

# 基于信息物理融合的变压器不平衡模式 绕组振动特征提取与形态识别

潘超, 石晓博, 安景革\*, 付桐睿

(现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林省 吉林市 132012)

## Vibration Feature Extraction and Shape Recognition of Transformer Unbalanced Mode Winding Based on Information Physical Fusion

PAN Chao, SHI Xiaobo, AN Jingge\*, FU Tongrui

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education  
(Northeast Electric Power University), Jilin 132012, Jilin Province, China)

**ABSTRACT:** Aiming at identifying and evaluating the vibration shapes of unbalanced operation windings of transformer, the characteristic information is extracted and the information-physical fusion technology is studied. Virtual/physical entities of transformer are divided into electromagnetic and mechanical subsystems, and the dynamic experimental platform is constructed to obtain multi-source and multi-feature physical information to form a global modal information base. The electrical and vibration signals are extracted as the key feature parameters of winding information fusion, and the fusion feature index is constructed to quantitatively evaluate the corresponding shapes of electromagnetic-mechanical sample space. On this basis, an Autoformer generalization model is proposed to cluster the shape domains mapped in each sample space, forming a vibration shape recognition scheme based on information-physical fusion. Finally, the validity and feasibility of information-physical fusion recognition is verified by multi-model and multi-scene virtual-reality consistency. The results show that the proposed method can effectively utilize the measurable winding electrical information to describe the unobservable mechanical feature information, more accurately reflecting the winding vibration instability shape under the unbalanced condition of the transformer, which is more advantageous than the traditional electrical parameter identification method, and lays the foundation for the digital twin of the whole life cycle of the electrical equipment.

**KEY WORDS:** information-physical fusion; feature extraction; Autoformer generalization; vibration shape recognition

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2400802)。  
National Key R&D Program of China (2021YFB2400802).

**摘要:** 针对变压器不平衡运行绕组振动形态识别与评价问题, 提取其特征信息, 研究信息物理融合技术。将变压器虚拟/物理实体划分为电磁、机械子系统, 通过搭建数字仿真与动模实验平台; 获取多源、多特征物理信息参数, 形成全局模-态信息库。提取电气与振动信号作为绕组信息融合的关键特征参数, 构建融合特征指标量化评价电磁-机械样本空间的对应形态; 在此基础上, 提出一种 Autoformer 泛化模型, 对各样本空间映射的形态域进行聚类划分, 形成基于信息物理融合的振动形态识别方案。最后, 通过多模型多场景的虚实一致验证信息物理融合识别的有效性与可行性。结果表明, 所提方法能够有效利用可量测的绕组电气信息描述难以观测的机械特征信息, 更准确地反映变压器不平衡工况下的绕组振动失稳形态, 相较于传统电气参数识别方法具有更大优势, 为电气设备全生命周期数字孪生奠定基础。

**关键词:** 信息物理融合; 特征提取; Autoformer 泛化; 振动形态识别

## 0 引言

电力变压器是电网的核心设备, 其运行状态影响系统的安全稳定运行<sup>[1]</sup>。现有统计<sup>[2]</sup>与事故分析<sup>[3-4]</sup>表明, 绕组机械性故障是导致变压器故障的重要因素。因此, 进行变压器绕组振动形态辨识与评价具有重要的研究价值和工程意义。

近年来, 国内外关于变压器绕组运行状态监测与评估开展了深入研究。文献[5]构建绕组双阶电路模型, 结合频率响应分析法对绕组变形进行诊断。文献[6]提出基于阻抗分析法的变压器绕组变形在线检测方法。上述研究通过绕组电气参数的分析实现变压器故障辨识, 但未研究内部绕组电磁、机械

运行状态的变化规律。文献[7]通过对在线计算的短路电抗样本进行概率密度估计得到其正态分布均值的估计值,根据短路电抗的偏差系数,评估绕组当前运行状态;文献[8]分析变压器表面振动特性,为基于振动信号的变压器绕组-铁心机械形态评估提供了新方案;文献[9]基于小波能量-矩阵变换方法提取振动信号特征值,通过信息熵计算权重系数实现变压器绕组机械形态信息的评估;通过信息评估可以对变压器绕组运行工况进行有效分类,目前在故障评价与分类方向有基于神经网络、支持向量机、模糊支持向量机、模糊均值<sup>[10]</sup>、Transformer模型等方法,其中,文献[11]在经典的Transformer模型的基础上提出 Autoformer 模型,该模型采用以快速傅里叶变换为基础的序列级自相关注意力机制,降低计算复杂度,提高信息利用能力以及分类预测的准确率。变压器不平衡模式下的绕组振动形态特征具有周期性和累积性的特点并且三相不平衡运行也造成绕组承受偏心电磁力(矩)及振动加剧<sup>[12-13]</sup>,虽有研究大多将变压器的电磁信息与机械特征分离,但未充分考虑不同场域信息的内在耦合与关联,也未分析绕组振动形态特征指标的适用性与泛化性。如何利用可观测电气参量描述难以观测的物理特征并提高变压器绕组机械故障(异常)识别的泛化性,是绕组运行状态监测与辨识的关键。

针对上述问题,本文研究变压器不平衡运行模式下绕组振动形态识别方法,建立变压器虚拟/物理实体,基于电磁-机械耦合原理,获取各系统参量形成全局模-态信息库。提取各子系统关键特征参数,分析特征参数对应关系及变化情况。基于虚拟/物理实体的电磁、振动信息,获得融合特征指标,划分绕组振动形态等级,提出基于 Autoformer 泛化模型的绕组振动形态识别方法,同时也对虚/实交互的时空一致性和信息物理融合方法进行校验。

## 1 电磁-机械信息物理融合思路

变压器电磁-机械信息物理融合包括电磁/机械物理信息与虚(虚拟仿真)实(实体监测)数据融合。图 1 为变压器信息物理融合基本原理,划分绕组为电磁与机械子系统,分别提取关键物理特征信息,其中电磁信息包含端口电压  $u$ 、电流  $i$ 、负载率  $\eta$ 、不平衡度  $\lambda$  及漏磁  $B_{\sigma}$  等;机械信息包含绕组电磁力  $F$ 、振动加速度  $g$  等时变参数。在虚实数据提取过程中,物理实体可直接量测  $u$ 、 $i$ 、 $\lambda$ 、 $\eta$ 、 $g$  等特

征信息;虚拟实体通过仿真获取物理实体特征信息、 $B_{\sigma}$  及  $F$  等。采用信息融合对虚拟/物理实体以及多源特征信息进行时空一致性校验,验证虚拟/物理实体及特征信息获取的有效性,并进一步构建全局模-态信息库,为信息物理融合奠定基础。

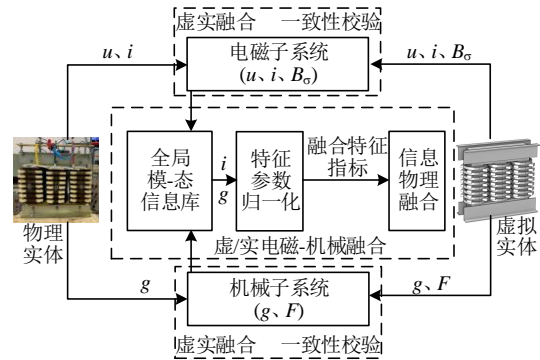


图 1 信息物理融合

Fig. 1 Information physical fusion

变压器绕组的电磁力(矩)由电磁耦合产生,并影响其振动特性<sup>[7-8]</sup>,故以电磁力为纽带关联绕组电磁与机械特征。选择绕组电流作为电磁子系统的关键特征参数,振动加速度作为机械子系统的关键特征参数,以时间为索引,形成设备运行周期过程的全局模-态信息库,结合虚实数据构建绕组融合特征指标及其量化评价体系,基于 Autoformer 模型识别预测绕组振动形态。

## 2 关键信息提取、融合及评估

### 2.1 电磁-机械特征信息提取

以变压器三相不平衡运行模式为研究对象,不平衡度  $\lambda$  的评价方法<sup>[14]</sup>可表示为

$$\lambda = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $I_{\max}$  为不平衡相电流最大值;  $I_{\min}$  为电流最小值; 当不平衡相电流超过某场景正常运行相电流时  $\lambda$  为正,反之为负。

为提升虚拟仿真与物理实验对比的准确性,采用根据实际建模→实测校验仿真→校正虚拟实体→虚实达成一致→反馈预测实际的闭环方案。

#### 2.1.1 物理实体信息

分别以不同电压等级变压器(1 kVA 220 V、15 kVA 380 V、250 kVA 10 kV)为研究对象,提取其物理实体信息。以三相三柱式实验变压器(JSSG-15 kVA 380 V/110 V)为例,搭建动模实验平台如图 2 所示(接线原理见附录 A),采集变压器不同模式下

的电磁-机械关键响应信息。

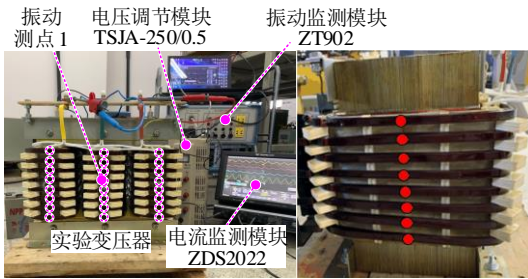


图2 动模实验平台

Fig. 2 Dynamic simulation experiment platform

信息采集过程如下。

1) 设置变压器不同运行模式, 调试传感器与电流监测模块(ZDS2022), 实时采集端口电压、电流信息, 对电压、电流进行滤波, 去除噪声及干扰信息(电气监测模块技术指标见附录 A)。

2) 结合变压器不平衡运行情况, 布置振动测点如图2所示, 接入压电加速度传感器并调试振动监测模块(ZT902), 在不同模式下实时采集变压器绕组振动信息, 对振动信号进行抗噪处理(振动监测模块技术指标见附录 A)。

3) 利用多功能材料拉压实验(平台见附录 A)测定变压器构件材料属性, 具体信息如表1所示。

表1 三相变压器参数

Table 1 Three phase transformer parameters

参数	额定值	量测值
容量 $S_N/\text{kVA}$	15	—
频率/Hz	50	—
高/低压绕组电压 $u_N/\text{V}$	380/110	—
铁心柱尺寸/mm	—	550×216×545
绕组高度/mm	—	370
硅钢片正杨氏模量/GPa	—	193
硅钢片泊松比	—	0.26
绕组线饼正杨氏模量/GPa	—	79
绕组线饼泊松比/mm	—	0.37

4) 以不平衡度  $\lambda$  为标签, 以时间  $t$  为索引, 存储电磁-机械信息。

### 2.1.2 虚拟实体信息

通过实际量测变压器电气、机械及材料数据, 进行数字化建模, 通过大量的仿真与实验对比, 反复修正模型参数及场域设置, 以完成仿真在实体及运行特性上的一致性, 使仿真模型能够有效反映物理实体的电磁机械过程。

采用 COMSOL 构建等比例有限元虚拟实体, 如图3所示, 变压器(硅钢片型号为 50WW800)部分

物理参数如表1所示。将虚拟实体划分为磁场连通域、载流激励域及机械应力域, 对应铁心、绕组及其他构件3个部分, 与物理实体保持空间一致。

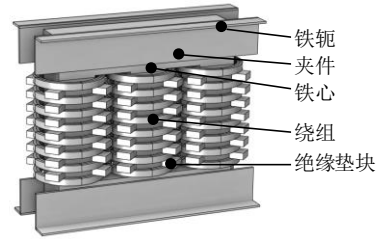


图3 变压器有限元虚拟实体

Fig. 3 Transformer finite element virtual entity

虚拟实体材料参数设定与表1信息一致, 仿真过程中, 网格剖分采用差异化四面体网格, 需精确计算的铁心绕组构件选择“精细化”单元, 垫块拉板等选择“粗略化”单元, 完美匹配层采用六面体扫掠处理。求解器选择“全耦合求解方法”。施加激励与边界: 1) 电磁系统中绕组激励设置为环形电流, 并设置磁场边界为磁力线平行边界条件, 其余设置自然边界条件; 2) 机械系统内变压器底座设定为固定约束条件, 其余部分施加铰支撑约束条件, 即变压器底座固定, 只考虑构件轴向振动情况。

变压器电磁-机械系统的数学模型与求解原理见附录 A, 通过数值仿真获取以不同时空尺度下变压器绕组的多元物理信息演变过程, 并构建模-态信息库, 基本原理如图4所示, 步骤如下。

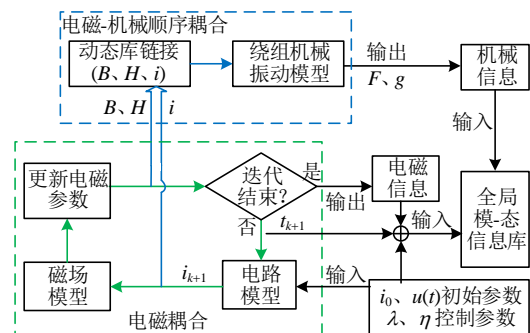


图4 全局模-态信息库构建原理

Fig. 4 Principles of global modal information repository construction

1) 以不平衡度  $\lambda$  为控制参数和状态标签, 以时间为索引, 在电磁子信息库中以  $t_k$  时刻绕组电流为激励设置载流激励域和磁场连通域, 求解绕组磁场时空分布并获得电磁场特征参数, 如电流  $i_k$ 、漏磁  $B_{\sigma k}$  等。

2) 信息获取迭代过程。若绝对收敛范数小于

收敛准则值，或者耦合循环达到设置次数则迭代结束。根据时间点索引建立链接，计算结果存储于全局模-态信息库。反之，更新时间索引  $t_{k+1}$ ，将耦合参数  $i_{k+1}$  输入磁场模型，进行下一时刻磁场求解。

3) 电磁-机械耦合仿真。在全局模-态信息库中检索  $t_k$  时刻电磁信息，求解绕组电磁力时空分布并以  $t_k$  为标签动态存储。以  $t_k$  时刻电磁力为激励设置机械应力域，求解绕组振动分布情况并获得机械场特征参数振动加速度  $g$ 。通过迭代判别是否进入下一时刻计算。

4) 以  $\lambda$  为标签、 $t$  为索引，合并电磁、机械特征信息，形成全局模-态信息库。

### 2.2 基于信息物理融合的形态评价

综合电磁子系统信息( $u$ 、 $i$ 、 $B_\sigma$ )和机械子系统信息( $F$ 、 $g$ )组建全局模-态信息库，提取关键响应参数，构建融合特征指标  $\xi$ ，如式(2)–(3)所示。基于全局模-态信息分别构建绕组电流与漏磁、电磁力的

映射关系，以绕组电流、振动分别反映电磁、机械子系统的变化情况。提取电流幅值与振动特征参数(幅值、均值、标准差)<sup>[15]</sup>，利用绕组电流、振动信息构建关键特征向量。由于融合特征指标的普适性较差，为提高识别泛化性，更准确的反映变压器内部运行工况，故基于全局模-态融合信息数据，利用 Autoformer 泛化模型识别绕组振动形态。

#### 2.2.1 基于 Autoformer 泛化模型的形态识别

针对变压器不平衡运行过程中绕组振动形态特点，利用 Autoformer 泛化模型内渐进分解模块的移动平均功能，将采集信息在时域中分解，以反映其周期性演变规律和累积性发展趋势<sup>[16]</sup>。如图 5 所示。

$$f(Z(X,Y)): z_n = \frac{z_i - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \quad (2)$$

$$\xi = \sum_{i=1}^n h_i z_n \quad (3)$$

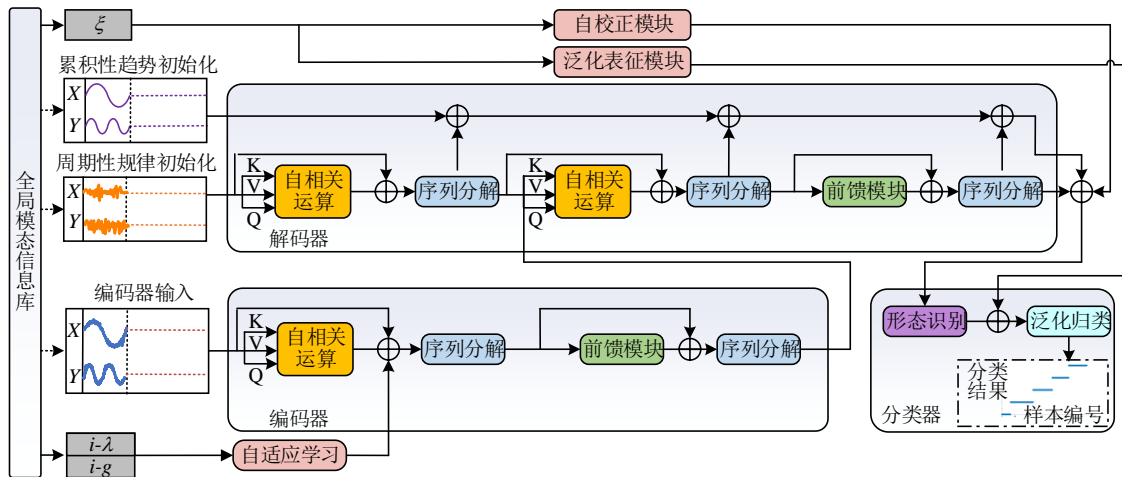


图 5 Autoformer 泛化模型

Fig. 5 Autoformer generalization model

1) 预处理。以  $\lambda$  为标签搜寻模-态信息库，提取电流信息为特征向量  $X$ 、振动信息为特征向量  $Y$ ，构成样本集  $Z$ ，并归一化处理得到  $z_n$ ，计算融合特征指标  $\xi$ ， $h$  为融合权重，依据  $\xi$  划分变压器绕组振动形态。

2) 编/解码器。样本集通过编码器得到原始序列的周期性演变特征，基于  $i-\lambda$  与  $i-g$  关联属性引入自适应学习机制，形成模-态信息特征映射智能体，并行输出的信息用于辅助解码器决策：上层运算主要从样本中逐步提取累积发展趋势信息并累加；下层利用自相关运算提取编码器输出出更高阶的时间依赖关系，最后通过前馈网络输出。基于观测信息

的周期性规律变化考虑既定场景下变压器构件承受的累积性趋势发展。

3) 分类器。基于融合特征指标  $\xi$  嵌入自校正和泛化表征模块，自校正结果与解码器输出对比以提升形态识别准确性，泛化表征与形态识别结果融合以改善类域划分的泛化能力。具体过程如式(4)–(7)所示。

$$\begin{cases} z_t = F_{\text{Avg}}(F_{\text{Padding}}(z)) \\ z_s = z - z_t \end{cases} \quad (4)$$

式中： $F_{\text{Avg}}$  为平均函数； $F_{\text{Padding}}$  为固定向量长度函数； $z_t$ 、 $z_s$  分别为累积分量 and 周期分量，将式(4)记为序列分解， $(z_t, z_s) = F_{\text{SeriesDe}}(z)$ ，并将其嵌入 Autoformer

层间。

$$\begin{cases} P_{en\_}^{l,1} = F_{SeriesDe}(F_{Correlation}(z_{en}^{l-1}) + z_{en}^{l-1}) \\ P_{en\_}^{l,2} = F_{SeriesDe}(F_{Feed}(P_{en}^{l,1}) + P_{en}^{l,1}) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} z_{de} = F_{Concat}(z_{ens}, z_0) \\ T_{de} = F_{Concat}(z_{ent}, z_{mean}) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} (P_{de}^{l,1}, T_{de}^{l,1}) = F_{SeriesDe}(F_{Correlation}(z_{de}^{l-1}) + z_{de}^{l-1}) \\ (P_{de}^{l,2}, T_{de}^{l,2}) = F_{SeriesDe}(F_{Correlation}(P_{de}^{l,2}, z_{en}^n) + P_{de}^{l,2}) \\ (P_{de}^{l,3}, T_{de}^{l,3}) = F_{SeriesDe}(F_{Feed}(P_{de}^{l,2}) + P_{de}^{l,2}) \\ T_{de}^l = T_{de}^{l-1} * W_{l,1} * T_{de}^{l,1} + W_{l,2} * T_{de}^{l,2} + W_{l,3} * T_{de}^{l,3} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $F_{Correlation}$  为自相关运算； $F_{Feed}$  为前馈模块； $F_{Concat}$  为连接函数；下标“\_”表示消除累积性趋势部分； $z_{en}$  为编码器输入； $P_{en}$  为编码器周期性规律输出部分； $z_{ens}$  为样本周期性规律部分； $z_{ent}$  为累积性趋势部分； $z_0$ 、 $z_{mean}$  分别为编码器分解结果的零值和均值； $z_{de}$ 、 $T_{de}$  分别为解码器周期性规律特征信息输入和累积性趋势信息输入； $P_{de}^{l,3}$ 、 $T_{de}^l$  分别为解码器最终输出的周期性特征分量和累积性趋势特征分量，其中  $l$  为解码器层数， $W$  为权重。

2.2.2 基于信息物理融合的形态识别方案

通过提取变压器电磁-机械信息特征，形成全局模-态特征信息库，融合多元特征信息，结合 Autoformer 泛化模型对绕组振动形态进行评估，形成基于信息物理融合的形态识别方案，如图 6 所示。

1) 搭建物理实体动模平台，量测变压器绕组电气信息及振动信息；基于物理实体构建虚拟实体，求解磁场模型得到绕组漏磁与电磁力，通过电

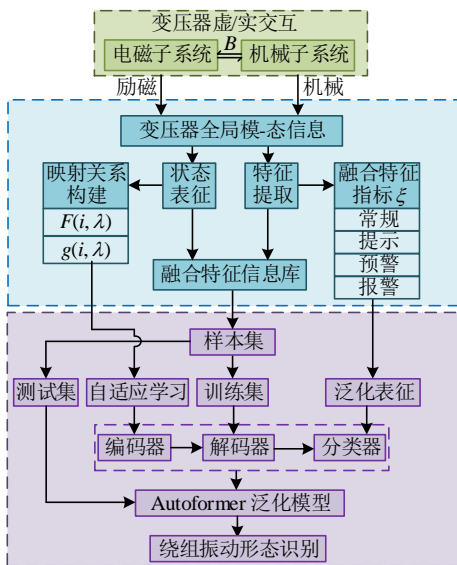


图 6 绕组振动形态识别方案

Fig. 6 Winding vibration pattern recognition scheme

磁-机械顺序耦合计算机械模型获取振动信息，根据标签、索引形成绕组全局模-态信息库。

2) 以绕组电流表征电磁子系统特性，以振动加速度表征机械子系统振动特性。结合虚实交互信息，计算融合特征指标并构建映射关系，形成绕组不平衡运行融合特征信息库。

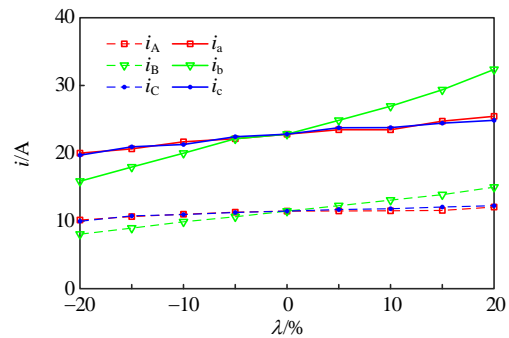
3) 分析绕组电流信号与振动信号的时域特征，结合虚/实样本集，训练 Autoformer 泛化识别模型，实现变压器绕组振动形态识别预测。

3 算例分析

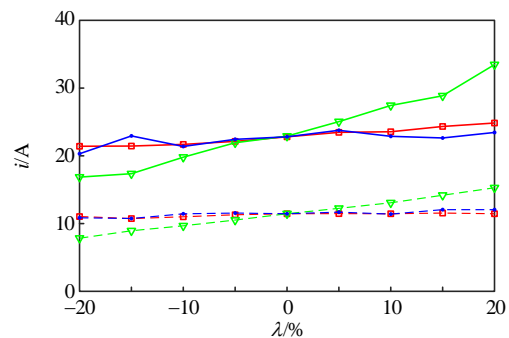
研究变压器三相不平衡运行，以 B 相不平衡为例，调节负载令  $\lambda$  变化范围为[-20%, 20%]。通过虚拟仿真和动模实验采集绕组的电磁-机械信息。

3.1 电磁信息

变压器在不同负载率条件下的绕组电流见附录 B。以 50% 负载率为例，B 相不平衡运行时的电流幅值变化如图 7 所示。



(a) 仿真电流



(b) 实测电流

图 7 绕组电流

Fig. 7 Winding current

$\lambda$  增加时，B 相电流明显增加，A、C 相电流基本无变化，表明单相负载不平衡对其他相电流的影响较小。当  $\lambda = 20\%$  时，B 相副边电流比正常情况下增大约 1.5 倍，原边电流增大约 1.3 倍，且 B 相电流变化与  $\lambda$  近似呈线性关系。

在绕组虚拟实体上平行于轴线方向设置 12 条观测路径，路径 1—4 位于 A 相，路径 5—8 位于 B 相，路径 9—12 位于 C 相，如图 8(a)所示；以 B 相电流最大时刻为观测时间点，绕组漏磁分布如图 8(b)所示；选取各路径的中部位置为典型信息采集点，提取其漏磁  $B_{\sigma}$ ，如图 8(c)所示。

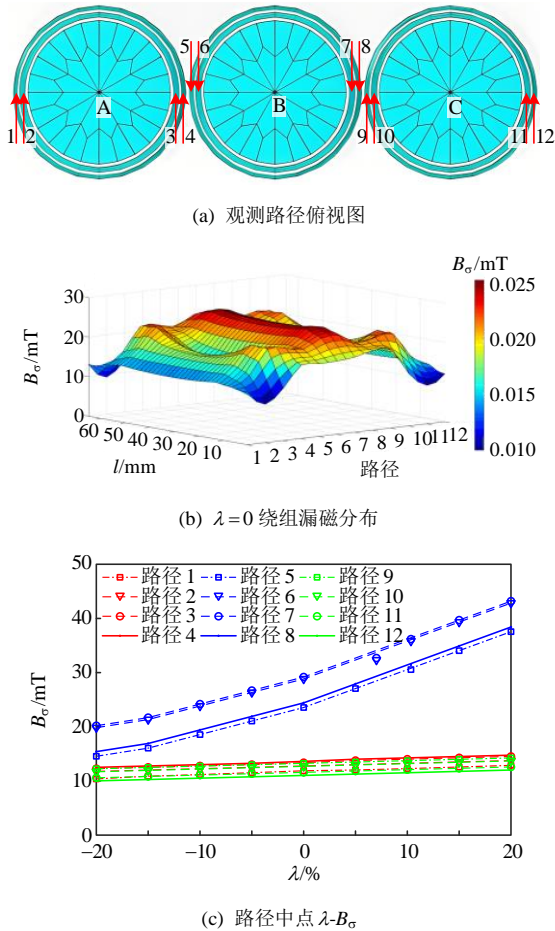


图 8 Magnetic density of winding

图 8 中，变压器正常运行时绕组  $B_{\sigma}$  分布具有较强的空间对称性，且同相绕组端部  $B_{\sigma}$  大于中部。当  $\lambda=20\%$  时，B 相各路径  $B_{\sigma}$  较正常情况下增大约 1.4 倍；该情况与电流变化类似，表明  $B_{\sigma}$  变化与  $\lambda$  近似呈线性关系。

3.2 机械信息

在 B 相电流最大时刻观测各路径上的电磁力  $F$ ，如图 9 所示。

图 9 中同相绕组端部受力高于中部，且  $F$  对称分布；且当  $\lambda=20\%$  时，B 相各路径  $F$  较正常情况下增大 58%，对比图 8 与图 9，绕组上的  $F$  分布规律与  $B_{\sigma}$  相符。

进一步分析副边绕组振动情况，以测点 1 为例，

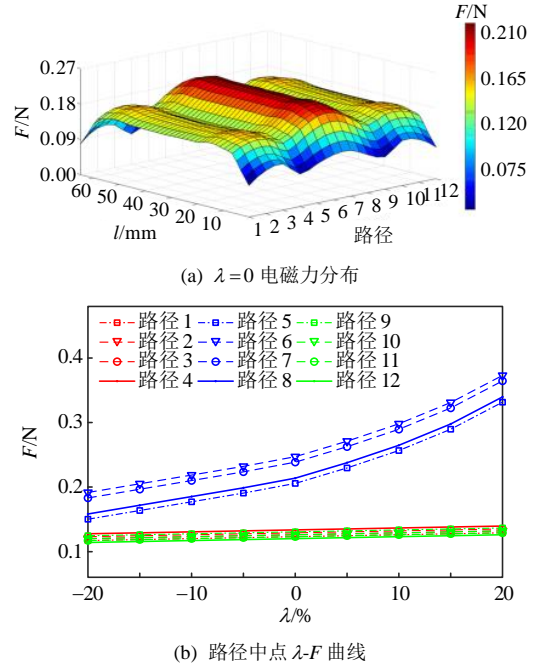


图 9 绕组电磁力

Fig. 9 Winding electromagnetic force

获取其振动时域信息，采样频率 12.8 kHz，选取  $\lambda=0、10\%$  时绕组的振动加速度  $g$  如图 10 所示。

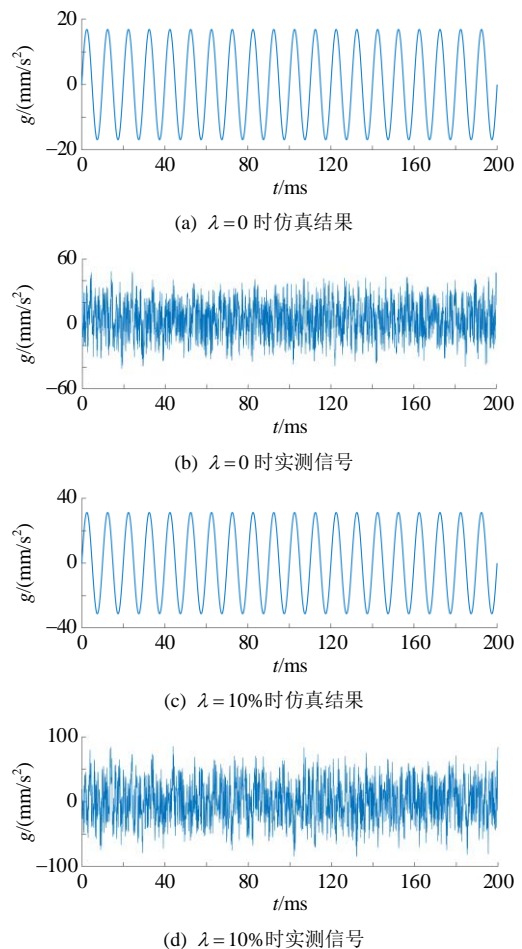


图 10 绕组振动

Fig. 10 Winding vibration

由图 10 可知,  $\lambda$  增加时, 振动加剧。  $g$  在时域中具有一定的周期波动规律, 由于虚拟实体为理想化模型, 各物理场计算互不干扰, 同时忽略变压器构件紧固传动的的影响, 因此物理实体振动信号的时频域分布更为复杂。进一步频谱分析表明, 绕组振动信号在 100 Hz 频段的分量占比较大, 该结论与已有研究一致<sup>[17-18]</sup>。故选取  $g_{100\text{Hz}}$  作为指纹量对三相副边绕组中部测点的振动加速度进行深入研究, 如图 11 所示。

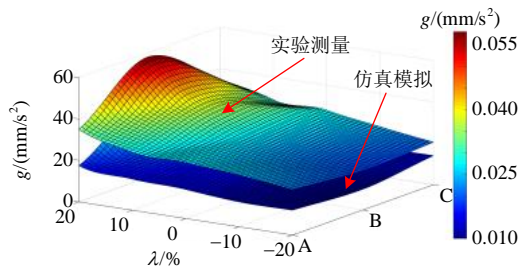


图 11 绕组不平衡度-振动状态

Fig. 11 Winding unbalance-vibration condition

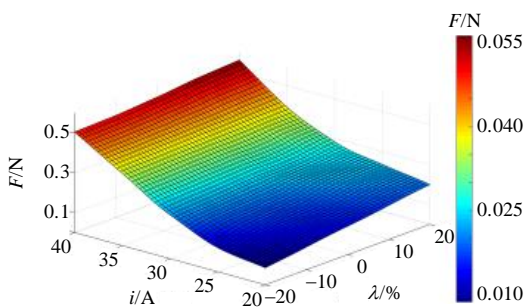
结果表明, 变压器不平衡运行时, B 相绕组受力加剧, 在当  $\lambda = 20\%$  时, B 相的  $g$  较正常情况下增大近 1.5 倍; A、C 相  $g$  变化较小, 导致三相绕组产生时变的偏心力(矩)与振动问题, 并且随着  $\lambda$  提高, 该问题愈加严重。

对比虚拟仿真与动模实验结果, 变压器不平衡运行时的  $i$ 、 $B_\sigma$ 、 $F$  及  $g$  具有一定关联规律; 同时, 多源物理信息的分布和变化规律基本相符, 验证了虚拟实体与物理实体的时空分布一致性, 也表明了虚/实交互信息获取的有效合理性。

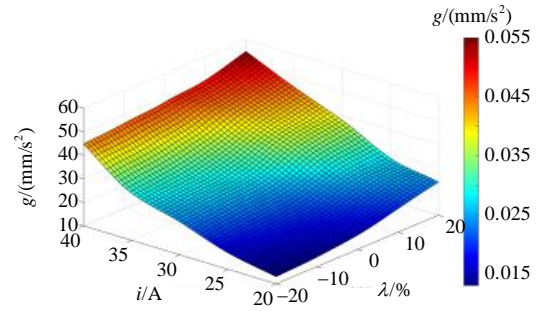
基于虚/实多源物理信息挖掘 B 相绕组  $i$ 、 $\lambda$  与  $g$  及  $F$  的隐含关联, 以副边绕组为例, 结果见图 12。

由图 12 不难发现相关特征参数对应的变化存在一定的规律, 因此可建立  $(i, \lambda)$  与  $(g, F)$  的简单数学映射, 如式(8)所示, 式(8)中变量参数如表 2 所示。

$$f(\lambda, i) = p_0 + p_1\lambda + p_2i + p_3\lambda^2 + p_4i^2 \quad (8)$$



(a)  $i$ - $\lambda$ - $F$  关联



(b)  $i$ - $\lambda$ - $g$  关联

图 12 多物理信息关联

Fig. 12 Relation of multi-physical information

表 2 公式参数

Table 2 Formula parameter

$f(\lambda, i)$	$p_0$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$
$g(\lambda, i)$	0.0284	0.00460	0.01120	0.001	0.00100
$F(\lambda, i)$	0.4125	0.00476	-0.02989	0.000	0.00082

结合式(1)、(8)可得泛函形式  $f$ , 通过  $f$  可实现利用  $i$ - $\lambda$  表征  $F$ - $g$  的目标。在此基础上, 通过虚实交互进一步提升特征信息的多样性和多元化, 扩充不平衡运行模式的融合特征信息库, 为信息物理融合识别的泛在性奠定基础。

### 3.3 信息融合与形态识别

#### 3.3.1 融合特征指标构建

传统方法采用单一场源特征值(电气特征或机械特征)识别绕组电磁-机械运行状态<sup>[19]</sup>, 部分结果如表 3 所示(各特征参数见附录 C)。

表 3 单一特征识别准确率

Table 3 Recognition accuracy of

single feature method

单位: %

特征值	绕组电流	绕组振动
THD	80.01	—
幅值	82.17	48.08
均值	—	50.35
标准差	—	52.83
瞬时频率均值/瞬时振幅均值	—	80.46

可以看出, 传统方法基于绕组电流信号的统计参数准确率可达到 80%, 而采用振动信号的统计参数准确率约 50%。虽然采用实验变压器振动信号时频域特征的识别准确率提高至 80%, 但准确获取实际变压器内部振动信号的难度较大。

基于变压器全局模-态信息, 以 50% 负载率为例, 选取绕组电流为电磁子系统特征参数、绕组振动加速度为机械子系统特征参数, 归一化处理原副边绕组实体电流及振动信号, 利用式(2)、(3)计算融合特征指标  $\xi$ 。结合变压器运行特征信息<sup>[20]</sup>, 选取

电磁特征参数权重为 0.7、振动特征参数权重为 0.3，融合结果如图 13 所示。

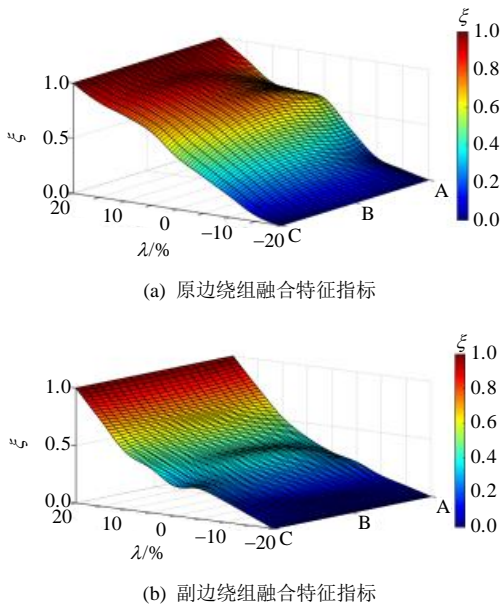


图 13 融合结果

Fig. 13 Fusion results

对比图 12、13 可知， $\xi(0 \leq \xi \leq 1)$  随  $\lambda$  变化的规律与对应模-态下绕组电流、振动的变化规律基本一致。结合绕组具体工况形成振动失稳判据，如表 4 所示。以 B 相为例， $0 \leq \xi \leq 0.10$  时， $-20\% \leq \lambda \leq -15\%$ ，绕组振动相较于正常情况减弱，但由于边相的电流与受力影响，导致构件整体承受偏心力(矩)作用，从而对绕组结构稳定性造成较大的累积性危害，故判定为异常预警 B 形态；当  $0.10 < \xi \leq 0.36$  时， $-15\% < \lambda \leq -5\%$ ，绕组受力与振动弱于正常形态，同上理判定为风险提示 B 形态；当  $0.36 < \xi < 0.64$  时， $|\lambda| < 5\%$ ，绕组振动正常，判定为正常运行形态；当  $0.64 \leq \xi < 0.89$ ， $5\% \leq \lambda < 15\%$ ，电流、受力及振动明显增大，判定为绕组风险提示 A 形态；当  $0.89 \leq \xi \leq 1$  时， $15\% \leq \lambda \leq 20\%$ ，绕组剧烈振动，判定为预警 A 形态； $\xi > 1$  或  $\xi < 0$  时，变压器运行严重不平衡，则判定为故障报警形态。由此振动失稳判据可划分变压器绕组的电磁与机械稳定性。

表 4 绕组形态域划分

Table 4 Domain division of winding morphology

绕组振动形态	$\xi$	$\lambda$	$F(N)$
异常预警 A	0.89~1.0	[15%, 20%]	[0.33, 0.38]
风险提示 A	0.64~0.89	[5%, 15%)	[0.27, 0.33)
正常运行	0.36~0.64	(-5%, 5%)	(0.23, 0.27)
风险提示 B	0.10~0.36	(-15%, -5]	(0.19, 0.23]
异常预警 B	0~0.10	[-20%, -15%]	[0.15, 0.19]

### 3.3.2 Autoformer 泛化模型识别绕组振动形态

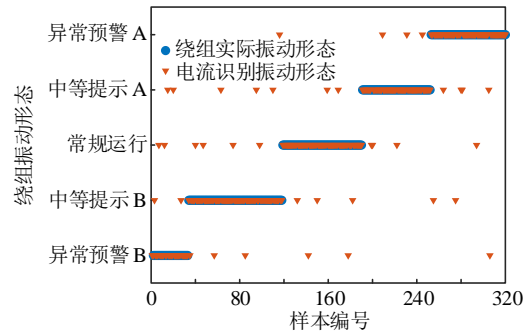
以变压器 50% 负载不平衡运行为例，其振动形态空间划分为 5 类( $\lambda = \pm 20\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $0\%$ )，各类子形态空间选取 80 组样本，依据不同负载率(25%、50%、75%、100%)可扩展样本空间至 1 600。选取各不平衡模式下共计 1 280 个随机样本作为训练样本集，其余作为测试样本集，测试样本数量如表 5 所示，基于 Autoformer 泛化模型进行绕组振动形态识别，结果如图 14 所示。

表 5 测试样本数

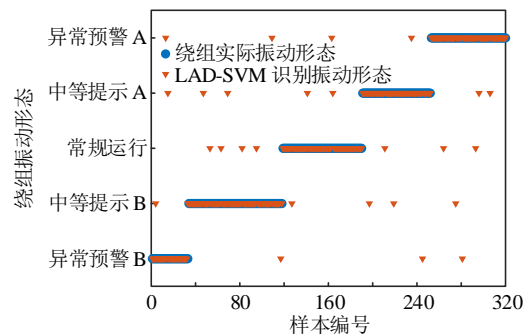
Table 5 Number of test samples

类别	预警 B	风险 B	正常	风险 A	预警 A
样本数	33	85	72	62	68

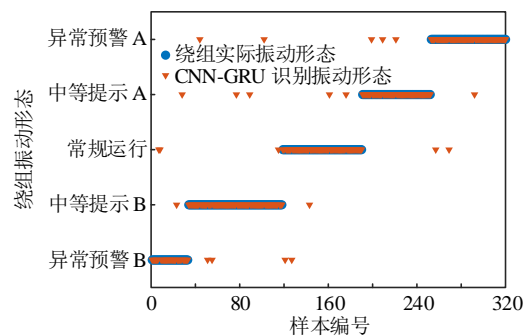
由图 14 可知，基于绕组电流特征参量识别运行状态的方法<sup>[19]</sup>未考虑振动特征信息，所识别的运



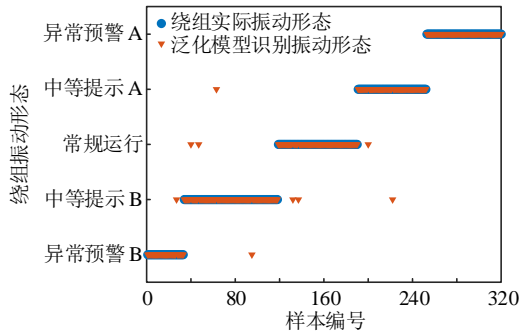
(a) 基于绕组电流的形态识别



(b) 基于 LDA-SVM 的形态识别



(c) 基于 CNN-GRU 的形态识别



(d) 基于 Autoformer 泛化模型的形态识别

图 14 振动形态识别结果  
Fig. 14 Vibration form recognition results

行状态无法有效评估绕组振动情况，准确率为 88.43%；基于线性判别分析投影算法-支持向量机 (linear discriminant analysis support vector machine, LDA-SVM) 的变压器振动形态辨识方法<sup>[21]</sup>，仅采集绕组振动信号进行分解与辨识，准确率为 92.18%；

基于卷积神经网络-门控循环单元的组合神经网络算法<sup>[22]</sup>(CNN-GRU)缺少泛化表征、结果校正模块，识别准确率仅为 93.43%；基于绕组电流-映射振动信号的多物理特征融合参量方法能够有效识别绕组振动形态，准确率可提高至 97.19%。

考虑实际应用环节，工程中大型变压器绕组振动信息获取难度较大，现有的箱体传感手段无法真实有效地反映本体内部构件的振动情况，针对该问题，通过本文方法先离线训练识别模块，利用融合特征指标关联电磁信息与机械信息，进而形成绕组振动形态域；实际监测过程中通过采集电气信息，提取电流、不平衡度等关键参数，利用识别模块进行绕组振动形态辨识与评估。另一方面，多物理场耦合仿真无法满足实时数据交互与同步传输机制的要求，因此，如图 15 所示，可将基于信息物理融合的绕组振动形态识别与评估划分为 2 个阶段。

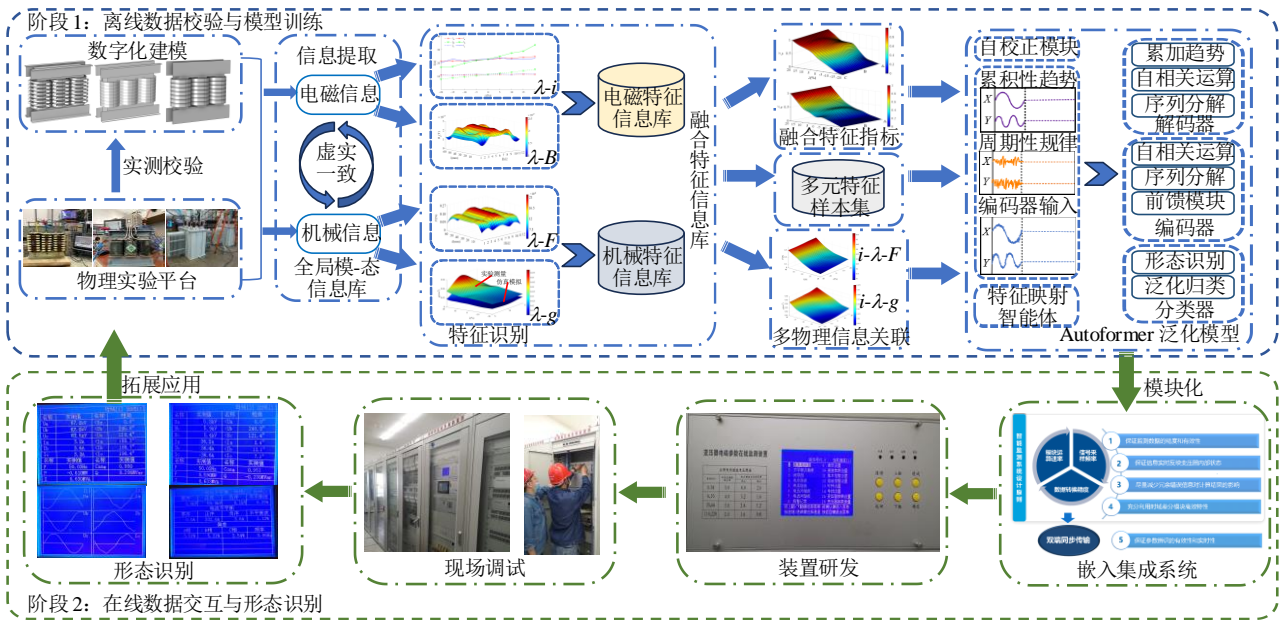


图 15 基于信息物理融合的绕组振动形态识别与评估

Fig. 15 Identification and evaluation of winding vibration morphology based on information physics fusion

1) 阶段 1。离线数据校验与模型训练。虚拟实体基于物理实体同步数字化建模，模拟不同场景及条件下的运行特性与物理特征，通过虚实信息校验提升虚拟实体的准确性和一致性；提取虚拟和物理实体特征参数进行数据交互，构建全局模-态信息库，形成融合特征指标和虚拟映射空间，并结合融合特征信息库训练 Autoformer 泛化模型；以此构建形态特征辨识模块，并制定形态域划分判据。

2) 阶段 2。在线数据交互与形态识别。将绕组形态域划分判据嵌入 Autoformer 泛化识别模型并

模块化，利用监测装置实时采集变压器运行信息。通过后台算法提取不平衡度、电流(励磁)及其他等关键电磁参数，输入形态特征辨识模块，关联融合特征指标与形态域，从而实时反映设备运行状态，通过该方式对绕组振动形态进行感知、评估及预测。

实际工程中变压器负载率一般低于 75%，虽然不平衡电流变化未超过规定阈值<sup>[23]</sup>，但绕组的受力与振动问题已不容忽视。现有的量测手段无法充分地反映变压器绕组的实时运行状态，而通过信息物理融合方法可利用电流不平衡度等可观测电

气信息形成多物理信息关联,从而描述变压器绕组内部难以观测的电磁-机械运行状态,并进行变压器绕组振动形态的识别与评估。

## 4 结论

基于变压器电磁-机械信息物理融合,研究绕组不平衡运行振动形态识别方法,得到结论如下。

1) 不平衡度增大时,绕组不平衡相电流与漏磁近似呈线性的变化规律;电磁力及振动随不平衡度增大而增大。通过融合多元信息,利用不平衡度建立绕组电流与振动及电磁力的映射关系,获得变压器绕组融合特征指标,可以有效表征绕组运行的电磁-机械工况。

2) 结合绕组电磁-机械信息形成融合特征指标,提出一种 Autoformer 泛化模型,学习周期性演变规律,并自校正累积性发展趋势,通过多模型多场景的虚实一致验证了该方法的有效性和可行性。同时也提升了信息物理融合方法的泛化性,振动形态识别准确性可达 97% 以上,为变压器生命周期运维与信息物理融合提供新的思路。

## 参考文献

- [1] 魏辰阳, 汤广福, 吴奕霖, 等. 高压大容量直流变压器拓扑研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6940-6959.  
WEI Chenyang, TANG Guangfu, WU Yilin, et al. Overview and prospect of topology research on high voltage and large capacity DC transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6940-6959(in Chinese).
- [2] 刘刚, 胡万君, 郝世缘, 等. 面向数字孪生模型应用的油浸式变压器绕组温度 POD-RBFLP 降阶计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4566-4579.  
LIU Gang, HU Wanjun, HAO Shiyuan, et al. Research on reduced order method of temperature rise of oil-immersed power transformer winding based on POD-RBFLP for digital twin model[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4566-4579(in Chinese).
- [3] 赵楚凡, 米传民, 周志鹏, 等. 基于组合关联分析模型的电力人身事故关键致因链筛选[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(4): 99-106.  
ZHAO Chufan, MI Chuanmin, ZHOU Zhipeng, et al. Key cause chains selection of electric personal accidents based on combinatorial association analysis model[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(4): 99-106(in Chinese).
- [4] 中国电力企业联合会, 中国电力统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.  
China Electric Power Enterprise Federation. China electric power statistical yearbook 2021[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021(in Chinese).
- [5] ZHANG Haijun, WANG Shuhong, YUAN Dongsheng, et al. Double-ladder circuit model of transformer winding for frequency response analysis considering frequency-dependent losses[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 8402304.
- [6] HONG Tianqi, DESWAL D, DE LEÓN F. An online data-driven technique for the detection of transformer winding deformations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 600-609.
- [7] 张宁, 朱永利, 高艳丰, 等. 基于变分模态分解和概率密度估计的变压器绕组变形在线检测方法[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 297-302.  
ZHANG Ning, ZHU Yongli, GAO Yanfeng, et al. An on-line detection method of transformer winding deformation based on variational mode decomposition and probability density estimation[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 297-302(in Chinese).
- [8] 师愉航, 汲胜昌, 张凡, 等. 变压器油箱表面运行变形振型特性研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1088-1095.  
SHI Yuhang, JI Shengchang, ZHANG Fan, et al. Research on vibration morphology characteristics of transformer tank surface[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1088-1095(in Chinese).
- [9] PAN Chao, YI Shuangyuan, SU Hao, et al. Excitation-vibration harmonic response research of transformer in DC biasing operation[J]. IET Electric Power Applications, 2019, 13(3): 410-417.
- [10] 陈金雷, 代洪光, 冀笑伟, 等. 基于电量守恒的低压配电台区拓扑识别算法[J]. 电力信息与通信技术, 2024, 22(7): 45-52.  
CHEN Jinlei, DAI Hongguang, JI Xiaowei, et al. Topology identification algorithm of low-voltage distribution transformer area based on conservation of electricity[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2024, 22(7): 45-52(in Chinese).
- [11] WU Haixu, XU Jiehui, WANG Jianmin, et al. Autoformer: decomposition transformers with autocorrelation for long-term series forecasting[C]// Proceedings of the 34th Annual Conference on Neural Information Processing Systems. NeurIPS, 2021: 22419-22430.
- [12] 王丰华, 段若晨, 耿超, 等. 基于“磁-机械”耦合场理论的电力变压器绕组振动特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2555-2562.  
WANG Fenghua, DUAN Ruochen, GENG Chao, et al. Research of vibration characteristics of power transformer winding based on magnetic-mechanical coupling field theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2555-2562(in Chinese).
- [13] 程宏波, 伦利, 康琛, 等. 一种基于多元统计分析的变压器状态评判方法[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2719-2724.

- CHENG Hongbo, LUN Li, KANG Chen, et al. A method for evaluating the state of a transformer based on multivariate statistical analysis[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2719-2724(in Chinese).
- [14] 中华人民共和国国家能源局. 配电变压器运行规程: DL/T 1102—2009[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009. National Energy Administration. The code of distribution transformer operation: DL/T 1102—2009[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2009(in Chinese).
- [15] 陈志伟, 何云翔, 黄胜鑫, 等. 基于响应面法的变压器绕组电磁力高效计算[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(16): 6685-6697. CHEN Zhiwei, HE Yunxiang, HUANG Shengxin, et al. Efficient calculation of transformer windings electromagnetic force based on response surface method [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(16): 6685-6697(in Chinese).
- [16] 范杏蕊, 李元诚. 基于改进 Autoformer 模型的短期电力负荷预测[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(4): 171-177. FAN Xingrui, LI Yuancheng. Short-term power load forecasting based on improved Autoformer model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(4): 171-177(in Chinese).
- [17] 曹辰, 徐博文, 李辉. 基于振动与电抗信息的变压器绕组形变状态综合监测方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1518-1530. CAO Chen, XU Bowen, LI Hui. Composite monitoring method for the state of transformer winding deformation based on vibration and reactance information[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1518-1530(in Chinese).
- [18] 刘宝稳, 马宏忠, 李凯, 等. 大型变压器绕组轴向固有频率振动分布特性与试验分析[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2329-2337. LIU Baowen, MA Hongzhong, LI Kai, et al. Distribution characteristics and experimental analysis of natural frequency vibration of large transformer winding[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2329-2337(in Chinese).
- [19] 胡一卓, 谢佳成, 李金忠, 等. 考虑绝缘老化或受潮的变压器绕组变形判据优化[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2361-2368. HU Yizhuo, XIE Jiacheng, LI Jinzhong, et al. Optimization of transformer winding deformation criterion considering insulation aging or dampness[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2361-2368(in Chinese).
- [20] 吴书煜, 汲胜昌, 祝令瑜, 等. 基于多重信息分解与时变权重组合的换流变压器振动状态参量综合预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7792-7804. WU Shuyu, JI Shengchang, ZHU Lingyu, et al. Comprehensive prediction method of converter transformer vibration state parameters based on multiple information decomposition and time-varying weight combination[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7792-7804(in Chinese).
- [21] 赵莉华, 张振东, 张建功, 等. 运行工况波动下基于振

- 动信号的变压器故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3925-3933.
- ZHAO Lihua, ZHANG Zhendong, ZHANG Jiangong, et al. Diagnosis methods for transformer faults based on vibration signal under fluctuating operating conditions[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3925-3933(in Chinese).
- [22] 杨威, 蒲彩霞, 杨坤, 等. 基于 CNN-GRU 组合神经网络的变压器短期故障预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 107-116. YANG Wei, PU Caixia, YANG Kun, et al. Short-term fault prediction method for a transformer based on a CNN-GRU combined neural network[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 107-116(in Chinese).
- [23] 潘超, 苏昊, 蔡国伟, 等. 变压器直流偏磁下异常电流表征振动特性研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(9): 1868-1879. PAN Chao, SU Hao, CAI Guowei, et al. Research on characterization of core vibration by abnormal current of DC bias transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(9): 1868-1879(in Chinese).

#### 附录 A 变压器实验参数及电磁机械耦合原理

变压器动模实验平台接线图如图 A1 所示。

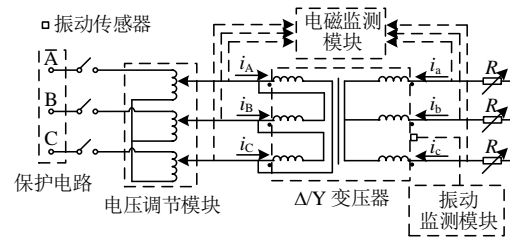


图 A1 实验接线原理

Fig. A1 Experimental wiring principles

表 A1 ZDS2022 技术指标参数

Table A1 ZDS2022 Parameters of technical indicators

关键指标	具体参数
通道数量	2(可拓展)
模拟带宽/MHz	200
采样率/(GSa/s)	1
存储深度	56Mpts@2ch, 112Mpts@1ch
通信接口	USB host、USB device、LAN
FFT 分解	4Mpts

表 A2 ZT902 技术指标参数

Table A2 ZT 902 Parameters of technical indicators

关键指标	具体参数
频率范围/kHz	0.01~10
测量参数	加速度、速度、位移
测量误差/%	<5
频率量程	8 档
抗混滤波器	8 阶椭圆
存储数据	600 组数据和 48 个 1024 点振动波形



图 A2 材料参数拉压实验平台(FL4000)  
Fig. A2 Material parameters tension and compression test platform (FL4000)

变压器电磁-机械系统的数学模型与求解原理：  
忽略磁滞效应，利用 Galerkin 余量对磁场模型求解。

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) = \int \mathbf{J} dV \quad (A1)$$

$$G_a = \int_V \nabla \times \mathbf{M}_m \cdot (\nu \nabla \times \mathbf{A}) dV - \int_{V_c} \mathbf{M}_m \cdot \mathbf{J} dV - \int_s \mathbf{M}_m \cdot [(\nu \nabla \times \mathbf{A}) \times \mathbf{n}] dS \quad (A2)$$

式中： $\nu$  为磁阻率； $\mathbf{A}$  为矢量磁位； $\mathbf{J}$  为电流密度； $G_a$  为 Galerkin 余量，计算过程如下； $\{\mathbf{M}_m\}$  为权函数序列，基函数与权函数相同； $\mathbf{n}$  为法相分量。 $G_a$  计算过程如下：

$$\left\{ \begin{aligned} G_a &= G_x + G_y + G_z \\ \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} &= \int_{\omega} \nu \begin{bmatrix} \frac{\delta M_m}{\delta x} \left( \frac{\delta A_x}{\delta x} + \frac{\delta A_y}{\delta y} + \frac{\delta A_z}{\delta z} \right) \\ \frac{\delta M_m}{\delta y} \left( \frac{\delta A_x}{\delta x} + \frac{\delta A_y}{\delta y} + \frac{\delta A_z}{\delta z} \right) \\ \frac{\delta M_m}{\delta z} \left( \frac{\delta A_x}{\delta x} + \frac{\delta A_y}{\delta y} + \frac{\delta A_z}{\delta z} \right) \end{bmatrix} dV + \\ &\int_{\omega} \nu \begin{bmatrix} \frac{\delta M_m}{\delta y} \left( \frac{\delta A_x}{\delta x} - \frac{\delta A_y}{\delta y} \right) - \frac{\delta M_m}{\delta z} \left( \frac{\delta A_x}{\delta z} - \frac{\delta A_y}{\delta x} \right) \\ - \frac{\delta M_m}{\delta z} \left( \frac{\delta A_x}{\delta y} - \frac{\delta A_y}{\delta z} \right) + \frac{\delta M_m}{\delta x} \left( \frac{\delta A_y}{\delta x} - \frac{\delta A_x}{\delta y} \right) \\ - \frac{\delta M_m}{\delta x} \left( \frac{\delta A_x}{\delta z} - \frac{\delta A_z}{\delta x} \right) + \frac{\delta M_m}{\delta y} \left( \frac{\delta A_x}{\delta y} - \frac{\delta A_y}{\delta z} \right) \end{bmatrix} dV \end{aligned} \right. \quad (A3)$$

离散化  $G_a$  方程得到代数方程组，计算  $\mathbf{A}$  并进一步求解绕组和铁心的磁通密度  $\mathbf{B}$  及磁场能量  $dW_m$  等场域参数。

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (A4)$$

$$dW_m = \frac{1}{2} \int d\mathbf{B} \cdot d\mathbf{H} \quad (A5)$$

式中  $\mathbf{H}$  为磁场强度。

根据能量平衡法，由系统能量计算时域电感。以  $\mathbf{B}$  相绕组为例，令某时刻一次、二次绕组电流变化为  $di_\eta$ 、 $di_\theta$  ( $\eta, \theta = 1, 2$ )。可将变压器电磁能量变化与状态变量关联，得到：

$$\begin{cases} dW_1 = \frac{1}{2} L_{\eta\theta} di_\eta di_\theta \\ dW_2 = \frac{1}{2} \int d\mathbf{B} \cdot d\mathbf{H} dV \end{cases} \quad (A6)$$

由能量守恒可联立式(13)中方程计算时域电感。

若  $t_k$  时刻的电感参数已知，可代入电路微分方程，利用改进欧拉法(Ieu)，由绕组电流  $i_k$  计算下一时刻的电流为

$$i_{k+1} = i_k + \frac{h}{2} (f(t_k, i_k) + f(t_{k+1}, i_k + hc)), \quad k = 0, 1, \dots, n-1 \quad (A7)$$

式中： $h$  为步长； $c$  为步长内的分段计算斜率。将时域电流作为电磁子系统的状态变量。

由电磁模型计算磁通密度  $\mathbf{B}$  及磁场能量等场域参数，可得出构件在运行中受到的电磁力。

$$\mathbf{F}_\kappa = \frac{\partial W_m}{\partial \kappa} = \frac{1}{\mu} \int \mathbf{B} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \kappa} dV \quad (A8)$$

式中： $W_m$  为构件磁场能量； $\mathbf{F}_\kappa$  为线圈或铁心在坐标  $\kappa$  方向承受的电磁力， $\kappa$  的定义范围为  $\{x, y, z\}$ 。

绕组质量-弹簧-阻尼系统如图 A3 所示。

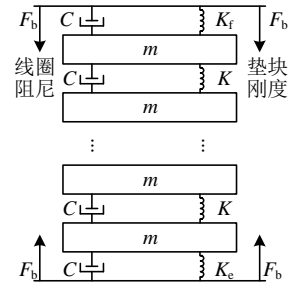


图 A3 绕组质量-弹簧-阻尼系统

Fig. A3 Mass-spring-damper system of winding

绕组线饼以刚体质量块  $m$  表示，考虑绕组线饼及绝缘垫片的机械特性，引入阻尼系数  $C$ 、刚度系数  $K$ ，表征绕组间的联系及绝缘垫片特性。在此基础上建立绕组轴向机械振动动力学模型：

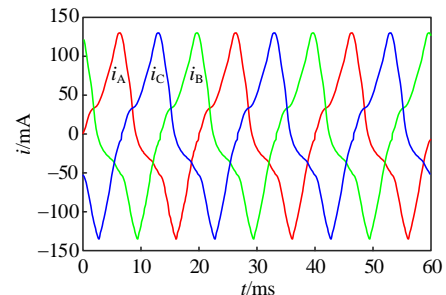
$$nm\mathbf{g}(t) + \sum_1^n C\nu(t) + (K_f + \sum_1^{n-1} K + K_e) s(t) = \mathbf{F}_w(t) + \mathbf{G}_w \quad (A9)$$

式中： $n$  为线饼数量； $m$  为单个线饼质量； $C$  为阻尼系数； $K_f$ 、 $K_e$  分别为首、末端垫片刚度系数； $\mathbf{F}_w$  为绕组轴向电磁力荷载； $\mathbf{G}_w$  为线饼总重力； $\mathbf{g}$ 、 $\nu$ 、 $s$  分别为绕组节点加速度矢量(位移矢量二阶导数)、速度矢量(位移矢量一阶导数)、位移矢量。

结合绕组机械模型，根据振动位移计算振动加速度  $\mathbf{g}$ ：

$$\alpha = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \times 100\% \quad (A10)$$

附录 B 仿真与实验电流对比



(a) 空载电流

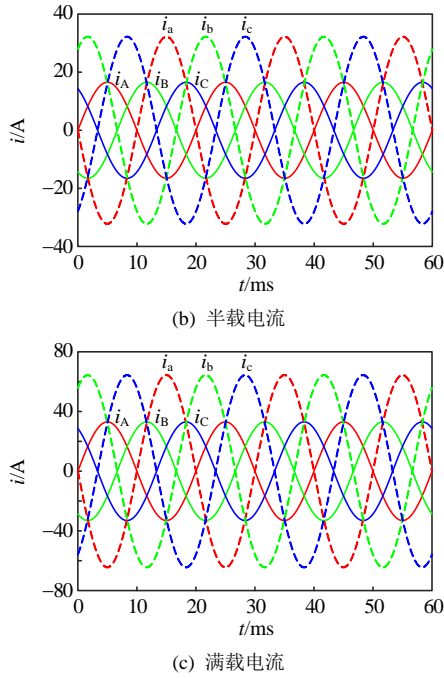


图 B1 正常运行电流仿真结果

Fig. B1 Simulation results of normal operating current

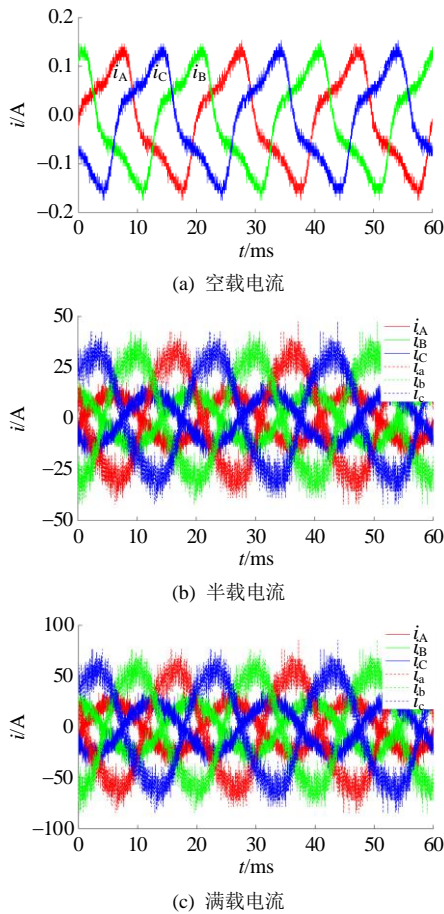


图 B2 正常运行电流实验结果(滤波前)

Fig. B2 Normal operating current experimental results (before filtering)

附录 C 绕组原始信号统计特征参数

变压器绕组原始信号统计特征参数见表 C1、C2。

表 C1 绕组电流原始信号统计特征参数

Table C1 Statistical characteristic parameters of original signal of winding current

运行模式	幅值/A	标准差
$\lambda = -20\%$	8.6/15.9	0.0066
$\lambda = -10\%$	9.6/19.1	0.0073
$\lambda = 0$	11.3/22.9	0.0079
$\lambda = 10\%$	12.8/27.3	0.0093
$\lambda = 20\%$	14.2/32.6	0.0111

注：表中数据“\*/\*”前一项为原边电流数据，后一项为副边电流数据。

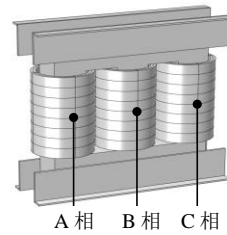
表 C2 振动原始信号统计特征参数

Table C2 Statistical characteristic parameters of original vibration signal

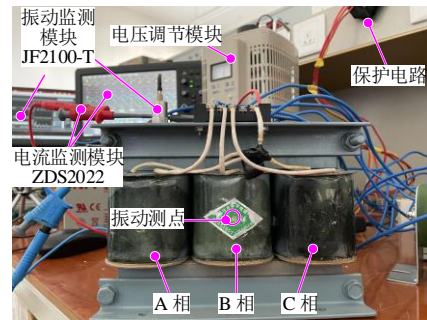
运行模式	幅值/(m/s <sup>2</sup> )	均值/(mm/s <sup>2</sup> )	标准差
$\lambda = -20\%$	0.010	9.5	0.0005
$\lambda = -10\%$	0.016	13.8	0.0022
$\lambda = 0$	0.028	25.0	0.0031
$\lambda = 10\%$	0.040	38.3	0.0093
$\lambda = 20\%$	0.055	50.2	0.0111

附录 D 不同电压等级变压器仿真与实验数据

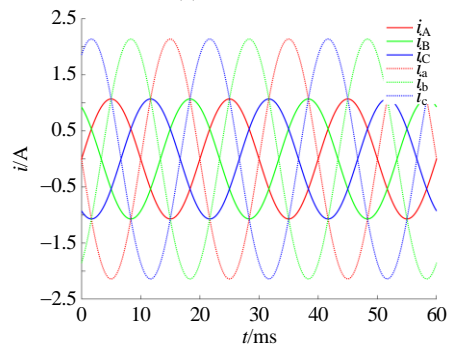
1 kVA 220 V 变压器，50%负载率， $\lambda = 0$  时部分仿真与实验数据如下。



(a) 仿真模型



(b) 实验平台



(c) 仿真电流

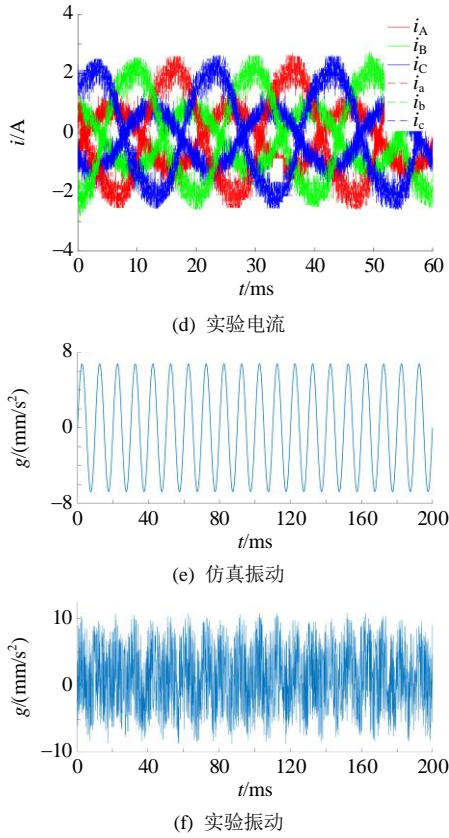
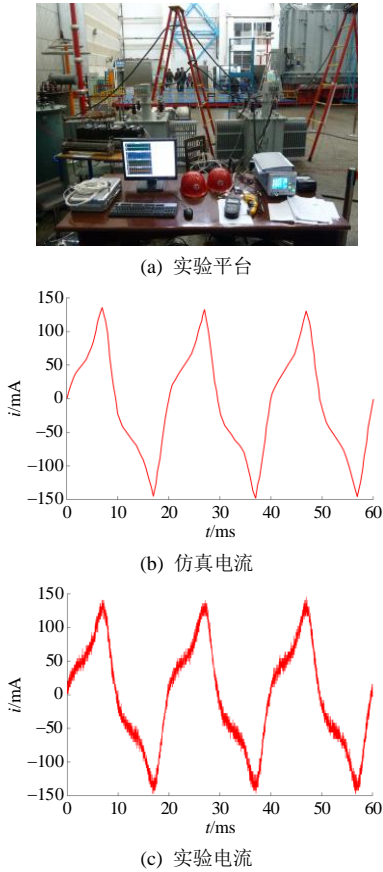


图 D1 1 kVA 220 V 变压器相关数据

Fig. D1 Related data of 1 kVA 220 V transformer

250kVA 10kV 变压器，空载、 $\lambda=0$  情况下部分仿真与实验数据如下。



(c) 实验电流

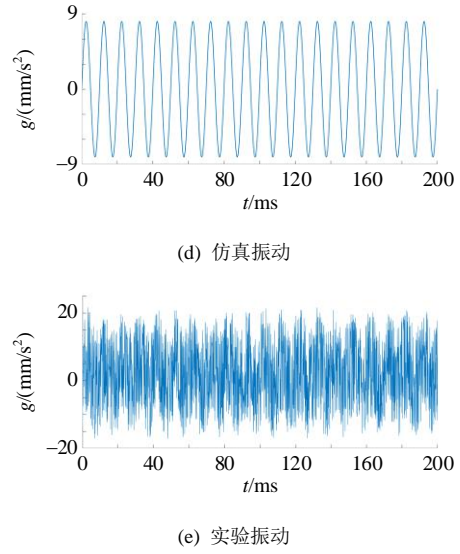
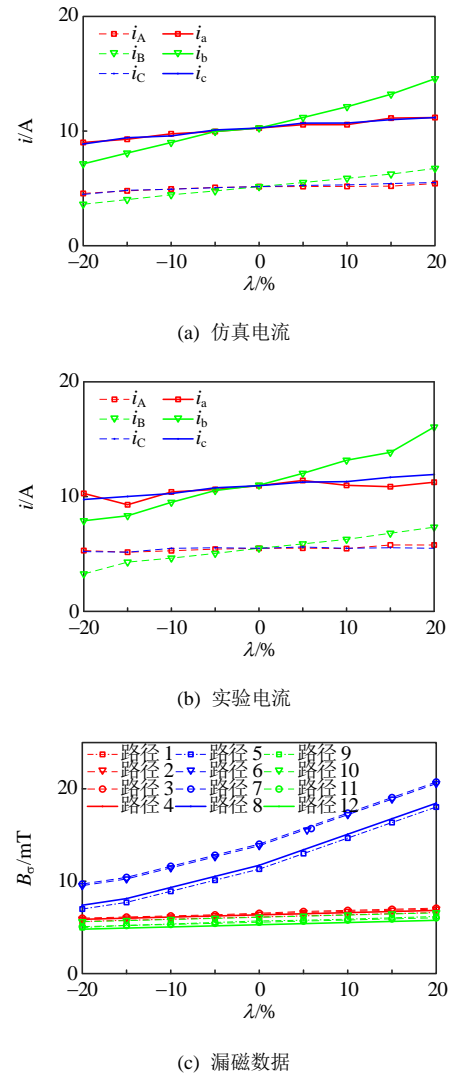


图 D2 250 kVA 10 kV 变压器相关数据

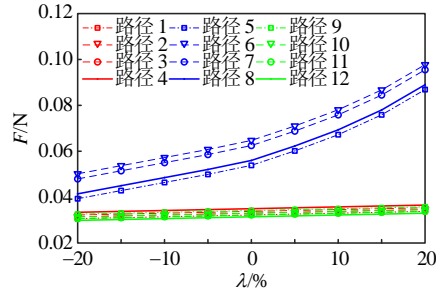
Fig. D2 Related data of 250 kVA 10 kV transformer

附录 E 不同负载情况下的部分数据

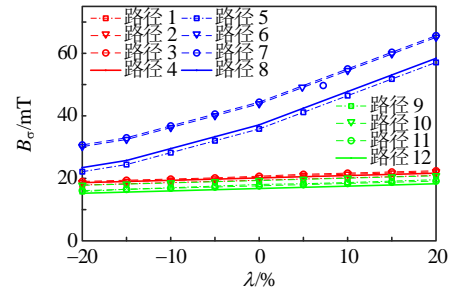
JSSG-15 kVA 380 V/110 V 变压器 25%、75% 负载率下不同  $\lambda$  的部分结果如下。



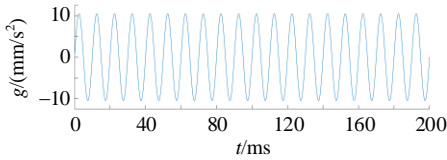
(c) 漏磁数据



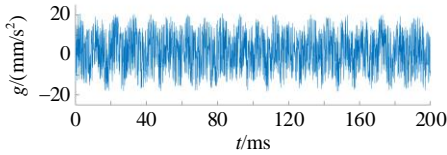
(d) 受力数据



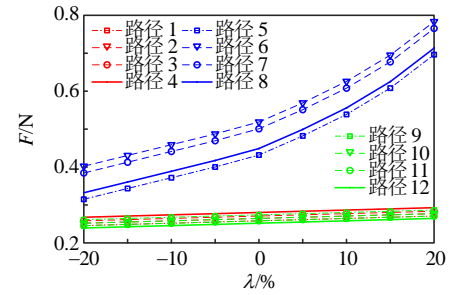
(c) 漏磁数据



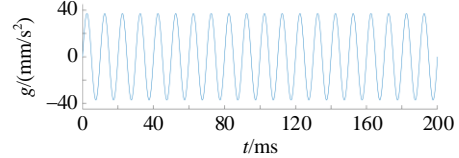
(e)  $\lambda = 0$  仿真振动



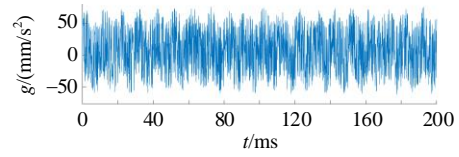
(f)  $\lambda = 0$  实验振动



(d) 受力数据



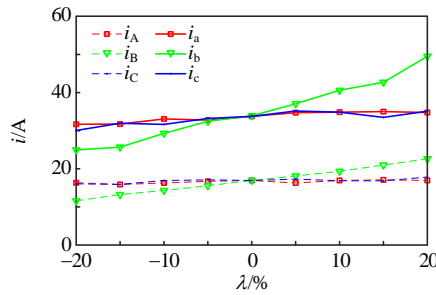
(e)  $\lambda = 0$  仿真振动



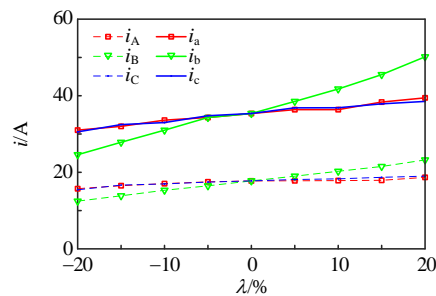
(f)  $\lambda = 0$  实验振动

图 E1 25%负载情况下部分数据  
Fig. E1 Partial data under 25% load

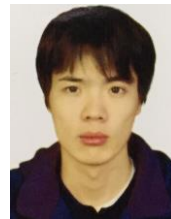
图 E2 75%负载情况下部分数据  
Fig. E2 Partial data under 75% load



(a) 仿真电流



(b) 实验电流



潘超

收稿日期: 2024-04-02。

作者简介:

潘超(1981), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定与电磁兼容, 31563018@qq.com;

\*通信作者: 安景革(2000), 男, 博士研究生, 研究方向为变压器内部故障辨识, 1125462364@qq.com。

(编辑 刘雪莹)