

不同激励条件对铁氧体磁心损耗的影响

颜 冲^{1,2}, 何 俊², 郭晓东²

(1. 中国计量学院 东磁研究院, 浙江杭州 310018;

2. 横店集团东磁股份有限公司 软磁事业部, 浙江东阳 322118)

摘 要: 在软磁器件的设计中, 磁心损耗的计算是设计人员的重要工作内容。在不同的激励条件下, 磁心的损耗也不同。综合介绍了直流偏置、矩形波激励和方波激励条件下铁氧体磁心损耗模型。在有直流偏置的正弦波激励下, 铁氧体磁心损耗会增大。在不同激励条件下通过对经典斯坦麦茨 (Steinmetz) 公式进行修正后其计算结果更符合实际情况。

关键词: 铁氧体磁心; 损耗; 直流偏置; 矩形波激励; 方波激励

中图分类号: TM277+.1

文献标识码: B

文章编号: 1001-3830(2011)02-0037-06

Influence of different excitation waveforms on ferrite core loss

YAN Chong^{1,2}, HE Jun², GUO Xiao-dong²

1. DMEGC Research Institute, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Soft Magnetic Material Division, Hengdian Group DMEGC Magnetism Co, Ltd, Dongyang 322118, China

Abstract: In the design of soft magnetic devices, calculation of core loss is an important task. The core loss is different for different excitation. The models of ferrite core loss were introduced under different excitation conditions respectively, such as DC-bias, rectangular wave and square wave excitations. The core loss increases due to DC-bias under sinusoidal wave excitations. It is verified by measurement that the accuracy is sufficient for modified traditional Steinmetz calculation equation.

Key words: ferrite core; power loss; DC-bias; rectangular wave excitation; square wave excitation

1 引言

软磁铁氧体材料因为其高电阻率、低损耗而在高频磁性元件中得到广泛应用。在这些磁性元件中, 磁心损耗是设计人员较为关注的重要参数。一方面可以根据磁心损耗来进行器件的热设计, 使产品符合规定的效能标准和避免产品过热而烧毁设备; 另一方面, 可以根据磁心损耗数据来选择合适的磁心尺寸, 避免磁心尺寸设计不当而造成材料浪费, 从而降低生产成本。

一般在厂家的产品目录中, 会提供铁氧体材料和不同型号器件在正弦激励条件下的磁心损耗数据。但即使是正弦波激励状况, 实际的应用条件如频率、磁通密度等往往也各不相同, 铁氧体厂家不

可能提供所有应用条件下的磁心损耗数据。为了得到正弦波激励时不同频率和工作磁通密度下的磁心损耗, 设计人员通常借助斯坦麦茨 (Steinmetz) 经验公式^[1]计算磁心损耗:

$$P_{cv} = C \cdot f^{\alpha} \cdot B^{\beta} \quad (1)$$

式中 P_{cv} 是铁氧体磁心损耗密度; C 是一个与铁氧体材料有关的系数; f 是工作频率; B 是交流工作磁通密度幅值; α 、 β 是待定系数, 一般 $1 \leq \alpha \leq 2$, $2 \leq \beta \leq 3$ ^[2]。

但在磁性元件的实际应用中, 其激励信号往往并不是正弦波, 可能是矩形波、方波、三角波等信号, 即使是正弦波激励, 有时往往会存在直流偏置磁场。在非正弦波激励和存在直流偏场的情况下, 斯坦麦茨经验公式显然不再适用, 需要进行修正。本文对直流偏置、矩形波激励、方波激励等情况下的磁心损耗计算模型进行了介绍。

收稿日期: 2010-07-26 修回日期: 2010-08-31

作者通讯: 颜冲 E-mail: yanc8888@yahoo.com.cn

2 直流偏置对磁心损耗的影响

软磁元件一般可分为电感与变压器两大类,它们在实际应用中所发挥的作用是不同的。电感是一个储能元件,而变压器则是一个能量传输元件。在能量的传输或储存过程中不可避免地会引起损耗,这种损耗就是磁性元件的损耗,包括铜损和磁损(磁心损耗)。

磁心损耗是由磁心内部变化的磁场所引起的。由法拉第定律可知磁通密度是电压的函数,由安培定律知道磁场强度则是电流的函数。这里的电流对电感而言就是流过线圈的电流,但对变压器来讲则是流过励磁电感的电流。所以,通常变压器所产生的磁场是一个纯粹的交变磁场,没有任何直流分量,而电感却往往工作在具有较大直流分量的交变磁场中。

以往的磁心损耗计算通常认为直流偏置对损耗的影响较小,所以一般都不考虑直流偏置磁场对磁心损耗的影响。所以自软磁铁氧体材料发明以来,虽然人们对纯正弦波激励下的磁心损耗进行了大量研究,但直流偏置对磁心损耗影响的研究并不多^[3~11]。事实上这种影响是存在的,在一定情况下会变得相当显著。

文献[4]被认为是近年来第一篇关于直流偏置对铁氧体磁心损耗影响的论文。作者通过实验对直流偏置下磁心损耗进行了研究,发现过去认为直流偏置对磁心损耗影响较小的观点值得商讨。实验结果表明当交变磁场幅度较大时,这种影响已经不能忽略;此外,作者还发现即便是在中等磁场下,直流偏置磁场的影响就已经不容忽视。因为测量发现,相同的交流磁场下,直流偏置磁场的存在会产生数倍于纯交变磁场下损耗的额外磁心损耗。该文的工作对磁性元件设计人员来讲具有很高的参考价值,但是其分析只通过图表的形式给出结果,影响了其在工程计算中的应用。

文献[5]认为直流偏置会使磁心损耗增大。忽略剩余损耗,通过把直流偏置对磁心损耗的影响分解成对磁滞损耗和涡流损耗的影响,给出了直流偏置影响下的磁心损耗计算方法的复杂公式^[5]:

$$P_c(s, f, B_{ac}) = \frac{(a_0 + a_1 s) B_{ac}^{x_1} f}{\sqrt{\left(\frac{1}{m} \left(1 - \left(\frac{s}{s_0} \right)^2 \right) \right)^2 + s^2}} + \frac{k_1 B_{ac}^{x_2} f^2}{\rho} \sqrt{\left(\frac{m_1 (s_1^2 - s^2)}{s_1^2} \right)^2 + \left(\frac{s}{f} \right)^2} \quad (2)$$

式中 $s=B_{dc}/B_{ac}$, f 、 B_{dc} 、 B_{ac} 和 ρ 分别为工作频率、直流磁通密度、交流磁通密度幅值和材料电阻率;其它为待定参数。式中第一项表示直流偏置对磁滞损耗的影响,第二项表示直流偏置对涡流损耗的影响。用该公式计算的 Magnetics 公司的 W 牌号铁氧体材料在直流偏置下的理论磁心损耗与实际测试结果的比较如图 1 所示。理论值与实际值吻合得较好,误差基本在 5% 以内。但该公式过于复杂,待定参数较多,在实际应用中比较麻烦。

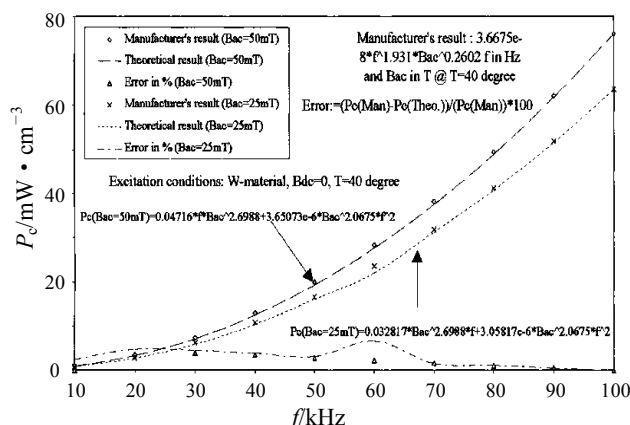


图 1 直流偏置下铁氧体磁心损耗的理论计算值与实际测试值比较^[5]

为了便于工程计算,设计人员总是力图对复杂的计算公式进行简化^[6,7,11]。如前所述,斯坦麦茨(Steinmetz)经验公式广泛用于工程计算,但在该公式中的待定系数 C 没有考虑直流偏置磁场,所以把该公式用于有直流偏置的磁心损耗计算时,应当对该系数进行修正。最简单的办法就是在斯坦麦茨(Steinmetz)经验公式中乘上一个修正系数 C_{new} 。即把公式(1)修改为:

$$P_{cv} = C_{new} \cdot C \cdot f^\alpha \cdot B^\beta \quad (3)$$

文献[6]通过对 Nicera 公司的 NC-2H 的 $\varnothing 30 \times 13 \times 9 \text{ mm}$ 铁氧体磁心在不同测试条件下的结果进行分析拟合,得到:

$$C_{new} = 1 + 0.010023 \cdot B_{dc} \cdot e^{-B_{ac}/136.4} \quad (4)$$

在 100kHz 正弦波激励下,不同直流偏置时磁心损耗的计算值与实测值如图 2 所示。其偏差一般为 5% 左右,有较高的精度。

文献[11]同样通过对 Nicera 公司的 NC-2H 的 $\varnothing 30 \times 13 \times 9 \text{ mm}$ 铁氧体磁心在不同测试条件下的结果进行分析拟合,得到:

$$C_{new} = (1 + B_{dc}^{1.81144} \cdot B_{ac}^{-2.0703})^{0.01622 B_{ac}} \quad (5)$$

用该式分析 Nicera 公司 NC-2H 的 $\varnothing 30 \times 13 \times 9 \text{ mm}$

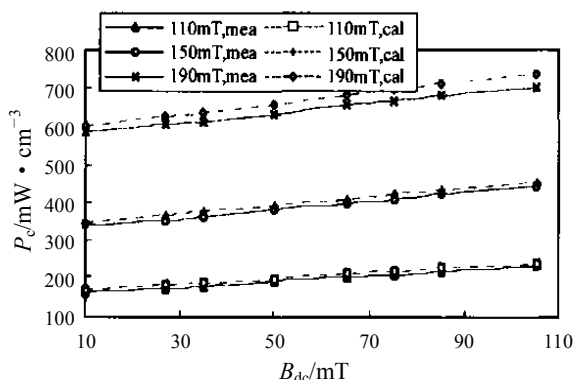
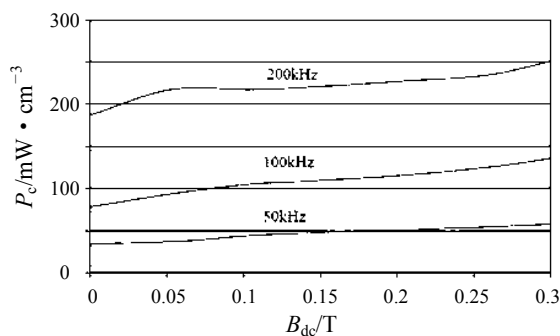
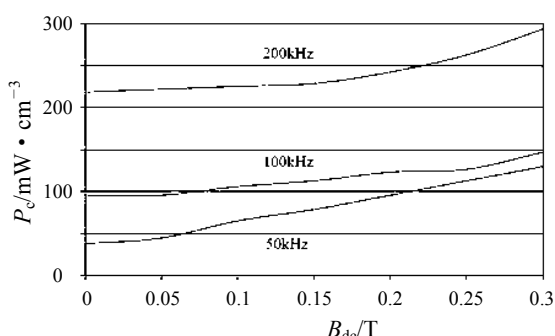


图2 100kHz 时 NC-2H 铁氧体磁环
直流偏置下的损耗实测值与计算值^[6]



(a) $\varnothing 25 \times 15 \times 10$ mm 磁心



(b) $\varnothing 30 \times 18 \times 6$ mm 磁心

图4 直流偏场对不同尺寸磁心损耗的影响^[10]

铁氧体磁心直流偏置下的磁心损耗计算值与实测值的偏差在 10% 以内。

文献[7]通过对 Magnetics 公司的 0F-44925-TC 铁氧体磁心在不同测试条件下的结果进行分析拟合, 得到:

$$C_{\text{new}} = (1 + B_{\text{dc}}^2 \times B_{\text{ac}}^{-2})^{6.894 B_{\text{ac}}} \quad (6)$$

计算结果与实测值也能够较好地吻合。

以上结果都是理想状况下的近似公式。在一般的应用频率 (低于 500kHz) 下, 磁心损耗主要以磁滞损耗为主。而磁滞损耗理论上等于磁滞回线的面积。当直流偏场作用于磁心时, 其磁滞回线会增大^[10], 从而使磁心损耗上升。图 3 是 MMG F49 材料在不同直流偏场下的磁滞回线。测试磁心为 $\varnothing 25 \times 15 \times 10$ mm 环形磁心, 测试条件为 100kHz/50mT。

实际上, 直流偏置对磁心损耗的影响比较复杂。除工作频率、交流磁通密度和直流偏场的影响外, 温度、磁心尺寸和形状等对磁心损耗都有影响。Baguley^[10]发现即使是同一类型的磁心, 其尺寸不同时, 直流偏场对磁心损耗的影响也不同。Baguley 分别对 MMG F49 材料的 $\varnothing 25 \times 15 \times 10$ mm 和 $\varnothing 30 \times 18 \times 6$ mm 两种尺寸的磁心在不同直流偏场下的损耗分别进行测试, 测试时交流磁通密度为

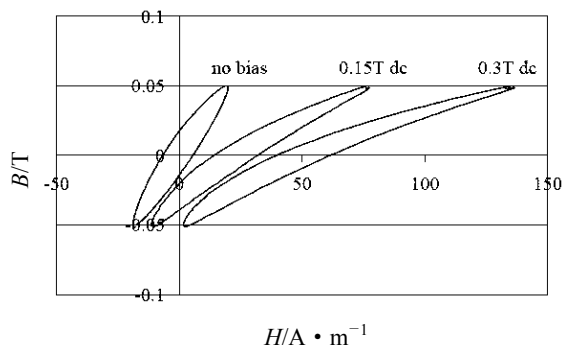


图3 不同直流偏场下的磁滞回线^[10]

50mT, 结果如图 4 所示。从图中看出, 在直流偏场作用下, $\varnothing 30 \times 18 \times 6$ mm 磁心的损耗增加得更快。当测试频率为 50kHz 时损耗上升尤其显著, 可能是该频率下磁心产生了铁磁共振^[10]。

3 矩形波激励下的磁心损耗

前面已经介绍过, 在软磁元件设计中, 设计人员目前广泛使用的磁心损耗计算方法是 Steinmetz 公式, 或者直接查阅软磁铁氧体材料生产厂家提供的产品数据手册中的图表来获得。但是无论是经典 Steinmetz 公式还是厂家数据手册上的图表仅仅适用于正弦波激励的情况。然而在高频功率变换器等应用中, 激励信号很少是正弦波, 通常是工作在矩形波信号激励或方波信号激励之下。所以正弦波激励产生的磁心损耗与矩形波或方波产生的磁心损耗之间的关联就成为设计人员要迫切解决的问题。本节介绍矩形波激励对磁心损耗的影响, 下节介绍方波激励对磁心损耗的影响。

Chen^[12]早在上世纪 70 年代就对非正弦波激励下磁心损耗进行了研究。此后学术界对矩形波、方波乃至任意波形激励下的磁心损耗问题进行了大量研究^[13~18]。其中对非正弦波激励利用傅立叶展开和对 Steinmetz 公式进行修正最为著名。

对非正弦波激励的傅立叶展开最初由 Rudy Severns^[13]提出。其基本思想是：首先将非正弦波激励信号作傅立叶分析，得到各次谐波的幅值和频率，然后利用 Steinmetz 公式分别计算各次谐波所产生的磁心损耗，最后将各次谐波的损耗叠加便得到总的磁心损耗值，此时得到的结果就是非正弦波激励信号下所产生的磁心损耗。

分析不难发现傅立叶分解方法存在以下问题：由于铁氧体磁心是一个非线性系统，而傅立叶分解之后再作叠加则是将非线性系统作线性系统来处理，这本身就引入了误差；为了较好地反映非正弦波信号，分解时通常要计算到较高次谐波^[19]，当谐波频率超出磁心所能正常工作的频率范围，在这种情况下使用 Steinmetz 公式来计算磁心损耗已经没有实际应用价值了。

Albach 等^[16]通过对 Steinmetz 公式进行修正来计算非正弦波激励下的磁心损耗。他们认为磁心损耗主要与磁化速率 $\frac{dB}{dt}$ 相关联。修正的 Steinmetz 公式如下：

$$P_{cv} = C \cdot f_{eq}^{\alpha-1} \cdot f \cdot B^\beta \quad (7)$$

式中 f_{eq} 称为等效频率，其值由下式确定：

$$f_{eq} = \frac{2}{\Delta B^2 \pi^2} \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt \quad (8)$$

由此可得矩形波激励信号下的磁心损耗计算公式为^[7]：

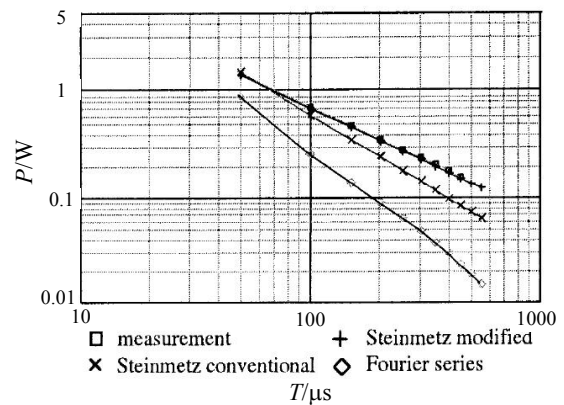


图 5 矩形波激励磁心损耗不同方法计算值与实测值的比较^[20]

$$P_{cv} = C \cdot \left[\frac{2}{D(1-D)\pi^2} \right]^{\alpha-1} \cdot f \cdot B^\beta \quad (9)$$

上式中 D 为占空比。图 5 对不同磁心损耗计算方法与实测值进行了比较。测试磁心为 Ferroxcube 的 3C85 材料制备的 E42/42/15 型磁心，测试磁通密度为 200mT，测试温度为 100℃。可以看出用该修正的 Steinmetz 公式计算得到的磁心损耗与实测值吻合得最好^[16,20]。用傅立叶分析得到的结果误差最大。

表 1 所示的是利用修正的 Steinmetz 公式得到的磁心损耗计算值与测量值之间的偏差值^[7]。测试磁心为 Magnetics 公司的 0F-44925-TC 铁氧体磁心。由该表发现绝大多数的计算结果误差值在 10% 左右，只有个别测量点的误差较大，这也就说明 (9) 式所描述的函数关系具有足够的精度。

表 1 矩形波激励磁心损耗计算值与测量值之间的偏差^[7]

占空比 D	磁心损耗计算值与测量值之间的偏差/%													
	25kHz					50kHz					75kHz			
	100mT	150mT	200mT	250mT	300mT	50mT	100mT	150mT	200mT	250mT	50mT	100mT	150mT	200mT
0.9	-7.7	-7.0	-3.6	-5.3	-2.6	9.5	3.7	2.5	4.8		19.9	10.1	8.0	
0.85	-5.0	-5.2	-4.2	-1.7	-1.5	3.8	-4.7	-5.9	-0.2		5.8	1.3	-2.5	1.2
0.8	-4.0	-1.2	-3.2	0.1	1.6	-1.2	-7.2	-4.5	0.0	2.7	1.9	-4.8	-5.2	-2.3
0.7	4.0	4.8	5.9	7.4	6.3	11.0	-5.6	-2.9	-1.4	6.0	5.5	-6.6	-9.5	-2.6
0.6	6.2	6.0	7.4	8.6	11.3	3.6	-7.1	-4.6	-1.6	5.2	8.5	-8.9	-10.7	-4.8
0.5	5.8	5.7	9.2	10.9	12.2	3.6	-4.0	-3.7	-1.0	3.5	6.2	-7.8	-10.9	-7.7
0.4	0.1	4.3	6.4	9.4	12.0	3.8	-7.1	-3.3	-0.9	4.3	5.4	-7.9	-10.0	-7.6
0.3	2.7	-0.1	5.3	5.7	5.9	0.1	-6.3	-4.0	-1.6	3.2	8.6	-5.8	-10.2	-6.9
0.2	-2.2	-3.6	-1.5	-0.4	1.3	-0.9	-4.0	-1.8	-1.6	3.2	-1.9	-6.5	-5.2	-3.8
0.15	-8.2	-4.6	-3.0	-1.7	0.3	-5.6	-4.6	-1.5	-1.3		-2.2	0.9	-2.5	2.1
0.1	-10.4	-7.8	-5.6	-5.1	-3.8	7.6	6.2	3.0	5.0		24.4	10.6	9.0	

4 方波激励下的磁心损耗

Chen^[7]对方波激励下的磁心损耗进行了研究，

发现方波激励下的磁心损耗比相同频率、相同磁通密度幅值的正弦波激励下的磁心损耗要低，他是最

早进行非正弦波激励下磁心损耗的研究者之一。同样,用傅立叶谐波分析等不同理论计算方法来计算方波激励下的磁心损耗。如果设正弦波激励下的磁心损耗为 $P_{cv,sin}$, 方波激励下的磁心损耗为 $P_{cv,squ}$, 利用傅立叶分析可求得方波激励与正弦波激励磁心损耗的比值为^[13,21]:

$$\frac{P_{cv,squ}}{P_{cv,sin}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(4/\pi)^{\beta}}{n^{(2\beta-\alpha)}} \quad (10)$$

式中 $n=1,3,5, \dots$, 为谐波次数; α 、 β 与 (1) 式中的物理意义相同。回归分析计算结果表明, 方波中对磁心损耗起决定作用的是基波分量, 高次谐波损耗占总损耗的比例很小。由于随着谐波次数 n 的增大, 谐波产生的损耗迅速下降, 所以高次谐波的损耗总和也不会太大。但是对于占空比不等于 0.5 的矩形波激励的情况, 高次谐波的损耗可能会增大, 因而会对总损耗有很大的影响。

而用等效频率法得到的方波激励与正弦波激励磁心损耗的比值为^[16,21]:

$$\frac{P_{cv,squ}}{P_{cv,sin}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{(2\beta-\alpha)}} \quad (11)$$

该结果与谐波分析得到的结果 (10) 式相似。

通常认为, 铁氧体材料的损耗一般由三部分组成: 磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗。在频率不太高的情况下, 主要考虑磁滞损耗和涡流损耗。磁心损耗理论计算的困难主要在于磁滞损耗。虽然关于磁滞损耗的模型很多, 但多比较复杂, 需要确定的参数较多, 一般很难用于工程计算。所以需要对磁滞损耗进行简单近似处理。在高频应用中可以认为, 对不同波形的激励信号, 在相同的激励频率下, 只要其磁通密度的幅值相同, 其磁滞损耗就相同^[14]。此时不同波形激励下磁心损耗的差异主要来自涡流损耗。正弦波激励下的涡流损耗为^[14]:

$$P_{e,sin} = \frac{\pi A_e}{4\rho} B^2 f^2 \quad (12)$$

式中 A_e 为磁心的有效截面积, ρ 为铁氧体材料的电阻率。方波激励下的涡流损耗则为^[14]:

$$P_{e,squ} = \frac{2A_e}{\pi\rho} B^2 f^2 \quad (13)$$

于是方波和正弦波激励下磁心涡流损耗的比值为:

$$\frac{P_{e,squ}}{P_{e,sin}} = \frac{8}{\pi^2} \quad (14)$$

用该简化模型计算得到的磁心损耗与实测值

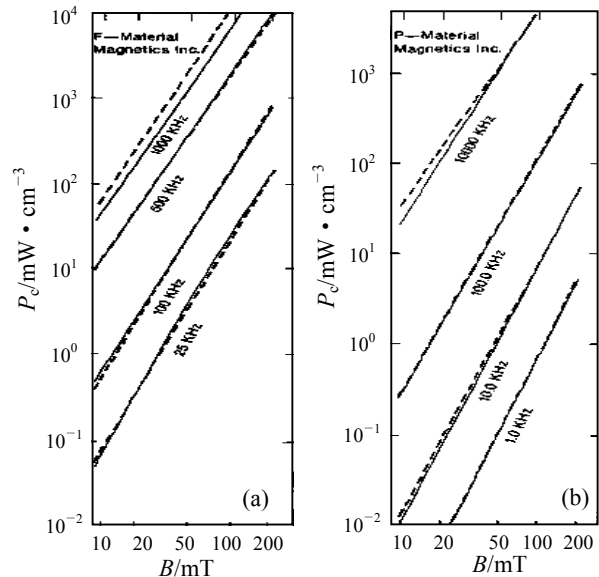


图6 磁心损耗理论计算与实测值的比较
(实线为计算值, 虚线为实测值)^[14]

对比于图6中。图6a为Magnetics公司的F材料制备的R16型磁心, 图6b为Magnetics公司的P材料制备的R16型磁心。可以看出: 在500kHz以下, 计算值与实测值符合得较好。但在1MHz时, 计算值小于实测值, 可能跟高频下材料电阻率下降得较快有关。

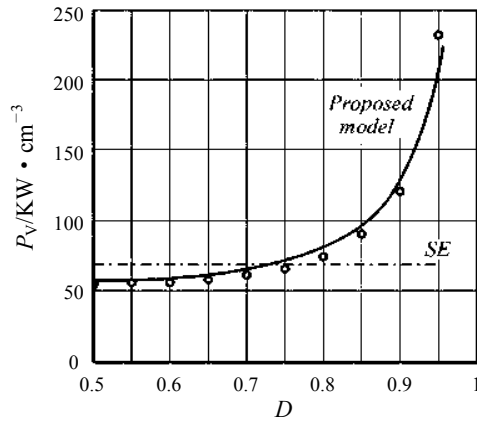
文献[22]考虑到不同方波激励下的占空比 D 不同, 对Steinmetz公式进行修正, 得到方波激励下的磁心损耗为:

$$P_{cv,squ} = [D^{1-\alpha} + (1-D)^{1-\alpha}] \cdot C_N \cdot (2f)^{\alpha} \cdot B^{\beta} \quad (15)$$

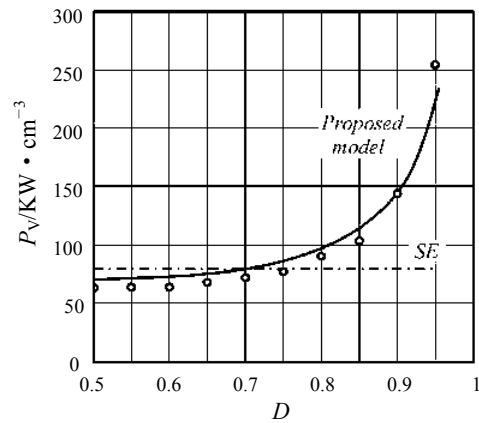
使用回归分析, 分别对 Ferroxcube 公司的 3F3 材料 ETD44 磁心和 EPCOS 的 N67 材料 EE42 磁心的磁心损耗实测值和计算值进行了比较, 结果示于图7。图中圆点为实测值, 实线为 (15) 式的计算值, 点实线为 (1) 式的计算值。测试条件为 100kHz/100mT, 测试温度为 100℃。结果表明, 使用经典的 Steinmetz 公式得到的磁心损耗值与占空比无关, 这与实测结果不符。而利用修正的 Steinmetz 公式 (15) 得到的结果与实测值符合得较好。

5 结论

在磁性元件的设计中, 对磁心损耗的计算是设计人员的重要工作内容。磁性元件设计人员不可能都事先对所有磁性元件的损耗进行实验测试, 所以进行磁心损耗理论计算具有重要意义。磁心损耗的计算模型很多, 可根据精度要求和适用范围来选择使用。以上所介绍的各种模型都是针对一定温度下 (通常是损耗谷点温度) 的磁心损耗计算, 实际应



(a) 3F3材料, ETD44磁心($\alpha=1.842$; $\beta=3.06$)



(b) N67材料, EE42磁心($\alpha=1.76$; $\beta=2.94$)

图7 方波激励下的磁心损耗计算值与实测值的比较^[22]

用中还要考虑温度对磁心损耗的影响。

参考文献:

- [1] Steinmetz Chas Proteus. On the law of hysteresis [A]. IEEE Proceeding [C]. USA: IEEE Press, 1984. 197-221.
- [2] EPCOS. Ferrites and Accessories. Data Book 2007 [Z]. Germany: EPCOS AG, 2007.
- [3] Richard M Bozorth. Ferromagnetism [M]. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press Reprint, 1993.
- [4] Ansgar Brockmeyer. Experimental evaluation of the influence of DC-premagnetization on the properties of power electronic ferrites [A]. IEEE Proceeding APEC'96 [C]. USA: IEEE Press, 1996. 454-460.
- [5] Wai Keung Mo, David K. Cheng, Lee Y S. Simple approximations of the DC flux influence on the core loss power electronic ferrites and their use in design of magnetic components [J]. IEEE Trans on IE, 1997, 44(6): 788-799.
- [6] 李智华, 罗恒廉, 费鸿俊. 直流偏置对功率铁氧体损耗影响的计算[J]. 电工电能新技术, 2002, 21 (3): 41-43.
- [7] 孔剑虹, 何湘宁, 钱照明, 等. 功率变换器电感在直流偏置或矩形波激励时磁损问题研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20 (5): 13-19.
- [8] Baguley C A, Carsten B, Madawala U K. An investigation into the impact of DC bias conditions on ferrite core loss [A]. The 33rd annual conference of the IEEE industrial electronic society [C]. Taipei, Taiwan: 2007, 1408-1413.
- [9] Baguley C A, Carsten B, Madawala U K. The effect of DC bias conditions on ferrite core loss [J]. IEEE Trans Magn, 2008, 44(2): 246-252.
- [10] Baguley C A, Madawala U K, Carsten B. The influence of temperature and core geometry on ferrite core losses under DC bias conditions [A]. International symposium on power electronics, electrical drives, automation and motion [C]. USA: 2008, 355-359.
- [11] 范莉, 夏非. 直流偏置下高频磁性材料铁芯损耗的研究[J]. 山西电子技术, 2008, 5: 82-83.
- [12] Chen D Y. Comparisons of high frequency magnetic core losses under two different driving conditions: A sinusoidal voltage and a square wave voltage [A]. IEEE Proc PESC'78 [C]. USA: 1978, 237-240.
- [13] Severns R. HF core losses for non-sinusoidal waveforms [A]. Proc. HFPC'91 [C]. USA: 1991. 140-148.
- [14] Roshen W. Ferrite core loss for power magnetic components design [J]. IEEE Trans Magn, 1991, 27(6): 4407-4415.
- [15] Brockmeyer A, Schulting L. Modeling of dynamic losses in magnetic material [A]. Proc EPE'93 [C]. USA: 1993. 112-117.
- [16] Albach M, Durbaum T, Broekm A. Calculating core losses in transformers for arbitrary magnetizing currents a comparison of different approaches [A]. IEEE Proc PESC'96 [C]. USA: 1996. 1463-1468.
- [17] Chung H Y, Poon F N K, Liu C P, et al. Analysis of Buck-Boost converter inductor loss using a simple online B-H curve tracer [A]. IEEE Proc APEC'00 [C]. USA: 2000. 640-646.
- [18] Reinert J, Broekmeyer A, De Doncker R W. Calculation of losses in ferro- and ferromagnetic materials based on the modified Steinmetz equation [A]. IEEE Proc IAS'99 [C]. USA: 1999. 2087-2092.
- [19] Carsten B. High frequency conductor losses in switch mode magnetics [A]. Proc HFPC'86 [C]. USA: 1986. 155-176.
- [20] Albach M, Durbaum T, Brockmeyer A. Calculating core losses in transformers for arbitrary magnetizing currents: a comparison of different approaches [A]. EPE Proc[C]. Sevilla, Spain: 1995. 1171-1176.
- [21] 李智华, 罗恒廉, 费鸿俊. 方波电压激励下的铁氧体铁芯损耗分析 [A]. 2000 年中国电源新技术应用研讨会论文集 [C]. 深圳: 2000.177-181.
- [22] Vencislav Cekov Valchev. Modeling losses in ferrite cores under square voltage waveforms [A]. ELECTRONICS' 2005 [C]. Sozopol, Bulgaria: 2005.