

张新林, 韩宇飞, 汪健, 等, 2020. 2010~2018年中国大陆构造环境监测网络绝对重力仪比测结果分析. 中国地震, 36(4): 872~878.

2010~2018年中国大陆构造环境监测网络 绝对重力仪比测结果分析

张新林¹⁾ 韩宇飞²⁾ 汪健¹⁾ 申重阳¹⁾
胡敏章¹⁾ 王嘉沛¹⁾ 李忠亚¹⁾

1) 中国地震局地震研究所地震大地测量重点实验室, 武汉 430071

2) 中国地震台网中心, 北京 100045

摘要 本文介绍了中国大陆构造环境监测网络(陆态网络)2010~2018年4次绝对重力仪比测的成果,4期系统偏差最大值分别为 $3.5\mu\text{Gal}$ 、 $1.7\mu\text{Gal}$ 、 $4.3\mu\text{Gal}$ 和 $3.8\mu\text{Gal}$ ($1\mu\text{Gal}=10^{-8}\text{m/s}^2$), 仪器互差分别为 $0\sim 5.5\mu\text{Gal}$ 、 $0.3\sim 3.2\mu\text{Gal}$ 、 $0\sim 3.4\mu\text{Gal}$ 和 $1.1\sim 7.0\mu\text{Gal}$ 。结果表明,参与比测的绝对重力仪观测中误差均优于 $5.0\mu\text{Gal}$,性能稳定,仪器间不存在明显的系统偏差,满足中国大陆构造环境监测网络绝对重力测量的工程设计要求。

关键词: FG5绝对重力仪 A10绝对重力仪 比对观测 陆态网络

[文章编号] 1001-4683(2020)04-0872-07 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

绝对重力测量是陆态网络的重要组成部分,也是建立新一代国家重力基准的基础和关键(张为民等,2008)。陆态网络的绝对重力测量工作主要由中国地震局地震研究所、总参测绘局第一测绘大队、中国科学院精密测量科学与技术创新研究院(中国科学院测量与地球物理研究所)和自然资源部第一大地测量队(原国家测绘地理信息局第一大地测量队)共同参与完成。经过陆态网络工程和综合地球物理场观测项目的持续实施、完善,我国基本建立了101个绝对重力控制下的固定点位定期复测、3000余段相对重力联测和80多个连续重力观测的基本体系,获取了大量的重力场动态时空变化数据。

绝对重力测量的作用及应用主要表现在以下几方面:①绝对重力测量为地震重力测网提供了可靠的控制基准。绝对重力观测与相对重力联测实施准同步观测,以便为各期重力观测数据提供参考基准,获取准确可靠的重力场动态变化信息,服务于地震监测预报和地球科学研究(祝意青等,2009、2013、2016、2017)。②绝对重力测量可为相对重力仪器提供高精度标校参考。相对重力仪格值和零漂需要在由绝对重力测定的重力基线场中进行定期标

[收稿日期] 2020-07-14; [修定日期] 2020-09-24

[项目类别] 国家自然科学基金(41404065)、“中国大陆环境监测网络工程”项目共同资助

[作者简介] 张新林,男,1980年生,助理研究员,主要从事地震位错理论研究、重力数据处理分析解释等工作。

E-mail: xinlinzhang2012@163.com

定,而区域绝对重力点可用于相对重力联测的校准(刘冬至,1998;玄松柏等,2018)。我国运行的连续重力台站约 80 个,需要定时利用绝对重力测量对其进行格值和零漂标定(孙和平等,2001;邢乐林等,2010)。^③长期绝对重力测量数据可为地震过程研究提供精确依据。世界上首次利用绝对重力仪检测出同震重力变化的地震为 1998 年日本岩手县 $M_{\text{w}}6.1$ 地震,绝对重力仪清晰记录了同震重力变化的时间序列,分析结果显示同震重力变化约 $-6\mu\text{Gal}$,相对重力测量结果和 GPS 观测位移亦印证其可靠性,采用平面位错理论可较好对其解释(Tanaka et al,2001)。分析 1996 年丽江 7.0 级地震前后(1990~1996 年)FG5-112 型和 JILAG 型绝对重力仪的多期观测数据发现,1995~1996 年的丽江和洱源绝对重力观测结果分别出现 $-14.8\mu\text{Gal}$ 和 $-10.9\mu\text{Gal}$ 的重力变化(王勇等,2004)。2008 年汶川 $M_{\text{w}}8.0$ 地震前,成都郫县基准站多年绝对重力时变具有上升、加速再转折发震的过程(邢乐林等,2008)。2015 年尼泊尔 $M_{\text{w}}7.8$ 地震前(2010~2013 年)西藏地区的仲巴、那曲、日喀则等绝对测点均呈现不同程度的重力增加趋势(Chen et al,2016)。^④长期绝对重力测量数据可为地壳变动过程研究提供重要参考(Sun et al,2009)。

稳定而可靠的绝对重力仪是实现上述研究和应用的基础,由于绝对重力仪只有原子钟、激光器等部件可标定,但绝对重力仪器不能进行有效标定,因此为了检验仪器自身的稳定性和仪器之间可能存在的系统偏差、统一各观测仪器的结果、统一全网绝对重力基准以满足陆态网络重力网控制测量的要求,定期组织参与陆态网络绝对重力测量的仪器进行比对观测具有重要意义。

1 比测方案

为了保证我国绝对重力仪的观测与研究的协调运行,实现技术与信息的共享,经中国地震局地震研究所、总参测绘局第一测绘大队、中国科学院精密测量科学与技术创新研究院和自然资源部第一大地测量队 4 家单位协商,于 2010 年 7 月在武汉组成了中国绝对重力仪观测与研究协调组。协调组专家成员依据测点稳定、干扰小、温度变化小等原则,研究确定 2000 国家重力基本网 3053#点(简称 IOS)、九峰引力与固体潮观测站绝对重力基准点(简称 JF-AG)及备用点 JF-AG1、中国科学院精密测量科学与技术创新研究院国家野外科学观测研究站 JF-009、JF-018 和 JF-020 作为绝对重力仪比对的观测点位。每台仪器在每期比测选择的观测墩上分别进行独立观测。FG5 型绝对重力数据采集设定为:每小时 1 组,每组下落 100 次,每次下落时间为 10s,连续进行 25 组观测;垂直梯度的测量在每期比测选择的观测墩上分别进行,FG5 型绝对重力仪落体的传感器高约 130cm,数据采集设定为:利用 2 台相对重力仪在 130cm 高度到墩面往返观测至少 5 个测回,得到不少于 10 个独立段差。A10 型绝对重力数据采集设定为:每小时 2 组,蓝、红激光各 1 组,每组下落 100 次,每次下落时间为 6s,连续进行 50 组观测;A10 型绝对重力仪落体的传感器位置高约 80cm,因此对应的垂直梯度测量为 80cm,其他技术要求与 130cm 垂直梯度测量相同。

2 绝对重力测量与数据处理

2010 年 7 月 11~25 日,参与陆态网络绝对重力测量的仪器进行了第一期绝对重力仪比测,参加的仪器见表 1,此次选用的观测墩为 JF-AG、JF-AG1、JF-018 和 JF-020,测量方式为 4

台仪器两两交叉互比。随后在陆态网络绝对重力测量第二期任务实施期间,于2013年6月16~28日开展了绝对重力仪的第二期集中比对,并且第一次吸收了新型绝对重力仪FG5X和A10参与比对(表1),此次选用的观测墩为IOS、JF-AG、JF-018和JF-020,测量方式为6台仪器均测4个观测墩,实际测量中FG5-112和FG5X-246因仪器故障未测JF-AG点。2015年6月1~10日和2018年3月14~31日,分别组织实施了陆态网络第三、第四期绝对重力比测(表1),这2期选用的观测墩同为ISO、JF-AG、JF-009和JF-018,测量方式为所有仪器均测4个观测墩,其中第四期绝对比测中FG5-112因仪器故障未测ISO和JF-AG点。

表1 绝对重力仪比测统计信息

参加单位	仪器型号	第一期 2010年7月	第二期 2013年6月	第三期 2015年6月	第四期 2018年3月
中国地震局地震研究所	FG5-232	√	√	√	
	FG5X-255				√
中国科学院精密测量科学与技术创新研究院	FG5-112	√	√	√	√
	FG5X-246		√	√	√
总参测绘局第一测绘大队	FG5-240	√	√	√	√
	A10-035			√	
自然资源部第一大地测量队	FG5-214	√	√	√	√
	A10-028		√		

注:√代表该仪器参与了该期绝对重力仪比测观测。

在绝对重力测量中,重力垂直梯度值作为输入参数参与观测值解算,因此在各期选中的绝对重力比测观测墩上均进行了同期重力垂直梯度测量。由于A10-028和A10-035分别承担了陆态网络第二期(2013~2014年)、第三期(2015~2016年)任务中的部分重力基准站的绝对重力观测,为了检测仪器状态,A10-028和A10-035分别参加了第二、第三期的绝对重力仪比测观测。由于FG5、FG5X和A10型绝对重力仪的传感器的传感器位置高度不同,FG5、FG5X型对应传感器位置高度约130cm,A10型对应传感器位置高度约80cm,为了获取精确的重力垂直梯度,因此分别测量了130cm和80cm高度处对应的重力垂直梯度。

为了获取高精度的重力观测值,测量的绝对重力值需进行大气压、极移、固体潮、海潮、仪器高度等改正。比测统一采用仪器自带的数据处理软件默认的ETGTAB潮汐模型对固体潮、海潮进行改正,垂直梯度测量采用陆态网络提供的流动重力记簿软件进行记录处理,绝对重力观测结果均归算至观测墩上重力标处。

3 观测结果

相关学者对第一、第二期的绝对重力仪比测分析结果进行了研究(肖凡等,2011;李建国等,2014)。第三、第四期的观测数据见表2,FG5型和A10型绝对重力仪观测结果标准差均优于 $3.0\mu\text{Gal}$,在 $0.5(\text{FG5X-246})\sim 2.8\mu\text{Gal}(\text{FG5-214})$ 之间。

为了更清晰地认识仪器之间的系统误差,对每期的观测数据分别计算该期各测量墩的所有仪器测量值的平均值,进而用各台仪器观测值和所得平均值作差,获得在同一测墩上各仪器测量结果的偏差。每台仪器在不同墩面均有1个偏差值,最后取各仪器在不同墩面的

表 2 绝对重力仪比测观测结果

仪器	第三期比测重力值/ μGal				第四期比测重力值/ μGal			
	IOS	JF-AG	JF-009	JF-018	IOS	JF-AG	JF-009	JF-018
FG5-112	$\sim 975.4 \pm 2.4$	$\sim 757.7 \pm 0.9$	$\sim 709.1 \pm 1.0$	$\sim 709.5 \pm 1.3$			$\sim 716.1 \pm 0.9$	$\sim 710.1 \pm 0.6$
FG5-214	$\sim 970.7 \pm 1.3$	$\sim 756.0 \pm 0.7$	$\sim 708.4 \pm 2.8$	$\sim 704.8 \pm 2.1$	$\sim 972.4 \pm 1.4$	$\sim 757.2 \pm 0.6$	$\sim 711.4 \pm 0.8$	$\sim 707.7 \pm 1.0$
FG5-232	$\sim 972.0 \pm 2.6$	$\sim 758.0 \pm 1.8$	$\sim 707.6 \pm 1.6$	$\sim 706.7 \pm 1.6$				
FG5-240	$\sim 973.1 \pm 2.4$	$\sim 757.7 \pm 1.4$	$\sim 705.9 \pm 0.9$	$\sim 709.5 \pm 0.8$	$\sim 964.5 \pm 1.2$	$\sim 748.2 \pm 0.9$	$\sim 700.9 \pm 1.4$	$\sim 703.5 \pm 0.8$
FG5X-246	$\sim 972.8 \pm 1.8$	$\sim 754.4 \pm 0.7$	$\sim 705.1 \pm 0.5$	$\sim 705.7 \pm 0.6$	$\sim 962.0 \pm 1.7$	$\sim 754.2 \pm 0.8$	$\sim 711.3 \pm 1.8$	$\sim 706.7 \pm 1.4$
A10-035	$\sim 968.3 \pm 1.5$	$\sim 746.7 \pm 1.6$	$\sim 705.7 \pm 1.5$	$\sim 702.5 \pm 1.6$				
FG5X-255					$\sim 960.3 \pm 2.0$	$\sim 752.7 \pm 1.4$	$\sim 699.6 \pm 0.7$	$\sim 706.9 \pm 0.5$

注: ~代表省略了绝对重力观测值的前六位。

偏差值的均值为该期比测各仪器的系统偏差值, 并取各仪器在各观测墩上观测精度的平均值为系统偏差值的精度。2010~2018 年 4 期的绝对重力仪系统偏差分析数据见表 3, 观测系统偏差图如图 1 所示。结果显示, 第一期 4 台绝对重力仪的观测结果与平均值之差在 $1.5 \sim 3.5 \mu\text{Gal}$ 之间; 第二期在 $0.4 \sim 1.7 \mu\text{Gal}$ 之间, 且均小于 $2 \mu\text{Gal}$; 第三期在 $0.6 \sim 4.3 \mu\text{Gal}$ 之间; 第四期在 $0 \sim 5.7 \mu\text{Gal}$ 之间。FG5-112、FG5-214 和 FG5-240 型重力仪参加了全部 4 期比测, FG5-112 系统偏差均为正值, 另外 2 台仪器则正、负值均有; FG5X-246 型重力仪参加了后 3 期的比测, 系统偏差均为负值。在第一期的观测结果中, FG5-112、FG-214 和 FG5-240 型重力仪测量结果之间相差小于 $1 \mu\text{Gal}$, 而 FG5-214 与 FG5-232 之间相差 $5.5 \mu\text{Gal}$, 略大于 2 台仪器分别在 2006 年和 2008 年比对观测实验时的互差 $2.7 \mu\text{Gal}$ 和 $0.4 \mu\text{Gal}$ (玄松柏等, 2008)。在第三期的观测结果中, 各仪器在各观测墩上的观测精度最大值为 FG5-214 在测点 JF-009 上的 $\pm 2.8 \mu\text{Gal}$, 最小值为 FG5X-246 在测点 JF-009 上的 $\pm 0.5 \mu\text{Gal}$; 第四期观测精度最大值为 FG5X-255 在测点 IOS 上的 $\pm 2.0 \mu\text{Gal}$, 最小值为 FG5X-255 在测点 JF-018 上的 $\pm 0.5 \mu\text{Gal}$ 。

表 3 绝对重力仪系统偏差

仪器	相对偏差值 (μGal)			
	第一期	第二期	第三期	第四期
FG5-112	1.5 ± 1.7	1.5 ± 0.3	2.8 ± 1.4	5.7 ± 0.7
FG5-214	2.0 ± 0.8	-1.7 ± 2.9	-0.7 ± 1.7	3.3 ± 1.0
FG5-232	-3.5 ± 0.8	1.0 ± 0.2	1.0 ± 1.9	
FG5-240	1.5 ± 1.2	0.7 ± 0.5	1.4 ± 1.4	-1.8 ± 1.1
FG5X-246		-1.0 ± 2.2	-0.6 ± 0.9	0.0 ± 1.4
A10-028		-0.4 ± 0.6		
A10-035			-4.3 ± 1.6	
FG5X-255				-3.4 ± 1.2

需要注意的是, FG5-112 型重力仪参加了第四期比测, 但该仪器未参与陆态网络 2017~2018 年的绝对测量任务。若不考虑 FG5-112, 那么 FG5-214、FG5-240、FG5X-246 和

FG5X-255 的系统偏差分别为 $3.8 \pm 1.0 \mu\text{Gal}$ 、 $-3.2 \pm 1.1 \mu\text{Gal}$ 、 $1.1 \pm 1.4 \mu\text{Gal}$ 和 $-2.1 \pm 1.2 \mu\text{Gal}$, 该期的仪器系统偏差优于 $4.0 \mu\text{Gal}$ 。4 期系统偏差最大值分别为 $3.5 \mu\text{Gal}$ 、 $1.7 \mu\text{Gal}$ 、 $4.3 \mu\text{Gal}$ 和 $3.8 \mu\text{Gal}$; 4 期仪器间的互差依次为 $0 \sim 5.5 \mu\text{Gal}$ 、 $0.3 \sim 3.2 \mu\text{Gal}$ 、 $0 \sim 3.4 \mu\text{Gal}$ 和 $1.1 \sim 7.0 \mu\text{Gal}$; 参与比测的绝对重力仪观测中误差均优于 $5.0 \mu\text{Gal}$ 。

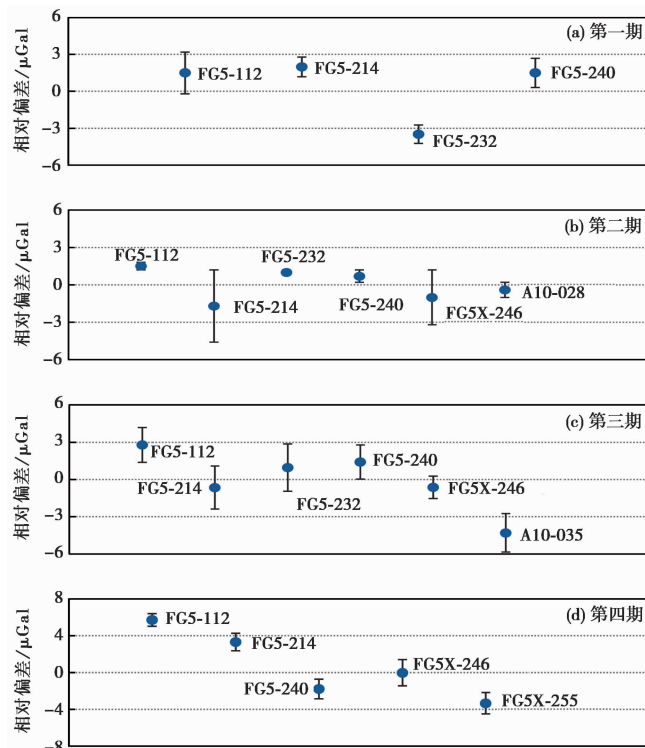


图 1 2010~2018 年 4 期绝对重力仪比对观测系统偏差

4 结论与讨论

(1) 第三、第四期全部观测结果精度均符合陆态网络工程 $\pm 5.0 \mu\text{Gal}$ 的设计指标; IOS 测点位于中国地震局地震研究所的一楼实验室, 各仪器在该测点上的观测精度略低于其他 3 个测点(表 2), 可能与点位位于市区、观测噪声较大有关。

(2) A10-035 型重力仪在第三期的比测中, 4 个测点的观测精度均优于 $\pm 1.6 \mu\text{Gal}$ (表 2), 且该期的仪器系统偏差统计分析为 $-4.3 \pm 1.6 \mu\text{Gal}$ (表 3), 优于陆态网络工程仪器系统偏差不超过 $5 \mu\text{Gal}$ 的设计指标, 同时也证实了 A10 型重力仪满足陆态网络工程绝对重力测量的要求(何志堂等, 2014、2015)。

(3) 由于每期比测参加仪器不同、测点也不同, 导致了仪器的稳定性分析困难, 且 4 期的比测结果显示, 各仪器每期的相对偏差并不稳定, 因此建议用于陆态网络测量的绝对重力仪应固定, 且在固定点位上定期进行比测。

(4) 每期比测时间均约 2 周, 时间跨度稍大, 且无超导重力观测提供的比测期间测点的重力时间变化序列用于不同重力仪、不同时间在同一测点的测量值的比较改正, 在今后的绝

对重力仪比测中,超导重力观测数据值得引入并作参考。

通过 2010~2018 年 4 期的绝对重力仪比对观测实验,表明参与陆态网络绝对重力测量的绝对重力仪性能稳定,仪器之间无明显系统偏差,可以满足陆态网络重力监测的要求。

致谢:感谢中国地震局地震研究所、总参测绘局第一测绘大队、中国科学院精密测量科学与技术创新研究院和自然资源部第一大地测量提供的绝对重力仪比测数据,感谢中国绝对重力仪观测与研究协调组的指导与帮助,感谢匿名审稿专家的宝贵意见。

参考文献

- 何志堂,韩宇飞,康胜军,等,2014. A10/028 与 FG5 绝对重力仪比对测量实验. 大地测量与地球动力学, **34**(3):142~145, 150.
- 何志堂,韩宇飞,康胜军,等,2015. “陆态网络” II 期西部绝对重力测定结果分析. 大地测量与地球动力学, **35**(6):927~930.
- 李建国,李辉,张松堂,等,2014. 中国绝对重力仪第二次比对测量. 大地测量与地球动力学, **34**(4):64~66.
- 刘冬至,1998. 绝对与相对重力同步比测中的拉科斯特重力仪标定. 地壳形变与地震, **18**(1):88~94.
- 孙和平,陈晓东,许厚泽,等,2001. GWR 超导重力仪潮汐观测标定因子的精密测定. 地震学报, **23**(6):651~658.
- 王勇,张为民,詹金刚,等,2004. 重复绝对重力测量观测的滇西地区和拉萨点的重力变化及其意义. 地球物理学报, **47**(1):95~100.
- 肖凡,张宏伟,王应建,等,2011. FG5 绝对重力仪比对观测数据分析. 海洋测绘, **31**(5):55~57.
- 邢乐林,李辉,何志堂,等,2008. 成都基准台绝对重力复测结果分析. 大地测量与地球动力学, **28**(6):38~42.
- 邢乐林,李辉,刘子维,等,2010. 利用绝对重力测量精密测定超导重力仪的格值因子. 大地测量与地球动力学, **30**(1):48~50.
- 玄松柏,汪健,李杰,等,2018. 新一代 CG-6 重力仪性能分析. 大地测量与地球动力学, **38**(1):5~7.
- 玄松柏,邢乐林,何志堂,等,2008. 国内绝对重力实验观测比对. 大地测量与地球动力学, **28**(4):72~74.
- 张为民,王勇,周旭华,2008. 我国绝对重力观测技术应用研究与展望. 地球物理学进展, **23**(1):69~72.
- 祝意青,李铁明,郝明,等,2016. 2016 年青海门源 M_s 6.4 地震前重力变化. 地球物理学报, **59**(10):3744~3752.
- 祝意青,梁伟锋,赵云峰,等,2017. 2017 年四川九寨沟 M_s 7.0 地震前区域重力场变化. 地球物理学报, **60**(10):4124~4131.
- 祝意青,闻学泽,孙和平,等,2013. 2013 年四川庐山 M_s 7.0 地震前的重力变化. 地球物理学报, **56**(6):1887~1894.
- 祝意青,徐云马,吕戈培,等,2009. 龙门山断裂带重力变化与汶川 8.0 级地震关系研究. 地球物理学报, **52**(10):2538~2546.
- Chen S, Liu M, Xing L L, et al, 2016. Gravity increase before the 2015 M_w 7.8 Nepal earthquake. *Geophys Res Lett*, **43**(1):111~117.
- Sun W K, Wang Q, Li H, et al, 2009. Gravity and GPS measurements reveal mass loss beneath the Tibetan Plateau: geodetic evidence of increasing crustal thickness. *Geophys Res Lett*, **36**(2):L02303.
- Tanaka Y, Okubo S, Machida M, et al, 2001. First detection of absolute gravity change caused by earthquake. *Geophys Res Lett*, **28**(15):2979~2981.

Comparisons of Absolute Gravimeters Measurements from Crustal Movement Observation Network of China during 2010 and 2018

Zhang Xinlin¹⁾ Han Yufei²⁾ Wang Jian¹⁾ Shen Chongyang¹⁾ Hu Minzhang¹⁾
Wang Jiapei¹⁾ Li Zhongya¹⁾

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

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract The results of 4-time comparisons on absolute gravimeter measurements from Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC) during 2010 and 2018 are introduced in this paper. The maximum systematic deviations of 4-time comparisons are 3.5 μ Gal, 1.7 μ Gal, 4.3 μ Gal, 3.8 μ Gal ($1\mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$), and the difference between the gravimeters are 0~5.5 μ Gal, 0.3~3.2 μ Gal, 0~3.4 μ Gal, 1.1~7.0 μ Gal, respectively. The results show that the errors of the absolute gravity measurements in the comparisons are superior to 5 μ Gal. The absolute gravimeters are stable and there are no obvious systematic deviations among instruments, which satisfies the designed requirements of absolute gravity measurements of Crustal Movement Observation Network of China.

Keywords: FG5 absolute gravimeter; A10 absolute gravimeter; Comparison; CMONOC