

文章编号: 1671-7449(2026)05-0610-07

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(5): 610-616.

用于宽范围集成NV磁强计的实时频率补偿技术

高小琪^{1,2,3}, 贾琪^{1,4}, 王国政^{1,2,3}, 高健¹, 任轩辉^{1,4}, 邢恩博^{2,3}, 马宗敏^{1,4*}

(1. 中北大学 宽禁带半导体超越照明材料与技术全国重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051;

3. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051; 4. 中北大学 半导体与物理学院, 山西 太原 030051)

摘要: 金刚石氮空位(Nitrogen Vacancy, NV)色心集成磁强计在高灵敏度磁场传感领域展现出巨大潜力, 但其动态范围受限于光学探测磁共振解调信号的线性区间宽度, 难以同时满足弱场高精度探测与强场测量需求。为此, 提出了一种实时阈值识别的闭环频率补偿技术: 通过持续监测锁相放大器输出信号, 在磁场引起的频率偏移超过半线性区间阈值时, 自动触发频率补偿, 使磁强计始终稳定工作于线性响应区。实验结果表明, 该方法将磁强计的动态范围从341.4 μT 扩展至4.08 mT, 提升约12倍。在扩展后的全量程内, 系统输出仍保持良好的线性, 拟合优度 $R^2=0.999\ 28$; 并且在保持880.32 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 高灵敏度的同时, 实现了约70 ms的快速响应。在高集成度的基础上, 系统同时具备宽动态范围、高线性度与高灵敏度的优势, 显著提升了NV磁强计在电流检测、材料成像等强场场景中的实用价值。

关键词: NV磁强计; 线性区间; 阈值识别; 宽动态范围

中图分类号: TM937

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026053

引用格式: 高小琪, 贾琪, 王国政, 等. 用于宽范围集成NV磁强计的实时频率补偿技术[J]. 测试技术学报, 2026, 40(5): 610-616.

Gao Xiaopi, Jia Qi, Wang Guozheng, et al. Real-time frequency compensation for wide dynamic range integrated NV magnetometers[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(5): 610-616.

Real-Time Frequency Compensation for Wide Dynamic Range Integrated NV Magnetometers

Gao Xiaopi^{1,2,3}, Jia Qi^{1,4}, Wang Guozheng^{1,2,3}, Gao Jian¹, Ren Xuanhui^{1,4}, Xing Enbo^{2,3}, Ma Zongmin^{1,4*}

(1. State Key Laboratory of Widegap Semiconductor Optoelectronic Materials and Technologies,

North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument,

North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

4. School of Semiconductors and Physics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The diamond nitrogen-vacancy (NV) center integrated magnetometer shows great potential for high-sensitivity magnetic field sensing. However, its dynamic range is limited by the linear interval of the

【收稿日期】2025-11-13

【修回日期】2025-12-29

【录用日期】2025-12-30

【基金项目】国家重点研发计划资助项目(2022YFC2204104); 国家自然科学基金国际合作与交流资助项目(62220106012); 山西省量子传感与精密测量重点实验室资助项目(201905D121001)

【作者简介】高小琪(2001—), 女, 硕士生, 主要从事量子传感与精密测量研究。E-mail: 15103589147@163.com。

*【通信作者】马宗敏(1980—), 男, 教授, 博士, 主要从事量子传感与精密测量研究。E-mail: mzmncit@163.com。

optically detected magnetic resonance (ODMR) demodulation signal, making it difficult to simultaneously achieve high-precision weak-field detection and strong-field measurement. To address this issue, a closed-loop frequency compensation technique based on real-time threshold recognition is proposed. By continuously monitoring the output signal of a lock-in amplifier, the frequency compensation is automatically triggered by this system when the magnetic field-induced frequency shift exceeds half of the linear interval threshold, thereby ensuring that the magnetometer remains stabilized within the linear response region. Experimental results show that the dynamic range of the magnetometer is extended by the proposed method from 341.4 μT to 4.08 mT with an improvement of approximately 12 times. Across the extended full scale, excellent linearity is maintained in system output with a goodness-of-fit $R^2 = 0.999\ 28$, while a fast response time of about 70 ms without compromising the high sensitivity of 880.32 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ is achieved. Based on a highly integrated NV magnetometer platform, the advantages of wide dynamic range, high linearity and high sensitivity are combined in this system to enhance significantly the practical value of NV magnetometers in strong-field applications such as current detection and material imaging.

Key words: nitrogen-vacancy magnetometer; linear interval; threshold recognition; wide dynamic range

0 引言

金刚石氮-空位(Nitrogen Vacancy, NV)色心磁强计作为新一代量子传感技术的代表,凭借其高空间分辨率、高灵敏度和可室温工作等优势,在电池电流测试^[1]、医疗诊断^[2]、磁异常定位^[3]、基础科学^[4]等研究领域展现出广泛应用前景。然而,在实际应用与系统集成过程中,传统基于微波调制和锁相解调的解调方案,其输出信号与磁场强度的线性关系仅在有限区间内保持稳定。一旦待测磁场超出该区间,会导致信号失真和测量失效^[5],严重制约了NV磁强计在复杂电磁环境中的适用性。

为突破NV磁强计动态范围的限制,研究者提出了多种技术路径。现有方法基于不同物理原理和系统设计,大致分为量子相位估计算法^[6-7]、反馈锁定^[8-9]和混合模拟数字控制^[10]三类。Nusran等^[6]在单电子自旋上使用了非自适应相位估计算法,从底层物理层面解决了相位模糊问题,将最大磁场强度和测量精度的比值提升了约8.5倍,但该方法依赖复杂的脉冲序列和后续数据处理,测试速度受限。Wang等^[8]设计了一种基于FPGA和超快跳频可编程微波源的闭环反馈系统,实现了无标度因子下的共振频率跟踪,从而扩展了动态范围,但其性能受限于硬件速度,系统复杂度较高。Hatano等^[10]采用锁相放大器与模拟积分器电路调节微波频率,实现了 $\pm 1\ 000\ \text{A}$ 电

流下的大磁场测量,然而该系统以100 ms周期读取积分器电压判断跳频,存在非实时性与响应延迟问题。综上,现有方法在测量速度、系统复杂度与实时性之间难以兼顾,在保持高集成度的同时无法实现动态大磁场的实时测量。

针对上述问题,本文提出一种实时阈值识别的频率补偿技术。该技术通过实时采集并监测集成NV磁强计的荧光响应信号,识别其偏离线性区间的临界状态,并据此触发快速的微波频率补偿,从而实现对共振点的反馈锁定,确保传感器始终工作于线性响应区间。通过构建闭环控制系统并进行实验验证,证明该方法在保持高灵敏度的同时,NV磁强计的动态范围扩展了约12倍。

1 NV色心磁场测量原理

金刚石NV色心用于磁场精密测量,源于其独特的能级结构。如图1(a)所示,NV色心的基态 $^3\text{A}_2$ 和激发态 ^3E 均具有自旋三重态结构,由自旋能级 $m_s=0$ 和 $m_s=\pm 1$ 构成^[11]。在532 nm激光连续激发下,基态电子跃迁至激发态,随后因量子态不稳定而回落。该过程存在两种路径:一是直接从激发态跃迁至基态,发出637 nm荧光;二是经由亚稳态回到基态,此过程不发出可见光^[12]。由于电子从 $m_s=\pm 1$ 态经亚稳态回到基态 $m_s=0$ 的概率更高,因此在激光激发时, $m_s=\pm 1$ 态所对应的荧光计数低于 $m_s=0$ 态,这一荧光计数差异是实现NV自旋态极化与读取的物理原理基础。

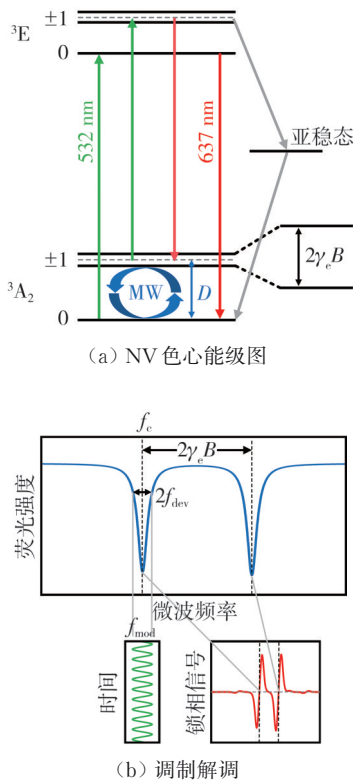


图1 NV 色心测磁原理

Fig. 1 NV centers energy level diagram and magnetic measurement principle

无外磁场时,基态中 $m_s=0$ 与 $m_s=\pm 1$ 能级之间存在 $D=2.87$ GHz的零场劈裂,且 $m_s=\pm 1$ 与 $m_s=-1$ 态处于简并状态。施加外磁场后,简并的 $m_s=\pm 1$ 态发生塞曼分裂^[13],两个态之间的能级差 Δf 与外部磁场 B 满足以下关系(见式(1)),通过测量 Δf 即可反推得到磁场 B 的数值^[14]。

$$\Delta f = 2\gamma_e B, \quad (1)$$

式中: γ_e 为电子旋磁比,为 2.8×10^4 MHz/T。

实验中常采用连续波光探测磁共振(Optically Detected Magnetic Resonance, ODMR)方法进行磁场测量:使用532 nm激光连续激发金刚石,同时施加连续的微波信号扫描并同步采集荧光输出。该方法得到的典型ODMR谱线如图1(b)上图所示。然而,在监测时变磁场时,ODMR方法存在明显不足:由于需要扫描整个频谱范围,大量时间被耗费在非共振区域^[15-16],导致系统响应迟缓,难以实现动态磁场的实时探测。

为解决该问题,本文采用微波调制技术对施加于金刚石的微波信号进行频率调制,调制深度为 f_{dev} ,调制频率为 f_{mod} ,再通过锁相放大器进行解调。该方法不仅能有效抑制低频噪声,还可提升

系统信噪比与灵敏度^[17]。解调后得到的信号如图1(b)下图所示。将微波源频率固定在解调信号斜率最大处的零点,可使磁强计对外磁场的变化最为敏感。在解调信号的线性区间内,可通过式(2)快速计算磁场值^[18],从而显著提高信号提取速度与系统响应带宽。

$$B = \frac{I}{\gamma_e \max \left| \frac{dI}{df} \right|}, \quad (2)$$

式中: I 为荧光响应电流值; $\max \left| \frac{dI}{df} \right|$ 为解调信号的最大斜率。

2 系统搭建

2.1 实时频率补偿技术

在调制解调的基础上,可利用解调信号的线性区间进行磁场测量。当外部磁场变化所引起的NV色心频率偏移处于该区间内时,磁场与荧光响应之间呈线性关系,对应的磁场变化范围即为NV磁强计的固有动态范围。然而,该范围受限于线性区间的宽度,一旦NV色心频率偏移超出该区间,信号将进入饱和区,导致输出动态范围非线性。

对磁场引起的频率偏移进行实时补偿可实现动态范围的线性扩展。基于线性区间内频率偏移 f 与荧光响应 I 之间的转换关系 $\left| \frac{dI}{df} \right|$,通过实时采集的荧光响应值可计算出当前磁场下的解调信号零点,即新的共振频率。设磁强计初始定频点为 f_1 ,新共振频率为 f_2 ,则

$$f_2 = f_1 + \frac{I}{\left| \frac{dI}{df} \right|}. \quad (3)$$

系统将计算所得的频偏值与 f_1 叠加后反馈至微波源,实现频率自动更新,从而避免信号饱和,扩展测量范围。

然而,由于定频信号本身存在nA级波动,若在无实际磁场变化的情况下直接根据实时波动连续计算频偏并补偿频率,将导致工作点的累积偏移,引入额外测量误差。为此,本文将实时频率偏移量超过阈值 H 作为触发补偿的条件。如图2

所示,解调信号的半个线性区间宽度为 3.5 MHz, H 需小于该宽度,故将其设置为 3 MHz。该阈值机制仅在频偏超限时触发补偿,既能在临界状态下快速将工作点恢复至有效范围,又可有效抑制因信号波动引起的误触发,从而在扩展动态范围的同时,保障系统的抗干扰能力与测量可靠性。

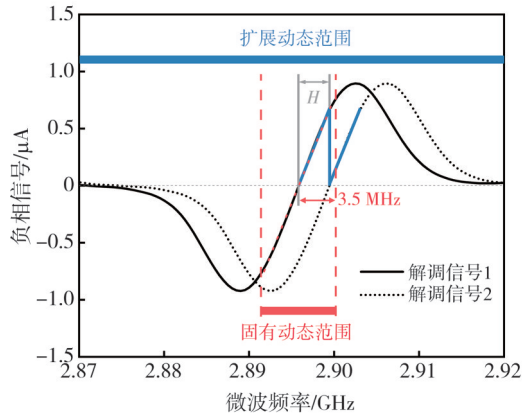
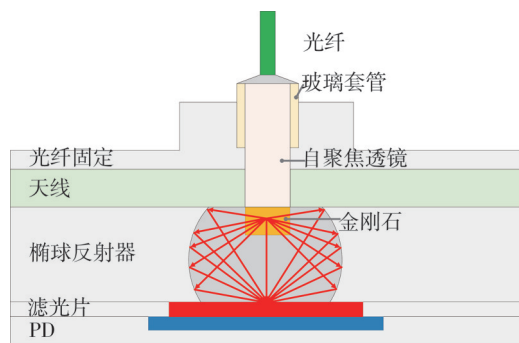


图 2 扩展动态范围原理

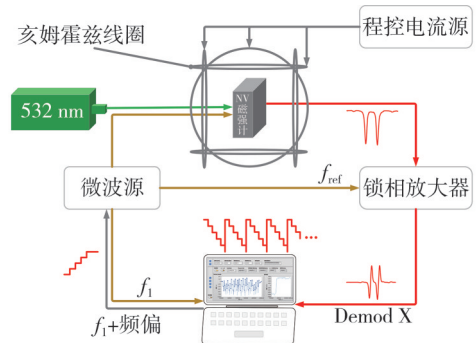
Fig. 2 Principle of expanding dynamic range

2.2 测试平台搭建

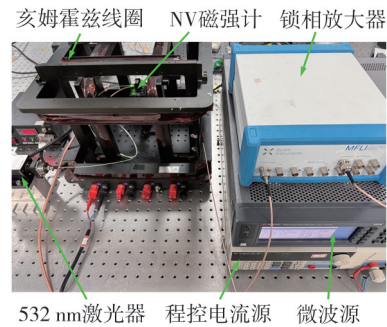
为验证所提技术在集成化磁强计中的实际性能,研制了一款紧凑型集成 NV 磁强计,其结构如图 3(a) 所示。该磁强计将光纤、自聚焦透镜、金刚石、天线板、椭球反射镜、滤光片及光电探测器集成于一体,整体尺寸为 20 mm×20 mm×9.08 mm。激光经光纤耦合器 (PAF2-A4A, Thorlabs) 传输至光纤-自聚焦透镜模块,形成准直光束均匀激发金刚石。金刚石样品置于 20 mm×20 mm 的微波天线板表面,其受激发射的荧光由高反射率纯铝椭球反射镜(长度 4.48 mm)反射并聚焦至光电探测器 (PDB-C609-2, Advanced Photonix Inc)。最终,光电探测器输出的电流信号送入锁相放大器进行实时监测与分析。



(a) 集成磁强计结构图



(b) 闭环测试系统



(c) 实验装置

图 3 NV 磁强计结构及磁场测试系统

Fig. 3 NV magnetometer structure and magnetic field testing system

将集成 NV 磁强计置于三轴亥姆霍兹线圈中心,与激光器(MGL-III-532-100 mW, 长春)、微波源(N5181B, Keysight)、锁相放大器(MFLI, Zurich Instruments)、程控电流源(ZY6952)及上位机构建闭环测试系统,系统架构如图 3(b) 所示。在磁强计完成初始定频后,通过程控电流源驱动三轴亥姆霍兹线圈产生时变磁场,以系统评估 NV 磁强计动态测量性能,实验装置如图 3(c) 所示。

3 实验与结果

3.1 磁强计标定

本节对集成磁强计进行了系统测试标定。在激光器输出功率 75 mW、微波功率 30 dBm 的工作条件下,通过程控电流源向三轴亥姆霍兹线圈施加 1.0 A 电流,以产生均匀偏置磁场,获得如图 4(a) 上图所示的 ODMR 信号。经多次测试确定最优调制参数:调制深度 8 MHz、调制频率 500 Hz 时,解调信号斜率最大,结果如图 4(a) 下图所示。

将微波源频率固定于解调信号最大斜率对应的零点位置(2.896 08 GHz),该点所在线性区间斜率为 0.241 85 $\mu\text{A}/\text{MHz}$ 。随后通过程控电流源

改变线圈电流,从0.7 A起始,以0.02 A为步长、10 s为间隔逐步增加至1.3 A,以表征磁强计的固有动态范围。测量结果如图4(b)所示,当电流在 ± 0.18 A范围内变化时(以1.0 A为定频点),系统响应保持良好的线性关系($R^2=0.9989$),对应的磁强计固有动态范围为 $341.4 \mu\text{T}$ ($\pm 170.7 \mu\text{T}$)。

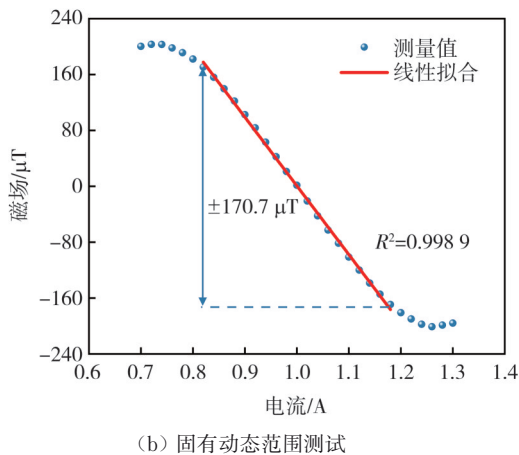
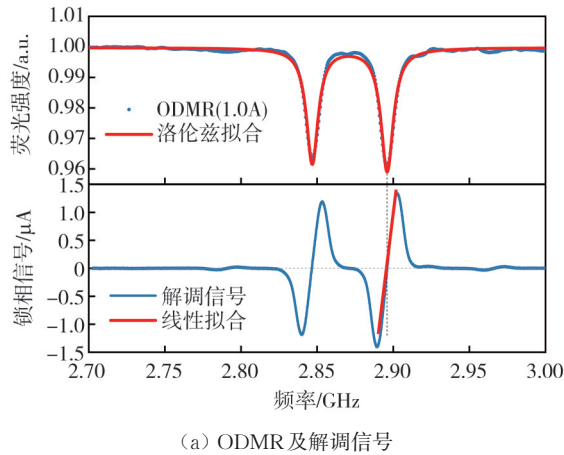


图4 NV磁强计固有动态范围测试结果图

Fig. 4 NV magnetometer intrinsic dynamic range test result chart

3.2 实时扩展动态范围测试

系统响应时间是评估磁强计动态磁场测量性能的关键参数。在实际测试中,解调信号从达到阈值至恢复工作零点的过程受以下因素共同影响:程控电流源的切换稳定时间、光电转换与解调时间,以及数字处理与微波源频率切换时间。

为准确测量系统对动态磁场的响应时间,通过程控电流源以0.02 A步进调节亥姆霍兹线圈电流,观察系统响应。磁强计初始定频于X轴线圈通1.0 A时,随电流逐步增加至约1.12 A时,频率偏移超过设定阈值 H ,系统触发频率调整使解

调信号回到零点。通过对20次频偏超限至补偿完成的过程进行统计分析,如图5(a)左下角放大图所示,测得从电流改变到成功切换频率的总时长约为0.176 s。各阶段平均耗时为:电流切换稳定时间 $t_1=0.065$ s,光电转换解调时间 $t_2=0.041$ s,频率补偿系统本身的响应时间 $t_3=0.070$ s。作为对比,如图5(b)所示,手动调节微波源频率不仅无法实现实时响应与补偿,还会在切换过程中引入明显的信号扰动,且单次操作耗时约4.1 s。

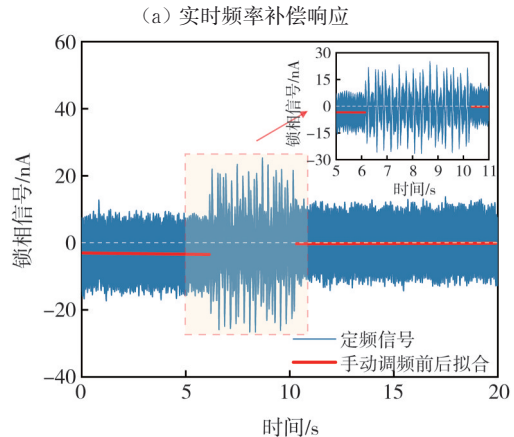
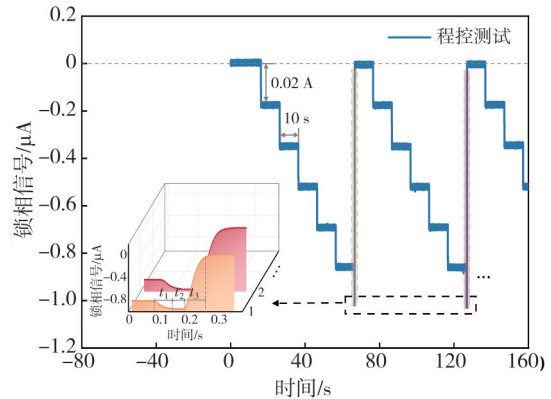


图5 系统性能测试

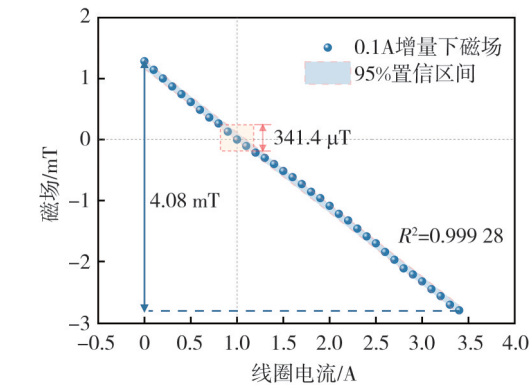
Fig. 5 System performance test results

相比之下,基于上位机的阈值触发切换机制具有更快的响应速度,且不会引入额外系统噪声。该实时频率补偿方案在实现闭环频率跟踪的同时,支持对锁相放大器与微波源的远程控制,有效解决了手动设置参数存在的效率低与稳定性差的问题。

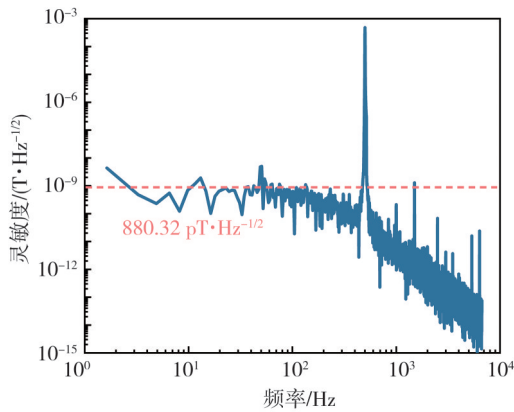
如图5(a)所示,在0.02 A电流步进条件下,系统已展现出良好的实时频率补偿与线性测量能力。为进一步验证其在大范围磁场变化下的适用性,进行了更大步长的测试:在磁强计初始定频于工作零点后,以每10 s增加0.1 A的步长调节线圈电流,测

试其在 0~3.4 A 电流范围内的响应。

随着线圈驱动电流的增大,每步 0.1 A 的电流变化所对应的磁场变化在磁强计固有动态范围的半个线性区间(170.7 μT)内,在超过 3 MHz 的频率偏移时,系统均能通过实时采集的荧光响应值计算出当前频偏,并自动触发频率补偿,使信号重新回归零点,从而持续实现线性磁场测量。通过汇总每 10 s 间隔内采集的荧光响应均值,并依据式(2)进行换算,得到如图 6(a) 所示的扩展测量结果。该结果表明,磁强计在线圈电流 0~3.4 A 内变化时,输出保持良好线性($R^2=0.999\ 28$),动态范围被成功扩展至 4.08 mT ($-2.80\sim+1.28\text{ mT}$),显著提升了其在大磁场变化场景中的适用性。



(a) 程控电流源大范围变化磁场测试



(b) 灵敏度

图 6 动态范围扩展测试及灵敏度

Fig. 6 Dynamic range extension test results and system sensitivity

磁强计的灵敏度是衡量其磁场探测能力的关键指标。在连续波检测方法中,灵敏度定义为传感器在单位时间内能够分辨的最小磁场变化。当外磁场方向与 NV 色心晶轴方向一致时,其磁场探测灵敏度公式为^[18]

$$\eta = \frac{\sigma_B}{\sqrt{ENBW}} \approx \frac{ASD}{\max \left| \frac{dI}{df} \right| \gamma_e}, \quad (4)$$

式中: σ_B 为磁强计整体系统噪声; $ENBW$ (Equivalent Noise Bandwidth) 为系统等效噪声带宽; ASD (Amplitude Spectral Density) 为 ODMR 解调信号的振幅谱密度,可通过锁相放大器进行测量。借助式(4)计算灵敏度,如图 6(b) 所示,系统灵敏度为 $880.32\text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

表 1 将应用该技术后磁强计的灵敏度与已有集成 NV 磁强计进行了对比。由表 1 可知,在引入实时频率补偿后,系统仍保持高灵敏的优势。

表 1 灵敏度对比

Tab. 1 Sensitivity comparison

文献来源	灵敏度/(nT·Hz ^{-1/2})
[8]	4.2
[14]	9.6
[19]	2.5
[20]	2.14
本文	0.880 32

实验结果表明,该技术不仅扩展磁强计动态范围,还在保持高灵敏度的情况下,显著提升了测量线性度——拟合优度 R^2 由 0.998 9 提高至 0.999 28。该提升得益于阈值触发机制的双重优势:仅当实时频偏超阈值才触发补偿,避免连续调节引入噪声;通过规避线性区间边缘的非线性区,确保传感器始终工作于稳定中心区,从而将宽范围测量转化为多个高线性度片段的优化组合。该频率补偿方法在扩展动态范围的同时优化了系统整体测量质量,在精密测量中展现出显著优势。

4 结 论

本文提出了一种实时阈值识别的频率补偿技术,通过构建上位机与锁相放大器、微波源的闭环控制系统,成功实现了集成 NV 磁强计动态范围的扩展。综合性能测试表明:该技术将磁强计的动态范围从 341.4 μT 扩展至 4.08 mT,提升了约 12 倍,并在全量程内保持了良好的线性响应($R^2=0.999\ 28$),从而有效解决了强场测量难题。在实现范围扩展的同时,系统仍具备 $880.32\text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的高灵敏度,响应时间约为 70 ms。该方案未增加硬件复杂度,且有效避免了手动调频引入的信号干扰,为 NV 磁强计在动态宽场环境中的实际应用提供了一种高效且可靠的技术途径。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] Hatano Y, Tanigawa J, Nakazono A, et al. A wide dynamic range diamond quantum sensor as an electric vehicle battery monitor[J]. Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2024, 382(2265): 20220312.
- [2] Arai K, Kuwahata A, Nishitank D, et al. Millimetre-scale magnetocardiography of living rats with thoracotomy [J]. Communications Physics, 2022, 5: 200.
- [3] Gao J, Zhao J, Ma Z, et al. Magnetic sensitivity technology based on microwave modulation of solid state spin system NV center [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2018, 9(2): 188-193.
- [4] Schirhagl R, Chang K, Loretz M, et al. Nitrogen-vacancy centers in diamond: nanoscale sensors for physics and biology[J]. Annual Review of Physical Chemistry, 2014, 65: 83-105.
- [5] Clevenson H, Pham L M, Teale C, et al. Robust high-dynamic-range vector magnetometry with nitrogen-vacancy centers in diamond [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(25): 252406.
- [6] Nusran N M, Momeen M U, Gurudev Dutt M V. High-dynamic-range magnetometry with a single electronic spin in diamond [J]. Nature Nanotechnology, 2012, 7(2): 109-113.
- [7] Herbschleb E D, Kato H, Makino T, et al. Ultra-high dynamic range quantum measurement retaining its sensitivity[J]. Nature Communications, 2021, 12: 306.
- [8] Wang C, Liu Q, Hu Y, et al. Realization of high-dynamic-range broadband magnetic-field sensing with ensemble nitrogen-vacancy centers in diamond [J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(1): 015109.
- [9] Kumar H, Dasika S, Mangat M, et al. High dynamic-range and portable magnetometer using ensemble nitrogen-vacancy centers in diamond [J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95(7): 075002.
- [10] Hatano Y, Shin J, Tanigawa J, et al. High-precision robust monitoring of charge/discharge current over a wide dynamic range for electric vehicle batteries using diamond quantum sensors [J]. Scientific Reports, 2022, 12: 13991.
- [11] Ma Y, Rohlfing M, Gali A. Excited states of the negatively charged nitrogen-vacancy color center in diamond [J]. Physical Review B, 2010, 81(4): 041204.
- [12] Acosta V M, Jarmola A, Bauch E, et al. Optical properties of the nitrogen-vacancy singlet levels in diamond[J]. Physical Review B, 2010, 82(20): 201202.
- [13] Acosta V M, Bauch E, Ledbetter M P, et al. Diamonds with a high density of nitrogen-vacancy centers for magnetometry applications [J]. Physical Review B, 2009, 80(11): 115202.
- [14] Liu Y, Liu Z, Li Y, et al. The fiber self-focusing integrated nitrogen vacancy magnetometer [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1501908.
- [15] Maertz B J, Wijnheijmer A P, Fuchs G D, et al. Vector magnetic field microscopy using nitrogen vacancy centers in diamond [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(9): 092504.
- [16] 付江豪, 任轩辉, 杨应杰, 等. 用于集成NV磁强计的高稳定和高灵敏度微波天线[J]. 测试技术学报, 2025, 39(5): 592-598.
Fu Jianghao, Ren Xuanhui, Yang Yingjie, et al. Highly stable and sensitive microwave antenna used for integrated NV magnetometer[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(5): 592-598. (in Chinese)
- [17] El-Ella H A R, Ahmadi S, Wojciechowski A M, et al. Optimised frequency modulation for continuous-wave optical magnetic resonance sensing using nitrogen-vacancy ensembles[J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14809-14821.
- [18] Liu X, Zheng D, Zhao J, et al. Improvement of excitation and collection efficiency simultaneously with integrated Au coatings for chip-scale NV magnetometer[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 352: 114206.
- [19] Zhu Y, Wang K, Yu Z, et al. Multimodal sensing based on nitrogen-vacancy center ensembles in deep-sea environments [J]. Diamond and Related Materials, 2025, 157: 112521.
- [20] Dai Y, Tian W, Liu Q, et al. A fully-integrated diamond nitrogen-vacancy magnetometer with nanotesla sensitivity [J]. Advanced Quantum Technologies, 2025, 8(4): 2300438.