

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.06.007

基于金刚石 NV 色心的电流传感器仿真

赵龙¹, 王鑫¹, 孙峰², 汪玉¹, 陈明², 许克标²

(1. 国网安徽省电力有限公司 电力科学研究院, 安徽 合肥 230601; 2. 国仪量子(合肥)技术有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要: NV 色心是金刚石中的一种点缺陷, 可以用于高精度磁场测量。文章探讨将 NV 系综作为磁传感器来测量电流的可行性, 并对电流强度、NV 色心荧光强度与偏共振的关系进行建模仿真, 分析传感器放置距离、激光、微波功率、金刚石 NV 色心浓度等对传感器性能的影响, 从而为金刚石 NV 色心电流传感器的设计与研制奠定了理论基础。

关键词: 量子精密测量; 磁传感; 电流传感; 电子自旋共振

中图分类号: TM936.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2023)06-0760-07

Simulation of current transformer based on NV center in diamond

ZHAO Long¹, WANG Xin¹, SUN Feng², WANG Yu¹, CHEN Ming², XU Kebiao²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230601, China; 2. Chinainstru & Quantumtech (Hefei) Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: The nitrogen-vacancy(NV) center is a kind of quantum defect in diamond which can be used in high precision magnetic measurement. This paper studies the potential of current sensing with NV ensemble as current transformer, and carries out the modeling and simulation on the relationship between the current intensity and fluorescence intensity of NV center and the off-resonance. The effects of transformer location, laser, microwave power and NV center concentration on transformer performance are analyzed. The study can lay a theoretical foundation for the design and development of diamond NV center magnetometer as current transformer.

Key words: quantum precision measurement; magnetic sensing; current sensing; electron spin resonance

0 引言

在电力系统中, 电流传感技术对于电能计量、继电保护、谐波检测、线路故障定位、智能设备控制等业务具有极其重要的作用。以电网系统的电流互感器为例, 传统的电磁式电流互感器利用电磁感应原理来测量电流强度, 在结构上可以分为一次线圈、二次线圈和采集电路, 如图 1 所示。待测的一次电流在一次线圈内产生磁场, 通过铁芯传入二次线圈引发感应电压, 再通过采集电路采集二次线圈的电压, 即可计算出一次电流的强度。但是, 随着电网规模的增加与技术指标要求的提升, 传统的电磁式电流互感器逐渐表现出各种技

术瓶颈, 比如测量带宽小、动态范围窄、体积庞大、铁磁共振引发能量损耗、绝缘成本较高等缺点^[1]。

随着电网的智能化、数字化和自动化的不断发展, 以光纤式电流互感器、空心线圈电流互感器为代表的电子式电流传感器逐渐向智能化、数字化和小型化发展。与传统的电磁式电流互感器相比, 光纤电流互感器具有绝缘简单、频带宽、无磁饱和、体积小等优点, 但是光纤材料易受环境因素的影响, 带来较大的测量误差。空心线圈电流互感器由于其固有电感特性限制了其频率响应, 而且容易受到杂散磁场和相间电流的干扰^[2]。隧道式磁阻(tunneling magneto resistive, TMR)电流传感器近年来发展较快, 其原理是利用隧道磁阻

收稿日期: 2020-04-14; 修回日期: 2020-06-22

基金项目: 国家电网有限公司科技资助项目(52120519009)

作者简介: 赵龙(1983—), 男, 甘肃庆阳人, 博士, 国网安徽省电力有限公司高级工程师。

效应实现对磁场的测量,具有灵敏度高、功耗低、温度稳定性好等优点,在智能电表领域有着广泛的应用前景。

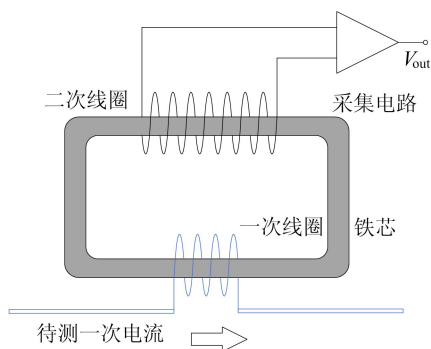


图 1 电磁式电流互感器

NV 色心是金刚石中的一种点缺陷,对 NV 色心电子能级结构的研究早在 20 世纪 90 年代已开始进行^[3]。文献[4]的研究工作表明,基于 NV 色心的磁测量装置理论上可以达到 $3 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的磁测量灵敏度。近年来,基于 NV 色心的高精度磁传感器研究也取得了一定成果,目前已经在 20 kHz 的磁场频率下实现了 $0.9 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的磁测量灵敏度和 100 pT 的磁测量精度^[5],在直流磁场的测量中也能达到 $10 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级的磁测量灵敏度^[3,6]。与其他磁传感器相比,NV 色心有着极为优异的灵敏度与频率响应范围,而且作为 NV 色心载体的金刚石物理化学性质稳定,可以耐受各种极端环境。

本文提出一种基于金刚石 NV 色心的电流传感技术,将含有大量 NV 色心的金刚石晶体作为传感器探头,通过测量电流产生的磁场实现对电流的传感,并对电流强度、NV 色心荧光强度与偏共振的关系进行建模仿真,分析传感器放置距离、激光、微波功率、金刚石 NV 色心浓度等对传感器性能的影响,从理论上给出了基于 NV 色心的设计与优化方案。

1 NV 色心的磁测量原理

NV 色心是金刚石中的一种点缺陷,由一个氮原子和一个空位取代金刚石中 2 个相邻的碳原子所组成,分子结构如图 2 所示^[7]。

NV 色心点缺陷在自然生成的金刚石中广泛存在,而且可以通过高温高压方法(high pressure high temperature, HPHT)、化学气相沉积法(chemical vapor deposition, CVD)和离子辐照方法制备含有大量 NV 色心的金刚石。NV 色心具

有 C_{3v} 对称性,即绕 NV 主轴方向旋转 120° 后与旋转前完全相同,其中空穴与氮原子的连线所在的方向被称为 NV 色心的主轴方向。金刚石中碳原子的晶胞结构有 4 种不同取向的共价键,因此对含有多个 NV 色心的 NV 系综金刚石样品,测量到的 NV 色心也有 4 种不同的主轴方向,彼此的夹角约为 $109^\circ 28'$ 。

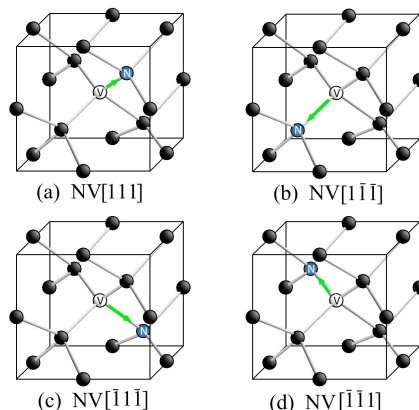


图 2 NV 色心的分子结构

NV 色心的电子自旋为 1,因此电子能级分为总自旋为 0 的单态与总自旋为 1 的三重态。根据自旋方向与磁场方向的夹角,三重态又进一步分为自旋平行于磁场的 1 态(m_s 为电子的自旋量子数,记为 $m_s = +1$)、自旋垂直于磁场的 0 态($m_s = 0$)、自旋反平行于磁场的 -1 态($m_s = -1$)。在没有外磁场的情况下,自旋分量为 1 和 -1 的电子能量相同,处于简并态。基态中 0 态与 ± 1 态存在 $D_{gs} = 2.87 \text{ GHz}$ 的零场劈裂,激发态中 0 态与 ± 1 态存在 $D_{es} = 1.4 \text{ GHz}$ 的零场劈裂。而当 NV 色心的主轴方向上出现外磁场时,自旋分量为 1 和 -1 的电子会获得附加能量,破坏能级简并,如图 3 所示。零声子线(zero-phonon line, ZPL)表示 NV 色心电子直接从激发态回到基态发射光子波长,三重态的 ZPL 为 637 nm,单态的 ZPL 为 1 043 nm。

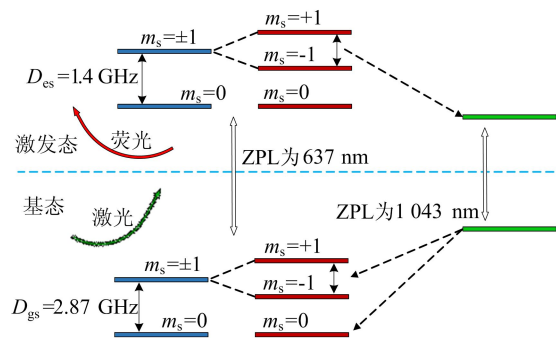


图 3 NV 色心的电子能级结构

当 NV 色心被微波照射时,如果微波频率满足 NV 色心的共振条件,那么微波会改变 NV 色心电子能级上的电子分布,使 NV 色心进入共振状态。NV 色心的共振频率 ω_{MW} 与沿 NV 色心主轴方向的磁场强度分量 B_{\parallel} 满足:

$$\omega_{\text{MW}} = D_{\text{gs}} \pm \gamma_{\text{NV}} B_{\parallel} \quad (1)$$

其中, D_{gs} 为 NV 色心的零场劈裂, $D_{\text{gs}} = 2.87 \text{ GHz}$; γ_{NV} 为 NV 色心的旋磁比, $\gamma_{\text{NV}} = 2.8 \text{ GHz/T}$ 。这说明,只要确定 NV 色心的微波共振频率,就可以计算出 NV 色心主轴方向的磁场强度。

NV 色心的零声子线是 637 nm,因此 532 nm 波长的激光可以激发 NV 色心电子,同时放出波长在 600~800 nm 之间的荧光。当 NV 色心与微波发生共振时,部分荧光光子会以声子的形式消耗掉,导致 NV 色心的荧光强度降低^[8],据此可以判断 NV 色心的共振频率,从而计算出外磁场强度。这被称为 NV 色心的连续波磁测量技术,实验中会给出 NV 色心在不同微波频率下的荧光强度,也就是 NV 色心的连续波谱(continuous wave spectrum,CW)。

当微波频率与 NV 色心的共振频率存在较小的频率差时,NV 色心的荧光强度也会部分降低,降低的幅度与频率差有关。因此,只要测出荧光强度的衰减幅度,就可以根据输入微波的频率计算出实际的共振频率,也就能计算出外磁场强度。这意味着在外磁场变化范围不大的情况下,只要监控 NV 的荧光强度与输入的微波频率,就可以实时监控外磁场强度变化,从而实现高精度磁测量。

2 理论计算

NV 色心的荧光强度与电子分布状态和激光强度有关,而电子分布状态与 NV 色心的共振状态有关,因此主要取决于外磁场强度与微波频率。选取 NV 色心的一个共振点进行计算,如果将微波频率与共振频率之间的差值记为偏共振 Δ ,那么 NV 色心的稳态电子分布与偏共振的关系可以使用五能级系统来描述^[9-10],如图 4 所示。

从微观上说,NV 色心在激光和微波的作用下放出荧光的过程中,激光不仅激发出 NV 色心的荧光,同时也会极化 NV 色心的电子分布,使荧光强度逐渐增加到极大值;而共振频率下的微波会破坏激光的极化作用,从而降低荧光强度。除此以外,NV 色心自身的退相干现象也会以横向

弛豫和纵向弛豫的形式破坏极化,以下分别建立这些因素的数学模型。

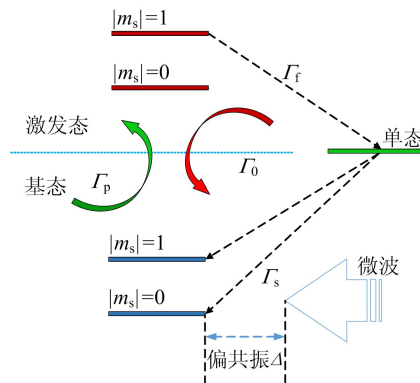


图 4 NV 色心的五能级系统

激光对电子的激发作用分为正常激发和无辐射跃迁 2 个部分,其中正常激发的过程可以将电子激发到激发态上,同时激发态的电子也会以恒定的速率落回基态,激发与回落的过程中自旋不变;无辐射跃迁过程发生在激发态落到基态的过程中,部分 ± 1 态的激发态的电子会经过单态落到基态上,这个过程中不会放出光子,并且自旋有概率会变成 0。如果将激光的激发速率记为 Γ_0 ,激发态电子落回基态的速率记为 Γ_p ,从三重态的激发态通过无辐射跃迁到单态的速率记为 Γ_f ,从单态通过无辐射跃迁到三重态的基态速率记为 Γ_s ,那么根据电子守恒可以推导出,激发态 0 态的电子密度 $\rho_{e_0 e_0}$ 、激发态 ± 1 态的电子密度 $\rho_{e_1 e_1}$ 、单态的电子密度 ρ_{ss} 满足:

$$\frac{d\rho_{e_0 e_0}}{dt} = \Gamma_p \rho_{00} - \Gamma_0 \rho_{e_0 e_0} \quad (2)$$

$$\frac{d\rho_{e_1 e_1}}{dt} = \Gamma_p \rho_{11} - (\Gamma_0 + \Gamma_f) \rho_{e_1 e_1} \quad (3)$$

$$\frac{d\rho_{ss}}{dt} = \Gamma_f \rho_{e_1 e_1} - \Gamma_s \rho_{ss} \quad (4)$$

其中: $\rho_{e_0 e_0}$ 为激发态 0 态的电子密度; $\rho_{e_1 e_1}$ 为激发态 ± 1 态的电子密度; ρ_{ss} 为自旋单态的电子密度。

方程涉及基态上 0 态的电子密度 ρ_{00} 与 ± 1 态的电子密度 ρ_{11} 。讨论 ρ_{00} 、 ρ_{11} 的演化时,需要计入 NV 色心电子的纵向弛豫速率 γ_1 与微波的拉比频率 Ω ,其中纵向弛豫会逐渐消除 0 态与 ± 1 态上的电子密度差异^[11],而微波会使电子在 0 态和 ± 1 态之间周期性翻转,因此 ρ_{00} 、 ρ_{11} 满足:

$$\frac{d\rho_{00}}{dt} = -\frac{i\Omega}{2}(\rho_{01} - \rho_{10}) - \frac{\gamma_1}{2}(\rho_{00} - \rho_{11}) -$$

$$\Gamma_p \rho_{00} + \Gamma_0 \rho_{e_0 e_0} + \frac{\Gamma_s}{2} \rho_{ss} \quad (5)$$

$$\frac{d\rho_{11}}{dt} = -\frac{i\Omega}{2}(\rho_{10} - \rho_{01}) - \frac{\gamma_1}{2}(\rho_{11} - \rho_{00}) -$$

$$\Gamma_p \rho_{11} + \Gamma_0 \rho_{e_1 e_1} + \frac{\Gamma_s}{2} \rho_{ss} \quad (6)$$

ρ_{00} 、 ρ_{11} 的演化方程中出现了参数 ρ_{01} 、 ρ_{10} ，这 2 个参数代表 NV 色心 0 态的电子与 ± 1 态的电子之间的相干强度，是量子力学中的概念。在量子力学中，相干性表示不同量子态之间的关联强度^[12]，此处可以理解为 NV 色心的电子在 0 态与 ± 1 态之间翻转的能力。按照量子力学的理论，自由演化的量子态会逐渐发生退相干，导致量子态之间的相干性逐渐降低，这被称为量子态的横向弛豫过程^[8]。如果将 NV 色心电子的横向弛豫速率记为 γ_2 ，那么 NV 色心电子的相干强度 ρ_{01} 、 ρ_{10} 满足：

$$\frac{d\rho_{01}}{dt} = -\left(\gamma_2 + \frac{\Gamma_p}{2} - i\Delta\right)\rho_{01} + \frac{i\Omega}{2}(\rho_{11} - \rho_{00}) \quad (7)$$

$$\frac{d\rho_{10}}{dt} = -\left(\gamma_2 + \frac{\Gamma_p}{2} + i\Delta\right)\rho_{10} + \frac{i\Omega}{2}(\rho_{00} - \rho_{11}) \quad (8)$$

方程(7)、(8)给出了 NV 色心不同能级上的电子密度在激光与微波的共同作用下随时间演化的物理模型，这里只考虑平衡态下的电子分布。当 NV 色心达到平衡态时，所有能级的电子密度都不随时间变化，也就是电子密度对时间的一阶导数项都为 0，对电子密度归一化后即可求解。

NV 色心的荧光来源于激发态向基态的跃迁，因此荧光强度 S 计算公式为：

$$S = \rho_{e_0 e_0} + \frac{\Gamma_0}{\Gamma_0 + \Gamma_s} \rho_{e_1 e_1} \quad (9)$$

这里没有考虑荧光收集效率与光电探测器的转换系数。将电子密度的稳态解带入荧光强度的表达式，并引入近似条件 $\Gamma_0 \gg \Gamma_s \gg \Gamma_p$ ，可以得到荧光强度与偏共振的关系，即

$$S(\Delta) = S(\Delta \rightarrow \infty) \left(1 - \frac{C\gamma^2}{\Delta^2 + \gamma^2}\right) \quad (10)$$

其中： C 为 NV 色心的 CW 谱对比度； γ 为 NV 色心的 CW 谱吸收峰宽度，满足：

$$\gamma = \sqrt{\left(\gamma_2 + \frac{\Gamma_p}{2}\right)^2 + \left(4 + \frac{\Gamma_p}{\Gamma_s}\right) \frac{2\gamma_2 + \Gamma_p}{8\gamma_1 + 2\Gamma_p} \Omega^2} \quad (11)$$

$$C = \frac{2\Gamma_p + 3\Gamma_s}{2\Gamma_p + 5\gamma_1} \frac{\Omega^2 \Gamma_p}{[(4\Gamma_s + \Gamma_p)\Omega^2 + 2\Gamma_s\gamma_2(2\gamma_1 + \Gamma_p)]\gamma} \quad (12)$$

为了提升磁测量灵敏度，实际使用中会对微波进行频率调制，这会使微波的频率随时间呈现正弦振荡的形式，使偏共振附加上随时间震荡的正弦信号。此时荧光强度满足：

$$S(\Delta, t) =$$

$$S(\infty) \left\{1 - \frac{C\gamma^2}{[\Delta + kD\sin(\omega t)]^2 + \gamma^2}\right\} \quad (13)$$

其中： D 为调制信号的调制深度； ω 为调制信号的调制频率； k 为调制信号向微波频率的转换系数。将荧光强度在 $\Delta=0$ 的邻域内进行泰勒展开，并认为调制信号幅度较小从而假设 $\gamma \gg kD$ ，可得：

$$\tilde{S}(\Delta, t) = S(\infty) \left[(1 - C) + \frac{2CkD\sin(\omega t)}{\gamma^2} \Delta + O(\Delta^2) \right] \quad (14)$$

将结果保留到一阶项，并与调制信号相乘，再通过截止频率远低于 ω 的低通滤波，从而实现信号的解调。解调后的信号满足：

$$\tilde{S}(\Delta) = \frac{CkD^2}{\gamma^2} \Delta \quad (15)$$

(15)式仅在 $\Delta=0$ 的邻域内适用，超出范围时被舍弃的高阶项不能忽略，否则会出现明显的非线性效应影响结果。

3 指标分析

NV 色心最突出的磁测量指标是灵敏度与频率响应，以下分别从理论上分析这两项指标。在连续波磁测量环境下，NV 色心的磁测量灵敏度满足：

$$S_{\text{sensitivity}} = \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{\hbar}{g_e \mu_B} \frac{\Delta\nu}{C_{\text{CW}} \sqrt{R}} \quad (16)$$

其中： $\Delta\nu$ 为 NV 色心的 CW 谱吸收峰宽度； C_{CW} 为 NV 色心 CW 谱吸收峰对比度； R 为光电探测器荧光收集效率； \hbar 为约化普朗克常数； g_e 为 NV 色心量子体系的 g 因子； μ_B 为玻尔磁子。显然，提升荧光收集效率与吸收峰对比度 C_{CW} 、或者降低吸收峰宽度可以提升 NV 色心的磁测量灵敏度。实验中，NV 色心磁传感器实现了 $15 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的磁测量灵敏度^[3]，已经超过了常用的各种磁阻传感器，接近磁测量灵敏度最高的超导量子干涉仪^[13-14]和原子磁力计的指标^[15-17]。由于超导量子干涉仪必须工作在低温环境下，同时原子磁力计只有在弱磁场下才能表现出极高的灵敏度，而 NV 色心可以直接在室温下工作，有着优秀的适用性。另一项指标是 NV 色心的频率响应。从 NV 色心的工作原理可以看出，NV 色心的磁测

量频率响应主要取决于电子分布重新达到平衡态的时间,这可以通过增加激光功率来提升。实验中通常利用 NV 色心探测频率在 0~100 kHz 范围内的磁场,根据最新的实验结果,NV 色心的频率响应已经可以覆盖 0~140 kHz 的范围^[18]。

现有的电子式电流互感器通常能达到 0.2S 级的电流测量精度,这表示电流互感器的电流测量信噪比小于 0.2%;除此之外,现有的电子式电流互感器采样率通常低于 10 kHz,根据奈奎斯特采样定理,意味着电流互感器的频率响应范围^[2]肯定低于 5 kHz。NV 色心电流互感器的磁测量带宽可以通过设置锁相放大器的时间常数来控制,当带宽被设置为 10 kHz 时,对灵敏度为 10 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的 NV 色心电流互感器,其磁测量精度可以达到 1 nT。现有电流互感器中,待测电流到测量设备之间的距离通常为 30 cm,因此 NV 色心电流互感器的理论精度可以达到 1.5 mA。电流互感器的校验标准中,待测电流的幅度通常取 1 kA,对电流的测量精度约为 2 A,因此 NV 色心的灵敏度满足电流互感器的设计需求,其高灵敏度、高频率响应特性在智能电网中有着较大的应用前景^[19-20]。

4 电流测试仿真

本文探讨将 NV 色心传感器应用于 50 Hz 交流电测量的可行性,以及应用中各种潜在问题的解决方案。50 Hz 的交流电可以被简单地当成稳恒电流处理,因此在导体周围产生的磁场强度 $B(t)$ 满足:

$$B(t) = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \cos(\omega t) \quad (17)$$

其中: I 为电流的幅度; ω 为电流的频率; d 为导线到 NV 色心样品的距离; μ_0 为真空磁导率,这里用其近似代替空气磁导率。为了简化仿真,以下采用的模型中只考虑 NV 色心传感器对直流电流的响应。

仿真的流程如下:首先采用(17)式计算待测导体周围的磁场分布,根据(1)式给出电流引发的微波偏共振强度;然后根据 NV 色心荧光强度与偏共振强度的关系(10)式,给出 NV 色心的荧光强度;最后根据锁相放大器解调信号的物理过程(14)式处理荧光信号,给出不同的待测电流下 NV 色心传感器的输出信号。

以下的仿真中,NV 色心传感器的共振峰对比度设置为 0.1,导体到传感器的距离为 20 cm,

产生的磁场与 NV 色心的主轴方向夹角为 80° ,调制信号的频率设置为 20 kHz,调制信号幅度为 2 V,调制信号的转换系数为 0.1 MHz/V,对不同的共振峰宽度 γ 和信号对比度 C ,仿真结果如图 5、图 6 所示。

从仿真结果可以看出,NV 色心对待测电流幅度的响应曲线类似于微分谱,当电流产生的磁场沿偏置场的反方向增加时,信号强度随电流幅度的变化先增加后减小;反之,当电流产生的磁场与偏置磁场同方向时,信号强度随电流幅度的增加先减小后增加。显然,NV 色心传感器的动态范围就是输出信号两侧极值点之间的区域,而传感器的电流测量灵敏度主要取决于曲线的斜率。从以上 2 组仿真结果可以看出,降低吸收峰线宽、提升吸收峰对比度可以提升 NV 色心的电流测量灵敏度,但降低吸收峰线宽会减小 NV 色心的电流测量动态范围。

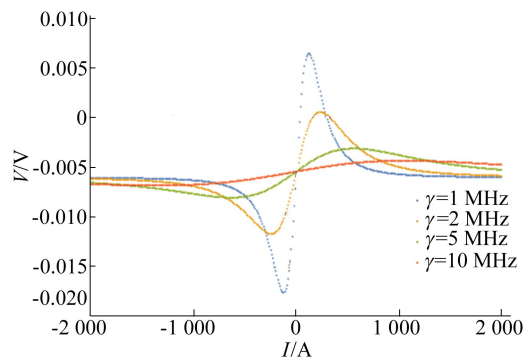


图 5 NV 色心电流响应曲线与吸收峰线宽的关系

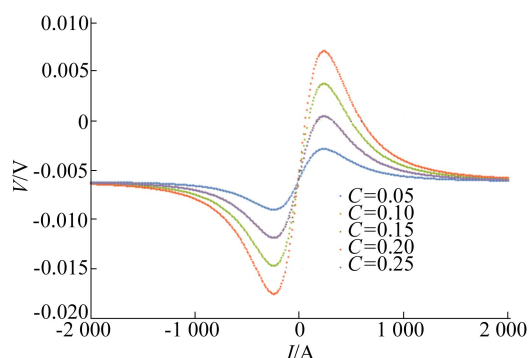


图 6 NV 色心电流响应曲线与吸收峰对比度的关系

5 误差分析

首先分析 NV 色心传感器的系统非线性误差,并验证近似关系(15)式的准确性。以 $\gamma = 2$ MHz 仿真结果为例,将电流值为 $-20 \sim 20$ A 的数据点用于拟合电流转换到信号的线性系数,拟

合结果如图 7 所示。

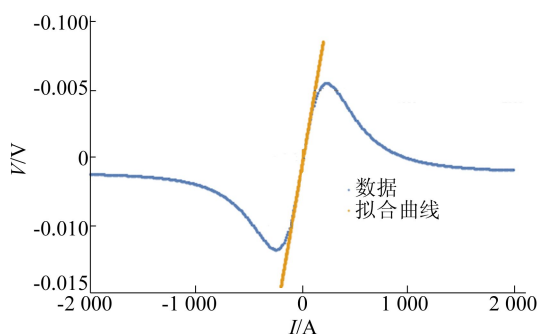


图 7 NV 色心的共振信号中心点邻域斜率仿真

对 $-20 \sim 20$ A 的数据点拟合得到的斜率为 4.553×10^{-5} V/A, 对应图 6 的拟合曲线。从数据对比中可以看出,在 $-100 \sim 100$ A 的范围内非线性效应较弱,电流测量灵敏度较高,而超出这一范围后灵敏度逐渐下降。将仿真数据的初始参数带入信号斜率的理论表达式(15)式,得出的共振点理论斜率为 4.86×10^{-5} V/A,在量级上基本相同。

NV 色心的电流响应曲线有明显的非线性效应,因此需要考虑非线性拟合的情况。因为解调过程中用到了低通滤波器,所以可以假设解调信号与输入信号的微分满足线性关系,即解调信号满足:

$$S_{FM}(\Delta) = S_{FM} \frac{\Delta}{(\Delta^2 + \gamma^2)^2} + S_0 \quad (18)$$

按照(18)式对信号进行拟合,结果如图 8 所示。

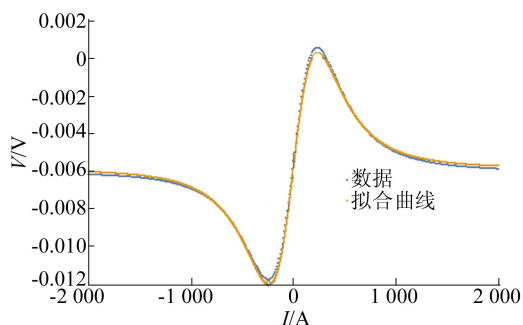


图 8 NV 色心电流响应曲线的非线性拟合

从图 8 可以看出,非线性拟合的结果与原始数据在 $-160 \sim 160$ A 的范围内比较接近,但整体上存在明显的系统偏差,在极值点周围偏差最大。

综上所述,线性拟合的有效范围较小,超出范围后有明显非线性,但计算上较为简单;非线性拟合有效范围较大,但有整体的系统误差,而且参数

的拟合较为困难。因此,最好使用查找表加线性插值的方法逐段确定电流到传感器信号的转换系数,从而确定测量数据与待测电流的拟合关系。

除了 NV 色心响应曲线的非线性以外,另一个需要考虑的因素是电流到传感器的距离误差。由于交流电的趋肤效应,电流到传感器的距离可能不同于导线中心到传感器的距离。此外,在使用聚磁环收集待测磁场的情况下,聚磁环中心与导线的偏离也会导致类似的结果。仍然以 $\gamma = 2$ MHz 的仿真结果为例分析距离造成的误差,在不同电流强度下输出信号随距离的变化如图 9 所示。

从图 9 可以看出,随着电流到金刚石距离的增加,NV 色心的输出信号先增加后减小。这可以从 NV 色心吸收峰的形状上来理解,当外加磁场从无限大降低到 0 时,NV 色心的共振频率也从无限远的位置沿电流响应曲线移动到共振频率点上,因此表现出先增加后降低的特性。

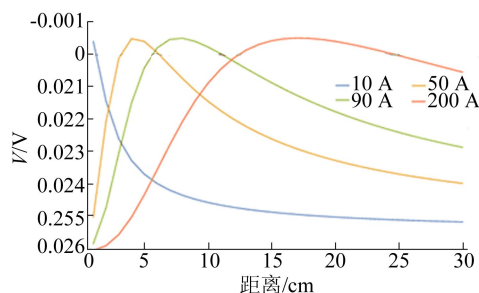


图 9 NV 色心信号强度与导体距离的关系

考虑不同距离上电流位置波动对 NV 色心传感器输出信号的影响时,可以用测量 2 个距离相近、幅度相同的电流获得的输出信号的差值来描述信号随电流位置的波动,以此为基础的仿真结果如图 10 所示。

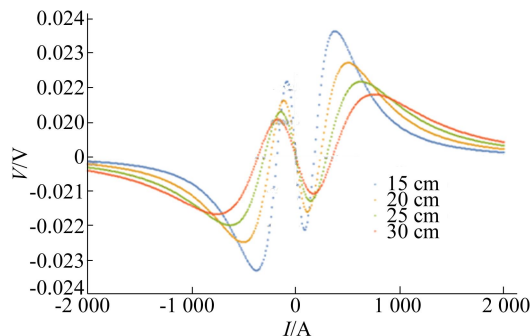


图 10 NV 色心信号波动幅度与电流中心位置的关系

从图 10 可以看出,产生磁场的电流越接近

NV 色心传感器, 电流位置波动产生的噪声越大。而且对每个待测电流距离, 存在一个特定的电流幅度值, 在这个电流幅度下电流位置波动引发的噪声最大。测试中应该避开这些距离下对应的特定电流值, 以求降低电流位置误差的影响。

6 结 论

本文以 NV 色心的连续波磁测量技术为基础, 讨论了 NV 色心的磁测量原理与优势, 并分析了将 NV 色心应用于电流传感器的可行性。NV 色心在电流测量精度与频率响应范围方面有明显优势, 既能实现高精度的电流测量, 也能提供高频电流冲击的监控与分析。除此之外, NV 色心可以在室温下工作, 能够适应较大范围的温度变化, 而且物理化学性质稳定, 满足安全性、可靠性、多功能性等需求。

本文根据 NV 色心的磁测量理论建立了 NV 色心电流传感器的仿真模型, 给出了 NV 色心对待测电流的响应曲线。在此基础上, 本文分析了 NV 色心电流传感器的灵敏度和动态范围的影响因素, 给出 NV 色心电流传感器的优化方法。此外, 本文还分析了 NV 色心对待测电流的非线性响应现象以及电流位置波动对信号的影响, 并提出了相应的解决方案。这些仿真分析为 NV 色心电流传感器的设计提供了理论指导, 为下一步的实际生产和测试提供了参考。

[参 考 文 献]

- [1] PAPP A, HARMS H. Magneto-optical current transformer. 1: principles[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(22): 3729-3734.
- [2] 肖智宏. 电子式互感器原理与实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [3] BARRY J F, TURNER M J, SCHLOSS J M, et al. Optical magnetic detection of single-neuron action potentials using quantum defects in diamond[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(49): 14133-14138.
- [4] 彭世杰, 刘颖, 马文超, 等. 基于金刚石氮空位色心的精密磁测量[J]. *物理学报*, 2018(16): 197-208.
- [5] WOLF T, NEUMANN P, NAKAMURA K, et al. Subpicotesla diamond magnetometry [J]. *Physical Review X*, 2015, 5(4): 041001.
- [6] CHATZIDROSOS G, WICKENBROCK A, BOUGAS L, et al. Miniature cavity-enhanced diamond magnetometer [J]. *Physical Review Applied*, 2017, 8(4): 044019.
- [7] PHAM L M. Magnetic field sensing with nitrogen-vacancy color centers in diamond[D]. Cambridge, Mass; Harvard University, 2013.
- [8] GOLDMAN M L, DOHERTY M W, SIPAHIGIL A, et al. State-selective intersystem crossing in nitrogen-vacancy centers [J]. *Physical Review B*, 2015, 91(16): 165201.
- [9] JENSEN K, ACOSTA V M, JARMOLA A, et al. Light narrowing of magnetic resonances in ensembles of nitrogen-vacancy centers in diamond [J]. *Physical Review B*, 2013, 87(1): 014115.
- [10] DR ÉAU A, LESIK M, RONDIN L, et al. Avoiding power broadening in optically detected magnetic resonance of single NV defects for enhanced dc magnetic field sensitivity [J]. *Physical Review B*, 2011, 84(19): 195204.
- [11] LEVITT M H, HOLGER F F. Spin dynamics: basics of nuclear magnetic resonance [J]. *Medical Physics*, 2010, 37(1): 406.
- [12] 曾谨言. 量子力学[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [13] FAGALY R L. Superconducting quantum interference device instruments and applications [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(10): 101101.
- [14] QUEITSCH M. Modeling and inversion of airborne full tensor magnetic gradiometry data in the thuringian basin and forest [D]. Jena; Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2016.
- [15] KOMINIS I K, KORNACK T W, ALLRED J C, et al. A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer [J]. *Nature*, 2003, 422(6932): 596-599.
- [16] 季云兰. 无自旋交换弛豫原子磁力计及其零场超低场核磁共振的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [17] 陈伯韬, 江敏, 季云兰, 等. 用于零场核磁共振探测的无自旋交换弛豫原子磁力仪 [J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1004001.
- [18] XIE Y, GENG J, YU H, et al. Dissipative quantum sensing with a magnetometer based on nitrogen-vacancy centers in diamond [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(1): 014013.
- [19] 高佳宜, 王坚俊, 应康, 等. 冲击负荷对地区电网电能质量的影响研究 [J]. *能源工程*, 2017(4): 18-22.
- [20] 杨庆, 孙尚鹏, 司马文霞, 等. 面向智能电网的先进电压电流传感方法研究进展 [J]. *高电压技术*, 2019, 45(2): 349-367.

(责任编辑 张 镛)