

重力加速度的量子测量仪器 ——原子干涉绝对重力仪*

张祎阳^{1,2} 董翔宇^{1,2} 王少凯^{1,2,3,†}

(1 中国计量科学研究院 时间频率计量科学研究所 北京 100029)

(2 国家市场监管重点实验室(时间频率与重力计量基准) 北京 100029)

(3 合肥国家实验室 合肥 230088)

A quantum atomic interference gravimeter for absolute measurements of gravitational acceleration

ZHANG Yi-Yang^{1,2} DONG Xiang-Yu^{1,2} WANG Shao-Kai^{1,2,3,†}

(1 Division of Time and Frequency Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

(2 Key Laboratory of State Administration for Market Regulation (Time Frequency and Gravity Primary Standard), Beijing 100029, China)

(3 Hefei National Laboratory, Hefei 230088, China)

2024-09-24收到

† email: wangshk@nim.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20241203

CSTR: 32040.14.wl20241203

摘 要 重力加速度是一个随时间和空间变化的物理量,在资源勘探、大地测量、计量科学等领域有非常重要的应用。重力仪是用来获取重力数据的仪器,根据标度因子获取方式的不同分为相对重力仪与绝对重力仪。绝对重力仪的测量数据能够跨越时空直接比较与应用,因此更受关注。原子干涉绝对重力仪由于没有机械磨损,可以集高精度、长连续的绝对重力测量于一身。文章将简要介绍原子干涉绝对重力仪的基本原理、物理实现、性能指标、国内外进展以及未来发展等内容。

关键词 重力加速度, 原子干涉绝对重力仪, 性能指标

Abstract Little g , a position dependent and time varying quantity, has very important applications in resource exploration, geodesy, metrology, and other fields. A gravimeter is an instrument used to obtain gravity data, which may be relative or absolute according to how the scale factors are obtained. An absolute gravimeter can directly compare and apply measurements across time and space, so it is of more interest. Since there is no mechanical wear, an atomic gravimeter can provide precise and accurate measurements of gravity for long continuous periods of time. In this paper, the basic principle, physical realization, and figure of merit parameters of atomic gravimeters are reviewed, followed by a brief introduction to their current and future development at home and abroad.

Keywords gravity acceleration, atomic gravimeter, figure of merit

* 科技创新2030——“量子通信与量子计算机”重大项目(批准号: 2021ZD0300602)

1 引言

重力加速度 $\mathbf{g}(\mathbf{r}, t)$ 是描述重力场作用强度的空间分布以及随时间变化的物理量,其量值反映地球与周围环境的质量分布及变化。地球表面重力加速度的大小受很多因素(如地理纬度、地质构成等)影响,在全球范围内变化幅度约为 $10^{-3}g$ ($g \approx 9.8 \text{ m/s}^2$),在地表附近竖直方向其梯度约为 $3 \times 10^{-7} \text{ g/m}$ 。受天体运行带来的潮汐影响,重力加速度每半天变化的幅度约为 10^{-7} g 量级。重力加速度量值的精确测定在资源勘探、大地测量以及计量科学等领域中有着非常广泛且重要的应用。比如在大地测量领域,利用CHAMP、GRACE、GOCE等重力卫星提供的全球重力数据在水文监测、防震减灾等方面发挥着巨大作用^[1-3]。在计量领域,质量单位千克的复现是通过功率天平将宏观质量链接到普朗克常数来实现的,目前该实验对重力加速度准确度的要求高达 10^{-9} 量级^[4]。近年来国内外光钟研究不断取得突破,越来越多的光钟达到了 10^{-18} 量级的评定不确定度^[5]。基于光钟的秒定义变革以及将来国际原子时(TAI)的产生都要求精确知道光钟的物理高度^[6]。将局域的重力异常作为边界值求解测地学基本方程可以给出准确度优于3 cm的局域大地水准面起伏,其空间分辨率与观测得到的重力异常分布密度有关,目前可以做到分辨率优于1 km^[7]。结合全球导航卫星系统(GNSS)技术确定观测点的椭球高度,扣除当地的大地水准面起伏就可以给出光钟的物理高度。该方法具有全球一致、比对精度不随距离衰减等优点。此外在许多地球动力学研究中,比如涉及大地隆起、火山爆发等地壳形变的研究,需要通过对重力加速度进行连续观测从而获取有用信息^[8]。

重力仪是用来获取重力数据的仪器,根据标度因子获取方式的不同分为相对重力仪与绝对重力仪。相对重力仪一般是对检测质量施加一个与重力平衡的外

力,通过观测外力的变化来推断重力的变化。相对重力仪的优点是灵敏度高,可以连续工作。缺点是只能测量相对重力变化,且长时间测量存在漂移,需要定期用绝对重力仪或标准引力场对其标度因子进行校准。绝对重力仪通过对观测量与标度因子的直接测量来获得重力加速度的绝对值。目前主流的绝对重力仪是基于自由落体方式的,通过对自由下落物体的位置与时间进行精确测量从而得到重力加速度的准确值。根据工作原理的不同,自由下落式绝对重力仪又可以分为激光干涉绝对重力仪与原子干涉绝对重力仪。表1给出了常用的相对重力仪与绝对重力仪的主要技术指标。其中激光干涉绝对重力仪的典型代表是美国microg公司生产的FG5系列产品,目前具有最高的重力测量准确度。但是由于使用中存在机械部件间的磨损,不可以长时间连续工作。而原子干涉绝对重力仪由于没有机械磨损,从而可以长时间连续工作。从表1的数据可以看出,原子干涉绝对重力仪集高精度、长连续的重力测量于一身,部分兼具了相对重力仪与激光干涉绝对重力仪的优点,但主要缺点是系统复杂,性能对工作环境依赖性较强^[9-16]。

2 原子干涉绝对重力仪基本原理

原子干涉绝对重力测量过程如图1所示:经激光冷却和初态制备后的原子波包被对向传输的拉曼激光分束、反转、合束后进行探测。原子干涉精密测量的核心是如何实现对原子波包的相干操控。假设二能级原子(基态 $|g\rangle$,激发态 $|e\rangle$)的位置与动量分别为 $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{p}$,其波函数 $\psi_i \sim \exp(i\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}/\hbar)$ 。该原子波包通过与光场相互作用发生内态跃迁后,会获得一个与光场的波矢量

表1 几种重力仪的性能指标($1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2 \approx 10^{-9} \text{ g}$)

重力仪类型		灵敏度/ ($\mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$)	准确度/ μGal	漂移/ ($\mu\text{Gal}/\text{月}$)	长时间 连续工作
相对 重力仪	弹簧重力仪 ^[9]	10	—	6000	√
	超导重力仪 ^[10]	0.3	—	0.5	√
绝对 重力仪	激光干涉绝对重力仪 ^[11]	15	2	—	×
	原子干涉绝对重力仪 ^[12-16]	4	3—5	—	√

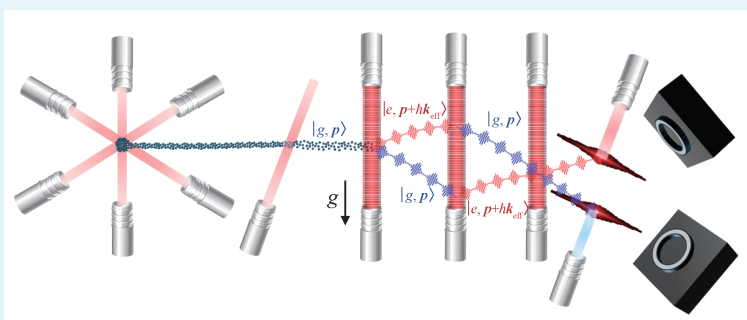


图1 原子干涉绝对重力测量过程示意图

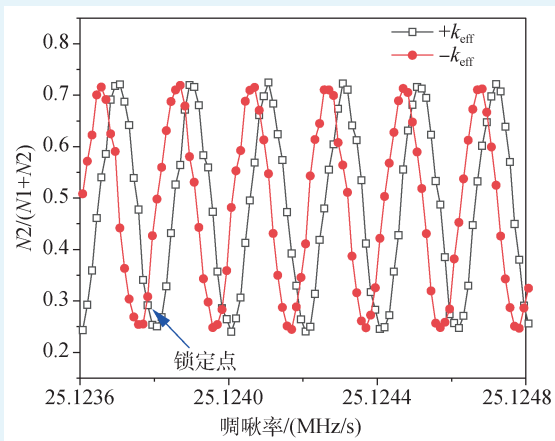


图2 有效波矢分别为正负情况下, 扫描啁啾率得到的干涉条纹

k_{eff} 相关的位相因子。若原子的初始内态为基态 $|g\rangle$, 末态为激发态 $|e\rangle$, 则末态波函数变为 $\psi_f \sim \exp(i\mathbf{k}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{r}) \times \exp(i\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}/\hbar)$, 表明原子动量从 $\mathbf{p}$ 变为 $\mathbf{p} + \hbar\mathbf{k}_{\text{eff}}$ 。若原子的初始内态为激发态 $|e\rangle$, 末态为基态 $|g\rangle$, 则末态波函数变为 $\psi_f \sim \exp(-i\mathbf{k}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{r}) \times \exp(i\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}/\hbar)$, 表明原子动量从 $\mathbf{p}$ 变为 $\mathbf{p} - \hbar\mathbf{k}_{\text{eff}}$ 。对于大量原子组成的原子系综, 光与原子相互作用的时间 t 会影响原子处于内态的几率。一般情况下 $\psi_f \sim \alpha\psi_i + \beta\exp(i\mathbf{k}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{r}) \times \psi_i$ 。通过改变相互作用时间 t 使得 $\alpha = \beta = \frac{1}{\sqrt{2}}$, 此时

光场对原子波包相起分束器的作用; 当 $\alpha = 0, \beta = 1$, 此时光场对原子波包相起反射镜的作用。大多数原子干涉绝对重力仪选择使用双光子拉曼/布拉格过程来实现对原子波包的分束、反转、合束等相干操作。虽然高阶布拉格衍射具有更高的理论灵敏度, 但是双光子过程的衍射位相控制

的更好, 更有利于准确度的提高。与单光子拉曼/布拉格过程相比, 双光子拉曼/布拉格过程不仅干涉面积更大, 而且仅需要控制两束激光的相对相位差, 还可以很大程度上降低对激光绝对相位噪声的要求。

目前, 实验上采用最多且技术最成熟的是三脉冲受激拉曼原子干涉, 输出端原子内态归一化布居数

满足^[16]:

$$P = \frac{N_2}{N_1 + N_2} = \frac{1}{2} (1 - V \cos[(\mathbf{k}_{\text{eff}} \mathbf{g} - \alpha)T^2 + \phi_{\text{sys}} + \phi_{\text{stat}}]) ,$$

其中, N_1 和 N_2 表示 $F=1$ 和 $F=2$ 的两个超精细基态中的原子布居数, V 是干涉条纹对比度, $\mathbf{k}_{\text{eff}}$ 是拉曼激光的有效波矢, α 是两束拉曼激光频差的啁啾率, $\mathbf{g}$ 是当地的重力加速度, T 是原子波包的自由演化时间, ϕ_{sys} 是指不能用统计方法平均掉的相移, ϕ_{stat} 指能用统计方法平均掉的相移。通过改变啁啾率 α 就可以得到干涉条纹。如图2所示, 通过将啁啾率锁定在有效波矢 $\mathbf{k}_{\text{eff}}$ 为正与负两组条纹的交叉点上, 可以很大程度的减小系统误差^[16]。

3 原子干涉绝对重力仪的物理实现

原子干涉绝对重力仪的硬件部分一般包含真空物理、激光电控、振动处理等几个部分。

3.1 真空物理部分

真空物理部分是原子干涉重力测量的主要发生场所, 由碱金属源、2/3D-MOT (磁光阱)、干涉区、探测区等真空腔体部分以及外围的磁场线圈、微波天线、磁屏蔽等组成。真空腔体一般由磁性较小的铝或钛等金属材料, 或者玻璃等非金属材料构成。原子干涉绝对重力仪一般使用碱金属元素铷或铯作为检测质量。由于碱金属在室温下具有较高 (10^{-7} torr) 的蒸气压, 用三维磁光阱就可以直接从背景气体中捕获到数量足够的原子。更好的办法是先使用二维磁光阱对碱

金属原子进行横向冷却形成原子束流,然后通过直径几个毫米、长度几个厘米的差分管道后进入三维磁光阱进一步冷却。经过偏振梯度冷却后原子温度达到几个 μK , 原子数目达到 10^8 量级。二维磁光阱不仅提高了三维磁光阱的装载率,还有助于整个原子干涉区保持较高的真空度(10^{-9} — 10^{-10} torr)。冷却后的原子既可以按喷泉的方式先上抛再下落,也可以直接下落。在进行干涉之前,通常会使用长度为几百微秒的竖直拉曼脉冲结合微波脉冲对冷原子团进行进一步的选速与初始态制备,完成后原子团在竖直方向的速度分布更窄且处于 $m_f=0$ 的磁不敏感状态。为了进一步减小二阶塞曼效应的影响,还会在干涉区外边包覆 1—2 层坡莫合金,实现内部剩余磁场小于 100 nT。中国计量科学研究院研制的自由下落式原子干涉重力仪 NIM-AGRb-1 的真空物理部分就基于上述原理设计,其原理图与实物图如图 3 所示。

除了基于传统的反射镜结构的原子干涉绝对重力仪以外,真空物理设计也存在着金字塔形反射镜以及光栅 MOT 等特殊的设计思路^[17, 18], 这些方法有助于实现原子重力干涉仪的小型化与集成化。

3.2 激光电控部分

原子干涉绝对重力仪中的激光主要用来实现对原子的冷却囚禁、初态制备、原子波包的相干操控、原子末态探测等功能。目前 ^{87}Rb 原子重力干涉仪的激光系统主要有基于半导体激光器^[19, 20]和基于光纤激光器两种方案^[21]。如图 4 所示,半导体激光系统方案通常采用两台包含锥形放大器(TA)的半导体激光器作为激光光源,其中一台 TA1 作为参考激光,

实现频率锁定,并实现 2D MOT 光、3D MOT 光、探测光和 $F=2$ 清除光;另外一台 TA2 偏频 6.834 GHz 锁定在 TA1 上,实现拉曼从激光、重抽运光和 $F=1$ 清除光,共 9 种频率的激光。系统中包括两个电学伺服系统,用于实现激光频率稳定和拉曼激光的获得,其他激光均通过声光调制器实现。基于光纤激光器的方案通常先利用窄线宽的 1560 nm 光纤激光器经过大功率光纤放大器后输出瓦量级的激光,然后再通过波导型周期性极化倍频晶体 PPLN (周期性极化铌酸锂)进行倍频,产生干涉仪所需的 780 nm 激光。

拉曼激光的产生方法主要有两种,光学锁相法与电光调制法。光学锁相法是通过光学锁相环使两束激光频差锁定在外部微波频率上,电光调

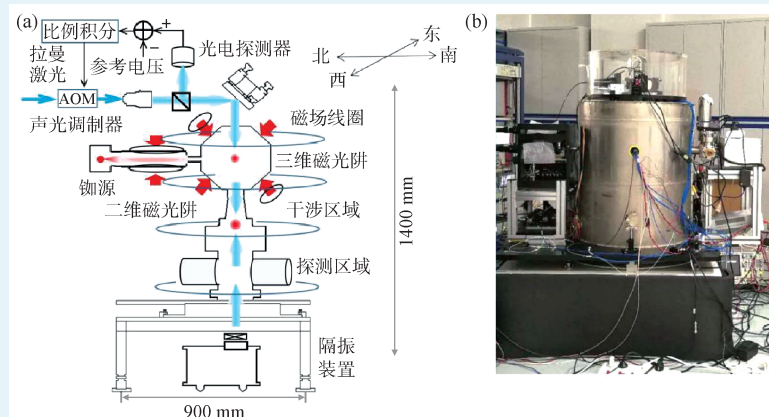


图 3 自由下落式原子干涉重力仪 NIM-AGRb-1 的真空物理部分的原理图(a)与实物照片(b)

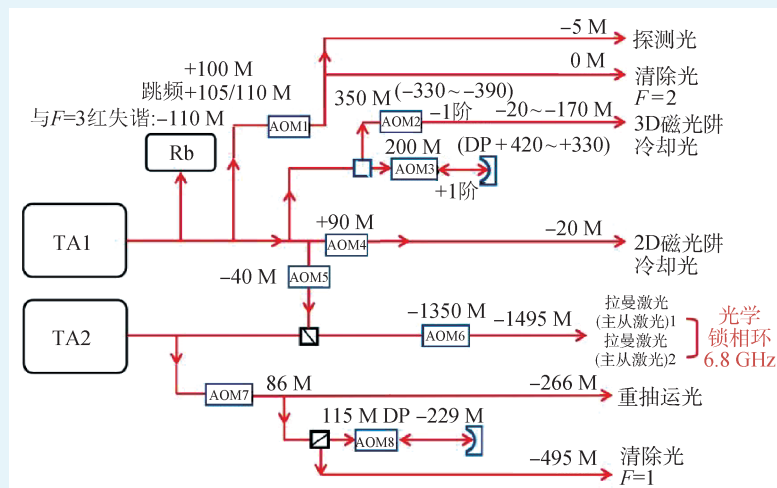


图 4 NIM-AGRb-1 光学系统方案图(其中 AOM 为声光调制器, DP 代表双次通过, -110 M 是指激光频率相对于原子共振吸收频率有 -110 MHz 的失谐)

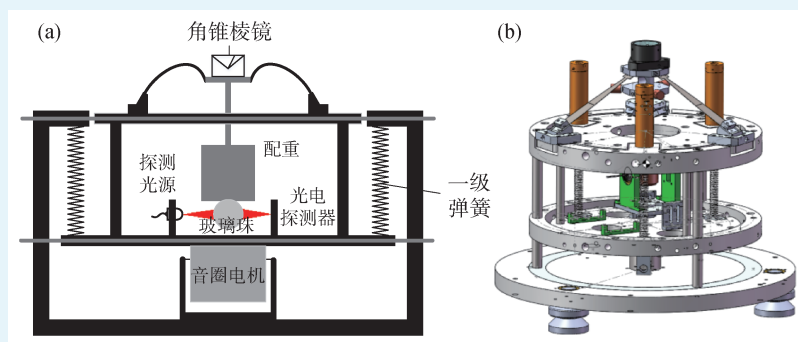


图5 基于特殊弹簧振子结构的二级主动式隔振系统的示意图(a)和结构图(b)

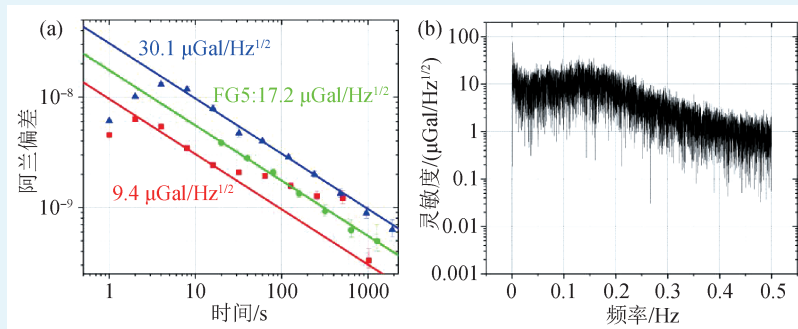


图6 NIM-AGrb-1与FG5的稳定度(a)以及灵敏度结果(b)

制法是采用微波信号对电光调制器进行调制,取其载波和一级边带作为相干光对。第一种方法无需调制器件,产生相干光的相噪等性能取决于光学锁相环的锁相性能以及外部微波频率的稳定性;第二种方法载波与边带的相干性良好,性能只受微波调制信号影响,但缺点在于调制时产生了多级边带。为了解决多级边带的问题,伯明翰大学课题组提出的基于倍频 I/Q 调制器的光学单边带(OSSB)激光系统,可消除附加边带,且抑制效果优于 20 dB^[22]。中国计量科学研究院提出了基于原子吸收的方案,边带抑制比可达 50 dB^[23]。

电控系统主要是对重力测量过程中激光的频率、强度、偏振等进行精确控制,控制的精度要求在微秒量级。随着原子干涉绝对重力仪小型化技术的不断发展,基于嵌入式或 FPGA 系统的电控系统也得到了广泛的应用^[24]。

3.3 振动处理部分

在原子干涉重力测量中,两束对向传播拉曼

激光间的任何非共模相位噪声都会对干涉仪的输出产生影响。通常使用平面反射镜实现拉曼激光的对向传播,因此该平面反射镜成为了原子干涉绝对重力仪中需要进行振动隔离的对象。根据不同的噪声环境以及不同的应用场景,人们发展了各种振动噪声隔离或处理技术。在相对安静的地面环境下,静态工作的原子干涉绝对重力仪通常使用较为复杂的长周期(约 10 s)主动隔振系统来降低测量噪声^[25],或者利用低噪声速度型传感器结合商用被动隔振平台^[26, 27]或者数据后处理的方法进行振动处理^[24, 28]。对于需要在动态环境下工作的原子干涉绝对重力仪,则更多采用高带

宽的加速度型传感器进行振动处理^[24, 29]。

清华大学开发了多种适用于原子干涉绝对重力仪的隔振系统。第一种是基于 LaCoste 零长弹簧的被动式隔振系统,主动反馈只是用来补偿弹簧蠕变和温度变化带来的影响,实际工作时本征周期可达 32 s^[30]。第二种是图 5 所示的基于特殊弹簧振子结构的二级主动式隔振系统,实际系统中获得了大于 20 s 的周期^[31]。

4 原子干涉绝对重力仪性能指标

4.1 灵敏度、稳定度、连续工作能力

在仪器科学领域,灵敏度反映一台仪器从噪声中分辨信号的能力。在数学上用仪器的噪声功率谱密度的平方根来表示,其物理意义是对应频点单位带宽内的噪声。稳定度是用来描述一组测量数据之间相互接近程度的量,在数学上用标准偏差或阿兰偏差来表示^[12]。假设我们测量得到一组时间上均匀分布的重力观测值 $g(t_i)$,扣除掉潮汐等时变因素的影响后得到 $g_0(t_i)$ 。灵敏度 S 一般

可以从 $g_0(t)$ 的自关联函数通过傅里叶变换得到。若仪器的噪声服从高斯分布,灵敏度 S 也可以从测量值的阿兰偏差进行 $t^{-1/2}$ 拟合得到。图6(a)给出了中国计量科学研究院研制的原子干涉绝对重力仪与商用FG5的稳定度以及 $t^{-1/2}$ 拟合的灵敏度结果。最上面的蓝线显示NIM-AGRb-1在2017年参加第十届全球绝对重力仪比对时的灵敏度为 $30.1\text{ }\mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$,最下面的红线显示改进后的灵敏度为 $9.4\text{ }\mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$,中间的绿线显示商用FG5的灵敏度为 $17.2\text{ }\mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$ 。图6(b)给出了对应图6(a)中红色结果用噪声功率谱密度得到的灵敏度,可以看出在0—0.1 Hz频段内噪声幅度约为 $10\text{ }\mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

前面我们介绍了原子干涉绝对重力仪相对于光学重力仪的一大优势在于不存在机械磨损,可以长时间连续工作。在实际使用中,限制其长时间连续工作的主要因素为激光器的锁定时间。在NIM-AGRb-1中有两个锁定环路,一个是主激光器通过频率调制转移光谱的方法锁定在铷的吸收线上,另一个是两台拉曼激光之间的锁相。锁定环路通过压电陶瓷或者反馈激光二极管的电流来改变输出频率,但是随着长时间的积累有可能导致激光器跳模。图7给出了NIM-AGRb-1在约2000小时连续工作后得到的测量结果,图上的尖峰表示在此期间记录到的地震信号。据我们所知,这是国际上公开报道的原子干涉绝对重力仪最长的连续工作时间。

4.2 准确度与复现性

准确度反映测量值与被测量真值或参考值之间一致性的程度,包含仪器的系统不确定度与统计不确定度。复现性是指在不同的测量条件下测量值之间的一致程度,不同的测量条件包括人员、时间、地点等因素。由于重力加速度本身是一个随时间、空间变化的物理量,因此为了对重力仪的性能准确评估,必须按统一的方式扣除重力场的时空变化。由国际计量委员会(CIPM)和国际大地测量协会(IAG)共同组织的全球绝对重力仪国际比对(ICAG),选择具有良好地面振动条件

的实验室作为比对点,并利用超导重力仪或其他相对重力仪实现不同时刻重力测量值间的链接,可以实现最高精度等级的重力仪比对。由于参加关键比重的重力仪基本都是各国准确度等级最高的仪器,因此关键比对参考值(KCRV)具有比世界上任何单台重力仪更小的不确定度。对于参加研究性比重的重力仪,可以获得该仪器相对于KCRV的等效度(DoE),验证该重力仪宣称的不确定度是否合理。此外,在绝对重力仪比对中通常要求完成3—4个点位的重力测量,数据处理后还可以获得每台重力仪在这些点位上的复现性结果。

在参加比对前,原子干涉绝对重力仪必须完成自己的系统误差评估。这些误差一般分为两类,一类与拉曼激光的波矢方向无关,包括二阶塞曼效应、单光子频移、射频相移等,可以通过改变波矢方向消除影响;另一类与波矢方向有关,包括双光子相移、科里奥利力效应、波前畸变等效应。表2给出了参加第十届全球绝对重力仪国际比对(ICAG2017)前NIM-AGRb-1的系统评估结

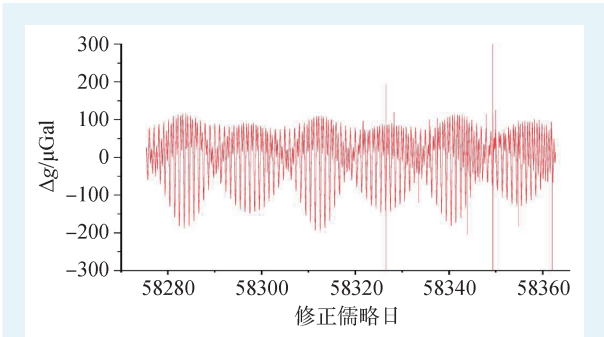


图7 NIM-AGRb-1连续工作2000小时后的测量结果

表2 NIM-AGRb-1的系统误差评估结果

系统效应	误差/ μGal	不确定度/ μGal
k_{eff} 独立性	0.0	0.2
仪器自引力	3.3	0.2
垂直度	0.0	0.2
双光子频移	-5.2	0.8
科里奥利力	-19.7	0.8
波前畸变	1.3	4.0
激光频率	-0.5	0.2
微波频率	0.2	0.1
总和	-20.6	4.2

果, 总的系统不确定度为 $4.2 \mu\text{Gal}$ 。NIM-AGRB-1 在 ICAG2017 比对中取得了 $-2.4 \pm 4.6 \mu\text{Gal}$ 的国际比对量值等效度; 在 4 个点位的实测复现性为 $1.7 \mu\text{Gal}$, 该复现性在参加 ICAG2017 的所有原子干涉绝对重力仪中最好。

5 原子干涉绝对重力仪国内外进展

美国斯坦福大学的 Kasevich 和朱棣文最早提出了采用冷原子喷泉和双光子拉曼跃迁来测量重力加速度^[32]。1992 年, 他们采用冷钠原子喷泉实现了重力加速度 g 的测量^[33], 灵敏度为 $1.3 \times 10^3 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$ 。2001 年, 改用冷铯原子喷泉又将单次 (1.3 s) 测量稳定度提高到 $20 \mu\text{Gal}$, 自评系统不确定度为 $3.4 \mu\text{Gal}$, 与 FG5 测值之差为 $7 \pm 7 \mu\text{Gal}$ ^[12]。法国巴黎天文台 (LNE-SYRTE) 采用自由落体的铷原子测量重力加速度, 2014 年的测量灵敏度达到 $5.7 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$ ^[34]。2009 年与 2013 年参加了两次国际绝对重力仪比对, 分别取得了 $-1.6 \pm 7.8 \mu\text{Gal}$ 与 $6.2 \pm 5.5 \mu\text{Gal}$ 的国际比对等效度^[35, 36]。德国柏林洪堡大学采用铷原子喷泉研制成了可移动的重力仪, 2015 年该课题组报道其重力测量灵敏度为 $9.6 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$, 长期稳定度最小值可以达到 $0.05 \mu\text{Gal}$, 自评估系统不确定度为 $3.9 \mu\text{Gal}$ ^[13]。法国 iXblue 公司研制了便携绝对重力仪 AQG, 2021 年报道在 1 s 积分时间内分辨率达到 $50 \mu\text{Gal}$, 长时间稳定度达到 $1 \mu\text{Gal}$, 同时具有安装和预热时间很短的优点^[37]。加州大学伯克利分校研发的可移动原子干涉重力仪灵敏度达到了 $37 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$, 长期稳定性优于 $2 \mu\text{Gal}$, 同时在伯克利山的实地考察中重力仪的实际灵敏度约为 $500 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$, 不确定度为 $40 \mu\text{Gal}$ ^[38]。

国内多家单位开展了原子干涉绝对重力仪的研究工作。根据应用场景的不同, 各单位研究的重点也有所不同。一些研究聚焦于性能指标的提升, 另一些则将重点放在了仪器的小型化与实用化方面。在短期灵敏度方面, 华中科技大学研制的基于布拉格方式的原子干涉绝对重力仪展示了 $2.2 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$ 的灵敏度^[39], 为目前国

际最好水平。2017 年, 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、浙江工业大学、中国计量科学研究院研制的 4 台原子干涉绝对重力仪参加了第十届全球绝对重力仪比对, 分别取得了 $-3.8 \pm 10.2 \mu\text{Gal}$ 、 $1.3 \pm 3.0 \mu\text{Gal}$ 、 $-11.4 \pm 14.0 \mu\text{Gal}$ 、 $-2.4 \pm 4.6 \mu\text{Gal}$ 的国际比对等效度^[40]。2023 年, 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院、中国计量科学研究院的 2 台原子干涉绝对重力仪参加了在美国举办的第十一届全球绝对重力仪比对, 分别取得了 $-1.92 \pm 2.62 \mu\text{Gal}$ 、 $0.59 \pm 4.91 \mu\text{Gal}$ 的国际比对等效度^[41]。中国科学技术大学从 2015 年开始原子干涉绝对重力仪的样机研制, 到 2021 年基本完成定点高精度小型化原子干涉绝对重力仪的定型。目前短期灵敏度达到 $30 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$, 长期稳定度优于 $1 \mu\text{Gal}$ ^[42]。航空工业计量所研制了喷泉式冷原子干涉绝对重力仪样机, 同时还开展了小型化和工程化可搬运重力仪样机, 并已经服务于重力计量^[43]。国防科技大学研制了一套基于原子干涉仪的车载重力测量系统, 基于小型化、高度集成的仪器设计, 实现了高精度的野外重力测量, 室外测量灵敏度为 $520 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$ 、测量重复性优于 $20 \mu\text{Gal}$ ^[44]。

6 总结与未来展望

原子干涉绝对重力仪具有准确度高、稳定度好、测量速度快、无机械磨损等优点, 在大地测量、计量科学、惯性导航等方面都具有十分显著的应用价值。经过 30 多年的发展, 原子干涉绝对重力仪在灵敏度、稳定度、连续工作能力等方面都取得了长足进步, 在进一步提高准确度和小型化方面仍有较大发展潜力。

目前原子干涉绝对重力仪的准确度达到了 $3\text{—}5 \mu\text{Gal}$ 的水平^[45]。限制准确度进一步提高的主要原因在于原子具有有限的温度, 在自由下落过程中会横向膨胀。这样拉曼激光的波前畸变会带来额外的相移, 给重力测量引入系统误差。采用温度更低的冷原子样品有利于减小波前相位误差。因此研究如何有效地降低原子云的温度, 特别是

在水平方向的温度对提高原子干涉绝对重力仪的准确度具有非常重要的意义。采用温度更低的冷原子样品,原子干涉绝对重力仪的不确定度有望进一步降低至亚微伽水平。

在原子干涉绝对重力仪的小型化与可移动化方面,随着小型化超高真空系统、小型化激光和光路系统,以及小型化隔振系统的发展,小型化

原子干涉绝对重力仪的发展也越来越快。其中,对载体动态环境下的振动噪声处理是动态重力测量的难点和重点,改良主被动隔振技术以及振动补偿技术都是研究的重点。虽然小型化原子干涉绝对重力仪可能会牺牲一些精度,但由于其技术发展潜力巨大,且在某些应用领域,如地震监测、惯性导航等,具有独特的优势,仍然值得关注。

参考文献

- [1] Riegger J *et al.* Water Resources Research, 2014, 50(4): 3444
- [2] Liu H *et al.* Journal of Geophysical Research-Space Physics, 2005, 110(A4): A04301
- [3] Bingham R J *et al.* Geophysical Research Letters, 2011, 38: L01606
- [4] Kibble B P *et al.* Metrologia, 2007, 44: 427
- [5] 卢炳坤, 林弋戈, 方占军. 物理, 2023, 52(7): 456
- [6] 赵国栋, 卢晓同, 常宏. 激光与光电子学研究进展, 2023, 60(11): 1106003
- [7] Denker H *et al.* Journal of Geodesy, 2018, 92(5): 487
- [8] Marson I *et al.* Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1986, 19(1): 22
- [9] Francis O. Journal of Geodesy, 2021, 95: 116
- [10] iGrav 轻便型超导重力仪. <https://www.greenviewgeo.cn/zh-hant/products/igrav%E8%BD%BB%E4%BE%BF%E5%9E%8B%E8%B6%85%E5%AF%BC%E9%87%8D%E5%8A%9B%E4%BB%AA>
- [11] FG5-X 绝对重力仪. <https://www.greenviewgeo.cn/zh-hant/products/fg5-x%E7%BB%9D%E5%AF%B9%E9%87%8D%E5%8A%9B%E4%BB%AA>
- [12] Peters A *et al.* Metrologia, 2001, 38: 25
- [13] Freier C *et al.* 2015, arXiv: 1512.05660v1-6 [physics.atom-ph]
- [14] Hu Z K *et al.* Phys. Rev. A, 2013, 88: 043610
- [15] Louchet-Chauvet A *et al.* New Journal of Physics, 2011, 13: 065025
- [16] Wang S K *et al.* Metrologia, 2018, 55(3): 360
- [17] Wu X *et al.* Optica, 2017, 4(12): 1545
- [18] Nshii C C *et al.* Nature Nanotechnology, 2013, 8(5): 321
- [19] 赵阳, 王少凯, 庄伟 等. 激光与光电子学进展, 2015, 52: 091406
- [20] Zhao Y *et al.* Photonics, 2020, 7: 32
- [21] Sané S S *et al.* Optics Express, 2012, 20(8): 8915
- [22] Zhu L *et al.* Optics Express, 2018, 26(6): 6542
- [23] Cong Y *et al.* Optics Letter, 2024, 49(10): 2745
- [24] Fang B *et al.* J. Phys.: Conf. Ser., 2016, 723: 012049
- [25] Hensley J M *et al.* Review of Scientific Instruments, 1999, 70: 2735
- [26] Tang B *et al.* Review of Scientific Instruments, 2014, 85: 093109
- [27] Zhou M K *et al.* Review of Scientific Instruments, 2015, 86: 046108
- [28] Chen B *et al.* Chinese Optics Letters, 2020, 18(9): 090201
- [29] Zhou Y *et al.* Sensors, 2024, 24(3): 1016
- [30] Li G *et al.* Review of Scientific Instruments, 2014, 85(10): 104502
- [31] Yao J M *et al.* IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(6): 2670
- [32] Kasevich M *et al.* Physical Review Letters, 1991, 67(2): 181
- [33] Kasevich M *et al.* Applied Physics B-Photophysics and Laser Chemistry, 1992, 54(5): 321
- [34] Gillot P *et al.* metrologia, 2014, 51: L15
- [35] Jiang Z *et al.* Metrologia, 2012, 49: 666
- [36] Francis O *et al.* Metrologia, 2015, 52: 07009
- [37] Janvier C *et al.* Recent Advances in Quantum Gravity Sensors. In: First International Meeting for Applied Geoscience & Energy Expanded Abstracts, 2021: 3039
- [38] Wu X *et al.* Sci. Adv., 2019, 5: eaax0800
- [39] Zhang T *et al.* Physics Review Applied, 2023, 20: 014067
- [40] Wu S Q *et al.* Journal of Geodesy, 2021, 95: 63
- [41] Newell D *et al.* CCM. G-K2.2023 Key Comparison and Additional Comparison. 2024, <https://www.bipm.org/documents/d/guest/ccm-g-k2-2023>
- [42] Jiang B N *et al.* Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2021, 51(7): 074205
- [43] 白金海, 马慧娟, 胡栋 等. 宇航计测技术, 2023, 43(05): 1
- [44] Zhang X *et al.* Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(9): 94
- [45] Geiger R *et al.* AVS Quantum Science, 2020, 2(2): 024702