

文章编号 1004-924X(2021)07-1527-12

## 光干涉绝对重力仪测量 A 类不确定度优化

李春剑\*, 吴书清, 粟多武, 冯金扬, 王启宇

(中国计量科学研究院 时间频率计量科学所, 北京 100029)

**摘要:**光干涉绝对重力仪采用迈克尔逊干涉仪监测被测落体的下落位移。干涉仪的参考棱镜需相对于地球中心静止, 然而置于地面上的参考棱镜会随着地面振动, 这将使干涉法所测的落体相对于地球的位移变化有偏差, 直接影响重力仪单次测量数据的准确性, 同时增大了多次测量数据的分散性。因此, 针对 NIM-3A 型绝对重力仪提出了全新的测振补偿法, 利用高精度测振传感器监测地面振动, 并将它补偿到干涉法监测的被测落体下落位移上。实验结果表明: 测量结果的 A 类不确定度优化了 7.8 倍, 且未出现系统偏差。该方法在未出现系统偏差的情况下, 有效提高了单次测量数据的准确性, 减小了多次测量数据的分散性, 优化了测量结果的 A 类不确定度。

**关键词:**干涉测量; 绝对重力仪; 测振补偿法; A 类不确定度; 分散性

**中图分类号:** TB934 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.2020.0566

## Improvement method for type A uncertainty of interferometric gravimeter

LI Chun-jian\*, WU Shu-qing, SU Duo-wu, FENG Jin-yang, WANG Qi-yu

(Division of Time and Frequency, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

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

**Abstract:** An interferometric gravimeter monitors the trajectory of a free-falling object using a Michelson laser interferometer. The reference mirror of the interferometer, relative to the center of the earth, must be static. However, its vibration, according to ground vibrations, is inevitable and causes a deviation between the dropper displacement relative to the center of the earth and that monitored via optical interferometry. This directly impacts the measurement accuracy for a single drop and many scattered drops. Therefore, a vibration compensation method, which compensates the dropper displacement measured via optical interferometry according to ground vibrations monitored by a high-precision ultra-low frequency vibration sensor, is proposed herein for a NIM-3A absolute gravimeter. Experimental results indicate that type A uncertainty of NIM-3A was 7.8 times optimized, without system deviations. The proposed method effectively improves the measurement accuracy for a single drop and many scattered drops and type A uncertainty of NIM-3A without system deviations.

**Key words:** interferometric measurement; absolute gravimeter; vibration compensation method; type A uncertainty; dispersion

收稿日期: 2020-11-03; 修订日期: 2021-01-05.

基金项目: 科技部国家计量基准资源共享服务平台项目 (No. APT1901-8, No. APT2001-3); 国家重点研发计划资助项目 (No. 2016YFF0200103, No. 2018YFF0212401); 中国计量科学研究院基本科研业务费资助项目 (No. AKY1608)

## 1 引言

重力加速度  $g$  是一个随着空间和时间不断变化的物理量,其量值在地球物理学<sup>[1]</sup>、测地学<sup>[2-3]</sup>及计量学<sup>[4-5]</sup>等领域是一个十分重要的地理参数<sup>[6-7]</sup>。在地球物理学、测地学领域,重力加速度  $g$  值是地球内部密度结构、地球表层密度变化、山脉边缘动态补偿等研究非常重要的地理参数<sup>[8-9]</sup>。在计量学领域,重力加速度  $g$  值会影响“测力”及其相关的力值标准,如压力、扭矩等,同时精确的重力加速度  $g$  值还会影响国际单位制中 7 个基本单位之一——质量单位“千克”的重新定义,即功率天平 and 能量天平的建立。上述领域对重力加速度  $g$  值的要求为  $10^{-5} \sim 10^{-9}$  量级。然而,由于地壳板块的运动<sup>[2]</sup>,重力加速度  $g$  值每年的变化量为 1 微加 ( $1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ) 或是几微加,若想观测到该量级的变化就需要借助精度在对应数量级的仪器设备。高精度的相对重力仪可以实现微加级相对重力值的测量,然而相对重力仪存在着定期的校准、测量范围受限、长期漂移等问题,高精度的绝对重力仪即可解决这些问题<sup>[6,8]</sup>。

绝对重力仪根据测量方法不同,分为单摆式绝对重力仪、光干涉绝对重力仪和原子干涉绝对重力仪。其中,光干涉绝对重力仪和原子干涉绝对重力仪的精度较高,可达  $10^{-9}$  量级。光干涉绝对重力仪为目前主流的绝对重力仪<sup>[10]</sup>,具备自主研发能力的国家包括美国<sup>[2,11]</sup>、俄罗斯、意大利、波兰和中国。美国研制的 FG5、A10 型绝对重力仪已商品化。法国研制的原子干涉绝对重力仪是第一台不同测量原理的绝对重力仪,并已参加了两次国际比对。我国多家单位在进行绝对重力仪的研制,包括光干涉绝对重力仪<sup>[12-14]</sup>和原子干涉绝对重力仪<sup>[15-17]</sup>。光干涉绝对重力仪的实现方式分为自由下落法和上抛下落法,均利用光学干涉仪对被测落体的轨迹进行监测<sup>[18-19]</sup>,同时记录时间,通过位移-时间拟合得到重力加速度  $g$  值。位移和时间的测量精度直接影响重力加速度  $g$  值的测量精度。时间测量的测量精度由高精度铷钟来保证;被测落体相对于地球位移变化的测量精度受落体的偏摆、参考棱镜随地面振动大小的影响。利用机械结构精确定位可保证落体的偏摆在允许范围内,然而参考棱镜随地面振动

是无法避免的,这会直接影响重力仪单次的测量数据。由于地面振动是随机的,可利用多次测量取平均消除地面振动对测量结果准确性的影响,然而大量实验,多次测量得到的结果的分散性比较大,也就是测量结果的 A 类不确定度较大。针对上述问题,美国 FG5 型绝对重力仪将参考棱镜放置于一个名为 Super Spring<sup>[2]</sup> 的长周期主动隔震台上,其隔振周期为 60 s,能够有效地隔离地面振动给参考棱镜带来的影响。意大利 IMGC-02 型绝对重力仪<sup>[20-21]</sup>和俄罗斯 ABG-VNIIM-1 使用零长弹簧被动隔振原理对参考棱镜进行隔振。清华大学研制的 T 型绝对重力仪<sup>[12]</sup>采用主动隔振<sup>[22]</sup>的方法对参考棱镜进行隔振。

本文针对自制的 NIM-3A 型绝对重力仪,使用测振补偿法进行隔振,测量重力加速度时将地面振动记录下来,数据处理时将其补偿到干涉仪监测的被测落体下落位移(落体相对于参考棱镜的位移)上。处理后的被测落体下落位移更加接近实际发生位移,这样有效减小了地面振动对测量结果的影响,提高了单次测量的准确性。

## 2 NIM-3A 型绝对重力仪

### 2.1 测量原理

在重力场中,由万有引力公式可推导出自由落体加速度公式如下<sup>[23]</sup>:

$$\ddot{s} = \frac{G \cdot M}{s^2}, \quad (1)$$

其中: $s$ 为自由落体的位移, $G$ 为万有引力常数, $M$ 为地球的质量。

考虑到重力梯度,且它为线性时,则有:

$$\ddot{s} = g_0 + \gamma \cdot (s - s_0), \quad (2)$$

其中: $g_0$ 和 $s_0$ 分别为 $t=0$ 时刻的初始重力加速度和初始位移, $\gamma$ 为重力梯度。

求解微分方程(2),得到:

$$s = s_0 + \frac{g_0}{\gamma} \left[ \cosh(\sqrt{\gamma t}) - 1 \right] + \frac{v_0}{\sqrt{\gamma}} \sinh(\sqrt{\gamma t}), \quad (3)$$

其中 $v_0$ 为 $t=0$ 时刻的初始速度。

对式(3)进行幂级数展开得到<sup>[24]</sup>:

$$s = s_0 + v_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\gamma^n t^{2n+1}}{(2n+1)!} + g_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\gamma^n t^{2n+2}}{(2n+2)!} \quad (4)$$

只取  $n=0$  和  $n=1$  两项时有:

$$s(t) = s_0 + v_0 \left( t + \frac{\gamma}{6} t^3 \right) + \frac{1}{2} g_0 \left( t^2 + \frac{\gamma}{12} t^4 \right) \quad (5)$$

即:

$$s(t) = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} g_0 t^2 + \frac{1}{6} \gamma v_0 t^3 + \frac{1}{24} \gamma g_0 t^4 \quad (6)$$

若重力梯度  $\gamma$  已知,通过位移和时间进行二次项拟合即可得到重力加速度  $g$  值。

### 2.2 测量方法

NIM-3A 型绝对重力仪采用上述测量原理进行重力加速度测量。当被测落体在重力场中自由下落时,精确测量被测落体的下落位移和时间,进而拟合得到重力加速度  $g$  值。具体如下:利用激光干涉仪(迈克尔逊干涉仪)监测自由下落物体的轨迹<sup>[25]</sup>,其光路见图 1,激光光束从激光器中发出,通过分光镜分为两束,反射的一束为测量光束,透射的一束为参考光束;测量光束照射到置于真空腔内的被测落体(直角立体棱镜)上发生反射,经分光镜至参考棱镜,又经参考棱镜反射至分光镜,与参考光束汇合;当被测落体下

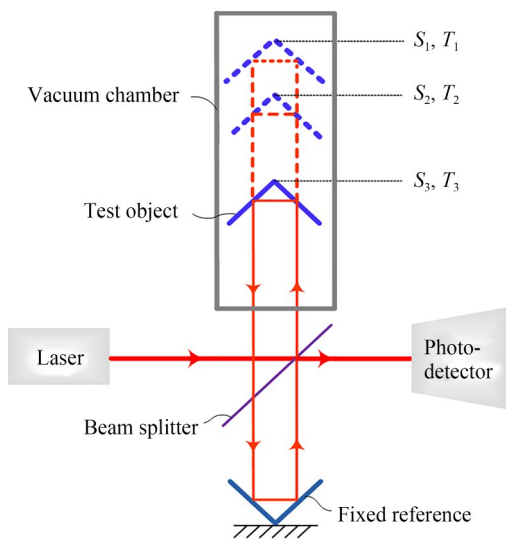


图 1 光干涉绝对重力仪的光学系统

Fig. 1 Optical system of interferometric gravimeter

落时,反射回来的测量光束和透射的参考光束发生干涉,产生干涉条纹;干涉条纹的个数对应被测落体的下落位移,同时记录下落的时间。通常采用多点测量,利用最小二乘拟合法得到重力加速度  $g$  值。

### 2.3 测量系统

测量装置包括真空系统、机械传动系统、光学系统、测振系统以及电气系统,如图 2 所示。其中,真空系统为真空腔部分,被测落体置于其中进行自由落体运动,一般真空度小于  $1 \times 10^{-4}$  Pa。机械传动系统包括电机、过真空传动轴、钢带、传动导杆、托盘及被测落体。电机通过过真空传动轴与钢带相连,钢带带动托盘上下运动,托盘内有个与之分离的被测落体(直角立体棱镜)。当钢带带动托盘向下高速运动时(托盘加速度大于  $1g$ ),被测落体实现自由下落。光学系统包括激光器、光学干涉仪(2.2 所述迈克尔逊干涉仪)和光电探测器,监测被测落体的下落轨迹,原理如图 1 所示。测振系统包括拾振器(测振仪)和振动采集仪,用于监测并记录地面振动情况。电气系统包括上位机、电机传动控制器、干涉条纹和地面振动采集系统、铷钟(频率标准)以及激光控制器。

NIM-3A 型绝对重力仪通过上位机控制整个

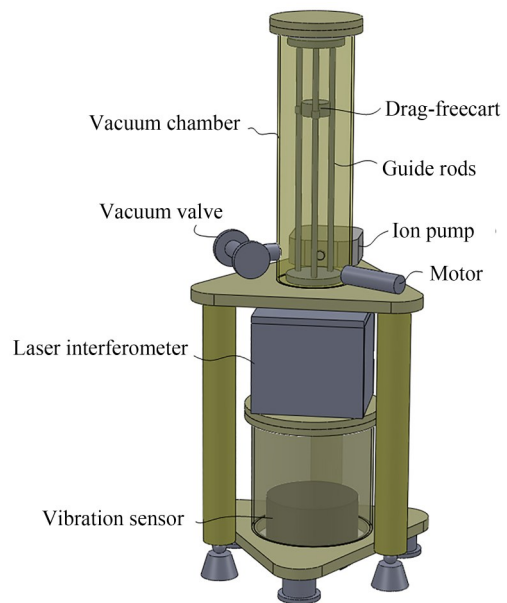


图 2 NIM-3A 型绝对重力仪光机真空部分

Fig. 2 Mechanical vacuum system and laser interferometer of NIM-3A

装置。测量开始时,上位机向电机传动控制器发出“启动”指令,电机通过钢带带动托盘(落体置于托盘内)升至最高点,暂停几秒钟待被测落体稳定后,电机带动托盘加速下降(加速度大于  $1g$ ),被测落体实现自由下落,干涉仪发生干涉。在被测落体下落的瞬间,上位机通知采集卡开始干涉条纹和地面振动信号的采集。当落体到达最低点后,暂停几秒钟,重复上升-下降的动作。在下次下落之前,上位机计算得到本次下落的测量结果。当测量次数达到设定值后,上位机通知电机控制器“停止”电机运动,并计算全部下落的测量平均值、不确定和统计直方图等,测量结束。测量也可设置为特定时刻开始的循环测量。

### 3 地面振动的影响

光干涉绝对重力仪在高真空条件下精确测量被测落体在重力场中自由下落所经历的位移和时间,然后计算得到重力加速度。其中,位移测量利用迈克尔逊干涉仪实现。参考棱镜置于地面,干涉仪产生的干涉条纹对应被测落体相对于参考棱镜(地面)的位移变化。理想状态下,参考棱镜需相对于地球中心静止,然而地球表面除了大地脉动外还受其他振动源的干扰,因此,激光干涉法所测的位移变化与实际有些偏差,被测落体下落的位移测量也不准确,最终位移-时间拟合得到的重力加速度不准确。由于地面振动是随机的,可通过多次测量取平均的方法消除地面振动对测量结果准确度(被测量的测得值与其真值间的一致程度)<sup>[19]</sup>的影响。然而,这样需要进行大量的实验,并且多次测量结果的分散性比较大,A类不确定度<sup>[26]</sup>也会比较大。

针对上述问题,本文提出振动补偿法来提高 NIM-3A 型绝对重力仪的精度。

## 4 测振补偿法

### 4.1 测振补偿系统

NIM-3A 型绝对重力仪测量重力加速度时将地面振动(参考棱镜相对于地球中心的位移)记录下来,数据处理时将它补偿到干涉仪监测的

位移(被测落体相对于参考棱镜的位移)上,得到被测落体自由下落的位移。

位移补偿示意图如图 3 所示,激光干涉仪监测被测落体的位移为  $x$ ,参考棱镜随地面振动的位移为  $y$ ,均以竖直向下为正方向。补偿后得到被测落体相对于地球的位移为  $z = x - y$ ,这样  $z$  相比于  $y$  将更加接近实际发生位移,有效地减小了地面振动对位移测量的影响。

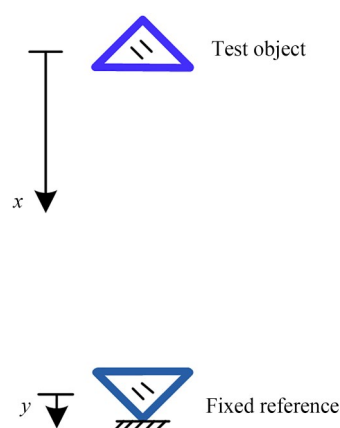


图 3 位移补偿示意图

Fig. 3 Schematic diagram of displacement compensation

高精度绝对重力仪进行测量的点位均为比较稳定的地基,地面振动基本为低频段,故选择低频测振仪,应用时参考棱镜和低频测振仪刚性连接。NIM-3A 型绝对重力仪选用的测振仪为 VSE-311M,测量频率为  $0.03 \sim 70$  Hz,输出灵敏度(速度)为  $2 \times 5000 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ ,分辨率(速度)约为  $1 \times 10^{-5} \text{ Gal}$ 。

电气框图如图 4 所示。被测落体下落的瞬间,干涉条纹采集系统和振动采集系统接收到同一触发信号,分别对干涉条纹(被测落体相对于参考棱镜的位移)和地面振动(参考棱镜相对于地球的位移)进行采集。为保证采集的干涉条纹和地面振动信号同步,两系统利用同一时间频率标准铷钟作为时钟源。干涉条纹和振动信号采集完成后由上位机进行处理,利用图 3 所示的位移补偿方法得到被测落体自由下落的位移,并与记录的时间拟合得到重力加速度  $g$ 。

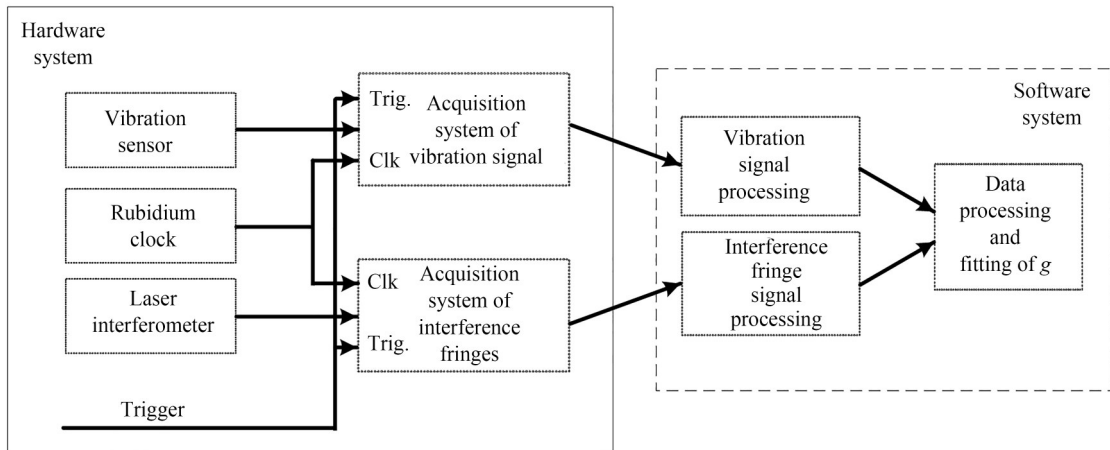


图 4 测振补偿法的原理框图

Fig. 4 Principle block diagram of vibration compensation method

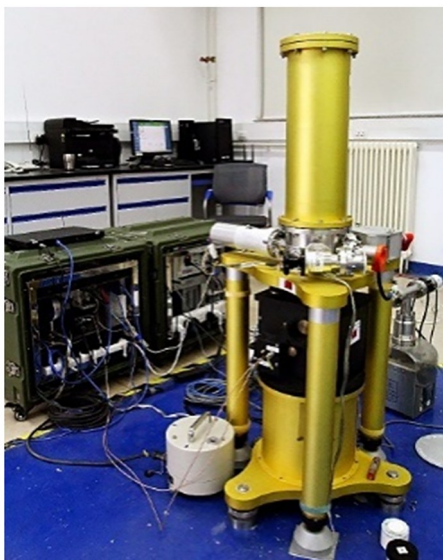
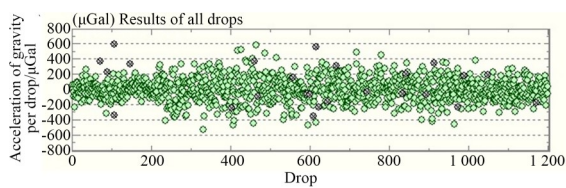


图 5 NIM-3A 型绝对重力仪(注:在中国计量科学研究院昌平院区重力台站进行重力台站加速度测量)

Fig. 5 NIM-3A absolute gravimeter (Note: NIM-3A is working at gravity site in Changping campus of National Institute of Metrology)

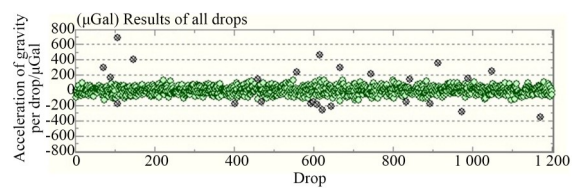
### 4.2 性能测试

在振动较大的地基进行重力测量时,如中国计量科学研究所和平里院区,振动补偿后 A 类测量不确定度(即算术平均值的实验标准差)为振动补偿前的 1/10。在振动较小的地基上测量时,如中国计量科学研究所昌平院区重力台站(远离市区,周围环境及其安静,点位采用独立地基设计),振动补偿后 A 类测量不确定度为补偿前的 1/4。图 5 为 NIM-3A 型绝对重力仪在中国计量科学研究所昌平院区重力台站进行测量时的现场照片。图 6 为测量数据,振动补偿前测量数据分散于  $\pm 500 \mu\text{Gal}$  内(图 6(a)),A 类测量不确定度为  $5.2 \mu\text{Gal}$ ;振动补偿后测量数据大部分在  $\pm 150 \mu\text{Gal}$  内(图 6(b)),A 类测量不确定度仅为  $1.3 \mu\text{Gal}$ 。振动补偿前后的测量结果偏差在  $2\sim 3 \mu\text{Gal}$ ,在测量不确定度范围内,所以振动补偿后未出现系统偏差。



(a) 振动补偿前 1 200 次下落数据

(a) Data for 1 200 drops without vibration compensation method



(b) 振动补偿后 1 200 次下落数据

(b) Data for 1 200 drops with vibration compensation method

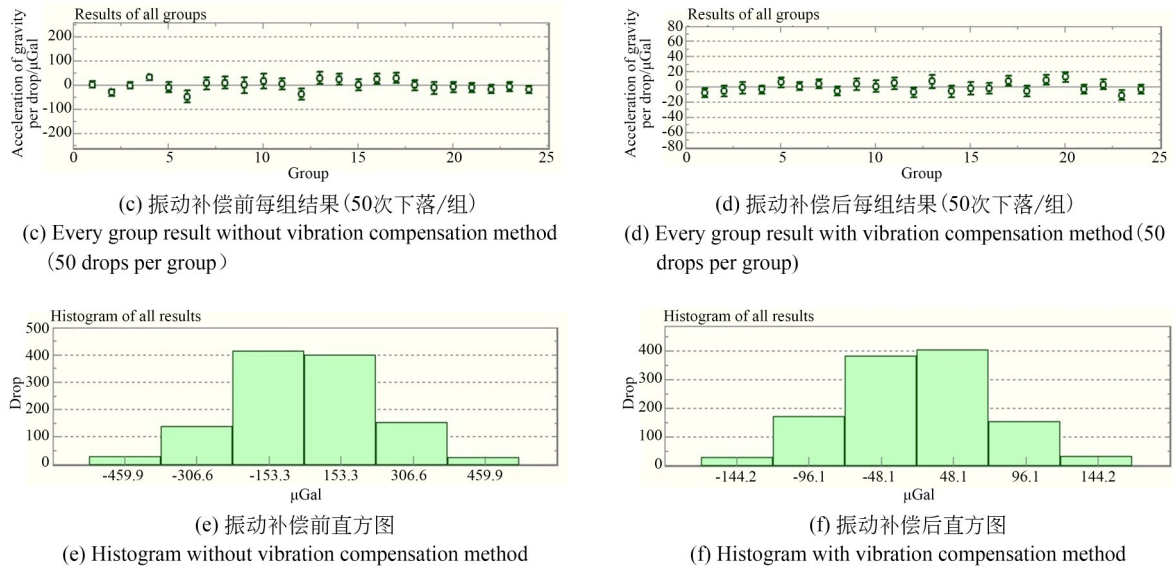


图 6 中国计量科学研究院昌平院区重力台站 NIM-3A 型绝对重力仪振动补偿前后的测量数据对比 (绿色圆点为振动补偿前后未超出  $3\sigma$  剔除的数据, 灰色圆点为振动补偿后超出  $3\sigma$  剔除的数据)

Fig. 6 Datum of NIM-3A at gravity site in Changping campus of National Institute of Metrology (Green dots are the datum not exceeding 3 sigma and grey dots are the datum exceeding 3 sigma with vibration compensation)

### 5 测振补偿法改进

若将测振传感器采集到的振动信号不进行处理, 直接补偿到干涉法所测的落体下落位移 (被测落体相对于参考棱镜的位移) 上, 由于测振传感器的频率响应特性 (见图 7), 采集到的振动信号不够完备: 一是频率范围内两侧信号的幅

值有一定的衰减, 使得位移补偿不足; 二是两侧信号存在一定的相移, 使得与干涉法同步测得的落体下落位移存在一定的相位差。可见测振传感器的频率响应特性直接影响振动补偿效果, 本文利用传递函数测试及反演技术来提高测振传感器所测的振动信号, 最终改善振动补偿效果。

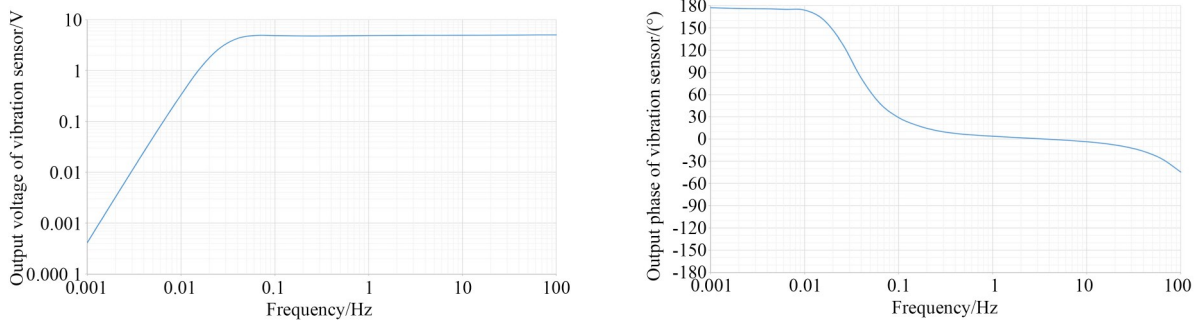


图 7 低频测振传感器 VSE-311M z 轴方向的频率响应特性

Fig. 7 Frequency response characteristic of VSE-311M in z axis

#### 5.1 传递函数测试和反演技术

传递函数测试原理如图 8 所示。其中,  $x(t)$  为测振传感器时域输入信号,  $y(t)$  为测振传感器时域输出信号。首先对  $x(t)$  和  $y(t)$  进行快速傅

里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 得到对应的频域信号  $X(f)$  和  $Y(f)$ , 再对两个频域信号进行处理, 得到测振传感器某个频率点 ( $k$  点) 的幅频和相频特性。将频率范围内所有频率点的

幅频和相频特性存入传递函数数据文件中,供实时控制与反演时使用。

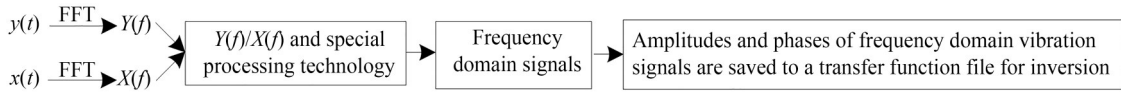


图 8 传递函数测试原理

Fig. 8 Principle for transfer function test technology

在测振传感器测量地面振动时,首先对振动信号的时域波形进行数据采集(DAQ)得到信号的数字序列,经窗函数处理后,根据传递函数测试原理得到的测振传感器传递函数曲线进行实时控制和反演,再经窗函数复原成无缝连接的振动信号真实原始波形和数据,过程如图 9 所示。

### 5.2 振动信号处理

利用低频测振传感器 VSE-311M 的频率响应特性(图 7)和 5.1 中提及的传递函数测试和反演技术对测振传感器采集的振动信号进行处理。

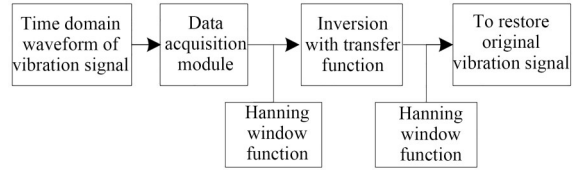


图 9 传递函数反演原理

Fig. 9 Principle for transfer function inversion

图 10 所示为在中国计量科学研究院昌平院区 21 号楼地下一层比对大厅的隔振地基上采集的振动信号。从图中可以看出,应用传递函数反演技术前后两个振动位移信号的偏差在纳米量

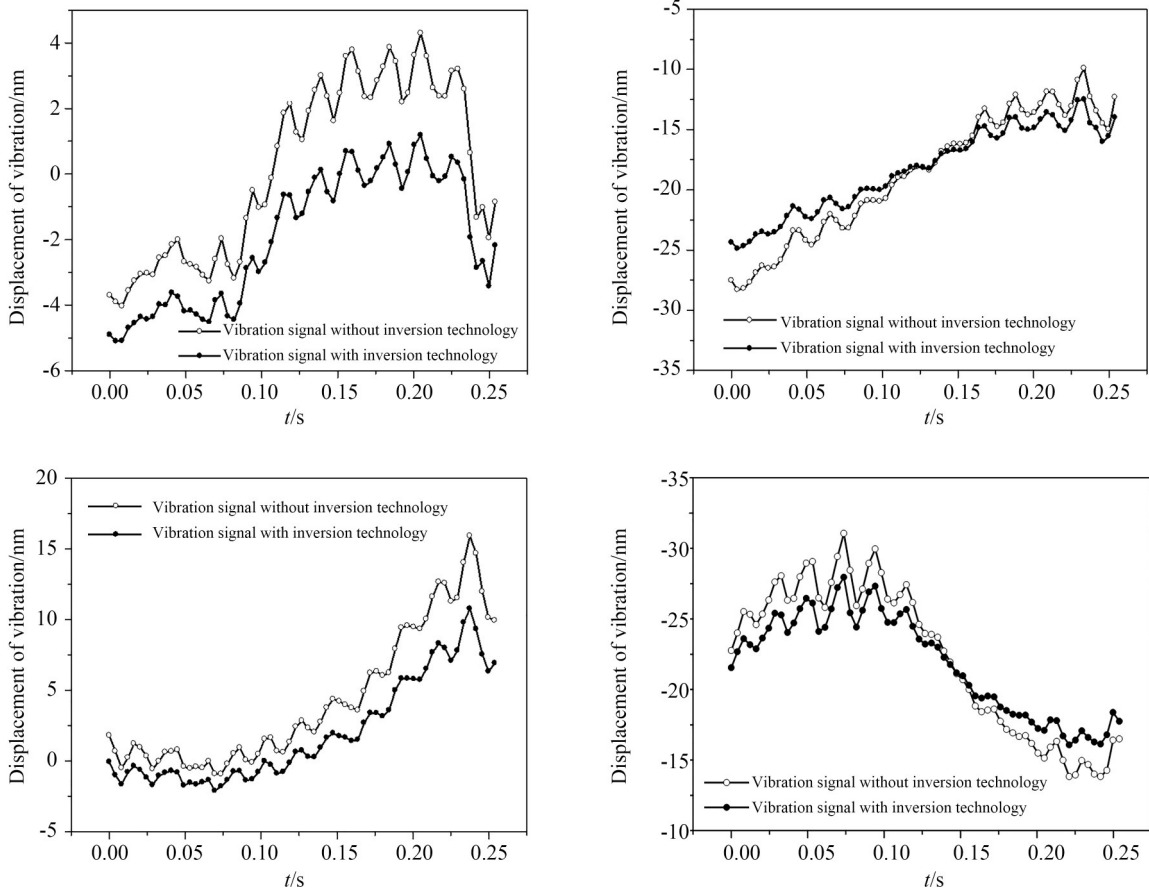
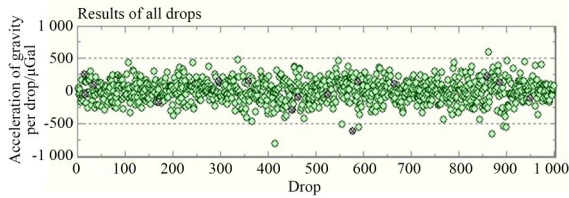


图 10 采用传递函数反演技术前后的振动位移信号

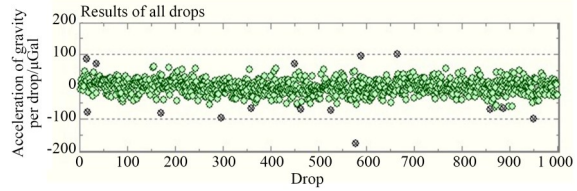
Fig. 10 Vibration displacement signals without and with transfer function inversion technology

级,可带来重力加速度  $0.1 \mu\text{Gal}$  的偏差;应用传递函数反演技术后振动信号更加接近参考棱镜

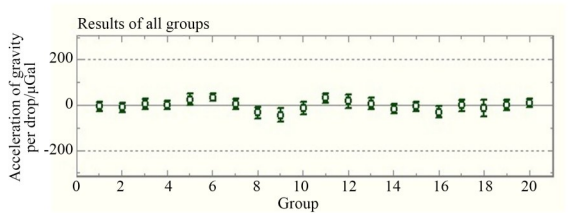
实际受到的振动,振动补偿效果更好,最终得到的重力加速度更加准确。



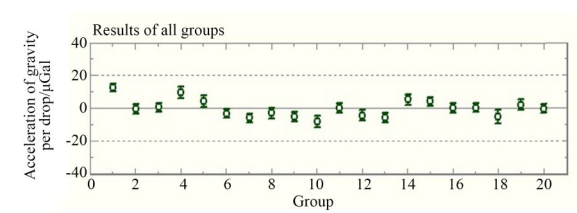
(a) 振动补偿前 1 000 次下落数据  
(Data for 1 000 drops without vibration compensation method)



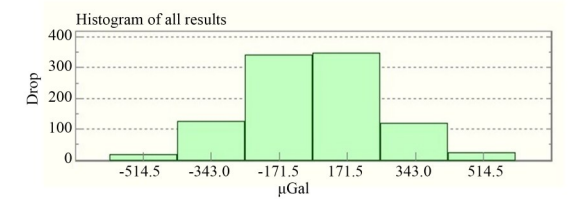
(b) 振动补偿后 1 000 次下落数据  
(Data for 1 000 drops with vibration compensation method)



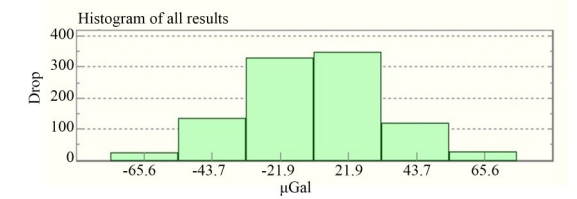
(c) 振动补偿前每组结果 (50 次下落/组)  
(Every group result without vibration compensation method (50 drops per group))



(d) 振动补偿后每组结果 (50 次下落/组)  
(Every group result with vibration compensation method (50 drops per group))



(e) 振动补偿前直方图  
(Histogram without vibration compensation method)



(f) 振动补偿后直方图  
(Histogram with vibration compensation method)

图 11 中国计量科学研究院昌平院区重力台站 NIM-3A 型绝对重力仪振动补偿前后测量数据对比(改进后)(绿色圆点为振动补偿前后未超出  $3\sigma$  剔除的数据,灰色圆点为振动补偿后超出  $3\sigma$  剔除的数据)

Fig. 11 Datum of NIM-3A at gravity site in Changping campus of National Institute of Metrology after improment (Green dots are the datum not exceeding 3 sigma and grey dots are the datum exceeding 3sigma with vibration compensation)

### 5.3 性能测试

在中国计量科学研究院昌平院区重力台站进行测试,振动补偿后 A 类测量不确定度为补偿前的  $1/7.8$ 。图 11 为测量数据,振动补偿前测量数据分散于  $\pm 500 \mu\text{Gal}$  内(图 11(a)),A 类测量不确定度为  $5.5 \mu\text{Gal}$ ;振动补偿后测量数据大部分分散于  $\pm 70 \mu\text{Gal}$  内(图 11(b)),A 类测量不确定度仅为  $0.7 \mu\text{Gal}$ 。振动补偿后潮汐符合图见图 12。振动补偿前后的测量结果有  $1\sim 2 \mu\text{Gal}$  的偏差,在测量不确定度范围内,所以改进后的振动补偿未出现系统偏差。

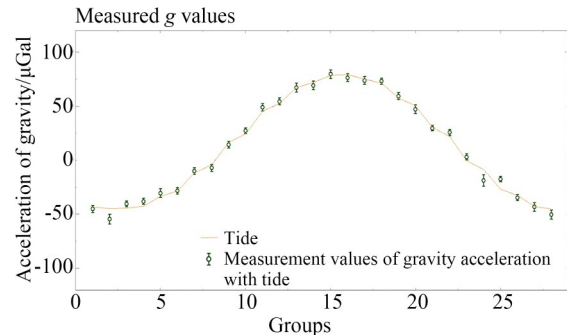
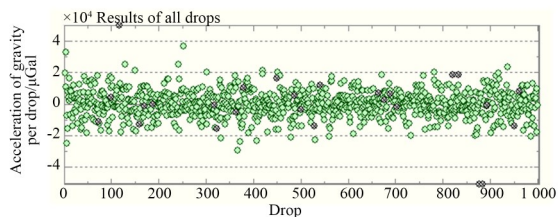


图 12 潮汐符合图

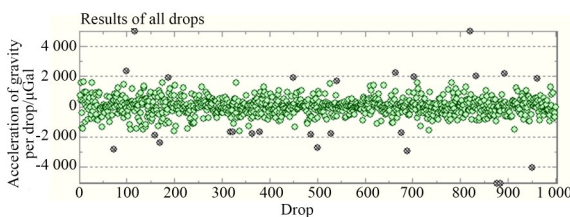
Fig. 12 Measurement results with tide

在环境噪声(振动)较大的测点上测量时,改进后的振动补偿法对测量 A 类不确定度也有很好的优化效果。图 13 为在天津某工地测量得到的数据,单次下落结果的分散性由振动补偿前的  $\pm 20\ 000\ \mu\text{Gal}$  优化为振动补偿后的  $\pm 2\ 000$

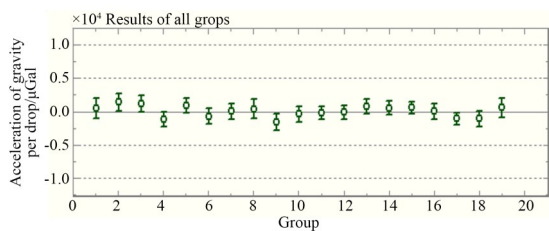
$\mu\text{Gal}$ , A 类不确定度由  $264.8\ \mu\text{Gal}$  变为  $17.6\ \mu\text{Gal}$ (1/15 倍)。振动补偿前后的测量结果有  $10\ \mu\text{Gal}$  以内的偏差,在测量不确定度范围内,所以振动条件不佳的情况下改进后的振动补偿未出现系统偏差。



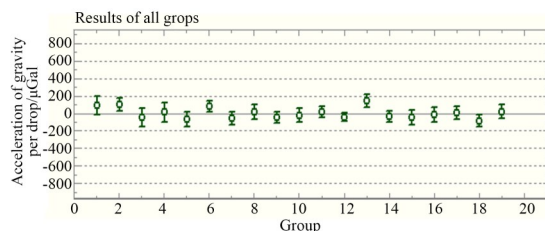
(a) 振动补偿前 1 000 次下落数据  
(a) Data for 1 000 drops without vibration compensation method



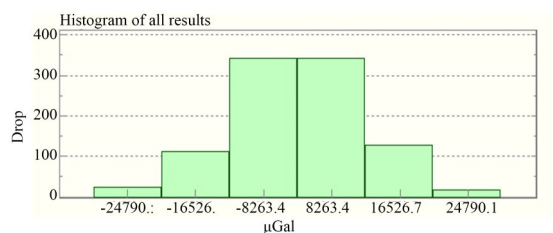
(b) 振动补偿后 1 000 次下落数据  
(b) Data for 1 000 drops with vibration compensation method



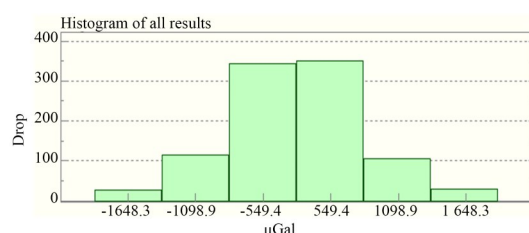
(c) 振动补偿前每组结果(50次下落/组)  
(c) Every group result without vibration compensation method (50 drops per group)



(d) 振动补偿后每组结果(50次下落/组)  
(d) Every group result with vibration compensation method (50 drops per group)



(e) 振动补偿前直方图  
(e) Histogram without vibration compensation method



(f) 振动补偿后直方图  
(f) Histogram with vibration compensation method

图 13 天津某工地(地面振动较大)NIM-3A 型绝对重力仪振动补偿前后测量数据对比(改进后)(绿色圆点为振动补偿前后未超出  $3\sigma$  剔除的数据,灰色圆点为振动补偿后超出  $3\sigma$  剔除的数据)

Fig. 13 Datum of NIM-3A at gravity site at construction site in Tianjin after improment(Green dots are the datum not exceeding 3 sigma and grey dots are the datum exceeding 3sigma with vibration compensation)

由此可见,振动补偿法很好地减小了地面振动对实验数据的影响,缩小了多次测量实验数据的分散性,优化了测量结果的 A 类不确定度。改进后振动补偿法使得地面振动采集更精确,进一步提高了单次测量结果的准确性,缩小了测量实

验数据的分散性,降低了测量结果的 A 类不确定度(7.8 倍)。

2013 年 9 月,采用测振补偿法的 NIM-3A 型绝对重力仪代表我国参加了由瑞士联邦计量院(Federal Institute of Metrology, METAS)主办的

第九届国际绝对重力仪比对 ICAG-2013。比对结果表明, NIM-3A 型绝对重力仪的测量结果偏离关键比对参考值(Key Comparison Reference Value, KCRV)  $1.5 \mu\text{Gal}$ , 标准不确定度为  $5.3 \mu\text{Gal}$ 。该结果已在国际计量局网站上公布<sup>[27]</sup>, 见

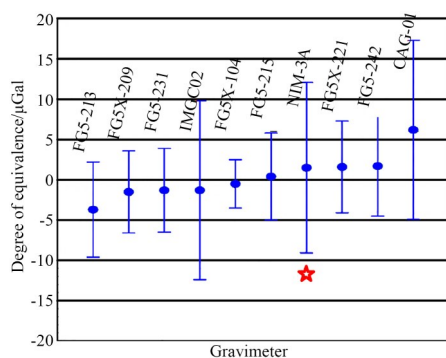


图 14 ICAG-2013 关键比对结果

Fig. 14 Results of ICAG-2013

图 14。2017 年 10 月, NIM-3A 型绝对重力仪又代表我国参加了第十届国际绝对重力仪比对 ICAG-2017, 其比对结果见图 15<sup>[28]</sup>, NIM-3A 型绝对重力仪的测量结果偏离 KCRV 值  $0.4 \mu\text{Gal}$ , 标准不确定度为  $3 \mu\text{Gal}$ 。

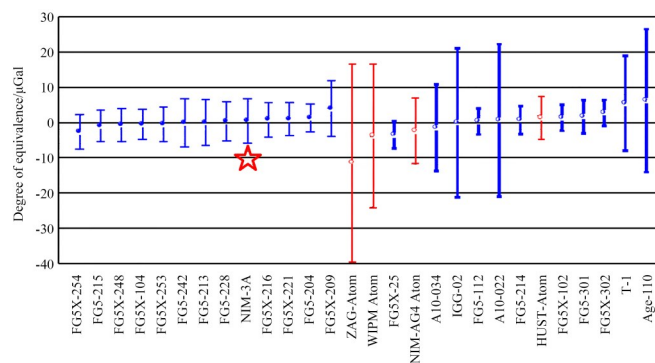


图 15 ICAG-2017 关键比对结果

Fig. 15 Results of ICAG-2017

## 6 结 论

地面振动是高精度绝对重力测量最主要的影响因素。本文提出的振动补偿法有效地降低

了地面振动对测量结果的影响, 优化了测量数据的分散性。实验结果表明: 改进后的振动补偿法使得绝对重力仪测量结果的 A 类不确定度优化了 7.8 倍, 未出现系统偏差。

### 参考文献:

- [1] WILLIAMS S D P, BAKER T F, JEFFRIES G. Absolute gravity measurements at UK tide gauges [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 28(12): 2317-2320.
- [2] 祝意青, 梁伟锋, 李辉, 等. 中国大陆重力场变化及其引起的地球动力学特征[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2007, 32(3): 246-250.  
ZHU Y Q, LIANG W F, LI H, et al. On gravity field variations and geodynamic characteristics in mainland of China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(3): 246-250. (in Chinese)
- [3] 张为民, 王勇, 詹金钢, 等. 中国地壳运动观测网络中的绝对重力测定[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2004, 29(3): 227-230.  
ZHANG W M, WANG Y, ZHAN J G, et al. Ab-

- solute gravity determination in the crustal movement observation network of China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(3): 227-230. (in Chinese)
- [4] JIANG Z, PALINKAS V, FRANCIS O. On the gravimetric contribution to watt balance experiments [J]. *Metrologia*, 2013, 50: 452-471.
- [5] ANDREAS L, ROLF K, ANDREA H. Investigation in the local gravity field of a force laboratory of PTB [J]. *Vdi Berichte*, 2002.
- [6] MARSON I, FALLER J E.  $g$ -the acceleration of gravity: its measurement and its importance [J]. *J. Phys. E*, 1988, 19: 22-23.
- [7] FALLER J E. The measurement of little  $g$ : A fertile ground for precision measurement science [J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2005, 110: 559-581.
- [8] NIEBAUER T M, SASAGAWA G S, FALLER

- J E, *et al.* A new generation of absolute gravimeters [J]. *Metrologia*, 1995, 32: 159-180.
- [9] 王启宇, 冯金扬, 李春剑, 等. 面向绝对重力仪的光束垂直性快速调节[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(1): 1-7.  
WANG Q Y, FENG J Y, LI CH J, *et al.* Fast alignment of beam verticality for absolute gravimeters[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(1): 1-7. (in Chinese)
- [10] HU H, SVITLOV S, ROTHLEITNER C, *et al.* Improvements of the MPG-2 transportable absolute ballistic gravimeter[J]. *Metrologia*, 2010, 47: 575-582.
- [11] VITOUCHKINE A L, FALLER J E. Measurement results with a small cam-driven absolute gravimeter[J]. *Metrologia*, 2002, 39(5): 465-469.
- [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): 542-549.  
HU H, WU K, SHEN L, *et al.* A new high precision absolute gravimeter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(9): 542-549. (in Chinese)
- [13] 吴琼, 郭有光, 滕云田, 等. 绝对重力仪设计中的一种新型落体控制方式[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(2): 443-449.  
WU Q, GUO Y G, TENG Y T, *et al.* A new method of controlling the falling body in absolute gravimeter design [J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(2): 443-449. (in Chinese)
- [14] 吴书清, 徐进义, 李春剑, 等. NIM-3型绝对重力仪的研制[C]. *中国国际地球物理仪器及应用学术研讨会*, 北京, 2012.  
WU SH Q, XU J Y, LI CH J, *et al.* Development of NIM-3 Absolute Gravimeter [C]. *China International Symposium on Geophysical Instruments and Applications*, Beijing, 2012. (in Chinese)
- [15] 郑森林, 林强. 分析原子干涉仪的矩阵方法[J]. *光学学报*, 2005, 25(6): 860-864.  
ZHENG S L, LIN Q. The matrix method in treating atom interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(6): 860-864. (in Chinese)
- [16] 任利春, 周林, 李润兵, 等. 不同序列拉曼光脉冲对原子重力仪灵敏度的影响[J]. *物理学报*, 2009, 58(12): 8230-8235.  
REN L CH, ZHOU L, LI R B, *et al.* Dependence of sensitivity of atom interferometer gravimeters on the Raman laser pulse sequences [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(12): 8230-8235. (in Chinese)
- [17] 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. *Study of Atomic Interference Gravity Measurement Principle Experiment* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [18] ROTHLEITNER C, SVITLOV S, MÉRIMÈCHE H, *et al.* A method for adjusting the centre of mass of a freely falling body in absolute gravimetry [J]. *Metrologia*, 2007, 44: 234-241.
- [19] 冯金扬, 吴书清, 李春剑, 等. 基于双干涉仪的自由落体绝对重力测量[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10): 2740-2746.  
FENG J Y, WU SH Q, LI CH J, *et al.* Free-fall absolute gravity measurement based on double interferometers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 2740-2746. (in Chinese)
- [20] BICH W, D'AGOSTINO G, PENNECCHI F, *et al.* Uncertainty due to parasitic accelerations in absolute gravimetry [J]. *Metrologia*, 2011, 48: 212-218.
- [21] GERMAK A, DESOGUS S, ORIGLIA C. Interferometer for the IMGC rise-and-fall absolute gravimetry [J]. *Metrologia*, 2002, 39: 471-475.
- [22] LI G, HU H, WU K, *et al.* Ultra-low frequency vertical vibration isolator based on LaCoste spring linkage [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(10): 104502-1:104502-6.
- [23] NAGOMYI V D. A new approach to absolute gravimeter analysis [J]. *Metrologia*, 1995, 32: 201-208.
- [24] FATTORI M, LAMPORESI G, PETELSKI T, *et al.* Towards an atom interferometric determination of the Newtonian gravitational constant [J]. *Physics Letters A*, 2003, 318: 184-191.
- [25] BROWN J M, NIEBAUER T M, KLINGELE E. Towards a dynamic absolute gravity system [C]. *In Gravity, Geoid and Geodynamics 2000. Proceeding of the GGG2000 IAG International*

*Symposium Banff, Canada*, 2001.

- [26] VITOUCHKINE A L, FALLER 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: 19-21.

[27] FRANCIS O, BAUMANN H, ULLRICH C, *et al.* CCM. G-K2 key comparison[J]. *Metrologia*, 2015, 52 (1A): 07009-07009.

[28] WU S, FENG J, LI C, *et al.* The results of CCM. G-K2.2017 key comparison[J]. *Metrologia*, 2020, 57(1A):7002.

作者简介:



李春剑(1983—),女,河北保定人,硕士,副研究员,2009年于中国计量科学研究院获得硕士学位,主要从事绝对重力精密测量的研究。E-mail: lichj@nim.ac.cn



吴书清(1979—),男,安徽合肥人,博士研究生,副研究员,2012年于中国计量科学研究院获得硕士学位,主要从事绝对重力精密测量的研究。E-mail:wushq@nim.ac.cn