

考虑可逆分量的解析 Preisach 磁滞模型及其特征参数辨识算法

陈彬^{1,2}, 王斐然², 万妮娜³, 唐波^{1,2}, 黄力^{1,2}

(1. 湖北省输电线路工程技术研究中心, 宜昌 443002; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 宜昌 443002;
3. 国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司, 宜昌 443002)

摘要: 基于洛伦兹函数的解析 Preisach 模型具有形式简便、分布函数易于确定等优势, 但如果考虑可逆磁化分量, 模型的复杂程度和参数会显著增加, 导致用于传统模型参数辨识的解析或神经网络等方法不再适用。为此, 首先通过引入可逆磁化分量, 构建一种考虑可逆分量的解析 Preisach 模型; 然后, 分析了各个特征参数对磁滞回线形状的影响规律, 并且结合循环迭代法与粒子群算法, 提出一种针对考虑可逆分量解析 Preisach 模型的特征参数混合寻优算法; 最后, 将所提磁滞模型及其参数辨识算法得到的磁滞回线计算值与实测值进行对比。结果表明, 该模型及其参数辨识算法的最大平均相对误差为 4.49%, 验证了该方法的准确性和有效性。

关键词: 磁滞特性; Preisach 模型; 可逆磁化分量; 粒子群算法; 参数辨识

Analytical Preisach Hysteresis Model Considering Reversible Component and Its Characteristic Parameter Identification Algorithm

CHEN Bin^{1,2}, WANG Feiran², WAN Nina³, TANG Bo^{1,2}, HUANG Li^{1,2}

(1. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, Yichang 443002, China;
2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
3. Yichang Electric Company, State Grid Hubei Electric Power Company, Yichang 443002, China)

Abstract: The analytical Preisach model based on the Lorentz function has the advantages of simple form and easy determination of distribution function, which can be applied to the simulation of hysteresis and loss characteristics of core. However, at present, analytical or neural network methods are usually used to identify its parameters. The above methods have some shortcomings in dealing with multi-dimensional complex problems, such as low accuracy and slow convergence speed. In addition, if the reversible magnetization component needs to be considered, the model complexity and model parameters will increase significantly, which aggravates the difficulty of parameter identification. Therefore, this paper first constructs an analytical Preisach model considering the reversible component by introducing the reversible magnetization component. Then, the influence of various characteristic parameters on the shape of hysteresis loop is analyzed, and a hybrid optimization algorithm for characteristic parameters considering the reversible component analysis Preisach model is proposed by combining the cyclic iterative method and particle swarm optimization algorithm. Finally, the calculated hysteresis loops obtained by the proposed hysteresis model and its parameter identification algorithm are compared with the measured values. The results show that the maximum average relative error of the model and its parameter identification algorithm is 4.49%, which verifies the accuracy and effectiveness of the proposed method.

Key words: hysteresis characteristics; Preisach model; reversible magnetization component; particle swarm algorithm; parameter identification

0 引言

铁磁材料被广泛应用于发电机、变压器等电气

设备中, 其固有的磁滞特性是一个复杂的非线性多支问题^[1-2]。铁磁材料磁滞特性的深入研究以及精确模拟, 对电气设备的设计、电力系统的安全稳定运行、精确计算铁磁材料内部损耗等具有重要的意义^[3-6]。目前已有的描述磁滞特性的磁滞模型主要有 J-A 模型^[7-9]、Energetic 模型^[10]、Preisach 模型^[11-12]等。其

基金资助项目: 国家自然科学基金青年科学基金(52107006); 湖北省自然科学基金面上项目(2021CFB149)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52107006), Natural Science Foundation of Hubei Province (2021CFB149).

中 J-A 模型与 Energetic 模型需要辨识大量参数, 计算复杂, 模型的精度取决于参数的准确度; 而 Preisach 磁滞模型对铁磁材料的磁性能模拟精度较高, 相较于其他磁滞模型计算较为简单, 因此在铁磁材料磁滞特性的研究中得到了广泛的应用^[13]。

德国物理学家 F. Preisach 在 1935 年首次提出 Preisach 磁滞模型^[14], 在此基础上, 俄国数学家 Kranoselskii 从纯数学形式出发提出了用于表述任何物理滞后现象的经典的 Preisach 模型(classic Preisach model)^[15]。经典 Preisach 模型能够同时兼顾准确性、简便性和效率, 因而作为基础 Preisach 模型进一步发展, 并且取得了大量的理论和应用成果^[16-18]。经典 Preisach 模型作为典型的唯象模型, 此类模型的磁滞物理规律是根据铁磁材料磁特性的实验事实得到的, 同时经典 Preisach 模型的擦除特性与同余特性也是模型准确描述铁磁材料磁滞特性的关键, 因此经典 Preisach 模型对磁滞回线的模拟以及对磁滞现象的描述有较高的精度^[19]。然而, 经典 Preisach 模型作为纯数学形式的磁滞模型, 其在电力系统电磁暂态特性分析等实际工程应用中的计算过于复杂, 需要对其分布函数进行简化。

为了较为简单地求解经典 Preisach 模型的分布函数, R. D. Vecchia 学者早期提出过构造 Everett 积分函数近似计算分布函数的方法^[20], 但具体的确定过程仍较为复杂^[19,21], 主要原因是计算 Everett 积分函数所需要的一阶回转曲线数据测量困难, 测量结果往往不够准确, 易于产生较大的误差, 导致此方法难以实现。相对而言, 文献[21-23]基于目前常用的洛伦兹函数、高斯函数、cosh 函数等来近似代替分布函数, 简化了经典 Preisach 模型的实现过程, 且保证了模型的计算精度。然而, 上述方法均基于矩形磁滞回环来描述磁滞特性, 没有考虑铁磁材料磁化过程中的可逆磁化问题, 影响了磁滞回线模拟的精确度^[19]。

为此, I. D. Mayergoyz 提出了改进的 Preisach 磁滞模型, 即在经典 Preisach 模型的基础上增加了考虑可逆磁化的表达式^[24], 减少了经典模型中同余特性对模型的限制, 更能精确地描述磁滞现象; Min Luo 等学者在对软磁材料磁滞特性的建模中, 进一步提出对可逆磁化分量的确定方法^[25-26]。上述研究虽然对可逆磁化分量有所考虑, 但仅是将可逆磁化分量与经典 Preisach 模型相结合, 并且磁滞模型在考虑可逆磁化后, 模型表达式更加复杂, 如何

确定每个参数, 使其不会影响模型的模拟精度, 是需要考虑的问题。

为了解决考虑可逆分量的解析 Preisach 模型的多维复杂参数辨识问题, 本文首先将磁化过程分解为不可逆分量和可逆分量, 运用基于洛伦兹函数的解析 Preisach 模型表征磁化过程中的不可逆磁化分量, 并结合可逆磁化分量表达式, 构建一种综合考虑不可逆分量与可逆分量的解析 Preisach 模型。然后, 为了确定模型参数的最优值, 采用控制变量法分析了各个特征参数对磁滞回线形状的影响规律, 并结合循环迭代法与粒子群算法, 提出一种针对考虑可逆分量解析 Preisach 模型的特征参数混合寻优算法。最后, 利用电工钢测量系统测量了超薄取向硅钢片的磁特性, 将本文所提磁滞模型及其参数辨识算法得到的磁滞回线计算值与实测值作比较, 验证本文所提方法的有效性 & 准确性。

1 磁滞模型表达式

1.1 基于洛伦兹分布函数的 Preisach 模型

在经典 Preisach 模型理论中, 铁磁材料的磁滞特性可以描述为:

$$f(t) = \iint_{U \geq V} \mu(U, V) \gamma_{UV} u(t) dU dV \quad (1)$$

式中: $\mu(U, V)$ 为分布函数; γ_{UV} 为磁滞算子, 只有 ± 1 两个取值; U 和 V 分别代表磁滞算子翻转时, 输入值 $u(t)$ 的值, 如图 1 所示。

其中经典模型的分布函数 $\mu(U, V)$ 不易确定, 且通过引入 Everett 积分函数^[19]来计算分布函数的方法存在着过程复杂、难以实现等问题。因此, 本文采用另一种分布函数的确定方法即运用洛伦兹函数近似代替分布函数 $\mu(U, V)$ ^[20-21], 其中洛伦兹函数 P_s 的解析式如式(2)所示, 分布函数 $\mu(U, V)$ 可以表示为: $\mu(U, V) = P_s(U)P_s(-V)$ 。

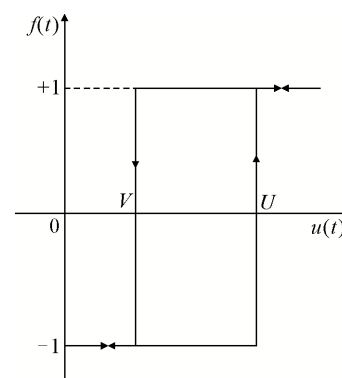


图 1 磁滞算子

Fig.1 Magnetic dipoles

$$P_s(H) = \frac{A}{1 + (\sigma(H - H_d)/H_d)^2} \quad (2)$$

式中： H 为磁场强度； A 、 σ 、 H_d 为洛伦兹函数参数。参数 A 可根据 σ 、 H_d 算出，其计算式为：

$$A = \frac{M_s}{\sqrt{\int_{-H_s}^{H_s} \left(\frac{1}{1 + (\sigma(U - H_d)/H_d)^2} \int_{-H_s}^U \frac{dV}{1 + (\sigma(V + H_d)/H_d)^2} dU \right)} dU} \quad (3)$$

式中： H_s 为饱和磁场强度； M_s 为饱和磁化强度。根据铁磁材料磁滞回线饱和点 (H_s, M_s) 以及 $\mu(U, V) = P_s(U)P_s(-V)$ ，可以分别构成磁滞回线上升段 $(-H_s < H < H_s)$ 和下降段 $(H_s > H > -H_s)$ 的表达式：

$$M_i(H) = -M_s + 2 \int_{-H_s}^H \int_{-H_s}^U P_s(U)P_s(-V) dU dV \quad (4)$$

$$M_d(H) = M_s - 2 \int_{-H}^{-H_s} \int_{-H_s}^U P_s(U)P_s(-V) dU dV \quad (5)$$

将式(2)代入式(4)和式(5)，并对 H 进行求导，分别得到磁滞回线上升段与下降段的导数表达式为：

$$\frac{dM_i}{dH} = \frac{2A^2}{1 + \left(\frac{H - H_d}{H_d}\sigma\right)^2} \frac{H_d}{\sigma} \left(\arctan\left(\frac{H + H_d}{H_d}\sigma\right) - \arctan\left(\frac{-H_s - H_d}{H_d}\sigma\right) \right), -H_s < H < H_s \quad (6)$$

$$\frac{dM_d}{dH} = \frac{-2A^2}{1 + \left(\frac{H + H_d}{H_d}\sigma\right)^2} \frac{H_d}{\sigma} \left(\arctan\left(\frac{H_s - H_d}{H_d}\sigma\right) - \arctan\left(\frac{H - H_d}{H_d}\sigma\right) \right), -H_s < H < H_s \quad (7)$$

本文以3% Si-Fe的超薄取向硅钢片样品为例，磁滞回线的上升段导数 dM_i/dH 如图2所示，测量系统和磁滞回线实验结果详见第3章。磁滞回线的上升段二次导数 $d(dM_i/dH)/dH$ 如图3所示。

由图2、图3可知：

$$\frac{d}{dH} \left(\frac{dM_i}{dH} \right)_{H=H^*} = 0 \quad (8)$$

式中： H^* 为 dM_i/dH 达到最大值时对应的磁场强度。

将式(6)代入式(8)可得：

$$1 + \left(\frac{H^* - H_d}{H_d}\sigma\right)^2 - 2\sigma \frac{H^* - H_d}{H_d} \left(\arctan\left(\frac{H^* + H_d}{H_d}\sigma\right) - \arctan\left(\frac{-H_s + H_d}{H_d}\sigma\right) \right) \left(1 + \left(\frac{H^* + H_d}{H_d}\sigma\right)^2 \right) = 0 \quad (9)$$

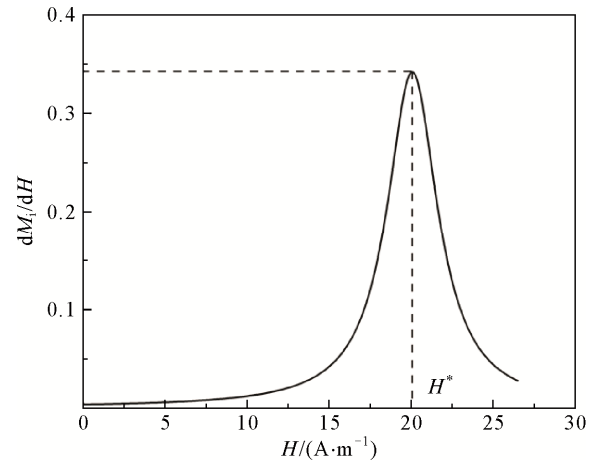


图2 dM_i/dH 曲线

Fig.2 dM_i/dH curve

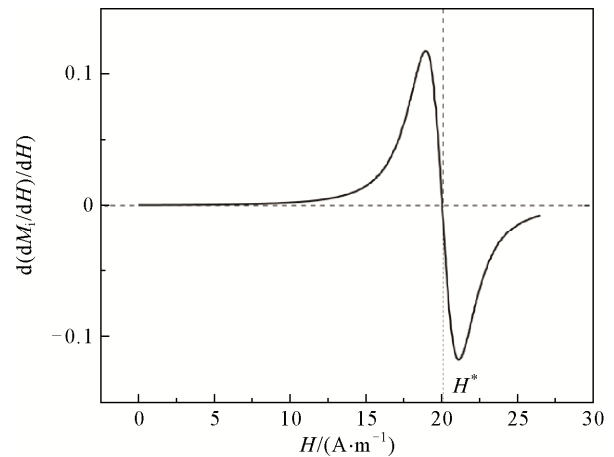


图3 $d(dM_i/dH)/dH$ 曲线

Fig.3 $d(dM_i/dH)/dH$ curve

另外，将式(6)与式(7)相除，可知磁滞回线上升段与下降段对 H 的导数在 H^* 处应满足：

$$\frac{\left(\frac{dM_i}{dH}\right)_{H=H^*}}{-\left(\frac{dM_d}{dH}\right)_{H=H^*}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{H^* + H_d}{H_d}\sigma\right)^2\right)}{\left(1 + \left(\frac{H^* - H_d}{H_d}\sigma\right)^2\right)} \cdot \frac{\left(\arctan\left(\frac{H^* + H_d}{H_d}\sigma\right) - \arctan\left(\frac{-H_s - H_d}{H_d}\sigma\right)\right)}{\left(\arctan\left(\frac{H_s - H_d}{H_d}\sigma\right) - \arctan\left(\frac{H^* - H_d}{H_d}\sigma\right)\right)} \quad (10)$$

通过求解由等式(9)与(10)所构成的非线性方程组，可以确定两个特征参数 σ 、 H_d 的初始值，同样特征参数 A 的初始值由 σ 、 H_d 代入式(3)得出。但由于非线性方程组的求解比较困难，过程较为复杂，

因此需进一步对模型特征参数进行辨识。关于不可逆磁化分量的3个特征参数辨识将在第2章详细讨论。

在确定磁滞模型的特征参数后,即可通过磁滞回线上升段与下降段的模型计算磁滞回线。磁滞回线上升段计算式为:

$$M_i(H) = 2A^2 \left(\frac{H_d}{\sigma} \right)^2 \left(\text{loren} \left(\frac{H + H_d}{H_d} \sigma, 2\sigma \right) - \text{loren} \left(\frac{-H_s + H_d}{H_d} \sigma, 2\sigma \right) \right) + 2A^2 \left(\frac{H_d}{\sigma} \right)^2 \arctan \left(\frac{-H_s + H_d}{H_d} \sigma \right) \cdot \left(\arctan \left(\frac{H - H_d}{H_d} \sigma \right) + \arctan \left(\frac{H_s + H_d}{H_d} \sigma \right) \right) - M_s \quad (11)$$

磁滞回线下降段计算式为:

$$M_d(H) = -2A^2 \left(\frac{H_d}{\sigma} \right)^2 \left(\text{loren} \left(\frac{-H + H_d}{H_d} \sigma, 2\sigma \right) - \text{loren} \left(\frac{-H_s + H_d}{H_d} \sigma, 2\sigma \right) \right) - 2A^2 \left(\frac{H_d}{\sigma} \right)^2 \arctan \left(\frac{-H_s + H_d}{H_d} \sigma \right) \cdot \left(\arctan \left(\frac{-H - H_d}{H_d} \sigma \right) + \arctan \left(\frac{H_s + H_d}{H_d} \sigma \right) \right) + M_s \quad (12)$$

式(11)、(12)中 $\text{loren}(x, a)$ 函数的定义为:

$$\text{loren}(x, a) = \int_0^x \frac{\arctan(x)}{1 + (x - a)^2} dx \quad (13)$$

式中: x 、 a 为函数变量, 无实际含义。

1.2 磁滞模型可逆磁化分量表达式

采用 1.1 节给出的解析 Preisach 模型及其特征参数初始值, 可以初步得到不可逆磁化分量。对于 3% Si-Fe 超薄取向硅钢片样品, 最大磁密为 1.0 T 时静态磁滞回线测量结果如图 4 中虚线所示。采用 1.1 节给出的不可逆磁化分量表达式, 以及式(3)、(9)、(10)算得的特征参数 σ 、 H_d 、 A 初始值, 得到不可逆磁化分量曲线, 计算结果如图 4 中实线所示, 其中: $H^* = 20.0766$ A/m, $\sigma = 11.4546$, $H_d = 20.0763$ A/m, 参数 A 由式(3)计算, 为 171.0734。

对比图 4 中硅钢样品的磁滞回线测量结果与通过模型算得的磁滞回线不可逆磁化分量计算结果可知, 尽管不可逆磁化分量能够大概重现磁滞回线相同的矫顽力与剩磁, 但在最大磁感应强度、磁滞曲

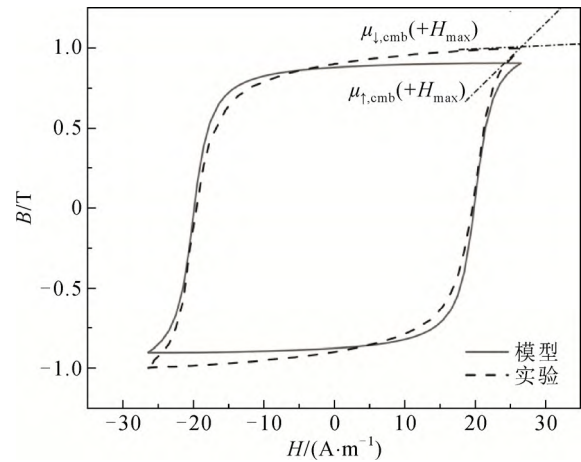


图 4 模型计算与实验测量的不可逆磁化分量结果对比
Fig. 4 Comparison of irreversible magnetization component results between model calculation and experimental measurement

线形状等方面仍有较大的计算误差。

由上述分析可知, 为了全面描述铁磁材料的磁化特性, 可将铁磁材料的磁化过程分为不可逆磁化分量与可逆磁化分量两部分。将图 4 中的磁滞回线测量结果可以分解为图 5 所示的不可逆分量部分与图 6 所示的可逆分量部分之和。磁滞回线应满足总磁通密度 $B_{\text{cmb}}(H)$ 是两个分量之和^[23-24], 即:

$$B_{\text{cmb}}(H) = B_{\text{irr}}(H) + B_{\text{rev}}(H) \quad (14)$$

式中: $B_{\text{irr}}(H)$ 为不可逆分量; $B_{\text{rev}}(H)$ 为可逆分量。

总磁导率 $\mu_{\text{cmb}}(H)$ 满足同样的规律, 即总磁导率等于不可逆分量磁导率 $\mu_{\text{irr}}(H)$ 和可逆分量磁导率 $\mu_{\text{rev}}(H)$ 之和, 计算式为:

$$\mu_{\text{cmb}}(H) = \mu_{\text{irr}}(H) + \mu_{\text{rev}}(H) \quad (15)$$

其中可逆分量磁导率 $\mu_{\text{rev}}(H)$ 计算式^[23-24]为:

$$\mu_{\text{rev}}(H) = \frac{dB_{\text{rev}}(H)}{dH} = B_d \frac{2}{\pi \alpha} \frac{1}{1 + (H/\alpha)^2} \quad (16)$$

式中: B_d 、 α 为磁导率计算参数。

如图 5 所示, 基于洛伦兹函数的解析 Preisach 模型得到的不可逆分量的下降段分支在最大磁场强度 H_{max} 处的磁导率总是为 $\mu_{\text{irr}}(+H_{\text{max}}) = 0$, 因此磁滞回线在此点处的总磁导率与可逆分量磁导率相等, 即 $\mu_{\text{cmb}}(+H_{\text{max}}) = \mu_{\text{rev}}(+H_{\text{max}})$ 。参数 B_d 可由参数 α 与总磁滞回线实验测量值下降段在最大磁场强度处的磁导率来确定, 计算式^[24-25]为:

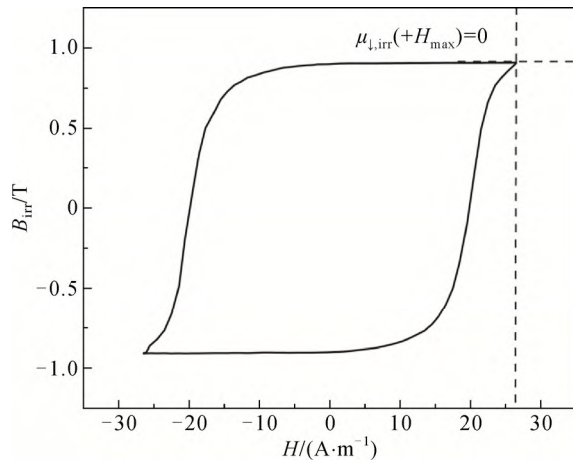


图5 磁滞回线不可逆磁化分量

Fig.5 Irreversible magnetization component of the hysteresis loop

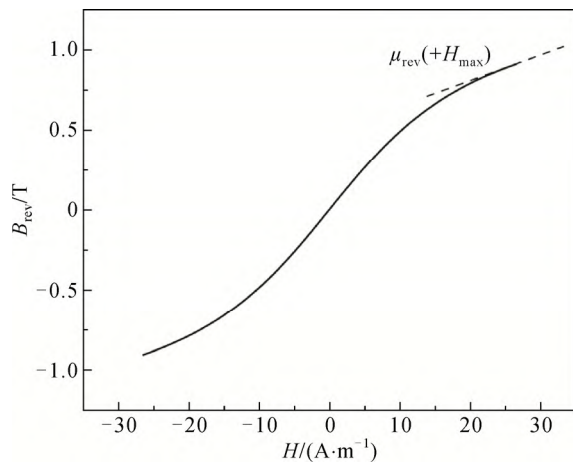


图6 磁滞回线可逆磁化分量

Fig.6 Reversible magnetization component of the hysteresis loop

$$B_d = \mu_{\downarrow, \text{cmb}}(+H_{\text{max}}) \cdot \frac{\pi}{2} \alpha \left(1 + \left(\frac{H}{\alpha} \right)^2 \right) \quad (17)$$

通过参数 B_d 和 α 可根据式(18)计算出总磁滞回线的可逆分量值, 即:

$$B_{\text{rev}} = \frac{\pi}{2} B_d \operatorname{atan} \left(\frac{\pi H}{2\alpha} \right) \quad (18)$$

2 磁滞模型特征参数的影响及其辨识

2.1 不可逆磁化分量特征参数对磁滞回线的影响

采用控制变量法分析不可逆磁化分量特征参数对磁滞回线的影响。由于参数 A 由参数 σ 、 H_d 的取值所决定, 因此不对参数 A 进行分析。参数 σ 、 H_d 对超薄取向硅钢片磁滞回线的影响如图 7、8 所

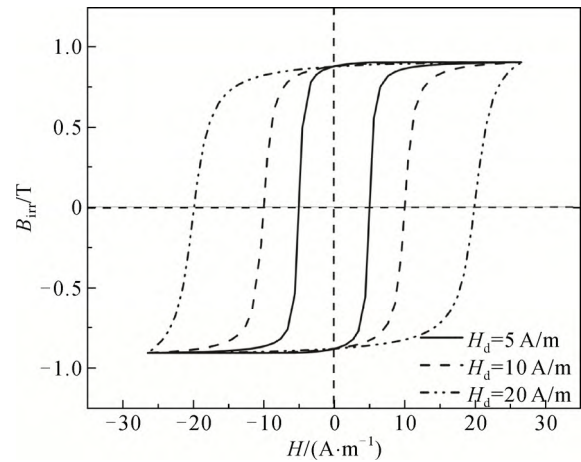


图7 不同参数 H_d 下的磁滞回线

Fig.7 Hysteresis curves at different H_d

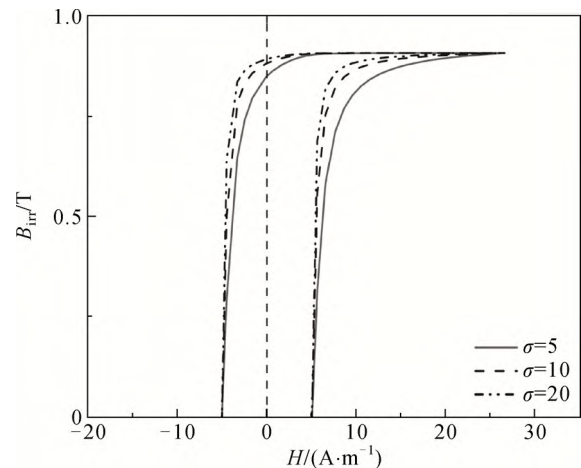


图8 不同参数 σ 下的磁滞回线

Fig.8 Hysteresis curves at different σ

示。其中, 图 7 参数 σ 设置为 10, 改变参数 H_d ; 图 8 参数 H_d 设置为 5 A/m, 改变参数 σ 。

选取磁滞回线的剩磁 B_r 、矫顽力 H_c 和饱和磁通密度 B_s 为特征值, 用于分析模型参数 σ 、 H_d 对磁滞回线的影响, 如表 1 所示。

图 7、8 表明参数 H_d 对矫顽力有较大影响, 且两者呈正相关。参数 σ 对剩磁有较大影响, 两者呈正相关。

2.2 磁滞模型特征参数辨识

考虑可逆分量的基于洛伦兹函数的解析 Preisach 模型参数辨识具体流程如图 9 所示。在本文 1.2 节给出可逆分量计算表达式后, 首先需要可对逆分量计算参数进行确定。根据式(17)、(18)可知, 可逆分量待辨识参数为 B_d 、 α , 而参数 B_d 又由参数 α 以及微分磁导率 $\mu_{\downarrow, \text{cmb}}(+H_{\text{max}})$ 来确定。本文选择参

表 1 各参数对磁滞回线的影响

Table 1 Influence of each parameter on the hysteresis loop

参数	剩磁 B_r/T	矫顽力 $H_c/(A \cdot m^{-1})$	饱和磁密 B_s/T
$H_d \uparrow$	—	\uparrow	—
$\sigma \uparrow$	\uparrow	—	—

注: “ \uparrow ”表示增大, “—”表示不变或变化很小。

数扫描法确定合适的参数 α , 为避免计算次数过多, 可以在参数扫描之前约束参数 α 的取值范围。如果参数 α 取值过小会导致可逆磁化分量的最大磁通密度 B_{rev} 大于总磁滞回线最大磁通密度 B_{cmb} , 因此需要引入不等式(19)对可逆磁化分量的最大磁通密度进行限制。同时, 当磁场强度为 0 时, 可逆磁化分量也应该为 0, 因此剩余磁通密度应满足式(20)。

$$B_{rev}(+H_{max}) < B_{cmb}(+H_{max}) \quad (19)$$

$$B_{rev}(0) = 0 \quad (20)$$

根据式(19)、(20)确定参数 α 的取值范围, 逐个选取取值范围内的参数 α , 并按照图 9 所示的计算流程完成后续计算, 可提高运算效率。

然后, 针对本文 1.1 节提出的解析算法不能保证参数 σ 、 H_d 的计算初值为全局最优的问题, 引入了用于全局寻优的粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO)。

粒子群算法会随着迭代次数的增加, 不断更新每个粒子的位置, 使其不断靠近最优值。为了运用粒子群算法计算不可逆磁化分量参数 σ 、 H_d 最优问题, 需要设置优化算法的目标函数, 本文以磁通密度的理论计算值与实验测量值之间均方根误差最小化为目标函数, 如式(21)所示, 将参数 σ 、 H_d 的最优值提取问题转化为目标函数的最小化问题。

$$E_f = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (B_{meas, irr} - B_{model})^2} \quad (21)$$

式中: E_f 为均方根误差值; B_{model} 为基于式(11)与式(12)的理论计算值; $B_{meas, irr}$ 为实验测量的不可逆分量值, 根据已得到的可逆分量值和总磁滞回线实验测量值 $B_{meas, cmb}$, 由式(22)计算得到; n 为频点数目。

$$B_{meas, irr}(H) = B_{meas, cmb}(H) - B_{rev}(H) \quad (22)$$

粒子群算法具体步骤为:

1) 初始化粒子群。本文设置粒子数量为 20, 设置粒子 (σ 、 H_d) 的定义域, 通过本文 1.1 节对参数初值的计算, 参数 σ 定义域为 [0, 30], 参数 H_d 定义域为 [0, 50], 在定义域内随机初始化粒子的坐标以

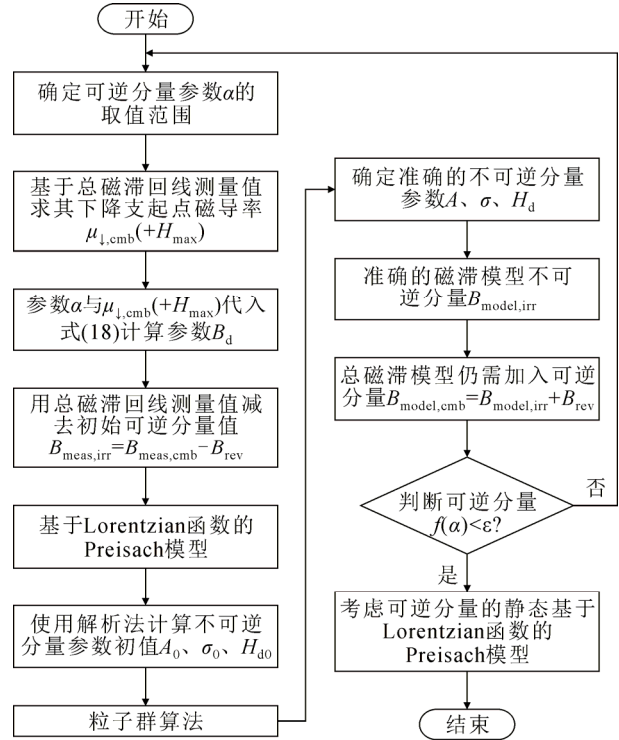


图 9 考虑可逆分量的解析 Preisach 模型参数辨识流程

Fig.9 Flowchart of parameters identification for analytical Preisach model considering reversible component

及初始化粒子速度。

2) 初始化最优值。根据式(21)求粒子的目标函数, 初始化个体最优值 P 以及群体的最优值 G 。个体最优值 P 为 20×2 的矩阵, 其中 20 为粒子数量, 2 为待辨识参数数量。群体最优值 G 为 1×2 的矩阵, 用于记录当前的最优参数。

3) 进行迭代, 更新最优值。用迭代后的粒子 (σ 、 H_d) 计算目标函数 E_f , 与 P 中粒子计算的 E_f 比较, 若更小则更新 P ; 在 P 更新结束后, 找出迭代后的群体最优值, 并与当前群体化最优值 G 对比, 若比 G 小则进行更新。

4) 判断是否达到最大迭代数, 满足条件计算结束, 否则继续下一步运算。

5) 根据式(23)、(24)分别更新粒子速度、粒子坐标:

$$v_{t+1}(i, j) = wv_t(i, j) + c_1r_1(P_t(i, j) - x_t(i, j)) + c_2r_2(G_t(j) - x_t(i, j)) \quad (23)$$

$$x_{t+1}(i, j) = x_t(i, j) + v_{t+1}(i, j) \quad (24)$$

式中: w 是惯性权重; c_1 、 c_2 是学习因子; r_1 、 r_2 是随机数, 取值范围在 [0, 1] 之间; $P_t(i, j)$ 为第 t 代中粒子个体的最优预测位置; $G_t(j)$ 为第 t 代中粒

子种群的全局最优预测位置；第 t 代中第 i 个粒子的位置坐标为 $x_t(i, j)$ ，速度为 $v_t(i, j)$ 。

6) 迭代次数加 1，返回步骤 3)。

粒子群算法的具体流程如图 10 所示。

在通过粒子群算法确定不可逆分量后，需对所有参数是否满足相对误差 $f(\alpha)$ 的要求进行最终判断：

$$f(\alpha) = \left(\frac{\mu_{\uparrow, \text{model, cmb}}(+H_{\max}) - \mu_{\uparrow, \text{meas, cmb}}(+H_{\max})}{\mu_{\uparrow, \text{meas, cmb}}(+H_{\max})} \right)^2 \quad (25)$$

式中： $\mu_{\uparrow, \text{model, cmb}}(+H_{\max})$ 和 $\mu_{\uparrow, \text{meas, cmb}}(+H_{\max})$ 分别为模型计算和实际测量的总磁滞回线在最大磁场处的磁导率。

当 $f(\alpha)$ 小于允许误差 β 时，参数辨识终止，分别输出可逆磁化分量与不可逆磁化分量最优参数。

3 仿真与实验验证

3.1 静态磁滞回线测量

利用 BROCKHAUS-MPG-200D 电工钢测量系统测量 0.08 mm 超薄取向硅钢片在频率 10 Hz、不同最大磁通密度下(0.1~1.8 T)的磁滞回线，实验测量系统如图 11 所示。超薄取向硅钢单片的基本参数如表 2 所示。通过铁磁材料磁特性测量系统测量材料在不同峰值磁密条件下的磁滞回线，通过实验测试与模型模拟结果对比，判断模型参数辨识的准确性与磁滞回线的拟合精度。

3.2 静态磁滞回线测量

采用第 2 章所提出的方法，计算超薄取向硅钢片在不同最大磁密下的磁滞回线。为了验证模型的有效性，针对 0.3、0.6、1.0、1.4、1.8 T 最大磁密下的改进模型计算值以及基于洛伦兹函数的 Preisach 模型计算值与实验测量值进行对比，结果如图 12 所示。从实验验证的结果可知，改进模型计算结果与实验结果基本相符，且计算结果优于基于洛伦兹函数的 Preisach 模型计算结果。图 13 为粒子群算法在不同最大磁密时，参数辨识的迭代曲线。在不同磁密下，可逆分量参数和不可逆分量参数的辨识结果如表 3 所示。

为了验证模型的有效性与准确性，本文引入平均相对误差用于描述模型的磁滞回线模拟效果，平均相对误差的计算式为：

$$\varepsilon = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{|B_{j, \text{model}} - B_{j, \text{meas}}|}{|B_{j, \text{meas}}|} \times 100\% \quad (26)$$

式中： $B_{j, \text{model}}$ 和 $B_{j, \text{meas}}$ 分别为各频点的磁通密度计算

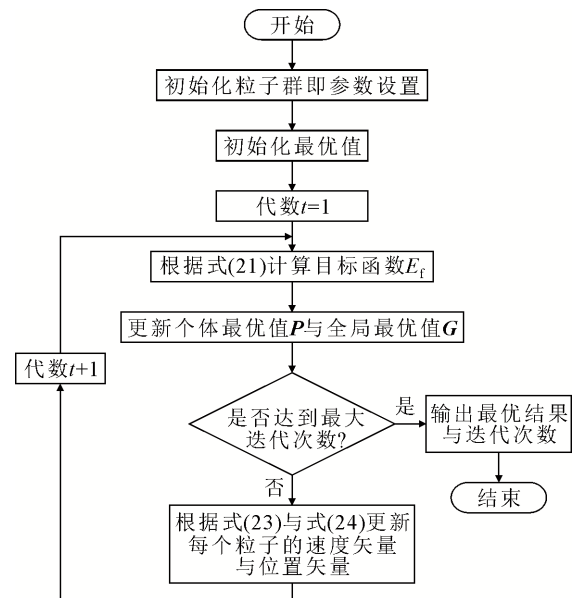


图 10 基于粒子群算法的不可逆分量参数提取流程图

Fig.10 Flow chart of irreversible component parameter extraction based on PSO

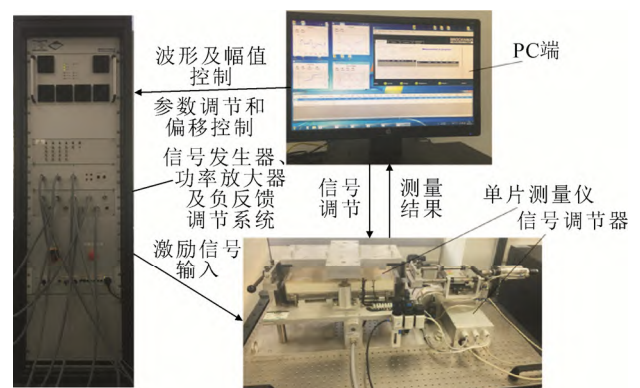


图 11 超薄取向硅钢片磁特性测量系统

Fig.11 Ultra thin grain oriented silicon steel sheet measuring device for magnetizing feature

表 2 超薄取向硅钢片样品参数

Table 2 Sample parameters of ultra thin grain oriented silicon steel sheet

参数名称	取值
长度/mm	300
宽度/mm	30
厚度/mm	0.079 45
横截面/mm ²	2.3834
密度/(kg·m ⁻³)	7190

值和测量值； m 是不同磁通密度下测量的频点数目。

本文在不同磁密下对比了基于洛伦兹函数的

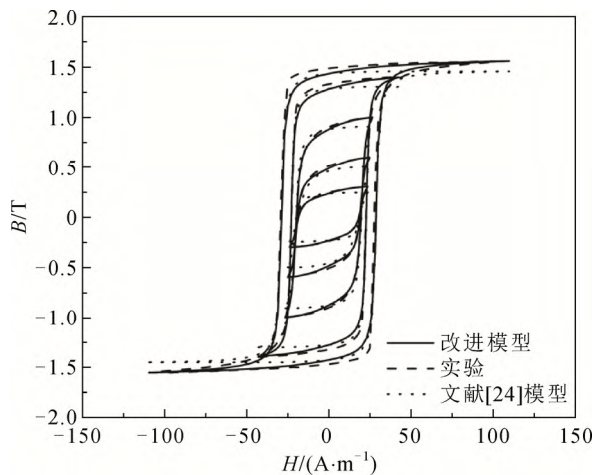


图 12 不同磁密下的模型计算值与测量值对比

Fig.12 Comparison of model calculated and measured values under different magnetic densities

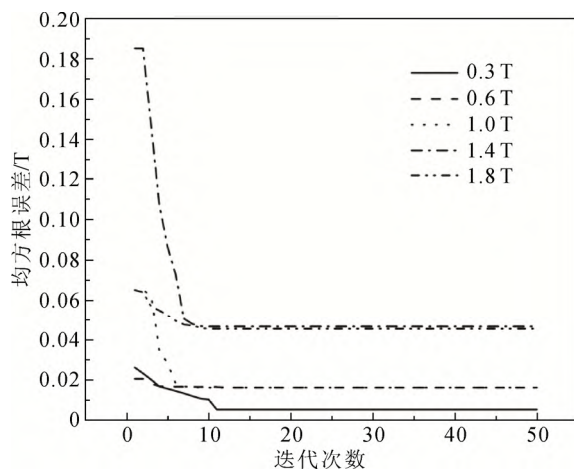


图 13 不同最大磁密下粒子群算法均方根误差随迭代次数变化图

Fig.13 Variation of root mean square error of particle swarm algorithm with iteration times under different maximum magnetic densities

Preisach 模型平均相对误差与考虑可逆分量的 Preisach 模型及其参数辨识算法的平均相对误差, 对比结果如图 14 所示。由图 14 可知, 考虑可逆分量的基于洛伦兹函数的 Preisach 模型及其参数辨识算法可以较好模拟材料的磁滞回线。本文方法计算误差显著减小的原因在于: 一方面考虑了可逆磁化分量对磁化过程的影响, 另一方面采用循环迭代方法以及粒子群算法, 对可逆分量参数和不可逆分量参数进行全局寻优。

4 结论

本文在基于洛伦兹函数的解析 Preisach 模型的

表 3 不同磁密下模型参数值

Table 3 Model parameter values under different magnetic densities

磁密 B_s/T	可逆分量参数		不可逆分量参数	
	α	B_d/T	$H_d/(A \cdot m^{-1})$	σ
0.3	23	0.882 83	19.7469	7.8885
0.6	25	0.154 01	19.6758	10.5183
1.0	26	0.141 30	20.0763	11.4546
1.4	44	0.158 43	22.9007	19.4228
1.8	89	0.147 11	28.8136	20.1274

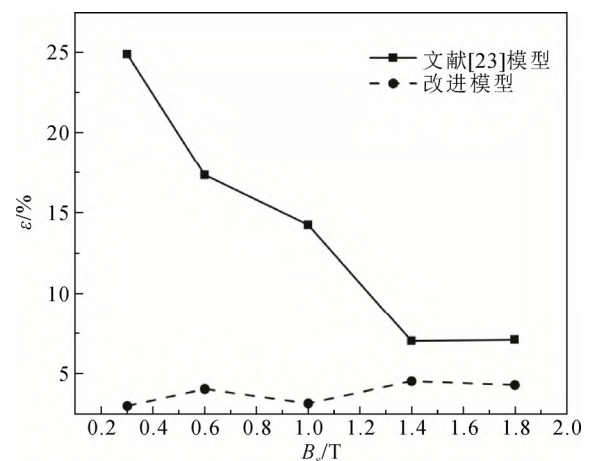


图 14 平均相对误差随最大磁通密度变化曲线

Fig.14 Average relative error versus maximum magnetic flux density

基础上, 开展了相关研究, 综合考虑了此模型现有参数辨识方法计算精度低, 以及在考虑可逆磁化分量后、参数辨识难度增加的问题, 得出如下结论:

1) 在基于洛伦兹函数的解析 Preisach 模型中引入可逆磁化分量表达式, 构建一种考虑可逆分量的解析 Preisach 模型。

2) 基于循环迭代法以及粒子群优化算法, 针对铁磁材料磁化过程中的不可逆磁化分量参数与可逆磁化分量参数, 提出一种特征参数混合寻优算法。

3) 利用电工钢测量系统测量了超薄取向硅钢片的磁特性, 以实验测量结果为基准, 将本文所提混合寻优算法结合模型针对不同磁密下的磁滞回线进行参数寻优与计算, 最大平均相对误差为 4.49%, 模型计算精度大大提高, 验证了该方法的有效性。

参考文献 References

- [1] 关大伟. 基于 Preisach 模型的磁特性模拟方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
GUAN Dawei. Research on the simulation method of magnetic properties based on the Preisach model[D]. Beijing, China: North China

- Electric Power University, 2017.
- [2] 张弘刚. 基于 Preisach 模型的电工钢片磁滞特性模拟研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
ZHANG Honggang. Research on the hysteretic modeling of electrical steel based on the Preisach model[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2018.
- [3] KRINGS A, BOGLIETTI A, CAVAGNINO A, et al. Soft magnetic material status and trends in electric machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(3): 2405-2414.
- [4] 陈彬, 陈健, 梁旭, 等. 大功率中频三相变压器绕组和铁芯谐波损耗模型[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3119-3131.
CHEN Bin, CHEN Jian, LIANG Xu, et al. Harmonic loss model of winding and core of high-power three-phase medium-frequency transformer[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3119-3131.
- [5] 陈彬, 梁旭, 万妮娜, 等. 中频变压器瞬态电磁场温度场耦合求解分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(12): 4400-4409.
CHEN Bin, LIANG Xu, WAN Nina, et al. Coupled transient electromagnetic-thermal fields analysis of medium-frequency transformer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4400-4409.
- [6] 陈彬, 秦小彬, 万妮娜, 等. 基于 R-L 型分数阶导数与损耗统计理论的铁磁材料高频损耗计算方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(2): 299-310.
CHEN Bin, QIN Xiaobin, WAN Nina, et al. Calculation method of high-frequency loss of ferromagnetic materials based on R-L type fractional derivative and loss statistical theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 299-310.
- [7] 刘任, 李琳. 基于损耗统计理论与 J-A 磁滞模型的直流偏磁下磁性材料损耗计算方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 4062-4069.
LIU Ren, LI Lin. Loss prediction of magnetic material under DC bias based on the statistical theory of losses and Jiles-Atherton hysteresis model[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 4062-4069.
- [8] 陈彬, 秦小彬, 唐波, 等. 基于 R-L 分数阶导数的动态 J-A 磁滞模型及其特征参数辨识算法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4590-4602.
CHEN Bin, QIN Xiaobin, TANG Bo, et al. Dynamic J-A hysteresis model based on R-L fractional derivative and its characteristic parameter identification algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4590-4602.
- [9] 熊兰, 周健瑶, 宋道军, 等. 基于改进 J-A 磁滞模型的电流互感器建模及实验分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 482-488.
XIONG Lan, ZHOU Jianyao, SONG Daojun, et al. Modeling and experimental analysis of current transformer based on modified J-A hysteretic model[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 482-488.
- [10] 刘任, 李琳. 基于场分离技术与损耗统计理论的动态 Energetic 磁滞模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6412-6418.
LIU Ren, LI Lin. A dynamic energetic hysteresis model based on the field separation approach and statistical theory of losses[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6412-6418.
- [11] 赵志刚, 李晓雪, 姬俊安, 等. 基于 Preisach 磁滞模型的电工钢片磁特性模拟[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 4038-4046.
ZHAO Zhigang, LI Xiaoxue, JI Jun'an, et al. Simulation of magnetic properties of electrical steel sheets based on Preisach model[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 4038-4046.
- [12] 张新刚, 王泽忠, 徐春丽. Preisach 理论及其在铁心磁化过程建模中的应用[J]. 高电压技术, 2005, 31(9): 14-17.
ZHANG Xingang, WANG Zezhong, XU Chunli. Preisach theory and its application to magnetization modeling of magnetic core[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(9): 14-17.
- [13] 黄雷, 包广清, 陈俊全. 基于 Levenberg-Marquardt 算法的改进 Preisach 模型磁特性模拟与验证[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 6006-6014.
HUANG Lei, BAO Guangqing, CHEN Junquan. Magnetic property simulation and verification with improved Preisach hysteresis model based on Levenberg-Marquardt algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 6006-6014.
- [14] PREISACH F. Über die magnetische nachwirkung[J]. Zeitschrift für Physik, 1935, 94(5/6): 277-302.
- [15] KRASMOSELSKIL M, DOKROVSKIL A. Systems with hysteresis[M]. Nauka Moscow, Russia: [s.n.], 1983.
- [16] BERTOTTI G, BASSO V, PASQUALE M. Application of the Preisach model to the calculation of magnetization curves and power losses in ferromagnetic materials[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30(2): 1052-1057.
- [17] ZHU J G. Numerical modelling of magnetic materials for computer aided design of electromagnetic devices[D]. Sydney, Australia: University of Technology, 1994.
- [18] 赵国生, 李朗如, 朱浩, 等. 一种新的动态矢量 Preisach 磁滞模型[J]. 华中科技大学学报, 1997(7): 88-90.
ZHAO Guosheng, LI Langru, ZHU Hao, et al. A new Preisach model of hysteresis for the dynamic vector[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1997(7): 88-90.
- [19] 赵志刚, 张鹏, 马习纹, 等. 基于改进 Preisach 模型的电工钢片磁特性模拟[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 2149-2157.
ZHAO Zhigang, ZHANG Peng, MA Xiwen, et al. Simulation of magnetic properties of electrical steel sheets based on improved Preisach model[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2149-2157.
- [20] VECCHIO R D. An efficient procedure for modeling complex hysteresis processes in ferromagnetic materials[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1980, 16(5): 809-811.
- [21] 李富华, 刘德志, 陈俊全, 等. 基于 Lorentzian 函数的 Preisach 磁滞模型辨识与验证[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 1-7.
LI Fuhua, LIU Dezhi, CHEN Junquan, et al. Identification of a Preisach hysteresis model with Lorentzian function and its verification[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 1-7.
- [22] FINOCCHIO G, CARPENTIERI M, CARDELLI E, et al. Analytical solution of Everett integral using Lorentzian Preisach function approximation[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2006, 300(2): 451-470.
- [23] MAYERGOYZ I D. Mathematical models of hysteresis and their applications[M]. New York, USA: Elsevier, 2003.
- [24] 李伊玲, 李琳, 刘任, 等. 两种简化 Preisach 模型静态特性的对比分析及评估[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(5): 25-31.
LI Yiling, LI Lin, LIU Ren, et al. Comparative analysis and comprehensive evaluation of different simplified Preisach models[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(5): 25-31.
- [25] LUO M, DUJIC D, ALLMELING J. Modelling hysteresis of soft core materials using permeance-capacitance analogy for transient circuit simulations[C]// Proceedings of the 19th European Conference on Power Electronics and Applications. Warsaw, Poland: IEEE, 2017.
- [26] LUO M, DUJIC D, ALLMELING J. Modeling frequency-dependent core loss of ferrite materials using permeance-capacitance analogy for system-level circuit simulations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3658-3676.



CHEN Bin
Ph.D.
Corresponding author

陈彬(通信作者)

1989—, 男, 博士, 讲师

主要从事电力装备电磁特性模拟与测量技术、
电工新材料综合磁性模拟与测量技术的研究

E-mail: chenbin@ctgu.edu.cn

收稿日期 2022-03-04 修回日期 2022-12-20 编辑 程子丰