

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007219

激光干涉绝对重力仪数据采集与处理的时间优化方法*

张 旸, 吴 琼, 滕云田, 黄家亮
(中国地震局地球物理研究所 北京 100081)

摘 要:激光干涉绝对重力仪作为高精度绝对重力测量中的典型测量仪器, 单次测量的常规流程一般是电机驱动、数据采集、重力加速度绝对值计算和结果的显示与存储。这种顺序控制过程中, 存在耗时长、结果输出时间误差较大的问题。本文创新性地提出一种时间优化方法, 通过建立数据采集前电机驱动与采集后数据处理两个过程时间复用机制的时间优化模型, 对顺序控制方式中的各步骤进行优化与重新配置, 实现缩短常规测量的测量时长, 减少结果输出时间误差的目的。实测结果表明, 时间优化方法将单次测量时间从原来的 34.3 ± 0.3 s, 精确控制为 22 s, 误差 5 ms, 大幅提高测量效率的同时实现了单次测量时间的精准控制, 也增加了与同类观测数据的融合分析的可行性。

关键词: 激光干涉; 绝对重力测量; 时间优化

中图分类号: TH762 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.99

The time-optimization technique for data acquisition and processing of the laser interference absolute gravimeter

Zhang Yang, Wu Qiong, Teng Yuntian, Huang Jialiang
(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Laser interferometer is a typical measuring instrument in high-precision absolute gravity measurement. During the conventional process of single measurement, it generally involves motor drive, data acquisition, gravity acceleration absolute value calculation, and measurement results display and storage. During the process of sequential control, it requires a lot of time and a large output time error. In this study, an innovative time-optimization method is proposed. A time optimization model of the two-process time-reuse mechanisms of motor drive and post-acquisition data processing before data acquisition is formulated. The steps in the sequential control mode are optimized and reconfigured to achieve the goal of reduce the measurement time of conventional measurements and the error of result output time. The practical measurement results show that the time optimization method could reduce the time from the original 34.3 ± 0.3 s to be the precise 22 s, and the error is 5 milliseconds. The measurement efficiency is greatly improved. Meanwhile, the precise control of a single measurement time is achieved. However, it increases the feasibility of fusion analysis with similar observation data.

Keywords: laser interference; absolute gravimetry; time optimization

0 引 言

激光干涉绝对重力仪是一种经典的高精度绝对重力测量仪器, 广泛应用于在固体地球物理^[1]、地震观测^[2-3]、大地测量^[4]等领域。激光干涉绝对重力仪作为一种建立全球重力参考网所需的关键测量仪器, 国际

计量局在固定的时间节点会组织不同测量原理、不同实现技术而性能指标相当的仪器同时同址的比对以获取与真值更加逼近的测量结果, 并标定每套参比仪器的系统偏差, 用来建立全球绝对重力基准^[5]。目前全球有多家机构从事高精度绝对重力仪的研究工作^[6], 测量原理包含激光干涉^[7-9]和原子干涉^[10-11]两种, 但是目前世界上唯一商用的只有美国 Micro-g 公司的 FG5/

收稿日期: 2020-12-09 Received Date: 2020-12-09

* 基金项目: 科技部重点研发计划专项(2018YFC1503801)、中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项(DQJB19B23)资助

A10 系列的激光干涉绝对重力仪。

在激光干涉绝对重力仪的测量控制过程中,电机驱动提升、释放和承接落体、数据采集、重力加速度绝对值(g 值)计算、各类系统误差的补偿值计算以及测量结果的显示与存储等环节通过顺序控制方式完成^[12-13]。这就势必造成单次测量所需时间是各个环节耗时的叠加^[14-15]。其中基于数字化干涉信号提取时间位移坐标完成落体自由下落轨迹重构的绝对重力仪,单次测量时间一般在 35 s 甚至更长,而基于过零点触发硬件完成干涉信号处理的 FG5/A10 型绝对重力仪,单次测量时间在 18 s。由于每次测量对应的干涉信号过零次数不尽相同,也会造成单次测量结果输出的时间不固定,这也为同类观测仪器测量数据间的对比融合分析^[16-17]造成障碍。

本文采用时间复用机制,通过调整绝对重力测量的数据采集处理顺序,设计在数据采集准备开始后同时执行重力加速度绝对值(g 值)计算的时间优化流程,建立数据采集与处理的时间优化模型,依据模型利用 C#.net 编程技术编写多组循环测量程序,在 Age 型激光干涉绝对重力仪系统中运行测量程序,以数据采集的时间优化方法进行测量。时间优化方法的实现大幅缩短了单次测量时间,并对单次测量结果产出的时刻进行精准控制,提高了与同类地球物理仪器观测数据^[18-21]在时间尺度上的可比性,同时也大幅提高了整机的测量效率。

1 激光干涉绝对重力测量模型

1.1 常规测量流程分析

目前激光干涉绝对重力单次测量流程如图 1 所示,首先驱动电机上升将安装在高真空腔体内的被测元件提升至设定位置;然后对采集卡进行配置,并驱动电机加速下降实现被测元件处于自由下落状态时进行干涉信号和振动信号采集;基于同步采集的干涉信号和振动信号调用算法计算 g 值;测量过程中各类系统误差修正值计算;最后进行数据显示、结果计算、文件保存等处理,执行循环测量。

依据测量流程,按照相关性和功能划分,定义第 k 次测量过程以测量控制顺序分成 a 数据采集前准备阶段、b 数据采集阶段、c 数据采集后处理 3 个阶段,具体说明如下。

1) a 阶段包括电机上升和等待系统稳定。该阶段耗时 T_{ak} 为:

$$T_{ak} = t_D + t_{Aw} \quad (1)$$

式中: t_D 为电机上升时间; t_{Aw} 为稳定时间。

2) b 阶段包括采集卡配置、电机下降和原始数据采

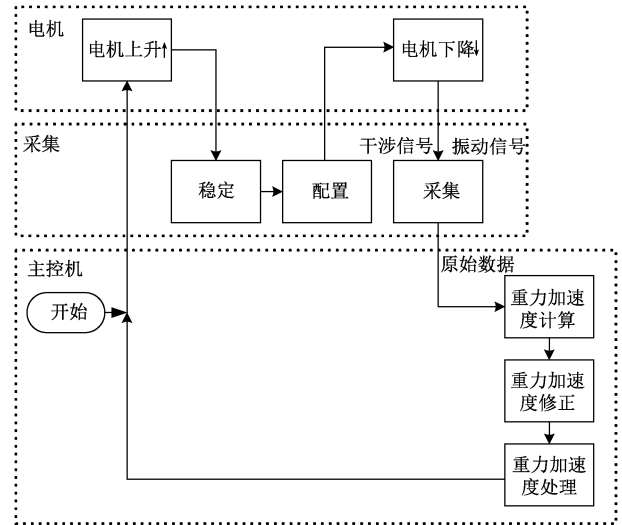


图 1 激光干涉绝对重力仪的常规测量流程

Fig. 1 Conventional measurement flow of the laser interference absolute gravimeter

集。该阶段耗时 T_{bk} 为:

$$T_{bk} = t_{AS} + t_U + t_{ADk} \quad (2)$$

式中: t_{AS} 为采集配置时间; t_U 为电机下降时间; t_{ADk} 为采集原始数据时间。

3) c 阶段包括 g 值计算、系统误差修正值计算。为了获取高精度重力加速度值,在进行 g 值计算的程序中必须包含振动误差的修正,不同的振动误差修正算法对应不同的计算时间。该阶段耗时 T_{ck} 为:

$$T_{ck} = t_{gk} + t_{g'k} + t_{g''k} \quad (3)$$

式中: t_{gk} 为 g 值计算时间; $t_{g'k}$ 为系统误差修正值计算时间; $t_{g''k}$ 为重力加速度处理时间。

则完成 n 次测量所需的总时间 T_C 为:

$$T_C = \sum_{k=1}^n (T_{ak} + T_{bk} + T_{ck}) \quad (4)$$

1.2 测量流程的时间优化模型

绝对重力仪测量流程优化主要实现两个目标:大幅缩短单次测量的总时间;单次测量的时间精准控制。

测量的总时间包括各个单次测量时间,需要对单次测量进行优化设计。单次测量流程的 a、b、c 三个阶段相互关系如下:

1) 每次测量, a 阶段必须先执行,通过电机上升和等待系统稳定达成数据采集条件。

2) b 阶段需要与 a 阶段对应,通过电机下降和数据采集完成一次数据采集。

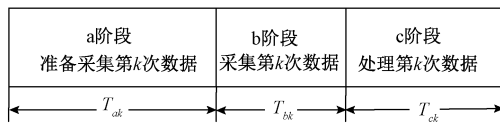
3) 每次生成原始数据后, c 阶段才能执行,通过主机完成数据采集后的 g 值计算。

在满足 3 个阶段相互关系条件下,考虑到 a、b 阶段

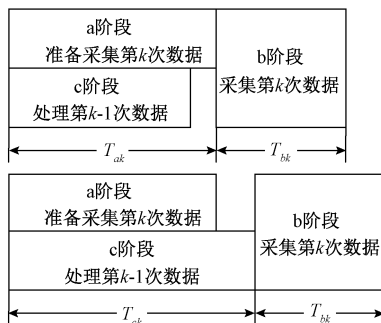
和c阶段是异步执行关系(a、b阶段是电机和采集卡执行,c阶段是主控机上执行),不需要a、b、c三个阶段完全按顺序执行。由于a、c两个阶段执行时间较长都需要十几秒以上,如果c阶段处理上一次原始数据,则a、c两个阶段可以同时执行,即把a阶段执行时间复用在c阶段执行上用以缩短时间,b阶段等待a、c两个阶段都结束后再执行,这就是单次测量流程优化设计的基本思路,具体如图2(a)所示。

单次测量优化时间为 T_{ak} 或 T_{ck} (T_{ak} 和 T_{ck} 其中最大值)与 T_{bk} 之和,相比按顺序执行时间的 T_{ak} 、 T_{bk} 、 T_{ck} 之和,缩短了 T_{ck} 或 T_{ak} (T_{ak} 和 T_{ck} 其中最小值)。对于整体 n 次测量,时间优化设计第1次测量只执行a、b阶段获得第1次数据,第 n 次后再单独执行1次c阶段处理第 n 次数据, $n-1$ 次测量均执行单次测量优化,因此相比按顺序执行的 n 次测量和,优化设计的总时间大约可缩短 $(n-1) \times (T_{ck}$ 或 $T_{ak})$ 。

单次测量顺序执行:



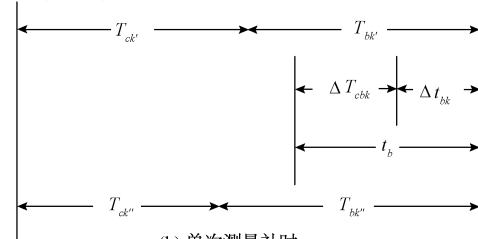
单次测量优化执行:



(a) 单次测量优化

(a) Optimization of single measurement

单次测量优化补时:



(b) 单次测量补时

(b) Time compensation for single measurement

图2 激光干涉绝对重力仪的优化测量流程

Fig. 2 The time-optimization measurement process of the laser interference absolute gravimeter

经过时间复用优化的单次测量,由于a阶段和c阶段同时执行,原来各自的时间效应也相应的重合。如单

次测量时间差值,常规测量差值取决于 T_{ak} 、 T_{bk} 、 T_{ck} 三部分,而优化后只取决于 T_{ak} 或 T_{ck} 与 T_{bk} 两部分,优化的单次测量考虑的因素变少时间差值变小,易于做时间上的控制与处理。

通过单次测量补时设计可以固定单次测量优化时间。优化时间为 T_{ck} 与 T_{bk} 之和,由于 T_{ck} 与 T_{bk} 都不固定,可以在 T_{bk} 中加入单次测量补时 Δt_{bk} ,如图2(b)所示,设补时固定值 t_b 取值范围大于 T_{ck} 与 T_{bk} 之和的变化差值 ΔT_{cbk} ,则加入补时 Δt_{bk} 可使单次测量时间固定。对于优化时间为 T_{ak} 与 T_{bk} 之和,由于 T_{ak} 固定, Δt_{bk} 取 T_{bk} 的变化差值。

在时间优化设计的测量中,第1次测量时间记为 T_{a1} 、 T_{b1} 和最后计算的 T_{ck+1} 之和,如果 T_{b1} 取最小值, T_{ck+1} 取最大值,当固定值 $T_{ak} < T_{ck}$ 则第1次测量时间近似比单次测量固定时间多 T_{a1} ;而当 $T_{ak} \geq T_{ck}$ 也可近似为多 T_{a1} 。选取单位时间为 T_U ,单次测量优化固定时间为 T_s ,测量次数就等于 $[(T_U - T_{a1})/T_s]$ 。在单位时间内控制固定测量次数可以获取绝对重力测量的分时段。

综上,建立绝对重力测量数据采集的时间优化模型。定义第 k 次测量a阶段、b阶段和c阶段的时间如式(5)~(7)所示,定义 $T_{a \cup c}$ 表示一次测量a阶段和c阶段的合并时间(等于其中最大值)如式(8)所示,测量 n 次的总时间如式(9)所示。

$$T_{ak} = t_D + t_{Aw} \quad (5)$$

$$T'_{bk} = t_{As} + t_U + t_{ADk} + \Delta t_{bk} \quad (6)$$

$$T_{ck} = t_{g^{k-1}} + t_{g'^{k-1}} + t_{g''^{k-1}} \quad (7)$$

$$\begin{cases} T_{a \cup c} = T_{ak}, T_{ck} \leq T_{ak} \\ T_{a \cup c} = T_{ck}, T_{ak} < T_{ck} \end{cases} \quad (8)$$

式中: t_D 表示电机上升时间; t_{Aw} 表示采集稳定时间; T_{ak} 表示第 k 次测量a阶段的时间; t_{As} 表示采集配置时间; t_U 表示电机下降时间; t_{ADk} 表示第 k 次采集原始数据时间; Δt_{bk} 表示第 k 次测量补时时间; T'_{bk} 表示第 k 次测量b阶段的时间; $t_{g^{k-1}}$ 表示第 $k-1$ 次重力加速度计算时间; $t_{g'^{k-1}}$ 表示第 $k-1$ 次重力加速度修正补偿时间; $t_{g''^{k-1}}$ 表示第 $k-1$ 次重力加速度处理时间; T_{ck} 表示第 k 次测量c阶段的时间。

$$T'_G = T_{a1} + T_{b1} + \sum_{k=2}^n (T_{a \cup c} + T_{bk}) + T_{cn+1} \quad (9)$$

式中: n 表示测量次数; T_{a1} 表示第1次测量a阶段的时间; T_{b1} 表示第1次测量b阶段的时间; T_{cn+1} 表示第 n 次测量c阶段的时间; T'_G 表示测量 n 次总共的时间。

2 时间优化方法实现

在绝对重力测量过程中一般采用分组测量再求总体平均值作为最终测量结果,因此依据数据采集的时间优

化模型,设计多组循环测量的程序执行结构,如图 3 所示。连续测量次数定为组数 j 和每组测量次数 i 的乘积,总循环次数 k 则为 $ixj+1$ 次。第 1 次循环程序执行 a(1) 阶段和 b(1) 阶段获取第 1 次原始数据,以后按照单次测量优化方法,如第 2 次循环,先执行第 2 次数据采集准备 a(2) 阶段,同时执行对第 1 次原始数据处理 c(1) 阶段计算得出第 1 次重力加速度数据,再执行第 2 次数据采集 b(2) 阶段获取第 2 次原始数据。每组循环结束后的下一次循环 c(k) 阶段增加对上一组原始数据的单组处理。最后一次循环 $ixj+1$ 次执行增加多组处理的 c(ixj) 阶段,完成整个连续测量。



组数j			
循环次数	a阶段	c阶段	b阶段
$K=i \times (j-1) + 1$	a($i \times (j-1) + 1$)	c($i \times (j-1)$)	b($i \times (j-1) + 1$)
$K=i \times (j-1) + 2$	a($i \times (j-1) + 2$)	c($i \times (j-1) + 1$)	b($i \times (j-1) + 2$)
...
$K=i \times j$	a($i \times j$)	c($i \times j - 1$)	b($i \times j$)
$K=i \times j + 1$		c($i \times j$)	

图 3 时间优化多组循环测量

Fig. 3 Multiple cycle measurement by using time-optimization measurement process

编程实现时间优化多组循环测量,对应 a/c 阶段和 b 阶段功能,测量中程序每次循环依次执行 a 程序、c 程序和 b 程序,如图 4 所示,具体过程如下。

1) a 程序实现驱动电机开始上升。记录本次测量的

起始时刻 N_k 取到毫秒级,然后驱动电机开始上升。

2) c 程序实现对上次原始数据的 g 值计算、系统误差补偿值和 g 值处理。完成图形显示与中间测量结果保存。当一组测量结束后完成单组结果计算,图形显示与数据保存。测量完成后进行总体测量结果计算。

3) b 程序实现在 a 阶段和 c 阶段执行完后采集原始数据并补时。首先计算当前时刻 N'_k 与 N_k 差值 ($N'_k - N_k$),与程序设定的 T_{ak} 比较,小于 T_{ak} 则等待相差时间 $T_{ak} - (N'_k - N_k)$ 即等待 a 阶段与 c 阶段时间差完成。再记录当前采集起始时刻 N''_k ,配置采集卡并驱动电机开始下降,然后驱动采集卡开始两个通道原始数据的同步采集,等待采集卡的数据传到主机上后,b 阶段完成采集结束,记录采集结束时刻 N'''_k ,为减少异步误差设定的 t_b 可以从 N'''_k 开始计算,最后补时 Δt_{bk} 。

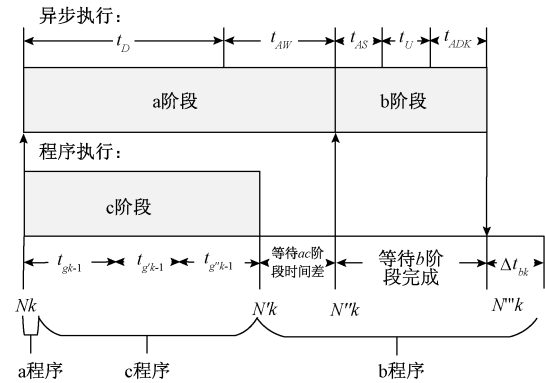


图 4 时间优化单次程序执行

Fig. 4 Single program execution under time-optimization

3 实验测试与分析

实验环境选取一套国内典型的 Age 型激光干涉绝对重力仪系统,系统运行依据时间优化模型开发的时间优化多组循环测量程序进行实地架设测量。

测量前根据 Age 型重力仪系统实际测量所需的参数设置情况,计算测量控制设备理论运行时间,设定数据采集模型中的常量, $t_D = 12$ s, $t_{Aw} = 8$ s, $t_{As} = 10$ ms, $t_U = 400$ ms。经过算法测试,调用固定算法的变量 t_{gk-1} 约 11~13 s, $t_{g'k-1}$ 约 100~300 ms, $t_{g''k-1}$ 约 1~2 s。按照数据采集模型,单次测量常规时间为 $T_{ak} + T_{bk} + T_{ck}$ 约 34~36 s, 单次测量优化时间为 $T_{ak} + T_{ck}$ 约 21~22 s, 单次测量优化固定时间可取 22 s。

在相同条件下进行常规和时间优化与时间优化补时的连续测量,结果文件记录毫秒级测量时间,测量次数 $n = 1\ 250$ 。运行结果如图 5 所示。

常规单次测量时间值 34.3 ± 0.3 s, 优化单次测量时间值 21.4 ± 0.05 s, 优化补时的单次测量时间值 22 s, 误

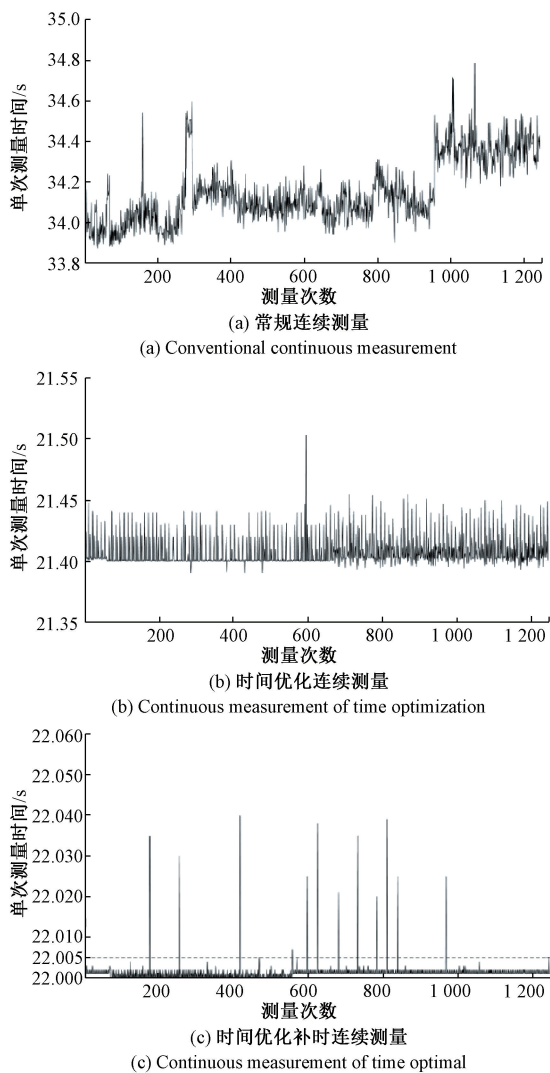


图5 单次测量耗时测试

Fig. 5 Time consuming test of single measurement

差 5 ms。在相同条件下完成 1 250 次测量时,常规测量的总时间 11 h 9 min 16.955 s,时间优化测量的总时间 7 h 25 min 58.868 s,时间优化补时为 7 h 38 min 21.835 s,结果具体分析如下:

1) 时间优化的单次测量可节省时间约 13 s,1 250 次测量缩减总体测量时间约 4 h,测量次数越多测量的总时间缩短会越明显。

2) 时间优化的单次测量的耗时误差从常规的 0.3 s 降至 0.05 s,耗时误差明显减小一方面是高效的时间复用机制使得过程变量变少,另一方面也是异步执行的测量控制误差减少。

3) 时间优化补时的单次测量耗时最大误差约为 40 ms,这类误差是非实时计算机系统中资源抢占造成的粗大误差,同一计算机系统条件下的单次测量均存在该误差。但是在常规和时间优化单次测量的时间统计中,

该误差值湮没在固有的控制时间误差范围内,无法有效识别。而对于时间优化补时单次测量中,可以通过数理统计中通用的粗差剔除算法精准识别,因此可以确定时间优化补时方法的单次测量耗时的实际误差在 5 ms 以内,如图 5(c) 所示。

4) 时间优化补时的单次测量的固定时间设定 22 s 也可取其他值,设计算法还可以动态补加时间值用以控制单位时间内测量的固定次数。

4 结 论

本文详细分析了激光干涉绝对重力常规测量各环节的相互关系,通过建立数据采集前电机驱动与采集后数据处理两个过程时间复用机制的时间优化模型,对顺序控制方式中的各步骤进行优化与重新配置,并编程实现了时间优化模型。

在 Age 型激光干涉绝对重力仪系统中运行结果表明,单次测量时间从常规的 34.5 ± 0.5 s,精确控制为 22 s,误差 5 ms,测量的总时间大幅缩短,单次测量的耗时误差大幅减小,其补时设计让单次测量时间达到设定值进而能在单位时间内控制固定测量次数。

本文的时间优化方法能够大幅缩短常规测量时间,并对单次测量结果产出的时刻进行精准控制,增加了与同类观测数据的融合分析的可行性,同时大幅提高整机的观测能力和运行效率,为激光干涉绝对重力仪的研发提供解决方案和技术借鉴。

参考文献

- [1] D'AGOSTINO G, DESOGUS S, GERMAK A, et al. The new IMGC-02 transportable absolute gravimeter: Measurement apparatus and applications in geophysics and volcanology [J]. *Annals of Geophysics*, 2008, 51(1): 39-49.
- [2] TIMOFEEV V Y, KALISH E N, STUS Y F. Gravity and displacement variations in the areas of strong earthquakes in the east of russiaizvestiya [J]. *Physics of the solid earth*, 2018, 54(3): 430-443.
- [3] XING L L, WANG L H, HU M Z. Determination of mantle upwelling rate beneath Taiyuan basin by using absolute gravity, GPS [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 138: 179-184.
- [4] OLIVIER F, HENRI B, TOMAS V, et al. The European comparison of absolute gravimeters 2011 (ECAG-2011) in Walferdange, Luxembourg: Results and recommendations [J]. *Metrologia*, 2013, 50: 257-268.
- [5] JIANG Z, PALINKAS V, ARIAS F E, et al. The 8th

- international comparison of absolute gravimeters 2009: the first key comparison (CCM. G-K1) in the field of absolute gravimetry [J]. *Metrologia*, 2012, 49: 666-684.
- [6] NIEBAUER T M, SASAGAWA G S, FALLER J E, et al. A new generation of absolute gravimeters [J]. *Metrologia*, 1995, 32: 159-180.
- [7] 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): 099101. 1-099101. 8.
HU H, WU K, SHEN L, et al. A new high precision absolute gravimeter [J]. *Acta Phys. Sin.* 2012, 61(9): 099101. 1-099101. 8.
- [8] 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, 28(4): 2141-2147.
TENG Y T, WU Q, GUO Y G, et al. New type of high-precision absolute gravimeter based on laser interference [J]. *Progress in Geophys.* 2013, 28(4): 2141-2147.
- [9] WU X, PAGEL Z, PAGEL Z, et al. Gravity surveys using a mobile atom interferometer [J]. *Science Advances* 2019, 5 (9): eaax0800.
- [10] MÉNORET V, VERMEULEN P, MOIGNE N LE, et al. Gravity measurements below 10^{-9} g with a transportable absolute quantum gravimeter [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 12300.
- [11] 吴琼,滕云田,黄大伦,等. 绝对重力仪研制中一种新的自由落体轨迹重建算法[J]. *地震学报*,2012, 34(4): 549-556.
WU Q, TENG Y T, HUANG D L, et al. A new type of algorithm for rebuilding the trace of free-fall body in absolute gravimeter development [J]. *Acta. Seismologica Sinica*, 2012, 34(4): 549-556.
- [12] WU Q, TENG Y T, ZHANG B, et al. Application of generic algorithm to improving measurement accuracy of laser interference absolute gravimeter [J]. *Instrumentation Measure Metrologie*, 2018, 18 (3): 467-477.
- [13] 吴燕雄,滕云田,吴琼,等. 船载绝对重力仪测量系统的误差修正模型及不确定度分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*,2020,10. 13203/j. whugis20190412.
WU Y X, TENG Y T, WU Q, et al. Error correction model and accuracy analysis of the shipborne absolute gravity measurement system [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, DOI: 10. 13203/j. whugis20190412.
- [14] 李俊秋,张雁翔,周晨,等. 黑龙江重力仪器对松原地震的同震响应分析[J]. *科学技术创新*,2020(7): 38-39.
LI J Q, ZHANG Y X, ZHOU CH, et al. Analysis of coseismic response of gravity instrument to Songyuan earthquake in Heilongjiang Province [J]. *Science and Technology Innovation*,2020(7):38-39.
- [15] 秦佩,梁连仲,陶照明,等. 数字重力仪高精度恒温测温系统设计与测试研究[J]. *地球物理学报*,2019, 62(10):3665-3674.
QIN P, LIANG L ZH, TAO ZH M, et al. Design and test of high precision constant temperature measuring system for digital gravimeter [J]. *Chinese Journal of Geophysics*,2019,62(10):3665-3674.
- [16] 张新林,韩宇飞,汪健,等. 2010~2018年中国大陆构造环境监测网络绝对重力仪比测结果分析[J]. *中国地震*,2020,36(4):872-878.
ZHANG X L, HAN Y F, WANG J, et al. Analysis of absolute gravimeter comparison results of tectonic environment monitoring network in China continent from 2010 to 2018 [J]. *Earthquake Research in China*,2020, 36(4):872-878.
- [17] 王应建,邱雪峰,张松堂,等. A10/35绝对重力仪测试及性能分析[J]. *海洋测绘*,2015,35(6):65-68.
WANG Y J, QIU X F, ZHANG S T, et al. Measurement and performance analysis of A10/35 absolute gravimeter [J]. *Marine Surveying and Mapping*, 2015, 35(6):65-68.
- [18] 刘向东,刘习凯,马东,等. 超导重力仪器:机遇与挑战[J]. *导航与控制*,2019,18(3):7-13.
LIU X D, LIU X K, MA D, et al. Superconducting gravity instruments: opportunities and challenges [J]. *Navigation and Control*,2019,18(3):7-13.
- [19] 邓友茂,王振亮,孙诚业. CG-5重力仪的观测时间与精度分析[J]. *地质装备*,2020,21(1):30-33.
DENG Y M, WANG ZH L, SUN CH Y. Analysis of observation time and accuracy of CG-5 gravimeter [J]. *Geological Equipment*,2020,21(1):30-33.
- [20] 梁霄,徐如刚,林承灏,等. CG-5型重力仪漂移特性与分段平差处理[J]. *大地测量与地球动力学*,2020, 40(6):655-660.
LIANG X, XU R G, LIN CH H, et al. CG-5 gravimeter drift characteristics and time-division adjustment treatment [J]. *Geodesy and Geodynamics*,2020,40(6):

655-660.

- [21] 路利春,周明霞,张佩,等. CG-5 型高精度重力仪器外业工作中常见问题及解决方法[J]. 陕西地质,2018, 36(2):68-72.

LU L CH, ZHOU M X, ZHANG P, et al. Common problems and solutions of CG-5 high precision gravity instrument in field work [J]. *Geology of Shaanxi*, 2018, 36(2):68-72.

作者简介



张阳,2011 年于中国地震局地球硕士学位,现为中国地震局地球物理研究所工程师,主要研究方向为地球物理观测技术及仪器的研发。物理研究所获得。

E-mail: zhangyang@cea-igp. ac. cn

Zhang Yang received his M. Sc. degree from Institute of Geophysics, China Earthquake Administration in

2011. He is currently an engineer at Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. His main research interests include geophysics observation technology and equipment.



吴琼(通信作者),2005 年于北京石油化工学院获得学士学位,2011 年于中国地震局地球物理研究所获得理学博士学位,现为中国地震局地球物理研究所研究员,主要研究方向为地球物理观测技术及仪器的研发。

E-mail: wuqiong@cea-igp. ac. cn

Wu Qiong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beijing Institute of Petrochemical Technology in 2005, and received his Ph. D. degree from Institute of Geophysics, China Earthquake Administration in 2011. He is currently a researcher at Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. His main research interests include geophysics observation technology and equipment.