

祝杰,韩宇飞,王嘉沛,等. 2025. 2024 年度中国大陆构造环境监测网络绝对重力仪系统偏差与观测精度分析[J]. 地震研究, 48(4): 702–711, doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2025. 0072.

Zhu J, Han Y F, Wang J P, et al. 2025. Analysis on systematic deviation and observation accuracy of absolute gravimeters in the Crustal Movement Observation Network of China in 2024[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(4): 702–711, doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2025. 0072.

## 2024 年度中国大陆构造环境监测网络绝对重力仪 系统偏差与观测精度分析\*

祝杰<sup>1</sup>, 韩宇飞<sup>1♣</sup>, 王嘉沛<sup>2</sup>, 徐欣<sup>3</sup>, 张新林<sup>2</sup>, 白磊<sup>4</sup>, 康胜军<sup>5</sup>

(1. 中国地震台网中心, 北京 100045; 2. 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉 430071;  
3. 首都师范大学 管理学院, 北京 100089; 4. 中国科学院 精密测量科学与技术创新研究院,  
湖北 武汉 430077; 5. 自然资源部第一大地测量队, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 随着“中国大陆构造环境监测网络”项目中绝对重力仪数量和类型的不断增加, 绝对重力观测数据解算基准存在着由于不同仪器系统偏差造成的不统一, 影响了时变重力数据解算的精度和准确性。为研究绝对重力仪间系统偏差, 通过分析 2024 年度 10 台绝对重力仪的同址集中比测数据, 采用加权最小二乘平差方法对数据进行统一解算, 获得了 3 个测点重力标准参考值和各仪器的系统偏差, 最后综合对比分析陆态网络历期比测结果。结果表明: ①10 台绝对重力仪的系统偏差为  $-3.42 \sim 4.50 \mu\text{Gal}$ , 观测精度为  $0.69 \sim 3.38 \mu\text{Gal}$ , 仪器间系统偏差在数个  $\mu\text{Gal}$  量级; ②参加 2023、2024 两期比测的 6 台仪器系统偏差的变化值与重力基准变化值的偏差为  $-1.31 \sim 3.69 \mu\text{Gal}$ , 表明陆态网络观测使用绝对重力仪性能稳定, 适合用于探测地震相关的微小重力变化信号; ③陆态网络 9 期比测的绝对重力仪系统偏差全部优于  $5 \mu\text{Gal}$ , FG5、FG5X 型绝对重力仪的系统偏差标准差维持在  $2 \mu\text{Gal}$  左右, 而 A10 型绝对重力仪的系统偏差标准差最大达  $4.56 \mu\text{Gal}$ , 因此各仪器的系统偏差在高精度重力测量中应予以考虑。

**关键词:** 中国大陆构造环境监测网络; 比测; 绝对重力仪; 系统偏差

**中图分类号:** P315.62 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000–0666(2025)04–702–10

doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2025. 0072

### 0 引言

地球时变重力场包含丰富的地球系统物质分布与运移信息, 直接反映地球内部构造运动、地表质量迁移的本质和过程(祝意青等, 2022; 韩建成等, 2022)。高精度的时变绝对重力场观测能够探测地震孕育、同震重力、冰川均衡调整以及

青藏高原长期构造运动等诸多地球物理过程引起的信号, 在建立重力基准、探测地球内部微小重力变化、监测地壳构造运动、重力场长期变化等地震监测预报和地球动力学研究方面具有重要意义(陈晓东等, 2013; 邢乐林等, 2016; 孙和平, 2024; 贾剑钢, 2019; Chen et al, 2022; 黄江培等, 2023)。

我国自 20 世纪 80 年代开始实施绝对重力观测

\* 收稿日期: 2024–07–30.

**基金项目:** 中国地震台网中心青年基金(QNJJ2024–06); 地震科技星火计划攻关项目(XH23054C); 中国地震局地震研究所基本科研业务费专项资助项目(IS202326341); 国家自然科学基金(42204089).

**第一作者简介:** 祝杰(1992–), 工程师, 主要从事 InSAR 数据分析应用及地震重力站网管理研究.

E-mail: zhujie@seis. ac. cn.

**通信作者简介:** 韩宇飞(1981–), 高级工程师, 主要从事地震重力站网管理、重力数据处理与应用研究.

E-mail: yfhan@seis. ac. cn.

(申重阳等, 2020), 早期主要通过国内外合作开展观测并建立重力基准。1998 年, “中国地壳运动观测网络” 工程 (以下简称 “网络工程”) 建成实施, 每 2 ~ 3 a 对中国大陆 25 个基准站进行一期绝对重力观测, 初步构建了中国大陆统一的重力基本网。2012 年建成的 “中国大陆构造环境监测网络” (以下简称 “陆态网络”) 涵盖 101 个绝对重力测点, 平均测点间距 200 ~ 300 km, 形成中国大陆分布基本均匀的绝对重力测网, 为重力基准网、相对重力联测网提供了重力基准控制 (韩宇飞等, 2020)。自 2009 年开始, 按照 “全国成场、区域成网” 的观测思路, 中国地震局统筹网络工程、陆态网络和 “中国大陆地球物理场综合观测” 流动重力测量任务, 在中国大陆逐步建成了由 101 个绝对重力点、4 000 余个相对重力联测点和 80 个连续重力台站组成的综合地震重力监测系统 (祝意青等, 2020; 申重阳等, 2020)。

随着陆态网络重力观测任务与中国地震局常规重力观测任务的深入融合, 参与年度绝对重力观测的仪器类型由单一型号的 FG5 仪器增加为 FG5、FG5X 和 A10 等多种型号仪器。不同型号的仪器在激光器和落体仓长度方面存在显著差异, 相同型号不同编号的仪器也经常存在观测结果不一致的情况, 导致绝对重力测量结果存在基准不统一的问题。因此, 有必要开展绝对重力仪系统性偏差研究工作, 进一步强化绝对重力整网控制。目前使用较多的是基于自由落体型绝对重力仪, 其关键部件原子钟和激光器可以有效标定, 但仪器整体组装后暂无法进行有效标定。为保证仪器

的有效性和准确性, 通常的解决办法是定期进行绝对重力仪比对观测 (吴书清等, 2009; 胡若等, 2020; Wu *et al*, 2021)。为分析 2024 年度陆态网络绝对重力仪系统偏差与观测精度, 保障年度绝对重力观测具备统一的绝对重力基准, 2024 年 3 月中国地震台网中心组织陆态网络共建 4 部委开展了第 9 期全国绝对重力仪比测, 根据 《地壳运动监测技术规程》 (以下简称 “技术规程”) (地壳运动监测工程研究中心, 2014), 对参加比测的绝对重力仪进行同址同期测试, 使用加权最小二乘平差方法对参与比测的绝对重力观测数据及观测点位的重力垂直梯度结果进行处理和分析, 获得参与比测仪器之间的系统偏差 (Xing *et al*, 2009; 张新林等, 2020; 王嘉沛等, 2022)。

## 1 研究方法及数据处理

### 1.1 测点布设

绝对重力测量作为高精度的重力观测手段, 对观测点位有着严格的要求。中国绝对重力仪观测与研究协调组依据测点的稳定性好、温湿度变化小、环境干扰小等原则, 确定武汉大地测量国家野外科学观测研究站 (以下简称 “武汉大地测量站”) 的 3 个测点 IGG009、IGG018、IGG020 观测墩作为此次绝对重力仪比对观测点位, 如图 1 所示。3 个测点均建立在稳定基岩上, 多次参与陆态网络、军民融合等项目的绝对重力仪比测工作, 积累了丰富的绝对重力观测数据, 是开展绝对重力比测的理想场地。

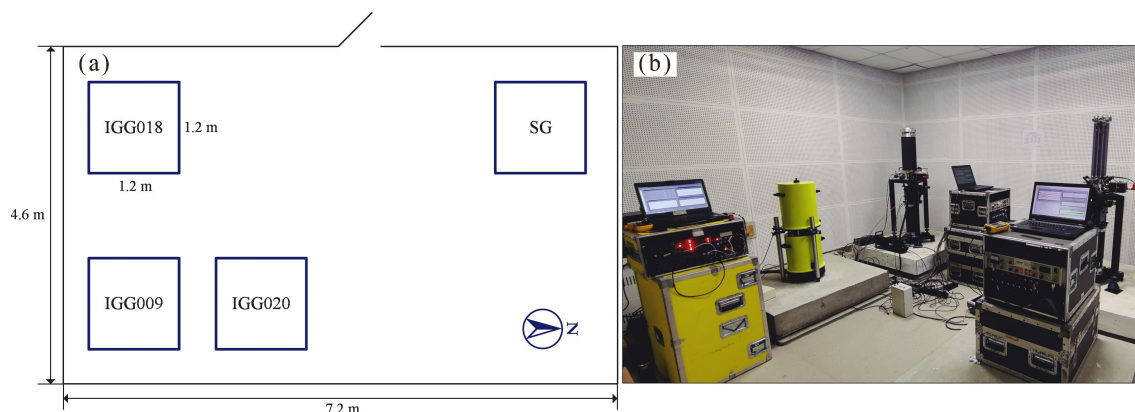


图 1 武汉大地测量站测点布设 (a) 与绝对重力仪比测现场 (b)

Fig. 1 Layout of measurement points at Wuhan Geodetic Station (a) and a picture of comparative observation of absolute gravimeters (b)

按照国际惯例,比测期间采用高精度的超导重力仪开展持续重力变化监测,为短期内的绝对重力测量提供实时的重力观测参照(孙和平等,2021)。图2a为2024年3月13—29日GWR iGrav-052超导重力仪记录的原始重力反馈电压值、经格值因子标定转换成重力观测值,经过地球固体潮改正(图2b)、海潮改正(图2c)、气压改正(图2d)和极移改正(图2e)后,获得重力残差变化(图2f)。图2f显示,在整个比测期间,测点周边环境十分稳定,GWR iGrav-052超导重力仪观测到的重力变化非常小,变化幅度为 $-1.32 \sim 1.26 \mu\text{Gal}$  ( $1 \mu\text{Gal} = 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ )。此外,超导重力仪改正使用的模型与绝对重力测量模型相同,以保证数据的一致性。

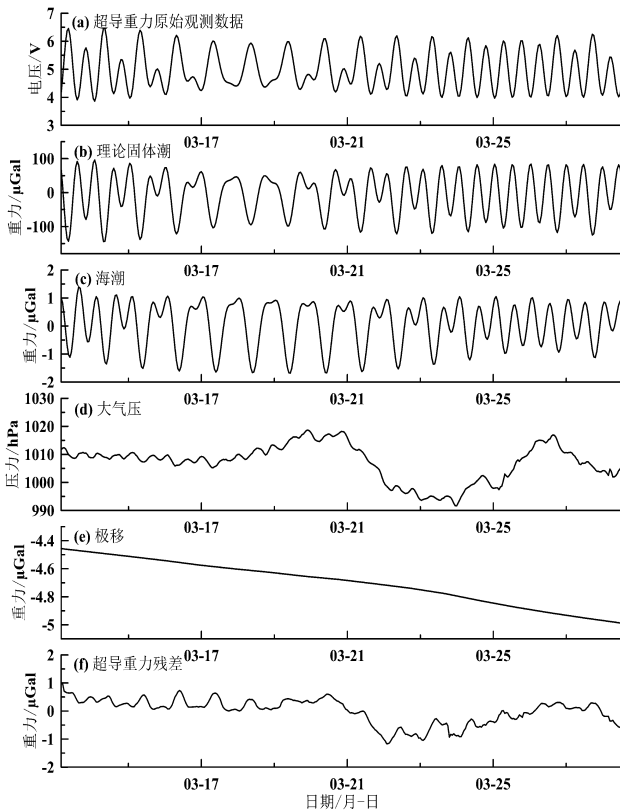


图2 2024年3月13—29日GWR iGrav-052超导重力仪观测结果

Fig. 2 Observations of superconducting gravimeter GWR iGrav-052 during 13-29 March, 2024

## 1.2 测量原理

在真空舱内,通过激光产生干涉条纹和铷原子频标分别精确测定落体块在自由下落运动过程中的位置与时刻(图3)。根据自由落体运动方程

求解测量点的重力值(白磊等,2016)为:

$$x_i = x_0 + v_0 \hat{t}_i + \frac{g_0 \hat{t}_i^2}{2} + \frac{\gamma v_0 \hat{t}_i^3}{6} + \frac{\gamma g_0 \hat{t}_i^4}{24} \quad (1)$$

$$\hat{t}_i = t_0 - \frac{(x_i - x_0)}{c} \quad (2)$$

式中: $x_i$ 表示落体块相对于初始位置的下落垂直距离; $x_0$ 、 $v_0$ 、 $g_0$ 分别表示位置、速度和重力加速度的初始值; $\gamma$ 和 $c$ 分别表示实测重力垂直梯度值和光速; $\hat{t}_i$ 表示下落延迟时间。

利用最小二乘拟合对式(1)进行计算,所得的重力值 $g_0$ 即为落体在有效高度处含固体潮、海潮负荷、大气压力、极移等地球物理因素影响的绝对重力值。

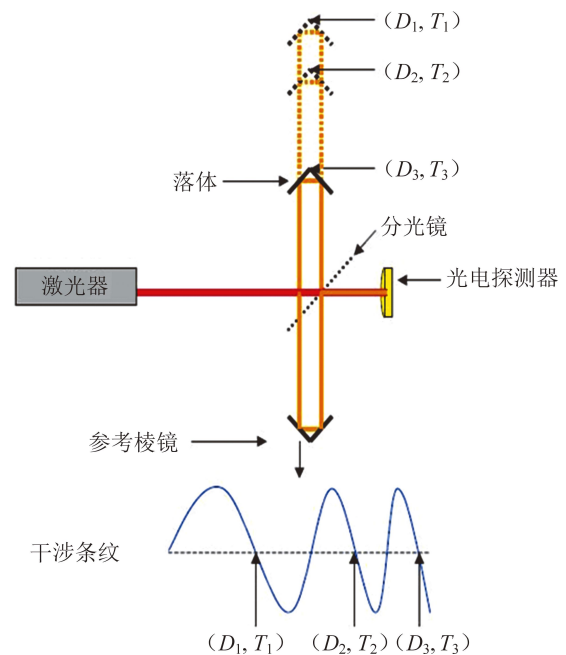


图3 自由落体型绝对重力仪测量原理  
(修改自贾剑刚,2019)

Fig. 3 Measurement principle of free-fall type, absolute gravimeter (modified based on Jia, 2019)

## 1.3 数据处理

### 1.3.1 重力观测方法

2024年度,共有10台绝对重力仪参加比测,比测时间为2024年3月15—29日,具体仪器及比测时间见表1。仪器为目前国际上主流的FG5、FG5X、A10型绝对重力仪,都是基于自由落体原理的光学绝对重力仪。

表1 参与2024年度绝对重力仪比测的仪器信息

Tab. 1 Information of the absolute gravimeters applied to the comparative measurement in the year 2024

仪器	所属单位	比测日期		
		IGG009	IGG018	IGG020
FG5X-259	湖北省地震局	2024-03-20	2024-03-19	2024-03-21
FG5-232		2024-03-18	2024-03-21	2024-03-20
A10-059		2024-03-25	2024-03-27	2024-03-26
FG5X-246	中国科学院精密测量科学与技术创新研究院	2024-03-15	2024-03-16	2024-03-17
FG5X-257		2024-03-16	2024-03-17	2024-03-15
A10-046		2024-03-18	2024-03-20	2024-03-19
A10-048	中国地震局第一监测中心	2024-03-22	2024-03-23	2024-03-24
FG5X-260	自然资源部第一大地测量队	2024-03-25	2024-03-24	2024-03-23
FG5-214		2024-03-27	2024-03-25	2024-03-26
FG5X-264	某测绘大队	2024-03-28	2024-03-27	2024-03-29

根据陆态网络比测要求，每台仪器分别在3个测点观测墩上进行独立观测。比测前，对各台仪器的铷钟频率和气压计进行统一标定，并抽取真空。比测过程中按照技术规程严格执行。其中FG5和FG5X型绝对重力仪按照每1小时1组，每组100次下落，每次下落10 s，观测有效组数不小于25组；A10型绝对重力仪按照每1小时2组（红光和蓝光），每组100次下落，每次下落6 s，观测有效组数不少于50组。最终获得共计30次的绝对重力测量结果。

1.3.2 数据处理

为获取高精度的绝对重力观测值，需对原始重力观测值 $g_0$ 进行相关改正，包括大气压（ $-0.3\text{ }\mu\text{Gal/hPa}$ ）、极移、固体潮、海潮负荷、仪器高度（王庆宾，吴晓平，2001）等。本文采用Micro-g公司提供的g9绝对重力数据处理软件，按默认的ETGTAB潮汐模型对固体潮、海潮进行改正。不同型号绝对重力仪测量的参考高度不同，需利用重力垂直梯度将重力值归算到同一高度（观测墩面）。具体做法为：首先利用2台高精度的CG-6型相对重力仪，分别测量3个测点在130和80 cm两个高度的重力垂直梯度，具体按设定的至少5个往返次数，测量观测墩面标志点到固定高度处（FG5型绝对重力仪固定高度为130 cm，A10型绝对重力仪固定高度为80 cm）的重力差；然后根据高度换算成重力垂直梯度；

最后对所有独立观测结果计算重力差平均值和中误差，其中中误差 $\leq \pm 4\text{ }\mu\text{Gal}$ ，且每台仪器达到精度要求的有效独立成果数 $\geq 5$ 个。本文采用陆态网络提供的流动重力记簿软件对重力垂直梯度进行记录和处理，得到3个测点的重力垂直梯度（表2）。2024年3月15日FG5X-246绝对重力仪在IGG009测点的25组重力观测结果（图4）显示，观测精度均在 $2\text{ }\mu\text{Gal}$ 以内，表明比测期间仪器测量结果稳定。

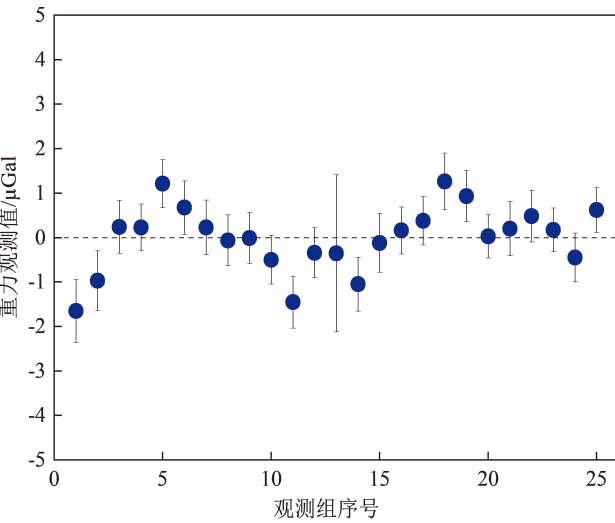


图4 2024年3月15日FG5X-246型绝对重力仪在IGG009测点的25组重力观测结果

Fig. 4 Twenty-five groups of observational results from FG5X-246 at Point IGG009 on 15 March, 2024

表 2 3 个测点的重力垂直梯度

Tab. 2 Vertical gradient of gravity at three measurement points

测点	重力垂直梯度/( $\mu\text{Gal} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	
	高度 130 cm	高度 80 cm
IGG009	-2. 671 6	-2. 735 9
IGG018	-2. 700 2	-2. 766 0
IGG020	-2. 875 4	-2. 926 9

对 3 个测点上的每台仪器均进行了观测，共获得 30 个绝对重力观测值和观测精度，对观测值的地球物理效应（固体潮、海潮、大气压、极移）和重力垂直梯度均进行了改正，并从测量值中减去了相同的常数，保留了小数点前 3 位有效数字。图 5 展示了 3 个测点上 10 台重力仪测量的原始绝对重力观测值。从图可见，10 台仪器的测量结果整体较平稳，无明显差异。除 A10-059 型重力仪的观测精度超过 3  $\mu\text{Gal}$  外，其余 27 个测量结果观测精度均在 2  $\mu\text{Gal}$  以内。

为比较观测结果，利用图 5 中的所有观测结果，建立基本方程：

$$g_{ij} = g_i + \delta_j + \varepsilon_{ij} \tag{3}$$

式中： $g_i$  为比测点位  $i$  上的标准参考值； $\delta_j$  为观测仪器  $j$  的系统偏差； $\varepsilon_{ij}$  为观测仪器  $j$  在观测墩  $i$  上的随机误差。

在没有任何约束的条件下，式（3）存在无数多组解。对系统偏差  $\delta_j$  引入了通用的约束条件，即参加比对的所有仪器系统偏差累加和为零，计算如下：

$$\sum_j \delta_j = 0 \tag{4}$$

$$\min \|g_{ij} - g_i - \delta_j\|_2^2 \tag{5}$$

在所有参加比测仪器的  $\varepsilon_{ij}$  的平方和为最小的条件下，基于最小二乘方法求解每个测点的  $g_i$  以及各观测仪器的  $\delta_j$ 。

2 计算结果及分析

2.1 数据解算结果

根据绝对重力数据处理流程，获得了 2024 年和 2023 年 3 个测点的重力标准参考值和各仪器的系统偏差（表 3、图 6a）。

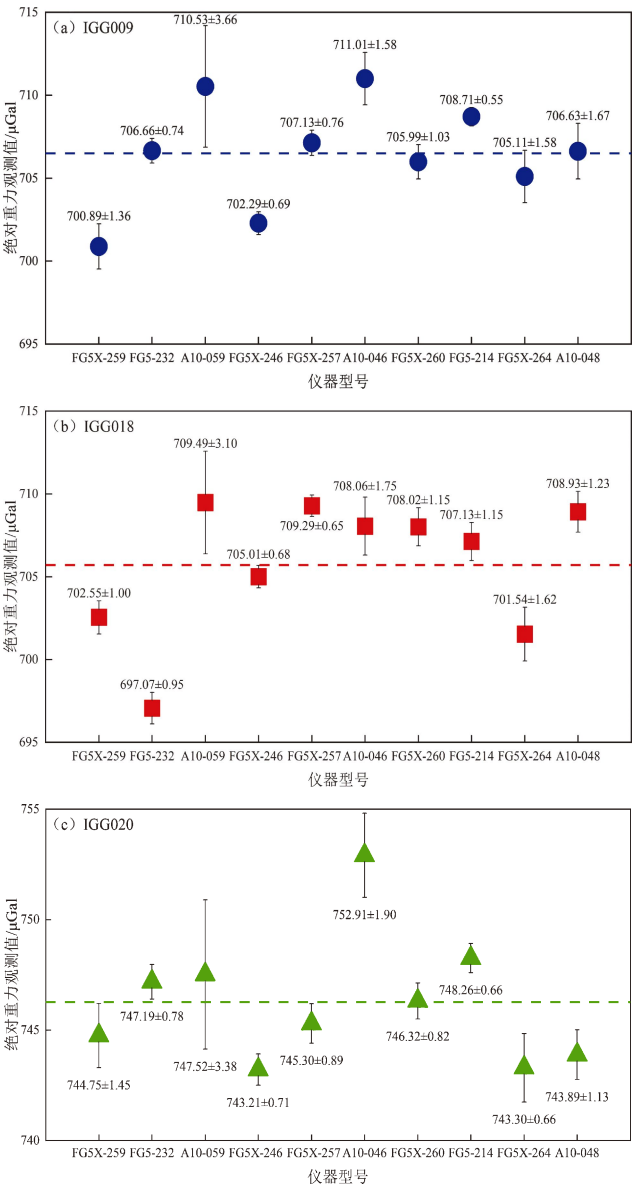


图 5 各仪器在 3 个测点的原始绝对重力观测值  
Fig. 5 Original absolute gravity observations of the instruments at 3 measurement points

表 3 2023 和 2024 年 3 个测点的重力标准参考值及两者的变化值

Tab. 3 Standard reference values of gravity for three measurement points in the year 2023 and 2024, and the gravity variation in these two years

测点	重力标准参考值/ $\mu\text{Gal}$		重力标准参考的变化值/ $\mu\text{Gal}$
	2023 年	2024 年	
IGG009	~ 706. 62	~ 706. 50	-0. 12
IGG018	~ 709. 59	~ 705. 71	-3. 88
IGG020	~ 748. 17	~ 746. 27	-1. 90



本文统一处理了 2024 年 10 台绝对重力仪的 30 次的观测数据。结果表明, 10 台绝对重力仪的系统偏差为  $-3.42 \sim 4.50 \mu\text{Gal}$ , 观测精度为  $0.69 \sim 3.38 \mu\text{Gal}$ , 满足陆态网络项目  $\pm 5 \mu\text{Gal}$  的设计指标要求, 表明这 10 台绝对重力仪的稳定性较好。其中, 在 3 台 A10 绝对重力仪中, A10-048 型绝对重力仪表现性能最稳定, 系统偏差最小, 为  $(0.32 \pm 1.34) \mu\text{Gal}$ ; A10-046 型绝对重力仪系统偏差最大, 为  $(4.50 \pm 1.74) \mu\text{Gal}$ 。在 7 台 FG5 绝对重力仪中, FG5X-260 型绝对重力仪表现性能最稳定, 系统偏差为  $(0.62 \pm 1.00) \mu\text{Gal}$ ; FG5X-259 绝对重力仪系统偏差最大, 为  $(-3.42 \pm 1.27) \mu\text{Gal}$ 。A10-046 和 FG5X-259 型绝对重力仪的互差最大, 为  $7.92 \mu\text{Gal}$ 。

## 2.2 比测结果对比

为研究武汉重力基准的变化, 以及绝对重力仪对重力变化测量的精度, 设定 2023 年比测点位和比测时间与 2024 年一致, 将 2023 年、2024 年两期的观测结果作进一步对比分析。按照同样的数据处理方法, 统一处理了 2023 年 9 台绝对重力仪的 27 次观测数据, 获得 3 个测点的重力标准参考值和各仪器的系统偏差 (表 3、图 6b)。结果表明, 参加 2023 年观测的 9 台绝对重力仪的系统偏差为  $-3.74 \sim 5.00 \mu\text{Gal}$ , 观测精度为  $0.60 \sim 1.88 \mu\text{Gal}$ , 满足陆态网络项目  $\pm 5 \mu\text{Gal}$  的设计指标要求。

将 2024 年与 2023 年各测点的重力标准参考值作差, 可获得各测点重力标准参考的变化值 ( $g_{09}$ ,  $g_{018}$ ,  $g_{020}$ ), 再取平均值, 可获得各测点重力标准参考变化值的平均值  $g = -1.97 \mu\text{Gal}$ , 将其作为 2 次比对观测整体的基准变化值, 结果见表 3。从表 3 可见, 2023—2004 年, 武汉大地测量站 3 个测点的重力标准参考值变化均值在  $2 \mu\text{Gal}$  以内, 基准稳定性较好。

2024 年和 2023 年两期比测中, 有 6 台仪器 (FG5X-260、FG5-214、FG5X-246、FG5X-257、FG5X-264、A10-048 型绝对重力仪) 参与测量。将这 6 台仪器 2024 年和 2023 年的系统偏差作差, 可获得各仪器系统偏差的变化值 (图 6c), 图 6c 显示这 6 台仪器系统偏差的变化值为  $-3.28 \sim 1.72 \mu\text{Gal}$ , 无明显变化, 说明这 6 台仪器性能比较稳定。

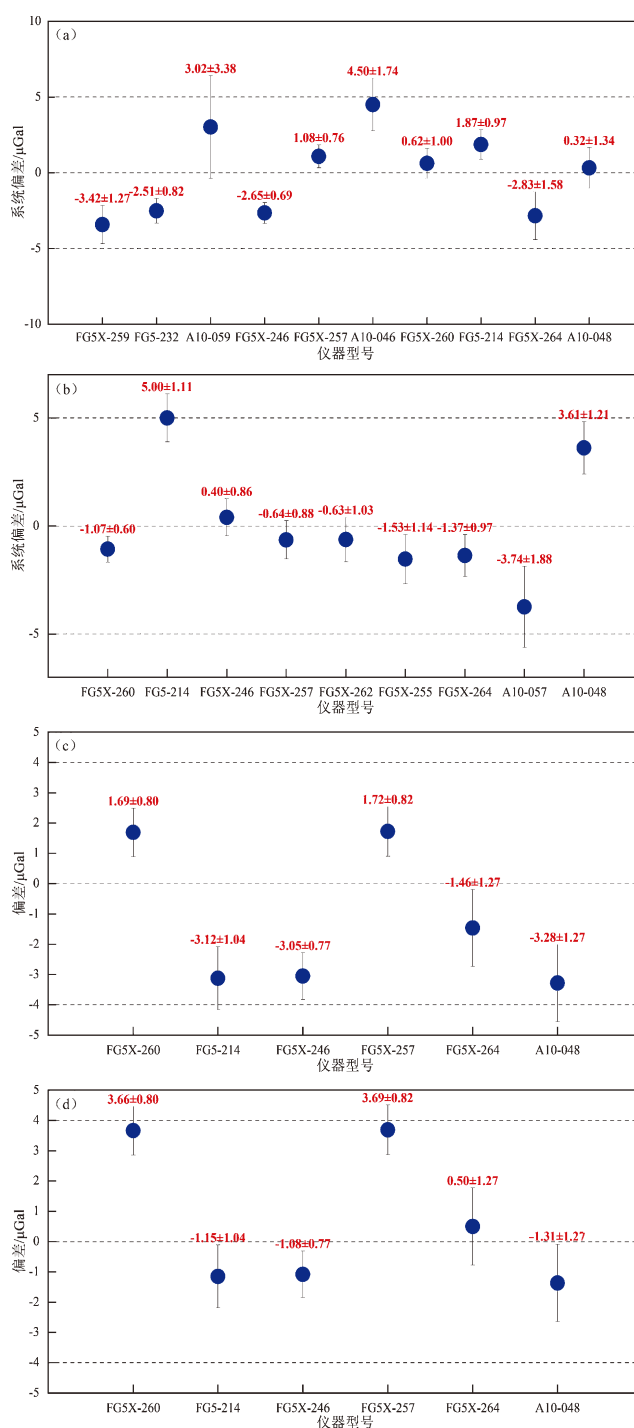


图 6 2024 年 (a) 和 2023 年 (b) 各绝对重力仪之间的系统偏差、2024 年和 2023 年 6 台仪器的系统偏差 (c) 及其与基准变化值的偏差 (d)

Fig. 6 Systematic deviation between the absolute gravimeters in 2024 (a) and 2023 (b); the systematic deviation between 6 gravimeters in 2024 and 2023 (c), deviation between the systematic deviation between 6 gravimeters and the benchmark variation values (d)



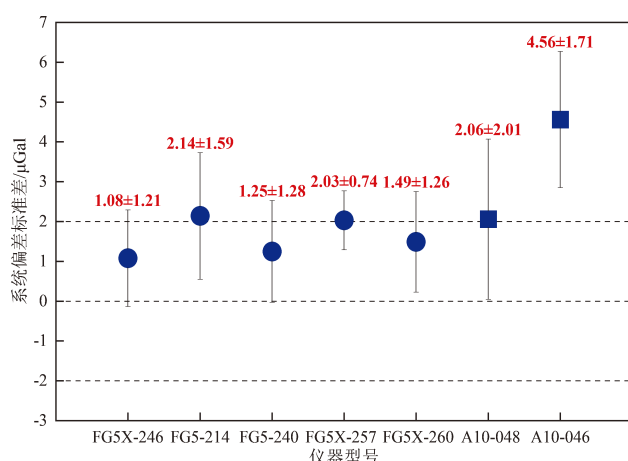


图7 历期比测结果的仪器间系统偏差标准差分布

Fig. 7 Standard deviation distribution of inter-instrument systematic deviation from historical comparison results

## 4 结论

为研究陆态网络测网内绝对重力仪间可能存在的系统性偏差,本文分析了2024年陆态网络10台绝对重力仪的观测数据,采用加权最小二乘平差方法对数据进行统一解算,获得了3个测点的重力标准参考值和各仪器间的系统偏差。综合对比分析了陆态网络历期比测结果,得出如下主要结论:

(1) 2024年陆态网络绝对重力仪比测结果显示,10台绝对重力仪的系统偏差为 $-3.42 \sim 4.5 \mu\text{Gal}$ ,观测精度为 $0.69 \sim 3.38 \mu\text{Gal}$ 。所有仪器状态均较稳定,仪器间系统偏差在数个 $\mu\text{Gal}$ 量级,符合陆态网络项目 $\pm 5 \mu\text{Gal}$ 的设计要求,参与比测的绝对重力仪可用于陆态网络年度流动重力观测任务实施,服务于全网流动重力测量的控制和数据解算。

(2) 2024年和2023年的比测结果显示,同时参加两期比测的6台仪器的系统偏差的变化值与重力基准变化值的偏差为 $-1.31 \sim 3.69 \mu\text{Gal}$ ,6台绝对重力仪均稳定性强,表明武汉重力基准稳定,适合开展各类型的重力比测、仪器测试工作。

(3) 参加陆态网络9期比测的绝对重力仪的仪器间系统偏差全部优于 $5 \mu\text{Gal}$ ,表明测网内使用的绝对重力仪状态均较稳定,有能力识别微小的重力场变化信号。FG5型和FG5X型绝对重力仪稳

定性明显优于A10型,其中FG5X-246和FG5-240型绝对重力仪性能相对最稳定,A10-046型绝对重力仪稳定性相对较差。

尽管陆态网络测网内使用的绝对重力仪系统偏差优于 $5 \mu\text{Gal}$ ,但仪器间互差是客观存在的,如第九期比测中,A10-046与FG5X-259两台绝对重力仪间互差达 $7.92 \mu\text{Gal}$ ;第八期比测中,A10-048与A10-057两台绝对重力仪互差达 $7.35 \mu\text{Gal}$ 。因此,在区域重力监测网中建议采用同台绝对重力仪进行重复观测,不要频繁更换仪器,以尽可能减小仪器间互差对绝对重力基准建立和维持的影响。同时,建议在未来一段时间内,在不同测站绝对重力仪的实际测量结果的基础上,进一步考虑仪器本身存在的系统偏差影响。随着原子绝对重力仪研发的突破和在地震系统业务中的相继投入使用,绝对重力观测技术将在地震监测预报、地球动力学研究中展出更广阔的应用前景。

感谢中国科学院精密测量科学与技术创新研究院、自然资源部第一大地测量队、湖北省地震局、中国地震局第一监测中心等单位提供的绝对重力仪比测数据。

## 参考文献:

- 白磊,张为民,邢乐林,等. 2016. FG5x-246与FG5绝对重力仪比对测量实验[J]. 地理空间信息,14(3):104-106.
- Bai L,Zhang W M,Xing L L,*et al.* 2016. Contrast test of FG5x-246 absolute gravimeter with FG5[J]. Geospatial Information,14(3):104-106. (in Chinese)
- 陈晓东,孙和平,张为民,等. 2013. 用绝对重力仪测定超导重力仪格值的精度分析[J]. 大地测量与地球动力学,33(5):145-149.
- Chen X D,Sun H P,Zhang W M,*et al.* 2013. Accuracy analysis on determination of calibration factor of a superconducting gravimeter using an absolute gravimeter[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,33(5):145-149. (in Chinese)
- 地壳运动监测工程研究中心. 2014. 地壳运动监测技术规程[M]. 北京:中国环境出版社.
- National Earthquake Infrastructure Service. 2014. Technical regulations on crustal movement monitor[M]. Beijing: China Environmental Science Press. (in Chinese)
- 韩建成,陈石,李红蕾,等. 2022. 陆地高精度重力观测数据的应用研究进展[J]. 地球与行星物理理论评,53(1):17-34.
- Han J C,Chen S,Li H L,*et al.* 2022. The recent progress using high -



- precision terrestrial gravity measurements[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 53(1):17–34. (in Chinese)
- 韩宇飞,汪健,徐如刚,等. 2020. 陆态网络重力测网的分形特征与地震监测能力分析[J]. *中国地震*, 36(4):879–887.
- Hang Y F, Wang J, Xu R G, *et al.* 2020. Fractal characteristics and earthquake monitoring capability of the CMONOC Gravity Network[J]. *Earthquake Research in China*, 36(4):879–887. (in Chinese)
- 胡若,吴书清,冯金扬,等. 2020. CCM. G – K2. 2017 关键比对报告[J]. *计量技术*, (5):100–108.
- Hu R, Wu S Q, Feng J Y, *et al.* 2020. Key comparison report of CCM. G – K2. 2017 [J]. *Measurement Technique*, (5):100–108. (in Chinese)
- 黄江培,杜家云,曹颖,等. 2023. 云南流动重力观测中相对重力仪漂移估计方法[J]. *地震研究*, 46(4):511–520.
- Huang J P, Du J Y, Cao Y, *et al.* 2023. The estimation method of the zero drift of the relative gravimeter in high – precision time – varying gravity observation in Yunnan[J]. *Journal of Seismological Research*, 46(4):511–520. (in Chinese)
- 贾剑钢. 2019. 精密重力测量技术及其应用研究[D]. 武汉:武汉大学.
- Jia J G. 2019. Technology and application study on precision gravity measurements[D]. Wuhan: Wuhan University. (in Chinese)
- 申重阳,祝意青,胡敏章,等. 2020. 中国大陆重力场时变监测与强震预测[J]. *中国地震*, 36(4):729–743.
- Shen C Y, Zhu Y Q, Hu M Z, *et al.* 2020. Time – varying gravity field monitoring and strong earthquake prediction on the Chinese Mainland[J]. *Earthquake Research in China*, 36(4):729–743. (in Chinese)
- 孙和平,周江存,徐建桥,等. 2021. 高精度超导重力观测与研究为国家精密测绘和全球地球动力学提供理论基础[J]. *中国科学院院刊*, 36(2):216–223.
- Sun H P, Zhou J C, Xu J Q, *et al.* 2021. High – precision superconducting gravimetric observations and investigations provide national surveying and mapping and Earth's dynamics with theoretical fundamentals[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 36(2):216–223. (in Chinese)
- 孙和平. 2024. 对我国重力学未来发展的几点思考[J]. *中国科学院院刊*, 39(5):881–890.
- Sun H P. 2024. Some reflections on developing trend of gravimetry in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 39(5):881–890. (in Chinese)
- 王嘉沛,张新林,韩宇飞,等. 2022. 2021 年中国大陆构造环境监测网络绝对重力比测结果分析[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 50(9):11–16.
- Wang J P, Zhang X L, Han Y F, *et al.* 2022. Results of comparison of absolute gravimeters from crustal movement observation network of China in 2021[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 50(9):11–16. (in Chinese)
- 王庆宾,吴晓平. 2001. 绝对重力测量值的改正[J]. *测绘学院学报*, 18(3):160–163.
- Wang Q B, Wu X P. 2001. The correction for absolute gravity measurement[J]. *Journal of Institute of Surveying and Mapping*, 18(3):160–163. (in Chinese)
- 吴书清,吉望西,刘达伦,等. 2009. 绝对重力仪国际比对现状[J]. *地球物理学进展*, 24(2):768–773.
- Wu S Q, Ji W X, Liu D L, *et al.* 2009. The status of the international absolute gravimeter comparison[J]. *Progress in Geophysics*, 24(2):768–773. (in Chinese)
- 邢乐林,李辉,李建国,等. 2016. 陆态网络绝对重力基准的建立及应用[J]. *测绘学报*, 45(5):538–543.
- Xing L L, Li H, Li J G, *et al.* 2016. Establishment of absolute gravity datum in CMONOC and its application[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 45(5):538–543. (in Chinese)
- 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[J]. *中国地震*, 36(4):872–878.
- Zhang X L, Han Y F, Wang J, *et al.* 2020. Comparisons of absolute gravimeters measurements from Crustal Movement Observation Network of China during 2010 and 2018[J]. *Earthquake Research in China*, 36(4):872–878. (in Chinese)
- 祝意青,申重阳,刘芳,等. 2020. 重力观测地震预测应用研究[J]. *中国地震*, 36(4):708–717.
- Zhu Y Q, Shen C Y, Liu F, *et al.* 2020. Application of earthquake prediction based on gravity observation[J]. *Earthquake Research in China*, 36(4):708–717. (in Chinese)
- 祝意青,张勇,杨雄,等. 2022. 时变重力在地震研究方面的进展与展望[J]. *地球与行星物理论评*, 53(3):278–291.
- Zhu Y Q, Zhang Y, Yang X, *et al.* 2022. Progress of time – varying gravity in seismic research[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 53(3):278–291. (in Chinese)
- Chen Z H, Chen S, Zhang B, *et al.* 2022. Uncertainty quantification and field source inversion for the continental – scale time – varying gravity dataset: A case study in SE Tibet, China[J]. *Pure Appl Geophys*, 180:683–702.
- Wu S Q, Feng J Y, Li C J, *et al.* 2021. The results of 10th international comparison of absolute gravimeters(ICAG – 2017)[J]. *Journal of Geodesy*, 95(6):1–16.
- Xing L L, Li H, Li J C, *et al.* 2009. Comparison of absolute gravity measurements obtained with FG5/232 and FG5/214 instruments[J]. *Geo – spatial Information Science*, 12(4):307–310.

## Analysis on Systematic Deviation and Observation Accuracy of Absolute Gravimeters in the Crustal Movement Observation Network of China in 2024

ZHU Jie<sup>1</sup>, HAN Yufei<sup>1</sup>, WANG Jiapei<sup>2</sup>, XU Xin<sup>3</sup>, ZHANG Xinlin<sup>2</sup>, BAI Lei<sup>4</sup>, KANG Shengjun<sup>5</sup>

(1. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

(2. Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, Hubei, China)

(3. School of Management, Capital Normal University, Beijing 100089, China)

(4. Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology,  
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, Hubei, China)

(5. The First Geodetic Surveying Brigade of MNR, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

### Abstract

As the number and the type of absolute gravimeters involved in the Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC) continue to increase, there is inconsistency in the calculation benchmark of absolute gravity observation data due to systematic deviations of different gravimeters, which affects the precision of time-varying gravity data calculation. To study the systematic deviation between absolute gravimeters, this article analyzes the concentrated comparison data of 10 absolute gravimeters in the same location in 2024, and uses the weighted least squares adjustment method to uniformly solve the data. Three gravity standard reference values and systematic deviations of each instrument are obtained, and finally, the historical results of the terrestrial network are comprehensively compared and analyzed. Research has shown that: ① The systematic deviation of 10 absolute gravimeters is in the range of  $-3.42 - 4.5 \mu\text{Gal}$ , the observation accuracy is in the range of  $0.69 - 3.38 \mu\text{Gal}$ , and the systematic deviation between instruments is in the order of  $\mu\text{Gal}$  magnitude; ② The deviation of the six instrument systems involved in the comparative measurements in 2023 and 2024 from the gravity reference is between  $-1.31 \mu\text{Gal}$  and  $3.69 \mu\text{Gal}$ . The use of absolute gravimeters for terrestrial network observation has stable performance and is suitable for detecting weak signals of gravity change related to earthquakes. ③ The systematic deviation of all absolute gravimeters involved in 9 terms of the CMONOC measurement is better than  $5 \mu\text{Gal}$ , and the standard deviation of the systematic deviation of gravimeter FG5 and gravimeter FG5X is keeping at around  $2 \mu\text{Gal}$ , while the maximum standard deviation of the systematic deviation of gravimeter A10 is  $4.56 \mu\text{Gal}$ , so the systematic deviation of each instrument should be taken into account in high-precision gravity measurement.

**Keywords:** CMONOC; comparative observation; absolute gravimeter; systematic deviation