

观测组数及组内落体数对测定绝对重力值的影响^{*}

肖 凡 张松堂 张宏伟 王应建 李建国

(解放军 61365 部队,天津 300140)

摘 要 在设置不同观测组数和组内落体数的情况下,分别计算对 FG5 绝对重力仪的重力观测精度和重力值的影响,并对结果进行了分析。分析结果表明,观测组数设置为 13 次,每小时 1 组,组内落体数为 100 次,能够满足 $5 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 技术指标的绝对重力测定要求。

关键词 FG5 绝对重力仪;观测组数;组内落体数;观测精度;技术指标

中图分类号:P315.72+5

文献标识码:A

EFFECTS OF SET AND DROP NUMBERS ON ABSOLUTE GRAVITY MEASUREMENTS

Xiao Fan, Zhang Songtang, Zhang Hongwei, Wang Yingjian and Li Jianguo

(61365 Troops of PLA, Tianjin 300140)

Abstract To estimate the effects of set and drop numbers on FG5 absolute gravity measurement, different set and drop numbers were taken in a test and the result of absolute gravity accuracy and gravity value were calculated and analyzed. The results show that when the sets is 13, 1 set/hour and 100 drops/set then the FG5 absolute gravity measurement can satisfy the $5.0 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ accuracy requirement.

Key words: FG5 absolute gravimeter; set number; drop number; accuracy; technology index

1 引言

FG5 绝对重力仪是当前世界上精度最高、使用范围最广的商业化绝对重力仪,观测精度可达 $(1 \sim 2) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。因此 FG5 绝对重力观测被广泛应用于海平面变化、地震、火山、构造运动及相关环境变化、地质灾害等研究领域。目前我国总共引进了 6 台 FG5 绝对重力仪,在“国家 2000 重力基本网”、“中国地壳观测网络”等国家重大科学工程的建设中发挥着重大作用。但由于 FG5 绝对重力仪设计精密、造价昂贵,故障率较高,并且在国内不能进行维修,因此如何科学合理地利用该仪器,减少对仪器

的损耗值得研究。而在使用 FG5 进行绝对重力测量时,需要多少观测数据能够满足 $5 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 的精度要求,一直以来没有一个明确的答案,基于此,本文对上述问题进行了研究。

2 FG5 绝对重力仪的测量原理

FG5 的测量原理比较简单:令测试块在真空舱中做自由落体运动,垂直下落约 20 cm 的距离。在这一过程中,激光干涉仪追踪测试块,确定其位置,通过在干涉仪中使用频率稳定的氦氖激光得到下落距离,同时由铷原子钟提供精确的时间,最后利用

$$x_i = x_0 + v_0 t_i + g_0 t_i^2 / 2 \quad (1)$$

^{*} 收稿日期:2011-07-08

基金项目:中国大陆构造环境监测网络专项;61365 部队科研创新项目:重力测量数据处理系统(2011003)

作者简介:肖凡,男,1981 年生,工程师,主要研究方向为绝对重力观测与数据处理分析. E-mail:maryxiaox@gmail.com

计算出 g_0 的值。式中,变量 x_0 、 v_0 、 g_0 分别表示初始位置、速度、重力加速度的最优估计值。由于在这一过程中地球重力场的梯度值 γ 对 g 造成一个可测得的偏差,则式(1)完善为:

$$x_i = x_0 + v_0 t_i + g_0 t_i^2 / 2 + \gamma x_0 t_i^2 / 2 + \gamma x_0 t_i^3 / 6 + \gamma x_0 t_i^4 / 24$$

(2)

由于光速有限的原因,干涉条纹到达底部的时间会比它们应该到达的时间早,因此,式(2)应进一步修正为:

$$x_i = x_0 + v_0 \tilde{t}_i + g_0 \tilde{t}_i^2 / 2 + \gamma x_0 \tilde{t}_i^2 / 2 + \gamma x_0 \tilde{t}_i^3 / 6 + \gamma x_0 \tilde{t}_i^4 / 24$$

(3)

式中, \tilde{t}_i 为延迟时间,计算公式为

$$\tilde{t}_i = t_0 - (x_i - x_0) / c$$

(4)

由式(3)应用最小二乘原理所求得的重力值即为绝对重力仪有效观测高度处的含潮汐、气压、极移等因素影响的 g 值^[1]。

3 观测组数影响

测试块每次下落便能得到一个观测值,而一次下落无法获取测站高精度的绝对重力值。FG5 采用分组计算的方式,一组设置 m 次下落,取得 m 个观测值,将这 m 个观测值进行固体潮、海洋负荷潮、气压、极移等改正后^[2]按照最小二乘原理进行计算得到组观测值。同样的方法,总共测量 n 组,将 n 个组观测值按照最小二乘原理进行计算,最终获得所测站点的重力值。

3.1 观测组数对精度的影响

国际上通常对组数 n 的设置 为 12~96 组,国内一般情况下设置为 25~30 组,但是究竟需要多少组下落并没有一个明确的结论,这需要根据对观测精度的要求来决定^[3]。

观测精度 σ 的计算公式为:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (g_j - G)^2}$$

(5)

式中, j 是每组的序号, G 为组均值^[4,5]。

选取恩施、隆尧、青岛、荣成、泰安、襄樊、永兴岛、长治、郑州、秭归、琼中、淮北等 12 个测站环境较好的 FG5/240 绝对重力数据进行分析,其中 3 个沿海测站,9 个内陆测站,较好的测站环境具体指:1)测站所在地质环境的稳定性较好;2)测站本身的稳定性较好;3)环境噪声相对较低;4)温度比较稳定;5)具有较好的供电环境。

基于 12 个测站的 25 组连续观测数据,根据式(5)分别计算当选取观测组数 n 设置为 1~25、组内落体数设置为 100 时的观测精度 σ ,结果见图 1。

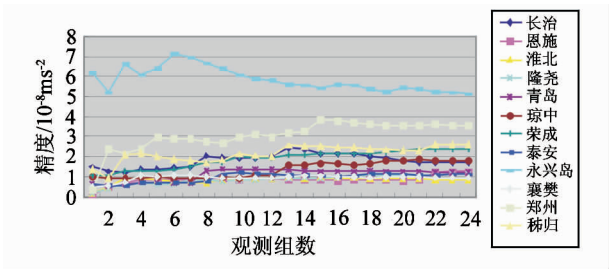


图 1 绝对重力观测精度随观测组数的变化
Fig. 1 Variation of accuracy of absolute gravity measurement with the number of observation set

由图 1 可以看出,永兴岛测站的观测精度稍差,为 $(5 \sim 7) \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}$,郑州测站为 $3 \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}$,其他测站的观测精度为 $(1 \sim 2) \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}$,且所有测站的精度变化范围为 $(1 \sim 2) \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}$ 。在观测组数达到 13 组后,随着观测组数的增加精度几乎没有变化。

3.2 观测组数对重力值的影响

分别计算 12 个测站的观测数据在观测组数设置为 1~25、组内落体数设置为 100 情况下的重力值,与观测组数设置为 25、组内落体数设置为 100,共计 2 500 个下落时计算得到重力值 G 的差值,其差值的绝对值随观测组数的变化结果见图 2。

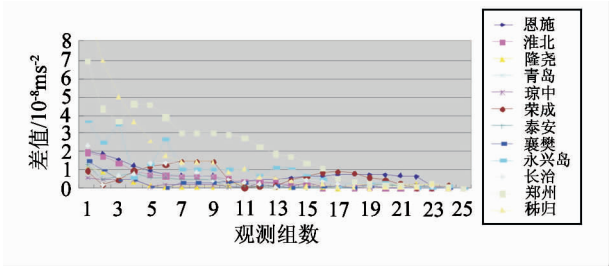


图 2 观测绝对重力值的差值随观测组数的变化
Fig. 2 Variation of difference of absolute gravity value with number of observation set

从图 2 可以发现,随着观测组数的增加,重力值与 G 值之间的差值越来越小。说明随着观测组数的增加,重力值并不会一直随之发生变化,而是达到一定观测组数之后趋于稳定的。12 个测站中除永兴岛、郑州外,其余 10 个测站在观测组数达到 13 组之后,重力值能够稳定在一个较小的变化范围之内,约 $1 \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}$ 。

4 组内落体数影响

4.1 组内落体数对精度的影响

在进行绝对重力数据处理时,每组测量的标准方差 σ_j 的计算公式为:

$$\sigma_j = \pm \sqrt{\frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m (g_i - \bar{g}_j)^2}$$

(6)

式中, j 是每组的序号, m 为每组的下落次数, g_i 为每次下落得到的重力值, \bar{g}_j 为 g_i 的算术平均值。如果 g_i 与 \bar{g}_j 之差大于 3 倍的标准方差,则将其剔除并重新计算 \bar{g}_j 和 σ_j 。首先分别计算当 n 设置为 25、 m 为 1~100 时的 \bar{g}_j ,然后根据式(5)分别计算不同情况下的观测精度 σ ,组内落体数对测量精度的影响情况见图 3。

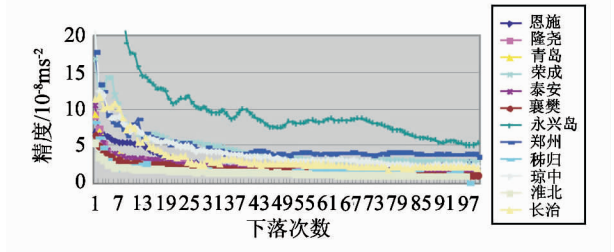


图3 绝对重力观测精度随组内落体数的变化
Fig. 3 Variation of accuracy of absolute gravity measurement with drops number in each set

由图 3 可以看出,在组内落体数达到 50 次之后,除永兴岛外其余所有测站的绝对重力观测精度便能够一直维持在一个非常稳定的量级,变化为 $(1 \sim 2) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。

4.2 组内落体数对重力值的影响

同观测组数对重力值影响的计算方法类似,以观测组数为 25 组,组内落体数为 100 次计算得到的重力值 G 为最优估计值,在不同组内落体数的情况下分别计算重力值,并与 G 值较差,差值的绝对值随组内落体数的变化情况见图 4。

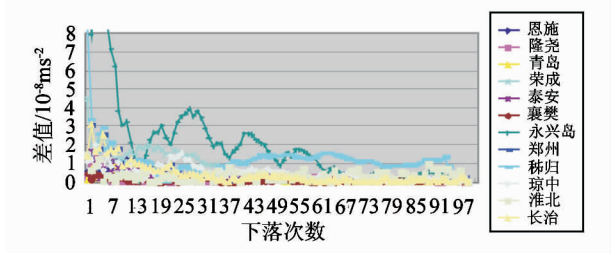


图4 观测绝对重力值的差值随组内落体数的变化
Fig. 4 Variation of difference of absolute gravity value with drops number in each set

当组内落体数达到一定数量之后,测站的绝对重力值趋于稳定,其中永兴岛组内落体数达到 60 次,秭归 95 次,其余 10 个测站 50 次之后,绝对重力值变化非常小,约在 $1 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 范围内。

5 综合影响

当观测组数达到 13 组或者组内落体数设置为 50 次以上时,观测精度能够达到一般国内绝对重力测量 $5 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 的精度要求^[6],且绝对重力值也

趋于稳定,约在 $1 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 的变化范围内。因此,以观测组数 n 为 13、组内落体数 m 为 50 作为节点,分别计算当 n 为 13 和 25、 m 为 50 和 100 在 4 种不同排列组合的情况下的观测精度和重力值,并与真值 G 较差,统计分析结果见表 1。

表1 综合影响分析表 (单位: 10^{-8} ms^{-2})
Tab. 1 Statistics of synthetical effects (units: 10^{-8} ms^{-2})

测站名	组数/落体数							
	25/100		13/100		25/50		13/50	
	精度	差值	精度	差值	精度	差值	精度	差值
恩施	1.26	0	0.91	0.50	1.64	0.22	1.36	0.37
隆尧	1.18	0	0.91	0.20	1.79	0.29	1.18	0.03
青岛	1.23	0	1.37	0.03	1.45	0.16	1.37	0.15
荣成	2.36	0	1.91	0.12	3.43	0.07	1.83	0.41
泰安	1.13	0	1.14	0.09	1.60	0.13	1.55	0.55
襄樊	0.97	0	0.96	0.19	1.68	0.13	1.74	0.29
永兴岛	4.69	0	5.81	0.75	7.41	1.16	8.95	1.29
长治	1.71	0	2.03	0.20	2.48	0.31	2.64	0.48
郑州	3.87	0	3.03	2.27	3.88	0.31	3.57	3.04
秭归	3.37	0	2.03	0.67	1.53	1.42	3.70	1.98
琼中	1.82	0	1.05	0.25	3.11	0.54	2.74	0.61
淮北	0.87	0	0.91	0.33	1.37	0.34	1.28	0.67
精度统计	最差值		5.81		7.41		8.95	
	最优值		0.91		1.37		1.18	
	平均值		1.84		2.61		2.66	
差值统计	最大值		2.27		1.42		3.04	
	最小值		0.09		0.07		0.03	
	平均值		0.47		0.42		0.82	

由表 1 看出,3 种组合模式下永兴岛测站的精度最差,最优值为恩施的 $0.91 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,淮北的 $1.37 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,隆尧的 $1.18 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,精度平均值最高的是 13/100 模式,为 $1.84 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$;从差值统计结果看出,3 种组合模式下最大值分别出现在永兴岛、秭归和郑州,最小值均小于 $0.1 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,平均值均小于 $1.0 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。

6 永兴岛问题

在进行数据处理和统计分析后,我们发现永兴岛测站的精度较差,需要对该测站的结果进一步进行分析。由于该测站环境较好,且不存在观测数据质量问题,但该测站位于海洋,因此需考虑海潮负荷改正方面的影响。该测站的绝对重力观测 GMT 时间为 2010 年 8 月 9—10 日,属大潮期间观测,图 5 给出了观测期间前后数天的海潮负荷影响(CSR 海潮模型),可以看出海潮负荷影响的变化为 $(-8 \sim 6) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,较内陆的 $(1 \sim 2) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 变化大了将近一个数量级。

目前国际上使用比较多的全球海潮模型有 CSR、FES、TPXO、NAO、SCH 等,我们选取其中 3 个模型对永兴岛绝对重力测量数据进行海洋负荷影响

改正,对 25 组连续绝对重力观测数据进行精度评定,结果见表 2。

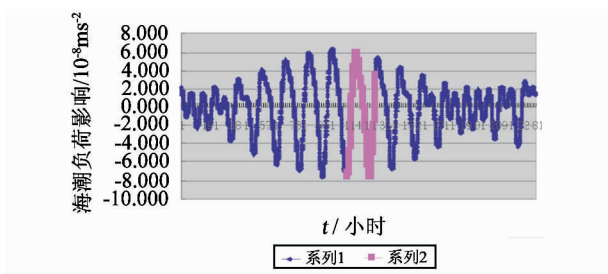


图 5 永兴岛观测前后数天海洋负荷的影响
Fig. 5 Effects of ocean load at Yongxingdao station before and after the observation

表 2 不同海潮模型负荷潮改正后观测结果的标准偏差 (单位: 10^{-8}ms^{-2})

Tab. 2 Standard deviation of observation results corrected from different ocean load model (units: 10^{-8}ms^{-2})			
海潮模型	CSR	FES	SCH
标准偏差	4. 78	4. 77	4. 69

由表 2 看出,经 3 个模型的海潮负荷改正后,绝对重力观测精度均优于 $5 \times 10^{-8}\text{ms}^{-2}$,但难以达到 $2 \times 10^{-8}\text{ms}^{-2}$ 。图 6 给出了经 CSR 模型改正后的组重力值与海潮负荷分布,可以看出,绝对重力观测数据经过 CSR 模型改正后,组重力与海潮负荷变化仍然基本吻合,这说明全球海潮模型并没有很好地反映出我国近海的海潮影响,因此应尽快建立适用于我国近海的区域精密海潮模型,以提高绝对重力测定精度。

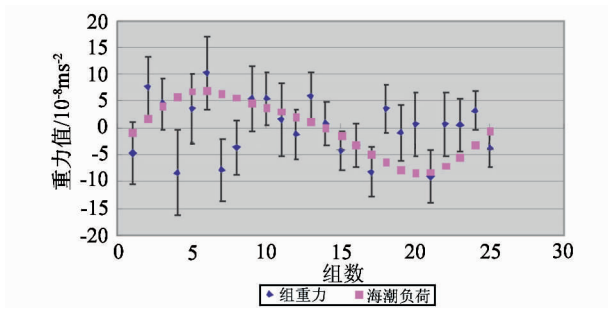


图 6 永兴岛组重力与海潮负荷变化
Fig. 6 Variations of set gravity value and ocean load effect

7 结束语

测站环境是影响绝对重力观测精度的主要因素,增加观测组数和观测时间不能明显提高观测精度,因此建议绝对重力测站的选取及建设应该更加规范严格,以确保观测成果的质量和精度。

在近海及岛礁进行绝对重力观测时,海洋负荷对绝对重力值的影响较大,可以通过延长观测时间和组数来减小海洋负荷的影响,还应尽量避免在大潮期间进行近海测站的绝对重力观测,亟需在不增加观测时间和组数的前提下,建立精密区域海潮模型。

在内陆测站进行绝对重力观测时,建议观测组数设置为 13 组,每小时 1 组,组内落体数为 100 次,并且在夜间进行观测,以减少环境噪声对观测精度的影响,能够有效地减少对绝对重力仪的损耗,且满足 $5 \times 10^{-8}\text{ms}^{-2}$ 技术指标的绝对重力测定要求。

参 考 文 献

- 1 邢乐林,等. FG5 绝对重力仪及测点 3053 的绝对重力测量[J]. 测绘信息与工程,2007,32(2):27-28. (Xing Lelin, et al. FG5 absolute gravimeter and its survey in 3053 station[J]. Journal of Geomatics,2007,32(2):27-28)
- 3 Micro-g LaCoste. FG5 absolute gravimeter user's manual [M]. Colorado,USA,2008.
- 2 Xing Lelin, et al. Comparison of absolute gravity measurements obtained with FG5/232 and FG5/214 instruments [J]. Geo-spatial Information Science ,2009,12(4):307-310
- 4 刘冬至,等. 中国地震重力网络绝对重力观测结果分析[J]. 大地测量与地球动力学,2007,(5):88-93. (The analysis of absolute gravity surveying result of China earthquake gravity network[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2007,(5):88-93)
- 5 邢乐林,等. 成都基准台绝对重力复测结果分析[J]. 大地测量与地球动力学,2008,(6):38-42. (Xing Lelin, et al. Analysis of repeat absolute gravity surveying results at Chengdu seismostation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2008,(6):38-42)
- 6 张为民,等. 绝对重力基准点的重复测量[J]. 大地测量与地球动力学,2003,(2):104-106. (Zhang Weimin, et al. Repeat observation of absolute gravimetry dutam in crustal movement observation netwok of China [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2003,(2):104-106)