

# 零漂改正对中国地壳运动观测网络重力数据处理的影响

隗寿春<sup>1,2,3</sup> 徐建桥<sup>3</sup> 郝洪涛<sup>4</sup> 韩宇飞<sup>5</sup>

1 中国科学院大学,北京市玉泉路甲 19 号,100049  
2 中国地震局第二监测中心,西安市西影路 316 号,710054  
3 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室,武汉市徐东大街 340 号,430077  
4 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  
5 地壳运动监测工程研究中心,北京市三里河路 56 号,100045

**摘要:** 基于中国地壳运动观测网络 2000 年流动重力观测数据,分析 18 台 LCR-G 型相对重力仪的零漂特性。结果显示,重力仪零漂率在某些时段变化较大,最大达 10  $\mu\text{Gal/h}$  以上。根据重力仪零漂改正的不同处理方法,利用传统平差模型与改进模型对观测数据进行平差计算,并对结果进行比较。在相同先验中误差的情况下,传统平差模型的后验中误差为 39  $\mu\text{Gal}$ ,重力值平均精度为 26.5  $\mu\text{Gal}$ ,而改进模型的后验中误差为 16.5  $\mu\text{Gal}$ ,重力值平均精度为 11.2  $\mu\text{Gal}$ ,远高于传统平差模型。在数据预处理阶段按闭合观测分段进行零漂改正,可以有效消除重力仪零漂剧烈变化的影响,明显优于将仪器零漂率当作固定参数的计算方法。

**关键词:** 流动重力测量;零点漂移;平差模型

**中图分类号:** P312 **文献标识码:** A

中国地壳运动观测网络 (crustal movement observation network of China, CMONOC) 相对重力联测工作由 LCR-G 型重力仪施测<sup>[1-3]</sup>。由于 LCR-G 型重力仪具有零漂率小 ( $<5\mu\text{Gal/h}$ ) 且基本呈线性的优点,因此,传统的重力网平差模型主要采用线性零漂的处理方法<sup>[4-8]</sup>,即认为重力仪零漂率在观测过程中保持不变,将其作为未知参数与测点重力值一并进行平差。然而实际外业测量中,其零漂的长期变化可能存在非线性。由于中国地壳运动观测网络观测时间跨度大,在数据处理中将零漂率作为固定常数可能不合适。本文利用中国地壳运动观测网络 2000 年流动重力观测数据,探讨相对重力仪零漂的不同处理方法对重力网平差结果的影响。

## 1 相对重力仪零点漂移

重力仪漂移是由弹簧张力的衰减及未被补偿或未被屏蔽的外界作用引起的<sup>[9]</sup>。为减弱或消除零点漂移对观测数据的影响,一般采取往返闭合观测的方式,即 A-B-C... C-B-A 的观测顺序,并

要求闭合时间应尽量缩短。如果能适当控制漂移,便可以识别出较大的跳动,从而消除其影响。一般而言,对重力仪漂移的模拟是读数  $z$  对时间  $t$  的泰勒展开式:

$$z(t) = z(t_0) + \left(\frac{\partial z}{\partial t}\right)_0 (t - t_0) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 z}{\partial t^2}\right)_0 (t - t_0)^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{\partial^3 z}{\partial t^3}\right)_0 (t - t_0)^3 + \cdots \quad (1)$$

式中,  $t_0$  为每个测量时段的起始时间。引入漂移系数  $d_1, d_2, d_3, \cdots$ , 则上式简化为:

$$z(t) = z(t_0) + d_1(t - t_0) + d_2(t - t_0)^2 + d_3(t - t_0)^3 + \cdots = z(t_0) + \sum_{p=1}^s d_p(t - t_0)^p = z(t_0) + D(t) \quad (2)$$

式中,  $z(t_0)$  代表模拟漂移起始时间的读数。实际数据处理过程中一般取  $s = 1$ , 即

$$D(t) = d(t - t_0) \quad (3)$$

上式即为重力仪漂移改正常用公式,其中  $d$  为重力仪在该测量时段的漂移率,可以表示为:

$$d = - \frac{[(g' - g) - \sum (g'_i - g_i)]}{[(t' - t) - \sum (t'_i - t_i)]} \quad (4)$$

式中,  $g, g', t, t'$  分别为测段起始点往返观测值和观测时刻;  $g_i, g'_i, t_i, t'_i$  分别为需要计算静态漂移的观测点到达和离开的观测值和相应的观测时刻。

## 2 相对重力数据处理

### 2.1 传统平差模型

传统平差模型将仪器的零漂改正放在平差过程中,其原始观测数据经过仪器格值系数改正、周期误差改正、潮汐改正、气压改正、仪器高改正等预处理以后得到测点间的观测段差,将段差作为平差元素,采用间接平差模型,即可得到观测方程为:

$$v_{ij} = \hat{g}_j - \hat{g}_i + \hat{d}(t_j - t_i) - (g_j - g_i) \quad (5)$$

式中,  $v_{ij}$  为任意测点  $i, j$  之间的段差改正数;  $g_i$  和  $g_j$  为测点  $i, j$  的预处理重力值(不包括漂移改正);  $t_i$  和  $t_j$  为  $i, j$  两点的观测时间;  $\hat{d}$  为相对重力仪零漂率平差值;  $\hat{g}_i$  和  $\hat{g}_j$  为测点  $i, j$  的平差重力值。

### 2.2 改进平差模型

改进的平差模型顾及到重力仪零漂长期变化的非线性,在数据预处理阶段,按闭合观测时间分段求取仪器零漂率并改正,将零漂改正后的预处理段差值作为平差元素,列出其观测方程:

$$v_{ij} = \hat{g}_j - \hat{g}_i - (g'_j - g'_i) \quad (6)$$

式中,  $v_{ij}$  为任意测点  $i, j$  之间的段差改正数;  $g'_i$  和  $g'_j$  为测点  $i, j$  经漂移改正后的预处理重力值;  $\hat{g}_i$  和  $\hat{g}_j$  为测点  $i, j$  的平差重力值。

## 3 实测资料处理

本文以中国地壳运动观测网络 2000 年中国大陆流动重力数据为例,验证相对重力仪零漂的不同处理方法对平差结果的影响。

### 3.1 数据资料

相对重力联测共有 6 个作业组,每个作业组采用 3 台不同型号的 LCR-G 型重力仪同时观测。联测工作采用对称观测,即 A-B-C...C-B-A,每条测线一般在 3 d 内闭合,见表 1。可以看出,各小组的观测周期最短为 2 个月,最长为 13 个月,在如此长的观测周期内将重力仪漂移率视作一个固定值是不合适的。因此,本文按闭合观测时间段分别求取各台仪器的零漂率变化。

图 1 为各组仪器观测期间零漂率的变化情况,其中第 3 组(G924、G020、G114)和第 4 组(G776、G869、G794)分别在两个时间段进行观测,因此分别绘制两者各时段的零漂率变化情况。可以看出,各台仪器零漂率并不是一个固定值,且变化范围较大,个别时段甚至达到 10  $\mu$ Gal/h 以上。重力仪 G853 零漂率相比其他仪器变化尤其

剧烈,仪器性能较差,这与实际情况是符合的。

表 1 相对重力观测数据情况  
Tab. 1 Data of relative gravity observation

观测组	重力仪	观测起始时间	观测结束时间	观测段差数
第 1 组	G999	2000-03-13	2001-03-20	205
	G003	2000-03-13	2001-03-20	205
	G027	2000-03-13	2001-03-20	204
第 2 组	G793	2000-09-13	2000-11-08	129
	G853	2000-09-13	2000-11-08	128
	G854	2000-09-13	2000-11-08	130
第 3 组	G776	2000-06-27	2000-12-22	148
	G869	2000-06-27	2000-12-22	148
	G794	2000-06-27	2000-12-22	148
第 4 组	G924	2000-06-26	2001-01-03	167
	G020	2000-06-26	2001-01-03	168
	G114	2000-06-26	2001-01-03	166
第 5 组	G796	2000-06-26	2000-09-14	110
	G063	2000-06-26	2000-09-14	111
	G065	2000-06-26	2000-09-14	111
第 6 组	G920	2000-06-26	2000-09-06	87
	G060	2000-06-26	2000-09-06	87
	G066	2000-06-26	2000-09-06	85

### 3.2 平差计算

利用相同的基准点及观测数据,并赋以同样的先验中误差及仪器观测精度,分别利用两种平差模型对观测数据进行平差计算,结果见表 2。

表 2 两种模型平差计算结果一  
Tab. 2 The first result of two adjustment methods

平差模型	先验中误差 / $\mu$ Gal	后验中误差 / $\mu$ Gal	重力值精度 / $\mu$ Gal	两模型重力平差值之差 / $\mu$ Gal		
				最小值	最大值	平均值
传统模型	20	39	26.5			
改进模型	20	16.5	11.2	0.2	207.5	23.6

传统模型的后验中误差和重力值平均中误差均是改进模型的 2 倍,平差结果也相差较大。其原因可能是,由于存在个别仪器零漂率较大的段差,利用固定的平均零漂率直接计算会引入较大误差,使得相应段差误差较大,甚至成为粗差。为进一步验证改进模型的优劣,本文将传统模型认为是粗差的观测值删除,并用传统模型进行第二次平差,结果见表 3。

表 3 两种模型平差计算结果二  
Tab. 3 The second result of two adjustment methods

平差模型	先验中误差 / $\mu$ Gal	后验中误差 / $\mu$ Gal	重力值精度 / $\mu$ Gal	两模型重力平差值之差 / $\mu$ Gal		
				最小值	最大值	平均值
传统模型 (二次平差)	20	20.8	14.2	0.1	40.8	12.9
改进模型	20	16.5	11.2			

由表 3 可以看出,利用传统模型的平差结果消除数据中的粗差,并进行二次平差以后,平差精度较原始数据有了很大改进,但仍然低于改进模型,测点的平差重力值与改进模型结果的差异也

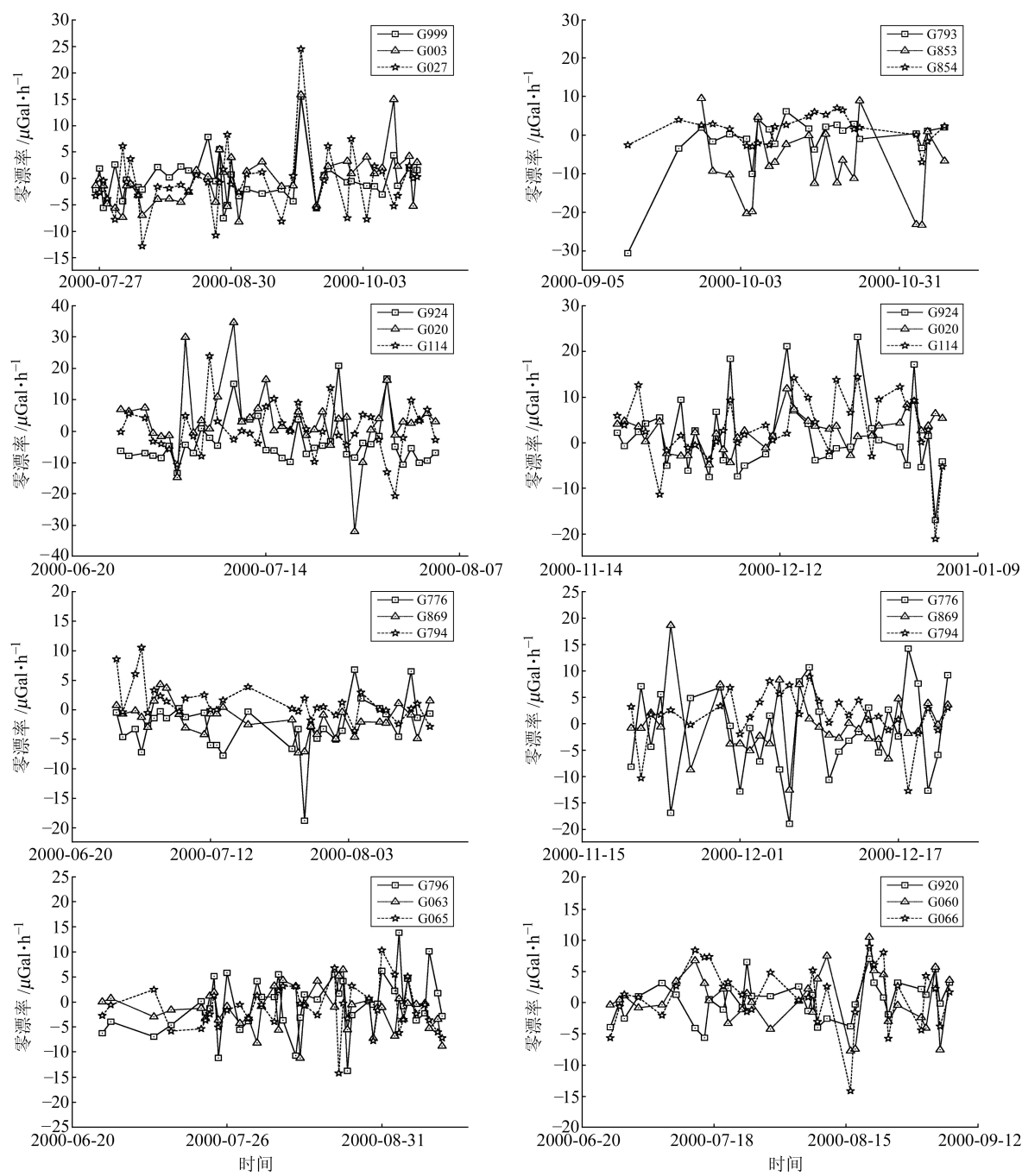


图 1 各台仪器零漂率变化情况  
Fig. 1 Change of zero drift rate of relative gravimeters

大大减小。造成传统模型误差较大的原因,是部分测段仪器零漂率与其平均零漂率相差较大,按平均零漂率计算会导致该测段往返观测自差及互差超限,这时通常会认为是由于仪器突跳导致;而由改进模型结果看来,这种零漂率的变化是仪器零漂特性的正常反映,只要适当地进行零漂改正即可有效地消除其影响。

4 结 语

基于对 6 个观测组共 18 台 LCR-G 型相对重力仪零漂特性的研究表明,LCR-G 型相对重力仪

并未表现出明显的线性零漂特性,相反,偶尔会出现零漂变化很大的情况,个别时段的零漂率明显偏移其平均零漂。这也是导致采用固定零漂率作为平差参数的平差结果误差较大的原因。利用两个平差模型对相同的观测数据进行平差计算,结果表明,传统平差模型采用固定零漂率计算零漂改正,会导致某些零漂变化较大的测段出现观测自差及互差超限,并误认为是仪器突跳所致,从而误判为粗差并将其删除。在数据预处理阶段按闭合往返观测分别计算仪器零漂率,利用预处理后的段差进行平差计算,即可以避免这种误判并消

除重力仪零漂剧烈变化的影响,其平差精度比传统的平差计算模型有了明显提高。随着仪器观测精度的提高,在观测时间跨度较长的情况下,在数据预处理阶段按闭合观测对观测数据进行零漂改正尤其重要。

参考文献

[1] 牛之俊,马宗晋,陈鑫连,等. 中国地壳运动观测网络[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(3): 88-93(Niu Zhijun, Ma Zongjin, Chen Xinlian, et al. Crustal Movement Observation Network of China[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2002, 22(3): 88-93)

[2] 许厚泽. 重力观测在中国地壳运动观测网络中的作用[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(3): 1-3 (Xu Houze. Function of Gravimetry in CMONOC[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2003, 23(3): 1-3)

[3] 张为民,王勇,詹金刚. 中国地壳运动观测网络基准站绝对重力的测定[J]. 地壳形变与地震, 2001, 21(4): 114-116 (Zhang Weimin, Wang Yong, Zhan Jingang. Absolute Gravity Observation on Benchmark Station of CMONOC [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 2001, 21(4): 114-116)

[4] 郝洪涛. 基于地表重力观测的地壳垂直运动 and 同震位错研

究[D]. 北京:中国科学院大学, 2015 (Hao Hongtao. Research on Vertical Displacement of Crust and Coseismic Gravity Change Based on Land Gravimetry [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015)

[5] 王宝仁. 重力仪重复观测数据处理方法[J]. 物探化探计算技术, 1992(2): 96-105 (Wang Baoren. Data Processing Methods for Repeating Observation by Gravimeter [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1992(2): 96-105)

[6] Pagiatakis S D, Salib P. Historical Relative Gravity Observations and the Time Rate of Change of Gravity Due to Postglacial Rebound and Other Tectonic Movements in Canada[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(B9)

[7] Hwang C, Wang C G, Lee L H. Adjustment of Relative Gravity Measurements Using Weighted and Datum-free Constraints[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(9): 1 005-1 015

[8] 李辉,刘冬至,刘绍府. 地震重力监测网统一平差模型的建立[J]. 地壳形变与地震, 1991, 11(增 1): 68-74 (Li Hui, Liu Dongzhi, Liu Shaofu. Integrated Adjustment Models for the Seismic-Gravity Network [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1991, 11(Suppl): 68-74)

[9] Torge W. Gravimetry[M]. Berlin: Springer, 1989

Impacts of Zero Drift Correction in CMONOC Data Processing

WEI Shouchun<sup>1,2,3</sup> XU Jianqiao<sup>3</sup> HAO Hongtao<sup>4</sup> HAN Yufei<sup>5</sup>

1 University of Chinese Academy of Sciences, A19 Yuquan Road, Beijing 100049, China

2 Second Crust Monitoring and Application Center, CEA, 316 Xiyang Road, Xi'an 710054, China

3 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, 340 Xudong Street, Wuhan 430077, China

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

5 National Earthquake Infrastructure Service, 56 Sanlihe Road, Beijing 100045, China

**Abstract:** Based on CMONOC mobile gravity data from 2000, zero drift characteristics of 18 LCR-G relative gravimeters are studied. The results show that zero drift rate of gravimeter may sometime shave a significant change, up to 10  $\mu\text{Gal/h}$ . Based on different processing methods of zero drift correction, the results of traditional and improved adjustment models are compared. Given the same priori error, the posterior error of the traditional adjustment model is 39  $\mu\text{Gal}$ , and its average accuracy of gravity value is 26.5  $\mu\text{Gal}$ ; however, for the improved adjustment model, its posterior error is 16.5  $\mu\text{Gal}$  and the average accuracy of gravity value is 11.2  $\mu\text{Gal}$ . The accuracy of the improved model is much higher than that of the traditional adjustment model. The comparison shows that computing the zero drift correction by circuit in the data preprocessing can effectively eliminate the error of significant change of zero drift. The improved model is superior to traditional adjustment model that assumes the zero drift as a constant.

**Key words:** mobile gravity observation; zero drift; adjustment model

**Foundation support:** National Key Basic Research Program of China, No. 2014CB845902; National Natural Science Foundation of China, No. 41274085, 41304059.

**About the first author:** WEI Shouchun, PhD, majors in data processing of mobile gravity, E-mail: scwei1986@126.com.

**Corresponding author:** HAO Hongtao, PhD, associate professor, majors in the mobile gravity observing technology, E-mail: haoht2014@ sina.com.