

狭窄空间内矩形导体电流测量装置设计与优化

沈悦¹ 唐玥² 褚子扬¹ 权硕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:针对狭窄空间内矩形导体电流测量,提出了一种基于霍尔元件椭圆阵列的电流测量装置,通过理论计算和有限元仿真分析确定了相对最优的阵列分布,搭建实验平台并通过实验验证了该方法的可行性,以及导体偏心状态下电流测量的有效性,同时分析了导体偏心状态下的电流测量偏心误差。仿真和实验结果表明,椭圆阵列电流测量装置在行业允许的 $\pm 1\%$ 误差限内,允许导线X轴偏心 $-4.1\sim 4.1$ mm,Y轴无限制;且与传统电流测量装置相比,重量减轻82.9%,安装占用面积减小72.4%,对狭窄空间的适用性更强,为新能源产品轻量化、小型化、持续降本提供了技术支持。

关键词:电流测量;狭窄空间;矩形导体;椭圆阵列;霍尔元件

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

Design and optimization of current measurement device for rectangular conductors in confined spaces

Shen Yue¹ Tang Yue² Chu Ziyang¹ Quan Shuo¹

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

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

Abstract: For the current measurement of rectangular conductor in narrow space, a current measurement device based on elliptic array of Hall elements is proposed, and the relatively optimal array distribution is determined through theoretical calculation and finite element simulation analysis, and the feasibility of the method is verified by constructing an experimental platform and experimentally verifying the validity of the current measurement in the state of conductor eccentricity, and at the same time analyzing the eccentricity error of the current measurement in the state of conductor eccentricity is analyzed. Simulation and experimental results show that the elliptical array current measurement device designed in this paper is within the industry's allowable $\pm 1\%$ error limit, allowing wire X-axis eccentricity of -4.1 to 4.1 mm, Y-axis is unlimited; and compared with the traditional current measurement device, the weight is reduced by 82.9%, and the installation occupancy area is reduced by 72.4%, and the applicability to the narrow space is much stronger, which provides technical support for new energy product lightweight, miniaturization, and continuous cost reduction.

Keywords: current measurement; narrow spaces; rectangular conductors; elliptical arrays; Hall elements

0 引言

电动汽车、智能电网以及民用储能等新能源领域产品的快速发展,对电力系统各状态量的测量提出了更高的要求,针对电流量的测量,目前使用较多的是带磁芯的磁通门电流传感器和基于欧姆定律的分流器,但是前者会出现磁饱和、直流偏磁等现象导致测量精度降低,而后者则需要直接串联在电路中,增加了电气绝缘成本和安装难

度^[1]。新型罗氏线圈测量精度高,但其制作工艺要求较高^[2]。光纤电流传感器测量精度高、安装灵活轻便,但是标定方法复杂^[3]。

在产品逐渐轻量化、小型化、持续降本的趋势下,电流传感器的安装空间逐渐狭窄,针对狭窄空间内的状态量测量,方案需要更加轻量紧凑,传统的电流传感器因此逐渐显示出劣势,抛弃磁芯、将磁传感器模块组合起来的磁传感器阵列电流测量方案逐渐引起各领域的注意,这种电流

测量方案不受磁饱和、磁滞和其他磁非线性影响^[4],且具有体积小、质量轻、成本低等优点。

霍尔元件作为一种常用的磁敏检测器件,广泛应用于电流检测领域^[5]。目前关于磁传感器阵列的研究主要集中在适合测量圆形导体的圆形阵列,文献[6—13]研究了导体偏心、倾斜以及外部干扰源对圆形磁传感器阵列性能的影响并提出优化方法以提高精度。与圆形导体相比,矩形导体的散热效果更好,且成本低廉,因此在工业领域得到广泛应用。使用圆形阵列测量矩形导体电流所需空间较大^[14],在狭窄空间条件下适用性较差,为了减小磁传感器阵列的面积,文献[15]提出使用矩形阵列测量矩形导体电流,但是由于拐角处的磁场强度会发生剧烈变化,需要在拐角处放置两个相互垂直的磁传感器,增加了电路设计难度,且极易增大磁传感器的位置误差。文献[16]提出矩形阵列的优化算法,但是仅针对安装在坐标轴上的磁传感器有效。文献[17—19]研究了在矩形导体上下表面粘贴表贴式磁传感器,但是该测量方案的精度基本取决于磁传感器粘贴位置的精确度。椭圆传感器阵列因其几何特性,与圆形阵列相比,使用的面积更小,与矩形阵列相比,磁场变化梯度更小^[20],可以使用较少的采样点,获得更准确的闭合回路积分近似值^[15],是狭窄空间内矩形导体电流测量的更优方案。

本文基于狭窄空间内检测矩形导体载流电流的典型应用——电动汽车高压配电箱中的矩形导体电流检测,研究霍尔元件椭圆阵列电流传感器对矩形导体的电流测量效果,首先通过计算和仿真给出椭圆阵列不同纵横比、不同霍尔元件数量对应的电流误差;接着针对导体偏心引起的误差进行理论计算,同时使用有限元仿真分析软件进行仿真分析,并给出合适的阵列参数以降低误差;然后通过实验验证参数的可行性和有效性以及理论值、仿真值与实验值的匹配性;最后通过有限元仿真得出矩形导体在任何偏心距离下,霍尔元件椭圆阵列传感器的电流误差,为导体实际安装与误差计算提供理论依据。

1 霍尔传感器椭圆阵列参数设计

1.1 椭圆阵列设置

在狭窄空间内检测矩形载流导体电流的典型场景是对电动汽车高压配电箱中的矩形载流导体电流进行检测,从而为动力电池故障诊断与安全管理提供参考数据。虽然高压配电箱中矩形导体的尺寸没有明确的规定,但是目前市场上电动汽车高压配电箱中使用的矩形导体的经典尺寸为20 mm×4 mm,考虑到实际设计中的电路层尺寸、椭圆阵列对不同尺寸的导体的适用性以及高压配电箱中的空间,本文将椭圆阵列的长半轴 a 设置为30 mm。椭圆阵列的纵横比(aspect ratio, AR)表示椭圆短半轴 b 与长半轴 a 的比值,取值范围为(0,1),圆形阵列的纵横比AR=1。

多个霍尔元件沿被测载流导体的闭合回路分布,通过

对每个芯片输出的霍尔电压进行处理,模拟载流导体所产生的磁场在该闭合回路上的积分,其复现效果不仅取决于霍尔元件的数量而且也与霍尔元件的分布方式有关。本文采用均匀曲线段长度法(uniform curve segment length method, UCSL)确定各霍尔元件的位置,即椭圆上每一段曲线长度一致,该方法将霍尔元件均匀的分布在给定的闭合回路上。

由于椭圆闭合路径的弧长积分解析解不存在,本文使用数值分析方法求解近似解。首先将椭圆闭合路径近似为由 K 个点($K \geq 5\,000\,000$)构成^[21],第1象限上距离 X 轴最近的点为第1个点,则第 n 个点的坐标为:

$$E_n = (E_{n,x}, E_{n,y}) = \left(a \cos \frac{n \times 360^\circ}{K}, b \sin \frac{n \times 360^\circ}{K} \right) \quad (1)$$

$$n = 1, 2, \dots, K$$

X 轴到第 k 个点的长度为:

$$s(k) = \sum_{n=1}^k \sqrt{(E_{n,x} - E_{n-1,x})^2 + (E_{n,y} - E_{n-1,y})^2} \quad (2)$$

$$k = 1, 2, \dots, K$$

由式(2)可得,椭圆闭合路径的周长为 $s(K)$,若使用UCSL法将椭圆闭合路径分为 N 段,则每一曲线段的弧长为:

$$\Delta s = \frac{s(K)}{N} \quad (3)$$

引入曲线段相对偏置参数 $s_{0,r}$,根据文献[19]其最佳取值为:

$$s_{0,r} \cong \begin{cases} \frac{1}{2 \times 4N}, & N \text{ 为奇数} \\ \frac{1}{4N}, & N \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (4)$$

记 X 轴到第1个霍尔元件 P_0 处的初始偏置曲线段弧长为 s_0 ,其计算公式为:

$$s_0 = s_{0,r} \times s(K) \quad (5)$$

则 X 轴到第 i 个($i = 1, 2, \dots, N$)霍尔元件 P_{i-1} 处的曲线段长度为:

$$s_i = s_0 + i \Delta s \quad (6)$$

若存在 m 使得 $s(m) = s_i, m = 1, 2, \dots, K$,即 X 轴到椭圆闭合路径上第 m 个点的弧长等于 X 轴到第 i 个霍尔元件 P_{i-1} 处的曲线段长度,则霍尔元件坐标为:

$$P_{i-1} = \left(a \cos \frac{m \times 360^\circ}{K}, b \sin \frac{m \times 360^\circ}{K} \right) \quad (7)$$

$$n = 1, 2, \dots, K$$

此时,霍尔元件的敏感轴方向即椭圆曲线在霍尔元件处的切向矢量 $\vec{t}_{i-1}$ 为:

$$\vec{t}_{i-1} = \frac{\left(-a \sin \frac{m \times 360^\circ}{K}, b \cos \frac{m \times 360^\circ}{K} \right)}{\sqrt{\left(a \sin \frac{m \times 360^\circ}{K} \right)^2 + \left(b \cos \frac{m \times 360^\circ}{K} \right)^2}} \quad (8)$$

不同纵横比下的霍尔元件阵列示意图如图1所示,其中 s_0 表示初始偏置曲线段, P_{i-1} 表示霍尔元件的位置,

$\vec{t}_{i-1}$ 表示霍尔元件的敏感轴方向, X_p 表示 X 向的偏心距离, Y_p 表示 Y 向的偏心距离。

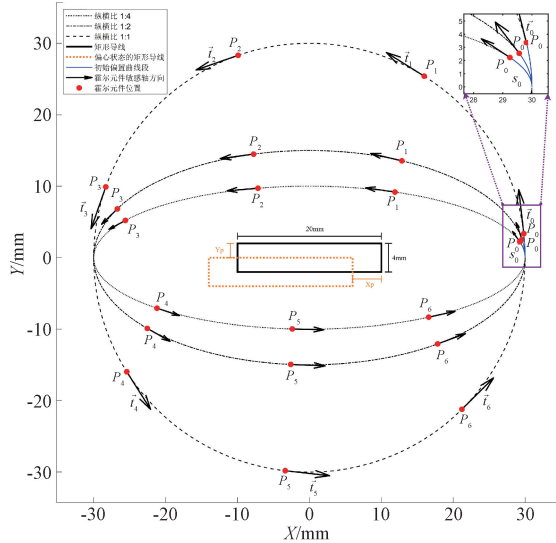


图1 不同纵横比下的霍尔元件阵列示意图

Fig.1 Schematic diagram of Hall element array with different aspect ratios

1.2 理论值计算

1) 磁传感器阵列电流传感器原理

长直载流导线电流产生的磁场可被视为准静态场,即满足安培环路定理:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum I \quad (9)$$

式中: H 为磁场强度; I 为待测电流。

按照 UCSL 分布方法沿积分环路布置 N 个霍尔芯片,待测电流为:

$$I = \sum_{i=1}^N H_i \Delta s_i \quad (10)$$

式中: H_i 为第 i 个霍尔元件处的切向磁场强度; Δs_i 为每一曲线段的弧长。对于 UCSL 分布方法,每一曲线段的弧长相等,因此只需计算出载流导体周围的磁场分布,即可计算出待测电流。

2) 矩形截面导体电流测量原理

如图2所示,以矩形导体中心为坐标原点建立坐标系,由于矩形导体和椭圆形阵列自身的几何特点,矩形载流导体周围的磁场分布仅关于 X 轴和 Y 轴对称,分布在椭圆闭合路径上的各个霍尔元件感应到的磁场分量均不相同,输出霍尔电压也均不相同。但是由于载流导体上的电流是均匀分布的,即横截面上各点的电流密度相等,因此可以采用微元法计算磁场分布,矩形载流导体在平面任意点 (a, b) 处激发的磁场强度可以看作无数个电流微元在该点处激发的磁场强度矢量和。

根据无限长直载流导线模型,可以得到无限长直载流导体在距离导体 ρ 处产生的磁场强度为:

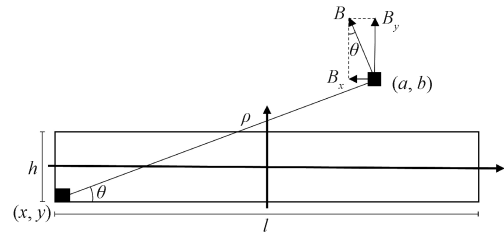


图2 矩形截面导体在平面任意点激发的磁场

Fig.2 Magnetic field of a rectangular cross-section conductor excited at any point of the plane

$$H_i = \frac{I}{2\pi\rho} \quad (11)$$

设矩形载流导体的截面积为 S , 则电流微元为:

$$dI = \frac{I}{S} dx dy \quad (12)$$

因此电流微元 dI 在点 (a, b) 处产生的磁场强度在 X 轴上的分量为:

$$dH_{ix} = -\frac{dI}{2\pi\rho} \sin\theta = -\frac{I \sin\theta}{2\pi\rho S} dx dy \quad (13)$$

待测电流 I 在点 (a, b) 处产生的磁场强度在 X 轴上的分量为:

$$\begin{aligned} H_{ix} &= -\iint_S \frac{I \sin\theta}{2\pi\rho S} dx dy = \\ &= -\iint_S \frac{I(b-y)}{2\pi S[(a-x)^2 + (b-y)^2]} dx dy = \\ &= -\frac{I}{2\pi S} \int_{-h/2}^{h/2} dy \int_{-l/2}^{l/2} \frac{(b-y)}{(a-x)^2 + (b-y)^2} dx \end{aligned} \quad (14)$$

同理,待测电流 I 在点 (a, b) 处产生的磁场强度在 Y 轴上的分量为:

$$\begin{aligned} H_{iy} &= \iint_S \frac{I \cos\theta}{2\pi\rho S} dx dy = \\ &= \iint_S \frac{I(a-x)}{2\pi S[(a-x)^2 + (b-y)^2]} dx dy = \\ &= \frac{I}{2\pi S} \int_{-h/2}^{h/2} dy \int_{-l/2}^{l/2} \frac{(a-x)}{(a-x)^2 + (b-y)^2} dx \end{aligned} \quad (15)$$

因此待测电流 I 在点 (a, b) 处产生的磁场强度为:

$$\vec{H}_i = \begin{pmatrix} H_{ix} \\ H_{iy} \end{pmatrix} \quad (16)$$

霍尔元件敏感轴方向的磁场强度为:

$$H_{i,MFS} = \vec{H}_i \cdot \vec{t}_i \quad (17)$$

根据安培环路定理可得待测电流为:

$$I_{calc} = \sum_{i=1}^N H_{i,MFS} \cdot \Delta s_i \quad (18)$$

计算误差为:

$$\epsilon_{calc} = \left(\frac{I_{calc} - I}{I} \right) \times 100\% \quad (19)$$

为了找出最适合狭窄空间使用的椭圆阵列电流传感器的纵横比和霍尔元件数量,利用 MATLAB 计算出椭圆阵列纵横比与电流误差的关系,计算结果如图3所示。

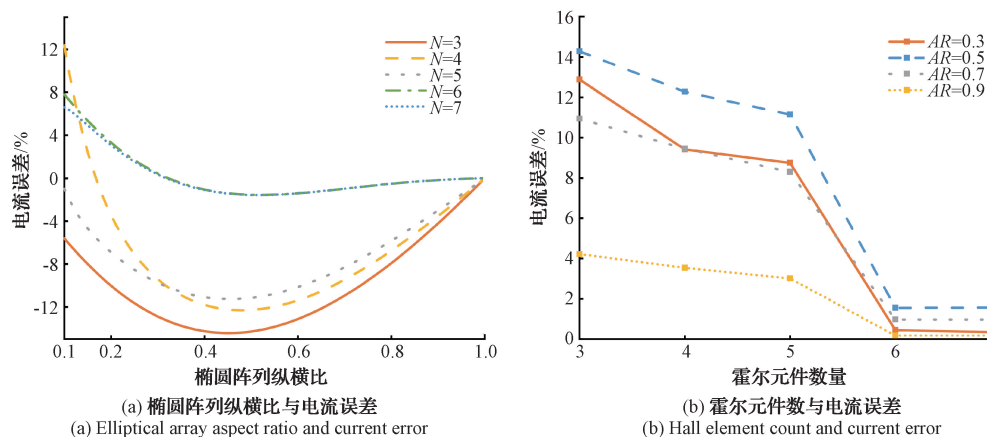


图3 椭圆阵列纵横比与电流误差关系

Fig. 3 Plot of elliptical array aspect ratio versus current error

由图3(a)可知,当椭圆阵列纵横比为1:1时,电流误差的理论值为0,即圆形阵列仍然具有较好的性能,但是圆形阵列所需的面积较大,不适合在狭窄空间内使用。当霍尔元件数量取4、6、7时,除纵横比为1:1外,仍存在其他的纵横比使电流误差的理论值为0,如 $N=4, AR=0.17$ 、 $N=6, AR=0.33$ 和 $N=7, AR=0.31$ 。考虑到椭圆阵列对不同尺寸矩形导体的适用性,本文不考虑 $N=4, AR=0.17$ 组合。由图3(b)可知,使用的霍尔元件数量越多,电流误差越小,即椭圆阵列对安培环路定律的复现效果越好, $N=6$ 与 $N=7$ 两种情况下,电路误差没有明显降低,可以推测 $N>7$ 时,误差减小的程度更小,考虑到霍尔元件椭圆阵列传感器的经济性,不再考虑 $N>7$ 的情况,后续仅讨论 $N=6$ 与 $N=7$ 两种情况。

1.3 仿真设置

与圆形载流导体相比,矩形载流导体的磁场分布相对复杂,而针对矩形载流导体的磁场分布进行精确分析,对于计算待测电流值至关重要。本文在CPU型号为i7-12700H、显卡为RTX 3050配置的笔记本Lenovo Y7000P上使用有限元仿真分析软件COMSOL Multiphysics进行建

模分析,矩形铜排的物理属性为电导率为 5.998×10^7 S/m,密度为 8960 kg/m³,环境区域设置为电导率为0的空气,在霍尔元件位置处设置探针并使用自适应方法对网格进行剖分。对矩形载流导体的磁场分布进行仿真,其磁通密度模分布如图4所示,矩形载流导体的磁场分布近似为椭圆,这为霍尔元件椭圆阵列电流测量方案提供了一定的依据。

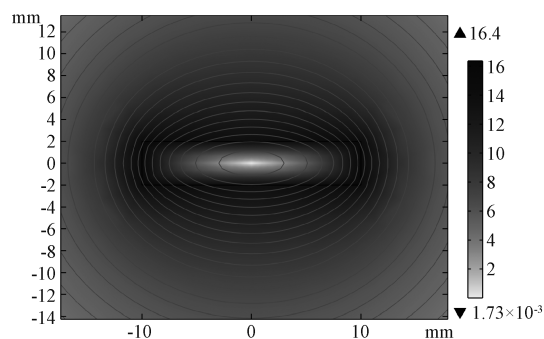


图4 矩形载流导体的磁场分布

Fig. 4 Magnetic field distribution of rectangular current-carrying conductor

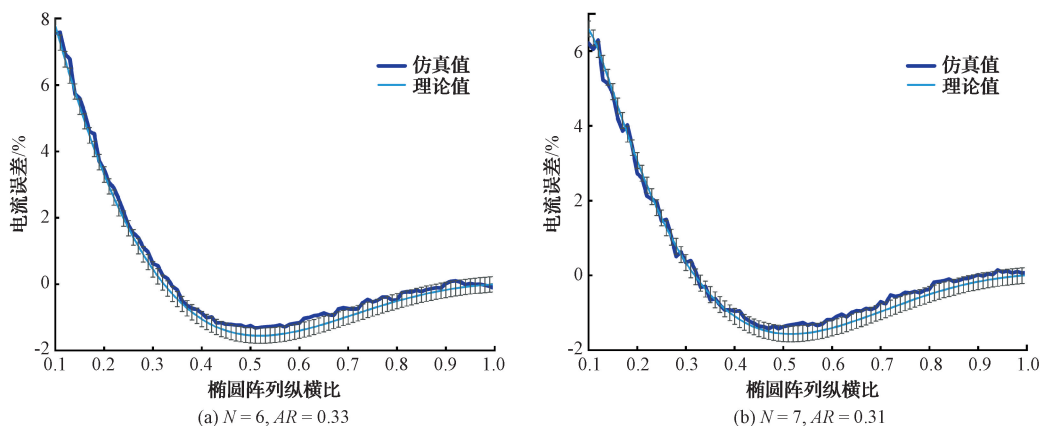


图5 椭圆阵列纵横比与电流误差仿真结果

Fig. 5 Elliptical array aspect ratio and current error simulation results

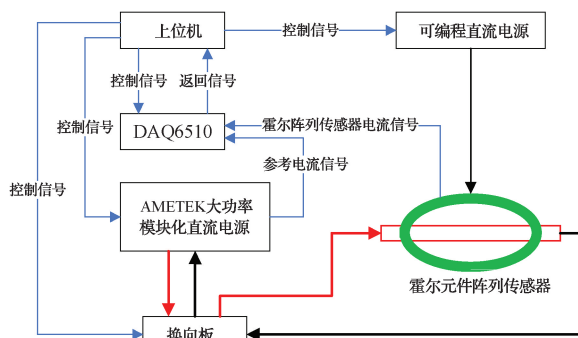
在 COMSOL Multiphysics 中使用 LiveLink for MATLAB 接口实现 COMSOL 与 MATLAB 联合仿真, 图 5 所示为 $N = 6$ 与 $N = 7$ 两种情况下椭圆阵列纵横比与电流误差的关系。由于网格划分方法等因素 COMSOL 仿真时会产生仿真误差, 由图 5 可以看出, $N = 6$ 与 $N = 7$ 时电流误差的仿真值基本在理论值的标准误差内, 即理论计算与仿真具有较好的一致性。

2 实验设计与验证

2.1 实验平台

本文以 LabVIEW 为环境搭建实验平台系统, 实现信号发送^[22], 实验装置原理及实物如图 6 所示, 所有的控制

信号均由上位机发出, 所有的数据均通过 DAQ6510 传输到上位机。Keithley DAQ6510 数据采集和记录万用表系统提供通道数高达 80 个, 分辨率为 16 bit, 采样率为 1 MS/s 模数转换器用于多通道读数。AMETEK 大功率模块化直流电源 SG 系列根据所需的输出电压, 在一个机箱中配置 1~6 个模块, 以提供 5~30 kW 的功率, 电压输出范围为 10~1 000 V, 电流的输出范围为 5~6 000 A, 本文设置 AMETEK 大功率模块化直流电源输出 500 A 直流电流, 用于给矩形导体提供 500 A 直流电流。换向板可以将 AMETEK 大功率直流电源输出的电流范围扩展至 -500~500 A。可编程直流电源用于向霍尔元件阵列传感器供电。



(a) 实验装置原理

(a) Schematic diagram of the experimental setup



(b) 实验装置实物

(b) Physical drawing of the experimental setup

图 6 实验平台

Fig. 6 Experimental platform

2.2 PCBA 设计

根据上述分析和仿真可以得出 $N = 6$ 、 $AR = 0.33$ 与 $N = 7$ 、 $AR = 0.31$ 两种情况下, 霍尔元件椭圆阵列电流传感

器具有较好的性能。为了对比椭圆阵列与圆形阵列的性能, 本文对 $N = 6$ 、 $AR = 1$ 和 $N = 7$ 、 $AR = 1$ 两组参数也进行实验, 4 个电路板上霍尔元件的位置与敏感轴方向如表 1 所示。

表 1 霍尔元件的位置与敏感轴方向

Table 1 Hall element position and sensitive axis orientation

	$S_{0,r}$	霍尔元件位置 P_{i-1}	霍尔元件敏感轴方向 $\vec{t}_{i-1}$
PCBA1 $N = 6, AR = 0.33$	0.041 7	(26.94, 4.40)、(5.57, 9.83)、 (-16.59, 8.33)、(-26.94, -4.40)、 (-5.56, -9.83)、(16.59, -8.33) (29.18, 2.17)、(11.77, 8.55)、	(-0.827, 0.563)、(-0.998, 0.063)、 (-0.976, -0.216)、(0.827, -0.563)、 (0.998, -0.063)、(0.976, 0.216)
PCBA2 $N = 7, AR = 0.31$	0.017 9	(-7.07, 9.04)、(-25.41, 4.95)、 (-21.01, -6.64)、(-2.36, -9.27)、 (16.43, -7.78)	(-0.611, 0.791)、(-0.991, 0.131)、 (-0.997, -0.075)、(-0.897, -0.443)、 (0.957, -0.291)、(1.000, -0.024)、 (0.980, 0.199)
PCBA3 $N = 6, AR = 1$	0.041 7	(28.98, 7.76)、(7.76, 28.98)、 (-21.21, 21.21)、(-28.98, -7.76)、 (-7.76, -28.98)、(21.21, -21.21)	(-0.259, 0.966)、(-0.966, 0.259)、 (-0.707, -0.707)、(0.259, -0.966)、 (0.966, -0.259)、(0.707, 0.707)
PCBA4 $N = 7, AR = 1$	0.017 9	(29.81, 3.36)、(15.96, 25.40)、 (-9.91, 28.32)、(-28.32, 9.91)、 (-25.40, -15.96)、(-3.36, -29.81)、 (21.21, -21.21)	(-0.112, 0.994)、(-0.847, 0.532)、 (-0.944, -0.330)、(-0.330, -0.944)、 (0.532, -0.847)、(0.994, -0.112)、 (0.707, 0.707)

由 COMSOL 仿真可知霍尔元件处的磁感应强度的范围为 $-7.9 \sim 7.9 \text{ mT}$, 因此选择 AKM EQ-730L 霍尔元件设计椭圆阵列电流传感器。AKM EQ-730L 的灵敏度为 130 mV/mT , 供电电压为 $3 \sim 5 \text{ V}$, 磁感应强度的感应范围为 $-18 \sim 18 \text{ mT}$, 其数据手册中推荐的电路如图 7 所示。

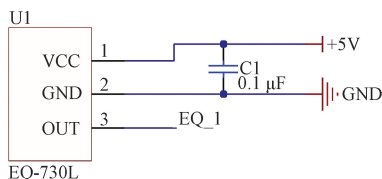


图 7 AKM EQ-730L 典型电路

Fig. 7 Typical circuit diagram of AKM EQ-730L

印刷电路板 (printed circuit board assembly, PCBA) 的工作原理如图 8 所示, 通过 E1205SY 电源模块, 将输入的 12 V 直流电转换为 5 V 直流电为 EQ-730L 和运放电路供电, 同时通过 TLV1117 低压降线性稳压器 (low drop-out regulator, LDO), 将 5 V 直流电转换为 3.3 V 直流电, 为 STM32F103C8T6 芯片供电。EQ-730L 感应到载导体产生的磁场, 并输出霍尔电压, 经过电压跟随器稳定后, 送入加法器计算霍尔元件椭圆阵列输出的总霍尔电压。将霍尔元件阵列总电压以及各霍尔元件输出的霍尔电压模拟量输入 STM32F103C8T6 的 ADC 端, 通过 PA11 和 PA12 端口输出 CAN 信号, 最后通过 TJA1050CAN 收发芯片将 CAN 信号传输到 DAQ6510。

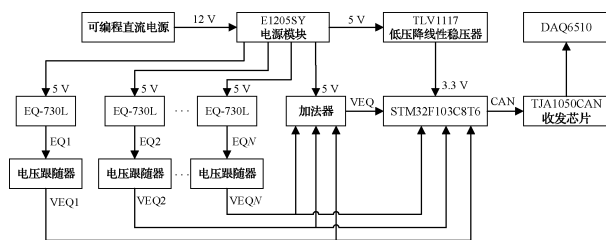


图 8 PCBA 工作原理

Fig. 8 PCBA working schematic

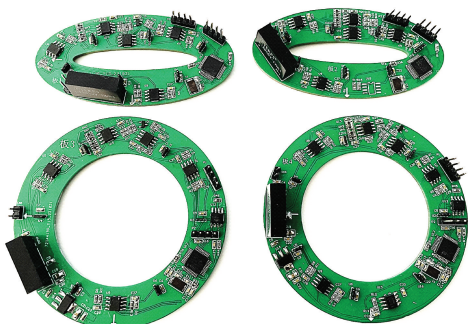


图 9 PCBA 实物

Fig. 9 PCBA physical drawing

2.3 实验过程

1) 标定

由于霍尔元件的贴片位置、电路板加工精度等因素的影响, 导致霍尔阵列电流传感器在默认参数状态下的测量精度偏低, 为了保证霍尔阵列电流传感器的测量精度, 在实际测试之前需要对其进行标定。

将待测矩形导体放置在霍尔元件阵列的中心位置, 通过上位机和换向板控制 AMETEK 大功率模块化直流电源输出 $-500 \sim 500 \text{ A}$ 电流脉冲, 步长为 10 A , 电流脉冲长度为 500 ms , 暂停长度为 1 s 等待导体冷却。将霍尔元件阵列输出的总电压作为设定电流的函数进行线性最小二乘拟合, 拟合直线的斜率对应霍尔元件阵列电流传感器的灵敏度 SensCal , y 截距对应霍尔元件阵列电流传感器的偏移量 OffsetCal 。对每个霍尔元件阵列电流传感器进行 3 次标定, 计算 3 次标定的灵敏度 SensCal 平均值和偏移量 OffsetCal 的平均值, 作为最终的灵敏度和偏移量。

2) 测试

根据标定得到的灵敏度 SensCal 和偏移量 OffsetCal , 可以由霍尔元件阵列输出的总电压得出待测电流为:

$$I_{\text{meas}} = \text{SensCal} \times \text{VEQ} + \text{OffsetCal} \quad (20)$$

若设定电流为 I , 测量误差为:

$$\epsilon_{\text{meas}} = \left(\frac{I_{\text{meas}} - I}{I} \right) \times 100\% \quad (21)$$

使用导体偏心装置改变导体的 X 向偏心距离和 Y 向偏心距离, 模拟实际使用时霍尔元件阵列电流传感器的工作, 测量矩形导体在 X 向偏心和 Y 向偏心的测量电流及测量误差。

3 偏心误差分析

3.1 导体偏心情况下的电流理论误差与仿真误差

虽然在安装矩形导体和霍尔元件阵列传感器时, 可以通过仪器校正, 避免导体偏离霍尔元件阵列中心, 但是在实际使用中, 由于工况的复杂性以及电动汽车自身的震动, 矩形导体不可避免的会偏离霍尔元件阵列电流传感器的中心位置, 即出现偏心的情况。如图 1 所示, 将偏心距离分解为 X 向偏心距离 X_p 和 Y 向偏心距离 Y_p , 根据 2.2 节的理论分析, 偏心情况下待测电流 I 在点 (a, b) 处产生的磁场强度在 X 轴上的分量 H_{ixp} 和 Y 轴上的分量 H_{iyp} 分别为:

$$\begin{aligned} H_{ixp} &= - \iint_S \frac{I \sin \theta}{2\pi \rho S} dx dy = \\ &= - \iint_S \frac{I(b-y)}{2\pi S[(a-x)^2 + (b-y)^2]} dx dy = \\ &= - \frac{I}{2\pi S} \int_{-\frac{h}{2}+X_p}^{\frac{h}{2}+X_p} dy \int_{-\frac{l}{2}+X_p}^{\frac{l}{2}+X_p} \frac{(b-y)}{(a-x)^2 + (b-y)^2} dx \\ H_{iyp} &= \iint_S \frac{I \cos \theta}{2\pi \rho S} dx dy = \end{aligned} \quad (22)$$

$$\iint_S \frac{I(a-x)}{2\pi S[(a-x)^2 + (b-y)^2]} dx dy = \frac{I}{2\pi S} \int_{-\frac{b}{2}+Y_p}^{\frac{b}{2}+Y_p} dy \int_{-\frac{a}{2}+X_p}^{\frac{a}{2}+X_p} \frac{(a-x)}{(a-x)^2 + (b-y)^2} dx \quad (23)$$

4个PCBA允许的导体偏心范围如表2所示,由于PCBA几何尺寸的限制,椭圆阵列与圆形阵列的X向可允许偏心距离仅相差4.2 mm,而圆形阵列的Y向可允许偏心距离是椭圆阵列的近10倍。

表2 4个PCBA允许的导体偏心范围

Table 2 Allowable conductor eccentricity range for four PCBAs

	-X 向极限偏心 距离/mm	+X 向极限偏心 距离/mm	-Y 向极限偏心 距离/mm	+Y 向极限偏心 距离/mm
$N=6, AR=0.33$	-10.5	10.5	-2.1	2.1
$N=7, AR=0.31$	-10.7	10.7	-2.0	2.0
$N=6, AR=1$	-14.9	14.9	-20.9	20.9
$N=7, AR=1$	-14.9	14.9	-20.9	20.9

在MATLAB仿真 $N=6, AR=0.33, N=7, AR=0.31, N=6, AR=1$ 以及 $N=7, AR=1$ 四种情况下,导

体仅在X向偏心时以及导体仅在Y向偏心时,不同偏心距离对应的电流误差,结果如图10所示。

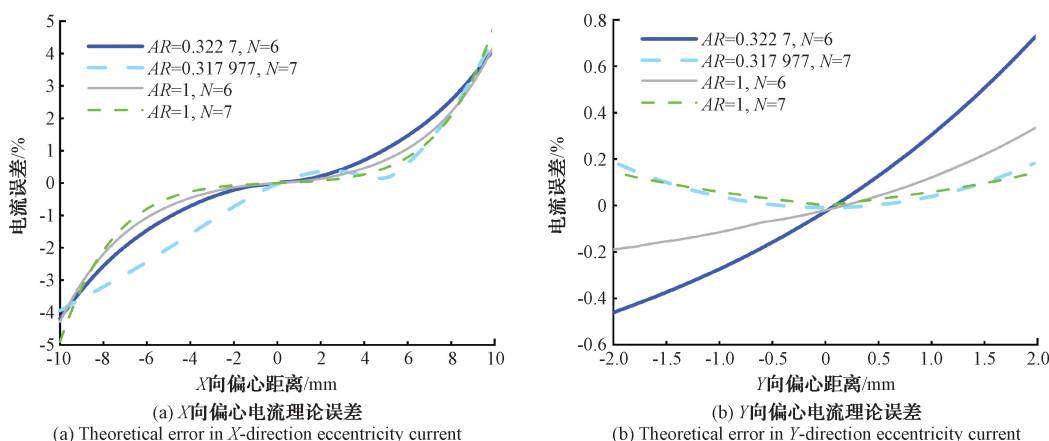


图10 不同偏心距离下的电流理论误差

Fig. 10 Theoretical error of current at different eccentricity distances

由图10(a)可知,若导体仅在X向发生偏心,当 $N=6$ 时,在 $\pm 1\%$ 的误差允许范围内,圆形阵列允许导体的X向偏心范围为 $-5.8 \sim 5.9$ mm,而椭圆阵列允许导体的X向偏心范围为 $-5 \sim 5.2$ mm。但是当 $-X$ 向偏心距离大于9 mm或 $+X$ 向偏心距离大于9.1 mm时,椭圆阵列产生的电流误差小于圆形阵列,即在导体可偏移的距离内,圆形阵列产生的误差大于椭圆阵列。当 $N=7$ 时,在 $\pm 1\%$ 的误差允许范围内,圆形阵列允许导体的X向偏心范围为 $-6.3 \sim 6.4$ mm,而椭圆阵列允许导体的X向偏心范围为 $-2.8 \sim 6.7$ mm,与圆形阵列相比,椭圆阵列在 $+X$ 方向上具有较好的性能。

由图10(b)可知,若导体仅在Y向发生偏心, $N=6, AR=0.33$ 和 $N=7, AR=0.31$ 两种椭圆阵列均可以满足 $\pm 1\%$ 的允许误差,且随着霍尔元件数量的增加,电流误差会随之减小。由于圆形阵列的尺寸特征,圆形阵列的Y向可偏心范围扩展至 $-20.5 \sim 20.5$ mm,导致电流误差最终会超过椭圆阵列下的电流误差。因此,在实际工况下,

椭圆阵列的性能更优与圆形阵列。

虽然在可接受的 $\pm 1\%$ 误差范围内,椭圆阵列允许的偏心距离小于圆形阵列,但是在实际应用时,PCBA的几何特征导致圆形阵列下导体的可偏移距离大于椭圆阵列,因此会产生更大的电流误差,而且圆形阵列的安装占用面积大于椭圆阵列,不便于在狭窄空间内安装,使得椭圆阵列成为狭窄空间内矩形导体电流测量的更优选择。

3.2 导体偏心情况下的电流误差验证

由于在实测时难以准确定位每个偏心距离,因此在实测时仅测量导体在极限偏心距离下的电流误差,测量结果如表3所示。

由表3可知,与理论值相比,仿真值更加接近实测值。由于在理论推导时为了控制变量,将矩形导体假设成无限长直载流导线模型,而在有限元仿真过程中是依据电磁学底层公式进行迭代计算,没有进行简化而求出数值解,使得与理论值相比,仿真值更加接近实测值。

表 3 矩形导体偏心情况下的电流误差汇总
Table 3 Summary of current errors in the case of rectangular conductor eccentricity

		-X 向极限 偏心距离下的 电流值/A	+X 向极限 偏心距离下的 电流值/A	-Y 向极限 偏心距离下的 电流值/A	+Y 向极限 偏心距离下的 电流值/A	X 向平均 误差/%	Y 向平均 误差/%
N=6 AR=0.33	理论值	478.75	521.25	497.65	503.80	4.25	0.62
	仿真值	476.05	524.10	499.05	500.95	4.81	0.19
	实测值	477.25	524.55	498.85	502.30	4.73	0.35
N=7 AR=0.31	理论值	478.20	529.25	500.90	500.90	5.11	0.18
	仿真值	477.60	529.25	501.00	500.95	5.17	0.20
	实测值	477.15	522.95	501.10	501.35	4.58	0.25
N=6 AR=1	理论值	418.35	586.05	488.85	512.80	16.77	2.40
	仿真值	416.35	593.15	489.05	513.05	17.68	2.40
	实测值	414.95	585.75	489.05	511.15	17.08	2.21
N=7 AR=1	理论值	416.25	594.85	506.95	506.35	17.86	1.33
	仿真值	410.95	602.80	506.50	506.90	19.19	1.34
	实测值	413.70	598.15	506.85	506.80	18.45	1.37

通过对比理论值计算、有限元仿真分析以及实际测试的结果,发现与 $N=6$ 、 $AR=0.33$ 椭圆阵列相比, $N=7$ 、 $AR=0.31$ 椭圆阵列仅在导体偏心距离较小的情况下具有较好的特性,且在导体沿 $-X$ 方向偏心时电流误差大于 $N=6$ 、 $AR=0.33$ 椭圆阵列,综合考虑到霍尔元件椭圆阵列电流传感器的整体性能和成本, $N=6$ 、 $AR=0.33$ 椭圆阵列更具优势。

不同电流测量方案的测量装置重量及安装使用面积如表 4 所示。

表 4 不同测量方案装置对比
Table 4 Comparison of devices for different measurement schemes

传感器	装置 重量/g	安装占用 面积/mm ²	X 向偏心 误差/%	Y 向偏心 误差/%
磁通门电流	69.5	3 290	—	—
霍尔元件圆 形阵列电流	15.5	2 827.4	≤17.08	≤2.21
本文	11.9	908.5	≤4.73	≤0.35

由表 4 可知,所本文设计的霍尔元件椭圆阵列电流传感器相比于传统电流测量方案,测量设备的重量及安装占用面积都得到有效减少,重量减少 82.9%,安装占用面积减小 72.4%,因此在满足实际使用要求的情况下,本文设计的霍尔元件椭圆阵列电流传感器更加适合狭窄空间内的矩形导体电流测量。

3.3 导体全局偏心情况下的电流误差预测

在 COMSOL Multiphysics 中使用 LiveLink for MATLAB 接口仿真分析 $N=6$ 、 $AR=0.33$ 时,矩形载流

导体在可偏心范围内任意位置对应的电流误差绝对值,仿真结果如图 11 所示。当矩形导体的 X 向偏心距离在 $-4.1\sim4.1$ mm, Y 向偏心距离在 $-2.1\sim2.1$ mm 范围内,霍尔元件椭圆阵列电流传感器的测量误差在可接受的 $\pm 1\%$ 之内,这为导体安装提供了一定的参考。

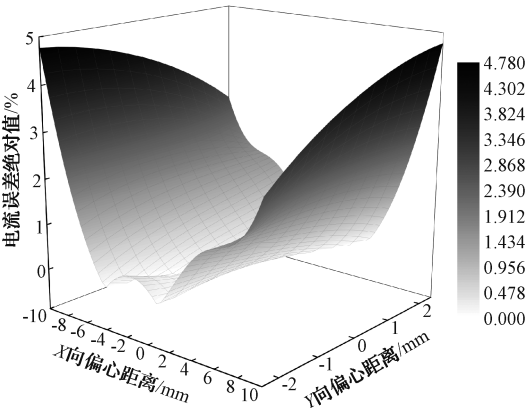


图 11 矩形导体全局偏心情况下的电流误差
Fig. 11 Current error for the case of global eccentricity of rectangular conductor

4 结 论

本文针对狭窄空间内矩形导体电流测量,提出了一种基于霍尔元件椭圆阵列的电流测量装置,经过理论计算、有限元仿真分析给出适合狭窄空间矩形导体电流测量的霍尔元件椭圆阵列参数,并通过理论计算、有限元仿真分析、实验测量验证该电流测量方法可行性、导体偏心状态下电流测量的有效性以及对于狭窄空间的适用性。结果表明,本文提出的 $N=6$ 、 $AR=0.33$ 霍尔元件椭圆阵列

的电流测量装置相比于传统电流测量装置重量减轻82.9%,安装占用面积减小72.4%,更加适合在轻量化、小型化产品中使用;同时本文使用有限元仿真分析软件COMSOL预测若导体的X向偏心距离在 $-4.1\sim 4.1\text{ mm}$,Y向偏心距离在 $-2.1\sim 2.1\text{ mm}$ 范围内,本文提出的电流测量装置的测量误差在可接受的 $\pm 1\%$ 之内,为导体安装提供了一定的参考,进一步为能源消费电力化、电力生产低碳化以及能源电子产业发展提供理论和技术支持。

参 考 文 献

- [1] 胡军,马浩宇,李鹏,等. 基于磁场传感器阵列的电流测量方法研究进展[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1779-1794.
- HU J, MA H Y, LI P, et al. Research progress of current measurement method based on magnetic field sensor array[J]. High Voltage Technology, 2023, 49(5): 1779-1794.
- [2] 陈佳旗,贾春荣,邸志刚,等. 电子式电流互感器应用现状及发展趋势[J]. 电子测量技术, 2022, 45(17): 144-152.
- CHEN J Q, JIA CH R, DI ZH G, et al. Application status and development trend of electronic current transformer [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(17): 144-152.
- [3] 李建光,肖浩,刘东伟,等. 用于铝电解电流精确测量的手持式光纤电流传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 39-48.
- LI J G, XIAO H, LIU D W, et al. Research on handheld fiber optic current sensor for accurate measurement of aluminum electrolysis current[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 39-48.
- [4] 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.
- [5] 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.
- LI X Y, LI Y S, LIU J. Research and design of symmetric closed-loop hall current sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(8): 69-76.
- [6] RIPKA P. Contactless measurement of electric current using magnetic sensors[J]. TM-Technisches Messen, 2019, 86(10): 586-598.
- [7] MA X, GUO Y, CHEN X, et al. Impact of coreless current transformer position on current measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(10): 3801-3809.
- [8] ITZKE A, WEISS R, DILEO T, 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.
- [9] 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.
- [10] KHAWAJA A H, HUANG Q, CHEN Y. A novel method for wide range electric current measurement in gas-insulated switchgears with shielded magnetic measurements [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(12): 4712-4722.
- [11] GUO C, ZHANG H, GUO H, et al. Crosstalk analysis and current measurement correction in circular 3D magnetic sensors arrays [J]. IEEE Sensors Journal, 2020: 1-1.
- [12] YU H, QIAN Z, 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.
- [13] ZHANG H, LI F, GUO H, et al. Current measurement with 3-D coreless TMR sensor array for inclined conductor[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(16): 6684-6690.
- [14] 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.
- [15] 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]. 北京:中国科学技术大学, 2017.
- GUO Q. Research on key technology of new high current sensor based on magnetic sensor array [D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2017.
- [16] 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.
- XIE Z Y, YANG T Y, WANG L CH. Optimized design of non-contact current sensor based on rectangular array [J]. Instrumentation Technology and Sensors, 2022(12): 7-12.
- [17] XU X P, LIU T Z, ZHU M, et al. New small-volume high-precision TMR busbar DC current sensor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, 56(2): 1-5.

- [18] XU X P, LIU T Z, ZHU M, et al. Nonintrusive installation of the TMR busbar DC current sensor[J]. Journal of Sensors, 2021, 2021: 1-10.
- [19] BLAGOJEVIĆ M, JOVANOVIĆ U, JOVANOVIĆ I, et al. Realization and optimization of bus bar current transducers based on Hall effect sensors[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(6): 065102.
- [20] LI W, ZHANG G, ZHONG H, et al. A wideband current transducer based on an array of magnetic field sensors for rectangular busbar current measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-11.
- [21] 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.
- [22] 何智, 张栋, 俞雪锋, 等. 基于 LabVIEW 的智能 TAS 传感器测试系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(8): 26-32.
- HE Z, ZHANG D, YU X F, et al. Design of intelligent TAS sensor test system based on LabVIEW [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(8): 26-32.

作者简介

沈悦, 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: 1719463617@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@cw Xu. edu. cn