



## 流动式相对重力仪的研制与应用

张 寒, 朱学毅, 缙小路, 吴 畏, 仇 恺, 高 峰

### Development and application of mobile relative gravimeter

Zhang Han, Zhu Xueyi, Gou Xiaolu, Wu Wei, Qiu Kai, and Gao Feng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2024-009>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### CG-5重力仪零漂特性与温度变化的关系分析

Analysis of the relationship between the zero drift characteristics and the temperature change of CG-5 gravimeter

地震科学进展. 2020(6): 14–17

#### 地震重力观测技术的新发展方向：绝对重力与重力梯度一体化观测

The new development direction of seismic gravity observation technology: Integrated measuring of absolute gravity and vertical gravity gradient

地震科学进展. 2023, 53(2): 49–56

#### 基于重力观测的巴颜喀拉块体强震震级模拟分析

Simulation analysis of strong earthquake magnitude in Bayankala block based on gravity observation

地震科学进展. 2021(11): 481–488

#### 泉州地震台g-Phone重力仪观测资料干扰因素分析

Analysis of interference factors of g-Phone gravimeter observation data at Quanzhou seismic station

地震科学进展. 2023(4): 159–164

#### 山东重力网建设综述与优化设计

Construction review and optimization design of Shandong gravity network

地震科学进展. 2022(5): 215–221

#### 上海地震流动观测台综合伺服系统的研发

Research and development of integrated servo system for Shanghai seismic mobile observatory

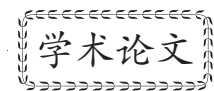
地震科学进展. 2021(10): 467–471



关注微信公众号，获得更多资讯信息

张寒, 朱学毅, 缙小路, 等. 流动式相对重力仪的研制与应用 [J]. 地震科学进展, 2024, 54(7): 466-470. doi:10.19987/j.dzkkjz.2024-009

Zhang H, Zhu X Y, Gou X L, et al. Development and application of mobile relative gravimeter[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(7): 466-470. doi:10.19987/j.dzkkjz.2024-009



## 流动式相对重力仪的研制与应用

张 寒<sup>\*</sup> 朱学毅 缙小路 吴 畏 仇 恺 高 峰

(天津航海仪器研究所, 天津 300131)

**摘要** 地球重力场信息是进行地球物理研究的重要基础数据, 对我国具有重要意义。作为陆上高精度重力测量的核心仪器, 流动式相对重力仪因其技术门槛高, 国内市场长期被国外产品所垄断。天津航海仪器研究所依托掌握的金属零长弹簧制备核心技术, 成功研制出流动式相对重力仪, 成为国内极少数掌握该项技术的单位, 可全面满足包括陆上重力基线场在内的野外测量作业要求。由天津航海仪器研究所研制的流动式相对重力仪通过了国内最具权威用户组织中国地震局的入网测评, 实测重复性标准差为 3.1  $\mu\text{Gal}$ , 精度为 3.5  $\mu\text{Gal}$ , 分辨力优于 1  $\mu\text{Gal}$ , 整体性能达到国际先进水平。

**关键词** 相对重力仪; 重力测量; 零长弹簧; 设备入网测试

中图分类号: P315.62 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2024)07-0466-05

doi: 10.19987/j.dzkkjz.2024-009

## Development and application of mobile relative gravimeter

Zhang Han, Zhu Xueyi, Gou Xiaolu, Wu Wei, Qiu Kai, Gao Feng

(Tianjin Navigation Instrument Research Institute, Tianjin 300131, China)

**Abstract** The information of Earth gravity field is an important basic data for geophysical research, and is of great significance to China. As a core equipment for land high precision measurement, mobile relative gravimeter's technical threshold is high, and the domestic market has been monopolized by foreign products for a long time. Based on the core technology of metal zero-length spring preparation, Tianjin Navigation Instrument Research Institute has successfully developed mobile relative gravimeter, which has become one of the few units in China that have mastered this technology and can fully meet the requirements of field measurement operations, including the terrestrial gravity baseline field. Mobile relative gravimeter developed by Tianjin Navigation Instrument Research Institute passed equipment admittance testing of China Earthquake Administration, the most authoritative user organization in China. The measured repeatability standard deviation is 3.1  $\mu\text{Gal}$ , the accuracy is 3.5  $\mu\text{Gal}$ , and the resolution is better than 1  $\mu\text{Gal}$ . Its performance reached the international advanced level.

**Keywords** relative gravimeter; gravity measurement; zero-length spring; equipment admittance testing

收稿日期: 2024-01-07; 采用日期: 2024-05-13。

基金项目: 天津市军民融合科技重大专项(19ZXJRGX00030)资助。

<sup>\*</sup> 通信作者: 张寒(1998-), 男, 助理工程师, 主要从事重力测量技术的研究。E-mail: zh\_email1101@163.com。



0 引言

相对重力仪是用于精确测量地球各点之间重力加速度相对变化量的精密仪器，是获取地球重力场信息的核心仪器。高精度相对重力仪可以为地球重力场测量和地球物理基础理论研究提供更加准确和全面的数据，也可以为石油和金属矿藏的重力勘探提供更加高效和可靠的方法。此外，重力仪测得的重力场信息对于卫星的发射和精确观测也有着重要的作用<sup>[1-3]</sup>。因此，各国高度重视地球重力场信息的获取和利用，重力仪的重要性日益突出。

零长弹簧技术方案是国内外相对重力仪所使用的主流技术方案，按照零长弹簧材质可分为石英零长弹簧和金属零长弹簧，国际上这两类技术方案的典型产品分别为加拿大 Scintrex 公司研发的 CG-6 重力仪和美国 ZLS 公司研发的 Burris 金属零长弹簧自动重力仪<sup>[4]</sup>。流动式相对重力仪是天津航海仪器研究所研制的一款便携式高精度相对重力仪，具有数字化、智能化和自动化等特点，可实现一键式操作。实物图见图 1，规格参数见表 1。

该型重力仪采用具有自主知识产权的零长弹簧重力传感器技术方案，提高了重力测量的精度和稳定性。该型重力仪的直接测程达 8 000 mGal，不需要根据实际情况调整测程，极大地提高了设备使用的便利性，具体技术指标如表 2 所示。针对野外工程作业，重力仪提出自适应的水平控制算法，增强了对野外恶劣环境的适应性。在人机交互方面设计了专用的重力数据后处理软件，提供友好的人机交互界面，便于数据处理和质量评估。此外，该型重力仪的核心零部件均由天津航海仪器研究所研发，实现了从测量原理到敏感元件全部核心技术的自主可控，为我国在重力测量领域的发展增添了一块重要拼图。

1 基本工作原理

该型重力仪使用自研金属零长弹簧作为重力敏感元件，当重力发生变化时，弹簧敏感重力变化量产



图 1 天津航海仪器研究所研制的流动式相对重力仪实物图  
Fig. 1 Physical diagram of mobile relative gravimeter developed by Tianjin Navigation Instrument Research Institute

表 1 流动式相对重力仪规格参数  
Table 1 Specification parameters of mobile relative gravimeter

尺寸	重量/kg	续航/h
265 mm(长)×265 mm(宽)×355 mm(高)	< 10	≥14

生长度变化，经电容位移传感器转换为电信号，控制反馈回路产生相应反向输出电压，使电磁力矩器产生平衡电磁力，保持弹性系统处于零位平衡状态，实现零位闭环控制，最后通过对伺服反馈电流值进行后续计算处理实现重力测量，所使用的清晰原理和简洁结构能够有效地提高重力测量的精度和稳定性。重力测量原理图见图 2。

在重力仪的重力敏感器中，零长弹簧的使用提高了测量的精度和稳定性。零长弹簧是一种经过特殊处理后带有预载力的精密弹簧，因其具有高稳定性和高分辨率的特点，成为重力测量使用的最佳敏感元件。零长弹簧作为重力仪的核心敏感元件可以实现更加精准的控制和调节，其较强的弹性恢复力和对外力的抗干扰能力可以直接提高重力仪的测量

表 2 流动式相对重力仪技术指标表  
Table 2 Technical data table of mobile relative gravimeter

重力仪名称	技术指标				
	零长弹簧类型	观测精度/ $\mu\text{Gal}$	读数分辨率/ $\text{mGal}$	直接测程/ $\text{mGal}$	残余漂移/ $(\mu\text{Gal}\cdot\text{d}^{-1})$
流动式相对重力仪	恒弹合金	< 5	0.001	8 000	≤20
CG-6自动测量重力仪 <sup>[5]</sup>	熔融石英	< 5	0.000 1	8 000	≤20
Burris自动重力仪 <sup>[6]</sup>	恒弹合金	≤3	0.000 1	50(总测程 7 000)	≤10

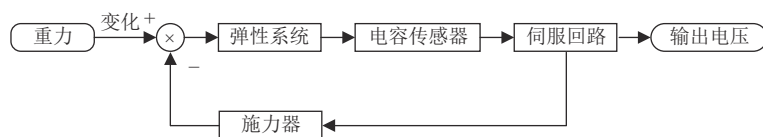


图2 重力测量原理图

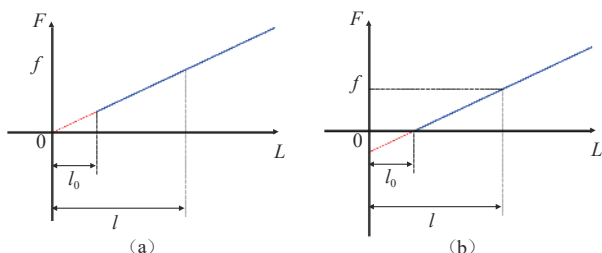
Fig. 2 The principle diagram of gravity measurement

效率(图3)。

在特定的制备工艺下,零长弹簧的弹性系数与长度成正比。当弹簧一端被固定,另一端悬挂一个质量为  $m$  的重物时,弹簧被拉伸,其拉伸长度为  $\Delta l$ ,此时弹簧的弹性力  $F$  和物体的重力  $mg$  达到平衡。重物受到地球的自转、潮汐、地震等因素的影响,物体的重力发生变化,弹簧的弹性力与重力之间的平衡被打破,由于重物质量恒定,可计算出重力的变化:

$$\Delta g = \frac{k\Delta l}{m} \quad (1)$$

式中,  $k$  是零长弹簧的弹性系数。

图3 零长弹簧(a)和正长弹簧(b)的  $F$ - $L$  关系图Fig. 3 The  $F$ - $L$  diagram of zero-length spring (a) and positive-length spring (b)

此外,为了减小设备运动过程中的震动和冲击对仪器测量造成的影响,重力敏感器采用了拉丝定中方案限制检测质量的运动自由度。当检测质量处于稳定状态时,水平的拉丝系统不会产生竖直方向的分力;当设备运动时,检测质量由于受到震动和冲击,在竖直方向上产生微小位移,平衡状态被破坏,拉丝系统受到拉力和扭矩作用后对检测质量施加反向的力和力矩,使其恢复平衡状态。

整个弹性系统的刚度由零长弹簧和拉丝系统共同组成:

$$K = K_s + K_t \quad (2)$$

式中,  $K_s$  是零长弹簧的刚度,  $K_t$  是拉丝系统在竖直方向上的刚度。对其进行合理的理论计算设计弹性系统各部分参数,使得敏感器分辨力达到一定指标,具备高精度重力测量的能力。

为了准确地测量零长弹簧因重力变化所产生的微小位移,重力仪采用了差分式电容位移传感器。差分式电容位移传感器由3块平行的金属板组成,动极板可沿垂直面移动,当金属板之间的距离发生变化时,他们之间的电容也会发生变化,这个变化可以通过电路转换为电信号,从而反映出位移的大小。差分式电容位移传感器相比于普通的电容位移传感器具有更高的灵敏度和更小的非线性误差,可以更加精确地检测零长弹簧的位移变化。通过对电信号的后续计算处理,重力仪可以实现重力测量(图4)。

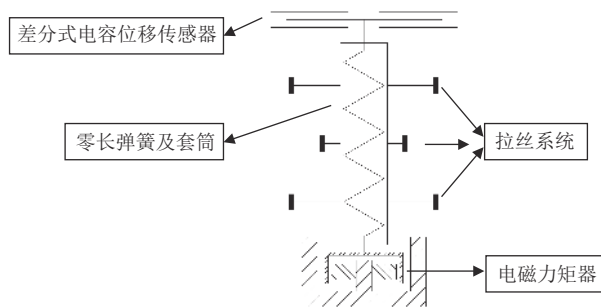


图4 重力敏感器结构简图

Fig. 4 Structure diagram of the gravity sensor

重力仪所测得的重力测量值包含自身误差以及测区地形、位置、固体潮汐等,输出值并不能直接反映出测点的真实重力值,需要对其进行一系列的补偿处理才能得到准确的相对重力值<sup>[7]</sup>。

补偿处理包括滤波、固体潮改正、温度校正、倾斜改正和零位漂移改正(图5)。滤波去除重力信号中的噪声和干扰,提高信噪比;固体潮改正消除月球和太阳对地球引力的周期性影响,使重力值更加稳定;温度校正消除温度变化对重力敏感器的影响;倾斜改正消除重力仪的倾斜角度对重力测量的影响,使重力测量值更加精确;零位漂移改正为了消除重力仪的零位漂移对重力测量的影响,使重力值更加稳定。通过这些补偿处理后,重力仪得到测点的相对重力值,完成高精度的重力测量。

## 2 设备性能测试

流动式相对重力仪在武汉中心地震台和庐山重



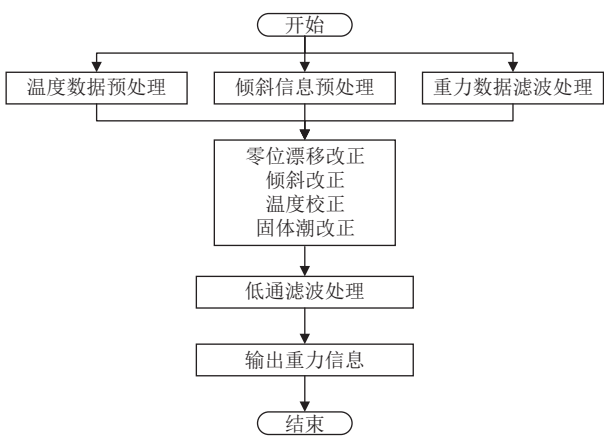


图 5 重力测量数据处理流程图

Fig. 5 Flow chart of gravity measurement data processing

力基线场完成入网测试。庐山重力基线场共有重力基本点 24 个, 重力基准点 1 个, 最大高差超过 1000 m, 重力段差超过 300 mGal, 是我国最早建立的重力仪格值标定测量短基线之一。该型重力仪主要技术指标检测结果如表 3 所示, 满足技术要求, 获得入网资质。

设备野外工程作业地点选择在西藏自治区林芝市(图 6)。林芝盆地位于青藏高原, 平均海拔 3 100 m, 测量该地的重力场信息有利于开展相关研究。此次工程测量跟随湖北省地震局测量院, 共测量超过 150 个测点, 每日测量时长超过 8 小时, 测量数据完整、有效, 满足工程作业指标要求。

表 3 设备入网测试检测结果  
Table 3 Equipment admittance test results

项目	测试项目				
	格值精度	分辨力/ $\mu\text{Gal}$	重复性标准差/ $\mu\text{Gal}$	漂移率/ $(\text{mGal}\cdot\text{h}^{-1})$	精度/ $\mu\text{Gal}$
技术要求	$\leq 5\times 10^{-5}$	$\leq 1$	$\leq 20$	$\leq 0.003$	$\leq 15$
测试结果	$0.139\times 10^{-5}$	优于 1	3.1	0.000 6	3.5



图 6 林芝市实地测量实拍

Fig. 6 Actual shooting of field survey in Linzhi

3 结论

目前流动式相对重力仪在北京灵山国家重力基线场、武汉九宫山国家重力基线场已进行多次设备检验, 并参加了湖北省地震局组织的高原实地测量工程, 满足野外测量作业的要求。该型重力仪的成功研制对于打破国内对国外高端产品依赖的现状有重要意义, 但作为重力测量领域的追赶者, 它仍然存在不足之处, 在测量精度等关键指标上需要开展技术攻关, 不断加大科研力度, 在性能上追赶国外高精度产品, 为我国地球物理科学研究夯实基础, 成为中国重力仪器一张亮丽的名片。

参考文献

[1] 朱学毅, 吴畏, 刘红光, 等. ZSGA-2 型重力敏感器关键技术分析与试验验证 [J]. 导航与控制, 2019, 18(3): 42-46  
Zhu X Y, Wu W, Liu H G, et al. Key technology analysis and test verification of ZSGA-2 gravity sensor[J]. Navigation and Control, 2019, 18(3): 42-46

[2] 许厚泽, 孙和平. 我国重力固体潮实验研究进展 [J]. 地球科学进展, 1998, 13(5): 415-421  
Xu H Z, Sun H P. Progress status of the experimental study on tidal gravity in China[J]. Advances in Earth Science, 1998, 13(5): 415-421

[3] 袁桂琴, 熊盛青, 孟庆敏, 等. 地球物理勘查技术与应用研究 [J]. 地质学报, 2011, 85(11): 1744-1805  
Yuan G Q, Xiong S Q, Meng Q M, et al. Application research of geophysical prospecting techniques[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(11): 1744-1805

- [4] 耿启立. 重力仪器国外代表产品及国内研发最新进展[J]. 地质装备, 2016, 17(1): 27-30  
Geng Q L. The typical gravimeters oversea and the development of gravimeters in China[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2016, 17(1): 27-30
- [5] 劳雷工业公司. CG-6 自动测量重力仪[EB/OL]. [2024-01-05]. <https://www.greenviewgeo.cn/zh-hant/products/cg-6> 自动测量重力仪/  
Laurel Technologies Company Limited. CG-6 autograv gravity meter[EB/OL]. [2024-01-05]. <https://www.greenviewgeo.cn/zh-hant/products/cg-6> 自动测量重力仪/
- [6] 北京桔灯地球物理勘探股份有限公司. 美国 Burris 零长度金属弹簧重力仪[EB/OL]. [2024-01-05]. <https://www.orangelamp.com/product/showproduct.php?lang=cn&id=145>  
Beijing Orangelamp Geophysical Exploration Company Limited. American burris relative gravimeter[EB/OL]. [2024-01-05]. <https://www.orangelamp.com/product/showproduct.php?lang=cn&id=145>
- [7] 全建军, 郑永通, 王绍然, 等. 地磁学科数据跟踪分析中常见问题的讨论[J]. 地震科学进展, 2023, 53(11): 513-522  
Quan J J, Zheng Y T, Wang S R, et al. Discussion on common problems in data tracking and analysis of geomagnetics[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2023, 53(11): 513-522