

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311454

# 基于车载原子干涉仪的野外流动重力测量\*

张旭<sup>1,2</sup>, 颜树华<sup>1,2</sup>, 李期学<sup>1,2</sup>, 朱凌晓<sup>1,2</sup>, 杨俊<sup>1,2</sup>

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

**摘要:**移动重力测量在计量学、地球科学及国防军事等领域有着广泛的应用需求。原子干涉重力仪在可移动高精度重力测量上具有良好的技术潜力,但目前仍很难兼具高集成度与高灵敏度。针对此问题,本文研制了一套基于原子干涉仪的车载重力测量系统,基于小型化、高度集成的仪器设计,实现了高精度的野外重力测量,室外测量灵敏度为  $520 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、测量重复性优于  $20 \mu\text{Gal}$ 。在长  $10 \text{ km}$ 、高程变化  $100 \text{ m}$  的野外测线上开展了单点调试时间小于  $5 \text{ min}$ 、有效测量时间小于  $15 \text{ min}$  的快速重力测量,并与 LG-1 相对重力仪进行比对。在一般性的野外测试环境下,2 种重力仪的测量残差小于  $100 \mu\text{Gal}$ ,车载绝对重力仪自身测量残差小于  $15 \mu\text{Gal}$ 。因此,该车载重力测量系统极大地提高了野外重力测量效率,方便运输、随停随测、测量准确,为可移动重力测量领域提供了可靠的技术解决方案。

**关键词:** 车载原子重力仪;绝对重力测量;野外流动重力测量

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

## Mobile gravity surveys in the field based on vehicle-mounted atom interferometer

Zhang Xu<sup>1,2</sup>, Yan Shuhua<sup>1,2</sup>, Li Qixue<sup>1,2</sup>, Zhu Lingxiao<sup>1,2</sup>, Yang Jun<sup>1,2</sup>

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Interdisciplinary Center for Quantum Information, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Mobile gravity measurement is important in metrology, earth science, national defense, etc. The atom gravimeter has good technical potential in mobile and high precision gravity measurement. However, it is still difficult to achieve both high integration and high sensitivity. In this article, a vehicle gravity measurement system based on the atom interferometer is developed. Based on the miniaturized and highly integrated instrument design, the high precision gravity measurement in the field could be achieved. The sensitivity is  $520 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$  for outdoor gravity measurement and the measurement repeatability is better than  $20 \mu\text{Gal}$ . Then, we carry out a rapid gravity measurement on a field survey line with a length of  $10 \text{ km}$  and an elevation change of  $100 \text{ m}$ . The gravity measurement results are compared with the LG-1 relative gravimeter. The debugging time of each point is less than  $5 \text{ min}$ , and the effective measurement time is less than  $15 \text{ min}$ . In the general field environment, the measurement residuals of two gravimeters are less than  $100 \mu\text{Gal}$ , and the residuals of the designed vehicle gravimeter are less than  $15 \mu\text{Gal}$ . Therefore, this vehicle-mounted gravity measurement system greatly improves the efficiency of field gravity mapping. It is convenient for transportation and has fast and accurate measurement. In general, the instrument provides a reliable technical solution for the field of mobile gravity measurement.

**Keywords:** vehicle-mounted atom gravimeter; absolute gravity measurement; mobile gravity surveys in the field

收稿日期: 2023-05-19 Received Date: 2023-05-19

\* 基金项目: 国家自然科学基金(12004428)、湖南省自然科学基金优秀青年项目(2021JJ20047)、中国博士后科学基金(2020M683729)、湖南省自然科学基金(2021JJ30774)项目资助

## 0 引言

地球重力场能够反映地球表层及内部物质的空间分布和运动动态,是地球的重要物理特征。陆地重力观测是监测地球重力场变化的重要手段之一,为分析重力场的变化规律、地壳的运动和结构、地表的重力场参数等提供重要参考依据,在计量学、地球科学、资源勘测、灾害预报及国防军事等领域都有着广泛的应用需求<sup>[1-2]</sup>。陆地重力观测主要在地球表面架设绝对重力仪或相对重力仪进行重力测量<sup>[3]</sup>。其中,冷原子干涉绝对重力仪利用激光与原子的相互作用进行重力测量,在测量灵敏度及长期稳定性等方面均展现出了良好的性能及技术潜力。

近30年来,冷原子干涉重力测量技术已经取得了极大的技术进展<sup>[4-13]</sup>。一方面,国内外各实验小组<sup>[14-16]</sup>在实验室环境下实现了超高精度的重力测量及基础物理常数的测定;同时,冷原子干涉重力仪也正在朝着小型化、集成化和动态化的方向发展<sup>[17-21]</sup>,并且基于车载、船载、机载等多种应用场景开展了重力测量实验<sup>[22-25]</sup>。其中最具代表性的是法国 Muquans 公司推出的商业化便携式量子绝对重力仪(absolute quantum gravimeter, AQG)<sup>[26]</sup>,其传感头直径为 38 cm,高度为 70 cm,测量灵敏度为 50  $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,长期稳定度优于 1  $\mu\text{Gal}$ 。

资源勘探、重力场模型构建等实际需求对车载重力测量提出了迫切需求,各实验团队也陆续开展了车载条件下的冷原子干涉绝对重力测量实验。加利福尼亚大学研制的车载冷原子干涉重力仪在伯克利山开展了绝对重力测量,整段测量路程长约 7.6 km,海拔变化约 400 m,测量灵敏度约为 500  $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,不确定度约为 40  $\mu\text{Gal}$ <sup>[27]</sup>。但是系统整体尺寸较大,传感头与控制系统分别安装在两辆尺寸为 1 m×0.8 m×1.7 m 的平板车上。华中科技大学研制的车载原子重力仪传感头尺寸为  $\Phi 0.4 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ ,控制机柜尺寸为 0.6 m×0.6 m×0.9 m,灵敏度为 1.9  $\text{mGal}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,分辨率可以达到 30  $\mu\text{Gal}@10\,000 \text{ s}$ <sup>[28]</sup>。他们同样在山上开展了重力测量实验,但是每次测量时需将传感头从车内搬运到地面上,再进行 25 min 的重力测量。浙江工业大学研制的车载原子重力仪传感头尺寸为  $\Phi 0.52 \text{ m} \times 0.55 \text{ m}$ ,控制机柜高度为 0.8 m<sup>[29]</sup>,他们将传感头安装在三轴稳定平台上,基于多种室外环境开展了重力测量实验<sup>[29-31]</sup>,目前报道的野外环境下的重力测量灵敏度为 1  $\text{mGal}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[30]</sup>,还有待提升。综上所述,国内外各实验团队针对车载重力测量开展了多种模式的应用实验,将重力仪的应用场景从实验室环境拓展到了野外车载环境,并得到了较为可靠的重力测量结果。但是上述研究成果均存在以下两点不足:

1) 将重力仪直接安置在测量车辆上,缺乏针对车载环境的专用设计;2) 采用小型化设计重力仪测量灵敏度普遍不高。因此,为真正实现原子重力仪的野外工程应用,车载原子干涉重力测量系统还需兼具小型化、高精度、快速测量等优势,做到方便运输、随停随测、测量可靠。

基于上述需求,本文基于原子干涉重力仪研制了车载重力测量系统,并进行了野外流动重力测量实验研究。该原子干涉重力仪集成度高,兼具小型化与高精度的优点。在室外环境下,该系统的重力测量灵敏度为 520  $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,积分时间 15 min 后,重力测量分辨率达到 15  $\mu\text{Gal}$ 。本文进行了原子干涉重力仪的重复性实验,验证了系统的重复性优于 20  $\mu\text{Gal}$ 。本文还开展了野外环境下的流动重力测量实验,并与 LG-1 相对重力仪的重力测量结果进行了比较。在一般的野外测试环境下,二者的重力残差小于 100  $\mu\text{Gal}$ ,车载绝对重力仪自身的重力残差小于 15  $\mu\text{Gal}$ 。上述测量结果表明,该车载绝对重力仪具有较好的一致性,能够为陆地重力观测提供小型化、高精度、快速测量的重力测量仪器。

## 1 冷原子干涉重力仪的基本原理

冷原子干涉重力仪的基本原理为物质波干涉。首先,<sup>87</sup>Rb 原子在 1 对反亥姆赫兹线圈和 3 对正交圆偏振冷却光的作用下被囚禁在磁光阱(magneto optical trap, MOT)中,装载 300 ms 后,再经偏振梯度冷却(polarization gradient cooling, PGC)技术,进一步冷却至 5  $\mu\text{K}$ 。然后,冷原子团在重力的作用下自由下落,经拉曼选态  $\pi$  脉冲激光和吹散光作用后被制备到磁不敏态。接着,作用 3 束  $\pi/2-\pi-\pi/2$  拉曼脉冲激光,对冷原子团进行分束、反射及合束的相干操作,自由演化时间为 50 ms。最后,在探测区对原子团的荧光信号进行归一化探测,可以得到原子布局数与重力加速度的表达式为:

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

其中,  $k_{\text{eff}}$  为受激拉曼跃迁的有效波矢;  $g$  为重力加速度;  $\alpha$  为拉曼光扫频啁啾率;  $T$  为自由演化时间。

当  $k_{\text{eff}}g - 2\pi\alpha = 0$  时,对于任意自由演化时间,干涉条纹都在  $\alpha_0$  处重合,并且:

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

因此,在不同的自由演化时间下扫描拉曼光扫频啁啾率,可以得到干涉条纹重合处对应的啁啾率  $\alpha_0$ ,当拉曼光与重力方向完全重合时,即可得到当地的绝对重力加速度:

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

考虑原子干涉仪的系统误差,原子干涉相位可以重新表达为:

$$\phi = (k_{\text{eff}}g - 2\pi\alpha)T^2 + \phi_{\text{ind}} + \phi_{\text{dep}} \quad (4)$$

其中,  $\phi_{\text{ind}}$  为与拉曼光波矢方向无关的相位误差,  $\phi_{\text{dep}}$  为与拉曼光波矢方向相关的相位误差。

反转拉曼光波矢方向,原子干涉相位为 0 的条件分别为:

$$\begin{aligned} (k_{\text{eff}}g - 2\pi\alpha_+)T^2 + \phi_{\text{ind}} + \phi_{\text{dep}} &= 0 \\ (-k_{\text{eff}}g - 2\pi\alpha_-)T^2 + \phi_{\text{ind}} - \phi_{\text{dep}} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $\alpha_+$  为正啁啾率,对应的拉曼波矢方向向下,  $\alpha_-$  为负啁啾率,对应的拉曼波矢方向向上。此时,可以得到当地的绝对重力加速度:

$$g = \frac{\pi(\alpha_+ - \alpha_-)}{k_{\text{eff}}} - \frac{\phi_{\text{dep}}}{k_{\text{eff}}T^2} \quad (6)$$

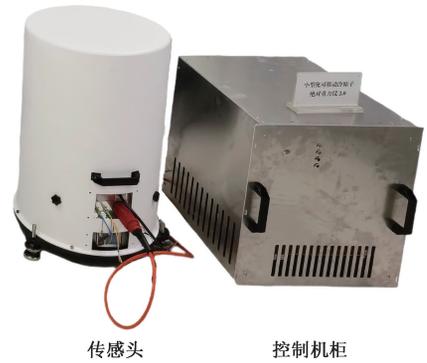
因此,实验中一般通过反转波矢法消除与波矢方向无关的系统误差。

## 2 车载重力测量系统

### 2.1 系统构成

本文所研制的原子干涉重力仪如图 1 所示,由传感头和控制机柜组成。传感头由真空腔、光学模块、磁屏蔽罩、主动隔振平台及其他辅助设备组成。真空腔以钛合金为主要材料,为原子的冷却、干涉及探测提供可靠的高真空度环境。光学模块直接安装在真空腔上,保证激光和磁场相对位置关系的稳定。磁屏蔽罩和主动隔振平台为重力测量提供了良好的磁场和振动环境。传感头的直径为 0.4 m,高度为 0.64 m,整体结构稳固紧凑。控制机柜由激光系统和电控系统组成,高度优化为 11 U。激光系统采用双激光器光纤光源方案,主激光器经光功率放大器放大及倍频晶体倍频后分为两路,一路经锁频模块将激光频率锁在<sup>87</sup>Rb 原子  $|F=2\rangle \rightarrow |F'=3\rangle$  共振跃迁,另外一路输出作为吹散光,从激光器输出激光分为两路,一路通过锁相模块锁定在主激光器上,实现从激光输出频率的快速切换。另外一路通过电光调制器、光功率放大器及倍频晶体后,输出作为冷却光、拉曼光及回泵光。电控系统为激光系统和传感头提供控制信号、射频信号及微波信号,并实现荧光信号的采集及系统状态的监测。传感头和控制机柜之间由两根光纤跳线和 1 根线缆进行连接,分别实现激光及电信号的传输。整套仪器综合考虑了散热及运输抗震等实际需求,实现了较高的集成度,总功率约为 250 W。

基于该套原子干涉重力仪,团队搭建了车载重力测量系统,如图 2 所示,整个车厢可以分为驾驶区、操控区和传感区。其中,传感区位于车厢的后部,主要包含传感



传感头 控制机柜

图 1 原子重力仪实物图

Fig. 1 Photo of atom gravimeter

头及车载调平平台。传感头安装在车载调平平台上,在测量状态下可以进行姿态调整,在运输状态下具备减震功能。传感区与操控区用隔板隔开,保证传感区内具有安静的测量环境。控制机柜安装在操控区的后部,控制机柜前设置人员操控位,用于设置系统参数及监控系统状态。

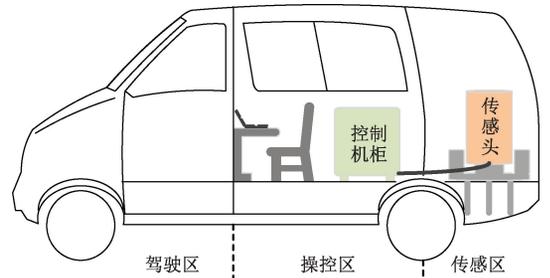


图 2 车载重力测量系统示意图

Fig. 2 Diagram of the vehicle gravity measurement system

另外,车内还安装了全球定位系统、空调温控系统及不间断电源,分别用于提供测试点的经纬度和海拔高度、维持车厢内的温度及不间断电力保证,确保车载重力测量系统能够稳定运行。

### 2.2 车载重力测量实验

车载重力测量系统集成完毕后,本研究首先在国防科技大学的校园内开展车载重力测量实验。首先,实验车辆经短时运输后到达测试地点,运输过程中,车内各模块状态良好,均能承受车辆行驶过程中的振动冲击。到达测试地点后,系统上电,车载调平平台进行自动调平,同时进行激光频率的锁定及激光的输出,检查系统参数并开始重力测量。若该测点没有可参考的重力信息,则通过扫描自由演化时间的操作完成绝对重力初值的标定。标定结束后,固定自由演化时间为 50 ms,交替波矢方向进行测量,对干涉条纹进行拟合计算波谷对应的啁啾率,基于式 (5) 与 (6) 消除与波矢方向无关的系统误

差,得到当地的绝对重力测量值。针对不同的重力测量精度需求,该系统可持续开展时长为2~60 mins的绝对重力测量实验,提供准确可靠的绝对重力测量结果。

为评估车载重力测量系统在室外环境下的测量性能,本研究在国防科技大学校园内的停车场开展了时长约7 h的长时间重力测量实验。经固体潮修正的重力测量结果如图3所示,其中,每一个点代表一次重力测量。测试过程中存在人员走动及车辆行驶的干扰,但车载重力测量系统对此类振动干扰具备一定的鲁棒性,重力测量值的实验标准偏差仅为63.8  $\mu\text{Gal}$ 。

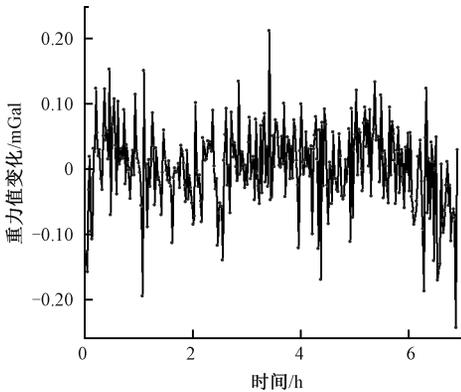


图3 车载重力测量结果

Fig. 3 Results of vehicle gravity measurement

对图3所示的重力测量结果做艾伦标准差分析,分析结果如图4所示,其中,实线为不同时间间隔对应的艾伦标准差,虚线为系统量化噪声的拟合结果,因此,车载重力测量系统的灵敏度为 $520 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,积分时间15 min后,重力测量分辨率能够达到15  $\mu\text{Gal}$ 。重力测量灵敏度并没有随着室外振动噪声的增加而显著恶化,同时,重力测量结果没有明显的漂移,稳定性较好。因此,即使在振动环境复杂的室外,该系统仍展现出了较高的测量精度,能够为陆地重力观测应用提供准确可靠的绝对重力测量结果。

### 2.3 重要性

重复性是评估仪器测量性能的重要指标之一。对于车载原子重力仪,测量结果的稳定是保证重力值准确可靠的关键。为评估原子干涉重力仪的重复性,本文在同一测量地点进行多次重力测量,测量时间为连续6天的每天10:00。每一次重力测量流程保持一致:接通电源后,开启铷源,进行系统预热、激光频率的锁定及激光输出。然后进行1 h的重力测量。测量结束后,关闭重力仪。重复性测量结果如图5所示,6次重力测量结果的实验标准偏差为19.6  $\mu\text{Gal}$ ,即车载原子重力仪的测量重复性为19.6  $\mu\text{Gal}$ ,体现出了良好的内符合精度。

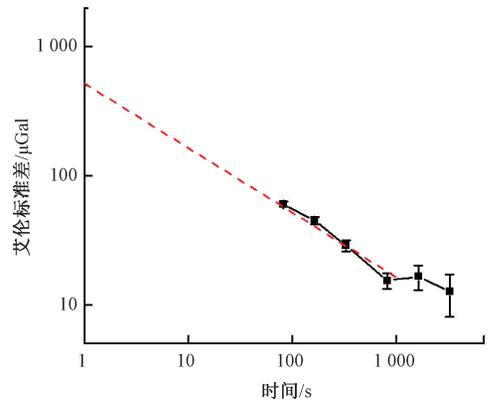


图4 车载重力测量灵敏度评估

Fig. 4 Evaluation of vehicle gravity measurement sensitivity

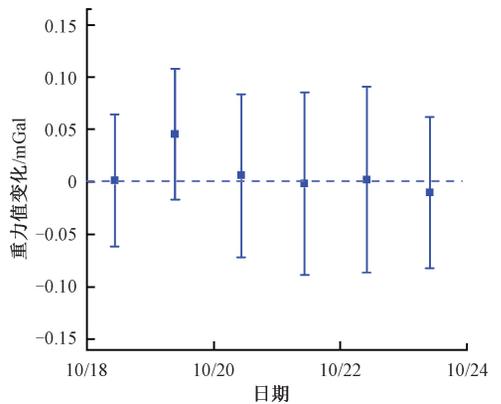


图5 原子干涉重力仪重复性评估

Fig. 5 Evaluation of atom gravimeter's repeatability

## 3 野外流动重力测量

为评估车载重力测量系统在野外环境下的测量性能,本文开展了野外环境下的流动重力测量实验。测试地点选择为野外山地及其周边地区,测试路线及测点坐标如图6所示。测试路线的起点位于城区主干道,为图中的测试点1,测试终点位于山区内部,为图中的测试点4,其中测试点2位于山脚。整条路线长度约10 km,测点的最大高程差约100 m。在到达测试点之前预先进行车载重力测量准备工作:开启铷源、进行激光锁频及激光输出等,到达测试点后,车载调平平台进行自动调平,并在重力测量软件中录入测试点的经纬度信息,用于后续的固体潮校正,单点调试时间小于5 min。根据图4中得到的不同积分时间对应的车载重力测量分辨率,本文选择在每个测试点进行15 min的重力测量。沿着该路线往返测试,除测试点2,每个测试点均进行了两次测试。

野外车载重力测量现场照片如图7所示,此时正在测试点3进行重力测量。测试在11月份开展,期间测试

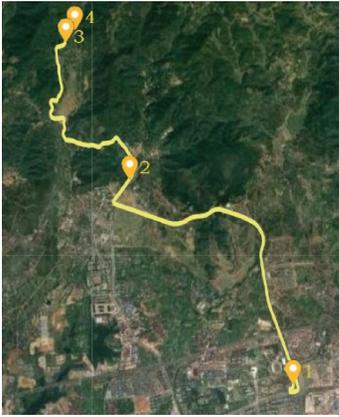


图6 车载重力测量路线

Fig. 6 Vehicle gravity measurement route

地的天气状况为:早晚时段降雨频繁,午时前后温度较高,阳光充裕,环境湿度约90%,阳光直射时车内温度约30℃。因此,该测试环境对车载重力测量系统的温湿度适应性提出了一定的要求。一般情况下,在车辆行进过程中将车内的温度和湿度控制到合适的范围后,在测量状态下关闭空调、车门即可,使得整个测量过程中系统处于温湿度适宜的环境,同时减小了空气流动对重力测量的影响。



图7 野外车载重力测量现场照片

Fig. 7 Photo of vehicle gravity measurement in the field

为评估车载重力测量系统的测量结果,本文与 LG-1 相对重力仪进行了比对。LG-1 相对重力仪在已知的绝对重力基准点与测试点之间进行重复往返观测,经固体潮改正及零漂校正后,可以得到测试点的绝对重力值。由于两地之间的重力差值较大,受 LG-1 格值系数不确定度的影响,引点过程产生的重力误差较大,约为 40  $\mu\text{Gal}$ 。野外车载流动重力测量数据如表 1 所示,出于保密原则,本文将绝对重力测量值的均值  $g_0$  隐去,重力测量结果如图 8 所示,其中矩形代表车载绝对重力仪的测量结果,圆形代表 LG-1 相对重力仪的测量结果。测点之间的最大重力值变化超过 15 mGal,车载绝对重力仪与 LG-1 的重力残差小于 200  $\mu\text{Gal}$ 。其中,测点 4 的重力残差明显远

高于其他测点。该现象的原因分析如下:测点 4 位于水泵附近,水流的不断冲击对环境振动产生了较大影响。一方面,由于 LG-1 相对重力仪在测试前需要进行精准的调平,且 LG-1 的自重较小,受振动噪声的干扰程度较大,因此,该测试环境增大了其调平误差,进而增大了 LG-1 的重力测量误差。另一方面,恶劣的振动环境也增大了车载绝对重力仪的测量误差。如不考虑该测点,则两种重力仪的重力残差小于 100  $\mu\text{Gal}$ 。

表 1 野外车载流动重力测量数据

Table 1 The data of gravity measurement in the field

测量点	车载绝对重力仪/mGal	LG-1/mGal	残差/ $\mu\text{Gal}$
1	$g_0 + 12.814$	$g_0 + 12.77$	44
4	$g_0 + 0.972$	$g_0 + 0.81$	162
3	$g_0 + 1.334$	$g_0 + 1.33$	4
2	$g_0 + 17.623$	$g_0 + 17.54$	83
3	$g_0 + 1.333$	$g_0 + 1.33$	3
4	$g_0 + 0.920$	$g_0 + 0.81$	110
1	$g_0 + 12.827$	$g_0 + 12.77$	57

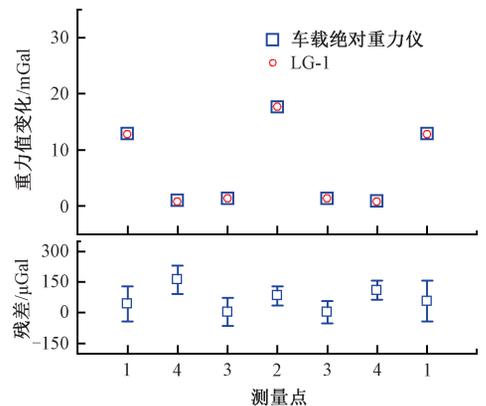


图8 野外车载流动重力测量结果

Fig. 8 Results of gravity measurement in the field

同时,本研究将同一测点前后两次的重力测量值进行比较,结果如图 9 所示。可以发现,测量点 4 处的重复性最差,相差约 50  $\mu\text{Gal}$ ,其他测点的重力残差小于 15  $\mu\text{Gal}$ ,与前期重复性评估的结果较为一致。这也验证了测点 4 的振动环境较为恶劣,不利于高精度的重力测量,同时也为恶劣振动环境下的重力测量试验带来了新的研究问题与挑战。

因此,车载原子绝对重力仪与相对重力仪的测试结果具有高度的一致性,测量偏差小于 200  $\mu\text{Gal}$ ,在同一地点的两次测量结果保持一致,测量偏差小于 50  $\mu\text{Gal}$ 。如果仅考虑普通的野外测试环境,车载重力仪与相对重力仪的测量残差小于 100  $\mu\text{Gal}$ ,同一地点的测量残差小于

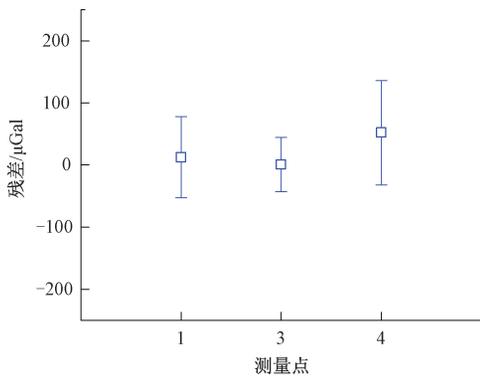


图9 两次车载重力测量的残差

Fig. 9 Residual error of twice vehicle gravity measurement

15  $\mu\text{Gal}$ ,满足野外重力测绘的应用需求。在野外测试环境下,振动噪声仍是限制重力测量灵敏度的主要因素,温湿度等环境因素的变化也将影响重力仪的测量精度。本文研究的车载系统设计及隔振措施一定程度上抑制了上述因素的影响,实现了高精度的野外车载重力测量。但是,为进一步拓展车载重力仪的野外应用,在恶劣环境下仍然保持高精度重力测量成为野外车载重力仪亟需攻关的关键问题。

## 4 结 论

本文搭建了基于原子干涉仪的车载重力测量系统,开展了野外流动重力测量实验,并评估了其测试性能。该重力仪结构紧凑,传感头与控制机柜都实现了较高的集成度。室外环境下的重力测量灵敏度达到 $520 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,积分时间15 min后,重力测量分辨率为15  $\mu\text{Gal}$ 。该重力仪的重复性优于20  $\mu\text{Gal}$ ,在长时间的重力测量实验中没有出现明显的漂移。本文还开展了野外环境下的流动重力测量实验,并与LG-1的测量结果进行了比较。在一般的野外测试环境下,两种重力仪的重力残差小于100  $\mu\text{Gal}$ ,车载绝对重力仪自身的残差小于15  $\mu\text{Gal}$ 。测量结果表明,车载绝对重力仪具有较好的一致性。该车载重力测量系统极大地提高了野外重力测量的效率,同时兼具高精度与小型化优势,为资源勘测、重力测绘等野外应用提供了技术解决方案。后续将进一步开展在恶劣振动环境下的重力测量实验,实现在不同测试环境下的高精度重力测量。

## 参考文献

[1] 韩建成,陈石,李红蕾,等. 陆地高精度重力观测数据的应用研究进展[J]. 地球与行星物理论评, 2022, 53(1): 17-34.  
HAN J CH, CHEN SH, LI H L, et al. The recent

progress using high-precision terrestrial gravity measurements [J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2022, 53(1): 17-34.

- [2] 朱栋,高世腾,朱欣欣,等. 量子重力仪在地球科学中的应用进展[J]. 地球科学进展, 2021, 36(5): 480-489.  
ZHU D, GAO SH T, ZHU X X, et al. Progress of quantum gravimeter applied in the fields of earth science [J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(5): 480-489.
- [3] ANTONI M L, CARBONE D, M€NORET V, et al. Detecting volcano-related underground mass changes with a quantum gravimeter [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(13): e2022GL097814.
- [4] TINO G M. Testing gravity with cold atom interferometry: Results and prospects [J]. *Quantum Science and Technology*, 2021, 6(2): 024014.
- [5] LUO Q, HU Z K, MAO D K, et al. Precision gravity measurements with cold atom interferometer[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2016, 46(7): 073003.
- [6] PETERS A, CHUNG K Y, CHU S. High-precision gravity measurements using atom interferometry [J]. *Metrologia*, 2001, 38(1): 25.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 房丰洲,顾春阳. 高精度重力仪的测量原理与发展现状[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1830-1840.  
FANG F ZH, GU CH Y. Measurement principle and development status of high precision gravimeters [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(8): 1830-1840.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 苏业南, 周超, 李期学, 等. 冷原子干涉可编程时序控制系统设计与实现 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(10): 74-82.
- SU Y N, ZHOU CH, LI Q X, et al. Design and implementation of programmable timing control system for cold atom interference [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(10): 74-82.
- [13] ZHANG T, CHEN L L, SHU Y B, et al. Ultrahigh-sensitivity Bragg atom gravimeter and its application in testing lorentz violation [J]. Physical Review Applied, 2023, 20(1): 014067.
- [14] CHIUW S W, KOVACHY T, CHIEN H C, et al. 102 k large area atom interferometers [J]. Physical Review Letters, 2011, 107(13): 130403.
- [15] 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: 1931-1942.
- [16] 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.
- [17] 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): 013639.
- [18] XU V, JAFFE M, PANDA C D, et al. Probing gravity by holding atoms for 20 seconds [J]. Science, 2019, 366(6466): 745-749.
- [19] 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.
- [20] 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): 025001.
- [21] HUANG C, LI A, QIN F. Research progress of dynamic measurement technology of atom gravimeter [J]. Applied Sciences, 2023, 13(15): 8774.
- [22] BIDEI Y, ZAHZAM N, BRESSON A, et al. Absolute airborne gravimetry with a cold atom sensor [J]. Journal of Geodesy, 2020, 94: 1-9.
- [23] BIDEI Y, CARRAZ O, CHARRIÈRE R, et al. Compact cold atom gravimeter for field applications [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(14): 144107.
- [24] HAUTH M, FREIER C, SCHKOLNIK V, et al. First gravity measurements using the mobile atom interferometer GAIN [J]. Applied Physics B, 2013, 113: 49-55.
- [25] 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.
- [26] MÉNORET V, VERMEULEN P, LE M N, et al. Gravity measurements below 10<sup>-9</sup> g with a transportable absolute quantum gravimeter [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-11.
- [27] WU X J, PAGEL Z, S. MALEK B, et al. Gravity surveys using a mobile atom interferometer [J]. Science Advances, 2019, 5(9): eaax0800.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.

- [31] 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.

## 作者简介



张旭,2017年于国防科技大学获得学士学位,2019年于国防科技大学获得硕士学位,现于国防科技大学攻读博士学位,主要研究方向为量子精密测量。

E-mail: zhangxu13@nudt.edu.cn

**Zhang Xu** received her B. Sc. degree from National University of Defense Technology in 2017 and received her M. Sc. degree from National University of Defense Technology in 2019. She is currently a Ph. D. candidate at National University of Defense

Technology. Her main research interest is quantum precision measurement.



颜树华(通信作者),1992年于清华大学获得学士学位,1994年于清华大学获得硕士学位,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,主要研究方向为原子惯性传感器、量子时空基准。

E-mail: yanshuhua996@nudt.edu.cn

**Yan Shuhua** (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Tsinghua University in 1992 and 1994, and received his Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2004. He is currently a professor in the College of Intelligence Science and Technology at National University of Defense Technology. His main research interests include atomic inertial sensors and quantum space-time reference.