

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.04.11

基于冷原子重力仪的轨道移动绝对重力测量

张旭^{1,2}, 颜树华^{1,2}, 李期学^{1,2}, 章欢开^{1,2}, 王亚宁^{1,2},
杨俊^{1,2}, 朱凌晓^{1,2*}, 刘纪勋^{1,2*}

(1.国防科技大学 智能科学学院, 湖南长沙 410073;
2.国防科技大学 量子信息学科交叉中心, 湖南长沙 410073)

摘要: 绝对重力测量在铁路路基探测等领域发挥着重要作用, 但大多数室外移动重力仪结构复杂或精度一般, 可使用的范围有限。研制了一套轨道移动绝对重力测量系统, 实现了高集成的系统结构设计、自动化的测试流程, 开展了实验室及轨道环境下的绝对重力测量, 测量结果可靠。首先, 在实验室环境下重力测量灵敏度达到了 $440 \mu\text{Gal} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 测量 300 s 的误差小于 $30 \mu\text{Gal}$ 。其次, 在炎热、嘈杂的室外轨道移动条件下, 绝对重力测量不确定度优于 $15 \mu\text{Gal}$, 与相对重力仪(LG-1)的测量偏差优于 $40 \mu\text{Gal}$ 。最后, 轨道环境下的重力测量灵敏度达到 $707.9 \mu\text{Gal} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。所提出的轨道移动绝对重力测量系统可以在室外条件下进行快速重力测量, 为铁路路基探测提供了新的仪器与解决方案。

关键词: 冷原子重力仪; 铁路探测; 可移动; 绝对重力测量

中图分类号: TB939; TH762 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795(2023)04-0128-07

Movable measurement of absolute gravity on the rail based on cold atom gravimeter

ZHANG Xu^{1,2}, YAN Shuhua^{1,2}, LI Qixue^{1,2}, ZHANG huankai^{1,2}, WANG Yaning^{1,2},
YANG Jun^{1,2}, ZHU Lingxiao^{1,2*}, LIU Jixun^{1,2*}

(1.College of Artificial Intelligence, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2.Interdisciplinary Center for Quantum Information, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Absolute gravity measurement plays an important role in the field of railway subgrade detection, but most mobile gravimeters have complex structures or mediocre accuracy, and their application range is limited. In this paper, we integrate a system of movable absolute gravity measurement on the rail, which realizes highly integrated system structure design and automatic test process, and undertake experiments of absolute gravity measurement in the laboratory and on the rail. Firstly, in the laboratory, the long-erm gravity measurement sensitivity is $440 \mu\text{Gal} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ and the measurement accuracy is $30 \mu\text{Gal}$ in the integration time of 300 s. Secondly, on the outdoor rail, the uncertainty of movable gravity measurement is less than $15 \mu\text{Gal}$, and the measurement deviation with the relative gravimeter (LG-1) is less than $40 \mu\text{Gal}$. Lastly, the gravity measurement sensitivity on the rail is about $707.9 \mu\text{Gal} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. Therefore, our system can realize fast gravity measurement under outdoor conditions and provide new instrument and solution for detection of railway subgrade.

Key words: cold atom gravimeter; detection on railway; movable measurement; absolute gravity measurement

收稿日期: 2022-12-12; 修回日期: 2023-03-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12004428); 湖南省自然科学基金优秀青年项目(2021JJ20047)

引用格式: 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.

Citation: ZHANG X, YAN S H, LI Q X, et al. Movable measurement of absolute gravity on the rail based on cold atom gravimeter[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(4): 128-134.



0 引言

铁路路基建设是国家的重要基础工程,促进了社会发展,与国民生活密切相关。铁路路基探测是铁路施工过程中不可缺少的重要环节,主要是对路基质量进行检测与分析,根据分析结果完成地基的加固,从而确保铁路工程的顺利实施。重力勘探是实现铁路路基探测的有效手段之一,对重力加速度的测量提出了新的应用需求。

重力加速度的精确测量是监测地球重力场变化的重要手段^[1],为分析重力场的变化规律、地壳的运动和结构、地形地质等提供了重要的参考数据。目前,重力场测绘手段主要有卫星重力测绘^[2]、海洋重力测绘^[3]、航空重力测绘^[4-5]、车载重力测绘^[6-7]等,存在测绘成本较高、系统复杂、测绘效率低等问题。铁路作为国家重要基础设施,覆盖地区广,受气候和自然条件的影响较小,是货物运输及人员通行的主要工具之一,可供多种类型的交通工具行驶,承载能力较大,运输成本较低。因此,基于轨道设施进行重力测量也是实现地球观测的有效手段之一。

绝对重力仪是实现高精度重力测量的关键仪器。而冷原子干涉绝对重力仪^[8]利用激光与原子的相互作用,实现原子团的分束、反转和合束,从而形成干涉及惯性量测量,在精密测量领域具有极大的优越性及良好的技术潜力^[9-12]。近年来,冷原子干涉重力仪发展迅速,国内外各实验团队不仅在实验室环境下实现了高精度、高可靠的绝对重力测量^[13-14],还基于车载、船载、机载等不同应用环境开展了重力测量实验^[15-19],不断推进冷原子干涉重力仪在小型化、集成化及环境适应性等方面的发展^[20-23]。法国 Muquans 公司研制的冷原子干涉绝对重力仪(Absolute Quantum Gravimeter, AQG)已成为商用化设备,灵敏度达到 $75 \mu\text{Gal} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,测量频率为 2 Hz ,具有较高的系统集成度及环境适应性^[24]。2018年,法国航天实验室将原子干涉绝对重力仪搭载于航海船上,尽管海况恶劣,仍实现了误差优于 1 mGal 的绝对重力测量^[25]。2020年,浙江工业大学的研究团队将原子干涉重力仪搭载到集装车上,实现了小范围的车载绝对重力测量,在平坦道路且长时间积

分下,达到了 $30 \mu\text{Gal}$ 的测量分辨力,验证了车载原子干涉重力仪的可行性^[7]。但是,室外重力测量常需要人工搬运,且需要安装在调平平台或六轴稳定平台上进行较长时间的调平,增加了系统的复杂程度。因此,虽然这些室外重力测量方案都取得了一定成果,但仍存在测量方案复杂、系统结构复杂、测绘效率低等问题。而轨道移动重力测量可以随停随测,为重力场测绘提供了新的思路及技术方案,其特有的工作环境及噪声模式也为重力测量带来了新的挑战。

基于研制的小型化原子干涉重力仪工程样机,在轨道车上集成了一套轨道移动绝对重力测量系统,并利用该系统进行了绝对重力测量,对测量过程中的环境变化及重力测量结果等数据进行了详细分析,并与相对重力仪(LG-1)进行了比对,评估了冷原子重力仪在轨道环境下的测试性能。

1 冷原子干涉重力仪的基本原理

冷原子干涉重力仪基于原子的相干性来操控原子的运动,对原子团进行分束、合束等操作,最终获得干涉条纹,从而实现对惯性量的测量。下面对其基本原理进行简要阐述。

首先, Rb^{87} 原子通过磁光阱囚禁及偏振梯度冷却后,温度降至 $5 \mu\text{K}$ 。然后,通过拉曼选态 π 脉冲将原子制备到磁不敏态上,减小外界磁场对原子的影响。再通过三束 $\pi/2 - \pi - \pi/2$ 拉曼脉冲,对原子团进行分束、反射及合束,自由演化时间为 50 ms 。最后,通过归一化双能级探测方法,得到原子在基态能级上的相对布局数为

$$P = A + C \cos(\phi) \quad (1)$$

式中: A 为原子干涉条纹的直流偏置; C 为对比度; ϕ 为干涉相位,rad。

干涉相位可以表示为

$$\phi = (k_{\text{eff}} \cdot g - 2\pi \cdot \alpha) T^2 \quad (2)$$

式中: k_{eff} 为受激拉曼跃迁的有效波矢,rad/m; g 为重力加速度, m/s^2 ; α 为拉曼光扫频啁啾率,Hz/s; T 为自由演化时间,s。

因此,对于任何一个自由演化时间,存在啁啾率 $\alpha_0 = k_{\text{eff}} g / 2\pi$,使得干涉相位为零,即改变自由演化时间时,干涉条纹会在干涉条纹的波峰或波谷处重合。找到对应的 α_0 即可计算得到当地的

绝对重力加速度值为

$$g = \frac{2\pi\alpha_0}{k_{\text{eff}}} \quad (3)$$

2 轨道移动绝对重力测量系统

2.1 轨道移动绝对重力测量装置

轨道移动绝对重力测量装置如图1所示,由传感探头和机柜两部分组成。



图1 轨道移动绝对重力测量装置

Fig.1 Experimental apparatus of movable absolute gravity measurement on the rail

传感探头的直径为400 mm,高度为640 mm,是重力测量的敏感单元。传感探头内包含真空模块,真空模块外被两层共轴圆筒形磁屏蔽罩包裹,其底部有反射镜、离子泵、加速度计、倾斜计、信号处理电路和隔振平台等模块。激光系统与电控系统集成在一个机柜内,高度小于500 mm。激光系统包括窄线宽光纤激光器、激光调制器、激光锁频模块和激光功率放大器等,实现对激光频率、偏振、功率及功率比的精确控制。电控系统主要包括时序控制器、微波射频模块、电源模块,提供原子干涉实验所需的电源、时序控制信号、微波信号和射频信号等,同时实现实验数据的采集及处理。为保证在野外环境下激光及电控系统的稳定运行,将激光及电控机柜放置在通用的温湿度控制机柜内。受实验轨道车尺寸的限制,传感探头与激光电控机柜需并排安装在轨道车上。

2.2 轨道移动绝对重力测量实验步骤

轨道移动绝对重力测量实验装置搭建完成后,在百米火车轨道上开展了移动绝对重力测量,具体实验步骤为:

①系统进行上电预热,开启铷源电流,输出激光及电控信号,实施激光器频率的锁定及传感

探头的调平,对原子团冷却后的温度及传感探头内部的磁场分布进行检查,整体时间约20 min。

②轨道车前进到测试点,开始重力测量。根据测试精度的不同要求,可分别进行2~60 min的重力测量。

③测试完成后,系统带电直接前进到下一测试点,只需进行传感探头的调平,就可直接开始新一轮的测量。

3 绝对重力测量结果分析

3.1 实验室环境下的绝对重力测量结果分析

在实验室环境下开展了约35 h的绝对重力测量实验,并对研制的冷原子干涉绝对重力仪进行性能评估。经固体潮校正后的重力测量结果如图2所示,重力测量值的标准差约为48.5 μGal ,不存在明显的漂移。

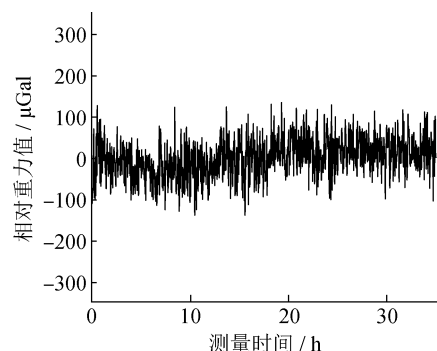


图2 实验室环境下的重力测量结果

Fig.2 Gravity measurement results in the laboratory

原子干涉重力测量的灵敏度通常定义为考虑重力测量带宽的分辨率,即

$$S = \frac{1}{SNR} \cdot \frac{1}{SF} \cdot \frac{1}{\sqrt{BW}} \quad (4)$$

式中: S 为重力测量灵敏度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$; SNR 为干涉相位测量信噪比; SF 为重力加速度和干涉相位的比例因子, $SF = k_{\text{eff}}T^2$, s^2/m ; BW 为测量带宽, Hz 。

计算重力测量结果的艾伦方差,可以得到实验室环境下绝对重力仪的测量灵敏度,如图3所示,其中重力测量灵敏度约为440 $\mu\text{Gal} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,120 s积分时间下的测量误差小于45 μGal ,300 s积分时间下的测量误差小于30 μGal 。因此,该系统具备开展绝对重力测量的基本条件。

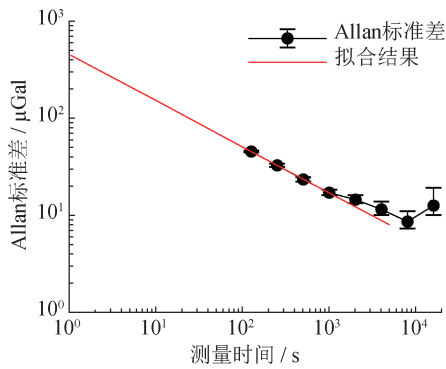


图3 实验室环境下的重力测量灵敏度

Fig.3 Sensitivity for gravity measurement in the laboratory

3.2 轨道移动绝对重力测量环境分析

测试时间为七月下旬，天气闷热潮湿，因此评估了环境温湿度对重力测量的影响。传感探头内部温度计测量得到的温度数据如图4所示，系统所处的环境温度变化范围为31~35℃，湿度变化范围为65%~80%，重力测量环境较为恶劣。但是，在该环境下，研制的冷原子绝对重力仪仍能保持正常工作，未产生温湿度相关的明显漂移，重力测量精度也没有因此而恶化。

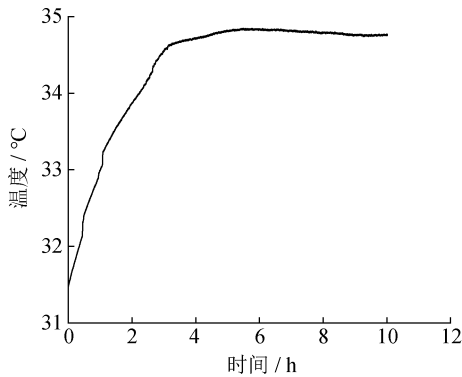
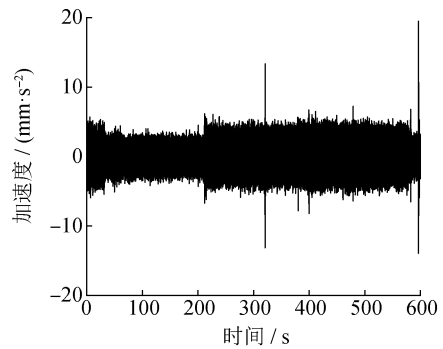


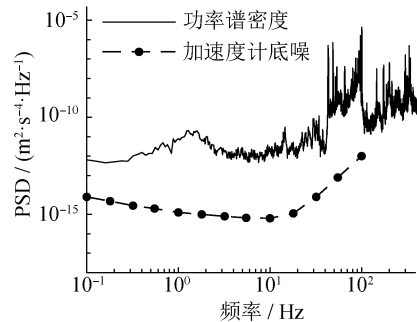
图4 传感探头内部的温度变化曲线

Fig.4 Temperature change curve measured inside of the sensing probe

轨道测试环境下的振动环境较为嘈杂，经隔振平台隔离后，残余振动噪声对重力测量还有较大的影响，实测经系统内部隔振平台隔离后的振动噪声时域测试结果和功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)如图5所示。受轨道车尺寸限制，传感探头与温湿度控制机柜需并排安装，机柜空调运行时的噪声将直接传递过去，如图5(a)所示，空调运行时，振动噪声也将同步增大。通过原子干涉仪的振动噪声传递函数，可以计算得到振动噪声对重力测量灵敏度的影响约为713.62 $\mu\text{Gal} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。



(a) 时域结果
(a) Time domain results



(b) 功率谱密度
(b) PSD

图5 轨道测试环境下经隔振平台隔离后的振动噪声

Fig.5 Vibration noise after isolation by the vibration isolation platform on the rail

此外，轨道测试环境还伴随着倾斜角度的漂移，传感探头内部的倾斜计测得的倾斜角度漂移如图6所示，其中包含的冲击信号属于振动噪声，体现了轨道上复杂的振动环境。但是系统最大的倾斜漂移小于20"，对重力测量准确度的影响小于5 μGal 。在重力测量过程中，会实时测量倾斜角度并进行补偿，以消除倾斜噪声引起的重力值变化。

3.3 轨道移动绝对重力测量结果分析

轨道移动绝对重力测量的实验方案为：在火车轨道上均匀选取四个点，使用研制的绝对重力仪与相对重力仪(LG-1)分别进行重力测量。相对重力仪(LG-1)在绝对重力基准点与轨道测试点之间进行往返观测，经固体潮改正及零漂校正后，得到段差观测值及轨道测试点的绝对重力值，引点过程产生的误差小于5 μGal 。绝对重力仪扫描正负波矢干涉条纹(单次测量周期为75 s)，在每个测量点进行约1 h的重力测量，经固体潮改正后得到测试点的绝对重力值。

图7为轨道移动绝对重力测量结果，测量结果均已进行固体潮改正及重力梯度(309.5 $\mu\text{Gal/m}$)修

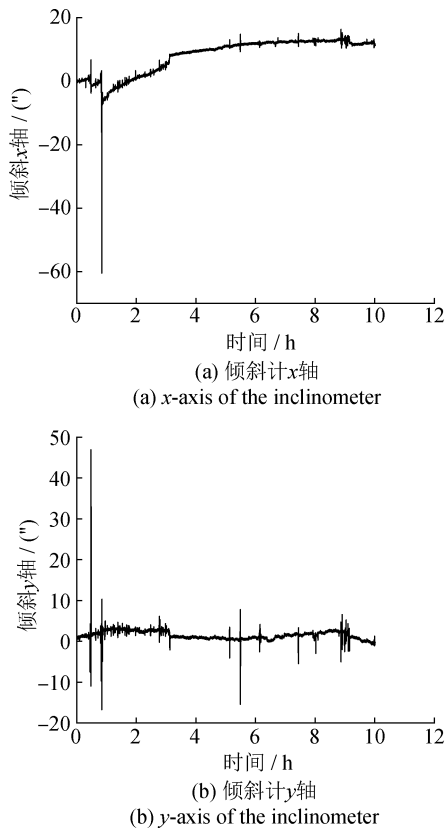


图6 轨道测试环境下的倾斜角度漂移

Fig.6 Tilt angle drift in the measurement on the rail

正, 归算到同一水平面。绝对重力测量结果的测量不确定度均小于 $15 \mu\text{Gal}$, 两台重力仪的测试结果基本吻合, 测量偏差小于 $40 \mu\text{Gal}$ 。

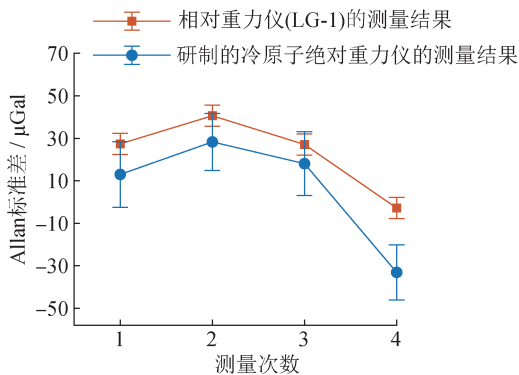


图7 轨道移动绝对重力测量结果

Fig.7 Moveable absolute gravity measurement results on the rail

受测量场地限制, 测试点之间海拔高度差别不大, 因此各点的绝对重力值差异较小。但是, 对于不同的测试点, 研制的绝对重力仪和相对重力仪的重力测量值变化趋势一致, 测量偏差比较稳定, 表明轨道移动绝对重力测量系统测试结果有效可靠。

3.4 轨道单点绝对重力测量结果分析

在轨道移动绝对重力测量实验中, 重力仪测量性能较为稳定, 无明显差异。因此, 为评估轨道移动绝对重力测量系统的稳定性及测量精度, 选择了轨道上的一个测试点进行 12 h 的长期重力测试, 测试结果如图 8 所示。可以看出, 两台重力仪的测试结果基本吻合, 潮汐趋势保持一致。

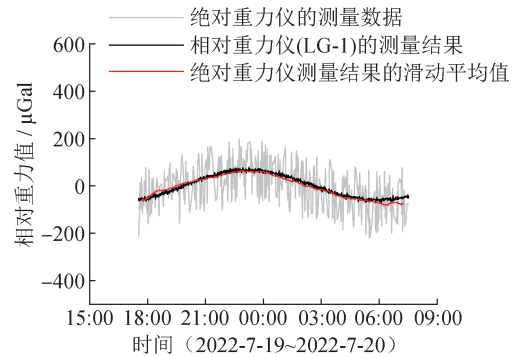


图8 轨道单点长期重力测试结果

Fig.8 Single-point long-term gravity measurement results on the rail

将图 8 中的重力测量结果经固体潮改正后, 进行艾伦方差的计算, 结果如图 9 所示, 其中单次测量误差小于 $75.5 \mu\text{Gal}$, 300 s 积分时间下的测量误差小于 $43.2 \mu\text{Gal}$, 1 500 s 积分时间下的测量误差小于 $16.4 \mu\text{Gal}$ 。该环境下重力测量的灵敏度约为 $707.9 \mu\text{Gal} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。因此, 振动噪声是该系统重力测量精度的主要限制因素。

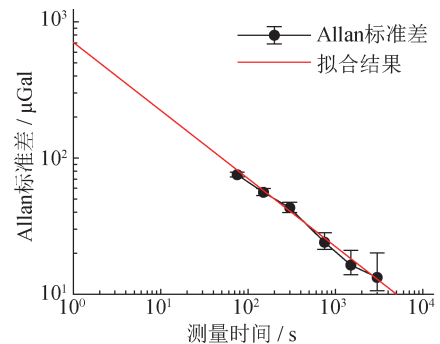


图9 轨道绝对重力测量灵敏度

Fig.9 Sensitivity of absolute gravity measurement on the rail

4 结论

搭建一套结构紧凑、体积小的轨道移动绝对重力测量系统, 并开展实验室及轨道环境下的绝对重力测量实验, 对机柜单独进行了温湿度控制。

在实验室环境下,进行了约35 h的重力测量实验,重力测量灵敏度约为 $440 \mu\text{Gal} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,单次测量误差小于 $45.4 \mu\text{Gal}$,300 s测量误差小于 $30 \mu\text{Gal}$,表明该系统具备开展重力测量实验的基本条件。在轨道环境下,开展了移动绝对重力测量实验。虽然天气炎热,振动环境嘈杂,但是该系统绝对重力测量结果的测量不确定度均小于 $15 \mu\text{Gal}$,与相对重力仪的测试结果基本吻合,测量偏差小于 $40 \mu\text{Gal}$ 。最后,为评估轨道移动绝对重力测量系统的测试性能,进行了轨道单点长期(12 h)重力测试,其中,重力测量的灵敏度约为 $707.9 \mu\text{Gal} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,单次测量的误差小于 $75.5 \mu\text{Gal}$,300 s的测量误差小于 $43.2 \mu\text{Gal}$ 。该灵敏度主要受限于轨道振动噪声,测试系统的性能仍待进一步完善。

本文的实验结果不仅体现了轨道移动绝对重力测量系统的稳定性与高精度,也为铁路路基探测提供了新的方案和实验验证,可拓展应用于地球物理、资源勘探、灾害预报等领域。

参考文献

- [1] AKDOGAN Y, YILDIZ H, AHI G O. Evaluation of global gravity models from absolute gravity and vertical gravity gradient measurements in Turkey [J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(11): 115009-1-115009-13.
- [2] PAIL R, GOIGINGER H, SCHUH W D, et al. Combined satellite gravity field model GOCO01S derived from GOCE and GRACE [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(20).
- [3] CHRISTENSEN A N, ANDERSEN O B. Comparison of satellite altimetric gravity and ship-borne gravity-offshore Western Australia [J]. *Aseg Extended Abstracts*, 2016, 2016(1).
- [4] GEIGER R, MÉNORET V, STERN G, et al. Detecting inertial effects with airborne matter-wave interferometry [J]. *Nature Communications*, 2011, 2(1).
- [5] YU N, KOHEL J, KELLOGG J, et al. Development of an atom-interferometer gravity gradiometer for gravity measurement from space [J]. *Applied Physics B*, 2006, 84(4): 647-652.
- [6] 王凯楠, 徐晗, 周寅, 等. 基于车载原子重力仪的外场绝对重力快速测绘研究[J]. *物理学报*, 2022, 71(15): 341-350.
WANG K N, XU H, ZHOU Y, et al. Research on rapid surveying and mapping of outfield absolute gravity based on vehicle-mounted atomic gravimeter [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(15): 341-350. (in Chinese)
- [7] 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): 35-42.
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): 35-42. (in Chinese)
- [8] TINO G M. Testing gravity with cold atom interferometry: results and prospects [J]. *Quantum Science and Technology*, 2021, 6(2).
- [9] 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(7): 21-38.
CHEN L L, LUO Q, DENG X B, et al. Precision gravity measurements with cold atom interferometer [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2016(7): 21-38. (in Chinese)
- [10] PETERS A, CHUNG K Y, CHU S. High-precision gravity measurements using atom interferometry [J]. *Metrologia*, 2001, 38(1).
- [11] 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): 32-43.
- [12] ZHOU L, XIONG Z, 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.
- [13] 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.
- [14] KARCHER R, IMANALIEV A, MERLET S, et al. Improving the accuracy of atom interferometers with ultracold sources [J]. *New Journal of Physics*, 2018, 20(11): 113041.
- [15] TINO G M, SORRENTINO F, AGUILERA D, et al. Precision gravity tests with atom interferometry in space [J]. *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*, 2013, 243: 203-217.
- [16] 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.
- [17] BIDEI Y, CARRAZ O, CHARRIÈRE R, et al. Compact cold atom gravimeter for field applications [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(14): 144107-1-144107-4.

(本文编辑: 郑燕)

- [18] BIDE L Y, ZAHZAM N, BRESSON A, et al. Absolute air-borne gravimetry with a cold atom sensor [J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(2): 1-9.
- [19] WU X, PAGEL Z, MALEK B S, et al. Gravity surveys using a mobile atom interferometer [J]. Science Advances, 2019, 5(9).
- [20] CHARRIÈRE R, CADORET M, ZAHZAM N, et al. Local gravity measurement with the combination of atom interferometry and Bloch oscillations [J]. Physical Review A, 2012, 85(1).
- [21] XU V, JAFFE M, PANDA C D, et al. Probing gravity by holding atoms for 20 seconds [J]. Science, 2019, 366(6466): 745-749.
- [22] FU Z J, WANG Q, WANG Z, et al. Participation in the absolute gravity comparison with a compact cold atom gravimeter [J]. Chinese Optics Letters, 2019, (1), 52-57.
- [23] FU Z J, WU B, CHENG B, et al. A new type of compact gravimeter for long-term absolute gravity monitoring [J]. Metrologia, 2019, 56(2).
- [24] 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).
- [25] BIDE L Y, ZAHZAM N, BLANCHARD C, et al. Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry [J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 627.



第一作者: 张旭(1995—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为量子精密测量理论与技术。



通讯作者: 朱凌晓(1990—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为量子时空精密测量。



通讯作者: 刘纪勋(1990—), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为原子干涉精密测量。