

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.04.015

开合式罗氏线圈误差形成机理与补偿方法研究

刘 青^{1,2}, 张晓晖¹, 雍晟晖², 陈一林², 刘浩林¹, 康 帅²

(1. 西安理工大学 工程训练中心, 陕西 西安 710054;

2. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对大功率脉冲电能源电性能测试要求,在分析罗氏线圈开合方式对精度影响的基础上,本文设计了一种新的开合式罗氏线圈结构。本文通过对罗氏线圈的绕线匝数、骨架厚度的均匀性、导体位置偏心以及外部磁场影响等因素的分析,对于罗氏线圈的测量误差形成机理进行了研究,并利用互补开合式罗氏线圈结构和一次导线支架对于气隙漏磁和导体位置变化导致的误差进行了补偿。试验结果表明,电流在1~20 A范围内,测量误差为0.24%,由于罗氏线圈具有无磁饱和特性,可以外推到大电流测试需求,因此为高精度大功率脉冲电源性能指标的准确测量提供依据。

关键词: 罗氏线圈; 误差补偿; 互补开合式; 高精度

中图分类号: TM452

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2020)04-0544-07

Research on open structure Rogowski coil performance and error compensation method

LIU Qing^{1,2}, ZHANG Xiaohui¹, YONG Shenghui², CHEN Yilin², LIU Haolin¹, KANG Shuai²

(1. Engineering Training Center, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at the electrical performance test requirements of high-power pulsed electric energy, and on the basis of analyzing the influence of Rogowski coil opening and closing methods on accuracy, this paper designs a new opening and closing Rogowski coil structure. Based on the analysis of the number of turns of the Rogowski coil, the uniformity of the thickness of the skeleton, the eccentricity of the conductor position and the influence of the external magnetic field, the paper studies the formation mechanism for the measurement error of the Rogowski coil, with the complementary open-close Rogowski coil structure and the primary wire support used to compensate for the errors caused by air gap magnetic leakage and conductor position changes. The test results show that the measurement error is 0.24% when the current is in the range of 1~20 A; because the Rogowski coil has no magnetic saturation characteristics, it can be extrapolated to high current test requirements, so it provides a basis for accurate measurement of high-precision high-power pulse power performance indicators.

Key words: Rogowski coil; error compensation; complementary open structure; high precision

近些年来,高能武器已逐渐成为各国军方的研究重点,而电磁炮作为高能武器的代表,一直备受媒体与军方的高度关注。现阶段针对电磁炮的实战化应用仍存在诸多问题亟需解决,如电源系统,由于其在极短的时间内提供MJ级能量^[1],因此需要进一步进行研究。目前,对这种大功率脉冲电能源技术指标的准确测试,已成为制约我国电磁炮以及电磁发射技术发展的关键瓶颈问题。罗氏线圈以其良

好的线性度、测量频带宽、无磁饱和、动态范围大等优势已成为测量传感器的最佳方案^[2-3]。

目前常用的罗氏线圈有闭合式和开合式两种,其中闭合式罗氏线圈受骨架材料热胀冷缩的影响,会造成磁通不均匀,出现测量误差且安装极为不便^[4]。为了抵消温度影响,本文通过分析罗氏线圈的误差机理,重点研究一次导体偏心与外部磁场耦合对开合式罗氏线圈测量精度的影响,并提出误差

收稿日期: 2020-06-11; 网络出版日期: 2020-10-26

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20201026.1145.005.html>

基金项目: “十三五”装备预研资助项目(41421070101); 国家重点实验室开放基金项目(2018XXAQ09)

第一作者: 刘青,男,博士,副教授,研究方向为电力检测。E-mail: 948481478@qq.com

补偿方法,从而提高罗氏线圈针对大功率脉冲电源的测量精度。

1 罗氏线圈误差机理分析

罗氏线圈的误差主要由绕线匝数的均匀性、骨架厚度的均匀性、导体位置偏心以及外部磁场等影响因素产生。PCB 罗氏线圈能够很好的解决传统罗氏线圈绕线和骨架厚度不均匀带来的问题,但是气隙造成的漏磁成为限制开合式罗氏线圈大规模应用的瓶颈问题^[5-7]。由于气隙的存在,罗氏线圈无法形成密闭的结构,从而导致漏磁。图 1 显示了在 ANASYS 软件仿真中,开合式罗氏线圈存在的漏磁现象。

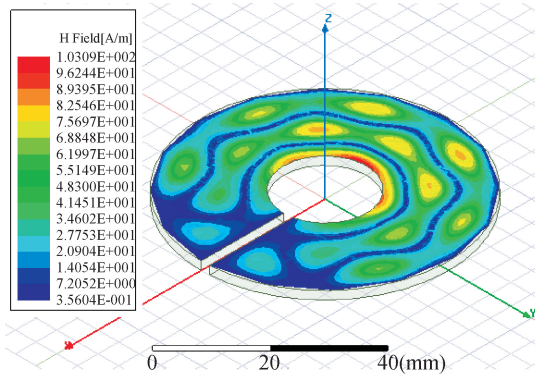


图 1 开合式罗氏线圈漏磁仿真

Fig. 1 Magnetic flux leakage simulation of open structure Rogowski coil

由图 1 可知,由于开合式罗氏线圈存在非常明显的漏磁现象,导致磁场在气隙处迅速减小,引起开合式罗氏线圈磁场分布不均,从而引起测量误差。由于气隙的存在,当一次导体存在偏心或外部有磁场时,会影响开合式罗氏线圈自身的磁场,从而导致测量误差增大。

1.1 一次导体位置偏心分析

当一次导体偏心时,被测导线在罗氏线圈内部与线圈垂直,但存在位置偏移,见图 2。取罗氏线圈

$$\delta(l) = \frac{e(l, t) - e(0, t)}{e(0, t)} = \frac{l}{2N \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \ln\left(\frac{1 + (l/b)^2 - 2(l/b)\cos(2\pi n/N)}{1 + (l/a)^2 - 2(l/a)\cos(2\pi n/N)}\right) \quad (4)$$

由式(4)可得,当罗氏线圈结构参数一定时,一次导体的位置偏心引起的误差与罗氏线圈的外内径之比、匝数以及一次导体的偏心距有关。

1.2 一次导体倾斜分析

当一次导体倾斜时,图 3 中圆平面为初始平面,椭圆平面为一次导体倾斜后与其垂直的平面。

线圈 P 点处磁感应强度垂直分量为:

上任意一点 M ,一次导体的偏心距为 l ,一次导体与线圈平面相交于点 K , MK 距离为 λ ,罗氏线圈中心半径为 r , OM 与 OK 之间的夹角为 α 。

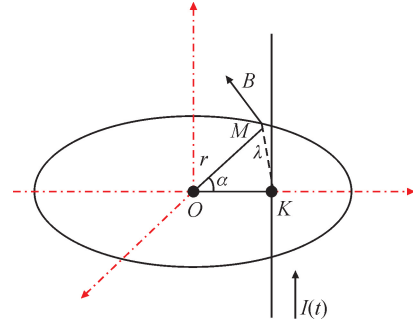


图 2 一次导体位置偏心示意图

Fig. 2 Schematic diagram of primary conductor position eccentricity

则 M 点处的磁感应强度 B_M 为:

$$B_M = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \frac{r - l \cos \alpha}{r^2 + \lambda^2 - 2rl \cos \alpha} \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; I 为一次导体的电流。

当一次导体存在位置偏心时, M 点处的感应电动势 $e_M(l, t)$ 为:

$$e_M(l, t) = \frac{d\left(\iint B_M dS\right)}{dt} = -\frac{\mu_0 h}{4\pi} \cdot \ln\left(\frac{b^2 + l^2 - 2bl \cos \alpha}{a^2 + l^2 - 2al \cos \alpha}\right) \cdot \frac{dI}{dt} \quad (2)$$

式中: h 为厚度; b 为外径; a 为内径。

N 匝线圈时,令 $\alpha = m \cdot \frac{2\pi}{N}$, 其中 m 为匝数变量,此时线圈的感应电动势 $e(l, t)$ 为:

$$e(l, t) = -\sum_{m=0}^{N-1} \frac{\mu_0 h}{4\pi} \cdot \ln\left(\frac{b^2 + l^2 - 2bl \cos\left(m \cdot \frac{2\pi}{N}\right)}{a^2 + l^2 - 2al \cos\left(m \cdot \frac{2\pi}{N}\right)}\right) \cdot \frac{dI}{dt} \quad (3)$$

偏心引起的感应电动势误差 $\delta(l)$ 为:

$$B_P \cos \omega = \frac{\mu_0 I}{2\pi k} \cdot \frac{OM}{OP} = \frac{\mu_0 I}{2\pi k} \cdot \frac{\cos \theta}{\cos^2 \omega + \cos^2 \theta \sin^2 \omega} \quad (5)$$

式中: I 为一次导体的电流; k 为磁场到被测导线中心的距离; θ 为倾斜角; ω 为 P 点与倾斜面之间的夹角。

P 点处的感应电动势为:

$$e_p(\theta, t) = - \frac{d \left(\iint_P B \cos \omega dS \right)}{dt} = - \frac{\mu_0 h}{2\pi} \cdot \frac{\cos \theta}{\cos^2 \omega + \cos^2 \theta \sin^2 \omega} \cdot \ln \left(\frac{b}{a} \right) \cdot \frac{dI}{dt} \quad (6)$$

式中: h 为厚度; b 为外径; a 为内径。

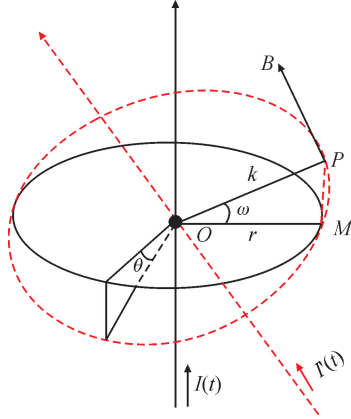


图3 一次导体倾斜示意图

Fig. 3 Schematic diagram of primary conductor tilt

由于开合式结构设计的感应磁场是非均匀分布的,因此,每匝线圈的感应电压不相等,不能累乘。

$$\delta(\theta, l) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \frac{\cos \theta}{\sin^2 \left(m \cdot \frac{2\pi}{N} \right) \cos^2 \theta + \cos^2 \left(m \cdot \frac{2\pi}{N} \right)} + \frac{l}{2N \ln \left(\frac{b}{a} \right)} \sum_{m=0}^{N-1} \ln \left(\frac{1 + (l/b)^2 - 2(l/b) \cos \theta}{1 + (l/a)^2 - 2(l/a) \cos \theta} \right) - 1 \quad (9)$$

根据式(9),设定罗氏线圈外径为 50 mm,内径为 20 mm,气隙角为 3° ,匝数为 400 匝时,用 MATLAB 绘制倾斜和位置偏移的总误差曲线图,见图 4。

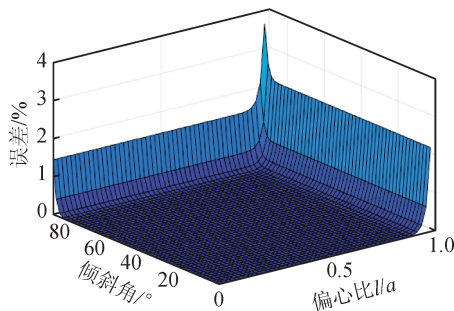


图4 倾斜角和位置偏心引起的总误差

Fig. 4 Total error caused by tilt angle and position eccentricity

由图 4 可知,当倾斜角接近 90° 时,即使无位置偏心,开合式结构设计的罗氏线圈的测量误差会迅速增大至 1.521%;当位置偏心比 l/a 接近为 1 时,即使无倾斜,其误差也会迅速增大至 2.531%;当倾斜角和位置偏心同时存在时,其测量误差最大为 3.702% 左右。

1.3 外部磁场的影响

罗氏线圈测量原理是通过一次载流导体产生的

在倾斜时, N 匝线圈的感应电动势为:

$$e(\theta, t) = - \sum_{m=0}^{N-1} \frac{\mu_0 h}{2\pi} \cdot \frac{\cos \theta}{\sin^2 \left(m \cdot \frac{2\pi}{N} \right) \cos^2 \theta + \cos^2 \left(m \cdot \frac{2\pi}{N} \right)} \cdot \ln \left(\frac{b}{a} \right) \cdot \frac{dI}{dt} \quad (7)$$

式中: m 为匝数变量, $\omega = m \cdot \frac{2\pi}{N}$ 。

可得倾斜误差 $\delta(\theta)$ 为:

$$\delta(\theta) = \frac{e(\theta, t) - e(0, t)}{e(0, t)} = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \frac{\cos \theta}{\sin^2 \left(m \cdot \frac{2\pi}{N} \right) \cos^2 \theta + \cos^2 \left(m \cdot \frac{2\pi}{N} \right)} - 1 \quad (8)$$

由式(8)可得,当罗氏线圈结构参数一定时,一次导体的倾斜偏心引起的误差与罗氏线圈的匝数和一次导体的倾斜角有关。

由式(4)和式(8)得出由倾斜误差和位置偏心误差, $\delta(\theta)$ 和 $\delta(l)$ 引起的误差总和为:

磁场去感应电流,因此当存在外部干扰磁场时,会影响一次导体产生磁场的变化,导致罗氏线圈产生测量误差^[8]。本文以外部邻近交变电流的存在对罗氏线圈感应电动势的影响为例,研究外磁场造成的罗氏线圈测量误差,外部电流影响示意图见图 5。

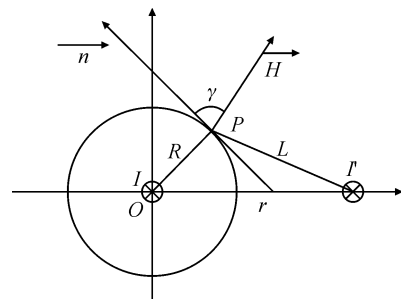


图5 外部磁场影响示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the influence of external magnetic field

假设截面面积 S 处处均匀, R 为罗氏线圈等效半径, r 为邻近导体的中心距, γ 为 P 点磁场强度与 P 点处罗氏线圈等效圆切线的夹角, L 为外部载流导体到 P 点的中心距。则邻近电流在罗氏线圈中产生的感应电压为:

$$\Delta e(t) = - \frac{d\phi}{dt} = - \frac{d}{dt} \int_0^{2\pi} \mu_m S R \frac{I(t)}{2\pi L} \cos \gamma d\gamma =$$

$$-\frac{\mu_0 SR}{2\pi} \frac{dI(t)}{dt} \int_0^{2\pi} \frac{\cos\gamma}{L} d\gamma + \frac{\mu_0 SR}{2\pi} \frac{dI(t)}{dt} \cdot \int_{\theta}^{\theta+\delta} \frac{\cos\gamma}{L} d\gamma = \frac{\mu_0 SR}{2\pi} \frac{dI(t)}{dt} \int_{\theta}^{\theta+\delta} \frac{\cos\gamma}{L} d\gamma \quad (10)$$

由此引起的相对误差为:

$$\frac{\Delta e(t)}{e(t)} = \frac{R \int_{\theta}^{\theta+\delta} \frac{\cos\gamma}{L} d\gamma}{2\pi} \quad (11)$$

由式(11)可得,当外部载导体距罗氏线圈距离一定时,引起的误差与罗氏线圈的等效半径成正比,与外部载导体距罗氏线圈的距离成反比。

设相邻电流同被测电流大小相等,罗氏线圈等效半径 $R=35$ mm,气隙起始角 $\theta=0$,气隙角 $\delta=\pi/48$ rad,邻近导体与穿心导体距离 r 分别为 24, 30, 36, 42 cm 时,仿真分析邻近电流磁场对罗氏线圈测量产生的相对误差,其变化曲线见图 6。

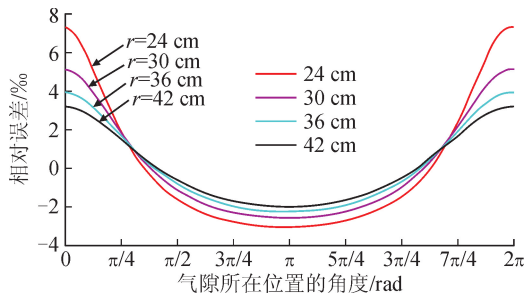


图 6 邻近导体位置变化对测量性能的影响

Fig. 6 Influence of the change of adjacent conductor position on the measurement performance

仿真结果表明,邻近导体与罗氏线圈开口位置距离最近时,相对误差较大,较其他位置时高数倍甚至数十倍。此外,邻近导体距离线圈位置越远,对罗氏线圈测量性能影响越小。当距离大于 30 cm 时,其相对误差大小可控制在 5% 以内。因此在使用罗氏线圈传感器时,应远离外界无关通流导体,如果不可避免,则应设计磁场屏蔽壳,减小测量误差。

2 误差补偿方法研究

2.1 气隙漏磁的补偿方法

针对气隙导致的漏磁问题,本文依据闭合式罗氏线圈工作原理,提出一种串联补偿方法来减少漏磁,见图 7。由于没有气隙的存在,闭合式罗氏线圈的磁场分布均匀,无漏磁现象,其测量精度非常高。

本文依据闭合式罗氏线圈的结构,将两个开合式罗氏线圈按照气隙相反的方向互补,以削弱单个开合式罗氏线圈气隙所产生的漏磁现象^[9-10]。ANASYS 仿真结果见图 8。

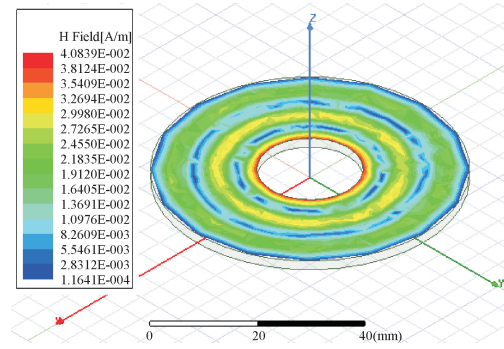
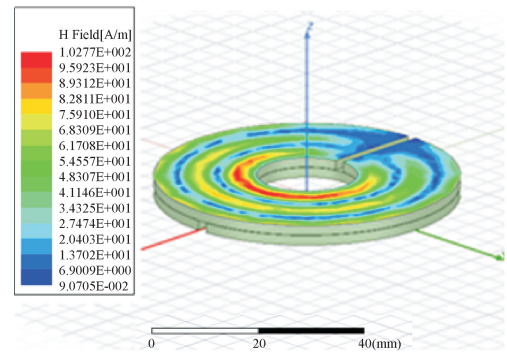
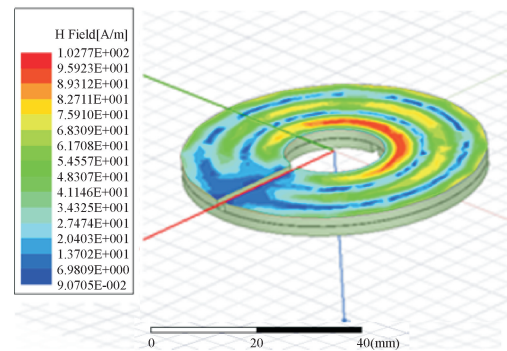


图 7 闭环式罗氏线圈的磁场分布图

Fig. 7 Magnetic field distribution diagram of closed loop Rogowski coil



(a) 开合式罗氏线圈正向



(b) 开合式罗氏线圈反向

图 8 开合式罗氏线圈互补的 ANASYS 仿真
Fig. 8 ANASYS simulation of the complementary Rogowski coil

两个开合式罗氏线圈互补后上表面磁场分布图见图 8(a),在气隙处依然存在漏磁现象,但相较于单个的开合式罗氏线圈,其漏磁现象已有较大改善,且磁场分布较为均匀;见图 8(b),两个开合式罗氏线圈互补后下表面磁场分布图,其漏磁方向与上表面漏磁方向相反,因此可以相互补偿,并在 ANASYS 中观察其内部的磁场分布,具体结果见图 9。

由图 9 可知互补开合的罗氏线圈整体磁场分布较均匀。在图 8(a)和图 8(b)中互补的开合式罗氏线圈表面虽有磁场泄露,但其内部磁场在气隙处几

乎没有漏磁现象。因此将两个开合式罗氏线圈互补放置的结构可以有效补偿单个开合式罗氏线圈的磁场泄露。

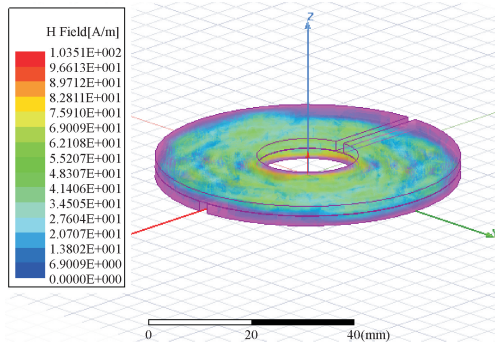
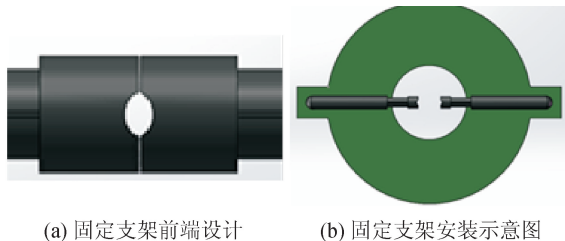


图 9 罗氏线圈互补后的内部磁场分布图

Fig. 9 Internal magnetic field distribution diagram after Rogowski coil complementation

2.2 导体位置变化误差补偿措施

由于一次导体会在罗氏线圈中发生位置偏移与倾斜,在互补的开合式罗氏线圈中,导体的位置变化会引起上下两个罗氏线圈所产生的磁场不同,导致气隙处的磁场变化,因此在罗氏线圈的结构上设计导线固定支架,支架前端设计环形固定口来固定不同直径的一次导体,见图 10(a)。将一次导体固定在罗氏线圈的中心,固定支架安装示意图见图 10(b)。



(a) 固定支架前端设计

(b) 固定支架安装示意图

图 10 导线固定支架及安装示意图

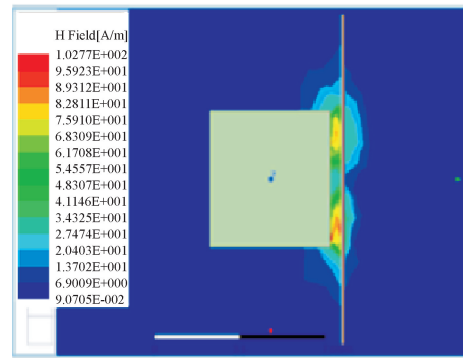
Fig. 10 Wire fixing bracket and installation diagram

固定支架安装在罗氏线圈上,固定支架将一次导体固定在罗氏线圈的中心,从而避免由于导体位置变化而引起罗氏线圈磁场的改变。

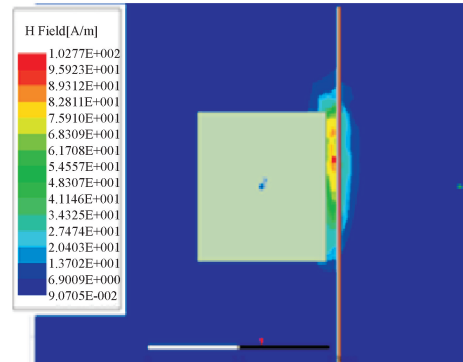
2.3 外部干扰磁场的补偿方法研究

由于外部磁场的频率具有随机性,可能是低频、高频或者低频和高频同时存在的磁场干扰,因此往往需要选择多种屏蔽材料,且材料厚度也会影响对磁场的屏蔽效果^[11-12],在 ANSYS HFSS 中,采用不同厚度的铝和铁对同一信号源屏蔽效果进行仿真分析,将铝屏蔽板布置在铁屏蔽板外,先由铝屏蔽板对高频磁场辐射进行屏蔽,避免铁屏蔽板产生磁滞损耗和涡流损失现象,再由铁屏蔽板对低频信号进行屏蔽。

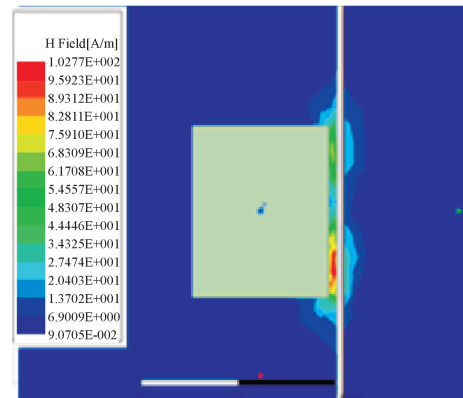
图 11 展示了不同厚度屏蔽材料的屏蔽效果。



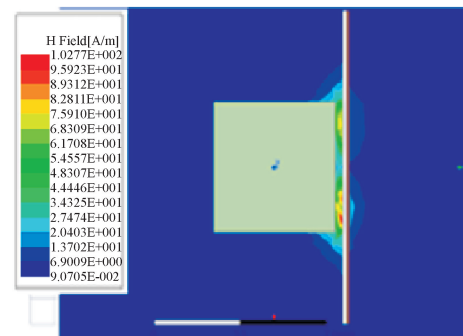
(a) 铝板厚 1 mm, 铁板厚 0.5 mm



(b) 铝板厚 1 mm, 铁板厚 1 mm



(c) 铝板厚 2 mm, 铁板厚 0.5 mm



(d) 铝板厚 2 mm, 铁板厚 1 mm

图 11 不同厚度屏蔽材料的屏蔽效果

Fig. 11 Shielding effect of shielding materials with different thickness

由图 11 可以得出,当仿真铝屏蔽板厚度分别为 1 mm、2 mm,铁屏蔽板厚度分别为 0.5 mm、1 mm 时,增加铁板的厚度对低频信号磁场具有很好的抑

制作用,增加铝屏蔽板的厚度对高频信号的磁场具有很好的抑制作用。当铝屏蔽板厚度为 1 mm 时,大量高频信号磁场仍然可以穿过铝屏蔽板,而铁屏蔽板的厚度无法屏蔽高频信号的磁场,导致高频信号磁场可以穿过屏蔽壳体。当采用 2 mm 厚的铝屏蔽板时,高频信号的磁场几乎被完全屏蔽,而由于铁屏蔽板越厚,对低频信号的屏蔽效果越好,当铝屏蔽板厚度为 2 mm,铁屏蔽板厚度为 1 mm 时,对大部分频率的外部磁场具有很好的屏蔽作用,与理论计算结果一致

3 试验结果与分析

为了验证本文针对开合式罗氏线圈的补偿方法和磁场屏蔽补偿方法的效果,搭建了如图 12 所示的实验平台。实验分别对闭合式罗氏线圈、开合式罗氏线圈和互补开合式罗氏线圈进行对比测量。由于罗氏线圈互补放置后其互感系数会改变,因此在实验中将闭合式罗氏线圈和开合式罗氏线圈串联,其中开合式罗氏线圈串联时应保证气隙方向相同,每个罗氏线圈上安装固定支架,保证一次导体穿过罗氏线圈的中心。

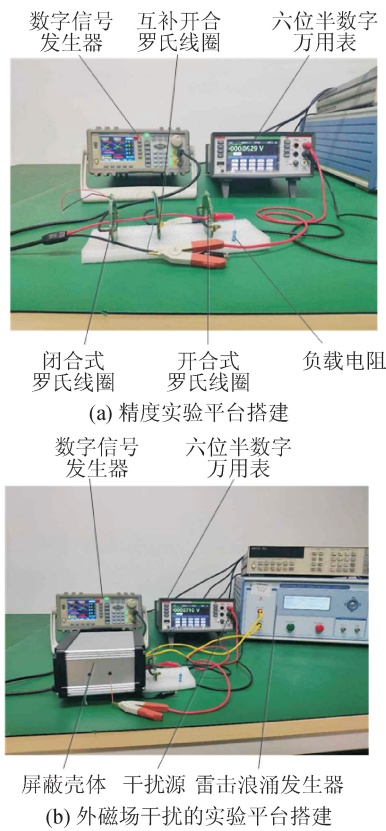


图 12 互补开合式罗氏线圈精度测试平台
Fig. 12 Accuracy test platform of complementary open structure Rogowski coil

见图 12(a),数字信号发生器外接 1 Ω 电阻,使数字信号发生器发出 10 kHz 的频率、1~20 V 的电压信号,然后分别使用闭合式罗氏线圈、互补开合式罗氏线圈和开合式罗氏线圈进行测量,最后使用六位半数字万用表测量罗氏线圈的输出。由于闭合式罗氏线圈的测量精度高于开合式罗氏线圈,因此以闭合式罗氏线圈测量数据为标准值,分别对比互补开合式罗氏线圈和开合式罗氏线圈的测量数据,并求测量误差。

由表 1 可得,互补开合式罗氏线圈测量数据与闭合式罗氏线圈测量数据更为接近。在较低的幅值时,由于罗氏线圈自身感应强度较小,此时互补磁场也较小,所以测量误差略大;当幅值较大时,互补开合式罗氏线圈与闭合式罗氏线圈的测量数据较为接近。当幅值为 20 V 时,两者的测量误差仅为 0.24%,而开合式罗氏线圈的测量数据误差达到 8.29%,由此可知,互补开合式罗氏线圈测量精度较高。

表 1 互补开合式罗氏线圈误差分析
Tab. 1 Error analysis of complementary Rogowski coil

幅值/ V	闭合式 罗氏线圈/ mV	互补开合式 罗氏线圈/ mV	测量 误差/ %	开合式 罗氏线 圈/mV	测量 误差/ %
1	62.9	59.7	5.09	53.4	15.10
2	63.4	60.4	4.73	54.1	14.70
4	65.5	62.3	4.88	56.5	13.70
6	66.2	63.1	4.68	57.5	13.16
8	67.1	64.8	3.43	58.4	13.00
10	68.4	66.5	2.78	61.5	10.10
12	71.2	69.7	2.11	65.9	9.41
14	74.2	73.8	0.54	67.0	9.70
16	77.6	76.7	1.16	70.2	9.54
18	80.1	79.4	0.87	72.8	9.11
20	83.2	83.0	0.24	76.3	8.29

实验通过雷击浪涌发生器模拟外部磁场干扰,见图 12(b)所示,雷击浪涌发生器可瞬间发出直流、低频和高频的信号,用其模拟外部磁场干扰能够很好地检验屏蔽板对外部磁场的屏蔽能力。将一个互补开合式罗氏线圈安装在屏蔽壳内,另一个互补开合式罗氏线圈无屏蔽壳,当雷击浪涌发生器放电时,分别记录两个罗氏线圈测量的数据,见表 2,并将记录的数据与表 1 对应的数据作对比。

表2 有无屏蔽壳体的测量数据对比
Tab.2 Comparison of measured data with
and without shielded housing

幅值/ V	互补开合式 罗氏线圈 (带屏蔽壳体)/ mV	测量 误差/ %	互补开合式 罗氏线圈 (不带屏蔽壳体)/ mV	测量 误差/ %
2	60.8	0.66	63.8	5.33
10	66.8	0.45	71.1	6.47
20	83.0	0.31	88.2	5.90

由表2可得,不带屏蔽壳体的互补开合式罗氏线圈的测量数据与表1的数据相差很大,最大测量误差为6.47%;而带有屏蔽壳体的互补开合式罗氏线圈最大测量误差为0.66%。因此,采用所提及的本文屏蔽壳体对外部磁场的屏蔽较好,能够提高罗氏线圈的测量精度。

4 结 论

本文通过分析罗氏线圈的误差机理,研究了罗氏线圈误差补偿方法,提出了互补开合式罗氏线圈结构,设计了一次导线支架,并通过实验得出结论。

1) 在电压幅值为1 V时,一次电流为1 A,测量误差为5.09%。

2) 随着一次电压幅值的增加,精度反而提高,当幅值上升到20 V时,一次电流为20 A,测量误差为0.24%。

由于罗氏线圈具有良好的线性度,在一定范围内,互补开合式罗氏线圈可以满足测量要求,从而为动辄上 kJ 的大功率脉冲电源技术指标的测量提供很好的解决思路。

参考文献:

- [1] 马伟明,肖飞,聂世雄. 电磁发射系统中电力电子技术的应用发展[J]. 电工技术学报,2016,31(19):1-10.
MA Weiming, XIAO Fei, NIE Shixiong. Applications and development of power electronics in electromagnetic launch system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 1-10.
- [2] TSUKUDA M, NAKASHIMA K, TABATA S, et al. Clamp type built-in current sensor using PCB in high-voltage power modules[J]. Microelectronics Reliability, 2017, 76/77: 517-521.
- [3] LEE J H, LIM H R, SHIN H K, et al. Simulation and development of Rogowski coil for lightning current measurement[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2019, 14(5): 1831-1839.
- [4] 侯春光,阎文博,高有华,等. 电子式电流互感器的温度试验研究[J]. 电器与能效管理技术,2020(2):93-98.
HOU Chunguang, YAN Wenbo, GAO Youhua, et al.

Study on temperature test method of electronic current transformer[J]. Low Voltage Apparatus, 2020(2): 93-98.

- [5] 王鑫红,赵海龙,秦力,等. 测量线路故障行波电流的新型罗氏线圈传感器试验与应用[J]. 现代工业经济和信
息化,2019,9(11):74-76.
WANG Xinhong, ZHAO Hailong, QIN Li, et al. Test and application of a new Roche coil sensor for measuring traveling wave current of line faults[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2019, 9(11): 74-76.
- [6] MING Lei, XIN Zhen, LIU Wei, et al. Structure and modelling of four-layer screen-returned PCB Rogowski coil with very few turns for high-bandwidth SIC current measurement[J]. IET Power Electronics, 2020, 13 (4): 765-775.
- [7] 邸志刚,孙腾飞,贾春荣. 新型传统 Rogowski 线圈的设计与研究[J]. 电力电子技术,2020,54(3):36-39.
QIU Zhigang, SUN Tengfei, JIA Chunrong. Design and research of new traditional Rogowski coil[J]. Power Electronics, 2020, 54(3): 36-39.
- [8] 马坦. 罗氏线圈传感器及应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
MA Tan. The research of Rogowski coil and its applications[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [9] 邸志刚,孙腾飞,贾春荣. 双面回绕式 PCB-Rogowski 线圈的研究[J]. 微电机,2019,52(9):19-24.
QIU Zhigang, SUN Tengfei, JIA Chunrong. Research on double-sided rewinding PCB-Rogowski coil[J]. Micromotors, 2019, 52(9): 19-24.
- [10] 李振华,张阳坡,蒋伟辉,等. 钳形 Rogowski 线圈性能分析及误差补偿方法[J]. 电网技术,2020,44(3): 1121-1127.
LI Zhenhua, ZHANG Yangpo, JIANG Weihui, et al. Research on clamp-shape Rogowski coil performance and error compensation method[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 1121-1127.
- [11] 林磊,谭林丰,钟和清,等. 脉冲强流环境中磁场辐射干扰对充电电源的影响及其抑制措施[J]. 高电压技术,2016,42(6):1974-1980.
LIN Lei, TAN Linfeng, ZHONG Heqing, et al. Influence of magnetic radiation interference on charging power supply in intense pulse current environment and its suppression methods[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1974-1980.
- [12] 曹荣刚,李军. 脉冲功率电源辐射电磁场屏蔽测量与分析[J]. 高电压技术,2014,40(4):1159-1164.
CAO Ronggang, LI Jun. Measurement and analysis of two-layer sheets' shielding effects against transient field for pulsed power supplies[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1159-1164.

(责任编辑 王绪迪)