

原子干涉陀螺研究进展及展望

王雨潇, 胡 镜, 顾 楠, 张 燚, 汪之国, 罗 晖, 谭中奇*

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:作为新一代陀螺仪的代表,原子陀螺凭借其理论上的超高精度、卓越的长期稳定性以及小型化集成化的巨大潜力,已成为高精度惯性导航领域的研究焦点。其中,原子干涉陀螺作为原子陀螺的一种,引起了惯导领域的广泛关注。本文系统梳理了原子干涉陀螺技术发展脉络,从基本原理出发,阐释原子源制备、干涉环路构建及相位解算等关键技术环节,分析灵敏度、极限精度等关键参数的内在关联与制约机制,并揭示了数据更新率受限、动态范围窄等工程化瓶颈的物理本质。最后,指出原子干涉陀螺的未来发展方向应聚焦于:解决外部干扰问题以提升精度、改进芯片工艺实现小型化和集成化、优化组合惯性传感器、提升数据更新率以及探索扩大动态范围等方面。

关键词:原子干涉陀螺;原子干涉;灵敏度;极限精度;测量带宽

中图分类号:V241.5 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2025)05-001-23



论文
拓展

Research progress and prospect of atomic interference gyroscope

WANG Yuxiao, HU Jing, GU Nan, ZHANG Yi, WANG Zhiguo, LUO Hui, TAN Zhongqi*

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: As a representative of the next generation of gyroscopes, atomic gyroscopes have become a focal point of research in the field of high-precision inertial navigation and have garnered significant attention due to its theoretically ultra-high precision, exceptional long-term stability, and immense potential for miniaturization and integration. Among them, the atomic interference gyroscope, as a type of atomic gyroscope, has attracted widespread interest in the field of inertial navigation. The development of atomic interference gyroscopes was systematically reviewed. Beginning with fundamental principles, the critical technical components including atomic source preparation, interferometric loop construction, and phase resolution were elaborated on. Through rigorous analysis, the intrinsic correlations between core performance parameters such as sensitivity and ultimate accuracy were established, while their mutual constraint mechanisms was elucidated. Furthermore, the physical origins of engineering bottlenecks including limited data update rates and narrow dynamic ranges were revealed. Finally, the future development directions and trends for atomic interference gyroscopes were outlined, emphasizing the need for in-depth research in several areas: solving external interference issues to improve accuracy, improving chip processing technology for miniaturization and integration, optimizing the combined inertial sensors, increasing data update rates, and exploring ways to expand dynamic range.

Keywords: atomic interference gyroscope; atomic interference; sensitivity; ultimate precision; measurement bandwidth

随着惯性导航技术的快速发展,陀螺仪作为惯性测量的核心器件,其性能直接决定了惯性导航系统的精度和可靠性。从最早的机械陀螺到光学陀螺,再到机电系统陀螺,陀螺仪技术经历了多次革新,逐步向着高精度、小型化和集成化方向发展。近年来,原子陀螺以其极高的理论精度和良好的零偏稳定性,成为惯性导航领域的研究热点,极有望成为新一代陀螺仪的代表。其中,原子

干涉陀螺因其超高灵敏度和长期稳定性,展现出广阔的应用前景,尤其在高精度导航、战略武器装备等领域具有重要意义。然而,尽管原子干涉陀螺技术取得了显著进展,其在工程化应用中仍面临诸多挑战,如外部干扰抑制、数据更新率提升、小型化与集成化等问题亟待解决。因此,对原子干涉陀螺的研究现状、关键技术及未来发展趋势进行系统梳理,不仅有助于明确当前技术瓶颈,还

收稿日期:2025-02-05

基金项目:国防科技大学自主创新科学基金资助项目(22-ZZCX-063)

第一作者:王雨潇(2001—),男,四川成都人,硕士研究生,E-mail:WaltonBryant@163.com

*通信作者:谭中奇(1978—),男,湖南双峰人,教授,博士,博士生导师,E-mail:zhqitan@sina.com

引用格式:王雨潇,胡镜,顾楠,等.原子干涉陀螺研究进展及展望[J].国防科技大学学报,2025,47(5):1-23.

Citation:WANG Y X, HU J, GU N, et al. Research progress and prospect of atomic interference gyroscope[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(5): 1-23.

能为后续研究提供方向指导。

1 陀螺仪的发展与演化

惯性导航系统 (inertial navigation system, INS) 基于惯性测量原理工作,通过三个相互垂直的加速度计和陀螺仪测算载体的线加速度和角速度,从而独立地推导平台位置、速度和方向信息。相比于其他导航系统 (如 GLONASS、GPS 和北斗等),INS 具有不依赖外部参考、不受外界环境干扰等优势,在电磁干扰和恶劣天气影响等情况下仍能提供可靠的导航信息,因此在导航技术中发

挥着难以替代的作用,其中,陀螺仪用以测量物体相对惯性空间的角速度,并结合伺服系统实现对物体角运动的控制。自 1852 年世界上第一台陀螺仪诞生^[1-2]以来,陀螺仪技术发展至今已有 170 余年历史。随着科学理论进步和工艺水平不断提高,基于不同原理的陀螺仪相继出现,其性能指标对比^[3-4]如表 1 所示。表 1 展示了不同类型陀螺仪在零偏稳定性、精度、灵敏度、体积、成本和应用等方面的比较,其中原子干涉陀螺具有极高的零偏稳定性与精度潜力,但相比其他类型的陀螺仪仍处于实验室样机阶段。

表 1 不同陀螺仪的性能指标对比^[3]
Tab. 1 Comparison of performance indicators of different gyroscopes^[3]

陀螺类型	零偏稳定性/(°/h)	精度	准备时间	体积	价格	抗干扰能力	维护费用	应用
液浮	0.001	中	长	大	高	弱	较高	中/高精度,军用
动力调谐	0.01	中	中	中	低	中	低	中/低精度,民用
静电	0.000 1	高	长	大	高	弱	低	高精度,军用
激光	0.001	中	短	中	中	中	低	中/高精度,军用
光纤	0.001	中	短	中	低	中	中	中/高精度,军用/民用
MEMS	0.1	中	短	小	低	中	低	低精度,民用
半球谐振	0.000 1	高	短	小	中	强	低	高精度,军用/民用
核磁共振	0.01	中	短	小	中	强	高	工程原型阶段
原子干涉	0.000 01	极高					高	原型阶段

陀螺仪技术对国家综合定位、导航和授时 (positioning, navigation and timing, PNT) 体系建设具有重要意义,未来将不断向着高精度和小型化两大方向迈进,其技术发展趋势^[5]如图 1 所示。图 1 展示了不同类型陀螺仪的市场渗透率随时间的演变趋势,横跨 1920 年至 2060 年的时间跨度,描绘了陀螺仪技术的发展历程与未来展望。横轴时间跨度包含历史数据 (1920—2020 年) 和预测数据 (2021—2060 年) 两个阶段,其演变曲线主要基于多篇介绍陀螺仪发展进程与未来展望的文章的总结分析^[6-11]。最早出现的机械 (mechanical, MEC) 陀螺在 20 世纪初期开始应用,随后环形激光陀螺 (ring laser gyroscope, RLG)、光纤陀螺 (interferometric fiber optic gyroscope, IFOG)、半球谐振陀螺 (hemispherical resonator gyroscope, HRG) 和微机电系统 (micro-electro-mechanical systems, MEMS) 陀螺相继发展并逐步扩大市场占有率。近年来,光子集成陀螺 (photonic integrated gyroscope, PIG) 和原子陀螺 (atomic gyroscope,

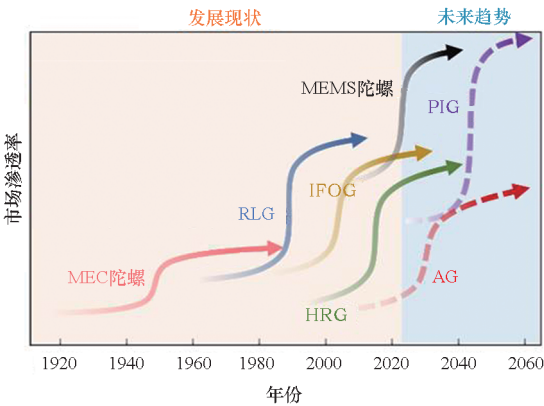


图 1 陀螺仪技术发展趋势^[5]
Fig. 1 Gyroscope technology trends^[5]

AG) 作为新一代技术正在兴起。其中原子陀螺技术不断取得突破性进展,以 2024 年为例,中国空间站在国际上首次实现了空间微重力条件下的冷原子干涉陀螺,转动测量不确定度优于 3.0×10^{-5} rad/s;同时也实现了在轨的冷原子干涉加速度计,加速度测量分辨率优于 1.1×10^{-6} m/s²^[12]。

此外,美军也早在 2013 年就将冷原子陀螺视为改变游戏规则、保持 2030 年前技术优势重点优先发展的最关键技术之一,是为美军维持军事优势并能够在 2030 年之前发展或投入使用的新兴技术^[13],预计在 2040 年后将获得更大的市场份额。陀螺仪技术从机械化向光学化,再到量子化的发展路径,展现了陀螺仪技术不断追求高精度、小型化和更好性能的发展方向,其中原子陀螺等新型技术可能成为下一代主导性技术。同时,科技水平的迅猛发展促使国防装备需求提高,对我国惯导技术产品的精度(期望优于 10^{-5})、体积、寿命(期望超过 20 年)和长期稳定性要求也越来越高,在理论上具有极高精度和零偏稳定性的原子陀螺仪具有很大的发展潜力与价值。

2 原子干涉陀螺简介

原子陀螺技术有望成为继机械陀螺、光学陀螺和 MEMS 陀螺之后的新一代陀螺仪技术,因其在理论上具有高精度和小体积等潜在的优势而受到广泛关注。当前原子陀螺主要分为核磁共振陀螺(nuclear magnetic resonance gyroscope, NMRG)、无自旋交换弛豫陀螺(spin exchange relaxation free gyroscope, SERFG)和原子干涉陀螺(atomic interference gyroscope, AIG),其中,原子干涉陀螺以碱金属原子、电子和惰性气体原子作为工作介质,具有小体积、超高精度和灵敏度等优势^[14-15],其利用原子束的相干性进行精密测量,核心包含内态干涉和外态干涉两种机制^[16]。

图 2 为各类陀螺性能比较^[17]。原子的短波长特性使其具有相较于其他陀螺更高的测量精度;同时,原子的量子属性决定了原子干涉陀螺仪具有更好的长期稳定性、更小的漂移、更高的精度,且通过长时间积分后能够达到更高的转动测量分辨率^[18]。目前,原子干涉陀螺发展迅速,清华大学研究团队^[19]于 2024 年提出闭环双原子干涉仪结构,通过相位锁定至非惯性光学相位并优化初始光学相位,将短时探测的灵敏度提高到 $2.73 \times 10^{-5} \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{1/2})$ 。此外,该团队利用和差信号处理抑制共模噪声,提升差分信号信噪比,未来计划采用电光调制器实现快速相位调制,并优化温度漂移问题以提升长期稳定性。同年,中国科学院大学^[20]创新提出原子干涉陀螺仪的自校准方法,通过激光频率失谐调制原子速度,动态控制陀螺仪标度因子,

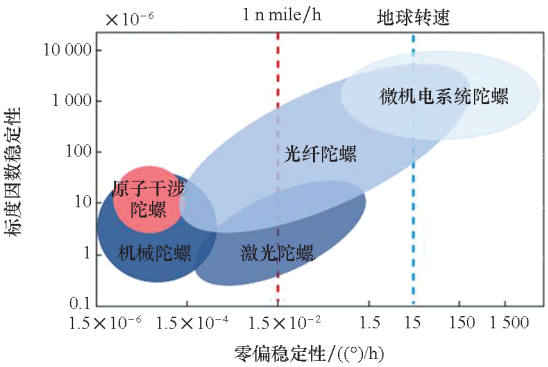


图 2 各陀螺仪零偏稳定性比较^[17]

Fig. 2 Comparison of zero-bias stability of each gyroscope^[17]

消除干涉信号周期性导致的相位模糊,从而实现无须外部参考的绝对旋转测量,解决传统原子陀螺仪依赖标定的问题。然而,原子干涉陀螺的发展也面临不少挑战,主要包括:原子干涉陀螺仪通常由许多复杂的光学和量子元件组成,如激光系统、原子束分离器等,增加了制造和维护成本以及操作复杂性;此外,尽管原子干涉仪通过将激光脉冲驱动的内态跃迁与外态路径分离结合起来,在一定程度上实现了对干涉路径的相位控制,但外部环境(如温度变化引起的激光波长漂移、机械振动导致的路径扰动)仍然显著影响外态干涉的精度。这些动态噪声问题目前还需有效的工程化解决方案,因而限制了原子干涉陀螺仪的推广和应用。

3 原子干涉陀螺基本原理

原子干涉的本质在于原子的波动性,根据量子态的操控方式,可分为内态干涉和外态干涉两大类型:内态干涉通过操控原子的能级跃迁,利用能级能量差 ΔE 与相干演化时间 T 的关系积累相位。外态干涉则主要通过对原子质心运动进行分束与合束,构建空间闭合干涉路径来探测惯性效应(如旋转速率和加速度)。在冷原子干涉陀螺仪中,这两种干涉机制相互协同:激光诱导原子分束构建空间干涉环路,同时,内部能态的转换标记路径信息,并通过荧光探测的布居数差异提取干涉相位。因此,实现原子干涉过程的基本步骤包括原子束源制备、干涉环路构建和原子干涉。

3.1 原子束源制备

原子束源的质量直接影响着原子干涉效果的好坏。目前绝大多数原子干涉过程所使用原子源为原子束流或原子云团。原子束流是指原子以束

流的形式连续不断出射,而原子云团则是指多个原子形成大块原子云团后发射。原子束源一般在磁光阱(magneto optical trap, MOT)中制备。磁光阱主要由光学黏胶光束和磁场组成,有二维和三维两类,如图 3 所示,二者区别在于第三个维度上的两束冷却光束。磁光阱中对射的光束为偏振方向相反的圆偏振光,梯度磁场由反亥姆霍兹线圈构成^[21]。常见的二维磁光阱主要有纯二维磁光阱(pure-2DMOT)和光栅二维磁光阱(2D-GMOT)等,二者在原子利用效率、原子通量和冷却效果等方面各有优势^[22]。

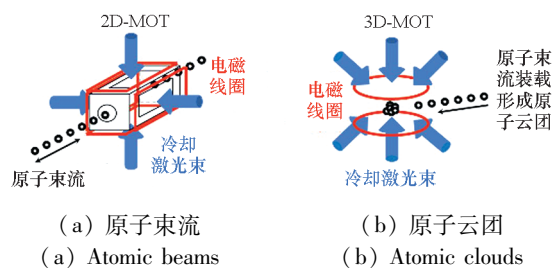


图 3 不同原子束源制备原理^[22]

Fig. 3 Preparation principle of different atomic beam sources^[22]

在二维磁光阱中,原子蒸汽受到四个方向上冷却激光的同时作用而被冷却囚禁在特定方向上扩散,并在四束冷却激光的作用下被拉成长条状,从而形成原子束流。在此基础上,将二维磁光阱生成的原子束流装载至三维磁光阱中,三组对射冷却激光可以使各个方向上原子减速,形成“光学黏胶”,从而制备原子云团。此外,基于冷却激光对原子的动量衰减以及磁光阱的阻尼作用,还可以在三维磁光阱中直接得到原子云团^[23],云团原子数密度的典型值一般在 $10^9/\text{cm}^3 \sim 10^{11}/\text{cm}^3$ 范围内^[24]。

3.2 干涉环路构建

以三能级系统的⁸⁷Rb 原子为例^[15],使用 3 束相干 Raman 激光可以实现原子束的分束、反射和合束,从而构建原子干涉环路。典型的原子干涉陀螺方案中一般通过双光子受激 Raman 跃迁实现^[3,25],如图 4(a)所示。内态选择使分布在多个内态的原子群体被制备为统一的基态 $|g\rangle$,为后续的双光子 Raman 跃迁提供了统一的初态条件,然后与频率为 ω_1 和 ω_2 的两束相干 Raman 激光相互作用。原子首先在 ω_1 激光作用下受激跃迁至 $|i\rangle$ 态并获得 ω_1 光子的动量 p_1 ($p_1 = \hbar k_1$, 其中 $\hbar$ 为约化普朗克常量),然后在 ω_2 光子的作用下受激跃迁至 $|e\rangle$ 态,在受激跃迁的同时辐射出一个

与 ω_2 光子同向的相干光子并获得 $-p_2$ ($p_2 = \hbar k_2$) 的反冲动量。在这一过程中,⁸⁷Rb 原子获得了 $p_1 - p_2$ 的动量,并处于 $|g, p_0\rangle$ 和 $|e, p_0 + p_1 - p_2\rangle$ 的相干叠加态,运动轨迹发生偏移,如图 4(b)所示。对于初始处于 $|e\rangle$ 态的原子,上述过程则正好相反。当两束 Raman 光对向传播时,原子将获得 $p_1 + p_2$ 的动量,产生更大角度轨迹偏移,如图 4(b)所示。

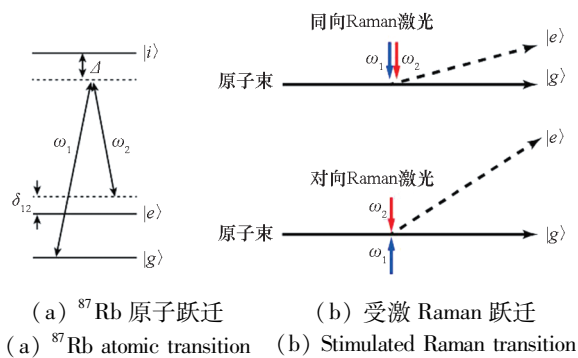


图 4 环路构建原理^[15]

Fig. 4 Loop construction principle^[15]

通过求解原子与激光作用的哈密顿量,可以得到原子处于上述叠加态时的布居数^[25]:

$$P_e(\tau) = \frac{\omega_R^2 \sin^2 \left[\frac{\tau}{2} \sqrt{\omega_R^2 + (\delta_{12} - \delta_{AC})^2} \right]}{\omega_R^2 + (\delta_{12} - \delta_{AC})^2} \quad (1)$$

$$P_g(\tau) = 1 - P_e(\tau) \quad (2)$$

其中: τ 为激光与原子相互作用的时间; δ_{12} 为双光子失谐; δ_{AC} 为 AC Stark 位移; ω_R 为有效 Rabi 频率,其本质上是电偶极相互作用时产生的非对角耦合项^[15]。当原子与第一束 Raman 激光作用的 Rabi 相位 $\omega_R \tau = \pi/2$ 时,原子处于两态上的概率相等(即等幅分束),同时 $|e, p_0 + p_1 - p_2\rangle$ 态原子的相位将与第一束 Raman 激光的相位 ϕ_1 相同。随后在第二束 Rabi 相位为 π 、相位 ϕ_2 的 Raman 激光作用下,原子发生量子态反转,两路径原子“反射”后聚拢;最后传播至空间重合,并在第三束相位 ϕ_3 的 Raman 激光作用下合束干涉。此时 $|g, p_0\rangle$ 态的原子有一半概率继续待在 $|g, p_0\rangle$ 态,另一半概率跃迁至 $|e, p_0 + p_1 - p_2\rangle$ 态; $|e, p_0 + p_1 - p_2\rangle$ 态原子同理,有一半概率继续待在 $|e, p_0 + p_1 - p_2\rangle$ 态,另一半概率跃迁至 $|g, p_0\rangle$ 态。它们均获得激光的相位 ϕ_3 ,干涉环路形成如图 5(a)所示。最终两态的布居数^[26]为:

$$P_g = \frac{1}{2} [1 + \cos(\phi_1 - 2\phi_2 + \phi_3)] \quad (3)$$

$$P_e = \frac{1}{2} [1 - \cos(\phi_1 - 2\phi_2 + \phi_3)] \quad (4)$$

3.3 原子干涉

实际上,除了 Raman 激光的相位外,原子处于两态的布居数还受系统的旋转、原子间干涉和其他共模因素引起的相位变化影响。原子干涉过程中,参与干涉两态间的总相移 $\Delta\phi_{\text{Total}}$ 包含载体线性加速度引入的相位 $\Delta\phi_a$ 、载体旋转角速度引入的相位 $\Delta\phi_\Omega$ 、Raman 激光和原子相互作用时引入的相位 $\Delta\phi_R$ ^[15]。

如图 5(a),在三脉冲型原子干涉陀螺中,参与干涉两态总相移^[15,27-28]为:

$$\begin{aligned}\Delta\phi_{\text{Total}} &= \Delta\phi_a + \Delta\phi_\Omega + \Delta\phi_R \\ &= \mathbf{k}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{a}T^2 + 2\mathbf{k}_{\text{eff}} \cdot (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v})T^2 + \phi_1 - 2\phi_2 + \phi_3\end{aligned}\quad (5)$$

式中: $\mathbf{k}_{\text{eff}}$ 为 Raman 双光子过程的有效波矢大小,等于两束 Raman 光的波矢差; $\mathbf{a}$ 表示原子(或载体/平台)沿敏感轴的线加速度; $\boldsymbol{\Omega}$ 为平台/装置

的旋转角速度; $\mathbf{v}$ 表示原子运动速度。

可见,三脉冲原子干涉陀螺可以同时输出载体的线加速度和转动角速度信息,但是需要构建两个相同的干涉环路来完成对两惯性量的解耦输出。一般采用两对射原子束分别与同一组 Raman 激光产生干涉,然后将得到的两相移相减,以抵消重力 g 的影响,根据相移相减结果即可解算角速度:

$$\Delta\phi_{\text{Total1}} - \Delta\phi_{\text{Total2}} = \frac{4m\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{A}}{\hbar} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{A}$ 指干涉环路的“有效面积”(或面积投影)。

同理,四脉冲型原理如图 5(b)所示,总的惯性相移^[28]由式(7)表示,其中 ϕ_{i0} 表示第 i 个激光脉冲的初始相位。

$$\Delta\phi_{\text{Total}} = 4\boldsymbol{\Omega} \cdot (g \times \mathbf{k}_{\text{eff}})T^3 + (\phi_{10} - 2\phi_{20} + 2\phi_{30} - \phi_{40}) \quad (7)$$

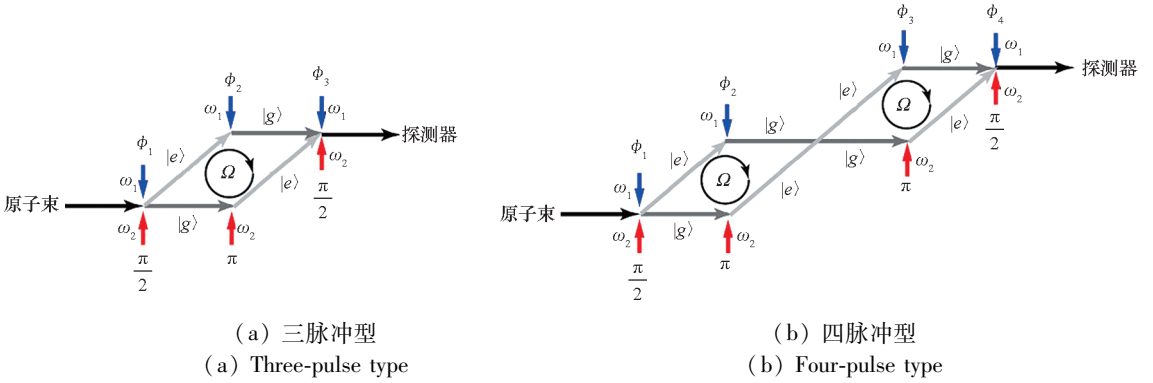


图 5 不同原子干涉陀螺原理^[15]

Fig. 5 Principle of different atomic interference gyroscope^[15]

相比于三脉冲型,四脉冲型的双环路结构可以实现独立消除加速度项的影响,一定程度上方便了转动角速度的提取;此外,四脉冲型还具备更高的测量精度与稳定性。然而,从式(5)、式(7)来看,四脉冲型虽然消除了独立的重力加速度项,为单独提取转动信息提供了方便^[25],但角速度测量的性能受当地重力加速度影响,要想获得高精度的转动测量需要实时获得当地重力值^[29];此外,四脉冲型所使用的 Raman 激光脉冲更多,在结构、体积和能耗等方面更劣势;同时,脉冲数量的增加也增长了原子飞行路程,从而影响陀螺的数据更新率。

综合上述影响,以三脉冲型干涉仪为例,最终两态布居数为^[30]:

$$P_g = \frac{1}{2} \{ 1 + \cos[\mathbf{k}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{a}T^2 + 2\mathbf{k}_{\text{eff}} \cdot (2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v})T^2 + \phi_{\text{Raman}}] \} \quad (8)$$

$$P_e = \frac{1}{2} \{ 1 - \cos[\mathbf{k}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{a}T^2 + 2\mathbf{k}_{\text{eff}} \cdot (2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v})T^2 + \phi_{\text{Raman}}] \} \quad (9)$$

其中,余弦中三项分别为线性加速度引入的相位、旋转角速度引入的相位、Raman 激光和原子相互作用时引入的相位。如图 6 所示^[18],将装置放置在高精度转台上,图中绿色三角形拟合的曲线表示转台静止时测量得到的原子干涉条纹,红色圆点与黑色方块拟合的曲线分别代表转台以 -0.05 ($^\circ$)/s 与 0.05 ($^\circ$)/s 的转速转动时观察到的原子干涉条纹。干涉环路转动角速度的变化将引起干涉条纹的相位变化,条纹平移方向取决于旋转方向。可见,包括旋转在内的众多因素引入了新的相移,这些相移又影响着原子在两态上的布居数。因此,通过检测原子发生干涉后处在某一态上的布居数即可解算出角速度。实际应用中,一般检测 $|e, p_0 + p_1 - p_2\rangle$ 态上的布居数达到

上述目的。

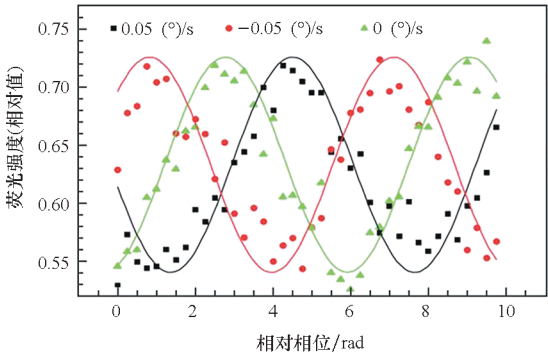


图 6 旋转角速度引起干涉相位变化^[18]

Fig. 6 Interference phase change caused by rotational angular velocity^[18]

使用能与原子某能级跃迁(如 $|g\rangle\rightarrow|e\rangle$)共振的探测光束(共振探针)将原子激发到激发态,激发态原子自发辐射跃迁到基态的荧光可由光电二极管收集,通过选择适当频率的探测光可对原子某一能态进行有选择的探测,处于该能态上原子数量越多,则辐射出的荧光光子越多,荧光越强,由此将不可见的原子布居数转化为可观测的荧光强度信号。通过检测某一能级的荧光信号(表征原子数量)来观察与角速度相关的相移^[15]。

4 原子干涉陀螺的类型、结构与性能

自 1991 年以来,原子干涉陀螺仪经过 30 余年的研发和努力,逐渐形成了较为成熟的技术方案或构型^[29],如图 7 所示。按照采用的原子束源类型,可以分为连续型和脉冲型;按照 Raman 光与原子相互作用的构型,可分为三脉冲和四脉冲构型。

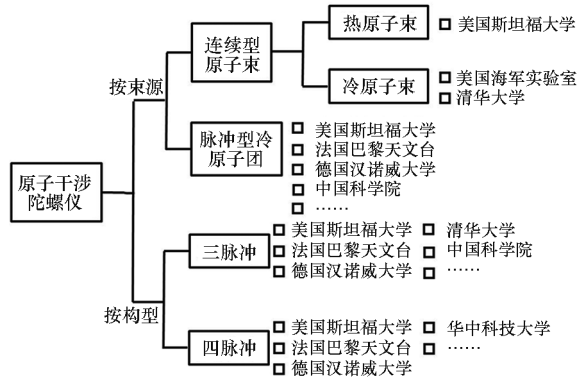


图 7 原子干涉陀螺主要分类^[29]

Fig. 7 Main classification of atomic interference gyroscopes^[29]

4.1 原子束源类型

4.1.1 连续型原子束

由于可以连续采样,连续型原子束更适合动

态环境下的应用。连续型原子束包括热原子束和冷原子束。热原子束的原子数量更多,纵向速度更大(可达每秒几百米),因此干涉信号具有更大的信噪比,但需要更长的干涉距离;冷原子束纵向速度更小(可精确控制在每秒几米),原子活动空间更小,因而可实现更小体积的干涉系统。随着激光冷却原子技术的发展,为进一步实现干涉陀螺的集成化和小型化,国内外研究热点逐渐由热原子束干涉向冷原子束干涉发生转变^[17,31]。在原子干涉实验中,一般通过将原子温度冷却至 μK 量级使原子间的相对运动几乎停止,便于操控原子束朝同一方向运动^[32]。

清华大学的连续冷原子束干涉仪^[33]利用空间分离的 Raman 光束相干操控速度范围为 $10\sim 20\text{ m/s}$ 的冷却 ^{87}Rb 原子,装置在面积为 0.07 mm^2 的 Sagnac 环路区域内操作,该装置数据更新率约为 190 Hz ,短时旋转灵敏度达到了 $7.8\times 10^{-5}\text{ rad}/(\text{s}\cdot\text{Hz}^{1/2})$ 。在该干涉仪中,低速的 ^{87}Rb 原子在一个三维磁光阱中制备得到,沿 Z 轴向的反亥姆霍兹线圈用以产生横向场梯度为 15 Gs/cm 的四极磁场,使用 6 束冷却激光对高速运动的 ^{87}Rb 原子进行冷却,并且由于不平衡的辐射压力,冷原子从 $1/4$ 波片和 M2 的钻孔中沿着 Z 轴向暗道传播,并最终相对于水平方向 3.7° 连续出射,形成冷原子束源,如图 8(a) 所示。

美国斯坦福大学的热原子束干涉仪^[27]则使用双路对射铯原子波束与同一组 Raman 激光序列相互作用,图 8(b) 展示了其中一路的方案原理,由 Cs 炉出射的铯原子束在超高真空 (ultra high vacuum, UHV) 室中被横向冷却并光学泵浦至特定基态,而后作为束源进入干涉区域。相较于清华大学方案中的冷原子,该干涉仪所使用热原子束速度可达 300 m/s ,短时灵敏度可以达到 $6\times 10^{-10}\text{ rad}/(\text{s}\cdot\text{Hz}^{1/2})$,同时具有很高的内在准确性与长期稳定性。

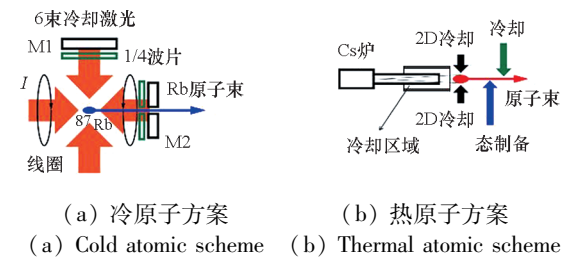


图 8 连续型原子束源原理结构^[33]

Fig. 8 Principle structure of continuous atomic beam source^[33]

4.1.2 脉冲型冷原子团

磁光阱中形成的冷原子云团通常使用移动光学黏胶的方式以一定初速度发射至干涉区域。美国 Sandia 国家实验室给出了一种满足惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)对原子干涉陀螺仪输出带宽的要求的新方案。如图 9 所示,该原子干涉仪的玻璃腔体尺寸为 20 mm × 30 mm × 60 mm,通过横向双磁光阱配置方案来将对抛的冷原子团重复囚禁,实现了超短的干涉时间与高带宽的系统数据输出。2014 年,该团队研制的冷原子干涉仪同时实现了角速度和加速度的测量,灵敏度分别为 $1 \times 10^{-6} \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{1/2})$ 和 $8.8 \times 10^{-7} \text{ g}/\text{Hz}^{1/2}$,其中,角速度测量的长期稳定性估计优于 $10^{-2} (^\circ)/\text{h}$ 。

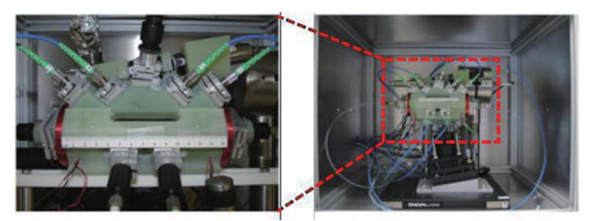


图 9 美国 Sandia 国家实验室冷原子干涉陀螺仪^[29]
Fig. 9 Cold atom interferometric gyroscope developed by Sandia National Laboratory in the United States^[29]

4.2 主要构型

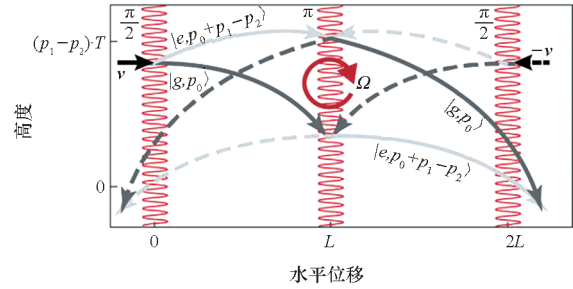
按照 Raman 光与原子相互作用的构型,可以将原子干涉陀螺分为三脉冲型和四脉冲型原子干涉陀螺^[29]。二者所形成的干涉环路^[15,27]可以由图 10 表示,其中 L 代表原子在相邻两次 Raman 脉冲间隔时间 T 内沿水平方向的飞行位移。

4.2.1 三脉冲型

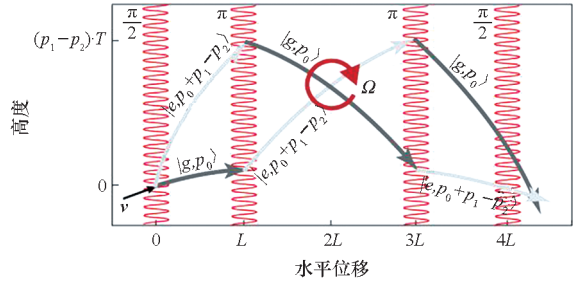
目前国外主要有法国巴黎天文台、德国汉诺威大学和美国斯坦福大学对三脉冲型原子干涉仪研究较为深入,国内主要是清华大学和中国科学院处于该领域领先地位。前文中提到的采用连续型原子束的清华大学冷原子束干涉仪和斯坦福大学热原子束干涉仪都是典型的三脉冲型。2022 年,中国科学院提出了一种水平对抛式原子干涉陀螺物理系统研制方案^[34],构造了稳定 10^{-8} Pa 量级真空度的干涉环境,并获得直径约为 6 mm、温度 12.8 μK 的冷原子团,用以作为原子源,原子数量约 8×10^9 个,其基本物理结构如图 11 所示,目前中国科学院已经利用该系统展开后续实验研究。

4.2.2 四脉冲型

四脉冲型选用的 Raman 激光的 Rabi 相位序列为 $\pi/2-\pi-\pi-\pi/2$ 。与三脉冲型不同的是,



(a) 三脉冲型干涉环路
(a) Interference loops of three-pulse gyroscopes



(b) 四脉冲型干涉环路
(b) Interference loops of four-pulse gyroscopes

图 10 不同类型陀螺的干涉环路^[29]
Fig. 10 Interference loops of different types of gyroscopes^[29]

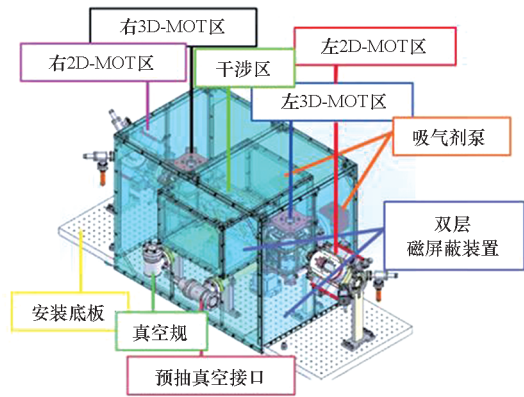


图 11 中国科学院水平对抛式原子干涉陀螺^[34]
Fig. 11 Chinese Academy of Sciences horizontal parabolic atomic interference gyroscope^[34]

四脉冲型在对原子束进行分束和反射操作后并不直接合束,而是形成两个干涉环路后再进行合束。2008 年,AOSense 公司研制出可移动的小型化四脉冲型冷原子干涉混合惯性传感器,用于旋转速率、线性加速度和重力梯度的精确测量,如图 12 所示。陀螺仪基于两对 Raman 激光脉冲工作,角随机游走系数小于 $8.73 \times 10^{-8} \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{1/2})$,绝对精度优于 $1 \times 10^{-4} (^\circ)/\text{h}$,最大输入角速度为 $10 (^\circ)/\text{s}$,地球自转速率测量值与理论值之比为 $1.000\,7 \pm 0.000\,5$ ^[23,27]。2022 年,法国巴黎天

文台在原有四脉冲型干涉仪的基础上增加了一对 Raman 激光,使得在 X 和 Y 方向排布的两对 Raman 光可以分别测量水平方向的两个角速度^[35],如图 13 所示。

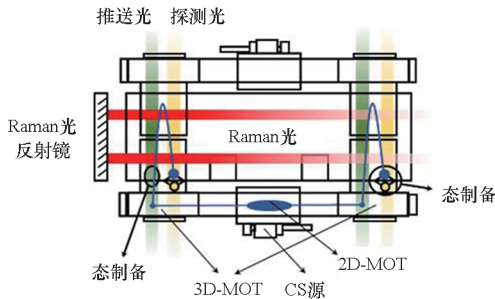


图 12 AOSense 四脉冲型冷原子干涉仪原理图^[23,27]

Fig. 12 Schematic diagram of AOSense's four-pulse cold atom interferometer^[23,27]

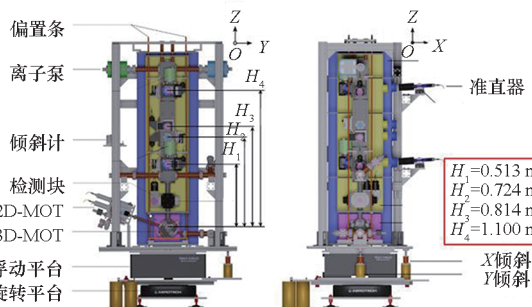


图 13 法国巴黎天文台四脉冲型干涉仪^[36]

Fig. 13 Four-pulse interferometer at the Paris Observatory in France^[36]

4.3 性能分析

原子干涉陀螺仪作为实现新一代超高精度陀螺仪的重要技术途径,在惯性参数的测量领域已经向对应的极限水平发起了挑战。例如,角随机游走系数和零偏不稳定性上已优于商用光纤陀螺指标^[37]。接下来将对原子干涉陀螺仪涉及应用领域的几个关键参数进行分析。

4.3.1 极限精度

精度是指陀螺仪测量结果与真实值之间的接近程度,是一个综合性指标,因为它综合了系统设计、环境稳定性、噪声抑制能力、校准水平等多种因素的整体表现,通常包括角随机游走 (angle random walk, ARW)、零偏稳定性、动态范围、数据更新率和漂移等指标。精度越高,测量误差越小。光学陀螺和原子干涉陀螺都是通过测量相移间接获得系统角速度信息。室温下原子波长在 10^{-2} nm 量级,而可见光波长在 380 ~ 780 nm,根据 Sagnac 效应计算公式,考虑到原子飞行速度和光速的关系,在干涉环路面积相等条件下,同一角

速度下光学陀螺获得的相移仅为原子干涉陀螺的 10^{-10} :

$$\frac{\phi_{\text{Optic}}}{\phi_{\text{Atom}}} = \frac{c}{v} \cdot \frac{\lambda_{\text{DB}}}{\lambda_0} \approx 10^{-10} \quad (10)$$

式中, ϕ_{Optic} 为光学陀螺中由 Sagnac 效应产生的相位差, ϕ_{Atom} 为原子干涉陀螺中由 Sagnac 效应产生的相位差 (物质波相位), c 表示光速, v 表示原子干涉仪中原子的平均速度, λ_{DB} 代表原子物质波的波长, λ_0 代表光学陀螺所用光的波长。

这说明,从理论层面而言,原子干涉陀螺的极限精度是与其干涉环路面积相同的光学陀螺极限精度的 10^{10} 倍左右,可达到 10^{-19} rad/s 量级^[37]。然而,当前原子干涉仪测量存在相关技术水平的限制,比如光学陀螺可以使用更好的光分束器、环形激光陀螺中高精度反射镜或光纤陀螺中的多个光纤匝可以大大增加有效面积,原子干涉陀螺 (cm^2 量级) 目前难以达到和光学陀螺 (m^2 量级) 相近的干涉环路面积水平,实际应用中式 (10) 比值应该在 10^4 量级或者更低。当前国际先进水平的原子干涉陀螺仪在测量精度方面已达到较高水平,国内相关研究也取得了显著进展。从整体发展趋势来看,该领域仍存在值得深入探索的技术提升空间。

4.3.2 灵敏度

灵敏度通常是指陀螺仪输出信号与输入角速度之间的比例关系,表示单位角速度输入能产生多大的输出信号变化,通常以噪声密度 (如 $\text{rad} / (\text{s} \cdot \text{Hz}^{1/2})$) 来量化。灵敏度越高,陀螺仪对微小角速度变化的响应越明显,这对惯性导航系统的短期性能尤为关键。根据标准量子极限相关理论^[38],经典的原子干涉仪相位灵敏度极限最终受限于 $1/\sqrt{N}$, N 为参与干涉的总原子数。冷原子干涉仪实际参与干涉的原子数量级在 10^6 水平,远低于热原子干涉仪和光学干涉仪^[39]。相比于光学陀螺,原子干涉陀螺灵敏度的提升受环路面积、相应波源通量以及相干操作效率等因素影响更大,同时噪声水平还受到检测光束和 Raman 光束散射光引起的噪声背景的限制^[33],但理论上噪声极限仍可以达到光学陀螺的 10^4 倍^[40]。原子干涉仪最后的荧光探测信号 I 可表示成下面的形式^[17]:

$$I \propto NP, P = \frac{1}{2} [1 - \chi \cos(\Delta\phi_{\text{Total}})] \quad (11)$$

式中, P 为参与干涉的原子在两能态的转移概率, χ 为条纹对比度,荧光探测信号与参与干涉的总原子数 N 以及干涉相移 $\Delta\phi_{\text{Total}}$ 有关。除对不同物理量测量过程中标度因数不同外,干涉系统测量灵敏度主要受限于干涉相移噪声水平的高低。不

同于光学干涉,原子干涉系统中的干涉相移同时来自转动角速度、线加速度等惯性参量,这些惯性参量测量过程中将不可避免地伴随其他噪声,导致最终干涉相移存在噪声。下面介绍其中两种典型噪声。

1) 散粒噪声。干涉环路的形成基于 Raman 脉冲对原子波包的空间路径分束与后续的相干重组。理想情况下,具备特定 Rabi 相位的 Raman 激光的作用使原子处于两态上的概率相等;然而在实际情况中,这个概率并非定值,而是存在一定波动,导致散粒噪声^[41]。散粒噪声只与某一态上概率 p 以及参与干涉的原子数目 N 有关,这也是前文提到的灵敏度极限受限于 $1/\sqrt{N}$,其表达式如下:

$$\delta_s = \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}} \quad (12)$$

2) 探测噪声。原子干涉条纹的相位变化最终是通过分析电路输出电信号得到的,必然会引入电路中的热噪声和暗电流等探测噪声,影响角速度测量过程中飞行时间(time of flight, TOF)信号的积分值 $S^{[41]}$ 。探测噪声可以表示为:

$$\delta_D = \frac{\sqrt{(p \cdot \delta S_1 \cdot a_2)^2 + [(1-p) \delta S_2 \cdot a_1]^2}}{N} \quad (13)$$

式中, a_1, a_2 为比例系数, $\delta S_1, \delta S_2$ 为电路噪声对 TOF 信号积分值的贡献。与散粒噪声类似,增大原子数目也可以减小探测噪声。

除增加干涉原子数和降低干涉相移噪声外,提高灵敏度最直接的方法之一就是增大干涉环路面积,但干涉环路面积增大的同时也将使得原子干涉需要更长的时间与更大的空间,在这期间重力导致的轨迹偏移会更加显著,导致原子的路径偏离预期,影响干涉信号的相位测量。基于原子与光场和磁场产生的电磁相互作用来抵消原子重力的磁导引型原子干涉仪^[31]可以有效解决这一问题,可减少原子束扩散的同时保证干涉条纹对比度。

4.3.3 灵敏度与精度的制衡

灵敏度的提升能够直接影响精度,尤其是 ARW 这一短期误差指标。陀螺仪在角度上的随机误差,描述了陀螺仪在短时间内角度测量的不确定性,是影响陀螺短期精度的重要指标之一。除此之外,精度还受偏置稳定性、标度因数误差、非线性等影响。ARW 与噪声密度的关系可以通过以下推导表示^[42]:

假设陀螺仪角速率信号中存在白噪声,噪声功率谱密度 $S_\omega(f)$ 为常数,表示在任何单位频带内的噪声能量。此时,其噪声密度为:

$$\sigma_\omega = \sqrt{S_\omega(f)} \quad (14)$$

该噪声密度的单位通常是 $(^\circ)/\sqrt{\text{Hz}}$ 或 $\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

对角速率进行积分来得到角度时,噪声会累积。假设在时间段 T 内,白噪声的角速率 ω_{noise} 的积分结果表示为:

$$\theta(t) = \int_0^T \omega_{\text{noise}}(t) dt \quad (15)$$

由于噪声在时间上的累积,最终产生的角度噪声的均方根值 σ_θ 表示为:

$$\sigma_\theta^2 = \sigma_\omega^2 \cdot T \quad (16)$$

这说明了单位时间内白噪声的影响。

由上述关系,可以得到 ARW 的表达式:

$$\text{ARW} = \sigma_\theta = \sigma_\omega \cdot \sqrt{T} \quad (17)$$

由此可见,灵敏度越高(噪声密度越低),角随机游走越小,短期精度越高。此外,需要指出的是,零偏稳定性的改善通常依赖对慢变噪声源(如温度、磁场与激光频率漂移、机械热漂等)的抑制,当提升灵敏度的措施同时针对这些共性噪声源时,有可能间接改善零偏稳定性。然而,精度不仅取决于灵敏度,还受到其他因素的影响,例如陀螺仪的结构设计、温度漂移补偿能力以及动态范围等。

二者的相互制约主要体现在干涉时间和动态范围的平衡上。灵敏度与干涉时间 T 的平方成正比^[43],延长干涉时间可以提高灵敏度,但同时会降低动态范围和数据更新率。例如, Landragin 小组的脉冲型原子干涉陀螺仪具有 80 ms 的干涉时间,实现了长期稳定性 $1 \times 10^{-8} \text{ rad/s} @ 1000 \text{ s}$,但其数据更新率仅为 1.72 Hz^[29],难以满足惯性导航系统对高动态范围和高数据更新率的需求,而增大动态范围需要减少干涉时间或干涉距离,这会导致灵敏度下降。类似的例子如实时校准磁场梯度,高精度的高频标定会中断连续测量,从而降低有效积分时间使灵敏度下降。因此,在实际应用中,灵敏度和精度很难同时提高,需要在特定应用场景下进行优化设计。例如美国空军大学^[44]通过 Kalman 滤波器融合原子干涉陀螺与光纤陀螺输出,最终系统实现角速度测量灵敏度 $3 \times 10^{-7} \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{1/2})$ 与数据更新率 430 Hz 的协同提升,导航定位误差从纯光纤陀螺的 2.5 n mile/d 降低至 0.8 n mile/d。

在惯性导航系统中,灵敏度作为传感器的基础性能参数,与角随机游走、零偏稳定性和漂移等导航精度指标有着内在联系。研究者在改进传感器时,既关注灵敏度提升,也必须考虑其对随机误差特性的影响;而惯导系统集成者则更直接关注这些误差指标如何影响最终的导航精度。高灵敏

度通常能提供更优的信噪比,有助于降低角随机游走水平,但并不必然带来更好的零偏稳定性。因此,在实际应用中,需要将灵敏度的改进与惯导系统的精度需求相结合。例如,原子干涉陀螺以其超高的灵敏度和良好的长期稳定性在平台惯导系统中表现优异,但其动态范围受限,可能限制其在捷联惯导系统中的应用。通过结合高灵敏度的原子干涉陀螺和高动态范围的光纤陀螺,能够在一定程度上实现高精度与高数据更新率的平衡,为惯性导航系统提供更优的解决方案^[45]。

4.3.4 数据更新率

原子干涉陀螺的数据更新率是指原子干涉条纹变化导致的数据更新的速度。从直观上理解,原子干涉仪的数据更新速度 f_u 与原子干涉所需时间 t_i 有关,满足 $f_u \leq t_i^{-1}$;然而,干涉所需总时间与所用束源类型有很大关系。对于采用连续型原子束的干涉仪,其极限数据更新率 f_{uc} 与原子飞行速度 v 以及相邻 Raman 激光束距离 L 有关:

$$f_{uc} \leq \frac{v}{2L} \quad (18)$$

对于采用脉冲型冷原子团的干涉仪,其数据更新率 f_{ui} 则受限于包括干涉用时 t_i 、飞行用时 t_f 和原子云团制备用时 t_p 在内的众多因素:

$$f_{ui} \leq \frac{1}{t_i + t_f + t_p} \quad (19)$$

因此,在原子干涉时间相同的条件下,脉冲型较连续型数据更新速度更慢。目前公开报道的连续型原子束干涉仪的数据更新率普遍在 100 Hz 以上;而脉冲型冷原子团干涉仪由于原子云团制备等因素限制,数据更新率只能达到 1 Hz 左右。

5 国内外原子干涉陀螺技术研究现状

1993 年,世界上第一台原子干涉仪研制成功,自此原子干涉技术迅速发展,如今已经能实现实验室内原理样机的高精度惯性测量和良好的长时间漂移性能。随着以原子惯性技术为代表的一系列新技术的兴起,未来原子干涉陀螺将朝着更高精度、更稳定以及更具备工程应用价值的方向不断发展^[16]。

5.1 国外研究现状

国外从事原子干涉陀螺仪研究的单位主要有美国斯坦福大学、法国巴黎天文台、德国汉诺威大学,以及美国国家标准技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)、AOSense 公司、弗吉尼亚大学、巴黎萨克雷大学等。其中,美国斯坦福大学在该领域起步较早。

1991 年,该大学朱棣文团队首次观察到原子干涉仪的陀螺效应,原子干涉陀螺仪的巨大精度潜力引起了发达国家的密切关注^[3];1997 年首次实现用热原子束(二维横向冷却)进行干涉的原子陀螺仪^[17,46],短期灵敏度为 $2 \times 10^{-8} \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{1/2})$,与当时最先进的有源环形激光陀螺仪相当;2000 年,该团队对物质波干涉陀螺仪进行改进,使用一对反向传播的原子束来区分旋转和加速度,确定绝对零旋转速率的同时实现共模抑制,系统 1 s 的积分内具有 $6 \times 10^{-10} \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{1/2})$ 的短期旋转速率灵敏度^[47],达到了当时原子干涉陀螺仪的最高水平。2006 年,斯坦福大学将一种精确光电反转陀螺仪输入轴的新技术引入热原子干涉陀螺仪原理样机,使其性能进一步提升,实现角随机游走系数小于 $3 \times 10^{-6} (^\circ)/\text{h}^{1/2}$ 、零偏稳定性优于 $6 \times 10^{-5} (^\circ)/\text{h}$ 、标度因数稳定性小于 $5 \times 10^{-6} [16-17,48]$,满足高精度导航的短期噪声和长期稳定性要求。2011 年,研究人员展示了一种基于脉冲序列的光脉冲冷原子干涉陀螺仪,克服了以往原子干涉陀螺仪的精度和动态范围限制,将以前传感器的动态范围扩展了 1 000 倍^[49]。2020 年,斯坦福大学展示了一种窄线宽 780 nm 激光系统,具有 40 W 功率和 230 MHz 的频率调制带宽^[50];该系统通过提供同步斯塔克位移补偿双分束器,最大限度地抑制原子分束过程中的原子自发辐射过程,有助于提高原子干涉测量的高精度测量性能。2021 年,斯坦福大学针对长基线原子干涉测量介绍了物质波原子梯度计干涉传感器(matter-wave atomic gradiometer interferometric sensor, MAGIS)系列实验的第一个探测器 MAGIS-100^[51],其具有 100 m 的垂直基线,是费米实验室正在建造的下一代量子传感器,结合了最先进的 10 m 级原子干涉仪中展示的技术与世界上最好的原子钟的最新技术,将为未来 km 级探测器提供开发平台;同时,该探测器足够灵敏,可以探测来自自己已知来源的引力波。

法国巴黎天文台在原子干涉陀螺仪研究领域也取得了一定成就。2006 年,巴黎天文台开发出基于冷原子干涉测量的六轴惯性传感器,三个单 Raman 光束对在三个正交方向上连续脉冲,从而实现惯导中角速度与加速度的三维测量,在 600 s 的积分时间下,角速度和加速度测量分辨率分别为 $2.8 \times 10^{-2} (^\circ)/\text{h}$ 和 $6.4 \times 10^{-2} \mu\text{g}$ ^[52]。2009 年,该单位的 Landragin 团队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。其后,该单位在陀螺仪的小型化和性能提升

方面不断取得突破。2018 年报道实现了灵敏度达到 $3 \times 10^{-8} \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{1/2})$ 、零偏稳定性优于 $6.2 \times 10^{-5} (^\circ)/\text{h}$ 的超高精度四脉冲冷原子干涉陀螺仪。在 2022 年的第九届 IEEE 惯性传感器与系统国际研讨会中,法国巴黎天文台等单位报告了高稳定双轴冷原子陀螺仪 SYRTE(如图 14 所示),具有 11 cm^2 的大物理面积和 800 ms 的长询问时间,灵敏度和稳定性达到 $3 \times 10^{-10} \text{ rad}/\text{s}$ ^[53]。

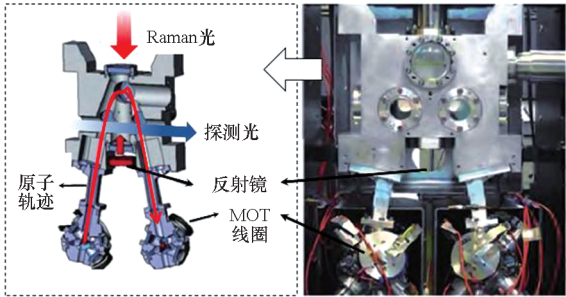


图 14 法国巴黎天文台研制的冷原子干涉陀螺仪^[53]

Fig. 14 Cold atomic interferometric gyroscope developed at the Paris Observatory in France^[53]

德国汉诺威大学针对该技术的研究起步较晚,但是发展迅速。2008 年,汉诺威大学搭建了一套紧凑型的双轴型冷原子干涉仪。如图 15^[54]所示,其敏感单元长度小于 1 m,对角速度和加速度的测量灵敏度分别为 $2 \times 10^{-4} \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{1/2})$ 和 $2 \times 10^{-4} \text{ g}/\text{Hz}^{1/2}$ 。随后陀螺仪的灵敏度和精度不断提升。2015 年报道显示^[55],短期灵敏度提升至 $1.2 \times 10^{-7} \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{1/2})$,长期稳定性达到 $5.4 \times 10^{-3} (^\circ)/\text{h}$ 。

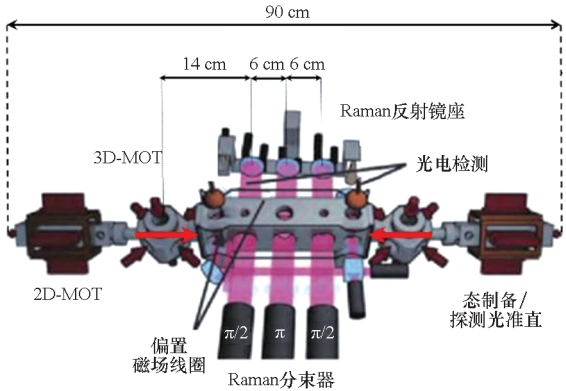


图 15 德国汉诺威大学研制的冷原子干涉陀螺仪^[54]

Fig. 15 Cold atom interferometric gyroscope developed at the University of Hannover in Germany^[54]

除此之外,美国的康奈尔大学、海军实验室、NIST 以及 Sandia 国家实验室也都对冷原子干涉陀螺仪开展了研究工作。NIST 使用 cm 级原子气室实现了基于单一原子源的多轴测量点源原子干

涉仪(atomic point-source interferometry, PSI),基于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 $5 \times 10^{-4} \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{1/2})$,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 $10^{-6} \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{1/2})$ 。该陀螺仪的性能目前并不高,但是体积小、实现简单,相比传统原子干涉陀螺仪还可以同时测量加速度,灵敏度可达 $1.6 \times 10^{-5} \text{ g}/\text{Hz}^{1/2}$ 。2003 年,美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)制定了利用超冷原子干涉原理实现高精度惯性导航系统研究计划,并将以原子干涉技术为核心的原子惯性传感技术视为下一代的主导惯性技术。2020 年,以色列魏茨曼科学研究所开发了“双 T 干涉”(dual-T interferometry)方法^[56],同时运行两个尺度因子略微不同的干涉仪。这种配置产生莫尔条纹效应,创造出比单一干涉仪大得多的有效周期,同时保持高灵敏度并抑制共模噪声。在单次测量、两次连续测量与三次连续测量中分别将动态范围提高了约 10 倍、100 倍及 1 000 倍。2022 年,美国弗吉尼亚大学改进了基于玻色凝聚原子的双 Sagnac 干涉仪,转动灵敏度的散粒噪声极限可达 $6 \times 10^{-7} \text{ rad}/\text{s}$ ^[5]。2022 年,巴黎萨克雷大学的 Bernard 等研制了用于机载应用的冷原子惯性测量单元,可以交替测量每个惯性分量(3 次加速度和 3 次旋转),与经典的惯性传感器混合,能够结合两种技术的优势,在机载惯性导航兼容性范围内提供具有高动态范围的精确连续测量^[57]。

5.2 国内研究现状

近年来,我国也加紧了对原子干涉陀螺仪技术的研究,主要研究单位有中国科学院精密测量院(中国科学院武汉物理与数学研究所)、北京航天控制仪器研究所、华中光电研究所、清华大学、华中科技大学、哈尔滨工业大学等。

2010 年,中国科学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,报道了研制的可搬运冷原子干涉陀螺仪,解决了原子干涉陀螺仪物理系统与光学系统的集成化问题,使得高精度原子干涉陀螺仪的可搬运实验得以演示。如图 16 所示,陀螺仪的物理系统体积为 0.24 m^3 ,光学系统体积为 0.04 m^3 ,短期灵敏度和长期稳定性分别为 $1.5 \times 10^{-7} \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{1/2})$ 和 $2 \times 10^{-4} (^\circ)/\text{h} @ 23\,000 \text{ s}$ ^[58]。据目前公开报道数据,该原子干涉陀螺仪是将冷原子团与三脉冲 Raman 光相互作用构

型的国际最好水平。2022 年,中国科学院精密测量院实现了 Mach-Zehnder 型双原子干涉陀螺仪,干涉臂长度达 40 cm,干涉面积高达 1.2 cm^2 (当时 Mach-Zehnder 型原子干涉陀螺中最大),将三个大尺度分离的 Raman 激光精确对齐到 $0.4\text{ }\mu\text{rad}$ 水平,同时通过调节原子速度实现了绝对旋转测量,灵敏度达到 $1.5\times 10^{-7}\text{ rad}/(\text{s}\cdot\text{Hz}^{1/2})$,长期稳定性达到 $9.5\times 10^{-10}\text{ rad}/\text{s}@23\,000\text{ s}^{[59]}$ 。

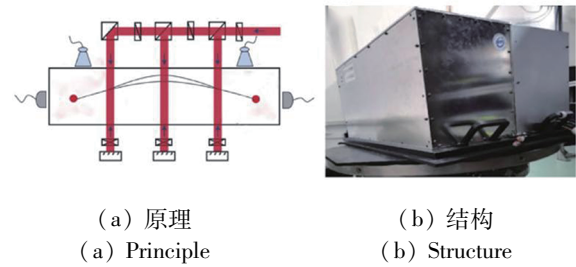


图 16 中国科学院精密测量院研制的 Mach-Zehnder 型原子干涉陀螺仪^[58]

Fig. 16 Mach-Zehnder atomic interference gyroscope developed by the Institute of Precision Metry, Chinese Academy of Sciences^[58]

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。2008 年,清华大学以三脉冲构型的原子干涉仪为例,提出了一种基于原子干涉仪相位调制进行绝对转动测量的方法,该方法利用傅里叶变换实现在动量谱空间对转动角速度进行测量,可以直接获得绝对转动角速度^[43]。2013 年,清华大学提出了基于两步低温阳极键合工艺的碱金属蒸气腔室制作方法,可用于实现原子钟、原子磁力计及原子陀螺仪等原子器件的芯片级集成^[60]。2015 年,清华大学开发了一种使用连续冷⁸⁷Rb 原子源的光脉冲原子干涉仪,通过扩大 Sagnac 环面积,提高旋转灵敏度,实现了 0.07 mm^2 的干涉面积,为高带宽陀螺仪应用提供了技术基础^[33]。2017 年,清华大学提出了基于连续冷原子束的干涉陀螺仪方案,在保证系统灵敏度和紧凑型的前提下有助于解决冷原子干涉陀螺仪低带宽和数据率的问题,陀螺理论上 1 s 积分时间内的短期灵敏度为 $7.8\times 10^{-5}\text{ rad}/(\text{s}\cdot\text{Hz}^{1/2})$,其中干涉条纹信噪比为 15.1,系统带宽 190 Hz,理论带宽可以达到 790 Hz^[35]。2024 年,清华大学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,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 $7.3\text{ }\mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$ 和

$3.9\times 10^{-5}\text{ rad}/(\text{s}\cdot\text{Hz}^{1/2})$,长期稳定性分别为 $0.13\text{ }\mu\text{g}$ 和 $3.5\times 10^{-5}\text{ rad}/\text{s}^{[61]}$ 。

2018 年,哈尔滨工业大学基于三脉冲对抛式冷原子干涉陀螺的物理实现过程,分析主要噪声来源及其作用机理,并基于灵敏度函数提出了功率谱分析函数方法;此外,还通过 Allan 方差法对中国科学院武汉物理与数学研究所的冷原子陀螺进行了系统性能评估,为后续系统精度提高提供了理论依据^[62]。2021 年,北京航天控制仪器研究所针对原子陀螺中半导体激光稳频技术研究,介绍了饱和吸收光谱稳频、双色激光稳频和调制转移谱稳频的工作原理和特点,并展望了激光稳频技术发展趋势,对研制高性能原子陀螺仪具有重要参考意义^[63]。同年,华中光电技术研究所从 Raman 光与原子相互作用的内态演化方程出发,根据实际 Raman 光强度的变化推导了三脉冲冷原子陀螺仪在不同 Raman 光强度下的相位输出值,由此提出了一种通过监控 Raman 光强度变化对实际输出值进行后处理的补偿算法^[64],并通过光强调制实验验证了该算法的有效性,补偿后系统输出的长期稳定性提升了 33%。

2021 年,华中光电技术研究所联合华中科技大学提出倾斜镜补偿方案,用于恢复超出旋转率极限的三脉冲冷原子陀螺仪的干涉条纹对比度,如图 17 所示。该研究将 $0\sim 15\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$ 的旋转率范围内的干涉条纹对比度恢复至约 35%,条纹对比度不稳定性仅为 1.2%,表现出极强稳健性,并

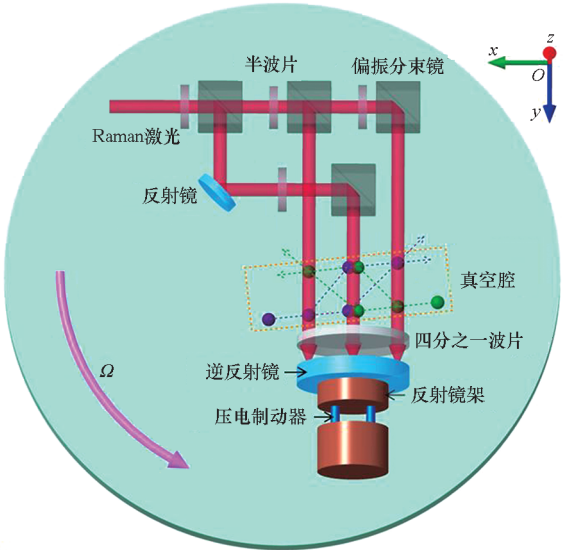


图 17 华中科技大学研制的三脉冲冷原子干涉陀螺仪示意图^[65]

Fig. 17 Schematic diagram of the three-pulse cold atom interferometer gyroscope developed by Huazhong University of Science and Technology^[65]

且在高达 60 (°)/s 的旋转率下无灵敏度损失,为高性能惯性导航系统提供了新解决方案^[65]。

2022 年,华中科技大学设计了一个大标度因子四脉冲原子干涉陀螺仪的探头部分,以提高转动测量的灵敏度,预期可以实现最大干涉时间为 $4T =$

1.6 s 的原子干涉转动测量,有效 Sagnac 面积达 147.2 cm²;同时,采用有限元法对探头的磁屏蔽结构进行仿真优化,设计了一种可拆卸的双层磁屏蔽结构^[66]。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^[17]。

表 2 国内外部分原子干涉陀螺仪性能比较

Tab. 2 Comparison of the performance of some atomic interference gyroscopes at home and abroad

研究团队	灵敏度/ (rad/(s·Hz ^{1/2}))	ARW/ ((°)/h ^{1/2})	长期稳定性/ ((°)/h)	特点
中国科学院精密测量院 ^[59]	1.5×10 ⁻⁷		1.9×10 ⁻⁴	三脉冲(目前最好)、体积大、精度高
斯坦福大学 ^[48,67]		3.0×10 ⁻⁶	6.0×10 ⁻⁵	三脉冲、横向冷却的热原子束、体积大、精度高
斯坦福大学 & AOSense ^[67]		3.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴	四脉冲、混合传感器、体积小
斯坦福大学 ^[49]	8.5×10 ⁻⁸			四脉冲、双干涉仪、体积大、动态范围大、灵敏度高
巴黎天文台 ^[37]	3.0×10 ⁻⁸		6.2×10 ⁻⁵	四脉冲、交替抛射、体积大、精度高
清华大学 ^[29]	6.2×10 ⁻⁵		1.7×10 ⁻¹	三脉冲、双干涉仪、体积适中、长期稳定性差
汉诺威大学 ^[55]	1.2×10 ⁻⁷		5.4×10 ⁻³	三脉冲、体积小、动态范围大
Sandia 国家实验室 ^[54]	1.0×10 ⁻⁶		<0.01	三脉冲、带宽大、体积小
美国海军实验室 ^[68-70]	1.7×10 ⁻⁸			三脉冲、对比度高、原子通量大、灵敏度高

原子干涉陀螺仪的发展,对于满足我国航天、航海发展对高性能陀螺仪的迫切需求方面存在重大意义^[16]。其所具备的超高理论精度,特别适合作为高精度平台式惯性导航系统的传感器应用于战略武器装备。但目前来看,原子干涉陀螺仪距离最终产业化应用仍面临许多技术困难,需要做好中长期的规划部署^[3]。

6 原子干涉陀螺的关键技术

我国原子干涉陀螺相关技术发展起步较晚,在理论研究与精密制造等方面曾与美国等发达国家存在一定差距,经过长期的技术追赶,目前主流的四脉冲原子陀螺仪角随机游走噪声与国外相差 2 倍,仍需开展科技创新和技术突破等工作,以满足各领域工程化应用需求。下面简单介绍其中的

关键技术。

6.1 原子陀螺的小型集成化技术

传统实验室样机通常采用两到三台激光器及配套激光控制系统,体积庞大,运输困难,并且样机测量稳定性高度依赖激光参数稳定性,难以适应复杂外场条件。因此,原子干涉陀螺的小型化、集成化对于工程化应用而言十分关键,目前主要集中在使用速度更低的冷原子、缩小真空系统和激光器等方式缩小光学系统的体积,未来将朝着提高光学系统的环境适应能力以及简化激光控制系统构型等方向发展。国内已有小型化、集成化和稳定性强的光学系统研究突破。如图 18 所示,通过使用小型化的激光器与光学元件能大大减小系统体积^[71]。



图 18 黄壮团队实验系统^[71]

Fig. 18 Experimental system of Huang Zhuang's group^[71]

2022 年,陈玮婷团队^[72]将现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)作为集成微处理单元,以直接数字频率合成器(direct digital synthesizer, DDS)为分布执行单元,实现了利用单激光器分时输出冷原子干涉所需所有操控激光,包括冷却光、泵浦光、吹散光、Raman 光和探测光等,激光频率(相位)、功率和开关全程在线可调,降低系统尺寸的同时提高控制集成度,如图 19 所示。

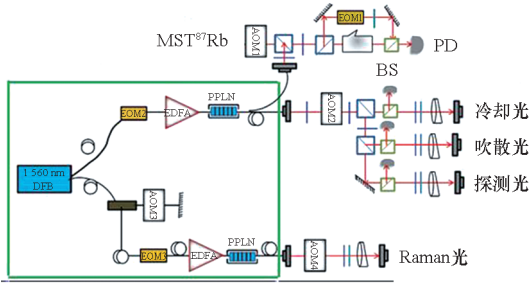


图 19 单激光器冷原子干涉仪激光光路示意图^[72]
Fig. 19 Schematic diagram of the laser optical path of a single-laser cold atom interferometer^[72]

6.2 原子芯片制备工艺

原子干涉过程中,原子束在相邻 Raman 光之间的自由飞行导致干涉环路的形成需要较大体积,限制了其在导航系统上的应用。目前成熟的原子干涉陀螺工程化样机都是空间型,具有紧凑结构的芯片构型可以解决这一小型化问题。然而目前相关研究大部分仍处于基础理论阶段,面临许多挑战。比如,芯片构型对芯片导线加工的精细度提出了极高的要求,如图 20 所示,芯片上磁场梯度较大,原子引导线(宽度仅 10 μm)上的加工瑕疵会引起磁场“尖角”,从而破坏原子波相位与原子分布均匀性,影响干涉条纹的形成与检测^[16]。

6.3 差分消噪与惯性解耦技术

自由空间中飞行的原子束会不可避免受到重力影响,给测量结果带来误差,即便是在宇宙中航行的飞行器,虽然在太空中受到重力影响很小,但其在椭圆轨道近地点与远地点向心加速度的不同仍会带来微小误差,影响高精度测量结果。由式(5),当原子速度相反时,旋转引起的相移也相反,因此,需要采用原子运动速度方向相反的双原子干涉环路陀螺差分消除重力等对旋转测量的影响。目前,国内外通常使用平抛结构引入差分法,实现对三脉冲型重力加速度解耦。水平对抛式原子干涉陀螺不仅可以解耦惯性参量,还能消除

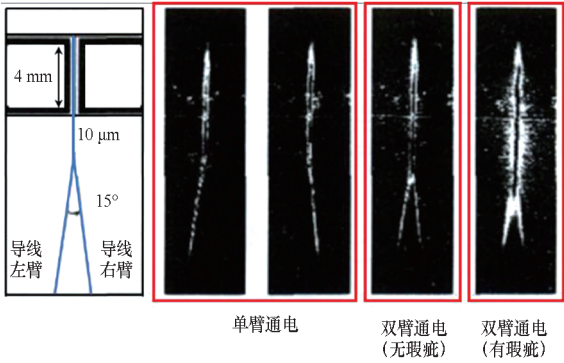


图 20 原子引导导线微小的宽度变化引起原子不均匀分布^[16]

Fig. 20 Uneven distribution of atoms due to small variations in the width of atomic guide wires^[16]

激光相位抖动和重力等因素对旋转测量的影响,使测量的灵敏度提高一倍^[24]。针对这一结构,国外研究单位主要有德国汉诺威大学(如图 11 的水平对抛式冷原子干涉仪)和美国 Sandia 国家实验室,国内包括清华大学、中国科学院及 717 所等单位基本采用此结构。

6.4 其他重要技术

冷原子干涉测量系统中,磁光阱通过梯度磁场和囚禁光将原子冷却并囚禁在轴心,偏置磁场提供量子化轴以确保原子能级跃迁的稳定性,补偿磁场则用于抵消外界磁场干扰,三类磁场的精密控制通过低噪声恒流源和快速响应控制策略实现,国内已有研究团队^[73]实现了磁场开关时间优于 300 μs (开启)/50 μs (关断)的技术突破。

窄线宽激光器在冷却原子和干涉测量中同样起到重要作用,其频率稳定性和相位稳定性直接影响测量精度。目前通过光学锁相环^[74-75]、声光调制(acousto-optic modulator, AOM)和电光调制(electro-optic modulator, EOM)等技术实现 Raman 激光的频率差和相位稳定^[76],结合半导体激光器注入锁定技术,进一步提升了系统的稳定性和集成度。目前市场上声光调制移频频率和衍射效率普遍较低^[77],要求多台激光器配合使用;电光调制边带结合注入锁定是简单稳定的激光锁相实验方案,适用于精密测量领域,同时得益于半导体激光器注入锁定技术的越发成熟,这一方案是今后原子干涉陀螺仪中 Raman 光制备的主要方向^[78-80]。

此外,背景气体粒子(氮气、水蒸气等)与冷原子碰撞会导致原子束发散及相干时间缩短,显著降低干涉信号信噪比,同时影响磁光阱的原子装载效率。为此需维持超高真空环境($10^{-8} \sim$

10^{-7} Pa),此条件下原子与气体粒子碰撞概率可忽略(约每 200 s 一次)。国内研究团队^[81]通过离子泵(抽速 40 L/s)和钛升华泵技术实现了超高真空环境的维持,并采用钛合金真空容器以进一步提高系统的可靠性和环境适应性。这些技术的协同发展为原子干涉陀螺的高精度测量和工程化应用奠定了坚实基础。

7 发展瓶颈

经过多年的发展,原子干涉陀螺正逐渐从实验室环境下的原理样机走向工程化的应用过渡^[82],尽管原子干涉陀螺因其理论上超高灵敏度与良好的长期稳定性而受到广泛关注,但其技术应用仍然存在诸多瓶颈,还有许多可探究的问题,限制了其在商业化和技术普及中的进一步发展。在工程技术方面,如何实现小型化、集成化和自动化并且保持原有的高精度是一个重要问题;在基础技术方面,对于如何提高数据更新率、带宽以及动态范围也仍待考察^[29]。若要加速推进原子干涉陀螺的发展,提高其性能指标以大量投入实际应用,原子干涉陀螺还应降低系统结构的复杂性与昂贵的制造成本,突破数据更新率、动态范围与测量带宽受限等影响陀螺重要性能指标的技术瓶颈。

7.1 系统复杂性与高制造成本

原子干涉陀螺仪作为一种基于量子干涉原理的高精度惯性测量设备,其系统复杂性与高成本主要体现在光学系统、原子冷却与操控、真空与磁屏蔽系统、信号处理与控制系统等多个方面。

首先,光学系统的复杂性是系统设计中的核心难点之一。原子干涉陀螺依赖高精度的激光系统,包括激光器、光学腔、光束分束器和反射镜等。为了确保干涉信号的质量,这些光学元件需要极高的制造精度和稳定性,将导致高额的制造成本。例如,Raman 激光系统需要对激光频率、相位和强度进行精确控制,以实现高灵敏度的角速度测量^[23,27],其中窄线宽激光器和频率锁定装置价格昂贵,是系统成本的重要组成部分;此外,多脉冲干涉方案中需要多束激光的精确空间和时间控制,这进一步增加了系统的设计和调试难度。

其次,原子冷却与操控技术是实现高精度测量的关键。通常通过激光冷却技术将原子温度降低到 μK 甚至 nK 量级,以减少热噪声对测量的影响^[52]。冷原子捕获和操控需要复杂的磁光阱或偶极阱系统,这些系统对真空环境、磁场分布和激光参数的要求极高,并且超高真空腔体的制造和

维护成本极高,磁光阱系统的设计和运行也需要大量资源投入。此外,原子束的相干性和稳定性直接决定了干涉信号的质量,这对系统的设计和运行提出了更高的要求。

再次,真空与磁屏蔽系统是保证测量精度的重要组成部分。原子干涉陀螺系统通常需要在超高真空环境下运行,以避免原子与背景气体的碰撞,同时需要多层磁屏蔽装置来减少外界磁场对原子能级的影响^[66]。这些装置的设计和制造不仅复杂,还显著增加了系统的体积和质量。

最后,信号处理与控制系统的复杂性也不容忽视。系统的信号处理需要高精度的相位测量和解调技术,这对电子控制系统的设计提出了极高要求。系统需要实时控制激光器、磁场和原子操作过程,同时对干涉信号进行高精度采集和分析^[47]。

总体来看,高精度的仪器设备加上复杂的集成与调试进一步增加了成本,尤其是在实验室阶段,系统的每一次升级和优化都需要大量的资源投入^[47]。目前,原子干涉陀螺仍处于实验室研究和原型开发阶段,尚未实现大规模量产。这种低产量不仅限制了技术的推广应用,也进一步推高了设备的制造成本^[37]。

7.2 数据更新率受限

由式(18)~(19)可知,原子干涉陀螺的数据更新率会受到包括原子云团制备、原子飞行和原子干涉所需时间等因素的制约。原子干涉陀螺通常依赖冷原子技术,通过激光冷却将原子温度降低到 μK 甚至 nK 量级。这一过程需要数百毫秒甚至数秒的时间来捕获和冷却足够数量的原子,从而限制了系统的测量频率。此外,为了提高测量精度,干涉时间(即原子在干涉路径中传播的时间)通常较长。例如,Guessoum 团队的冷原子干涉陀螺仪采用 800 ms 的长询问时间^[53],进一步限制了数据更新率。最后,为了确保测量精度,系统需要在每次测量前进行光学对准、磁场校准和温度稳定等操作,这些步骤也会占用一定时间,影响数据更新率。

一般来说,应用惯导技术的场合所需数据更新率需要在 100 Hz 以上,所以目前导航场景实际应用的连续性原子干涉陀螺的数据更新率基本在 100 Hz 的水平。对于脉冲型原子干涉仪,其数据更新率较低,主要有两种提升方法:

1)一种方法是通过缩短干涉时间来提升数据更新率。由式(5)可知,Sagnac 相移对 T 具有二次依赖性,在对抛式原子干涉仪中的自由落体

测量中,缩短 Raman 光作用时间^[83]可以缩短干涉路径,但同时也将带来灵敏度的显著下降。此时,可通过使用较大原子数并最小化两次测量之间的死区时间的方式来尽量补偿灵敏度的下降,即重新捕获并在两次发射之间回收尽可能多的原子。2014 年,Sandia 国家实验室的研究人员在干涉仪序列后重新捕获原子,可以在每秒 50 至 100 次测量的高数据速率下保持较大的原子数^[84],使脉冲式原子陀螺仪的数据更新率达到 60 Hz 左右,但仍不足以满足一般惯导技术的应用需求,其实验装置如图 21 所示。

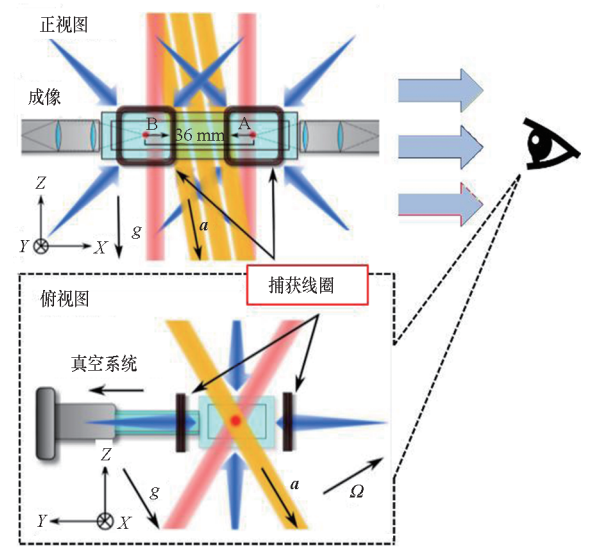


图 21 Sandia 国家实验室高数据更新率原子干涉陀螺^[84]
Fig. 21 Sandia National Laboratory atomic interferometric gyroscope with high data update rate^[84]

2) 另一种方法是利用其他高数据更新率的惯性传感器与原子干涉仪相结合,这样的组合输出既具有较高的数据更新率,又保持了原子干涉仪的长期稳定性。2014 年,法国巴黎天文台 Landragin 团队通过原子干涉仪的输出来修正其他惯性传感器^[85],最终使得输出信号的数据更新率达到 430 Hz^[29],如图 22 所示。但该方案需要额外的高精度惯性传感器提供信息,并且系统复杂,成本也更高的问题未得到解决。

此外,美国空军大学使用 Kalman 滤波器,将导航级传感器与原子干涉仪结合,提出一种组合算法^[86],如图 23 所示。该方法将两个测量传感器的测量值均接入 Kalman 滤波器中,滤波器根据冷原子干涉仪得到的速度、方位等的测量误差,修正导航级惯性导航系统的输出,以实现高数据率的输出。该方法虽然可以提高数据输出速率,但仍然需要其他具有较高传感精度的惯导传感器辅助,并且系统复杂,成本较高。2022 年,中国科学

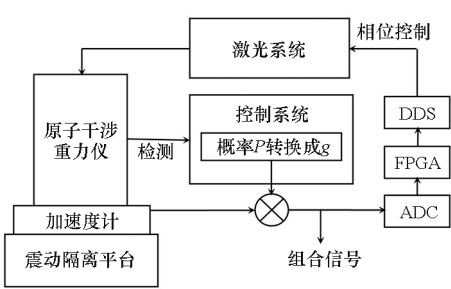


图 22 法国巴黎天文台原子干涉加速度计与传统加速度计组合方案^[85]
Fig. 22 Combination of atomic interferometer and conventional accelerometer at the Paris

Observatory in France^[85]

院提出一种采用组合陀螺仪(高精度原子干涉陀螺 + 高采样率光纤陀螺)和加速度计构建单轴惯性导航系统的技术方案,采用 Kalman 滤波器、原子干涉陀螺对光纤陀螺进行校准,建立了组合陀螺仪导航系统^[45]。虽然这类组合输出的方式能够使惯性传感器具有高精度和高数据更新率,但对进行组合导航的其他惯性传感器精度要求依然很高,系统依然复杂,成本较高。

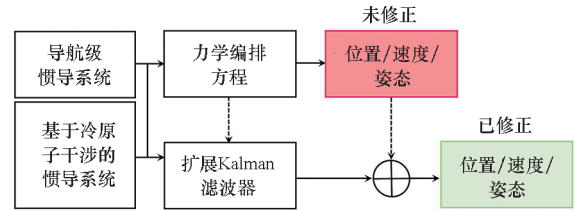


图 23 美国空军大学组合导航算法示意图^[86]
Fig. 23 Schematic diagram of integrated navigation

algorithm of the United States Air Force University^[86]

7.3 非歧义动态范围受限

非歧义动态范围是指原子干涉陀螺在不发生信号模糊或相位跳变的情况下,能够准确测量的最大角速度范围。原子干涉陀螺通过测量干涉条纹的相移推算转动信息,但其非歧义动态范围受相位的限制,即当被测量引起的相移超过 2π 时,将无法判断其处于哪个周期。这一指标直接决定了陀螺在高动态环境(如航空航天、车辆导航)中的适用性。由于原子干涉陀螺仪的工作原理依赖于干涉条纹的相位变化,其非歧义动态范围通常受到干涉条纹周期性和相位测量范围的限制。在实际应用中,原子干涉陀螺的非歧义动态范围通常较小,难以满足高动态环境下的测量需求。例如,当输入角速度超过干涉条纹的周期范围时,干涉信号会出现模糊或跳变,导致测量误差。这一问题在动态范围较大的应用场景(如高速飞行

器、卫星姿态控制)中尤为突出。这一问题将在原子干涉惯性传感器工程实用化过程中限制其应用场景^[29]。原子干涉惯性传感器的动态范围和灵敏度相互制约,若要增大动态范围,可采用减少原子干涉时间 T 或干涉距离 L 的方式,但会导致灵敏度的降低。如何在不损失灵敏度的前提下增大非歧义动态范围,对于原子干涉陀螺仪实际应用具有重要意义。

非歧义动态范围受限的原因主要有:

- 1)干涉条纹周期性限制:原子干涉陀螺基于原子波的干涉效应,其产生的干涉条纹的周期性决定了其能够测量的最大角速度范围。当输入角速度超过干涉条纹的周期范围时,相位变化会出现模糊,导致测量结果不准确。
- 2)激光相位噪声的影响:激光系统的相位噪声会对干涉信号的相位测量产生干扰,进一步限制了动态范围的扩展。
- 3)信号处理能力的限制:当前的信号处理技术在高动态环境下难以实时解算快速变化的干涉信号,导致动态范围受限。
- 4)原子冷却与操控时间:原子冷却和干涉过程需要一定的时间,这使得系统难以快速响应高动态输入。

解决上述问题的办法之一是使用大动态范围的陀螺仪进行辅助分辨原子干涉周期($2n\pi$)^[46],该方案与将原子干涉仪和导航级惯导系统相结合提高数据更新率的方法类似,具有较大动态范围的惯性传感器提供初步确定的转速范围,原子干涉仪提供更高精度的测量结果。需要注意的是,两个传感器测量点的不同、经典传感器的偏置和传递函数等因素均会产生误差^[29],一定程度上限制了其工程应用。

另一种方法是采用两种原子进行干涉^[87],如图 24 所示为两种同位素的全局干涉时间序列,图 25 为两个同步干涉仪的实验干涉信号。在该双组分原子干涉测量方案中,原子波源由⁸⁷Rb、⁸⁵Rb两种原子组成,⁸⁷Rb 原子在干涉时具有较小的标度因数和较大的动态范围,而⁸⁵Rb 原子具有更高的灵敏度和更小的动态范围。结合两个干涉

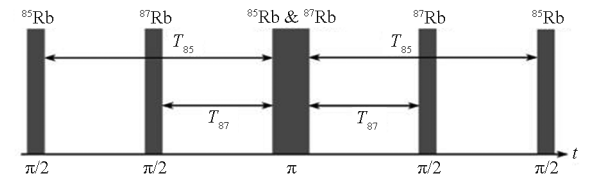


图 24 两种同位素的全局干涉时间序列^[87]
Fig. 24 Global interference time series of two isotopes^[87]

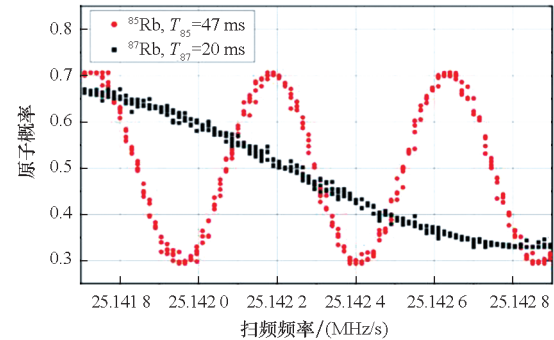


图 25 法国航空航天研究院双组分方案^[87]
Fig. 25 Two-component scheme of the French Institute of Aerospace Research^[87]

信号的干涉相移求解转速,即可在增大动态范围的同时不损失系统检测灵敏度。

此外,还可通过对相干光的频率进行调制来提高原子干涉仪的动态范围^[88]。该方案首先对相干操纵激光进行调制,使用调制得到的相干操纵光控制原子束进行分束、反射及合束,实现干涉;然后获取原子干涉的干涉条纹,计算干涉条纹包络中心点的调制频率即可得到转动角速度;最后,还可通过改进激光系统的相位噪声控制技术,减少激光相位噪声对干涉信号的影响,从而提高动态范围。

7.4 测量带宽受限

测量带宽是指原子干涉陀螺仪能够准确响应的信号频率范围。较高的测量带宽对于动态环境中的惯性测量至关重要,例如航空航天导航、车辆动态控制和地震监测等场景。然而,原子干涉陀螺的测量带宽通常受限于其工作原理和系统设计,难以满足高频动态信号的测量需求。这一问题在工程应用中显得尤为突出,限制了其适用范围。原子干涉陀螺的每个测量周期包含原子冷却、干涉和探测等多个步骤,而原子云的制备和操控需要较长时间,这导致测量频率受限,难以实现高带宽测量。此外,测量周期之间存在不可避免的死时间(dead time),即该时间段干涉区内不存在原子,则干涉仪无法获得信号,尤其是在需要连续测量的动态环境中,这种死时间进一步限制了测量带宽。为了消除死时间,通常采用连续的冷原子束源来实现干涉,这样可以获得连续的信号采集从而消除死时间,同时可以适当兼顾系统灵敏度和数据率。2017 年,清华大学报道了基于连续冷原子束的干涉陀螺仪的研究进展^[35],如图 26 所示。相比脉冲型冷原子团干涉陀螺,该连续型方案通过连续采样获得更高数据更新率,更

能适应动态环境下的运动测量。然而,连续型原子干涉仪的原子源速度分布较宽,相比脉冲型原子干涉仪,其长期稳定性更差,同时存在着系统复杂、成本较高的问题^[29]。

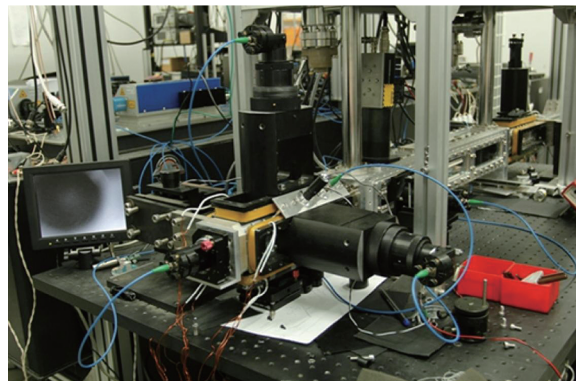


图 26 原子干涉陀螺仪屏蔽之前的物理系统^[35]

Fig. 26 Experimental set-up of the atom interferometer gyroscope before magnetically shielding^[35]

7.5 新兴技术解决方案

针对原子干涉陀螺仪在系统复杂性、数据更新率、动态范围以及测量带宽等方面面临的技术瓶颈,近年来涌现一些具有前瞻性的新兴技术,有望从根本上突破这些限制。其中,量子纠缠增强灵敏度技术和光子集成芯片技术作为两个重要研究方向,正在改变原子干涉陀螺仪的技术路线。量子纠缠增强灵敏度技术通过操控原子间的量子关联,可以突破标准量子极限,从根本上提升测量灵敏度;光子集成芯片技术则通过将复杂的光学系统微型化、集成化,大幅降低系统体积、复杂度和成本。这些新兴技术不仅有望解决当前面临的瓶颈问题,还可能为原子干涉陀螺仪开辟全新的应用场景。

Greve 等^[89]在 2022 年报告了一种在高精度光学腔量子电动力学系统中实现的物质波干涉仪,利用 700 个在外部自由度上纠缠的原子,并通过量子非破坏测量 (quantum non-demolition measurement, QND) 与单轴扭曲动力学 (one-axis twisting dynamics, OAT) 两种机制增强相位测量的灵敏度,成功实现了灵敏度的增强,为原子干涉陀螺仪研究提供了重要参考。2024 年, Kodigala 等^[90]设计并验证了一种高性能硅光子单边带调制器,成功将传统的复杂光学系统微型化,为原子干涉陀螺仪的体积、重量和功耗 (size, weight, and power, SWaP) 瓶颈提供了有效解决方案,实现了高达 47.8 dB 的边带抑制比和 30 dB 的载波抑制比,这一指标已达到甚至超过了传统体积光

学系统的水平;其次,该团队还利用该芯片构建的原子干涉系统成功演示了冷原子生成、原子态选择性检测以及清晰的原子干涉条纹,并通过测量得到重力加速度值 $g \approx 9.77 \pm 0.01 \text{ m/s}^2$,验证了系统的实用性和可靠性。该研究从根本上改变了原子干涉陀螺仪的技术路线,将传统的体积光学元件替换为微型化的集成光子芯片。这不仅大幅度减小了系统尺寸,还提高了系统对环境扰动 (如振动、冲击和辐射) 的抵抗能力,同时降低了系统复杂度和功耗。

8 总结与展望

作为有望成为新一代陀螺仪的典型代表,原子干涉陀螺具有极高的理论精度与良好的零偏稳定性,在未来具有很大的发展潜力,从目前世界各地相关研究人员提出的技术创新路线来看,原子干涉陀螺的发展趋势可概括为以下几个重点方向:

1) 探索外部干扰因素的合理解决方案。目前针对温度、振动等动态问题并没有普适的技术手段加以解决,一定程度上限制了原子干涉陀螺精度的进一步提升与突破。未来研究应开发高精度温控系统,减少温度波动对原子干涉信号的影响,如通过采用热屏蔽和主动温控技术,可以显著提高系统的环境适应性。针对动态环境中的振动干扰,研究高效的振动隔离装置和动态补偿算法,如采用基于惯性传感器的实时振动补偿技术,可以有效降低振动噪声对测量精度的影响。

2) 采用模块化设计方法,简化激光控制系统构型,将光学系统、冷原子系统和信号处理系统分离,便于生产和维护。此外还应研究高效的大动量转移 (large momentum transfer, LMT) 技术,可以在不增加系统复杂性的情况下提高干涉信号的灵敏度。针对半导体激光器的频率稳定性问题,利用更高效的稳频技术 (如调制转移谱稳频和双色激光稳频),以提高激光系统的长期稳定性。

3) 研究基于微纳加工技术的集成光学芯片和冷原子芯片,减少系统体积和复杂性。例如,通过开发低成本、高性能的激光器和真空腔体,可以显著降低系统成本。芯片构型原子干涉陀螺是实现小型化与集成化的一大重要方向,进一步简化陀螺结构,但目前对相关制作工艺水平要求很高,如对芯片导线加工具有很高的精细度要求等。

4) 单一的原子干涉陀螺在长期漂移和动态范围方面存在一定局限性,未来的研究可以探索原子干涉陀螺与其他惯性传感器的组合方案,以

实现优势互补。①与光纤陀螺的融合:光纤陀螺具有较大的动态范围和较高的响应速度,可以与原子干涉陀螺结合形成混合导航系统,从而弥补其在动态性能上的不足。②与 MEMS 陀螺的融合:MEMS 陀螺以其低成本和小体积著称,可以与原子干涉陀螺结合应用于便携式导航设备。③多传感器数据融合算法:研究基于人工智能和机器学习的多传感器数据融合算法,可以提高系统的鲁棒性和实时性。

5)原子干涉陀螺的数据更新率受限于冷原子制备和干涉测量周期,难以满足高动态环境下的实时测量需求,以下几种可行的方案能帮助提高陀螺系统数据更新率。①发展连续原子束技术:通过采用连续原子束加载技术,可以显著缩短冷原子制备时间,从而提高数据更新率。②采用并行测量技术:研究多通道并行测量方案,通过同时操作多个干涉通道,可以在不改变单个通道测量周期的情况下提高整体数据更新率。③开发快速信号处理算法:采用基于 FPGA 的高速数据采集和处理技术,可以减少信号处理延迟,从而提升数据更新率。

6)原子干涉陀螺的非歧义动态范围通常受限于干涉条纹的周期性,难以满足高动态环境的测量需求,未来的研究可以探索以下方向:①多脉冲干涉方案——通过增加干涉脉冲的数量,可以在不显著降低灵敏度的情况下扩展动态范围;②相位解模糊技术——研究基于相位解模糊的信号处理算法,通过实时解算干涉条纹的周期性变化,可以显著提高动态范围;③混合导航系统——将原子干涉陀螺与其他高动态范围的惯性传感器结合,可以有效弥补其动态范围的不足。

7)除上述发展方向外,最新研究揭示了两项新兴技术有望从根本上突破原子干涉陀螺仪的性能瓶颈:量子纠缠增强灵敏度技术和高性能硅光子集成技术。前者通过操控原子间的量子关联,可以突破标准量子极限,从基础物理层面提升测量灵敏度;后者已经取得重大突破,如近期开发的硅光子单边带调制器成功将传统庞大的光学系统集成到单个芯片上,同时实现了 47.8 dB 的边带抑制和 30 dB 的载波抑制,性能甚至超越传统光学系统。因此,随着技术的不断进步,原子干涉陀螺的应用领域有望进一步拓展,如:航空航天领域利用原子干涉陀螺的高精度和长期稳定性帮助实现卫星姿态控制和深空探测,地球物理领域利用原子干涉陀螺的高灵敏度进行地震监测和重力场测量,导航领域将芯片化小型化的

原子干涉陀螺应用于无人机、自动驾驶和个人导航设备等。

综上所述,相比于传统陀螺技术,原子干涉陀螺具有诸多不可替代的关键优势:首先,其旋转测量的基础是基于量子力学的德布罗意波干涉效应,这一物理机制使其理论精度远优于任何机械陀螺、光学陀螺及 MEMS 陀螺;其次,原子干涉陀螺不存在机械磨损问题,零偏稳定性本质上优于机械陀螺;再次,原子干涉陀螺使用原子作为检测单元,这些原子的性质完全相同且不随时间改变,因此具有优异的长期稳定性和重复性,而这是任何基于宏观结构的传统陀螺无法比拟的;最后,原子干涉陀螺对重力和惯性力的特殊敏感性使其在地球物理和精密导航领域具有独特价值。这些本质优势使原子干涉陀螺在高精度导航和精密科学测量领域拥有不可替代的地位。

作为新一代陀螺仪技术的典型代表,原子干涉陀螺的发展潜力巨大。为达到其广泛应用的目标,研究方向应围绕提升环境适应性、优化系统设计和实现小型化集成化展开。同时,通过与其他惯性传感器的协同融合,不仅可以弥补其动态性能的不足,还能在算法层面提升系统的实时性和鲁棒性。关键技术的突破,如改进数据更新率、拓展非歧义动态范围,以及开发面向实际场景的低成本、便携式系统,将为原子干涉陀螺的工程化应用铺平道路。在此基础上,原子干涉陀螺的潜在应用领域将不断拓展,与智能导航、航空航天、地球物理等领域深度融合,为高科技产业和科学探索带来革命性变革。尽管当前研究热度有所下降,但原子干涉陀螺作为一种高精度惯性测量设备,仍然具有重要的科学价值和应用潜力。随着科学技术的不断进步和应用需求的增长,原子干涉陀螺仪将成为惯性导航领域的重要技术支柱,为未来的科技发展提供强有力的支持。

参考文献(References)

[1] 许江宁,马恒,何泓洋. 陀螺原理[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
XU J N, MA H, HE H Y. Gyro principle[M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)

[2] 宋丽君,薛连莉,董燕琴,等. 惯性技术发展历程回顾与展望[J]. 导航与控制, 2021, 20(1): 29-43.
SONG L J, XUE L L, DONG Y Q, et al. Review and prospect of inertial technology development process[J]. Navigation and Control, 2021, 20(1): 29-43. (in Chinese)

[3] 史文策,许江宁,林恩凡. 陀螺仪的发展与展望[J]. 导航定位学报, 2021, 9(3): 8-12.

- SHI W C, XU J N, LIN E F. Development and prospect of gyroscope[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(3): 8–12. (in Chinese)
- [4] 傅军, 常扬, 宁治文. 光纤陀螺小型化技术研究进展[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(7): 1–4, 7.
FU J, CHANG Y, NING Z W. Research progress on miniaturization technology of fiber-optic gyroscope[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(7): 1–4, 7. (in Chinese)
- [5] 涂述荣, 陈少春, 高博泽, 等. 2022 年国外惯性技术与回顾[J]. 导航定位与授时, 2023, 10(4): 69–80.
GAN S R, CHEN S C, GAO P Z, et al. Development and review of foreign inertial technology in 2022[J]. Navigation Positioning and Timing, 2023, 10(4): 69–80. (in Chinese)
- [6] PASSARO V M N, CUCCOVILLO A, VAIANI L, et al. Gyroscope technology and applications: a review in the industrial perspective[J]. Sensors (Basel), 2017, 17: 2284.
- [7] HUANG W Y, YAN X, ZHANG S Y, et al. MEMS and MOEMS gyroscopes: a review[J]. Photonic Sensors, 2023, 13: 230419.
- [8] DRANITSYNA E V, EGOROV D A, UNTILOV A A. Current state and development prospects of fiber-optic gyroscopes[J]. Gyroscopy and Navigation, 2023, 14: 277–289.
- [9] 薛连莉, 沈玉芃, 徐月. 2019 年国外惯性技术与回顾[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(1): 60–66.
XUE L L, SHEN Y P, XU Y. Development and review of foreign inertial technology in 2019[J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(1): 60–66. (in Chinese)
- [10] 薛连莉, 翟峻仪, 葛悦涛. 2020 年国外惯性技术与回顾[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(3): 59–67.
XUE L L, ZHAI J Y, GE Y T. Development and review of foreign inertial technology in 2020[J]. Navigation Positioning and Timing, 2021, 8(3): 59–67. (in Chinese)
- [11] 涂述荣, 刘志强, 宋丽君, 等. 2021 年国外惯性技术与回顾[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(3): 23–30.
GAN S R, LIU Z Q, SONG L J, et al. Development and review of foreign inertial technology in 2021[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(3): 23–30. (in Chinese)
- [12] LI J T, CHEN X, ZHANG D F, et al. Realization of a cold atom gyroscope in space[J]. National Science Review, 2025, 12(4): nwaf012.
- [13] 李攀, 雷兴, 刘元正, 等. 冷原子陀螺技术分析和发展前景展望[C]//中国惯性技术学会 2023 年科技工作者研讨会——新型惯性元件与先进导航技术, 2023.
LI P, LEI X, LIU Y Z, et al. Analysis of cold atom gyroscope technology and prospects for development[C]//2023 China Inertial Technology Society Seminar for Scientific and Technological Workers—New Inertial Components and Advanced Navigation Technology, 2023. (in Chinese)
- [14] FANG J C, QIN J. Advances in atomic gyroscopes: a view from inertial navigation applications[J]. Sensors (Basel), 2012, 12(5): 6331–6346.
- [15] GUSTAVSON T L. Precision rotation sensing using atom interferometry[D]. Stanford: Stanford University, 2000.
- [16] 王巍, 王学锋, 马建立, 等. 原子干涉陀螺仪关键技术及进展[J]. 导航与控制, 2011, 10(2): 55–60, 46.
WANG W, WANG X F, MA J L, et al. Key technologies and advances of atomic interferometric gyroscopes[J]. Navigation and Control, 2011, 10(2): 55–60, 46. (in Chinese)
- [17] 邓敏, 张隼, 钱天予, 等. 基于原子体系的量子惯性传感器研究现状[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(9): 16–40.
DENG M, ZHANG Y, QIAN T Y, et al. Research status of the quantum inertial sensor based on the atomic system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(9): 16–40. (in Chinese)
- [18] 李润兵, 姚战伟, 鲁思滨, 等. 原子干涉陀螺仪精密测量及应用[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(2): 8–17.
LI R B, YAO Z W, LU S B, et al. Precision measurement and applications of atomic interferometric gyroscopes[J]. Navigation Positioning and Timing, 2021, 8(2): 8–17. (in Chinese)
- [19] WANG S Z, MENG Z X, YAN P Q, et al. Dual-atom interferometric gyroscope with continuous cold atomic beams[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2889: 012057.
- [20] CHEN H H, YAO Z W, LU Z X, et al. Self-calibrated atom interferometer gyroscope by modulating atomic velocities[J]. The Review of Scientific Instruments, 2024, 95(5): 053201.
- [21] WANG X H, JIA S, WANG Y D. Research and development of the physical system for horizontal counter-propagating atom interferometric gyroscope[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 87–95.
- [22] 李军强. 冷原子干涉仪磁光阱优化设计与实验研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2022.
LI J Q. Optimal design and experimental study of magneto-optical trap of cold atom interferometer[D]. Xi'an: Shanxi Normal University, 2022. (in Chinese)
- [23] 陆璇辉, 王将峰. 基于原子干涉的量子陀螺仪[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 293–295, 311.
LU X H, WANG J F. Quantum gyroscope based on an atom interferometer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3): 293–295, 311. (in Chinese)
- [24] 陈霞, 郑孝天. 原子干涉陀螺仪关键技术与研究进展[J]. 光学与光电技术, 2013, 11(5): 65.
CHEN X, ZHENG X T. Research progress and key technologies of interferometric atom gyroscope[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2013, 11(5): 65. (in Chinese)
- [25] 孙川, 鲁思滨, 陈小莉, 等. 原子干涉陀螺仪研究现状与发展趋势[C]//中国惯性技术学会 2021 科技工作者研讨会——前沿技术与惯性技术的融合与应用, 2021: 3–12.
SUN C, LU S B, CHEN X L, et al. Research status and development trends of atomic interferometric gyroscopes[C]//China Inertial Technology Society 2021 Symposium for Scientific and Technological Workers—Integration and Application of Frontier Technologies and Inertial Technologies, 2021: 3–12. (in Chinese)
- [26] 王锴, 姚战伟, 鲁思滨, 等. 新一代惯性测量仪器: 拉曼型原子干涉陀螺仪[J]. 量子电子学报, 2016, 33(5): 513–523.
WANG K, YAO Z W, LU S B, et al. A new generation of inertial measurement instrument: Raman-type atom interferometric gyroscope[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2016, 33(5): 513–523. (in Chinese)
- [27] TAKASE K. Precision rotation rate measurements with a mobile atom interferometer[D]. Stanford: Stanford University, 2008.

[28] 詹苏. 四脉冲原子干涉转动测量原理性实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
ZHAN S. Research on the principle rotation measurement experiment of four-pulse atom interferometry [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)

[29] 孟至欣, 颜培强, 王圣哲, 等. 原子干涉陀螺仪研究现状及分析[J]. 导航与控制, 2022, 21(5/6): 19–32.
MENG Z X, YAN P Q, WANG S Z, et al. Research status and analysis of atomic interferometer gyroscope [J]. Navigation and Control, 2022, 21(5/6): 19–32. (in Chinese)

[30] 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(4/5): 29–40.
CHEN L K, CHEN S, PAN J W. Atomic interference-based quantum technology and its application for inertial navigation[J]. Navigation and Control, 2020, 19(4/5): 29–40. (in Chinese)

[31] 李润兵, 王谨, 詹明生. 冷原子干涉仪及空间应用[J]. 物理, 2008, 37(9): 652–657.
LI R B, WANG J, ZHAN M S. Cold atom interferometers and their applications in space [J]. Physics, 2008, 37(9): 652–657. (in Chinese)

[32] 钟山. 冷原子干涉陀螺仪研究进展与应用[C]//中国造船工程学会2015年学术会议, 2016.
ZHONG S. Research progress and applications of cold atom interferometric gyroscopes [C]// Proceedings of the 2015 Academic Conference of the China Shipbuilding Engineering Society, 2016. (in Chinese)

[33] XUE H B, FENG Y Y, CHEN S, et al. A continuous cold atomic beam interferometer[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(9): 094901.

[34] 王先华, 贾森, 王一丁. 水平对抛式原子干涉陀螺物理系统研制[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 87–95.
WANG X H, JIA S, WANG Y D. Research and development of the physical system for horizontal counter-propagating atom interferometric gyroscope [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 87–95. (in Chinese)

[35] 王安琪, 孟至欣, 李营营, 等. 连续冷原子束干涉陀螺仪研究进展[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(1): 77–84.
WANG A Q, MENG Z X, LI Y Y, et al. Research progress in a continuous cold atomic beam interferometer gyroscope[J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(1): 77–84. (in Chinese)

[36] GAUTIER R. Mesures de précision avec un gyromètre-acceleromètre à atomes froids double axes [D]. Paris: Sorbonne Université, 2022.
GAUTIER R. Precision measurements with a dual-axis cold atom gyroscope-accelerometer [D]. Paris: Sorbonne University, 2022. (in German)

[37] SAVOIE D, ALTORIO M, FANG B, et al. Interleaved atom interferometry for high-sensitivity inertial measurements[J]. Science Advances, 2018, 4(12): eaau7948.

[38] 郑盟锟, 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. Research on the preparation of atomic bipartite states that can exceed the standard quantum limit[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(16): 160303. (in Chinese)

[39] 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.

[40] SCULLY M O, DOWLING J P. Quantum-noise limits to matter-wave interferometry [J]. Physical Review Applied, 1993, 48(4): 3186–3190.

[41] 赵苗苗. 原子干涉陀螺仪中的探测噪声研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
ZHAO M M. Research on detection noise in atomic interferometric gyroscopes [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

[42] ALLAN D W, LEVINE J. A historical perspective on the development of the allan variances and their strengths and weaknesses[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63(4): 513–519.

[43] 朱常兴, 冯焱颖, 叶雄英, 等. 利用原子干涉仪的相位调制进行绝对转动测量[J]. 物理学报, 2008, 57(2): 808–815.
ZHU C X, FENG Y Y, YE X Y, et al. The absolute rotation measurement of atom interferometer by phase modulation[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(2): 808–815. (in Chinese)

[44] CANCIANI A. Integration of cold atom interferometry INS with other sensors[C]//Proceedings of the 2012 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2012.

[45] 鲁思滨, 蒋敏, 姚战伟, 等. 原子干涉陀螺仪监控光纤陀螺的组合导航方案[J]. 导航与控制, 2022, 21(5/6): 33–41.
LU S B, JIANG M, YAO Z W, et al. A hybrid gyroscope scheme based on fiber optical gyroscope and cold atom interferometer gyroscope[J]. Navigation and Control, 2022, 21(5/6): 33–41. (in Chinese)

[46] GUSTAVSON T L, BOUYER P, KASEVICH M A. Precision rotation measurements with an atom interferometer gyroscope[J]. Physical Review Letters, 1997, 78(11): 2046–2049.

[47] GUSTAVSON T L, LANDRAGIN A, KASEVICH M A. Rotation sensing with a dual atom-interferometer Sagnac gyroscope[J]. Classical and Quantum Gravity, 2000, 17: 2385–2398.

[48] DURFEE D S, SHAHAM Y K, KASEVICH M A. Long-term stability of an area-reversible atom-interferometer Sagnac gyroscope[J]. Physical Review Letters, 2006, 97(24): 240801.

[49] STOCKTON J K, TAKASE K, KASEVICH M A. Absolute geodetic rotation measurement using atom interferometry[J]. Physical Review Letters, 2011, 107: 133001.

[50] KIM M, NOTERMANS R, OVERSTREET C, et al. 40 W, 780 nm laser system with compensated dual beam splitters for atom interferometry [J]. Optics Letters, 2020, 45(23): 6555–6558.

[51] ABE M, ADAMSON P, BORCEAN M, et al. Matter-wave atomic gradiometer interferometric sensor (MAGIS-100) [J]. Quantum Science and Technology, 2021, 6: 044003.

[52] CANUEL B, LEDUC F, HOLLEVILLE D, et al. Six-axis inertial sensor using cold-atom interferometry [J]. Physical Review Letters, 2006, 97(1): 010402.

[53] GUESSOUM M, GAUTIER R, BOUTON Q, et al. High stability two axis cold-atom gyroscope [C]//Proceedings of 2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2022.

- [54] 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 R, LI S L, HUANG Y M, et al. Review and prospect of atomic gyroscope development[J]. Measurement & Control Technology, 2023, 42(10): 1–10. (in Chinese)
- [55] 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.
- [56] YANKELEV D, AVINADAV C, DAVIDSON N, et al. Atom interferometry with thousand-fold increase in dynamic range[J]. Science Advances, 2020, 6(45): eabd0650.
- [57] BERNARD J, CADORET M, BIDEL Y, et al. Progress towards the development of a cold-atom inertial measurement unit for onboard applications[C]//Proceedings of 2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2022.
- [58] 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(5/6): 42–50, 59.
CHEN H H, YAO Z W, LU Z Q, et al. Portable high-precision atomic interferometer gyroscope[J]. Navigation and Control, 2022, 21(5/6): 42–50, 59. (in Chinese)
- [59] 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, 2022, 103: 023319.
- [60] 尤政, 马波, 阮勇, 等. 芯片级原子器件 MEMS 碱金属蒸气腔室制作[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1440–1446.
YOU Z, MA B, RUAN Y, et al. Microfabrication of MEMS alkali metal vapor cells for chip-scale atomic devices[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1440–1446. (in Chinese)
- [61] MENG Z X, YAN P Q, WANG S Z, et al. Closed-loop dual-atom-interferometer inertial sensor with continuous cold atomic beams[J]. Physical Review Applied, 2024, 21(3): 034050.
- [62] 张淋, 高伟, 李倩. 冷原子干涉陀螺仪实现及其性能分析[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7): 11–18.
ZHANG L, GAO W, LI Q. Realization and performance analysis of gyroscope based on cold atom interference[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(7): 11–18. (in Chinese)
- [63] 庄铭今, 范晓婷, 王天顺, 等. 原子陀螺仪用激光稳频技术进展与趋势分析[J]. 激光杂志, 2021, 42(6): 1–6.
ZHUANG M J, FAN X T, WANG T S, et al. Progress and trend analysis of laser frequency stabilization technology for atomic gyroscopes[J]. Laser Journal, 2021, 42(6): 1–6. (in Chinese)
- [64] 黄晨, 乐旭广, 程俊, 等. 三脉冲冷原子陀螺仪中基于内态演化的拉曼光光强补偿算法[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(2): 45–49.
HUANG C, YUE X G, CHENG J, et al. Compensation algorithm for Raman pulse intensity based on internal-state evolution in three pulse cold-atom interference gyroscope[J]. Navigation Positioning and Timing, 2021, 8(2): 45–49. (in Chinese)
- [65] ZHAO Y, YUE X G, CHEN F S, et al. Extension of the rotation-rate measurement beyond the rotation-rate limit using tip-tilt mirror compensation in a cold-atom gyroscope[J]. Physical Review A, 2021, 104: 013312.
- [66] 高皓. 大标度因子原子干涉陀螺仪探头的设计与仿真研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
GAO H. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the master degree in science [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [67] GUSTAVSON T L. Cold atom gyros [C]//Proceedings of IEEE Sensors, 2013.
- [68] KWOLEK J M, BLACK A T. Continuous sub-Doppler-cooled atomic beam interferometer for inertial sensing[J]. Physical Review Applied, 2022, 17: 024061.
- [69] KWOLEK J M, FANCHER C T, BASHKANSKY M, et al. Three-dimensional cooling of an atom-beam source for high-contrast atom interferometry[J]. Physical Review Applied, 2020, 13: 044057.
- [70] BLACK A T, KWOLEK J M. High-bandwidth, sub-Doppler atomic beam interferometry [C]//Proceedings of the Optical and Quantum Sensing and Precision Metrology II, 2022.
- [71] 黄壮. 原子干涉仪集成化光学系统设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
HUANG Z. The design and implementation of integrated optical system for atom interferometers [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [72] 陈玮婷, 孔德龙, 裴闯, 等. 冷原子干涉仪激光控制系统集成化设计及其在重力测量中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2022, 30(5): 666–673.
CHEN W T, KONG D L, PEI C, et al. Integrated design of the laser control system in cold atom interferometer and its application in gravity measurement[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2022, 30(5): 666–673. (in Chinese)
- [73] 黄国鹏, 王斌, 陈新文, 等. 用于冷原子干涉系统的精密磁场控制技术研究[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(6): 117–122.
HUANG G P, WANG B, CHEN X W, et al. Precision magnetic field control technology applied in cold atom system[J]. Optics and Photonics Technology, 2023, 21(6): 117–122. (in Chinese)
- [74] YIM S H, LEE S B, KWON T Y, et al. Optical phase locking of two extended-cavity diode lasers with ultra-low phase noise for atom interferometry[J]. Applied Physics B, 2014, 115: 491–495.
- [75] MARINO A M, STROUD C R, Jr. Phase-locked laser system for use in atomic coherence experiments[J]. The Review of Scientific Instruments, 2008, 79(1): 013104.
- [76] 黄敏. 用于冷原子干涉的拉曼激光实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
HUANG M. Experimental study of Raman laser for cold atom interference [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)
- [77] MUÑOZ D, CORONE J, CHAMORRO J, et al. Microwave signal generation using optical injection locking [C]//Proceedings of Latin America Optics and Photonics Conference, 2016.
- [78] STEIER W, STOVER H. Locking of laser oscillators by light injection[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2021, 2(4): 111–112.
- [79] GIRARD A. The effects of the insertion of a CW, low-pressure CO₂ laser into a TEA CO₂ laser cavity[J]. Optics Communications, 1974, 11(4): 346–351.

[80] CHEN W L, QI X H, YI L, et al. Optical phase locking with a large and tunable frequency difference based on a vertical-cavity surface-emitting laser [J]. Optics Letters, 2008, 33(4) : 357 – 359.

[81] 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.
HU Q Q. Performance evaluation and improvement of the cold atom interferometry gravimeter [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)

[82] BONGS K, HOLYNSKI M, VOVROSH J, et al. Taking atom interferometric quantum sensors from the laboratory to real-world applications[J]. Nature Reviews Physics, 2019, 1: 731 – 739.

[83] BUTTS D L, KINAST J M, TIMMONS B P, et al. Light pulse atom interferometry at short interrogation times [J]. Journal of the Optical Society of America B Optical Physics, 2011, 28(3) : 416 – 421.

[84] 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: 054012.

[85] LAUTIER J, VOLODIMER L, HARDIN T, et al. Hybridizing matter-wave and classical accelerometers [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105: 144102.

[86] 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.

[87] BONNIN A, DIBOUNE C, ZAHZAM N, et al. New concepts of inertial measurements with multi-species atom interferometry[J]. Applied Physics B, 2018, 124(9) : 181.

[88] 冯焱颖, 孟至欣, 颜培强, 等. 原子干涉陀螺仪信号解算方法、装置、计算机设备和存储介质: CN112667966A[P]. 2021 – 04 – 16.
FENG Y Y, MENG Z X, YAN P Q, et al. Atomic interference gyroscope signal resolving method and device, computer equipment and storage medium: CN112667966A[P]. 2021 – 04 – 16. (in Chinese)

[89] GREVE G P, LUO C, WU B, et al. Entanglement-enhanced matter-wave interferometry in a high-finesse cavity [J]. Nature, 2022, 610(7932) : 472 – 477.

[90] KODIGALA A, GEHL M, HOTH G W, et al. High-performance silicon photonic single-sideband modulators for cold-atom interferometry [J]. Science Advances, 2024, 10(28) : eade4454.