第 52 卷 第 7 期：3338-3352 高电压技术 Vol.52, No.7: 3338-3352
2026 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251639

基于电磁-结构力场的换流变压器绕组结构参数优化及故障诊断

袁发庭[1,2]，鲍国苗[2]，费瑞昊[2]，肖明月[2]，桂童童[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）

摘　要：换流变压器是高压直流输电系统电能变换与传输的关键装备，其运行可靠性对电网整体稳定性至关重要。为此围绕换流变压器绕组结构优化与故障诊断开展系统研究，提出了多场耦合建模-结构参数优化-绕组故障诊断的完整方法体系。首先，构建了电磁-结构力场耦合的换流变压器仿真模型，分析谐波激励下振动特性变化规律；其次，以振动最小值作为优化目标，选取绕组高度、厚度和间距等 6 个关键结构参数，采用梯度提升回归树模型结合贝叶斯优化算法进行优化，使最大振动位移较初始设计降低 11.93%。进而，针对优化后绕组仍可能发生的故障提出了基于振动信号的诊断方法，该方法通过相关性分析获得了最佳的油箱壁面测点位置，构建了绕组典型故障仿真模型，并建立了基于 TST-XGBoost 的故障诊断模型，最终实现了 98.33%的故障识别准确率。研究成果不仅为换流变压器的减振设计提供了有效的方法，也为绕组状态评估与智能诊断提供了理论基础与技术支撑。
关键词：换流变压器；多场耦合；谐波激励；贝叶斯优化；故障诊断

Winding Structure Parameter Optimization and Fault Diagnosis of Converter Transformer Based on Electromagnetic-structural Force Field

YUAN Fating[1,2], BAO Guomiao[2], FEI Ruihao[2], XIAO Mingyue[2], GUI Tongtong[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)

Abstract：Converter transformer is the key equipment for power conversion and transmission in HVDC transmission system, and its operation reliability is very important to the overall stability of power grid. In this paper, the structural optimization and fault diagnosis of converter transformer windings are systematically studied, and a complete method system of multi-field coupling modeling+structural parameter optimization+winding fault diagnosis is proposed. Firstly, the simulation model of converter transformer with electromagnetic-structural force field coupling is constructed, and the variation law of vibration characteristics under harmonic excitation is analyzed. Secondly, the minimum vibration is taken as the optimization objective, and six key structural parameters, such as winding height, thickness, and spacing, are selected. The gradient boosting regression tree model combined with Bayesian optimization algorithm is used for optimization, so that the maximum vibration displacement is reduced by 11.93% compared with the initial design. Furthermore, a diagnosis method based on vibration signal is proposed for the faults that may still occur in the optimized winding. By using the method, the best position of the tank wall measuring point can be obtained through correlation analysis, the typical fault simulation model of the winding can be constructed, the fault diagnosis model can be established based on TST-XGBoost, and the fault recognition accuracy of 98.33% can be realized. The research results not only provide an effective method for the vibration reduction design of converter transformer, but also provide theoretical basis and technical support for winding state evaluation and intelligent diagnosis.
Key words：converter transformer; multi-field coupling; harmonic excitation; Bayesian optimization; fault diagnos

基金资助项目：国家自然科学基金(52307179)；湖北省教育厅科研计划项目(D20231205)；湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T2024003)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China(52307179), Science and Technology Research Project of Education Department of Hubei Province(D20231205), Outstanding Young and Middle-aged Sci-tech Innovation Team Project of Universities in Hubei Province (T2024003).

0 引言

换流变压器作为特高压直流输电换流站的能量转换核心与系统运行关键节点，承担着交直流电能拓扑转换与电压等级匹配的核心职责，其运行状态直接决定特高压直流输电通道的电能传输效率、功率调控精度及系统安全稳定裕度。但在实际运行过程中，谐波激励引发的换流变压器振动与噪声问题愈发突出：铁芯的振动不仅会产生噪声，还会造成结构件松动，从而影响设备的安全稳定运行[1-2]。因此，在推进换流变压器振动优化的基础上，进一步开展其故障诊断研究，具有重要的工程价值。

当前研究在绕组参数优化与故障诊断方面已取得显著进展。在减振方面，文献[3-5]聚焦于通过减小漏磁面积和增大绕组预紧力来削弱电磁力引起的振动，从而提升系统刚度、减少共振风险，最终实现抑制绕组振动、降低变压器位移。文献[6-8]以抑制铁芯磁致伸缩效应与电磁力振动为核心，采用低磁致伸缩率硅钢片、降低磁通密度及优化铁芯尺寸比例与夹紧力的优化措施，有效降低了变压器的振动。文献[9-10]以阻断铁芯向油箱的振动传递、降低振动与噪声为目标，采用橡胶类阻尼材料与聚丙烯复合作为隔振材料，在铁芯与油箱间安装减振垫、复合式隔振器等装置，显著降低了整体的振动位移与加速度。在故障诊断方面，文献[11-12]以振动信号为核心诊断依据，通过信号分解或特征提取挖掘故障相关参数，结合智能算法优化模型参数与特征提取过程，利用分类模型实现了变压器不同工况及绕组松动等故障的分类识别。文献[13-14]通过先进时频分析技术提取声纹特征，深度融合深度学习模型实现状态识别，最终实现铁芯松动、短路冲击等故障的高精度诊断。文献[15-17]以局放信号为诊断依据，运用检测技术捕获相关特征，结合定位技术或模式识别，实现了局放源定位与故障类型识别。然而，现有研究仍存在一定局限：在减振方面，集中于单一部件或固定工况，未能系统性地解决谐波激励下的绕组结构优化问题；在故障诊断方面，局限于单一部件分析、过度依赖特定工况数据、仅进行浅层技术叠加，减振措施及后续运维环节未能形成有效衔接。

本文开展基于电磁-结构力场的换流变压器绕组结构参数优化及故障诊断。首先，构建谐波激励下的多场耦合模型，分析复杂工况下的响应特性；其次，采用贝叶斯优化算法对绕组结构参数优化，提升变压器运行的稳定性；在此基础上，考虑长期运行中绕组仍可能发生的缺陷，提出基于振动信号的 TST-XGBoost 融合模型诊断架构，最终形成从振动控制到状态监测的完整技术体系。

1 换流变压器等效模型及电磁-结构力场基本理论

1.1 换流变压器基本结构参数及等效模型

本文以一台交流侧电压为 220 kV、直流侧电压为 500 kV、额定容量为 315 MVA 的单相四柱式换流变压器为分析对象，并依据其实际参数建立了三维等效模型。为平衡计算精度与仿真效率，建模过程中实施如下简化处理：1）简化夹件和连接件，采用辊支撑结构代替原复杂夹件；2）铁芯叠片构造的局部振动差异对整体振动响应影响较小，故铁芯按整体建模；3）油箱各衔接处均采用直角连接方式处理，以此降低建模难度。该换流变压器的整体三维等效模型及相关结构参数如图 1 所示。

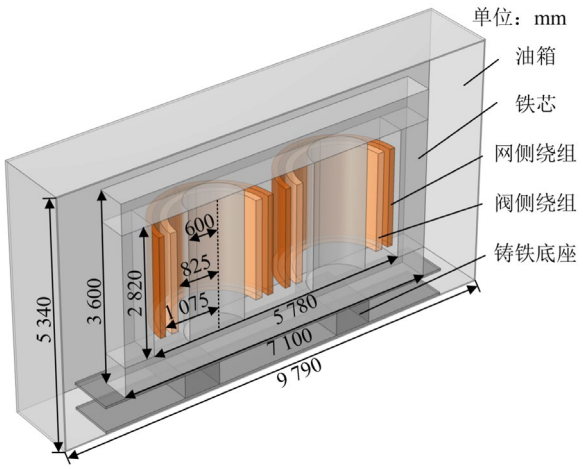


图 1 变压器剖面结构图

Fig.1 Section structure diagram of transformer

1.2 电磁场-结构力场基本理论

在低频工作条件下，位移电流的影响可忽略不计，引入磁矢位并利用其旋度等于磁通密度的关系，可推导得到磁矢位与电流密度之间的关联方程：

$$\nabla\times\left(\mu^{-1}\nabla\times\boldsymbol{A}\right)=\boldsymbol{J}_{\mathrm{c}}-\eta\frac{\partial\boldsymbol{A}}{\partial t} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{B}=\nabla\times\boldsymbol{A} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{A}$ 为磁矢位；$\boldsymbol{B}$ 为磁通密度；μ为磁导率；$\boldsymbol{J}_{\mathrm{c}}$ 为源电流密度矢量；η为电导率；t 为时间。

换流变压器铁芯的振动主要是麦克斯韦力与磁致伸缩力共同作用的结果，计算式可表示为：

$$\begin{cases} \boldsymbol{F}_{\max}=\int_S \boldsymbol{T}_{\max}\mathrm{d}S=\int_S\left(\boldsymbol{B}\otimes\boldsymbol{H}-\frac{1}{2}(\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{H})\boldsymbol{I}\right)\mathrm{d}S \\ \boldsymbol{F}_{\mathrm{mag}}=\int_V\left(-\nabla\cdot(\boldsymbol{D}\boldsymbol{\varepsilon})\right)\mathrm{d}V=\int_V\left(-\nabla\cdot(\boldsymbol{D}f(\boldsymbol{B}))\right)\mathrm{d}V \end{cases} \tag{3}$$

式中：V 为铁芯体积；$\boldsymbol{F}_{\max}$ 为麦克斯韦力；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{mag}}$ 为磁致伸缩力；$\boldsymbol{T}_{\max}$ 为麦克斯韦应力张量；$\boldsymbol{H}$ 为磁场强度；$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵；$\boldsymbol{S}$ 为铁芯表面积分区域；$\boldsymbol{\sigma}$ 为磁致伸缩应力张量；$\boldsymbol{D}$ 为材料弹性模量矩阵；$\boldsymbol{\varepsilon}$ 为磁致伸缩应变张量；$f(\boldsymbol{B})$ 为 $\boldsymbol{B}$ 映射作 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的函数。

铁芯的各组件可看作线弹性材料，其力学特性遵循弹性力学的基本规则，所以铁芯的振动过程能够通过式(4)的弹性力学方程来描述[18]。

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{c}}\frac{\partial^2\boldsymbol{u}_{\mathrm{c}}}{\partial t^2}+\boldsymbol{C}\frac{\partial\boldsymbol{u}_{\mathrm{c}}}{\partial t^2}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}\boldsymbol{u}_{\mathrm{c}}=\boldsymbol{F}_{\max}+\boldsymbol{F}_{\mathrm{mag}} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{M}_{\mathrm{c}}$ 为铁芯质量矩阵；$\boldsymbol{u}_{\mathrm{c}}$ 为铁芯振动位移量；$\boldsymbol{C}$ 为铁芯阻尼矩阵；$\boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}$ 为铁芯刚度矩阵。

绕组振动主要由绕组间电磁力所引起，当绕组中流过正弦负载电流时，其振动加速度[19]可表示为：

$$a_\omega\propto I_1^2\left(1+\cos(2\omega t)\right) \tag{5}$$

当存在谐波电流时，绕组振动加速度表达式为：

$$a_\omega\propto I_1^2\left(1+\cos(2\omega t)\right)+\sum_{k=2}^{n}I_k^2\cos(\omega t)\cos(k\omega t) \tag{6}$$

式中：a_ω 为绕组的振动加速度；ω为电流基波的角频率；n 为谐波次数；I_k 为 k 次谐波电流幅值。

在确定激励条件后，通过上述方法能够计算出换流变压器的振动分布情况。换流变压器的振动传播路径主要包含固体传播与液体传播这 2 种类型，具体的传播机制如图 2 所示。

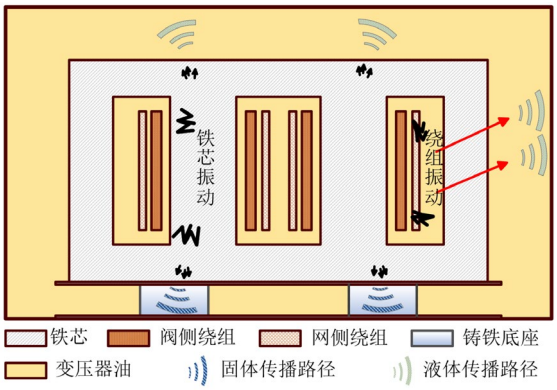


图 2 振动传播机理

Fig.2 Vibration propagation mechanism

1.3 激励加载、边界条件及材料参数设置

1.3.1 激励加载

本文构建了由 2 个 6 脉动换流器构成的 12 脉动换流系统，该系统交流侧接 Y/Y 和 Y/Δ这 2 种不同接线的变压器，实现 30°相位差，2 组换流桥在直流侧采用串联拓扑，直流输电系统原理详见附录 A1。通过在 Simulink 中构建直流输电仿真模型，计算得到直流侧谐波分布见图 3。

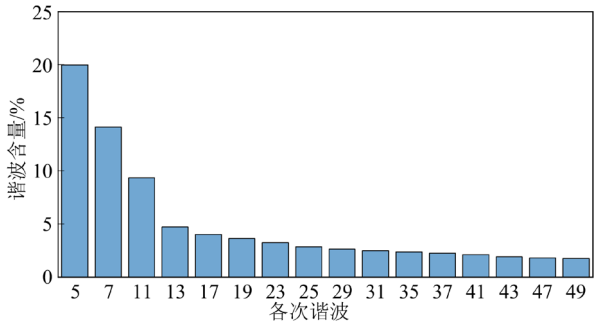


图 3 变压器直流侧谐波含量

Fig.3 Transformer DC side harmonic content

根据上述谐波含量，考虑到 13 次及更高次数的谐波对振动的影响比较小[20]，分别给出了基波以及基波和不同谐波组合下的电流波形，见图 4。

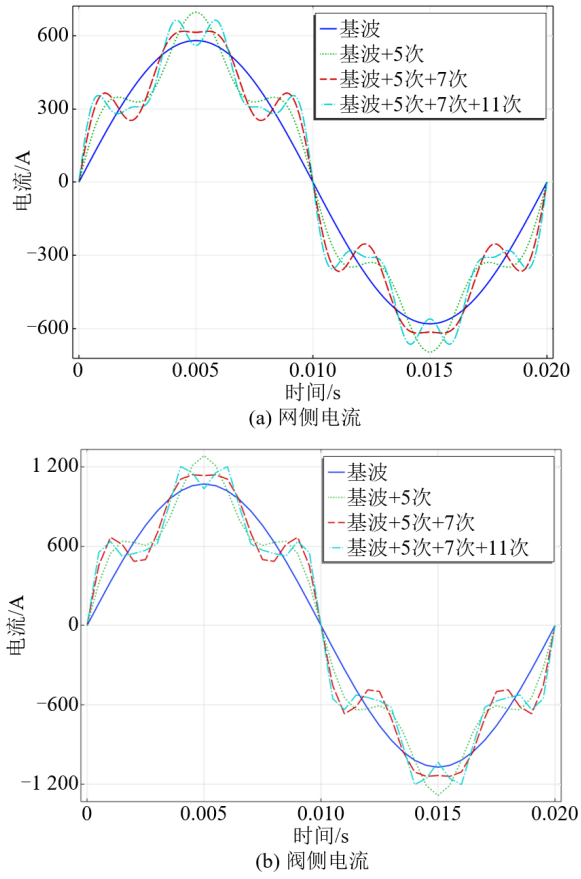


图 4 电流激励波形

Fig.4 Current excitation waveforms

1.3.2 边界条件

1）磁场边界条件：换流变压器外部边界为开

放空间，故设为磁绝缘边界条件，以此模拟磁场无穷远衰减特性；而在铁芯、绕组这类不同材料或介质的接触面上，要设置连续性边界条件，保证磁感应强度的法向分量、磁场强度的切向分量都能连续传递，从而实现磁场在不同介质间的合理过渡。

2）结构力场边界条件：底座采用固定约束限制所有方向位移，模拟实际安装固定状态；油箱外壁设为自由边界，允许振动时产生变形与位移；铁芯、绕组和变压器油之间采用柔性连接；各部件衔接处绑定约束，保障结构整体性与振动传递的连续性。

1.3.3 材料参数

换流变压器各结构部件对应的材料基础属性参数，具体内容可查看表 1。

为了更精准地呈现硅钢片的磁化特性与磁致伸缩效应，本文通过实验获取了硅钢片的磁特性实测数据，相关结果如图 5 所示。

上述实测数据将作为硅钢片材料本构模型的输入参数，用于电磁-结构力场耦合仿真分析。

表 1 变压器材料属性

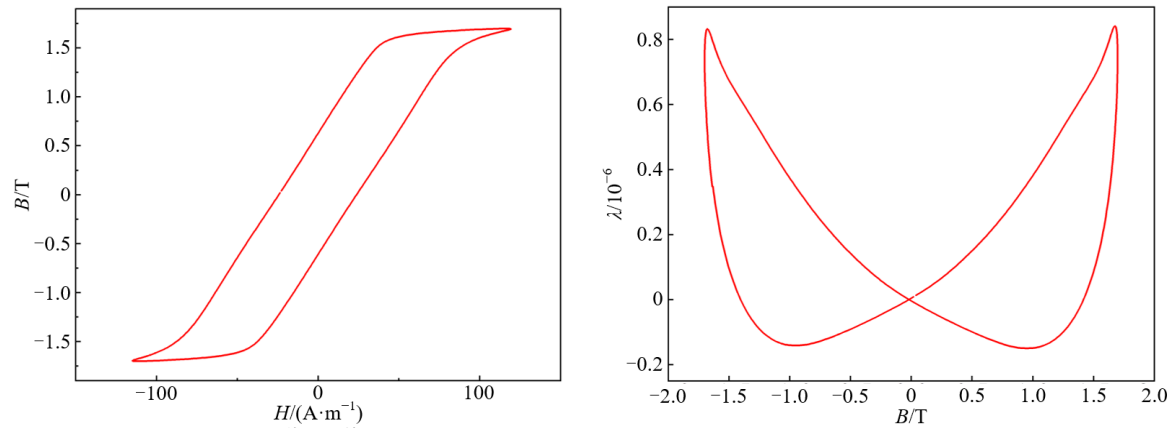
Table 1 Transformer material properties

材料	密度/(kg·m^{-3})	杨氏模量/GPa	泊松比
硅钢片	7 650	220	0.27
铜	8 960	110	0.3
铸铁底座	7 300	120	0.29
油箱	7 800	200	0.3
变压器油	880	—	—

1.4 仿真结果

根据上述的电磁-结构力场仿真计算方法，通过激励加载、边界条件及材料参数的设置，进而计算得出了基波运行工况下换流变压器的磁通密度分布情况，相关结果如图 6 所示。

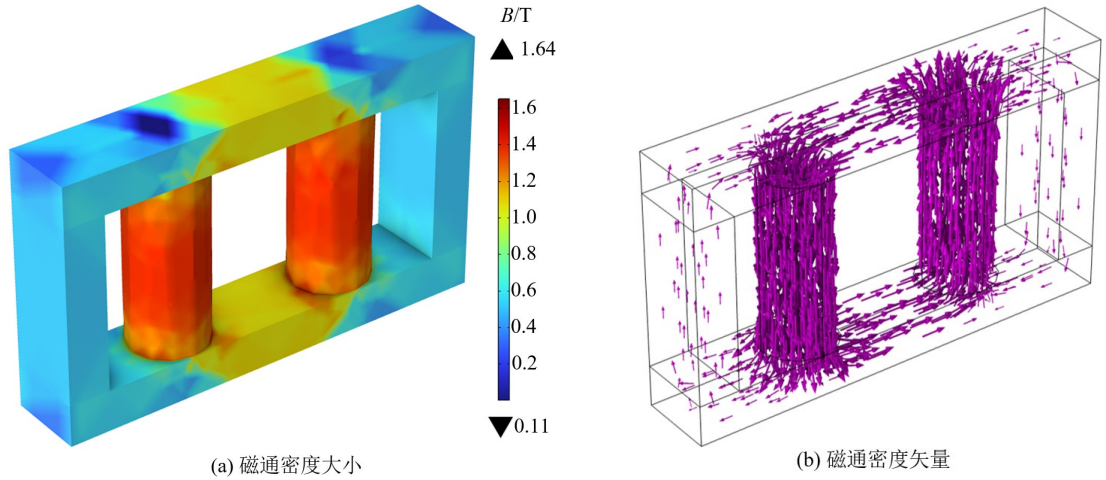
由图 6 可知，铁芯的磁通密度主要集中在铁芯柱区域，最大值为 1.64 T；上、下铁轭的中部区域磁通密度次之，而铁芯的拐角位置磁通密度相对较小。



(a) 磁滞回线 (b) 磁滞伸缩曲线

图 5 硅钢片磁特性测量数据

Fig.5 Measurement data of magnetic properties of silicon steel sheet



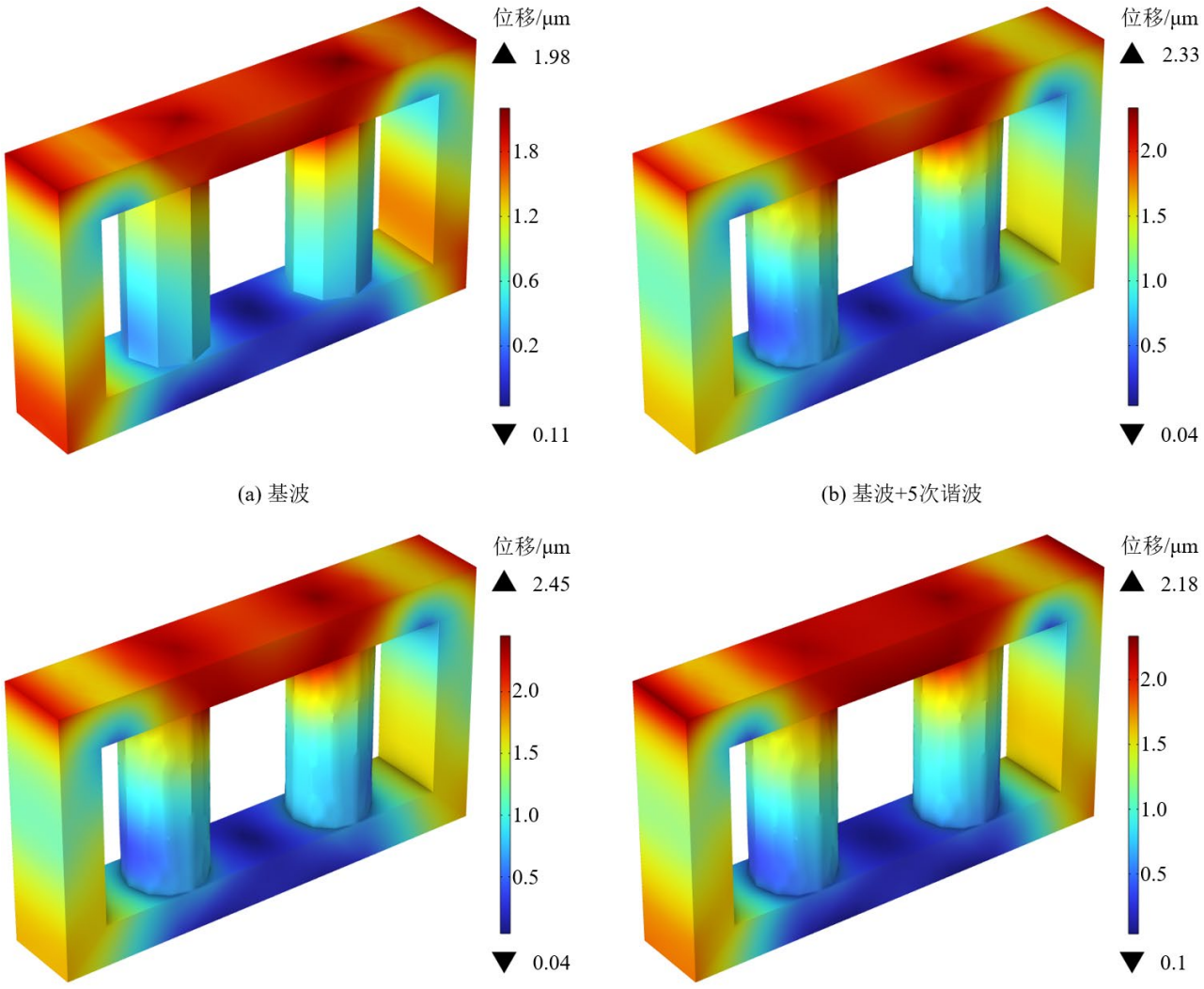
(a) 磁通密度大小 (b) 磁通密度矢量

图 6 铁芯磁通密度分布

Fig.6 Magnetic flux density distribution of iron core

为分析谐波对换流变压器振动特性的影响，基于 1.3 节中基波与谐波电流波形，开展电磁-结构力场耦合仿真，得到变压器振动位移分布云图。选取电流达到峰值时刻(t=0.005 s)进行分析，基波和不同谐波激励下的铁芯振动位移如图 7 所示。

结果表明，不同谐波组合下铁芯振动分布趋势一致，基波激励下振动峰值为 1.98 μm，基波+5 次谐波、基波+5+7 次谐波和基波+5+7+11 次谐波的振动峰值分别为 2.33、2.45 和 2.18 μm。可见谐波对变压器振动影响显著[19]。结合换流变压器实际运行中谐波含量的复杂性，本文后续仿真将采用基波+5+7+11 次谐波组合作为激励。



(a) 基波　(b) 基波+5次谐波

(c) 基波+5+7次谐波　(d) 基波+5+7+11次谐波

图 7　铁芯振动分布云图

Fig.7　Cloud diagram of core vibration distribution

1.5　实验验证

受特高压换流变压器实体测试的条件限制，为验证本文所建三维仿真模型的计算合理性，选取某型号 10 kV 的油浸式变压器作为实验样机，在变压器正面的中上部分选取 2 个测点开展振动特性实验测量，实验样机的详细参数如表 2 所示，对应的实验样机如图 8 所示。

表 2　实验样机参数

Table 2　Test prototype parameters

参数	数值或型号
变压器型号	S9-M-630/10
额定容量/kVA	630
额定电压/kV	10/0.4
外形尺寸/mm	1 907×1 427×1 202

针对该实验样机，采用多物理场耦合仿真方法构建三维模型并开展振动分析，提取仿真和实验测量数据，测点①和测点②的最大振动加速度对比分析如表 3 所示。



图 8 实验样机

Fig.8 Experimental platform construction

表 3 误差分析

Table 3 Error analysis

位置	实验结果/(m·s^{-2})	仿真数据/(m·s^{-2})	误差/%
测点①	0.058 1	0.054 9	5.51
测点②	0.052 3	0.054 7	4.59

根据对比仿真数据与实验测量结果可知，实验结果与仿真数据的振动加速度信号最大误差不超过5.6%[18]，实验结果验证了三维仿真模型的准确性。

2 基于电磁-结构力场的换流变压器绕组结构参数优化

换流变压器各结构参数对振动特性影响显著。为有效抑制变压器振动，引入贝叶斯优化方法，对关键结构参数进行优化。优化流程如图 9 所示。

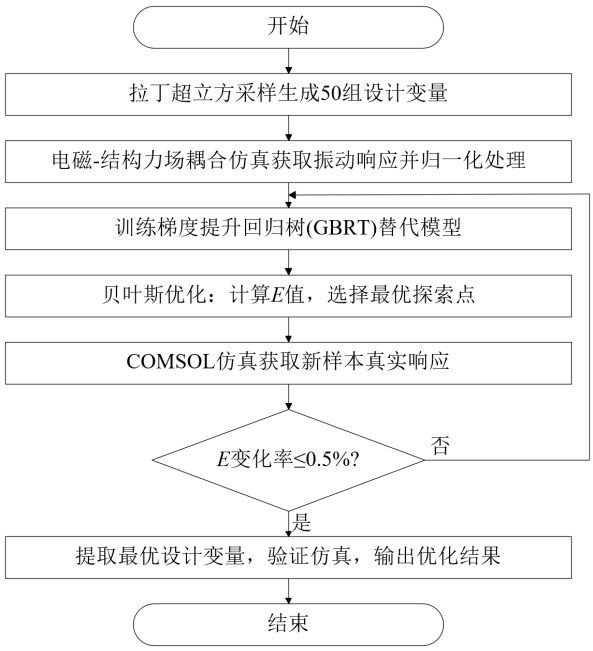


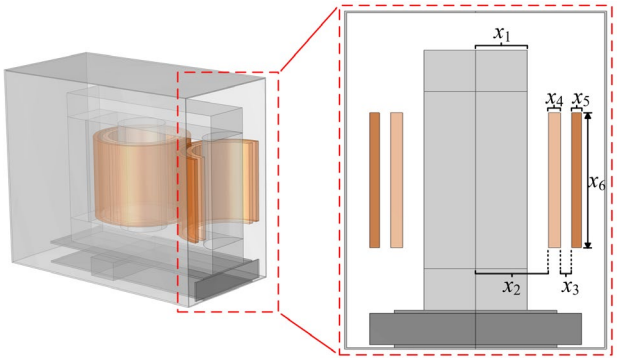
图 9 绕组结构优化流程图

Fig.9 Flowchart of winding structure optimization

2.1 优化模型的建立

为实现换流变压器结构参数的精准优化，需明确优化变量、目标与约束条件，具体建立过程如下所述。

1）优化变量选取：选取铁芯柱半径、网/阀侧绕组厚度、绕组高度、绕组间距以及绕组和铁芯间距 6 个关键结构参数作为优化变量，如图 10 所示。



x_1—芯柱半径；x_2—绕组与铁芯柱间距；x_3—绕组间距；x_4 和 x_5—阀侧和网侧绕组厚度；x_6—绕组高度

图 10 优化变量

Fig.10 Optimization variables

2）优化目标定义：以减小换流变压器铁芯的振动位移作为核心优化方向，对应的数学表达式为：

$$\begin{cases} \text{Minimize}: f(\boldsymbol{x}) = Y \\ \boldsymbol{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6] \end{cases} \tag{7}$$

式中：Minimize 表示求最小值；Y 为最大振动位移，μm；$\boldsymbol{x}$ 为 6 个结构参数构成的变量向量。

3）约束条件设定：为确保电磁性能满足运行要求，避免铁芯磁通过饱和；各间距参数需满足最小绝缘距离要求，保证在各种工况下绝缘强度足够，避免发生绝缘击穿；各参数的优化范围基于上述多约束条件综合确定，具体数值范围详见表 4。

表 4 优化模型参数

Table 4 Optimization of model parameters

优化参数	优化范围/m	优化前/m	优化后/m
x_1	0.5~0.60	0.550	0.595
x_2	0.8~0.95	0.875	0.841
x_3	0.1~0.15	0.125	0.131
x_4	0.1~0.15	0.125	0.118
x_5	0.1~0.15	0.125	0.123
x_6	2.1~2.60	2.350	2.328

2.2 实验设计

采用拉丁超立方抽样方法生成 50 组初始参数组合，基于这些样本构建概率模型，预测设计空间

内任意点的目标函数值，同时以期望改进值作为采集函数，确定下一个具有高评估价值的参数点，其对应的数学表达式如式(8)所示。

$$E(\boldsymbol{x}_*)=(f_{\min}-\mu_*)\Phi\left(\frac{f_{\min}-\mu_*}{\sigma_*}\right)+\sigma_*\phi\left(\frac{f_{\min}-\mu_*}{\sigma_*}\right) \quad (8)$$

式中：$E(\boldsymbol{x}_*)$为期望改进函数在设计点$\boldsymbol{x}_*$处的取值；$\boldsymbol{x}_*$为期待评估的候选样本点；$f_{\min}$为当前目标函数的最优值；μ_*为目标函数值的后验均值预测；σ_*为目标函数值的后验标准差；Φ为标准正态分布的累积分布函数；ϕ为标准正态分布的概率密度函数。

基于上述机理分析，在选定参数点处进行有限元仿真获取真实响应值，并将新数据加入样本集更新代理模型，最终获得的优化预测模型相关性达0.928，结合代理模型更新后的 50 组实验仿真数据结果详见附录 B1。

2.3 响应面模型建立

根据仿真数据，本文借助回归分析的方法，构建了结构参数与最大振动位移之间的响应面模型，如图 11 所示。

由图 11 分析可知，铁芯柱半径(x_1)直接决定了铁芯的磁路截面积，增大 x_1 能有效降低铁芯的磁通密度和由此产生的电磁激振力，从而对抑制振动位移贡献最大；阀侧与网侧绕组厚度(x_4、x_5)直接影响其等效电流密度、自身机械刚度及散热油道的布置空间，两侧绕组需要协同优化，避免因一侧参数突变导致振动能量分布不均；绕组与铁芯间距(x_2)、绕组高度(x_6)共同影响绕组的漏磁场分布和结构刚度，x_2 增大导致漏磁增加，在一定范围内改变了电磁力的作用路径和分布，x_6 则直接关联绕组的轴向刚度；绕组间距(x_3)主要影响绕组间的漏磁和互感，其对整体主磁路和铁芯受力影响相对间接，故敏感性较低。

2.4 基于贝叶斯的换流变压器绕组结构优化

根据构建的响应面模型，初步拟合出铁芯振动响应与设计变量之间的关联后，为获得铁芯振动位移最小的最优结构参数，采用贝叶斯优化(Bayesian optimization)方法来开展全局范围的寻优计算。

2.4.1 贝叶斯基本方法

贝叶斯优化是基于序列策略的黑箱全局优化方法，核心是结合高斯过程构建代理模型，通过先验与后验分布更新逼近目标函数真实分布；并利用期望改进等采集函数分配采样资源，以最大信息增益高效定位全局最优解。相比传统方法，高斯过程回归可拟合非线性问题，与梯度提升回归树互补，精准捕捉变量与振动响应关联；期望改进准则能以少样本高效搜索全局最优，降低计算成本；概率化建模可提供结果置信度评估，提升工程可靠性。

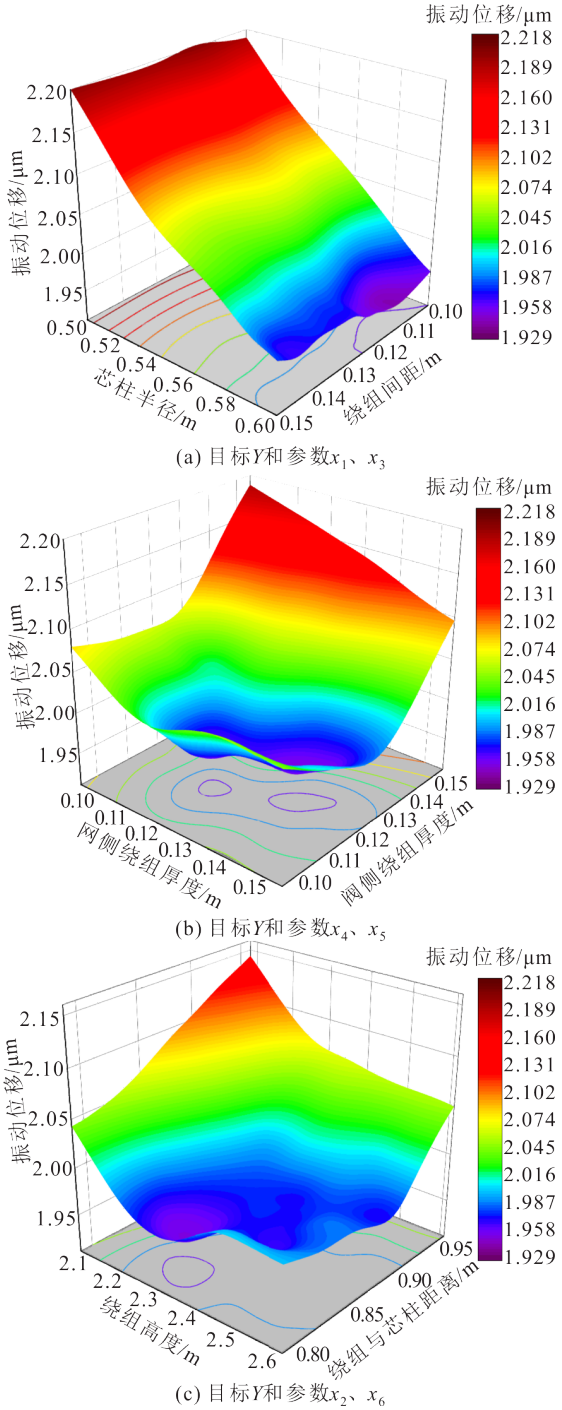


图 11 优化目标与参数响应面图

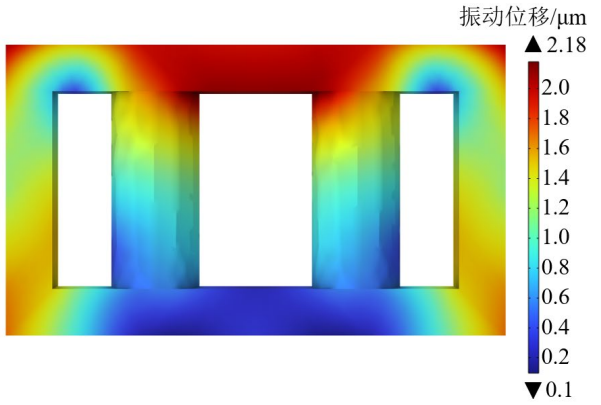
Fig.11 Optimization objective and parameter response surface diagram

2.4.2 优化结果

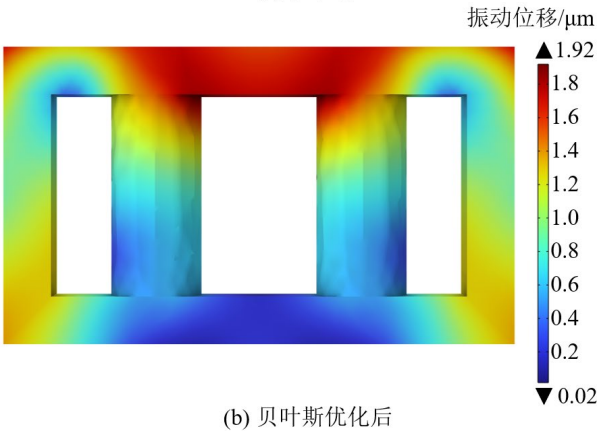
基于所构建的贝叶斯优化框架进行全局寻优，获得了最优结构参数。优化前后的模型参数对比如表 4 所示，优化前后铁芯振动位移分布对比结果如

图 12 所示。

结果表明，优化前后铁芯振动区域分布大致相同，铁芯拐角及上轭部振动位移降幅显著，铁芯的振动位移最大值由 2.18 μm 显著降至 1.92 μm，降幅达 11.93%，验证了该优化策略在降低铁芯振动上的有效性和可靠性。



(a) 优化前



(b) 贝叶斯优化后

图 12 优化前后振动位移分布

Fig.12 Vibration displacement distribution before and after optimization

3 基于油箱壁面测点振动信号的故障诊断

绕组结构优化虽能抑制变压器振动，但长期运行中，铁芯绕组异常振动仍可能引发故障。为此，本章在减振设计基础上构建完整诊断体系，涵盖油箱壁面测点优化、典型故障仿真建模、振动信号特征提取及绕组故障诊断这 4 个环节，保障换流变压器安全稳定运行。图 13 展示了故障诊断的整体流程。

3.1 油箱壁面测点优化

3.1.1 测点布置

为研究油箱内部振动信号与壁面响应之间的关联特性，本文采用区域网格划分方法对油箱壁面进行测点布置。在保证精度与计算效率的前提下，将油箱正面划分为 9×5 的网格，侧面划分为 5×3 的网格，并以各网格区域中心作为振动监测点。油箱壁面测点布置结果如图 14 所示。

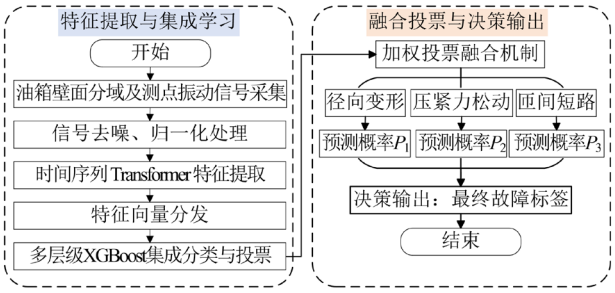
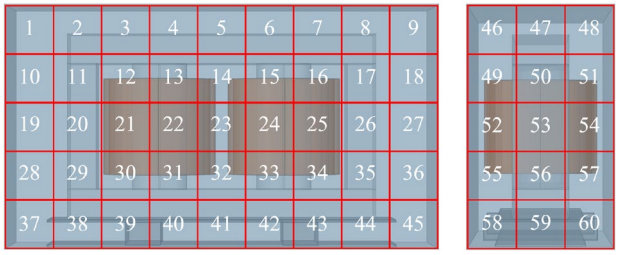


图 13 故障诊断流程图

Fig.13 Fault diagnosis flow chart



(a) 油箱壁正面 (b) 油箱壁侧面

图 14 油箱壁面分域图

Fig.14 Oil tank wall partition diagram

根据铁芯和绕组振动分布结果，选取铁芯和绕组振动强烈区作为振动参考点，如图 15 所示。

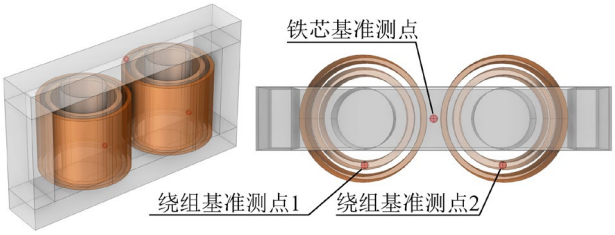


图 15 油箱内部基准测点

Fig.15 Internal reference measuring point of fuel tank

3.1.2 最佳振动测点确定

以基准参考测点的频域振动加速度信号为输入，取 0~1 kHz 范围内工频的倍频信号为样本数据，采用皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient，PCC)量化各测点与参考点之间振动响应的一致性，总体相关系数的计算式如式(9)所示。

$$p_{X,Y}=\frac{\operatorname{cov}(X,Y)}{\sigma_X\sigma_Y} \tag{9}$$

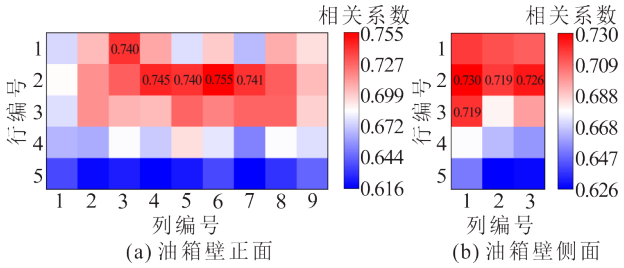
式中：$p_{X,Y}$ 为 X 和 Y 的皮尔逊相关系数；$\mathrm{cov}(X,Y)$ 为变量 X 和 Y 的协方差；σ_X 和 σ_Y 为 X 和 Y 的标准差。

将变量代入后，样本皮尔逊相关系数的计算式可表示为：

$$p_{x,y}=\frac{\sum_{i=1}^{20}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{20}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{20}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{10}$$

式中：x_i 为基本测点样本数据；y_i 为油箱壁面测点样本数据；$\bar{x}$、$\bar{y}$ 分别为 x 和 y 的样本均值。

对每个基准测点所对应的多个相关系数取平均值，以其平均相关系数作为最终的评判指标基于计算得到的相关系数矩阵，绘制出油箱壁面相关性分布热图，如图 16 所示。



(a) 油箱壁正面 (b) 油箱壁侧面

图 16 振动相关性热图

Fig.16 Vibration correlation heat map

根据相关性热力图分析结果可知，由于芯柱两侧绕组振动信号互相叠加，导致油箱正中间相关系数较大，与铁芯振动信号相叠加后，最大相关系数分布在油箱的中上部分。一般认为当$|p_{x,y}|$>0.7 时，变量之间存在强相关性，经显著性检验，最终遴选相关性最高的 5 个区域 3、13、14、15、16 中心作为油箱壁面振动测点，如图 17 所示。

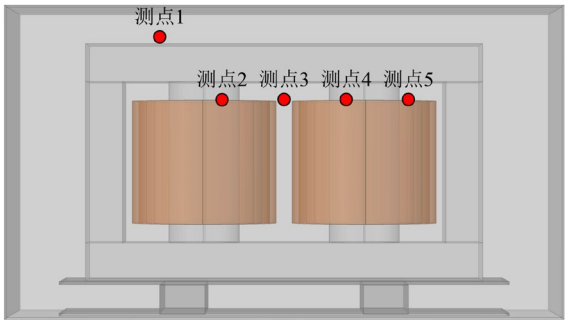


图 17 最佳振动测点

Fig.17 Best vibration measuring point

3.2 换流变压器典型故障模型构建

为研究谐波激励下变压器绕组典型故障的振动响应特性，本文建立含各次谐波激励的绕组径向变形、压紧力松动及匝间短路这 3 类故障模型如图 18 所示，故障仿真结果详见附录 A2。

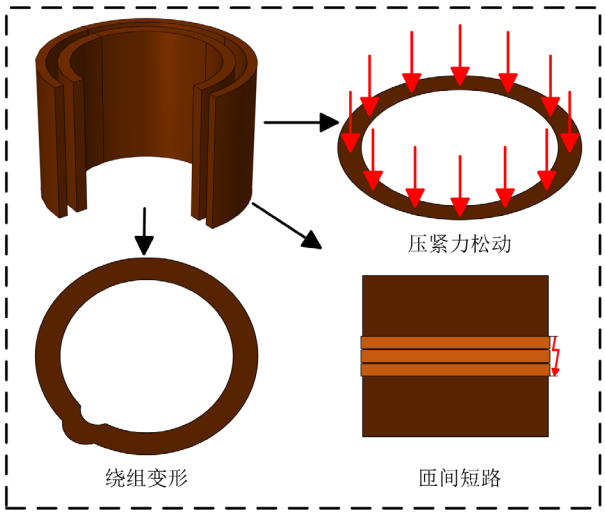


图 18 典型绕组故障

Fig.18 Typical winding fault

3.3 特征信号提取与分析

为有效诊断换流变压器绕组状态，本文基于 3.1 节的 5 个测点提取并分析特征信号，对不同故障下下的振动加速度信号进行傅里叶变换，得到图 19 所示的频域信号图。

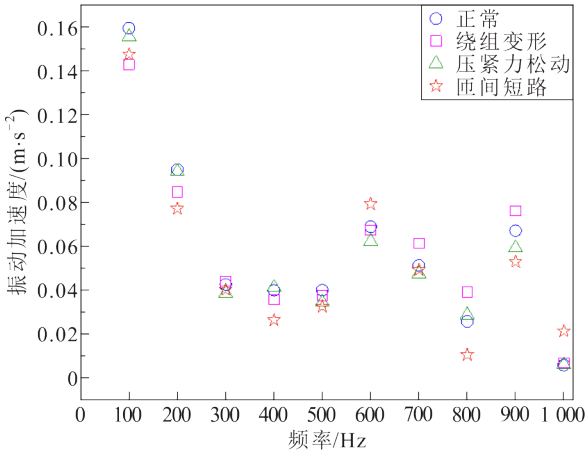


图 19 频域信号图

Fig.19 Frequency domain signal diagram

通过对比正常工况与 3 类故障工况下的振动频域曲线可知：绕组变形工况下，100~200 Hz 处振动小幅降低，而 700~900 Hz 等频点振动幅值显著增大；压紧力松动故障时，在全频带内 100、200、300 Hz 及 500~700 Hz 频段的峰值出现不同程度的衰减，但在 400 Hz 与 800 Hz 处振动幅值明显抬升；匝间短路故障下，振动在全频带 100~500 Hz 及

700~900 Hz 范围内均发生不同程度衰减，仅有 600 Hz 与 1 000 Hz 这 2 处振动幅值出现明显提升。

3.4 基于时间序列 Transformr-XGBoost 融合投票机制的绕组故障诊断

3.4.1 TST-XGBoost 基本原理

TST-XGBoost 集成投票智能诊断框架是通过 TST 捕捉频域特征的长程依赖与全局关联，其核心计算过程为：

$$f_{\text{Attention}}(\boldsymbol{Q},\boldsymbol{K},\boldsymbol{V})=f_{\text{softmax}}\left(\frac{\boldsymbol{Q}\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}}{\sqrt{d_k}}\right)\boldsymbol{V} \tag{11}$$

式中：$f_{\text{Attention}}$ 为计算权重关联函数；$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{K}$、$\boldsymbol{V}$ 分别代表查询、键和值矩阵；d_k 为维度缩放因子；f_{softmax} 为概率归一化函数。

在获得 TST 提取的深度特征后，将其作为输入传递至 XGBoost 集成学习框架进行故障分类。XGBoost 通过优化如下目标函数完成模型训练：

$$\mathcal{L}(\boldsymbol{\theta})=\sum_{i=1}^{n}\ell\left(y_i,\hat{y}_i\right)+\gamma\mathrm{T}+\frac{1}{2}\lambda\|\boldsymbol{\omega}\|^2 \tag{12}$$

式中：$\mathcal{L}(\boldsymbol{\theta})$ 为模型的目标损失函数；$\ell\left(y_i,\hat{y}_i\right)$ 为多分类对数损失(y_i 为真实故障标签，$\hat{y}_i$ 为预测值)；$\gamma T+(\lambda\|\boldsymbol{\omega}\|^2)/2$ 为正则项(T 为叶子节点数，$\boldsymbol{\omega}$为节点权重，γ=0.1，λ=1 为正则参数)。

为整合 TST 与 XGBoost 的优势，采用加权投票机制，设 TST 对故障类别 c 的预测概率为 $p_{\text{TST},c}$，XGBoost 为 $p_{\text{XGB},c}$，则融合概率为：

$$p_{\text{fusion},c}=\alpha p_{\text{TST},c}+(1-\alpha)p_{\text{XGB},c} \tag{13}$$

式中：α 为验证集准确率，最终故障类型由 $\text{argmax}p_{\text{fusion},c}$ 判定。

该诊断框架相较于单一模型能更全面覆盖绕组故障振动信号的非线性、耦合性特征，集成投票机制能有效降低个体模型偏差、减少边缘样本误判。

3.4.2 融合投票机制的绕组故障类型识别

1）故障分类

构建基于油箱壁面振动信号的 TST-XGBoost 融合诊断模型，将正常工况(Q1)、绕组径向变形(Q2)、压紧力松动(Q3)及匝间短路(Q4)这 4 类状态的识别作为第 1 层诊断任务。每种工况各设置 300 组样本数据，样本覆盖不同负载条件，模型经 XGBoost 训练测试后，最终完成绕组故障状态的分类识别，得到的混淆矩阵如图 20 所示。

结果表明，该融合诊断模型对 4 类工况的整体识别准确率达到 99.72%。其中，Q1 与 Q4 的精确率和召回率均为 100%；Q2 的召回率为 98.98%，Q3 的分类准确率为 98.91%，仅个别样本与正常工况存在轻微混淆，验证了融合诊断策略的有效性。

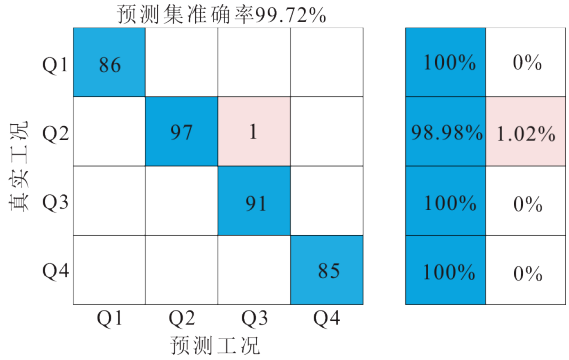


图 20 故障类型识别混淆矩阵

Fig.20 Fault-type identification confusion matrix

2）性能验证

为揭示各测点与绕组故障的关联，采用 SHAP 气泡图可视化各测点特征分布见图 21。发现测点 1 和 3 的特征与 SHAP 值呈显著正相关，进一步绘制了特征重要性排名柱状图详见附录 A3。这一结论与变压器振动传播理论中关于结构响应敏感区的论述高度相符[21]，验证了诊断模型的有效性。

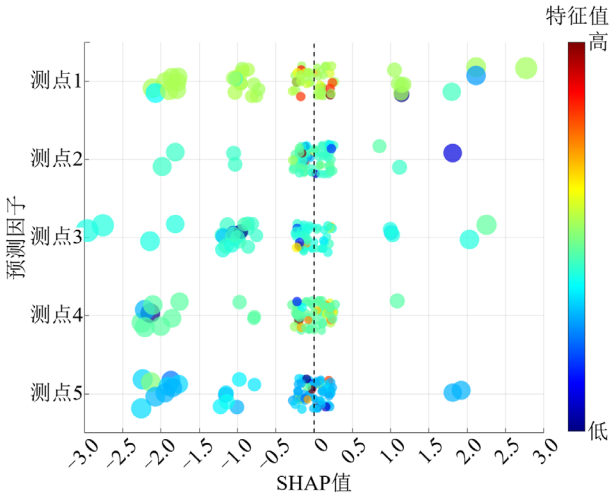


图 21 SHAP 气泡图

Fig.21 Diagram of SHAP bubble

上述技术框架具有通用性，基于当前阶段性与仿真资源聚焦性考虑，后续将以绕组径向变形为例深入研究故障诊断方法，其余故障类型可按相同技术逻辑拓展分析。

3.4.3 融合投票机制的绕组故障程度辨识

在绕组故障类型识别的基础上，本节进一步开

展绕组故障程度辨识。以绕组径向变形为例，构建故障程度辨识模型，将 1 200 组样本按 7:3 比例划分为训练集与测试集，模型在测试集上的准确率达到 98.61%。图 22 为样本预测图，故障混淆矩阵如图 23 所示。

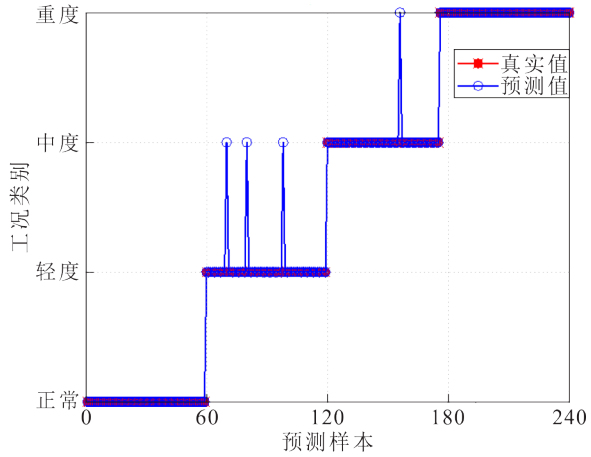


图 22 样本预测图

Fig.22 Diagram of sample prediction

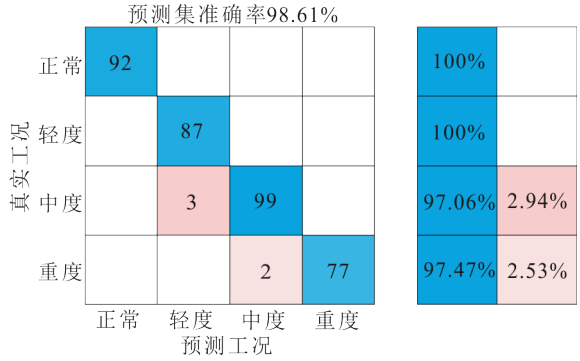


图 23 故障程度辨识混淆矩阵

Fig.23 Fault degree identification confusion matrix

结果表明，该融合投票模型对不同变形程度样本均保持良好预测一致性。中度、重度变形样本的召回率分别达到 97.06%、97.47%，实现了绕组故障程度的精准识别，验证了模型的合理性。

3.5 绕组故障诊断结果分析

基于时间序列 Transformr-XGBoost 融合投票机制的绕组故障诊断总体预测准确率可由下式表示：

$$P_Z = P_I P_{II} \tag{14}$$

式中：P_Z 为总体预测准确率；P_I 为绕组故障分类预测准确率；P_{II} 为绕组故障程度辨识预测准确率。经计算，本模型在测试集上的整体预测准确率达到 98.33%。

通过融合多源信息与故障诊断策略，该方法成功实现了绕组故障程度的高精度辨识，不仅验证了测点布局的有效性，也为变压器状态评估提供了可靠依据。后续研究可将该方法拓展至其他故障类型的精细化诊断，以进一步提升其工程适用性。

4 结论

1）构建了电磁-结构力场耦合仿真模型，明确了谐波激励下换流变压器的振动产生与传播机理。仿真结果表明，铁芯最大振动位移集中在铁芯上轭及芯柱连接区域，整体呈对称分布，最大值为 2.23 μm，为后续结构优化奠定了理论基础。

2）提出了基于贝叶斯优化的绕组结构参数智能优化方法。通过优化 6 个关键设计变量，将铁芯振动位移从 2.18 μm 降低至 1.92 μm，降幅达 11.93%。

3）基于优化后的振动基准，通过相关性分析筛选最优油箱壁面测点，进一步提出了 TST-XGBoost 融合投票模型，最终在测试集上实现了 98.33%的整体预测准确率，验证了其在故障类型识别与故障程度辨识中的有效性和可靠性。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 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.

[2] 袁发庭，张仁杰，颜智威，等. 考虑材料磁致伸缩特性的铁芯电抗器振动特性分析及分层优化策略[J]. 高电压技术，2025，51(3)：1464-1475.
YUAN Fating, ZHANG Renjie, YAN Zhiwei, et al. Analysis of vibration characteristics of ironcore reactor considering magnetostrictive characteristics properties of materials and hierarchical optimization strategy[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1464-1475.

[3] 王昌宇. 换流变压器振动和噪声问题研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2023.
WANG Changyu. Research on vibration and noise of converter transformer[D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2023.

[4] ZHANG B, YAN N, DU J M, et al. A novel approach to investigate the core vibration in power transformers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 8400804.

[5] 张悦. 基于抗震性分析的变压器隔振结构研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2020.
ZHANG Yue. Research on transformer vibration isolation structure based on earthquake resistance analysis[D]. Shenyang, China: Shen-

yang University of Technology, 2020.

[6] 彭明聪. 大型电力变压器减振降噪技术应用研究[D]. 北京：北京交通大学，2015.
PENG Mingcong. Research on vibration and noise of large power transformer and it's reduction approaches[D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2015.

[7] JAVORSKI M, ČEPON G, SLAVIČ J, et al. A generalized magneto-strictive-forces approach to the computation of the magnetostriction-induced vibration of laminated steel structures[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(11): 5446-5453.

[8] 吕晓宇. 考虑磁致伸缩效应影响的结构振动抑制方法研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2020.
LÜ Xiaoyu. Research on structural vibration suppression technology with considering of magnetostriction[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.

[9] HU J Z, LIU D C, LIAO Q F, et al. Electromagnetic vibration noise analysis of transformer windings and core[J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(4): 251-257.

[10] 钟星鸣. 干式变压器的振动和噪声研究[D]. 广州：华南理工大学，2010.
ZHONG Xingming. Research on vibration and noise of dry-type transformer[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2010.

[11] YANG Q, CHEN Y, HAN R, et al. Transient overvoltage response performance of transformer windings with short-circuit fault[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(10): 2265-2272.

[12] 李浩，魏繁荣，王浩，等. 基于振动信号与深度学习的电力变压器故障诊断方法[J]. 电工电能新技术，2024，43(10)：1-12.
LI Hao, WEI Fanrong, WANG Hao, et al. Power transformer fault diagnosis method based on vibration signal and deep learning[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(10): 1-12.

[13] 庞永林，王文超，刘天奇，等. 融合多模态残差连接的变压器故障声纹诊断方法[J]. 河北大学学报(自然科学版)，2025，45(6)：590-600.
PANG Yonglin, WANG Wenchao, LIU Tianqi, et al. A transformer fault voiceprint diagnosis method based on multimodal residual connection[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2025, 45(6): 590-600.

[14] 曲朝阳，刘谊豪，曲楠，等. 基于声纹脊线化和元学习的变压器故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制，2025，53(13)：163-174.
QU Zhaoyang, LIU Yihao, QU Nan, et al. Transformer fault diagnosis method based on acoustic ridging and meta-learning[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(13): 163-174.

[15] 谷佳洋. 基于电-声联合分析的变压器局部放电监测系统设计与应用[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2025.
GU Jiayang. Design and application of transformer partial discharge monitoring system based on electro-acoustic analysis[D]. Harbin, China: Northeast Agricultural University, 2025.

[16] WANG X L, LI Q M, LI C R, et al. Reliability assessment of the fault diagnosis methodologies for transformers and a new diagnostic scheme based on fault info integration[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2292-2298.

[17] 郭文骏，王臻龙，赵湘文，等. 油浸式配电变压器局部放电检测技术及模式识别综述[J]. 广东电力，2023，36(5)：67-78.
GUO Wenjun, WANG Zhenlong, ZHAO Xiangwen, et al. Review of partial discharge detection technology and pattern recognition of oil-immersed distribution transformers[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(5): 67-78.

[18] 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形变特性[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.

[19] 潘志城，邓军，彭翔，等. 计及谐波影响的在运换流变压器振动信号特性分析[J]. 变压器，2021，58(9)：63-67.
PAN Zhicheng, DENG Jun, PENG Xiang, et al. Analysis of vibration signal characteristics of converter transformer in operation considering harmonic effect[J]. Transformer, 2021, 58(9): 63-67.

[20] 赵莉华，丰遥，谢荣斌，等. 谐波对变压器振动特性的影响[J]. 水电能源科学，2017，35(11)：198-202，197.
ZHAO Lihua, FENG Yao, XIE Rongbin, et al. Influence of harmonics on vibration properties of transformer[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(11): 198-202, 197.

[21] 张凡，汲胜昌，师愉航，等. 电力变压器绕组振动及传播特性研究[J]. 中国电机工程学报，2018，38(9)：2790-2798.
ZHANG Fan, JI Shengchang, SHI Yuhang, et al. Research on transformer winding vibration and propagation characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9): 2790-2798.



袁发庭(通信作者)
1988—，男，博士，副教授，博导
主要从事电工装备多物理场仿真计算、优化设计及故障诊断方面的研究工作
E-mail: yuanfatinghss@163.com

YUAN Fating
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



鲍国苗
2000—，男，硕士生
主要研究方向为变压器减振优化及故障诊断
E-mail: bguomiao@163.com

BAO Guomiao

收稿日期 2025-11-19 修回日期 2026-02-28 编辑 曾文君

附录 A

A1　直流输电系统原理

作为直流输电系统里的关键部件，换流器在完成交-直或直-交电能转换时，采用传统晶闸管的相控整流技术。其通过调控晶闸管触发角实现电能转换，因相控导通特性使输出电流波形偏离理想正弦形态，从而在换流变压器中引入以 $6k\pm1$ 次为主的特征谐波分量。直流输电系统的原理如图 A1。

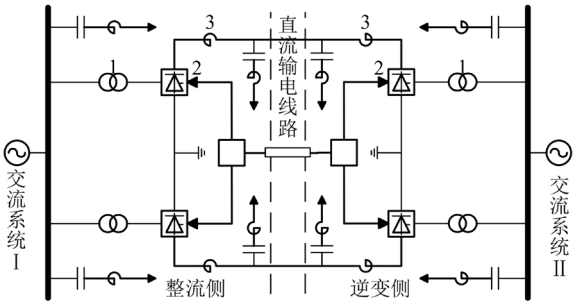


图 A1　直流输电系统原理

Fig.A1　Principle of DC transmission system

A2　换流变压器绕组典型故障仿真

1）绕组变形：采用有限元方法建立了轻度(20%)、中度(40%)和重度(60%)变形 3 类模型，可系统反映绕组从局部畸变到整体劣化的演化过程，不同变形程度的振动仿真结果如图 A2 所示。

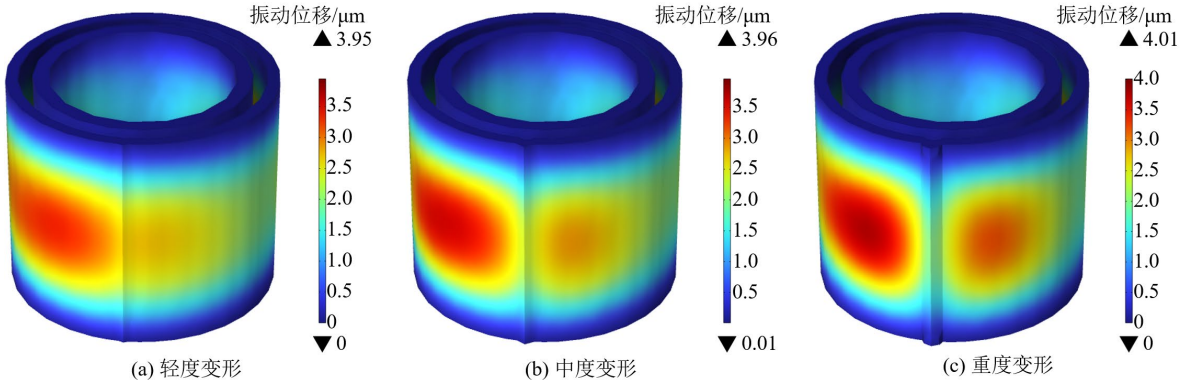


图 A2　绕组变形仿真图(图序号不连续)

Fig.A2　Diagram of winding deformation simulation

仿真结果表明，最大振动位移集中于绕组中部，且振动范围随故障程度加剧而显著增大。重度变形振动响应峰值为 4.01 μm。

2）压紧力松动：以正常压紧力 4 MPa 为基准，建立了轻度(3 MPa)、中度(2 MPa)和重度(1 MPa)松动三级模型，以模拟压紧系统从局部性能下降到整体失效的变化过程。图 A3 展示了压紧力松动故障的仿真结果。

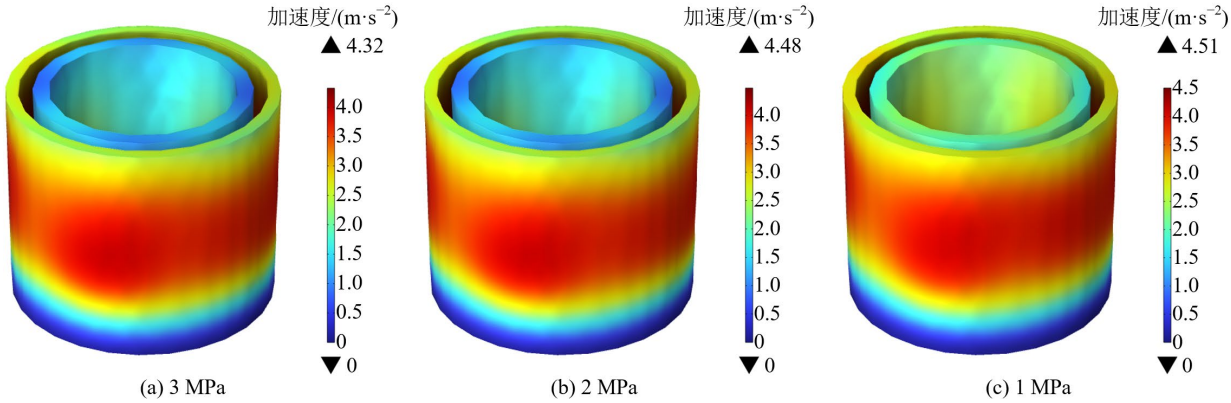


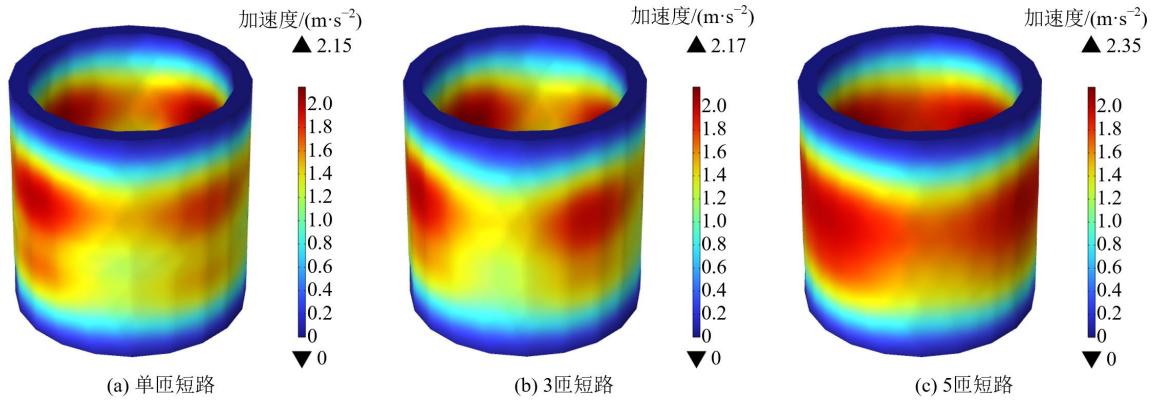
图 A3　压紧力松动仿真图

Fig.A3　Looseness simulation diagram of pressing force

由图可知，由于绕组底部采用固定约束，振动能量主要集中在中部区域并向上部扩散，最大振动

加速度达到 4.51 m/s²。

3）匝间短路：模型按严重程度分为单匝、3 匝和 5 匝，分别对应不同的绝缘损伤与环流强度。图 A4 展示了匝间短路故障的仿真结果。



(a) 单匝短路　(b) 3匝短路　(c) 5匝短路

图 A4　匝间短路故障仿真图

Fig.A4　Diagram of inter-turn short circuit fault simulation

仿真结果表明，短路匝数直接决定振动响应的强度与分布特征。随着短路匝数的增加，振动加剧且影响范围扩大，5 匝短路故障时，振动加速度峰值增至 2.35 m/s²。

A3　特征重要性分析

本文进一步通过特征重要性排名柱状图量化各测点贡献度，见图 A5。

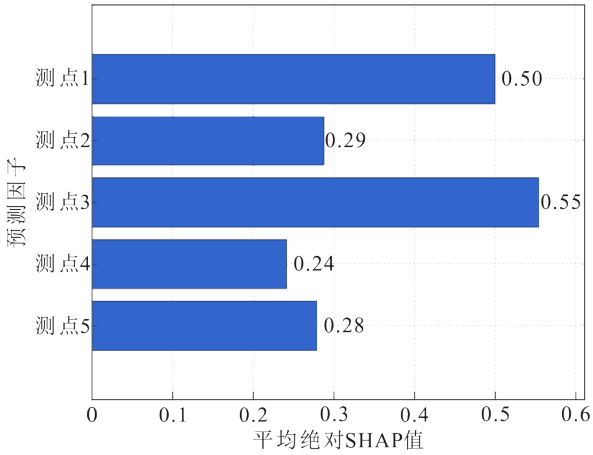


图 A5　SHAP 柱状图

Fig.A5　Column chart of SHAP

由图可知，测点 3 平均绝对 SHAP 值最高，达 0.55，对模型故障诊断起主导作用。这一结果与 SHAP 气泡图结果相符，验证了本文故障诊断模型的准确性。

附录 B

B1　实验设计仿真数据

本文采用拉丁超立方抽样方法获取对应仿真数据，如表 B1 所示。

表 B1　仿真数据结果

Table B1　Simulation data results

样本	x_1/ m	x_2/ m	x_3/ m	x_4/ m	x_5/ m	x_6/ m	Y/ μm
1	0.563	0.825	0.133	0.111	0.137	2.110	2.067
2	0.522	0.831	0.138	0.100	0.122	2.365	2.127
3	0.584	0.941	0.120	0.108	0.116	2.161	2.006
4	0.553	0.919	0.125	0.147	0.139	2.151	2.064
5	0.569	0.926	0.143	0.117	0.144	2.212	2.052
6	0.531	0.922	0.119	0.137	0.114	2.580	2.093
7	0.539	0.935	0.100	0.126	0.130	2.335	2.047
8	0.514	0.855	0.146	0.129	0.141	2.222	2.173
9	0.598	0.916	0.111	0.124	0.145	2.263	2.093
10	0.553	0.809	0.107	0.106	0.115	2.488	2.047
11	0.500	0.852	0.118	0.146	0.140	2.345	2.217
12	0.574	0.821	0.115	0.138	0.100	2.396	2.045
13	0.510	0.803	0.109	0.118	0.124	2.233	2.206
14	0.578	0.889	0.141	0.142	0.102	2.508	2.028
15	0.506	0.950	0.132	0.130	0.138	2.355	2.190
16	0.559	0.864	0.102	0.102	0.127	2.202	2.039
17	0.549	0.907	0.117	0.140	0.150	2.518	2.039
18	0.543	0.947	0.129	0.135	0.106	2.253	2.190
19	0.525	0.895	0.121	0.104	0.148	2.273	2.129
20	0.571	0.880	0.105	0.134	0.111	2.120	2.039
21	0.588	0.910	0.113	0.149	0.121	2.406	2.190
22	0.529	0.870	0.144	0.150	0.113	2.284	2.112
23	0.520	0.828	0.136	0.122	0.104	2.131	2.154
24	0.600	0.818	0.110	0.125	0.131	2.294	1.964
25	0.518	0.880	0.112	0.113	0.101	2.324	2.156
26	0.594	0.837	0.127	0.133	0.127	2.590	1.985
27	0.516	0.874	0.108	0.148	0.107	2.304	2.139
28	0.596	0.886	0.139	0.136	0.117	2.182	1.974
29	0.502	0.867	0.114	0.115	0.132	2.539	2.210
30	0.512	0.812	0.130	0.132	0.109	2.478	2.185
31	0.582	0.846	0.137	0.141	0.147	2.314	2.012
32	0.547	0.834	0.101	0.139	0.129	2.498	2.017

续表 B1

样本	x_1/ m	x_2/ m	x_3/ m	x_4/ m	x_5/ m	x_6/ m	Y/ μm
33	0.541	0.800	0.126	0.119	0.146	2.427	2.034
34	0.537	0.938	0.122	0.101	0.120	2.467	2.067
35	0.508	0.904	0.147	0.121	0.110	2.447	2.186
36	0.590	0.944	0.127	0.120	0.134	2.559	1.993
37	0.557	0.861	0.134	0.110	0.105	2.600	2.051
38	0.545	0.849	0.103	0.131	0.149	2.192	2.032
39	0.580	0.843	0.131	0.107	0.103	2.243	2.014
40	0.576	0.929	0.149	0.112	0.112	2.386	2.029
41	0.533	0.840	0.142	0.145	0.136	2.569	2.079
42	0.565	0.815	0.150	0.127	0.119	2.365	2.058
43	0.551	0.806	0.124	0.144	0.125	2.171	2.064
44	0.592	0.858	0.135	0.103	0.135	2.416	1.973
45	0.586	0.901	0.106	0.116	0.108	2.457	1.994
46	0.504	0.898	0.116	0.127	0.126	2.100	2.214
47	0.567	0.877	0.104	0.109	0.143	2.529	2.064
48	0.527	0.913	0.140	0.105	0.118	2.141	2.120
49	0.535	0.892	0.145	0.114	0.142	2.549	2.060
50	0.561	0.932	0.148	0.143	0.133	2.437	2.075

根据表格数据可知，样本 11 对应的铁芯振动位移最大，为 2.217 μm；样本 24 对应的参数组合在振动抑制方面效果最好，其铁芯振动位移降到了 1.964 μm。上述结果说明结构参数对变压器振动特性具有显著影响，验证了参数优化在减振方面的有效性，同时为后续贝叶斯优化代理模型的训练提供了数据基础。