

# UUI 磁件的优异电磁特性是变压器省铜的技术支撑

**UUI is excellent magnetic properties of magnetic transformer province copper technical support**

吴康

**摘要**：本文将从变压器磁件选择面临的挑战述起，再深入对 UUI 新型磁件所具优异特性和 UUI 新型磁件是变压器省铜的有效选择等问题作分析说明。

**关键词**：磁件，电磁特性，涡流损耗，磁通与线圈

**Abstract:** this article will choose challenge from transformer magnetic parts above, further to the UUI with excellent properties and new type of magnetic parts UUI new magnetic pieces is the effective choice of the copper transformer province analysis of the problems.

**Key words:** magnetic pieces, Magnetic properties, Eddy current loss, Magnetic flux and the coil

中图分类号：TM4 文献标识码：A 文章编号：1606-7517(2015)01-3-128

## 1 变压器磁件选择面临的挑战

应该说理想变压器的假设条件是：磁芯材料有足够大的磁导率，其值可等效地看作是无限大；励磁电流足够小，其值可等效地看作是零；磁芯的任何损耗都小到可以忽略；线圈绕组的电阻小到可以忽略；所有绕组之间的磁通都是完全耦合，没有磁通“泄漏”；绕组间的电容小到可以忽略。然而实际变压器并非如此，在磁件特性的选择上面临高频磁件功率损耗的挑战，具体如下：

### 1.1 励磁电流

由于磁芯材料的相对磁导率  $\mu_r$  值是有限的，则励磁电流  $i_m$  将不等于零，在原边绕组中就有励磁电流存在，励磁电流的大小及它引起的损耗与原边绕组的匝数成反比。

### 1.2 磁芯损耗

磁芯损耗包含磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗，它与磁芯的材质及工作条件有关：磁滞损耗与磁滞回线所围成的闭合曲线面积成正比，闭合曲线面积和工作频率成正比。

由法拉第定律可知，当磁芯中磁通交变时，磁芯中亦会产生感应电动势，这个感应电动势会在磁芯材料上产生环形电流。这个环形电流称为涡流，涡流在磁芯上引起的有限功率损耗称为涡流损耗。涡流损耗和频率的平方成正比。

剩余损耗是由于磁化弛豫效应或磁性滞后效应引起的损耗，是磁滞损耗和涡流损耗以外的磁芯损耗。为了减小磁芯损耗，可用高电阻率的磁性材料（如铁氧体磁性材料）或用能减少涡流电流的磁芯结构。

### 1.3 漏磁通

磁通不可能完全耦合所有的线圈，即存在漏磁通的影响。漏磁通主要分为扩散磁通和旁路磁通，漏磁通一旦深入线圈将引起涡流损耗，同时影响线圈的电感量。漏磁通的大小与磁件的磁芯几何结构、线圈绕组的布置方式、线圈的绕制工艺和气隙的设置有关。

### 1.4 分布电容

在变压器的绕组中存在寄生电容。最值得注意的是线圈导线和变压器磁芯之间以及各绕组间的寄生电容。电容量的大小与绕组的几何形状、磁芯的介电常数、变压器的封装材料及线圈的匝数有关。原、副边电容效应是由线圈匝间的电容引起的，尽管匝和匝之间的电容通常是很小的，因电容串联之和要比并联的小，在分析变压器电路时每一个理想绕组两端应并联一个集中的电容，每两个理想绕组间应串联一个集中电容。

## 1.5 绕组电阻

用来绕制线圈的导线，其电阻不为零，因而每个绕组上都会产生电阻损耗。绕组的等效电阻与开关频率、绕组的布置方式、导线截面积及导线长度等有关。

## 1.6 趋肤效应

当导线流过交变电流时，在导线内部将产生与电流方向相反的电动势。由于导线中心较导线表面的磁链大，在导线中心处产生的电动势就比在导线表面附近处产生的电动势大。这样作用的结果，电流在表面流动，中心则无电流，这种由导线本身电流产生之磁场使导线电流在表面流动，就是“趋肤效应”。电流只在导线的表层流过，其表层的厚度称为“穿透厚度或趋肤深度”，它和工作频率的平方根成反比。

由于趋肤效应使导线有效导电面积减小，电流密度有所提高，引起铜耗增加，效率下降。因此工作于高频的变压器就需考虑这一影响。频率增加，穿透厚度减小。在保持电流不变的情况下相当于电流密度增加，铜耗显著增大，使变压器温升增高。在高频变压器中的单根导线，一般线径不超过穿透厚度的2到3倍为宜，线径过大等于浪费铜线。采用绞合线，可较有效地降低电流密度。

## 1.7 邻近效应

相邻导线流过高频电流时，由于磁电作用使电流偏向一边流动。当一些导线被缠绕成一层或几层线匝时，磁动势随绕组的层数线性增加，产生涡流，使电流集中在绕组交界面间流动，这种现象就是邻近效应。邻近效应随绕组层数增加而呈指数规律增加。因此，邻近效应影响远比趋肤效应影响大。弱邻近效应比减弱趋肤效应作用大。

理论和实践都说明，设计工频变压器时使用的简单方法，对设计高频变压器不适用。在磁芯窗口允许情况下，应尽可能使用直径大的导线来绕制变压器。在高频应用中常导致错误，使用直径太大的导线，则会使层数增加，叠加和弯曲次数增多。从而加大了邻近效应和趋肤效应，就会使损耗增加。因此太大的线径和太小的线径一样低效。显然由于邻近效应和趋肤效应缘故，绕制高频电源变压器用的导线或薄铜片都有个最佳值。

## 2 UUI新型磁件所具优异特性

面对高频磁件功率损耗的挑战，应用 UUI 新型磁件是一种有效解决方案。这是为什么呐？因为在磁路参数

( $Ae$ 、 $Le$ 、 $...$ ) 与磁芯材质相同的情况下，与 EE 型中柱开隙磁件相比较，UUI 磁件性能更高，成本更低。具体如下：

性能更高

其一是功率损耗低。UUI 磁件匝数的减少和最佳线径的减小能减少绕组的层数，从而有效减弱邻近效应和分布电容以及它们引起的损耗，同时 UUI 磁件的气隙远离线包，扩散磁通引起的涡流损耗很小；其二是耦合系数高，分数匝影响小。UUI 磁件设计成磁路双气隙，使得磁件的磁密分布更加均匀，并且气隙位置远离线包，扩散磁通对线包影响很小，当  $=0.035Le$  时，UUI 磁件的漏磁在 10kHz~500kHz 时则降低约 20%，耦合系数提高 3%。同时 UUI 磁件由于边柱有气隙，在分数匝应用场合中，0.5 匝原边对变压器的漏磁和原副边的耦合系数影响很小。采用分数匝时耦合系数提高 5%。其三是可靠性高，寿命长磁件的功串损耗降低。发热量减小，温升低，可靠性得到提高，寿命延长，分布电容及绕组间电容减小，使得磁件的输出更加平稳，整机的可靠性提高，寿命延长。

### 成本更低

其一是节省铜材。匝数的减少及最佳线径的减小，直接导致磁件第一组线圈用铜量的大幅度减少，腾出绕线空间，为采用绞合线或较大线径的铜包铝提供有利的条件；其二是磁芯成本低，磁芯结构简单，模具寿命长，磨削量少，机加工容易；其三是一致性好，合格率高。磁芯结构简单，气隙一致性好，磁通密度分布均匀，不同匝数的计算  $AL$  值一致性很好（见下表）；小匝数线圈的电感量不会因为布线位置不同而发生较大的变化。

## 3 UUI 新型磁件是变压器省铜的有效选择

其主要原因有以下几点：

众所周知，交变电流产生交变磁场，交变磁场感应交变电流，在交变电流的作用下，日字型磁回路产生交变磁场即磁通。磁通分为主磁通、扩散磁通和旁路磁通。据此就 UUI 新型磁件的这几个参数对减少涡流和损耗又何影响作说明。

那 UUI 新型磁件的主磁通又是怎样的独特呐？主磁通存储了磁件的大部分能量，其作用是产生外自感磁链。由于这部分磁通未深入线圈窗口内，故它不会在绕组上感应出涡流和损耗。图 1 为 UUI 型磁件和 EE 型磁件的主磁通模拟比较示意图。

从图 1 看出 UUI 新型磁件不会在绕组上感应出涡流和损耗，而 EE 型磁件就有。

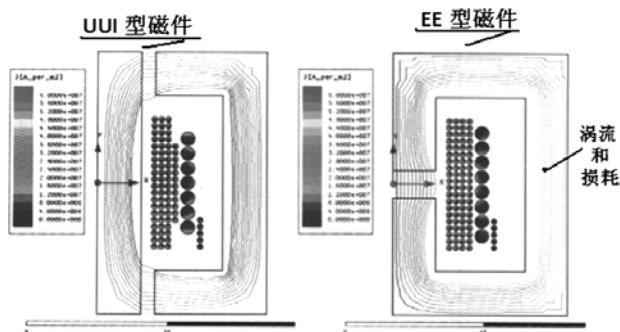


图 1 UUI 型磁件和 EE 型磁件的主磁通模拟比较示意图

UUI 新型磁件的扩散磁通又是怎样的独特呐？通常 EE 型磁件气隙附近的扩散磁通进入磁心窗口，会严重削弱气隙附近绕组的电感量，降低线圈的“电—磁”转换效率，形成低效的填充线圈，同时在气隙附近的绕组上感应出涡流和损耗。而 UUI 型气隙附近的扩散磁通进入磁芯窗口很少，它只是稍微削弱气隙附近绕组的电感量，同时在气隙附近的绕组上感应出很小涡流和损耗。

UUI 新型磁件的旁路磁通又是怎样的独特呐？旁路磁通的作用是产生内自感磁链，同时其穿越磁心柱间的线圈窗口，将在线圈上感应出很大的涡流和损耗，内自感，内自感链成正比，而内自感磁链与绕组窗口旁路磁势以及其所链的匝数有关，UUI 结构的内自感是 EE 型结构的 2 倍以上，从图 2 为 UUI 型和 EE 型磁件的旁路磁势及所链匝数分布图可看出。

\* 通过从实验中作对比分析

任何一匝线圈处于 UUI 型绕线窗口不同位置时，其电感量变化不大，从图 3 为 UUI 型电感值与线包位置关系图可见曲线较平坦；而处于 EE 型绕线窗口不同位置时，电感量变化特别大，从图 4 为 EE 型电感值与线包位置关系图可见曲线有深凹。则可知 UUI 型每一匝线圈“电—磁”

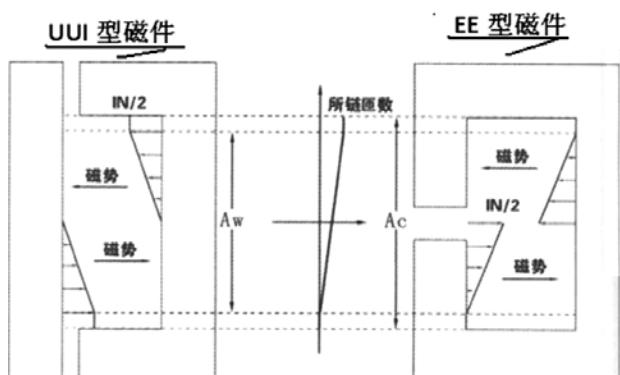


图 2 UUI 型和 EE 型磁件的旁路磁势及所链匝数分布图

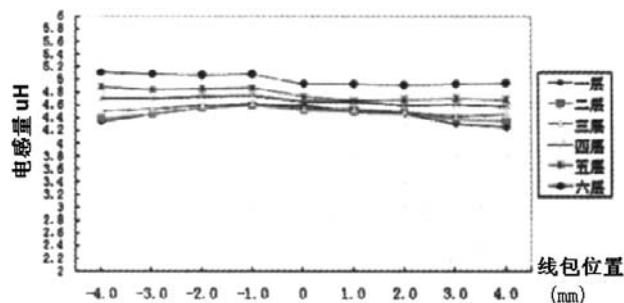


图 3 UUI 型电感值与线包位置关系图

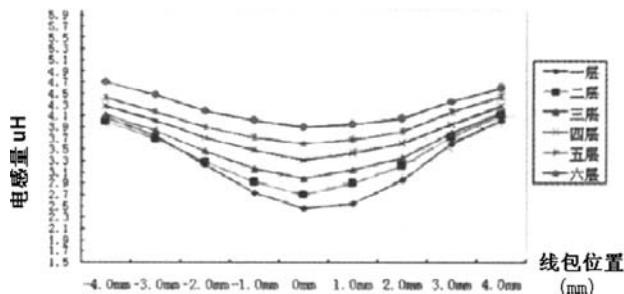


图 4 EE 型电感值与线包位置关系图

转化效果比较均衡。

在此所使用磁芯（磁芯材质为 DTT-P4，磁路气隙量为 1.2mm）作实验对比分析。在本对比实验中，我们用 0.14mm 的漆包线在特制小骨架上缠绕出 6 层每层 8 匝的线包，线圈间缠绕两圈绝缘带作为绝缘层，每层线圈皆制作引出线。线包共有 6 个线圈。线包高度为 1.6mm，小骨架高度为 3.3mm。将带有一上述线包的小骨架分别套在 UUI16.3 磁芯与 EE19 的磁芯的中柱上，小骨架沿磁芯中柱每次移动 1mm，在 0.3V/100KHz 的工作条件下，用 TH2810B 型电感测量仪分别测量各个线圈的电感量，并将实验所得结果绘制成曲线。实验中所使用的磁芯的磁芯材质为 DTT-P4，磁路气隙量为 1.2mm。

#### 4 后话

UUI 磁件设计成磁路双气隙，与 EE 型中柱开隙磁件相比较，磁密分布更加均匀，气隙附近的扩散磁通对线圈的影响很小，旁路磁通产生的内自感大，在磁件性能相当的情况下，UUI 磁件第一组线圈的匝数是 EE 型中柱开隙磁件的 85% 左右。

理论与实践两者都说明：由于邻近效应和趋肤效应的缘故，高频磁件的线径有个最佳值，太大和太小的线径一样低效。UUI 高频磁件由于匝数减少，最佳线径跟着减小。上述两者的减小直接导致 UUI 磁件用铜量的大幅度降低。