

基于 R-L 型分数阶导数的动态解析逆 Preisach 模型

陈彬^{1,2}, 王斐然^{1,2}, 陈睿³, 唐波^{1,2}, 万妮娜⁴

(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. 南方电网超高压输电公司天生桥局, 兴义 562400;

4. 国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司, 宜昌 443002)

摘要: 准确的变压器电磁暂态模型对保障电力变压器安全意义重大, 其中更为重要的是对变压器铁芯部分的建模。然而, 变压器铁芯的非线性磁滞特性及动态特性的模拟仍存在不精确, 误差大等问题。为此, 首先通过差分法改进静态解析正 Preisach 模型, 构造一种更利于动态模型建立的静态解析逆 Preisach 模型; 然后, 在损耗统计理论、场分离技术以及分数阶导数理论的基础上, 改进动态涡流场强分量, 并与静态解析逆 Preisach 模型以及剩余损耗分量相结合, 得到改进的动态解析逆 Preisach 磁滞模型, 同时引入量子遗传算法对分数阶导数参数进行全局寻优。最后, 将准确的动态解析逆 Preisach 模型在不同频率与不同最大磁密下与实验数据对比, 结果表明, 该模型的最大平均相对误差为 5.857%, 验证了该方法的有效性。

关键词: 软磁材料; Preisach 模型; 损耗统计理论; 分数阶导数; 量子遗传算法; 参数辨识

Dynamic Analytical Inverse Preisach Model Based on R-L Fractional Derivative

CHEN Bin^{1,2}, WANG Feiran^{1,2}, CHEN Rui³, TANG Bo^{1,2}, WAN Nina⁴

(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. CSG EHV Power Transmission Company, Xingyi 562400, China; 4. Yichang Electric Company State Grid Hubei Electric Power Company, Yichang 443002, China)

Abstract: Accurate transformer electromagnetic transient model is of great significance to ensure the safety of power transformers, and the more important part is the modeling of the transformer core. However, the simulation of the nonlinear hysteresis characteristics and dynamic characteristics of the transformer core still has problems such as inaccuracy and remarkable errors. To this end, this paper firstly improves the static analytical positive Preisach model by the difference method, and constructs a static analytical inverse Preisach model that is more conducive to the establishment of dynamic models. Then, based on loss statistics theory, field separation technology and fractional derivative theory, the improved dynamic eddy current field strength component is combined with the static analytical inverse Preisach model and the residual loss component to obtain an improved dynamic analytical inverse Preisach hysteresis model. At the same time, the quantum genetic algorithm is introduced to optimize the fractional derivative parameters globally. Finally, the data from the accurate dynamic analytical inverse Preisach model are compared with the experimental data at different frequencies and different maximum magnetic densities. The results show that the maximum average relative error of the model is 5.857%, which verifies the effectiveness of the method in this paper.

Key words: soft magnetic material; Preisach model; statistical theory of losses; fractional derivative; quantum genetic algorithm; parameter identification

0 引言

电力变压器中的电磁能量转换通常产生于系

统参数发生变化时, 主要由系统故障或操作所引起, 会在变压器内部产生电磁暂态过程, 因此需要针对变压器电磁暂态模型进行研究, 以保障电力变压器的安全、可靠运行^[1]。在变压器低频电磁暂态时, 变压器的饱和特性、铁芯损耗以及涡流损耗具有显著的影响, 需要先构建准确的变压器铁芯模型, 因

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).

此针对铁芯的非线性磁滞特性及动态损耗特性建立准确的动态磁滞模型, 对变压器电磁暂态模型的建立具有重要意义^[2]。

对于铁芯的非线性磁滞特性, 国内外学者已建立了多种经典模型, 如 J-A 模型^[3-5]、Energetic 模型^[6]、Preisach 模型^[7-8]等。而这些经典模型, 均是以磁场强度 H 为输入, 磁通密度 B 为输出的正模型, 此类正模型虽能准确模拟静态磁滞特性, 然而在动态模型的建立以及实际应用中通常难以运用。以 Preisach 模型为例, 其正模型会受擦除特性与同余特性的影响, 而逆模型会消除两种特性影响, 从而更好的模拟磁特性。另外在经典电磁场计算问题中, 矢量磁位 A 通常作为求解变量, 磁通密度 B 会成为内置的磁滞模型输入 ($B = \nabla \times A$), 磁场强度 H 为需要求解的输出变量^[9], 此种计算方式也更符合逆模型的求解过程。因此逆磁滞模型不仅满足构建动态模型的条件, 并且更加符合工程实际, 在构建动态模型前, 需要对正磁滞模型进行改进。但现有不同类型的逆 Preisach 模型均为离散差值性 Preisach 模型^[10-11], 在计算精度与计算速度等方面均有所欠缺。提出高精度的解析逆 Preisach 模型是解决非解析逆 Preisach 模型所存问题的关键所在。

在铁磁材料的实际应用中, 因其工作频率通常并非为零, 仅用考虑非线性磁滞特性的静态模型, 已不能准确描述变压器铁芯的动态特性, 需要引入动态涡流分量与剩余损耗分量^[12], 构建变压器铁芯准确的动态模型。传统的损耗统计理论以及场分离技术在保证计算精度的基础上, 减小了损耗求解的复杂程度, 但在涡流分量计算方面仍不能准确体现涡流分量与频率的相关特性^[13]。Ducharme Benjamin 等人运用数学定理分数阶导数改进铁磁材料涡流分量的计算, 实现了对铁磁材料涡流损耗与涡流场强的精确模拟^[14]。R. Liu 等人在此基础上, 运用改进的涡流损耗分量, 并与传统静态 Energetic 模型相结合, 精确预测了铁磁材料的高频动态损耗^[15]。然而, 分数阶导数参数的准确提取方法, 仍是基于分数阶导数的动态磁滞模型与损耗计算的关键问题。目前运用分数阶导数计算涡流分量, 其参数没有稳定的求解方法, 通常根据实验数据运用试凑法而得到, 此办法并不能保证分数阶导数参数为全局最优值^[16], 影响动态模型的准确模拟。

在传统静态 Preisach 模型的基础上, 本文首先

改进解析静态正 Preisach 模型, 运用考虑可逆分量的基于洛伦兹函数的解析逆 Preisach 模型表征磁滞特性。然后, 基于损耗统计理论与场分离技术引入动态涡流分量与额外损耗分量, 并运用 R-L 分数阶导数改进涡流分量表达式, 构建动态解析逆 Preisach 模型。针对分数阶导数参数的确定问题, 引入量子遗传算法, 实现对分数阶导数模型参数的参数辨识。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, 比较了不同频率、不同磁通密度下动态模型与实验测量数据, 验证本文所提方法的有效性 & 准确性。

1 静态解析逆 Preisach 磁滞模型

1.1 静态解析正 Preisach 模型及其参数辨识

基于洛伦兹函数的 Preisach 模型是经典 Preisach 模型的改进模型, 此模型针对经典模型分布函数 $\mu(U, V)$ 不易确定的问题, 运用洛伦兹函数近似代替 Everett 分布函数。洛伦兹函数的解析式如式 (1) 所示, 经典 Preisach 模型的分布函数 $\mu(U, V)$ 可以表示为 $\mu(U, V) = P_s(U)P_s(-V)$, 即两个洛伦兹函数的乘积。

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

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, 计算式为:

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

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 $\mu(U, V) = P_s(U)P_s(-V)$, 可以分别得到磁滞回线上升段和下降段的表达式^[17]为:

$$M_i(H) = -M_s + 2 \int_{-H_s}^H \int_{-H_s}^U P_s(U)P_s(-V) dU dV \quad (3)$$

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

将式(1)代入式(3)和式(4)可以分别获得磁滞回线上升段表达式与下降段表达式, 其中磁滞回线上升段的表达式为:

$$M_i(H) = 2A^2 \left(\frac{H_d}{\sigma}\right)^2 \left(\text{loren}\left(\frac{H+H_d}{H_d}\sigma, 2\sigma\right) - \text{loren}\left(\frac{-H_s+H_d}{H_d}\sigma, 2\sigma\right) \right) + 2A^2 \left(\frac{H_d}{\sigma}\right)^2 \text{atan}\left(\frac{-H_s+H_d}{H_d}\sigma\right) \cdot \left(\text{atan}\left(\frac{H-H_d}{H_d}\sigma\right) + \text{atan}\left(\frac{H_s+H_d}{H_d}\sigma\right) \right) - M_s \quad (5)$$

磁滞回线下降段的表达式为:

$$M_d(H) = -2A^2 \left(\frac{H_d}{\sigma}\right)^2 \left(\text{loren}\left(\frac{-H+H_d}{H_d}\sigma, 2\sigma\right) - \text{loren}\left(\frac{-H_s+H_d}{H_d}\sigma, 2\sigma\right) \right) - 2A^2 \left(\frac{H_d}{\sigma}\right)^2 \text{atan}\left(\frac{-H_s+H_d}{H_d}\sigma\right) \cdot \left(\text{atan}\left(\frac{-H-H_d}{H_d}\sigma\right) + \text{atan}\left(\frac{H_s+H_d}{H_d}\sigma\right) \right) + M_s \quad (6)$$

式(3)、(4)中 $\text{loren}(x, a)$ 函数定义为:

$$\text{loren}(x, a) = \int_0^x \frac{\text{atan}(x)}{1+(x-a)^2} dx \quad (7)$$

由于经典 Preisach 模型及其改进模型均存在着基于矩形磁滞回环来描述磁滞特性的问题, 没有考虑磁化过程中的可逆磁化分量, 进而影响了磁滞回线模拟的精确度, 如图 1 所示。因此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, 并在基于洛伦兹函数的 Preisach 模型基础上引入可逆分量。

在引入可逆磁化分量后, 磁滞回线应满足总磁通密度 $B(H)$ 是两个分量之和^[18-19]:

$$B(H) = B_{\text{irr}}(H) + B_{\text{rev}}(H) \quad (8)$$

式中: $B_{\text{irr}}(H)$ 表示不可逆分量; $B_{\text{rev}}(H)$ 表示可逆分量。

总磁导率 $\mu(H)$ 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, 计算式如下。

$$\mu(H) = \mu_{\text{irr}}(H) + \mu_{\text{rev}}(H) \quad (9)$$

其中可逆分量磁导率 $\mu_{\text{rev}}(H)$ 计算式^[18-19]为:

$$\mu_{\text{rev}}(H) = \frac{dB_{\text{rev}}(H)}{dH} = B_d \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha \cdot (1+(H/\alpha)^2)} \quad (10)$$

式中: B_d 、 α 为磁导率计算参数。

通过参数 B_d 和 α 即可根据式(11)计算出总磁滞回线的可逆分量值:

$$B_{\text{rev}} = \frac{2}{\pi} B_d \text{atan}\left(\frac{H}{\alpha}\right) \quad (11)$$

将式(5)、(6)与式(11)相结合, 即可得到考虑可逆分量的解析正 Preisach 模型, 为了使此静态模型对磁特性模拟达到更好的效果, 文献[17]通过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, 通过此混合寻优算法可得到不同磁密下静态模型的准确参数, 进而计算出静态磁滞回线。

1.2 静态解析逆 Preisach 模型

在基于洛伦兹函数的静态解析正 Preisach 模型的表达式推导过程中, 已知磁滞回线上升段与下降段的表达式, 如式(5)和(6)所示。在此基础上, 可得到静态不可逆磁化分量的导数表达式 dM/dH 。并通过式(12)转化为不可逆分量的动态磁导率 dB_{irr}/dH 。最后与式(8)相结合得到静态磁滞回线的动态磁导率 dB/dH 。

$$\frac{dB(H)}{dH} = \begin{cases} \mu_0 \left(1 + \frac{d(M_i(H))}{dH} \right) + \mu_{\text{rev}}(H) & (\text{上升段, } -H_s < H < H_s) \\ \mu_0 \left(1 + \frac{d(M_d(H))}{dH} \right) - \mu_{\text{rev}}(H) & (\text{下降段, } H_s > H > -H_s) \end{cases} \quad (12)$$

式中: μ_0 为真空磁导率, 其值为 $4\pi \times 10^{-7}$ 。

在已知动态磁导率 dB/dH 解析表达式后, 铁磁材料磁场强度可通过差分法求得, 将解析 Preisach 模型转换为逆模型的形式, 具体转换表达式如式(13)所示。

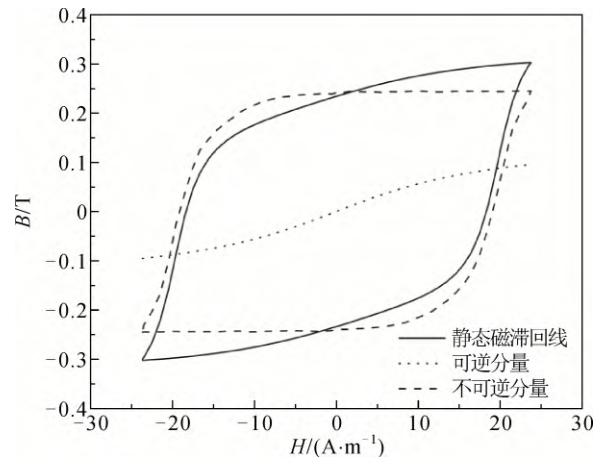


图 1 不可逆分量与可逆分量以及静态磁滞回线对比

Fig.1 Comparison of irreversible and reversible components and static hysteresis loops

$$H(t + \Delta t) = H(t) + \frac{\Delta B}{dB/dH} \quad (13)$$

式中: ΔB 为两个连续时刻之间磁通密度的变化量。

因此, 基于 1.1 节考虑可逆分量的基于洛伦兹

$$H(t + \Delta t) = -H(t) + \frac{B(t + \Delta t) - B(t)}{\mu_0 \left[1 + \frac{2A^2}{1 + \left(\frac{H(t) - H_d}{H_d} \sigma \right)^2} \frac{H_d}{\sigma} \left(\operatorname{atan} \left(\frac{H(t) + H_d}{H_d} \sigma \right) - \operatorname{atan} \left(\frac{-H_s - H_d}{H_d} \sigma \right) \right) \right]} + \left(\frac{2B_d}{\pi \alpha \left(1 + (H(t)/\alpha)^2 \right)} \right) \quad (14)$$

解析逆 Preisach 模型下降段的表达式为:

$$H(t + \Delta t) = H(t) - \frac{B(t + \Delta t) - B(t)}{\mu_0 \left[1 + \frac{-2A^2}{1 + \left(\frac{H(t) + H_d}{H_d} \sigma \right)^2} \frac{H_d}{\sigma} \left(\operatorname{atan} \left(\frac{H_d - H(t)}{H_d} \sigma \right) - \operatorname{atan} \left(\frac{-H_s - H_d}{H_d} \sigma \right) \right) \right]} - \left(\frac{2B_d}{\pi \alpha \left(1 + (H(t)/\alpha)^2 \right)} \right) \quad (15)$$

2 动态解析逆 Preisach 模型

2.1 改进动态模型

根据损耗统计理论, 铁磁材料的总损耗 W 由磁滞损耗 W_h 、涡流损耗 W_{cl} 与剩余损耗 W_{ex} 3 部分构成^[5]:

$$W_t = W_h + W_{cl} + W_{ex} \quad (16)$$

基于场分离技术, 总磁场强度可以分解为磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗对应的磁场分量的叠加, 如图 2 所示, 总损耗可以进一步表示为:

$$W = \int_0^T H_h(B) dB + \int_0^T dW_{cl} + \int_0^T dW_{ex} = \int_0^T (H_h(B) + H_{cl}(B) + H_{ex}) dB \quad (17)$$

式中: H_h 为磁滞损耗对应磁场分量, 可以由本文 1.2 节静态解析逆 Preisach 模型得到; H_{cl} 和 H_{ex} 分别为与频率相关的涡流分量与剩余损耗分量, 表达式为:

$$H_{cl} = k_{cl} \frac{dB}{dt} = \frac{\gamma d^2}{12} \frac{dB}{dt} \quad (18)$$

$$H_{ex} = \lambda k_{ex} \left(\frac{dB}{dt} \right)^{0.5} = \lambda \sqrt{\gamma G S V_0} \left(\frac{dB}{dt} \right)^{0.5} \quad (19)$$

式中: d 为铁磁材料厚度; γ 为电导率; G 为无量纲数, $G=0.1356$; S 为铁磁材料横截面积; V_0 为统计系数; λ 为符号函数, 当 $dB/dt > 0$ 时, $\lambda = 1$; 当 $dB/dt < 0$ 时, $\lambda = -1$ 。

然而传统涡流损耗表达式以及涡流磁场强度表达式中均含有 dB/dt , 为磁通密度对时间的整数阶导数, 如式(18)所示。但铁磁材料涡流磁密与涡流

函数的解析 Preisach 模型的表达式(5)、(6), 以及磁滞回线的动态磁导率, 即可求得解析逆 Preisach 模型的表达式。具体表达式如式(14)、(15)所示。

解析逆 Preisach 模型上升段的表达式为:

损耗存在非局部、频率、历史等依赖性过程^[18], 整数阶导数并不适用于此过程。为了更好的考虑涡流损耗对频率的依赖性, 本文引入分数阶导数对涡流损耗与涡流磁密表达式进行改进。

分数阶导数将传统导数的阶数 n 由整数推广至非整数和复数。目前常用的分数阶导数算子有 Grünwald-Letnikov(G-L 型)与 Riemann-Liouville(R-L 型)分数阶导数, 而 R-L 型分数阶导数是对 G-L 分数阶导数的改进与扩展^[7]。因此, 本文运用 R-L 分数阶导数对传统涡流分量计算式进行改进^[20]。R-L 型分数阶导数算子表达式如式(20)所示。

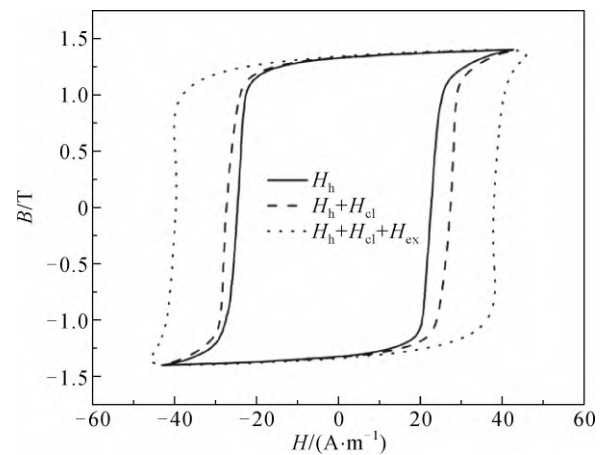


图 2 不同磁场叠加对应磁滞回线示意图

Fig.2 Schematic diagram of the hysteresis loop corresponding to the superposition of different magnetic fields

$$\frac{d^n f(t)}{dt^n} = {}_0D_t^n f(t) = \frac{1}{\Gamma(1-n)} \int_0^t (t-\tau)^{-n} f(\tau) d\tau \quad (20)$$

式中： D 为分数阶导数算子； n 为分数阶导数的阶数，针对涡流分量计算式进行改进时， n 的通常取值范围为(0,1)，因此在算子 D 前以最小值 0 表示，在欧拉伽马函数计算时用最大值 1 减去非整数阶数 n 进行计算； t 表示需改进公式的自变量； $\Gamma(\cdot)$ 为欧拉伽马函数。

将式(20)引入式(18)，可以实现对传统损耗统计理论中的涡流场分量的改进：

$$H_{cl}^{RL} = \rho \frac{d^n B(t)}{dt^n} \quad (21)$$

式中： ρ 为改进后的涡流分量阻尼系数。

在正弦激励下，计算式(21)可以进一步表示为：

$$H_{cl}^{RL} = \rho B_s \omega^n \cos\left(\omega t + \frac{n\pi}{2}\right) \quad (22)$$

式中： B_s 为最大磁密。

基于分数阶导数的改进涡流损耗表达式为：

$$W_{cl} = \int_0^T H_{cl}^{RL} \cdot \frac{dB(t)}{dt} dt \quad (23)$$

将静态磁滞分量与分数阶导数改进涡流分量以及剩余损耗分量相叠加形成动态解析逆 Preisach 模型，其具体流程如图 3 所示。

为了更好地模拟铁磁材料的动态磁滞特性，需要对模型参数进行参数辨识，其关键问题为分数阶导数参数 ρ ， n 的确定。

2.2 动态模型参数辨识

在本文 1.1 节中，对于静态模型的参数辨识已通过文献[19]所提混合优化算法进行确定，为使改进动态模型能够更好的模拟铁磁材料动态特性，需要对涡流损耗参数与剩余损耗参数进行参数辨识与确定。

分数阶导数参数 ρ 和 n 的准确提取方法，是基于分数阶导数的动态磁滞模型是否准确的关键问题。阻尼系数 ρ 在损耗统计理论运用中具有明确的物理含义，与材料的尺寸及其他物理参数相关。然而分数阶导数阶次 n 对不同材料的取值不同，且会影响阻尼系数 ρ 的确定。两个参数都会对涡流分量对应磁滞回线的矫顽力产生影响，因而，若要实现动态模型的精确计算，同时获取参数 ρ 和 n 在其限制条件内的全局最优值尤为重要。运用全局寻优的算法可以更为快速与准确地得到参数最优值，因此本文引入了用于全局寻优的量子遗传算法。

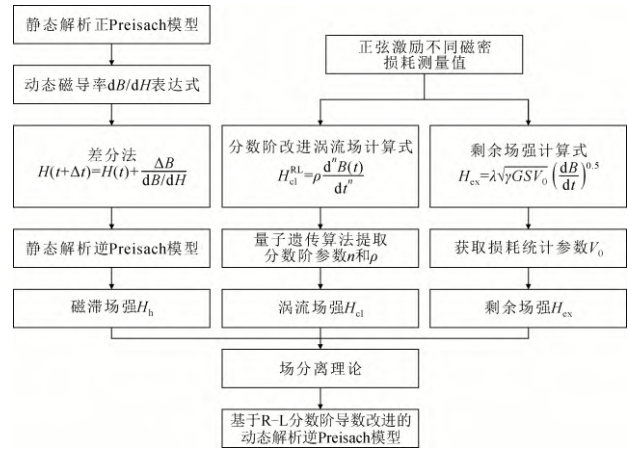


图 3 动态解析逆 Preisach 模型流程图

Fig.3 Flow chart of dynamic analysis of inverse Preisach model

量子遗传算法是基于量子计算与遗传算法而提出的概率进化算法。此算法会随着迭代次数的增加，实现染色体的更新操作，使其不断靠近最优值。为了解决运用量子遗传算法计算分数阶导数参数 ρ ， n 最优问题，需要设置优化算法的目标函数，目标函数的最小化问题即为参数的最优值提取问题。为了简化参数辨识的目标函数，避免对实验数据的二次处理，本文直接运用损耗测量值与改进涡流损耗表达式的计算值之间的均方根误差作为优化算法的目标函数，基于分数阶导数的改进涡流损耗表达式如式(23)所示，目标函数如式(24)所示。

$$E_f = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_{cl}(i) - W_{meas}(i))^2} \quad (24)$$

式中， E_f 为均方根误差值； W_{cl} 为基于式(23)的理论计算值； W_{meas} 实验测量的损耗值。

量子遗传算法基本步骤如下：

1) 种群初始化。利用算法函数生成量子比特应用于染色体，并形成初始化种群下的量子比特染色体编码矩阵，如式(25)所示。

$$q_j^g = \begin{bmatrix} a_1^g & a_2^g & \cdots & a_m^g \\ b_1^g & b_2^g & \cdots & b_m^g \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中： q_j^g 为第 g 代的第 j 个染色体； m 为一个染色体中的基因数目； a_m^g 和 b_m^g 均代表基因中的量子比特，并满足条件 $a^2 + b^2 = 1$ 。

2) 初始化最优值。对步骤 1) 中初始种群的每个个体进行一次测量，得到对应的解集。

3) 基于目标函数式(24)对步骤 2) 中每个个体

的解进行适应度评估, 并记录最优个体与其适应度, 作为下一代的演化目标。

4) 对步骤 3) 进行循环迭代, 更新最优值。将个体最优值与当前最优值进行对比, 取适应度更小的个体进行更新。

5) 判断是否达到结束条件, 满足条件计算结束。结束条件通常为是否达到最大迭代次数。

6) 利用量子旋转门得到新的种群。量子旋转门的更新式如式(26)所示。

$$\begin{bmatrix} a'_i \\ b'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中: θ_i 为旋转角, $\theta_i = s(a_i, b_i)\Delta\theta_i$; $s(a_i, b_i)$ 和 $\Delta\theta_i$ 分别为旋转方向与大小。

7) 迭代次数加 1, 返回步骤 3)。

量子遗传算法具体流程如图 4 所示。

在通过量子遗传算法确定分数阶导数准确参数后, 即可通过式(18)即式(21)确定准确的涡流分量。通过总损耗测量值与涡流分量损耗计算值, 可以提取额外损耗分量统计系数 V_0 :

$$W_t - W_{cl} = W_h + k_{ex} B_s^{1.5} f^{0.5} \quad (27)$$

式中: k_{ex} 为剩余损耗拟合系数, $k_{ex} = 8.76\sqrt{\gamma GSV_0}$ 。

3 仿真与实验验证

3.1 动态磁滞回线测量及参数提取

利用 BROCKHAUS-MPG-200D 电工钢测量系统测量 0.08mm 超薄取向硅钢片磁特性, 实验测量系统如图 5 所示。超薄取向硅钢单片的基本参数如表 1 所示。通过铁磁材料磁特性测量系统测量材料在不同频率, 不同最大磁密条件下的动态磁滞回线, 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。且通过测量磁滞回线, 其损耗测量值可以表示为:

$$P_m = f \int HdB = fS_m \quad (28)$$

式中: S_m 为频率 f 下动态磁滞回线面积。

3.2 实验验证与结果分析

本文 1.2 节给出的静态解析逆 Preisach 磁滞模型, 并通过文献[19]所提出的结合循环迭代法与粒子群算法的混合优化算法, 可以得到准确的不同磁密下的静态磁滞回线。静态解析逆 Preisach 磁滞模型的可逆分量参数和不可逆分量参数的具体取值如表 2 所示。通过表 2 所示参数, 验证静态解析逆 Preisach 模型的有效性, 针对 0.3 T、0.6 T、1.0 T、

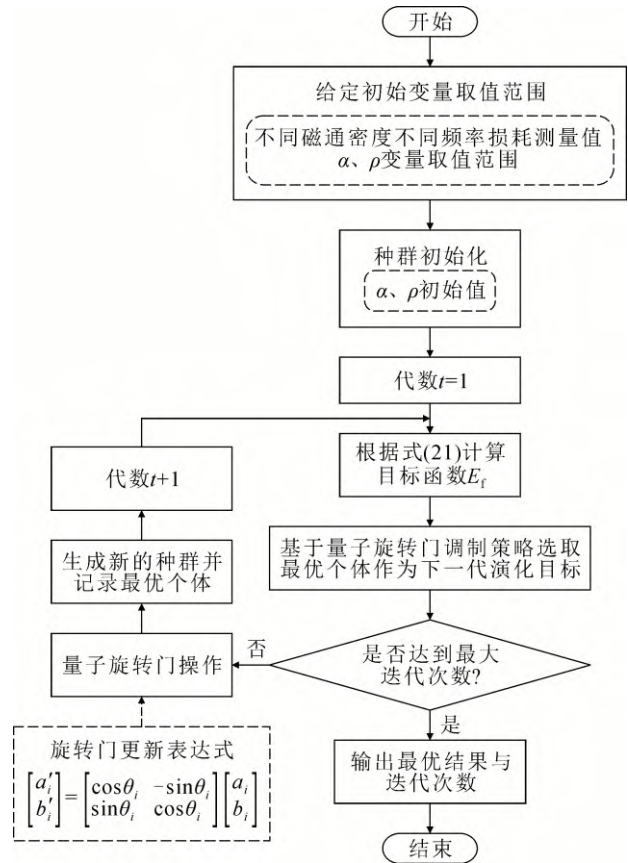


图 4 分数阶导数参数辨识流程图

Fig.4 Fractional derivative parameter identification flowchart

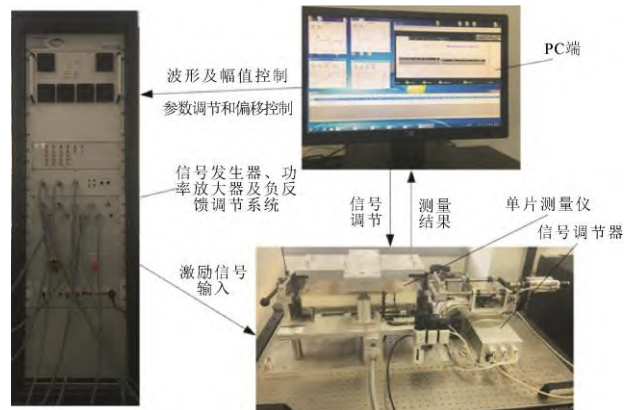


图 5 超薄取向硅钢片磁特性测量系统

Fig.5 Ultra thin grain oriented silicon steel sheet measuring device for magnetizing feature

1.4 T、1.8 T 最大磁密下的模型计算值与实验测量值进行对比, 静态模型的计算结果如图 6 所示。并分别计算不同最大磁密下测量结果和模型计算结果的平均相对误差, 在最大磁密为 1.4 T 时, 得到平均相对最大误差为 4.49%, 说明该静态解析逆 Preisach 模型能够准确模拟静态磁滞回线。

表 1 超薄取向硅钢片样品参数取值

Table 1 Parameters of ultra thin grain oriented silicon steel sheet sample

参数	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
电导率/(MS m ⁻¹)	2.17

表 2 不同磁密静态解析逆 Preisach 磁滞模型参数取值

Table 2 Model parameter values under different magnetic density

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 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

在精确模拟静态磁滞回线后，采用本文 2.2 节所提量子遗传算法对分数阶导数的两个参数 ρ 和 n 进行参数辨识。其中损耗测量数据选用最大磁密 B_s=0.3 T、1.0 T、1.4 T、1.5 T 时，频率 f=100 Hz、500 Hz、1000 Hz、2000 Hz 共 16 个损耗测量数据作为基准。为减少参数寻优的难度，分数阶导数的两个参数可设置限制条件，参数应满足文献[15]推导证明的限制条件，如式(29)，(30)所示。

阻尼系数 ρ ：

$$\rho > \frac{\sigma d^2}{12} > 1.437 \times 10^{-5} \quad (29)$$

分数阶导数阶次 n ：

$$n > 0.5 \quad (30)$$

最终，采用量子遗传算法辨识出的分数阶导数参数 ρ 和 n 分别为 0.0052 和 0.812。因参数辨识采用多个磁密与多个频率，因此参数辨识所得到的分数阶导数参数 ρ 和 n 也可模拟不同情况下的涡流分量，两个参数 ρ 和 n 量子遗传算法的参数辨识迭代曲线如图 7 所示。

同时，动态模型中的剩余损耗分量统计系数 V₀ 对不同最大磁密下的提取值由式(27)拟合得到，如图 8 所示。

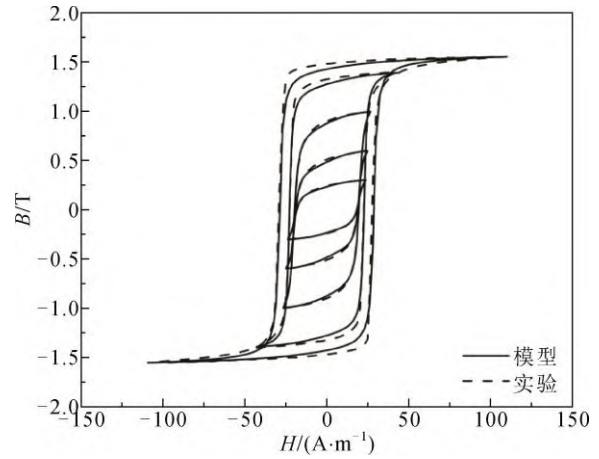


图 6 不同磁密下的静态模型计算值与测量值对比

Fig.6 Comparison of model calculated and measured values under different magnetic densities

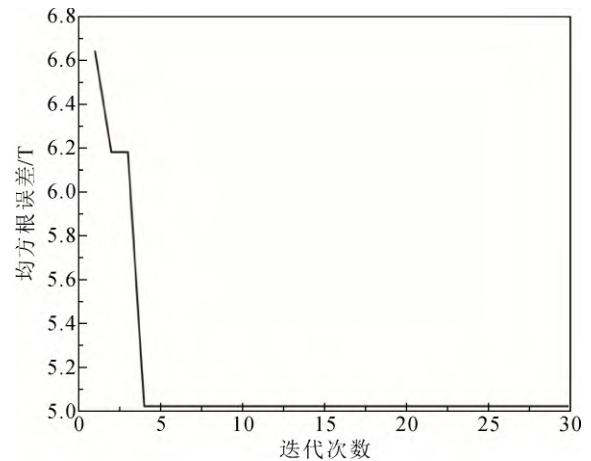


图 7 分数阶导数参数辨识迭代次数

Fig.7 Number of iterations for fractional derivative parameter identification

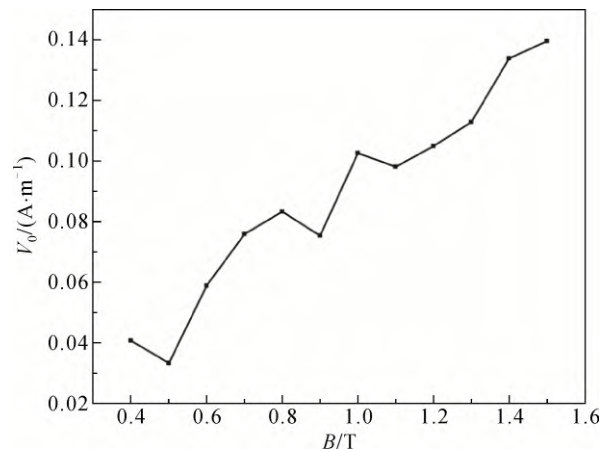


图 8 参数 V₀ 随最大磁密变化曲线

Fig.8 Change curve of parameter V₀ with the maximum magnetic density

采用第 2 章所提出的方法, 计算超薄取向硅钢片在不同频率下的动态磁滞回线。为了验证模型的有效性, 针对 0.3 T、1.0 T 与 1.4 T 最大磁密下的模型计算值与实验测量值进行对比, 结果如图 9、图 10 与图 11 所示。从实验验证的结果可知, 模型计算结果与实验结果基本相符。

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基于 R-L 型分数阶导数的动态解析逆 Preisach 模型的模拟效果, 平均相对误差的计算式为:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|B_{i,model} - B_{i,meas}|}{|B_{i,meas}|} \times 100\% \quad (31)$$

式中: N 是不同磁通密度下测量的频点数目; $B_{i,model}$ 为本文提出的动态模型计算值; $B_{i,meas}$ 为实验测量值。

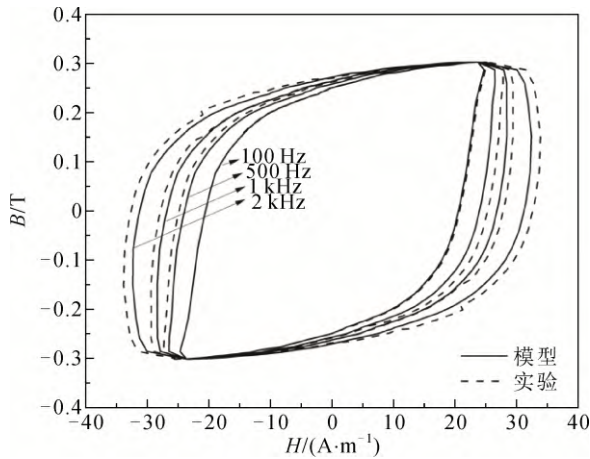


图 9 最大磁密为 0.3 T 的动态模型

Fig.9 Dynamic model with a maximum magnetic density of 0.3 T

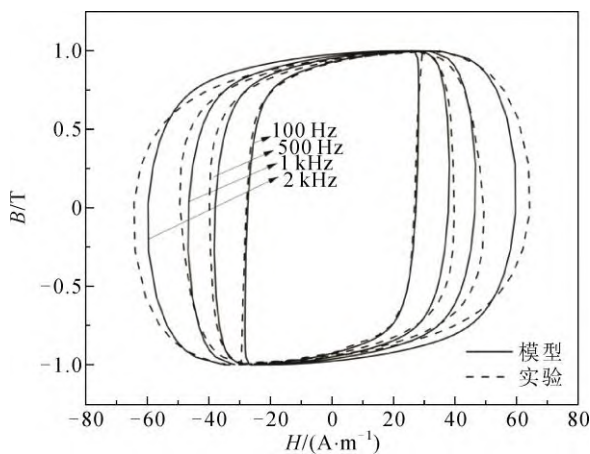


图 10 最大磁密为 1.0 T 的动态模型

Fig.10 Dynamic model with a maximum magnetic density of 1.0 T

不同磁密和频率下, 动态磁滞回线平均相对误差如表 3 所示。

4 结论

针对变压器电磁暂态模型精度低的问题, 本文开展了变压器铁芯磁滞特性与动态损耗特性的研究以及变压器铁芯动态模型的构建, 得出如下结论:

1) 将传统静态正 Preisach 模型运用差分法改进为静态解析逆 Preisach 模型, 逆模型有利于下一步构建动态模型。

2) 基于场分离技术和分数阶导数理论, 改进涡流分量表达式, 并构建动态解析逆 Preisach 磁滞模型。通过量子遗传算法对分数阶导数进行参数辨识后, 得到模型参数的全局最优解, 实现动态模型对动态特性的准确模拟。

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, 将模型计算结构与实验测量数据进行比较, 结果表明: 此动态模型与实验数据最大平均相对误差为 5.857%, 验证了该方法的有效性。

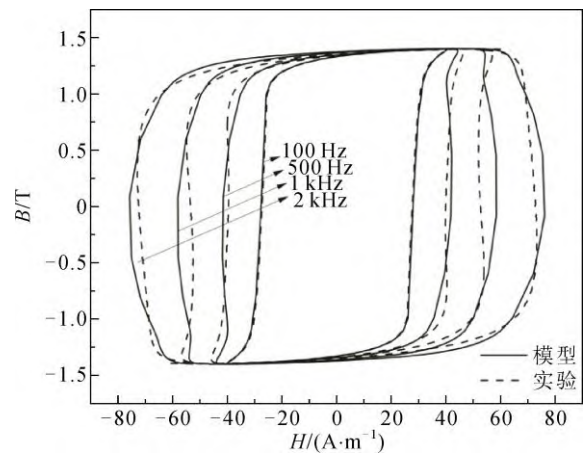


图 11 最大磁密为 1.4 T 的动态模型

Fig.11 Dynamic model with a maximum magnetic density of 1.4 T

表 3 不同磁密、频率下动态磁滞回线平均相对误差

磁密/T	平均相对误差/%			
	100 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
0.3	0.157	1.267	0.987	1.587
1.0	0.176	0.683	1.943	1.374
1.4	0.184	1.245	3.781	5.857

参考文献 References

- [1] 邹密. 计及磁滞效应的变压器低频电磁暂态模型及其在铁磁谐振中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
ZOU Mi. Low-frequency transformer model considering hysteresis behavior and its application in ferroresonance[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2018.
- [2] 程时杰. 先进电工材料进展[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4273-4285.
CHENG Shijie. Progress in advanced electrical materials[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4273-4285.
- [3] SARKER P C, GUO Y G, LU H Y, et al. Improvement on parameter identification of modified Jiles-Atherton model for iron loss calculation[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, 542: 168602.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 李伊玲, 李琳, 刘任, 等. 基于非均匀单元离散法的静态逆 Preisach 模型分布函数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5340-5350.
LI Yiling, LI Lin, LIU Ren, et al. The non-uniform element discretization method for identifying distribution function of static inverse Preisach model[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5340-5350.
- [10] ZIRKA S E, MOROZ Y I, HARRISON R G, et al. Inverse hysteresis models for transient simulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 552-559.
- [11] FALLAH E, BADELI V. A new approach for modeling of hysteresis in 2-D time-transient analysis of eddy current using FEM[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(7): 7402714.
- [12] BERTOTTI G. Dynamic generalization of the scalar Preisach model of hysteresis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 28(5): 2599-2601.
- [13] KOWAL D, SERGEANT P, DUPRÉ L, et al. Comparison of iron loss models for electrical machines with different frequency domain and time domain methods for excess loss prediction[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(1): 6300110.
- [14] DUCHARNE B, SEBALD G, GUYOMAR D, et al. Fractional model of magnetic field penetration into a toroidal soft ferromagnetic sample[J]. International Journal of Dynamics and Control, 2018, 6(1): 89-96.
- [15] LIU R, LI L. Analytical prediction model of energy losses in soft magnetic materials over broadband frequency range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 2009-2017.
- [16] 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.
- [17] 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/OL]. 高电压技术, 2022: 1-11 [2022-08-24]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220260>.
CHEN Bin, WANG Feiran, WAN Nina, et al. Analytical Preisach hysteresis model considering reversible component and its characteristic parameter identification algorithm[J/OL]. High Voltage Engineering, 2022: 1-11 [2022-08-24]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220260>.
- [18] LUO M, DUJIC D, ALLMELING J. Modelling hysteresis of soft core materials using permeance-capacitance analogy for transient circuit simulations[C] // 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe). Warsaw, Poland: EPE'17 ECCE Europe, 2017: 1-10.
- [19] 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.
- [20] 陈文, 孙洪广, 李西成, 等. 力学与工程问题的分数阶导数建模[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
CHEN Wen, SUN Hongguang, LI Xicheng, et al. Fractional derivative modeling of mechanics and engineering problems[M]. Beijing, China: Science Press, 2010.



CHEN Bin
Ph.D.

Associate professor
Corresponding author



WANG Feiran

陈彬(通信作者)

1989—, 男, 博士, 副教授, 博导
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的研究工作
E-mail: chenbin@ctgu.edu.cn

王斐然

1998—, 男, 硕士生
主要从事磁性材料磁滞建模与损耗模拟方面的
研究工作
E-mail: 295361629@qq.com

收稿日期 2022-09-07 修回日期 2022-12-20 编辑 陈蔓