

电压互感器匝间短路磁—热分布形态仿真与故障辨识

吴 田^{1,2}, 刘秀磊^{1,2}, 王南极³, 冯兴龙⁴, 王申华⁵, 巨心悦^{1,2}

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002; 3. 国网濉溪县供电公司, 安徽 淮北 235100; 4. 国网湖北直流公司, 湖北 宜昌 443005; 5. 国网浙江省电力有限公司武义供电公司, 浙江 金华 321200)

摘要: 电压互感器长期处于恶劣的运行环境中, 在各种过应力下绕组绝缘可能发生局部匝间短路故障, 影响设备的计量性能和运行安全。然而, 现有针对电压互感器局部匝间短路故障引发漏磁畸变与局部过热的研究相对不足, 尚难系统揭示短路位置和匝数对磁—热场分布形态的影响规律。此外, 现有故障辨识特征多侧重于单点幅值或局部状态, 难以刻画故障响应的空间差异, 导致不同故障状态的辨识能力受限。为解决上述问题, 文中提出了一种磁—热轴向分布形态特征驱动电压互感器匝间短路故障辨识方法: 基于Comsol有限元软件构建场—路耦合与磁—热耦合仿真模型, 提取漏磁和温度的轴向分布序列, 构建用于表征故障响应的磁—热轴向分布形态特征; 进而, 采用贝叶斯优化极端梯度提升(extreme gradient boosting, XGBoost)模型对单一物理量特征和磁—热融合特征进行分类验证, 评价特征体系有效性。仿真结果表明: 短路位置主要影响磁—热异常响应的轴向分布区域, 短路匝数主要影响漏磁幅值和热点温升; 磁—热融合特征输入下模型辨识效果最优, 准确率达96.15%。

关键词: 电压互感器; 匝间短路故障; 磁—热耦合; 轴向分布形态特征; 故障辨识

Simulation of Magnetic-thermal Distribution Patterns and Fault Identification under Inter-turn Short Circuits in Potential Transformer

WU Tian^{1,2}, LIU Xiulei^{1,2}, WANG Nanji³, FENG Xinglong⁴, WANG Shenhua⁵, JU Xinyue^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. Hubei Transmission Line Engineering Technology Research Center, Hubei Yichang 443002, China; 3. State Grid Suixi County Power Supply Company, Anhui Huaibei 235100, China; 4. State Grid Hubei Direct Current Company, Hubei Yichang 443005, China; 5. State Grid Zhejiang Wuyi County Power Supply Co., Ltd., Zhejiang Jinhua 321200, China)

Abstract: Potential transformers are frequently exposed to harsh operating conditions. Under various overstresses, local inter-turn short circuit faults may occur in the winding insulation, which affects the metering performance and operation safety of the equipment. However, the existing research on the leakage flux distortion and local overheating caused by the local inter-turn short circuit fault of the potential transformer is relatively insufficient, and it is difficult to reveal the influence of the short circuit position and the number of turns on the distribution of the magnetic-thermal field. In addition, the existing fault identification features mostly focus on single point amplitude or local state, which is difficult to describe the spatial difference of fault response, resulting in limited identification ability of different fault states. In order to solve the above problems, this paper proposes a method for identifying the inter-turn short circuit fault of potential transformer driven by magnetic-thermal axial distribution characteristics: Based on Comsol finite element software, the field-circuit coupling and magnetic-thermal coupling simulation models are constructed, and the axial distribution sequences of leakage flux and temperature are extracted to construct the magnetic-thermal axial distribution morphological characteristics used to characterize the fault response. Furthermore, the Bayesian optimized extreme gradient boosting (XGBoost) model is used to classify and verify the single physical quantity feature and the magnetic-thermal fusion feature to evaluate the effectiveness of the feature system. The simulation results show that the short circuit position mainly affects the axial distribution area of the magnetic-thermal anomaly response, and the number of short circuit turns mainly affects the magnetic flux leakage amplitude and the temperature rise of the hot spot. The model identification effect is the best under the magnetic-thermal fusion feature input, and the accuracy rate is 96.15 %.

Key words: potential transformer; inter-turn short circuit fault; magnetic-thermal coupling; axial distribution characteristics; fault identification

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51807110)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51807110).

0 引言

电压互感器是电力系统中实现电压测量与状态感知的重要设备,其运行状态直接关系到电网监测结果的准确性和二次设备动作的可靠性^[1]。在长期运行过程中,绕组绝缘性能会受到电压冲击、过负荷或谐振过流等因素影响而逐渐劣化。当局部匝间绝缘失效后,绕组内部会形成闭合短路回路,短路环流改变原有磁通分布路径,并引起局部损耗增加,使设备内部出现漏磁畸变和局部过热等异常响应^[2-6]。因此,开展电压互感器匝间短路故障下的磁—热响应规律研究,并构建有效故障辨识方法,对揭示故障机理和提升设备运行可靠性具有重要意义。

目前,针对电压互感器及变压器等绕组类设备匝间短路故障的研究主要围绕外部电气量诊断^[7]、智能诊断方法^[8]及多物理场仿真分析^[9]等方面展开。外部电气量诊断因其非侵入性和可在线实施的特点,成为绕组匝间短路故障检测的重要技术手段。文[10-11]分别基于励磁电流畸变特征和空载损耗增量实现了对匝间短路故障的有效辨识。文[12]通过考虑一次电压波动对误差状态的影响,建立了电压互感器在线误差评估模型,为互感器绕组劣化监测提供了电气量分析依据。文[13-14]通过分析三相电压、电流、零序电压及小波能量熵特征,揭示了电压互感器绕组故障的外部电气量演化规律。为进一步提高故障识别能力,智能诊断方法逐渐被应用于绕组故障研究。文[15]将改进YOLOv8红外图像切片辅助超推理算法应用于绕组匝间短路故障检测,实现了基于红外图像特征的绕组故障识别。文[16]进一步结合多模态特征融合与注意力机制,提出了干式电压互感器早期匝间短路诊断模型,提高了对微弱故障特征的识别能力。然而,此类方法通常依赖大量标注样本,模型可解释性和物理意义不足,工程泛化能力仍有待验证。因此,多物理场

仿真逐渐成为绕组故障研究的重要手段。文[17]通过场—路耦合与电磁—结构耦合仿真,分析了绕组故障下的电磁力与损耗特征。文[18-19]从电—磁—热协同耦合角度,研究了变压器电流、磁场及热点温度的变化规律。文[20]将漏磁场仿真与迁移学习相结合,实现了绕组早期故障辨识。文[21]基于多物理场耦合模型,揭示了绕组温升与力学特性之间的耦合关系。文[22-23]基于多物理场及电磁—流热双向耦合开展了温升计算与结构参数优化。文[24]进一步分析了短路工况下绕组磁场—结构力场耦合及累积形变特性。上述研究深化了对变压器领域绕组故障多物理场响应的认识,但针对电压互感器匝间短路故障下磁—热耦合建模、故障特征量化表征及多状态辨识等方面的研究仍相对匮乏,存在以下局限:

1)现有针对电压互感器的研究对匝间短路引起的内部漏磁畸变与局部过热关注不足,尚难揭示短路位置和短路匝数对磁—热场分布特性的影响。

2)现有匝间短路故障辨识特征多来源于外部电气量或局部测点,尚未反映故障响应在绕组轴向上的空间差异,一定程度上限制了不同短路位置和短路程度下故障状态的辨识能力。

为解决上述问题,文中提出一种磁—热轴向分布形态特征驱动电压互感器匝间短路故障辨识方法。通过建立多物理场仿真模型,分析不同短路状态下内部漏磁与温度响应规律,提取径向漏磁分量、轴向漏磁分量和温度的轴向分布序列,构建磁—热轴向分布形态特征。在此基础上,采用贝叶斯优化XGBoost模型对单一物理量特征与磁—热融合特征进行分类辨识,并结合树形夏普利加法解释(SHapley Additive exPlanations, SHAP)方法分析各特征对分类结果的贡献,验证所构建特征体系的有效性。

1 电压互感器多物理场分析

1.1 磁场分析

电压互感器与变压器的运行原理基本相同，主要由一、二次侧绕组以及铁芯组成，具有近似轴对称几何结构。为计算电磁场空间分布，文中采用圆柱坐标系 (r, θ, z) 对磁场进行分析。基于工频准静态近似和绕组的轴对称结构，忽略位移电流后，电磁场的矢量磁位控制方程可表示为二维标量椭圆偏微分方程^[25]

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\nu \frac{1}{r} \frac{\partial (r A_\theta)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial (A_\theta)}{\partial z} \right) = -J_\theta(r, z) \quad (1)$$

式(1)中： ν 为磁阻率； A_θ 为磁矢势的环向分量； J_θ 为电流密度的环向分量； r 和 z 分别为径向和轴向坐标。

由麦克斯韦方程 $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ 可得磁通密度分量计算公式

$$B_r = -\frac{\partial (A_\theta)}{\partial z}, B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial (r A_\theta)}{\partial r} \quad (2)$$

式(2)中： B_r 为磁通密度的径向分量； B_z 为磁通密度的轴向分量。

1.2 温度场分析

电压互感器内部会因绕组损耗与铁芯损耗产生热量，一部分热量引起器件自身温升，另一部分则经环氧树脂绝缘材料和空气向外传递。如图 1 所示，电压互感器运行过程中的热传递主要由热传导、热对流和热辐射组成。

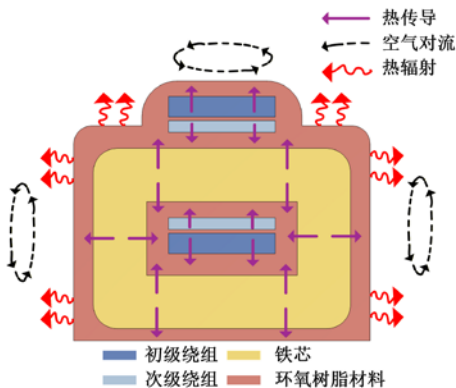


图 1 电压互感器传热过程

Fig. 1 Heat transfer process of potential transformer

考虑内部热源作用时，温度场控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

式(3)中： k 为热导率； q 为热源强度； ρ 为材料密度； c_p 为比热容； T 为温度； t 为时间。

除内部导热外，电压互感器外表面还通过对流和热辐射与周围环境进行换热，分别采用牛顿冷却定律和 Stefan-Boltzmann 定律描述^[26]。

1.3 匝间短路故障等效电路

当电压互感器由于绝缘老化或者过电压冲击等因素导致绕组发生匝间短路故障时，一次侧未短路绕组、一次侧短路绕组和二次侧绕组之间相互耦合，等效电路图见图 2。

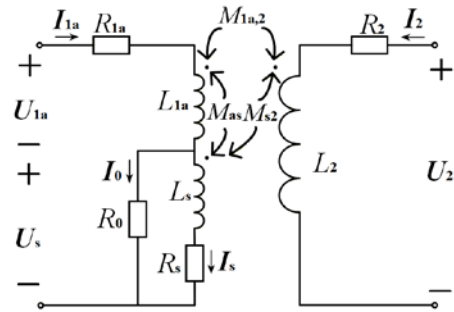


图 2 匝间短路时电压互感器等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of potential transformer under inter-turn short circuit

匝间短路故障会改变铁芯磁通分布和绕组电流大小，电压互感器的铁芯损耗近似与最大磁通密度的平方成正比^[27]，因此，匝间短路故障工况下的铁芯损耗可表示为

$$P_{c,f} = P_{c,n} \left(\frac{B_f}{B_n} \right)^2 \quad (4)$$

式(4)中： $P_{c,f}$ 、 $P_{c,n}$ 分别表示故障状态和正常状态下铁芯的单位体积损耗； B_f 、 B_n 分别表示故障状态和正常状态下铁芯中的最大磁通密度。

绕组损耗与绕组电流的平方成正比，故障状态下总的绕组损耗 $P_{cu,f}$ 为

$$P_{cu,f} = I_{1a}^2 R_{1a} + I_s^2 R_s + I_0^2 R_0 + I_2^2 R_2 \quad (5)$$

式(5)中: I_{1a} 、 I_0 、 I_s 、 I_2 分别为短路后一次侧电流、短路电阻电流、短路绕组电流、二次侧电流; R_{1a} 、 R_s 、 R_0 、 R_2 分别为一次侧未短路绕组等效电阻、短路绕组等效电阻、短路电阻、二次侧绕组等效电阻。

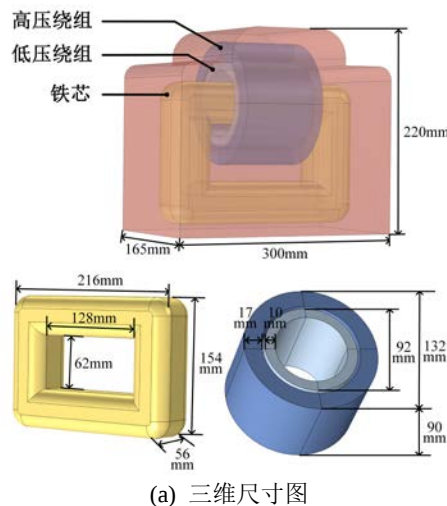
2 电压互感器匝间短路故障辨识方法

2.1 电压互感器仿真模型

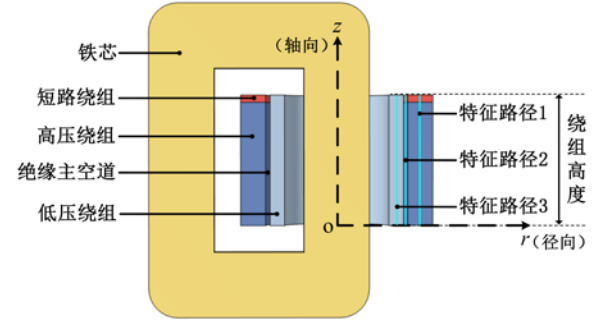
2.1.1 模型构建

文中以 JDZ10-10 型电压互感器为研究对象构建仿真模型, 见图 3(a)。为兼顾计算精度与效率, 文中对模型做出如下简化: 将绕组等效简化为同心圆柱体; 将铁芯等效简化为矩形闭合磁路, 忽略实际铁芯边角处的微小漏磁。

电压互感器绕组短路模型与轴向路径构建示意图见图 3(b), 文中在 Comsol 中对绕组进行布尔分割操作, 构建特定短路故障区域, 通过外电路耦合引入短路电阻, 得到相应的绕组故障模型。此外, 文中以高、低压同心绕组的中心轴作为参考轴, 其中, 与中心轴平行的 z 方向为轴向, 与中心轴垂直的 r 方向为径向, 从绕组底端至顶端的轴向距离为绕组高度。并设定 3 条与中心轴平行的特征路径, 分别用于提取高压绕组温度、径向与轴向漏磁分量以及低压绕组温度的轴向分布数据。



(a) 三维尺寸图



(b) 绕组短路模型与轴向路径构建

图 3 电压互感器仿真模型

Fig. 3 Potential transformer simulation model

2.1.2 边界条件与材料参数

为使仿真结果更能切实反映电压互感器的工作状态, 各物理场边界条件设定如下:

1)在电磁耦合模块中, 模型箱体外侧设置为磁绝缘边界, 以限制磁力线的计算区域并保证内部磁通的连续性。

2)在温度场模型中, 铁芯损耗与绕组损耗作为温度场仿真热源, 模型初始温度为 20 °C。

3)箱体外表面采用分面换热边界条件, 基于自然对流换热关联式^[28], 结合设备表面空间朝向、特征尺寸与实际环境条件, 箱体底面的传热系数设置为 4 W/(m²·K), 顶面传热系数为 10 W/(m²·K), 其他面的传热系数设置为 8 W/(m²·K)。

电压互感器各材料参数设置见表 1。

表 1 电压互感器各材料参数

Table 1 Material parameters of potential transformer

材料	比热容 /[J·(kg·K) ⁻¹]	密度 /(kg·m ⁻³)	导热系数 /[W·(m·K) ⁻¹]	电导率 /(S·m ⁻¹)
铜	385	8 900	400.00	6.0×10 ⁷
硅钢	460	7 870	45.00	1.5×10 ⁶
环氧树脂	1 200	1 900	0.22	1.0×10 ⁻¹⁵

2.2 仿真验证

为验证所构建电压互感器仿真模型的准确性, 开展与仿真条件一致的样机试验, 试验平台与接线示意图见图 4, 主要由调压台、升压变压器、保护电阻、分压器、电压互感器、滑动变阻器、采集卡以及温度传感器组成。

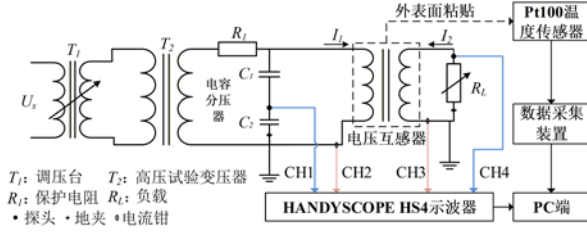
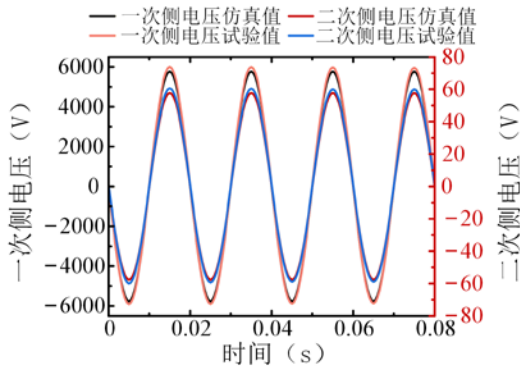


图4 试验平台与接线示意图

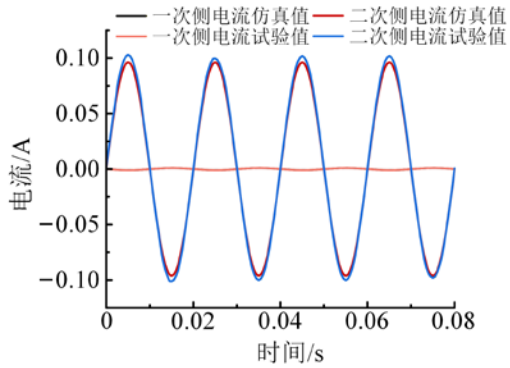
Fig. 4 Experimental platform and wiring schematic

受电压互感器样机结构与试验安全性限制，文中未开展匝间短路故障工况下的直接试验验证，主要对正常运行工况下电压互感器进行试验测试，验证模型稳态条件下的有效性。

如图5所示，正常运行工况下，一、二次侧电压和电流的试验波形与仿真波形在周期、相位及幅值变化趋势上基本一致，文中所构建的模型能够较好地反映电压互感器的电压传递与电流响应特征。试验结果与仿真结果之间存在的局部幅值差异，主要与铁芯实际磁化特性与测量误差有关。



(a) 一、二次侧电压试验值与仿真值对比



(b) 一、二次侧电流试验值与仿真值对比

图5 电压互感器试验与仿真结果对比

Fig. 5 Comparison of experiment and simulation results of potential transformer

在电压互感器各侧面布置温度测点进行温度试验，测点温度的仿真值与实测值见表2。各测点相对误差在3.4%~4.9%之间，平均相对误差为4.18%。仿真温度略低于实测温度，可能与实际环境换热条件波动及测点安装误差有关。总体而言，文中所构建的模型能够较准确地反映电压互感器正常稳态工况下的表面温度分布特性。

表2 电压互感器表面温度仿真值与实测值对比
Table 2 Comparison between simulated and measured surface temperature of potential transformers

测点	仿真值/°C	实测值/°C	相对误差/%
上表面	28.1	29.5	4.7
前表面	27.5	28.6	3.8
后表面	27.4	28.8	4.9
左表面	25.6	26.7	4.1
右表面	25.7	26.6	3.4

2.3 故障辨识方法

2.3.1 轴向分布形态特征构建

电压互感器发生匝间短路故障时，短路环流会改变绕组附近磁场分布，并引起局部损耗增加，导致漏磁场和温度场发生变化。不同短路位置和短路匝数下，故障响应的空间分布和强度水平存在差异，仅采用单点峰值或局部测点值难以完整表征故障状态。因此，文中首先提取正常工况和故障工况下特征路径上的漏磁分量和温度数据，获得相应的轴向分布曲线。在此基础上，构建轴向分布形态特征指标，对磁-热响应差异进行定量表征，并为后续故障辨识模型提供具备物理意义的特征输入。

设多物理场参量沿绕组高度 L 的采样位置为：

$z_1, z_2, \dots, z_n, z_i \in [0, L]$ 。对三类物理量通道

$k \in \{r, z, T\}$ ，分别定义正常工况下分布序列为：

$X_n^{(k)} = [X_n^{(k)}(z_1), X_n^{(k)}(z_2), \dots, X_n^{(k)}(z_n)]$ ，匝间短路故障

工况下分布序列为：

$X_f^{(k)} = [X_f^{(k)}(z_1), X_f^{(k)}(z_2), \dots, X_f^{(k)}(z_n)]$ 。

各通道的幅值序列为：

$$A_n^{(k)}(z_i) = \begin{cases} |X_n^{(k)}(z_i)|, & k \in \{r, z\} \\ X_n^{(k)}(z_i), & k = T \end{cases} \quad (6)$$

$$A_f^{(k)}(z_i) = \begin{cases} |X_f^{(k)}(z_i)|, & k \in \{r, z\} \\ X_f^{(k)}(z_i), & k = T \end{cases} \quad (7)$$

式(6)、(7)中： r 、 z 、 T 分别为径向漏磁分量分布、轴向漏磁分量分布、温度分布； $X_n^{(k)}(z_i)$ 与 $X_f^{(k)}(z_i)$ 分别为第 k 类物理量在轴向位置 z_i 处的正常值与故障值； n 为轴向采样点数； $A_n^{(k)}(z_i)$ 与 $A_f^{(k)}(z_i)$ 分别为第 k 类通道在正常工况和故障工况下 z_i 处的幅值表征量。为消除量纲差异，文中以正常工况为统一参考进行归一化处理

$$\begin{cases} \tilde{A}_n^{(k)}(z_i) = \frac{A_n^{(k)}(z_i) - A_{n,\min}^{(k)}}{A_{n,\max}^{(k)} - A_{n,\min}^{(k)} + \varepsilon} \\ \tilde{A}_f^{(k)}(z_i) = \frac{A_f^{(k)}(z_i) - A_{n,\min}^{(k)}}{A_{n,\max}^{(k)} - A_{n,\min}^{(k)} + \varepsilon} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中： $\tilde{A}_n^{(k)}(z_i)$ 与 $\tilde{A}_f^{(k)}(z_i)$ 分别为第 k 类通道在正常工况和故障工况下 z_i 处的归一化幅值； $A_{n,\max}^{(k)}$ 与 $A_{n,\min}^{(k)}$ 分别为正常工况下第 k 类通道轴向分布的最大值与最小值。

在此基础上，定义6类轴向分布表征因子：

1)形态偏离指数。为度量故障工况与正常工况下物理量在轴向分布形态上的偏离程度，引入形态偏离指数

$$Q_1^{(k)} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{A}_n^{(k)}(z_i) \tilde{A}_f^{(k)}(z_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\tilde{A}_n^{(k)}(z_i))^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\tilde{A}_f^{(k)}(z_i))^2}} \quad (9)$$

式(9)中， $Q_1^{(k)}$ 为第 k 类通道的形态偏离度表征量。

2)瓦瑟斯坦距离。引入离散瓦瑟斯坦距离衡量两条曲线的整体偏离程度。首先定义归一化离散概率分布为

$$\begin{cases} p_n^{(k)}(z_i) = \frac{\tilde{A}_n^{(k)}(z_i)}{\sum_{m=1}^n \tilde{A}_n^{(k)}(z_m) + \varepsilon} \\ p_f^{(k)}(z_i) = \frac{\tilde{A}_f^{(k)}(z_i)}{\sum_{m=1}^n \tilde{A}_f^{(k)}(z_m) + \varepsilon} \end{cases} \quad (10)$$

对应的累计分布函数为

$$\begin{cases} P_n^{(k)}(z_j) = \sum_{i=1}^j p_n^{(k)}(z_i) \\ P_f^{(k)}(z_j) = \sum_{i=1}^j p_f^{(k)}(z_i) \end{cases} \quad (11)$$

则离散瓦瑟斯坦距离为

$$Q_2^{(k)} = \sum_{j=1}^n |P_n^{(k)}(z_j) - P_f^{(k)}(z_j)| \Delta z \quad (12)$$

式(10)-(12)中： $p_n^{(k)}(z_i)$ 和 $p_f^{(k)}(z_i)$ 分别为第 k 类通道在正常工况和故障工况下位置 z_i 处的归一化概率质量； ε 为防止分母为零或接近于零而引入的微小正数； $P_n^{(k)}(z_j)$ 和 $P_f^{(k)}(z_j)$ 分别为累计到位置 z_j 的分布函数； Δz 为相邻采样点间距； $Q_2^{(k)}$ 为第 k 类通道的整体偏离程度表征量。

3)能量增量系数。引入能量增量系数刻画故障导致的整体异常能量增长程度。

$$Q_3^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_f^{(k)}(z_i))^2 - \sum_{i=1}^n (A_n^{(k)}(z_i))^2}{\sum_{i=1}^n (A_n^{(k)}(z_i))^2 + \varepsilon} \quad (13)$$

式(13)中， $Q_3^{(k)}$ 为第 k 类通道的能量增量系数。

4)峰值增强系数。峰值增强系数刻画因故障引起的局部热点或漏磁峰值放大程度。

$$Q_4^{(k)} = \frac{\max_i A_f^{(k)}(z_i)}{\max_i A_n^{(k)}(z_i) + \varepsilon} \quad (14)$$

式(14)中， $Q_4^{(k)}$ 为第 k 类通道的峰值增强系数。

5)轴向对称偏移指数。引入轴向对称偏移指标表征故障工况下特征分布的对称程度。

$$Q_5^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^{n/2} |\tilde{A}_f^{(k)}(z_i) - \tilde{A}_f^{(k)}(z_{n+1-i})|}{\sum_{i=1}^{n/2} [\tilde{A}_f^{(k)}(z_i) + \tilde{A}_f^{(k)}(z_{n+1-i})] + \varepsilon} \quad (15)$$

式(15)中, $Q_5^{(k)}$ 为第 k 类通道的轴向对称性偏移量。

6)能量质心偏移量。为刻画异常分布在轴向上的位置偏移特征,定义故障工况下的能量质心位置为

$$z_c^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i (A_f^{(k)}(z_i))^2}{\sum_{i=1}^n (A_f^{(k)}(z_i))^2 + \varepsilon} \quad (16)$$

则能量质心偏移量为

$$Q_6^{(k)} = \left| \frac{2z_c^{(k)} - L}{2L} \right| \quad (17)$$

式(16)、(17)中: $z_c^{(k)}$ 为第 k 类通道在故障工况下沿轴向的能量质心位置; $Q_6^{(k)}$ 为归一化能量质心偏移量。

2.3.2 样本构建与标签编码

文中共构建正常运行状态和 12 种匝间短路故障运行状态,样本特征由径向漏磁分量 $B_r - Q_1 \sim B_r - Q_6$ 、轴向漏磁分量 $B_z - Q_1 \sim B_z - Q_6$ 和温度 $T - Q_1 \sim T - Q_6$ 三类物理量的轴向分布形态特征组成。单一物理场输入时特征维度为 6。磁—热融合输入时,融合特征向量为 18 维。分类标签采用数字编码方式,具体编码见表 3。

表 3 不同运行状态及标签编码

Table 3 Label encoding of different operating states

标签	绕组侧别	故障位置	短路匝数
0	—	—	0
1	低压绕组	端部	2
2	低压绕组	端部	10
3	低压绕组	端部	25
4	低压绕组	中部	2
5	低压绕组	中部	10
6	低压绕组	中部	25
7	高压绕组	端部	20
8	高压绕组	端部	85
9	高压绕组	端部	175
10	高压绕组	中部	20
11	高压绕组	中部	85
12	高压绕组	中部	175

2.3.3 基于贝叶斯优化 XGBoost 的故障辨识模型

文中以径向漏磁分量特征、轴向漏磁分量特

征、温度特征及磁—热融合特征分别作为模型输入,以不同运行状态标签作为模型输出,构建电压互感器匝间短路故障辨识模型。

基于贝叶斯优化 XGBoost 的故障辨识流程见图 6。首先,对构建得到的磁—热轴向分布形态特征样本进行分层随机划分,其中训练集用于模型训练和超参数寻优,测试集用于最终故障状态预测与性能评价。随后,在训练集内部执行分层五折交叉验证。每次交叉验证中,选取 4 折样本用于模型训练,剩余 1 折作为验证折,用于计算该组候选超参数下的 F_1 分数。

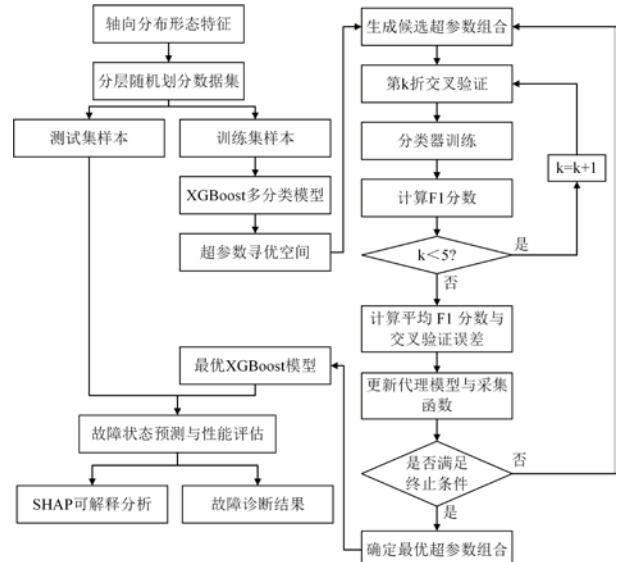


图 6 基于贝叶斯优化 XGBoost 的故障辨识流程图
Fig. 6 Fault identification flowchart based on Bayesian optimized XGBoost

在贝叶斯优化过程中,每轮迭代首先生成一组候选超参数组合,并在训练集上执行分层五折交叉验证。完成五折训练与验证后,汇总各折验证结果,计算平均 F_1 分数及交叉验证误差,并将其作为该组候选超参数的性能评价依据。随后,贝叶斯优化器根据当前评价结果更新代理模型与采集函数,并判断是否满足终止条件。当达到最大迭代次数或目标函数趋于收敛时,输出最优超参数组合。否则继续生成新的候选超参数组合并进入下一轮迭代。获得最优参数后,基于完整训练集重新训练 XGBoost 模型,并利用测试集进行故障状态预测和性能评

价。最后，结合 SHAP 方法对最优模型进行可解释性分析，获得各磁—热轴向分布形态特征对故障辨识结果的贡献程度。

为评价模型辨识性能，文中选取准确率 I_{acc} 、精确率 I_{pre} 、召回率 I_{rec} 、 F_1 分数 I_{f1} 和特异性 I_{spe} 作为评价指标。

3 电压互感器磁—热响应与辨识结果

3.1 磁场仿真结果

3.1.1 正常工况下仿真结果

为表征电压互感器内部漏磁场的空间分布规律，对绕组区域的漏磁磁感应强度进行仿真分析。如图 7 所示，为直观分析绕组内部漏磁分布情况，文中基于 Comsol 有限元仿真软件的局部隐藏功能，对 1/4 绕组实体进行了隐藏。正常运行工况下，漏磁主要集中在高、低压绕组间的绝缘主空道区域，最大漏磁磁感应强度约 0.138 mT。在径向方向上，漏磁由主空道向两侧绕组递减。

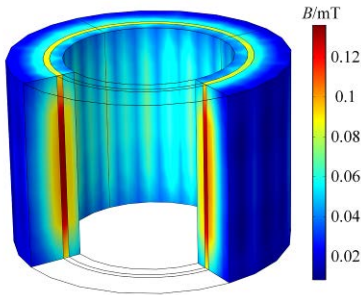


图 7 正常工况下绕组内部漏磁磁感应强度分布特征
Fig. 7 Distribution characteristics of leakage flux density within the windings under normal working conditions

因此，文中以主空道区域的漏磁分布展开，并沿特征路径 2 提取漏磁随时间及绕组高度变化的三维云图，见图 8。从时间维度上可以看出，该特征路径上漏磁呈现出稳定的周期性变化，周期与外加工频电源一致。从空间维度上，漏磁沿绕组高度呈现出中部较大，端部较小的分布规律。这主要是由于中部位置磁路结构相对均匀，漏磁分布集中，而端部漏磁易发散且磁路不连续，故磁感应强度逐渐衰减。

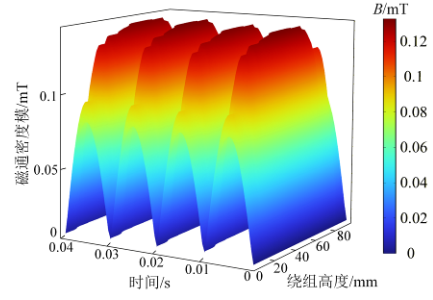
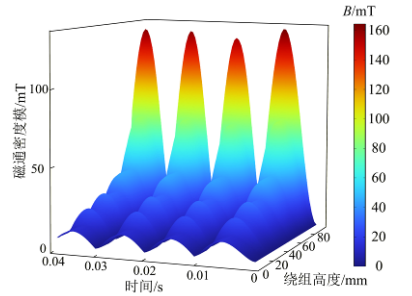


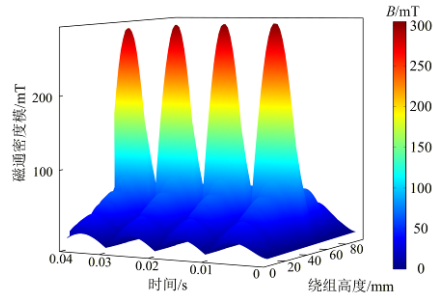
图 8 正常工况下漏磁时空分布云图
Fig. 8 Spatiotemporal distribution of leakage flux under normal working conditions

3.1.2 匝间短路工况下仿真结果

如图 9 所示，为分析绕组发生匝间短路故障时漏磁的时空演化特性，选取高压绕组发生 20 匝匝间短路作为典型工况分析，分别研究高压绕组不同故障位置下主空道漏磁随时间及绕组高度变化的分布规律。



(a) 端部短路故障



(b) 中部短路故障

图 9 高压绕组 20 匝短路故障下漏磁时空分布云图
Fig. 9 Spatiotemporal distribution of leakage flux under 20-turn short circuit fault of high voltage winding

高压绕组端部发生短路时，漏磁主要集中于绕组端部故障位置，沿绕组高度向内部逐渐衰减，最大漏磁磁感应强度约为 160 mT。这主要是由于端部磁路结构不完整且边缘磁通外溢明显，短路电流产生的反向磁动势引起磁通剧烈畸变，从而导致漏

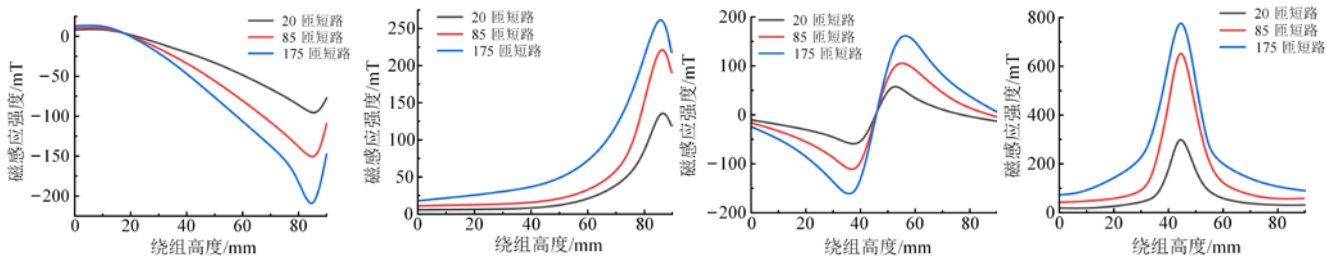
磁高度集中。中部发生短路时，漏磁主要集中在中部故障位置，并沿绕组两侧递减，最大漏磁磁感应强度约为 300 mT。原因主要在于中部磁路结构相对封闭且结构对称，短路电流产生附加磁势后，导致该区域漏磁增加，同时向上下两侧产生挤压与重分配效应，进而形成以短路位置为中心的对称漏磁分布。

为进一步定量分析不同短路位置及短路匝数对漏磁分布特性的影响，提取主空道特征路径 2 上径向、轴向漏磁分量随绕组高度的变化曲线。其中径向漏磁分量指向外侧为正、指向内侧为负；轴向漏磁分量向上为正、向下为负。

如图 10(a)、(b)所示，高压绕组端部短路时，径向、轴向漏磁分量均在短路位置出现最大值，并沿绕组高度向无故障端逐渐衰减。发生 20、85、175 匝短路时，径向漏磁分量的峰值分别约为 91、150、

210 mT。轴向漏磁分量的峰值分别约为 132、220、275 mT。随着短路匝数增加，径向与轴向漏磁分量幅值均显著抬升，说明短路环流增强后，端部区域磁场畸变持续加剧。

如图 10(c)、(d)所示，高压绕组中部短路时，径向漏磁分量在故障位置下方形成负峰、上方形成正峰，轴向漏磁分量在中部故障位置形成单峰，并由短路位置向绕组两侧递减。发生 20、85、175 匝短路时，径向漏磁分量的峰值分别约为 60、105、165 mT，轴向漏磁分量的峰值分别约为 290、650、780 mT。中部短路对应的轴向漏磁分量显著高于端部短路，说明了中部区域短路时在连续磁路下的附加磁场叠加效应更强。综合来看，短路位置决定了漏磁曲线的空间分布形态；短路匝数决定了漏磁曲线的幅值水平，且在相同短路匝数下，中部短路时轴向漏磁分量变化更加显著。



(a) 端部短路时径向漏磁分量 (b) 端部短路时轴向漏磁分量 (c) 中部短路时径向漏磁分量 (d) 中部短路时轴向漏磁分量
图 10 高压绕组不同短路位置及匝数下漏磁随绕组高度的变化曲线

Fig. 10 Curves of leakage flux with winding height under different short circuit positions and turns of high voltage winding

综合磁场仿真结果可知，正常工况下漏磁主要集中在高、低压绕组之间的绝缘主空道。发生匝间短路后，短路环流产生的附加磁动势会引起故障区域磁场畸变和局部漏磁集中，且绕组中部短路对磁场的扰动更为显著。因此，在产品设计时应合理设置绝缘主空道尺寸，保持其沿绕组轴向分布均匀，避免局部尺寸突变。同时，适当增加绕组中部的匝间绝缘厚度或选用耐电强度更高的绝缘材料，以提高产品的绝缘安全裕度。

3.2 温度场仿真结果

3.2.1 正常运行工况下仿真结果

将场一路耦计算得到的铁芯损耗与绕组损耗作为体热源导入温度场模型，对正常运行工况下的电压互感器进行温度场求解。结果见图 11，绕组温度主要分布在 37.2~38.6 °C 之间，高温区域主要集中于内层低压绕组靠近铁芯一侧，沿径向向外逐渐降低，表明了绕组损耗产生的热量首先在内部积聚，经绝缘介质沿径向向外逐渐递减。铁芯温度主要分布在 43.8~45.2 °C 之间，高温区域主要位于铁芯上轭及转角位置。正常运行工况下，铁芯损耗整

体大于绕组损耗，铁芯作为主要热源，整体温度水平高于绕组；同时，绕组内层靠近铁芯，受结构布置限制导致散热条件较差，因此内层绕组温度较高。

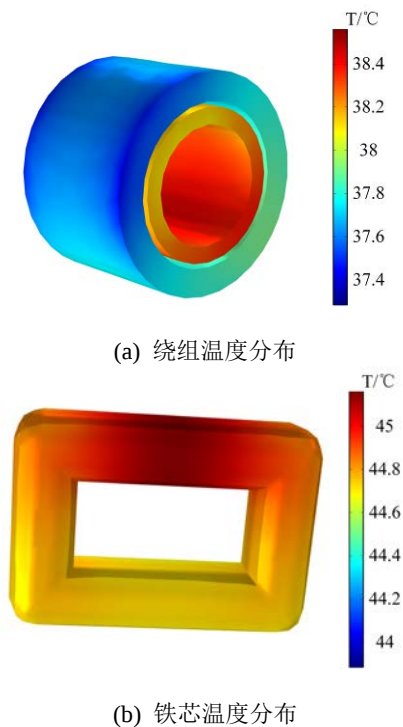


图 11 正常工况下温度分布示意图
Fig. 11 Diagram of the temperature distribution under normal working conditions

3.2.2 匝间短路工况下仿真结果

以高压绕组匝间短路工况为例，高压绕组发生匝间短路故障时，故障匝内环流会显著增大，导致局部绕组损耗急剧上升，绕组的整体温度分布情况由稳定平滑转变为明显的局部热点分布。高压绕组端部发生 20 匝匝间短路时，结果见图 12，绕组整体温度主要分布在 96.3~98.2 °C 之间，高温热点区主要集中在端部短路故障位置，并沿绕组轴向向下递减。当高压绕组中部发生 20 匝匝间短路时，绕组整体温度分布在 98.4~101.8 °C 之间，高温热点区集中于中部故障位置，热聚集特征更显著，并沿绕组轴向向两端递减。与正常运行工况下绕组温度相比，端部故障与中部故障时的最高温度分别升高了约 59.6、63.2 °C，表明了高压绕组发生匝间短路故障时会导致绕组的异常升温。

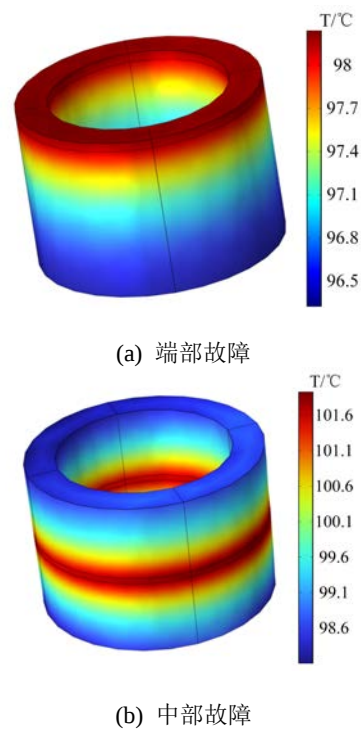
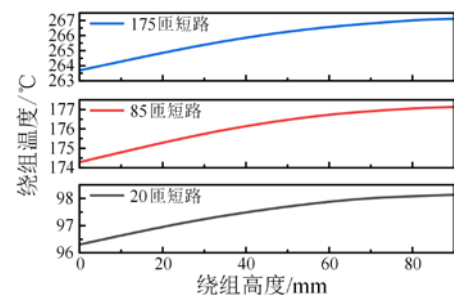
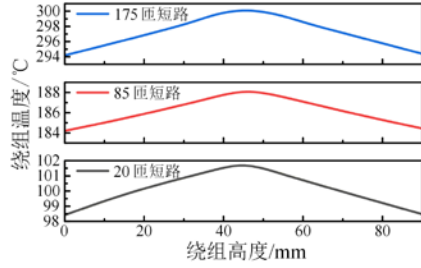


图 12 高压绕组 20 匝短路故障下绕组温度分布特征
Fig. 12 Winding temperature distribution of high voltage winding under 20-turn short circuit fault

为揭示不同短路匝数变化对高压绕组热特性的影响规律，并表征热量沿绕组高度的传导与聚集性，文中对高压绕组特征路径 1 上的温度分布进行了对比分析，结果见图 13。高压绕组端部发生 20、85、175 匝短路时温度分别约分布于 96.3~98.2、174.3~177.3、263.6~267.2 °C 之间，均沿绕组高度方向递增，最高热点温度出现在端部短路故障区。与正常工况下绕组最高温度相比，峰值温度分别升高约 59.6、138.7、228.6 °C，表明了短路匝数的增加将显著增强故障环流及局部铜耗，使端部热点温升快速放大。



(a) 端部短路时高压绕组温度分布



(b) 中部短路时高压绕组温度分布

图 13 不同短路匝数下高压绕组轴向温度分布
Fig. 13 Axial temperature distribution of high voltage winding under different short circuit turns

中部短路工况下，绕组温度分布呈现中间高、两端低的单峰特征，热量主要围绕故障区域向上下两侧递减。在中部发生 20、85、175 匝短路时，温度分别约分布于 98.4~101.8、184.1~188.0、294.1~299.8 °C 之间，较正常工况分别升高约 63.2、149.4、261.2 °C。通过对比同一短路匝数下两类故障可知，中部短路的峰值温度始终高于端部短路，随着短路匝数的增加，峰值温度分别高出约 3.6、10.7、32.6 °C，且温差随短路匝数的增加进一步扩大。

综合温度场仿真结果可知，正常工况下热量主要积聚在铁芯及其邻近的低压绕组区域。发生匝间短路后，故障匝铜耗迅速增加，在短路位置形成环状热点，中部短路的热积聚更加显著。因此，在产品热设计时应将铁芯及其邻近绕组区域作为重点散热优化部位，提高灌封绝缘材料的导热性能，并适当增加绕组中部的耐热设计裕度，以降低局部过热引起绝缘进一步劣化的风险。

3.3 匝间短路故障辨识结果

3.3.1 不同物理场特征输入下的辨识结果

为评价不同物理场轴向分布形态特征对电压互感器匝间短路故障状态的表征能力，文中分别以径向漏磁分量特征、轴向漏磁分量特征、温度特征以及磁—热融合特征作为输入，采用贝叶斯优化 XGBoost 模型开展多故障状态分类辨识。通过比较不同输入特征下的分类性能，分析单一物理场特征与磁—热融合特征对故障位置和故障程度的区分

能力。不同输入特征下模型的故障辨识性能见表 4。仅采用径向漏磁分量、轴向漏磁分量及温度信号输入时，故障辨识准确率分别为 85.58%、90.38%、88.46%，说明了在单一特征条件下，轴向漏磁分量对故障状态的表征能力最强。采用磁—热融合特征输入时，模型的故障辨识效果最佳。 I_{acc} 、 I_{pre} 、 I_{rec} 、 I_{f1} 、 I_{spe} 分别为 96.15%、96.44%、95.56%、95.53%、99.68%，各项评价指标均高于 3 种单一特征输入情形。该结果表明，漏磁与温度特征在故障表征上具有互补性，漏磁特征主要反映短路环流引起的电磁扰动和磁路重分布，捕捉故障位置及局部磁场畸变。温度特征则反映铜耗增加及热点积聚效应，刻画故障严重程度和局部热响应水平。二者融合后可有效增强模型对复杂故障状态的综合辨识能力。

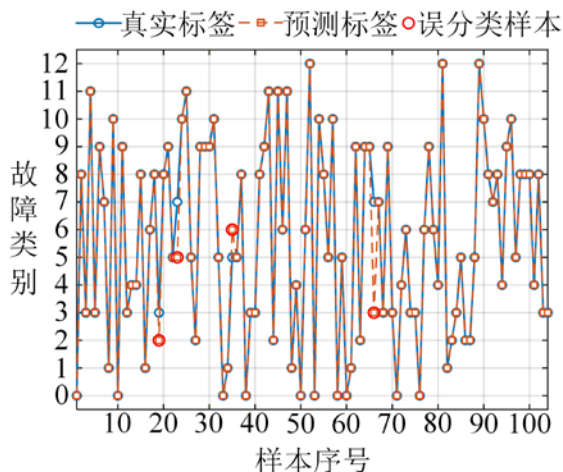
表 4 不同输入特征下故障辨识性能评价结果

指标	径向漏磁 分量特征	轴向漏磁 分量特征	温度特征	磁—热融 合特征
I_{acc}	85.58	90.38	88.46	96.15
I_{pre}	86.16	90.19	88.47	96.44
I_{rec}	84.67	88.08	86.03	95.56
I_{f1}	85.14	88.68	86.75	95.53
I_{spe}	98.78	99.19	99.03	99.68

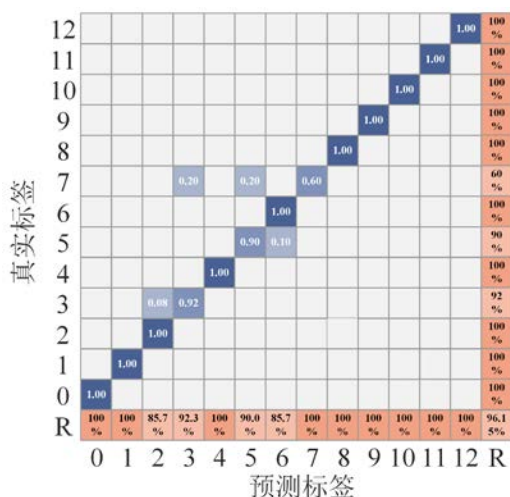
3.3.2 磁—热融合特征辨识结果

基于前述不同输入特征的辨识结果可知，磁—热融合特征在各项评价指标上均表现最优。为分析磁—热融合特征下模型对各故障类别的辨识效果，文中采用贝叶斯优化后的 XGBoost 模型对测试集样本进行故障状态预测。XGBoost 模型的最优参数组合为决策树数量为 220、单棵树最大深度为 5、学习率为 0.085、样本采样比例为 0.85、叶节点最小样本权重和为 2、节点分裂最小损失下降量为 0.15、 L_2 正则化系数为 2.10。在该参数组合下对测试

集样本进行故障状态预测，辨识结果见图 14。



(a) 真实标签与预测标签对比



(b) 混淆矩阵

图 14 磁—热融合特征下故障辨识结果

Fig. 14 Fault identification results under magnetic-thermal fusion features

由图 14 可知，在 4 类误判样本中，有 3 类为在相同故障位置下故障严重程度不同的类别。这类样本在轴向分布形态上具有较高的相似性，差异主要体现在幅值、能量增量及热点温升水平上，因此当个别样本受归一化处理或局部边界场扰动影响时，其表征参数可能向相邻严重程度类别偏移，进而造成轻微等级混淆。总体而言，模型对大多数类别具有较高的判别可靠性，能够较为准确地辨识不同匝间短路故障状态。

3.3.3 基于 SHAP 可解释的磁—热轴向分布形态特征贡献分析

为进一步分析磁—热融合轴向分布形态特征

对故障辨识结果的贡献，文中采用 SHAP 方法对贝叶斯优化 XGBoost 模型进行解释分析。磁—热融合特征的 SHAP 分布结果见图 15，其中横坐标为不同输入特征，纵坐标为 SHAP 值，颜色表示特征取值大小。

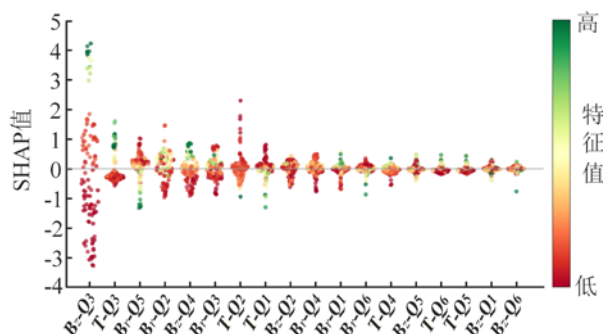


图 15 基于 SHAP 的磁—热轴向分布形态特征贡献分析

Fig. 15 Contribution analysis of magnetic-thermal axial distribution morphological features based on SHAP

由图 15 可知，不同磁—热轴向分布形态特征对分类结果的贡献存在明显差异。其中， B_z-Q_3 的 SHAP 值分布范围最大，说明轴向漏磁分量的能量增量系数对故障辨识贡献最高。该特征能够反映匝间短路后轴向漏磁分量整体增强程度，与短路匝数增加和磁路畸变加剧密切相关，因此对故障状态区分具有较强作用。

4 结论

文中以电压互感器为研究对象，建立了场—路耦合与磁—热耦合三维仿真模型，并系统研究了不同故障工况下绝缘主空道漏磁及绕组热点温度的特性分布规律。在此基础上，构建了磁—热轴向分布形态特征，并采用贝叶斯优化 XGBoost 模型对正常状态及不同短路故障状态进行了分类辨识。主要结论如下：

1) 正常工况下，漏磁主要集中于高、低压绕组之间的绝缘主空道，热量主要积聚于铁芯与低压绕组邻近区域。因此在水产品设计时应尽量保持绝缘主空道尺寸均匀，并优化铁芯与低压绕组邻近区域的灌封导热性能。

2)发生匝间短路后,故障位置出现漏磁集中和环状热点现象,且漏磁幅值与热点温度均随短路匝数增加而升高。短路位置主要决定漏磁与温度的空间分布形态,短路匝数主要决定漏磁与温度的幅值水平。相同短路匝数下,中部短路的磁—热响应最强,高压绕组中部发生175匝短路时,轴向漏磁分量峰值和最高温度分别可达到780 mT和299.8℃。因此在产品绝缘设计上,应适当加强绕组中部的匝间绝缘和耐热设计。

3)文中所构建的磁—热融合特征能够有效表征不同匝间短路故障状态,贝叶斯优化XGBoost模型的辨识准确率达到96.15%,其中轴向漏磁分量的能量增量系数对故障辨识贡献最高。

参考文献:

- [1] 何 成,周云天,张传计,等. 高压电力互感器及其误差在线评估技术综述[J]. 高电压技术, 2026, 52(1): 102-116.
He Cheng, Zhou Yuntian, Zhang Chuanji, et al. A review of instrument transformer and measurement error evaluation technologies[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(1): 102-116.
- [2] 李俊宏,谢小荣,张琦雪,等. 大型发电机电压互感器匝间短路的简化等效电路及在线监测判据[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(13): 5601-5611.
Li Junhong, Xie Xiaorong, Zhang Qixue, et al. Simplified equivalent circuit and online monitoring criterion of large generator potential transformer turn-to-turn short-circuit faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(13): 5601-5611.
- [3] Guillen D, Olivares-Galvan J C, Escarela-Perez R, et al. Diagnosis of interturn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization[J]. Measurement, 2019(141): 24-36.
- [4] 郝 艳,咸日常,冷学冰,等. 基于电压、电流不平衡度差值的干式变压器匝间短路故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 12-21.
Hao Yan, Xian Richang, Leng Xuebing, et al. Identification method for an inter-turn short circuit fault of a dry-type transformer based on voltage and current imbalance difference[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 12-21.
- [5] Zhang Lijing, Sheng Gehao, Zhou Nan, et al. Incipient interturn fault detection for ONAN power transformers using electrothermal characteristic fusion analysis[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2024, 18(9): 1871-1884.
- [6] 赵霁恺,舒 进,都劲松,等. 基于场路直接耦合合法的电压互感器匝间短路外特性分析[J]. 热力发电, 2023, 52(1): 132-139.
Zhao Jikai, Shu Jin, Du Jinsong, et al. External characteristics analysis of voltage transformer inter-turn short circuit based on field-circuit direct coupling method[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(1): 132-139.
- [7] Ashok K, Li Dan, Gebraeel N, et al. Online detection of inter-turn winding faults in single-phase distribution transformers using smart meter data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5073-5083.
- [8] Attallah O, Ibrahim R A, Zakzouk N E. A lightweight deep learning framework for transformer fault diagnosis in smart grids using multiple scale CNN features[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 14505.
- [9] 邓祥力,王 振,曾 平,等. 利用漏磁场幅值特征的变压器绕组早期故障定位方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2025, 37(7): 102-112.
Deng Xiangli, Wang Zhen, Zeng Ping, et al. Early fault localization method for transformer windings using leakage magnetic field amplitude characteristics[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2025, 37(7): 102-112.
- [10] Li Peng, Guo Pengcheng. Diagnosis of interturn faults of voltage transformer using excitation current and phase difference[J]. Engineering Failure Analysis, 2022(134): 105979.
- [11] Ehsanifar A, Allahbakhshi M, Tajdinian M, et al. Transformer inter-turn winding fault detection based on no-load active power loss and reactive power[J].

- International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021(130): 107034.
- [12]赵 鹏, 马克琪, 李红斌, 等. 计及一次电压波动的电压互感器误差状态在线评估方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 1042-1051.
Zhao Peng, Ma Keqi, Li Hongbin, et al. On-line error evaluation method of instrument voltage transformers considering primary voltage fluctuations[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1042-1051.
- [13]Wei Yang, Wu Ligui, Li Guangyao, et al. Study on the characteristics of turn-to-turn short circuit faults in the primary windings of the generator terminal voltage transformer[J]. Electronics, 2024, 13(23): 4772-4772.
- [14]古 亮, 蔡 瑜, 陈新岗, 等. 基于小波能量熵的电磁式电压互感器绕组故障检测[J]. 中国测试, 2024, 50(7): 99-106.
Gu Liang, Cai Yu, Chen Xingang, et al. Interlayer insulation fault detection of electromagnetic voltage transformer winding based on wavelet energy entropy[J]. China Measurement & Testing Technology, 2024, 50(7): 99-106.
- [15]Zhang Zhaochuang, Xia Jianhua, Wen Yuchuan, et al. Detection method for inter-turn short circuit faults in dry-type transformers based on an improved YOLOv8 infrared image slicing-aided hyper-inference algorithm[J]. Energies, 2024, 17(18): 4559-4559.
- [16]梁书嘉, 吴 田, 王南极, 等. 基于多模态特征融合与注意力机制的干式电压互感器绕组早期匝间短路故障诊断 [J/OL]. 南方电网技术, 1-13[2026-08-25].<https://link.cnki.net/urlid/44.1643.tk.20251022.1539.004>.
Liang Shujia, Wu Tian, Wang Nanji, et al. Early turn-to-turn short-circuit fault diagnosis of dry-type voltage transformer winding based on multimodal feature fusion and attention mechanism[J/OL]. Southern Power System Technology, 1-13[2026-08-25].<https://link.cnki.net/urlid/44.1643.tk.20251022.1539.004>.
- [17]张冰倩, 咸日常, 于 洋, 等. 匝间短路故障下电力变压器绕组的物理特征分析[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 2177-2185.
Zhang Bingqian, Xian Richang, Yu Yang, et al. Analysis of physical characteristics of power transformer windings under inter-turn short circuit fault[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2177-2185.
- [18]杨存祥, 曹炳锦, 安 然, 等. 变压器匝间短路故障电—磁—热多物理场协同分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(5): 1984-1990.
Yang Cunxiang, Cao Bingjin, An Ran, et al. Multi-physical fieldcooperative analysis of electric-magnetic-thermal for the transformerinter-turn short circuit fault[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(5): 1984-1990.
- [19]Hao Y, Zhang Z, Xiao J, et al. Study on thermal characteristics of winding under inter-turn fault of oil-immersed transformer[J]. Electronics, 2024, 13(14): 2869-2869.
- [20]Deng Xiangli, Zhang Zhan, Zhu Hongye, et al. Early fault diagnosis of transformer winding based on leakage magnetic field and DSAN learning method[J]. Frontiers in Energy Research, 2023(10): 1-17.
- [21]Jia Xiaoyu, Lin Mei, Su Shiwei, et al. Numerical study on temperature rise and mechanical properties of winding in oil-immersed transformer[J]. Energy, 2022(239): 121788.
- [22]袁发庭, 施文苑, 王 玥, 等. 基于多物理场仿真的油浸式变压器温度特性分析及散热器优化[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 221-231.
Yuan Fating, Shi Wenwan, Wang Yue, et al. Temperature characteristic analysis and radiator optimization of oil-immersed transformer based on multi-physical field simulation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 221-231.
- [23]袁发庭, 杨文韬, 韩毅凛, 等. 基于电磁-流热双向耦合的变压器绕组温升计算及结构参数优化[J]. 高电压技术, 2024, 50(3): 952-961.
Yuan Fating, Yang Wentao, Han Yilin, et al. Temperature rise calculation and structure optimization research of transformer winding based on electromagnetic-fluid-thermal coupling[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 952-961.
- [24]袁发庭, 杨 毅, 钟 浩, 等. 短路工况下配电变压器

绕组磁场—结构力场耦合特性及累积效应变形特性[J]. 高电压技术, 2025, 51(10): 5238-5252.

Yuan Fating, Yang Yi, Zhong Hao, et al. Magnetic-structural force coupling characteristics and cumulative deformation characteristics of distribution transformer windings under short-circuit conditions[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(10): 5238-5252, .

[25]陈彬, 沈辰轩, 刘洋, 等. 高频变压器电磁场—结构力场—声场求解及特性分析[J]. 高电压技术, 2024, 50(10): 4459-4474.

Chen Bin, Shen Chenxuan, Liu Yang, et al. Solution and characteristic analysis of high-frequency transformer based on electromagnetic field-structural force field-acoustic field[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4459-4474.

[26]陈思, 盛戈皞, 张立静, 等. 基于绕组等效热参数的干式变压器温度场分布快速仿真方法[J]. 高电压技术, 2025, 51(1): 97-109.

Chen Si, Sheng Gehao, Zhang Lijing, et al. Fast simulation method of temperature field distribution for dry-type transformer based on equivalent thermal parameters of windings[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 97-109.

[27]刘弘景, 张丹丹, 李伟, 等. 大型油浸式变压器绕组温度场的有限元分析[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 83-89.

Liu Hongjing, Zhang Dandan, Li Wei, et al. Finite element analysis for temperature field of winding in large oil-immersed transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 83-89.

[28]段辞涵, 阮江军, 邓永清, 等. 变压器温度场计算边界辐射—对流复合换热等效方法研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(10): 120-129.

Duan Cihan, Ruan Jiangjun, Deng Yongqing, et al. Study on equivalent method of boundary radiation-convection heat transfer for transformer temperature field calculation[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(10): 120-129.

吴田(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为带电作业、高电压与绝缘技术等 (E-mail :

wutian_08@163.com)。

刘秀磊(2002—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为带电作业、高电压与绝缘技术(E-mail: 2239825022@qq.com)。

王南极(1997—), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究方向为高电压与绝缘、高压电气设备故障诊断等(E-mail: 2813258408@qq.com)。