

杨雅慧, 刘洪良, 郝洪涛, 等. CG-5重力仪格值系数修正与应用研究[J]. 华南地震, 2021, 41(4): 63–68. [YANG Yahui, LIU Hongliang, HAO Hongtao, et al. Research on Correction and Application of Scale Parameter of CG-5 Gravimeter [J]. South China journal of seismology, 2021, 41(4): 63–68]

CG-5重力仪格值系数修正与应用研究

杨雅慧¹, 刘洪良¹, 郝洪涛², 张展伟¹

(1. 河北省地震局保定地震监测中心站, 河北 保定 071000;

2. 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室), 武汉 430071)

摘要: 在地表重力观测过程中, CG-5重力仪的格值系数会随着时间的推移而发生变化。选用河北测区内2015—2017年相对重力观测数据, 基于重力差法对两台编号为C859、C873的CG-5相对重力仪进行格值系数的误差计算及修正, 研究其变化特征, 并对修正前后不同时间尺度的重力场变化进行对比分析。结果表明: 两台CG-5相对重力仪的格值系数在3年内存在不同程度的变化, 均呈现整体上升的趋势, 累计变化量分别为0.028%, 0.034%; 采用修正后的格值系数可得到点值精度更高的平差结果; 不同时间尺度上的重力场变化相比修正前也出现明显差异, 2017年河北大城 M_L 3.6级地震发生在格值系数修正后0.5 a期重力变化零值线附近, 这些结果表明了对CG-5重力仪进行格值系数修正的正确性和必要性。

关键词: CG-5重力仪; 河北测区; 格值系数; 误差修正; 重力变化; 零值线

中图分类号: P315.73

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2021)04-0063-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.04.08

Research on Correction and Application of Scale Parameter of CG-5 Gravimeter

YANG Yahui¹, LIU Hongliang¹, HAO Hongtao², ZHANG Zhanwei¹

(1. Baoding Earthquake Monitoring Central Station, Hebei Earthquake Agency, Baoding 071000, China;

2. Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, China)

Abstract: In the process of gravity observation, the scale parameter of CG-5 gravimeter will change with time. Based on the relative gravity data from 2015 to 2017 in Hebei gravity survey network and the gravity difference method, the scale parameter error of CG-5 gravimeter numbered C859, C873 was calculated and corrected. The variation characteristics were studied, and the gravity variation of different time scale before and after the correction were compared and analyzed. The results show that: the scale parameters of the two CG-5 gravimeters have different degrees of change in three years, showing an overall upward trend with cumulative changes of 0.028% and 0.034% respectively; the results with higher accuracy can be obtained by using the modified scale parameter. The gravity field variation at different time scale is also significantly different from those before the correction. The Dacheng M_L 3.6 earthquake in 2017 occurred near the zero line of gravity change in period 0.5 a after the correction of the scale coefficient, indicating the correctness and necessity of the scale parameter

收稿日期: 2021-0x-0x

基金项目: 河北省地震局地震科技星火计划(DZ202108090034)

作者简介: 杨雅慧(1990-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事流动重力观测技术研究。

E-mail: 1143950457@qq.com

correction for CG-5 gravimeter.

Keywords: CG-5 gravimeter; Hebei gravity survey network; Scale parameter; Error correction; Gravity variation; The zero line

0 引言

相对重力观测是我国目前进行地震监测预测的重要手段之一。为了获取更加科学的、真实的重力场信息，更好地服务于地震监测与预报分析，高精度的重力数据必不可少。目前，我国相对重力测量使用仪器大多为CG-5相对重力仪。CG-5相对重力仪由加拿大Scintrex公司制造，为全自动重力仪，读数重复性较好，其测量精度优于5 μgal，读数分辨率为1 μgal^[1]，自引入以来在我国地震重力测量中发挥着越来越重要的作用。

经学者研究发现，该仪器存在零点漂移变化非线性、个体之间差异大的问题^[2]，而且仪器的一次项格值系数逐年发生变化、不同的仪器之间变化量存在差异^[3-5]，这些由于重力仪本身性能参数变化而带来的系统误差问题不同程度的影响了重力变化结果的真实性及可靠性。其中，以格值系数变化对于重力资料处理结果的影响尤为明显^[5-7]。

2015—2017年期间，河北测区重力测量使用仪器为两台CG-5相对重力仪，重力仪编号为C859、C873，每年进行两期复测，共取得了六期相对重力观测数据。其中，两台CG-5相对重力仪于2015年12月进行了格值系数的长基线标定。本

文结合标定结果，对2015—2017年期间两台重力仪的格值系数的一致性进行了检测及修正，分析其变化特征，并对格值系数修正前后本测区不同时间尺度的重力场变化情况进行了对比分析。

1 数据与方法

1.1 数据概况

河北重力测区主要位于北京、天津以南区域，北部为燕山断裂带，西部为太行山山前断裂，唐山—磁县断裂带纵跨测区东部，其重力观测为首都圈安全提供着重要保障。自1968年开始，于邢台地区建立了由四个闭合环29个测点组成的，以汽车为运输工具的流动重力测网，复测周期为一年，使用仪器为CG-2型重力仪；2009年将原先的文霸、邯郸、邢台三个测网进行了优化组合，组成了大华北重力测网；2012年开始使用CG-5型重力仪进行观测；2014年对测网内42个损毁和测量环境不稳定的点位进行了改造。现测网主要由60个测点、66个测段组成，分布示意如图1所示。2015—2017年期间，每年进行两期重复观测，共累积了6期流动重力观测资料，使用仪器均为CG-5相对重力仪-C859、C873。

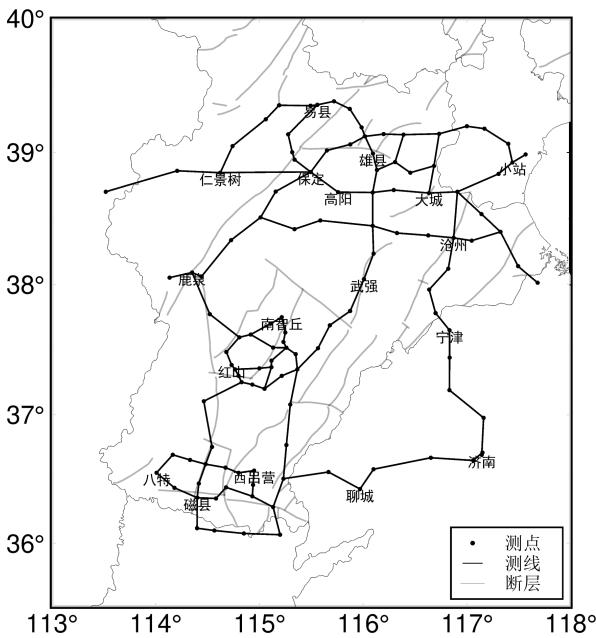


图1 河北测区重力网分布图
Fig.1 Distribution map of gravity network in Hebei survey area

1.2 方法概述

由于CG-5相对重力仪在出厂时的非线性系数被调整为0^[1],则对于某一测点的观测值仅需考虑仪器一次项的格值系数即可,其数学模型可表示为:

$$F_i = E \cdot X_i \tag{1}$$

式(1)中, E 为仪器一次项系数, X_i 为该测点观测值经过固体潮、零漂、气温、气压等改正之后的重力值。对于测量过程中任意两点的重力差 $F_{X_{ij}}$:

$$F_{X_{ij}} = E(X_j - X_i) \tag{2}$$

因此,对于由于格值系数变动引起的重力差变化,存在:

$$\Delta F_{X_{ij}} = \Delta E(X_j - X_i) \tag{3}$$

式(3)中, $F_{X_{ij}}$ 为不同重力点*i*、*j*的重力值之差, ΔE 为格值系数的变化量。

则在同期计算中,若采用两台CG-5相对重力仪同时进行观测,当两台仪器的格值系数不匹配时,得到:

$$\Delta F_{X_{ij}} = (\Delta E_2 - \Delta E_1)(X_j - X_i) \tag{4}$$

通过公式(4)可进行同期观测中不同仪器之间的格式系数一致性检测及误差计算,然后以其中一台仪器为基准对另一台仪器的格值系数进行修正,使两者的格值系数相匹配;同样,认为相邻两期的重力差与重力差变化的线性关系是由于格值系数不一致造成的^[3],可按公式(4)进行邻期格值系数的一致性检测及修正。

本文对测区内2015—2017年期间共6期流动重力观测资料进行了整理,利用中国地震局流动重力数据处理通用软件LGADJ分别对各期资料中两台重力仪C859、C873进行平差解算,平差方法采用

经典平差,取位于测网中心区域且较为稳定的点—衡水点作为起算基准点。在格值系数的检测与计算中,首先基于2015年底长基线标定结果,对2015年第二期重力数据进行平差处理并检测两台重力仪的格值系数一致性,以仪器C873为基准进行仪器C859格值系数的改正,然后由此期结果分别对相邻2015年第一期及2016年第一期数据进行同期、邻期格值系数一致性检测,得到其修正结果;再由2016年第一期结果依次向后各期次递推检测,由此获得所有期次的重力仪格值系数修正量及修正结果。

2 结果与分析

2.1 格值系数修正

两台CG-5重力仪在2015年12月份进行了长基线标定,标定结果为C859: 0.999 979 3±0.000 028, C873: 0.999 984 7±0.000 028。基于标定结果及上述检测方法,得到重力仪C859、C873每期检测的修正量及修正前后的结果,如表1所列。图2为两台重力仪的格值系数随时间变化曲线。分析可知,重力仪C859、C873的格值系数均出现不同程度的变化,总体为上升趋势。其中,两台重力仪在2017年3月期次中均出现突然抬升,变化较大,重力仪C873相比上一期变化量达0.039%;2017年9月期次出现下降,变化量达0.016%。其余期次两台仪器的变化量均保持在0.015%以内。在研究时段内,重力仪C873、C859的格值系数三年累计变化量分别为0.028%,0.034%。经修正后,平差结果中平均点值精度均得到了提高,表明了格值系数修正的正确性和必要性。

表1 C859、C873重力仪格值系数修正
Table 1 Scale parameters correction of C859 and C873 gravimeter

时间/年-月	初始格值系数		改正后格值系数		格值系数变化检测精度		平均点值精度	
	C859	C873	C859	C873	C859	C873	改正前	改正后
2015-03	0.999 793	0.999 847	0.999 586	0.999 878	0.000 004	0.000 002	0.0088	0.0080
2015-09	0.999 793	0.999 847	0.999 655	0.999 847	0.000 004		0.0115	0.0101
2016-03	0.999 793	0.999 847	0.999 789	0.999 992	0.000 002	0.000 010	0.0130	0.0121
2016-09	0.999 793	0.999 847	0.999 846	0.999 992	0.000 002	0.000 006	0.0164	0.0153
2017-03	0.999 793	0.999 847	0.999 990	1.000 388	0.000 006	0.000 002	0.0137	0.0136
2017-09	0.999 793	0.999 847	0.999 825	1.000 224	0.000 004	0.000 009	0.0125	0.0120

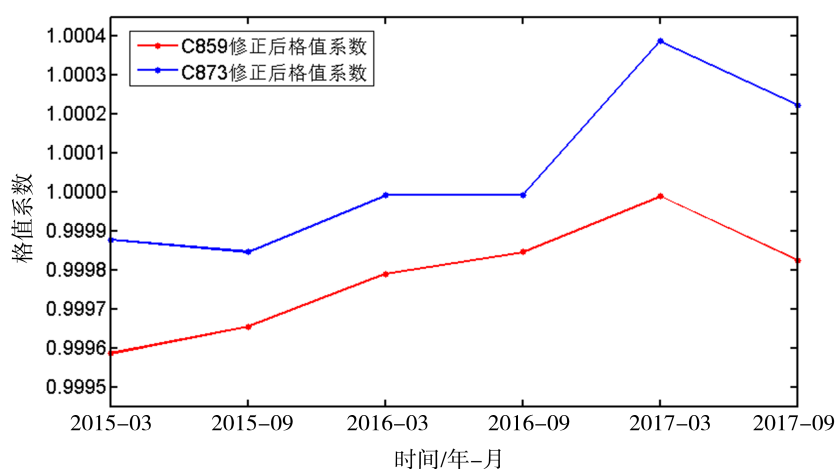


图2 C859、C873 格值系数变化图

Fig.2 Scale parameter change graph of C859 and C873 gravimeter

2.2 重力场变化分析

为了进一步验证格值系数的修正对于数据处理的重要性及必要性,取格值系数变化较大的期次,基于修正后的格值系数重新进行平差解算,得到不同时间尺度下的重力场变化信息。

图3(a)、(b)分别为2016-09—2017-03期次0.5 a尺度的格值系数修正前后重力变化图像,其中黑色实粗线为零值线。由图可发现,修正前后的重力变化图像存在明显差异。修正前的图(a)中重力差异变化显著,正高值及负低值区域突出,正负差异变化达130 μgal ;而修正后的图(b)中重力变幅明显减小,最大正变化仅为20 μgal ,正负差异变化控制在60 μgal 以内,无异常高值区。图(3a)中河北南部磁县—八特一带存在正变化异常区域,测区北部的水口—易县一带区域负异常明显,

达到-70 μgal ;而图(3b)中南部的高值区域消失,北部负异常变化明显减弱。另外,重力场的零值线位置和走向也发生了明显变化,修正前的图(3a)中零值线为东北—西南走向,在红山—桥河一带发生转折,呈“V”字型分布;修正后整体走向为北东向,局部出现弯曲,使得重力场整体态势分布由原来的北负南正变为西负东正,重力场整体变化更加平缓。修正后零值线的整体走向与唐山—河间—磁县断裂带走向一致。2017年4月28日,河北大城发生 $M_L 3.6$ 级地震,震中位置紧挨北东走向的大陈断裂,位于图(b)中零值线附近,为零值线拐弯区域,按照以往经验,地震一般发生在与区域内活动断裂一致的正负变化带上^[8-9],表明了格值系数修正后的重力场变化更能反映地震及断裂信息。

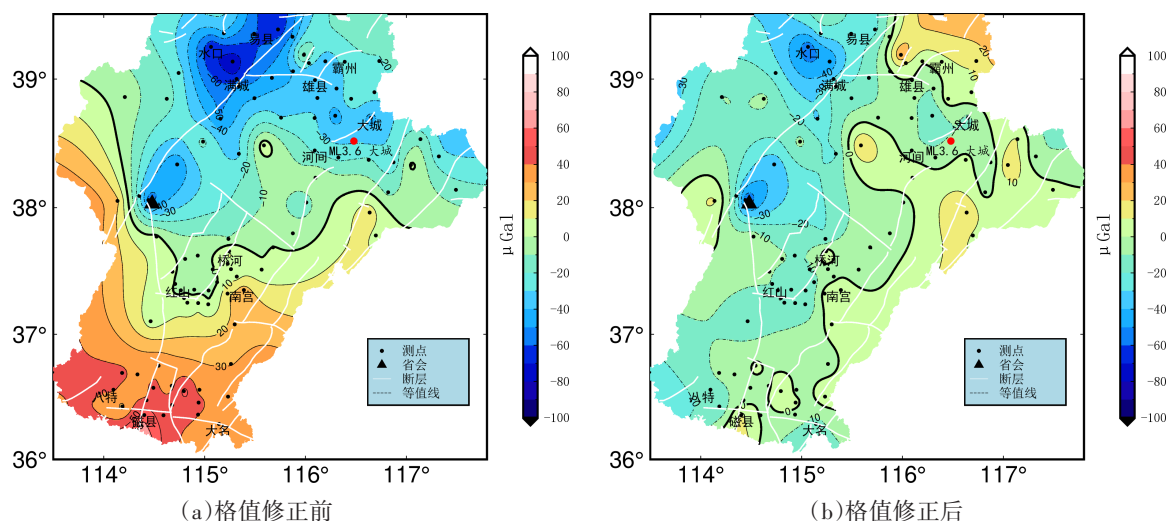


图3 格值修正前后重力场变化图(2016-09-2017-03)

Fig.3 Gravity variation image before and after scale parameter correction (201609-201703)

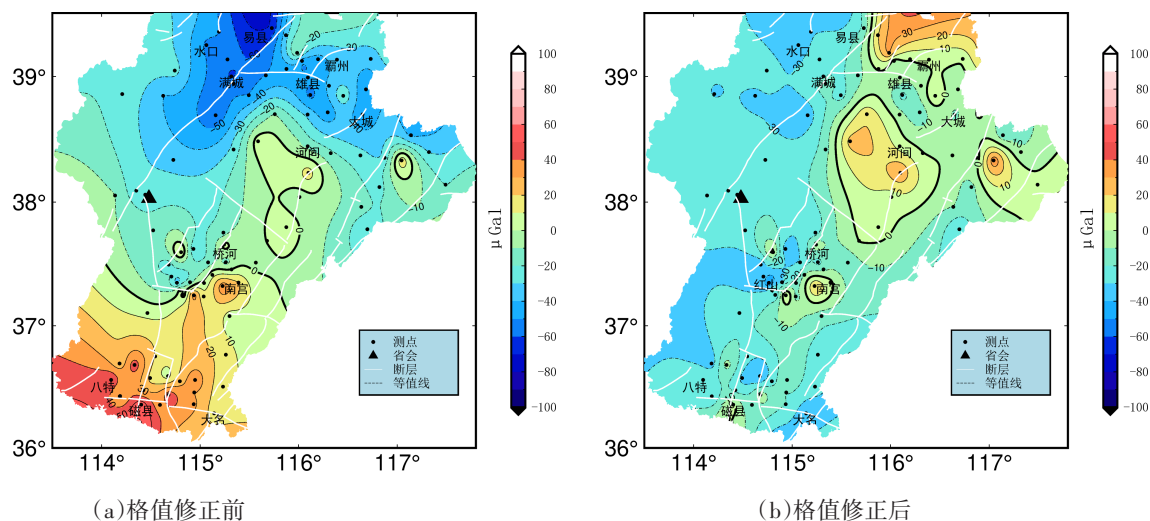


图4 格值修正前后重力场变化图(2016-03—2017-03)

Fig.4 Gravity variation image before and after scale parameter correction (201603-201703)

1 a尺度 2016-03—2017-03 的重力场变化情况如图4所示,图(4a)、(4b)中重力变化趋势及分布呈现明显的差异性。格值系数修正前重力场北部水口—易县附近存在负异常高值区,最大达 $-70 \mu\text{gal}$;南部的八特—磁县一带存在正异常高值区,

最高值达 $50 \mu\text{gal}$ 。格值系数修正后北部原负值异常区消失,但在其附近的东北角霸州以北一带形成局部的正变化区域,幅值为 $30 \mu\text{gal}$;南部原正异常区变化为负低值区,整体重力变幅缩小为 $-30 \sim 30 \mu\text{gal}$,无显著异常高值。

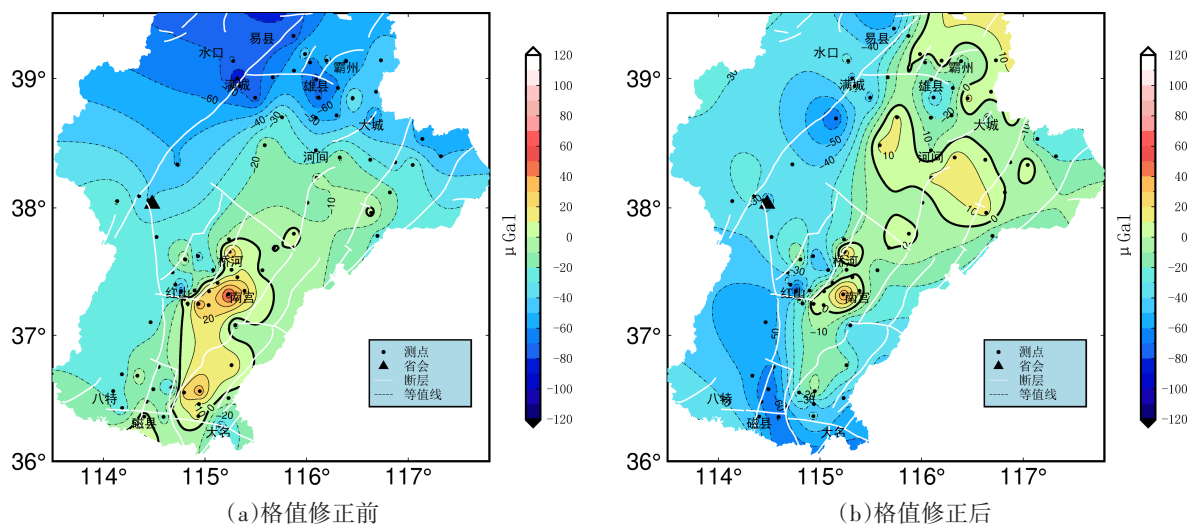


图5 格值修正前后重力场变化图(2015-03—2017-03)

Fig.5 Gravity variation image before and after scale parameter correction (201503-201703)

图5为2 a尺度 2015-03—2017-03 重力场变化图像,重力累积变化明显。格值系数修正前图像存在较明显的负异常区域,位于测区北部水口—易县—满城一带;正值区域位于河北南部桥河—南宫一带,正负最大差异变化为 $-80 \sim 50 \mu\text{gal}$ 。格值系数修正后原北部负异常区域变幅明显降低,测区西南部形成负异常区,最高达 $-60 \mu\text{gal}$;测区东部出现局部变化平缓的正值区。修正后测区内北东向等值

线明显,与唐山—河间—磁县断裂带走向一致。

由格值系数修正前后的不同时间尺度的重力变化可以发现,修正后的重力场正负差异变化明显减小,且零值线位置及走向均发生明显改变。修正后的重力变化分布更倾向于西负东正,测区中部等值线走向与测区内唐山—河间—磁县断裂带走向更为一致。2017年河北大城 $M_L 3.6$ 级地震发生在大陈断裂附近,位于零值线的拐弯处。因此,格值系数的

修正不仅消除了因仪器参数变化引起的系统误差,增强了数据的科学性,而且与测区内断层分布信息更为一致,更能反映地震信息。

3 结语

本文基于2015—2017年河北测区的相对重力观测数据,对C859、C873两台重力仪的格值系数进行了一致性检测及修正,并对修正前后的重力场变化情况进行了对比分析,结果表明:

(1)重力仪C859及C873在2015—2017年间格值系数变动均较大,整体呈上升趋势。其中,重力仪C859格值系数累计变化量达到0.034%。河北测网内测点之间最大重力差可达300 mgal,那么因格值系数的变化造成的差异可达102 μ gal,影响不容忽视。

(2)通过不同时间尺度下格值系数修正后的重力场变化对比,发现重力场变化差异明显,相比修正前,修正后重力变化更加平缓,与测区内断裂带及地震信息的相关性也更加明显。

(3)对于相对重力数据,为了得到更加可靠、科学的结果,在平差解算之前有必要进行仪器格值系数的检测及修正,消除系统误差,得到更为真实的重力场信息。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 汪健,孙少安,邢乐林,等. CG-5重力仪的漂移特征[J]. 大地测量与地球动力学,2016,36(6):556-559.
- [3] 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.
- [4] 郝洪涛,李辉,孙少安,等. CG-5重力仪格值系数变化研究及应用[J]. 大地测量与地球动力学,2016,36(增1):14-17.
- [5] 黄江培,王青华,徐声鑫,等. CG-5重力仪一次项系数变化特性分析及其对观测数据的影响研究[J]. 地震研究,2020,43(1):101-108.
- [6] 冯建林,檀玉娟,秦建增,等. CG-5重力仪一次项格值系数对宁夏重力场变化的影响[J]. 大地测量与地球动力学,2017,37(3):319-322.
- [7] 梁伟锋,刘芳,祝意青,等. 重力仪一次项系数对重力场动态变化的影响研究[J]. 大地测量与地球动力学,2015,30(5):882-886.
- [8] 祝意青,梁伟锋,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.
- [9] 祝意青,梁伟锋,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.