

基于 SPICE 模型的 Buck 变换器磁芯损耗仿真分析与实验验证

张宇飞, 田家良, 佟光辉, 周 岩

(南京邮电大学 自动化学院, 江苏南京 210023)

摘 要: 以 Buck 变换器为对象, 提出了一种基于 SPICE 仿真策略模拟开关变换器铁氧体的磁芯功率损耗。该方法基于磁芯功率损耗构成分离模型, 使用一组正弦激励下的损耗数据作为仿真基准, 通过三个模拟行为构建模块体现占空比对磁滞损耗和涡流损耗的影响。该仿真算法可直观地给出 Buck 变换器磁损随占空比的变化, 同时也给出了磁滞损耗分量、涡流损耗分量和磁通密度等关键变量的变化特征。实验表明所提出的磁损仿真结果与实验结果取得了较好的一致性。

关键词: Buck 变换器; 磁芯损耗; SPICE 模型; 仿真; 实验

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2020)01-0036-05

DOI: 10.19594/j.cnki.09.19701.2020.01.009

Simulation analysis and experimental verification of core losses of buck converters based on SPICE model

ZHANG Yu-fei, TIAN Jia-liang, TONG Guang-hui, ZHOU Yan

School of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China

Abstract: Taking the Buck converter as an example, a simulation method was proposed for ferrite core losses in switched mode power converters based on the SPICE model. Based on loss components model, the effects of duty cycles on hysteresis losses and eddy current losses are reflected by using three analog behavioral building blocks (ABM). The simulation method can intuitively give the changing tendency of magnetic losses when duty cycles change, and the variation characteristics of key variables, such as hysteresis and eddy current loss and magnetic flux density, are displayed directly. Simulation results show that the proposed method is in good agreement with the experimental results.

Key words: Buck converter; core loss; SPICE model; simulation; experiment

1 引言

开关变换器中磁芯元件的功率损耗与磁通密度、频率、占空比、温度、激励电压和直流偏磁等工作条件直接相关, 因此磁芯损耗的建模、仿真、计算等过程会十分复杂。

在磁芯损耗预测的实际应用中, 普遍采用的是基于实验数据拟合的斯坦麦茨(SE)方程。经典 SE 方程通过三个系数拟合磁芯材料在正弦激励条件下不同频率和磁通密度时的损耗, 具有参数少、应用简单的优点。但由于拟合 SE 数据需要在零直流偏置的正弦磁通密度激励条件下收集, 而大多开关变换器中磁性元件承受的激励是占空比变化的矩形波。为了克服传统 SE 方程在非正弦激励条件下应用存在的缺点, 许多学者提出如 MSE、GSE、iGSE、RGSE

等 SE 修正模型分析磁芯损耗^[1-2]。

基于磁损构成模型的有限元仿真可以得到相对精确的磁损数据, 但有限元仿真软件存在建模复杂、设置参数多和计算时间长等缺点, 限制了其在实际工程中的广泛应用。许多电子电路仿真器(PSPICE 和 IsSPICE 软件)包含的铁氧体磁滞模型可进行单一磁芯饱和特性分析, 但预测结果对于各种磁芯类型以及不同工作条件并未得到严格验证。有研究者^[3]介绍了一种基于 RGSE 的 SPICE 模型, 通过导入到包含电感元件(如电感器或变压器)的系统的 SPICE 原理图中, 以估算预期的磁芯损耗。具体建模时引用一个功率控制电阻模块(PCR)来转化所测电感元件的损耗, 导致所得结果不够直观, 需要多次转化才能得到最终结果。

收稿日期: 2018-10-22 修回日期: 2018-11-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307088)

作者通讯: 张宇飞 E-mail: 602964899@qq.com

本文根据磁芯损耗产生的物理机理和开关变换器电路工作的特性，建立功率电感磁芯损耗模型，最后转化为具体电路的 SPICE 磁损模型。首先分析频率、磁通密度幅值、占空比等工作条件对磁滞损耗和涡流损耗的影响，并以 Buck 变换器中功率电感为例，给出了基于 SPICE 模型的开关变换器中功率电感仿真方法，具有重要的工程应用价值。

2 磁芯损耗物理模型

磁性元件的磁芯损耗，又叫铁损或者空载损耗，是铁磁物质在交流磁化过程中，因发热而消耗的热量。磁损的功率损耗密度 P_v (单位体积内的磁芯损耗) 主要包括磁滞损耗 P_h 、涡流损耗 P_e 和剩余损耗 P_r 。由于本文所提出的仿真方法是基于 Bertotti 磁损分离的模型^[5]，因此需要简要回顾分离模型中磁滞损耗 P_h 、涡流损耗 P_e 和剩余损耗 P_r 分量的工作特征。

2.1 磁滞损耗

磁性元件中的磁畴在外磁场的作用下转动时克服磁畴壁的摩擦力而消耗的能量为磁滞损耗。在开关变换器中磁性元件一般工作于强激励条件下，磁滞损耗 P_h 与频率 f 和磁通密度 B 的关系为

$$P_h \propto B^2 f \quad (1)$$

2.2 涡流损耗

由于磁芯中流过的交变磁场在磁芯中产生感应电压，磁芯材料中将会产生相应的感应电流。磁芯材料在感应电流作用下所消耗的能量就是涡流损耗，因此磁芯涡流损耗的大小与磁芯的材料、线圈的匝数、激励的波形等有关：

$$P_e \propto B^2 f^2 \frac{K_e}{\rho} \quad (2)$$

剩余损耗是磁畴壁随外磁场变化所产生的损耗，由于开关变换器中磁性元件工作在高频、大磁通密度条件下，为简化分析，剩余损耗忽略不计。

综上，磁芯损耗的表达式为：

$$P_v = P_h + P_e = c_1 B^2 f + c_2 \frac{K_e}{\rho} (Bf)^2 \quad (3)$$

这也符合斯坦麦兹方程的一般方程式。

2.3 基于正弦激励数据的分离方程

然而(3)式中包含了许多物理系数和材料系数，不易获取。实际上磁芯生产厂家提供的正弦激励损耗曲线数据就已经包含了所有的信息，可以利用这一损耗数据作为突破口分析磁芯损耗分离模型。

基于(1)和(2)式，在相同条件下测量两个不同频率点 f_A 和 f_B 的正弦激励磁损数据 $P_{v\sin}(f_A)$ 和 $P_{v\sin}(f_B)$ ，就可以获得相应的磁滞损耗和涡流损耗分量^[5-7]。

$$\begin{bmatrix} P_{v\sin}(f_A) \\ P_{v\sin}(f_B) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{f_B}{f_A} & \left(\frac{f_B}{f_A}\right)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{h\sin}(f_A) \\ P_{e\sin}(f_A) \end{bmatrix} \quad (4)$$

3 Buck变换器功率电感损耗特征

3.1 Buck变化器工作原理

Buck 变换器主电路如图 1 所示，它由开关管 Q1、续流二极管 D1、电感 L 、电容 C 以及负载电阻 R_L 构成。

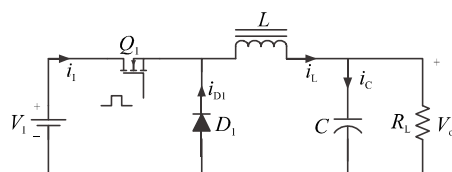


图 1 Buck 变换器主电路

设定 Buck 变换器工作在连续导通模式(CCM)，在 Q1 导通期间磁通变化量为

$$B_{pp}^+ = \frac{V_1 - V_0}{NA_e} DT \quad (5)$$

在 Q1 截止期间磁通变化量为

$$B_{pp}^- = \frac{V_0(1-D)T}{NA_e} \quad (6)$$

式中， V_1 为输入电压， V_0 为输出电压， N 为线圈匝数， A_e 为磁芯截面积。

3.2 Buck变换器工作原理

设 Buck 变换器 $D=0.5$ 时的磁滞损耗分量 $P_{h\text{squ}}=1$ 、经典涡流损耗分量 $P_{e\text{squ}}=1$ ，当 Buck 变换器占空比变化时涡流损耗 $P_{e\text{rec}}=1$ 与 $D=0.5$ 方波激励涡流损耗 $P_{e\text{squ}}$ 的关系为^[1]：

$$\frac{P_{e\text{rec}}(D)}{P_{e\text{squ}}} = \frac{1-D}{D} \quad (7)$$

当 Buck 变换器的占空比变化时，可以通过磁芯正弦激励磁滞损耗数据来预测矩形波磁滞损耗：

$$P_{h\text{rec}}(D) = 4(1-D)^2 P_{h\text{sin}} \quad (8)$$

因此不同占空比条件下，Buck 变换器功率电感磁芯损耗为^[9]：

$$P_{v\text{rec}}(D) = 4(1-D)^2 P_{h\text{sin}} + \frac{8}{\pi^2} \frac{1-D}{D} P_{e\text{sin}} \quad (9)$$

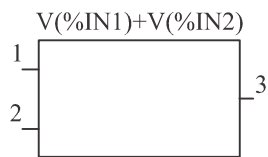


图 2 ABM 模块示意

4 Buck 变换器磁损的 SPICE 模型

4.1 初步思路

虽然在电路仿真软件中通过模型功能仿真系统特性较为常见，但在功率级运行的同时预测磁芯损耗仍然是一个挑战。当电流具有强大的动态特性，例如幅度、频率或占空比急剧变化时，需要建立瞬时的磁芯损耗模型，这在电子电路仿真软件中实现是非常困难的。

由于本文不涉及对 Buck 变换器的动态控制问题，只需要稳态分析。对 Buck 变换器而言，功率电感承受的激励电压为占空比一定的矩形波，因此如果计算一段时间内磁损的平均值，即可避免瞬时采集电流电压信息的难题。

4.2 模拟行为构建块(ABM)

需要考虑的另一个问题是将预测的磁芯损耗转化为模拟电路。这个任务可以通过几个模拟行为构建块(ABM)来完成,这些模块可以采集电压或电流信息作为输入,通过在内部输入数量关系,来输出所需的数据。如图 2 所示,在输入端口 1 和 2 内输入电压,按照 SPICE 语法输入其内部数量关系,按图示关系式在输出端口 3 便能得到两者的电压和。

利用 ABM 模块输入所需要的信息,便能得到涡流损耗、磁通密度变化量和磁滞损耗等数值,通过组合得到的数据就可以对磁损进行有效预测。

4.3 仿真模型

根据(9)式,只需要通过 ABM 模块将占空比信息和正弦激励下分离出的涡流损耗和磁滞损耗信息输入,就能得到此占空比条件下磁芯损耗。

图 3 示出了 Buck 变换器电路内的功率电感磁芯损耗估算的 PSPICE 原理图,只需要三个 ABM 模块来实现电感器 L1 的 SPICE 磁损模型。

在图 3 中,根据(7)式由 ABM1 模块导出 Buck 电路的涡流损耗,用 SPICE 语法描述:

$$8 * (1 - D) * P_c \sin / \pi / \pi / D$$

由于功率变换器工作在高频条件下,在 ABM 输出口设计低通滤波器 R1 和 C1,即可过滤高频交

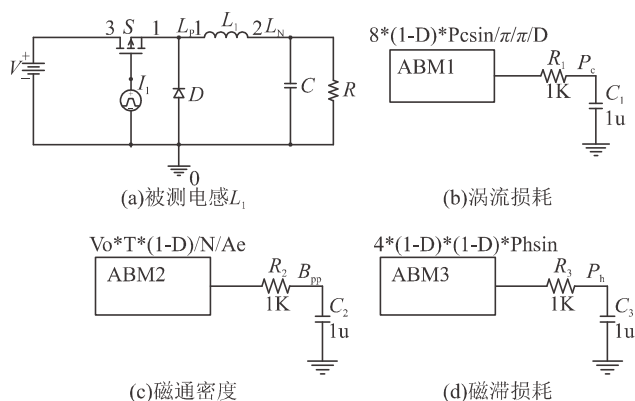


图 3 Buck 变换器电路内功率电感的 SPICE 磁芯损耗估算原理: (a)电感, (b)涡流损耗, (c)磁通密度, (d)磁滞损耗

流分量,并在 C1 上获得涡流损耗稳态值,并编码为 $V(P_e)$ 。

磁通密度变化量 B_{pp} 由 ABM2 模块实现,由(6)式设置 ABM2 的输出电压 $V(B_{pp})$,用 SPICE 语法表示:

$$V_o * T * (1 - D) / N / A_c$$

根据(8)式,应用 SPICE 语法,磁滞损耗由 ABM3 模块求出:

$$4 * (1 - D) * (1 - D) * P_{h \sin}$$

同理通过低通滤波器 R3、C3 输出磁滞损耗,编码为 $V(P_h)$ 。

5 实验与仿真

设定 Buck 变换器的工作条件为:直流偏置 H_{dc} 为 12.5 A/m,工作频率 f_s 为 100 kHz,占空比 D 的变化范围为 0.2~0.8。仿真实验中采用的磁环的核心参数:磁芯材料 3C90,芯尺寸 TX40/24/16,横截面积 $A_c=125 \text{ mm}^2$,电感 $L=130 \mu\text{H}$,文献[8]给出了该磁芯的实验数据。

5.1 Buck 电路仿真结果

在频率 100 kHz 和占空比 0.5 条件下的仿真结果如图 4 中所示,分别为电感 L1 两端电压 $V(LP, LN)$ 、磁通变化量 $V(BPP)$ 、涡流损耗 $V(Pc)$ 和涡流损耗 $V(Ph)$,这里将各项数值编码为对应的电压,记录时只需要将单位作相应对换即可。这里需要注意的是,由于本文对 Buck 变换器进行稳态分析,所以最终测量值应在波形稳定时读取。

如图,电感 L1 两端电压为 $\pm 25 \text{ V}$,此时频率为 100 kHz,占空比为 0.5。待电路稳定后,此时磁通变化量为 201 mT,由(7)、(8)式,假设此时 $P_{e \sin}=1$, $P_{h \sin}=1$,得到电路 $D=0.5$ 条件下涡流损耗 $P_e=0.820$

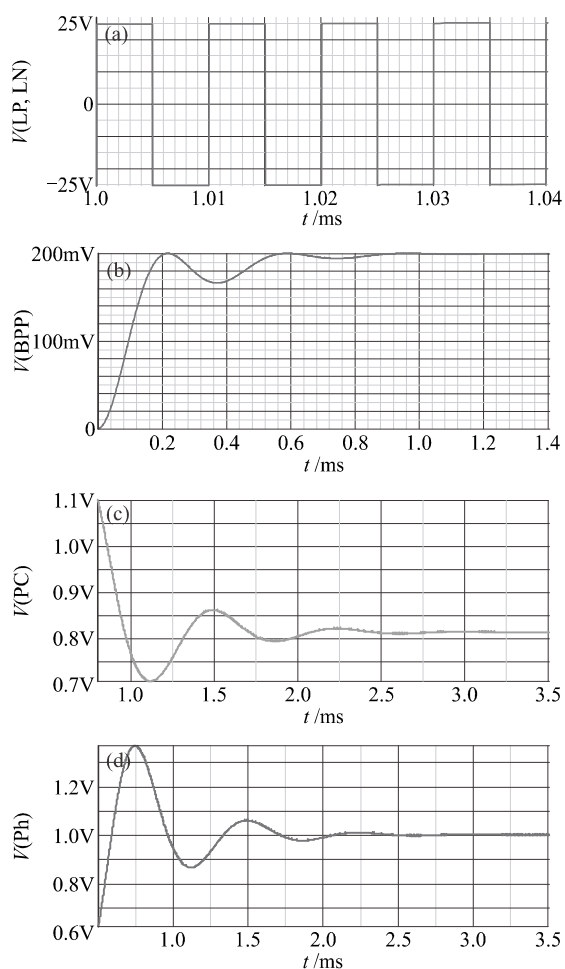


图4 $f=100\text{ kHz}$ 、 $D=0.5$ 条件下电感 L1 的(a)两端电压 $V(LP, LN)$, (b)磁通密度变化量 $V(BPP)$, (c)涡流损耗 $V(PC)$, (d)涡流损耗 $V(Ph)$

W, 磁滞损耗 $P_h=1.012\text{ W}$ 。闭环控制下的 Buck 变换器输出电压不变, 通过改变输入电压, 可得到占空比 0.2~0.8 条件下对应的磁通变化量、涡流损耗、磁滞损耗。通过整理仿真数据, 可以分别得到其关于占空比 D 的变化趋势。频率 100 kHz 下的仿真数据如表 1 所示。

表 1 频率 100 kHz 下的仿真数据

占空比 D	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
涡流损耗 P_e/W	3.241	1.892	1.212	0.820	0.542	0.343	0.212
磁通变化量 B_{pp}/T	0.326	0.285	0.238	0.201	0.162	0.115	0.081
磁滞损耗 P_h/W	2.554	1.993	1.431	1.012	0.661	0.354	0.173

5.2 实验与仿真结果比较

不同占空比条件下磁芯的涡流损耗、磁通密度变化量和磁滞损耗预估值和仿真值比较如图 5 所示。图 5a 表明, 涡流损耗仿真曲线和理论模型变化趋势一致, 说明模型较好地反映了在 Buck 变换器中磁芯

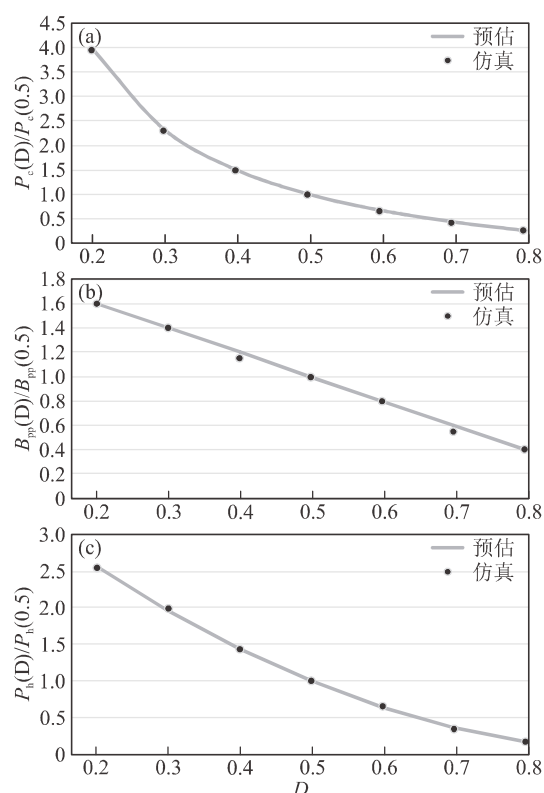


图 5 不同占空比条件下(100 kHz)预估值和仿真值比较: (a)涡流损耗, (b)磁通密度变化量, (c)磁滞损耗

的涡流损耗与占空比成非线性下降关系, 随着占空比的增大, 涡流损耗会显著降低。图 5b 表明, 除了 RC 滤波引入的误差, 磁通密度变化量预估值和仿真值两者曲线基本吻合。磁通密度变化量与占空比成线性关系, 随着占空比增大, 磁通密度变化量线性减小。图 5c 表明, 磁滞损耗预估值和仿真值变化趋势一致, 说明仿真模型较好地反映了磁滞损耗会随着占空比的增大而迅速减小。

在相同频率、直流偏磁和磁通密度变化量条件下, 正弦波和方波激励磁滞损耗相同, 可以通过磁芯正弦磁滞损耗数据来预测矩形波磁滞损耗。

测量相同磁通密度变化量和直流偏磁时 100 kHz 正弦激励下的磁损数据, 根据(4)式分离出 100 kHz 时的磁滞损耗分量和涡流损耗分量^[9]。表 2 列出了所获得的磁损数值和分离出来的磁损分量。

表 2 Buck 变换器功率电感实验数据

f/kHz	B_{pp}/mT	P_e/W	P_h/W	P_c/W
100	160	1.27	0.842	0.428

根据表 2 实验数据和表 1 仿真数据, 图 6 给出了不同占空比下 Buck 变换器磁损模型仿真值和实测

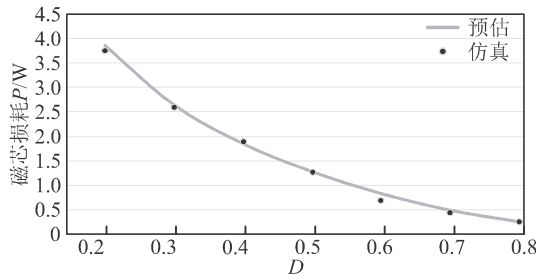


图 6 Buck 变换器磁芯损耗实测值和仿真值比较

值比较。可见 Buck 变换器中的磁芯损耗随着占空比的增大而显著降低，实验数据和模型仿真值吻合，证明了模型的准确性。

6 结论

本文以 Buck 变换器中的功率电感为例，根据磁芯损耗产生的物理机理和电路工作特征，通过电力电子仿真软件中的 ABM 模块构建 SPICE 磁损模型，对功率电感磁芯损耗进行仿真建模。

本文所提出的方法可对磁滞损耗分量、涡流损耗分量和磁通密度变化量进行有效仿真，给出磁芯损耗随占空比的变化。该仿真模型简单实用，能够满足工程应用精度。

参考文献:

[1] Reinert J, Brockmeyer A, De Doncker R. Calculation of

(上接 29 页)

法能够准确地测量金属磁粉芯基本磁化曲线、幅值磁导率和增量磁导率。

(2)建立了计及损耗的磁芯非线性模型，用串联电阻等效绕组损耗 R_w 、并联电阻等效磁芯损耗 R_c 和励磁电感 L_m 模拟磁芯励磁支路。根据磁芯的非线性模型，本文考虑了 R_w 与 R_c 对测量的影响，指出 R_w 与 R_c 对直流测量法的影响很小，可以忽略不计。

(3)数据处理的误差主要来自于数值积分，其主要影响分为两方面：一是理论公式的截断误差，此部分误差很小；二是示波器噪声引起的误差，因此要选择精度高的数字采集设备来控制噪声的影响。

参考文献:

[1] 唐坚. 金属软磁磁粉芯研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
[2] 李俊楠. 铁硅铝/铁硅金属磁粉芯制备及磁特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.

losses in ferro- and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation [J]. IEEE Trans Ind Appl, 2001, 37(4): 1055-1061.

[2] Venkatachalam K, Sullivan C R, Abdallah T, et al. Accurate prediction of ferrite core loss with non-sinusoidal waveforms using only Steinmetz parameters [A]. Proc Int Conf IEEE Comput Power Electron [C]. 2002. 36-41.

[3] Abramovitz A, Ben-Yaakov S. RGSE-based SPICE model of ferrite core losses [J]. IEEE Trans Power Electron, 2018, 33(4): 2825-2831.

[4] Roshen W A.A practical, accurate and very general core loss model for nonsinusoidal waveforms [J]. IEEE Trans Power Electron, 2007, 22(1): 30-40.

[5] Zhou Y, Chen Q M. Predicting core losses under the DC bias based on the separation model [J]. IEEE J Emerg Select Topics Power Electron, 2017, 5(2): 833-840.

[6] Zhou Y, Sun A M. A simplified ferrite core loss separation model for switched mode power converter [J]. IET Power Electron, 2016, 9(3): 529-535.

[7] 周岩, 杨长业. 高频铁氧体功率损耗分离方法及其应用 [J]. 磁性材料及器件, 2013, 44(6): 50-54.

[8] 周岩. 高频矩形波激励下磁芯损耗的研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 91-95.

[9] 周岩, 张俊波, 陈麒米. 开关变换器功率电感磁损建模及应用[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 132-137.

作者简介: 张宇飞, 女, 2016 年获得了南京邮电大学电气工程学士学位, 目前正在攻读电气工程硕士学位, 研究方向为高频磁芯损耗建模。

[3] 赵修科. 开关电源中磁性元器件[M]. 南京: 南京航空航天大学出版社, 2004.

[4] 刘涛, 刘鑫, 梁仕斌, 等. 基于极性变化直流电压源的铁磁元件铁心剩磁通测量方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 137-144.

[5] 来磊. 保护用电流互感器励磁特性的直流法测量[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1528-1530.

[6] GB16847-1997 保护用电流互感器暂态特性技术要求[S].

[7] 钱昆明, 卢迁. 闭路磁芯等效参数的计算[J]. 磁性材料及器件, 1982, 13(3): 28-34.

[8] 李庆扬 王能超 易大义. 数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

[9] IEC 60205: 2001.Calculation of the effective parameters of magnetic piece parts[S].

[10] 谢从珍, 王建国, 黄玲. 数字存储示波器噪声特性的分析[J]. 高电压技术, 2014, 30(6): 22-26.

作者简介: 汪晶慧(1975—), 女, 1975 年生, 副教授, 研究方向为电力电力高频磁技术和磁性材料电磁特性测量。