

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514392

# 基于车载原子重力仪的野外高精度快速测量\*

朱凌晓<sup>1</sup>, 梁昌文<sup>1</sup>, 马笑笑<sup>1</sup>, 王亚宁<sup>2</sup>, 颜树华<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学智能科学学院 长沙 410073; 2. 长沙量子测量产业技术研究院有限公司 长沙 410073)

**摘要:** 陆基绝对重力测量在基础科学、地质灾害预警及国防安全等多个领域有着重要的应用。目前,常用的陆地绝对重力测量方式主要有室内静态测量、室外可移动测量和车载静基座测量,难以兼顾机动性和测量精度。为克服上述问题,故提出一种新型车载动基座原子干涉绝对重力仪。通过对激光系统和控制系统的优化设计,可实现一键启动,系统集成度和自动化程度显著提升。测量过程中传感头与动基座固连,并通过支撑结构与地面刚性耦合,抑制了载体振动对测量的影响。室内环境下系统测量灵敏度约  $147 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 积分时间 40 000 s 时测量分辨率优于  $1 \mu\text{Gal}$ 。在城市和山区野外环境下,开展了典型多场景重力连续流动测量实验,系统可稳定运行。野外快速测量条件下灵敏度约  $173 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 与室内环境下的指标较为接近,表现出良好的鲁棒性。车载系统可快速机动至指点位并展开部署,10 min 内可获得高精度重力数据。测试路线涵盖城市建筑、城市公路、山区公路、山区场坪等多种典型野外地形,测试结果表明,在海拔变化  $>1.6 \text{ km}$ 、温差约  $7.6 \text{ }^\circ\text{C}$  的复杂野外环境下,重力测量残差优于  $100 \mu\text{Gal}$ , 系统表现出良好的稳定性。所提出的车载重力仪具备野外多地形长途机动条件下的高精度快速测量能力,在重力基准网快速构建、重力场短波信息快速获取及野外条件下自然灾害预报等领域有巨大应用潜力。

**关键词:** 原子干涉; 车载重力仪; 野外重力测量; 流动重力测量

中图分类号: TH762 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

## Fast high-precision field measurement based on vehicle-mounted atomic gravimeter

Zhu Lingxiao<sup>1</sup>, Liang Changwen<sup>1</sup>, Ma Xiaoxiao<sup>1</sup>, Wang Yaning<sup>2</sup>, Yan Shuhua<sup>1</sup>

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
2. Changsha Quantum Measurement Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Changsha 410073, China)

**Abstract:** Absolute ground-based gravity measurement holds significant applications in various fields such as fundamental science, geological hazard early warning, and national defense security. At present, common terrestrial absolute gravity measurement methods mainly include indoor static measurement, outdoor mobile measurement, and vehicle-mounted static-base measurement, which struggle to balance mobility and measurement accuracy. To overcome the aforementioned issues, a novel vehicle-mounted dynamic-base atomic interferometric absolute gravimeter is proposed. Through the optimized design of the laser system and control system, it enables one-key startup, significantly enhancing the level of system integration and automation. During measurement, the sensor head is rigidly attached to the moving base and coupled to the ground via a support structure, effectively suppressing the impact of carrier vibrations on measurements. In indoor environments, the system achieves a measurement sensitivity of approximately  $147 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ , with a measurement resolution better than  $1 \mu\text{Gal}$  at an integration time of 40 000 seconds. Continuous flow gravity measurement experiments across typical multi-scenario environments are implemented in urban and mountainous field environments, demonstrating stable system operation. Under field fast measurement conditions, the sensitivity is approximately  $173 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ , which is relatively close to the performance achieved in indoor environments, indicating good

收稿日期: 2025-08-16 Received Date: 2025-08-16

\* 基金项目: 湖南创新型省份建设专项(2025QK1010, 2024GK1050)资助

robustness. The vehicle-mounted system can be rapidly mobilized to designated points and deployed, obtaining high-precision gravity data within 10 minutes. The test routes covered various typical field terrains, including urban buildings, urban roads, mountainous roads, and mountainous open areas. Test results show that, in complex field environments with altitude changes exceeding 1.6 km and temperature variations of approximately 7.6°C, the gravity measurement residuals are better than 100  $\mu\text{Gal}$ , demonstrating excellent system stability. The proposed vehicle-mounted gravimeter achieves high-precision fast measurement under long-distance mobility conditions across diverse field terrains. It exhibits significant application potential in areas such as the fast establishment of gravity reference networks, rapid acquisition of short-wavelength gravity field information, and natural disaster forecasting under field conditions.

**Keywords:** atom interferometry; vehicle-mounted gravimeter; field gravity measurement; mobile gravity measurement

## 0 引 言

重力加速度是描述地球重力场的关键参数之一, 随时间和空间动态变化, 重力加速度的精确测量是监测地球重力场变化的重要途径, 在基础科学<sup>[1-3]</sup>、大地测量<sup>[4-6]</sup>、资源勘探<sup>[7-9]</sup>、地质灾害预警<sup>[10-12]</sup>及国防安全<sup>[13-16]</sup>等领域有广泛应用。相比船载或机载重力仪, 陆地重力仪通常具有更好的振动环境, 容易获得更高的信噪比和测量精度, 且可在地表灵活机动, 适合通过密集测点获取重力场短波信息。陆地重力测量可使用绝对重力仪<sup>[17]</sup>或相对重力仪<sup>[18]</sup>, 其中相对重力仪操作简单、便于运输、精度较高, 但在野外应用中通常需进行往返封闭测量, 并溯源至已知重力基准点, 测量效率较低。相比来说, 可移动的绝对重力仪能够直接获得测量点位的绝对重力值, 可有效克服这一问题, 极大提高测量效率。

近年来, 冷原子干涉技术的发展为重力测量带来了革命性突破。基于物质波干涉原理的原子重力仪利用激光操控超冷原子, 实现绝对重力的精密测量, 在测量灵敏度及长期稳定性等方面展现出了良好的性能和潜力<sup>[19-22]</sup>, 原子重力仪在实验室环境下已实现亚  $\mu\text{Gal}$  量级的分辨率<sup>[23-24]</sup>。随着硬件技术的不断成熟, 原子重力仪的集成化和自动化程度不断提高, 逐步从实验室走向野外, 发展出了各种可移动重力仪, 并逐步应用到车载<sup>[25]</sup>、船载<sup>[26-29]</sup>、机载<sup>[30-32]</sup>等多种载体平台。其中车载重力仪为野外陆地重力快速测量提供了绝佳平台, 是陆地重力场快速建模的重要手段。

作为从实验室走向野外的初步尝试, 可移动原子重力仪可在不同测量点之间移动测量<sup>[33-35]</sup>。第1个商用可移动原子重力仪在稳定测量条件下的灵敏度可达几十  $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 精度几  $\mu\text{Gal}$  至几十  $\mu\text{Gal}$ <sup>[36]</sup>。华中科技大学也研制了类似的可移动重力仪, 经集成优化后可通过车辆载体在各测量点位之间转运, 室内外灵敏度均能达到 1.9  $\text{mGal}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 10 000 s 积分时间后的分辨率为 30  $\mu\text{Gal}$ <sup>[37]</sup>。然而此类重力仪在每个测量点都需进行卸载拆包、地面安装、预热调试、重新打包等额

外工作, 一定程度上降低了测量效率。为解决这些问题, 研究人员尝试将可移动重力仪安装在车辆载体上, 大大提高了测量效率<sup>[38-39]</sup>。然而, 此类重力仪没有与地面刚性耦合, 容易受到车辆载体振动的影响。随着超低频主动隔振、车载基座、多轴稳定平台等技术的发展, 不少研究小组探索开发了基于静基座和稳定平台的原子重力仪, 并在车载<sup>[40]</sup>、船载<sup>[41-42]</sup>和机载<sup>[43]</sup>条件下进行了实验验证。

上述车载原子重力仪在多种场景下开展了重力测量实验, 特定条件下都表现出了较好的测量性能, 测量效率和精度大幅提升, 但普遍还存在诸多问题。比如, 仪器大都在车载平台上直接运行, 虽然部分小组加装了稳定平台和隔振平台<sup>[38,40]</sup>, 但依然未能从根本上解决仪器与车载平台耦合的问题。测量过程中需人工干预, 自动化程度较低, 测量效率普遍不高。另外, 难以兼顾小型化和测量性能, 小型化的重力仪灵敏度大都在  $\text{mGal}/\sqrt{\text{Hz}}$  量级, 尚有待进一步提升。

在冷原子干涉系统深入研究的基础上<sup>[44-49]</sup>, 研制出适用于野外测量的冷原子重力仪, 并陆续开展了轨道移动测量和车载流动测量<sup>[50-52]</sup>, 进一步对控制柜结构、集光源系统、自动化控制系统等进行了优化设计, 新型车载原子重力仪通过激光智能稳频、动基座自动调平、重力初值自动标定、系统一键启动等技术, 将单点有效测量时间缩短至 10 min, 集成度和自动化程度显著提升, 测量效率更高, 支持车载越野条件下机动部署和高精度重力快速测量。开展了典型多场景重力连续流动测量实验, 结果表明, 系统可在城市和山区不同地段连续流动转运和定点测量, 运行稳定, 环境适应性更强, 为野外资源勘探、野外自然灾害检测、陆地重力场快速建模等提供了新的途径。

## 1 测量原理和实验装置

### 1.1 重力测量原理

冷原子重力仪利用激光脉冲对原子的内态和外态进行操控, 使原子波包进行干涉, 最后可在干涉相位中提取重力信息, 其基本原理如图 1(a) 所示。

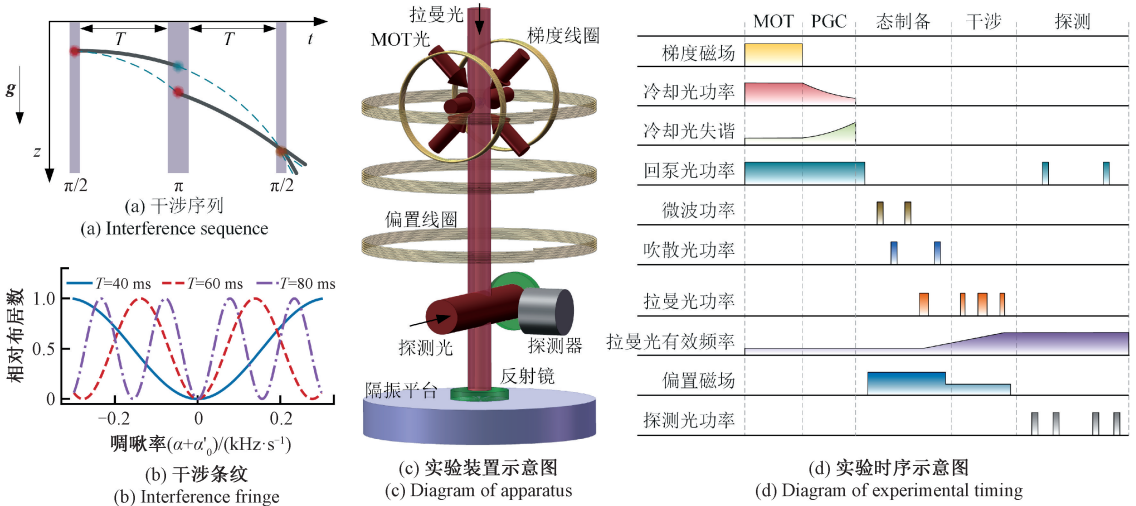


图1 实验方案

Fig. 1 Experimental scheme

对于一团制备在基态的冷原子(演化路径对应粗实线),首先利用拉曼(Raman)激光脉冲作用 $\tau/2$ 时间,使原子有 $1/2$ 的概率跃迁至激发态(演化路径对应细虚线),并获得一个双光子反冲动量,该脉冲称为 $\pi/2$ 脉冲。原子团中将有一半的原子完成跃迁,并在空间分成两团。原子自由演化 $T$ 时间后再作用第2个拉曼脉冲,脉冲宽度为 $\tau$ ,则所有原子的态发生翻转,即基态(激发态)跃迁至激发态(基态),同时获得(失去)一个双光子反冲动量,该脉冲称为 $\pi$ 脉冲。再经 $T$ 时间的自由演化,两团原子将汇合于一处,最后作用一个 $\pi/2$ 脉冲,则同一个态上的原子分别从两条不同的路径演化而来,实现Mach-Zehnder干涉。原子在两个能态上的布居数可通过荧光法测量,假设原子初态制备到 $^{87}\text{Rb}$ 原子 $D_2$ 线的 $|F=1\rangle$ 态,则最后原子处于 $|F=2\rangle$ 态的布居数可表示为<sup>[53]</sup>:

$$P_2 = 1/2[1 + C\cos(\mathbf{k}_{\text{eff}}\mathbf{g}T^2 - \alpha T^2 + \Delta\phi)] \quad (1)$$

其中, $C$ 为条纹对比度; $\mathbf{k}_{\text{eff}} \approx 4\pi/\lambda$ 为拉曼光有效波矢, $\lambda \approx 780\text{ nm}$ 为拉曼光波长; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; $\alpha$ 为拉曼光的啁啾率,用于补偿原子自由下落过程中重力引起的多普勒频移; $T$ 为原子波包的自由演化时间; $\Delta\phi$ 为系统误差引入的额外相移。在系统调试阶段,通常可以通过一些方法减小乃至消除系统误差<sup>[54]</sup>。比如,通过反转波矢法消除拉曼光波矢方向无关的系统误差,通过旋转干涉仪可以测量并消除科里奥利力引起的系统误差。

对啁啾率 $\alpha$ 进行扫描,同时保持其他参数固定不变,则可得到以 $T^2$ 为调制周期的干涉条纹。假设系统误差 $\Delta\phi$ 为0,当啁啾率满足:

$$\mathbf{k}_{\text{eff}}\mathbf{g} = \alpha_0 \quad (2)$$

对于任意自由演化时间 $T$ ,所有干涉条纹会重合于 $\alpha_0$ 。图1(b)展示了 $\mathbf{g}$ 取 $9.8\text{ m/s}$ ,自由演化时间取40、60和80 ms时的干涉条纹,其中 $\alpha'_0 \approx 25.1\text{ MHz}$ 。通过油面法或水平计可调整拉曼光与重力方向重合,根据式(2)可计算当地绝对重力。

## 1.2 实验装置

所用实验装置示意图如图1(c)所示。6束相互正交的近共振激光和一对反亥姆霍兹梯度线圈共同组成磁光阱(magneto-optical trap, MOT)装置,实现原子的囚禁和冷却。其中MOT光的直径和功率约20 mm和100 mW,梯度线圈可提供约10 G/cm的磁场梯度。拉曼光由两束频差约为6.8 GHz( $D_2$ 线超精细能级劈裂)、总功率约120 mW、相互正交的线偏振激光合束而成,相对 $D_2$ 线激发态红失谐约1 GHz。通过油面法调整激光方向使其与重力重合,并经底部反射镜反射后实现拉曼光反向干涉。拉曼光反射镜放置于主动隔振平台,可有效衰减100 Hz以下的超低频振动信号。偏置线圈为初态制备和原子干涉提供磁子能级劈裂及量子化轴参考方向,系统运行时可在竖直方向提供约100 mG的均匀磁场。探测光为一束功率约50 mW、直径约20 mm的驻波共振激光,用于对原子的末态进行探测,探测信号由光电探测器收集并传输至上位机。隔振平台以上的整个传感头均放置在磁屏蔽罩中,以消除地磁场及杂散磁场的影响。

系统所用的激光光源为长沙量子测量产业技术研究院研制的全光纤集成光源系统,可有效减小车载运输过程中振动对光源系统可靠性的影响。其核心器件主要包括光纤激光器、单边带调制器、电光调制器、声光调制器(acousto-optic modulator, AOM)以及光纤倍频波导器件,可实现多路激光分时复用,极大提高了系统的集成性及

可靠性。其中主激光器输出经掺铒光纤放大器进行功率放大,并由倍频晶体倍频至 780 nm 后分为两路:一路利用调制转移光谱(modulation transfer spectroscopy, MTS)锁模模块将激光频率锁定至  $D_2$  线  $|F=2\rangle \rightarrow |F'=3\rangle$  跃迁频率。从激光器输出一路经光学锁相环(optical phase-locked loop, OPLL)锁定至主激光器;另一路通过电光调制器、光功率放大器及倍频晶体后,用作冷却光、回泵光、拉曼光及吹散光。通过改变 OPLL 的参考频率可实现不同激光的频率跳变,激光输出的开关则通过控制 AOM 驱动信号来实现。光源系统经功率锁定、频率锁定及偏振优化后,频率波动优于 50 kHz,功率相对波动优于 1%,偏振消光比优于 20 dB。基于现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)的时序控制系统可实现 ns 量级的时序控制。图 1(d)为实验时序, $^{87}\text{Rb}$  原子首先在 MOT 完成装载,并将温度初步冷却至百  $\mu\text{K}$  量级,然后关闭梯度磁场,逐渐减小冷却光功率,同时增大冷却光失谐,实施偏振梯度冷却(polarization gradient cooling, PGC),继续将原子冷却至 2~5  $\mu\text{K}$ 。在微波  $\pi$  脉冲、拉曼  $\pi$  脉冲及吹散光的综合作用下,将冷原子初态制备到  $|F=1, m_F=0\rangle$  这一磁不敏磁子能级上。接着施加图 1(a)所示的 3 个拉曼脉冲序列,完成原子反向干涉,同时对拉曼光频率进行啁啾,使其线性变化以补偿重力引起

的多普勒频移。最后按照“探测→回泵→探测”的序列可实现原子的归一化末态探测,待原子落入探测区后,再次重复该过程可获得探测背景信号,用以消除探测噪声。

## 2 方案设计与调试

### 2.1 车载方案设计与部署

车载冷原子重力仪实时重力测量方案如图 2 所示。传感头核心部分即为图 1(c)中的实验装置,由真空腔、光学模块、磁屏蔽罩、主动隔振平台等组成。其中真空腔材料为钛合金,为冷原子干涉提供良好的真空环境,同时为磁场线圈、扩束筒、探测器、铷源等器件提供安装载体,可较好地保证激光和磁场的位置关系,系统运行时真空度约  $10^{-8}$  Pa。整个传感头直径 510 mm,高 800 mm,小巧的空间结构更便于车载安装。传感头固定在隔振平台上,该平台与一个带有 3 根支腿的车载动基座固连,支腿伸展至地面后可自动调平并锁定,从而使传感头与地面直接刚性耦合。集成光源系统和光电控制系统统一安装在一个多层控制柜中,控制柜和传感头之间通过光纤和信号线传输光电信号,经集成优化和结构优化后,控制柜整体空间尺寸为 620 mm × 600 mm × 520 mm,整机功率 <300 W。

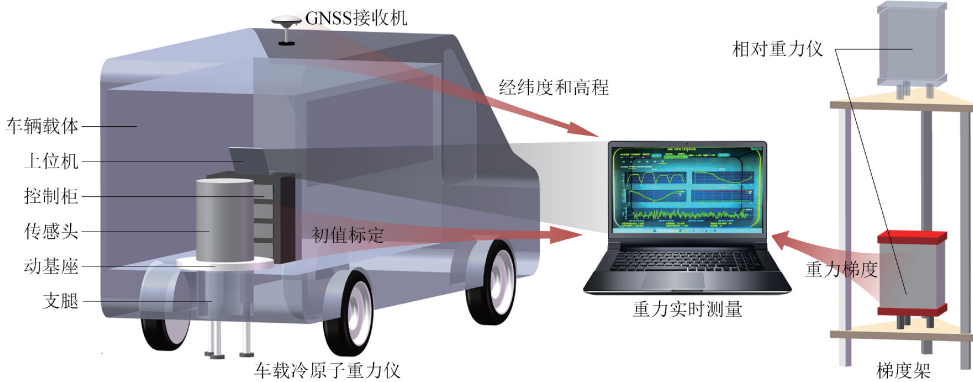


图2 车载冷原子重力仪实时重力测量方案

Fig. 2 Real-time gravity measurement solution for vehicle-mounted cold atom gravimeter

传感头和控制柜之间有一隔板,将空间划分为传感区和控制区。测试过程中,传感区为密闭环境,可保证传感单元所处外界环境的稳定性,控制区与驾驶室连通,为激光系统、电控系统和操作人员提供良好的运行环境和测试环境。车内定制安装了温度控制系统,以保证重力仪系统可长期稳定运行。车顶部安装全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)信号接收机,可实时接收卫星定位信号。车内剩余空间可放置相对重力仪、梯度架、移动电源、不间断电源(uninterruptible power supply, UPS)及其他常用调试设备。其中相对重力仪器

是捷克 GF 公司研发的陆地重力仪(LG-1),具备漂移和温度自动补偿等功能,配备可热插拔锂电池,续航能力可达 30 h,适用于多领域重力测量。所有设备在车载条件下运送至测量现场,停车后展开部署。首先一键开启光电系统热机,并自动完成激光锁定,同步将支腿伸展至地面。动基座安装了倾斜计和反馈控制系统,可实时获取基座相对重力方向的姿态信息,并据此对 3 个支腿的伸缩量进行微调,实现自动调平,精度优于  $100''$ ,同时在传感头内部集成了高精度倾斜传感器,用于实现  $\mu\text{Gal}$  级倾斜误差实时修正。传感头和光电系统准备完毕后需对初

始啁啾率进行标定,通常会在不同演化时间下扫描若干条干涉条纹,从而确定始啁啾率  $\alpha_0$ ,这一过程即为初值标定。图3展示了野外条件下,自由演化时间为40、60和80 ms时的干涉条纹。

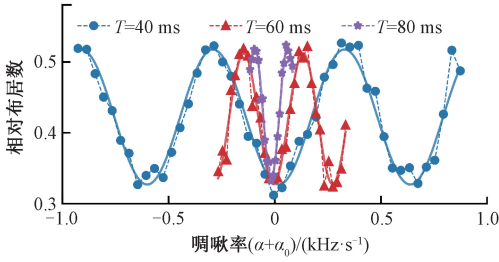
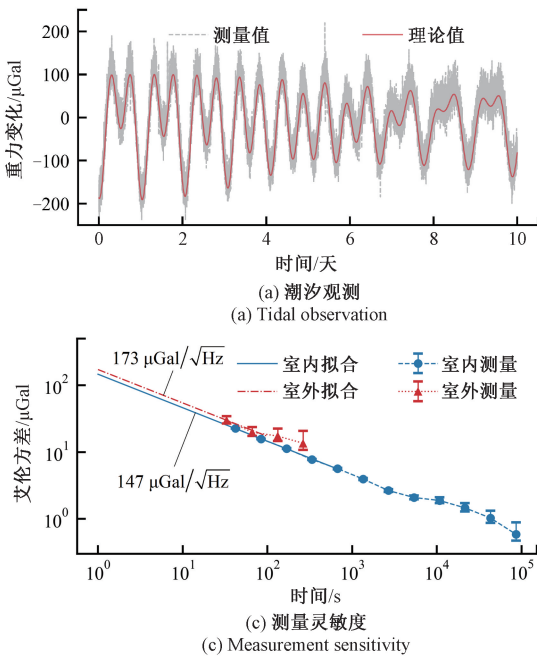
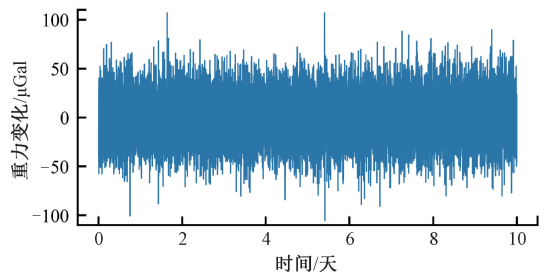


图3 初始啁啾率标定

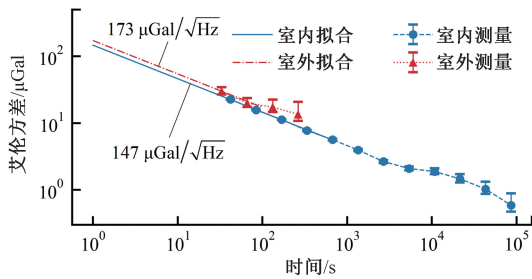
Fig. 3 Calibration of the initial chirp rate



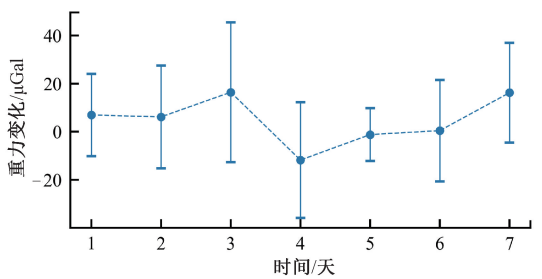
(a) 潮汐观测  
(a) Tidal observation



(b) 去除理论值后的重力残差  
(b) Gravity residuals after removal of theoretical value



(c) 测量灵敏度  
(c) Measurement sensitivity



(d) 重复性测试  
(d) Repeatability test

图4 系统测量性能

Fig. 4 Measurement performance of the system

由于车载条件下的测试主要由UPS供电,有效测量时间只有几十分钟,因此只在室内对系统做了长期测试。由图4(a)可以看出,重力仪测量结果可以跟随到潮汐变化,且与潮汐的理论值基本一致。进一步校正潮汐影响后的重力信号如图4(b)所示,信号标准差约23  $\mu\text{Gal}$ ,且并未出现明显的仪器漂移。

图4(c)展示了重力残差的艾伦方差,表明了较高的测量稳定性,测量灵敏度约147  $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,在积分时间40 000 s时,测量分辨率优于1  $\mu\text{Gal}$ 。另外,虽然室外测量时间比较短,但为了大致评估系统的野外测量性能,也做了约10 min的重力测量,最终测量灵敏度约

173  $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,与室内环境下的指标较为接近,系统表现出良好的鲁棒性。由于野外场景下,振动噪声和温湿度环境都更加恶劣,说明主动隔振系统和配套温控系统都启到了很好的效果,有效改善了系统的野外工作性能。另外,为评估重复性,每天开机30~60 min并进行重力测量,在每次测量完成后关闭所有设备的电源,保证每天测量条件的一致性。图4(d)展示了连续7天绝对重力测量结果,其中每个数据点都是200 s测量结果的平均值,误差棒表示1倍标准差。不同日期之间标准差的差异主要源于振动噪声、探测噪声、激光功率和频率波动等因素。尽管平均值略有波动,但总体重复性是可靠的,测量

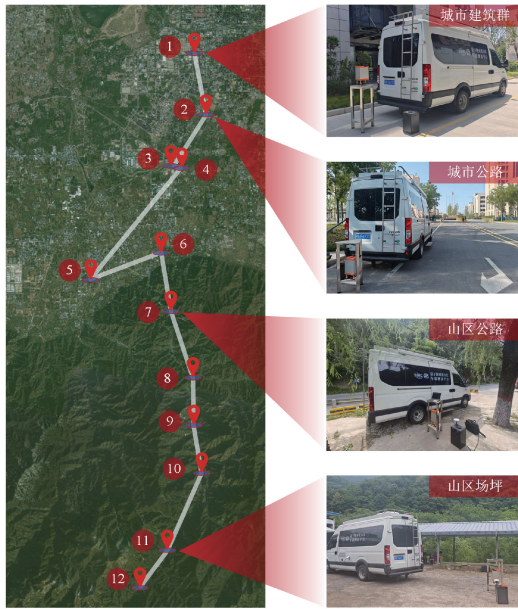
## 2.2 系统性能测试

为初步评估重力仪系统性能,对其长期稳定性、灵敏度、重复性3个指标进行了测试,结果如图4所示。

平均值波动范围约 $\pm 16 \mu\text{Gal}$ ,最大标准差约  $29 \mu\text{Gal}$ 。

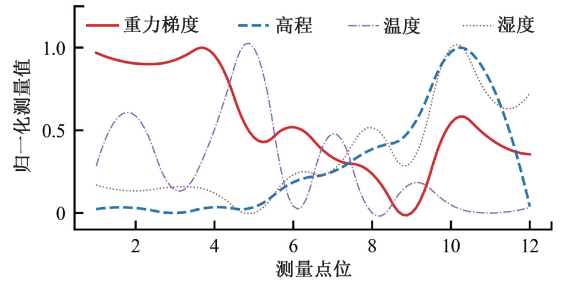
### 3 多场景重力快速测量

虽然系统在静态条件下达到了较好的测量性能,但作为车载冷原子重力仪,最关心的还是车载移动条件下的重力流动测量。因此在西安长安区选择了一段具有不同地形地貌的典型测试路线,横跨城市和山区两大类测

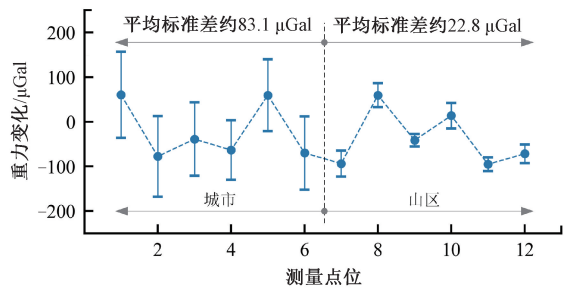


(a) 测试路线及典型测量现场  
(a) Testing route and typical measurement sites

试环境,典型测试场景主要包含城市建筑群、城市公路、山区公路、山区场坪。其中城市建筑群常有大量居民活动,居民区电磁环境复杂。城市公路场景车辆和行人活动较多,振动环境恶劣。山区公路上的来往车辆行驶速度较快,气压气流波动剧烈,空气粉尘颗粒较多。山区地形复杂,平整的测试点较少,但相比城市测量,山区行人车辆较少,地面振动环境好,且温湿度和电磁环境更加稳定。野外多场景重力测量路线及测量结果如图5所示。



(b) 典型测量项目相对变化  
(b) Relative changes of typical measurement items



(c) 重力残差@相对重力仪  
(c) Gravity residuals @ relative gravimeter

图5 野外多场景重力测量

Fig. 5 Multi-scene gravity measurement in the field

测量过程中,使用相对重力仪将室内重力基准传递至每个测量点位,同时用来测量当地重力梯度。如图5(a)所示,整个测试路线全程约49 km,共包含12个预选点位,经过的地形变化为“城市→郊区→山区”,经度变化约 $0.088^\circ$ ,纬度变化约 $0.334^\circ$ ,高程变化约1.65 km,重力梯度变化约 $114.5 \mu\text{Ga}/\text{m}$ ,温度范围 $27.4^\circ\text{C} \sim 34.9^\circ\text{C}$ ,湿度范围 $19.8\% \sim 53.5\%$ ,基本涵盖了车载重力仪的常用测试场景。尤其山区地形陡峭,重力变化剧烈,目前这类地区的重力场数据十分匮乏,对重力场测绘的需求非常广泛。测试当天城市和山区温差约 $7.6^\circ\text{C}$ ,湿度差约33.7%,且山区公路路况复杂,可检验野外复杂条件下车载系统转运不同地点的机动测量性能。图5(b)展示了重力梯度、高程、温度、湿度4个测量项目的相对变化量,为方便对比,图5(b)中对各项的测量值做了归一化处理。从图中的高程变化可以明显看出“由城市到山区”的地形变化,尤其在山区地段,结合图5(a)可以看出,跨越了山顶、山腰、山脚等不同的地形。重力梯度总体随着

高程的增加而减小,这是符合基本常识的,同时还受地形地貌、气压、温湿度等因素影响。

为提高测量效率,相对重力仪没有进行多次往返闭合测量,而是在每个点位只测量一次,同时根据仪器手册和标定数据进行线性漂移校正及格值校正。图5(c)展示了不同点位的重力测量残差,即,车载重力仪的测量值与参考值(相对重力仪从重力基准点传递的量值)之间的差值。每个点位进行10 min重复测量,测量频率约 $0.0238 \text{ Hz}$ (共14个测量值),图5(c)中每个数据点为10 min测量结果的平均值,误差棒表示1倍标准差。可以看出,整个测试路线上各点位的标准差绝对值均 $<100 \mu\text{Gal}$ ,反映出同一地点进行多次测量的重复性良好,误差棒的差异主要来自不同测量点位的的环境干扰和系统噪声。其中前6个点位处于城市地段,平均标准差约为 $83.1 \mu\text{Gal}$ ,后6个点位处于山区地段,该值约为 $22.8 \mu\text{Gal}$ ,两者相差约3.6倍,这主要是由于振动环境不同引起的,拉曼光反射镜的振

动噪声目前是原子干涉重力仪的主要噪声来源,山区地段相较城市地段车辆行人活动少,地面振动条件更好。

## 4 结 论

综上所述,所研制的新型车载原子干涉重力仪具有较好的测量性能,室内环境下的测量灵敏度约为  $147 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,积分 40 000 s 后的重力测量分辨率优于  $1 \mu\text{Gal}$ ,重复性优于  $16 \mu\text{Gal}$ ,在 10 天的长期测试中没有出现仪器漂移。野外快速测量条件下的灵敏度约  $173 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,与室内环境下的指标较为接近,系统表现出良好的鲁棒性。在野外车载条件下开展了典型多场景重力连续流动测量实验,重力仪系统可在城市和山区不同地段稳定运行。车载系统可快速展开部署进行实时重力测量,10 min 内即可获得高精度重力数据,在海拔变化  $>1.6 \text{ km}$ 、温差约  $7.6 \text{ }^\circ\text{C}$  的复杂野外环境下,重力测量残差优于  $100 \mu\text{Gal}$ 。虽然本次只进行了单个路线的重力测量,但从测量性能来看,所研发的车载原子重力仪完全具备在复杂地形中开展重力网格密集快速测量的潜力,为野外地质反演、重力基准网快速构建、重力场短波信息快速获取、野外条件下自然灾害预报等应用场景提供了新途径。

## 参考文献

- [ 1 ] ZHOU L, YAN S T, JI Y H, et al. Toward a high-precision mass-energy test of the equivalence principle with atom interferometers [ J ]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 1039119.
- [ 2 ] BUCHMUELLER O, ELLIS J, SCHNEIDER U. Large-scale atom interferometry for fundamental physics [ J ]. *Contemporary Physics*, 2023, 64(2): 93-110.
- [ 3 ] HAUG E G. Different mass definitions and their pluses and minuses related to gravity [ J ]. *Foundations*, 2023, 3(2): 199-219.
- [ 4 ] CROSSLEY D, HINDERER J, RICCARDI U. The measurement of surface gravity [ J ]. *Reports on Progress in Physics*, 2013, 76(4): 046101.
- [ 5 ] VAN CAMP M, DE VIRON O, WATLET A, et al. Geophysics from terrestrial time-variable gravity measurements [ J ]. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55(4): 938-992.
- [ 6 ] LIANG W, LI J CH, XU X Y, et al. A high-resolution earth's gravity field model SGG-UGM-2 from goce, grace, satellite altimetry, and EGM2008 [ J ]. *Engineering*, 2020, 6(8): 860-878.
- [ 7 ] 任政勇,柳建新,岳国璇,等.重力与磁法在有色金属矿产勘探中的研究进展 [ J ]. *中国有色金属学报*, 2023, 33(1): 240-260.  
REN ZH Y, LIU J X, YUE G X. Research progress of gravity and magnetic method in nonferrous metals mineral exploration [ J ]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2023, 33(1): 240-260.
- [ 8 ] 朱将波,陈社教,汪启年.1:20万区域重力调查成果分析——以可可西里湖地区为例 [ J ]. *工程地球物理学报*, 2024, 21(3): 433-442.  
ZHU J B, CHEN SH J, WANG Q N. Analysis of 1:200 000 regional gravity survey results— an example of the Hoh Xil lake area [ J ]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2024, 21(3): 433-442.
- [ 9 ] 苗忠英,郑绵平,黄元溢,等.三维地震和重力在思茅盆地固体钾盐勘探中的应用 [ J ]. *矿床地质*, 2024, 43(5): 1149-1163.  
MIAO ZH Y, ZHENG M P, HUANG Y Y. Application of 3D seismic and gravity survey in solid potash exploration in Simao Basin, Southwest China [ J ]. *Mineral Deposits*, 2024, 43(5): 1149-1163.
- [ 10 ] 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): 2022GL097814.
- [ 11 ] MARIYANTO M, LESTARI W, SILITONGA B I, et al. 3D inversion modelling of gravity data for identification of subsurface structures in the mud volcano area of sedati, sidoarjo [ J ]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2582(1): 12009.
- [ 12 ] DIAMENT M, LION G, PAJOT-MÉTIVIER G, et al. The AQG-B absolute quantum gravimeter: A promising sensor for volcano monitoring [ J ]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2024, 27(6): 17-23.
- [ 13 ] WANG B, YU L, DENG ZH H, et al. A particle filter-based matching algorithm with gravity sample vector for underwater gravity aided navigation [ J ]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(3): 1399-1408.
- [ 14 ] WANG H B, WU L, CHAI H, et al. Characteristics of marine gravity anomaly reference maps and accuracy analysis of gravity matching-aided navigation [ J ].

- Sensors, 2017, 17(8): 1851.
- [15] 邓敏, 张焱, 钱天宇, 等. 基于原子体系的量子惯性传感器研究现状[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(9): 16-40.
- DENG M, ZHANG Y, QIAN T Y, et al. Research status of the quantum inertial sensor based on the atomic system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(9): 16-40.
- [16] 万伏彬, 邝文俊, 钟曜宇, 等. 基于原子干涉技术的水下重力辅助导航研究展望[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(9): 41-54.
- WAN F B, KUANG W J, ZHONG Y Y, et al. Research prospect of underwater gravity-assisted navigation based on atomic interference technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(9): 41-54.
- [17] NIEBAUER T M, SASAGAWA G S, FALLER J E, et al. A new generation of absolute gravimeters [J]. Metrologia, 1995, 32(1/4): 159-180.
- [18] PÁLINKÁŠ V. Precise tidal measurements by spring gravimeters at the station Pecný [J]. Journal of Geodynamics, 2006, 41(1): 14-22.
- [19] WU X J, PAGEL Z, MALEK B S, et al. Gravity surveys using a mobile atom interferometer [J]. Science Advances, 2019, 5(9): aax0800.
- [20] LI CH Y, LONG J B, HUANG M Q, et al. Continuous gravity measurement with a portable atom gravimeter[J]. Physical Review A, 2023, 108(3): 032811.
- [21] PELLUET C, ARGUEL R, RABAULT M, et al. Atom interferometry in an einstein elevator [J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 4812.
- [22] CASSENS C, MEYER-HOPPE B, RASEL E, et al. Entanglement-enhanced atomic gravimeter[J]. Physical Review X, 2025, 15(1): 11029.
- [23] PETERS A, CHUNG K Y, CHU S. High-precision gravity measurements using atom interferometry [J]. Metrologia, 2001, 38(1): 25-61.
- [24] 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.
- [25] GUO J, MA S Q, ZHOU CH, et al. Vibration compensation for a vehicle-mounted atom gravimeter[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(13): 12939-12946.
- [26] 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.
- CHENG B, ZHOU Y, CHEN P J, et al. Absolute gravity measurement based on atomic gravimeter under mooring state of a ship[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(4): 103-109.
- [27] 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.
- CHE H, LI AN, FANG J, et al. Ship-borne dynamic absolute gravity measurement based on cold atom gravimeter[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(11): 148-156.
- [28] QIAO ZH K, YUAN P, ZHOU Y, et al. Marine absolute gravimetric survey based on atomic gravimeter [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2651(1): 12160.
- [29] ZHANG H K, LIU J X, ZHANG Y F, et al. A testing method for ship-borne atom gravimeters based on variations in acceleration induced by the Eötvös effect [J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(15): 28597-28606.
- [30] BIDEL Y, ZAHZAM N, BRESSON A, et al. Absolute airborne gravimetry with a cold atom sensor[J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(2): 20.
- [31] BONNIN A, BIDEL Y, BERNARD J, et al. Marine and airborne gravimetry with an absolute cold atom sensor[C]. 2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems, 2022: 1-4.
- [32] 翟晨杰, 王晶, 周俊杰, 等. 基于量子重力仪的航空绝对重力测量[J]. 物理学报, 2025, 74(7): 38-46.
- ZHAI CH J, WANG J, ZHOU J J, et al. Airborne absolute gravity measurements based on quantum gravimeter[J]. Acta Physica Sinica, 2025, 74(7): 38-46.
- [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] BIDEL Y, CARRAZ O, CHARRIÈRE R, et al. Compact cold atom gravimeter for field applications[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(14): 144107.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] ZHANG J Y, XU W J, SUN SH D, et al. A car-based portable atom gravimeter and its application in field gravity survey [J]. *AIP Advances*, 2021, 11(11): 115223.
- [38] 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.  
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): 25-32.
- [39] 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): 347-356.  
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): 347-356.
- [40] 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.
- [41] BIDEI Y, ZAHZAM N, BLANCHARD C, et al. Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 627.
- [42] 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.
- [43] GEIGER R, MÉNORET V, STERN G, et al. Detecting inertial effects with airborne matter-wave interferometry[J]. *Nature Communications*, 2011, 2(1): 474.
- [44] ZHU L X, LIU X, SAIN B, et al. A dielectric metasurface optical chip for the generation of cold atoms[J]. *Science Advances*, 2020, 6(31): abb6667.
- [45] 吕梦洁, 王光明, 颜树华, 等. 原子干涉重力仪集成光源系统综述[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(7): 1-10.  
LYU M J, WANG G M, YAN SH H, et al. Review of compact laser system for atom interferometry gravimeter[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(7): 1-10.
- [46] LI Q X, ZHANG X, ZHANG H K, et al. Determining the equivalent height of atom gravimeters by modulating raman lasers[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 3165800.
- [47] JIN M K, ZHANG X, LIU X, et al. A centimeter-scale dielectric metasurface for the generation of cold atoms[J]. *Nano Letters*, 2023, 23(9): 4008-4013.
- [48] 梁昌文, 马笑笑, 朱凌晓, 等. 用于原子干涉重力仪的隔振平台模型辨识及验证[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(9): 189-196.  
LIANG CH W, MA X X, ZHU L X, et al. Model identification and evaluation of vibration isolation platform for atomic interference gravimeter[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(9): 189-196.
- [49] LIANG CH W, WANG Q F, ZHANG H K, et al. Atom interferometry in a blue-detuned guiding optical potential[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(6): 2041-2044.
- [50] 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): 96-103.  
ZHANG X, YAN SH H, LI Q X, et al. Mobile gravity surveys in the field based on vehicle-mounted atom interferometer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(9): 96-103.
- [51] 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.  
ZHANG X, YAN SH 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.
- [52] 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.
- [53] KASEVICH M, CHU S. Atomic interferometry using stimulated Raman transitions [J]. *Physical Review Letters*, 1991, 67(2): 181-184.

- [54] 章欢开, 颜树华, 朱凌晓, 等. 冷原子干涉绝对重力精密测量与系统误差[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 1-12.

ZHANG H K, YAN SH H, ZHU L X, et al. Precision measurement of absolute gravity by cold atom interference and the system errors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 1-12.

- [55] 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.

WU B. Research on the noise sources and the systematic errors of the high precision cold atom gravimeter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

## 作者简介



**朱凌晓**, 2018年于英国伯明翰大学获博士学位, 现为国防科技大学智能科学学院教授, 主要研究方向为量子精密测量和传感、冷原子干涉仪和量子导航技术。

E-mail: zhulingxiao31@163.com

**Zhu Lingxiao** received his Ph. D. degree from the University of Birmingham in the UK in 2018. He is currently a professor with the School of Intelligent Science at the National University of Defense Technology. His main research interests include quantum precision measurement and sensing, cold atom interferometers, and quantum navigation technology.



**王亚宁**, 2018年于中科院上海光机所获得博士学位, 现为长沙量子测量产业技术研究院有限公司工程师, 主要研究方向为量子精密测量产业化研究。

**Wang Yaning** received his Ph. D. degree from the Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics at the Chinese Academy of Sciences in 2018. He is currently an engineer at Changsha Quantum Measurement Industry Technology Research Institute Co., Ltd. His main research interest is the industrialization of quantum precision measurement.



**颜树华**(通信作者), 2004年于国防科技大学获得博士学位, 现为国防科技大学智能科学学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为原子惯性传感器、重力异常探测、量子时空基准和纳米测量。

E-mail: yanshuhua996@163.com

**Yan Shuhua** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from the National University of Defense Technology in 2004. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at the College of Artificial Intelligence at the National University of Defense Technology. His main research interests include atomic inertial sensors, gravity anomaly detection, and quantum space-time.