

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2025.02.010

金刚石 NV 色心的矢量磁场测量方法研究

汤晨晨^{1,2,3}, 付江豪^{1,2,3}, 郑斗斗^{1,2}, 杨应杰^{1,2,3}, 高健^{1,2}, 郭浩^{1,2},
李中豪^{1,2}, 马宗敏^{1,2,3}, 张晓明^{1,2}, 唐军^{1,2,3}, 刘俊^{1,2}

- 中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室, 太原 030051;
- 中北大学量子传感与精密测量山西重点实验室, 太原 030051;
- 中北大学半导体与物理学院, 太原 030051)

摘要:在地磁导航技术中, 矢量测量技术提供了比标量测量技术更多的信息, 例如角度和方向等。近年来, 基于金刚石氮空位(NV)色心的量子传感技术在矢量场检测领域, 因具有高灵敏度、高空间分辨率和全固态等优点而被广泛关注。然而, 由于平台的局限性, 无法用于移动式测量和外场测量。为了解决这一问题, 提出了一种便携式小型集成 NV 矢量磁强计, 并采用多通道、同时锁频方法实现三轴矢量磁场测量。该方法可以同时测量 NV 色心中磁场的三个笛卡尔分量, 并从收集到的荧光信号中提取和所有 NV 轴相关的自旋共振位移, 用于矢量磁场测量。实验结果表明, 磁强计的噪声峰峰值为 X 轴 0.114 nT, Y 轴 0.106 nT 和 Z 轴 0.093 nT, 与理论值相比, 误差在 1%~4% 之间。

关键词: 固态自旋; 金刚石氮空位(NV)色心; 集成磁强计; 矢量分析; 磁性检测

中图分类号: TP212

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2025)02-0093-09

Study on vector magnetic field measurement of diamond NV color centers

TANG Chenchen^{1,2,3}, FU Jianghao^{1,2,3}, ZHENG Doudou^{1,2}, YANG Yingjie^{1,2,3}, GAO Jian^{1,2},
GUO Hao^{1,2}, LI Zhonghao^{1,2}, MA Zongmin^{1,2,3}, ZHANG Xiaoming^{1,2}, TANG Jun^{1,2,3}, LIU Jun^{1,2}

- State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
- Shanxi Province Key Laboratory of Quantum Sensing and Precision Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China;
- School of Semiconductors and Physics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In geomagnetic navigation technology, vector measurement techniques provide more information than scalar measurement techniques, such as angle, direction. Quantum sensing technology based on nitrogen-vacancy (NV) color centers in diamond has attracted much attention in recent years for its advantages of high sensitivity, high spatial resolution, and all-solid-state in vector field detection. However, due to platform limitations, mobile and external field measurements cannot be performed. To solve this problem, a portable compact integrated NV vector magnetometer is proposed, and a multi-channel and simultaneous frequency locking method is adopted for triaxial vector magnetic field measurement. This method can simultaneously measure all the

收稿日期: 2024-10-09; 修订日期: 2025-02-12

作者简介: 汤晨晨(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事量子传感方面的研究。

通信作者: 马宗敏(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事量子传感与精密测量方面的研究。

Cartesian components of the magnetic field in the NV color centers, and extract the spin resonance displacements associated with all the NV axes from the collected fluorescence for vector magnetic field measurement. The experimental results show that the peak-to-peak noise values of the magnetometer are 0.114 nT on the X-axis, 0.106 nT on the Y-axis and 0.093 nT on the Z-axis, with errors between 1% and 4% compared to the theoretical values.

Key words: Solid-state spin; Nitrogen-vacancy (NV) color center; Integrated magnetometers; Vectors analysis; Magnetic detection

0 引言

地磁导航技术,作为一种无需依赖外部信号源的定位技术,正随着科技的不断进步和需求的日益增长而逐渐发展成熟。该技术依赖于高精度的矢量磁场测量来实现定位和导航功能^[1]。然而,它常常面临来自周围环境(如建筑物、电气设备等)的磁场干扰,这些干扰可能会对导航的准确性产生影响。金刚石氮空位(nitrogen-vacancy, NV)色心磁传感技术凭借其高灵敏度^[2-3]和高空间分辨率^[4]的独特优势,能够帮助导航系统更准确地感知地磁场的变化。NV色心独特的晶体结构(C_{3v} 对称结构)使其在矢量磁场测量和正交性方面更具优势,能够提供更高精度的矢量磁场测量结果。此外,NV色心磁强计具有全固态^[5]特性,确保了其在复杂环境中的稳定性和可靠性。将这一技术应用于地磁导航领域,可有效推动地磁导航技术向更高精度和更广泛应用的方向发展。事实上,NV色心磁强计在地磁导航领域^[6-7]已得到了初步的应用。

目前,高性能的NV矢量磁强计均是基于平台进行操作,这限制了移动式测量和外场测量的应用。尽管一些NV色心磁强计已经实现了便携与矢量性能的集成,但其采用的矢量检测方法为传统的扫频方式^[8],该方法在频率精度和停留时间等方面存在限制,导致检测速度相对较慢。也有如刘振华等^[9]和Newman等^[10]采用跳频方式进行矢量磁场的测量,虽然这种方式能够感测静态或缓慢变化的磁场,但当磁场的变换速度超过跳频时间时,会造成解算结果的不准确。

本文展示了一种便携式NV矢量磁强计,磁强计大小为65.51 mm×61.8 mm×163.37 mm。该NV矢量磁强计实现了从实验室系统到实际环境中磁场检测的应用转变。通过采用多通道、同时锁频的方法,能够测量所有笛卡尔磁场分量,进而重建完整的磁场矢量。将其测量结果与经过计量的三

轴线圈产生的磁场理论值进行对比,发现其误差在1%~4%之间,实现了高准确性的测量。同时,其三轴噪声峰峰值分别达到:X轴0.114 nT,Y轴0.106 nT和Z轴0.093 nT,进一步证明了其出色的性能。

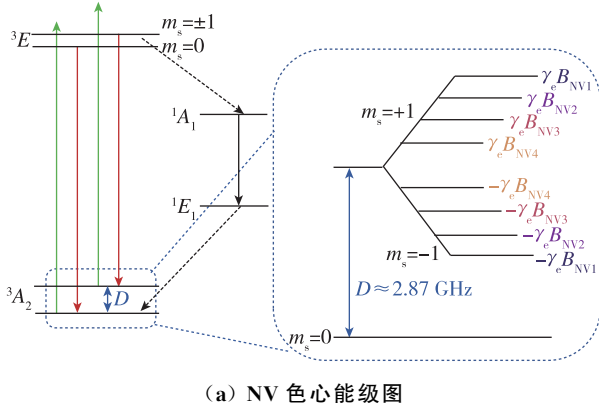
1 NV色心的晶格和能级

NV色心是一种原子尺度的缺陷,由取代碳原子(C)的氮(N)原子与附近的空穴形成^[11]。每个NV色心在金刚石晶体中都具有4种可能的取向^[9],即 $[1\ 1\ 1]$, $[1\ \bar{1}\ \bar{1}]$, $[\bar{1}\ 1\ \bar{1}]$, $[\bar{1}\ \bar{1}\ 1]$,这种对称性不仅决定了NV色心的能级结构,还在缺陷的光学特征表现方面扮演着重要的角色。NV色心通常存在2种电荷态,中性的 NV^0 和带负电荷的 NV^- ,其中 NV^- 色心更适用于量子传感应用。

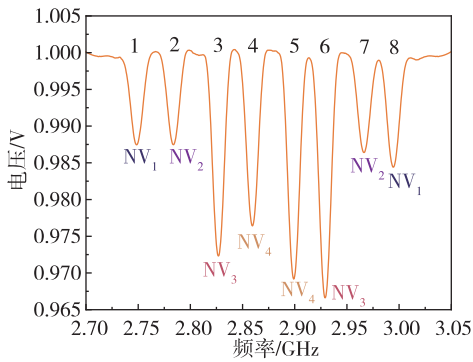
NV色心的能级包括1个三重态基态(3A_2)、1个三重态激发态(3E)和2个亚稳态(1A_1 和 1E)^[12],如图1(a)所示。基态 $m_s=0$ 与 $m_s=\pm 1$ 之间存在零场劈裂 $D\approx 2.87$ GHz。在有外界磁场的情况下, $m_s=\pm 1$ 态发生劈裂,劈裂能级差与外界磁场呈线性关系。NV色心在绿色泵浦光的作用下会从基态跃迁至激发态,从激发态到基态有两种衰变路径,处于 $m_s=0$ 态的NV色心将直接跃迁回基态并释放光子,而处于 $m_s=\pm 1$ 态的NV色心以一定的概率通过系统间交叉(intersystem crossing, ISC)机制,经过单态 1A_1 和 1E 衰变回基态,属于非辐射途径。图1(a)虚线框中显示了在磁场存在的情况下, $m_s=\pm 1$ 能级的塞曼劈裂。在连续光泵浦的作用下,通过微波扫频和荧光采集即可得到NV色心的光学检测磁共振(optical detected magnetic resonance, ODMR)谱图,如图1(b)所示,编号为1~4(5~8)的共振特征对应于 $|m_s=0\rangle\rightarrow|m_s=-1\rangle$ ($|m_s=0\rangle\rightarrow|m_s=1\rangle$)的自旋跃迁。

2 模型的建立

NV色心独特的结构使得外界磁场会在不同的



(a) NV 色心能级图



(b) 偏置磁场下 NV 色心的 ODMR 谱图

图 1 NV 色心特性图

Fig. 1 NV color center characteristics chart

NV 轴上产生投影。当外界磁场发生变化时, $m_s = \pm 1$ 能级的不同 NV 轴的劈裂能级差会发生波动, 导致各个轴的劈裂程度产生变化, 进而造成各个谐振频率点发生偏移^[13]。因此, 如何根据不同轴的谐振频率偏移量实现外界被测磁场的矢量信息解算, 将是本文讨论的重点。基于此, 结合目前实验室所使用的金刚石切割面为 $[1\ 0\ 0]$ 方向, 建立将金刚石 NV 色心轴映射到三轴笛卡尔坐标系的转换模型, 如图 2 所示。在实验中, 选择系综金刚石表面为坐标系的 X, Y 轴所在平面, Z 轴则与金刚石表面垂直。因此, 坐标系的单位矢量 X, Y, Z 分别为: $[1\ 1\ 0], [\bar{1}\ \bar{1}\ 0], [0\ 0\ 1]$, 金刚石 4 个 NV 轴 (NV_1, NV_2, NV_3, NV_4) 的单位矢量可分别表示为: $(\sqrt{2}/3\ 0\ \sqrt{1}/3), (0\ -\sqrt{2}/3\ -\sqrt{1}/3), (\sqrt{2}/3\ 0\ -\sqrt{1}/3), (0\ -\sqrt{2}/3\ \sqrt{1}/3)$ 。该坐标系是基于微观角度建立的, 从微观到宏观之间的传递关系可通过 NV 色心轴、金刚石坐标系和探头坐标系之间的转换实现。若转换过程不理想, 则将对矢量磁场测量的准确性产生影响。

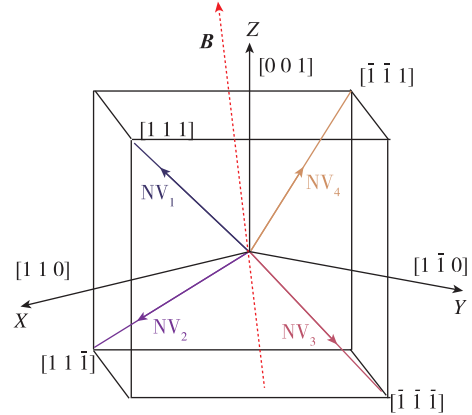


图 2 NV 色心轴和笛卡尔三轴之间的转换模型

Fig. 2 Model of the transformation between the NV color center axis and the Cartesian three axes

由于经频率调制后的 ODMR 信号通过锁相放大器 (lock-in amplifier, LIA) 解调后, 可得到具有线性区间的解调曲线, 谐振频率 (f) 对应于该解调曲线的零点^[14]。解调曲线具有良好的线性度, 且电压偏移值和微波频率在该区间内呈线性关系^[9, 15], 且该线性关系可以定量确定。当外界磁场发生变化时, 共振频率点会发生偏移, 表现为 LIA 输出电压的变化。通过找到 $\Delta U - \Delta f$ 的对应关系, 便可以关联共振峰的偏移量和电压偏移量。因此, 根据电压偏移差计算共振频率的变化量, 通过实时计算不同 NV 轴共振频率的变化量, 可以准确快速得到三轴矢量磁场的分量。建立的 NV 色心的共振频率和三轴磁场的矢量解模型描述如下

$$\begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \\ \Delta f_3 \\ \Delta f_4 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: Δf_i 是共振峰频率的偏移 ($i = 1, 2, 3, 4$); B_x, B_y 和 B_z 是三轴磁场分量; \mathbf{A} 为有效旋磁比矩阵 (NV 色心共振频率与三轴磁场的转换系数矩阵)。矩阵 \mathbf{A} 被定义为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial B_x} & \frac{\partial f_1}{\partial B_y} & \frac{\partial f_1}{\partial B_z} \\ \frac{\partial f_2}{\partial B_x} & \frac{\partial f_2}{\partial B_y} & \frac{\partial f_2}{\partial B_z} \\ \frac{\partial f_3}{\partial B_x} & \frac{\partial f_3}{\partial B_y} & \frac{\partial f_3}{\partial B_z} \\ \frac{\partial f_4}{\partial B_x} & \frac{\partial f_4}{\partial B_y} & \frac{\partial f_4}{\partial B_z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

结合哈密顿算法, 在磁场小且应变较低的情况

下,矩阵 \mathbf{A} 由 NV 对称轴的单位矢量确定^[14]

$$\mathbf{A}_1 = \frac{g_e \mu_B}{h} \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & 0 & \sqrt{\frac{1}{3}} \\ 0 & -\sqrt{\frac{2}{3}} & -\sqrt{\frac{1}{3}} \\ \sqrt{\frac{2}{3}} & 0 & -\sqrt{\frac{1}{3}} \\ 0 & -\sqrt{\frac{2}{3}} & \sqrt{\frac{1}{3}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于偏置场在每个非对称轴上都有磁场分量,因此,非对称轴上的磁场投影也会导致测量的 ODMR 发生偏移,使得有效旋磁比矩阵 \mathbf{A}_1 和 \mathbf{A} 不同。此外,各坐标系在转换过程中存在误差,导致坐标系间的不完全重合,进而对矩阵 \mathbf{A} 产生影响。除此之外,应变参数和与温度有关的零场分裂等也会使矩阵 \mathbf{A} 的实验结果和理论结果产生差异,需通过三轴磁通门传感器和三轴亥姆霍兹线圈确定 NV 矢量磁强计 \mathbf{A} 的具体值^[10],具体方法在第 4 章进行讨论。

3 实验装置

为易于操作并保证良好的便携性,将所有磁强计的功能组件(如图 3(b)所示)完全集成在一个便携式封装外壳内,尺寸为 65.51 mm×61.8 mm×163.37 mm,实物如图 3(c)所示。使用 3D 打印外壳固定集成组件,包括激光器、分束棱镜、微波(microwave, MW)天线板(3 cm×4 cm)、透镜、滤波片、光电探测器(PDB-C609-2)及边带收集结构(fluorescence waveguide excitation and collection, FWEC)^[16]。透镜和滤波片固定在 3D 打印的垫圈中,光电探测器被固定在印制电路板(printed circuit board, PCB)上,并通过导线引出电流。该 PCB 通过强力胶粘在固定光学组件的底座上,底座和光学组件之间用螺丝固定。永久 Ne-Fe-B 磁体作为磁强计的偏置磁场,使用坚固的粘合剂牢固地固定在磁强计内部,以产生具有 8 个共振频率的 ODMR 谱图,用于磁场测量,如图 1(b)所示。通过手动调整镜片中心高度使其与激光器输出光高一致,确保经过分光棱镜的光可以精准激发到金刚石中心,从而获取到最佳信号,确定并固定激光器和透镜的位置。

NV 色心磁强计的工作原理包括激光激发、微波产生和磁场检测。激光器发出 532 nm 的激光照射在金刚石[1 0 0]面上,用于激发 NV 中心。实验使用的

是通过高温高压(high pressure high temperature, HP-HT)方法生长的金刚石(4 mm×4 mm×1.5 mm),含氮量为 100 ppm,抛光面为[1 0 0]。分束棱镜将激光分为两束,一束经过透镜激发 NV 色心,其中透镜的作用是对激光器发出的激光束进行聚焦,而金刚石发出的荧光通过 FWEC 后由光电探测器(photodetector 1, PD1)收集;另一束作为参考信号由 PD2 收集,用于抑制激光幅度噪声^[17]。

微波由 4 台是德科技微波源(N5181B)提供,并通过混频器进行频率转换。4 个微波源分别产生 4 个载波信号,对应的频率分别为 f_1, f_2, f_3, f_4 ,对应于图 1(b)中标号为 1, 2, 3, 4 的 ODMR 共振频率。在对应的调制频率上进行正弦调频,用于平衡测量带宽和对比度,同时确保没有一个频率是其他频率的整数倍,从而避免 NV 对调制微波的非线性响应产生谐波干扰^[18]。混频后的微波信号通过环形铜丝天线辐射到金刚石上,随后通过 LIA(苏黎世 HF2LI)进行解调,并通过 LIA 的上位机软件观察由磁场变化引起的电压偏移。读取各轴的电压偏移后,通过自适应矢量投影算法对电压数据进行处理。根据电压与频偏的关系得到共振频率的偏移量,代入矢量模型即可计算出空间坐标系下的三轴磁场分量。自适应矢量投影算法通过傅里叶变换将信号转换到频率域上,在频率响应中进行投影,在去除噪声的同时保留有效信号,因此不会影响频域响应^[18]。

4 验证和分析

NV 色心共振频率与三轴磁场之间的转换系数矩阵确定装置如图 3(a)所示,使用三维磁通门磁强计(CH-350)和国产的三轴亥姆霍兹线圈(MFC-3)确定 NV 矢量磁强计的有效旋磁比矩阵 \mathbf{A} 。

首先,将磁通门磁强计探头放置在屏蔽筒内的均匀区域,使线圈对准磁通门磁强计探头的 X 轴。通过控制电流源,使电流以 0.1 A 的步进逐渐增大,则磁通门磁强计输出的磁场峰峰值发生变化,从而可以获得磁场和电流之间的关系。在此基础上,将 NV 矢量磁强计置于屏蔽筒内同一位置,使 NV 矢量磁强计探头的 X 轴与线圈 X 轴重合。采用同样的方式控制电流源,获得 NV 四轴频移和电流的对应关系,进而确定 NV 四轴频移和磁场的关系。对 NV 四轴频移和磁场的关系曲线进行线性拟合,如图 4 所示,其斜率即为有效旋磁比矩阵 \mathbf{A} 的第 2 列数据, NV_1 轴对应矩阵 \mathbf{A} 的第 1 行第 2 列数

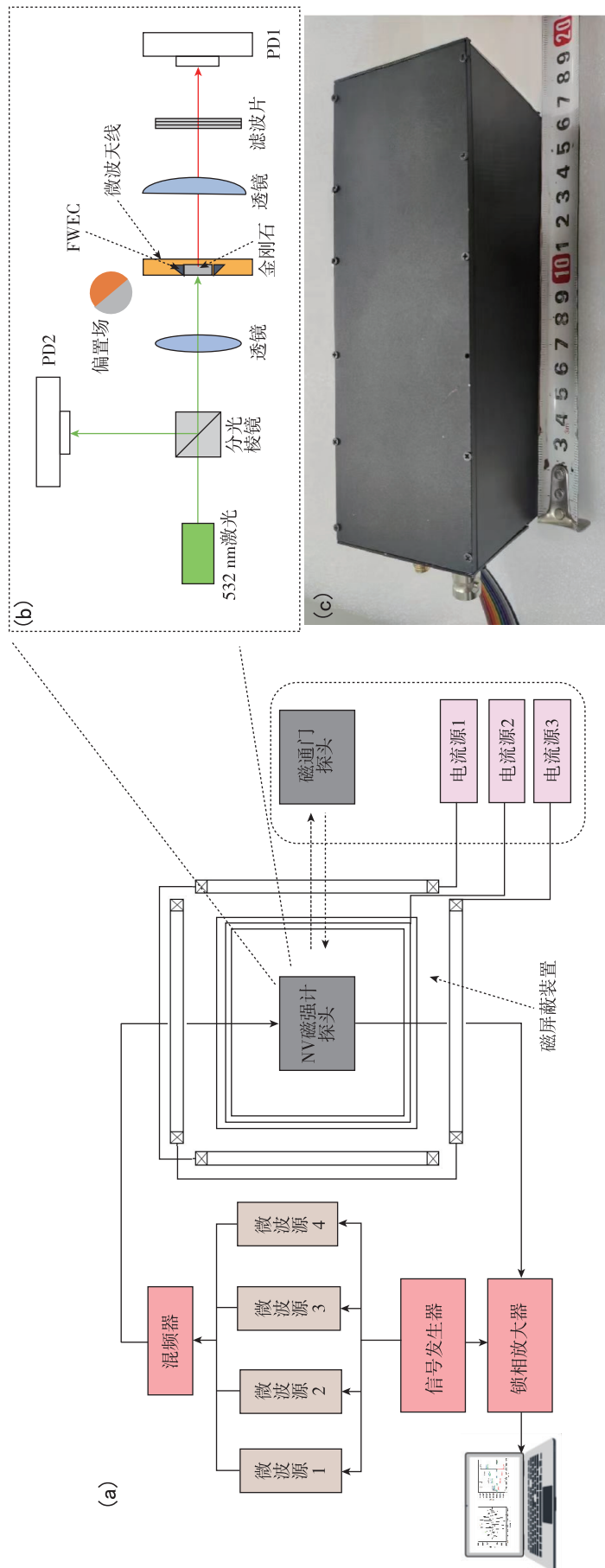


图 3 实验装置图
Fig. 3 Experimental setup diagram

据, NV_2 轴对应矩阵 \mathbf{A} 的第 2 行第 2 列数据, 以此类推。将同样的方法应用于 Y 轴和 Z 轴, 在各轴方向上均进行线性拟合, 进而确定 \mathbf{A} 矩阵。经实验确定矩阵 \mathbf{A} 如式(4)所示。

$$\mathbf{A}(\text{MHz}/\mu\text{T}) = \begin{bmatrix} 0.314 & 0.015 & 0.247 \\ 0.029 & -0.283 & -0.234 \\ 0.302 & 0.019 & -0.269 \\ 0.057 & -0.275 & 0.238 \end{bmatrix} \quad (4)$$

因此, 金刚石 NV 中心的轴向磁场分量和三轴磁场的矢量解模型为

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.314 & 0.015 & 0.247 \\ 0.029 & -0.283 & -0.234 \\ 0.302 & 0.019 & -0.269 \\ 0.057 & -0.275 & 0.238 \end{bmatrix}^+ \cdot \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \\ \Delta f_3 \\ \Delta f_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

得到矩阵 \mathbf{A} 后, 便可以根据峰值偏移计算磁场矢量分量, 从而得到磁场数据。

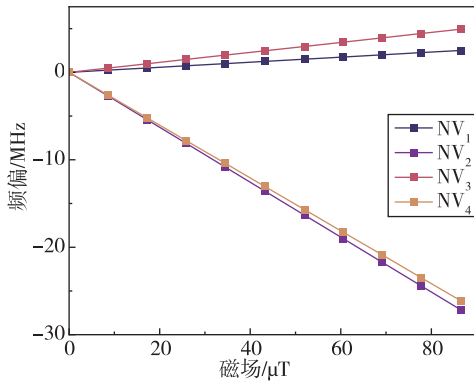


图 4 矩阵 \mathbf{A} 实验结果

Fig. 4 Experimental results for matrix \mathbf{A}

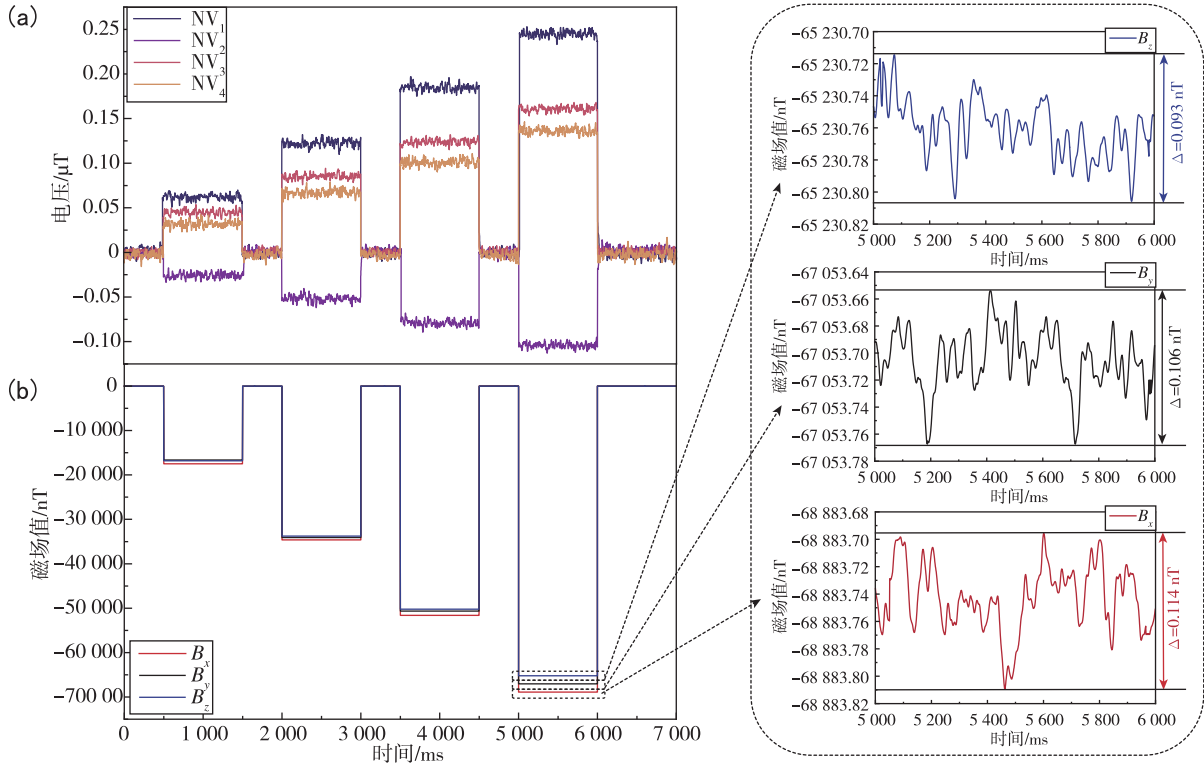
矢量磁场测量装置如图 3(a) 所示(不包括虚线内设备), 将探头固定在屏蔽筒中的可调节伸缩杆上。调节伸缩杆使 NV 矢量磁强计探头的坐标系和三轴正交线圈的坐标系重合, 并使其处于线圈中心位置处, 通过对线圈施加电流使其产生磁场进行测量。实验使用的屏蔽筒内三轴无矩线圈常数为 $17.214 \mu\text{T}/\text{A}$ (X 轴), $16.853 \mu\text{T}/\text{A}$ (Y 轴) 和 $16.856 \mu\text{T}/\text{A}$ (Z 轴), 磁强计的零场测量值约为 100 nT 。由于偏置磁场的存在, 得到如图 1(b) 所示的 ODMR 谱图。检测

到的信号通过 LIA 进行解调, 其中 LIA 的时间常数最小为 $1 \mu\text{s}$, 滤波器带宽最大为 200 kHz , 采样率最大为 14 kSa/s , 调制深度为 20 dB 。通过多次实验获得最佳匹配, 使用的调制频率分别为 3380 Hz , 2000 Hz , 1024 Hz 和 4056 Hz , 分别对应图 1(b) 中标记为 1, 2, 3 和 4 的 ODMR 共振特征频率。

在不施加任何磁场的情况下, 电压曲线保持稳定。当向磁强计探头施加处于其动态范围内的磁场时, 谐振频率被依次处理, 得到电压偏移曲线。在本方法中, 分别对 X, Y, Z 轴线圈同时施加 1 A , 2 A , 3 A 和 4 A 的电流。由于 NV 磁强计探头周围磁场发生变化, 导致 NV 四轴荧光 ODMR 谱线发生偏移, 进而使 LIA 电压输出发生变化, 如图 5(a) 所示, 不同颜色代表 NV 的不同轴。将从图 5(a) 中提取的数据代入式(4), 即可得到矢量磁场分量 B_x, B_y, B_z , 如图 5(b) 所示。其中, 三轴的噪声峰峰值分别可以达到 0.114 nT , 0.106 nT 和 0.093 nT , 如图 5(b) 虚线框中所示。

为验证矢量结果的准确性, 利用三轴亥姆霍兹线圈产生磁场的理论值与 NV 矢量磁强计的多组测量结果进行比较, 结果如图 6 所示。结果表明, 在 NV 矢量磁强计的量程范围内, 测量值与理论值误差在 $1\% \sim 4\%$ 之间两者重合度较好。

为验证该方法测量较快变化磁场的可能性, 对其进行交流磁场的测量。对线圈施加呈正弦变化的交流磁场, 其频率分别为 $f_x = 8 \text{ Hz}$, $f_y = 18 \text{ Hz}$ 和 $f_z = 28 \text{ Hz}$ 。通过该矢量方法进行解算, 其结果如图 7 所示((a)(b)(c)分别为 X, Y, Z 三轴测量结果时域图, (d)(e)(f)分别为其对应的频域结果), 其中红、黑、浅蓝色为矢量磁强计测量结果 ($B_x = 20006 \text{ nT}$, $B_y = 20189 \text{ nT}$ 和 $B_z = 20312 \text{ nT}$)。为验证其准确性, 将其与磁通门结果进行对比, 磁通门测量结果为 $B_x = 19991 \text{ nT}$, $B_y = 20281 \text{ nT}$ 和 $B_z = 20412 \text{ nT}$, 如图 6 中深蓝色所示, 二者误差在 $1\% \sim 3\%$ 之间。(注意: 图 6 中深蓝色与其他颜色结果错开是为了更清晰地进行对比)。激光和微波功率的不稳定、系统内部的电子噪声或外部环境的电磁干扰以及实验过程中传输线路的扰动等, 均导致了图中 NV 色心输出的信号幅值发生变化。



(a) 磁场变化的电压偏移结果; (b) 三轴磁场(虚线框里为三轴噪声峰峰值)

图 5 NV 色心矢量测量和解算

Fig. 5 NV color center vector measurements and deconvolution

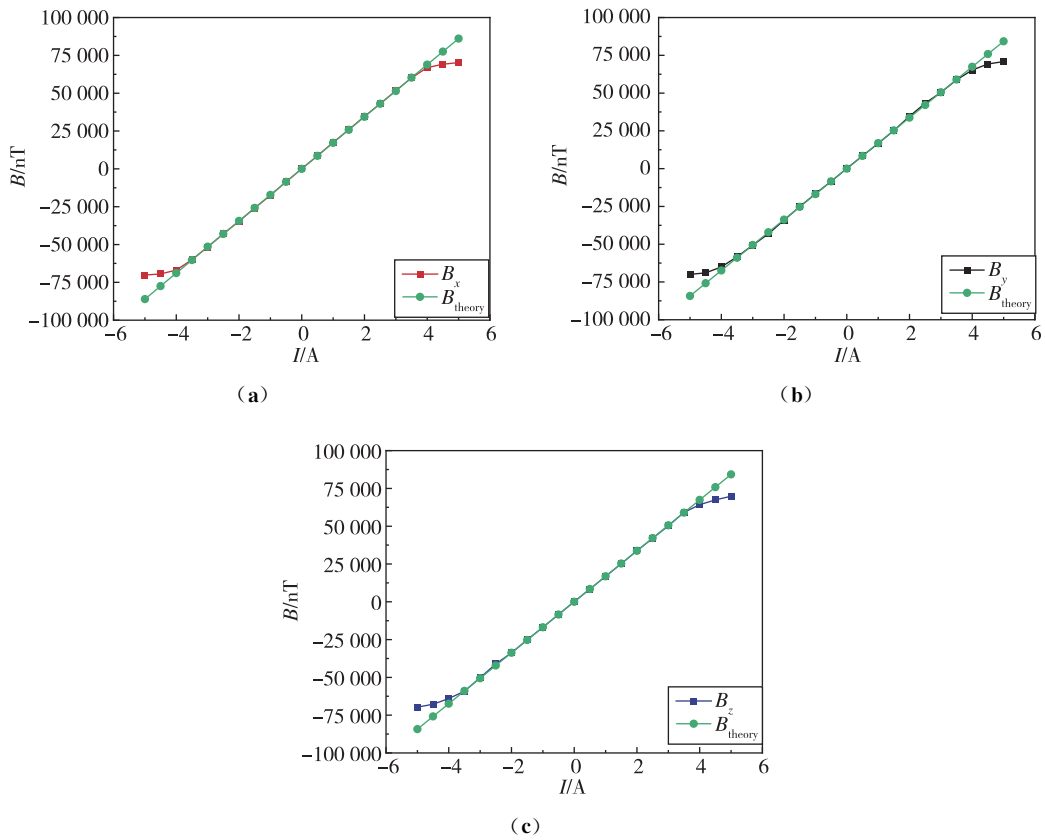


图 6 NV 矢量磁强计测量磁场与理论值的比较结果

Fig. 6 Comparison of the measured magnetic field by NV vector magnetometer with theoretical value

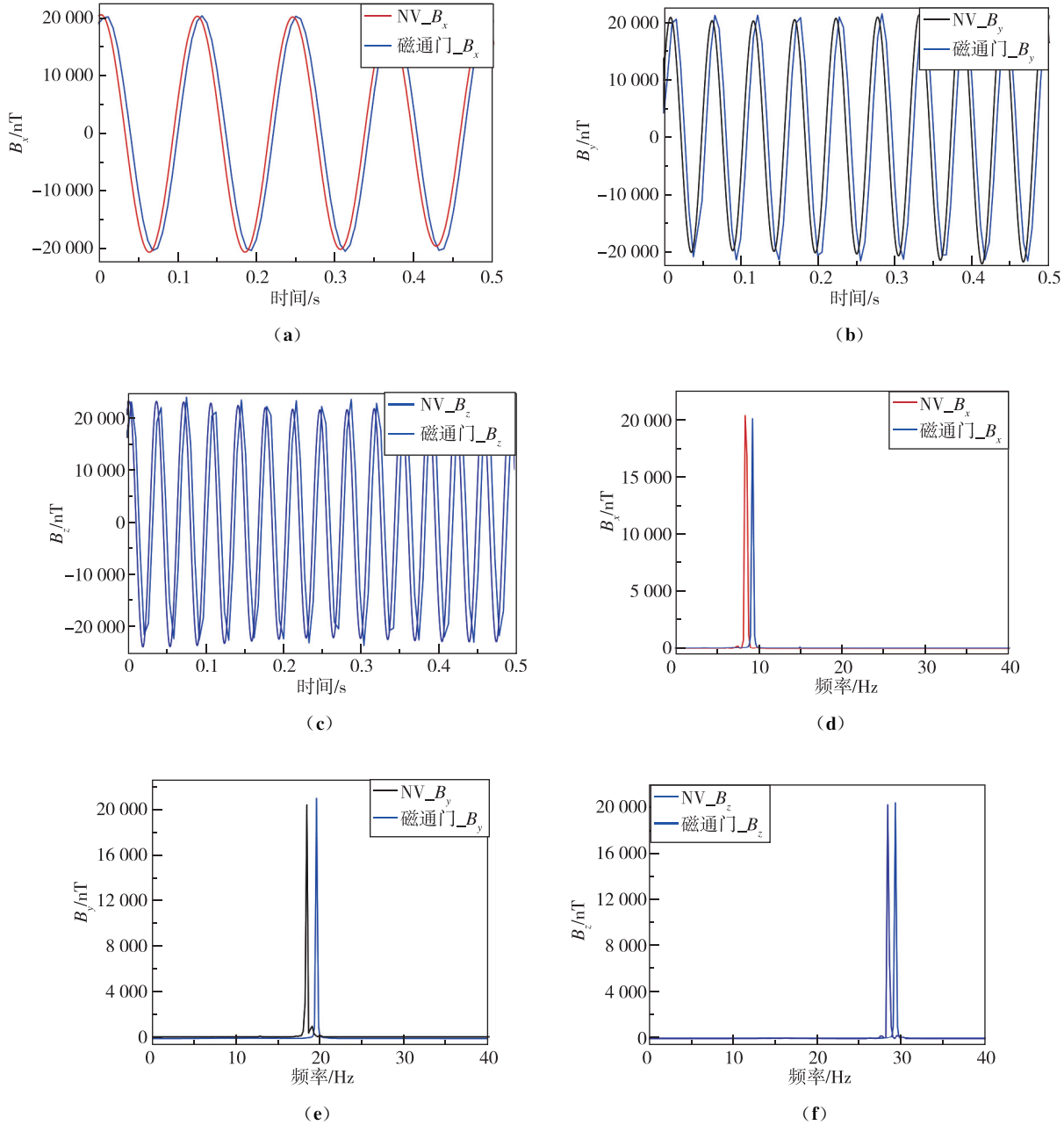


图 7 NV 矢量磁强计交流磁场测量结果

Fig. 7 AC magnetic field measurements by NV vector magnetometer

5 结论

介绍了一种结合 FWEC 和噪声抑制装置的便携式 NV 矢量磁强计,并通过对实验测量结果的分析,得到以下结论。

1)通过集成 NV 色心磁强计,采用多通道、同时锁频的方法进行矢量磁场测量,并结合自适应矢量投影技术,降低了环境干扰对测量结果的影响,提高了测量的稳定性和可靠性。

2)矢量测量结果与理论值相比,二者吻合较好,

误差范围在 1%~4% 之间, X, Y 和 Z 三轴噪声峰峰值分别达到了 0.114 nT, 0.106 nT 和 0.093 nT, 展现出卓越的性能。

3)在地磁导航领域,本文提出的 NV 色心矢量磁强计及其测量方法能够精准地感知地磁中微弱的磁场变化,提供高精度的矢量测量结果,为地磁导航技术的发展提供了有力支持。

综上所述,提出的便携式 NV 色心矢量磁强计及矢量测量方法在地磁导航领域具有重要的应用价值,能够有效提升磁场测量的精度和可靠性,为该领域的研究和应用提供新的技术手段。

参考文献

- [1] 陆一, 魏东岩, 纪新春, 等. 地磁定位方法综述[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(2): 118-130.
LU Yi, WEI Dongyan, JI Xinchun, et al. Review of geomagnetic positioning method[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(2): 118-130 (in Chinese).
- [2] FUKUI T, DOI Y, MIYAZAKI T, et al. Perfect selective alignment of nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. Applied Physics Express, 2014, 7(5): 055201.
- [3] BARRY J F, SCHLOSS J M, BAUCH E, et al. Sensitivity optimization for NV-diamond magnetometry[J]. Reviews of Modern Physics, 2020, 92(1): 015004.
- [4] FEDOTOV I V, BLAKLEY S M, SEREBRYANNIKOV E E, et al. High-resolution magnetic field imaging with a nitrogen-vacancy diamond sensor integrated with a photonic-crystal fiber[J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 472-475.
- [5] 郑斗斗, 郭浩, 李中豪, 等. NV 色心磁强计研究进展及应用[J]. 导航与控制, 2022, 21(Z2): 139-161.
ZHENG Doudou, GUO Hao, LI Zhonghao, et al. Research progress and application of NV color-centered magnetometer[J]. Navigation and Control, 2022, 21(Z2): 139-161(in Chinese).
- [6] FRONTERA P, ALESSANDRINI S, STETSON J. Shipboard calibration of a diamond nitrogen vacancy magnetic field sensor [C]// Proceedings of 2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Monterey: IEEE, 2018: 497-504.
- [7] GRAHAM S M, NEWMAN A J, STEPHEN C J, et al. On the road with a diamond magnetometer[J]. Diamond and Related Materials, 2025, 152: 111945.
- [8] ZHAO B, GUO H, ZHAO R, et al. High-sensitivity three-axis vector magnetometry using the electron spin ensembles in single diamond [J]. IEEE Magnetics Letters, 2019, 10: 1-4.
- [9] LIU Z, ZHENG D, FU J, et al. Integrated NV (nitrogen vacancy) vector magnetometer in real-time utilizing frequency-hopping method[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 9: 14068-14075.
- [10] NEWMAN A J, GRAHAM S M, EDMONDS A M, et al. Tensor gradiometry with a diamond magnetometer [J]. Physical Review Applied, 2024, 21(1): 014003.
- [11] GROSZ A, HAJI-SHEIKH M J, MUKHOPADHYAY S C. High sensitivity magnetometers [M]. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [12] ZHENG D D, MA Z M, GUO W, et al. A hand-held magnetometer based on an ensemble of nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(15): 155004.
- [13] 伍大锦. 金刚石 NV 色心矢量磁场测量方法及应用研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
WU Dajin. Study on the measurement and application of color-centered vector magnetic field in diamond NV [D]. Taiyuan: North University of China, 2023(in Chinese).
- [14] 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: 252406.
- [15] SCHLOSS J M, BARRY J F, TURNER M J, et al. Simultaneous broadband vector magnetometry using solid-state spins[J]. Physical Review Applied, 2018, 10(3): 034044.
- [16] WANG X, ZHENG D, WANG X, et al. Portable diamond NV magnetometer head integrated with 520 nm diode laser[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(6): 5580-5587.
- [17] GRAHAM S M, RAHMAN A, MUNN L, et al. Fiber-coupled diamond magnetometry with an unshielded sensitivity of 30 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ [J]. Physical Review Applied, 2023, 19(4): 09170.
- [18] GEBREKIDAN M T, KNIPFER C, BRAEUER A. Vector casting for noise reduction[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2020, 51(7): 731-743.

(编辑:黄利华)