

金属磁粉芯直流磁化特性测量及其误差分析

汪晶慧, 张宇超, 陈 为, 张 越

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建福州 350000)

摘 要: 金属磁粉芯材料具有高饱和磁感应强度($B_s > 1$ T), 同时起始磁导率较低(< 1000), 导致其磁化特性测量困难。介绍了金属磁粉芯的直流测量方法, 利用大功率直流源作为激励源, 通过合理控制测量电路的作用时间, 实现金属磁粉芯较宽范围的磁化特性测量。分析了直流测量法的误差, 考虑了磁芯损耗与绕组损耗对测量结果的影响, 搭建了完整的测量电路, 测量最大磁感应强度至 0.3 T, 磁场强度至 10 kA/m, 验证了本方法的可行性。

关键词: 磁粉芯; 直流磁化特性; 测量; 误差分析

中图分类号: TM936

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2020)01-0026-04

DOI: 10.19594/j.cnki.09.19701.2020.01.007

Measurement and its error analysis of DC magnetization characteristics of metal magnetic powder core

WANG Jing-hui, ZHANG Yu-chao, CHEN Wei, ZHANG Yue

College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fujian 350000, China

Abstract: This paper introduces the DC measurement method of metal magnetic powder core, by using high-power DC source as excitation source and reasonable control of the action time of measurement circuit, to realize the measurement of magnetization characteristics of metal magnetic powder core. The paper analyzes the error of DC measurement method, considers the influence of core loss and winding loss on the measurement results, and builds a complete measurement circuit, measuring the maximum magnetic induction to 0.3 T, the magnetic field strength to 10 kA/m, which verifies the feasibility of the method.

Key words: magnetic powder core; DC magnetization characteristic; measurement; error analysis

1 引言

金属磁粉芯作为一种结构比较特殊的复合软磁材料, 主要由铁磁性粉末经过绝缘包裹后, 通过粉末冶金方法制成。由于铁磁性粉末颗粒很小, 又被非铁磁性绝缘介质形成的薄膜物质隔开, 因此金属磁粉芯一方面可以隔绝涡流, 减小磁芯损耗, 使材料应用于较高频率; 另一方面由于颗粒的间隙效应, 导致材料具有低磁导率及软饱和特性。金属磁粉芯的特殊软磁性能使其在许多应用场合具有其他磁性材料难以比拟的优势, 广泛应用于电讯、雷达、电视、电源、太阳能发电等领域^[1-2]。

磁芯的直流磁化特性指在直流或近似直流激励下磁芯表征的磁化特性。在工程应用中, 软磁材料常工作在一定的直流偏置磁场下, 研究和测量软磁

材料的直流磁化特性能得到磁芯在直流偏置作用下的材料性能, 对软磁材料的研制、应用都具有十分重要的意义。软磁材料直流磁化特性的传统测量方法主要有大信号交流测量法与阻抗测量法。大信号交流测量法, 顾名思义, 通过对被测磁件施加低频大信号正弦交流激励实现磁化特性的测量, 然而由于金属磁粉芯的低磁导率特性, 导致磁芯电感阻抗很小, 大信号交流测量法势必要提供更大的功率, 才能测量更宽的磁感应强度范围, 而使用大功率的交流激励源或者功率放大器都将带来昂贵的测量成本。另一种方法是阻抗测量法, 基本原理是在持续的直流分量上叠加交流小信号, 在该激励条件下计算被测件的电感值, 然后不断改变直流分量的大小从而得到不同直流偏置下的电感值, 这种方法在测量过程中直流分量较大, 需要保证线圈能承受设定

收稿日期: 2018-11-26 修回日期: 2019-06-18

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2015J01191)

通讯作者: 汪晶慧 E-mail: wjh@fzu.edu.cn

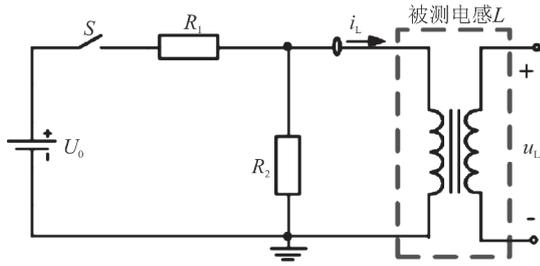


图 1 直流测量法测量磁芯磁化特性电路原理

的电流值，同时测量过程中容易造成磁芯明显的温升，对磁特性测量精度有一定影响。

本文介绍了测量磁粉芯直流磁化特性的一种新方法——直流测量法，详细说明了直流测量法的基本原理，分析了直流测量法的主要误差来源，通过实验验证了该方法的可行性，并对实验结果进行了讨论。

2 直流测量法原理和磁芯有效参数计算

2.1 测量原理

图 1 为直流测量法的电路原理。假设磁芯无初始储能，当开关 S 闭合时，短时间内，直流电压源为电感充能，磁芯激磁；当电路稳定后，磁芯磁化曲线激磁至顶点，此时开关 S 断开，电感储能引起响应，被测电感 L 通过电阻 R₂ 释放能量，磁芯去磁，这一过程磁芯磁感应强度 B 随磁场强度 H 的变化如图 2 所示。通常认为 4 至 5 倍的时间常数 $\tau(=L/R)$ 后响应过程结束，通过合理控制开关通断，磁芯充磁与去磁时间非常短，因此可以实现宽范围磁粉芯磁化特性的测量^[4-6]。

若被测磁芯元件绕组匝数为 N，有效横截面积为 A_e，有效磁路长度为 l_e，每次测量所达到的最大激磁电流为 I_m，则磁感应强度幅值 B_m 和磁场强度幅值 H_m 可表示为：

$$B_m = \frac{\int u_L(t) dt}{N \cdot A_e} + B_r \quad (1)$$

$$H_m = \frac{N \cdot I_m}{l_e} \quad (2)$$

增大直流输入功率，由图 2 中每次测量的磁化曲线顶点 A 可以得到更多的 H_m 与 B_m，从而可以计算磁芯的幅值磁导率 μ_a 与增量磁导率 μ_Δ ，每次测量结果幅值磁导率 μ_a 和增量磁导率 μ_Δ 表示为^[3]：

$$\mu_a = \frac{B_m}{\mu_0 \cdot H_m} \quad (3)$$

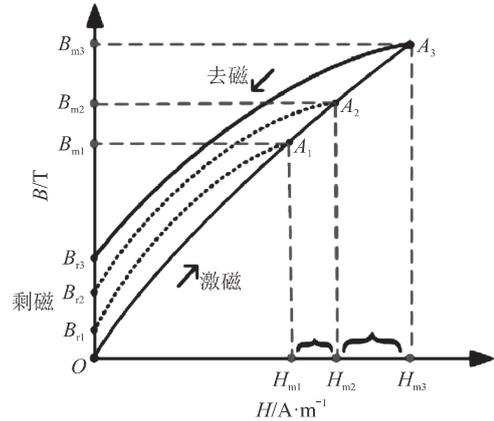


图 2 磁芯磁感应强度 B 与磁场强度 H 的 B-H 曲线

$$\mu_\Delta |_{H_{DC}} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \cdot \Delta H} \quad (4)$$

其中， ΔB 和 ΔH 分别为增量磁感应强度与增量磁场强度，H_{DC} 为前一次测量所得 H_m， μ_0 为真空磁导率。

2.2 测量磁芯有效参数计算

金属磁粉芯在功率变换器中一般作为储能电感，同时工作磁场强度较大。由于金属磁粉芯材料繁多，根据需求场合不同，实际应用尺寸也大小不一。本文一方面考虑实际选择材料的过程中，为节约测量成本，常采用小样品试样去评估成品的磁化特性；另一方面结合 IEC 中金属磁粉芯测量的标准尺寸，选择两种具有代表性的磁粉芯材料与内外径尺寸，如表 1 所示。

表 1 测量磁芯尺寸

| 序号 | 材料 | 外径 D ₁ | 内径 D ₂ | 高度 h |
|----|-----|-------------------|-------------------|------|
| A3 | 铁硅铝 | 26.9 | 14.7 | 11.2 |
| A4 | 铁硅 | 26.9 | 14.7 | 11.2 |

由外径尺寸与磁芯高度可以计算磁芯的横截面积 A_e 和有效磁路长度 l_e。IEC60205 标准规定了适用于铁磁材料闭合回路有效参数计算的统一规则^[7,9]，本文采用 IEC60205 标准中规定的方法计算磁芯的有效长度与有效横截面积，磁芯常数 C₁ 与 C₂ 及 l_e 与 A_e 按

$$\begin{cases} C_1 = \frac{2\pi}{h \cdot \ln(D_1/D_2)} \\ C_2 = \frac{4\pi \cdot (1/D_1 - 1/D_2)}{h^2 \cdot \ln^3(D_1/D_2)} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} l_e = C_1^2 / C_2 \\ A_e = C_1 / C_2 \end{cases} \quad (6)$$

计算，结果为：有效磁路长度 l_e=61.531 mm，有

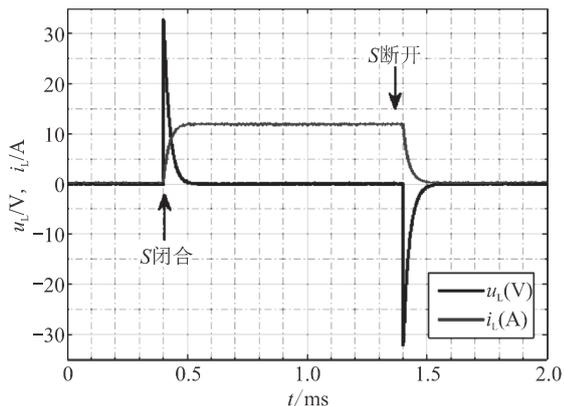


图 3 磁芯直流测量法电压电流的典型采样波形

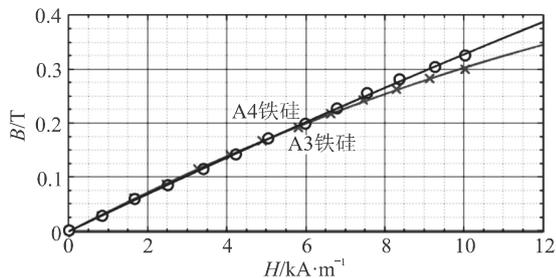


图 4 基本磁化曲线

效横截面积 $A_e=66.278 \text{ mm}^2$ 。

为上述两种金属磁粉芯样品施加绕线(聚酯漆包线, 线径 0.38 mm)。为消除线圈电阻对测量电压的影响同时最大化原副边的耦合, 减小漏感, 选择双绕组并绕的绕线方式, 绕组均匀分布, 匝数为 50 匝, 原、副边匝数比为 1 : 1。

3 测量结果

按图 1 搭建直流测量法的测量回路, 选择双并联大功率 MOSFET AOD4184 作为电路开关, 充电电阻 $R_1=5 \text{ }\Omega$ (包含线路直流电阻与 MOSFET 导通电阻), 放电电阻 $R_2=10 \text{ }\Omega$, 均为大功率电阻。数据采集设备选择功率分析仪 PX8000, 其具有 12 位的 AD 转换精度和 100 MS/s 的采样率, 电压直接输入量程 1.5~1000 V(均方根值), 电流测量可以外接传感器, 本实验选择电流传感器为 YOKOGAWA 701932, 适用于大功率与高精度采样。

测量电感原边电流 $i_1(t)$ 和副边电压 $u_1(t)$ 的典型采样波形图如图 3 所示。改变激励大小, 通过(1)和(2)式计算不同激励条件下的 B_m 与 H_m , 得到 A3 与 A4 的基本磁化曲线如图 4 所示, 表 2 是完整的实验测量数据。

由表 2 和图 4 可以看出, 直流测量法成功将标

准磁芯的磁感应强度 B 的测量范围提高至 0.3 T, 磁场强度 H 达到 10 kA/m 以上。另外由图 1 的原理图可以看出, 直流测量法测量设备很少, 测量成本低, 同时大功率直流源容易获得; 所需控制设备为 MOSFET, 控制信号为脉宽可调的单脉冲信号, 控制部分十分简单。

表 2 实验测量数据

| A3 铁硅铝 | | | | A4 铁硅 | | | |
|--------|----------------------|---------|--------------|-------|----------------------|---------|--------------|
| B/T | H/ A·m ⁻¹ | μ_a | μ_Δ | B/T | H/ A·m ⁻¹ | μ_a | μ_Δ |
| 0.03 | 885.73 | 23.51 | 23.51 | 0.03 | 910.11 | 22.48 | 22.48 |
| 0.06 | 1779.59 | 25.12 | 26.71 | 0.05 | 1803.97 | 24.21 | 25.96 |
| 0.08 | 2665.32 | 23.76 | 21.04 | 0.08 | 2697.83 | 23.12 | 20.91 |
| 0.11 | 3534.80 | 23.82 | 23.99 | 0.11 | 3681.07 | 22.99 | 22.64 |
| 0.13 | 4420.54 | 23.43 | 21.89 | 0.13 | 4550.55 | 23.03 | 23.21 |
| 0.15 | 5281.89 | 23.31 | 22.68 | 0.16 | 5444.41 | 23.26 | 24.46 |
| 0.18 | 6257.01 | 22.56 | 18.48 | 0.18 | 6460.16 | 22.75 | 19.98 |
| 0.20 | 7150.87 | 22.42 | 21.47 | 0.21 | 7313.39 | 22.90 | 24.03 |
| 0.22 | 8036.60 | 22.25 | 20.89 | 0.24 | 8125.99 | 23.20 | 25.94 |
| 0.24 | 8938.58 | 21.70 | 16.78 | 0.26 | 9019.84 | 23.01 | 21.32 |
| 0.26 | 9832.44 | 21.27 | 17.03 | 0.28 | 9994.96 | 22.46 | 17.35 |
| 0.28 | 10807.56 | 20.45 | 12.13 | 0.30 | 10807.56 | 22.22 | 19.18 |

为验证直流测量法的有效性, 用阻抗测量法测量金属磁粉芯, 与直流测量法测量结果进行对比, 以铁硅材料金属磁粉芯为例, 测量对比结果如图 5 所示, 由图 5 可以看出, 直流测量法的测量结果与阻抗测量法的测量结果基本吻合。

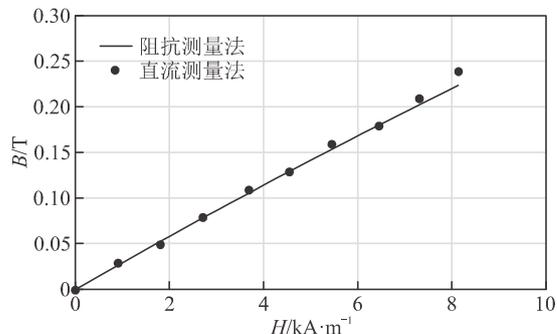


图 5 阻抗测量法与直流测量法对比

4 测量误差分析

4.1 等效测量模型与测量误差

由于被测磁芯在磁化过程中必然存在绕组损耗与磁芯损耗, 这两部分损耗都会对磁化特性的测量带来影响, 考虑磁芯损耗与绕组损耗的等效电路如图 6 所示, 其中 R_w 为绕组损耗等效电阻, R_c 为磁芯损耗等效电阻, 该模型为磁芯经典等效模型, 广泛应用于变压器磁芯非线性仿真与计算。等效充放电电路如图 7 所示。

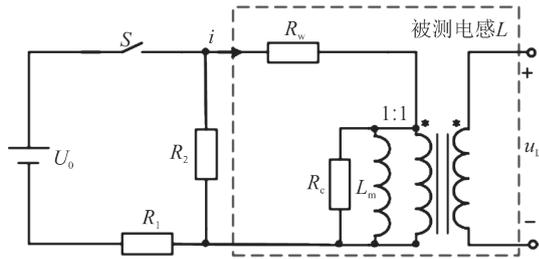


图6 直流测量法实验原理图

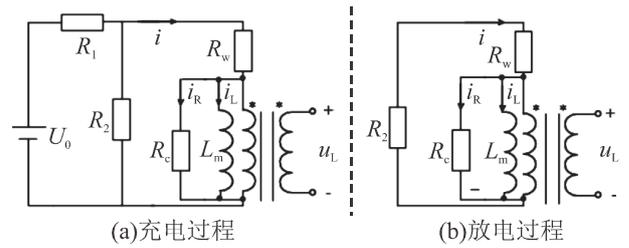


图7 充放电过程

对于充电过程(图7a), 假设在 $t=0$ 时刻开关 S 闭合, 此时电路为一阶零状态响应, 则:

$$i_L(0_+) = i_L(0_-) = 0 \quad (7)$$

$$i_L(\infty) = \frac{U_0}{R_1 + R_2 // R_w} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_c} = \frac{U_0 \cdot R_2}{R_1 \cdot (R_2 + R_w) + R_2 \cdot R_c} = I_0 \quad (8)$$

$$i_R(0_+) = \frac{U_0}{R_1 + R_2 // (R_c + R_w)} \cdot \frac{R_2}{R_c + R_w + R_2} \quad (9)$$

$$i_R(\infty) = 0 \quad (10)$$

电流 $i_L(t)$ 和 $i_R(t)$ 为:

$$i_L(t) = \frac{U_0 \cdot R_2}{R_1 \cdot (R_2 + R_w) + R_2 \cdot R_c} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (11)$$

$$i_R(t) = \frac{U_0 \cdot R_2}{R_1 \cdot (R_c + R_w + R_2) + R_2 \cdot (R_c + R_w)} e^{-t/\tau} \quad (12)$$

因此等效磁芯等效模型中流过的电流 $i(t)$ 为:

$$i(t) = i_L(t) + i_R(t) \quad (13)$$

副边电压

$$u_L(t) = i_R(t) \cdot R_c = \frac{U_0 \cdot R_2 \cdot R_c}{R_1 \cdot (R_c + R_w + R_2) + R_2 \cdot (R_c + R_w)} e^{-t/\tau} \quad (14)$$

充电过程的时间

$$\tau = \frac{L_m}{R_c // (R_w + R_1 // R_2)} \quad (15)$$

与上述充电过程类似, 当 S 断开, 此时电路为一阶零输入响应, 由图7b有:

$$i_L(t) = I_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (16)$$

$$i_R(t) = -I_0 \cdot \frac{R_2 + R_w}{R_2 + R_w + R_c} \cdot e^{-t/\tau} \quad (17)$$

因此放电过程等效磁芯等效模型中流过的电流 $i(t)$ 为:

$$i(t) = I_0 \cdot \left(\frac{R_c}{R_2 + R_w + R_c} \right) \cdot e^{-t/\tau} \quad (18)$$

电感副边电压为:

$$u_L(t) = -I_0 \cdot \frac{(R_2 + R_w) \cdot R_c}{R_2 + R_w + R_c} \cdot e^{-t/\tau} \quad (19)$$

放电过程中的时间

$$\tau = \frac{L_m}{(R_2 + R_w) // R_c} \quad (20)$$

由上述计算过程可以发现, 由于磁芯损耗等效电阻的存在, 必然引起测量电流与电压的误差。结合实际情况, 在直流测量法中集肤效应与邻近效应对绕组损耗的影响很小, R_w 可近似等效为线圈直流电阻。另外, 磁芯损耗主要由磁滞损耗和涡流损耗组成, 这两部分损耗均与频率有关, 频率越高磁芯损耗越大, 直流测量法是基于直流功率源的测量方法, 磁芯损耗的影响可以忽略不计。

3.2 实验数据处理误差

除测量误差, 实验误差还包括由计算引入的数据处理误差。数据处理误差包括两部分: 截断误差与舍入误差^[8]。由于数字示波器的原理是对连续波形的离散采样, 因此应用(1)式计算磁感应强度 B 时涉及到数值积分, 必然引入误差。在数值分析中常用余项描述数值积分公式的截断误差, 针对一阶动态电路, 假设运用复化梯形公式计算磁感应强度 B , 其余项

$$R_n = -\frac{4}{12} \cdot \tau \cdot \Delta t^2 \cdot u''(\eta), \eta \in (0, 4\tau) \quad (21)$$

本实验中 $\Delta t = 10^{-8}$ s, R_n 的数量级在 10^{-20} 左右, 因此测量中理论计算数值积分的误差非常小。

另一部分引起数值积分误差的因素为采样过程中引入的噪声。噪声对数值积分运算的影响主要是非零均值引起的波形倾斜^[10]。噪声主要来源于示波器内部的热噪声和电子噪声等。此部分误差对积分计算影响比较大, 因此一方面要选择分辨率高、上升时间短的示波器; 另一方面可以结合噪声分布规律控制信噪比, 将积分误差控制在一定范围内。

5 结论

(1) 相比于传统交流激励的方法, 磁芯直流测量法能够实现更宽范围的磁化特性测量, 且直流测量

(下转 40 页)

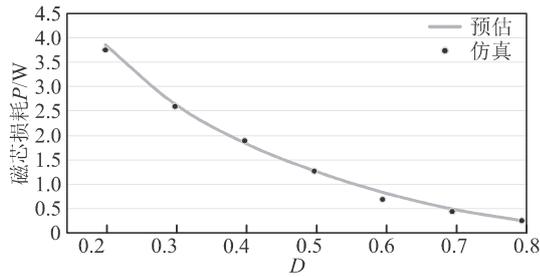


图 6 Buck 变换器磁芯损耗实测值和仿真值比较

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。