

UUI与EE型磁芯变压器功耗对比分析

黄思仲¹, 林金城¹, 肖 镔²

¹ 厦门南磁电子有限公司, 福建厦门 361100

² 中国电子科技集团公司 第九研究所, 四川绵阳 621000

摘要: 高频电子变压器及电感器是开关电源中的重要组成部分, 它的功率损耗约占电源总损耗的30%, 因而此部分功率损耗的大幅度降低可以提高开关电源的性能。基于脉冲变压器的原理, 就UUI磁芯和传统EE型磁芯中柱开隙磁件的功率损耗进行定性比较分析, 结果表明开关电源采用UUI磁芯电子变压器时, 变压器本身的功率损耗可以降低20%。

关键词: UUI磁芯, EE型磁芯, 电子变压器, 电感器, 功率损耗

Comparative analysis on the power loss between UUI and EE core transformers

HUANG Si-zhong¹, LIN Jin-cheng¹, XIAO Bin²

¹Xiamen Nanci Electronics Co, Ltd, Xiamen 361100, China

²Ninth Institute, China Electronics Group Corporation, Mianyang 621000, China

Abstract: High frequency magnetic units (electronic transformers and inductors) are important components in switching power supply, and it accounts for about a third of power loss in overall power loss. Thus, amount of reduction in magnetic unit power loss can greatly increase the efficiency of switching power supply. Based on theory of pulse transformer, this article compared and analyzed the power loss of UUI and EE magnetic units. The result suggests that the power loss of electronic transformer had a 20% reduction for switching power supply using UUI core transformer.

Keywords: UUI core, EE core, electronic transformer, inductor, power loss

1 引言

从2009年开始, 南磁公司与客户互动, 在绿色照明、加湿器和充电器等产品上, 持续不断地进行了许多UUI新型变压器和电感器(本文统称为磁件)与传统EE型中柱开隙磁件的对比试验。六年多一千多例的试验结果表明, 在磁芯材质相同、磁路参数相近、磁件电气性能相当的条件下, UUI新型磁件具有以下特点:

(1) UUI新型磁件线圈的匝数是EE型磁芯中柱开隙磁件的85%;

(2) UUI新型磁件的最佳线径是EE型磁芯中柱开隙磁件的90%;

(3) UUI新型磁件的绕组ACR是EE型磁芯中柱开隙磁件的80%;

(4) 采用UUI新型磁件时, 整机的转换效率提高了1%左右。

2 脉冲变压器的等效电路

2.1 理想变压器

理想变压器模型与实际变压器的等效电路如图1和图

2 所示,理想变压器的假设条件是:

- (1) 磁芯材料有足够大的磁导率,其值可等效地看作是无限大 ($\mu \rightarrow \infty$);
- (2) 励磁电流足够小,其值可等效地看作是零 ($i_m=0$);
- (3) 磁芯的任何损耗都小到可以忽略;
- (4) 线圈绕组的电阻小到可以忽略;
- (5) 所有绕组之间的磁通都是完全耦合,没有磁通“泄漏” ($k=1$);
- (6) 绕组间的电容小到可以忽略。

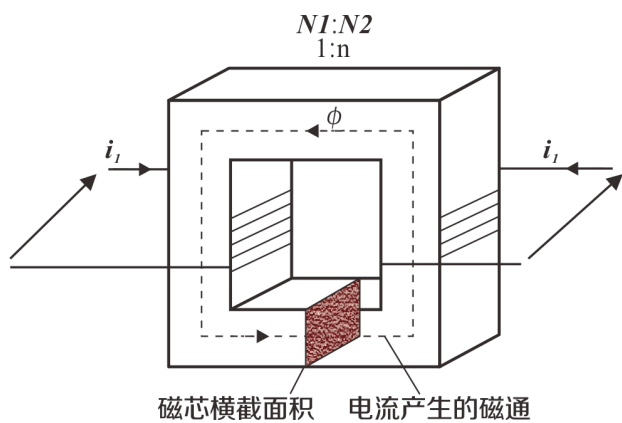


图1 理想变压器模型

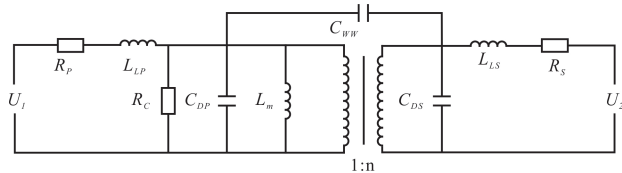


图2 实际变压器等效电路

2.2 实际变压器及等效电路

实际变压器总是不满足理想变压器的假设条件,主要表现在下述几方面:

- (1) 励磁电流:由于磁芯的磁导率 (μ) 是有限的,所以在原边绕组中就有励磁电流存在,即在等效电路中增加一个和原边线圈并联的电感 L_m ;
- (2) 磁芯损耗:磁芯损耗包括磁滞损耗和涡流损耗,在等效电路中用一个并联在原边绕组两端的电阻 R_c 等效。
- (3) 绕组电阻:绕制变压器线圈的导线其电阻不为零,所以存在电阻损耗,即在等效电路中原边和副边线圈分别

等效为串联电阻 R_p 和 R_s 。

(4) 漏磁通:原边和副边的磁通不可能完全耦合,即存在漏磁通,包含旁路磁通和扩散磁通,即在等效电路的理想原边线圈和副边线圈分别增加一个串联电感 L_{lp} 和 L_{ls} 。

(5) 分布电容:线圈导线和变压器磁芯之间以及各绕组之间的寄生电容,即在等效电路中原边和副边线圈两端分别并联一个集中的电容 C_{dp} 和 C_{ds} ;

(6) 绕组间电容:变压器原边和副边绕组之间的电容 C_{ww} ;

2.3 高频电流效应

高频下存在两种效应:趋肤效应和邻近效应。前者指导线流过交变电流时,电流趋于在表面流动,导线中心无电流的现象;后者指相邻导线流过高频电流时,由于磁电作用使电流偏向一边的特性。

理论和实践都说明,设计工频变压器时使用的简单方法,对高频变压器不适用。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,损耗增大。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的缘故,绕制高频电源变压器用的导线或薄铜片存在一个最佳值。

3 小线包电感对比实验

3.1 实验模型与方法

为了比较两种磁芯的电感特性,制作了简易小线包进行试验。简易线包采用直径 0.14mm 的漆包线绕制,共 6 层,每层绕 8 圈。小线包装在磁芯的中柱上,线包沿中柱上下移动,每移动一次测量 6 个电感数据,总共需测量 9 次。

3.2 实验数据

图 3、图 4 和表 1 给出了两种磁芯电感与线包位置的关系,可以看到,EE 型磁芯电感器线圈的电感量在磁路的气隙处,不同层次线圈的电感量变化较大;而对应 UII 新型结构磁芯电感器,其线包上不同层次线圈的电感量的变化很小。

3.3 不同区域电感量

两种磁件的最大磁密位置如图 5 所示。可以看出:

EE 型磁芯的特点:(1) A3、B3、C3 的感量最高;(2)

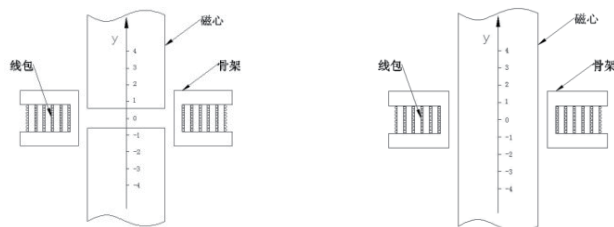
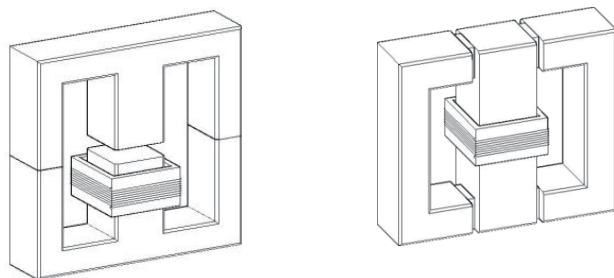


图3 电感对比实验模型：(a) EE型磁芯，(b) UUI型磁芯

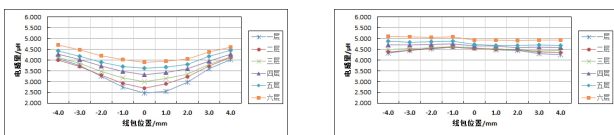


图4 各层电感与线包位置的关系：(a) EE型磁芯，(b) UUI磁芯

表1 电感与线包位置的关系实验数据 单位： μH

EE型线包中心横截面与磁路气隙中心横截面之间的距离											UUI线包中心横截面与磁路气隙中心横截面之间的距离										
绕组											绕组										
-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	0	1.0	2.0	3.0	4.0			-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	0	1.0	2.0	3.0	4.0		
4.069	3.740	3.238	2.741	2.462	2.556	2.965	3.605	4.025	一层		4.337	4.457	4.537	4.599	4.586	4.489	4.463	4.306	4.254	一层	
4.007	3.700	3.286	2.924	2.702	2.908	3.211	3.722	4.126	二层		4.378	4.457	4.542	4.596	4.520	4.495	4.489	4.376	4.343	二层	
4.130	3.839	3.478	3.166	2.996	3.141	3.356	3.790	4.160	三层		4.495	4.528	4.586	4.618	4.546	4.526	4.488	4.424	4.450	三层	
4.272	4.026	3.716	3.486	3.323	3.433	3.604	3.960	4.275	四层		4.695	4.702	4.722	4.743	4.643	4.644	4.586	4.602	4.570	四层	
4.426	4.170	3.905	3.705	3.613	3.676	3.810	4.176	4.452	五层		4.877	4.838	4.847	4.867	4.732	4.672	4.683	4.697	4.678	五层	
4.708	4.482	4.195	4.016	3.903	3.955	4.053	4.368	4.599	六层		5.115	5.080	5.059	5.070	4.925	4.919	4.908	4.923	4.937	六层	

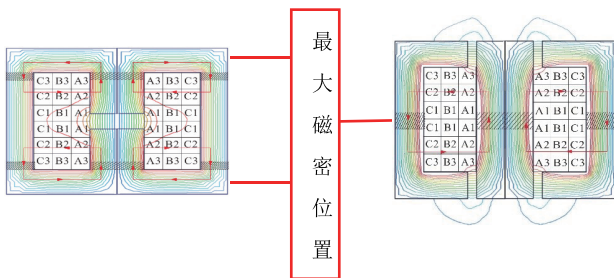


图5 不同区域电感量分布：(a) EE型磁芯电感，(b) UUI型磁芯电感

B2、C2、C1的感量中等；(3) A2、B1的感量较小；(4) A1的感量最小；(5) 受骨架影响，感量最高的位置无法充分绕满线圈。

UUI型磁芯的特点：(1) A1的感量最高；(2) A3的感量最低；(3) 其余区域的感量都很高；(4) 受骨架影响，感量最低的位置(A3)线圈的匝数不是很多。

在最大磁密相同的情况下，EE型磁件100匝的电感量与UUI新型磁件85匝的电感量相当。

4 UUI新型磁件的特点

(1) 理论和实践都说明，设计工频变压器时使用的简单方法，对高频变压器不适用。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，使损耗增加。因此太大和太小的线径一样低效。显然由于邻近效应和趋肤效应的缘故，绕制高频电源变压器用的导线或薄铜片都有个最佳值。

(2) 与EE型中柱开隙磁件相比较，在磁芯材质相同、磁路参数相近、最高磁通密度相近、磁件电气性能相当条件下，UUI磁件的匝数较之EE型中柱开隙磁件降低了15%，由于趋肤效应和邻近效应的缘故，匝数减少最佳线径随之减小，多年的应用实例统计结果表明，采用UUI磁件时，最佳线径可以减小10%左右，同时绕组交流电阻可以降低20%左右。

(3) UUI新型磁件把磁路气隙化一为二，同时从线包中部移到线包的两侧，线圈基本上不受扩散磁通的影响，UUI新型磁件特殊的气隙位置设置，导致其旁路磁通较EE型中柱开隙磁件的小得多。

下面，我们以UUI磁件的以上特点为基础，就UUI磁件和传统EE型中柱开隙磁件的九个功率损耗项目的降幅进行推算。

5 高频磁件损耗来源

5.1 励磁电流、磁芯、交流电阻、扩散磁通和旁路磁通引起的功率损耗

励磁电流所引起的损耗与线圈匝数的平方及线圈的交流电阻成正比，即UUI新型磁件该项损耗是EE型中柱开隙的58% (0.852×0.8)，下降了42%。

磁芯损耗主要由主磁通引起，它与磁芯的材质、工作频率、磁通密度及工作温度有关。由于UUI新型磁件和EE型的主磁通相似，所以两者相当。

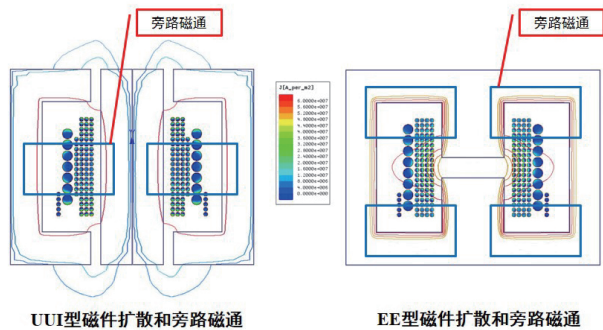


图 6 旁路磁通分布图

绕组引起的损耗与 ACR 成正比，由于 UII 新型磁件的绕组交流电阻是 EE 型的 80%，因此 UII 新型磁件该项损耗较 EE 型降低 20%。

UII 新型磁件把磁路气隙化一为二，同时从线包中部移到线包的两侧，线圈基本上不受扩散磁通的影响，扩散磁通引起的损耗很小几乎为零。必须注意的是：气隙处三倍气隙距离范围内磁通密度很高，在该区域内的导磁导体将产生高频热效应，采用 UII 新型磁件时，气隙处五倍气隙距离范围内不得存在导磁导体。

UII 新型磁件的旁路磁通比 EE 型的要小很多，其对应的损耗较 EE 型至少降低 80%。表 2 是励磁电流、磁芯、交流电阻、扩散磁通和旁路磁通引起的功率损耗。

表 2 励磁电流、磁芯、交流电阻、扩散磁通和旁路磁通引起的功率损耗

序号	损耗项目	影响因素	EE型	UII型	幅度
1.	励磁电流	线圈匝数和交流电阻	高	低	↓42%
2.	磁芯损耗	材质、磁密及密度	—	—	0%
3.	绕组电阻	交流电阻	高	低	↓20%
4.	扩散磁通	频率、线径及气隙设置	高	低(几乎为零)	↓90%
5.	旁路磁通	频率、线径及气隙设置	高	低	↓80%

5.2 分布电容、绕组之间电容、趋肤效应和邻近效应引起的功率损耗

(1) 邻近效应引起的损耗随着线圈层数的增加而按指数规律递增 [4]。假设 EE 型磁件线圈的匝数是 100，每层的匝数为 20，那么层数为 5；由于 UII 磁件线圈的匝数是 EE 型的 85%；最佳线径是 EE 型的 90%，即线圈的匝数变为 85，每层的匝数变为 22.2，层数仅为 3.825 层。从表 3 中可以清楚地看出，UII 磁件由于邻近效应所引起的功率

表 3 多层线圈表面涡流

序号	损耗项目	影响因素	EE型	UII型	幅度
6.	邻近效应	层数与匝数	高	低	↓48%
7.	分布电容	匝数、层数及绝缘厚度	高	低	↓20%
8.	绕组之间的电容	绕组间绝缘厚度	—	—	0%
9.	趋肤效应	频率、线径、长度及股数	高	低	↓15%

损耗只是 EE 型的 52%(893/1700)。

(2) 变压器线圈总分布电容的大小主要与线圈的层数 $(n-1)$ 成正比 [3]。由于 UII 新型磁件线圈匝数是 EE 型的 85%，最佳线径是 EE 型的 90%，线圈的层数是 EE 型的 76.5%，因此 UII 新型磁件分布电容引起的损耗较 EE 型至少降低 20%。

(3) 绕组之间的电容引起的损耗，它的影响只有在工作频率高于变压器的上限截止频率时才起作用。在这方面，两者差别不大。

表 4 分布电容、绕组之间电容、趋肤效应和邻近效应引起的功率损耗

序号	损耗项目	影响因素	EE型	UII型	幅度
6.	邻近效应	层数与匝数	高	低	↓48%
7.	分布电容	匝数、层数及绝缘厚度	高	低	↓20%
8.	绕组之间的电容	绕组间绝缘厚度	—	—	0%
9.	趋肤效应	频率、线径、长度及股数	高	低	↓15%

(4) 趋肤效应所引起的损耗与频率、导线线径、长度及股数有关。由于 UII 磁件线圈的匝数较 EE 型减少 15%，因此 UII 型该项损耗较 EE 型降低 15%。

6 高频磁件功耗数值分析

6.1 权重假设

高频变压器的功耗分为九个项目：磁芯损耗及绕组电阻、扩散磁通、邻近效应、旁路磁通、分布电容、励磁电流、趋肤效应和绕组之间的电容引起的损耗。在这些损耗中，磁芯损耗和绕组损耗最高；扩散磁通和邻近效应较高；旁路磁通、分布电容和励磁电流较低；趋肤效应和绕组间电容最低。我们根据“二八法则”，对上述九项损耗所占比例按表 5 的模拟权重进行分配：

下面，我们根据前述九个项目的功耗降幅推算结果，结合本模拟权重分配，对高频磁件功率损耗的降低幅度进行推算汇总。

6.2 数值分析汇总

表 5 高频磁件功耗项目

序号	高频磁件损耗项目	权重模拟	权重模拟
1.	磁芯损耗	35~40%	75%
2.	绕组电阻	35~40%	
3.	扩散磁通	7~8%	15%
4.	邻近效应	7~8%	
5.	旁路磁通	3%	8%
6.	分布电容	3%	
7.	励磁电流	2%	
8.	趋肤效应	1.50%	2%
9.	绕组之间的电容	0.50%	
合计		—	100%

在磁芯材质相同，磁路参数相近，最高磁通密度相近，磁件电气性能相当及工作频率 45KHz 左右的条件下：UUI 新型磁件由于气隙外移，扩散磁通引起的损耗极小；同时线圈匝数减少 15%，最佳线径减小 10%，层数减少 23%。线圈绕组的 ACR 降低 20%。从而较大幅度降低了邻近效应、旁路磁通和励磁电流引起的损耗；有效地减少绕组电阻、分布电容和趋肤效应引起的损耗。采用 UUI 磁件替代传统 EE 型中柱开隙磁件时，磁件本身功率损耗可以降低 20%。

表 6 功率损耗降幅模拟分析

高频磁件、功率损耗项目	影响因素	幅度 (%)	影响程度	权重	模拟 1 (%)	模拟 2 (%)	模拟 3 (%)
磁芯损耗	材料、磁密、频率及温度	0.	极大	35-40.	35.0.	0.00.	37.5.
绕组电阻	ACR 值	1.20.	极大	35-40.	40.0.	0.00.	37.5.
扩散磁通	频率、线径及气隙位置	1.90.	较大	7-8.	8.0.	7.20.	7.5.
邻近效应	层数与匝数	1.48.	较大	7-8.	7.0.	3.36.	7.5.
旁路磁通	频率、线径及气隙位置	1.80.	较小	3.	3.0.	2.40.	3.0.
分布电容	匝数、层数及绝缘厚度	1.20.	较小	3.	3.0.	0.60.	3.0.
励磁电流	铁窗匝数和 ACR	1.42.	很小	2.	2.0.	0.84.	2.0.
趋肤效应	频率、线径、长度及股数	1.15.	很小	1.50.	1.5.	0.23.	1.5.
绕组之间的电容	绕组匝绝缘厚度	0.	极小	0.50.	0.5.	0.00.	0.5.
合计		—	—	—	100.	22.63.	100.

7 应用实例

7.1 实例一

UUI19 变压器替代 PQ26 变压器，应用于“中山子弹头照明” 35W 的 LED 灯驱动器上。对比分析如图 7 所示，具体性能参数改善结果如下：(1) 磁芯磁路面积 Ae 增加 8.5%，气隙量减小 19%；(2) 绕组铜重减小 30%，磁芯重量减小 12%；(3) 初级绕组的交流电阻降低 36%，漏感降低 12%；(4) 变换效率提高 3.8%，磁件温升降低 6.4℃。

7.2 实例二

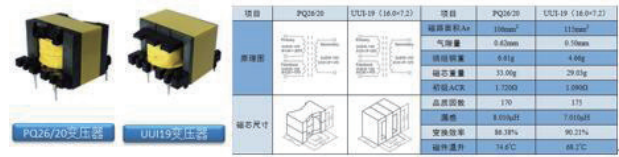


图 7 UUI19 变压器替代 PQ26 变压器的对比

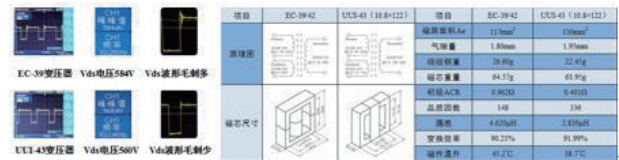


图 8 UUI43 变压器替代 EC39 变压器的对比

UUI43 变压器替代 EC39 变压器，应用在“四川川奇”产 75V3A 电瓶车充电器上。对比分析如图 8 所示，具体性能参数改善结果如下：(1) 磁芯磁路面积 Ae 增加 11%，气隙量加大 8%；(2) 绕组铜重减少 15%；(3) 初级 ACR 降低 58%，Q 值提高 128%；(4) 漏感降低 39%，变换效率提高 1.78%；(5) 磁件温升降低 6.5℃。(6) Vds 电压降低 24V。

参考文献

- [1] 黄凯. 高频磁性元件绕组损耗的研究 [J]. 河北工业大学, 2012.
- [2] 黄健聪, 严思幸, 叶治政, 等. 脉冲变压器的磁学 [J]. 电源技术应用, 2000, (7): 322-326.
- [3] 陶星芳. 开关电源原理与设计 (连载 73) 开关电源变压器的分布电容 (part2) [EB/OL]. <http://www.eetrend.com/blog/100022457>, 2009-10-26
- [4] 张国权, 徐月朗, 程毅. 开关电源中线圈的邻近效应的研究 [J]. 磁性元件与电源, 2012, (10): 119-121.
- [5] 黄文缘, 黄进, 陈荣敬. 电瓶车充电器模拟试验 [Z]. 南磁公司内部资料. 2016..

作者简介

黄思仲(1964—)，男，福建南安人，1985 年毕业于南京化工学院化工机械专业，长期从事软磁磁件的研究和生产工作。