

# CG-5 重力仪格值系数变化研究及应用

郝洪涛<sup>1,2</sup> 李 辉<sup>1,2</sup> 孙少安<sup>1,2</sup> 刘代芹<sup>3</sup>

1 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室), 武汉市洪山侧路40号, 430071

2 中国地震局地壳应力研究所武汉科技创新基地, 武汉市洪山侧路40号, 430071

3 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐市科学二街338号, 830010

**摘要:** 利用新疆地区2010~2013年重力观测数据, 结合近年来相对重力仪格值系数标定结果, 对编号为509的CG-5重力仪格值系数变化进行研究。结果表明, 该仪器格值系数存在明显的变化, 2010~2013年期间, 变化量达到了0.000 4, 与华北长基线标定结果基本相同。对格值系数进行改正后, 重力场变化更为平缓, 表明格值系数误差改正对于重力异常变化的核实和排除至关重要。

**关键词:** CG-5 重力仪; 格值系数; 仪器标定; 重力异常

**中图分类号:** P244

**文献标识码:** A

高精度地表相对重力观测是进行地震、火山等构造活动监测与研究的重要手段<sup>[1-3]</sup>。但由于相对重力观测数据本身除包含真实的重力场变化结果外, 还不可避免地含有一些仪器自身性能参数变化带来的系统误差, 因此, 为获取真实可靠的重力场变化结果, 需要对这些仪器系统误差进行检测和消除。研究结果表明, 相对重力仪一次项格值系数变化是相对重力联测系统误差的主要来源之一, 在测区重力差达数百毫伽时, 格值系数即使发生微小的变化也会对观测结果造成严重的影响<sup>[4]</sup>。

CG-5 重力仪是目前世界上使用的主流相对重力仪之一。该仪器为加拿大 STRIEX 公司生产, 传感器类型为无静电熔凝石英传感器, 测量精度优于  $5 \mu\text{Gal}$ , 测量量程达  $8\,000 \text{ mGal}$ , 并在出厂时评估了一次线性项标定因子。但由于传感器空间稳定性、基准电压的稳定性等因素, 其一次线性项标定因子仍会发生变化; 尤其在仪器投入使用初期, 由于新熔凝石英传感器的压力释放, 一次线性项标定因子最大可变化  $0.1\%$ <sup>[5]</sup>。一些关于 CG-5 重力仪性能的研究结果也表明, CG-5 重力仪一次线性项标定因子在数年内存在约  $0.05\%$  的变化<sup>[6]</sup>。

中国地震局自 2010 年起开始在地震重力测量<sup>[7]</sup>中推广使用 CG-5 重力仪。其中, 2010~

2013 年期间在新疆喀什-伽师测区重力观测中持续使用了编号为 509 的 CG-5 重力仪, 获得了多期重复观测数据。此外, 该台仪器在 2010 年初和 2013 年初分别在武汉-沈阳长基线标定场地<sup>[8]</sup>进行了一次项格值系数标定。本文以 2010~2013 年期间新疆喀什-伽师测区重力观测数据为例, 结合近年来格值系数标定结果, 研究 CG-5-509 重力仪格值系数变化特征, 并分析格值系数变化对重力观测成果的影响。本文研究结果可为 CG-5 重力仪观测资料精细处理提供参考, 从而有利于真实重力场变化信息的提取及其应用。

## 1 方法与数据

### 1.1 格值系数误差对重力点值的影响

由于 CG-5 重力仪出厂时通过电子调整, 已将二次非线性项标定系数调整为 0<sup>[5]</sup>, 因此, CG-5 重力仪观测值数学模型可简化如下:

$$F(Z_i) = g_i \cdot E_i \quad (1)$$

在利用目前我国地震重复重力测量通用平差处理软件 LGADJ 进行数据处理时, 通常采用经典平差方法, 以重力段差为平差元素, 将待求重力点重力值作为未知数。设重力仪在  $i, j$  两点的观测值分别为  $F(Z_i)$ 、 $F(Z_j)$ , 则  $i, j$  两点的单程重力段差为:

$$l_{ij} = F(Z_j) - F(Z_i) = E_i(g_j - g_i) \quad (2)$$

收稿日期: 2015-12-04

项目来源: 中国地震局地震研究所所长基金(IS201326121); 国家自然科学基金(41304059); 地震行业科技专项(201308009, 201308004); 中国地震局科技星火计划(XH14054Y)。

第一作者简介: 郝洪涛, 助理研究员, 主要从事重力观测技术与应用研究, E-mail: haoht2004@sina.com。

通讯作者: 刘代芹, 高级工程师, 主要从事重力测量、大地测量以及地壳形变分析等研究, E-mail: xjdjldq@126.com。

其误差方程为:

$$v_{ij} = (\bar{g}_j - \bar{g}_i) - E_1(g_j - g_i) = (\bar{g}_j - \bar{g}_i) - l_{ij} \tag{3}$$

式中,  $\bar{g}_i, \bar{g}_j$  为  $i, j$  点待求重力值。

对于已知重力值的重力点,将已知重力值作为观测值,误差方程为:

$$v_h = \tilde{G}_h - g_h = \tilde{G}_h - l_h \tag{4}$$

式中,  $\tilde{G}_h$  为重力点  $h$  平差后的重力值,在此作为未知数求解;  $G_h$  为已知重力值;  $v_h$  为平差后改正数。

将式(3)、式(4)联合写为:

$$V = A\tilde{X} - L \tag{5}$$

式中,  $V$  为改正数向量;  $\tilde{X}$  为待求的重力点重力值;  $A$  为未知数系数矩阵;  $L$  为观测值向量。

根据经典平差公式,有:

$$\hat{X} = (A^T P A)^{-1} A^T P L \tag{6}$$

在测网中无两个以上基准点进行强行控制的情况下,当一次项格值系数存在偏差  $\Delta E_1$  时,设其对段差观测值影响为  $\Delta L$ ,则根据式(3)、式(4)可知:

$$\Delta L = \Delta E \cdot L - [\Delta E \cdot G, 0, \dots, 0]^T \tag{7}$$

其中,  $G$  为平差起算基准点设定的重力值。

将式(7)代入式(6),可求得  $\Delta E$  对重力点值结果的影响  $\Delta X$  为:

$$\Delta X = \Delta E \cdot X - [\Delta E \cdot G, \Delta E \cdot G, \dots, \Delta E \cdot G]^T = [0, \Delta E \cdot (X_2 - G), \Delta E \cdot (X_3 - G), \dots, \Delta E \cdot (X_n - G)] \tag{8}$$

即格值系数误差对计算点值的影响与计算点和基准点重力差呈线性相关。鉴于在短期内真实的重力场变化与重力点值呈线性关系为小概率事件,因此可假设相邻两期观测期间重力点值变化与重力点值自身的线性关系主要源自两期观测仪器采用的格值系数误差,则重力点值变化与重力点值的线性回归结果即为两期观测期间格值系数的变化量。即已知  $X_n - G$  和  $\Delta X$ ,可求得  $\Delta E$ 。

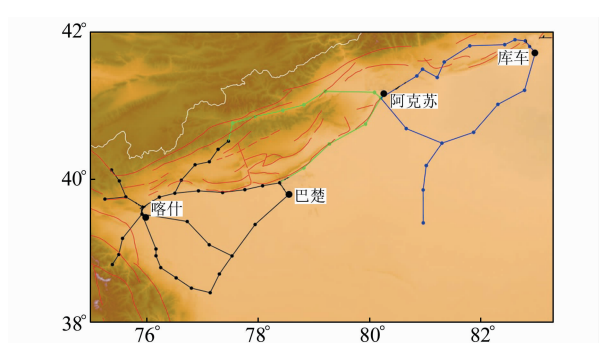
1.2 观测数据与处理

喀什-伽师重力网位于新疆西部,构造分区上位于南天山褶皱带、帕米尔弧形构造带以及塔里木块体三个构造单元的交界地带,是研究重力变化与构造活动的理想地区。新疆地震局于 2005 年起开始对该重力网进行定期复测,使用仪器早期为拉克斯特 G 型重力仪,2010 年后改为 CG-5 型重力仪,其中编号为 509 的重力仪在 2010~2013 年期间持续使用了 4 年之久,总计获得 10 期复测数据。由于 2010 年后新疆地震局对喀什-伽师重力网陆续进行了数次改造,各期观测资料覆盖有所不同(图 1)。资料概况如表 1 所示。

表 1 观测数据概况

Tab. 1 General information of gravity data

期次	观测时间	测点数/个	使用仪器
1	2010-03-19~2010-03-29	41	CG-5,509/524
2	2010-07-17~2010-07-24	35	CG-5,509/524
3	2011-03-14~2011-03-22	40	CG-5,509/524
4	2011-07-20~2011-07-30	45	CG-5,509/524
5	2011-12-06~2011-12-17	42	CG-5,509/524
6	2012-03-15~2012-03-25	42	CG-5,509/524
7	2012-07-16~2012-07-27	43	CG-5,509/524
8	2012-11-22~2012-12-04	42	CG-5,509/524
9	2013-06-15~2013-07-02	66	CG-5,509/526
10	2013-09-11~2013-10-04	83	CG-5,509/526



白色线条为国界;红色线条为断层;黑色点、线为原有测点测线;绿色点、线表示 2011 年新增测点、测线;蓝色点、线表示 2013 年新增测点、测线

图 1 喀什-伽师重力网示意图

Fig. 1 Gravity network of Kashi-Jiashi

数据处理中,首先对 C509 单台仪器各期观测数据进行单独平差计算,初始格值系数采用 2010 年初华北长基线标定结果<sup>[8]</sup>,平差软件采用中国地震局流动重力数据处理通用软件 LG-ADJ<sup>[9]</sup>,平差计算方法采用拟稳平差,计算过程中实施了固体潮、气压、仪器高等改正。然后利用前述方法依次对相邻两期采用仪器格值系数的匹配程度进行检测,以前一期为准对后一期进行修正后,获取修正后的格值系数,并与 2013 年初长基线标定结果进行对比。

2 结果分析

表 2、图 2 为 C509 仪器各期观测采用格值系数的检测和修正结果。分析可知,各期采用初始格值系数相比前一期一般存在偏大现象,其中 2011 年 3 月期次观测最为明显,相比 2010 年 7 月期次偏大 0.015%;其余期次格值系数不符合度量级小于 0.01%。修正后格值系数除 2013 年两期观测保持稳定外,之前时段明显呈持续下降态势,2013 年 6 月相比 2010 年 3 月累积变化量达 0.038%。通过检测方法获取的 2013 年 6 月期次格值系数为 0.000 952,与 2013 年 1 月在华北长基线场的标定结果 0.999 041 基本相同,这

也说明了通过该方法研究 CG-5 重力仪格值系数 变化是可靠的。

表 2 C509 仪器格值系数变化结果  
Tab. 2 Scale parameter change of C509 gravimeter

时间	喀伽测网检测结果			华北标定结果	
	初始格值系数	相对前一期不符合度	修正后格值系数	时间	标定格值系数
2010-03	0.999 490		0.999 490	2010-01	0.999 490±0.000 014
2010-07	0.999 490	0.000 008±0.000 031	0.999 482		
2011-03	0.999 490	0.000 150±0.000 035	0.999 332		
2011-07	0.999 490	0.000 070±0.000 032	0.999 262		
2011-12	0.999 490	0.000 050±0.000 026	0.999 212		
2012-03	0.999 490	0.000 080±0.000 034	0.999 132		
2012-07	0.999 490	0.000 014±0.000 030	0.999 118		
2012-11	0.999 490	0.000 005±0.000 036	0.999 113		
2013-06	0.999 490	0.000 061±0.000 030	0.999 052	2013-01	0.999 041±0.000 040
2013-09	0.999 490	-0.000 010±0.000 029	0.999 062		

由式(8)可知,在测点若重力值与基准点重力值差异达  $100\times10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,对测点重力值的影响可达  $38\times10^{-8}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。由于喀什-伽师重力测区的重力值范围达  $500\times10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  以上,对计算重力点值及重力变化的影响最大可达  $190\times10^{-8}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  以上,因此格值系数误差在该测区重力资料处理与分析中必须予以考虑。

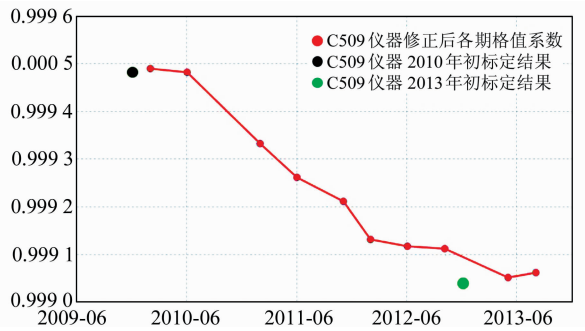


图 2 C509 格值系数变化  
Fig. 2 Scale parameter change of C509 gravimeter

为对此进行验证,分别采用修正前后的格值系数计算了 2013 年 6 月期次相对 2010 年 3 月期次的重力变化。图 3(a)、图 3(b)分别为格值系数修正前后的重力变化图像。分析可知,格值系数修正前,图像中重力变化非常显著,最大正负变化均在  $100\text{ }\mu\text{Gal}$  以上,正负差异变化在  $200\text{ }\mu\text{Gal}$  以上;而格值系数修正后的重力变化图像中,最大正负变化均在  $20\text{ }\mu\text{Gal}$  左右,差异变化在  $40\text{ }\mu\text{Gal}$  左右,无显著异常变化。修正前后重力变化的格局也发生了明显变化,修正前,图像中整体呈自西向东、由负向正的趋势变化,喀什南部存在一个最大量级约为  $60\text{ }\mu\text{Gal}$  的局部的正异常变化区;而修正后,图像中大范围的趋势异常变化消失,正负变化相对高值区主要分布在南天山西部及喀什地区,凸显了该地区在重力场变化整体平缓的背景 下重力变化相对复杂的特征。因此,格值系数误差的检测和修正对于获取真实的重力场变化结

果、核实重力异常变化信息具有重要意义。

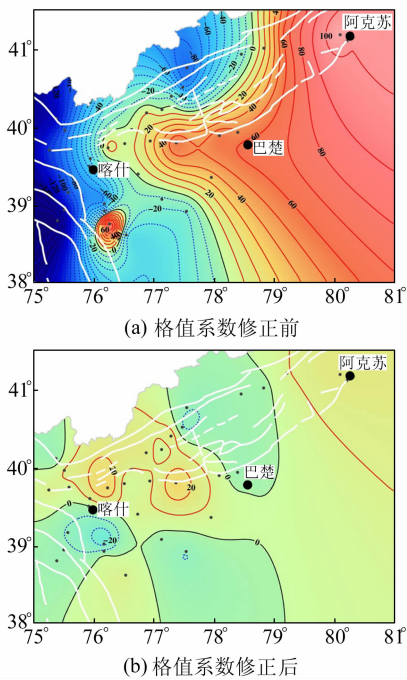


图 3 格值系数修正前后 2010-03~2013-06 重力场变化图像  
Fig. 3 Gravity variation Image of 2010-03-2013-06 before and after correction of scale parameter

3 结 语

利用新疆地区 2010~2013 年重力观测数据,结合近年来相对重力仪格值系数标定结果,对编号为 509 的 CG-5 重力仪格值系数变化进行研究,并分析了格值系数改正前后计算获得的重力场变化图像,探讨了格值系数对重力场变化结果的影响。结果表明:

1)CG-5-509 重力仪在 2010~2013 年期间格值系数存在明显的持续下降变化趋势,4 年期间累积变化达到了 0.000 39。通过检测方法获得的 2013 年 6 月格值系数与 2013 年初华北长基线标定结果基本相同,说明通过本文方法研究相对重

力仪格值系数变化及其影响具有可行性。

2)对格值系数进行改正后,重力场变化整体更为平缓,表明格值系数误差的检测和修正对于获取真实的重力场变化结果、核实重力异常变化信息具有重要意义<sup>[10]</sup>。

### 参考文献

- [1] Barnes D.F. Gravity Changes During the Alaska Earthquake [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1966, 71(2): 451-456
- [2] Fujii Y. Gravity Changes in the Shock Area of the Niigata Earthquake, 16 June, 1964 [J]. *Zisin*, 1966, 19(3): 200-216
- [3] Kisslinger C. Processes During the Matsushiro, Japan, Earthquake Swarm as Revealed by Leveling, Gravity, and Spring-Flow Observations [J]. *Geology*, 1975, 3(2): 57-62
- [4] Ukawa M, Nozaki K, Ueda H, et al. Calibration Shifts in Scintrex CG-3M Gravimeters with an Application to Detection of Microgravity Changes at Iwo-tou Caldera, Japan [M]. *Geophysical Prospecting*, 2010, 58: 123-132
- [5] 曹金国, 王来鹏, 翟广卿, 等. CG-5 重力仪及应用 [M]. 北京: 解放军出版社, 2007 (Cao Jinguo, Wang Laipeng, Zhai Guangqing, et al. CG-5 Gravimeter and Its Application [M]. Beijing: Chinese People's Liberation Army Press, 2007)
- [6] Parseliunas E, Petroskevicius P, Birvydiene R, et al. Investigation on the Automatic Gravimeters Scintrex CG-5 and Analysis of Gravimetric Measurements [C]. The 8th International Conference on Environmental Engineering, Vilnius, 2011
- [7] 贾民育, 詹洁晖. 中国地震重力监测体系的结构与能力 [J]. *地震学报*, 2000, 22(4): 360-367 (Jia Minyu, Zhan Jiehui. The Structure and Ability of the China Seismological Gravity Monitoring System [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2000, 22(4): 360-367)
- [8] 刘少明, 孙少安, 卢红艳, 等. LCR 重力仪与 CG-5 重力仪的长基线混合标定 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2012, 32(1): 56-59 (Liu Shaoming, Sun Shaoan, Lu Hongyan, et al. Mixed Calibration on Long Baseline for LCR and CG-5 Gravimeters [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(1): 56-59)
- [9] 刘少府, 刘冬至, 李辉. 高精度重力测量平差及其软件 [J]. *地震*, 1991(4): 57-66 (Liu Shaofu, Liu Dongzhi, Li Hui. Adjustment of High Precision Gravity Measurements and Its Software [J]. *Earthquake*, 1991(4): 57-66)
- [10] 郝洪涛, 李辉, 刘子维, 等. 基于重力差方法检测重力仪一次项格值系数变化 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(2): 87-90 (Hao Hongtao, Li Hui, Liu Ziwei, et al. Study on Change of Scale Parameters in Linear Term of Gravimeter with Gravity Difference Method [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(2): 87-90)

## Research and Application of Scale Parameter Change of CG-5 Gravimeter

HAO Hongtao<sup>1,2</sup> LI Hui<sup>1,2</sup> SUN Shaoan<sup>1,2</sup> LIU Daiqin<sup>3</sup>

1 Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, 40 Hongshance Road, Wuhan 430071, China

2 Wuhan Base of Institute of Crustal Dynamics, CEA, 40 Hongshance Road, Wuhan 430071, China

3 The Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous, 338 2nd-Kexue Street, Urumqi 830011, China

**Abstract:** By using the gravity data in Kashi-Jiashi area of Xinjiang from 2010 to 2013, together with the scale parameters calibrated in a long baseline of North-China during recent years, the scale parameter of a CG-5 gravimeter with a number of C509 was studied. The result showed that scale parameter of C509 gravimeter changed obviously with a magnitude of about 0.000 4, which is consistent with the calibration result. After the scale parameter change was corrected, gravity variation calculated was more smoothly, which indicate that correction of scale parameter change was important to verify gravity anomaly variation.

**Key words:** CG-5 gravimeter; scale parameter; calibration; gravity