

WANG Linsong, CHEN Chao, DU Jinsong, et al. Test Measurements and Analysis of the A10-022 Absolute Gravimeter in the Lushan Short Calibration Line[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(3): 347-352. (王林松, 陈超, 杜劲松, 等. A10-022 绝对重力仪在庐山短基线的测量试验与分析[J]. 测绘学报, 2012, 41(3): 347-352.)

## A10-022 绝对重力仪在庐山短基线的测量试验与分析

王林松<sup>1</sup>, 陈超<sup>1,2</sup>, 杜劲松<sup>1</sup>, 王同庆<sup>1</sup>

1. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 湖北 武汉 430074

### Test Measurements and Analysis of the A10-022 Absolute Gravimeter in the Lushan Short Calibration Line

WANG Linsong<sup>1</sup>, CHEN Chao<sup>1,2</sup>, DU Jinsong<sup>1</sup>, WANG Tongqing<sup>1</sup>

1. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Three Gorges Research Center for Geo-hazard of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The A10 mobile absolute gravimeter provides us with high stability, high reliability and high measurement precision observed data after years improving and practicing in researches. The A10-022 absolute gravimeter is used to measure the absolute gravity at partial gravity base points in Lushan short calibration line. The results show that it is feasible to firstly utilize A10 absolute gravimeter to mobile absolute gravity observation with a purpose of relative gravimeter calibration field, and measuring stably and efficiently. The gravity values of the base points are independent, so there is no error accumulation and transmission, and observation results have high precision.

Key words: A10 absolute gravimeter; mobile observation; short calibration line; measurement precision and stability

摘 要: A10 流动式绝对重力仪通过近几年来改进与实用研究, 已说明其观测结果的稳定性、可靠性及具有较高的测量精度。利用 A10-022 绝对重力仪对庐山短基线部分重力基点进行绝对重力测量, 试验结果表明利用 A10 绝对重力仪进行室外相对重力仪格值标定场的流动绝对重力测量, 是可行的, 测量稳定而高效, 获得的各基点重力值相互独立, 没有误差积累与传递, 观测结果精度较高。

关键词: A10 绝对重力仪; 流动观测; 短基线; 测量精度与稳定性

中图分类号: P244

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2012)03-0347-06

基金项目: 国家自然科学基金(40730317; 40774060); 科技部国际科技合作专项(2010DFA24580); 中国地质大学(武汉)教学实验室开放基金(SKJ2011089)

## 1 引 言

在 1985 国家重力基本网的基础上重建的 2000 国家重力基本网(简称 2000 网), 是中国重要的基础测绘工程项目。其中, 建立的 8 条国家级高精度重力仪格值短基线标定场为测绘、资源勘探、地震预报、空间技术和国防建设等领域中重力仪的标定提供高精度的基础设施<sup>[1]</sup>。庐山相对重力仪格值标定场(短基线)始建于 1985 年, 标定场内 24 个基点沿庐山北山公路布设。庐山基线共进行了 5 次大规模的观测<sup>[2-3]</sup>, 由各次观测的结果及其变化可见<sup>[4]</sup>: 1985 年建场的基线值与次年中德合作观测结果几乎一致, 23 个测段中最大差值仅为  $7 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ , 各测段差值绝对值的平均

值为  $2.3 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。这个结果既显示了庐山基线建场观测值的可靠性, 又说明该地区地质构造比较稳定。由于庐山基线部分测点因公路扩建以及时间久而遭不同程度破坏与丢失, 在 2000 年与 2011 年复测前, 分别由中国地震局地震研究所以及陕西地矿局第二综合物探大队对测点重新进行了选埋。而在以往的基点重力段差测量中, 均采用多台相对重力仪同时进行循环重复观测, 测量比较耗时耗力。

中国地质大学(武汉)于 2010 年 4 月购买型号为 A10-022 绝对重力仪, 通过长期的室内同点观测试验及其与精度更高的 FG5 的比对以验证 A10-022 的观测性能, 即测量稳定性与可靠性, 取得了较好的观测结果。本文尝试采用野外流动式

绝对重力仪 A10 与相对重力仪联合进行庐山重力仪格值标定场的重建,探讨野外流动式绝对重力仪 A10 的测量可行性及其相关技术要求。此次 A10-022 绝对重力仪的观测试验是在 2000 年修建后观测点基础上进行的,故将最后观测结果与 2000 年复测段差结果比对。

## 2 A10-022 绝对重力仪的测量稳定性与可靠性

通过 Preston-Thomas 等科研人员的早期工作,几代的绝对重力仪相继被开发并且商业化<sup>[5]</sup>,JILA 型可移动式绝对重力仪,在国内早期国际绝对重力基本网测量中得到了较好的应用<sup>[6]</sup>。FG5 与 A10 型绝对重力仪是在 JILA 型的基础上研制成功的,并且 FG5 是目前最先进、商业化程度最高的绝对重力仪<sup>[7-8]</sup>,国际绝对重力仪比对显示出不同型号的 FG5 测量的绝对重力值具有较高的一致性<sup>[9]</sup>。而 FG5 绝对重力测量通常需要稳定的环境条件,一些在室外观测的实例中,也需要一些比较充足的后勤保障,比如具有观测墩面的临时性测量集装箱或帐篷。基于这些原因,Micro-g LaCoste 公司开发了一种可在户外环境下使用的、快速采集数据以及可携带式的自由落体式绝对重力仪——A10。A10 绝对重力仪的标称测量精确度(accuracy)为  $\pm 10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ,试验证明在安静的基站其测量精度优于  $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ <sup>[10-13]</sup>。

### 2.1 A10-022 的测量稳定性分析

当外界观测环境理想与稳定时,A10 的稳定性主要取决于铷原子钟与偏正氦氖激光器的稳定性。作为时间标尺的铷原子钟,会以每年  $1 \times 10^{-10}$  的速率衰老,如果忽略这种老化的影响,会导致重力值以每年  $0.2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  的变化;A10 绝对重力仪采用偏正稳定的氦氖激光器(ML-1)作为标准距离标尺<sup>[14]</sup>。经过长期对该类型激光的标定文献<sup>[15]</sup>认为激光频率会以至少 1 MHz/年变化,进而导致重力值平均每年  $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  的变化。在定期的校准中,可以根据标定的激光波长线性插值得到漂移率<sup>[15-16]</sup>。而文献<sup>[13]</sup>在两次对激光校准的过程中,均发现两种模型的红蓝波长都存在漂移,但漂移的大小相同、方向相反,导致最后的测量结果(即绝对重力值)没有发生变化。A10-022 绝对重力仪在出厂前已对激光和铷原子

钟进行了严格的校正,短时间内还无需进行校正,但在今后长期的使用过程中进行重新标定也是必要的。

A10 绝对重力测量原理是当块体下落时,通过原子钟和激光干涉仪产生的光波干涉条纹数获得精确的时间-距离对,从而能够计算出重力加速度的值<sup>[10]</sup>。其中合理地选择干涉条纹的开始与结束时间显得十分重要<sup>[13]</sup>。根据 A10-022 试验结果,选择开始条纹(starting fringe)为 30 ms、停止条纹(stopping fringe)为 135 ms。表 1 为从 2010 年 4 月开始在中国地质大学(武汉)重力实验室内进行 1 个月的同点重复观测结果,采用观测组数较少,整个测量时间均在 30 min 之内。从表 1 可以看出,1 个月内的 4 次测量获得的重力值约在  $\pm 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  内变化,组间标准差均在  $\pm 3 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  以内。因此,同点重复测量显示了 A10-022 在下落次数及组数都相对较少的前提下,同样获得了具有较高稳定性的测量结果。

表 1 同点 1 个月内的 4 次观测结果

Tab. 1 Four observed results of the same point in one month

观测时间	下落间隔时间 /s	组数	每组下落次数	重力值 / $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$	组间标准差 / $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$
2010-04-15	6	4	50	~705.51	1.05
2010-04-20	6	4	50	~705.64	2.35
2010-04-26	6	4	50	~706.75	2.86
2010-05-17	6	4	50	~705.21	2.22

注:“~”表示隐去的绝对重力值相同重复的前 6 位数

### 2.2 A10-022 与 FG5-232 的比对

中国科学院测量与地球物理研究所九峰动力大地测量中心实验观测站始建于 20 世纪 80 年代末,室内温度年变化较小,所有基墩均建在基岩上,均由水泥浇铸而成,基墩四周留有隔震槽,以降低周围环境的微震干扰给观测仪器造成的影响。A10-022 绝对重力仪于 2010 年 5 月 21 日于中科院测量与地球物理研究所九峰山台站进行了观测。2010 年 7 月至 2011 年 10 月,国家地震局地震研究所利用 FG5-232 重力仪分别在该台站进行了 3 次测量。2 台绝对重力仪的观测结果见表 2。

表 2 测地所九峰观测站 #020 观测台 A10-022 与 FG5-232 绝对重力观测结果与比较

Tab. 2 Comparison between the absolute gravity observations of A10-022 and FG5-232 at the Jiufeng observing station (No. 020)

仪器型号	观测时间	组数	下落间隔时间/s	每组下落次数	重力垂直梯度 /(10 <sup>-8</sup> m/s <sup>2</sup> /cm)	初始高度重力值 (A10: 71.5 cm, FG5: 130 cm) /(10 <sup>-8</sup> m/s <sup>2</sup> )	转换到 130 cm 处重力值 /(10 <sup>-8</sup> m/s <sup>2</sup> )	组间 标准差 /(10 <sup>-8</sup> m/s <sup>2</sup> )
A10-022	2010-05-21	28	6	50	-2.823 5	~537.59	~372.42	3.09
FG5-232	2010-07-16	25	10	100	-2.823 5	~370.25	~370.25	1.49
FG5-232	2011-07-24	30	10	100	-2.8235	~368.82	~368.82	1.20
FG5-232	2011-10-26	25	10	100	-2.8235	~369.44	~369.44	1.13

注:“~”表示隐去的绝对重力值相同重复的前 6 位数

由于 FG5-232 常年在全国各基站进行重复绝对重力测量及比对,测量结果稳定可靠<sup>[17-19]</sup>。并且 FG5-232 于 2007 年 11 月在卢森堡 Walferdange 举办的第 2 次绝对重力比对中,观测结果表明 FG5-232 仪器的相对偏差在所有参加的 20 台仪器中是最小的((1.4±0.7)×10<sup>-8</sup> m/s<sup>2</sup>)<sup>[20]</sup>,这为利用 A10-022 与高精度的 FG5-232 的比对奠定了坚实的基础。由表 2 可以看出,A10-022 与 FG5-232 的 3 次观测结果偏离均在 4×10<sup>-8</sup> m/s<sup>2</sup> 以内,明显优于 A10 的 10×10<sup>-8</sup> m/s<sup>2</sup> 标称测量精度,并且 A10 相比 FG5 在安装、测量时间以及对环境因素适应等方面都有其自身的优势,这也为仪器的野外测量提供了一个相对可靠的依据。

结合 A10-022 绝对重力仪的重复同点测量,以及在国家基准点与更精确的仪器(如 FG5)比对,验证了 A10-022 的精准性和长时间的稳定性及可靠性。通过观测表明,A10-022 重力仪在环境噪声较低的实验室测点上,能够提供优于±6×10<sup>-8</sup> m/s<sup>2</sup> 的精确度,并且在野外流动观测点上能达到优于±10×10<sup>-8</sup> m/s<sup>2</sup> 的精确度(厂家规格)。

### 3 数据采集与处理

#### 3.1 软件采集参数设置

考虑到流动观测的可操作性,相比 FG5 每个观测点不少于 20 组的观测组数,A10 观测组数的选择既要顾及观测精度,同时也要适合于自身的流动性特点,所以在观测组数与结果可靠性的选取上也必须通过试验对比得出一个较合适的观测组数。同时在落体下落间隔时间的选择上也需要通过长期的对比试验来得到一个适合于野外流动观测且精度较高的下落间隔时间。

在庐山标定场相邻的九江地震台重力引点的测量中,通过设置不同观测组数、每组下落次数及下落间隔时间,对比最后的结果与观测精度。表 3 为 3 次独立的仪器安装(不同日期)以及同 1 次仪器安装内的 3 次不同采集参数设置而得到的测量结果(已经过气压、固体潮、极移、基准高度等校正)。通过试验对比,说明在满足精度要求的前提下,A10 在观测组数、下落间隔时间以及组间间隔时间上都要少于 FG5 测量设置的采集参数。从表 3 可以看出同点观测、不同参数设置的测量结果相差很小。

表 3 九江地震台重力基准点引点不同参数设置的观测结果<sup>[21]</sup>

Tab. 3 Observation results with different acquisition parameter settings at the gravity point convenient for use of Jiujiang seismostation<sup>[21]</sup>

安装编号	观测时间	下落时间/s	组间间隔时间/min	每组下落次数/次	2 组观测结果 /(10 <sup>-8</sup> m/s <sup>2</sup> )	4 组观测结果 /(10 <sup>-8</sup> m/s <sup>2</sup> )	8 组观测结果 /(10 <sup>-8</sup> m/s <sup>2</sup> )	16 组观测结果 /(10 <sup>-8</sup> m/s <sup>2</sup> )
1	2011-09-05	10	20	100	~592.12	~591.26	~591.58	~591.84
2	2011-09-05	1	1	100	~588.30	~588.03		
3	2011-09-05	6	3	50	~592.03	~591.15		
4	2011-09-11	2	2	50	~590.90	~590.80	~591.70	

注:“~”表示隐去的绝对重力值相同重复的前 6 位数

#### 3.2 观测数据处理

绝对重力观测数据需经过各种校正才能得到绝对重力值。这些校正包括固体潮校正(包含海潮负荷校正)、气压校正、极移校正与光速有限校

正,这些校正总体称为内部校正。最后对观测值进行仪器高校正,求得测点墩面高度处的重力值。固体潮校正(包含海潮负荷校正)、气压校正和极移校正均通过仪器厂方提供的专用软件计算,输

入参数包括:测点坐标(经、纬度和高程)、观测时的 GMT 时间、极移参数(可通过 Earth Orientation Center 官方网站 <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/> 获得)以及实测气压值,其中实测气压值采用仪器自身记录的实时气压值。此外,光速有限校正采用厂家标定的数值。

高精度的垂直重力梯度测量在绝对重力观测中发挥着很大的作用,不仅有效地应用于自由落体获得重力加速度的最小二乘拟合过程中,特别是将仪器初始高度绝对重力值转换到地面或者其他固定参考高度时,更加需要高精度的垂直重力梯度值。一般情况下垂直重力梯度通常由相对重力仪测量得到,但一些学者研究认为由于观测点处垂体重力梯度的未知或不确定以及测量过程中难免产生的误差会增大最后绝对重力值的不确定度,而采用精确的计算绝对重力仪自由落体的有效测量高度<sup>[22-23]</sup>。尽管如此,相对重力仪测量重力垂直梯度在将绝对重力测量结果转换到重力网中或其他垂直高度中(不同类型的绝对重力仪观测高度),同样也是非常重要的。在本文中,由于需要将 A10-022 绝对重力仪测量结果转换到观测墩面上,进而与以往测量结果对比,需要获得高精度的垂直重力梯度数据。因此,在 A10-022 进行绝对测量的同时,利用 LCR-D 型 159# 重力仪和自制脚架构成的平台,在测点处进行垂直梯度测量,测量精度均优于  $0.03 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2/\text{cm}$ (采集软件的默认值)。

#### 4 测量结果与分析

根据庐山相对重力仪格值标定场上基点分布及其环境特点,观测点的选择主要依据观测台的稳定性,考虑交通是否便利,且尽可能选择原有的观测点,以便与以前的观测值进行比较。根据以上原则,初步选择的观测点为 3#、8#、11#、12#、17#、18# 和 22#,同时,为了保证观测效果,在上述 7 个观测点之中使用下落间隔时间为 6 s,组数为 10 组的参数设置进行了第 1 次观测(表 5 带\* 观测点)。随后,选择了第 1 次观测中的 4 个观测点进行第 2 次观测,观测时间均小于第 1 次测量,以验证 A10-022 绝对重力仪的稳定性。由最后结果(表 4)可以看出,两次的绝对重力观测的标准差均小于  $4.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ (最大  $3.58 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ),而且两次观测结果的互差也在  $6 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  以内(最大  $5.52 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ )。由于此

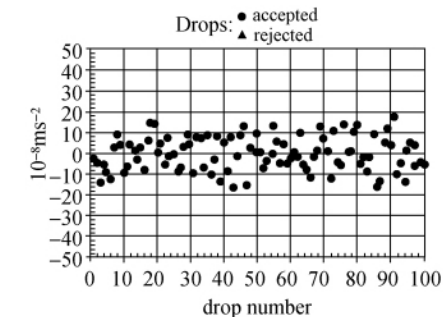
次测量大多选择在夜间进行,环境噪声较小,单组的测量标准差均低于  $50 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。图 1 为观测质量较好的 3# 观测点第 1 组组内和最后组间结果,其中第 1 组内标准差为  $8.11 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ,最后的组间标准差为  $2.25 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ,红蓝激光模式测量组间的结果的分离由激光频率的漂移造成。

表 4 庐山重力标定场 A10-022 绝对重力观测结果(符号 \* 表示第 1 次观测)

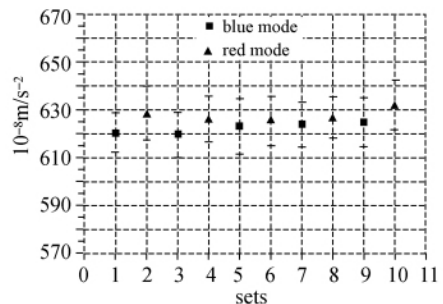
Tab. 4 Observation results by the A10-022 in the Lushan gravimeter calibration field (symbol \* indicates the first observation)

观测点	观测日期	垂直重力梯度/( $10^{-8} \text{ m/s}^2/\text{cm}$ )	测量时间/min	转换到墩面重力值/( $10^{-8} \text{ m/s}^2$ )	组间标准差/( $10^{-8} \text{ m/s}^2$ )
* 03	2011-09-08	-2.725	150	~49 625.13	2.25
03	2011-09-09	-2.725	40	~49 623.56	1.66
* 08	2011-09-08	-3.937	150	~98 916.68	3.22
* 11	2011-09-06	-2.652	200	~68 779.25	1.58
11	2011-09-07	-2.652	20	~68 782.40	1.89
* 12	2011-09-09	-3.626	40	~58 688.62	2.06
* 17	2011-09-09	-3.691	40	~08 650.20	3.58
* 18	2011-09-10	-4.307	150	~97 528.18	1.95
18	2011-09-10	-4.307	8	~97 526.98	2.15
* 22	2011-09-07	-2.607	150	~55 167.99	2.43
22	2011-09-09	-2.607	32	~55 162.47	1.42

注:“~”表示隐去的绝对重力值相同重复的前 4 位数



(a) 第1组组内测量结果



(b) 最后10组组间测量结果

图 1 3# 基点观测结果

Fig. 1 Observation results of the No. 03

庐山重力格值标定场及九江地震台重力引点,系属于国家重力 2000 网。利用 A10-022 绝对重力仪在庐山重力仪格值标定场部分观测点上进行绝对重力测量,与早先利用相对重力仪测量的标定点之间的段差结果比较,可以验证 A10-022 绝对重力仪的准确度,其中相对重力仪的段差采用 2000 联测观测资料平差后各观测点的重力值<sup>[4]</sup>。A10-022 绝对重力仪观测段差结果与相对重力仪测量的标定点段差结果互差全部在  $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  以内,除 3# 与 8# 观测点段差结果互差较大外( $9.15 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ),其他各个段差结果互差均在  $5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  以内,如图 2 所示。

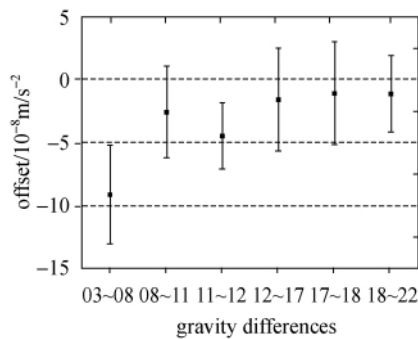


图 2 A10-022 绝对重力仪观测段差结果与相对重力仪测量的标定点之间段差结果的互差

Fig. 2 Offset of the gravity segment difference between the A10-022 absolute gravimeter and relative gravimeters

与所有测量仪器一样,A10 绝对重力仪具有相应的系统不确定度。仪器制造商给定的 FG5 绝对重力仪系统不确定度为  $\pm 2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ,A10 的系统不确定度为  $\pm 10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。而观测结果的总不确定度由仪器系统不确定度与观测值不确定度所决定,若根据仪器制造商给定的 A10 绝对重力仪系统不确定度,本次测量结果的精度都将高于  $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

系统不确定度是依据仪器各测量单元及校正项的误差源评估得到。误差源由 4 部分组成,即计算模型、系统单元与模式、环境噪声和安装调试。系统不确定度一般没有固定的测试方法,通常是根据长期观测结果以及不同仪器之间的相互比对和操作经验给出推荐值。就 A10 重力仪而言,目前还没有推出相应的系统不确定度推荐值。但是在“计算模型”、“环境噪声”和“安装调试”方面,应与 FG5 重力仪处于同一水平(本次重力梯

度测量精度优于  $0.03 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2/\text{cm}$ )。A10 系统不确定度与 FG5 最大差异之处在于“系统单元与模式”部分。

从两种仪器的系统结构来看<sup>[10,24-25]</sup>,自由落体室长度及采用的激光技术是关键部分。A10 落室长度约为 8 cm,FG5 落室长度约为 20 cm,显然,FG5 在每次下落的过程中可以测到比 A10 多 2 倍以上的距离-时间组数,有利于获得更准确的观测值;另一方面,FG5 采用通用的 WEO-200 激光器进行测距,A10 采用仪器制造商研发的 ML-1 激光器进行测距。仪器制造商经过对比测试认为,在激光频率稳定性方面,ML-1 与 WEO-200 具有同等水平,但 ML-1 略有漂移,需要定期标定。考虑到本次试验使用的 A10-022 绝对重力仪出厂不到两年,激光器频率漂移尚不显著。从本文观测对比情况来看,A10-022 近期的观测数据与 FG5 观测差异均在  $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  以内;文献[13]在美国丹佛的国家观测站通过长期观测对比,认为 A10 与 FG5 的平均差异在  $3.2(\pm 3.5) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。因此,可以相信本文试验观测结果的不确定度应小于  $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

## 5 结 论

利用绝对重力仪进行相对重力仪格值标定场重力基点的绝对重力测量在国内是一种新的尝试。本文试验结果表明,利用绝对重力仪进行室外流动绝对重力测量是可行的,使用这种方法可以高效率地完成高精度重力测量,而且所获得的各基点重力值相互独立,没有积累误差,测量结果可靠。目前,全国各省、市、自治区的重力基点、基点网、格值标定场都不同程度地被损坏,亟须重建。利用移动式绝对重力仪作为重力基点、基点网、格值标定场的测量技术手段之一,将会有很大的科学与经济应用价值。

本次试验属国内首次应用 A10 移动式绝对重力仪进行重力格值标定场的基点重力值标定,实际工作中不免会存在一些问题。例如,如何利用仪器的实时气压记录分析气压变化对观测结果的影响,以改善气压校正的准确度。由于 A10 绝对重力仪野外观测的工作特点,使得外界影响因素相比室内较多,流动的野外测量要求安装 A10 的次数较多,合理正确的安装步骤是取得精确数据的前提,在安装过程中通常会出现由于硬件安装或设置错误而导致数据的离散度及结果的偏差

较大,在测量过程中可以针对实时采集数据的状态来判断安装的正确性,例如:①单组的测量标准差不应超过  $100 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ;②最小二乘拟合下落抛物线的均方根(残差曲线)不应超过  $1 \text{ nm}$ ;③组间标准差不应超过  $6 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ;④最好每个场地的绝对重力值采用两个独立的安装测量,两次独立的安装操作所测结果之间的偏差不应超过  $8 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。

致谢:感谢陕西地矿局第二综合物探大队与中国地震局地震研究所邢乐林助理研究员分别在野外实测与论文撰写过程中的热情帮助。此外,与中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院的梁青博士、陈波博士、王秋革与王浩然等的积极讨论使作者收益颇多,在此一并表示衷心感谢。

### 参考文献:

- [1] LIU Dongzhi. Calibration of LaCoste-Romberg Gravimeter in Absolute and Relative Gravimetric Conjunction [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 1998, 18(1): 88-94. (刘冬至. 绝对与相对重力同步比测中的拉科斯特重力仪标定[J]. *地壳形变与地震*, 1998, 18(1): 88-94.)
- [2] NAKAGAWA I. Japan-China International Gravimeter Connection and Characteristics of Lacoste & Romberg Gravimeter[M]. Kyoto: Kyoto University Press, 1987, 16-22.
- [3] TORGE W, RODER R H, SCHNULL M, et al. Gravimeter Calibration Line Wuhan, China [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 1988, 8(2): 124-133. (TORGE W, RODER R H, SCHNULL M, 等. 重力仪垂直标定基线(武汉)[J]. *地壳形变与地震*, 1988, 8(2): 124-133.)
- [4] LIU Dongzhi, WANG Xiaoquan, XING Canfei, et al. Verification and Analysis of Short Calibration Lines of 2000 National Gravity Network [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2002, 22(4): 61-65. (刘冬至, 王晓权, 邢灿飞, 等. 《2000 国家重力基本网》短基线的检定与分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2002, 22(4): 61-65.)
- [5] NIEBAUER T M, SASAGAWA G S, FALLER J E, et al. A New Generation of Absolute Gravimeters[J]. *Metrologia*, 1995, 32(3): 159-180.
- [6] QIU Qixian. The First Results of Absolute Gravity Measurement at IAGBN Stations Beijing and Nanning [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1994, 23(2): 150-154. (丘其宪. 北京和南宁国际绝对重力基本点上首批绝对重力测量结果[J]. *测绘学报*, 1994, 23(2): 150-154.)
- [7] FALLER J E. Thirty Years of Progress in Absolute Gravimeters: A Scientific Capability Implemented by Technological Advances[J]. *Metrologia*, 2002, 39(5): 425-428.
- [8] ZHANG Weimin, WANG Yong, ZHANG Chijun. The Preliminary Analysis of the Effects of the Soil Moisture on Gravity Observations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, 30(2): 108-111. (张为民, 王勇, 张赤军. 土壤浸湿对重力观测影响的初步分析[J]. *测绘学报*, 2001, 30(2): 108-111.)
- [9] FRANCIS O, VAN DAM T, AMALVICT M, et al. Results of the International Comparison of Absolute Gravimeters in Walferdange(Luxembourg) of November 2003[C]// *Gravity, Geoid and Space Missions—GGSM 2004*; 129. Porto: Springer, 2005; 272-275.
- [10] Micro-g LaCoste Inc. A-10 Portable Gravimeter Users Manual[R]. Colorado: Micro-g LaCoste Inc, 2008.
- [11] HOLWEG D. Systemanalyse des Feld-Absolutgravimeters A-10 # b002 [D]. Darmstadt: Technical University Darmstadt, 2001.
- [12] LIARD J, GAGNON C. The New A-10 Absolute Gravimeter at the 2001 International Comparison of Absolute Gravimeters[J]. *Metrologia*, 2002, 39(5): 477-483.
- [13] SCHMERGE D, FRANCIS O. Set Standard Deviation, Repeatability and Offset of Absolute Gravimeter A10-008 [J]. *Metrologia*, 2008, 43(5): 414-418.
- [14] Micro-g LaCoste Inc. ML-1 Polarization Stabilized Laser [R]. Colorado: Micro-g LaCoste Inc, 2005.
- [15] NIEBAUER T M, FALLER J E, GODWIN H M, et al. Frequency Stability Measurements on Polarization-stabilized He-Ne Lasers[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(7): 1285-1289.
- [16] MÄKINEN J, STÅHLBERG B. Long-term Frequency Stability and Temperature Response of a Polarization-stabilized He-Ne Laser [J]. *Measurement*, 1998, 24(3): 179-185.
- [17] XING Lelin, LI Hui, HE Zhitang, et al. Analysis of Repeat Absolute Gravimetric Results at Chengdu Seismostation[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2008, 28(6): 38-42. (邢乐林, 李辉, 何志堂, 等. 成都基准台绝对重力复测结果分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2008, 28(6): 38-42.)
- [18] XING Lelin, SUN Wenke, LI Hui, et al. Present-day Crust Thickness Increasing beneath the Qinghai-Tibetan Plateau by Using Geodetic Data at Lhasa Station [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(1): 41-44. (邢乐林, 孙文科, 李辉, 等. 用拉萨点大地测量资料检测青藏高原地壳的增厚[J]. *测绘学报*, 2011, 40(1): 41-44.)
- [19] XING Lelin, LI Hui, LI Jiancheng, et al. Comparison of Absolute Gravity Measurements Obtained with FG5/232 and FG5/214 Instruments [J]. *Geo-spatial Information Science*, 2009, 12(4): 307-310.
- [20] XING Lelin, SHEN Chongyang, LI Hui, et al. Comparative

(下转第 365 页)

- [10] BLEWITT G. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data[J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17(3): 199-202.
- [11] SUN H, CANNON M E, MILIGARD T. Real-time GPS Reference Network Carrier Phase Ambiguity Resolution [C] // ION NTM-99. San Diego: Institute of Navigation, 1999: 193-200.
- [12] HAN S W. Carrier Phase-based Long-range GPS Kinematic Positioning [D]. Sydney: The University of New South Wales, 1997.
- [13] CHEN H Y, RIZOS C, HAN S. An Instantaneous Ambiguity Resolution Procedure Suitable for Medium-scale GPS Reference Station Networks [J]. Survey Review, 2004, 37(291): 396-410.
- [14] DAI L, WANG J, RIZOS C, et al. Predicting Atmospheric Biases for Real-time Ambiguity Resolution in GPS/GLONASS Reference Station Networks [J]. Journal of Geodesy, 2003, 76(11-12): 617-628.
- [15] HU G, ABBEY D A, CASTLEDEM N. An Approach for Instantaneous Ambiguity Resolution for Medium-to Long-range Multiple Reference Station Networks [J]. GPS Solutions, 2005(9): 1-11.
- [16] GE Maorong, LIU Jingnan. The Estimation Methods for Tropospheric Delays in Global Positioning System [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1996, 25(4): 285-291. (葛茂荣, 刘经南. GPS 定位中对流层折射估计研究 [J]. 测绘学报, 1996, 25(4): 285-291.)
- [17] GAO Xingwei, CHEN Ruizhi, LI Xiyin. A Study of the Neutral Atmospheric Effects on Pseudorange Positioning with Non-difference Models [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(2): 134-140. (高星伟, 陈锐志, 李夕银. 中性大气对非差伪距定位的影响及其模型改正分析 [J]. 测绘学报, 2007, 36(2): 134-140.)
- [18] HOPFIELD H S. Two-quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data [J]. Journal of Geophysical Research, 1969, 74(18): 4487-4499.
- [19] SAASTAMOINEN J. Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction [J]. Bulletin Géodésique, 1973, 107: 13-34.
- [20] BLACK H D. An Easily Implemented Algorithm for the Tropospheric Range Correction [J]. Journal of Geophysical Research, 1978, 83(B4): 1825-1828.

(责任编辑: 宋启凡)

收稿日期: 2011-07-18

修回日期: 2011-10-25

第一作者简介: 祝会忠(1983—), 男, 博士生, 主要从事 GNSS 高精度实时动态定位算法及应用研究。

First author: ZHU Huizhong(1983—), male, PhD candidate, majors in algorithm and application of GNSS for high-accuracy dynamic positioning.

E-mail: zhuhuizhong@whu.edu.cn

(上接第 352 页)

- Observation of Absolute Gravimeters in Walferdange [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(3): 77-79. (邢乐林, 申重阳, 李辉, 等. 欧洲 Walferdange 绝对重力仪比对观测 [J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(3): 77-79.)
- [21] WANG Linsong, CHEN Chao, WANG Tongqing, et al. Analysis of Measuring Accuracy in Field with A-10 Absolute Gravimeters [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(1): 60-63. (王林松, 陈超, 王同庆, 等. A-10 绝对重力仪野外测量精度分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(1): 60-63.)
- [22] NIEBAUER T M. The Effective Measurement Height of Free-fall Absolute Gravimeters [J]. Metrologia, 1989, 26(2): 115-118.
- [23] TIMMEN L. Precise Definition of the Effective Measurement Height of Free-fall Absolute Gravimeters [J]. Metrologia, 2003, 40(2): 62-65.
- [24] Micro-g LaCoste Inc. FG5 Absolute Gravimeter User's Manual [R]. Colorado: Micro-g LaCoste Inc, 2007
- [25] Micro-g LaCoste Inc. Absolute Gravimeters [EB/OL]. Colorado: Micro-g LaCoste Inc, [2011-10-12]. <http://www.microglacoste.com/absolutemeters.php>.

(责任编辑: 丛树平)

收稿日期: 2011-12-09

修回日期: 2012-02-23

第一作者简介: 王林松(1983—), 男, 博士生, 研究方向为重磁资料处理解释、时变重力及其应用。

First author: WANG Linsong(1983—), male, PhD candidate, majors in gravity and magnetic data processing and interpretation, time-varying gravity and its application.

E-mail: wanglinsong123@yahoo.cn