

文章编号: 1001-1609(2006)06-0421-03

# PCB型 Rogowski 线圈的可靠性研究

张 艳, 李红斌

(华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

Study on the Reliability of PCB Rogowski Coil

ZHANG Yan, LI Hong-bin

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

摘要: PCB型 Rogowski 线圈克服了传统手工绕制空心线圈重复性差、准确性低的缺点,便于大规模的自动化生产。可是 PCB型 Rogowski 线圈依靠镀通孔和焊接点实现线圈的绕制和串联连接,这种特殊的结构使得线圈的可靠性取决于镀通孔和焊接点的可靠性。为了设计高可靠性的 PCB型 Rogowski 线圈,介绍了镀通孔的失效模式和失效机理,给出了 PCB型 Rogowski 线圈的失效判据,建立了 PCB型 Rogowski 线圈的可靠性框图和数学模型,基于 GJB/Z 299B-98 定量地推导出 PCB型 Rogowski 线圈的失效率与线圈镀通孔数目及镜像印制板对数间的关系。最后,预计出测量 300 A 电流的 PCB型 Rogowski 线圈的平均寿命约为 27 年。

关键词: Rogowski 线圈; 印刷电路板; 镀通孔;  
可靠性预测; 失效率

中图分类号: TM452

文献标识码: A

Abstract: PCB Rogowski coil overcomes the drawbacks such as poor repeatability and low accuracy of traditional handmade Rogowski coils, and is propitious to extensive automatic production. But PCB Rogowski coil is formed by interconnections of the conductive imprints on the upper and lower sides of single PCB with plated through holes as well as connections of mirrored PCB pairs in series with soldering points. This special design causes reliability of coil depending on the quality of PTH and soldering point. Thus, this paper presents the failure modes and failure mechanism of PTH, establishes the reliability model of PCB Rogowski Coil, deduces relational formula of the failure rate, lifetime to the number of PTH and the pairs of mirrored PCB, finally, it predicts the failure rate and lifetime of PCB Rogowski Coils for 300 A current measurement.

Key words: Rogowski coil; printed circuit board(PCB);  
plated through holes(PTH);  
reliability prediction; failure rate

收稿日期: 2006-02-05; 修回日期: 2006-03-10

基金项目: 科技部攻关项目(2004BA409B01-1)。

作者简介: 张 艳(1979-),女,河南许昌人,博士研究生,主要研究方向为电子式互感器及其可靠性。

## 0 引言

Rogowski 线圈电流互感器是 IEC60044-8 中提出的 3 种电子式电流互感器之一,是电流互感器发展的方向<sup>[1]</sup>。制作高精度的 Rogowski 线圈必须遵循以下原则:线圈密度恒定;骨架截面积恒定;线圈横截面与中心线垂直<sup>[2]</sup>。传统的 Rogowski 线圈用手工将漆包线均匀的绕制在非铁磁材料的环形骨架上制成,批量生产时准确度低,分散性较大,阻碍了其产业化发展。PCB(印刷电路板)型 Rogowski 线圈基于现在的双面印刷电路板制造工艺<sup>[3-5]</sup>,制作简单,绕线密集匀称,可以做地非常精确,非常适合批量生产。

但是 PCB 型 Rogowski 线圈也有其弱点,即其特殊结构设计引起的可靠性问题,目前国内外鲜有文献提出。Rogowski 线圈作为传感元件用于敏感变化的电流信号,为后续处理电路提供输入信号,在高电压、恶劣的自然环境下必须具有高可靠性。由于 PCB 型的 Rogowski 线圈采用镀通孔实现印制线路的串绕连接,一个镀通孔连接不可靠,整个 Rogowski 线圈的输出信号将可能发生畸变,导致错误的电流测量和继保装置的误动作,因而 Rogowski 线圈在设计时必须以高可靠性为出发点。下文将从镀通孔失效模式与机理、Rogowski 线圈的可靠性预计、Rogowski 线圈的可靠性试验标准等几个方面阐述对 PCB 型 Rogowski 线圈的可靠性研究,给出 PCB 型 Rogowski 线圈的失效判据及定量的可靠性指标。

## 1 PCB 型 Rogowski 线圈的制作

### 1.1 PCB 型 Rogowski 线圈的设计原理

不同应用场合下,PCB 型 Rogowski 线圈的形状有圆形,椭圆形,矩形等,但它们的设计原理是相同的。PCB 型 Rogowski 线圈由一对或者多对镜像印刷

板串联连接而成。镜像印制板结构见图 1，印制板 PCB1 和 PCB2 电气方向相反连接。它们能够有效抑制垂直于线圈平面磁场产生的感应电势且使线圈的输出电势加倍(与单个线圈的输出电势相比)，为了提高 PCB 型 Rogowski 线圈输出的电压值，可将多对镜像 PCB 板串联使用以增加线圈输出的感应电势。

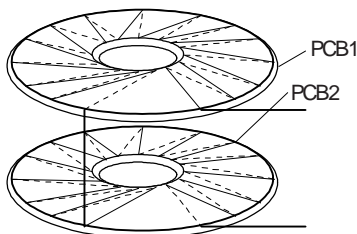


图 1 PCB 型 Rogowski 线圈示意图

已设计好的 PCB 型 Rogowski 线圈的 protel 图将被发送给 PCB 制版商，采用双面印刷电路板制作方式生产。双面印刷电路板的典型工艺是图形电镀法和 SMOBC 法。若研发人员不了解印制板生产相关的性能质量标准，没有向制造商提出制造要求，生产的 PCB 型 Rogowski 线圈在实际使用时可能存在可靠性较低的问题。IPC6011《印制板通用性能规范》对印制板性能进行了等级分类<sup>[6]</sup>：1 级为一般电子产品，外观缺陷并不重要；2 级为耐用电子产品，要求高性能及长寿命，需要不间断工作但非关键。印制板的某些外观缺陷是允许的；3 级为高可靠性电子产品，包括那些连续功能或一旦需要立即工作的关键性设备。基于 PCB 型 Rogowski 线圈在电流互感器中起至关重要的作用，其性能必须满足 2 级的要求。

### 1.2 镀通孔的失效模式

通常情况下，单个印制板上有几百个镀通孔，整个 Rogowski 线圈共有几千个镀通孔。由于镀通孔起着双面板印制线路电气互连的作用，它的可靠性是印制板质量的核心。镀通孔设计相关的参数是镀层的厚度、镀层层数、印制板厚度、镀通孔直径等等。孔壁镀铜，不仅要求镀层有合适的厚度、均匀性和延展性，而且要求镀层在 288 热冲击 10s 不能产生断裂 (IPC-TM-650 的 2.6.8 中规定)<sup>[7]</sup>，镀通孔的结构见图 2。

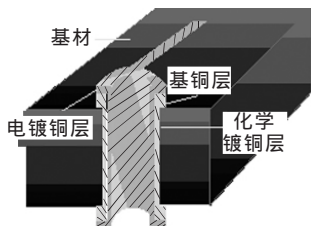


图 2 镀通孔的结构

目前，双面板生产中经常出现的质量缺陷主要有：孔内镀铜层空洞、瘤状物、孔内镀层薄、孔内镀层附着力不足、孔内镀层与表面基铜面接合处的铜层

脱落等。其常见的失效模式是孔壁桶形裂纹、孔拐角裂缝等。其中孔壁桶形裂纹的失效机理是印制板在受到热冲击时，镀通孔因基板热膨胀系数高于铜箔热膨胀系数所引起的轴向拉伸应力(热机械应力)造成断裂现象<sup>[8]</sup>。

### 1.3 PCB 型 Rogowski 线圈的失效

IEC 60044-8 将电子式电流互感器的使用环境温度划分为 3 个等级，见表 1。除了基本的误差试验外，还要求温度循环准确度试验中各测量点的测量误差在规定的相应误差限值之内。温度循环中的最高温度和最低温度应与表 1 相符且温度变化率不低于 5 K/h<sup>[9]</sup>。

表 1 温度等级

等级	最低温度/	最高温度/
- 5/40	- 5	40
- 25/40	- 25	40
- 40/40	- 40	40

PCB 型 Rogowski 线圈电流互感器送检之前，在实验室做了大量的温度循环准确度试验。试验结果表明在电子线路正常的情况下，线圈输出信号的畸变是由于 PCB 型 Rogowski 线圈未能承受规定温度变化产生的热机械应力而引起的。一般情况下，如果客户没有特殊要求，PCB 制造商只会执行 IPC 6012B《刚性板的合格和性能规范要求》中的一些常规测试。为了提高 PCB 型 Rogowski 线圈的可靠性，还应该加入特殊性能测试——热冲击试验。热冲击测试依据 IPC-TM-650 方法 2.6.7.2 B 对样品进行温度循环试验，温度循环试验的极限温度由样品的材料决定，试验次数 100 次，不同温度阶段转换时间为 2min，要求记录测试前第一个高温循环、最后一个高温循环时的互联电阻。如果电阻变化超过 10%，IPC 6012B 认为印制板的性能不合格。IPC-TM-650 方法 2.6.7.2 中规定了 6 种测试条件，制造印制板使用的基材是 FR4，所以测试条件为 D 型，流程见表 2。

表 2 测试流程

阶段	温度 / [F]	时间 /min
1	- 55, +0/- 5 [- 67, +0/- 9]	15
2	25, +10/- 5 [77, +18/- 9]	0
3	+125, +5/- 0 [257, +9/- 0]	15
4	25, +10/- 5 [77, +18/- 9]	0

从表 2 可以看出，PCB 型 Rogowski 线圈进行热冲击测试时，最低温度为 - 55 (波动范围 - 60 ~ - 55)，最高温度 125 (波动范围 125 ~ 130)，在最低温度维持 15 min 后，2 min 内直接升温到最高温度再维持 15 min。如此循环 100 次。这种测试要求远远高于 IEC 60044-8 温度循环准确度试验的温度变化范围。如果 PCB 型 Rogowski 线圈通过了热

冲击测试，完全可以承受温度循环准确度试验中产生的热机械应力。因此，从工程角度，设定 Rogowski 线圈阻值变化超过 10%为 PCB 型 Rogowski 线圈的失效判据。

## 2 PCB 型 Rogowski 线圈的可靠性预测

### 2.1 PCB 型 Rogowski 线圈的可靠性模型

可靠性预测方法一般有元器件计数法和元器件应力分析法两种<sup>[10-11]</sup>。PCB 型 Rogowski 线圈实际使用时以一对镜像 PCB 板为最小结构单元，由一对或者多对镜像印刷电路板串联连接而成。除了镜像连接和线圈输出电势引出线焊接点外，并无其它电子元器件。所以从可靠性角度分析，PCB 型 Rogowski 线圈的可靠性取决于印制板的可靠性和焊接点的可靠性，由此建立其可靠性模型，包含其可靠性框图和可靠性数学模型两项内容。图 3 中假设 PCB 型 Rogowski 线圈由 K 对镜像印刷电路板串联连接而成，则焊接点的数目为 4K 个。

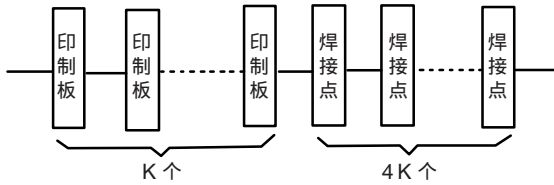


图 3 PCB 型 Rogowski 线圈的可靠性框图

IEC 60044-8 标准中指出了电子式电流互感器在可靠性方面应与变电站的电子元件的可靠性可比，电子元件的寿命一般服从指数分布，由此认为镜像印制 Rogowski 线圈的寿命也服从指数分布。设单个印制板的工作失效率为  $p_1$ ，焊接点的工作失效率为  $p_2$ ，PCB 型 Rogowski 线圈的工作失效率为  $p_0$ 。由可靠性框图得到 PCB 型 Rogowski 线圈的工作失效率  $p_0$  和平均无故障工作时间 MTBF 分别为：

$$p_0 = 2K p_1 + 4K p_2 \quad (1)$$

$$MTBF = 1/p_0 \quad (2)$$

### 2.2 PCB 型 Rogowski 线圈的可靠性数学模型

在中华人民共和国国家军用标准 GJB/Z 299B-1998 《电子设备可靠性预计手册》中，元器件计数法和元器件应力分析法关于印制板和焊接点的工作失效率模型是相同的，印制板和焊接点的工作失效率模型分别如式(3)，式(4)所示：

$$p_1 = (b_1 N + b_2) e_1 q_1 c_1 \quad (3)$$

式中： $p_1$  为工作失效率； $b_1$ 、 $b_2$  为基本失效率， $b_1 = 0.00017 \times 10^{-6}/h$ ， $b_2 = 0.0011 \times 10^{-6}/h$ ；N 为使用的金属化孔数； $e_1$  为环境系数； $q_1$  为质量系数； $c_1$  为复杂度系数。

$$p_2 = b_e e_2 q_2 \quad (4)$$

式中： $p_2$  为工作失效率； $b_e$  为基本失效率， $b_e = 0.000092 \times 10^{-6}/h$ ； $e_2$  为环境系数； $q_2$  为质量系数。

由式(1)，式(3)，式(4)可以得到 PCB 型 Rogowski 线圈的工作失效率  $p_0$  为：

$$p_0 = 2K (b_1 N + b_2) e_1 q_1 c_1 + 4K b_e e_2 q_2 \quad (5)$$

由 Rogowski 线圈的测量原理可知，Rogowski 线圈尺寸固定时，被测母线电流越小，要感应出一定的输出电势，所需镜像印刷电路板的对数 K 就越多，Rogowski 线圈的镀通孔的总数就越多。由式(5)可知，单片印制板上的镀通孔个数 N 和镜像印刷电路板的对数 K 越多，PCB 型 Rogowski 线圈的工作失效率就越高。因此，PCB 型 Rogowski 线圈传感头设计时要权衡考虑镜像印刷电路板的对数和单片印制板上的镀通孔个数以保证较低的失效率。

若传感头的安装空间没有严格的限制，在不改变印制板厚度、板厚/孔径比匹配的情况下，应该适当增加印制板的横截面积，这样可以减少镜像印刷电路板的对数。而镀通孔数目的减少可以降低 PCB 型 Rogowski 线圈的工作失效率，延长平均无故障工作时间。

### 2.3 PCB 型 Rogowski 线圈的可靠性预测实例

被测电流越小，PCB 型 Rogowski 线圈包含的镜像印制板对数越多。下面给出一个测量小电流的 PCB 型 Rogowski 线圈的可靠性预计实例。其额定电流测量值是 300 A，相关预测参数列在表 3 中。

表 3 PCB 型 Rogowski 线圈的可靠性预测参数

类型	N	$b_e/(10^{-6}/h)$	$e_1$	$q_1$	$c_1$	$p_i/(10^{-6}/h)$
印制板	600	-	4.0	1.0	1.0	0.4124
焊接点	-	0.000092	4.0	1.0	-	0.000368

将表 3 中的参数代入式(5)可知 Rogowski 线圈的工作失效率  $p_0$  为：

$$p_0 = 2 \times 5 \times (b_1 N + b_2) e_1 q_1 c_1 + 4 \times 5 \times b_e e_2 q_2 = 4.13136 \times 10^{-6}/h$$

将表 3 中的参数代入式(2)可知 Rogowski 线圈的平均无故障工作时间 MTBF 为：MTBF = 1/(4.13136 × 10<sup>-6</sup>) = 242051 h，由计算可知，Rogowski 线圈的平均寿命约为 27 年。

## 3 PCB 型 Rogowski 线圈的可靠性试验

国内外针对刚性双面印制电路板性能规定的相关标准主要有：

(1) IPC 标准有：① IPC 6011 印制板通用性能规范；② IPC 6012B 刚性板的合格和性能规范要求；③ IPC-A-600G 印制板验收条件；④ IPC-TM-650 试验方法手册。

(2) 我国国标有：① GB/T 16261-1996 印制板总规范(供能力认证用)；② GJB 362A-1996 刚性印制板总规范；③ GB/T 4588.3-2002 印制板的设计和使用；④ GB/T 4588.2-1996 有金属 (下转第 427 页)



图9 开断试验的试验形态

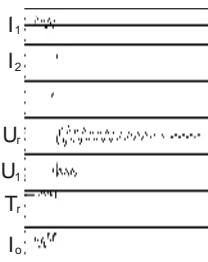


图10 T100a开断试验的示波图

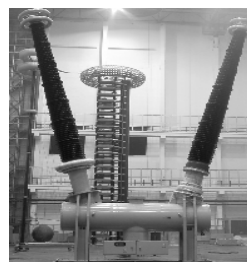


图11 样机进行绝缘试验

开断试验 T100a 的示波图。

绝缘试验除按照技术规范的要求进行标准规定的试验外, 依据有关标准按照海拔 3 000 m 校正后的数值重新对整台样机进行了雷电和操作冲击耐压试验, 试验参数分别达到了 2 688 kV 和 1 860 kV, 灭弧室内绝缘同样也承受了高达 2 688 kV 的雷电冲击电压, 其高度可靠的内绝缘性能也得到了验证。图 11 为进行绝缘试验时的形态。

另外, 其它试验项目的试验结果也都达到或高于设计时的期望值。

## 4 结语

型式试验的结果显示, 研制的 LW13-800 双断口罐式断路器是一种开断性能优良、绝缘性能可靠、可以在海拔 3 000 m 及以下环境中使用的断路器产品, 完全可以满足 750 kV 输电线路对断路器的要求。

## 参考文献:

- [1] 黎斌. SF<sub>6</sub> 高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

(上接第 423 页)

化孔单、双面印制板分规范; ⑤GB/T 4677-2002 印制板测试方法。

(3) IEC 相关标准: PCB 型 Rogowski 线圈除了要遵循上述的有关印制板性能相关标准外, 因其是电流互感器的组成部分, 还要依据 IEC 60044-8 进行电子式电流互感器相关的型式试验和例行试验。

## 4 结语

Rogowski 线圈电流互感器是新型电子式电流互感器的一种, 具有广阔的应用前景。IEC 60044-8 标准中指出了电子式电流互感器在可靠性方面应与变电站的电子元件的可靠性可比。本文仅是 Rogowski 线圈电流互感器可靠性研究的开始, 文中简要介绍了 PCB 型 Rogowski 线圈的设计原理, 镀通孔常见的失效模式、失效机理; 给出了 PCB 型 Rogowski 线圈的失效判据; 建立了 PCB 型 Rogowski 线圈的可靠性框图和可靠性数学模型; 定量地推导出 PCB 型 Rogowski 线圈的失效率和平均寿命与线圈镀通孔数目及镜像印制板对数间的关系, 对如何设计和生产高可靠性 PCB 型 Rogowski 线圈给出一些指导建议。最后依据军标 GJB/Z 299B-1998 对测量 300 A 电流的 PCB 型 Rogowski 线圈的工作失效

率和寿命进行了可靠性预计, 在保证正确的生产工艺和严格的质量检验后, 这种电流等级的 PCB 型 Rogowski 线圈具有很高的可靠性, 寿命可达到 27 年。

## 参考文献:

- [1] 李红斌, 刘延冰, 张明明. 电子式电流互感器的关键技术[J]. 高电压技术, 2004, 30(10): 4-6.
- [2] Kojovic L. Rogowski Coils Suit Relay Protection and Measurement [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1997, 10(3): 47-52.
- [3] 李红斌, 陈庆, 张明明, 等. 一种基于印刷电路板的高准确度 Rogowski 线圈[J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 54-56.
- [4] 陈庆, 李红斌, 张明明, 等. 采用主副印刷电路板构造的 Rogowski 线圈的性能分析及设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 79-82.
- [5] Kojovic L. PCB Rogowski Coils Benefit Relay Protection[J]. IEEE Computer Applications in Power, 2002, 15(3): 50-53.
- [6] IPC 6011. Generic Performance Specification for Printed Boards[S].
- [7] IPC-TM-650. Test Methods Manual[S].
- [8] Ahmad Mudasar, Sue Teng, Mason Hu. Assessing the Reliability of Plated Vias[J]. PC FAB, 2002, 25(11): 30-37.
- [9] IEC 60044-8 Electronic Current Transformers[S].
- [10] MIL-HDBK-217F. Reliability Prediction of Electronic Equipment-NOTICE2[S].
- [11] GJB/Z 299B-1998. 电子设备可靠性预计手册[K].

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!