

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311513

基于原子体系的量子惯性传感器研究现状*

邓敏¹, 张毅^{2,3}, 钱天宇^{2,3}, 罗晖^{2,3}, 汪之国^{2,3}

(1. 湖南高地光电科技发展有限公司 长沙 410073; 2. 国防科技大学前沿交叉学科学院 长沙 410073;
3. 量子信息机理与技术湖南省重点实验室 长沙 410073)

摘要:惯性传感器的性能直接决定了惯性导航系统的精度。基于原子体系的量子惯性传感器有望在更小体积和更低成本下达到传统惯性传感器的性能,且理论上可以获得比现有技术更高的测量灵敏度和长期稳定性。近些年随着量子精密测量领域的快速发展,量子惯性传感器的实用化和工程化方面研究进展显著,未来通过替代传统加速度计和陀螺仪,有可能形成高度集成、低功耗和低漂移的量子惯性导航系统。文章简要介绍了基于原子体系的量子惯性传感器的基本原理,总结了以原子干涉陀螺仪、原子自旋陀螺仪、原子干涉加速度计、原子干涉重力仪和重力梯度仪为主的量子惯性传感器研究现状,并对有待解决的关键技术问题进行了梳理和分析,可为量子惯性传感器的发展提供参考。

关键词:量子惯性导航;原子陀螺仪;原子加速度计;重力场匹配

中图分类号: TH74 V241.5 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

Research status of the quantum inertial sensor based on the atomic system

Deng Min¹, Zhang Yi^{2,3}, Qian Tianyu^{2,3}, Luo Hui^{2,3}, Wang Zhiguo^{2,3}

(1. Hunan Gaodi Photoelectric Technology Development Co., Ltd., Changsha 410073, China; 2. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 3. Hunan Key Laboratory of Mechanism and Technology of Quantum Information, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The performance of the inertial sensor directly determines the accuracy of the inertial navigation system. The quantum inertial sensor based on the atomic system is expected to achieve the performance of the traditional inertial sensor with a smaller volume and lower cost, and theoretically can obtain higher measurement sensitivity and long-term stability than the existing technology. In recent years, with the rapid development of the field of quantum precision measurement, the practical and engineering research of quantum inertial sensors has made remarkable progress. In the future, by replacing traditional accelerometers and gyroscopes, it is possible to form a highly integrated, low-power, and low-drift quantum inertial navigation system. This article briefly introduces the basic principles of quantum inertial sensors based on atomic systems, and summarizes the current research status of quantum inertial sensors mainly including atomic interference gyroscope, atomic spin gyroscope, atomic interference accelerometer, atomic interference gravimeter, and gravity gradiometer. The article also reviews and analyzes key technical issues that need to be solved. It provides valuable insight for the development of quantum inertial sensors.

Keywords: quantum inertial navigation; atomic gyroscope; atomic accelerometer; gravity field matching

0 引言

自海湾战争以来,各国军队逐渐意识到全球定位系统(global position system, GPS)在电子环境日益复杂、频

谱对抗日益激烈的未来战场环境中的脆弱性。为确保在战场上取得定位导航授时(positioning navigation and timing, PNT)的主导权,必须减少对GPS的依赖^[1]。惯性导航系统(inertial navigation system, INS)可以克服卫星导航易受电子攻击、在太阳风暴中失效、无法在水下和地下

收稿日期:2023-06-02 Received Date: 2023-06-02

* 基金项目:国家自然科学基金(12174446)、湖南省杰出青年基金(2023JJ10050)、湖南省自然科学基金(2021JJ40700)项目资助

环境应用的缺点,具有自主、连续、隐蔽等优点,在军事、民用等领域有着广泛应用,其惯性测量单元(inertial measurement units, IMU)的核心主要由陀螺仪和加速度计这两种惯性传感器构成,它们的性能直接决定了INS的精度。但由于惯性传感器的误差会随时间积累,一般还要对INS的位置进行定期校准。目前,主要运用外部辅助技术来校准IMU的导航偏差。其中包括卫星导航、无线电导航和天文导航等。然而,外部校准也可能降低载体的隐蔽性和自主性,这在国防军事应用中将提高暴露的风险^[2]。

近年来,随着量子精密测量技术的快速发展,以原子陀螺仪和原子加速度计为代表的量子惯性传感器可以提供对角速度和加速度更高灵敏度和长期稳定性的绝对测量。通过替代传统惯性传感器,长时间内可以保证INS的定位精度,而无需频繁进行重新校准。另外,在长距离航行时,还可以利用安装在载体上的高精度原子重力仪或原子重力梯度仪来实现重力场匹配导航的复合式惯导方案,限制INS误差随时间积累,延长系统的重调周期^[3]。

基于原子体系的量子惯性传感器主要分为干涉式和自旋式两大类^[4],前者的基本原理类似于光学干涉仪,主要利用原子的物质波干涉来敏感载体的惯性信息,包括原子干涉陀螺仪、原子干涉加速度计、原子干涉重力仪和原子干涉重力梯度仪;后者利用原子核和电子的自旋来敏感转动信息,包括核磁共振陀螺仪、无自旋交换弛豫陀螺仪和金刚石NV色心陀螺仪。美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)资助的“微PNT”(Micro-PNT)计划、“芯片级组合原子导航(chip-scale combinatorial atomic navigation, C-SCAN)”项目和“精确惯性导航系统(precise integrated navigation system, PINS)”计划,以及欧洲航空局(European Space Agency, ESA)资助的“空间超精密冷原子干涉测量(hyper precision cold atom interferometry in space, HYPER)”计划,其核心均为高性能原子惯性传感器^[1,4-7]。

原子惯性传感器第1个优点是,其中唯一的运动部件是原子系综,其惯性特性随时间的推移保持不变。这比基于宏观物质运动的传感器提供了更好的长期稳定性。例如传统加速度计由于不可避免的使用磨损,弹簧的动态特性会发生变化,因此在测量中会产生漂移。理论上,基于原子干涉的陀螺仪灵敏度可以比类似尺寸的光学陀螺仪高几个数量级^[2]。基于原子体系的量子惯性传感器的第2个优点是可以提供加速度和角速度的绝对测量,而不是相对于参考值的变化^[7]。第3个优点就是传感器的噪声分析相对简单。例如冷原子干涉仪在敏感

惯性信息时,原子绝大部分时间处于物理隔离的真空中,环境噪声只能通过拉曼光与原子作用瞬间影响测量结果,因此可以建立精确的原子与光作用模型来评估系统测量误差^[8]。

1 原子干涉式量子惯性传感器研究进展

自1991年斯坦福大学朱棣文小组首次实现脉冲式原子干涉仪以来,基于原子干涉仪的精密测量物理蓬勃发展。广泛应用于诸如重力加速度测量^[9]、角速度测量^[10]、牛顿引力常数测量^[11]、精细结构常数测量^[12]、等效原理验证^[13]、引力波探测^[14]和寻找暗物质^[15]等领域。原子干涉仪的基本原理和光学Mach-Zehnder干涉仪类似,只是从光波的干涉变成了原子的物质波干涉。而不同的应用场景可能会采用不同的原子或者几何构型来完成干涉。如图1所示,其基本过程为制备好的原子以速度 v 进入干涉区域后与拉曼光脉冲发生三次相互作用,分别相当于光学分束器($\pi/2$ 脉冲)、反射器(π 脉冲)和合束器($\pi/2$ 脉冲)的作用。一次完整的测量周期还包括了原子源的制备和干涉后的探测环节,而干涉时间 T 是指两次拉曼光脉冲之间的间隔。原子干涉仪最后的荧光探测信号 S 有如下简单关系^[16]:

$$S \propto NP, P = \frac{1}{2}[1 - \chi \cos \Phi] \quad (1)$$

其中, N 是参与干涉的总原子数目, χ 是干涉条纹的对比度, P 是参与干涉的两个量子态在探测阶段时的转移概率, Φ 是干涉相移。载体转速 Ω 和所在位置加速度 a 引入的干涉相移分别为:

$$\begin{aligned} \Phi_{\Omega} &= 2k_{\text{eff}} \cdot (\Omega \times v) T^2 \\ \Phi_a &= k_{\text{eff}} \cdot a T^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: k_{eff} 为拉曼光有效波矢。若相互对抛的一组原子干涉仪同时工作,就可以同时解算出载体的角速度和加速度。

对于相同转速 Ω ,原子干涉仪相位 $\Phi_{\Omega}^{\text{atom}}$ 和光学干涉仪相位 $\Phi_{\Omega}^{\text{opt}}$ 的改变量之比为:

$$R_{\text{gyro}} = \frac{\Delta \Phi_{\Omega}^{\text{atom}}}{\Delta \Phi_{\Omega}^{\text{opt}}} = \frac{4\pi m \Omega A_1 \hbar^{-1}}{4\pi \Omega A_2 c^{-1} \lambda^{-1}} \quad (3)$$

式中: A_1, A_2 分别为原子干涉仪和光学干涉仪的干涉环路面积。 m 为原子质量, \hbar, c 和 λ 分别为约化普朗克常量、光速和激光波长。若干涉环路面积相同, $R_{\text{gyro}} \approx 10^{10}$,原子干涉陀螺仪理论上要比光学干涉陀螺仪的测量精度高很多。但在目前技术下,大型光学干涉仪环路面积为 m^2 量级,而原子干涉仪的环路面积为 mm^2 量级,导致两者无法匹配,因此 $R_{\text{gyro}} \approx 10^3 \sim 10^4$ 。

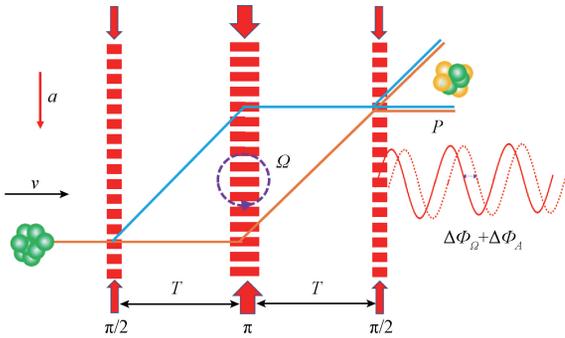


图1 三脉冲拉曼光 Mach-Zehnder 构型的原子干涉仪示意图

Fig.1 Diagram of Mach Zehnder atomic interferometer with three pulse Raman light

原子干涉仪的灵敏度主要由测量具体物理量的标定因数和干涉相位 Φ 的噪声水平决定。而干涉仪的相位灵敏度极限又最终受限于所谓的标准量子极限 $\Delta\Phi_{\text{SQL}} = 1/\sqrt{N}$ ^[17], N 是参与干涉的粒子数。冷原子干涉仪目前实际参与干涉的原子数只有 $10^7 \sim 10^8$ 个,远低于热原子

干涉仪和光学干涉仪中参与干涉的粒子数。因此增加参与干涉的原子数目也是提升原子干涉仪性能的一个重要方面^[18-19]。若参与干涉的原子都被制备在量子纠缠态,则相位测量的不确定度有可能超越标准量子极限,在理想的探测条件下,接近海森伯极限 $1/N$ ^[20]。此外,由于原子源的制备和信号探测都需耗时,因此,在使用原子干涉仪进行惯性测量时,会丢失部分惯性信息,从而导致了测量死区。为了减少甚至消除这类测量死区,可以通过制备连续原子束,或者周期性地运行多个干涉仪来减少惯性信息的丢失^[21]。

1.1 原子干涉陀螺仪

陀螺仪是惯性导航系统的核心器件,原子干涉陀螺仪也是根据 Sagnac 效应来测量角速度。尽管理论上原子陀螺仪的灵敏度比光学陀螺仪要高很多,但目前原子干涉陀螺仪的性能指标并不比激光陀螺仪 (ring laser gyroscope, RLG) 和半球谐振陀螺仪 (hemispherical resonator gyroscope, HRG) 有很大优势,且还处于实验室样机阶段。根据表 1 给出的不同性能 IMU 对惯性传感器指标要求的总结^[22-23],原子干涉陀螺仪未来将适用于战略级潜艇、洲际弹道导弹等场景。

表 1 IMU 按其等级划分的性能比较

Table 1 Comparison among the main kinds of IMU, divided according to their performance grade

等级	战略级	导航级	战术级	商业级
定位误差	30~100 m/h	1 nmi/h	10~20 nmi/h	范围较广
陀螺仪漂移	$10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{h}$	$<10^{-2} \text{ }^\circ/\text{h}$	$1 \sim 10 \text{ }^\circ/\text{h}$	$0.1 \text{ }^\circ/\text{s}$
加速度计零偏	$0.1 \sim 1 \text{ } \mu\text{g}$	$<100 \text{ } \mu\text{g}$	$1 \sim 5 \text{ mg}$	$100 \sim 1\,000 \text{ } \mu\text{g}$
应用	潜艇、洲际弹道导弹	通用导航、高精度地理测绘	与 GPS 集成用于地图绘制、战术武器	低成本导航、计步器、防抱死制动、安全气囊
成本	1 000 000 美元	100 000 美元	2 000~50 000 美元	加速度计:1 美元 陀螺仪:10 美元

注: 1 nautical mile (nmi) $\approx 1\,851 \text{ m}$

1997 年,使用热原子束(二维横向冷却)进行干涉的原子陀螺仪在美国斯坦福大学首次被实现。测量灵敏度为 $2 \times 10^{-8} \text{ rads}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$ ^[24]。2000 年,该团队将灵敏度提升至 $6 \times 10^{-10} \text{ rads}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$ ^[25],达到了当时原子干涉陀螺仪的最高水平。后来,随着激光冷却原子技术的发展,以冷原子为工作介质的干涉陀螺仪在集成化和小型化上体现出更大的优势和潜力,导致国内外研究热点逐渐由热原子束干涉向冷原子干涉发生转变。美国 DARPA 于 2003 年制定的 PINS 计划和同年由欧洲航天局 ESA 制定的 HYPER 计划推动了原子惯性技术的快速发展,使得美国的斯坦福大学、法国巴黎天文台和德国汉诺威大学等研究单位在原子干涉陀螺仪的研究上处于领先地位。图 2 给出了原子干涉陀螺仪预期

性能与各类陀螺仪的比较^[26]。在图 2 中,HRG 归属于机械陀螺仪,虚线圆圈表示实验室中原子干涉陀螺仪的预期性能。

2006 年,美国斯坦福大学将研制的热原子束干涉陀螺仪原理样机性能进一步提升,角度随机游走系数小于 $3 \times 10^{-6} \text{ }^\circ/\text{h}^{1/2}$,零偏稳定性优于 $6.0 \times 10^{-5} \text{ }^\circ/\text{h}$ ^[26-27],首次在该类型陀螺仪上达到了高精度导航技术的指标要求。2008 年,由该团队成立的衍生公司 AOSense 研制出了小型化可移动的冷原子干涉混合惯性传感器。装置如图 3 所示,可同时实现角速度、加速度和重力梯度测量。该陀螺仪敏感单元体积小于 1 m^3 ,角度随机游走系数小于 $3 \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\text{h}^{1/2}$,绝对精度优于 $1 \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\text{h}$,最大输入角速度为 $10 \text{ }^\circ/\text{s}$ 。实际测得地球自转角速度值与理论值之比为

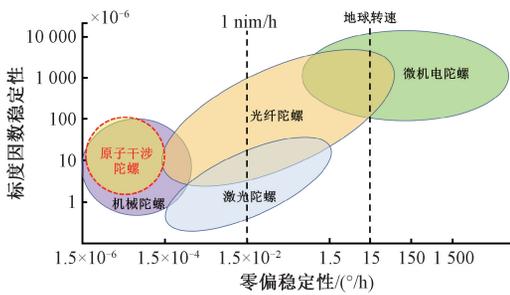


图2 按工作原理划分的陀螺仪零偏稳定性比较
Fig. 2 Comparison of gyroscope bias stability divided by working principle

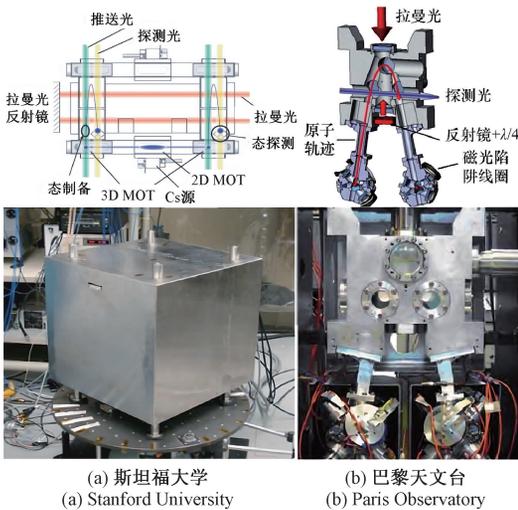


图3 斯坦福大学和巴黎天文台研制的冷原子干涉陀螺仪
Fig. 3 Cold atom interference gyroscope developed by Stanford University and Paris Observatory

度高精度测量,还需要实时获取载体所在位置的重力信息,因此,该方案并不适用于单独导航^[32]。

2008年,德国汉诺威大学搭建了一套紧凑型的对抛型冷原子干涉仪。如图4所示,其敏感单元长度小于1 m,对角速度和加速度测量灵敏度分别为 $2 \times 10^{-4} \text{ rads}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$ 和 $2 \times 10^{-4} \text{ g/Hz}^{1/2}$ ^[33]。随后不断进步,陀螺仪的灵敏度和精度不断提升,2015年报道显示,短期灵敏度提升至 $1.2 \times 10^{-7} \text{ rads}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$,长期稳定性达到 $5.4 \times 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{h}$ ^[34]。

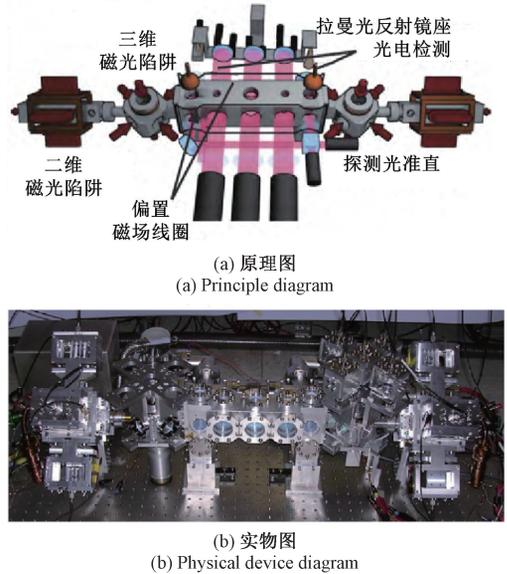


图4 德国汉诺威大学研制的冷原子干涉陀螺仪
Fig. 4 Cold atom interference gyroscope developed by University of Hanover in Germany

1.0007 ± 0.0005 ^[28]。通过对重力进行实时补偿,这套演示系统模拟导航的漂移仅有 5 m/h ^[29]。

2006年,法国巴黎天文台为了在冷原子干涉仪中实现惯导中的角速度与加速度三维测量,成功研制了一台六轴惯性传感器,在600 s的积分时间下,角速度和加速度测量分辨率分别为 $2.8 \times 10^{-2} \text{ }^\circ/\text{h}$ 和 $6.4 \times 10^{-2} \text{ } \mu\text{g}$ ^[30]。并于2009年研制出敏感单元尺寸为 $30 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 的紧凑型冷原子干涉陀螺仪^[31]。其后,该团队在陀螺仪的小型化和性能提升方面不断取得突破。2019年报道实现了灵敏度达到 $3 \times 10^{-8} \text{ rads}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$,零偏稳定性优于 $6.2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ/\text{h}$ 的超高精度四脉冲(冷原子团依次与 $\pi/2-\pi-\pi-\pi/2$ 拉曼光脉冲序列相互作用)冷原子干涉陀螺仪^[21]。载体转动 Ω 引入的相移为 $\Phi_\Omega = 1/2k_{\text{eff}} \cdot (\mathbf{g} \times \Omega) T^2$, 它与三脉冲构型的相移公式(式(2))不同,无法测量重力加速度 \mathbf{g} 方向的角速度。此外,由于重力加速度会随时间和地域变化,想要对角速

除此之外,美国的康奈尔大学^[35]、海军实验室^[36]、国家标准技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)^[37]以及Sandia国家实验室^[38]也都对冷原子干涉陀螺仪开展了研究工作。NIST使用厘米级原子气室实现了基于单一原子源的多轴测量陀螺仪,被称为点源原子干涉仪(point-source interferometry, PSI),它利用冷原子云的热膨胀将速度相关的相移映射到成像平面上来敏感惯性信息。角速度测量灵敏度为 $5.0 \times 10^{-4} \text{ rads}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$,系统积分800 s后的长期稳定性为 $10^\circ/\text{h}$ 。改进后的敏感头的灵敏度可以达到 $10^{-6} \text{ rads}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$ 。该陀螺仪的性能目前并不高,但是具有体积小,比传统原子干涉陀螺仪实现简单,且可以同时测量加速度(加速度测量灵敏度为 $1.6 \times 10^{-5} \text{ g/Hz}^{1/2}$)的优点。

为了满足IMU对原子干涉陀螺仪输出带宽的要求,美国Sandia国家实验室给出了一种新的方案。如图5所示,该原子干涉仪的玻璃腔体尺寸为 $20 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$,通过横向双磁光阱配置方案来将对抛的冷原子

困重复囚禁,实现了超短的干涉时间,最终获得了高带宽的系统数据输出。2014年,该小组研制的冷原子干涉仪同时实现了角速度和加速度的测量,输出频率为60 Hz。角速度和加速度测量的灵敏度分别为 $1 \times 10^{-6} \text{ rads}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$ 和 $8.8 \times 10^{-7} \text{ g/Hz}^{1/2}$ 。其中,角速度测量的长期稳定性估计优于 $10^{-2} \text{ }^\circ/\text{h}$ ^[38]。另外,可以通过类似激光干涉测量中的双波长方案^[32],或者辅加传统陀螺仪进行组合输出^[39-40]来达到增加原子干涉陀螺仪动态范围的目的。法国航空航天研究院2018年提出了由⁸⁷Rb和⁸⁵Rb构成的双组分原子干涉测量方案,利用⁸⁷Rb具有较小的标度因数数和较大的动态范围,以及⁸⁵Rb具有更高的灵敏度和更小的动态范围的特点,将两者进行结合,实现了系统测量灵敏度不降低而动态范围增加的效果^[41]。2019年,以色列魏茨曼科学研究所利用标度因数非常接近的双干涉过程产生类似摩尔条纹周期的方案,大大提高了动态测量范围^[42]。

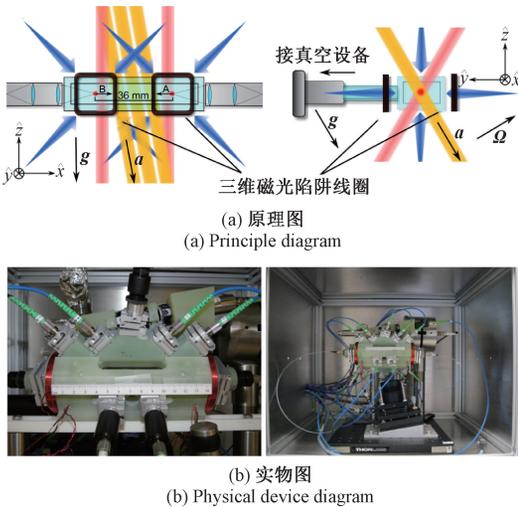


图5 美国 Sandia 国家实验室研制的冷原子干涉陀螺仪
Fig. 5 Cold atom interference gyroscope developed by Sandia National Laboratory

国内开展原子干涉陀螺仪技术研究的主要单位有中科院精密测量院(原中科院武汉物数所)^[43]、清华大学^[44]、华中科技大学^[45]、华中光电研究所^[46]、哈尔滨工业大学^[47]和北京航天控制仪器研究所等。清华大学2022年在国际上报道了基于连续冷原子束的闭环原子干涉惯性传感器,该系统是对热原子束干涉陀螺仪方案的进一步探索,它可以实现加速度和角速度的连续解耦测量,但干涉面积目前还太小,导致加速度和角速度测量的短期灵敏度分别只有 $7.3 \mu\text{g/Hz}^{1/2}$ 和 $39 \mu\text{rads}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$,长期稳定性分别为 $0.13 \mu\text{g}$ 和 $35 \mu\text{rad/s}$ 。2010年,中科院精密测量院在国内首次实现原子干涉陀螺仪 Sagnac效应的实验验证,2021年发表了其最新研究成果,短期灵敏度和长期稳定性分别为 $1.5 \times 10^{-7} \text{ rads}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$ 和

$1.9 \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\text{h}$ (积分23 000 s)^[48]。据目前公开报道数据,该原子干涉陀螺仪是冷原子团与三脉冲拉曼光相互作用构型的国际最好水平,陀螺仪装置如图6所示。

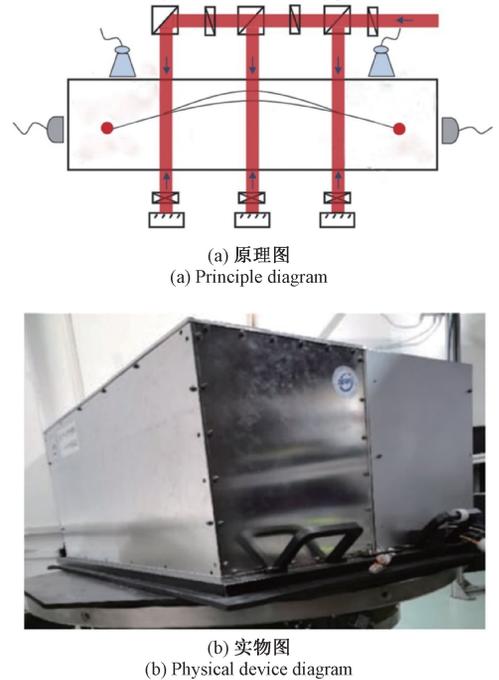


图6 中科院精密测量院研制的 Mach-Zehnder 型原子干涉陀螺仪

Fig. 6 A three-pulse Mach-Zehnder atomic interference gyroscope developed by Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS

上述空间型原子干涉陀螺仪通常包含真空腔体、大量光机电部件,具有体积大和功耗严重的缺点,因此在实际应用中会面临较大困难。表2比较了国内外具有代表性的部分高精度空间原子干涉陀螺仪的性能与特点。

2018年,为了开发便携式光电集成电路(photonic integrated circuit, PIC),美国 DARPA 发布了“原子-光子集成(atomic-photon integration, A-Phi)”项目,用于替代传统自由空间光学组件来实现高性能、稳健、便捷式的原子钟和原子陀螺仪。2014年,为了解决原子芯片上的冷原子导引及分束、基底材料制备、干涉过程中的相位退相干等关键技术问题,法国国家研究署发布了一个原子芯片惯性传感项目(on-atom chip inertial sensing, On-ACIS),希望研制出基于磁导引的高精度冷原子芯片陀螺仪。英国国防部为了将量子导航系统和重力成像系统进行芯片集成与制造,启动了量子罗盘(quantum compass)项目^[49]。因此,原子系统的微型化和芯片集成化成为了一种趋势^[50]。在原子芯片上实现原子干涉陀螺仪还有一个独特优势:芯片表面可以方便刻蚀不

表 2 国内外部分高精度原子干涉陀螺仪性能比较

Table 2 Performance comparison of some high precision atomic interference gyroscopes at home and abroad

团队	灵敏度	长期稳定性	特点
中科院精密测量院 ^[43]	$1.5 \times 10^{-7} \text{ rads}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$	$1.9 \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\text{h}$	三脉冲构型目前最好水平,体积大、精度高
斯坦福大学 & AOSense ^[6,26,28]	ARW; $3.0 \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\text{h}^{1/2}$	$1.0 \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\text{h}$	四脉冲、混合传感器、体积小、重力方向角速度无法测量
斯坦福大学 ^[26-27]	ARW; $3.0 \times 10^{-6} \text{ }^\circ/\text{h}^{1/2}$	$6.0 \times 10^{-5} \text{ }^\circ/\text{h}$	三脉冲、采用横向冷却的热原子束、体积大、精度高
巴黎天文台 ^[21]	$3.0 \times 10^{-8} \text{ rads}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$	$6.2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ/\text{h}$	四脉冲、交替抛射、体积大、精度高、重力方向角速度无法测量
汉诺威大学 ^[34]	$1.2 \times 10^{-7} \text{ rads}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$	$5.4 \times 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{h}$	三脉冲、体积小
Sandia 国家实验室 ^[38]	$1.0 \times 10^{-6} \text{ rads}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$	$<0.01 \text{ }^\circ/\text{h}$	三脉冲、带宽高、体积小

注:1) ARW:角随机游走系数,若高频噪声都是调频白噪声,则角随机游走系数与灵敏度值相同;2) $1 \text{ rad/s} \approx 2 \times 10^5 \text{ }^\circ/\text{h}$, $1 \text{ rads}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2} \approx 3 \text{ } 438 \text{ }^\circ/\text{h}^{1/2}$

同导线结构产生环形闭合导引磁场,使冷原子物质波波包能像光纤陀螺仪中的激光环路一样多次往返运动,解决自由空间中干涉面积较小的限制,这对原子干涉陀螺仪具有极为重要的意义。

2017 年,美国弗吉尼亚大学基于芯片上线圈构成的时间轨道平均势阱(time-orbiting potential, TOP)在实验上获得了超冷原子玻色-爱因斯坦凝聚体(Bose-Einstein condensation, BEC)的环形闭合回路原子干涉仪^[51],并于 2020 年首次在实验上验证了对角速度的测量,干涉对比

度达到 50%,环路面积约为 0.5 mm^2 ,转动测量灵敏度为 $8 \times 10^{-5} \text{ rads}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$,接近地球自转水平。作者认为,若在此基础上将闭合面积扩展到 1 cm^2 以上时,其测量灵敏度预计可达 $10^{-7} \text{ rads}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$ ^[52]。法国巴黎天文台的 Garrido 等^[53]也在该方向上持续探索,图 7 展示了他们的最新实验装置。目前技术条件下的原子芯片干涉陀螺仪主要存在退相干因素复杂、灵敏度不高、带宽和动态范围小的缺点,需要深入基础研究和新的技术方案才能取得突破。

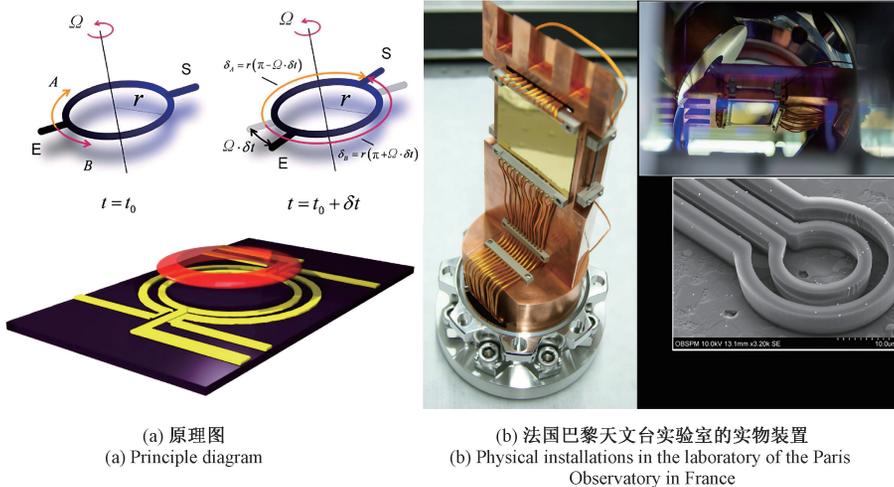


图 7 环形导引原子芯片干涉陀螺仪
Fig. 7 Illustration of the circular guided atomic chip interferometric gyroscope

以色列本·古里安大学近些年提出了毫米级原子芯片量子陀螺仪概念,旨在实现原子干涉陀螺仪的高度集成化。如图 8 所示,该方案在深刻蚀的基底上集成了微真空系统、微磁光阱和微激光系统等各种组件,连续的冷却和实验阶段在一系列微型真空室(无阴影)中从左到右进行,体积仅有 $20 \text{ mm} \times 24 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ^[54]。虽然芯片级原子干涉仪已经在实验室里实现^[55],但要将所有必要的功能完全集成仍然被视为一个长期的挑战。此外,在芯

片上制备 BEC 目前还只能局限于实验室环境下的基础科学研究^[56],要实现基于 BEC 的可移动惯性传感器,这个时间不会少于 10 年。大家普遍认为高度集成化的超冷原子芯片一旦技术成熟,将代表一个临界点,它将使基于原子的量子传感器得到广泛应用。国内专项重点支持原子芯片的研究计划仍然相对较少,中科院上海光学精密机械研究所对导引型原子芯片陀螺仪开展了相关研究^[57]。

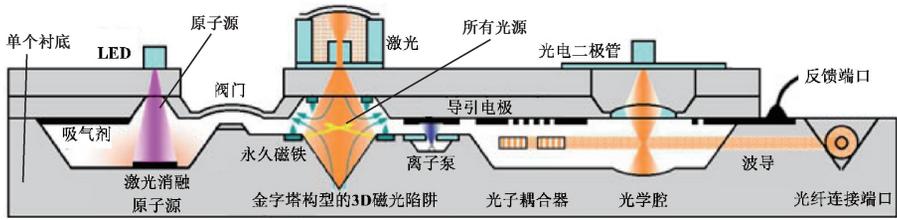


图8 未来高度集成的原子芯片概念图

Fig. 8 A concept map of a highly integrated atomic chip of the future

1.2 原子干涉加速度计

在原子干涉仪示意图1中,若左右对抛的一组原子干涉仪同时工作,就可以同时解算出载体的角速度和加速度。若不考虑转动,则一个原子干涉仪就可以获得载体的加速度信息,原子干涉加速度计同样有长期稳定性好,理论精度高的优点(对重力加速度的测量精度已达 10^{-9} g量级),但目前和传统加速度计相比,依旧存在动态范围小,体积、质量和功耗大的不足。图9给出了各类加速度计的稳定性对比^[26]。其中,虚线圆圈表示实验室中原子干涉加速度计的预期性能。若干涉仪中的拉曼光沿着重力方向传播,就能测量当地重力加速度,但是要补偿由拉曼光反射镜振动引入的相位,因为干涉仪无法区分测量加速度信息来自于地面振动还是地球引力。

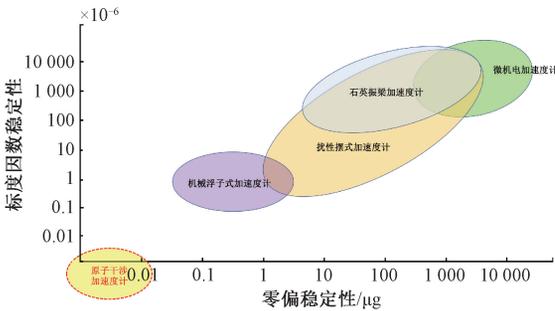
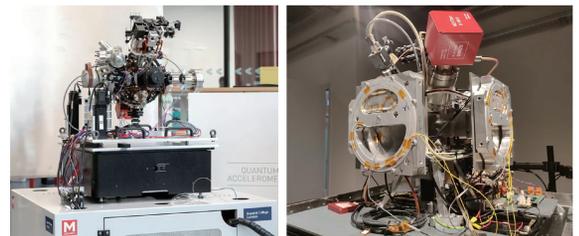


图9 按工作原理划分的加速度计稳定性比较

Fig. 9 Comparison of the stability of accelerometers divided by working principle

2013年,华中科技大学基于冷原子干涉仪进行绝对重力加速度测量,在振动环境极好的山洞里,系统输出带宽为1 Hz,短期灵敏度达到 4.2×10^{-9} g/Hz^{1/2},长期稳定性优于 5×10^{-10} g^[9]。理论上,通过配置拉曼光方向可以实现多自由度的加速度测量,且各轴测量性能都与重力加速度测量水平相当,但由于地表重力作用,在非重力方向上,原子很快就会偏离拉曼光作用区间,干涉时间缩短导致测量灵敏度降低。2011年,法国巴黎天文台的Geiger等^[58]在飞机上沿机翼方向进行加速度测量。在飞机俯冲完全失重(重力为0 g)和正常飞行(重力为1 g)两种实验条件下分别实现灵敏度为 2×10^{-5} 和

1.6×10^{-4} g/Hz^{1/2}的测量,满足了惯性导航对噪声水平的要求(飞行器加速度的1/300)。2018年,英国M Squared公司报道其研制的水平方向原子干涉加速度计,如图10所示,测量精度为 10^{-8} g,输出带宽3 Hz,敏感单位重量和占地面积分别为40 kg和1 m²,其外围光电系统占地面积为0.7 m²^[59]。未来希望实现三轴加速度测量,成为真正的“量子罗盘”。



(a) 英国M Squared公司

(a) M Squared in the UK

(b) 法国iXBlue公司

(b) iXBlue in France

图10 英国M Squared公司和法国iXBlue公司研制的两台紧凑型原子干涉加速度计

Fig. 10 Two compact atomic interference accelerometers developed by M Squared in the UK and iXBlue in France

冷原子的制备需要占用一定时间,导致冷原子加速度计的输出带宽受限。2017年,美国Sandia国家实验室的研究人员直接在热原子系综内进行原子干涉。该方案的输出带宽可以达到10 kHz,动态范围高达88 g,但比起冷原子干涉加速度计,其测量灵敏度却低了近5个数量级,仅为 10^{-2} g/Hz^{1/2}^[60]。2012年,法国iXblue公司提出一种传统加速度计和原子加速度计组合的设计方案^[61-62],可以很好结合传统加速度计高动态范围和原子干涉加速度计灵敏度高、长期稳定性好的两方优点。该组合传感器具有400 Hz的带宽,灵敏度达到 $3.2 \mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$,积分11 h后的长期稳定性为 10^{-8} g。

将上述原子干涉加速度计在运动载体上进行动态测量时会遇到麻烦,因为原子飞行过程中会因载体的复杂加速运动或姿态迅速改变而离开拉曼光作用区域,从而降低加速度计性能,使其应用场景受到很大限制。针对该问题,2013年,澳大利亚国立大学的研究小组尝试利

用光波导中的光场势垒来迫使冷原子只能沿某个干涉方向运动,理论计算表明,该方案可实现的加速度测量灵敏度为 $10^{-10} \text{ g/Hz}^{1/2}$ ^[63]。另外,2018 年,新加坡南洋理工大学的 Shau-Yu Lan 小组还尝试过在中空的光子光纤内完成冷原子干涉实验,实现加速度测量^[64]。

1.3 原子干涉重力仪和重力梯度仪

20 世纪 70 年代,美国和俄罗斯海军都认识到,潜艇发射弹道导弹的精度在很大程度上取决于导弹发射时对重力的精确测量。实现高精度惯性导航的一种解决思路就是利用重力信息进行辅助导航:1) 利用高精度的实测重力信息修正 INS 中使用的“模型重力”来提高导航精度,从系统本身角度提高导航定位精度。美国空军实验室的研究表明,惯导要达到 5 m/h 的定位精度,要求重力矢量的水平分量扰动测量精度达到 0.5 mGal(相当于垂线偏差 0.1")^[65-66]; 2) 利用重力场图形匹配技术来限制 INS 误差随时间积累,这种无源重力导航技术,可以提高系统的定位精度,延长系统的重调周期。

从目前公开发表的文献可知,最开始研究重力辅助导航的目的是为了提高美国搭载三叉戟弹道导弹的俄亥俄级核潜艇的性能,这是 20 世纪 70 年代美国海军的一项绝密军事计划。20 世纪 90 年代后期,洛克希德马丁(Lockheed Martin)公司成功研制了包括重力仪和重力梯度仪两种重力传感器的通用重力模块(universal gravity module, UGM)。1998 年~1999 年,美国海军分别在水面舰船和水下潜艇上对 UGM 进行了重力无源导航和地形估计的演示验证。结果表明导航系统采用重力图形匹配技术后,可将经度误差和纬度误差降低至导航系统标称误差的 10%^[67]。该重力模块将重力异常匹配(重力矢量在幅度上的扰动)和重力梯度匹配(重力扰动向量 3 个分量的导数,共 5 个独立变量)两种模式相结合来用于惯

性辅助导航,分别对应重力场中的长波和短波数据,能更有效的提高匹配导航精度^[68]。图 11 给出了重力匹配导航的原理图,水下潜艇通过搭载的重力仪和重力梯度仪实时测量重力场信息,再与预先存储的海洋重力场数据进行匹配,估计并校正潜艇的位置^[69]。

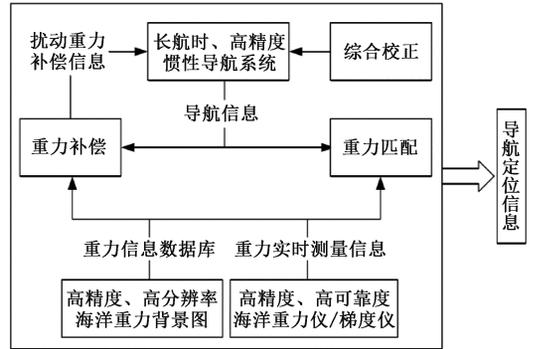


图 11 重力匹配导航系统的功能框图

Fig. 11 Functional diagram of the gravity matching navigation system

1) 原子干涉重力仪

地球重力场信息除了应用于高精度惯性导航领域外,也是重要的国家战略资源,在军事、地球物理、矿场勘探和测绘等领域都有广泛应用。目前,对重力加速度的静态绝对测量是原子干涉技术最成熟的应用,目前已经开始商用的原子重力仪产品在测量精度和长期稳定性方面都展现出比传统重力仪更强的性能。世界上第 1 台原子喷泉式重力仪由美国斯坦福大学的朱棣文和 Kasevich 等^[70]在 1992 年设计开发,积分 2 000 s 时间后的分辨率为 30 μGal ,后来提升到 3 μGal ^[71]。目前全世界从事原子干涉重力仪的研究机构有近 30 家^[72],表 3 和 4 分别列出了国内外有代表性的几个机构的静态测试性能和野外车载静态测试

表 3 国内外部分高精度原子重力仪实验室静态测试的灵敏度及精度

Table 3 Sensitivity and accuracy of laboratory static tests of of some high precision atomic gravimeters at home and abroad

测试场景	研究单位	灵敏度/($\mu\text{Gal/Hz}^{1/2}$)	不确定度/ μGal
实验室静态测试	美国斯坦福大学 ^[71,73]	8.0	3.0
	华中科技大学 ^[9, 74]	4.2	3.0
	法国巴黎天文台 ^[75-76]	5.7	5.2
	德国洪堡大学 ^[77]	9.6	3.2
	中国计量院 ^[78]	44.0	5.2
	中科院精密测量院 ^[79-80]	28.0	9.0
	浙江工业大学 ^[81-82]	90.0	7.8
	中国科技大学 ^[83]	35.5	7.6

注:原子重力仪测量精度以系统总的测量不确定度来评估,它包括系统测量偏差(B类不确定度)和测量标准差(A类不确定度),系统长期稳定性一般以测量数据的阿伦方差曲线最低点斜率为 0 的平坦位置(噪声功率谱密度中, $S(f) = b_{-1}f^{-1}$ 的调频闪变噪声在该位置占主导)来衡量,因此系统长期稳定性数值要小于系统总的测量不确定度。

表4 国内外部分高精度原子重力仪野外车载静态测试的灵敏度及精度

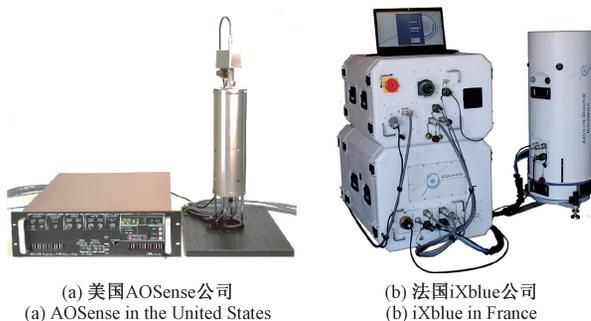
Table 4 Sensitivity and accuracy of field vehicle static test of some high precision atomic gravimeters at home and abroad

测试场景	研究单位	野外测试环境	灵敏度 / $(\mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2})$	精度 / μGal
野外车载静态测试	加州大学伯克利分校 ^[84]	伯克利山的上山道路	500.0	40.0(不确定度)
	国防科技大学 ^[85]	野外山地和城区主干道	520.0	20.0(重复性) 100.0(外符合)
	浙江工业大学 ^[86]	长沙黄兴大道高振动噪声环境	1 000.0	162.0(内符合) 169.0(外符合)
	华中科技大学 ^[87]	喻家山的上山道路和人防山洞实验室通道上	1 900.0	200.0(内符合)

注:外符合精度主要反映测量值与真值之间的偏差程度,一般用系统测量偏差度量,即精确度;内符合精度主要反映测量值之间的离散度,一般用测量标准差度量,即精密度。

性能。现阶段,已有一些重力仪实现了便携式的可搬运外场测量。但大多数设备都需要在较为稳定的实验室条件下工作,对于野外环境下的静态测量或动态测量,原子干涉重力仪还必须在系统鲁棒性、紧凑性和用户友好性等方面进一步提升与优化,才能满足用户的实际需求。

2010年,美国 AOSense 公司向其客户交付了第 1 台商用重力仪,灵敏度和分辨率分别为 $1 \mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$ 和 $0.1 \mu\text{g}$,是该领域最早进行商业推广的公司,但后续产品精度的提升未见公开报道^[88]。法国 Muquans 公司(已被 iXblue 收购)的重力仪目前已经在世界各国商业推广,国内也有部分单位购买。该公司推出了 AQG-A 和 AQG-B 这两款产品^[89]。AQG-A 的灵敏度和长期稳定性分别为 $50 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$ 和 $1 \mu\text{Gal}$,AQG-B 由 AQG-A 升级而成,提升了稳定性,瞄准外场应用^[90]。图 12 展示了目前国外已报导的两种商用化原子干涉重力仪外形图。



(a) 美国 AOSense 公司
(a) AOSense in the United States

(b) 法国 iXblue 公司
(b) iXblue in France

图 12 美国 AOSense 公司和法国 iXblue 公司(AQG-B)分别推出的原子重力仪产品

Fig. 12 Atomic gravimeter products developed by AOSense in the United States and iXblue (AQG-B) in France, respectively

国内相关实验研究开始于 2002 年左右,目前主要的研究单位包括中科院精密测量院、华中科技大学、浙江大

学、中国计量科学研究院、国防科技大学、华中光电研究所等。静态指标整体处于国际先进水平,其中华中科技大学于 2013 年报道的实验室静态测量灵敏度达到了 $4.2 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$,是当时国际最好水平。图 13 展示了部分单位研制的可搬运原子干涉重力仪,相关衍生公司也开始提供重力仪的商业服务。目前,上述各研究单位都在积极开展车载静态测量或者船载动态测量的研究。

显然,动载平台上的重力测量技术在无源重力导航、重力场的大区域测绘、矿产勘探等领域非常关键。然而,车辆、船舶或者飞机等载体的复杂运动姿态和各类振动噪声都会给重力仪测量带来极大困难。2022 年,海军工程大学联合两家单位进行了船载重力动态测量实验。在航速 4.6 节(nmi/h)的条件下,4 条重复测线与同船 dgShip 型相对重力仪的外符合精度分别为 2.331、1.837、3.988 和 2.589 mGal,而内符合精度则为 2.272 mGal^[91]。2020 年 9 月末,在中国南海某海域,浙江工业大学研制的绝对重力仪搭载某试验船进行了最大航速为 24.2 km/h 的重力测量,航程约 85 km,灵敏度达到 $136.8 \text{ mGal}/\text{Hz}^{1/2}$,测量数据与重力场模型 XGM2019 计算结果的差异为 $0.8 \pm 10.8 \text{ mGal}$ ^[92]。该小组^[93]和华中光电研究所^[94]、国防科技大学、加州大学伯克利分校还分别开展了野外车载静态测试。图 14 展示了加州大学伯克利分校和国防科技大学各自研制的车载原子干涉重力仪。目前,国内外在车载动态测量实验上都面临较大技术挑战,还未见相关报道。

如图 15 所示,2015 年 10 月和 2016 年 1 月,在北大西洋与法国布列塔尼区以西的海域及杜瓦纳内海湾,法国航空航天实验室(The French Aerospace Lab, ONERA)的研究小组在海况为 4~6 级(对应浪高 2~5 m)的条件下,完成了两次船载原子干涉重力仪的测试实验,首次在海面上实现了亚 mGal 精度动态绝对重力加速度测量^[95]。2017 年 4 月,该小组将船载重力仪又安装到一架飞机



图 13 国内部分机构研制的可搬运原子干涉重力仪

Fig. 13 Diagram of transportable atom gravimeters developed by some research institutions in China

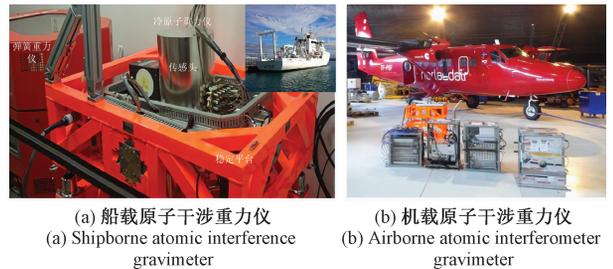


(a) 加州大学伯克利分校
(a) University of California, Berkeley

(b) 国防科技大学
(b) National University of Defense Technology

图 14 加州大学伯克利分校和国防科技大学分别研制的车载原子干涉重力仪

Fig. 14 The on-board atomic interference gravimeter developed by the University of California, Berkeley and the University of Defense Science and Technology, respectively



(a) 船载原子干涉重力仪
(a) Shipborne atomic interference gravimeter

(b) 机载原子干涉重力仪
(b) Airborne interferometer gravimeter

图 15 法国 ONERA 团队研制的船载原子干涉重力仪和机载原子干涉重力仪

Fig. 15 Shipborne atomic interference gravimeter and airborne interference gravimeter developed by ONERA in France

上,在冰岛上空实现了首次机载原子干涉重力仪的绝对重力测量^[96]。飞机在 1.4 和 1.9 km 两个高程上的测量差异标准偏差为 1.7~3.9 mGal (内符合精度)。除此之外,还在 2.6 km 高度上完成了一系列测线的测量,这些数据与基于地表测量数据推算到相同高程的对应值比较,标准偏差为 3.3~6.2 mGal (外符合精度)^[97]。

近年来,基于原子芯片的冷原子干涉重力仪获得了广泛的关注^[98]。2016 年,德国汉诺威大学的 Abend 等^[55]研制了一台基于原子芯片的 BEC 超冷原子干涉重

力仪。如图 16 所示,它通过原子芯片来制备和相干操控自由下落的 BEC,并将芯片作为反射镜来形成脉冲晶格,驱动布洛赫振荡和双布拉格衍射从而形成敏感重力的原子干涉仪。它兼顾了测量精度和系统体积的矛盾,在 1 cm³ 空间内实现了长达数十毫秒的自由下落,为实现亚 μGal 精度的便携式重力仪开启了新的技术途径。

2) 原子干涉重力梯度仪

目前,实现重力梯度测量的技术方案有旋转加速度计方案^[99]、静电悬浮方案^[100]、超导方案^[101]和原子干涉^[102]方案。其中,旋转加速度计方案是技术成熟度和可靠性最高的方案。1971 年,美国空军提出了研制精度为 1 E 的动基座重力梯度仪计划(绝密等级)。美国 Bell

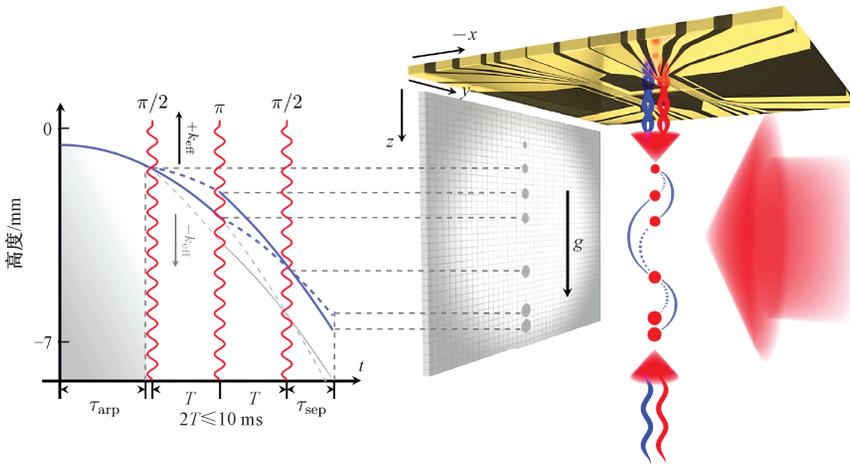


图 16 基于原子芯片的 BEC 干涉重力仪

Fig. 16 BEC interferometer gravimeter based on atomic chip

Aerospace 公司(现并入洛克希德马丁公司)为此研制的基于旋转加速度计的重力梯度测量系统最开始用于辅助美国海军俄亥俄级战略核潜艇的隐蔽导航,1994 年解密后形成了全张量航空重力梯度测量系统(Air-FTG)并开始商业应用,在重力资源测绘和地质勘探等领域已经取得极好的效果。从公开资料报道来看,该系统在飞机和汽艇上作业的结果显示其探测能力分别达到 $2 \text{ E}@200 \text{ m}$ 和 $1.7 \text{ E}@100 \text{ m}$ ^[103-104]。由于重力梯度仪在惯性导航与制导、大地测量、空间科学等国家战略领域有着广泛的应用,尽管国外旋转加速度计重力梯度仪相关技术已经成熟,但是,他们对核心技术极端保密,相关设备也严格出口管制^[105]。

原子干涉重力梯度仪是由竖直或者水平配置的两个原子干涉重力仪进行差分测量组成。它同样具有冷原子干涉重力仪拥有的高精度、低漂移、无机械磨损和常温工作等特点,还有对振动噪声不敏感的优势,是一种极具应用潜力的新一代技术方案。但目前基于原子干涉的重力梯度仪离 Air-FTG 的技术成熟度还较远,主要体现在还没有出现集成度较高且可以测量重力梯度全张量的技术方案报道,另外,测量精度和测量带宽不能兼顾。表 5 给出了国内外部分高精度原子干涉重力梯度仪的灵敏度及长期稳定性。

1998 年,美国斯坦福大学在国际上首次利用两个竖直方向的原子干涉仪实现了重力梯度的测量,该重力梯度仪的测量基线(两个干涉仪相隔距离)长度为 1.4 m ,经过改进后该系统达到约 $28 \text{ E}/\text{Hz}^{1/2}$ 的测量灵敏度,测量精度优于 7.0 E 。2008 年,他们又研制出首个方便搬运的水平原子干涉重力梯度仪,因其测量基线为水平方向,所以研制难度更大。该款梯度仪基线长度为 0.7 m ,测量灵敏度约为 $60 \text{ E}/\text{Hz}^{1/2}$,积分 2000 s 后的测量分辨

表 5 国内外部分高精度原子干涉重力梯度仪的灵敏度及长期稳定性

Table 5 Sensitivity and uncertainty of some high-precision atom interference gravity gradiometers at home and abroad

研究单位	灵敏度/ ($\text{E}/\text{Hz}^{1/2}$)	长期稳定性 $\text{E}(1 \text{ E}=10^{-9} \text{ s}^{-2})$	基线 长度/ m
斯坦福大学 ^[106-107]	28	7.0	1.4
斯坦福大学 ^[108] (水平方向)	60	2.0	0.7
华中科技大学 ^[109]	99	1.0	0.3
佛罗伦萨大学 ^[110]	100	1.7	0.3
iXblue 公司 ^[111]	50	0.15	0.63
中科院精密测量院 ^[112]	160	0.9	0.45
伯明翰大学 ^[113]	466	20.0	1.0
浙江工业大学 ^[114-115]	465	11.0	0.83
华中光电研究所 ^[116]	100	5.0	0.48

注:各研究单位的重力梯度仪获得长期稳定性的积分时间并不相同。

率约为 2 E 。在图 17 所示的车载动态测量实验中,能观测到实验楼一楼外墙附近区域 300 E 的重力梯度变化。该款梯度仪随后也被转让到 AOSense 公司进一步研发,为美国战略核潜艇提供新一代重力梯度仪,已完成陆地车载平台试验,并在潜艇上搭载测试,性能目前不详^[117]。斯坦福大学还与美国航空航天局合作开展星载高精度冷原子重力梯度仪的研究工作^[118],在星载条件下,试图通过提升干涉时间 T 和采用大动量转移技术^[119],将测量灵敏度提升到 $7 \times 10^{-5} \text{ E}/\text{Hz}^{1/2}$,这将比 GOCE 卫星搭载的静电悬浮重力梯度仪还要高出 2 个数量级。欧盟也启动了类似的星载冷原子干涉仪项目^[120-121]。

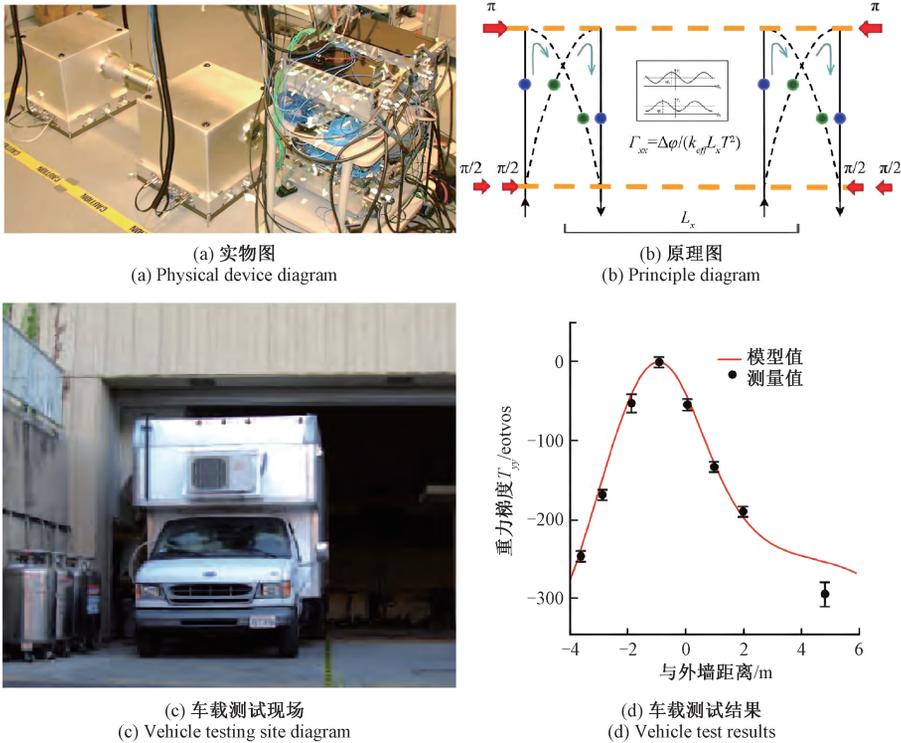


图 17 美国斯坦福大学的第 1 代可移动水平原子重力梯度仪

Fig. 17 The first generation horizontal atom gravity gradiometer developed by Stanford University

2022 年初,法国 iXblue 公司与巴黎天文台合作,研制了一台测量垂直地表方向分量的原子重力梯度仪。如图 18 所示,该重力梯度仪的测量基线长度为 62.5 cm,测量灵敏度达到 50 E/Hz^{1/2},积分 1.1×10⁵ s 后的测量分辨率为 0.15 E,该值相当于一个边长为 10 cm 的立方洞

穴在地下 37 cm 位置处对地表产生的重力梯度异常。除此之外,意大利佛罗伦萨大学、法国航空航天局、英国伯明翰大学、美国喷气推进实验室以及国内的中科院精密测量院、华中科技大学、华中光电研究所和浙江工业大学等十余家单位先后开展了原子干涉重力梯度仪技术的研究并取得了一系列重要的进展。国内的中科院精密测量院在该领域积累了较长时间,研制了目前公开报道中集成度最高的原子干涉重力梯度仪。探头尺寸只有 37 cm×28 cm×92 cm,测量基线是 45 cm,测量灵敏度为 160 E/Hz^{1/2},经过 1.7×10⁴ s 积分后的测量分辨率可以达到 0.9 E 的水平。另外,华中光电技术研究所还初步开展了冷原子干涉重力梯度仪动态测量方面的研究。如图 19 所示,其在低速的车载平台上进行了很好的演示实验,但离真正可以实用的航空/海洋重力梯度仪还有很长的道路要走。



(a) 法国 iXblue 公司
(a) iXBlue in France

(b) 中科院精密测量院
(b) Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS

图 18 法国 iXblue 公司和中科院精密测量院研制的垂直向绝对原子重力梯度仪

Fig. 18 Vertical atomic interference gravity gradiometer developed by iXblue and Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS

2 原子自旋式量子惯性传感器研究进展

基于原子自旋体系的原子惯性传感器目前主要应用于陀螺仪,它主要利用原子核和电子的自旋来敏感转动信息。宏观转动与微观粒子自旋之间的联系在一个世纪前首次被讨论,图 20 展示了基于原子自旋的转动测量理论与技术的发展历史^[22]。图中左列列出了自旋-转动耦

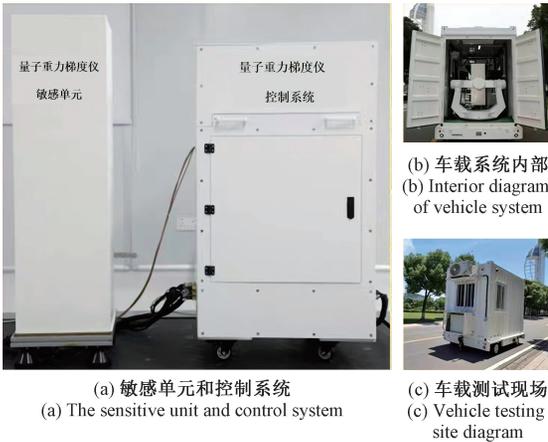


图 19 华中光电研究所研制的车载原子干涉重力梯度仪
 Fig. 19 A vehicle-mounted atomic interference gravity gradiometer developed by Huazhong Optoelectronic Research Institute

(quantum based gyroscope, QYRO), 旨在开发符合太空环境条件的基于原子自旋的量子陀螺仪技术, 实现对小型卫星的高精度姿态控制, 预计在 2027 年, 搭载该量子陀螺仪的卫星将发射升空。

2.1 核磁共振陀螺仪

核磁共振陀螺仪是通过检测惰性气体核自旋在静磁场中的拉莫尔进动频率变化来获得转动信息, 它具有精度高(理论精度为 $10^{-4} \text{ }^\circ/\text{h}$)、体积小和成本低(图 21)的特点^[124]。工作过程如图 22 所示, 泵浦光极化碱金属原子后, 再通过自旋交换来极化惰性气体的原子核, 使其形成宏观磁矩。闭环控制的射频磁场使惰性原子系综发生核磁共振, 使该宏观磁矩绕主磁场做拉莫尔进动, 当载体转动时, 其转动角频率将耦合到磁矩进动频率中, 通过碱金属这个内置的高精度原子磁力仪来检测该宏观磁矩的进动频率即可解算载体转动信息^[6]。核磁共振陀螺仪没有运动部件, 还具有抗振动、大动态和高带宽等特点, 能

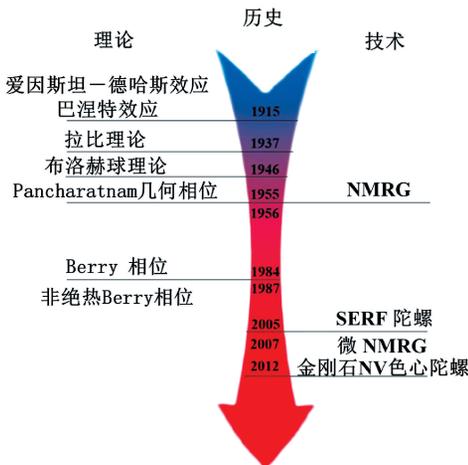


图 20 基于原子自旋的转动测量理论与技术进展
 Fig. 20 Theoretical and technological developments for the atomic spin-based rotation measurement

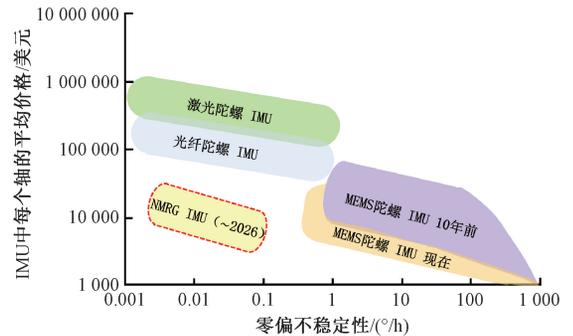
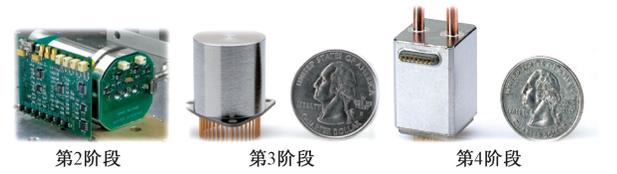
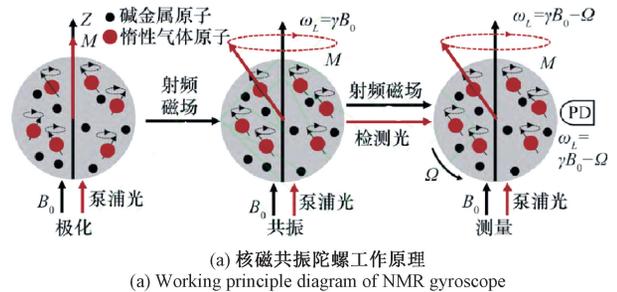


图 21 不同种类 IMU 的性价比^[125]
 Fig. 21 Comparison of cost performance of different IMUs

合理理论的进展—从早期的半经典理论到几何相位理论。右栏列出了原子自旋陀螺仪技术的发展—从核磁共振陀螺仪(nuclear magnetic resonance gyroscope, NMRG)到最新的金刚石 NV 色心陀螺仪。传统陀螺仪的尺寸和成本随着性能的提高呈指数增长, 而 NMRG 的长期稳定性理论上可与环形激光陀螺仪和光纤陀螺仪相媲美, 同时成本更低, 封装更小^[122]。无自旋交换(spin exchange relaxation free, SERF)原子陀螺仪与传统的浮动陀螺仪和电悬浮陀螺仪这两类超高精度陀螺仪相比, 保持了战略级性能, 且成本更低^[123]。2022 年 8 月底, 量子初创公司 Q. ANT、博世(Bosch)和通快(Trumpf)3 家公司与德国航空航天中心合作启动一个耗资 2 800 万欧元的项目



(b) 诺斯罗普·格鲁曼公司各阶段的核磁共振陀螺仪样机
 (b) Northrop Grumman's NMR gyroscope prototype at various stages

图 22 核磁共振陀螺仪工作原理和样机
 Fig. 22 Working principle and prototype of NMR gyroscope

够应用于捷联式惯导系统中。因此,在未来小型化的智能设备和智能军用装备领域,核磁共振陀螺会有很好的应用潜力,是当前发展最为成熟的原子陀螺仪,也是实现芯片导航级陀螺仪的重要技术途径之一,因此受到惯性导航领域的广泛关注。

1955 年,Leete 等^[22]发明了第一个核磁共振陀螺仪,而导航级核磁共振陀螺仪的研究最开始由美国在 20 世纪 70 年代开启。1979 年,美国 Kearfott 公司和 Litton 公司率先研制出原理样机,零偏稳定性分别达到了 $0.05^\circ/\text{h}$ ^[126] 和 $0.1^\circ/\text{h}$ ^[127]。20 世纪 80 年代末期,由于光学陀螺仪的迅猛发展,核磁共振陀螺仪遭遇技术瓶颈,无法在精度、体积和成本等方面与光学陀螺仪进

行竞争,造成其发展出现停滞。直到 21 世纪,量子技术和微纳加工工艺的快速发展,美国 DARPA 启动了“微 PNT”计划,并于 2012 年在该计划中启动了“C-SCAN”项目^[128],图 23 是其概念图。主要指标包括 IMU 体积小于 20 cm^3 ,冷启动时间小于 10 s,功耗不大于 1 W,测量动态范围超过 $1\ 500^\circ/\text{s}$,加速度和角速度测量目标精度分别为 10^{-6} g 和 $10^{-4}^\circ/\text{h}$,标度因数稳定性达到 1×10^{-6} ^[129]。C-SCAN 项目试图通过组合算法将各种陀螺仪融合成一个整体,优势互补,对导航系统在长期漂移、动态范围和启动时间上的性能进行综合提升。核磁共振陀螺仪作为该计划的核心惯性器件之一再次成为研究热点。

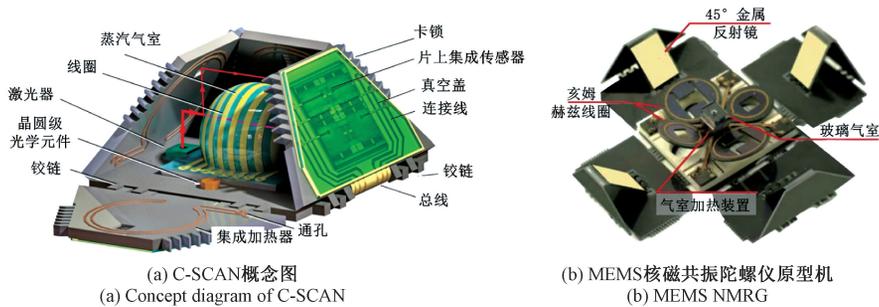


图 23 芯片级组合原子导航仪(C-SCAN)概念图和加州大学欧文分校的 MEMS 核磁共振陀螺仪原型机
Fig. 23 Concept diagram of C-SCAN and MEMS NMRG at UC Irvine

美国诺斯罗普·格鲁曼公司(Northrop Grumman Corporation)从 2005 年开始研制核磁共振陀螺仪,如图 22 所示,历经 4 个阶段,于 2014 年实现了零偏稳定性为 $0.01^\circ/\text{h}$ (美国威斯康星大学麦迪逊分校的 Walker 等^[130]研制的核磁共振仪在 2016 年的报道中:角度随机游走系数为 $0.005^\circ/\text{h}^{1/2}$,零偏稳定性为 $0.02^\circ/\text{h}$,测量带宽和体积分别为 300 Hz 和 10 cm^3 ,其整体指标与诺斯罗普·格鲁曼公司的陀螺仪接近),体积为 5 cm^3 的核磁共振陀螺仪原理样机,并于 2017 年使用该样机搭建了惯性导航系统^[122,129]。它在微机电(micro-electro-mechanical system, MEMS)陀螺仪的体积下实现了光学陀螺仪的精度,功耗更低。此外,NIST 和加州大学欧文分校基于微纳加工技术,利用¹²⁹Xe-⁸⁷Rb 气室研制了表头体积约 $\Phi 1\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ 的 MEMS 核磁共振陀螺仪实验室样机^[131]。

最新研究还包括德国博世公司^[132-133]、俄罗斯圣彼得堡国立信息技术、机械和光学大学(简称圣光机大学)^[134]、俄罗斯联邦国家研究中心^[135]等机构对影响核磁共振陀螺仪零偏稳定性因素的研究工作。

我国从“十二五”计划开始进行核磁共振陀螺仪的研制。目前北京航天控制仪器研究所、北京自动化控制设备研究所、航空 618 所、北京航空航天大学、国防科技大学和北京计算科学研究中心等正在积极投入核磁共振陀螺仪的研究。图 24 展示了北京自动化控制设备研究所从 2013 年~2016 年期间的研究历程,他们于 2016 年研制出角度随机游走系数小于 $0.2^\circ/\text{h}^{1/2}$,零偏稳定性优于 $1^\circ/\text{h}$,体积 50 cm^3 的工程样机^[136-137]。国防科学技术大学自 2014 年研制出了原理样机后,正逐步推进表头和系统的微型化发展^[138-139]。

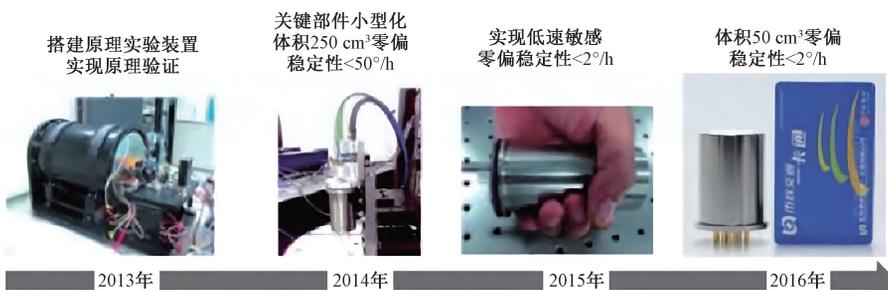


图 24 北京自动化控制设备研究所核磁共振陀螺仪研究历程
Fig. 24 Research history of NMRG in Beijing Institute of Aerospace Control Instruments

2.2 SERF 原子陀螺仪

SERF 原子陀螺仪是基于碱金属原子的电子自旋和惰性气体原子的核自旋检测来实现角速度测量,通过选取碱金属原子的电子自旋角动量 (electron spin angular momentum, ESAM) 和惰性气体原子的原子核自旋角动量 (nuclear spin angular momentum, NSAM) 构成如图 25 所示结构。通过施加偏置补偿磁场使碱金属原子的 ESAM 处于 SERF 态,拥有较长的弛豫时间。当载体感受到外界转动激励时,磁场方向及探测激光方向随转动一起改变,NSAM 感受到磁场方向的变化并随之一起改变方向,而 ESAM 则因受到 NSAM 对磁场的补偿作用而保持原指向不变。因此,探测激光与 ESAM 之间的夹角 α 即反映了转动信息。由于电子旋磁比更大,因此 SERF 陀螺仪的测量精度相较于核磁共振陀螺仪更高,其理论精度可达 $10^{-8}^{\circ}/\text{h}$,在海陆空天等军事领域有比较大的应用潜力^[124]。

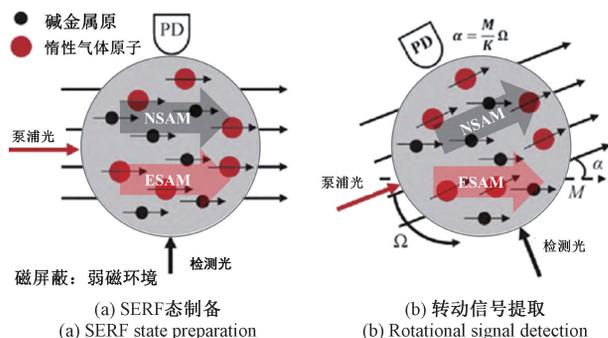


图 25 无自旋交换弛豫原子陀螺仪工作原理

Fig. 25 Working principle of a spin free relaxation atomic gyroscope

21 世纪初期美国普林斯顿大学率先开展 SERF 陀螺仪技术研究,如图 26 所示,该团队搭建了两代实验研究平台。2005 年实现了陀螺仪效应的原理样机^[140],其角度随机游走系数为 $0.002^{\circ}/\text{h}^{1/2}$,零偏稳定性为 $0.04^{\circ}/\text{h}$ 。后来,普林斯顿大学成立了 Twinleaf 公司,用于实现该原理样机的成果转换。2009 年起, DARPA 连续两年资助 Twinleaf 公司,旨在让其研制出高精度、小体积的 SERF 陀螺仪工程样机。2011 年报道的指标是其角度随机游走系数为 $1.8 \times 10^{-7}^{\circ}/\text{h}^{1/2}$,零偏稳定性达到了 $5 \times 10^{-4}^{\circ}/\text{h}$ ^[6]。2016 年,普林斯顿大学以 ^3He 、 ^{129}Xe 和 Rb 为工作物质研制出了耦合磁强计 SERF 核自旋陀螺仪^[141]。2018 年, C-SCAN 项目对普林斯顿大学 Romalis 等^[142]和 Twinleaf 公司进行支持,他们使用直径 10 mm 的球形气室研制出了 SERF 原子陀螺仪,其角度随机游走系数为 $0.025^{\circ}/\text{h}^{1/2}$,零偏稳定性优于 $0.01^{\circ}/\text{h}$ ^[143]。该团队还利用这种高灵敏度原子自旋陀螺仪去尝试寻找暗物质,新的远程力和

永久电偶极矩^[144]。2013 年,法国航空航天实验室也开始了基于 Rb-Xe 原子的 SERF 陀螺仪研究^[145]。此外,美国霍尼韦尔公司还开展了 SERF 陀螺仪的芯片化相关研究^[146]。

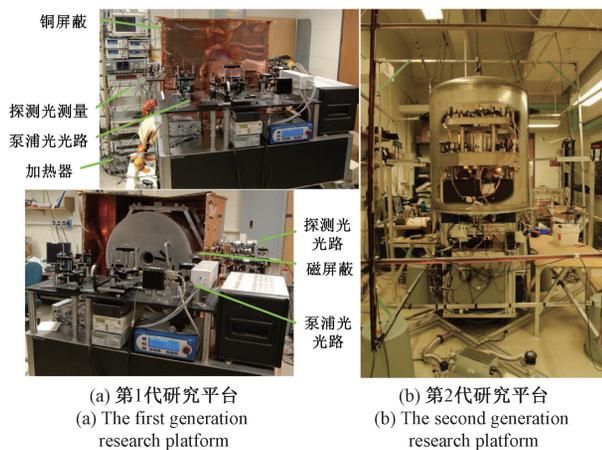


图 26 普林斯顿大学的第一代^[147]和第二代 SERF 陀螺仪研究平台^[148]

Fig. 26 Princeton University's first generation and second generation SERF gyroscope research platform

国内 SERF 原子陀螺仪研究相对较晚。2008 年,北京航空航天大学开始推进 SERF 陀螺仪实验平台的搭建,并于 2019 年研制了原理样机(图 27)。2020 年,该原理样机的零偏稳定性达到 $0.001^{\circ}/\text{h}$ 量级^[149-150]。此外,2016 年,北京航天控制仪器研究所也在实验上验证了 SERF 陀螺仪的工作机制。

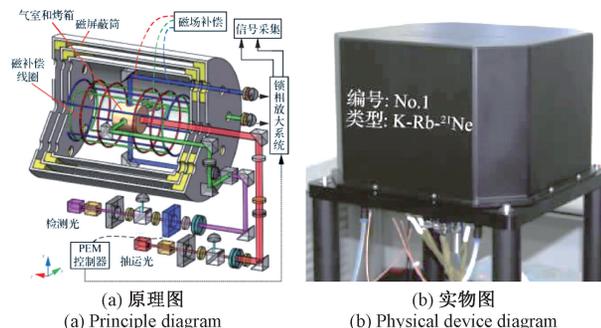


图 27 北京航空航天大学第 1 代 SERF 陀螺仪

Fig. 27 First generation SERF gyroscope at Beijing University of Aeronautics and Astronautics

2.3 金刚石 NV 色心陀螺仪

金刚石 NV (氮-空位) 色心陀螺仪利用惯性转动过程中色心自旋态 (包括氮空位中的核自旋或电子自旋) 累积的几何相位变化,来敏感惯性参量。通过检测射频或微波 Ramsey 脉冲序列后的色心自旋态粒子荧光

强度,可以获取几何相位信息,从而反推出载体相对于惯性空间的角速度变化^[151]。金刚石 NV 色心陀螺仪因其固态自旋密度高和能级结构稳定等特征,不仅具备体积小、环境适应性强和启动迅速等天然优势,而且能够进行多轴测量。这为研究人员提供了崭新的方向,有望克服原子陀螺仪在集成和小型化方面所面临的技术挑战。

2005年,加州大学圣巴巴拉分校的 Epstein 等^[152]证明了 NV 色心对角速率的敏感性。2012年,墨尔本大学的 Hollenberg 团队首次探讨了在 NV 色心量子体系中观察几何相位的可能性,并详细研究了其与宏观转动之间的紧密关联。同年,美国加州大学伯克利分校的 Ledbetter 等^[153]首次提出了基于 NV 色心系综几何相位进行惯性测量的方案。在测量自旋绕对称轴转动导致动力学相位积累方面,麻省理工学院的 Ajoy 等^[154]提出了一种基于射频 Ramsey 脉冲序列的测量方案。即利用金刚石固有的晶向特征来实现三轴角速度矢量的稳定测量。2020年,俄罗斯列贝德夫物理研究所的 Soshenko 等^[155]通过动力学相位成功实现了角速度的测量,这是金刚石色心陀螺仪真正意义上的首次原理验证。

2021年,美国加州大学伯克利分校的 Jarmola 等^[156]和 Zhao 等^[157]展示了一种使用双射频 Ramsey 脉冲序列

实现 NV 色心中核自旋态几何相位读取的陀螺仪方案,实验结果表明其角速度测量灵敏度为 $4.7^\circ/\text{s}^{1/2}$,长期稳定性为 $0.4^\circ/\text{s}$ 。国内的北京航空航天大学、中国空间技术研究院和浙江大学等单位在该方向上也开展了相关研究^[158-159]。

3 研究现状总结与展望

基于原子体系的量子惯性传感器有望在更小体积和更低成本下达到传统惯性传感器的性能,且理论上可以获得比现有技术更高的测量灵敏度和长期稳定性,有可能开启下一代量子惯性导航时代。尽管有前文所述诸多优点,但目前正处于从实验室到现场部署的过渡阶段,依旧面临高成本、尺寸和重量较大、功耗高(cost, size, weight, and power, CSWAP)等一系列问题。不同原理的传感器成熟度相差较大,例如原子干涉重力仪和重力梯度仪已经逐步进入商业化应用。易集成、低功耗和抗振动强的核磁共振陀螺仪目前处于工程样机阶段,集成度最高。而超高精度的原子干涉陀螺仪和 SERF 陀螺仪还处于实验室样机阶段,金刚石 NV 色心陀螺仪目前仅有学术研究价值。表 6 总结了基于原子体系的量子惯性传感器研究现状。

表 6 基于原子体系的量子惯性传感器研究现状总结

Table 6 Summary of research status of the quantum inertial sensor based on the atomic system

类型	实现精度量级	特点/研究现状
原子干涉陀螺仪	$10^{-5}^\circ/\text{h}$	超高精度、成本高、体积大、处于实验室样机阶段
核磁共振陀螺仪	$10^{-2}^\circ/\text{h}$	精度高、体积小、成本低、动态范围大、处于工程样机阶段
无自旋交换弛豫陀螺仪	$10^{-4}^\circ/\text{h}$	超高精度、带宽较小、技术难度大、处于实验室样机阶段
金刚石 NV 色心陀螺仪	$10^3^\circ/\text{h}$	体积小、启动快、处于学术研究阶段
原子干涉重力仪	$1 \mu\text{Gal}$	超高精度、集成度高、成本高、开始商业应用
原子干涉重力梯度仪	1 E	超高精度、成本高、无法全量程测量、初步商业应用
原子干涉加速度计	10^{-8} g	超高精度、体积大、成本高、处于实验室样机阶段

注: $1 \mu\text{Gal} \approx 10^{-9} \text{ g}$; $1 \text{ E} = 10^{-9} \text{ s}^{-2}$

该领域的研究现状还体现在如下 4 个主要方面:

1) 工程化应用阶段面临竞争。目前,基于原子体系的量子惯性传感器的应用主要集中在一些需要极高精度的计量问题或基础物理问题探究上,若要真正进入国防应用,除了上述提到的 CSWAP,还必须要动态范围、带宽、重复率、可移植性、可靠性和生存性等方面都达到在恶劣环境中使用所需要的技术成熟水平,并且实质性的超过正在使用和不断进步的另外几种相互竞争技术。例如,法国赛峰集团开发的 HRG 系列产品,不仅能针对空间和国防应用,还针对商业海洋市场,商业客机,甚至便携式应用,如手持式红外双筒望远镜。他们在 2018 年的

一篇论文中宣称:“HRG 技术不仅可以取代激光陀螺仪和光纤陀螺仪,还可以取代电悬浮陀螺仪和实现终极性能的冷原子干涉陀螺仪”^[160]。NASA 用来替换哈勃望远镜上老旧机械陀螺仪的 HRG 陀螺仪随机游走系数和零偏稳定性的报道指标为 $1 \times 10^{-5}^\circ/\text{h}^{1/2}$ 和 $8 \times 10^{-5}^\circ/\text{h}^{1/2}$ ^[161]。下一代伽利略卫星中考考虑部署的意大利三轴弹簧加速度计 ISA,它的尺寸和重量仅为 $300 \text{ mm} \times 170 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 和 6 kg ,峰值功率为 12 W ,虽然其目前精度为 10^{-9} g ($1 \mu\text{Gal}$),但预计可以提高到伽利略卫星所需的 $0.1 \mu\text{Gal}$ 水平^[7]。另外,2023 年 5 月 22 日,美国 ANELLO Photonics 公司推出了基于全球最小芯片光学陀螺仪的惯性导航系统,产品稳

健可靠,价格便宜,适用于长期 GPS 拒止环境下的导航和定位,无辅助航向零偏小于 $0.5^\circ/\text{h}^{[162]}$ 。除此之外,近年来出现的光力学加速度计具有精度高和微型化的潜力,也是下一代加速计的研究热点之一^[163]。

2) 外场动态测量技术有待突破。DARPA 在 2011 年制定了“高动态范围原子传感器 (high dynamic range atomic sensors, HiDRA)”计划,目标是提高冷原子 IMU 动态范围并将其应用到各类军事装备平台(例如飞机、舰艇和导弹)。目前,基于原子干涉式的惯性传感器正在突破外场动态测量和环境适应性等关键技术,但也面临一些棘手问题,例如现有原子干涉仪原理无法同时兼顾高动态范围、高带宽和高精度测量,当角速度和加速度过大时会导致条纹对比度剧烈下降,减小干涉时间则会直接降低测量精度。一种解决方案是通过与传统惯性传感器组合来确保精度的同时增加带宽,拓展动态测量范围。另外,动态环境引起的原子团温度、抛射速度、激光功率和磁场分布抖动都会使得拉曼光脉冲与原子相互作用效率降低。而通过量子最优控制方法来优化拉曼光脉冲序列是提高系统对环境噪声鲁棒性的一种可能解决方案^[164-166]。除此之外,目前外场实验较为成功的都是单轴方向测量,受系统姿态等因素的影响可以通过传统加速度计、测倾仪和气压计等外部传感器来预测和补偿,但多轴测量导致的各类噪声耦合将会比较复杂,这方面的工作还很少报道。

3) 系统化集成方案与工艺还需探索。尽管美国的 C-SCAN 和 A-PHI 大大推动了原子惯性传感器的微型化发展。但其进一步实用需要激光器、光学系统和真空系统等协同发展。目前,针对原子干涉仪中的核心部件磁光阱已经出现了包括反射镜金字塔结构和光栅结构在内的多种小型化方案。而通过创新方案设计和微纳工艺突破,开发一种包含所需全部光学元器件的光子集成电路芯片来实现更紧凑、更稳定的便捷式高性能激光系统是可能的^[167]。目前,光子-原子芯片领域的研究还处于探索阶段,仍存在一系列科学技术难题亟待解决。例如:对于环形导引原子芯片陀螺仪,理论上需要深入研究原子芯片上的各类原子损耗、热噪声及相干性问题,而在芯片设计与实现技术层面,一方面需要设计更优的方案,能够在理论上实现高密度 BEC 的囚禁与相干操控,另一方面还需要开发微米尺度甚至纳米尺度的原子芯片新工艺、解决微纳尺度结构的精准构造、纳米尺度薄膜的高精度制备以及多层芯片间微结构的对准等工艺技术,探索原子光学器件混合集成或者单片集成技术以及封装互联技术。

4) 国内外技术水平还存在一定差距。在空间型原子干涉式惯性传感器领域,国内静态技术指标已经处于世界第一梯队,而国内外在外场动态测量方向上都处

于起步阶段。但以光电探测芯片、激光器芯片和离子泵为代表的核心元器件还难以完全自主可控。另外,国内在基于原子芯片的惯性传感器研究领域,相关研究报道较少。基于自旋式的原子陀螺仪,国内的研究大多还处于实验室样机阶段,在系统性能、体积和成本等方面还需努力追赶国际先进水平。而美国诺斯罗普·格鲁曼公司的核磁共振陀螺技术逐渐发展和成熟,已研制出面向军事领域的微小型导航级核磁共振陀螺仪。国内在核心技术和关键部件的差距主要表现在以下两个方面:1) 在自旋噪声机理、磁屏蔽技术、长弛豫时间原子气室制备技术、原子极化及稳定控制技术和 SERF 态闭环操控技术等关键技术方面的研究不够系统^[4];2) 在微小型高性能原子气室制备、微小型磁屏蔽制备、微小型器件精密制造与集成和高性能半导体激光研制等相关工艺技术方面基础薄弱,与先进水平有较大差距^[4]。

展望未来,原子惯性传感器未来的发展趋势依旧是小型化和高精度,通过微纳加工工艺和集成电路制造技术,开发便携式光电集成电路替代原先的空间光学组件,将原子操控装置微型化甚至实现片上集成,从而实现紧凑型、低功耗、高精度和稳定的原子惯性传感器^[6]。另外,利用多种惯性传感器进行组合导航,充分利用其不同的优势以提高整体系统性能,也是未来的发展方向之一。量子压缩与纠缠、多光子大动量转移^[168]和光晶格囚禁^[169-170]等前沿量子技术的发展和引入有望更进一步提升原子惯性传感器的测量性能并拓宽其应用领域。

4 结 论

本文简要介绍了基于原子体系的量子惯性传感器的基本原理,总结了以原子干涉陀螺仪、原子自旋陀螺仪、原子干涉加速度计、原子干涉重力仪和重力梯度仪为主的量子惯性传感器在国内外的发展历程和研究现状,客观指出各类传感器的性能特点,并对有待解决的关键技术问题进行了梳理和分析,提出了一些解决思路和途径,可为量子惯性传感器的发展提供参考。

参考文献

- [1] YANG Y, LI X. Micro-PNT and comprehensive PNT[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46 (10): 1249-1254.
- [2] 陈冻侃, 陈帅, 潘建伟. 原子干涉技术在惯性领域中的应用[J]. 导航与控制, 2020, 19 (Z1): 29-40.
CHEN L K, CHEN SH, PAN J W. Atomic interference-based quantum technology and its application for inertial navigation[J]. Navigation and Control, 2020, 19 (Z1): 29-40.

- [3] 张旭, 颜树华, 朱凌晓, 等. 冷原子干涉型量子传感器在导航应用中的研究现状[C]. 第十届中国卫星导航年会, 2019: 105-109.
ZHANG X, YAN SH H, ZHU L X, et al. Research status of cold atom interferometric quantum sensors in navigation applications [C]. The 10th China Satellite Navigation Annual Conference, 2019: 105-109.
- [4] 刘院省, 阚宝玺, 石猛, 等. 原子陀螺仪技术研究进展[J]. 第四届航天电子战略研究论坛论文集(新型惯性器件专刊), 2018, 63: 4-11,17.
LIU Y X, KAN B X, SHI M, et al. Research progress in atomic gyroscope technology [J]. Proceedings of the Fourth Aerospace Electronics Strategic Research Forum (Special Issue on New Inertial Devices), 2018, 63: 4-11,17.
- [5] 邹鹏飞, 颜树华, 林存宝, 等. 冷原子干涉陀螺仪在惯性导航领域的研究现状及展望[J]. 现代导航, 2013, 4(4): 263-269.
ZOU P F, YAN SH H, LIN C B, et al. Research status and prospects of cold atom interferometry gyroscope in inertial navigation fields[J]. Modern Navigation, 2013, 4(4): 263-269.
- [6] 骆曼箬, 李绍良, 黄艺明, 等. 原子陀螺研究进展及展望[J]. 测控技术, 2023,42(10): 1-10.
LUO M ZH, LI SH L, HUANG Y M, et al. Review and prospect of atomic gyroscope development [J]. Measurement and Control Technology, 2023, 42(10): 1-10.
- [7] TRAVAGNIN M. Cold atom interferometry for inertial navigation sensors [R]. Publ. Office of EU, Luxembourg, 2020.
- [8] MAHADESWARASWAMY C. Atom interferometric gravity gradiometer: Disturbance compensation and mobile gradiometry [D]. Silicon Valley: Stanford University, 2009.
- [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] DUTTA I, SAVOIE D, FANG B, et al. Continuous cold-atom inertial sensor with 1 nrad/sec rotation stability[J]. Physical Review Letters, 2016, 116 (18): 183003.
- [11] FIXLER J B, FOSTER G T, MCGUIRK J M, et al. Atom interferometer measurement of the Newtonian constant of gravity[J]. Science, 2007, 315 (5808): 74-77.
- [12] YU C, ZHONG W, ESTEY B, et al. Atom-interferometry measurement of the fine structure constant [J]. Annalen der Physik, 2019, 531 (5): 1800346.
- [13] ASENBAUM P, OVERSTREET C, KIM M, et al. Atom-interferometric test of the equivalence principle at the 10^{-12} level [J]. Physical Review Letters, 2020, 125 (19): 191101.
- [14] DIMOPOULOS S, GRAHAM P W, HOGAN J M, et al. Atomic gravitational wave interferometric sensor [J]. Physical Review D, 2008, 78 (12): 122002.
- [15] TINO G M. Testing gravity with cold atom interferometry: Results and prospects [J]. Quantum Science and Technology, 2021, 6 (2): 024014.
- [16] GUSTAVSON T L. Precision rotation sensing using atom interferometry[D]. Silicon Valley: Stanford University, 2000.
- [17] 郑盟锬, 尤力. 能够突破标准量子极限的原子双数态的制备研究[J]. 物理学报, 2018, 67 (16): 160303.
ZHENG M K, YOU L. Generation of twin-fock states for precision measurement beyond the standard quantum limit[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67 (16): 160303.
- [18] HÖSCHELE J, BUOB S, RUBIO-ABADAL A, et al. Atom-number enhancement by shielding atoms from losses in strontium magneto-optical traps [J]. Physical Review Applied, 2023, 19 (6): 064011.
- [19] ZHANG Y, LIU Q X, SUN J F, et al. Enhanced cold mercury atom production with two-dimensional magneto-optical trap [J]. Chinese Physics B, 2022, 31 (7): 073701.
- [20] SZIGETI S S, HOSTEN O, HAINE S A. Improving cold-atom sensors with quantum entanglement: Prospects and challenges [J]. Applied Physics Letters, 2021, 118 (14): 140501.
- [21] SAVOIE D, ALTORIO M, FANG B, et al. Interleaved atom interferometry for high-sensitivity inertial measurements [J]. Science Advances, 2018, 4 (12): eaau7948.
- [22] ZHANG C, YUAN H, TANG Z, et al. Inertial rotation measurement with atomic spins: From angular momentum conservation to quantum phase theory [J]. Applied Physics Reviews, 2016, 3 (4): 041305.
- [23] PASSARO V M, CUCCOVILLO A, VAIANI L, et al. Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective [J]. Sensors, 2017, 17 (10):

- 2284.
- [24] GUSTAVSON T, BOUYER P, KASEVICH M J P R L. Precision rotation measurements with an atom interferometer gyroscope [J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78 (11): 2046.
- [25] GUSTAVSON T, LANDRAGIN A, KASEVICH M J C, et al. Rotation sensing with a dual atom-interferometer Sagnac gyroscope [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2000, 17 (12): 2385.
- [26] GUSTAVSON T L. Cold atom gyros [C]. *IEEE Sensors 2013 Tutorial*, 2013.
- [27] DURFEE D, SHAHAM Y, KASEVICH M J P R L. Long-term stability of an area-reversible atom-interferometer Sagnac gyroscope [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97 (24): 240801.
- [28] TAKASE K. Precision rotation rate measurements with a mobile atom interferometer [D]. *Silicon Valley: Stanford University*, 2008.
- [29] SURIANO M A. Robust technology to augment or replace the US reliance on the global positioning system [R]. *Air War College Air University Maxwell AFB United States*, 2011.
- [30] CANUEL B, LEDUC F, HOLLEVILLE D, et al. Six-axis inertial sensor using cold-atom interferometry [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97: 010402.
- [31] GEIGER R, LANDRAGIN A, MERLET S, et al. High-accuracy inertial measurements with cold-atom sensors [J]. *AVS Quantum Science*, 2020, 2 (2): 024702.
- [32] 孟至欣, 颜培强, 王圣哲, 等. 原子干涉陀螺仪研究现状与分析 [J]. *导航与控制*, 2022, 21 (5): 19-32. MENG ZH X, YAN P Q, WANG SH ZH, et al. Research status and analysis of atom interference gyroscope [J]. *Navigation and Control*, 2022, 21 (5): 19-32.
- [33] 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: 273-281.
- [34] BERG P, ABEND S, TACKMANN G, et al. Composite-light-pulse technique for high-precision atom interferometry [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114 (6): 063002.
- [35] PATIL Y, CHEUNG H, BHAVE S, et al. System design of a cold atom gyroscope based on interfering matter-wave solitons [C]. *2020 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, 2020: 1-4.
- [36] KWOLEK J, FANCHER C, BASHKANSKY M, et al. Three-dimensional cooling of an atom-beam source for high-contrast atom interferometry [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13 (4): 044057.
- [37] CHEN Y J, HANSEN A, HOTH G W, et al. Single-source multi-axis cold-atom interferometer in a centimeter-scale cell [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12 (1): 014019.
- [38] 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.
- [39] CANCIANI A, RAQUET J. Integration of cold-atom interferometry INS with other sensors [C]. *Proceedings of the 2012 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, 2012: 151-185.
- [40] LAUTIER J, VOLODIMER L, HARDIN T, et al. Hybridizing matter-wave and classical accelerometers [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105: 144102.
- [41] BONNIN A, DIBOUNE C, ZAHZAM N, et al. New concepts of inertial measurements with multi-species atom interferometry [J]. *Applied Physics B*, 2018, 124: 1-8.
- [42] YANKELEV D, AVINADAV C, DAVIDSON N, et al. Atom interferometry with thousand-fold increase in dynamic range [J]. *Science Advances*, 2020, 6 (45): eabd0650.
- [43] YAO Z W, CHEN H H, LU S B, et al. Self-alignment of a large-area dual-atom-interferometer gyroscope using parameter-decoupled phase-seeking calibrations [J]. *Physical Review A*, 2021, 103 (2): 023319.
- [44] MENG Z X, YAN P Q, WANG S Z, et al. Closed-loop dual-atom-interferometer Inertial sensor with continuous cold atomic beams [J]. *ArXiv Preprint*, 2022, ArXiv: 2210.15346.
- [45] XU W J, CHENG L, LIU J, et al. Effects of wave-front tilt and air density fluctuations in a sensitive atom interferometry gyroscope [J]. *Optics Express*, 2020, 28 (8): 12189-12200.
- [46] ZHAO Y, YUE X, CHEN F, et al. Extension of the rotation-rate measurement range with no sensitivity loss in a cold-atom gyroscope [J]. *Physical Review A*, 2021, 104 (1): 013312.

- [47] ZHANG L, GAO W, LI Q, et al. A novel monitoring navigation method for cold atom interference gyroscope[J]. *Sensors*, 2019, 19 (2): 222.
- [48] 陈红辉, 姚战伟, 陆泽茜, 等. 可搬运高精度原子干涉陀螺仪[J]. *导航与控制*, 2022, 21: 42-50.
CHEN H H, YAO ZH W, LU Z Q, et al. Transportable high-precision atom-interferometer gyroscope [J]. *Navigation and Control*, 2022, 21:42-50.
- [49] 李沫, 陈飞良, 罗小嘉, 等. 原子芯片的基本原理, 关键技术及研究进展[J]. *物理学报*, 2021, 70 (2): 023701.
LI M, CHEN F L, LUO X J, et al. Basic principles, key technologies, and research progress of atomic chips[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70 (2): 023701.
- [50] 刘爱萍, 陈广杰, 陈梁, 等. 集成光子-原子芯片的研究进展(特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51 (5): 0551302.
LIU AI P, CHEN G J, CHEN L, et al. Advances in integrated photonic-atom chips (invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51 (5): 0551302.
- [51] HORNE R, SACKETT C. A cylindrically symmetric magnetic trap for compact bose-einstein condensate atom interferometer gyroscopes [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88 (1): 013102.
- [52] MOAN E, HORNE R, ARPORNTHIP T, et al. Quantum rotation sensing with dual Sagnac interferometers in an atom-optical waveguide [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124 (12): 120403.
- [53] GARRIDO ALZAR C L. Compact chip-scale guided cold atom gyroscopes for inertial navigation: Enabling technologies and design study [J]. *AVS Quantum Science*, 2019, 1 (1): 014702.
- [54] KEIL M, AMIT O, ZHOU S, et al. Fifteen years of cold matter on the atom chip: Promise, realizations, and prospects [J]. *Journal of Modern Optics*, 2016, 63 (18): 1840-1885.
- [55] ABEND S, GEBBE M, GERSEMANN M, et al. Atom-chip fountain gravimeter[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117 (20): 203003.
- [56] ZATEZALO A, VULETIC V, BAKER P, et al. Bose-Einstein interferometry and its applications to precision undersea navigation [C]. *2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, 2008: 940-950.
- [57] 程俊. 导引型原子芯片陀螺仪的研究进展及其小型化[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- CHENG J. Research progress and miniaturization of guided atomic chip gyroscopes[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [58] GEIGER R, MÉNORET V, STERN G, et al. Detecting inertial effects with airborne matter-wave interferometry[J]. *Nature Communications*, 2011, 2 (1): 474.
- [59] THOM J, PICKEN C, MALCOLM J, et al. Commercial quantum sensors using atom interferometry and laser sources for precision metrology [C]. *Optical and Quantum Sensing and Precision Metrology*, 2021, 11700: 1170007.
- [60] BIEDERMANN G, MCGUINNESS H, RAKHOLIA A, et al. Atom interferometry in a warm vapor[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118 (16): 163601.
- [61] BATTELIER B, BARRETT B, FOUCHÉ L, et al. Development of compact cold-atom sensors for inertial navigation[C]. *Quantum Optics*, 2016: 21-37.
- [62] 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.
- [63] MCDONALD G, KEAL H, ALTIN P, et al. Optically guided linear Mach-Zehnder atom interferometer [J]. *Physical Review A*, 2013, 87 (1): 013632.
- [64] XIN M, LEONG W S, CHEN Z, et al. An atom interferometer inside a hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Science Advances*, 2018, 4 (1): e1701723.
- [65] ROGERS M M, HUFFMAN R E, SHEARER C M. An investigation into the feasibility of using a modern gravity gradiometer instrument for passive aircraft navigation and terrain avoidance [C]. *Proceedings of the 2009 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, 2009: 49-60.
- [66] 邵哲明, 尹业宏. 原子干涉技术在惯性导航领域的进展[J]. *光学与光电技术*, 2017, 15 (4): 90-94.
SHAO ZH M, YIN Y H. Progress of atom interference in navigation[J]. *Optics and Optoelectronics Technology*, 2017, 15 (4): 90-94.
- [67] XIONG L, MA J, ZHANG L, et al. Submarine navigation based on gravity gradient-terrain matching[C]. *MIPPR 2007: Remote Sensing and GIS Data Processing and Applications, and Innovative Multispectral Technology and Applications*, 2007: 1239-1244.
- [68] GLEASON, DAVID M. Passive airborne navigation and

- terrain avoidance using gravity gradiometry[J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1995, 18 (6): 1450-1458.
- [69] DEGREGORIA A J. Gravity gradiometry and map matching: An aid to aircraft inertial navigation systems[D]. Dayton: Air Force Institute of Technology, 2010.
- [70] KASEVICH M, CHU S J A P B. Measurement of the gravitational acceleration of an atom with a light-pulse atom interferometer[J]. *Applied Physics B*, 1992, 54: 321-332.
- [71] PETERS A, CHUNG K Y, CHU S J M. High-precision gravity measurements using atom interferometry [J]. *Metrologia*, 2001, 38 (1): 25.
- [72] TRAVAGNIN M. Cold atom interferometry sensors: Physics and technologies [R]. Publ. Office of EU, Luxembourg, 2020.
- [73] MÜLLER H, CHIOU S W, HERRMANN S, et al. Atom-interferometry tests of the isotropy of post-Newtonian gravity[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100 (3): 031101.
- [74] XU Y Y, CUI J F, QI K, et al. Evaluation of the transportable atom gravimeter HUST-QG[J]. *Metrologia*, 2022, 59 (5): 055001.
- [75] GILLOT P, FRANCIS O, LANDRAGIN A, et al. Stability comparison of two absolute gravimeters: Optical versus atomic interferometers [J]. *Metrologia*, 2014, 51 (5): L15-L17.
- [76] LOUCHET-CHAUVET A, FARAH T, BODART Q, et al. The influence of transverse motion within an atomic gravimeter[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13 (6): 065025.
- [77] FREIER C, HAUTH M, SCHKOLNIK V, et al. Mobile quantum gravity sensor with unprecedented stability[C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016: 012050.
- [78] 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.
- [79] ZHANG X, ZHONG J, TANG B, et al. Compact portable laser system for mobile cold atom gravimeters[J]. *Applied Optics*, 2018, 57 (22): 6545-6551.
- [80] HUANG P W, TANG B, CHEN X, et al. Accuracy and stability evaluation of the ^{85}Rb atom gravimeter WAG-H5-1 at the 2017 International Comparison of Absolute Gravimeters[J]. *Metrologia*, 2019, 56 (4): 045012.
- [81] FU Z, WANG Q, WANG Z, et al. Participation in the absolute gravity comparison with a compact cold atom gravimeter[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17 (1): 011204.
- [82] ZHU D, ZHOU Y, WU B, et al. Metrological traceability method for atomic absolute gravimeters[J]. *Applied Optics*, 2021, 60 (26): 7910-7920.
- [83] 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.
- [84] WU X, PAGEL Z, MALEK B S, et al. Gravity surveys using a mobile atom interferometer [J]. *Science Advances*, 2019, 5 (9): eaax0800.
- [85] 李期学. 车载冷原子干涉绝对重力测量技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2023.
- LI Q X. Research on absolute gravity measurement technology by developing a vehicle-mounted cold atom interferometry gravimeter [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2023.
- [86] 王凯楠, 徐晗, 周寅, 等. 基于车载原子重力仪的外场绝对重力快速测绘研究[J]. *物理学报*, 2022, 71 (15): 159101.
- WANG K N, XU H, ZHOU Y, et al. Study on rapid mapping of outfield absolute gravity based on vehicle atomic gravimeter [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71 (15): 159101.
- [87] 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: 115223.
- [88] KASEVICH M. Precision navigation sensors based on atom interferometry [C]. *Frontiers in Optics*. Optica Publishing Group, 2003: Tu11.
- [89] MÉNORET 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: 12300.
- [90] 邓小兵, 徐文杰, 程源, 等. 小型化原子重力仪及应用[J]. *导航与控制*, 2022, 21: 66-79.
- DENG X B, XU W J, CHENG Y, et al. Miniaturized atomic gravimeter and its application[J]. *Navigation and Control*, 2022, 21: 66-79.
- [91] 车浩, 李安, 方杰, 等. 基于冷原子重力仪的船载动态绝对重力测量实验研究[J]. *物理学报*, 2022, 71:

113701.
CHEN H, LI AN, FANG J, et al. Experimental study on shipborne dynamic absolute gravity measurement based on cold atomic gravimeter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71: 113701.
- [92] DONG Z, HAN X, YIN Z, et al. Data processing of shipborne absolute gravity measurement based on extended Kalman filter algorithm [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71 (13): 133702.
- [93] BING C, PEI-JUN C, YIN Z, et al. Experiment on dynamic absolute gravity measurement based on cold atom gravimeter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71 (2): 026701.
- [94] GUO J, MA S, ZHOU C, et al. Vibration compensation for a vehicle-mounted atom gravimeter[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22 (13): 12939-12946.
- [95] BIDE L Y, ZAHZAM N, BLANCHARD C, et al. Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry[J]. *Nature Communications*, 2018, 9 (1): 627.
- [96] BIDE L Y. Shipborne cold atomic gravimeter[D]. Paris: Paris Sackley University, 2020.
- [97] BIDE L Y, ZAHZAM N, BRESSON A, et al. Absolute airborne gravimetry with a cold atom sensor[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94: 1-9.
- [98] LI D, HE W, SHI S, et al. Review of atom chips for absolute gravity sensors[J]. *Sensors*, 2023, 23 (11): 5089.
- [99] LEE J B. FALCON gravity gradiometer technology[J]. *ASEG Extended Abstracts*, 2001 (1): 1-4.
- [100] TOUBOUL P, FOULON B, RODRIGUES M, et al. In orbit nano-g measurements, lessons for future space missions [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2004, 8 (5): 431-441.
- [101] MOODY M V, PAIK H J, CANAVAN E R. Three-axis superconducting gravity gradiometer for sensitive gravity experiments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73 (11): 3957-3974.
- [102] SNADDEN M, MCGUIRK J, BOUYER P, et al. Measurement of the Earth's gravity gradient with an atom interferometer-based gravity gradiometer[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81 (5): 971.
- [103] LANE R. Airborne gravity 2010: Abstracts from the ASEG-PESA airborne gravity 2010 workshop [M]. Geoscience Australia and the Geological Survey of New South Wales, 2004.
- [104] 涂良成, 黄祥青, 李祝, 等. 旋转加速度计重力梯度仪及其关键技术分析[C]. 中国地球科学联合学术年会, 2014 .
TU L CH, HUANG X Q, LI ZH, et al. Analysis of rotating accelerometer gravity gradiometer and its key technologies[C]. *China Earth Science Joint Academic Annual Meeting*, 2014.
- [105] 张伦东, 孙付平. 旋转加速度计式重力梯度仪关键技术进展及分析[J]. *测绘科学技术*, 2021, 9 (1): 26-39.
ZHANG L D, SUN F P. The key technologies development and analysis of rotating accelerometer gravity gradiometer [J]. *Geomatics Science and Technology*, 2021, 9 (1): 26-39.
- [106] SNADDEN M, MCGUIRK J, BOUYER P, et al. Measurement of the Earth's gravity gradient with an atom interferometer-based gravity gradiometer[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81 (5): 971.
- [107] MCGUIRK J M, FOSTER G, FIXLER J, et al. Sensitive absolute-gravity gradiometry using atom interferometry [J]. *Physical Review A*, 2002, 65 (3): 033608.
- [108] BIEDERMANN G, WU X, DESLAURIERS L, et al. Testing gravity with cold-atom interferometers [J]. *Physical Review A*, 2015, 91 (3): 033629.
- [109] 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.
- [110] SORRENTINO F, BODART Q, CACCIAPUOTI L, et al. Sensitivity limits of a Raman atom interferometer as a gravity gradiometer[J]. *Physical Review A*, 2014, 89 (2): 023607.
- [111] JANVIER C, MÉNORET V, DESRUELLE B, et al. Compact differential gravimeter at the quantum projection-noise limit[J]. *Physical Review A*, 2022, 105 (2): 022801.
- [112] LYU W, ZHONG J Q, ZHANG X W, et al. Compact high-resolution absolute-gravity gradiometer based on atom interferometers [J]. *Physical Review Applied*, 2022, 18 (5): 054091.
- [113] STRAY B, LAMB A, KAUSHIK A, et al. Quantum sensing for gravity cartography[J]. *Nature*, 2022, 602 (7898): 590-594.

- [114] 徐炜豪, 吕伟, 仲嘉琪, 等. 原子干涉重力梯度仪发展现状与分析[J]. 导航与控制, 2022, 21 : 80-90.
XU W H, LYU W, ZHONG J Q, et al. Development status and analysis of gravity gradiometer based on atomic interferometer [J]. Navigation and Control, 2022, 21: 80-90.
- [115] 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: 18-29.
YANG G D, WENG K X, WU B, et al. Research progress of quantum gravity gradiometer[J]. Navigation Positioning and Timing, 2021, 8: 18-29.
- [116] 宋宏伟. 冷原子重力梯度仪发展现状及趋势[J]. 光学与光电技术, 2023, 21: 1-14.
SONG H W. Development status and trend of cold atomic gravity gradiometer[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2023, 21: 1-14.
- [117] BROWN D, MAUSER L, YOUNG B, et al. Atom interferometric gravity sensor system [C]. Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, 2012: 30-37.
- [118] RAKHOLIA A, SUGARBAKER A, BLACK A, et al. Development of an atom interferometer gravity gradiometer for Earth sciences [C]. APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics Meeting Abstracts, 2017: K1-010.
- [119] KOTRU K, BUTTS D L, KINAST J M, et al. Large-area atom interferometry with frequency-swept Raman adiabatic passage [J]. Physical Review Letters, 2015, 115 (10): 103001.
- [120] TINO G M, BASSI A, BIANCO G, et al. SAGE: A proposal for a space atomic gravity explorer [J]. The European Physical Journal D, 2019, 73 (11): 1-20.
- [121] TRIMECHE A, BATTELLIER B, BECKER D, et al. Concept study and preliminary design of a cold atom interferometer for space gravity gradiometry [J]. Classical and Quantum Gravity, 2019, 36 (21): 215004.
- [122] LARSEN M, BULATOWICZ M. Nuclear magnetic resonance gyroscope: For DARPA's micro-technology for positioning, navigation and timing program [C]. 2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings, 2012: 1-5.
- [123] TAZARTES D. An historical perspective on inertial navigation systems [C]. 2014 International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS), 2014 : 1-5.
- [124] 石猛, 阚宝玺, 刘院省, 等. SERF 陀螺仪研究进展及关键技术 [J]. 导航与控制, 2016, 15 (4): 103-107.
SHI M, KAN B X, LIU Y X, et al. Research progress and the key technology of SERF gyroscope [J]. Navigation and Control, 2016, 15 (4): 103-107.
- [125] RIEDRICH-MÖLLER J. Atomic gyroscopes for precise positioning [C]. Quantum Sensing with Hot Vapors Symposium 21st, 2022.
- [126] GROVER B C, KANEGBERG E, MARK J G, et al. Nuclear magnetic resonance gyro [P]. Google Patents, 1979.
- [127] GREENWOOD I. NMRG with unequal fields [P]. US Patent, 1979.
- [128] SHKEL A M. The chip-scale combinatorial atomic navigator [J]. GPS World, 2013, 24 (8): 8-10.
- [129] 陈颖, 刘占超, 刘刚. 核磁共振陀螺仪研究进展 [J]. 控制理论与应用, 2019, 36 (7): 1017-1023.
CHEN Y, LIU ZH CH, LIU G. Advances in nuclear magnetic resonance gyroscope [J]. Control Theory and Applications, 2019, 36 (7): 1017-1023.
- [130] WALKER T G, LARSEN M S. Spin-exchange-pumped NMR gyros [M]. Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics, Elsevier, 2016: 373-401.
- [131] NOOR R M, GUNDETI V, SHKEL A M. A status on components development for folded micro NMR gyro [C]. 2017 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2017: 156-159.
- [132] CIPOLLETTI R, RIEDRICH-MOELLER J, FUCHS T, et al. Modeling of the transient behavior of a nuclear magnetic resonance gyroscope [C]. 2021 IEEE Sensors, 2021: 1-4.
- [133] RIEDRICH-MÖLLER J, CIPOLLETTI R, SCHMID M, et al. Nuclear spin precession in MEMS vapour cell-key element of a nuclear magnetic resonance gyroscope [C]. European Quantum Electronics Conference, 2021.
- [134] ZAVITAEV A, EVSTIFEEV M. Estimation of the nuclear magnetic gyroscope sensitivity to inertial influences [C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022: 012014.
- [135] CHALKOV V, SHEVCHENKO A. Experimental study of nuclear gyro bias compensation using the quality factor estimation [C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022: 012012.

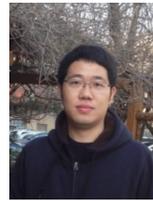
- [136] WAN S, SUN X, ZHENG X. Prospective development of nuclear magnetic resonance gyroscope[J]. *Navigation Positioning & Timing*, 2017, 4 (1): 7-13.
- [137] 万双爱, 孙晓光, 郑辛, 等. 核磁共振陀螺技术发展展望[J]. *导航定位与授时*, 2017, 4 (1): 7-13.
WAN SH AI, SUN X G, ZHENG X, et al. Prospective development of nuclear magnetic resonance gyroscope[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2017, 4 (1): 7-13.
- [138] WANG Z, YUAN B, ZHAO H, et al. Optically pumped NMR oscillator based on ^{131}Xe nuclear spins[J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2021, 326: 106959.
- [139] WANG Z, PENG X, ZHANG R, et al. Single-species atomic comagnetometer based on ^{87}Rb atoms [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124 (19): 193002.
- [140] KORNACK T, GHOSH R, ROMALIS M V. Nuclear spin gyroscope based on an atomic comagnetometer[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95 (23): 230801.
- [141] LIMES M, SHENG D, ROMALIS M. A $^3\text{He}-^{129}\text{Xe}$ comagnetometer with ^{87}Rb magnetometry [C]. *APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics Meeting Abstracts*, 2016: K1. 178.
- [142] LIMES M, SHENG D, ROMALIS M V. $^3\text{He}-^{129}\text{Xe}$ comagnetometry using ^{87}Rb detection and decoupling[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120 (3): 033401.
- [143] ROMALIS M, KORNACK T. Chip-scale combinatorial atomic navigator (C-SCAN) low drift nuclear spin gyroscope[R]. *Princeton University Princeton United States*, 2018.
- [144] JACKSON KIMBALL D F. Spin gyroscope is ready to look for new physics[J]. *Physics*, 2018, 11: 5.
- [145] RENON G, ZAHZAM N, BIDEL Y, et al. A nuclear-electronic spin gyro-comagnetometer[C]. *APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics Meeting Abstracts*, 2014: M6. 002.
- [146] LUST L M, YOUNGNER D W. Chip scale atomic gyroscope[P]. *US Patent*, 2008.
- [147] VASILAKIS G. Precision measurements of spin interactions with high density atomic vapors [M]. *Princeton University*, 2011.
- [148] BROWN J M. A new limit on lorentz-and cpt-violating neutron spin interactions using a potassium-helium comagnetometer[M]. *Princeton University*, 2011.
- [149] JIANG L, QUAN W, LI R, et al. A parametrically modulated dual-axis atomic spin gyroscope[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112 (5): 054103.
- [150] 房建成, 魏凯, 江雷, 等. 超高灵敏极弱磁场与惯性测量科学装置与零磁科学展望[J]. *航空学报*, 2022, 43 (10): 306-332.
FANG J CH, WEI K, JIANG L, et al. Ultra-sensitive extremely weak magnetic field and inertial measurement scientific equipment and zero magnetic science prospect[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43 (10): 306-332.
- [151] 范鹏程, 李铭心, 卞国栋, 等. 金刚石氮—空位色心惯性测量技术发展展望[J]. *导航定位与授时*, 2021, 8 (2): 50-58.
FAN P CH, LI M X, BIAN G D, et al. Development and prospect of diamond nitrogen-vacancy color center inertial measurement technology [J]. *Navigation, Positioning and Timing*, 2021, 8 (2): 50-58.
- [152] EPSTEIN R, MENDOZA F, KATO Y, et al. Anisotropic interactions of a single spin and dark-spin spectroscopy in diamond[J]. *Nature Physics*, 2005, 1 (2): 94-98.
- [153] LEDBETTER M, JENSEN K, FISCHER R, et al. Gyroscopes based on nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. *Physical Review A*, 2012, 86 (5): 052116.
- [154] AJOY A, CAPPELLARO P. Stable three-axis nuclear-spin gyroscope in diamond[J]. *Physical Review A*, 2012, 86 (6): 062104.
- [155] SOSHENKO V V, BOLSHEDVORSKII S V, RUBINAS O, et al. Nuclear spin gyroscope based on the nitrogen vacancy center in diamond [J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126 (19): 197702.
- [156] JARMOLA A, LOUETTE S, ACOSTA V M, et al. Demonstration of diamond nuclear spin gyroscope[J]. *Science Advances*, 2021, 7 (43): eabl3840.
- [157] ZHAO L, SHEN X, JI L, et al. Inertial measurement with solid-state spins of nitrogen-vacancy center in diamond[J]. *Advances in Physics: X*, 2022, 7 (1): 2004921.
- [158] DING W, ZHANG W, WANG X. Quantum-memory-assisted precision rotation sensing[J]. *Physical Review A*, 2020, 102 (3): 032612.
- [159] SONG X, WANG L, FENG F, et al. Nanoscale quantum gyroscope using a single ^{13}C nuclear spin

- coupled with a nearby NV center in diamond [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123 (11): 114301.
- [160] DELHAYE F. HRG by SAFRAN: The game-changing technology[C]. 2018 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2018: 1-4.
- [161] ROZELLE D M. The hemispherical resonator gyro: From wineglass to the planets [J]. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2013, 134: 1157-1178.
- [162] WANG Y C, LU S Y, YEN T H, et al. Silicon photonics multi-function integrated optical circuit for miniaturized fiber optic gyroscope [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(19): 6324-6332.
- [163] 刘骅锋, 焦世民, 涂良成. 国外光学加速度计研究现状及发展趋势[J]. *导航与控制*, 2021, 20(3): 1-8, 43.
- LIU H F, JIAO S H M, TU L C H. Status and trend of optomechanical accelerometers abroad [J]. *Navigation and Control*, 2021, 20(3): 1-8, 43.
- [164] DUNNING A, GREGORY R, BATEMAN J, et al. Composite pulses for interferometry in a thermal cold atom cloud [J]. *Physical Review A*, 2014, 90(3): 033608.
- [165] SAYWELL J C, KUPROV I, GOODWIN D, et al. Optimal control of mirror pulses for cold-atom interferometry [J]. *Physical Review A*, 2018, 98(2): 023625.
- [166] SAYWELL J, CAREY M, BELAL M, et al. Optimal control of Raman pulse sequences for atom interferometry [J]. *Journal of Physics B-atomic Molecular And Optical Physics*, 2019, 53: 085006.
- [167] LEE J, DING R, CHRISTENSEN J, et al. A compact cold-atom interferometer with a high data-rate grating magneto-optical trap and a photonic-integrated-circuit-compatible laser system [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5131.
- [168] RUDOLPH J, WILKASON T, NANTEL M, et al. Large momentum transfer clock atom interferometry on

the 689 nm inter-combination line of strontium [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(8): 083604.

- [169] POLI N, WANG F Y, TARALLO M G, et al. Precision measurement of gravity with cold atoms in an optical lattice and comparison with a classical gravimeter [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(3): 038501.
- [170] XU V, JAFFE M, PANDA C D, et al. Probing gravity by holding atoms for 20 seconds [J]. *Science*, 2019, 366(6466): 745-749.

作者简介



邓敏, 2010年于东北师范大学获得学士学位, 2013年于华东师范大学获得硕士学位, 2018年于清华大学获得博士学位, 现为湖南高地光电科技发展有限公司工程师, 主要研究方向为量子精密测量技术。

E-mail: dengm13@tsinghua.org.cn

Deng Min received his B. Sc. degree from Northeast Normal University in 2010, M. Sc. degree from East China Normal University in 2013, and Ph. D. degree from Tsinghua University in 2018. He is currently an engineer at Hunan Gaodi Photoelectric Technology Development Co., Ltd. His main research field is quantum precision measurement technology.



汪之国(通信作者), 2003年于吉林大学获得学士学位, 2010年于国防科技大学获得博士学位, 现为国防科技大学前沿交叉学科学院副教授, 主要研究方向为基于自旋体系的量子精密测量技术。

E-mail: maxborn@nudt.edu.cn

Wang Zhiguo (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jilin University in 2003 and Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2010. He is currently an associate professor in the College of Advanced Interdisciplinary Studies at National University of Defense Technology. His main research direction is quantum precision measurement technology based on spin systems.