DOI: 10.3969/j.issn.1006 - 4729.2016.01.006

PCB 型罗戈夫斯基线圈电流传感器设计

陈 炯, 崔 律, 徐璐琪

(上海电力学院 电气工程学院, 上海 290000)

摘 要:介绍了罗戈夫斯基线圈的基本原理.对比普通罗戈夫斯基线圈传感器,设计了基于印刷线路板(PCB)型罗戈夫斯基线圈的电流传感器,其工作频带为 0 ~ 1 MHz,测量电流最大可达 100 A,测量精度为 0.1 A.该传感器具有结构简单,抗干扰能力强等优点.

关键词:罗戈夫斯基线圈; 电流传感器; 印刷电路板; 互感系数

中图分类号: **文献标志码**:A **文章编号**: 1006 - 4729(2016)01 - 0020 - 05

Design of Current Sensor Based on PCB Rogowski Coils

CHEN Jiong, CUI Lü, XU Luqi

(*School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai* 290000, *China*)

Abstract: The principle of Rogowski coil is introduced first, and it is compared with the ordinary Rogowska coil sensor; then a current sensor based on PCB rogowski coils is designed. Its working frequency band is 0 ~ 1 MHz, and the maximum current is 100 A, and its measurement accuracy is 0.1 A. The sensor has the advantages of simple structure, strong anti-interference ability.

Key words: Rogowski coils; current sensor; PCB; mutual inductance

近年来,随着电力系统电压等级的不断提高,系统对电气设备绝缘性能的要求也不断提高,电气设备绝缘的好坏直接影响着电力系统能否正常运行,一旦出现绝缘损坏,将有可能导致人员伤亡以及带来不可估量的经济损失,所以对电气设备的绝缘检测显得尤为重要.电流传感器在绝缘检测中是必不可少的测量设备,传统的电磁式电流传感器缺陷很多,如易燃易爆、二次侧不能开路、测量范围小、频带窄等.而电子式电流互感器的出现,弥补了老式传感器的不足,罗戈夫斯基线圈电流传感器就是其中的一种.

本文通过对罗戈夫斯基线圈工作原理的阐述和对其组成结构的分析,对比普通罗戈夫斯基线圈传感器,设计了基于印刷线路板(PCB)型罗戈夫斯基线圈的电流传感器,能满足在大量程前提下实现高精度的测量.

1 罗戈夫斯基线圈原理分析

1.1 线圈工作原理

罗戈夫斯基线圈是将导线缠绕在横截面均匀的非磁性骨架上,导线所组成的线圈均匀分布在骨架上,被测导体即一次侧电流穿过线圈中心,当被测导体通过的电流发生变化时就会在线圈周围产生变化的磁场,此时线圈两端会产生感应电动势[1],其测量原理如图 1 所示.

收稿日期: 2015 - 09 - 30

通讯作者简介:崔律(1990 -),男,在读硕士,浙江宁波人.主要研究方向为高电压.E-mail:clxguiv@ sina.com.

假设使用均匀度良好的线圈,当载流导体通过电流 $i(t)$ 时,穿过线圈的磁链为:

$$\psi(t) = \mu_0 NAi(t) \tag{1}$$

式中:μ_0——真空磁导率;

A——线圈横截面积;

N——线圈匝数;

$i(t)$——被测电流.

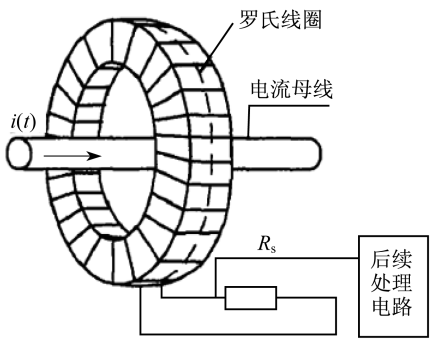


图 1　罗戈夫斯基线圈原理示意

由法拉第电磁感应定律可得,线圈两端的感应电动势与被测导体电流的关系为:

$$e(t) = -\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t} = -\mu_0 NA\frac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

令 $M=\mu_0 NA$,可得:

$$e(t) = -M\frac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

式中:M——互感系数.

1.2　积分器

由式(3)可知,线圈所产生的感应电动势与一次侧电流之间呈微分关系,为了得到成正比的真实信号,必须加装积分器. 根据积分器的不同,罗戈夫斯基线圈会有两种不同的工作状态[2],即自积分工作状态和外积分工作状态.

自积分工作状态就是自身 RL 构成积分环节,无需外接积分器,适用于测量电流持续时间短、快速变化的脉冲电流. 其原理如图 2 所示.

由电路图可列出:

$$u_2 = M\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} = L\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} + i_2(R + R_S) \tag{4}$$

自积分电路满足条件为:

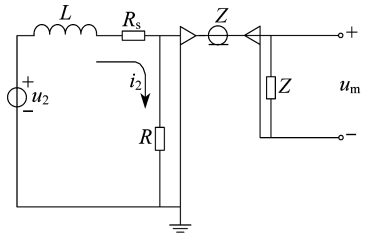
$$L\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \gg i_2(R + R_S) \tag{5}$$

电感上的压降远远大于电阻上的压降,则式(4)可变为:

$$u_2 = M\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} \approx L\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

则输出电压 u 可表示为:

$$u_{\mathrm{m}}(t) = \frac{M}{L}i_1(t)R \tag{7}$$



注:L—线圈的自感;R_S—线圈的内电阻;R—端口电阻;i_2,u_2—输出端的电流和电压;u_{m}—经过积分电路后的输出电压;Z—电缆波阻抗.

图 2　自积分工作状态原理

外积分工作状态适用于测量上升缓慢的宽脉冲电流信号,也可测量高电压大电流. 其等效电路图如 3 所示.

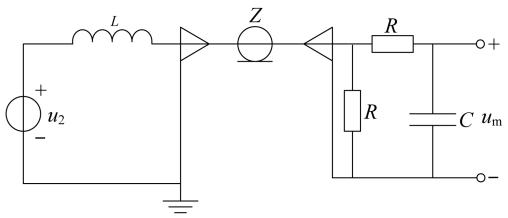


图 3　外积分工作状态原理

同样,可以列出电路方程:

$$u_{\mathrm{m}} = \frac{1}{RC}\int_0^t u_2\mathrm{d}t = M\frac{i_1(t)}{RC} \tag{8}$$

$$i_1(t) = u_{\mathrm{m}}(t)\frac{RC}{M} \tag{9}$$

2　PCB 型线圈设计

由上文可知,被测电流的要求为带宽 0 ~ 1 MHz,测量的最大电流为 100 A,测量精度要达到 0.1 A. 普通的罗戈夫斯基线圈是将导线漆包线均匀地绕在环形非铁磁骨架上制成,其绕制过程通常是由手工或绕线机来完成的,采用这两种方式很难做到线圈均匀绕制、每匝线圈横截面相等,而且有易断线及层间电容增大误差等缺点. 因此,本文设计了一种 PCB 型的电流传感器,印制线圈能均匀地布置在 PCB 板上,克服了普通罗戈夫斯基线圈的不足,测量精度更高,可用于工业批量生产.

2.1 PCB 型线圈组成

PCB 型线圈可分为主印制电路板和副印制电路板(小贴片)两部分,如图 4 所示. 在主印制板的中心开有通孔,其目的是为了使一次侧电流导体从中穿过. 主印制电路板上均匀分布着同型号的小贴片,通过主印制板正面的连线将其连接. 主印制电路板反面的圆形线相当于罗戈夫斯基线圈回线,用以构成一个闭合的回路,抵消线圈中由外磁场所产生的感应电压. 小贴片上印制线圈的形状可为圆形、椭圆、矩形等[3],为了便于分析计算线圈互感,本文采用矩形印制方法.

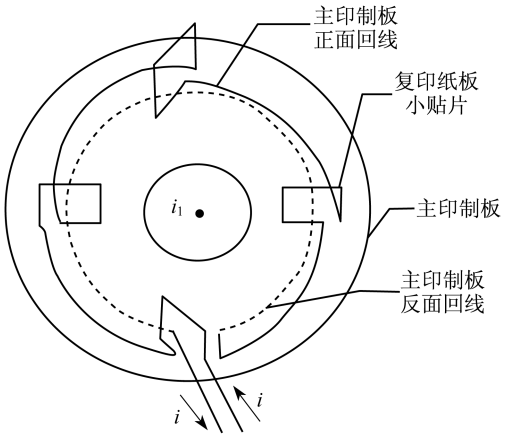


图 4 PCB 型罗戈夫斯基线圈原理

2.2 系统总体设计

设计该 PCB 线圈的关键在于确定其互感系数[4],拥有稳定的互感系数是保证传感器测量准确度的前提,而互感系数与线圈的结构有关,包括小贴片上线匝的长、宽、高以及匝数,同时与主印制电路板的内外半径也有关系.

整个传感器的系统框图如图 5 所示. 通过线圈感应出被测物体的电压信号,经过 RC 积分器,将电压信号转换成与电流成正比的信号,然后对模拟信号进行放大滤波,通过 AD 转换器变成数字信号输出.

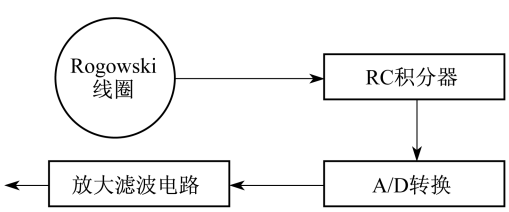


图 5 传感器系统示意

2.3 小贴片参数推导

需要确定的小贴片的参数有长度 a,宽度 b,匝间距 c,与被测导线的距离 d,小贴片 PCB 板的层数 m,印刷线匝数 n,小贴片个数 N. 具体结构如图 6 所示.

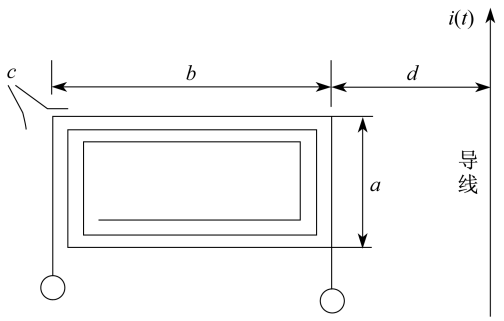


图 6 小贴片结构示意

根据文献[5],每一层小贴片的互感系数为:

$$M_0 = \int_d^{d+b} \frac{\mu_0}{2\pi x} a\mathrm{d}x + \int_{d+c}^{d+b-c} \frac{\mu_0}{2\pi x}(a-2c)\mathrm{d}x + \cdots + \int_{d+(n-1)}^{d+b-(n-3)} \frac{\mu_0}{2\pi x}[a-2(n-1)c]\mathrm{d}x \quad (10)$$

总互感系数为:

$$M = NmM_0 \quad (11)$$

传感器输入电流与输出电压的关系为:

$$U = \frac{M}{CR_1} i_1 \quad (12)$$

本文设计的传感器要求测量精度为 0.1 A,即 $i_1(t) = 0.1$ A.

选用 16 位精度的 AD 转换器,最大输入电压为 ±10 V,其有效分辨率为 14 位,故可分辨出的最小电压为:

$$U_i = \frac{20}{2^{14}} = 1.2 \times 10^{-3}\ \mathrm{V} \quad (13)$$

在时域内,脉冲宽度响应取决于积分器的时间常数. 为防止信号波长部分的衰减造成半峰值时间测量不准,积分时间常数至少应为脉冲宽度(或脉冲周期)的 10 倍,即:

$$RC \geqslant 10 \times \frac{1}{5 \times 10^6} = 2 \times 10^{-6}\ \mathrm{s} \quad (14)$$

作为 RC 积分器必须满足条件:

$$R \gg \frac{1}{\omega C} \quad (15)$$

因此,被测电流的下限频率由此条件决定,而上限频率则取决于以下条件:

$$\omega L \ll Z \rightarrow L \ll \frac{Z}{2\pi f} = \frac{50}{2 \times \pi \times 5 \times 10^6} = 1.59 \times 10^{-6}\ \text{H} \quad (16)$$

为确保能测得工频电流,取 $\omega = 2\pi f = 314$ rad/s,带入式(14)得 $RC \gg 3.18 \times 10^{-3}$.

积分电容 C 的取值应远大于电路的杂散电容,但不能过大,否则会引起泄漏电阻的增加,从而引进新的误差,同时体积也会变大,受到设计空间的限制. 本文选用 $R = 80\ \text{k}\Omega$, $C = 0.04\ \mu\text{F}$.

取 $M = 8.2 \times 10^{-6}$,由式(12)可得:

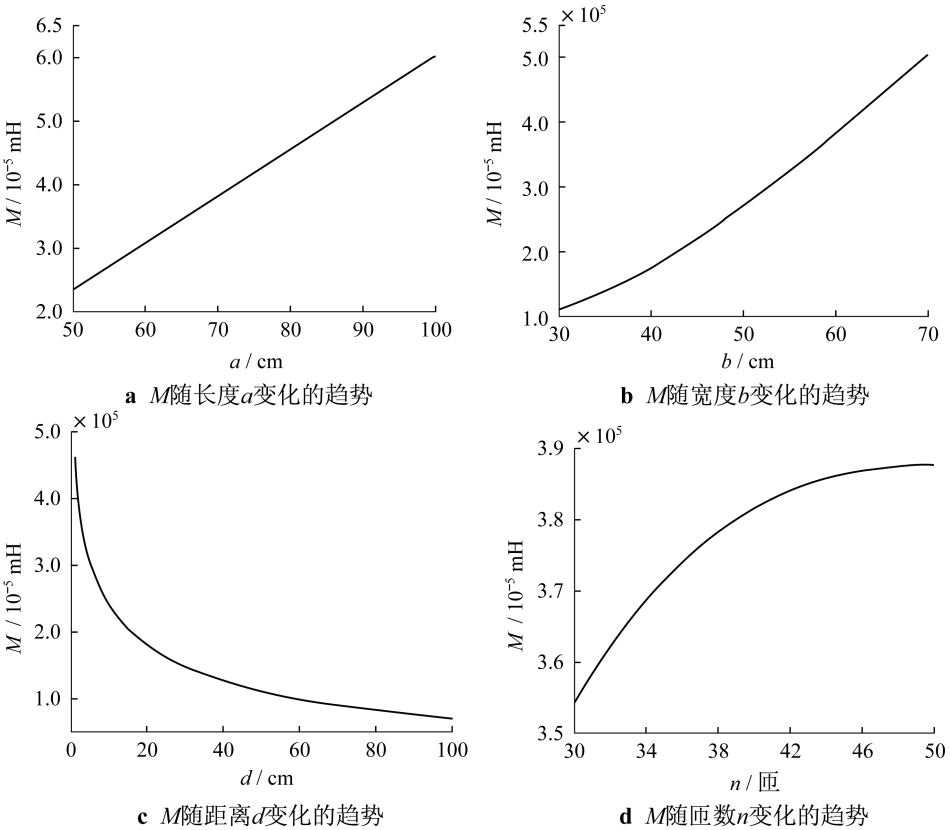
$$U_{\min} = \frac{Mi}{RC} = \frac{8.2 \times 10^{-6} \times 0.1}{80 \times 10^3 \times 0.04 \times 10^{-6}} = 2.56 \times 10^{-4}\ \text{V} \quad (17)$$

$$U_{\max} = \frac{Mi}{RC} = \frac{8.2 \times 10^{-6} \times 300}{80 \times 10^3 \times 0.04 \times 10^{-6}} = 0.77\ \text{V} \quad (18)$$

将被测电压信号放大 10 倍后 $U_{\min} = 2.56 \times 10^{-3}$ V 大于 AD 芯片的可分辨率 1.2×10^{-3},满足要求. $U_{\max} = 7.7$ V 小于 AD 芯片的最大输入量程 10 V,满足设计要求.

3　Matlab 仿真分析

通过 Matlab 仿真,可清楚地看出小贴片参数对线圈互感系数的影响,如图 7 所示.



a M随长度a变化的趋势　**b** M随宽度b变化的趋势

c M随距离d变化的趋势　**d** M随匝数n变化的趋势

图 7　线圈互感 M 与 PCB 小贴片参数的关系

当小贴片个数为 50 个,每一片层数为 6 层,$d = 7.5$ cm, $c = 0.05$ mm, $a = 20$ cm, $b = 18$ cm, $n = 120$ 匝时,其单位互感系数为:$M_0 = 2.73 \times 10^{-8}$ H. 最终可以得到设计的传感器的总互感系数为 $M = 8.2 \times 10^{-6}$ H.

根据算得的 PCB 线圈参数,绘制传感器的简化模型如图 8 所示.

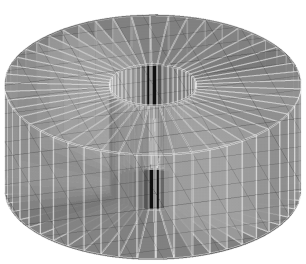


图 8　PCB 型罗戈夫斯基线圈电流传感器简化模型

4 结 语

本文阐述了罗戈夫斯基线圈的工作原理,介绍了两种积分器. 针对普通罗戈夫斯基线圈绕线不均匀、测量精度低的缺点,设计了一种基于PCB 的新型罗戈夫斯基线圈电流传感器,由主印制板与副印制板组成. 重点分析了副印制板即小贴片的参数对传感器互感的影响,并根据设计要求,确定了小贴片的结构参数,建立了传感器的简化模型,可实现对系统正常运行时的工频大电流的测量以及泄漏电流等小电流的测量.

参考文献:

[1] 张明明,张艳,李红斌,等. Rogowski 电流互感器的积分器技术[J]. 高电压技术,2004,30(9):13-16.

[2] 张岗. 光电混合式电流互感器的设计理论及其在电力系统中的应用[D]. 武汉:华中理工大学,2000.

[3] 杨红伟,陈明军. Rogowski 线圈的设计原理及其预处理电路的分析[J]. 机电工程,2008,25(2):86-88.

[4] Fiber Optic Sensors Working Group. Optical current transducers for power systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994,9(4):1 778-1 788.

[5] WARD D F, EXON J. Using Rogowski coils for transient current measurements [J]. Engineering Science and Education Journal,1993,2(3):105-113.

(编辑 白林雪)

(上接第 4 页)

是温度,且温度对磨损的影响随温度的升高而增强.

(3) 温度会引起材料物性及气体动力场内颗粒受力发生变化,在热态中冲蚀磨损的研究更加复杂.

参考文献:

[1] 贾兆鹏,徐党旗,张广才,等. 低温再热器磨损泄漏及再热汽温偏低原因分析及改造[J]. 热力发电,2014,13(2):122-128.

[2] YEE K H, SHAYLER P J, COLLINGS N. Erosion of metals by fly ash particle[J]. Wear,1983(91):161-170.

[3] 董刚,张九渊. 固体粒子冲蚀磨损研究进展[J]. 材料科学与工程学报,2003,21(2):307-312.

[4] NAGARAJAN R, AMBEDKAR B, GOWRISANKAR S, *et al*. Development of predictive model for fly-ash erosion phenomena in coal-burning boilers[J]. Wear,2009(267):122-128.

[5] 赵宪萍,徐开义,孙家庆. 电站锅炉中受热面温度对飞灰磨损影响规律的试验研究[J]. 上海电力学院学报,1995,11(3):18-24 .

[6] 孙家庆,张从宽. 关于锅炉对流受热面灰磨损的研究[J]. 锅炉技术,1980(7):1-10.

[7] 岑可法,樊建人,池作和,等. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M]. 北京:科学出版社,1994:436-439.

[8] 赵宪萍,石奇光,孙家庆,等. 飞灰磨损基本规律的试验研究[J]. 华东工业大学学报,1996,18(4):65-71.

[9] 赵宪萍,孙坚荣. 12Cr1MoV 合金钢热态飞灰冲刷磨损性能的试验研究[J]. 热能动力工程,2000,15(5):502-505.

[10] 赵宪萍,孙坚荣. 电厂锅炉常用钢材热态飞灰磨损性能的试验研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(21):117-120.

[11] 李庆棠,陈川辉,张林进,等. 耐热钢高温抗冲蚀磨损性能试验[J]. 南京工业大学学报,2012,34(3):93-97.

[12] 章燕谋. 锅炉与压力容器用钢[M]. 西安:西安交通大学出版社,1997:120-127.

[13] BIRKS N, MEIER G H, PETTIT F S. 金属高温氧化导论[M]. 章丽,王文,译. 北京:高等教育出版社,2010:121-131.

[14] 张而耕,童遂放,王琼琦,等. 12Cr1MoV 珠光体耐热钢长期服役中碳化物的变化以对性能的影响[J]. 机械工程材料,2009,33(9):28-32.

[15] 石奇光,马庆,徐开义,等. 飞灰冲刷角度变化对锅炉常用钢材磨损影响的试验研究[J]. 上海电力学院学报,1996,12(1):1-7.

[16] 赵宪萍,徐开义,孙家庆. 电厂锅炉中受热面温度对飞灰磨损影响规律的试验研究[J]. 上海电力学院学报,1995,11(3):18-24.

[17] 袁竹林,朱立平,耿凡,等. 气固两相流动与数值模拟[M]. 南京:东南大学出版社,2013:25-36.

(编辑 白林雪)