doi：10.11823/j.issn.1674-5795.2024.06.05

用于铷原子干涉仪的小型化光路设计

贾钧洁，赵远，汪子楷，许云鹏，胡栋，陈雷*
（中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所，北京 100095）

摘　要：为使铷原子干涉仪小型化的同时提升应用可靠性，研制了一套集成化光学系统。运用模块化设计思路将系统分为光纤激光器、空间光路和稳频光路三个独立模块，便于安装和调试。采用自研的小型化光学结构件，通过优化空间光路和光纤激光器设计，大大缩小了空间光路体积，空间光路的尺寸仅为120 mm×190 mm×26 mm，重量为900 g，稳频光路的尺寸仅为50 mm×70 mm×40 mm。采用环氧树脂胶或螺纹将所有光学元件固定在光学底板上，不含弹簧结构的光学调整架有效提升了空间光路稳定性，保证了空间光路系统的应力稳定性和热稳定性。此外，对两个空间光路模块分别进行了精密温控设计，经高低温实验验证，在0～40 ℃的温度条件下，内部温度起伏在0.1 ℃以内，冷却光功率峰峰值起伏小于8%，空间光路的可靠性得到进一步提升。该集成化光学系统应用于动态原子干涉仪后，原子干涉仪的静态测量灵敏度达到323.4 μGal/$\sqrt{\text{Hz}}$@T = 20 ms，长期稳定性为10.3 μGal@1 000 s。此设计为实现原子干涉仪的小型化与实际应用提供了有效方案。

关键词：绝对重力测量；原子干涉仪；光纤激光器；空间光路；小型化；调制转移谱稳频
中图分类号：TB96；V241.6；O431.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1674-5795（2024）06-0050-09

Design of miniaturized optical system for ^{87}Rb atom interferometer

JIA Junjie, ZHAO Yuan, WANG Zikai, XU Yunpeng, HU Dong, CHEN Lei*
(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: To tackle the challenges of miniaturization and enhanced application reliability in ^{87}Rb atom interferometers, an integrated optical system has been devised. Adopting the philosophy of modular design, the system is divided into three modules: fiber laser, spatial optical path and frequency stabilization, for easy installation and adjustment. By employing self-developed miniaturized optical components and optimizing the design of the spatial optical path and fiber laser, a substantial reduction in the size of the spatial optical path has been achieved, only with dimensions of 120 mm×190 mm×26 mm and a weight of 900 g. The optical path of frequency stabilization just has dimensions of 50 mm×70 mm×40 mm. All optical elements are securely fixed onto the optical baseplate using epoxy resin glue or screws. The design has avoided spring-loaded optical mounts, ensuring stress and thermal stability and effectively enhancing the stability of the spatial optical path. Furthermore, the precise temperature controls have been implemented for both spatial optical path modules. The reliability of the spatial optical path has been further enhanced. During temperature experiment ranging from 0 ℃ to 40 ℃, the internal temperature fluctuation is less than 0.1 ℃, and the peak-to-peak power fluctuation is less than 8%. The integrated optical system achieves a sensitivity of 323.4 μGal/$\sqrt{\text{Hz}}$@T = 20 ms in dynamic atom interferometer and long-term stability of 10.3 μGal@1 000 s. This design provides an effective solution for

收稿日期：2024-11-11；**修回日期：**2024-11-18
引用格式：贾钧洁，赵远，汪子楷，等. 用于铷原子干涉仪的小型化光路设计[J]. 计测技术，2024，44（6）：50-58.
Citation：JIA J J, ZHAO Y, WANG Z K, et al. Design of miniaturized optical system for ^{87}Rb atom interferometer [J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(6): 50-58.

the miniaturization and practical application of atomic interferometers.

Key words: absolute gravity measurement; atom interferometer; fiber laser; spatial optical path; miniaturization; modulated transfer spectrum frequency stabilization

0 引言

1991年，KASEVICH M和CHU S首次发表了关于冷原子干涉仪的研究报告[1]。到目前为止，已经吸引了全世界50多家科研单位和公司从事相关技术研究。原子干涉仪不仅在基础物理学中用于精细结构常数[2-4]与引力常数[5-6]精密测量，还成为验证等效原理的重要仪器[7-9]。此外，量子传感器在惯性参数测量上的出色表现加速了冷原子干涉仪的相关技术研发，科研人员据此开发了冷原子重力仪[10-12]、重力梯度仪[13-15]和陀螺仪[16-17]等高精度设备。但在地球物理学、资源勘探、惯性导航及空间物理学等工程领域的应用中[18-19]，对原子干涉仪的小型化和稳定性有着更高的要求，光学系统作为其中最复杂且易损的部分之一，需要重点进行优化设计。

在原子干涉仪的光学系统设计中，存在多种配置方案，目前，集成光路系统主要分为两种方案：全光纤光路系统和空间集成光路系统。基于1 560 nm光纤倍频系统的全光纤光路的优势在于其光功率对环境中的振动、温度和湿度不敏感，这使得光学系统能够在较为恶劣的环境下保持相对稳定。但是，较多的光纤器件级联容易造成偏振消光比的下降，在外界振动和温度变化较大时，偏振起伏会影响原子的操控质量，进而影响干涉仪的测量精度。为提升光纤光路的偏振消光比，需要偏振纯化器件，但这样又将激光偏振起伏转化为光功率起伏，最终仍会影响原子干涉仪的测量精度。

相比之下，空间集成光路系统展现出更为优异的偏振性能，且易于调节，在需要对光偏振态进行精确控制的原子干涉测量中具有显著优势。但是，空间光路易受振动、温度和湿度的影响，稳定性相对较差，且存在体积较大、不易搬运的问题，不利于原子干涉仪的工程化。因此，众多国内外相关研究机构一直致力于开发集成化的高稳光学系统，为原子干涉仪在星载[20-22]、机载[23-24]、船载[25-26]和车载[27]环境下提供可行的光路系统方案。德国洪堡大学所研制的空间集成光路系统总质量为27 kg，体积为340 mm × 274 mm × 227 mm，系统通过了8.10 g RMS的振动负载测试，在15 ~ 35 ℃的高低温试验中，光纤耦合效率起伏在0.851到0.917之间，整个激光系统具有较高的稳定性[20]。上海光学精密机械研究所为铷原子钟设计的集成化光学系统尺寸为770 mm × 360 mm，在6.11 g RMS的振动测试中输出功率起伏小于5%，在5 ~ 43 ℃的高低温试验中，功率起伏小于20%[21]。中科院精测院最新研制的空间集成光路，采用模块化设计，便于更换调试，并将系统的外包络体积优化至400 mm × 483 mm × 133 mm[28]。实现更为简单、小型、稳定的光学系统，是各研究单位进一步适应小型化需求、促进原子干涉仪实际应用时关注的重点方向。

为了简化光学系统并保证光路系统的功能实现，本文提出了一种基于光纤激光器和空间光路集成的改进方案，采用小型化光学元器件，优化了空间光路模块，缩小了光路体积和重量，相较于使用弹簧结构的传统空间光路，该系统使用环氧树脂胶和螺纹固定的方法，增强了温度和振动稳定性，既能发挥光纤光路的环境稳定性，又能保证较高的偏振消光比，对原子干涉仪的工程化具有重要意义。

1 光学系统的实现

1.1 铷原子干涉仪激光频率需求

冷原子重力测量包括原子冷却与陷俘、偏振梯度冷却、初态制备、原子干涉、末态探测，这5个过程需要用到冷却光、回泵光、吹除光、拉曼光、探测光等多种不同频率、不同功率的激光，以^{87}Rb原子干涉仪为例，具体的激光频率设置如图1所示。

冷却与陷俘发生在磁光阱(Magneto-Optical Trap，MOT)中，需要用到冷却光和回泵光[29]。如图1所示，冷却光相对于$F = 2 \rightarrow F' = 3$红失谐

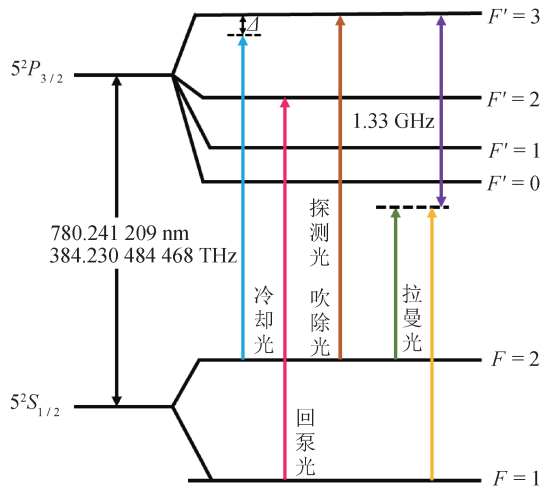


图 1 铷原子干涉仪所需激光频率和 ^{87}Rb 跃迁能级示意图

Fig.1 The transition levels of ^{87}Rb line and laser frequencies required for ^{87}Rb atom interferometer

$2\Gamma\sim 6\Gamma$ 处（Γ 为自然线宽，频率约为 6 MHz），回泵光与 $F=1\rightarrow F'=2$ 能级共振。在 MOT 阶段结束后，需进行偏振梯度冷却，使原子温度进一步冷却至 μK 量级，需要将冷却光设定在相对于 $F=2\rightarrow F'=3$ 红失谐约 100 ~ 150 MHz。初态制备是为了获得对外界磁场不敏感的 $m_F=0$ 磁子能级的原子团，需要使用一对频率差为 6.834 GHz 的拉曼光，使原子发生 $|F=2,\ m_F=0\rangle\rightarrow|F=1,\ m_F=0\rangle$ 跃迁，2 束拉曼光频率分别为 $F=1\rightarrow F'=1$ 和 $F=2\rightarrow F'=1$ 红失谐约为 1 GHz 处，再利用 $F=2\rightarrow F'=3$ 吹除光吹走残留的 $F=2$ 态原子，仅留下 $|F=1,\ m_F=0\rangle$ 态原子参与干涉。三脉冲原子干涉仪由 π/2 − π − π/2 三束拉曼脉冲组成，拉曼光与原子相互作用实现双光子受激跃迁，频率与初态制备的拉曼光频率接近。探测阶段的探测光与 $F=2\rightarrow F'=3$ 为近共振状态。

1.2 光纤激光器系统设计

光纤激光器系统设计方案如图 2 所示。采用单种子光纤激光模式，波长为 1 560 nm 的激光器作为种子光源，倍频产生所需要的全部激光。

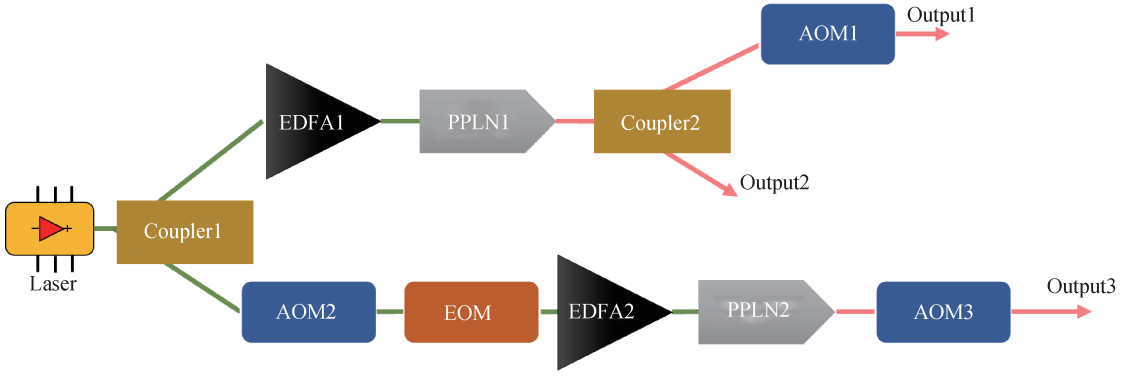


图 2 光纤激光器系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the fiber laser system

种子光输出经光纤耦合器（Coupler）1 分为两路，一路经掺铒光纤放大器（Erbium-doped Optical Fiber Amplifier，EDFA）1 放大和周期极化铌酸锂倍频波导（Periodically Poled Lithium Niobate，PPLN）1 倍频后输出 780 nm 的激光。该激光由 Coupler2 再分为两路：一路经声光调制器（Acousto-Optic Modulator，AOM）1 移频 230 MHz 作为稳频光输出；另一路输出 Output2 作为冷却、探测和吹除光。Coupler1 的另一路输出经 AOM2 移频实现拉曼光大失谐后，进入电光调制器（Electro-Optic Modulator，EOM），然后由 EOM 调制的边带产生拉曼光和回泵光，最后 AOM3 作为拉曼光和回泵光的开关。拉曼光和冷却光功率设定在 300 mW 左右，由于光纤激光器长期输出功率会衰减，且光功率闭环需要留有一定的裕量（一般锁定在激光功率的 70%），因此两路主输出（Output1 和 Output2）激光器功率设定为 1 W。

相比高频调制空间 AOM[30] 产生拉曼光大失谐需要借助聚焦透镜、扩束透镜及 2 个反射镜来调节空间注入才能实现 20% ~ 30% 衍射效率的方案，采用光纤 AOM 产成大失谐拉曼光能使控制和光路更简单可靠。此外，该设计采用单种子 EOM 产生

回泵光和拉曼光，相较于使用2台激光器拍频锁相的方案[31]，不仅减小了光路体积，还提高了光学系统可靠性。

1.3　空间光路设计

空间光路设计如图3所示。光纤激光器系统输出的Output2作为空间光路模块的输入，由Shutter1作为该模块的总开关，经AOM4移频210 ~ 230 MHz后由偏振分束棱镜(Polarization Beam Splitter，PBS)2分为两路：一路作为竖直冷却光、探测光和吹除光，经准直扩束器由光纤1输出；另一路作为水平冷却光，用Shutter2控制开关，最后由光纤2输出。

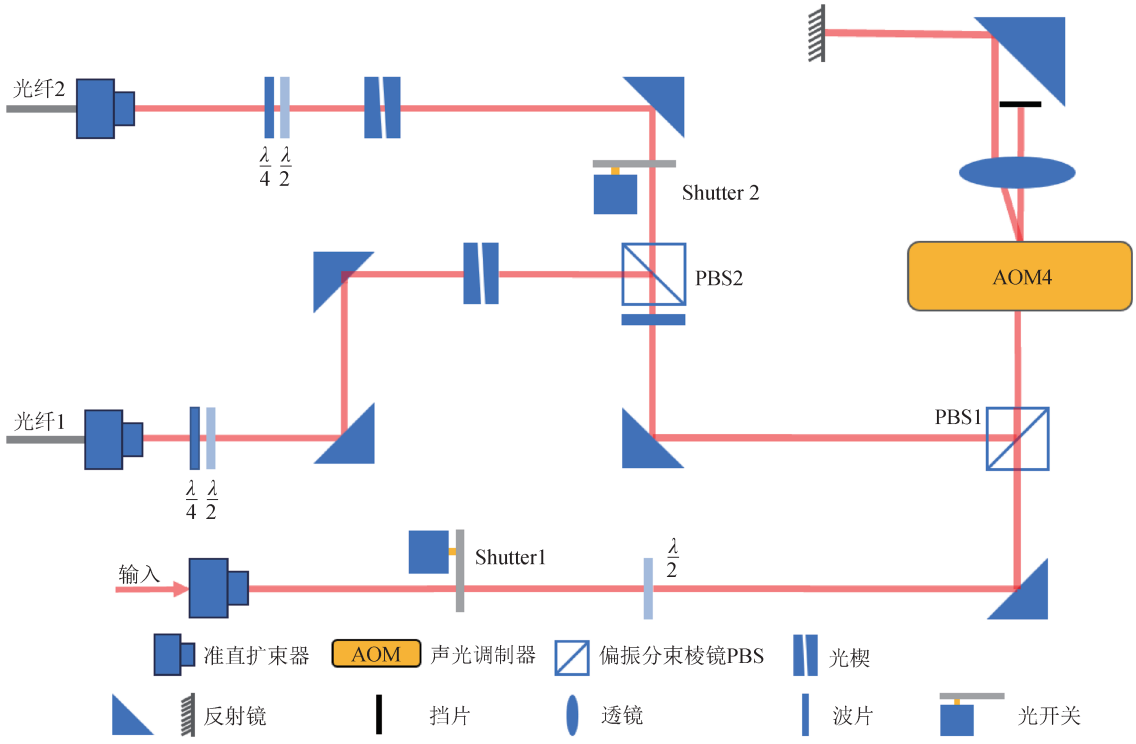


图3　空间光路设计图

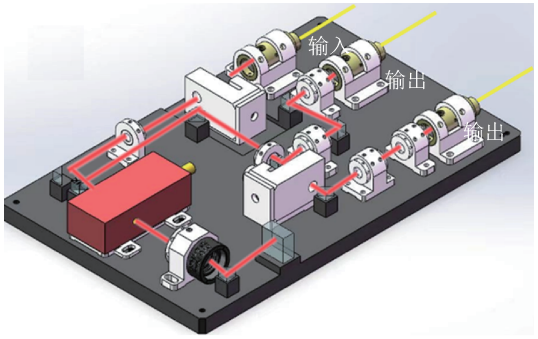
Fig.3　Diagram of spatial optical path

空间光路模块机械设计图如图4(a)所示，采用5mm × 5 mm × 5 mm规格的PBS和直角反射镜，由环氧树脂胶直接固定在光学底板上。ϕ5 mm尺寸的波片和光楔通过自主设计的小型化机械结构件实现固定，之后通过螺纹紧固在光学底板上。最后，为适应0 ~ 40 ℃的环境温度，对空间光路模块进行了主被动温控设计。

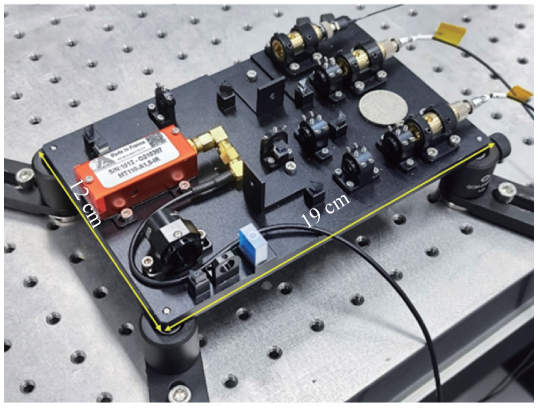
空间光路模块实物如图4(b)所示，该模块光高10 mm，尺寸为120 mm × 190 mm × 26 mm，重量为900 g，光纤耦合效率为75% ~ 85%，偏振消光比大于28 dB。传统的空间光路使用2个带有弹簧结构的光学镜架调节光纤耦合光束的位置和指向，然后由五维光纤耦合器（该器件的优点是可调性更强，缺点是可靠性较低）耦合到单模保偏光纤，研制小型化空间光路的PBS和反射镜与光学底板之间直接使用环氧树脂胶固定，没有使用机械安装件和弹簧结构，在实现小型化的同时提升了系统可靠性；光纤耦合器属于只可调焦光纤耦合器，因此只有一个自由度，进一步提升了光路的可靠性。长时间运行光路导致光束指向发生变化时，可通过光楔器件补偿光纤耦合，光楔器件利用转动方式调节，因此对外界变化不敏感。另外，基于光纤激光器的设计改进，使得整个空间光路只需一个空间AOM4(目前已知空间光路空间AOM最少的方案)实现，空间光路分光器件也较少，进一步提升了系统的可靠性，适应了小型化需求。

1.4　稳频光路设计

激光器使用了基于四波混频的调制转移谱



(a) 机械设计图
(a) Mechanical design diagram



(b) 光路实物图
(b) Physical image of the optical path

图 4 空间光路模块

Fig.4 The module of spatial optical path

(Modulated Transfer Spectrum，MTS)稳频[32]，具有鉴频信号斜率大，稳频精度、稳定性高等优点，且能有效降低调制残余误差。MTS 光路设计如图 5 所示，光纤激光器输出的 Output1 输入到稳频光路模块，由光纤耦合器分为两路，一路经准直扩束器 1 作为探测光进入铷泡，另一路由 EOM 调制后作为泵浦光，由准直扩束器 2 输出。两路光在铷泡中发生四波混频效应，最后探测光由光电探测器(Photodetector，PD)探测。分光比由 PBS 和光纤准直扩束器 2 调节，偏振由 PBS 和准直扩束器 1 调节。

整个稳频模块的空间光路仅由铷泡、PBS 和透镜各一个组成，将准直扩束器直接胶粘固定在稳频模块外壳，PBS 和聚焦透镜直接胶粘在光学底板上，使得该模块不仅体积小(尺寸为 70 mm × 50 mm × 40 mm)，还拥有较好的环境适应性，其实物如图 6(a)所示，稳频效果如图 6(b)所示。根据标定的激光器频率与调制电压关系 424 MHz / V，可得到图 6(b)MTS 误差信号的斜率为 16. 7 MHz / V，因此激光器的实际短期频率起伏优于 300 kHz(因为误差信号包含电路噪声)。最后对 MTS 模块的空间光路进行温控设计，以适应 0 ~ 40 ℃的环境温度。

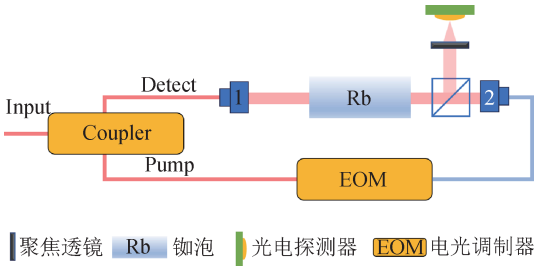
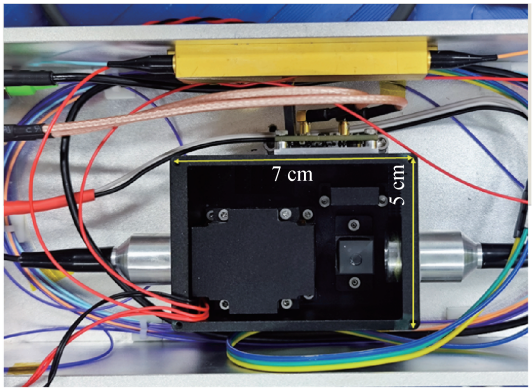
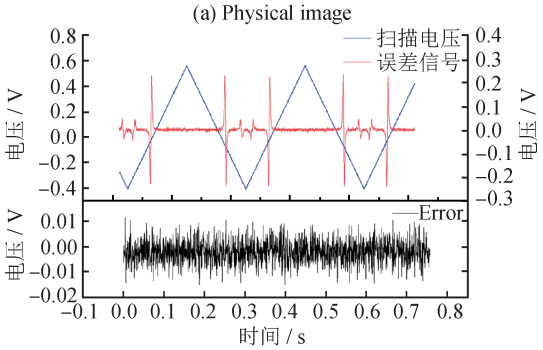


图 5 MTS 光路设计图

Fig.5 The design diagram of MTS



(a) 实物图
(a) Physical image



(b) 稳频效果图
(b) The effect of frequency stabilization

图 6 MTS 模块

Fig.6 The module of MTS

2 光学系统性能

2.1 空间光路稳定性测试

2.1.1 空间光路温控方案

对空间光路采用了双层主动温控方案，方案设计图如图 7 所示。其中光路系统为内层温控对

象，其产生的热量经内层温控元件传导至光路外壳；光路外壳作为外层温控对象，产生的热量通过外层温控元件传导至安装在光路外壳上的散热片，最终由风扇实现降温。内外层的温控元件均使用热电制冷器(Thermoelectric Cooler，TEC)，通过温控电路模块进行温度控制。此外，在光路系统与外壳、外壳与温控系统壳体之间都填充了导热系数为0.02 W/(m·K)的隔热泡沫。增加隔热泡沫可以减少热传导，在提高温控精度的同时大幅减小温控系统的功耗。此设计不仅能提升温控的精准度，还拓宽了系统的温度适应范围，确保了光学性能的稳定性和可靠性。

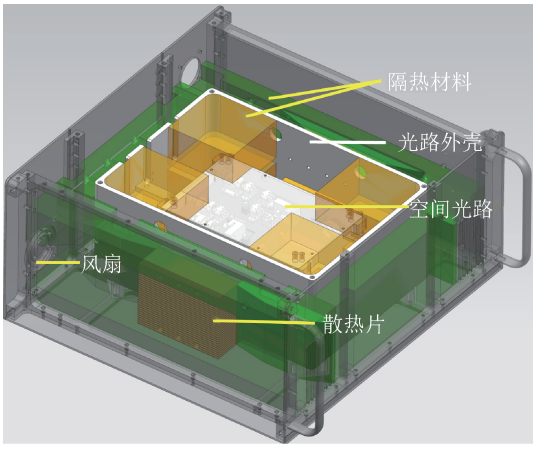


图7　光路温控设计图

Fig.7　The design diagram of optical path temperature control

2.1.2　空间光路高低温实验结果

实验环境温度变化范围为5～35 ℃。通过温控装置监测光路系统内的温度变化，实验结果如图8所示。在40 h的测试周期内，外界环境温度变化

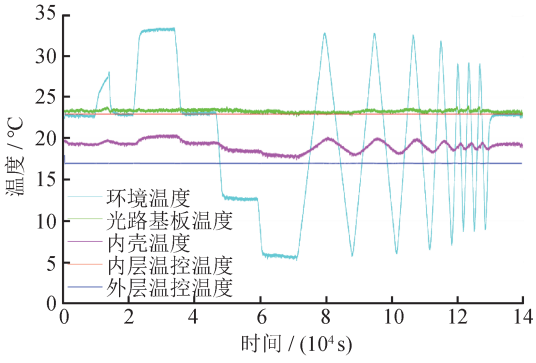
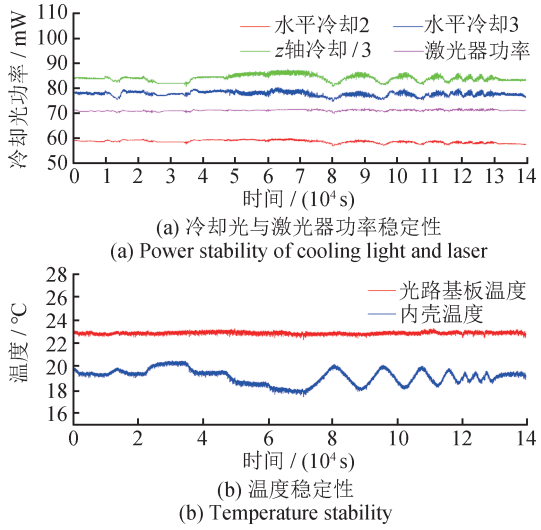


图8　温控效果

Fig.8　The performance of temperature control

了约30 ℃，而经过温控设计优化后的光路系统表现出了显著的温度稳定性，其外层温控元件的温度波动不超过0.2 ℃，内层温控元件的波动保持在0.1 ℃以下，内壳体温度波动控制在2.5 ℃以内，光路基板的温度波动也维持在0.5 ℃以下，且温度均匀性优于1 ℃。光路系统的温度稳定性相较于外部环境提高了两个数量级，这表明经过温控设计的光路系统显著减少了外界温度波动对系统性能的影响。

高低温下，冷却光的功率起伏如图9所示。对空间光路输出的三路(水平冷却光经过一分二光纤分束器分为两束)冷却光的功率稳定性进行评估。在温度变化的条件下，每个方向上的冷却光输出功率峰峰值的变化率均小于8%。



(a) 冷却光与激光器功率稳定性

(a) Power stability of cooling light and laser

(b) 温度稳定性

(b) Temperature stability

图9　高低温实验测试结果

Fig.9　Results of high and low temperature test

2.2　稳频光路稳定性测试

在高低温实验箱中对稳频光路的频率稳定性进行测试，实验环境温度变化范围为0～40 ℃。在稳频光路输出端使用AOM移频153 MHz产生足够频差，与校准激光器进行拍频。随后，使用频率计数器(采样率1 Hz)连续27 h采集拍频信号。实验结果如图10所示，激光在锁定状态下时，频率会随外界环境温度的周期性变化而变化，但频率的长期漂移范围控制在600 kHz(包含了2台激光器无关的频率起伏，实际频率起伏小于600 kHz)左右。

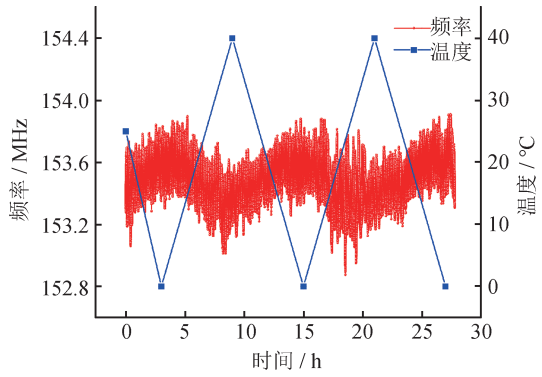


图 10 高低温(0 ~ 40 ℃)实验频率波动

Fig.10 Frequency fluctuations in high and low temperature test (0 ~ 40 ℃)

2.3 原子干涉实验结果

该小型化光路系统已成功应用于海/空冷原子绝对重力仪，并经历了 1 ~ 2 年的外场实验，经过微调后，仍能保持原始状态。如 1.2 节所述，光路系统产生了原子干涉过程所需的各种激光，在原子干涉真空腔中的应用如图 11 所示。真空腔体内，3 束冷却光的交点与磁场中心重合，配合竖直入射的回泵光完成了原子的冷却与陷俘，使用拉曼光和吹除光实现对原子的操控完成选态和干涉，最后由探测光获取原子状态。

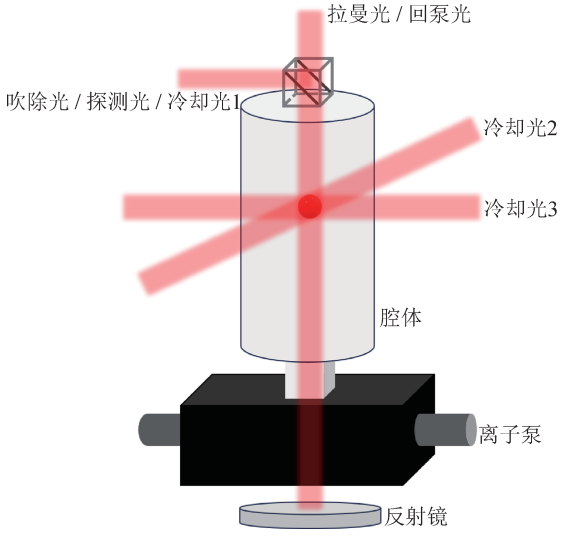
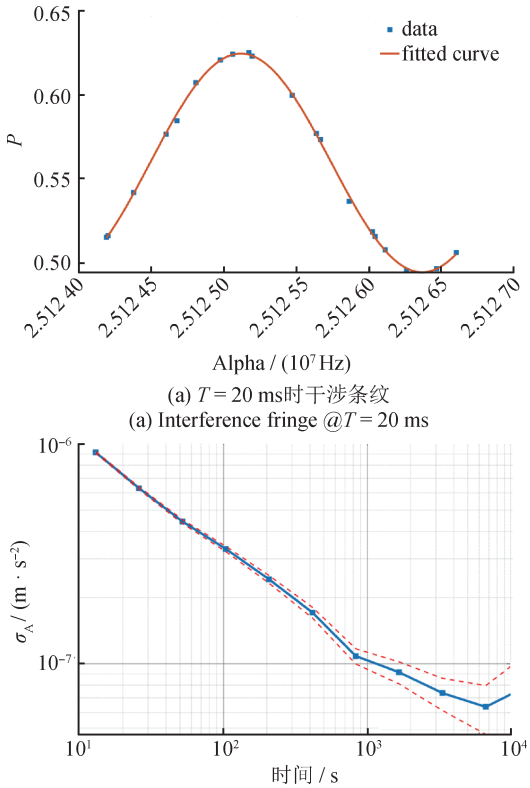


图 11 真空腔部分原理示意图

Fig.11 Schematic diagram of the vacuum sensor

在 T = 20 ms 的干涉时间下，得到了如图 12(a)的干涉条纹。长期测量数据的 Allan 方差如图 12(b)所示，干涉仪的静态灵敏度为 323.4 μGal/$\sqrt{\text{Hz}}$，长期稳定性为 10.3 μGal @ 1 000 s。



(a) T = 20 ms时干涉条纹

(a) Interference fringe @T = 20 ms

(b) Allan方差

(b) Allan deviation

图 12 原子干涉仪实验结果

Fig.12 Gravity measurements conducted by the atom interferometer

3 结论

本研究针对铷原子干涉仪提出并研制了一种小型化光路系统方案。该方案将空间光路的尺寸缩减至 120 mm × 190 mm × 26 mm，重量为 900 g，稳频光路的尺寸优化到 50 mm × 70 mm × 40 mm，极大地提高了系统的便携性和集成度。此外，通过光路温控，保证空间光路在 0 ~ 40 ℃的温度变化范围内，内部温度起伏在 0.1 ℃以内，冷却光功率峰峰值起伏小于 8%，表现出了较好的温度稳定性。为验证该光路的系统性能，在原子重力测量实验中进行了测试，该原子重力仪系统能够实现 323.4 μGal/$\sqrt{\text{Hz}}$ 的静态灵敏度，而且表现出了 10.3 μGal @ 1 000 s 的长期稳定性，为铷原子干涉仪的小型化和工程化提供了有效方案。未来，小型化光路将应用于类似卫星导航等复杂空间环境中，这些环境对光路要求更为苛刻，后期可以使用更低温度膨胀系数的非金属材料，并采用化学

键合法等方式继续优化，进一步提高小型化光路的稳定性和环境适应性。

参考文献

[1] KASEVICH M, CHU S. Atomic interferometry using stimulated Raman transitions[J]. Physical Review Letters, 1991, 67(2): 181-184.

[2] PARKER R H, YU C, ZHONG W, et al. Measurement of the fine-structure constant as a test of the Standard Model[J]. Science, 2018, 360(6385): 191-195.

[3] RYM B, PIERRE C, SAÏDA G K, et al. New determination of the fine structure constant and test of the quantum electrodynamics[J]. Physical Review Letters, 2011, 106(8). DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.080801.

[4] WEISS D S, YOUNG B C, CHU S. Precision measurement of $\hbar$/mCs based on photon recoil using laser-cooled atoms and atomic interferometry[J]. Applied Physics B, 1994, 59(3): 217-256.

[5] 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.

[6] ROSI G, SORRENTINO F, CACCIAPUOTI L, et al. Precision measurement of the Newtonian gravitational constant using cold atoms[J]. Nature, 2014, 510(7506): 518-521.

[7] ZHOU L, LONG S, TANG B, et al. Test of equivalence principle at 10^{-8} level by a dual-species double-diffraction raman atom interferometer[J]. Physical Review Letters, 2015, 115(1). DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.013004.

[8] DUAN X C, DENG X B, ZHOU M K, et al. Test of the universality of free fall with atoms in different spin orientations[J]. Physical review letters, 2016, 117(2). DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.023001.

[9] WILLIAMS J, CHIOW S W, MUELLER H, et al. Quantum test of the equivalence principle and space-time aboard the International Space Station[J]. New Journal of Physics, 2016, 18(2). DOI: 10.1088/1367-2630/18/2/025018.

[10] PETERS A, CHUNG K Y, CHU S. High-precision gravity measurements using atom interferometry [J]. Metrologia: International Journal of Scientific Metrology, 2001, 38(1): 25-61.

[11] FREIER C, HAUTH M, SCHKOLNIK V, et al. Mobile quantum gravity sensor with unprecedented stability[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016, 723(1). DOI: 10.1088/1742-6596/723/1/012050.

[12] SÉBASTIEN M, PIERRE G, BING C, et al. Calibration of a superconducting gravimeter with an absolute atom gravimeter[J]. Journal of Geodesy, 2021, 95(5). DOI: https://doi.org/10.1007/s00190-021-01516-6.

[13] SNADDEN M J, MCGUIRK J M, 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): 971-974.

[14] BIEDERMANN G W, WU X, DESLAURIERS L, et al. Testing gravity with cold-atom interferometers[J]. Physical Review A, 2015, 91(3). DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevA.91.033629.

[15] 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). DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.18.054091.

[16] GUSTAVSON T L, LANDRAGIN A, KASEVICH M A. Rotation sensing with a dual atom-interferometer Sagnac gyroscope[J]. Classical and Quantum Gravity, 2000, 17(12): 2385-2398.

[17] WEI Y Z, BIN L S, BING L R, et al. Calibration of atomic trajectories in a large-area dual-atom-interferometer gyroscope[J]. Physical Review A, 2018, 97(1). DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.013620.

[18] MARSON I, FALLER J E. *g*-the acceleration of gravity: its measurement and its importance[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1986, 19(1). DOI: 10.1088/0022-3735/19/1/002.

[19] HOGAN J M, JOHNSON D M S, DICKERSON S, et al. An atomic gravitational wave interferometric sensor in low earth orbit (AGIS-LEO) [J]. General Relativity and Gravitation, 2011, 43(7): 1953-2009.

[20] HANNES D, ORTWIN H, ANDRÉ W, et al. Ultrastable, Zerodur-based optical benches for quantum gas experiments[J]. Applied optics, 2014, 53(20): 4468-4474.

[21] ZHANG Z, XIANG J F, XU B, et al. Integrated, reliable laser system for an ^{87}Rb cold atom fountain clock[J]. Chinese Physics B, 2023, 32(1). DOI: 10.1088/1674-1056/ac9e95.

[22] 张虹，周能，邓肖丹，等. 国外航空重力测量与数据处

理技术最新进展[J]. 物探与化探, 2019, 43(5): 1015-1022.
ZHANG H, ZHOU N, DENG X D, et al. The latest progress in air gravity measurement and data processing technology abroad[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(5): 1015-1022. (in Chinese)

[23] 赵远, 郭梅影, 许云鹏, 等. 基于冷原子干涉原理的机载绝对重力测量[J]. 计测技术, 2024, 44(1): 115-117.
ZHAO Y, GUO M Y, XU Y P, et al. Airborne absolute gravity measurement based on cold atom interferometry principle [J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(1): 115-117. (in Chinese)

[24] BIDEL Y, ZAHZAM N, BRESSON A, et al. Airborne absolute gravimetry with a quantum sensor, comparison with classical technologies[J]. Journal of Geophysical Research. Solid Earth, 2023, 128(4). DOI: https://doi.org/10.1029/2022JB025921.

[25] 李红雨, 曹诚, 李凤婷, 等. 航空、航海重力和重力梯度在海洋、未知陆地战略勘探的发展[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(01): 316-325.
LI H Y, CAO C, LI F T, et al. Development of airborne and marine gravity exploration and gravity gradient strategic exploration for the ocean and unknown land[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(1): 316-325. (in Chinese)

[26] 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(增刊2): 66-79.
DENG X B, XU W J, CHENG Y, et al. Miniaturized atom gravimeter and its application [J]. Navigation and Control, 2022, 21(supplement 2): 66-79. (in Chinese)

[27] WU X, PAGEL Z, MALEK B S, et al. Gravity surveys using a mobile atom interferometer [J]. Science Advances, 2019, 5(9). DOI: 10.1126/sciadv.aax0800.

[28] 葛贵国, 方杰, 何萌, 等. 高精度冷原子干涉仪集成化光学系统的设计[J]. 量子电子学报, 2024, 41(5): 761-771.
GE G G, FANG J, HE M, et al. Design of a high-precision cold atom interferometer integrated optical system [J]. Journal of Quantum Electronics, 2024, 41(5): 761-771. (in Chinese)

[29] VETSCH E, REITZ D, SAGUÉ G, et al. Optical interface created by laser-cooled atoms trapped in the evanescent field surrounding an optical nanofiber[J]. Physical Review Letters, 2010, 104(20). DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.203603.

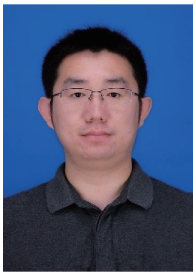
[30] QIN L, HENG Z, KE Z, et al. A compact laser system for a portable atom interferometry gravimeter[J]. The Review of scientific instruments, 2019, 90(4). DOI: https://doi.org/10.1063/1.5053132.

[31] CHEN B, LONG J B, XIE H T, et al. Portable atomic gravimeter operating in noisy urban environments[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(9): 12-17.

[32] SHIRLEY J H. Modulation transfer processes in optical heterodyne saturation spectroscopy [J]. Optics Letters, 1982, 7(11): 537-539.

(本文编辑: 刘宇轩, 米若鑫)

第一作者: 贾钧洁(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为量子精密测量。



通信作者: 陈雷(1985—), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为原子干涉仪、动态重力仪。