

“无心”互感器—罗氏线圈的工作原理及分析

蒋大维

江阴市星火电子科技有限公司



前段时间有个热播的电视剧，叫做《无心法师》，讲得一个没有心的法师的故事，掀起大家追剧热潮。这让我联想到我们磁芯行业中的产品，磁芯就是我们行业产品中的心脏，如我们的互感器，互感器发展了几十年，结构、功能、形式发生了变化，如它的磁芯从热轧硅钢到冷轧硅钢，再到纳米晶甚至到铁氧体，他的形式从闭合式的互感器发展到现在的开合式互感器，功能从测量用互感器到保护用电流互感器。它们的原理都始终都是万变不离其中，就是通过磁芯这颗心脏来进行电磁转换，先电生磁、再磁换电，最终达到能量变换或者传递的效果。

不过现在出现了一种互感器，也学习了电视剧的热潮，摒弃了它的心脏，做了个无心的互感器，这个互感器就是我们今天要讲的无心传感器—罗氏线圈。

罗氏线圈（Rogowski 线圈）全称罗哥夫斯基线圈，由于不含铁芯，又叫空心线圈，是一个均匀缠绕在非铁磁性材料上的环形线圈，所以它区别于传统互感器的重要一点是它没有磁芯。

罗氏线圈工作原理是线圈骨架围绕被测导体，导体周围的磁场会随着导体中电流的改变而改变，骨架上的漆包线会因此感应出电动势。将该电动势积分运算后可还原导体中的电流。一个完整的罗氏线圈电流测量系统应该包括一个线圈和一个积分器，这篇文章抛开积分器不谈，只对线圈进行介绍，让大家对罗氏线圈工作原理有一个详尽的

了解。

1 罗氏线圈工作原理

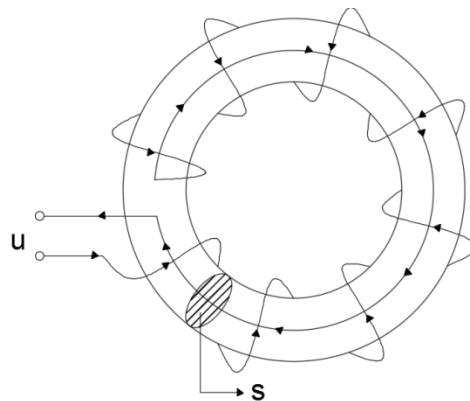


图1 截面为环形的罗氏线圈工作原理图

罗氏线圈测量电流的理论依据是法拉第电磁感应定律和安培环路定律（见图1：罗氏线圈工作原理），当被测电流沿轴线通过罗氏线圈中心时，在环形绕组所包围的体积内产生相应变化的磁场，强度为H，由安培环路定律得：

$$\oint H \cdot dl = I(t)$$

由 $B = \mu H$, $e(t) = d\Phi/dt$, $\Phi = N \int B \cdot dS$, $e(t) = M \cdot di/dt$, 得：其截面为环形时，互感系数M和自感系数L分别为：

$$M = \mu \cdot nS \quad \text{公式 1}$$

$$L = \mu \cdot SnN \quad \text{公式 2}$$

$$u = 2\pi f \cdot \mu \cdot SnN \cdot I/N \quad \text{公式 3}$$

$$= 6.28f \cdot \mu \cdot Sn \quad \text{公式 4}$$

上式中，H为线圈内部的磁场强度，B为线圈内部的磁感应强度， μ 为真空磁导率： $4\pi \cdot 10^{-7}$ ，N为线圈匝数，n为单位长度下的线圈匝数，S线圈的截面积，u为线圈输出电压值。由公式4可见，线圈二次输出电压值和频率f、线圈截面积S、绕线的密度n3个关键因素有关系。

1、频率f：在不加积分器的情况下，罗氏线圈的输出和频率成正比的关系，即是60HZ的输出比50HZ的输出多出20%，也就是说，频率越高的被测电流罗氏线圈感应

的输出信号就越大，频率越高的电流越容易被检测；

2、绕线的密度 n ：绕线密度与输出成正比，单位长度绕的线越多，即绕线密度 n 越大输出越大；

3、线圈截面积 S ：线圈截面积越大，输出信号就越大，要取得较大的输出信号，可以采用截面较大的骨架。

设计举例：客户要设计一个罗氏线圈，一次导体是个电缆，电缆直径是 100mm，罗氏线圈的规格是 1000A/0.1V，50HZ。

设计思路：罗氏线圈不用考虑到饱和，但是要测试 100mm 直径的电缆，那罗氏线圈的周长需要 $100\text{mm} * \pi = 314\text{mm}$ ，我们可以留点余裕，那线圈设计到 320mm，线圈的截面采用常规的 6mm 直径管。

按照公式 4，先计算出 $n=8972\text{T/M}$ ；

那么 320mm 要绕的圈数为： $N=8972\text{T} * 0.32=2871\text{T}$ ；

确定了线圈匝数，再来确定线径，罗氏线圈的输出信号电流非常小，所以几乎不用考虑线径的电流密度，直接考虑如何排线以保证绕线均匀为准。线径 d 可以按如下计算：

$$d=L/T/1.2; \quad \text{公式 5}$$

d 为漆包线直径； L 为罗氏线圈长度；1.2 漆包线排绕系数。

即 $d=320\text{mm}/2871\text{T}/1.2=0.092\text{mm} \approx 0.09\text{mm}$ ；

根据公式 2 计算它的自感 $L=0.914\text{mH}$ ；

这样线圈的参数就出来了：用 320mm 长的 $\phi 6$ 的柔性骨架，绕制 2871T 即可。

罗氏线圈做好后的测试，一般采用工频大电流发生器给罗氏线圈信号，同时用高阻抗万用表测其输出电压值。



图为： 我公司使用大电流发生器（1KA）

本例的测试，可以用 1000A 工频交流通进罗氏线圈，同时测其二次电压是否是 0.1V 即可。如果没有 1000A 的

工频大电流，亦可采用较小的电流源，如 100A，那么输出只要测试到 0.01V 即可，当然再小的电流源就不建议使用，因为罗氏线圈没有磁芯，周围的干扰信号对小电流测试影响太大，导致测试误差很大。

有没有其它方便的测试方法呢，有，可以测试二次的电感量，采用 10KHZ 的频率测试线圈的电感是否符合自感 L 的理论值即可。

各位肯定说，明明是 50HZ 的，你用 10KHZ 的频率，误差岂不是很大，其实不要紧，因为罗氏线圈是空气磁导率，空气磁导率基本不受频率的影响，但我用 10K 的频率测试，要比 50HZ 来的稳定。

2 罗氏线圈的误差

与常规互感器相比，罗氏线圈不含铁磁性材料，故无磁滞效应，无磁饱和现象，所以能测试数千安培的电流而不饱和，几乎没有相位差，同时无二次开路危险。响应频带宽 1Hz-1MHz。但由于制造工艺和材料的限制，对于正常 50Hz 正弦波来说其准确度不及带铁芯的常规互感器。罗氏线圈的测量误差主要由以下 3 方面决定。

1、绕线的平整度：罗氏线圈的绕线平整度直接关系到罗氏线圈的输出误差，线圈绕组必须绝对均匀以保证绕组间距对称。线圈一周匝数分布不等即导致互感系数 M 随初级导体位置的变化而变化。这样就产生了源于待测电缆或母线位置的实际误差，对于匝数密度不同于平均分布值的线圈段，导体与其距离越小，这种误差就越大。

2、绕线骨架横截面的平整度，匝数密度一样，如果缠绕在导体上的整个线圈的横截面不一致，则互感系数 M 也将不恒定，导体位置变化同样会产生误差。

3、线圈接口：常规的柔性罗氏线圈都有一个接口

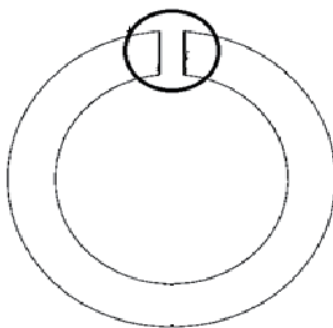


图 2 罗氏线圈接口处

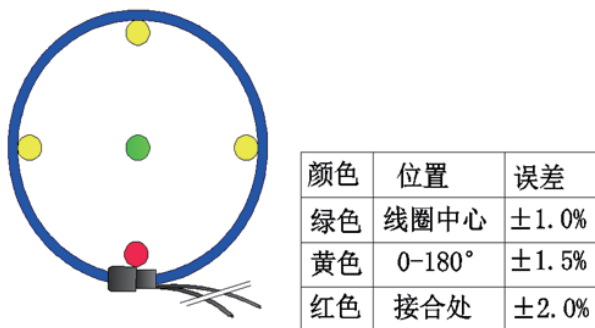


图3 常规罗氏线圈误差示意图

来方便安装,但是一般的接插口设计中间都会留下空隙(见图2,罗氏线圈接口处),这样出现的问题就和绕线平整度一样,可以说问题比绕线平整度不均的问题风味严重,因为接插口由于没有进行绕线,所以其互感器系数明显低于其它部位,一次导体距离接插口越小,这种误差就越大(见图3,常规罗氏线圈误差示意图)。

有的人说,我的罗氏线圈的准确级很高,通过积分器的调整可以达到0.5甚至0.2,这个是错误的想法,为什么?

积分器起到还原一次电流的作用,同时可以将本来很弱的二次信号进行放大,便于仪器仪表利用。

打个比方,做100只参数为1000A/0.1V的罗氏线圈,通过积分器输出1V。实际做出来的100只罗氏线圈由于工艺原因在不经过积分器输出的电压不一,由0.9-0.11V形成正态分布。那积分器是可以对单点进行补偿的,把所有罗氏线圈做成统一的1V。

但这样就行了么?

首先罗氏线圈低端电流(准确级5%的点)是否补偿

了,在我的一篇《互感器中几个模糊名词解析》中已经讲到,准确级是四个点(5%、20%、100%、120%)的比值差和相位差共同组成的。因为罗氏线圈的低端点误差是非常大的,当然在生产中是可以通过软件补偿,但实际使用时,可能在不同环境中,那么在不同的环境中它的电流低端点很容易受到不同的干扰,受到不同的干扰,它的误差又会形成不同的变化,那你的补偿就会失效。

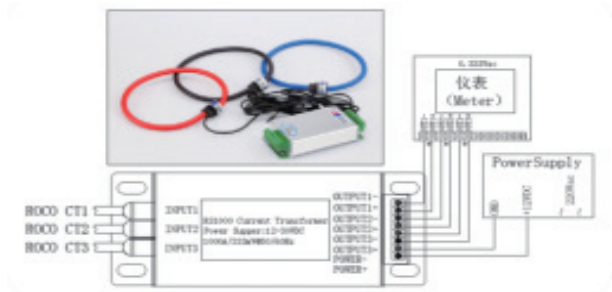
其次,罗氏线圈不同位置的误差如何进行补偿(见图3),现在的软件应该还没有智能到判断用户使用罗氏线圈的位置,如果以后软件智能了,例如发现客户使用位置在黄色块,立刻启动黄色块补偿数据,那样我相信还是可以的,但不是现在。

所以说,罗氏线圈的误差真正取决于罗氏线圈本身,而不是在积分器上,起码现在不是。

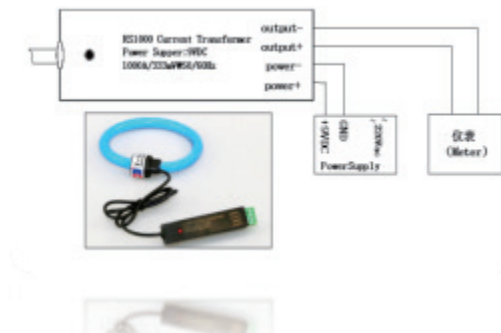
3 罗氏线圈的应用及前景

基于罗氏线圈的具有电流可实时测量、响应速度快、不会饱和、几乎没有相位误差的特点,故其可应用于继电保护,可控硅整流,变频调速,电阻焊等信号严重畸变的场合。

现在有很多人说,罗氏线圈现在已经可以替代常规的电磁式电流互感器,我觉得这在短时间内是不可能的,因为罗氏线圈虽然不会饱和且线性度好,但传统电磁式互感器的准确级是罗氏线圈无法比拟的,罗氏线圈可以用作保何用电流互感器,但用作测量用电流互感器就很勉强了,所以说短时间内罗氏线圈是无法替代传统电磁式互感器的。



附图1 三相罗氏线圈及积分器



附图2 单相罗氏线圈及积分器