小型化量子重力仪高精度重力测量

翁堪兴, 周寅, 朱栋, 王凯楠, 吴彬, 程冰, 林强*

浙江工业大学理学院, 浙江省量子精密测量重点实验室, 杭州 310023

*联系人, E-mail: qlin@zjut.edu.cn

收稿日期: 2020-07-11; 接受日期: 2020-09-23; 网络出版日期: 2021-02-23

远洋航路搭载测量与保障技术研究及应用试验(编号: DD20191004)、国家自然科学基金(编号: 61727821)和国家重点研发计划(编号: 2017YFC0601602)资助项目

摘要 重力场是地球的一个基本物理场, 它携带和反映了地球的诸多信息, 对基础研究和实际应用都非常重要. 由于地球重力场是随空间、时间变化的, 需要可移动的高精度重力仪进行测量. 量子重力仪是近年发展起来的一种基于原子干涉的新型高精度重力测量设备. 和传统重力仪相比, 量子重力仪具有更好的稳定性和准确性, 可以精密地勘测地球的重力场分布. 本文对量子重力仪的基本原理、实验及其应用进行了综述, 主要包括国内外小型化量子重力仪方面的最新研究成果; 介绍了小型化量子重力仪的基本原理、小型化量子仪核心单元(真空系统、光路系统、隔振系统和野外测量保障系统)的研制以及在重力比对、地震监测和重力场测绘等领域的应用. 最后, 本文介绍了量子重力仪的精度限制因素(拉曼相位噪声、振动噪声和探测噪声)以及在其他基础物理研究领域(万有引力常数测量和弱等效原理检验)的应用. 量子重力仪作为量子传感器中较为成熟的技术, 尤其在动态测量方面表现出明显的优势. 未来, 随着量子重力仪的不断发展, 还可能在地球物理、资源探勘、惯性导航和太空重力观测等领域发挥重要作用.

关键词 重力场, 量子重力仪, 精密测量

PACS: 03.75.-b, 06.30.Gv, 07.07.Df, 39.25.+k

1 引言

地球重力场是地球系统物质质量分布产生的一个最基本的物理场. 它客观反映了由地球各圈层相互作用和动力过程决定的物质空间分布、运动和变化. 同时也承载了地球系统演化进程中的一切与其重力场作用机制相关的信息. 因此, 地球重力场的时空演化是地

球系统动力过程的历史再现^[1].

地球重力场分布由地球物质分布结构决定, 因此对地球重力场进行高精度测量具有重要科学意义. 主要体现在: 在地球物理方面, 利用高精度重力数据可以计算出地球内部的物质密度分布, 对研究地球内部结构、地球动力学和大地水准面的确定精度具有重要的意义^[2-4]; 通过对高精度重力数据的反演可以推断出

引用格式: 翁堪兴, 周寅, 朱栋, 等. 小型化量子重力仪高精度重力测量. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 074204
Weng K X, Zhou Y, Zhu D, et al. High-accuracy gravity measurement with miniaturized quantum gravimeter (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 074204, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0263](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0263)

地球内部矿物质的分区, 为矿产资源勘探提供有效的技术支持^[5,6]; 在惯性导航方面, 高精度的重力场数据是导航系统的重要修正量, 对提升导航精度非常重要^[7,8]; 同时连续的高精度重力观测也是研究地震活动的重要手段^[9,10].

自1963年意大利科学家伽利略利用斜坡滚动实验测量重力加速度起, 世界各地的科学家们就开始了基于不同原理的重力测量技术探索. 其中较为成熟的方案有3种: 摆法、光学干涉法和原子干涉法. 其中摆法是由法国天文学家Richer在1672年首次发现摆的振动周期和其所处的地理位置有关. 法国的Borda在1792年利用摆仪实现了重力 $m\text{Gal}$ ($1\text{ Gal}=1\text{ cm/s}^2$)量级的测量^[11].

到了20世纪, 重力测量技术进入了快速发展阶段, 相继诞生了光学干涉式和原子干涉式的重力仪. 其中, 光学干涉式重力仪的典型代表是美国的Micro-g La-Coste公司研制的FG-5型角锥下落式绝对重力仪^[12-14], 其测量精度在 $2\text{--}5\text{ }\mu\text{Gal}$. 但是角锥每次自由下落到最后都会和托车(角锥提升装置)有硬接触, 每次硬接触都会对角锥带来一定的磨损. 为了延长落体(角锥)的使用寿命, 该型重力仪的测量频率通常设置在 $1/15\text{ Hz}$ 左右^[15]. 原子干涉式绝对重力仪是近30年快速发展起来的量子绝对重力仪^[16], 其最佳分辨率已经达到 $4.2\text{ }\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$, 其精度已经达到与FG-5相当的水平^[17]. 该型重力仪的落体是冷原子团, 不存在机械磨损等问题, 可以有效提升测量频率, 目前已经实现测量频率为 $1\text{--}2\text{ Hz}$ ^[18-20]. 浙江工业大学研究组(原依托浙江大学)自2002年起开始量子重力仪的研制工作, 是国

内最早开展量子重力仪研究的研究组之一. 2016年, 浙江工业大学研究组自主研发的可移动式量子重力仪, 是我国首台参与亚太地区绝对重力比对的量子重力仪. 在此之后, 继续参加了2017年的第10届全球绝对重力仪国际比对(International Comparison of Absolute Gravimeters, ICAG-2017), 并且比对结果的中心值与此重力仪的测量结果在误差范围内吻合. 2019年, 浙江工业大学自主研发的ZAG-E系列小型化量子重力仪(图1(a))正式通过中国计量科学研究院校准, 不确定度为 $10\text{ }\mu\text{Gal}$. 此外, 法国Muquans公司也研制了小型化的量子重力仪, 图1(b)是该公司的AQG型量子重力仪^[21,22].

2 量子重力仪的原理

2.1 激光冷却

量子重力仪和光学干涉式重力仪一样都需要在真空环境下释放落体. 但是和光学干涉式重力仪不同, 量子重力仪的落体是通过激光冷却技术制备的冷原子团.

激光冷却技术借助于光场对原子的作用力. 虽然早在17世纪牛顿和开普勒就意识到了这种作用力, 但是由于这种作用力实在太微弱, 在实验上很难被观察到. 直到1933年, 德国汉堡大学的Frisch^[23]使用钠的共振光实现了钠原子运动轨迹的偏转. 此后, 得益于激光的发明和应用, 莫斯科光谱研究所的Letokhov和美国贝尔实验室的Ashkin等人^[24-26]相继提出了利用激光对

图 1 (网络版彩图) 小型化量子重力仪. (a) 浙江工业大学研制^[22](已获得授权); (b) 法国Muquans公司研制^[21](已获得授权)
Figure 1 (Color online) The miniaturized quantum gravimeters produced by (a) Zhejiang University of Technology (ZJUT) (Adapted with permission from ref. [22] © Acta Physica Sinica), (b) Muquans, France (Adapted with permission from ref. [21] © Springer Nature).

原子产生的作用力来实现对原子的操控。

1975年, 美国国家标准与技术研究院的Wineland与Dehmelt^[27]和美国斯坦福大学的Hänsch与Schawlow^[28]提出利用对射激光实现镁离子和中性原子的多普勒冷却. 多普勒冷却的基本原理是: 当初速度为 v_0 的被冷却原子受到一束反向传输的激光照射时, 由于多普勒效应, 原子实际感受到的激光频率会比激光本身的频率高, 因此冷却激光的频率需要相对原子的跃迁频率存在红失谐(负失谐)来补偿多普勒效应带来的频差. 与此同时, 被冷却原子受激跃迁至激发态吸收了运动方向相反光子的动量($\hbar k$), 原子将会被减速至 $v_0 - \hbar k / m$ (其中, $\hbar$ 是狄拉克常数, k 是激光的波矢, v_0 是原子的初速度, m 是原子的质量). 原子在激发态的维持时间非常短, 很快就会通过自发辐射回落至基态. 回落至基态的原子将会继续吸收反向运动的光子, 形成循环跃迁. 在 n 个周期之后, 原子将会被减速至 $v_0 - n\hbar k / m$, 由于每次自发辐射出的光子方向是完全随机的, 所以 n 次循环之后自发辐射产生的合力是零, 并不会额外加速原子.

1985年, 美国贝尔实验室的朱棣文研究组^[29]利用三对两两对射激光的重合处对预冷却的钠原子实现了“光学粘胶”(Optical Molasses), 并且将钠原子冷却至多普勒极限温度 $240 \mu\text{K}$. 其中, 多普勒冷却的理论极限温度 T_D 是: $T_D = \hbar\Gamma / 2k_B$ (其中, $\hbar$ 是狄拉克常数, Γ 是原子的自然线宽, k_B 是玻尔兹曼常数). 但是, 仅仅过了两年时间, 1987年美国国家标准与技术研究院的Phillips研究组^[30]同样利用光学阻尼成功将钠原子冷却至 $43 \mu\text{K}$, 突破了理论多普勒极限温度. 1989年, 朱棣文研究组^[31]和法国巴黎高等师范学院的Cohen-Thannoudji研究组^[32]分别独立提出了多能级非缓变跃迁的亚多普勒理论. 此后, 基于亚多普勒理论, 原子被冷却的最低温度不断被打破.

利用光学粘胶可以实现原子的超低温冷却, 但是光学粘胶没有指向中心的恢复力, 无法实现冷原子团的囚禁. 1987年, 朱棣文研究组和美国麻省理工的Pritchard研究组^[33,34]合作采纳了Dalibard提出的不均匀静磁场和光学粘胶结合的方法, 实现了对原子的囚禁. 这种结合了光学粘胶和梯度静磁场的装置, 称为“磁光阱”.

磁光阱的基本原理如图2(a)所示, 它主要由6束两

图 2 (网络版彩图) (a) 磁光阱模型; (b) 原子能级结构图
Figure 2 (Color online) (a) The magneto-optical trap setup; (b) energy levels of atoms.

两对射的圆偏振红失谐激光搭配上梯度静磁场组成. 通常该磁场梯度大小为 10 G/cm , 由一对反亥姆霍兹线圈提供, 并且在6束激光的交汇处磁场强度为零. 此时, 磁光阱中心的原子在磁场的作用下, 原子的磁子能级将发生塞曼分裂, 能级结构如图2(b)所示. 假定原子基态总角动量 $J=0$, 在磁场中没有发生塞曼位移和分裂, 则原子的激发态 $J=1$, 具有三个磁子能级分别是 $m_f = 0, \pm 1$, 在磁场中产生塞曼分裂, 在一定的磁场强度内, 磁子能级 $m_f = -1$ 沿 Z 轴正方向线性递减, 而沿负方向能级线性递增; $m_f = 0$ 保持不变, $m_f = 1$ 的变化与 $m_f = -1$ 相反. 沿 Z 轴对射激光作用至原子, 假设激光的频率为 ω_L , 相对基态到激发态磁子能级 $m_f = 0$ 共振频率的失谐为 δ_0 , 激光的偏振方向分别为 σ^+ 和 σ^- . 假定原子初始状态位于 z_0 ($z_0 > 0$), 由 σ 跃迁选择定则可可知 σ^+ 和 σ^- 分别对应的跃迁为 $\Delta m_f = 1$ 和 $\Delta m_f = -1$. 在 $z_0 < 0$ 处, 由于原子吸收更多的 σ^+ 光子, 从而感受到的是指向中心的正向力. 同理, 在 $z_0 > 0$ 处, 由于原子吸收更多的 σ^- 光子, 同样感受到的是指向中心的负向力. 于是, 磁光阱中心的原子都将感受到指向中心的辐射压力的作用^[35]. 因此, 将上述理论推广到磁光阱的三维坐标的 x, y 轴同样适用, 最终在磁光阱中心实现原子的三维冷却与囚禁, 被囚禁的冷原子团如图3所示.

近年来, 随着磁光阱技术的应用与发展, 相继出现了镜面磁光阱^[36]、金字塔型磁光阱^[37]和光栅磁光阱^[38,39], 如图4所示, 其本质还是基于光学粘胶和梯度静磁场的组合. 单光束磁光阱和传统的六光束磁光阱相比, 具有光路简单、稳定性好等优点, 但是该方案对激光性能和制造工艺要求较高.

图 3 (网络版彩图)磁光阱中囚禁的冷原子团

Figure 3 (Color online) The cold atomic cloud trapped in the magneto-optical trap.

图 4 (网络版彩图)单光束磁光阱. (a) 金字塔型磁光阱^[37](已获得授权); (b) 光栅型磁光阱^[39](已获得授权)

Figure 4 (Color online) The single beam magneto-optical trap. (a) Pyramid magneto-optical trap [37]. Adapted with permission from ref. [37] © Springer Nature; (b) grating magneto-optical trap [39]. Adapted with permission from ref. [39] © American Physical Society.

2.2 原子干涉

1923年, 法国物理学家德布罗意提出具有质量的粒子也具有波动性质, 其波长 λ 由普朗克常量 h 和粒子的动量 p 决定, 即 $\lambda=h/p$. 1927年, Thomson等人在单晶和多晶上观察到了电子的衍射和干涉现象. 但是原子由于动量大, 其物质波波长极短(通常在 $0.1\text{--}1\text{ \AA}$), 在实验上很难观察到其干涉现象. 激光冷却技术的出现, 可以有效地降低原子的动量, 使其物质波波长远大于没有激光冷却的原子, 有利于在实验上观察研究. 1988年, Pritchard研究组^[40]首次利用激光实现了用于原子干涉的分束仪, 并观察到了钠原子在驻波场中的Bragg散射. 1991年, 各种类型的原子干涉仪相继出

现^[41–43], 其中包括美国斯坦福大学的朱棣文研究组提出的用双光子受激Raman跃迁型Mach-Zehnder原子干涉仪, 并实现了重力的高精度测量^[44].

光学干涉仪是通过反射镜和分光镜来实现光波的分束、反转和合束. 原子干涉仪和光学干涉仪相似, 同样也需要对物质波进行分束、反转和合束的操作. 目前, 绝大部分实验上采用的是三脉冲受激Raman跃迁来实现Mach-Zehnder原子干涉仪, 如图5所示.

原子干涉仪的实验过程如下: 首先通过磁光阱技术在真空腔中制备足够数目的冷原子(通常在 10^8 个原子数量级), 然后通过微波选态和Raman速度选择之后, 原有的原子团只剩下对磁场不敏感的磁子能级为 $m_F=0$ 的原子. 在原子自由下落过程中, t_0 时刻作用第一束 $\pi/2$ 脉冲, 持续时间 τ 在数个微秒, 此时基态的原子将会均分到两个基态上. 在这里, 第一束脉冲的作用类似光学Mach-Zehnder干涉仪中的分光镜. 第一个脉冲作用结束之后, 原子开始沿着两条路径自由演化, 持续时间为 T . 在 t_0+T 时刻, 作用第二束 π 脉冲, 脉冲的持续时间是 $\pi/2$ 脉冲的两倍 2τ , 该脉冲的作用是实现原子路径和能级的反转, 类似光学干涉仪中的反射镜, 改变光波的传播方向. π 脉冲结束之后, 原子的路径开始闭合, 此时在 t_0+2T 时刻, 再作用第三束 $\pi/2$ 脉冲, 沿不同演化路径的双态原子相干叠加起来, 实现原子的内态干涉. 在整个干涉过程中, 三束脉冲的强度是一致的, 改变的是脉冲的持续时间.

完成原子内态干涉之后, 原子会继续自由下落, 并进入原子数探测区. 原子上下两条路径的相位差 $\Delta\phi=\phi_1-2\phi_2+\phi_3$ ($i=1, 2, 3$ 表示第 i 个脉冲, ϕ_i 为每束

图 5 (网络版彩图)原子干涉仪脉冲时序

Figure 5 (Color online) The sequence of the three-pulse atomic interferometer.

脉冲引起的相位变化). 这个相位差可以在原子进入探测区之后, 通过分别探测 $|F=1\rangle$ 态的原子数 N_1 和 $|F=2\rangle$ 态的原子数 N_2 , 计算出某一态的跃迁概率 $P=N_2/(N_1+N_2)$. 对于双态原子干涉仪而言, 任一态的原子跃迁概率 P 可以表述为

$$P = P_0 + \frac{C}{2} \cos(\Delta\phi), \quad (1)$$

$$\Delta\phi = (k_{\text{eff}}g - 2\pi\alpha)T^2, \quad (2)$$

其中, P_0 为原子跃迁概率的偏置, C 是原子干涉条纹的对比度, k_{eff} 是Raman光的有效波矢, g 是当地的重力加速度, α 是Raman光的啁啾率, T 是两束Raman脉冲的时间间隔. 所以, 通过计算原子的跃迁概率即可精密测量重力加速度 g .

3 小型化量子重力仪的研制

3.1 真空系统

小型化量子重力仪的真空系统是为原子囚禁和干涉提供理想的工作环境. 通常要求真空度在 10^{-7} Pa水平以上, 这样可以有效抑制背景原子与冷原子相互碰撞引起的加热效应, 从而提高原子干涉信号的信噪比. 同时, 对真空腔体的材料也有要求, 尽量使用无磁性低放气的材料.

目前量子重力仪大部分的真空腔采用的是金属腔体和玻璃窗片的组合形式. 但是由于存在两种不同的材料, 会使玻璃窗片受力不均匀产生形变, 从而影响到量子重力仪测量精度. 石英是一种理想的用于制备真空的材质, 它具有较高的透过率、低膨胀系数和He漏率^[45]. 目前, 越来越多的研究组开始采用石英材质制备用于量子传感器的真空腔^[46-48].

图6是浙江工业大学研究组使用全石英材质制备的用于小型化量子重力仪的真空腔. 通过和原有的金属真空腔相比, 石英真空腔囚禁原子的速率明显高于金属腔, 而且对冷却光功率的要求更低, 更适用于小型化量子传感器^[49].

此外, 单光束磁光阱和石英真空腔的组合应用, 不仅可以简化量子重力仪真空系统, 还能提升量子重力仪的稳定性. 法国巴黎天文台和LP2N实验室联合研制的“MiniAtom”量子重力仪^[50], 以及Muquans公司的AQG型量子重力仪^[21]采用的就是单光束金字塔型磁光阱技术.

图 6 (网络版彩图)全石英微型真空腔^[49](已获得授权)

Figure 6 (Color online) The quartz miniaturized vacuum chamber. Adapted with permission from ref. [49] © The Optical Society.

3.2 光路系统

光路系统是小型化量子重力仪的核心单元之一, 其主要功能是为量子重力仪提供用于原子囚禁、冷却、选态和干涉等各实验过程中所需要的特定频率的激光, 如图7所示.

用于小型化量子重力仪的光路系统不仅要体积和质量足够小, 同时还要能够满足小型化量子重力仪长期在野外使用的需求, 所以光路系统在设计的同时需要克服野外复杂环境变化等不确定因素. 图8是浙江工业大学小型化量子重力仪的光路方案, 其中一台激光器(DLC1)通过调制转移光谱锁定在固定频率, 另一台激光器(DLC2)通过拍频锁相的方法锁定频率. 两台激光器的激光通过光路系统在空间和时序上的控制,

图 7 (网络版彩图) ^{87}Rb 的D₂线能级图和激光的频率

Figure 7 (Color online) Level diagram of the ^{87}Rb D₂ line.

图 8 (网络版彩图)浙江工业大学小型化量子重力仪光路系统原理图

Figure 8 (Color online) The scheme of laser system for atom gravimeter designed by ZJUT.

产生小型化量子重力仪所需的拉曼光、冷却光和探测光等。同时,为了使该光路系统能够适应野外高温(严寒)环境,还针对光路系统设计了精密温控系统。通过精密温控系统,确保光路系统始终工作在最佳温度 25°C (波动小于 0.5°C),以便充分发挥光路的性能。

随着原子干涉技术的不断成熟和应用,基于量子

技术的惯性传感器已经开始应用到太空中^[51-53]。因此,对光路系统的稳定性和环境适应性的要求也更加苛刻。图9是法国巴黎天文台Franck研究组^[54]针对太空冷原子惯性传感器设计的光路系统,该系统采用高稳定性的通信级激光器,通过对 1560 nm 通信级激光倍频的方法来满足冷原子惯性传感器对激光的需求。目前,

图 9 (网络版彩图)用于太空冷原子惯性传感器的光路系统^[54](已获得授权)。(a) 光路原理图; (b) 光路实物图

Figure 9 (Color online) The laser system for cold atom inertial sensor in space. Adapted with permission from ref. [54] © Springer Nature. (a) Schematic of the laser system; (b) picture of the laser system.

光路系统通过了地面的测试, 并且光路系统的技术成熟度已经达到了4级, 未来可以用于完成太空任务.

此外, 1560 nm激光器和电光调制器(EOM)组合的调制光路也是目前量子重力仪的主流方案, 国内外诸多研究组也都有使用该方案^[55-58].

3.3 隔振系统

量子重力仪是通过测量自由下落的冷原子团和拉曼反射镜之间的相位差来获得重力加速度的. 拉曼反射镜的振动噪声是小型化量子重力仪的主要噪声来源之一, 尤其是在野外测量时, 振动环境复杂多变, 振动噪声会直接影响仪器的测量精度.

用于重力仪的隔振系统主要可以分为被动式(无源)隔振系统和主动式(有源)隔振系统两大类. 重力仪被动式隔振系统的类型之一是基于长周期的零长弹簧设计^[59]. 该型被动隔振系统主要包括零长弹簧结构、几何反弹簧结构、欧拉压杆结构和扭秤弹簧结构等. 目前意大利计量院研制的IMGC-02型(光学干涉式)绝对重力仪就是使用该原理的被动隔振系统. 由于被动隔振系统的本质是利用特殊结构的弹性元件使系统获得较好的隔振效果, 所以该隔振系统容易受到弹性材料蠕变和温漂等因素影响, 无法长期保持良好的隔振性能. 清华大学研究组通过反馈控制补偿零长弹簧的蠕变和温漂的方法, 使得被动隔振系统能够维持本征频率32 s长达1年以上^[60].

量子重力仪使用被动隔振系统对振动噪声的抑制效果有限. 因此, 法国巴黎天文台研究团队通过被动隔振系统和地震仪组合的方式实现振动噪声抑制^[61], 实验装置如图10所示. 测量过程中使用地震仪同步记录拉曼反射镜的振动, 再利用数字滤波器对振动噪声进行修正, 最终重力仪的灵敏度提升了50%^[9].

量子重力仪还可以使用主动式隔振系统. 根据弹簧振子模型的不同可以分为一级主动式隔振系统^[62-65]和二级主动隔振系统^[66-69]. 浙江工业大学研究组的主动隔振系统采用的是一级主动式隔振系统, 如图11所示. 该隔振系统主要是由被动隔振平台、音圈电机和地震仪等构成. 通过采用滑模鲁棒算法, 使得系统在0.1–10 Hz频域范围内的残余振动噪声功率谱密度被隔振平台最大降低了99.9%. 同时, 该算法还具有整定参数少、抗干扰能力强等特点^[70].

随着量子重力仪的不断发展和应用推广, 专门针

图 10 (网络版彩图)基于振动噪声修正的隔振系统的原理图^[61](已获得授权)

Figure 10 (Color online) The schematic diagram of vibration isolation system based on vibration noise correction. Adapted with permission from ref. [61] © Springer Nature.

A: 拉曼反射镜; B: 地震仪; C: 音圈电机
D: 二维平衡台; E: 平衡块; F: 被动隔振平台

图 11 (网络版彩图)浙江工业大学小型化量子重力仪隔振系统实物图^[70]

Figure 11 (Color online) The picture of vibration isolation system of miniaturized quantum gravimeter designed by ZJUT. Adapted with permission from ref. [70] © Acta Physica Sinica.

对量子重力仪设计的隔振系统取得显著进展, 其中主要包括清华大学^[69]、中国科学院武汉物理与数学研究所^[64]、华中科技大学^[65]和浙江工业大学^[71]等. 这些单位基于不同的隔振原理和结构, 设计了适用于小型化量子重力仪的隔振系统.

3.4 野外测量保障系统

小型化量子重力仪的应用场景包括野外. 为了保障量子重力仪在野外正常工作, 基于小型化量子重力仪的工作特性, 浙江工业大学研究组设计了专用于量子重力仪野外测量保障系统, 如图12所示. 该量子重力仪野外测量保障系统主要由差分GPS测高系统、隔振系统、重力仪姿态调整系统、不间断电源供电系统(UPS)以及温湿度控制系统等组成. 其中, 差分GPS负责实时记录重力仪海拔信号, 可用于相关参数的修正; 隔振系统用于抑制车厢和地面的振动噪声, 主要抑制10 Hz以上的振动噪声; 重力仪姿态调整系统用于量子重力仪调水平, 确保拉曼光反射镜是水平放置的. UPS和温湿度控制系统给整个测量系统提供能源和良好的测量环境, 确保仪器的性能处于最佳状态^[22].

法国国家航空航天研究中心(Office National d'Etudes et de Recherches Aéronautiques, ONERA)的研究组是国际上率先开展小型化量子重力仪野外测试的课题组. 在2015–2017年, 相继进行了小型化量子重力仪的船载^[48]和机载^[72]测试实验. 图13是法国ONERA研究组研制的量子重力仪的机载模拟系统. 该系统主要包括: 六轴机载环境模拟平台、陀螺稳定平台 and 小型化量子重力仪. 通过预先在实验室模拟野外机载测量环境, 可以有效地对野外测量保障系统进行设计和优化.

4 小型化量子重力仪的应用

4.1 重力比对

高精度绝对重力仪是用于精确测量重力加速度值的高精密仪器. 为了验证重力仪测量结果的有效性, 需要定期进行绝对重力仪测量比对, 以验证其测量不确定度的有效性并确保其测量值的可溯源性^[73]. 全球绝对重力仪国际比对每4年举办一次, 是目前级别最高的重力比对, 其比对结果获得了国际计量局和各国计量院的权威认可.

2009年, 在国际计量局举办的第8届全球绝对重力仪国际比对(ICAG-2009)上, 量子重力仪(法国巴黎天文台研制的CAG-1)首次参与了对比^[74].

此后, 每届全球绝对重力仪国际比对都有量子重力仪参与对比^[75]. 中国计量科学研究院在2017年成功

图 12 浙江工业大学设计的野外测量保障车辆示意图

Figure 12 The schematic diagram of field measurement supporting vehicle designed by ZJUT.

图 13 (网络版彩图)法国研制的量子重力仪机载模拟系统照片^[72](已获得授权)

Figure 13 (Color online) The photograph of the motion simulator for the atom gravimeter. Adapted with permission from ref. [72] © Springer Nature.

举办了第10届全球绝对重力仪国际比对(ICAG-2017), 这是全球绝对重力仪国际比对首次在中国举行, 标志着我国在重力精密测量领域获得了国际认可. 此次全球绝对重力仪国际比对中, 我国共有7台自主研发的绝对重力仪参与国际重力比对, 其中有1台光学干涉式重力仪和6台量子重力仪. 这是全球绝对重力仪国际比对

自举办以来参与的量子重力仪最多的一次,展示了我国在量子重力仪研制领域的实力.最后,有4台量子重力仪(图14中星形的测量结果,从左往右分别来自浙江工业大学(ZAG-Atom)、中国科学院武汉数学物理研究所(WAG-H5-1)、中国计量科学研究院(NIM-AGrb)和华中科技大学(HUST-QG))的测量结果获得此次全球绝对重力仪国际比对主办单位的认可和采用^[76].

4.2 地震监测

地震是最具破坏力的自然灾害之一,它是地壳快速释放能量过程中造成的振动.地震在孕育和发生的过程中,势必伴随着地球内部结构的变化.重力可以客观地反映地球内部变化,因此对地球重力的连续监测,是研究地震现象的重要手段,对防灾减灾意义重大.自1966年起,我国就开始了重力监测.在1997年,中国地震局研究团队通过分析1976年唐山大地震前后重力监测的数据,发现地震区域的重力值在震前和震后有明显变化^[77,78].尤其是在2008年汶川大地震前,中国地震局就曾通过分析重力监测数据对此次地震进行了中期预测,而且预测的震中和汶川大地震的震中是吻合的^[79].

量子重力仪作为高精度的重力测量仪器,已经多次监测到地震波信号.2009年,法国巴黎天文台报道了利用量子重力仪成功观测到来自我国的7.7级地震信号^[9].2013年,浙江大学研究组成功观测到巴基斯坦

的7.2级地震,观测结果和传统的地震仪高度一致,如图15所示^[10].

4.3 重力场测绘

小型化量子重力仪和传统的光学干涉重力仪相比,具有更快的测量速度和更强的环境适应性,因此更加适用于重力场测绘.

目前,法国ONERA的研究组已经成功利用量子重力仪进行了船载和机载重力场测绘^[48,72].其船载量子重力仪测量结果比商用的海洋重力仪(KSS32M)的精度高了5倍,机载量子重力仪测量结果的不确定度在1.7–3.9 mGal.2019年,加州大学伯克利分校的Müller研究团队^[80]也开展了车载量子重力仪野外测绘实验,测量结果不确定度在40 μ Gal.同年,浙江工业大学林强研究团队也开展了车载量子重力仪外场测绘工作,通过选取不同地形(平地和大斜坡),检验了量子重力仪野外环境适应性,此次外场测绘的环境恶劣,测量车厢外温度最高超过45°C.得益于良好的野外测量保障系统,量子重力仪的性能稳定.测量结果表明该车载量子重力仪的不确定度约30 μ Gal^[22].

5 总结与展望

本文对小型化量子重力的发展历程、基本原理和研制过程及其应用作了综述.和其他的量子惯性传感

图 14 (网络版彩图)第10届ICAG-2017全球绝对重力仪国际比对部分结果

Figure 14 (Color online) The partial results of global absolute gravimeter comparison for ICAG-2017.

图 15 (网络版彩图)量子重力仪观测到的7.2级地震信号^[10](已获得授权). (a) 分别使用量子重力仪(黑线)和传统地震仪(红线)采集到的地震信号; (b) 地震S波局部放大图

Figure 15 (Color online) 7.2 magnitude seismic signal observed by quantum gravimeter. Adapted with permission from ref. [10] © IOP Publishing. (a) Black curve: the acceleration measured by our quantum gravimeter; red curve: the seismic wave signal measured by the traditional seismometer; (b) surface waves' partial enlargement.

器相比,小型化量子重力仪已经到了实用化阶段,其各项技术指标已经比较成熟.量子重力仪作为一款能够实现重力场进行精密测量的高精密仪器,目前已经或即将在全球绝对重力仪国际比对、地震监测和重力场测绘等方面发挥重要的作用.

当前,小型化量子重力仪的精度主要受限于测量过程中的各项噪声,其中主要包括测量点的地面振动噪声、拉曼光的相位噪声以及探测噪声等^[61].如何有效地抑制这些测量噪声,已经成为提升小型化量子重

力仪精度的主要研究方向.

未来,量子重力仪将会继续朝着更加小型化和实用化的方向发展.例如,更加紧凑的真空腔体、振动抑制性能更好的隔振系统、更加稳定的光路系统以及体积和质量更小的电控系统等,使其具备更好的稳定性和便携性,在基础科学研究、资源勘探和惯性导航等领域发挥更大的作用.同时,欧美国家正在积极发展用于太空的量子传感器技术^[51,81],量子重力仪将来也有可能应用于太空中的重力观测等领域.

致谢 向所有参加过量子重力仪研究的本课题组师生、对本课题组相关研究给予过支持和帮助的所有专家学者表示衷心的感谢.

参考文献

- 1 Ning J, Wang Z. Progress and present status of research on earth's gravitational field. *J Geomat (China)*, 2013, 38: 1–7
- 2 Novák P, Kern M, Schwarz K P, et al. On geoid determination from airborne gravity. *J Geodesy*, 2003, 76: 510–522
- 3 Battaglia M, Roberts C, Segall P. Magma intrusion beneath long valley caldera confirmed by temporal changes in gravity. *Science*, 1999, 285: 2119–2122
- 4 Panet I, Flury J, Biancale R, et al. Earth system mass transport mission (e.Motion): A concept for future earth gravity field measurements from space. *Surv Geophys*, 2013, 34: 141–163
- 5 Blakely R J, Jachens R C. Regional study of mineral resources in Nevada: Insights from three-dimensional analysis of gravity and magnetic anomalies. *Geol Soc Am Bull*, 1991, 103: 795–803
- 6 Zhang G L, Zhao G X, He F Q, et al. Application of the gravity method to the iron ore exploration in eastern Hebei Province. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 2015, 89: 2097–2098
- 7 Wang Y, Wu L, Chai H, et al. Technology of gravity aided inertial navigation system and its trial in South China Sea. *IET Radar Sonar Navigat*,

- 2016, 10: 862–869
- 8 Chang L, Qin F, Wu M. Gravity disturbance compensation for inertial navigation system. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2019, 68: 3751–3765
- 9 Merlet S, Le Gouët J, Bodart Q, et al. Operating an atom interferometer beyond its linear range. *Metrologia*, 2009, 46: 87–94, arXiv: [0806.0164](#)
- 10 Wu B, Wang Z, Cheng B, et al. The investigation of a μGal -level cold atom gravimeter for field applications. *Metrologia*, 2014, 51: 452–458
- 11 Yao J M, Wu K. Review on the development of vibration isolators for absolute gravimeter (in Chinese). *Navigat Control*, 2019, 18: 14–26 [要佳敏, 伍康. 绝对重力仪隔振系统发展综述. *导航与控制*, 2019, 18: 14–26]
- 12 Niebauer T M, Sasagawa G S, Faller J E, et al. A new generation of absolute gravimeters. *Metrologia*, 1995, 32: 159–180
- 13 Okubo S, Yoshida S, Sato T, et al. Verifying the precision of a new generation absolute gravimeter FG5-Comparison with superconducting gravimeters and detection of oceanic loading tide. *Geophys Res Lett*, 1997, 24: 489–492
- 14 Faller J E, Marson I. Ballistic methods of measuring g -the direct free-fall and symmetrical rise-and-fall methods compared. *Metrologia*, 1988, 25: 49–55
- 15 Peters A, Chung K Y, Chu S. High-precision gravity measurements using atom interferometry. *Metrologia*, 2001, 38: 25–61
- 16 Kasevich M, Chu S. Measurement of the gravitational acceleration of an atom with a light-pulse atom interferometer. *Appl Phys B*, 1992, 54: 321–332
- 17 Hu Z K, Sun B L, Duan X C, et al. Demonstration of an ultrahigh-sensitivity atom-interferometry absolute gravimeter. *Phys Rev A*, 2013, 88: 043610
- 18 Fu Z, Wu B, Cheng B, et al. A new type of compact gravimeter for long-term absolute gravity monitoring. *Metrologia*, 2019, 56: 025001
- 19 Karcher R, Imanaliev A, Merlet S, et al. Improving the accuracy of atom interferometers with ultracold sources. *New J Phys*, 2018, 20: 113041, arXiv: [1804.04909](#)
- 20 Biedermann G W, Wu X, Deslauriers L, et al. Testing gravity with cold-atom interferometers. *Phys Rev A*, 2015, 91: 033629, arXiv: [1412.3210](#)
- 21 Ménoret V, Vermeulen P, Le Moigne N, et al. Gravity measurements below $10^{-9}g$ with a transportable absolute quantum gravimeter. *Sci Rep*, 2018, 8: 12300, arXiv: [1809.04908](#)
- 22 Wu B, Zhou Y, Cheng B, et al. Static measurement of absolute gravity in truck based on atomic gravimeter (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2020, 69: 25–32 [吴彬, 周寅, 程冰, 等. 基于原子重力仪的车载静态绝对重力测量. *物理学报*, 2020, 69: 25–32]
- 23 Frisch R. Experimenteller nachweis des einsteinschen strahlungsrückstoßes. *Z Physik*, 1933, 86: 42–48
- 24 Ashkin A, Gordon J P. Cooling and trapping of atoms by resonance radiation pressure. *Opt Lett*, 1979, 4: 161–163
- 25 Letokhov V S. Narrowing of the doppler width in a standing light wave. *ZhETF*, 1968, 7: 348–351
- 26 Ashkin A. Atomic-beam deflection by resonance-radiation pressure. *Phys Rev Lett*, 1970, 25: 1321–1324
- 27 Wineland D J, Dehmelt H. Proposed $10^{14}\delta\nu < \nu$ laser fluorescence spectroscopy on Ti^+ mono-ion oscillator III. *Bull Am Phys Soc*, 1975, 20: 637
- 28 Hänsch T W, Schawlow A L. Cooling of gases by laser radiation. *Opt Commun*, 1975, 13: 68–69
- 29 Chu S, Hollberg L, Bjorkholm J E, et al. Three-dimensional viscous confinement and cooling of atoms by resonance radiation pressure. *Phys Rev Lett*, 1985, 55: 48–51
- 30 Lett P D, Watts R N, Westbrook C I, et al. Observation of atoms laser cooled below the doppler limit. *Phys Rev Lett*, 1988, 61: 169–172
- 31 Ungar P J, Weiss D S, Riis E, et al. Optical molasses and multilevel atoms: Theory. *J Opt Soc Am B*, 1989, 6: 2058–2071
- 32 Dalibard J, Cohen-Tannoudji C. Laser cooling below the doppler limit by polarization gradients: Simple theoretical models. *J Opt Soc Am B*, 1989, 6: 2023–2045
- 33 Raab E L, Prentiss M, Cable A, et al. Trapping of neutral sodium atoms with radiation pressure. *Phys Rev Lett*, 1987, 59: 2631–2634
- 34 Wang Y Q. *Laser Cooling and Trapping of Atoms* (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 2007 [王义道. 原子的激光冷却与陷阱. 北京: 北京大学出版社, 2007]
- 35 Zhuang W L T. Laser cooling and manipulating atoms: Principles and applications. *Sci Technol Rev*, 2018, 36: 28–38
- 36 Hyodo M, Nakayama K, Watanabe M, et al. Mirror magneto-optical trap exploiting hexapole-compensated magnetic field. *Phys Rev A*, 2007, 76: 013419
- 37 Bowden W, Hobson R, Hill I R, et al. A pyramid mot with integrated optical cavities as a cold atom platform for an optical lattice clock. *Sci Rep*, 2019, 9: 11704, arXiv: [1907.13429](#)
- 38 Lee J, Grover J A, Orozco L A, et al. Sub-doppler cooling of neutral atoms in a grating magneto-optical trap. *J Opt Soc Am B*, 2013, 30: 2869–2874, arXiv: [1309.4732](#)

- 39 Barker D S, Norrgard E B, Klimov N N, et al. Single-beam zeeman slower and magneto-optical trap using a nanofabricated grating. *Phys Rev Appl*, 2019, 11: 064023, arXiv: [1811.09180](#)
- 40 Martin P J, Oldaker B G, Miklich A H, et al. Bragg scattering of atoms from a standing light wave. *Phys Rev Lett*, 1988, 60: 515–518
- 41 Carnal O, Mlynek J. Young's double-slit experiment with atoms: A simple atom interferometer. *Phys Rev Lett*, 1991, 66: 2689–2692
- 42 Keith D W, Ekstrom C R, Turchette Q A, et al. An interferometer for atoms. *Phys Rev Lett*, 1991, 66: 2693–2696
- 43 Riehle F, Kisters T, Witte A, et al. Optical ramsey spectroscopy in a rotating frame: Sagnac effect in a matter-wave interferometer. *Phys Rev Lett*, 1991, 67: 177–180
- 44 Kasevich M, Chu S. Atomic interferometry using stimulated raman transitions. *Phys Rev Lett*, 1991, 67: 181–184
- 45 Gwo D H. Ultraprecision bonding for cryogenic fused-silica optics. In: *Proceedings of Secondary Ultraprecision Bonding for Cryogenic Fused-Silica Optics*. San Diego: SPIE, 1998. 136–142
- 46 Altin P A, Johnsson M T, Negnevitsky V, et al. Precision atomic gravimeter based on bragg diffraction. *New J Phys*, 2013, 15: 023009, arXiv: [1207.1595](#)
- 47 Butts D L, Kinast J M, Timmons B P, et al. Light pulse atom interferometry at short interrogation times. *J Opt Soc Am B*, 2011, 28: 416–421
- 48 Bidet Y, Zahzam N, Blanchard C, et al. Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry. *Nat Commun*, 2018, 9: 627
- 49 Weng K, Wu B, Lin J, et al. Compact magneto-optical trap with a quartz vacuum chamber for miniature gravimeters. *J Opt Soc Am B*, 2020, 37: 1637–1642
- 50 Lautier J, Landragin A, Battelier B, et al. Miniatom: Realization of an absolute compact atomic gravimeter. In: *Proceedings of 2013 Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC)*. New York: IEEE, 2014. 448–449
- 51 Becker D, Lachmann M D, Seidel S T, et al. Space-borne Bose-Einstein condensation for precision interferometry. *Nature*, 2018, 562: 391–395, arXiv: [1806.06679](#)
- 52 Elliott E R, Krutzik M C, Williams J R, et al. NASA's Cold Atom Lab (CAL): System development and ground test status. *npj Micrograv*, 2018, 4: 16
- 53 Chiow S, Williams J, Yu N. Laser-ranging long-baseline differential atom interferometers for space. *Phys Rev A*, 2015, 92: 063613, arXiv: [1502.00047](#)
- 54 Caldani R, Merlet S, Pereira Dos Santos F, et al. A prototype industrial laser system for cold atom inertial sensing in space. *Eur Phys J D*, 2019, 73: 248, arXiv: [1908.10058](#)
- 55 Zhu L, Lien Y H, Hinton A, et al. Application of optical single-sideband laser in Raman atom interferometry. *Opt Express*, 2018, 26: 6542–6553, arXiv: [1801.04319](#)
- 56 Zhu L, Zhong J Q, Chen X, et al. Measurement and control of the sideband to carrier ratio of an electro-optic modulator used in atom interferometers. *Opt Express*, 2017, 25: 11365–11376
- 57 Chiow S, Yu N. Compact atom interferometer using single laser. *Appl Phys B*, 2018, 124: 7
- 58 Wang Q Y, Wang Z Y, Fu Z J, et al. Investigation of the thermal adaptability for a mobile cold atom gravimeter. *Chin Phys B*, 2016, 25: 123701
- 59 LaCoste Jr. L J B. A new type long period vertical seismograph. *Physics*, 1934, 5: 178–180
- 60 Li G, Hu H, Wu K, et al. Ultra-low frequency vertical vibration isolator based on lacoste spring linkage. *Rev Sci Instrum*, 2014, 85: 104502
- 61 Le Gouët J, Mehlstäubler T E, Kim J, et al. Limits to the sensitivity of a low noise compact atomic gravimeter. *Appl Phys B*, 2008, 92: 133–144, arXiv: [0801.1270](#)
- 62 Saulson P R. Vibration isolation for broadband gravitational wave antennas. *Rev Sci Instrum*, 1984, 55: 1315–1320
- 63 Hensley J M, Peters A, Chu S. Active low frequency vertical vibration isolation. *Rev Sci Instrum*, 1999, 70: 2735–2741
- 64 Tang B, Zhou L, Xiong Z, et al. A programmable broadband low frequency active vibration isolation system for atom interferometry. *Rev Sci Instrum*, 2014, 85: 093109
- 65 Zhou M K, Xiong X, Chen L L, et al. Note: A three-dimension active vibration isolator for precision atom gravimeters. *Rev Sci Instrum*, 2015, 86: 046108
- 66 Nelson P G. An active vibration isolation system for inertial reference and precision measurement. *Rev Sci Instrum*, 1991, 62: 2069–2075
- 67 Wu K, Li G, Hu H, et al. Active low-frequency vertical vibration isolation system for precision measurements. *Chin J Mech Eng*, 2017, 30: 164–169
- 68 Wang G, Wu K, Hu H, et al. Ultra-low-frequency vertical vibration isolator based on a two-stage beam structure for absolute gravimetry. *Rev Sci*

- [Instrum](#), 2016, 87: 105101
- 69 Yao J, Wu K, Guo M, et al. An ultralow-frequency active vertical vibration isolator with geometric antispring structure for absolute gravimetry. [IEEE Trans Instrum Meas](#), 2020, 69: 2670–2677
- 70 Luo D Y, Cheng B, Zhou Y, et al. An ultra-low frequency active vibration isolation system based on sliding mode robustness algorithm (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2018, 2: 82–87 [罗东云, 程冰, 周寅, 等. 基于滑模鲁棒算法的超低频主动隔振系统. *物理学报*, 2018, 2: 82–87]
- 71 Zhou Y, Luo D, Wu B, et al. Active vibration isolation system based on the LADRC algorithm for atom interferometry. [Appl Opt](#), 2020, 59: 3487–3493
- 72 Bidel Y, Zahzam N, Bresson A, et al. Absolute airborne gravimetry with a cold atom sensor. [J Geod](#), 2020, 94: 9, arXiv: [1910.06666](#)
- 73 Liu S L, Wu S Q, Feng J Y, et al. Proceedings of 10th Relative Gravity Measurement Campaign during the 10th International Comparison of Absolute Gravimeters (in Chinese). *Acta Metrol Sin*, 2020, 41: 198–201 [刘善良, 吴书清, 冯金扬, 等. 第10届全球绝对重力仪关键比对相对重力测量. *计量学报*, 2020, 41: 198–201]
- 74 Jiang Z, Pálinkáš 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. [Metrologia](#), 2012, 49: 666–684
- 75 Francis O, Baumann H, Ullrich C, et al. CCM.G-K2 key comparison. [Metrologia](#), 2015, 52: 07009
- 76 Wu S, Feng J, Li C, et al. The results of CCM.G-K2.2017 key comparison. [Metrologia](#), 2020, 57: 07002
- 77 Chen Y T, Gu H D, Lu Z X. Variations of gravity before and after the Haicheng earthquake, 1975, and the Tangshan earthquake, 1976. [Phys Earth Planet Inter](#), 1979, 18: 330–338
- 78 Li R H, Huang J L, Li H, et al. The mechanism of regional gravity changes before and after the Tangshan earthquake. [Acta Seimol Sin](#), 1997, 10: 497–500
- 79 Zhu Y, Liang W, Xu Y. Medium-term prediction of $M_s 8.0$ earthquake in Wenchuan, Sichuan by mobile gravity. *Recent Dev World Seismol*, 2008. 36–39
- 80 Wu X, Pagel Z, Malek B S, et al. Gravity surveys using a mobile atom interferometer. [Sci Adv](#), 2019, 5: eaax0800, arXiv: [1904.09084](#)
- 81 Schuldt T, Schubert C, Krutzik M, et al. Design of a dual species atom interferometer for space. [Exp Astron](#), 2015, 39: 167–206, arXiv: [1412.2713](#)

High-accuracy gravity measurement with miniaturized quantum gravimeter

WENG KanXing, ZHOU Yin, ZHU Dong, WANG KaiNan, WU Bin,
CHENG Bing & LIN Qiang*

*Zhejiang Provincial Key Laboratory of Quantum Precision Measurement, College of Science, Zhejiang University of Technology,
Hangzhou 310023, China*

Gravity field is a basic physical field of the Earth. It carries and reflects much information of the Earth, which is very important for fundamental research and practical application. Since the earth's gravity field changes with space and time, it needs to be measured by a mobile high-precision gravimeter. Quantum gravimeter is a new type of high-precision gravity measurement device developed in recent years and is based on atomic interference technology. Compared with traditional gravimeters, quantum gravimeters have better stability and accuracy, and can accurately survey the Earth's gravitational field distribution. In this paper, the basic principle, experiment and application of quantum gravimeter are summarized, including the latest research results in the development and application of miniaturized quantum gravimeter at home and abroad; the basic principle of miniaturized quantum gravimeter, the development of core unit of miniaturized quantum gravimeter (such as vacuum chamber, laser system, vibration isolation system and measurement supporting system) and its application in gravity comparison, earthquake monitoring and gravity field mapping are introduced. Finally, the accuracy limitations of quantum gravimeter (such as Raman phase noise, vibration noise and detection noise) and the other fundamental applications (measurement of Newton's gravitational constant, weak equivalence principle) are presented. As a relatively mature technology in quantum sensors, quantum gravimeters show obvious advantages especially in dynamic measurement. In the future, with the development and maturity of miniaturized quantum gravimeters, it may also play an important role in geophysics, resource exploration, inertial navigation, and space gravity observation.

gravity field, quantum gravimeter, precise measurement

PACS: 03.75.-b, 06.30.Gv, 07.07.Df, 39.25.+k

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0263](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0263)