

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.12.024

罗氏线圈磁屏蔽盒的设计与研究

杨为之¹, 宋坤宇², 周力行¹

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410000; 2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080)

摘要: 罗氏线圈受制造工艺等因素限制,其测量精度易受外界磁场干扰。对此,基于罗氏线圈工作原理与磁干扰分析设计了一种全新的罗氏线圈磁屏蔽盒。在实验室环境下,应用全、半屏蔽盒于正常信号衰减测试、模拟相间工频干扰测试、铁心振动干扰测试,并借助Ansys Maxwell对磁屏蔽盒仿真,考虑屏蔽盒材料,半、全屏蔽盒对正常信号获取以及抗磁干扰中的影响,实验结果表明:在获取正常信号方面,低频电流下添加屏蔽盒后信号衰减较为明显,而在高频电流条件下添加屏蔽盒后信号衰减较小;同时,添加了屏蔽盒后抗磁干扰能力大幅提升。仿真结果表明全屏蔽盒屏蔽性能更优,磁屏蔽盒采用硅钢材料将进一步提升正常信号获取能力。文中设计的磁屏蔽盒可应用于测量高频电流,并可根据外界磁干扰选择全、半屏蔽盒,有效地改善罗氏线圈测量精度。

关键词: 罗氏线圈; 磁屏蔽盒; 有限元; 非均匀磁场; 高频电流测量

Design and Research of the Magnetic Shielding Box of the Rogowski Coil

YANG Weizhi¹, SONG Kunyu², ZHOU Lixing¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410000, China;

2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: Due to the limitation of the manufacturing process, the measuring precision of the coil is easily affected by the external magnetic field. A new Rogowski coil magnetic shielding box is designed based on Rogowski coil working principle and analysis of magnetic interference. Under the laboratory environment, using full-shielding box and semi-shielding box normal signal decay test, simulation of inter phase power line interference test and core vibration interference test. At the same time, add a shielding box has significantly enhanced the ability of anti-magnetic interference. Designing the magnetic shielding box modeling in Ansys Maxwell finite element simulation, analyzing the effect which considering material of shielding box, semi-shielding, full-shielding box of normal signal acquisition and anti-magnetic interference. The results showed that: in normal signal acquisition, input and output ratio of non-shielding box is higher in low frequency current operating conditions, and whether add shielding box has little influence in the condition of high frequency current. The simulation results show that full-shielding box has better performance, magnetic shielding box using silicon steel material will further enhance the ability to obtain the normal signal. The magnetic shielding box designed in this paper can be used in the measurement of high frequency current, and can choose the full and half shielding box according to the external magnetic interference, and effectively improve the measurement accuracy of the Roche coil.

Key words: Rogowski coil; magnetic shielding box; finite element; non-uniform magnetic field; high frequency current measurement

0 引言

随着数字信号和微处理技术的发展,罗氏

(Rogowski)线圈得到了极大的发展^[1]。由于其采用非接触式的测量方式以及无磁芯的特殊结构,罗氏线圈具有无磁滞效应、无磁饱和现象以及结构简单等

优点,近年来广泛应用于变电站内电力设备状态监测以及试验中大电流采集^[2-5]。同时,在变电站智能化过程中,站用土地资源的紧张导致站内电气距离逐渐减小,站内高电压、大电流的环境易产生叠加磁场,特别是智能电网建设中众多电子设备的加入,站内磁场环境愈发复杂^[6-9]。变电站运行报告表明,站用罗氏线圈受外界干扰磁场影响其工作可靠性下降,因此如何降低外界磁场对罗氏线圈的干扰具有重要意义^[10-14]。

国内外学者对罗氏线圈抗磁干扰进行了大量的研究,文[8]认为非均匀磁场在罗氏线圈近侧端与远侧端感应的电势相抵消,因此非均匀磁场对罗氏线圈无影响,但上述分析建立在罗氏线圈绕线绝对均匀的情况下,而事实上工艺难以实现;文[10]认为绕线制作工艺的提升以及设计罗氏线圈磁屏蔽盒是解决罗氏线圈磁干扰的两种思路;文[11]提出了一种新型的罗氏线圈骨架结构,线圈骨架内屏蔽层的材料采用铝箔能够改善输电导线中外电磁场对罗氏线圈的电磁干扰,提升测量精度,但在变电站内的电磁干扰仍得不到改进;文[12]提出增大罗氏线圈匝数密度和线圈截面积均匀度,同时附加屏蔽罩结构,提供了磁屏蔽盒的设计思路,但文献并未对屏蔽盒的材料与规格进行探讨。

文中根据电磁干扰原理设计了一种全新的罗氏线圈屏蔽盒结构。在实验室环境下,考虑不同频率、幅值的电流行波在添加磁屏蔽盒前后,分别测试其对正常信号的衰减程度与对干扰信号的衰减程度。最后采用Ansys Maxwell有限元对屏蔽盒结构进行建模分析,考虑屏蔽盒材料为真空、铝、镍铁以及硅钢时磁场的分布云图,分析了增设屏蔽盒后罗氏线圈对正常信号采集的影响以及对干扰信号的屏蔽作用,验证了屏蔽盒在改善磁场分布上的作用。

1 罗氏线圈磁屏蔽盒设计

1.1 罗氏线圈干扰分析

罗氏线圈见图1,其测量电流的理论依据是电磁感应定律和安培环路定律^[15-17],将导线将线圈均匀环绕在非磁性材料构成的环形骨架上,同时线圈两端增设终端电阻 r 以测量大电流。测量时将罗氏线圈环绕在导线上,当导线通过的电流发生变化时,导致线圈中磁通量发生变化,进而使得环绕的线圈两端会产生感应电压,测量感应电压的大小并通过对应关系即可算出导线中电流的值^[18]。

而外界存在干扰磁场时,罗氏线圈的工作将受到影响,文[19]已表明在罗氏线圈绕组分布不绝对均匀的情况下外界磁场干扰对罗氏线圈工作的影

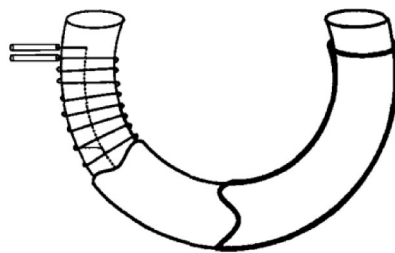


图1 罗氏线圈示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Rogowski coil

响。常规的提提高加工工艺水平受到技术条件限制,仍然难以保障线圈的匝数密度以及截面积的均匀^[20-22]。而罗氏线圈增设一个导磁材料制作的磁屏蔽盒后,将有效地减少磁场直接作用于罗氏线圈,而将大部分磁干扰消耗于磁屏蔽盒中^[23-24]。在现场运行中,干扰磁场的方位无法确定,若能做到屏蔽效果最大化,磁屏蔽盒需要做到对罗氏线圈的全包围;但用全包围势必会影响罗氏线圈正常感应导线的磁场,从而带来更严重的误差^[25]。为此,在屏蔽罩内侧设计一条缝隙以便导线的磁通能够被正常感应。

1.2 磁屏蔽盒规格

文中设计的磁屏蔽盒固定于半圆环状罗氏线圈上,安装时导线从内环穿过。罗氏线圈的屏蔽盒见图2。图2中内径为42 mm,外径为86 mm,宽为15 mm,屏蔽盒壁厚0.5 mm,中间缝隙为2 mm。磁屏蔽盒采用坡莫合金铸成。



图2 罗氏线圈屏蔽盒

Fig. 2 Rogowski coil shielding box

2 实验分析

2.1 实验概述

在磁封闭的环境下搭建实验平台,见图3。图3中罗氏线圈满足绕制均匀,表面光滑的条件,磁屏蔽盒规格按照设计要求,盒体用料为坡莫合金。实验中导线型号为LGJ-240,选用1 m长固定在绝缘支架上,其导线内径为21.6 mm,磁屏蔽盒与导线安装的缝隙选用硅胶垫片,一方面保证安装后装置的

稳定性,同时不会造成误差。试验电源采用工频电流发生器,电流幅值小于20 mA的称为小行波,电流幅值为20~40 mA的称为中行波,电流幅值大于40 mA的称为大行波。由于现场实测行波频率大多集中在2 MHz以下,因此试验电流频率采用5~2 000 kHz。放大电路设置为225倍。



图3 实验现场接线图

Fig. 3 Experimental wiring diagram

实验考虑屏蔽盒对正常信号的衰减测试以及对干扰信号的屏蔽测试,为使得实验中电流尽可能与实际中罗氏线圈测量的电流特征相吻合,考虑小、中、大电流幅值以及电流频率的不同,具体实验结果如下。

2.2 正常信号衰减测试

为研究罗氏线圈添加屏蔽盒对正常信号的衰减程度的影响,将屏蔽盒与罗氏线圈组合安装于导线上,发生器输入与放大器输出的变比作为参考量。在小行波下,采用不同频率的电流激励后变比测量结果见图4。图4中全盒屏蔽时由于波形幅值太小无法测量,仅测得无屏蔽与半盒屏蔽数据。

对于小行波,可以看出加半盒屏蔽后,5~100 kHz左右信号衰减程度可达50%,频率100~500 kHz衰减30%左右,高于500 kHz时衰减不明显。由此可看出屏蔽盒对低频信号衰减较大,对高频信号衰减程度较弱。

在中行波下,不同频率的电流对应的变比见图5。

对于中行波,加半盒屏蔽后,效果与小行波相同,在中低频时(5~50 kHz)行波有较大衰减,可达50%;电流频率高于100 kHz后,屏蔽盒对行波基本没有衰减;对于全盒屏蔽,在频率低于50 kHz时,其变比大于半盒屏蔽,说明在低频时全盒屏蔽衰减小于半盒屏蔽,当频率大于50 kHz时,其变比小于全盒屏蔽,说明在高频时衰减大于全盒屏蔽,同样,在

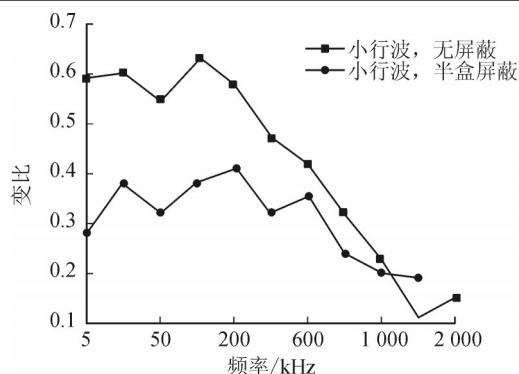


图4 小行波下不同电流频率变比

Fig. 4 Small wave under different current frequency ratio

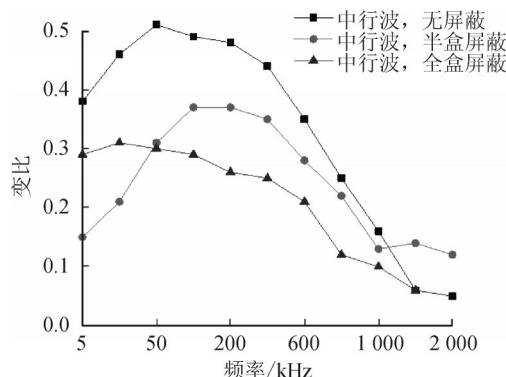


图5 中行波下不同电流频率变比

Fig. 5 Middle wave under different current frequency ratio

1.5 MHz以上时罗氏线圈增加屏蔽盒对正常信号获取没有衰减,反而有增强作用。

在大行波下,不同频率的电流对应的变比见图6,其中全盒屏蔽时波形幅值太小无法测量,仅测得无屏蔽与半盒屏蔽数据。

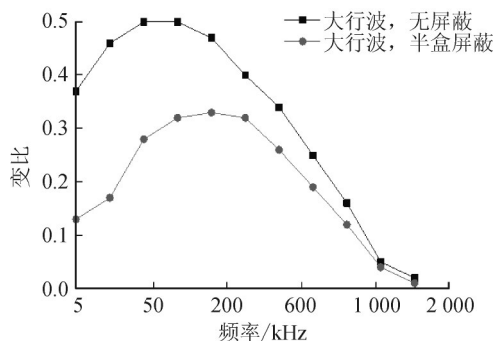


图6 大行波下不同电流频率变比

Fig. 6 Large wave under different current frequency ratio

对于大行波,加半盒屏蔽后,效果与小行波相同,在中低频时行波有很大衰减最大可达到65%,在高频时,屏蔽对行波基本没有衰减,且频率在1.5 MHz以上时对行波有增强作用;

综合而言,输出信号的大小随电流频率的增大出现先增大后减小的趋势,并在100~200 kHz达到最大值;而在高频(大于1 000 kHz)时,变比为0.1~0.15,

但此时罗氏线圈增加屏蔽盒与否对变比影响很小。半盒屏蔽在电流频率为50~1 000 kHz的区间内, 对小、中、大行波正常信号的衰减较小; 全盒屏蔽在电流频率为0~50 kHz的区间内, 对中行波的正常信号衰减较小。因此, 当所测电流信号在上述范围内时, 采用相应的屏蔽盒不会对测量结果产生较大误差。

2.3 干扰信号屏蔽测试

为模拟相间工频干扰测试, 将屏蔽盒与罗氏线圈放置在距离导线100、200、300 mm的位置, 导线上施加100 A的电流, 通过放大器输出的电压幅值见图7。

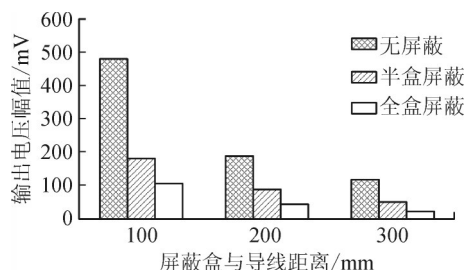


图7 屏蔽盒对干扰信号的影响

Fig. 7 Effect of shielding box on jamming signal

可以看出无屏蔽盒情况下, 磁干扰在线圈中感应的电压输出远大于半盒屏蔽与全盒屏蔽, 且当干扰源距离导线越近时, 屏蔽盒的效果更明显。在屏蔽磁干扰方面可以看出全屏蔽盒优于半屏屏蔽盒, 前者感应的干扰电压输出约为后者的50%。

另外, 在高压导线耦合取电方面, 罗氏线圈常用于高压电流的测量, 此时导线的铁心干扰较为严重, 因此考虑为另一主要干扰源并设置实验。试验中铁心震动磁场来源于交流信号, 现场设备带有陷波功能, 可以看出铁心震动带来的杂波干扰, 将铁心中施加50~300 A的电流, 测试无屏蔽、半盒屏蔽、全盒屏蔽下输出电压幅值见表1, 并将半盒屏蔽、全盒屏蔽衰减程度见图8。

由图8可以看出, 增加屏蔽盒后铁心干扰衰减明显, 在电流为100 A以下时, 屏蔽效果随电流幅值的增加而增加; 电流大于100 A时, 屏蔽盒的屏蔽效果出现饱和, 其中半盒屏蔽可屏蔽65%的铁心干扰, 全盒屏蔽可屏蔽80%的铁心干扰, 屏蔽效果显著。

3 仿真分析

3.1 模型搭建

为研究上述磁屏蔽盒对罗氏线圈正常工作的影响以及磁屏蔽盒对外界磁干扰的屏蔽作用, 在Ansys Maxwell中搭建瞬态磁场分析模型^[26]。由于磁屏蔽盒内缝隙相对较小, 导线上远离罗氏线圈处的电流在罗氏线圈上感应的磁场可忽略不计^[27], 故导

表1 不同铁心激励下罗氏线圈输出信号

Table 1 Output signal of the Rochecoil under different iron core excitation

参数	I/A				
	50	100	150	200	300
无屏蔽/mV	192	436	600	748	896
半盒屏蔽/mV	92	146	178	194	272
全盒屏蔽/mV	52	66	88	107	120

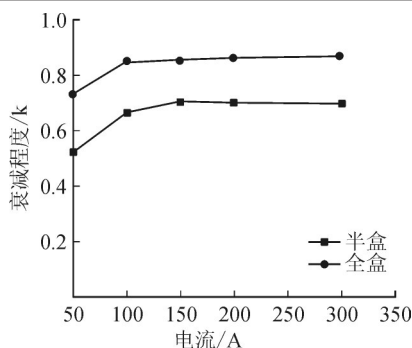


图8 不同屏蔽盒对干扰信号的衰减程度

Fig. 8 Attenuation of different shielding box to the interference signal

线长度设置为100 mm亦可模拟实际情况, 导线内径为21.6 mm, 导线材料设置为铝, 外加激励为幅值1 000 A的交流电。

罗氏线圈屏蔽盒仿真模型按实体的规格搭建, 采用截面为长方形的半圆环作为半屏蔽盒模型, 全圆环作为全屏蔽盒模型, 截面长为10 mm, 宽为5 mm, 圆环内径为54 mm。

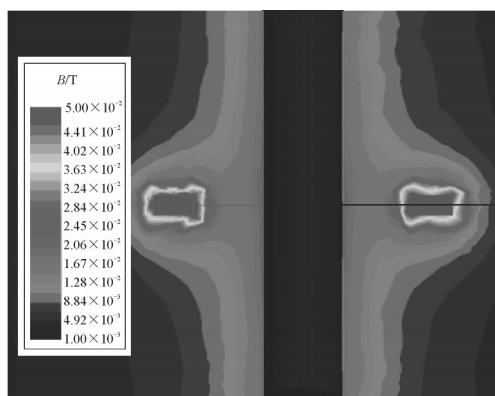
3.2 屏蔽盒材料

屏蔽盒材料的 $B-H$ 曲线不同时, 对正常信号的获取与干扰信号的屏蔽作用也不同。为此, 设置磁屏蔽盒为非导磁材料作为参考组, 包含真空以及铝。设置导磁材料为验证组, 包含硅钢以及镍铁。磁屏蔽盒截面磁场分布云图见图9。在参考组中, 由于铝和真空均不导磁, 其运算结果应与未加屏蔽盒结果相同; 而在验证组中, 其运算结果应较前者有明显变化。

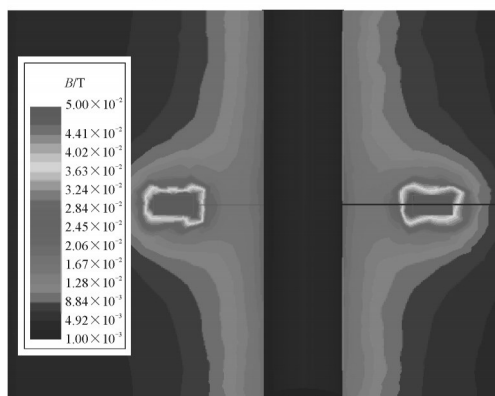
由图9可以看出在参考组中, 磁屏蔽盒材料选用真空和铝时计算结果一致, 磁屏蔽盒盒体上无感应磁场, 磁通全部感应于罗氏线圈中。在验证组中, 当材料选用镍铁时, 磁屏蔽盒盒体上有较多的感应磁通, 罗氏线圈中感应磁通明显下降; 材料选用硅钢时, 同样在盒体中有较多的感应磁通, 相对于镍铁而言, 其罗氏线圈中感应的磁场强度更高, 说明磁屏蔽盒采用硅钢在感应正常电流信号方面具有更大的优势, 因此在改进设计中可采用硅钢代替镍铁或坡莫合金材料。

3.3 正常信号衰减分析

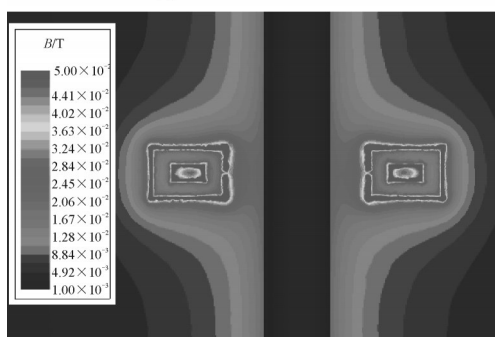
为验证磁屏蔽盒对导线感应磁通的衰减作用,



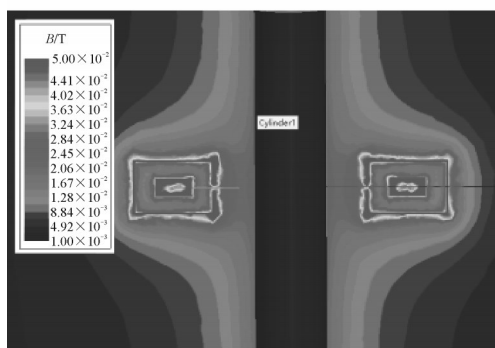
(a) 磁屏蔽盒材料为真空



(b) 磁屏蔽盒材料为铝



(c) 磁屏蔽盒材料为镍铁



(d) 磁屏蔽盒材料为硅钢

图9 仿真磁场云图

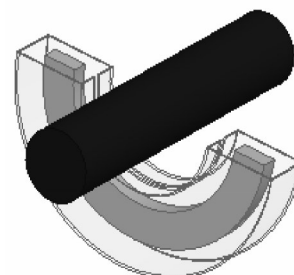
Fig. 9 Simulation of magnetic field

将罗氏线圈环绕于导线,分析半盒屏蔽、全盒屏蔽以及未加屏蔽盒的情况见图10。

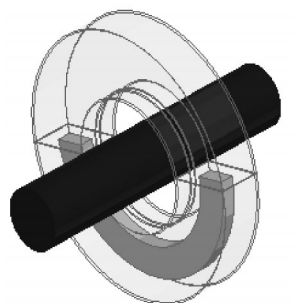
提取沿罗氏线圈轴向的磁场强度数据,见图11。



(a) 未添加磁屏蔽盒



(b) 半磁屏蔽盒



(c) 全磁屏蔽盒

图10 磁屏蔽盒对导线磁通影响示意图

Fig. 10 Effect of magnetic shielding box on the magnetic flux

由图11可以看出,无屏蔽盒、半屏蔽盒以及全屏蔽盒的磁场曲线峰值均出现在轴线中央。

当电流频率为50 Hz时,其中无屏蔽盒下感应的干扰磁场峰值约为0.5 T,半屏蔽盒下感应的干扰磁场峰值约为0.2 T,全屏蔽盒下感应的干扰磁场峰值约为1.5 T。可以看出,采用半屏蔽盒会屏蔽正常电流信号50%以上,而增加全屏蔽盒相比无屏蔽盒感应磁场强度提升了2~3倍。

当电流频率为200 kHz时,无屏蔽盒下感应的干扰磁场峰值约为16 T,半屏蔽盒下感应的干扰磁场峰值约为5 T,全屏蔽盒下感应的干扰磁场峰值约为2 T,与实验吻合。

3.4 磁干扰屏蔽分析

为验证磁屏蔽盒对外界磁干扰的屏蔽作用,模拟相间工频干扰试验,将导线横向移动至距离罗氏线圈及屏蔽盒100 mm处,见图12。同样考虑未添加磁屏蔽盒、半磁屏蔽盒以及全磁屏蔽情况。

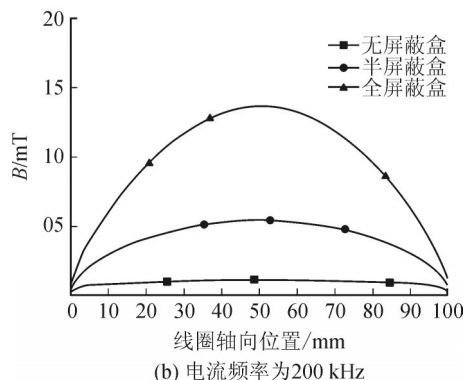
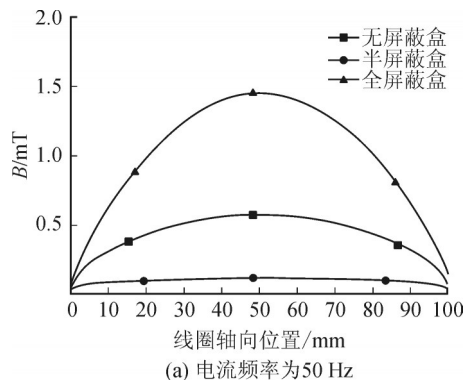


图 11 罗氏线圈磁场分布图

Fig. 11 The magnetic field distribution of the Rogowski coil

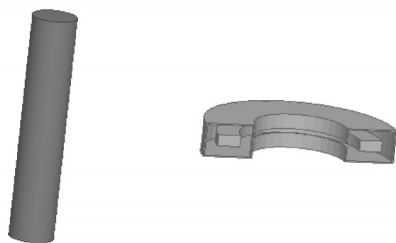


图 12 磁屏蔽盒对磁干扰屏蔽示意图

Fig. 12 Magnetic shielding box for magnetic interference shielding

运算完毕后同样提取罗氏线圈轴线上的磁场强度数据,分析未添加磁屏蔽盒与添加磁屏蔽盒后的数据见图 13。

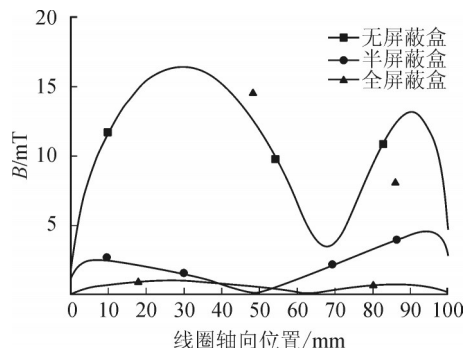


图 13 罗氏线圈磁场分布图

Fig. 13 The magnetic field distribution of the Rogowski coil

由图 13 可以看出,无屏蔽盒、半屏蔽盒以及全

屏蔽盒的磁场曲线均出现不同程度的 M 状,其中无屏蔽盒下感应的干扰磁场峰值约为 16.5 mT,位于轴线 30 mm 处;半屏蔽盒下感应的干扰磁场峰值约为 4.8 mT,位于轴线 90 mm 处;全屏蔽盒下感应的干扰磁场峰值约为 1.7 mT,未添加屏蔽盒时其外界干扰产生的磁场强度为 1.8 mT,位于轴线 35 mm 处。综合而言,半屏蔽盒最大能够降低相间磁场干扰 70%,全屏蔽盒最大能够降低相间磁场干扰 90%,屏蔽盒对外界磁干扰的屏蔽作用显著,能有效减少外界干扰对罗氏线圈工作的误差。

4 结论

1)实验结果表明,在正常信号衰减方面,电流频率在 0~400 kHz 条件下,半盒屏蔽的正常信号衰减为 20%~65%,全盒屏蔽的正常信号衰减为 20%~40%;电流频率在 400~1 000 kHz 条件下,半盒屏蔽的正常信号衰减为 10%~20%,全盒屏蔽的正常信号衰减为 40%~60%;电流频率在 1 000~2 000 kHz 条件下,半盒屏蔽、全盒屏蔽与无屏蔽差距较小,可认为两种屏蔽盒均对正常信号无衰减。在干扰信号屏蔽方面,半盒屏蔽可屏蔽约 60%的磁干扰,全盒屏蔽可屏蔽约 75%的磁干扰。

2)通过 Ansys Maxwell 有限元仿真验证了磁屏蔽盒的有效性,结果表明屏蔽盒选用硅钢材料相比于镍铁情况更佳。正常信号衰减方面,采用半屏蔽盒会屏蔽正常电流信号 50%以上,而增加全屏蔽盒相比无屏蔽盒感应磁场强度提升了 2~3 倍。干扰信号屏蔽方面,半屏蔽盒最大能够降低相间磁场干扰 70%,全屏蔽盒最大能够降低相间磁场干扰 90%。

3)综合而言,罗氏线圈屏蔽盒在测量高频电流时具有最佳作用,根据磁环境的复杂程度选择全盒屏蔽或半盒屏蔽将有效降低外界磁干扰,同时可以正常感应导线上电流信号。

参考文献:

- [1] 叶 挺,朱赛男. 用于测量工频和雷电流罗氏线圈的研制[J]. 电瓷避雷器,2014(6):72-78.
YE Ting, ZHU Sainan. Used to measure the power frequency and the development of the lightning current roche coil[J]. Insulators and Surge Arreste, 2014(6):72-78.
- [2] HLAVACEK J, PROCHAZKA R, KNENICKY M, et al. Influence of Rogowski coil shielding to measurement results[C]//International Scientific Conference on Electric Power Engineering(EPE). [S. l.]:IEEE, 2016 :1-5.
- [3] 胡泉伟,黄海波,袁 鹏,等. 基于罗氏线圈原理的 500 kV

- 电网过电压监测系统研究[J]. 高压电器, 2011, 47(5): 59-64.
- HU Quanwei, HUANG Haibo, YUAN Peng, et al. 500 kV power grid based on Rogowski coil principle of over voltage monitoring system[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(5): 59-64.
- [4] 梁 瑜, 蒋兴良, 杨 庆, 等. 雷电流测量用 Rogowski 线圈频谱特性分析[J]. 高电压技术, 2005, 41(5): 18-20.
- LIANG Yu, JIANG Xingliang, YANG Qing, et al. The spectral characteristics of Rogowski coil used in the measurement of lightning current[J]. High Voltage Engineering, 2005, 41(5): 18-20.
- [5] 田朝勃, 索南加乐, 罗苏南, 等. 应用于 GIS 保护及监测的罗氏线圈电子式电流互感器[J]. 中国电力, 2003, 36(10): 53-56.
- TIAN Zhaobo, SUONAN Jiale, LUO Sunan. Applied to the protection and monitoring of GIS of Rogowski coil electronic current transformer[J]. China Electric Power, 2003, 36(10): 53-56.
- [6] 陈承伟, 孙 悦, 王凯奇, 等. 罗氏线圈非理想工作情况分析[J]. 电气自动化, 2015, 37(4): 72-73.
- CHEN Chengwei, SUN Yue, WANG Kaiji et al. Roche coil ideal work situation analysis[J]. Electrical Automation, 2015, 37(4): 72-73.
- [7] IBRAHIM M E, ABD-ELHADY A M. Differential reconstruction method for power frequency AC current measurement using rogowski coil[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(23): 8420-8425.
- [8] 池立江, 刘 伟, 冉允喜. 一次导体偏心对罗氏线圈的干扰研究[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 67-71.
- CHI LiJiang, LIU Wei, RAN YunXi. An eccentric interference study of roche coil conductor[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 67-71.
- [9] ZHANG Zhousheng, BAO Han, MA Aiqing. The analysis of the factors affecting the performance of clamp Rogowski coil[C]// International Conference on Power System Technology (POWERCON). [S.l.]: IEEE, 2014: 1446-1450.
- [10] 池立江, 颜 语, 汶占武, 等. 非均匀外磁场对罗氏线圈的干扰研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 151-154.
- CHI Lijiang. YAN Yu, WEN Zhanwu, et al. Non-uniform external magnetic field interference with roche coil study[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 151-154.
- [11] HEMMATI E, SHAHRTASH S. M. Evaluation of shielded Rogowski coil for measuring partial discharge signals[C]// 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). [S.l.]: IEEE, 2012: 446-450.
- [12] 周宪林, 姚云鹏, 崔国琴, 等. Rogowski 线圈的抗干扰设计[J]. 科学时代, 2011(11): 147-148.
- ZHOU Xianlin, YAO Yunpeng, CUI Guoqin, et al. Rogowski coil of anti-interference design[J]. Scientific Time, 2011(11): 147-148.
- [13] 张 献, 章鹏程, 杨庆新, 等. 基于有限元方法的电动汽车无线充电耦合机构的磁屏蔽设计与分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 71-79.
- ZHANG Xian, ZHANG Chengpeng, YANG Qingxin, et al. Based on the finite element method(fem)of electric vehicle charging coupling mechanism of magnetic shielding design and analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 71-79.
- [14] 电磁兼容 试验和测量技术 工频频率变化抗扰度试验: GB/T 17626. 28—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- Electromagnetic compatibility—Testing and measurement techniques—Variation of power frequency, immunity test: GB/T 17626. 28—2006[S]. Beijing: The Chinese Standard Press, 2006.
- [15] 陈瑜辉, 徐春营. 输电线路行波测量罗式线圈波形校正电路的设计[J]. 数字技术与应用, 2012(12): 113.
- CHEN Yuhui, XU Chunying. Transmission line traveling wave measurement ROM coil waveform correction circuit design[J]. Journal of Digital Technology and Applications, 2012(12): 113.
- [16] 马 仪, 周文俊, 孙伟忠, 等. 雷电流传感器罗氏线圈的研制及测试[J]. 南方电网技术, 2011, 5(6): 39-41.
- MA Yi, ZHOU Wenjun, SUN Weizhong, et al. Development and test of Rogowski coil in lightning current transducer[J]. Southern Power Grid Technology, 2011, 5(6): 39-41.
- [17] 陶 涛, 赵治华, 潘启军, 等. 一种抗强干扰型双面对称布线 PCB 罗氏线圈[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 130-137.
- TAO Tao, ZHAO Zhihua, PAN Qijun, et al. Strong interference resistance double-sided symmetrical layout PCB roche coil[J]. Journal of Electrotechnics, 2011, 26(9): 130-137.
- [18] 周开涛. 基于 Ansoft 的空心电抗器工频磁场干扰屏蔽分析[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- ZHOU Kaitao. Based on Ansoft hollow reactor power frequency magnetic field interference shielding analysis[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [19] METWALLY IA. Metwally performance improvement of slow-wave rogowski coils for high impulse current measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(2): 538-547.
- [20] 张玉红. Rogowski 线圈电流互感器的仿真分析与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- ZHANG Yuhong. Simulation analysis and design of Rogowski coil current transformer[D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2006.
- [21] 衡思坤, 韩遇春, 张劲松, 等. 适用于配电网故障指示器的 PCB 型罗氏线圈电流互感器设计[J]. 水电能源科学, 2015(5): 186-189.
- HENG Sikun. HAN Yuchun, ZHANG Jinsong, et al. Suit-

- [13] HUTTENLOCHER D P, KLANDERMAN G A, RUCK LIDGE W J. Comparing images using the Hausdorff distance[J]. IEEE Transactions on PAMI, 1993, 15(9): 850-863.
- [14] 李化, 杨新春, 李剑, 等. 基于小波分解尺度系数能量最大原则的GIS局部放电超高频信号自适应小波去噪[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 85-91.
LI Hua, YANG Xinchun, LI Jian, et al. Based on wavelet decomposition scale coefficient of energy maximum principle of GIS partial discharge UHF signal adaptive wavelet denoising[J]. Journal of Electrotechnics, 2012, 27(5): 85-91.
- [15] BHOWMICK S, NANDI S. Online detection of an interturn winding fault in single-phase distribution transformers using a terminal measurement-based modeling technique[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 1007-1013.
- [16] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模及仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 57-63.
XU Ye, GUO Moufa, CHEN Bin, et al. Modeling and simulation for single-phase to ground arc faults on distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 57-63.
- [17] 束洪春, 肖白. 配电网单相电弧接地故障选线暂态分析法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(21): 54-55.
SHU Hongchun, XIAO Bai. A transient-based study of fault line selection for single-phase to ground faults on distribution system[J]. Automation of Electric Power System, 2001, 26(21): 58-61.
- [18] 刘晓明, 韩颖, 王尔智, 等. 基于多物理场耦合的高压SF₆断路器混沌电弧模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 165-172.
LIU Xiaoming, HAN Ying, WANG Erzhi, et al. Chaos of arc model for SF₆ circuit breaker based on coupled multiple—physical field simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 165-172.
- [19] 黄绍平, 杨青, 李靖. 基于MATLAB的电弧模型仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 64-66.
HUANG Shaoping, YANG Qing, LI Jing. Arc model based on MATLAB simulation[J]. Journal of Electric Power System and Its Automation, 2005, 17(5): 64-66.
- [20] 林莘, 王娜, 徐建源. 动态电弧模型下特快速瞬态过电压特性的计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 157-164.
LIN Xin, WANG Na, XU Jianyuan. Calculation and analysis of dynamic arc model under VFTO characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 157-164.

邓祥力(1973—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统继电保护。

姚媛媛(1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护。

(上接第146页)

- able for distribution network fault indicator of PCB roche coil current transformer design[J]. Water and Electricity Energy Science, 2015(5): 186-189.
- [22] 龙祖利. 小型大电流Rogowski线圈设计及性能[J]. 高电压技术, 2007, 32(7): 79-83.
LONG Zuli. Design and performance of miniature Rogowski coil for heavy current measurement[J]. High Voltage Technology, 2007, 32(7): 79-83.
- [23] 孔庆源, 戴敏. 冲击电流测量中Rogowski线圈的应用[J]. 高电压技术, 2005, 30(11): 6-7.
KONG Qingyuan, DAI min. Application of Rogowski coil in impulse current measurement[J]. High Voltage Engineering, 2005, 30(11): 6-7.
- [24] IBRAHIM A. Metwall coaxial-cable wound Rogowski coils for measuring large-magnitude short-duration current pulses[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2003, 62(1): 119-128.
- [25] 王宝诚, 王德玉, 郭伟扬. 罗氏线圈的频率特性分析与传感器的设计方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 21-27.
WANG Baocheng, WANG Deyu, WU Weiyang. The analysis of the frequency characteristic of roche coil sensor design method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 21-27.
- [26] 张士文. 罗氏线圈若干问题研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
ZHANG Shiwen. Study on some problems of the of the Roche coil[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [27] 周辉. 磁屏蔽技术的仿真研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
ZHOU Hui. Simulation study of magnetic shielding technology[D]. Changsha: Hunan University, 2014.

杨为之(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压绝缘技术。

宋坤宇(1993—), 男, 硕士, 研究方向为高电压与绝缘技术(通讯作者)。