

冷原子干涉加速度测量技术研究现状与发展动态分析

肖玉华, 张炯阳*, 高望远, 陈江, 杨世宇, 雷军刚, 刘志栋
(兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 高精度加速度测量在惯性导航与重力场测量等领域有着广阔的应用前景。基于冷原子干涉的加速度测量传感器能够充分发挥原子物质波波长短、演化时间长和频率响应精确等特点, 比传统加速度计和重力仪等惯性传感器具有更高的测量灵敏度、精度和长期稳定性, 为现有加速度测量技术带来重大变革。从冷原子干涉加速度测量的基本原理出发, 综述了30多年来国内外冷原子干涉加速度测量技术的研究进展, 结合惯性导航对加速度测量的技术需求, 分析总结了冷原子干涉加速度测量技术的发展动态与重点发展方向是系统的集成化与小型化、重复频率和测量带宽的提高、与经典加速度计的复合以及多轴加速度测量等, 旨在提升和完善冷原子干涉加速度传感器的整体性能, 以推动冷原子干涉加速度传感器向工程应用迈进, 为满足高精度惯性测量的国防战略需求提供有力支撑。

关键词: 冷原子干涉; 加速度测量; 集成化与小型化; 测量带宽; 复合加速度计

中图分类号: TB771; TH744.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2023)06-0525-18

DOI: 10.3969/j.issn.1006-7086.2023.06.001

Research Status and Development of Acceleration Measurement Technology Based on Cold Atom Interferometry

XIAO Yuhua, ZHANG Jiong yang*, GAO Wangyuan, CHEN Jiang, YANG Shiyu, LEI Jungang, LIU Zhidong
(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory,
Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: High-precision acceleration measurement has a broad application prospect in the fields of inertial navigation and gravity field measurement. The acceleration measurement sensor based on cold atom interferometry can fully exploit the short wavelength, long evolution time, and precise frequency response of atomic matter waves, which is much higher than the measurement sensitivity, accuracy and long-term stability of traditional inertial sensors such as accelerometers and gravimeters, bringing significant changes to the existing acceleration measurement technology. Starting from the basic principle of cold-atom interferometric acceleration measurement, the research progress of cold-atom interferometric acceleration measurement technology at home and abroad over the past 30 years is reviewed. And at the same time, combining with the demand for acceleration measurement technology in the field of inertial navigation, it is analyzed and concluded that the development dynamics of cold-atom interferometric acceleration measurement technology and the key development direction are the integration and miniaturization of the system, the improvement of the repetition frequency and the measurement bandwidth, hybrid accelerometers and multi-axis acceleration measurement, etc. The aim is to improve and perfect the overall performance of cold-atom interferometric acceleration sensors, in order to boost and facilitate the advancement of cold-atom interferometric acceleration sensors to the stage of engineering applications, and to provide a powerful support to meet the strategic demand for high-precision inertial measurements from the national defense industry.

收稿日期: 2023-07-06

基金项目: 重点实验室基金(6142207210101)

作者简介: 肖玉华, 高级工程师, 主要从事冷原子技术与精密测量研究。E-mail: yhxiao2004@sina.com

通信作者: 张炯阳, 工程师, 主要从事冷原子干涉重力测量技术研究。E-mail: zhangjy529@126.com

引文信息: 肖玉华, 张炯阳, 高望远, 等. 冷原子干涉加速度测量技术研究现状与发展动态分析[J]. 真空与低温, 2023, 29(6): 525-542.

XIAO Y H, ZHANG J Y, GAO W Y, et al. Research status and development of acceleration measurement technology based on cold atom interferometry[J]. Vacuum and Cryogenics, 2023, 29(6): 525-542.

Key words: cold atom interferometry; acceleration measurement; integration and miniaturization; measurement bandwidth; hybrid accelerometer

0 引言

原子干涉精密测量随着原子物理学的发展而迅速发展,特别是 20 世纪 70 年代激光冷却技术的问世,实现了对原子的冷却与俘获,通过增加原子的相干长度增强了原子的波动性,使这种对原子的精准控制成为物理学家的实验研究工具^[1-4]。其中,以冷原子为敏感介质构建的原子干涉惯性传感器,可充分发挥原子物质波波长短、演化时间长和频率响应精确等特点,比基于传统惯性测量原理的传感器具有更高的测量灵敏度、精度和长期稳定性,为当前惯性测量技术注入了新的活力。到目前为止,光脉冲原子干涉加速度传感器的灵敏度和精度水平已经达到甚至超越了现有基于其他技术原理的传感器。已应用于地球物理^[5-7]、惯性传感^[8-11]、计量^[12]以及基础物理规律验证^[13-16]等领域。

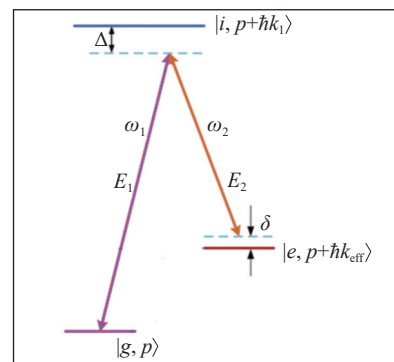
冷原子干涉加速度传感器的性能主要包括灵敏度、稳定性、精度、测量带宽、紧凑性和可移动性等。在冷原子干涉测量技术研究最初的 20 年里,研究工作主要集中在实验室环境中的灵敏度改善和基础物理规律验证,目前更多的研究是解决工程应用方面的问题。特别在惯性制导方面,要求加速度传感器具有高稳定性、宽动态范围和高采样率、紧凑性和健壮性。然而,冷原子加速度传感器在这些方面还不够成熟,无法与其他技术原理的成熟传感器竞争。因此,提高冷原子加速度传感器的整体性能是当前冷原子干涉精密测量技术发展的一项重要任务。

1 冷原子干涉加速度测量基本原理

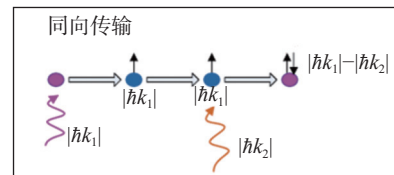
双光子受激跃迁(主要包括受激拉曼跃迁和布拉格衍射等)是脉冲式冷原子干涉加速度测量的理论基础,其中,布拉格衍射在本质上是受激拉曼跃迁的演变情形。朱棣文小组最早研制的原子干涉仪是采用双光子受激拉曼脉冲原理实现的^[17],这也是目前技术最成熟、性能最好的原子干涉绝对加速度测量方案。

以三能级原子系统为例说明原子干涉加速度测量的基本原理。该原子系统由两个基态 $|g\rangle$ 、 $|e\rangle$ 和一个激发态 $|i\rangle$ 构成。三能级原子系统与双光子受激跃迁动量传输过程如图 1 所示^[18],其中,角频率为 ω_1 和 ω_2 (通常 $\omega_1 - \omega_2$ 的频率差为 kHz 到 GHz 之间)的光场 E_1 、 E_2 使三能级原子系统的两个基态

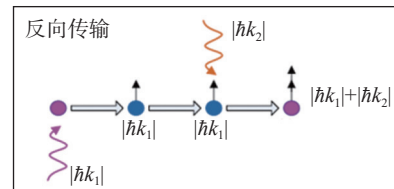
$|g, p\rangle$ 和 $|e, p + \hbar k_{\text{eff}}\rangle$ (k_{eff} 为有效波矢)通过激发态 $|i, p + \hbar k_i\rangle$ 相耦合, Δ 为 $|g\rangle \leftrightarrow |i\rangle$ 跃迁的单光子失谐, δ 为 $|g\rangle \leftrightarrow |e\rangle$ 跃迁的双光子失谐。当原子与两束同向传输的激光 k_1 和 k_2 相互作用时,发生双光子跃迁,动量传输 $\hbar|k_{\text{eff}}| = \hbar(|k_1| - |k_2|)$ 是一个小量;当原子与两束反向传输的激光 k_1 和 k_2 相互作用时,发生双光子跃迁,其动量传输为 $\hbar|k_{\text{eff}}| = \hbar(|k_1| + |k_2|) \approx 2\hbar|k_2|$ 。



(a) 双光子受激跃迁过程中原子能级变化



(b) 同向受激跃迁过程



(c) 反向受激跃迁过程

图 1 三能级原子系统与双光子跃迁动量传输过程示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the momentum transfer process in a three-level atomic system with two-photon transition

与光学 Mach-Zehnder(M-Z)干涉仪类似,典型的原子干涉序列由“ $\pi/2 - \pi - \pi/2$ ”脉冲构成,其原理如图 2 所示^[18]。图中 ω_1 和 ω_2 代表反向传输的两束脉冲激光的角频率, r_1 、 r_{21} (r_{22})和 r_{31} (r_{32})分别是 t_1 、 t_2 、 t_3 时刻原子团的中心位置。将冷原子团看作一个理想质点,通过控制脉冲激光的时间及强度,形成 $\pi/2 - \pi - \pi/2$ 的激光脉冲序列,使原子分束、反射、合束,形成干涉。假设所有原子具有统一的初态 $|g, p\rangle$,在 t_1 时刻, $\pi/2$ 脉冲与原子作用使原子“分

束”,并等概率地分布在 $|g, p\rangle$ 和 $|e, p + \hbar k_{\text{eff}}\rangle$ 态,获得 $\hbar k_{\text{eff}}$ 的动量差,使得 $|g\rangle$ 态与 $|e\rangle$ 态原子在空间上逐渐分开,分别沿着路径 AB_1 和 AB_2 传输。经光脉冲时间间隔 T 之后,在 $t_2 = t_1 + T + \tau/2$ 时刻, π 脉冲使 $|g\rangle$ 态、 $|e\rangle$ 态原子发生内部能态及外部动量态的反转,即处于 $|g, p\rangle$ 态的原子跃迁至 $|e, p + \hbar k_{\text{eff}}\rangle$, $|e, p + \hbar k_{\text{eff}}\rangle$ 态的原子跃迁至 $|g, p\rangle$ 态,起到类似反射镜的作用,使两个态的原子分别沿着路径 B_1C_1 和 B_2C_2 合束。又经过第二段光脉冲作用时间间隔 T 后,在 $t_3 = t_1 + T + 3\tau/2$ 时刻,另一束 $\pi/2$ 脉冲作用

于原子,使不同路径的原子波包含束,形成闭合的干涉环路。对合束后的原子团进行的内态探测发现,两个能级上的原子布居数分布取决于原子所经历的相位差,因而形成跃迁概率 P 随相位差 ϕ 变化的干涉条纹,表达式为:

$$P = \frac{N_e}{N_e + N_g} = P_0 - \frac{C}{2} \cos(\phi) \quad (1)$$

式中: N_e 和 N_g 分别为 $|e\rangle$ 态和 $|g\rangle$ 态的原子布居数, P_0 为干涉条纹的幅值偏移, C 为干涉条纹的对比度。

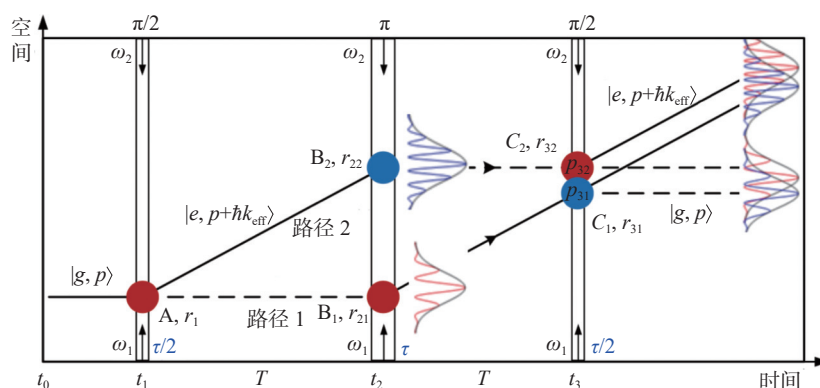


图2 原子干涉仪的原子自由演化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of atomic free evolution process in an atom interferometer

P 为原子最后探测时处于 $|e, p + \hbar k_{\text{eff}}\rangle$ 的概率,相位差 ϕ 包含角速度 Ω 和加速度 a 引入的相位 ϕ_Ω 和 ϕ_a ,其中

$$\phi_\Omega = 2k_{\text{eff}}(\Omega \times v_0) T^2 \quad (2)$$

$$\phi_a = k_{\text{eff}} a T^2 \quad (3)$$

式(2)和(3)分别为基于原子干涉的角速度 Ω 和加速度 a 测量对应的相移公式,式中, v_0 为原子的初始速度。

扫描解析干涉条纹得到与惯性量相应的相移,可计算出 Ω 和 a 。

原子干涉加速度计与传统光学干涉加速度计相比,其相位改变量比率为 $R_a = 2m\lambda c^2/vh$ 。利用典型值 $m \approx 10^{-25}$ kg、 $\lambda \approx 10^{-7}$ m、 $v_0 \approx 10^{-2}$ m/s、 $c \approx 3.0 \times 10^8$ m/s和 $h \approx 6.63 \times 10^{-34}$ J·s对 R_a 进行估算,可得 $R_a \approx 10^{20}$ 。即使原子干涉环路面积(mm^2 数量级)无法与光学干涉(m^2 数量级)相匹配,但原子干涉与光学干涉的相位改变量比率却高达 $10^3 \sim 10^4$ 。因此,在某种程度上,冷原子干涉加速度计有望挑战当前加速度测量极限,成为精度更高的加速度测量传感器。

2 冷原子干涉加速度测量技术国内外研究现状

2.1 国外现状分析

虽然冷原子干涉加速度测量传感器与冷原子干涉重力仪的原理相近,但这两种仪器的实际使用有不同的约束要求,实现方式也不同。通常对加速度传感器的灵敏度要求比重力仪低,但对其动态范围、响应速度、尺寸、功耗、便携性和可靠性方面的要求更高。在惯性导航系统中,必须沿三个不同的轴测量加速度,以准确获得运动载体的位置和速度信息。原子干涉重力仪是一种简单的单轴仪器,用于测量与地球重力场相关的垂直加速度,必须非常敏感和便携。在国内外文献调研中,我们注意到,同一研究组经常同时致力于惯性导航和重力测量应用研究。

美国斯坦福大学朱棣文小组是最早开展冷原子干涉重力加速度测量的研究团队。1991年,他们通过操控冷钠原子团实现了原子干涉,并利用研制出的干涉仪对重力加速度进行了精密测量,从实验上证实了原子干涉仪的高性能和技术潜力^[17]。1992年,他们研制出世界上首台原子干涉重力加速度测量装置^[19],如图3所示。

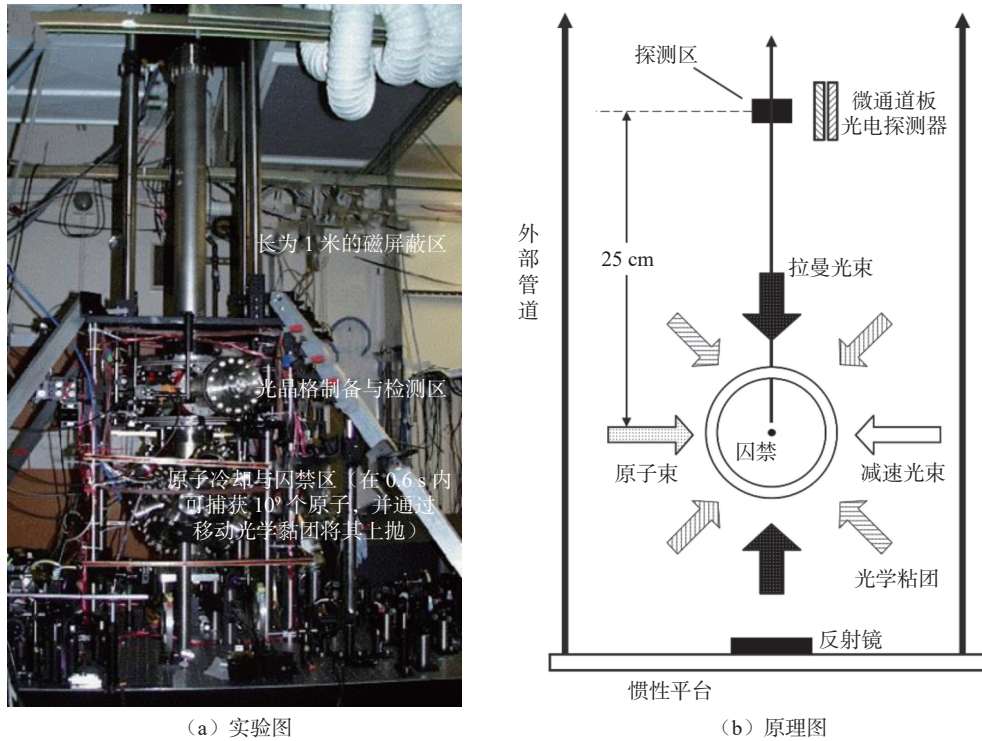


图 3 斯坦福大学研制的原子干涉重力加速度测量装置

Fig. 3 Atomic interferometer acceleration measurement apparatus developed by Stanford University

该装置采用三脉冲受激拉曼跃迁的 M-Z 干涉方案, 在 1 Hz 的脉冲频率下, 将激光冷却获得的钠原子团(尺寸为 ~ 3 mm、原子数为 $\sim 5 \times 10^7$ 、温度为 ~ 30 μK)沿垂直方向上抛产生原子喷泉, 原子的均方根速度分布为 ~ 30 cm/s。当 $T=50$ ms 时, 加速度绝对灵敏度 $\Delta g_n/g_n=3 \times 10^{-8}$ @2 000 s(本文中 g_n 指代标准重力加速度值, 根据该领域学术通用表示方法, 本文中 mg_n 、 μg_n 、 ng_n 分别表示 $1 \times 10^{-3} g_n$ 、 $1 \times 10^{-6} g_n$ 、 $1 \times 10^{-9} g_n$)。2001 年, 他们采用铯喷泉原子干涉重力仪, 通过主动隔振, 在两天的积分时间内使 $\Delta g_n/g_n$ 达到 $\sim 10^{-10}$, 远远高于传统重力仪的测量水平^[1]。他们认为, 随着二极管激光技术和原子真空气室小型化技术的不断发展, 可以将该装置开发成便携式的加速度计。

鉴于原子干涉仪展现出的性能优势和巨大的应用前景, 欧美各国纷纷颁布了各种量子计划法案来推动原子干涉惯性传感器的研制。在这些计划支持下, 原子惯性传感器取得了长足的进步和发展。美国国防部高级研究计划局(DARPA)将以原子干涉为核心的原子惯性技术作为未来军用惯性导航系统的首选技术。针对全球定位系统(GPS)的缺点, DARPA 最早于 2003 年制定了“精确惯性导航系统(PINS)”研究计划, 其目标是利用超冷原子干涉进行高精度惯性导航, 并将该系统集成到载体平台上, 同时进行全张量重力梯度测量, 最终实现一

种不需要与外界平台交换信号、不受地理环境限制的新一代军用惯性导航技术。2010 年前后, 依托斯坦福大学深厚的原子干涉仪技术基础, 美国 AOSense 公司发布了原子重力仪商用产品^[20], 如图 4 所示, 其分辨率优于 $0.1 \mu g_n$ 。2011 年, DARPA 制定了“高动态范围原子传感器(HiDRA)”研究计划, 其目标是提高 PINS 计划中冷原子惯性测量单元(IMU)的动态范围, 并将其应用到各类军事装备平台上, 例如飞机、舰艇和导弹等。

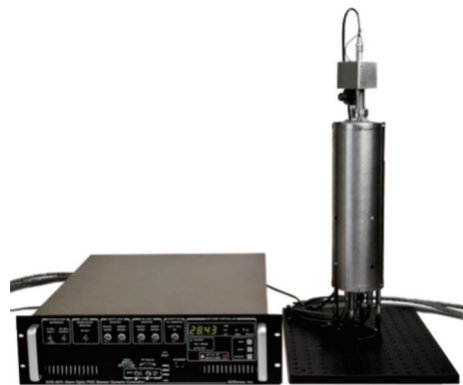


图 4 AOSense 公司开发的商用原子重力仪

Fig. 4 Commercial atomic gravimeter developed by AOSense

不同于斯坦福大学的高精度目标, 美国桑迪亚国家实验室和新墨西哥大学的联合小组致力于高采样带宽的原子干涉惯性传感器的研究。2012 年,

该小组研制了采样率带宽为 50 ~ 330 Hz、对应灵敏度为 $0.57 \sim 36.7 \mu\text{g}_n \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 的原子加速度计^[21]。2014 年,利用冷原子重捕获方法实现了更高采样率的双轴紧凑型冷原子惯性传感器,如图 5 所示^[22]。图中:矢量 \mathbf{g} 为重力方向; \mathbf{a} 和 $\boldsymbol{\Omega}$ 分别为加速度和角速度测量方向。蓝色光束为冷却光,粉色光束为探测光,黄色光束为拉曼光。

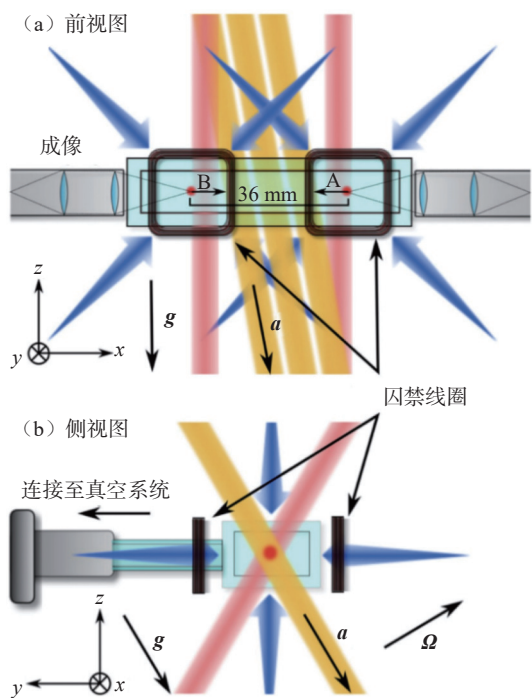


图 5 桑迪亚国家实验室双轴冷原子干涉仪示意图

Fig. 5 Diagram of a dual-axis high-data-rate atom interferometer at Sandia National Laboratories

该传感器可在同一个矩形玻璃真空腔中囚禁两团冷原子,使其间距为 36 mm,并利用激光将 A、B 两团原子对抛。在抛射过程中利用激光对原子进行操控完成干涉,当原子继续运行到另一个磁光阱(MOT)区域时对其进行重新捕获,捕获效率达到 85%。该方案可获得的采样率在 50~100 Hz 之间,当采样率为 60 Hz 时,光脉冲作用时间间隔 T 为 4.1 ms,加速度和角速度灵敏度分别为 $0.88 \mu\text{g}_n \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 和 $1.1 \mu\text{rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

2013 年,美国斯坦福大学提出一种基于 PSI (Point source interferometry) 技术的冷原子惯性传感器,它采用单个冷原子团的膨胀效应和空间成像进行三轴惯性($\Omega_x, \Omega_y, \mathbf{g}$)测量和解析^[23]。制备好的冷原子团存在一个速度分布,完成干涉后,速度不同的原子与同一角速度原子耦合所贡献的相移不同,当采用 CCD 对原子团进行空间成像时,不同空间位置对应的相移不同,根据相移的空间梯度和方向

等信息可以计算出角速度信息,最终从总相移中解析出角速度和加速度。2019 年,美国国家标准与技术研究院(NIST)研制的基于 PSI 技术的惯性传感器在 5~10 Hz 的采样率下的加速度和角速度灵敏度分别为 $16 \mu\text{g}_n \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 和 $576 \mu\text{rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,单次测量的“死时间”(指在加速度测量过程中对原子干涉相位没有贡献的时间,与冷原子的制备和探测时长有关)为 84%,其原理如图 6 所示^[24]。图中 F 为角动量子数, m_F 为磁量子数。

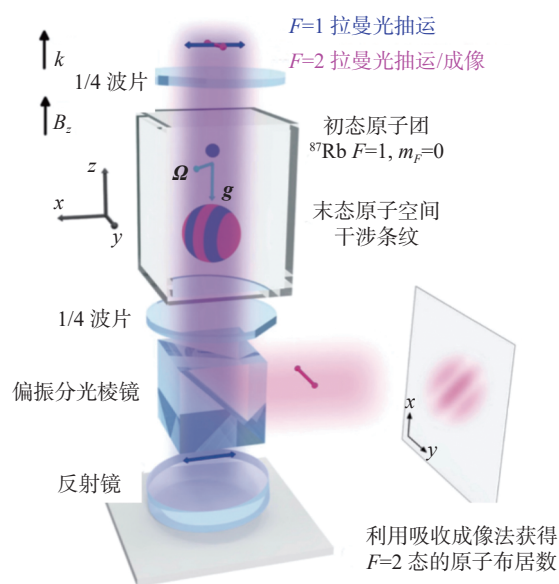


图 6 NIST 研制的 PSI 冷原子三轴惯性传感器测量原理图

Fig. 6 Measurement schematic of the PSI cold-atom triaxial inertial sensor developed by NIST

2017 年,美国加州大学伯克利分校(UC Berkely)使用金字塔结构磁光阱和单台激光器方案实现了多轴惯性测量,其系统结构紧凑,功耗小^[25]。在金字塔结构中,竖直方向和两个 45° 方向都可以作用拉曼光,如图 7 所示。当分别在竖直方向和两个垂直金字塔内表面的方向作用拉曼光时,可测得包含相应方向的加速度信息,如图 8(a)所示。如果采用四脉冲法,可在惯性测量信息中分离出角速度,因而有望实现全惯性力的测量,如图 8(b)所示。但单次测量无法得到单个惯性力,必须联解方程组,并要求测量过程保持静止。在 1 Hz 的单次采样率条件下,其加速度测量灵敏度为 $0.6 \mu\text{g}_n \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,积分 10 000 s 的稳定度为 $0.04 \mu\text{g}_n$,角速度测量灵敏度为 $300 \mu\text{rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

2019 年美国 UC Berkely 报道了一种可移动小型化原子重力仪,其灵敏度为 $37 \mu\text{g}_n \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 、长期稳定度优于 2ng_n ,该重力仪通过车载完成了区域性重力勘察,不确定度约为 40ng_n ^[26]。

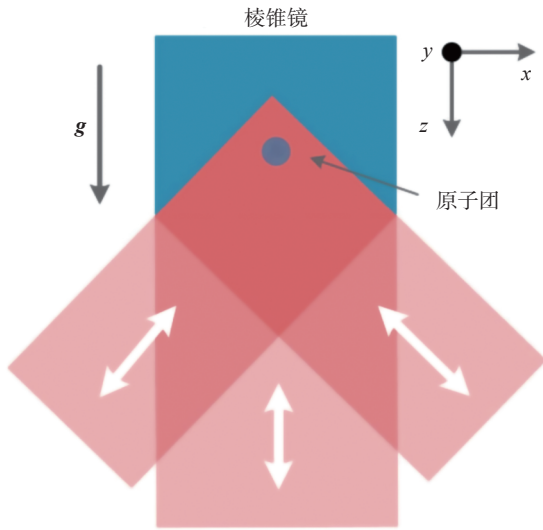


图 7 金字塔多轴冷原子惯性传感器原理示意图
Fig. 7 Schematic diagram of pyramid multi-axis cold atom inertial sensor

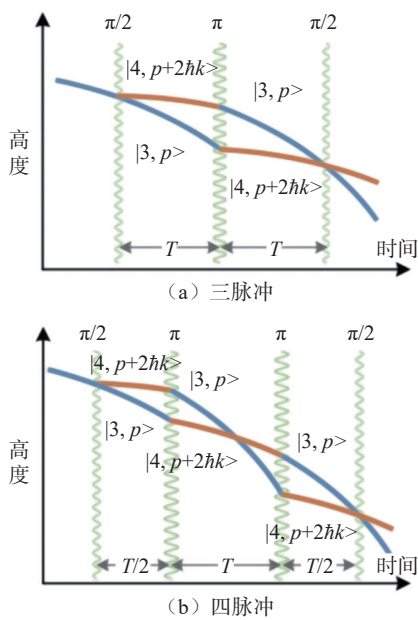


图 8 三脉冲和四脉冲作用下的原子演化轨迹
Fig. 8 Space-time trajectories of atoms in the three pulses geometry and the four pulses geometry

法国对原子干涉仪的研究紧随美国之后,并且在实际外场应用方面开展了不少引领性的工作。2006 年,法国巴黎天文台(LNE-SYRTE) Canuel 等^[27]通过三脉冲和四脉冲组合的方法研制了一种六轴原子干涉惯性传感器,它是由两个磁光阱组成左右对抛的双环路 M-Z 型原子干涉仪。原子团沿抛物线轨迹发射,并与顶部的拉曼激光器相互作用,如图 9 所示。其中:(a)~(d)为通过四种脉冲构型实

现的 3 个方向的角速度和加速度的测量。在三脉冲序列构型中,拉曼光束的方向可以为水平或垂直,相应的干涉仪平面处于水平(a)或垂直(b)(c);(d)为蝶型四脉冲序列的水平光束,可以测量角速度 Ω_x 。这种构型的原子干涉仪可实现加速度(a_x, a_y, a_z)和角速度($\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$)的精确测量,同时,由于采用了双环路干涉,可有效消除环境噪声的影响。实验测得的加速度灵敏度和角速度灵敏度分别为 $0.47\mu g_n@1\text{ s}$ 和 $2.2\ \mu\text{rad/s}@1\text{ s}$ 、 $0.064\mu g_n@600\text{ s}$ 和 $0.14\ \mu\text{rad/s}@600\text{ s}$ 。此外,该传感器在小型化和紧凑性方面也有很大的提升。

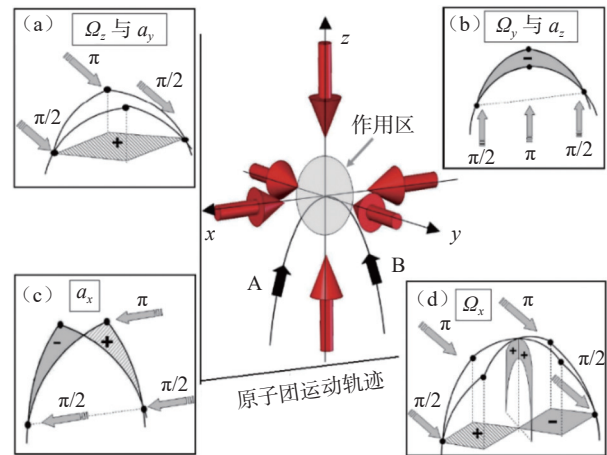


图 9 法国巴黎天文台研制的六轴原子惯性传感器原理示意图

Fig. 9 Principle of six-axis atomic inertial sensor developed by the Paris Observatory

2009 年,法国巴黎天文台设计了双衍射对称分束方案,将原子重力仪的干涉环路面积增大了一倍^[28]。2010 年,通过引入该分束方案研制的重力仪的灵敏度为 $83\text{ng}_n\ \text{Hz}^{-1/2}$ ^[29]。同年,法国光学所联合巴黎天文台将原子重力仪的磁光阱设计成金字塔构型,使得重力仪的集成度得到进一步的提高^[30]。

由于原子重力仪具有高的灵敏度,因此通常需要低振动和高热稳定性的工作环境,而这些环境必须专门设计。为了给原子重力仪未来的工程应用提供环境适应性设计指引,2011 年,法国巴黎天文台 Bouyer 等^[31]首次使用原子重力仪在零重力飞机上进行了重力加速度测量实验,如图 10 所示。为了量化原子干涉仪测量中包含的信息,在拉曼光反射镜上安装了机械加速度计。由于原子分束和反射镜的缺陷对干涉信号有较大影响,导致原子干涉仪探测过程中出现噪声信号。为了提升重力仪的测

量性能, 须对机械加速度计的比例因子进行校准, 并隔离大于 10 Hz 的高频振动。通过这种组合的加速度测量模式, 在 $1g_n$ 下, 灵敏度水平达到 $0.16mg_n Hz^{-1/2}$, 能够测量比飞机典型加速度波动弱 99.7% 以上的惯性效应; 在 $0g_n$ 下, 研究了一种振动噪声抑制方法: 利用四脉冲方案构建了一种相当于由两个连续单环路干涉仪组合而成的双环路干涉仪, 解耦两种加速度计的测量数据得出加速度测量结果, 由于仪器对低频惯性效应不太敏感, 预计其测量灵敏度为 $20\mu g_n Hz^{-1/2}$ 。这为未来在机载、空间站、卫星平台等微重力环境下应用冷原子干涉仪进行更精密的物理研究和工程应用奠定了基础。

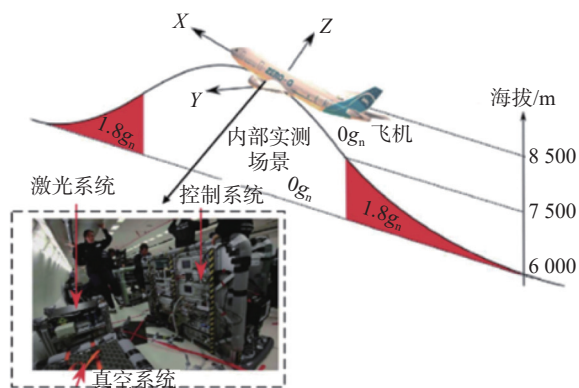


图 10 冷原子干涉加速度计在零重力飞机上进行实验
Fig. 10 Operation of a cold atom interferometer accelerometer on-board a $0g_n$ aircraft

2013 年, 法国航空航天研究院 (ONERA) 报道了可用于外场的原子重力仪, 其灵敏度达到 $42ng_n Hz^{-1/2}$, 精度为 $25ng_n$, 并使用该重力仪在运动电梯中进行

了重力加速度测量^[32]。2018 年, ONERA 利用船载原子重力仪完成了部分区域海洋的重力图测绘, 平均重力测量精度优于 $1\mu g_n$ ^[33]。2020 年, ONERA 利用机载原子重力仪进行了航空重力测量, 精度达到 μg_n 级^[34]。

2019 年, 法国巴黎天文台通过法国 Muquans 公司 (现已被 iXblue 公司收购) 发布了商业化的冷原子重力仪, 如图 11 所示, 其灵敏度达到 $50ng_n Hz^{-1/2}$, 稳定度优于 $1ng_n$ ^[35]。

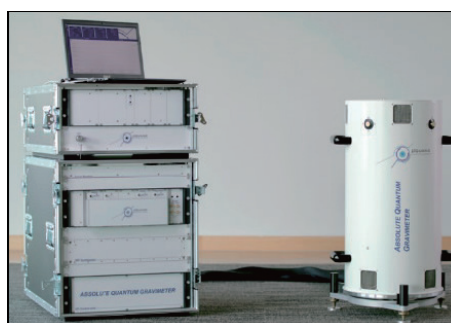


图 11 Muquans 公司开发的商用原子重力仪
Fig. 11 Commercial atomic gravimeter developed by Muquans

除了以重力仪的高精度为目标外, 法国其他研究组还研究高采样带宽的原子干涉惯性传感器。2014 年, 法国巴黎天文台 Lautier 等^[36] 提出了一种原子加速度计和机械加速度计复合式测量方案, 其性能测试结果如图 12 所示。其中: (a) 为经典加速度计估计的原子波包相移测试; (b) 为对振动噪声实时补偿的原子波包相移测试; (c) 为测量的加速度的 Allan 标准偏差。

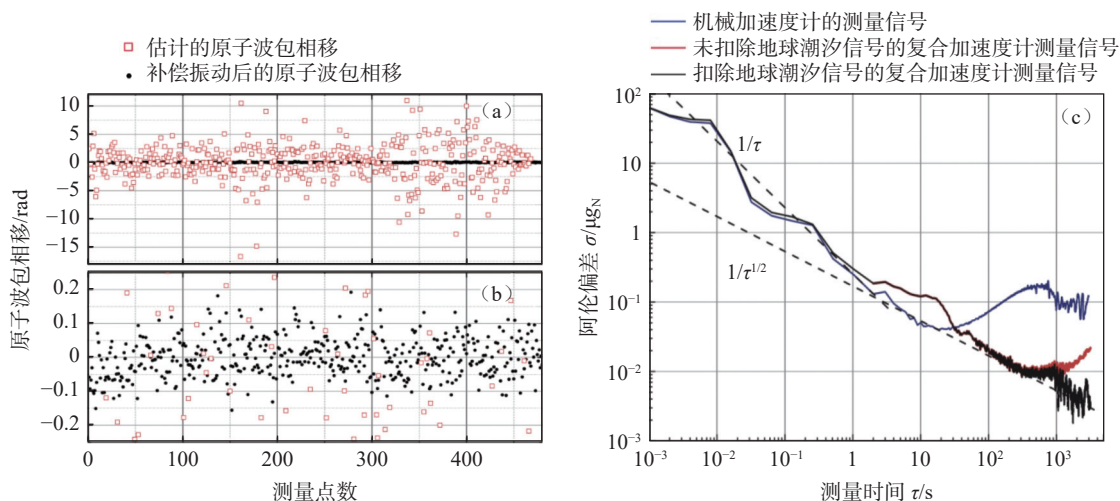


图 12 原子加速度计和机械加速度计复合式测量方案
Fig. 12 Testing result of quantum-classical hybrid accelerometer

冷原子干涉传感器较低(约 1 Hz)的采样率和时序工作中存在的“死时间”问题会造成传感器的低频噪声和低频噪声的混叠干扰效应。如果用主动或被动隔离平台解决该问题又会导致传感器体积庞大,不适合在移动环境中工作。提高采样率可减小这种混叠干扰效应,但会大幅降低测量灵敏度。利用机械加速度计和原子加速度计同时测量的加速度数据与二者之间的修正算法,以及冷原子干涉加速度计的高灵敏度,可有效解决冷原子干涉加速度计的条纹数模糊性问题。利用实时的方式预先补偿由振动引起的原子相位波动,在波包重新组合之前作用于拉曼激光器的相位差,除了能抑制振动噪声,还可有效提高仪器的灵敏度。此外,可充分利用这种相关性来校正机械加速度计的漂移。最终,经复合后的加速度计的振动噪声降低近 98.3%,测量灵敏度为 $65\text{ng}_n\text{Hz}^{-1/2}$,长期分辨率为 $3\text{ng}_n@300\text{s}$ 。从图 12 可知,扣除潮汐影响后,复合加速度计 1 000 s 积分时间的稳定性较机械加速度计提高了一个数量级。之后报道的冷原子加速度计大多采用这种复合方式来提高加速度测量的性能。这种复合加速度计结合了两类加速度计的优点,可提供 DC 至 430 Hz 的连续测量宽带信号,这得益于原子干涉加速度计长期稳定性和准确性。采用这种复合加速

度计进行导航,4 h 后的累积误差小于 1 m。这种复合加速度计的性能优势不仅使其在地球科学(地震学和重力学)方面很有吸引力,在惯性导航中有着更为重要的意义。

法国 iXblue 公司和数字光子学与纳米科学实验室(LP2N)合作,研发了适用于工业、国防、太空领域的冷原子惯性传感器。2016 年,他们提出了一种单 MOT 方案,在该方案中,传感器的探头结构与原子重力仪类似,但在三个正交方向都有拉曼光,可以测三个方向的加速度^[37]。

2018 年,他们将仅对竖直方向加速度敏感的原子干涉加速度计与经典机械加速度计组合形成复合式惯性传感器^[38],如图 13 所示。这种传感器采用原子干涉加速度计和机械加速度计之间的相关性来跟踪后者的偏差,并使用非线性卡尔曼滤波优化跟踪所有干涉条纹参数,使加速度计偏差不受实验参数的变化影响。他们通过同时增加振动噪声、温度变化和激光强度波动来模拟实验室中的移动环境,测得的机械加速度计的偏差小于 $1\mu\text{g}_n@400\text{Hz}$ 。该复合加速度计测量带宽高达 400 Hz,测量灵敏度为 $3.2\mu\text{g}_n\text{Hz}^{-1/2}$,稳定性达到 $10\text{ng}_n@11\text{h}$ 。图 14 为测量的加速度的 Allan 偏差。

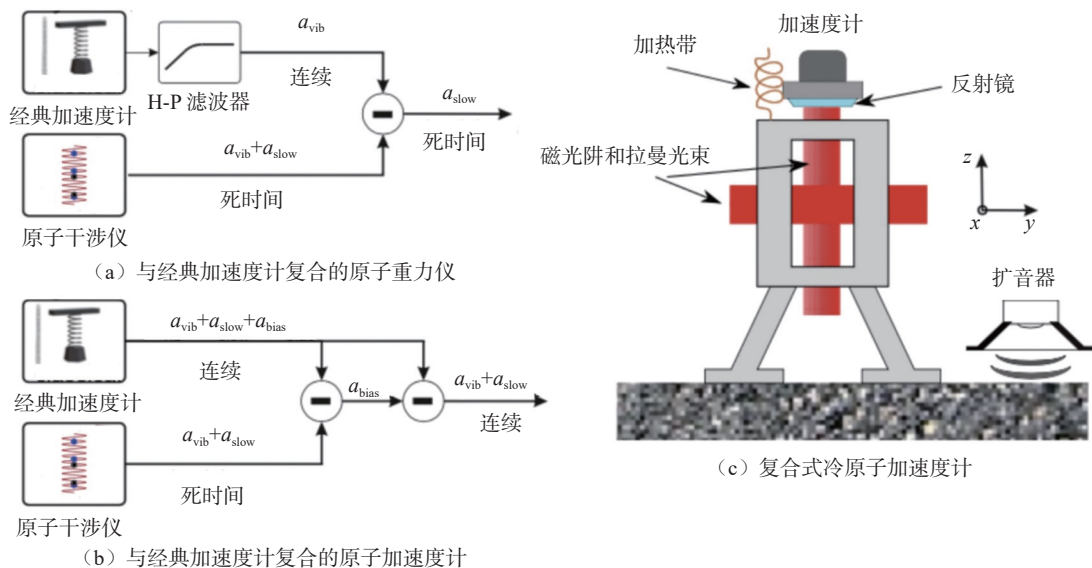


图 13 iXblue 公司和 LP2N 实验室联合开发的复合式冷原子加速度计

Fig. 13 Hybrid cold atom accelerometer developed by iXblue and LP2N jointly

惯性导航要求惯性测量单元(加速度计和陀螺仪)具备三轴测量能力。为了有效解决冷原子干涉加速度计的三轴测量问题,2019 年 iXblue 公司和

LP2N 联合提出了一种基于三维双衍射(3D double diffraction)的理论模型,有望在单 MOT 构型下实现六轴全惯性同步且独立的测量^[39]。在三个正交

方向同时对制备好的原子团作用脉冲时间间隔为 T 的三脉冲拉曼光, 形成 12 个空间分离的 M-Z 型原子干涉仪, 以空间成像的方法得到各自相移从而得出 6 个惯性量。在该理论模型中, 由原子团的初速度带来的影响将会被差分消除, 而与角速度耦合

的原子速度是由拉曼光精确传递的, 能够显著减小惯性测量的误差和长漂。该理论模型最重要的是采用简单的构型实现了六轴惯性的同步独立测量, 并且传感器的姿态可任意调整, 因此, 在惯性导航的应用中有较大潜力, 但目前尚处于理论阶段。

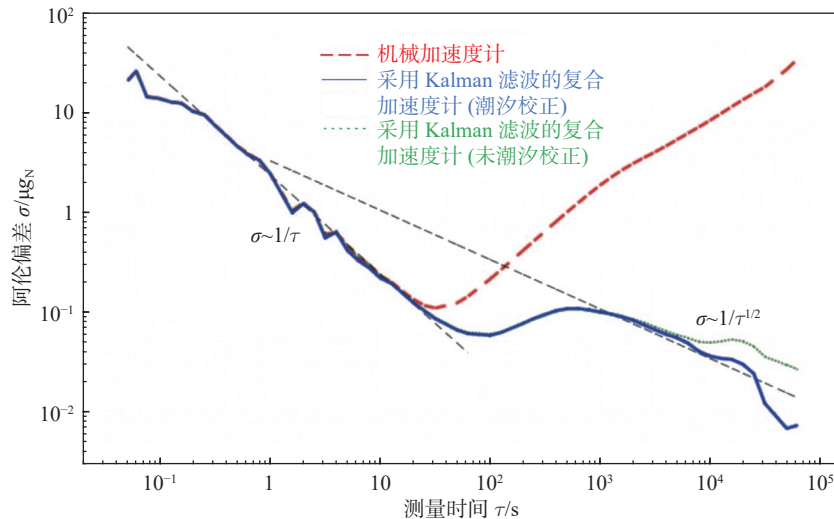


图 14 复合式冷原子加速度计加速度测量的 Allan 偏差

Fig. 14 Allan deviation of acceleration signals from the hybrid cold atom accelerometer

2022 年, iXblue 公司报道了世界上首台三轴冷原子干涉加速度计^[11], 其原理设计与外形结构如图 15 所示。该加速度计外形像一个金属盒子, 长度等同于一台笔记本电脑, 沿三个互为正交的方向 (k_x 、 k_y 和 k_z) 对加速度进行测量, k_x 、 k_y 和 k_z 垂直于各自的拉曼光反射镜。为了提高稳定性和测量带宽, 以复杂环境的应用要求, 反馈回路中融合

了冷原子加速度计和机械加速度计的测量数据。通过将三个正交原子加速度计与导航级机械加速度计三位一体相结合来测量完整的加速度矢量, 其稳定度较机械加速度计提高了 50 倍, 达到 60ng_n 。同时, 该加速度计以 1kHz 高速数据采样率跟踪加速度矢量, 绝对幅度精度优于 $10\mu\text{g}_n$, 指向精度为 $4\mu\text{rad}$ 。

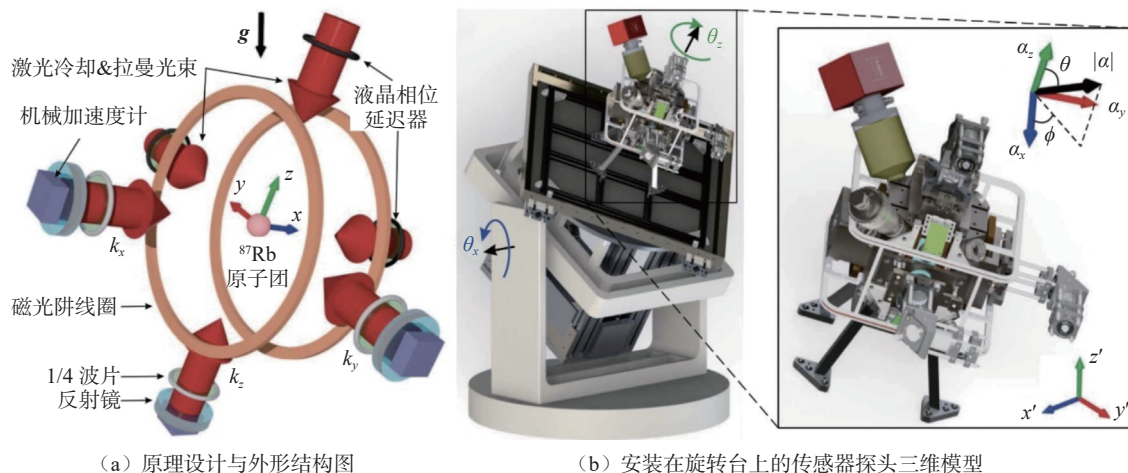


图 15 iXblue 公司研制的三轴冷原子干涉加速度计

Fig. 15 Three-axis cold atom interferometer accelerometer developed by iXblue

2008 年, 德国汉诺威大学 Rasel 小组用铷原子干涉仪搭建了一套集成化的原子陀螺和加速度计^[40],

灵敏度分别为 $0.19\text{ mrad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 和 $0.2\text{mg}_n\text{ Hz}^{-1/2}$ 。2015 年, 德国洪堡大学的原子重力仪 GAIN 灵敏度

达到 $9.6\text{ng}_n \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 长期稳定性为 0.05ng_n , 精度达到 3.9ng_n ^[41]。同年, 德国汉诺威大学通过组合光脉冲的方法实现了更大干涉环路面积的原子干涉仪, 由该干涉仪实现的陀螺仪角速度测量灵敏度达到 $0.12 \text{ mrad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 用该陀螺仪测得的地球转速相对不确定度仅为 1.2% ^[42]。

2016 年, 德国汉诺威大学报道了基于原子芯片的喷泉重力仪, 预期精度优于 1ng_n ^[43]。该重力仪利用原子芯片实现了玻色-爱因斯坦凝聚体(BECs)的产生、准直与自由下落, 采用布洛赫振荡和双布拉格衍射的物理机制, 对自由下落的 BECs 原子进行相干操作, 实现重力加速度测量。图 16(a)为原子芯片喷泉重力仪示意图, (b)为 BECs 原子下落的时空轨迹, (c)为经再上抛的 BECs 原子再次下落的时空轨迹。该原子芯片在重力仪工作的所有环节中均起着重要作用, 如作为 z 方向的光反射镜、光晶格的制备与移动、诱发布洛赫振荡和双布拉格衍射, 用于 BECs 原子干涉测量等。其中, 通过

CCD 相机检测 x 方向脉冲光的吸收信号获得相干态的原子数。图 16(b)和(c)的时空轨迹均是从释放 BECs 原子开始, 主要经历的过程包括: (1)经过 $\tau_{\text{arp}}=10.2 \text{ ms}$ 的快速绝热过程, 进入浅磁阱, 在 $T_{\text{dkc}}=280 \mu\text{s}$ 的时间内完成 BECs 原子的准直; (2)进行作用时间为 $2T$ (时长可调)的 M-Z 干涉, 使 BECs 原子波包实现相干分束、发射与合束; (3)在 BECs 原子波包分离 $\tau_{\text{sep}}=13 \text{ ms}$ 后, 对相干态原子数进行检测。从图 16(a)的方案可知, 在 BECs 原子下落过程中, 准备工作占用了相当大一部分时间, 使得干涉时间减少。相反, 对于图 16(c)的方案, 在采用布洛赫振荡和双布拉格衍射实现 M-Z 干涉之前, 通过将 BECs 原子再上抛(上抛作用时间 $T_L < 1 \text{ ms}$), 释放后的 BECs 原子将经过 $\tau_{\text{exp}}=6 \text{ ms}$ 进入浅磁阱进行准直, 以减少原子间相互作用的影响。之后, 采用 Stern-Gerlach 型偏转, 在 $\tau_{\text{SG}}=7 \text{ ms}$ 的时间内, 将磁敏感态的残余原子分离, 可使重力仪灵敏度提高 2 个数量级。

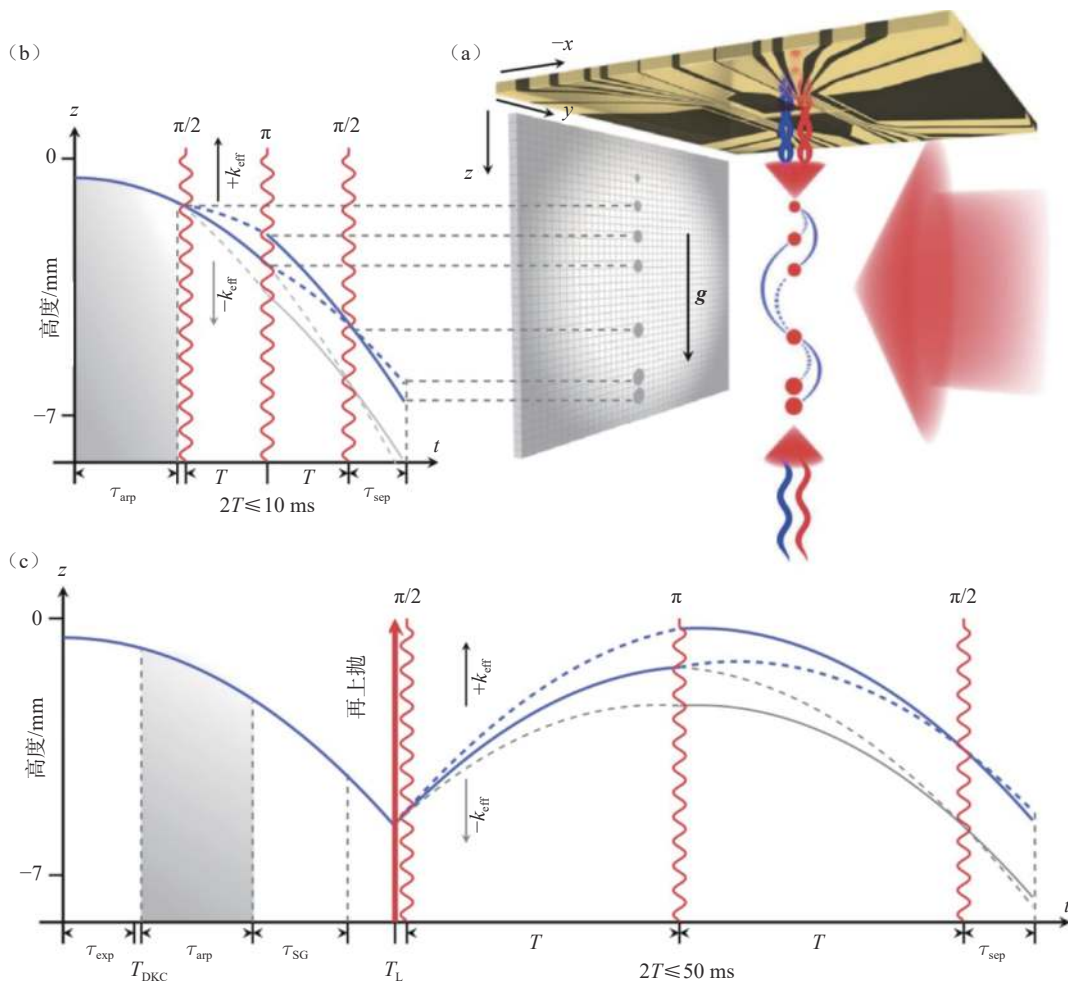


图 16 原子芯片喷泉重力仪示意图及 BECs 原子下落的时空轨迹和经再上抛的 BECs 原子下落的时空轨迹

Fig. 16 Schematic diagram of atom-chip fountain gravimeter, and space-time trajectories of a BECs without and with relaunch

可以看出,这种芯片级的 BECs 原子干涉重力仪可在 1 cm^3 的体积内完成数十毫秒的自由下落,这为小型化、高可靠的原子重力仪实现优于 ng_n 精度的重力加速度测量奠定了坚实的基础。

2008年,意大利佛罗伦萨大学研制了一种用于测量万有引力常数 G 的冷原子重力梯度仪,其重力加速度测量灵敏度约为 $34\text{ng}_n\text{ Hz}^{-1/2}$ [44]。2012年,该梯度仪的测量灵敏度达到了 $9\text{ng}_n\text{ Hz}^{-1/2}$ [45]。2016年,他们在基于布拉格衍射方案的原子干涉仪中采用大动量转移技术,进一步提高了原子干涉的环路面积[46]。他们还提出了一种可在布拉格衍射型原子干涉仪中制备冷原子自旋压缩态的方法,以进一步降低系统噪声[47]。

除了上述研究机构外,英国伯明翰大学[10, 48]、澳大利亚国立大学[49]等也都在进行相关的原子干涉惯性技术研究。英国 M Squared 激光系统公司依托自身先进的激光技术,研制了原子加速度计产品[50],并于2018年底推向市场。该加速度计的质量为 40 kg 、采样率为 3 Hz 、测量精度为 10ng_n ,主要面向大型机动平台导航和基础科学研究等方面的应用,但是具体技术细节尚未公开报道,其实物如图 17 所示。

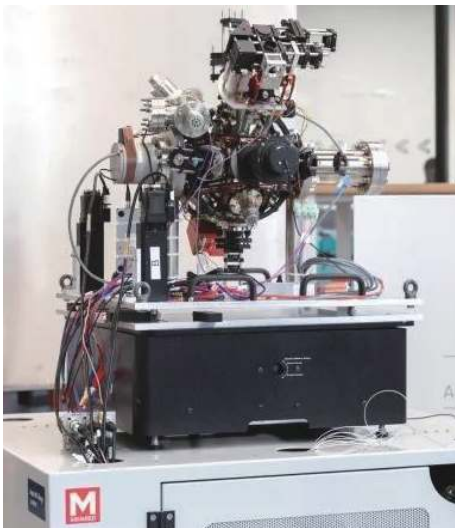


图 17 M Squared 激光系统公司开发的原子加速度计

Fig. 17 Atomic accelerometer developed by M Squared Laser Systems

同样由于原子干涉仪展现出的技术潜力和应用前景,欧空局先后于2003和2004年制定了“空间高精度原子干涉测量技术(HYPER)”[51]和“空间原子干涉仪(SAI)”[52]研究计划,并于2010年启动了“集成量子传感器(iSense)”项目。HYPER计划是第一个基于原子干涉的高精度惯性测量技术的

空间实验项目。该项目利用左右对抛的两个双环路 M-Z 型原子干涉仪测量两个正交方向的加速度和旋转角速度,采用激光控制原子的初速度,研制出灵敏度分别为 $10^{-9}\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}\text{ Hz}^{-1/2}$ 和 $2\times 10^{-12}\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}/\text{Hz}^{-1/2}$ 的原子陀螺仪以及灵敏度为 $0.1\text{ng}_n\text{ Hz}^{-1/2}$ 和 $2\times 10^{-5}\text{ng}_n\text{ Hz}^{-1/2}$ 的原子加速度计,其中低精度原子干涉仪用于姿态和轨道控制系统,高精度原子干涉仪用于精细结构常数测量并以此验证广义相对论[51]。SAI计划旨在研制一种便携式原子干涉加速度计[52],并将其用于空间任务中。该加速度计在地面测试中自由演化时间约为 100 ms ,灵敏度为 $10\text{ng}_n\text{ Hz}^{-1/2}$;在空间微重力环境下自由演化时间约为 2 s ,预计灵敏度可达 $5\times 10^{-3}\text{ng}_n\text{ Hz}^{-1/2}$ 。iSense项目采用微型光学元件和光纤组件替代普通的光电子元件,将原子干涉仪的体积、质量和功耗分别减小至 0.1 m^3 、 20 kg 和 50 W ,获得了背包大小的原子惯性传感器,实现灵敏度为 $1\mu\text{g}_n\text{ Hz}^{-1/2}$ 的重力加速度测量。该项目有望将原子干涉仪从实验研究推向实际应用[53]。

综上所述,在这些重大研究计划的支持下,国外的原子惯性传感技术得到了快速发展,取得了重大技术突破,其中美国斯坦福大学和伯克利大学、法国巴黎天文台和 ONERA、德国洪堡大学和汉诺威大学、英国伯明翰大学等研究机构走在了原子惯性传感技术研究的前列,并逐步向工程应用阶段迈进。

2.2 国内现状分析

我国对原子干涉技术的研究始于2004年,以冷原子重力仪研究为主,主要研究单位有中国科学院精密测量院、华中科技大学、浙江大学、浙江工业大学、中国科学技术大学、中国计量院、国防科技大学、清华大学、北京航天控制仪器研究所和兰州空间技术物理研究所等。

中国科学院精密测量院于2011年采用 ^{85}Rb 原子研制了基于 $\pi/2-\pi-\pi/2$ 拉曼脉冲序列的原子喷泉重力仪。由于 ^{85}Rb 原子的超精细能级分裂为 3.03 GHz ,该重力仪巧妙地利用 1.5 GHz 的声光调制器(AOM)的 ± 1 级衍射来实现拉曼光。实验室环境下的灵敏度达到 $0.2\mu\text{g}_n\text{ Hz}^{-1/2}$,精度达到 $0.15\mu\text{g}_n$ [54]。2017年,他们研制的可测量竖直重力梯度分量的原子重力梯度仪在 15 000 s 积分时间下的重力测量稳定度优于 20ng_n [55]。同年,他们的原子重力仪 WAG-H5-1 参加了国际重力比对,在安静环境下测得的灵敏度

达到 $28\text{ng}_n \text{Hz}^{-1/2}$, 4 000 s 积分时间内稳定度达到 1ng_n , 精度优于 10ng_n ^[56]。

依托多年来在冷原子干涉方面的工程技术基础, 中国科学院精密测量院研制了空间冷原子干涉仪^[57], 如图 18 所示, 干涉仪于 2022 年 11 月 12 日由天舟五号货运飞船搭载发射升空, 将在我国空间站开展为期 1 年的空间基础物理科学实验。这是国际上首台利用激光冷却的双组份铷同位素原子实现的空间原子干涉仪, 用于爱因斯坦弱等效原理检验。



图 18 中国科学院精密测量院研制的空间冷原子干涉仪

Fig. 18 Space cold atom interferometer developed by the Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS

2012 年, 华中科技大学研制出灵敏度为 $54\text{ng}_n \text{Hz}^{-1/2}$ 、2 000 s 积分时间下稳定度约为 1.5ng_n 的喷泉式原子重力仪^[57]。2013 年, 他们研制了基站式原子干涉重力仪, 在解决了低相噪拉曼光、低频振动噪声抑制等关键技术后, 通过提高原子数和探测信噪比, 使重力测量灵敏度达到 $4.2\text{ng}_n \text{Hz}^{-1/2}$, 100 s 积分时间下稳定度优于 0.5ng_n ^[9], 这至今仍是拉曼型原子干涉重力测量的最高灵敏度值。2017 年, 华中科技大学研制的可移动原子重力仪参加了“第十届全球绝对重力仪国际比对”, 重力测量不确定度为 3ng_n ^[58]。2019 年研制的集成化原子重力仪灵敏度为 $53\text{ng}_n \text{Hz}^{-1/2}$, 3 000 s 积分时间下稳定度优于 10ng_n ^[59]。2021 年研制了用于车载重力测量的 μg_n 级原子重力仪, 测量灵敏度达到 $1.9\mu\text{g}_n \text{Hz}^{-1/2}$, 长期测量分辨率为 10ng_n ^[60]。2021 年, 华中科技大学结合耶鲁大学 Kasevich 小组和佛罗伦萨大学 Tino 小组的原子干涉重力梯度仪构型的优点, 设计了双磁光阱、单一干涉区的双喷泉原子干涉重力梯度仪。该种构型兼具快速装载原子和优化源质量位置的优点。经过测试, 该重力梯度仪在 0.3 m 的基线上, 实现了 $100\text{E Hz}^{-1/2}$ ($1\text{E}=10^{-9}/\text{s}^2$) 测量灵敏度, 这是目前

国内原子干涉重力梯度测量的最高灵敏度^[61]。

浙江大学采用二维磁光阱制备冷原子团, 并将其水平推送至三维磁光阱, 通过原子团的自由下落实现重力测量。2014 年其重力测量的灵敏度达到 $100\text{ng}_n \text{Hz}^{-1/2}$, 1 000 s 积分时间重力测量分辨率为 5.6ng_n ^[62]。2017 年, 浙江大学联合浙江工业大学参加“第十届全球绝对重力仪国际比对”, 并取得了有效比对数据: 灵敏度为 $90\text{ng}_n \text{Hz}^{-1/2}$, 1 000 s 积分时间下稳定度为 4ng_n , 与传统绝对重力仪 FG-5X 的偏差为 14.1ng_n , 不确定度为 20ng_n ^[63]。2019 年, 浙江工业大学(原浙江大学小组)将其原子重力仪置于地震台站进行长期绝对重力监测, 在无隔振系统的情况下重力测量灵敏度达到 $300\text{ng}_n \text{Hz}^{-1/2}$ ^[64]。2019 年, 浙江工业大学用原子重力仪实现了车载流动静态重力测试, 精度优于 30ng_n ^[65]。2020-2021 年, 他们先后在车载和船载动态环境下对原子重力仪进行了测量, 利用位姿平台保证重力仪倾斜角度的稳定性, 重力测量灵敏度分别为 $270\text{ng}_n \text{Hz}^{-1/2}$ 和 $16.6\mu\text{g}_n \text{Hz}^{-1/2}$ 。2020 年研制的重力梯度仪的测量基线为 0.53 m, 脉冲时间间隔 $T=55 \text{ms}$, 单次测量时间为 500 ms, 目前实测重力梯度灵敏度为 $1320\text{E Hz}^{-1/2}$ ^[66]。

中国计量院从 2013 年开始研制基准型原子绝对重力仪, 并于 2017 年在“第十届全球绝对重力仪国际比对”中首次公布了性能参数。该重力仪的灵敏度为 $44\text{ng}_n \text{Hz}^{-1/2}$, 30 000 s 积分时间下的稳定度为 0.2ng_n , 与传统绝对重力仪 FG-5X 的偏差为 0.2ng_n , 不确定度为 6.3ng_n ^[67]。

国防科技大学从 2010 年开始冷原子干涉方面的研究工作, 并于 2016 年研制了小型化冷原子干涉重力仪, 在 $T=90 \text{ms}$ 的条件下, 实现的重力加速度测量灵敏度为 $121\text{ng}_n \text{Hz}^{-1/2}$, 3 000 s 积分时间下稳定度达到 5.1ng_n ^[68]。

中国科学技术大学从 2015 年开始原子干涉重力仪的研制工作, 2017 年研制出第一代集成化原子重力仪, 灵敏度为 $28\text{ng}_n \text{Hz}^{-1/2}$, 1 000 s 积分时间下的稳定度达到 0.8ng_n 。2019 年, 在保证性能的前提下, 通过进一步小型化设计, 使重力仪的体积缩减了 50%, 在实验室环境下测得的灵敏度为 $35.5\text{ng}_n \text{Hz}^{-1/2}$, 2 000 s 积分时间下的稳定度达到 0.8ng_n , 不确定度为 15ng_n ^[69]。2020 年, 他们利用该重力仪开展了在室内嘈杂环境下的连续重力测量^[70]。

表 1 为国内主要研究单位研制的冷原子重力仪的性能。图 19 为 2017 年华中科技大学、中国计

量院、中国科学院精密测量研究院和浙江工业大学四家单位参加“第十届全球绝对重力仪国际比对”(ICAG 2017)取得的有效比对数据,其中,华中科技大学研制的 HUST-QG/2017 原子重力仪的国际比对结果为 $1.3\text{ng}_n \pm 3.1\text{ng}_n$, 中国计量科学研究院

的 NIM-AGRB/2017 的国际比对结果为 $-2.4\text{ng}_n \pm 4.6\text{ng}_n$, 中国科学院精密研究院的 WAG-H5-1/2017 的国际比对结果为 $-3.8\text{ng}_n \pm 10.2\text{ng}_n$, 浙江工业大学的 ZAG-Atom/2017 的国际比对结果为 $-11.4\text{ng}_n \pm 14.1\text{ng}_n$ ^[71]。

表 1 国内主要研究单位研制的冷原子重力仪的性能

Tab. 1 list of the performance parameters of cold atom gravimeters developed by major research institutions in China

序号	研究机构及重力仪名称/时间	脉冲间隔 时间/ms	重力仪探头 尺寸/cm	灵敏度和分辨率	不确定度/ ng_n
1	华中科技大学 HUST-QG/2017	300	50×50×160	$4.2\text{ng}_n \text{ Hz}^{-1/2}$, $0.5\text{ng}_n @ 100 \text{ s}$	3.0
2	中国计量科学研究院 NIM-AGRB/2017	70	90×80×140	$44\text{ng}_n \text{ Hz}^{-1/2}$, $0.2\text{ng}_n @ 30\,000 \text{ s}$	5.2
3	中国科学院精密测量院 WAG-H5-1/2017	200	90×60×195	$28\text{ng}_n \text{ Hz}^{-1/2}$, $1\text{ng}_n @ 4\,000 \text{ s}$	10
4	浙江工业大学 ZAG-Atom/2017	70	D52×H55	$90\text{ng}_n \text{ Hz}^{-1/2}$, $4\text{ng}_n @ 1\,000 \text{ s}$	20
5	中国科学技术大学/2019	92	30×30×65	$35.5\text{ng}_n \text{ Hz}^{-1/2}$, $0.8\text{ng}_n @ 2\,000 \text{ s}$	15
6	国防科技大学/2017	90	—	$121\text{ng}_n \text{ Hz}^{-1/2}$, $5.1\text{ng}_n @ 3\,000 \text{ s}$	—

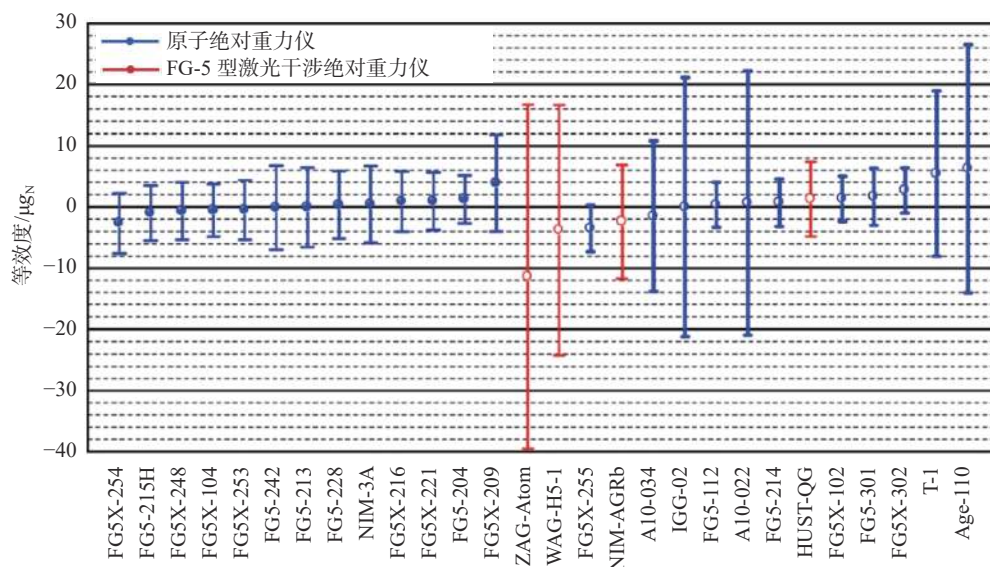


图 19 “第十届全球绝对重力仪国际比对”国内外重力仪比对结果

Fig. 19 The results of 10th International Comparison of Absolute Gravimeters

综上所述,与欧美国家相比,我国对冷原子干涉加速度测量技术的研究虽然起步略晚,但在冷原子重力仪研制方面已取得了一系列进展和成果,无论从性能还是集成度上都有很大的突破,特别是原子重力仪的性能指标已达到国际先进水平,这些都为我国原子惯性传感器切实迈向实际应用打下了坚实基础。以原子重力仪、原子加速度计等为核心的实用化原子惯性传感器的研制成功势必推动我国高精度无源自主导航技术的蓬勃发展。

3 冷原子干涉加速度测量技术发展动态分析

经过 30 多年的发展,目前冷原子干涉加速度

计已具备了不亚于甚至超越经典加速度计的性能^[9,41],但仍然存在传感器尺寸太大、系统复杂程度高及功耗较大等问题,阻碍了其从实验室向工程应用的转化。此外,从性能提升方面考虑,原子干涉加速度传感器在灵敏度、精度和测量频率上仍然有很大的改进空间。从国内外研究现状可以看出,众多研究小组都在不断地探索传感器性能的提升方法、新机制以及原子干涉技术在不同领域的应用研究,目前冷原子干涉加速度测量技术主要呈现以下发展态势。

3.1 系统集成化与小型化

为了使原子干涉加速度测量技术满足复杂环

境下对可移动和抗干扰能力的要求,冷原子惯性传感器系统的集成化和小型化尤为重要。这不仅包括对实现干涉过程的真空物理单元的重新构建,而且包括对相应的激光和电子学单元的优化设计。具体如下:

(1) 金字塔型原子干涉仪结构

金字塔型结构由法国巴黎天文台 Landragin 等^[30]在 2010 年提出,他们采用一个类似金字塔形状的四棱锥形拼接镜面,反射从棱锥底面射入的激光,在四棱锥中心形成三对互相垂直的激光交汇区域,用于原子冷却与干涉所需激光的空间布局。与传统采用多个分散安装的激光扩束器独立导引各路激光的方法相比,这种金字塔结构只需一束激光进入扩束器,并通过光学开关控制实现分时复用,即可达到相同的功能,有效简化了干涉仪的结构和体积。然而,金字塔结构的四棱锥形拼接镜面对加工工艺要求高,而且金字塔尖的反射特征难以确定,使得垂直方向对射激光的功率和偏振的一致性很难保证,导致原子的冷却温度、数目和体密度分布受到较大影响,因此,金字塔型结构的原子干涉仪未来的研究重点是提高加工精度,以进一步提升加速度测量的灵敏度和精度。

(2) 基于原子芯片的冷却与干涉

原子芯片是一种利用微电子技术将导线刻蚀在半导体芯片上实现原子冷却和量子态操控所需的微磁阱结构,可以将传统繁复的物理系统简化并缩减至芯片尺寸,这是实现原子干涉系统小型化的发展方向之一。具体分析有:1)采用原子芯片可产生四极磁阱,替代传统反亥姆霍兹线圈的功能作用,形成芯片上的磁势阱;在此基础上,结合镜面磁光阱技术,可将激光数量简化到四束。此外,经由光学黏团进一步冷却的原子,通过绝热转移到微磁阱中进行蒸发冷却,最终实现芯片上的 BEC 制备。2)利用原子芯片上的势阱构型,可以对原子团进行导引以及相干态的分束与合束,在原子芯片上构成闭合的干涉环路,实现基于原子干涉的精密测量。欧空局的 iSense 项目是结合原子芯片的镜面磁光阱和双光子拉曼跃迁的干涉机制进行重力测量的典型应用。研究者在芯片上实现了原子的冷却与囚禁,获得的原子数为 7×10^6 个,冷却温度为 $4.4 \mu\text{K}$,最终完成了重力加速度测量实验^[53]。

(3) 光学与电子学系统的集成

原子的冷却与干涉须通过光学与电子学系统

共同配合以实现对各种不同功能的激光功率大小、失谐量以及开关时序的控制。当采用自由空间分立的商用光学元件时,通常将其铺设在光学平台上,同时配置多台电子学驱动设备,这种系统体积繁复庞杂。目前,国内外的可移动原子重力仪光学系统中的光学元件和安装基座均是通过小型化设计与一体化成型定制加工,再集成到独立的模块中,然后与电子学模块共同组成集成式的光电子学机箱形成的。然而,这种光电子学机箱仍然采用了大量的自由空间光路布局方式,使得系统的结构与尺寸很难小型化。欧空局的 iSense 项目在干涉仪系统集成的基础上应用微集成激光器作为光源,然后利用全光纤(声光调制器、电光调制器、分束器等)和集成波导器件组成整个光路系统,使系统尺寸摆脱了光路结构的限制,最终整个系统被集成到 $100 \text{ cm} \times 90 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$ 的机箱内,并完成了原子干涉实验^[71]。

3.2 提高重复频率与测量带宽

原子干涉仪的工作过程包括原子源制备、原子干涉和荧光探测三个阶段,为了保证原子源的品质与测量分辨率,原子源制备与冷原子物质波干涉自由演化时间较长,使得测量周期通常在 1 Hz 或亚赫兹水平,干涉仪的重复频率和测量带宽受到很大的限制,因此,原子干涉仪更多情况下应用于慢变或恒定惯性量(如地球自转和重力加速度)的测量。目前,提升冷原子干涉加速度计重复频率与测量带宽的主要方法有缩短演化时间与原子重捕获^[21]。

缩短原子制备与干涉时间是最直接的提升重复频率的手段。但这种方法受冷原子制备方法的限制,从背景原子气体捕获足够数量和较低温度的原子团所需时间不能被无限缩短;此外,压缩干涉时间则是以损失测量分辨率为代价换取更短的测量周期。这种重捕获方法既有利于提升测量带宽,又有利于干涉仪尺寸的减小,能够保证测量的准确性,但这会使灵敏度的损失较大,因此实际应用中必须在灵敏度和测量带宽之间进行权衡。

3.3 与经典加速度计复合

冷原子干涉加速度计具有优异的内禀长期稳定性,然而其工作过程中涉及的“死时间”问题(与冷原子制备和检测有关)会导致惯性信息损失,从而大幅降低了原子干涉惯性测量单元(IMU)的实际可用性。此外,当保持较长的演化时间以获得高灵敏度时,振动会导致干涉仪的相位波动远远大于 2π 。在干涉仪测量过程中,利用经典加速度计

可解除相位测定中的模糊性问题并有助于改善信噪比,这已在重力仪和水平加速度计上得到证明。这表明,这种与经典加速度计复合的测量技术可以有效解决原子干涉仪在“死时间”内的加速度测量问题。

类似于原子钟可将本地振荡器(如石英或激光)驯服在较高的稳定度一样,冷原子加速度计可用来自伺服具有较大带宽且偏置稳定性较差的经典加速度计。然而,值得注意的是惯性传感涉及三轴加速度测量的问题,其三轴准直和信号串扰使惯性测量变得更为复杂,而原子钟并不存在这些问题。与机械加速度计复合是有效解决冷原子干涉加速度计高带宽连续测量难题的重要手段,也是当前针对大型机动载体高精度长航时自主导航需求所开展的战略级加速度计技术研究的热点。

3.4 多轴加速度测量

三轴加速度测量是惯性导航操作的基础。目前,很少有原子干涉仪可以实现多轴测量。在惯性导航中,惯性测量单元由一个三轴加速度计和一个三轴陀螺仪组成,其中惯性的所有分量(甚至对于加速度的三个分量)依赖于三个方向上的连续测量。实现三轴加速度测量是当前冷原子干涉加速度传感器的发展重点。法国 iXBlue 公司和 LP2N 实验室联合提出了一种新的多维原子光学理论方法及多维原子干涉仪几何构型^[39],通过解析一次干涉包含的加速度信息实现对加速度三个分量的提取,采用该理论方法及几何构型实现的三轴冷原子干涉加速度计可大幅简化系统架构,尽管该研究目前还处于理论阶段,但对于解决冷原子干涉三轴加速度测量具有重要的应用价值和发展潜力。

4 结束语

基于冷原子干涉技术的加速度传感器已表现出优异的性能和广阔的应用前景。本文通过对冷原子干涉加速度测量技术的国内外研究现状调研,结合惯性传感器在复杂环境下对可移动与抗干扰能力的应用需求,分析认为,当前冷原子干涉加速度测量技术的发展动态和重点发展方向主要有系统集成化与小型化、重复频率与测量带宽的提高、与经典加速度计复合以及多轴加速度测量等。冷原子干涉加速度传感器系统的集成化与小型化主要是为了满足复杂环境下对便携式与可移动的使用要求;采用原子重捕获方法的高采样率干涉仪可在一定程度上减少“死时间”问题,提升测量带宽;

采用冷原子干涉加速度传感器与机械加速度计复合的测量方案可以降低与“死时间”相关的惯性噪声混叠,是当前高精度惯性导航原子加速度计的研究热点;多维原子光学理论方法及多维原子干涉仪模型为单 MOT 构型下实现三维同步且独立的高精度加速度测量提供了重要的理论基础,有望在一个紧凑的体积中实现高精度低漂移三轴冷原子干涉加速度计的研制,该理论模型将对未来冷原子干涉加速度计的发展产生重要影响,并为惯性导航系统的发展提供了新的解决思路。可以预见,随着冷原子干涉加速度传感器技术的不断成熟和发展,有望实现传感器技术指标的进一步提升和实际工程应用,为未来高精度惯性测量的国防战略需求提供有力支撑。

参考文献:

- [1] PETERS A, CHUNG K Y, CHU S. High-precision gravity measurements using atom interferometry[J]. *Metrologia*, 2001, 38(1): 25–61.
- [2] HEAVNER T P, DONLEY E A, LEVI F, et al. First accuracy evaluation of NIST-F2[J]. *Metrologia*, 2014, 51(3): 174.
- [3] BOTHWELL T, KENNEDY C J, AEPPLI A, et al. Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample[J]. *Nature*, 2022, 602(7897): 420–424.
- [4] SCHERSCHLIGT J, FEDCHAK J A, BARKER D S, et al. Development of a new UHV/XHV pressure standard (cold atom vacuum standard)[J]. *Metrologia*, 2017, 54(6): S125–S132.
- [5] OLSSON P A, MILNE G, SCHERNECK H G, et al. The relation between gravity rate of change and vertical displacement in previously glaciated areas[J]. *Journal of Geodynamics*, 2015, 83: 76–84.
- [6] BATTAGLIA M, ROBERTS C, SEGALL P. Magma intrusion beneath long valley caldera confirmed by temporal changes in gravity[J]. *Science*, 1999, 285(5436): 2119–2122.
- [7] BECKER M W. Potential for satellite remote sensing of ground water[J]. *Ground Water*, 2006, 44(2): 306–318.
- [8] STOCKTON J K, TAKASE K, KASEVICH M A. Absolute geodetic rotation measurement using atom interferometry[J]. *Physical Review Letter*, 2011, 107(13): 133001.
- [9] 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.

- [10] STRAY B, LAMB A, KAUSHIK A, et al. Quantum sensing for gravity cartography[J]. *Nature*, 2022, 602(7898): 590–594.
- [11] TEMPLIER S, CHEINEY P, D'ARMAGNAC Q, et al. Tracking the vector acceleration with a hybrid quantum accelerometer triad[J]. *Science Advance*, 2022, 8(45): eadd3854.
- [12] KIBBLE B, HUNT G J M. A measurement of the gyromagnetic ratio of the proton in a strong magnetic field[J]. *Metrologia*, 1979, 15(1): 5–30.
- [13] DUAN X C, DENG X B, ZHOU M K, et al. Test of the Universality of Free Fall with Atoms in Different Spin Orientations[J]. *Physical Review Letter*, 2016, 117(2): 023001.
- [14] ZHOU L, HE C, YAN S T, et al. United test of the equivalence principle at 10^{-10} level using mass and internal energy specified atoms[M]. *Physics arXiv: Quantum Physics*, 2019.
- [15] FIXLER J B, FOSTER G T, MCGUIRK J M, et al. Atom interferometer measurement of the newtonian constant of gravity[J]. *Science*, 2007, 315(26): 74–77.
- [16] DIMOPOULOS S, GRAHAM P W, HOGAN J M, et al. Testing general relativity with atom interferometry[J]. *Physical Review Letter*, 2007, 98(11): 111102.
- [17] KASEVICH M, CHU S. Atomic interferometry using stimulated raman transitions[J]. *Physical Review Letters*, 1991, 67(2): 181–184.
- [18] 胡青青. 冷原子干涉重力仪测量性能评估与提升方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- [19] KASEVICH M, CHU S. Measurement of the gravitational acceleration of an atom with a light-pulse atom interferometer[J]. *Applied Physics B*, 1992, 54(5): 321–332.
- [20] YOUNG B, BONOMI D S, PATTERSON T, et al. Atom optic inertial and gravitational sensors[C]//*Laser Science*, 2007.
- [21] MCGUINNESS H J, RAKHOLIA A V, BIEDERMANN G W. High data-rate atom interferometer for measuring acceleration[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(1): 011106.
- [22] RAKHOLIA A V, MCGUINNESS H J, BIEDERMANN G W. Dual-Axis High-Data-Rate Atom Interferometer via Cold Ensemble Exchange[J]. *Physical Review Applied*, 2014, 2(5): 054012.
- [23] DICKERSON S M, HOGAN J M, SUGARBAKER A, et al. Multiaxis inertial sensing with long-time point source atom interferometry[J]. *Physical Review Letter*, 2013, 111(8): 083001.
- [24] CHEN Y J, HANSEN A, SHUKER M, et al. Robust inertial sensing with point-source atom interferometry for interferograms spanning a partial period[J]. *Optics Express*, 2020, 28(23): 34516–34529.
- [25] WU X, ZI F, DUDLEY J, et al. Multiaxis atom interferometry with a single-diode laser and a pyramidal magneto-optical trap[J]. *Optica*, 2017, 4(12): 1545–1551.
- [26] WU X, PAGEL Z, MALEK B S, et al. Gravity surveys using a mobile atom interferometer[J]. *Science Advance*, 2019, 5(9): aax0800.
- [27] CANUEL B, LEDUC F, HOLLEVILLE D, et al. Six-axis inertial sensor using cold-atom interferometry[J]. *Physical Review Letter*, 2006, 97(1): 010402.
- [28] LÉVÈQUE T, GAUGUET A, MICHAUD F, et al. Enhancing the area of a Raman atom interferometer using a versatile double-diffraction technique[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(8): 080405.
- [29] MALOSSI N, BODART Q, MERLET S, et al. Double diffraction in an atomic gravimeter[J]. *Physical Review A*, 2010, 81(1): 013617.
- [30] 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): 134101.
- [31] GEIGER R, MENORET V, STERN G, et al. Detecting inertial effects with airborne matter-wave interferometry[J]. *Nature Commun*, 2011, 2: 474.
- [32] BIDEL Y, CARRAZ O, CHARRIÈRE R, et al. Compact cold atom gravimeter for field applications[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(14): 144107.
- [33] BIDEL Y, ZAHZAM N, BLANCHARD C, et al. Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry[J]. *Nature Commun*, 2018, 9(1): 627.
- [34] BIDEL Y, ZAHZAM N, BRESSON A, et al. Absolute airborne gravimetry with a cold atom sensor[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(2): 1–9.
- [35] MENORET V, VERMEULEN P, LE MOIGNE N, et al. Gravity measurements below $10^{-9}g$ with a transportable absolute quantum gravimeter[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 12300.
- [36] LAUTIER J, VOLODIMER L, HARDIN T, et al. Hybridizing matter-wave and classical accelerometers[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(14): 144102.
- [37] STUHLER J, SHIELDS A J, BATTELIER B, et al. Devel-

- opment of compact cold-atom sensors for inertial navigation[C]//Conference on Quantum Optics, 2016.
- [38] CHEINEY P, FOUCHÉ L, TEMPLIER S, et al. Navigation-compatible hybrid quantum accelerometer using a kalman filter[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(3): 034030.
- [39] BARRETT B, CHEINEY P, BATTELIER B, et al. Multidimensional atom optics and interferometry[J]. *Physical review letters*, 2019, 122(4): 043604.
- [40] MÜLLER T, GILOWSKI M, ZAISER M, et al. A compact dual atom interferometer gyroscope based on laser-cooled rubidium[J]. *The European Physical Journal D*, 2009, 53(3): 273–281.
- [41] FREIER C, HAUTH M, SCHKOLNIK V, et al. Mobile quantum gravity sensor with unprecedented stability[C]//8th Symposium Frequency Standards and Metrology, 2015.
- [42] BERG P, ABEND S, TACKMANN G, et al. Composite-light-pulse technique for high-precision atom interferometry[J]. *Physical Review Letter*, 2015, 114(6): 063002.
- [43] ABEND S, GEBBE M, GERSEMANN M, et al. Atom-chip fountain gravimeter[J]. *Physical Review Letter*, 2016, 117(20): 203003.
- [44] SORRENTINO F, ANGELIS M D, BERTOLDI A, et al. Precision measurements of gravity using cold atom sensors[J]. *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*, 2009, 4: 09025.
- [45] SORRENTINO F, BERTOLDI A, BODART Q, et al. Simultaneous measurement of gravity acceleration and gravity gradient with an atom interferometer[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(11): 114106.
- [46] D'AMICO G, BORSELLI F, CACCIAPUOTI L, et al. Bragg interferometer for gravity gradient measurements[J]. *Physical Review A*, 2016, 93(6): 063628.
- [47] ROSI G, D'AMICO G, CACCIAPUOTI L, et al. Quantum test of the equivalence principle for atoms in coherent superposition of internal energy states[J]. *Nature Commun*, 2017, 8: 15529.
- [48] HINTON A, PEREA ORTIZ M, WINCH J, et al. A portable magneto-optical trap with prospects for atom interferometry in civil engineering[J]. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 2017, 375(2099): 20160238.
- [49] HARDMAN K S, KUHN C, MCDONALD G D, et al. The role of source coherence in atom interferometry[J]. *Physical Review A*, 2014, 89(2): 023626.
- [50] 英国 M squared 公司网站: www. m2lasers. com.
- [51] JENTSCH C, MÜLLER T, RASEL E, et al. HYPER: A satellite mission in fundamental physics based on high precision atom interferometry[J]. *General Relativity & Gravitation*, 2004, 36(10): 2197–2221.
- [52] SORRENTINO F, BONGS K, BOUYER P, et al. Theometer project: status and prospects[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, 327(1): 012050.
- [53] DE ANGELIS M, ANGININ M C, BEAUFILS Q, et al. iSense: a portable ultracold-atom-based gravimeter[J]. *Procedia Computer Science*, 2011, 7: 334–336.
- [54] LIN Z, YUAN X Z, WEI Y, et al. Measurement of local gravity via a cold atom interferometer[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(1): 78–81.
- [55] WANG Y, ZHONG J, SONG H, et al. Location-dependent Raman transition in gravity-gradient measurements using dual atom interferometers[J]. *Physical Review A*, 2017, 95(5): 053612.
- [56] HUANG P W, TANG B, CHEN X, et al. Accuracy and stability evaluation of the ⁸⁵Rb atom gravimeter WAG-H5-1 at the 2017 International Comparison of Absolute Gravimeters[J]. *Metrologia*, 2019, 56(4): 045012.
- [57] 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): 043630.
- [58] XU Y Y, CUI J F, QI K, et al. Evaluation of the transportable atom gravimeter HUST-QG[J]. *Metrologia*, 2022, 59(5): 055001.
- [59] LUO Q, ZHANG H, ZHANG K, et al. A compact laser system for a portable atom interferometry gravimeter[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(4): 043104.
- [60] ZHANG J Y, XU W J, SUN S D, et al. A car-based portable atom gravimeter and its application in field gravity survey[J]. *AIP Advances*, 2021, 11(11): 115223.
- [61] MAO D K, DENG X B, LUO H Q, et al. A dual-magneto-optical-trap atom gravity gradiometer for determining the Newtonian gravitational constant[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(5): 053202.
- [62] WU B, WANG Z Y, CHENG B, et al. The investigation of a μ Gal-level cold atom gravimeter for field applications[J]. *Metrologia*, 2014, 51(5): 452.
- [63] 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(1): 011204.

- [64] FU Z J, WU B, CHENG B, et al. A new type of compact gravimeter for long-term absolute gravity monitoring[J]. *Metrologia*, 2019, 56(2): 025001.
- [65] 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(06): 35-42.
- [66] 杨公鼎, 翁堪兴, 吴彬, 等. 量子重力梯度仪研究进展 [J]. *导航定位与授时*, 2021, 8(2): 18-29.
- [67] Wang S K, Zhao Y, Zhuang W, et al. Shift evaluation of the atomic gravimeter NIM-AGRb-1 and its comparison with FG5X[J]. *Metrologia*, 2018, 55(3): 360-365.
- [68] 罗玉昆. 冷原子干涉精密重力测量系统关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- [69] XIE H T, CHEN B, LONG J B, et al. Calibration of a compact absolute atomic gravimeter[J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(9): 093701.
- [70] CHEN B, LONG J, XIE H, et al. Portable atomic gravimeter operating in noisy urban environments[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(9): 090201.
- [71] MALCOLM J I. Construction of a portable platform for cold atom interferometry[D]. Birmingham: University of Birmingham, 2016.

(责任编辑:任 妮)