

# 矩形波激励下磁芯损耗的研究

## The study of the core loss under the rectangular wave

汪晶慧, 陈为

福州大学电气工程与自动化学院 350108

**摘要:** 磁性元件的磁芯损耗与功率变换器的效率息息相关, 功率变换器中磁性元件的激励电压是占空比可调的矩形波, 因此矩形波激励下磁性元件的磁芯损耗模型的精确预测有助于磁性元件的设计和优化。本文基于修正的斯坦麦茨方程提出新型的矩形波激励下磁芯损耗预测模型, 经前期建立的磁芯损耗测量装置的实验验证, 证实其能精确地预测矩形波激励下的磁芯损耗, 且能描述占空比不等于 0.5 的矩形波激励下磁滞回线不对称的物理现象。

**关键词:** 磁芯损耗, 矩形波激励, 建模

中图分类号: TM4 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517 (2015) 11-5-117

### 1 引言

磁性元件作为功率变换技术中必不可少的器件, 其损耗与功率变换器的效率息息相关。功率变换器中磁性元件的激励电压大多是占空比可调的矩形波, 描写矩形波电压激励的参数频率、幅值和占空比都会影响其激励下的磁芯损耗<sup>[1]</sup>。而磁芯厂家提供的磁芯损耗数据都是基于正弦波激励, 因此, 建立精确的矩形波激励下磁性元件磁芯损耗的预测模型具有重要的理论意义和工程应用价值。

本文在前期建立的磁芯损耗测量装置的基础上, 通过大量的磁性元件磁芯损耗的数据测量, 建立了基于修正的斯坦麦茨方程 (MSE) 的精确的磁芯损耗预测模型, 且能描述占空比不等于 0.5 的矩形波激励下磁滞回线激励和祛磁不对称的物理现象。

### 2 现有的磁芯损耗预测模型

现有磁芯损耗模型中, 广为人们接受的斯坦麦茨方程 (Steinmetz-equation) 是计算正弦波激励下的磁芯损耗<sup>[2]</sup>, 其认为单位体积的功率损耗  $P$  取决于频率  $f$  和峰值磁通密度  $B_m$  的幂函数:

$$P = k \cdot f^a \cdot B_m^\beta \quad (1)$$

式中  $k$ 、 $a$ 、 $b$  系数或者是磁芯厂商提供, 或者用户根据实验数据获取。对于同一材料, 不同的频率下有不同的系数值, 一般  $1 < a < 3$ ,  $2 < b < 3$ 。文献 [3][4] 在斯坦麦茨方程

的基础上, 不增加额外的参数, 提出了修正的斯坦麦茨方程 (MSE) 来计算任意波形激励下的磁芯损耗。MSE 是假设磁芯损耗与磁通密度变化率有关, 再通过对不同时刻的不同磁通密度变化率作加权处理, 得到加权平均磁密变化率, 而磁芯损耗由加权平均磁密变化率决定, 从而计算出任意波形励磁下的等效正弦波频率:

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

而后用等效正弦波频率计算矩形波激励下磁芯损耗:

$$P = f \cdot (k \cdot f_{\text{sin,eq}}^{a-1} \cdot B^\beta) \quad (3)$$

式中  $f$  为任意波型的频率;  $k$ 、 $a$ 、 $b$  系数仍为对应  $f_{\text{sin,eq}}$  下的斯坦麦茨方程中的系数。

### 3 实验装置

为了实现和评估新型的磁芯损耗预测模型, 本文笔者建立了测量磁芯损耗的装置, 且验证了其精度。

#### 1) 定标量热计法测量装置

被测件损耗最终将转化为热量, 量热计法是通过测量被测件损耗发热引起的温升得到损耗<sup>[5]</sup>。测量时, 被测磁性元件放在盛有导热性好、热容小、绝缘性高的热工质的隔热容器里。若知道热工质的比热容, 则可通过温升来获得损耗, 计算如下:

$$W = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (4)$$

式中的  $W$  是焦耳能量； $c$  是比热容； $m$  是物体的质量； $\Delta T$  是温升。量热计法不受被测件电气特性的影响，从理论上可以精确测量被测件的损耗。本文笔者建立了量热法装置，如图 1 所示。其误差来源主要有隔热容器的散热、容器内转子转动带来附加的热等。为了有效地消除误差，文献 [6] 提出定标量热计法。其具体做法是：在与被测件测量环境相同的情况下（相同的环境温度，等量的热工质，相同的磁力搅拌器转速），将温度系数小的电阻置于绝热容器中做热源，给电阻通以直流电压一段时间后断电，待温度稳定后读出温升。直流电压、电流和通电时间之积即为电阻的焦耳热量。改变电压，重复实验，可得热量 ~ 温升曲线，用线性最小二乘法拟合热量与温升的函数关系，如式 (5) 所示。

$$W = c \cdot m(\Delta T + \Delta T_0) = c \cdot m \cdot \Delta T + c \cdot m \cdot \Delta T_0 = k_1 \cdot \Delta T + k_2 \quad (5)$$

式中  $\Delta T_0$  为散热和额外热量的温升代数和，在固定的时间内是固定值；系数  $c$  和  $m$  在稳定的工况下是线性的，因此可通过拟合得到系数  $k_1$  和  $k_2$ ，也就无需精确的  $c$  值。然后在相同条件下用磁性元件实验，在所需波形、频率、幅值等条件下测得温升，由热量与温升函数关系得磁性元件产生的热量，即其损耗。文献 [6] 中验证定标量热计法最大相对误差是 4.99%，可精确测量小损耗角磁件的磁芯损耗。

交流功率计法测量高阻抗角磁粉芯磁性元件磁芯损耗时测量误差很大，因此本文利用建立好的定标量热计法测量装置测量正弦波激励下的磁芯损耗。

## 2) 直流法测量装置

针对交流功率计法在测量阻抗角接近  $90^\circ$  的磁芯损耗时会产生很大的测量误差的问题，文献 [7] 采用直流法测量磁芯损耗。其原理如图 2 所示，直流激励源通过 DC/AC 电路转换为加在被测磁性元件上的占空比可调的矩形波电

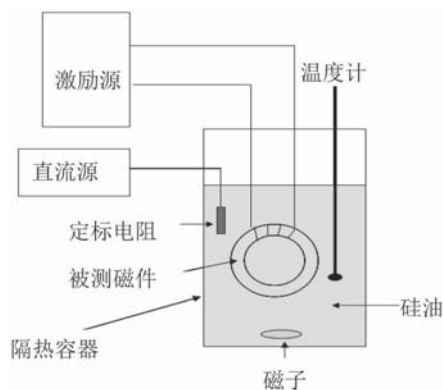


图 1 量热法测量装置原理图

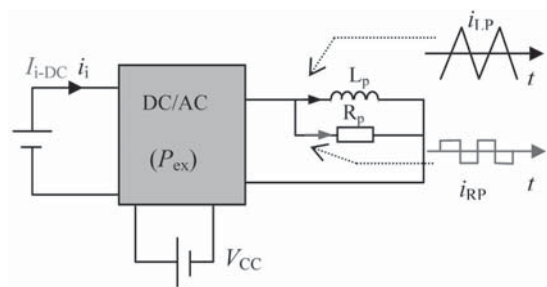


图 2 直流测量法原理图

压。图中所示磁性元件采用并联模型，磁件上励磁电感上的电流则为图中所示的三角波波形  $i_{i,p}$ ，图中的  $R$  为磁件损耗交流等效并联电阻， $R$  上的电流为图中所示的矩形波波形  $i_{i,rp}$ 。外部的  $V_{CC}$  给 DC/AC 电路的驱动电路提供电源。激励源输出的有功功率等于直流激励源以外电路消耗的总功率。直流激励源的输出功率减去被测磁性元件以外电路消耗的功率则是被测磁性元件的损耗，计算如下：

$$P_{\text{core}} = P_{\text{in}} - P_{\text{ex}} - P_{\text{copper}} \quad (6)$$

式中的  $P_{\text{in}}$  是电源的输出有功功率； $P_{\text{ex}}$  是除了磁性元件损耗以外的其他损耗； $P_{\text{core}}$  是磁芯损耗； $P_{\text{copper}}$  是线圈损耗。而  $P_{\text{in}}$  可以计算如下：

$$P_{\text{in}} = V_i \cdot I_{i,\text{DC}} \quad (7)$$

式中的  $V_i$  是输入直流电压； $I_{i,\text{DC}}$  是输入端电流的直流分量。从式 (7) 中可以看出，只要测量出直流激励源的输入端电流  $i_i$  的直流成分  $I_{i,\text{DC}}$  便可得到总输出功率  $P_{\text{in}}$ 。这是直流测量法最大的优点：避免了交流功率法被测磁性元件上电压和电流之间相位差带来的误差，也就规避了阻抗角对测量的影响。

式 (7) 中的  $P_{\text{ex}}$  文献 [9] 采用空心电感定标的方法拟合扣除。磁性元件若采用里兹线绕制且匝数较少时式子中  $P_{\text{copper}}$  可忽略，也可用文献 [8] 中的方法扣除。文献 [7] 中验证该装置测量的最大相对误差只有 6.59%，因此可精确地测量高阻抗角磁件在矩形波激励下的磁芯损耗。

本文利用文献 [7] 中建立的直流法测量装置测量不同占空比矩形波激励下的磁芯损耗。

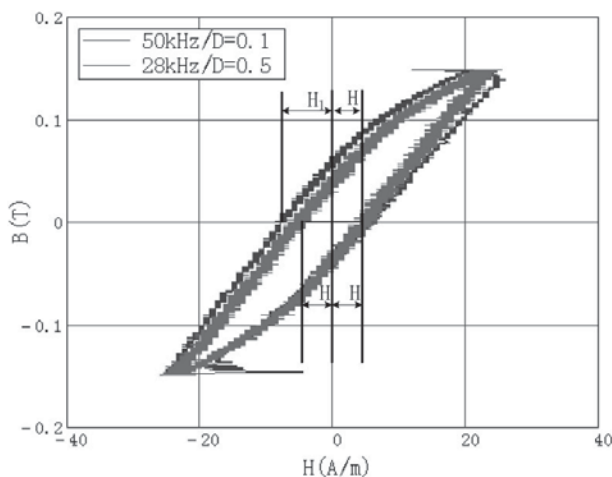
## 4 矩形波激励下磁性元件的磁滞回线

利用文献 [7] 中建立的直流法测量装置测量磁性元件的磁滞回线，示波器采样被测磁性元件上的电压和电流信号，用下式分别计算磁感应强度  $B(t)$  和磁场强度  $H(t)$ ：

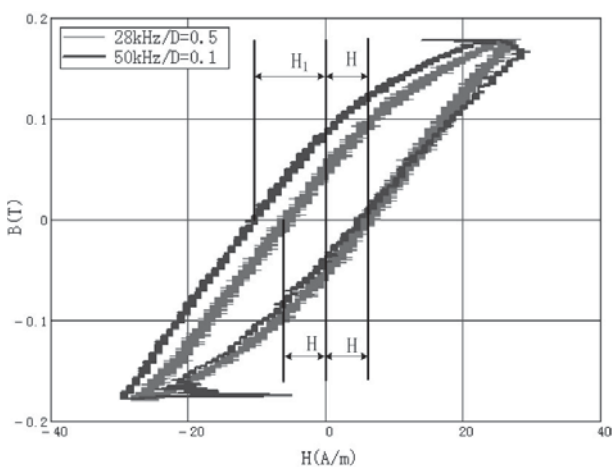
$$B(t) = \frac{1}{N \cdot A_e} \int_{-\infty}^t u(\xi) d\xi \quad (8)$$

$$H(t) = \frac{i(t) \cdot N}{l_e} \quad (9)$$

式中的  $N$  是磁性元件的匝数； $A_e$  是磁性元件的有效截面积； $l_e$  是有效磁路长度； $u(t)$  和  $i(t)$  分别是数字示波器采集的磁性元件上电压和电流。以铁氧体 PC47 磁性材料为例绘制出的磁滞回线如图 3 所示。图 3(a) 图和 (b) 图中分别有两条磁滞回线，对称的磁滞回线是频率为 28kHz，占空比为 0.5，磁通密度峰值分别为 0.15T 和 0.18T 时的磁滞回线；不对称的磁滞回线是频率为 50kHz，占空比为 0.1，磁通密度峰值为 0.15T 和 0.18T 时的磁滞回线。从图中可以看出，占空比为 0.1 的矩形波激励下的磁滞回线激磁和祛磁不对称。



(a) 磁通密度峰值为 0.15T



(b) 磁通密度峰值为 0.18T

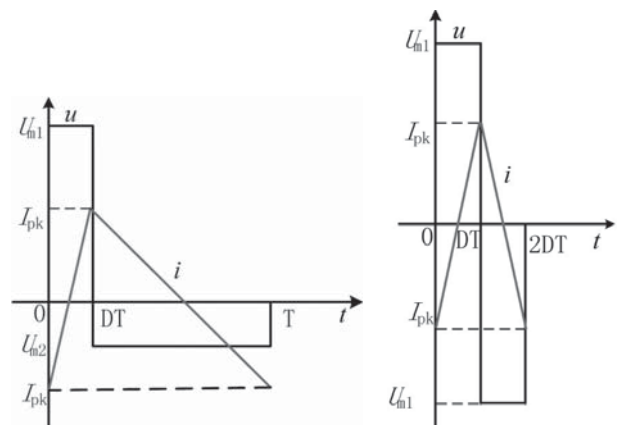
图 3 铁氧体 PC47 的磁滞回线

## 5 矩形波激励下磁芯损耗的新模型——基于 MSE 加权平均法

修正斯坦麦茨公式 (MSE) 计算不同占空比矩形波激励下磁芯损耗在定性上有其合理性，但是在某些条件下有其不合理的地方，且不能描述前面磁滞回线在占空比不等于 0.5 时激磁和祛磁不对称的物理现象。磁性元件的激磁和祛磁不仅与磁通密度峰值有关，而且与磁通密度的变化率有关。本文在修正斯坦麦茨公式 (MSE) 的基础上提出加权平均法计算占空比可调矩形波激励下磁芯损耗。加权平均法是把矩形波激励的一个周期分成几段，以电流曲线的拐点为分界线。如图 4 所示，把图 4(a) 图的矩形波分成 (b) 图和 (c) 图两段。每一段都用式 (10) 计算其等效频率，用式 (11) 计算每一段的损耗，最后利用式 (12) 加权求总的磁芯损耗，如下：

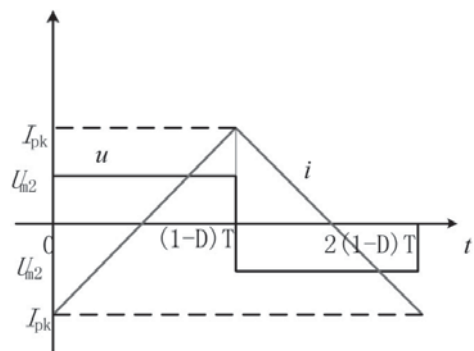
$$f_{\text{sin,eqi}} = \frac{8}{\pi^2 \cdot 2 \cdot \Delta T_i} = \frac{4}{\pi^2 \cdot \Delta T_i} \quad (10)$$

$$P_i = f_i \cdot (k \cdot f_{\text{sin,eqi}}^{\alpha-1} \cdot B_m^\beta) \cdot \frac{\Delta T_i}{T} \quad (11)$$



(a) 磁性元件压、电流波形

(b) 第一段波形



(c) 第二段波形

图 4 加权平均法原理

$$P_{total} = \sum P_i \quad (12)$$

式中  $\Delta T_i$  为第  $i$  段的时间长度； $f_{sin.eqi}$  为第  $i$  段的等效正弦频率； $f_i$  是第  $i$  段的方波工作频率； $P_i$  为第  $i$  段的功率损耗； $B_m$  为最大磁通密度； $T$  是整个波形的周期； $P_{total}$  是总的磁芯损耗。

图 4(a) 所示的不同占空比矩形波的  $i$  为 2，第一段的  $\Delta T_1$  为  $D \cdot T$ ，第二段的  $\Delta T_2$  为  $(1-D) \Delta T$ 。则：

$$f_{sin.eq1} = \frac{4}{\pi^2 \cdot D \cdot T} \quad (13)$$

$$f_{sin.eq2} = \frac{4}{\pi^2 \cdot (1-D) \cdot T} \quad (14)$$

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot D \cdot T} \quad (15)$$

$$f_2 = \frac{1}{2(1-D) \cdot T} \quad (16)$$

利用式 (13) 至式 (16) 分别计算频率为 50kHz 和 100kHz 下不同占空比的每一段的等效频率，结果见表 1 和表 2。

## 6 实验验证

为了验证加权平均法计算磁件磁芯损耗的精度，本文利用建立好的量热法测量装置和直流法测量装置测量了钕坡莫合金 MPP 磁芯 CM229173 的磁芯损耗，结果如图 5 和图 6 所示。图 5 中  $P_{sin}$  是频率为 100kHz、 $B_m$  为 0.1T 正弦波激励下的磁芯损耗， $P_{square}$  为频率为 100kHz、 $B_m$  为 0.1T 占空比不同的矩形波激励下的磁芯损耗。图 6 中  $P_{sin}$  是频率为 50kHz、 $B_m$  为 0.1T 正弦波激励下的磁芯损耗， $P_{square}$  为频率为 50kHz、 $B_m$  为 0.1T 占空比不同的矩形波激励下的磁芯损耗。从图中可以看出：占空比从 0.5 变到 0.1，其磁芯损耗变大；占空比为 0.5 的矩形波激励下的磁芯损耗比同频率相同磁感应强度的正弦波激励的磁芯损耗小。

分别用修正的斯坦麦茨和加权平均法来计算不同占空比矩形波激励下磁芯损耗，并且与测量得到的不同占空比矩形波激励下磁芯损耗比较，得到的数据见表 3。表 3 中  $D$  为占空比， $P_{等效}$  是修正的斯坦麦茨计算的磁芯损耗， $P_{加权等效}$  是加权平均法计算得到的磁芯损耗， $P_{直流法}$  是直流法测

表 1 频率为 50kHz 不同占空比的等效频率

| 占空比D       | 0.1           |               | 0.2           |               | 0.3           |               | 0.4           |               |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 等效频率 (kHz) | $f_{sin.eq1}$ | $f_{sin.eq2}$ | $f_{sin.eq1}$ | $f_{sin.eq2}$ | $f_{sin.eq1}$ | $f_{sin.eq2}$ | $f_{sin.eq1}$ | $f_{sin.eq2}$ |
|            | 202.642       | 22.516        | 101.321       | 25.330        | 67.548        | 28.949        | 50.661        | 33.774        |

表 2 频率为 100kHz 不同占空比的等效频率

| 占空比D      | 0.1           |               | 0.2           |               | 0.3           |               | 0.4           |               |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 等效频率(kHz) | $f_{sin.eq1}$ | $f_{sin.eq2}$ | $f_{sin.eq1}$ | $f_{sin.eq2}$ | $f_{sin.eq1}$ | $f_{sin.eq2}$ | $f_{sin.eq1}$ | $f_{sin.eq2}$ |
|           | 405.285       | 45.032        | 202.642       | 50.661        | 135.095       | 57.898        | 101.321       | 67.548        |

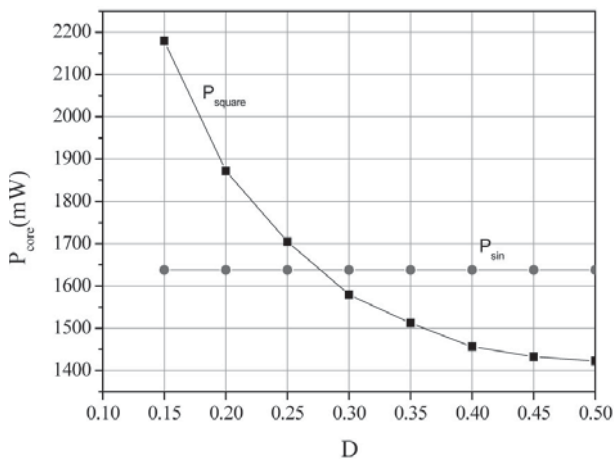


图 5  $f=100\text{kHz}$ 、 $B_m=0.1\text{T}$  磁芯损耗曲线

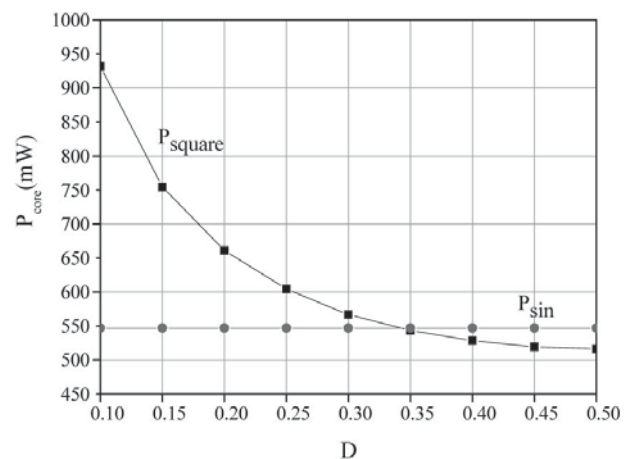


图 6  $f=50\text{kHz}$ 、 $B_m=0.1\text{T}$  磁芯损耗曲线



表 3 测量及分别用两种模型计算的磁芯损耗

| $f$ 方波 (kHz) | D   | $P_{等效}$ (mW) | $P_{加权等效}$ (mW) | $P_{直流法}$ (mW) | $B_m$ (T) | 等效误差%  | 加权误差% |
|--------------|-----|---------------|-----------------|----------------|-----------|--------|-------|
| 50           | 0.2 | 575.41        | 627.18          | 661.08         | 0.1       | -12.96 | -5.13 |
| 50           | 0.3 | 531.54        | 571.11          | 566.86         | 0.1       | -6.23  | 0.75  |
| 50           | 0.4 | 526.74        | 515.04          | 528.36         | 0.1       | -0.31  | -2.52 |
| 50           | 0.5 | 506.63        | 506.63          | 516.34         | 0.1       | -1.88  | -1.88 |
| 100          | 0.2 | 1911.98       | 1809.08         | 1851.81        | 0.1       | 3.25   | -2.31 |
| 100          | 0.4 | 1576.26       | 1395.25         | 1450.81        | 0.1       | 8.65   | -3.83 |
| 100          | 0.5 | 1473.74       | 1473.74         | 1423.17        | 0.1       | 3.55   | 3.55  |

量的磁芯损耗；等效误差是用修正斯坦麦茨方程计算磁芯损耗的相对误差；加权误差是用加权平均法计算磁芯损耗的相对误差。

从表中可以看出：在占空比较小时，加权平均法计算磁芯损耗的误差较修正斯坦麦茨计算磁芯损耗相对误差要小。可见用加权平均法计算磁芯损耗较修正斯坦麦茨计算磁芯损耗精确，特别是在计算占空比较小的矩形波激励下磁芯损耗时。且其能描述占空比不等于 0.5 的矩形波激励下磁滞回线激励和祛磁不对称的物理现象。

## 7 结论

本文分别利用前期建立好的定标量热计法装置和直流法装置测量正弦波激励和矩形波激励下磁性元件磁芯损耗，提出基于 MSE 加权平均法预测磁件磁芯损耗，得到以下的结论：

(1) 占空比等于 0.5 的矩形波激励下磁滞回线激励和祛磁对称；而占空比不等于 0.5 的矩形波激励下磁滞回线激励和祛磁不对称。

(2) 矩形波激励的占空比从 0.5 变到 0.1，其磁芯损耗变大；占空比为 0.5 的矩形波激励下的磁芯损耗比同频率相同磁感应强度的正弦波激励的磁芯损耗小。

(3) 在修正斯坦麦茨方程计算磁芯损耗基础上，提出加权平均法计算占空比可调矩形波激励下磁芯损耗。加权平均法是把一个周期分成几段，以曲线的拐点为分界线。每一段都修正斯坦麦茨方程计算其等效频率，而后加权平均计算总的损耗。实验验证加权平均法较修正斯坦麦茨方程有更高的精度，且能描述占空比不等于 0.5 矩形波激励下的磁件磁滞回线激励和祛磁不对称的物理现象。

## 参考文献

- [1] D.Y.Chen. Comparisons of high frequency magnetic core losses under two different driving conditions: a sinusoidal voltage and a square-wave voltage. IEEE. Proc. PESC, 1978: 237-240.
- [2] C. P. Steinmetz. On the law of hysteresis. AIEE Transactions, vol. 9, 1892: 3-64.
- [3] Reinert, J, Brockmeyer, A, De Doncker, R.W.A.A. Calculation of losses in ferro- and ferrimagnetic materials based on the modified steinmetz equation. IEEE Transactions on industry applications, 37(4), 2001: 1055-1061.
- [4] 旷建军, 郑力新, 卢小芬, 方瑞明. 非正弦励磁下磁芯损耗的计算. 磁性材料及器件, 2009: 44-46.
- [5] Sven Weier, Mohsin A. Shafi, Richard McMahon. Precision Calorimetry for the accurate measurement of losses in power electronic devices. IEEE transactions on industry applications, 46(1), 2010: 278-284.
- [6] 汪晶慧, 陈为. 超低损耗角磁芯损耗测量的量热计法. 电工电能新技术, 2012: 6-9.
- [7] 汪晶慧, 陈为. 超低损耗角磁芯高频损耗测量方法. 电工技术学报, 2012: 133-138.
- [8] 汪晶慧, 陈为. 矩形波激励下磁芯损耗测量中绕组损耗的测量. 南昌大学学报(工科版), 2012: 279-282.

## 作者简介

汪晶慧：1975 年生，博士，副教授，福州大学电气工程与自动化学院，18960877689。