

# CG-5 重力仪零漂改正及格值系数检测应用研究

郝洪涛<sup>1,2</sup> 李 辉<sup>2</sup> 孙和平<sup>3</sup> 周江存<sup>3</sup> 王青华<sup>4</sup> 魏东平<sup>1</sup>

1 中国科学院大学地球科学学院, 北京, 100049

2 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉, 430071

3 中国科学院测量与地球物理研究所, 湖北 武汉, 430077

4 云南省地震局, 云南 昆明, 650041

**摘要:** 利用分测线零漂改正方法和格值系数变化检测方法, 对云南重力测区 2014 年两期 CG-5 重力仪观测数据进行了精细处理, 获得了该地区重力场变化, 并用绝对重力观测结果进行了验证。结果表明: (1) CG-5 重力仪零漂率存在明显的随时间变化, C1169 和 C1170 两台重力仪在第一期观测时间内呈近似线性的增大趋势, 变化量达  $20 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 第二期观测时间内则趋于稳定, 经零漂改正后, 观测数据联测精度明显提高; (2) C1170 重力仪格值系数变化发生了明显变化, 变化量约为 -0.000 100; (3) 经格值系数改正后, 获得的重力变化结果与绝对重力观测结果更为一致, 重力场变化图像更为清楚地反映了昭通-鲁甸断裂两侧的差异变化和鲁甸 6.5 级地震的发震背景, 验证了大地震一般发生在与主要活动断裂一致的重力场变化正负转换带上这一结论, 说明本文所用方法能有效消除观测数据中的系统误差, 有利于真实重力场变化信息的获取。

**关键词:** CG-5 重力仪; 零漂; 格值系数; 重力变化

中图法分类号:P223.2

文献标志码:A

CG-5 相对重力仪是加拿大 SCINTREX 公司生产的石英弹簧重力仪, 其标称测量精度优于  $5 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , 读数分辨率达  $1 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , 且具有自动化程度高的优点<sup>[1]</sup>, 是目前世界上使用最为广泛的相对重力仪之一。近年来, 我国在地震重力测量<sup>[2]</sup>工作中开始推广使用 CG-5 重力仪, 并对该重力仪的零漂特征、格值系数等主要性能参数进行了测试研究。文献[3]对 10 台 CG-5 重力仪在庐山重力基线场测试数据的研究结果表明, 该型仪器零漂率大, 但短期内线性程度好; 文献[4]对 LCR-G 型重力仪和 CG-5 重力仪的混合标定研究结果表明, CG-5 重力仪在不同基线场的标定结果存在较大差异; 文献[5]对新疆地区 CG-5 重力仪的实测数据精度进行了分析, 表明其联测精度可达  $7 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。这些结果对于 CG-5 重力仪观测数据的应用研究具有重要参考意义, 但关于该型重力仪在较长时间内零漂率和格值系数的稳定性却并未深入探讨, 本文拟进一步对这些问题进行研究。

目前, 我国地震重力测量数据的处理通常将重力仪零漂率作为常数进行整体解算<sup>[6]</sup>, 格值系数则采用基线场标定结果, 但标定周期通常达 3 ~ 5 a, 因此数据处理结果中可能会存在由于重力仪零漂率变化和格值系数变化带来的误差。为减弱甚至消除格值系数误差的影响, 一些学者研究了多种改正方法, 如区域适定法<sup>[7-8]</sup>、标定结果内插方法<sup>[9]</sup>、重力差方法<sup>[10]</sup>等。区域适定法需要利用测区积累的多期资料, 搜索测区内空间分布和重力值分布相对均匀且重力变化较小的测点, 计算过程相对繁琐。标定结果内插方法是利用多期基线场标定结果内插出观测时刻的格值系数, 时效性较差。重力差方法则最为直观简便, 可以快速检测格值系数变化带来的误差。根据本文所用实测数据的情况, 因为区域适定法需要利用测区积累的多期资料, 而标定结果内插方法是利用多期基线场标定结果, 所以本文选用重力差方法。

本文以我国地震重力监测的典型地区——云南重力测区 2014 年 CG-5 重力仪观测数据为例,

收稿日期: 2015-09-22

项目资助: 中国地震局地震研究所所长基金(201326121); 国家自然科学基金(41304059); 大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金(SKLGED2013-1-2-EZ, SKLGED2013-1-1-Z); 中国地震局地震行业科研专项(201308004, 201508009)。

第一作者: 郝洪涛, 博士生, 助理研究员, 主要从事流动重力观测技术研究。haoht2004@sina.com

通讯作者: 魏东平, 博士, 教授。dongping@ucas.ac.cn

研究了 CG-5 重力仪零漂率变化,讨论了零漂改正和格值系数改正对观测数据处理结果的影响,利用测区内绝对重力结果并结合改正前后观测数据联测精度指标对改正结果进行验证,并成功提取了 2014-08-03 鲁甸地震前后的重力变化信息。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 观测数据与处理

### 1.1 观测数据概况

云南重力测区位于我国著名的强震活动地区“南北地震带”的南段,强震活动频繁,历来是我国地震监测与研究的重点地区之一。该测区大致可分为滇西、滇东两部分,并通过南华-昆明、永仁-昆明两条测线连接成为整体;测区北部另延伸有 3 条测线,与四川地区重力观测形成连接(见图 1)。

测区相对重力观测在 2014 年以前一直使用 LCR-G 型重力仪,2014 年使用最新引进的 2 台 CG-5 重力仪(仪器编号分别为 C1169、C1170)对该测区实施了 2 期观测,观测时间分别为 2014 年 3~4 月和 8~9 月。两期观测之间,2014-08-03 测区内曾发生鲁甸 6.5 级地震,为 CG-5 重力仪观测数据在地震发生机理研究中的应用提供了宝贵震例。观测数据中仪器格值系数采用武定基线场标定结果,数据检核符合《地震重力测量规范》<sup>[11]</sup>要求,单条测线闭合观测自差优于  $25 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,互差优于  $30 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。观测数据基本情况如表 1 所示。

### 1.2 零漂率变化计算与改正

在地震重力观测数据处理中,重力仪零漂率

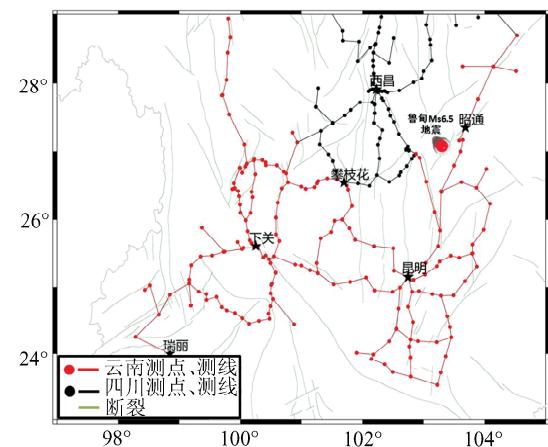


图 1 云南重力测区示意图

Fig. 1 Gravity Network in Yunnan Area

通常在平差计算时作为仪器参数进行解算得出<sup>[6]</sup>,本文采用同样的方法解算。该方法首先将观测数据按照每条测线的闭合观测时间进行分段,逐段进行平差,计算得到各时间段的零漂率,从而可研究 CG-5 重力仪零漂率变化,并分析其稳定性。根据各数据段零漂率计算结果,用式(1)对观测数据进行零漂改正:

$$\Delta D^i = D \times (t^i - t^0) / E \quad (1)$$

式中,D 为每条测线数据解算出的零漂率;  $t^0$ 、 $t^i$  分别为一段数据中的初始点和零漂改正点的观测时间;E 为平差计算采用的格值系数。

对零漂改正前和改正后的观测数据分别进行整体平差计算,对比改正前后的精度指标,可检验零漂改正的效果(见表 2)。

### 1.3 格值系数变化检测与改正

根据文献[10],格值系数变化检测方法为在平差计算不采用两个以上测点进行基准约束时,格值系数误差对重力点值的影响为:

$$\Delta X_i = \Delta E(X_i - G) \quad (2)$$

表 1 观测数据概况

Tab. 1 Gravity Data

期次	观测时间			测点数	测段数	仪器格值系数
	1	2014-03-06~2014-04-26	2014-08-16~2014-09-27			
1				201	214	C1169: 0.999 998
2				196	206	C1170: 1.000 066

表 2 零漂改正前后联测精度/( $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

Tab. 2 Accuracies Before and After Zero Drift Correction/( $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

期次	零漂改正前联测精度			零漂改正后联测精度		
	C1169	C1170	整体	C1169	C1170	整体
第一期	34.3	30.7	27.6	5.6	5.7	7.1
第二期	8.1	7.8	9.9	6.2	5.0	8.8

式中,  $\Delta E$  为格值系数误差;  $G$  为起算点基准值或

拟稳点的重心基准值;  $X_i$  为第  $i$  个测点的重力值。为增加数据样本, 将任意  $i, j$  两点的重力值相减组成重力差  $D_{X_{ij}}$ :

$$D_{X_{ij}} = X_j - X_i \quad (3)$$

则  $\Delta E$  对  $D_{X_{ij}}$  的影响为:

$$\Delta D_{X_{ij}} = \Delta E(X_j - X_i) \quad (4)$$

即格值系数误差对重力差的影响与重力差的大小呈线性关系。

地震重力观测至少采用 2 台仪器同时进行观测,如仪器格值系数存在误差,则由同期两台仪器观测数据计算的重力差变化与重力差关系式为:

$$\Delta D_{X_j} = (\Delta E_2 - \Delta E_1)(X_j - X_i) \quad (5)$$

式中,  $\Delta E_1$  和  $\Delta E_2$  分别为两台仪器的格值系数误差,  $\Delta E_2 - \Delta E_1$  反映的是同期两台仪器使用的格值系数的不匹配程度。通过对同期两台仪器计算的重力差变化和重力差进行线性回归,可计算  $\Delta E_2 - \Delta E_1$ , 并可以一台仪器为基准, 对另一台仪器格值系数进行改正, 使两台仪器格值系数在同期观测中匹配。需要说明的是, 在回归分析中为减弱粗差的影响, 对重力差和重力差变化作了分段平均, 并去除了数量较少的数据段, 具体方法参见文献[10]。

鉴于短期内真实的重力差变化与重力差呈线性关系为小概率事件, 本文假设相邻两期观测期间重力差变化与重力差的线性关系主要源自两期观测仪器采用的格值系数误差, 则重力差变化与重力差的线性回归结果即为两期观测期间格值系数的变化量。

基于以上讨论, 根据式(2)~(5), 对 C1169、C1170 重力仪格值系数进行了检测。以表 1 中的格值系数为初始值, 对经过零漂改正后的单期、单台仪器数据分别进行平差计算。然后对同期两台仪器计算得到的重力差变化与重力差进行线性回归, 检验两台仪器在同期观测中使用的格值系数是否匹配, 并以 C1169 仪器为基准, 对 C1170 进

行改正。最后采用同期匹配后的格值系数, 对两期观测数据分别进行整体计算, 再对两期计算结果的重力差与重力差变化进行线性回归, 检验两期观测采用的格值系数是否匹配, 并进行改正。

## 2 结果与讨论

### 2.1 零漂改正

利用 § 1 节的零漂率计算方法, 本文获得了 C1169、C1170 重力仪在两期观测时间内的零漂率(见图 2)。结果表明, 第一期观测期间两台仪器的零漂率均不稳定, 明显呈近似线性的持续增大态势, 且其变化量级相近, 均约为  $20 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。第二期观测期间两台仪器的零漂率仍存在微弱的增大趋势, 但变化量已明显减小, 均约为  $4 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 这表明两台仪器的零漂率正逐步趋于稳定。对两期观测时间内的零漂率变化进行整体分析, 发现两台仪器的零漂率变化均与二次多项式拟合结果符合较好, 并可由此推测两台仪器的零漂率不久将转入下降阶段。文献[3]曾指出, CG-5 重力仪在投入使用初期零漂率较大, 随时间的推移会逐步下降, 逐渐稳定至  $20 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  左右。但从本文结果来看, CG-5 重力仪投入使用初期零漂率反而存在先增大、再稳定的阶段, 之后才会逐步下降, 再次稳定, 可能是由于该两台重力仪所用弹簧与早期仪器的处理工艺有所不同。

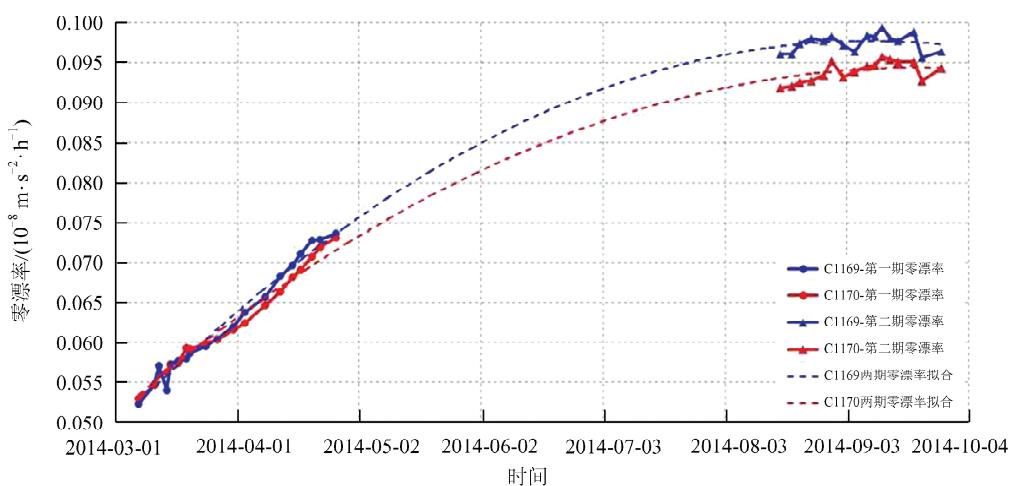


图 2 CG-5 重力仪零漂率变化

Fig. 2 Variation of Zero Drift of CG-5 Gravimeters

此外, 两台仪器零漂率的变化具有较好的同步性, 尤其是在第二期观测最后两个测线观测时间段, 两台仪器零漂率均出现突变, C1169 变化量为  $-4 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , C1170 约为  $-2 \times$

$10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。对观测数据进行分析, 发现最后三个测线所在的区域差别较大, 第 14 测线观测区域位于丽江-乡城的高原地区, 而最后两个测线则位于滇西南地区, 测区地形、气压、仪器读数

段均发生明显变化。这说明CG-5重力仪零漂率可能受其所在观测区域环境影响,但其具体机制仍需进一步试验和研究。

根据零漂率计算结果,对观测数据进行零漂改正后再次进行平差计算,观测数据联测精度指标明显提高(见表2)。第一期两台仪器整体计算的联测精度由 $27.6 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 提高至 $7.1 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,第二期观测两台仪器整体计算的联测精度由 $8.1 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 提高至 $7.8 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。第一期观测由于零漂率变化较大,故联测精度计算结果提高明显。这表明在CG-5重力仪零漂率变化较大时,先对观测数据按照单个测线闭合观测进行零漂改正后再进行整体平差计算,更有利于反映观测数据真实的精度指标,从而提供更可靠的处理结果。

## 2.2 格值系数变化检测结果

图3为C1169和C1170重力仪格值系数变化的检测结果。在同期两台仪器格值系数不匹配的检测结果中,第一期线性回归结果(图3(a))为 $0.000\ 021 \pm 0.000\ 002$ ,表明武定基线场标定结果对本期观测基本适用,但仍存在微小的误差。而第二期回归结果则达 $0.000\ 128 \pm 0.000\ 002$ (图3(b)),约为第一期检测结果的6倍。由图3可知,云南重力测区的最大重力差在 $500 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 以上,第二期检测结果对单台仪器计算结果的影响可达 $50 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,说明在该期观测中两台仪器使用的格值系数已不匹配,因此必须予以考虑和改正。根据以上检测结果,对C1170仪器采用的初始格值系数进行了修正,修正量为检测结果的负数。此外,格值系数修正后,两期观测数据的整体联测精度均有所提高,第一期由 $7.1 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 提升至 $6.8 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,第二期由 $8.8 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 提升至 $6.8 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

对同期观测格值系数不匹配修正后,两期之间格值系数不匹配程度的回归分析结果

(图3(c))为 $-0.000\ 007 \pm 0.000\ 001$ ,量级很小,且重力差和重力差变化明显呈离散状态,表明两期计算结果采用的格值系数匹配程度较好,因此,无需进行改正。由于同期检测均以C1169仪器为基准,因此可推测C1169仪器格值系数在两期观测期间未发生变化,而C1170仪器则发生了较为明显的变化,变化量约为 $-0.000\ 107$ 。修正后的格值系数如表3所示。

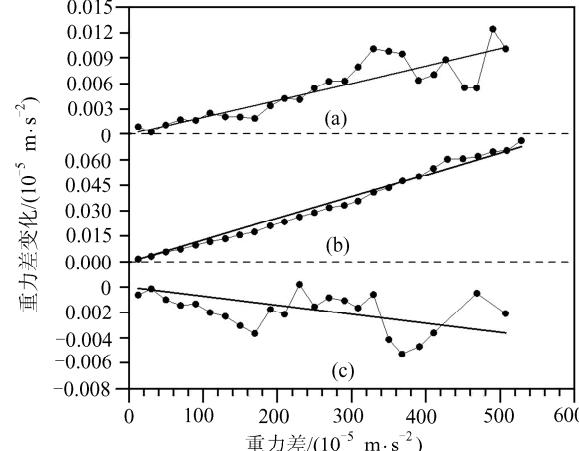


图3 格值系数检测与改正

Fig. 3 Detection and Correction of Scale Factor Surveys

## 2.3 格值系数变化结果的验证

由式(5)可知,格值系数误差会导致重力差的变化与重力差本身线性相关。在单期观测中,由于两台仪器采取同点、同时观测,两台仪器的观测结果之间不存在观测物理量的差异,如二者之间存在系统偏差,则可判定是由于仪器参数误差所致,因此,同期观测中不同仪器格值系数不匹配的检测和改正是合理的。同期两台仪器整体计算结果也表明,格值系数改正后联测精度得到提高,且格值系数不匹配检测结果越大,精度改善越为明显,这也从侧面证明,格值系数改正能有效减弱或消除仪器之间的系统偏差。

表3 格值系数检测、修正结果

Tab. 3 Results of Detection and Correction of Scale Factor

期次	初始格值系数		检测修正量		修正后格值系数	
	C1169	C1170	同期检测修正(C1170)	两期之间检测修正	C1169	C1170
第一期	0.999 998	1.000 066	$-0.000\ 021 \pm 0.000\ 002$	$-0.000\ 007$	0.999 998	1.000 045
第二期	0.999 998	1.000 066	$-0.000\ 128 \pm 0.000\ 002$	$\pm 0.000\ 001$	0.999 998	0.999 938

相邻两期检测和改正的基础是假设真实的重力场变化在短期内不会出现重力差变化与重力差线性相关,至少不会出现明显的相关。为对检测结果进行验证,本文首先收集了测区内2010年以来绝对重力观测结果,以两期相对重力观测前后

均有实测结果为标准,选取昆明、下关、瑞丽三个测点,通过线性内插方式获得各测点在每期观测时刻的绝对重力值和两期观测之间的变化量。再以昆明测点(其余两点为支线联测)绝对重力值为起算基准,分别采用修正前后的格值系数对两期

数据进行计算,获得改正前后各测点的变化量,与绝对结果进行对比(见表 4)。结果表明,格值系数改正后,下关点变化量未发生变化,其原因是该点与昆明基准点的重力差仅约为  $1 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

,格值系数误差造成的影响几乎可忽略不计;而瑞丽测点的变化量则由  $+18.7 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  减小至  $+4.5 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,与绝对重力结果基本相同,这表明格值系数改正对该测点非常有效。

表 4 格值系数修正前后绝对点变化验证/( $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

Tab. 4 Testing of Correction of Scale Factor by Gravity Variation Observed by Absolute Gravimetry/( $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

点名	绝对观测时间	绝对观测内插变化量	格值系数改正前计算变化量	格值系数改正后计算变化量
昆明	2012-08-25, 2014-05-24, 2014-08-20	-9.0		
下关	2010-10-26, 2014-05-21, 2014-10-06	+2.0	+9.0	+9.0
瑞丽	2011-06-29, 2014-11-08	+2.0	+18.7	+4.5

图 4(a)和图 4(b)分别为格值系数改正前后的重力场变化图像。图 4(a)中基本为正变化,攀枝花和滇西南两个正变化极值区最大约为  $+30 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,昭通-鲁甸断裂两侧均为正变化。而图 4(b)中攀枝花、滇西南地区的正变化明显减弱,昭通以北地区由正变化转为负变化,滇西北地区整体增大约  $5 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。整体而言,格值系数修正后的图像变化更为平缓,数值均在  $\pm 20 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  以内,这说明格值系数变化检测对于重力异常变化的核实和分析可提供重要参考。此外,与图 4(a)相比,图 4(b)还凸显了昭通-鲁甸断裂南北两侧的差异变化,2014-08-03 鲁甸 6.5

级地震即位于与该断裂基本重合的 0 值线附近。重力场的演化规律与构造活动关系的研究结果表明,活动地块的边界带在重力场演化中往往具有重要的控制作用,大地震一般发生在与主要活动断裂一致的重力场变化正负转换带上<sup>[12-13]</sup>,鲁甸 6.5 级地震发生在本文计算的重力变化 0 值线附近再次验证了这一结论。昭通-鲁甸断裂为大凉山次级块体与华南地块之间的边界带<sup>[14]</sup>,经格值系数修正的图像更为清楚地反映了该断裂两侧的差异变化和鲁甸 6.5 级地震的发震背景,与重力场的演化规律更为一致。

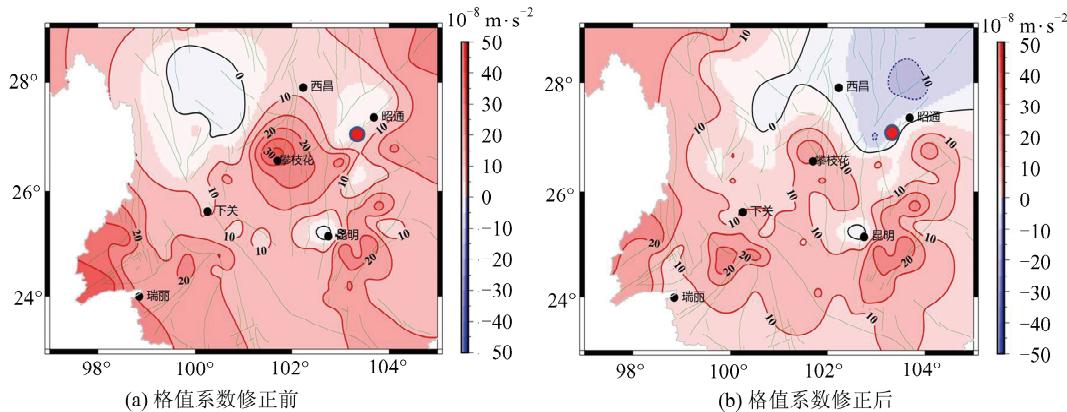


图 4 格值系数改正前后重力变化图像

Fig. 4 Gravity-Variation Image Before and After Scale Factor Correct

### 3 结语

本文以我国地震重力监测的典型地区-云南重力测区 2014 年两期观测数据为例,研究了利用分测线零漂改正和格值系数变化检测改正对 CG-5 重力仪观测数据进行精细处理的方法。数值结果表明,CG-5 重力仪在投入使用初期,其零漂率存在明显的随时间变化。云南测区 2014 年观测使用的 C1169、C1170 重力仪,在全年两期观测时

间内其零漂率均表现出不同程度的变化,其中第一期观测期间两台仪器零漂率均呈近似线性的增大趋势,变化量达  $20 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,因此,在地震重力数据处理中不宜将零漂率作为固定常数直接进行解算。对观测数据按照单个测线进行零漂率改正后,显著提高了观测数据精度指标,从而提供了更为可靠的观测成果。

CG-5 重力仪格值系数会发生变化,但不同仪器的变化特征不同。云南测区 2014 年两期观测中,C1170 重力仪格值系数变化量约为

-0.000 100, C1169 格值系数则未发生明显变化。经格值系数改正后,获得的重力变化结果与绝对观测结果更为一致,说明本文所用方法能有效消除观测数据中的系统误差,从而有利于真实重力场变化信息的获取。本文结果可为地震重力测量中 CG-5 重力仪观测数据的精细处理提供参考。

格值系数改正后,重力场变化图像更为清楚地反映了鲁甸-昭通断裂两侧的差异变化,2014-08-03 鲁甸 6.5 级地震位于与该断裂基本重合的重力变化 0 值线附近,符合大地震一般发生在与主要活动断裂一致的重力变化正负转换带上的认识,因此与重力场的演化规律更为一致。

## 参 考 文 献

- [1] Cao Jinguo, Wang Laishun, Zhai Guangqing, et al. CG-5 Gravimeter and Its Application [M]. Beijing: Chinese People's Liberation Army Press, 2007(曹金国,王来卿,翟广卿,等. CG-5 重力仪及应用 [M]. 北京:解放军出版社,2007)
- [2] Jia Minyu, Zan Jiehui. THE Structure and Ability of the China Seismological Gravity Monitoring System [J]. *Acta Seismological Sinica*, 2000, 22(4): 360-367(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)
- [3] Xing Lelin, Li Hui, Xia Zhengchao, et al. Study on Zero Drift Characteristics of CG-5 Gravimeter [J]. *Acta Seismological Sinica*, 2012, 32(5): 369-373(邢乐林,李辉,夏正超,等. CG-5 重力仪零漂特性研究 [J]. 地震学报, 2012, 32(5): 369-373)
- [4] 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(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)
- [5] Liu Daiqin, Li Jie, Zhu Zhiguo, et al. Primary Evaluation of Measuring Accuracy of LCR-g and CG-5 Relative Gravimeter Using Observation Data [J]. *Inland Earthquake*, 2012, 26(1): 45-51(刘代芹,李杰,朱治国,等. 利用观测资料对 CG-5 型与 LCR-G 型相对重力仪精度初步评定 [J]. 内陆地震, 2012, 26(1): 45-51)
- [6] Liu Shaofu, Liu Dongzhi, Li Hui. Adjustment of High Precision Gravity Measurements and Its Software [J]. *Earthquake*, 1991(4): 57-66)(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)
- [7] Jia Minyu, Xing Canfei, Sun Shaoan. Optimum Solution of the Gravitational Data in the Western Yunnan Experimental Field [J]. *Acta Seismological Sinica*, 1994, 16(Supp.): 100-108(贾民育,邢灿飞,孙少安. 滇西实验场重力资料的最佳解 [J]. 地震学报, 1994, 16(增刊): 100-108)
- [8] Sun Shaoan, Xiang Aimin, Wu Weiri. Time-Varying Characteristics of LCR-g Gravimeter Parameters [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2002, 22(2): 102-105(孙少安,项爱民,吴维日. LCR-G 型重力仪仪器参数的时变特征 [J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(2): 102-105)
- [9] Motoo U. Calibration Shifts in Scintrex CG-3M Gravimeters with an Application to Detection of Microgravity Changes at Iwo-Tou Caldera, Japan [J]. *Geophysical Prospecting*, 2010, 58: 1123-1132
- [10] 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(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)
- [11] State Seismological Bureau. Seismological gravimetric standard [M]. Beijing: Seismological Press, 1997(国家地震局. 地震重力测量规范 [M]. 北京: 地震出版社, 1997)
- [12] Zhu Yiqing, Liang Weifeng, Li Hui, et al. On Gravity Field Variations and Geodynamic Characteristics in Mainland of China [J]. *Geomatics and Information on Science of Wuhan University*, 2007, 32(3): 246-250(祝意青,梁伟峰,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)
- [13] Zhu Yiqing, Liang Weifeng, Zhan Feibing, et al. Study on Dynamic Change of Gravity Field in China Continent [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(3): 804-813(祝意青,梁伟峰,湛飞并,等. 中国大陆重力场动态变化研究 [J]. 地球物理学报, 2012, 55(3): 804-813)
- [14] Wen Xueze, Du Fang, Yi Guixi, et al. Earthquake Potential of the Zhaotong and Lianfeng Fault Zones of the Eastern Sichuan-Yunnan Border Region [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(10): 3361-3372(闻学则,杜方,易桂喜,等. 川滇交界东段昭通、莲峰断裂带的地震危险背景 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(10): 3361-3372)

# Application of Zero Drift Correct and Detection of Scale Parameters of CG-5 Gravimeter

HAO Hongtao<sup>1,2</sup> LI Hui<sup>2</sup> SUN Heping<sup>3</sup> ZHOU Jiangcun<sup>3</sup>

WANG Qinghua<sup>4</sup> WEI Dongping<sup>1</sup>

1 College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2 Institute of Seismology, CSB, Wuhan 430071, China

3 Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan 430077, China

4 Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650041, China

**Abstract:** Using zero drift correction for single survey line data and a scale factor change detection method, we carried out fine processing of CG-5 gravimeter from dual survey observation data during 2014 for the Yunnan area; gravity variations in the area were obtained. The results show that: (1) a zero drift rate of CG-5 gravimeter varies significantly over time. In the first survey period, the zero drift rate of gravimeter C1169 and C1170 present a tendency of linear increase at a magnitude of  $20 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  variation. During the second survey period, the zero drift rate of the gravimeters tended to be stable. After zero drift correction, the observation precision improved substantially. (2) The scale factor of the C1170 gravimeter changed at a magnitude of  $-0.000\ 100$ . (3) After scale factor correction, the gravity variation showed a better agreement with the absolute observation result, and the gravity variation image can clearly reflect the difference between the two sides of the Zhaotong-Ludian faults and seismogenic background of the Ludian 6.5 earthquake, which verified the view that a large earthquake occurred in the positive-negative transition area of gravity variation. Systematic observation error can be effectively eliminated using our proposed method that obtains the real gravitational field change.

**Key words:** CG-5 gravimeter; zero drift; scale factor; gravity variation

**First author:** HAO Hongtao, PhD candidate, specializes in the mobile gravity observing technology. E-mail: haoht2004@sina.com

**Corresponding author:** WEI Dongping, PhD, professor. E-mail: dongping@ucas.ac.cn

**Foundation support:** The Director Foundation of the Institute of Seismology, China Earthquake Administration, No. 201326121; the National Natural Science Foundation of China, No. 41304059; the Open Fund of State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Nos. SKLGED2013-1-2-EZ, SKLGED2013-1-1-Z; the Special Found for Earthquake Scientific Research of China, Nos. 201308004, 201508009.