

小型大电流 Rogowski 线圈设计及性能

龙祖利

(西南科技大学, 绵阳 621002)

摘要: 为适应电流测量的新要求, 介绍了一种针对高频大电流测量的小型 Rogowski 线圈。研究了线圈不均匀放置包括偏心放置和倾斜放置对电流测量性能的影响后提出了线圈屏蔽盒、线圈导线多层绕制和使用磁芯线圈等设计方案, 并使用多种结构的线圈测量了电流波形, 得到了大量的测试数据。对比国外标准电流测试探头测试数据改进设计, 取得很好的效果, 并证明了使用磁性材料利于满足线圈自积分条件, 但使用磁性材料必须充分考虑工作频带和饱和磁感应强度, 相比而言空心线圈的工作频带更宽。

关键词: 大电流测量; Rogowski 线圈; 自积分; 小型; 性能; 设计

中图分类号: TM835.2; TM933.1

文献标志码: A

文章编号: 1003-6520(2007)07-0079-05

Design and Performance of Miniature Rogowski Coil for Heavy Current Measurement

LONG Zu-li

(Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621002, China)

Abstract: A kind of miniature Rogowski coil which measures high frequency and heavy current is introduced, and the principle of work of Rogowski coil is analyzed. The influence of non-uniform laying of the miniature Rogowski coil, including the biased laying and the inclined laying on the electric current survey performance is discussed. In order to reduce the influence of the coil laying on the capriciousness, the coil may be wound thread or increased evenly from the integral coefficient. The Rogowski coil of the hollow multi-layer circles reduces the coil stray capacity in the manufacture process. The design project of coil is proposed, the current waveform is tested by using many kinds of structures of the coil, and the massive test data are obtained. Through comparing the overseas standard electric current test and head test data of the probe, the current coil design is improved unceasingly. The test using magnetic material can enhance the coil actually from the integral criterion function, but the used magnetic material should have saturation induction density and consider its working band.

Key words: heavy current measurement; Rogowski coil; integral calculus; miniature; performance; design

0 引言

Rogowski 线圈(罗氏线圈)相对于传统的安培表、电流互感器、分流器等电流测量方法, 有许多优点: ①测量频带宽(从几 Hz 到几百 MHz)^[1]; ②测量范围广(从几 A 到几百 kA)^[2]; ③隔离性好, 因罗氏线圈与被测回路没有直接的电连接^[3], 故对原边信号影响很小, 并可方便地实现对高压回路的隔离测量; ④结构简单, 易于加工^[4]; ⑤体积小, 重量轻, 成本低^[5]; ⑥对大电流测量准确有效^[6]。故罗氏线圈应用日益广泛。

但随着人们研究的深入, 对电流的测量提出了更高的要求, 如要求罗氏线圈设计用于测量峰值电流为 kA 级的大电流, 测试环境中存在很强的空间电磁场干扰, 且要求线圈体积尽量小, 便于安装到主

设备中。为此, 本文对罗氏线圈进行了一些改良, 如将最初的非铁磁骨架改为磁性骨架, 得到了新型的罗氏线圈, 使其能适用于更广泛的电流测试场合。本文将详细介绍罗氏线圈原理、自积分条件及制作过程中进行的部分性能研究和设计方案。

1 罗氏线圈原理

传统罗氏线圈(原理见图 1, 结构^[7]见图 2)实际上是均匀密绕在环形非磁性骨架上的空心螺线管(N 为线圈匝数), 其输出电压 $u(t)$ 正比于被测原电流 $i_1(t)$ 随时间 t 的变化率^[8,9] $di_1(t)/dt$, 即 $u(t) = M di_1(t)/dt$, 其中 $i_1(t)$ 垂直通过测量线圈所在的平面, M 为互感系数。只有对 $u(t)$ 进行积分, 才能还原出与 $i_1(t)$ 成线性关系的波形曲线。

自积分式空心罗氏线圈是在输出端并联一采样电阻 R_s , 其自积分等效电路^[10]见图 3, 其中 $i_2(t)$ 为线圈感应产生的感应电流, L_0 为线圈的自感系数, R_0 为线圈绕线的电阻, C_0 为线圈绕线与线圈外壳间产生的分布电容, 通常 C_0 很小, 在 pF 量级。

基金资助项目: 西南科技大学青年基金(07ZX3148)。

Project Supported by Youth Fund of Southwest University of Science and Technology(07ZX3148).

根据图 3, 忽略 C_0 后, 回路方程为:

$$u(t) = \frac{M di_1(t)}{dt} = \frac{L_0 di_2(t)}{dt} + (R_0 + R_s) i_2(t), \quad (1)$$

$i_1(t)$ 与 $i_2(t)$ 要同相位, 则有

$$(R_0 + R_s) i_2(t) = 0 \text{ 或 } L_0 di_2(t)/dt \gg (R_0 + R_s) i_2(t).$$

令 $\alpha = (R_0 + R_s)/L_0$. $i_2(t)$ 为正弦衰减信号^[10], 设

$$i_2(t) = I_m e^{-\alpha t} \sin \omega t, \quad (2)$$

将式(2)代入 $L_0 di_2(t)/dt \gg (R_0 + R_s) i_2(t)$ 可得:

$$L_0 \omega I_m e^{-\alpha t} \cos \omega t - L_0 \alpha I_m e^{-\alpha t} \sin \omega t \gg (R_0 + R_s) I_m e^{-\alpha t} \sin \omega t. \quad (3)$$

因主要关心电流信号的第 1 个峰值及第 1 个周期, 故可将正弦衰减信号假设为理想状态, 即 $\alpha \rightarrow 0$. 并且考虑到 $\sin \omega t, \cos \omega t$ 均为有界函数, 则式(3)转化为 $\omega L_0 \gg R_0 + R_s$ ^[11]. 此时, 式(1)可略去最右边一项, 变为

$$M di_1(t)/dt = L di_2(t)/dt,$$

两边同时对 t 积分得到: $i_1(t) = N i_2(t)$.

可见此时 $i_1(t)$ 与 $i_2(t)$ 成线性关系且同相位。

这种利用线圈本身的结构参数实现了 $u(t)$ 与 $i_1(t)$ 成线性关系且同相位的方式称为自积分方式, 其中 $\omega L_0 \gg R_0 + R_s$ 称为罗氏线圈的自积分条件。由该条件可见, 这种测量方法适用于自积分式空心罗氏线圈对高频冲击信号的测量, 即罗氏线圈的传统应用领域。

2 小型大电流罗氏线圈设计、性能研究

2.1 小型大电流罗氏线圈放置不均匀的性能

实际上已有很多人利用罗氏线圈研究过放置不均匀的问题, 理论证明罗氏线圈是安培定律的具体化, 均匀绕制、自积分条件满足很好的柔性罗氏线圈可为安培定律提供一个很好的证明^[12], 因为只要线圈的始末端合到一起, 线圈的输出电压就与导线的放置位置无关。

因而要求: ①导线在线圈上绕制均匀; ② $i_1(t)$ 导线通过线圈圆心; ③ $i_1(t)$ 垂直于线圈平面。但实际使用中罗氏线圈测量的电流频率为数万 Hz, 且线圈尺寸要求很小, 使这 3 点都很难满足, 罗氏线圈绕制并非完全均匀, 本身自积分条件满足不佳, 很难达到非常理想化的条件, 这将会严重影响测量波形。

图 4 是 $i_1(t)$ 导线以随意角度、随意位置通过自积分条件满足较差的空心罗氏线圈时的测量波形; 图 5 是 $i_1(t)$ 导线经过人为对正固定, 基本通过线圈圆心, 并与线圈平面基本垂直后的测量波形。

2.1.1 线圈偏心放置的性能

设罗氏线圈并非均匀绕制, 且被测 $i_1(t)$ 导线未通过罗氏线圈圆心 O 点(见图 6), 偏心度 λ 为 $i_1(t)$

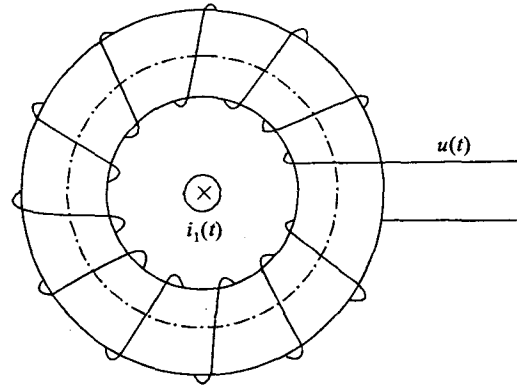


图 1 罗氏线圈原理图

Fig. 1 Schematic of Rogowski coil

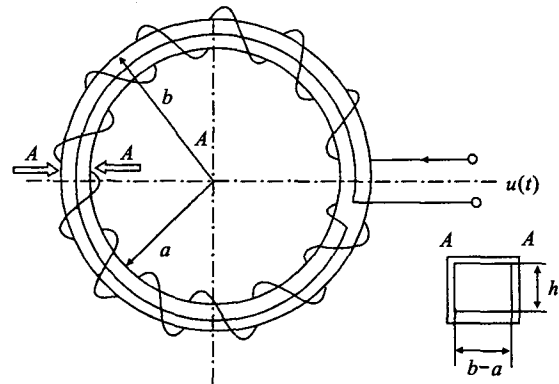


图 2 罗氏线圈结构图

Fig. 2 Configuration of Rogowski coil

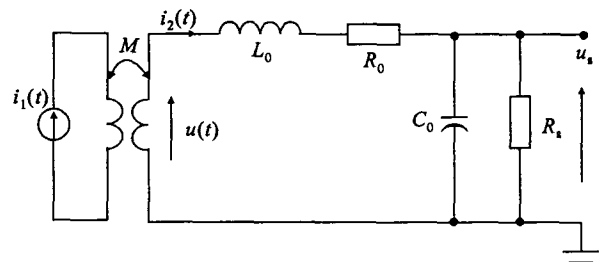


图 3 罗氏线圈等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of Rogowski coil

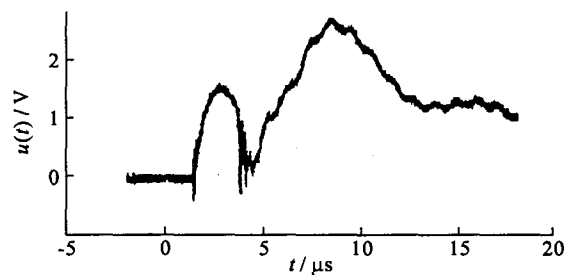


图 4 放置不均匀的罗氏线圈测量波形

Fig. 4 Measured waveform of Non-uniform laying Rogowski coil

导线距罗氏线圈圆心 O 点的距离, γ 为非均匀绕线的初始角度, θ 为非均匀绕线所对应的圆心角, R_a 为线圈骨架内径, R_b 为线圈骨架外径, n 为线圈匝数, h 为线圈厚度, μ_0 为真空介电常数。则

$$u(t) = \frac{d\Psi}{dt} = - \left(\frac{\mu_0 n h}{2\pi} \ln \frac{R_b}{R_a} \right) \frac{di_1(t)}{dt} - \frac{\mu_0 n h}{2\pi\theta} \frac{di_1(t)}{dt} \int \frac{1}{R} \arctan\left(\frac{R-\lambda}{R+\lambda} \tan \frac{\theta+\gamma}{2}\right) dR + \frac{\mu_0 n h}{2\pi\theta} \frac{di_1(t)}{dt} \int \frac{1}{R} \arctan\left(\frac{R-\lambda}{R+\lambda} \tan \frac{\gamma}{2}\right) dR. \quad (4)$$

若 $\theta = 2\pi, \gamma = 0$, 即线圈绕线均匀分布, 则式(4)为

$$u(t) = \frac{d\Psi}{dt} = - \left(\frac{\mu_0 n h}{2\pi} \ln \frac{R_b}{R_a} \right) \frac{di_1(t)}{dt}. \quad (5)$$

式(5)与 $i_1(t)$ 导线通过罗氏线圈圆心的感应电动势公式一致, 与偏心度 λ 无关, 可见罗氏线圈骨架绕线均匀可大大降低对 $i_1(t)$ 导线的同轴度要求。

2.1.2 线圈倾斜放置的性能

当 i_1 与线圈平面并非垂直而是存在夹角 $\alpha (\alpha < 90^\circ)$, 见图 7a) 时, i_1 沿线圈平面和垂直于线圈平面可进行正交分解 (见图 7b)。

i_1 被正交分解到两个方向上, 其中 $i_1 \cos\alpha$ 垂直于线圈平面, 将在线圈平面内感应产生磁场, 而 $i_1 \sin\alpha$ 平行于线圈平面, 其感应产生的磁场垂直于线圈平面。由罗氏线圈测量电流的原理可知, $i_1 \sin\alpha$ 产生的磁场对于测量是一种干扰信号, 并且罗氏线圈在其平面内的等效包络线面积比线圈骨架的截面积大, 若处理不好, 将对测量造成很大影响。减小这种干扰的办法是在罗氏线圈内部增加回绕线^[13], 即用漆包线先在线圈截面中心绕一周, 再以骨架连同绕在其上的导线为芯按相反方向绕线 (见图 8)。

经过反向回绕的罗氏线圈既能消除母线倾斜通过线圈平面带来的干扰, 又可减小空间电磁波干扰。图 9 是相同条件下同样的罗氏线圈在正向回绕、未加回绕和反向回绕时的波形图, 从图中不难看出反向回绕消除干扰的作用。

2.2 大电流罗氏线圈的结构设计

2.2.1 屏蔽盒的设计

罗氏线圈测量的好坏很大程度上要受到外加干扰的影响, 并且罗氏线圈大都在条件恶劣的环境下工作, 因此能否消除干扰是罗氏线圈设计成功与否的关键所在^[14]。

空间杂波穿越线圈包围的空间时, 其与截面垂直的分量会引起感应电压并与信号电压叠加, 对后续测量产生干扰。因此, 为了正确反映 i_1 , 必须只让 i_1 的磁场与测量线圈交链, 故解决电磁屏蔽问题非常重要, 其关键是屏蔽盒 (见图 10) 的设计。

图 10 中在垂直于屏蔽盒轴线方向开了一条缝隙, 称为主气隙。因为空气的磁导率比金属小很多, 有了这条主气隙, 金属板不能形成环路, 金属板在缝隙处磁阻变得很大, 可防止 i_1 产生的磁场被聚集在屏蔽盒的金属板内而无法进入到线圈内部。

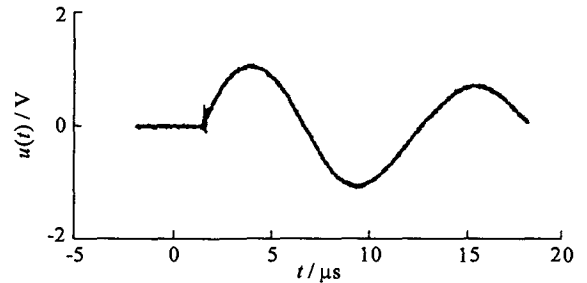


图 5 基本对正后罗氏线圈测量波形
Fig. 5 Measured waveform of basic alignment

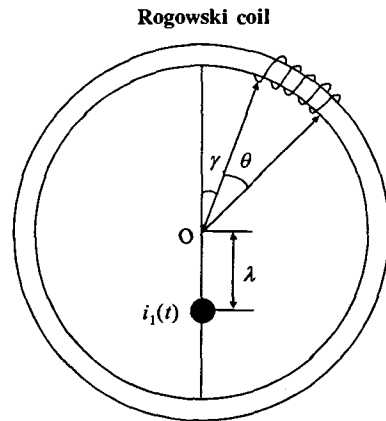


图 6 非均匀绕制罗氏线圈偏心放置
Fig. 6 Inhomogeneous circling Rogowski coil bias laying Rogowski coil

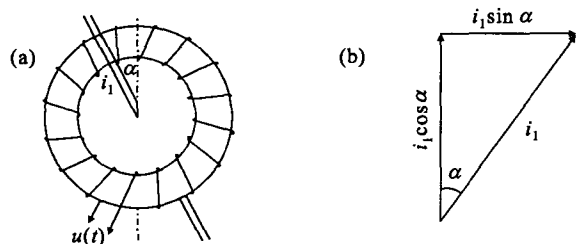


图 7 原电流与线圈平面存在 α 夹角
Fig. 7 α angle exists between primary current and coil plane

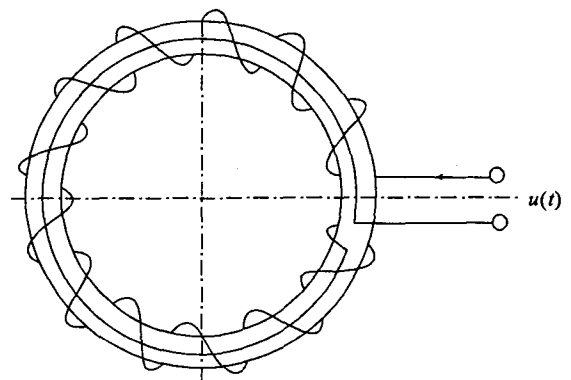


图 8 罗氏线圈相反回绕示意图
Fig. 8 Schematic of Rogowski coil opposition winding around

此外在屏蔽盒的环形内侧开一道缝隙, 称为辅助气隙, 可防止屏蔽盖与屏蔽盒壁的环形中感应出

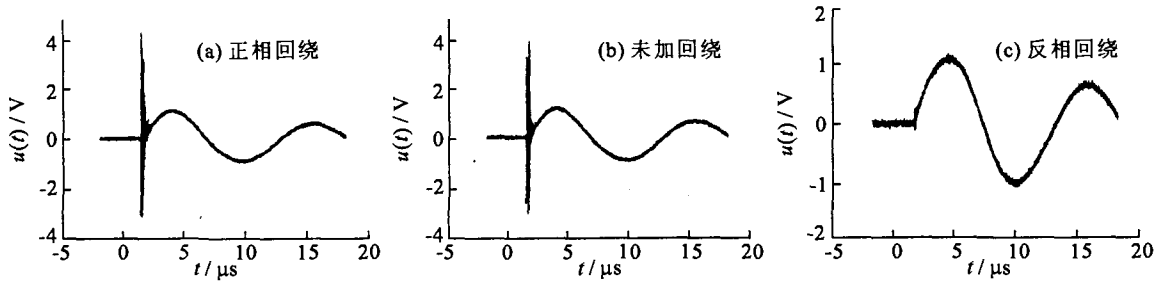


图9 不同绕线时罗氏线圈的测量波形

Fig. 9 Measured waveform of different winding

环形电流,该环形电流产生的磁场方向将与通过线圈的 i_1 产生的磁场方向相反,抵消通过线圈内部的磁通,使测量的 $u(t)$ 小于真实值。

2.2.2 采用多层绕制的线圈结构

对自积分式罗氏线圈,自积分条件满足情况的好坏直接影响到测量的准确度。用于测量 100kHz 电流信号的小型罗氏线圈骨架单层绕线的 M 、 L 。较小,不利于满足自积分条件。因 i_1 频率不变时只能提高 L 。故试验了一种多层绕制的罗氏线圈,通过提高线圈匝数 N 来提高线圈自感系数 L 。这将更易于满足自积分条件。

但多层绕制的线圈(即在前一层线圈表面上绕制新一层线圈)的自感 L 会增大,同时分布电容 C_0 随着线圈匝数 N 的增加而成倍增加,而且由于前一层绕线的影响,多层绕制的线圈很难保证均匀密绕,故抑制外界杂散磁场的的能力不强,很容易受外界干扰的影响,测量准确度不高。

双层线圈测量的电流波形图见图 11,可见电流波形大致的包络轮廓并未畸变,这说明自积分条件得到了较好满足。但波形信号存在明显振荡,这主要是因为采用多层绕制后,层与层之间很难做到真正的均匀绕制,层与层之间、层与外壳之间引入了较多的分布电容,而线圈本身又具有较大的电感,电容和电感共同作用引起振荡。解决这种振荡的方法为:①采用更好的绕制工艺,尽量减小绕线分布电容;②将绕线多点通过电阻接地。

多层绕制的罗氏线圈在解决分布电容的问题时必然导致线圈体积过大,而且多层绕制线圈只是在单层线圈骨架上绕制多层绕线,这虽然能提高线圈的 L 。但 L 。本质上仍受线圈骨架的制约,仍要求线圈本身较好地满足自积分条件,这样不利于线圈的小型化。综合以上考虑,最终准备在设计上选取更有利的结构。

2.2.3 带磁芯结构的罗氏线圈

自积分式空心罗氏线圈测量一些低频脉冲信号时,若要求仍能满足自积分条件,则要么把线圈骨架设计到很大的尺寸,这将不利于实际使用;要么选用

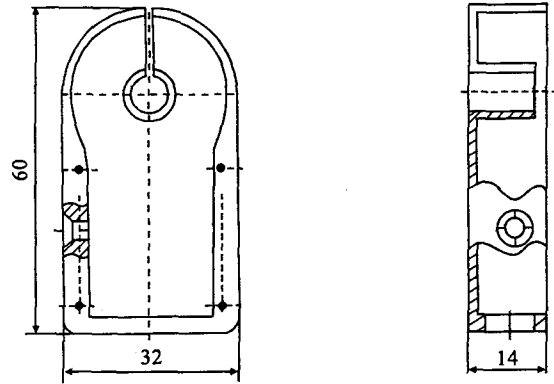


图10 屏蔽盒结构图

Fig. 10 Configuration of Shielded box

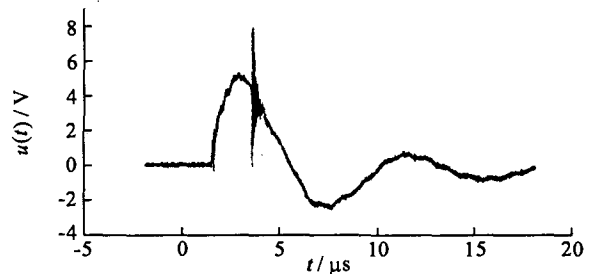


图11 双层绕制罗氏线圈电流波形测试图

Fig. 11 Current waveform test chart of double-decked circling Rogowski coil

很小的取样电阻,这又将使信噪比大为下降。为了使线圈适应低频信号的测量并尽量减小线圈尺寸,只能提高罗氏线圈的 L 。而使用磁性材料作为线圈骨架^[15],可增大线圈的 L 。使其在较低频率下也能满足自积分条件。这种改进后的带磁芯的罗氏线圈,拓宽了罗氏线圈测量高频冲击信号的传统使用范围,使其用途更广泛。

因磁芯的磁导率 μ 是空气磁导率的几千倍,而线圈的 L 又正比于 μ ,故带磁芯的罗氏线圈的 L 是相同尺寸空心线圈的几千倍,这使得自积分条件更容易满足。但若被测电流产生的磁场强度过大,使磁芯工作在饱和区域,则磁芯 μ 值将会大幅下降,自积分条件可能不再满足,波形就会发生畸变。所以在设计带磁芯的罗氏线圈时,避免磁芯饱和是非常关键的问题。

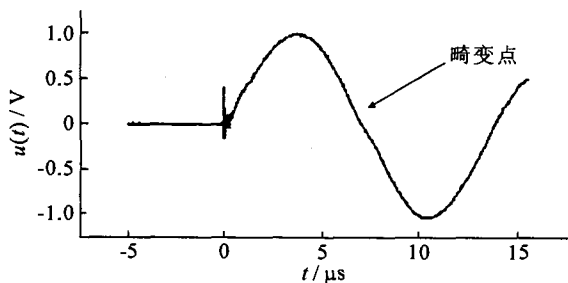


图12 带磁芯的罗氏线圈饱和后的电流波形

Fig. 12 Caturated current waveform of magnetic core Rogowski coil

图12为带磁芯的罗氏线圈工作在磁芯饱和区域时测量的电流波形,波形在第1次通过零点时有明显畸变^[16]。

对饱和磁感应强度为 B_s 的磁芯而言,允许的最大励磁电流 $I_{\max B}$ ^[17]与骨架尺寸有关,即:

$$I_{\max B} = \frac{2\pi B_s (b-a)}{\mu} \ln \frac{b}{a}$$

而根据 $i_1(t)$ 算得的最大励磁电流为

$$I_{\max I} = 2(R_o + R_s) I_m / \omega L$$

为使磁芯在测量中不饱和,必须满足 $I_{\max B} > I_{\max I}$ 。

选取线圈磁芯骨架材料时还要充分考虑 $i_1(t)$ 的工作频率,必须选取合适的磁芯工作频率范围,以免磁芯频率响应不够。

此外,为使线圈更好地满足自积分条件,应尽量选取磁导率高的材料作为磁芯材料。

本文自制罗氏线圈所用磁芯材料为锰锌铁氧体,最大饱和磁感应强度 $B_s = 0.5 \text{ T}$, $\mu = 5000$,工作频率为数万 Hz,线圈用 $500 \text{ m}\Omega$ 采样电阻,反向回绕法绕线。图13为带磁芯的罗氏线圈电流测试波形(下部曲线)与美国标准电流测试探头电流测试波形(上部曲线)对比图,可见干扰信号得到较好控制,测量结果较理想。

3 结 语

本文首先分析了罗氏线圈的工作原理,研究了空心罗氏线圈的放置不均匀性能,阐述了空心多层绕制罗氏线圈和带磁芯的罗氏线圈的设计。

为减小线圈放置的随意性对测量的影响,可均匀绕线或增大线圈的自积分系数,使线圈更接近理想的理论状态;空心多层绕制的罗氏线圈制作过程中应尽量减小线圈杂散电容,并均匀绕线;带磁芯的罗氏线圈的磁芯饱和问题是设计的重点,要求根据原电流峰值来计算磁芯材料的饱和磁感应强度 B_s 。

参 考 文 献

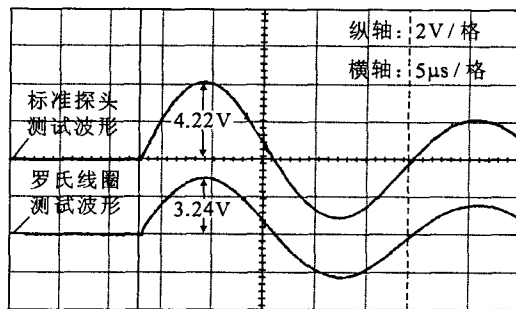


图13 带磁芯的罗氏线圈电流测试波形对比图

Fig. 13 Comparison of electric current test waveforms of magnetic core Rogowski coil

带方法[J]. 电测与仪表, 2003, 40(9): 12-15.

JIN Yong-tao, LIU Hui-jin, XIONG Ling-ling. Analysis is on the frequency characteristics of Rogowski coil and also means to broaden the bandwidth of frequency response [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2003, 40(9): 12-15.

[2] 戴建华, 李开成. 基于 Rogowski 线圈的大电流测量[J]. 高电压技术, 2002, 28(1): 6-7.

DAI Jian-hua, LI Kai-cheng. Heavy current measurement based on Rogowski coil [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(1): 6-7.

[3] 邹积岩, 段雄英, 张 铁. 罗柯夫斯基线圈测量电流的仿真计算及实验研究[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 82-84.

ZOU Ji-yan, DUAN Xiong-ying, ZHANG Tie. The simulating calculation and experimental research of Rogowski coil for current measurement [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(1): 82-84.

[4] 李维波, 毛承雄, 李启炎, 等. 陡脉冲大电流的 Rogowski 测量线圈仿真研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(8): 11-13.

LI Wei-bo, MAO Cheng-xiong, LI Qi-yan, et al. The simulation research of Rogowski coils for measuring fast pulsed heavy current [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(8): 11-13.

[5] 颜重光. Rogowski 微分电流传感器[J]. 仪表技术, 2003(2): 47, 52.

YAN Chong-guang. Rogowski di/dt differential current transducer [J]. Instrumentation Technology, 2003(2): 47, 52.

[6] 王新新, 吴泽辉. Rogowski 线圈的波形畸变及其校正[J]. 高电压技术, 1996, 22(3): 16-18.

WANG Xin-xin, WU Ze-hui. The distortion and correction of the waveform measured with a Rogowski coil [J]. High Voltage Engineering, 1996, 22(3): 16-18.

[7] 霍小社, 王 颖, 林 莘. 基于 Rogowski 线圈电流传感器的研制 [J]. 高压电器, 2002, 38(3): 19-22.

HUO Xiao-she, WANG Ying, LIN Xin. The development of current transducer based on the Rogowski coil [J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3): 19-22.

[8] 乔 卉, 刘会金, 王群峰, 等. 基于 Rogowski 线圈传感的光电流互感器的研究[J]. 继电器, 2002, 30(7): 40-43.

QIAO Hui, LIU Hui-jin, WANG Qun-feng, et al. The research of optical current transducer based on the rogowski coils [J]. Relay, 2002, 30(7): 40-43.

[9] 申 焯, 钱 政, 罗承沐, 等. Rogowski 线圈测量误差分析和估计 [J]. 高电压技术, 2003, 29(1): 6-7.

SHEN Zhu, QIAN Zheng, LUO Cheng-mu, et al. The analysis and estimation of measurement error of Rogowski coil [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(1): 6-7. (下转第 106 页)

[1] 金涌涛, 刘会金, 熊玲玲. Rogowski 线圈频率特性分析及拓宽频

survivability assessment of the harris RF-3200 transceiver, ADA258437[R]. Adelphi MD; Harry Diamond Labs, 1992.

[3] Andrew A C. XM-1 tank EMP susceptibility and survivability test program, ADA094627[R]. Adelphi MD; Harry Diamond Labs, 1980.

[4] Kalab B. Analysis of failure of electronic circuits from EMP-induced signals, AD778754[R]. Washington DC; Harry Diamond Labs, 1973.

[5] GJB538-88 半导体器件的电磁脉冲损伤阈值试验方法[S], 1988.
GJB 538-88 Experimental methods of EMP failure thresholds for semiconductor devices[S], 1988.

[6] GJB548A 微电子器件试验方法和程序[S], 1996.
GJB548A Experimental methods and procedures of micro-electronics[S], 1996.

[7] GJB128A 半导体分立器件试验方法[S], 1997.
GJB128A Experimental methods of discrete devices[S], 1997.

[8] 刘尚合, 武占成, 朱长清, 等. 静电放电及危害防护[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005.
LIU Shang-he, WU Zhan-cheng, ZHU Chang-qin, et al. ESD harms and protection techniques [M]. Beijing: Post College Publishing Company, 2005.

[9] 陈京平, 刘尚合, 谭志良, 等. 集成电路方波脉冲注入损伤效应实验研究[J]. 军械工程学院学报, 2006, 18(2): 12-15.
CHEN Jing-ping, LIU Shang-he, TAN Zhi-Liang, et al. Study on the damage effects of integrated circuits injected by square wave pulse[J]. Ordnance Engineering College Journal, 2006, 18(2): 12-15.

[10] 周佩白, 鲁君伟, 傅正财, 等. 电磁兼容问题的计算机模拟与仿真技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
ZHOU Pei-bai, LU Jun-wei, FU Zheng-cai, et al. Computer simulation and emulation technology of EMC problems[M].

Beijing: China Electric Power Press, 2006.

[11] Milletta J R. Component damage from electromagnetic pulse induced transients, ADA053899[R]. Adelphi MD; Harry Diamond Labs, 1977.

[12] Dante M, Tasca S J. EMP response and damage modeling of diodes, junction field effect transistor testing and semiconductor device failure analysis, ADA040154[R]. Philadelphia PA Space Div; General Electric Company, 1976.

[13] Ricketts L W, Bridges J E, Miletta J. EMP radiation and protective techniques [M]. New York: Wiley, 1976.

[14] Hugh B, Dante M, Donnell O. Development of high level electrical stress failure threshold prediction model for small scale junction integrated circuit, ADA060874. [R]. Philadelphia PA Space Div; General Electric Company, 1978.

[15] Tasca D M, Peden J C. Pulsed power failure modes in semiconductor devices, ADD875032[R]. Philadelphia PA Space Div; General Electric Company, 1970.

[16] Bruno M, Kalab B. Damage characterization of semiconductor device for the AN/TRC-145 EMP study, ADA050921 [R]. Adelphi MD; Harry Diamond Labs, 1980.



陈京平
Ph. D. CHEN Jing-ping

陈京平 1979—,男,博士生,研究方向为电磁防护理论与技术。电话: (0311) 88616536; E-mail: yyjp-yp@126.com

收稿日期 2006-12-30 编辑 郭守珠

(上接第 83 页)

[10] 张涛, 李澎, 罗承沐, 等. 罗果夫斯基线圈测量高电压及电力系统中的暂态电流[J]. 电工电能新技术, 2002, 21(7): 53-56.
ZHANG Tao, LI Peng, LUO Cheng-mu, et al. Measurement of transient current in high-voltage and power system using Rogowski coil[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2002, 21(3): 53-56.

[11] 李美英, 陈翔, 葛荣尚. 基于 Rogowski 线圈和压频变换的电流测量方法[J]. 清华大学学报, 2000, 40(3): 28-31.
LI Fu-ying, CHEN Xiang, GE Rong-shang. Accurate current measurement method for large currents[J]. Journal of Tsinghua University, 2000, 40(3): 28-31.

[12] Ehsan Abdi Jalebi, Paul Roberts, Richard McMahon. Real time rotor bar current measurements using a Rogowski coil transmitted using wireless technology[R]. Cambridge, UK: University of Cambridge, 2003.

[13] 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 Zhao-bo, SUONAN Jia-le, LUO Su-nan, et al. Rogowski coil electronic current transducer applied to protection and monitoring of GIS[J]. Electric Power, 2003, 36(10): 53-56.

[14] 李海燕. 毫秒级罗哥夫斯基线圈的研制[D]. 西安: 西安交通大学, 1986.

[15] 阿路·土尔斯别克. 带磁芯大电流罗哥夫斯基线圈的研制与应用[J]. 新疆工学院学报, 1998, 19(2): 152-155.

Alembiek Tursbiek. Development of Rogowski coil with ferrite core and its application[J]. Journal of Xinjiang Institute of Technology, 1998, 19(2): 152-155.

[16] 谭宇刚, 韩旻. 低频铁芯式罗果夫斯基线圈饱和问题分析[J]. 高电压技术, 2001, 27(2): 22-23.
TAN Yu-gang, HAN Min. Analysis on the saturation of low-frequency Rogowski coil with magnetic core[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(2): 22-23.

[17] 王新新, 韩旻, 王祥珩, 等. Rogowski 线圈磁芯饱和问题研究[J]. 电工技术学报, 1994, 7(2): 34-38.
WANG Xin-xin, HAN Min, WANG Xiang-heng, et al. Study of the core saturation in a Rogowski coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1994, 7(2): 34-38.



龙祖利

龙祖利 1975—,男,硕士,讲师,从事光纤通信、光电子及 TDRSS 的信息交换技术等方面的研究。电话: (0816)6332007; E-mail: lzl@swust.net.cn

收稿日期 2006-04-12 编辑 李东