DOI:10.3788/JQO20253102.0201

# 采用原子磁强计和磁通门磁强计对 磁场线圈常数的标定及对比

赵妮<sup>1</sup>,杨永彪<sup>1</sup>,张露露<sup>1</sup>,李杨<sup>1</sup>,赵军业<sup>1</sup>,杨保东<sup>2,3</sup>,王彦华<sup>2,3</sup>,王军民<sup>1,3†</sup>

(1. 山西大学光电研究所 光量子技术与器件全国重点实验室, 山西 太原 030006;

2. 山西大学物理电子工程学院,山西太原 030006;

3. 山西大学极端光学协同创新中心,山西太原 030006)

摘要:许多实验中需要对亥姆霍兹磁场线圈对或鞍型无矩磁场线圈通电流来提供稳定的、均匀的磁场环境。磁场线圈常数是指给定的磁场线圈中通入单位电流可在磁场线圈中心产生的磁场强度。精确地标定磁场线圈常数,对于环境磁场的补偿、磁强计灵敏度的评估等都具有重要意义。在高磁导率坡莫合金(permalloy)多层磁屏蔽环境下,我们分别采用自主研发的光泵铷-87原子自旋自由进动衰减型(Free-Induction Decay, FID)磁强计和商售磁通门磁强计,对待测磁场线圈在低噪声、高精度的恒流电源驱动下所产生的磁场进行了测量,标定了磁场线圈常数,并对两种测量方法做了比较。结果表明,光泵铷-87原子FID磁强计有较高的灵敏度(1~10 Hz分析频率范围内,典型灵敏度约为6.5 pT/Hz<sup>1/2</sup>),且没有零漂问题,性能显著优于磁通门磁强计。我们还利用所研制的光泵铷-87原子FID磁强计对商售磁通门磁强计进行了标校。

关键词: 磁场线圈常数; 原子磁强计; 磁通门磁强计; 拉莫尔频率; 自旋自由进动衰减 中图分类号: O441.4; O441.5 文献标识码: A

## Calibration and Comparison of Magnetic Coil Constant by using of an Atomic Magnetometer and a Fluxgate Magnetometer

ZHAO Ni<sup>1</sup>, YANG Yongbiao<sup>1</sup>, ZHANG Lulu<sup>1</sup>, LI Yang<sup>1</sup>, ZHAO Junye<sup>1</sup>, YANG Baodong<sup>2,3</sup>, WANG Yanhua<sup>2,3</sup>, WANG Junmin<sup>1,3†</sup>

(1. State Key Laboratory of Quantum Optics Technologies and Devices, and Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. School of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

3. Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

收稿日期: 2024-12-10; 接受日期: 2025-02-01

基金项目:国家自然科学基金项目(12474483);山西省基础研究计划项目(202403021211013)

**作者简介**:赵妮(1998-),女,山西运城人,硕士研究生,研究方向为精密测量。E-mail:1569381067@qq.com **†通信作者:**王军民,E-mail:wwjjmm@sxu.edu.cn 020201

Abstract: Objective Magnetic field precision measurements were widely used in materials diagnosis and research, mineral resources exploration, magnetocardiography (MCG) and magnetoencephalography (MEG) detection, geomagnetic field measurement, space magnetic field measurement, atomic spin gyro inertial navigation, dark matter searching, etc. In a magnetic field detection system, to achieve high-sensitivity magnetic field measurement, it is necessary to use magnetic coils to provide a stable and uniform magnetic field. The magnetic coil constant is the ratio of the generated magnetic field value at the center of the magnetic coil to the applied current. Precise calibration of the magnetic coil constant is very important for effective suppression of magnetic field noise, compensation of ambient magnetic field, and calibration of magnetometer sensitivity.

**Methods** To precisely measure the magnetic coil constant, we employed two different methods under good magnetic shielding conditions: the optically-pumped free-induction decay (FID) Rubidium-87 atomic magnetometer developed by ourselves and the commercially available fluxgate magnetometer. A magnetic moment-free coil is placed in the center of a four-layer permalloy magnetic shield. The uniform magnetic field is generated in the center of the magnetic coil by a constant-current source (Key-Sight, Model B2961A) with low noise and high stability. The coil constant is measured by the fluxgate magnetometer and the optically-pumped FID Rubidium-87 atomic magnetometer, and accuracy of the coil constant calibration are compared.

**Results and Discussions** Optically-pumped atomic FID magnetometers employ spin polarization of atomic ensemble and Larmor precession of the macroscopic magnetic moment around the magnetic field to map Larmor frequency information on the probe laser polarization rotation to extract the magnetic field information. Due to its advantages of high sensitivity (typical~6.5 pT/ $Hz^{1/2}$  with analysis frequency range of 1~10 Hz in our case), high resolution and wide dynamic range, it can meet the needs of different fields. In terms of measuring magnetic coil constant, the optically-pumped FID Rubidium-87 magnetometer performs much better than the commercially fluxgate magnetometer due to its good signal-to-noise ratio (SNR) and high sensitivity, and the magnetic field values can be accurately measured. The magnetic coil constant measured by the optically-pumped FID Rubidium-87 atomic magnetometer is  $(126.956 \pm 0.076)$  nT/mA, and that measured by the fluxgate magnetometer is  $(127.3 \pm 0.3)$  nT/mA. Clearly the magnetic coil constant value measured by the optically-pumped FID Rubidium-87 atomic magnetic coil constant value measured by the optically-pumped FID Rubidium-87 atomic magnetic coil constant value measured by the optically-pumped FID Rubidium-87 atomic magnetic coil constant value measured by the optically-pumped FID Rubidium-87 atomic magnetic coil constant value measured by the optically-pumped FID Rubidium-87 atomic magnetic coil constant value measured by the optically-pumped FID Rubidium-87 atomic magnetic coil constant value measured by the optically-pumped FID Rubidium-87 atomic magnetic coil constant that measured by the fluxgate magnetometer is much more accurate than that measured by the fluxgate magnetometer, because the former's sensitivity is much better and it has no zero point drifing.

**Conclusions** The optically-pumped FID Rubidium-87 atomic magnetometer has much better sensitivity and does not need to be calibrated during magnetic field measurement, because it does not have the problem of zero point drifting. Therefore, the optically-pumped FID Rubidium-87 atomic magnetometer can be used to calibrate the available fluxgate magnetometer. We compare the magnetic field values measured by our optically-pumped FID Rubidium-87 atomic magnetometer with that of the available fluxgate magnetometer, and get the calibration factor of 0.9967.

Keywords: magnetic coil constant; atomic magnetometer; fluxgate magnetometer; Larmor frequency; free-induction decay (FID)

## 1 引言

亥姆霍兹磁场线圈对或鞍型无矩磁场线圈通电流可产生均匀磁场,在光泵原子磁强计<sup>[1-3]</sup>、原子自旋陀螺仪<sup>[4-5]</sup>、中子自旋滤波器<sup>[6-7]</sup>、脑磁和心磁检测<sup>[8-9]</sup>、基础物理研究等许多领域得到了广泛应用。磁场精密测量领域,评价磁强计性能的指标主要包括准确度、灵敏度、带宽、空间分辨率和稳定性等。通常需要由亥姆霍兹磁场线圈对或鞍型无矩磁场线圈通电流产生均匀磁场,从而去标定磁强计的磁场测量灵敏度以及其他指标。但首先需要对磁场线圈常数,也就是磁场线圈中通入单位电流在磁场线圈中心产生的磁场强度,进行精确测量。

测量磁场线圈常数可采用不同的磁强计。比如, 将商售的磁通门磁强计或商售的霍尔磁强计的探头置 于多层磁屏蔽桶内的磁场线圈的中心用于测量磁场。 在测量磁场线圈常数时须在很大程度上降低背景磁场 及起伏的影响。然而,商售的磁通门磁强计和商售的 霍尔磁强计的灵敏度较差,而且都存在零漂问题,在 使用过程中需要反复校准;此外,其探头放置的角度 和方位还会引起航向误差。因此,该方法在测量磁场 线圈常数时的精度有限。光泵原子磁强计通过原子系 综与磁场、光场的相互作用来获取磁场信息,不存在 零漂问题,而且由于其高灵敏度的优点,已被广泛应 用于磁场精密测量及磁场线圈常数标定<sup>[10-13]</sup>。

近年来采用光泵原子磁强计标定磁场线圈常数

受到许多研究者的关注。Breschi等<sup>[14]</sup>提出了一种基于自旋排列态的原子自由进动衰减(Free-Induction Decay, FID)型三轴磁场线圈原位标定方法。Zhang 等<sup>[15]</sup>采用自旋极化共磁强计标定磁场线圈常数。 Chen等<sup>[16]</sup>基于测量惰性气体原子系综的FID信号标 定磁场线圈常数。Zhao等<sup>[17]</sup>通过无损相位测量和相干光抽运使铷原子系综的自旋极化相干再生,拉莫尔 进动信号连续振荡,实现磁场线圈常数标定。Wang 等<sup>[18]</sup>通过检测FID瞬态响应信号,根据FID信号频率和相关拉比振荡幅度标定磁场线圈常数。Wang等<sup>[19]</sup>通过双光束无自旋交换弛豫(Spin Exchange Relaxation-Free: SERF)原子磁强计对三轴磁场线圈 交替采用方波信号,得到相应的FID信号,然后通过 快速傅里叶变换(Fast Fourier Tranform, FFT)得到 拉莫尔进动频率,实现了三轴磁场线圈常数的标定。

在先前的工作中,我们基于光泵铷原子FID磁 强计测试表征了若干台商售的恒流电源的电流噪 声<sup>[20]</sup>。在测试的六种恒流电源中,美国Key Sight公 司 B2961A型恒流电源的电流噪声水平相对最低。 为了避免恒流电源的电流噪声对磁场测量和磁场线 圈常数标定的影响,本实验中选用低噪声、高稳定 度的B2961A型精密恒流电源,驱动置于高磁导率坡 莫合金(Permalloy)四层磁屏蔽桶中的单轴无矩磁 场线圈,产生轴向均匀磁场。采用自主研发的光泵 锄-87原子FID磁强计和商售的磁通门磁强计测量磁 场线圈常数,并比较二者的测量结果及精度。此外, 我们还基于所研制的光泵铷-87原子FID磁强计对商 售磁通门磁强计进行了标校。

## 2 实验装置

采用光泵铷原子 FID 磁强计进行磁场测量的原理 简述如下。在充有缓冲气体的铷原子气室中,不考虑 核 自 旋, <sup>87</sup>Rb 原子 基态能级为 5S<sub>1/2</sub> ( $m_J$ =+1/2) 和 5S<sub>1/2</sub> ( $m_J$ =-1/2)。在 y 方向施加弱磁场  $B_0$ ,每个 <sup>87</sup>Rb 原子以角频率 $\omega$ = $\gamma B_0$ 绕 $B_0$ 作拉莫尔自旋进动, $\gamma$ 为铷 -87 原子基态的旋磁比。此时原子系综的宏观磁矩非 常小。在 y 方向施加共振于 <sup>87</sup>Rb 原子 795 nm 的 D1 跃 迁线的  $\sigma^+$ 圆偏振泵 浦光, 耦合 5S<sub>1/2</sub> ( $m_J$ =-1/2)-5P<sub>1/2</sub> ( $m_J$ =+1/2)跃迁,可实现 <sup>87</sup>Rb 原子系综自旋极化 态 5S<sub>1/2</sub> ( $m_J$ =+1/2)的制备,原子系综的宏观磁矩沿泵 浦光的波矢量方向。在z方向施加频率等于拉莫尔频 率的交变磁场 $B_{rr}$ , <sup>87</sup>Rb原子在基态5S<sub>1/2</sub>( $m_J$ =+1/2)和 5S<sub>1/2</sub>( $m_J$ =-1/2)之间发生磁偶极跃迁,原子系综的自 旋极化态被破坏。施加交变磁场 $\pi/2$ 脉冲,原子的宏 观磁矩演化到垂直于静磁场 $B_0$ 所在的平面内。随后 撤去交变磁场,原子的宏观磁矩发生自由进动衰减 (FID),直至演化到热平衡态。采用780 nm波长频率 大失谐的线偏振探测光束沿x方向传播,结合平衡偏 振仪可探测原子系综的FID信号。

光泵铷原子FID磁强计的实验装置如图1所示。 实验中采用<sup>87</sup>Rb 同位素提纯的高硼硅玻璃材质的方 形原子气室,尺寸为15mm×15mm×15mm,气室 壁厚约1mm, 气室外壁镀770~800nm波长范围的 消反射膜,气室内充有100 Torr氮气(N,)作为缓 冲气体和荧光猝灭气体。为了产生均匀磁场,减弱 磁场线圈所产生磁场对坡莫合金(permalloy)磁屏 蔽桶的磁化,我们采用了单轴无矩磁场线圈。磁场 线圈和铷原子气室置于高磁导率坡莫合金的四层磁 屏蔽桶内,以充分降低地磁场和其他背景磁场的影 响。四层磁屏蔽桶内中心处的残余磁场小于5 nT, 其屏蔽因子大于10000。采用B2961A型低噪声、高 稳定度恒流电源驱动无矩磁场线圈,在线圈内部的 对称中心处产生沿y方向的静磁场B<sub>0</sub>。射频交变磁 场B<sub>RF</sub>沿z方向。泵浦光由波长为795 nm的分布布 拉格反射器式(Distributed Bragg Reflactor, DBR) 单频半导体激光器提供,用饱和吸收光谱(Saturated Absorption Spectroscopy, SAS) 锁频方法将其 频率锁定在<sup>87</sup>Rb原子 795 nm 波长 D1 跃迁线  $5S_{1/2}(F_e=2)-5P_{1/2}(F_e=1)$ 精细跃迁,用于铷-87原子 系综自旋极化态的制备。泵浦光通过两个声光频移器 (Acousto-Optic Modulator, AOM1, AOM2), AOM1 用于主动反馈改善光强的稳定度, AOM2用于泵浦光 的开关控制。泵浦光束经望远镜扩束至直径约 10 mm,经过零级λ/4波片转换为圆偏振光束,沿y 方向(平行于B。方向)穿过铷原子气室。波长为 780 nm 的单频 DBR 半导体激光器提供探测光,利用 共焦法布里--珀罗腔(F-P腔)无调制激光频率锁定 方法将其频率锁定在蓝失谐于<sup>87</sup>Rb原子780 nm波长 D2 跃迁线  $5S_{1/2}(F_g=2)-5P_{3/2}(F_e=3)$  超精细跃迁约 6 GHz。AOM3 作为探测光的开关。线偏振的探测光 束经线偏振器LP进一步提高其偏振度后,沿x方向 穿过铷原子气室(经过两个45度入射角的全反镜和



图1. 光泵铷原子FID磁强计实验装置及其时序图。

AOMs (AOM1, AOM2, AOM3): 声光调制器; SAS lock: 饱和吸收光谱锁频装置; Offset lock: 共焦法布里– 珀罗腔 (F-P腔) 无调制激光频率锁定装置; BE: 扩束器;  $\lambda/4$ : 四分之一波片;  $\lambda/2$ : 半波片; LP: 线偏振器; WP: 沃拉斯顿棱镜; PDs (PD1, PD2): 平衡差分光电探测器; NI DAQ: National Instrument 公司数据采集系统。 时序图中,  $t_0 \cong t_1$ 时段的  $T_{Pump}$ 为铷原子磁强计的泵浦时段,制备铷原子系综的自旋极化态;  $t_1 \cong t_2$ 时段的  $T_{RF}$ 为铷原 子磁强计的横向交变磁场  $\pi/2$ 脉冲作用时段,操控铷原子系综的自旋极化态;  $t_2 \cong t_3$ 时段的  $T_{Probe}$ 为铷原子磁强计的 探测时段,探测铷原子自旋绕  $B_0$ 磁场拉莫尔进动的 FID 信号。

**Fig. 1.** Experimental setup and the time sequence of FID-type optically-pumped Rubidium atomic magnetometer. AOMs (AOM1, AOM2, AOM3): acousto-optic modulator; BE: laser beam expander; SAS lock: saturation absorption spectroscopic device for laser frequency lock; Offset lock: modulation-free laser frequency lock based on a confocal Fabry-Perot (F-P) cavity;  $\lambda/4$ : quarter-wave plate;  $\lambda/2$ : half-wave plate; LP: linear polarizer; WP: Wollaston prism; L: lens; PDs (PD1, PD2): balanced differential photo-electric detector; NI DAQ: National Instrument data acquisition system.

In the time sequence diagram,  $T_{\text{Pump}}$  from  $t_0$  to  $t_1$  is the pumping period of the Rubidium magnetometer to prepare the spin polarization state of Rubidium atoms;  $T_{\text{RF}}$  from  $t_1$  to  $t_2$  is the transverse AC magnetic field  $\pi/2$  pulse of the Rubidium magnetometer, which manupulates the spin polarized state of Rubidium atoms;  $T_{\text{Probe}}$  from  $t_2$  to  $t_3$  is the detection time of the Rubidium magnetometer, which detects the FID signal of the Larmor precession of Rubidium atomic spin around the  $B_0$  magnetic field.

两个直角全反射棱镜,在铷原子气室处探测光束的 直径约2 mm),到达由零级λ/2 波片和沃拉斯顿棱镜 组成的平衡偏振仪,通过平衡差分光电探测器测量 偏振面旋转信号,由数据采集系统 NI-DAQ (National Instrument 公司 NI-USB6363型)和计算机 LabView程序采集FID信号。通过设定控制时序,实 现在时间上铷-87原子系综自旋极化的泵浦过程、自 旋极化态的π/2射频交变磁场脉冲操控、自旋自由 进动 (FID)信号的探测三者互相没有重叠,消除 了相互之间的影响。

光泵铷原子 FID 磁强计测量的磁场  $B_0$  与拉莫尔 频率  $\omega$  之间的关系为:

 $\omega = \gamma B_0, \qquad (1)$ 

其中γ表示<sup>87</sup>Rb 原子基态的旋磁比, γ= 6.99583 Hz/nT。

## 3 磁场测量及误差

图2为基于光泵铷原子FID磁强计的磁场测量结 果。实验中,通过优化泵浦光功率、铷-87原子数密 度、探测光功率、射频交变磁场强度等,得到高信 噪比、窄线宽的磁共振信号。优化的泵浦光束功率 约为5 mW(高斯直径约10 mm),优化的探测光束 功率约为30 μW(高斯直径约2 mm)。采用压控恒流 源驱动射频交变磁场线圈在铷原子气室处产生射频交 变磁场,射频交变磁场线圈常数为136.718 nT/mA, 通过磁场线圈常数可以将压控恒流源的输出电流转 换为射频交变磁场强度,射频交变磁场强度设定为 410.154 nT。设定时序周期*T*为50 ms,泵浦光开启时 间 $T_{Pump}$ 为20 ms,射频交变磁场开启时间 $T_{RF}$ 为 0.2 ms,探测光开启时间 $T_{Probe}$ 为29.8 ms,参见图1中 的时序示意图。恒流电源施加100 mA电流驱动无矩 磁场线圈,沿y方向产生 $B_0$ 约12.628  $\mu$ T 的静磁场。 射频交变磁场 $B_{RF}$ 的频率设定为88.343 kHz,与铷-87 原子基态的拉莫尔频率共振(12.628  $\mu$ T × 6.99583 Hz/nT~88.343 kHz)。铷原子气室温度被控制在~ 85 °C,对应的铷-87 原子数密度约为2.2×10<sup>12</sup>/cm<sup>3</sup>。 图2(a)为一个时序周期内典型的FID信号,拟合得 到铷-87 原子系综的自旋横向弛豫时间为 $T_2$ =(2.43±0.01) ms。图2 (b)为将图2 (a)的FID信号进行快速傅里叶变换(FFT)得到的频域的磁共振信号。将磁共振信号作洛伦兹拟合,得到其半高全宽(FWHM)为(337.276±1.906) Hz,其中心频率为88347.469 Hz。根据拉莫尔频率与<sup>87</sup>Rb原子基态旋磁比的关系(见(1)式),可以计算得到磁场值 $B_0$ =12.628 59 µT。图2 (c)为连续测量6000个周期得到的磁场值,内插图为磁场测量值的统计分布,磁场的平均值为 $B_0$ =12.62859 µT。图2 (d)为根据图2 (c)一系列的磁场测量值计算得到的磁场噪声功率谱密度(Power Specral Sensity, PSD),在带宽为1~10 Hz分析频率范围内,灵敏度约为6.5 pT/Hz<sup>1/2</sup>。



图2. 光泵铷原子FID磁强计测量磁场。

(a) 典型的FID信号;(b) FFT变换后的FID信号;(c) 6000个连续采样周期的直流磁场值;(d) 磁场噪声功率 谱密度。在1~10 Hz分析频率范围内,灵敏度为6.5 pT/Hz<sup>1/2</sup>。

Fig. 2. Magnetic field measurement by using of optically-pumped atomic FID magnetometer.

(a) A typical FID signal; (b) The FID signal after FFT; (c) Measured DC magnetic field values for 6000 sampling periods; (d) The power spectral density (PSD) of magnetic field noise. The sensitivity is  $\sim$ 6.5 pT/Hz<sup>1/2</sup> with analysis frequency range of 1 $\sim$ 10 Hz.

实验中我们也采用商售磁通门磁强计对无矩磁 场线圈常数进行了测量。所用的磁通门磁强计为美 国MEDA公司的FVM-400型三轴磁通门磁强计,如 图3所示。磁通门探头尺寸为25.4mm×25.4mm× 100.6mm,该磁通门磁强计的磁场测量范围为 ±100000 nT,分辨率为1 nT。测量过程中,磁通门 磁强计的探头感应区置于磁屏蔽桶内磁场线圈的中 心位置,通过调整探头的角度和位置,使其与后续 放置铷原子气室的中心位置尽量重合。磁通门磁强 计由于存在零漂问题,在使用过程中需要反复校 准。通过恒流电源驱动无矩磁场线圈产生磁场,在 相同电流下,采用磁通门磁强计记录300s的磁场值 读数,并取统计平均值。

恒流电源向磁场线圈施加相同的电流,在铷原子



**图 3.** 美国 MEDA 公司的 FVM-400 型三轴磁通门 磁强计

左手是主机,右手是三轴磁通门探头。

**Fig. 3.** Model FVM-400 three-axis fluxgate magnetometer from MEDA, USA

Left hand, the instrument panel; Right hand, the threeaxis fluxgate detector head.

气室的中心位置产生相同强度的静磁场。实验中分别施加 20 mA、50 mA、100 mA、200 mA、250 mA

的电流至无矩磁场线圈,采用自主研发的光泵铷原 子 FID 磁强计和商售的磁通门磁强计测量得到的磁 场值及其误差见表1。结果表明,光泵铷-87 原子 FID 磁强计由于磁共振信号的线宽较窄,信噪比较 高,测磁灵敏度约为6.5 pT/Hz<sup>12</sup>;可根据拉莫尔频 率和铷-87 原子基态的旋磁比可以较为精确地得到 磁场值,且不存在零漂问题,其测量误差较小。而 磁通门磁强计由于存在零漂问题,在使用过程中需 要反复校准,测磁灵敏度也较差,分辨率为1 nT。 因此光泵铷原子 FID 磁强计的磁场测量精度明显优 于磁通门磁强计。

光泵铷原子 FID 磁强计测得的磁场值,与对应 的磁共振信号线宽,也列在了表1中。光泵铷原子 FID 磁强计的磁共振信号线宽与磁场测量值之间的 关系,画在了图4中。随着恒流电源向无矩磁场线 圈施加的电流增大,沿y方向施加的静磁场值相应 增强。当磁场较强时,非线性塞曼效应会使得磁共 振信号展宽。

#### 表1. 恒流电源向磁场线圈施加不同电流情况下两种方法测量磁场的比较。

Tab. 1. Comparison of magnetic fields measured by two methods under the applied current to the magnetic coil by the constant current source.

电流/mA	20	50	100	200	250
磁通门磁强计测得的 磁场值/nT	$2569 \pm 3$	$6367\pm8$	$12747 \pm 12$	$25501 \pm 13$	31881±12
FID磁强计测得的 拉莫尔频率/Hz	$17748.823 \pm 0.632$	44419.960±0.914	$88754.509 \pm 0.622$	$177562.703 \pm 0.438$	$221984.548 \pm 0.425$
FID磁强计测得的 磁场值/nT	$2537.057 \pm 0.090$	6349.491±0.131	$12686.773 \pm 0.093$	$25381.220 \pm 0.063$	$31730.981 \pm 0.061$
FID磁强计测得的 磁共振线宽/Hz	277.243 ± 2.312	292.438±2.914	337.276±1.906	394.026±1.232	$402.823 \pm 1.212$

## 4 磁场线圈常数标定

光泵铷原子FID磁强计,由于拉莫尔进动频率与 磁场强度通过旋磁比直接联系起来(参见式(1)), 不存在零漂问题,在磁场测量过程中不需要校准;而 且光泵铷原子FID磁强计的灵敏度优于磁通门磁 场计。

恒流电源向置于四层磁屏蔽桶内的无矩磁场 线圈施加电流,在磁场线圈内对称中心处产生静 磁场。采用我们研发的光泵铷-87原子FID磁强计 通过 NI 数据采集卡和 LabView 程序记录 FID 信号,经 FFT 变换得到拉莫尔频率,进而得到磁场 值。将测得的一系列磁场值统计平均即为相应电 流情形下的磁场测量值。电流在 2~250 mA 范围 逐渐增大,对应的磁场测量结果如图5(a)所 示。不同电流条件下,光泵铷原子 FID 磁强计测 量磁场的误差如图5(b)所示。对图5(a)中的 数据进行线性拟合,可得到磁场与电流 I 之间的 关系为:



**图 4.** FID 原子磁强计测得的磁场值和磁共振线宽的 关系。

图中数据点方块的纵向尺寸已远大于磁共振信号的 线宽值。

**Fig. 4.** Relationship between the magnetic field values measured by the FID atomic magnetometer and the magnetic resonance linewidth.

The longitudinal sizes of all the data pionts are much larger than the errors of the magnetic resonance linewidth.



B(nT)=126.956(nT/mA)·I(mA)-4.914(nT)。 (2) 光泵铷原子 FID 磁强计测得的磁场线圈常数 为(126.956±0.076)nT/mA。磁场线圈不加电流 时,四层磁屏蔽桶内铷原子气室处的残余磁场为 4.914 nT。

恒流电源施加电流驱动无矩磁场线圈产生磁场,在每个电流值下,采用美国 MEDA 公司的 FVM-400 型磁通门磁强计记录了 300 s 的磁场读数,统计平均后得到相应电流下的磁场测量值。 在 2~250 mA 范围内逐渐增大电流,相应的磁场 测量值如图 6 (a)所示。不同电流条件下,磁通 门磁强计测量磁场的误差如图 6 (b)所示。对图 6 (a)中的数据进行线性拟合,可得到磁场与电流 *I* 之间的关系为:

B (nT)=127.3 (nT/mA)·I(mA)-4.914 (nT)。
(3) 磁通门磁强计测得的磁场线圈常数为
(127.3±0.3) nT/mA。



**图 5.** (a) 光泵铷原子 FID 原子磁强计标定磁场线圈常数。得到的磁场线圈常数为(126.956±0.076) nT/mA; (b) 不同电流条件下光泵铷原子 FID 磁强计测量磁场的误差

Fig. 5. (a) Result of the coil constant calibrated by using of the optically-pumped rubidium FID atomic magnetometer. The coil constant is $(126.956 \pm 0.076)$  nT/mA; (b) Measurement error of magnetic field of the optically-pumped rubidium FID atomic magnetometer at different current



**图 6.** (a) 磁通门磁强计标定磁场线圈常数。得到的磁场线圈常数为(127.3±0.3) nT/mA; (b) 不同电流下磁通门 磁强计测量磁场的误差。

Fig. 6. (a) Result of the coil constant calibration by using the fluxgate magnetometer. The coil constant is  $(127.3 \pm 0.3)$  nT/mA; (b) Measurement error of magnetic field of the fluxgate magnetometer at different current.

## 5 采用光泵铷原子 FID 磁强计标校商售磁 通门磁强计

在实验中,采用我们研发的光泵铷原子 FID 磁强 计和商售磁通门磁强计,在相同的电流条件下,分别 测量置于四层磁屏蔽桶内的无矩磁场线圈对称中心处 的多组磁场值。定义*B*=*C*·*B*<sub>a</sub>,其中*B*<sub>a</sub>为待标校的商 售磁通门磁强计测得的磁场值,*B*为我们研发的光泵 铷-87 原子 FID 磁强计测得的磁场值,*C*为标定因子。

图7为采用我们研发的光泵铷-87原子FID磁强 计标校美国MEDA公司的FVM-400型磁通门磁强计



**图7.** 磁通门磁强计的磁场测量值 *B*<sub>a</sub>与光泵铷原子 FID 磁强计的磁场标定值 *B*之间的关系。 图中数据点方块的尺寸已远大于磁场值的测量误差。 由数据点的线性拟合得到的标定关系 *B*=*C*·*B*<sub>a</sub>中的

标定因子C=0.9967。

**Fig. 7.** Relationship between the magnetic field *B* values calibrated by optically-pumped FID Rubidium atomic magnetometer and the measured  $B_a$  values by using of the fluxgate magnetometer.

The sizes of all the data pionts are much larger than the errors of the measured magnetic field values. In  $B = C \cdot B_a$ , the calibration factor C = 0.9967 is obtained by linear fitting.

的测量结果。将光泵铷原子 FID 磁强计标定的磁场 值和磁通门磁强计的磁场测量值进行线性拟合,磁 通门磁强计的磁场测量值均偏大,得到的标定因子 为*C*=0.9967。

## 6 结论与展望

基于低噪声、高稳定度的恒流电源,在良好的高磁导率坡莫合金四层磁屏蔽条件下,采用我们研制的 光泵铷原子FID磁强计和商售磁通门磁强计分别对待 测磁场线圈常数进行了测量,并作了对比分析。基于 我们研制的光泵铷原子FID磁强计,测得的磁场线圈 常数为(126.956±0.076) nT/mA;基于商售磁通门磁强 计,测得的磁场线圈常数为(127.3±0.3) nT/mA。前者 的精度更高,显著优于后者。这得益于我们研发的光 泵铷原子FID磁强计灵敏度更高(1~10 Hz分析频率 范围内,典型的灵敏度为6.5 pT/Hz<sup>12</sup>),且没有零漂的 问题。而磁通门磁强计的灵敏度较差,且有明显的零 漂问题。此外,我们还利用所研制的光泵铷原子FID 磁强计对商售磁通门磁强计进行了标校。磁通门磁强 计的磁场测量值均偏大,须乘以标定因子0.9967。

在后续工作中,可以通过引入偏振压缩态光场 这一独特的光量子资源,使光泵原子磁强计的探测 光可突破光子散粒噪声水平<sup>[21-23]</sup>,提高测量信噪比, 进一步提升光泵原子磁强计的灵敏度,从而可更精 确地标定磁场线圈常数。此外,基于标定的磁场线 圈常数,可以通过主动反馈实现磁场稳定,从而进 一步降低磁场噪声,实现更高灵敏度的原子磁强 计。此外,还可以通过磁场线圈常数将磁场噪声功 率谱密度转换为恒流电源的电流噪声功率谱密度, 实现对恒流电源电流噪声的测试与表征<sup>[24-25]</sup>。

### 参考文献

- [1] BUDKER D, ROMALIS M. Optical magnetometry[J]. Nature Phys, 2007, 3(4):227-234. DOI: 10.1038 /nphys566.
- [2] ZHANG R, KANTA D, WICKENBROCK A, et al. Heading-error free optical atomic magnetometry in the earth-field range[J]. Phys Rev Lett, 2023, 130(15):153601. DOI: 10.1103/PhysRevLett.130.153601.
- [3] LI S R, MA D Y, WANG K, et al. High sensitivity closed-loop Rb optically pumped magnetometer for measuring nuclear magnetization[J]. Opt Express, 2022, 30(24):43925–43937. DOI: 10.1364/OE.473654.
- [4] MEYER D, LARSEN M. Nuclear magnetic resonance gyro for inertial navigation[J]. *Gyroscopy and Navigation*, 2014, 5(2): 75–82. DOI: 10.1134/S2075108714020060.
- [5] WALKER T G, LARSEN M. Spin-exchange-pumped NMR gyros[J]. Adv At Mol & Opt Phys, 2016, 65:373–401. DOI: 10. 1016/BS.AAMOP.2016.04.002.

- [6] JIANG C Y, TONG X, BROWN D R, et al. Development of a compact in situ polarized <sup>3</sup>He neutron spin filter at Oak Ridge National Laboratory[J]. Rev Sci Instrum, 2014, 85(7):075112. DOI: 10.1063/1.4890391.
- [7] KARIMI E, MARRUCCI L, GRILLO V, et al. Spin-to-orbital angular momentum conversion and spin-polarization filtering in electron beams[J]. Phys Rev Lett, 2012, 108(4):044801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.044801.
- [8] LIMES M E, FOLEY E L, KORNACK T W, et al. Portable magnetometry for detection of biomagnetism in ambient environments[J]. Phys Rev Applied, 2020, 14(1):011002. DOI: 10.1103/PhysRevApplied. 14.011002.
- [9] SANDER T H, PREUSSER J, MHASKAR R, et al. Magneto-encephalography with a chip-scale atomic magnetometer[J]. Biomed Opt Express, 2012, 3(5):981–990. DOI: 10.1364/BOE.3.000981.
- [10] SHENG D, LI S, DURAL S, et al. Subfemtotesla scalar atomic magnetometry using multipass cells[J]. Phys Rev Lett, 2013, 110(16):160802. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.160802.
- [11] HUNTER D, PICCOLOMO S, PRITCHARD J D, et al. Free-induction-decay magnetometer based on a microfabricated Cs vapor cell[J]. Phys Rev Applied, 2018, 10(1):014002. DOI: 10.1103/PhysRev Applied.10.014002.
- [12] LIU C, DONG H F, SANG J J. Submillimeter resolution magnetic field imaging with digital micromirror device and atomic vapor cell[J]. *Appl Phys Lett*, 2021, **119**(11):114002. DOI: 10.1063/5.0061364.
- [13] 张露露, 白乐乐, 杨煜林, 等. 采用反抽运光改善光泵铷原子磁强计的灵敏度[J]. 物理学报, 2021, 70(23):230702. DOI: 10.7498/APS.70.20210920.
   [ZHANG L L, BAI L L, YANG Y L, et al. Improving the sensitivity of an optically pumped rubidium atomic magnetometer by

using of a repumping laser beam[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(23):230702. (in Chinese). DOI: 10.7498/APS.70.20210920].

- [14] BRESCHI E, GRUJIC Z, WEIS A. In situ calibration of magnetic field coils using free-induction decay of atomic alignment[J]. *Appl Phys B*, 2014, 115(1):85–91. DOI: 10.1007/s00340-013-5576-1.
- [15] ZHANG H, ZOU S, CHEN X Y. A method for calibrating coil constants by using an atomic spin co-magnetometer[J]. Eur Phys J D, 2016, 70(10):203. DOI: 10.1140/epjd/e2016-70091-y.
- [16] CHEN L L, ZHOU B Q, LEI G Q, et al. A method for calibrating coil constants by using the free induction decay of noble gases[J]. AIP Advances, 2017, 7(7):075315. DOI: 10.1063/1.4985742.
- [17] ZHAO Q, FAN B L, WANG S G, et al. A calibration method for coil constants using an atomic spin self-sustaining vector magnetometer[J]. J Magnetism & Magnetic Materials, 2020, 514:166977. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.166977.
- [18] WANG Y X, TANG J J, ZHOU B Q, et al. Rabi oscillation of spin-polarized rubidium in the spin-exchange relaxation-free regime[J]. Opt Express, 2022, 30(19):35071–35084. DOI: 10.1364/OE.471475.
- [19] WANG K, MA D, LI S, et al. Triaxial coils in-situ calibration method based on measuring the alternating magnetic fieldinduced dynamic response of the SERF magnetometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(16):18099–18107. DOI: 10.1109/ JSEN.2023.3291361.
- [20] ZHAO N, ZHANG L L, YANG Y B, et al. Characterizing current noise of commercial constant-current sources by using an optically pumped rubidium atomic magnetometer[J]. Rev Sci Instrum, 2023, 94(9):095001. DOI:10.1063/5.0159751.
- [21] TROULLINOU C, JIMENEZ MARTJNEZ R, KONG J, et al. Squeezed-light enhancement and backaction evasion in a high sensitivity optically pumped magnetometer[J]. Phys Rev Lett, 2021, 127(19):193601. DOI: 10.1103/ PHYSREVLETT.127.193601.
- [22] BAI L L, WEN X, YANG Y L, et al. Quantum-enhanced rubidium atomic magnetometer based Faraday rotation via 795-nm Stokes operator squeezed light[J]. J Opt, 2021, 23(8):085202. DOI: 10.1088/2040-8986/AC1B7C.
- [23] DING Y D, ZHANG R, ZHENG J H, et al. Active stabilization of terrestrial magnetic field with potassium atomic magnetometer[J]. Rev Sci Instrum, 2022, 93(1):015003. DOI: 10.1063/5.0073636.
- [24] 陈大勇, 缪培贤, 史彦超, 等. 抽运-检测型原子磁力仪对电流源噪声的测量[J]. 物理学报, 2022, 71(2):024202. DOI: 10. 7498/aps.71.20211122.

[CHEN D Y, MIAO P X, SHI Y C, *et al.* Measurement of noise of current source by pump-probe atomic magnetometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, **71**(2):024202. (in Chinese). DOI: 10.7498/APS.71.20211122.]

[25] SHEN L, ZHANG R, WU T, et al. Suppression of current source noise with an atomic magnetometer[J]. Rev Sci Instrum, 2022, 91(8):084701. DOI: 10.1063/5.0009987.