

扁椭圆阵列霍尔传感器的载流导线偏心 误差优化研究^{*}

王宇劼¹ 唐 玥^{1,2} 李小康¹ 吴骏炎¹ 肖 杨¹

(1. 南京信息工程大学自动化学院 南京 210044; 2. 无锡学院物联网工程学院 无锡 214105)

摘 要:在配电系统中,使用圆形阵列霍尔电流传感器进行电流检测具有较高的精度,然而汽车电子、航空航天等领域对仪器内部空间利用率要求较高,此时因其占用较大的空间会导致实用性降低。为解决这一问题,提出适用于扁椭圆($AR \geq 2$)阵列霍尔传感器的误差优化算法。首先使用投影法将圆形阵列转化为 $AR=2$ 及 $AR=4$ 的椭圆形阵列,缩小传感器尺寸以节省空间;接着针对阵列传感器在电流检测过程中因载流导线偏心造成的测量误差进行分析,提出适用于扁椭圆阵列传感器的误差优化算法;最后对不同 AR 的椭圆阵列传感器进行导线偏心误差测试,并对误差优化算法进行验证。实验结果表明,椭圆阵列传感器的精度会随着 AR 的增大而降低, $AR=4$ 的椭圆阵列传感器最大相对误差达到 33.36%,应用误差优化算法可将相对误差降至 0.41%,满足测量精度的同时极大提升了实用性。

关键词:霍尔电流传感器;椭圆阵列;导线偏心误差;误差优化

中图分类号: TM933.14 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1099

Optimization of current carrying wire eccentricity for flat elliptic array Hall sensor

Wang Yujie¹ Tang Yue^{1,2} Li Xiaokang¹ Wu Junyan¹ Xiao Yang¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. School of Internet of Things Engineering, Wuxi University, Wuxi 214105, China)

Abstract: In the power distribution system, the use of circular array Hall current sensor for current detection has a high accuracy, but the automotive electronics, aerospace and other fields require a high utilization rate of the internal space of the instrument, at this time because of its large space occupation will lead to practicality. To solve this problem, this paper proposes an error optimization algorithm for flat elliptic ($AR \geq 2$) array Hall sensors. Firstly, the circular array is transformed into $AR=2$ and $AR=4$ oval array by projection method, and the sensor size is reduced to save space. Secondly, the measurement errors caused by the eccentricity of the current carrying wire in the current detection process of the array sensor are analyzed, and the error optimization algorithm suitable for the flat elliptic array sensor is proposed. Finally, the wire eccentricity error of elliptic array sensors with different AR is tested, and the error optimization algorithm is verified. The experimental results show that the accuracy of the elliptic array sensor will decrease with the increase of AR . The maximum relative error of the elliptic array sensor with $AR=4$ can reach 33.36%, and the application of error optimization algorithm can reduce the relative error to 0.41%, which meets the measurement accuracy and greatly improves the practicability.

Keywords: Hall current sensor; elliptical array; wire eccentricity error; error optimization

0 引 言

霍尔电流传感器凭借其非接触测量电流的特点以及

精度高、响应速度快等优势,在汽车电子、工业控制、航空航天、家用电器等领域得到了广泛的应用^[1-7]。传统的非接触式霍尔电流传感器通常采用铁芯集磁,然而采用铁芯

收稿日期:2023-08-25

^{*} 基金项目:2023 年江苏省研究生实践创新计划(SJCX23_0388)资助

集磁的方式虽然可以有效提高测量精度,但也增加了传感器的重量,同时由于铁芯易磁饱和的特性导致其测量范围不足,无法测量较大的直流电流^[8-11]。近年来,阵列式霍尔电流传感器逐渐成为研究焦点,相较于依靠铁芯聚磁的电流传感器,其被认为是具有精度高、重量轻、大线性范围、宽频率带宽高的可靠方案,且阵列式霍尔电流传感器可以同时用于直流和高频交流测量^[12-14]。

圆形阵列式霍尔电流传感器在实际应用时会占用较大的空间,尽管采用扁椭圆阵列霍尔电流传感器可以节省空间,从而极大地提高实用性,但同时会增大测量误差^[15]。此外,由于失去了铁芯的聚磁,载流导线位置的偏移会导致阵列式霍尔电流传感器的测量误差增大,目前许多研究集中在阵列式霍尔电流传感器参数调整与减小外界因素引起测量误差的关系上^[16-18]。文献[19]提出的导线定位算法通过公式推导,对阵列传感器算法进行优化,使其可以在导线位置发生偏移后计算出偏移量,进而调整霍尔芯片的输出达到减小误差的效果,然而该方法对实验设备要求较高,降低了其实用性。文献[20]对导线定位算法加以改进,提出了一种适用于圆形阵列霍尔电流传感器的去偏心误差优化算法,进一步简化了算法并且提升了传感器测量精度。文献[21]参考该去偏心误差优化算法设计出了一种适用于矩形阵列传感器的误差优化算法,并验证了该算法可以明显提高矩阵阵列传感器的精度。文献[22]对不同宽高比(aspect ratio, AR)的椭圆阵列传感器进行了精度分析,但未提出精度优化方法。尽管文献[18-21]的方法应用于圆形及矩形阵列传感器,但对于本文对扁椭圆形阵列传感器的精度优化提供了思路。

本文提出一种适用于扁椭圆($AR \geq 2$)阵列霍尔传感器的导线偏心误差优化算法,在保证测量精度的同时缩小阵列传感器的尺寸以提升实用性。实验结果表明误差优化算法可以有效降低扁椭圆阵列霍尔传感器的测量误差,使其满足大部分应用领域的电流测量精度要求。

1 椭圆阵列霍尔传感器

椭圆型传感器阵列的排布形状由椭圆的半长轴 a 和半短轴 b 来定义,二者的比 $a:b$ 即为椭圆的宽高比, $AR = 1$ 即为圆形。由于椭圆形阵列传感器相较于圆形阵列传感器可以节省较多的空间,应用更为广泛,故本文对扁椭圆形阵列传感器的精度优化进行研究。

1.1 阵列传感器测量原理

在通电半导体材料上施加一个磁场后,由于磁场对半导体中电子和空穴施加的洛伦兹力不同,会在通电半导体材料的另外两极产生一个电压,即霍尔电势。霍尔电势计算公式为:

$$U = K_H I_C B \quad (1)$$

式中: K_H 为霍尔元件灵敏度; I_C 为霍尔元件的驱动电流; B 为霍尔元件的磁感应强度。由于 K_H 和 I_C 均由霍尔元件自身特性决定,故另常数 $K = K_H \cdot I_C$, 可将式(1)进一

步化简为:

$$U = KB \quad (2)$$

横截面为圆形的载流导线与霍尔元件位置关系示意图如图1所示,载流导线通过的电流为 I ,霍尔元件与载流导线的距离为 R ,霍尔元件的磁感应强度为 B 霍尔元件两极产生的电压为 U 。已知真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, 根据安培定律可得霍尔元件的磁感应强度:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi R} I \quad (3)$$

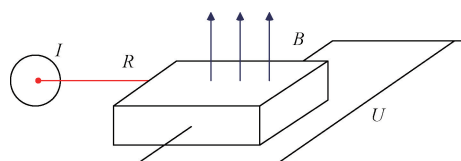


图1 霍尔原理示意图

阵列传感器的工作原理是多个霍尔元件围绕载流导线以圆形均匀排布,从而达到近似积分的效果,对载流导线产生的磁场进行测量,进而计算出通过导线的电流值。由8个霍尔元件构成的圆形传感器阵列如图2所示。在霍尔传感器圆形阵列中,每个霍尔元件均匀排布,与载流导线的距离均为 R 。由此可知每个霍尔元件的磁感应强度相等。该阵列霍尔传感器的总霍尔电势为:

$$U = \sum_{i=1}^8 U_i = K \sum_{i=1}^8 B_i \quad (4)$$

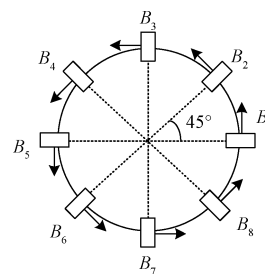


图2 霍尔传感器圆形阵列

1.2 椭圆阵列霍尔传感器

本文使用投影法将圆形传感器阵列转化为椭圆形传感器阵列。记霍尔元件的数量为 N , 由 N 个霍尔元件构成的椭圆传感器阵列中,霍尔元件至载流导线的距离为 r_i , 第 i 个霍尔元件的位置 P_i 为:

$$P_i = \left(r_i \cos\left((i-1) \frac{360^\circ}{N}\right), r_i \sin\left((i-1) \frac{360^\circ}{N}\right) \right) \quad (5)$$

本文设计的阵列传感器,均采用 Melexis 公司的 MLX91209 芯片作为霍尔元件。该霍尔芯片具有高精度和高分辨率的特点,芯片驱动电流为 14 mA,灵敏度可从 5~150 mV/mT 范围内调整。用户可以根据使用场景对灵敏度、输出电压等进行调整。图3、4所示分别为由8颗霍尔芯片构成的 $AR=2$ 及 $AR=4$ 的椭圆形阵列传感器

示意图,载流导线为圆柱形,椭圆中心与载流导线的横截面重合。

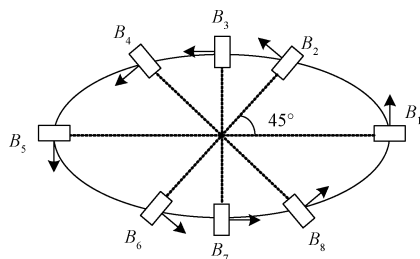


图3 AR=2的椭圆形传感器阵列

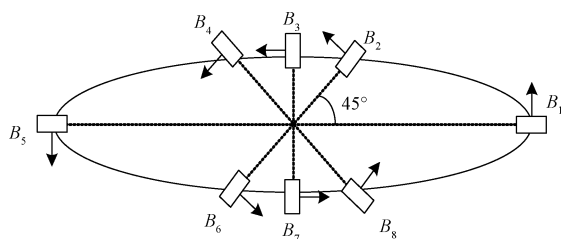


图4 AR=4的椭圆形传感器阵列

已知各霍尔芯片到导线中心的距离 R , 通过测量各芯片的输出即霍尔电压 U , 根据式(2)得出每颗芯片的磁感应强度 B , 进一步通过式(3)可求出待测电流 I 。阵列霍尔传感器对8颗霍尔芯片检测的电流值 I 进行求和取平均, 从而减小测量误差。本文设计3种不同阵列排布的椭圆形阵列传感器, 图5所示分别为 $AR=1$ 、 $AR=2$ 、 $AR=4$ 的阵列传感器, 传感器阵列长半轴均为4 cm, 短半轴分别为4、2、1 cm。

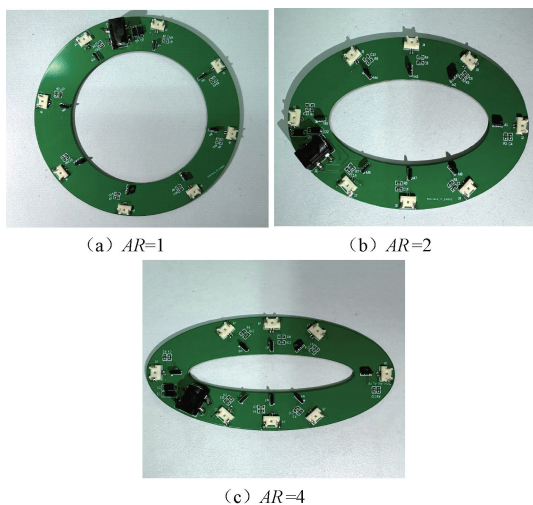


图5 不同AR的阵列传感器

2 载流导线偏心误差优化算法

尽管阵列式霍尔传感器无需采用聚磁环集磁, 避免了测量直流大电流过程中易发生的磁芯饱和现象, 具有更大

的量程, 但在使用过程中难免因外界干扰而影响测量精度, 其中载流导线位置的偏移是造成测量误差的主要原因之一。

2.1 导线偏心误差分析

以 $AR=4$ 的椭圆为例, 假设载流导线在水平方向发生位置偏移, 偏移距离为 d , 此时导线中心与霍尔芯片的距离为 R , B_2' 为霍尔芯片实际的磁感应强度, 该霍尔芯片的坐标记为 $(P_{B_2}X, P_{B_2}Y)$, 且 $P_{B_2}X = P_{B_2}Y$ 。导线偏心位置示意图如图6所示。

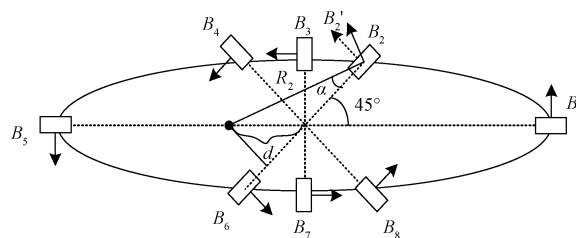


图6 导线偏心位置示意图

由图5中 α 角及安培定律可知:

$$r_2 \times \sin \alpha = d \times \sin 45^\circ \quad (6)$$

$$B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi R_2} I \quad (7)$$

$$B_2' = B_2 \times \cos \alpha \quad (8)$$

$$r_2 = \sqrt{(d + P_{B_2}X)^2 + (P_{B_2}Y)^2} \quad (9)$$

同样, 可以结合安培定律和余弦定理, 可得到霍尔芯片在其他测量点的磁感应强度, 进一步可计算出每颗霍尔芯片在导线偏心情况下检测的电流值。

记各霍尔芯片测得的磁场强度为 B_i , 在不考虑夹角 α 影响的情况下, 对8颗霍尔芯片的总磁感应强度进行计算:

$$\sum_{i=1}^8 B_i = \frac{\mu_0}{2\pi r_1} I + \frac{\mu_0}{2\pi r_2} I + \frac{\mu_0}{2\pi r_3} I + \frac{\mu_0}{2\pi r_4} I \quad (10)$$

从而可得待测电流值 I :

$$I = \frac{\pi}{4\mu_0} \sum_{i=1}^8 B_i r_i \quad (11)$$

根据以上方法计算电流值 I , 虽然导线偏心后从导线中心到各测点的距离 r 是实际距离, 但各霍尔芯片测得的磁场强度 B_i 并不是在该点处激发的实际磁场强度。因此, 如果在导线偏心时采用数值积分算法, 则测量结果必然会产生较大误差。

2.2 误差优化算法设计

通过上述分析可知, 若对导线进行定位, 计算出导线偏移距离 d 以及偏移角 α 、 β 、 γ , 并设计算法对霍尔芯片的输出进行反馈调整, 即可降低导线位置偏移而引起的误差。本文基于 $AR=4$ 的椭圆阵列进行算法设计, 其原理如图7所示。由于椭圆形阵列排布的对称性, 故只需对 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 五处霍尔芯片的校准参数进行计算。

以椭圆圆心为原点, 椭圆长轴及短轴所在直线分别为

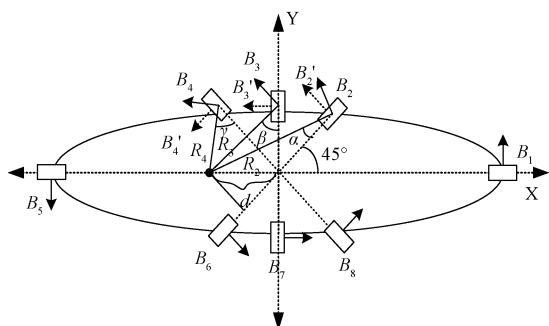


图7 算法设计原理

x, y 轴建立直角坐标系。由于椭圆形阵列 $AR=4$, 为便于计算, 记短半轴长度为 r , 则长半轴长度为 $4r$, 霍尔芯片中心至载流导线的距离为 R_1 , 假定导线在水平方向偏移并记导线偏移距离为 d 。

霍尔芯片的输出电压可测量得出, 记各霍尔芯片输出电压为 U_i , 由式(2)和(3)可得:

$$U_1 = K \cdot \frac{\mu_0}{2\pi 4r + d} \cdot I \quad (12)$$

$$U_5 = K \cdot \frac{\mu_0}{2\pi 4r - d} \cdot I \quad (13)$$

进一步化简可得:

$$d = \frac{4r(U_5 - U_1)}{U_5 + U_1} \quad (14)$$

由已知的短半轴长度 r 、霍尔芯片输出电压 U_1 及 U_5 , 即可计算出导线偏移距离 d , 从而对导线位置进行定位。

导线位置偏移后, 由于偏移角 α, β, γ 的存在, 每颗霍尔芯片测量点处的磁场强度相较于实际的磁场强度较小, 从而导致了电流检测误差增加。故需要对每颗霍尔芯片的输出电压单独进行反馈调整, 从而提高整体测量精度。

已知 $P_{B2}X = P_{B2}Y$, 将其代入椭圆方程:

$$\frac{x^2}{16} + y^2 = r^2 \quad (15)$$

可得 B_2 处霍尔芯片的坐标 P_2 为 $\left(\frac{4\sqrt{r}}{\sqrt{17}}, \frac{4\sqrt{r}}{\sqrt{17}}\right)$, 同理

可知 B_4 处霍尔芯片的坐标 P_4 为 $\left(\frac{4\sqrt{r}}{\sqrt{17}}, \frac{4\sqrt{r}}{\sqrt{17}}\right)$ 。

令常数 $m = \frac{4\sqrt{r}}{\sqrt{17}}$, 根据余弦定理可得:

$$\begin{cases} \cos\alpha = \frac{2\sqrt{2}m + \sqrt{2}d}{2\sqrt{m^2 + (m+d)^2}} \\ \cos\beta = \frac{r}{\sqrt{d^2 + r^2}} \\ \cos\gamma = \frac{2\sqrt{2}m - \sqrt{2}d}{2\sqrt{m^2 + (m-d)^2}} \end{cases} \quad (16)$$

通过式(2)、(3)计算可得, 当导线位置发生偏移时, 各霍尔芯片的输出电压如下:

$$\begin{cases} U_1 = K \cdot \frac{\mu_0}{2\pi R_1} \cdot I \\ U_2 = K \cdot \frac{\mu_0}{2\pi R_2} \cdot I \cdot \cos\alpha \\ U_3 = K \cdot \frac{\mu_0}{2\pi R_3} \cdot I \cdot \cos\beta \\ U_4 = K \cdot \frac{\mu_0}{2\pi R_4} \cdot I \cdot \cos\gamma \\ U_5 = K \cdot \frac{\mu_0}{2\pi R_5} \cdot I \end{cases} \quad (17)$$

由式(17)可知, 当导线位置发生偏移时, 采集到各霍尔芯片的输出电压后进行加权平均算法便可以消除误差。由于椭圆形阵列的对称性, 可以直接得出 B_6, B_7 以及 B_8 处霍尔芯片的加权系数, 如表1所示。

表1 霍尔芯片与加权系数对应关系

编号	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8
系数	1	$\frac{1}{\cos\alpha}$	$\frac{1}{\cos\beta}$	$\frac{1}{\cos\gamma}$	1	$\frac{1}{\cos\gamma}$	$\frac{1}{\cos\beta}$	$\frac{1}{\cos\alpha}$

已知椭圆阵列短半轴长度为 r , 通过测量 U_1 及 U_5 并代入式(14)即可对位置发生偏移后的载流导线进行定位, 利用已知的导线偏移距离 d 以及常数 m 即可通过式(16)推导出加权系数, 对照表1将测得的各霍尔芯片输出电压与其对应的加权系数相乘, 即可对各霍尔芯片输出进行反馈调理, 达到消除载流导线偏心带来的测量误差。最终阵列传感器的输出取8颗霍尔芯片输出总和的均值以保证电流值计算的准确度。

3 去偏心误差优化算法实验

3.1 实验平台搭建

本文对 $AR=1, AR=2$ 以及 $AR=4$ 的椭圆阵列传感器进行测试实验。测试系统由上位机、可编程直流电源、数字万用表、大电流源、电流换向器、PTC04 编程器、载流导线以及支架等设备组成。对于每次测量, 使用 $-500 \sim 500$ A 的电流脉冲, 步长为 100 A。实验测试平台如图8所示。

如图9所示, 将 $AR=1, AR=2$ 及 $AR=4$ 的阵列传感器进行固定, 载流导线穿过3只阵列传感器正中心, 后续偏心实验中对载流导线的位置进行调整, 使其发生偏移。

3.2 传感器线性度测试

为了确保传感器进行电流检测的可靠性, 实验前进行传感器线性度测试。固定载流导线的位置, 调整通过载流导线的电流值, 并记录下传感器对应的感应电压, 以此确定二者之间的变化规律。不同 AR 的传感器感应电压测试结果如表2所示。

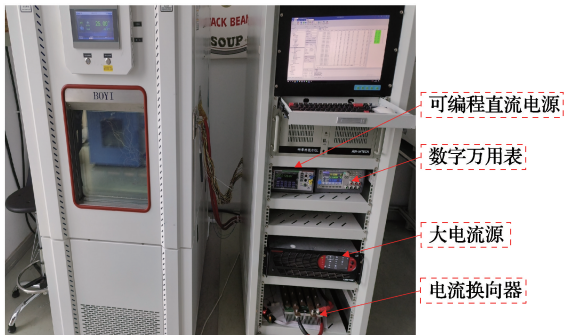


图8 传感器测试平台



图9 传感器测试环境

记通过导线的电流值为 I_T , $AR=1$ 、 $AR=2$ 、 $AR=4$

电流值/A	感应电压/V		
	$AR=1$	$AR=2$	$AR=4$
-500	0.751	0.752	0.749
-400	1.103	1.099	1.101
-300	1.454	1.452	1.447
-200	1.797	1.802	1.799
-100	2.146	2.154	2.149
0	2.502	2.499	2.497
100	2.851	2.850	2.852
200	3.202	3.204	3.200
300	3.547	3.549	3.549
400	3.903	3.902	3.899
500	4.251	4.249	4.252

的阵列传感器感应电压分别为 U_{T1} 、 U_{T2} 、 U_{T3} ,使用线性回归分析法对电流值与传感器感应电压进行数据拟合,可得拟合曲线:

$$\begin{cases} U_{T1} = 0.0035I_T + 2.5008 \\ U_{T2} = 0.0035I_T + 2.5001 \\ U_{T2} = 0.0035I_T + 2.4995 \end{cases} \quad (18)$$

图10所示为传感器的线性拟合曲线,测试结果证明传感器感应电压与通过导线的电流值成线性关系,确保了传感器进行电流检测的可靠性。

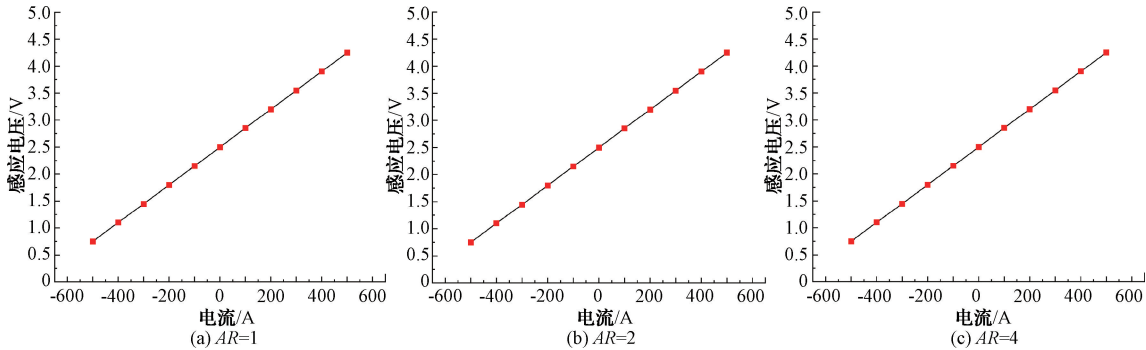


图10 阵列传感器线性拟合曲线

3.3 导线偏心实验

调整载流导线位置,分别使其相较于阵列传感器中心点偏移0.5、1、1.5和2 cm。 $AR=1$ 、 $AR=2$ 、 $AR=4$ 的椭圆阵列传感器在导线不同偏移距离的相对误差如图11所示。当通过导线的电流为0 A时,磁场强度为0,此时载流导线位置的偏移对传感器检测精度无影响,故0 A电流下的误差数据无需进行分析。

通过上述实验可见,载流导线位置的偏移对传感器测量精度造成较大影响,且偏移量越大,带来的误差也随之增加。如图12所示,在同一偏移距离下, AR 增大的同时,传感器的相对误差也会增加。

阵列传感器在导线各偏移量下的平均相对误差如表3所示。导线偏移量达到2 cm时, $AR=4$ 的阵列相较于 $AR=1$ 的阵列增加28.91%的误差,有较大的优化空间,且 AR 更大的阵列在实际应用中可以节省大量空间,具有更强的实用性及较高的研究价值。

3.4 优化算法验证实验

对 $AR=4$ 的椭圆阵列传感器应用误差优化算法,并再次进行导线偏心实验。载流导线保持同一偏移方向,依次调整载流导线距阵列传感器中心点的距离为0.5、1、1.5、2 cm。理论电流值、传感器优化前后实测的电流值及相对误差如表4所示。

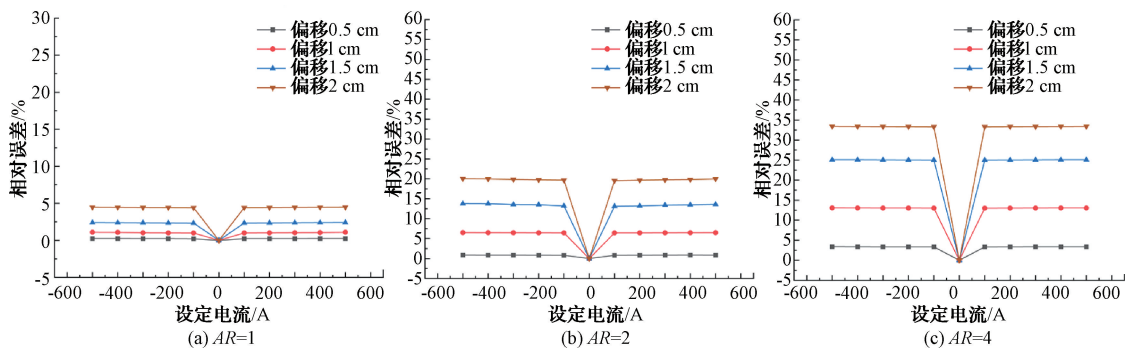


图 11 椭圆阵列传感器测量误差

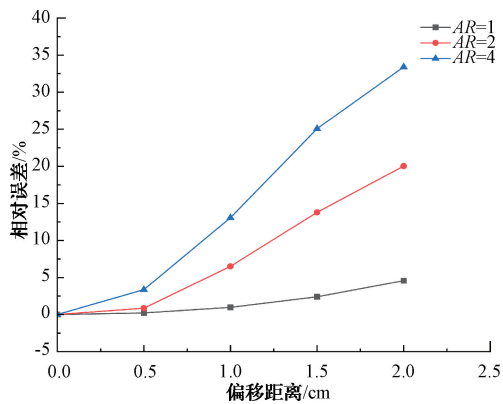


图 12 导线偏移误差汇总

表 3 不同 AR 的阵列在各偏移量下相对误差

偏移距离/cm	AR=1	AR=2	AR=4
0.5	0.23%	0.84%	3.35%
1	1.04%	6.47%	13.04%
1.5	2.36%	13.47%	25.04%
2	4.45%	19.82%	33.36%

由表 4 可知,在 $-500\sim 500\text{ A}$ 的电流脉冲范围内,当导线偏移量分别达到 0.5 cm 、 1 cm 、 1.5 cm 、 2 cm 时,传感器优化前平均相对误差分别为 3.35% 、 13.04% 、 25.04% 、 33.36% ,应用误差优化算法后将传感器平均相对误差分别降至 0.08% 、 0.15% 、 0.29% 、 0.41% 。

表 4 AR=4 的椭圆阵列传感器优化前后测量误差

理论电流值/A	偏移距离/cm	优化前电流值/A	优化前相对误差/%	优化后电流值/A	优化后相对误差/%
-500	0.5	-483.142	3.37	-499.545	0.09
	1	-434.631	13.07	-499.235	0.15
	1.5	-374.645	25.07	-498.471	0.31
	2	-332.955	33.41	-497.933	0.41
-400	0.5	-386.564	3.36	-399.668	0.08
	1	-347.764	13.06	-399.402	0.15
	1.5	-299.764	25.06	-398.824	0.29
	2	-266.456	33.39	-398.384	0.41
-300	0.5	-289.938	3.35	-299.733	0.09
	1	-260.874	13.04	-299.532	0.16
	1.5	-224.877	25.04	-299.112	0.29
	2	-199.893	33.37	-298.749	0.42
-200	0.5	-193.298	3.35	-199.846	0.08
	1	-173.942	13.03	-199.706	0.15
	1.5	-149.956	25.02	-199.428	0.29
	2	-133.298	33.35	-199.208	0.39
-100	0.5	-96.659	3.34	-99.928	0.07
	1	-86.984	13.02	-99.862	0.14
	1.5	-74.999	25.01	-99.723	0.28
	2	-66.679	33.32	-99.602	0.39

续表

理论电流值/A	偏移距离/cm	优化前电流值/A	优化前相对误差/%	优化后电流值/A	优化后相对误差/%
100	0.5	96.664	3.37	99.924	0.08
	1	86.989	13.01	99.861	0.14
	1.5	74.997	25.01	99.711	0.29
	2	66.687	33.31	99.611	0.39
200	0.5	193.316	3.34	199.838	0.08
	1	173.956	13.02	199.698	0.15
	1.5	149.948	25.03	199.404	0.29
	2	133.316	33.34	199.188	0.41
300	0.5	289.932	3.36	299.739	0.09
	1	260.889	13.04	299.556	0.15
	1.5	224.877	25.04	299.091	0.31
	2	199.914	33.36	298.776	0.41
400	0.5	386.556	3.36	399.628	0.09
	1	347.816	13.05	399.348	0.16
	1.5	299.736	25.07	398.768	0.31
	2	266.472	33.38	398.352	0.41
500	0.5	483.155	3.37	499.525	0.09
	1	434.705	13.06	499.184	0.16
	1.5	374.685	25.06	498.461	0.31
	2	333.022	33.39	497.883	0.42

算法优化前后, $AR=4$ 的阵列传感器在导线不同偏移量下的相对误差如图 13 所示。当导线偏移距离达到 2 cm 时, 误差优化算法依旧可以将传感器相对误差降至 0.5% 以内, 相较优化前传感器的精度提升了 30% 以上。

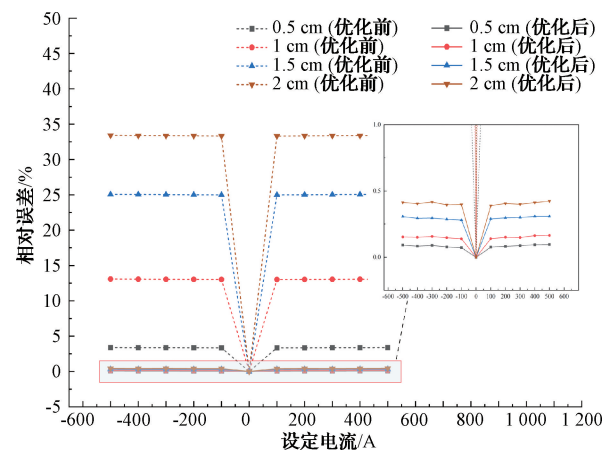


图 13 优化前后传感器相对误差

电流传感器广泛应用于汽车电子、航空航天等领域, 例如逆变器、电池管理系统、飞行器电力系统等, 且各类仪器对内部的空间利用率要求较高。相较于 $AR=1$ 的圆形阵列传感器, $AR=4$ 的扁椭圆形阵列传感器在保持较高测量精度的同时, 缩小了传感器尺寸, 极大提升了仪器内

部的空间利用率。

实验证明, 该误差优化算法的应用, 使 $AR=4$ 的扁椭圆阵列传感器相较于圆形阵列传感器在提高了实用性的同时, 将整体相对误差控制在 0.5% 以内, 满足测量精度要求。

4 结 论

本文设计了一种扁椭圆阵列霍尔传感器, 相较于传统的圆形阵列霍尔传感器提高空间利用率, 减少了应用限制, 分析了该阵列传感器中载流导线位置偏移带来的测量误差, 提出了一种适用于扁椭圆阵列传感器的载流导线偏心误差优化算法, 当载流导线位置偏移时, 对各霍尔芯片的反馈输出进行调整, 从而减小因载流导线偏心引起的误差。

通过实验测量以及数据分析, 验证了误差优化算法的可行性。实验结果表明, 本文提出的扁椭圆阵列霍尔传感器在满足了测量精度要求的同时, 节省了大量空间, 提升了实用性。

参 考 文 献

- [1] 张宇, 罗渝林, 吴铁洲. 基于电感变换器的均衡方案[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(9): 170-175.
- [2] 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.
- [3] 张彬, 李震, 李垣江, 等. 开关霍尔安装相位偏差对PMSM性能影响实验研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(1): 8-14.
- [4] 宋敏. 基于霍尔传感器的电动汽车电动车窗防夹控制算法实验研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(7): 112-116.
- [5] 杨杜兵, 张家洪, 陈福深, 等. 铌酸锂集成 MZI 型光波导大电流传感器[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 87-95.
- [6] 卢伟业. 三维霍尔开关型传感器[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(1): 83-86.
- [7] 张涵竹, 李岩松, 刘君. 校验用开合式霍尔电流传感器聚磁环设计[J]. 电测与仪表, 2022, 59(2): 171-175.
- [8] 许少毅, 孙俊雯, 彭强, 等. 一种基于阶梯型磁致伸缩复合材料的聚磁式光纤电流传感器[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 172-181.
- [9] 李雪洋, 李岩松, 刘君. 对称式闭环霍尔电流传感器研究与设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(8): 69-76.
- [10] 袁亮, 张旭乐, 张贺, 等. 基于多量程控制罗氏线圈标准电流互感器研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(11): 88-93.
- [11] 谢志远, 顾育先. 基 STM32 的开环霍尔电流传感器的温度补偿研究[J]. 光电子技术, 2020, 40(1): 63-69.
- [12] WEISS R, ITZKE A, WEIGEL R, et al. A novel closed loop current sensor based on a circular array of magnetic field sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(7): 2517-2524.
- [13] 李非凡, 冀永芳, 庄盛秋. 三轴隧道磁阻阵列电流传感器及电流测量方法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(18): 54-60.
- [14] 国旗. 基于磁传感器阵列的新型大电流传感器关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [15] WEISS R, ZAPF F, SKELLY A, et al. Busbar current measurement with elliptical sensor arrays without conductor specific calibration [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-9.
- [16] 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.
- [17] LI Z H, ZHANG S Q, WU Z T, et al. Study of current measurement method based on circular magnetic field sensing array [J]. Sensors, 2018, 18(5): 1439.
- [18] 项琼, 岳长喜, 胡琛, 等. 基于霍尔传感器阵列的电流测量系统[J]. 电测与仪表, 2017, 54(23): 105-110.
- [19] 顾善匀. 大电流下无铁芯霍尔电流传感器的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [20] 谢志远, 张畅, 谢思哲. 阵列式霍尔传感器去偏心误差优化算法设计[J]. 电测与仪表, 2020, 57(22): 133-138.
- [21] 谢志远, 杨添驿, 王力崇. 基于矩形阵列的非接触式电流传感器优化设计研究[J]. 仪表技术与传感器, 2022(12): 7-12.
- [22] ZAPF F, WEISS R, WEIGEL R. Crosstalk in elliptical sensor arrays for current measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-11.

作者简介

王宇劼, 硕士研究生, 主要研究方向为霍尔传感器及电流检测技术。

E-mail: 1752528604@qq.com

唐玥(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为车用传感器研究与设计。

E-mail: tangyue@cxwu.edu.cn