

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107270

三轴隧道磁阻阵列电流传感器及电流测量方法

李非凡 冀永芳 庄盛秋

(国家电网江苏省电力有限公司 徐州供电分公司 徐州 221005)

摘要: 针对现有阵列式电流传感器测量偏心、倾斜导线时仍存在较大电流测量误差,设计了一种三轴隧道磁阻阵列电流传感器实现了导线偏心、倾斜时电流的准确测量,对单轴、双轴和三轴隧道磁阻阵列传感器的电流测量误差进行仿真比较,最大电流测量误差结果为25%、20.5%和1.39%,结果表明三轴隧道磁阻阵列电流传感器显著提高了导线偏心、倾斜时的电流测量精度,克服了导线偏心、倾斜对电流测量误差的影响,三轴隧道磁阻阵列电流传感器在电流测量领域中具有巨大优势。

关键词: 无铁芯电流传感器;隧道磁阻传感器;非垂直;圆形传感器阵列;电流算法

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Current measurement with 3-D coreless TMR sensor array for inclined conductor

Li Feifan Ji Yongfang Zhuang Shengqiu

(Xuzhou Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Xuzhou 221005, China)

Abstract: In view of the large measurement error introduced by the non-verticality of the wire, which still exists in the magnetic sensor arrays, a 3-D tunnel magnetoresistance (TMR) sensor array scheme is proposed to precisely measure the current when the wire is eccentric and tilted. Then the current measurement error of the single-axis, two-axis and three-axis TMR sensor array is simulated and compared, where the maximum current errors are 25%, 20.5% and 1.39%. It is obvious that the 3-D TMR sensor array can significantly improve the measurement accuracy and overcome the influence of eccentricity and tilt, so the 3-D TMR sensor array has great advantages in the field of current measurement.

Keywords: terms-coreless current transducer; TMR sensor; un-perpendicularity; circular sensor array; correction algorithm

0 引言

非侵入式电流测量器件正广泛应用于配电、电力电子、驱动技术等许多应用当中^[1]。由于其非接触、简单及廉价的系统集成性等突出特点,磁传感器阵列得到了大量研究。与传统的罗戈夫斯基线圈相比,磁传感器阵列克服了所需的积分电路及失调问题^[2]。由于其不含铁芯,磁传感器阵列解决了铁芯磁饱和与剩磁问题^[3-6]。随着磁传感技术的持续发展,陆续出现霍尔传感器和磁通门传感器之间的竞争^[7-11],后来隧道磁阻(tunnel magnetoresistance, TMR)传感器^[12-14]提供了优于霍尔传感器、各向异性磁阻(anisotropic magnetoresistive, AMR)和巨型磁阻(giant magnetoresistance, GMR)传感器的灵敏度和线性度^[15]。

隧道磁阻传感器不仅稳定、微型化、功耗低,而且集成度高、带宽宽^[16]。磁传感器阵列通常安装在印制电路板

(printed circuit board, PCB)上,并分布在载流导线周围^[17-19]。Chen等^[20]提出了一种采用4个霍尔传感器的圆形阵列方案,其中霍尔传感器均匀分布在以电流轴线为圆心的圆周上,且每个霍尔传感器测量所在位置处的切向磁场,安培环路定律中的闭合回路积分是通过在每个霍尔传感器响应的求和来近似,但是最后电流测量误差还会受到霍尔传感器安装精度、导线形状、电缆绝缘厚度和导线直径的影响。

基于磁传感器阵列的电流测量方法还有很多,但现有的磁传感器阵列测量电流方法大都基于如下假设:载流导线是垂直于磁传感器阵列平面,并且周围没有其他干扰磁场存在。例如,导线定位算法利用4对霍尔传感器实现了偏心导线垂直于磁传感器阵列平面时的电流准确测量^[21]。但现场实际测量时,导线与磁传感器阵列平面的不垂直可能引入较大的测量误差^[22]。因此,本文提出一种三轴隧道

收稿日期:2021-07-14

磁阻阵列电流测量方法,适用于偏心、倾斜导线的电流准确测量,并给出了该电流测量方法的理论仿真和实验验证。

1 结构与原理

隧道磁阻传感器可根据磁敏感轴的数量分为单轴、双轴和三轴磁阻传感器。单轴隧道磁阻传感器只能检测一个指定方向的磁场,双轴隧道磁阻传感器可以测量某一测点处 x 、 y 方向上的磁场,而三轴隧道磁阻传感器集成度最高,可以同时测量空间某一测点处 x 、 y 和 z 方向上的磁场。本文选用的是三轴隧道磁阻传感器,其结构如图1所示。

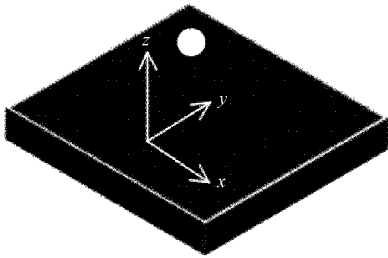


图1 三轴隧道磁阻传感器结构

本文提出一种三轴隧道磁阻阵列电流测量方案,其中4个三轴隧道磁阻传感器均匀放置在圆周上,假定导线是偏心、倾斜的无限长直导线,如图2所示。

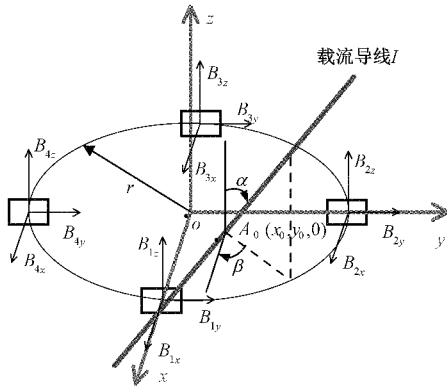


图2 三轴隧道磁阻传感器阵列原理

在图2中,导线倾斜角包括天顶角 α 和偏转角 β ,其中天顶角 α 是导线与正 z 轴之间的角度,而偏转角 β 是导线在 xoy 平面的投影线与正 x 轴之间的夹角。4个三轴隧道磁阻传感器对称排列在半径为 r 的圆周上,导线与 xoy 平面的交点坐标为 $A_0(x_0, y_0, 0)$,载流导线的方向向量表示为 $\mathbf{l}=(m, n, p)$,其中 $m=\sin\alpha\cos\beta$, $n=\sin\alpha\sin\beta$, $p=\cos\alpha$ 。

三轴隧道磁阻阵列电流测量方法是基于毕奥-萨伐尔定律中对于无限长直载流导线,磁感应强度计算式为:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi\rho} \mathbf{e}_l \times \mathbf{e}_\rho \quad (1)$$

其中, μ_0 为真空磁导率; ρ 为场点和载流导线之间的垂直距离;向量 \mathbf{e}_l 和 \mathbf{e}_ρ 相应地表示为单位方向向量和相对位置矢量。接下来探究导线与 xoy 平面相交位置、导线倾斜

角以及磁感应强度分量之间的关系。

4个磁传感器测点的坐标为 $(x_i, y_i, 0)$,测点处的磁感应强度为 $B_i(B_{ix}, B_{iy}, B_{iz})$,其计算式为:

$$\begin{cases} B_i = \sqrt{B_{ix}^2 + B_{iy}^2 + B_{iz}^2} \\ B_{ix} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{-p(y_i - y_0) \sqrt{m^2 + n^2 + p^2}}{\rho^2(y_i - y_0)^2 + \rho^2(x_i - x_0)^2 + [m(y_i - y_0) - n(x_i - x_0)]^2} \\ B_{iy} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{p(x_i - x_0) \sqrt{m^2 + n^2 + p^2}}{\rho^2(y_i - y_0)^2 + \rho^2(x_i - x_0)^2 - [m(y_i - y_0) - n(x_i - x_0)]^2} \\ B_{iz} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{[n(x_i - x_0) - m(y_i - y_0)] \sqrt{m^2 + n^2 + p^2}}{\rho^2(y_i - y_0)^2 + \rho^2(x_i - x_0)^2 + [m(y_i - y_0) - n(x_i - x_0)]^2} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知,磁感应强度分量 B_{ix} 、 B_{iy} 、 B_{iz} 与电流 I 成正比,并且受相对位置和倾斜角度的影响,上述非线性方程可以用相除的办法转换为线性方程。已知4个隧道磁阻传感器的坐标为 $(r, 0, 0)$ 、 $(0, r, 0)$ 、 $(-r, 0, 0)$ 和 $(0, -r, 0)$,可以得到如下表达式:

$$\begin{cases} \frac{B_{1x}}{B_{1y}} - \frac{(y_1 - y_0)}{x_1 - x_0} = k_1 \\ \frac{B_{2y}}{B_{2x}} - \frac{x_2 - x_0}{-(y_2 - y_0)} = k_2 \\ \frac{B_{3x}}{B_{3y}} - \frac{-(y_3 - y_0)}{x_3 - x_0} = k_3 \\ \frac{B_{4y}}{B_{4x}} - \frac{x_4 - x_0}{(y_4 - y_0)} = k_4 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} k_1 x_0 + y_0 - k_1 x_1 + y_1 - k_1 r \\ x_0 + k_2 y_0 = x_2 + k_2 y_2 = k_2 r \\ k_3 x_0 + y_0 - k_3 x_3 + y_3 - k_3 r \\ x_0 + k_4 y_0 = x_4 + k_4 y_4 = -k_4 r \end{cases} \quad (3)$$

可得:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & 1 \\ 1 & k_2 \\ k_3 & 1 \\ 1 & k_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} k_1 r \\ k_2 r \\ -k_3 r \\ -k_4 r \end{bmatrix} \quad (4)$$

此外,由于定义了 α 、 β 与 m 、 n 、 p 之间的确定性关系,可以通过 m/p 、 n/p 的值唯一确定导线的倾斜度。获得 m/p 、 n/p 的步骤如下:

$$\begin{cases} \frac{B_{1z}}{B_{1y}} = \frac{m(y_1 - y_0) - n(x_1 - x_0)}{p(x_1 - x_0)} = -\frac{m}{p}k_1 - \frac{n}{p} = k_5 \\ \frac{B_{2z}}{B_{2x}} = \frac{m(y_2 - y_0) - n(x_2 - x_0)}{-p(y_2 - y_0)} = -\frac{m}{p} - \frac{n}{p}k_2 = k_6 \\ \frac{B_{3z}}{B_{3y}} = \frac{m(y_3 - y_0) - n(x_3 - x_0)}{p(x_3 - x_0)} = -\frac{m}{p}k_3 - \frac{n}{p} = k_7 \\ \frac{B_{4z}}{B_{4x}} = \frac{m(y_4 - y_0) - n(x_4 - x_0)}{-p(y_4 - y_0)} = -\frac{m}{p} - \frac{n}{p}k_4 = k_8 \end{cases} \quad (5)$$

可得:

$$\begin{bmatrix} \frac{m}{p} \\ \frac{n}{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & 1 \\ 1 & k_2 \\ k_3 & 1 \\ 1 & k_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -k_5 \\ -k_6 \\ -k_7 \\ -k_8 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: k_i 是指磁感应强度分量之间的比例系数,可由磁传感器测量到的数据求取。综上所述,针对偏心、倾斜导线电流的测量方法可以简单表示如下。

1) 获取比例系数 k_i :基于4个三轴隧道磁阻传感器的

输出数据 (B_{1x}, B_{1y}, B_{1z}) , 8 个磁场比例系数 k_i 由式(3)和(5)计算得到。

2) 求取 $A_0(x_0, y_0, 0)$ 坐标: 当获得 k_1, k_2, k_3 和 k_4 时, 可以通过式(4)确定相交点 $A_0(x_0, y_0, 0)$ 位置。

3) 确定倾斜参数 $(m/p, n/p)$: 当系数 $k_1 \sim k_8$ 都获得后, 倾斜参数 $(m/p, n/p)$ 可由式(6)计算得出。

4) 获得导线电流值: 对于无限长直载流导线, 导线电流与磁感应强度之间的关系为:

$$I_t = \frac{2\pi\rho B_t}{\mu_0} \quad (7)$$

其中, 磁感应强度 B_t 是由式(2)计算的合成磁场, 而参数 ρ 是指各个隧道磁阻传感器与载流导线之间的垂直距离, 其计算公式为:

$$\rho = \frac{\sqrt{(y_t - y_0)^2 + (x_t - x_0)^2 + [(y_t - y_0)m/p - (x_t - x_0)n/p]^2}}{\sqrt{(m/p)^2 + (n/p)^2 + 1}} \quad (8)$$

利用三轴隧道磁阻传感器阵列测得的数据, 可以求取 4 个电流 I_t , 其平均值作为电流测量方法最终求得的电流值 I 。

因此, 三轴隧道磁阻阵列电流测量方法的流程如图 3 所示。

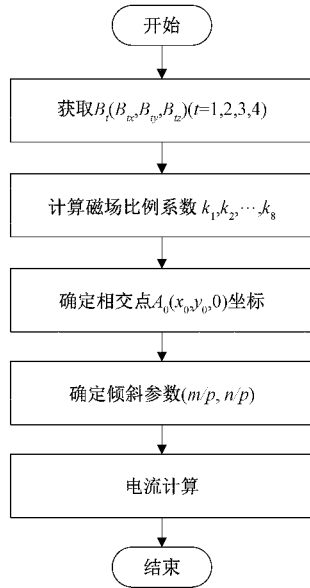


图 3 三轴隧道磁阻阵列电流测量算法流程

2 理论仿真

假设三轴隧道磁阻传感器阵列半径 $r = 15.6 \text{ mm}$, 设定仿真电流 $I_{exact} = 100 \text{ A}$, 倾斜角 α 和 β 的变化范围分别是 $0 \sim \pi/3$ 与 $0 \sim \pi/4$, 步长都为 $\pi/180$ 。由于三轴隧道磁阻传感器阵列的对称性, 只需考虑在 1/8 象限内导线倾斜角变化对电流测量误差的影响。

对于单轴隧道磁阻传感器阵列, 4 个单轴磁传感器分

别测量所处的切向磁场。显然, 在单轴磁传感器测量模型中, 只考虑了磁感应强度的 $B_{1y}, B_{2x}, B_{3y}, B_{4x}$ 分量。然后, 使用安培环路定律计算导线电流为:

$$I \approx \frac{1}{\mu_0} (B_{1y} - B_{2x} - B_{3y} + B_{4x}) \cdot \frac{\pi}{2} r \quad (9)$$

假设导线与 xoy 平面的相交点坐标为 $(0, 0, 0)$, 得出基于安培环路定律的电流相对误差如图 4 所示, 电流相对误差随天顶角 α 和偏转角 β 的变化如图 5 所示。

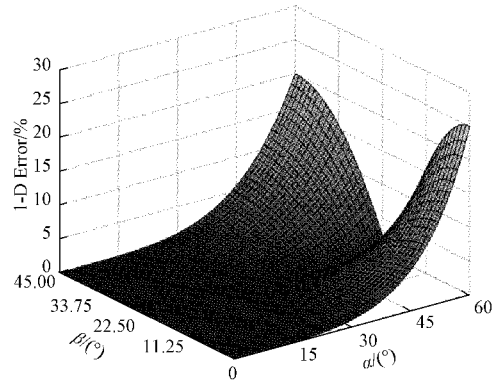
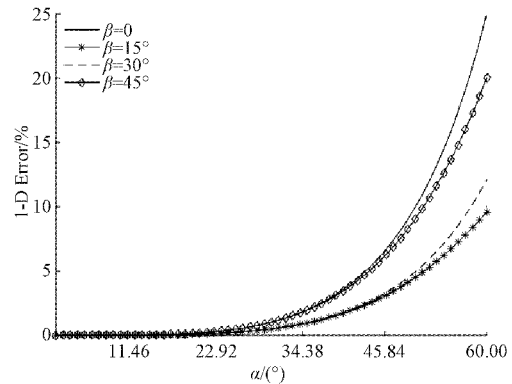
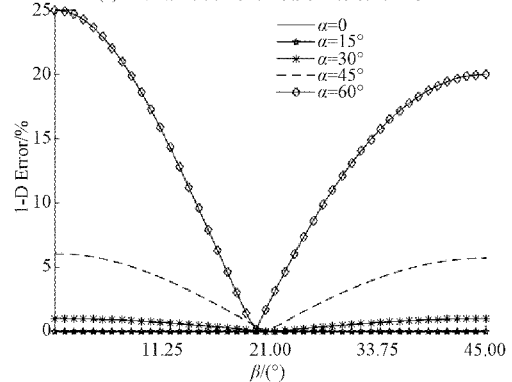


图 4 单轴隧道磁阻阵列的电流测量误差



(a) 电流相对误差随天顶角 α 的变化曲线



(b) 电流相对误差随偏转角 β 的变化曲线

图 5 电流相对误差变化曲线

由上图可知, 电流相对误差在 $\beta \approx 22.5^\circ$ 附近有局部最小值。当天顶角 $\alpha < 30^\circ$ 时, 电流相对误差小于 1%; 当天顶角 $\alpha < 45^\circ$ 时, 电流相对误差小于 7%; 当天顶角 $\alpha > 45^\circ$ 时,

电流相对误差随天顶角 α 的增加迅速增大,即导线偏离 z 轴的程度越大电流测量相对误差越大,当导线偏离 z 轴的角度达到 60° 时,电流相对误差最大可达 25% 。因此,导线倾斜角 α 和 β 对单轴隧道磁阻阵列的电流测量误差有显著影响。

双轴隧道磁阻传感器是一种平面磁传感元件,可检测 x 、 y 方向上的磁感应强度分量。由于缺失磁感应强度 z 轴分量,不能充分考虑导线倾斜角变化对电流测量误差的影响。假定导线与双轴磁传感器阵列平面垂直,忽略周围干扰磁场,导线偏心位置可以根据双轴磁传感器测得的 B_{ix} 和 B_{iy} 分量确定,相交点 $A_0(x_0, y_0, 0)$ 由式(4)确定,令偏心比 $e_r = d/r$, 其中 $d = (x_0^2 + y_0^2)^{1/2}$ 。最后,电流计算式为:

$$\begin{cases} B_t = \sqrt{B_{ix}^2 + B_{iy}^2} = \frac{\mu_0 I}{2\pi\sqrt{(x_t - x_0)^2 + (y_t - y_0)^2}} \\ I = \frac{2\pi\sqrt{(x_t - x_0)^2 + (y_t - y_0)^2} B_t}{\mu_0} \end{cases} \quad (10)$$

利用双轴隧道磁阻传感器阵列测得的数据,可以求得 4 个电流值,其平均值被选作为最终的导线电流值。由于双轴磁传感器阵列的对称性,只需考虑 $1/8$ 象限内导线倾斜角变化对电流相对误差的影响。导线与 xoy 平面相交点坐标为 $(0.002, 0.002, 0)$, 电流相对误差如图 6 所示。

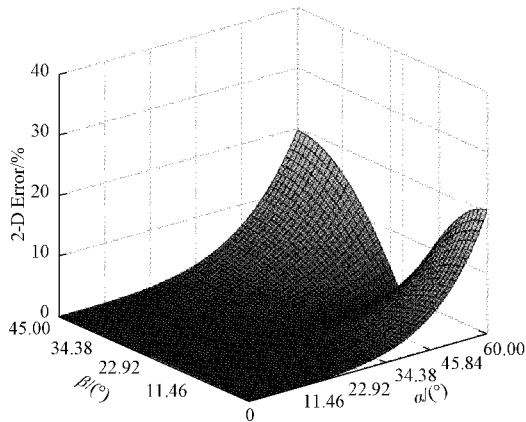


图 6 双轴隧道磁阻阵列的电流测量误差

由图 6 可知,电流相对误差在 $\beta \approx 20^\circ$ 附近存在最小值。当天顶角 $\alpha > 45^\circ$ 时,电流相对误差迅速增加;当天顶角 $\alpha = 60^\circ$ 、偏转角 $\beta = 20^\circ$ 时,电流相对误差最大可达 20.49% 。因此,导线倾斜角变化(包括天顶角 α 和偏转角 β)对双轴隧道磁阻阵列的电流测量误差影响较大。

三轴隧道磁阻传感器实现了磁感应强度 xyz 的三轴测量,于是便可深入探究导线倾斜角对电流测量误差的影响。基于三轴隧道磁阻传感器阵列测得的 B_{ix} 、 B_{iy} 和 B_{iz} ,可由式(4)确定载流导线与 xoy 平面的交点坐标 $A_0(x_0, y_0, 0)$,然后由式(6)可计算出倾斜参数 $(m/p, n/p)$,最后利用式(7)计算出导线电流值 I ,其平均值作为电流测量方法最终求

得的电流值 I 。

上述导线电流值 I 的获取是基于严格的理论推导,不存在理论误差,而由仿真得到的电流相对误差约为 1×10^{-13} ,这是由于 MATLAB 的数值计算误差产生的。考虑到现场实际应用中三轴隧道磁阻传感器阵列存在失调电压和背景噪声,所以在三轴隧道磁阻传感器的输出中加入了 $\text{SNR} = 40 \text{ dB}$ 的高斯白噪声。载流导线与 xoy 平面的交点坐标为 $(0.005, 0.005, 0)$, 电流相对误差如图 7 所示。

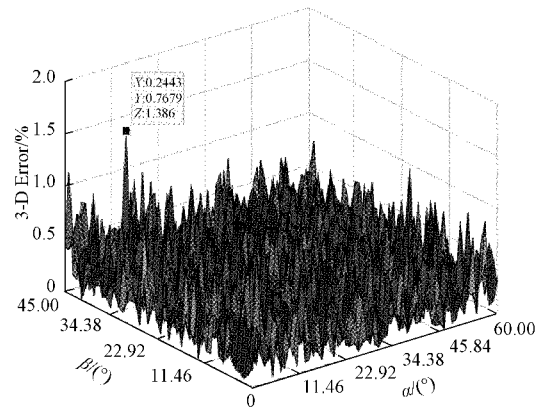


图 7 SNR=40 dB 时的电流测量误差

在磁场数据中加入 40 dB 的高斯白噪声后,使用三轴隧道磁阻阵列电流测量方法的最大相对误差仅为 1.386% , 电流相对误差平均值为 0.29% , 标准差为 0.25% 。与双轴隧道磁阻阵列电流测量方法相比,它的电流测量精度得到大大提高。因此,三轴隧道磁阻阵列电流测量方法对导线偏心、倾斜位置的精确定位显著提高了电流测量的准确性,实现了导线偏心、倾斜时的电流准确测量。

3 实验验证

本文设计了一种开口式圆形隧道磁阻传感器阵列电流传感器,样品如图 8 所示。圆孔的半径 r 为 15.6 mm , 4 个超低功耗的三轴隧道磁阻传感器安装在 PCB 上,选择的三轴隧道磁阻传感器类型为 TMR2301(MDT 公司)。它具有良好的温度稳定性、宽饱和磁场 ($\pm 500 \text{ Oe}$)、高灵敏度 (1 mV/V/Oe) 和宽带宽 (200 kHz)。

实验系统原理如图 9 所示。电流测量实验中所用的直流电源为 DLM8-450E-M1,它的最大输出电流为 450 A ,精度为 0.75% 。所用交流电源为 SLQ-500,它的最大输出电流有效值为 500 A ,精度为 0.5% 。三轴隧道磁阻传感器阵列采集到的数据传输至数据采集卡 HKTECH-6104,其采样速率高达 100 kHz 。同时将交直流钳 CA-PAC12 的测量值作为参考电流值,其电流测量误差小于 1.5% 。实验中示波器选择的是 MSO7104B。

在交直流测量实验中,电流分别设定为 $I_{DC} = 101 \text{ A}$ 、 $I_{AC} = 100 \text{ A}$,导线如图 10 所示位置倾斜放置。导线电流值

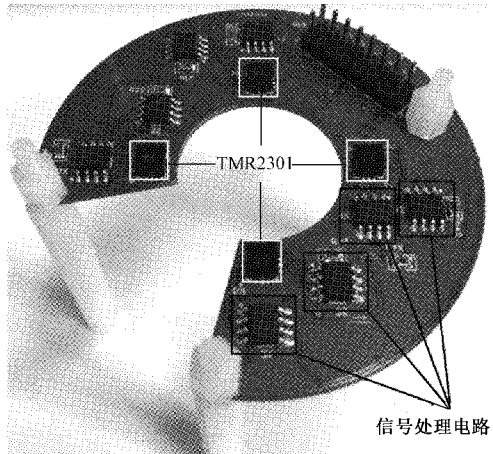


图 8 三轴 TMR 传感器阵列电流传感器

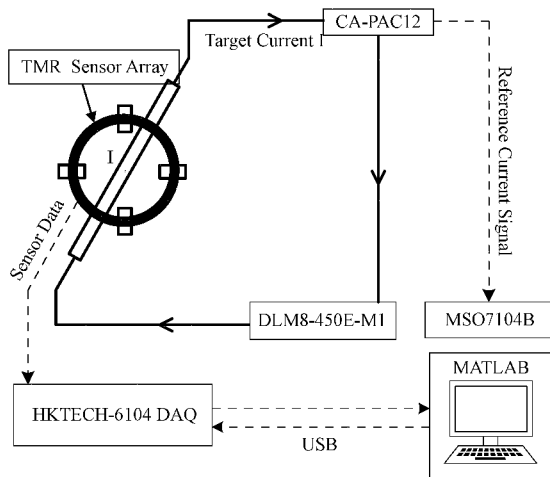


图 9 电流测量实验系统原理

的获取是通过将检测到的待测电流产生的磁场数据,代入到 MATLAB 中执行电流算法得来。

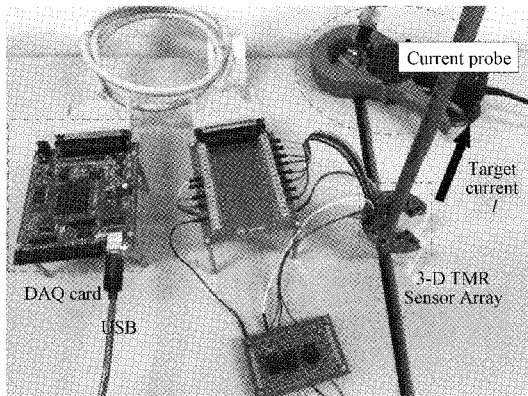
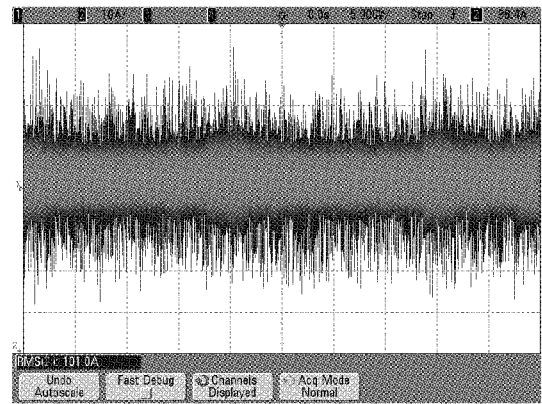
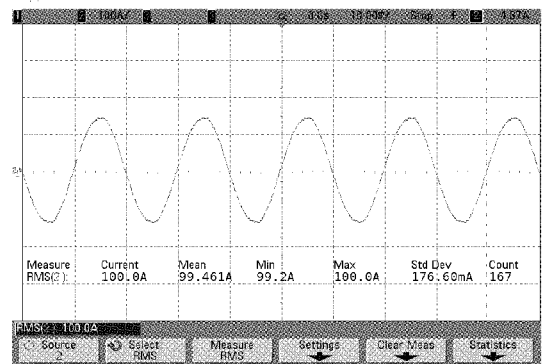


图 10 电流测量实验

交直流钳的参考电流波形如图 11 所示,采用三轴隧道磁阻阵列电流测量方法计算的电流波形如图 12 所示。由此可得,电流的平均相对误差分别为 2.7%(DC)和 2.2%(AC)。

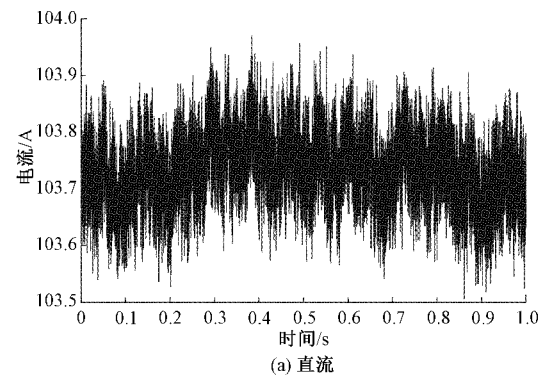


(a) 直流输出

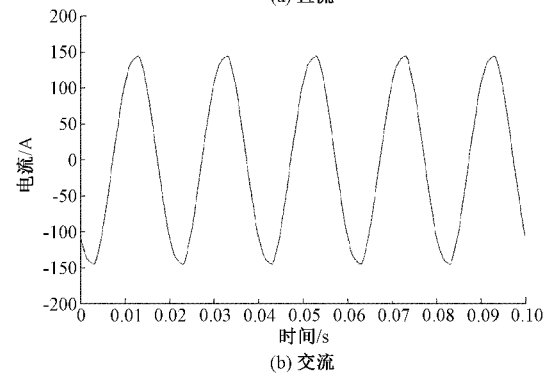


(b) 交流输出

图 11 交直流钳的参考电流输出



(a) 直流



(b) 交流

图 12 采用三轴隧道磁阻阵列电流测量方法计算的电流值

接着研究三轴隧道磁阻阵列电流测量系统的动态范围,进行了40~260 A的交直流测量实验,电流测量误差如表1和2所示。

表1 直流测量实验中的电流相对误差

| 电流/A | 误差/% | 电流/A | 误差/% |
|------|------|------|------|
| 40 | 4.81 | 160 | 1.61 |
| 60 | 2.83 | 180 | 2.21 |
| 80 | 2.23 | 200 | 1.50 |
| 100 | 2.92 | 220 | 0.95 |
| 120 | 2.02 | 240 | 0.27 |
| 140 | 1.79 | 260 | 0.15 |

表2 交流测量实验中的电流相对误差

| 电流/A | 误差/% | 电流/A | 误差/% |
|------|------|------|------|
| 40 | 3.56 | 160 | 1.82 |
| 60 | 2.94 | 180 | 1.77 |
| 80 | 2.88 | 200 | 1.59 |
| 100 | 2.49 | 220 | 1.36 |
| 120 | 2.14 | 240 | 1.42 |
| 140 | 2.10 | 260 | 1.29 |

由表1和2的测量结果可知,采用三轴隧道磁阻阵列电流测量方法计算的电流平均相对误差分别为1.94%(DC)和2.11%(AC)。由于电流钳测量误差和电源噪声的影响,上述测量实验中的电流相对误差会偶有波动。且随着电流值的增大,电流相对误差呈现下降的趋势,这是TMR2301和AD620芯片存在的固有误差导致的。

最后研究不同倾斜角对电流测量误差的影响,进行了100和200 A的电流测量实验,电流相对误差随倾斜角的变化情况如表3和4所示。

表3 直流电流下相对误差随倾斜角 α 的变化情况

| 电流/ A | 电流相对误差随倾斜角 α 的变化情况, $\beta \approx 20^\circ$ | | | | | |
|----------|---|------|------|------|------|------|
| | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° |
| 100 | 3.49 | 3.17 | 3.04 | 1.38 | 1.37 | 0.22 |
| 200 | 0.67 | 0.12 | 0.48 | 0.30 | 0.29 | 0.24 |

表4 交流电流下相对误差随倾斜角 α 的变化情况

| 电流/ A | 电流相对误差随倾斜角 α 的变化情况, $\beta \approx 30^\circ$ | | | | | |
|----------|---|------|------|------|------|------|
| | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° |
| 100 | 2.95 | 2.66 | 1.58 | 2.25 | 1.43 | 1.96 |
| 200 | 1.32 | 1.19 | 1.63 | 0.51 | 0.75 | 0.33 |

由表3和4的结果可知,三轴隧道磁阻阵列的电流测量方法在不同倾斜角下的电流平均相对误差分别为1.23%(DC)和1.55%(AC)。由此可见,导线倾斜角变化

对电流测量结果的影响很小,三轴隧道磁阻阵列电流测量方法可实现导线偏心、倾斜时的电流准确测量。

4 结 论

本文基于高灵敏度、稳定性的三轴TMR元件设计一种圆环形开口式三轴无铁芯隧道磁阻电流传感器,在导线偏心、倾斜时可以获得电流磁场在 x 、 y 、 z 方向上的分布,通过对导线偏心、倾斜位置的精确定位,大大提高了电流测量的准确性,克服了导线倾斜角变化对电流测量的影响,实现对导线偏心、倾斜时电流的准确测量。独特优势在于更换TMR元件便可以改变电流传感器的线性范围和精度,易满足不同场合的电流测量需求,不仅可以实现大动态范围下交直流同测,而且体积小简单易用。随着研究的不断深入,还需进一步提高三轴无铁芯隧道磁阻电流传感器的可靠性、精度及动态范围,后续工作中将不断优化电流算法和更新使用的TMR磁传感器。并将进一步研究当阵列外存在电流磁场干扰时的情形,将三轴隧道磁阻阵列电流测量方法应用在三相电流测量中,进一步提高三轴无铁芯隧道磁阻电流传感器在生产中的实用性。

参考文献

- [1] ITZKE A, WEISS R, WEIGEL R. Influence of the conductor position on a circular array of Hall sensors for current measurement [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(1):580-585.
- [2] LI Z, LI Q, WU Z, et al. A fault diagnosis method for on load tap changer of aerospace power grid based on the current detection [J]. IEEE Access, 2018, 99(6):24148-24156.
- [3] GUO Q, FU P, GAO G, et al. Rectangular magnetic sensor array for current measurement by the quadrature method [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 46(5): 1227-1233.
- [4] CHEN Y R, TSAI Y P, CHEN N, et al. Multifunctional coreless Hall-effect current transformer for the protection and measurement of power systems [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(3): 557-565.
- [5] CHEN K L, CHEN Y R, TSAI Y P, et al. A novel wireless multifunctional electronic current transformer based on zigbee-based communication [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4):1888-1897.
- [6] 丁浩,常文治,杜非,等.基于环形阵列TMR的电流传感器干扰原理研究[J].电力信息与通信技术,2020,18(10):7-14.
- [7] 王冰,蒋磊,宋福明,等.30 kA闭环式集成霍尔电流传感器设计[J].电子测量与仪器学报,2020,34(11):188-193.

- [8] 徐东海,朱胜平,王臻,等.一款基于磁通门芯片的开环电流传感器[J].仪表技术与传感器,2018,26(20):188-193.
- [9] 郭博,杨尚林,刘诗斌,等.用于电流测量的柔性基底磁通门传感器[J].传感技术学报,2020,33(12):1822-1828.
- [10] ALEXANDER I, ROLAND W, TAYLOR D L, et al. The influence of interference sources on a magnetic field-based current sensor for multiconductor measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(16): 6782-6787.
- [11] MENG L, GAO P, HAJI M M, et al. Magnetic sensor array-based ac current measurement for multiconductor cables using evolutionary computation method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2015, 64(10):2747-2758.
- [12] CHEN Y, HUANG Q, KHAWAJA A H. Interference-rejecting current measurement method with tunnel magnetoresistive magnetic sensor array [J]. Science, Measurement & Technology, IET, 2018, 12(6): 733-738.
- [13] LIU X, LIU C, HAN W, et al. Design and implementation of a multi-purpose TMR sensor matrix for wireless electric vehicle charging[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(5):1683-1692.
- [14] 郭欢,郭春贤,陈威浩,等.应用 TMR 阵列传感器的弯曲导线电流测量[J].电子测量技术,2020,43(8):60-65.
- [15] 杨晓光,温静,解存福,等.基于多层 GMR 材料的电流传感器设计与实验研究[J].传感技术学报,2020,33(1):12-16.
- [16] KHOKLE R P, FRANCO F, FREITAS S C, et al. Eddy current-tunneling magneto-resistive sensor for micromotion detection of a tibial orthopaedic implant[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(4): 1285-1292.
- [17] LI Z, ZHANG S, WU Z, et al. Study of current measurement method based on circular magnetic field sensing array[J]. Sensors, 2018, 18(5): 1439-1453.
- [18] BERNIERI A, FERRIGNO L, LARACCA M, et al. An AMR-based three-phase current sensor for smart grid applications [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(23):7704-7712.
- [19] WEISS R, MAKUCH R, ITZKE A, et al. Crosstalk in circular arrays of magnetic sensors for current measurement [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4903-4909.
- [20] CHEN K L, CHEN N M. A new method for power current measurement using a coreless hall effect current transformer [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2011, 60(1): 158-169.
- [21] CHEN W L, ZHANG H Q, CHEN L, et al. Wire-positioning algorithm for coreless Hall array sensors in current measurement [J]. Measurement Science & Technology, 2018, 29(5): 1-5.
- [22] YU H, ZHENG Q, LIU H, et al. Circular array of magnetic sensors for current measurement: Analysis for error caused by position of conductor[J]. Sensors, 2018,18(2): 578-589.

作者简介

李非凡,硕士研究生,主要研究方向为电能计量。

E-mail:997627482@qq.com

冀永芳,本科,主要研究方向为电能计量、计量管理。

E-mail:15952267677@139.com

庄盛秋,硕士研究生,主要研究方向为电能计量、计量管理。

E-mail:15952116688@139.com