

# 基于原子重力仪的车载静态绝对重力测量\*

吴彬 周寅 程冰<sup>†</sup> 朱栋 王凯楠 朱欣欣 陈佩军  
翁堪兴 杨秋海 林佳宏 张凯军 王河林 林强<sup>‡</sup>

(浙江工业大学理学院, 光学研究所, 杭州 310023)

(2019年11月20日收到; 2019年12月18日收到修改稿)

目前大多数原子重力仪的装置复杂、体积庞大、环境适应性差, 不能应用于野外进行绝对重力测量, 这限制了原子重力仪的应用领域. 本文利用自研的小型化原子重力仪, 集成了一套车载绝对重力测量系统. 该系统主要由原子重力仪、被动平台隔震系统、位姿平台调平系统、差分GPS测高系统、不间断电源供电系统及车载空调温控系统等组成. 首先, 本文对该测量系统的车载环境适应性进行了评估, 发现在野外40℃高温、8°大倾角普通路面的环境下, 该系统仍然能够正常工作; 其次, 介绍了车载绝对重力测量的实验步骤及数据处理方法, 并测量了车头朝向对绝对重力测量的影响. 最后, 在野外平坦路面上进行了重复测线工作, 评估了系统的内符合绝对重力测量精度, 结果约为30 μGal; 在野外大倾角山体路面, 通过测量不同海拔高度点的绝对重力值, 得到了地球的垂直重力梯度值, 约为-231(36) μGal/m. 本文结果为野外绝对重力勘测提供了依据.

**关键词:** 冷原子, 原子干涉仪, 原子重力仪, 绝对重力测量

**PACS:** 03.75.Dg, 67.85.-d, 37.25.+k, 91.10.-v

**DOI:** 10.7498/aps.69.20191765

## 1 引言

原子干涉仪目前已经发展成为精密测量领域的一个重要工具. 利用它可以精确测量超精细结构常数<sup>[1,2]</sup>、万有引力常数<sup>[3]</sup>、旋转角速度<sup>[4,5]</sup>、重力场梯度<sup>[6,7]</sup>及重力加速度<sup>[8-10]</sup>. 然而, 大多数原子干涉仪的实验装置结构复杂、体积大、重量重、功耗大、环境适应性差, 只能在实验室环境下工作. 近年来, 随着真空、激光、电子控制等技术的快速发展, 基于原子干涉仪原理的小型化原子重力仪进展较快<sup>[11-14]</sup>; 它们逐渐参与到国际顶尖的绝对重力比对活动中来<sup>[15-18]</sup>, 且其性能可与现有最好的光学干涉式绝对重力仪相媲美; 原子重力仪的商用产

品也开始出现<sup>[19]</sup>, 相关的野外应用研究正在逐渐开展<sup>[20-22]</sup>. 鉴于原子重力仪的测量速度更快、寿命更长、灵敏度更高, 且内部无移动的机械部件, 它比现有最好的光学干涉式绝对重力仪更适合在野外使用. 这种仪器在重力基准维护、重力测绘、资源勘探、地震火山监测、重力匹配导航等领域都有着广泛的应用前景.

然而, 基于原子重力仪的野外应用研究才刚刚起步, 仪器真正从实验室原理样机转变为野外工程样机仍需要较长时间. 早期阶段, 人们在慢速卡车<sup>[23]</sup>、0-g飞机<sup>[24,25]</sup>、超音速火箭<sup>[26]</sup>以及空间站<sup>[27]</sup>上基于原子干涉装置进行了初步的野外实验. 随后, 法国的Bidel等<sup>[20]</sup>利用电梯测量了不同楼层高度的绝对重力值, 并初步评估了重力场垂直梯度. 此外,

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2016YFF0200206, 2017YFC0601602)、国家自然科学基金 (批准号: 61727821, 61475139, 61478069, 11604296, 11404286, 51905482) 和中国自然资源航空物探遥感中心项目 (批准号: DD20189831) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [bingcheng@zjut.edu.cn](mailto:bingcheng@zjut.edu.cn)

<sup>‡</sup> 通信作者. E-mail: [qlin@zjut.edu.cn](mailto:qlin@zjut.edu.cn)

船载绝对重力测量也取得了初步结果, 评估的重力测量精度达到了 1 mGal. 美国的 Wu 等<sup>[22]</sup> 基于原子重力仪进行了野外绝对重力勘测, 实现的测量精度约为 40  $\mu$ Gal.

本文将报道我们团队在原子重力仪车载集成与测试方面的最新进展. 我们研制的一套小型化原子重力仪样机通过了中国计量科学研究院的校准测试, 实验室静态测量精度为 10  $\mu$ Gal. 基于该样机, 我们在普通箱式货车上集成了一套车载绝对重力测量系统, 并利用该系统进行了野外测试, 对车载测量过程、系统温度适应性、数据分析方法及初步测量结果进行了详细分析. 结果发现, 在野外 40  $^{\circ}$ C 高温、8 $^{\circ}$ 大倾角普通路面环境下, 该系统仍能够正常工作. 经过多次定点测试, 最终评估的测量精度约为 30  $\mu$ Gal. 本文结果为原子重力仪的野外使用提供了思路和参考数据.

## 2 小型化原子重力仪介绍

本文实验使用的小型化原子重力仪为新研制的一套仪器, 其原理与先前文章中描述的仪器相似<sup>[28,29]</sup>, 区别是集成度更高、体积更小、环境适应性更强. 原子重力仪的原理很多文章中都有详细描述<sup>[8,30]</sup>, 这里只做简要介绍. 实验中采用的自由落体是一团经激光冷却后的铷 87 原子, 它首先在二维磁光阱被制备, 然后输送至三维磁光阱进行装载. 300 ms 内, 制备的原子数目达到  $10^8$  个, 这些原子经过偏振梯度冷却过程后, 原子团温度降至 5  $\mu$ K. 随后关断各个激光束让原子团在重力场中自由下落, 并通过微波和拉曼选态  $\pi$  脉冲将原子制备到对磁场不敏感且温度更低的  $|F=1, m_F=0\rangle$  纯态上. 为了测量自由落体原子团的加速度, 用三束多普勒敏感的  $\pi/2$ - $\pi$ - $\pi/2$  拉曼激光脉冲序列, 分别实现原子物质波的分束、偏转以及合束, 最终形成一个典型的马赫-曾德尔型原子干涉仪. 拉曼  $\pi$  脉冲的时间是 10  $\mu$ s, 拉曼脉冲之间的时间间隔  $T$  是 60 ms, 一个测量周期耗时 500 ms. 最后, 在原子干涉仪的输出端, 利用归一化探测方法收集原子的荧光信号, 得到原子在两个态上的布居数  $P = P_m \pm C/2 \cos \phi$ , 其中  $P_m$ ,  $C$ ,  $\phi$  分别是原子干涉条纹的直流量、对比度和相位. 干涉条纹相位  $\phi = (\mathbf{k}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{g} - \alpha)T^2$ ,  $k_{\text{eff}} \simeq 4\pi/\lambda$  是拉曼光束的有效波矢,  $\lambda$  是激光波长, 约为 780 nm;  $g$  是重力加速

度;  $\alpha$  是用于补偿重力诱导的多普勒频移的拉曼光扫频啁啾率;  $T$  是两束拉曼脉冲之间的时间间隔. 实验中, 通过扫描  $\alpha$  得到原子干涉条纹, 通过余弦函数拟合得到干涉条纹相位, 从而精确提取重力加速度.

本文所用的原子重力仪实验装置与先前文章介绍的装置<sup>[29]</sup> 相似, 是一个改进版本, 其实物照片如图 1 所示. 下面将着重介绍两者的区别, 并在此基础上描述新实验装置的特点. 新一版的小型化原子重力仪装置也包括超高真空系统、激光光路系统和电子控制系统三部分. 新版超高真空系统集成度更高, 它的体积和重量都有所改善, 直径 52 cm, 高度 55 cm, 重量 70 kg. 我们优化了内部器件分布, 更换了小型离子泵, 改善了支撑脚. 在激光光路系统方面, 优化了系统结构设计, 加装了激光器锁频模块及光路模块的控温功能, 缩小小光路光高至 20 mm. 因此整个光路更加稳定, 温度适应性更强, 抗震性也得到提高. 电子控制系统的改进是最大的, 通过整合各个自制电路模块, 利用同一块背板进行供电和通信, 使得各模块之间的连接线大大减少. 因此整个电子控制系统的模块化程度变高, 运行效率得到提升, 功耗约为 250 W.



图 1 原子重力仪实验装置的照片

Fig. 1. Photo of experimental apparatus of atomic gravimeter.

在进行车载测试之前, 我们对实验用小型化原子重力仪的性能进行了评估, 主要包括灵敏度和精度两方面. 为了评估仪器的状态, 在普通实验室地面上测量了潮汐引起的重力变化数据, 减去潮汐理论数据, 计算的艾伦偏差曲线如图 2 所示. 评估的

重力测量灵敏度约为  $270 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{-1/2}$ , 该灵敏度主要受限于地面振动噪声, 实验中没有加振动隔离的措施. 由测量曲线知, 20 min 测量积分时间, 重力测量分辨率可达  $8 \mu\text{Gal}$ .

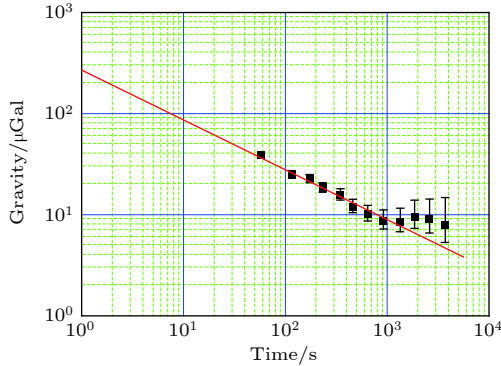


图 2 重力测量灵敏度评估

Fig. 2. Evaluation of the sensitivity for gravity measurement.

在重力测量绝对精度方面, 分析了各个系统误差项, 并进行了内符合测试, 在同一个测量点进行多次绝对重力测量, 评估的内符合精度约  $10 \mu\text{Gal}$ . 为了评估仪器的外符合精度, 需要跟其他高精度绝对重力仪进行比对. 因此, 将该设备从杭州运输至北京, 在中国计量科学研究院进行了长期测试及精度评估. 一方面北京的测量环境较好, 仪器的稳定性和灵敏度得以提高; 另一方面, 北京的测点上已经有相对准确的绝对重力值, 可以进行外符合精度评估. 经过两周的测试评估, 该原子重力仪的外符合精度约为  $10 \mu\text{Gal}$ , 中国计量科学研究院针对该仪器也出具了官方的校准证书. 此外, 参加了在武汉举办的“陆态网络绝对重力比对活动”, 评估的精度也是  $10 \mu\text{Gal}$ . 因此, 可以基本确定该设备的测量精度为  $10 \mu\text{Gal}$ .

### 3 基于原子重力仪的车载绝对重力测量系统

#### 3.1 车载绝对重力测量系统构成

在上述小型化原子重力仪的基础上, 在一个普通箱式货车上集成了一套车载绝对重力测量系统, 系统构成示意图如图 3 所示. 该系统主要由原子重力仪测量系统、被动平台隔震系统、位姿平台调平系统、差分 GPS 测高系统、不间断电源供电系统 (UPS) 及车载空调温控系统组成.

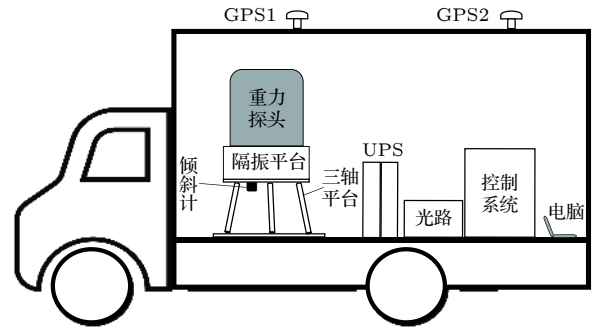


图 3 基于原子重力仪的车载绝对重力测量系统示意图  
Fig. 3. Schematic diagram of the system of absolute gravity measurement on a truck based on atomic gravimeter.

原子重力仪测量系统包括超高真空系统、激光光路系统和电子控制系统三部分, 其中激光光路系统和电子控制系统分别平行地固定在车厢底板上; 超高真空系统放置在被动平台隔振系统上, 该隔振系统用于隔离车上及地面的高频振动噪声, 自然共振频率  $0.5 \text{ Hz}$ , 它对  $10 \text{ Hz}$  以上的高频振动噪声抑制效果较好; 被动平台隔振系统下方是位姿平台调平系统, 该系统的功能是调水平, 它的下表面安装有一个大量程倾斜计, 用于粗调平; 超高真空系统内部集成了一个少量程高精度倾斜计, 该倾斜计可以指示水平位置, 利用电脑控制程序可实现一键调平, 调平精度一般在  $\mu\text{rad}$  量级; 差分 GPS 测高系统装在车厢顶部, 用于记录测量点的经纬度以及海拔信息, 海拔测量精度可达到  $\text{cm}$  量级, 后期数据处理时将把海拔信息转化为超高真空系统的高度信息. 不间断电源供电系统放置在车厢底部, 为用电设备提供电源支撑. 车载空调温控系统为测试车辆自带系统, 包括控温和保温两个功能, 通常控温精度在  $1\text{--}2 \text{ }^\circ\text{C}$ , 车厢内部及外部还配有多个温湿度监控设备, 可实时显示温湿度信息. 此外, 考虑到测试车辆轮胎会引入随机振动, 我们还配有专用的车辆底盘支撑架, 可将测试车辆架空, 直接固定在地面上. 最后, 为了减少人员的干扰, 设计了远程操作系统来控制整个测量系统.

#### 3.2 车载绝对重力测量实验步骤

在车载绝对重力测量系统搭建完成后, 进行了初步测试和联调. 基于位姿平台调平系统, 利用大量程倾斜计进行粗调平; 调整被动隔振平台, 使原子重力仪的超高真空系统悬浮, 且处于隔振的最佳状态; 基于超高真空系统内部集成的小量程高精度

倾斜计, 利用位姿平台进行精调平, 整个调整过程耗时约 20 min; 关闭车门、测试车辆发动机及空调, 检查实验参数并进入测量状态, 主控电脑开始采集干涉条纹数据, 测量时间设定为 20 min. 重力数据测量期间, 利用另外一台辅助电脑同步采集环境参数信息, 包括车厢内外的温度、湿度、气压, 测量点的经纬度、海拔高度及航向角; 车内位姿平台的倾斜角度等, 这些数据将用于后期修正及结果分析. 因有效测量时间为 20 min, 根据艾伦偏差曲线, 重力测量分辨率可小于 10  $\mu\text{Gal}$ .

## 4 野外绝对重力测量及结果分析

### 4.1 野外车载环境适应性测试及结果

为了检验已集成的车载绝对重力测量系统, 首先测试了其野外环境适应能力, 测试现场照片如图 4 所示. 测试内容主要包括运输安全性、空调控温能力、位姿平台倾斜角度稳定性等. 在运输安全性方面, 先后将各个部件放置在车内, 进行跑车实验, 单独检验部件的抗振、抗冲击能力. 经过多次测试, 可保证各个部件在运输过程中不会出现安全性问题. 随后, 对集成后的车载测量系统进行跑车实验, 验证整个系统的可靠性, 实验发现该测量系统能够承受车载运输中的振动及冲击.



图 4 野外车载绝对重力测量现场照片  
Fig. 4. Photos of field measurement of absolute gravity on a truck.

因测试是在暑假期间开展, 室外温度较高, 我们评估了车载空调的控温能力, 测试数据如图 5 所示. 由图 5 可知, 在外界温度超过 40  $^{\circ}\text{C}$  情况下, 车辆内部温度可维持在  $(24 \pm 3) ^{\circ}\text{C}$ . 实验发现, 原子重力仪样机在空调控温状态下能够正常工作, 重力测量的灵敏度无明显变化.

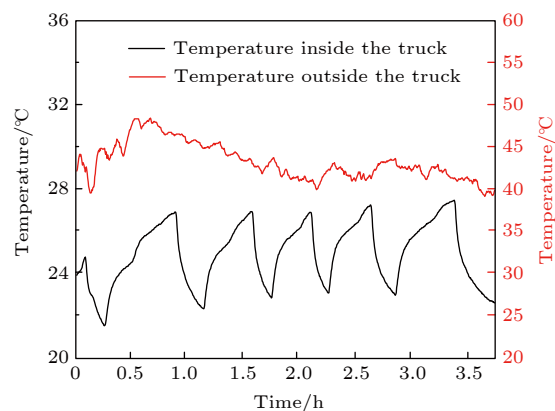


图 5 车厢内外部测量的温度变化曲线  
Fig. 5. Curves of temperature changes measured inside and outside of the truck.

在位姿平台倾斜稳定性方面, 利用高精度倾斜计进行了长期监控, 并与实验室内的数据进行了比较, 结果如图 6 所示. 实验发现, 车载情况下倾斜的高频噪声明显变大, 幅度可达 50  $\mu\text{rad}$ , 这些高频噪声主要来源于人员上下车、风、周边车辆引起的车箱随机摇摆. 但倾斜角度的漂移不大, 因此对测量影响不大.

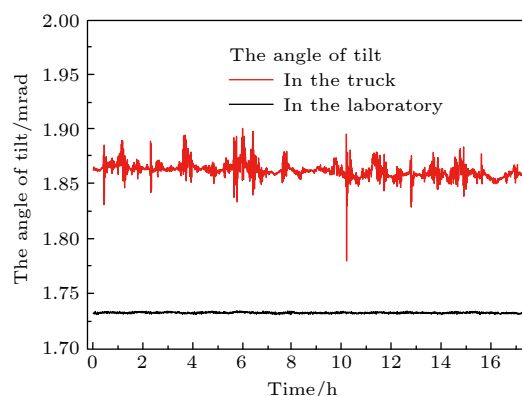


图 6 位姿平台倾斜角度的稳定性测试  
Fig. 6. Stability test of tilt angles of the posture platform.

### 4.2 野外测试路线规划

在完成野外车载适应性测试后, 对野外测试路线进行了规划. 测试路线包括平坦路面和大倾角路面. 平坦路面的测量环境稍好, 可初步验证整个系

统的测量性能. 大倾角路面的测试可进一步评估位姿平台的调节能力, 且测试点有一定高度差, 通过测量可以得到测试区域的重力梯度值.

我们选择的平坦路面的跑车路线如图 7(a) 所示, 基本在浙江工业大学的校园内;  $S$  点是出发点位置 (实验室门口),  $A, B, C$  三点是测量位置, 测试路面较为平坦, 海拔高度基本在 19.25 m, 车头统一朝向  $235.0^\circ$ , 红色路线一圈的路程约为 2 km.



图 7 野外测量路线规划 (a) 平坦路面; (b) 大倾角路面  
Fig. 7. Route planning of field gravity measurement: (a) Flat road; (b) slope road.

大倾角路面的跑车路线如图 7(b) 所示, 主要在一个比较陡的山坡上进行测试. 测试地点离出发点  $S$  的车程约为 2.5 km. 我们选取了三个测量点 ( $D, E, F$ ) 进行绝对重力定点测量, 其中  $D$  点和  $F$  点的海拔高度差为 12.77 m, 路面的倾斜角度约为  $8.6^\circ$ . 此外,  $D, E, F$  三个测量点的车头朝向角分别为  $146.94^\circ, 115.43^\circ, 120.52^\circ$ , 该朝向角用于修正科里奥利效应引起的绝对重力值. 该跑车路线需要经过一段颠簸路面, 路况较差. 在正式测量前, 测试车辆围绕该路线进行了多次跑车实验, 以检验 UPS 的供电能力、差分 GPS 的覆盖范围以及各部件的抗冲击能力. 为了评估仪器的内符合精度, 我们选择相对重力测量领域常用的往返测量方案, 按顺序保证每个测量点都有两个测量数据, 比如测点规划可以是  $D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow F$ .

### 4.3 系统效应修正及数据处理方法

测量到的原始重力数据需要修正仪器的系统效应, 以及由环境因素引起的重力值变化, 以便最终得到每个测点的绝对重力值. 系统效应修正方面, 根据样机的校准测试结果, 对自引力效应、频率基准、激光绝对频率、拉曼光重合度、测量高度修正、双光子光移、科里奥利效应等系统误差进行了修正. 然而, 因科里奥利效应跟原子的平均水平速度相关, 所以原子重力仪测量到的重力值跟仪器朝向有关系, 详细的理论分析和实验结果可参考文献 [28].

在实际测量中, 车头的朝向会引起重力值变化, 且呈现正弦变化关系, 野外实验前在实验室测量了仪器朝向对重力测量值的影响, 如图 8 红点所示 (红线是正弦拟合曲线). 理论上, 利用拟合的正弦曲线以及测量的车头朝向角, 可以进行相应的科里奥利效应修正. 为了确认拟合的正弦曲线在车载情况下是否一样, 我们在车载环境下重复了科里奥利效应实验. 在车载绝对重力测量系统集成后, 我们在实验室外的空场地画了一个大圆, 并每隔  $60^\circ$  做一个标记. 通过整体移动车辆到标记位置, 每隔  $60^\circ$  测量一个重力值, 可以得到车头朝向角与重力值的关系, 测量数据如图 8 黑点所示. 实验发现实验室和野外车载的科里奥利效应在横向上有一个较大的移动, 主要原因是原子在东西方向上的平均水平速度发生了变化. 原子重力仪在装车、安装及调试的过程中, 振动、冲击及温度变化会影响真空系统和激光系统. 真空系统内的反射镜角度、磁场线圈位置、磁屏蔽位置、耦合头位置等会发生变化, 从而导致三维磁光阱中磁场中心与光场中心会发生相对偏离. 激光系统内的激光器性能、光路方向、光纤耦合效率等会发生变化, 从而导致光功率会抖动. 这些因素都会引起原子在东西方向上的水平速度发生变化, 从而引起科里奥利效应在横向上有一个移动. 此外, 野外测量时车辆的朝向角与车内真空探头的朝向角有可能不相同, 实验室测量是以真空探头上的朝向角为基准的, 因此实验室和野外测量时朝向角 (图 8 的横轴) 可能存在一定差异, 这也会导致科里奥利效应在横向上有一个移动. 根据野外车载数据拟合正弦曲线, 在野外的每个测点只要记录车头朝向角, 就可以对科里奥利效应引起的重力值变化进行修正.

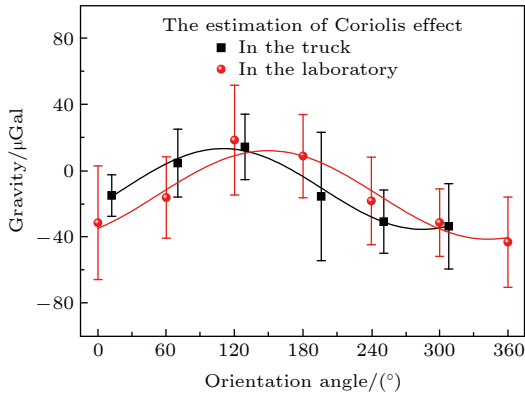


图 8 科里奥利效应的修正 (红点, 实验室内的测量数据; 红线, 正弦拟合; 黑点, 车载情况下的测量数据; 黑线, 正弦拟合)

Fig. 8. Correction of Coriolis effect. Red and black dots represent the experimental data measured in the laboratory and the truck. Red and black lines are the corresponding sinusoidal fitted curves.

除此之外, 每个测点还要修正环境引起的绝对重力值变化, 主要包括潮汐、气压以及极地运动。潮汐引起的重力值修正可以通过理论模型进行计算, 气压引起的重力值变化可以利用高精度气压计采集到的数据进行修正, 极地运动修正可以通过输入极地参数进行计算。

#### 4.4 测量结果

在平坦路面情况下, 最终处理后的绝对重力测量数据如图 9 所示, 两次重复测量的内符合精度较好, 基本在仪器的测量不确定度以内; 通过比较两次测量的残差数据, 可以评估出仪器的内符合精度, 约为 30  $\mu\text{Gal}$ 。A 点和 C 点之间的重力值相差约 290  $\mu\text{Gal}$ 。

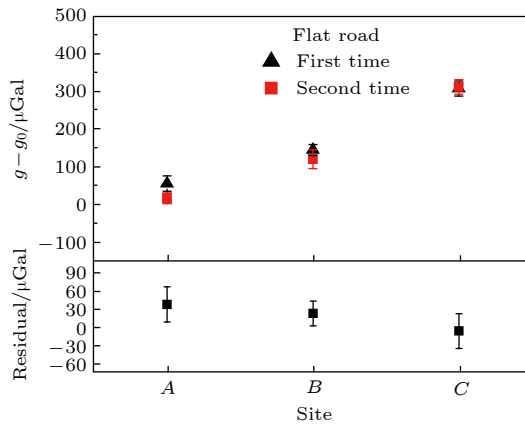


图 9 平坦路面情况下的绝对重力测量结果

Fig. 9. Measured results of absolute gravity in the case of flat road.

在大倾角路面情况下, 最终的实验结果如图 10 所示, 仪器的内符合精度也在 30  $\mu\text{Gal}$  左右, 两次测量数据的重复性较好。因为三个测量点的垂直高度差较大, D 和 F 点的重力值相差约 3080  $\mu\text{Gal}$ 。通过线性拟合三测点的海拔高度和绝对重力值, 可得到测点区域的垂直重力梯度, 约为 -231(36)  $\mu\text{Gal}/\text{m}$ , 该值比自由空间的垂直重力梯度 (一般在 -300  $\mu\text{Gal}/\text{m}$ ) 小, 主要原因是山体质量的影响, 利用该值可以评估测量区域山体岩石的平均质量密度。

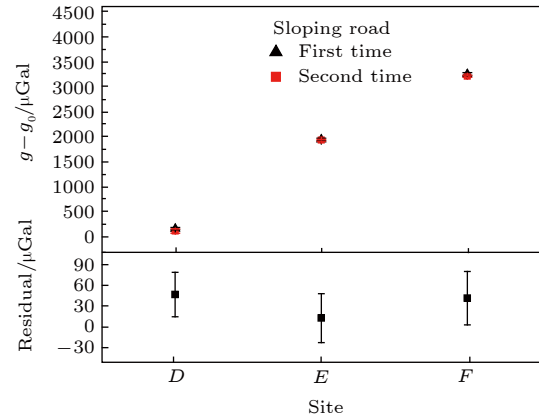


图 10 倾斜路面情况下的绝对重力测量结果

Fig. 10. Measured results of absolute gravity in the case of slope road.

#### 5 结 语

本文基于小型化原子重力仪样机搭建了一套车载绝对重力测量系统, 并开展了野外绝对重力测量实验。系统所用的原子重力仪体积小、重量轻、功耗低, 实验室环境下的绝对重力测量精度达到 10  $\mu\text{Gal}$ 。该样机通过了中国计量科学研究所的校准, 参与了多次绝对重力比对活动。结合被动平台隔震系统、位姿平台调平系统、差分 GPS 测高系统、不间断电源供电系统及车载空调温控系统, 我们在一个小型箱式货车上集成了一套车载绝对重力测量系统。随后, 对该系统的车载环境适应性进行了测试, 评估了系统的运输安全性、空调的控温能力、位姿平台的倾斜角度稳定性, 实验发现在野外 40 $^{\circ}\text{C}$  高温、8 $^{\circ}$  大倾角路面的环境下, 该系统仍然能够正常工作。此外, 本文对车载绝对重力测量数据的处理方法进行了分析, 尤其是对科里奥利效应引起的重力值变化做了野外实验测量。

基于该车载绝对重力测量系统, 首先在平坦路面上进行了野外测量实验, 评估了仪器的内符合精

度, 约为 30  $\mu\text{Gal}$ . 其次, 在大倾斜的山坡上开展了重复测点工作, 得到的重力值差值为 3080  $\mu\text{Gal}$ ; 通过线性拟合测量到的重力值与海拔高度数据, 得到测量区域的垂直重力梯度值, 约  $-231(36)$   $\mu\text{Gal}/\text{m}$ , 该梯度值可以用于评估山体岩石的平均质量密度. 目前, 该测量系统的性能有待进一步改善, 重力测量灵敏度主要受限于振动噪声, 测量精度受限于系统效应的稳定性, 测量的自动化和效率有待提高. 该系统可以为流动重力测绘、地质体解释、地球物理研究提供技术支撑.

## 参考文献

- [1] Bouchendira R, Clade P, Guellati-Khelifa S, Nez F, Biraben F 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 080801
- [2] Parker R H, Yu C, Zhong W, Estey B, Müller H 2018 *Science* **360** 191
- [3] Rosi G, Sorrentino F, Cacciapuoti L, Prevedelli M, Tino G 2014 *Nature* **510** 518
- [4] Dutta I, Savoie D, Fang B, Venon B, Alzar C L G, Geiger R, Landragin A 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 183003
- [5] Gustavson T L, Bouyer P, Kasevich M A 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2046
- [6] McGuirk J M, Foster G T, Fixler J B, Snadden M J, Kasevich M A 2002 *Phys. Rev. A* **65** 033608
- [7] Sorrentino F, Bodart Q, Cacciapuoti L, Lien Y H, Prevedelli M, Rosi G, Salvi L, Tino G M 2014 *Phys. Rev. A* **89** 023607
- [8] Peters A, Chung K Y, Chu S 2001 *Metrologia* **38** 25
- [9] Peters A, Chung K Y, Chu S 1999 *Nature* **400** 849
- [10] Hu Z K, Sun B L, Duan X C, Zhou M K, Chen L L, Zhan S, Zhang Q Z, Luo J 2013 *Phys. Rev. A* **88** 043610
- [11] Freier C, Hauth M, Schkolnik V, Leykauf B, Schilling M, Wziontek H, Scherneck H G, Müller J, Peters A 2016 *J. Phys. Conf. Ser.* **723** 012050
- [12] Wu X J, Zi F, Dudley J, Bilotta R J, Canoza P, Müller H 2017 *Optica* **4** 1545
- [13] Wu B, Wang Z Y, Cheng B, Wang Q Y, Xu A P, Lin Q 2014 *Metrologia* **51** 452
- [14] Zhang X W, Zhong J Q, Tang B, Chen X, Zhu L, Huang P W, Wang J, Zhan M S 2018 *Appl. Opt.* **57** 6545
- [15] Gillot P, Francis O, Landragin A, Dos Santos F P, Merlet S 2014 *Metrologia* **51** L15
- [16] Huang P W, Tang B, Chen X, Zhong J Q, Xiong Z Y, Zhou L, Wang J, Zhan M S 2019 *Metrologia* **56** 045012
- [17] Fu Z J, Wang Q Y, Wang Z Y, Wu B, Cheng B, Lin Q 2019 *Chin. Opt. Lett.* **17** 011204
- [18] Wang S K, Zhao Y, Zhuang W, Li T C, Wu S Q, Feng J Y, Li C J 2018 *Metrologia* **55** 360
- [19] Menoret V, Vermeulen P, Le Moigne N, Bonvalot S, Bouyer P, Landragin A, Desruelle B 2018 *Sci. Rep.* **8** 12300
- [20] Bidet Y, Zahzam N, Blanchard C, Bonnin A, Cadoret M, Bresson A, Rouxel D, Lequentrec-Lalancette M F 2018 *Nat. Commun.* **9** 627
- [21] Fu Z J, Wu B, Cheng B, Zhou Y, Weng K X, Zhu D, Wang Z Y, Lin Q 2019 *Metrologia* **56** 025001
- [22] Wu X J, Pagel Z, Malek B S, Nguyen T H, Zi F, Scheirer D S, Müller H 2019 *Sci. Adv.* **5** eaax0800
- [23] Mahadeswaraswamy C 2009 *Ph. D. Dissertation* (California: Stanford University)
- [24] Geiger R, Ménoret V, Stern G, Zahzam N, Cheinet P, Battelier B, Villing A, Moron F, Lours M, Bidet Y, Bresson A, Landragin A, Bouyer P 2011 *Nat. Commun.* **2** 474
- [25] Barrett B, Antoni-Micollier L, Chichet L, Battelier B, Lévêque T, Landragin A, Bouyer P 2016 *Nat. Commun.* **7** 13786
- [26] Becker D, Lachmann M D, Seidel S T, et al. 2018 *Nature* **562** 391
- [27] Elliott E R, Krutzik M C, Williams J R, Thompson R J, Aveline D C 2018 *NPJ Microgravity* **4** 7
- [28] Wu B, Zhu D, Cheng B, Wu L M, Wang K N, Wang Z Y, Shu Q, Li R, Wang H L, Wang X L, Lin Q 2019 *Opt. Express* **27** 11252
- [29] Wu B, Cheng B, Fu Z J, Zhu D, Zhou Y, Weng K X, Wang X L, Lin Q 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 190302 (in Chinese) [吴彬, 程冰, 付志杰, 朱栋, 周寅, 翁堪兴, 王肖隆, 林强 2018 *物理学报* **67** 190302]
- [30] Le Gouet J, Mehlstaubler T E, Kim J, Merlet S, Clairon A, Landragin A, Dos Santos F P 2008 *Appl. Phys. B* **92** 133

# Static measurement of absolute gravity in truck based on atomic gravimeter<sup>\*</sup>

Wu Bin    Zhou Yin    Cheng Bing<sup>†</sup>    Zhu Dong    Wang Kai-Nan    Zhu Xin-Xin  
Chen Pei-Jun    Weng Kan-Xing    Yang Qiu-Hai    Lin Jia-Hong  
Zhang Kai-Jun    Wang He-Lin    Lin Qiang<sup>‡</sup>

(*Institute of Optics, College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China*)

( Received 20 November 2019; revised manuscript received 18 December 2019 )

## Abstract

Currently, most of the experimental apparatuses of atomic gravimeters are complex in structure, large in size, and poor in environmental adaptability, so that they cannot be used to implement the absolute gravity measurement. Thus, the application areas of atomic gravimeter are greatly limited. In this paper, we integrate a system of absolute gravity measurement on a truck based on a compact homemade atomic gravimeter. This atomic gravimeter has a small size, light weight, low power consumption, and its accuracy is estimated as 10  $\mu\text{Gal}$  in the case of laboratory environment. This system consists of atomic gravimeter for gravity measurement, passive isolation platform for vibration suppression, posture platform for tilt adjustment, differential GPS for altitude measurement, UPS for power supply, air-conditioned truck for temperature control and transportation. At first, we estimate the performance of environmental adaptability for this measurement system on the truck, and it is found that this system can still work even at a high field temperature of 40  $^{\circ}\text{C}$  and a big tilt angle of  $8^{\circ}$  for the road. Besides, the experimental procedures of absolute gravity measurement and the methods of processing measured data are introduced. The Coriolis effect is analyzed and the dependence of measured gravity on the orientation of the truck has been measured. Finally, the repeated line measurements are performed on a flat field road. The accuracy of self-coincidence for absolute gravity measurement is evaluated to be 30  $\mu\text{Gal}$  and the difference in measured gravity among different locations is about 3080  $\mu\text{Gal}$ . Besides, we obtain the vertical gravity gradient of the earth by measuring the absolute gravity values at different altitude sites on a slope road, and the value is estimated to be  $-231(36)$   $\mu\text{Gal}/\text{m}$ . The presented results can provide the basic reference for the field absolute gravity survey.

**Keywords:** cold atom, atom interferometer, atomic gravimeter, absolute gravity measurement

**PACS:** 03.75.Dg, 67.85.-d, 37.25.+k, 91.10.-v

**DOI:** 10.7498/aps.69.20191765

---

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2016YFF0200206, 2017YFC0601602), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61727821, 61475139, 61478069, 11604296, 11404286, 51905482), and the Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources Program of China (Grant No. DD20189831).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [bingcheng@zjut.edu.cn](mailto:bingcheng@zjut.edu.cn)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [qlin@zjut.edu.cn](mailto:qlin@zjut.edu.cn)