

# Experimental Research of Some Interference Factors in the Development Process of Absolute Gravimeter

Wendi Huang\*, Tao Huang, Mingze Gao, Youguang Guo

Beijing Aodi Detection Instrument Company, LTD, Beijing  
Email: \*huangxiaobao\_wendy@163.com

Received: Aug. 18<sup>th</sup>, 2017; accepted: Sep. 1<sup>st</sup>, 2017; published: Sep. 8<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

The basic principle of an absolute gravimeter is described in this paper. Moreover, eddy current, vacuum and vibration noise are analyzed in the effect of accuracy and precision. Experiments provide real and effective data for the development of absolute gravimeter.

## Keywords

Absolute Gravimeter, Eddy Current, Vacuum, Vibration Noise

---

# 绝对重力仪研制中几种干扰因素的实验研究

黄雯迪\*, 黄涛, 高铭泽, 郭有光

北京奥地探测仪器有限公司, 北京  
Email: \*huangxiaobao\_wendy@163.com

收稿日期: 2017年8月18日; 录用日期: 2017年9月1日; 发布日期: 2017年9月8日

---

## 摘要

本文简要地介绍了研制中的绝对重力仪的基本原理, 并分别从磁场涡流、真空和振动噪声三方面阐述了各个因素对仪器准确度和精度的影响, 实验结果真实可靠且具有理论价值。

---

\*通讯作者。

## 关键词

绝对重力仪, 磁场涡流, 真空, 振动噪声

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

重力场是地球科学研究、资源勘探和导航的重要手段之一, 精确的重力加速度值  $g$  对大地测量、地球物理和精密计量都具有十分重要的意义。因此, 从上个世纪六七十年代开始, 美国、中国、法国和意大利等国先后开展对绝对重力仪的研究[1] [2] [3] [4] [5]。目前, 国际上主要研制的绝对重力仪可分为两类, 一类是激光干涉绝对重力仪, 另一类是原子干涉绝对重力仪, 这二者均是通过精密测量物质在地球重力场中自由下落运动的轨迹来获取测点的绝对重力加速度值, 但主要的不同点在于原子干涉绝对重力仪中做自由下落运动的物质是被激光冷却的原子团, 而激光干涉绝对重力仪的落体是光学角锥棱镜[6] [7] [8]。无论是何种绝对重力仪, 都会因其结构复杂、研发成本高和使用不方便, 使得形成商业化的难度很大。所以, 直至如今, 只有美国的 Micro-g 公司旗下的实验室中使用的高精度绝对重力仪 FG-5 和可移动野外使用的 A10 被小批量生产, 并广泛地应用于世界各国的地球物理研究和重力网的建设中, 而这一系列的重力仪也被公认为国际技术最先进、最成熟的产品, 所以价格持续走高。

中国地质装备集团下属的北京奥地探测仪器有限公司从上世纪 70 年代就开始自主研发重力仪, 并陆续生产了多款面向地面应用的全自动数字重力仪。2015 年推出了十套 ZSM-6 重力仪完成了一次性通过军方验收, 交付客户使用的任务, 实现了重力仪的产业化, 扭转了过去 20 多年来我国重力仪器完全依赖进口的被动局面[9] [10]。在如此坚实的基础上, 奥地公司正致力于研发一套高精度的绝对重力仪, 并逐步实现商业化, 届时可以打破国外绝对重力仪生产厂家的商业垄断, 提高我国绝对重力仪行业的国际地位。

本文将从以下几个方面叙述本公司绝对重力仪的研发进程。首先是对整套设备的原理做一个简单的介绍; 然后, 针对不同的干扰因素, 详细分析其对系统性能的影响; 最后, 总结现阶段取得的成果以及待解决的问题, 对未来的工作做出规划。

## 2. 绝对重力仪原理介绍

本课题中所研制的重力仪属于激光干涉绝对重力仪, 整套系统的主要结构原理示意图如下图 1 所示, 原理样机实物图见文末附图。各部件的具体参数如下:

1) 真空系统: 选择容量为 25 升、重量为 7 千克、抽速为 22 升/秒的溅射离子泵来维持系统下落取数过程中真空室的真空度;

2) 激光测量系统: 整套激光干涉测量系统是在经典的迈克尔逊干涉仪基础上做的改进, 激光为热稳频激光器, 其频率重现性为  $3 \times 10^{-8}$ , 日长期稳定性为  $5 \times 10^{-9}$ ;

3) 时间基准: 铷原子钟固定输出频率 10 M, 频率重现性为  $5 \times 10^{-11}$ , 漂移  $\leq 1 \times 10^{-12}$ /日;

4) 落体控制机构: 采用日本安川交流电机, 额定输出功率为 100 W; 导轨为直线导轨, 通过真空联轴器与电机相连, 控制托架向上做匀速运动, 向下做加速运动从而实现落体的自由下落;

5) 数采系统: 利用铷原子钟的 10 M 标准频率锁定 100 M 的高速数采卡, 采集干涉系统输出的光电

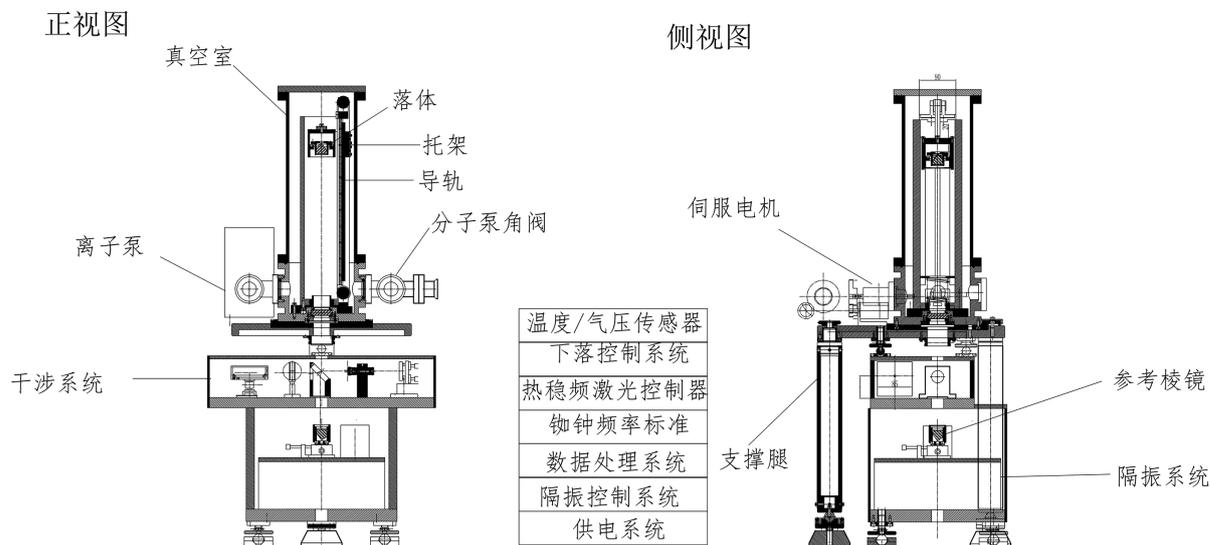


Figure 1. Schematic diagram of the main structure of the system

图 1. 系统主要结构原理示意图

信号，通过计算机软件计算出最终的绝对重力加速度值，并在程序中添加了对气压、固体潮、极移等的修正；

6) 供电系统：使用电池容量为 3000 VA 的 UPS (不间断电源)为离子泵供电，降低市电骤断对设备工作的影响，保证真空度始终处于较高的水平。

本项目将参考棱镜固定在隔振系统上，从而消除由于地面振动带来的系统误差，具体隔振系统的原理说明将在下一小节中做详细阐述。

### 3. 几种干扰因素的分析

作为一种高精度精密仪器，绝对重力仪会受到各种干扰源的影响而产生误差，因此，需要进行大量地修正来提高仪器的可靠性。这些误差有些来自于仪器或零件的制造与装配，比如：直线导轨自身的形变，角锥棱镜的制造角差，激光器光速的发散性和测量光束的不垂直性等，这类误差大多是通过仪器出厂校准以及在使用过程中结合实际需要进行不断地调整来消除；还有一些误差属于环境误差，比如：温度、固体潮汐、极移和地下水位的变化都或多或少地影响测量结果，这部分误差往往遵循一些具体的公式或线性关系，所以可以添加相应的程序逐个修正。本文选取了常见的三种干扰，即磁场、空气阻力和振动噪声，利用实验直观地分析了它们对系统准确度和精度的影响，为今后的工作消除了隐患。

#### 3.1. 磁场

考虑到落体的金属外壳在下落过程中，会与周围不均匀的磁场相互作用，产生涡流，所以在制作落体时，应选取无磁材料加工落体外壳。本课题中所采用的落体外壳材料为铝合金，但在定位珠位置(如图 2)使用不同的两种材料来制作，从而分析这一微小的差异对结果的影响。落体 1#上的定位珠为钨合金球，落体 2#上的定位珠为钛合金球。用磁力仪检测钨合金球和纯钛球经过磁化处理后所带的磁性大小，可以发现在强磁作用下，钨球上的剩磁力可达到 6 mT，即使隔离放置一段时间后，剩磁依旧大于 0.05 mT，而钛合金球在强磁作用下，不会被磁场所影响，则不带有磁性。保证其他因素相同，通过对 1#和 2#落体分别进行下落取数实验，最终可以看出，当采用无磁定位珠落体后，测量精度大大改善，所得绝对重力平均值更接近参考值(表 1)。所以，在今后的落体设计中应更加严格地选择材料。

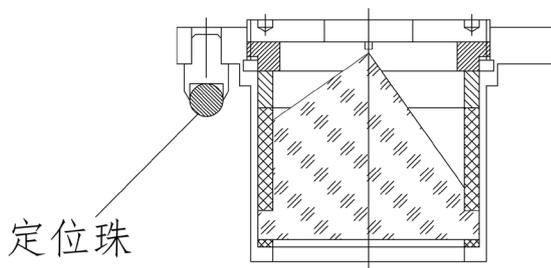


Figure 2. Structure diagram of fall body  
图 2. 落体结构图

Table 1. Observation resulting data of standard experiment with different fall bodies

表 1. 不同落体时的实验观测结果

落体编号	真空度 (Pa)	测量组数 (组)	单组下落次数 (次)	平均值与参考值的差值 (微伽)	测量精度 (微伽)
1#	$1 \times 10^{-4}$	40	16	959.4	55.4
2#	$1 \times 10^{-4}$	40	16	116	22.5

### 3.2. 空气阻力

为了保证落体的自由下落，所有的运动结构均安置在真空室中，且在正式试验时，真空室内的真空度需要保持在  $1 \times 10^{-4}$  Pa 以上，否则真空系统中残余的空气分子会阻碍落体的下落，产生测量误差。为了证明这一点，则通过控制真空室上离子泵一侧角阀打开的大小，使系统处于不同等级的真空环境，然后分别进行取数操作，得到相应的结果如下表 2。可以清晰地看出，当其他因素保持一致时，仅改变真空度处于不同等级，就会明显看到，随着真空度的逐步提高，系统的测量精度越来越好，与参考值的差值也不断缩小。所以，真空室内真空度的高低对自由下落法绝对重力观测的影响很大，不可忽略。

### 3.3. 振动噪声

作为一种对实验环境要求极高的精密仪器，绝对重力仪的精度和稳定性与隔振系统的发挥密不可分，而隔振的主要作用是消除仪器周围的振动噪声。常见的噪声有以下两类，一类是频率在 0.5 Hz 以上的噪声，其来源主要为建筑、树木的晃动以及人类活动，另一类为频率在 0.05~0.5 Hz 的噪声，其来源为海浪撞击海岸时在地壳中产生的表面波和体波。绝对重力仪的隔振技术可分为被动式隔振和主动式隔振，被动式隔振装置的特点是不需要引入外界能源，装置结构简单，易于实现，可靠性强，但其固有频率固定，隔振频带窄；主动式隔振是在传统被动式隔振的基础上引入外界能量，加入由控制器、传感器和执行器构成的控制系统，应用一定的控制策略驱动作用器，从而达到抑制或消除振动的目的。所以，针对 0.5 Hz 以上的噪声，被动隔振就可以发挥作用，而对那些处于 0.05~0.5 Hz，甚至是低于 0.05 Hz 的振动就无能为力了。为了更好地证明这一说法，本项目分别使用被动式隔振和主动式隔振在不同振动背景下进行下落取数实验，可以对隔振的性能给出一个比较客观的评价，也为后期的改进指明了方向。

#### 3.3.1. 负刚性无源隔振系统

首先，介绍一种负刚性无源隔振，它属于被动式隔振，隔振机理与汽车悬架相类似，当车轮在颠簸的道路上迅速地上下移动时，悬架内部的支撑弹簧可以提供一定的质量使得乘客感受不到垂直方向的反弹力。本项目将需要隔振的参考棱镜放置在该隔振平台上，整个承物平台压在一根主弹簧之上，主弹簧与四根挠曲连接相互作用；另一根弹簧与系统外部的一个旋钮相连，可以提供一个向内挤压的力量，使

**Table 2.** Observation resulting data of standard experiment in different vacuum conditions  
**表 2.** 不同真空状态下实验观测结果

日期	真空度 (Pa)	测量组数 (组)	单组下落次数 (次)	平均值与参考值的差值 (微伽)	测量精度 (微伽)
2017.5.25	约 $1 \times 10^{-2}$	40	16	12622	137
2017.5.25	约 $1 \times 10^{-3}$	40	16	693.5	67.8
2017.5.25	约 $5 \times 10^{-4}$	40	16	168.0	26.4
2017.5.25	约 $1 \times 10^{-4}$	40	16	88.4	16.9

得系统呈现负刚性；主弹簧通过一个轴承与系统外部的一根曲柄相连，依据平台上所承物体的重量，分别顺时针和逆时针旋转曲柄，增加或减少主弹簧的承重能力[11]。由于是被动式隔振，其固有频率的最优情况是 0.5 Hz，也就是说只能消除频率高于 0.5 Hz 的振动。

### 3.3.2. 超低频有源垂直隔振系统

其次，介绍一种超低频有源垂直隔振，它属于主动式隔振，是在零长弹簧长周期系统的基础上利用精密机械、光电探测以及比例积分微分控制等技术实现的长周期振荡系统。当参数设置合适时，系统的固有周期可以达到 20 s 以上，完全可以满足高精度要求的 0.05 Hz 以下的固有频率。但是，由于使用时需要外接 $\pm 12$  V 电源，且弹簧随着温度变化会出现蠕变现象，所以需要时常关注着隔振的固有周期是否变化，并进行手动调节[12]。

### 3.3.3. 实验分析

本项目采取两种不同的隔振分别从测量稳定性和抗干扰能力两方面对整套样机进行评估。

选取了两个振动背景完全不同的地点，地点 A 为普通工业园区的一栋大楼的三层，地面为楼板，整个园区在正常工作时会有大量的人类活动以及车辆经过，环境较差；地点 B 为中国计量科学研究院内的绝对重力值已知点，整个实验园区远离闹市，依山建造，振动背景很好，是全球绝对重力仪关键比对主办地。本文中 3.1 小节和 3.2 小节都是在地点 A 使用负刚性无源隔振进行干扰因素分析的，本小节实验的主要内容是分别使用负刚性无源隔振系统(缩写为“负刚无源”)和超低频有源垂直隔振系统(缩写为“超低有源”)在地点 A 和 B 做下落取数实验，最后得到结果如下表 3 所示。

观察上表，可以发现同一个隔振在振动背景好的地点 B 的测量精度远优于在地点 A 时；当处于同一地点 A 上，负刚性无源隔振的测量精度与超低频有源隔振相差不大，这也反映出超低频有源隔振在环境较差的地方无法发挥出真实性能的事实；但是，无论在哪个地点，超低频有源隔振的绝对重力平均值都比负刚性无源隔振要好，这也是其隔振频率范围广的优势所致。

## 4. 总结与展望

本文以一套绝对重力仪原理样机为对象，介绍了仪器的工作原理，分析了磁场涡流、真空、振动噪声这几种干扰因素对仪器性能的影响，得到结论如下：1. 一定要选择无磁材料加工落体外壳，即便是落体上的定位珠，也应该在保证其坚固耐用的基础上，优先使用无磁材料；2. 当仪器进行下落取数时，真空室内的真空度应不低于  $1 \times 10^{-4}$  Pa，这样才能消除空气阻力对落体自由运动的作用；3. 在振动背景较差的工作环境中，超低频有源隔振的测量稳定性和抗干扰能力与负刚性无源隔振相差不大，本课题在工业区的三楼楼板上进行 100 组下落取数实验，测量精度已经接近 20 微伽。超低频有源隔振在振动背景非常好的地点发挥出色，100 组下落实验后测量精度达到 5 微伽。至此，本课题已经完成了预定的部分目标，并且发现了试验样机的系统误差主要来自于落体的光心和质心不重合[13] [14] [15]，那么，下面工作

**Table 3.** Observation resulting data of standard experiment with different isolation-vibration at site A and site B  
**表 3.** 不同隔振系统在地点 A/B 的实验观测结果

日期	实验地点	隔振类型	真空度 (Pa)	下落次数 (次)	平均值与参考值的差值 (微伽)	测量精度 (微伽)
2017.5.27	A	负刚无源	约 $1 \times 10^{-4}$	1600	121.2	20.1
2017.6.9	A	超低有源	约 $1 \times 10^{-4}$	960	81	22.4
2017.7.12	B	负刚无源	约 $1 \times 10^{-4}$	1600	100	8.2
2017.7.13	B	超低有源	约 $1 \times 10^{-4}$	1600	76	5.0

的重心就是通过对落体的光心和质心的校正来进一步提高仪器的准确度，尽快做出满足国内市场需求的  
高精度绝对重力仪。

## 致 谢

本文在成文过程中受到了来自中国计量科学技术研究院的黄大伦研究员的耐心指导，并感谢中国计量科学技术研究院昌平院区的领导为我们提供了试验场地和技术标准。

## 基金项目

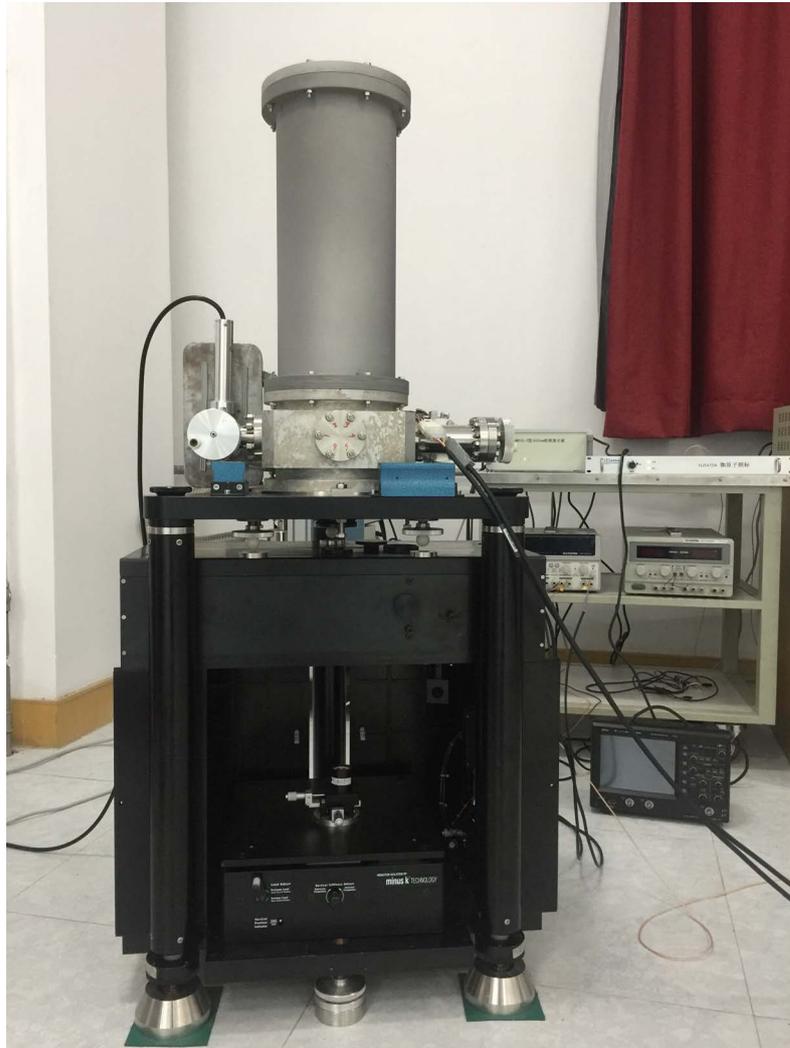
国家高技术研究发展计划(“863 计划”)项目(2014AA06A606)。

## 参考文献 (References)

- [1] Niebauer, T.M., Sasagawa, G.S., Galler, J.E., *et al.* (1995) A New Generation of Absolute Gravimeters. *Metrologia*, **32**, 159-180. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/32/3/004>
- [2] Peters, A., Chung, K.Y. and Chu, S. (1999) Measurement of Gravitational Acceleration by Dropping Atoms. *Nature*, **400**, 849-852.
- [3] Vitouchkine, A.L. and Faller, J.E. (2004) A Direct and Sensitive Method for Positioning the Centre of Mass of a Dropping Object at the Optical Centre of the Enclosed Corner Cube in Ballistic Absolute Gravimeters. *Metrologia*, **41**, L19-L21. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/41/4/L01>
- [4] 郭有光, 黄大伦, 方永源, 徐进义, 刘达伦. 中国 NIM 型绝对重力仪及国际绝对重力仪比对[J]. 现代计量测试, 1998(6): 13-17.
- [5] 郭有光. NIM- II 型绝对重力仪[J]. 中国计量, 1998(6): 38.
- [6] 郭有光, 李德禧, 黄大伦, 方永源, 张光远, 徐进义. 高精度绝对重力仪观测研究[J]. 地球物理学报, 1990(4): 447-453.
- [7] 吴琼. 高精度绝对重力仪关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2011.
- [8] 刘达伦, 吴书清, 徐进义, 郭有光. 绝对重力仪研究的最新进展[J]. 地球物理学进展, 2014, 19(4): 739-742.
- [9] 滕云田, 吴琼, 郭有光, 等. 基于激光干涉的新型高精度绝对重力仪[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(4): 2141-2147.
- [10] 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.
- [11] Callaway, E. (2007) How It Works: Passive Vibrational Isolation. *The Scientist*, 9.
- [12] 王观, 胡华, 伍康, 李刚, 王力军. 基于两级摆杆结构的超低频垂直隔振系统[J]. 物理学报, 2016, 65(20): 40-46.
- [13] Rothleitner, C., Svitlov, S., Mérimèche, H. and Wang, L.J. (2007) A Method for Adjusting the Centre of Mass of a Freely Falling Body in Absolute Gravimetry. *Metrologia*, **44**, 234-241.
- [14] 冯金扬, 吴书清, 李春剑, 粟多武, 于梅. 基于双干涉仪的自由落体绝对重力测量[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2740-2746.
- [15] 肖凡. FG5 高精度绝对重力测量影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012.

## 附图

原理样机图如下：



期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ojs@hanspub.org](mailto:ojs@hanspub.org)