

Rogowski 线圈的结构、电磁参数对其性能影响的研究

李维波, 毛承雄, 陆继明, 余翔, 黄浩

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

Study of the Influences of Dimensions and Electromagnetic Parameters on the Performance of Rogowski Coil

LI Wei-bo, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, YU Xiang, HUANG Hao

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

摘要: 分析了 Rogowski 线圈结构参数(如线圈宽度、厚度和中心半径)和电磁参数(如线圈自感、互感和内阻)之间的关系以及它们对线圈动态特性(时域和频域特性)的影响。利用 MATLAB 软件和等值电路对 Rogowski 线圈进行了仿真研究。经过实验验证所得出的有关优选 Rogowski 线圈电磁和结构参数的方法,对于快速设计具有合理结构、最优电磁参数和良好动态特性的 Rogowski 线圈具有理论指导作用。

关键词: Rogowski 线圈; 电磁参数; 结构参数; 特性

中图分类号: TM933.1 **文献标识码:** A

Abstract: The relations between dimensions and electromagnetic parameters of the Rogowski coil have been studied as well as their influences on the dynamic performance of the coil (i.e. time- and frequency-domain characteristics). By means of software MATLAB and the equivalent circuit, the methods of optimizing both dimensions and electromagnetic parameters of the coil are proposed, which are verified by experiment and can be as a guide to design a coil with high performance to measure current.

Key words: Rogowski coil; electromagnetic parameters; dimensions; performance

1 前言

Rogowski(简称罗氏)线圈又称作磁位计^[1],实际是一特殊结构的空心线圈,不含铁心,它不存在磁饱和问题,也不存在动力和热力的稳定问题,而且几乎不受被测电流大小的限制。它因被测电流所产生的磁场变化而感应出相应的电势,本身并不与被测电流回路存在直接电的联系。

由于罗氏线圈频带较宽、自身的上升时间可以做得非常小,因此适于测量快速变化的大电流。根据文[2-10]可知,罗氏线圈的应用范围主要集中在:利用它测量脉冲电流、暂态电流、稳定交流大电流以及

继电保护用电流监测等方面。

2 罗氏线圈原理分析

罗氏线圈是均匀密绕在一个由塑料棒(例如聚酰胺)构成的环形骨架上,线圈两端接终端电阻 R_s ,进行电流测量。当电流 $I_1(t)$ 变化时,线圈所感应的电势 $e(t)$ 为:

$$e(t) = -n \frac{d\phi}{dt} = -M \frac{dI_1(t)}{dt}; \quad M = n\mu_0 S / (2\pi r_c) = L_0/n$$

式中: M, L_0, n 和 S 分别为线圈互感、自感、匝数和截面积; μ_0 为真空磁导率。由等值电路^[6-9]有:

$$e(t) = L_0 \frac{di_2(t)}{dt} + (R_0 + R_s) i_2(t) \quad (1)$$

$$u_s = R_s i_2(t) \quad (2)$$

式中: R_0 和 $i_2(t)$ 为线圈内阻和感应电流, u_s 为终端电阻 R_s 端电压。当 $R_0 + R_s$ 较大且电流的变化率不是很大,即满足 $\omega L_0 \ll R_0 + R_s$ 时,则被测电流为:

$$I_1(t) = - \frac{R_0 + R_s}{MR_s} \int u_s(t) dt$$

这种罗氏线圈实质上相当于一个微分环节,要使输出信号还原为被测电流形状,就必须后接一个积分还原电路^[2-10]。

3 罗氏线圈结构和电磁参数影响研究

现分两种截面(即矩形和圆形,见图1(a)和(b))形状,讨论罗氏线圈等值电路中结构参数和电磁参数之间的相互影响。

(1)当罗氏线圈为矩形心架结构时,图2(a)中 D 为中心直径($D=2r_c$),满足:

$$r_c^2 = (3a^2 + 3b^2 + 2ab) / 32$$

式中: b, a 和 r_c 分别为线圈外径、内径和中心半径。 h 和 c 分别为线圈宽度和厚度,该线圈互感 M_j :

$$M_j = \frac{n\mu_0 S}{2\pi h} \ln \sqrt{\frac{1+h/r_c}{1-h/r_c}}$$

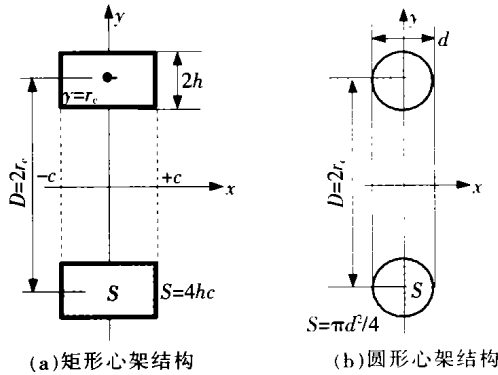


图1 Rogowski线圈不同心架结构

式中线圈矩形横截面面积为 $S=4hc$, M_j 和 L_0 的相对误差分别为:

$$\delta_j = \frac{M-M_j}{M} = \frac{r_c}{h} \cdot \ln \sqrt{\frac{1+h/r_c}{1-h/r_c}} - 1 \quad (3)$$

$$\delta_L = \delta_n + \delta_j \quad (4)$$

式(3)和式(4)表明,在矩形心架线圈上均匀密绕 n 匝导线时(即 $\delta_n=0$),则线圈自感 L_0 和互感 M_j 的相对误差均取决于线圈心架参数 h 和 r_c (或 D)。

(2)当罗氏线圈为圆形心架结构时,见图1(b)。图中: d 为圆形截面直径; D 为中心直径($D=2r_c$),圆形截面线圈的互感 M_y 为:

$$M_y = \frac{n\mu_0 S}{\pi D} \cdot \frac{2}{1+\sqrt{1-(d/D)^2}} \quad (5)$$

圆形截面互感 M_y 值的相对误差:

$$\delta_y = \frac{M-M_y}{M} = \frac{2}{1+\sqrt{1-(d/D)^2}} - 1 \quad (6)$$

式(5)和式(6)表明,在圆形心架线圈上均匀密绕时,线圈自感 L_0 和互感的相对误差均取决于线圈结构参数 d 和 r_c (或 D)。

以 δ_L 为 y 轴,以 $x=h/r_c$ 或者 $x=d/D$ 为 x 轴,分别作出矩形和圆形心架截面时 δ_L 与 x 的关系曲线(δ_L-x),见图2。由图2可知:在相同 x 前提下,圆形截面要比矩形更有利于减小 δ_L (或 δ_j, δ_y)。

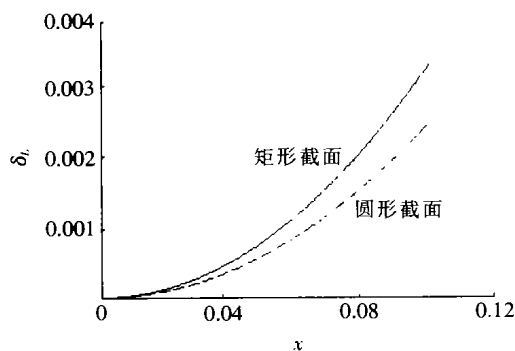


图2 Rogowski线圈不同截面时的 δ_L-x 曲线

将式(1)变换为相量表示:

$$E(\omega) = -j\omega M I_1(\omega) \quad (7)$$

则终端电阻端电压 u_s 的相量表示:

$$u_s(\omega) = -\frac{R_s}{R_s + R_0 + j\omega L_0} j\omega M I_1(\omega) \quad (8)$$

当终端电阻 $R_s \rightarrow \infty$ 时,由式(7),(8)得:

$$\frac{u_s(\omega)}{M\omega} = -\frac{E(\omega)}{M\omega} = -jI_1(\omega) \quad (9)$$

联立式(8),(9)可得:

$$\frac{u_s(\omega)}{M\omega} + \frac{R_0}{R_s} \cdot \frac{u_s(\omega)}{M\omega} + \frac{j\omega L_0}{R_s} \cdot \frac{u_s(\omega)}{M\omega} = -jI_1(\omega) \quad (10)$$

根据式(10)画出罗氏线圈相量图,见图3。因此罗氏线圈的相角和幅值误差分别为:

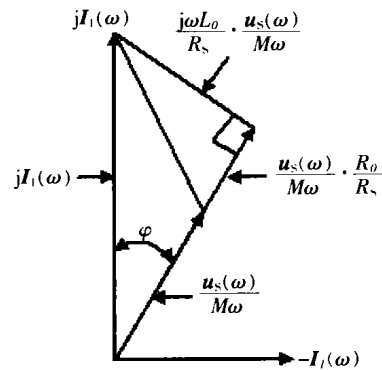


图3 罗氏线圈的相量图

$$\varphi = -\arctan \frac{\omega L_0}{R_s + R_0} \quad (11)$$

$$\epsilon = -\frac{R_0 + j\omega L_0}{R_0 + R_s + j\omega L_0}$$

$$|\epsilon| = \frac{\sqrt{R_0^2 + (\omega L_0)^2}}{\sqrt{(R_0 + R_s)^2 + (\omega L_0)^2}} \quad (12)$$

式(10)和式(11)表明,罗氏线圈的相角和幅值误差不仅取决于线圈的心架结构参数,还取决于线圈终端电阻 R_s ,线圈内阻 R_0 ,线圈自感 L_0 等电磁参数。

下面讨论导线内阻 R_0 与线圈结构参数的关系。假设 $x=b/a$,矩形截面线圈的内阻 R_0 为:

$$R_0 = 16\rho \frac{a^2(x+1)[(x-1)/2+c/a]}{\lambda^3} \quad (13)$$

式中: ρ 和 λ 分别为导线电阻率($\Omega \cdot m$)和导线直径(m)。当 $a=0.050$ m, $\lambda=0.001$ m时,分别作出 $c=0.005$ m和 $c=0.010$ m时的 R_0 与 x 的关系曲线^[8,9],见图4。在 $a=0.050$ m, $c=0.005$ m时,分别作出 $\lambda=0.001$ m和 $\lambda=0.0005$ m时的 R_0 与 x 的关系曲线,见图5。当 $x=1.1$ (即 $b=0.055$ m, $a=0.050$ m时), $c=0.005$ m时,讨论导线内阻 $R_0(\Omega)$ 与 $\lambda(mm)$ 的关系曲线见图6。

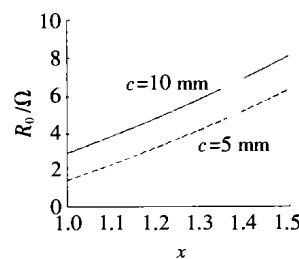


图4 R_0-x-c 的关系曲线

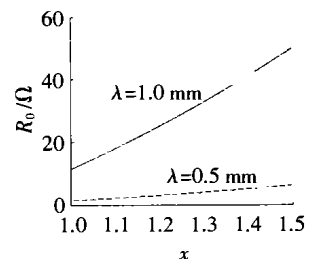


图5 $R_0-x-\lambda$ 的关系曲线

分析图4和图5可知,在 $x=1.0 \sim 1.5$ 范围内, R_0-x 近似成线性关系。由图4~6可得,如果希望线圈内阻较小,在 λ 和 c 一定时,可以适当减小 x ;在 x

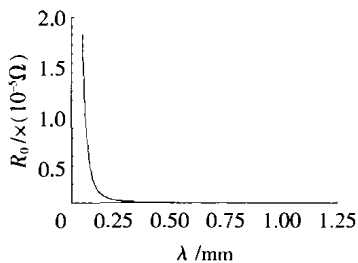


图6 $R_0-\lambda$ 的关系曲线

一定时,可以适当增加 λ 和减小 c 。

4 结构和电磁参数对罗氏线圈动态特性影响的研究

分析罗氏线圈的动态特性有利于研究线圈结构和电磁参数对其性能的影响,从而优化线圈结构和电磁参数,以确保线圈测量系统的准确与可靠^[8,9]。联立式(1)和式(2),假设初始条件为0,根据拉氏变换(s 为拉氏算子),则线圈的传递函数为:

$$H(s) = \frac{u_s(s)}{I_1(s)} = -\frac{R_s}{n} \cdot \frac{s}{s+\alpha} \quad (14)$$

式中: $\alpha=(R_s+R_0)/(nM)$ 。该方程全为实系数,且 $\alpha>0$,所以,该线圈(传感器)的所有极点分布在虚轴的左半边,确保了该传感器测试系统的稳定性,其单位阶跃响应的时域中表达式为:

$$u_s(t) = -\frac{MR_s}{R_s+R_0} \cdot (1-e^{-\alpha t}) \quad (15)$$

以矩形截面线圈为例,分析其结构和电磁参数对线圈动态特性的影响,则线圈内阻:

$$R_0 = \frac{16\rho(c+h)n^3}{\pi^3 D^2}$$

因此, α 为:

$$\alpha = \frac{16\rho n^3(c+h) + \pi^3 D^2 R_s}{2\mu_0 \pi^2 n^2 c D^2 \ln \sqrt{\frac{1+2h/D}{1-2h/D}}}$$

当线圈为圆形截面时,推得 α 为:

$$\alpha = 2 \frac{4\rho n^3 d + \pi^2 D^2 R_s}{\mu_0 \pi^2 n^2 d^2 D} (1 + \sqrt{1 - (d/D)^2})$$

图7和图8为线圈的环形骨架中心直径 $D=0.1$ m, $R_s=137 \Omega$, $h=0.005$ m, $c=0.01$ m时,在匝数 n 分别选取1 000, 1 500, 2 000时,借助Matlab软件^[8,9,11]仿真计算线圈的阶跃响应、幅频和相频特性。分析图7和图8可知:匝数越少,线圈电压的上升时间越短,响应速度越快,并且线圈的高频特性越明显。当然匝数越少,线圈与磁场交链的磁链越小,互感越小,感应信号也越弱。

图9为 $n=1 000$, $h=0.010$ m时, c 分别选取0.01, 0.02, 0.03 m时线圈的阶跃响应^[8,9]。图10为 $n=1 000$, $c=0.010$ m时, $2h/D$ 分别选取0.005, 0.010, 0.020时线圈的阶跃响应。参数 c (或 $2h/D$)越小时,线圈电压的上升时间越短,响应速度越快。当然参数 c (或

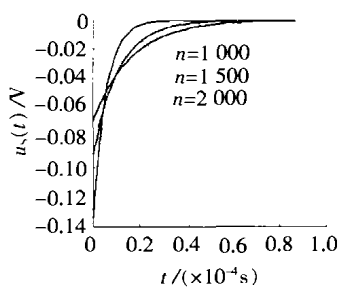


图7 线圈在不同匝数 n 时的阶跃响应

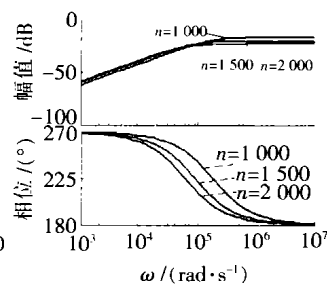


图8 线圈在不同匝数 n 时的幅频和相频特性

$2h/D$)越小时,线圈与磁场交链的有效面积就越小,磁通量越小,感应信号也越弱。根据式(3)可知: h/D 越小,对于减小线圈自感和互感的相对误差有利。但是, h 太小时,线圈的刚度会明显不足。参数 c 对线圈自感和互感的相对误差虽然没有影响,但是明显影响线圈与磁场所交链的磁通量。因此,当线圈截面不允许任意大时,可取较大 c 和较小的 h ,即磁场梯度方向的伸展必须尽可能小。

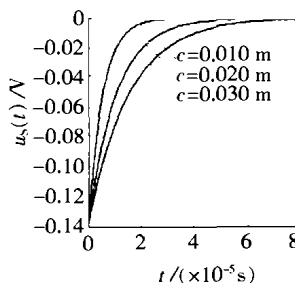


图9 线圈在不同参数 c 时的阶跃响应

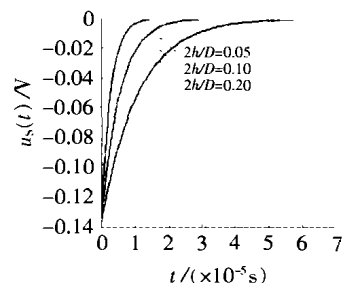


图10 线圈在不同参数 h 时的阶跃响应

当 h 和 c 变化时,对线圈测量系统的幅频、相频特性影响规律类同线圈匝数 n 。

综上所述,线圈结构和电磁参数对线圈性能均产生直接影响,线圈动态性能随 c, h, n 等参数的变化而变化。

5 设计准则

利用它测量脉冲电流(分短脉宽和长脉宽)时,应该要求线圈具有较好的高频特性,宜选取较小的 c, h, n 等参数^[8,9];利用它测量稳定交流大电流时,线圈微秒级的上升时间一般可以忽略,为增强线圈灵敏度,提高测量准确度,得到尽可能大的感生电势,宜选取较大的 c, n 和较小的 h 等参数;利用它作继电保护用电流监测时,由于该短路电流的持续时间一般为10~20 ms,适当限制线圈的上升时间。因此参数 c, h, n 应该视暂态电流幅值而定,以确保获得较大感生电势。下面以测量脉冲电流为例进行分析说明。

由前述分析得知,对于外积分线圈来说,要求同时满足 $\omega L_0 \ll R_0 + R_s$,即:

$$L_0 (di_2(t)/dt) \ll (R_0 + R_s) i_2(t) \quad (16)$$

图11表示矩形截面罗氏线圈的设计流程图。根据所得到的具有合理结构尺寸的线圈,加工成功后,

测量其分布电容 C_0 , 继续研究其动态特性, 将有利于优选线圈的其它电磁参数(如终端电阻 R_s , 积分参数等), 确保测量回路的稳定性、准确性与可靠性, 文[8,9]已有论述, 此处省略。

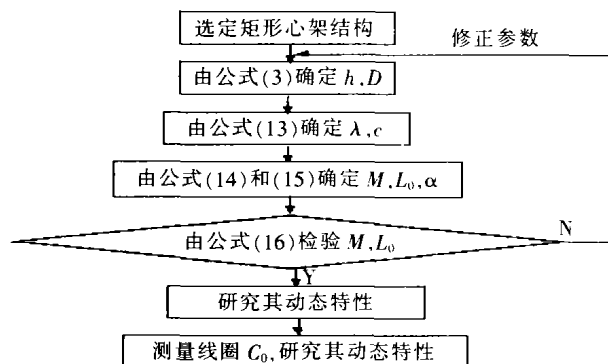
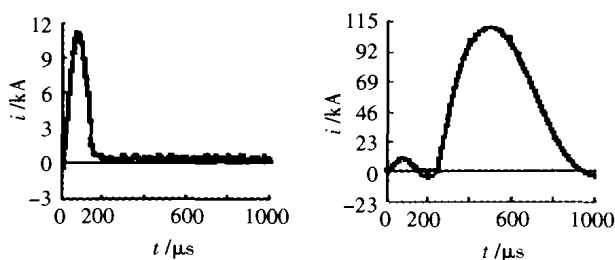


图 11 罗氏线圈设计流程图

因此, 在选取线圈结构和电磁参数时, 必须综合考虑被测量电流的特点、线圈动态性能和感应信号强弱等方面的情况。

6 实验结果

检测对象为神光 III 高功率激光实验装置中的能源模块^[9], 它主要包括预电离和主放电两部分。每台能源模块由 10 路氙灯提供泵浦能量, 电流波形为临界阻尼脉冲波形。测量线圈的结构和电气参数^[8,9]如下: $a=0.100\text{ m}$, $b=0.120\text{ m}$, $r_c \approx 0.055\text{ m}$, $d=0.01\text{ m}$, $M=2.0 \times 10^{-7}\text{ H}$, $L_0=2.8 \times 10^{-4}\text{ H}$, $C_0=3.1 \times 10^{-8}\text{ F}$, $n=1\ 400$ 匝, $R_0=18.2\ \Omega$, 其测量结果见图 12(a)和(b)。



(a)脉宽 140 μs , 峰值电流 11.5 kA (b)脉宽 600 μs , 峰值电流 111.5 kA

图 12 氙灯电流的试验采集波形

7 结论

基于罗氏线圈集中参数的数学模型, 分析其结构和电磁参数影响特点, 以及它们对线圈性能影响的特点, 给出了设计准则, 简化了设计过程, 提高了设计效率, 保证了测量回路的测试准确度。

参考文献:

- [1] 李维波, 毛承雄, 陆继明. 新型磁位计在线检测技术研究[J]. 传感器技术, 2001, 20(11): 14-17.
- [2] G R Turner, I W Hofsajer. Rogowski Coils for Short Duration ($<10\ \mu\text{s}$) Pulsed Current ($>10\text{ kA}$) Measurements[A]. 1999 IEEE Africon Conference[C], Africon, 1999.
- [3] Liao Ruijin, Sun Caixin, Gu Leguan. The Development of the Linear Rogowski Coil for Measuring Large Impulse Current [A]. Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials[C], 1998.
- [4] W F Ray, C R Hewson. High Performance Rogowski Current Transducers [J]. IEEE Industry Applications Confer, 2000 (5): 3 083-3 090.
- [5] D A Ward, J La T Exon. Using Rogowski Coils for Transient Current Measurements [J]. IEEE Science and Engineering Journal, 1993, 2(3):105-113.
- [6] 陈本孝. Rogowski Coil 在交流大电流测量中的应用 [J]. 华中科技大学学报, 1998, 26(2): 82-84.
- [7] 李芙蓉, 陈翔. 基于 Rogowski 线圈和压频变换的电流测量方法[J]. 清华大学学报(自科版), 2000, 40(3): 28-31.
- [8] 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.
- [9] 李维波, 毛承雄, 李启炎, 等. 神光 III 强激光能源模块测量线圈研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 53-57.
- [10] J D Ramboz. Machinable Rogowski Coil, Design and Calibration [J]. IEEE Trans. on Instrumentation & Measurement, 1996, 45(2): 511-515.
- [11] 李维波, 毛承雄, 陆继明, 等. 高压变频器谐波抑制措施仿真研究[J]. 高压电器, 2003, 39(5):16-19.

作者简介: 李维波(1973-), 男, 博士研究生, 主要从事高压大电流智能化检测技术研究。

(上接第 93 页)

- Protectors in Low-voltage AC Power Circuit[J]. IEEE Trans. on PAS-99, 1980(1): 129-133.
- [4] 吴维韩, 何金良, 高玉明. 金属氧化物非线性电阻特性和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
 - [5] IEEE Std C62.36-2000, IEEE Standard Test Methods for Surge Protectors Used in Low-voltage Data, Communications, and Signaling Circuits[S].
 - [6] IEC 61643-1:1998. IDT, Surge Protective Device Connected to Low-voltage Power Distribution Systems Part 1: Performance Requirements and Testing Methods[S].

- [7] K Eda, A Iga, M Matsuoka. Degradation Mechanism of Non-ohmic Zinc Oxide Ceramics [J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(5): 2 678-2 684.
- [8] A Haddad. Co-ordination of Spark-gap Protection with Zinc-oxide Surge Arresters [J]. IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., 2001, 148(1): 21-27.

作者简介: 寇晓造(1978-), 男, 河南人, 硕士生, 从事电磁兼容及低压系统过电压研究。