

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.02

工程化原子重力仪综述

白金海, 胡栋, 贡昊, 王宇

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 基于冷原子干涉原理的绝对重力加速度测量装置具有灵敏度高、可长期测量等优点, 在基础物理研究以及资源勘探、惯性导航等领域具有十分重要的意义, 是公认的下一代绝对重力仪。本文描述了原子干涉重力测量的原理, 总结了硬件系统组成和性能要求, 指出了限制测量精度和工程化应用的主要因素, 并综述了原子重力仪工程化发展的现状和趋势。

关键词: 原子干涉仪; 绝对重力测量; 冷原子

中图分类号: TB93; O4-1

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)02-0022-13

Review of Engineering Atomic Gravimeter

BAI Jinhai, HU Dong, GONG Hao, WANG Yu

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The absolute gravity acceleration measurement device based on the cold atom interference principle has the advantages of high sensitivity and long-term continuous measurements. It is of great significance in basic physics research, resource exploration, and inertial navigation, and is recognized as the next generation of absolute gravimeter. This article describes the principle of atomic interferometric gravimetry, summarizes the hardware system composition and performance requirements, points out the main factors limiting the capability of measurement and engineering application, and summarizes the current situation and future trend of the engineering development of atomic gravimeter.

Key words: atom interferometer; absolute gravity measurement; cold atom

0 引言

重力加速度 g 是描述地球重力场的关键参数, 对其进行实时实地的高精度测量在地球物理、资源勘探、惯性导航、重力网建立以及基础物理研究等领域^[1-3]具有重要的意义和广阔的应用前景。

目前占据垄断地位的商业绝对重力仪是美国 Microg Lacoste 公司生产的基于角锥下落激光干涉测量原理的 FG5-X, 由美国 James Faller 博士带领的团队历经 40 余年研发设计而成, 测量灵敏度为 $15 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$, 不确定度为 $2 \sim 5 \mu\text{Gal}$ ^[4], 主要存在的问题是售价昂贵(不少于 500 万人民币)、维护不易、核心元件易机械磨损、无法连续测量等。而上世纪 90 年代发展起来的原子干涉原理绝对重力仪(简称原子重力仪), 得益于激光冷却与陷俘技术^[5]和原子操控技术的发展, 自朱棣文小组首次利用拉曼脉冲操控技术实现冷原子物质波干涉测量以来^[6], 原子干涉绝对重力测量的不确定度已经与 FG5-X 相当^[7], 测量灵敏度^[8]已经达到了 $4.2 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$, 且还具有大幅度提升的潜力, 测量

速度更快、可以实现长期连续测量, 是公认的下一代绝对重力仪。

随着物理原理与实验技术的快速发展, 原子重力仪已经逐渐从实验室原理样机研发阶段向工程化样机研发阶段过渡。据统计, 在全球有约 30 家科研院所或公司在研发工程化原子重力仪^[9], 已经开始参加国际绝对重力比对^[10-13], 并已开启了卡车、船载、机载环境测试^[14-16], 也在小型可搬运、工程化等方面得到了较大进展^[17-20]。实验室型原子重力仪追求极致的测量性能, 而对体积功耗重量等指标不敏感, 一般占据整个实验室空间, 不具备可搬运测量的能力, 主要用于基础科学研究和前沿探索, 与之对比, 工程化原子重力仪一般采用较短的自由演化时间以减小探头尺寸, 主要针对野外环境的实际应用, 更关注小型化、可搬运等工程化指标。

本文进行了工程化原子重力仪综述, 对比了工程化原子重力仪和传统激光干涉重力仪的区别, 介绍了工程化原子重力仪的基本原理和现状, 总结了其未来的发展趋势。

1 原子重力仪和传统激光干涉重力仪的对比

1992 年以来，传统激光干涉重力仪 FG5(最新型号为 FG5 - X)占据了绝对重力仪的垄断地位，甚至成为了绝对重力测量的行业标准。但随着原子重力仪的发明，和经过 30 年的技术积累，情况得以改观，其已在测量灵敏度、测量频率等指标上实现了远好于 FG5 - X 的性能，在体积、功耗、重量等指标上也稍好于 FG5 - X。二者的对比详见表 1，虽然当前的原子重力仪在长期稳定性、可维护性等方面落后于 FG5 - X，但是 FG5 - X 基本上已经达到了自身的性能瓶颈，而原子重力仪仍具有极大的发展潜力。

表 1 原子重力仪和传统激光干涉重力仪的对比

	原子重力仪	传统激光干涉重力仪
研究时间	约 30 年	约 50 年
发明人	Steven Chu	James Faller
技术成熟度	7, 8 级	8, 9 级
测量原理	物质波干涉	光学干涉
物理限制	标准量子极限	光学衍射极限
探测物体	原子，微观物体	角锥落体，宏观物体
测量灵敏度	$4.2 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$	$15 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$
测量准确度	约 $5 \mu\text{Gal}$	$2 \sim 5 \mu\text{Gal}$
灵敏度限制	环境振动	环境振动
准确度限制	拉曼光波前畸变， $3 \sim 4 \mu\text{Gal}$	干涉系统、落体系统和 环境因素引起的误差， 均在 $1 \mu\text{Gal}$ 左右
测量频率	约 1 Hz， 可连续测量	约 0.05 Hz， 不能连续测量
长期稳定性	一般	较好
可维护性	较差	一般
安装时间	约 1 h	约 1 h
体积、重量、 功耗	约 0.4 m^3 ， 100 kg, 300 W ($\mu\text{Quans-AQG}$)	1.5 m^3 ， 150 kg, 500 W (FG5 - X)

2 测量方案和基本原理

朱棣文小组最早的原子干涉仪使用的是双光子受激拉曼脉冲原理实现的^[6]，除此之外还有基于布拉格衍射原理、Raman-Nath 衍射原理、绝热转移原理和玻色爱因斯坦凝聚体的 AC-Josephson 效应等原理的原子干涉仪^[21-24]，但是到目前为止，基于拉曼脉冲干涉原理的重力测量仍然是技术最成熟、性能最高的原子干

涉绝对重力测量方案。拉曼脉冲原子干涉绝对重力仪又可以分为喷泉式和自由下落式，在冷原子装载后：喷泉式重力仪参考原子喷泉钟原理，使原子上抛到顶点后再自由下落，在此过程中实现干涉操控，优点是在维持干涉尺寸不变的前提下使干涉自由演化时间增加 2 倍，有利于提升系统的测量灵敏度，缺点是增加了系统的复杂性，此方案一般应用于实验室内不可搬运样机^[25-27]；自由下落式重力仪直接释放原子，在原子自由下落过程中进行干涉操控，优点是整个装置大幅度简化。

当前各家研究所或公司的工程化(商业化)原子重力仪均采用自由下落式方案，在维持干涉空间 10 cm 量级的前提下已经可以实现 $1 \mu\text{Gal}$ 量级的重力测量精度。本文所指的原子重力仪特指自由下落式拉曼脉冲型原子干涉绝对重力仪，其基本原理详见文献 28，这里只做简单描述。

典型的原子重力仪如图 1 所示^[29]，以此为例说明干涉重力测量的过程：原子经过磁光阱装载和预冷却后，冷原子团一般有几百微开尔文的温度和 $10^7 \sim 10^8$ 量级的原子数；经过偏振梯度冷却技术进一步冷却后，温度下降到几个微开尔文，然后释放原子使原子团在重力场的作用下自由下落；在自由下落过程中，首先使原子进一步经过微波或拉曼选态，使其状态初始化，然后进行拉曼干涉操控，最后在原子团下落到探测区后进行归一化探测^[30]，从测量得到的原子态跃迁概率信息可以推算出重力加速度值。

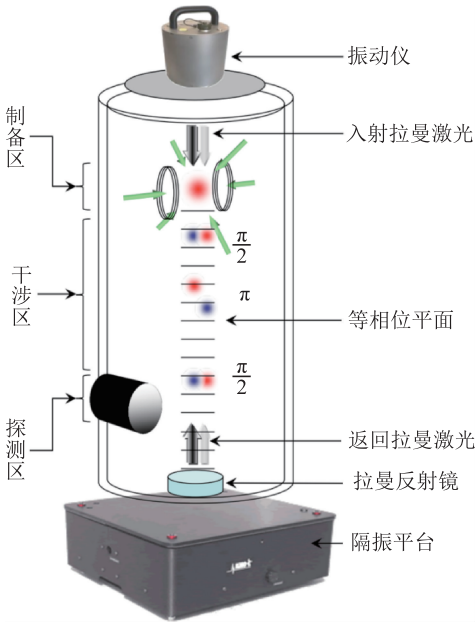


图 1 原子重力仪结构图

干涉操控过程使用的拉曼脉冲序列包含 $\frac{\pi}{2}$ - π - $\frac{\pi}{2}$ 三个子脉冲, 对应于物质波分束、反射、合束操作, 构成了马赫-曾德尔型原子干涉仪。原子末态布居数比例 P 为

$$P = \frac{1 + C \cdot \cos(\Delta\Phi)}{2} \quad (1)$$

式中: C 为干涉条纹对比度, 与原子团温度和拉曼光参数等条件有关; $\Delta\Phi$ 为干涉仪相移。不考虑重力梯度, $\Delta\Phi$ 的表达式为

$$\Delta\Phi = (\vec{k}_{\text{eff}} \cdot \vec{g} - \alpha) \cdot T^2 \quad (2)$$

式中: $\vec{k}_{\text{eff}} = \vec{k}_1 - \vec{k}_2$ 为激光有效波矢 ($\vec{k}_{i=1,2}$ 为拉曼激光波矢); $\vec{g}$ 为待测重力加速度; α 为拉曼激光啁啾频率; T 为脉冲间隔时间, 也即物质波自由演化时间。实验中, 通过扫描啁啾频率 α 改变干涉仪相位, 测量出余弦干涉条纹, 从条纹数据中拟合得到重力加速度值。

3 实验系统和精度限制

3.1 实验系统

原子重力仪是量子精密测量的代表性仪器, 涉及多项前沿技术, 包含激光、超高真空、自动控制等等, 整个实验测量系统的框架和参数要求如图 2 所示^[9]。冷原子俘获和操控需要在真空系统中进行, 不仅要具有超高真空度, 还需要用到无磁材料、磁屏蔽环境; 原子的冷却、操控和探测需要用激光实现, 对激光的功率、频率提出了极高要求^[68]; 控制系统用来控制仪器、设备的运转和连接, 实现自动化测量; 振动隔离与补偿系统用来减小振动噪音对重力测量的影响; 最后, 为了修正系统误差, 监测系统运转, 需要用到很多高精度辅助设备。

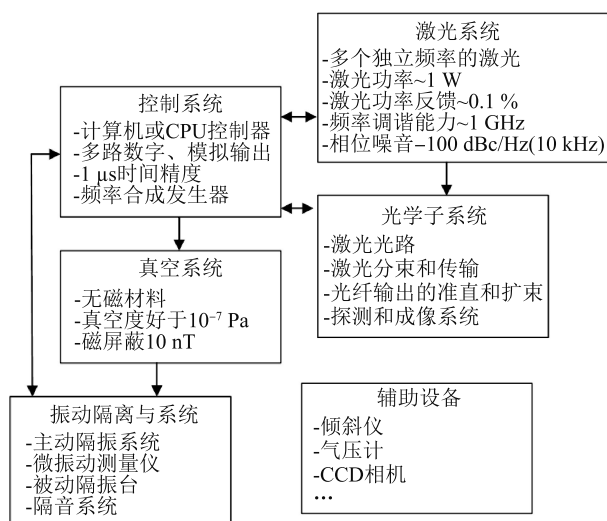


图2 原子重力仪系统框架图^[9]

3.2 灵敏度限制

影响原子重力仪测量灵敏度的因素有拉曼激光相位噪音、振动噪音、探测噪音、原子散粒噪音、背景磁场噪音等等^[40-41]。随着技术的发展, 到目前为止, 除振动噪音外, 其他噪音对重力引起相移值的测量影响已经低至毫弧度水平(单次测量), 不再是 $1 \mu\text{Gal}$ 分辨力原子重力仪的限制条件, 但是振动噪音的影响仍然在 $10 \sim 100 \text{ mrad}$, 经 1000 s 积分时间后对重力测量的影响在 $10 \mu\text{Gal}$ 量级, 是限制原子重力仪测量灵敏度的主要因素。

由等效原理可知, 重力测量设备无法区分地球引起的重力加速度和环境振动加速度(或者设备所在载体的加速度), 又根据传递函数可知, 频率 $0.1 \sim 10 \text{ Hz}$ 的振动噪音对测量的影响最大, 几乎 1 比 1 的进入到干涉相位中。环境振动噪音来源复杂、无处不在, 是限制原子重力仪野外环境测量精度进而影响其工程化发展的最主要因素。

各单位使用超级弹簧^[31]、被动隔振平台隔振^[32-33]、主动反馈隔振^[34-36]、算法后补偿隔振^[37-38]等多种措施减小振动噪音对重力测量的影响。目前振动噪音对重量测量影响最小的结果是华中科技大学引力实验研究中心^[8,34]实现的 $1 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$, 实验结果如图 3 所示, 经主动反馈隔振后振动噪音已经接近传感器本底(偏离 1 Hz 处达到了地球低背景噪声本底), 其所在地下山洞实验室的垂直本底振动噪声谱在 $10 \sim 100 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}@0.1 \sim 10 \text{ Hz}$, 比一般实验室条件好 $1 \sim 2$ 个量级, 甚至在无主动隔振措施条件下也能实现 $1 \mu\text{Gal}$ 量级的重力测量分辨力^[39]。

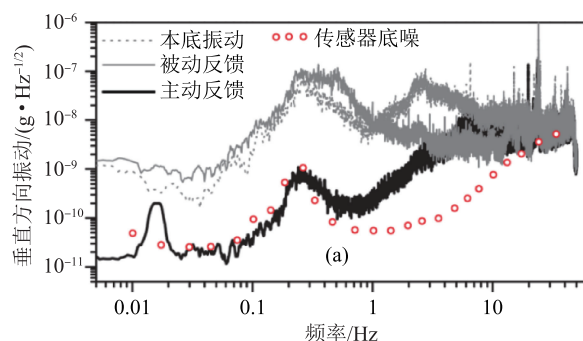


图3 振动噪音功率谱密度曲线^[34]

3.3 准确度限制

原子重力仪最大的优点是高精度和自校准特性, 通过量子干涉测量, 直接将重力加速度信息与时间频率和激光波长联系起来, 但是有大量的系统误差会影

响重力测量值的准确性, 包含 AC-Stark 频移、碰撞频移、塞曼频移、重力梯度、拉曼光倾斜、波前畸变、科里奥利力偏移等^[41-42], 除波前畸变外, 其他效应引起的系统误差可以通过评估和抑制减小到 $1 \mu\text{Gal}$ 以下, 比如说利用反向操作拉曼激光消除波矢相关系统误差^[43], 旋转拉曼光反射镜消除科里奥利力偏差^[44]等, 而波前畸变引起的系统误差最好结果评估在 $3 \sim 4 \mu\text{Gal}$, 是限制原子重力仪准确度的最主要因素。

原子重力仪使用三个间隔时间为 T 的拉曼脉冲激光操控原子实现物质波干涉, 不同拉曼脉冲作用时的原子团所处位置不同, 导致原子感受到的激光波前不同。另外, 有限温度原子团的自由膨胀、激光能量的高斯分布以及真空腔制备过程对光学窗口的影响也加剧了波前畸变效应。理论计算表明, 0.1 nm 的波前畸变会导致 1 mrad 量级的相位测量误差^[9]。为减小波前畸变的影响, 通常使用尺寸大于 1 cm 的拉曼激光和 $\lambda/20$ 表面质量的加厚光学窗口, 甚至是在超高真空系统开发胶黏而不是压封的技术安装窗口以减小应力不平衡变形导致的影响^[45]。法国 LNE-SYRTE 研究组^[46]使用不同温度的原子 ($50 \text{ nK} \sim 7 \mu\text{K}$) 外推 0 K 条件下的重力测量值, 实验结果如图 4 所示, 不同原子团温度条件下测量得到的重力加速度值不同, 他们将波前畸变引起的不确定度评估到 $1.3 \mu\text{Gal}$, 但是他们使用超冷原子 (Bose Einstein Condensate, BEC) 作为测量介质, 测量系统极端复杂, 不适用于工程化原子重力仪。

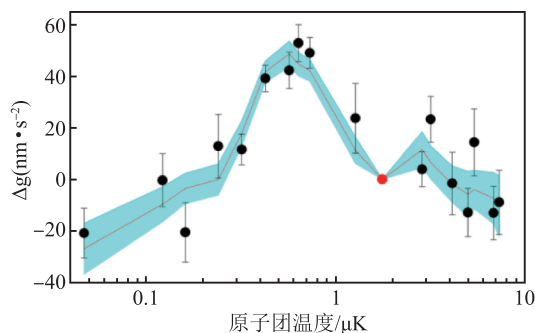


图4 重力测量值随原子团温度的变化^[46]

与之对比, 传统激光重力仪 FG5-X 仅使用激光测量角锥落体的位置, 可以使用尺寸很小的激光光束, 也不存在激光与原子的相互作用, 波前畸变的影响可以忽略不计。

4 原子重力仪的工程化

4.1 真空系统

原子重力仪使用激光操控原子态, 进而实现高精

度重力测量, 整个原子制备、操控、探测过程均需在真空腔中实现, 真空度要达到 10^{-7} Pa 量级, 以减小背景气体对冷原子团温度和寿命以及对拉曼激光波前的影响。最早的原子重力仪采用原子喷泉方案以增加最大干涉时间, 之后, 斯坦福大学和中科院武汉数物所研发出 10 m 喷泉原子干涉测量装置(图 5) 以进行等效原理检测、引力波测量等基础科学研究^[47-48], 其干涉演化时间可达 1 s 水平, 大幅度提升了惯性物理量测量的灵敏度。

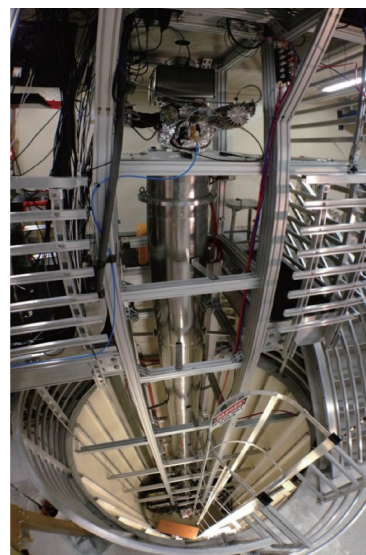
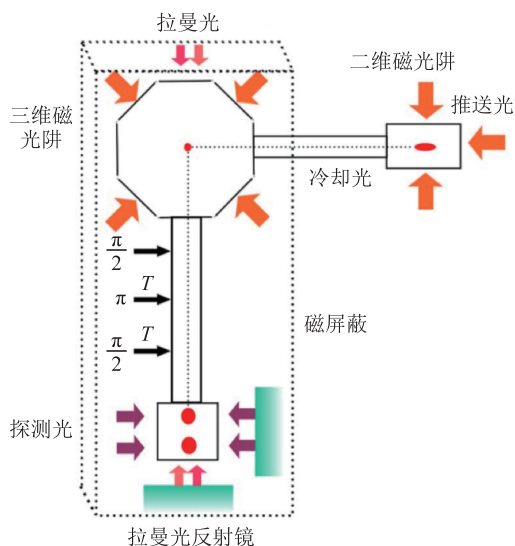
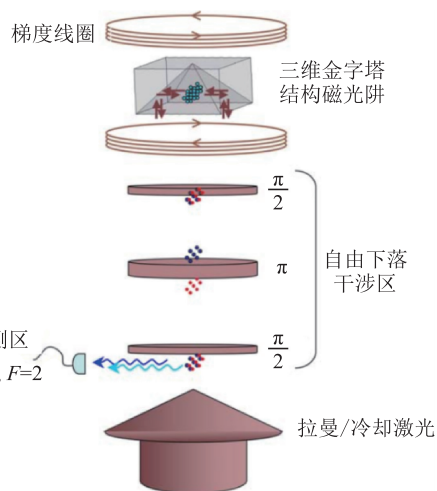


图5 斯坦福大学的 10 m 喷泉原子干涉测量装置^[47]

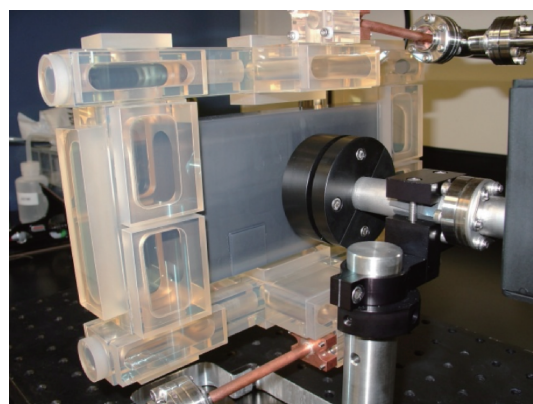
之后, 为满足工程化应用需求, 各家都在进行小型化真空系统的研究。第一个发展是从喷泉原子重力仪过渡到自由下落式原子重力仪^[30], 因为原子团不需要上抛, 三维磁光阱所需的冷却光可以由一个声光调制器提供, 简化了光路系统和配套电控系统, 并且为了保证干涉区真空度的前提下大幅度增加系统测量速度, 往往使用二维磁光阱预冷却技术^[49-50]。典型的自由下落式原子重力仪如图 6 所示, 使用二维磁光阱预冷却, 可以将系统测量频率由 0.5 Hz 提升至 $2 \sim 3 \text{ Hz}$ 水平。

传统磁光阱结构真空腔最大的问题是为了形成三维封闭势阱, 需要 6 束冷却光形成两两对射相互正交的配置, 不仅结构复杂、安装不便、维护技术要求高, 而且在实际使用时容易出现因光强功率、偏振、方向等参数不稳导致的原子团数量降低、温度升高等问题, 并引起原子团残余横向速度变化导致出现较大的系统误差, 对原子重力仪的测量精度和长期稳定性造成极大影响, 严重限制了其工程化应用的能力。

图6 使用二维磁光阱预冷却的自由下落式原子重力仪^[50]图7 金字塔结构原子重力仪^[52]

真空系统第二个发展是使用金字塔结构真空腔实现了原子干涉重力测量。Jhe 小组第一个使用金字塔结构进行了磁光阱原子冷却^[51]，仅使用一束冷却光在金字塔反射面的反射就构成了6束激光配置，且偏振方向自动满足多普勒冷却的要求。之后，金字塔结构被用于原子干涉仪中，大幅度降低了真空系统的复杂性，同时也简化了配套光路系统和电控系统。典型的金字塔原子重力仪如图7所示^[52]，其中，冷却光、再泵浦光和拉曼光等激光使用同一束光纤入射进真空系统，使真空系统的体积和复杂性大幅度降低，使用此装置，Landragin 实现了约 $17 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的重力测量灵敏度，1000 s 积分分辨率达到 $6 \mu\text{Gal}$ ，主要受振动噪音限制。另外，金字塔结构真空系统使用冷却激光的来回反射形成磁光阱配置，激光功率利用率显著提高，使冷却激光功率由瓦量级降低到几十毫瓦，相应激光系统和光路子系统的结构复杂性也大幅度降低。例如，美国伯克利大学的金字塔单光束原子重力仪仅使用一台 240 mW 的 DFB 激光器，就提供了所有试验操作所需的激光^[53]。

真空系统除了技术难度高、结构复杂外，还存在设计制备周期长、成本高的问题。针对这些问题，美国斯坦福大学开发了微晶玻璃真空腔制备技术，使用成本低廉、加工简单的微晶玻璃替代传统金属真空系统，对原子重力仪等基于冷原子系综实现物理参数测量的仪器研发来说具有重要的意义。图8为斯坦福大学研发的多轴原子干涉仪真空系统^[53]，使用 Zerodur 公司的微晶玻璃结合自研的胶黏技术和真空制备技术，

图8 微晶玻璃真空系统^[53]

4.2 激光系统

原子重力仪中，利用光与原子的相互作用实现原子态的初始化、相干操控和末态探测，以实现重力加速度等物理量的量子精密测量^[55]，这对激光的频率、线宽、功率等参数提出了极高要求，比如说激光频率稳定性要好于 10^{-9} 、线宽小于 1 MHz、功率达到 100 mW 量级、频率功率的快速调谐能力、极小的拉曼光残余相噪以及多路独立激光以满足不同实验阶段的需求等，这需要设计巧妙的激光系统和光路子系统来实现。

为保证实验的灵活性和高性能，早期的原子重力测量系统一般使用多台窄线宽外腔半导体激光器作为主激光器，多台激光放大器放大激光功率，使用复杂的自由空间分光光路、声光电调制光路以及光纤耦

合分束光路来分配激光,图9为斯坦福大学早期的原子干涉仪激光系统,整个激光系统一般平铺在几个平米大、一吨多重的光学平台上,基本没有可搬运、工程化测量的可能。

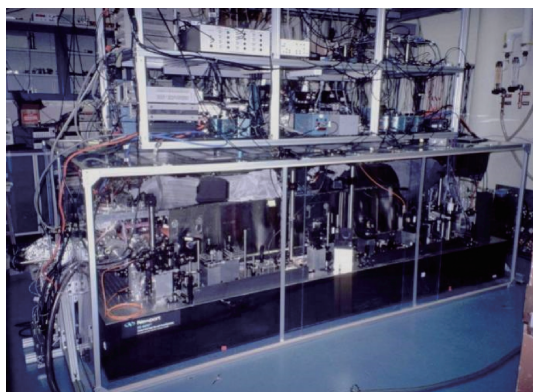


图9 斯坦福大学的早期原子重力仪激光系统

之后,为满足工程化应用需求,各单位开始研发小型化、可搬运的原子重力仪激光系统。

第一个发展是从大光学平台光路升级到小平台光路,首先是通过巧妙的光路设计和时序设计减小所需的独立激光器数量,实现激光输出的复用^[56];然后是研发小尺寸、低高度光学元器件以及紧凑的光路来减小自由空间光路的体积^[57]。图10为佛罗伦萨大学的小型化激光系统^[54],整个激光光路(不包含光纤分束子光路)放置在一块60 cm×60 cm大小的光学平板上,只有传统3 m×1.5 m尺寸的大光学平台面积缩小了十几分之一,这样的话,激光系统可以和电控系统与设备放置在一个占地面积约为0.5 m²的可搬运机架内,初步实现工程化现场测量。

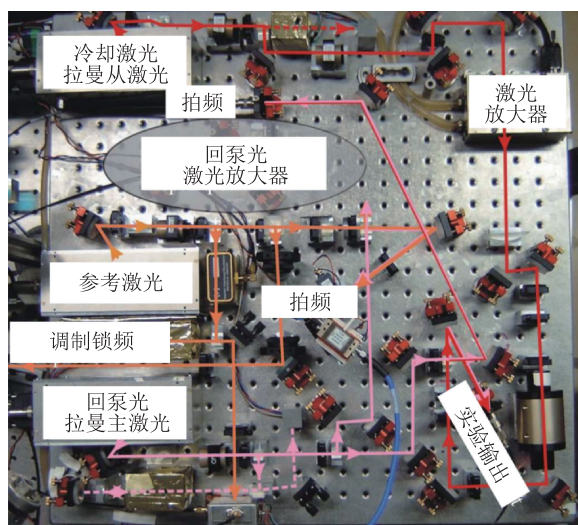


图10 典型的小型化激光系统^[54]

这种小平台光路使用半导体激光器和自由空间光路实现,整个系统对环境温度、湿度和振动条件的要求较高,存在激光器易失锁、功率长期漂移大、需要专业人员维护等问题,不利于原子重力仪在环境因素复杂多变的非实验室条件下的正常工作。

第二个发展是光纤激光技术的应用。得益于通信波段大功率光纤激光器和倍频技术的发展,已经有多家单位^[58-60]先后利用商用1560 nm光纤激光器和晶体倍频技术获得了线宽窄、功率足的780 nm激光,并用于原子重力仪实测。基本方案如下:使用分布式反馈激光器(Distributed Feedback Laser, DFB)作为主激光器,在保留半导体激光器调谐范围大、线宽窄,使用方便的前提下,DFB激光器内置布拉格衍射结构形成光栅,相比于光栅外置的外腔半导体激光器,不仅有更大的不跳模范围,且温度系数更小,抗震能力更强,另外其使用电流调谐反馈,反馈模型单一,易于实现自动化技术长期锁频^[60];然后使用光纤激光器(EDFA)放大DFB激光输出,放大后的激光功率可达几十瓦,且输出横模模式极好,利于后续光路;之后是利用倍频晶体(PPLN)将1560 nm激光倍频到780 nm(铷原子D2线共振波长),一般倍频效率可达20%~40%水平,有瓦量级的功率输出,足够满足整个原子重力仪的使用。

4.3 隔振系统

在原子重力仪中,环境振动噪音是影响最大的技术噪音,是影响工程化发展、限制测量灵敏度的最主要因素。当前应用于原子重力仪的主动隔振技术基本上均类似于美国James Faller及其合作者开发的且已经应用于商业激光干涉重力仪的‘超级弹簧’(Super Spring)^[45]技术。超级弹簧的设计思想如下:想象一个物块悬挂在弹簧末端的系统,其弹簧拉伸长度在1 km,则对应的物块共振周期约为60 s,可以有效的隔离地球自然微振动本底的影响。此时在距弹簧末端一定距离处‘抓住’弹簧(比如30 cm),截断上端多余部分,若在物块因自然共振而发生位置变化时实时跟随使‘抓点’位置同步发生变化,则此系统表现的特性与1 km弹簧系统一致,也即使用30 cm的弹簧就实现了1 km弹簧的性能。图11为Faller-Rinker超级弹簧结构图^[45],由主弹簧、位置测量系统(包含发光二极管、蓝宝石球、光电二极管等)、伺服电路、音圈电机以及支撑结构等组成。

斯坦福大学最早将主动隔振技术引入原子重力仪中,其采用商业微振动传感器测量振动而不是直接测

量物块位置的方案,目的是减少工程研发成本^[31]。之后,各单位为进一步降低工程研发成本,又使用商业被动隔振平台代替复杂的弹簧和支撑结构。二者本质上与超级弹簧无甚区别。

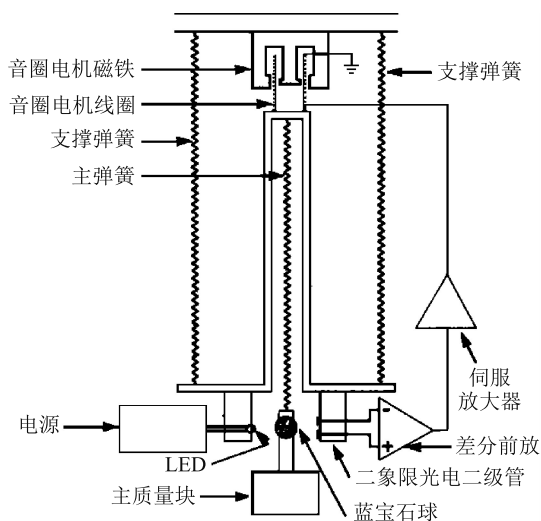


图 11 Faller-Rinker 超级弹簧结构图^[45]

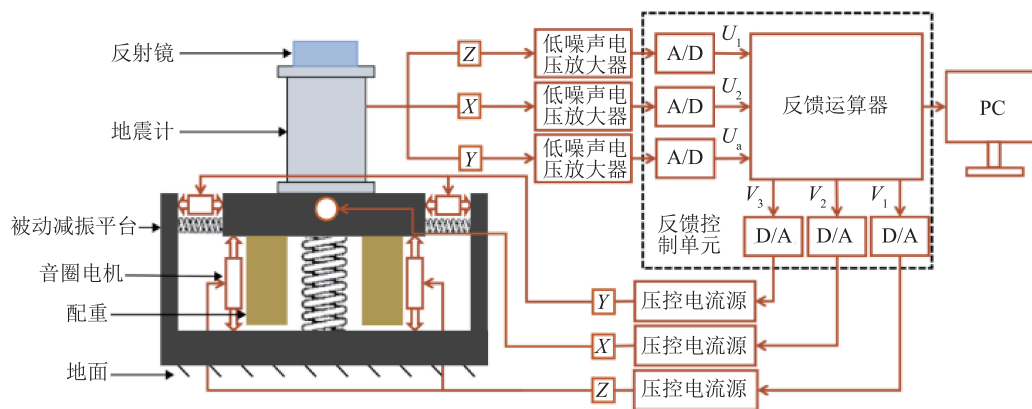


图 12 典型三维主动隔振控制系统^[36]

实验室级别的超级弹簧最高可达到几百秒的共振周期^[41,45],相当于弹簧具有几十公里长的有效长度,但是借助商业被动隔振平台和商业微振动传感器实现的原子干涉仪主动隔振系统一般只有几十秒的共振周期^[34],仅与工业级别超级弹簧相当。实际上,用于激光干涉重力仪的超级弹簧系统稍加改造即可用于原子重力仪(比如说扩宽光学窗口尺寸等),但由于是专利保护、技术瓶颈以及商业竞争(单独购买 FG5-X 超级弹簧需要约 200 万人民币)等方面的原因,导致除中国计量院的原子重力仪样机使用清华大学研发的超级弹簧系统外^[7,69],鲜见超级弹簧系统直接用于原子干涉测量的公开报导。

目前流行的三维主动隔振系统结构一般如图 12 所示^[36]。隔振平台通常选用美国 Minus K 公司的负刚性隔振平台,其中 50BM-4 型号隔振台的水平、垂直固有频率均可调节至 0.5 Hz,体积、重量和负载等也比较合适,且使用简单、无需供电,一般为方便安装音圈电机,会施加简单的机械改造^[66];微振动传感器一般选用英国 Guralp 公司的产品,其中,常用的三轴振动传感器 3ESPC 在 0.01 ~ 10 Hz 频率范围内的噪声本底在 $10^{-10} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级,测量带宽为 0.001 ~ 100 Hz,安装时需要保证拉曼光、隔振平台和传感器的中心轴对准^[70],另外,因为传感器具有一定的磁场系数,所以一般会施加磁屏蔽措施,降低磁光阱梯度磁场开关的影响(同时也会降低因磁力突变导致的隔振平台激励);音圈电机可定制也可以直接购买商业标准产品,安装时需注意对称性,防止使平台产生扭转;伺服硬件电路可以自制,也可以购买商业电压放大器、压控电流源;伺服控制系统可以使用 FPGA 嵌入式系统构建,也可以使用标准化数据采集卡外加计算机软件来实现。

除了使用主动隔振系统抑制振动噪音的影响外,也有只使用被动隔振平台隔振进行原子干涉测量的报导^[33],优点是结构简单紧凑、成本低,但对低于 10 Hz 频率下的振动成分抑制较差,甚至在共振频率($\sim 1 \text{ Hz}$)附近还会放大振动噪音,使在一般环境条件下的重力测量灵敏度仅能达到 $100 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级。

此外,法国 LNE-SYRTE 开发了补偿隔振方法,也可以大幅度抑制振动噪音对重力测量灵敏度的影响,基本原理是使用振动传感器记录实时振动大小,并计算其产生的相移,可以直接在干涉测量相位中减去此相移进而去除振动噪音的影响^[37],也可以通过控制拉

曼激光锁相环系统产生与之相反的相移,进而抵消振动噪音对于干涉测量相位的影响^[38],其性能主要受微振动传感器传递函数的非线性、延迟时间以及水平振动耦合等因素限制。利用此方法,LNE-SYRTE将振动噪音导致的测量灵敏度影响抑制了60倍,实现了 $65\text{ }\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的重力测量灵敏度(或者抑制3倍,实现 $20\text{ }\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的测量灵敏度)。与之对比,成熟的三维主动隔振技术,比如中科大陈帅团队^[36]可以实现1800倍的振动噪音抑制,在外界环境振动导致的测量灵敏度为 $1.6\times 10^4\text{ }\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 条件下,实现了 $8.8\text{ }\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的振动贡献灵敏度,远好于补偿隔振的结果。

但是,补偿隔振方法的结构更简单、稳定,维护成本更低,其工作原理也决定了可能比主动隔振技术更适用于捷联式配置的移动重力测量,利用此技术,已经实现了传统加速度计和原子重力仪(加速度计)的混合测量^[67,71],将前者高带宽、大动态范围,后者高精度、低漂移的优点结合起来,如图13所示。此外,正如2.3节的描述,当前的原子重力仪准确度被波前畸变误差限制在约 $4\text{ }\mu\text{Gal}$,应用补偿隔振技术的原子重力仪在比较安静的环境下经过100~1000 s的积分测量后,就可以实现低于此值的分辨力,完全匹配当前工程化原子重力仪发展的需求。法国 μQuans 公司生产的准商业化原子重力仪AQG就是使用补偿隔振技术实现的,其重力探头的高度仅为70 cm,与之对比,应用主动隔振技术的原子重力仪探头仅隔振系统就有近50 cm的高度。

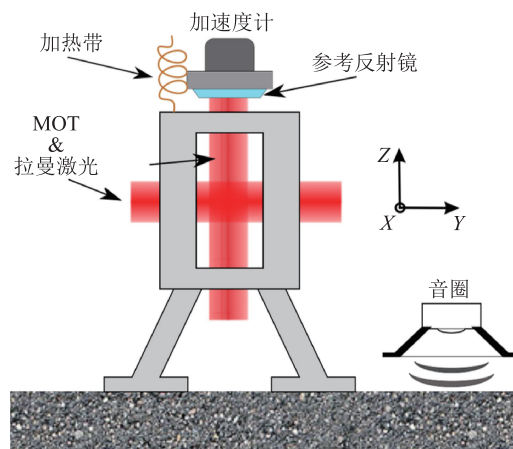


图13 传统加速度计和原子重力仪混合测量^[71]

4.4 控制系统

在原子重力仪中,使用控制系统操控激光、磁场

以及设备的工作和互连,以实现重力加速度的自动测量。到目前为止,冷原子物理实验室最常用的控制系统组建方式是利用美国National Instruments公司的标准数据采集卡和计算机LabVIEW软件来构建数据采集和处理系统^[61],提供多路数字模拟输出通道和多路模拟输入通道,并使用计算机远程通信或单片机直接控制的方法控制诸如信号发生器等外部实验设备,优点是系统组建容易、控制灵活,但存在处理速度慢、有死区时间、易出错、交互界面不友好等缺点,不适于原子重力仪的工程化应用。

现场可编程门阵列(FPGA)发展迅速,在图像处理、通信安防等行业均有广泛的应用,目前,以FPGA为核心的嵌入式控制系统已经被用于原子重力仪^[62-63],图14为博洛尼亚大学研究小组研发的FPGA控制系统^[63]示意图,可以使用计算机软件触发开始测量,也可以通过外部开关控制测量,控制系统包含16路数字输出通道、8路模拟输出通道、多路模拟输入通道以及多路射频输出通道(由直接数字合成发生器DDS提供),工作频率为10 MHz,无死区时间,扩展性强,可脱离计算机独立工作,满足原子干涉仪工程化发展的需求。

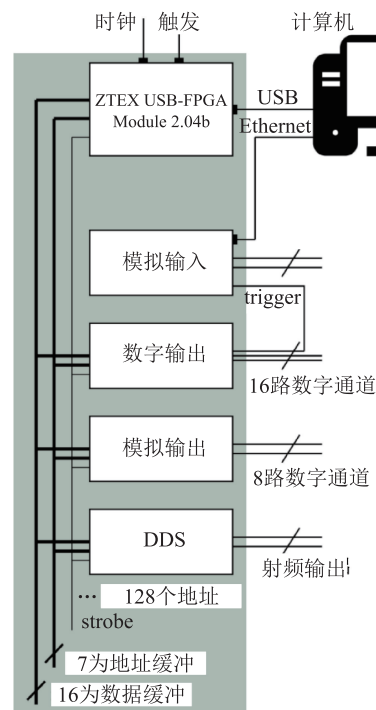


图14 FPGA控制系统^[63]

4.5 非实验室条件测量

目前最先进的原子重力仪已经达到或超过了传统

激光干涉重力仪和弹簧重力仪的测量性能,但是很多原子重力仪仅工作在实验室环境下,要求较好的空调系统提供恒温、干燥环境,以及振动噪音较小的安静条件。各单位已经开展了多例原子重力仪在非实验室环境条件下的重力测量试验,目前已经有车载、电梯测试、船载、机载等野外环境测量实验,为未来工程化应用积累了丰富经验。

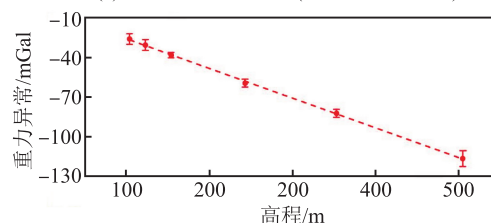
伯克利大学的 Müller 小组和浙江大学林强小组分别进行了车载环境原子重力仪试验^[64,16],他们在各自校园内进行了重力测量,实验结果基本一致,不确定度均在 $10 \mu\text{Gal}$ 量级。Müller 小组的重力仪在实验室环境下有 $2 \mu\text{Gal}$ 左右的长期稳定性, $20 \mu\text{Gal}$ 左右的不确定度,其车载实验结果如图 15 所示,其中,图 15(a)为伯克利大学形貌图,蓝线为测量路线,整个测量路程约 7.6 公里,高度变化约 400 m,图 15(b)为测量的重力异常值随高程的变化,主要由山体结构引起,由此可以计算地下岩石的密度约为 2 g/cm^3 ,图 15(c)为实验装置,图 15(d)为实验人员、装置和货车构成的测量系统全局图。遗憾的是,两家单位的测量均采用间断方式,即车载运输时不测量,到测量位停车后再开始测量,每个测量位花费约 15 min 的调整设备时间,几分钟的数据测量时间。此种测量方式仅证明原子重力仪可以车载运输并快速恢复测量,并没有给出移动测量时可以实现的性能指标。

法国航空航天实验室和斯坦福大学的研究小组分别进行了原子重力仪船载实验^[65,14],斯坦福大学的船载实验主要在美国海军舰艇上进行,没有较为详细的公开数据,法国同时使用原子重力仪和传统弹簧重力仪进行重量测量,如图 16 所示,虽然受海洋上恶劣的实验条件限制,但是原子重力仪仍得到了优于 10^{-5} m/s^2 的测量精度,优于商业弹簧重力仪的测量结果。

法国人也进行了原子加速度计在机载环境下的测试试验^[67],如图 17 所示,他们使用机械加速度计粗测,原子加速度计进一步测量的方式得到加速度结果,其实验结果表明,在 1 g 大小的标准重力加速度条件下,原子加速度计的测量结果比机载加速度计的抖动小 300 倍,在 0 g (微重力)条件下,原子加速度计的测量灵敏度约为 $2 \times 10^{-5} \text{ g/Hz}^{1/2}$,主要受机械加速度计的非线性响应导致的测量能力下降限制。



(a) 伯克利大学形貌图(蓝线为测量路线)



(b) 随高程变化的重力异常测量结果

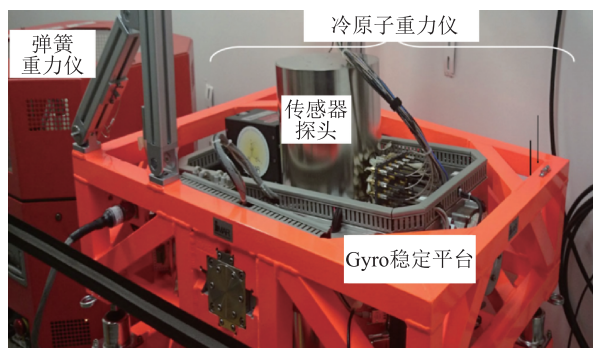
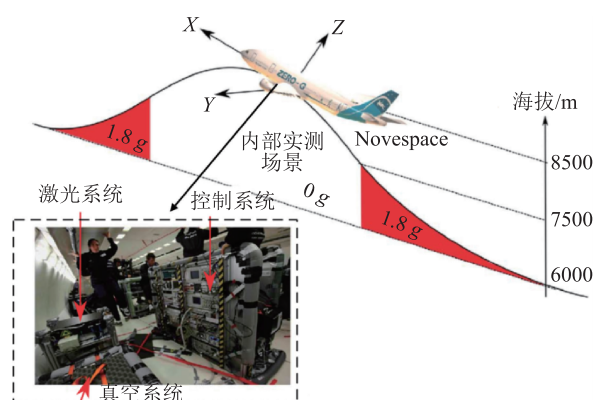


(c) 实验装置



(d) 测量系统全局图

图 15 伯克利大学的车载重力测量实验^[64]

图 16 法国的船载原子重力测量实验^[14]图 17 第一个机载原子干涉测量实验^[67]

5 国内外对比

美国斯坦福大学在 1991 年左右就实现了第一台原子重力仪原理样机，其于 2004 年成立了商业公司 AOSense，并在 2010 年向航空航天客户交付了第一个商业化原子重力仪。欧洲国家的一些团队迅速跟进，法国人于 2011 年成立了 Muquans 公司，并在 2018 年左右交付了第一台商业化原子重力仪，他们采用了先进的金字塔结构真空腔和稳定的全光纤激光系统，并采用算法后补偿隔振技术，在安静环境下实现了约 $50 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度，几个 μGal 水平的准确度，激光系统、控制系统和真空系统的总体积约为 0.5 m^3 ，总重量不到 120 kg，是当前最成熟的商业化原子重力仪（AOSense 公司主要服务于美国军方，无公开指标数据），如图 18 所示，仪器由左侧的控制系统（包含激光系统）和右侧的重力测量探头组成。

与之对比，国内于 2006 年左右才开始原子重力仪研究，第一台原理样机出现在 2010 年左右，比国外晚了近 20 年，经过多年的发展后，截止到目前，已经有多家团队跟进原子重力仪研究，包括华中科技大



图 18 法国 Muquans 公司研发的原子重力仪

学^[39,71-73]、浙江大学（浙江工业大学）^[50,74-75]、武汉数物所^[76-77]、北京大学、国防科技大学^[78-79]、中科大^[43,56]、中国计量院^[7,80]、航空计量所^[11,81]、船舶 717 所等，研发的最佳性能实验室样机已经可以和美国与欧洲的相媲美。目前，各单位均投入了大量的人员和经费用来开发工程化原子重力仪，与国外相比，主要存在的问题或差距如下：①核心设备诸如激光器、微振动传感器、高精度倾斜仪、高端频谱仪、高端信号发生器等严重依赖进口，不但制约了相关基础学科的发展，还有受制于人的可能；②关键技术诸如金字塔真空腔加工、全光纤激光器制备等掌握不足，目前已有的几家可搬运样机基本使用传统自由空间光路和传统磁光阱方案实现，与国外最先进商业原子重力仪的技术水平整整差了一代；③各单位合作程度低、交流少，没有形成集团力量，与之对比，国外尤其是欧洲科研团队的交流合作程度很高；④各单位的研究经费基本来自于国家科研项目，经过两个五年计划的支持后，国内最好水平的原子重力仪在测量灵敏度等指标上已经达到了国际先进水平，但尚未见有相关公司成立并获得资本支持的报导，不利于后续科研成果的转化；⑤技术创新动力不足，创新结果少，虽然在实验技术和测量精度上取得了很大进展，但测量技术路线和测量方法基本上照搬国外，尚未见国内团队提出新的技术路线和测量方法。

6 总结

二十余年前，两次诺贝尔物理学奖授予了冷原子物理研究领域，之后基于冷原子和超冷原子的基础科学和应用研究蓬勃发展，其中，原子干涉惯性参数测量是最具有代表意义的工作之一。尤其到近几年，随着技术水平的积累，原子重力仪已经从原理样机阶段逐渐进入了工程化研究阶段，和冷原子钟一起，成为了冷原子物理研究进入到工程化实用的代表。

原子重力仪利用物质波干涉原理测量绝对重力加速度,在地球物理科学、引力波探测等基础科学研究以及资源勘探、惯性导航、重力网建立等应用研究领域有着极为重要的前景和意义。当前最好的原子重力仪已经实现了超过传统激光干涉绝对重力仪 FG5-X 的测量灵敏度,不确定度也与 FG5-X 相当,其指标主要受环境振动噪音和波前畸变偏差限制,离量子标准极限尚有极远的距离。目前国际上已经开展了大量原子重力仪工程化应用研究工作,并进行了大量野外环境测试实验,最先进的工程化原子重力仪由结构简单的小体积金字塔结构真空系统、性能稳定的全光纤激光系统、结构紧凑的补偿隔振系统和可靠的 FPGA 嵌入式控制系统等组成,已经达到了准商业化水平,而国内的工程化样机离国际最高水平尚有较大差距,需要在加速核心设备国产化、加强合作交流、加速关键技术突破、推进野外测试、优化创新能力等多方面进行努力。

参 考 文 献

- [1] Mueller H, Chiow S W, Herrmann S, et al. Atom Interferometry tests of the isotropy of post-Newtonian gravity[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(3): 031101.
- [2] Fernando Sansò, Jekeli C, Bastos L, et al. International Association of Geodesy Symposia[M]. 2005.
- [3] Pawlowski B. Gravity gradiometry in resource exploration[J]. *Leading Edge*, 1998, 17(1): 51-52.
- [4] 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[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(4): 489-492.
- [5] Chu S. Nobel Lecture: The manipulation of neutral particles[J]. *Review of Modern Physics*, 1998, 261(3): 685-706.
- [6] Kasevich M, Chu S. Atomic Interferometry Using Stimulated Raman Transitions[J]. *Physical Review Letters*, 1991, 67(2): 181-184.
- [7] Wang S, Zhao Y, Zhuang W, et al. Shift evaluation of the atomic gravimeter NIM-AGRB-1 and its comparison with FG5X[J]. *Metrologia: International Journal of Scientific Metrology: Internationale Zeitschrift für Wissenschaftliche Metrologie: Journal International de Metrologie Scientifique*, 2018, 55(360): 1-11.
- [8] Hu Z K, Sun B L, Duan X C, et al. Demonstration of an ultrahigh-sensitivity atom-interferometry absolute gravimeter[J]. *Physical Review A*, 2013, 88(4): 043610.
- [9] Geiger R, Landragin A, Sébastien Merlet, et al. High-accuracy inertial measurements with cold-atom sensors[J]. *AVS Quantum Science*, 2020, 2(2): 024702.
- [10] Merlet S, Bodart Q, Malossi N, et al. Comparison between two mobile absolute gravimeters: optical versus atomic interferometers[J]. *Metrologia*, 2010, 47(4): L9-L11.
- [11] Hu D, Wang Y, Ma H, et al. Gravity acceleration measurement based on Atom interferometry[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2018, 1149, 012021.
- [12] Fu Z, Wu B, Cheng B, et al. A new type of compact gravimeter for long-term absolute gravity monitoring[J]. *Metrologia*, 2019, 56(2): 025001.
- [13] Xu Y, Cui J, Qi K, et al. On-site calibration of the Raman laser absolute frequency for atom gravimeters[J]. *Physical Review A*, 2018, 97(6): 063626.
- [14] Bidel Y, Zahzam N, Blanchard C, et al. Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 627.
- [15] Bidel Y, Zahzam N, Bresson A, et al. Absolute airborne gravimetry with a cold atom sensor[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(20): 1-9.
- [16] 吴彬, 林佳宏, 张凯军, 等. 基于原子重力仪的车载静态绝对重力测量[J]. *物理学报*, 2020, 69(6): 35-42.
- [17] Schkolnik V, Hellmig O, Wenzlawski A, et al. A compact and robust diode laser system for atom interferometry on a sounding rocket[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(8): 217.
- [18] McGuinness H J, Rakholia A V, Biedermann G W, et al. High data-rate atom interferometer for measuring acceleration[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(1): 011106.
- [19] Carraz O, Lienhart F, Charriere R, et al. Compact and robust laser system for onboard atom interferometry[J]. *Applied Physics B*, 2009, 97(2): 405-411.
- [20] Vincent M, Pierre V, Nicolas L M, et al. Gravity measurements below 10^{-9} with a transportable absolute quantum gravimeter[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 12300.
- [21] Giltner D M, McGowan R W, Lee S A. Atom Interferometer Based on Bragg Scattering from Standing Light Waves[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 75(14): 2638.
- [22] Cahn S B, Kumarakrishnan A, Shim U, et al. Time-Domain de Broglie Wave Interferometry[J]. *Physical Review Letters*, 1997, 79(5): 784-787.
- [23] Featonby P D, Summy G S, Webb C L, et al. Separated-Path Ramsey Atom Interferometer[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(3): 495-499.
- [24] Anderson B P. Macroscopic Quantum Interference from Atomic Tunnel Arrays[J]. *Science*, 1998, 282(5394): 1686-1689.
- [25] Peters A, Chung K Y, Chu S. High-precision gravity measurements using atom interferometry[J]. *Metrologia*, 2001, 38(1): 25.

- [26] Schmidt M, Senger A, Hauth M, et al. A mobile high-precision absolute gravimeter based on atom interferometry[J]. *Gyroscopy & Navigation*, 2011, 2(3): 170.
- [27] Zhou L, Xiong Z Y, Yang W, et al. Measurement of Local Gravity via a Cold Atom Interferometer[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(1): 013701.
- [28] Weiss D S, Young B C, Chu S. Precision measurement of $\hbar/m_{\text{Cs}}$ based on photon recoil using laser-cooled atoms and atomic interferometry[J]. *Applied Physics B*, 1994, 59(3): 217–256.
- [29] Fang B, Dutta I, Gillot P, et al. Metrology with Atom Interferometry: Inertial Sensors from Laboratory to Field Applications[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2016, 723(1): 012049.
- [30] Bordé C J. Atomic interferometry with internal state labelling[J]. *Physics Letters A*, 1989, 140(1–2): 10–12.
- [31] Hensley J M, Peters A, Chu S. Active low frequency vertical vibration isolation[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(6): 2735–2741.
- [32] Gouet J L, Mehlstaebler T E, Kim J, et al. Limits to the sensitivity of a low noise compact atomic gravimeter[J]. *Applied Physics B*, 2008, 92(2): 133–144.
- [33] 吴彬, 程冰, 付志杰, 等. 大倾斜角度下基于冷原子重力仪的绝对重力测量[J]. *物理学报*, 2018, 67(19): 71–81.
- [34] Zhou M K, Hu Z K, Duan X C, et al. Performance of a cold-atom gravimeter with an active vibration isolator[J]. *Physical Review A*, 2012, 86(4): 43630.
- [35] Tang B, Zhou L, Xiong Z, et al. A programmable broadband low frequency active vibration isolation system for atom interferometry[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(9): 123–205.
- [36] Chen B, Long J B, Xie H T, et al. A mobile three-dimensional active vibration isolator and its application to cold atom interferometry[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68, 183301.
- [37] Merlet S, Gout J L, Bodart Q, et al. Operating an atom interferometer beyond its linear range[J]. *Metrologia*, 2009, 46(1): 87.
- [38] Lautier J, Volodimer L, Hardin T, et al. Hybridizing matter-wave and classical accelerometers[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(14).
- [39] 周敏康. 原子干涉重力测量原理性实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [40] Peters A, Chung K Y, Chu S. High-precision gravity measurements using atom interferometry[J]. *Metrologia*, 2001, 38(1): 25.
- [41] Peters A. High precision gravity measurements using atom interferometry. [D]. Stanford University. 1998.
- [42] Lele C, Qin L, Xiaobing D, et al. Precision gravity measurements with cold atom interferometer[J]. *Scientia Sinica(Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2016, 000(007): P. 15–32.
- [43] 谢宏泰. 可移动原子重力仪的研制和系统误差处理[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [44] Lan S Y, Kuan P C, Estey B, et al. Influence of the Coriolis force in atom interferometry[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(9): 90402.
- [45] Faller J E, Rinker R L. Super spring[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 68(6): 1900–1900.
- [46] Karcher R, Imanaliev A, Merlet S, et al. Improving the accuracy of atom interferometers with ultracold sources[J]. *New Journal of Physics*, 2018, 20(11).
- [47] Alex Sugarbaker. Atom interferometry in a 10 m fountain[D]. San Francisco: Stanford University, 2014.
- [48] 郝恺. 十米喷泉原子干涉仪束源特性实验研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉物理与数学研究所), 2012.
- [49] Dieckmann K, Spreeuw R J C, Weidemüller M, et al. Two-dimensional magneto-optical trap as a source of slow atoms[J]. *Physical Review A*, 1998, 58(5): 3891–3895.
- [50] Fu Z J, Wang Q Y, Wang Z Y, et al. Participation in the absolute gravity comparison with a compact cold atom gravimeter[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(01): 52–57.
- [51] Lee K I, Kim J A, Noh H R, et al. Single-beam atom trap in a pyramidal and conical hollow mirror[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(15): 1177–1179.
- [52] Bodart Q, Merlet S, Malossi N, et al. A cold atom pyramidal gravimeter with a single laser beam[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(13): 849.
- [53] Wu X, Zi F, Jordan D, et al. Multiaxis atom interferometry with a single-diode laser and a pyramidal magneto-optical trap[J]. *Optica*, 2017, 4(12): 1545.
- [54] Petelski T G. Atom interferometers for precision gravity measurements[D]. Tuscany: University of Florence, 2005.
- [55] Degen C, Reinhard F, Cappellaro P. Quantum sensing[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2017, 89(3): 035002.
- [56] 龙金宝. 基于原子干涉的可搬运重力仪的研制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [57] 黄壮. 原子干涉仪集成化光学系统设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [58] Wang Q, Wang Z, Fu Z, et al. A compact laser system for the cold atom gravimeter[J]. *Optics Communications*, 2016, 358: 82–87.
- [59] Theron F, Carraz O, Renon G, et al. Narrow linewidth single laser source system for onboard atom interferometry[J]. *Applied Physics B*, 2015, 118(1): 1–5.

- [60] Allard F, Maksimovic I, Abgrall M, et al. Automatic system to control the operation of an extended cavity diode laser[J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(1): 54–58.
- [61] 白金海. 光与原子相互作用中的量子现象[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院物理研究所), 2018.
- [62] Malek B, Pagel Z, Wu X, et al. Embedded Control System for Mobile Atom Interferometers[J]. 2019, 90(7): 073103.
- [63] Bertoldi A, Feng C H, Eneriz H, et al. A control hardware based on a field programmable gate array for experiments in atomic physics[J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(3): 033203.
- [64] Wu X, Pagel Z, Malek B S, et al. Gravity surveys using a mobile atom interferometer[J]. Science Advances, 2019, 5(9): eaax0800.
- [65] Mahadeswaraswamy. Atom interferometric gravity gradiometer Disturbance compensation and mobile gradiometry[D]. San Francisco: Stanford University, 2009.
- [66] Christian Freier. Precision Gravity Measurements with Quantum and Classical Sensors[D]. Berlin: Humboldt-Universität zu Berlin, 2017.
- [67] Geiger R, Ménotet, V, Stern G, et al. Detecting inertial effects with airborne matter-wave interferometry[J]. Nature Communications, 2011, 2: 474.
- [68] 贡昊, 王宇, 白金海, 等. 半导体激光器稳频综述[J]. 计测技术, 2019, 39(3): 1–7.
- [69] Li G, Hu H, Wu K, et al. Ultra-low frequency vertical vibration isolator based on LaCoste spring linkage[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(10): 1411–417.
- [70] 汤彪. 高精度原子干涉仪主动隔振系统的实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院武汉物理与数学研究所), 2014.
- [71] Zhou M K, Duan X C, Chen L L, et al. Micro-Gal level gravity measurements with cold atom interferometry[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(5): 32–43.
- [72] Zhou M K, Hu Z K, Duan X C, et al. Precisely mapping the magnetic field gradient in vacuum with an atom interferometer[J]. Physical Review A, 2010, 82(6): 1203–1206.
- [73] Zhou M K, Luo Q, Chen L L, et al. Observing the effect of wave-front aberrations in an atom interferometer by modulating the diameter of Raman beams[J]. Physical Review A, 2016, 93(4): 043610.
- [74] Wu B, Wang Z, Cheng B, et al. The investigation of a μGal -level cold atom gravimeter for field applications[J]. Metrologia, 2014, 51(5): 452.
- [75] Wang Z Y, Chen T, Wang X L, et al. A precision analysis and determination of the technical requirements of an atom interferometer for gravity measurement[J]. Frontiers of Physics in China, 2009, 4(2): 174–178.
- [76] 熊宗元, 姚战伟, 王玲, 等. 对抛式冷原子陀螺仪中原子运动轨迹的控制[J]. 物理学报, 2011, 60(11).
- [77] Zhou L, Xiong Z Y, Yang W, et al. Development of an atom gravimeter and status of the 10-meter atom interferometer for precision gravity measurement[J]. General Relativity and Gravitation, 2011, 43(7): 1931–1942.
- [78] Wei C, Yan S, Jia A, et al. Compact phase-lock loop for external cavity diode lasers[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(5): 57–60.
- [79] Hu Q Q, Yang J, Luo Y K, et al. A theoretical analysis and determination of the technical requirements for a Bragg diffraction-based cold atom interferometry gravimeter[J]. Optik – International Journal for Light and Electron Optics, 2017, 131: 632–639.
- [80] Wang Q Y, Feng J Y, Wang S K, et al. Calibration of the superconducting gravimeter based on a cold atom absolute gravimeter at NIM[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(12): 254–259.
- [81] 贡昊, 王宇, 白金海, 等. 面向重力加速度测量领域的原子干涉操控方法综述[J]. 测控技术, 2020, 39, 343(9): 76–82.

收稿日期: 2021-02-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61727819); 国家“十三五”计量基础科研项目(JSJL2019205C002)

作者简介

白金海(1988–), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为量子精密测量。参与或主持多项量子测量相关项目, 并作为主要参与者研制了冷原子干涉绝对重力仪。

