



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: RAI-g 量子重力仪野外测试结果分析
作者: 李忠亚, 胡敏章, 张新林, 王嘉沛, 张澳兵
DOI: 10.13203/j.whugis20240156
收稿日期: 2024-11-04
网络首发日期: 2024-11-05
引用格式: 李忠亚, 胡敏章, 张新林, 王嘉沛, 张澳兵. RAI-g 量子重力仪野外测试结果分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20240156>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240156

引用格式：

李忠亚, 胡敏章, 张新林, 等. RAI-g 量子重力仪野外测试结果分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240156 (LI Zhongya, HU Minzhang, ZHANG Xinlin, et al. Analysis of Field Test Results for the RAI-g Quantum Gravimeter[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240156)

RAI-g 量子重力仪野外测试结果分析

李忠亚^{1,2,3,4,5} 胡敏章^{1,4,5} 张新林^{1,4,5} 王嘉沛^{1,4,5} 张澳兵^{1,4,5}

1 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉, 430071

2 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 湖北 武汉, 430077

3 中国科学院大学, 北京, 100049

4 武汉引力与固体潮国家野外科学观测研究站, 湖北 武汉 430071

5 湖北省地震局, 湖北 武汉 430071

摘要：量子重力测量是一种新型的观测技术，具有精度高、连续观测和无格值与漂移误差等特点，展现了在大地测量领域的巨大应用潜力。为评估量子重力仪在野外观测环境下的性能表现，本文采用 RAI-g 量子重力仪在武汉所、九峰和襄樊三个野外重力观测站的观测数据，处理得到重力值及其精度信息，并与 FG5X 绝对重力仪测量结果进行比较。测试结果表明：

(1) RAI-g 量子重力仪在市区和郊区不同噪声环境下均能实现正常连续绝对重力测量，观测过程中数据噪声类型以白噪声为主，重力值的观测精度优于 $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，准确度优于 $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ；(2) RAI-g 重力仪的灵敏度与重力观测站的背景噪声有关，采用位于市区武汉所站的观测数据计算的灵敏度为 $357 \times 10^{-8} \text{ m/(s}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})$ ，郊区的九峰和襄樊两个站则分别是 $72 \times 10^{-8} \text{ m/(s}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})$ 和 $89 \times 10^{-8} \text{ m/(s}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})$ 。RAI-g 量子重力仪在三个重力站均取得了优异的观测结果，但其长期稳定性仍需要更多的测试验证。

关键词：量子重力仪；绝对重力；精度；准确度；阿伦偏差

Analysis of Field Test Results for the RAI-g Quantum Gravimeter

LI Zhongya^{1,2,3,4,5} HU Minzhang^{1,4,5} ZHANG Xinlin^{1,4,5} WANG Jiawei^{1,4,5} ZHANG Aobing^{1,4,5}

1 Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

¹ 收稿日期：2024-11-04

资助项目：国家重点研发计划（2023YFC2907003）；地震科技星火计划（XH24025YC）；国家自然科学基金（42204089）；国家精密重力测量科学中心开放课题（PGMF-2024-Z001）；武汉引力与固体潮国家野外科学观测研究站开放研究基金（WHYWZ202401、WHYWZ202402、WHYWZ202412）

第一作者：李忠亚，博士生，助理研究员，主要从事地球重力场观测、解释和应用研究。
lzy56868@126.com

通讯作者：胡敏章，博士，研究员。huminzhang@126.com

2 Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China.

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Wuhan Gravitation and Solid Earth Tide, National Observation and Research Station, Wuhan 430071, China

5 Hubei Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

Abstract: Quantum gravity observation is a cutting-edge measurement technology that provides high accuracy and continuous observation, and is free from calibration factor and drift errors. This technology showcases immense potential in the field of geodesy. At the current stage, field tests of quantum gravimeters are essential to evaluate their performance in field observational environments. This paper employs the mobile absolute gravity observation method for field testing. The RAI-g quantum gravimeter was used to observe at three field gravity observation stations: Wuhan Institute, Jiufeng, and Xiangfan. The observation data were processed to obtain gravity values and their precision information, and the results were compared with those measured by the FG5X absolute gravimeter. The tests reveal the following two key insights. First, the RAI-g quantum gravimeter is capable of achieving normal continuous absolute gravity observation in urban and suburban vibration environments. White noise dominates the data throughout the observation process, with gravity value observation precision better than $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ and correctness better than $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$. Second, the instrument's sensitivity is found to be influenced by the background noise level of the gravity station. Specifically, the sensitivity calculated from RAI-g gravimeter measurements observed at the Wuhan Institute station located in an urban area is $357 \times 10^{-8} \text{ m/(s}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})$, while the results from Jiufeng and Xiangfan stations in suburban areas exhibit sensitivities of $72 \times 10^{-8} \text{ m/(s}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})$ and $89 \times 10^{-8} \text{ m/(s}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})$, respectively. The RAI-g quantum gravimeter achieved excellent observation results at all three gravity stations, but its long-term stability still requires further testing and validation.

Key words: Quantum gravimeter; Absolute gravity; Precision; Correctness; Allan deviation

新的测量技术可能会带来测量领域的颠覆性变革。量子重力仪，又称冷原子重力仪，是一种新型重力观测仪器。该仪器采用物质波干涉原理进行重力值测量，既能实现绝对重力值测量，又能进行连续重力测量。相比较于传统的激光干涉型绝对重力仪，量子重力仪采用的原子物质波波长短于光波，且其是采用微观原子作为检测质量，无机械摩擦。相比于弹簧型连续重力仪和超导重力仪，量子重力仪能连续实现绝对重力值观测，理论上没有格值和漂移误差。这些特点有利于量子重力仪获取高质量重力观测数据。

1991年，斯坦福大学朱棣文课题组利用钠原子干涉仪实现了绝对重力测量^[1]。随后，量子重力观测技术备受关注，并取得了巨大发展，目前高精度量子重力仪的灵敏度已经达到 $4.2 \times 10^{-8} \text{ m/(s}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})$ ^[2]。国际上，法国 Muquans 公司最早研发了商品化的 AQG 型量子重力仪，其结构紧凑，便于运输，能自动完成连续数据采集，观测精度达到数微伽量级，安静观测环境下仪器灵敏度能达到 $50 \times 10^{-8} \text{ m/(s}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})$ ^[3]。近些年，国内量子重力仪同样发展迅速。中国科学院精密测量科学与技术创新研究院、华中科技大学、浙江大学、浙江工业大学、中国计量院和中国科学技术大学等单位已经成功研制了高精度的量子重力仪^[2,4-8]。2017年第10届国际绝对重力仪比对观测期间，国内部分量子重力仪研发单位携带他们的仪器参加了比对观

测，比对结果显示国内仪器性能与国际水平相当^[9]。尽管目前量子重力仪发展迅速，但该类型仪器绝大多数测试是在实验室条件下完成，导致对于量子重力仪在野外条件下的观测数据质量了解不充分。此外，量子重力仪研制厂家公布的精度等参数需要检验和确认。因此，十分必要开展量子重力仪的野外测试并分析仪器的性能指标，以便认识和评估量子重力仪的野外性能表现，推进仪器迭代升级更新和在大地测量与地球物理等领域应用。

RAI-g 型重力仪（图 1）是一款由华中科技大学研制的高精度、可搬运的量子重力仪，其采用铷原子作为测试质量，能够实现原子物质波干涉和实时数据采集处理，同时具有隔振设备。本文采用 RAI-g 型量子重力仪，在三个重力观测站开展野外流动绝对重力测试，对观测数据进行处理并与同址 FG5X 绝对重力仪观测值进行比较，分析仪器观测重力值的精度、准确度和阿伦偏差等性能指标，最后展望该仪器在大地测量领域的应用前景。

1 RAI-g 量子重力仪测试

精密绝对重力测量通常需要在稳定的观测墩上开展。RAI-g 量子重力仪测试选择的观测场地（图 1）分别为中国地震局地震研究所的绝对重力实验室的重力观测墩（武汉所）、九峰地震台的重力观测墩（九峰）和襄樊地震台的重力观测墩（襄樊）。三个重力观测站是中国地震重力监测网络的基准站，均拥有稳定的观测墩，且采用 FG5(X)绝对重力仪进行重复观测以维持重力基准^[10]。三个站背景噪声存在差别，其中武汉所站位于市区，而九峰站和襄樊站则位于郊区；三个站中武汉所站和九峰站纬度和高程接近，但它们与襄樊站存在差异，三个站绝对重力最大最小值相差接近 $6 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。上述三个重力观测站的优越条件不仅满足精密绝对重力测量要求，而且使它们成为开展 RAI-g 量子重力仪测试的理想场所。

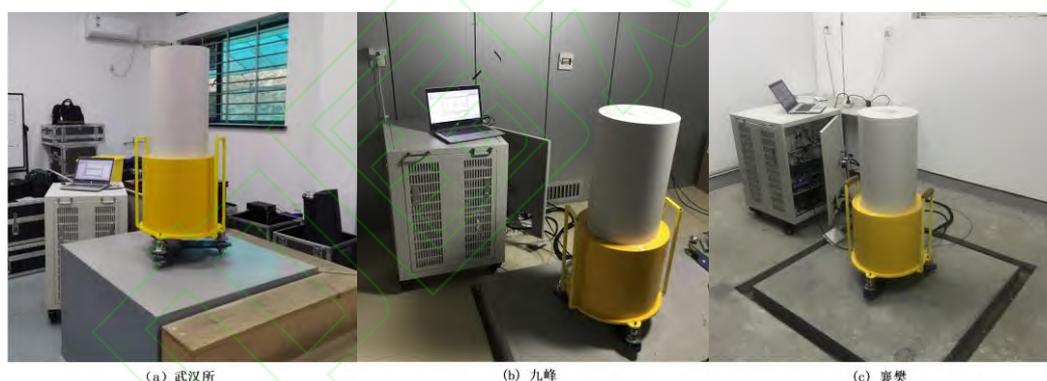


图 1 RAI-g 量子重力仪在武汉所、九峰和襄樊观测站

Fig. 1 RAI-g quantum gravimeter at the Wuhan Institute, the Jiufeng and the Xiangfan observation stations

RAI-g 量子重力仪的测试方案为：在三个重力站首先采用量子重力仪进行观测，然后将观测结果与目前综合性能最好的 FG5X 绝对重力仪结果进行对比，评估量子重力仪观测结果精度和准确度等性能指标。测试工作的观测模式采用绝对重力测量的流动观测模式，即将重力仪运输至一个测站进行观测，结束后再运输至另一个重力站直至观测结束。2020 年 11 月，在三个重力站分别开展了量子重力仪测试。测试顺序为由武汉所站至九峰站，最后在襄樊站结束。测试过程中所有关于 RAI-g 量子重力仪的操作均由厂家技术人员完成。为实现盲测，所有测试流程中仪器操作人员均不知道观测站的先验重力值。

RAI-g 量子重力仪配备有测 g 软件，该软件具有重力测量时序控制、气压等外部环境数据提取、重力数据处理和输出等功能。量子重力仪每 6 s 能完成一次重力加速度测量，且具

备连续观测能力。利用测 g 软件对观测数据进行采集和处理，我们获得了三个重力站的原始重力观测结果（图 2，每个站所有重力观测值均减去了常数）。RAI-g 量子重力仪在三个重力站能实现连续绝对重力测量。各重力站观测时间从 3 h 至 15.2 h 不等，但所有站点的观测结果均能清晰显示重力固体潮信号。

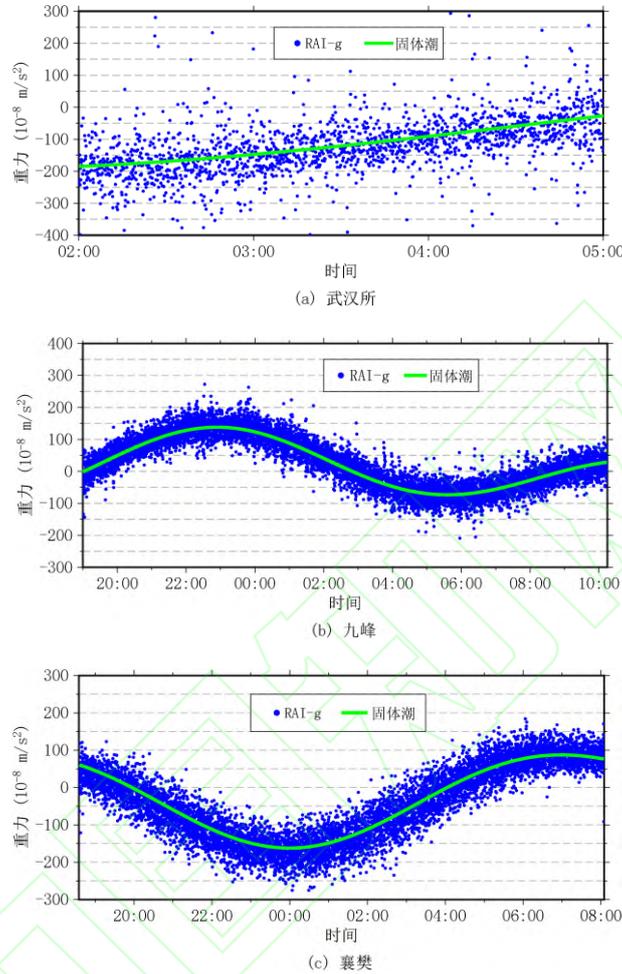


图 2 RAI-g 量子重力仪原始观测结果，蓝点表示量子重力仪每次绝对重力测量值（均减去了常数），绿线表示 Eterna 软件计算的固体潮信号

Fig.2 Raw observational results of RAI-g quantum gravimeter. Blue dots represent the absolute gravity observations of the quantum gravimeter (each minus a constant value), while the green line represents the solid Earth tide signal calculated by the Eterna software.

2 测试结果分析

RAI-g 量子重力仪在三个重力站原始观测结果（图 2）经潮汐、气压和极移等补偿后可得改正后的观测结果（图 3，所有结果均减去了常数）。图 3 展示的三个重力站观测结果分布的密集程度存在差异，九峰站重力观测值分布最为密集，襄樊站次之，武汉所站最离散。这种分布差异与重力站背景振动噪声有关。武汉所站位于武汉市区，站点周边车辆和人员活动频繁，背景噪声大。襄樊站尽管位于襄阳市郊区，但站点附近车辆和人员活动较为频繁。而九峰站位于山洞内部，站点周围 500 m 范围内没有显著的人为活动，属于安静的观测站。

用于精密绝对重力测量的重力仪需要有较好的地面振动误差抑制性能。固定在地表的重力仪进行绝对重力测量过程中，地面振动会导致重力仪处于非惯性系中，且重力仪测量的重力加速度和地面振动加速度无法区分，这会引入地面振动误差。基于物质波干涉

原理的量子重力仪测量绝对重力时，地面振动会引起拉曼光反射镜的波动，改变激光和自由下落原子的相对位置，从而将地面振动误差传入观测结果。RAI-g 量子重力仪抑制地面振动误差的策略是：采用加速计观测的地面振动对重力观测结果进行补偿。图 3 显示的结果表明，无论是市区背景噪声较大观测站还是郊区安静观测站，RAI-g 量子重力仪均能实现正常连续绝对重力测量，但观测环境安静的台站测量结果分布更加密集。

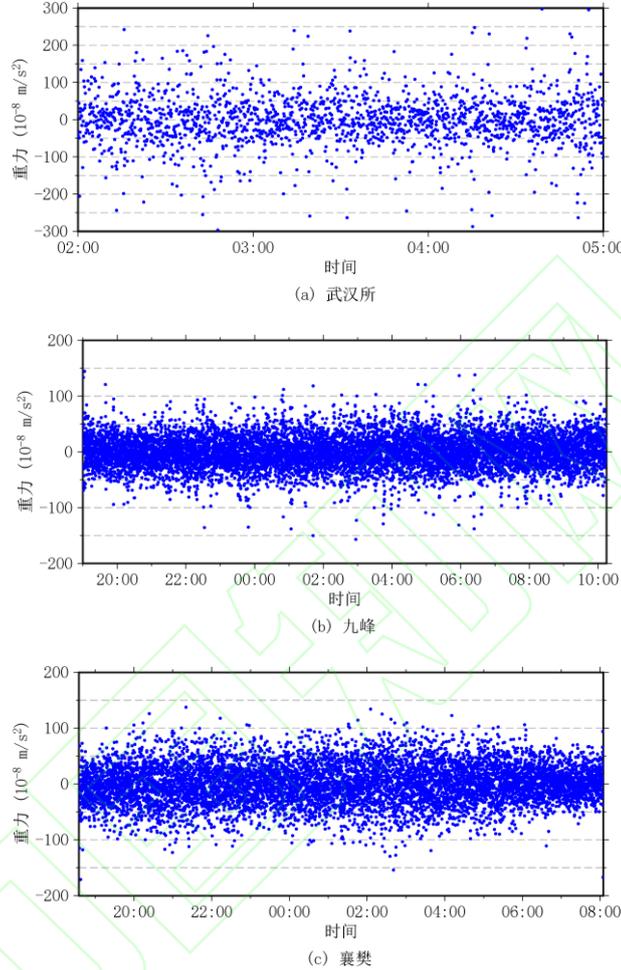


图 3 RAI-g 量子重力仪改正后的观测结果（均减去了常数）

Fig. 3 Corrected observational results of RAI-g quantum gravimeter (each minus a constant value).

为评估 RAI-g-001 量子重力仪观测得到的重力值与三个重力站重力值的参考值之间的差异，我们搜集了三个重力站其他类型绝对重力仪的观测值。三个重力站重复绝对重力测量通常采用 FG5、FG5X 和 A10 三款绝对重力仪观测。A10 绝对重力仪观测精度比 FG5(X)重力仪结果低一个量级；而 FG5X 绝对重力仪是 FG5 绝对重力仪的升级版，其观测结果具有更小的离散度和更高精度，是目前综合性能最好和广泛使用的绝对重力仪^[9, 11-12]。因此，我们选择三个重力站 FG5X 绝对重力测量值来代表重力站重力值的参考值。武汉所站 FG5X 绝对重力仪观测数据是在 RAI-g 重力仪观测结束后立即采集完成，九峰站和襄樊站则分别是 2019 年 9 月和 6 月观测的数据。图 4 为 FG5X 绝对重力仪在三个重力观测站每次下落重力值分布。该结果已经进行了潮汐、气压和极移改正，并采用实测重力垂直梯度归算至 RAI-g 量子重力仪的绝对重力值测量的高度，同时所有结果均减去了常数。

由于九峰站和襄樊站 FG5X 绝对重力仪与 RAI-g 量子重力仪观测时间存在十多月间隔，

两种仪器观测结果比较时需要考虑陆地水储量变化引起的重力变化^[13]。我们利用 GLDAS/NOAH 模型数据，采用负荷理论计算了 2019 年 6 月至 2020 年 11 月上述两个站水文环境变化引起的重力变化（图 5）。图 5 表明两个站水文环境变化引起的重力变化幅度较小，最大最小值之差小于 $3 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。FG5X 绝对重力仪观测至 RAI-g 量子重力仪观测间隔的时间内，九峰站和襄樊站重力变化分别为 $1.26 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 和 $1.02 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

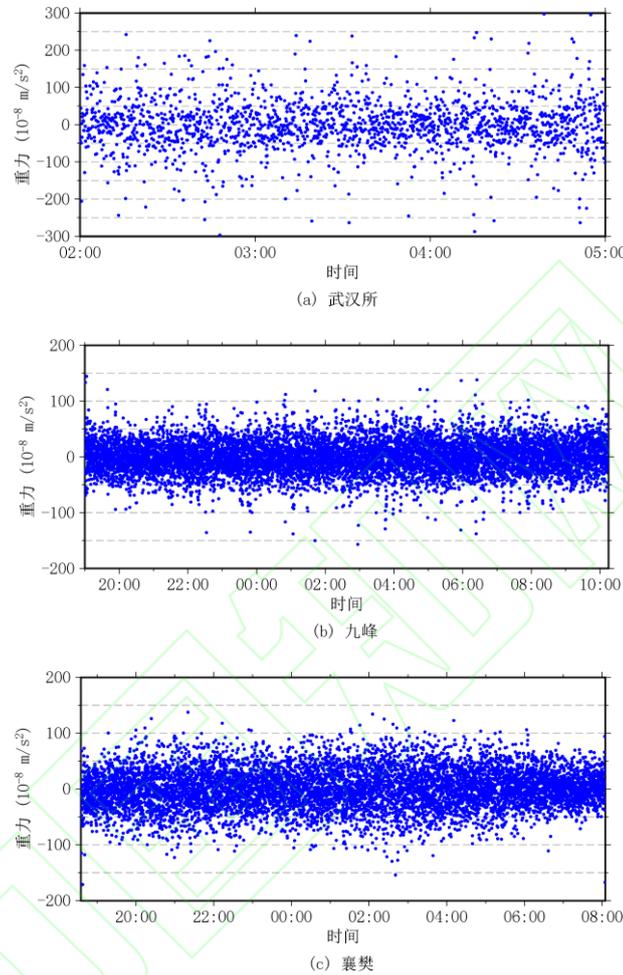


图 4 FG5X 绝对重力仪观测结果（均减去了常数）

Fig.4 Observational results of FG5X absolute gravimeter (each minus a constant value).

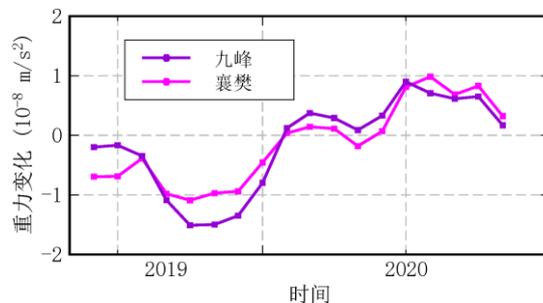


图 5 采用 GLDAS/NOAH 水文模型（土壤湿度和雪深）计算的九峰站（紫线）和襄樊站（洋红线）重力变化

Fig.5 Gravity changes calculated from the GLDAS/NOAH hydrological model (soil moisture and snow depth) at Jiufeng Station (purple line) and Xiangfan Station (magenta line).

RAI-g 量子重力仪和 FG5X 绝对重力仪在三个重力站观测结果见表 1，表中的两种类型重力仪观测结果均进行了相关处理。其中量子重力仪结果是首先从图 3 展示的观测数据中剔除超过 3 倍观测数据序列标准差的数据（表 1 中拒绝观测数），然后将剩余数据（表 1 中接收观测数）的平均值及其中误差作为重力仪观测的测站重力值及其精度。FG5X 重力仪观测数据采用 g9 软件处理，策略与量子重力仪类似。FG5X 重力仪观测数据处理得到的重力值加上图 5 中水文引起的重力变化即为量子重力仪观测时重力站重力值的参考值，表 1 中两种类型重力值结果均减去了每个重力站重力值的参考值。

由表 1 可知，RAI-g 量子重力仪在三个重力站观测的重力值精度均优于 $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，特别是在九峰站和襄樊站精度分别达到了 $0.29 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 和 $0.44 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。量子重力仪观测得到的重力值精度与仪器每次观测数据总体分布的密集程度和总观测数有关。图 3 显示的三个重力站中，量子重力仪观测结果分布均较为密集，且均实现了数千次正常绝对重力测量。RAI-g 量子重力仪精度测试结果表明该仪器的观测精度达到了数微伽量级。

本文中采用准确度来评估量子重力仪的系统误差。量子重力仪准确度定义为重力站绝对重力参考值与重力仪观测绝对重力值之差。由表 1 可得量子重力仪在武汉所站、九峰站和襄樊站测试结果的准确度分别为 $1.70 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 、 $-2.06 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 和 $7.35 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。上述结果表明 RAI-g 量子重力仪准确度优于 $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

表 1 RAI-g 量子重力仪和 FG5X 绝对重力仪观测结果

Tab.1 Observational results of RAI-g quantum gravimeter and FG5X absolute gravimeters

观测站	时间	仪器	重力 (10^{-8} m/s^2)	接收观测数	拒绝观测数
武汉所	2020.11.17	RAI-g-001	-1.70 ± 1.83	1767	33
	2020.11.20-2020.11.22	FG5X-259	0 ± 0.95	3784	16
九峰	2020.11.27-2020.11.28	RAI-g-001	2.06 ± 0.29	9067	70
	2019.09.19-2019.09.21	FG5X-259	0 ± 0.18	8973	27
襄樊	2020.11.29-2020.11.30	RAI-g-001	-7.35 ± 0.44	8054	33
	2019.06.06-2019.06.07	FG5X-246	0 ± 0.18	2451	49

3 讨论

RAI-g 量子重力仪观测结果中粗差和偶然误差分布是评估仪器性能的重要依据。我们将每次观测结果与平均值之差超过 3 倍观测数据序列标准差的观测视作含有粗差的结果。由表 1 可知，RAI-g 重力仪在武汉所站、九峰站和襄樊站包含粗差观测数占总观测数之比分别为 18‰、8‰和 4‰，三个重力站 FG5X 重力仪结果分别为 4‰、3‰和 19.6‰。RAI-g 重力仪包含粗差的观测结果占比均小于 2%，且与 FG5X 绝对重力仪观测结果中粗差比例相当，这些优异表现说明该仪器具有较好抵抗粗差的能力。

我们假设 RAI-g 量子重力仪在三个重力站观测数据剔除粗差后，剩余数据不存在系统误差。图 6 为根据剩余观测数据绘制的观测数据误差分布直方图，图中横轴表示每次观测数据误差（每次观测数据与平均值之差），纵轴为对应区间观测数据数量。由图 6 可知，量子重

力仪武汉所站误差绝对值均小于 $400 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，九峰站和襄樊站则分别小于 $100 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 和 $120 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ；三个重力站误差绝对值较小观测数据数量大于误差绝对值大的观测数据；三个重力站正负误差分布大致对称；武汉所站、九峰站和襄樊站所有观测数据误差之和分别为 $1.1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 、 $0.13 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 和 $-0.03 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，与误差正负变化范围相比误差之和基本接近 0。上述结果表明 RAI-g 量子重力仪在三个重力站观测数据误差分布基本满足偶然误差统计特性。

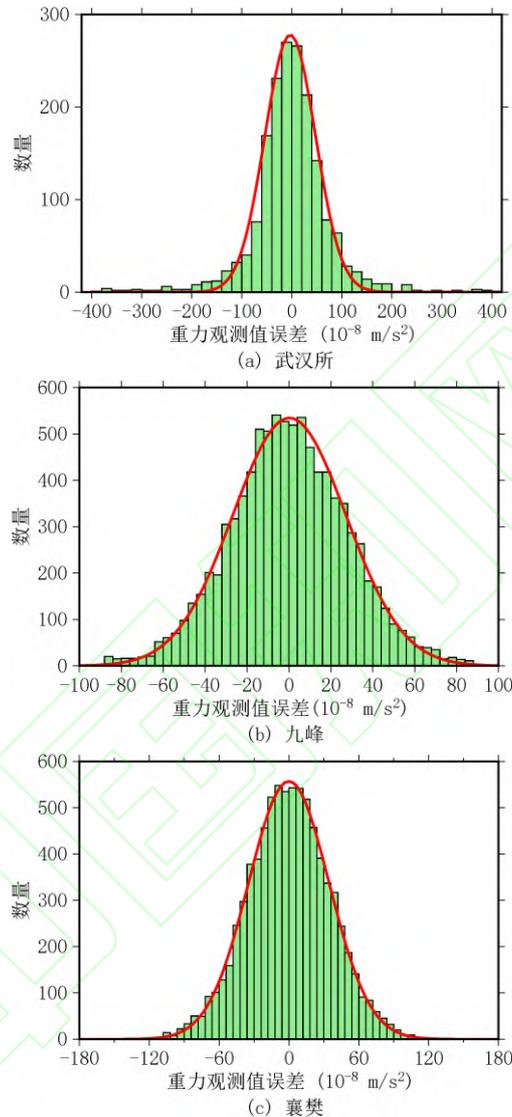


图 6 RAI-g 量子重力仪观测数据误差分布直方图

Fig.6 Histogram of observational data errors for RAI-g quantum gravimeter.

RAI-g 量子重力仪的一大优势是能够连续进行绝对重力测量。重力仪连续观测数据的稳定性是影响观测结果质量的重要依据。为分析量子重力仪观测过程中的稳定性，我们计算了三个重力站观测数据的阿伦偏差（图 7）。我们采用图 7 中阿伦偏差结果拟合了 RAI-g 量子重力仪在武汉所、九峰和襄樊站观测结果的分辨率分别为 $357 \times 10^{-8} \text{ m}/(\text{s}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})$ 、 $72 \times 10^{-8} \text{ m}/(\text{s}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})$ 和 $89 \times 10^{-8} \text{ m}/(\text{s}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})$ ，即三个重力站观测精度要达到 $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 所需要的观测时间分别为 35.40 h、1.44 h 和 2.20 h。RAI-g 量子重力仪的分辨率在三个重力站不一致，结合图 3 观测结果分布和图 6 误差分布直方图可知，重力仪分辨率与观测站背景环境振动有关，观测站测量结果离散度越大对应的分辨率越低。由图 7 中阿伦偏差曲线可知，三个站阿

阿伦偏差随时间增加而不断减小,这说明 RAI-g 量子重力仪重力观测过程中白噪声为主要噪声类型。尽管 RAI-g 量子重力仪在背景噪声不一样的台站分辨率存在差别,但所有三个重力站连续观测数据不存在显著有色噪声,仪器测量过程中具有较好稳定性。

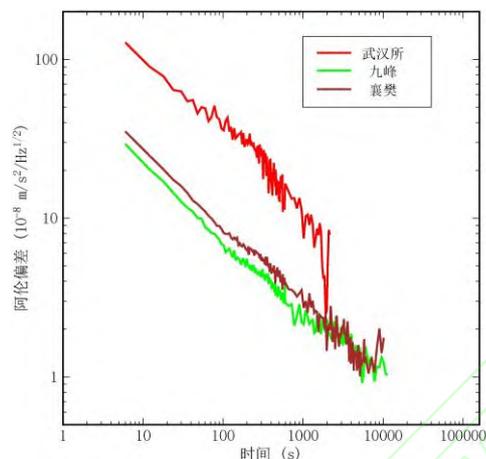


图 7 RAI-g 量子重力仪观测数据的阿伦偏差

Fig.7 Allan deviation of observational data for RAI-g quantum gravimeter.

RAI-g 量子重力仪观测结果中含有的系统误差是决定仪器性能的重要因素。本文中采用 FG5X 绝对重力仪观测结果作为参考值,将量子重力仪观测结果与其比较得到准确度来衡量量子重力仪系统误差大小。多次国际绝对重力仪比对观测结果和陆态网络绝对重力基准观测结果均表明,FG5(X)绝对重力仪之间不存在显著系统性偏差^[9,11-12,14-15]。国内绝对重力仪比对观测结果显示,本文中使用 FG5X-246 和 FG5X-259 两台绝对重力仪与其它编号 FG5(X)绝对重力仪比对观测重力值之差绝对值不超过 $4 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ^[16-17]。因此,采用本文中 FG5X-246 和 FG5X-259 两台绝对重力仪在三个重力站观测值作为重力参考值合理。RAI-g 量子重力仪台站测试顺序为武汉所站至九峰站,最后为襄樊站。武汉所站至九峰站路程约 19 km,而九峰站至襄樊站路程约 331 km。尽管武汉所站重力值精度是三个台站最低,但其准确度结果与九峰站相当,且优于襄樊站结果。量子重力仪经过短途运输,其准确度没有显著变化,但经过长距离运输至襄樊站,其准确度指标低于未长距离运输观测结果。本文测试结果表明,量子重力仪经过长距离运输后,其观测结果准确度略微下降,但仍然优于 $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

大地测量对于重力测量精度的要求可以分为毫伽量级和微伽量级两类。本文中 RAI-g 量子重力仪测试结果显示其观测精度优于 $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,能满足大地水准面建立、精密水准测量中重力改正和均衡重力异常等领域毫伽级重力观测精度要求。微伽级重力观测数据常用于地表及内部质量迁移导致的重力变化研究,量子重力仪的精度指标展示了在时变重力领域应用的较大潜力。需要注意的是,时变重力通常需要几年甚至几十年重力观测资料,重力仪本身的稳定性对于观测结果的影响较大。上面对于量子重力仪稳定性分析仅限于仪器观测过程中,在更长时间内仪器的稳定性需要后续长期测试来确定。

4 结语

本文采用 RAI-g 量子重力仪,分别在背景噪声不同的武汉所、九峰和襄樊三个重力站开展了流动绝对重力测量,利用观测数据计算了每个重力站重力值及其精度、准确度和阿伦偏差,并将观测结果与每个站 FG5X 绝对重力测量结果对比分析。测试分析结果表明,RAI-g 量子重力仪在三个重力站均能实现正常绝对重力测量,绝对重力测量值的平均值精度均优于 $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,准确度均优于 $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。三个站阿伦偏差结果表明,量子重力仪观测数据以白噪声为主要噪声类型,观测过程中仪器具有较好稳定性。量子重力仪观测数据在三个站计算的分分辨率存在差异,背景噪声较大的武汉所站分辨率最差,为 $357 \times 10^{-8} \text{ m/(s}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})$,位于

郊区的九峰和襄樊两个站结果分别约是武汉所站的 1/4 和 1/5，台站背景噪声制约仪器分辨率。RAI-g 量子重力仪能满足毫伽级精度重力观测要求，并且在微伽量级的时变重力应用领域展现了较大潜力。

参考文献

- [1] Kasevich M, Chu S. Measurement of the gravitational acceleration of an atom with a light-pulse atom interferometer[J]. *Applied Physics B*, 1992, 54: 321-332.
- [2] Hu Zhongkun, Sun Buliang, Duan Xiaochun, et al. Demonstration of an ultrahigh-sensitivity atom-interferometry absolute gravimeter[J]. *Physical Review A*, 2013, 88(4): 043610.
- [3] Ménot V, Vermeulen P, Le Moigne N, et al. Gravity measurements below 10^{-9} g with a transportable absolute quantum gravimeter[J]. *Scientific reports*, 2018, 8(1): 12300.
- [4] Zhou Lin, Xiong Zongyuan, Yang Wei, et al. Measurement of local gravity via a cold atom interferometer[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(1): 013701.
- [5] Huang Panwei, Tang Biao, Chen Xi, et al. Accuracy and stability evaluation of the 85Rb atom gravimeter WAG-H5-1 at the 2017 International Comparison of Absolute Gravimeters[J]. *Metrologia*, 2019, 56(4): 045012.
- [6] Wu Bin, Wang Zhaoying, Cheng Bing, et al. The investigation of a μ Gal-level cold atom gravimeter for field applications[J]. *Metrologia*, 2014, 51(5): 452.
- [7] Fu Zhijie, Wu Bin, Cheng Bing, et al. A new type of compact gravimeter for long-term absolute gravity monitoring[J]. *Metrologia*, 2019, 56(2): 025001.
- [8] Wang Shaokai, Zhao Yang, Zhuang Wei, et al. Shift evaluation of the atomic gravimeter NIM-AGRb-1 and its comparison with FG5X[J]. *Metrologia*, 2018, 55(3): 360.
- [9] Wu Shuqing, Feng Jinyang, Li Chunjian, et al. The results of 10th international comparison of absolute gravimeters (ICAG-2017)[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(6): 63.
- [10] Wang Jiawei, Zhang Xinlin, Zhang Yi, et al. Analysis of gravity variation vertical crustal deformation at Wuhan Jiufeng seismic station[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 964-971. (王嘉沛, 张新林, 张毅等. 武汉九峰地震台重力变化与地壳垂直形变分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2022, 47(6): 964-971.)
- [11] Niebauer T M, Billson Ryan, Ellis Brian, et al. Simultaneous gravity and gradient measurements from a recoil-compensated absolute gravimeter[J]. *Metrologia*, 2011, 48(3), 154.
- [12] Jiang Z, Pálinkás V, Arias F E, et al. The 8th International Comparison of Absolute Gravimeters 2009: the first Key Comparison (CCM. G-K1) in the field of absolute gravimetry[J]. *Metrologia*, 2012, 49(6): 666.
- [13] Huang Yapeng, Hu Minzhang, Hao Hongtao. Influence of hydrometeorological factors on mobile gravity variation in the Northern Xinjiang, China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(1): 85-92.
- [14] Pálinkás V, Wziontek H, Vařko M, et al. Evaluation of comparisons of absolute gravimeters using correlated quantities: reprocessing and analyses of recent comparisons[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95: 1-23.
- [15] Xing Lelin, Li Hui, Li Jianguo, et al. Establishment of absolute gravity datum in CMONOC and its application[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016,45(5):538-543. (邢乐林, 李辉, 李建国, 等. 陆态网络绝对重力基准的建立及应用[J]. *测绘学报*, 2016,45(5):538-543.)
- [16] Zhang Xinlin, Han Yufei, Wang Jian, et al. Comparisons of absolute gravimeters measurements from crustal movement observation network of China during 2010 and 2018[J]. *Earthquake*

Research in China, 2020, 36(4): 872-878. (张新林, 韩宇飞, 汪健, 等. 2020–2018 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, 2020, 36(4): 872-878.)

[17] Li Zhongya, Wang Yong, Xing Lelin, et al. Investigating the Causes of a Rapid Gravity Decrease at the Luzhou Observatory[J]. Pure and Applied Geophysics, 2024, 181: 467-477.

网络首发:

标题: RAI-g 量子重力仪野外测试结果分析

作者: 李忠亚, 胡敏章, 张新林, 王嘉沛, 张澳兵

收稿日期: 2024-11-04

DOI:10.13203/j.whugis20240156

引用格式:

李忠亚, 胡敏章, 张新林, 等. RAI-g 量子重力仪野外测试结果分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240156 (LI Zhongya, HU Minzhang, ZHANG Xinlin, et al. Analysis of Field Test Results for the RAI-g Quantum Gravimeter[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240156)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

垂线偏差对 CHZ- II 重力仪稳定平台姿态精度的影响

安文, 许江宁, 吴苗, 李峰

武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(3): 381-387.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190093>

FG5 绝对重力仪观测数据的实测重力潮汐改正

田桂娥, 陈晓东, 吴书清, 孙和平, 白磊, 桑鹏, 牛晓伟

武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(6): 870-878.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180472>

武汉九峰地震台重力变化与地壳垂直形变分析

王嘉沛, 张新林, 张毅, 李忠亚, 胡敏章, 申重阳

武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(6): 964-971.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220157>