

实际电动机维修环境下的铁损测试

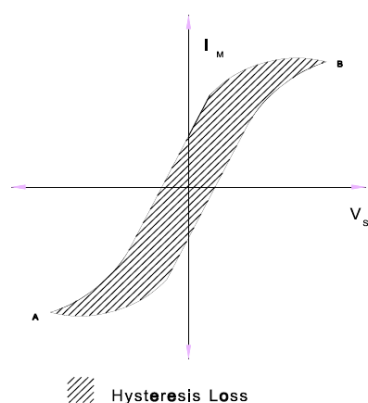
摘要

LEXSECO 于 35 年前研发了第一台商用铁损测试仪，此后，LEXSCO 在各种电动机维修车间环境下进行测试。在世界范围已有成千台 LEXSECO 铁损仪在使用。本文将展示环形变压器型铁损测试的数学基础，并讨论这个测试的方法在电动机维修环境的应用，包括常见的铁芯修复技术。

铁损的概念

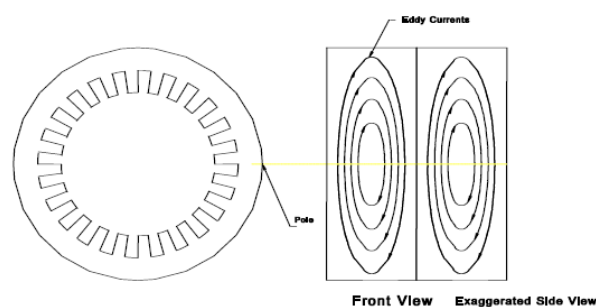
在解释任何确定铁芯损耗和铁芯劣化测试方法之前，应该理解钢材的物理性质。铁材料具有各种电、磁和机械属性，在电气设备设计中应予以考虑。设计的原则一般是最大化输出，同时减小相关的电气和机械损耗。由于设计的原因，电动机具有一定的 I^2R 铜损、风阻和摩擦、和杂散载荷损耗，它们与电动机的特定设计参数相关。同样设计者选择铁芯钢的等级，钢的设计厚度和处理技术，意图减少钢的损耗而不会使材料成本产生明显的增加，这些损耗分为两类：

1. 磁滞损耗
2. 涡流损耗



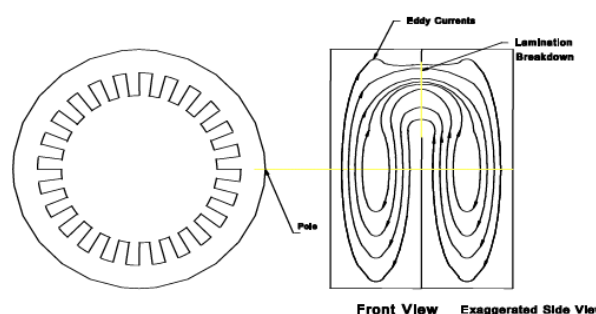
磁滞损耗是由于改变钢的磁极消耗的输入能量，其与交流电流波形的极性变化相关联。铁芯损耗的这一部分损耗由图1中磁滞曲线的阴影部分表示，理想情况下，电压(V_s) 对磁化电流(I_M) 的绘图表示A到B的路径等于B到A的路径，然而，由于此消耗的能量增加，A到B的路径不等于B到A的路径，产生了滞后回路。两个路径之间的面积与磁滞损耗相等。磁滞损耗以发热的形式消耗。

涡流是由于电动机中产生的磁场导致的循环电流，典型的涡流如图 2 所示。



任何电导体至于磁场中，在磁场垂直面形成一个正比于导体截面积和磁场强度的电流涡流。因此，硅钢片的厚度被减小以降低涡流的大小。

当硅钢片之间的绝缘被破坏，涡流将增加，在劣化点，硅钢片之间的电流如图 3 所示。涡流损耗是对这些循环电流的总的输入能量。正如磁滞损耗，涡流损耗也是以热量形式消耗。

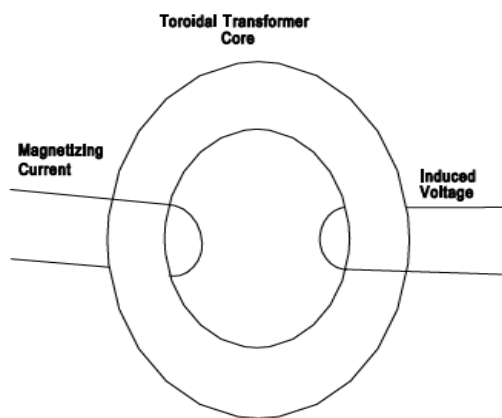


涡流损耗和磁滞损耗之和是电动机的铁芯损耗。

铁芯损耗测试方法

目前，有两种类型的测试方法确定电动机的总铁芯损耗。第一种称为分离损耗方法，在IEEE标准112和CSA 标准390中描述。利用线性回归分析和百分比载荷特性，这个测试方法确定总损耗的每个部分，以及特定电动机的效率。当需要知道铁芯损耗在整个电动机系统的确切性质时，这种测试比任何其它测试更有效。然而，电动机必须在完全运行状态，这限制了其在电动机维修即分类为预防维修方面的应用。其次，测试必须在实验室控制环境下进行。将铁芯损耗测试委托给电动机测试专业实验室是一个高成本而耗时的过程。分离损耗测试的时间和成本保守估计为每天一台电动机，每天\$1000以上，这进一步降低了电动机对非紧急停机的设置。显然，对电动机维修行业，用分离损耗测试方法确定铁芯状态是非常不实际的。

另一种方法非常适于电动机维修行业，通常称为环形变压器测试，或环形测试，如图4所示。



虽然环形变压器测试方法有几种变化，但是它们具有相同的数学基础。传统的“环形测试”和商业铁芯损耗测试仪共同的基本原理是基于称为法拉第电磁定律。根据法拉第定律 (1)，任何硅钢片铁芯，不过其尺寸和设计如何，可用作环形变压器的铁芯，一旦被激励到一个选定的背铁磁通密度，铁芯钢的功率损耗可被测量。更准确地，

$$v = n \left(\frac{d\phi}{dt} \right) \quad (1)$$

这里 v 是感应电压， n 是变压器的匝数， ϕ 是铁芯的磁通。假定，

$$\phi = B_M \times c \quad (2)$$

这里 B_M 是磁通密度， c 是环的截面面积，我们可直接将磁通密度(2)代入法拉第定律 (3)。

$$v = n \left(\frac{d(B_M \times c)}{dt} \right) \quad (3)$$

对于环形测试，法拉第等式中的电压 (v) 保持恒定于固定电源的供电电压。对于一个已知的目标背铁磁通密度(B_M)，用这个等式可求出匝数(n)。通过对铁芯绕上计算的线圈匝数，可获得目标磁通密度。由于劳动强度大并只可用于定子铁芯，环形测试经常被大部分电动机维修车间的维修程序所忽略。

对于商业铁芯损耗测试仪，匝数 (n) 保持为一匝，电压源可以改变，这获得相同的目的并简化了测试步骤。

为了进一步提高测试磁通密度的精度，等式被进一步简化为求取磁通 (ϕ) 而不是电压(v)，这个解决方案是IRD LLC公司的专利，不受波形形状和频率二者的影响，因此这个等式避免了固有的变压器谐波的影响。

一旦达到了目标背铁磁通密度，即可测量激励电流，感应电压，以及激励和结果功率值，通过比较环形变压器初级激励功率和次级结果功率的差，可以确定铁芯钢的损耗。由于使用的导体的尺寸很大，变压器绕线的铜损可以忽略不计。

应用铁损测试

虽然环形变压器测试的原理相对简单，其对各种电动机设计的应用是复杂的并需要进一步的解释。

损耗的瓦特数除以钢的重量得到业界可接受的标准值瓦特每公斤，这个值去除了被测铁芯保留的变量之一，即铁芯的尺寸。现在，一个 500 HP 的定子铁芯可以与一个 5 HP 的定子比较瓦特损耗。评价铁芯损耗测试结果的关键是进行大量随机抽样铁损测试，辅助统计分析，计算出平均铁损、明确的界限、和最大不接受限值。平均铁损由下式给出：

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4)$$

并且统计的标准方差(σ)定义为：

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (5)$$

认真检验绘图结果之后，发现低限值 (L_1) 可表示为

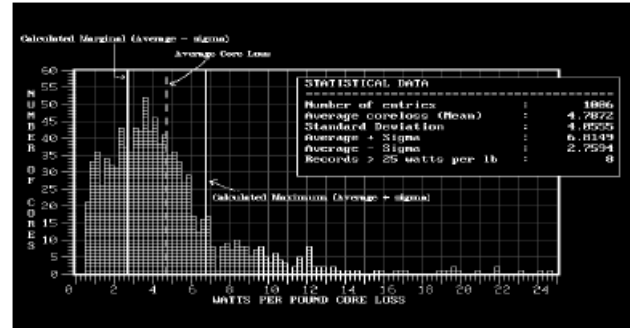
$$L_1 = \bar{x} - \frac{\sigma}{2} \quad (6)$$

高限值(L_2) 可表示为

$$L_2 = \bar{x} + \frac{\sigma}{2} \quad (7)$$

假定平均定子铁芯是界限并需要一些修理，由增加低限值和高限值得到的三个区间可用来分类。处于 0 至低限值(L_1)的电动机铁芯，称为界限值，定义为良好定子铁芯，几乎或完全不需要修理。从界限值至高限值 (L_2)，称为最大限值，定义为边界铁芯，需要更多的修理。大于最大界限值的外部区间，定义为坏的铁芯，这些铁芯通常具有显著的硅钢和片间绝缘系统损坏，不总是能得到满意修理的。

正像任何统计计算一样，样本的大小 (n) 决定了计算的准确度或可信水平，样本统计数量 ($n = 1006$) 如图5中所示。



第二个关键的认识是，这些不接受限值是变化的。原来的-NEMA 结构电动机，由较厚和较低级的铁芯钢制成，具有比T-结构电动机的最大不接受限值还要高的平均铁损，不论功率大小。自从原来的-NEMA 结构被 U-结构然后被 T-结构取代以来，一般测试评价价值趋于降低，它们的平均值比原来的-NEMA分别降低了25%和50%。因此，测试比较应该与类似电动机的样本间进行，并且创立多参数测试。

在多参数测试中，对于每种不同的结构分类 (包括 Pre-NEMA, Original-NEMA, T-Frame, U-Frame, High Efficiency, Above-NEMA and IEC frames) 建立有区别的界限和最大不接受限值，这保证了被测试的铁芯与类似类型和设计的铁芯进行比较。对于Above-NEMA 结构，进行类似比较需要铭牌额定效率和制造日期在相同的期间，同样，对特殊用途电动机，必须进行几乎一致的样本统计，才能提供关于铁芯钢状态的有用的信息。

收集用于统计分析足够大的样本数量不是一件容易的事，要能获得任何可信的水平，一个电动机车间收集数据可能需要一年或更多的时间，为了加快这个进程，应该收集多个电动机维修车间得到的结果。如果以有规律的方式进行统计分析，这个信息将动态跟踪电动机行业的趋势。如果工业部门引入新的电动机结构，可以在相对短得时间内很容易地分析它并将其结合到多参数测试环境。

定子测试之前

商业铁损测试仪比多圈环路测试的一个主要优点是它能够对AC (绕线或鼠笼转子) 和 DC (电枢) 机器的转动部分进行激励。对于绕线转子和电枢, 很容易实施已经描述的方法, 然而对于鼠笼转子, 必须采取一个稍微不同的方法。除非在启动中, 或者在变速应用的瞬态, 例如绕线转子电动机或变频器过程, 随着机器接近同步转速在鼠笼转子中的频率趋近于零。如果转子运行于接近额定转速并不经历频繁的启动/停机, 单独由硅钢劣化引起的转子损耗一般可以被忽略。对于上述描述不包括的转子, 通过转子损耗测试、笼条/端环完整性, 和热点测试得到的结果对确定几乎任何转子的运行完整性可能是非常有帮助的, 但是瓦特每公斤损耗的计算可以被忽略。因为一般转子不是由如铁损测试仪所提供的 60 Hz AC 波形所驱动的, 由60 Hz 测试确定的损耗将包含相对原始设计标准极度放大的磁滞和涡流成分。

维修还是更换?

一旦完成一个铁芯损耗测试, 被破坏的铁芯硅钢区域被识别, 则必须进行修理, 铁芯必须被重新叠加, 或铁芯必须被更换。从经济的角度出发, 决策必须考虑维修部门和最终客户二者的利益。特殊的定子铁芯和 50 HP 以上的定子铁芯可通常被修理和重绕, 因为比更换铁芯的成本低很多。然而, 低于 50HP, 对最终客户更换电动机比修理/重绕铁芯通常具有更高性价比。

除了经济的考虑, 重绕一个损坏的定子铁芯而有满意的结果取决于采用的修理技术。下面列出了常用的修理技术, 但并不意味着排斥其它方法。无一例外, 修理的目的是减少或消除破坏的区域, 同时使铁芯硅钢的变形最小。

裂开: (也称为敲击或拍打) 是最常用的减少瓦特每公斤损耗和清除热点区域的修理方法之一, 开裂一

般提供最好的结果而不需拆卸铁芯硅钢或使铁芯变形。由于可以用标准的维修车间工具在相对短的时间内完成, 应当在尝试任何其它方法之前做。这个方法可以应用于定子、绕线转子或电枢。通过用一个木槌 (或打击楔和锤子) 打击外部硅钢片的背铁部分, 短路的硅钢片将震动并常常被分开。

展开: 像裂开一样, 这个方法不需要从测试铁芯拆卸硅钢, 但是它需要使硅钢片展开分离。在很多情况下, 硅钢片的展开可以清除裂开操作之后存留的热点区域。使用一个螺丝刀或相似的工具耙平受影响的齿区域的表面, 将提供足够的片间分离, 以便施加绝缘。

研磨: 研磨一般用于去除由于机械故障导致的短路的硅钢 (即熔在槽中的铜, 或转子刮蹭定子齿表面)。当处理得当, 可清除受损区域而不需去掉太多的硅钢。锉或研磨受损区域可以有效降低瓦特每公斤损耗。

一旦取得了希望的结果, 修理过程最后和最关键的一步是对铁芯重新绝缘。当铁芯状态的改善是显著的, 足以保证铁芯重绕, 铁芯硅钢片必须重新做绝缘以防止故障区域的复发, 重绕之前铁芯铁芯应恢复到其原来的形状。这个过程的一个可选的步骤是最终的铁损测试, 以证实铁芯状态没有返回到其原来状态 (一些变化是可以接受的)。

结论

存在几种确定电动机铁损的方法, 每种具有其优点和缺点。当合理使用, 商业铁损测试仪在实际电动机维修环境下确定电动机铁芯硅钢状态是有效的, 与一个积极的数据采集和评价策略, 以及合适的修理技术相结合, 它适用于变化的电动机设计, 并保证修理的电动机, 一般对最终用户比新更换更经济, 提供足够投资回报。由于坏的铁芯导致的保修将大大减少, 对电动机维修部门和最终客户一样, 这是一个双赢的局面。