

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*

黄江培, 王青华, 徐声鑫, 刘东, 曹颖, 邱奎

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 采用线性回归方法分析 2015—2018 年云南区域内相对重力观测数据, 分析获取到的云南省 2 台 CG-5 相对重力仪 3 年内一次项系数变化差异, 发现段差与互差呈线性关系; 利用线性回归方法获取 3 年内每个观测周期的一次项系数, 结合绝对重力点资料, 对得出的一次项系数进行验证; 对比一次项系数修正前后 3 年期的变化趋势, 分析重力变化与 2018 年地震相关性。结果表明: 2 台 CG-5 重力仪一次项系数在 3 年内均发生变化, 且变化规律不一致, 一次项系数变化差异最大达到 0.0002 ; 在一个观测周期内, 一次项系数随时间及测值段均未发生明显变化; 一次项系数修正前后对重力观测数据最大影响能达到 $100 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 以上, 且修正后的数据与绝对重力观测值符合性更好, 与地震的相关性也更加明显。

关键词: CG-5 重力仪; 一次项系数; 段差; 测值段

中图分类号: P315.62

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)01-0101-08

0 引言

高精度的重力观测资料能够较好地反映伴随活动断层的物质迁移和构造变形所引起的地表重力变化(祝意青等, 2015, 2018a; 王同庆等, 2017), 在地震中长期预测中效果显著(祝意青等, 2018b)。云南省于 20 世纪 80 年代就开始进行地震相对重力观测, 至 2018 年已经实现云南省行政区域观测全覆盖。

加拿大 SCINTREX 公司生产的 CG-5 相对重力仪, 标称测量精度达到 $5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 读数分辨率达 $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 同时具有较高的自动化程度(郝洪涛等, 2011, 2016), 被广泛运用于中国矿产探测及地震科学研究。研究人员多年来对观测数据进行分析发现, CG-5 重力仪一次项系数在不同观测周期均有所不同, 且不同仪器的变化趋势及数值均有差异(冯建林等, 2017; 梁伟锋等, 2015)。目前中国地震局重力学科组(以下简称“重力学科组”)每 2~3 年组织一次全国性的长基线标定, 各个测区在每个测量周期开测之前也会进行短基线标定, 用于修正仪器的一次项系数。长

基线标定可以满足测值跨度的要求, 但在时间维度上无法满足一年 2 期的修正要求; 短基线标定在时间上能基本满足每期一次修正要求, 但是云南短基线标定 $300 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的测值跨度在空间上无法满足整个云南测区的测值段跨度修正要求。一次项系数对观测数据的影响为系统误差, 因此可通过数据分析处理进行消除。

本文收集 2015 年 3 月至 2018 年 3 月云南区域共 7 期相对重力观测数据, 基于同时同地观测的 2 台重力仪不存在观测物理量偏差的原理, 利用线性回归分析获取其在每期观测中的一次项系数变化差异, 并对在一个观测周期内不同时间段及不同测值段的变化特性进行分析, 计算一次项系数修正值, 最终获取每期观测时仪器一次项系数的最或然值, 并分析其对地震观测数据的影响。

1 数据与方法

1.1 观测数据

相对重力测量采用周期性复测的形式进行观测, 一年观测 2 期, 测区上半年观测于每年的 3—5 月完成, 下半年于 7—9 月完成。2017 年以前云南省地震

* 收稿日期: 2019-01-15.

基金项目: 云南省地震局青年基金(2017K07)资助.

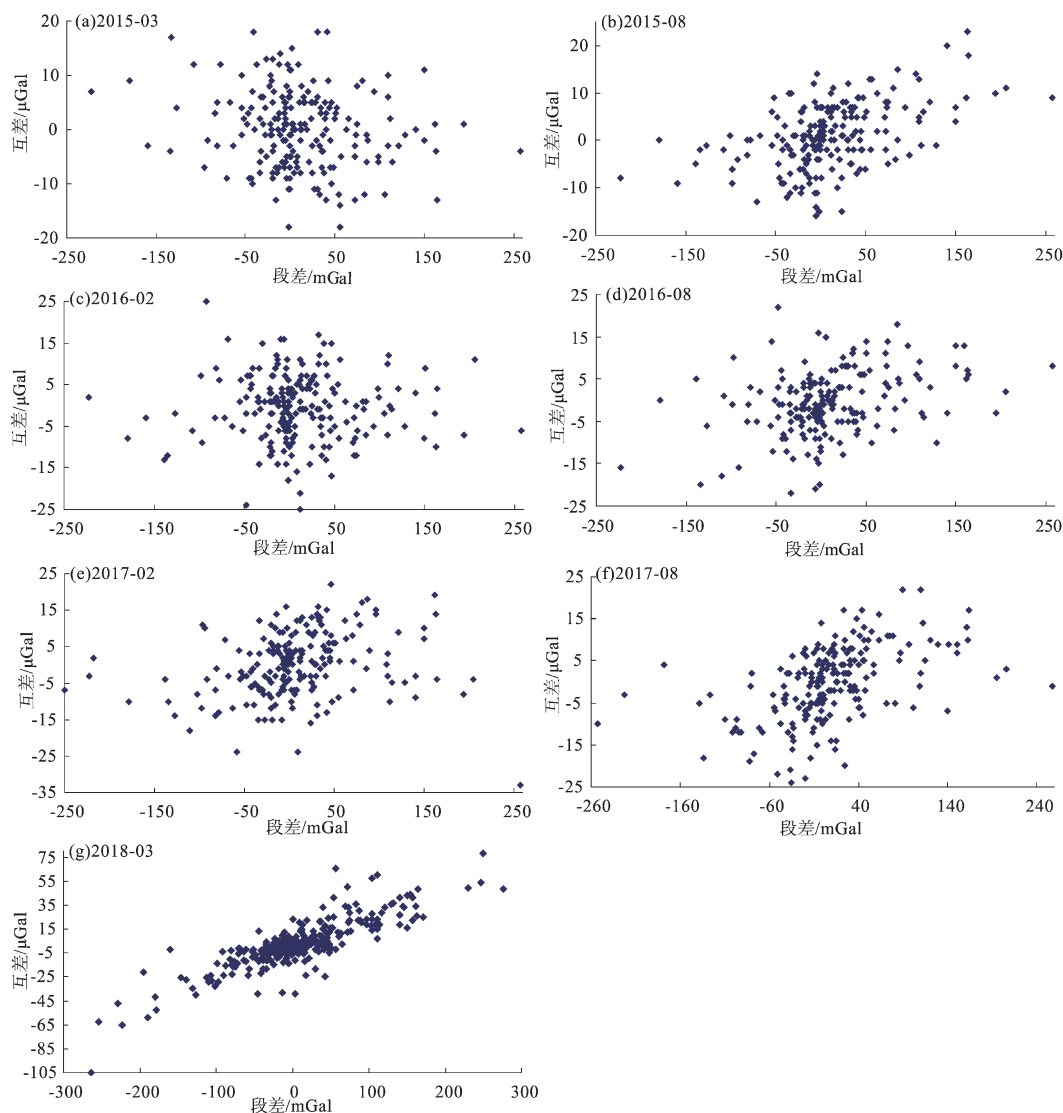


图2 不同观测周期2台仪器互差与段差关系

Fig. 2 The relation diagram of mutual difference and segment difference between two gravimeters in different observation periods

1.2 数学模型

根据CG-5重力仪出厂参数,其非线性系数已经调整为0,观测值仅考虑其一次项标定系数即可。在不考虑偶然观测误差的情况下,某个测点上的读数数学模型为:

$$F(X_i) = E(X_i + x_0 + \delta_{漂} + \delta_{固} + t_{温} + p_{压} + h_{高}) \quad (1)$$

式中: E 为一次项系数; X_i 为该点重力值; x_0 为仪器零重力值读数; $\delta_{漂}$ 为零漂改正; $\delta_{固}$ 为固体潮改正; $t_{温}$ 为温度改正; $p_{压}$ 为气压改正; $h_{高}$ 为仪高改正。

CG-5为相对重力观测仪器,式(1)中 x_0 为未知数,如果没有联测基准点,在某一个测点上

的仪器读数不具备物理意义,但是对相邻2个观测点进行差值计算后消除 x_0 ,剩下的各项改正均可通过观测其他物理量或经验公式获取,最终结果即为2个测点的段差。

因此,CG-5重力仪对相邻2个测点的段差观测值数学模型可简化为:

$$F(X_{ij}) = (E + \Delta E)(X_i - X_j) \quad (2)$$

式中: ΔE 为一次项系数差异。

由于2台仪器同时同地观测,其观测结果不存在物理量差异,如果观测二者存在系统误差,可以判定为是由于一次项系数差异 ΔE 引起的,其数学模型可表示为:

$$DX_{ij} = (E_1 + \Delta E_1)(X_i - X_j) - (E_2 + \Delta E_2)(X_i - X_j) = \Delta E_{12}(X_i - X_j) \tag{3}$$

其误差方程为：

$$v_{ij} = \Delta E_{12}(\overline{X_i - X_j}) - DX_{ij} \tag{4}$$

在实际观测中，互差 DX_{ij} 可以作为观测值直接得出，其量级（ $\times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ）远远小于段差 $(\overline{X_i - X_j})$ （ $\times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ），因此可以采用 2 台仪器段差的平均值作为 $(\overline{X_i - X_j})$ 。

将 7 期观测数据分别带入式（4），利用经典平差方法结算，计算出每期 2 台仪器一次项系数变化的差异 ΔE 见表 1。

从表 1 可以看出，2 台仪器的一次项系数变化差异在各期均不一致，随着时间推移总体呈增大趋势，在 2018 年 3 月观测时，已经达到万分之二以上，对重力值跨度超过 $1\,000\,000 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的云南区域影响明显。

表 1 各个观测周期内 2 台仪器的一次项系数变化差异
Tab. 1 Differences of primary term coefficient between two gravimeters in each observation period

日期	ΔE	日期	ΔE
2015-03	-0.000 013	2017-02	0.000 027
2015-08	0.000 051	2017-08	0.000 078
2016-02	-0.000 005	2018-03	0.000 230
2016-08	0.000 039		

1.3 在同一观测周期内一次项系数随时间变化分析

每一期观测时，重力仪一次项系数与上期均有变化，且 2 台仪器变化是存在差异的。完成一个观测周期大概需要 60 ~ 100 d，为了分析此期间内 2 台仪器的一次项系数的变化差异特性，本文以差异较为明显的 2018-03 期为例，在一个观测周期内，以 15 d 为间隔，对 2 台仪器的一次项系数差异进行计算，结果如图 3 所示。

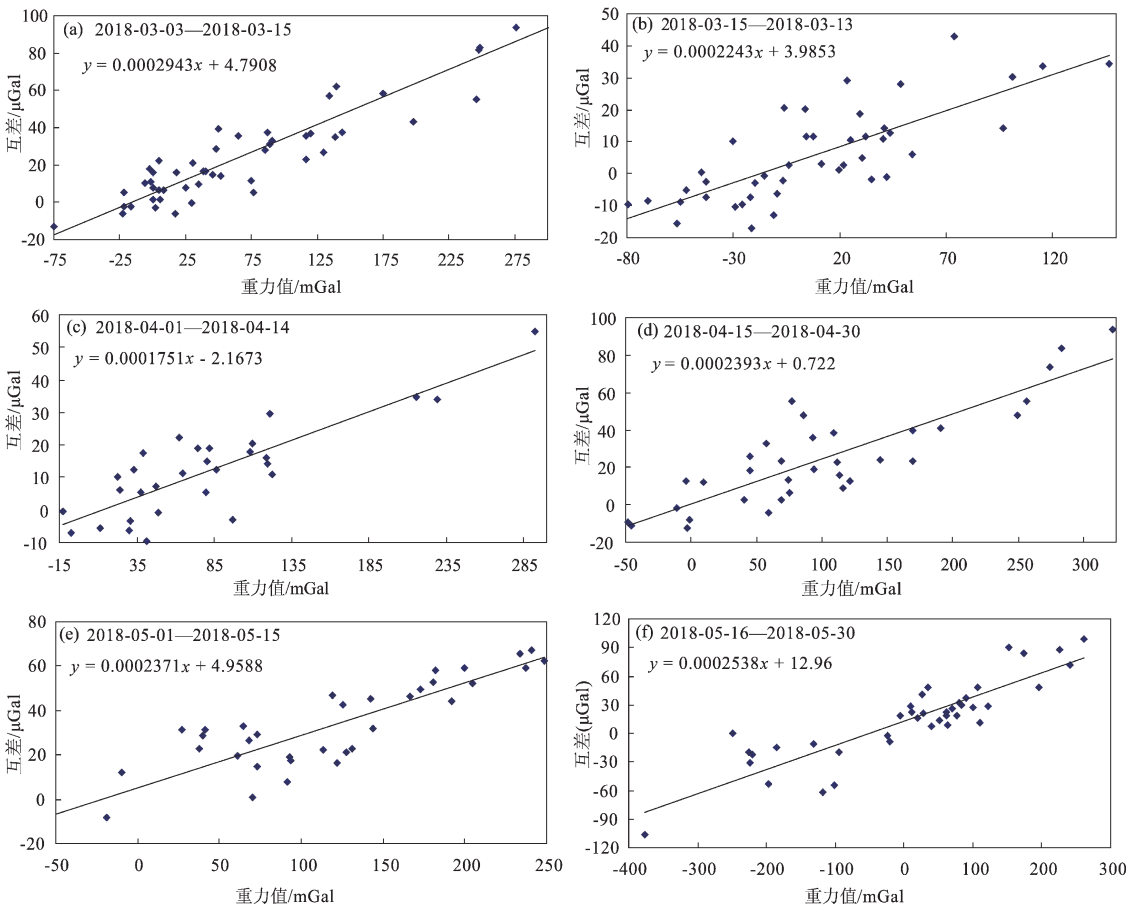


图 3 同一观测周期内不同时间段 2 台仪器一次项系数差异
Fig. 3 Differences of primary term coefficient between two gravimeters in different time periods in an observation period

从图 3 可以看出，由于总样本被拆分成多个小样本，数据量减少，观测误差对回归分析结果影响增大，但是在一个观测周期的不同时间段，2 台仪器一次项系数差异总体趋势是一致的，不同时间段变化并不大。通过线性回归分析，不同时间段 2 台仪器一次项系数差异如表 2 所示。

表 2 同一观测周期内不同时间段的一次项系数变化差异
Tab. 2 Differences of primary term coefficient between two gravimeters in different time periods in an observation period

日期	ΔE
2018-03-03—2018-03-15	0.000 294 3
2018-03-15—2018-03-30	0.000 224 3
2018-04-01—2018-04-14	0.000 175 1
2018-04-15—2018-04-30	0.000 239 3
2018-05-01—2018-05-15	0.000 237 1
2018-05-15—2018-05-29	0.000 253 8

从表 2 可以看出，在一个观测周期内的不同时间段里，2 台仪器的一次项系数差异变化不大，与全样本量总体计算的一次项系数差异的偏差均在万分之一以内。因此，可以认为在一个观测周期内的不同时间段可采用同一个一次项系数。

1.4 在一次观测周期内一次项系数随测值段的变化分析

测值段的变化包含两部分：一是由于零漂造成的仪器自身测值段变化，二是由于空间重力变化引起的测值段变化。根据观测经验及已有文献分析可知，CG-5 仪器漂移较大，日变化率能达到 $1\,000 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ （汪健等，2016；邢乐林等，2010），造成观测值段一直在增大。直观上看，一次项系数与测值段似乎存在相关性，为了研究云南测区内 2 台仪器一次项系数变化与观测值段的关系，以 2018-03 期观测结果为例，在合理分配测值段及样本量的情况下，将观测结果大致按 150 mGal 的间隔拆分，分别计算每个测值段的 2 台仪器一次项系数差异，结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出，虽然样本量减少，观测误差影响增大，但是不同观测值段内 2 台仪器的一次项系数差异总体趋势一致，与全样本量计算结果偏差较小，因此可以认为，在一个观测周期内的不同观测值段，均可采用统一的一次项系数。

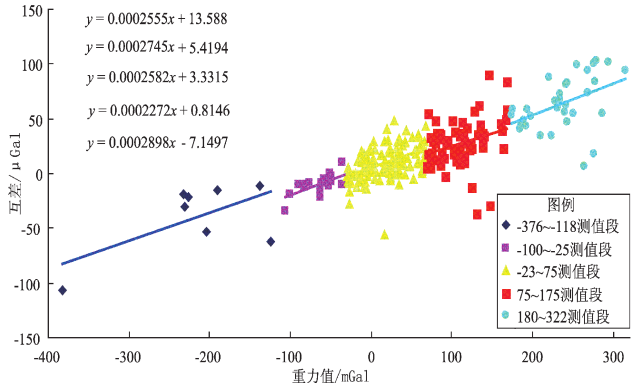


图 4 同一测量周期不同测值段内 2 台仪器的一次项系数差异

Fig. 4 Differences of primary term coefficient of two gravimeter in different measurement periods in an observation period

1.5 各观测周期一次项系数计算

根据上述研究可知，1 台仪器在一个观测周期内可以采用统一的一次项系数。考虑到云南测区地面起伏较大，海拔跨度超过 3 000 m，高山与低谷交错纵横，测点在不同海拔均有分布，鉴于在短期内真实重力变化与段差呈线性关系的可能性不大，因此可认为相邻观测周期期间段差变化与段差呈线性关系主要是因为 2 期一次项系数的偏差。于是可以将 2 期段差变化作为 DX_{ij} ，2 期段差平均值作为 $(\overline{X_i} - \overline{X_j})$ ，代入式 (4) 中，利用 2014 年 12 月全国标定的结果作为 2015 年 3 月观测资料的一次项系数，逐期计算一次项系数差异，并计算每期一次项系数的最或然值，结果见图 5 及表 3。

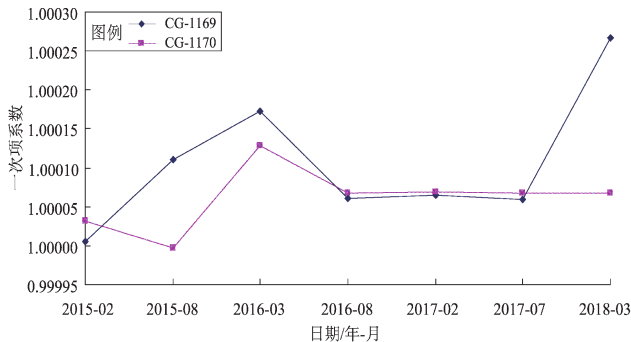


图 5 2 台仪器各观测周期的一次项系数

Fig. 5 Differences of primary term coefficient of two Gravimeter in each observation period

表 3 各观测周期 2 台仪器的一次项系数
Tab. 3 Primary term coefficient of two Gravimeter
in each observation period

日期	仪器	
	CG - 1169	CG - 1170
2015 年 2 月	1.000 006	1.000 031
2015 年 8 月	1.000 110	0.999 997
2016 年 3 月	1.000 172	1.000 128
2016 年 8 月	1.000 060	1.000 068
2017 年 2 月	1.000 065	1.000 069
2017 年 7 月	1.000 059	1.000 068
2018 年 3 月	1.000 267	1.000 067

通过图 5 及表 3 可以看出, 编号 CG - 1169 仪器一次项系数从 2015 年 3 月至 2016 年 8 月有所变化, 2016 年 8 月至 2017 年 7 月相对稳定, 2018 年 3 月出现突变, 3 年内随时间变化达到 0.000 261; 编号 CG - 1170 仪器 2015 年 3 月至 2016 年 8 月有所变化, 其后一直比较稳定, 3 年内一次项系数累计变化为 0.000 036。2 台仪器 3 年内累计变化差异为 0.000 224, 与独立分析 2018 - 03 期得出的差异基本一致, 可以认为表 3 结果为仪器观测时的实际一次项系数。

2 结果分析

2.1 一次项系数修正前后与绝对重力观测值比对结果

通过上述分析发现, 在一个观测周期内, 一次项系数并没有随着时间及观测值段发生明显变化, 可以认为一个观测周期内均可采用同一个一次项系数。

重力学科组在每个相对重力测区内均布设了部分绝对重力观测点作为基准值, 对相对重力观测起到控制作用。本文以 2018 - 03 期为例, 对比一次项系数修正前后相对测量结果与绝对值测量结果, 对表 3 中的一次项系数修正结果进行验证, 验证结果如表 4 所示。

表 4 一次项系数修正前后与绝对重力值的对比

基准点	CG - 1169/ μGal		CG - 1170/ μGal	
	修正前差值		修正后差值	
	修正前差值	修正后差值	修正前差值	修正后差值
基 I 新	1.5	-0.3	2.9	3.9
下关台	-11.1	-13	-0.3	-0.7
攀枝花	-75.4	-3.2	27.1	10.3
乡城	17.6	-14.3	-20.9	-8.5

从表 4 中可以看出, 一次项系数变化较大的 CG - 1169 号仪器修正前后最大变化有 72.2 μGal , 并且修正后与基准值较为接近, 修正效果明显; CG - 1170 号仪器由于一次项系数变化不大, 修正前后没有明显变化。综上所述, 表 3 中的一次项系数是合理可用的。

2.2 修正前后重力变化趋势对比

利用修正后的一次项系数, 对 2015 年 8 月至 2018 年 3 月共计 6 期的观测数据进行重新计算, 并绘制变化趋势图, 本文仍然以一次项系数变化较为明显的 2018 - 03 期观测数据为例, 对比修正前后 2015 - 02 期至 2018 - 03 期 3 年期重力变化趋势情况, 对比结果如图 6 所示。

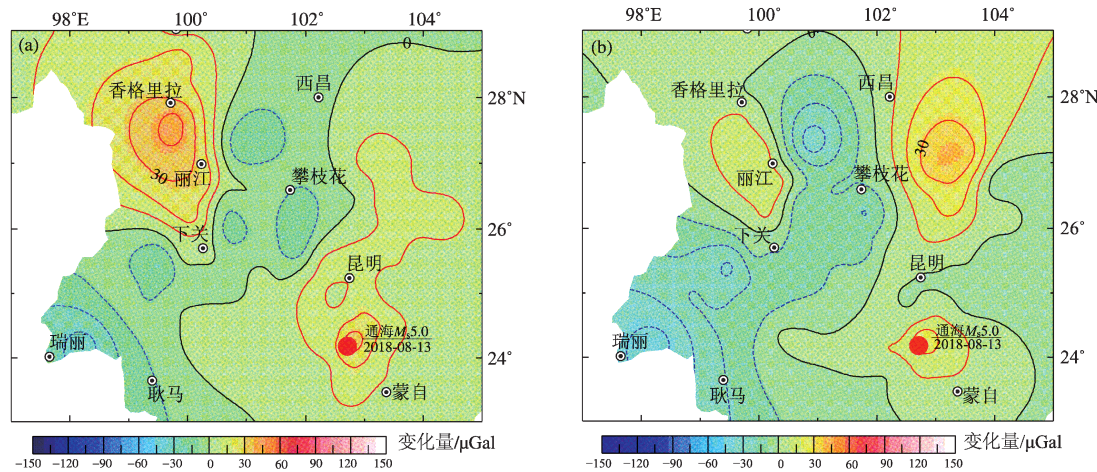


图 6 一次项系数修正前 (a)、后 (b) 3 年期重力变化趋势图

Fig. 6 Gravity change trend map in three years before and after primary term coefficient correction

从图6可以看出,通过一次项系数修正以后,香格里拉地区强烈的重力场增大趋势有所减弱,但是在丽江、香格里拉、西昌至攀枝花中间形成了一个明显的重力场减弱区域,根据以往震例经验推断(祝意青等,2015;张永奇等,2017),该区域在未来中长期是具备孕育中强震的可能;通海附近的变化趋势也更加独立,形成了一个明显增大的区域,与2018年下半年的通海地震相符性更强,同时可以看出鲁甸地震后,其周围区域重力恢复性增大明显。

3 结论

通过线性回归方法分析2015—2018年云南区域内相对重力观测数据,结合获取到的云南省2台CG-5相对重力仪3年内一次项系数变化差异,利用线性回归方法获取3年内每个观测周期的一次项系数,对得出的一次项系数进行验证,分析重力变化与2018年地震相关性。得出以下结论:

(1) 3年内云南测区内2台CG-5相对重力仪一次项系数存在变化,且变化量存在差异。

(2) 在一个观测周期内,一次项系数随观测时间及测值段的变化会发生变化,但不明显。

(3) 通过一次项系数修正后,相对重力观测结果与绝对重力观测结果更为接近,说明一次项系数修正是有效可行的。

(4) 通过一次项系数修正以后,测区内重力变化趋势与地震发生的相对关系更为明显。

利用线性回归的方法获取仪器一次项系数是可行的,克服了长基线标定和短基线标定在时间和空间上的限制,同时可以随着观测数据的增多实时进行修正,该方法在野外工作中更加适用。通过一次项系数的修正,重力观测结果的映震效果更佳,能够为中长期的地震预测预报提供较为

有效的支持。

云南区域内的2台CG-5型相对重力仪承担了云南全境及贵州、四川部分区域的流动重力观测任务,一直处于高强度工作状态。随着时间的推移,仪器逐渐老化,弹性疲劳明显。在以后的观测中,仪器在一个观测周期内是否会随着时间和测值段发生明显变化,变化过程是渐进的还是会出现跳格现象,这些都需要在不断的观测过程中继续分析和研究。

参考文献:

- 冯建林,檀玉娟,秦建增,等.2017.CG-5重力仪一次项一次项系数对宁夏重力场变化的影响[J].大地测量与地球动力学,37(3):319-322.
- 国家地震局.1979.地震重力测量规范[M].北京:地震出版社.
- 郝洪涛,李辉,刘子维,等.2011.基于重力差方法检测重力仪一次项一次项系数变化[J].大地测量与地球动力学,31(1):87-90.
- 郝洪涛,李辉,孙和平,等.2016.CG-5重力仪零漂改正及一次项系数检测应用研究[J].武汉大学学报(信息科学版),41(9):1265-1271.
- 梁伟锋,刘芳,祝意青,等.2015.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,35(5):882-886.
- 汪健,孙少安,邢乐林,等.2016.CG-5重力仪的漂移特征[J].大地测量与地球动力学,36(6):556-560.
- 王同庆,王树发,杨博,等.2017.基于重力和GPS的山西地区形变特征分析[J].地震研究,40(1):101-110.
- 邢乐林,李辉,夏正超,等.2010.CG-5重力仪零漂特性研究[J].地震学报,32(3):369-373.
- 张永奇,丁晓光,曹建平,等.2017.关中流动重力测网的中小地震映震能力分析[J].地震研究,40(2):248-256.
- 祝意青,刘芳,李铁明,等.2015.川滇地区重力场动态变化及其强震危险含义[J].地球物理学报,58(11):4187-4196.
- 祝意青,刘芳,徐云马,等.2018b.重力监测在地震预报中的应用与展望[J].国际地震动态,(8):9-10.
- 祝意青,申重阳,张国庆,等.2018a.我国流动重力监测预报发展之再思考[J].大地测量与地球动力学,38(5):441-446.
- GB/T 20256—2006,国家重力控制测量规范[S].

Study on the Change of Primary Term Coefficient of CG –5 Gravimeter and Its Effect on Earthquake Monitoring Data

HUANG Jiangpei, WANG Qinghua, XU Shengxin, LIU Dong, CAO Ying, QIU Kui
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

Based on the relative gravity observation data from 2015 to 2018 in Yunnan, we studied the relationship between segment difference and mutual difference of two CG –5 gravimeters belong to the Yunnan earthquake administration, and calculated the primary term coefficient differences between two gravimeters by linear regression method in three years. Then, we analyzed the differences of primary term coefficient in different time periods and different measurement periods in an observation period. The results show that the first-order coefficients of the two gravimeters have changed in three years, and have different change laws. The maximum difference has reached 0.000 2, while the primary term coefficient has not changed significantly with time or with the measured interval in a period of observation. We calculated the primary term coefficient of each observation period in three years, and proved the results are reasonable and applicable, combined with the data of absolute gravity. We analyzed the correlation between gravity change and 2018 earthquake by comparing the trend maps of three years before and after primary term coefficient corrected. It is concluded that the maximum effect on gravity observation data can reach $100 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ before and after primary term coefficient correction. The corrected data are in good agreement with the absolute gravity observations and the correlation with earthquakes is also more obvious.

Keywords: CG –5 Gravimeter; Primary term coefficient; Section difference Value segment