

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209075

一种矢量原子磁力仪中旋转磁场的设计及实验验证

陈大勇 缪培贤 史彦超 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 兰州 730000)

摘要: 目前国内外报道了几种矢量原子磁力仪的技术方案,其中基于磁场旋转调制法的矢量原子磁力仪可实现对矢量磁场的连续测量。本文对磁场旋转调制法矢量原子磁力仪的工作原理进行了阐述,对“旋转磁场”的设计、产生以及标定方法进行了介绍,在此基础上基于抽运-检测型原子磁力仪对旋转磁场和矢量磁场的叠加磁场进行了实验测量,验证了实测磁场的平均值、峰峰值与理论计算结果的符合情况,分析了实测磁场的平均值与理论平均值的偏差起源,并通过实验验证了矢量原子磁力仪的连续测量能力。研究内容为连续测量型矢量原子磁力仪的研制奠定了技术基础。

关键词: 矢量原子磁力仪;磁场旋转调制法;矢量磁场;抽运-检测型原子磁力仪

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

The design and experimental verification of rotating magnetic field in a vector atomic magnetometer

Chen Dayong Miao Peixian Shi Yanchao Cui Jingzhong Liu Zhidong

(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: At present, several technical schemes of vector atomic magnetometer have been reported at home and abroad, and a vector atomic magnetometer based on magnetic field rotation-modulation method can realize the continuous measurement of vector magnetic field. In this paper, the working principle of the vector atomic magnetometer based on the magnetic field rotation-modulation method is described, and the design, generation and calibration method of the "rotating magnetic field" are introduced. Then, the superposition magnetic field of the rotating magnetic field and the vector magnetic field is experimentally measured by a pump-probe atomic magnetometer. The coincidences of the average value and peak-to-peak value of the measured magnetic field with the theoretical calculation results are verified, and the origins of the deviation between the average values of the measured magnetic field and the theoretical results are analyzed. At last, the continuous measurement ability of vector atomic magnetometer is verified by experiments. The research content of this paper lays a technical foundation for the development of continuous measurement vector atomic magnetometer.

Keywords: vector atomic magnetometer; magnetic field rotation-modulation method; vector magnetic field; pump-probe atomic magnetometer

0 引言

基于光与原子相互作用的原子磁力仪研究已超过半个世纪,目前国际上出现了 Mz 和 Mx 模式的光泵磁力仪、相干布居囚禁磁力仪、非线性磁光旋转磁力仪、无自旋交换弛豫磁力仪等多种原子磁力仪^[1],近年来国内外诸多课题组开展了原子磁力仪研制、指标提升以及计量相关等方向的研究^[2-10]。磁场是矢量场,上述原子磁力仪均为标量磁力仪,只能获得磁场的数值大小。目前广泛采用三轴磁通门

传感器测量矢量磁场,但其存在零偏误差^[11]。2018年北京航空航天大学董海峰等^[12]综述了三轴矢量原子磁力仪的7种实现方法,分别为磁场扫描法^[13]、磁场旋转调制法^[14]、磁场轮流抵消法^[15]、磁场投影法^[16]、磁场交叉调制法^[17]、磁场分立调制法^[18]和自旋进动调制法^[19],其中磁场旋转调制法相比其他方法的突出优势在于可实现对矢量磁场的连续测量,该方案选用快速响应的 Mx 钾光泵原子磁力仪作为磁传感器,而光轴与外磁场夹角接近 0°或 90°是 Mx 光泵磁力仪的测量盲区,当矢量磁场的方向突变时容易落入

Mx 光泵磁力仪测量盲区,导致矢量原子磁力仪失锁。近几年国内若干矢量原子磁力仪的研究工作^[20-22]也没有很好地解决地磁场附近矢量磁场连续测量的问题。

磁场旋转调制法要求标量原子磁力仪具有很高的带宽和磁场采样率,而 Mz 光泵磁力仪、相干布居囚禁磁力仪和无自旋交换弛豫磁力仪等不满足上述要求。兰州空间技术物理研究所 2017 年报道的抽运-检测型铷原子磁力仪的测量范围为 100~100 000 nT,磁场采样率最高为 1 kHz^[7],当测量 10 000 nT 的磁场时,盲区为磁场方向与探测光方向的夹角小于 10°,可快速锁定上万 nT 的突变磁场^[8],本文利用抽运-检测型原子磁力仪研制基于磁场旋转调制法的矢量原子磁力仪,首先介绍该矢量原子磁力仪的工作原理,以及磁场旋转调制法中旋转磁场的设计、测量和标定;其次用抽运-检测型原子磁力仪测量旋转磁场和矢量磁场的叠加场,并分析了实测磁场的平均值与理论计算值之间偏差的起源;并最后通过实验验证了矢量原子磁力仪的连续测量能力。

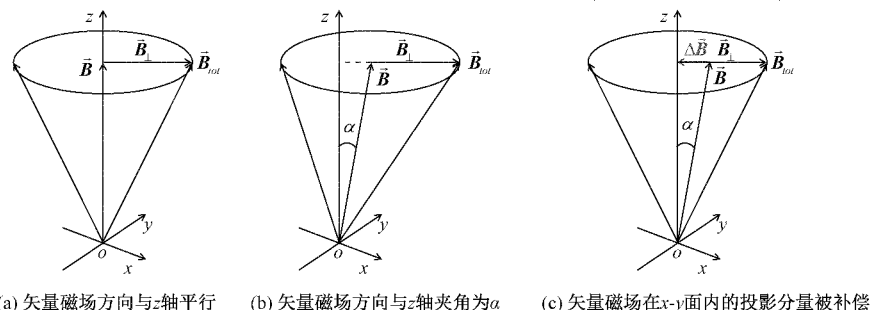


图 1 基于磁场旋转调制法的矢量原子磁力仪原理

因此测量磁场值 B_{tot} 的波动峰峰值 ΔB_{tot} 为:

$$\Delta B_{tot} = B_{max} - B_{min} \quad (3)$$

测量磁场值 B_{tot} 的平均值 $B_{tot, avg}$ 为:

$$B_{tot, avg} = \sqrt{B^2 + B_{\perp}^2} \quad (4)$$

如图 1(c)所示,在 x 轴和 y 轴额外设计亥姆霍兹线圈组,分别通入电流使铷泡空间位置产生的补偿磁场 $\Delta\vec{B}$ 与矢量磁场 \vec{B} 的矢量和平行于 z 轴,则抽运-检测型原子磁力仪将测得没有调制信息的恒定磁场。矢量原子磁力仪以测量的磁场波动峰峰值作为判定条件,不断改变通入 x 轴和 y 轴亥姆霍兹线圈组的补偿电流,使测量磁场的波动值峰峰趋近于零。额外设计的 x 轴和 y 轴磁场线圈产生的磁场大小即为矢量磁场的 B_x 和 B_y 分量, z 轴分量为: $B_z = \sqrt{B_{tot}^2 - B_{\perp}^2}$ 。 B_x 和 B_y 分量的符号由 x 轴和 y 轴磁场线圈的绕线方式结合以及补偿电流方向得到, B_z 的符号可在测量前先做判定。

1.2 实验装置

旋转磁场产生和测量实验装置如图 2 所示,包括旋转磁场产生和抽运-检测型原子磁力仪。旋转磁场是将相位差 90°的两组 20 Hz 正弦交流信号通入 x 轴和 y 轴放置的两组线圈中,在线圈空间几何中心产生相应的旋转磁场。

1 工作原理及实验装置

1.1 磁场旋转调制法矢量原子磁力仪的工作原理

磁场旋转调制法矢量原子磁力仪工作原理如图 1 所示。图 1(a)中,频率为 20 Hz、振幅为 500 nT 的旋转磁场 \vec{B}_{\perp} 在 x-y 平面内绕着 z 轴旋转,当矢量磁场 \vec{B} 与 z 轴平行时,由 $\vec{B}_{tot} = \vec{B} + \vec{B}_{\perp}$ 可知,总磁场 \vec{B}_{tot} 的方向会变化,但大小不会发生变化,采用标量抽运-检测型原子磁力仪测得的一组磁场值是恒定值;在图 1(b)中,当矢量磁场 \vec{B} 与 z 轴有 α 角度时,采用标量抽运-检测型原子磁力仪测得的磁场 \vec{B}_{tot} 的模值随时间以 20 Hz 的频率变化,其磁场最大值 B_{max} 和最小值 B_{min} 分别由式(1)和(2)决定。

$$B_{max} = \sqrt{(B \cos \alpha)^2 + (B_{\perp} + B \sin \alpha)^2} \quad (1)$$

$$B_{min} = \sqrt{(B \cos \alpha)^2 + (B_{\perp} - B \sin \alpha)^2} \quad (2)$$

抽运-检测型原子磁力仪的探头部分置于旋转磁场均匀区,其中圆偏振抽运激光与 z 轴平行,线偏振探测激光与 x 轴平行,抽运-检测型原子磁力仪的磁场采样率被设定为 200 Hz。铷泡为 $\Phi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的圆柱型气室,缓冲气体为 100 Torr 的氮气,采用交流无磁加热的方式使铷泡温度稳定在 100 °C。铷泡附近的亥姆霍兹线圈产生的射频激励磁场作用于气室中的铷原子,以实现磁共振。

抽运-检测型原子磁力仪对 z 轴方向的磁场测量效果最佳^[7-9],磁场测量包含 3 个物理过程,即原子极化态制备、射频磁场激励和自由弛豫信号探测,原子极化态制备是 795 nm 圆偏振抽运激光作用在铷泡上,使 ^{87}Rb 原子磁矩与外磁场平行或反平行;射频磁场激励是抽运激光作用一段时间后关闭,用射频信号发生器给亥姆霍兹线圈输入特定时间的正弦交变信号以产生共振射频场,驱动 ^{87}Rb 原子磁矩进动至与外磁场垂直的平面内;自由弛豫信号探测是红失谐 6 GHz 的线偏振探测激光穿过铷泡,采用差分放大的探测方法和计算机中编写的 Labview 程序实现铷原子拉莫尔进动信号的提取及处理,得到外磁场值。当外磁场方向与 z 轴方向有夹角时,抽运-检测型原子磁力仪自由弛豫信号信噪比降低^[8],原因是射频场激励后铷原子磁矩绕外磁场进动过程中在 x 轴上的投影分量的变化量减小。

实验时,图2的装置被置于磁屏蔽筒中,筒内含产生 y 轴和 z 轴的磁场线圈组,该线圈组的坐标系与图2标出的坐标系重合。标定 y 轴方向旋转磁场振幅的过程如下:首先在 y 轴方向产生 1 000 nT 的本底磁场和 20 Hz 的交变磁场,交变磁场是将正弦交流信号通入图2中 y 轴线圈后产生的;圆偏振抽运激光在铷泡上作用一段时间使 ^{87}Rb 原子磁矩与 z 轴平行或反平行;抽运光关闭后,由于此时沿着 z 轴方向的原子磁矩与 y 轴方向垂直,禁用射频场的条件下原子磁矩将绕着 y 轴本底磁场在 $x-z$ 平面内拉莫尔进动,由线偏振探测光差分测得拉莫尔进动信号并计算出磁场值,测量的总磁场的峰峰值即为旋转磁场振幅值的2倍。

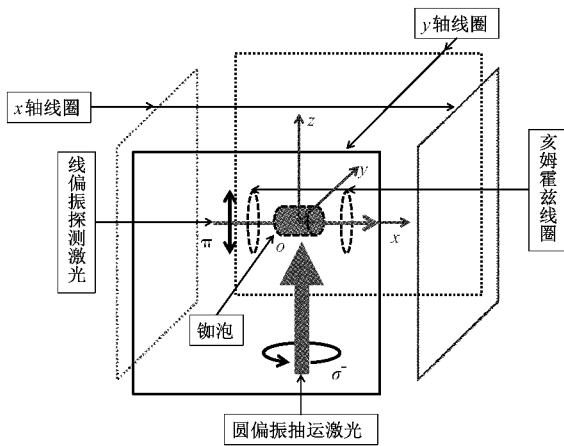


图2 旋转磁场产生和测量装置示意图

2 实验与讨论

本节依次介绍旋转磁场的产生方法、标定方法,在旋转磁场和矢量磁场的叠加场中验证标量原子磁力仪的测量结果与理论计算结果是否符合,以及分析 B_{ω} 的实测平均值与理论计算值偏差的起源,并初步实现矢量原子磁力仪的锁定。

2.1 旋转磁场的产生和测量

1) 旋转磁场产生

旋转磁场的产生是将相位差 90° 的两组正弦信号分别通入到 X 轴和 Y 轴的亥姆霍兹线圈组,线圈所包围的空间中心会产生的旋转磁场可用式(5)表示。

$$\vec{B}_-(\omega t) = B_0[\cos(\omega t)\vec{i} + \sin(\omega t)\vec{j}] \quad (5)$$

式中: B_0 为旋转磁场的幅值, \vec{i} 和 \vec{j} 表示矢量磁场的方向。基于式(5),图2中设置 x 轴线圈和 y 轴线圈,这两个线圈为方形亥姆霍兹线圈。一个方形亥姆霍兹线圈由两个方形线圈组成,要求两方形线圈中心的间距是方形线圈边长的 0.5445 倍^[23]。方形线圈的边长大约为 330 mm,两方形线圈的中心间距大约为 180 mm,线圈匝数为 1 匝,在线圈绕制过程中应注意除方形线圈导线外其他部分导线应设

计为双绞线形式。由于 x 轴线圈和 y 轴线圈使用了相同的设计,它们的线圈系数大致相等。实验中两组正弦信号由两个 DDS 产生,基于 DDS 相位同步技术控制两个 DDS 输出的正弦信号的初始相位,使两组正弦信号的相位差严格等于 90° ,图3所示为两个 DDS 输出的正弦交流信号,通入 x 轴和 y 轴线圈时需要将该信号放大至预期的幅值,实现旋转磁场振幅的设定。

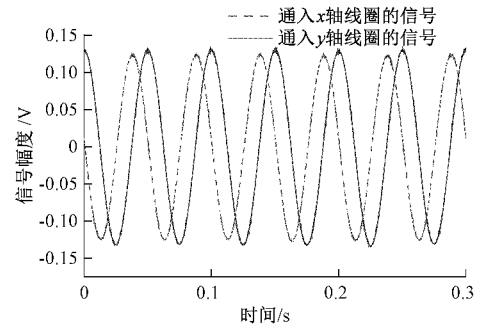


图3 通入 x 轴和 y 轴线圈中的正弦交流信号

2) 旋转磁场的测量

抽运-检测型原子磁力仪测量旋转磁场振幅的方法详见 1.2 节实验装置部分的介绍,具体实验中需分别标定 x 轴和 y 轴线圈产生的交变磁场的振幅。图2的装置被置于磁屏蔽筒中,筒内采用图2中所示的坐标系定义,磁屏蔽筒的轴线方向与 z 轴方向平行。标定 y 轴线圈产生的交变磁场的振幅时,需用筒内 y 轴附加的磁场线圈在 y 轴方向产生本底磁场。抽运-检测型原子磁力仪在旋转磁场标定中,设置磁场采样率 200 Hz,则一个测量周期为 5 ms,其中抽运光作用 1 ms, ^{87}Rb 原子磁矩自由弛豫信号 4 ms,截取中部 3 ms 时长的自由弛豫信号计算出磁场值。

旋转磁场标定包括两个步骤:1)向磁屏蔽筒内 y 轴附加磁场线圈通入电流,将本底磁场调整为 1 000 nT,图4(a)所示为本底磁场测量结果;2)向磁屏蔽筒内 y 轴线圈加载 20 Hz 的正弦信号,抽运-检测型原子磁力仪测得 y 轴 1 000 nT 本底磁场和正弦交变磁场的叠加场,调整正弦信号发生器的输出功率,使磁力仪测得磁场的峰峰值为 1 000 nT,即交变磁场的振幅为 500 nT,测量结果如图4(b)所示。标定 x 轴线圈产生的交变磁场的振幅时,将图2中 x 轴和 y 轴的线圈组绕 z 轴旋转 90° ,此时 x 轴线圈处于原来 y 轴线圈的位置,用上述相同的方法将 x 轴线圈产生的交变磁场的振幅标定为 500 nT。当图2中 x 轴线圈和 y 轴线圈中通入上述被标定的两组相位差 90° 的正弦交变磁场时,这两组线圈在铷泡空间位置产生的旋转磁场的振幅为 500 nT。

2.2 旋转磁场和矢量磁场组成的叠加场测量

旋转磁场和矢量磁场组成的叠加场如图1(b)所示,利用抽运-检测型原子磁力仪测量叠加场可分析旋转磁场及矢量原子磁力仪的设计效果。

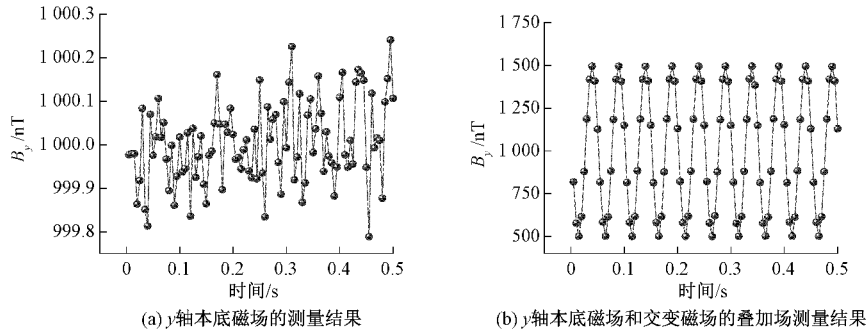


图 4 旋转磁场振幅的标定

1) 磁场波动峰峰值 ΔB_{tot} 的验证

本节验证磁场波动的测量峰峰值与理论计算值是否相符,其中理论值是利用式(1)~(3)计算获得,测量值是抽运-检测型原子磁力仪对不同 α 角度矢量磁场和旋转磁场的叠加场的测量结果。实验中不同 α 角度矢量磁场由磁屏蔽筒内 z 轴线圈和额外的 y 轴磁场线圈产生,图 2 实验装置放入磁屏蔽筒内,其坐标系与筒内额外线圈组的坐标系重合,额外的 y 轴磁场线圈的线圈系数是 65.66 nT/mA,用以产生 y 轴的磁场分量。抽运-检测型原子磁力仪的一个工作周期为 5 ms,抽运光作用 1 ms,射频场作用 0.1 ms,射频场关闭后截取 3 ms 的实验数据用于计算磁场值。

叠加场测量结果如图 5 所示,当磁屏蔽筒内仅有 z 轴方向磁场,磁场强度为 40 000 nT,此时抽运-检测型原子磁力仪的原始信号如图 5(a)所示,测得的磁场值如图 5(b)所示,0.2 s 内 40 个磁场值的平均值为 40 000.7 nT,峰峰值

为 0.6 nT;当磁屏蔽筒内 z 轴方向的磁场为 40 000.7 nT,同时在 $x-y$ 面内施加 500 nT 的旋转磁场,则此时的叠加场如图 1(a)所示,叠加场的方向随时间变化,但强度不变,理论上抽运-检测型原子磁力仪的磁场测量值为恒定值,而实测结果如图 5(c)所示,0.2 s 内 40 个磁场值的平均值为 40 003.3 nT,峰峰值为 0.8 nT;当磁屏蔽筒内 z 轴方向的磁场为 40 000.7 nT、 y 轴方向磁场为 6 566 nT 磁场时,经计算矢量磁场为 40 536 nT、与 z 轴夹角为 9.32° 。当 $x-y$ 面内旋转磁场为 500 nT,则矢量磁场和旋转磁场的叠加场如图 1(b)所示,抽运-检测型原子磁力仪测得的磁场 \vec{B}_{tot} 值以旋转磁场的频率变化,磁场的极值由式(1)和(2)决定,实测结果如图 5(d)所示,0.2 s 内 40 个磁场值的平均值为 40 562.1 nT,磁场波动峰峰 ΔB_{tot} 为 160.9 nT,理论计算的 ΔB_{tot} 为 161.9 nT,与实测值的差值为 1 nT。

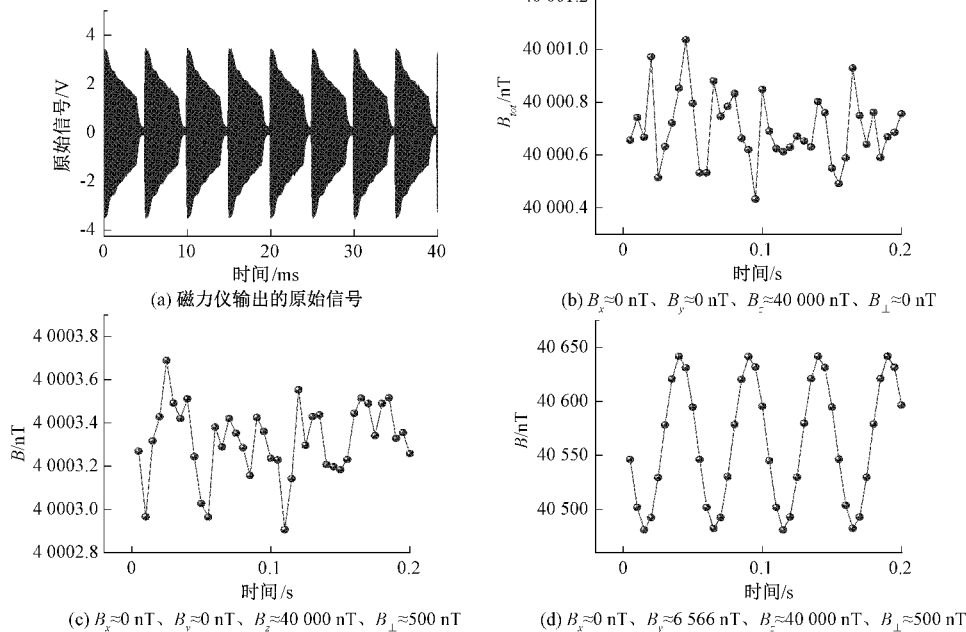


图 5 旋转磁场和矢量磁场的叠加场中标量原子磁力仪的测量结果

2) 叠加场中标量原子磁力仪测量盲区的分析

本节简要分析旋转磁场和矢量磁场的叠加场中标量原

子磁力仪的测量盲区。实验中 z 轴分量固定为 40 000 nT,矢量磁场与 z 轴夹角 α 随着 y 轴分量增加而逐渐增

大,抽运-检测型原子磁力仪测量获得的磁场波动峰峰值 ΔB_{tot} 和叠加场平均值如图6所示,图6中实验测量得到的磁场波动峰峰值 ΔB_{tot} 和叠加场平均值与理论计算结果符合很好,当 y 轴磁场分量增加至 78 792 nT、磁场平均值为 88 071.4 nT,用式(4)可计算出矢量磁场

的磁场值 B , 然后用 $\arccos(B_z/B)$ 可得矢量磁场与 z 轴夹角 α 为 62.99° , 同时用 $\arctan(B_y/B_z)$ 计算出矢量磁场与 z 轴夹角 α 为 63.08° , 两结果相近。当继续增加 y 轴磁场分量时,抽运-检测型原子磁力仪输出错误的磁场值。

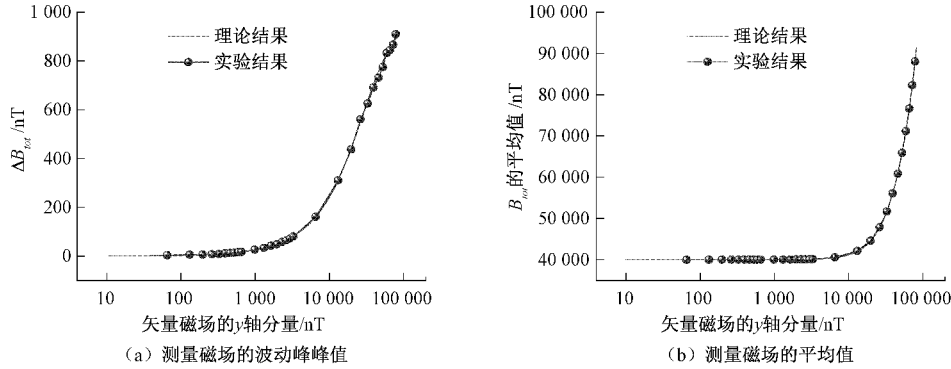


图6 测量磁场的波动峰峰值和平均值随矢量磁场 y 轴分量的变化

由于 M_x 光泵磁力仪的测量盲区为光轴与外磁场夹角接近 0° 或 90° 的区域,基于 M_x 光泵磁力仪的磁场旋转调制法矢量原子磁力仪,当待测矢量磁场的方向突变超过 45° 时,矢量磁场容易进入 M_x 光泵磁力仪的测量盲区,导致矢量原子磁力仪失锁。图6的实验结果表明,基于抽运-检测型原子磁力仪的磁场旋转调制法矢量原子磁力仪,即使矢量磁场的 α 角从 0° 突变至超过 60° ,抽运-检测型原子磁力仪依然有可能实现锁定,并且输出正确的磁场值,相比基于 M_x 光泵磁力仪的磁场旋转调制法矢量原子磁力仪有减小测量盲区的潜力。

3) 实测平均值 $B_{tot-avg}$ 与理论计算值的偏差分析

叠加场 B_{tot} 平均值 $B_{tot-avg}$ 的理论计算值可用式(4)计

算获得,本节对 $B_{tot-avg}$ 的实验测量值与理论计算值的偏差进行研究及分析。

实验中磁屏蔽筒内 z 轴分量固定为 40 000 nT,当 y 轴分量逐渐增加,实测平均值变化曲线如图6(b)所示,减去理论计算值,得到的偏差随 y 轴分量变化的曲线如图7(a)所示,可以看出偏差值随着 y 轴分量增加而缓慢增加,当 B_y 增加至 13 132 nT,差值达到最大值 29.6 nT,然后又随着 y 轴分量增加而急剧减小。经分析, y 轴分量 B_y 在 $0 \sim 13\ 132$ nT,即额外 y 轴线圈通入电流小于 200 mA 时,偏差存在且随 y 轴分量 B_y 增加而增加的原因是磁屏蔽筒的磁化,导致磁屏蔽筒内实际测量磁场值大于理论计算值;偏差存在的另一个原因是原子极化态的横向弛豫时间

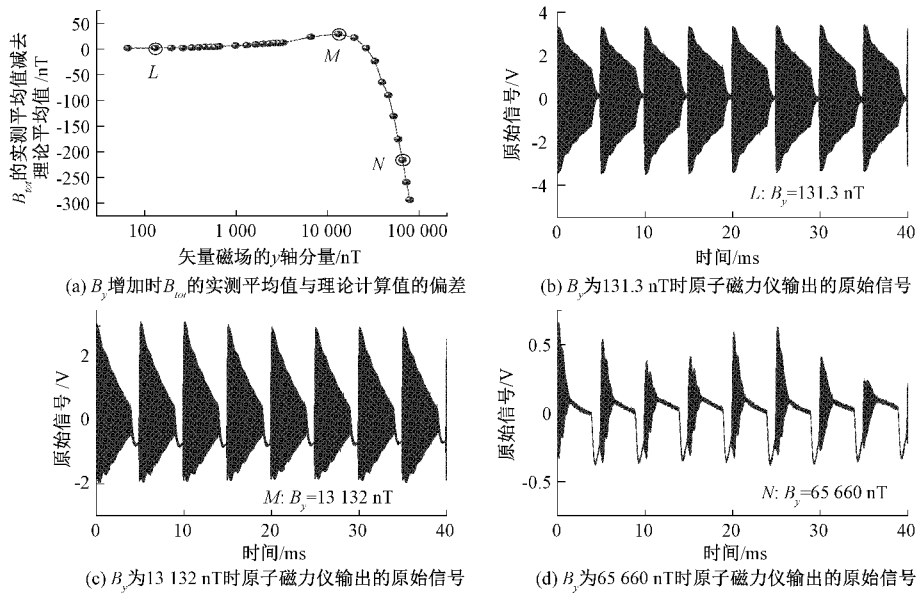


图7 当 B_z 为 40 000 nT 时 B_{tot} 的实测平均值与理论计算值偏差的起源分析

随着磁场强度的增加而逐渐减小^[7-8],当磁场强度增加到一定程度时原子极化态的弛豫时间会小于 3 ms,傅里叶变换 3 ms 时长的自由弛豫信号时会引入较大的计算误差。图 7(a)中 L、M 和 N 位置对应的 y 轴分量分别为 131.3 nT、13 132 nT 和 65 660 nT,它们对应的自由弛豫信号分别如图 7(b)、(c)和(d)所示,其中图 7(d)中自由弛豫信号小于 1.5 ms。

4) 分析及讨论

抽运-检测型原子磁力仪对旋转磁场和矢量磁场的叠加场的测试结果显示,实验测量值与理论计算值符合很好,说明旋转磁场的设计、产生及性能满足矢量原子磁力仪的应用需求;叠加场中标准原子磁力仪测量盲区的研究结果表明,相比 Mx 光泵磁力仪,基于抽运-检测型原子磁力仪的矢量原子磁力仪方案有潜力减小测量盲区。以上研究成果对矢量原子磁力仪的性能研究及改进提供技术基础和参考。

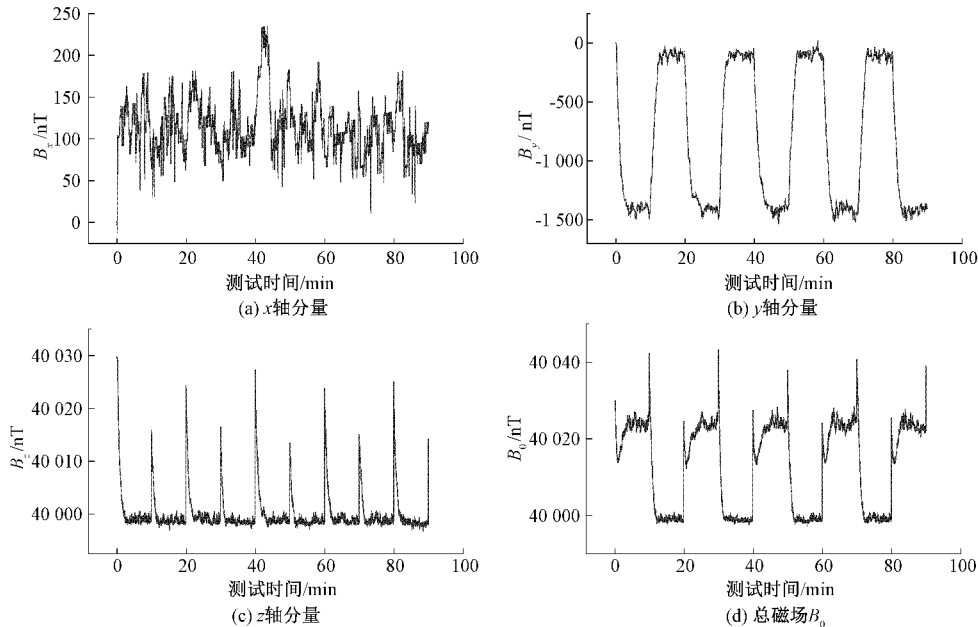


图 8 矢量原子磁力仪测量突变矢量磁场时输出的磁场值

图 8(a)中 x 轴磁场分量 B_x 在 50~200 nT 范围内变化,此时实验装置未施加 x 轴磁场分量,理论上应为 0,这种背景磁场的偏差是磁屏蔽筒被磁场磁化后导致的;图 8(b)中 y 轴磁场分量 B_y 设置为每隔 10 min 在 0 nT 和 1 313 nT 之间切换,实测 B_y 在 -80~-1 400 nT 之间切换;图 8(c)中 z 轴分量约为 40 000 nT,与预设的 z 轴本底磁场符合;图 8(d)中矢量原子磁力仪测量得到的矢量磁场模值在 40 000 nT 和 40 024 nT 之间切换,与理论计算的 40 000 nT 和 40 022 nT 之间切换基本相符,此时矢量磁场与 z 轴的夹角 α 在 0° 和 2° 之间切换。

从图 8 的实验结果可以得出磁屏蔽筒的磁化对测量误差的贡献是不可忽略的内容,其次图 8(d)中矢量原子磁

2.3 矢量原子磁力仪对突变矢量磁场的测量

本节对该矢量原子磁力仪的矢量磁场连续测量的能力进行实验验证。实验是在图 2 实验装置的基础上,在 x 轴和 y 轴分别增加电流补偿线圈用以产生补偿磁场,实验过程中通过测量软件实时控制通入 x 轴或 y 轴补偿线圈的电流,使补偿磁场和待测矢量磁场的矢量和平行于 z 轴,此时待测矢量场、旋转磁场和补偿磁场的叠加场如图 1(c)所示,当矢量原子磁力仪实现了对矢量磁场的跟踪及锁定,即补偿磁场和待测矢量磁场的矢量和平行于 z 轴时,抽运-检测型原子磁力仪测量的磁场波动峰峰值将趋于 0,此时测得矢量磁场的模值为 $B_0 = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$ 。

实验时磁屏蔽筒内 z 轴分量固定为 40 000 nT, y 轴磁场分量每隔 10 min 在 0 nT 和 1 313 nT 之间切换,矢量原子磁力仪对这种连续突变矢量磁场跟踪锁定的测量结果如图 8 所示。

力仪实现矢量磁场的跟踪锁定后,测得的总磁场的波动峰峰值小于 5 nT,经计算 5 nT 对应 α 角度的波动峰峰值小于 0.3° 。

3 结 论

本文首先介绍了基于磁场旋转调制法的矢量原子磁力仪的工作原理,阐述了旋转磁场的设计和标定方法;其次利用抽运-检测型原子磁力仪测量了旋转磁场和矢量磁场的叠加场,实验测量结果与理论计算结果相符;然后分析了实验测量值与理论计算值存在偏差的起源;最后验证了矢量原子磁力仪对突变矢量场的连续跟踪锁定能力。本论文的技术方案相比俄罗斯选用 Mx 光泵磁力仪的技术

方案,有潜力减小矢量原子磁力仪的动态测量盲区。本文研究内容为连续测量型矢量原子磁力仪的研制奠定了技术基础。

参考文献

- [1] 刘国宾,孙献平,顾思洪,等. 高灵敏度原子磁力计研究进展[J]. 物理, 2012, 41(12):803-810.
- [2] 顾源,石荣晔,王延辉. 分布式反馈激光抽运铯磁力仪灵敏度相关参数研究[J]. 物理学报, 2014, 63(11):110701.
- [3] 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.
- [4] 王言张,梁檬. 基于 Herriott 型多通道池的 SERF 原子磁力仪研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6):43-49.
- [5] 黄圣洁,张桂迎,胡正琿,等. 利用高灵敏的无自旋交换弛豫原子磁力仪实现脑磁测量[J]. 中国激光, 2018, 45(12):1204006.
- [6] 李辉,江敏,朱振南,等. 铷-氙气室原子磁力仪系统磁场测量能力的标定[J]. 物理学报, 2019, 68(16):160701.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 杨宝,崔敬忠,缪培贤,等. 自由弛豫信号截取时长对 NMOR 铷原子磁力仪性能的影响[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1):97-104.
- [10] 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.
- [11] 高翔,严胜刚,李斌. 三轴磁通门磁梯度仪转向差校正方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6):1226-1232.
- [12] 董海峰,李继民. 三轴矢量原子磁力仪综述[J]. 导航与控制, 2018, 17(5):18-25.
- [13] ALLDREDGE L R, SALDUKAS I. An automatic standard magnetic observatory [J]. Journal of Geophysical Research, 1964, 69(10):1963-1970.
- [14] ALEXANDROW E B, BALABAS M V, KULYASOV V N, et al. Three-component variometer based on a scalar potassium sensor [J]. Measurement Science & Technology, 2004, 15(5):918-922.
- [15] VERSHOVSKII A K. A new method of absolute measurement of the three components of the magnetic field[J]. Optics and Spectroscopy, 2006, 101(2):309-316.
- [16] PATTON B, ZHIVUN E, HOVDE D C, et al. All-optical vector atomic magnetometer [J]. Physical Review Letters, 2014, 113(1):013001.
- [17] SELTZER S J, ROMALIS M V. Unshielded three-axis vector operation of a spin-exchange-relaxation-free atomic magnetometer [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(20):4804-4806.
- [18] GRAVRAND O, KHOKHLOV A, LE MOUËL J L, et al. On the calibration of a vectorial ^4He pumped magnetometer [J]. Earth Planets and Space, 2001, 53(10):949-958.
- [19] FAIRVEATHER A J, USHER M J. A vector rubidium magnetometer [J]. Journal of Physics E Scientific Instruments, 1972, 5(10):986-990.
- [20] SUN W M, HUANG Q, HUANG Z J, et al. All-optical vector cesium magnetometer [J]. Chinese Physics Letters, 2017, 34(5):058501.
- [21] 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, 481:257-261.
- [22] DING Z C, YUAN J, LONG X W. Design and optimization of a high-sensitivity radio-optical cesium magnetometer [J]. Optics and Laser Technology, 2019, 119:105573.
- [23] 刘坤,张松勇,顾伟. 方形亥姆霍兹线圈磁场系统均匀性分析[J]. 现代电子技术, 2012, 35(7):190-194.

作者简介

陈大勇,高级工程师,主要研究方向为原子磁力仪技术等。

E-mail:gansuhust2010@126.com

缪培贤(通信作者),高级工程师,主要研究方向为原子磁力仪技术等。

E-mail:miaopeixian@163.com