



抽运-检测型原子磁力仪对电流源噪声的测量

陈大勇 缪培贤 史彦超 崔敬忠 刘志栋 陈江 王宽

Measurement of noise of current source by pump-probe atomic magnetometer

Chen Da-Yong Miao Pei-Xian Shi Yan-Chao Cui Jing-Zhong Liu Zhi-Dong Chen Jiang Wang Kuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 024202 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211122

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211122>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高灵敏度的量子迈克耳孙干涉仪

High sensitivity quantum Michelson interferometer

物理学报. 2018, 67(13): 134202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172563>

双螺线圈射频共振结构增强硅空位自旋传感灵敏度方法

Methodology of improving sensitivity of silicon vacancy spin-based sensors based on double spiral coil RF resonance structure

物理学报. 2020, 69(23): 234206 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200765>

铷-氙气室原子磁力仪系统磁场测量能力的标定

Calibration of magnetic field measurement capability of rubidium-xenon vapor cell atomic magnetometer

物理学报. 2019, 68(16): 160701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190868>

共振线极化光实现原子矢量磁力仪的理论研究

Theory of atomic vector magnetometer using linearly polarized resonant light

物理学报. 2018, 67(6): 060701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172108>

采用反抽运光改善光泵铷原子磁强计的灵敏度

Improving the sensitivity of an optically pumped rubidium atomic magnetometer by using of a repumping laser beam

物理学报. 2021, 70(23): 230702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210920>

基于最优化线性波数光谱仪的谱域光学相干层析成像系统

Optimized linear wavenumber spectrometer based spectral-domain optical coherence tomography system

物理学报. 2018, 67(10): 104208 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172606>

抽运-检测型原子磁力仪对电流源噪声的测量*

陈大勇 缪培贤[†] 史彦超 崔敬忠 刘志栋 陈江 王宽

(兰州空间技术物理研究所, 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

(2021年6月13日收到; 2021年9月28日收到修改稿)

用于在宽量程范围内标定原子磁力仪的灵敏度的复现磁场通常由精密电流源和标准线圈产生, 电流源噪声将直接影响原子磁力仪在宽量程范围内标定的灵敏度. 本文基于抽运-检测型原子磁力仪首先提出抑制复现磁场漂移的磁补偿方法, 其次开展宽量程范围内电流源的噪声和原子磁力仪的灵敏度之间依赖关系的研究. 研究表明, 抽运-检测型原子磁力仪的灵敏度主要由电流源噪声决定, 因此可用特定磁场下的灵敏度估算电流源在对应输出电流条件下的电流噪声. 本文研究对弱磁传感器灵敏度指标的标定、高精度电流源的研制、磁感应强度计量和电流计量的协同发展都具有参考价值.

关键词: 原子磁力仪, 磁补偿, 电流源噪声, 灵敏度**PACS:** 42.60.-v, 07.55.Ge, 42.50.Gy, 42.62.-b**DOI:** 10.7498/aps.71.20211122

1 引言

高灵敏度的弱磁传感器在惯性导航^[1,2]、生物医学^[3,4]、全球地磁数据获取^[5,6]、军事磁异反潜^[7]、基础物理研究^[8-11]等领域具有广泛的应用. 原子磁力仪是一种重要的弱磁传感器, 根据工作原理可分为Mz和Mx模式的光泵原子磁力仪、相干布居囚禁(coherent population trapping, CPT)原子磁力仪、非线性磁光旋转(nonlinear magneto-optical rotation, NMOR)原子磁力仪、无自旋交换弛豫(spin-exchange relaxation free, SERF)原子磁力仪等^[12]. 一些期刊论文中用磁共振曲线的线宽与信噪比的比值来评估原子磁力仪的灵敏度指标^[13,14], 该方法标定的灵敏度被称为本征灵敏度. 一种抽运-检测型原子磁力仪通过傅里叶变换自由弛豫的拉莫尔进动信号得到拉莫尔进动频率^[15], 将时域的自由弛豫信号变换至频域的磁共振曲线时获得 10^8 量级的信噪比^[16], 用本征灵敏度方法评

估该磁力仪的灵敏度指标显然不合理^[16]. 用于标定原子磁力仪灵敏度的复现磁场一般由恒定弱磁标准装置^[17]产生, 或者由磁屏蔽筒中的载流磁场线圈产生, 因此复现磁场中不可避免地引入由电流源噪声传递的本底磁场噪声. 由于目前商业在售的精密电流源最高精度达到 10^{-6} 量级, 因此直接利用这种电流源和线圈产生10000 nT复现磁场时, 理论上本底磁场噪声在 10 pT/Hz^{1/2}量级. 一些原子磁力仪受限于工作原理, 无法准确测量本底磁场噪声, 例如Mz光泵磁力仪^[18]和CPT原子磁力仪^[19]都是基于PID反馈控制实现磁场跟踪锁定及测量功能, 这两种原子磁力仪测量并输出的磁场值滤除了PID反馈控制带宽外的高频磁场噪声.

近年来基于载流线圈、磁屏蔽筒和高灵敏度原子磁力仪的组合装置开展电流测量或电流计量的相关研究成为值得关注的问题, 例如Li等^[20]基于Mz光泵磁力仪研制了电流传感器, Shen等^[21]基于Mx光泵磁力仪实现了电流源噪声的抑制, 如何推动磁感应强度计量和电流计量的协同发展是值

* 真空技术与物理重点实验室基金(批准号: HTKJ2019KL510001)和甘肃省重点研发计划(批准号: 20YF3GA001)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: miaopeixian@163.com

得研究和探讨的问题. 2017年缪培贤等^[15]报道的一种抽运-检测型原子磁力仪可测量复现磁场中由精密电流源噪声引入的本底磁场噪声, 该原子磁力仪直接傅里叶变换自由弛豫的拉莫尔进动信号得到与外磁场关联的拉莫尔进动频率, 避免了由PID反馈控制引入的测量误差, 更准确地测量了本底磁场噪声. 本文在该抽运-检测型原子磁力仪基础上额外设计磁补偿系统用于获得稳定的复现磁场, 并研究了两种电流源输出的电流噪声与原子磁力仪测量的磁场噪声之间的对应关系.

2 实验装置

本文采用的抽运-检测型原子磁力仪实验装置如图1所示, 尺寸为 $\Phi 25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的圆柱型铷原子气室置于磁屏蔽筒和标准线圈组的中心位置, 采用无磁加热方式将铷原子气室的温度稳定在 $100\text{ }^\circ\text{C}$. 锁定至 ^{87}Rb 原子 D_1 线跃迁的圆偏振抽运光与外磁场方向平行, 用于实现原子系综极化态的制备; 红失谐 4 GHz 的线偏振探测光与外磁场方向垂直, 用于自由弛豫的拉莫尔进动信号的探测. 图1中虚线框内显示了原子磁力仪的工作时序示意图, 本文中设定磁场测量周期 $T = 100\text{ ms}$, 抽运光作用时长 $t_1 = 30\text{ ms}$, 射频激励磁场作用时长 $t_2 = 0.1\text{ ms}$, 磁场采样率为 10 Hz , 抽运-检测型

原子磁力仪的时序和实测数据如图2所示.

为了在磁屏蔽筒中获得恒定的复现磁场, 磁屏蔽筒内放置了两组标准线圈, 其中在标准线圈1中用精密电流源通入恒定电流, 用于产生目标磁场; 磁屏蔽筒剩磁的漂移和精密电流源输出电流的漂移会导致磁屏蔽筒中目标磁场的缓慢漂移, 在标准线圈2中动态地输入补偿小电流使抽运-检测型原子磁力仪测量的磁场值稳定在设定的目标磁场值. 实验中采用是德科技公司的精密电流源B2912A或直流电源分析仪N6705B向标准线圈1中输入恒定电流, 采用精密电流源B2912A向标准线圈2中动态地输入补偿小电流. 精密电流源B2912A为双通道输出, 通道1(CH1)在前面板, 通道2(CH2)在后面板. B2912A电源后面板的USB接口与计算机相连, 可用计算机中的LabVIEW程序控制B2912A的输出电流. 载流标准线圈产生的磁场 B 和通入电流 I 呈线性关系:

$$B = CI, \quad (1)$$

其中 C 为线圈系数. 扫描通入标准线圈的电流 I 时采用抽运-检测型原子磁力仪测得一系列的磁场值 B , 通过线性拟合可得标准线圈的线圈系数 C . 经标定, 标准线圈1和2的线圈系数分别为 $C_1 = 52.4265\text{ nT/mA}$, $C_2 = 14.2905\text{ nT/mA}$, 标准线圈1和2的电阻分别为 $3.8, 2.5\ \Omega$.

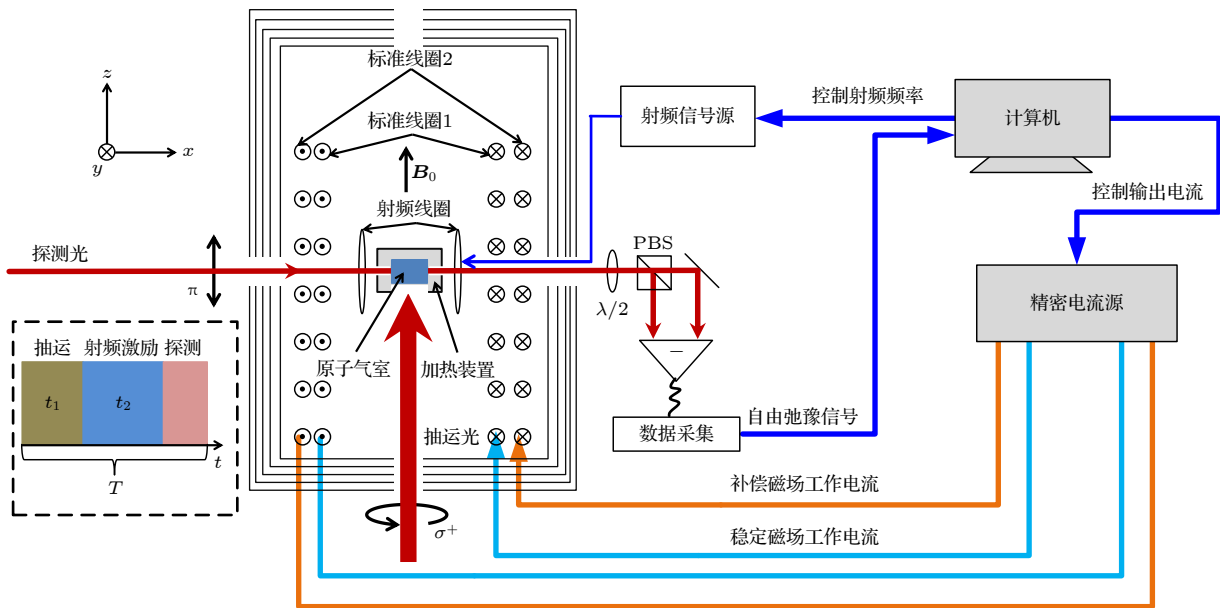


图1 实验装置示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

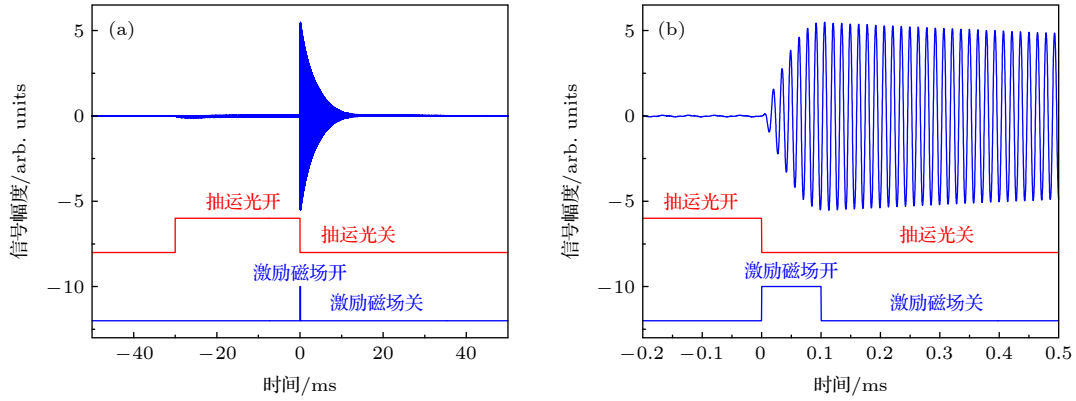


图 2 原子磁力仪的时序示意图 (a) 10000 nT 磁场下的实测数据; (b) 图 (a) 中部分曲线的放大

Fig. 2. The schematic diagram of timing sequence for atomic magnetometer: (a) The data measured in the magnetic field of 10000 nT; (b) expanded version of the curve in Fig. (a).

3 实验系统及测量结果

灵敏度是衡量仪器性能的一个关键指标, 在磁传感器研制领域内较为普遍且科学的做法是采用功率谱密度方法 (power spectral density, PSD), 该方法能够检测出信号的随机本底噪声, 而且使测量独立于信号持续时间和采样数量^[15]. 本文选取 5 min 的测量磁场值分析其功率谱密度, 并将 1 Hz 频点附近 21 个幅值的平均值作为原子磁力仪的灵敏度. 需额外说明的是, 本文中自由弛豫信号的傅里叶变换采用矩形窗, 在不同磁场条件下截取自由弛豫信号的时长不同, 例如在 10000 nT 截取 5 ms 时长的数据, 在 100 nT 截取 20 ms 时长的数据, PCI-5922 数据采集卡的采样率为 5 M/s. 傅里叶变换中采用矩形窗的优势是在稳定磁场条件下得到的频率的稳定度高, 有利于评估电流源的噪声, 但带来的劣势是频率准确度差; 假如需要提高测量磁场的准确度, 自由弛豫信号应按照整数倍周期截取, 但这种情况下实验中无法评估电流源的噪声, 与自由弛豫信号数据处理方法相关的内容在本文中不展开讨论. 接下来首先基于实验结果分析磁补偿设计以及电流源的电流噪声对抽运-检测型原子磁力仪的灵敏度的影响, 在此基础上讨论磁感应强度计量和电流计量协同发展的重要性.

3.1 磁补偿设计对抽运-检测型原子磁力仪的灵敏度的影响

实验中通过 LabVIEW 程序实现磁补偿设计, 具体步骤如下: 首先在 LabVIEW 程序中设定需要

达到的目标磁场, 例如目标磁场为 10000 nT; 其次采用精密电流源 B2912A 的通道 1 向标准线圈 1 中输入恒定电流, 该电流值使铷原子气室位置的磁场约为 10000 nT, 抽运-检测型原子磁力仪实际测量的磁场值在 10000 nT 附近; 然后在 LabVIEW 程序中实时计算设定值和实测值的差值, 并设计负反馈回路, 实时调整精密电流源 B2912A 的通道 2(CH2) 向标准线圈 2 中输入的补偿小电流, 使原子气室区域的磁场稳定在目标值.

磁补偿设计对抽运-检测型原子磁力仪实测灵敏度的影响结果如图 3 所示. 图 3(a) 显示了无磁补偿时原子磁力仪记录的磁场值, 精密电流源 B2912A 的通道 1 向标准线圈 1 中输入电流设定为 190.5 mA, 500 s 内复现磁场由 10000.1 nT 漂移至 10000.6 nT, 复现磁场的漂移主要源于电流源输出电流的漂移和磁屏蔽材料磁化状态的缓变. 图 3(b), (c) 分别显示了有磁补偿时原子磁力仪记录的磁场值和精密电流源输出的补偿电流, B2912A 向标准线圈 1 输入的电流依然设定为 190.5 mA, 而向标准线圈 2 输入的补偿电流动态地由 -0.034 mA 变化至 -0.076 mA, 抽运-检测型原子磁力仪实际测量的磁场值由 10000.7 nT 补偿至 10000.0 nT, 磁场稳定后峰峰值约为 240 pT. 图 3(d) 给出图 3(a), (b) 中 5 min 稳定磁场值的功率谱密度, 在小于 0.1 Hz 的低频部分, 有磁补偿条件下的功率谱密度幅值小于无磁补偿条件下的功率谱密度幅值. 抽运-检测型原子磁力仪的灵敏度在无磁补偿条件下为 18.95 pT/Hz^{1/2}, 在有磁补偿条件下为 15.94 pT/Hz^{1/2}. 精密电流源 B2912A 是一款数字化电流源, 从其说明书中可知, 当输出电流为 190.5 mA, 其电流分辨

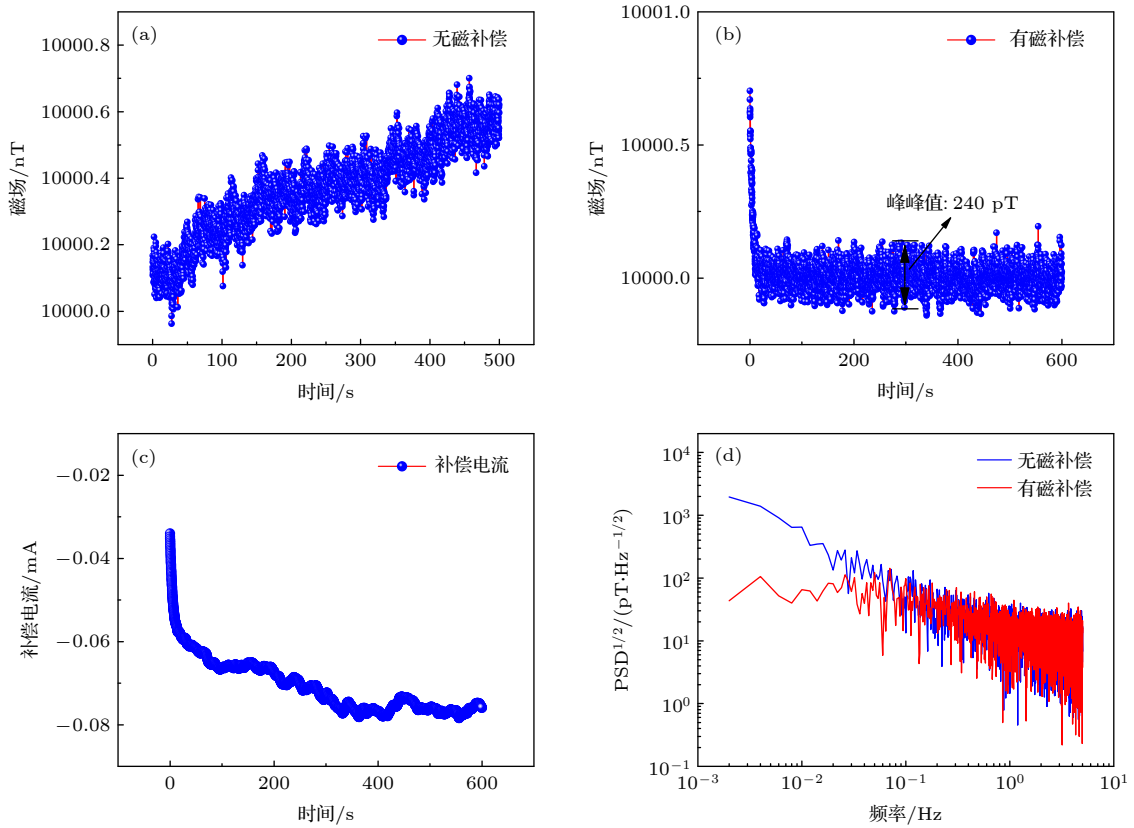


图3 磁补偿设计对抽运-检测型原子磁力仪实测灵敏度的影响 (a) 无磁补偿时实测磁场值; (b) 有磁补偿时实测磁场值; (c) 磁补偿时精密电流源输出的补偿电流; (d) 图(a)和(b)中5 min 稳定磁场值的功率谱密度

Fig. 3. The influence of the design of magnetic compensation on the sensitivity of pump-probe atomic magnetometer: (a) Magnetic field values without magnetic compensation; (b) magnetic field values with magnetic compensation; (c) compensation current in the process of the magnetic compensation; (d) the power spectral density of the magnetic field values in (a) and (b).

率为 $1 \mu\text{A}$, 补偿电流从 -0.034 mA 变至 -0.076 mA 时电流分辨率都为 100 pA , 补偿电流的电流分辨率比稳定电流的电流分辨率小 4 个数量级, 因此补偿电流几乎不会额外引入电流噪声. 上述实验结果表明, 磁补偿设计显著抑制了测量磁场的漂移, 在功率谱密度谱中消除了低频部分的 $1/f$ 噪声, 对高频部分几乎没有影响.

3.2 不同电流源的电流噪声对抽运-检测型原子磁力仪的灵敏度的影响

在有磁补偿条件下, 分别用精密电流源 B2912A 和直流电源分析仪 N6705B 向标准线圈 1 中输入恒定电流来产生宽量程范围内的目标磁场, 抽运-检测型原子磁力仪的灵敏度与外磁场的依赖关系如图 4 所示. 精密电流源 B2912A 的精度可达 10^{-6} , 随着输出电流的增加可自动切换量程, 该仪表说明书中指出: 当电流源输出的量程值分别为 1 mA , 10 mA , 100 mA , 1 A 时, 分别对应着 1 nA , 10 nA ,

100 nA , $1 \mu\text{A}$ 的电流分辨率. 当 $I > 100 \text{ mA}$ 时, 磁力仪灵敏度约为 $15 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}$, 对应电流分辨率为 $1 \mu\text{A}$; 当 $10 \text{ mA} < I < 100 \text{ mA}$ 时 (图 4 中阴影部分), 磁力仪灵敏度约为 $1 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}$, 对应电流分辨率为 100 nA ; 当 $1 \text{ mA} < I < 10 \text{ mA}$ 时, 磁力仪灵敏度约为 $0.2 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}$, 对应电流分辨率为 10 nA . 本实验用的标准线圈 1 与文献 [15] 中的线圈相同, 因此重测的原子磁力仪的灵敏度与外磁场的依赖关系基本与文献 [15] 相同. 直流电源分析仪 N6705B 有 4 个输出通道, 每个通道可选配不同型号直流电源模块, 实验中通道一内直流电源模块型号是 N6762A, 其技术参数是当输出电流小于 0.1 A 时, 电流最小分辨率约为 $2 \mu\text{A}$, 输出电压和电流均对电流分辨率有影响. 图 4 中利用直流电源分析仪 N6705B 向标准线圈 1 输入恒定电流来产生待测磁场时, 在 100 nT 至 10000 nT 宽磁场范围内抽运-检测型原子磁力仪的灵敏度都约为 $20 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}$, 明显不同于用精密电流源 B2912A 时灵敏度的台阶式分布.

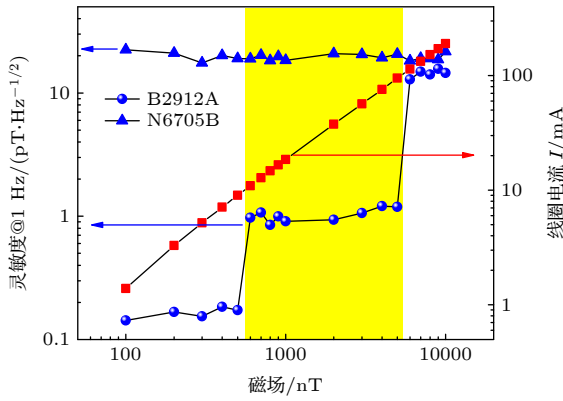


图 4 分别用两种电流源产生的外磁场与原子磁力仪的灵敏度的依赖关系

Fig. 4. The relationship between the sensitivity of atomic magnetometer and the external magnetic field generated by two current sources respectively.

分别用两种电源产生 5000 nT 和 6000 nT 磁场时, 抽运-检测型原子磁力仪测量的磁场值如图 5 所示, 此时电流设定值由 94.8 mA 增加至 113.9 mA. 当选用精密电流源 B2912A 产生磁场时, 由于电流源输出的量程值由 100 mA 自动切换至 1 A, 导致电流输出的分辨率由 100 nA 增加至 1 μ A, 图 5(a) 中

5000 nT 的磁场波动峰峰值约为 23 pT, 图 5(b) 中 5000 nT 的磁场波动峰峰值约为 230 pT, 与图 3(b) 中 10000 nT 的磁场波动峰峰值 240 pT 相近. 当选用直流电源分析仪 N6705B 产生磁场时, 图 5(c) 中 5000 nT 的磁场波动峰峰值约为 300 pT, 图 5(d) 中 6000 nT 的磁场波动峰峰值也约为 300 pT, 表明直流电源分析仪 N6705B 产生 5000 nT 和 6000 nT 磁场时电流输出的分辨率 (或噪声) 基本相同. 图 4 和图 5 的实验结果表明, 电流源输出电流的噪声水平直接决定了抽运-检测型原子磁力仪的灵敏度.

3.3 实验结果分析

上述实验分析了磁补偿设计和不同电流源的电流噪声对抽运-检测型原子磁力仪的灵敏度的影响, 实际上更本质地说, 上述实验是用抽运-检测型原子磁力仪测量了电流源输出电流的噪声. 从图 4 可知, 抽运-检测型铷原子磁力仪的灵敏度受限于精密电流源噪声引入的磁场噪声, 尤其在地磁场量级的复现磁场中由精密电流源噪声引入的本底磁场噪声超过 10 pT/Hz^{1/2}. 如果在地磁场下需

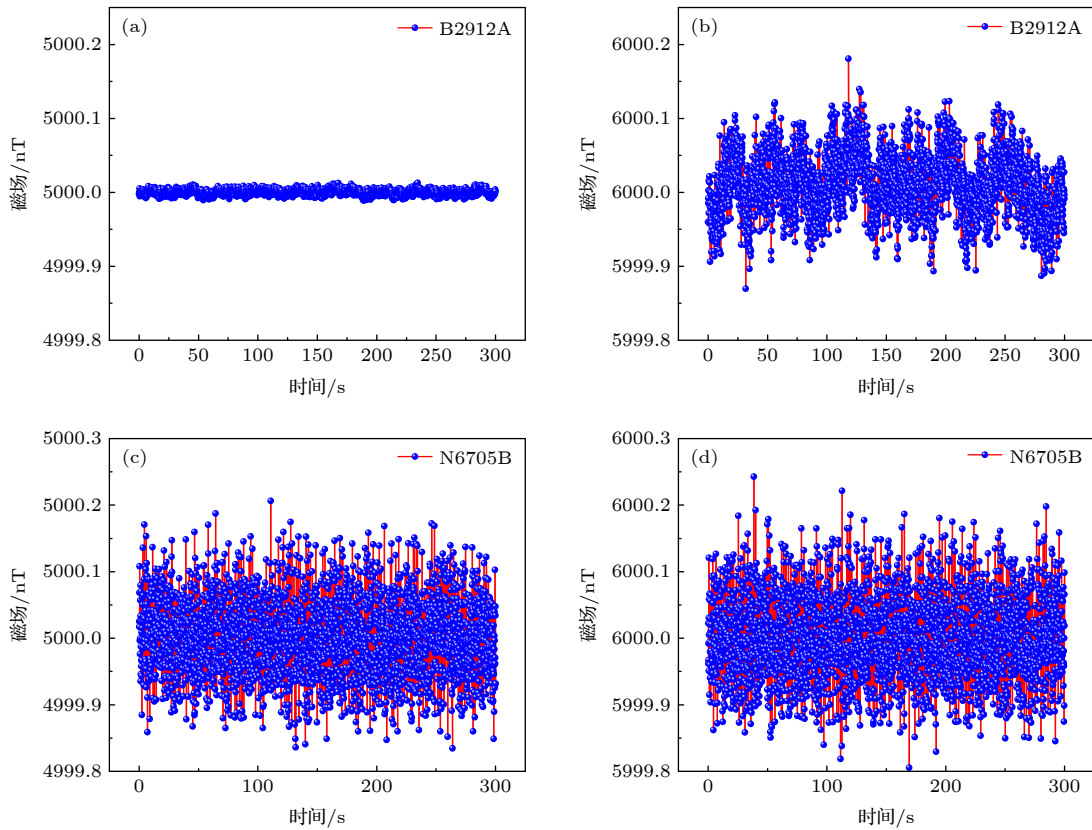


图 5 分别用两种电源产生 5000 nT 和 6000 nT 磁场时抽运-检测型原子磁力仪测量的磁场值

Fig. 5. The magnetic field values measured by pump-probe atomic magnetometer when the magnetic field of 5000 nT and 6000 nT is generated by two current sources respectively.

要将原子磁力仪的灵敏度提高到 $0.2 \text{ pT/Hz}^{1/2}$, 精密电流源的精度至少需提高至 10^{-8} , 然而目前国际上没有 8 位精度的精密电流源在售. (1) 式中磁感应强度和电流呈正比, 比例系数为线圈系数. 用图 5(a) 中的磁场数据得到原子磁力仪的灵敏度为 $1.19 \text{ pT/Hz}^{1/2}$, 用该值除以线圈系数 C_1 , 可得精密电流源 B2912A 输出 94.8 mA 电流时的电流噪声为 $22.70 \text{ nA/Hz}^{1/2}$, 该数值为电流分辨率 100 nA 的数值的 22.7%. 用图 5(c) 中的磁场数据得到原子磁力仪的灵敏度为 $20.63 \text{ pT/Hz}^{1/2}$, 用该值除以线圈系数 C_1 , 可得直流电源分析仪 N6705B 输出 94.8 mA 电流时的电流噪声为 $0.39 \text{ }\mu\text{A/Hz}^{1/2}$, 该数值为电流分辨率 $2 \text{ }\mu\text{A}$ 的数值的 19.5%. 对上述电流源噪声在数值上是电流分辨率数值约 20% 的结论, 未来需综合数据处理过程和电流计量的定标细节给出更合理的解释. 从上述实验结果分析可知, 磁感应强度计量和电流计量的协同发展十分重要, 国内工业界应考虑基于高灵敏度原子磁力仪来实现电流的计量, 推动高精度电流源的研制, 反过来推动高灵敏度磁传感器的研制. 实际科学研究或工程应用中应避免不科学地追求磁传感器高灵敏度指标的做法, 因为选用不科学的标定方法或设计不合理的 PID 反馈控制会导致磁传感器灵敏度远优于复现磁场中由电流源噪声引入的本底磁场噪声, 然而这种磁传感器实际上没有测量出最本征的复现磁场, 反而变得不灵敏了.

4 结 论

本实验通过抽运-检测型原子磁力仪监测了电流源输出电流的噪声, 得出结论如下: 用功率谱密度标定的原子磁力仪的灵敏度指标主要取决于电流源的电流噪声水平, 并且用特定磁场下的灵敏度指标可估算电流源在对应输出电流条件下的电流噪声; 设计的磁补偿反馈回路对抑制复现磁场的漂移有很好的效果, 消除了低频 $1/f$ 噪声, 但并不抑制电流源输出电流的高频噪声. 本实验和结论提供了一种电流噪声的测量方法, 未来可基于抽运-检测型原子磁力仪设计专门用于测量电流噪声的实验装置, 推动高精度电流源的研制, 反过来推动高性能弱磁传感器的研制, 因此本实验和结论对磁感

应强度计量和电流计量的协同发展具有重要的参考价值. 本实验中自由弛豫信号的傅里叶变换采用矩形窗处理, 是以牺牲测量磁场的准确度为代价去测量电流源的噪声; 如需提高测量磁场的准确度, 自由弛豫信号应按照整数倍周期截取. 未来我们将进一步分析自由弛豫信号的数据处理方法对磁力仪输出磁场的稳定性和准确度的影响.

参考文献

- [1] Kornack T W, Ghosh R K, Romalis M V 2005 *Appl. Phys. Lett.* **95** 230801
- [2] Meyer D, Larsen M 2014 *Gyroscopy and Navigation* **5** 75
- [3] Shah V K, Wakai R T 2013 *Phys. Med. Biol.* **58** 8153
- [4] Boto E, Holmes N, Legget J, et al. 2018 *Nature* **555** 657
- [5] Maus S, Sazonova T, Hemant K, Fairhead J D 2007 *Geochem. Geophys. Geosyst.* **8** 1
- [6] Cohen Y, Achache J 1990 *J. Geophys. Res.* **95** 10783
- [7] Clem T R 1998 *Nav. Eng. J.* **110** 139
- [8] Savukov I M, Romalis M V 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 123001
- [9] Vasilakis G, Brown J M, Kornack T W, Romalis M V 2009 *Phys. Rev. Lett.* **94** 261801
- [10] Miao P X, Zheng W Q, Yang S Y, Wu B, Cheng B, Tu J H, Ke H L, Yang W, Wang J, Cui J Z, Lin Q 2019 *J. Opt. Soc. Am. B* **36** 819
- [11] Yang B, Miao P X, Shi Y C, Feng H, Zhang J H, Cui J Z, Liu Z D 2020 *Chin. J. Lasers* **47** 1012001 (in Chinese) [杨宝, 缪培贤, 史彦超, 冯浩, 张金海, 崔敬忠, 刘志栋 2020 *中国激光* **47** 1012001]
- [12] Liu G B, Sun X P, Gu S H, Feng J W, Zhou X 2012 *Physics* **41** 803 (in Chinese) [刘国宾, 孙献平, 顾思洪, 冯继文, 周欣 2012 *物理* **41** 803]
- [13] Gu Y, Shi R Y, Wang Y H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 110701 (in Chinese) [顾源, 石荣晔, 王延辉 2014 *物理学报* **63** 110701]
- [14] Li N, Huang K K, Lu X H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 133201 (in Chinese) [李楠, 黄凯凯, 陆璇辉 2013 *物理学报* **62** 133201]
- [15] Miao P X, Yang S Y, Wang J X, Lian J Q, Tu J H, Yang W, Cui J Z 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 160701 (in Chinese) [缪培贤, 杨世宇, 王剑祥, 廉吉庆, 涂建辉, 杨炜, 崔敬忠 2017 *物理学报* **66** 160701]
- [16] Yan J Q, Cui J Z, Miao P X, Yang S Y, Wang J X, Lian J Q, Tu J H 2018 *Vacuum & Cryogenics* **24** 259 (in Chinese) [鄢建强, 崔敬忠, 缪培贤, 杨世宇, 王剑祥, 廉吉庆, 涂建辉 2018 *真空与低温* **24** 259]
- [17] Wang X F, Han X D, Yang J X 2007 *Journal of Astronautic Metrology and Measurement* **27** 26 (in Chinese) [王晓峰, 韩晓东, 杨敬轩 2007 *宇航计测技术* **27** 26]
- [18] Gan Q, Shang J T, Ji Y, Wu L 2017 *Rev. Sci. Instrum.* **88** 115009
- [19] Li X, Shi Y, Xue H B, Ruan Y, Feng Y Y 2021 *Chin. Phys. B* **30** 030701
- [20] Li G Z, Xin Q, Geng X X, Liang Z, Liang S Q, Huang G M, Li G X, Yang G Q 2020 *Chin. Opt. Lett.* **18** 031202
- [21] Shen L, Zhang R, Wu T, Peng X, Yu S, Chen J B, Guo H 2020 *Rev. Sci. Instrum.* **91** 084701

Measurement of noise of current source by pump-probe atomic magnetometer*

Chen Da-Yong Miao Pei-Xian[†] Shi Yan-Chao Cui Jing-Zhong

Liu Zhi-Dong Chen Jiang Wang Kuan

(*Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou*

Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

(Received 13 June 2021; revised manuscript received 28 September 2021)

Abstract

The stable and reproducible magnetic field generated by a precision current source and a coil is usually used to calibrate the sensitivity of an atomic magnetometer. The noise of the current source directly determines the noise of the magnetic field. Therefore a highly sensitive atomic magnetometer can be used to measure the noise of the current source.

In this paper, a pump-probe atomic magnetometer is used to measure and estimate the noises of two current sources in a wide range. Firstly, in order to suppress the drift of magnetic field, which is caused by the drift of the current source or the gradual change of the magnetization of magnetic shielding materials, a method of implementing the magnetic compensation by using a precision source B2912A with small current is proposed and realized. The experimental results show that the magnetic compensation significantly suppresses the drift of magnetic field and reduces the amplitude of the power spectral density of magnetic field values to less than 0.1 Hz, but have little effect on the amplitude of the power spectral density of magnetic field values more than 0.1 Hz. Secondly, the relationship between the sensitivity of the pump-probe atomic magnetometer and the noises of two current sources in a wide range is respectively verified experimentally. When the magnetic field varies from 100 nT to 10000 nT, the sensitivity of the pump-probe atomic magnetometer increases stepwise from 0.2 pT/Hz^{1/2} to 15 pT/Hz^{1/2} by using a precision source B2912A to generate the magnetic field, while the magnetometer sensitivity is always about 20 pT/Hz^{1/2} by using a DC power analyzer N6705B to generate the magnetic field. When the magnetic field increases from 5000 nT to 6000 nT, the current resolution of B2912A changes from 100 nA to 1 μ A, leading the peak to peak of the measured magnetic field to change from 23 pT to 230 pT. In the same transformation process of the magnetic field, the current resolution of N6705B is always about 2 μ A, causing the peak to peak of the measured magnetic field to maintain at 300 pT. The experimental results show that the sensitivity of the pump-probe atomic magnetometer is limited by the noise of the magnetic field, thus the current noise can be estimated by the sensitivity of the pump-probe atomic magnetometer. When the magnetic field is set to 5000 nT, the current of B2912A or N6705B supplied to the coil is 94.8 mA, while the noise of B2912A or N6705B is 22.70 nA/Hz^{1/2} or 0.39 μ A/Hz^{1/2}, respectively. The value of the current noise is about 20% of the value of the current resolution, which will be given a more reasonable explanation by combining the data processing process and the calibration details of current source in the future.

Our research is of great significance in calibrating the sensitivity of magnetic sensor, developing the high-precision current sources, and co-developing the magnetic induction metrology and current metrology.

Keywords: atomic magnetometer, magnetic compensation, the noise of current source, sensitivity

PACS: 42.60.-v, 07.55.Ge, 42.50.Gy, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.71.20211122

* Project supported by the Foundation of Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, China (Grant No. HTKJ2019KL510001) and the Key R&D Program of Gansu Province, China (Grant No. 20YF3GA001).

[†] Corresponding author. E-mail: miaopeixian@163.com