

基于罗科夫斯基线圈的脉冲电流的测量

刘顺新, 闫利超, 张丹

(郑州航空工业管理学院机电工程系, 河南郑州 450015)

摘要:对脉冲电流的测量方法以罗科夫斯基线圈的设计过程进行了阐述,对罗科夫斯基线圈设计过程中的骨架材料以及绕线材料选择的问题,分别进行介绍,同时分析了提高罗科夫斯基线圈互感系数的方法,并通过具体的实验对脉冲电流进行了测量。

关键词:罗科夫斯基线圈;脉冲电流;互感系数

中图分类号:TP216 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-1841(2007)11-0063-03

Measurement of Pulsed Current Based on Rogowski Coil

LIU Shun-xin, YAN Li-chao, ZHANG Dan

(Dept of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou Institution of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: The measuring method of heavy pulsed current and the design of Rogowski coil were discussed. The crucial elements of Rogowski coil were also presented. There is a experiment to measure the pulsed current by using some experiment devices.

Key words: Rogowski coil; pulsed current; mutual inductance

1 测量方法

目前,用于脉冲电流测量的传感理论与方法按工作原理,主要分为2大类:第一类为直接法,即根据被测电流在已知电阻上的电压降来确定被测电流的大小,如电阻分流器,它的特点是结构简单,准确可靠,但是只适宜测量 10^4 A以下的电流;另一类是间接法^[1],它是以被测电流所建立的磁场为工作基础,其特点是将电流的测量问题转变为磁场的测量问题,通过其他手段测量其磁通密度、磁通或磁势等方法来间接完成大电流的测量任务。

1912年,Rogowski根据麦克斯第一方程,证明了围绕导体的线圈端电压可用来测量磁场强度,并且此电压与线圈形状无关,称这种线圈为罗科夫斯基线圈^[2]。后来,根据全电流定律证明了罗科夫斯基线圈可以用来测量脉冲大电流,不过刚开始获得的准确度并不高(2%~3%),而且性能也不够稳定。直到1966年,西德的Heumann改变了罗科夫斯基线圈的结构并将罗科夫斯基线圈的测量准确度提高了一个数量级(0.1%),才使得罗科夫斯基线圈又被逐渐重视起来^[3]。到20世纪80年代初,英国Rocoil公司已经实现了罗科夫斯基线圈系列化和产业化^[4]。到了20世纪80年代中后期,以罗科夫斯基线圈为传感头的电子式电流互感器装置的研制成功,进一步加速了它的应用。由于罗科夫斯基线圈是一种特殊结构的空心线圈,不含铁芯,也就不必考虑因含铁芯而具有的优缺点。用于测量交变大电流时,与带铁芯的电磁式电流互感器相比,罗科夫斯基线圈它具有以下显著优点:测量线圈本身与被测电流回路没有直接的电的联系,而是通过电磁场耦合,因此与主回路有着良好的电气绝缘;由于没有铁芯饱和问题,测量范围宽,同样的绕组,

电流测量范围可以从几A到数十万A;频率范围宽,一般可设计到0.1~100 MHz以上,特殊的可设计到2 GHz的通带,线圈自身的上升时间可做得很小(如ns数量级);测量准确度高,可设计到优于0.1%,一般为0.5%~1%;易于以数字量输出,实现电力计量与保护的数字化、网络化和自动化;没有由于充油而产生的易燃、易爆等危险,符合环保要求,而且体积小、质量轻、生产成本低。作为大电流现场测量用传感器的罗科夫斯基线圈,具有低功率输出、结构简单、线性良好等优良特性,在许多大电流测量场合下,它都是敏感器件的首选对象,这都将给罗科夫斯基线圈的更广泛应用与研究带来了新的契机。

2 罗科夫斯基线圈的设计

罗科夫斯基线圈是在由塑料棒(例如聚酰胺等非磁性材料)构成,截面均匀的环形骨架芯上,均匀密绕 n 匝小线圈后,再在线圈两端接上终端电阻,就可以测量交变大电流了,如图1所示。在加工罗科夫斯基线圈时,要求必须回绕一周,即沿着任意闭曲面环绕线圈,当绕到终点后再稀疏回绕到起点。

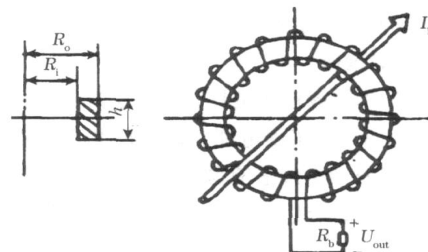


图1 罗科夫斯基线圈结构图

罗科夫斯基线圈是靠磁感应法来测量电流的。它处在一个快速变化的电磁场中,必须防止这个快速变化的电磁场以及其他杂散电磁场对测量回路的干扰。因此线圈必须采用屏蔽

措施。可以用铁盒把线圈屏蔽起来。

2.1 骨架材料的选择

罗科夫斯基线圈骨架的基本作用是支撑和绝缘,由线圈的测量原理可知,骨架的尺寸对线圈的互感系数有着决定性作用,因此骨架材料的一些参数对整个系统有着很大的影响^[5]。选择骨架材料时主要考虑工作温度稳定性、膨胀系数、机械强度、吸湿率等参数,其次再考虑介电常数、抗电强度和介电损耗角正切等参数^[6]。

一般来说,适于做罗科夫斯基线圈骨架材料的有以下几种:

(1) 石英玻璃。石英玻璃具有软化温度高、硬度大、化学稳定性好等特点。但是石英玻璃对碱类和碱性盐类的抵抗力较差。

(2) 橡胶。纯橡胶的电气性能因杂质含量而变化,其缺点是耐热性不高,在较高的温度下(>100)会快速老化,甚至变脆或开裂;对光照(特别是紫外光)、氧气(特别是臭氧)的作用很不稳定;不抗油,在汽油、变压器油、苯的作用下会胀大、变脆。由于上述缺点,故使橡胶的用途受到了一定的限制。

(3) 有机玻璃。它有相当好的机械性能;它具有不对称的分子结构,是一种偶极性电介质,它的电气绝缘性能不算高,故很少作为电介质。

(4) 酚醛层压板。酚醛树脂层压板耐高温特性好,热变形温度高,脱膜时变形小,价格低廉,但是其脆性比较大,收缩率高、耐碱性差、易吸潮、电性能差。

(5) 陶瓷。陶瓷的机械强度高、耐热性强,它的热胀温度系数一般都在 10^{-6} 数量级,故可认为是热冲击稳定的物质。陶瓷有良好的导热性和化学稳定性,在一般电场下不会老化,在机械负荷的长期作用之下,也不会产生永久形变。其吸水性近似为零。

为便于加工,骨架截面一般做成矩形。骨架高度和厚度都不能太大,尤其在磁场梯度方向上尽可能小,形成扁平线圈。线圈半径要小,这一点更应特别注意。环境温度变化时,骨架、铜线热胀冷缩导致线圈几何参数的变化,最终反映为线圈互感的变化。选择温度系数尽可能小的骨架材料,能够很好地减小温度变化带来的误差。选用纤维材料制作骨架,可将 $-20 \sim +70$ 范围内线圈输出的温度误差控制在 $\pm 0.05\%$ 以内^[7]。

2.2 绕线材料的选择

制作线圈所用的漆包线是具有绝缘层的导电金属,其作用是通过电流产生磁场,实现电能和磁能的相互转换,所以又称电磁线。漆包线的导电线芯有圆线、扁线、带、箔等,通常采用铜线、铝线或其他金属线作导电线芯。考虑到材料的性价比,一般制作线圈采用铜漆包线。铜具有高的导热性能和导电性能,足够的机械强度,良好的耐腐蚀性,并且无低温脆性,便于焊接,因此铜是应用最广泛的导电材料。

2.3 罗科夫斯基线圈设计步骤

罗科夫斯基线圈实质上是电流互感器系统。高压大电流

测量时多采用空心结构,载有电流 i_1 的导线穿过线圈,积分线圈输出端的感应电势 $u_2 = M \frac{di_1}{dt}$,在线圈出口处接小信号电阻 R ,即可测出 i_1 。令线圈的电流、内阻、匝数、自感、固有电容、输出电压分别为 i_2 、 r 、 n 、 L 、 C_0 、 u ,设计测量冲击电流的罗科夫斯基线圈的这些参数时,应根据实际尺寸在电流波的频率分布范围内,满足线圈自积分条件(即 $1/(C_0) \gg R$, $L \gg r + R$, $\omega = 2\pi f$, f 为 i_1 等效频率)和灵敏度(取其值为线圈截面积 S_c ,并令 $S_c = u/i_1 = R/n$)的要求,故 R 要足够小。

骨架采用空心设计,根据实际需要确定内圈半径 a 、外圈半径 b 后再由满足单匝导线长度、电感最大的条件确定圈高 h 。设 μ_0 为空气磁导率, d 、 l 、 S_1 分别为漆包线的直径、电阻率、总长度、导线截面积,则

$$\begin{aligned} l &= 2n(b - a + h + d), S_1 = d^2/4, \\ r &= l/S_1, S_c = (h + d)(b - a + d) \end{aligned} \quad (1)$$

并由电磁场理论导出线圈 L 、 M 的计算式。如导线线圈绕在绝缘带上,其导磁系数与空气基本相同,则一、二次间互感系数为

$$M = \frac{n^2 S_1 \mu_0}{(b + a)} \quad (2)$$

要小、 d 要大,以使 r 尽可能小;如 l 一定,则 $h = b \ln(a/b)$ 和 $h = a \ln(a/b)$ 时 L 最大。由自积分条件和相关条件可知线圈低、高频截止频率分别为

$$f_1 = \frac{r+R}{2L} \quad f_2 = \frac{L}{2C_0 R} \quad (3)$$

可见降低 $r+R$ 和增大 L 可以降低 f_1 ,减小 R 、 C_0 可提高 f_2 。因空心线圈的 f_2 可大于30 MHz,远高于冲击电流频谱分析的最高频率,故只需考虑 f_1 。输出电压 $u = Ri_2 = Ri_1/n$,正比于输入电流幅值,波形相同,测量 u 的波形和幅值即可测量 i_1 ^[8]。

2.4 提高罗科夫斯基线圈互感系数的直接方法

因为罗科夫斯基线圈没有铁芯,线圈的互感系数很小。因此当用来测小电流时,线圈感应出的电压非常微弱,极易受外界的干扰而很难精确测量。可以采用以下几种方法来提高线圈的互感系数:

2.4.1 增加罗科夫斯基线圈的匝数密度

增大线圈的匝数可以增强信号电平,但若线圈绕制过密,一方面在外积分测量条件下,会受上限频率的制约;另一方面匝间电容的增强,也会使波形失真。为了避免集肤效应和线圈分布电容的影响,高频响的罗科夫斯基线圈^[9]可以用铜带代替圆铜线绕制,只绕较少的匝数。

2.4.2 采用多层绕制结构

单层绕制的线圈的互感系数、自感、串联电阻和匝散电容都比较小,其互感系数一般为 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{H}$ 。而多层绕制线圈,即在前一层线圈表面上绕制一层新的线圈,用这种方法绕制的线圈可以使互感系数较大,在相同的骨架上与单层绕制的线圈相比,多层绕制的线圈的互感系数可以达到 $1.0 \sim 10.0 \mu\text{H}$ 。但是多层绕制线圈的分布电容随着线圈匝数的增加而线性增加,串联电感与线圈匝数的平方成正比,这些因素均会降低线圈的

频率响应特性。这种结构的线圈不适合对频率和相移要求较高的场合^[10]。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 ability 不强,很容易受外界干扰的影响,测量精度不高。

2.4.3 多个线圈叠加

将多个具有相同尺寸骨架的线圈串联叠加,这样绕制的线圈的分布电容随线圈数量的增加而近似线性减小,串联电感随线圈数量增加而线性增加。这样,罗科夫斯基线圈的频响特性在理论上是不受影响的,线圈的互感也相应地增大。但是由于各线圈之间存在分布电容,故罗科夫斯基线圈的频率实际上是下降的^[11]。实验表明:当叠加 2 个线圈时,罗科夫斯基线圈的频率范围下降 10%;叠加更多的线圈时,罗科夫斯基线圈的频率范围下降更多,而且随着线圈数量的增多,线圈的高度也相应增加,这样就不适用于对空间要求较严的场合。

3 测量结果

采用 LR 自积分器的罗科夫斯基线圈和数字示波器来测量电流^[12]。LR 自积分器的罗科夫斯基线圈是指采用线圈本身的电感 L 与线圈端口所接的电阻 R 构成积分器的罗科夫斯基线圈,又称为自积分的罗科夫斯基线圈。实验电路如图 2 所示。

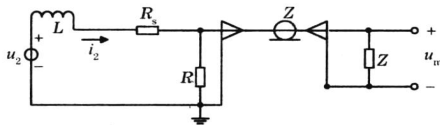


图 2 采用 LR 自积分器的罗科夫斯基线圈

罗科夫斯基线圈匝数为 650,端口电阻 $R = 3.3 \Omega$ 。对电压 u_m 的测量选用 TDS-2024 数字示波器配合高压探头。

由电路图可列出

$$u_2 = M di_1/dt = L di_2/dt + i_2(R_s + R) \quad (4)$$

因 $R_s + R$ 很小,所以

$$L di_2/dt \gg i_2(R_s + R) \quad (5)$$

这样式(4)可写为

$$u_2 = M di_1/dt \approx L di_2/dt$$

故测得的电压信号为

$$u_m(t) = Ri_2(t) = \frac{R}{L} \int_0^t L \frac{di_2}{dt} dt = \frac{R}{L} \int_0^t u_2 dt \quad (6)$$

式(7)证明了信号电压 u_m 是通过 u_2 对 t 的积分获得的。

L/R 为积分时间常数,故

$$u_m(t) = \left(\frac{R}{L} \right) \int_0^t M di_1 = MR i_1(t) / L \quad (7)$$

$$i_1(t) = \frac{u_m L}{RM}$$

测得的电压 u_m 波形如图 3 所示。

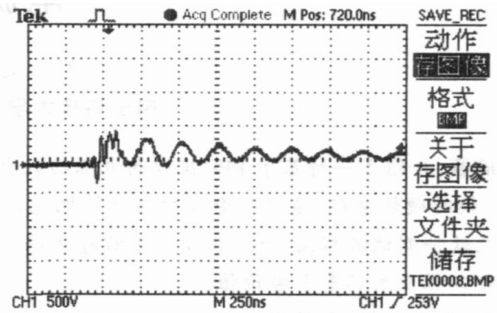


图 3 电压 u_m 实测的波形图

4 结束语

对脉冲电流的测量进行了分析,设计了测量电流的罗科夫斯基线圈,并对线圈实际电流进行了测量。结果表明:该线圈设计的合理性,能够为高功率脉冲技术的研究提供有力的工具。

参考文献:

- [1] 揭秉信. 大电流测量. 北京:机械工业出版社,1987.
- [2] JAME Mr C R. The design of high performance rogowski coils. Power Electronics Machines and Drives, 2002(4): 16 - 18.
- [3] RAMBOZ J D. Machinable rogowski coil, design and calibration. IEEE Trans. on Instrumentation & Measurement, 1996, 45(2): 511 - 515.
- [4] REINBALD C D. Application of optical current and voltage sensing. 1997 Electric Utility Conference, ABB Data, U. S. A.
- [5] 胡娟,吴桂清,周友庆. 不同电压等级下的 Rogowski 线圈电子式电流互感器的研究. 变压器, 2002, 39(10): 11 - 13.
- [6] 罗承沐,王廷云,申焯,等. 磁光材料温度特性的研究. 光电式互感器的研究与发展研讨会,北京,2000.
- [7] 电工材料应用手册编委会. 电工材料应用手册. 北京:机械工业出版社,1999:759 - 760.
- [8] 李维波,毛承雄,陆继明,等. Rogowski 线圈的结构、电磁参数对其性能影响的研究. 高电压技术, 2004, 40(2): 94 - 97.
- [9] 金涌涛,刘会金,熊玲玲. Rogowski 线圈频率特性及拓宽频带方法. 电测与仪表, 2003(9): 12 - 16.
- [10] 陈景亮,姚学玲,孙伟. 两种典型 Rogowski 线圈的研制. 高电压技术, 2004, 30(7): 14 - 16.
- [11] 孔庆源,戴敏. 冲击电流测量中的 Rogowski 线圈的应用. 高电压技术, 2005, 31(11): 6 - 7.
- [12] 邹积岩,段雄英,张铁. 罗科夫斯基线圈测量电流的仿真计算及试验研究. 电工技术学报, 2001, 16(1): 81 - 84.
- [13] 张仁豫,陈昌渔. 高电压试验技术. 北京:清华大学出版社,2003.

作者简介:刘顺新(1978—),硕士,主要研究方向为短间隙真空电弧特性研究,10 kV 和 35 kV 高压真空断路器的设计。

E-mail: lsxcj @zzia. edu. cn

(上接第 62 页)

- [10] 牟昌华. 电容成像敏感分布及图像重建算法研究:[学位论文]. 北京:清华大学,2005.
- [11] YAN H, SHAO F Q, WANG S J. Fast calculation of sensitivity distributions in capacitance tomography sensors. Electronics Letters, 1998, 34(20): 1936 - 1937.

- [12] 赵进创,傅文利,李陶深,等. 电容层析成像图像重建的新算法. 计算机工程, 2004, 30(8): 54 - 82.
- [13] 蔡芹,马宁,王延平. 电容层析成像的 BP 网络重建. 武汉大学学报, 1997, 43(1): 107 - 112.

作者简介:刘靖(1971—),讲师,从事冻土肿胀、融沉机理及电容层析成像方面的研究. E-mail: liujing19 @singhua. org. cn