

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2026.03.007

基于 RVM 的双特征融合变压器铁心剩磁辨识方法研究

彭乃勇¹, 孙振兴¹, 翟雪松¹, 马涛¹, 杨海涛²

(1. 国网安徽电力有限公司淮北供电公司, 安徽 淮北 235000;

2. 国网安徽电力有限公司电力科学研究院, 合肥 230092)

摘要: 铁心剩磁作为诱发变压器励磁涌流的关键内因, 工程中受制于非线性磁滞与合闸相位的强耦合作用面临在线识别精度不足的难题。考虑到传统方法在特征表征维度上的欠缺, 本文选取合闸相位与励磁涌流峰双特征量, 提出一种基于相关向量机(relevance vector machine, RVM)的剩磁辨识方案。研究以 Jiles-Atherton(J-A)动态磁滞理论为基础, 在 COMSOL 多物理场平台中建立单相变压器场路耦合模型, 通过直流脉冲注入法产生不同初始剩磁状态, 并在铁心中心区域设置磁通探针获取稳态剩磁数据, 构建剩磁与双特征变量之间的非线性映射并验证模型的物理一致性。在此基础上构建稀疏化 RVM 回归模型, 依托贝叶斯框架下的自动相关性判别机制实现参数自适应调整, 减少模型对人工参数调节的依赖。仿真结果表明该方法在剩磁反演中具有较高辨识精度, 模型决定系数 R^2 达到 0.998, 表明其在复杂非线性关系建模与剩磁精确辨识方面具备良好的有效性。

关键词: 变压器剩磁; 励磁涌流; 合闸相位; 相关向量机; 有限元仿真

Research on Identification Method of Transformer Core Remanence Based on Dual-feature Fusion Using SVM

PENG Naiyong¹, SUN Zhenxing¹, ZHAI Xuesong¹, MA Tao¹, YANG Haitao²

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Huabei Power Supply Company, Anhui Huabei 235000, China; 2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Hefei 230092, China)

Abstract: Strong coupling between nonlinear hysteresis and the closing phase, together with the core remanence as a key internal cause of transformer magnetizing inrush current, leads to the challenge of insufficient online identification accuracy in engineering. Considering the shortcomings of traditional method in feature characterization, in this paper the dual features of closing phase angle and inrush current peak are selected, and a remanence identification scheme based on Relevance Vector Machine(RVM) is proposed. Based on Jiles-Atherton dynamic hysteresis theory, a single-phase transformer field-circuit coupled model is set up in COMSOL Multiphysics. Different initial remanence states are generated through DC pulse injection, and steady-state remanence data are obtained by setting a flux probe in the core center. The nonlinear mapping between remanence and dual features is constructed with verified physical consistency. On this basis, a sparse RVM regression model is constructed, realizing adaptive parameter adjustment via Bayesian automatic relevance determination (ARD) to reduce manual tuning dependency. Simulation results show that this method exhibits high accuracy in remanence inversion, achieving a coefficient of determination R^2 is up to 0.998, which confirms its excellent effectiveness in capturing complex nonlinear relationships and enabling precise remanence identification.

Keywords: transformer core remanence; inrush current; closing phase; relevance vector machine; finite element simulation

收稿日期:2026-01-29; 修回日期:2026-02-25

基金项目:国网安徽电力有限公司重点科技项目(SGAHHB00FCJS2400462)。

Project Supported by Key Science and Technology Project of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. (SGAHHB00FCJS2400462)。

0 引言

电力变压器是电网能量流转与电压变换的核心设备,其稳态运行直接关乎供电系统可靠性。铁磁材料天然具有磁滞属性,变压器停运后内部磁通无法随电流同步归零,会沿磁滞回线衰减并留存为非零剩磁^[4-5]。该剩磁具有极强记忆效应,极性与幅值由分闸时刻电压相位、负载性质及材料自身磁滞特性多重耦合而成^[2]。变压器再次空载合闸时系统电压引入的强迫磁通与初始剩磁叠加,合成磁链瞬时值突破饱和拐点后铁心会快速陷入深度饱和区^[3],进而诱发幅值达额定电流 8~10 倍的暂态励磁涌流^[4-5]。该类冲击电流会产生剧烈热效应造成绕组变形与绝缘累积性损伤,还可能引发差动保护误动、电压跌落及谐波污染,严重威胁电网安全^[6]。

变压器铁心剩磁辨识的现有技术主要分为物理模型间接估算与数据驱动智能辨识两类。文献[7]提出暂态电流法,通过正反向直流电压激励采集暂态电流并积分得电荷量,利用其与剩磁的单调映射间接计算剩磁,兼具测量与退磁功能,但精度受经验拟合公式和采集噪声的影响。文献[8]提出能量变化检测法,基于直流激励下的电磁暂态过程,通过场路耦合建立剩磁与正反向能量变化的关联,对比能量幅值确定剩磁方向并拟合定量模型,且支持离线检测,但对激励参数要求较高,需精准采集电压电流信号。文献[9]基于预充磁原理设计间接测量方案,通过注入特定磁通抵消合闸时的磁通自由分量,由涌流抑制效果反推剩磁,可结合涌流抑制工程应用,但精度依赖充磁控制,更适用于间接评估。文献[10]通过求解不同剩磁工况下磁滞小回环所围面积,以该面积量化表征剩磁幅值,同时引入电荷量作为特征参数实现对剩磁极性的判别,但对磁滞模型参数依赖性强,且磁滞小回环面积计算易受测量噪声与涡流损耗干扰,低剩磁工况下辨识度不足。

针对上述工程问题,本文建立基于相关向量机(relevance vector machine, RVM)的剩磁辨识模型并选取合闸相位与励磁涌流峰值作为双特征输入,以 J-A 动态磁滞原理为依据在 COMSOL 多物理场环境中构建场路耦合模型,通过直流脉冲注入与磁通探针协同监测采集覆盖多工况的剩磁数据,系统剖析“合闸相位-剩磁-涌流峰值”三者的非线性映射机制并验证特征向量的物理合理性,采用贝叶斯框架下的 RVM 算法且借助自动相关性测度(automatic relevance determination, ARD)实现模型稀疏化训练,该方法可应对传统算法核参数寻优的计算困境,同时给出高精度预测值及其概率置信区间,显

著增强辨识系统的鲁棒性。

1 剩磁检测原理

1.1 磁畴理论

变压器的空载合闸过程实际上是变压器铁心的磁化过程。铁磁材料固有的磁滞特性决定了合闸前铁心内部残留剩磁,该剩磁作为初始磁化状态^[11],直接参与合闸后铁心磁链的叠加过程,进而影响励磁电流的暂态特性。励磁电流的大小决定了铁心内磁场的强弱,而励磁电流的幅值与相位由绕组电压约束^[12],使得铁心内部的总磁通受电压与剩磁的共同调控。单相变压器等效电路如图 1 所示。

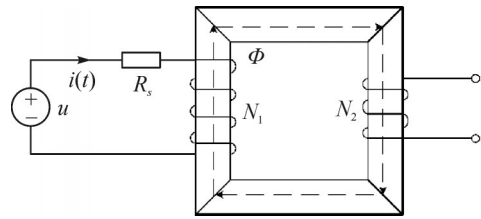


图1 单相变压器等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of single-phase transformer

在变压器空载合闸过程中,绕组磁链的演化过程同时受法拉第电磁感应定律与磁链连续性原理约束^[13]。根据法拉第电磁感应定律,绕组端电压与磁链变化率之间满足

$$u(t) = -N \frac{d\psi(t)}{dt} \quad (1)$$

式中: $u(t)$ 为绕组端电压为绕组匝数; N 为绕组匝数; $\psi(t)$ 为绕组所链合的总磁链。设合闸时刻 $t=0$, 系统侧施加的交流电压可表示为

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

式中, U_m 、 ω 与 θ 依次表征电压幅值、角频率及合闸初相角。基于铁磁介质的磁链连续性原理,磁通状态无法发生阶跃突变,因此合闸时刻铁心内将驻留在前次运行遗留的剩磁磁链 ψ_r ^[14]。通过对上述电压-磁链方程在时域 $[0, t]$ 内积分,可推导出合闸暂态过程中的总磁链演化方程为

$$\psi(t) = -\int_0^t U_m \sin(\omega \tau + \theta) d\tau + \psi_r \quad (3)$$

进一步整理可得

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \theta) \quad (4)$$

由此可将合闸后的磁链分解为交流分量、直流偏置分量与剩磁分量 3 部分,即:

$$\psi(t) = \psi_{ac}(t) + \psi_{dc} + \psi_r \quad (5)$$

当总磁链 $\psi(t)$ 所对应的磁密超过铁心饱和磁密 B_s 时,磁导率急剧下降,等效励磁电感 L_m 随之显著减小。根据磁链与电流之间的关系 $L_m \psi/i$,在端电压

保持不变的条件下,励磁电流将迅速增大,从而形成幅值远高于稳态励磁电流的励磁涌流。因此,剩磁磁链 ψ_r 与直流偏置磁链 ψ_{dc} 的叠加效应是导致铁心快速进入饱和状态、进而产生励磁涌流的根本原因。

1.2 非线性映射机理

深入分析铁心磁化过程可知,励磁涌流的严重程度直接取决于合闸后铁心内瞬时总磁链的峰值。由式(5)可知,当不计及系统阻尼衰减时,合闸后半周期左右交流分量与直流偏置分量极性相同并发生叠加,此时总磁链达到最大值 ψ_{max} ,其近似表达式可写为

$$\psi_{max} \approx \psi_m + |\psi_m \cos \theta + \psi_r| \tag{6}$$

式中, ψ_m 为稳态磁链幅值,总磁链峰值受合闸初相角 θ 与初始剩磁 ψ_r 的共同影响,当 θ 取0且 ψ_r 与稳态磁通方向一致时磁通偏置达到最大水平,铁心随之进入深度饱和工况。

变压器铁心由高磁导率硅钢片叠压构成,其*i-ψ*磁化特性表现出显著的非线性迟滞行为^[15],在磁化状态进入饱和区后励磁电流与磁链之间的近线性关系被破坏并呈现急剧上升特征,因此研究中常采用奇次多项式对饱和区磁化曲线进行数值拟合,可以较为准确地表征该类非线性电磁特性,公式为

$$i(t) = a_1 \psi(t) + a_n [\psi(t)]^n \tag{7}$$

通过将时域磁链演化式(6)代入磁化特性模型式(7),可推导出励磁涌流首波峰值 i_{peak} 与系统状态变量间的非线性解析关联,公式为

$$i_{peak} = a_1 (\psi_m + |\psi_m \cos \theta + \psi_r|) + a_n (\psi_m + |\psi_m \cos \theta + \psi_r|)^n \tag{8}$$

由式(8)解析可得励磁涌流峰值 i_{peak} 本质受剩磁 ψ_r 与合闸初相角 θ 的二元非线性耦合机制支配, θ 对涌流幅值存在显著调制效应,但仅依靠单一峰值特征无法完成剩磁状态的逆向反演。从 i_{peak} 到 ψ_r 的映射因不满足数学单射条件,故需重构包含合闸初相角 θ 的高维特征空间并建立确定逆映射模型,以此消除待辨识参数的不确定性进而实现铁心剩磁的高精度辨识。

2 变压器场路耦合仿真

2.1 软件选取与参数取值

变压器空载合闸时会经历高度非线性电磁暂态过程,铁心磁滞特性与多物理场耦合作用使得内部电磁量随时间的演变规律极为复杂^[16-20],传统解析模型描述此类问题存在明显局限,因此本研究采

用数值仿真方法并选取 COMSOL Multiphysics 有限元平台作为主要分析工具,通过 Magnetic Fields 接口求解时域麦克斯韦方程组实现铁心磁通密度分布、绕组电流及端电压响应的统一计算,同时引入 Electrical Circuit 模块描述外部激励与开关动作构建磁场与电路紧密耦合的仿真体系,进而准确反映变压器空载合闸过程中励磁涌流的产生机理及剩磁效应的作用特征。

基于上述分析构建单相变压器电磁暂态模型,重点探讨铁心磁化过程对励磁电流暂态行为的影响,为兼顾计算效率与模型物理可信度对变压器结构进行必要简化,仅保留主导电磁特性的铁心与励磁绕组而忽略夹件及油隙等次要因素,铁心采用二维截面建模且绕组通过多匝线圈等效处理,实现磁场方程与外部电路方程的双向动态耦合,为后续不同剩磁水平下的仿真分析提供可靠模型支撑,模型主要电气参数如表1所示。

表1 电气参数取值
Table 1 Electrical parameter value selection

参数	数值
初级绕组电阻 R_p/Ω	1
初级绕组匝数 N_p	300
次级绕组电阻 $R_s/k\Omega$	10
次级绕组匝数 N_s	100
电源电压幅值 U_{ac}/V	250
电源电压频率 f/Hz	50

传统单值 B-H 曲线仅能描述磁性材料磁化过程中的平均特性,忽略了铁磁材料固有的磁化历史依赖性,会导致空载合闸仿真中励磁涌流特性偏离实际物理过程。为克服这一缺陷,本文选用 Jiles-Atherton (J-A) 磁滞模型进行铁心建模。该模型从铁磁材料微观磁畴运动机理出发,将磁化过程分解为可逆磁化和不可逆磁化两部分,能够精准刻画磁饱和特性,与实际铁心剩磁形成机制高度一致。其具体参数如表2所示。

表2 J-A 参数取值
Table 2 J-A parameter value selection

参数	数值
磁饱和强度 $M_s/(A/m)$	1.5e6
形状参数 $a/(A/m)$	560
畴壁钉扎系数 $k/(A/m)$	1 000
磁场耦合系数 α	0.000 7
可逆磁化系数 c	0.1

2.2 初始剩磁的获取

为统一量化不同工况下的初始剩磁水平,本文在铁心主磁路截面设置虚拟磁通探针作为物理场结果与数据分析之间的关键接口,通过采集稳态瞬

时磁通量对各工况剩磁进行定量标定,磁通探针位置如图2所示。

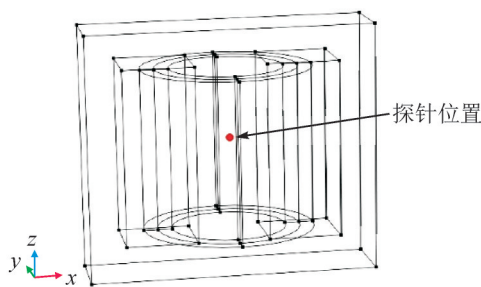


图2 磁通探针位置
Fig. 2 Magnetic flux probe position

考虑到探针位置可能对局部磁场分布产生影响,正式计算前需对模型进行磁场无畸变验证,三维磁通密度模值分布会显示出探针引入后的磁场拓扑结构,图3证明了探针布设方案是否具备良好的合理性。

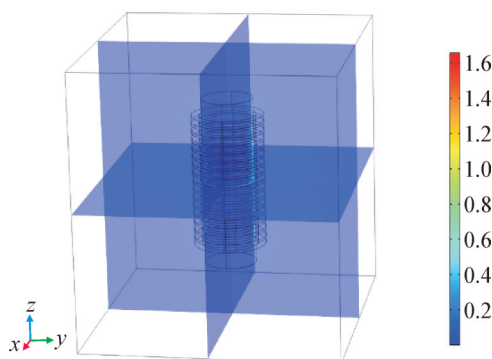


图3 变压器求解域三维磁场分布
Fig. 3 3-D magnetic field distribution of the transformer solution domain

由图3切面颜色梯度可知,铁心外部空气域磁感应强度仅极少量漏磁通散逸至周围空间,空气域最外层边界处磁通密度模平滑收敛至接近零值,表明仿真模型零磁标量电位边界条件设置合理,有效规避了磁场畸变。

2.3 仿真结果分析

在初始剩磁基准确定后,借助 COMSOL 的电路接口向系统施加正弦交流电压激励,通过精确控制合闸初相角,使其覆盖电压过零点、峰值点以及若干中间相位,以系统分析合闸相位变化对励磁涌流特性的非线性调制作用。在合闸暂态过程中,对初级绕组电流进行实时监测,并提取首个波峰作为反映铁心磁化程度的关键特征量。与此同时,为进一步验证铁心在强暂态激励条件下的磁化响应特性,额外提取了直流脉冲激励作用后的磁场分布数据,其磁通密度云图及矢量流向如图4所示,用以检验所提取涌流特征的物理一致性。

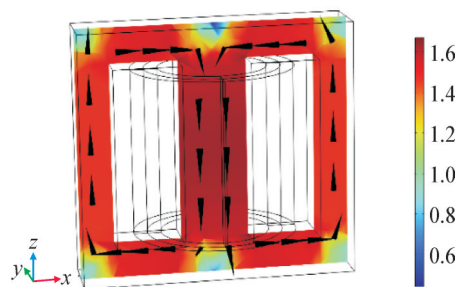
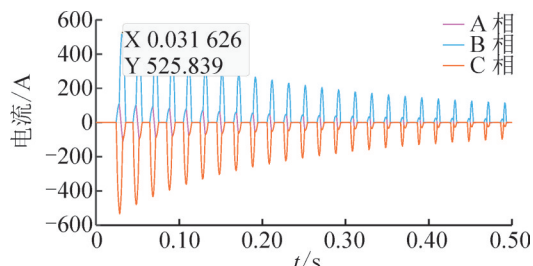


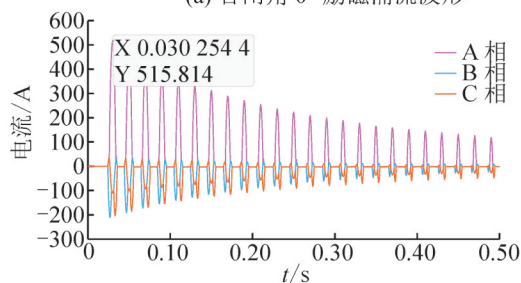
图4 铁心磁通密度分布与矢量流向
Fig. 4 Core flux density distribution and vector flow direction

进一步的分析表明,在合闸瞬间强励磁电流作用下铁心主体区域产生显著磁感应效应,磁通密度峰值约为 1.6 T,表明铁心已处于深度饱和运行状态,磁力线沿心柱、旁柱及上下铁轭形成完整闭合回路,整体分布特征符合磁通连续性规律,验证了仿真模型对硅钢铁心非线性磁化特性的刻画精度。

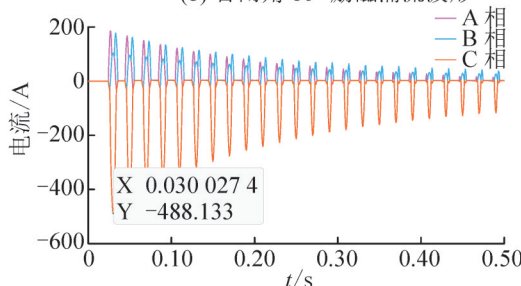
仿真时间设定为 0.5 s,为探究激励水平与合闸初相角对励磁涌流瞬态特性的影响,设计两组对比工况:第1组固定激励脉冲幅值为 400 V,分别设置合闸角为 0°、30°、90°,仿真得到变压器初级绕组励磁涌流波形如图5所示。



(a) 合闸角 0° 励磁涌流波形



(b) 合闸角 60° 励磁涌流波形



(c) 合闸角 90° 励磁涌流波形

图5 不同合闸角工况下励磁涌流波形
Fig. 5 Inrush current waveforms under different closing angle conditions

第2组固定合闸角为0°,分别设置激励脉冲幅值为200 V、300 V,仿真得到的励磁涌流波形如图6所示。

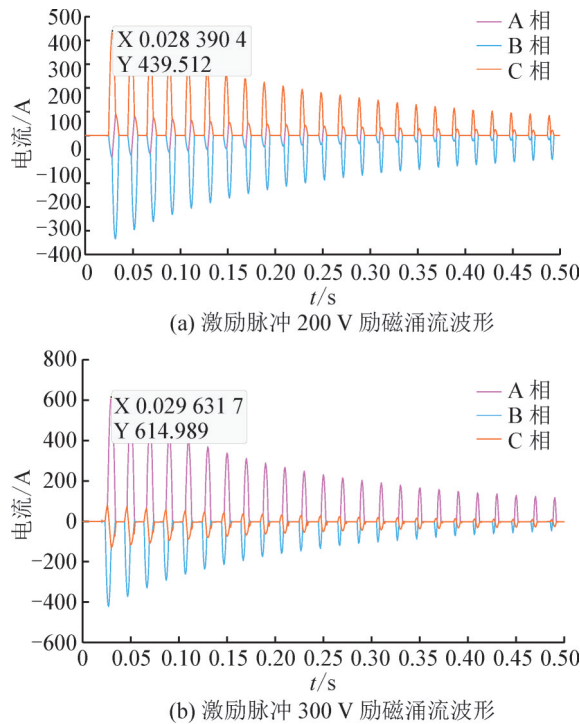


图6 不同激励脉冲工况下励磁涌流波形
Fig. 6 Waveform of excitation inrush current under different excitation pulse conditions

仿真结果进一步表明激励幅值与合闸初相角的协同作用显著影响励磁涌流暂态特征,不同工况下电流波形表现出差异化非对称直流偏置特征与幅值衰减规律,本文提取各测试工况下励磁涌流首半波峰值并与磁通探针测得的剩磁真值比对,进行系统性统计分析,定量结果如表3所示。

表3 不同工况下励磁涌流波峰值及剩磁值
Table 3 Peak value and remanence value of excitation inrush current under different conditions

激励电压/V	合闸角/(°)	首波峰值/A	剩磁值/T
200	0	439.5	0.56
250	0	525.8	0.84
250	60	515.8	0.71
250	90	488.1	0.64
300	0	615.0	0.97

3 剩磁辨识模型及验证

3.1 模型构建原理

相关向量机(RVM)的核心优势是基于贝叶斯推断框架对模型参数施加概率化约束,在回归建模中实现稀疏特性^[21-29]。本文选取励磁涌流峰值与合闸初相角作为训练样本输入向量 $x_i=[I_{peak}, \theta]^T$, 铁心

剩磁 B_r 作为目标输出 t_i , 构建的回归模型可表示为

$$t_i = y(x_i; w) + \epsilon_i = \sum_{j=1}^N w_j K(x_i, x_j) + w_0 + \epsilon_i \quad (9)$$

式中: $\epsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ 为独立同分布的随机噪声分量; $K(x_i, x_j)$ 为核函数映射得到的设计矩阵; $w=[w_0, w_1, \dots, w_N]^T$ 为待估计权重向量。

剩磁辨识问题中输入输出存在显著强非线性关系,本文选用高斯径向基(radial basis function, RBF)核函数提升模型对复杂拓扑映射特征的刻画能力。RVM 为规避传统点估计的过拟合缺陷,在贝叶斯框架下为每一维权重 w_j 赋予相互独立的零均值高斯先验分布,公式为

$$p(w_j|\alpha_j) = N(w_j|0, \alpha_j^{-1}) \quad (10)$$

其精度由超参数 α_j 调控,模型训练本质是对超参数集合 α 及噪声方差 σ^2 的协同寻优。通过对第2类边际似然函数的迭代最大化,RVM 具备天然的自动相关性判定(automatic relevance determination, ARD)能力,优化过程中大量超参数 α_j 逐渐趋于无穷大,对应权重的后验均值与方差收缩至零,相关基函数被判定为统计无效并从模型中剔除,最终仅有少量超参数保持有限值的样本被保留为模型的“相关向量”集合,形成结构精简且预测性能不受损的稀疏回归模型。

本文基于 RVM 理论构建的剩磁辨识算法流程见图7。

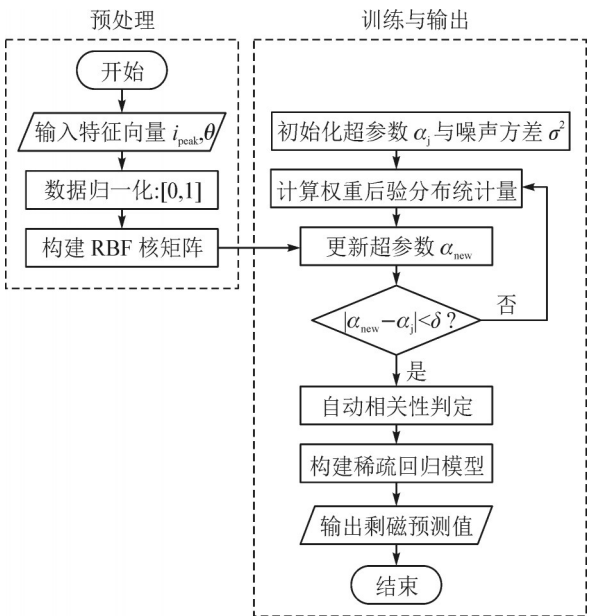


图7 RVM算法流程
Fig. 7 RVM algorithm flowchart

算法先对原始励磁涌流峰值与合闸相位数据

做归一化预处理,再初始化核参数与超参数并进入贝叶斯迭代更新阶段,每一轮迭代中模型同步更新权重的后验统计量及对应超参数,满足收敛判据后自动触发剪枝机制剔除无效基函数,最终输出由有限相关向量构成的高精度剩磁预测模型。

3.2 剩磁辨识模型验证

根据所建立的 COMSOL 场路耦合仿真模型,收集并整理 300 组不同仿真工况样本,构建统一的标准化数据集用于检验 RVM 在剩磁反演问题中的适用性,覆盖剩磁范围 $B_r=[-1.2T, 1.2T]$ 及合闸相角 $\alpha=[0^\circ, 180^\circ]$,按随机原则划分为 240 组训练样本与 60 组测试样本,并且经 Max-Min 方法归一化至 $[0, 1]$ 区间以削弱量纲差异对核函数计算结果的影响。

在 MATLAB 仿真环境中建立 RVM 剩磁预测模型,采用高斯径向基函数作为核函数并通过交叉验证确定核宽参数 $\gamma=1.8$,贝叶斯迭代在第 48 次更新时达到收敛条件,测试集上的剩磁预测结果如图 8 所示。结果表明预测值在整体变化趋势及局部细节上均与实际剩磁高度一致,说明模型能够有效表征励磁涌流峰值、合闸相位与铁心剩磁之间的强非线性映射关系,图中给出的 95% 置信区间对观测点实现了良好覆盖并为预测结果提供定量参考,验证了该方法在复杂运行工况下具备良好的鲁棒性与泛化能力。

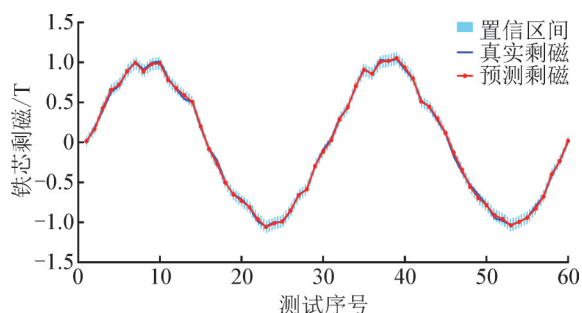


图8 测试集真实剩磁值与预测值对比
Fig. 8 Comparison of actual and predicted remanence values on the test set

为了进一步量化评估算法性能,计算得到测试集的决定系数 R^2 达到 0.998,表明预测剩磁值与真实剩磁值之间具有极强的线性相关性,拟合程度极高,其散点分布如图 9 所示。

引入双特征向量后,RVM 算法有效克服了单一特征值反演剩磁的病态问题,能够实现对铁心剩磁的高精度反演,也进一步体现了所构建辨识模型的预测准确性与可靠性,为工程场景下的剩磁精准辨识提供了有力支撑。

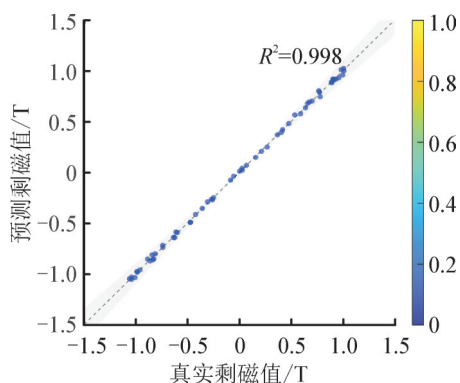


图9 剩磁预测值与真实值散点分布
Fig. 9 Scatter distribution between predicted and actual remanence value

4 结语

本文针对变压器铁心剩磁在线辨识面临的特征提取不完备及模型泛化能力弱等关键问题,开展了融合电磁机理分析与 RVM 稀疏概率模型的研究。通过理论推导、仿真建模与算法验证,主要得出以下结论:

1)构建了基于电磁物理机理的样本生成体系。依据 J-A 动态磁滞理论,建立单相变压器场路耦合有限元模型,通过施加不同幅值的直流脉冲并结合铁心中心磁通探针测量方法,有效抑制边缘效应与漏磁干扰,准确地复现铁心复杂磁滞过程,实现多运行工况下剩磁数据的高精度获取。

2)明确了合闸相位对励磁涌流的非线性调制特性。研究表明励磁涌流峰值并非单由剩磁幅值决定,而是合闸相位与剩磁共同作用的结果,通过构建由合闸相位与涌流峰值组成的双特征输入向量,避免了单一特征反演中的多值问题,形成较为合理的剩磁辨识特征空间。

3)验证了 RVM 算法在剩磁辨识工程应用中的优势。引入自动相关性判定机制后模型在保持高拟合精度的同时实现参数稀疏化与结构简化,提高了计算效率与稳定性,预测结果满足 95% 置信区间要求且决定系数 R^2 达到 0.998,在辨识精度与抗参数扰动能力方面优于传统回归方法。

基于上述研究,本文构建的双特征输入 RVM 铁心剩磁辨识方法实现了电磁机理分析与数据驱动模型的有效结合,为选相合闸条件下变压器剩磁的在线定量获取提供了新的技术路径,并为电力设备暂态过程的智能感知与控制提供了理论支撑与工程参考价值。

参考文献

[1] 程新博,张玥璇,陈承,等.分闸变压器时铁心磁轨迹反

- 演及剩磁产生[J]. 变压器, 2024, 61(3): 14-19.
- CHENG Xinbo, ZHANG Yuexuan, CHEN Cheng, et al. Magnetic track inversion and remanence generation of iron core when switched off transformer[J]. Transformer, 2024, 61(3): 14-19.
- [2] 赵紫薇,汪友华,火彩玲. 变压器环形铁心建模和剩磁测量[J]. 电测与仪表, 2023, 60(7): 116-121.
- ZHAO Ziwei, WANG Youhua, HUO Cailing. Toroidal iron core modeling of transformer and residual flux density measurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(7): 116-121.
- [3] 王青于,田淞铂,曾强,等. 基于本征正交分解和离散经验插值的变压器磁场及短路电磁力快速计算方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(19): 6167-6179.
- WANG Qingyu, TIAN Songbo, ZENG Qiang, et al. Fast calculation method of magnetic field and short-circuit electromagnetic force of transformer based on proper orthogonal decomposition and discrete empirical interpolation method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(19): 6167-6179.
- [4] 李斌,彭伍龙,姚斌,等. 基于复合环流与零序电流特征的换流变压器励磁涌流波形相关性识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 8027-8038.
- LI Bin, PENG Wulong, YAO Bin, et al. An algorithm of identifying inrush current of converter transformer based on waveform cross-correlation of composite circulation and zero sequence current characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 8027-8038.
- [5] 韩平平,童青洋,王焱,等. 基于偏磁模拟的换流变选相合闸励磁涌流抑制策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4977-4985.
- HAN Pingping, TONG Qingyang, WANG Yan, et al. Inrush current suppression strategy of converter transformer phase selection closing based on magnetic bias simulation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4977-4985.
- [6] 李海涛,刘北阳,滕文涛,等. 基于可变合闸角的变压器励磁涌流抑制方法[J]. 中国电力, 2022, 55(9): 70-78.
- LI Haitao, LIU Beiyang, TENG Wentao, et al. Research on inrush current suppression of transformer based on changeable closing angle[J]. Electric Power, 2022, 55(9): 70-78.
- [7] 王朝祚,汪友华,刘成成,等. 电力变压器剩磁测量与退磁系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2025(3): 65-71.
- WANG Chaozuo, WANG Youhua, LIU Chengcheng, et al. Design of residual flux measurement and demagnetization system for power transformers[J]. Instrument Technique and Sensor, 2025(3): 65-71.
- [8] 王丽丽,高树国,相晨萌,等. 考虑能量变化的电力变压器剩磁检测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2025, 37(8): 115-122.
- WANG Lili, GAO Shuguo, XIANG Chenmeng, et al. Residual flux detection method for power transformers considering changes in energy[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2025, 37(8): 115-122.
- [9] 武玉才,刘艳泽,谭曜昆,等. 基于预充磁原理的三相变压器励磁涌流抑制[J]. 电机与控制学报, 2025, 29(6): 12-21.
- WU Yucui, LIU Yanze, TAN Yaokun, et al. Suppression of inrush current of three-phase transformer based on pre-magnetization principle[J]. Electric Machines and Control, 2025, 29(6): 12-21.
- [10] VULIN D, MILICEVIC K, BIONDIC I, et al. Determining the residual magnetic flux value of a single-phase transformer using a minor hysteresis loop[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 36(4): 2066-2074.
- [11] 张云舰,孔祥清,孙乾,等. 基于励磁电感的变压器铁心剩磁估算[J]. 变压器, 2024, 61(6): 6-11.
- ZHANG Yunjian, KONG Xiangqing, SUN Qian, et al. Estimation of residual magnetism in transformer cores based on excitation inductance[J]. Transformer, 2024, 61(6): 6-11.
- [12] 陈承,罗勇芬,孙玟玟,等. 变压器剩磁的制备及对绕组变形测量的影响[J]. 变压器, 2024, 61(9): 26-35.
- CHEN Cheng, LUO Yongfen, SUN Minmin, et al. Transformer remanence preparation and influence on winding deformation measurement[J]. Transformer, 2024, 61(9): 26-35.
- [13] 包维翰,杨超,赵宇明,等. 交直流混合微电网中互联换流器联结变的暂稳态特性分析方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1771-1780.
- BAO Weihuan, YANG Chao, ZHAO Yuming, et al. Steady state and transient analysis approach of the interface converter's coupling transformer in AC/DC hybrid microgrid [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1771-1780.
- [14] 栾云飞,张禄亮,季天瑶,等. 基于直方图和余弦相似度的光伏电站主变压器励磁涌流识别[J]. 电测与仪表, 2025, 62(7): 181-189.
- LUAN Yunfei, ZHANG Luliang, JI Tianyao, et al. Histogram and cosine similarity based magnetizing inrush current identification for main transformer in photovoltaic power station[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(7): 181-189.
- [15] 孔庆奕,容焯,齐文达,等. 变压器用取向硅钢片磁特性影响因素研究[J]. 变压器, 2020, 57(1): 31-36.
- KONG Qingyi, RONG Ye, QI Wenda, et al. Study on influence factors of magnetic performance of oriented Silicon steel sheet for transformer[J]. Transformer, 2020, 57(1): 31-36.
- [16] 钱锋,张蔚,蒲云豪,等. 纳米晶铁心变压器空载损耗的

- 研究[J]. 变压器, 2024, 61(1): 9-13.
- QIAN Feng, ZHANG Wei, PU Yunhao, et al. Research on no-load loss of nanocrystalline iron core transformer [J]. Transformer, 2024, 61(1): 9-13.
- [17] 普子恒, 冯子灏, 王耀强, 等. 雷电冲击下变压器绕组电压分布求解模型算法优化设计[J]. 电瓷避雷器, 2024(2): 80-89.
- PU Ziheng, FENG Zihao, WANG Yaoqiang, et al. Optimization design of transformer winding voltage distribution solving model algorithm under lightning impulse[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(2): 81-89.
- [18] 朱涛, 陈理, 沈煜, 等. 真型变压器中典型悬浮缺陷的局部放电特征[J]. 高压电器, 2025, 61(1): 173-180.
- ZHU Tao, CHEN Li, SHEN Yu, et al. Partial discharge characteristics of typical floating defects in full-size power transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(1): 173-180.
- [19] 黄建业, 杜厚贤, 林爽, 等. 变压器振动特征值分类算法优化研究[J]. 高压电器, 2025, 61(1): 181-188.
- HUANG Jianye, DU Houxian, LIN Shuang, et al. Research on classification algorithm optimization of transformer vibration eigenvalues[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(1): 181-188.
- [20] 高树国, 相晨萌, 王丽丽, 等. 基于振动超声复合信号的变压器套管及升高座故障监测方法[J]. 电瓷避雷器, 2024(1): 177-186.
- GAO Shuguo, XIANG Chenmeng, WANG Lili, et al. The monitoring method of transformer bushing and riser by using vibration and ultrasonic composite signal sensor[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(1): 177-186.
- [21] 王磊, 梅红伟, 刘建军, 等. 基于支持向量机的电网设备绝缘材料缺陷太赫兹成像方法[J]. 高压电器, 2025, 61(3): 160-167.
- WANG Lei, MEI Hongwei, LIU Jianjun, et al. Terahertz imaging method of insulation material defects in power grid equipment based on support vector machine algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(3): 160-167.
- [22] 胡俊, 李小龙, 张喻, 等. 基于改进鲸鱼算法优化支持向量机的电压暂降源识别[J]. 东北电力技术, 2025, 46(5): 18-22.
- HU Jun, LI Xiaolong, ZHANG Yu, et al. Voltage sag source identification based on support vector machine optimized by IWOA[J]. Northeast Electric Power Technology, 2025, 46(5): 18-22.
- [23] 何宁辉, 吴旭涛, 张佩, 等. 基于多分类支持向量机的变压器在线监测数据错误模式识别[J]. 高压电器, 2024, 60(7): 173-181.
- HE Ninghui, WU Xutao, ZHANG Pei, et al. Error pattern identification of on-line monitoring data of transformer based on multi-classification SVM[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 173-181.
- [24] 何国阳, 汲胜昌, 祝令瑜, 等. 在运换流变压器噪声特性及噪声预测方法[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5): 117-127.
- HE Guoyang, JI Shengchang, ZHU Lingyu, et al. Noise characteristics and prediction methods of operating converter transformers[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5): 117-127.
- [25] 范利东, 张亚杰. 一种辐向分裂变压器的结构分析[J]. 变压器, 2024, 61(1): 1-4.
- FAN Lidong, ZHANG Yajie. Structure analysis of a radial split transformer [J]. Transformer, 2024, 61(1): 1-4.
- [26] 李宜, 刘守豹, 方圆, 等. 玻璃钢电容型变压器套管故障分析[J]. 电瓷避雷器, 2025(1): 143-148.
- LI Yi, LIU Shoubao, FANG Yuan, et al. Fault analysis of glass fiber reinforced plastic capacitive bushing of transformer[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(1): 143-148.
- [27] 刘旭明, 何晓坤, 陈武. 基于辅助变压器的无环流全桥直流变换器[J]. 电力工程技术, 2025, 44(6): 202-210.
- LIU Xuming, HE Xiaokun, CHEN Wu. A circulating current free medium frequency DC-DC converter based on auxiliary transformer[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6): 202-210.
- [28] 许恺, 陈骥群, 王毅. 一种基于实时负荷的变压器电抗优化控制方法[J]. 东北电力技术, 2024, 45(4): 1-5.
- XU Kai, CHEN Jiqun, WANG Yi. Optimal control method of transformer reactance based on real time load[J]. Northeast Electric Power Technology, 2024, 45(4): 1-5.
- [29] 李国友, 施勇, 邹德旭, 等. 换流变压器网侧套管典型电连接结构振动失效特性试验及分析[J]. 电瓷避雷器, 2025(1): 133-142.
- LI Guoyou, SHI Yong, ZOU Dexu, et al. Vibration failure characteristics test of typical electric connection structure of converter transformer grid-side bushing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(1): 133-142.

作者简介:

彭乃勇(1979—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力设备故障诊断、电力设备励磁涌流。E-mail: 911401559@qq.com。