANDRAGIN A, et al. Stability comparison of two absolute gravimeters; optical versus atomic interferometers[J]. Metrologia, 2014, 51(5): L15-L17.

- [31] FREIER C, HAUTH M, SCHKOLNIK V, et al. Mobile quantum gravity sensor with unprecedented stability [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 723 (1): 012050.
- [32] WU X J, PAGEL Z, MALEK B S, et al. Gravity surveys using a mobile atom interferometer [J]. *Science Advances*, 2019, 5(9): eaax0800.
- [33] 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.
- [34] XU Y Y, CUI J F, QI K, et al. Evaluation of the transportable atom gravimeter HUST-QG [J]. *Metrologia*, 2022, 59(5): 055001.
- [35] 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. (in Chinese)
- [36] 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.
- [37] WANG S K, ZHAO Y, ZHUANG W, et al. Shift evaluation of the atomic gravimeter NIM-AGRB-1 and its comparison with FG5X [J]. *Metrologia*, 2018, 55(3): 360–365.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] COOKE A K, CHAMPOLLION C, LE MOIGNE N. First evaluation of an absolute quantum gravimeter (AQG#B01) for future field experiments [J]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2021, 10(1): 65–79.
- [43] 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): e2022GL097814.
- [44] WU S Q, FENG J Y, LI C J, et al. The results of 10th international comparison of absolute gravimeters (ICAG-2017) [J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(6): 63.
- [45] BIDEL Y, ZAHZAM N, BLANCHARD C, et al. Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 627.
- [46] BIDEL Y, ZAHZAM N, BRESSON A, et al. Absolute airborne gravimetry with a cold atom sensor [J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(2): 20.
- [47] 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.
SUN H P. Some reflections on developing trend of gravimetry in China [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2024, 39(5): 881–890. (in Chinese)
- [48] MERLET S, GILLOT P, CHENG B, et al. Calibration of a superconducting gravimeter with an absolute atom gravimeter [J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(5): 62.
- [49] WANG Q Y, FENG J Y, WANG S K, et al. Calibration of the superconducting gravimeter based on a cold atom absolute gravimeter at NIM [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(12): 123701.
- [50] WANG K N, WU L M, CHENG B, et al. Accurate evaluation of the scale factor for a gPhone relative gravimeter with a stable cold atom gravimeter [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(17): 32326–32336.
- [51] SHETTEL N, LEE K S, OON F E, et al. Geophysical survey based on hybrid gravimetry using relative measurements and an atomic gravimeter as an absolute reference [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 6511.
- [52] LI C Y, XU R G, CHEN X, et al. Joint gravity survey using an absolute atom gravimeter and relative gravimeters [EB/OL]. (2025-04-01) [2025-10-20]. <https://arxiv.org/abs/2504.00588>.
- [53] 王嘉沛, 韩宇飞, 张新林, 等. 我国绝对重力观测应用与研究进展 [J]. *地球与行星物理论评 (中英文)*, 2025, 56(3): 243–257.
WANG J P, HAN Y F, ZHANG X L, et al. Application and research progress of absolute gravity observation in China [J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2025, 56(3): 243–257. (in Chinese)
- [54] 冯金扬, 吴书清, 李春剑, 等. 绝对重力仪国际比对方法 [J]. *地球与行星物理论评*, 2022, 53(3): 269–277.
FENG J Y, WU S Q, LI C J, et al. International comparison method of absolute gravimeter [J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2022, 53(3): 269–277. (in Chinese)
- [55] LI L, CHEN L L, LUO Q, et al. Coriolis effect due to laser beam tilting in an atom interferometer [J]. *Optics Express*, 2025, 33(1): 462–474.
- [56] LUO Q, LI L, ZHOU H, et al. Evaluating the effect of wavefront aberrations in an atom gravimeter [J]. *Metrologia*, 2025, 62(5): 055006.
- [57] 王嘉沛, 胡敏章, 周敏康, 等. 国产绝对重力仪山洞比对观测 [J/OL]. *大地测量与地球动力学*, 2025: 1–12. [2025-10-20]. <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2025.05.173>.
WANG J P, HU M Z, ZHOU M K, et al. Domestic absolute gravimeter cave comparison observation [J/OL]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2025: 1–12 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2025.05.173>. (in Chinese)
- [58] 邓小兵, 徐文杰, 程源, 等. 小型化原子重力仪及应用 [J]. *导航与控制*, 2022, 21(5): 66–79.
DENG X B, XU W J, CHENG Y, et al. Miniaturized atom gravimeter and its application [J]. *Navigation and Control*, 2022, 21(5): 66–79. (in Chinese)
- [59] JIANG Z, PÁLINKÁŠ V, FRANCIS O, et al. Relative gravity measurement campaign during the 8th international comparison of absolute gravimeters (2009) [J]. *Metrologia*, 2011, 49(1): 95–107.
- [60] 刘善良, 吴书清, 冯金扬, 等. 第 10 届全球绝对重力仪关键比对相对重力测量 [J]. *计量学报*, 2020, 41(2): 198–201.
LIU S L, WU S Q, FENG J Y, et al. Relative gravity measurement campaign during the 10th international

- comparison of absolute gravimeters [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(2): 198–201. (in Chinese)
- [61] VAN CAMP M, VAUTERIN P. Tsoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and earth tides[J]. *Computers & Geosciences*, 2005, 31(5): 631–640.
- [62] HARNISCH G, HARNISCH M. Hydrological influences in long gravimetric data series [J]. *Journal of Geodynamics*, 2006, 41(1/2/3): 276–287.
- [63] CREUTZFELDT B, GÜNTNER A, WZIONTEK H, et al. Reducing local hydrology from high-precision gravity measurements: a lysimeter-based approach [J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 183(1): 178–187.
- [64] KAZAMA T, OKUBO S. Hydrological modeling of groundwater disturbances to observed gravity: theory and application to Asama Volcano, Central Japan [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2009, 114 (B8): B08402.
- [65] 贺前钱, 罗少聪, 孙和平, 等. 武汉九峰站地下水变化对重力场观测的影响 [J]. *地球物理学报*, 2016, 59(8): 2765–2772.
HE Q Q, LUO S C, SUN H P, et al. The influence of groundwater changes on gravity observations at Jiufeng station in Wuhan [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(8): 2765–2772. (in Chinese)
- [66] SPRATT R S. Modelling the effect of atmospheric pressure variations on gravity [J]. *Geophysical Journal International*, 1982, 71(1): 173–186.
- [67] 孙和平, 罗少聪. 地球物理场观测中的大气效应问题研究 [J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(3): 507–513, 472.
SUN H P, LUO S C. Study of the atmospheric pressure influence on geophysical observations [J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 17(3): 507–513, 472. (in Chinese)
- [68] ZHANG Z Q, YOU W, LIU X Y, et al. Development and evaluation of a 532 nm iodine-stabilized laser frequency standard at PGMF [J]. *Engineering Research Express*, 2025, 7(1): 015309.
- [69] ZHANG Z Q, YOU W, LIUX Y, et al. High performance molecular iodine optical reference using an unsaturated vapor cell [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2024, 95(6): 063003.
- [70] 毛强兵, 徐浩, 黄娇娇, 等. 一种用于标定重力仪的引力场装置 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(9): 17–22.
MAO Q B, XU H, HUANG J J, et al. Gravitational field device for calibrating gravimeters [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 50(9): 17–22. (in Chinese)
- [71] MAO Q B, XU H, CHENG Y, et al. Apparatuses for verifying the precision of gravimeters with lifting spherical source masses [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(12): 124503.
- [72] MAO Q B, HUANG T, LIU R Q, et al. Apparatus for testing gravimeter based on sinusoidal modulation of gravitational signal [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1006609.