

金属表面裂纹的氮-空位色心漏磁检测

余志武¹,项诸宝¹,毛建锋¹,伍军²,沈忆华³,赵博文³,张少春³,廖燕飞³,周梦良³

(1. 高速铁路建造技术国家工程研究中心,长沙 410075; 2. 中国中铁股份有限公司,北京 100039;
3. 安徽省国盛量子科技有限公司,合肥 230088)

摘要: 基于氮-空位(NV)色心对磁场的敏感特性,以含浓度1~2 ppm(百万分之一)NV色心的金刚石量子传感器为核心,微波共振扫频激发NV色心的量子自旋为基础,通过优化的共聚焦光路激发NV色心来收集反射回的含磁场信息的光信号,以3块板卡组成控制采集模块对信号进行滤波处理和可视化处理,搭建一套量子精密测量系统。采用该量子精密测量系统完成0.1~1 mm深度下和5~15 mm提离值下的金属表面裂纹检测。试验结果表明,该系统的磁场测量灵敏度达 $6 \text{ nT} \cdot \sqrt{\text{Hz}}^{-1}$,可完成最小深度为0.1 mm和最大提离值为15 mm的金属表面裂纹检测,为金属表面裂纹的工业检测提供了一种新方式。

关键词: 氮-空位色心;量子磁传感器;灵敏度;金属裂纹;漏磁检测

中图分类号: TM93; TN304.18; TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2024)08-0007-06

Nitrogen-vacancy color center magnetic flux leakage detection of metal surface cracks

YU Zhiwu¹, XIANG Zhubao¹, MAO Jianfeng¹, WU Jun², SHEN Yihua³, ZHAO Bowen³,
ZHANG Shaochun³, LIAO Yanfei³, ZHOU Mengliang³

(1. National Engineering Research Center of High-speed Railway Construction Technology, Changsha 410075, China; 2. China Railway Group Limited, Beijing 100039, China; 3. Anhui Guosheng Quantum Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: Based on the sensitive characteristics of nitrogen-vacancy (NV) color center to magnetic field, the diamond quantum sensor containing a concentration of 1—2 ppm NV color center was the core, and the quantum spin of the NV color center excited by microwave resonance frequency sweep was the foundation, and the NV color center was excited by the optimized confocal optical path to collect the reflected optical signal containing magnetic field information for signal collection, and the control acquisition module composed of three boards was used to filter and visualize the signal for signal processing, and a quantum precision measurement system was built. The quantum precision measurement system was used to detect metal cracks at a depth of 0.1 mm—1 mm and a lifting value of 5 mm—15 mm. The experimental results showed that the sensitivity of the system was $6 \text{ nT} \cdot \sqrt{\text{Hz}}^{-1}$, the minimum depth of 0.1 mm and metal crack detection with a maximum lift value of 15 mm can be achieved, providing a new detection method for metal crack industrial detection.

Key words: nitrogen-vacancy (NV) color center; quantum magnetic sensor; sensitivity; metal crack; magnetic flux leakage detection

漏磁检测作为一种无损检测方式,检测时利用被测对象的磁特性,可在不损害检测对象使用性能

收稿日期: 2023-12-27

基金项目:中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目重大专项课题(2021- 专项-02)

作者简介:余志武(1955—),男,教授,主要研究方向为工程结构服役安全评估与养维

通信作者:沈忆华, yihua.shen@gshqt.com

的前提下,完成被测对象中的缺陷检测。漏磁检测的应用已较为广泛,其通过对金属被测物进行磁化,使用磁传感器收集磁场信息并进行分析,从而完成金属的裂纹检测^[1]。

漏磁检测中高灵敏度的磁传感器对检测结果的准确性至关重要。一直以来,国内外学者致力于研究高灵敏度的磁传感器。随着量子技术的不断发展,量子磁传感器逐渐进入大众视野。其中基于金

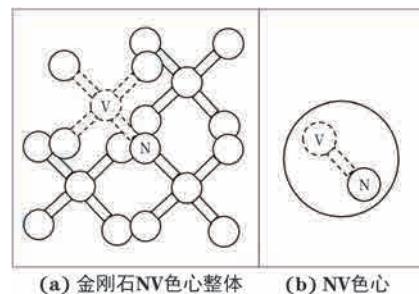
刚石氮-空位(NV)色心的量子磁传感器可以实现高灵敏度和高空间分辨率的磁场测量。美国加州大学Acosta团队提出一套共聚焦NV色心磁测量系统,其磁测量分辨率达到5 pT^[2]。2020年,美国新墨西哥大学的Fescenko团队利用磁聚集技术结合NV色心测磁,在频率10 Hz~1 000 Hz内将磁场测量灵敏度提到0.9 pT·Hz⁻¹^[3]。中国科学技术大学的王鹏飞团队将金刚石NV色心测磁应用到单细胞成像中,其成像空间分辨率达10 nm^[4]。中国科学院武汉物理与数学研究所等单位在微弱磁场测量方面进入深入研究,搭建了相应的原理样机^[5]。然而,还有团队将金刚石NV色心测磁高灵敏度的优势应用到传统的工业检测中,且NV色心制作困难,复杂的光学系统以及量子操纵的困难性阻碍了其从实验室原理样机到实际工业检测的过渡。

鉴于此,笔者围绕金属表面裂纹的漏磁检测,提出一种基于金刚石NV色心量子磁传感器的漏磁检测方法。通过搭建基于金刚石NV色心量子磁传感器的量子精密测量系统,完成金属微裂纹检测和高提离值状态下的检测,旨在将量子精密测量的优势应用到金属表面裂纹的无损检测中。

1 检测原理

1.1 氮-空位色心漏磁检测原理

金刚石NV色心量子磁传感器的核心传感单元是金刚石中的人造晶格缺陷^[6],金刚石NV色心结构如图1所示。NV色心是利用离子注入的方式,将原金刚石结构中的一个C原子用N原子取代,并在相邻位置形成一个空穴(V),两者共同组成带电的NV色心。



(a) 金刚石NV色心整体 (b) NV色心

图1 金刚石NV色心结构示意

NV色心荧光辐射稳定且相干时间长,存在两种不同的带电状态:电中性状态的NV⁰和带负电荷状态的NV⁻。由于NV色心是金刚石中的一个N原子替换掉C原子形成,这个N原子与周围的C原子并未配对,此时会形成4个游离键。呈中性的NV⁰有5个电子,电子自旋量子数S=1/2,而带负电的NV⁻多一个从晶格捕获的自由电子,共有6个电子。两者可以通过光谱特性区分,前者的零声子线(ZPL)在576 nm附近,后者的零声子线在637 nm附近。其中NV⁰在测磁领域应用有限^[7],故不做特殊说明,文中的NV为NV⁻。

电子的自旋与轨道耦合相互作用,使其具有稳定的能级结构。电子自旋是电子的一个内禀性质,可以看作是电子围绕自身轴旋转产生的磁矩。电子自旋有两种可能的取向,即向上和向下。NV色心的基态能级根据自旋状态不同,表现为m_s=±1,m_s=0的自旋三重态^[8-10],NV色心能级跃迁示意如图2所示,图中B为偏置磁场。当外磁场为零时,NV色心的m_s=+1和m_s=-1处于简并态,并与m_s=0态之间存在零场劈裂,零场劈裂大小D=2.87 GHz。金刚石NV色心在基态的哈密顿量可以表示为

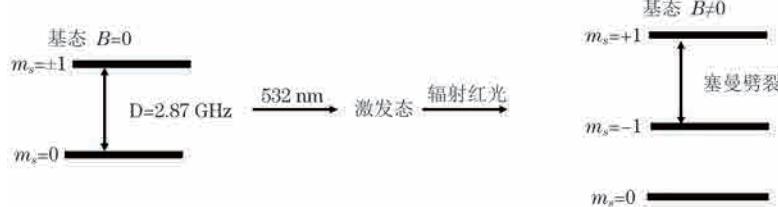


图2 NV色心能级跃迁示意

$$H_s = DS^2 + g_s \mu_B \vec{B} \cdot \vec{S} \quad (1)$$

式中:S为自旋算符;g_s为电子自旋g因子,一般取2.003;μ_B为波尔磁子,表示旋磁比,一般取2.8 MHz/Gs;B为矢量磁场;S为矢量自旋算符。

利用532 nm绿色激光激发,基态的m_s=0和m_s=±1会从基态跃迁到激发态,这不是一个稳定的

状态,此时NV色心的m_s=0和m_s=±1会回落到基态,并辐射红色荧光。施加微波并扫频,当微波频率与基态能级共振频率一致时,收集的荧光强度会降低,也就是探测的信号会出现一个峰(或者谷),这就是光学探测磁共振(ODMR)法的原理^[11-12]。

当外磁场发生改变时,m_s=±1发生塞曼劈裂,此时NV色心的哈密顿量求解之后可以表示为

$$E = \begin{bmatrix} g_e \mu_B B_z + \frac{g_e \mu_B}{2} \frac{B_{\perp}^2}{D} \\ -g_e \mu_B \frac{B_{\perp}^2}{D} \\ -g_e \mu_B B_z + \frac{g_e \mu_B}{2} \frac{B_{\perp}^2}{D} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: E 为能量; g_e 为朗德因子, 一般取 2; B_z 为平行于 NV 色心轴向的磁场; B_{\perp} 为垂直于 NV 色心轴向的磁场; D 为零场劈裂。

由以上结果可知, NV 色心基态的共振频率分别为 $D + g_e \mu_B B_z + \frac{g_e \mu_B}{2} \frac{B_{\perp}^2}{D}$ 和 $D - g_e \mu_B B_z + \frac{g_e \mu_B}{2} \frac{B_{\perp}^2}{D}$, 两者的频率差为 $2g_e \mu_B B_z$ 。NV 色心共振频率图谱如图 3 所示, 图中 a.u. 为任意单位, 表示相对强度。

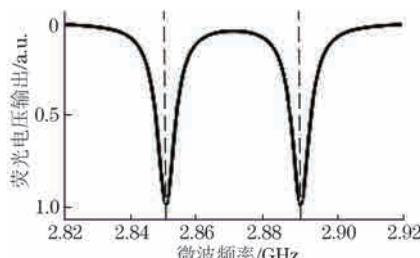


图 3 NV 色心共振频率图谱

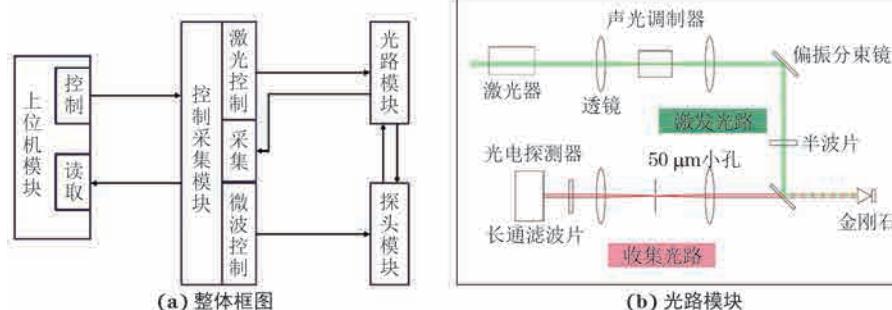


图 4 量子精密测量系统结构框图

2.1 光路模块

光路模块主要由激发光路和收集光路组成, 结构如图 4(b) 所示。其中激发光路激发金刚石 NV 色心, 收集光路收集系统产生的光信号信息, 这类信息的主体是 NV 色心所发出的红色荧光, 实际检测中红色荧光的强弱对应着被测漏磁的大小。

2.2 控制采集模块

控制采集模块系统主要由 3 块板卡集成, 其中的电源板负责给系统各个部分供电, 并严格按照上电时序确保系统的稳定性。激光与微波板的激光硬件电路部分控制激光器辐射绿色激光, 激发金刚石 NV 色心, 微波部分负责根据主控板的指令进行微波功率调节, 将微波信号通过微波天线辐射到 NV 色

在外磁场改变时, 利用 ODMR 方法可以得出两个峰, 一个对应 $m_s=0$, 一个对应 $m_s=+1$, 两个态的共振频率 f^- 和 f^+ , 则磁场大小为

$$B = \frac{f^+ - f^-}{2\gamma_e} \quad (3)$$

式中: $\gamma_e = \frac{g_e \mu_B}{h}$; h 为普朗克常量。

1.2 金属表面裂纹漏磁检测原理

金属表面裂纹漏磁检测原理为: 使用磁性物质对被测金属进行磁化^[13], 当被测金属没有缺陷时, 磁力线将全部从金属内部通过, 此时检测的磁场为 B ; 当被测金属存在缺陷时, 缺陷周围的磁场就会发生泄漏, 即一部分磁力线会从被测金属外穿过, 形成漏磁场 $B_{\text{漏}}$, 此时检测的磁场为 $B + B_{\text{漏}}$, 采集磁场信号并进行分析就可判别缺陷情况。

2 量子精密测量系统

基于金刚石 NV 色心量子磁传感器的量子精密测量系统结构框图如图 4 所示, 其主要由光路模块、控制采集模块、上位机模块、探头等组成。

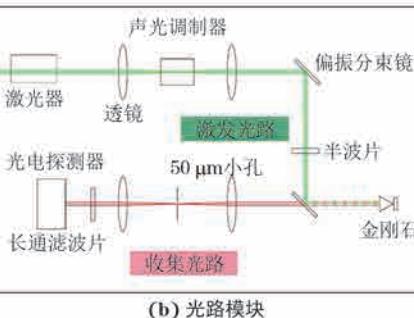


图 4 量子精密测量系统结构框图

心上, 实现对 NV 色心的量子自旋操控^[14]并根据指令进行微波扫频, 进行 ODMR 测试。主控板负责向系统各个部分下发指令, 并对光路模块发送的信号进行滤波处理, 滤除杂散噪声, 最终上传到上位机模块中, 进行可视化处理。

2.3 上位机模块

上位机模块负责下发指令, 并对系统的数据进行可视化处理, 方便完成检测任务。

2.4 探头

探头主要由金刚石 NV 色心量子磁传感器和励磁结构组成, 其实物如图 5 所示, 励磁结构由一个 π 型衔铁以及两块永磁体组成, 其作用是磁化被测物。金刚石 NV 色心量子磁传感器由螺旋式

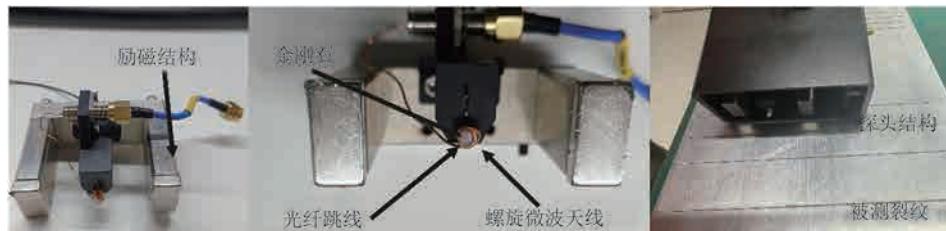


图 5 NV 色量子磁传感器漏磁检测探头实物

微波天线, 光纤跳线以及含 NV 色心的金刚石组成。其中螺旋微波天线的作用是将微波板卡发射的微波信号辐射到 NV 色心上, 完成对 NV 色心的量子操控, 光纤跳线的作用主要是辐射和收集光。光纤跳线的中间固定的是一颗尺寸为 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$ (长×宽×高)的金刚石, 其中的 NV 色心浓度为 1~2 ppm(百万分之一)。

3 检测试验

3.1 敏感度测试

在进行金属裂纹检测之前, 先对金刚石 NV 色量子磁传感器的灵敏度进行表征。在实验室地磁场的环境下搭建试验平台(见图 6), 开始测试灵敏度。

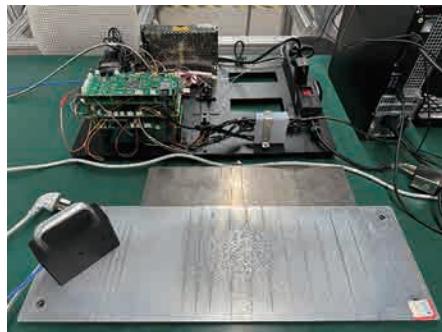


图 6 氮-空位色心漏磁检测试验平台构成

金刚石 NV 色心磁传感器的灵敏度主要受限于噪声, 因此使用噪声谱密度曲线表征其灵敏度大小。在 400 kHz 的采样率下, 采集 10 s 的金刚石 NV 色心磁传感器的测量数据, 计算并得到噪声谱密度曲线, 其结果如图 7 所示, 可以看出该磁传感器的灵敏度为 $6 \text{nT} \cdot \sqrt{\text{Hz}}^{-1}$ 。

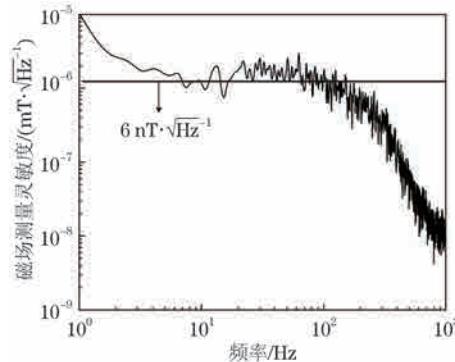


图 7 金刚石 NV 色心磁传感器噪声谱密度曲线

3.2 裂纹深度检测试验

裂纹深度检测试验中, 保持裂纹的轴向位置、宽度和长度不变, 加工的缺陷深度分别为 0.1, 0.2, 0.5, 1 mm, 加工的金属板材料为灰铸铁(HT150, 磁导率为 100~400), 在无附着物时, 探头距被测钢板 5 mm, 各裂纹的具体尺寸如表 1 所示。

表 1 各裂纹的具体尺寸

项目	序号														mm
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
长度	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
宽度	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
深度	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.1	0.2	0.5	1.0		

不同深度裂纹的漏磁检测结果如图 8 所示。在没有裂纹时, 输出电压在 0 mV 左右; 1~4 号裂纹深度为 0.2 mm, 裂纹间距为 10 mm, 对应输出电压约为 -50 mV; 5~7 号裂纹深度为 0.5 mm, 裂纹间距为 20 mm, 输出电压超过 -50 mV; 8~10 号裂纹对应深度为 0.5 mm, 裂纹间距为 30 mm, 输出电压接近 -100 mV; 11~14 号裂纹深度分别为 0.1, 0.2, 0.5, 1 mm, 裂纹间距为 40 mm, 输出电压分别

为 -20, -40, -60, -190 mV。分析以上结果可知, 随着裂纹的深度增加, 输出的电压幅值也在增加。其主要原因是深度是决定漏磁场大小的主要因素, 深度增加时, 对应的漏磁场强度增加, 表现形式为输出的电压幅值也相应增加。1~15 号裂纹的半宽高也大致一样, 表明裂纹的宽度是一致的, 与实际情况相符。12 号裂纹与 1~4 号裂纹物理尺寸是一样的, 其输出电压相对较小, 原因是系统的灵敏度较高, 对

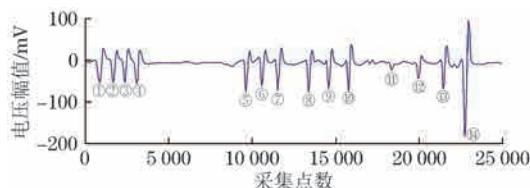
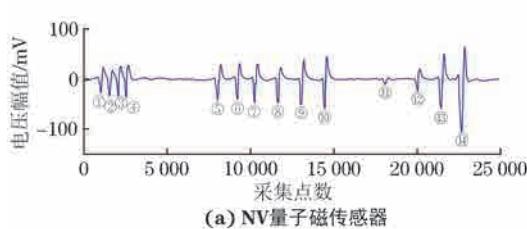
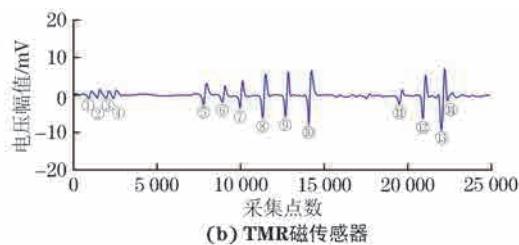


图 8 不同深度裂纹的漏磁检测结果

磁场的反应较灵敏, 对待测裂纹邻近的漏磁场也有反应。举例说明, 检测到3号裂纹时, 实际检测的是邻近2号和4号, 甚至1号和5号裂纹叠加的“漏磁场”。当裂纹间距减小时, 实际检测的“漏磁场”的强度会增大, 表现为系统的输出电压增大, 反之则会

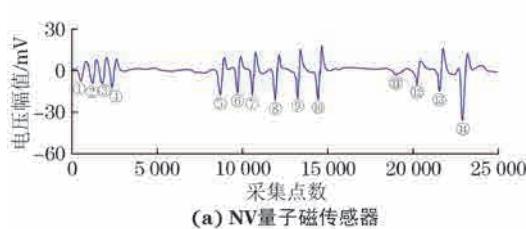


(a) NV量子磁传感器

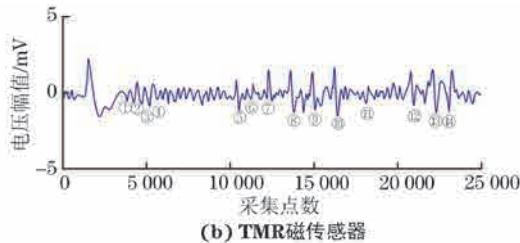


(b) TMR磁传感器

图 9 薄膜厚度为 2 mm, 提离值为 7 mm 时的检测结果

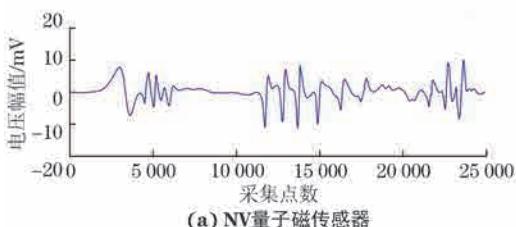


(a) NV量子磁传感器

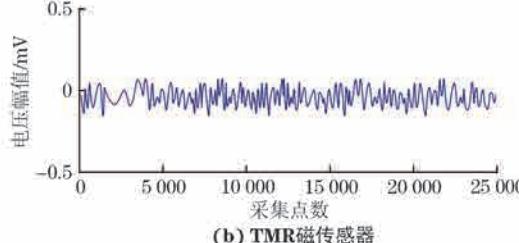


(b) TMR磁传感器

图 10 薄膜厚度为 5 mm, 提离值为 10 mm 时的检测结果



(a) NV量子磁传感器



(b) TMR磁传感器

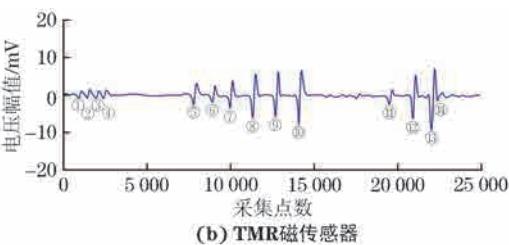
图 11 薄膜厚度为 10 mm, 提离值为 15 mm 时的检测结果

由以上结果可知, 当塑料薄膜逐渐增厚即提离值增大时, 裂纹的输出电压逐渐减小。裂纹间距越小, 检测结果受提离值的影响越小, 主要原因是小间距时, 被测裂纹的漏磁场是多个周边裂纹漏磁场叠加而成且周围裂纹对该漏磁场的影响较大, 导致检测到的漏磁场较真实值偏大; 裂纹间距增大时, 被测裂纹的漏磁场受到周围裂纹漏磁场的影响会变小甚至没有影响。如图 11(a) 所示, 当薄膜厚度增加到 10 mm 时, 间距较小的裂纹和间距较大的裂纹受到的影响都非常大, 较没有薄膜的时候, 输出电压下降

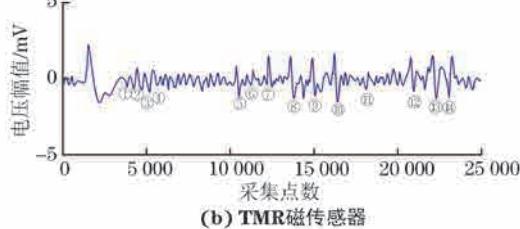
减小。上述结果亦表明基于金刚石 NV 色心的量子磁传感器的精密测量系统可以有效检测出金属板上的裂纹缺陷, 检测出的最小裂纹深度为 0.1 mm。

3.3 提离值试验

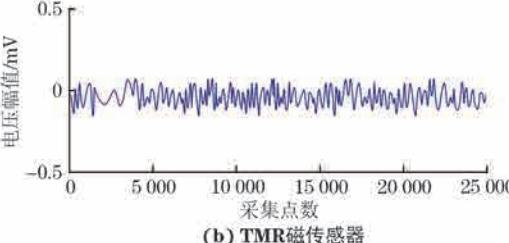
为探究不同提离值下, 该系统检测裂纹的能力, 在上述的待测金属板上附上不同厚度的塑料薄膜, 模拟不同提离值下的裂纹检测并且与传统磁传感器检测[使用 TMR(隧道磁阻)磁传感器]对比。薄膜厚度为 2 mm, 提离值为 7 mm; 薄膜厚度为 5 mm, 提离值为 10 mm; 薄膜厚度为 10 mm, 提离值为 15 mm 时的检测结果如图 9~11 所示。



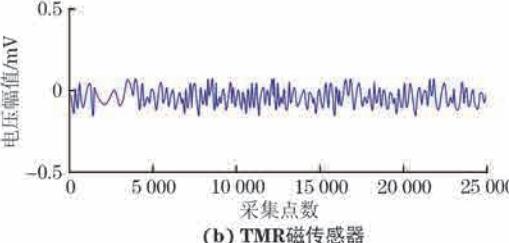
(a) NV量子磁传感器



(a) NV量子磁传感器



(a) NV量子磁传感器



(b) TMR磁传感器

了约 10 倍。在这个输出量级下, 噪声的相对影响增大, 往往会造成误检以及漏检。另外, 深度为 0.1 mm 的裂纹已经完全无法检测, 其他的裂纹特征相对也不明显。

对比传统 TMR 磁传感器的检测结果, 如图 9(b), 10(b), 11(b) 所示, 发现其输出信号的幅值相较 NV 色心量子磁传感器的输出幅值约缩小 10 倍; 且在薄膜厚度为 2 mm 时, 已经发生漏检(漏检 14 号缺陷), 在薄膜厚度为 5 mm 时, 缺陷的特征信号已经被淹没在噪声中, 勉强能完成某些缺陷的

检测, 在薄膜厚度为 10 mm 时, 缺陷已经无法识别。而且, TMR 磁传感器检测时存在磁滞, 输出信号与缺陷之间存在失真延时。可见基于 NV 色心量子磁传感器搭建的量子精密测量系统在提高值较大的情况下, 检测能力优于传统磁传感器的。

4 结语

使用金刚石 NV 色心量子磁传感器搭建量子精密测量平台进行金属裂纹检测试验, 结果表明该系统可以在提高值 15 mm 下检测出长度为 1 mm, 宽度为 0.2 mm, 深度为 0.1 mm 的金属裂纹, 为金属裂纹工业检测提供了一种新的方式。系统的灵敏度极高(可达到 $6 \text{ nT} \cdot \sqrt{\text{Hz}}^{-1}$), 比传统金属裂纹检测传感器的灵敏度高几个数量级, 即使对微弱的磁场变化也有较大的响应, 表明该系统可以测量出深度更小的裂纹。

参考文献:

- [1] 罗朝莉, 朱冰, 徐志伟, 等. 铝板表面缺陷的激光超声可视化检测[J]. 无损检测, 2023, 45(10): 9-13.
- [2] ACOSTA V M, JARMOLA A, ZIPP L J, et al. Broadband magnetometry by infrared-absorption detection of diamond NV centers and associated temperature dependence[C]//SPIE Proceedings, Advances in Photonics of Quantum Computing, Memory, and Communication IV. San Francisco, California: SPIE, 2011.
- [3] FESCENKO I, JARMOLA A, SAVUKOV I, et al. Diamond magnetometer enhanced by ferrite flux concentrators[J]. Physical Review Research, 2020, 2(2): 023394.
- [4] WANG P F, CHEN S Y, GUO M S, et al. Nanoscale magnetic imaging of ferritins in a single cell[J]. Science Advances, 2019, 5(4): 8038.
- [5] 郑红应. 基于不同电流大小下的金刚石 NV 色心量子调控及耦合能量转移研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [6] 靖克, 谢一进, 蓝子衡, 等. 基于金刚石氮-空位色心的磁测量技术[J]. 计测技术, 2023, 43(4): 15-32.
- [7] 沈忆华, 雷金辉, 张云伟, 等. 金刚石 NV 色心在钢丝绳缺陷检测中的应用[J]. 微纳电子技术, 2023, 60(6): 957-964.
- [8] AHMADI S, EL-ELLA H A R, HANSEN J O B, et al. Pump-enhanced continuous-wave magnetometry using nitrogen-vacancy ensembles[J]. Physical Review Applied, 2017, 8(3): 034001.
- [9] DEGEN C, REINHARD F, CAPPELLARO P. Quantum sensing[J]. Reviews of Modern Physics, 2017, 89(3): 035002.
- [10] FESCENKO I, JARMOLA A, SAVUKOV I, et al. Diamond magnetometer enhanced by ferrite flux concentrators[J]. Physical Review Research, 2020, 2(2): 023394.
- [11] DOHERTY M W, STRUZHIN V V, SIMPSON D A, et al. Electronic properties and metrology applications of the diamond NV-center under pressure[J]. Physical Review Letters, 2014, 112(4): 047601.
- [12] 王琪, 黄堃, 聂运龙, 等. 基于金刚石氮空位系综光探测磁共振的振动检测实验[J]. 量子光学学报, 2022, 28(1): 63-70.
- [13] 吕连鑫, 杨理践, 耿浩, 等. 基于管道漏磁内检测的缺陷解析方法[J]. 无损检测, 2023, 45(5): 46-50.
- [14] 高扬, 徐超群, 黄魁, 等. 激光与微波功率对金刚石 NV 色心磁强计 ESR 谱线的影响研究[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(11): 1222-1225.