

激光抽运 - 检测型原子磁力仪对交变磁场的测量

陈大勇, 史彦超, 缪培贤, 崔敬忠, 刘志栋

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

摘要: 交变磁场作为磁场一种特殊的存在形式, 有着广泛的应用和学术价值, 而现阶段没有行之有效的方法对交变磁场进行绝对测量。抽运 - 检测型原子磁力仪具有量程宽、灵敏度高、能准确反映磁场真实特性, 在磁场测量及标定中具有非常重要的意义。通过对抽运 - 检测型原子磁力仪在交变磁场激励下作用机理研究, 对实验装置进行改进, 实现抽运 - 检测型原子磁力仪对交变磁场的绝对测量, 在 Z 轴方向上实现了背景磁场 40000 nT, 频率为 100 Hz、磁场强度幅值为 1000 nT 的交变磁场测量; 在 Y 轴方向上实现了背景磁场 1000 nT, 频率为 20 Hz、磁场强度幅值为 500 nT 的交变磁场测量。测量结果表明该实验装置适用于低频、弱磁场强度交变磁场的测量, 该方法为交变磁场的测量和标定提供一种切实可行的技术手段。

关键词: 原子磁力仪; 交变磁场; 测量; 校准

中图分类号: TH741; TN29 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.01.003

Measurement for alternating magnetic field by pump-probe atomic magnetometer based on laser

CHEN Da-yong, SHI Yan-chao, MIAO Pei-xian, CUI Jing-zhong, LIU Zhi-dong
(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: As a special form of magnetic field, alternating magnetic field has a wide range of applications and academic value. At present, there is no proven method for absolute measurement of alternating magnetic field. Pump detection atomic magnetometer has a wide range, high sensitivity and can accurately reflect the real characteristics of magnetic field, which is of great significance in magnetic field measurement and calibration. Through the research on the action mechanism of the pump detection atomic magnetometer excited by the alternating magnetic field, the absolute measurement of an alternating magnetic field by the pump detection atomic magnetometer is achieved through the improvement of the experimental. And the measurement of an alternating magnetic field with a background magnetic field of 40,000 nT, a frequency of 100 Hz and an amplitude of 1000 nT is achieved in the Z -axis direction; the measurement of alternating magnetic field in the Y -axis direction with a background field of 1000 nT, a frequency of 20 Hz and an amplitude of 500 nT. The results show that the experimental device is suitable for the measurement of alternating magnetic field at low frequencies and weak magnetic field strengths, and the method provides a practical technical tool for the measurement and calibration of alternating magnetic field.

Keywords: atomic magnetometer; rotating magnetic field; measurement; calibration

基金项目: 甘肃省重点研发计划项目 (No. 20YF3GA001) 资助。

作者简介: 陈大勇 (1981 -), 男, 高级工程师, 研究方向为原子磁力仪技术。E-mail: gansuhust2010@126.com

收稿日期: 2022-02-10

1 引言

交变磁场作为磁场一种特殊的存在形式,在冶金、生物科学、医疗以及磁场相关的物理学研究中都有着广泛的应用和学术价值^[1-5],而现阶段没有切实可行方法对交变磁场进行绝对测量^[6-7]。原子磁力仪作为磁传感器重要的研究方向,是近年来磁场测量以及弱磁探测中的研究热点,目前按照工作原理可分为 Mz 和 Mx 光泵原子磁力仪、CPT (coherent population trapping) 原子磁力仪、抽运-检测型原子磁力仪 (Pump-probe Atomic Magnetometer)、无自旋交换弛豫 (spin-exchange relaxation free, SERF) 原子磁力仪等^[8],其中抽运-检测型原子磁力仪 (Pump-probe Atomic Magnetometer) 是通过对原子弛豫信号探测,并经傅里叶变换得到待测磁场强度,属于绝对测量,能准确地反映了磁场及其噪声特性,具有量程宽、灵敏度高等优势^[9-11],开展基于抽运-检测型原子磁力仪的磁场测量以及标定的技术研究对于磁场测量具有重要的意义。

本文提出了一种基于抽运-检测型原子磁力仪的交变磁场测量方法,该方法是对抽运-检测型原子磁力仪在交变磁场激励下物理特性研究基础上,对实验装置进行改进实现对交变磁场的测量,该装置在测量交变磁场强度的同时可以对其频率测量。

2 测量原理

2.1 抽运-检测型原子磁力仪

抽运-检测型原子磁力仪一个工作周期包括光抽运、射频磁场激励、原子磁矩弛豫信号探测三个物理过程,组成如图 1 所示,包括抽运激光及波长锁定模块、探测激光及控制电路、抽运-检测型原子磁力仪等,其中抽运激光为圆偏振,探测激光为线偏振。

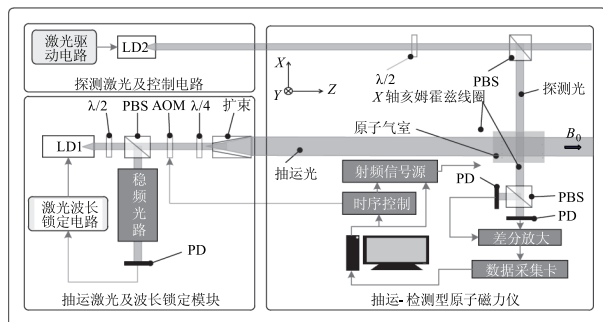


图 1 抽运-检测型原子磁力仪

Fig. 1 Composition and working principle of the pump-probe atomic magnetometer

抽运-检测型原子磁力仪的工作原理及过程如下:首先抽运光完成原子极化态制备,即光抽运,以⁸⁷Rb 为工作原子,采用 D₁ 线 795 nm 圆偏振激光制备原子极化态,抽运光为左旋时,原子被抽运至 5²S_{1/2}(m_j = +1/2) 态,右旋时,原子被抽运至 5²S_{1/2}(m_j = -1/2) 态。原子极化态制备完成后,原子磁矩与待测磁场 B₀ 平行或反平行;关闭抽运光后,用频率约等于待测磁场 B₀ 拉莫尔进动频率的射频磁场持续激励⁸⁷Rb 原子,原子磁矩将在实验室坐标系中做复杂的运动,原子在两个基态能级间来回跃迁。通过控制射频激励磁场的工作时长,使原子磁矩进动到 X-Y 轴所在平面停止,此时原子磁矩将绕着 B₀ 进动;当线偏振的探测光穿过⁸⁷Rb 原子气室,差分探测可获得原子弛豫信号,对该信号傅里叶变换可得到与待测磁场 B₀ 相互关联的拉莫尔进动频率,计算出 B₀^[10]。

原子弛豫信号振幅与原子磁矩在探测光方向上的投影矢量 μ_{⊥x} 模值成正比,输出信号 V_{signal} 如表达式(1)所示^[12]:

$$V_{\text{signal}} = A\mu\sin(\gamma B_{\text{rf}}t)\cos(\omega_0t + \delta) \times e^{-t/T_2} \quad (1)$$

表达式中(ω₀t + δ)为实验室坐标系中 μ_⊥ 与 x 轴正方向的夹角、δ 为初始相位;A 为比例系数;T₂ 为原子系综宏观磁化强度的弛豫时间^[12]。

2.2 交变磁场的测量原理

抽运-检测型原子磁力仪为标量原子磁力仪,原子弛豫信号幅值正比于原子磁矩在探测光方向上的投影,应尽可能增加原子磁矩在探测光方向上分量的模幅值。此外,抽运-检测型原子磁力仪探测光所在的方向为测量盲区^[13],待测磁场不能分布于该方向。抽运-检测型原子磁力仪对交变磁场测量需要具备以下条件:首先交变磁场应在垂直与探测光所在的方向;其次需要在一定背景磁场下,且交变磁场强度幅值要小于背景磁场。此外,只有当交变磁场垂直于 X 轴方向时,抽运-检测型原子磁力仪才能对其进行测量。

2.2.1 Z 轴方向交变磁场的测量原理

基于图 2 可对 Z 轴方向上交变磁场的测量原理及过程进行阐述。图 2(a) 中背景磁场和交变磁场在 Z 轴方向上,此时交变磁场的测量包括三个过程,即光抽运、射频磁场激励和原子磁矩弛豫信号探测,其工作时序如图 2(b) 所示,首先光抽运使⁸⁷Rb

原子磁矩与抽运光平行或反平行,即处于 Z 轴方向上;关闭抽运光之后,用特定时长频率约等于背景磁场拉莫尔进动频率的射频激励磁场作用于 ^{87}Rb 原子,使原子磁矩进动至 $X-Y$ 轴所在平面,之后关闭射频磁场。这里需要指出,背景磁场应远大于交变磁场,使交变磁场对射频激励磁场工作频率的影响可忽略;关闭射频激励磁场后,原子磁矩将绕着 Z 轴背景磁场和交变磁场进动,探测光穿过 ^{87}Rb 原子气室时,过差分探测获得携带背景磁场和交变磁场强度信息的原子弛豫信号,对该信号进行傅里叶变换,得到背景磁场和交变磁场叠加场的强度信息,这个数据处理过程只能得到一个磁场值,是原子弛豫信号一个平均后的结果。

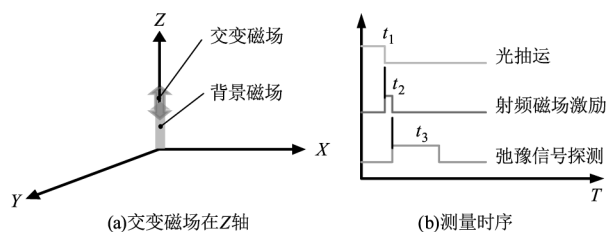


图 2 Z 轴方向交变磁场的测量及时序

Fig. 2 Measurement and timing of alternating magnetic field in Z -axis direction

2.2.2 Y 轴方向交变磁场的测量原理

当背景磁场和交变磁场在 Y 轴方向、抽运光 Z 轴方向时,原子极化态制备的同时原子磁矩有可能会绕着 Y 轴背景磁场和交变磁场进动,这就意味着光抽运过程中原子极化态会有一部分损失掉,势必增加了原子系综衰变,因此抽运-检测型原子磁力仪对 Y 轴方向上交变磁场测量原理的研究应建立在光抽运特性分析及研究的基础上。

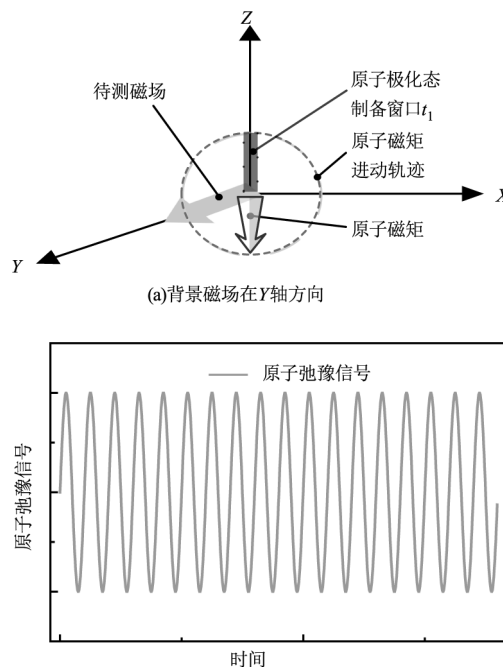
曾昭明等利用“光泵磁共振实验”开展了光抽运的理论分析及研究,并在基础上给出了光抽运理论模型的数学表达式,即原子气室抽运光的透射信号 I_t 的表达式(2)^[14]:

$$I_t = I_0(1 - Ae^{-t/\tau}) \quad (2)$$

表达式(2)中 I_0 为原子气室抽运光的入射光强; A 为归一化的系数,该系数用实验数据拟合获得; τ 为原子系综衰变系数^[14],则原子极化态制备可以用 e 指数函数进行描述,即开始阶段原子系综宏观磁化率快速增加,随着时间推移将减缓,最终趋于一个平衡点,光抽运过程需要一定时长的光抽运积累,且该时长与抽运光光强成反比,则光抽运过程与抽运速

率和原子系综衰变相关,因此只要抽运速率足够快,且光抽运的时间积累满足极化要求,就可以降低上述物理过程对原子极化态制备的影响。

图 3(a)是磁场在 Y 轴方向、原子极化在 Z 轴方向时,通过精确控制原子极化态的制备时间,即原子磁矩进动一个周期后,在特定时间点和时长的光抽运会使损失掉的原子系综宏观磁化率得到补充,原子弛豫信号成为幅值保持稳定的正弦信号。基于该物理现象,赵琴和徐迟等提出了一种能持续产生原子弛豫信号的原子磁力仪,该磁力仪通过时序控制,在原子磁矩弛豫信号每个周期内的特定时间窗口进行原子极化态的制备,从而使原子弛豫信号得以维持^[15-16],得到的原子弛豫信号如图 3(b)所示,其频率由 Y 轴磁场强度决定。这种情况对原子极化态制备时间提出很高的要求,因此在磁场较弱时容易实现。



(b)持续产生的原子弛豫信号

图 3 原子弛豫信号的持续产生

Fig. 3 Self-sustaining atomic relaxation signal

抽运-检测型原子磁力仪对 Y 轴方向交变磁场的测量原理及过程可用图 4 进行阐述,其中光抽运方向为 Z 轴、背景磁场和交变磁场在 Y 轴方向,交变磁场的测量包括光抽运和原子弛豫信号探测两个过程,图 4(a)是 Y 轴交变磁场测量的工作时序;图 4(b)是完成原子极化态的制备后,原子磁矩将绕着 Y 轴背景磁场和交变磁场进动;当探测光穿过 ^{87}Rb

Rb 原子气室,差分探测获得原子磁矩弛豫信号如图 4(c)所示,该信号携带了 Y 轴背景磁场和交变磁场的强度信息。这里需要指出抽运光光强约为 $20 \mu\text{W}/\text{mm}^2$ 、光斑为 $10 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$,完全覆盖原子气室,不同于 Z 轴交变磁场的测量,Y 轴增加了增加抽运光的作用时长,用以提高原子系综宏观极化率。

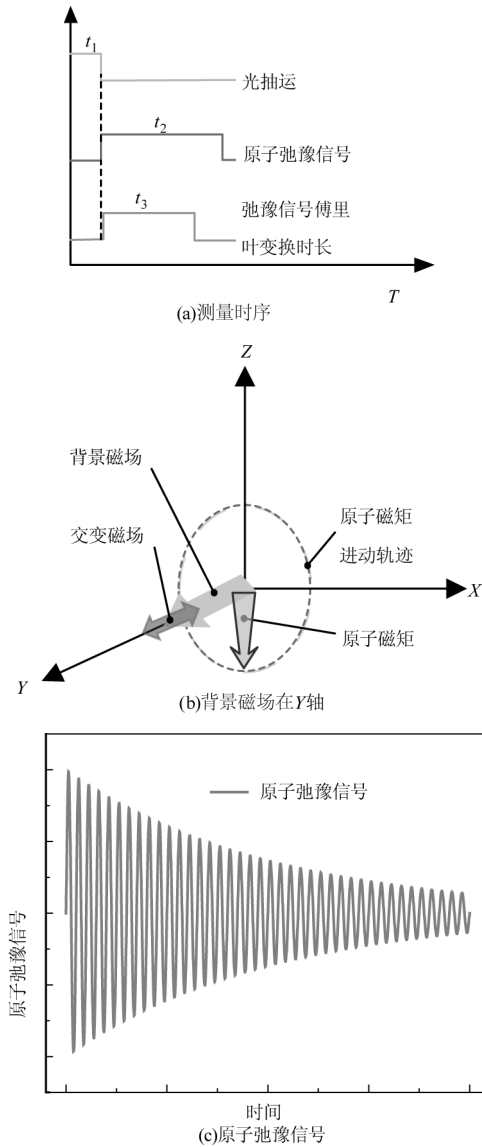


图4 Y轴交变磁场测量

Fig.4 Measurement of Y-axis alternating magnetic field

2.3 交变磁场的测量带宽

原子磁力仪磁场采样率是交变磁场测量的重要影响因素,决定了交变磁场的测量带宽。抽运-检测型原子磁力仪一个测量周期内是通过原子弛豫信号的傅里叶变换获得待测磁场值,其作用效果是对原子弛豫信号平均后获得了一个磁场测量值,这个过程中待测磁场被认为是一恒定磁场。

交变磁场的测量是通过抽运-检测型原子磁力

仪获得交变磁场一个周期内若干个采样点数据,经数据拟合获得交变磁场的磁场强度和频率信息,本文以一个周期内的 10 个采样点数据拟合获得交变磁场的磁场强度和频率,由于抽运-检测型原子磁力仪的最高采样率为 $1000 \text{ Hz}^{[17]}$,因此抽运-检测型原子磁力仪对交变磁场的测量带宽最高为 100 Hz 。

3 实验装置

抽运-检测型原子磁力仪交变磁场的测量装置如图 5 所示,包括抽运-检测型原子磁力仪、交变磁场、背景磁场、磁场测量数据处理及射频激励磁场等部分,其中交变磁场的产生装置由 DDS 频率合成器、电压放大电路、功率放大电路和相应亥姆霍兹线圈产生,DDS 为 AD 公司的 AD9852,用以产生相应频率的正弦信号。电压放大电路对正弦信号幅值进行控制实现对交变磁场磁感应强度的控制和调整。功率放大电路对正弦信号功率进行放大,使正弦信号有足够的功率驱动亥姆霍兹线圈产生相应频率的交变磁场;背景磁场由是德科技精密电流源 B2912A 和相应方向的亥姆霍兹线圈产生;射频激励磁场由信号源 33250A 和 X 轴亥姆霍兹线圈产生。实验中 Z 轴和 Y 轴背景磁场和交变磁场是通过交变磁场的产生装置、精密电流源 B2912A 和相应的亥姆霍兹线圈进行组合产生。

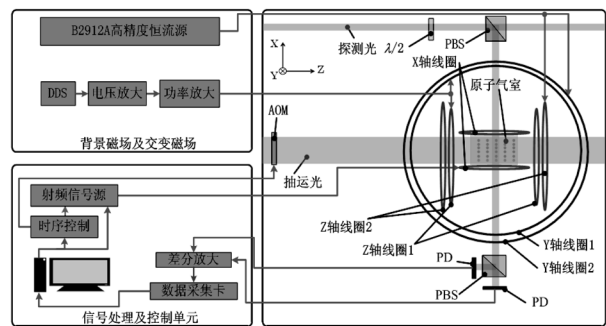


图5 交变磁场测量装置

Fig.5 The measuring device for alternating magnetic field

4 实验过程及讨论

本节对 2.2 节两种情况的交变磁场进行测量,并对其测量结果进行分析及讨论。

4.1 Z 轴方向交变磁场测量

图 2(a)中背景磁场和交变磁场的叠加场在 Z 轴方向,B2912A 通过 Z 轴亥姆霍兹线圈 2 产生 40000 nT 的背景磁场,交变磁场由实验装置中交变磁场产生装置和 Z 轴亥姆霍兹线圈 1 产生,频率为

100 Hz,幅值为 1000 nT,实验中忽略交变磁场对背景磁场强度的影响,射频激励磁场频率为 280 kHz。抽运-检测型原子磁力仪对 Z 轴方向交变磁场测量周期设置为 1 ms,其中光抽运作用时长为 0.3 ms、射频激励磁场作用时长为 0.1 ms、原子弛豫信号测量时长为 0.6 ms。

图 6 是 Z 轴方向背景磁场 40000 nT 和交变磁场 1000 nT 时的测量结果,图 6(a)是仅有背景磁场时,抽运-检测型原子磁力仪测量获得的数据,磁场波动的峰峰值小于 0.5 nT,背景磁场强度约为 40000.4 nT。图 6(b)是背景磁场和交变磁场的叠加场的测量结果,实验中设置背景磁场为 40000 nT、交变磁场磁场强度幅值为 1000 nT,频率为 100 Hz。交变磁场的测量,每个点测量时长为 1 ms,进行 100 个点的采样、总共测量时长为 100 ms、10 个周期的交变磁场。采用 Origin 8.5 对 100 个采样点进行拟合,图 6(b)给出了数据拟合的结果,背景磁场为 40005.7 nT、交变磁场强度幅值为 1001.4 nT、角频率 200π rad/s,既 100 Hz,则 Z 轴方向上的交变磁场表达式为 $1001.4 \sin(200\pi t)$ 。

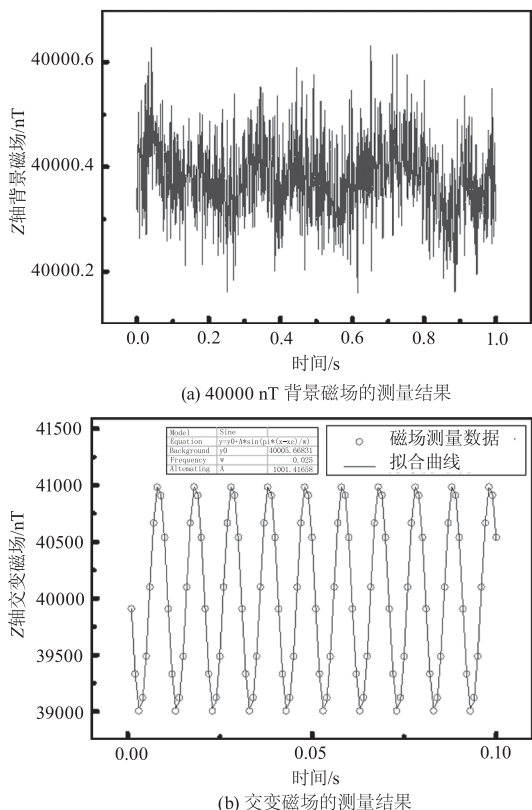


图 6 Z 轴方向交变磁场测量

Fig. 6 The measurement of alternating magnetic field in Z-axis direction

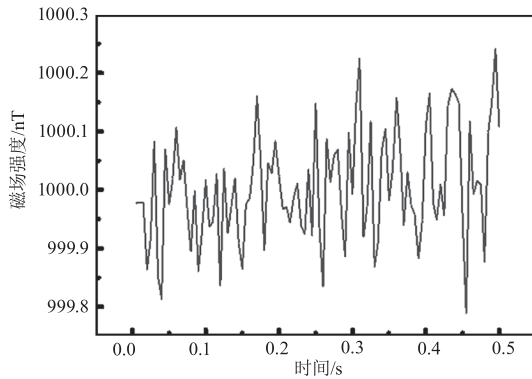
4.2 Y 轴方向交变磁场测量

图 4 给出了 Y 轴方向交变磁场的测量过程及方法,实验中抽运-检测型原子磁力仪对 Y 轴方向交变磁场测量周期设置为 5 ms,其中光抽运作用时长为 1 ms、原子磁矩弛豫信号测量时长为 4 ms,抽运光关闭 0.1 ms 后的 3 ms 的原子磁矩弛豫信号用于计算磁场值。Y 轴方向交变磁场测量的具体实验参数如下: B2912A 通过 Y 轴亥姆霍兹线圈 2 产生 1000 nT 的背景磁场;交变磁场由交变磁场产生装置和 Y 轴亥姆霍兹线圈 1 产生,磁场强度幅值为 500 nT,频率为 20 Hz。

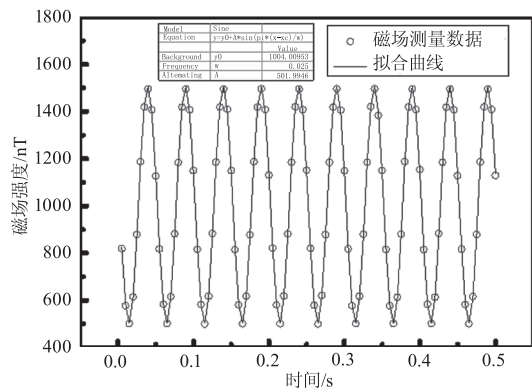
图 7 是 Y 轴背景磁场为 1000 nT、交变磁场强度幅值为 500 nT,频率为 20 Hz 时的测量结果。图 7(a)是仅有背景磁场时的磁场数据,磁场波动峰峰值小于 0.5 nT,背景磁场约为 1000 nT。图 7(b)是 Y 轴背景磁场和交变磁场叠加场的测量结果,其中背景磁场设置为 1000 nT、交变磁场磁场强度幅值为 500 nT,频率为 20 Hz。Y 轴交变磁场的测量,每个点测量时长为 5 ms,进行 100 个点的采样、总共测量时长为 500 ms、10 个周期。采用 Origin 8.5 对 100 个采样点进行拟合,图 7(b)给出了数据拟合的结果,背景磁场为 1004 nT、交变磁场强度幅值为 501.9 nT、角频率 40π rad/s,既 20 Hz,Y 轴方向上的交变磁场表达式为 $501.9 \sin(40\pi t)$ 。

4.3 分析及讨论

从图 6 和图 7 给出的测量数据以及数据拟合得到的交变磁场表达式,可以看出交变磁场的加入会使背景磁场强度有一定程度的增加,其中 Z 轴 40000 nT 背景磁场加入交变磁场后,背景磁场增加量为 5.6 nT;Y 轴 1000 nT 背景磁场加入交变磁场后,背景磁场增加量为 4 nT,该增加量推测是交变磁场产生装置中包含直流分量导致。从测量数据可以看出,该抽运-检测型原子磁力仪交变磁场测量方法适用于低频、弱磁场强度的交变磁场测量,相比现阶段交变磁场测量常用的“霍尔效应法”和“电磁感应方法”^[6-7,18-19],优势在于抽运-检测型原子磁力仪属于绝对磁场测量,是将磁场测量溯源至原子固有属性“旋磁比”上。此外,原子磁力仪高磁场采样率仍然是难以解决的问题,限制了原子磁力仪在交变磁场测量和标定中的应用。



(a) 1000 nT 背景磁场的测量结果



(b) 交变磁场的测量结果

图7 Y轴方向交变磁场测量

Fig. 7 the measurement of alternating magnetic field in Y-axis direction

5 结论

本文通过对抽运-检测型原子磁力仪在交变磁场激励下作用机理的研究,对抽运-检测型原子磁力仪进行相应的改进,实现了对交变磁场的绝对测量,其中Z轴方向上可对频率为100 Hz、磁场强度幅值为1000 nT的交变磁场测量;Y轴方向上可对频率为20 Hz、磁场强度幅值为500 nT的交变磁场测量。实验结果表明该方法适用于低频、弱磁场强度交变磁场的绝对磁场测量。

参考文献:

- [1] Wang L S, Shen J, Feng Z R, et al. Effect of rotating magnetic field on microstructure formation of directionally solidified Sn-1.6-Cd peritectic alloy [J]. Appl Phys A, 2013, 113: 117-183.
- [2] Wasak A, Drozd R, Jankowiak D, et al. Rotating magnetic field as tool for enhancing enzymes properties-laccase case study [J]. Sci. Rep., 2019, 9: 1-9.
- [3] Vyskocil J, Mayorga-Martinez C C, Jablonska E, et al. Cancer cells microsurgery via asymmetric bent surface

Au/Ag/Ni microrobotic scalpels through a transversal rotating magnetic field [J]. ACS Nano, 2020, 14(7).

- [4] Guo Zhiming, Liang Liang, Peng Zhengqiao, et al. Modeling and measurement of magnetic field for capsule robot driving [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 216-223. (in Chinese)
郭志明, 梁亮, 彭正乔, 等. 胶囊机器人驱动磁场的建模与测量 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 216-223.
- [5] Siqueira E C, Seridonio A C, Fachini F F. Heat transfer and magnetovortical antiresonance of a ferrofluid with a rotating magnetic field [J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2013, 26: 2333-2335.
- [6] Tang Luxin, Zhang H. Research progress of alternating magnetic field measurement [J]. Measurement & Control Technology, 2013, 32(4): 1-4. (in Chinese)
唐露新, 张洪. 交变磁场测量的研究进展 [J]. 测控技术, 2013, 32(4): 1-4.
- [7] Li Xianglin, Wu Jing, Jin Hailin, et al. Development of low-frequency three-dimensional magnetic field measurement system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 41(1): 33-37. (in Chinese)
李祥麟, 吴静, 金海彬, 等. 低频三维磁场测量系统研制 [J]. 宇航计测技术, 2021, 41(1): 33-37.
- [8] Liu Guobin, Sun Xianping, Gu Sihong, et al. Progress in high sensitive atomic magnetometers [J]. Physics, 2012, 41(12): 803-810. (in Chinese)
刘国宾, 孙献平, 顾思洪, 等. 高灵敏度原子磁力仪研究进展 [J]. 物理, 2012, 41(12): 803-810.
- [9] Gruji Z D, Koss P A, Bison G, et al. A sensitive and accurate atomic magnetometer based on free spin precession [J]. The European Physical Journal D, 2015, 69: 135.
- [10] Miao Peixian, Yang Shiyu, Wang Jianxiang, et al. Rubidium atomic magnetometer based on pump-probe nonlinear magneto-optical rotation [J]. Acta Phys. Sin., 2017, 66(16): 160701. (in Chinese)
缪培贤, 杨世宇, 王剑祥, 等. 抽运-检测型非线性磁光旋转铷原子磁力仪的研究 [J]. 物理学报, 2017, 66(16): 160701.
- [11] Chen Dayong, Miao Peixian, Shi Yanchao, et al. Measurement of the noise of current source by pump-probe atomic magnetometer [J]. Acta Phys. Sin. 2022, 71(2): 024202. (in Chinese)
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.

- [12] Yang Bao, Miao Peixian, Shi Yanchao, et al. Theoretical and experimental studies on classic physical picture of two-level magnetic resonance[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10):1012001. (in Chinese)
杨宝, 缪培贤, 史彦超, 等. 二能级磁共振经典物理图像的理论 and 实验研究[J]. 中国激光, 2020, 47(10):1012001.
- [13] Miao P X, Zheng W Q, Yang S Y, et al. Wide-range and self-locking atomic magnetometer based on free spin precession[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2019, 36(4):819-828.
- [14] 曾昭明, 陈宜保, 袁科亮, 等. 光泵磁共振实验中光抽运信号波形成因的探究[J]. 物理与工程, 2011, 21(11):62-64.
- [15] Xu C, Wang S G, Feng Y Y, et al. A self-sustaining atomic magnetometer with t-1 averaging property[J]. Scientific Reports, 2016, 6:28169.
- [16] Zhao Q, Fan B L, Wang S G, et al. A vector atomic magnetometer based on the spin self-sustaining larmor method [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 481(1):257-261.
- [17] Miao Peixian, Yang Shiyu, Cui Jingzhong, et al. Analysis of related problems of weak magnetic metrology[J]. Vacuum & Cryogenics, 2020, 26(6):494-502. (in Chinese)
缪培贤, 杨世宇, 崔敬忠, 等. 弱磁计量相关问题的分析[J]. 真空与低温, 2020, 26(6):494-502.
- [18] Chen Jinquan. An introduction of the method for the experiment of measuring bass frequency alternating magnetic field[J]. Journal of Guilin Institute of Electronic Technology, 2002, 22(4):53-56. (in Chinese)
陈金全. 测量低频交变磁场的实验方法[J]. 桂林电子工业学院学报, 2002, 22(4):53-56.
- [19] Huang Le, Zhang Zhiyong, Peng Lianmao. High performance graphene Hall sensors[J]. Acta Phys. Sin., 2017, 66(21):218501. (in Chinese)
黄乐, 张志勇, 彭练矛. 高性能石墨烯霍尔传感器[J]. 物理学报, 2017, 66(21):218501.