

## 激光与光电子学进展

## 小型水平式高精度原子重力梯度仪的设计与实现

吕伟<sup>1,2</sup>, 张小伟<sup>1</sup>, 徐炜豪<sup>1,2</sup>, 朱磊<sup>1</sup>, 仲嘉琪<sup>1,3\*</sup>, 王谨<sup>1,3,4\*\*</sup>, 詹明生<sup>1,3,4\*\*\*</sup><sup>1</sup>中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 湖北 武汉 430071;<sup>2</sup>中国科学院大学物理学院, 北京 100049;<sup>3</sup>合肥国家实验室, 安徽 合肥 230094;<sup>4</sup>武汉量子技术研究院, 湖北 武汉 430206

**摘要** 重力梯度仪在资源勘探、地球物理研究、自主导航等领域有重要的应用价值。原子干涉重力梯度仪是一种新型的高精度测量仪器, 小型实用化是其实现广泛应用需要解决的核心问题。本文设计实现了 1 套可测量水平分量的小型高精度原子重力梯度仪。该仪器采用全石英材料真空腔体与附件框架相结合的技术方案, 使得探头部分的体积降低到 105 L, 采用模块化双面光路结构, 使得光学单元的体积降低为 36 L, 因而具有十分优良的可搬运性能。在实验室条件下, 该原子重力梯度仪的测量灵敏度为  $320 \text{ E}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 测量分辨率为  $3.3 \text{ E}@4800 \text{ s}$  ( $1 \text{ E}=1 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ )。

**关键词** 冷原子; 重力梯度仪; 原子干涉仪; 受激拉曼跃迁

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230723

## Design and Realization of Compact Horizontal-Type High-Precision Atom Gravity Gradiometer

Lü Wei<sup>1,2</sup>, Zhang Xiaowei<sup>1</sup>, Xu Weihao<sup>1,2</sup>, Zhu Lei<sup>1</sup>, Zhong Jiaqi<sup>1,3\*</sup>, Wang Jin<sup>1,3,4\*\*</sup>, Zhan Mingsheng<sup>1,3,4\*\*\*</sup><sup>1</sup>Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China;<sup>2</sup>School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;<sup>3</sup>Hefei National Laboratory, Hefei, 230094, Anhui, China;<sup>4</sup>Wuhan Institute of Quantum Technology, Wuhan 430206, Hubei, China

**Abstract** The gravity gradiometer has important application value in resource exploration, geophysical research, autonomous navigation and other fields. The gravity gradiometer based on atom interferometers is a new type of high-precision measuring instrument, and its miniaturization and practicality are the core problems to be solved in its wide application. We design and implement a compact high-precision atom gravity gradiometer capable of measuring horizontal components. The instrument adopts the technical scheme of combining all-quartz vacuum cavity and accessory frame, which reduces the volume of the sensor part to 105 L. It adopts a double-sided optical modular structure, which reduces the volume of the optical unit to 36 L. These evolutions make the instrument very easy to carry. In laboratory, the sensitivity of the instrument is measured to be  $320 \text{ E}/\sqrt{\text{Hz}}$ , and the resolution is  $3.3 \text{ E}@4800 \text{ s}$  ( $1 \text{ E}=1 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ ).

**Key words** cold atoms; gravity gradiometer; atom interferometer; stimulated Raman transition

## 1 引言

重力梯度测量技术对于资源勘探<sup>[1]</sup>、地球物理与

环境研究<sup>[2]</sup>、自主导航<sup>[3]</sup>等领域都具有十分重要的意义。19 世纪, 匈牙利的物理学家 Roland Eötvös 研制出世界上第一台扭秤式重力梯度仪。经过一个多世纪的

收稿日期: 2023-02-27; 修回日期: 2023-03-17; 录用日期: 2023-03-22; 网络首发日期: 2023-04-02

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0601602)、科技创新 2030“量子通信与量子计算机”重大项目(2021ZD0300603)、精密重力测量国家重大科技基础设施仪器项目

通信作者: \*jqzhong@apm.ac.cn; \*\*wangjin@apm.ac.cn; \*\*\*mszhan@apm.ac.cn

发展,在不同的技术领域,人们先后提出并实现了基于旋转加速度计<sup>[4]</sup>、静电悬浮<sup>[5]</sup>、超导<sup>[6]</sup>和原子干涉<sup>[7]</sup>等方案的重力梯度仪。其中,原子干涉重力梯度仪(简称为原子重力梯度仪)是一种基于量子技术的新型重力梯度仪,一方面,它以原子能级及相关跃迁谱线为基准,具有和原子钟同源的内置高精度和稳定性,另一方面,它以真空中的自由下落原子团为测量介质,不存在由机械磨损所引入的寿命、误差和漂移问题。因此,相对于前述几种经典的测量方案,原子重力梯度仪具有高精度、低漂移、无磨损、可在常温环境长时工作等优势,是一种极具应用潜力的重力梯度测量仪器。目前,国际上已实现的原子重力梯度仪包括测量垂向分量( $\Gamma_{zz}$ )的垂向原子重力梯度仪和测量水平分量( $\Gamma_{xx}$ 、 $\Gamma_{yy}$ )的水平原子重力梯度仪。垂向( $\Gamma_{zz}$ )重力梯度仪是应用最为广泛的单分量重力梯度仪,而 $\Gamma_{xx} + \Gamma_{yy}$ 则是双分量重力梯度仪的最佳组合,可获得比单个垂直重力梯度仪更多的重力梯度信息。

经过 20 余年的发展,原子重力梯度仪技术日趋成熟。2022 年,法国 iXblue 公司研制出测量分辨率达到 0.15 E (1 E = 0.1  $\mu\text{Gal}/\text{m} = 1 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ ) 的高精度垂向原子重力梯度仪<sup>[8]</sup>;同年,英国伯明翰大学也研制出可搬运垂向原子重力梯度仪,该仪器测量分辨率为 20 E,但具有很强的鲁棒性,可以在外场试验中观测到地下隧道所引起的重力梯度变化<sup>[9]</sup>。相对于垂向原子重力梯度仪,水平原子重力梯度仪的敏感方向与原子的飞行轨迹垂直,需使用至少两束拉曼激光来实现对原子的干涉操作,因此空间的结构更加复杂。2015 年,斯坦福大学报道了一台基线长度可调的水平原子重力梯度仪<sup>[10]</sup>,该梯度仪的探头部分包含两个约 60 cm  $\times$  60 cm 的独立探头,其基线长度可在 70 cm ~ 1.8 m 之间变化,其测量分辨率最高可达到 1.6 ~ 2 E 的水平。然而,仪器的小型化问题始终是原子重力梯度仪在走向应用的过程中所必须解决的问题之一,例如上述两台垂向原子重力梯度仪的探头高度都在 1.8 m 左右,水平原子重力梯度仪的探头长度也处于 1.5 ~ 2.6 m 之间,这极大地影响了仪器的可搬运性能,以及和稳定平台的适配性,从而限制了仪器在灵活机动和动态场景下的应用。本课题组于 2022 年实现了高精度小型化的垂向原子重力梯度仪,其探头高度仅为 92 cm,体积为 95 L,测量分辨率可达 0.86 E<sup>[11]</sup>。近期,本课题组进一步采用了与垂向原子重力梯度仪截然不同的物理构型和技术方案,设计实现了探头和光学单元高度集成的小型水平式原子重力梯度仪,并完成了对重力梯度水平分量  $\Gamma_{xx}$  和  $\Gamma_{yy}$  的高精度测量。

## 2 测量原理

图 1(a)为类比于马赫-曾德尔(M-Z)光学干涉仪的 M-Z 原子干涉仪,其本质是利用一个  $\pi/2 - \pi - \pi/2$  的拉曼(Raman)激光序列来实现原子的分束-反射-合束

操作<sup>[12]</sup>。其中: $\pi/2$ 脉冲作用于原子,可使原子以 1/2 的几率发生基态 $|g\rangle$ 和激发态 $|e\rangle$ 间的跃迁,同时发生光子-原子间的动量交换,起到类比于光学干涉仪中分束/合束镜的作用; $\pi$ 脉冲作用于原子,可使得原子以最大的几率(理想情况下为 100%)发生 $|g\rangle$ 态和 $|e\rangle$ 态间的跃迁,同时发生光子-原子间的动量交换,起到类比于光学干涉仪中分束/合束镜的作用。在原子与 Raman 光场的相互作用过程中,Raman 激光的相位会进入到原子的相位中。若原子在初始时刻全部处于 $|g\rangle$ 态,则经过  $\pi/2 - \pi - \pi/2$  三个激光脉冲相继作用后,原子态将演化为

$$|\psi\rangle = \frac{1}{2} \left\{ \exp[-i(\varphi_1 - \varphi_{2b})] + \exp[-i(\varphi_{2a} - \varphi_3)] \right\} |g\rangle + \frac{i}{2} \left\{ \exp[-i(\varphi_1 - \varphi_{2b} + \varphi_3)] + \exp(-i\varphi_{2a}) \right\} |e\rangle, \quad (1)$$

式中: $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 和 $\varphi_3$ 分别为与原子作用时原子所处位置上三个激光脉冲的相位( $\varphi_{2a}$ 、 $\varphi_{2b}$ 分别为第二脉冲在两条空间分离的路径上各自的相位),此时原子在 $|g\rangle$ 态和 $|e\rangle$ 态的几率分别为

$$P_g = \left| \frac{1}{2} \left\{ \exp[-i(\varphi_1 - \varphi_{2b})] + \exp[-i(\varphi_{2a} - \varphi_3)] \right\} \right|^2 = \frac{1}{2} [1 + \cos(\varphi_1 - \varphi_{2a} - \varphi_{2b} + \varphi_3)], \quad (2)$$

$$P_e = \left| \frac{i}{2} \left\{ \exp(-i\varphi_{2a}) + \exp[-i(\varphi_1 - \varphi_{2b} + \varphi_3)] \right\} \right|^2 = \frac{1}{2} [1 - \cos(\varphi_1 - \varphi_{2a} - \varphi_{2b} + \varphi_3)]. \quad (3)$$

在重力场中,原子的两个干涉路径将发生如图 1(b)所示的偏转,从而使得原子在与 Raman 激光作用时拾取到  $\Delta\varphi = k_{\text{eff}} \cdot \Delta z$  的偏转相位,此时,由重力加速度  $g$  所引起的干涉相移  $\Delta\varphi$ <sup>[13]</sup>可表示为

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_{2a} - \Delta\varphi_{2b} + \Delta\varphi_3 = k_{\text{eff}} \cdot g T^2, \quad (4)$$

式中: $k_{\text{eff}}$ 为 Raman 光的有效波矢量; $T$ 为原子在相邻 Raman 脉冲之间的自由演化时间。因此,可以通过测量原子干涉条纹的相移来实现对重力加速度  $g$  的测量。

由于重力梯度的存在,相隔距离  $L$  的两个原子干涉仪将感受到不同的重力场  $g_1$ 、 $g_2$  并产生各自不同的相移  $\Delta\varphi_1$  和  $\Delta\varphi_2$ 。由式(4)可知:

$$\Delta\varphi_{\text{diff}} = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = k_{\text{eff}} \cdot \Delta g \cdot T^2. \quad (5)$$

沿  $L$  方向的重力梯度与差分干涉相位之间的关系为

$$\Gamma_L = \frac{\Delta g}{L} = \frac{\Delta\varphi_{\text{diff}}}{k_{\text{eff}} \cdot L T^2}, \quad (6)$$

即可以通过测量两个干涉仪之间的差分干涉相位实现对重力梯度的测量。

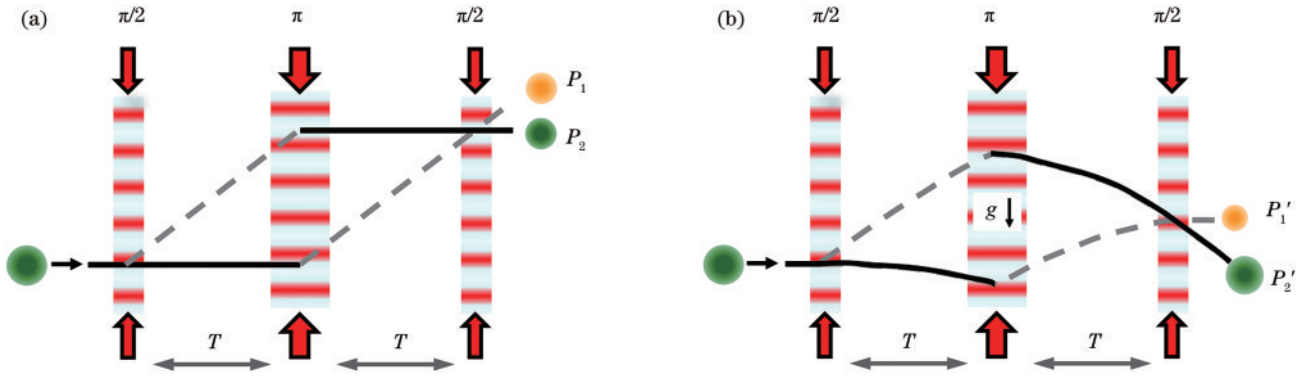


图 1 原子干涉过程中重力导致的相移示意图

Fig. 1 Schematic diagram of phase shift caused by gravity during atomic interference

### 3 物理构型和测量过程

水平重力梯度  $\Gamma_{xx}$  (或  $\Gamma_{yy}$ ) 是重力加速度  $g$  的水平分量  $g_x$  (或  $g_y$ ) 在  $x$  (或  $y$ ) 方向的空间变化率, 由前文所述的原理可知, 这需要由两个在水平方向 ( $x$  或  $y$ ) 间隔一定距离的两个原子干涉仪同步拾取该水平 ( $x$  或  $y$ ) 方向传播的 Raman 激光相位来实现。无重力条件下的水平重力梯度仪的构型如图 2(a) 所示, 每一个干涉

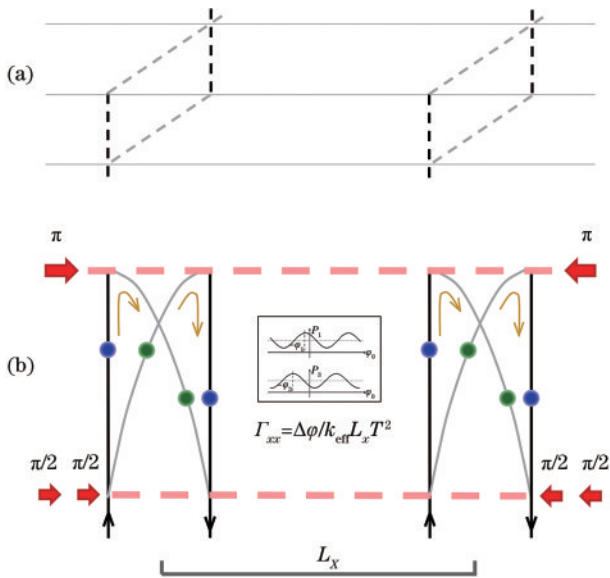


图 2 水平式原子重力梯度仪的构型

Fig. 2 Configuration of the horizontal-type atom gravity gradiometer

仪的两个干涉路径构成直立的平行四边形。在有重力且垂向 ( $z$ ) 分量占主导的条件下, 如果原子团具有向上的初速度, 干涉仪的路径将获得向下折叠的趋势, 选取适当的 Raman 脉冲开关时间可实现如图 2(b) 所示的完全折叠结构, 即第一和第三脉冲作用时刻原子所处的高度相同, 同时第二脉冲作用于原子轨迹的顶点。该结构的空间布局相对简单, 第一、第三脉冲可以共用同一光束, 且能有效利用真空腔体的纵向, 还可以在很大程度上消除由地球转动所引入的相移。

水平式原子重力梯度仪的空间结构如图 3 所示。

本文采用 2D-MOT 装载 3D-MOT 的方案。气态  $^{85}\text{Rb}$  原子首先在 2D-MOT 中被四束空间对称分布且指向中轴线的冷却激光进行横向二维预冷却, 再由推载光输送到 3D-MOT 中。冷却激光和线圈产生的四极磁场在区域中心协同产生能量最低的囚禁势场来实现冷原子团的制备。冷原子团制备完成后, 向上和向下传播的冷却光的频率同时分别移动  $\pm\Delta\nu$ , 由移动光学粘胶效应可知, 原子将获得向上的初始速度  $\lambda\Delta\nu$  并在重力场作用下上升、下落从而形成原子喷泉。原子向上运动进入喷泉-干涉区域, 该区域设置由偏置磁场线圈产生确定量子化轴方向的偏置磁场, 利用微波和淬灭激光将原子制备到  $5^2\text{S}_{1/2}$ 、 $F=2$ 、 $m_F=0$  的磁场不敏感能级上。初态制备完成后, 利用贯穿左右两个干涉仪的 Raman 激光光束, 依次对冷原子团施加  $\pi/2-\pi-\pi/2$  三个 Raman 激光脉冲, 原子在激光脉冲的操作下在  $F=2$ 、 $F=3$  态之间进行相干转移, 同时与光子进行动量交换并完成分束、反射、合束过程。最终, 原子下落回喷泉-干涉区域底部, 被探测激光激发, 干涉后的内态布居数通过自发辐射的荧光被光电探测器探测并

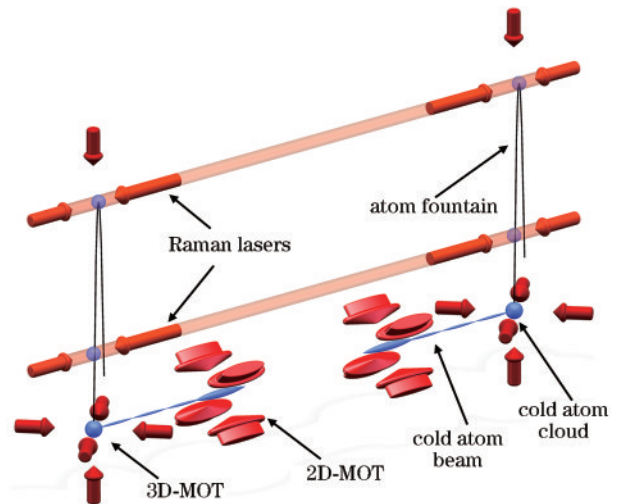


图 3 水平式原子重力梯度仪的空间结构及工作过程

Fig. 3 Spatial structure and working process of the horizontal-type atom gravity gradiometer



记录下来。通过对内态布居数的处理提取两个干涉仪的干涉相位差,再进一步计算得到重力梯度的测量值。

#### 4 小型水平式原子重力梯度仪的系统组成

小型水平式原子重力梯度仪的具体实现方案如图 4 所示。整机包含探头 (sensor unit)、光学单元 (optical unit) 和电控单元 (electronic control unit) 三个部分。其中:探头是重力梯度的核心单元,原子干涉的各相关物理过程都在此发生,由真空腔体 (vacuum chamber)、光学附件 (opt accessories)、线圈附件 (magnetic coils)、荧光探测系统 (optical detector) 以及

磁屏蔽罩 (mgnt sheilding) 组成;光学单元是操作原子所需的各路激光的产生单元,由冷却光 (cooling) 部分、回泵 (repumping) 光部分和 Raman 光部分组成,每一个部分又由激光器 (lasers)、光功率放大器 (amplifiers)、声光/电光调制器 (modulators)、输出光纤 (opt fibers) 以及反射镜等基础元器件组成;电控单元是对物理和光学单元中各个部件进行驱动、控制以及数据采集、处理、存储和输出的单元,由主控单元 (M control unit) 和温控电路 (tmp ctrl)、磁场电流源 (mgnt drv)、射频源 (RF drivers) 等各驱动电路组成。三个子单元之间通过光纤 (optical fibers) 与电缆 (cables) 连接,以方便搬运和测量。

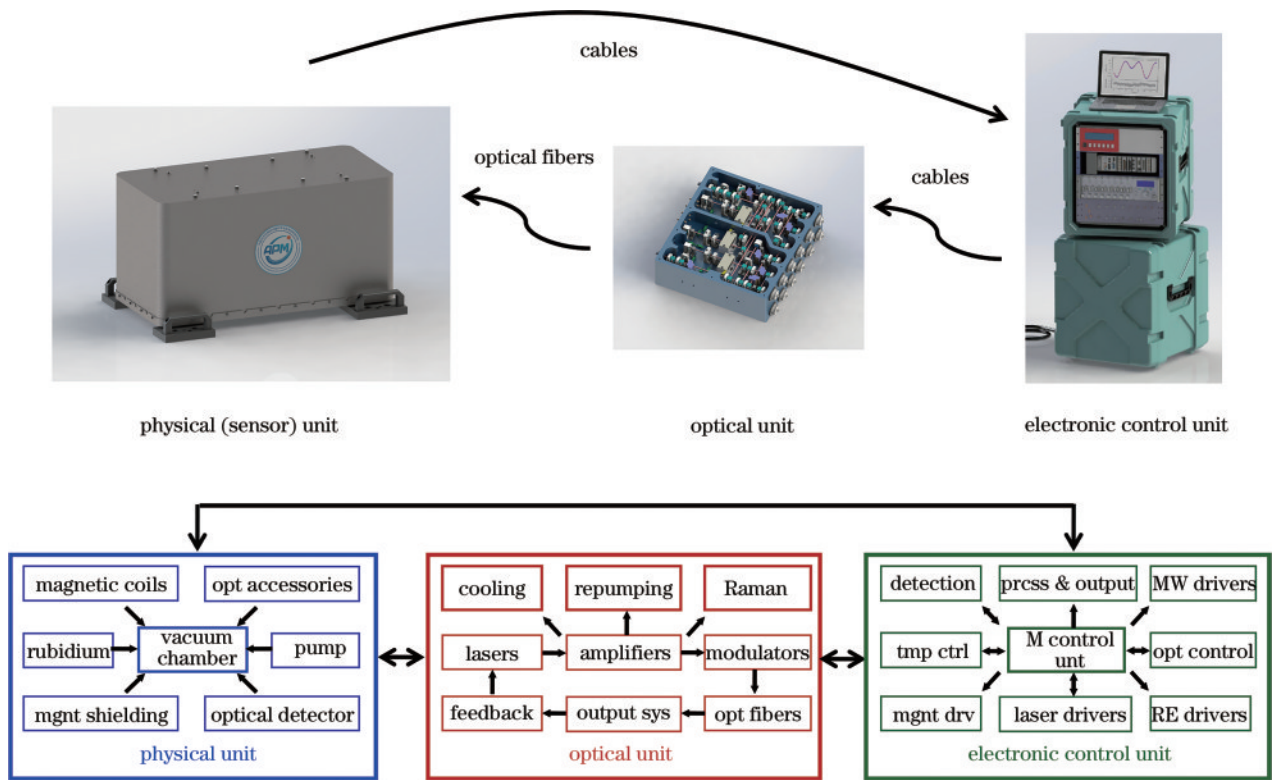


图 4 小型水平式原子重力梯度仪系统的组成

Fig. 4 Constitution of the compact horizontal-type atom gravity gradiometer

##### 4.1 探头

探头的内部结构如图 5 所示。环境磁场会使得原子的能级发生移动 (塞曼效应),从而影响光与原子的相互作用,一方面它直接影响原子的冷却和上抛过程,另一方面也会在干涉过程中带来额外的相位,从而引入测量噪声与误差。因此,探头的最外层为特制的双层磁屏蔽 (magnetic shielding) 结构,采用高磁导率的坡莫合金材料,可将环境磁场屏蔽 20 dB 以上。磁屏蔽的内部是一个近似于左右镜像的结构,分别为两个敏感于重力水平分量的原子干涉仪组件,主要包括真空腔体 (vacuum chamber)、支撑部件 (holder) 以及安装于真空腔体周围的光学与磁场 (magnetic coils) 附件等,

二者相距 45 cm。

真空腔是铷原子的容器。为了实现仪器的小型化,提高空间的利用效率,我们提出了全石英真空腔技术,使得真空腔具有更小的体积、更大的通光孔径。采用钛真空连接管将左、右干涉仪的真空腔连接为一体,使得 Raman 激光在两团原子之间无阻隔地传播,从而避免传统分体式方案中两干涉仪之间的窗片缺陷和空气扰动所引入的测量噪声和误差,实现最高的噪声共模抑制水平。原子的飞行轨迹和 Raman 激光的传播路径分别如图 5 中黑色和红色虚线所示。装配后探头的整体尺寸为 70 cm(L) × 42 cm(W) × 35 cm(H),体积小于 105 L,质量低于 80 kg,适合多种交通工具搬运。

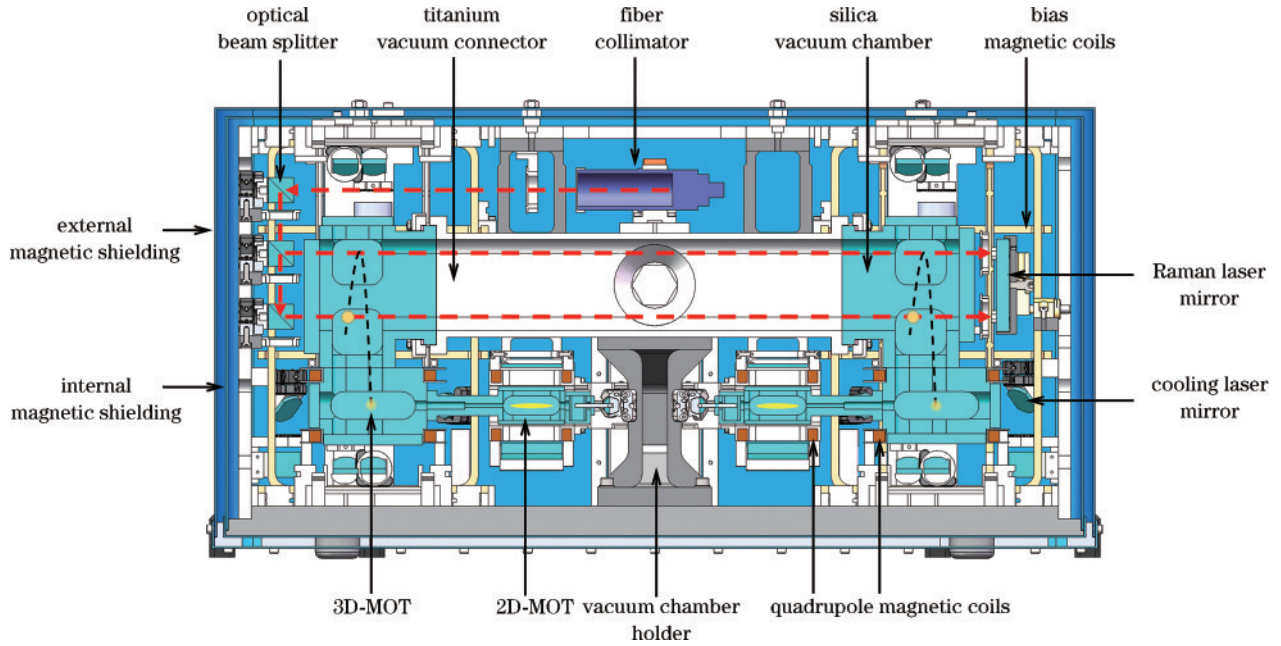


图 5 小型水平式原子重力梯度仪探头的内部结构

Fig. 5 Internal structure of the sensor of the compact horizontal-type atom gravity gradiometer

4.2 光学单元

如文献 [14] 中所述, 基于 <sup>85</sup>Rb 的高精度原子干涉仪从激光冷却到末态探测的整个测量过程共需要二维冷却光、三维冷却光、上行喷泉光、下行喷泉光、推载光 (pushing)、探测/淬灭光、拉曼光共 7 路 13 束激光 (其中拉曼光为单束, 其余左右干涉仪各 1 束)。如图 6<sup>[14]</sup> 所示, 除拉曼激光之外, 上述所有激光频率均在

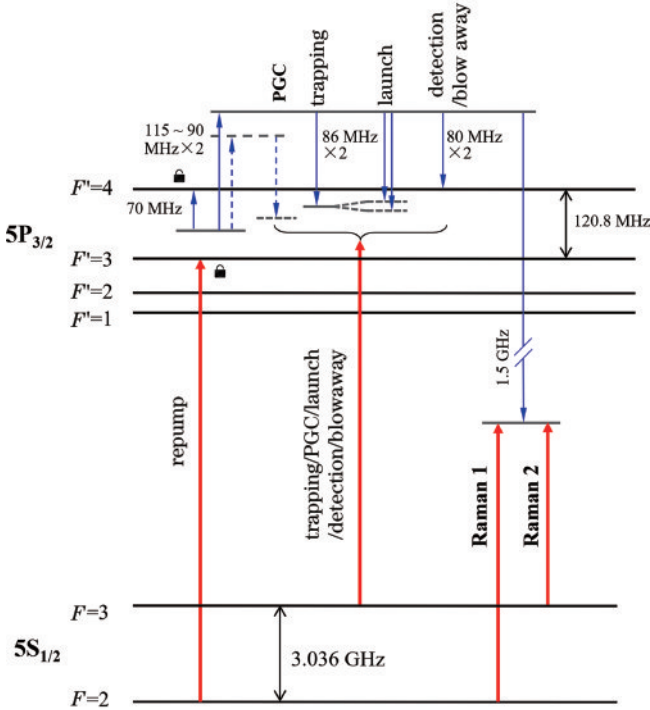


图 6 <sup>85</sup>Rb 原子 D<sub>2</sub> 跃迁能级及原子干涉所需的各种激光频率<sup>[14]</sup>  
Fig. 6 Energy levels of <sup>85</sup>Rb D<sub>2</sub> transition and various laser frequencies required for atom interference<sup>[14]</sup>

|F = 3⟩ → |F' = 4⟩ 跃迁的共振频率附近, 因此先通过正移频得到一束与共振频率蓝失谐的总控激光, 再将总控激光分束并各自负移频得到频率、光强独立可控的各路激光。为避免相干操作过程中的自发辐射, 拉曼激光需要相对于共振频率有较大的失谐量, 因此采用将高频 (1.5 GHz) 声光调制器的 ±1 级衍射光合束放大的方案, 来获得频差等于下能级劈裂, 且与共振频率远失谐的一对高功率拉曼激光。

<sup>85</sup>Rb 原子重力梯度仪光学单元的具体实现方案如图 7 所示。采用一台半导体激光器 (DL) 作为主激光 (包含 2D-MOT、3D-MOT 冷却光、推载光、探测光以及 Raman 激光) 的种子光, 其输出光束分成两路, 一路通过声光调制器 (AOM1) 正频移 70 MHz 后用调制转移谱锁定在 |F = 3⟩ → |F' = 4⟩ 共振峰, 另一路往返通过 115 MHz 的 AOM2 后得到相对于 |F = 3⟩ → |F' = 4⟩ 跃迁蓝失谐 160 MHz 的激光并注入冷却激光功率放大器 (TA1)。经过功率放大后的主激光光束分成 6 路, 前 5 路分别往返通过 AOM 3~AOM7 得到 2D-MOT 冷却光、3D-MOT 水平冷却光 (3D-MOT horizontal)、上行喷泉光、下行喷泉光和探测/淬灭光并输送至探头。第 6 路往返通过 1.5 GHz 的 AOM8, 同时取 +1 和 -1 级衍射光合束作为 Raman 光的种子光并注入 TA2, 得到频差等于 <sup>85</sup>Rb 5<sup>2</sup>S<sub>1/2</sub> 能级超精细劈裂的一束双频高功率 Raman 激光, 再经过高速光开关 AOM9 后输送至探头。半导体激光器 (DL) 输出的回泵光与主种子激光拍频, 锁定于 |F = 2⟩ → |F = 3⟩ 的共振谱线上, 并依次与 2D-MOT 冷却光、3D-MOT 水平冷却光、探测/淬灭光束重合。

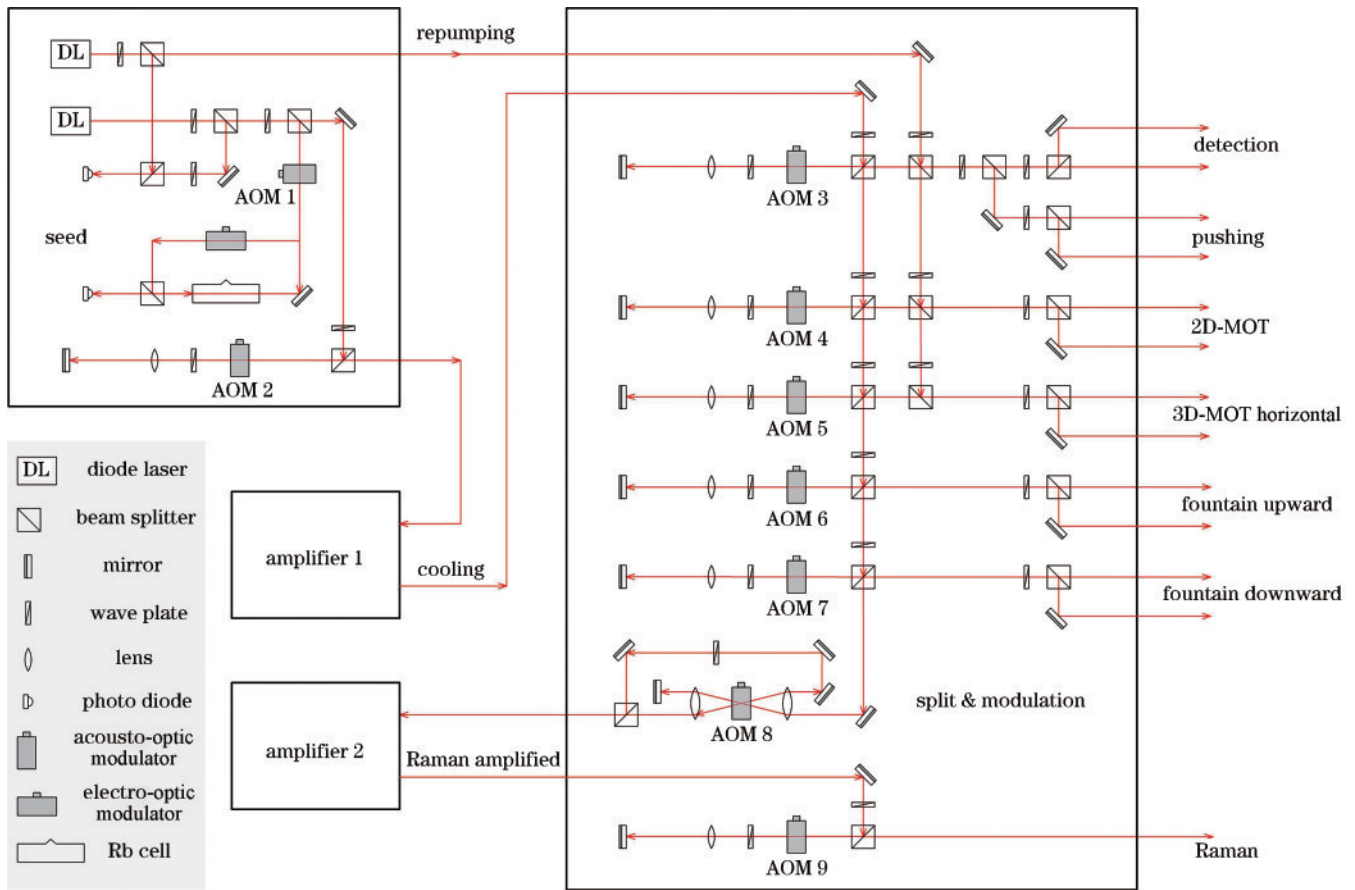


图 7 水平式原子重力梯度仪的光学单元原理图

Fig. 7 Schematic diagram of optical unit of horizontal-type atom gravity gradiometer

光学单元包括一个种子模块(seed)、两个功放模块(amplifier)和一个分光调制模块(split & modulation)。种子光模块中安装有主激光器、回泵激光器、AOM1、AOM2,以及外围的稳频、移频光路。两个功放模块分别对主激光和Raman种子光进行功率放大。AOM3~AOM9及外围光路安装于分光调制模块中,最终产生原子干涉所需的具有特定频率、功率和时变特征的各束激光,并通过单模保偏光纤输送至探头。光学单元的尺寸为 $60\text{ cm}\times 40\text{ cm}\times 15\text{ cm}$ ,总体积为 $36\text{ L}$ 。其中,分光调制模块设计为双面的立体光路结构,尺寸为 $33\text{ cm}\times 30\text{ cm}\times 12\text{ cm}$ 。

### 4.3 电控单元

电控单元的主要功能包括:对探头提供离子泵高压驱动信号(high-voltage for ion-pump)、选态微波信号(microwave)、磁场线圈驱动电流(magnetic coil current),采集末端激光光强信号(optical intensity)和原子荧光信号(photocurrent signal from atom fluorescence)。对光学单元(opt unit)提供激光器及光功率放大器的电流驱动信号,采集并反馈控制激光器及光功率放大器的温度,对各路声光/光电调制器提供驱动射频信号并由此调制控制激光的频率、功率和开关,以及对种子激光的频率参考信号进行采集、处理并实现反馈锁定。

电控单元的结构如图所示,包括离子泵驱动组件(ion-pump HV driver)、光电流放大组件( $I$ - $V$  amplifier)、低噪声信号源(signal generator)、微波组件、主控单元(main control case)、多通道射频组件(RF case)、电源及磁场电流源驱动组件(power/current source case)、种子光驱动组件(seed laser driver case)和激光功率放大器组件(power amplifier driver case)。其中,低噪声信号源采用Agilent公司的33622A产品,种子光驱动组件采用Toptica公司的DC110系列产品,激光功率放大器组件采用Thorlabs公司的PRO8000系列产品。微波、射频磁场电流源等组件均为自主研发。

主控单元是整个水平原子重力梯度仪的控制中枢,它基于NI公司的CompactRIO硬件系统,以及自主开发的原子重力梯度仪应用软件,实现包括光强控制、磁场电流控制、光强比例控制等24路模拟信号的实时输出,以及激光光电流信号、原子荧光信号、光强比例信号、环境温湿度信号、姿态信号等12路模拟信号的采集,激光开关、磁场开关、激光频率跳变、扫频触发等24路数字信号的输出与采集。主控单元具有光强实时反馈、光强比例实时反馈、干涉信号处理、数据存储等一系列功能。整个电控单元安装在两个12 U的减震防护机箱内,单个机箱约 $65\text{ cm}\times 65\text{ cm}$ ,总质



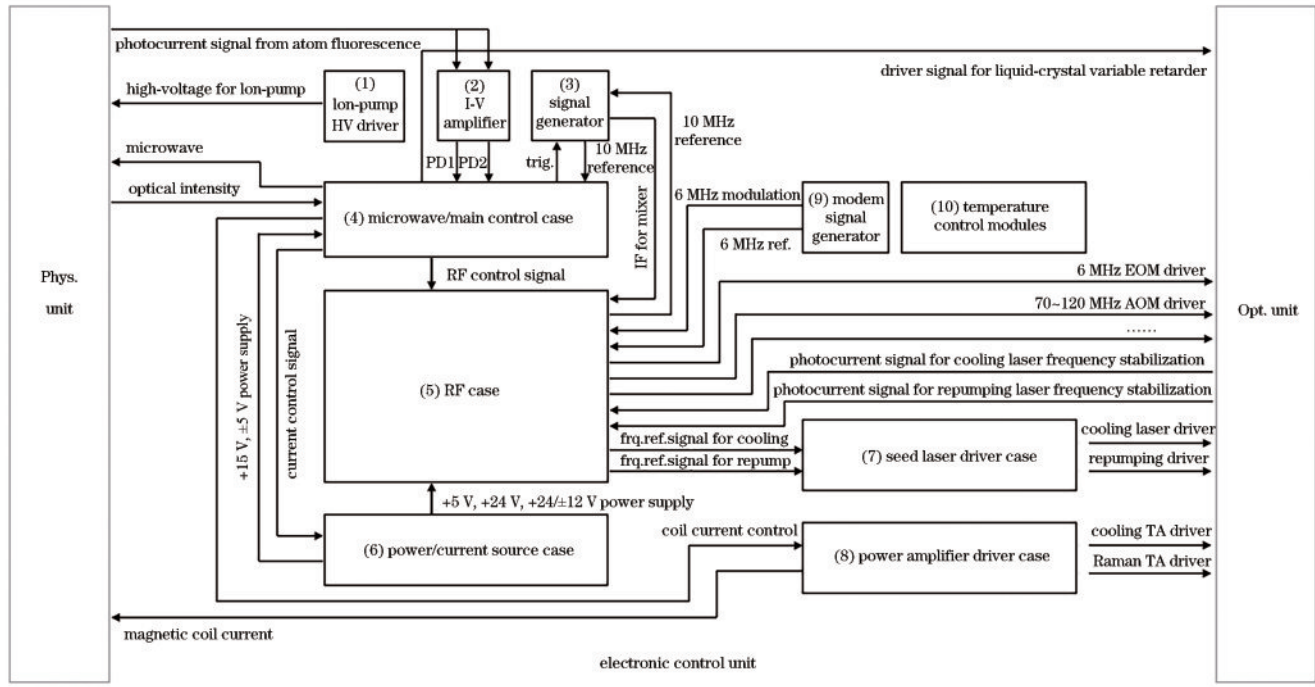


图 8 电控单元示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the electronic control unit

量为 120 kg。经过后续的研发和改进,该电控单元的集成度具有非常大的提升空间。

## 5 仪器的调试与测试

装配完成的小型水平式原子重力梯度仪整机实物如图 9 所示。光学单元和探头对温、湿度波动和振动都相当敏感,因此,本文将光学单元安装在探头的上方,方便进行一体化环境参数控制。

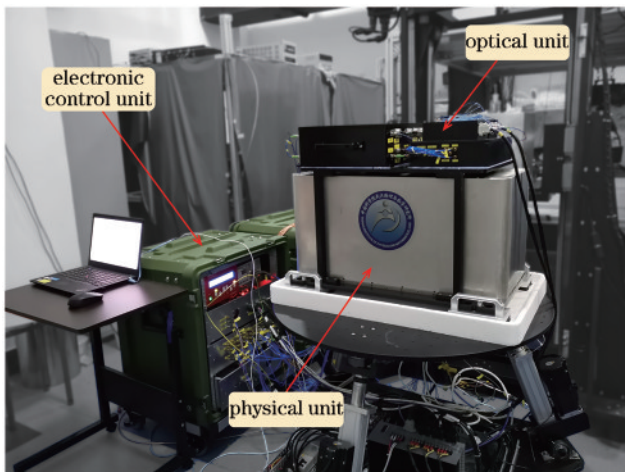


图 9 小型化水平式原子重力梯度仪整机

Fig. 9 Photograph of compact horizontal-type atom gravity gradiometer

整机联调过程也分为冷原子制备、原子喷泉、初态制备、相干操作等步骤。在冷原子制备阶段,Rb 原子在 2D-MOT 中经过二维预冷却形成一束冷原子束流。

束流方向指向 3D-MOT 中心,原子运动到 3D-MOT 中被进一步冷却并囚禁,形成初始冷原子团。在 0.5 s 内,原子的装载速度随装载时间  $t$  呈近似线性增长,在 2 s 后逐渐趋于饱和,最终能够囚禁接近于  $10^9$  的原子数。实际测量过程中,150 ms 内原子装载数可以达到  $1.7 \times 10^8$ ,能够满足实验所需,此时原子数目已经不是限制干涉信噪比的主要因素。

在 3D-MOT 中完成冷原子团制备后,通过反向改变竖直方向对射的一对冷却光频率 ( $\pm \Delta\nu$ ) 使原子获得向上的初始速度  $\lambda\Delta\nu$ ,并在重力的作用下上升到最高点后折返下落,从而形成原子喷泉。为了突破多普勒冷却极限温度,在原子上抛的过程中利用偏振梯度冷却 (PGC) 的方法将原子团温度进一步冷却至  $10 \mu\text{K}$  以下。原子在下落到探测区时,被竖直方向传播的探测激光激发,原子自发辐射的荧光被光电探测器所采集,其强度正比于下落的原子的数目。喷泉的上抛速度为 1.5 m/s,上抛高度为 12 cm,探测到原子的下落荧光信号的时刻距离上抛操作的时间为 277 ms。

在上抛离开磁光阱区域后,所有的原子均处于  $|5^2S_{1/2} F=3\rangle$  态,为了消除一阶塞曼效应对原子能级的影响,我们进一步对原子的磁子能级进行了选择。在原子上升过程中,首先在原子轨迹上施加偏置磁场,使  $|F=3\rangle$  能级发生分裂,再用空间的微波场将处于磁子能级  $m_F=0$  的原子转移到  $|F=2, m_F=0\rangle$  态上,再利用与  $|F=3\rangle \rightarrow |F'=4\rangle$  跃迁共振的淬灭激光将处于  $|F=3, m_F \neq 0\rangle$  态的原子清除,此时喷泉中所有剩余的原子均处于  $|F=2, m_F=0\rangle$  态,利用这部分原子

进行后续的干涉过程。

如前文所述,原子干涉所使用的 Raman 激光根据脉冲宽度  $\tau$  的不同区分为  $\pi/2$  脉冲(分束、合束脉冲)和  $\pi$  脉冲(反射脉冲)。实验中需要由原子从  $|g\rangle(F=2, m_F=0)$  态到  $|e\rangle(F=3, m_F=0)$  态的实际转移效果来确定  $\pi/2$  和  $\pi$  脉冲的作用时间。

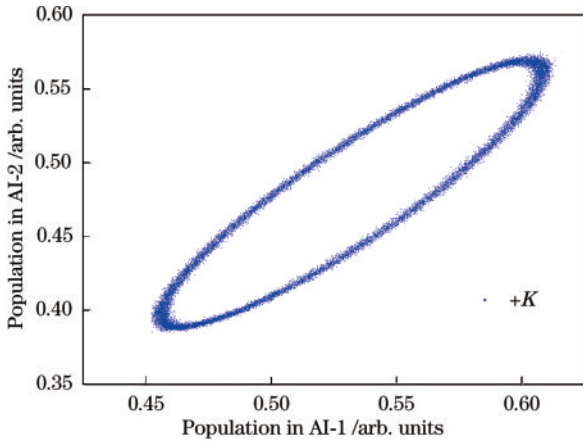
通过  $\pi/2$ - $\pi$ - $\pi/2$  Raman 脉冲序列对选态后的原子团进行分束-反射-合束操作,脉冲间的原子自由演化时间  $T=100.5$  ms,期间原子上升/下落距离约 5 cm。干涉完成后约 20 ms,原子下落至探测区。采用与  $|F=3\rangle \rightarrow |F'=4\rangle$  跃迁共振的垂向探测光,对处于  $|F=3\rangle$  态的原子进行激发,并通过荧光探测获得原子的内态布居数。由等效原理可知,敏感于重力加速度的原子干涉仪也必定会对振动加速度有同样的敏感性,但刚性连接的两个原子干涉仪感受到的振动噪声在很大程度上是一致的,因此,通过噪声共模抑制来提取重力加速度的差值是重力梯度仪数据提取的核心思想。将两路同步的正弦信号分别作为  $x$  和  $y$  坐标绘制李萨如图形,可以从中提取出两路正弦信号的相位差。在理想情况下该李萨如图形由椭圆方程来描述。

$$aP_A^2 + bP_A P_B + cP_B^2 + dP_A + eP_B + f = 0, \quad (7)$$

式中: $P_A, P_B$  分别为原子干涉仪的末态原子数目; $(a, b, c, d, e, f)$  为椭圆参数。则椭圆所包含的差分相位可表示为

$$\Delta\varphi_{\text{diff}} = \arccos\left[-b/(2\sqrt{ac})\right]。 \quad (8)$$

在振动噪声的作用下,尽管测量得到的干涉相位



是无序的,但由重力的差值在两路干涉信号中引入的相位差是不变的,这使得在不对振动噪声进行隔离和补偿的条件下,该李萨如图形仍然可以呈现为信噪比很高的椭圆信号,通过对式(7)进行最小二乘拟合可以从椭圆中提取出两路干涉信号的相位差,并计算得到水平重力梯度的数值。

除了振动噪声之外,磁场和光强等噪声也会通过二阶塞曼效应、交流斯塔克效应等物理效应进入到干涉相位当中,从而造成重力或重力梯度测量的噪声和漂移。在实验中,我们通过反转 Raman 激光  $k_{\text{eff}}$  波矢量的方向来去除这部分噪声和漂移。由重力所引起的相移与 Raman 激光  $k_{\text{eff}}$  波矢量的方向相关,而由塞曼频移和交流斯塔克频移等效效应引起的相位差与 Raman 光  $k_{\text{eff}}$  波矢的方向无关,因此,在不同方向 Raman 光  $k_{\text{eff}}$  波矢下的两个原子干涉仪的相位差可以写为

$$\Delta\varphi_{+k} = \Delta\varphi_{k,\text{indep}} + \Delta\varphi_{k,\text{dep}}, \quad (9)$$

$$\Delta\varphi_{-k} = \Delta\varphi_{k,\text{indep}} - \Delta\varphi_{k,\text{dep}}, \quad (10)$$

式中: $\Delta\varphi_{k,\text{dep}}$  为与 Raman 光  $k_{\text{eff}}$  波矢的方向相关的相移,主要包括由重力梯度引起的相移; $\Delta\varphi_{k,\text{indep}}$  为由塞曼频移、交流斯塔克频移造成的与 Raman 光  $k_{\text{eff}}$  波矢的方向无关的相移。两式相减,可以消去  $\Delta\varphi_{k,\text{indep}}$  而保留包含有重力梯度信息的  $\Delta\varphi_{k,\text{dep}}$ ,提高梯度仪的短期灵敏度和长期稳定性。图 10 分别为两个不同方向  $k_{\text{eff}}$  作用下的双干涉仪中的差分椭圆,分别拟合两个椭圆可得  $\Delta\varphi_{+k}$  与  $\Delta\varphi_{-k}$ ,最终得到差分相位为

$$\Delta\varphi_{\text{diff}} = (\Delta\varphi_{+k} - \Delta\varphi_{-k})/2 = \Delta\varphi_{k,\text{dep}}。 \quad (11)$$

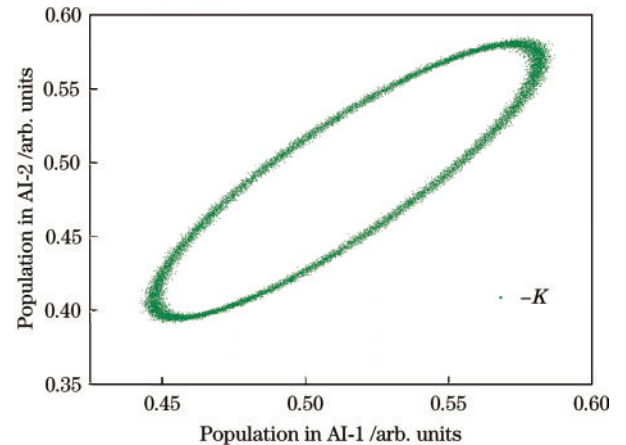


图 10 不同 Raman 光  $k_{\text{eff}}$  波矢方向条件下的差分椭圆

Fig. 10 Differential ellipses under different orientations of  $k_{\text{eff}}$  of Raman light

在实验室条件下对仪器的静态指标进行了测试,测试环境温度为  $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。该仪器单个干涉数据点的测量耗时 470 ms,  $+k$  和  $-k$  测量均为 40 个数据点进行一次相位拟合,因此该梯度仪 37.6 s 可完成一次重力梯度测量。梯度仪的基线长度为 45 cm,自由演化时间  $T=100.5$  ms,由式(6)可计算得到 1 mrad 的差分相位对应约 13.7 E 的重力梯度。由椭圆相位的阿伦

偏差计算得到重力梯度的阿伦偏差,如图 11 所示,积分 100 s 的测量精度可以达到 32 E,积分 4800 s 的条件下,可达到 3.3 E 的测量分辨率。由于重力梯度仪对振动噪声具有很好的免疫性,因此在振动水平具有很大差异的不同环境下(例如嘈杂的三楼实验室和安静的山体基岩上),其测试结果未见有明显的差别。本文利用  $\sigma = s\sqrt{\tau}$  关系对 1000 s 以内的数据点进行拟合,得



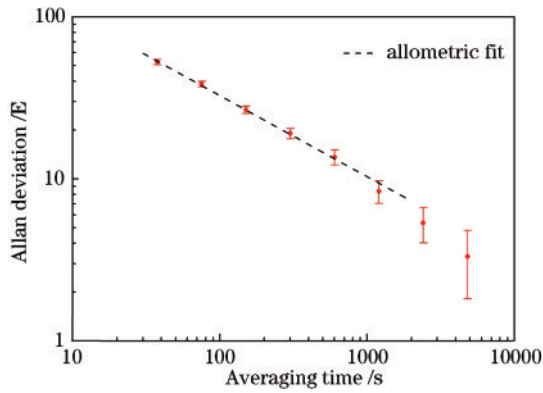


图 11 重力梯度测量值的阿伦方差曲线

Fig. 11 Allan deviation curve of gravity gradient measurement

到测量灵敏度  $s=320 \text{ E}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。目前,我们在非干涉状态下测得的归一化原子信号的信噪比约为 300:1,经过数值模拟得到该信噪比条件下的椭圆相位噪声为  $24 \text{ mrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,对应重力梯度测量噪声  $328 \text{ E}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,与实测灵敏度基本相符,因此,目前该重力梯度仪的测量灵敏度主要受限于探测噪声。在后续实验中,我们将通过改进探测激光频率和功率的稳定性来进一步实现测量灵敏度的提高。

为了验证该水平重力梯度仪的实际性能,本文进一步开展了基于移动质量块的重力场调制实验。将重约 500 kg 的质量块在梯度仪的附近往复运动并记录重力梯度测量值的变化。质量块为边长为 30 cm 的立方体,由 64 块尺寸为  $15 \text{ cm} \times 7.5 \text{ cm} \times 3.75 \text{ cm}$  的钨砖堆叠而成,其中心初始位置(高位点)与重力梯度仪的物理中心同高,水平相隔距离为 64.3 cm,实验中质量块沿竖直方向下降 57.1 cm 到低位点(水平方向距离不变),如此往复交替测量。经数值积分算,质量块在高点产生重力梯度为 104.14 E,在低点产生重力梯度为 47.03 E,梯度变化值为 57.11 E,承载板及其他随动部件产生重力梯度变化约 1.69 E,故重力梯度变化的理论值为 58.8 E。实验中每 1 h 改变一次质量块的位置,测得约 10 个数据点。测量结果如图 12 所示,以 1 h 作为测量时间,质量块在两个位置处重力梯度仪测得

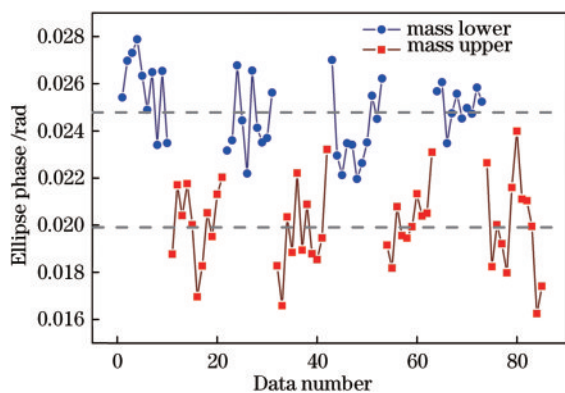


图 12 重力场调制实验测量结果

Fig. 12 Experimental results of gravity field modulation

的差分相位分别为  $(24.8 \pm 0.85) \text{ mrad}$  和  $(19.9 \pm 0.26) \text{ mrad}$ ,采用相邻数据相减的方法计算得到两组相位的差值为  $(4.6 \pm 0.40) \text{ mrad}$ ,对应重力梯度的变化  $(62.8 \pm 5.5) \text{ E}$ ,与理论值  $58.8 \text{ E}$  符合较好。

## 6 结 论

本文在前期小型垂向高精度原子重力梯度仪的工作基础上,基于不同物理构型设计实现了小型化水平式高精度原子重力梯度仪。采用全石英真空腔技术,通过对仪器结构的精细设计,成功地将重力梯度仪的探头单元压缩至 100 L 左右。通过对原子干涉过程的设计和优化,保证了仪器小型化后的测量精度。在实验室环境下,该仪器的测量灵敏度为  $320 \text{ E}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,积分 4800 s 的条件下重力梯度测量分辨率可达到 3.3 E。在重力场调制实验中,仪器测得重力梯度的变化量与不确定度与理论值相符,仪器的静态测试指标得到验证。在后续工作中,我们将进一步开展仪器的环境适应性研究工作,采用提高自适应能力和环境主动控制相结合的技术路线,使其满足在野外恶劣环境下工作的需求。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang G L, Zhao G X, He F Q, et al. Application of the gravity method to the iron ore exploration in eastern Hebei Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(6): 2097-2098.
- [2] 赵云峰, 祝意青, 刘芳. 重力水平梯度及其在地震重力前兆中的研究初探[J]. *地震地质*, 2015, 37(4): 1020-1029.  
Zhao Y F, Zhu Y Q, Liu F. Preliminary discussion on horizontal gravity gradient and its application to seismic gravity precursor research[J]. *Seismology and Geology*, 2015, 37(4): 1020-1029.
- [3] 王虎彪, 王勇, 许大欣, 等. 重力异常和重力梯度联合辅助导航算法及仿真[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(1): 116-122.  
Wang H B, Wang Y, Xu D X, et al. Aided navigation algorithm and simulation research based on the data of gravity anomaly and gravity gradient[J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(1): 116-122.
- [4] Lee J B. Falcon gravity gradiometer technology[J]. *Exploration Geophysics*, 2001, 32(3/4): 247-250.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.

- [8] 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.
- [9] Stray B, Lamb A, Kaushik A, et al. Quantum sensing for gravity cartography[J]. *Nature*, 2022, 602(7898): 590-594.
- [10] Biedermann G W, Wu X, Deslauriers L, et al. Testing gravity with cold-atom interferometers[J]. *Physical Review A*, 2015, 91(3): 033629.
- [11] Lv 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.
- [12] Kasevich M A, Chu S. Atomic interferometry using stimulated Raman transitions[J]. *Physical Review Letters*, 1991, 67(2): 181-184.
- [13] Storey P, Cohen-Tannoudji C. The Feynman path integral approach to atomic interferometry. A tutorial[J]. *Journal De Physique II*, 1994, 4(11): 1999-2027.
- [14] Zhang X W, Zhong J Q, Tang B, et al. Compact portable laser system for mobile cold atom gravimeters [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(22): 6545-6551.