物理学报 Acta Physica Sinica

Chinese Physical Society

Institute of Physics, CAS

船载系泊状态下基于原子重力仪的绝对重力测量

程冰 周寅 陈佩军 张凯军 朱栋 王凯楠 翁堪兴 王河林 彭树萍 王肖隆 吴彬 林强

Absolute gravity measurement based on atomic gravimeter under mooring state of a ship

Cheng Bing Zhou Yin Chen Pei-Jun Zhang Kai-Jun Zhu Dong Wang Kai-Nan Weng Kan-Xing Wang He-Lin Peng Shu-Ping Wang Xiao-Long Wu Bin Lin Qiang

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 70, 040304 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201522

在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.70.20201522

当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于原子重力仪的车载静态绝对重力测量

Static measurement of absolute gravity in truck based on atomic gravimeter

物理学报. 2020, 69(6): 060302 https://doi.org/10.7498/aps.69.20191765

大倾斜角度下基于冷原子重力仪的绝对重力测量

Measurement of absolute gravity based on cold atom gravimeter at large tilt angle

物理学报. 2018, 67(19): 190302 https://doi.org/10.7498/aps.67.20181121

拉曼激光边带效应对冷原子重力仪测量精度的影响

Influence of Raman laser sidebands effect on the measurement accuracy of cold atom gravimeter

物理学报. 2019, 68(19): 194205 https://doi.org/10.7498/aps.68.20190581

可移动三维主动减振系统及其在原子干涉重力仪上的应用

A mobile three-dimensional active vibration isolator and its application to cold atom interferometry

物理学报. 2019, 68(18): 183301 https://doi.org/10.7498/aps.68.20190443

基于原子干涉仪的微观粒子弱等效原理检验

Test of weak equivalence principle of microscopic particles based on atom interferometers

物理学报. 2018, 67(16): 160402 https://doi.org/10.7498/aps.67.20180621

利用Kapitza-Dirac脉冲操控简谐势阱中冷原子测量重力加速度

Measurement of gravity acceleration by cold atoms in a harmonic trap using Kapitza-Dirac pulses

物理学报. 2019, 68(20): 203701 https://doi.org/10.7498/aps.68.20190749

船载系泊状态下基于原子重力仪的绝对重力测量*

程冰 周寅 陈佩军 张凯军 朱栋 王凯楠 翁堪兴
王河林 彭树萍 王肖隆 吴彬† 林强‡

(浙江工业大学理学院，浙江省量子精密测量重点实验室，杭州 310023)

(2020 年 9 月 13 日收到; 2020 年 10 月 23 日收到修改稿)

重力场是反映地球质量分布及变化的重要参数, 动态重力测量在地质调查、地球物理、资源勘探等领域有着重要应用. 目前动态重力测量均基于相对测量原理, 动态相对重力仪存在零点漂移问题, 影响其测量性能. 动态绝对重力仪可以为相对重力仪提供同步同址校准, 解决其长漂问题, 因此备受关注. 本文基于原子重力仪和惯性稳定平台, 搭建了一套船载绝对重力动态测量系统, 并在船载系泊状态下开展了绝对重力动态测量实验. 经评估, 船载系泊环境下的重力测量灵敏度为 16.6 mGal/$\mathrm{Hz}^{-1/2}$, 1000 s 积分时间内重力测量的分辨率可达 0.7 mGal. 通过两周的绝对重力测量, 评估了系统的稳定性. 为了评估绝对重力的动态测量精度, 将船上测量点与码头高精度绝对重力基准点的绝对重力值进行了比较, 两点之间的绝对重力值差及其不确定度评估结果为 (-0.072 ± 0.134) mGal. 本文结果为海洋相对重力仪的同时同船校准提供了一种新方案.

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.70.20201522

1 引 言

重力场的精密测量对基础地质勘察、矿产资源勘探、地球物理研究、地震火山监测、大地水准面绘制、惯性匹配导航等具有重要的意义. 静态重力测量虽然精度很高 (微伽 (10^{-8} m/s^2) 量级), 但不适合在野外进行大面积测量. 动态重力测量是在移动载体 (轮船、飞机等) 上开展重力测量, 可适用于野外复杂地形情况下的重力场测量, 效率较高、测量速度较快, 精度一般在毫伽 (10^{-5} m/s^2) 量级, 譬如海洋及航空重力测量是区域重力场调查的常见方式. 然而, 动态重力测量目前均为相对重力测量, 测量的是运动载体相对固定绝对重力基准点的重力值变化. 相对重力测量过程中的仪器零点漂移问题影响最终的测量性能, 将绝对重力仪应用于移动载体进行动态测量, 可以为动态相对重力仪提供同址校准, 为解决仪器长期漂移问题提供了一种新思路.

目前高精度绝对重力测量主要有两种方式: 激光干涉和原子干涉. 激光干涉式绝对重力仪一般适用于定点静态测量. 虽然研究人员曾采用改进方案进行了初步的动态测量可行性验证试验[1], 但因自由下落载体 (角锥反射镜) 受到动态环境干扰影响较大, 最终的测量结果不太理想, 后续也鲜有文章报道. 原子干涉式绝对重力仪[2](原子重力仪) 是近三十年来快速发展起来的一种新型重力测量设备, 它利用激光冷却后的冷原子团作为落体, 并基于物质波干涉测量重力加速度. 早期, 原子重力仪由于体积大、质量重、功耗高、可搬运性差等因素, 只能

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFC0601602, 2016YFF0200206)、国家自然科学基金 (批准号: 51905482, 61727821, 61875175, 11704334)、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.

† 通信作者. E-mail: wubin@zjut.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: qlin@zjut.edu.cn

© 2021 中国物理学会 Chinese Physical Society

在实验室静态环境下工作[3]. 近年来, 随着技术的快速发展, 原子重力仪的小型化进展较快[4–10], 其技术成熟度得到大幅提高; 原子重力仪逐渐参与到国际顶尖的绝对重力比对活动中来[11–14], 其静态测量性能可与现有最好的光学干涉式绝对重力仪相媲美[11,14,15], 且相关的野外静态测量实验正在逐渐被报道[16–20]. 在动态实验方面, 研究人员在慢速卡车[21]、移动电梯[22]、0-g 飞机[23,24]、超音速火箭[25]以及空间站[26]上基于原子干涉装置进行了初步的实验, 然而这些实验数据相对比较粗糙, 并未获得精确的重力场数据. 近两年, 基于同一套原子重力仪, 法国的 Bidel 研究小组[16,17]在海洋船载及航空机载环境下分别开展了绝对重力测量实验研究; 最终评估的测量精度分别约为 1.0 mGal[16] 和 1.7 mGal[17]. 该精度与现有海洋及航空相对重力仪的测量精度相当, 这些实验结果为开展动态高精度绝对重力测量提供了新思路和新方案.

本文首先介绍了基于原子重力仪开展动态绝对重力测量的基本原理. 在此基础上, 报道了本研究小组新搭建的一套船载绝对重力测量系统, 并对其主要系统组成进行了阐述. 进一步对野外船载的测量条件、测试环境等进行了介绍, 并在野外船载系泊状态下开展了绝对重力动态测量实验, 分析了动态绝对重力的测量结果. 经评估, 重力测量的灵敏度可达 16.6 mGal/Hz$^{-1/2}$; 通过与码头高精度绝对重力基准点进行比较, 得到的最终测量结果为 (–0.072 ± 0.134) mGal. 本文结果为开展船载动态绝对重力测量及同船重力校准提供了一种新的方案.

2 动态绝对重力测量系统原理

如图 1 所示, 动态绝对重力测量系统主要由原子重力仪、惯性稳定平台和集装箱组成. 其中, 原子重力仪刚性固定在惯性稳定平台上部, 惯性稳定平台放置于集装箱内部. 原子重力仪是整个测量系统的核心, 主要用于测量垂向的重力加速度; 惯性稳定平台用于实现原子重力仪的姿态控制, 使其在船载系泊动态环境下仍处于垂线方向; 集装箱主要用于温湿度控制, 为整个外场实验提供一个良好的测量环境.

动态绝对重力测量的原理是利用原子重力仪测量垂向的总加速度, 并基于高精度加速度计实时测量载体的干扰加速度, 组合成一套混合加速度测量系统. 动态环境下, 基于高精度加速度计的信号和原子干涉仪的权重函数分离振动对原子重力仪的影响, 最终实现干扰加速度的分离和重力加速度信息的获取.

原子重力仪的测量原理很多文章中都有阐述[3,27], 下面结合本文实验进行简要描述. 原子重力仪的基本原理是利用激光冷却技术制备一团冷原子, 把它作为落体, 利用原子物质波干涉的方法精密测量落体的垂向加速度. 如图 1 所示, 首先基于二维磁光阱 (2D-MOT) 制备一团扁平的冷原子, 通过水平的推送光将其快速输送至三维磁光阱 (3D-MOT). 随后, 关断光场和磁场, 让原子在重力场中自由下落, 并利用微波和拉曼选态脉冲实现量子态的制备. 进一步, 通过作用三束多普勒敏感的

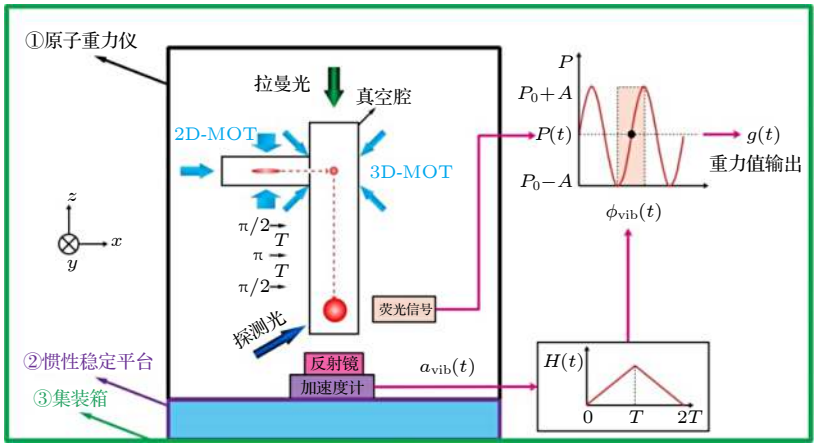

图 1 船载系泊状态下的绝对重力测量系统原理图

Fig. 1. The schematic diagram of absolute gravity measurement system under mooring state of a ship.

拉曼激光脉冲 ($\pi/2-\pi-\pi/2$), 实现原子物质波的分束、偏转以及合束, 形成一个物质波干涉仪. 最后, 基于时间飞行法 (TOF) 探测原子的荧光信号, 实现归一化探测, 在原子干涉仪的输出端, 原子的布居数 P 可以表示为

$$P = P_0 \pm A\cos\phi, \tag{1}$$

其中 P_0, A, ϕ 分别是原子干涉条纹的直流量、对比度和相位. 原子干涉条纹的相位 $\varphi = (\boldsymbol{k}_{\rm eff}\cdot\boldsymbol{g}-\alpha)T^2+\varphi_{\rm Vib}$, 其中 $\boldsymbol{k}_{\rm eff}$ 是拉曼光束的有效波矢, 其大小约为 $4\pi/\lambda$, λ 是激光波长 (约为 780 nm); $\boldsymbol{g}$ 是重力加速度; α 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; $\phi_{\rm Vib}$ 是拉曼反射镜振动引起的干涉条纹相移, 可写为

$$\phi_{\rm Vib} = k_{\rm eff}\int_{-T}^{T} H(t)\cdot a_{\rm Vib}(t){\rm d}t, \tag{2}$$

其中 $H(t)$ 为原子干涉仪的灵敏度函数, $a_{\rm Vib}(t)$ 为拉曼反射镜的实时振动加速度.

实验中, 通过扫描 α 得到原子布居数信号; 通过高精度加速计采集拉曼反射镜的振动加速度 $a_{\rm Vib}(t)$, 通过 (2) 式得到 $\phi_{\rm Vib}$, 最终还原原子干涉条纹; 通过拟合得到原子干涉条纹相位, 从而精确提取重力加速度信息.

3 实验系统及实验过程

实验系统的示意图如图 2 所示. 整个测量系统主要包括三个部分: 原子重力仪、惯性稳定平台、辅助单元, 系统整体集成在一个 20 英尺的集装箱内 (外部尺寸为 5.89 m × 2.35 m × 2.39 m). 下面分别对系统的各个部分进行简要介绍.

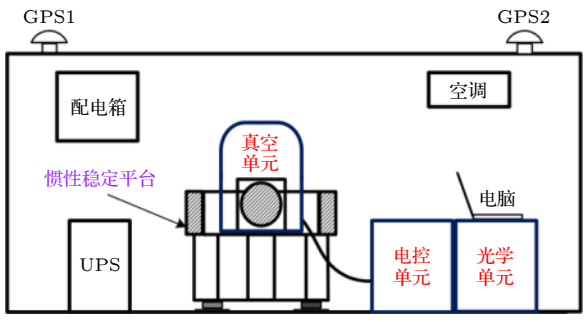

图 2 实验系统的示意图

Fig. 2. The schematic diagram of the experimental system.

原子重力仪是测量的核心, 本文采用课题组较为成熟的小型化原子重力仪, 先前文章已有详细介绍 [10,19,28], 在此只对原子重力仪的改进部分做简要介绍. 为了适应野外码头的恶劣温度环境, 改进了原子重力仪的光学单位, 激光器和小型化光路都增加了温控, 使其处于恒温状态. 为了进行动态测量, 将拉曼光反射镜固定在高精度加速度计上部, 并将整个装配体固定于惯性稳定平台内框架的底部, 真空单元固定在内框架的上部. 动态测量环境下, 惯性稳定平台可以维持真空腔和拉曼反射镜处于垂线方向. 为了减小干扰力矩, 实现了电控单元与惯性稳定平台两部分的总线整合.

惯性稳定平台主要用于隔离外界的角运动干扰, 实现地理坐标系的跟踪与定位, 保持原子重力仪的真空单元处于垂线方向. 辅助单元主要用于集装箱内部的温湿度控制、船体姿态参数的测量、整个系统的供电. 为了适应码头的恶劣环境, 基于空调控制集装箱内部的温度和湿度, 在外场测试的两周内, 集装箱内的温度一般维持在 25 ℃ 以下 (外界温度变化范围约 30 ℃—45 ℃), 湿度控制在 70% 以内 (外界湿度变化范围约 85%—90%). 此外, 在集装箱的顶部集成了一套差分 GPS(测高的精度在厘米级), 用于测量船体的高度信息. 最后, 基于不间断电源 (UPS) 为空调、原子重力仪、惯性稳定平台等设备提供供电, 以维持整个测量系统正常运行.

船载系泊状态下的实验过程如下: 首先启动惯性稳定平台, 20 min 预热后进入工作状态, 原子重力仪的真空单元此时处于垂线状态. 其次, 调试原子重力仪使其处于工作模式, 通过测量不同 T 下的原子干涉条纹, 粗略得到绝对重力值. 通过长扫实验可以精确评估绝对重力值, 基于差分 GPS 和气压计实时记录船体的高度以及外界的气压数据, 以便于后期进行系统效应修正.

4 船载系泊状态下的绝对重力测量结果及分析

4.1 测试环境

本次实验在浙江省舟山市某码头进行, 测试船停靠码头, 处于系泊状态. 图 3 红色虚线框内为测试用集装箱, 集装箱内为船载冷原子绝对重力测量系统. 测试码头现有一个绝对重力基准点, 离船上测试位置约 50 m, 可用于验证测量到的绝对重力值. 因实验时间正值夏季, 码头测量环境较为恶劣,

集装箱表面温度长期在 45 ℃ 以上, 测量期间常有 7—8 级大风, 时常有强降雨, 码头其他货物装卸活动也会对高精度重力测量产生影响.

由于船体始终处于运动状态, 船体高度变化曲线如图 4(a) 所示. 实验期间船体高度日均变化约为 2.5 m. 置于拉曼反射镜下的高精度加速度计测量了船体的加速度噪声功率谱, 如图 4(b) 所示, 低频 0.2 Hz 有一个峰, 幅度超过 10^{-2} m/s^2 (1 Gal).

图 3 实验测试现场图

Fig. 3. The photo of the experimental test.

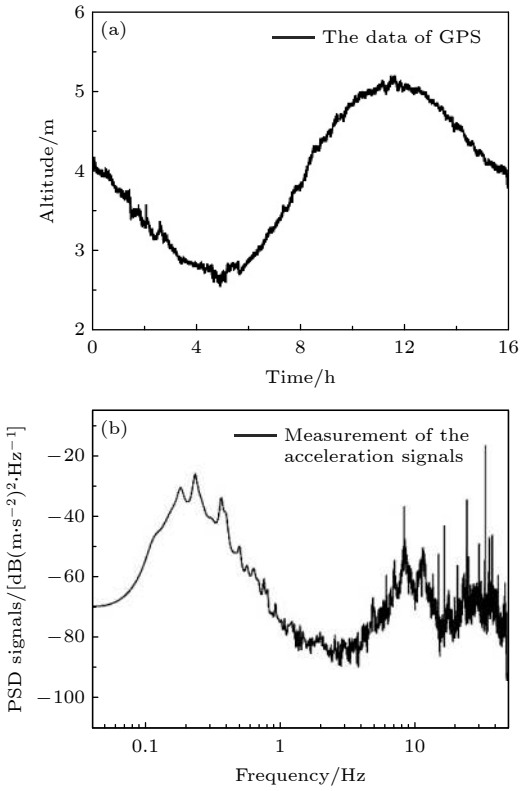

图 4 船载测量环境 (a) 船体高度变化; (b) 船体加速度噪声功率谱

Fig. 4. The measurement environment of the ship: (a) The variation of the altitude of the ship; (b) the noise power spectrum density of the acceleration of the ship.

4.2 船载系泊状态下的绝对重力测量结果

在原子重力仪调试完成后, 开展绝对重力测量实验. 首先, 运行原子重力仪采集原子布居数信号 ($T = 10$ ms); 同时, 基于拉曼反射镜下的高精度加速度计记录干扰加速度信号, 并同步传给数据采集卡; 结合原子干涉仪的权重函数, 通过 (2) 式积分得到干扰加速度对原子干涉条纹的相位贡献. 利用该相位可以还原出原子干涉条纹, 如图 5 所示, 蓝色空心四边形是实测的原始原子布居数信号, 黑色空心三角形是振动补偿修正后的数据, 红线是相应的拟合曲线, 通过拟合干涉条纹的相位最终提取重力加速度的信息.

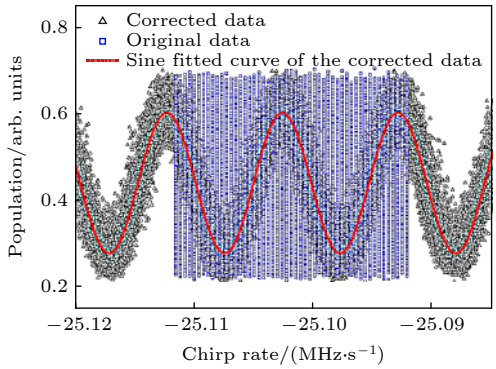

图 5 原子干涉条纹信号 ($T = 10$ ms). 蓝色空心四边形: 原始原子布居数信号; 黑色空心三角形: 振动修正后信号; 红线: 拟合曲线

Fig. 5. The signals of atomic interference fringes ($T = 10$ ms). Blue dots: The original signals of atomic population; Black dots: The signals after vibration correction; Red line: the fitted curve.

在恢复原子干涉条纹后, 进一步开展系泊状态下的短期连续重力测量实验. 图 6 所示为连续 5 个多小时的测量数据, 灰点为实测原始数据, 红线为 8 min 移动平均后的数据, 测量数据已经修正潮汐和船体高度变化引起的时变重力值. 由实验数据可知, 重力值变化的峰峰值约为 80 mGal, 测量值无明显漂移. 计算这些数据点的艾伦偏差 (如图 7 所示), 可评估重力测量的灵敏度, 约为 16.6 mGal/Hz$^{1/2}$, 1000 s 积分时间内重力测量的分辨率可达 0.7 mGal.

在重力测量的灵敏度性能评估之后, 开展了绝对重力测量实验, 并对系统的测量不确定度进行了分析和评估. 与先前文章类似 [28], 首先通过倾斜调制实验找到垂线方向, 再通过扫描不同 T 下的原子干涉条纹提取暗条纹位置, 最终获得绝对重力数据. 经过近两周的测量, 数据如图 8 所示, 绝对重

力值变化的峰峰值约为 0.5 mGal, 所有数据统计的标准偏差约为 0.130 mGal (A 类不确定度 $\Delta_{\rm A}$). B 类不确定度主要包括原子重力仪系统修正的不确定度和外界环境参数修正的不确定度. 原子重力仪系统修正主要包括双光子光移、科里奥利力、拉曼光波前等, 本文中使用的原子重力仪, 其系统效应修正的不确定度为 0.010 mGal, 详细的评估参见课题组先前已发表文章[13,19,20]; 外界环境参数修正包括固体潮、极地运动、气压等, 固体潮采用理论模型进行修正, 不确定度一般小于 0.005 mGal. 极地运动利用极地参数进行计算, 不确定度小于 0.002 mGal. 气压是根据实时的实测数据进行修正, 不确定度小于 0.002 mGal. 为了与码头绝对重力基准点进行比较, 还需将船上测量点的绝对重力值归算到同一测量高度, 鉴于差分 GPS 的高度测量分辨率约为 5 cm, 基于自由空间垂向重力场梯度的理论值 0.3086 mGal/m, 评估的高度修正的不确定度为 0.015 mGal. 最终合成的 B 类不确定度 $\Delta_{\rm B}$ 约为 0.019 mGal. 因此, 船上测量点动态重力测量的合成不确定度 $\Delta_{\rm ship}=\sqrt{\Delta_{\rm A}^2+\Delta_{\rm B}^2}$, 约为 0.131 mGal.

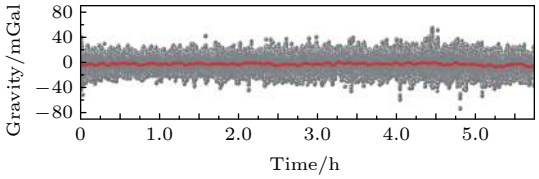

图 6 系泊状态下的连续重力变化数据. 灰点: 原始重力数据; 红线: 移动平均后的数据

Fig. 6. The continuous changes of gravity under mooring state of a ship. Grey dots: The original data of measured gravity; Red line: The data after the dealing of moving average.

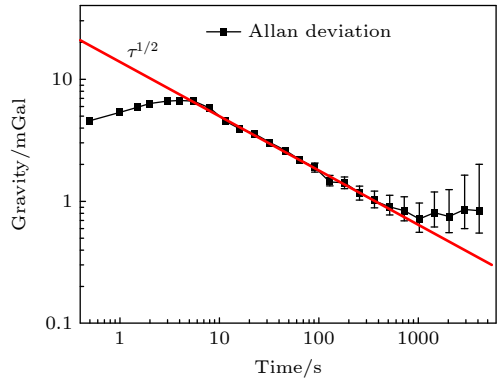

图 7 船载系泊状态下的重力测量灵敏度评估

Fig. 7. The sensitivity evaluation of measured gravity data when the ship is moored.

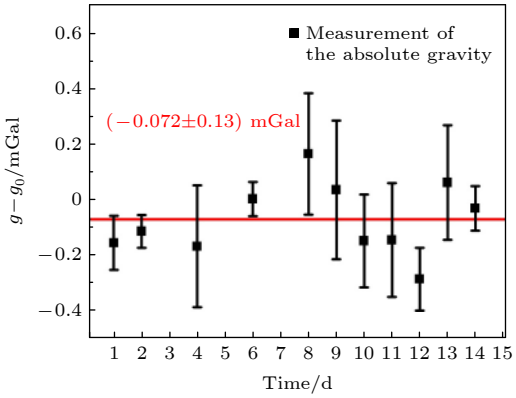

图 8 绝对重力测量值的长期稳定性评估

Fig. 8. The estimation of long-term stability for the measured absolute gravity values.

码头绝对重力基准点的测量不确定度 $\Delta_{\rm ref}$ 为 0.030 mGal, 将船上测量点的绝对重力值归算到码头绝对重力基准点的高度, 可以进行粗略的比较. 考虑到码头绝对重力基准点与船上测量点水平相距 50 m 左右, 整个码头离岸边约 150 m, 周围较为空旷, 因此两点的垂向重力场梯度值变化不大, 因此本文忽略由垂向重力场梯度异常引入的不确定度修正.

综合以上分析, 两个测点的最终合成不确定度 $\Delta=\sqrt{\Delta_{\rm ship}^2+\Delta_{\rm ref}^2}$, 约为 0.134 mGal. 鉴于船上测量点归算的绝对重力值比码头绝对重力基准点的值小 0.072 mGal, 最终的比对测量结果可以写为 (–0.072 ± 0.134) mGal.

本文实验初步验证了船载系泊状态下, 基于原子干涉技术开展动态绝对重力测量的方案具有可行性. 该实验系统未来有望为海洋相对重力仪提供一种新的校准方法, 在码头或者停船状态实现同时同船高精度校准, 为抑制相对重力仪的零点漂移、开展远洋长航时重力场测绘提供了一种校准方案.

5 结 语

本文搭建了一套船载绝对重力测量系统, 由原子重力仪、惯性稳定平台、差分 GPS 测高仪、不间断电源供电系统及温控单元等组成. 在野外船载系泊状态下, 开展了绝对重力动态测量实验研究. 评估了测量船的振动噪声水平, 发现振动噪声主要集中在低频 0.2 Hz 附近, 幅度超过 1 Gal. 在码头恶劣环境下, 评估了集装箱内的温湿度控制性能, 温度和湿度通常可控制在 25 ℃ 和 70%. 随后, 开展

了船载系泊状态下的短期重力连续测量, 5 个多小时测量时间内, 重力测量峰峰值变化为 80 mGal, 得到的重力值数据并无明显漂移. 经计算, 重力测量的灵敏度为 16.6 mGal/Hz$^{-1/2}$, 1000 s 积分内重力测量的分辨率可达 0.7 mGal. 最后, 通过与码头已知的高精度绝对重力基准点进行比较, 发现两者的绝对重力值相符合, 约为 (–0.072 ± 0.134) mGal. 通过两周的绝对重力测量实验, 评估了仪器的绝对重力测量性能及其稳定性, 绝对重力值的峰峰值变化约为 0.5 mGal, 测量不确定度为 0.131 mGal. 本文研究结果为海洋相对重力仪同船同址校准提供了一种新方案.

本项研究得到了中国自然资源航空物探遥感中心、自然资源部第二海洋研究所和杭州微伽科技有限公司的大力支持, 在此一并致谢!

参考文献

[1] Baumann H, Klingele E E, Marson I 2012 *Geophys. Prospect.* **60** 361

[2] Kasevich M, Chu S 1992 *Appl. Phys. B* **54** 321

[3] Peters A, Chung K Y, Chu S 2001 *Metrologia* **38** 25

[4] Freier C, Hauth M, Schkolnik V, Leykauf B, Schilling M, Wziontek H, Scherneck H G, Muller J, Peters A 2016 *J. Phys. Conf. Ser.* **723** 012050

[5] Wu X J, Zi F, Dudley J, Bilotta R J, Canoza P, Muller H 2017 *Optica* **4** 1545

[6] Wu B, Wang Z Y, Cheng B, Wang Q Y, Xu A P, Lin Q 2014 *Metrologia* **51** 452

[7] 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

[8] Luo Q, Zhang H, Zhang K, Duan X C, Hu Z K, Chen L L, Zhou M K 2019 *Rev. Sci. Instrum.* **90** 043104

[9] Menoret V, Vermeulen P, Le Moigne N, Bonvalot S, Bouyer P, Landragin A, Desruelle B 2018 *Sci. Rep.* **8** 12300

[10] 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

[11] Gillot P, Francis O, Landragin A, Dos Santos F P, Merlet S 2014 *Metrologia* **51** L15

[12] Huang P W, Tang B, Chen X, Zhong J Q, Xiong Z Y, Zhou L, Wang J, Zhan M S 2019 *Metrologia* **56** 045012

[13] Fu Z J, Wang Q Y, Wang Z Y, Wu B, Cheng B, Lin Q 2019 *Chin. Opt. Lett.* **17** 011204

[14] Wang S K, Zhao Y, Zhuang W, Li T C, Wu S Q, Feng J Y, Li C J 2018 *Metrologia* **55** 360

[15] 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

[16] Bidel Y, Zahzam N, Blanchard C, Bonnin A, Cadoret M, Bresson A, Rouxel D, Lequentrec-Lalancette M F 2018 *Nat. Commun.* **9** 9

[17] Bidel Y, Zahzam N, Bresson A, Blanchard C, Cadoret M, Olesen A V, Forsberg R 2020 *J. Geodesy* **94** 2

[18] Wu X J, Pagel Z, Malek B S, Nguyen T H, Zi F, Scheirer D S, Muller H 2019 *Sci. Adv.* **5** eaax0800

[19] Wu B, Zhou Y, Cheng B, Zhu D, Wang K N, Zhu X X, Chen P J, Weng K X, Yang Q H, Lin J H, Zhang K J, Wang H L, Lin Q 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 060302 (in Chinese) [吴彬, 周寅, 程冰, 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 2020 物理学报 **69** 060302]

[20] Fu Z J, Wu B, Cheng B, Zhou Y, Weng K X, Zhu D, Wang Z Y, Lin Q 2019 *Metrologia* **56** 025001

[21] Mahadeswaraswamy C 2009 *Ph. D. Dissertation* (California: Stanford University)

[22] Bidel Y, Carraz O, Charriere R, Cadoret M, Zahzam N, Bresson A 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 144107

[23] Geiger R, Ménoret V, Stern G, Zahzam N, Cheinet P, Battelier B, Villing A, Moron F, Lours M, Bidel Y, Bresson A, Landragin A, Bouyer P 2011 *Nat. Commun.* **2** 474

[24] Barrett B, Antoni-Micollier L, Chichet L, Battelier B, Lévèque T, Landragin A, Bouyer P 2016 *Nat. Commun.* **7** 1

[25] Becker D, Lachmann M D, Seidel S T, Ahlers H, Dinkelaker A N, Grosse J, Hellmig O, Muentinga H, Schkolnik V, Wendrich T, Wenzlawski A, Weps B, Corgier R, Franz T, Gaaloul N, Herr W, Luedtke D, Popp M, Amri S, Duncker H, Erbe M, Kohfeldt A, Kubelka-Lange A, Braxmaier C, Charron E, Ertmer W, Krutzik M, Laemmerzahl C, Peters A, Schleich W P, Sengstock K, Walser R, Wicht A, Windpassinger P, Rasel E M 2018 *Nature* **562** 391

[26] Elliott E R, Krutzik M C, Williams J R, Thompson R J, Aveline D C 2018 *NPJ Microgravity* **4** 1

[27] Le Gouet J, Mehlstaubler T E, Kim J, Merlet S, Clairon A, Landragin A, Dos Santos F P 2008 *Appl. Phys. B* **92** 133

[28] 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]

Absolute gravity measurement based on atomic gravimeter under mooring state of a ship*

Cheng Bing Zhou Yin Chen Pei-Jun Zhang Kai-Jun Zhu Dong
Wang Kai-Nan Weng Kan-Xing Wang He-Lin Peng Shu-Ping
Wang Xiao-Long Wu Bin† Lin Qiang‡

(*Zhejiang Provincial Key Laboratory of Quantum Precision Measurement, College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou* 310023, *China*)

(Received 13 September 2020; revised manuscript received 23 October 2020)

Abstract

The gravity field is one of the basic physical fields of the Earth. Dynamic measurements could improve the efficiency of gravity surveying and mapping, and have very important applications in the fields of geological survey, geophysics, resource exploration, inertial navigation and so on. Currently, dynamic gravity measurements are mostly based on relative measurements. The dynamic relative gravimeters have the problem of zero drift, which affects the measurement performance. Dynamic absolute gravimeters can provide synchronous and co-site calibration for relative gravimeters and solve the problem of long drift. Therefore dynamic absolute gravimeters have attracted much attention. Based on a homemade atomic gravimeter and an inertial stable platform, a system of absolute gravity dynamic measurement has been built on a ship. The dynamic measurement experiments of absolute gravity under the state of ship-borne mooring have been carried out. It is found that the frequency of vibration noises of this ship is around 0.2 Hz, and the amplitude is about 1 Gal. In the case of harsh environment, the temperature and humidity of the used container have been controlled to be 25 ℃ and 70% via the air conditioning. Then, a continuous gravity measurement of 5 hour has been taken, and the peak to peak value of 80 mGal has been achieved. The values of gravity have no drifts at all during the measurements. Besides, the sensitivity of gravity measurement has been evaluated to be 16.6 mGal/$\mathrm{Hz}^{-1/2}$ under the environment of ship-borne mooring. A resolution of 0.7 mGal could be reached with an integration time of 1000 s. The stability of this system has been estimated after the measurement of absolute gravity for two weeks, and the change of absolute gravity values is about 0.5 mGal. Finally, in order to evaluate the accuracy of the dynamic measurement of absolute gravity, the measured average value of absolute gravity at ship-borne has been compared with the value of the high-precision absolute gravity reference point of the pier, and the results are estimated to be (-0.072 ± 0.134) mGal. The results of this paper could provide a new solution for the simultaneous and co-site calibration of the ocean relative gravimeter on the same ship.

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.70.20201522

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant Nos. 2017YFC0601602, 2016YFF0200206), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51905482, 61727821, 61875175, 11704334), and the China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources Program (Grant No. DD20189831).

† Corresponding author. E-mail: wubin@zjut.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: qlin@zjut.edu.cn