

基于巨磁阻效应的电流传感器密封式聚磁环设计^{*}

马建军 李岩松 李雪洋 刘 君 柳 赞

(华北电力大学(北京)电气与电子工程学院 北京 102206)

摘 要:智能电网的建设离不开先进的传感和量测技术。相对于传统巨磁阻电流传感器聚磁环有开口的情况,文中提出了一种应用于巨磁阻电流传感器上的密封式聚磁环,包括对密封式聚磁环形状与构造、气隙开口大小与凹凸程度的设计,以及对密封式聚磁环所用的材料进行挑选。利用 COMSOL Multiphysics 对密封式聚磁环的模型进行仿真,对比分析了密封式聚磁环与传统式聚磁环之间的磁场饱和程度,气隙中心磁场均匀度的大小关系。仿真结果表明,密封式聚磁环的聚磁能力是传统开口式聚磁环的 764 倍,其结构能够使得巨磁阻传感器拥有更低的磁滞,灵敏度比传统开口结构磁环更好,从而可以为现场实时、精确、可靠的电流进行测量;小电流实验验证了密封式聚磁环在微弱磁场下的聚磁效果显著,0.2 A 及其以下电流所产生的磁场经密封式聚磁环聚磁后作用于巨磁阻芯片上,密封后巨磁阻芯片输出的电压是密封前的 5 倍以上。

关键词:巨磁阻效应;电流传感器;密封式聚磁环

中图分类号: TM27

文献标识码: B

国家标准学科分类代码: 470.4017

Design of sealed magnetic concentrating ring of current sensor based on giant magnetoresistance effect

Ma Jianjun Li Yansong Li Xueyang Liu Jun Liu Yun

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The construction of a smart grid cannot be separated from advanced sensing and measurement technologies. Compared with the traditional giant magneto-resistive current sensor with an opening in the magnetic concentrating ring, this paper proposes a sealed magnetic concentrating ring applied to the giant magneto-resistive current sensor, including the shape and structure of the sealed magnetic concentrating ring, and the air gap opening. The design of the size and the degree of unevenness, and the selection of the materials used in the sealed magnetic concentrator. Using COMSOL Multiphysics to simulate the model of the sealed magnetic concentrator, the relationship between the magnetic saturation degree of the sealed magnetic concentrator and the traditional magnetic concentrator and the uniformity of the magnetic field at the center of the air gap was compared and analyzed. The simulation results show that the magnetic concentrating ability of the sealed magnetic concentrator is 764 times that of the traditional open magnetic concentrator, and its structure can make the giant magneto-resistive sensor have lower hysteresis and better sensitivity than the traditional open magnetic ring. It can be used for real-time, accurate and reliable current measurement in the field; small current experiments have verified that the magnetic concentrating effect of the sealed magnetic concentrating ring is remarkable under weak magnetic fields. The magnetic field generated by the current of 0.2 A and below acts on the giant magnetoresistive chip after being concentrated by the sealed magnetic concentrating ring. The output voltage of the giant magnetoresistive chip after sealing is more than 5 times that before sealing.

Keywords: giant magneto-resistance effect; current sensor; sealed magnetic ring

0 引言

电流是电网中受到监测的众多的基本状态量之一,实时、精确、可靠的测量电流的变化对智能电网的建设与发展十分重要^[1-2]。相比于磁力法、电磁感应法、磁饱和法和电磁效应法、磁共振法、超导效应法、霍尔效应及磁光效应法等^[3-4],巨磁阻电流传感器拥有高灵敏度、宽范围,可测直流到高频的电流信号,并且具有成本低、体积小、更好的温度稳定性等优点,适合大规模推广。巨磁电阻拥有多种材料体系^[5-11],可以满足不同测量需求,凭借其优良的灵敏度和动态范围性能,可以对电网中的各种电流进行实时有效的监测,提高供电可靠性。传统巨磁阻电流传感器的聚磁环有一段空气气隙,而空气气隙磁阻很大,会大幅削减气隙内的磁场强度;同时气隙切面的凹凸状况会影响气隙间磁场强度大小和磁场均匀程度^[12],未对气隙切面的凹凸度与磁场均匀度关系的进行具体研究。利用铁氧体制作空心圆环结构的磁芯可以实现低磁阻通路,同时作为磁旁路减小气隙处的磁感应强度^[13],但是磁力线几乎全部聚集在圆环磁芯中,而量测位置处于圆环内部气隙,其内部气隙经过极少的磁力线,容易产生测量误差。铁镍钼材质的磁环在理论上都满足设计要求^[14],但是铁镍钼是一种类似黏土结构的材料,质地较脆,加工难度大,用手工锉刀打磨出的间隙,不能完全保证间隙的磁场强度均匀。巨磁阻芯片对磁场方向较为敏感,磁环结构可保证气隙处的磁场基本不会随着外界导线位置变化,简化了量测过程,降低了巨磁阻芯片对电流位置和角度的敏感程度^[15],选用坡莫合金作为磁环材料^[16-17],磁环的聚磁能力仍有提升空间。

根据以上所述,文中提出了一种聚磁环主体使用铁基纳米晶合金材料,气隙处使用磁流体进行密封的密封式圆形聚磁环结构,利用此种结构巨磁阻电流传感器能更准确的实时监测电网中电流的变化。与传统的开口聚磁环相比,此种聚磁环的灵敏度更高,精确度更好;在传统的巨磁阻电流传感器的基础上,利用离心率的定义,对气隙开口的凹凸程度进行探讨,研究了气隙凹凸程度气隙磁场分布均匀度关系。

1 巨磁阻电流传感器原理

巨磁阻效应是在外部磁场的作用下,电阻发生了呈量级的下降变化^[18],人们将这种比 AMR 高得多的磁电阻效应取名为巨磁阻(giant magnetoresistance, GMR)效应。

闭环巨磁阻电流传感器的结构如图1所示。其中包括聚磁环、巨磁阻芯片、运算放大器、功率放大电路、反馈

线圈和采样电阻。待测电流穿过聚磁环,导线周围产生磁场,聚磁环将磁感线集中起来形成磁通作用于开口处的巨磁阻芯片,再由巨磁阻芯片输出一个差分电压信号,经过功率放大电路后输出补偿电流;反馈电路引入零磁通原理^[19],补偿电流经过反馈线圈产生一个与原磁场方向相反的反馈磁场,削弱聚磁环中的磁场,使巨磁阻芯片输出电压下降,反馈电流随之下降,当反馈磁场与聚磁环中的磁场大小相等,此时整个闭环结构达到动态平衡。

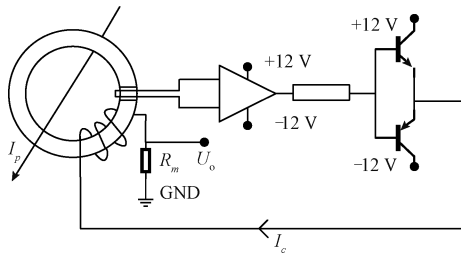


图1 闭环巨磁阻电流传感器原理

Fig. 1 Principle of closed-loop giant magneto-resistive current sensor

其数学表达式为:

$$N_1 I_p = N_2 I_c \quad (1)$$

式中: N_1 为待测电流的导线匝数,在单根无限长输电线里 $N_1=1$; I_p 是待测电流; N_2 是反馈线圈匝数; I_c 是反馈电路中的补偿电流。

通过测量采样电阻上的电压值,就能获得补偿电流 I_c 的数值,进而求得待测电流 I_p 的数值。

2 密封式聚磁环设计

传统巨磁阻电流传感器的聚磁环是有一个开口的圆环形结构,而文中提出的密封式聚磁环结构如图2所示。在传统的带有开口的圆环结构上,利用磁流体将开口气隙进行密封,由于磁流体具有良好的形变能力,可将巨磁阻芯片置于磁流体中进行测量。此种结构,减小了气隙处漏磁通的产生,大幅度削弱了气隙处的磁阻,可以很好的聚集磁通提高测量精度。从磁环材料、气隙凹凸程度与气隙磁场均匀度的关系、磁流体材料选取情况出发,改进了聚磁环的设计方法,以提高巨磁阻电流传感器测量的精度和灵敏度。

2.1 磁环材料特性

聚磁环作为巨磁阻电流传感器的重要组成部分,其最重要的作用就是聚集待测电流周围产生的磁通,而其构成材料的性能又会直接影响到聚磁效果,进而影响到测量的灵敏度。为了获得良好的灵敏度,必须对聚磁环的材料提出几点要求:

1) 有高饱和磁感应强度;

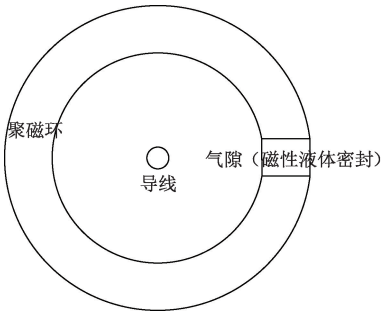


图2 密封式聚磁环结构
Fig.2 Sealed magnetic ring structure

- 2) 磁滞回线较窄,即低磁滞、矫顽力小,磁导率高;
3) 有良好的温度稳定性,温度适用范围广。

表1 几种软磁材料的对比

Table 1 Comparison of several soft magnetic materials

性能	坡莫合金	铁氧体 (MnZn)	铁基非晶 (FeMSiB)	钴基非晶 (CoFeMSiB)	纳米晶 Finemet (FeCuNbSiB)
饱和磁通密度 B_s/T	0.89	0.44	1.56	0.53	1.35
矫顽力 $H_c/(A \cdot m^{-1})$	0.8	8.0	5.0	0.32	1.3
居里温度 $T_c/^{\circ}C$	460	150	415	180	570
相对磁导率	20 000	5 300	4 500	18 000	16 000
电阻率 $\rho/(\Omega \cdot m)$	0.8×10^{-6}	0.2	1.4×10^{-6}	1.3×10^{-6}	1.1×10^{-6}

从表1中可以看到,Finemet居里温度为570℃,比锰锌铁氧体要高的多,其饱和磁通密度与铁基非晶材料十分接近,数值大约为锰锌铁氧体的3倍。Finemet的各项特性较好,由其制成的聚磁环,在测量精度和灵敏度上都优于材料为非晶合金、坡莫合金和铁氧体制成的聚磁环。

2.2 气隙凹凸程度与气隙磁场均匀度关系

1) 气隙凹凸程度

文中设计气隙的截面是矩形,引用数学中双曲线和椭圆中离心率的定义,其定义式为:

$$e = c/a \tag{2}$$

式中: e 为离心率。若是椭圆, c 为焦点间的距离, a 为长轴长度;若是双曲线, c 为焦点间的距离, a 为双曲线与坐标轴相交的两个交点之间的距离。

通过 e 的大小对气隙的凹凸情况进行描述,当 $0 < e < 1$ 即为椭圆, $e > 1$ 则为双曲线,有几个特殊情况,椭圆情况下 $e = 0$ 是正圆, e 趋于1的时候,此时是长为 a 的一条线段;而 $e = 1$ 是一条抛物线。此3种特殊情况下磁环结构如图3所示。

2) 气隙磁场均匀度

由于磁环存在一段气隙,气隙端面形状不同,气隙间的磁感线分布均匀程度也是不一样的。巨磁阻电流传感器的芯片须处在一个均匀的磁场中,测量出的电流值更

常见的软磁材料^[20]有硅钢片、坡莫合金、非晶合金软磁材料、纳米晶合金软磁材料和铁氧体软磁材料等。硅钢片在导磁性能方面不如上述其他几种软磁材料,另外其漏磁现象较为严重,目前采用硅钢片作为磁芯材料的情况较少。坡莫合金自从1913年前后被开发出来至今,已成为使用领域最为广泛的软磁合金,但是其磁性能对工艺因素的变动十分敏感,生产设备复杂、工艺要求严格,而且其饱和磁感应强度值较低。铁氧体的综合性能较好,但其饱和磁感应强度相对较低,居里温度也只有200℃左右。

文中采用的是铁基纳米晶合金软磁材料Finemet,其具有较高的饱和磁感应强度,比较低的矫顽力和较高的居里温度,符合上述3点选材要求。表1为几种软磁材料的对比。

接近真实值。因此,定义一个磁场分布的均匀度 γ ,在气隙中心位置放置巨磁阻芯片,并在其周围留有一定裕度,此范围内磁场的均匀度 γ 的表达式:

$$\gamma = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max}} \tag{3}$$

式中: $B_{\max}$ 为此区域中的最大磁感应强度, $B_{\min}$ 为此区域中最小磁感应强度。

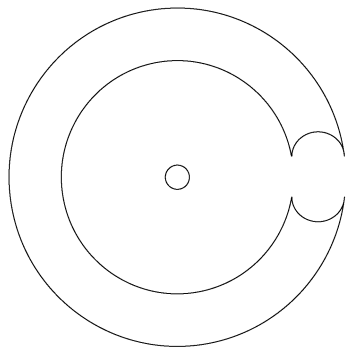
当 γ 的数值越接近0,表明此区域内的磁场越均匀;反之, γ 数值越大,说明此区域内的磁场越不均匀, γ 值太大则不适合进行测量。图4是椭圆 $e = 0$ 、 e 趋于1和双曲线 $e = 1$ 情况下气隙部分磁感线分布图。

通过 e 的变化,改变气隙切面的凹凸程度,取椭圆的离心率 $e \in [0, 1)$ 和双曲线的离心率 $e \in [1, 10]$, γ 与 e 的关系如图5所示。

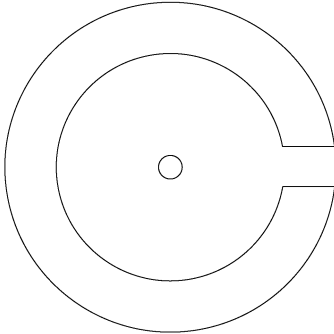
从图5可以看出,随着 e 的增大, γ 先减小后增大。当 $e = 1$ 时 γ 最小,其数值为 6.68×10^{-3} ,接近为0,磁场均匀度最好;当 e 大于1以后,双曲线的开口越来越大,磁场均匀程度越来越差,不符合测量要求。因此,选取切面为直线的磁环结构进行测量,其磁场均匀度极好,可以有效减少测量误差。

2.3 磁流体特性

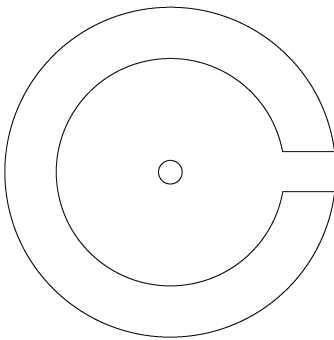
磁流体主要由3个要素构成,1)纳米级磁性颗粒,2)基液,3)包覆在纳米级磁性固体颗粒表面的界面活性剂



(a) 椭圆 $e=0$
(a) The elliptical $e=0$



(b) 椭圆 e 趋于 1
(b) The ellipse e approaches 1



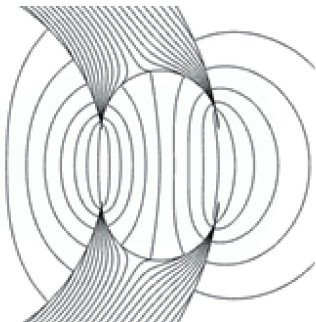
(c) 双曲线 $e=1$
(c) Hyperbolic $e=1$

图 3 3 种聚磁环结构

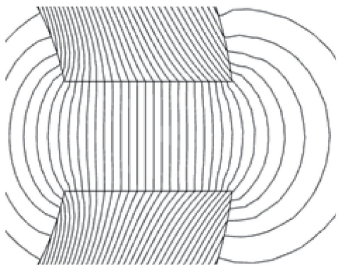
Fig. 3 Three poly magnetic ring structures

(也称为表面活性剂活分散剂)。磁流体不仅具有一般软磁的磁性,而且还有液体的流动性。无外加磁场的情况下,不表现对磁性物体的吸引力,只有在外加磁场后才对外显磁性,且随着外磁场的增加磁化强度成正比增加。饱和磁化后,磁场再增加磁化强度也不再增加,当外加磁场消失后,磁性颗粒立即退磁,几乎没有磁滞现象,其磁滞回线呈对称的“S”型。固态磁体与磁流体的磁化曲线如图 6 所示。

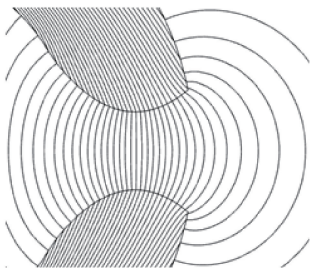
由图 6 可以看出,固体磁体在磁场大于 0 时和磁场小于 0 时都拥有一段线性关系,但其在磁场方向发生变化的时候,呈现很强的非线性;与此相比,磁流体在磁场



(a) 椭圆 $e=0$
(a) The elliptical $e=0$



(b) 椭圆 e 趋于 1
(b) The ellipse e approaches 1



(c) 双曲线 $e=1$
(c) Hyperbolic $e=1$

图 4 3 种情况下气隙部分磁感线分布

Fig. 4 Distribution of magnetic induction lines in air gap under three conditions

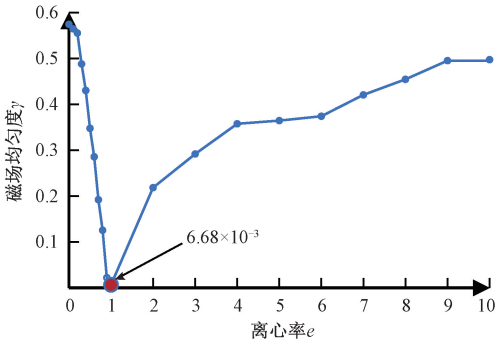


图 5 γ 与 e 的关系

Fig. 5 The relationship between γ and e

方向发生变化的情况下表现出良好的线性关系。

磁流体具有很快的退磁能力,用其将聚磁环的气隙进行密封,可以大幅减少漏磁通的产生,更好的聚集磁通。用磁流体密封后的聚磁环气隙磁感线分布图如图 7

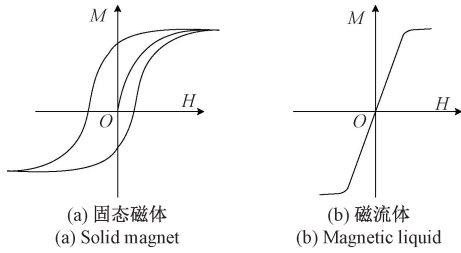


图 6 固态磁体与磁流体的磁化曲线

Fig. 6 Magnetization curve of solid magnet and magnetic liquid

所示,矩形为放置巨磁阻芯片进行测量的范围。

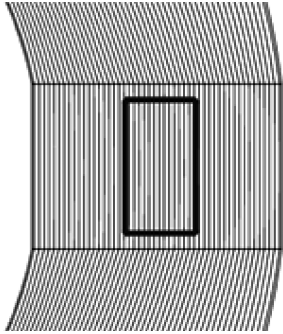


图 7 密封后聚磁环气隙部分磁感线分布

Fig. 7 Magnetic induction line distribution in the air gap of the polymagnetic ring after sealing

气隙中心位置的磁感应强度的分布如图 8 所示。

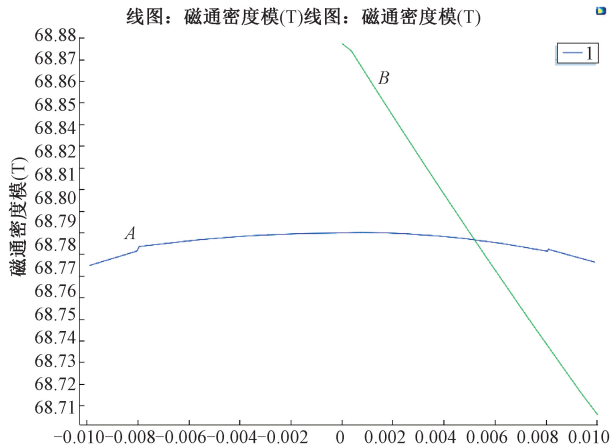


图 8 气隙中心位置的磁感应强度分布

Fig. 8 Magnetic induction intensity distribution at the center of the air gap

从图 7 可以看出,经过磁流体密封后,几乎所有的磁通都很好的聚集在磁环内,没有漏磁通的产生,图 8 中曲线 A 是图 7 矩形两个短边之间位置的磁通密度膜大小,曲线 B 是图 7 矩形两个长边之间位置的磁通密度膜大小,可以通过式(3)计算出此处磁场均匀度 $\gamma_A = 2.468 \times 10^{-3}$, $\gamma_B = 2.18 \times 10^{-4}$, γ 值最大为 0.2%,可见此处磁场的均匀度极好。

3 仿真结果

通过使用有限元方法求解,在 COMSOL Multiphysics 对密封式聚磁环进行建模。在此模型中,磁环主体材料选用 Finemet (Fe73.5Cu1Nb3Si13.5B9) 纳米晶软磁材料,其饱和磁通为 1.24 T,磁滞大小 0.5 A/m,相对磁导率 100 000,电导率 2.1×10^{-6} ,居里温度 570 $^{\circ}\text{C}$;气隙密封处选用铁氧体磁流体,其电导率为 1×10^{-12} ,使用温度 -10 $^{\circ}\text{C}$ ~ 150 $^{\circ}\text{C}$,相对磁导率 850。磁环外径 8 cm,内径 5 cm,聚磁环气隙宽度 2 cm,电流仅由单根输电线传输。通过改变电流值大小,可以在气隙中用巨磁阻电流传感器测量出磁感应强度的大小,二者的结构局部仿真图如图 9 所示。

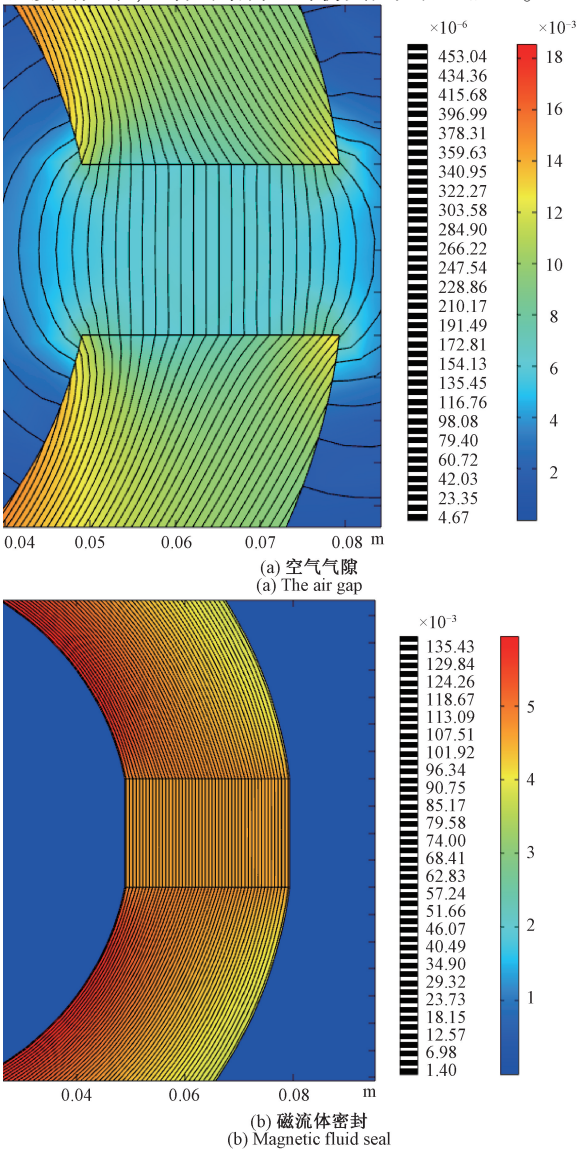


图 9 空气与磁流体密封气隙结构局部仿真
Fig. 9 Local simulation of air gap structure after air and magnetic fluid sealing

对 0~500 A 电流在磁环内某处产生的磁场大小的测量结果如表 2 所示。根据其数据绘制出电流大小与气隙磁感应强度大小的关系曲线,如图 10 所示。

表 2 不同电流下空气气隙与铁氧体磁液密封的磁场强度数据

Table 2 Magnetic field intensity data of air gap and ferrite magnetic fluid seal under different currents		
电流大小/A	空气气隙磁场强度/T	铁氧体磁液密封磁场强度/T
0	0	0
50	0.003 115 14	2.293 000 912
100	0.006 230 281	4.586 001 824
150	0.009 345 421	6.879 002 736
200	0.012 460 562	9.172 003 648
250	0.015 575 702	11.465 004 56
300	0.018 690 843	13.758 005 47
350	0.021 805 983	16.051 006 38
400	0.024 921 124	18.344 007 3
450	0.028 036 264	20.637 008 21
500	0.031 151 405	22.930 009 12

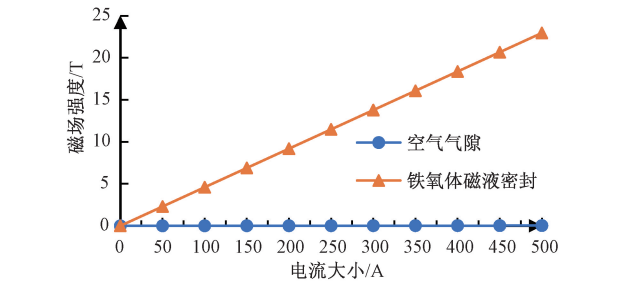


图 10 电流与气隙磁感应强度的关系
Fig. 10 The relationship between current and air gap magnetic induction

从图 10 可以看出,经过磁流体密封后的磁环可以很好的聚磁,磁通全部聚集在磁环内部,几乎没有漏磁通产生,相反空气气隙不仅产生了很大的漏磁通,而且气隙间的磁感应强度由于空气气隙的存在也被大大削减,经过磁流体密封后的磁环其密封处的磁感应强度与磁环内的磁感应强度几乎一致,没有减小,而且密封后的的磁场强度是空气气隙的 764 倍。这说明,巨磁阻电流传感器采取密封式聚磁环结构可以很大程度的提高灵敏度。

4 实验内容与结果

将密封式聚磁环置于室温环境下,将导线缠绕在密封式巨磁环一侧,导线中通入电流,密封式聚磁环实物图如图 11 所示。

当导线中通入电流,导线周围产生的磁通全部聚集在密封式聚磁环中,密封式聚磁环所聚集的磁通全部作

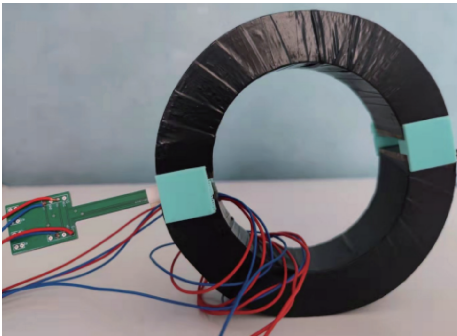


图 11 密封式聚磁环实物图
Fig. 11 Physical map of sealed magnetic concentrating ring

用于巨磁阻芯片上,芯片差分输出电压。改变通入导线电流大小可以改变磁场大小,巨磁阻芯片的输出电压与磁场大小成正相关,因此芯片的输出电压与通入导线电流成正相关。通过对比有无密封式聚磁环这两种情况下芯片输出电压的可以验证密封式聚磁环的聚磁效果。

4.1 实验内容

在室温下环境下进行小电流实验,导线中通入电流从 0~1 安匝逐渐增大,测量在不同电流下的巨磁阻芯片的输出电压值,实验结果如图 12 所示。

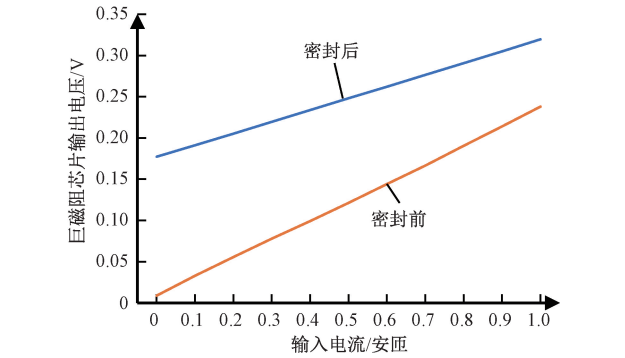


图 12 密封前后巨磁阻芯片输出对比
Fig. 12 Output comparison of giant magneto-resistive chips before and after sealing

当导线中无电流输出时,密封前后巨磁阻芯片的输出分别为 0.008 8 V 和 0.177 23 V,密封后的输出电压约为密封前的 20 倍;当导线中输入电流为 0.1 安匝,密封前后巨磁阻芯片的输出分别为 0.032 9 V 和 0.191 13 V,密封后的输出电压约为密封前的 5 倍;当导线中输入电流为 0.5 安匝,密封前后巨磁阻芯片的输出分别为 0.121 3 V 和 0.248 14 V,密封后的输出电压约为密封前的 2 倍;当导线中输入电流为 1 安匝,密封前后巨磁阻芯片的输出分别为 0.238 V 和 0.319 63 V,密封后的输出电压约为密封前的 1.34 倍。

4.2 实验结果分析

根据实验数据可以得知,密封式聚磁环在微弱磁场的情况下聚磁效果显著。由图12可知,密封后巨磁阻芯片输出电压数值明显大于密封前;在导线中通入小于0.2安匝电流,密封后巨磁阻芯片的输出电压是密封前的5倍以上。当电流逐渐增大,通电导线产生的磁场大小也随之变大,此时密封式聚磁环的聚磁效果表现仍较好,密封后巨磁阻芯片的输出电压仍然是密封前的1倍以上。

5 结 论

文中提出了一种拥有较强聚磁能力、应用于巨磁阻电流传感器的聚磁装置,设计了密封式聚磁环。纳米晶合金具有低磁滞高磁导率,磁流体具有很强的形变能力和零磁滞的特性,在传统磁环开口的基础上,以纳米晶合金为主体利用磁流体对气隙进行密封,密封后磁环内的磁场几乎全部聚集在磁环内部,大幅削减了漏磁通;结合不同气隙凹凸程度选择气隙磁场最均匀的切口即平面切口,设计聚磁环,保证聚磁环更好的聚磁,传感器更精准的测量。密封实验仿真对比结果显示,密封式聚磁环的聚磁能力是传统聚磁环的764倍,聚磁效果更强,在测量微小电流及弱磁场方面具有明显优势,实验结论为以后现场试验提供理论依据。

在实验室中进行了小电流实验对仿真结果进行了验证,密封式聚磁环在小电流弱磁场的条件下的聚磁效果显著。电流小于0.2 A的情况下,密封后巨磁阻芯片输出的电压可达密封前的5倍以上。本文所设计的密封式聚磁环结构在测量微小电流及微弱磁场的情况下具有一定的应用潜力。

参考文献

- [1] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等.智能电网技术综述[J].电网技术,2009,33(8):1-7.
CHEN SH Y, SONG SH F, LI L X, et al. Suvery on smart grid technology [J]. Power System Technology, 2009, 33(8):1-7.
- [2] 彭小圣,邓迪元,程时杰,等.面向智能电网应用的电力大数据关键技术[J].中国电机工程学报,2015,35(3):503-511.
PENG X SH, DENG D Y, CHEN SH J, et al. Key technologies of electric power big data and its application prospects in smart grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3):503-511.
- [3] 王冰,蒋磊,宋福明,等.30kA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.

- WANG B, JIANG L, SONG F M, et al. Design of 30 kA closed-loop integrated Hall current sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(11):188-193.
- [4] 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.
ZHANG H ZH, LI Y S, LIU J. Design of magnetic ring for open-close Hall sensor for calibration [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(2):171-175.
- [5] BERKOWITZ A E, MITCHELL J R, CAREY M J, et al. Giant magnetoresistance in heterogeneous Cu-Co alloys[J]. Physical Review Letters, 1992, 68(25):3745-3748.
- [6] 王海宝,郭海平,王于波,等.基于TMR元件的电流传感器的研制[J].电测与仪表,2018,55(9):103-107.
WANG H B, GUO H P, WANG Y B, et al. Research of current sensor based on TMR device [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(9):103-107.
- [7] 鲁文帅,尤睿,周扬,等.基于单片TMR磁传感器的非侵入电流监测微系统[J].仪器仪表学报,2020,41(6):1-9.
LU W SH, YOU R, ZHOU Y, et al. Non-invasive current monitoring micro-system based on monolithic TMR magnetic sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6):1-9.
- [8] 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.
LI F F, JI Y F, ZHUANG SH Q. Three-axis tunnel magnetoresistive array current sensor and current measurement method [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(18):54-60.
- [9] REIG C, CUBELLS-BELTRÁN M D, RAMÍREZ MUÑOZ D. Magnetic field sensors based on giant magnetoresistance (GMR) technology: Applications in electrical current sensing[J]. Sensors, 2009, 9(10):7919-7942.
- [10] DAUGHTON J M. GMR applications [J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 1999, 192(2):334-342.
- [11] 杨敏,王凤森,黄险峰.GMR传感器和TMR传感器的性能对比[J].国外电子测量技术,2019,38(1):127-131.
YANG M, WANG F S, HUANG X F. The performance comparison of GMR sensor and TMR sensor [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(1):127-131.
- [12] 嵇士杰.基于GMR效应的电流传感系统的设计及仿

- 真[D]. 北京:清华大学, 2011.
- JI SH J. Research of current sensor based on GMR effect for smart grid [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [13] 刘董. 基于 AMR 磁传感器的电流检测技术研究[D]. 青岛:青岛大学, 2020.
- LIU D. Research on current detection technology based on AMR magnetic sensor [D]. Qingdao: Qingdao University, 2020.
- [14] 李嘉鸿. 智能巨磁阻电流传感器设计[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2017.
- LI J H. Design of intelligent giant magneto-resistive current sensor [D]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2017.
- [15] XIAO C, ZHAO L, ASADA T, et al. An overview of integratable current sensor technologies [C]. 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of Industry Applications Conference, October 12-16, 2003, Salt Lake City, USA. New York: IEEE, 2003:1251-1258.
- [16] 张亚静. 铁基非晶纳米晶合金磁芯的制备及性能研究[D]. 北京:华北电力大学, 2019.
- ZHANG Y J. Research on the preparation and properties of Fe based amorphous nanocrystalline alloy core [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [17] 谢志远, 张冬祺, 陈楠. 基于铁基纳米晶的磁调制传感器的仿真研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(18): 125-130, 138.
- XIE ZH Y, ZHANG D Q, CHEN N. Simulation research of magnetic modulation sensor based on Fe based nanocrystalline [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(18): 125-130, 138.
- [18] BAIBICH M N, BROTO J M, FERT A F, et al. Giant magnetoresistance of (001) Fe / (001) Cr magnetic superlattices [J]. Physical Review Letters, 1988, 61(21): 2472-2475.
- [19] 王文, 吝伶俐, 乔记平, 等. 基于零磁通原理的微电流传感器的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2018(03): 23-25, 29.
- WANG W, LIN L Y, QIAO J P, et al. Research on micro current sensor based on zero flux principle [J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(3): 23-25, 29.
- [20] 严密, 彭晓领. 磁学基础与磁性材料[M]. 浙江大学出版社, 2006.
- YAN M, PENG X L. Fundamentals of Magnetism and Magnetic Materials [M]. Zhejiang University Press, 2006.

作者简介



马建军, 2019 年于华北电力大学获得学士学位, 现为华北电力大学硕士研究生, 主要研究方向为智能传感技术。
E-mail: 18800151323@163.com

Ma Jianjun received his B. Sc. degree from North China Electric Power University in 2019. Now he is a M. Sc. candidate at North China Electric Power University. His main research interest includes intelligent sensing technology.



李岩松(通信作者), 1991 于东北电力大学获得学士学位, 2000 年于华北电力大学获得硕士学位, 2004 年于华北电力大学获得博士学位, 2004 年至 2006 年在哈尔滨工业大学博士后流动站从事博士后科研。现为华北电力大学教授, 主要研究方向为智能传感与透明电网、电力系统分析与控制。

E-mail: liyansong811@126.com

Li Yansong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Northeast Electric Power University in 1991, M. Sc. degree from North China Electric Power University in 2000, and Ph. D. degree from North China Electric Power University in 2004. Now he is a professor of North China Electric Power University. His main research interests include intelligent sensing and transparent power grid, power system analysis and control.