

文章编号:1671-5942(2014)03-0142-04

A10/028 与 FG5 绝对重力仪比对测量试验^{* 1}

何志堂¹⁾ 韩宇飞²⁾ 康胜军¹⁾ 王晓栋¹⁾ 贺小明¹⁾ 李 辉^{3,4)} 陈永生⁵⁾

1)国家测绘地理信息局第一大地测量队,西安 710054
2)地壳运动监测工程研究中心,北京 100036
3)中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室),武汉 430071
4)中国地震局地壳应力研究所武汉科技创新基地,武汉 430071
5)四川新概念测绘技术有限公司,成都 610000

摘要 介绍 A10/028 与 FG5 绝对重力仪两次比对测量试验的情况,并分析其结果。结果显示,绝对重力仪 A10/028 与 FG5 观测结果之间没有明显差异,在 $\pm 5 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 之内,二者一致性较好;A10/028 抗干扰能力较强,测量结果重复性较好,内符合精度为 $\pm (2 \sim 3) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。

关键词 A10 与 FG5; 比对; 绝对重力测量; 重复性; 内符合精度

中图分类号:P223.1 文献标识码:A

CONTRAST TEST OF A10/028 ABSOLUTE GRAVIMETER WITH FG5

He Zhitang¹⁾, Han Yufei²⁾, Kang Shengjun¹⁾, Wang Xiaodong¹⁾, He Xiaoming¹⁾, Li Hui^{3,4)} and Chen Yongsheng⁵⁾

1) *The First Geodetic Brigade, NASMG, Xi'an 710054*
2) *National Earthquake Infrastructure Service, CEA, Beijing 100036*
3) *Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071*
4) *Wuhan Base for Institute of Crastal Dynamics, CEA, Wuhan 430071*
5) *Sichuan New Concept Mapping Technology Co. LTD, Chengdu 610000*

Abstract The result of contrast test of A10/028 absolute gravimeter with FG5 was introduced. The measurement results with the two kinds of gravimeter indicate that there is little difference between A10/028 and FG5, the difference of accuracy is within $\pm 5 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$. A10/028's precision of inner coincidence is $\pm (2 \sim 3) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$, with stronger anti-interference ability.

Key words: A10 and FG5; compare; absolute gravity measurements; repeatability; precision of inner coincidence.

绝对重力测量是地球物理研究的重要手段。通过绝对重力测量可以对地壳变化、地震前后重力变化等研究提供重力基准^[1-5]。目前国内外用于绝对重力测量的绝对重力仪主要有 FG5 型(以下简称 FG5)和 A10 型(以下简称 A10)两种。A10 与 FG5 都是基于自由落体运动原理研制的绝对重力仪。

FG5 标称精度为 $\pm 2 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$, 实际观测精度可达 $\pm (1 \sim 2) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ^[6-9], 但要求点位环境满足交流电源稳定、环境温度变化小($15 \sim 25^\circ\text{C}$)等条件, 野外使用受到一定的限制。A10 标称精度为 $\pm 10 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$, 可以采用 12 V 直流电源, 点位工作温度范围更大($-18 \sim +38^\circ\text{C}$)^[10], 在野外大部分

* 收稿日期:2013-11-25

基金项目:国家自然科学基金项目(41204019)。

作者简介:何志堂,男,1972 年生,硕士,高级工程师,主要从事重力应用研究。E-mail:hezhitang@aliyun.com。

环境下均可使用。相比较而言,A10体积更小、运输更方便,对于野外绝对重力施测具有一定的优势^[11]。虽然FG5和A10的关键部件(铷原子频标、激光器)可以标定,但仪器整体组装后无法标定^[6]。对于绝对重力仪测量结果的分析和校准,目前通行的办法是采用多台仪器比对测试,或在已有成果的点位上进行独立测试比对^[6,12]。该办法可有效地提高绝对重力仪测量结果的准确性。

2012年10月国家测绘地理信息局引进了A10/028绝对重力仪。为确保该仪器实测成果的可靠性,2013-05-09~22,A10/028与多台FG5分别在多个点位上进行比对测量试验。本文对测量结果和影响观测结果的因素进行分析,并结合国内外关于绝对重力测量研究的进展,探讨了应用A10型绝对重力仪建立高精度重力基准、服务于中国地震监测和地球动力学研究的可行性。

1 A10与FG5比较

1.1 基本原理

A10与FG5的工作原理基本一致,即在真空状态下,通过激光产生干涉条纹和铷原子频标分别精确定位落体自由下落运动过程中的位置与时刻,再根据自由落体运动方程求得测试点的重力。改化后的计算公式为:

$$x_i = x_0 + v_0 \tilde{t}_i + g_0 \tilde{t}_i^2 / 2 + \gamma g_0 \tilde{t}_i^2 / 2 + \gamma g_0 \tilde{t}_i^3 / 6 + \gamma g_0 \tilde{t}_i^4 / 24 \quad (1)$$

式中, \tilde{t}_i 是延迟时间,由 $\tilde{t}_i = t_i - (x_i - x_0) / c$ 给出; x_i 、 t_i 分别为下落距离和对应的时间; x_0 、 v_0 和 g_0 分别是位置、速度和重力加速度的初始值; γ 为测点的垂直重力梯度; c 为光速。 g_0 按式(1)求解,经过固体潮、大气压、海潮负荷、参考高度和极移等各项改正后,得到不同高度处的绝对重力值,最后根据最小二乘拟合原理即可求得测点有效高度处的绝对重力值(图1)^[11,13]。

1.2 A10与FG5的重要区别

1)采用的激光器不同。A10采用ML-1型偏振稳定氦氖激光器(polarization stabilized laser),其激光波长稳定性可达 $10^{-8} \sim 10^{-9}$,可以采用红/蓝两种波长。FG5采用WEO-100型碘稳频氦氖激光器,其激光波长稳定性可达 10^{-10} 以上,采用1F下e峰波长作为测量模式。在实测时,A10与FG5实现数据采集的主要区别是:FG5采用碘稳频He-Ne激光e峰波长完成所有数据采集;A10采用的偏振稳定氦氖激光器,其波长稳定性没有碘稳频氦氖的高,因此采用两种波长的激光(红/蓝)交替施测完成数据采集。数据处理时,采用红/蓝两波长各自结

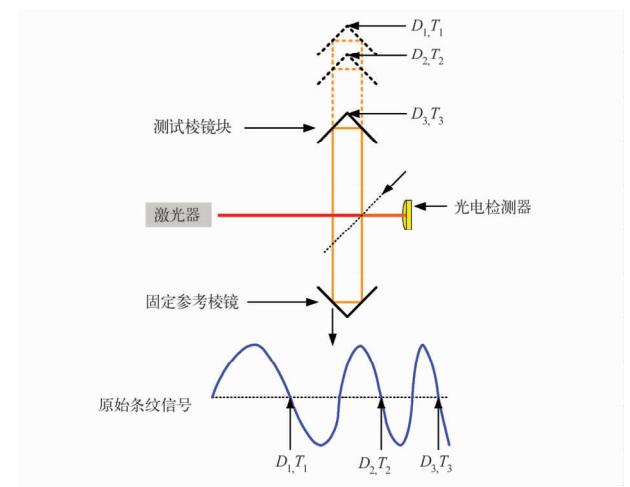


图1 绝对重力仪基本原理

Fig. 1 principle of absolute gravity measurement

果的均值作为最终结果,有效地消除因环境温度变化引起的结果误差。

2)仪器隔震系统不同。FG5型绝对重力仪所使用的隔震弹簧周期为30~60 s;而A10为了缩小体积,便于野外运输和测量,缩短其隔震弹簧长度,隔震效果有所降低。

3)相较FG5型绝对重力仪,A10缩短了自由落体下落距离,延长了落体下落间隔时间(1 s、2 s、6 s等)。

2 比对测量试验概述

比对测量试验采用5台FG5重力仪与A10/028重力仪在不同点位(表1)进行比对观测。试验分两个阶段进行:

表1 观测点位信息

Tab. 1 Some information about the observation sites

点号	点位名称	参与试验阶段
XF	襄樊基准点	第一阶段
XA	西安基准点	第一阶段
IOS	武汉绝对重力仪实验室	第一、第二阶段
IGG018	九峰	第二阶段
IGG20	九峰	第二阶段
JF_syn	武汉基准地震台	第二阶段

第一阶段为2013-05-09~22。A10/028与1台FG5(编号232)进行比对,主要试验A10/028的基本参数设置及成果精度提高和原因初步分析。

第二阶段为2013-06-17~25。A10/028与4台FG5(编号为232、214、112、240)及1台FG5X(编号246)进行比对,主要试验A10/028与FG5/FG5X之间整体结果的差异、一致性及原因分析。

试验采用两种仪器同期独立观测,然后利用所有绝对重力测量结果进行整体平差。

比对试验时,FG5 的基本设置为:有效组数 25 组,每小时 1 组,每组 100 个下落,每 10 s 一个下落。A10/028 的基本设置是连续观测 25 h,尽量消除潮汐影响,特别是周日潮汐的影响。有效组数 50 组,1 h 内红、蓝观测各 1 组(红、蓝间隔时间不超过 3 min),因为 A10 仪器数据以相邻红、蓝激光所测结果为“一个独立结果”,所以红、蓝激光所测结果单独施测时,总组数为 50 组才和项目要求组数一致。每组设置 100 次下落,每次下落时间为 6 s。根据对 A10/028 比对试验之前的测试以及其他该类型仪器的测量结果资料的分析^[11],所有不同设置中(2、3、5、6、10 s),每次下落时间为 6 s 的结果精度最好。这时上一次下落产生的震动对下一次下落结果影响最弱,从而可以保证 A10 测量精度最优。

3 比对过程及结果

3.1 第一阶段比对测量

第一阶段比对先后在武汉绝对重力仪实验室(以下简称 IOS)、襄樊基准点(以下简称 XF)和西安基准点(以下简称 XA)3 点进行。据此前资

料,上述点位都比较稳定。

重力垂直梯度测量采用 CG-5/230 和 CG-5/232 两台相对重力仪实施。为减少重力垂直梯度的空间非线性变化,架设高度分别为 A10 的有效高度 80 cm 和 FG5 的有效高度 130 cm。绝对重力测量的测试数据采用 g9 软件处理。

1) IOS 测点上的比对测量。本点先后实施了 3 次比对。为验证每组单独落体个数对成果的影响,首先采用 100 次下落进行试验,结果精度满足要求;考虑尽量减少仪器磨损和项目实施时间,该点第 2 次比对时,每组单独落体个数设置为 50,结果精度不如设置为 100 次的高。因此,该点第 3 次比对时采用 100 次下落,而且后续比对每组单独落体数都设置为 100 次。第 3 次比对试验时,两台仪器在第 2 次基础上相互调换位置(表 2)。

2) XF、XA 测点上的比对测量。2013-05-15 ~ 17、20 ~ 21 分别在 XF、XA 测点上进行了 A10/028 与 FG5/232 比对测量(在 XF 测点的不同位置,A10/028 与 FG5/232 同时连续观测 25 h,此后两台仪器交换位置再次测量)。

表 2 IOS 测点上的参数设置

Tab. 2 Parameters setted at IOS

时间	测量仪器	单次落体 时间/s	组间隔 时间/h	每组下落 次数/次	总组数 /组	总时间 /h	备注
2013-05-09 ~ 10	A10/028	6	0.5	100	50	25	
2013-05-09 ~ 11	A10/028	6	0.5	50	50	25	
	FG5/232	10	1	100	19	19	因地震中断
2013-05-09 ~ 12	A10/028	6	0.5	100	50	25	
	FG5/232	10	1	100	25	25	

3.2 第二阶段比对测量概述

2013-06-17 ~ 25 实施第二阶段比对测量。参与比对测量的 5 台 FG5 绝对重力仪分别在 4 点进行了绝对重力测量(FG5/112 和 FG5x/246 未参与 IOS 点位比测,仅实施了另 3 点测量),A10/028 也先后进行了同址绝对重力测量。

表 3 第二阶段比对试验仪器及参数设置

Tab. 3 Instruments and parameters used in the second step

仪器型号	总组数 /组	组间时间 间隔/h	每组落体 数/个	落体间隔 时间/s
FG5/232				
FG5/240				
FG5x/246	25	1	100	10
FG5/112				
FG5/214				
A10/028	50	0.5	100	6

别,为尽量减小重力垂直梯度空间非线性变化的影响,对各点分别实测了两个高度(1.30 和 0.8 m)的重力垂直梯度。

3.3 比对结果

比对试验结束后,对两阶段比对测量结果进行整理,并对试验结果进行分析。

表 4 为第一阶段比对测量结果。该阶段试验显示,A10/028 绝对重力仪单点测量精度在 XA 测点最高($\pm 1.5 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$),其他 5 次测量精度均优于 $\pm 5.0 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$;A10/028 与 FG5/232 测量结果互差较小,除第二次测量外,均优于 $\pm 5.0 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。

表 5 为第二阶段绝对重力比测试验数据经过极移、气压、仪器高、潮汐、重力梯度等改正后,各台仪器在各点的独立结果。

比对时,考虑到两种类型仪器的有效高度有差

表4 第一阶段比对试验结果

Tab. 4 Results of test in the first step

测点	次序	测试仪器	组数	有效组数	每组下落	有效落体	重力垂直梯度 /10 ⁻⁸ ms ⁻² · cm ⁻¹	地面重力值 /10 ⁻⁸ ms ⁻²	标准差 /10 ⁻⁸ ms ⁻²	互差 /10 ⁻⁸ ms ⁻²
IOS	1	A10/028	50	50	100	4 850	3.085 4	9 * * * * 985.0	±1.8	—
	2	A10/028	50	50	100	4 950	3.085 4	9 * * * * 981.1	±1.6	±5.4
	3	FG5/232	19	19	100	1 843	3.084 6	9 * * * * 975.7	±1.7	—
	3	A10/028	50	50	50	2 475	3.085 4	9 * * * * 979.2	±2.2	±4.3
XF	1	FG5/232	25	25	100	2 250	3.084 6	9 * * * * 974.9	±1.5	—
	1	A10/028	50	50	100	4 981	3.243 8	97 * * * * 681.7	±2.7	±0.3
	2	FG5/232	25	25	100	2 323	3.245 8	97 * * * * 682.0	±4.7	—
	2	A10/028	50	50	100	4 981	3.243 8	97 * * * * 682.3	±2.7	±2.2
XA	1	FG5/232	25	25	100	2 323	3.245 8	97 * * * * 680.1	±1.6	—
	1	A10/028	50	50	100	4 981	2.396 5	97 * * * * 733.4	±1.5	±4.2
		FG5/232	25	25	100	2 471	2.359 0	97 * * * * 729.2	±1.5	—

注:2013-05-10 在 IOS 点进行的第 1 次观测试验因 9d 前武汉市降雨导致重力变化,与其他成果可比性不强。

表5 第二阶段比对试验独立测量结果(单位:10⁻⁸ ms⁻²)Tab. 5 Results of test independent measurement in the second step (unit:10⁻⁸ ms⁻²)

仪器型号	IGG018		IGG020		JF_syn		IOS	
	重力值	精度	重力值	精度	重力值	精度	重力值	精度
FG5/232	* * 711.5	±0.7	* * 750.8	±1.0	* * 745.0	±1.0	* * 970.0	±1.5
FG5/240	* * 710.7	±1.3	* * 750.4	±1.7	* * 745.3	±1.2	* * 973.2	±1.6
FG5/214	* * 705.0	±1.6	* * 750.3	±0.7	* * 744.0	±0.9	* * 972.1	±0.7
FG5/112	* * 710.6	±1.2	* * 748.2	±1.4	* * 750.0	±1.6		
FG5x/246	* * 708.8	±0.7	* * 747.5	±0.6	* * 745.2	±0.9		
A10/028	* * 709.5	±2.3	* * 749.7	±2.3	* * 744.0	±2.6	* * 974.0	±2.2
平均值	* * 709.4	±1.4	* * 749.5	±1.4	* * 745.6	±1.5	* * 972.3	±1.6
A10/028 与均值之差	0.1		0.2		1.6		1.7	

该阶段试验显示,A10/028 绝对重力仪独立精度最小为 $\pm 2.2 \times 10^{-8}$ ms⁻²(IOS 测点),最大为 $\pm 2.6 \times 10^{-8}$ ms⁻²(JF_syn 测点),各测点精度较为稳定且均优于 $\pm 5.0 \times 10^{-8}$ ms⁻²;A10/028 在本阶段与 FG5 比测的 22 个结果中有 21 点次重力测量值相差均小于 $\pm 5.0 \times 10^{-8}$ ms⁻²,仅在 JF_syn 点上与 FG5/112 测量值相差 $\pm 6.0 \times 10^{-8}$ ms⁻²,可能是相对重力联测误差或 FG5/112 绝对重力仪测量时外界影响所致;对各点位所有测量结果取均值,其与 A10/028 测量值相差最大仅为 1.7×10^{-8} ms⁻²。

4 结 论

1) A10/028 绝对重力仪单点测量时,总下落组数设置为 50 组(红、蓝激光各施测 25 组),每组时间间隔 1 h,每组 100 个落体,每次落体时间间隔 6 s,其结果精度可达 $(2 \sim 3) \times 10^{-8}$ ms⁻²,成果自符合比较理想,而且在不同点位实测结果的精度比较一致(最大差 0.4×10^{-8} ms⁻²),说明其测量成果具有一定的稳定性。

2) A10/028 绝对重力仪试验测量精度优于

$\pm 5.0 \times 10^{-8}$ ms⁻²,且精度稳定,说明该仪器测量结果稳定性较好。

3) A10/028 与 5 台 FG5 的实测结果一致性较好,不存在明显的系统偏差,且在各测点 A10/028 测量结果与平均结果差距很小(最大为 1.7×10^{-8} ms⁻²),说明该仪器准确度较好。

综上,A10/028 绝对重力仪可以满足高精度重力控制测量或重力基准建立的施测要求。

参 考 文 献

- 1 邢乐林,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(1):72~74.(Xing Lelin, 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(1):72~74)
- 2 申重阳,等.2009 年姚安 Ms6.0 地震重力场前兆变化机理[J].大地测量与地球动力学,2011(2):17~22.(Shen Chongyang, et al. Mechanism of precursory gravity change before Yaoan Ms6.0 earthquake in 2009[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2011(2):17~22)

(下转第 150 页)