

弱磁计量相关问题的分析

缪培贤, 杨世宇, 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:通过分析采用抽运-检测型铷原子磁力仪和激光抽运的Mz铷光泵磁力仪测量稳定磁场和变化磁场得到的实验结果表明,用功率谱密度方法标定原子磁力仪的灵敏度更科学,进行原子磁力仪设计时最优灵敏度指标不应显著优于稳定磁场的本底磁场噪声水平。对原子磁力仪量程、灵敏度、磁场采样率、交变磁场响应带宽技术指标进行了讨论,对弱磁领域磁场计量工作提出一些建议。

关键词:原子磁力仪;灵敏度;磁场采样率;带宽

中图分类号:O562.3

文献标志码:A

文章编号:1006-7086(2020)06-0494-09

DOI:10.3969/j.issn.1006-7086.2020.06.012

Analysis of Related Problems of Weak Magnetic Metrology

MIAO Peixian, YANG Shiyu, CUI Jingzhong, LIU Zhidong

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

Abstract: By analyzing the experimental results of measuring the stable or changing magnetic field using the pump-probe rubidium atomic magnetometer and the laser-pumped Mz rubidium atomic magnetometer, we show that it is more scientific to calibrate the sensitivity of atomic magnetometer by power spectral density method, and point out that the optimal sensitivity of the designed atomic magnetometers should not be significantly better than the background magnetic noise of the stable magnetic field. This paper discusses the atomic magnetometer's range, sensitivity, magnetic field sampling rate, response bandwidth of alternating magnetic field, and proposes some suggestions for weak magnetic field metrology.

Key words: atomic magnetometer; sensitivity; magnetic field sampling rate; bandwidth

0 引言

工作在地磁场范围内的高性能磁力仪在航天、航空、船舶、兵器等国防工业系统中有比较广泛的应用,因此对该类磁力仪科学规范地标定具有重要意义。目前我国采用Overhauser质子磁力仪进行国内磁感应强度量值的溯源和传递^[1-2],然而该磁力仪除了准确度较高以外,其测量量程、灵敏度、磁场采样率等技术指标均无法满足对高性能原子磁力仪计量检定或标定的要求,导致国内弱磁领域磁场计

量工作存在盲区。例如加拿大GEM公司GSM-19T型号的Overhauser质子磁力仪的量程为20 000~120 000 nT,每4 s读1个磁场值时灵敏度为0.05 nT,分辨率为0.01 nT,磁场采样率 ≤ 2 Hz,可见该质子磁力仪的量程不能覆盖10 000 nT以下的磁场,灵敏度不能反映磁场复现系统的本底噪声,对正弦交变磁场的频响带宽小于1 Hz。如果在磁感应强度基准装置或磁屏蔽筒中复现地磁场量级的标准磁场时采用精度为 10^{-6} 的精密电流源(市场在售的最高

收稿日期:2020-06-02

基金项目:真空技术与物理重点实验室基金(HTKJ2019KL510001)

作者简介:缪培贤,博士,高级工程师,主要从事原子磁力仪技术研究。E-mail:miaopeixian@163.com。

引用本文: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.

MIAO P X, YANG S Y, CUI J Z, et al. Analysis of related problems of weak magnetic metrology[J]. Vacuum and Cryogenics, 2020, 26(6): 494-502.

精度),标准磁场中由电流源噪声引入的本底磁场噪声在 10 pT 量级,然而目前绝大多数原子磁力仪无法准确测量出该本底磁场噪声,反而得出灵敏度远优于 1 pT/Hz^{1/2} 的结论。灵敏度是指仪器测量最小被测量的能力,目前在分析磁力仪灵敏度时行业内较为正确的做法是采用系统噪声方法,系统噪声由功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)标定^[3-4]。本文结合作者前期在原子磁力仪方面的工作^[4-7],通过对抽运-检测型铷原子磁力仪和 Mz 光泵磁力仪实验结果的分析,表明用 PSD 方法标定原子磁力仪的灵敏度更为科学,原子磁力仪的闭环锁频控制方法和参数设置对灵敏度指标的影响十分显著。本文初步给出弱磁传感器计量检定或标定的一些建议。

1 原子磁力仪灵敏度技术指标的标定

抽运-检测型铷原子磁力仪和 Mz 光泵磁力仪的工作原理见参考文献[4-8]。本文主要对相关测试结果进行分析。值得一提的是,文献[4-6]中描述的抽运-检测型铷原子磁力仪的量程为 100~100 000 nT,极限灵敏度为 0.2 pT/Hz^{1/2},最高磁场采样率可达 1 000 Hz,该磁力仪将光抽运、射频场作用、自由弛豫信号探测在时序上分离,在物理上其工作方式与质子磁力仪十分相似,自由弛豫信号代表着原子磁矩对当前时刻待测磁场的被动感知。抽运-检测型铷原子磁力仪闭环锁定可称为被动式跟踪,自由弛豫信号的探测过程避免了抽运光和射频场的干扰,也避免了 Mz 光泵原子磁力仪中用于磁场锁定的主动式比例-积分-微分(PID)的反馈控制,由自由弛豫信号快速傅里叶变换直接得到拉莫尔进动频率的方法实时精确地获得了待测磁场值。不管是基于模拟电路还是数字电路的跟踪式 Mz 光泵磁力仪,其与磁场相关的拉莫尔进动频率是从主动式 PID 反馈控制的高稳晶振或信号源获得,这种跟踪锁定模式并不能实时精确地获得磁场值,磁力仪对外界磁场的快速响应与 PID 反馈控制设定的参数有关。基于以上的认识,分别分析抽运-检测型铷原子磁力仪和 Mz 光泵磁力仪在获得灵敏度技术指标上的差别。

1.1 抽运-检测型铷原子磁力仪灵敏度

文献[4]和[5]中描述了作者项目团队搭建的抽运-检测型铷原子磁力仪实验装置,以及灵敏度标定方法和相关实验结果,灵敏度采用一段时间内磁场测量值的 PSD(取 1 Hz 频点的平均值)来标定,本文引用其中重要的实验结果。实验中采用安捷伦

科技公司的 B2912A 型精密电流源产生待测磁场,电流源精度为 10⁻⁶,当电流输出量程值分别为 1 mA、10 mA、100 mA、1 A 时,分别对应着 1 nA、10 nA、100 nA、1 μ A 的电流分辨率。原子磁力仪测量的磁场由电流源产生,因此电流源的噪声将反映在磁力仪灵敏度测试中。图 1(a)显示了磁力仪灵敏度和线圈电流(*I*)与外磁场大小的依赖关系,灵敏度由特定磁场条件下以 10 Hz 磁场采样率采集 5 min 的磁场数据得到。当 *I* > 100 mA 时,磁力仪灵敏度约为 12 pT/Hz^{1/2},对应电流分辨率为 1 μ A;当 10 mA < *I* < 100 mA 时(图中阴影部分),磁力仪灵敏度约为 1 pT/Hz^{1/2},对应电流分辨率为 100 nA;当 1 mA < *I* < 10 mA 时,磁力仪灵敏度约为 0.2 pT/Hz^{1/2},对应电流分辨率为 10 nA;特殊的是,当 *I* < 1 mA 时,在 50 nT 磁场环境中磁力仪的灵敏度依旧为 0.2 pT/Hz^{1/2},此时对应电流分辨率为 1 nA。综上所述,该抽运-检测型铷原子磁力仪的极限灵敏度为 0.2 pT/Hz^{1/2}。图 1(b)显示了设定磁场约为 10 000 nT 时精密电流源的输出电流,该电流值由计算机中的 LabVIEW 程序直接从 B2912A 仪表读取。如果将电流值乘以线圈系数直接换算为磁场值,再将这些磁场值用 PSD 处理,取 1 Hz 频点附近 11 个值平均后得精密电流源引入的磁场噪声为 12.05 pT/Hz^{1/2},与图 1(a)中用 PSD 方法标定的原子磁力仪的灵敏度 12.36 pT/Hz^{1/2} 相近。图 1(c)和(d)分别是磁场为 5 000 nT 和 6 000 nT 时用原子磁力仪测得的磁场值,产生磁场的电流值分别为 94.8 mA 和 113.9 mA,测量磁场值的峰峰值大约为 23 pT 和 230 pT,可见用原子磁力仪测得的磁场峰峰值与精密电流源输出的电流分辨率是有关联的。从实验结果可以看出,抽运-检测型铷原子磁力仪灵敏度受限于精密电流源引入的磁场噪声,尤其在地磁场范围内由精密电流源引入的本底磁场噪声超过 10 pT/Hz^{1/2}。如果在地磁场下需要将抽运-检测型铷原子磁力仪的灵敏度提高到 0.2 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。

目前国际上除了采用 PSD 方法表征原子磁力仪的灵敏度外,还有文献[9]或产品采用均方根谱(Root Mean Square, RMS)来表征原子磁力仪的灵敏度,如加拿大 SCINTREX 公司的 Cs-3 或 Cs-L 光泵磁力仪产品册上采用 RMS 给出灵敏度。PSD 和 RMS 这两种方法都是从频谱上分析磁力仪测量的稳恒磁场数据,由于两种方法在数学处理上有差别,所以得到的灵敏度也不同。

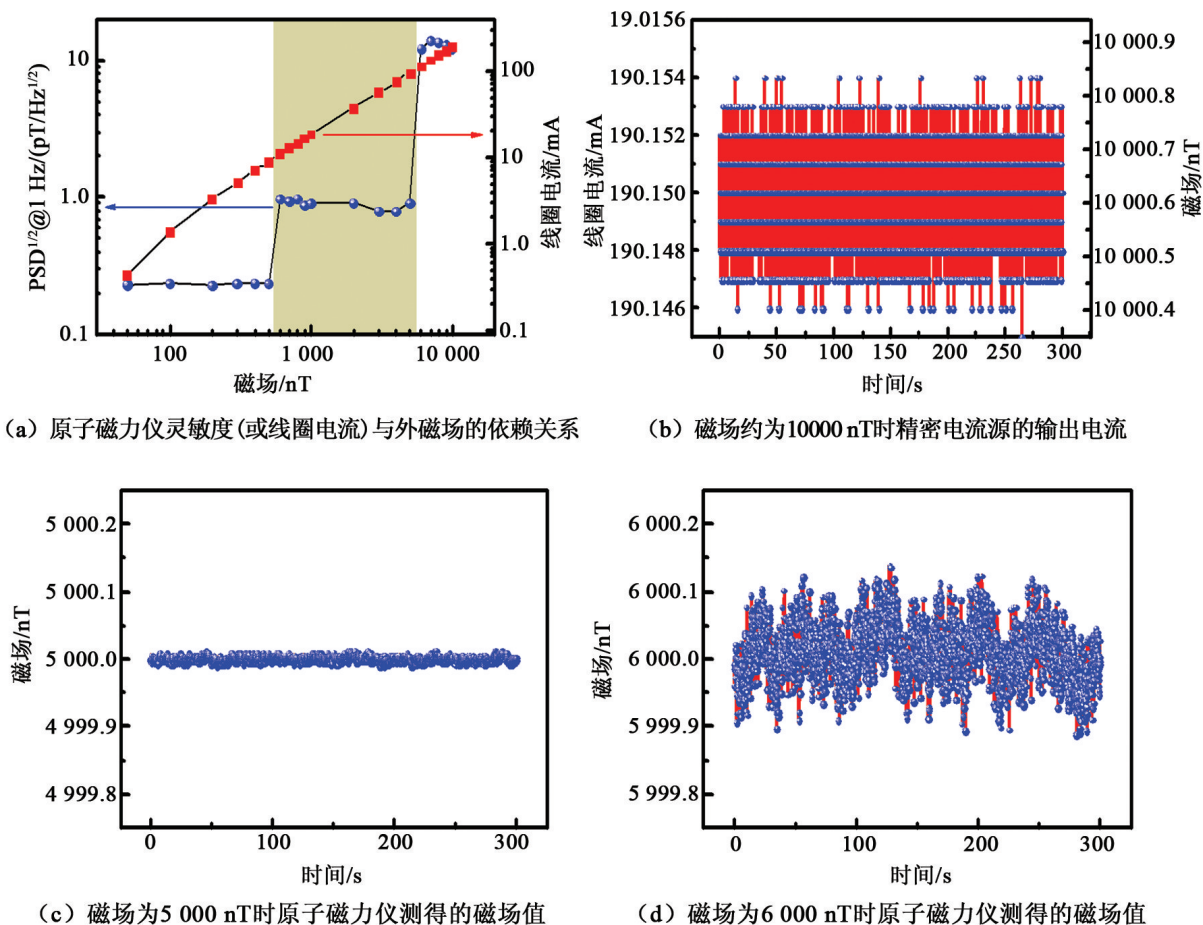


图1 精密电流源噪声对原子磁力仪测量结果的影响

Fig. 1 The influence of noise of precision current source on the measurement results of atomic magnetometer

文献[10]中分析了离散傅里叶变换公式,并介绍了多种类别频谱之间的关系,表达式(1)~(3)列出了幅度谱(AFS,定义符号 A_{AFS})、均方根谱(RMS,定义符号 P_{RMS})、功率谱(PWR,定义符号 P_{PWR})、功率谱密度(PSD,定义符号 N_{PSD})之间关系的表达式,其中AFS的详细表达式见文献[10]。

$$P_{\text{RMS}} = \frac{1}{\sqrt{2}} A_{\text{AFS}} \quad (1)$$

$$P_{\text{PWR}} = P_{\text{RMS}}^2 \quad (2)$$

$$N_{\text{PSD}} = \frac{1}{d} P_{\text{PWR}} \quad (3)$$

表达式(3)中的 d 为频率间隔,表达式(4)给出其物理含义,其中 N 为样本数量(即时域的采样点数), h 为时域采样点之间的时间间隔,其倒数为时域采样率, T_s 为时域的采集时间^[10]。

$$d = \frac{1}{Nh} = \frac{1}{T_s} \quad (4)$$

从式(4)可知,PWR开平方得到RMS,PSD是单位频率间隔内的功率,因此可得出两点结论:第一,

分别用RMS和PSD得到频谱数据的量纲不同,例如处理一段时间的磁场数据,当磁场单位为pT时,RMS单位也为pT,PSD开平方后其单位为pT/Hz^{1/2};第二,须区分信号的性质并选择合适的频谱分析方法,使测量结果独立于时域的采集时间。确定性信号(包括周期信号)是一系列正弦信号的叠加,在频域是离散的信号,分析这类信号适合采用AFS、RMS和PWR方法,采集时间对获取各个频率分量的数值没有影响,而用PSD方法分析时,结果与采集时间有关^[10]。稳定随机信号在频域具有连续的频谱,该信号适宜用PSD方法分析,采集时间对获取各个频率分量的数值没有影响^[10],而根据式(4),采集时间 T_s 越长,频域的频率间隔 d 越小,式(3)中当保持功率谱密度 N_{PSD} 不变,则功率谱 P_{PWR} 随着频率间隔 d 的减小而减小,即功率谱 P_{PWR} 随着采集时间 T_s 的增加而减小,由式(1)和式(2)可知,AFS和RMS也随着采集时间 T_s 的增加而减小。从工程角度来说,研究人员关心的是测量信号通过频谱分析后在频域显示的数值,并希望

不同制造商提供的产品的技术指标能够相互对比,因此选用合适的、统一的频谱分析方法十分重要。

精密电流源输出电流至磁场线圈产生原子磁力仪测量的稳恒磁场,该磁场应被看做是稳定随机信号,不同长时的磁场值用RMS方法和PSD方法处理时,将得到不同的原子磁力仪灵敏度。在10 000 nT

和500 nT磁场下(500 nT磁场测量结果扣除了本底磁场的漂移),用抽运-检测型铷原子磁力仪以10 Hz的磁场采样率采集2 h的磁场数据,分别截取前1 min、5 min、10 min、20 min等时长的磁场数据,然后用RMS方法和PSD方法在1 Hz频点标定灵敏度,实验结果如图2所示。

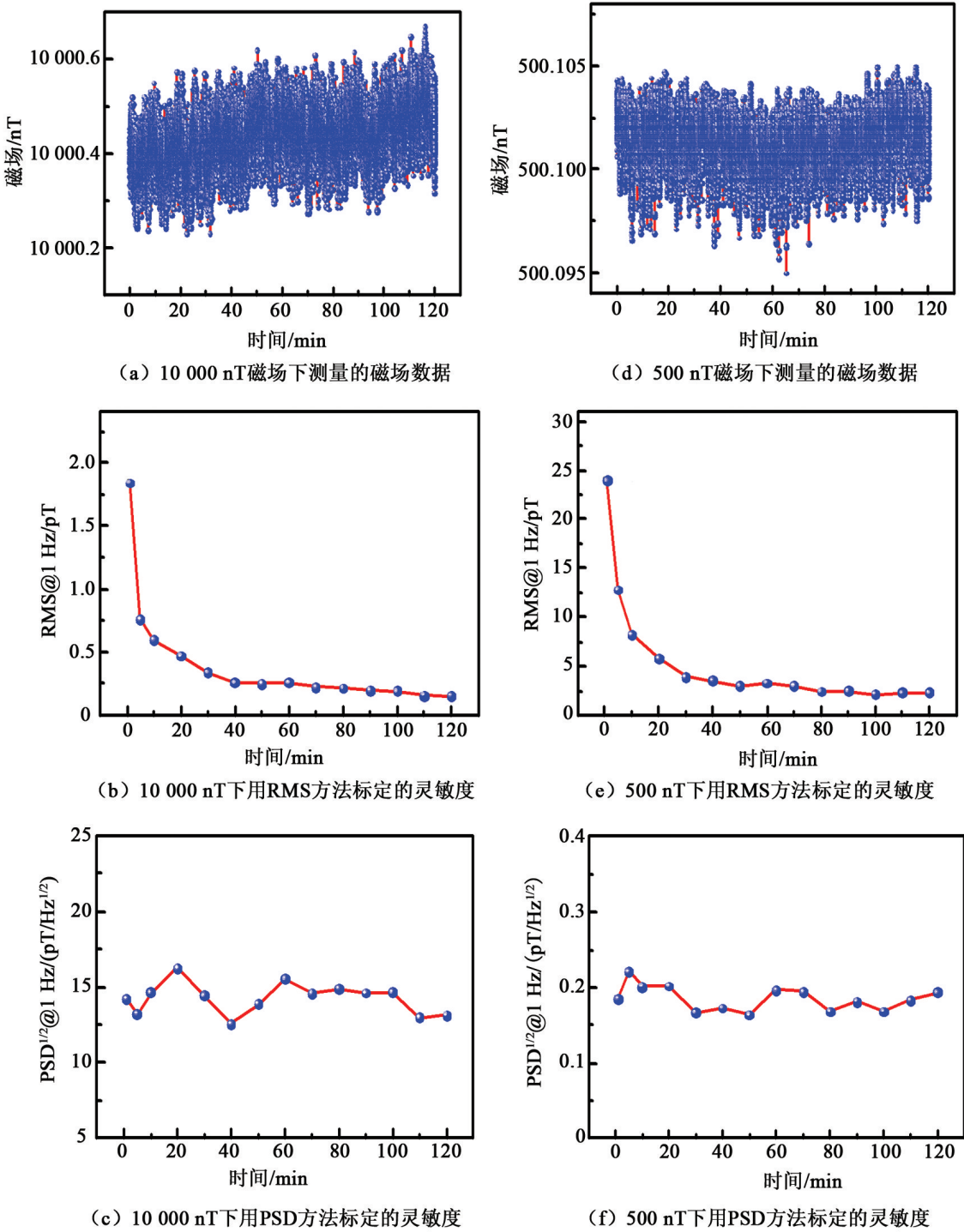


图2 用RMS方法和PSD方法对不同时长磁场数据的处理结果

Fig. 2 Results of processing the magnetic field data of different durations by RMS and PSD methods

由图2(b)和(e)可知,处理越长时间的磁场数据,即采样的数据量越多,采用RMS方法标定得到的灵敏度越高。由图2(c)和(f)可知,采用PSD方法标定的灵敏度与采样数量无关,能够科学地反映原子磁力仪的实际性能。分别对比2 h磁场数据的处理结果,10 000 nT磁场下用RMS方法得到的灵敏度是0.2 pT,用PSD方法得到的灵敏度是13.2 pT/Hz^{1/2};500 nT磁场下用RMS方法得到的灵敏度是2.3 fT,用PSD方法得到灵敏度是0.2 pT/Hz^{1/2},采用这两种方法得到的灵敏度的量纲不同。PSD方法使测量独立于信号持续时间和采样数量,通常用来检测信号的本底噪声,用于表征原子磁力仪的灵敏度时更为科学。

1.2 Mz光泵磁力仪灵敏度

Mz光泵磁力仪是通过扫描射频场的频率测量磁共振吸收峰并锁定至光强最弱位置来确定待测磁场,其跟踪式锁频物理过程需要设计主动式PID反馈控制过程,动态地改变频率变化步长,因此Mz光泵磁力仪并不是实时精确地测量磁场值,而是追踪外界磁场变化的过程。后文用一组实验结果可以说明,由于物理原理和PID反馈控制设计而导致Mz光泵磁力仪对磁场的测量不是实时精确的,可通过牺牲对变化磁场的快速响应而获得远超过本底磁场噪声水平的灵敏度指标。

用激光抽运Mz光泵磁力仪在10 000 nT磁场附近测得的磁共振曲线如图3所示,待测磁场产生装置与抽运-检测型铷原子磁力仪相同。实验中用LabVIEW软件设计了跟踪式锁频物理过程:当大范围扫描频率确定磁共振频率位置后,以该频率为中心频率,频率扫描范围设定为100 Hz,将采集的光检信号数据线性拟合得到斜率,当斜率为正时以固定步长左移,当斜率为负时以固定步长右移,即实现了跟踪式锁频。为了动态改变频率跟踪步长,在LabVIEW程序中引入跟踪步长变化参数。以拟合的斜率值除以跟踪步长变化参数,再乘以固定步长作为新的步长,然后以新步长追踪磁共振频率。实验中设定磁场采样率为5 Hz,固定步长为0.02 Hz。图4显示了不同跟踪步长变化参数条件下Mz光泵原子磁力仪对10 nT突变磁场的锁定过程,当跟踪步长变化参数较小时,原子磁力仪对10 nT突变磁场锁定很快,但稳定时测得的磁场值波动较大;当跟踪步长变化参数变大时,原子磁力仪对突变磁场的锁定变慢,稳定时其磁场值波动较小。从图4(c)中可以看出,不同跟踪步长变化参数条件下10 nT磁场

追踪耗时从1~1 450 s。从实验中可知,锁定状态下光检采集数据的线性拟合斜率大约在10⁻⁸数量级,因此跟踪步长变化参数远大于10⁻⁸数量级时,新步长变得非常小,对磁场的实时跟踪锁定能力变差。

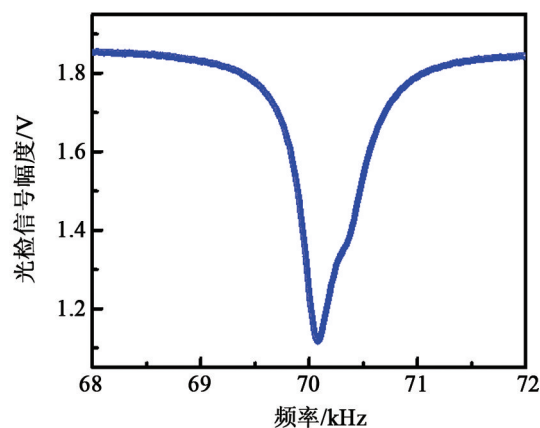


图3 激光抽运Mz光泵磁力仪在10 000 nT磁场附近的磁共振曲线

Fig. 3 Magnetic resonance curve of laser pumped Mz magnetometer when the magnetic field is about 10 000 nT

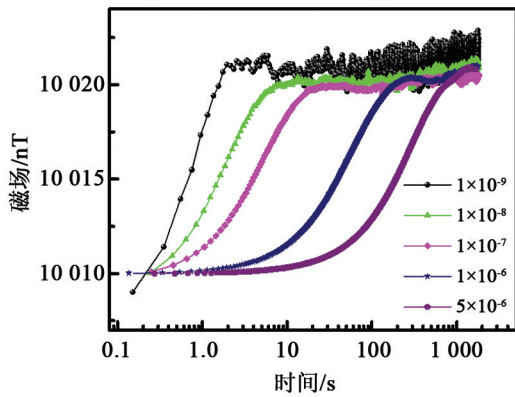
图4(d)给出了用PSD方法得到的磁力仪的灵敏度,随着跟踪步长变化参数的变大,灵敏度提高。图1(a)中显示了灵敏度和精密电流源量程之间的关系,10 000 nT磁场附近精密电流源产生的磁场噪声导致灵敏度约为12 pT/Hz^{1/2},而上述实验中通过减小射频频率扫描的步长使图4(d)阴影部分灵敏度优于12 pT/Hz^{1/2}。因此,如果没有其他技术指标的制约,仅仅从灵敏度指标来看,Mz光泵原子磁力仪可以达到远超过本底磁场噪声水平的灵敏度,但实际上变得“不灵敏”了,表现为对变化磁场的响应变差,这是由其原理和反馈控制的不合理设计而导致的。上述实验是数字化跟踪式Mz光泵磁力仪闭环锁定的一种反馈控制设计方法,通过提高磁场采样率可在一定程度上改善Mz光泵磁力仪对外界变化磁场的响应速度,但不会改变上述结论。

1.3 不同原理原子磁力仪灵敏度对比讨论

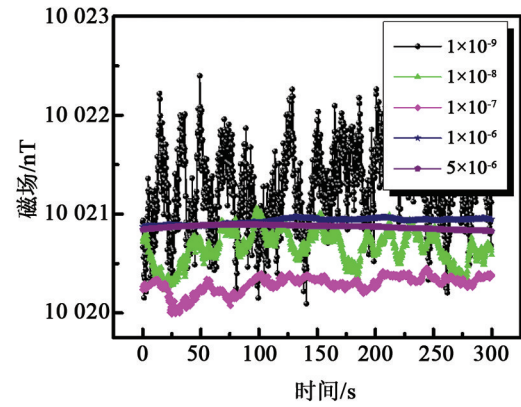
文献[8]综述了几种不同原理的原子磁力仪,其中相干布局囚禁(Coherent Population Trapping, CPT)原子磁力仪和Mz光泵磁力仪都是通过扫描射频场频率并锁定磁共振吸收峰来测量磁场的,这类磁力仪设计时需要考虑闭环锁定磁场的PID反馈控制,不合理的设计会出现磁力仪灵敏度优于复现磁场本底磁场噪声的情况。自激振荡式的Mx光泵磁力仪先对光电探测信号中的交流信号进行相位移动,

然后再把其加在射频线圈上实现闭环锁定,相比 M_z

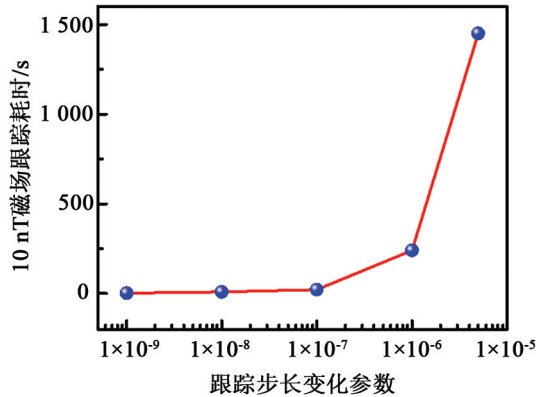
光泵磁力仪具有响应快、噪声低的优点^[8]。



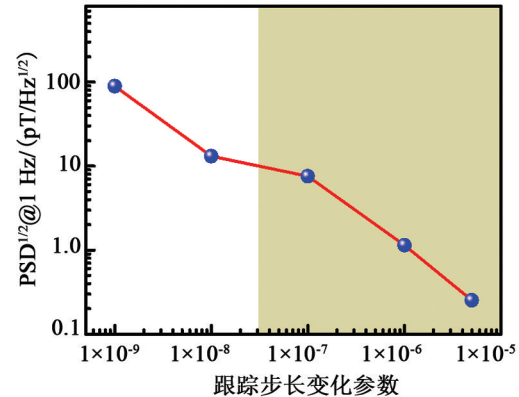
(a) 跟踪锁定过程中磁力仪输出的磁场值



(b) 稳定锁定时300秒的磁场数据



(c) 跟踪锁定耗时与跟踪步长变化参数的依赖关系



(d) 用PSD方法标定的灵敏度与跟踪步长变化参数的依赖关系

图4 不同跟踪步长变化参数下 M_z 光泵磁力仪对 10 nT 突变磁场的响应

Fig. 4 Responses of M_z magnetometer to 10 nT abrupt magnetic field under different parameters for different tracking step variation

M_x 光泵磁力仪工作时有相位锁定的过程^[11-12],也需要设计主动式PID反馈控制,实时动态的锁定使线圈中射频信号的相位和光电探测的拉莫尔进动信号的相位始终相差约 90° 。待测磁场中的高频磁场噪声原理上会导致原子磁矩绕磁场进动的角速度产生动态高频的波动,进而导致光电探测的拉莫尔进动信号的相位产生高频波动,而这种波动信息会被主动式PID反馈控制所抑制,引入类似滤波的效果,且滤波效果与PID反馈控制设定的参数有关。因此当相位锁定环路不足以响应由高频磁场噪声引起的相位波动时, M_x 光泵磁力仪测量的磁场原理上也会丢失复现磁场中的高频磁场噪声,使得 M_x 光泵磁力仪的灵敏度优于复现磁场的本底噪声水平;当相位锁定环路可响应由高频磁场噪声引起的相位波动时, M_x 光泵磁力仪可测量出复现磁场中的高频磁场噪声,给出类似图 1(a) 的实验结果。无自旋交换弛豫 (Spin-Exchange Relaxation Free, SERF)

原子磁力仪工作在零磁场附近,具有较高的灵敏度,但与量程覆盖地磁场的原子磁力仪有本质的差别。文献[4-6]中描述的抽运-检测型铷原子磁力仪将光抽运、射频场作用、自由弛豫信号探测在时序上分离,自由弛豫信号代表着原子磁矩对当前时刻待测磁场的被动感知,由于避免了抽运光和射频场的干扰,该方法实时精确地获得了待测磁场值。由于没有类似 M_z 和 M_x 光泵磁力仪中的主动式PID反馈控制,抽运-检测型铷原子磁力仪测量结果中不丢失待测磁场中的高频本底磁场噪声,能够测量待测磁场中由精密电流源引入的本底磁场噪声,而且能够在开环状态下实现地磁场附近几百甚至上千 nT 波动磁场的测量。

在表征原子磁力仪灵敏度时,除了 PSD 和 RMS 以外,还有本征灵敏度和散粒噪声限表征方式,从文献[5]中可以看出,用本征灵敏度和散粒噪声限在表征原子磁力仪的性能指标时并不准确,在弱磁计量

中应避免使用。文献[3]指出,灵敏度可用分辨率定义,而分辨率是将磁力仪置于足够缓慢变化的磁场中时其相邻两个磁场值的变化量。从图4的测量结果可以看出,采用分辨率定义灵敏度也是不科学的,由于跟踪步长的不合理设计可使分辨率变得很高。

2 原子磁力仪对变化磁场的响应能力

用 M_z 光泵磁力仪、 M_x 光泵磁力仪和CPT原子磁力仪描述对变化磁场的响应能力时引入带宽的概念,带宽越高表示响应越快,通常采用与低通滤波类似的3 dB带宽作为磁力仪的带宽^[3],即从低频逐渐升到高频过程中交变磁场测量幅值衰减约一半时所对应的交变磁场频率。带宽技术指标与磁力仪的磁场采样率是相关的,高磁场采样率是高带宽的前提条件。从图4中 M_z 光泵磁力仪的测量结果可以推断,带宽指标与灵敏度指标相互制约,以不合理主动式PID反馈控制获得很高的灵敏度时,必然导致磁力仪对变化磁场的响应能力变差,带宽指标降低。文献[13]中描述了抽运-检测型铷原子

磁力仪的灵敏度与自由弛豫信号截取时长的依赖关系,表明灵敏度与磁场采样率是相互制约的。因此,弱磁领域磁场计量时应该同时给出原子磁力仪灵敏度、磁场采样率和带宽三个技术指标,才能科学地反映出原子磁力仪的实际性能。

作者报道了抽运-检测型铷原子磁力仪的磁场采样率最高可达到1 000 Hz,可测量100 Hz的交变磁场,而且该原子磁力仪在闭环模式下能够测量 z 轴方向500~100 500 nT内10 000 nT的磁场突变,对应频率跃变为70 kHz^[4-6]的研究结果。抽运-检测型铷原子磁力仪输出的磁场测量值是自由弛豫信号截取时长内实际磁场值的平均值^[13],因此在测量交变磁场时磁场测量幅值也有衰减的情况。图5为抽运-检测型铷原子磁力仪在50 000 nT附近对峰峰值约为100 nT的正弦和方波交变磁场的响应,测量时抽运-检测型铷原子磁力仪处于开环模式,射频激励磁场频率为349.5 kHz,实验中自由弛豫信号截取时长设定为0.5 ms,磁场采样率设定为100 Hz或1 000 Hz,正弦和方波信号由安捷伦33250A信号发生器产生。

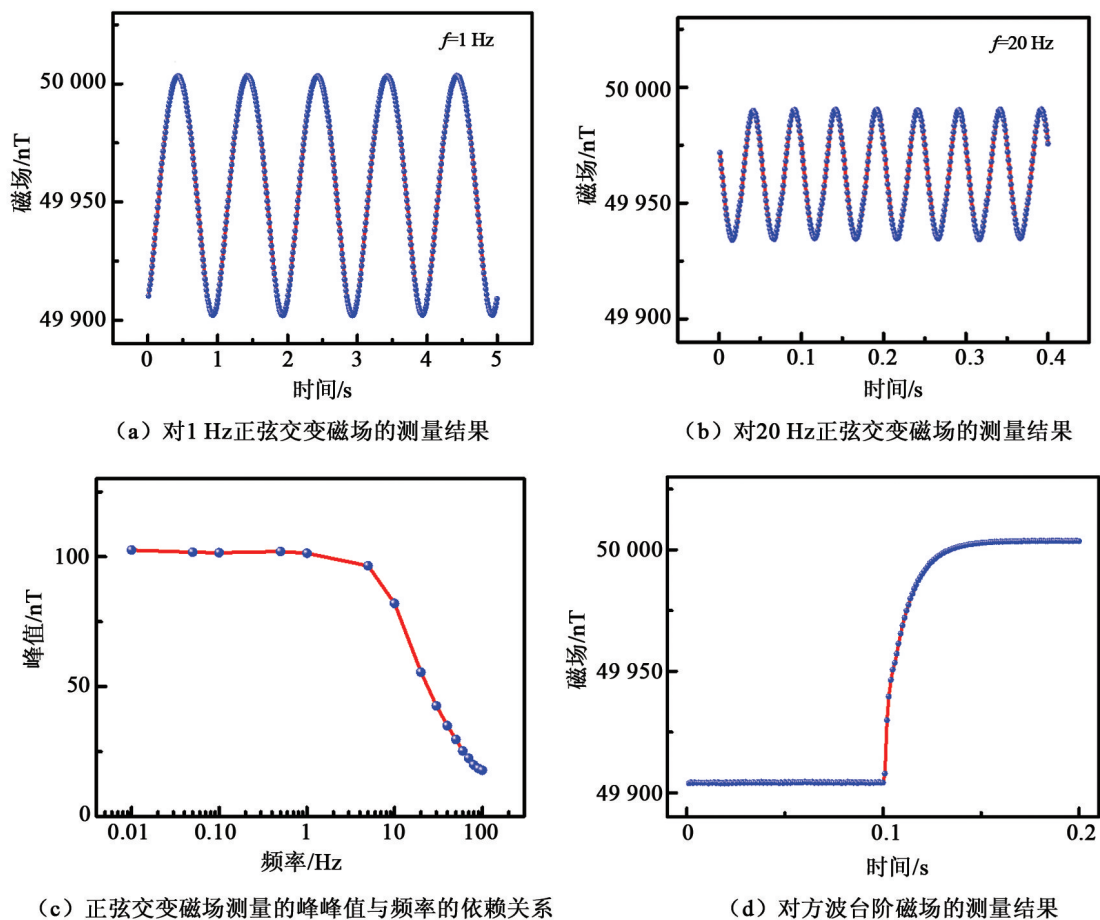


图5 用抽运-检测型铷原子磁力仪在50 000 nT附近对峰峰值约为100 nT的正弦和方波交变磁场的测量结果

Fig. 5 Measurement results of sinusoidal and square-wave alternating magnetic fields with a peak-to-peak value of 100 nT by pump-probe atomic magnetometer near 50 000 nT

图5(a)和(b)给出抽运-检测型铷原子磁力仪对1 Hz和20 Hz正弦交变磁场的测量结果,图5(c)给出磁场测量峰峰值与正弦交变磁场频率的依赖关系,根据带宽的定义,该原子磁力仪对正弦交变磁场的响应带宽为20 Hz。很多研究者也倾向于用测量台阶响应来描述原子磁力仪对变化磁场的响应能力,图5(d)给出抽运-检测型铷原子磁力仪对100 nT突变磁场的台阶响应,方波信号电平突变经历23 ms时测量磁场的变化量达到90 nT,超过60 ms后测量磁场变化量接近100 nT,表明通电线圈瞬间产生磁场时有滞后效应,这与通电线圈的暂态过程有关。对正弦交变磁场响应带宽的测量也应考虑线圈感抗变化的问题,即线圈感抗随着正弦交变信号频率的增加而增加,在正弦交变信号电压幅度不变的条件下,通入线圈的正弦交变电流幅度是逐渐减小的,导致待测正弦交变磁场峰峰值也逐渐减小,因此峰峰值减小并非完全由自由弛豫信号截取时长内实际磁场值的平均而导致。综上所述,描述磁力仪对变化磁场的响应能力时建议同时参考正弦交变磁场和方波磁场的测量结果。

上述实验结果表明,抽运-检测型铷原子磁力仪对变化磁场具有非常好的响应能力,正弦交变磁场响应带宽达到20 Hz。同时也必须指出,实验中采用截取时长很短的自由弛豫信号获得拉莫尔进动频率,实际上是在获得高磁场采样率的同时降低了拉莫尔进动频率测量的准确度,导致测量磁场不准确,这是由于自由弛豫信号快速傅里叶变换中频谱泄漏引入了数据处理误差,对图1和图2磁场数据的处理同样存在频谱泄漏的问题,正在细致地研究自由弛豫信号快速傅里叶变换过程中的频谱泄漏与抽运-检测型原子磁力仪测量准确度和真实分辨率的依赖关系。

3 对弱磁传感器计量检定或标定工作的建议

我国目前在地磁测量领域正处于高性能磁力仪产品的攻关阶段,相关产品在军事磁异反潜、地磁匹配导航、空间磁场探测等领域具有重要的应用,科学的综合技术指标评价体系对该领域的高质量发展尤为重要。基于实验结果的分析,作者建议从以下几个方面考虑对弱磁传感器的计量检定或标定工作:

(1)确定标准磁场复现装置的本底磁场噪声水平。根据目前国际上最高精度的精密电流源噪声估计不同复现磁场范围内的本底磁场噪声,也可采

用文献[4-6]中相同原理的抽运-检测型铷原子磁力仪实现标定。

(2)确定弱磁传感器的测量量程。磁力仪测量范围是一项重要的指标,也是下一步标定灵敏度的重要参考。

(3)采用PSD方法标定弱磁传感器的灵敏度,要求灵敏度不得显著优于本底磁场噪声水平。如果弱磁传感器量程足够宽,测量精度足够高,可考虑参考图1(a)给出不同磁场范围内的灵敏度指标。弱磁传感器灵敏度显著优于本底磁场噪声水平时应考虑主动式PID反馈控制的参数设计是否合理,是否明显降低了弱磁传感器对变化磁场的响应能力。

(4)标定磁场采样率和带宽(或台阶磁场响应速度)技术指标,要求弱磁传感器提升对变化磁场的响应能力。弱磁传感器灵敏度达到本底磁场噪声水平后,不同弱磁传感器可用磁场采样率和带宽(或台阶磁场响应速度)等技术指标评价优劣,磁场采样率指标越高,对变化磁场响应越快,该磁力仪性能指标相对优异。实际上磁场采样率和灵敏度两个技术指标是相互制约的,高磁场采样率一般会导致灵敏度的降低,但待标定弱磁传感器可在不同磁场采样率条件下给出灵敏度的标定结果,兼顾稳定磁场和变化磁场的高精度测量。

以上从量程、灵敏度、磁场采样率、带宽四个技术指标的分析给出了对弱磁传感器计量检定或标定的初步建议,具体开展工作时应考虑与实际应用需求相符。由于各种弱磁传感器原理有差异,相关产品技术指标体系相差较大,例如光泵磁力仪还有分辨率、峰峰值噪声、转向差、死区范围等技术指标^[3],因此可针对特定原理的弱磁传感器编写相应计量检定或标定的标准规范,例如国内已编写了磁通门磁强计校准规范。

4 结论

本文分析了弱磁测量领域原子磁力仪灵敏度远优于复现磁场中磁场噪声水平的两个原因:一是采用RMS方法标定的灵敏度指标优于采用PSD方法标定的灵敏度指标,实际上采用PSD方法标定灵敏度更加科学;另一方面是原子磁力仪由于工作原理的限制丢失了待测磁场中的高频噪声成分,主动式PID反馈控制可能会导致标定的灵敏度优于本底磁场噪声水平,实际上是牺牲了对变化磁场的快速响应能力。因此光泵磁力仪工程化产品研发过程

中不能片面地追求高灵敏度,需要综合分析量程、灵敏度、磁场采样率、带宽等技术指标的相互制约关系。

文献[4-6]中描述的抽运-检测型碱金属原子磁力仪具有宽量程、高灵敏度、高磁场采样率、高带宽的综合性能指标,能够准确测量恒定复现磁场中的噪声,且考虑到其物理工作方式与质子磁力仪十分相似,该抽运-检测型碱金属原子磁力仪是弱磁领域计量级原子磁力仪的有力补充。对磁感应强度量值溯源而言,磁场转化线性度较好的 Overhauser 质子磁力仪具有独特优势,但其量程、灵敏度、磁场采样率、带宽技术指标都无法标定抽运-检测型碱金属原子磁力仪;抽运-检测型碱金属原子磁力仪具有优异的综合性能,但其存在原子核与核外电子角动量耦合带来的非线性效应,测量磁场较大时会引入误差。弱磁计量工作中可以考虑将 Overhauser 质子磁力仪与抽运-检测型碱金属原子磁力仪配合使用,抽运-检测型碱金属原子磁力仪的磁场测量值可被 Overhauser 质子磁力仪在其量程范围内进行修正,然后由抽运-检测型碱金属原子磁力仪完成对其他弱磁传感器技术指标的评价工作,搭建起磁感应强度量值溯源和弱磁传感器技术指标评价之间的桥梁。需进一步指出的是,磁感应强度计量和电流计量应是相互依存、相互促进的关系。国内可考虑建立基于拉莫尔进动效应的电流计量基准,磁感应强度与通入线圈的电流呈线性关系,其中线圈系数溯源至其他量子自然基准,引导国内精度优于 10^{-6} 的电流源的研制,反过来提高磁感应强度的计量精度。弱磁计量实现整个国防系统中磁感应强度量值的溯源和量值的传递,在国防系统中具有重要的意义。殷切期盼本文的观点能够获得弱磁领域磁力仪研究单位和科研工作者的认可和重视,行业内研究人员尽早达成共识,共同推动行业标准的研究和建立,使弱磁测量科学地、高质量地发展。

参考文献:

- [1] 张伟. 磁感应强度基准装置的改进[J]. 计量技术, 2011, 12: 47-49.
- [2] 伏吉庆, 张伟, 贺青. 磁感应强度基准技术评述[J]. 计量学报, 2019, 40(4): 700-703.
- [3] 宗发保, 邹鹏毅, 顾建松, 等. 光泵磁力仪的主要技术指标及测试方法[J]. 声学及电子工程, 2016(2): 44-45.
- [4] 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): 42-51.
- [5] 鄢建强, 崔敬忠, 缪培贤, 等. 原子磁力仪灵敏度标定方法研究[J]. 真空与低温, 2018, 24(4): 259-265.
- [6] 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.
- [7] 杨宝, 缪培贤, 史彦超, 等. 二能级磁共振经典物理图像的理论和实验研究[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1012001.
- [8] 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.
- [9] KOMINIS I K, KORNACK T W, ALLRED J C, et al. A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer[J]. Nature, 2003, 422(10): 596-599.
- [10] 薛大同. 静电悬浮加速度计噪声测试数据的频谱分析方法[J]. 空间科学学报, 2008, 28(1): 55-63.
- [11] GROEGERS, BISON G, SCHENKER J L, et al. A high-sensitivity laser-pumped magnetometer[J]. The European Physical Journal D, 2006, 38: 239-247.
- [12] 李楠, 黄凯凯, 陆璇辉. 提高激光抽运铯原子磁力仪灵敏度的研究[J]. 物理学报, 2013, 62(13): 193-198.
- [13] 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.