

文章编号 1004-924X(2015)10-2740-07

基于双干涉仪的自由落体绝对重力测量

冯金扬*, 吴书清, 李春剑, 粟多武, 于梅
(中国计量科学研究院, 北京 100029)

摘要: 为了避免用光学干涉法测量自由落体绝对重力过程中落体旋转对测量结果准确度的影响, 提出了基于双干涉仪的绝对重力测量方法。介绍了落体旋转影响绝对重力测量结果的机理, 提出了对同时测量的两组干涉仪数据进行融合处理的方法。根据预先设定的重力值, 双干涉仪中落体上、下反射棱镜光心与质心垂直方向的初始高度差, 以及随机生成的每次测量对应的角速度序列和振动引起的上、下干涉仪重力测量偏差序列, 进行了仿真计算。结果表明: 光心-质心的距离为 2.5 mm 的双干涉仪通过数据融合处理得到的重力测量结果的偏差约为 0.5 μGal , 标准偏差约为 0.3 μGal , 与现有调校落体光心-质心的方法得到的结果相当。选择合适的上、下棱镜光心-质心距离可以更好地消减落体旋转对测量结果的影响, 将其分别设计为 ± 3 mm 时, 用双干涉法数据融合得到的重力值偏差小于 1 μGal , 满足相关领域对精密重力测量的需求。

关键词: 绝对重力测量; 精密测量; 双干涉仪; 落体旋转; 数据融合

中图分类号: TH762; TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152310.2740

Free-fall absolute gravity measurement based on double interferometers

FENG Jin-yang*, WU Shu-qing, LI Chun-jian, SU Duo-wu, YU Mei

(National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

* Corresponding author, E-mail: fengjy@nim.ac.cn

Abstract: To avoid the effect of falling body rotation on measurement accuracy for free-fall absolute gravity measurement based on optical interferometry, a novel method by using two interferometers was proposed. Firstly, the effect mechanism of falling body rotation on absolute gravity measurements was introduced and a data fusion method using data derived from an absolute gravimeter with two simultaneously measured interferometers was presented. Then simulation experiments were carried out according to a preset gravity value, the initial perpendicular height difference between the optical center (OC) and the center of mass (COM) in the upper and lower interferometer reflecting prisms in falling body, the randomly generated sequences of rotation angular velocity of falling body and the gravity measurement deviation caused by vibration for the upper and lower interferometer, respectively. The experimental results show that gravity deviation and the standard deviation obtained by data fusion processing from double interferometers with the vertical distance between OC and COM of 2.5 mm are about 0.5 μGal and 0.3 μGal , respectively, which are consistent with that of the existing method by strictly adjustment of the COM of fall body. By properly choosing the distance of OC to

收稿日期: 2015-03-27; **修订日期:** 2015-06-01.

基金项目: 国家质量监督检验检疫总局技改量传项目 (No. AJG1403); 中国计量科学研究院基本科研业务费专项资金资助项目 (No. AKY1406)

COM for the upper and lower prisms, the effect of rotation can be better reduced. When the distance of the OC to the COM is designed to be ± 3 mm, the gravity value deviation calculated from double interferometer data fusion is less than $1\mu\text{Gal}$, which meets the requirements of some measurement fields for precise gravity measurement.

Key words: absolute gravity measurement; precision measurement; double interferometers; rotation of falling body; data fusion

1 引 言

重力加速度 g 的精确测定是人类认识地球重力场并观测其变化,从而认知地球的重要手段之一。绝对重力测量能直接获得地面观测点上的绝对重力值,可将它作为基准进行重复观测以监测重力场的变化;而相对重力测量则是测定两点的重力差值。精密重力测量技术在国防军事、能源勘探、地质研究、地震预报及计量科学等领域都有着广泛的应用,对国民经济建设起着重要的作用^[1-4]。高精度的绝对重力仪涉及了真空、精密机械加工、机电控制、精密测量等多个学科领域,其研制水平充分体现出一个国家在这些领域里的技术实力。迄今为止,国际上能够独立研制绝对重力仪的国家仅有美国、德国、法国、俄罗斯、意大利、波兰和中国。

目前,普遍采用的绝对重力值测量原理是基于光学干涉法测量在真空中自由下落物体的加速度^[5]。测量时,在落体中固定一个反射棱镜作为干涉仪的可动棱镜,通过精确测量该棱镜自由下落过程中的位移和时间,拟合得到落体在重力场作用下的加速度,作为绝对重力测量值。利用稳频激光提供长度测量基准、铷原子钟提供时间测量基准,测量的相对不确定度可达到 10^{-9} 量级^[6-9],测量准确度达到 $2\mu\text{Gal}$ ($1\mu\text{Gal}=1\times 10^{-8}\text{m/s}^2$)。此外,基于原子干涉原理搭建的新型重力加速度测量装置的测量不确定度能达到 10^{-10} 量级^[10],有望实现更高的测量精度。随着国内绝对重力测量需求的日益增长,近年来国内多家单位,如中国计量科学研究院、中国地震局、中科院测量与地球物理研究所、清华大学、浙江大学、华中科技大学等相继开展了自由落体绝对重力仪^[11-13]和原子干涉绝对重力仪^[14-15]的研制工作。本研究小组在早期自由落体绝对重力仪研制^[16-17]的基础上,研制了小型化 NIM-3 型^[11]和高精度

NIM-3A 型绝对重力仪。其中,NIM-3A 型绝对重力仪的测量结果的合成标准不确定度优于 $5\mu\text{Gal}$,并在 2013 年卢森堡大学举办的第九届全球绝对重力仪关键比对中得到了关注。

在自由落体绝对重力的测量过程中,固定棱镜会受到来自地面垂直方向的振动扰动而影响重力测量值。由于重力加速度作用于落体质心,而干涉仪测量的却是落体中棱镜光心的位移,光心绕质心旋转会产生一个附加的加速度^[8],这是自由落体绝对重力仪最大的误差之一。为了减小振动的影响,通常采用超长弹簧^[7-8]或长周期地震计来隔离地面的振动。例如 NIM-3A 型绝对重力仪利用长周期地震仪拾取地面的振动情况对测量结果进行补偿,大大减小了振动对重力值 g 测量精度的影响。然而,落体旋转是个随机因素,它带来的影响不易消除。现有技术通过反复调校落体,使得落体质心和可动反射棱镜的光心重合,以减小落体旋转的影响^[18-19]。实测得到落体的旋转角速度 ω 约为 10 mrad/s ,当落体光心和质心的距离小于 $25\mu\text{m}$ 时,其影响小于 $1\mu\text{Gal}$,可以忽略。但是随着工作时间的增加,落体和托盘之间的磨损日趋恶化,光心、质心的相对位置仍会发生改变,导致测量结果中出现系统误差,因此需要定期调校落体或通过比对消除测量误差。

本文提出了一种基于双干涉仪的自由落体绝对重力测量方法,利用双干涉仪同时记录落体自由下落过程中的位移变化,然后对上、下干涉仪测量数据进行融合处理,以减小落体旋转对自由落体绝对重力测量精度的影响。

2 双干涉仪自由落体绝对重力测量原理

2.1 落体旋转的影响

落体旋转致使自由落体绝对重力的测量结果中存在附加加速度。如图 1 所示,由于存在加工

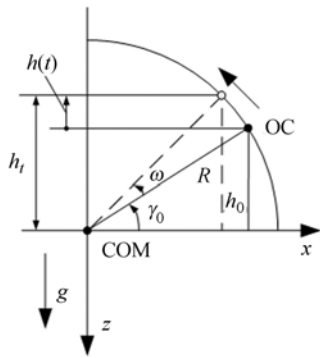


图 1 落体旋转引入附加加速度的原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of additional acceleration caused by rotation of falling body

误差,光心(OC)和质心(COM)不可能完全重合,落体下落过程中,光心围绕质心旋转使得光心在竖直方向受一个附加的向心力作用,产生的附加垂向加速度为:

$$g_{\omega} = \omega^2 R \sin(\gamma_0 + \omega t), \quad (1)$$

其中: ω , R 和 γ_0 分别为落体角速度、光心-质心间距和光心-质心与水平面的初始夹角。由于落体自由下落过程很短,引起的偏转角度变化 ωt 很小,上式可简化为:

$$g_{\omega} = \omega^2 h_0. \quad (2)$$

式中 h_0 为光心-质心垂直方向的初始高度差。

2.2 双干涉仪测量方法

双干涉仪测量原理示意图如图 2 所示。在落体的上、下方设置对称的干涉仪,每组干涉仪包括参考棱镜、落体棱镜和分光镜,落体内安装有上、下反射棱镜,且二者的光心在垂直方向有一定距离,落体质心在两个光心中间。每组干涉仪中入射激光经分光镜分束后一部分作为参考光,另一部分经落体棱镜和参考棱镜反射后形成测量光,两束光在分光镜上合束后发生干涉。在落体下落过程中,记录两组干涉仪的干涉信号变化,并分别读取下落过程中的位移变化,拟合得到重力加速度的测量结果。

当某次下落过程中落体角速度为 ω_i 时,上、下干涉仪同时测量的结果分别为:

$$g_{ui} = g_0 + \omega_i^2 h_{u0} + \Delta g_{ui}, \quad (3)$$

$$g_{di} = g_0 + \omega_i^2 h_{d0} + \Delta g_{di}, \quad (4)$$

其中: h_{u0} , h_{d0} 分别为落体上、下反射棱镜光心-质心垂直方向的初始高度差, Δg_{ui} , Δg_{di} 分别为振动引起的上下干涉仪的重力值误差, g_0 为该点的

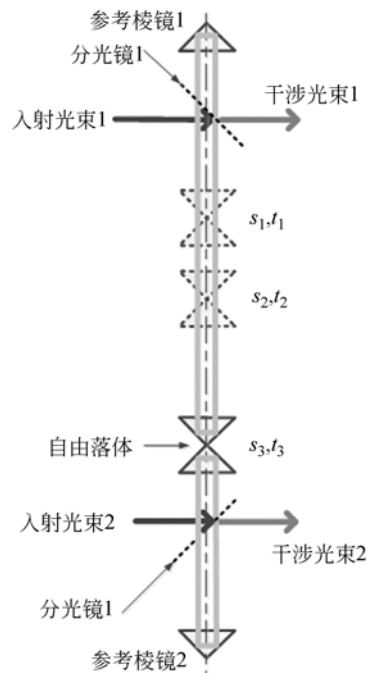


图 2 双干涉仪自由落体绝对重力测量原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of free-fall absolute gravity measurement based on double interferometers

绝对重力真值。当落体旋转作为测量精度的主要影响因素时,可通过隔振或振动补偿来修正振动带来的影响,并采用多次测量求平均的方法来减小其影响(在精密重力测量过程中,振动通常是随机扰动),即认为 $\sum \Delta g_{vi} \approx 0$, 可得 n 次测量结果的平均值为:

$$\begin{aligned} \bar{g}_u &= g_0 + \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\omega_i^2 h_{u0}) + \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta g_{vi} \approx \\ &g_0 + \frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 \right) \cdot h_{u0}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \bar{g}_d &= g_0 + \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\omega_i^2 h_{d0}) + \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta g_{vi} \approx \\ &g_0 + \frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 \right) \cdot h_{d0}. \end{aligned} \quad (6)$$

从式(5)和(6)中消除 $\sum_{i=1}^n \omega_i^2$ 变量可得:

$$\frac{\bar{g}_d - g_0}{g_u - g_0} = \frac{h_{d0}}{h_{u0}}. \quad (7)$$

令 $\kappa_1 = h_{d0}/h_{u0}$, 它只与落体中下、上反射棱镜光心-质心垂直方向的初始高度差的比值有关,是个常数。从式(7)可看出,利用双干涉仪在相同点进行多组测量,通过测得的多组 \bar{g}_u 和 \bar{g}_d 结果可拟合出重力值 \bar{g}_0 和干涉仪光心-质心高度差的比

值 $\bar{\kappa}_h$, 其结果不受落体旋转角的影响。考虑到振动对重力测量产生的影响是随机的, 可直接根据多次下落的重力测量结果 g_{ui} 和 g_{di} 来拟合得到 $\bar{\kappa}_h$, 通过统计效应消除振动的影响, 此时只需将式 (7) 中 \bar{g}_u 和 \bar{g}_d 分别用 g_{ui} 和 g_{di} 代替即可进行拟合。

将 $\bar{\kappa}_h$ 代入式 (3) 和式 (4) 可得:

$$g'_{0i} = g_0 + \frac{\bar{\kappa}_h \cdot \Delta g_{u_{ei}} - \Delta g_{d_{ei}}}{\bar{\kappa}_h - 1} = \frac{\bar{\kappa}_h \cdot g_{ui} - g_{di}}{\bar{\kappa}_h - 1} \quad (8)$$

其中两个光心不重合, 即 $\bar{\kappa}_h \neq 1$ 。利用单次测得的 g_{ui} 和 g_{di} 及拟合得到的 $\bar{\kappa}_h$ 计算得到的重力值 g'_{0i} 仅含振动影响, 落体旋转的影响通过数据处理消除。通过对参考镜进行隔振或振动补偿来减小外界振动的影 响, 可使单次测量结果更接近真值^[8]。

3 仿真计算流程

利用仿真软件 MATLAB 进行数值模拟仿真计算, 计算流程如图 3 所示。预先设定点位的重力值及落体上、下反射棱镜光心-质心垂直方向的初始高度差。为了提高测量的准确度, 精密重力

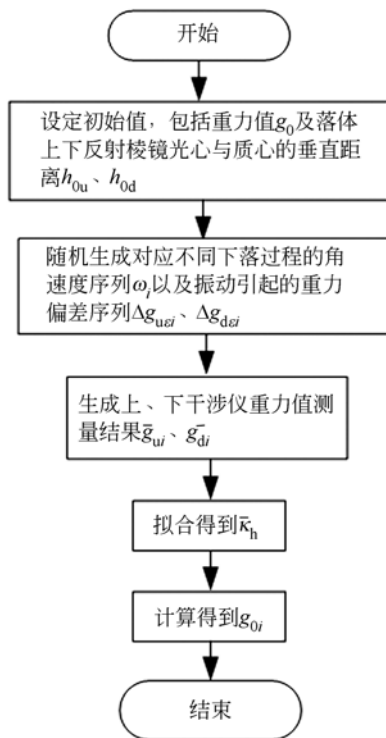


图 3 仿真计算流程

Fig. 3 Flowchart of simulation

测量需要进行多次下落取平均值, 每组测量随机生成对应 N 次不同自由落体下落测量过程中的角速度序列及 ω 振动引起的上、下干涉仪的重力测量偏差序列 $\Delta g_{u_{ei}}$ 和 $\Delta g_{d_{ei}}$ 。接着根据式 (5) 和式 (6) 计算得到每次下落对应的上、下干涉仪的重力测量结果 g_{ui} 和 g_{di} , 将上、下干涉仪的测量结果 g_{ui} 和 g_{di} 分别代替 \bar{g}_u 和 \bar{g}_d 代入式 (7), 拟合得到 $\bar{\kappa}_h$ 。最后, 根据 $\bar{\kappa}_h$ 和 g_{ui} 和 g_{di} 计算得到各次的重力测量结果 g_{0i} 。

4 结果与讨论

预设点位的重力值为 $g_0 = 9.8 \text{ m/s}^2$, 落体上、下反射棱镜光心-质心垂直方向的初始高度差分别为 $h_{u0} = +2.5 \text{ mm}$ 、 $h_{d0} = -2.5 \text{ mm}$, “+”, “-”号表示光心分布在质心的上下侧。每组测量时下落次数取 $N = 1\ 200$, 每次下落过程中生成的角速度序列 ω_i 符合正态分布, 且均值为 0、峰值为 10 mrad/s ; 振动引起的上、下干涉仪的重力测量偏差序列 $\Delta g_{u_{ei}}$ 和 $\Delta g_{d_{ei}}$ 符合正态分布, 且均值为 0、峰值为 $20 \text{ }\mu\text{Gal}$ (参考 FG-5X 型绝对重力仪的测量结果分散性, 在地基良好的情况下, 峰值分布在 $\pm 20 \text{ }\mu\text{Gal}$ 以内)。这里角速度 ω_i 的正负分别对应顺时针和逆时针的旋转方向。

首先考虑拟合下落次数对 $\bar{\kappa}_h$ 的影响。针对不同的下落次数, 进行 1 000 次重复计算, 得到 $\bar{\kappa}_h$ 的拟合结果如图 4 所示。图中给出了不同下落次数多次重复计算的均值和标准偏差, 其中利用 1 200 次下落拟合得到的结果用均值和标准偏差表示为 $-0.990\ 1 \pm 0.004\ 2$ 。

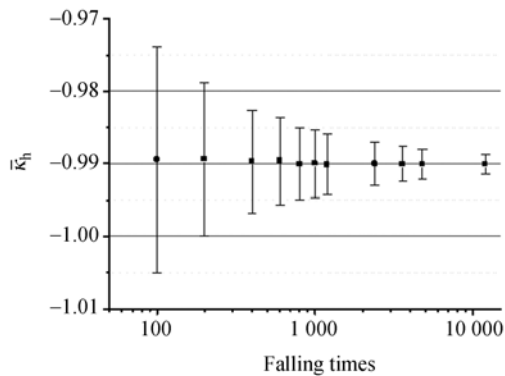
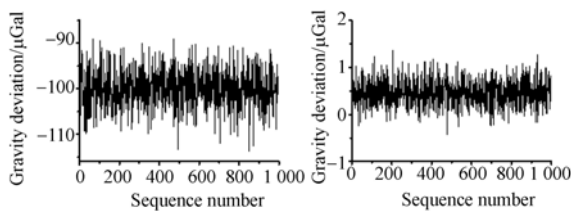


图 4 不同下落次数时 $\bar{\kappa}_h$ 的拟合结果

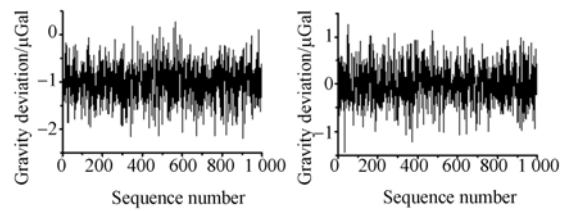
Fig. 4 Fitting result of $\bar{\kappa}_h$ under different falling times

接着取 $\bar{\kappa}_h = -0.990 1$, 每组下落次数 $N = 1\ 200$, 进行 1 000 组测量, 计算得到的结果如图 5 所示。图 5(a)和(b)分别为光心-质心距离为 2.5 mm 时上干涉仪结果和根据上、下干涉仪结果计算出的重力值, 各组测量偏差的均值分别为 $-100.2\ \mu\text{Gal}$ 和 $+0.5\ \mu\text{Gal}$, 标准偏差分别约为 $4.2\ \mu\text{Gal}$ 和 $0.3\ \mu\text{Gal}$ 。当取 $\bar{\kappa}_h = -0.985 9$ (取 1 200 次下落拟合结果的下偏差) 时, 双干涉法各组计算结果偏差的均值和标准偏差分别为 $+0.7\ \mu\text{Gal}$ 和 $0.3\ \mu\text{Gal}$ 。作为比较, 图 5(c)和(d)分别给出了光心-质心垂直距离为 $25\ \mu\text{m}$ 和无落体旋转影响 (光心-质心垂直距离为 0) 时单个干涉仪的测量结果, 偏差的均值分别为 $-1.0\ \mu\text{Gal}$ 和 $-0.04\ \mu\text{Gal}$, 标准偏差均约为 $0.4\ \mu\text{Gal}$ 。由此可见, 尽管双干涉仪系统光心、质心的距离较大, 通过对上、下干涉仪的测量数据进行融合处理, 测量结果的偏差大大减小, 并与光心-质心垂直距离为 $25\ \mu\text{m}$ 和无落体旋转影响时的结果相当, 偏差结果小于 $1\ \mu\text{Gal}$ 。上述结果表明, 双干涉法在振动条件良好的情况下, 利用根据一组 1 200 次下落的测试结果拟合得到的 $\bar{\kappa}_h$ 即可准确地计算出重力值, 避免了反复调校落体光心-质心至 $25\ \mu\text{m}$ 范围内的繁琐过程。另外, 考虑到落体磨损会导致光心、质心位置发生变化, 一段时间后需要在振动条件好的环境下重新测定 $\bar{\kappa}_h$ 。

为了研究光心-质心距离的影响, 选取不同的光心-质心距离, 利用 1 200 次重复下落拟合得到的 $\bar{\kappa}_h$, 基于双干涉法进行了 1 000 次重复计算, 结果如图 6 所示。仿真结果表明, 随着距离的增大,



(a) 落体光心-质心垂直距离为 2.5 mm 时单个干涉仪的测量结果
(b) 利用 $\bar{\kappa}_h$ 修正双干涉仪的测量结果
(a) Measuring results by single interferometer with vertical distance between OC and COM of 2.5 mm
(b) Measuring results by double interferometers corrected with $\bar{\kappa}_h$



(c) 落体光心-质心垂直距离为 25 μm 时单个干涉仪的测量结果
(d) 无落体旋转时单个干涉仪的测量结果
(c) Measuring results by single interferometer with vertical distance between OC and COM of 25 μm
(d) Measuring results by single interferometer without effect of falling body rotation

图 5 重力测量偏差结果

Fig. 5 Experiment results of deviation in gravity measurement

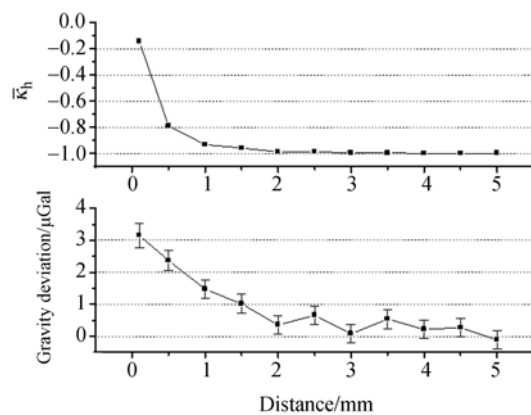


图 6 不同光心-质心距离时的双干涉法重力测量结果
Fig. 6 Measuring results by double interferometers with different distances between OC and COM

拟合常数 $\bar{\kappa}_h$ 越来越接近实际值 -1 ; 当距离为 0.1 mm 时, 重力偏差值和标准偏差值较大, 分别为 $3.2\ \mu\text{Gal}$ 和 $0.38\ \mu\text{Gal}$; 当距离增大到 2 mm 以上时, 重力偏差较小, 小于 $1\ \mu\text{Gal}$ 。这是由于光心-质心距离较小时, 落体旋转对测量结果带来的影响较小, 而重力值受其他扰动因素 (如振动) 的影响不能忽略, 此时落体旋转效应对上、下干涉仪测量结果的作用较弱, 因此拟合得到的值的精度差, 基于双干涉仪的重力计算结果偏差较大。可见, 在双干涉仪系统中, 单干涉仪中落体旋转效应的影响需适当放大, 才能保证 $\bar{\kappa}_h$ 的拟合精度。实际应用中, 光心-质心的距离可选取为 3 mm。

加工和装配带来的误差会导致 $\bar{\kappa}_h$ 的取值有一定的偏差,因此设定下棱镜光心-质心的距离为-3 mm,上棱镜光心-质心的距离分别取 2.5, 2.6, 2.7, ..., 3.5 mm 进行仿真计算,1 000 次仿真实验得到的重力平均值偏差和标准偏差结果如图 7 所示。仿真计算结果表明, $\bar{\kappa}_h$ 取值范围内重力偏差均小于 $1.5 \mu\text{Gal}$, 上棱镜光心-质心距离分别为 2.7, 2.8, 2.9, 3.0, 3.1 mm 时,重力偏差小于 $1 \mu\text{Gal}$, 即上棱镜光心-质心距离的加工精度为 $(2.9 \pm 0.2) \text{ mm}$, 双干涉仪能够有效降低落体旋转的影响。此外,振动是影响测量精度的另一个重要因素。仿真计算中振动引起的上、下干涉仪重力测量偏差峰值增大为 $50 \mu\text{Gal}$ 时,利用均值和标准偏差表示 1 200 次下落拟合得到的 $\bar{\kappa}_h$

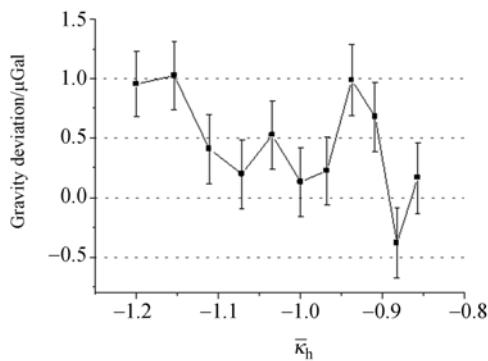


图 7 不同 $\bar{\kappa}_h$ 值时双干涉仪的测量结果

Fig. 7 Gravity deviations measured by double interferometers with different $\bar{\kappa}_h$

为 -0.9409 ± 0.0115 。 $\bar{\kappa}_h = -0.93$ (接近拟合结果的下偏差) 时, 双干涉法各组计算结果偏差的均值和标准偏差分别为 $3.6 \mu\text{Gal}$ 和 $0.8 \mu\text{Gal}$ 。可见, 振动的大小会影响双干涉法的测量精度, 有必要通过物理隔振或振动补偿方法消除振动的影响。

5 结 论

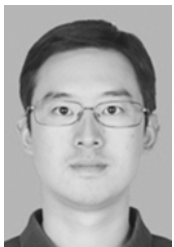
本文提出一种基于双干涉仪的自由落体绝对重力测量方法, 通过对两组对称分布的干涉仪的测量结果进行数据融合来计算重力值, 避免了现有方法对落体光心-质心距离反复调校至 $25 \mu\text{m}$ 范围内的繁琐过程, 减小了落体旋转的影响。基于 MATLAB 数值计算软件进行仿真计算的结果表明, 光心-质心的距离为 2.5 mm 时, 双干涉仪数据融合处理结果的重力值偏差均值约为 $0.5 \mu\text{Gal}$, 标准偏差为 $0.3 \mu\text{Gal}$, 与现有调校落体光心-质心方法的测量结果相当。选择合适的上、下棱镜光心、质心距离可以更好地消减落体旋转对测量结果的影响, 上、下落体棱镜光心-质心距离分别设计为 $\pm 3 \text{ mm}$ 时, 双干涉法数据融合得到的重力值偏差小于 $1 \mu\text{Gal}$, 能满足基于精密重力测量开展的大地测量、地球物理、地球内部动力学机制、环境与灾害等研究的需求。

参考文献:

- [1] FALLER J E. Thirty years of progress in absolute gravimetry: a scientific capability implemented by technological advances [J]. *Metrologia*, 2002, 39 (5): 425.
- [2] 郭有光, 李德禧, 黄大伦, 等. 高精度绝对重力仪观测研究 [J]. *地球物理学报*, 1990, 33(4): 447-453.
GUO Y G, LI D X, HUANG D L, et al.. Observation study of a high accuracy and absolute gravimeter [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1990, 33(4): 447-453. (in Chinese)
- [3] 张为民, 王勇, 周旭华. 我国绝对重力观测技术应用研究与展望 [J]. *地球物理学进展*, 2008, 23(1): 69-72.
ZHANG W M, WANG Y, ZHOU X H. Expecta-
- tion and application study of absolute gravity observation technology in China [J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(1): 69-72. (in Chinese)
- [4] 刘冬至, 李辉, 邢乐林, 等. 中国地震重力网绝对重力观测结果分析 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2007, 27(5): 88-93.
LIU D ZH, LI H, XING L L, et al.. Analysis of absolute gravimetry result of China earthquake gravity network [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007, 27(5): 88-93. (in Chinese)
- [5] 刘达伦, 吴书清, 徐进义, 等. 绝对重力仪研究的最新进展 [J]. *地球物理学进展*, 2005, 19(4): 739-742.
LIU D L, WU SH Q, XU J Y, et al.. The new evolution of absolute gravimeter [J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 19(4): 739-742. (in Chinese)
- [6] PETER G, MOOSE R E, WESSELLS C W, et al..

- High-precision absolute gravity observations in the United States [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B5): 5659-5674.
- [7] RINKER III R L. *Super Spring: a New Type of Low-Frequency Vibration Isolator* [D]. University of Colorado at Boulder, 1983.
- [8] NIEBAUER T M, SASAGAWA G S, FALLER J E, *et al.*. A new generation of absolute gravimeters [J]. *Metrologia*, 1995, 32(3): 159.
- [9] Micro-g LaCoste absolute gravimeter[Z/OL]. www.microglacoste.com/absolutemeters.php.
- [10] PETERS A, CHUNG K Y, CHU S. Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms [J]. *Nature*, 1999, 400(6747): 849-852.
- [11] 吴书清. 基于自由落体原理的绝对重力仪关键技术的研究及应用[D]. 北京:中国计量科学研究院, 2012.
- WU SH Q. *The Research and Application of Absolute Gravimeter Based on Free-fall Theory*[D]. Beijing:National Institute of Metrology, 2012. (in Chinese)
- [12] 胡华, 伍康, 申磊, 等. 新型高精度绝对重力仪[J]. *物理学报*, 2012, 61(9):99101-099101.
- HU H, WU K, SHEN L, *et al.*. A new high precision absolute gravimeter [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(9):99101-099101. (in Chinese)
- [13] 滕云田, 吴琼, 郭有光, 等. 基于激光干涉的新型高精度绝对重力仪[J]. *地球物理学进展*, 2013(4):2141-2147.
- TENG Y T, WU Q, GUO Y G, *et al.*. New type of high-precision absolute gravimeter base on laser interference [J]. *Progress in Geophysics*, 2013(4):2141-2147. (in Chinese)
- [14] 周敏康. 原子干涉重力测量原理性实验研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.
- ZHOU M K. *Experimental Demonstration of an Atom Interferometry Gravimeter* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [15] 王肖隆. 基于原子干涉的高分辨率引力测量[D]. 杭州:浙江大学, 2011.
- WANG X L. *High Resolution Gravity Sensors Based on Atom Interferometry* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
- [16] 郭有光, 黄大伦, 方永源. NIM-2 型可移激光绝对重力仪[J]. *地球物理学报*, 1988, 31(1):73-81.
- GUO Y G, HUANG D L, FANG Y Y. A transportable laser interferometry absolute gravimeter type NIM-2 movable [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1988, 31(1):73-81. (in Chinese)
- [17] 郭允晟, 方永源. 符合原理在激光绝对重力仪中的应用[J]. *计量学报*, 1982, 3(4):259-266.
- GUO Y SH, FANG Y Y. Coincidence method and application in laser interferometry absolute gravimeter [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1982, 3(4): 259-266. (in Chinese)
- [18] VITOUCHKINE A L, FALLAR J E. A direct and sensitive method for positioning the centre of mass of a dropping object at the optical centre of the enclosed corner cube in ballistic absolute gravimeters [J]. *Metrologia*, 2004, 41(4):19.
- [19] ROTHLEITNER C, SVITLOV S, MERIMECHE H, *et al.*. A method for adjusting the centre of mass of a freely falling body in absolute gravimetry[J]. *Metrologia*, 2007, 44(3):234.

作者简介:



冯金扬(1984—),男,湖南郴州人,博士,助理研究员,2006年于华中科技大学获得学士学位,2013年于清华大学获得博士学位,现为中国计量科学研究院力学与声学研究所博士后,主要从事绝对重力精密测量方面的研究。E-mail: fengjy@nim.ac.cn