第 50 卷 第 11 期：5174-5183　　高电压技术　　Vol.50, No.11: 5174-5183
2024 年 11 月 30 日　　High Voltage Engineering　　November 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231141

变温条件下 Energetic 磁滞模型参数修正方法

陈　彬[1,2]，曾庆麟[1,2]，贾燕峰[3]，黄　力[1,2]，唐　波[1,2]
（1. 湖北省输电线路工程技术研究中心(三峡大学)，宜昌 443002；2. 三峡大学电气与新能源学院，宜昌 443002；3. 国网河南省电力有限公司三门峡供电公司，三门峡 472000）

摘　要：铁磁材料的磁滞特性存在温度依赖性，导致铁芯类设备的性能会受到温度的影响。但是现有的 Energetic 磁滞模型无法对温度进行有效表征，导致损耗计算结果误差较大。为此，首先研究了 Energetic 各个模型参数对磁滞回形状特征值的影响，分析了铁磁材料磁滞特性的温度依赖性。然后在采用公式法进行参数辨识的基础上，提取不同温度下磁滞回线的形状特征值，并引入居里温度和临界指数等系数，提出了各形状特征值关于温度的表达式。进一步将特征值表达式与各模型参数的辨识公式相结合，提出了考虑温度特性的模型参数辨识方法，建立了一种变温条件下的修正 Energetic 磁滞模型。最后，以纳米晶合金的极限磁滞回线测量结果为例，模拟该材料在各温度下的磁滞回线，并与多组测量值进行对比，验证了模型的准确性和可行性。

关键词：Energetic 模型；温度特性；磁滞回线；参数辨识；铁磁材料；居里温度

Correction Method of Energetic Hysteresis Model Parameters Under Variable Temperature Conditions

CHEN Bin[1,2], ZENG Qinglin[1,2], JIA Yanfeng[3], HUANG Li[1,2], TANG Bo[1,2]
(1. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Sanmenxia Electric Company, State Grid Henan Electric Power Company, Sanmenxia 472000, China)

Abstract: The hysteresis characteristics of ferromagnetic materials are temperature-dependent, thus the performance of iron core equipment is affected by temperature. However, the existing Energetic hysteresis models can not effectively characterize the temperature, resulting in a significant error in the loss calculation. Therefore, the influence of each parameter of the Energetic hysteresis model on the shape of hysteresis loop is firstly studied in this paper. The magnetic properties and temperature dependence of the ferromagnetic material are analyzed. Then, based on the parameter identification by formula method, the shape eigenvalues of hysteresis loops at different temperatures are extracted. The Curie temperature and critical exponent coefficients are introduced, and the expressions of the shape eigenvalues with respect to temperature are proposed. The expressions of eigenvalues are combined with the identification formulas of various model parameters. Moreover, the model parameter identification method considering temperature characteristics is proposed and a modified Energetic hysteresis model under variable temperature conditions is established. Finally, the hysteresis loop of the material at various temperatures was simulated and compared with multiple sets of measured values while taking the measurement results of the ultimate hysteresis loop of a nanocrystalline alloy as an example, which verified the consistence and feasibility of the proposed model.

Key words: Energetic model; temperature characteristics; hysteresis loop; parameter identification; ferromagnetic materials; Curie temperature

0　引言

铁磁材料因易于磁化、也易于退磁，被广泛应用于电机、变压器、互感器和电磁开关等电气设备中。磁滞现象是铁磁材料的固有特性之一，主要通过材料的磁滞回线来表征[1-2]。然而，在实际运行过程中铁磁材料的磁滞特性存在温度依赖性，高环境温度下会导致铁磁材料的磁滞特性发生变化，进而影响电气设备的性能[3-4]。提高铁磁材料在变温条件下磁滞特性模拟的准确性，对于电气设备的电磁特性分析至关重要。因此，有必要建立一种能精确、

基金资助项目：国家自然科学基金(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).

有效表征铁磁材料温度依赖性的磁滞模型。

目前，用于模拟变温条件下铁磁材料磁滞特性的方法主要包括：基于 Preisach 模型的修正和基于 J-A 模型的修正。其中，基于 Preisach 模型的方法先通过测量极限磁滞回线下降支，来确定该模型表达式中的分布函数项，再引入饱和磁化强度的温度修正式，将分布函数项中的极限磁滞回线下降支的值修正为与温度相关的函数式[5]；或者将解析 Preisach 模型中的参数扩展为温度的线性函数，着重对解析 Preisach 模型进行温度修正来模拟材料的磁滞特性，比如针对基于逻辑分布函数和微分反正切函数(derivative-arc-tangent, DAT)的解析 Preisach 模型[6]。该类修正方法旨在从 Preisach 模型的分布函数上进行温度修正来快速模拟不同温度下的磁滞回线。基于 J-A 模型的修正方法是通过分析模型各参数随温度的变化规律，引入居里温度和临界指数作为参数，将 J-A 模型的 5 个参数表示为温度的函数，实现变温条件下的磁化特性模拟[7-8]。该方法旨在从模型参数上进行修正，使参数与温度相关联，物理意义更明确，但该方法需要求解非线性微分方程，计算过程仍较为繁琐。还有学者为了结合 2 种模型各自的优点，同时对解析 Preisach 和 J-A 2 种模型进行温度修正，分别模拟变温条件下的小磁滞回线和主磁滞回线[9]。

与 Preisach 和 J-A 模型相比，Energetic 磁滞模型用一个简单的解析闭合表达式来表示，求解速度明显更快；此外，由于 Energetic 模型参数与温度、应力、频率、磁化方向等因素有关，可用于考虑温度对磁滞特性的影响[10-14]。因此，Energetic 模型在变温条件下的磁滞特性模拟方面具有较大的应用前景。利用 Energetic 模型模拟变温条件下的磁滞特性时，通常使用精确度较高的拟合法进行参数辨识[15]，但是磁滞回线的形状特征值会随温度而变化，因此在不同温度下需重新对模型参数进行辨识，耗时长且需要该温度下的实测数据，降低了 Energetic 模型在变温条件下的实用性。

本文首先研究了 Energetic 各个模型参数对磁滞回线形状特征值的影响，以及各形状特征值的温度依赖性。然后在采用公式法进行参数辨识的基础上，提取若干组不同温度下的磁滞回线形状特征值测量结果，并引入居里温度和临界指数等系数，提出各形状特征值关于温度的表达式。再将各特征值表达式与模型参数的辨识公式相结合，使模型参数适用于变温条件下的磁滞回线计算，从而建立一种变温条件下的修正 Energetic 模型。最后以纳米晶合金各温度下的极限磁滞回线测量值为例，利用修正 Energetic 磁滞模型模拟材料在各温度下的磁滞回线，并将模拟值和多组测量值进行对比，检验模型的准确性和可行性。

1　Energetic 磁滞模型

1.1　Energetic 模型及其参数辨识方法

Energetic 模型是由学者 Hauser 基于铁磁材料能量最小化原理以及磁畴理论与磁畴的统计分布特征推导得到的唯象学模型[16]，其解析表达式为：

$$\begin{aligned} H = H_{\mathrm{d}} + \mathrm{sgn}(m)H_{\mathrm{r}} + \mathrm{sgn}(m-m_0)H_{\mathrm{i}} = \\ N_{\mathrm{e}}M_{\mathrm{s}}m + \mathrm{sgn}(m)H_{\mathrm{r}} + \mathrm{sgn}(m-m_0)\cdot \\ \left(\frac{k}{\mu_0 M_{\mathrm{s}}} + c_{\mathrm{r}}H_{\mathrm{r}}\right)\left(1-\rho\exp(-\frac{q}{\rho}|m-m_0|)\right) \end{aligned} \tag{1}$$

式中：m 为实际磁化强度 M 与饱和磁化强度 M_{s} 的比值；H 为实际磁场强度；H_{d} 为退磁场强度；H_{r} 为可逆磁场强度；H_{i} 为不可逆磁场强度；N_{e} 为退磁因子；k 为与磁滞损耗有关的系数；c_{r} 为磁畴或晶粒的自适应几何尺寸相关系数；q 为与钉扎点密度有关的常数；μ_0 为真空磁导率；ρ为磁场反转函数，表示铁磁材料磁场反转点对磁化状态的影响；m_0 为上一磁场反转点对应的 m 值，其中 m、H_{r}、ρ的表达式分别为：

$$m = \frac{M}{M_{\mathrm{s}}} \tag{2}$$

$$H_{\mathrm{r}} = h\left(\left((1+m)^{1+m}(1-m)^{1-m}\right)^{g/2} - 1\right) \tag{3}$$

$$\rho = 2 - \rho_0\exp(-\frac{q}{\rho_0}|m-m_0|) \tag{4}$$

式中：h 为与饱和磁场相关的比例系数；g 为关于材料各向异性的自适应常数；ρ_0 为上一反转点对应的 ρ值。若从反向饱和点开始利用 Energetic 模型计算磁滞回线，则此时 m_0=－1、ρ_0=1，相应地求解出各 M 值下的磁场强度 H。每经过一次磁场反转点，需对ρ_0、m_0 进行更新，即令 m_0 为该反转点对应的 m 值，然后通过式(4)计算ρ值。

在使用 Energetic 模型之前，首先需要对模型参数进行辨识，现已提出的 Energetic 模型的参数辨识方法有拟合法和公式法。拟合法是利用实测磁滞回线与模拟结果之间的误差构建目标函数，从而将模型参数的提取问题转化为目标函数最小值的优化问题，再通过优化算法寻优辨识获得各参数的最优解。

公式法是通过提取铁磁材料实测初始磁化曲线和极限磁滞回线数据的特征值，再利用解析公式计算出各模型参数[17]。需要提取的磁滞回线特征值包括：饱和磁化点(H_s，M_s)、剩余磁化强度 M_r、初始磁化率 μ_0 、矫顽力 H_c、矫顽力点磁化率μ_c、磁场最大测量点(H_m，M_m)、主磁滞回线上升支拐点附近的任意点(H_g，M_g)，如图 1 所示。

1.2 模型参数对磁滞回线的影响分析

首先给定 Energetic 模型各个参数的最初取值，假设：M_s=7.885 1×10^6 A/m，k=7.927，N_e=3.772 1×10^{-6}，h=0.397，g=6.139，q=16.351，c_r=1.368。然后采用控制变量法分析 Energetic 模型参数(k、q、c_r、h、N_e、g)与磁滞回线形状特征之间的关系。依次改变各个模型参数，其余模型参数固定不变，研究剩磁 B_r、矫顽力 H_c、饱和磁场强度 H_s 等磁滞回线形状特征参数的变化规律[18]，如表 1 和图 2 所示。

由分析结果可知，磁滞回线的剩磁 B_r 主要受参数 q、c_r、N_e 影响，参数 q、c_r 与剩磁呈正相关，参数 N_e 与剩磁呈负相关；矫顽力 H_c 主要受参数 k 影响并呈正相关趋势，相同规律也可从参数 k 的近似计算式 k=$\mu_0 M_s H_c$ 看出。由于上述分析中饱和磁化强度 M_s 保持不变，因此参数的变化仅决定了饱和磁场强度 H_s 的大小。

2 Energetic 模型的温度修正

2.1 铁磁材料磁滞特性的温度依赖性分析

随着温度的升高，铁磁材料的饱和磁化强度 M_s 不断减小，当温度达到居里温度附近时，饱和磁化强度 M_s 急剧下降至接近 0 处，铁磁材料由铁磁性转变为顺磁性。铁磁材料的居里温度比较高，如纳米晶合金的居里温度可达到约 843 K[19]。电力设备的工作温度一般远低于其居里温度，在正常的工作环境下，随着温度的升高，铁磁材料的磁化强度 M_s 不断降低。因此，有必要对铁磁材料的温度依赖性进行分析，从而进一步研究温度变化对其磁滞特性的影响。

以纳米晶合金材料为例，在不同温度 T 下的极限磁滞回线测量结果如图 3 所示。随着温度的上升，磁滞回线的饱和磁密 M_s 不断减小；矫顽力 H_c 和剩磁 M_r 则不断上升；初始磁化率总体呈减小趋势，随着温度增加到 353 K 之后，减小速度趋于平缓；矫顽力处磁化率总体呈上升趋势，在 303~393 K 之间变化较小。

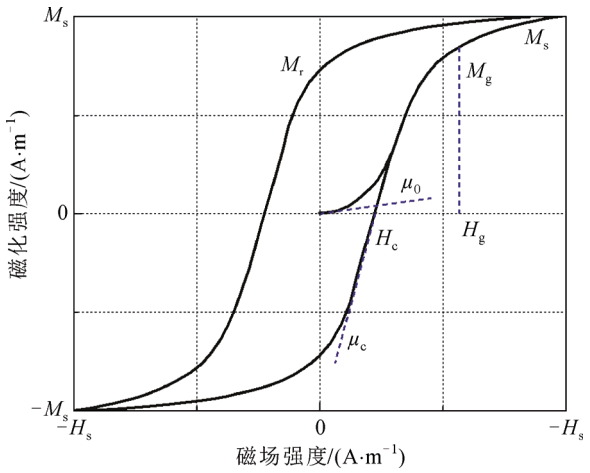


图 1 基于公式法的 Energetic 模型参数辨识所需特征值

Fig.1 Characeristic value required for parameter identification of Energetic model based on formula method

表 1 磁滞回线形状特征随参数的变化趋势

Table 1 Variation trend of hysteresis loop shape characteristics with parameters

参数	B_r/(T)	H_c/(A·m^{-1})	H_s/(A·m^{-1})
k↑	—	↑	↑
q↑	↑	—	—
c_r↑	↑	—	↑
h↑	—	—	↑
N_e↑	↓	—	↑
g↑	—	—	↑

注：表中“↑”表示增大，“↓”表示减小，“—”表示不变或变化很小。

显然，环境温度的变化会对磁滞回线的形状产生影响，各回线特征值也随之改变。因此，要想利用 Energetic 模型计算不同温度下的磁滞回线，需要对模型参数进行温度修正，使得各参数随着温度的变化而变化。

2.2 磁滞回线形状特征值温度修正

利用公式法确定 Energetic 模型参数时，某温度下的模型参数计算与该温度下磁滞回线的形状特征值相关[20]，当温度变化对磁滞回线的形状产生影响时，各形状特征值也将随之改变。为了使模型参数计算式能够考虑温度特性，首先需建立形状特征值 M_s、H_c、M_r、 χ_0 与温度的关系。

针对饱和磁化强度 M_s 的温度依赖性，可根据文献[21]中的 Weiss 理论，当环境温度低于居里温度时，温度变化时饱和磁化强度 M_s 有以下近似表达式：

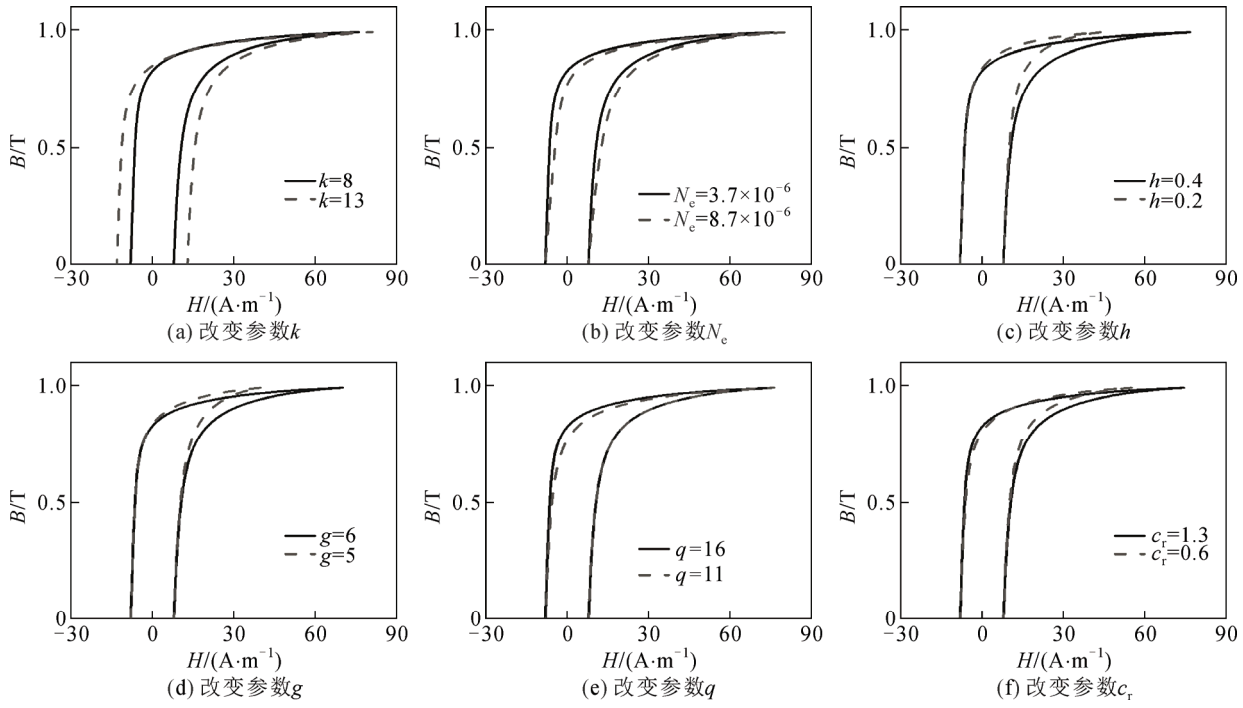


图 2　Energetic 模型各参数对磁滞回线形状的影响

Fig.2　Influence of Energetic model parameters on the shape of hysteresis loop

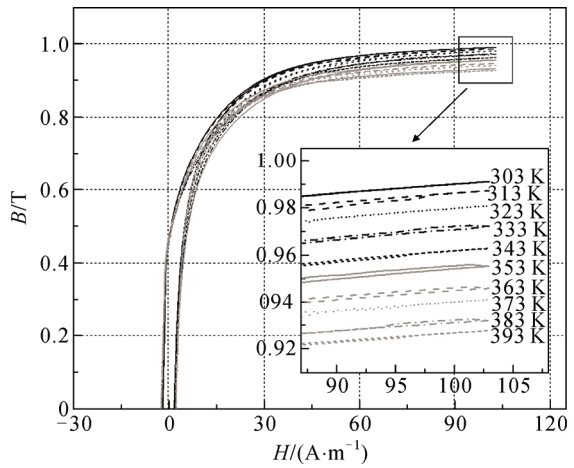


图 3　不同温度下的纳米晶极限磁滞回线

Fig.3　Limit hysteresis loops of nanocrystals at different temperatures

$$M_{\mathrm{s}}(T)=M_{\mathrm{s}}(T_0)\left(\frac{T_{\mathrm{c}}-T}{T_{\mathrm{c}}-T_0}\right)^{\beta} \tag{5}$$

式中：$M_{\mathrm{s}}(T_0)$为常温时磁滞回线的饱和磁化强度；T为温度，K；T_0为常温，K；T_{c}为居里温度；T_{c}=843 K；β为临界指数。

磁滞回线的矫顽力随温度呈指数变化[23]，同时根据图 4 所示不同温度下矫顽力的测量值，得到矫顽力 H_{c} 关于温度的表达式为：

$$H_{\mathrm{c}}(T)=H_{\mathrm{c}}(T_0)\mathrm{e}^{\lambda(T-T_0)} \tag{6}$$

式中：$H_{\mathrm{c}}(T_0)$为常温时磁滞回线的矫顽力；λ为待拟合系数。

针对剩余磁化强度和初始磁化率的温度依赖性，可结合图 4、图 5 所示不同温度下测量值的规律，对常用的经验公式进行修正，得到 $M_{\mathrm{r}}(T)$、$\chi_0(T)$ 的表达式分别为：

$$M_{\mathrm{r}}(T)=\frac{M_{\mathrm{r}}(T_0)}{1-\alpha(T-T_0)} \tag{7}$$

$$\chi_0(T)=\chi_0(T)\mathrm{e}^{\delta(T-T_0)} \tag{8}$$

式中：$M_{\mathrm{r}}(T_0)$、$\chi_0(T_0)$分别为常温时磁滞回线的剩余磁化强度和初始磁化率；α、δ为待拟合系数。

2.3　Energetic 模型参数温度修正

第 1.2 节分析结果初步验证了 Energetic 模型参数与磁滞回线形状的相关性以及通过修正 Energetic 模型参数来模拟变温条件下磁滞特性的可行性。为了修正模型参数，本文利用 Energetic 模型各参数与各磁滞回线形状特征值的数学关系[22]，即以公式法计算模型参数为基础，建立考虑温度特性的磁滞模型参数改进计算式。变温条件下 Energetic 模型参数修正具体过程如下文所述。

参数 k 的计算式是根据 Energetic 模型计算磁滞回线的矫顽力处时，式(1)中退磁场强度 H_{d}、可逆磁场强度 H_{r} 均为 0，而 $1-\rho\exp(-\frac{q}{\rho}|m-m_0|)\approx 1$。因此可得参数 k 与矫顽力 H_{c} 之间有如下关系：

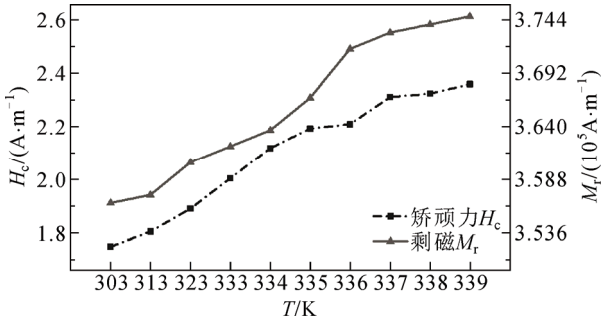


图 4 不同温度下的矫顽力 H_c 与剩磁 M_r

Fig.4 Coercive force H_c and residual magnetism M_r at different temperatures

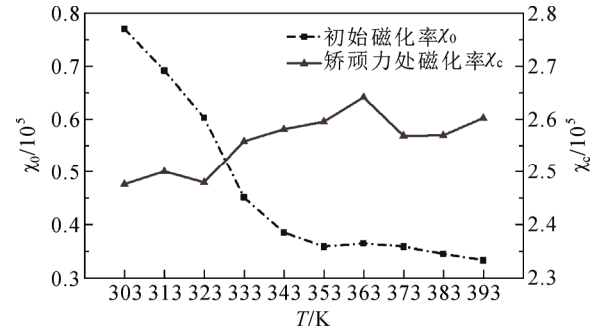


图 5 不同温度下的初始磁化率与矫顽力点磁化率

Fig.5 Initial magnetic susceptibility and coercive point magnetic susceptibility at different temperatures

$$k(T)=\mu_0 H_c(T) M_s(T) \tag{9}$$

式中：$k(T)$为参数 k 在相应温度 T 下的修正；$H_c(T)$为拟合获得的矫顽力 H_c 关于温度 T 的表达式。

参数 N_e 则可通过计算回线矫顽力处的磁化率来近似计算[16]：

$$N_e \approx \frac{1}{\chi_c}\bigg|_{H=H_c} \tag{10}$$

式中：χ_c 为常温 T_0 下矫顽力处的磁化率。此处考虑到不同温度下纳米晶合金材料磁滞回线在矫顽力处的磁化率 χ_c 几乎不变，因此令 N_e 为定值，等于常温下的数值。

参数 g 的计算需要通过数值方法求解超越方程，该方程除了包括曲线矫顽力 H_c 和饱和磁化强度 M_s 外，还需要曲线拐点附近任意点和最大测量点的数据，具体计算式为：

$$\frac{\left((1+m_g)^{1+m_g}(1-m_g)^{1-m_g}\right)^{g(T)/2}-1}{\left((1+m_m)^{1+m_m}(1-m_m)^{1-m_m}\right)^{g(T)/2}-1}=\frac{H_g-H_c(T)-N_eM_s(T)m_g}{H_m-H_c(T)-N_eM_s(T)m_m} \tag{11}$$

式中：H_g、m_g 分别为上升支拐点附近任意点的磁场强度和相对磁化强度，$m_g=M_g/M_s$；H_m、m_m 分别为最大测量磁场强度和相对最大测量磁化强度，$m_m=M_m/M_s$。

参数 q 的计算与矫顽力 H_c、饱和磁化强度 M_s 有关外，还与磁滞回线的初始磁化率 χ_0 有关，因此参数 q 的修正式为：

$$q(T)=\frac{M_s(T)\left(1-N_e\chi_0(T)\right)}{H_c(T)\chi_0(T)} \tag{12}$$

式中：$\chi_0(T)$ 为磁滞回线初始磁化率 χ_0 关于温度 T 的表达式。

参数 c_r 与钉扎点密度有关，将式中的各形状特征值用带有温度特性的表达式替换后，其修正计算式为：

$$\begin{aligned}c_r(T)=&\left(\frac{H_s-H_c(T)-N_eM_s(T)}{M_s(T)\exp(g(T)\ln 2)}\cdot\right.\\&\left(\left((1+m_r(T))^{1+m_r(T)}(1-m_r(T))^{1-m_r(T)}\right)^{g(T)/2}-1\right)-\\&\left(1-2\exp(q(T)\frac{m_r(T)-m_m}{2})\right)\frac{H_c(T)}{M_s(T)}+N_em_r(T)\Big)/\\&\left(\left(\frac{H_s-H_c(T)-N_eM_s(T)}{M_s(T)\exp(g(T)\ln 2)}\cdot\right.\right.\\&\left(\left((1+m_r(T))^{1+m_r(T)}(1-m_r(T))^{1-m_r(T)}\right)^{g(T)/2}-1\right)+\\&\left.\left.\frac{H_c(T)}{M_s(T)}\right)\left(1-2\exp(q(T)\frac{m_r(T)-m_m}{2})\right)-N_em_r(T)\right)\end{aligned} \tag{13}$$

式中：H_s 为饱和磁场强度；$m_r(T)$为相对剩余磁化强度，$m_r(T)=M_r(T)/M_s(T)$；$M_r(T)$为磁滞回线剩磁 M_r 关于温度 T 的表达式。

参数 h 是饱和磁场强度相关系数，可以利用以上步骤计算的修正参数以及相关形状特征值拟合表达式计算，即：

$$h(T)=\frac{H_s-H_c(T)-N_eM_s(T)}{(c_r(T)+1)(\exp(g(T)\ln 2)-1)} \tag{14}$$

式中：参数 $c_r(T)$、$g(T)$ 均为温度 T 下相应的修正模型参数。

根据上述式(5)、式(9)—式(14)，对饱和磁化强度 M_s 以及 Energetic 模型 6 个参数进行修正，得到变温条件下的 Energetic 模型为：

$$\begin{cases}H=N_eM_s(T)m+\mathrm{sgn}(m)H_r+\mathrm{sgn}(m-m_0)\cdot\\\left(\dfrac{k(T)}{\mu_0M_s(T)}+c_r(T)H_r\right)\left(1-\rho\exp\left(-\dfrac{q(T)}{\rho}|m-m_0|\right)\right)\\H_r=h(T)\left(\left((1+m)^{1+m}(1-m)^{1-m}\right)^{g(T)/2}-1\right)\\m=\dfrac{M}{M_s(T)}\\\rho=2-\rho_0\exp(-\dfrac{q(T)}{\rho_0}|m-m_0|)\end{cases} \tag{15}$$

式中：$k(T)$、$q(T)$、$c_r(T)$、$g(T)$、$h(T)$ 以及 $M_s(T)$为变温条件下的修正模型参数和饱和磁化强度关于温度 T 的表达式，其余项的含义与式(1)—式(4)相同。Energetic 模型的温度修正总体流程如图 6 所示。

3　计算与实验验证

3.1　不同温度下极限磁滞回线测量

将纳米晶合金铁芯样品放置于自然对流烘箱(德国宾德 ED56)中，把 k 型热电偶贴在样品表面，电路其余部分放置于室温中。采用 TD8210 磁性直流测量系统，利用模拟冲击法测量在 303~393 K 温度范围内纳米晶环型铁芯的极限磁滞回线，磁化特性测量系统如图 7 所示，环型铁芯样品的基本参数如表 2 所示。通过实验测量数据，分析纳米晶合金极限磁滞回线的温度特性，同时对比实验测量数据与修正 Energetic 模型计算值，来判断修正模型的准确性。

3.2　不同温度下极限磁滞回线模拟

根据 303~393 K 共 10 组纳米晶合金的极限磁滞回线测量值，提取常温 T_0=303 K 以及其余温度下回线的形状特征值 M_s、H_c、M_r、χ_0，拟合式(5)—式(8)确定各系数：β=0.370 6、λ=0.003 7、α=5.846 3×10^{-6}、δ=0.012 4。拟合结果如图 8 所示。

采用考虑温度特性的模型参数修正式(9)—式(14)，计算纳米晶合金极限磁滞回线在 303~393 K 下的 Energetic 模型参数，其中参数 N_e 取常温 T_0 下的值 3.889×10^{-6}，其余参数在不同温度下的计算结果如图 9 所示。图 10 分别给出了部分温度下修正模型的仿真结果。

为了定量说明本文所提方法的准确性，引入磁场强度的均方根误差作为标准，用于评判模拟出的磁滞回线整体形状与磁滞测量的吻合程度，均方根误差的计算式为：

$$E_H=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(H_{meas}-H_{model}\right)^2} \tag{16}$$

式中：E_H 为磁场强度均方根误差；n 为数据点数目；H_{meas} 为磁场强度测量值；H_{model} 为磁场强度计算值。

首先利用本文提出的 Energetic 温度修正模型和文献[4]中的 J-A 温度修正模型分别模拟了在不同温度下纳米晶合金的极限磁滞回线，其中 303 K 和 333 K 下的模拟结果对比如图 11 所示，并计算 2 种模型在不同温度下的磁场强度均方根误差，如图 12 所示。由对比结果可知，J-A 温度修正模型在特殊点处的模拟精度与本文所提模型相近，但当温度逐渐升高时，饱和段的磁场强度模拟值逐渐出现偏差，均方根误差逐渐增大，这是因为文献[4]的温度修正 J-A 模型在修正模型各参数时仅利用了通过饱和磁化强度与温度的关系引入的临界指数 β，而本文所提参数修正方法则利用了除饱和磁化强度以外的其他形状特征值与温度的关系，引入不同的系数对各模型参数进行修正。

提取修正 Energetic 模型在不同温度下剩磁和矫顽力处的模拟值，与测量值进行对比，用于评判

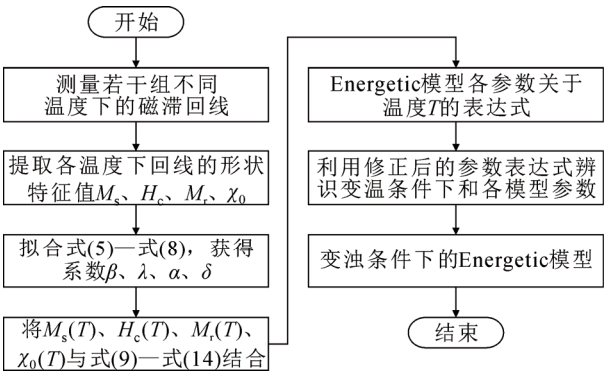


图 6　Energetic 模型温度修正流程图

Fig.6　Flowchart of temperature correction for Energetic model

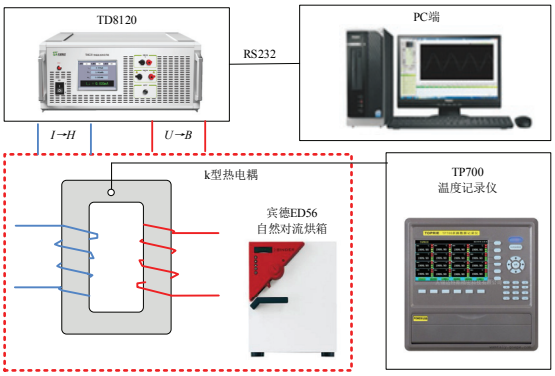


图 7　铁芯样品磁化特性测量系统示意图

Fig.7　Schematic diagram of measuring system for magnetization characteristics of iron core samples

表 2　纳米晶合金环型铁芯样品参数

Table 2　Specimen parameters of nanocrystalline alloy ing core

参数	数值
磁路长度/mm	647.97
横截面积/mm^2	1 232
体积/mm^3	9.97×10^5
质量/g	6 101.64

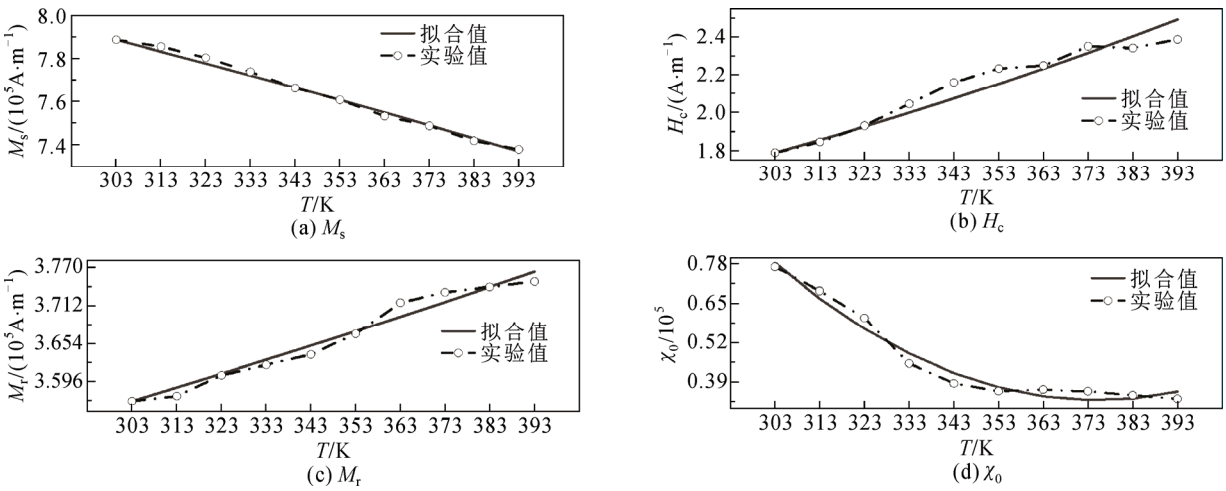


图 8 各形状特征值拟合结果

Fig.8 Fitting results of each characteristic values

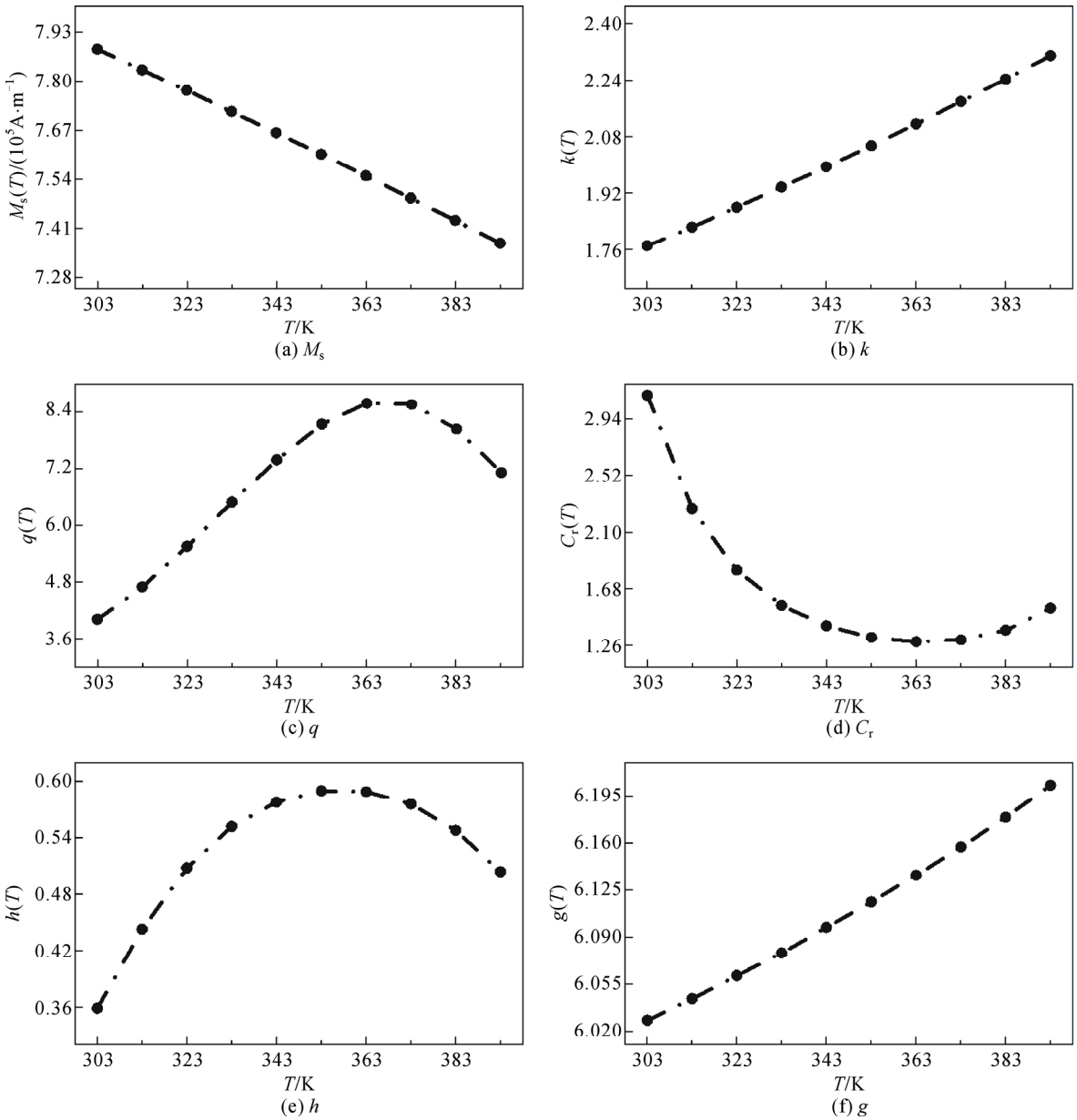


图 9 不同温度下模型修正参数取值

Fig.9 Model correction parameter values at different temperatures

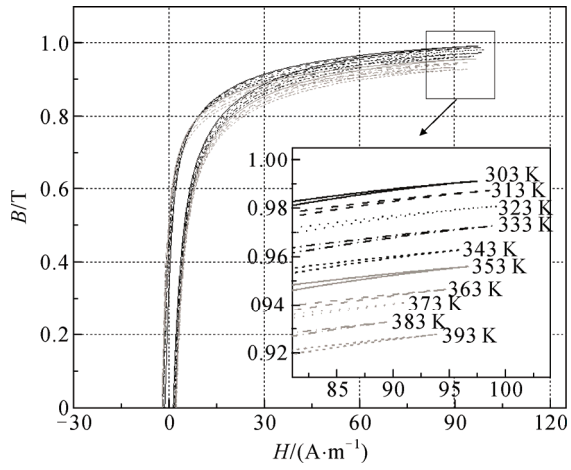
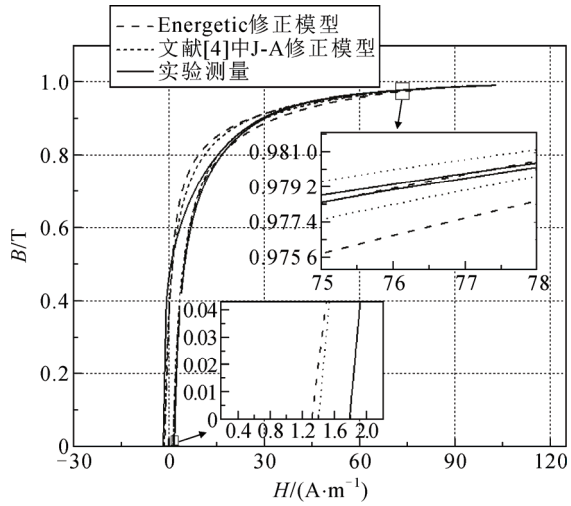
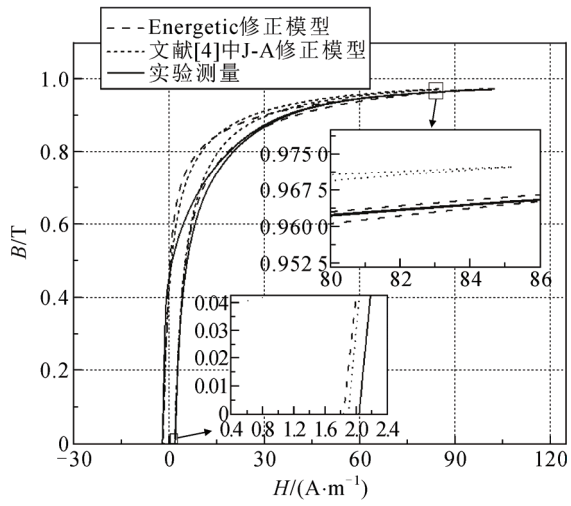


图 10　不同温度下磁滞回线仿真结果

Fig.10　Simulation results of hysteresis loops at different temperatures



(a) 303 K



(b) 333 K

图 11　2 种温度修正模型模拟结果对比

Fig.11　Comparison of results of two temperature correction models

特殊点处修正模型的计算效果。表 3 展示了各温度下修正模型的计算均方根误差以及磁滞回线特征值 B_r、H_c 的对比结果。

由表 3 可知，随着温度的上升，磁滞回线的整体模拟精度会略微降低，但总体误差较小，其中磁场强度均方根误差 E_H 最大不超过 2.98 A/m，最小为 2.14 A/m，证明本文所提修正模型的整体模拟精度较高。

此外，回线特殊点剩磁 B_r 处的模拟精度呈先升高、再降低趋势，而矫顽力 H_c 在低温下模拟精度较低，在高温下模拟精度较高。考虑到所模拟的曲线为纳米晶合金的极限磁滞回线，回线的磁场强度范围约为−100~100 A/m，磁滞回线形状窄，剩磁与矫顽力较小，Energetic 磁滞模型在模拟这种类型的磁滞回线时本身会存在一定的模拟误差，但总体而言

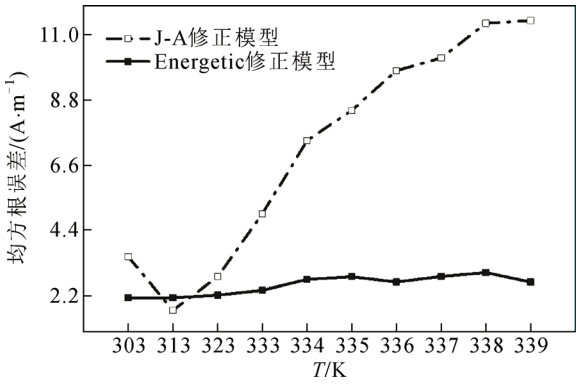


图 12　各温度下 2 种修正模型的均方根误差

Fig.12　Root-mean-square deviation of two modified models at different temperatures

表 3　Energetic 修正模型在不同温度下的计算误差

Table 3　Calculation error of Energetic correction model at different temperatures

T/K	B_r/T		H_c/(A·m^{-1})		E_H/(A·m^{-1})
	模拟值	测量值	模拟值	测量值	
303	0.321	0.448	1.321	1.787	2.14
313	0.412	0.449	1.493	1.844	2.14
323	0.432	0.453	1.690	1.929	2.23
333	0.438	0.455	1.837	2.043	2.39
343	0.468	0.457	1.972	2.158	2.75
353	0.491	0.461	2.077	2.232	2.84
363	0.506	0.467	2.160	2.249	2.66
373	0.513	0.469	2.251	2.351	2.85
383	0.508	0.470	2.352	2.364	2.98
393	0.493	0.471	2.379	2.399	2.66

2 者随温度的变化趋势与测量结果基本一致，且矫顽力处的均方根误差远低于整体模拟误差水平。为方便说明，提取常温 303 K 下磁滞回线磁场强度处于正半轴的模拟值与实验值，并以数据点数为横轴、以模型输出量磁场强度为纵轴作对比，见图 13。

4 结论

1）本文明确了 Energetic 磁滞模型各个参数对磁滞回线形状特征值的影响规律，分析了铁磁材料磁滞特性对温度的依赖性，结果表明磁滞回线形状特征值对温度具有明显的依赖关系。

2）提出了考虑温度特性的 Energetic 模型参数辨识方法。通过数值拟合的方法，引入居里温度与临界指数等系数，提出了磁滞回线形状特征值关于温度的表达式，对各模型参数进行修正计算。

3）以纳米晶合金铁芯为例，不同温度下磁滞回线计算结果的均方根误差最大不超过 2.98 A/m，最小为 2.14 A/m，证明本文所提方法的整体模拟精度较高。

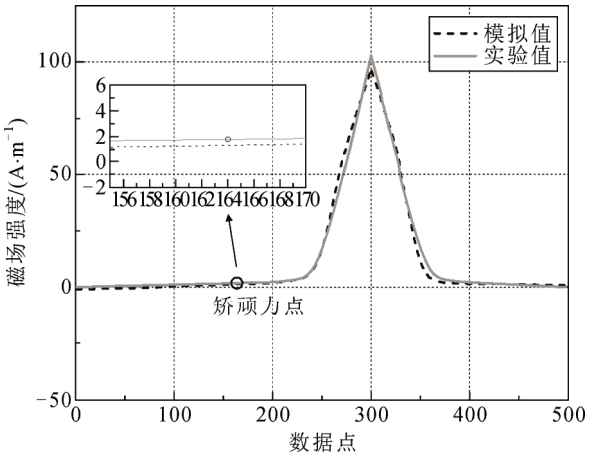


图 13 常温 303 K 下磁场强度模拟结果与实验结果对比

Fig.13 Comparison between simulated and experimental results of magnetic field strength at room temperature(303 K)

参考文献 References

[1] 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 the Preisach model[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 4038-4046.

[2] 杜莹雪，李 琳. 改进逆 Play 模型与非正弦激励下硅钢片磁滞特性模拟[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4647-4655.
DU Yingxue, LI Lin. Simulation of hysteresis characteristics of silicon steel sheet under non-sinusoidal excitation based on improved inverse play model[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4647-4655.

[3] 李梦星，张艳丽，赵加贺，等. 基于玻尔兹曼函数和磁畴能量最小化的电工钢片磁滞特性模拟[J]. 中国电机工程学报，2022，43(21)：8538-8549.
LI Mengxing, ZHANG Yanli, ZHAO Jiahe, et al. Modeling of hysteresis characteristics of electrical steel sheet based on boltzmann function and domain energy minimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 43(21): 8538-8549.

[4] 刘 任，杜莹雪，李 琳，等. 解析正 Preisach 磁滞模型的推导与修正[J]. 中国电机工程学报，2022，43(5)：2070-2078.
LIU Ren, DU Yingxue, LI Lin, et al. Derivation and modification of analytical forward Preisach hysteresis model[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 43(5): 2070-2078.

[5] 李 超，徐启峰. 随温度变化的 Preisach 磁滞模型建模方法[J]. 电工技术学报，2013，28(12)：90-94.
LI Chao, XU Qifeng. Modeling of temperature dependent hysteresis based on Preisach theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 90-94.

[6] SUTOR A, RUPITSCH S J, BI S S, et al. A modified Preisach hysteresis operator for the modeling of temperature dependent magnetic material behavior[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(7): 07D338.

[7] RAGHUNATHAN A, MELIKHOV Y, SNYDER J E, et al. Modeling the temperature dependence of hysteresis based on Jiles-Atherton theory[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10): 3954-3957.

[8] HUSSAIN S, BENABOU A, CLÉNET S, et al. Temperature dependence in the Jiles-Atherton model for non-oriented electrical steels: an engineering approach[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 7301205.

[9] XIANG Y K, XU Q F, HUANG Y F, et al. A ferromagnetic design for current sensor temperature characteristics improvement[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(4): 1435-1441.

[10] 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.

[11] 刘 任. 软磁材料的磁滞模拟与损耗计算方法研究[D]. 北京：华北电力大学，2021.
LIU Ren. Research on the methods for hysteresis simulation and loss calculation of the soft magnetic materials[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2021.

[12] 陈 彬，王斐然，万妮娜，等. 考虑可逆分量的解析 Preisach 磁滞模型及其特征参数辨识算法[J]. 高电压技术，2023，49(11)：4766-4774.
CHEN Bin, WANG Feiran, WAN Nina, et al. Analytical Preisach hysteresis model considering reversible component and its characteristic parameter identification algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4766-4774.

[13] 陈 彬，王斐然，陈 睿，等. 基于 R-L 型分数阶导数的动态解析逆 Preisach 模型[J]. 高电压技术，2023，49(9)：3918-3926.
CHEN Bin, WANG Feiran, CHEN Rui, et al. Dynamic analytical inverse Preisach model based on R-L fractional derivatives[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3918-3926.

[14] 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.

[15] 赵志刚，姬俊安，马习纹，等. 基于动态 J-A 模型的直流偏磁条件下电工钢磁特性模拟及实验验证[J]. 高电压技术，2020，46(6)：2081-2089.
ZHAO Zhigang, JI Jun'an, MA Xiwen, et al. Simulation and experimental verification of magnetic properties of electrical steal sheets under DC bias based on the dynamic J-A model[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2081-2089.

[16] HAUSER H. Energetic model of ferromagnetic hysteresis[J]. Journal of Applied Physics, 1994, 75(5): 2584-2597.

[17] HAUSER H. Energetic model of ferromagnetic hysteresis: isotropic magnetization[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(5): 2753-2767.

[18] ABOURA F, TOUHAMI O. Modeling and analyzing energetic hysteresis classical model[C]// Proceedings of 2018 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb. Algiers: IEEE, 2018: 1-5.

[19] 李东辉. 磁场/应力热处理作用下铁基非晶/纳米晶合金软磁性性能研究[D]. 南京：东南大学，2020.
LI Donghui. Study on soft magnetic properties of Fe-based amorphous/nanocrystalline alloys by applied magnetic/stress field heat treatment[D]. Nanjing, China: Southeast University, 2020.

[20] IBRAHIM M, PILLAY P. Hysteresis-dependent model for the brushless exciter of synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(4): 1321-1328.

[21] ARROTT A, NOAKES J E. Approximate equation of state for nickel near its critical temperature[J]. Physical Review Letters, 1967, 19(14): 786-789.

[22] HAUSER H, MELIKHOV Y, JILES D C. Examination of the equivalence of ferromagnetic hysteresis models describing the dependence of magnetization on magnetic field and stress[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(4): 1940-1949.

[23] HAUSCHILD J, FRITZSCHE H, BONN S, et al. Determination of the temperature dependence of the coercivity in Fe/Cr (110) multilayers[J]. Applied Physics A, 2002, 74(1): 1541-1543.



陈　彬(通信作者)
1989—，男，博士，副教授
主要从事电力装备电磁特性模拟与测量技术、电工新材料综合磁特性模拟与测量技术方面的研究
E-mail: chenbin@ctgu.edu.cn

CHEN Bin
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



曾庆麟
1998—，男，硕士生
主要从事铁磁材料磁滞建模方面的研究
E-mail: 1016874192@qq.com

ZENG Qinglin

收稿日期　2023-06-21　修回日期　2024-01-11　　编辑　程子丰